

## ĐÁNH GIÁ TỔNG QUAN VỀ TÁC ĐỘNG CỦA ĐỘNG ĐẤT ĐỐI VỚI HỆ THỐNG ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC

Phạm Quốc Dự<sup>1</sup>, Đỗ Duy Bốn<sup>2</sup>, Phạm Anh Tuấn<sup>3</sup>, Đỗ Tiến Thịnh<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: anhtuanpham.vn@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-8>

**TÓM TẮT:** Trong bối cảnh phát triển việc xây dựng đường sắt cao tốc (ĐSCT) tại Việt Nam, việc bảo đảm an toàn trước các rủi ro thiên tai, đặc biệt là động đất là rất quan trọng. Kinh nghiệm quốc tế từ các quốc gia có hệ thống ĐSCT phát triển như Trung Quốc, Nhật Bản và Hoa Kỳ cho thấy, ảnh hưởng của động đất lên hệ thống đường sắt cao tốc là rất quan trọng đối với an toàn của quá trình vận hành, khai thác, đặc biệt là tại những khu vực địa chấn mạnh, phức tạp.

Bài báo này có mục tiêu chính là đưa ra những đánh giá tổng quan về tác động của động đất lên công trình đường sắt cao tốc, cũng như xem xét các yêu cầu chung của các tiêu chuẩn, hướng dẫn kỹ thuật của quốc tế đối với việc thiết kế kháng chấn cho đối tượng công trình này.

**TỪ KHÓA:** Đường sắt cao tốc; Thiết kế kháng chấn; Tiêu chuẩn kỹ thuật; Chỉ dẫn thiết kế.

**ABSTRACT:** In the context of developing high-speed railway (HSR) construction in Vietnam, ensuring safety against natural disasters, especially seismic effects, is crucially important. International experience from countries with developed HSR systems such as China, Japan and the United States shows that the impact of earthquakes on HSR systems is critical for the safety of operation, especially in areas with strong and complex seismicity. This paper aims to provide an overview of the impact of earthquakes on HSR structures, as well as to review the general requirements of international standards and technical guidelines for seismic design of this type of structures.

**KEYWORDS:** High-speed railway; Seismic design; Technical standards; Design guidelines.

### 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hệ thống đường sắt cao tốc (ĐSCT) là một thành tựu quan trọng trong giao thông vận tải, cho phép di chuyển tốc độ cao giữa các thành phố. Tuy nhiên, các tuyến ĐSCT thường trải dài qua nhiều vùng địa lý, trong đó có những khu vực tiềm ẩn nguy cơ động đất. Động đất là thảm họa tự nhiên có sức tàn phá lớn, đặc biệt đe dọa đến an toàn kết cấu của các công trình hạ tầng [1]. Thực tế lịch sử đã cho thấy nhiều trận động đất mạnh gây hư hại nghiêm trọng cho mạng lưới giao thông: ví dụ, trận động đất Kobe (Nhật Bản) năm 1995 đã tàn phá hệ thống đường sắt trong vùng Kobe, khiến phần lớn mạng lưới đường sắt tê liệt. Việc nghiên cứu tổng quan về động đất và tác động của chúng đến ĐSCT là hết sức cần thiết nhằm đề xuất các giải pháp thiết kế, xây dựng phù hợp, đảm bảo an toàn khai thác cho loại hình giao thông hiện đại này.

### 2. TÁC ĐỘNG ĐỘNG ĐẤT ĐỐI VỚI HỆ THỐNG ĐSCT

Động đất là hiện tượng rung động đột ngột của vỏ Trái Đất, sinh ra do sự trượt gãy nhanh chóng

trên các đứt gãy (fault) tích lũy ứng suất. Theo lý thuyết phục hồi đàn hồi (elastic rebound) của H.F. Reid, vỏ đá bị biến dạng đàn hồi dần dần do các mảng kiến tạo di chuyển; khi ứng suất vượt sức chịu của đá, đoạn đứt gãy sẽ trượt gãy, giải phóng năng lượng dưới dạng nhiệt và sóng địa chấn lan truyền ra xung quanh [1]. Nói cách khác, động đất được phát sinh bởi sự trượt nhanh dọc theo đứt gãy đang bị kẹt trong trạng thái ứng suất cao, bắt đầu từ chấn tiêu (focus) và phát ra sóng rung động. Hầu hết động đất lớn là động đất kiến tạo, xảy ra tại ranh giới các mảng thạch quyển; tiêu biểu như vành đai “Vòng lửa Thái Bình Dương” nơi mảng Thái Bình Dương va chạm các mảng lục địa gây hoạt động động đất và núi lửa mạnh mẽ. Ngoài ra còn có động đất do núi lửa phun trào, động đất sụp đổ công trình ngầm, hay động đất kích thích do hồ chứa nước, nổ mìn,... nhưng chiếm tỷ lệ nhỏ so với động đất kiến tạo.

