

PHẢN ỨNG KIỀM - SILIC TRONG KẾT CẤU BÊ TÔNG VÀ CÁC GIẢI PHÁP QUAN TRẮC ĐỂ QUẢN LÝ RỦI RO

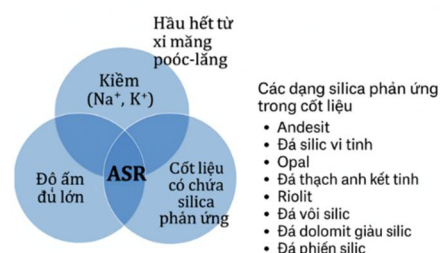
Nguyễn Thị Huệ¹

Tóm tắt: Phản ứng kiềm-silic (ASR) là một trong những nguyên nhân nội sinh gây giãn nở, nứt, và suy giảm đặc tính cơ lý của bê tông. Bài báo phân tích cơ chế phá hoại của ASR, đồng thời nhận diện các dạng hư hỏng đặc thù trên một số loại hình công trình như đập thủy điện, hạ tầng giao thông. Trên cơ sở đó, bài báo cũng hệ thống hóa và đánh giá các giải pháp quan trắc từ truyền thống đến công nghệ tiên tiến phục vụ công tác quản lý công trình. Thông qua phân tích bài học kinh nghiệm trong quản lý cầu Kashima (Nhật Bản), mức độ phá hoại do ASR được làm rõ bằng các minh chứng định lượng, qua đó khẳng định vai trò quan trọng của hệ thống quan trắc tự động và theo dõi phát triển vết nứt trong việc đánh giá mức độ suy thoái và kiểm chứng hiệu quả gia cường. Cuối cùng, nghiên cứu đã đề xuất một quy trình quan trắc và quản lý rủi ro ASR khép kín, làm cơ sở định hướng cho các hệ thống đập thủy điện tại Việt Nam. Quy trình này hỗ trợ các cơ quan quản lý chuyển đổi từ phương thức bảo trì khắc phục sang quản lý chủ động, góp phần tối ưu hóa chi phí và đảm bảo an toàn vận hành trong suốt vòng đời công trình.

Từ khóa: Phản ứng kiềm-silic, ASR, suy thoái bê tông, quan trắc, quản lý rủi ro.

1. TỔNG QUAN VỀ PHẢN ỨNG KIỀM - SILIC TRONG BÊ TÔNG

Bê tông là vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi nhờ có độ bền cao, giá thành hợp lý và khả năng tạo hình linh hoạt theo yêu cầu thiết kế. Tuy nhiên, bê tông cũng mang đặc tính dễ bị suy thoái, đặt ra những thách thức đáng kể trong quá trình vận hành khai thác, sửa chữa và bảo dưỡng. Trong số các nguyên nhân gây ra suy giảm độ bền của bê tông, phản ứng kiềm-silic (Alkali-Silica Reaction - ASR) là một trong những cơ chế hư hỏng đáng chú ý trong nhiều loại hình công trình lớn, thách thức sự ổn định, an toàn của công trình. Trong hai loại phản ứng kiềm-cốt liệu, ASR là dạng phổ biến hơn so với phản ứng kiềm-carbonate (Alkali-Carbonate Reaction - ACR). Không giống với các cơ chế hư hỏng bên ngoài như ăn mòn cốt thép hay xâm nhập ion clorua, ASR là phản ứng nội sinh, xảy ra bên trong kết cấu bê tông. Phản ứng này xảy ra khi các khoáng silica hoạt tính (SiO_2) trong cốt liệu phản ứng với ion kiềm (Na^+ , K^+) cùng ion hydroxyl (OH^-) trong dung dịch lỗ rỗng của bê tông, tạo ra gel kiềm-silic có khả năng hút nước và trương nở. Khi hấp thụ nước, gel tăng thể tích, gây ra ứng suất nội tại trong bê tông. Khi ứng suất vượt cường độ chịu kéo của bê tông thì sẽ gây ra nứt tại vùng tiếp xúc giữa cốt liệu và hồ xi măng, cũng như trong chính cốt liệu và đá xi măng. Quá trình này là nguyên nhân chính dẫn đến suy giảm độ bền và tuổi thọ của bê tông (Fanijo et al., 2021).



