

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

Ngô Văn Thúc

**NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐẶC ĐIỂM
PHÁ HỦY CỦA BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG
NANO SILICA ỨNG DỤNG TRONG CÔNG TRÌNH CẦU**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2021

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

Ngô Văn Thúc

**NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ ĐẶC ĐIỂM
PHÁ HỦY CỦA BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG
NANO SILICA ỨNG DỤNG TRONG CÔNG TRÌNH CẦU**

Ngành : Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông
Chuyên ngành : Xây dựng Cầu Hầm
Mã số : 9580205

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

PGS.TS. Bùi Tiến Thành

GS.TS. Nguyễn Viết Trung

Hà Nội – 2021

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án này là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi. Các kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa được ai công bố trong các công trình khác.

Tác giả luận án

Ngô Văn Thức

LỜI CẢM ƠN

Sau thời gian học tập và nỗ lực nghiên cứu tại Trường Đại học Giao thông Vận tải, với sự giúp đỡ nhiệt tình của các thầy cô, đồng nghiệp, bạn bè, gia đình và người thân, nghiên cứu sinh đã hoàn thành luận án “Nghiên cứu tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao sử dụng nano silica ứng dụng trong công trình cầu”.

Luận án được thực hiện dưới sự hướng dẫn của PGS.TS. Bùi Tiến Thành và cố GS.TS. Nguyễn Viết Trung. Nghiên cứu sinh xin gửi lời tri ân sâu sắc nhất đến các thầy hướng dẫn đã tận tình chỉ dẫn, giúp đỡ, tạo điều kiện và động viên trong quá trình học tập, nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh xin trân trọng cảm ơn đến quý giáo sư, nhà khoa học, thầy cô giáo và đồng nghiệp đã đóng góp các ý kiến quý báu trong thời gian học tập và hoàn thành luận án.

Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Ban Giám Hiệu, Khoa Công Trình, Phòng Đào tạo Sau đại học, Bộ môn Cầu Hầm, Trung tâm khoa học Công nghệ, Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng của Trường Đại học Giao thông Vận tải đã luôn ủng hộ và tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh xin dành lời cảm ơn gửi đến Phòng thí nghiệm Bộ môn Xây dựng Công trình ngầm và Mỏ - Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Trung tâm thí nghiệm Đường bộ cao tốc - Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải đã hỗ trợ nghiên cứu sinh trong quá trình thí nghiệm.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn các thành viên gia đình đã luôn thông cảm, đồng hành và chia sẻ những khó khăn trong suốt chặng đường học tập và hoàn thành luận án.

Trân trọng cảm ơn!

Hà Nội - 2021

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC BẢNG	xi
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT, KÝ HIỆU	xiii
MỞ ĐẦU	1
1. Đặt vấn đề nghiên cứu.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu.....	3
3. Đối tượng nghiên cứu.....	3
4. Phạm vi nghiên cứu.....	3
5. Phương pháp nghiên cứu.....	3
6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của nghiên cứu	3
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG SỬ DỤNG NANO SILICA VÀ PHÁ HỦY TRONG BÊ TÔNG.....	5
1.1. Giới thiệu về ứng dụng công nghệ nano trong bê tông.....	5
1.2. Tổng quan về bê tông cường độ cao sử dụng nano silica	7
1.2.1. Giới thiệu	7
1.2.2. Một số ứng dụng bê tông cường độ cao sử dụng vật liệu nano.....	9
1.2.3. Ảnh hưởng của nano silica đến các tính năng của bê tông.....	11
1.2.4. Tổng quát về hàm lượng nano silica sử dụng trong bê tông	21
1.2.5. Tình hình nghiên cứu sử dụng nano silica trong bê tông tại Việt Nam	22
1.3. Tổng quan về cơ học phá hủy trong bê tông.....	24
1.3.1. Khái niệm về cơ học phá hủy	24
1.3.2. Phá hủy trong bê tông.....	25
1.3.3. Phương pháp thí nghiệm các tham số phá hủy của bê tông.....	31
1.3.4. Các mô hình phá hủy trong bê tông.....	35

1.3.5. Nghiên cứu về cơ học phá hủy bê tông tại Việt Nam.....	43
1.4. Kết luận chương 1	44
CHƯƠNG 2. XÁC ĐỊNH THÀNH PHẦN VÀ MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ HỌC CHỦ YẾU BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG NANO SILICA	46
2.1. Vật liệu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng nano silica.....	46
2.1.1. Xi măng.....	47
2.1.2. Nano silica (NS).....	47
2.1.3. Cốt liệu lớn.....	49
2.1.4. Cốt liệu nhỏ.....	51
2.1.5. Nước.....	52
2.1.6. Silica fume	52
2.1.7. Phụ gia siêu dẻo	53
2.2. Thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng nano silica	54
2.2.1. Giới thiệu	54
2.2.2. Các yêu cầu khi thiết kế bê tông cường độ cao sử dụng nano silica ..	55
2.2.3. Thiết kế thành phần bê tông cường độ cao sử dụng nano silica.....	56
2.3. Thí nghiệm một số tính chất cơ học chủ yếu BTCĐC sử dụng NS.....	63
2.3.1. Kế hoạch thí nghiệm	63
2.3.2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm.....	65
2.3.3. Thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS.....	68
2.3.4. Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS	73
2.3.5. Thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS	77
2.4. Kết luận chương 2	82
CHƯƠNG 3. THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH ĐẶC ĐIỂM PHÁ HỦY BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG NANO SILICA.....	84

3.1. Đề cương thí nghiệm.....	84
3.1.1. Mục đích thí nghiệm.....	84
3.1.2. Cơ sở thí nghiệm.....	84
3.1.3. Phương pháp thí nghiệm.....	84
3.2. Các đặc trưng phá hủy bê tông.....	86
3.2.1. Năng lượng phá hủy.....	86
3.2.2. Chiều dài đặc trưng.....	87
3.2.3. Độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD).....	88
3.3. Thí nghiệm các tham số và đặc điểm phá hủy BTCĐC sử dụng NS.....	91
3.3.1. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm.....	91
3.3.2. Thiết bị thí nghiệm.....	93
3.3.3. Tiến hành thí nghiệm.....	94
3.4. Phân tích kết quả thí nghiệm.....	95
3.4.1. Đặc điểm phá hủy BTCĐC sử dụng NS.....	95
3.4.2. Ảnh hưởng của nano silica đến năng lượng phá hủy.....	101
3.4.3. Ảnh hưởng của nano silica đến chiều dài đặc trưng.....	102
3.4.4. Tính toán chiều dài vết nứt.....	103
3.4.5. Độ mở rộng đầu vết nứt (độ mở rộng vết nứt danh định) BTCĐC sử dụng NS.....	104
3.4.6. Luật mềm hóa của BTCĐC sử dụng NS.....	105
3.5. Kết luận chương 3.....	106
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU SỨC KHÁNG LAN TRUYỀN NÚT VÀ ỨNG DỤNG BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG NANO SILICA TRONG KẾT CẤU CẦU.....	107
4.1. Giới thiệu.....	107
4.2. Nghiên cứu sức kháng nứt BTCĐC sử dụng nano silica.....	107
4.2.1. Cường độ chống nứt khởi đầu và cường độ chống nứt dính kết.....	108

4.2.2. Tiếp cận xác định đường cong sức kháng lan truyền nứt K_R	110
4.2.3. Sức kháng lan truyền nứt BTCĐC sử dụng nano silica.....	114
4.2.4. Tiêu chuẩn lan truyền vết nứt dựa trên K_R	117
4.3. Xác định độ dự trữ cường độ sau nứt kết cấu BTCĐC sử dụng NS.....	118
4.3.1. Tiếp cận tính toán độ dự trữ cường độ kết cấu bê tông sau nứt	118
4.3.2. Xác định độ dự trữ cường độ sau nứt kết cấu BTCĐC sử dụng NS	120
4.4. Ứng dụng BTCĐC sử dụng NS trong vùng neo chịu tải cục bộ.....	125
4.4.1. Đặc điểm kết cấu vùng neo.....	125
4.4.2. Phân tích ứng xử vùng neo dự ứng lực dầm cầu BTCĐC sử dụng NS	127
4.5. Hiệu quả kinh tế kỹ thuật BTCĐC sử dụng NS ứng dụng trong công trình cầu	131
4.6. Kết luận chương 4	132
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	133
DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA NGHIÊN CỨU SINH..	137
TÀI LIỆU THAM KHẢO	138
PHỤ LỤC I.....	151
PHỤ LỤC II.....	159

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Ứng dụng công nghệ nano trong ngành vật liệu xây dựng [47]	6
Hình 1.2. Quan hệ kích thước và diện tích bề mặt vật liệu trong bê tông [91].....	8
Hình 1.3. Vữa xi măng phụ gia nano sửa chữa công trình cầu đường (BASF)....	9
Hình 1.4. Nhà thờ Jubilee - Rome (1996).....	10
Hình 1.5. Cầu Gartnerplatzbrucke - Đức (2007)	10
Hình 1.6. Cầu Iowa - Hoa Kỳ (2006).....	10
Hình 1.7. Đường hầm Umberto I – Rome (2007).....	11
Hình 1.8. Tòa nhà Philharmonie de Paris (2015).....	11
Hình 1.9. Sơ đồ ảnh hưởng của NS trong vữa và bê tông cường độ cao [83]....	12
Hình 1.10. Ảnh hưởng của NS đến độ sụt của hỗn hợp bê tông [110]	13
Hình 1.11. Ảnh hưởng của NS đến thời gian bắt đầu (a) và kết thúc (b) đông kết của BTCĐC [51]	14
Hình 1.12. Ảnh SEM cấu trúc của bê tông thường (a) và bê tông có thành phần NS (b) [35].....	15
Hình 1.13. Ảnh hưởng NS đến cường độ kéo khi uốn BTCĐC ở 7 ngày tuổi (a) và 28 ngày tuổi (b) [76].....	18
Hình 1.14. Ảnh hưởng của NS đến khả năng chống thấm clorua của BTCĐC sử dụng tro bay [113].....	20
Hình 1.15. Các chế độ phá hủy cơ bản [57].....	25
Hình 1.16. Quá trình phá hủy bê tông dưới tác dụng của ứng suất kéo [101]....	27
Hình 1.17. Quan hệ ứng suất - biến dạng bê tông thường và bê tông cường độ cao [13].....	28
Hình 1.18. Quan hệ tải trọng - biến dạng xét đến sự ảnh hưởng của các hạt mịn [102]	30
Hình 1.19. Mô hình thí nghiệm kéo dọc trục [82]	31
Hình 1.20. Mô hình thí nghiệm uốn ba điểm dầm có rãnh [56]	32
Hình 1.21. Mô hình thí nghiệm kéo khi ép chẻ [56].....	33
Hình 1.22. Các hình dạng mẫu thí nghiệm tách (a) lập phương – đúc mẫu, (b) và (c) mẫu trụ tròn – lõi khoan từ kết cấu [82]	34
Hình 1.23. Mô hình thí nghiệm tách nê [82].....	34

Hình 1.24. Đường cong phi tuyến cho mô hình nứt dính kết	37
Hình 1.25. Định nghĩa của mô hình nứt dính kết [57]	38
Hình 1.26. Đường cong ứng suất cho mô hình dây nứt [36]	38
Hình 1.27. Mô hình nứt 2 tham số [36]	39
Hình 1.28. Mô hình hiệu ứng kích thước [16][36]	41
Hình 1.29. Ba giai đoạn của quá trình lan truyền nứt theo mô hình double-K [103]	42
Hình 2.1. Nano silica	48
Hình 2.2. Ảnh quét SEM của nano silica	49
Hình 2.3. Kết quả soi XRD của nano silica	49
Hình 2.4. Sàng và phối trộn thành phần hạt đá theo tiêu chuẩn ASTM C33	50
Hình 2.5. Biểu đồ đường cong cấp phối của đá theo ASTM C33	51
Hình 2.6. Thí nghiệm thành phần hạt cát	51
Hình 2.7. Biểu đồ cấp thành phần hạt cát theo ASTM C33	52
Hình 2.8. Phụ gia khoáng gốc silica fume hãng Sika	53
Hình 2.9. Phụ gia siêu dẻo Sika ViscoCrete 3000-20M	54
Hình 2.11. Cân và khuấy đều nano silica với nước	66
Hình 2.12. Chuẩn bị vật liệu cho một mẻ trộn	66
Hình 2.13. Xác định độ sụt của hỗn hợp BTCĐC sử dụng NS	67
Hình 2.14. Trộn, đúc và đầm chặt mẫu	68
Hình 2.15. Bảo dưỡng mẫu BTCĐC sử dụng NS	68
Hình 2.16. Thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS	69
Hình 2.17. Ảnh hưởng của NS đến cường độ nén của BTCĐC	69
Hình 2.18. Biểu đồ phân tích phần dư thống kê kết quả thí nghiệm R_n	71
Hình 2.19. Biểu đồ ảnh hưởng tương tác các yếu tố đến R_n	71
Hình 2.20. Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS	73
Hình 2.21. Ảnh hưởng của NS đến cường độ kéo khi uốn của BTCĐC	74
Hình 2.22. Biểu đồ phân tích phần dư thống kê thí nghiệm R_{ku}	75
Hình 2.23. Biểu đồ ảnh hưởng tương tác các yếu tố đến R_{ku}	76
Hình 2.24. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS	78

Hình 2.25. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS	81
Hình 2.26. Quan hệ giữa mô đun đàn hồi và tỉ lệ NS	81
Hình 3.1. Sơ đồ thí nghiệm uốn ba điểm trên mẫu đầm có rãnh	85
Hình 3.2. Công phá hủy là diện tích dưới đường cong tải trọng – độ võng ($p - \delta$)	86
Hình 3.3. Mô tả CMOD trong thí nghiệm uốn ba điểm [68]	88
Hình 3.4. Quan hệ độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD) và độ mở rộng vết nứt tương ứng x (COD) [66]	89
Hình 3.5. Luật mềm hóa song tuyến của bê tông.....	90
Hình 3.6. Kích thước mẫu đầm thí nghiệm uốn ba điểm.....	92
Hình 3.7. Chuẩn bị mẫu đầm thí nghiệm uốn ba điểm có rãnh mồi	92
Hình 3.8. Máy thí nghiệm uốn Control	93
Hình 3.9. Đầu đo độ võng (a) và độ mở rộng miệng vết nứt (b)	93
Hình 3.10. Bố trí thí nghiệm uốn ba điểm mẫu đầm BTCĐC có rãnh	94
Hình 3.11. Đầu đo CMOD được bố trí tại vị trí rãnh trên mẫu đầm	94
Hình 3.12. Thực hiện thí nghiệm uốn ba điểm mẫu đầm có rãnh.....	95
Hình 3.13. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – CMOD BTCĐC 0% NS...	96
Hình 3.14. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – CMOD BTCĐC 0.5% NS	96
Hình 3.15. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – CMOD BTCĐC 1.5% NS	97
Hình 3.16. Ảnh hưởng NS đến quan hệ tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt..	97
Hình 3.17. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – độ võng BTCĐC 0% NS..	98
Hình 3.18. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – độ võng BTCĐC 0.5% NS	99
Hình 3.19. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – độ võng BTCĐC 1.5% NS	99
Hình 3.20. Ảnh hưởng của NS đến quan hệ tải trọng – độ võng.....	100
Hình 3.21. So sánh kết quả P-CMOD (a) và P- δ (b) với các nghiên cứu khác	101
Hình 3.22. Ảnh hưởng của NS đến năng lượng phá hủy của BTCĐC	102
Hình 3.23. Ảnh hưởng NS đến chiều dài đặc trưng.....	103
Hình 3.24. Quan hệ ứng suất – chiều dài lan truyền vết nứt.....	104
Hình 3.25. Quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt danh định.....	104
Hình 3.26. Đường cong mềm hóa song tuyến BTCĐC sử dụng NS	105

Hình 4.1. Tải trọng có hiệu trên vùng nứt dính kết tại vị trí tới hạn.....	109
Hình 4.2. Dạng phân phối ứng suất dính kết với giai đoạn lan truyền nứt $a_0 \leq a \leq a_c$	112
Hình 4.3. Dạng phân phối ứng suất dính kết với giai đoạn lan truyền nứt $a_c < a \leq a_{w0}$	112
Hình 4.4. Dạng phân phối ứng suất dính kết với giai đoạn lan truyền nứt $a > a_{w0}$	113
Hình 4.5. Sơ đồ khối tính toán sức kháng lan truyền nứt	114
Hình 4.6. Cường độ chống nứt khởi đầu BTCĐC sử dụng NS	115
Hình 4.7. Sức kháng lan truyền nứt BTCĐC sử dụng NS	116
Hình 4.8. Cường độ chống nứt dính kết BTCĐC sử dụng NS	116
Hình 4.9. So sánh kết quả lập trình và các kết quả nghiên cứu khác.....	117
Hình 4.10. Biểu đồ miêu tả công dự trữ sau nứt	119
Hình 4.11. Quan hệ cường độ dự trữ và chiều dài lan truyền nứt BTCĐC NS0.0	122
Hình 4.12. Quan hệ độ dự trữ cường độ và chiều dài lan truyền nứt BTCĐC 1,5% NS.....	124
Hình 4.13. Lan truyền vết nứt tại vùng neo chịu tải trọng cục bộ [67].....	125
Hình 4.14. Vùng cục bộ, vùng tổng thể và các đường nứt trong vùng neo [16]	126
Hình 4.15. Mặt cắt cấu tạo vùng neo đầu dầm.....	127
Hình 4.16. Mô hình vùng neo cáp ở đầu dầm dự ứng lực	128
Hình 4.17. Ứng suất vùng neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a), có xét ảnh hưởng cốt thép (b) theo phương X.....	129
Hình 4.18. Ứng suất vùng neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a), có xét ảnh hưởng cốt thép (b) theo phương Y	129
Hình 4.19. Ứng suất vùng neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a), có xét ảnh hưởng cốt thép (b) theo phương Z	130
Hình 4.20. Ứng suất dọc trục neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a) có xét ảnh hưởng cốt thép (b)	130

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Cường độ của các loại vữa xi măng phụ gia nano (BASF).....	17
Bảng 1.2. Tỷ lệ nano silica sử dụng trong bê tông của một số nghiên cứu	21
Bảng 1.3. Tổng hợp các mô hình phá hủy trong bê tông.....	35
Bảng 2.1. Thành phần hóa học của xi măng Bút Sơn PC40	47
Bảng 2.2. Thành phần khoáng tính toán của xi măng Bút Sơn PC40.....	47
Bảng 2.3. Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng Bút Sơn PC40	47
Bảng 2.4. Thành phần hóa học nano silica	48
Bảng 2.5. Chỉ tiêu kỹ thuật nano silica (Aerosil 200)	48
Bảng 2.6. Các tính chất kỹ thuật của đá.....	50
Bảng 2.7. Thành phần cấp phối đá theo sau khi phối trộn tiêu chuẩn ASTM C33	50
Bảng 2.8. Các tính chất kỹ thuật của cát.....	51
Bảng 2.9. Kết quả thí nghiệm thành phần hạt của cát theo tiêu chuẩn ASTM C33	52
Bảng 2.10. Chỉ tiêu kỹ thuật Sikacrete PP1	53
Bảng 2.11. Chỉ tiêu kỹ thuật phụ gia Sika ViscoCrete 3000-20M	54
Bảng 2.12. Độ sụt của hỗn hợp bê tông có và không sử dụng phụ gia siêu dẻo	57
Bảng 2.13. Xác định kích thước D_{max} của hạt cốt liệu lớn.....	57
Bảng 2.14. Xác định thể tích đá được đầm chặt trên một đơn vị thể tích bê tông	58
Bảng 2.15. Xác định lượng nước ban đầu cho hỗn hợp bê tông.....	59
Bảng 2.16. Xác định tỷ lệ N/CKD cho $1m^3$ bê tông có sử dụng PGSD	59
Bảng 2.17. Kết quả tính toán thành phần BTCĐC 70MPa sử dụng NS.....	63
Bảng 2.18. Số lượng mẫu thí nghiệm tính chất cơ học BTCĐC sử dụng NS	64
Bảng 2.19. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm R_n	72
Bảng 2.20. Phân tích phương sai ANOVA mô hình hồi quy R_n	72
Bảng 2.21. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm chịu R_{ku}	76
Bảng 2.22. Phân tích phương sai ANOVA cho mô hình hồi quy R_{ku}	77
Bảng 2.23. Tổng hợp kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS	79

Bảng 3.1. Diện tích dưới đường cong P- δ	100
Bảng 3.2. Kết quả tính toán năng lượng phá hủy.....	101
Bảng 3.3. Kết quả tính toán chiều dài đặc trưng.....	103
Bảng 3.4. Kết quả các tham số mềm hóa BTCĐC sử dụng NS.....	105
Bảng 4.1. Cường độ chống nứt khởi đầu BTCĐC sử dụng nano silica.....	115
Bảng 4.2. Độ dư trữ cường độ sau nứt của BTCĐC sử dụng 0% NS.....	121
Bảng 4.3. Độ dư trữ cường độ sau nứt BTCĐC sử dụng 1.5% NS	123
Bảng 4.4. Các thông số kích thước dầm và tải trọng tính toán vùng neo	127
Bảng 4.5. Các tham số tính toán cốt thép sử dụng trong vùng neo	128
Bảng 4.6. Kết quả phân tích ứng suất vùng neo chịu tải trọng cục bộ	130

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT, KÝ HIỆU

1. Các chữ viết tắt

BTCĐC	Bê tông cường độ cao
BTCLC	Bê tông chất lượng cao
BTXM	Bê tông xi măng
CKD	Chất kết dính
C-S-H	Calcium-silicate-hydrate (Hydrat Canxi Silicat)
CMOD	Crack mouth open displacement (độ mở rộng miệng vết nứt)
CTOD	Crack tip open displacement (độ mở rộng đầu vết nứt)
ITZ	Interface transition zone (Vùng chuyển tiếp bề mặt)
NS	Nano silica
N/CKD	Nước/Chất kết dính
N/X	Nước/xi măng
LEFM	Linear Elastic Fracture Mechanics (Cơ học phá hủy đàn hồi tuyến tính)
LVDT	Linear Variable Differential Transducer (Biến áp vi sai biến đổi tuyến tính)
SEM	Scanning Electron Microscope (Kính hiển vi điện tử)
SF	Silica fume
PGSD	Phụ gia siêu dẻo
RILEM	Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (Hiệp hội các phòng thí nghiệm và chuyên gia vật liệu)
XRD	X – Ray Diffraction (Kỹ thuật nhiễu xạ tia X)

2. Các ký hiệu

A_L	Diện tích nguyên của dầm tại mặt cắt tạo rãnh
a	Chiều dài nứt
a_c	Chiều dài lan truyền nứt tới hạn ứng với tải trọng lớn nhất
a_e	Chiều dài nứt có hiệu
a_0	Chiều dài rãnh (nứt) tạo trước
B	Chiều rộng mẫu dầm thí nghiệm uốn ba điểm
D	Chiều cao mẫu dầm thí nghiệm uốn ba điểm
D_{max}	Đường kính cỡ hạt lớn nhất danh định của đá
E	Mô đun đàn hồi bê tông
m	Khối lượng của dầm giữa các gối trong thí nghiệm phá hủy
g	Gia tốc trọng trường
R_n	Cường độ nén bê tông
R_{ku}	Cường kéo khi uốn bê tông
T	Tuổi
V_c	Thể tích cát
V_{CA}	Thể tích lèn chặt của đá
V_{kk}	Thể tích không khí trong bê tông
$V_{đ}$	Thể tích đá
V_{xm}	Thể tích xi măng
V_{sf}	Thể tích silica fume
V_{ns}	Thể tích nano silica
W_F	Công phá hủy
δ_0	Độ võng lớn nhất của mẫu dầm
l_{ch}	Chiều dài đặc trưng
G_F	Năng lượng phá hủy

Δa	Chiều dài lan truyền vết nứt
ρ_{dlc}	Khối lượng thể tích lèn chặt của đá
ρ_{clc}	Khối lượng thể tích lèn chặt của cát
ρ_c	Khối lượng riêng của cát
H_0	Chiều dày của mẫu giữ đầu đo độ mở rộng miệng vết nứt
K_R	Sức kháng lan truyền nứt
K_{lc}^e	Cường độ nứt có hiệu
K_I^C	Cường độ chống nứt dính kết
K_{lc}^C	Cường độ chống nứt dính kết tới hạn
K_{lc}^{ini}	Cường độ chống nứt khởi đầu
K_{lc}^{un}	Cường độ nứt tới hạn
f_t	Cường độ kéo của bê tông (CEP-FIB)
f_{fl}	Cường độ kéo khi uốn bê tông (CEP-FIB)
h_b	Chiều cao dầm thí nghiệm uốn bốn điểm
σ_1	Ứng suất tương ứng với biến dạng ε_1
σ_2	Ứng suất tương ứng với 40% của tải trọng phá hủy
σ_s	Ứng suất tại điểm gãy của đường cong mềm hóa
$\sigma(w)$	Ứng suất dính kết tại điểm đầu rãnh tạo trước
$\sigma_s(CTODc)$	Ứng suất dính kết tại điểm có chuyển vị mở rộng đầu vết nứt tới hạn
ε_2	Biến dạng tương đối tương ứng với ứng suất σ_2
w	Chiều rộng vết nứt tại đầu của rãnh
w_s	Độ mở rộng vết nứt tại điểm gãy của đường cong mềm hóa
w_0	Độ mở rộng vết nứt không ứng suất
x_e	Khoảng cách từ hợp lực đến đáy dầm

P	Tải trọng
P_{max}	Tải trọng lớn nhất
δ	Độ võng
$R_S(\Delta a_i)$	Độ dư trữ cường độ sau nứt ứng với chiều dài lan truyền vết nứt Δa_i
$U_L(\Delta a_i)$	Lượng công hấp thụ ứng với chiều dài lan truyền vết nứt Δa_i
U_T	Tổng lượng công hấp thụ gây phá hủy hoàn toàn kết cấu

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề nghiên cứu

Trong những năm gần đây, việc sử dụng vật liệu nano vào bê tông cường độ cao (BTCĐC) đã được ghi nhận, chúng có thể cải thiện đáng kể tính chất cơ học và độ bền của bê tông [31][80][91][110]. Sự kết hợp vật liệu nano vào hỗn hợp để cải thiện các tính chất cơ học bê tông đã trở thành lĩnh vực nghiên cứu đầy hứa hẹn. Các hạt nano được đặc trưng bởi tỉ lệ diện tích bề mặt lớn và khả năng hoạt tính cao. Theo Sanchez và Sobolev [91], hạt silica ở kích thước nanomet giúp kích hoạt các phản ứng thủy hóa của xi măng và các phản ứng loại bỏ các thành phần kém bền trong bê tông $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sinh ra các sản phẩm gel pozzolan có chất lượng tốt hơn. Quá trình này làm cho bê tông có cấu trúc đặc chắc, phát triển cường độ sớm, tăng khả năng chịu nén, chịu kéo, chống thấm, chống ăn mòn.

Hiện nay, vật liệu nano được nghiên cứu ứng dụng rộng rãi cùng với việc chi phí sản xuất giảm với quy mô công nghiệp, việc sử dụng vật liệu nano đã nhận được sự thu hút đặc biệt để nghiên cứu chế tạo bê tông sử dụng trong nhiều kết cấu xây dựng [110]. Ở Việt Nam, công nghệ nano bắt đầu được quan tâm phát triển, điển hình là các chương trình hội thảo nghiên cứu sản xuất, ứng dụng nano silica (NS) từ vật liệu phế thải là tro trấu và các dự án đầu tư nhà máy sản xuất NS phục vụ ngành vật liệu xây dựng. Một số đề tài nghiên cứu khoa học, luận án tiến sĩ, thạc sĩ sử dụng vật liệu nano vào trong lĩnh vực xây dựng, sửa chữa công trình cầu đường đã được thực hiện với nhiều cơ sở lý thuyết và thực nghiệm [7][12][14][18]. Hầu hết các nghiên cứu đều cho thấy những mặt tích cực khi sử dụng vật liệu nano vào bê tông. Tuy nhiên, các nghiên cứu đa phần đều sử dụng vật liệu nano trong bê tông thường dẫn đến chưa phát huy hết tác dụng. Nhiều nhà nghiên cứu báo cáo hàm lượng nano silica tối ưu khác nhau cùng với một số ảnh hưởng bất thường cần chú ý trong các nghiên cứu xa hơn [39][88][92-93]. Hàm lượng sử dụng phù hợp của vật liệu nano cần phải được đánh giá khách quan theo các yếu tố kỹ thuật và dựa trên các cơ sở thực nghiệm.

Trong các công trình cầu, bê tông được sử dụng có cường độ cao và nhiều cấu kiện được tăng cường ứng suất trước, vì thế đặc điểm phá hủy của các kết cấu bê tông này thường rất giòn. Ngoài ra, nhiều kết cấu bê tông công trình cầu đang xuống cấp trầm trọng do sự ảnh hưởng của tải trọng nặng, tải trọng lặp cùng với các hiện tượng ăn mòn nghiêm trọng. Tổng hợp các yếu tố trên có thể dẫn đến các hiện tượng phá hủy đột ngột và nguy hiểm. Theo Mindess [72], hiện tại chúng ta đang bước vào thời kỳ có thể đưa cơ học phá hủy vào thiết kế và đánh giá kết cấu bê tông. Điều này sẽ giúp đạt được mức an toàn toàn diện, đặc biệt đối với các kết cấu có kích thước khác nhau. Việc nghiên cứu đặc điểm phá hủy của bê tông cho phép chúng ta phân tích các ứng xử và trạng thái làm việc của kết cấu sau khi xuất hiện vết nứt. Khả năng chống lan truyền nứt và độ dự trữ cường độ sau nứt có thể được xác định dựa trên các phương pháp cơ học phá hủy. Nó sẽ giúp cải thiện tính kinh tế cũng như độ tin cậy của kết cấu. Các ứng dụng của cơ học phá hủy mang tính cấp thiết cho kết cấu các công trình như đập bê tông, cầu vượt nhịp lớn, và các lò phản ứng hoặc các bể chứa lò phản ứng hạt nhân, mà yêu cầu về an toàn đặc biệt cao và có nguy cơ gây ra thảm họa rất lớn.

Theo Van Mier [102], bê tông trong quá trình đông kết chắc chắn sẽ xuất hiện các vết nứt siêu nhỏ bên trong, chúng sẽ phát triển và được kết nối với nhau để tạo thành một số vết nứt rõ rệt bởi nhiệt độ và tải trọng thay đổi trong quá trình vận hành. Với sự lan truyền của các vết nứt, phá hủy có thể xảy ra đối với các kết cấu bê tông. Việc xem xét ảnh hưởng của các hạt khoáng siêu mịn kích thước nanomet đến đặc điểm phá hủy, sự lan truyền vết nứt, độ dự trữ cường độ trong quá trình phá hủy là một trong những nội dung nghiên cứu để làm cơ sở áp dụng hiệu quả các tính năng của bê tông. Bên cạnh đó, sự xuất hiện của vật liệu mới như bê tông sử dụng vật liệu nano với nhiều tính năng ưu việt đòi hỏi phải nghiên cứu các đặc tính đặc biệt như độ bền và đặc điểm phá hủy để khai thác một cách hiệu quả các tính chất của vật liệu cho mục đích an toàn và kinh tế.

Từ những vấn đề được phân tích như trên, đề tài “Nghiên cứu tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao sử dụng nano silica ứng

dụng trong công trình cầu” được nghiên cứu sinh lựa chọn nghiên cứu.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Xác định được thành phần cấp phối BTCĐC sử dụng nano silica.
- Đánh giá sự ảnh hưởng của NS đến một số tính chất cơ học chủ yếu của BTCĐC.
- Thực nghiệm xác định các tham số và đặc điểm phá hủy của BTCĐC.
- Ứng dụng kết quả thí nghiệm cơ học phá hủy tính toán sức kháng lan truyền nứt và độ dự trữ cường độ sau nứt của BTCĐC sử dụng NS.
- Nghiên cứu ứng dụng BTCĐC sử dụng NS trong kết cấu công trình cầu.

3. Đối tượng nghiên cứu

- Nano silica và ảnh hưởng của nano silica đến các tính chất cơ học chủ yếu và đặc điểm phá hủy của kết cấu BTCĐC trong công trình cầu.

4. Phạm vi nghiên cứu

- * Phạm vi nghiên cứu về vật liệu: Nano silica và thành phần chế tạo BTCĐC ứng dụng trong kết cấu cầu.
- * Phạm vi nghiên cứu về các tính chất cơ học: Các tính chất cơ học chủ yếu của BTCĐC sử dụng NS ứng dụng trong kết cấu cầu (cường độ nén, cường độ kéo khi uốn, mô đun đàn hồi).
- * Phạm vi nghiên cứu về cơ học phá hủy: Đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng NS ứng dụng trong kết cấu cầu.

5. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết trên cơ sở kế thừa, phân tích tổng hợp các nghiên cứu trong và ngoài nước về các vấn đề liên quan bê tông sử dụng nano silica và cơ học phá hủy.

Thí nghiệm các tính năng cơ học chủ yếu và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao sử dụng nano silica. Thí nghiệm cơ học phá hủy được tiến hành

qua phương pháp uốn ba điểm mẫu dầm có rãnh mối. Các thí nghiệm được tiến hành dựa trên các thiết bị tin cậy ở các phòng thí nghiệm ở Việt Nam.

Sử dụng phương pháp thống kê để phân tích kết quả thí nghiệm, đảm bảo độ tin cậy của kết quả nghiên cứu. Sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn phân tích ứng xử cục bộ của kết cấu cầu bê tông cường độ cao sử dụng nano silica.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của nghiên cứu

*** Ý nghĩa khoa học:**

Chứng minh được khả năng sử dụng nano silica trong hỗn hợp BTCĐC với điều kiện công nghệ và thiết bị ở Việt Nam.

Phân tích ảnh hưởng của nano silica đến các tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy của BTCĐC.

Xác định được sức kháng lan truyền nứt và độ dự trữ cường độ sau nứt BTCĐC sử dụng nano silica.

Đánh giá khả năng ứng dụng BTCĐC sử dụng nano silica vào kết cấu công trình cầu.

*** Ý nghĩa thực tiễn:**

Nghiên cứu phương pháp chế tạo BTCĐC sử dụng NS, một loại vật liệu khoáng có tiềm năng sản xuất ở Việt Nam từ vật liệu tro trấu.

Các tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng NS được xác định là cơ sở khoa học để ứng dụng vật liệu trong kết cấu công trình cầu.

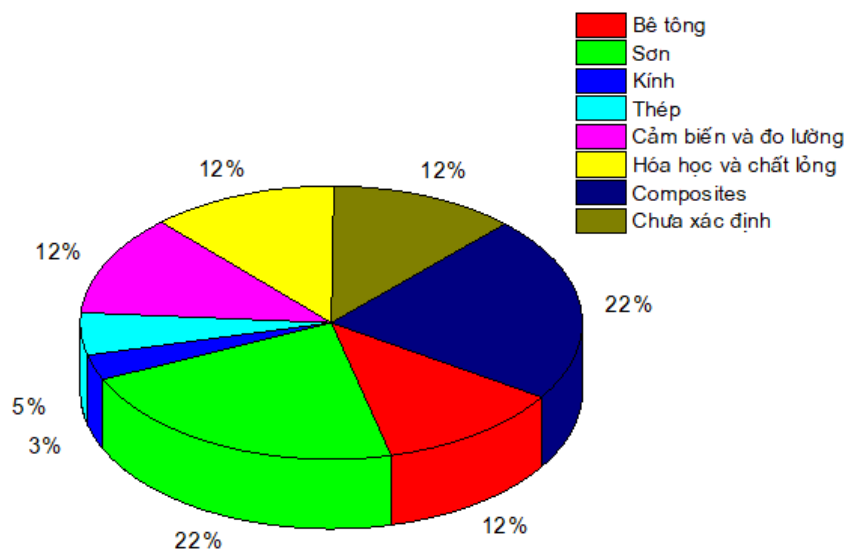
Khả năng chống lan truyền nứt và độ dự trữ cường độ của BTCĐC được cải thiện khi sử dụng NS, đặc điểm này có thể áp dụng trong các kết cấu cầu thường xuất hiện vết nứt.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG SỬ DỤNG NANO SILICA VÀ PHÁ HỦY TRONG BÊ TÔNG

1.1. Giới thiệu về ứng dụng công nghệ nano trong bê tông

Khái niệm về công nghệ nano được nhắc đến năm 1960 khi nhà vật lý người Mỹ Richard Feynman đề cập tới khả năng chế tạo vật chất ở kích thước siêu nhỏ đi từ quá trình tập hợp các nguyên tử, phân tử [44]. Những năm 1980, nhờ sự ra đời của hàng loạt các thiết bị phân tích, trong đó có kính hiển vi đầu dò quét SPM và STM có khả năng quan sát đến kích thước vài nguyên tử hay phân tử, con người có thể quan sát và hiểu rõ hơn về lĩnh vực nano. Công nghệ nano cho phép thao tác và sử dụng vật liệu ở tầm phân tử, làm tăng và tạo ra tính chất đặc biệt của vật liệu, giảm kích thước của các thiết bị đến kích thước cực nhỏ. Công nghệ nano giúp thay thế những hóa chất, vật liệu và quy trình sản xuất truyền thống gây ô nhiễm bằng một quy trình mới gọn nhẹ, tiết kiệm năng lượng, giảm tác động đến môi trường. Theo Sobolev and Sanchez [91], áp dụng công nghệ nano đã tạo nên những đột phá trong nhiều lĩnh vực như y tế, năng lượng, sinh học, công nghệ thông tin, điện tử, vật liệu và nhiều lĩnh vực quan trọng khác.

Công nghệ nano là các công nghệ liên quan đến việc thiết kế, phân tích, chế tạo, ứng dụng các cấu trúc, thiết bị và hệ thống bằng việc điều khiển hình dáng, kích thước ở quy mô nanomet (10^{-9}m). Vật liệu nano có thể được định nghĩa là các hạt có kích thước trong khoảng từ 1nm đến 100nm. Hạt nano tồn tại trong các khu vực chuyển tiếp từ cụm nguyên tử sang vật chất vĩ mô với tỷ lệ bề mặt đặc trưng cao, bao gồm hạt nano kim loại, nano phi kim loại, nano hữu cơ, nano vô cơ và hạt nano sinh học [110]. Báo cáo của RILEM 197-NCM về công nghệ nano trong vật liệu xây dựng là tài liệu đầu tiên nhấn mạnh tiềm năng của công nghệ nano về phát triển vật liệu xây dựng [114]. Công nghệ nano ứng dụng được ứng trong ngành vật liệu xây dựng với số lượng đáng kể nhằm chế tạo các loại vật liệu như bê tông, sơn, kính, thép, composite,... (Hình 1.1) [47].



Hình 1.1. Ứng dụng công nghệ nano trong ngành vật liệu xây dựng [47]

Bê tông là một vật liệu đa quy mô có thể được xem xét bắt đầu từ nm cho đến cm. Điều này hoàn toàn đúng cho cả các thành phần bê tông từ hạt nano đến cốt liệu thô và cấu trúc vi mô từ gel C-S-H đến cốt liệu thô. Hiện nay, việc ứng dụng vật liệu nano và nghiên cứu bê tông ở quy mô nanomet được coi là chủ đề đang được quan tâm và đã trở thành một lĩnh vực cho nhiều nhà nghiên cứu [47].

Có nhiều loại vật liệu khoáng ở kích thước nano có thể sử dụng để tăng cường chất lượng bê tông như là nano SiO_2 (nano silica, NS) [70], nano CaCO_3 [95], nano Al_2O_3 [62], nano Fe_3O_4 [37], nano TiO_2 [63] và nano metakaolin [74]. Giữa các vật liệu nano đó, NS là loại được áp dụng rộng rãi nhất trong bê tông do hoạt tính cao, diện tích bề mặt đặc trưng cao do đó các hoạt động pozzolanic trong bê tông có thể đạt ở mức độ cao. Hơn nữa, NS có thể thúc đẩy quá trình hòa tan C_3S trong xi măng và tạo ra sản phẩm C-S-H hoạt động cao, tỷ lệ nghịch với kích thước của các hạt silica [48].

Trong vật liệu bê tông, hiện tại các ứng dụng vật liệu bổ sung nhằm nâng cao chất lượng thường là silica fume ở dạng vô định hình. Silica fume (SF) làm việc trong bê tông với hai tác động chính. Thứ nhất về mặt hóa học, SF có vai trò tạo các phản ứng pozzolanic để loại trừ Ca(OH)_2 và sản sinh thêm geo C-S-H.

Thứ hai là có tác dụng vật lý như một vật liệu chèn, vì SF có kích thước nhỏ hơn khoảng 100 lần so với hạt xi măng. SF có thể lấp đầy các khoảng trống trong vữa xi măng và làm tăng độ đặc chắc của bê tông [83]. Những nghiên cứu Qing, Dunster, Senf và cộng sự đã cho rằng khi thêm 1kg SF vào hỗn hợp bê tông sẽ giảm khoảng 4kg xi măng và điều này có thể cao hơn nếu sử dụng NS [81]. Một khả năng khác là lượng xi măng được giữ nguyên và thêm NS vào để cải thiện những tính chất của bê tông dựa trên những đặc tính của NS [94].

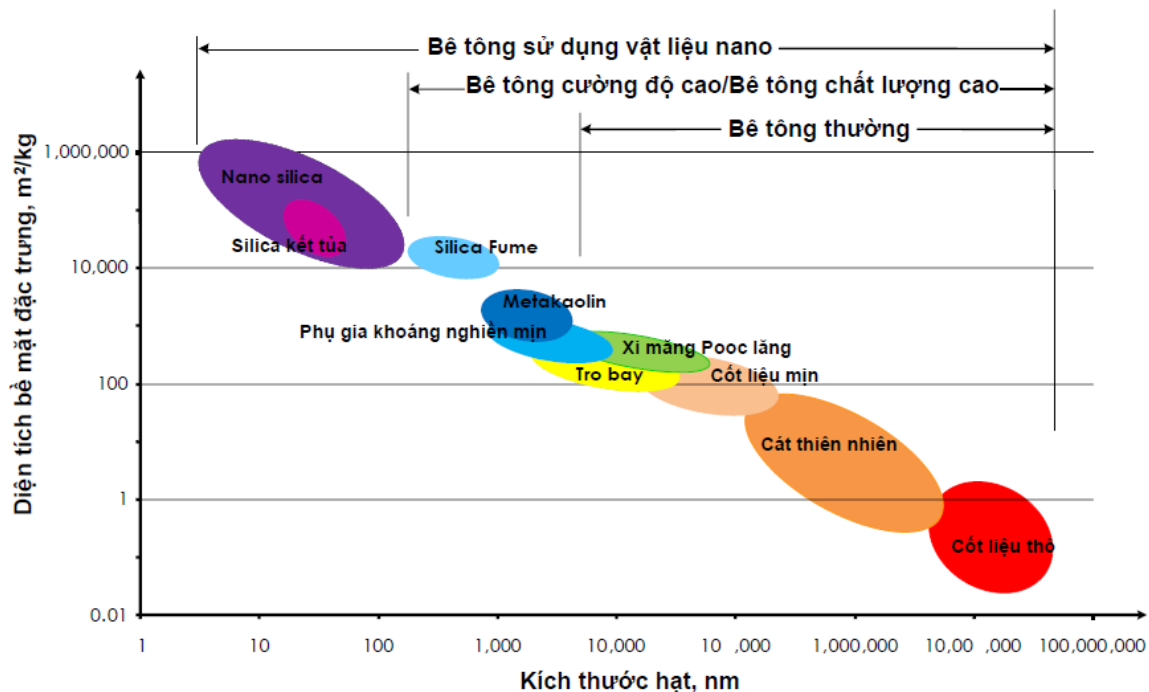
1.2. Tổng quan về bê tông cường độ cao sử dụng nano silica

1.2.1. Giới thiệu

Là loại vật liệu xây dựng được tiêu thụ nhiều nhất, bê tông thường được sử dụng trên thế giới, có cường độ cao, mô đun đàn hồi lớn, tính dẻo và tính dễ thi công. Định hướng của các kết cấu công trình cầu hiện đại là vượt nhịp, cường độ cao và tuổi thọ thiết kế lâu dài với yêu cầu cao hơn đối với bê tông. Tuy nhiên, bê tông thường khó có thể đáp ứng các yêu cầu đó. So sánh với bê tông truyền thống, bê tông cường độ cao (BTCĐC) và bê tông chất lượng cao (BTCLC) có những tính chất cơ học và độ bền vượt trội hơn và gần đây chúng được sử dụng phổ biến và rộng rãi hơn. BTCĐC có thể được minh họa như một loại bê tông có thể đáp ứng các kết hợp đặc biệt của các tính chất và yêu cầu về tính đồng nhất, thường không thể có được bằng cách sử dụng vật liệu, cấp phối truyền thống. Với sự phát triển như hiện nay, có nhiều phương pháp để chế tạo BTCĐC. Thông thường, những loại phụ gia có thể được thêm vào bê tông để có được chất lượng cao, và những loại phụ gia phổ biến bao gồm các loại phụ gia khoáng, phụ gia hóa học. Trong số phụ gia khoáng được thêm vào bê tông, nano silica có nhiều triển vọng và được dự đoán sẽ phổ biến trong tương lai [110].

Theo Sanchez và Sobolev đã nghiên cứu sự phân bố kích thước hạt có trong bê tông thông thường so với bê tông chất lượng cao và bê tông chất lượng cao sử dụng nano silica [91]. BTCĐC và BTCLC là kết quả của sự cải tiến cấu trúc đá xi măng thông qua silica fume và các khoáng pozzolanic khác. Sự phân

bố kích thước hạt của BTCĐC và BTCLC nằm trong khoảng từ kích thước cỡ mm lên đến khoảng 100nm (Hình 1.2). Đối với BTCĐC sử dụng nano silica, phạm vi kích thước hạt nhỏ nhất của bê tông đạt ở mức độ khoảng 5nm [91].



Hình 1.2. Quan hệ kích thước và diện tích bề mặt vật liệu trong bê tông [91]

Ứng xử cơ học của vật bê tông phụ thuộc vào các yếu tố cấu trúc có hiệu quả ở kích thước micro và nano. Kích thước ở giai đoạn hydrat canxi silicat (C-S-H), thành phần có quyết định về cường độ và các tính chất khác trong cấu trúc xi măng, nằm trong phạm vi vài nm [100]. Do đó, công nghệ nano có tiềm năng trong kỹ thuật bê tông qua ứng xử tối ưu để cải thiện tính chất cơ học và tính bền vững của BTCĐC.

Nhiều nghiên cứu về sự ảnh hưởng của hạt NS đã được tiến hành trong những năm gần đây. Kết quả nghiên cứu mang lại nhiều khích lệ và sự động viên cho các nghiên cứu mới bắt đầu. Trong luận án tiến sĩ của Quercia (2014) tại Đại học Eindhoven trình bày một cách thấu đáo về tính năng vượt trội khi sử dụng NS thêm vào bê tông [83]. Những tác động từ việc lấp đầy các lỗ rỗng đến những ảnh hưởng về mặt lý hóa đã được nêu rõ trong luận án với nhiều số liệu thí nghiệm. Quercia đã khảo sát với nhiều loại kích thước và sự phân bố kích

thước hạt để đánh giá sự ảnh hưởng đến tính chất cơ học của bê tông từ lúc bắt đầu thủy hóa đến khi hình thành cường độ. NS không những kích hoạt mạnh các phản ứng hydrat tạo các sản phẩm C-S-H có chất lượng, chúng còn chèn kín các lỗ rỗng với kích thước siêu mịn dẫn đến cường độ bê tông tăng lên và sự suy giảm các yếu tố nguy hại cho bê tông như thấm, ăn mòn một cách đáng kể. Thay đổi chất lượng của vùng chuyển tiếp vữa và cốt liệu cũng được đề cập khi thêm thành phần NS vào bê tông. Điều đó giúp cải thiện các phẩm chất và tạo ra một loại bê tông có độ bền cao cùng với nhiều tính năng đặc biệt.

1.2.2. Một số ứng dụng bê tông cường độ cao sử dụng vật liệu nano

Với các tính năng nổi bật bê tông và các sản phẩm vữa có thành phần nano đã được áp dụng tại nhiều nước phát triển. Một số sản phẩm vữa khô sử dụng công nghệ nano hiện đang có mặt trên thị trường là ChronoliaTM, AgiliaTM, DuctalTM của hãng Lafarge hay các sản phẩm vữa khô Emaco Nanocrete của hãng BASF (Hình 1.3) [34].

Tại châu Âu, ứng dụng vật liệu nano được sử dụng trong sửa chữa công trình như: bê tông và vữa không co ngót trong thay thế khe co giãn, nắp hố ga, thay thế bê tông hư hỏng, bong tróc trong các công trình nhà và cầu đường.



Hình 1.3. Vữa xi măng phụ gia nano sửa chữa công trình cầu đường (BASF)

Vật liệu nano còn ứng dụng nhiều trong việc sản xuất các loại xi măng đặc biệt ứng dụng sản xuất các cấu kiện chất lượng cao phục vụ hạ tầng kỹ thuật như vỏ hầm, sàn bê tông, tấm panel... Một số công trình nổi tiếng trên thế giới được

biết đã ứng dụng bê tông sử dụng vật liệu nano trong bê tông có thể kể đến như công trình nhà thờ Jubilee ở Rome với các kết cấu vỏ bọc dày 80cm bằng bê tông sử dụng nano TiO_2 , được xây dựng từ năm 1996.



Hình 1.4. Nhà thờ Jubilee - Rome (1996)



Hình 1.5. Cầu Gartnerplatzbrücke - Đức (2007)



Hình 1.6. Cầu Iowa - Hoa Kỳ (2006)

Công trình cầu Gartnerplatzbrücke sông Fulda tại Đức có các trụ cầu được

thi công bằng bê tông cường độ cao sử dụng nano silica, cầu Iowa được xây dựng năm 2006 tại Hoa Kỳ được thi công bởi bê tông cường độ cao sử dụng nano silica với tỉ lệ 1% chất kết dính, đường hầm Umberto I (Rome) với kết cấu vỏ hầm ứng dụng bê tông có thành phần nano, tòa nhà Philharmonie de Paris được thi công bằng bê tông sử dụng nano TiO_2 3% được xây dựng năm 2015.



Hình 1.7. Đường hầm Umberto I – Rome (2007)

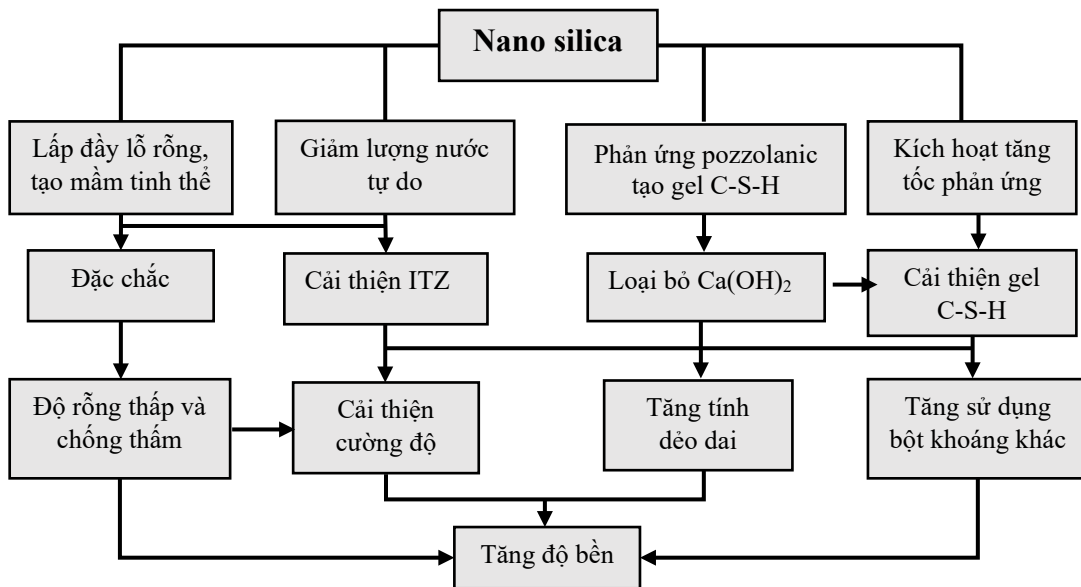


Hình 1.8. Tòa nhà Philharmonie de Paris (2015)

1.2.3. Ảnh hưởng của nano silica đến các tính năng của bê tông

Theo nhiều nghiên cứu trên thế giới, NS thêm vào vữa và bê tông có thể có những ảnh hưởng khác nhau [83]. Các hạt NS đã làm thay đổi các tính năng của bê tông thông qua việc làm tăng tốc độ thủy hóa của xi măng, cải thiện cấu trúc vi mô, giảm các lỗ rỗng và cải thiện chất lượng bề mặt chuyển tiếp giữa vữa và cốt liệu (ITZ). Nguyên nhân của sự ảnh hưởng này là do diện tích bề mặt rất cao của NS và khả năng kích hoạt sự kết tủa của gel C-S-H. Các hạt NS tham

gia vào phản ứng pozzolanic loại bỏ các $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tạo ra các gel C-S-H với độ rắn và chất lượng cao hơn (Phương trình 1.1). Với kích thước siêu nhỏ của các hạt NS có khả năng lấp đầy các lỗ rỗng siêu nhỏ trong bê tông, tạo ra các mầm tinh thể liên kết chặt trong lỗ rỗng dẫn đến tăng cường độ kéo khi uốn và giúp cho bê tông có độ chặt cao hơn. NS còn đóng vai trò như các trung tâm hạt nhân cho phép hình thành các cụm C-S-H, thúc đẩy mạnh hơn sự hydrat hóa, dẫn đến sự gia tăng về mặt cường độ và độ bền của bê tông.