Các tham số đặc trưng của động đất bao gồm: Mức độ mạnh yếu của động đất được đo bằng độ lớn

(magnitude) - phản ánh năng lượng giải phóng tại nguồn chấn tiêu. Thang độ lớn phổ biến là thang  $M_w$  (moment magnitude); mỗi đơn vị tăng tương ứng năng lượng phát ra tăng khoảng 31,6 lần. Trong khi đó, độ rung lắc hay hư hại tại một địa điểm được đánh giá bằng cấp độ chấn rung (intensity) theo các thang MSK-64, Mercalli cải tiến (MMI), v.v. Cấp độ chấn rung phụ thuộc vào khoảng cách đến chấn tâm, độ sâu chấn tiêu và điều kiện địa chất công trình địa phương. Ví dụ, động đất mạnh xảy ra sâu hoặc xa có thể chỉ gây rung động nhẹ (cấp thấp) tại khu vực khảo sát; ngược lại, động đất độ lớn trung bình nhưng nông và ngay dưới khu đô thị có thể gây chấn động rất mạnh. Thang MMI mức XII (12) mô tả cảnh cực hạn: đồ nát hoàn toàn, nền đất biến dạng, đường ray xe lửa bị uốn cong mạnh. Yếu tố tần suất xảy ra cũng được quan tâm: thường sử dụng khái niệm chu kỳ lặp lại (return period) hoặc xác suất vượt quá trong thời gian thiết kế. Các nghiên cứu địa chấn học thống kê cho thấy động đất nhỏ xảy ra rất thường xuyên, trong khi động đất cực mạnh ( $M7$ ,  $M8$  trở lên) có chu kỳ lặp lại lâu (hàng trăm đến hàng ngàn năm). Vì vậy, đánh giá nguy cơ địa chấn cho công trình đòi hỏi xem xét nhiều mức động đất với xác suất khác nhau (sẽ đề cập chi tiết ở phần sau về tiêu chuẩn thiết kế).

Sóng địa chấn và rung động nền đất: Khi đứt gãy trượt gây, năng lượng tỏa ra dưới dạng sóng đàn hồi truyền qua các lớp đất đá. Có hai nhóm chính: sóng thân (body waves) lan sâu trong lòng đất gồm sóng P (Primary) dao động dọc phương truyền và sóng S (Secondary) dao động vuông góc phương truyền; cùng với đó là sóng bề mặt (surface waves) truyền theo mặt đất (gồm sóng Love và Rayleigh) thường gây rung lắc mạnh và kéo dài khi đến bề mặt. Dao động nền đất trong một trận động đất thực tế là tổng hợp phức tạp của nhiều pha sóng P, S và sóng mặt đến liên tiếp. Biên độ rung động giảm dần khi sóng lan xa (do phân tán năng lượng) nhưng có thể được khuếch đại ở vùng đất mềm do tính chất phản xạ và cộng hưởng địa tầng. Đặc tính rung động nền được mô tả thông qua các tham số như gia tốc nền cực đại PGA, vận tốc cực đại, thời gian kéo dài,... dùng trong thiết kế kháng chấn.

Tóm lại, động đất là kết quả của quá trình kiến tạo làm tích lũy ứng suất và giải phóng đột ngột, gây rung động nền đất dưới dạng sóng địa chấn. Hiểu rõ cơ chế này giúp kỹ sư dự báo được kịch bản chấn động thiết kế phù hợp cho công trình.

Tác động chung của động đất đến công trình: Động đất có thể gây ra nhiều dạng hư hại cho công trình xây dựng do gia tốc nền đất lớn, chuyển vị nền

và biến dạng địa chất. Sóng địa chấn làm kết cấu rung động, nếu biên độ vượt khả năng chịu lực sẽ gây nứt vỡ, thậm chí sập đổ. Các công trình nặng và cao (như cầu cạn, nhà cao tầng) chịu tác động cộng hưởng nếu chu kỳ dao động tự nhiên của chúng gần với thành phần tần số của sóng động đất. Nền đất yếu có thể hóa lỏng khi chấn động mạnh, làm mất khả năng chịu tải của móng. Mặt đất gần đứt gãy có thể bị dịch chuyển vĩnh viễn, tạo vết nứt, trượt lở gây hư hỏng nghiêm trọng cho móng và kết cấu bên trên. Chẳng hạn, trong trận Kobe 1995, nhiều cầu cao tốc trên cao và cầu cạn đường sắt xây những năm 1960 đã bị sập đổ do các trụ bê tông cốt thép non yếu về mặt cấu tạo chịu lực ngang (thiếu đai thép, liên kết kém). Những công trình xây dựng theo tiêu chuẩn cũ, không có đủ chi tiết cấu tạo chống lực ngang, thường chịu thiệt hại nặng nề hơn so với công trình thiết kế theo tiêu chuẩn hiện đại có xét đến động đất.