Hình 1. Ba điều kiện chính của phản ứng kiềm-silic

Phản ứng kiềm-silic là quá trình hóa học, mức độ phản ứng kiềm-silic phụ thuộc vào SiO_2 hoạt tính trong cốt liệu, nồng độ môi trường kiềm, nước trong lỗ rỗng (Hình 1), cũng như môi trường duy trì độ ẩm thích hợp trong một thời gian dài (Fanijo et al., 2021). Các nghiên cứu đi trước đã đưa ra danh sách SiO_2 phản ứng trong cốt liệu bao gồm: opal, chert, chalcedony, thủy tinh núi lửa, silica vô định hình... Hàm lượng và dạng tồn tại của SiO_2 trong cốt liệu sẽ đóng vai trò quyết định đến mức độ nguy cơ ASR (Sims, I., & Nixon, P., 2003; Sims & Poole, 2022). Điều kiện thứ hai cần cho phản ứng là nồng độ kiềm đủ cao trong dung dịch lỗ rỗng của bê tông. Na^+ và K^+ được giải phóng vào dung dịch lỗ rỗng của bê tông trong quá trình thủy hóa của xi măng Portland. Ngoài ra, kiềm có thể đến từ phụ gia khoáng, nước trộn bê tông hoặc xâm nhập từ môi trường ngoài. Khi lượng kiềm quy đổi $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ vượt một ngưỡng (thường lấy khoảng 0,6%), nguy cơ xảy ra ASR sẽ tăng đáng kể. Và cuối cùng, ASR chỉ xảy ra khi bê tông duy trì độ ẩm cao liên tục trong thời gian dài. Các nghiên cứu trước cho thấy phản ứng phát triển

¹Bộ môn Công nghệ và Quản lý xây dựng, Trường Đại học Thủy lợi

manh khi độ ẩm tương đối (RH) trong kết cấu vượt quá 80-85%. Trong khi đó, ở môi trường khô (RH<60%), phản ứng gần như không xảy ra (Fanijo et al., 2021; Olajide et al., 2024).

Hiện tượng ASR được phát hiện lần đầu tiên vào cuối thập niên 1930 trong các kết cấu bê tông đường cao tốc tại California, Hoa Kỳ và được Thomas Stanton công bố chính thức năm 1942 (Stanton, 1942). Sau đó ASR nhanh chóng được mở rộng nghiên cứu ở nhiều khu vực trên thế giới. Từ thập niên 1980 đến 1990, ASR được công nhận là vấn đề toàn cầu khi là nguyên nhân gây hư hỏng nghiêm trọng cho nhiều công trình lớn. Đến nay, ASR đã được ghi nhận ở hơn 60 quốc gia và hầu hết các bang của Mỹ và ASR vẫn là thách thức lớn cho các nhà khoa học (ACI Committee 221, 2008; Thomas, M.D.A., et al., 2013). Tại Việt Nam, vấn đề này ngày càng trở lên cấp thiết khi hệ thống cơ sở hạ tầng bao gồm các đập thủy lợi, cầu giao thông đã bước vào giai đoạn khai thác dài hạn. Nhiều công trình thủy điện lớn tại Việt Nam như Hòa Bình, Ialy, Tuyên Quang... đã vận hành trên 15 năm. Bên cạnh đó, khảo sát thực nghiệm đã chỉ ra rằng các phương pháp hóa học truyền thống đôi khi không đánh giá hết nguy cơ, các loại cốt liệu như đá phiến, riolit hay bazan tại Việt Nam vẫn có tiềm năng gây phản ứng ASR mạnh khi thử nghiệm bằng phương pháp lắng trụ thanh vữa tăng tốc (Hoàng & Nguyễn, 2025). Theo một số nghiên cứu, vùng Tây Bắc (Phan Si Pan và Tú Lệ) và Tây Thanh Hóa (Sông Mã) là những nơi có sự phân bố rộng rãi của các nguồn đá riolit, silic (Thanh et al., 2024; Tran et al., 2015). Việt Nam đã có tiêu chuẩn đánh giá cốt liệu (TCVN 7572-14:2006) nhưng chưa có quy trình chuẩn hóa để quan trắc và cảnh báo sớm khi đưa công trình vào vận hành. Và gần đây, một dự án nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định và đánh giá mức độ phản ứng ASR đã được triển khai, phục vụ công tác kiểm soát nguy cơ tại các kết cấu quan trọng của công trình thủy điện Bản Chát. Việc sửa chữa và khắc phục hư hỏng do ASR đòi hỏi một quá trình đánh giá, giám sát và can thiệp lâu dài. Công tác này không chỉ tốn nhiều công sức mà chi phí cũng rất lớn. Theo báo cáo của Viện Bê tông Hoa Kỳ, chi phí sửa chữa các công trình bị hư hỏng do ASR có thể lên đến hàng triệu USD cho mỗi dự án, tùy thuộc vào quy mô và mức độ thiệt hại (ACI Committee 221, 2011). Không chỉ tác động về mặt kinh tế, hư hỏng do ASR còn đặt ra các vấn đề nghiêm trọng về an toàn công trình. Trong một số trường hợp, khi mức độ hư hỏng quá nghiêm trọng, việc sửa chữa trở nên không khả thi, các nhà quản lý buộc phải lựa chọn giải pháp phá bỏ hoàn toàn để xây dựng mới. Một ví dụ điển hình là đập Mactaquac dự kiến sẽ phải xây dựng lại hoàn toàn vào năm 2030 do sự xuống cấp liên tục (Moffatt et al., 2016).