Hình 1.9. Sơ đồ ảnh hưởng của NS trong vữa và bê tông cường độ cao [83]

Phương trình phản ứng pozzolanic diễn ra trong bê tông giữa canxi hydroxit và silica khi có sự hiện diện của nước [83]:



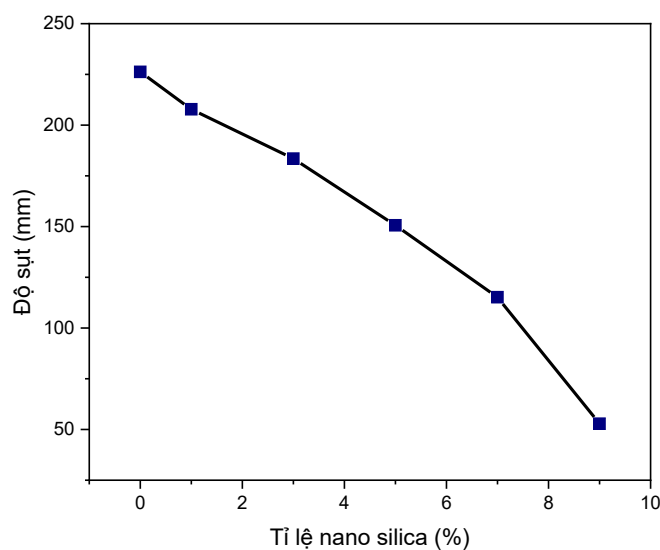
Sản phẩm của sự phản ứng chính là các canxi silicat hydrat $\text{CaH}_2\text{SiO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (C-S-H) có các pha với cấu trúc sợi liên kết cơ học với các thành phần khác trong bê tông. Do các hạt NS có diện tích bề mặt rất lớn so với hạt xi măng hay các hạt SiO_2 trong silica fume, nên ngay cả một lượng nhỏ các vật liệu này cũng có thể tăng tốc phản ứng pozzolanic đáng kể.

Ảnh hưởng của NS đến bê tông được đề cập trong rất nhiều nghiên cứu của các tác giả trên thế giới. Chúng sẽ được phân tích cụ thể trong nội dung phần tiếp theo.

1.2.3.1. Ảnh hưởng của nano silica đến tính chất hỗn hợp bê tông

a. Độ sụt và độ chảy xòe

Độ sụt và độ chảy xòe thường được sử dụng để đánh giá tính dễ thi công của bê tông. Cụ thể, độ chảy lan được dùng đánh giá tính dễ thi công của bê tông tươi với khả năng chảy cao. Tình trạng kết tụ của các hạt NS có thể ảnh hưởng đến độ chảy xòe của bê tông tươi [83][84]. Supit và Shaikh cho rằng việc sử dụng các hạt NS trong bê tông có thể làm giảm đáng kể độ sụt khoảng 40% và 60% đối với hàm lượng NS tương ứng từ 2-4% [95]. Zhang và cộng sự [110] đã nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng NS đến độ chảy lan và độ sụt của bê tông kết hợp với tro bay 15%. Kết quả cho thấy, áp dụng NS trong hỗn hợp bê tông dẫn đến giảm độ sụt và độ chảy lan, và sự sụt giảm đó tăng lên với hàm lượng NS tăng. Ngoài ra, Bahadori và Hosseini [30] đã cho thấy qua thí nghiệm độ sụt với kết quả có sự sụt giảm nghiêm trọng đối với bê tông có thành phần NS với điều kiện tỷ lệ phụ gia siêu dẻo không thay đổi. Givi và cộng sự đã quan sát qua các thí nghiệm, hàm lượng NS có ảnh hưởng đáng kể đến tính lưu động của hỗn hợp bê tông tươi với tỉ lệ N/CKD không thay đổi là 0.4 và tất cả các hỗn hợp bê tông chứa NS có giá trị độ sụt thấp [50]. Tính làm việc của bê tông tươi bị ảnh hưởng có thể do diện tích bề mặt tăng lên với vật liệu nano được sử dụng, đòi hỏi cần một lượng nước lớn hơn để đủ làm ướt xi măng và NS.

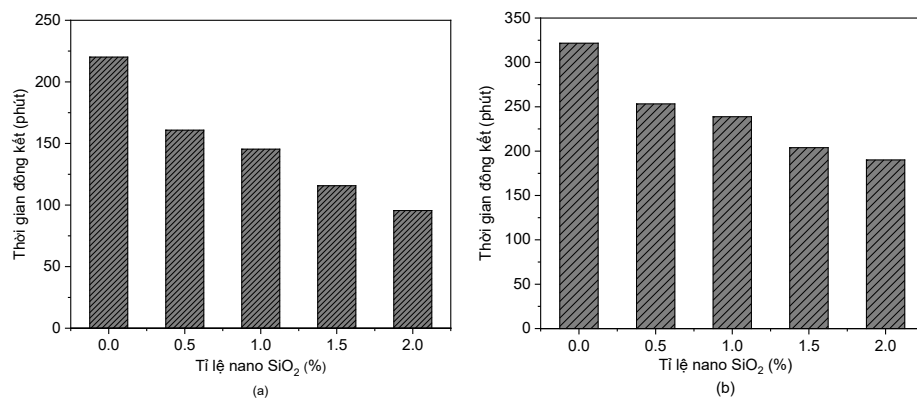


Hình 1.10. Ảnh hưởng của NS đến độ sụt của hỗn hợp bê tông [110]

Jalal và cộng sự [64] kết luận rằng, bê tông trộn với các hạt NS và silica fume làm giảm các đặc tính lưu động của BTCĐC, tuy nhiên việc bổ sung các hạt NS và silica fume cải thiện độ sệt của bê tông tươi. Có nhiều ý kiến cho rằng cần điều chỉnh lượng nước và phụ gia siêu dẻo để bê tông sử dụng NS đáp ứng các yêu cầu về tính lưu động của hỗn hợp BTCĐC [110].

b. Thời gian đông kết

Givi và cộng sự [51] đã nhận xét thời gian đông kết của BTCĐC có thể bị ảnh hưởng nhiều bởi việc sử dụng NS. Không chỉ bắt đầu mà thời gian kết thúc đông kết của BTCĐC cũng giảm xuống một cách rõ rệt do áp dụng NS và thời gian đông kết giảm xuống do tốc độ phản ứng hydrat hóa nhanh hơn trong BTCĐC có thành phần NS so với bê tông BTCĐC đối chứng (Hình 1.11).

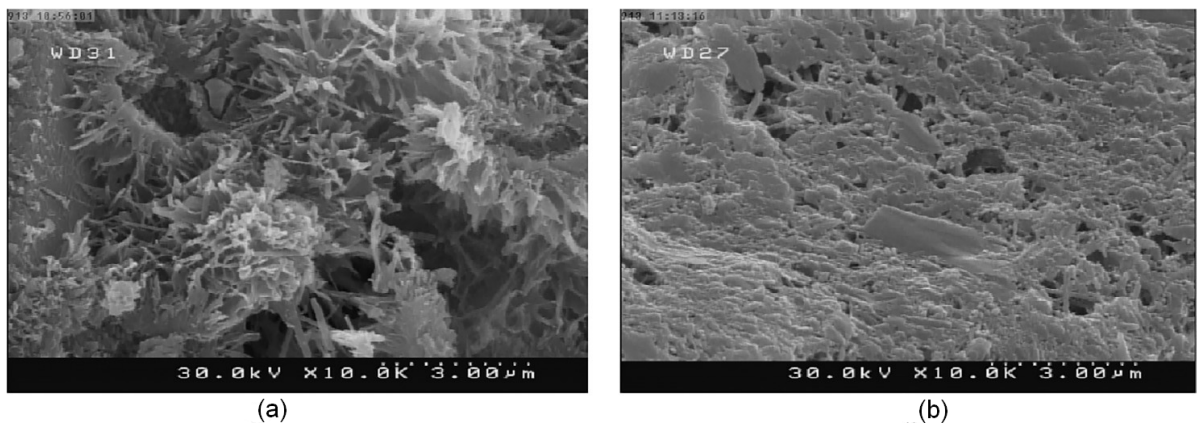


Hình 1.11. Ảnh hưởng của NS đến thời gian bắt đầu (a) và kết thúc (b) đông kết của BTCĐC [51]

Zhang và Islam [112] cũng đã chỉ ra có sự giảm đáng kể thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết cho cả bê tông có chứa tro bay và xỉ khi được thêm vào 2% NS. Sự giảm xuống của thời gian đông kết với lượng NS bổ sung do diện tích bề mặt đặc trưng siêu cao của hạt NS. Điều này có nghĩa rằng sự giảm xuống kích thước hạt dẫn đến năng lượng bề mặt cao hơn [51]. Kích thước hạt nhỏ hơn dẫn đến tăng diện tích bề mặt làm tăng nhanh số lượng nguyên tử trên bề mặt. Các nguyên tử bề mặt này hoạt động mạnh dẫn đến tốc độ phản ứng thủy hóa nhanh hơn.

1.2.3.2. Ảnh hưởng của nano silica đến cấu trúc vi mô và bề mặt chuyển tiếp

Với sự bao gồm của các hạt NS, cấu trúc vi mô của bê tông có thể được cải thiện bởi hiệu ứng bề mặt, hiệu ứng kích thước nhỏ, hiệu ứng lấp đầy. Cấu trúc vi mô của bê tông có thể được cải thiện bởi những hạt NS hoạt động như một chất kích hoạt thúc đẩy quá trình hydrat hóa bên trong bê tông [39]. Sử dụng kính hiển vi điện tử (SEM) nghiên cứu vi cấu trúc của mẫu vữa trong trường hợp có và không có hạt NS đã cho thấy cơ chế cải thiện cấu trúc với NS như Hình 1.12 [35]. Khi một lượng nhỏ hạt NS được phân tán đồng đều trong hỗn hợp hồ xi măng, các sản phẩm thủy hóa của xi măng lắng đọng trên các hạt NS do năng lượng bề mặt của chúng cao hơn, tức là hoạt động như vùng hạt nhân. Theo Bjornstrom [35], hạt nhân của sản phẩm thủy hóa trên hạt nano giúp thúc đẩy và tăng tốc quá trình thủy hóa xi măng, việc bổ sung các hạt silica giúp tăng quá trình giải phóng C_3S và hình thành nhanh chóng C-S-H trong hồ xi măng.



Hình 1.12. Ảnh SEM cấu trúc của bê tông thường (a) và bê tông có thành phần NS (b) [35]

Sự cải thiện tính chất bê tông nhờ các hạt nano lấp đầy lỗ rỗng, NS phản ứng với $Ca(OH)_2$ và tạo ra sản phẩm C-S-H. Cả hai quá trình đều bị ảnh hưởng bởi kích thước hạt và sự phân tán của các hạt nano trong hồ xi măng [48]. Hàm lượng $Ca(OH)_2$ giảm và hàm lượng C-S-H tăng trong vữa xi măng do bổ sung NS theo thí nghiệm DTA và XRD [99]. Với việc bổ sung NS, cải thiện đáng kể cấu trúc vùng chuyển tiếp (ITZ) ở tuổi sớm so với việc giảm hàm lượng [50].

Thêm NS vào bê tông giúp cải thiện đáng kể cấu trúc ITZ tuổi sớm liên quan đến chiết giảm hàm lượng, độ định hướng tinh thể và kích thước tinh thể, được báo cáo bởi Qing và cộng sự [81]. Trong quá trình hydrat hóa xi măng, các hạt NS lấp đầy lỗ rỗng ở các vùng chuyển tiếp cốt liệu – hồ và tạo ra ITZ dày đặc với độ rỗng ít hơn, gia tăng đáng kể mô đun đàn hồi của vữa [84]. Các hạt NS biến đổi vùng chuyển tiếp của vữa xi măng theo bốn cách khác nhau, hoạt động ở vùng hạt nhân, tạo ra nhiều C-S-H hơn qua phản ứng pozzolan do sự phân tán bởi hiệu ứng hạt nhân, kiểm soát tinh thể, và cải thiện hiệu ứng lấp đầy vi lỗ rỗng [58].

Việc bổ sung các hạt nano silica có ý nghĩa quan trọng đối với quá trình thủy hóa và vi cấu trúc của hồ như tăng tỷ lệ thủy hóa ban đầu, tăng lượng gel C-S-H trong hồ thông qua phản ứng pozzolanic, giảm độ rỗng, cải thiện tính chất cơ học của gel C-S-H. Các yếu tố này có tác dụng tăng cường các phẩm chất khác của bê tông. Bê tông có thành phần NS có cấu trúc vi mô đồng đều và đặc chắc hơn vì các tinh thể $\text{Ca}(\text{OH})_2$ có thể được hấp thụ NS và như vậy vùng chuyển tiếp của vữa xi măng và cốt liệu trở nên đặc chắc hơn do giảm số lượng và kích thước của các tinh thể $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [51].

1.2.3.3. Ảnh hưởng của nano silica đến các tính năng cơ học bê tông

a. Sự phát triển cường độ sớm

Supit và Shaikh [95] cho biết rằng cường độ chịu nén 3 ngày tuổi của bê tông được cải thiện bởi 2% NS thêm vào. Nghiên cứu của Li [75] chỉ ra rằng việc bổ sung các hạt NS vào bê tông tro bay có thể dẫn đến sự phát triển tuyệt vời không chỉ cường độ dài hạn mà cả cường độ ngắn hạn vì tro bay có thể được kích hoạt bởi các hạt NS. Bê tông có thành phần tro bay với khối lượng lớn (60%) có thể được cải thiện 95% cường độ nén ở tuổi sớm (3 ngày) khi sử dụng 1.5% NS, tuy nhiên cường độ nén ở các tuổi khác không cho thấy sự cải thiện lớn như vậy [95].

Hiệu quả của các hạt nano ở ngày tuổi sớm đặc biệt là trong 3 ngày đầu

tiên, độ hoạt tính siêu cao của các hạt NS góp phần thúc đẩy phản ứng hydrat hóa và phản ứng pozzolanic. Các sản phẩm vữa khô được chế tạo theo công nghệ nano của hãng hóa chất BASF cho kết quả cường độ phát triển ở những ngày đầu rất cao so với loại bình thường.

Bảng 1.1. Cường độ của các loại vữa xi măng phụ gia nano (BASF)

Loại vữa	Cường độ nén (MPa)				
	2 giờ	4 giờ	24 giờ	7 ngày	28 ngày
Emaco Fast Tixo	31	48	62	80	93
Emaco Fast Fluid	42	56	72	93	102
Emaco Fast Fibre	47	59	75	92	104

Ghi chú: Tixo – loại thường, Fluid – loại tăng độ chảy xèo, Fiber – loại thêm sợi.

b. Cường độ nén

Hầu hết các nghiên cứu chỉ ra rằng cường độ chịu nén của bê tông có thể được cải thiện bằng cách sử dụng NS với các mức độ khác nhau. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh thêm NS trong bê tông dẫn đến cường độ chịu nén cao hơn so với bê tông thường [39][70][83]. Các mẫu có NS với gấp đôi hàm lượng C-S-H có độ cứng cao so với mẫu có silica fume (SF). Theo Flores và cộng sự [45], khi bổ sung các hạt NS (5 đến 70nm, được hình thành bằng phương pháp sol-gel) cùng với phụ gia siêu dẻo trong vữa xi măng Pooclăng tạo ra cường độ chịu nén lên tới 63,9MPa và 95,9MPa lần lượt ở 1 và 28 ngày tuổi.

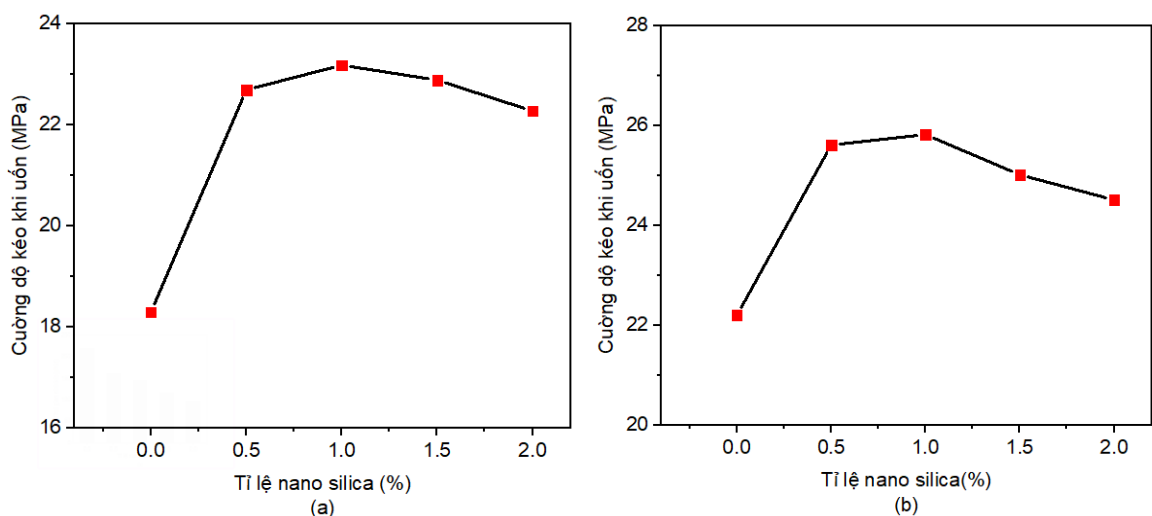
Nghiên cứu của Li [75] cho thấy rằng cường độ nén của vữa xi măng có chứa các hạt NS cao hơn so với vữa xi măng thường. Một nghiên cứu khác khi thêm một lượng nhỏ NS khoảng 0,25% giúp tăng 10% cường độ chịu nén và tăng 25% cường độ kéo uốn ở 28 ngày tuổi [96]. Du và cộng sự cho thấy sự cải thiện của các hạt NS về cường độ nén của bê tông nhẹ ở giai đoạn đầu (1–7 ngày

tuổi) là đặc biệt đáng chú ý, trong khi tác dụng của NS có thể giảm dần với thời gian bảo dưỡng lâu hơn [43].

c. Cường độ kéo khi uốn

Sự cải thiện cường độ kéo khi uốn của bê tông có thể tìm thấy bởi việc sử dụng các hạt NS và một số loại vật liệu nano khác. Theo nghiên cứu của Li và cộng sự [76], thêm NS có thể tăng đáng kể cường độ kéo khi uốn và tuổi thọ mỏi của bê tông ở các mức độ khác nhau phụ thuộc vào hàm lượng NS. Givi và cộng sự [50] cũng kết luận rằng cường độ kéo khi uốn của bê tông có thành phần NS có cải thiện so với bê tông đối chứng với tỉ lệ NS 1%.

Li và cộng sự [59] đã kiểm tra ảnh hưởng của việc bổ sung vào hỗn hợp bê tông các hạt nano silica và nano CaCO_3 đến cường độ kéo khi uốn của BTCĐC và thấy rằng, trong thời gian bảo dưỡng 7 ngày và 28 ngày, liều lượng nhỏ NS và nano CaCO_3 đã làm tăng cường độ kéo khi uốn của BTCĐC và sau đó bắt đầu giảm khi liều lượng các hạt nano vượt quá ngưỡng. Amin và cộng sự [29] cũng nhận thấy rằng việc bao gồm các hạt NS và nano NiFe_2O_4 đã tăng cường độ kéo khi uốn của bê tông cường độ cao khoảng 23% so với bê tông đối chứng. Hơn nữa, việc bổ sung NS cùng với các sợi tổng hợp vào bê tông có thể cải thiện đáng kể cường độ kéo khi uốn của BTCĐC [42].



Hình 1.13. Ảnh hưởng NS đến cường độ kéo khi uốn BTCĐC ở 7 ngày tuổi (a) và 28 ngày tuổi (b) [76]

1.2.3.4. Ảnh hưởng của nano silica đến độ bền bê tông cường độ cao

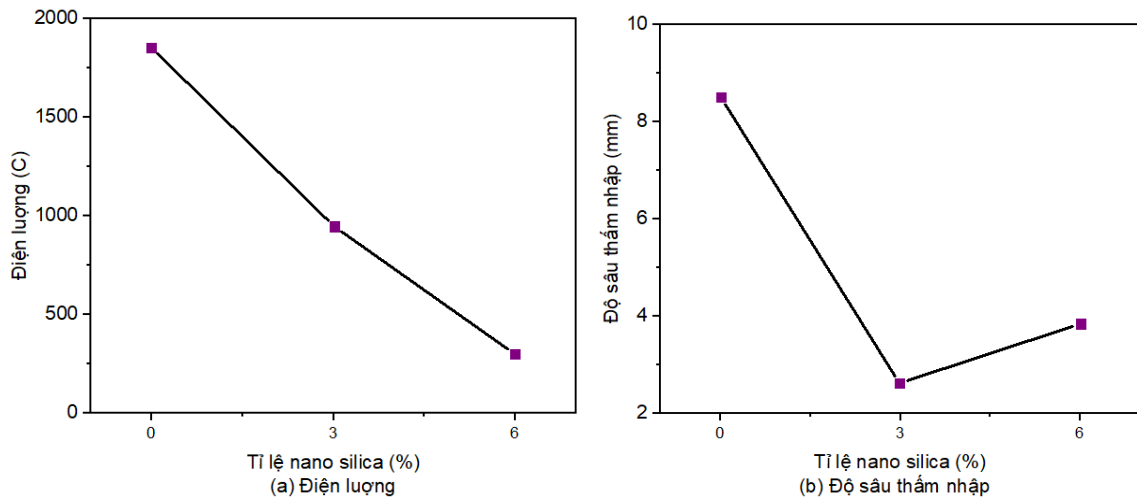
a. Chống thấm nước

Theo nghiên cứu của Sobolev [94], độ bền của bê tông cũng có thể được cải thiện thông qua việc giảm tính thấm và tính co ngót. Việc bổ sung các hạt nano có thể cải thiện đáng kể tính chống thấm của bê tông do hiệu ứng gia tăng diện tích bề mặt có tính phản ứng và làm đầy lỗ rỗng trong hạt xi măng. Theo Chithra và cộng sự [39], với sự thay thế 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% xi măng Pooclang bằng NS trong vữa xi măng và hỗn hợp bê tông sẽ cải thiện đáng kể tính chất của bê tông làm giảm hàm lượng xi măng và hạn chế được các hạt xi măng lơ lửng không thủy hóa có cường độ tương đối thấp. Theo những phát hiện của Du và cộng sự [42], ngay cả liều lượng rất nhỏ của NS (0.3% và 0.95%) có thể làm tăng khả năng chống thấm nước của bê tông vì liều lượng nhỏ các hạt NS có thể được phân tán đồng đều. Givi và cộng sự [51] đã phát họa hệ số hấp thụ nước của bê tông chứa NS ở mức 0.5%, 1.0%, 1.5% và 2.0% khối lượng xi măng và kết quả cho thấy NS đã cải thiện tính chống thấm nước của bê tông, đặc biệt là 2% trọng lượng NS được sử dụng. Việc phân loại kích thước hạt có ảnh hưởng đáng kể đến tính chống thấm của NS trong bê tông. Dựa trên kết quả của Givi và cộng sự [51], khả năng chống thấm nước của bê tông chứa NS với kích thước hạt nhỏ (15nm) tốt hơn bê tông chứa NS có kích thước lớn hơn (80nm) ở tuổi 28 ngày.

b. Chống thấm Clorua

Áp dụng phương pháp thử độ thấm nhanh clorua, Zhang và Li đã nghiên cứu thí nghiệm tính chống thấm clorua của BTCĐC có thành phần NS [113]. Kết quả chỉ ra khi có thành phần NS sẽ cải thiện khả năng chống thấm clorua của bê tông. Gopinath và cộng sự [54] cũng cho thấy khả năng chống thấm clorua của bê tông có NS tốt hơn nhiều so với bê tông đối chứng. Du và cộng sự [42] cho thấy khả năng chống thấm clorua của bê tông đã được cải thiện đáng kể với hàm lượng rất nhỏ (0.3%) NS, hệ số di chuyển và khuyết tán clorua của mẫu

thử có thể giảm lần lượt 28.7% và 31% tương ứng hàm lượng này của NS. Dựa vào kết quả thí nghiệm tính thấm nhanh clorua được thực hiện bởi Said và cộng sự [92], việc bổ sung các hạt NS làm giảm đáng kể chiều sâu thâm nhập vật lý và điện tích truyền của các mẫu như trong Hình 1.14. Điều này cho thấy rằng việc bổ sung các hạt NS có tác dụng đáng kể trong việc tinh lọc các lỗ rỗng và giảm tính dẫn của bê tông.



Hình 1.14. Ảnh hưởng của NS đến khả năng chống thấm clorua của BTCĐC sử dụng tro bay [113]

Zhang và cộng sự [112] đã quan sát thấy rằng, thêm 1% NS có thể làm giảm các điện tích truyền qua các mẫu bê tông có chứa tro bay hoặc xỉ so với bê tông đối chứng. Từ các thí nghiệm khuyết tán clorua không tăng tốc và tăng tốc được thực hiện bởi Du và cộng sự, khả năng chống xâm nhập clorua của bê tông nhẹ sẽ cao hơn khi bổ sung các hạt NS [43].

c. Khả năng chịu nhiệt

Bastami và cộng sự đã thực hiện một loạt thí nghiệm để kiểm tra khả năng chịu nhiệt độ cao của bê tông cường độ cao được điều chỉnh bằng NS [31]. Độ hao hụt khối lượng, cường độ nén, độ bền kéo của các mẫu được đo ở nhiệt độ cao 400°C, 600°C và 800°C ở tốc độ 20°C/phút. Cải thiện đáng kể độ nén và cường độ kéo ở nhiệt độ cao đã được quan sát thấy ở BTCĐC được điều chỉnh bằng NS so với bê tông cường độ cao đối chứng, trong khi giảm tổn thất khối

lượng của các mẫu được tìm thấy với sự hiện diện của các hạt NS. Yang và cộng sự [108] đã so sánh biến dạng co ngót, thay đổi khối lượng và thay đổi cường độ của bê tông có thành phần NS trước và sau khi chịu nhiệt độ cao ở các mức độ khác nhau. Kết quả là sự giảm đáng kể biến dạng co ngót và thay đổi khối lượng của bê tông sau được trải qua nhiệt độ cao khi có thành phần NS. Dựa trên các kết quả của một loạt các thí nghiệm nén bê tông có thành phần NS và cốt sợi thép sau khi chịu nhiệt độ từ 25-800°C, Gao và Li đã thiết lập một số mô hình toán học đơn giản về mối quan hệ ứng suất – biến dạng của bê tông và xem xét ảnh hưởng của hàm lượng NS [49], sợi thép sau khi trải qua các mức nhiệt độ cao khác nhau và kết luận rằng cấu trúc của vùng chuyển tiếp giao thoa bên trong bê tông có thể được cải thiện đáng kể bởi các hạt NS và cường độ liên kết bề mặt giữa sợi thép và vữa được tăng cường khi có thành phần NS.

1.2.4. Tổng quát về hàm lượng nano silica sử dụng trong bê tông

Theo hầu hết các nghiên cứu trên thế giới, hàm lượng NS sử dụng trong bê tông được tính theo tỉ lệ khối lượng chất kết dính. Đa phần các nghiên cứu sử dụng các hạt NS thêm vào bê tông với một dãy tỉ lệ và tiến hành thí nghiệm để xác định hàm lượng tối ưu. Kết quả thí nghiệm của các nghiên cứu đã công bố cho hàm lượng tối ưu của NS có sự khác nhau như trong Bảng 1.2.

Bảng 1.2. Tỉ lệ nano silica sử dụng trong bê tông của một số nghiên cứu

Tác giả	Tỉ diện của NS (m ² /g)	Dãy tỉ lệ NS (%)	Tỉ lệ NS đề xuất (%)
Chithra và cộng sự	215	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5	2
Supit và Shaikh	200	1; 2; 3; 4	2
Nazerigivi và cộng sự	200	0,5; 1; 1,5; 2	1,5
Khaloo và cộng sự	200	0,75; 1,5	1,5
Khaloo và cộng sự	380	0,75; 1,5	0,75
Mohammad và cộng sự	200	1; 2; 3; 4; 5; 6	3

Tác giả	Tỉ diện của NS (m ² /g)	Dãy tỉ lệ NS (%)	Tỉ lệ NS đề xuất (%)
Rajasundari và cộng sự	200	1; 1,5; 2; 2,5	2
Su và cộng sự	200	1; 3; 5	3
Wang và cộng sự	640	1; 2; 3	2
Xu và cộng sự	80	0,05; 0,1; 0,5; 1	1
Sakthivel và cộng sự	160	2,5; 3; 3,5	3
Parida và cộng sự	200	0,3; 0,6; 1	1
Amin và cộng sự	200	1; 2; 3; 4; 5	2
Qing và cộng sự	160	1; 2; 3; 4; 5	3
Ksenija Jankovic	200	1; 2; 3	2
Yingli Gao và cộng sự	250	1; 2; 3	2
Savas Erdem	200	0,5; 1; 1,5	1,5
Bastami và cộng sự	60	1,5; 3; 4; 5	3
Trần Hữu Bằng	258,3	0,5; 1; 1,5; 2	1

Các nghiên cứu sử dụng các hạt NS có kích thước và tỉ lệ diện tích bề mặt đặc trưng khác nhau. Sự ảnh hưởng của NS và hàm lượng sử dụng trong bê tông được đánh giá phụ thuộc vào chất lượng và tỉ diện của NS. Bên cạnh đó, công nghệ và thiết bị trộn hỗn hợp bê tông cũng là những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hàm lượng NS sử dụng.

1.2.5. Tình hình nghiên cứu sử dụng nano silica trong bê tông tại Việt Nam

Các nghiên cứu ứng dụng NS trong lĩnh vực xây dựng tại Việt Nam đa số được tiến hành trong các năm gần đây. Một số nghiên cứu đi sâu vào các lĩnh vực liên quan đến bê tông như nghiên cứu của tác giả Trần Hữu Bằng [14], nghiên cứu vật liệu NS điều chế từ tro trấu và silica fume làm phụ gia cho bê tông xi măng trong xây dựng đường ô tô khu vực miền Tây Nam Bộ.

Trong nghiên cứu của Trần Hữu Bằng, NS được sử dụng như một chất phụ

gia để chế tạo bê tông với các cấp cường độ từ 30 đến 40MPa, với hàm lượng NS sử dụng từ 0 đến 2% khối lượng chất kết dính. Tác giả đã thí nghiệm để đưa ra các thông số chủ yếu về cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo uốn, mô đun đàn hồi, độ mài mòn, khả năng chống thấm ion clo, hệ số thấm và độ thấm sâu của bê tông xi măng (BTXM), tính công tác của BTXM cấp C35 sử dụng phụ gia NS và BTXM sử dụng kết hợp phụ gia NS+SF trong kết cấu mặt đường ô tô. Bên cạnh đó, tác giả cũng đã đề xuất cấu tạo các dạng kết cấu mặt đường ô tô BTXM sử dụng phụ gia NS và BTXM sử dụng kết hợp phụ gia NS+SF. Đề xuất ứng dụng kết cấu mặt đường BTXM khu vực miền Tây Nam Bộ. Chiều dài tám khi dùng BTXM sử dụng phụ gia NS và BTXM sử dụng kết hợp phụ gia NS+SF cho mặt đường BTXM có thể lên đến 5m, tăng 10% so với qui định hiện hành.

Trong nghiên cứu sử dụng NS làm phụ gia nhằm giảm thiểu hằn lún vết bánh xe cho mặt đường bê tông nhựa của tác giả Lê Văn Bách [7], kết quả nghiên cứu bước đầu cho thấy việc thay thế bột khoáng trong bê tông nhựa bởi NS điều chế từ tro trấu với hàm lượng 0,5% và 1% sẽ làm tăng độ ổn định Marshall cũng như làm giảm được hằn lún vết bánh xe cho bê tông nhựa. Nhưng nếu thay thế đến 1,5% bột khoáng bởi NS trong thành phần của bê tông nhựa thì chiều sâu hằn lún vết bánh xe sẽ tăng lên nhưng không đáng kể. Tác giả đã kết luận rằng, vật liệu NS có triển vọng ứng dụng làm phụ gia cho bê tông nhựa và ứng dụng trong ngành vật liệu xây dựng.

Nhóm các tác giả Phạm Duy Hữu, Vũ Việt Cường, Vương Đặng Lê Mai, Đặng Thị Thanh Lê [12] đã công bố kết quả nghiên cứu, “Sử dụng SiO_2 điều chế từ tro trấu để tăng cường độ tuổi sớm cho bê tông xi măng nhiều tro bay”, Mức tăng này tỉ lệ với hàm lượng sử dụng, cụ thể 15,9% với 1% nano SiO_2 và 46,8% với 2% nano SiO_2 sản xuất từ tro trấu khi cho vào bê tông xi măng nhiều tro bay đã giải quyết được vấn đề phát triển cường độ chậm ở tuổi sớm.

Ngoài ra còn một số nghiên cứu khác sử dụng vữa khô gốc nano phục vụ sửa chữa cầu của nhóm nghiên cứu Trường Đại học Giao thông Vận tải [18],

hay các nghiên cứu sử dụng NS kết hợp với dung dịch kiềm hoạt hóa để xử lý đất yếu cho nền đường ô tô của nhóm nghiên cứu Trường Đại học Bách khoa thành phố Hồ Chí Minh [8].

Hầu như tất cả các nghiên cứu sử dụng nano silica trong bê tông tại Việt Nam đều cho kết quả khả quan với các tác dụng tuyệt vời của silica ở kích thước nanomet. Tuy nhiên các nghiên cứu với số lượng còn hạn chế, ứng dụng NS trong BTCĐC chưa được đề cập, các hạt NS được sử dụng chủ yếu trong các loại bê tông thường.

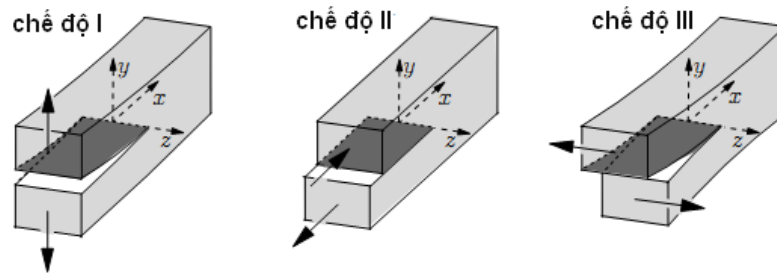
1.3. Tổng quan về cơ học phá hủy trong bê tông

1.3.1. Khái niệm về cơ học phá hủy

Theo Van Mier [101], phá hủy là trạng thái chớm hư hỏng đầu tiên của vật liệu sau giai đoạn ứng xử đàn hồi do sự hình thành và phát triển các vi đường nứt hoặc các vi lỗ rỗng bên trong cấu trúc vật liệu. Ở cấp độ vĩ mô có thể xem phá hủy là tập hợp các trạng thái nứt vi mô lỗ rỗng vi mô của vật liệu. Là trạng thái trước khi bắt đầu có sự tập trung biến dạng và sự giao thoa giữa các đường nứt nhỏ để tạo ra các đường nứt lớn và bắt đầu có sự lan truyền các đường nứt này dưới tác dụng của tải trọng.

Cơ học phá hủy là một lĩnh vực của cơ học nói chung, chuyên nghiên cứu sự hình thành của vết nứt trên vật liệu của kết cấu [57]. Cơ học phá hủy là một lĩnh vực đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện chất lượng của vật liệu và các thành phần cơ học của kết cấu. Cơ học phá hủy được ứng dụng nhiều trong vật liệu thép, cơ học gốm sứ và cơ học xương. Nó sử dụng các phương pháp phân tích cơ học vật rắn để phân tích trên một vết nứt và những thí nghiệm của cơ học vật rắn để mô tả đặc điểm chống lại phá hủy kết cấu.

Trong ngành kỹ thuật thường gặp ba chế độ phá hủy cơ bản:



Hình 1.15. Các chế độ phá hủy cơ bản [57]

- Dạng mở rộng (chế độ I) các bề mặt phá hủy bị tách theo phương Y
- Dạng trượt (chế độ II) các bề mặt trượt lên nhau theo phương X.
- Dạng trượt xoay (chế độ III) các bề mặt trượt lên nhau và xé ra theo phương Z.

1.3.2. Phá hủy trong bê tông

1.3.2.1. Giới thiệu

Phá hủy của bê tông là một trong những chủ đề được chú trọng nghiên cứu trong thời gian gần đây. Vật liệu và kết cấu làm từ bê tông dễ bị nứt do nhiều lý do khác nhau. Theo Van Mier [101], phá hủy trong bê tông là do sự tách rời các hạt cốt liệu và vữa xi măng hoặc bản thân các cốt liệu bị vỡ. Trong quá trình đông kết chắc chắn sẽ xuất hiện các vết nứt siêu nhỏ bên trong, chúng sẽ phát triển và được kết nối với nhau để tạo thành một số vết nứt rõ rệt bởi nhiệt độ và tải trọng thay đổi trong quá trình khai thác. Với sự lan truyền của các vết nứt, phá hủy có thể xảy ra đối các kết cấu bê tông. Để phân tích cơ chế phá hủy và ứng xử nứt của bê tông, với giả thiết xem bê tông còn nguyên vẹn khi đang làm việc ở giai đoạn ứng xử đàn hồi, vật liệu bê tông là đồng nhất. Sự phá hủy bê tông bắt đầu bằng sự xuất hiện các đường nứt nhỏ phân tán trong các vùng chịu lực bất lợi, khi tải trọng tiếp tục tăng, các đường nứt nhỏ này xu hướng tập trung tạo ra các đường nứt lớn có thể quan sát được.

1.3.2.2. Ứng xử bê tông khi phá hủy

Khi bê tông được sử dụng trong vật liệu kết cấu, thiết kế không ứng suất kéo là một quy tắc và các nghiên cứu ít khi đề cập đến ứng xử kéo của bê tông so với nén [101]. Hiện nay, các kết cấu lớn như cầu, hầm, đập được xây dựng

cũng hạn chế thiết kế chịu kéo đối với bê tông. Cường độ chịu kéo của bê tông thấp hơn rất nhiều so với cường độ chịu nén $f_t < f_c/10$. Phá hủy nén của bê tông về bản chất là một hiện tượng kéo. Bê tông có độ bền kéo thấp, phá hủy chế độ I (dạng phá hủy kéo) sẽ thường xuyên chiếm ưu thế, trừ khi được tăng cường thép, sợi thêm vào bê tông. Trong hầu hết các trường hợp, phá hủy tổng thể luôn bắt đầu và phát triển từ phá hủy kéo. Quá trình phá hủy của bê tông được xác định từ nhiều thí nghiệm và mô phỏng số ở mức độ cấu trúc của bê tông, quá trình phá hủy trong bê tông thường được chia thành bốn giai đoạn.

Giai đoạn (0): đàn hồi

Giai đoạn (A): nứt vi mô

Giai đoạn (B): nứt vĩ mô

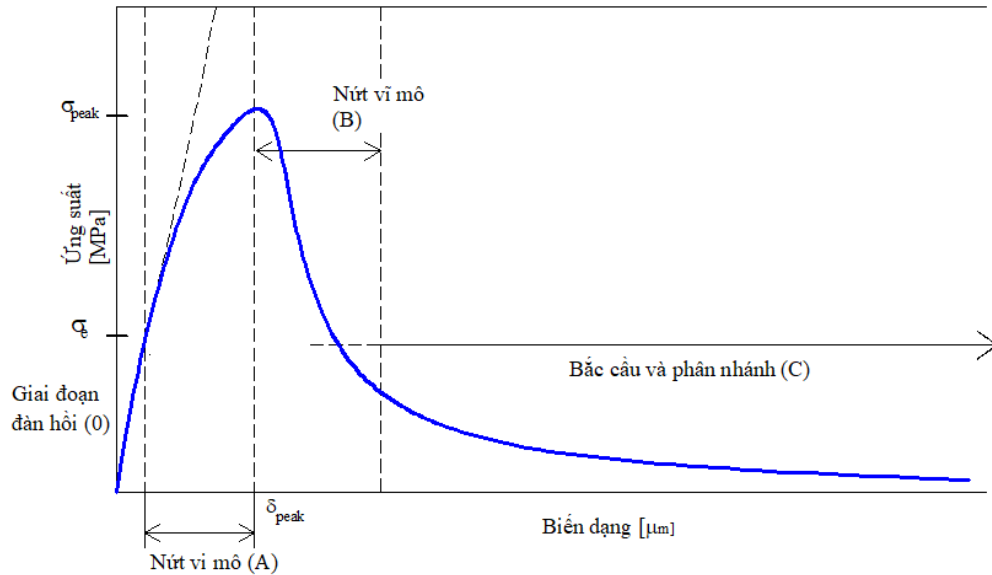
Giai đoạn (C): bắt đầu các bề mặt nứt

Như có thể thấy trong Hình 1.16, giai đoạn đàn hồi (0) là giai đoạn bắt đầu từ gốc. Tiếp theo, khi các vết nứt vi mô đầu tiên hình thành và phát triển, giai đoạn (A) dẫn đến một biểu đồ đường cong ứng suất - biến dạng trước khi đạt đỉnh. Điều này tiếp tục tới khi đạt được ứng suất đỉnh, với sự phát triển của các vết nứt vĩ mô, sự mất ổn định vĩ mô hình thành ở giai đoạn (B) dẫn đến một phần dốc của đường cong mềm hóa như trong biểu đồ Hình 1.16. Hai giai đoạn (B) và (C) rất có khả năng sẽ chồng lên nhau như Hình 1.16. Hiện tượng bắt đầu các bề mặt nứt bắt đầu gần như ngay lập tức sau khi vết nứt vĩ mô lan truyền. Trong giai đoạn B cấu trúc vật liệu về cơ bản là bị phá hoại. Các giai đoạn phá hủy bê tông sẽ được phân tích chi tiết trong nội dung bên dưới:

* Giai đoạn đàn hồi (0):

Ngay sau khi bắt đầu gia tải thì bê tông có thể hoạt động đàn hồi, nếu không có khuyết tật ban đầu, gia tải và dỡ tải sẽ giống nhau. Một số sai sót có thể xảy ra từ việc giữ mẫu quá khô hoặc ướt, tương ứng với việc mẫu sẽ bị co ngót hoặc trương nở, hoặc có thể là do ảnh hưởng của quá trình hydrat hóa. Tùy thuộc vào thành phần của vật liệu, và các đặc tính cục bộ của các thành phần ban

đầu đáp ứng là đàn hồi tuyến tính hoặc đàn hồi phi tuyến. Nói chung, giai đoạn (0) biểu diễn ứng xử đàn hồi của bê tông tương ứng với giả thiết đàn hồi tuyến tính của phần vật liệu không bị nứt.



Hình 1.16. Quá trình phá hủy bê tông dưới tác dụng của ứng suất kéo [101]

* Giai đoạn nứt vĩ mô (A):

Giai đoạn (A) thể hiện ứng xử phi tuyến trước đỉnh phá hủy của bê tông trước khi xảy ra nứt trong bê tông. Các đường nứt vĩ mô đã xuất hiện và phá hủy bê tông đã bắt đầu xảy ra. Trước khi ứng suất đạt đỉnh các vết nứt vĩ mô sẽ phát triển dọc theo bề mặt chuyển tiếp giữa cốt liệu và vữa xi măng. Khi tải trọng đạt đỉnh, một số lượng đáng kể các vết nứt vĩ mô đã phát triển.

* Giai đoạn nứt vĩ mô (B):

Giai đoạn (B) tương ứng với ứng xử phi tuyến sau đỉnh phá hủy của bê tông sau khi tải trọng đạt đến giá trị giới hạn và bắt đầu giảm xuống. Biến dạng vẫn còn nhỏ để có thể giả thiết rằng môi trường vẫn còn liên tục.

* Giai đoạn bắc cầu các bề mặt nứt (C):

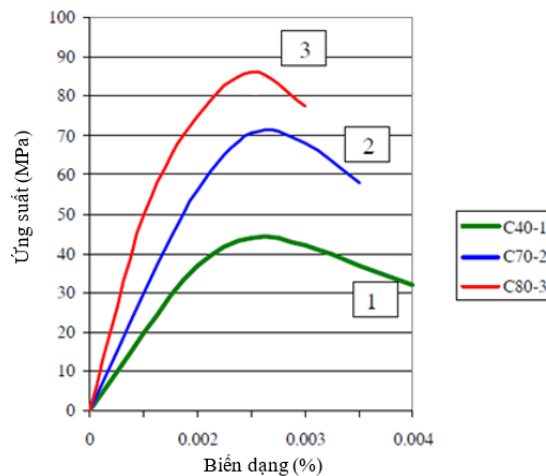
Giai đoạn (C) biểu diễn sự gia tăng nhanh của biến dạng đồng thời với sự suy giảm chậm của tải trọng do ảnh hưởng của hiệu ứng ma sát giữa các cốt liệu trong bê tông. Môi trường trở nên không liên tục hoặc liên tục yếu. Các vết nứt

chồng lên nhau là do ảnh hưởng cấu trúc, bề mặt của các vết nứt có hiện tượng bậc cầu, truyền ứng suất giữa các bề mặt nứt và tải trọng vẫn còn giữ lại một phần trong giai đoạn này cho đến khi phá hủy hoàn toàn.

1.3.2.3. Phá hủy trong bê tông cường độ cao

Hiện nay, sự gia tăng của việc sử dụng bê tông cường độ cao trong các kết cấu công trình đã đòi hỏi sự chú ý nhiều hơn từ các nhà nghiên cứu. Các nghiên cứu về tính chất và đặc điểm phá hủy của bê tông ngày càng được chú trọng và từng bước đưa vào trong tính toán và phân tích kết cấu.

Đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao khác biệt so với bê tông thường. Theo Giáo sư Phạm Duy Hữu [13], bê tông cường độ cao có cường độ chịu nén lớn, mô đun đàn hồi cao và độ dai khác biệt với bê tông thường. Đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng đối với bê tông cường độ cao có độ dốc ở phía giảm (sau khi đạt đỉnh) lớn hơn. Điều đó chứng tỏ bê tông cường độ cao có khả năng bị phá hủy đột ngột cao hơn so với bê tông thường. Đồng nghĩa với việc bê tông cường độ cao có độ dai thấp hơn so với bê tông truyền thống [13].



Hình 1.17. Quan hệ ứng suất - biến dạng bê tông thường và bê tông cường độ cao [13]

Đối với các vật liệu bán giòn, sự phát triển cường độ luôn đi đôi với độ giòn lớn hơn. Điều đó được thể hiện bằng các đặc điểm và tốc độ phá hủy. Chúng ta có thể quan sát thấy các dạng phá hủy giòn đối với bê tông cường độ cao và rất

cao. Các bề mặt vỡ của BTCĐC là đặc trưng tiêu biểu của vật liệu. Các vết nứt đi qua không phân biệt hồ và cốt liệu. Như vậy phá hủy của bê tông cường độ cao có quan hệ gần gũi với dạng chế thớ của kim loại dòn. Với bê tông thường vết nứt đi qua biên cốt liệu hay còn gọi là bề mặt chuyển tiếp của vữa và cốt liệu, vết nứt không đi xuyên qua cốt liệu. Trong bê tông thường cường độ vữa không ổn định, các đặc tính cơ học của các cốt liệu thô không có nhiều ảnh hưởng tới việc phá hủy của bê tông. Khuynh hướng này sẽ biến mất khi cường độ chịu nén của bê tông tăng lên ($\geq 50\text{MPa}$). Điều này có thể được giải thích bằng 2 lý do. Đầu tiên, thành phần vữa trong bê tông cường độ cao tốt hơn rất nhiều so với bê tông thường, và vì vậy có một khả năng là cốt liệu thô có thể trở thành mắt xích yếu nhất. Thứ hai, với sự phát triển của vùng tiếp xúc giữa cốt liệu thô và vữa, cốt liệu thô đóng vai trò như một chất gia cường thay vì một chất trơ. Vì vậy, cốt liệu chắc hơn với một vùng tiếp xúc bền vững hơn sẽ tạo ra bê tông chắc chắn hơn.

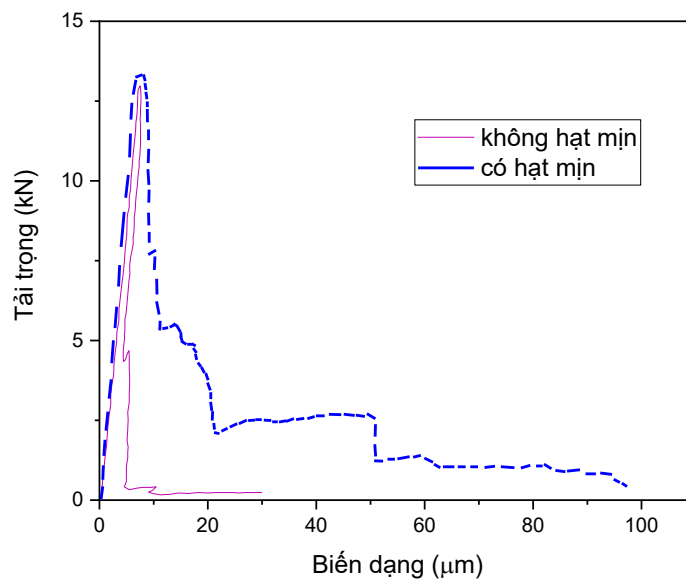
Khi thực hiện các thí nghiệm phá hủy trên ba loại bê tông, là bê tông thường, bê tông cường độ cao không và có muối silic, năng lượng phá hủy được xác định tương ứng 131J/m^2 , 135J/m^2 , 152J/m^2 [13]. Điều đó có nghĩa là để lan truyền trong bê tông cường độ cao một vết nứt có chiều dài đã cho cần thiết năng lượng gia tải lớn hơn so với bê tông thông thường. Nguyên nhân cơ bản là sự tăng chất lượng của hồ và cải thiện liên kết giữa hai pha hồ và cốt liệu.