Đối với hệ thống đường sắt cao tốc [2,3]: ĐSCT là hệ thống hạ tầng tuyến trải dài, bao gồm đường ray, nền đường, cầu cạn, hầm và các công trình phụ trợ (nhà ga, hệ thống điện v.v). Do yêu cầu đặc thù về độ chính xác cao của đường ray và vận tốc chạy tàu lớn, động đất có thể gây ra những hậu quả nghiêm trọng sau: (1) Biến dạng đường ray và nền đường - Rung động nền có thể làm đường ray thép bị uốn cong, dịch chuyển khỏi vị trí thiết kế, đặc biệt tại các khớp nối giãn hoặc đoạn ray liên dài không có mối hàn giãn nở. Nền đá ballast hoặc bê tông dưới đường ray có thể lún, trượt cục bộ. Hình 1 dưới đây minh họa hiện tượng đường ray bị uốn cong mạnh sau một trận động đất lớn tại Thổ Nhĩ Kỳ năm 2023. Sự dịch chuyển và biến dạng này khiến tàu có nguy cơ bị trật bánh nếu đang vận hành, hoặc phải ngừng khai thác cho đến khi sửa chữa xong. (2) Hư hại cầu cạn và kết cấu cầu – ĐSCT thường sử dụng nhiều cầu vượt và cầu cạn dài. Động đất gây dao động mạnh ở trụ cầu, móng cầu, có thể làm nứt vỡ bê tông, phá hoại kết cấu dầm cầu, làm văng khỏi gối cầu nếu không có cơ cấu neo giữ. Các gối cầu cao su hoặc PTFE có thể trượt, xô lệch; hư hỏng của chúng từng xảy ra trong nhiều sự cố (ví dụ cầu đường sắt bị trượt dầm trong động đất Đài Loan 1999). Đối với cầu dầm liên tục, chấn động ngang làm dịch chuyển mấu cầu và dầm liên tục tương đối, đòi hỏi thiết kế phải có khe hở hoặc thiết bị hạn chế chuyển vị (như bộ giảm chấn, thiết bị hãm đàn hồi). (3) Hư hỏng hầm – Tuy hầm đường sắt ít chịu tác động hơn trên mặt do bao quanh bởi khối đất đá, động đất mạnh vẫn có thể gây nứt vỡ lớp bê tông vỏ hầm, tróc lở và biến dạng đường hầm, đặc biệt nếu có tương tác với mạch nước ngầm. (4) Thiết bị và hệ thống – Các hệ thống điện khí hóa, thông tin

tín hiệu của ĐSCT cũng chịu ảnh hưởng: mất điện, đổ cột điện, đứt dây điện tiếp xúc,... có thể xảy ra do rung chấn. Hệ thống thông tin điều khiển có thể ghi nhận nhiễu loạn khi động đất, nhưng mặt tích cực là nhờ đó các cảm biến địa chấn dọc tuyến sẽ phát hiện chấn động và kích hoạt hệ thống dừng tàu khẩn cấp. Nhật Bản là quốc gia tiên phong áp dụng hệ thống cảnh báo và dừng tàu tự động khi có động đất (từ sau thảm họa trật bánh tàu Shinkansen năm 2004), giúp giảm thiểu thương vong cho hành khách.

Hiện tượng biến dạng này cho thấy lực nén và trượt mạnh đã tác động lên kết cấu đường sắt, làm thanh ray thép cong queo, tà vẹt bê tông bật khỏi vị trí ban đầu.



**Hình 1: Đường ray bị uốn cong và dịch chuyển sau trận động đất lớn (Thổ Nhĩ Kỳ, 2023)**

Ngày 16/3/2022, một trận động đất mạnh MJMA7,4 (độ sâu ~57 km) xảy ra ngoài khơi Fukushima - được xem là dư chấn muộn của trận động đất 2011. Trận động đất này gây rung lắc cực mạnh (cấp độ 6+ trên thang JMA, với gia tốc cực đại đo được lên tới ~1,232 gal), ảnh hưởng trực tiếp đến tuyến Tohoku Shinkansen. Mặc dù hệ thống cảnh báo sớm đã kích hoạt và giảm thiểu thương vong (một đoàn tàu Shinkansen Yamagata bị trật bánh nhưng không hành khách nào bị thương), các công trình hạ tầng trên tuyến đã chịu nhiều hư hại. Toàn bộ đoạn đường sắt cao tốc từ ga Fukushima đến ga Sendai buộc phải ngừng hoạt động để sửa chữa. Theo thống kê, quy mô hư hại kết cấu lần này chỉ đứng sau trận đại địa chấn 2011, với gần 1.000 điểm kết cấu bị hư hỏng ở các mức độ khác nhau. Sau nỗ lực phục hồi khẩn trương, tuyến Tohoku Shinkansen mới khôi phục chạy tàu sau gần 1 tháng (ngày 14/4/2022 mở lại một phần và hoạt động bình thường toàn tuyến từ 13/5/2022).