Do ASR là một quá trình tiến triển chậm, kéo dài và khó dự đoán, công tác quản lý các công trình cần được hỗ trợ bởi hệ thống đánh giá và quan trắc định kỳ. Trong điều kiện nguồn lực hạn chế, việc lựa chọn các kỹ thuật quan trắc phù hợp có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong xác định mức độ ưu tiên sửa chữa, đánh giá hiệu quả của phương pháp sửa chữa, từ đó tối ưu hóa chi phí quản lý tài sản và qua đó kéo dài tuổi thọ và đảm bảo an toàn vận hành công trình. Để giải quyết bài toán này, nghiên cứu được triển khai theo một phương pháp tiếp cận hệ thống được minh họa tại Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu

2. ẢNH HƯỞNG CỦA ASR ĐẾN CÁC CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG

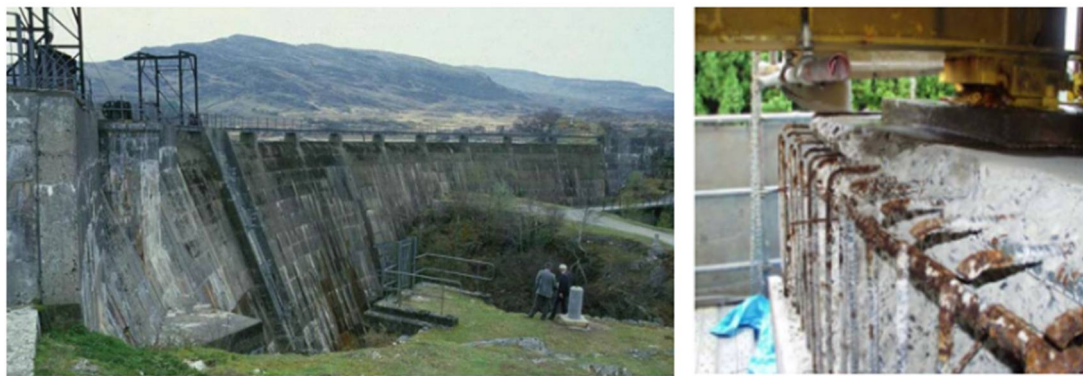
Phản ứng kiềm-silic tác động tiêu cực đến đa dạng các loại hình kết cấu bê tông như đập thủy điện, đường cao tốc, cầu, đường sân bay. Trong nội dung phần này, tập trung phân tích hai nhóm công trình điển hình là đập thủy điện và công trình cầu, đường do đây là loại hình công trình có điều kiện thuận lợi cho ASR phát triển và đã ghi nhận nhiều trường hợp hư hỏng điển hình.

2.1. Công trình đập thủy điện

Nhóm công trình này chịu ảnh hưởng rõ rệt từ phản ứng kiềm-silic do đặc thù thường xuyên tiếp xúc với nguồn ẩm dồi dào, một trong những điều kiện tiên quyết để kích hoạt sự trương nở của gel ASR. Trong các cấu trúc bê tông khối lớn này sẽ có sự trương nở không đều, gây ra các biến dạng hình học như dịch chuyển tương đối, nghiêng hoặc xoắn các cấu kiện (Rivard et al., 2010). Bên cạnh đó, hệ quả của ASR đến việc vận hành thiết bị cơ khí nghiêm trọng hơn. Sự thay đổi kích thước khối bê tông làm sai lệch vị trí của khe co giãn, gây kẹt hoặc làm mất khả năng vận hành bình thường của các cửa van, tuabin và các hệ thống máy móc lắp đặt trong đập gây mất an toàn vận hành và đòi hỏi chi phí sửa chữa rất tốn kém (Torii et al., 2016). Và khác với nứt bề mặt thông thường, ASR trong các đập lớn có thể tạo ra các vết nứt lớn kéo dài từ các hành lang ra bề mặt, đe dọa trực tiếp đến khả năng chống thấm và an toàn chịu lực của đập (Rivard et al., 2010). Số liệu trong một báo cáo đánh giá chung năm 1992 đã xác định 78 trường hợp phản ứng kiềm cốt liệu, chủ yếu là ASR tại các nhà máy thủy điện và đập hiện hữu trên thế giới (Charlwood, 1994). Năm 2014 nhóm nghiên cứu và đánh giá hiện trạng của 154 đập bê tông ở Thụy Sĩ với các tường bê tông đập trọng

lực, đập vòm, đập tràn và các loại đập khác đã chỉ ra rằng khoảng 50% trong số này đang gặp phải vấn đề giãn nở bê tông do ASR (AAR Working Group, 2017). Đập Mactaquac (Canada) là một trong những điển hình về công trình thủy điện bị ảnh hưởng nghiêm trọng bởi ASR. Kể từ khi xây dựng, tổng biến dạng trương nở đã đạt khoảng 6000 microstrain và đập đã tăng thêm gần 230 mm về chiều cao. Đập xuất hiện các khe hở tại các mối nối thi công trong

nhà máy điện, xuất hiện nứt và bong tróc bê tông tại các dầm, cửa tràn bị kẹt do trụ biên bị dịch chuyển xâm lấn vào không gian cửa... Công trình đã phải áp dụng công nghệ mô phỏng để dự báo tác động và lập kế hoạch cho biện pháp cắt khe giải phóng ứng suất định kỳ từ năm 1988 để bảo vệ các cửa lấy nước, mài vòng cổ tuabin để duy trì hoạt động, bơm vữa kiểm soát rò rỉ. (Charlwood, 1994; Moffatt et al., 2016).