1.3.2.4. Ảnh hưởng của khoáng siêu mịn đến đặc điểm phá hủy của bê tông

Các hạt khoáng siêu mịn sẽ giúp cho vữa khi đông cứng có chất lượng và độ đặc cao hơn, làm tăng độ dính kết giữa vữa và cốt liệu, độ dẻo dai hay độ bền phá hủy của bê tông cũng được cải thiện đáng kể. Với sự hiện diện của các hạt siêu mịn sẽ làm cải thiện mạnh vi cấu trúc và làm thay đổi ứng xử khi phá hủy của bê tông. Theo nghiên cứu của Ricardo và cộng sự [89] bê tông có chứa silica fume sẽ có các tham số phá hủy tốt hơn so với bê tông không có silica. Silica fume có tác dụng làm tăng tính đặc chắc, cải thiện cấu trúc C-S-H và làm tăng chất lượng vùng chuyển tiếp giữa vữa và cốt liệu. Năng lượng, độ bền và chiều

dài đặc trưng phá hủy đều phát triển cao hơn khi sử dụng silica fume, tính giòn của bê tông có xu hướng giảm xuống. Theo Zhang và cộng sự [110], đặc tính phá hủy là vô cùng quan trọng cho sự an toàn và độ bền của kết cấu bê tông cường độ cao. Sự cải thiện các cấu trúc lỗ rỗng trong bê tông cường độ cao bằng các phụ gia hóa học và phụ gia khoáng là nguyên nhân làm tăng độ đặc chắc vùng chuyển tiếp vữa và cốt liệu, do đó ảnh hưởng đến đặc tính phá hủy của bê tông.

Theo Van Mier [102], sự hiện diện của vật liệu siêu mịn sẽ thay đổi đáng kể đặc điểm ứng xử khi phá hủy bê tông. Tính dẻo của bê tông có thành phần siêu mịn tăng lên được thể hiện qua đường cong tải trọng – biến dạng (hoặc độ mở rộng vết nứt), sau khi đạt đỉnh độ dốc đường cong giảm so với bê tông không sử dụng hạt mịn như Hình 1.18. Tính dẻo dai của bê tông tăng lên được giải thích là sự bắc cầu các bề mặt nứt cao do chất lượng vữa và vùng chuyển tiếp được cải thiện.



Hình 1.18. Quan hệ tải trọng - biến dạng xét đến sự ảnh hưởng của các hạt mịn [102]

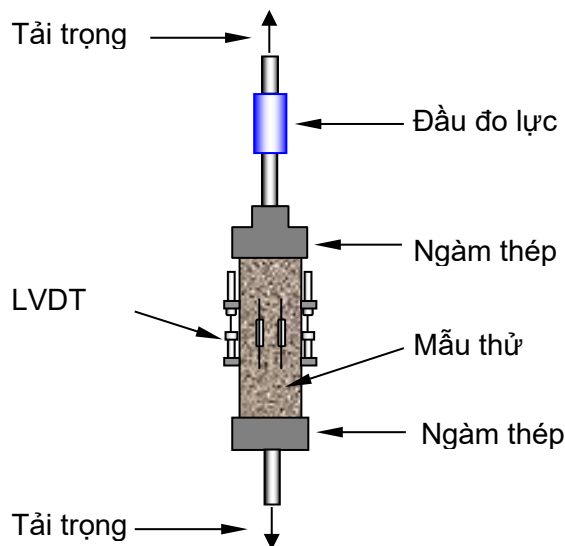
Một số nghiên cứu thực nghiệm cũng được tiến hành nhằm tìm hiểu mối quan hệ giữa ứng xử khi nứt của bê tông và các hạt siêu mịn, kết quả nhìn chung cho thấy có sự ảnh hưởng rõ rệt của thành phần khoáng siêu mịn đến các tham số phá hủy của bê tông [102][110].

1.3.3. Phương pháp thí nghiệm các tham số phá hủy của bê tông

Sự tiến bộ của lý thuyết phá hủy được đi kèm với sự phát triển của các phương pháp thí nghiệm để quan sát các ứng xử vật lý của một vật liệu khi phá hủy. Sự xuất hiện của các thiết bị thí nghiệm hiện đại đã mang tới sự hiểu biết sâu hơn và tốt hơn về quá trình phá hủy trong các vật liệu bán giòn như bê tông.

1.3.3.1. Thí nghiệm kéo dọc trục

Thí nghiệm kéo dọc trục là một trong những thí nghiệm được sử dụng sớm nhất để xác định đặc tính phá hủy chế độ I của vật liệu bán giòn [82]. Hillerborg [57] và Petersson [77] đã đề xuất phương pháp tốt nhất để xác định ứng xử mềm hóa khi kéo của mô hình nứt dính kết là phương pháp thí nghiệm kéo trực tiếp. Một thí nghiệm kéo dọc trục được thực hiện kéo mẫu ở 2 đầu đến khi phá hủy xảy ra. Trong quá trình thí nghiệm, tải trọng và biến dạng được ghi lại và dữ liệu thu được sau đó được sử dụng để xây dựng đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng (σ - ϵ) hoặc ứng suất – độ mở rộng vết nứt (σ - w) của vật liệu. Trong thí nghiệm này, cường độ kéo của vật liệu tương đương với ứng suất tại đỉnh đường cong. Sơ đồ thí nghiệm kéo dọc trục được mô tả như trong Hình 1.19.



Hình 1.19. Mô hình thí nghiệm kéo dọc trục [82]

Về nguyên tắc, cách trực tiếp để đo đường cong mềm hóa là thông qua các thí nghiệm kéo dọc trục [77]. Thí nghiệm này dường như cung cấp toàn bộ đường cong quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt (σ - w). Tuy nhiên, để có

được kết quả thí nghiệm này là rất khó khăn vì một số hạn chế sau:

- Vị trí vết nứt dính kết không được biết trước, trong nhiều trường hợp, vết nứt có thể xảy ra do tính không đồng nhất của vật liệu [55].

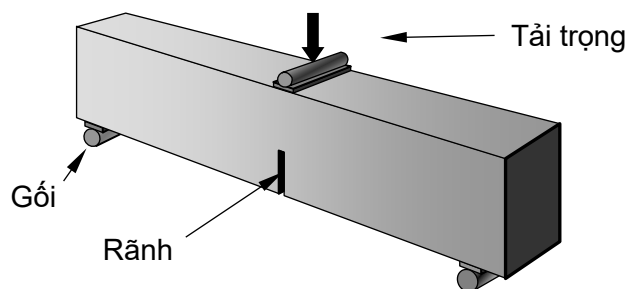
- Đối với các vật liệu có vùng tiến triển phá hủy rất nhỏ, các mẫu chưa nứt đã trải qua quá trình chảy trước khi đạt tới các dạng nứt dính kết, quá trình này đã làm tăng khả năng dễ biến dạng và tính mất ổn định của mẫu thử [52].

- Khi một vết nứt nhỏ được hình thành để bắt đầu quá trình phá hủy và một vết nứt dính kết đơn được hình thành, mẫu thử có xu hướng hình thành các dạng phá hủy không đối xứng và độ mở rộng vết nứt là không đồng đều trên mẫu [94].

1.3.3.2. Thí nghiệm uốn ba điểm

Do một số khó khăn liên quan đến thí nghiệm kéo dọc trục, thí nghiệm uốn ba điểm, là một thí nghiệm đơn giản thường được dùng để xác định năng lượng phá hủy dạng I [57].

Quá trình thí nghiệm dựa theo hướng dẫn của RILEM [90]. Trong thí nghiệm uốn ba điểm, mẫu dầm với rãnh được gia tải tại vị trí giữa nhịp. Trong hầu hết các trường hợp, một thiết bị thí nghiệm khép kín được sử dụng để chắc chắn thí nghiệm ổn định. Dầm có rãnh mỏi được đặt trên gối đỡ di động. Sau đó thí nghiệm thực hiện bằng cách tăng đều độ võng hoặc độ mở rộng vết nứt cho đến khi mẫu bị vỡ làm đôi. Trong quá trình thí nghiệm, độ mở rộng vết nứt, độ võng tại vị trí giữa nhịp của dầm và tải trọng tương ứng được ghi lại. Mô hình thí nghiệm uốn ba điểm được mô tả trên Hình 1.20.



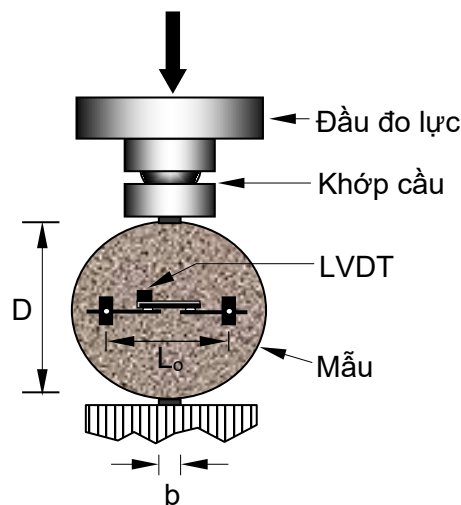
Hình 1.20. Mô hình thí nghiệm uốn ba điểm dầm có rãnh [56]

Do sự phổ biến và khả năng áp dụng cao tại các phòng thí nghiệm nên thí

nghiệm uốn ba điểm được sử dụng hầu hết trong các nghiên cứu để xác định các tham số và đặc điểm phá hủy của bê tông. Trong thực tế, phương pháp thí nghiệm uốn ba điểm đã được thực hiện bởi nhiều tác giả trong và ngoài nước như Jen và Shah [65], Karihaloo [69], Bui [36], Trần Thế Truyền [15], Nguyễn Thanh Vũ [9].

1.3.3.3. Thí nghiệm ép chẻ

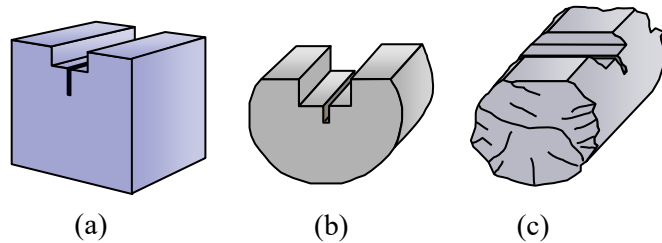
Ngoài thí nghiệm uốn ba điểm được sử dụng phổ biến để xác định các đặc tính phá hủy, thí nghiệm ép chẻ (Brazilian) và thí nghiệm tách cũng có thể sử dụng để xác định các tham số phá hủy. Cường độ kéo của vật liệu bán dòn là một tham số chủ yếu của mô hình nứt dính kết (cohesive crack model). Một cách tiếp cận sử dụng rộng rãi để thực nghiệm tham số này là tiến hành thí nghiệm kéo khi ép chẻ. Thí nghiệm kéo khi ép chẻ là một phương pháp tiêu chuẩn để đo cường độ kéo của bê tông (ASTM C496). Thí nghiệm được thực hiện bằng cách tác dụng tải trọng nén ngoài cho một mặt của mẫu hình trụ hoặc hình lập phương và phản lực ở đầu đối diện của tải trọng. Tải trọng và phản lực gối tựa tạo thành hai lực tập trung đối diện nhau, tạo ra sự phân bố đồng đều của ứng suất kéo theo trục dọc gây ra sự phá hủy kéo của vật liệu. Cường độ kéo khi ép chẻ của vật liệu được xem là một tính chất của vật liệu. Mô hình thí nghiệm kéo khi ép chẻ được mô tả như Hình 1.21.



Hình 1.21. Mô hình thí nghiệm kéo khi ép chẻ [56]

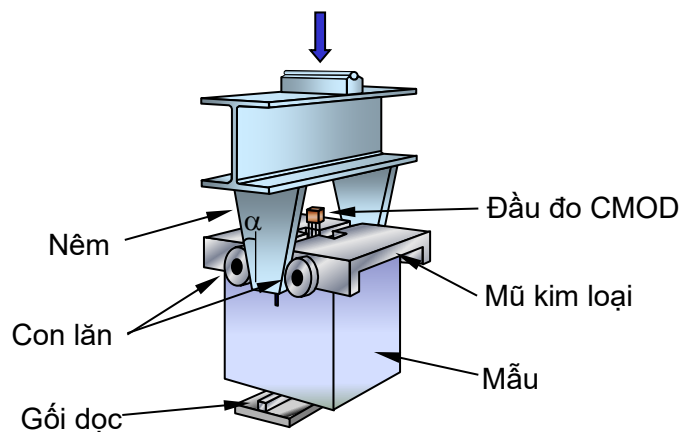
1.3.3.4. Thí nghiệm tách

Thí nghiệm tách là một phương pháp thí nghiệm được giới thiệu bởi Linsbauer và Tschegg, và được hoàn thiện bởi Brühwiler and Wittmann [38]. Đây là một thí nghiệm cơ học phá hủy ổn định được thiết kế để đo một số đặc tính phá hủy, đặc biệt là năng lượng phá hủy G_F . Thí nghiệm tách là một thử nghiệm đơn giản có khả năng xác định biểu đồ hoàn thiện của tải trọng – độ mở rộng vết nứt của một mẫu thử. Thí nghiệm sử dụng các mẫu thử nhỏ gọn được chuẩn bị dễ dàng bằng cách đúc mẫu bê tông bởi các khuôn hình trụ hoặc khoan từ các kết cấu hiện hữu. Rãnh được gia công bằng cách cắt hoặc tạo lúc đúc mẫu. Hình 1.22 thể hiện hình dạng các mẫu thường được sử dụng trong các thí nghiệm.



Hình 1.22. Các hình dạng mẫu thí nghiệm tách (a) lập phương – đúc mẫu, (b) và (c) mẫu trụ tròn – lõi khoan từ kết cấu [82]

Thí nghiệm tách được thực hiện bằng cách đặt mẫu trên một gối dài. Một mũi kim loại với 2 con lăn được gắn vào mẫu. Tải trọng tác dụng bằng cách đẩy xuống một cái niêm kim loại đặt giữa các con lăn. Mục đích là để tạo ra lực chia tách với ứng xử kéo lên mẫu.



Hình 1.23. Mô hình thí nghiệm tách nê [82]

Thí nghiệm tách có những ưu điểm khác biệt so các loại thí nghiệm phá hủy khác. Mẫu thử được thử được chuẩn bị đơn giản và có thể sử dụng mẫu khoan từ kết cấu. Mặt khác, ảnh hưởng của tải trọng bản thân mẫu đến năng lượng phá hủy là không đáng kể và kết quả thí nghiệm sẽ ổn định hơn.

1.3.4. Các mô hình phá hủy trong bê tông

Các mô hình phá hủy trong bê tông được đề xuất và phát triển bởi nhiều tác giả trong các thập kỷ qua, điển hình là các mô hình được liệt kê trong Bảng 1.3.

Bảng 1.3. Tổng hợp các mô hình phá hủy trong bê tông

Tiếp cận mô hình	Mô hình phá hủy	Tác giả đề xuất	Thời gian
Hệ số cường độ ứng suất	Đàn hồi tuyến tính	Orowan và Irwin	1949, 1957
Tiếp cận đường nứt dính kết	Mô hình nứt dính kết	A. Hillerborg và Petersson	1976, 1980, 1985
	Mô hình dẫy nứt	Bazant	1984
Tiếp cận nứt đàn hồi tương đương	Mô hình phá hủy hai tham số	Jenq và Shah	1985
	Mô hình nứt có hiệu	Karihaloo và Nallathambi	1989a, 1989b, 1990
	Mô hình hiệu ứng kích thước	Banzant, Pleiffer và Kazemi	1987, 1990
	Mô hình double-K	Reinhardt, Shilang Xu	1998, 1999, 2004

1.3.4.1. Mô hình cơ học đàn hồi tuyến tính

Một trong những lý thuyết sớm nhất về phá hủy được phát triển là cơ học phá hủy đàn hồi tuyến tính (LEFM). Sự phát triển ban đầu của nó được bắt nguồn từ nghiên cứu của Griffith, một kỹ sư hàng không người Anh, khi ông xây dựng một phương trình năng lượng để mô tả sự lan truyền các vết nứt bằng cách sử dụng tỷ lệ giải phóng năng lượng G_C [53]. Lý thuyết bắt đầu từ một giả thuyết cho rằng những vật liệu giòn có chứa các vết nứt cực nhỏ hình elip. Tiêu

chuẩn phá hủy này về cơ bản là một nghiên cứu về nguyên lý cân bằng năng lượng, vết nứt bắt đầu lan truyền khi năng lượng bề mặt gia tăng do sự gia tăng diện tích bề mặt bằng với năng lượng biến dạng giảm đi do chuyển vị của các đường bao và sự thay đổi năng lượng đàn hồi tích trữ.

Năm 1957, Irwin đã xây dựng một phương pháp tiếp cận mới, trong đó khái niệm hệ số cường độ ứng suất tới hạn K_{IC} được sử dụng làm tiêu chuẩn cho việc mở rộng vết nứt [61]. Kí hiệu I để chỉ dạng nứt thứ nhất – nứt mở rộng. Hệ số cường độ ứng suất tới hạn K_{IC} được gọi là độ bền phá hủy và nó là thước đo độ bền của vật liệu. Được biết đến như là tiêu chuẩn của Irwin, công thức này được chú ý do gần gũi với phân tích ứng suất thông thường. Hơn nữa, ứng dụng của nó vào đàn hồi tuyến tính cho phép hệ số cường độ ứng suất K_I được bổ sung. Irwin cũng nhận ra một mối quan hệ tồn tại giữa hệ số cường độ ứng suất K_I và tỷ lệ năng lượng giải phóng của Griffith G_I [61]:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E^*} \quad (1.1)$$

trong đó:

$E^* = E$ với trạng thái ứng suất phẳng

$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$ với trạng thái biến dạng phẳng

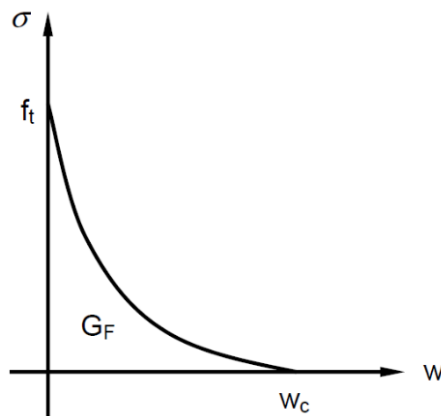
E là mô đun đàn hồi Young

ν là hệ số Poisson

Vào những năm 1960, một nghiên cứu về phá hủy trong bê tông bằng cách sử dụng cơ học phá hủy đàn hồi tuyến tính đã được quan tâm. Nỗ lực của các nhà nghiên cứu như Kaplan để ứng dụng các nguyên tắc của LEFM cho mẫu bê tông không có nhiều hiệu quả [68]. Nó cho các kết quả dự đoán từ lý thuyết khác xa so với kết quả thực nghiệm. Lý do của sự khác nhau này về cơ bản là do sự nứt vi mô do kéo của vật liệu bê tông.

1.3.4.2. Mô hình nứt dính kết

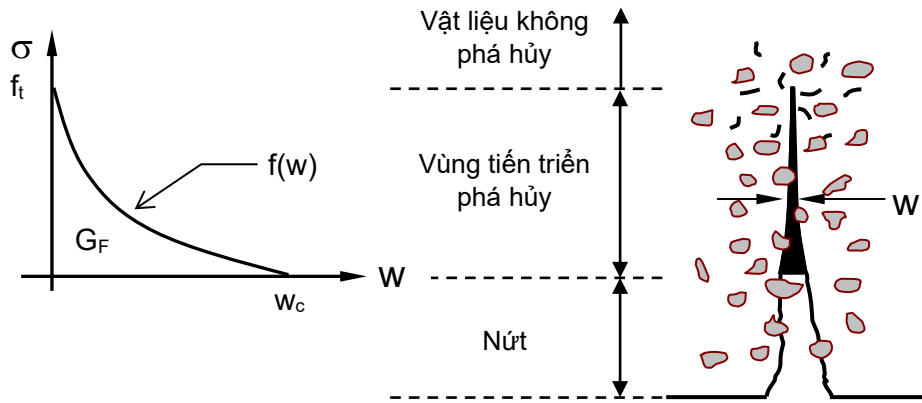
Hillerborg là một trong những người đầu tiên đưa ra mô hình phá hủy phi tuyến cho các vật liệu bán giòn. Dựa trên ý tưởng về vùng dẻo đầu vết nứt của Dugdale và Barenblatt, Hillerborg đã đề xuất mô hình nứt dính kết để phân tích các ứng xử vật lý của bê tông trong quá trình nứt [57]. Không giống các mô hình dựa trên LEFM, khi mà ứng dụng của chúng phụ thuộc vào sự tồn tại của các vết nứt trước đó, mô hình dính kết có thể được sử dụng để mô tả ứng xử của các cấu trúc bán giòn đã nứt cũng như chưa nứt. Một yếu tố thiết yếu của mô hình phá hủy được đề xuất phân tích là quy tắc mềm hóa. Đối với một quy tắc mềm hóa phi tuyến tính $\sigma = f(w)$ (Hình 1.24), các thông số chủ yếu bao gồm cường độ kéo f_t và năng lượng phá hủy G_F . Năng lượng phá hủy được định nghĩa là diện tích dưới đường cong ứng suất – độ mở rộng vết nứt (σ - w), trong đó σ là ứng suất kéo và w là độ mở rộng miệng của vết nứt.



Hình 1.24. Đường cong phi tuyến cho mô hình nứt dính kết [57]

Một thành phần thiết yếu của mô hình nứt dính kết là mối quan hệ mềm hóa hoặc quy tắc mềm hóa (Hình 1.25). Quy tắc mềm hóa là mô tả phân tích sự biến thiên của ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt w dọc theo chiều dài của vùng quá trình biến dạng.

Việc xác định quy tắc mềm hóa là một bước cần thiết trước khi mô hình nứt dính kết có thể được sử dụng để phân tích phá hủy.

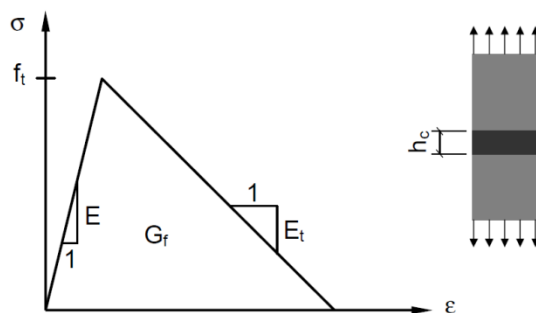


Hình 1.25. Định nghĩa của mô hình nứt dính kết [57]

Trong các ứng dụng thực tế của mô hình, các đường cong mềm hóa đơn giản đã được sử dụng. Các quy tắc mềm hóa phi tuyến cũng được sử dụng trong nghiên cứu quá trình phá hủy của các vật liệu gốc xi măng bởi Foote và cộng sự [46], Hu và Mai [60], Planas và Elices [79], Reinhardt và Xu [107]. Các dạng này của đường cong mềm hóa là một sự kết hợp tốt giữa tính toán đơn giản và dự đoán chính xác.

1.3.4.3. Mô hình dây nứt

Bazant và Oh đã đề xuất mô hình dây nứt được phát triển từ mô hình nứt dính kết. Cũng dựa trên khái niệm về phá hủy vật liệu bằng vùng dính kết, công thức của mô hình dây nứt có một vài điểm giống với mô hình nứt dính kết. Tuy nhiên, thay vì lý tưởng hóa vùng phá hủy như là một đường thẳng nứt, mô hình dây nứt giả sử rằng vùng phá hủy tạo thành một dải có chiều rộng hữu hạn h_c . Chiều rộng h_c của dải này được coi là một hằng số. Một sự phân bố đều các vết nứt nhỏ cũng được giả định trong dải này.

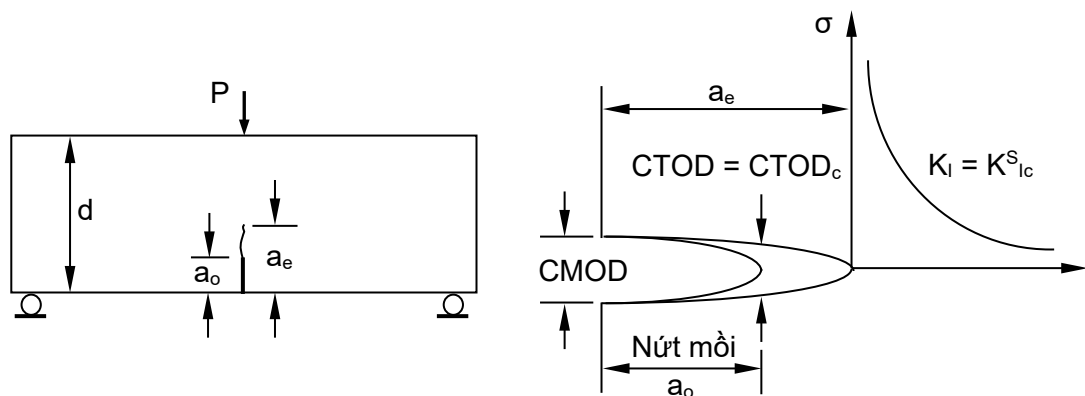


Hình 1.26. Đường cong ứng suất cho mô hình dây nứt [36]

Trong mô hình dẫy nứt, một đường cong ứng suất - biến dạng được sử dụng để mô tả ứng xử của vật liệu tại vùng phá hoại. Năng lượng tiêu hao trong quá trình hình thành và phát triển tất cả các vết nứt nhỏ trên một đơn vị diện tích được gọi là năng lượng phá hủy G_f . Đối với mỗi đoạn đường cong tuyến tính ứng suất-biến dạng được thể hiện như Hình 1.26, năng lượng phá hủy G_f được tính bằng tích của bề rộng dẫy nứt h_c và diện tích dưới biểu đồ ứng suất - biến dạng, trong đó: E là mô đun đàn hồi Young và E_t là tan của mô đun mềm hóa biến dạng. Các thông số f_t , E , E_t và h_c được coi là đặc tính của vật liệu. Đây là các tham số cần thiết để sử dụng trong mô hình dẫy nứt.

1.3.4.4. Mô hình hai tham số

Việc thực hiện số hóa hầu hết các mô hình phi tuyến tính với phân tích phá hủy khá phức tạp. Tuy nhiên, nếu chỉ xét tải trọng tối đa và không cần xét tới ứng xử mềm hóa hoàn toàn của kết cấu, những mô hình xấp xỉ có thể đáp ứng được. Những mô hình này sử dụng tiêu chuẩn phá hủy được sử dụng trong LEFM. Trong khi đó, LEFM cổ điển chỉ yêu cầu một tiêu chuẩn phá hoại, nhưng hầu hết các mô hình xấp xỉ sử dụng 2 thông số để mô tả vùng phá hoại. Trong các mô hình xấp xỉ được biết đến phổ biến bao gồm mô hình hai tham số của Jeng và Shah [66] và mô hình nứt có hiệu của Nallathambi và Karihaloo [73]. Những mô hình này thường được gọi là mô hình đàn hồi tương đương, trong đó một kết cấu thật được thay thế bằng một kết cấu đàn hồi tương đương. Do đó, tính toán trở nên đơn giản vì chỉ có tuyến tính, thay vì phân tích phi tuyến.



Hình 1.27. Mô hình nứt 2 tham số [36]

Trong công thức của mô hình 2 tham số, chỉ đưa ra các điều kiện cho tải trọng tối đa. Mô hình giả thiết rằng với tải trọng cao nhất, hệ số cường độ ứng suất K_I và độ mở rộng tại đầu vết nứt (CTOD) đạt tới giá trị tới hạn và các quan hệ sau được giữ lại:

$$K_I = K_{Ic}^S \quad (1.2)$$

$$CTOD = CTOD_c \quad (1.3)$$

trong đó: K_{Ic}^S là các giá trị tới hạn cường độ ứng suất của mô hình. Như đã minh họa ở Hình 1.27, hệ số giá trị tới hạn của cường độ ứng suất K_{Ic}^S được xác định tại đầu của chiều dài vết nứt hữu hiệu a_e sử dụng công thức cơ học phá hủy đàn hồi tuyến tính:

$$K_{Ic}^S = \sigma \sqrt{\pi a_e} g_1\left(\frac{a_e}{d}\right) \quad (1.4)$$

trong đó : d là chiều cao mẫu

Theo đồ thị, K_{Ic}^S được tính toán tại đầu của chiều dài vết nứt hữu hiệu a_e

Các tham số mô hình K_{Ic}^S và $CTOD_c$ được coi là các hằng số vật liệu, tức là các giá trị này độc lập với hình dạng mẫu và việc bố trí tải trọng. Các tham số này có thể được tính toán trực tiếp bằng các thí nghiệm uốn ba điểm.

1.3.4.5. Mô hình nứt có hiệu

Một cách tiếp cận tương tự với mô hình hai tham số là mô hình nứt có hiệu được đề xuất bởi Nallathambi và Karihaloo [73]. Tuy nhiên, biến dạng cắt tại đỉnh của tải trọng được sử dụng để xác định chiều dài vết nứt hữu hiệu a_e . Hơn nữa, các tham số chính cho thấy sự phát triển của quá trình nứt là K_{Ic}^e và chiều dài vết nứt có hiệu a_e . Mô hình giả sử rằng trạng thái nứt tới hạn đạt được khi hệ số cường độ ứng suất K_I tương ứng với chiều dài vết nứt có hiệu a_e đạt giá trị tới hạn K_{Ic}^e .

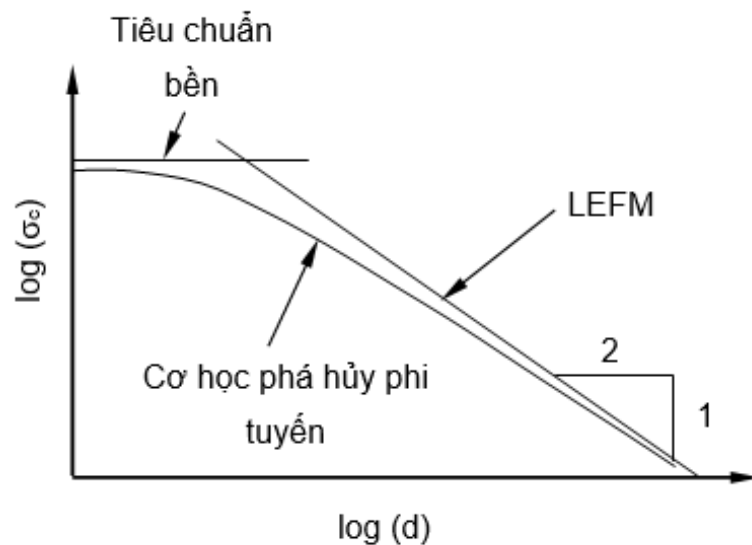
1.3.4.6. Mô hình hiệu ứng kích thước

Một lý thuyết khác của cơ học phá hủy đàn hồi tuyến tính được sử dụng rộng rãi cho phá hủy vật liệu bán giòn là luật hiệu ứng kích thước của Bazant [32]. Bằng cách phân tích kích thước và phép biến đổi đồng dạng, Bazant đã đề xuất một quy luật về tỉ lệ có thể dự đoán giá trị ứng suất phá hủy bằng cách sử dụng các kết cấu có rãnh tương đương về mặt hình học. Phương trình cho quy tắc tỉ lệ được thể hiện như sau:

$$\sigma_c = \frac{Bf_t}{\left[1 + \frac{d}{d_0}\right]^{1/2}} \quad (1.5)$$

trong đó: σ_c là ứng suất danh định tại đỉnh tải trọng

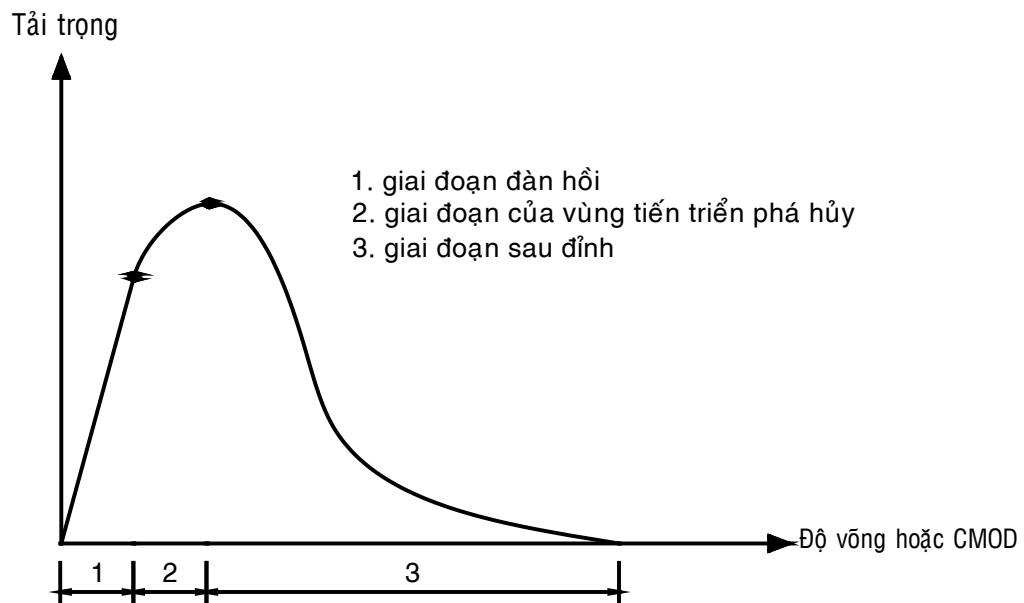
B và d_0 là các hằng số thực nghiệm có thể được xác định bằng cách sử dụng các dữ liệu thí nghiệm thu được từ các mẫu đầm có kích cỡ khác nhau nhưng đồng dạng về mặt hình học. B và d_0 có liên quan tới các tham số mô hình G_f và c_f được định nghĩa như là độ mở rộng vết nứt tối đa cho các kích cỡ vô cực. Một định nghĩa quy tắc hiệu ứng kích thước của Bazant được minh họa trong Hình 1.28.



Hình 1.28. Mô hình hiệu ứng kích thước [16][36]

1.3.4.7. Mô hình phá hủy double-K

Reinhardt và Xu đã đề xuất mô hình phá hủy double-K để dự đoán sự bắt đầu nứt và lan truyền nứt [105]. Dựa trên sự quan sát thực nghiệm, họ đã chia quá trình lan truyền nứt trong kết cấu bê tông thành 3 giai đoạn: giai đoạn bắt đầu nứt, giai đoạn lan truyền nứt ổn định và giai đoạn lan truyền nứt mất ổn định (biến dạng mềm hóa).



Hình 1.29. Ba giai đoạn của quá trình lan truyền nứt theo mô hình double-K
[103]

Để phản ánh các giai đoạn khác nhau trong quá trình phá hủy bê tông, hai tham số phá hủy (K_{lc}^{ini} , K_{lc}^{un}) đã được giới thiệu. K_{lc}^{ini} là cường độ chống nứt khởi đầu và K_{lc}^{un} là cường độ nứt giới hạn. Chúng được xem như tiêu chuẩn đánh giá sự lan truyền vết nứt trong bê tông. Trong đó, K_{lc}^{un} dùng để đánh giá sự ổn định lan truyền của vết nứt trong kết cấu. K_{lc}^{ini} dùng để đánh giá khả năng chống nứt của bê tông giai đoạn bắt đầu xuất hiện sự lan truyền vết nứt. Cường độ chống nứt khởi đầu K_{lc}^{ini} được định nghĩa như là khả năng chống lan truyền nứt vốn có của vật liệu, vết nứt vì mô được tập trung ở quy mô nhỏ trong trường hợp không có sự xuất hiện của vết nứt. Bên cạnh đó, mô hình này xem xét mối quan hệ giữa

K_{lc}^{ini} và K_{lc}^{un} , sự khác nhau giữa chúng được giả định là do sự bắc cầu ứng suất qua bề mặt vết nứt, sự khác này còn được gọi là cường độ chống nứt dính kết K_{lc}^C giới hạn, được tính toán dựa trên ứng suất dính kết và luật mềm hóa vật liệu.

1.3.5. Nghiên cứu về cơ học phá hủy bê tông tại Việt Nam

Ở Việt Nam, những nghiên cứu về cơ học phá hủy tập trung vào một số lĩnh vực như xây dựng, thủy lợi, cơ khí... Mặc dù còn khá mới mẻ nhưng cơ học phá hủy cũng nhận được nhiều sự quan tâm từ các nhà khoa học và các chuyên gia xây dựng ở trong nước. Một số nghiên cứu gần đây về cơ học phá hủy bê tông được thực hiện trên các loại bê tông thường và bê tông cường độ cao [9][11][15]. Trong nghiên cứu của tác giả Trần Thế Truyền [15], tác giả đã nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm xác định các tham số của mô hình phá hủy dòn đối với sáu loại bê tông có cường độ chịu nén f'_c : 20, 25, 30, 35, 40 và 50MPa. Các tham số của mô hình phá hủy dòn được cân chỉnh cho các cấp bê tông đã cung cấp một cơ sở dữ liệu cho việc tính toán các bộ phận kết cấu công trình giao thông bằng lý thuyết phá hủy dòn. Thông qua một số mô phỏng dầm BTCT đơn giản có kiểm chứng bằng thực nghiệm sử dụng kết quả cân chỉnh đã được chứng minh khả năng ứng dụng và phát triển hiệu quả của mô hình phá hủy dòn không cục bộ của Mazars. Tác giả Trần Thế Truyền đã sử dụng mô hình hiệu ứng kích thước của Bazant để phân tích khả năng triển khai các tính toán từ kích thước thí nghiệm ra kích thước thật của kết cấu trong thực tế.

Một nghiên cứu khác, trong báo cáo luận án Tiến sĩ, tác giả Phạm Duy Anh đã nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt sợi thép [11]. Một số đặc tính phá hủy của bê tông cường độ cao cốt sợi thép đã được tác giả xác định bằng thí nghiệm uốn 4 điểm. Biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng được xác định thông qua thí nghiệm. Các tham số phá hủy như năng lượng phá hủy, độ dai đã được tính toán dựa trên các kết quả thí nghiệm được sử dụng để phân tích các trạng thái phá hủy của dầm bê tông cốt sợi thép.

Trong luận văn tốt nghiệp thạc sĩ, tác giả Nguyễn Thanh Vũ đã tiến hành

mô phỏng ứng xử phá hủy và nứt dầm bê tông cốt thép cường độ cao dựa trên lý thuyết phá hủy dòn theo mô hình phá hủy dòn không cục bộ [9]. Các nghiên cứu lý thuyết phá hủy dòn bê tông theo mô hình của Mazars, Pijaudier – Cabot. Nguyễn Thanh Vũ đã trình bày quy trình thực nghiệm dầm bê tông cường độ cao (BTCĐC) có nứt môi, dầm bê tông cốt thép cường độ cao, áp dụng lý thuyết cơ học rạn nứt tính toán các đặc trưng nứt của bê tông. Tác giả cũng đã xây dựng bộ dữ liệu đặc trưng nứt cho bê tông cường độ cao, tính toán mô phỏng các đặc trưng nứt theo phương pháp phần tử hữu hạn thông thường và phương pháp phần tử hữu hạn có tích hợp lý thuyết phá hủy dòn không cục bộ Mazars – Pijaudier Cabot.

Ngoài các nghiên cứu được đề cập ở trên, còn có một số sách chuyên khảo, các báo cáo về cơ học phá hủy trong bê tông và ứng dụng cơ học phá hủy trong tính toán thiết kế kết cấu như: “Phá hủy, rạn nứt bê tông” [16], “Cơ học phá hủy – Bài toán ngược và lời giải” [5], “Cơ học phá hủy” [17], “Ứng dụng cơ học phá hủy trong kết cấu công trình” [10]. Những tài liệu trên là những nguồn cung cấp kiến thức bổ ích, tạo điều kiện cho các nghiên cứu tiếp theo về cơ học phá hủy bê tông trong thời gian tới ở Việt Nam.

1.4. Kết luận chương 1

- Theo kết quả tổng hợp và phân tích các nghiên cứu trong và ngoài nước, có thể nhận định nano silica đáp ứng được các yêu cầu sử dụng trong bê tông, bê tông cường độ cao một cách hiệu quả và được đánh giá có nhiều triển vọng.

- Nghiên cứu sử dụng nano silica trong bê tông chưa thống nhất về hàm lượng. Các nghiên cứu chủ yếu sử dụng NS trong các loại bê tông thường, có cường độ thấp. Cần tiếp tục nghiên cứu về thành phần và các tính chất cơ học của BTCĐC sử dụng nano silica với các điều kiện thực tế ở Việt Nam.

- Các nghiên cứu cơ học phá hủy bê tông ở Việt Nam đã xác định được đặc trưng phá hủy dòn của bê tông thường và bê tông cường độ cao. Tuy nhiên các nghiên cứu này cũng đề cập rằng, đường cong mềm hóa, sự tương tác của các bề

mặt vết nứt và ảnh hưởng của vật liệu thành phần tác động đến các đặc trưng phá hủy cần được phân tích bằng các phương pháp thực nghiệm.

- Nhiều nghiên cứu đã đề cập sự ảnh hưởng của các phụ gia khoáng siêu mịn đến các đặc trưng phá hủy của bê tông cường độ cao. Các hạt khoáng siêu mịn có thể đóng góp tích cực đến các ứng xử của bê tông khi phá hủy.

- Các nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng, đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao ứng dụng trong kết cấu công trình cầu có độ dòn lớn. Việc nghiên cứu đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng nano silica ứng dụng trong công trình cầu là cần thiết trong điều kiện đã nhiều phương pháp và thiết bị thí nghiệm tiên tiến.

CHƯƠNG 2. XÁC ĐỊNH THÀNH PHẦN VÀ MỘT SỐ TÍNH CHẤT CƠ HỌC CHỦ YẾU BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG NANO SILICA

Sự kết hợp của các vật liệu nano silica vào bê tông cường độ cao đã được ghi nhận, chúng có thể cải thiện đáng kể tính chất cơ học và phẩm chất của bê tông. Sử dụng vật liệu silica ở kích thước nanomet trong bê tông cường độ cao được xem là một bước tiến mới so với việc sử dụng vật liệu silica fume. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu bê tông sử dụng NS báo cáo hàm lượng tối ưu khác nhau cùng với một số ảnh hưởng bất thường, cần phải kiểm tra, đánh giá bằng phương pháp thực nghiệm.

Bê tông cường độ cao sử dụng nano silica được tính toán, phân tích xác định thành phần cấp phối để làm cơ sở thực nghiệm các tính chất của bê tông. Phương pháp tính toán thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng NS dựa trên phương pháp thiết kế thành phần bê tông của ACI 211.4R-08. Hàm lượng NS thêm vào được dựa trên cơ sở phân tích tổng hợp các kết quả nghiên cứu trước và được tính toán dựa trên phương pháp thể tích tuyệt đối. Những ảnh hưởng bất thường của NS đến các tính chất của bê tông sẽ được chú ý để hiệu chỉnh nhằm đảm bảo các tính năng làm việc của hỗn hợp bê tông và bê tông.

2.1. Vật liệu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng nano silica

Ngoài thành phần NS được thêm vào, vật liệu sử dụng chế tạo BTCĐC gồm các thành phần cơ bản như xi măng, silica fume, cốt liệu lớn, cốt liệu nhỏ, nước và phụ gia siêu dẻo.

Các vật liệu sử dụng được lựa chọn kỹ lưỡng và được thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật để đảm bảo phù hợp tiêu chuẩn quy định chế tạo BTCĐC. Đặc biệt vật liệu NS được thực hiện thí nghiệm để đánh giá khả năng áp dụng trong bê tông và tương tác với các vật liệu thành phần.

2.1.1. Xi măng

Xi măng sử dụng là loại xi măng PC40 thương hiệu Bút Sơn phù hợp theo TCVN 2682:2009 [2].

Bảng 2.1. Thành phần hóa học của xi măng Bút Sơn PC40

Silica	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO tự do
21,65	5,25	3,42	65,0	0,06	1,80	0,25	0,72	0,125

Bảng 2.2. Thành phần khoáng tính toán của xi măng Bút Sơn PC40

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51,74	24,20	8,16	10,35

Xi măng PC40 được mua trực tiếp tại Nhà máy Xi măng Bút Sơn tại tỉnh Hà Nam. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật xi măng được trình bày trong Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng Bút Sơn PC40

Chỉ tiêu	PC40
- Khối lượng riêng, g/cm ³	3,1
- Độ mịn (lượng sót sàng 0,09mm), %	0,2
- Cường độ nén, N/mm ²	
+ 3 ngày	28,4
+ 28 ngày	47,5
- Thời gian đông kết	
+ Bắt đầu, phút	125
+ Kết thúc, phút, không lớn hơn	225
- Bề mặt riêng, xác định theo phương pháp Blaine, cm ² /g	3350
- Độ ổn định thể tích, mm	1
- Độ dẻo tiêu chuẩn, %	27

2.1.2. Nano silica (NS)

Nghiên cứu sử dụng NS loại Aerosil 200 của hãng hóa chất Evonik (Bỉ) với

kích thước từ 5-50nm, diện tích bề mặt đặc trưng $200\pm 25\text{m}^2/\text{g}$ (Hình 2.1). Thành phần hóa học và các chỉ tiêu kỹ thuật của NS được trình bày trong Bảng 2.4 và Bảng 2.5.



Hình 2.1. Nano silica

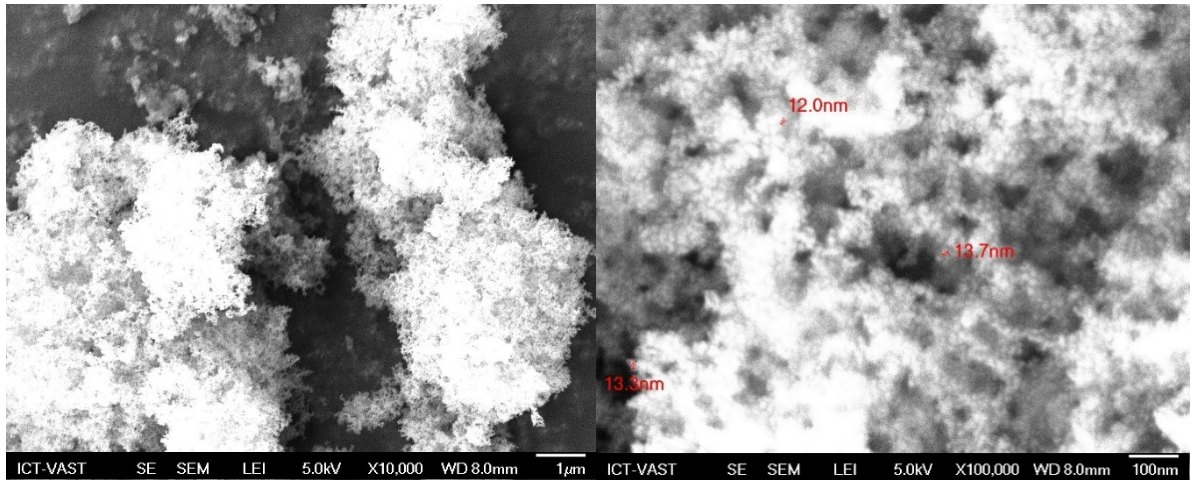
Bảng 2.4. Thành phần hóa học nano silica

Silica	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	HCL
$\geq 99,8$	$< 0,03$	$< 0,003$	$< 0,03$	$< 0,020$

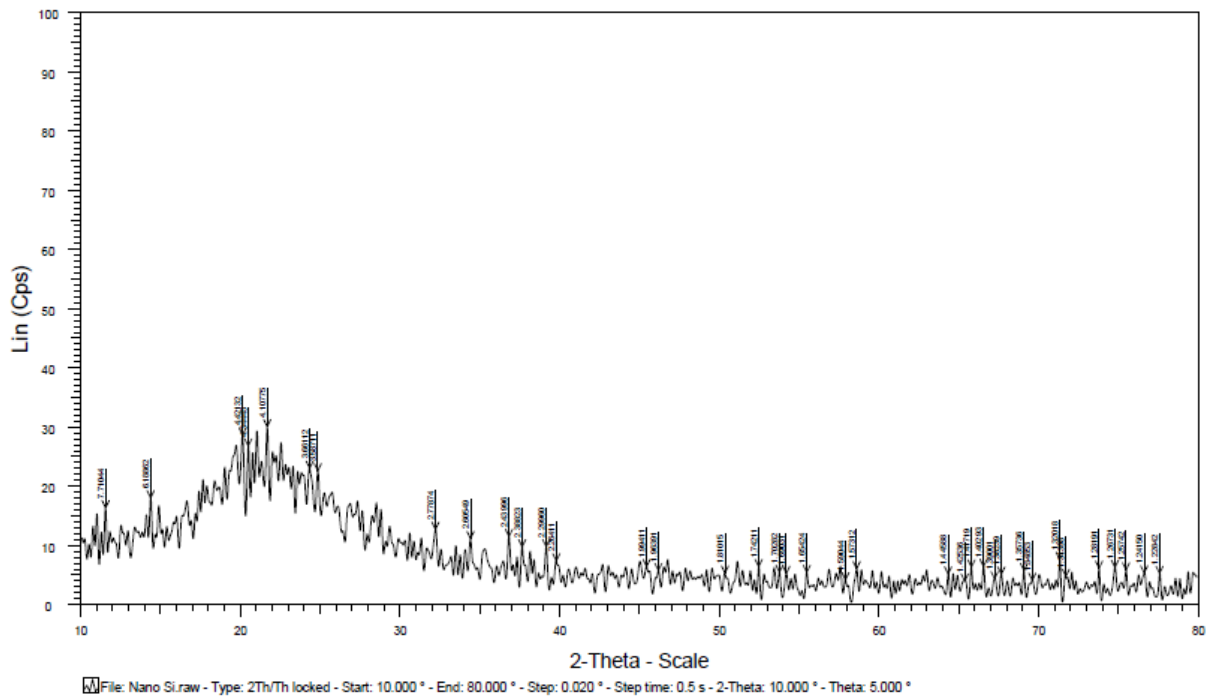
Bảng 2.5. Chỉ tiêu kỹ thuật nano silica (Aerosil 200)

Chỉ tiêu kỹ thuật	Aerosil 200
Kích cỡ	5-50nm
Diện tích bề mặt	$200\pm 25\text{m}^2/\text{g}$
pH	3,7-4,5
Tổn thất ở nhiệt độ $1000\text{ }^\circ\text{C}$ trong 2h	$< 1,5\%$
Lượng sót sàng $45\mu\text{m}$	$< 0,025\%$
Khối lượng thể tích	50g/l
Khối lượng riêng	$2,2\text{g}/\text{cm}^3$
Cấu trúc	100% vô định hình

Thí nghiệm phân tích XRD và SEM của NS được thực hiện tại Viện Hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam để đánh giá kích thước và hình dạng của NS. Kết quả thí nghiệm được trình bày trong Hình 2.2 và Hình 2.3.



Hình 2.2. Ảnh quét SEM của nano silica



Hình 2.3. Kết quả soi XRD của nano silica

* Nhận xét: Từ hình ảnh thí nghiệm SEM của NS (Hình 2.2), có thể thấy hạt nano có dạng hình cầu với kích thước trung bình khoảng 13nm. Từ kết quả phân tích XRD (Hình 2.3), cho thấy các hợp chất ở dạng nano và 100% trạng thái vô định hình.

2.1.3. Cốt liệu lớn

Đá được sử dụng làm cốt liệu lớn có nguồn gốc từ đá bazan được tuyển từ mỏ đá Sunway - Hòa Bình. Đá có dạng khối, không lẫn nhiều tạp chất và có ít

thành phần hạt dẹt. Hàm lượng ion Cl^- trong cốt liệu không được vượt quá 0,01% khả năng phản ứng kiềm silic đối với cốt liệu lớn được quy định như với cốt liệu nhỏ.

Đá bazan được lựa chọn thành phần cấp phối có $D_{\max} = 9,5\text{mm}$. Thành phần cấp phối hạt được sàng ra theo từng khoảng và được phối trộn lại thỏa mãn theo quy định của tiêu chuẩn ASTM C33 [19]. Các tính chất kỹ thuật và thành phần hạt sau khi phối trộn được thể hiện trong Bảng 2.6 và Bảng 2.7.