Sau trận động đất, công tác khảo sát hiện trường cho thấy nhiều dạng hư hỏng khác nhau

trên tuyến đường sắt cao tốc, từ phần kết cấu hạ tầng (cầu, trụ cầu, gối cầu, kết cấu cầu cận khung bê tông cốt thép) đến các thiết bị đường sắt (trụ điện cao áp, đường ray, v.v.).

Một số trụ cầu bê tông cốt thép trên tuyến đã bị hư hại nghiêm trọng do động đất. Phổ biến nhất là hiện tượng lún và nghiêng trụ cầu: Tại một vị trí cầu bê tông dự ứng lực (gồm 2 nhịp dầm đặt trên 2 trụ chính cao ~10 m), một trụ cầu đã bị lún tới ~400 mm, kéo theo cả nhịp cầu phía trên bị nghiêng lệch. Phần bê tông thân trụ xuất hiện nhiều vết nứt lớn và biến dạng nền móng rõ rệt do trụ tiếp nhận tải trọng quá mức từ nhịp dầm bên trên. Hư hỏng tập trung chủ yếu ở tầng dưới của trụ (đối với trụ rỗng hai tầng có sàn trung gian), biểu hiện bằng bê tông nứt vỡ, có vết gãy xé ngang thân trụ.

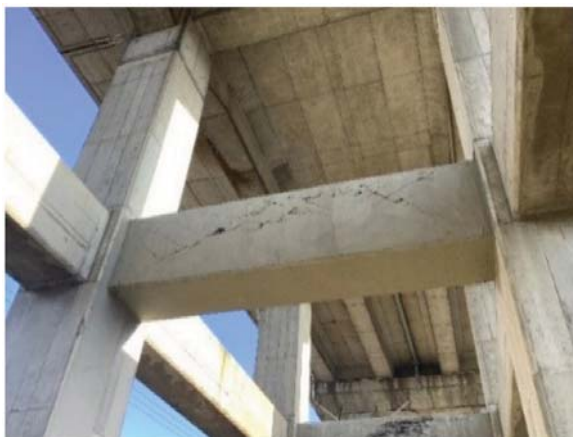


**Hình 2: Hư hỏng trụ cầu**

Hư hỏng ở dầm cầu chủ yếu liên quan đến sự dịch chuyển, biến dạng của nhịp dầm do rung chấn: Tại cầu Date (một cầu giàn thép 4 nhịp, hoàn thành năm 1967, bắc qua sông Abukuma), trận động đất đã làm xê dịch mạnh kết cấu nhịp cầu. Hiện trường cho thấy nhịp dầm phía tây của cầu đã

va chạm vào trụ cầu bên dưới, gây ra một khe hở lớn bất thường tại khe co giãn. Gối cầu phía đông bị vỡ khiến đầu dầm bên đó bị hạ thấp so với mô cầu. Rất may cây cầu này có lắp hệ thống chống rơi dầm, nên nhịp cầu không bị rơi khỏi gối.

Nhiều gối cầu - bộ phận liên kết giữa dầm cầu và trụ cầu/mô cầu - đã bị ảnh hưởng bởi động đất. Điển hình là tại cầu Showa (cầu giàn thép 4 nhịp, hoàn thành năm 1993, có trang bị hệ chống rơi dầm): mặc dù mô cầu và trụ cầu không thấy hư hại rõ, các chốt neo giữ gối cầu bị lỏng cả ở phía Bắc lẫn phía Nam. Sự lỏng này đồng nghĩa với việc dầm cầu có thể đã trượt lắc mạnh trên gối và làm các bulông neo bị xoay nói. Thực tế, mặt đường trên cầu Showa cũng xuất hiện vết nứt nhỏ, gián tiếp cho thấy cầu chịu rung chấn đáng kể. Việc các neo gối bị lỏng buộc phải siết chặt, kiểm tra lại trước khi thông cầu – do đó cầu Showa dù dự kiến khôi phục sau trận động đất 2021, đã phải tiếp tục đóng sau động đất 2022 để xử lý sự cố mới.