a) b)
*Hình 3a. Đập Maentwrog, Bắc Wales với các vết nứt do ASR (Sims & Poole, 2022)
và hình 3b. Gãy cốt thép trong dầm trụ cầu ở Nhật Bản do ảnh hưởng của ASR (Torii et al., 2008)*

2.2. Công trình cầu, đường

Trong lĩnh vực giao thông, ASR ảnh hưởng đến mọi loại cấu trúc bao gồm mặt đường, tường chắn, cầu và đường hầm, làm tăng chi phí bảo trì và rút ngắn tuổi thọ dịch vụ của công trình. Các nghiên cứu thực tế cho thấy dấu hiệu hư hỏng thường thấy trung bình sau 5 năm ở mặt đường bê tông, trong khi các cấu trúc cầu hay công trình thủy lợi khoảng từ 13 đến 16 năm (Behravan et al., 2025). Nghiên cứu tại cầu Sir Lowry’s Pass Viaduct (Nam Phi) đã ước tính ASR làm suy giảm cường độ và đặc biệt là ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi của bê tông. Cụ thể, mô đun đàn hồi có thể giảm tới 52% và cường độ chịu kéo giảm 62.5% ở các kết cấu mặt cầu (Kirchner et al., 2023). Tại Nhật Bản, các vết nứt nghiêm trọng do ASR lần đầu được phát hiện trên các trụ cầu của tuyến cao tốc Hanshin (Osaka) năm 1982. Sự kiện này đã mở

đầu cho chương trình khảo sát quy mô lớn trên toàn Nhật Bản, qua đó xác nhận nhiều công trình hạ tầng bị ảnh hưởng bởi ASR (Okada et al., 1996). Đặc biệt, nghiên cứu của Torii và cộng sự đã cho thấy một số cầu trên tuyến cao tốc Noto (tỉnh Ishikawa) xảy ra hiện tượng đứt gãy giòn cốt thép đai, chủ yếu tại các vị trí uốn cong 90 độ, với tỷ lệ gãy có thể lên tới 30-50% do quá trình trương nở kéo dài của bê tông do ASR (Torii et al., 2008). ASR còn gây ra hiện tượng đóng kín các khe co giãn, dẫn đến nứt vỡ do ứng suất quá mức tại các mối nối và làm hỏng các vật liệu chèn khe. Ngoài ra, các vết nứt dọc theo mép đường hoặc nứt mạng lưới tạo điều kiện cho sự xâm thực, gây ăn mòn cốt thép (Behravan et al., 2025).

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP QUAN TRẮC TRONG QUẢN LÝ KẾT CẤU BÊ TÔNG BỊ ẢNH HƯỞNG BỞI ASR

Bảng 1. Đánh giá và so sánh các phương pháp quan trắc công trình bị ảnh hưởng bởi ASR

Phương pháp	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng và công trình thực tế
Khảo sát trực quan (mắt thường, thước đo nứt)	Chi phí thấp, dễ thực hiện, không yêu cầu các thiết bị phức tạp	Chỉ đo định kỳ; Phụ thuộc vào nhân công; Độ chính xác chịu ảnh hưởng từ kỹ năng thực hiện.	Nhận diện triệu chứng bề mặt ban đầu (tiết gel, bong rộp); Khảo sát định kỳ, đánh giá và phân loại mức độ hư hại VD: Khảo sát định kỳ đường cao tốc Hanshin, Nhật Bản (Okada et al., 1996); Hệ thống quản lý cầu Sir Lowry’s Pass, Nam Phi (Kirchner et al., 2023)

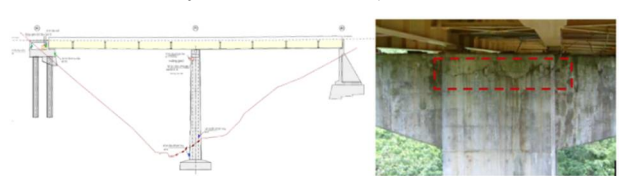
Phương pháp	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng và công trình thực tế
Đo giãn nở và biến dạng hình học	Chỉ số tin cậy để theo dõi tiến trình ASR, xác định tốc độ và dự báo mức độ trương nở	Cần thời gian quan trắc dài để thu thập dữ liệu có ý nghĩa thống kê	Áp dụng cho công trình bê tông khối lớn, công trình quan trọng; Đánh giá chênh lệch độ ẩm gây trương nở không đều <i>VD: Quan trắc liên tục quyết định cắt khe ứng suất tại Đập Mactaquac, Canada (Moffatt et al., 2016); Đánh giá kết cấu cầu Sir Lowry's Pass, Nam Phi (Kirchner et al., 2023) 25/06/2026 1:59:00 CH</i>
Sóng ứng suất không phá hủy (UPV/ Impact-Echo)	Thiết bị tin cậy, đơn giản; Rất nhạy trong việc phát hiện hư hại giai đoạn đầu (UPV); Đo được chỉ khi tiếp cận một mặt kết cấu (Impact-Echo)	Độ nhạy giảm mạnh ở giai đoạn suy thoái muộn (khi vết nứt và độ giãn nở quá lớn)	Đánh giá tình trạng suy giảm đặc trưng cơ học bên trong bê tông; Xác định các khiếm khuyết nội tại của kết cấu. <i>VD: Đo đặc định kỳ hàng năm trên 55 trụ cầu cao tốc Hanshin, Nhật Bản để đánh giá suy giảm cường độ (Okada et al., 1996)</i>
Cảm biến sợi quang (BOCDA/FBG) / Phát xạ âm (AE)/ Cảm biến điện từ (M.EYE Checker)	Quan trắc tự động, liên tục theo thời gian thực; Phân bố đo trên diện tích lớn, độ nhạy cao (phát hiện vết nứt cực nhỏ tới 10 μ m); Sai số thấp	Yêu cầu thiết bị công nghệ tiên tiến; Hệ thống chuyên dụng phức tạp hơn các phương pháp cơ học thông thường	Quan trắc dài hạn các công trình trọng điểm như đập, cầu lớn (Macioski et al., 2024); Cảnh báo sớm sự hình thành nứt (Holthuisen et al., 2024); Kiểm tra đứt gãy cốt thép nằm sâu bên trong bê tông (Công nghệ M.EYE Checker kiểm tra đứt gãy cốt thép tại Nhật Bản (JICA (Japan International Cooperation Agency, 2020) 25/06/2026 1:59:00 CH

