

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

VÕ MINH CHÍ

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA BÊ TÔNG
TỰ CẢM BIẾN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG
TRONG PHẠM VI NÉN ĐÀN HỒI

Ngành: Kỹ thuật Xây dựng Công trình Giao thông

Mã số: 9580205

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

NĂM 2026

Công trình được hoàn thành tại
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA, ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG

1. Người đồng hướng dẫn 1: **PGS.TS. Nguyễn Lan**
Trường Đại học Bách khoa - ĐHQĐ
2. Người đồng hướng dẫn 2: **TS. Nguyễn Minh Hải**
Trường Đại học Bách khoa - ĐHQĐ

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Trường họp tại Trường Đại học Bách khoa vào lúc ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam.
- Trung tâm Thông tin - Học liệu và Truyền thông, ĐHQĐ.
- Trung tâm Học liệu và Truyền thông, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQĐ

NĂM 2026

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Các bài báo công bố Quốc tế

- (1) **V. M. Chi**, N. M. Hai, N. Lan, and N. Van Huong, “An empirical model for electrical resistivity of mortar considering the synergistic effects of carbon fillers , current intensity , and environmental factors,” Case Stud. Constr. Mater., vol. 19, no. October, p. e02685, 2023, [doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02685](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02685). (**tạp chí quốc tế uy tín, SCIE, Q1**)
- (2) **V. M. Chi**, N. M. Hai, N. Lan, and N. Van Huong, “Stress Self-sensitivity of Carbon Black-filled Mortar under Non Destructive Compression and the Effects of Electric Circuit and Specimen Dimensions,” J. Adv. Concr. Technol., vol. 21, no. 9, pp. 762–776, 2023, [doi: 10.3151/jact.21.762](https://doi.org/10.3151/jact.21.762). (**tạp chí quốc tế uy tín, SCIE, Q2**)
- (3) **V. M. Chi**, N. Lan, N. M. Hai, and N. Van Huong, “Compression self-sensibility of the concrete using high content carbon black with various measurement conditions,” IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 1289, no. 1, p. 012033, 2023, [doi: 10.1088/1757-899x/1289/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899x/1289/1/012033). (**Bài báo hội thảo quốc tế TISDIC 2023, danh mục Web of Science**)

2. Các bài báo công bố trong nước

- (1) **Võ Minh Chí**, Nguyễn Minh Hải, Nguyễn Lan, Nguyễn Văn Hương, “Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng lên đặc tính dẫn điện và một số ứng dụng của SSC”, Tạp chí khoa học công nghệ đại học Giao thông Vận Tải Thành Phố Hồ Chí Minh, Volume 13, Issue 2, Pages: 64 - 78, 2024, [doi: https://www.doi.org/10.55228/jtst.13\(2\).64-78](https://www.doi.org/10.55228/jtst.13(2).64-78)
- (2) **Vo Minh Chi**, Nguyen Minh Hai, Nguyen Lan, Pham Van Ngoc, Nguyen Van Huong, Nguyen Duc Hung, “Electrical resistance response of a pair of self-sensing concrete blocks under non-destructive compression,” Transport and Communications Science Journal, Vol. 76, Issue 04 (05/2025), 568-582. [Doi: https://doi.org/10.47869/tcsj.76.4.10](https://doi.org/10.47869/tcsj.76.4.10)

3. Bảng độc quyền giải pháp hữu ích

- (1) Tên bằng: “Phương pháp chế tạo mẫu bê tông tự cảm biến và hệ thống cân tải trọng giao thông sử dụng mẫu bê tông này”. Số bằng 5110. Tác giả: TS. Nguyễn Minh Hải, **ThS. NCS. Võ Minh Chí**, TS. Phạm Văn Ngọc, PGS. TS. Nguyễn Lan, PGS. TS. Nguyễn Văn Hương, ThS. Mai Thị Thu Thủy.

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh phát triển hạ tầng hiện đại, bê tông tự cảm biến (SSC) nổi lên như giải pháp tiềm năng cho các công nghệ cảm biến quy mô lớn. Cơ chế của SSC dựa trên việc bổ sung vật liệu dẫn điện vào bê tông, tạo ra sự thay đổi điện trở suất dưới tác dụng của tải trọng và môi trường, qua đó cho phép gián tiếp xác định trạng thái ứng suất, biến dạng mà không cần cảm biến gắn ngoài.

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào giai đoạn vật liệu xuất hiện hư hại, trong khi các nghiên cứu về khả năng cảm biến của SSC ở giai đoạn chưa phá hủy còn hạn chế. Vì vậy, luận án hướng đến làm rõ và công thức hóa ứng xử điện trở của SSC trong vùng ứng suất nhỏ, nhằm khai thác khả năng cảm biến lâu dài và nâng cao hiệu quả kinh tế.

Bên cạnh đó, phần lớn nghiên cứu hiện nay chỉ xét SSC như một mẫu độc lập. Nghiên cứu này mở rộng sang hệ nhiều mẫu SSC hoạt động đồng thời, làm cơ sở đề xuất ứng dụng trong hệ thống cân tải trọng cỡ lớn, phục vụ quan trắc tải trọng và quản lý giao thông – logistics thông minh với chi phí hợp lý.

Những lý do trên tạo nên tính cấp thiết và ý nghĩa khoa học – thực tiễn cho việc lựa chọn đề tài nghiên cứu này.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của nghiên cứu là làm rõ ứng xử điện trở của SSC làm việc như các phần tử gối đỡ chịu nén trong hệ cân trong các cấu kiện chịu tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi ứng suất nhỏ và vật liệu chưa đạt đến trạng thái phá hủy. Kết quả nghiên cứu được định hướng để ứng dụng cho việc phát triển hệ thống cảm biến thế hệ mới được làm bằng chính bản thân bê tông có khả năng cân liên tục theo thời gian thực.

Các mục tiêu cụ thể được đặt ra như sau:

- i. Chế tạo SSC và làm rõ cơ chế ứng xử điện trở cơ bản của vật liệu dưới tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.
- ii. Xác định các yếu tố ảnh hưởng đến ứng xử điện trở của SSC, gồm loại và hàm lượng chất độn dẫn điện, kích thước mẫu, điều kiện đo và môi trường.

iii. Làm rõ ứng xử điện trở của hệ nhiều mẫu SSC dưới tác dụng của tải trọng tĩnh trong phạm vi nén đàn hồi, với các trường hợp nén đúng tâm và lệch tâm, làm cơ sở đề xuất mô hình cân tải trọng cỡ lớn.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

SSC sử dụng chất điện dẫn điện là muội than đen hoặc sợi carbon.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

SSC sử dụng chất điện dẫn điện là muội than đen hoặc sợi carbon. Nghiên cứu tập trung khảo sát ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng tĩnh trong phạm vi nén đàn hồi của vật liệu mà chưa xét đến các tải trọng động và va đập. Đồng thời, nghiên cứu tập trung phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ, độ ẩm đến tính điện của SSC trong môi trường phòng thí nghiệm mà chưa mở rộng sang môi trường thực tế kết hợp chu kỳ nhiệt - ẩm tuần hoàn.

4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp lý thuyết; Phương pháp thực nghiệm và phương pháp phân tích thống kê.

5. Ý nghĩa khoa học hoặc thực tiễn của luận án

Tính mới và ý nghĩa khoa học của luận án có thể được tóm lược như sau:

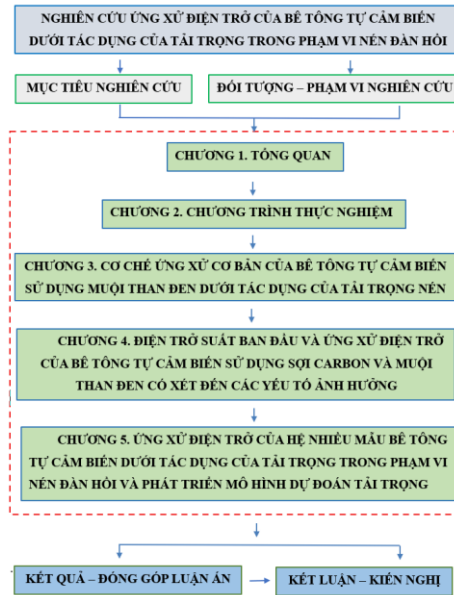
- *Thứ nhất*, làm rõ vùng ứng xử điện trở suất tuyến tính của bê tông trong phạm vi ứng suất nén đàn hồi.
- *Thứ hai*, mô hình hóa ứng xử điện trở suất có xét đến ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố, thay vì phân tích riêng lẻ như các nghiên cứu trước.
- *Thứ ba*, nghiên cứu ứng xử điện trở không chỉ trên một mẫu mà trên hệ nhiều mẫu SSC, hướng tiếp cận mới chưa được thực hiện trước đây.