**Hình 3: Hư hỏng dầm trung gian**



**Hình 4: Hư hỏng gối cầu Date**

Trên tuyến Tohoku Shinkansen, phần lớn đường ray cao tốc chạy trên các cầu cạn bê tông cốt thép 2 tầng dạng khung (ramen). Kết cấu này

gồm các cột bê tông song song hai bên, liên kết với nhau bằng dầm ngang ở giữa (tầng trung gian) và dầm đáy đường ray ở đỉnh. Sau động đất, hư hỏng trên diện rộng được phát hiện ở các cầu cạn dạng này, đặc biệt đoạn từ thành phố Koriyama (Fukushima) đến Shiroishi (Miyagi).

Động đất không chỉ gây hư hại tức thời mà còn để lại hậu quả gián tiếp: sau sự kiện, hoạt động giao thông gián đoạn, việc cứu hộ cứu nạn khó khăn nếu đường sắt bị hỏng. Vì vậy, đối với ĐSCT - một phương tiện chở khách khối lượng lớn và chạy tốc độ rất cao - yêu cầu an toàn địa chấn là cực kỳ nghiêm ngặt.



**Hình 5: Hư hỏng khung cầu cạn**

Yêu cầu thiết kế kháng chấn đặc thù cho ĐSCT: Do tính chất đặc biệt nêu trên, các quy phạm thiết kế đặt ra những tiêu chí khắt khe nhằm bảo vệ kết cấu và đảm bảo an toàn chạy tàu khi động đất. Tiêu chuẩn Trung Quốc GB 50111-2006 [2] (quy chuẩn thiết kế chống động đất cho đường sắt) phân loại cầu đường sắt thành các cấp bảo vệ A, B, C, D tùy tầm quan trọng và khẩu độ cầu, trong đó cấp A và B áp dụng cho các cầu lớn, cầu ĐSCT khẩu độ  $\geq 40$  m v.v. Mỗi cấp có yêu cầu kháng chấn tương ứng để ưu tiên bảo vệ. Đặc biệt, các công trình đường sắt được thiết kế phải chịu được ba mức động đất: động đất thường

xuyên (nhỏ), động đất thiết kế trung bình và động đất cực lớn hiếm gặp. Theo đó, sau động đất thường xuyên (nhỏ) - có chu kỳ lặp ~50 năm, công trình phải hoạt động bình thường, không được hư hại hoặc chỉ hư hại rất nhẹ, kết cấu vẫn trong trạng thái đàn hồi. Sau động đất thiết kế (vừa) - chu kỳ ~475 năm, công trình có thể bị hư hỏng nhưng ở mức có thể sửa chữa nhanh, phải khôi phục chức năng khai thác trong thời gian ngắn; kết cấu có thể làm việc đàn hồi dẻo nhẹ (vượt quá giới hạn đàn hồi) nhưng không được hư hỏng không thể sửa. Trong trường hợp động đất cực lớn (hiếm) - chu kỳ rất dài (~2475 năm hoặc hơn), công trình được phép hư hại nặng nhưng không được phép sụp đổ hoàn toàn, sao cho sau khi động đất kết thúc có thể sửa chữa khẩn cấp để đoàn tàu lưu thông với tốc độ hạn chế (phục vụ cứu viện). Những yêu cầu hiệu năng này thường được khái quát thành mục tiêu “Không hư hại với động đất nhỏ, không gián đoạn sử dụng với động đất vừa, không sụp với động đất lớn”.

Đối với đường sắt cao tốc, ngoài các mục tiêu trên, còn bổ sung yêu cầu về an toàn vận hành: Trong trường hợp động đất vừa phải (thường xuyên), kết cấu cầu đường sắt cao tốc không được biến dạng vượt giới hạn cho phép, đảm bảo đoàn tàu đang chạy có thể dừng lại an toàn từ vận tốc tối đa. Nói cách khác, thiết kế ĐSCT thường xét hai cấp động đất hoạt động: Cấp I - động đất cực đại (hiếm gặp): cho phép kết cấu đàn hồi dẻo, hư hỏng nhưng có thể sửa chữa được (thiết kế theo nguyên tắc sức bền và độ dẻo đảm bảo); Cấp II - động đất hoạt động (thường xuyên): kết cấu không bị hư hại, còn đủ độ bền để chạy tàu an toàn với tốc độ tối đa, các bộ phận kết cấu không được chảy dẻo và chuyển vị tương đối giữa cầu và ray nằm trong giới hạn cho phép của tương tác đường ray - cầu. Cách tiếp cận hai cấp này đã được áp dụng trên nhiều tuyến ĐSCT: ví dụ, Đài Loan thiết kế ĐSCT với động đất cấp I có chu kỳ ~950 năm, gia tốc nền tới 0,4g; động đất cấp II lấy bằng 1/3 gia tốc đó (~0,13g). California (Mỹ) - nơi đang phát triển ĐSCT - cũng quy định động đất cực đại 950 năm và động đất hoạt động ~50 năm (tương tự quan điểm của Trung Quốc và Nhật Bản). Như vậy, so với cầu đường bộ thông thường, cầu ĐSCT có yêu cầu khắt khe hơn nhiều: vừa phải đảm bảo không sụp ở động đất lớn, vừa phải đảm bảo không gián đoạn chạy tàu ở động đất vừa. Điều này đòi hỏi nhiều giải pháp kỹ thuật như tăng cường độ dẻo kết cấu (bố trí đầy đủ cốt thép đai, cấu tạo chống cắt cho cột bê tông cốt thép), sử dụng khớp nối linh