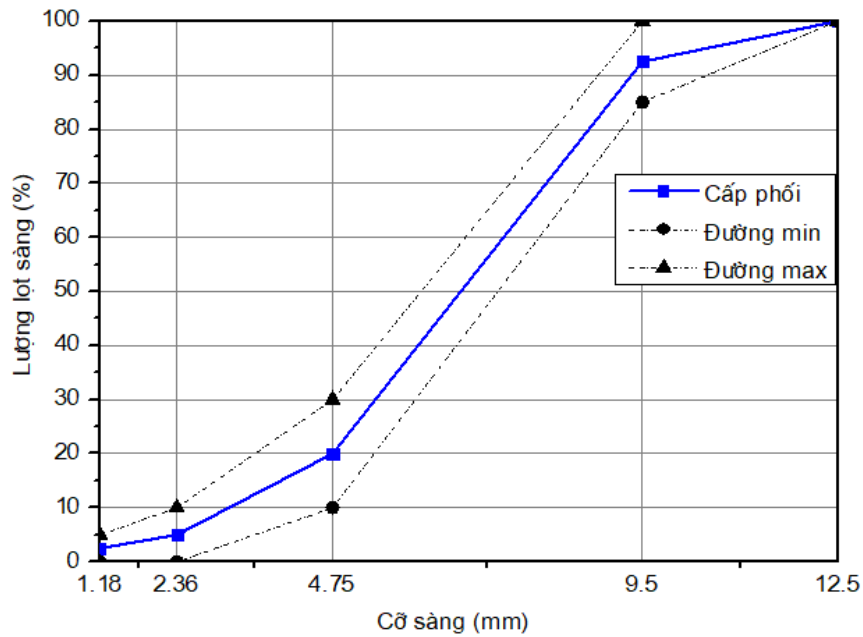
Hình 2.4. Sàng và phối trộn thành phần hạt đá theo tiêu chuẩn ASTM C33

Bảng 2.6. Các tính chất kỹ thuật của đá

$D_{\max}$ (mm)	Khối lượng riêng (g/cm^3)	Khối lượng thể tích chặt (g/cm^3)	Độ hút nước (%)	Độ ẩm (%)
9,5	2,74	1,615	0,71	0,4

Bảng 2.7. Thành phần cấp phối đá theo sau khi phối trộn tiêu chuẩn ASTM C33

Cỡ sàng (mm)	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18
Lượng sót riêng biệt (%)	0	7,5	72,5	15	2,5
Lượng sót tích lũy (%)	0	7,5	80	95	97,5
Lượng lọt sàng (%)	100	92,5	20	5	2,5
Min (%)	100	85	10	0	0
Max (%)	100	100	30	10	5



Hình 2.5. Biểu đồ đường cong cấp phối của đá theo ASTM C33

2.1.4. Cốt liệu nhỏ

Cát vàng (nguồn Việt Trì) được sử dụng làm cốt liệu nhỏ, với mô đun độ lớn 2.73. Các tính chất kỹ thuật của cát được thể hiện trong Bảng 2.8.

Bảng 2.8. Các tính chất kỹ thuật của cát

Mô đun	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Khối lượng thể tích chặt (g/cm ³)	Độ hút nước (%)	Độ ẩm (%)
2,73	2,66	1,73	1,05	2

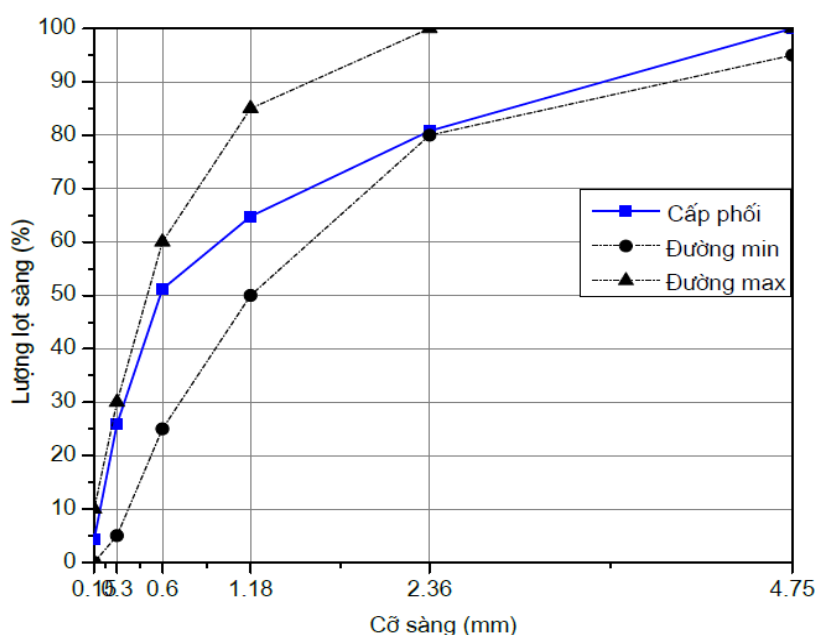
Cát được sàng phân tích thành phần hạt theo tiêu chuẩn ASTM C33. Kết quả thành phần hạt được trình bày trên Bảng 2.9.



Hình 2.6. Thí nghiệm thành phần hạt cát

Bảng 2.9. Kết quả thí nghiệm thành phần hạt của cát theo tiêu chuẩn ASTM C33

Cỡ sàng (mm)	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15
Lượng sót riêng biệt (%)	0	19,2	15,90	13,6	25,3	21,6
Lượng sót tích lũy (%)	0	19,2	35,1	48,7	74	95,6
Lượng lọt sàng (%)	100	80,88	64,8	51,2	25,9	4,3
Min (%)	95	80	50	25	5	0
Max (%)	100	100	85	60	30	10



Hình 2.7. Biểu đồ cấp thành phần hạt cát theo ASTM C33

2.1.5. Nước

Nước để chế tạo bê tông (rửa cốt liệu, trộn và bảo dưỡng bê tông) được lấy từ nguồn nước máy của hệ thống cấp nước sinh hoạt. Đảm bảo chất lượng không lẫn các tạp chất làm ảnh hưởng đến các tính chất của bê tông và không có phản ứng phụ với phụ gia.

2.1.6. Silica fume

Silica fume là một sản phẩm phụ được lấy ra từ quá trình nung thạch anh với than đá trong các lò hồ quang điện của ngành sản xuất silicon và các hợp kim thép silicon, khói bay ra có hàm lượng đioxit silic vô định hình cao và chứa các tinh thể hình cầu rất mịn. Sự phân bố bề mặt kích thước hạt của một loại

silica fume điển hình cho thấy hầu hết các hạt đều nhỏ hơn $0.1\mu\text{m}$ nhỏ hơn kích thước của hạt xi măng gấp 100 lần.

Nghiên cứu sử dụng sản phẩm gốc silica fume Sikacrete PP1 của hãng Sika, phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C1240-03. Các chỉ tiêu kỹ thuật Sikacrete PP1 được thể hiện trong Bảng 2.10.



Hình 2.8. Phụ gia khoáng gốc silica fume hãng Sika

Bảng 2.10. Chỉ tiêu kỹ thuật Sikacrete PP1

Chỉ tiêu kỹ thuật	Sikacrete PP1
Dạng/Màu	Bột/Màu xám
Gốc	Silica fume pozzolanic với độ chính xác về kích thước được kiểm soát chặt chẽ.
Cấu trúc	Bán nén
Khối lượng riêng	$2,2\text{g/cm}^3$
Liều lượng	5-10% theo trọng lượng chất kết dính

2.1.7. Phụ gia siêu dẻo

Đối với bê tông trong nghiên cứu được thiết kế thành phần theo bê tông cường độ cao, đòi hỏi phải sử dụng các loại phụ gia siêu dẻo nhằm kiểm soát tỷ lệ N/CKD, điều này càng cần thiết khi BTCĐC sử dụng NS. Các hạt NS có thể làm giảm độ sụt của bê tông do diện tích bề mặt đặc trưng rất lớn, sử dụng chất giảm nước cao nhằm mục đích đảm bảo tính công tác của bê tông tươi.

Phụ gia siêu dẻo dùng đúc mẫu bê tông sử dụng nano là loại Sika Viscocret

3000-20M của Hãng Sika. Sika Viscocrete 3000-20M là phụ gia giảm nước cao cấp cho bê tông trên cơ sở phối trộn của PCE polymer thế hệ thứ 3 để sản xuất bê tông cường độ cao. Sika ViscoCrete 3000-20M phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C494 loại G. Sika ViscoCrete 3000-20M có tính chất vượt trội bởi khả năng giảm nước của nó rất cao, cung cấp độ chảy tốt mà vẫn giữ được độ kết dính tối ưu cho bê tông.



Hình 2.9. Phụ gia siêu dẻo Sika ViscoCrete 3000-20M

Bảng 2.11. Chỉ tiêu kỹ thuật phụ gia Sika ViscoCrete 3000-20M

Chỉ tiêu kỹ thuật	ViscoCrete 3000-20M
Gốc	Polycarboxylat cải tiến trong nước
Dạng	Chất lỏng
Khối lượng thể tích	1,065–1,085kg/l
Độ pH	4,5 – 6,5
Liều lượng khuyến nghị	0,7 – 2,5 lít/100kg hỗn hợp chất kết dính

2.2. Thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng nano silica

2.2.1. Giới thiệu

Mục đích nhằm xác định thành phần cấp phối BTCĐC sử dụng NS, bước đầu phục vụ kiểm tra đánh giá được sự ảnh hưởng của các hạt NS đến một số tính chất cơ học chủ yếu của BTCĐC, làm cơ sở sử dụng trong các kết cấu công trình cầu và các kết cấu khác. Ngoài ra, kết quả của nghiên cứu là các cấp phối thành phần BTCĐC sử dụng NS, các cấp phối này sẽ được sử dụng phục vụ

trong các nghiên cứu thực nghiệm phân tích đặc điểm phá hủy của bê tông ở các chương sau của luận án.

2.2.2. Các yêu cầu khi thiết kế bê tông cường độ cao sử dụng nano silica

Thiết kế hỗn hợp bê tông cường độ cao sử dụng NS là sự lựa chọn thành phần phối trộn hợp lý các vật liệu thành phần nhằm thu được hỗn hợp bê tông chất lượng và tính năng cao. Về nguyên tắc, cũng giống như bê tông xi măng bình thường, khi thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng NS cần đảm bảo yêu cầu như sau:

- Cường độ của bê tông: Bê tông dùng cho mỗi loại kết cấu có thể cần đến một hoặc nhiều tính năng khác nhau. Yêu cầu về cường độ đối với bê tông sử dụng trong kết cấu công trình cầu là rất quan trọng. Một số kết cấu đòi hỏi tốc độ phát triển cường độ theo ngày tuổi để phục vụ quá trình thi công và khai thác.

- Yêu cầu về tính dẻo của hỗn hợp: Hỗn hợp bê tông phải được đảm bảo về tính dẻo để phục vụ quá trình thi công. Tuy nhiên, cần phải kiểm soát tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) để đảm bảo các tính chất cần đạt yêu cầu của bê tông. Bê tông cường độ cao đòi hỏi tỷ lệ N/CKD rất thấp nên hỗn hợp sẽ rất khô và điều này càng nghiêm trọng hơn khi có mặt các hạt NS. Phụ gia siêu dẻo sẽ là giải pháp cần thiết để tăng cường khả năng làm việc của hỗn hợp bê tông.

- Yêu cầu về vật liệu chế tạo: vật liệu chế tạo hội tụ đủ các yêu cầu về chất lượng, có nguồn gốc xuất xứ và nguồn cung cấp thuận lợi đối với yêu cầu sản xuất.

Dựa vào các yêu cầu ở trên, quá trình xác định thành phần cấp phối BTCĐC sử dụng NS được tiến hành theo trình tự cơ bản như sau:

- Xác định sơ bộ thành phần của bê tông.
- Hiệu chỉnh thành phần bê tông qua kết quả kiểm tra mẫu thí nghiệm về độ sụt và cường độ.
- Giám sát, kiểm tra quá trình đổ bê tông và đưa ra các hiệu chỉnh cần thiết trong quá trình đúc mẫu do sự thay đổi các thành phần vật liệu.

2.2.3. Thiết kế thành phần bê tông cường độ cao sử dụng nano silica

2.2.3.1. Phương pháp và tiêu chuẩn áp dụng

Hiện nay, có nhiều phương pháp thiết kế thành phần bê tông và bê tông cường độ cao, mỗi phương pháp đều có phạm vi ứng dụng riêng. Trong nghiên cứu sử dụng phương pháp ACI (ACI 211.4R-08) để thiết kế thành phần BTCĐC.

2.2.3.2. Phương pháp ACI

Các bước thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng NS được tiến hành theo ACI 211.4R-08 [20]. Hàm lượng phụ gia siêu dẻo xác định theo hướng dẫn của nhà sản xuất và điều chỉnh thực tế để đảm bảo độ sụt yêu cầu của hỗn hợp bê tông.

Hàm lượng silica fume và nano silica được thêm vào các hỗn hợp bê tông dựa trên các nghiên cứu trên thế giới, các tài liệu chuyên khảo và khuyến cáo từ nhà sản xuất. Silica fume và nano silica được xem như là thành phần chất kết dính (CKD), vì thế lượng xi măng sử dụng sẽ được hiệu chỉnh theo một tỉ lệ thích hợp trong quá trình tính toán cấp phối.

Các cấp phối BTCĐC sử dụng nano silica được tính toán thiết kế theo phương pháp thể tích tuyệt đối dựa trên lý thuyết tối ưu về độ đặc. Với giả thiết tổng thể tích đặc là 1m^3 (bao gồm thể tích không khí). Từng vật liệu thành phần chiếm 1 tỷ lệ nhất định theo khối lượng hoặc theo thể tích, với giả thiết $\sum_{i=1}^n V_i = 1$.

Sử dụng phương pháp thể tích tuyệt đối theo ACI 211.4R-08 để thiết kế hỗn hợp bê tông xi măng được tóm tắt qua 11 bước sau:

Bước 1: Lựa chọn độ sụt và cường độ bê tông yêu cầu

Chọn độ sụt gốc trước khi cho phụ gia siêu dẻo vào hỗn hợp bê tông

Bảng 2.12. Độ sụt của hỗn hợp bê tông có và không sử dụng phụ gia siêu dẻo

Bê tông có dùng phụ gia siêu dẻo (PGSD)	
Độ sụt trước khi thêm PGSD	2,5 – 5cm
Bê tông không dùng phụ gia siêu dẻo	
Độ sụt	5 – 10cm

Độ sụt từ 2,5 cm đến 5 cm được sử dụng để lựa chọn lượng nước ban đầu. Độ sụt thực tế khi thi công có thể lớn hơn tùy theo yêu cầu của kết cấu công trình và đạt được với hàm lượng phụ gia siêu dẻo tối ưu.

Theo ACI 318, cho phép những thành phần hỗn hợp bê tông được chọn dựa trên kinh nghiệm thực tế hoặc các mẻ trộn thử trong phòng thí nghiệm. Để đạt được cường độ chịu nén đặc trưng của dự án, thì bê tông cần phải được tính toán tỷ lệ sao cho cường độ chịu nén trung bình ngoài thực tế lớn hơn cường độ chịu nén đặc trưng f'_c bằng một giá trị đủ lớn để xác suất các kết quả không đạt là thấp.

Khi không xác định được độ lệch chuẩn thì cường độ chịu nén trung bình yêu cầu được tính theo công thức sau:

$$f'_{cr} = 1,1f'_c + 4,83 \text{ (MPa)} \quad (2.1)$$

trong đó: f'_{cr} là cường độ chịu nén trung bình yêu cầu, MPa

f'_c là cường độ chịu nén đặc trưng, MPa

Bước 2: Chọn kích thước $D_{\max}$ của hạt cốt liệu lớn

Dựa vào cường độ yêu cầu, cỡ hạt lớn nhất danh định tra Bảng 2.13 bên dưới chọn $D_{\max}$.

Bảng 2.13. Xác định kích thước $D_{\max}$ của hạt cốt liệu lớn

Cường độ bê tông yêu cầu, MPa	Kích thước tối đa của cốt liệu thô, mm
<62,5	Từ 19 đến 25,4
≥62,5	Từ 9,5 đến 12,5

Theo ACI 318, kích thước hạt lớn nhất danh định của cốt liệu không nên vượt quá 1/5 kích thước nhỏ nhất của cầu kiện, 1/3 chiều dày tấm và không quá 3/4 khoảng trống nhỏ nhất giữa các thanh cốt thép.

Bước 3: Chọn hàm lượng cốt liệu thô tối ưu

Lượng cốt liệu thô tối ưu phụ thuộc vào cường độ, đặc tính, kích thước hạt lớn nhất và mô đun độ lớn của cốt liệu nhỏ. Lượng cốt liệu thô tối ưu được lựa chọn từ Bảng 2.14 bên dưới là thể tích cốt liệu thô trên một đơn vị thể tích bê tông.

Bảng 2.14. Xác định thể tích đá được đầm chặt trên một đơn vị thể tích bê tông

Thể tích đá tối ưu cho cỡ hạt danh định lớn nhất với cát sử dụng có mô đun 2,5 – 3,2				
Cỡ hạt danh định lớn nhất (mm)	9,5	12,5	19	25
Thể tích của đá đầm trên 1m ³ bê tông (m ³)	0,65	0,68	0,72	0,75

Thể tích lèn chặt của cốt liệu ở trạng thái bão hòa bề mặt khô ứng với khối lượng thể tích đã lèn chặt được thí nghiệm theo ASTM C29.

Khối lượng của cốt liệu thô ở trạng thái khô tính cho 1m³ hỗn hợp bê tông được tính theo công thức 2.2.

$$D = \rho_{dlc} \times VCA \quad (2.2)$$

ρ_{dlc} : khối lượng thể tích lèn chặt của đá (g/cm³)

VCA : thể tích đá lèn chặt (m³)

Bước 4: Xác định lượng nước và hàm lượng không khí.

Lượng nước của một đơn vị thể tích bê tông được yêu cầu để tạo ra độ sụt đã cho phụ thuộc vào cỡ hạt lớn nhất, hình dạng hạt và cấp phối hạt, lượng xi măng và loại phụ gia siêu dẻo đã sử dụng. Lượng nước dự tính ban đầu được lấy như Bảng 2.15.

Bảng 2.15. Xác định lượng nước ban đầu cho hỗn hợp bê tông

Độ sụt (cm)	Lượng nước trộn (l/m ³)			
	Kích thước lớn nhất của đá (mm)			
	9,5	12,5	19	25
2,5 - 5	183	174	168	165
5 - 7,5	189	183	174	171
7,5 - 10	195	189	180	177
Hàm lượng không khí lọt vào (%)	3	2,5	2	1,5
	(2,5) ⁺	(2,0) ⁺	(1,5) ⁺	(1,0) ⁺

Giá trị trong bảng phải được điều chỉnh đối với cát có độ rỗng khác 35% theo công thức:

$$N_{đc} = (r_c - 35) \times 4,72 \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (2.3)$$

$$\text{Độ rỗng của cát: } r_c = \left(1 - \frac{\rho_{clc}}{\rho_c} \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad (2.4)$$

trong đó:

ρ_{clc} : khối lượng thể tích lèn chặt của cát (g/cm³)

ρ_c : khối lượng riêng của cát (g/cm³)

Bước 5: Lựa chọn tỉ lệ N/CKD

Tỉ số N/CKD của bê tông có sử dụng phụ gia siêu dẻo được yêu cầu chọn theo

Bảng 2.16. Xác định tỉ lệ N/CKD cho 1m³ bê tông có sử dụng PGSD

Cường độ yêu cầu f'_{cr} , MPa		Tỷ lệ N/CKD			
		Kích thước tối đa của cốt liệu thô, mm			
		9,5	12,5	19	25
62	28 ngày	0,38	0,36	0,35	0,34
	56 ngày	0,42	0,39	0,37	0,36

69	28 ngày	0,33	0,32	0,31	0,30
	56 ngày	0,37	0,35	0,33	0,32
76	28 ngày	0,30	0,29	0,27	0,27
	56 ngày	0,33	0,31	0,29	0,29
83	28 ngày	0,27	0,26	0,25	0,25
	56 ngày	0,30	0,28	0,27	0,27

Bước 6: Tính toán hàm lượng chất kết dính

Khối lượng của chất kết dính cho mỗi đơn vị thể tích bê tông (m^3) được xác định bằng cách chia lượng nước nhào trộn cho mỗi đơn vị thể tích bê tông cho tỷ lệ N/CKD. Lượng chất kết dính là tổng khối lượng của xi măng và các thành phần phụ gia khoáng (silica fume, nano silica).

Nếu chỉ dẫn kỹ thuật quy định giới hạn tối đa hoặc tối thiểu đối với lượng xi măng trên mỗi mét khối bê tông thì cần phải thỏa mãn yêu cầu này. Do đó, hỗn hợp nên được cân đối để chứa lượng chất kết dính lớn hơn cần thiết.

Với tỷ lệ N/CKD được chọn ở trên và lượng nước N; lượng chất kết dính cho $1m^3$ bê tông được tính như sau:

$$CKD = \frac{N}{N/CKD} \text{ (kg)} \quad (2.5)$$

* Trường hợp 1: không sử dụng nano silica, chất kết dính bao gồm xi măng và silica fume

$$CKD = X + SF \text{ (kg)} \quad (2.6)$$

* Trường hợp 2: sử dụng nano silica

Tính toán thay thế xi măng bởi nano silica theo tỉ lệ phần trăm khối lượng chất kết dính (xi măng + silica fume + nano silica).

Các tỉ lệ NS được cho vào bê tông dựa vào sự tham khảo các công trình nghiên cứu có liên quan đã được thực hiện trong và ngoài nước.

$$CKD = X + SF + NS \text{ (kg)} \quad (2.7)$$

$$NS = \%NS \times CKD \text{ (kg)} \quad (2.8)$$

Bước 8: Xác định lượng cốt liệu nhỏ (cát)

1. Không dùng NS

$$V_c = I - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_{sf} - V_n \text{ (m}^3\text{)} \quad (2.9)$$

2. Khi có thành phần NS

$$V_c = I - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_{sf} - V_{ns} - V_n \text{ (m}^3\text{)} \quad (2.10)$$

trong đó:

V_c : thể tích cát (m³)

V_{kk} : thể tích không khí trong bê tông (m³)

V_d : thể tích đá (m³)

V_{xm} : thể tích xi măng (m³)

V_{sf} : thể tích silica fume (m³)

V_n : thể tích nước (m³)

V_{ns} : thể tích nano silica (m³)

Bước 9: Xác định tỷ lệ các phụ gia hóa học

Cần sử dụng phụ gia siêu dẻo (PGSD) trong hỗn hợp bê tông cường độ cao. Sử dụng PGSD giúp các hạt xi măng và các chất kết dính khác phân tán trong hỗn hợp và có thể giảm lượng nước yêu cầu đến hơn 30%. Theo ACI 211.4R-08 [20], có thể sử dụng PGSD vào các hỗn hợp hiện có mà không cần điều chỉnh các tỷ lệ pha trộn để cải thiện khả năng làm việc của bê tông. Trong bê tông cường độ cao thường sử dụng PGSD để hạ thấp tỷ lệ nước/chất kết dính, cũng như làm tăng tính lưu động của bê tông. Hầu hết, trong bê tông cường độ cao đều chứa các phụ gia hóa học, điều này càng quan trọng khi có thành phần các hạt NS. Tỷ lệ phụ gia siêu dẻo được thêm vào dựa trên khuyến nghị của nhà sản xuất và thí nghiệm kiểm tra độ lưu động của từng cấp phối với tỷ lệ PGSD phù hợp nhất. Thường từ 0,7 – 2,5 lít/100 kg xi măng và có thể nhiều hơn tùy theo

yêu cầu về độ sụt và đặc tính của kết cấu.

Bước 10: Các mẻ trộn thử

Đối với hỗn hợp thử được chọn tỷ lệ thành phần trong các bước tính toán lựa chọn ở trên, một mẻ trộn thử được chế tạo để xác định tính công tác và cường độ đặc trưng. Khối lượng của cát, đá dăm, và nước phải được điều chỉnh cho chính xác với tình trạng ẩm của cốt liệu. Với một mẻ trộn nên chọn sao cho sau khi nhào trộn đều đạt hỗn hợp đồng nhất, tính công tác và cường độ yêu cầu.

Bước 11: Lựa chọn các tỷ lệ trộn tối ưu

Khi các tỷ lệ vật liệu thành phần đã được điều chỉnh để tạo ra khả năng làm việc mong muốn và các đặc tính về cường độ thì các mẫu thử cường độ nên được lấy từ các mẻ trộn thử nghiệm tiến hành gần giống với điều kiện thực tế theo các bước quy định. Các thí nghiệm cường độ cần được chế tạo từ các mẻ trộn thử có điều kiện giống như ở hiện trường theo các yêu cầu của ACI 318. Việc chuẩn bị các mẻ trộn và mẫu thử sẽ được đánh giá tốt hơn khi mà kích cỡ mẻ trộn thử với thiết bị, quy trình như trong điều kiện thực tế sẽ áp dụng.

2.2.3.3. Tính toán thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng NS

BTCĐC theo CEB-FIP quy định có cường độ nén sau 28 ngày tối thiểu là 60MPa trở lên. BTCĐC sử dụng trong công trình cầu thường dao động từ 60 đến 80MPa. Trong đó, mức cường độ nén 70MPa được sử dụng khá phổ biến trong kết cấu cầu với các ưu điểm về độ bền, đặc điểm thi công và khả năng cung ứng thực tế từ các trạm trộn. Dựa trên những yếu tố trên, nghiên cứu sinh chọn loại BTCĐC với cường độ đặc trưng 70MPa để tiến hành thiết kế thành phần và thí nghiệm.

Bê tông với cường độ đặc trưng 70MPa được tính toán thiết kế dựa theo phương pháp ACI. Các cấp phối sử dụng nano silica với các tỷ lệ khác nhau, cụ thể là 0%; 0,5%; 1%; 1,5%; 2%; 2,5% và 3% tổng lượng chất kết dính. Tỷ lệ phụ gia siêu dẻo được điều chỉnh theo thực tế để đảm bảo tính công tác của hỗn hợp bê tông. Kết quả tính toán thành phần cấp phối BTCĐC sử dụng NS được

thể hiện trong Bảng 2.17.

Bảng 2.17. Kết quả tính toán thành phần BTCĐC 70MPa sử dụng NS

Cấp phối	Vật liệu thành phần							
	XM	Cát	Đá	SF	NS	PGSD	Nước	N/CKD
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(lit)	(lit)	
NS0,0	544	661	1049	28,6	0,0	5,4	155	0,27
NS0,5	541	660	1049	28,6	2,8	6,5	155	0,27
NS1,0	538	659	1049	28,6	5,7	7,4	155	0,27
NS1,5	535	658	1049	28,6	8,6	7,6	155	0,27
NS2,0	532	657	1049	28,6	11,5	8,7	155	0,27
NS2,5	529	656	1049	28,6	14,3	9,3	155	0,27
NS3,0	527	655	1049	28,6	17,2	9,8	155	0,27

Ghi chú: XM – Xi măng, NS – Nano silica, SF – Silica fume, PGSD – Phụ gia siêu dẻo, N/CKD – Nước/chất kết dính.

2.3. Thí nghiệm một số tính chất cơ học chủ yếu BTCĐC sử dụng NS

2.3.1. Kế hoạch thí nghiệm

Thí nghiệm trong chương này tập trung xác định một số tính chất cơ học chủ yếu như cường độ nén, cường độ kéo khi uốn và mô đun đàn hồi của BTCĐC sử dụng NS.

Các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm VLXD, Trung tâm KHCN GTVT – Trường Đại học Giao thông Vận tải – Hà Nội, Phòng Thí nghiệm Công trình giao thông LAS XD – 72 – Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải.

Thí nghiệm cường độ nén và mô đun đàn hồi được tiến hành trên mẫu thử hình trụ đường kính 150mm, chiều cao 300mm. Cường độ kéo khi uốn được thí nghiệm trên mẫu dầm kích thước 150x150x600 mm. Ảnh hưởng của NS đến sự phát triển cường độ nén và cường độ kéo khi uốn sẽ được kiểm tra đánh giá tại

các ngày tuổi khác nhau là 3 ngày, 7 ngày, 28 ngày và 56 ngày. Đối với mô đun đàn hồi của BTCĐC sẽ được đánh giá tại 28 ngày tuổi. Số lượng mẫu phục vụ các thí nghiệm nén, uốn và mô đun đàn hồi được tổng hợp trong Bảng 2.18.

Bảng 2.18. Số lượng mẫu thí nghiệm tính chất cơ học BTCĐC sử dụng NS

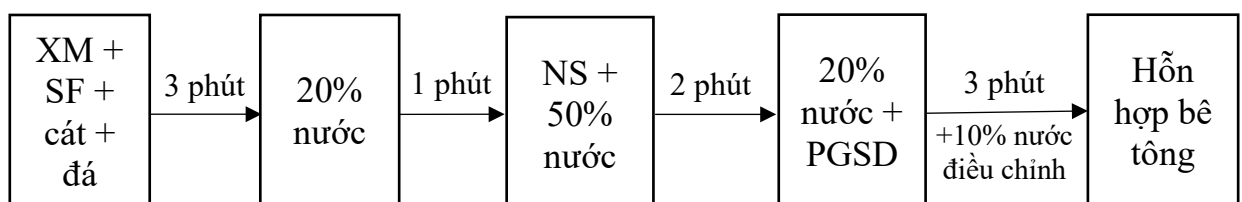
TT	Nội dung thí nghiệm	Cấp phối	Ngày tuổi	Số lượng mẫu	Hình dạng mẫu	Kích thước mẫu (cm)
1	Cường độ nén	NS0,0	3, 7, 28, 56	24	Hình trụ	15×30
2		NS0,5	3, 7, 28, 56	24		
3		NS1,0	3, 7, 28, 56	24		
4		NS1,5	3, 7, 28, 56	24		
5		NS2,0	3, 7, 28, 56	24		
6		NS2,5	3, 7, 28, 56	24		
7		NS3,0	3, 7, 28, 56	24		
8	Cường độ kéo khi uốn	NS0,0	3, 7, 28, 56	24	Hình lăng trụ	15×15×60
9		NS0,5	3, 7, 28, 56	24		
10		NS1,0	3, 7, 28, 56	24		
11		NS1,5	3, 7, 28, 56	24		
12		NS2,0	3, 7, 28, 56	24		
13		NS2,5	3, 7, 28, 56	24		
14		NS3,0	3, 7, 28, 56	24		
15	Mô đun đàn hồi	NS0,0	28	6	Hình trụ	15×30
16		NS0,5	28	6		
17		NS1,0	28	6		
18		NS1,5	28	6		
19		NS2,0	28	6		
20		NS2,5	28	6		
21		NS3,0	28	6		

2.3.2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

2.3.2.1. Quy trình trộn hỗn hợp bê tông cường độ cao sử dụng NS

Diện tích bề mặt đặc trưng của các hạt NS rất cao cùng với các tính chất đặc biệt của các hạt silica ở kích thước nanomet làm cho việc phân tán NS trở nên khó khăn hơn. Do đó, các phương pháp phân tán đặc biệt như trộn bằng các thiết bị sóng siêu thanh có thể được yêu cầu, làm tăng đáng kể chi phí chế tạo bê tông. Để tránh áp dụng các quy trình đặc biệt, hỗn hợp BTCĐC sử dụng NS được nghiên cứu trộn bằng phương pháp trộn thông thường với loại máy trộn cường bức. Tuy nhiên, để đảm bảo các mẫu trộn có thành phần vật liệu đồng nhất và các hạt NS phân tán trong bê tông với mức độ ổn định cao, nghiên cứu đề xuất quy trình trộn trên cơ sở tham khảo các nghiên cứu trước và kinh nghiệm từ quá trình trộn thử với trình tự như sau:

- NS được hòa với 50% lượng nước cần thiết, khuấy tốc độ cao để các hạt NS phân tán đồng đều;
- Cho hỗn hợp cát, đá, xi măng, silica fume trộn trước trong 3 phút;
- Cho 20% lượng nước cho vào hỗn hợp cát, đá, xi măng trộn 1 phút;
- Cho hỗn hợp NS, 50% lượng nước vào hỗn hợp trộn trong 2 phút;
- Khuấy đều 20% lượng nước và phụ gia siêu dẻo, sau đó thêm vào hỗn hợp và 10% lượng nước còn lại có tác dụng điều chỉnh sẽ được thêm vào trộn trong 2 phút cho đến khi hỗn hợp đồng nhất;
- Nghỉ máy trộn trong vòng 1 phút để chất siêu dẻo phản ứng, giúp đạt hiệu quả tốt hơn;
- Trộn lại trong 1 phút để tránh mất độ sụt và đảm bảo tính đồng nhất của hỗn hợp.



Hình 2.10. Sơ đồ trộn hỗn hợp bê tông sử dụng nano silica

2.3.2.2. Chuẩn bị vật liệu

Căn cứ vào thể tích của một mẻ trộn tính toán khối lượng tương ứng của từng loại vật liệu thành phần. Các thành phần vật liệu như cát, đá, xi măng, silica fume, phụ gia siêu dẻo được cân đong sẵn sàng trước khi bắt đầu trộn. Riêng nano silica sẽ được hòa chung với 50% lượng nước yêu cầu và được khuấy với tốc độ cao, đảm bảo các hạt nano silica phân tán đều trong hỗn hợp (Hình 2.11).



Hình 2.11. Cân và khuấy đều nano silica với nước



Hình 2.12. Chuẩn bị vật liệu cho một mẻ trộn

2.3.2.3. Kiểm tra độ sụt

Độ sụt của hỗn hợp bê tông được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM C143 [25] và tham khảo TCVN 3016:1993 [4].

* Thiết bị kiểm tra độ sụt:

- Dụng cụ đo độ sụt là côn Abrams hình nón cụt có kích thước

200x100x300mm, đáy và miệng hở;

- Que đầm hình tròn có đường kính bằng 16mm, dài 600mm;
- Phễu đổ hỗn hợp;
- Tấm thép dày 5mm;
- Thước đo độ sụt chuyên dụng;



Hình 2.13. Xác định độ sụt của hỗn hợp BTCĐC sử dụng NS

* Nhận xét: Hỗn hợp BTCĐC khi thêm NS có độ sụt giảm so với hỗn hợp đối chứng không có NS (Hình 2.13). Tỷ lệ sụt giảm của độ sụt tỷ lệ thuận với hàm lượng NS tăng thêm, hàm lượng phụ gia siêu dẻo sử dụng được điều chỉnh để đảm bảo tính lưu động của hỗn hợp bê tông theo yêu cầu.

2.3.2.4. Trộn, đổ khuôn và đầm chặt mẫu

* Thiết bị trộn và đúc mẫu:

- Máy trộn cưỡng bức với dung tích trộn 60 lit.
- Khuôn mẫu:
 - + Mẫu hình trụ có kích thước 15x30cm;
 - + Mẫu đầm có kích thước 15x15x60cm.

Yêu cầu mặt trong của khuôn phải nhẵn, độ cong vênh của các đường sinh khuôn trụ phải không vượt quá 0,05mm trên 100mm chiều dài. Khuôn phải được vệ sinh, bôi trơn trước khi đúc mẫu.

- Máy đầm rung tần số 2800-3000 vòng/phút, biên độ 0,35 – 0,5mm.

- Que đầm: thanh thép tròn có đường kính 16mm, dài 600mm



Hình 2.14. Trộn, đúc và đầm chặt mẫu

2.3.2.5. Bảo dưỡng mẫu

Mẫu thí nghiệm được phủ ẩm ở nhiệt độ trong phòng cho tới khi tháo khuôn rồi được bảo dưỡng tiếp cho đến ngày thử mẫu. Bảo dưỡng mẫu bằng cách ngâm mẫu trong nước (Hình 2.15).



Hình 2.15. Bảo dưỡng mẫu BTCĐC sử dụng NS

2.3.3. Thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS

Sau khi đúc và bảo dưỡng, các mẫu được tiến hành kiểm tra cường độ nén theo các ngày tuổi. Thí nghiệm cường độ chịu nén được tiến hành theo tiêu chuẩn ASTM C39 [26]. Máy dùng để thí nghiệm cường độ nén của mẫu bê tông là loại máy nén điện tử San 3000 với tải trọng tối đa 3000kN nén mẫu với tốc độ tăng tải 0,3MPa/s.

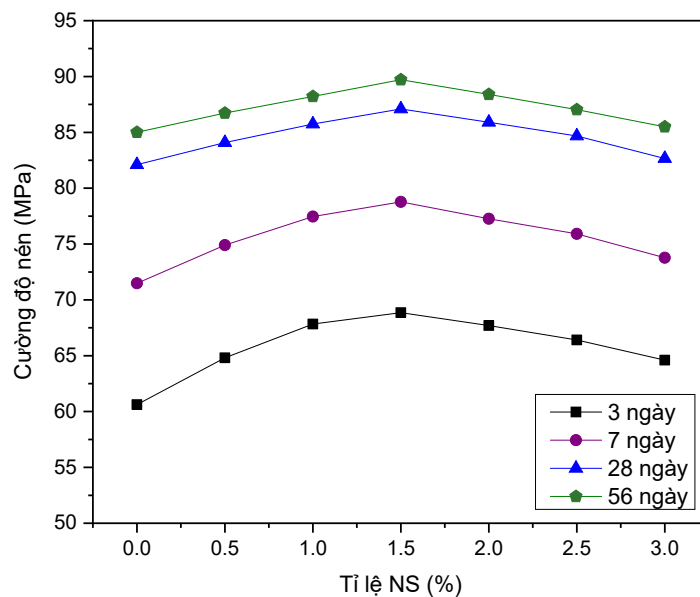


Hình 2.16. Thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS

2.3.3.1. Kết quả thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS

Kết quả thí nghiệm cường độ nén thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM C39 được thể hiện trong phụ lục II của luận án.

Ảnh hưởng của NS đến cường độ nén BTCĐC theo các ngày tuổi được thể hiện thông qua biểu đồ Hình 2.17.



Hình 2.17. Ảnh hưởng của NS đến cường độ nén của BTCĐC

So sánh kết quả cường độ nén trên Hình 2.17 nhận thấy, đối với các mức ngày tuổi khác nhau, cường độ nén tăng dần khi tỉ lệ NS sử dụng nhỏ hơn hoặc bằng 1,5%. Tuy nhiên, khi tỉ lệ NS tăng lên từ 2 đến 3% cường độ nén tăng không đáng kể và có xu hướng giảm so với tỉ lệ NS sử dụng 1,5%. Nguyên nhân có thể kể đến là do các hạt NS phân tán không đồng đều khi tỉ lệ sử dụng vượt quá ngưỡng 1,5%, nguyên nhân này khó tránh khỏi khi hỗn hợp bê tông được

trộn bằng các thiết bị trộn cưỡng bức thông thường, các hạt NS dư thừa không được phân tán đều, có thể bị tích tụ và tạo thành các vùng yếu trong cấu trúc bê tông. Vấn đề này cũng xảy ra tương tự như trong các nghiên cứu của các tác giả Chithra và cộng sự [39], Khaloo [70], Zhang và cộng sự [110], Trần Hữu Bằng [14].

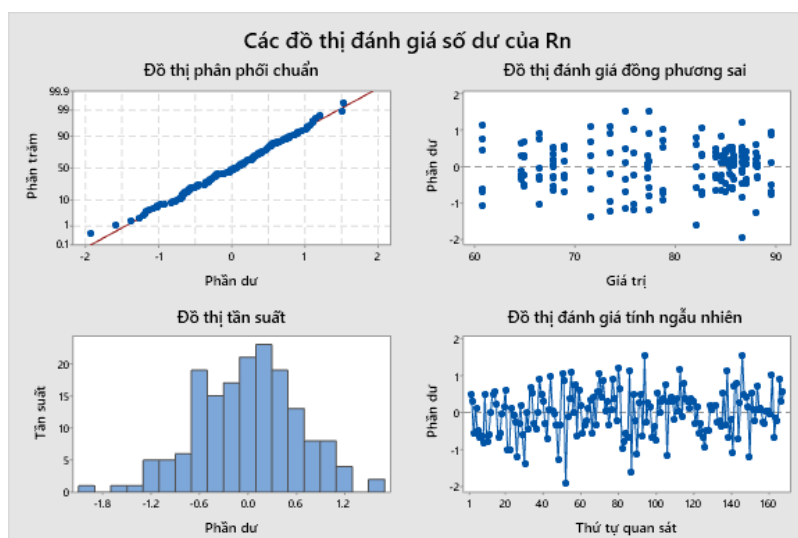
Mặt khác, cường độ nén BTCĐC ở các giai đoạn 3 và 7 ngày tuổi chịu sự ảnh hưởng của NS lớn hơn so với giai đoạn 28 và 56 ngày tuổi. Điều này có thể quan sát qua độ dốc của các đường cong thể hiện sự phát triển cường độ theo tỉ lệ NS và ngày tuổi trên Hình 2.17. Cụ thể đối với giai đoạn 3 và 7 ngày tuổi, cường độ nén BTCĐC sử dụng 1,5% NS cao hơn mẫu 0% NS là 13,58% và 10,18%, ở giai đoạn 28 và 56 ngày tuổi mức tăng này là 6,09% và 5,53%. Kết quả này cho thấy, khi sử dụng NS trong BTCĐC có thể giúp phát triển cường độ nén ở giai đoạn tuổi sớm tốt hơn so với giai đoạn muộn. Sự phát triển cường độ nén ở giai đoạn tuổi sớm có thể do khả năng kích hoạt các phản ứng pozzolan của các hạt NS tăng tốc sự hình thành các gel C-S-H.

Kết quả thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS có đặc điểm phát triển cường độ và mức độ ảnh hưởng của tỉ lệ NS đến cường độ nén tương đồng với một số nghiên cứu của các tác giả khác. Điển hình như của Khaloo và cộng sự [70], Chithra và cộng sự [39], Givi và cộng sự [50]. Theo các nghiên cứu trên, các tác giả đều sử dụng một chuỗi các tỉ lệ NS để thêm vào BTCĐC, kết quả cho thấy cường độ nén được tăng cường theo các độ tuổi khác nhau và khi tỉ lệ NS đạt đến một ngưỡng nhất định ($1,5 \div 2\%$) thì sự gia tăng cường độ nén bị giảm.

2.3.3.2. Phân tích thống kê kết quả thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS

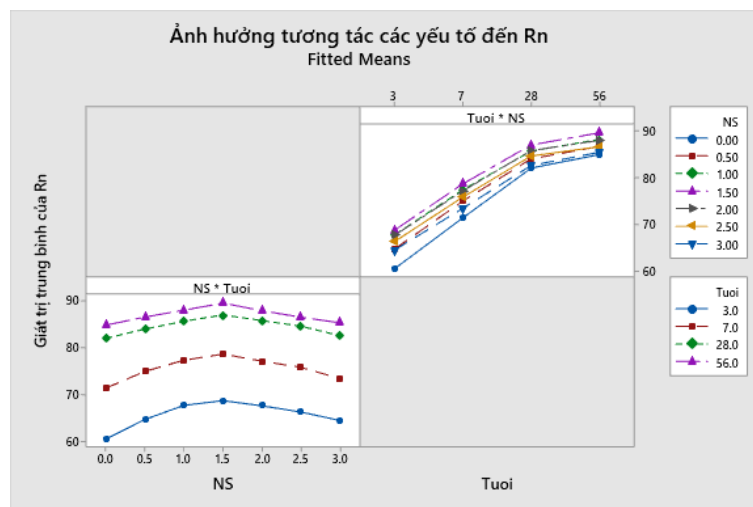
Để đánh giá độ tin cậy và sự ảnh hưởng của các yếu tố đến kết quả thu được từ quá trình thí nghiệm, kết quả thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS được phân tích thống kê bằng phần mềm thống kê Minitab19.

a. Phân tích phần dư thống kê và tương tác của các yếu tố



Hình 2.18. Biểu đồ phân tích phần dư thống kê kết quả thí nghiệm R_n

Thông qua các đồ thị đánh giá số dư R_n (Hình 2.18) cho thấy, đồ thị Phân phối chuẩn so sánh xác suất phân bố các số dư (hiển thị bằng các điểm) so với phân phối chuẩn (hiển thị bằng đường thẳng nét liền). Đồ thị thể hiện các số dư phân bố rất gần so với phân phối chuẩn. Đồ thị tần suất hiển thị tần suất xuất hiện các số dư. Đồ thị đánh giá đồng phương sai biểu thị quan hệ giữa các số dư và giá trị tương ứng của mô hình hồi quy, các giá trị ngẫu nhiên, không theo quy luật và phân bố đều hai bên qua đường “0” như vậy thỏa mãn các điều kiện áp dụng phương pháp thống kê thực nghiệm.



Hình 2.19. Biểu đồ ảnh hưởng tương tác các yếu tố đến R_n

Kết quả phân tích ảnh hưởng tương tác các yếu tố tỉ lệ NS và ngày tuổi đến R_n được thể hiện thông qua Hình 2.19. Kết quả tương tác yếu tố Tuổi*NS cho thấy, ảnh hưởng của NS đến cường độ nén BTCĐC ở giai đoạn từ 3 đến 28 ngày lớn hơn giai đoạn từ 28 đến 56 ngày.

b. Phân tích hồi quy – phương sai:

Bảng 2.19. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm R_n

Số hạng	Hệ số	Hệ số SE	Giá trị phân phối T	Giá trị xác suất P
Hằng số	61,421	0,626	98,16	0,000
NS	7,448	0,703	10,59	0,000
T	1,0771	0,0416	25,88	0,000
NS*NS	-2,202	0,215	-10,24	0,000
T*T	-0,011966	0,000651	-18,38	0,000
NS*T	-0,01532	0,00886	-1,73	0,086
R-sq = 92,48% R-sq(adj) = 92,24% R-sq(pred) = 92,00%				
Phương trình hồi quy: $R_n = 61,421 + 7,448NS + 1,0771T - 2,202NS*NS - 0,011966 T*T - 0,01532NS*T$				

Bảng 2.20. Phân tích phương sai ANOVA mô hình hồi quy R_n

Thành phần	Bậc tự do	Tổng bình phương	Trung bình bình phương	Giá trị phân phối F	Giá trị xác suất P
Mô hình	5	11612,0	2322,40	398,17	0,000
NS	1	654,1	654,12	112,15	0,000
T	1	3905,2	3905,18	669,53	0,000
NS*NS	1	611,2	611,18	104,78	0,000
T*T	1	1970,7	1970,67	337,86	0,000
NS*T	1	17,4	17,45	2,99	0,086

Sai số	162	944,9	5,83		
Độ vênh	22	879,3	39,97	85,23	0,000
Sai số thuần	140	65,7	0,47		
Tổng cộng	167	12556,9			

Xem xét các thành phần riêng lẻ của mô hình hồi quy (tuyến tính, bình phương và tương tác), ta thấy giá trị P của các thành phần này đều rất nhỏ, các hệ số quyết định R^2 đều lớn hơn 90%, đạt mức độ tin cậy cao (khoảng nghiên cứu từ 3 đến 56 ngày tuổi). Tuy nhiên thành phần thể hiện mối tương tác giữa tuổi và tỷ lệ NS ($NS*T$) có giá trị xác suất $P = 0,086 > 0,05$, nên không có ý nghĩa về mặt thống kê. Phương trình hồi quy tổng quát được viết rút gọn lại như Phương trình (2.11).

$$R_n = 61,421 + 7,448NS + 1,0771T - 2,202NS*NS - 0,011966T*T \quad (2.11)$$

2.3.4. Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS

Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn được tiến hành theo tiêu chuẩn ASTM C78 [27]. Mẫu sau khi bảo dưỡng được thí nghiệm uốn bốn điểm theo các mức ngày tuổi như kế hoạch. Máy dùng để thí nghiệm cường độ kéo khi uốn của mẫu bê tông là loại máy nén điện tử TTM 2000 với tải trọng tối đa 2000kN. Tốc độ gia tải khi uốn 0,1MPa/s được giữ không thay đổi đến khi mẫu phá hoại.



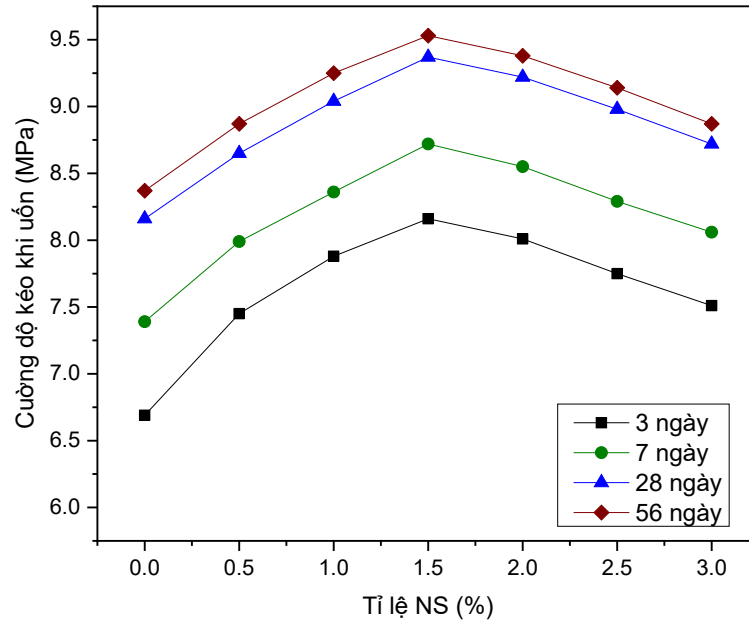
Hình 2.20. Thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS

2.3.4.1. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi uốn thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM

C78 [27] được thể hiện trong phụ lục II (Bảng kết quả thí nghiệm cường độ nén BTCĐC sử dụng NS).

Ảnh hưởng của NS đến cường độ kéo khi uốn BTCĐC theo các ngày tuổi được thể hiện thông qua biểu đồ Hình 2.21.



Hình 2.21. Ảnh hưởng của NS đến cường độ kéo khi uốn của BTCĐC

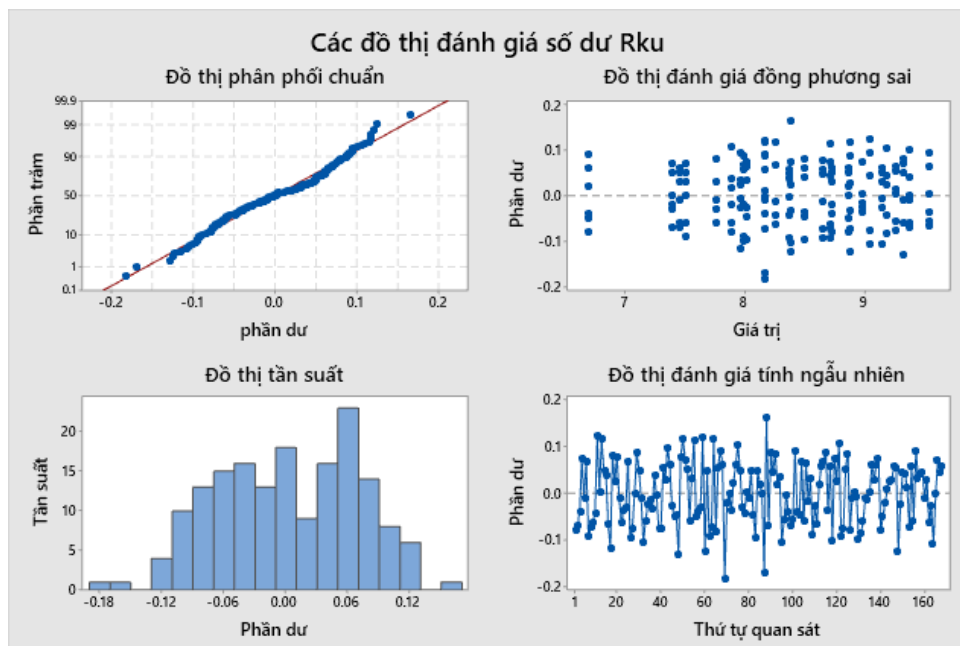
Theo kết quả phân tích Hình 2.21, cường độ kéo khi uốn BTCĐC tăng lên khi sử dụng NS. Cường độ kéo khi uốn được cải thiện đáng kể với tỷ lệ NS thêm vào từ 0,5÷1,5% và đạt cao nhất ở tỷ lệ 1,5%. Khi sử dụng tỷ lệ từ 2÷3% NS sự gia tăng bị ảnh hưởng theo xu hướng giảm so với tỷ lệ 1,5%. Cụ thể cường độ chịu kéo khi uốn của BTCĐC sử dụng 1,5%NS tăng lên so với BTCĐC đối chứng (0%NS) và thay đổi theo ngày tuổi là 21,07%; 18%; 14,82%; 13,86% tương ứng 3 ngày, 7 ngày, 28 ngày và 56 ngày tuổi. Tương tự như cường độ nén, cường độ kéo khi uốn BTCĐC được tăng lên nhiều hơn ở giai đoạn tuổi sớm (3 ngày, 7 ngày) khi sử dụng NS.