Những đóng góp về mặt thực tiễn của luận án như sau:

- (1) Ứng dụng SSC làm thiết bị đo đặc dưới dạng cảm biến tải trọng nén.
- (2) Những kết quả của luận án là cơ sở khoa học quan trọng cho việc phát triển các trạm cân thể hệ mới sử dụng vật liệu SSC với chi phí hợp lý, góp phần đa dạng hóa công nghệ cảm biến và nâng cao hiệu quả ứng dụng trong hạ tầng giao thông thông minh.

6. Cấu trúc của luận án

Cấu trúc của luận án được tổng hợp theo sơ đồ dưới đây:



CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

Phần nghiên cứu tổng quan được xây dựng trên cơ sở khảo sát và tổng hợp các tài liệu liên quan đến SSC theo một cấu trúc hệ thống. Cụ thể, nội dung tổng quan được phân chia thành ba nhóm chính, bao gồm: (i) ảnh hưởng của thành phần vật liệu và phương pháp chế tạo đến tính tự cảm biến của bê tông; (ii) ảnh hưởng của các điều kiện thí nghiệm như cấu tạo điện cực, dòng điện kích thích, hình dạng và kích thước mẫu, điều kiện tải trọng và môi trường; và (iii) các hướng ứng dụng của bê tông tự cảm biến trong công trình, đặc biệt trong quan trắc sức khỏe công trình và quản lý giao thông.

Từ các phân tích tổng quan, một số khoảng trống nghiên cứu quan trọng được xác định, làm cơ sở định hướng cho nội dung luận án, gồm:

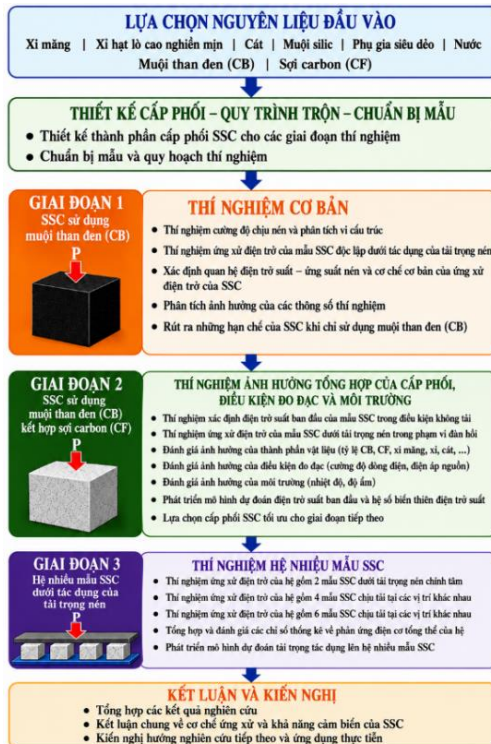
- Vấn đề 1: Làm rõ cơ chế ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.
- Vấn đề 2: Làm rõ các yếu tố ảnh hưởng đến điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải.

- Vấn đề 3: Làm rõ và xây dựng mô hình dự đoán ứng xử điện trở của mẫu SSC xét đến ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố môi trường và điều kiện đo đạc.
- Vấn đề 4: Làm rõ ứng xử cảm biến của hệ gồm nhiều mẫu bê tông dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi.

CHƯƠNG 2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Khái quát

Chương trình thực nghiệm của luận án được xây dựng theo hướng tiếp cận từ nghiên cứu cơ bản đến nghiên cứu ứng dụng, bắt đầu từ khảo sát đặc tính của SSC ở cấp độ mẫu đơn và tiến tới đánh giá khả năng nhận dạng tải trọng của hệ nhiều mẫu. Các nội dung nghiên cứu được tổ chức thành ba giai đoạn liên hoàn nhằm làm rõ cơ chế tự cảm biến, các yếu tố ảnh hưởng và khả năng ứng dụng của vật liệu. Sơ đồ chương trình thực nghiệm được trình bày tại Hình 2.1.



Hình 2.1. Sơ đồ chương trình thực nghiệm

2.2. Quy trình trộn hỗn hợp SSC và bảo dưỡng mẫu

Quy trình trộn SSC (Hình 2.2) được xây dựng dựa trên các nghiên cứu trước đây, gồm quy trình trộn ướt và trộn khô phù hợp với chất độn dẫn điện, cụ thể:

- Với mẫu CB, muối than đen được khuấy tạo huyền phù trước để phân tán tốt, sau đó trộn cùng hỗn hợp khô theo từng bước, cuối cùng điều chỉnh độ chảy bằng phụ gia siêu dẻo.
- Với mẫu CF, sợi carbon được trộn khô cùng các vật liệu để tránh vón và nổi, rồi mới thêm nước và phụ gia để đạt độ đồng nhất.
- Với mẫu CB+CF, kết hợp hai quy trình: muối than được tạo huyền phù trước, sợi carbon trộn khô, sau đó trộn chung theo từng giai đoạn để đảm bảo phân tán đều và hình thành mạng dẫn điện ổn định.



Hình 2.2. Các bước trộn hỗn hợp bê tông SSC

Các mẫu sau khi đúc được bảo dưỡng theo tiêu chuẩn Việt Nam 3105:2022, thể hiện tại Hình 2.3.

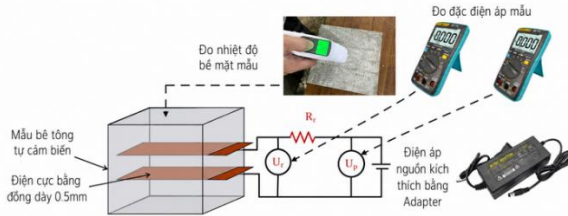


Hình 2.3. Bảo dưỡng mẫu SSC

2.3. Phương pháp thí nghiệm

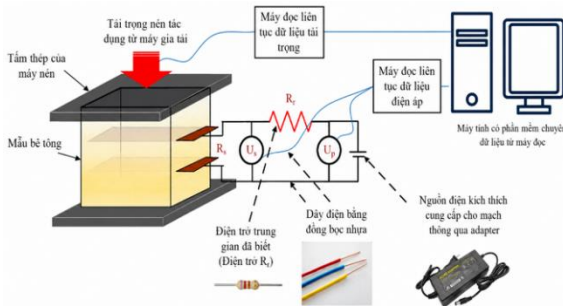
Thí nghiệm xác định điện trở suất ban đầu của mẫu SSC khi không có tải trọng tác dụng được thực hiện tại Hình 2.4. Điện trở suất được xác định thông

qua hệ đo điện một chiều, sử dụng nguồn điện kích thích và điện trở trung gian để điều chỉnh cường độ dòng điện. Các thông số điện áp và dòng điện được đo để tính toán điện trở suất của vật liệu.



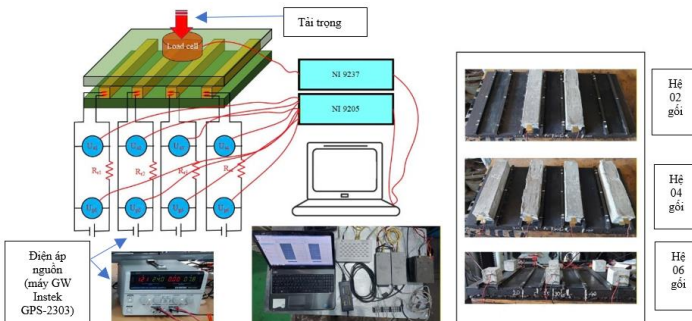
Hình 2.4. Sơ đồ đo điện trở suất ban đầu của mẫu SSC

Thí nghiệm ứng xử điện trở của mẫu SSC hoạt động độc lập dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi thực hiện tại Hình 2.5.