hoạt, khe co giãn, gối cầu có khóa chống rơi, thậm chí lắp thiết bị giảm chấn hoặc cách chấn cho cầu. Tiêu chuẩn GB 50111-2006 sau trận động đất Tứ Xuyên 2008 đã bổ sung các yêu cầu về cấu tạo cầu ĐSCT và sau đó được cụ thể hóa trong Quy phạm thiết kế đường sắt cao tốc Trung Quốc (TB 10621-2014) [4].

Bên cạnh thiết kế kết cấu, việc lựa chọn hướng tuyến và nền đất cũng là biện pháp giảm thiểu rủi ro địa chấn. Quy chuẩn GB 50111 khuyến cáo tuyến đường sắt nên tránh đi qua đứt gãy hoạt động mạnh cấp 8-9 độ MSK; nếu bắt buộc đi qua, cần chọn góc giao vuông và đoạn vượt ngắn nhất. Nền đắp phải kiểm tra nguy cơ hóa lỏng, trượt đất; các lớp đất yếu dễ hóa lỏng nên được gia cố hoặc thay bằng vật liệu đắp hạt thô có khả năng thoát nước tốt. Cầu nên đặt trên nền móng tốt, tránh khu vực bờ sông không ổn định; hạn chế xây cầu quá cao ở vùng động đất mạnh. Đối với đường hầm, không bố trí cửa hầm tại vị trí địa chất xấu dễ sụt lở; nếu tuyến gần dãy núi, nên đặt cửa hầm sâu vào bên trong, tránh miệng hầm nằm ngay chân taluy dốc không ổn định. Những biện pháp trên nhằm tránh tối đa tác động bất lợi của địa chấn lên công trình ngay từ khâu quy hoạch và thiết kế.

Tóm lại, tác động của động đất đến ĐSCT rất phức tạp, nghiêm trọng. Nhưng có thể phòng ngừa và giảm thiểu nhờ thiết kế kháng chấn phù hợp lựa chọn tuyến và giải pháp kết cấu hợp lý. Phần tiếp theo sẽ rút ra các bài học kinh nghiệm từ những thảm họa động đất lớn, qua đó nhấn mạnh thêm các điểm cần chú ý trong thiết kế và vận hành ĐSCT.

### 3. BÀI HỌC TỪ CÁC TRẬN ĐỘNG ĐẤT LỚN TRONG LỊCH SỬ

Lịch sử đã ghi nhận nhiều trận động đất lớn gây thiệt hại nặng nề, qua đó để lại những bài học quý báu cho ngành xây dựng và giao thông. Thứ nhất, các thảm họa động đất đã thúc đẩy sự ra đời của các tiêu chuẩn kháng chấn ngày càng hoàn thiện. Ví dụ, sau trận động đất San Francisco 1906, lý thuyết phục hồi đàn hồi ra đời; sau động đất San Fernando (Mỹ) 1971, quy định bổ sung về cấu tạo chống cắt cho cột bê tông được áp dụng rộng rãi; đặc biệt, động đất Northridge 1994 (Mỹ) và Kobe 1995 (Nhật) đã dẫn đến những cập nhật quan trọng trong tiêu chuẩn xây dựng ở nhiều nước, yêu cầu thiết kế chịu lực ngang mạnh hơn và cải tiến vật liệu, kết cấu dẻo hơn. Bolt (2006) [1] nhận xét rằng các trận động đất như Northridge, Kobe, Chi-Chi (Đài Loan, 1999) và nhiều sự kiện khác đều đã đóng góp vào việc cải tiến kỹ thuật thiết kế kháng

chấn trên thế giới. Chẳng hạn, sau động đất Kobe 1995 khiến hơn 100.000 tòa nhà hư hại, Nhật Bản đã sửa đổi phân cấp độ lớn sóng địa chấn JMA, bổ sung hệ thống cảnh báo khẩn cấp và yêu cầu mới về liên kết dầm cầu, cột trụ cho cầu đường sắt và đường bộ. Tại Đài Loan, trận động đất Chi-Chi 1999 ( $M_w$  7.6) xảy ra ngay trước khi hoàn thiện tuyến ĐSCT đầu tiên (khánh thành 2007) đã làm tăng đáng kể yêu cầu thiết kế: Đài Loan quyết định nâng gia tốc nền thiết kế lên đến  $\sim 0,4g$  cho động đất cực lớn, đồng thời trang bị hệ thống cảm biến dừng tàu tự động trên toàn tuyến. Nhờ đó, khi động đất 2016 ( $M_w$  6.4 miền Nam Đài Loan) xảy ra, các đoàn tàu cao tốc đã kịp dừng khẩn cấp, không gây thương vong cho hành khách dù đường ray và trụ cầu có bị ảnh hưởng nhỏ.