Kết quả của nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả mang lại đối với cường độ kéo khi uốn từ việc sử dụng NS trong BTCĐC tương tự như các nghiên cứu trước đây của Khaloo và cộng sự [70], Givi và cộng sự [50], Quercia và cộng sự [84], Bastami và cộng sự [31], Chithra và cộng sự [39]. Những ảnh hưởng làm giảm cường độ khi sử dụng tỷ lệ NS vượt quá mức tối ưu cũng được các tác giả trên đề cập trong các nghiên cứu.

2.3.4.2. Phân tích thống kê kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS

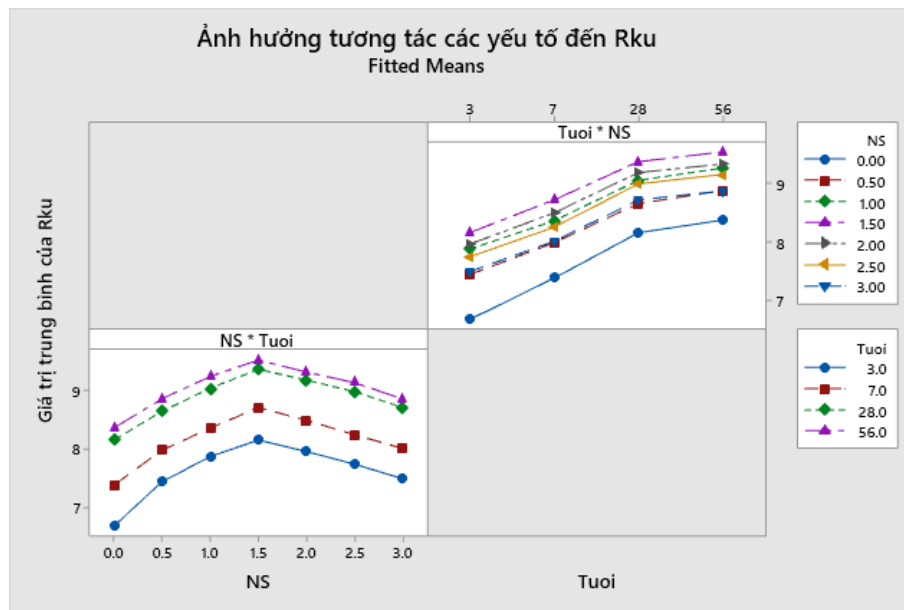
Tương tự như phân tích cường độ nén, kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi uốn BTCĐC sử dụng NS được phân tích thống kê bằng phần mềm thống kê Minitab19.

a. Phân tích phần dư thống kê và tương tác của các yếu tố



Hình 2.22. Biểu đồ phân tích phần dư thống kê thí nghiệm R_{ku}

- Thông qua các đồ thị đánh giá số dư R_{ku} Hình 2.22 cho thấy, đồ thị Phân phối chuẩn so sánh xác suất phân bố các số dư (hiển thị bằng các điểm) so với phân phối chuẩn (hiển thị bằng đường thẳng nét liền). Đồ thị thể hiện các số dư phân bố rất gần so với phân phối chuẩn. Đồ thị tần suất hiển thị tần suất xuất hiện các số dư. Đồ thị đánh giá đồng phương sai biểu thị quan hệ giữa các số dư và giá trị tương ứng của mô hình hồi quy, các giá trị ngẫu nhiên, không theo quy luật và phân bố đều hai bên qua đường “0” như vậy thỏa mãn các điều kiện áp dụng phương pháp thống kê thực nghiệm.



Hình 2.23. Biểu đồ ảnh hưởng tương tác các yếu tố đến R_{ku}

Kết quả phân tích ảnh hưởng tương tác các yếu tố tỉ lệ NS và ngày tuổi đến R_{ku} được thể hiện thông qua Hình 2.23. Kết quả tương tác yếu tố $Tuoi*NS$ cho thấy, ảnh hưởng của NS đến cường độ kéo khi uốn BTCĐC ở độ tuổi từ 3 đến 28 ngày tuổi lớn hơn giai đoạn từ 28 đến 56 ngày.

b. Phân tích hồi quy – phương sai:

Bảng 2.21. Thông tin mô hình hồi quy cho kết quả thí nghiệm R_{ku}

Số hạng	Hệ số	Hệ số SE	Giá trị phân phối T	Giá trị xác suất P
Hằng số	6,7469	0,0391	172,62	0,000
NS	1,3918	0,0439	31,68	0,000
T	0,07265	0,00260	27,94	0,000
NS*NS	-0,3948	0,0134	-29,38	0,000
T*T	-0,000792	0,000041	-19,49	0,000
NS*T	-0,001054	0,000553	-1,90	0,059
R-sq = 95,47% R-sq(adj) = 95,33% R-sq(pred) = 95,16%				
Phương trình hồi quy: $R_{ku} = 6,7469 + 1,3918NS + 0,07265T - 0,3948NS*NS - 0,000792T*T - 0,001054NS*T$				

Bảng 2.22. Phân tích phương sai ANOVA cho mô hình hồi quy R_{ku}

Thành phần	Bậc tự do	Tổng bình phương	Trung bình bình phương	Giá trị phân phối F	Giá trị xác suất P
Mô hình	5	77,7598	15,5520	683,42	0,000
NS	1	22,8403	22,8403	1003,71	0,000
T	1	17,7685	17,7685	780,83	0,000
NS*NS	1	19,6374	19,6374	862,96	0,000
T*T	1	8,6442	8,6442	379,87	0,000
NS*T	1	0,0825	0,0825	3,63	0,059
Sai số	162	3,6865	0,0228		
Độ vênh	22	2,9128	0,1324	23,96	0,000
Sai số thuần	140	0,7737	0,0055		
Tổng cộng	167	81,4463			

Phương trình hồi quy cường độ kéo khi uốn của BTCĐC theo các ngày tuổi và tỉ lệ NS xác định với các hệ số đều có ý nghĩa thống kê (khoảng nghiên cứu 3 ngày đến 56 ngày tuổi), giá trị xác suất P nhỏ so với mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ và các hệ số quyết định R^2 đều lớn hơn 90%, đạt mức độ tin cậy cao. Tuy nhiên, khi xem xét các thành phần riêng rẽ của mô hình hồi quy (tuyến tính, bình phương và tương tác), ta thấy thành phần thể hiện mối tương tác giữa tuổi và tỉ lệ NS (NS*T) có giá trị xác suất $P = 0,059 > 0,05$, nên không có ý nghĩa về mặt thống kê. Phương trình hồi quy tổng quát được viết rút gọn lại như Phương trình (2.12):

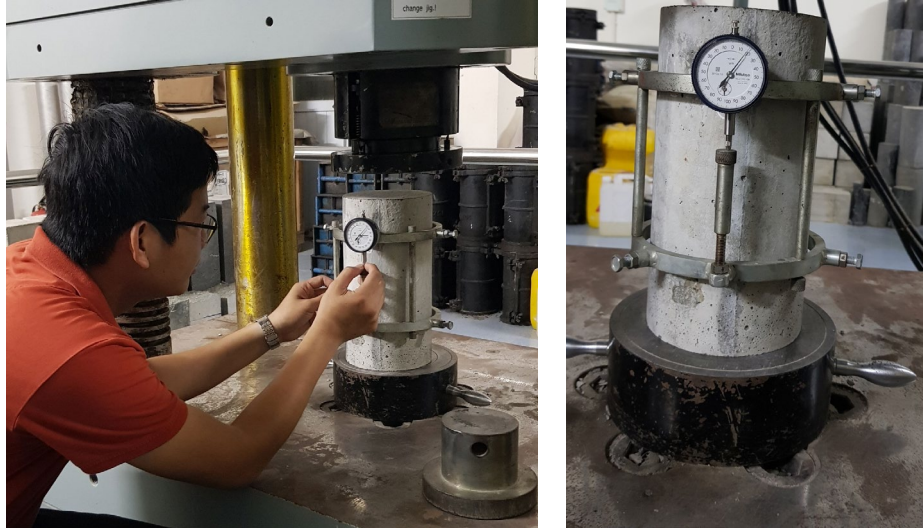
$$R_{ku} = 6,7469 + 1,3918NS + 0,07265T - 0,3948NS * NS - 0,000792T*T \quad (2.12)$$

2.3.5. Thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS

Mô đun đàn hồi của bê tông là tính chất cơ học quan trọng trong các mô hình tính toán kết cấu cũng như các nghiên cứu ứng xử của vật liệu bê tông.

Mô đun đàn hồi của BTCĐC sử dụng NS được thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C469 [28]. Mẫu trụ hình trụ có đường kính 150mm, chiều cao 300mm. Thí nghiệm mô đun đàn hồi thực hiện trên các mẫu được bảo dưỡng đến 28

ngày tuổi. Thí nghiệm được tiến hành bằng cách gắn đồng hồ đo biến dạng thiên phân kế (một vạch ứng với 0,001mm), lên mẫu thử thông qua giá chuyên dụng như Hình 2.24. Thí nghiệm được thực hiện bằng máy nén điện tử TTM 2000 với tải trọng tối đa 2000kN.



Hình 2.24. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS

2.3.5.1. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS

Trình tự tính toán và công thức xác định mô đun đàn hồi được thực hiện theo ASTM C469 [28]:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (2.13)$$

trong đó:

E : mô đun đàn hồi (MPa);

σ_1 : ứng suất tương ứng với biến dạng ε_1 (MPa);

σ_2 : ứng suất tương ứng với 40% của tải trọng phá hủy (MPa);

ε_2 : biến dạng tương đối tương ứng với ứng suất σ_2 .

Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi sau khi tính toán được tổng hợp trong Bảng 2.23.

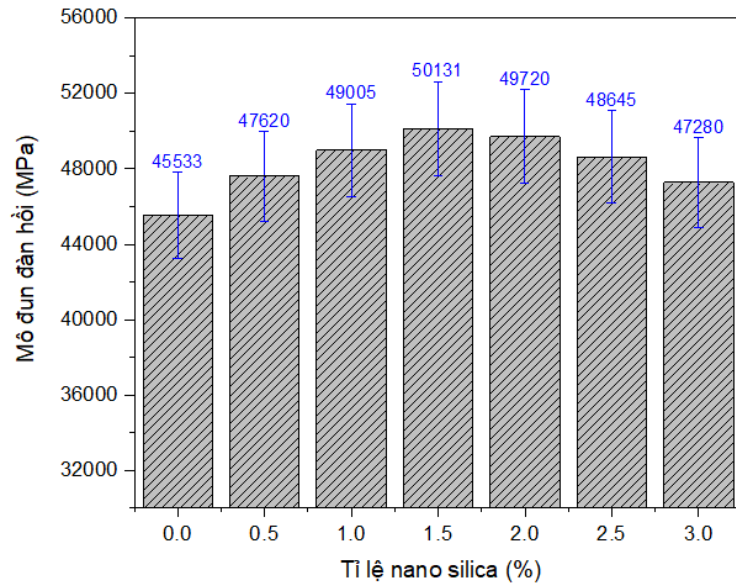
Bảng 2.23. Tổng hợp kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS

STT	Cấp phối	Mẫu	Mô đun đàn hồi (MPa)	Giá trị trung bình (MPa)
1	NS0,0	1	45672	45533
2		2	45846	
3		3	45000	
4		4	45522	
5		5	44810	
6		6	46349	
7	NS0,5	1	47206	47620
8		2	48030	
9		3	47813	
10		4	47903	
11		5	48095	
12		6	46672	
13	NS1,0	1	49516	49005
14		2	48507	
15		3	48300	
16		4	48636	
17		5	49851	
18		6	49219	
19	NS1,5	1	49588	50131
20		2	50615	
21		3	50164	

STT	Cấp phối	Mẫu	Mô đun đàn hồi (MPa)	Giá trị trung bình (MPa)
22		4	50000	
23		5	50725	
24		6	49697	
25	NS2,0	1	48906	49720
26		2	50317	
27		3	50469	
28		4	49104	
29		5	49692	
30		6	49833	
31	NS2,5	1	48841	48645
32		2	48438	
33		3	48529	
34		4	49104	
35		5	49048	
36		6	47910	
37	NS3,0	1	47879	47280
38		2	47656	
39		3	46667	
40		4	47059	
41		5	47969	
42		6	46449	

2.3.5.2. Phân tích kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS

Kết quả mô đun hồi BTCĐC sử dụng NS được thể hiện trên biểu đồ Hình 2.25.

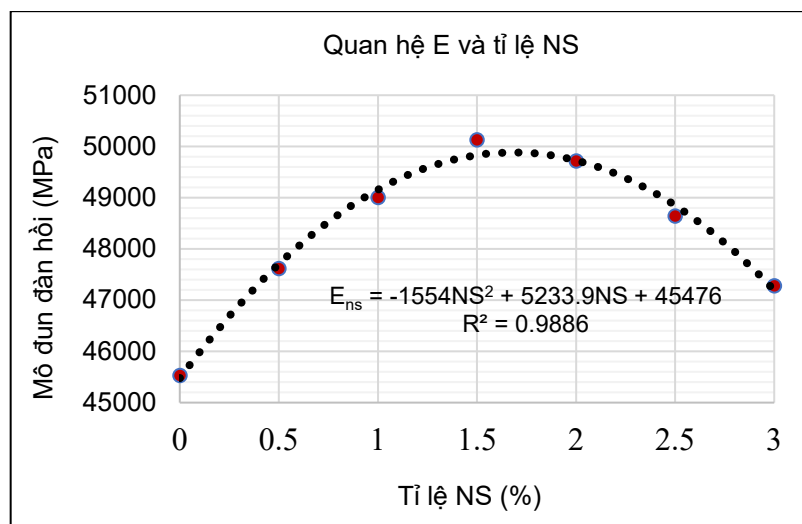


Hình 2.25. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi BTCĐC sử dụng NS

* Tương quan giữa mô đun đàn hồi và tỉ lệ NS:

Mối tương quan của mô đun đàn hồi và tỉ lệ NS đối với BTCĐC cường độ đặc trưng 70MPa được xây dựng thông qua kết quả thí nghiệm như Phương trình (2.17).

$$E_{NS} = -1554NS^2 + 5233,9NS + 45476 \quad (\text{MPa}) \quad (2.17)$$



Hình 2.26. Quan hệ giữa mô đun đàn hồi và tỉ lệ NS

Mô đun đàn hồi của BTCĐC ở 28 ngày tuổi được cải thiện khi sử dụng nano silica. Theo một số tác giả Quercia [83], Sobolev và cộng sự [94], nguyên nhân làm gia tăng mô đun đàn hồi của bê tông khi sử dụng NS chủ yếu là do chất lượng vùng chuyển tiếp và các sản phẩm gel C-S-H được cải thiện. Kết quả được thể hiện qua Hình 2.25 cho thấy, tỉ lệ 1.5% NS giúp BTCĐC cải thiện mô đun đàn hồi tốt nhất trong các tỉ lệ thực hiện thí nghiệm.

2.4. Kết luận chương 2

Kết quả nghiên cứu của chương 2 đã giải quyết được một số vấn đề như sau:

Các vật liệu thành phần chế tạo mẫu BTCĐC sử dụng NS được lựa chọn và thí nghiệm kiểm tra các tính chất kỹ thuật. NS được thí nghiệm xác định kích thước, hình dạng hạt và kiểm tra cấu trúc vô định hình để đảm bảo điều kiện phản ứng pozzolanic trong hỗn hợp bê tông.

Lựa chọn cường độ đặc trưng và thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng trong công trình cầu với sự thay đổi hàm lượng NS sử dụng từ 0 đến 3%. Kết quả xác định được 7 cấp phối BTCĐC sử dụng NS với cường độ đặc trưng 70MPa. Bên cạnh đó, một quy trình trộn BTCĐC sử dụng NS đã được thiết lập trên cơ sở tham khảo và thử nghiệm các mẻ trộn.

Kết quả thí nghiệm cường độ nén và cường độ kéo khi uốn được đánh giá thống kê và phân tích độ tin cậy. Quan hệ giữa tỉ lệ NS đến cường độ nén và kéo khi uốn cũng được xây dựng bằng các phương trình hồi quy dựa trên sự phát triển cường độ theo các ngày tuổi. Ảnh hưởng của NS đến cường độ nén và cường độ kéo khi uốn theo các ngày tuổi (3 ngày, 7 ngày, 28 ngày và 56 ngày) được nghiên cứu. Kết quả cho thấy, cường độ BTCĐC phát triển ở giai đoạn tuổi sớm tốt hơn khi sử dụng NS.

Hàm lượng NS được sử dụng trong BTCĐC từ 0 đến 3%, cường độ nén và kéo khi uốn BTCĐC tăng dần khi tỉ lệ NS sử dụng nhỏ hơn hoặc bằng 1,5%. Khi tỉ lệ NS tăng lên từ 2 đến 3% cường độ tăng so với bê tông đối chứng (0% NS) và có xu hướng giảm so với tỉ lệ NS sử dụng 1,5%.

Ngoài cường độ nén và kéo khi uốn, mô đun đàn hồi cũng được khảo sát với sự ảnh hưởng của NS ở 28 ngày tuổi. Kết quả cũng thể hiện rõ sự ảnh hưởng NS đến mô đun đàn hồi của BTCĐC. Tương tự như các giá trị cường độ, mô đun đàn hồi của BTCĐC được cải thiện tốt nhất khi sử dụng NS với tỉ lệ 1,5%. Khi tỉ lệ NS vượt quá 1,5%, sự cải thiện bắt đầu giảm xuống.

Các kết quả thiết kế thành phần cấp phối BTCĐC sử dụng NS và các tính chất cơ học chủ yếu sẽ được sử dụng để làm cơ sở cho các thí nghiệm và tính toán các đặc trưng phá hủy, ứng dụng BTCĐC trong các chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 3. THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH ĐẶC ĐIỂM PHÁ HỦY BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG NANO SILICA

Nội dung chương này tập trung nghiên cứu xác định các tham số và đặc điểm phá hủy BTCĐC sử dụng NS ở dạng I. Một phương pháp thí nghiệm đặc biệt bằng cách kiểm soát độ mở rộng vết nứt sẽ được áp dụng để xác định các tham số phá hủy của BTCĐC sử dụng NS.

3.1. Đề cương thí nghiệm

3.1.1. Mục đích thí nghiệm

Xác định các tham số và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao. Đánh giá sự ảnh hưởng của nano silica đến các tham số và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao với cường độ đặc trưng 70MPa.

3.1.2. Cơ sở thí nghiệm

Đề cương thí nghiệm đặc điểm phá hủy các mẫu bê tông cường độ cao có sử dụng nano silica được tham khảo các tài liệu và tiêu chuẩn như sau:

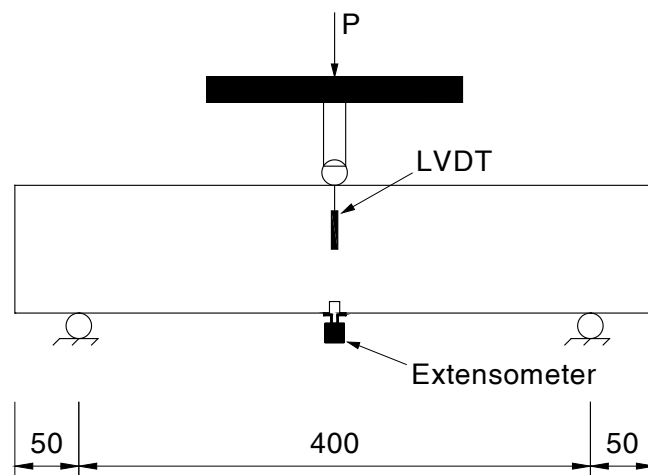
- RILEM 50-FMC [90], xác định năng lượng phá hủy của vữa và bê tông bằng thí nghiệm uốn ba điểm trên mẫu dầm có rãnh;
- Các kết quả nghiên cứu về cơ học phá hủy của bê tông thường và bê tông cường độ cao đã được công bố trên thế giới;
- Cơ sở vật chất, các thiết bị có liên quan trực tiếp thí nghiệm phá hủy của phòng thí nghiệm Trường đại học Giao thông Vận tải và các phòng thí nghiệm ở Việt Nam.

3.1.3. Phương pháp thí nghiệm

Hiện nay có nhiều phương pháp thí nghiệm cơ học phá hủy của bê tông như đã đề cập trong Chương 1 của luận án. Trong số các phương pháp trên, phương pháp uốn ba điểm mẫu dầm và phương pháp tách trên mẫu lập phương có rãnh (nứt tạo trước) được sử dụng phổ biến nhất. Hai phương pháp này được sử dụng trong nhiều nghiên cứu về đặc điểm phá hủy và lan truyền nứt trong bê

tông. Sau khi nghiên cứu và tìm hiểu khả năng tiến hành thí nghiệm của hai phương pháp với điều kiện máy móc thiết bị ở Việt Nam, nghiên cứu sinh quyết định chọn phương pháp thí nghiệm uốn ba điểm mẫu đầm có rãnh để xác định các tham số và đặc điểm phá hủy của BTCDC sử dụng NS.

Thí nghiệm uốn ba điểm mẫu đầm có rãnh được sử dụng để xác định các tham số và đặc điểm phá hủy của bê tông, thí nghiệm được miêu tả như sơ đồ trong Hình 3.1. Thí nghiệm phá hủy không giống các thí nghiệm xác định cường độ hay các tính chất cơ học khác, việc kiểm soát tải trọng không được sử dụng mà thay bằng cách kiểm soát độ võng hoặc độ mở rộng vết nứt trên mẫu. Tất cả thí nghiệm uốn ba điểm đều được thực hiện trong điều kiện khép kín. Độ võng hoặc độ mở rộng vết nứt sẽ được kiểm soát như một hàm tuyến tính theo thời gian, tốc độ phát triển của chúng rất nhỏ để đảm bảo thí nghiệm ổn định. Tải trọng được tự động điều chỉnh tăng nhanh hay chậm hoặc có thể giảm đều phụ thuộc vào ứng xử kết cấu thông qua đầu đo. Hay nói cách khác, đầu đo là thiết bị tự động sử dụng lõi cảm biến có khả năng phản hồi thông tin hai chiều để điều chỉnh độ lớn của tải trọng theo giá trị đo (độ võng hoặc độ mở rộng vết nứt). Các thông số được đo đạc trong suốt quá trình thí nghiệm là tải trọng tác dụng, độ võng của đầm được đo bằng LVDT, độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD) được đo bằng đầu đo độ mở rộng vết nứt (Extensometer) như trên sơ đồ bố trí thí nghiệm Hình 3.1.



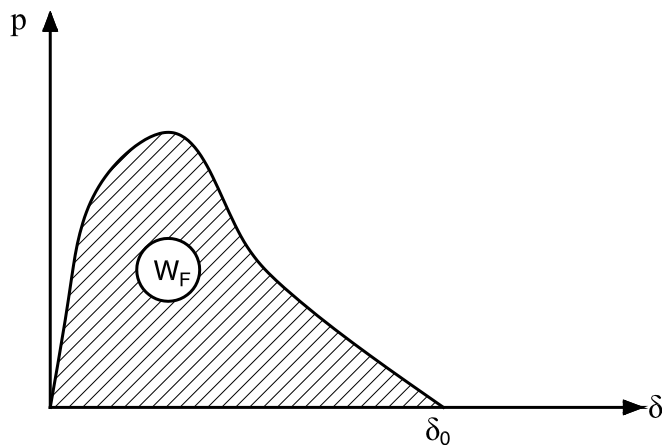
Hình 3.1. Sơ đồ thí nghiệm uốn ba điểm trên mẫu đầm có rãnh

Trong các khuyến nghị của RILEM cần tiến hành thí nghiệm sao cho tốc độ tăng độ võng giữa nhịp là một hằng số có giá trị 0,2mm/phút. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã đề xuất một sự thay đổi nhỏ đối với yêu cầu này [36]. Thay vì thực hiện các thí nghiệm dưới sự kiểm soát độ võng giữa nhịp thì các thí nghiệm được thực hiện dưới sự kiểm soát độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD). Hơn nữa, theo nhiều tác giả, bằng cách kiểm soát thí nghiệm thông qua CMOD, thí nghiệm sẽ diễn ra ổn định hơn [36][71][82].

3.2. Các đặc trưng phá hủy bê tông

3.2.1. Năng lượng phá hủy

Năng lượng phá hủy G_F là tham số quan trọng nhất trong ứng xử phá hủy của bê tông để miêu tả cơ chế của vết nứt. Trong mô hình nứt dính kết của Hillerborg cùng cộng sự [57], các tham số như năng lượng phá hủy, cường độ kéo f_t và mối quan hệ tải trọng - độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD) sẽ mô tả hoàn toàn đặc tính phá hủy của bê tông. G_F được coi một thước đo của năng lượng bị hấp thụ trong quá trình tạo ra và tách rời hoàn toàn một đơn vị diện tích nứt dính kết.



Hình 3.2. Công phá hủy là diện tích dưới đường cong tải trọng – độ võng ($p - \delta$)

Năng lượng phá hủy G_F đối với bê tông thường được xác định bằng phương pháp công phá hủy theo hướng dẫn của RILEM FMC 50 (1985). Năng lượng phá hủy G_F được tính theo Công thức (3.1).

$$G_F = \frac{W_F + mg\delta_0}{A_L} \quad (3.1)$$

trong đó :

G_F năng lượng phá hủy (Nmm/mm²);

W_F là diện tích phía dưới đường cong tải trọng - độ võng (N.mm);

m là tổng khối lượng của dầm giữa các gối (kg);

g là gia tốc trọng trường (m/s²);

δ_0 là độ võng lớn nhất của mẫu dầm (mm);

A_L là diện tích nguyên của dầm tại mặt cắt tạo rãnh (mm²).

3.2.2. Chiều dài đặc trưng

Theo CEB – FIP [40], chỉ riêng năng lượng phá hủy hay độ bền phá hủy không đủ mô tả độ giòn của bê tông. Một tham số khác là chiều dài đặc trưng l_{ch} đã được sử dụng. Về cơ bản nó là một phép đo độ giòn của vật liệu. Giá trị của tham số này càng nhỏ thì vật liệu càng giòn. Chiều dài đặc trưng được cho bởi biểu thức Công thức (3.2):

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f_t^2} \quad (3.2)$$

trong đó:

l_{ch} là chiều dài đặc trưng (mm);

E là mô đun đàn hồi bê tông (MPa);

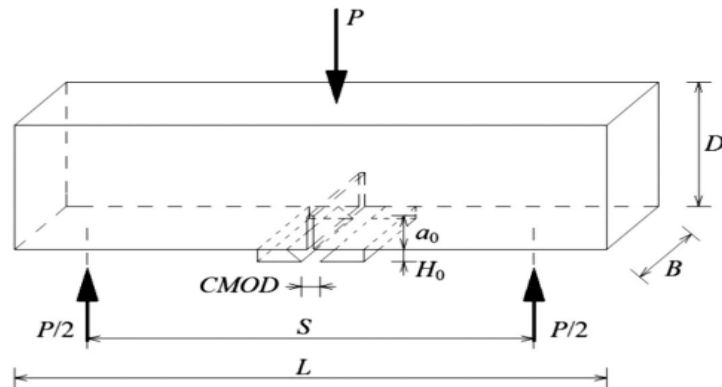
G_F là năng lượng phá hủy (Nmm/mm²);

f_t là cường độ kéo bê tông (MPa);

Chiều dài đặc trưng l_{ch} có thể được hiểu như là một tỷ lệ giữa năng lượng phá hủy G_F và mật độ năng lượng biến dạng tại lúc phá hủy $\frac{f_t^2}{E}$.

3.2.3. Độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD)

Độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD) có thể định nghĩa là sự tăng trưởng chiều rộng của miệng vết nứt tại đầu rãnh trong quá trình gia tải [68]. Độ mở rộng miệng vết nứt được biết đến là một chỉ số để đánh giá đặc tính phá hủy của vật liệu bê tông. Các vết nứt hình thành từ đầu rãnh và mở rộng lan truyền khi gia tải.



Hình 3.3. Mô tả CMOD trong thí nghiệm uốn ba điểm [68]

Đường cong quan hệ tải trọng – CMOD (P-CMOD) đại diện cho đặc tính phá hủy của bê tông theo các giai đoạn khác nhau. Theo lý thuyết đàn hồi và cơ học phá hủy, mối quan hệ P-CMOD tuân theo mối quan hệ tuyến tính trước khi vết nứt xuất hiện. Sau khi vết nứt xuất hiện mối quan hệ tuyến tính của P-CMOD không còn nữa. Đường cong sau đỉnh thể hiện đặc tính mềm hóa của bê tông. Tải trọng gây nứt có thể được xác định bởi P-CMOD tại vị trí đường cong chuyển sang phi tuyến. Vị trí này được xem là vị trí chuyển từ giai đoạn đàn hồi tuyến tính sang giai đoạn đàn hồi phi tuyến, lúc đó vết nứt dính kết bắt đầu phát triển [68].

3.2.4. Chiều dài vết nứt

Một công thức đơn giản để tính chiều dài vết nứt trong quá trình phá hủy theo đường cong P-CMOD được đo trên thí nghiệm uốn ba điểm được đề xuất bởi Xu và Reinhardt [106]. Công thức để xác định chiều dài vết nứt dựa trên thí nghiệm uốn ba điểm được viết lại như Công thức (3.3).

$$a = \frac{2}{\pi}(D + H_0) \arctan \sqrt{\frac{B \times E \times CMOD}{32.6P}} - 0.1135 - H_0 \quad (3.3)$$

trong đó:

a là chiều dài nứt (mm);

D là chiều cao mẫu dầm thí nghiệm (mm);

B là chiều rộng mẫu dầm (mm);

H_0 là chiều dày của mẫu giữ đầu đo CMOD (mm);

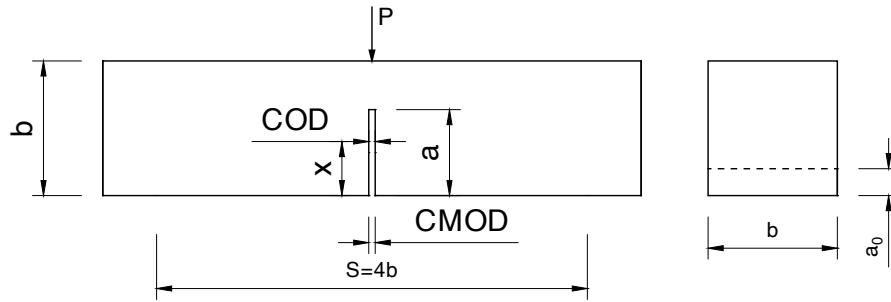
E là mô đun đàn hồi (MPa);

$CMOD$ là chuyển vị mở rộng miệng vết nứt của thí nghiệm uốn ba điểm mẫu dầm có rãnh (mm);

P là tải trọng (N).

3.2.5. Độ mở rộng đầu vết nứt (độ mở rộng vết nứt danh định)

Độ mở rộng vết nứt COD dọc theo đường nứt có thể được đánh giá theo giá trị của độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD) và vị trí x tương ứng của điểm được đề xuất bởi Jenq và Shah [66].



Hình 3.4. Quan hệ độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD) và độ mở rộng vết nứt tương ứng x (COD) [66]

$$COD(x) = CMOD \left\{ (1 - x/a)^2 + (1.018 - 1.149a/D)[x/a - (x/a)^2] \right\}^{1/2} \quad (3.4)$$

Độ mở rộng đầu vết nứt (CTOD) hay gọi là độ mở rộng vết nứt danh định (w) có thể được tính thông qua độ mở rộng miệng vết nứt bằng cách thay biến x

bằng chiều dài rãnh a_0 .

$$w = CTOD = CMOD \left\{ (1 - a_0/a)^2 + (1.018 - 1.149a/D)[a_0/a - (a_0/a)^2] \right\}^{1/2} \quad (3.5)$$

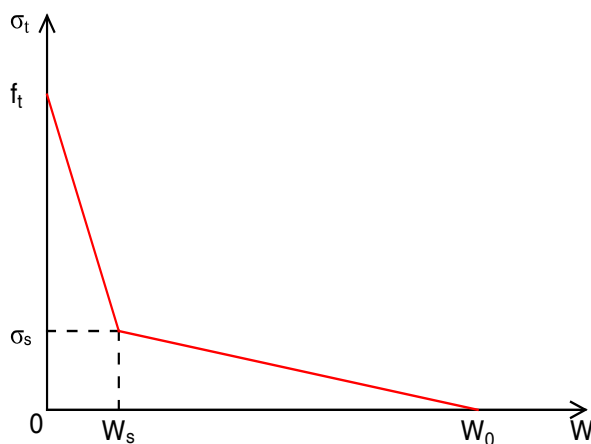
trong đó:

CMOD là độ mở rộng miệng vết nứt từ thí nghiệm uốn ba điểm (mm);

a là chiều dài vết nứt (mm).

3.2.6. Luật (quan hệ) mềm hóa bê tông

Luật mềm hóa của bê tông miêu tả các đặc trưng của vùng phát triển vết nứt và là tham số đầu vào để mô phỏng phần tử hữu hạn và tính toán các đặc trưng phá hủy của bê tông. Luật mềm hóa kéo của bê tông được nghiên cứu bởi nhiều tác giả với các dạng khác nhau như tuyến tính, song tuyến và dạng hàm mũ. Dạng mềm hóa song tuyến được xem là dạng khá đơn giản, dễ áp dụng trong tính toán và có độ chính xác cao, vì thế nó được sử dụng phổ biến để miêu tả ứng xử phá hủy của bê tông. Trong các nghiên cứu về sức kháng lan truyền nứt bê tông của nhiều tác giả [41][71][104], luật mềm hóa song tuyến bê tông luôn là yếu tố quan trọng phục vụ tính toán. Hình dạng của đường cong mềm hóa song tuyến được miêu tả như Hình 3.5, với bốn tham số chủ yếu là f_t , σ_s , w_s và w_0 . Để xác định các tham số trên, nghiên cứu sử dụng mô hình tính toán của Petersson [77] và tham khảo mô hình tính toán của CEB-FIP 90 [40].



Hình 3.5. Luật mềm hóa song tuyến của bê tông

Các tham số quan hệ mềm hóa song tuyến được tính theo Petersson [77]:

$$\sigma_s = \frac{f_t}{3} \quad (3.6)$$

$$w_s = \frac{0,8G_F}{f_t} \quad (3.7)$$

$$w_0 = \frac{3,6G_F}{f_t} \quad (3.8)$$

trong đó:

σ_s là ứng suất tại điểm gãy của đường cong mềm hóa (MPa)

w_s là độ mở rộng vết nứt tại điểm gãy của đường cong mềm hóa (mm);

w_0 là độ mở rộng vết nứt không ứng suất (mm);

f_t là cường độ kéo của bê tông (MPa), được quy đổi thông qua cường độ kéo khi uốn theo công thức của CEP-FIP 90 [40];

G_F là năng lượng phá hủy (N.mm/mm²).

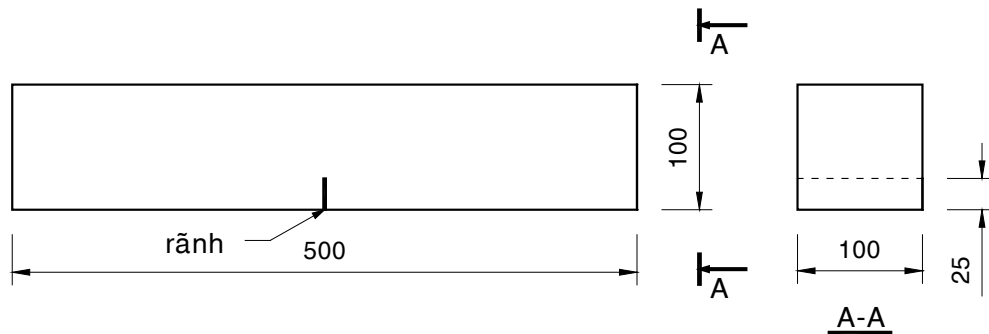
3.3. Thí nghiệm các tham số và đặc điểm phá hủy BTCĐC sử dụng NS

3.3.1. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Để đánh giá ảnh hưởng NS đến các tham số và đặc điểm phá hủy của bê tông, nghiên cứu sử dụng các cấp phối BTCĐC sử dụng NS đã được thiết kế thành phần và thí nghiệm kiểm tra các tính chất cơ học ở Chương 2. Tuy nhiên, đối với thí nghiệm phá hủy bê tông cần rất nhiều thời gian để thực hiện trên một mẫu (do kiểm soát thí nghiệm thông qua độ mở rộng miệng vết nứt). Do đó, các cấp phối thí nghiệm được lựa chọn dựa trên cơ sở phân tích kết quả các tính chất đã thực nghiệm. Theo kết quả nghiên cứu ở Chương 2, cấp phối BTCĐC 1,5% NS có các tính chất cơ học vượt trội, có nhiều tiềm năng ứng dụng trong kết cấu cầu. Vì thế, cấp phối này được chọn để thực hiện thí nghiệm phá hủy nhằm đánh giá các đặc trưng phá hủy để áp dụng hiệu quả các tính năng của bê tông. Bên cạnh đó, nghiên cứu sinh cũng tiến hành thí nghiệm cấp phối BTCĐC 0,5% NS,

do đây là cấp phối có tỉ lệ NS gần nhất với cấp phối đối chứng (0% NS). Điều đó có thể giúp nghiên cứu xác định ảnh hưởng NS đến các tham số phá hủy của bê tông một cách chính xác với tỉ lệ NS chênh lệch nhỏ nhất để so sánh với cấp phối đối chứng BTCĐC không sử dụng NS.

Mẫu đầm sử dụng trong thí nghiệm uốn ba điểm là một lăng trụ có kích thước 500x100x100mm với một rãnh rộng 2mm, chiều sâu rãnh là 25mm.



Hình 3.6. Kích thước mẫu đầm thí nghiệm uốn ba điểm

Tất cả các rãnh được cắt trên bề mặt vuông góc với mặt đỉnh của mẫu khi đúc mẫu. Theo Rilem [90], đầm thử nghiệm sau 28 ngày thì việc tạo rãnh được thực hiện tại ngày thứ 21. Sau đó, các mẫu được bảo dưỡng cho tới ngày thí nghiệm. Mỗi cấp phối được chuẩn bị 6 mẫu để phục vụ thí nghiệm.



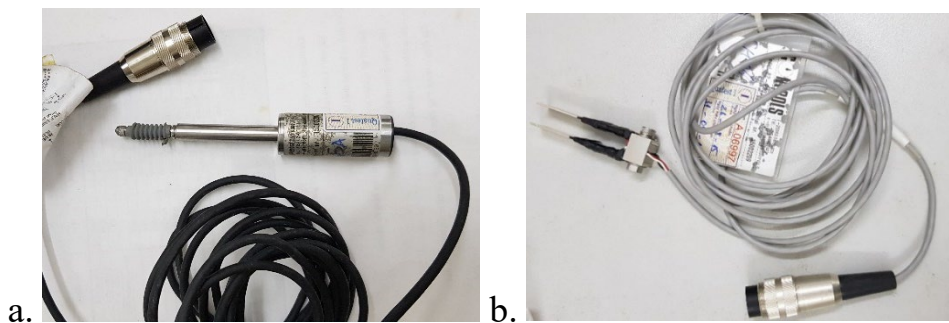
Hình 3.7. Chuẩn bị mẫu đầm thí nghiệm uốn ba điểm có rãnh mồi

3.3.2. Thiết bị thí nghiệm

Trong các thí nghiệm phá hủy bê tông, để thu được đường cong sau khi đạt đỉnh là không đơn giản. Đặc biệt đối với các loại bê tông có cường độ cao thì độ dòn sẽ rất lớn, các thiết bị chỉ kiểm soát tốc độ thí nghiệm thông qua tải trọng không thể thu được kết quả như mong muốn, việc thí nghiệm đòi hỏi các thiết bị chuyên dụng và có độ nhạy rất cao. Một thiết bị thí nghiệm có khả năng tùy chỉnh kiểm soát tốc độ gia tải theo độ mở rộng vết nứt hoặc độ võng (servo control) và hoạt động theo chế độ khép kín như Hình 3.8. Máy thí nghiệm Control có khả năng kết nối với các đầu đo độ võng (LVDT), đầu đo độ mở rộng miệng vết nứt (Extensometer) với độ nhạy rất cao để kiểm soát tốt tốc độ thí nghiệm và có thể thu được toàn bộ đường cong tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt và đường cong tải trọng – độ võng sau đỉnh từ thí nghiệm uốn ba điểm.



Hình 3.8. Máy thí nghiệm uốn Control

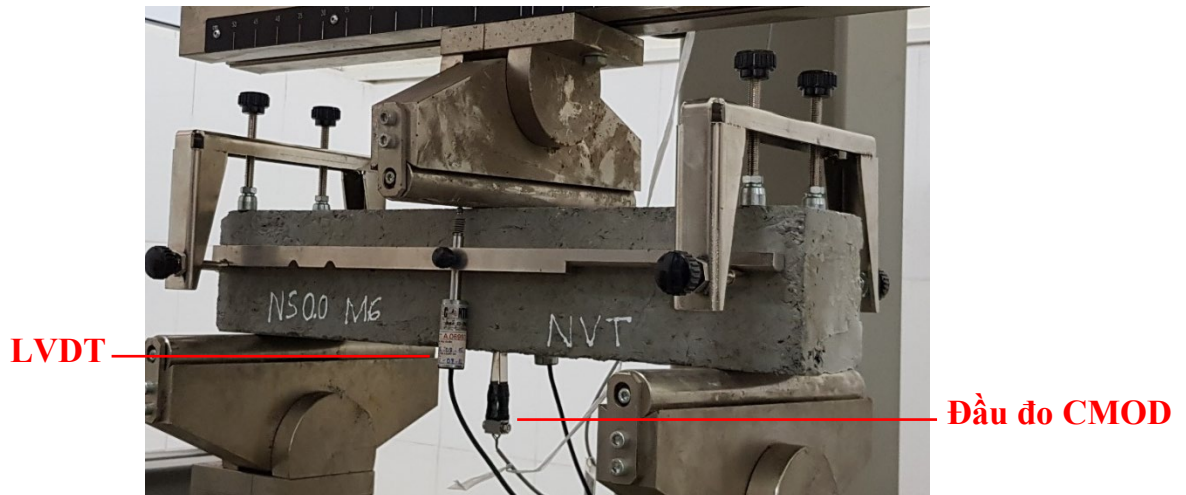


Hình 3.9. Đầu đo độ võng (a) và độ mở rộng miệng vết nứt (b)

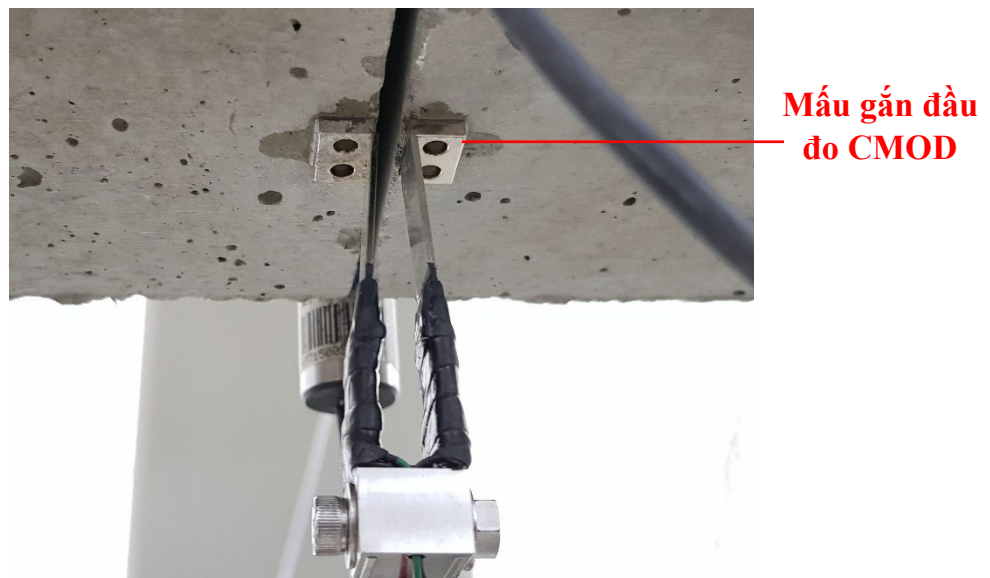
Đầu đo chuyển vị (LVDT) Hình 3.9 (a) được sử dụng để đo độ võng tại vị trí giữa dầm thí nghiệm nhằm thu được đường cong quan hệ tải trọng – độ võng. LVDT có hành trình đo 100mm. Hình 3.9 (b) là đầu đo độ mở rộng vết nứt có

độ chính xác cao. Đầu đo CMOD (Extensometer) là thiết bị đo độ mở rộng vết nứt chuyên dụng, có độ nhạy $1000 \times 10^{-6} \text{ strain/mm}$, khoảng đo tối đa 5mm và được gắn lên dầm thông qua các mẫu chuyên dụng như Hình 3.11. Đầu đo CMOD được sử dụng để thu được đường cong quan hệ tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt của thí nghiệm uốn ba điểm.

3.3.3. Tiến hành thí nghiệm



Hình 3.10. Bố trí thí nghiệm uốn ba điểm



Hình 3.11. Đầu đo CMOD được bố trí tại vị trí rãnh trên mẫu dầm

Tốc độ thí nghiệm được giữ ở một tốc độ nhất định bằng cách coi CMOD là một hàm tuyến tính của thời gian. Trong quá trình thí nghiệm, bắt đầu với một tốc độ $0,04 \mu\text{m/s}$. Không giống như các thí nghiệm cơ học bình thường, thí

nghiệm theo phương cơ học phá hủy cần phải mất một khoảng thời gian khá dài để thực hiện cho mỗi thí nghiệm.



Hình 3.12. Thực hiện thí nghiệm uốn ba điểm mẫu đầm có rãnh

3.4. Phân tích kết quả thí nghiệm

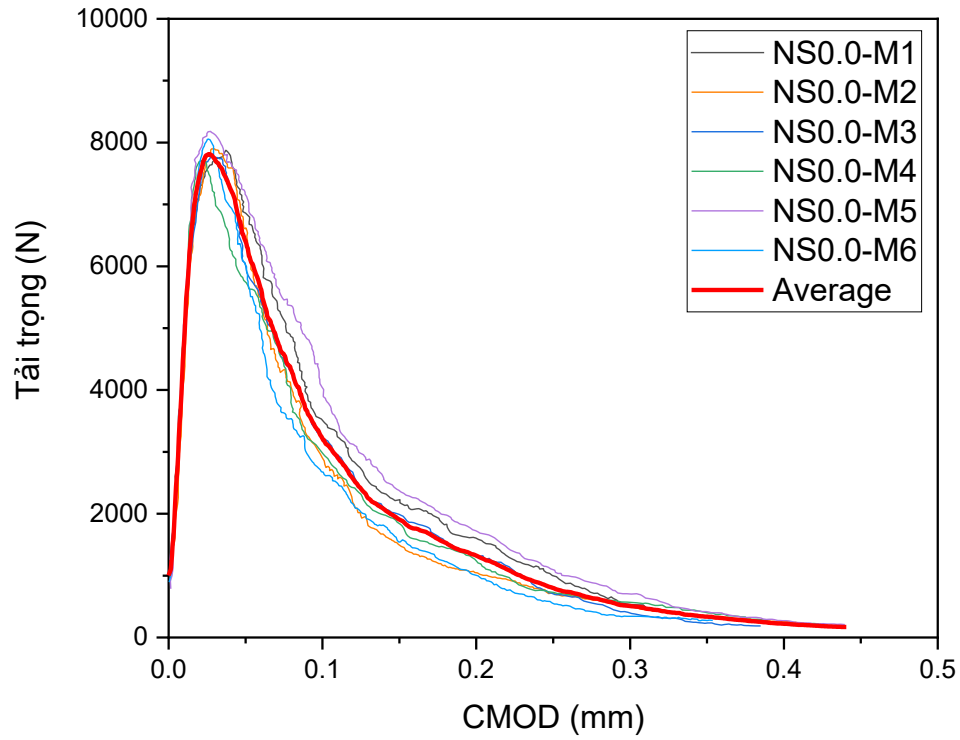
3.4.1. Đặc điểm phá hủy BTCĐC sử dụng NS

Trong quá trình thí nghiệm, độ mở rộng miệng vết nứt, độ võng tại giữa dầm và tải trọng tương ứng được ghi lại cho tới khi dầm phá hoại hoàn toàn. Các mẫu dầm bê tông cường độ cao đều có vết nứt phát triển trong một mặt phẳng thẳng đứng tương đối hẹp. Vết nứt được hình thành từ rãnh và mở rộng lên trên mẫu dầm thí nghiệm.

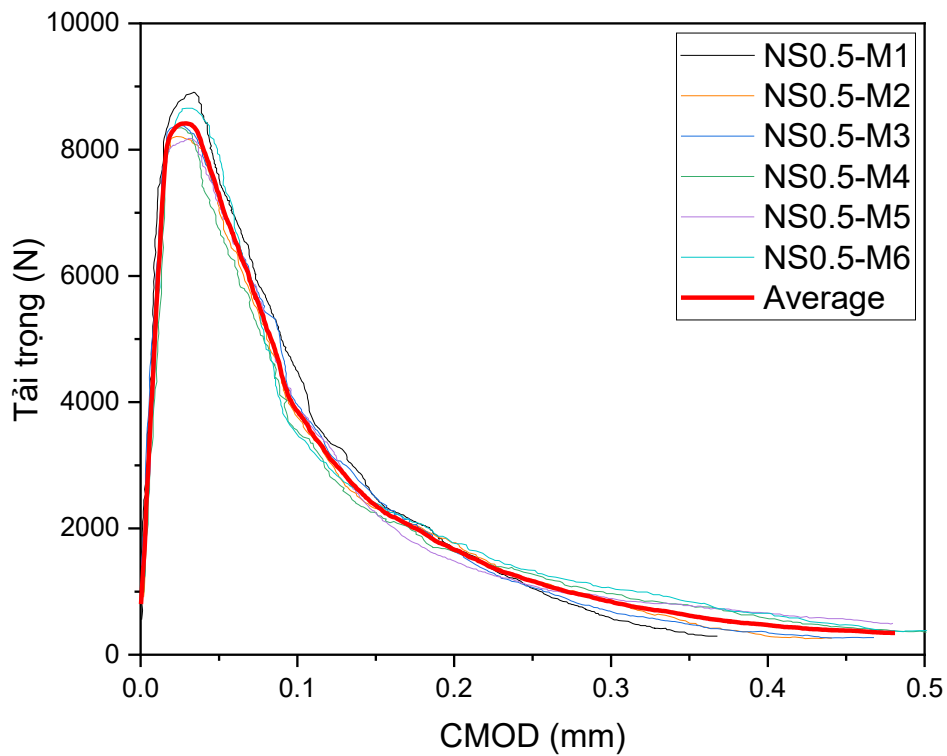
Quan sát quá trình thí nghiệm, nhận thấy mất khoảng thời gian ngắn (khoảng 1 phút) để đạt tới tải trọng đỉnh. Tuy nhiên, thời gian sau khi tải trọng đạt đỉnh đến khi phá hủy hoàn toàn là rất lớn, nguyên nhân là do việc kiểm soát độ mở rộng miệng vết nứt trong quá trình thí nghiệm.

Đường cong tải trọng - độ võng và đường cong tải trọng - CMOD được đo cho tất cả các cấp phối với các tỉ lệ nano silica thay đổi 0%, 0,5% và 1,5%. Ảnh hưởng của nano silica đến các tham số phá hủy như: độ bền phá hủy, năng lượng phá hủy, chiều dài đặc trưng vùng phát triển vết nứt, các quan hệ tải trọng – độ võng, tải trọng – CMOD sẽ được phân tích. Kết quả thí nghiệm được tính trung bình cho 6 mẫu cho mỗi cấp phối thí nghiệm tương ứng. Sử dụng phần mềm phân tích số liệu và biểu đồ Origin 2019b để tính đường cong trung bình quan hệ tải trọng – độ võng, tải trọng – CMOD của các kết quả thu được từ thí nghiệm.