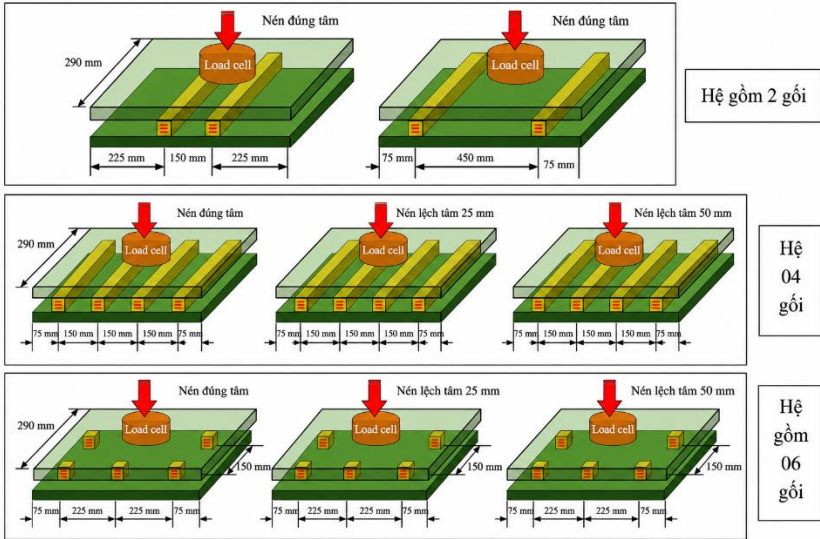
Hình 2.5. Sơ đồ mạch điện thí nghiệm SSC chịu tác dụng tải trọng nén

Thí nghiệm ứng xử điện trở của hệ gồm nhiều gói SSC dưới tác dụng của tải trọng nén thực hiện tại Hình 2.6.



Hình 2.6. Sơ đồ mạch điện cho hệ gói chịu tác dụng tải trọng nén

Mô hình hệ thống cân thu nhỏ được thiết kế phù hợp với thí nghiệm, sử dụng các gối SSC làm cảm biến đặt dưới bàn cân cứng nhằm chuyển tải trọng thành lực nén trực tiếp và loại bỏ ảnh hưởng của mô men uốn. Mô hình này được sử dụng để xác định ứng xử điện trở của hệ nhiều gối dưới tác dụng của tải trọng nén trong phạm vi không phá hủy, thể hiện tại Hình 2.7.



(a) Các mô hình hệ thống cân chịu tải trọng tại các vị trí khác nhau



(b) Hệ thống cân thu nhỏ lắp đặt vào máy nén

Hình 2.7. Mô hình hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm

Ngoài ra, các hạng mục thí nghiệm khác cũng được trình bày, cụ thể: Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của SSC; Thí nghiệm xác định độ rỗng của

SSC; Thí nghiệm xác định độ ẩm của mẫu bê tông; Thí nghiệm xác định đo nhiệt độ mẫu bê tông; Phân tích vi cấu trúc vật liệu (SEM)

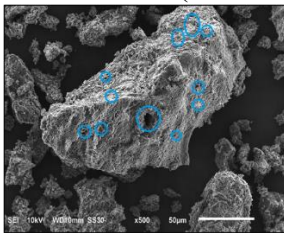
2.4. Kết luận chương 2

Chương 2 đã xây dựng được hệ thống thực nghiệm từ lựa chọn vật liệu, thiết kế cấp phối đến phương pháp thí nghiệm và quy trình chế tạo mẫu. Ba giai đoạn thực nghiệm được tổ chức có tính kế thừa, cho phép làm rõ cơ chế dẫn điện của SSC và xác định cấp phối tối ưu phục vụ cho nghiên cứu ứng dụng. Đây là cơ sở quan trọng cho các phân tích và thảo luận ở các chương tiếp theo của luận án.

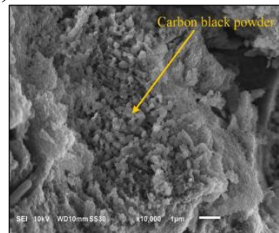
CHƯƠNG 3. CƠ CHẾ ỨNG XỬ CƠ BẢN CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN SỬ DỤNG MUỘI THAN ĐEN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NÉN

3.1. Cường độ chịu nén các mẫu và phân tích vi cấu trúc

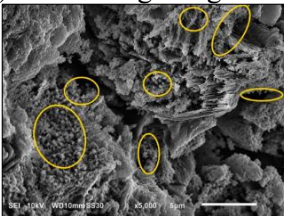
Cường độ chịu nén của mẫu SSC CB7 tại các ngày tuổi 3, 7 và 28 lần lượt đạt 20, 25 và 34 MPa (so với mục tiêu 30 MPa).



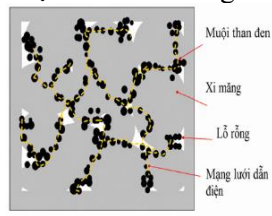
(a) Các lỗ rỗng trong bê tông



(b) Muội than đen trong bê tông



(c) Sự phân tán của muội than đen trong bê tông



(d) Hình ảnh phân tán của muội than đen trong bê tông

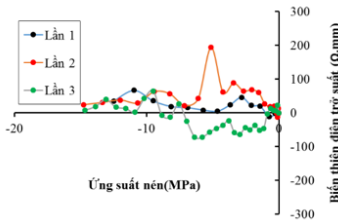
Hình 3.1. SEM mẫu SSC CB7

Quan sát SEM cho thấy lỗ rỗng tập trung quanh các vùng chứa muội than đen, phân bố thành các cụm kết tụ ngẫu nhiên trong nền bê tông. Các cụm này liên kết tạo thành mạng dẫn điện trong SSC. Kết quả phân tích vi cấu trúc (Hình

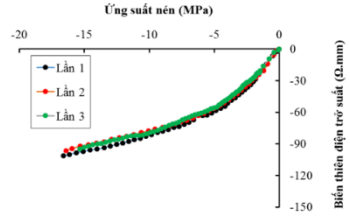
3.1) là cơ sở làm rõ cơ chế biến thiên điện trở suất của vật liệu dưới tác dụng của ứng suất nén trong các phần tiếp theo.

3.2. Quan hệ điện trở suất - ứng suất nén và cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở suất của SSC

Thí nghiệm cho thấy với điện áp nguồn 12 V, mối quan hệ giữa biến thiên điện trở suất của SSC và ứng suất nén chưa thể hiện rõ. Khi tăng điện áp kích thích lên 24 V, dòng điện qua mẫu ổn định hơn, qua đó ghi nhận điện trở suất của SSC giảm khi ứng suất nén tăng. Quan hệ điện giữa trở suất và ứng suất nén khi được cung cấp điện áp nguồn khác nhau thể hiện tại Hình 3.2.

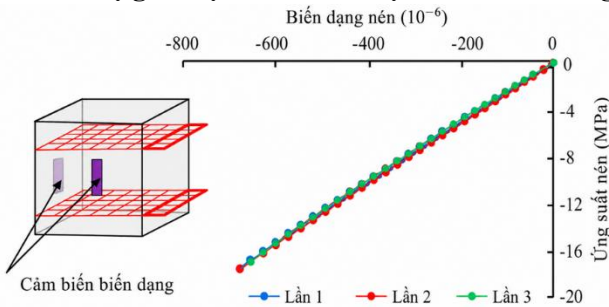


(a) $U_p = 12V$, $R_r = 820 \Omega$



(b) $U_p = 24V$, $R_r = 820 \Omega$

Hình 3.2. Quan hệ giữa sự biến thiên điện trở suất và ứng suất nén

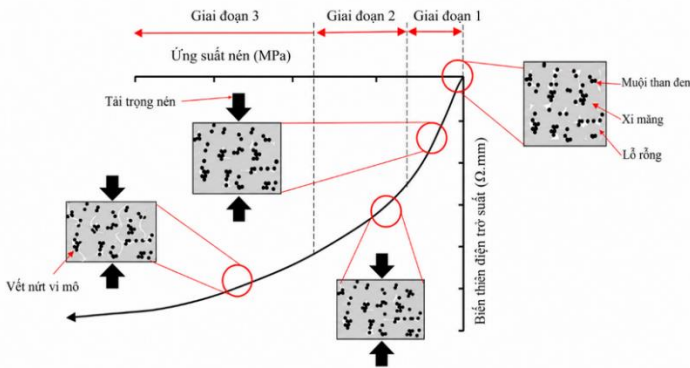


Hình 3.3. Mối quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng của mẫu W150L40

Khi ứng suất nén nhỏ hơn hoặc bằng 6 MPa (tương ứng 1/5 cường độ chịu nén của SSC), mối quan hệ giữa ứng suất và điện trở suất gần như tuyến tính. Mối quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng mô tả trong Hình 3.3 gần như tuyến tính khi ứng suất nén đạt gần 1/2 cường độ chịu nén thực tế của bê tông. Do đó, có thể suy luận rằng các vết nứt vi mô chưa hình thành trong bê tông khi ứng suất nén tương đương khoảng 1/5 cường độ chịu nén của bê tông.