Quản lý công trình bị ảnh hưởng bởi ASR đòi hỏi một chiến lược tiếp cận tích hợp nhằm đánh giá cả tình trạng bề mặt và sự suy giảm chất lượng nội tại bên trong kết cấu. Phần này tập trung vào các phương pháp quan trắc trực quan tại hiện trường, không làm tổn hại kết cấu. Việc quan trắc diễn biến theo thời gian thực kết hợp chuẩn đoán tình trạng hiện hữu của công trình sẽ làm cơ sở cho các kịch bản duy tu hiệu quả và hợp lý. Các công nghệ quan trắc từ truyền thống đến tiên tiến được tổng hợp và đánh giá chi tiết tại Bảng 1.

4. BÀI HỌC KINH NGHIỆM QUẢN LÝ RỦI RO ASR TỪ NHẬT BẢN VÀ ĐỀ XUẤT QUY TRÌNH QUAN TRẮC ĐỊNH HƯỚNG ÁP DỤNG CHO ĐẬP THỦY ĐIỆN TẠI VIỆT NAM

4.1. Bài học thực tiễn từ công tác quản lý rủi ro ASR tại cầu Kashima

Cầu Kashima được xây dựng vào năm 1978 trên tuyến đường cao tốc Noto, tỉnh Ishikawa, Nhật Bản. Cầu có cấu trúc hai nhịp đơn giản với trụ bê tông cốt thép hình chữ T, cao 42m (Hình 4). Công trình là một minh chứng điển hình cho sự suy thoái nghiêm trọng do sử dụng cốt liệu thô là đá andesit nghiền có hoạt tính ASR cao (Torii et al., 2008; Toshihiko Minato & Kazuyuki Torii, 2010).



Hình 4. Mặt cắt ngang và hình ảnh vết nứt trên trụ cầu Kashima

Khảo sát toàn diện năm 2004 đã ghi nhận hệ thống nứt mạng lưới dày đặc trên thân trụ, móng trụ, các vết nứt ngang lớn, rộng 5-8mm, tại vị trí khu vực xà mũ trụ (Hình 4) (Toshihiko Minato & Kazuyuki Torii, 2010). Các nhà nghiên cứu đã thực hiện một chuỗi các phân tích định lượng chuyên sâu để xác nhận sự hiện diện của các khoáng vật silica có hoạt tính cao như cristobalite và thủy tinh núi lửa, xác định tốc độ giãn nở đạt trên 0,55%, vượt xa ngưỡng cho phép. Kết cấu có sự suy giảm nghiêm trọng về đặc tính cơ lý của bê tông bao gồm cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi. Sự sụt giảm mạnh sóng siêu âm tại các vùng hư hỏng, chứng tỏ cấu trúc bê tông đã bị rỗng hóa và mất tính đồng nhất. Đặc biệt hơn, khi đục bỏ lớp bê tông bảo vệ, 50% lượng cốt thép đai tại dầm gối đã bị đứt gãy giòn tại các vị trí uốn cong 90° (Toshihiko Minato & Kazuyuki Torii, 2010). Sự cố này đã khẳng định rằng áp lực trương nở nội sinh từ gel ASR hoàn toàn có khả năng vượt qua giới hạn chịu kéo của thép, đe dọa trực tiếp đến an toàn chịu lực tổng thể của công trình.