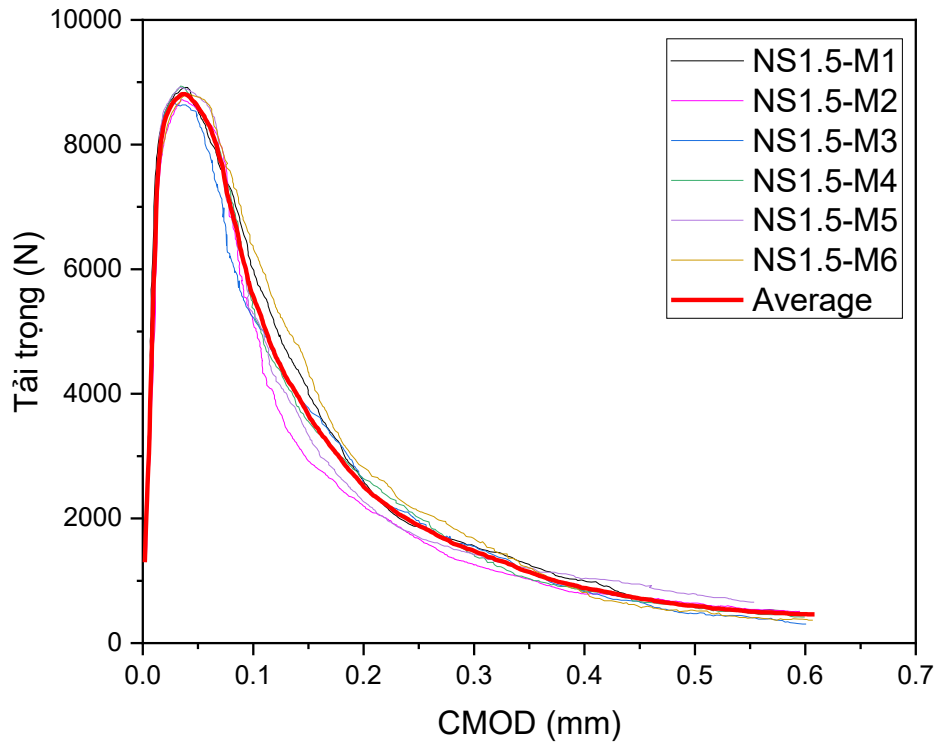
- **Kết quả quan hệ tải trọng – độ mở rộng vết nứt (CMOD):**



Hình 3.13. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – CMOD BTCĐC 0% NS

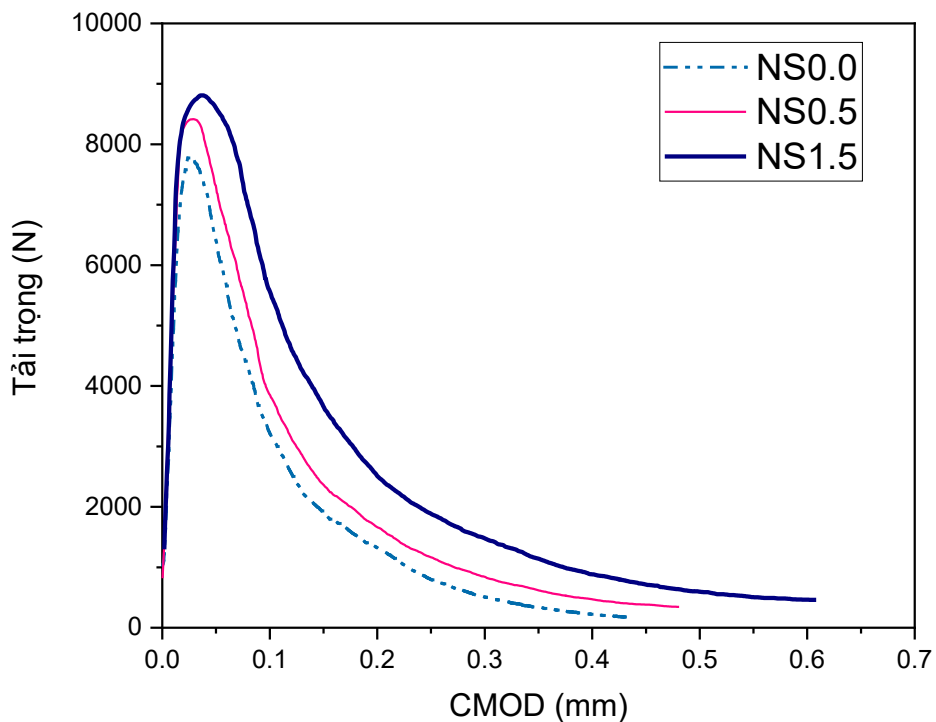


Hình 3.14. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – CMOD BTCĐC 0.5% NS



Hình 3.15. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – CMOD BTCĐC 1.5% NS

Kết quả cho thấy sự khác biệt của các đường cong P-CMOD tương ứng với các mẫu đầm được bảo dưỡng đến 28 ngày sử dụng nano silica với các tỉ lệ 0%, 0,5% và 1,5% được thể hiện trong Hình 3.16.

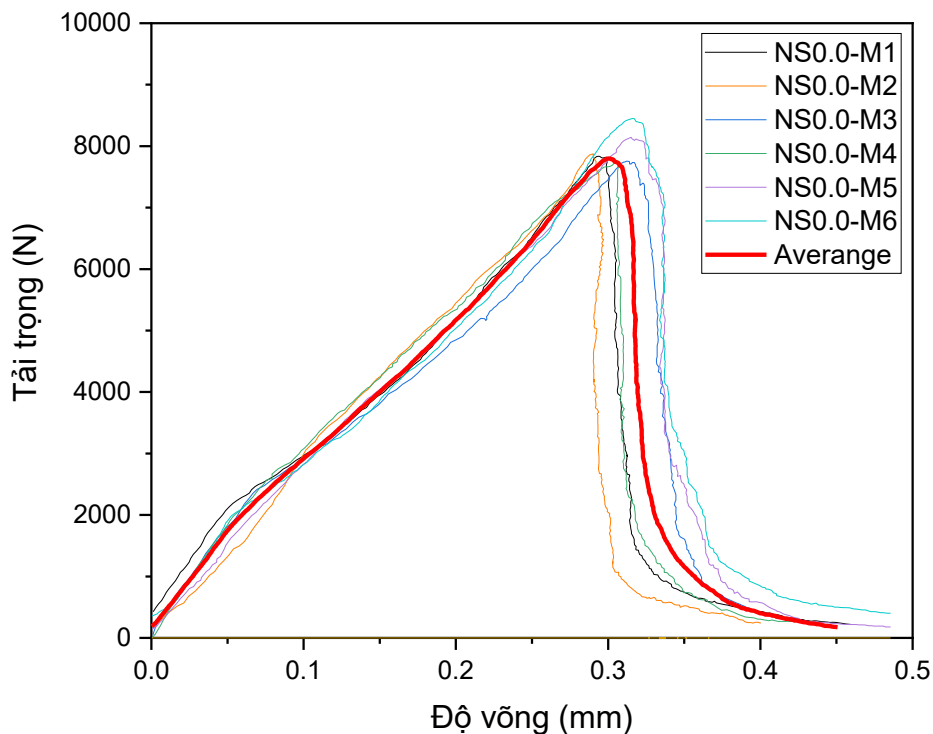


Hình 3.16. Ảnh hưởng NS đến quan hệ tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt

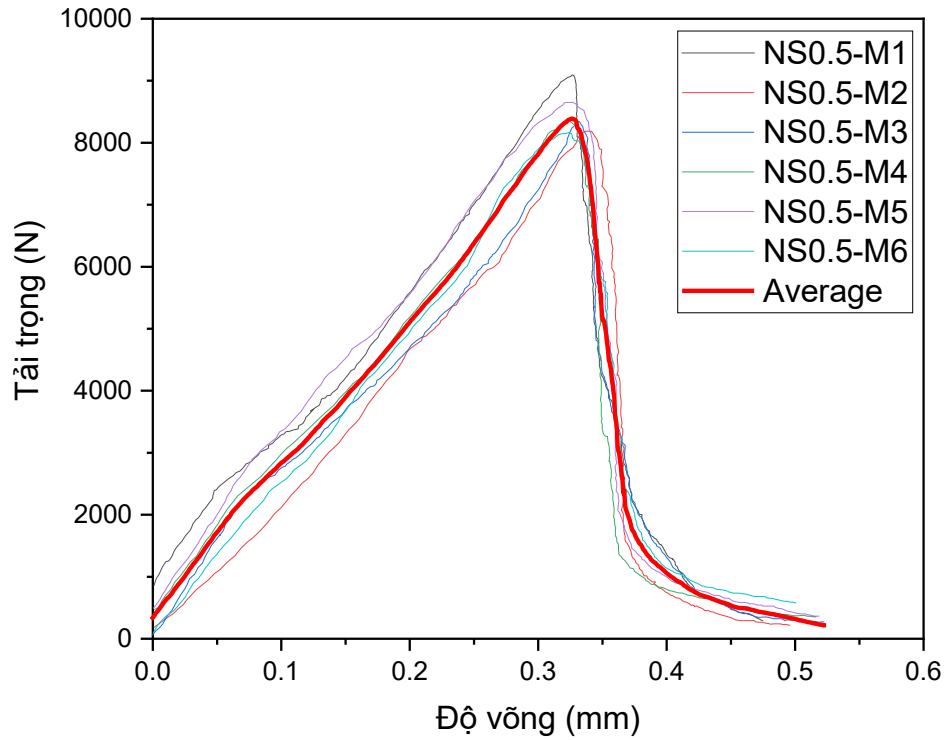
Đường cong P-CMOD của bê tông không sử dụng nano silica có giá trị lực giảm nhanh khi độ mở rộng miệng vết nứt CMOD còn rất nhỏ. Khi thêm vào bê tông với tỉ lệ NS 0,5% và 1,5% kết quả là đường cong P-CMOD có sự thay đổi rõ rệt và đặc biệt với tỉ lệ 1,5%. Ở giai đoạn đầu khi bê tông còn trong giới hạn đàn hồi, các đường cong có xu hướng phát triển giống nhau và sự khác biệt bắt đầu xuất hiện ở giai đoạn đường cong sắp đạt đỉnh, đỉnh của đường cong của bê tông có sử dụng NS cao hơn và biến đổi tăng dần tương ứng với tỉ lệ NS thêm vào. Điều này có thể dự đoán trước, khi cường độ kéo khi uốn của BTCĐC sử dụng NS tăng lên đã được thể hiện trong Chương 2 của kết quả nghiên cứu.

Quan sát Hình 3.16 cho thấy, ở giai đoạn sau đỉnh đường cong P-CMOD của bê tông sử dụng NS có giá trị lực giảm theo sự phát triển của CMOD chậm hơn, khi so sánh cùng một giá trị CMOD. Tải trọng của các mẫu sử dụng NS tỉ lệ 0,5% và 1,5% được duy trì tốt hơn so với mẫu không sử dụng NS.

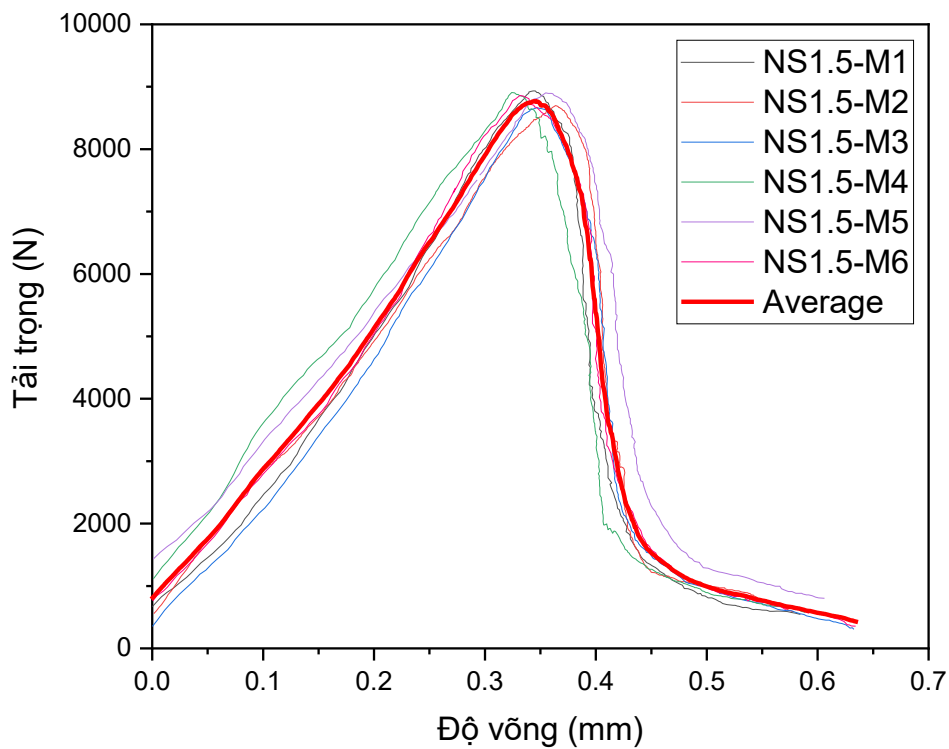
- **Kết quả quan hệ tải trọng – độ võng (P- δ):**



Hình 3.17. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – độ võng BTCĐC 0% NS



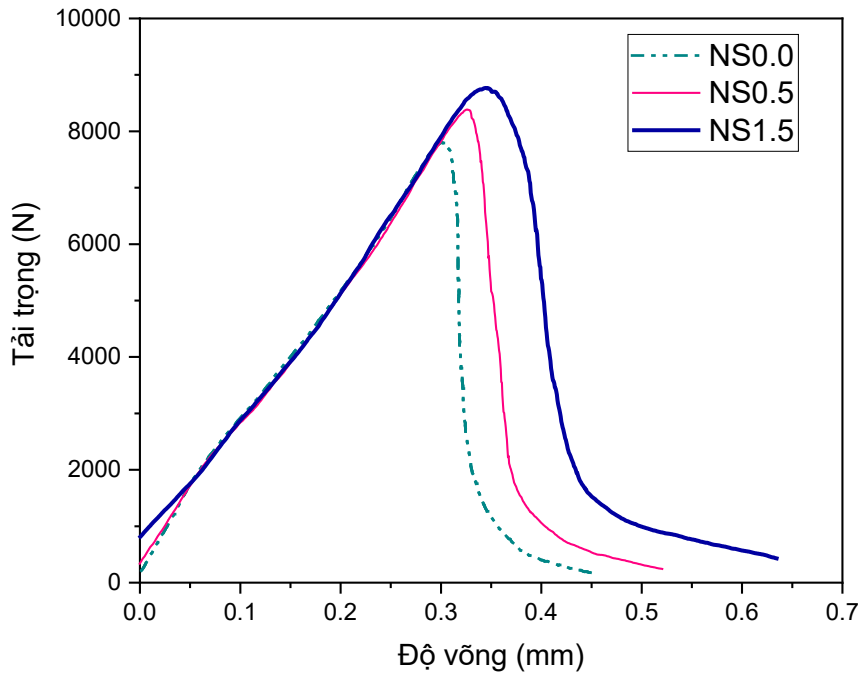
Hình 3.18. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – độ võng BTCĐC 0.5% NS



Hình 3.19. Kết quả đường cong quan hệ tải trọng – độ võng BTCĐC 1.5% NS

Đường cong quan hệ tải trọng và độ võng ($P-\delta$) hoàn chỉnh của bê tông cường độ cao với các tỉ lệ NS (0%; 0,5%; 1,5%) thêm vào được thể hiện thông

qua Hình 3.20. Đối với bê tông sử dụng NS có đường cong P- δ dày hơn, giai đoạn phi tuyến của đường cong dài hơn và tải trọng giảm xuống chậm hơn.



Hình 3.20. Ảnh hưởng của NS đến quan hệ tải trọng – độ võng

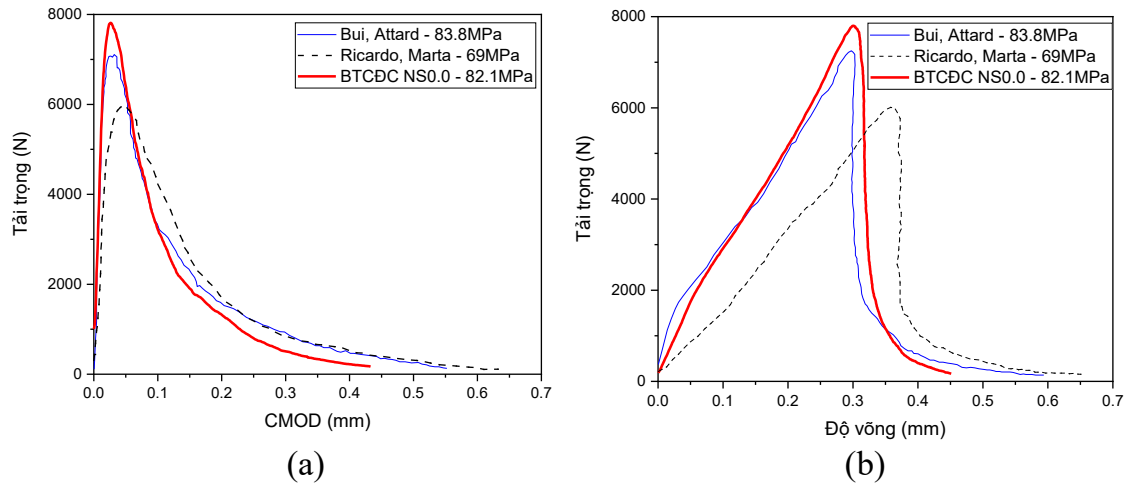
Quan sát Hình 3.20 cho thấy sự thay đổi của các đường cong quan hệ của P- δ , diện tích phần dưới đường cong P- δ và trục hoành (công phá hủy, kí hiệu W_F) của biểu đồ biến thiên tăng theo tỉ lệ NS. Sử dụng phương pháp tích phân để tính diện tích phần dưới đường cong P- δ . Kết quả cho thấy, W_F tăng 21,42% khi tỉ lệ NS là 0,5% và 58,71% khi tỉ lệ NS là 1,5%.

Bảng 3.1. Diện tích dưới đường cong P- δ

Cấp phối	Tải trọng max (N)	Độ võng max (mm)	W_F (N.mm)
NS0,0	7813	0,449	1454,80
NS0,5	8416	0,520	1766,42
NS1,5	8810	0,634	2308,90

- So sánh kết quả nghiên cứu trên thế giới

Kết quả thí nghiệm các đường cong quan hệ P-CMOD và P- δ được so sánh với một số kết quả nghiên cứu của thế giới được thể hiện thông qua Hình 3.21.



Hình 3.21. So sánh kết quả P-CMOD (a) và P- δ (b) với các nghiên cứu khác

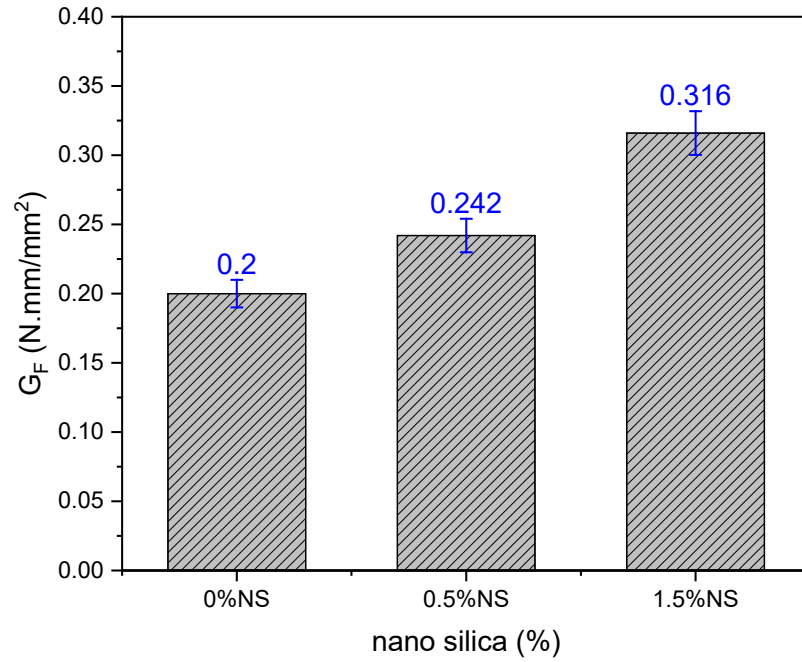
Dựa vào các biểu đồ trên Hình 3.21 cho thấy, sự tương đồng cao về hình dạng các đường cong quan hệ P-CMOD và P- δ với kết quả nghiên cứu điển hình của Bui và Attard [36], Ricardo [87].

3.4.2. Ảnh hưởng của nano silica đến năng lượng phá hủy (G_F)

Sự thay đổi về giá trị của năng lượng phá hủy khi tỉ lệ NS thay đổi từ 0%, 0,5%, 1,5% được thể hiện thông qua Bảng 3.2. Năng lượng G_F được tính dựa trên đường cong quan hệ tải trọng – độ võng thu được từ thí nghiệm uốn ba điểm. Kết quả tính toán được lấy trung bình từ kết quả thí nghiệm của 6 mẫu. So với mẫu bê tông không có NS thì các mẫu đầm có sử dụng NS có năng lượng phá hủy tăng lên lần lượt 21% và 58% tương ứng tỉ lệ NS là 0,5% và 1,5% của chất kết dính.

Bảng 3.2. Kết quả tính toán năng lượng phá hủy

Cấp phối	W_F (Nmm)	δ_0 (mm)	a_0 (mm)	A_{lig} (mm ²)	m (kg)	G_F (Nmm/mm ²)
NS0,0	1454,80	0,449	25	7500	9,82	0,200
NS0,5	1766,42	0,520	25	7500	9,84	0,242
NS1,5	2308,90	0,634	25	7500	9,84	0,316



Hình 3.22. Ảnh hưởng của NS đến năng lượng phá hủy của BTCĐC

Từ kết quả G_F của các cấp BTCĐC có sử dụng NS cao hơn, cho thấy năng lượng cần tiêu thụ khi phá hủy của BTCĐC sử dụng NS lớn hơn.

3.4.3. Ảnh hưởng của nano silica đến chiều dài đặc trưng

Để đánh giá độ dòn của các cấp phối bê tông cường độ cao với sự thay đổi hàm lượng NS, chiều dài đặc trưng l_{ch} đã được xác định dựa trên các tham số năng lượng phá hủy G_F , cường độ kéo và mô đun đàn hồi theo Công thức (3.2). Cường độ kéo được xác định gián tiếp thông qua cường độ kéo khi uốn theo công thức của CEB-FIP MC90 [40].

$$f_t = f_{ft} \frac{\alpha_{ft} \left(\frac{h_b}{h_o} \right)^{0.7}}{1 + \alpha_{ft} \left(\frac{h_b}{h_o} \right)^{0.7}} \quad (3.9)$$

trong đó:

f_t là cường độ kéo (MPa);

f_{ft} là cường độ kéo khi uốn (MPa);

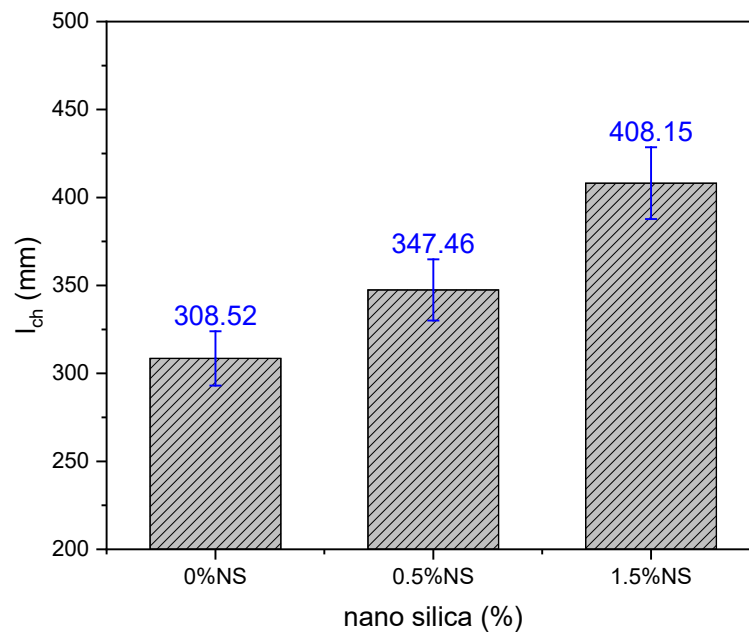
h_b là chiều cao dầm (mm);

$h_o = 100$ mm;

Kết quả tính toán l_{ch} được thể hiện trong Bảng 3.3.

Bảng 3.3. Kết quả tính toán chiều dài đặc trưng

Cấp phối	E (MPa)	G_F (Nmm/mm ²)	f_t (MPa)	l_{ch} (mm)
NS0,0	45533	0,200	5,430	308,52
NS0,5	47620	0,242	5,760	347,46
NS1,5	50131	0,316	6,230	408,15

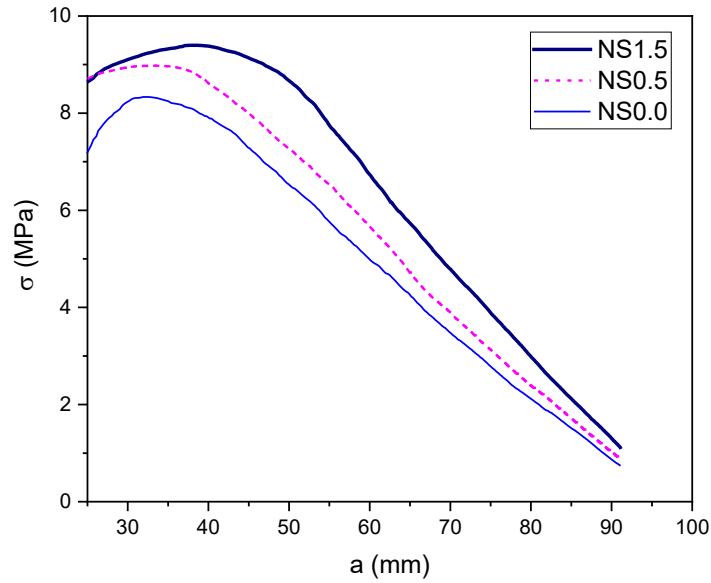


Hình 3.23. Ảnh hưởng NS đến chiều dài đặc trưng

Dựa trên Hình 3.23 cho thấy l_{ch} của BTCĐC có sử dụng NS đều cao hơn BTCĐC không sử dụng NS, cụ thể l_{ch} tăng 12,62% đối với 0,5% NS và 32,29% đối với 1,5% NS. Điều này có thể nhận thấy bê tông không có sử dụng NS có tính giòn cao hơn, khả năng bị phá hủy đột ngột lớn hơn.

3.4.4. Tính toán chiều dài vết nứt

Dựa theo công thức tính chiều dài vết nứt (3.4), có thể xây dựng mối quan hệ giữa ứng suất và chiều dài vết nứt (σ - a). Kết quả được thể hiện trong Hình 3.24.

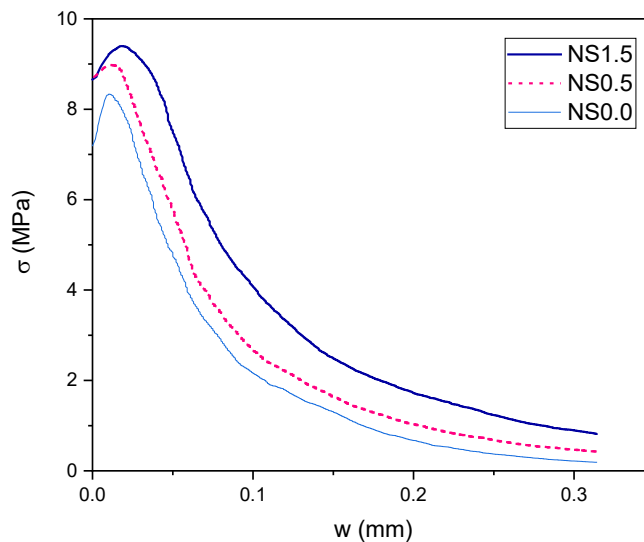


Hình 3.24. Quan hệ ứng suất – chiều dài vết nứt

Quan sát Hình 3.24, ứng suất giảm đáng kể khi vết nứt phát triển được thể hiện thông qua chiều dài a . Ở cùng một giá trị chiều dài vết nứt a , ứng suất của BTCĐC sử dụng NS được duy trì ở mức cao hơn.

3.4.5. Độ mở rộng đầu vết nứt (độ mở rộng vết nứt danh định)

Quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt danh định w được tính toán theo Công thức 3.5 và kết quả thể hiện thông qua các đường cong quan hệ Hình 3.25.



Hình 3.25. Quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt danh định

Hình 3.25 thể hiện ảnh hưởng của NS đến quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt danh định ($P-w$) của BTCĐC. Đối với các kết cấu bê tông, việc duy trì được ứng suất ở một mức độ nào đó khi vết nứt chưa mở rộng vượt quá giới hạn

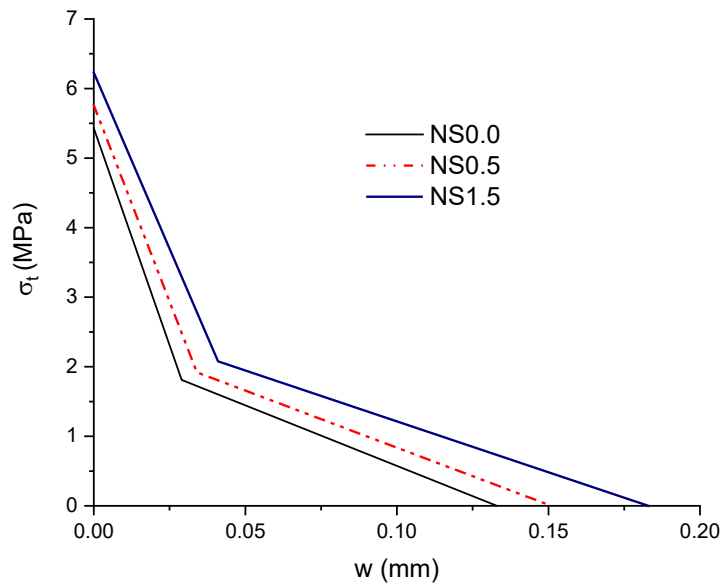
cho phép cũng là một yếu tố rất quan trọng cần được xem xét trong quá trình thiết kế và đánh giá kết cấu. Quan sát ứng suất trên biểu đồ Hình 3.25, đối với các độ mở rộng vết nứt 0,1mm, 0,2mm, 0,3mm, ứng suất của BTCĐC sử dụng NS đều có giá trị cao hơn so với bê tông đối chứng.

3.4.6. Quan hệ mềm hóa

Các tham số mềm hóa được tính theo các công thức được thiết lập bởi Petersson [77], kết quả thể hiện trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4. Kết quả các tham số mềm hóa BTCĐC sử dụng NS

Cấp phối	G_F (N.mm/mm ²)	f_t (MPa)	σ_s (MPa)	w_s (mm)	w_0 (mm)
NS0,0	0,200	5,430	1,810	0,029	0,133
NS0,5	0,242	5,760	1,920	0,034	0,151
NS1,5	0,316	6,230	2,077	0,041	0,183



Hình 3.26. Đường cong mềm hóa song tuyến BTCĐC sử dụng NS

Hình 3.26 là quan hệ mềm hóa song tuyến của BTCĐC được thiết lập từ các tham số phá hủy thu được từ kết quả thí nghiệm. So sánh các đường quan hệ mềm hóa cho thấy, BTCĐC sử dụng NS có đặc trưng ứng xử mềm hóa vật liệu tốt hơn. Giá trị w_0 và diện tích dưới đường cong mềm hóa đều tăng lên so với bê tông đối chứng.

3.5. Kết luận chương 3

Kết quả nghiên cứu trong Chương 3 được tóm tắt với một số nội dung như sau:

Thí nghiệm phá hủy các mẫu đầm có rãnh được thực hiện dựa trên hướng dẫn của Rilem. Kết quả thu được là các đường cong quan hệ tải trọng – độ mở rộng vết nứt, tải trọng – độ võng có giai đoạn sau đỉnh thể hiện đặc điểm mềm hóa của bê tông.

Các tham số và đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng NS được xác định thông qua thí nghiệm và tính toán như: năng lượng phá hủy, chiều dài đặc trưng, quan hệ tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt, tải trọng – độ võng. Kết quả cho thấy, có sự ảnh hưởng tích cực của NS đến các tham số và đặc điểm phá hủy của BTCĐC.

Tính dẻo của BTCĐC có sử dụng NS được cải thiện, điều đó được thể hiện thông qua đặc điểm phi tuyến trên các đường cong quan hệ tải – độ mở rộng miệng vết nứt. Ảnh hưởng của NS đến tính dẻo của BTCĐC cũng được thể hiện thông qua sự gia tăng các tham số phá hủy như năng lượng phá hủy và chiều dài đặc trưng.

Ngoài ra, các đặc trưng phá hủy quan trọng như chiều dài lan truyền vết nứt và quan hệ mềm hóa của BTCĐC sử dụng NS cũng được xác định. Các đặc trưng này sẽ được áp dụng trong tính toán sức kháng lan truyền vết nứt và độ dư trữ cường độ sau nứt của bê tông.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU SỨC KHÁNG LAN TRUYỀN NÚT VÀ ỨNG DỤNG BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG NANO SILICA TRONG KẾT CẤU CẦU

4.1. Giới thiệu

Trong thời gian khai thác công trình cầu, hầu hết các kết cấu bê tông đều trải qua quá trình nứt với một số mức độ khác nhau. Điều này chủ yếu do cường độ kéo của bê tông thấp và một số nguyên nhân cơ lý khó tránh khỏi trong quá trình phát triển cường độ. Khi các thành phần trong bê tông bị lão hóa và vượt quá ứng suất cho phép do hiện tượng quá tải, tác động của tải trọng cục bộ, tải trọng lặp, ăn mòn... các vết nứt có xu hướng mở rộng hoặc lan truyền, làm suy giảm cường độ kết cấu.

Mục đích nghiên cứu xác định sức kháng lan truyền nứt và độ dự trữ cường độ sau nứt của BTCĐC sử dụng NS. Đường cong sức kháng lan truyền nứt K_R được tính toán xác định bằng các phương trình được thiết lập dựa trên quy luật mềm hóa bởi Reinhardt và cộng sự [86]. Bên cạnh đó, sự suy giảm cường độ sau nứt của kết cấu BTCĐC sử dụng NS sẽ được dự báo với phương pháp tiếp cận công phá hủy. Chiều dài lan truyền vết nứt trong kết cấu được sử dụng tính toán độ dự trữ cường độ sau nứt. Các tiếp cận sử dụng mối quan hệ của sự tiêu hao công phá hủy tương ứng với sự phát triển vết nứt, cho phép dự báo độ dự trữ cường độ của kết cấu sau khi nứt. Các tham số đặc trưng phá hủy và đường cong quan hệ tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt (P-CMOD), đường cong quan hệ tải trọng – độ võng (P- δ) của bê tông từ thí nghiệm uốn ba điểm các mẫu đầm có rãnh sẽ được sử dụng trong tính toán.

Cuối cùng, khả năng ứng dụng BTCĐC sử dụng NS vào kết cấu công trình cầu sẽ được đánh giá thông qua việc phân tích ứng xử cục bộ kết cấu vùng neo cáp dự ứng lực.

4.2. Nghiên cứu sức kháng lan truyền nứt BTCĐC sử dụng nano silica

Trong những thập kỷ gần đây, nhiều nhà nghiên cứu đã miêu tả sự lan

truyền vết nứt của bê tông thông qua đường cong R và K_R điển hình như Karihaloo [69], Bazant và Jirasek [33], Planas và cộng sự [78], Reinhart và cộng sự [86], Xu và Reinhart [105], Kumar and Barai [71], Dong và cộng sự [41]. Trong số đó, một phương pháp được đề xuất để đánh giá cường độ chống nứt lan truyền theo đường cong K_R được thực hiện bởi Reinhardt và cộng sự [86], Xu và Reinhardt [104][107]. Trong các nghiên cứu của Reinhardt và Xu, mối quan hệ cơ bản giữa lực dính kết hoạt động trong vùng nứt dính kết và đường cong chống lan truyền nứt K_R đối với quá trình phá hủy trong bê tông khi xem xét lực dính kết dọc theo vùng nứt dính kết là yếu tố rất quan trọng.

Để đánh giá sự ảnh hưởng của nano silica đến khả năng chống lan truyền nứt của bê tông, phương pháp đánh giá theo K_R dựa trên quy luật mềm hóa bê tông được thực hiện. Trong phương pháp này, sức kháng lan truyền nứt K_R thu được bằng cách kết hợp của cường độ chống nứt khởi đầu K_{lc}^{ini} , là cường độ vốn có của vật liệu chống lại sự xuất hiện vết nứt lan truyền, cùng với K_I^C là cường độ chống lan truyền nứt do sự đóng góp của ứng suất dính kết dọc theo vùng tiến triển vết nứt.

4.2.1. Cường độ chống nứt khởi đầu và cường độ chống nứt dính kết

4.2.1.1. Cường độ chống nứt khởi đầu

Cường độ chống nứt khởi đầu K_{lc}^{ini} là khả năng của vật liệu chống lại sự xuất hiện của vết nứt khi kết cấu vượt qua trạng thái giới hạn đàn hồi. Cường độ chống nứt khởi đầu K_{lc}^{ini} được xác định thông qua cường độ nứt giới hạn K_{lc}^{un} cùng với cường độ chống nứt dính kết K_{lc}^C do ứng suất dính kết dọc theo đường nứt gây ra tương ứng giá trị độ mở rộng miệng vết nứt tới hạn $CMOD_c$ và chiều dài lan truyền vết nứt tới hạn a_c .

$$K_{lc}^{ini} = K_{lc}^{un} - K_{lc}^C \quad (4.1)$$

Đánh giá ứng suất dính kết $\sigma(x)$ trên vùng nứt để xác định K_{lc}^{ini} chỉ yêu cầu xác định ứng suất dính kết tại cuối của vùng nứt dính kết tại vị trí a_0 và hợp lực

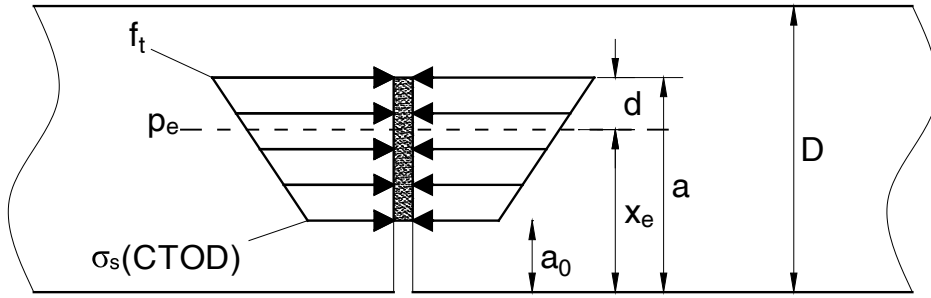
P_e của ứng suất dính kết $\sigma(x)$ trên toàn bộ vùng nứt dính kết cùng với vị trí làm việc có hiệu của nó x_e/a_c . Với $\sigma_s(CTOD_c)$, mối quan hệ ứng suất đối với độ mở rộng vết nứt tới hạn được đề xuất bởi Reinhart và cộng sự [86] có thể được dùng để tính hệ số β_c :

$$\beta_c = \sigma_c(CTOD_c) / f_t \quad (4.2)$$

Công thức tính P_e và vị trí làm việc có hiệu x_e/a_c :

$$P_e = \frac{f_t}{2}(1 + \beta_c)(a_c - a_0) \quad (4.3)$$

$$U_e = \frac{x_e}{a_c} = \frac{1}{3(1 + \beta_c)} \left\{ 2 + \beta_c + (1 + 2\beta_c) \frac{V_0}{V_c} \right\} \quad (4.4)$$



Hình 4.1. Tải trọng có hiệu trên vùng nứt dính kết tại vị trí tới hạn

Tính toán cường độ nứt K_{lc}^C do ứng suất dính kết trên vùng nứt dính kết tại vị trí tới hạn (tại P_{max}), được gọi là cường độ dính kết tới hạn, K_{lc}^C được tính theo Công thức (4.5).

$$K_{lc}^C = -Z(U_e, V_0 / V_c) \frac{2P_e}{\sqrt{\pi a_c}} F(U_e, V_c) \quad (4.5)$$

$Z(U_e, V_0 / V_c)$ là hàm điều chỉnh, được tính theo Công thức (4.6)

$$Z(U_e, V_0 / V_c) = \frac{6(1,025 - 0,1\beta_c)}{1 + 1,83(V_0 - 0,2)} \left(\frac{V_0}{V_c} \right)^P \sqrt{\frac{V_c}{\pi}} U_e^{-0,2} \quad (4.6)$$

$F(U_e, V_c)$ là hàm hình học, được tính theo Công thức (4.7)

$$F(U_e, V_c) = \frac{3,52(1-U_e)}{(1-V_c)^{3/2}} - \frac{4,35-5,28U_e}{(1-V^{1/2})} + \left(\frac{1,3-0,3U_e^{3/2}}{(1-U_e^2)^{1/2}} + 0,83-1,76U_e \right) \times (1-(1-U_e)V_c) \quad (4.7)$$

trong đó: $V_c = a_c/D$, $U_e = x_e/a_c$

a_c là chiều dài lan truyền nứt tới hạn ứng với tải trọng P_{max} (mm);

D là chiều cao mẫu đầm thí nghiệm (mm);

x_e là khoảng cách từ hợp lực đến đáy đầm (mm).

Cường độ nứt tới hạn K_{lc}^{un} được tính toán theo phương pháp hệ số cường độ ứng suất:

$$K_{lc}^{un} = \frac{3P_{max}S}{2D^2B} \sqrt{a_c} F_1(V_c), \quad (4.8)$$

trong đó:

$$F_1(V_c) = \frac{1,99 - V_c(1-V_c)(2,15 - 3,93V_c + 2,7V_c^2)}{(1+2V_c)(1-V_c)^{3/2}} \quad (4.9)$$

4.2.1.2. Cường độ chống nứt dính kết

Cường độ chống nứt dính kết K_I^C , là khả năng chống lại sự lan truyền của vết nứt do lực dính kết tồn tại dọc theo đường nứt, trong giai đoạn lan truyền vết nứt, độ mở rộng vết nứt của vật liệu sẽ tăng lên cùng với sự gia tăng chiều dài của vùng nứt dính kết. K_I^C là một hàm của cường độ kéo của vật liệu và dạng phân phối của lực kết dính trên vùng nứt, cũng như chiều dài của vùng nứt dính kết Δa .

$$K_I^C(\Delta a) = F(f_t, f(\sigma), \Delta a) \quad (4.10)$$

Hàm $F(f_t, f(\sigma), \Delta a)$ là phụ thuộc chủ yếu cường độ kéo f_t của bê tông và chiều dài của vùng nứt dính kết Δa .

4.2.2. Tiếp cận xác định đường cong sức kháng lan truyền vết nứt K_R

Trong các tính toán bằng các phân tử hữu hạn cho kết cấu bê tông theo mô

hình nứt dính kết của Hillerborg [57], một quy luật mềm hóa song tuyến để mô tả các đặc tính mềm hóa của vật liệu bê tông đã được sử dụng rộng rãi bởi nhiều nhà nghiên cứu [36][97][107]. Luật mềm hóa song tuyến cũng đã được sử dụng trong việc tìm kiếm các biểu thức phân tích của đường cong sức kháng lan truyền vết nứt [104].

Theo Xu và Reinhardt [104], công thức tổng quát tính sức kháng lan truyền nứt đối với thí nghiệm uốn ba điểm các dầm có rãnh như sau:

$$K_R(\Delta a) = K_{Ic}^{ini} + \int_{a_0}^a 2\sigma(x)F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{D}\right) / \sqrt{\pi a} dx \quad (4.11)$$

trong đó:

$$F_1\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{D}\right) = \frac{3,52(1-x/a)}{(1-a/D)^{3/2}} - \frac{4,35-5,28x/a}{(1-a/D)^{1/2}} \\ + \left\{ \frac{1,30-0,30(x/a)^{3/2}}{\sqrt{1-(x/a)^2}} + 0,83-1,76\frac{x}{a} \right\} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{x}{a}\right) \frac{a}{D} \right\} \quad (4.12)$$

Ứng suất dính kết tại các giai đoạn trong quá trình phá hủy có thể được đặc trưng bởi bốn vị trí lan truyền vết nứt khác nhau [104]. Giai đoạn đầu tiên là $a = a_0$, thứ hai là $a_0 < a \leq a_c$, thứ ba là $a_c < a \leq a_{w0}$ và cuối cùng là $a > a_{w0}$.

Theo bốn giai đoạn khác nhau của sự lan truyền vết nứt, sức kháng mở rộng vết nứt được tính theo công thức tổng quát (4.11). Ứng suất dính kết tương ứng với bốn giai đoạn lan truyền vết nứt được đề xuất bởi Xu và Reinhardt [104] như sau:

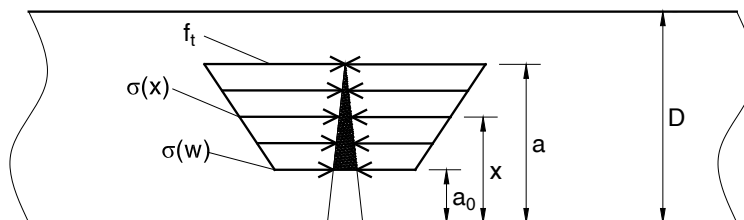
(a) Trường hợp 1: $a = a_0$

Lúc này kết cấu ứng xử trong giai đoạn đàn hồi và sự phát triển vết nứt không xảy ra. Vì vậy, ứng suất dính kết không tồn tại.

$$\sigma(x) = 0 \text{ với } a = a_0 \quad (4.13)$$

(b) Trường hợp 2: $a_0 < a \leq a_c$

Khi tải trọng tăng lên, kết cấu sẽ xuất hiện những đặc trưng phi tuyến. Khi vết nứt bắt đầu phát triển, sức kháng lan truyền nứt sẽ tăng lên do sự đóng góp của ứng suất dính kết dọc theo vùng vết nứt dính kết có thể được coi là tuyến tính cho đến khi sự lan truyền mất ổn định của vết nứt xảy ra. Tại vị trí tới hạn của sự lan truyền nứt mất ổn định, tải trọng đạt đến giá trị lớn nhất và độ mở rộng vết nứt tại đầu của rãnh *CTOD* cũng đạt được giá trị tới hạn *CTOD_c*. Đối với vị trí này, chiều dài của vết nứt được gọi là chiều dài nứt tới hạn *a_c*. Sự phân bố của ứng suất dính kết dọc theo vùng vết nứt dính kết được thể hiện trong Hình 4.2.



Hình 4.2. Dạng phân phối ứng suất dính kết với giai đoạn lan truyền nứt $a_0 < a \leq a_c$

Hàm phân bố ứng suất dính kết dọc theo vùng vết nứt dính kết được đưa ra trong Công thức (4.14) cho trường hợp $a_0 < a \leq a_c$:

$$\sigma(x) = \sigma(w) + (f_t - \sigma(w))(x - a_0) / (a - a_0) \quad a_0 \leq x \leq a \quad (4.14)$$

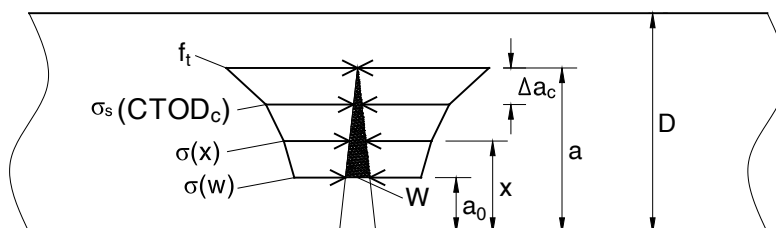
trong đó:

w là chiều độ mở rộng vết nứt tại đầu của rãnh (mm);

$\sigma(w)$ là giá trị của ứng suất dính kết tại điểm đầu rãnh (MPa);

f_t là cường độ kéo của bê tông (MPa).

(c) Trường hợp 3: $a_c < a \leq a_{w0}$



Hình 4.3. Dạng phân phối ứng suất dính kết với giai đoạn lan truyền nứt $a_c < a \leq a_{w0}$

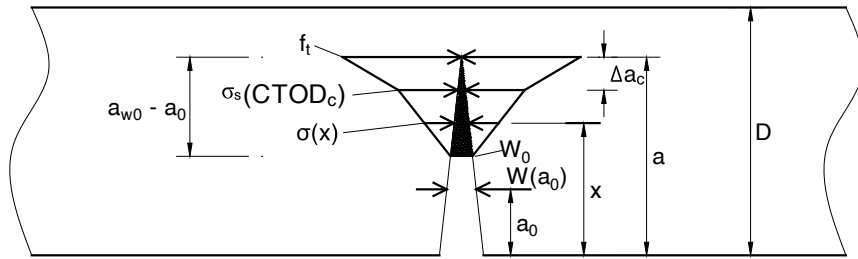
Sau khi tải trọng vượt qua tải trọng lớn nhất P_{max} , tương ứng, chiều dài nứt đạt giá trị tới hạn a_c , dạng phân phối của ứng suất dính kết trên vùng nứt dính kết là song tuyến.

Tương ứng, hàm của ứng suất dính kết dọc theo vùng nứt dính kết có thể được xấp xỉ như sau:

$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_1(x) = \sigma(w) + [\sigma_s(CTOD_c) - \sigma(w)](x - a_0) / [a - (a_0 + \Delta a_c)] & \text{khi } a_0 \leq x \leq (a - \Delta a_c) \\ \sigma_2(x) = \sigma_s(CTOD_c) + [f_t - \sigma_s(CTOD_c)](x - a + \Delta a_c) / \Delta a_c & \text{khi } (a - \Delta a_c) \leq x \leq a \end{cases} \quad (4.15)$$

(d) Trường hợp 4: $a > a_{w0}$

Đối với giai đoạn cuối cùng, một sự phân phối ứng suất dính kết hoàn chỉnh đã xuất hiện trên vùng nứt dính kết bởi vì chiều dài vết nứt đã vượt quá độ dài vết nứt đặc trưng a_{w0} . Trong khi đó, một vết nứt không ứng suất mới đã hình thành trước rãnh do sự xuất hiện của phân phối hoàn chỉnh của ứng suất dính kết trên vùng nứt dính kết.