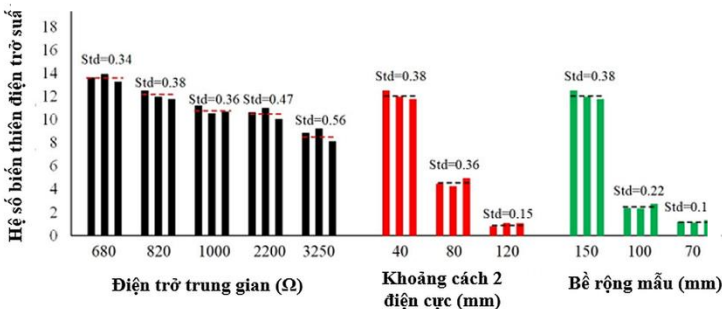
Dựa vào các phân tích bên trên, cơ chế cơ bản của ứng xử điện trở suất của SSC có thể được giải thích như tại Hình 3.4 với 03 giai đoạn chính như sau:

- **Giai đoạn 1:** Dưới tác dụng của ứng suất nén, các hạt muội than đen xích lại gần nhau hơn, đồng thời các lỗ rỗng trong bê tông cũng co lại.
- **Giai đoạn 2:** Do lỗ rỗng co mạnh ở giai đoạn đầu và dần ổn định khi ứng suất đạt ngưỡng nhất định, nên hiệu ứng co rỗng giảm ở giai đoạn 2. Vì vậy, điện trở suất giảm chậm dần và mối quan hệ với ứng suất nén trở nên phi tuyến (khi ứng suất khoảng 1/5 cường độ chịu nén).
- **Giai đoạn 3:** Khi ứng suất nén tăng cao, sự biến thiên điện trở suất của SSC chậm lại hoặc trở nên không ổn định do xuất hiện các vết nứt vi mô.



Hình 3.4. Cơ chế cơ bản ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng tải trọng nén

3.3. Phân tích ảnh hưởng của các thông số thí nghiệm



Hình 3.5. Ảnh hưởng của các tham số thí nghiệm đến hệ số biến thiên điện trở suất của SSC

Dựa trên quan hệ giữa điện trở suất và ứng suất nén của các mẫu SSC có kích thước, khoảng cách điện cực và điện trở trung gian khác nhau, phân tích hồi quy tuyến tính được sử dụng để xác định hệ số biến thiên điện trở suất, thể hiện tại Hình 3.5. Kết quả cho thấy các yếu tố này ảnh hưởng đáng kể đến dòng điện qua mẫu, từ đó làm thay đổi điện trở suất của SSC dưới tác dụng tải nén.

3.4. Kết luận Chương 3

Từ các kết quả thí nghiệm, có thể rút ra các kết luận chính như sau:

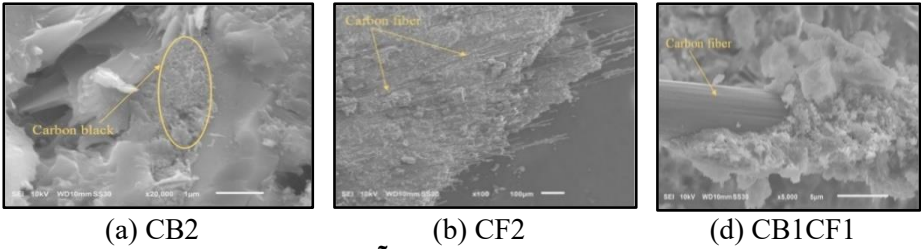
1. Dưới tác dụng của dòng điện kích thích có cường độ nhất định, điện trở suất của SSC giảm rõ rệt khi tăng ứng suất nén.
2. Trong vùng ứng suất nhỏ (< 6 MPa, $\sim 1/5$ cường độ chịu nén), quan hệ giữa biến thiên điện trở suất và ứng suất gần tuyến tính. Điều này cho thấy SSC có tiềm năng ứng dụng tốt trong vùng ứng suất nén đàn hồi, giúp tăng độ ổn định tín hiệu và tuổi thọ cảm biến.
3. Các yếu tố như khoảng cách điện cực, kích thước mẫu và điện trở trung gian ảnh hưởng đến dòng điện qua mẫu, từ đó tác động đáng kể đến điện trở suất và độ nhạy đo của SSC.

CHƯƠNG 4. ĐIỆN TRỞ SUẤT BAN ĐẦU VÀ ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA BÊ TÔNG TỰ CẢM BIẾN SỬ DỤNG SỢI CARBON VÀ MUỘI THAN ĐEN CÓ XÉT ĐẾN CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG

4.1. Cường độ chịu nén, độ rỗng và phân tích vi cấu trúc

Cường độ chịu nén sau 28 ngày của các mẫu N-, CB2-, CF2- và CB1CF1- lần lượt là 56,8; 53,0; 58,4 và 57,6 MPa, đều đáp ứng yêu cầu thiết kế 50 MPa. Độ rỗng xác định theo TCVN 3112:2022 cho thấy mẫu CF2- có độ rỗng thấp hơn, tương ứng với cường độ chịu nén cao hơn so với các mẫu còn lại.

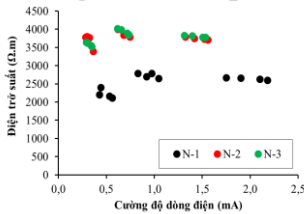
Ngoài ra, SEM các mẫu SSC tại Hình 4.1 cho thấy rằng có sự kết tụ giữa các hạt muội than đen và một số lỗ rỗng nhỏ được hình thành xung quanh các khu vực kết tụ này. Mẫu SSC chứa sợi carbon được phân bố tương đối đồng đều trong bê tông, có rất ít bằng chứng về sự kết tụ. Mặt khác, vùng tiếp xúc giữa sợi carbon và vật liệu bê tông xung quanh của mẫu là không có khoảng trống đáng kể, điều này thể hiện mối liên kết cao giữa thành phần vật liệu và sợi carbon.



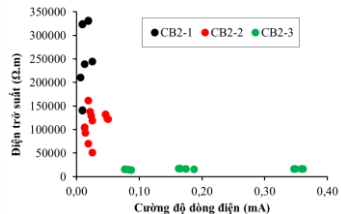
(a) CB2

(b) CF2

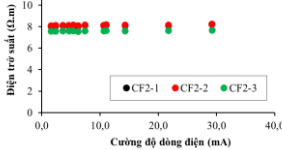
(d) CB1CF1

Hình 4.1. SEM của mẫu có sợi carbon và muội than đen**4.2. Điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải****4.2.1. Ảnh hưởng của thành phần vật liệu và cường độ dòng điện**

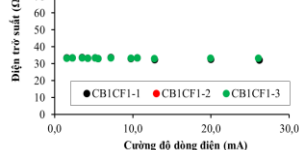
(a) Các mẫu N



(b) Các mẫu CB2



(c) Các mẫu CF2



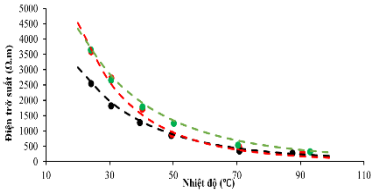
(d) Các mẫu CB1CF1

Hình 4.2. Quan hệ giữa cường độ dòng điện và điện trở suất của SSC

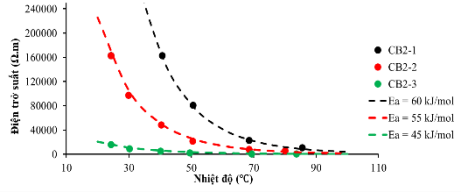
Kết quả thí nghiệm cho thấy các mẫu có cùng thành phần vật liệu và được chế tạo từ cùng một mẻ trộn vẫn có giá trị điện trở suất không hoàn toàn giống nhau, như thể hiện tại Hình 4.2. Sự khác biệt này có thể xuất phát từ tính không đồng nhất của vi cấu trúc vật liệu, sự phân bố chưa đồng đều của các thành phần dẫn điện và những sai khác nhỏ trong quá trình chế tạo, bảo dưỡng. Do đó, việc tạo ra các mẫu SSC có cấu trúc hoàn toàn đồng nhất để đạt được giá trị điện trở suất giống hệt nhau là một thách thức trong thực tế.