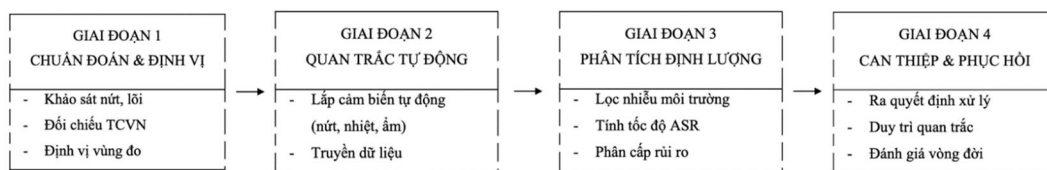
Đứng trước rủi ro, các nhà quản lý công trình cầu Kashima đã quyết định một chiến lược can thiệp được thực hiện vào năm 2005. Phần dầm mũ trụ được đập bỏ và thay mới hoàn toàn phần bê tông. Phần thân trụ được gia cường bằng phương pháp bọc bản thép dày 9mm nhằm tạo ứng suất nén ứng chế sự giãn nở của ASR (Torii et al., 2008). Song song với đó, các nhà quản lý cầu Kashima đã thiết lập một hệ thống quan trắc dài hạn nhằm hai mục tiêu: xác thực hiệu quả của giải pháp sửa chữa và dự báo rủi

ro phát triển ASR trên dữ liệu thời gian thực. Các cảm biến đo nứt tự động, có độ nhạy cao (1/1000 mm), dài đo $\pm 5\text{mm}$ được sử dụng. Cảm biến được lắp đặt tại cả phần đỉnh trụ, nơi ảnh hưởng bởi nhiệt độ và vùng chân trụ ổn định ẩm đã cho phép các nhà nghiên cứu tách bạch được độ mở rộng vết nứt do dao động nhiệt độ theo mùa so với sự tiến triển thực sự của ASR. Kết quả quan trắc chỉ ra rằng, xu hướng giãn nở của trụ cầu sau khi bọc thép đã được khống chế ở mức rất thấp và duy trì trạng thái ổn định dài hạn (Teruhiko Sasatani et al., 2011). Bài học cốt lõi từ cầu Kashima cho thấy, đối với các kết cấu trọng điểm bị ảnh hưởng bởi ASR, can thiệp kỹ thuật không phải là kết thúc. Việc tích hợp hệ thống quan trắc tự động không chỉ là công cụ giám sát mà là cơ

sở khoa học để tối ưu hóa chi phí bảo trì và đảm bảo an toàn tuyệt đối cho công trình trong suốt vòng đời vận hành.

4.2. Đề xuất quy trình quan trắc và quản lý rủi ro ASR định hướng cho đập thủy điện bê tông khối lớn tại Việt Nam

Kế thừa các nguyên lý cốt lõi từ khung quản lý quốc tế và đúc kết bài học thực tế về tính hiệu quả của hệ thống quan trắc cơ học từ trường hợp cầu Kashima, nghiên cứu này đề xuất một quy trình chuyên biệt hóa cho công tác quản lý rủi ro ASR tại các đập thủy điện bê tông khối lớn ở Việt Nam. Quy trình được cấu trúc thành một chu trình quản lý khép kín, bao gồm bốn giai đoạn liên hoàn như ở Hình 5.



Hình 5. Sơ đồ quy trình quản lý rủi ro ASR

Giai đoạn 1: Chuẩn đoán nguyên nhân và định vị vùng xung yếu

Thực hiện khảo sát mạng lưới vết nứt kết hợp khoan lõi bê tông để phân tích hóa lý, soi kính hiển vi điện tử, đối chiếu trực tiếp với TCVN 7572-14:2006 hoặc các tiêu chuẩn cập nhật nhằm xác định chính xác sự hiện diện của gel ASR. Tiếp theo sẽ lựa chọn vết nứt đại diện tại khu vực chịu ứng suất bất lợi, độ ẩm bão hòa như chân đập, hệ thống hành lang, cửa xả lũ để thiết lập mạng lưới đo.

Giai đoạn 2: Thiết lập mạng lưới quan trắc tự động, theo dõi liên tục theo thời gian thực

Lắp đặt hệ thống cảm biến đo phát triển vết nứt đồng bộ với cảm biến nhiệt độ và độ ẩm ngay tại vị trí khảo sát, nhằm kiểm soát các biến số môi trường tác động lên kết cấu. Bên cạnh đó, yêu cầu đồng bộ hóa dữ liệu vết nứt với cao trình mực nước hồ chứa. Đồng thời, thiết lập cơ chế thu thập dữ liệu tự động, liên tục và truyền thời gian thực về máy chủ.

Giai đoạn 3: Phân tích định lượng và đánh giá rủi ro nhằm chuyển hóa số liệu thô thành các chỉ số an toàn của công trình.

Bước này sẽ tiến hành lọc nhiễu dao động nhiệt - ẩm theo mùa, biến dạng đàn hồi do dao động mực nước hồ để cô lập và xác định tốc độ trương nở của ASR (mm/năm). Phân loại định lượng mức độ suy thoái dựa trên tốc độ mở rộng vết nứt.

Giai đoạn 4: Can thiệp và phản hồi dựa trên dữ liệu, đánh giá hiệu quả.