Hình 4.4. Dạng phân phối ứng suất dính kết với giai đoạn lan truyền nứt $a > a_{w0}$

Hàm của ứng suất dính kết được thể hiện trong Hình 4.4 có thể được xấp xỉ như sau:

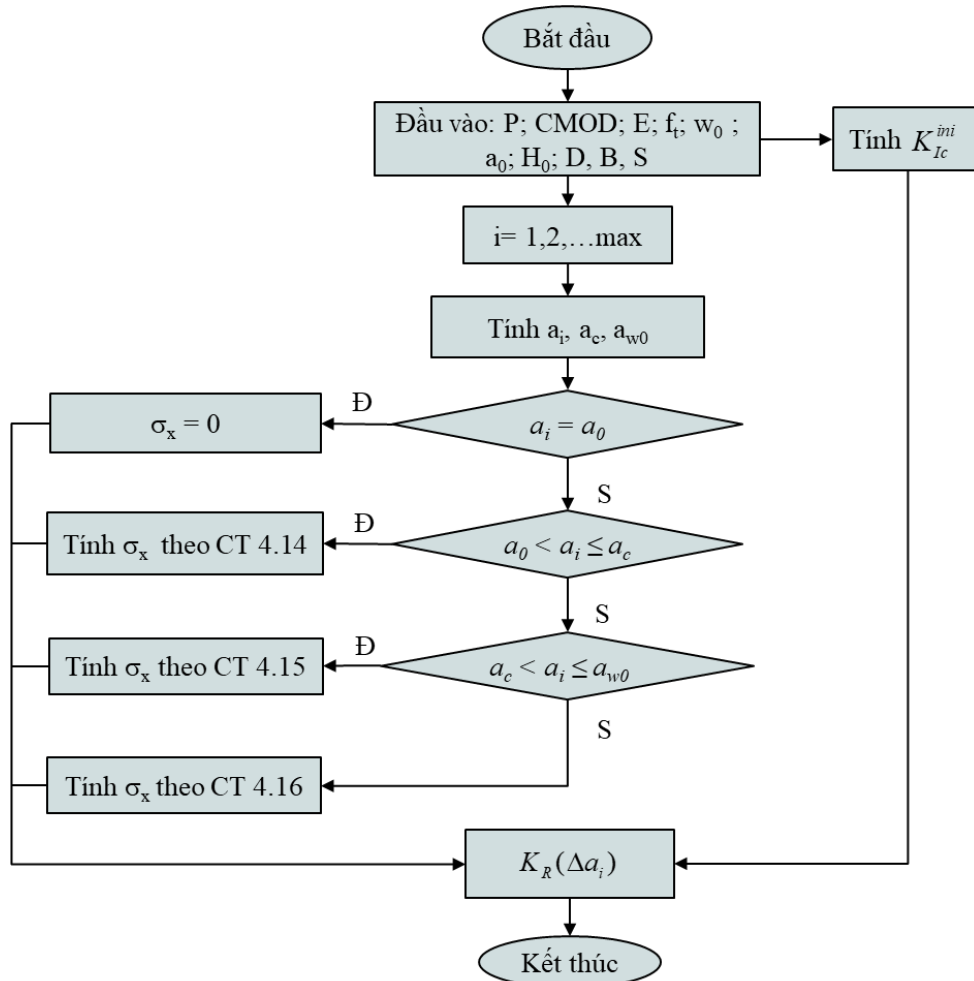
$$\sigma(x) = \begin{cases} \sigma_1(x) = 0 & \text{khi } (a_0 \leq x \leq (a - a_{w0} + a_0)) \\ \sigma_2(x) = \sigma_s(CTOD_c)(x - a - a_0 + a_{w0}) / (a_{w0} - a_c) & \text{khi } (a - a_{w0} + a_0) \leq x \leq (a - \Delta a_c) \\ \sigma_3(x) = \sigma_s(CTOD_c) + [f_t - \sigma_s(CTOD_c)](x - a + \Delta a_c) / \Delta a_c & \text{khi } (a - \Delta a_c) \leq x \leq a \end{cases} \quad (4.16)$$

Để đánh giá đường cong $K_R(\Delta a)$ bằng cách sử dụng các kết quả thử nghiệm

như đường cong P-CMOD từ kết quả thí nghiệm uốn ba điểm tiêu chuẩn các mẫu đầm có rãnh, cần phải biết giá trị chiều dài vết nứt lan truyền, các ứng suất tương ứng $\sigma(w)$ và $\sigma_s(CTOD_c)$. Các ứng suất $\sigma(w)$ và $\sigma_s(CTOD_c)$ tương ứng các điểm tại đó các khe nứt lần lượt là w và $CTOD_c$.

4.2.3. Sức kháng lan truyền nứt BTCĐC sử dụng nano silica

Sức kháng lan truyền vết nứt được hình thành từ việc kết hợp cường độ chống nứt khởi đầu và cường độ chống nứt dính kết dọc theo chiều dài lan truyền vết nứt. Các công thức (4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16) được thiết lập theo dạng chuỗi và lập trình bằng phần mềm toán học Mathcad 15. Sơ đồ khối tính toán sức kháng lan truyền nứt được mô tả như trong Hình 4.5.



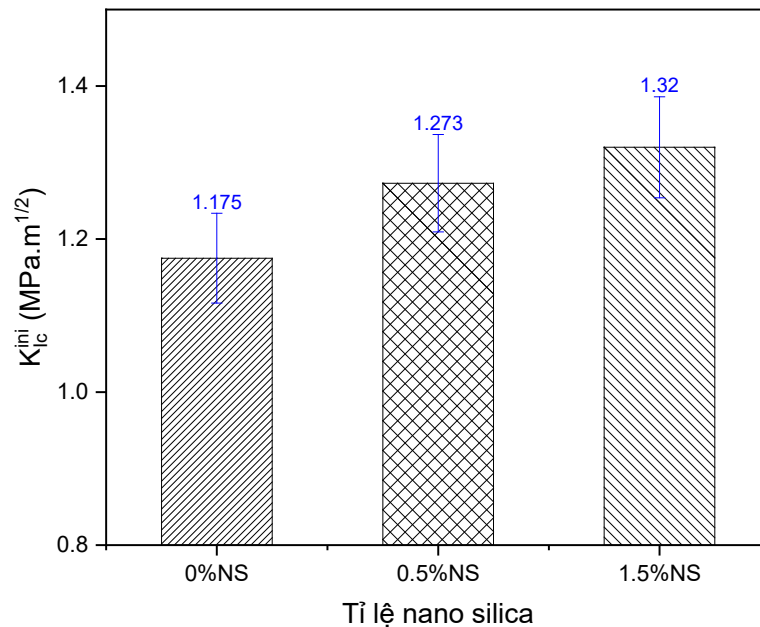
Hình 4.5. Sơ đồ khối tính toán sức kháng lan truyền nứt

Để tính sức kháng lan truyền nứt cần phải biết được cường độ chống nứt

khởi đầu K_{Ic}^{ini} . Cường độ chống nứt khởi đầu được tính toán thông qua cường độ chống nứt dính kết K_{Ic}^C và cường độ nứt giới hạn K_{Ic}^{un} được tính dựa trên các Công thức từ (4.1) đến (4.9). Kết quả được trình bày trong Bảng 4.1.

Bảng 4.1. Cường độ chống nứt khởi đầu BTCĐC sử dụng nano silica

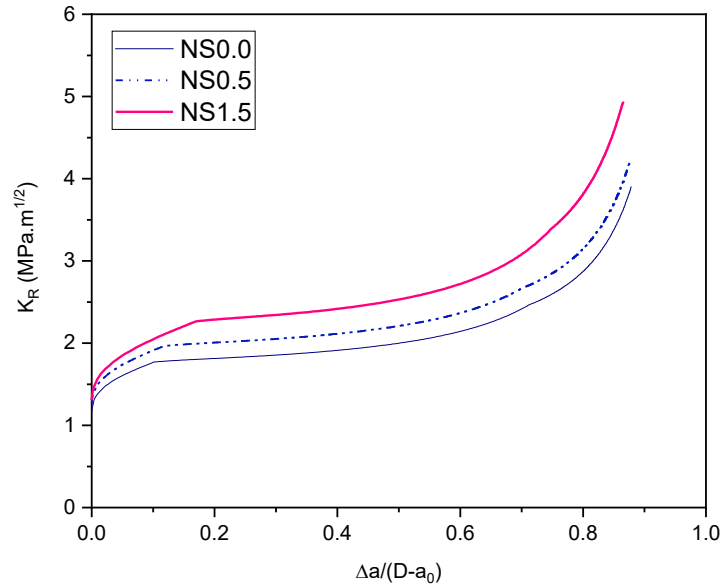
Cấp phối	β_c	U_e	K_{Ic}^C (MPa. $\sqrt{m}$)	K_{Ic}^{un} (MPa. $\sqrt{m}$)	K_{Ic}^{ini} (MPa. $\sqrt{m}$)
NS0,0	0,116	0,914	0,432	1,607	1,175
NS0,5	0,114	0,904	0,514	1,787	1,273
NS1,5	0,105	0,877	0,755	2,075	1,320



Hình 4.6. Cường độ chống nứt khởi đầu BTCĐC sử dụng NS

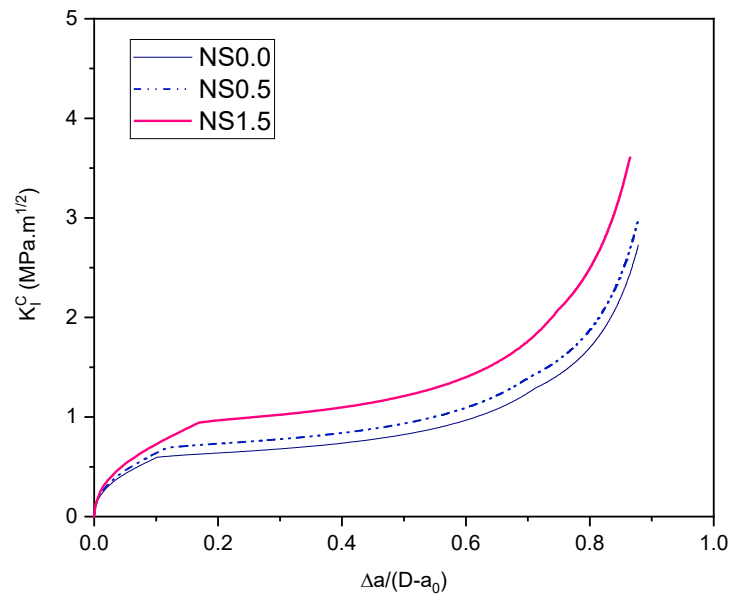
*** Tính toán cường độ chống nứt dính kết và sức kháng lan truyền vết nứt K_R :**

Kết quả sức kháng lan truyền nứt tương ứng chiều dài lan truyền vết nứt $K_R(\Delta a)$ được thể hiện dưới dạng các đường cong như Hình 4.7. Khi chỉ xét sự ảnh hưởng NS đến cường độ chống nứt dính kết K_I^C của BTCĐC có thể quan sát Hình 4.8. Để đánh độ tin cậy, kết quả lập trình được so sánh với kết quả nghiên cứu của một số tài liệu tham khảo được thể hiện trong Hình 4.9.



Hình 4.7. Sức kháng lan truyền nứt BTCĐC sử dụng NS

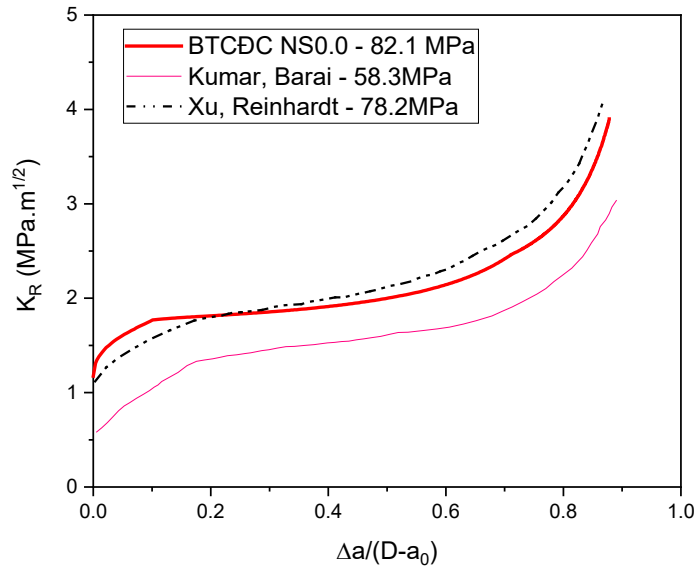
Các đường cong trong Hình 4.7, cho thấy rõ sự ảnh hưởng của NS đến sức kháng mở rộng vết nứt tương ứng với các giai đoạn tải trọng (P) và chiều dài lan truyền vết nứt (Δa). Đường cong sức kháng lan truyền nứt tương ứng với cấp phối BTCĐC sử dụng 1,5% NS có điểm bắt đầu tại K_{Ic}^{ini} cao hơn các cấp phối còn lại, chứng tỏ khả năng vốn có của vật liệu chống lại sự xuất hiện vết nứt cao hơn.



Hình 4.8. Cường độ chống nứt dính kết BTCĐC sử dụng NS

Bên cạnh đó, khi quan sát các đường cong $K_I^C(\Delta a)$ trên Hình 4.8 thể hiện, ở

đoạn sau khi vết nứt lan truyền, các giá trị K_I^C tương ứng với các chiều dài lan truyền nứt của BTCĐC sử dụng NS cũng đều cao hơn so với loại không sử dụng. Sự thay đổi này là do ảnh hưởng của NS đến đặc tính dính kết của các bề mặt nứt làm tăng cường độ chống nứt dính kết.



Hình 4.9. So sánh kết quả lập trình và các kết quả nghiên cứu khác

Quan sát kết quả đường cong sức kháng lan truyền vết nứt Hình 4.9 cho thấy có tính tương đồng cao với các đường cong được tính bởi các tác giả khác như của Kumar và cộng sự [71], Xu và Reinhardt [104][107].

4.2.4. Tiêu chuẩn lan truyền vết nứt dựa trên K_R

Sức kháng lan truyền nứt K_R có thể được coi là một tiêu chuẩn để mô tả sự ổn định của một vết nứt đang lan truyền trong quá trình phá hủy đã được công nhận bởi nhiều nhà nghiên cứu [33][104][107]. Các mối quan hệ của sức kháng lan truyền nứt K_R , hệ số cường độ ứng suất K_P , tải trọng tương ứng P và chiều dài lan truyền vết nứt được sử dụng phân tích sự ổn định của vết nứt. Tiêu chuẩn để phân tích độ ổn định lan truyền vết nứt của bê tông có thể được trình bày như sau:

$$K_P(\Delta a) < K_R(\Delta a) \quad \text{Vết nứt lan truyền ổn định}$$

$$K_P(\Delta a) = K_R(\Delta a) \quad \text{Sự lan truyền vết nứt không ổn định bắt đầu xảy ra}$$

$K_P(\Delta a) < K_R(\Delta a)$ Vết nứt lan truyền không ổn định

Như phương pháp xác định đường cong K_R , điểm bắt đầu của đường cong $K_R(\Delta a)$ là độ bền khởi đầu K_{Ic}^{ini} của bê tông. Phân tích độ ổn định của lan truyền vết nứt cho mode I có thể được mô tả bằng các tham số độ bền phá hủy khởi đầu K_{Ic}^{ini} , độ bền phá hủy tại đầu vết nứt do lực dính kết dọc theo đường nứt K_I^C và hệ số cường độ ứng suất K_P tại đầu vết nứt:

$K_P(\Delta a) - K_I^C(\Delta a) < K_{Ic}^{ini}$ Không xuất hiện vết nứt lan truyền

$K_P(\Delta a) - K_I^C(\Delta a) = K_{Ic}^{ini}$ Lan truyền vết nứt xảy ra tại trạng thái tới hạn

$K_P(\Delta a) - K_I^C(\Delta a) > K_{Ic}^{ini}$ Vết nứt lan truyền

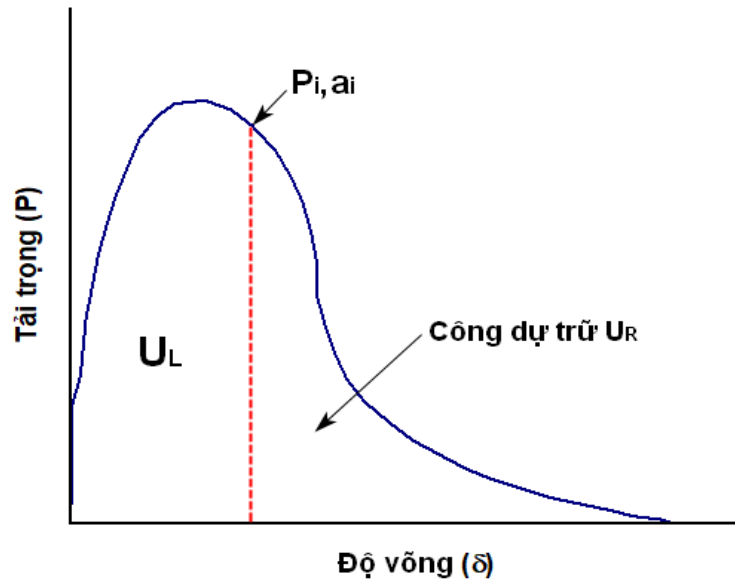
4.3. Xác định độ dự trữ cường độ sau nứt kết cấu BTCĐC sử dụng NS

Hiện nay, với nhiều kết cấu bê tông trong hệ thống cơ sở hạ tầng, công trình cầu đường đang xuống cấp nhanh chóng do nhiều yếu tố khác nhau, việc đánh giá các kết cấu này không bị phá hoại đột ngột hay dự báo độ dự trữ cường độ sau nứt là rất cần thiết. Trong nhiều thập kỷ qua, các nghiên cứu tuổi thọ của kết cấu bê tông đã thu hút rất nhiều sự chú ý và có một sự phát triển đáng kể với rất nhiều nghiên cứu. Nhưng hầu hết các khảo sát điều tập trung vào sự xuống cấp do ăn mòn bê tông và cốt thép. Trong thực tế, các hiện tượng ăn mòn sẽ bắt đầu phát triển mạnh khi kết cấu bị nứt và tác động cộng hưởng này làm nguy hại đến kết cấu bê tông. Bên cạnh đó, sự tồn tại của một vết nứt với chiều dài nhất định trong bê tông vẫn có thể chỉ ra trạng thái làm việc của kết cấu [103]. Nghiên cứu sử dụng phương pháp công phá hủy để dự báo độ dự trữ cường độ sau nứt của kết cấu BTCĐC sử dụng NS dựa trên tiếp cận các nghiên cứu của Wu [103] và Hiroshi Tada [98].

4.3.1. Tiếp cận tính toán độ dự trữ cường độ kết cấu bê tông sau nứt

Phương pháp công phá hủy được sử dụng khá phổ biến trong các phân tích cơ học phá hủy bê tông. Hình 4.10 thể hiện biểu đồ quan hệ công phá hủy với tải

trọng tác dụng và chiều dài phát triển của vết nứt. Biểu đồ tải trọng - độ võng cho thấy công phá hủy được hấp thụ bởi sự thay đổi độ võng và chiều dài phát triển vết nứt. Diện tích bên dưới đường cong tải trọng – độ võng ($P-\delta$) biểu thị tổng lượng công hấp thụ để gây phá hủy dầm hoàn toàn.



Hình 4.10. Biểu đồ miêu tả công dự trữ sau nứt [103]

Tổng lượng công hấp thụ bởi dầm có thể được xác định theo Công thức 4.17:

$$U_T = W_F = \int_0^{\delta} P d\delta \quad (4.17)$$

trong đó:

U_T là tổng lượng công phá hủy (N.mm);

P là tải trọng (N);

δ là độ võng thu được từ thí nghiệm uốn ba điểm trên mẫu dầm có rãnh (mm).

Tại điểm i trên đường cong $P-\delta$, tải trọng tương ứng P_i , độ võng và chiều dài phát triển vết nứt δ_i, a_i . Một lượng công sử dụng để tạo ra một vết nứt có chiều dài a_i , được kí hiệu $U_L(a_i)$, trong đó lượng công còn lại tương ứng phần dầm chưa bị phá hoại được gọi là $U_R(a_i)$. Khi vết nứt tiếp tục lan truyền tức là

chiều dài a tăng lên, lượng công còn lại sẽ giảm xuống và chiều cao chưa nứt được tính thông qua hiệu của chiều cao dầm D và chiều dài phát triển vết nứt a .

Theo Wu [103], độ dự trữ cường độ của bất kỳ thành phần kết cấu bê tông nào bị phát triển vết nứt sẽ tương xứng với tỷ lệ U_R/U_T và tỉ lệ chiều dài vết nứt trên chiều cao dầm a/D , hoặc phần không nứt trên chiều cao dầm $(D-a)/D$. Do đó, có thể dự đoán độ dự trữ cường độ của các kết cấu bê tông bị nứt bằng cách sử dụng công phá hủy được duy trì so với tỷ lệ chiều dài vết nứt của kết cấu. Vì vậy, độ dự trữ cường độ sau nứt có thể được tính theo Công thức 4.18:

$$R_S(\Delta a_i) = \left(1 - \frac{U_L(\Delta a_i)}{U_T} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (4.18)$$

trong đó:

$R_S(\Delta a_i)$ là độ dự trữ cường độ sau nứt tương ứng chiều dài lan truyền vết nứt Δa_i (%);

$U_L(\Delta a_i)$ là lượng công hấp thụ tương ứng chiều dài lan truyền vết nứt Δa_i (N.mm);

U_T là tổng lượng công hấp thụ gây phá hủy hoàn toàn kết cấu (N.mm);

Δa là chiều dài lan truyền vết nứt ($\Delta a = a - a_0$) (mm).

4.3.2. Xác định độ dự trữ cường độ sau nứt BTCĐC sử dụng NS

Để tính toán độ dự trữ cường độ của BTCĐC sử dụng NS sau khi nứt bằng phương pháp công phá hủy, các kết quả thí nghiệm phá hủy ở Chương 3 sẽ được sử dụng để tính toán. Chiều dài vết nứt a đã được tính toán thông qua công thức của Xu và Reinhardt [104].

Kết quả tính toán độ dự trữ cường độ $R_S(\Delta a)$ của kết cấu BTCĐC không và có sử dụng NS được thể hiện trong hai Bảng 4.2 và 4.3. Kết quả tính thể hiện trong các bảng tương ứng với loại BTCĐC sử dụng NS với tỉ lệ 0% và 1.5%. Trong đó, $U_L(\Delta a)$ là lượng công hấp thụ tương ứng chiều dài lan truyền vết nứt hay

là cường độ tiêu hao do vết nứt phát triển, khi kết cấu bị phá hủy hoàn toàn giá trị U_L sẽ bằng với U_T . Giá trị $\Delta a/(D-a_0)$ trong Bảng 4.2 và Bảng 4.3 là tỉ lệ chiều dài lan truyền vết nứt trên chiều cao dầm đã bỏ qua chiều dài rãnh tạo trước.

Bảng 4.2. Độ dự trữ cường độ sau nứt của BTCĐC sử dụng 0% NS

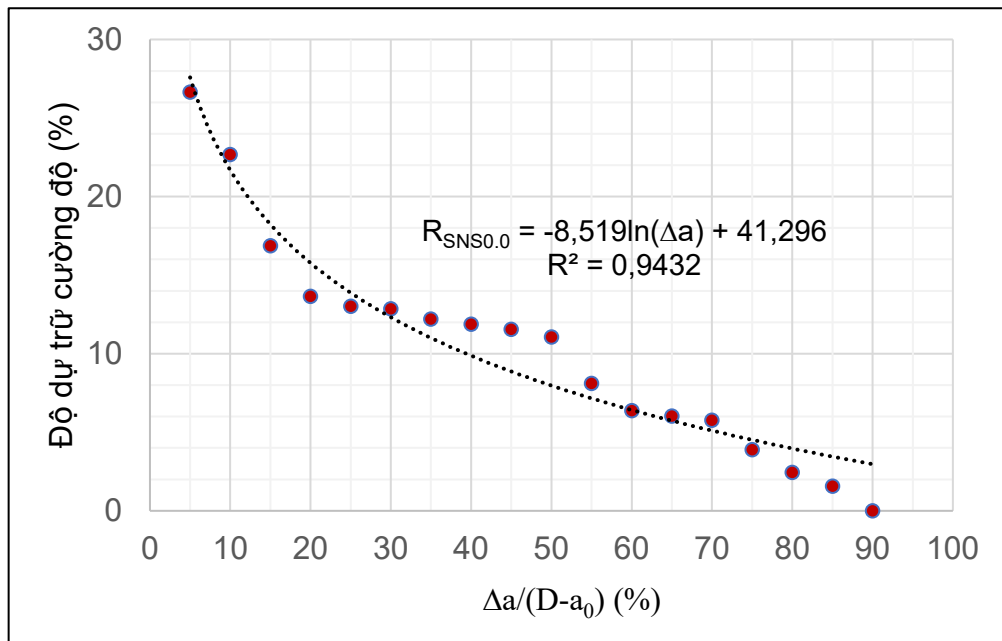
Tải trọng đỉnh (N)	G_F (N.mm/mm ²)	U_T (N.mm)	a (mm)	Δa (mm)	$U_L(\Delta a)$ (N.mm)	$\Delta a/(D-a_0)$ (%)	$R_S(\Delta a)$ (%)
7813	0,200	1454,8	-	-	0,00	-	100
			28,75	3,75	1067,10	5	26,65
			32,50	7,5	1125,00	10	22,67
			36,25	11,25	1238,62	15	16,86
			40,00	15,00	1256,22	20	13,65
			43,75	18,75	1265,53	25	13,01
			47,50	22,50	1267,86	30	12,85
			51,25	26,25	1277,46	35	12,19
			55,00	30,00	1283,42	40	11,88
			58,75	33,75	1286,92	45	11,54
			62,50	37,50	1294,04	50	11,05
			66,25	41,25	1336,82	55	8,11
			70,00	45,00	1361,98	60	6,38
			73,75	48,75	1367,22	65	6,02
			77,50	52,50	1371,00	70	5,76

Tải trọng đỉnh (N)	G_F (N.mm/mm ²)	U_T (N.mm)	a (mm)	Δa (mm)	$U_L(\Delta a)$ (N.mm)	$\Delta a/(D-a_0)$ (%)	$R_S(\Delta a)$ (%)
			81,25	56,25	1398,35	75	3,88
			85,00	60,00	1419,16	80	2,45
			88,75	63,75	1432,11	85	1,56
			92,5	67,5	1454,80	90	0
			-	-	1454,80	-	0

* Quan hệ chiều dài lan truyền vết nứt và độ dự trữ cường độ sau nứt BTCĐC không sử dụng NS:

Dựa vào kết quả tính toán độ dự trữ cường độ sau nứt R_S theo chiều dài lan truyền vết nứt Δa trong Bảng 4.2, mối quan hệ giữa R_S - Δa của BTCĐC không sử dụng NS được xây dựng như phương trình (4.19).

$$R_{SNS0,0} = -8,519 \ln(\Delta a) + 41,296 \quad (4.19)$$



Hình 4.11. Quan hệ độ dự trữ cường độ và chiều dài lan truyền nứt BTCĐC 0% NS

Bảng 4.3. Độ dư trữ cường độ sau nứt BTCĐC sử dụng 1.5% NS

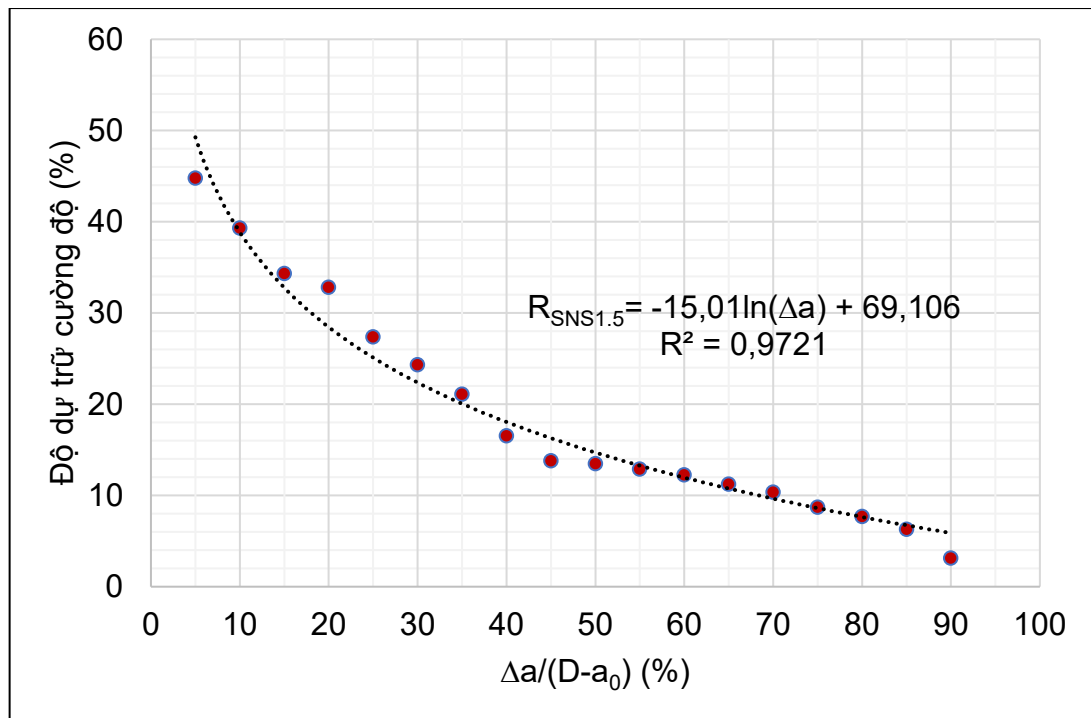
Tải trọng đỉnh (N)	G_F (N.mm/mm ²)	U_T (N.mm)	a (mm)	Δa (mm)	$U_L(\Delta a)$ (N.mm)	$\Delta a/(D-a_0)$ (%)	$R_s(\Delta a)$ (%)
8810	0,316	2308,90	-	-	0,00	-	100
			28,75	3,75	1275,21	5	44,77
			32,50	7,5	1401,50	10	39,30
			36,25	11,25	1516,02	15	34,34
			40,00	15,00	1551,12	20	32,82
			43,75	18,75	1676,49	25	27,39
			47,50	22,50	1747,61	30	24,31
			51,25	26,25	1844,81	35	21,10
			55,00	30,00	1927,47	40	16,52
			58,75	33,75	1990,27	45	13,80
			62,50	37,50	1997,66	50	13,48
			66,25	41,25	2011,05	55	12,90
			70,00	45,00	2026,06	60	12,25
			73,75	48,75	2049,15	65	11,25
			77,50	52,50	2069,93	70	10,35
			81,25	56,25	2108,26	75	8,69
			85,00	60,00	2131,11	80	7,70

Tải trọng đỉnh (N)	G_F (N.mm/mm ²)	U_T (N.mm)	a (mm)	Δa (mm)	$U_L(\Delta a)$ (N.mm)	$\Delta a/(D-a_0)$ (%)	$R_S(\Delta a)$ (%)
			88,75	63,75	2163,67	85	6,29
			92,5	67,5	2236,40	90	3,14
			-	-	2308,90	-	0

* Quan hệ chiều dài lan truyền vết nứt và độ dự trữ cường độ sau nứt BTCĐC sử dụng 1,5%NS:

Dựa vào kết quả tính toán độ dự trữ cường độ sau nứt R_S theo chiều dài phát triển vết nứt Δa trong Bảng 4.3, mối quan hệ giữa R_S - Δa của BTCĐC sử dụng 1,5%NS được xây dựng như phương trình (4.20).

$$R_{SNS1,5} = -15,01 \ln(\Delta a) + 69,106 \quad (4.20)$$



Hình 4.12. Quan hệ độ dự trữ cường độ và chiều dài lan truyền nứt BTCĐC 1,5% NS

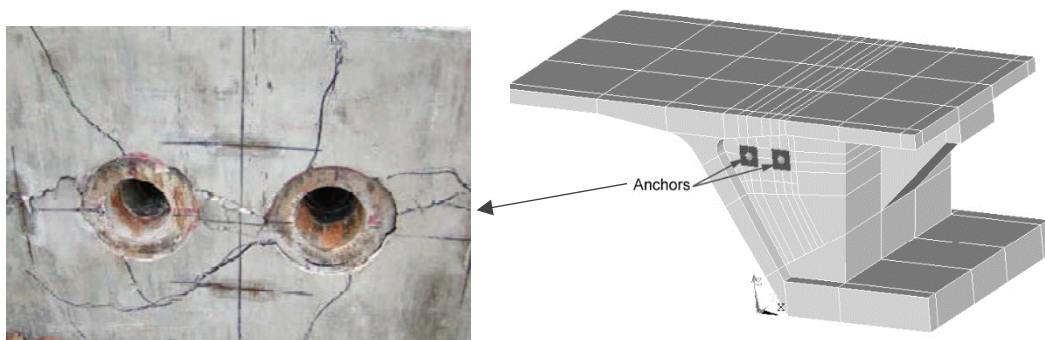
Nhận xét kết quả:

Khi chiều dài vết nứt phát triển, độ dự trữ cường độ bị suy giảm và tiến về 0 khi kết cấu phá hủy hoàn toàn. Đối với cùng một chiều dài lan truyền vết nứt, kết quả độ dự trữ cường độ của BTCĐC sử dụng NS cao hơn so với loại không sử dụng. Điều này có thể được giải thích rằng, khả năng giúp duy trì cường độ sau khi vết nứt xuất hiện của bê tông được cải thiện là do sự gia tăng chất lượng của vữa và vùng chuyển tiếp bề mặt. Bên cạnh đó, các hạt NS có thể làm tăng sức kháng lan truyền nứt của BTCĐC như đã đề cập thông qua các phân tích ở trên.

4.4. Ứng dụng BTCĐC sử dụng NS trong vùng neo chịu tải cục bộ

4.4.1. Đặc điểm kết cấu vùng neo

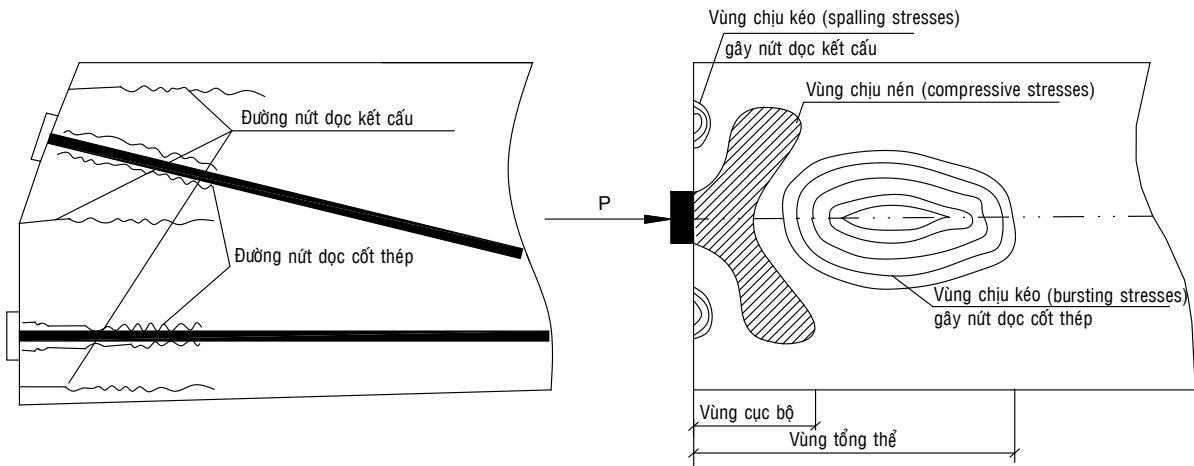
Vùng bê tông chịu lực cục bộ ở đầu neo dầm bê tông cốt thép dự ứng lực và ở các điểm neo dây văng cầu dây xiên dầm cứng có ứng xử rất phức tạp [67]. Ứng xử của bê tông tại các vùng neo rất phức tạp, có thể xuất hiện vết nứt do kéo hoặc do nén vỡ trong bê tông (Hình 4.13). Khi ứng suất kéo trong bê tông gây ra vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông, sẽ xuất hiện vết nứt, vị trí xuất hiện có thể là thớ trên, thớ dưới hay bên trong vùng neo.



Hình 4.13. Lan truyền vết nứt tại vùng neo chịu tải trọng cục bộ [67]

Phân bố trường ứng suất và biến dạng có thể gây ra các đường nứt cục bộ cả trong vùng chịu nén lẫn chịu kéo. Hai vùng này gọi là cục bộ và tổng thể được miêu tả như Hình 4.14. Trong đó, vùng chịu kéo do sự lan tỏa của ứng suất truyền từ thép vào bê tông gọi là vùng tổng thể, vùng chịu nén ngay dưới đầu

neo gọi là vùng cục bộ (Hình 4.14.). Các lý thuyết phi tuyến cần được dùng để mô phỏng chính xác ứng xử của các vùng này.



Hình 4.14. Vùng cục bộ, vùng tổng thể và các đường nứt trong vùng neo [16]

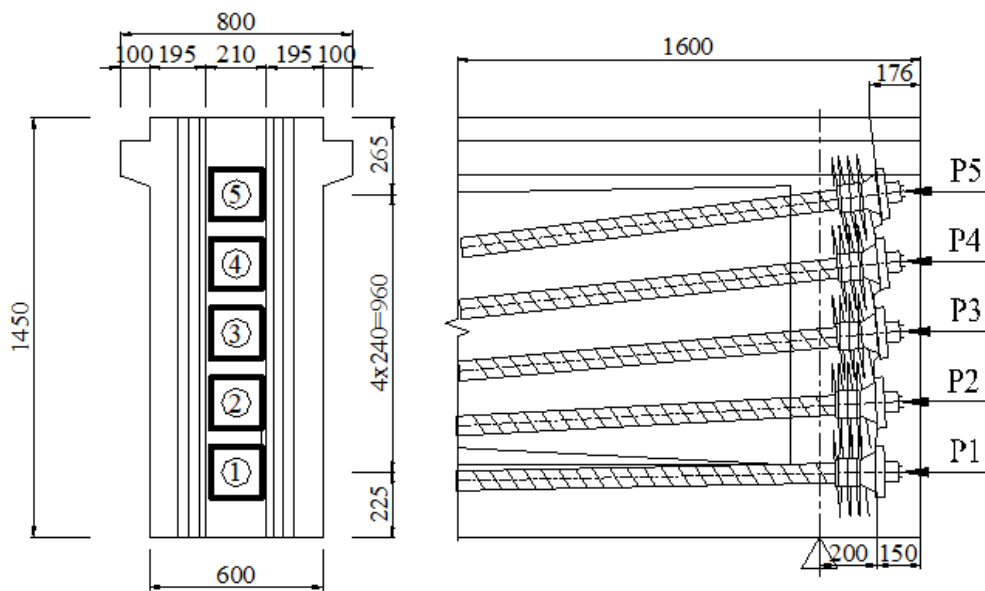
Vùng tổng thể chính là vùng neo, có chứa cả vùng cục bộ [16]. Vùng cục bộ là vùng bê tông nằm ngay dưới neo, được định nghĩa là một khối bê tông có dạng hình lăng trụ chữ nhật bao quanh và nằm ngay trước các thiết bị neo và cốt thép kiểm chế đi cùng neo. Vùng cục bộ chịu ứng suất cục bộ lớn và truyền ứng suất này sang các phần còn lại của vùng neo. Ứng xử của vùng cục bộ chịu ảnh hưởng lớn bởi các đặc trưng của vật liệu neo và cốt thép kiểm chế nhưng ít chịu ảnh hưởng của cấu tạo hình học và đặc điểm chịu lực chung của kết cấu tổng thể. Việc nghiên cứu khu vực cục bộ tập trung vào việc xem xét ảnh hưởng của áp lực neo lớn cũng như sự phù hợp của các cốt thép kiểm chế đến việc tăng khả năng của bê tông khi chịu lực ép này.

Đối với kết cấu bê tông chịu tải trọng cục bộ dễ xuất hiện vết nứt, khi xảy ra sự chảy dẻo có sự phân phối lại nội lực bên trong, do đó khi phân tích cần xem xét ảnh hưởng của các đặc tính cơ học của bê tông đến kết quả phân tích. BTCĐC sử dụng NS với các ưu thế về tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy sẽ là một vật liệu thích hợp sử dụng trong các kết cấu chịu tải trọng cục bộ. Ứng xử cục bộ vùng neo cáp đầu dầm BTCĐC sử dụng NS sẽ được phân tích trong nội dung tiếp theo.

4.4.2. Phân tích ứng xử vùng neo dự ứng lực dầm cầu BTCĐC sử dụng NS

a. Thông số vật liệu và kết cấu

Để phân tích ứng suất vùng neo ứng dụng BTCĐC sử dụng NS. Một kết cấu dầm I có vùng neo bố trí 05 bó cáp dự ứng lực với cấu tạo như Hình 4.15 được sử dụng phục vụ phân tích [6]. Các thông số tính toán kết cấu vùng đầu neo dầm được thể hiện trong Bảng 4.4. Với các tính chất và đặc điểm phá hủy đã được kiểm chứng BTCĐC 1,5% NS được đề xuất ứng dụng trong kết cấu vùng neo. Các tính chất cơ học BTCĐC 1,5% NS sẽ được sử dụng trong quá trình mô phỏng phân tích kết cấu vùng neo.



Hình 4.15. Mặt cắt cấu tạo vùng neo đầu dầm [6]

Bảng 4.4. Các thông số kích thước dầm và tải trọng tính toán vùng neo

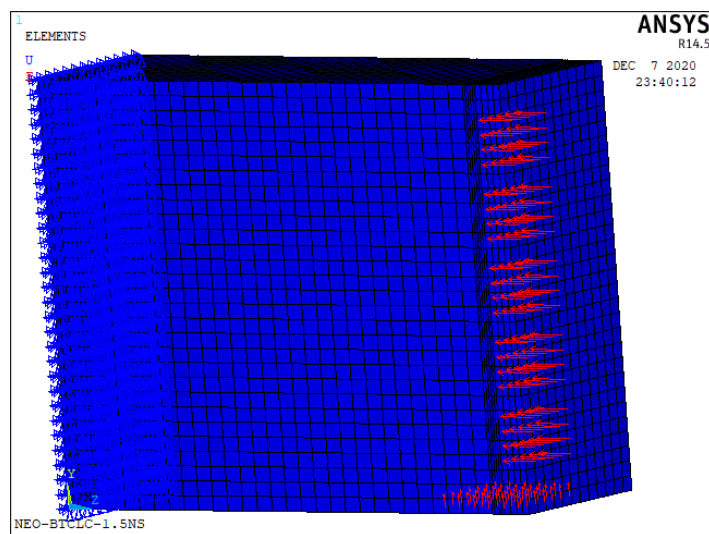
Chiều dài dầm (m)	25,7
Chiều cao dầm (m)	1,45
Chiều dài vùng D (m)	1,6
Loại cáp DUL (mm)	12,7
Lực căng bó cáp (kN)	959
Phản lực gối (kN)	565

Bảng 4.5. Các tham số tính toán của cốt thép trong vùng neo

Đường kính (mm)	14
Khoảng cách (mm)	100
Giới hạn chảy (MPa)	350
Mô đun đàn hồi (MPa)	200000

Trong phân tích này, vùng neo đầu dầm sẽ được mô phỏng với trường hợp dầm đưa vào khai thác, theo mô hình đàn dẻo có xét và không xét ảnh hưởng của cốt thép phân bố đầu dầm. Phương pháp phần tử hữu hạn (PPPTH) được sử dụng để mô phỏng sự làm việc của vùng neo. Để phản ánh đúng bản chất sự làm việc của kết cấu, ảnh hưởng của cốt thép đối với kết cấu vùng neo cũng được xét đến. Các thông số liên quan đến cốt thép vùng neo đầu dầm được thể hiện trong Bảng 4.5.

Vùng neo đầu dầm BTCĐC sử dụng nano silica được mô phỏng bằng phần mềm Ansys và sử dụng phần tử Solid65. Kích thước phần tử chọn khi mô phỏng trong Ansys là 50x50x60(mm). Tại vị trí gần cuối vùng D và vị trí tấm thép đệm được chia nhỏ hơn là 50x50x10(mm) (Hình 4.16), do những vùng này có sự thay đổi ứng suất phức tạp [6].



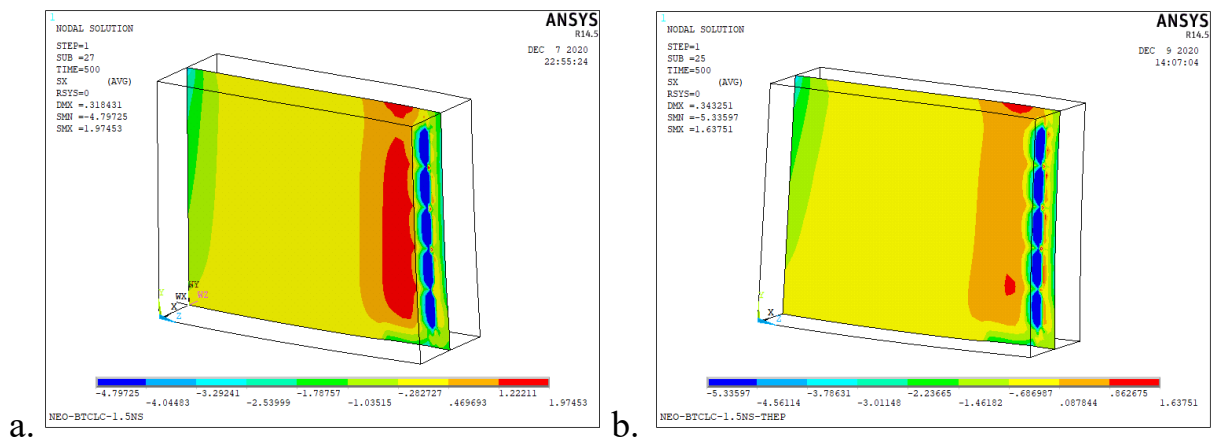
Hình 4.16. Mô hình vùng neo cáp ở đầu dầm dự ứng lực

Tại cuối vùng D được xem không chuyển vị nên gán điều kiện biên là

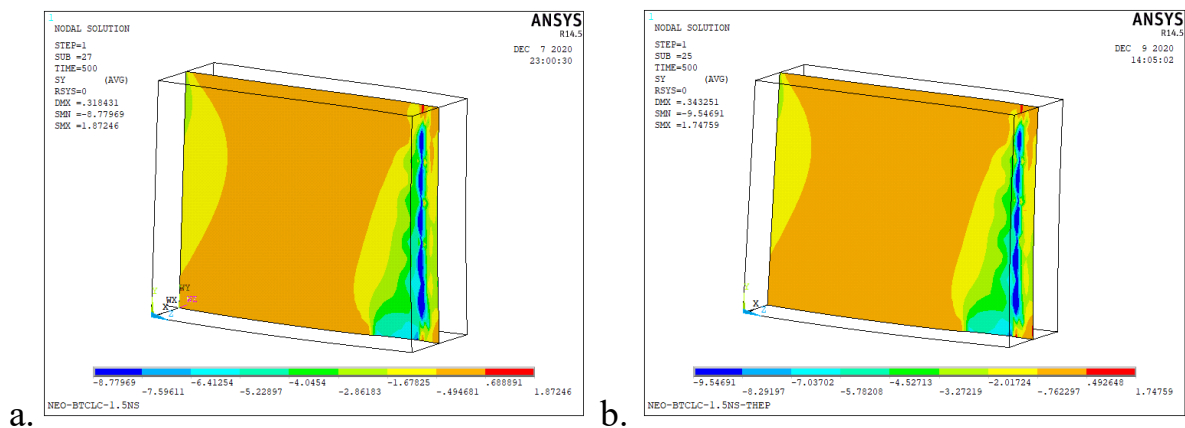
chuyển vị theo các phương bằng 0 [6]. Mô hình chỉnh thể tỉ lệ cốt thép theo tỉ lệ thể tích của bê tông được sử dụng khi xét đến cốt thép thường trong bê tông đầu dầm.

b. Kết quả phân tích ứng suất vùng neo chịu tải trọng cục bộ

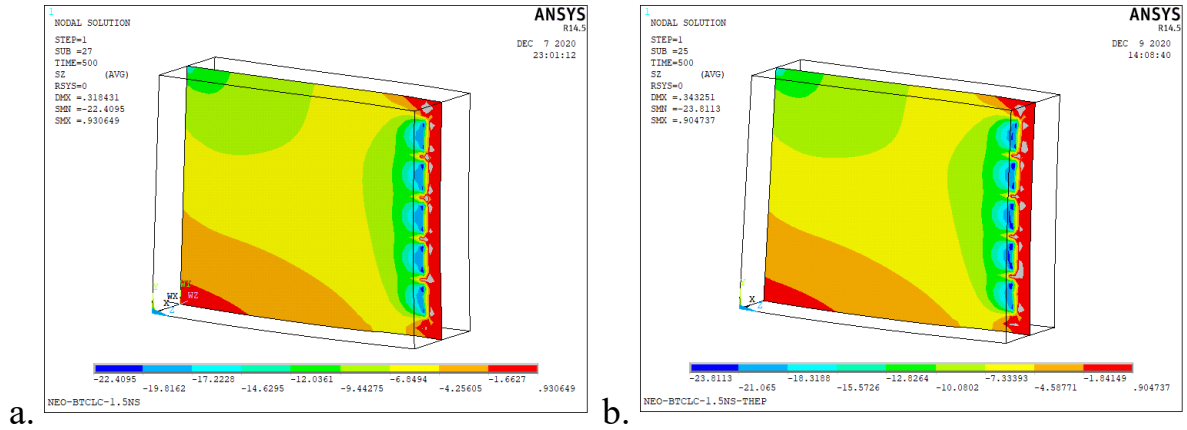
Vùng neo được phân tích với trường hợp xét tất cả các neo được căng, phản lực gối khi dầm đưa vào khai thác. Kết quả phân tích ứng suất theo ba phương X, Y, Z vùng neo có xét và không xét ảnh hưởng của cốt thép được thể hiện qua các biểu đồ Hình 4.17, Hình 4.18 và Hình 4.19. Ứng suất dọc trục neo điển hình được thể hiện qua Hình 4.20. Kết quả ứng suất lớn nhất theo các phương và dọc trục neo BTCĐC 1,5% NS được tổng hợp và so sánh với kết quả của bê tông thường [6] như trong Bảng 4.6.



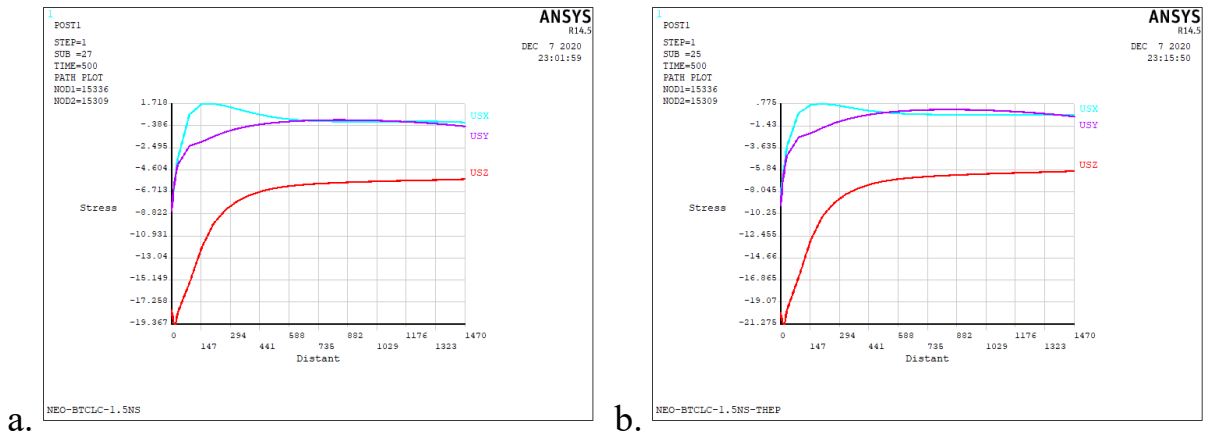
Hình 4.17. Ứng suất vùng neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a), có xét ảnh hưởng cốt thép (b) theo phương X



Hình 4.18. Ứng suất vùng neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a), có xét ảnh hưởng cốt thép (b) theo phương Y



Hình 4.19. Ứng suất vùng neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a), có xét ảnh hưởng cốt thép (b) theo phương Z



Hình 4.20. Ứng suất dọc trục neo không xét ảnh hưởng cốt thép (a) có xét ảnh hưởng cốt thép (b)

Bảng 4.6. Kết quả phân tích ứng suất vùng neo chịu tải trọng cục bộ

Ứng suất (MPa)	BTCĐC NS1,5	BT thường [6]
Ứng suất phương X (MPa)	1,98	3,90
Ứng suất phương Y (MPa)	1,87	1,96
Ứng suất phương Z (MPa)	0,93	2,70
Ứng suất dọc trục neo (MPa)	1,72	2,55

*** Nhận xét kết quả:**

Biểu đồ phân bố ứng suất vùng neo trong trường hợp xét đến các đặc trưng cơ học của BTCĐC 1,5% NS cho thấy, trong phạm vi vùng neo không xuất hiện vết nứt do ứng suất kéo lớn nhất đều nhỏ hơn so với ứng suất giới hạn.

Khi đối chiếu kết quả phân tích với các loại bê tông thường (Bảng 4.6), ứng suất kéo trong vùng neo BTCĐC sử dụng NS giảm xuống, ứng suất nén tăng lên theo các phương và giảm ứng suất kéo dọc theo các trục neo. Trong trường hợp có xét ảnh hưởng của cốt thép, ứng suất trong vùng neo và ứng suất dọc trục neo theo các phương đều giảm.