4.2.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm

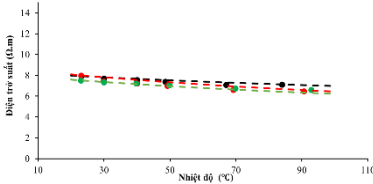
Điện trở suất của SSC bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ, kết quả ở Hình 4.3 chỉ ra rằng mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất tăng lên cùng với sự gia tăng các đặc tính cách điện của vật liệu.



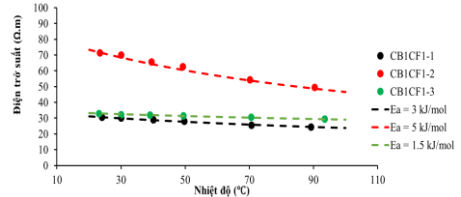
(a) Các mẫu N



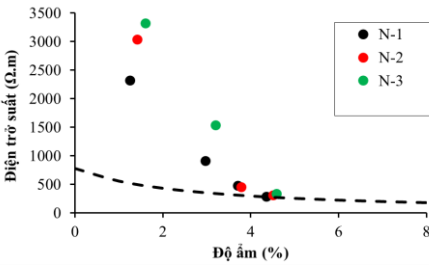
(b) Các mẫu CB2



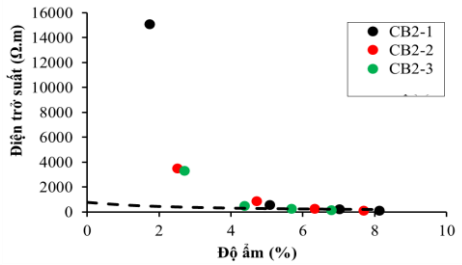
(c) Các mẫu CF2



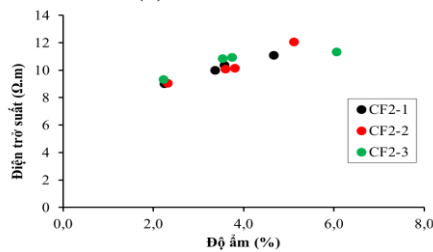
(d) Các mẫu CB1CF1

Hình 4.3. Mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở suất của mẫu

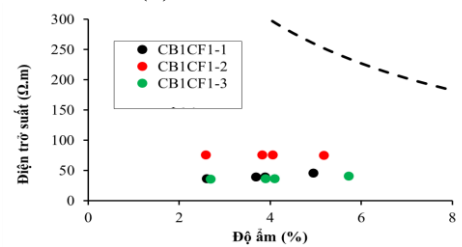
(a) Các mẫu N



(b) Các mẫu CB2



(c) Các mẫu CF2



(d) Các mẫu CB1CF1

Hình 4.4. Mối quan hệ giữa độ ẩm và điện trở suất của mẫu

Bên cạnh đó, độ ẩm cũng ảnh hưởng đến điện trở suất của SSC. Khi độ ẩm tăng lên, điện trở suất của mẫu N và CB2 giảm, với tốc độ giảm trở nên nhỏ hơn

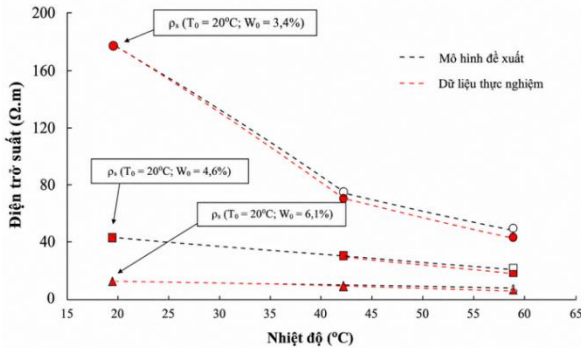
khi độ ẩm tiến đến điểm bão hòa của vật liệu. Mẫu chứa sợi carbon (mẫu CF2- và CB1CF1-) có xu hướng ngược lại, điện trở suất của vẫn ổn định hoặc tăng nhẹ khi độ ẩm tăng. Hình 4.4 cho thấy ảnh hưởng đáng kể của độ ẩm đến điện trở suất của SSC và mức độ ảnh hưởng này khác nhau giữa các mẫu có thành phần cấp phối khác nhau.

4.2.3. Phát triển mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu của SSC có xét đến ảnh hưởng đồng thời của thành phần vật liệu và yếu tố môi trường

Các nghiên cứu trước cho thấy điện trở suất bê tông ở trạng thái không tải chịu ảnh hưởng của các yếu tố như thành phần vật liệu, nhiệt độ và độ ẩm, nhưng chưa có công thức thực nghiệm xét đồng thời các yếu tố này. Dựa trên công thức Arrhenius, nghiên cứu đã phát triển mô hình dự đoán điện trở suất ban đầu có xét đến đồng thời các yếu tố trên. Kết quả được thể hiện tại công thức:

$$\rho_s = \rho_{s0(0)} e^{1.2\alpha(T-T_0)+0.9\beta(W-W_0)} \quad (4.10)$$

Mô hình đề xuất được đối chiếu với số liệu của Joanna và cộng sự, cho thấy không chỉ tương quan cao với kết quả thực nghiệm của nghiên cứu mà còn đánh giá tốt ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở suất của vật liệu xi măng ở các mức độ ẩm khác nhau, thể hiện Hình 4.5.

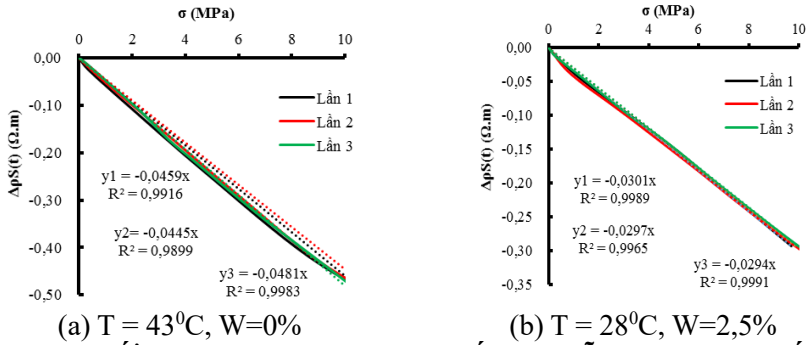


Hình 4.5. Mối tương quan giữa mô hình đề xuất và dữ liệu tham khảo

4.3. Ứng xử điện trở và mô hình dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi

Bốn mẫu CF2-1, CF2-2, CB1CF1-1 và CB1CF1-2 được thí nghiệm dưới tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi trong các điều kiện nhiệt độ và độ ẩm khác nhau.

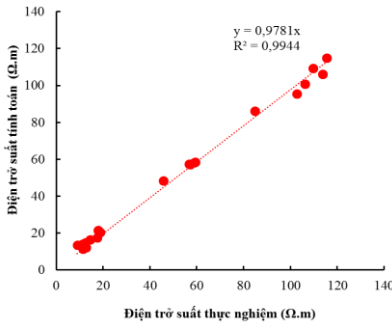
Kết quả cho thấy điện trở giảm tuyến tính theo tải nén, được mô tả tại Hình 4.6, chứng tỏ cơ chế cảm biến hoạt động hiệu quả khi chịu tải



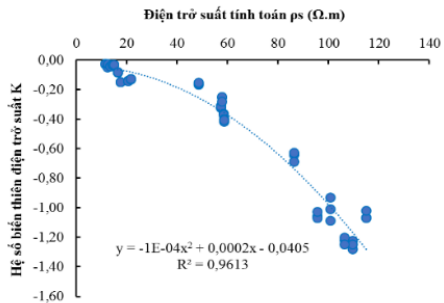
Hình 4.6. Ứng xử điện trở dưới ứng suất nén mẫu CF2-1 ở các cấp nhiệt độ và độ ẩm khác nhau

Phân tích hồi quy tuyến tính cho thấy độ dốc đường hồi quy là hệ số biến thiên điện trở suất k của mẫu dưới tải nén, có xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm. Giá trị k chỉ khác biệt nhỏ giữa các trường hợp, cho thấy điện trở suất ban đầu có thể là yếu tố chi phối chính hệ số k khi gia tải.