Quyết định các giải pháp can thiệp tương ứng với mức độ suy thoái như kiểm soát ẩm hay can thiệp

chịu lực sâu. Hệ thống quan trắc sẽ được tiếp tục duy trì để đánh giá hiệu quả của phương pháp sửa chữa và tối ưu hóa quản lý vòng đời công trình.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã hệ thống hóa cơ chế gây suy giảm chất lượng bê tông do phản ứng kiềm-silic (ASR), quá trình tiến triển chậm nhưng gây ra những hệ quả nghiêm trọng như giãn nở, nứt vỡ và suy giảm đặc tính cơ lý của bê tông, đặc biệt trong các kết cấu khối lớn như đập thủy điện và công trình cầu giao thông. Việc nhận diện các dạng hư hỏng đặc thù theo loại hình công trình giúp các nhà quản lý có cái nhìn toàn diện hơn về rủi ro tiềm ẩn đối với an toàn công trình và tầm quan trọng của việc kiểm soát phản ứng kiềm - silic (ASR) trong công tác quản lý và bảo trì công trình bê tông.

Bài báo đã tổng hợp và đánh giá hiệu quả của các giải pháp quan trắc từ truyền thống đến tiên tiến. Việc đánh giá rủi ro nếu chỉ dựa trên khảo sát trực quan truyền thống sẽ bộc lộ nhiều hạn chế, do đó đặt ra yêu cầu cấp thiết phải ứng dụng các công nghệ quan trắc tiên tiến nhằm chẩn đoán chính xác mức độ suy thoái và cung cấp dữ liệu tin cậy cho công tác quản lý.

Bài học quản lý thực tiễn từ công trình cầu Kashima đã cung cấp minh chứng định lượng về mức độ phá hoại của ASR cũng như vai trò thiết yếu của chiến lược giám sát dài hạn. Dữ liệu thực tế cho thấy áp lực trương nở nội sinh do ASR có thể gây đứt gãy giòn tới 50% cốt theo đai tại các vị trí quan trọng. Việc thiết lập mạng lưới cảm biến đo phát

triển vết nứt tự động không chỉ làm cơ sở cho quyết định sửa chữa mà còn xác nhận hiệu quả của giải pháp can thiệp cơ học bằng bọc bản thép. Điều này khẳng định, hệ thống quan trắc tự động không chỉ là công cụ giám sát mà còn là thước đo để kiểm chứng độ tin cậy của biện pháp sửa chữa.

Từ nền tảng lý thuyết và bài học thực tế, nghiên cứu đề xuất một quy trình gồm bốn giai đoạn cho công tác quản lý chất lượng vận hành và rủi ro ASR, đặc biệt định hướng cho hệ thống đập thủy điện bê tông khối lớn tại Việt Nam. Từ việc chẩn đoán thực nghiệm, thiết lập mạng lưới quan trắc động, phân tích - phân cấp rủi ro định lượng, đến ra

quyết định can thiệp kết cấu và duy trì phản hồi. Tích hợp chặt chẽ công nghệ giám sát hiện trường vào quy trình quản lý vòng đời công trình không chỉ giúp tối ưu hóa các quyết định kỹ thuật mà còn thiết lập cơ sở vững chắc để tiết kiệm ngân sách bảo trì và bảo đảm an toàn khai thác cho các công trình hạ tầng trọng điểm.

Lời cảm ơn: Tác giả xin chân thành cảm ơn Giáo sư Saiji Fukada và Phòng thí nghiệm Kết cấu, Trường Đại học Kanazawa (Nhật Bản) đã hỗ trợ cơ sở dữ liệu nền tảng và tạo điều kiện để tác giả tiếp nối, khai thác chuỗi số liệu quan trắc dài hạn tại công trình cầu Kashima phục vụ cho bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Hoàng M. Đ., & Nguyễn V. T. (2025). *Nghiên cứu phản ứng kiềm Silic của một số loại cốt liệu theo các phương pháp nhanh*. Vietnam Institute for Building Science and Technology, 2025(vi.vol4), 37. <https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol4-5>
- AAR Working Group. (2017). *Concrete swelling of Dams in Switzerland*. Technical Commission (TECO) of the Swiss Committee for Dams.
- ACI Committee 221. (2008). *221.1R-98 Report on Alkali-Aggregate Reactivity*.
- ACI Committee 221. (2011). *221.1R-98 State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity*.
- Behravan, A., Arce, G., Ozyildirim, H. C., Spradley, E., & Davenport, C. (2025). *Repair and Treatment of Alkali-Silica Reaction (ASR)-Affected Transportation Infrastructures: Review and Interview*. *Infrastructures*, 10(4), 101. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040101>
- Charlwood, R. G. (1994). *A review of alkali aggregate reaction in hydro plants and dams*.
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., & Almakrab, A. (2021). *Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States*. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00563. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563>
- Holthuisen, P., Zhou, Y., Šavija, B., & Çopuroğlu, O. (2024). *Evaluation of the Non-destructive Character of the Stiffness Damage Test for Damage Assessment of Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reaction Using Acoustic Emission*. In L. F. M. Sanchez & C. Trottier (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (pp. 3–10)*. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59349-9_1
- JICA (Japan International Cooperation Agency). (2020). *Inventory of products and technologies developed by japanese companies* (Nos. 5R-JR-18–003).
- Kirchner, H., Van Rooyen, J., Van Der Spuy, P. F., & Van Zijl, G. P. A. G. (2023). *Structural assessment of an ASR-affected reinforced concrete bridge*. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 65(4), 23–35. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2023/v65n4a3>
- Macioski, G., Sanchez, L. F. M., & de Medeiros, M. H. F. (2024). *Measuring Alkali-Silica Reaction Expansion in Concrete with Optical Fiber Sensors*. In L. F. M. Sanchez & C. Trottier (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (pp. 45–53)*. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59349-9_6
- Moffatt, E. G., Thomas, M. D. A., Hayman, S., Fournier, B., & Ideker, J. (2016). *Remediation Strategies Intended for the Reconstruction of the ASR-Induced Mactaquac Dam*. *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction - ICAAR 15*, Sao Paulo, Brazil.
- Okada, K., Imada, K., & Mikuni, H. (1996). *Maintenance system for highway structures damaged by ASR*. *Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Melbourne, Australia.
- Olajide, O. D., Nokken, M. R., & Sanchez, L. F. M. (2024). *Alkali-Silica Reactions: Literature Review on the Influence of Moisture and Temperature and the Knowledge Gap*. *Materials*, 17(1), 10. <https://doi.org/10.3390/ma17010010>
- Rivard, P., Ballivy, G., Gravel, C., & Saint-Pierre, F. (2010). *Monitoring of an hydraulic structure affected by ASR: A case study*. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 676–680. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.010>