4.5. Hiệu quả kinh tế kỹ thuật của BTCĐC sử dụng NS ứng dụng trong công trình cầu

- Hiệu quả kỹ thuật:

BTCĐC sử dụng NS có các tính chất cơ học vượt trội so với bê tông thường và có thể đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật đối với các kết cấu công trình cầu nói riêng và kết cấu xây dựng nói chung. BTCĐC sử dụng NS có khả năng làm việc tốt với các điều kiện yêu cầu về độ bền và chống nứt đối với các kết cấu chịu tải trọng phức tạp trong các công trình cầu.

- Hiệu quả kinh tế:

Dựa vào thành phần cấp phối, giá thành bình quân 1m^3 BTCĐC sử dụng NS lớn hơn gấp khoảng $1,15 \div 1,2$ BTCĐC không sử dụng NS. Tuy nhiên khi sử dụng BTCĐC sử dụng NS có khả năng rút ngắn thời gian phát triển cường độ. Khả năng chống nứt có thể được xem xét trong các kết cấu ứng dụng BTCĐC sử dụng NS, từ đó có thể cân nhắc giảm lượng cốt thép trong các vùng không cần thiết. Ngoài ra, các ưu điểm về độ bền và đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng NS có thể hạn chế các chi phí di tu sửa chữa tăng cường kết cấu trong quá trình khai thác công trình.

4.6. Kết luận chương 4

Đường cong sức kháng mở rộng vết nứt $K_R(\Delta a)$ được lập trình tính toán dựa trên các tham số được xác định từ thí nghiệm. Cường độ chống nứt khởi đầu K_{lc}^{ini} và cường độ chống nứt dính kết K_I^C của BTCĐC sử dụng NS đều tăng lên so với cấp phối đối chứng.

Độ dự trữ cường độ sau nứt BTCĐC được đánh giá thông qua phương pháp sử dụng công phá hủy. Kết quả cho thấy, độ dự trữ cường độ của kết cấu BTCĐC suy giảm đáng kể khi vết nứt phát triển. Tuy nhiên, khi so sánh kết quả tính toán, độ dự trữ cường độ sau nứt của BTCĐC sử dụng NS được duy trì tốt hơn so với loại không sử dụng. Từ kết quả tính độ dự trữ cường độ sau nứt R_S , mối quan hệ giữa R_S và chiều dài lan truyền vết nứt Δa của BTCĐC có và không có sử dụng NS được xây dựng thông hai Phương trình 4.19 và 4.20.

Ứng xử cục bộ của vùng neo cáp dự ứng lực sử dụng NS được tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả cho thấy, BTCĐC sử dụng NS phù hợp ứng dụng trong vùng neo chịu tải trọng cục bộ. Các ứng suất kéo, nén theo các phương không vượt quá ứng suất giới hạn, vùng neo không xuất hiện vết nứt.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Luận án đã tập trung nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm xác định các tính chất cơ học chủ yếu và đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng NS ứng dụng trong công trình cầu. Những kết quả đạt được và đóng góp mới của luận án được tóm tắt như sau:

1. Những kết quả đạt được

- 1.1. Đã lựa chọn và thí nghiệm kiểm tra các tính chất kỹ thuật của các vật liệu thành phần chế tạo mẫu BTCĐC sử dụng NS. Trong đó, NS được thí nghiệm kiểm tra kích thước, hình dạng và cấu trúc để đảm bảo điều kiện tạo các phản ứng trong hỗn hợp bê tông.
- 1.2. Thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng nano silica với sự thay đổi hàm lượng từ 0 đến 3%. Kết quả xác định được 7 cấp phối BTCĐC sử dụng NS với cường độ đặc trưng 70MPa.
- 1.3. Đề xuất một quy trình trộn và chế tạo thành công các mẫu thử BTCĐC sử dụng NS với điều kiện thiết bị trong phòng thí nghiệm ở Việt Nam.
- 1.4. Đã xác định ảnh hưởng của NS đến một số tính chất cơ học chủ yếu của BTCĐC như: cường độ nén, cường độ kéo khi uốn và mô đun đàn hồi. Kết quả thể hiện, tỉ lệ 1,5% giúp cải thiện các tính chất cơ học tốt hơn so với các hàm lượng sử dụng khác. Quan hệ giữa tỉ lệ NS với cường độ nén và cường độ kéo khi uốn của BTCĐC theo các ngày tuổi được xây dựng bằng các phương trình hồi quy (Phương trình 2.11, 2.12). Quan hệ giữa NS và mô đun đàn hồi của BTCĐC ở 28 ngày tuổi được thể hiện thông qua phương trình tương quan giữa E và NS (Phương trình 2.17).
- 1.5. Các tham số và đặc điểm phá hủy của BTCĐC sử dụng NS với các tỉ lệ 0; 0,5 và 1,5% đã được xác định. Kết quả thí nghiệm cho thấy có sự ảnh hưởng tích cực của NS đến năng lượng phá hủy, chiều dài đặc trưng, quan hệ tải trọng – độ mở rộng miệng vết nứt, quan hệ tải trọng – độ võng của BTCĐC. Các tham số và đặc điểm phá hủy được cải thiện nhiều nhất với tỉ

lệ 1,5%. Dựa trên kết quả thí nghiệm các quan hệ giữa ứng suất – độ mở rộng vết nứt, ứng suất – chiều dài vết nứt, mềm hóa cũng được xác định và sử dụng trong tính toán sức kháng lan truyền vết nứt.

- 1.6. Các giá trị cường độ chống nứt và đường cong sức kháng lan truyền nứt của BTCĐC sử dụng NS được tính toán thông qua các tính chất cơ học và tham số phá hủy. Kết quả là cường độ chống nứt khởi đầu, cường độ chống nứt dính kết và sức kháng lan truyền nứt của BTCĐC sử dụng NS đều tăng.
- 1.7. Độ dự trữ cường độ tương ứng với chiều dài lan truyền vết nứt Δa được xác định bằng phương pháp công phá hủy. Bê tông cường độ cao sử dụng nano silica sau khi nứt có độ dự trữ cường độ lớn hơn so với loại không sử dụng. Hàm quan hệ giữa chiều dài lan truyền vết nứt Δa và độ dự trữ cường độ sau nứt của BTCĐC có và không sử dụng NS đã được xây dựng (Phương trình 4.19, 4.20).
- 1.8. Ứng xử cục bộ của vùng neo cáp dự ứng lực BTCĐC sử dụng NS được phân tích bằng phương pháp phân tử hữu hạn có xét đến các tính chất cơ học của bê tông. Kết quả cho thấy, vùng neo BTCĐC sử dụng NS có ứng suất kéo, nén theo các phương đều giảm và không vượt quá ứng suất giới hạn.

2. Những đóng góp mới của luận án

- 2.1. Luận án đã thiết kế thành phần BTCĐC sử dụng NS với cường độ đặc trưng 70MPa ứng dụng trong công trình cầu. Bảy cấp phối thành phần BTCĐC được thiết kế với sự thay đổi hàm lượng NS sử dụng từ 0 đến 3%.
- 2.2. Luận án đã thực nghiệm và phân tích sự ảnh hưởng của NS đến một số tính năng chủ yếu của BTCĐC như: cường độ nén, cường độ kéo khi uốn và mô đun đàn hồi. Quan hệ giữa tỉ lệ NS và các tính năng của BTCĐC theo các ngày tuổi được xây dựng bằng các phương trình hồi quy.
- 2.3. Luận án đã thực nghiệm và đánh giá ảnh hưởng của NS đến các tham số và đặc điểm phá hủy của BTCĐC. Kết quả cho thấy, tính dẻo của BTCĐC sử

dụng NS được cải thiện thông qua tham số và đặc điểm phá hủy như: năng lượng phá hủy, chiều dài đặc trưng phá hủy, quan hệ mềm hóa, quan hệ ứng suất – độ mở rộng vết nứt, quan hệ ứng suất – chiều dài lan truyền vết nứt.

- 2.4. Luận án đã sử dụng các tính chất cơ học và tham số phá hủy từ thực nghiệm để tính toán sức kháng lan truyền nứt và độ dự trữ cường độ tương ứng với chiều dài lan truyền vết nứt của BTCĐC sử dụng NS. Các phương trình hồi quy quan hệ giữa sức kháng lan truyền nứt, độ dự trữ cường độ và NS được xây dựng.
- 2.5. Luận án đã đánh giá khả năng ứng dụng BTCĐC sử dụng NS trong kết cấu cầu. Bước đầu phân tích ứng xử cục bộ của vùng neo cáp dự ứng lực BTCĐC sử dụng NS bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả thể hiện, có nhiều triển vọng khi ứng dụng BTCĐC sử dụng NS trong các vùng chịu tải cục bộ nói riêng và các bộ phận kết cấu cầu nói chung.

3. Những tồn tại, hạn chế

- Kết quả nghiên cứu phụ thuộc vào điều kiện công nghệ và thiết bị trong phòng thí nghiệm, chưa xét đến các ảnh hưởng của các yếu tố thi công ngoài hiện trường.
- Mỗi thành phần để chế tạo mẫu làm thí nghiệm trong luận án chỉ lấy từ một nguồn vật liệu. Chưa có sự đa dạng trong các thành phần vật liệu thí nghiệm.
- Thí nghiệm phá hủy chưa thực hiện trên toàn bộ các cấp phối đã thiết kế. Chưa xét đến hiệu ứng kích thước trong quá trình thực hiện thí nghiệm.

4. Kiến nghị các hướng nghiên cứu tiếp theo

- Nghiên cứu ảnh hưởng của NS đến các tính năng khác của BTCĐC như: khả năng chống ăn mòn clorua, co ngót, nhiệt thủy hóa,...
- Xác định các đặc trưng phá hủy và độ dự trữ cường độ sau nứt của bê tông cường độ cao sử dụng NS có xét đến các ảnh hưởng của đặc trưng cốt

liệu, hiệu ứng kích thước và các hiện tượng ăn mòn.

- Nghiên cứu ảnh hưởng cấu trúc vi mô đến các tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy BTCĐC sử dụng nano silica.
- Dựa trên các kết quả của luận án, tiếp tục nghiên cứu chế tạo ngoài công trường các cấu kiện kết cấu cầu ứng dụng BTCĐC sử dụng nano silica.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA NGHIÊN CỨU SINH

1. Ngô Văn Thức, Bùi Tiến Thành, Nguyễn Văn Hậu (2019), “*Đánh giá sự ảnh hưởng của nano silica đến các tính chất của bê tông chất lượng cao*”, Tạp chí Giao thông Vận tải, 9/2019.
2. Van Thuc Ngo, Thanh Quang Khai Lam, Thi My Dung Do, and Trong Chuc Nguyen (2019), “*Nano concrete aggregation with steel fibers: A problem to enhance the tensile strength of concrete*”, E3S Web of Conferences135, Scopus Indexed, doi: 10.1051/e3sconf/201913503001.
3. Van Thuc Ngo, Tien Thanh Bui, Thanh Quang Khai Lam, Thi Thu Nga Nguyen and Van Hau Nguyen (2020), “*Experimental Evaluation of Nano Silica Effects to High Performance Concrete Strength in Early Age*”, Materials Science and Engineering 869, Scopus Indexed, doi:10.1088/1757-9X/869/3/032011.
4. Van Thuc Ngo, Thanh Quang Khai Lam, Thi My Dung Do, and Trong Chuc Nguyen (2020), “*Increased plasticity of nano concrete with steel fibers*”, Magazine of Civil Engineering, Scopus Indexed (ESCI), volume 93, Issue 1, pp. 27-34.
5. Ngo Van Thuc, Bui Tien Thanh, Nguyen Thi Cam Nhung, Nguyen Thi Thu Nga, Nguyen Duyen Phong and Lam Thanh Quang Khai (2020), *Effect of nano-silica on fracture properties and crack extension resistance of high-performance concrete*, International Conference on Computational Methods, volume 7, pp. 337-346.
6. Ngô Văn Thức, Bùi Tiến Thành, Nguyễn Thị Cẩm Nhung (2020), “*Nghiên cứu ảnh hưởng của nano silica đến năng lượng phá hủy của bê tông chất lượng cao*”, Tạp chí Giao thông Vận tải, 11/2020.
7. Ngô Văn Thức, Bùi Tiến Thành, Nguyễn Thị Cẩm Nhung, Nguyễn Duyệt Phong, Đặng Văn Kiên (2020), “*Nghiên cứu cường độ dư trữ sau nứt dầm bê tông chất lượng cao sử dụng nano silica*”, Tạp chí Giao thông Vận tải, 12/2020.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

TIẾNG VIỆT:

- [1] Bộ Khoa học và Công nghệ (2014), *TCVN 10306, Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần mẫu hình trụ.*
- [2] Bộ Khoa học và Công nghệ (2009), *TCVN 2682, Xi măng Pooc Lãng - Yêu cầu kỹ thuật.*
- [3] Bộ Khoa học và Công nghệ (2017), *TCVN 11823, Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ*
- [4] Bộ Khoa học và Công nghệ (1993], *TCVN 3016, Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt.*
- [5] Bùi Huy Đường (2008), *Cơ học phá hủy - Bài toán ngược và lời giải*, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.
- [6] Đặng Ngọc Lợi (2013), *Nghiên cứu áp dụng mô hình đàn ảo để tính toán kết cấu tại vùng neo*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa HCM, Hồ Chí Minh.
- [7] Lê Văn Bách (2016), *Bước đầu sử dụng nano SiO₂ điều chế từ tro trấu làm phụ gia cho bê tông asphalt*, Tạp chí Giao thông Vận tải, Số tháng 10.
- [8] Nguyễn Tấn Nô, Vũ Quốc Bảo, Lê Anh Tuấn, Nguyễn Minh Tâm (2016), *Xử lý đất yếu bằng tro trấu được hoạt hóa bởi dung dịch kiềm bằng geopolymer*, Tạp chí Xây dựng, Số 55.
- [9] Nguyễn Thanh Vũ (2014), *Phân tích ứng xử của dầm bê tông cốt thép cường độ cao chịu tải trọng tĩnh theo lý thuyết phá hủy dòn bê tông không cục bộ*, Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa HCM, Hồ Chí Minh.
- [10] Nguyễn Tuấn Ngọc (2013), *Ứng dụng cơ học phá hủy trong kết cấu công trình*, Thông tin Thư viện thiết kế - Tổng công ty Tư vấn thiết kế Giao thông vận tải, Hà Nội.
- [11] Phạm Duy Anh (2010), *Nghiên cứu thành phần, tính chất cơ học vật liệu và ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt sợi thép ứng dụng trong kết cấu cầu*, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội.

- [12] Phạm Duy Hữu, Vũ Việt Cường, Vương Đăng Lê Mai, Đặng Thị Thanh Lê (2015), *Sử dụng SiO_2 điều chế từ tro trấu để tăng cường độ tuổi sớm cho bê tông nhiều tro bay*, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, Số đặc biệt.
- [13] Phạm Duy Hữu, Nguyễn Ngọc Long, Đào Văn Đông, Phạm Duy Anh (2008), *Bê tông cường độ cao và bê tông chất lượng cao*, Nhà xuất bản Giao Thông Vận Tải, Hà Nội.
- [14] Trần Hữu Bằng (2019), *Nghiên cứu một số tính chất chủ yếu của bê tông xi măng nano SiO_2 và Silica Fume ứng dụng trong thiết kế mặt đường ô tô khu vực miền Tây Nam bộ*, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội.
- [15] Trần Thế Truyền, Nguyễn Viết Trung (2008), *Lý thuyết và thực nghiệm xác định các tham số của mô hình phá hủy dòn bê tông, ứng dụng vào phân tích cơ chế phá hủy của các bộ phận kết cấu công trình giao thông*" Tạp chí khoa học Giao thông Vận tải, Số 23.
- [16] Trần Thế Truyền, Nguyễn Xuân Huy, Phá hủy (2011), *Rạn nứt Bê tông: Cơ học và ứng dụng*, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [17] Trương Tích Thiện, Trần Kim Bằng (2010), *Cơ học phá hủy*, NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Hồ Chí Minh.
- [18] Vũ Bá Thành, Bùi Tiến Thành, Nguyễn Xuân Lam, Nguyễn Ngọc Long, Lê Bá Anh (2016), *Sử dụng xi măng nano kết hợp với cốt sợi phân tán để nâng cao tính dẻo trong sửa chữa khe co giãn cầu có xe tải lớn*, Tạp chí Giao thông Vận tải, Số tháng 10.

TIẾNG ANH:

- [19] ASTM C33 (1999), *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [20] ACI 211.4R-08 (2008), *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*, American Concrete Institute.

- [21] ACI 318 (2011), *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute.
- [22] ACI 363R-10 (2010), *Report on High-Strength Concrete*, American Concrete Institute.
- [23] ASTM C136 (2011), *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- [24] ASTM C127-01 (2001), *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.
- [25] ASTM C143 (2015), *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*.
- [26] ASTM C39 (2003), *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [27] ASTM C78 (2002), *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*.
- [28] ASTM C469 (2002) *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*
- [29] M. Amin, K. Abu el-hassan (2015), *Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete*, Construction and Building Materials, vol. 80, pp. 116-124.
- [30] H. Bahadori, P. Hosseini (2012), *Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties)*, Civil Engineering, vol. 18, pp. 416-425.
- [31] M. Bastami, M. Baghbadrani, F. Aslani (2014), *Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures*, Construction and Building Materials, vol. 68, pp. 402-408.
- [32] Z. P. Bazant (1984), *Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal*, ASCE Journal of Engineering Mechanics, vol. 110, pp. 518-535.

- [33] Z. P. Bazant and M. Jirasek (1993), *R-curve modeling of rate and size effects in quasibrittle fracture*, International Journal of Fracture, vol. 62, pp. 355-373.
- [34] B. Birgisson, A. K. Mukhopadhyay, G. Geary, M. Khan, K. Sobolev (2012), *Nanotechnology in Concrete Materials*, Transportation Research Board, Washington.
- [35] J. Bjornstrom, A. Martinelli, A. Matic, L. Borjesson, and I. Panas (2004), *Accelerating Effects of Colloidal Nanosilica for Beneficial Calcium-Silicate-Hydrate Formation in Cement*, Chemical Physics Letters, vol. 392, pp. 242–248.
- [36] T. T. Bui (2007), "Numerical simulation of Fracture in Plain and Fibre-reinforced Concrete," PhD thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [37] M. O. G. P. Braganca, K. F. Portella, M. M. Bonato (2016), *Performance of Portland cement concretes with 1% nano-Fe₃O₄ addition: Electrochemical stability under chloride and sulfate environments*, Construction and Building Material, vol. 117, p. 152–162.
- [38] E. Bruhwiler and F. H. Wittmann (1990), *The wedge splitting test, a new method of preforming stable fracture mechanics tests*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 35, pp. 117-125.
- [39] S. Chithra, S. R. R. Senthil Kumar, K. Chinnaraju (2016), *The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate*, Construction and Building Materials, vol. 113, pp. 794-804.
- [40] Comite Euro-International du Beton (1990), *CEB-FIP Model Code Bulletin D'Information*, EPF Lausanne.

- [41] W. Dong, Z. M. Wu, and X. M. Zhou (2013), *Calculating crack extension resistance of concrete based on a new crack propagation criterion*, Construction Building Material, vol. 38(2), pp. 879-889.
- [42] H. Du, S. Du, X. Liu (2014), *Durability performances of concrete with nano-silica*, Construction and Building Material, vol. 73, pp. 705-712.
- [43] H. Du, S. Du, X. Liu (2015), *Effect of nano-silica on mechanical and transport properties of lightweight concrete*, Construction and Building Materials, vol. 82, p. 114–122.
- [44] R. Feynman (1960), *There's plenty of room at the bottom*, Engineering and Science , vol. 23, pp. 22-36, 1960.
- [45] I. Flores, K. Sobolev, L. M. Torres-Martinez, E. L. Cuellar, P. L. Valdez, and E. Zarazua (2010), *Performances of Cement Systems with Nano-SiO₂ Particles Produced by Using the Sol-Gel Method*, The Transportation Research Board, vol. 2141, pp. 10-14.
- [46] R. M. L. Foote, Y. W. Mai and B. Cotterell (1986), *Crack growth resistance curves in strain-softening materials*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 34, pp. 593-607
- [47] E. Garboczi (2009), *Concrete nanoscience and nanotechnology: Definitions and applications. Nanotechnology in Construction 3*, Nanotechnology in Construction, vol. 3, pp. 81-88.
- [48] J. J. Gaitero, I. Campillo, P. Mondal, and S. P. Shah (2010), *Small Changes Can Make a Great Difference*, Transportation Research Board, vol. 2141, pp. 1-5.
- [49] D. Gao and L. Han (2014), *Evaluation of compressive strength and the highest exposure temperature of fiber and nanosized materials reinforced concrete by ultrasonic-rebound combined method*, J. Build. Mater, vol. 17, pp. 1025-1030.

- [50] A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz and M. A. M. Salleh (2011), *The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nanoparticles binary blended concrete*, Composites Part B: Engineering, vol. 42, pp. 562-569.
- [51] A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz and M. A. M. Salleh (2011), *Investigations on the development of the permeability properties of binary blended concrete with nano-SiO₂ particles*, Composites Material, vol. 45, pp. 1931–1938.
- [52] F. J. Gomez, M. Elices and A. Valiente (2000), *Cracking in PMMA containing U-shaped notches*, Fracture of Engineering Materials, vol. 23, pp. 795-803.
- [53] A. A. Griffth (1920), *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philosophical Transactions, Royal Society of London, vol. 221, pp. 163-198.
- [54] S. Gopinath, P. C. Mouli, A. R. Murthy, N. R. Iyer, S. Maheswaran (2012), *Effect of Nano Silica on Mechanical Properties and Durability of Normal Strength Concrete*, Archives of Civil Engineering, vol. 58, pp. 433–444.
- [55] Z. Guo and X. Zhang (1987), *Investigation of complete stress-deformation curves for concrete in tension*, ACI Material Journal, vol. 84, pp. 278-285.
- [56] A. Hillerborg (1985), *Results of three comparative test series for determining the fracture energy GF of concrete*, Materials and Structures, vol. 18, pp. 407-413.
- [57] A. Hillerborg (1976), *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*, Cement and Concrete Research, vol. 6, pp. 773-782.

- [58] P. Hosseini, A. Booshehrian, and S. Farshchi (2010), *Influence of Nano-SiO₂ Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Cement Mortars for Ferrocement*, the Transportation Research Board, vol. 2141, pp. 15-20.
- [59] W. Li, Z. Huang, F. Cao (2015), *Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix*, Construction and Building Materials, vol. 95, pp. 366-374.
- [60] X. Z. Hu and Y. W. Mai (1992), *Crack-bridging analysis for alumina ceramics under monotonic and cyclic loading*, Journal of the American Ceramic Society, vol. 75, pp. 848-853.
- [61] R. G. Irwin (1957), *Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate*, ASME Journal of Applied Mechanics , vol. 24, pp. 361-364.
- [62] R. Ismeal, J. V. Silva, R. N. F. Carmo (2016), *Influence of nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃*, Construction and Building Material, vol. 125, p. 1080–1092.
- [63] H. Jafari, S. Afshar (2015), *Improved Photodegradation of Organic Contaminants Using Nano TiO₂ and Nano SiO₂ Deposited on or Cement Concrete Blocks*, Photochemistry and Photobiology, vol. 92(1), pp. 87-101.
- [64] M. Jalal, A. Pouladkhan, O. F. Harandi, D. Jafari (2015), *Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete*, Construction and Building Material, vol. 95, pp. 366-374.
- [65] Y.S. Jenq and S.P. Shah (1985), *A fracture toughness criterion for concrete*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 21(5), pp. 1055–1069.
- [66] S. P. Jenq and Y. S. Shah (1985b), *Two parameter fracture model for concrete*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 111(10), 1227–1241

- [67] T. Kamal, R. Brenda (2008), *Post-Tensioned Bridge Girder Anchorage Zone Enhancement with Fiber Reinforced Concrete (FRC)*, PhD Thesis, The Florida Department of Transportation, Florida.
- [68] F. M. Kaplan (1961), *Crack Propagation and the Fracture of Concrete*, ACI Journal, vol. 58, pp. 591-610.
- [69] B. L. Karihaloo (1987), *Do plain and rubber-reinforced concretes have an R-curve behaviour?*, Shah SP, Swartz SE, editors. *Fractures of concrete and rock*. Springer-Verlag, pp. 96-105.
- [70] A. Khaloo, M. H. Mobini, P. Hosseini (2016), *Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete*, *Construction and Building Material*, vol. 113, pp. 188-201.
- [71] S. Kumar and S.V. Barai (2008), *Influence of specimen geometry and size-effect on the KR-curve based on the cohesive stress in concrete*, *International Journal Fracture*, vol. 152(2), pp. 127-148.
- [72] S. Mindess (2002), *Applications of fracture mechanics to concrete: Where do we go from here?* *Material Science to Application*, vol. 206, pp. 475-485.
- [73] P. Nallathambi and B. L. Karihaloo (1986), *Determination of the specimen-size independent fracture toughness of plain concrete*, *Magazine of Concrete Research*, vol. 38, pp. 67-76.
- [74] M. S. M. Norhasri, M. S. Hamidah, A. M. Fadzil (2017), *Inclusion of nanometakaolin as additive in ultra high performance concrete (UHPC)*, *Construction and Building Material*, vol. 127, pp. 167-175.
- [75] G. Li (2004), *Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂*, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1043-1049.
- [76] H. Li, M. H. Zhang, J. P. Ou (2007), *Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement*, *International Journal of Fatigue*, vol. 29, pp. 1292-1301.

- [77] P. E. Petersson (1981), *Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials*, Technical report, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [78] J. Planas, M. Elices and G. Ruiz (1993), *The equivalent elastic crack: 2. X-Y equivalences and asymptotic analysis*, Journal of Fracture, vol. 61, pp. 231-246.
- [79] J. Planas and M. Elices (1991), *Nonlinear fracture of cohesive materials*, International Journal of Fracture, vol. 51, pp. 139-157.
- [80] Y. Qing, Zh Zenan, Sh Li, Ch Rongshen (2008), *A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume*, J. Wuhan Univ. Technol. – Mater.Sci., vol. 21, pp. 153-157.
- [81] Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen (2007), *Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume*, Construction and Building Material, vol. 21, pp. 539-545.
- [82] N. S. Que (2003), *Identification Of Cohesive Crack Fracture Parameters Using Mathematical Programming*, PhD thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [83] G. Quercia (2014), *Application of nano-silica in concrete*, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- [84] G. Quercia, A. Lazaro, J. W. Geus, H. J. H Brouwers (2013), *Characterization of morphology and texture of several amorphous nano-silica particles used in concrete*, Cement and Concrete Composites, vol. 44, pp. 77-92.
- [86] H. W. Reinhardt, H. A. W. Cornelissen and D. A. Hordijk (1986), *Tensile tests and failure analysis of concrete*, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 112, pp. 2462-2477.

- [87] A.E. Ricardo, S.L.V. Marta (2006), *Fracture parameters for high-performance concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 36, pp. 576 – 583.
- [88] S. Riahi, A. Nazari (2011), *Compressive strength and abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and CuO nanoparticles in different curing media*, Science China Technological Sciences, vol. 54, pp. 2349-2357.
- [89] A.E. Ricardo and S.L.V. Marta (2006), *Fracture parameters for high-performance concrete*, Cement and Concrete, vol. 36, pp. 576-583.
- [90] RILEM (1985), *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*, Materials and Structures, 18:285-290. Committee FMC 50.
- [91] F. Sanchez and K. Sobolev (2010), *Nanotechnology in Concrete: A Review*, Construction And Building Materials, vol. 24, pp. 2060-2071.
- [92] A. M. Said, M. S. Zeidan, M. T. Bassuoni, Y. Tian (2012), *Properties of concrete incorporating nano-silica*, Construction and Building Material, vol. 36, pp. 838-844.
- [93] M. Stefanidou, I. Papayianni (2012), *Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement*, Composites Part B: Engineering, vol. 43, pp. 2706-271.
- [94] K. Sobolev, I. Flores, R. Hermosillo (2006), *Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites*, Denver: American Concrete Institute.
- [95] S. W. M. Supit, F. U. A. Shaikh (2014), *Effect of nano-CaCO₃ on compressive strength development of high volume fly ash mortars and concretes*, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 12, pp. 178-186.

- [96] K. Sobolev, I. Flores, L. M. Torres-Martinez, P. L. Valdez, E. Zarazua, E. L. Cuellar (2009), *Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials*, Nanotechnology in Construction, vol. 3, pp. 139-148.
- [97] H. Tada, P. C. Paris, R. G. Irwin (1985), *The stress analysis of cracks handbook*, St. Louis: Paris Productions Incorporated.
- [98] H. Tada, B. C. Paris and G. R. Irwin (2000), *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, New York: Wiley.
- [99] M. Tang, H. Ba, and Y. Li (2003), *Study on Compound Effect of Silica Fume and Nano-SiO₂ for Cementing*, Guisuanyan Xuebao, vol. 31, pp. 523-527.
- [100] H. F. W. Taylor (1993), *Nanostructure of C-S-H: Current Status*, Advanced Cement Based Materials, vol. 1, pp. 38-46.
- [101] J. G. M. Van Mier (1997), *Fracture Processes of Concrete*, CRC Press, Florida.
- [102] J. G. M. Van Mier (2013), *Concrete Fracture: A Multiscale Approach*, CRC Press, New York.
- [103] X. Wu, *Prediction of service load of concrete structures after cracking*, PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, Newark.
- [104] S. Xu, and H. W. Reinhardt (1999), *Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture*, International Journal of Fracture, vol. 92, pp. 71-99.
- [105] S. Xu, and H. W. Reinhardt (1999), *Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials - part II: analytically evaluating and practically measuring methods for three-point bending notched beams*, International Journal of Fracture, vol. 98, pp. 151-77.

- [106] S. Xu and H. W. Reinhardt (2000), *A simplified method for determining double-K fracture parameters for three-point bending tests*, International Journal of Fracture, vol. 104, pp. 181-209.
- [107] S. Xu and H. W. Reinhardt (1999), *Crack extension resistance based on the cohesive force in concrete*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 64, pp. 563-587.
- [108] X. N. Yang, X. G. Wan, S. Q. Wang (2013), *Comparison of performance of heat resistant concrete with nano silica fume and fly ash added*, Bull. Chinese Ceramic Soc, vol. 32, pp. 1146-1150.
- [109] R. Yu, P. Tang, P. Spiesz, H. J. H. Brouwers (2014), *A study of multiple effects of nanosilica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA)*, Construction and Building Materials, vol. 60, pp. 98-110.
- [110] P. Zhang, J. Wan, K. Wang, Q. Li (2017), *Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review*, Construction and Building Materials, vol. 148, pp. 648-658.
- [111] P. Zhang, Y. N. Zhao, Q. F. Li, T. H. Zhang, P. Wang (2014), *Mechanical properties of fly ash concrete composite reinforced with nano-SiO₂ and steel fiber*, Current Science, vol. 106, pp. 1529-1537.
- [112] M.H. Zhang, J. Islam (2012), *Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag*, Construction and Building Material, vol. 29, pp. 573-580.
- [113] M. H. Zhang, H. Li (2011), *Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement*, Construction and Building Material, vol. 25, pp. 608-616.

- [114] W. Zhu, P. Bartos, P. Porro (2004), *Application of nanotechnology in construction. Summary of a state-of-the-art report*, RILEM TC 197-NCM, Materials and Structures, vol. 37, pp. 649-658.

PHỤ LỤC I

TÍNH TOÁN THÀNH PHẦN CẤP PHỐI BTCĐC

SỬ DỤNG NANO SILICA

Bước 1: Lựa chọn độ sụt và cường độ bê tông yêu cầu

Chọn độ sụt gốc trước khi cho phụ gia siêu dẻo vào hỗn hợp bê tông là 2,5–5cm (theo Bảng 2.12, với bê tông có sử dụng phụ gia siêu dẻo).

$$f'_{cr} = 1,1f'_c + 4,83 = 81,83 \text{ (MPa)}$$

Bước 2: Chọn kích thước $D_{\max}$ của hạt cốt liệu lớn

Cường độ yêu cầu $f'_{cr} = 81,83 \text{ (MPa)}$ tra Bảng 2.13 chọn $D_{\max} = 9,5 \text{ (mm)}$.

Bước 3: Chọn hàm lượng cốt liệu thô tối ưu:

Hàm lượng cốt liệu thô tối ưu được lựa chọn từ Bảng 2.14 là 0,65 trên một đơn vị thể tích bê tông.

Khối lượng cốt liệu khô $= 0,65 \times 1615 = 1049,75 \text{ (kg/m}^3 \text{ bê tông)}$

Bước 4: Xác định lượng nước và hàm lượng không khí.

Khối lượng nước trên một đơn vị thể tích bê tông cần thiết để tạo ra một độ sụt xác định phụ thuộc vào lượng xi măng và kiểu hóa chất giảm nước được áp dụng. Lượng nước dự tính ban đầu được lấy như Bảng 2.15.

Giá trị trong bảng phải được điều chỉnh đối với cát có lỗ rỗng khác 35% theo công thức $N_{dc} = (r_c - 35) \times 4,72 \text{ l/m}^3$

Lượng nước được lựa chọn sơ bộ theo bảng trên là: 183 lít

Lỗ rỗng của cát được sử dụng là:

$$r_c = \left(1 - \frac{\rho_{clc}}{\rho_c}\right) \times 100 \text{ (%) } = \left(1 - \frac{1,735}{2,66}\right) \times 100 \text{ (%)}$$

Vậy lượng điều chỉnh nước trộn $= (34,78 - 35) \times 4,72 = -1,04 \text{ (kg/m}^3 \text{)}$

Do vậy tổng lượng nước trộn cần thiết cho một m^3 bê tông là:

$$N = (183 - 1,04) \times 0,85 = 154,67 \text{ (kg/m}^3 \text{)}$$

Bước 5: Chọn tỷ lệ N/CKD

Tỷ số N/CKD được yêu cầu chọn trong Bảng 2.16, $N/CKD = 0,27$.

Bước 6: Tính toán hàm lượng chất kết dính

Với tỷ lệ N/CKD được chọn ở trên bằng 0,27 và lượng nước $N=154,67$ lít; chất kết dính cho 1m^3 bê tông được tính như sau:

$$CKD = \frac{N}{N / CKD} = \frac{154,67}{0,27} = 572,85 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Theo tiêu chuẩn ACI 363R-10 hàm lượng xi măng tối đa là 593kg/m^3 . Vì vậy, chọn lượng chất kết dính: $CKD = 572,85 \text{ kg/m}^3 \leq 593\text{kg/m}^3$

Bước 7: Xác định khối lượng xi măng và nano Silica

1. Không dùng NS (chất kết dính chỉ bao gồm xi măng và silica fume):

Khối lượng xi măng (X), silica fume (SF):

$CKD = 572,85 \text{ (kg)}$, $X = CKD - SF = 544,21 \text{ (kg)}$, $SF = 0,05 \times CKD = 28,64 \text{ (kg)}$.

2. Sử dụng 0,5% NS:

Khối lượng xi măng (X), silica fume (SF), nano Silica (NS):

$CKD = 572,85 \text{ (kg)}$, $X = CKD - SF - NS = 541,34 \text{ (kg)}$, $SF = 28,64 \text{ (kg)}$, $NS = 0,005 \times CKD = 2,86 \text{ (kg)}$.

3. Sử dụng 1,0% NS thay thế xi măng:

$CKD = 572,85 \text{ (kg)}$, $X = CKD - SF - NS = 538,48 \text{ (kg)}$, $SF = 28,64 \text{ (kg)}$, $NS = 0,01 \times CKD = 5,73 \text{ (kg)}$.

4. Sử dụng 1,5% NS thay thế xi măng:

$CKD = 572,85 \text{ (kg)}$, $X = CKD - SF - NS = 535,61 \text{ (kg)}$, $SF = 28,64 \text{ (kg)}$, $NS = 0,015 \times CKD = 8,59 \text{ (kg)}$.

5. Sử dụng 2,0% NS thay thế xi măng:

CKD = 572,85 (kg), $X = \text{CKD} - \text{SF} - \text{NS} = 532,75$ (kg), $\text{SF} = 28,64$ (kg),
 $\text{NS} = 0,02 \times \text{CKD} = 11,46$ (kg).

6. Sử dụng 2,5% NS thay thế xi măng:

CKD = 572,85 (kg), $X = \text{CKD} - \text{SF} - \text{NS} = 529,89$ (kg), $\text{SF} = 28,64$ (kg),
 $\text{NS} = 0,025 \times \text{CKD} = 14,32$ (kg).

7. Sử dụng 3,0% NS thay thế xi măng:

CKD = 572,85 (kg), $X = \text{CKD} - \text{SF} - \text{NS} = 527,02$ (kg), $\text{SF} = 28,64$ (kg),
 $\text{NS} = 0,03 \times \text{CKD} = 17,19$ (kg).

Bước 8: Xác định khối lượng cốt liệu nhỏ

1. Không dùng NS:

Bảng 1. Thể tích các loại vật liệu trừ cát

Xi măng = $544,21 / (3,1 \times 10^3)$ (m ³)	0,1756
Đá = $1049,75 / (2,74 \times 10^3)$ (m ³)	0,383
Nước = $154,67 / 1000$ (m ³)	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf}) = 0,2487 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 2. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở

Xi măng (kg)	544,21
Cát (kg)	661,54
Đá (kg)	1049,75
Silica fume (kg)	28,64
Nước (lit)	154,67

2. Sử dụng 0,5% NS:

Bảng 3. Thể tích các loại vật liệu trừ cát với 0,5% NS

Xi măng = $541,34/(3,1 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,1746
Đá = $1049,75/(2,74 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,383
Nước = $154,67/1000 \text{ (m}^3\text{)}$	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013
Nano silica = $2,83/(2,2 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,0013

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf} - V_{ns}) = 0,2484 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 4. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở với 0,5% NS

Xi măng (kg)	541,34
Cát (kg)	660,74
Đá (kg)	1049,75
Nước (lít)	154,67
Silica fume (kg)	28,64
Nano silica (kg)	2,86

3. Sử dụng 1,0% NS:

Bảng 5. Thể tích các loại vật liệu trừ cát với 1,0% NS

Xi măng = $538,48/(3,1 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,1737
Đá = $1049,75/(2,74 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,383
Nước = $154,67/1000 \text{ (m}^3\text{)}$	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013
Nano silica = $5,73/(2,2 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,0026

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf} - V_{ns}) = 0,2480 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 6. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở với 1,0% NS

Xi măng (kg)	538,48
Cát (kg)	659,68
Đá (kg)	1049,75
Nước (lit)	154,67
Silica fume (kg)	28,64
Nano silica (kg)	5,73

4. Sử dụng 1,5% NS:

Bảng 7. Thể tích các loại vật liệu trừ cát với 1,5% NS

Xi măng = $535,61 / (3,1 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,1728
Đá = $1049,75 / (2,74 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,383
Nước = $154,67 / 1000 \text{ (m}^3\text{)}$	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013
Nano silica = $9,36 / (2,2 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,0039

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf} - V_{ns}) = 0,2476 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 8. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở với 1,5% NS

Xi măng (kg)	535,61
Cát (kg)	658,62
Đá (kg)	1049,75
Nước (lit)	154,67
Silica fume (kg)	28,64
Nano silica (kg)	8,59

5. Sử dụng 2,0% NS:

Bảng 9. Thể tích các loại vật liệu trừ cát với 2,0% NS

Xi măng = $532,75 / (3,1 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,1719
Đá = $1049,75 / (2,74 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,383
Nước = $154,67 / 1000 \text{ (m}^3\text{)}$	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013
Nano silica = $11,46 / (2,2 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,0052

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf} - V_{ns}) = 0,2472 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 10. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở với 2,0% NS

Xi măng (kg)	532,75
Cát (kg)	657,55
Đá (kg)	1049,75
Nước (lit)	154,67
Silica fume (kg)	28,64
Nano silica (kg)	11,46

6. Sử dụng 2,5% NS:

Bảng 11. Thể tích các loại vật liệu trừ cát với 2,5% NS

Xi măng = $529,89 / (3,1 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,1709
Đá = $1049,75 / (2,74 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,383
Nước = $157,67 / 1000 \text{ (m}^3\text{)}$	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013
Nano silica = $14,32 / (2,2 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,0065

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf} - V_{ns}) = 0,2469 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 12. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở với 2,5% NS

Xi măng (kg)	529,89
Cát (kg)	656,76
Đá (kg)	1049,75
Nước (lít)	154,67
Silica fume (kg)	28,64
Nano silica (kg)	14,32

7. Sử dụng 3,0% NS:

Bảng 13. Thể tích các loại vật liệu trừ cát với 3,0% NS

Xi măng = $527,02 / (3,1 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,170
Đá = $1049,75 / (2,74 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,383
Nước = $154,67 / 1000 \text{ (m}^3\text{)}$	0,1547
Không khí (m ³)	0,025
Silica fume (m ³)	0,013
Nano silica = $17,19 / (2,2 \times 10^3) \text{ (m}^3\text{)}$	0,0078

Thể tích cần thiết của cát trên 1m³ bê tông là:

$$V_c = (1 - V_d - V_{kk} - V_{xm} - V_n - V_{sf} - V_{ns}) = 0,2465 \text{ (m}^3\text{)}$$

Bảng 14. Quy đổi về khối lượng hỗn hợp cơ sở với 3,0% NS

Xi măng (kg)	527,02
Cát (kg)	655,69
Đá (kg)	1049,75
Nước (lít)	154,67
Silica fume (kg)	28,64
Nano silica (kg)	17,19

Bước 9: Xác định tỷ lệ phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo sử dụng loại ViscoCrete 3000-20M với tỷ lệ thông thường từ $0,7 \div 2,5$ lit/100kg xi măng. Liều lượng phụ gia siêu dẻo được xác định thông qua việc trộn thử các hỗn hợp bê tông và thử độ sụt để đảm bảo độ sụt yêu cầu.

Kết quả tính toán thành phần BTCĐC sử dụng NS được tổng hợp trong bảng 15.

Bảng 15. Kết quả tính toán thành phần BTCĐC 70MPa sử dụng NS

Cấp phối	Vật liệu thành phần							
	XM	Cát	Đá	SF	NS	PGSD	Nước	N/CKD
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(lit)	(lit)	
NS0,0	544	661	1049	28,6	0,0	5,4	155	0,27
NS0,5	541	660	1049	28,6	2,8	6,5	155	0,27
NS1,0	538	659	1049	28,6	5,7	7,4	155	0,27
NS1,5	535	658	1049	28,6	8,6	7,6	155	0,27
NS2,0	532	657	1049	28,6	11,5	8,7	155	0,27
NS2,5	529	656	1049	28,6	14,3	9,3	155	0,27
NS3,0	527	655	1049	28,6	17,2	9,8	155	0,27

PHỤ LỤC II
KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM CƯỜNG ĐỘ NÉN VÀ CƯỜNG ĐỘ KÉO KHI
UỐN BTCĐC SỬ DỤNG NANO SILICA

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
1	C70NS0,0	0	3	61,09	6,61
2	C70NS0,0	0	7	71,79	7,32
3	C70NS0,0	0	28	81,93	8,12
4	C70NS0,0	0	56	85,12	8,45
5	C70NS0,5	0,5	3	64,33	7,44
6	C70NS0,5	0,5	7	74,39	8,06
7	C70NS0,5	0,5	28	83,45	8,56
8	C70NS0,5	0,5	56	85,9	8,8
9	C70NS1,0	1	3	68,33	7,82
10	C70NS1,0	1	7	76,65	8,32
11	C70NS1,0	1	28	85,15	9,17
12	C70NS1,0	1	56	88,2	9,26
13	C70NS1,5	1,5	3	69,34	8,28
14	C70NS1,5	1,5	7	79,32	8,77
15	C70NS1,5	1,5	28	87,33	9,41
16	C70NS1,5	1,5	56	89,03	9,47
17	C70NS2,0	2	3	67,19	7,85
18	C70NS2,0	2	7	77,23	8,58
19	C70NS2,0	2	28	86,06	9,24
20	C70NS2,0	2	56	88,71	9,41
21	C70NS2,5	2,5	3	65,38	7,74
22	C70NS2,5	2,5	7	74,89	8,39
23	C70NS2,5	2,5	28	84,81	8,95
24	C70NS2,5	2,5	56	86,61	9,12

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
25	C70NS3,0	3	3	64,33	7,57
26	C70NS3,0	3	7	73,35	7,92
27	C70NS3,0	3	28	82,38	8,64
28	C70NS3,0	3	56	85,67	8,87
29	C70NS0,0	0	3	60,01	6,78
30	C70NS0,0	0	7	70,11	7,44
31	C70NS0,0	0	28	82,09	8,15
32	C70NS0,0	0	56	84,56	8,27
33	C70NS0,5	0,5	3	65,51	7,39
34	C70NS0,5	0,5	7	75,58	7,97
35	C70NS0,5	0,5	28	83,77	8,64
36	C70NS0,5	0,5	56	86,26	8,84
37	C70NS1,0	1	3	67,83	7,92
38	C70NS1,0	1	7	78,37	8,36
39	C70NS1,0	1	28	86,25	8,97
40	C70NS1,0	1	56	88,5	9,18
41	C70NS1,5	1,5	3	68,56	8,22
42	C70NS1,5	1,5	7	78,04	8,75
43	C70NS1,5	1,5	28	87,19	9,47
44	C70NS1,5	1,5	56	90,68	9,6
45	C70NS2,0	2	3	67,78	8,15
46	C70NS2,0	2	7	77,22	8,45
47	C70NS2,0	2	28	85,55	9,31
48	C70NS2,0	2	56	86,83	9,2
49	C70NS2,5	2,5	3	66,07	7,83
50	C70NS2,5	2,5	7	76,96	8,37
51	C70NS2,5	2,5	28	85,53	9,06

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
52	C70NS2,5	2,5	56	86,83	9,2
53	C70NS3,0	3	3	64,49	7,44
54	C70NS3,0	3	7	73,9	8,23
55	C70NS3,0	3	28	83,74	8,83
56	C70NS3,0	3	56	85,51	8,82
57	C70NS0,0	0	3	61,38	6,65
58	C70NS0,0	0	7	70,86	7,36
59	C70NS0,0	0	28	82,72	8,28
60	C70NS0,0	0	56	85,2	8,25
61	C70NS0,5	0,5	3	64,26	7,5
62	C70NS0,5	0,5	7	74,72	7,9
63	C70NS0,5	0,5	28	83,87	8,58
64	C70NS0,5	0,5	56	86,83	8,99
65	C70NS1,0	1	3	68,17	7,8
66	C70NS1,0	1	7	76,89	8,42
67	C70NS1,0	1	28	86,17	9,14
68	C70NS1,0	1	56	87,89	9,32
69	C70NS1,5	1,5	3	69,41	7,98
70	C70NS1,5	1,5	7	79,8	8,7
71	C70NS1,5	1,5	28	87,53	9,37
72	C70NS1,5	1,5	56	90,59	9,5
73	C70NS2,0	2	3	67,77	7,99
74	C70NS2,0	2	7	77,57	8,56
75	C70NS2,0	2	28	85,56	9,29
76	C70NS2,0	2	56	88,12	9,39
77	C70NS2,5	2,5	3	67,32	7,72
78	C70NS2,5	2,5	7	76,28	8,21

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
79	C70NS2,5	2,5	28	84,46	8,99
80	C70NS2,5	2,5	56	87,89	9,14
81	C70NS3,0	3	3	65,26	7,55
82	C70NS3,0	3	7	72,55	7,97
83	C70NS3,0	3	28	81,89	8,62
84	C70NS3,0	3	56	84,92	8,92
85	C70NS0,0	0	3	59,93	6,71
86	C70NS0,0	0	7	72,6	7,39
87	C70NS0,0	0	28	80,5	7,99
88	C70NS0,0	0	56	85,48	8,54
89	C70NS0,5	0,5	3	64,6	7,38
90	C70NS0,5	0,5	7	73,92	8,08
91	C70NS0,5	0,5	28	84,36	8,7
92	C70NS0,5	0,5	56	87,23	8,96
93	C70NS1,0	1	3	67,2	7,9
94	C70NS1,0	1	7	78,98	8,4
95	C70NS1,0	1	28	85,49	8,94
96	C70NS1,0	1	56	88,48	9,2
97	C70NS1,5	1,5	3	69,02	8,16
98	C70NS1,5	1,5	7	78,1	8,68
99	C70NS1,5	1,5	28	86,74	9,3
100	C70NS1,5	1,5	56	88,96	9,48
101	C70NS2,0	2	3	68,01	8,29
102	C70NS2,0	2	7	77,26	8,46
103	C70NS2,0	2	28	86,22	9,14
104	C70NS2,0	2	56	88,46	9,4
105	C70NS2,5	2,5	3	67,16	7,69

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
106	C70NS2,5	2,5	7	74,73	8,32
107	C70NS2,5	2,5	28	84,97	8,97
108	C70NS2,5	2,5	56	87,08	9,18
109	C70NS3,0	3	3	64,90	7,41
110	C70NS3,0	3	7	73,32	7,99
111	C70NS3,0	3	28	83,02	8,65
112	C70NS3,0	3	56	85,53	8,89
113	C70NS0,0	0	3	61,77	6,75
114	C70NS0,0	0	7	71,39	7,46
115	C70NS0,0	0	28	82,89	8,25
116	C70NS0,0	0	56	85,37	8,34
117	C70NS0,5	0,5	3	65,11	7,51
118	C70NS0,5	0,5	7	75,19	7,89
119	C70NS0,5	0,5	28	84,47	8,73
120	C70NS0,5	0,5	56	87,01	8,9
121	C70NS1,0	1	3	67,53	7,99
122	C70NS1,0	1	7	77,59	8,27
123	C70NS1,0	1	28	85,17	8,97
124	C70NS1,0	1	56	87,93	9,31
125	C70NS1,5	1,5	3	68,16	8,25
126	C70NS1,5	1,5	7	77,84	8,64
127	C70NS1,5	1,5	28	86,63	9,36
128	C70NS1,5	1,5	56	89,21	9,54
129	C70NS2,0	2	3	67,94	7,96
130	C70NS2,0	2	7	77,34	8,65
131	C70NS2,0	2	28	86,11	9,10
132	C70NS2,0	2	56	88,27	9,36

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
133	C70NS2,5	2,5	3	66,15	7,74
134	C70NS2,5	2,5	7	75,67	8,24
135	C70NS2,5	2,5	28	84,30	8,99
136	C70NS2,5	2,5	56	87,21	9,21
137	C70NS3,0	3	3	64,25	7,53
138	C70NS3,0	3	7	74,65	8,08
139	C70NS3,0	3	28	81,99	8,79
140	C70NS3,0	3	56	85,30	8,79
141	C70NS0,0	0	3	59,53	6,64
142	C70NS0,0	0	7	72,19	7,37
143	C70NS0,0	0	28	82,89	8,17
144	C70NS0,0	0	56	84,30	8,4
145	C70NS0,5	0,5	3	65,08	7,48
146	C70NS0,5	0,5	7	76,6	8,05
147	C70NS0,5	0,5	28	84,59	8,71
148	C70NS0,5	0,5	56	87,14	8,75
149	C70NS1,0	1	3	68,00	7,86
150	C70NS1,0	1	7	76,25	8,41
151	C70NS1,0	1	28	86,29	9,09
152	C70NS1,0	1	56	88,28	9,27
153	C70NS1,5	1,5	3	68,62	8,09
154	C70NS1,5	1,5	7	79,49	8,78
155	C70NS1,5	1,5	28	87,19	9,31
156	C70NS1,5	1,5	56	89,81	9,63
157	C70NS2,0	2	3	67,49	7,85
158	C70NS2,0	2	7	76,95	8,62
159	C70NS2,0	2	28	85,94	9,23

STT	Cấp phối	NS (%)	Tuổi (ngày)	R _n (MPa)	R _{ku} (MPa)
160	C70NS2,0	2	56	88,12	9,39
161	C70NS2,5	2,5	3	66,39	7,78
162	C70NS2,5	2,5	7	76,94	8,19
163	C70NS2,5	2,5	28	84,02	8,96
164	C70NS2,5	2,5	56	86,54	9,04
165	C70NS3,0	3	3	64,39	7,5
166	C70NS3,0	3	7	74,43	8,17
167	C70NS3,0	3	28	82,96	8,76
168	C70NS3,0	3	56	86,05	8,93