Để kiểm chứng độ tin cậy của công thức (4.10), điện trở suất tính toán được so sánh với kết quả thực nghiệm. Kết quả cho thấy sự tương quan cao giữa hai giá trị (Hình 4.7), khẳng định tính phù hợp của công thức. Phân tích hồi quy cho thấy mối quan hệ này được mô tả tốt nhất bằng hàm mũ bậc hai (Hình 4.8).



Hình 4.7. Tương quan giữa điện trở suất thực nghiệm và tính toán



Hình 4.8. Quan hệ giữa hệ số K thực nghiệm và điện trở suất tính toán

Tương quan giữa hệ số biến thiên điện trở suất k và điện trở suất tính toán ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và độ ẩm được xác định tại công thức:

$$y = -10^{-4}\rho s^2 + 0,0002\rho s - 0,0405 \quad (4.11)$$

Từ công thức (4.11), công thức dự đoán hệ số biến thiên điện trở suất K dưới tác dụng của tải trọng nén khi chịu ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như thành phần cấp phối, nhiệt độ và độ ẩm được biểu diễn công thức (4.12):

$$K = -10^{-4}\rho_{s0(0)}^2 e^{2,4\alpha(T-T_0)+1,8\beta(W-W_0)} + 0,0002\rho_{s0(0)} e^{1,2\alpha(T-T_0)+0,9\beta(W-W_0)} - 0,0405$$

4.4. Kết luận Chương 4

Những kết luận từ Chương này như sau:

- (1) Nhiệt độ và độ ẩm có ảnh hưởng đến điện trở suất ban đầu của mẫu ở điều kiện không tải. Những ảnh hưởng này khác nhau không chỉ giữa các mẫu có thành phần vật liệu khác nhau mà còn giữa các mẫu có cùng thành phần vật liệu.
- (2) Công thức dự đoán điện trở suất ban đầu của SSC khi chưa chịu tác dụng của tải trọng được xây dựng có xem xét ảnh hưởng đồng thời của thành phần vật liệu khác nhau và yếu tố môi trường và được trình bày tại công thức (4.10).
- (3) Ứng xử điện trở của mẫu SSC dưới tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, xét đến sự khác nhau về cấp phối, nhiệt độ và độ ẩm, đều thể hiện quan hệ giảm tuyến tính
- (4) Công thức xác định giá trị hệ số biến thiên điện trở suất K khi chịu tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như thành phần cấp phối, nhiệt độ và độ ẩm được xác định nhằm dự đoán tải trọng tác dụng lên mẫu SSC và được trình bày tại công thức (4.12).

CHƯƠNG 5. ỨNG XỬ ĐIỆN TRỞ CỦA HỆ GỐI BÊ TÔNG TỰ CẨM BIẾN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG TRONG PHẠM VI NÉN ĐÀN HỒI VÀ PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN TẢI TRỌNG

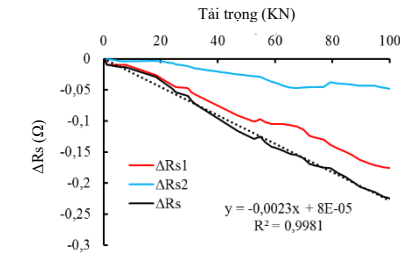
5.1. Ứng xử điện trở của hệ gối SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi

5.1.1. Ứng xử điện trở của hệ gồm 02 gối kích thước 50x50x250 mm chịu nén đúng tâm

Trước khi đánh giá ứng xử điện trở dưới tải trọng, các mẫu gối SSC được thí nghiệm trong điều kiện không tải. Kết quả cho thấy điện trở chỉ biến đổi rất nhỏ

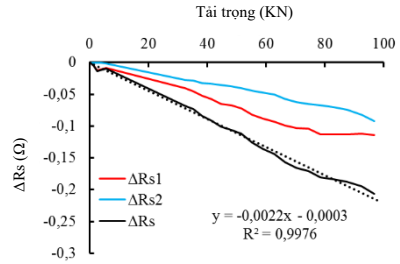
và không theo xu hướng rõ rệt, chứng tỏ điện trở của gói khi được cấp điện áp kích thích duy trì ổn định. Điều này đảm bảo độ tin cậy để sử dụng làm cơ sở so sánh khi phân tích ứng xử điện trở dưới tác dụng của tải nén ở các giai đoạn tiếp theo.

Dưới tải trọng nén đúng tâm, ứng xử điện trở tổng hợp của hai gói trong cả hai lần đo tương đối nhất quán. Mặc dù từng gói có xu hướng biến đổi phức tạp, ứng xử tổng hợp vẫn thể hiện quan hệ tuyến tính và ổn định (Hình 5.1a). Tuy nhiên, ở Hình 5.1(b), ứng xử này chuyển sang phi tuyến, có thể do khoảng cách giữa hai gói tăng ($L=450\text{mm}$), làm xuất hiện ảnh hưởng của tải trọng lệch tâm.

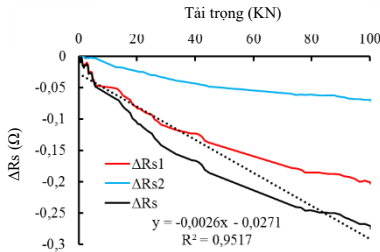


Lần đo thứ nhất

(a) Khoảng cách 02 gói $L = 150 \text{ mm}$ ($U_p = 10\text{V}$)

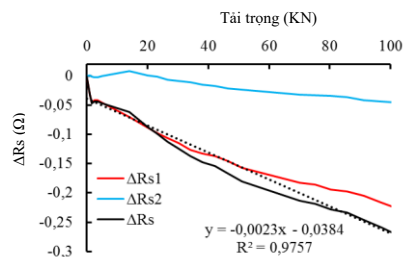


Lần đo thứ hai



Lần đo thứ nhất

(b) Khoảng cách 02 gói $L = 450 \text{ mm}$ ($U_p = 10\text{V}$)

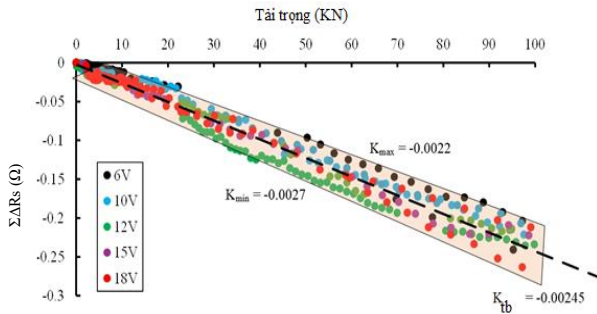


Lần đo thứ hai

Hình 5.1. Ứng xử điện trở của hệ gồm 2 gói SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi

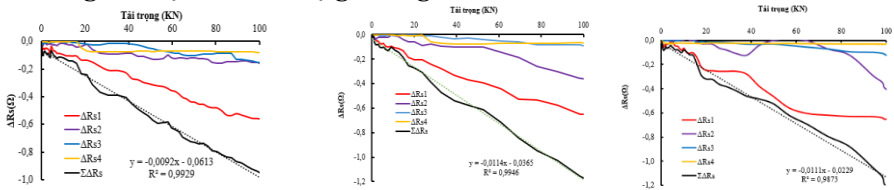
Từ những kết quả trên, điện áp nguồn (U_p) đã được thay đổi trong 4 trường hợp bổ sung, bao gồm 6 V, 12 V, 15 V và 18 V để thay đổi cường độ dòng điện

qua mẫu bê tông, là một yếu tố có thể ảnh hưởng đến ứng xử điện trở của bê tông. Kết quả cho thấy mặc dù ứng xử điện trở của từng gói có thể dao động, ứng xử điện trở tổng hợp của hệ gói vẫn gần như tuyến tính và ổn định trong tất cả các trường hợp. Hệ số độ dốc của đường hồi quy giữa tổng biến thiên điện trở của hệ gói và tải trọng được xác định là hệ số biến thiên điện trở. Tham số này được sử dụng để chuyển đổi sự thay đổi điện trở của các gói SSC trong hệ cân bằng tải trọng tác dụng lên bàn cân. Kết quả cho thấy với một giá trị biến thiên điện trở xác định, tải trọng thực tế có thể chênh lệch khoảng $\pm 10\%$ so với giá trị dự đoán trung bình, được mô tả tại Hình 5.2.