- Sims, I., & Nixon, P. (2003). *Detection of potential alkali-reactivity of aggregates—Petrographic method*. RILEM Recommended Test Method AAR-1, 36, 480–496.
- Sims, I., & Poole, A. B. (2022). *Despite Stanton: AAR from denial to remedy in the UK, Europe & the World*. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete:
- Stanton, T. E. (1942). *Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 107(1), 54–84. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005540>
- Teruhiko Sasatani, Shuzo Ura, Makoto Tsuda, & Kazuyuki Torii. (2011). *Reinforcement and Monitoring of RC Bridge Piers Deteriorated by ASR*. コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1.
- Thanh, D. N., Hieu, P. T., Truong, L. X., Minh, P., Giang, N. T., & Tuan, L. C. (2024). *The Petrographic Characteristics and U-Pb Zircon Isotope Age of Felsic Extrusive Rocks in the Western Thanh Hoa Area, Song Ma Suture Zone*. The Iraqi Geological Journal, 1–8. <https://doi.org/10.46717/igi.57.1D.1ms-2024-4-11>
- Thomas, M.D.A., Fournier, B., & Folliard, K.J. (2013). *Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book*.
- Torii, K., Kubo, T., Sannoh, C., & Kanitani, M. (2016). *The Strengthening of an ASR-Affected Water Intake Tower in a Hydro-Electric Dam by Using Post-tensioned Tendons and the Long-term Monitoring of the Tower*. Journal of Advanced Concrete Technology, 14(7), 384–396. <https://doi.org/10.3151/jact.14.384>
- Torii, K., Wasada, S., Sasatani, T., & Minato, T. (2008). *A survey on ASR-Affected bridge pier with fracture of steel bars on Noto expressway*. Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAR).
- Toshihiko Minato, & Kazuyuki Torii. (2010). *Effects of Reinforcement Fracture and Improper Reinforcement Arrangement on ASR Deterioration of Concrete Structures*. コンクリート工学年次論文集 Vol.32.
- Tran, T. H., Lan, C.-Y., Usuki, T., Shellnutt, J. G., Pham, T. D., Tran, T. A., Pham, N. C., Ngo, T. P., Izokh, A. E., & Borisenko, A. S. (2015). *Petrogenesis of Late Permian silicic rocks of Tu Le basin and Phan Si Pan uplift (NW Vietnam) and their association with the Emeishan large igneous province*. Journal of Asian Earth Sciences, 109, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.009>

Abstract:

ALKALI – SILICA REACTION IN CONCRETE STRUCTURES AND MONITORING APPROACHES FOR RISK MANAGEMENT

Alkali–Silica Reaction (ASR) is one of the primary internal mechanisms leading to expansion, cracking, and deterioration of the mechanical properties of concrete. This study examines ASR-induced deterioration mechanisms and characteristic damage patterns in hydraulic and transportation structures. It also reviews and evaluates monitoring approaches, ranging from conventional methods to advanced sensing technologies for structural management. Base on lessons learned from the management of the Kashima Bridge in Japan, ASR-induced damage is quantitatively demonstrated, highlighting the essential role of automated crack monitoring systems in assessing deterioration levels and verifying the effectiveness of mitigation measures. Finally, the study proposes an integrated framework for ASR monitoring and risk management, with a focus on hydropower dams in Vietnam. This framework supports infrastructure managers in transitioning from reactive to proactive maintenance strategies, thereby optimizing lifecycle costs and ensuring operational safety throughout the structure's service life.

Keywords: Alkali–Silica Reaction (ASR), concrete deterioration, automated monitoring, risk management.

Ngày nhận bài: 11/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 03/6/2026