Thứ hai, bài học kinh điển là cần đặc biệt lưu ý hiện tượng địa chấn thứ cấp như hóa lỏng nền đất và địa chấn kèm hòa hoãn. Trong động đất Niigata (Nhật Bản) 1964, nền đất cát bão hòa nước hóa lỏng làm hàng trăm ngôi nhà chìm, cầu lún; tương tự, hóa lỏng do động đất đã làm sụp đổ tuyến đường sắt nhẹ trên cao ở Kobe 1995 do móng trụ mất ổn định. Các vụ cháy lớn sau động đất (San Francisco 1906, Tokyo 1923, Kobe 1995) thiêu hủy nhiều công trình hơn cả bản thân chấn động. Vì vậy, đối với hệ thống ĐSCT điện khí hóa, cần có phương án ngắt điện nhanh và phòng cháy sau động đất nhằm ngăn chặn hỏa hoạn lan rộng.

Thứ ba, động đất lớn cho thấy tầm quan trọng của duy tu, nâng cấp hạ tầng cũ. Nhiều cầu, hầm xây trước khi có tiêu chuẩn kháng chấn hiện đại đã không trụ vững qua các trận động đất gần đây. Trong trận Tứ Xuyên (Trung Quốc) 2008, phần lớn tuyến đường sắt cũ qua vùng núi bị hư hại (sập hầm, trượt lở nền đường), khiến Trung Quốc phải xem xét lại quy hoạch tuyến và nâng cấp tiêu chuẩn. Kinh nghiệm từ sự kiện này đã được tích hợp vào tiêu chuẩn GB 50111 (bản 2009), bổ sung các quy định về độ dẻo kết cấu cầu đường sắt và yêu cầu kiểm tra bắt buộc đối với cột trụ cầu bê tông (như tỷ lệ cốt thép dọc tối đa, đai thép tối thiểu) nhằm tăng khả năng chống chịu biến dạng lớn. Tại Mỹ, sau động đất Loma Prieta 1989 làm hư hại một phần cầu San Francisco-Oakland, chương trình gia cường cầu lớn (như Cầu Cổng Vàng, hệ thống đường sắt BART) được thực hiện. Nhật Bản cũng đã gia cố hầu hết cầu cạn đường sắt cao tốc xây từ thập niên 1960 để đáp ứng tiêu chuẩn mới sau 1995, thay gối cầu, bổ sung cáp giữ dầm. Những công trình nào không thể nâng cấp (do chi phí hoặc kỹ thuật) thì

phải hạn chế khai thác hoặc lên kế hoạch thay thế để đảm bảo an toàn lâu dài.

Cuối cùng, bài học quan trọng nhất là cần hệ thống cảnh báo và quy trình ứng phó hiệu quả. Như đã nêu, Nhật Bản triển khai hệ thống UrEDAS và các thiết bị đo gia tốc dọc tuyến Shinkansen: khi phát hiện động đất vượt ngưỡng, hệ thống tự động hãm tàu khẩn cấp. Nhờ vậy, trong trận động đất Tōhoku 2011 ( $M_w$  9.0) - một trong những trận lớn nhất lịch sử - dù hạ tầng đường sắt cao tốc bị hư hại đáng kể (một số đoạn đường ray biến dạng, cột điện đổ), nhưng không có đoàn tàu nào gặp tai nạn nghiêm trọng do tất cả các chuyến đang chạy đều dừng an toàn trước khi rung chấn mạnh xảy ra. Trải nghiệm này cho thấy ngoài thiết kế kết cấu bền vững, vận hành thông minh cũng là chìa khóa giảm thiểu thiệt hại và thương vong khi động đất.

Tổng hợp các bài học trên, có thể thấy mỗi trận động đất lớn là một phép thử khắc nghiệt đối với hệ thống công trình. Đối với đường sắt cao tốc, việc học hỏi từ các thảm họa quá khứ đã và đang giúp các quốc gia nâng cao tiêu chuẩn an toàn, hoàn thiện thiết kế để các tuyến ĐSCT tương lai có khả năng chống chịu tốt hơn trước mỗi đe dọa địa chấn.