Hình 5.2. Dữ liệu đo lường mối quan hệ giữa sự biến thiên điện trở và tải trọng nén tương ứng với điện áp kích thích

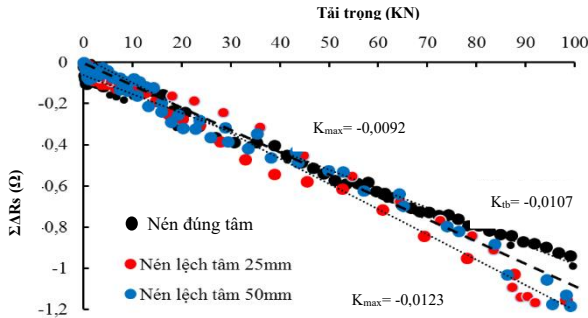
5.1.2. Ứng xử điện trở của hệ gồm 4 gói SSC kích thước 50x50x250 mm



(a) Nén đúng tâm (b) Nén lệch tâm 25 mm (c) Nén lệch tâm 50 mm

Hình 5.3. Ứng xử điện trở của hệ gồm 04 gói kích thước 50x50x250 mm chịu tải trọng nén ở các vị trí khác nhau

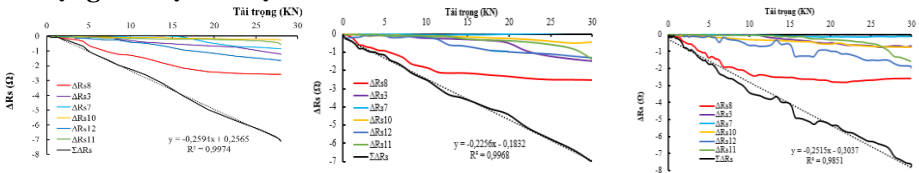
Ứng xử điện trở của hệ 4 gói SSC được khảo sát tại các vị trí nén đúng tâm, lệch tâm 25 mm và 50 mm. Mặc dù từng gói có ứng xử điện trở khác nhau và không theo xu hướng cố định, nhưng điện trở tổng thể của hệ vẫn giảm tuyến tính theo tải trọng tác dụng, được mô tả tại Hình 5.3.



Hình 5.4. Dữ liệu tổng hợp tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 04 gói SSC kích thước 50x50x250 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

Kết quả thí nghiệm hệ cân tại các vị trí chịu lực cho thấy, với một giá trị biến thiên điện trở xác định, tải trọng tương ứng có thể dao động khoảng $\pm 14,4\%$ so với giá trị dự đoán trung bình, thể hiện tại Hình 5.4. Sai lệch này chủ yếu xuất phát từ sự khác biệt trong phân bố tải trọng giữa các gói và tính không đồng nhất của vật liệu SSC. Mặc dù vậy, xu hướng biến thiên điện trở theo tải trọng vẫn được duy trì rõ rệt, cho thấy hệ cân đề xuất có khả năng nhận biết và ước lượng tải trọng với độ tin cậy chấp nhận được.

5.1.3. Ứng xử điện trở của hệ gồm 6 gói SSC kích thước 50x50x50 mm chịu tải trọng nén tại các vị trí khác nhau



(a) Nén đúng tâm

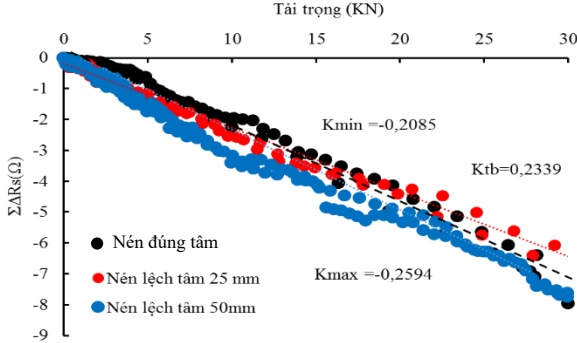
(b) Nén lệch tâm 25 mm

(c) Nén lệch tâm 50 mm

Hình 5.5. Ứng xử biến thiên điện trở của hệ gồm 06 gói SSC kích thước 50x50x50 mm chịu nén ở các vị trí khác nhau

Thí nghiệm trên hệ 06 gói SSC (50×50×50 mm) dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi tại các vị trí khác nhau cho thấy ứng xử điện trở của từng gói không đồng nhất và không theo xu hướng cố định, nhưng ứng xử điện trở tổng hợp có xu hướng giảm tuyến tính, thể hiện tại Hình 5.5. Hệ số biến thiên điện trở thay đổi theo vị trí đặt tải, dẫn đến sai lệch tải trọng khoảng $\pm 10,8\%$ so với giá trị dự đoán trung bình, và được thể hiện tại Hình 5.6. Kết quả này cho thấy hệ nhiều gói SSC có khả năng phản ánh sự thay đổi tải trọng thông qua tín hiệu điện trở tổng hợp. Đồng thời, mô hình đề xuất vẫn duy trì độ chính xác chấp

nhận được khi tải trọng tác dụng không phân bố đều giữa các gối.



Hình 5.6. Dữ liệu tổng hợp tổng biến thiên điện trở của hệ gồm 06 gối SSC kích thước 50x50x50 mm chịu tải trọng nén tại những vị trí khác nhau

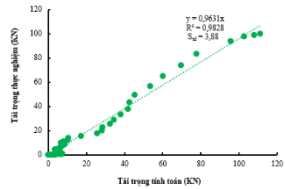
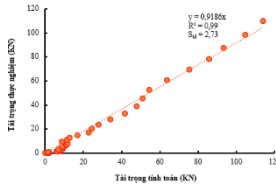
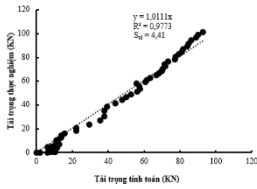
5.2. Mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều gối SSC

Mô hình dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ thống cân thu nhỏ trong phòng thí nghiệm được xây dựng như sau: Tải trọng (P) tác dụng lên mặt cân được truyền xuống hệ gồm nhiều gối bê tông tại các vị trí gia tải khác nhau.

$$P = A \cdot \frac{a}{L} \left(\frac{\Delta R_1}{K_1} + \frac{\Delta R_2}{K_2} + \dots + \frac{\Delta R_n}{K_n} \right) \quad (5.4)$$

Trong đó, P (KN) là tải trọng vật thể cần xác định; $\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_n$ (Ω) lần lượt là giá trị biến thiên điện trở so với điện trở ban đầu tương ứng của các mẫu SSC từ mẫu 1 đến mẫu (n); $K_1, K_2, \dots, K_n$ là hệ số biến thiên điện trở suất của từng mẫu SSC từ 1 đến n được xác định công thức (4.12); A (m²) là diện tích chịu lực của mỗi gối; a (m²) là diện tích tiếp xúc giữa điện cực và bê tông của mỗi gối; L (m) là khoảng cách giữa 2 điện cực của mỗi gối.

Để kiểm chứng phương pháp trên, tải trọng tính toán theo công thức (5.4) được xác định cho hệ gồm 4 gối (50×50×250 mm) và 6 gối (50×50×50 mm) tại các vị trí nén khác nhau, sau đó so sánh với tải trọng thực nghiệm tương ứng. Kết quả cho thấy sự tương quan cao giữa hai đại lượng, chứng tỏ phương pháp dự đoán tải trọng dựa trên hệ số biến thiên điện trở suất có độ chính xác tương đối tốt, thể hiện tại Hình 5.7, Hình 5.8.

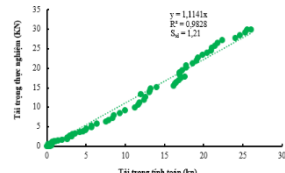
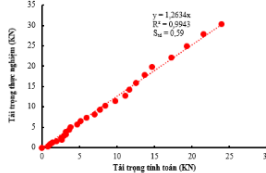
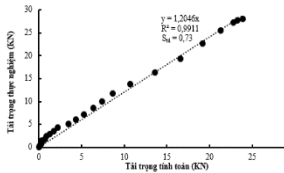


(a) Nén đúng tâm

(b) Nén lệch tâm 25 mm

(c) Nén lệch tâm 50 mm

Hình 5.7. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 gối kích thước 50x50x250 mm



(a) Nén đúng tâm

(b) Nén lệch tâm 25 mm

(c) Nén lệch tâm 50 mm

Hình 5.8. Tương quan giữa tải trọng thực nghiệm và tải trọng tính toán của hệ gồm 04 gối kích thước 50x50x50 mm

5.3. Kết luận Chương 5

Những kết luận từ Chương này như sau:

- (1) Trong các mô hình thí nghiệm, ứng xử điện trở của từng gối trong hệ có thể khác nhau khi chịu tải nén tại các vị trí khác nhau, ứng xử điện trở tổng hợp của toàn hệ vẫn tuyến tính và ổn định giữa các lần đo. Tính tuyến tính giảm dần khi khoảng cách giữa các gối tăng, do ảnh hưởng của tải trọng lệch tâm.
- (2) Hệ số biến thiên điện trở K của hệ có sai số khoảng 10%, do đó cần tiếp tục nghiên cứu để giảm sai lệch, nâng cao độ chính xác cho hệ cân quy mô lớn.
- (3) Công thức (5.4) cho phép dự đoán tải trọng tác dụng lên hệ nhiều gối với độ chính xác tương đối tốt so với kết quả thực nghiệm, ngay cả khi các gối có kích thước và vị trí chịu tải khác nhau.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Những kết quả đạt được của luận án

Nghiên cứu đã tiến hành khảo sát một cách có hệ thống ứng xử điện trở của bê tông tự cảm biến dưới tác dụng của tải trọng nén và đánh giá khả năng ứng

dụng của vật liệu này trong các hệ thống đo tải trọng. Các thành quả chính dựa trên kết quả nghiên cứu trong luận văn có thể được rút ra như sau:

(1) Nghiên cứu đã làm rõ cơ chế cơ bản chi phối ứng xử điện trở suất của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén. Kết quả thực nghiệm cho thấy trong phạm vi ứng suất nén đàn hồi, tương ứng khoảng $1/5$ cường độ chịu nén của vật liệu, khi bê tông chưa xuất hiện vi nứt và cấu trúc lỗ rỗng trong vi mô bị nén chặt dần, mối quan hệ giữa sự thay đổi điện trở suất và ứng suất nén thể hiện xu hướng tuyến tính rõ rệt. Điều này cho thấy SSC có thể hoạt động ổn định trong vùng ứng suất nén đàn hồi, giúp duy trì tính ổn định của tín hiệu điện và nâng cao độ lặp lại của phép đo khi sử dụng làm vật liệu cảm biến.

(2) Nghiên cứu đã phân tích ảnh hưởng của các yếu tố môi trường và thành phần vật liệu đến điện trở suất ban đầu của SSC trong điều kiện không tải. Kết quả thực nghiệm cho thấy điện trở suất ban đầu của vật liệu chịu ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ, độ ẩm môi trường và thành phần cấp phối. Trên cơ sở đó, một mô hình thực nghiệm dự đoán điện trở suất ban đầu đã được xây dựng, cho phép hiệu chỉnh giá trị điện trở suất ban đầu của vật liệu trong các điều kiện đo đặc khác nhau. Mô hình này tạo cơ sở để giảm sai số khi so sánh các giá trị điện trở trong quá trình đo tải trọng thực tế.

(3) Nghiên cứu đã xây dựng được mô hình mô tả ứng xử điện trở suất của mẫu SSC chịu tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, có xét đến ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như thành phần vật liệu, nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Từ mô hình này, hệ số biến thiên điện trở suất K được xác định, cho phép thiết lập mối quan hệ định lượng giữa tải trọng tác dụng và tín hiệu điện trở thu được từ mẫu SSC.

(4) Nghiên cứu đã mở rộng phân tích từ một mẫu SSC đơn lẻ sang hệ gồm nhiều mẫu SSC, nhằm mô phỏng cấu hình thực tế của các hệ thống cảm biến tải trọng. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp dự đoán tải trọng được đề xuất cho hệ nhiều gói SSC có độ phù hợp tương đối tốt với tải trọng thực nghiệm. Cụ thể, sai số của hệ số biến thiên điện trở K của hệ được ghi nhận ở mức khoảng 10%, cho thấy tiềm năng ứng dụng của hệ thống SSC trong các thiết bị đo tải

trọng. Trên cơ sở đó, một công thức dự đoán tải trọng cho hệ nhiều gối SSC đã được đề xuất, cho phép xác định tải trọng tác dụng lên hệ gối có kích thước và vị trí chịu tải khác nhau.

Các kết quả của nghiên cứu đã góp phần làm rõ cơ chế cảm biến của bê tông SSC dưới tác dụng của tải trọng trong phạm vi nén đàn hồi, đồng thời đề xuất được mô hình dự đoán điện trở suất và phương pháp xác định tải trọng cho hệ nhiều gối SSC, tạo cơ sở khoa học quan trọng cho việc phát triển các thiết bị cảm biến diện rộng từ chính bản thân vật liệu bê tông, đặc biệt phù hợp trong định hướng phát triển các hệ thống giám sát giao thông, hàng hóa thông minh trong tương lai.

2. Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù nghiên cứu đã làm rõ được một số cơ chế cơ bản và đề xuất được các mô hình dự đoán ứng xử điện trở của SSC dưới tác dụng của tải trọng nén, vẫn còn một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và nâng cao khả năng ứng dụng của vật liệu này trong các hệ thống cảm biến kết cấu và giao thông thông minh.

Trước hết, cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về ảnh hưởng dài hạn của các yếu tố môi trường đến đặc tính điện của SSC. Trong điều kiện làm việc thực tế, các cấu kiện bê tông thường chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, chu kỳ khô–ướt, quá trình cacbonat hóa và sự xâm nhập của các ion trong môi trường. Những yếu tố này có thể làm thay đổi cấu trúc lỗ rỗng và mạng dẫn điện bên trong vật liệu, từ đó ảnh hưởng đến điện trở suất và độ ổn định của tín hiệu cảm biến theo thời gian. Do đó, cần thực hiện các nghiên cứu dài hạn nhằm đánh giá sự suy giảm tính dẫn điện và độ nhạy cảm biến của SSC, qua đó xác định tuổi thọ làm việc hiệu quả của vật liệu khi sử dụng trong các hệ thống cảm biến kết cấu.

Thứ hai, các thí nghiệm trong nghiên cứu chủ yếu được thực hiện dưới tải trọng nén tĩnh, trong khi trong điều kiện thực tế các công trình giao thông và kết cấu hạ tầng thường chịu tác dụng của tải trọng động, tải trọng lặp và rung động do phương tiện giao thông gây ra. Vì vậy, cần tiếp tục nghiên cứu ứng xử điện

cơ của SSC dưới các dạng tải trọng động và tải trọng chu kỳ, bao gồm việc đánh giá độ ổn định của tín hiệu điện trở, khả năng lặp lại của phép đo và sự thay đổi của độ nhạy cảm biến theo số chu kỳ tải. Các kết quả này sẽ giúp đánh giá chính xác hơn khả năng ứng dụng của SSC trong các hệ thống giám sát tải trọng giao thông và quan trắc sức khỏe công trình.

Thứ ba, nhằm hướng tới việc hoàn thiện công nghệ cảm biến phục vụ hệ thống giao thông thông minh, cần ưu tiên thiết kế và tối ưu hóa cấu trúc cụ thể của hệ cảm biến sử dụng gói SSC được lắp đặt dưới nền đường.

Cuối cùng, các nghiên cứu tiếp theo cũng cần xem xét khía cạnh kinh tế và tính bền vững của vật liệu SSC. Việc sử dụng các vật liệu dẫn điện như sợi carbon hoặc các vật liệu nano có thể làm tăng chi phí sản xuất bê tông. Do đó, cần thực hiện các nghiên cứu nhằm tối ưu hóa chi phí vật liệu, đánh giá vòng đời sản phẩm và phân tích hiệu quả kinh tế của hệ thống cảm biến SSC, từ đó hướng tới việc phát triển các giải pháp giám sát kết cấu thông minh có chi phí hợp lý và khả năng ứng dụng rộng rãi trong thực tế.