#### **4. ĐÁNH GIÁ NGUY CƠ ĐỊA CHẤN TẠI CÁC KHU VỰC CÓ TIỀN NĂNG PHÁT TRIỂN ĐSCT**

Trên thế giới, các tuyến ĐSCT hiện có và tương lai phân bố tại nhiều khu vực địa chất khác nhau, do đó mức độ nguy cơ địa chấn rất đa dạng. Nhật Bản, Đài Loan, Indonesia, Thổ Nhĩ Kỳ, Iran, Trung Quốc vùng Tây Nam, bờ Tây Hoa Kỳ... là những nơi có hoạt động động đất mạnh và đều đã hoặc đang phát triển đường sắt cao tốc. Những khu vực này nằm trên hoặc gần ranh giới mảng kiến tạo rất năng động (như vành đai Thái Bình Dương, đứt gãy Anatolia, dãy Himalaya). Ví dụ, Nhật Bản phải thiết kế ĐSCT cho gia tốc nền rất cao và tần suất động đất dày; tuyến Shinkansen Tōhoku đã trải qua nhiều trận động đất lớn. Tương tự, Trung Quốc có tuyến ĐSCT qua Tứ Xuyên - Vân Nam (địa hình núi cao, nhiều đứt gãy) nên phải áp dụng tiêu chuẩn kháng chấn cao nhất (cấp độ 9, gia tốc nền  $>0,4g$ ). Trong khi đó, một số nước châu Âu như Pháp, Đức, Anh cũng có ĐSCT nhưng nguy cơ động đất thấp hơn nhiều (Tây Âu nằm sâu trong mảng Âu-Á ổn định). Thực tế, tiêu chuẩn thiết kế ĐSCT ở Pháp thường xét động đất cực đại có chu kỳ khoảng 475 năm (PGA tương đối thấp), còn động đất thường xuyên thì nhỏ (20-50 năm) - phần

ánh đúng điều kiện địa chấn ôn hòa của khu vực này. Ngược lại, Maroc (Bắc Phi) dù không thuộc vùng siêu hoạt động nhưng cũng phải tính đến kích bản động đất hiếm ~1000 năm cho tuyến ĐSCT mới, do nước này nằm gần đới hút chìm Địa Trung Hải (tuy nguy cơ không cao như Nhật nhưng không thể bỏ qua hoàn toàn).

Tại Đông Nam Á, Việt Nam và Thái Lan là những nước đang có kế hoạch phát triển đường sắt cao tốc. Khu vực này nằm ở rìa phía tây của vành đai Thái Bình Dương, nhìn chung nguy cơ động đất ở mức trung bình. Đối với Việt Nam, theo phân vùng động đất, các tỉnh Tây Bắc (gần đứt gãy Sông Hồng, Điện Biên) và khu vực ven biển miền Trung (gần đứt gãy Thuận Hải – Minh Hải ngoài khơi) có thể gặp động đất mạnh nhất khoảng cấp 7 - 8 (theo thang MSK, tương đương M6 – 7). Lịch sử đã từng ghi nhận động đất ~M6.7 ở Điện Biên (1935) và ~M6.1 ở Quảng Nam (tam giác Sông Tranh, 1957). Như vậy, nếu tuyến ĐSCT Bắc - Nam đi qua các vùng này, cần đặc biệt quan tâm đến giải pháp kháng chấn. Việc khảo sát địa chất và lập bản đồ nguy cơ địa chấn chi tiết dọc tuyến là bước bắt buộc trước khi thiết kế. Thật vậy, tiêu chuẩn của Trung Quốc (bản đồ phân vùng gia tốc nền) cũng như các quy chuẩn quốc tế đều yêu cầu xác định cường độ nền tảng thiết kế theo vị trí công trình. Do đó, với tuyến ĐSCT tương lai ở Việt Nam, cần tham khảo bản đồ phân vùng động đất quốc gia (do Viện Vật lý Địa cầu công bố) để chọn được cấp động đất thiết kế phù hợp cho từng đoạn tuyến - ví dụ đoạn qua miền Trung có thể lấy cấp 7 MSK, miền Bắc cấp 8 MSK. Ngoài ra, các đứt gãy hoạt động đã biết phải được điều tra kỹ và tránh tối đa khi chọn tuyến, như khuyến cáo tương tự trong tiêu chuẩn Trung Quốc.

Một khía cạnh nữa trong đánh giá nguy cơ là ảnh hưởng của biến đổi khí hậu và các hiện tượng cực đoan có thể đồng thời với động đất. Ở những vùng có nguy cơ sóng thần (như Nhật Bản, Indonesia), tuyến ĐSCT ven biển phải nâng cao cos nền hoặc làm cầu cạn để tránh bị ngập khi xảy ra động đất kèm sóng thần (như sự cố sóng thần Tōhoku 2011 từng làm ngập một phần tuyến Shinkansen ven biển). Những phân tích liên ngành này ngày càng được chú trọng trong quy hoạch hạ tầng bền vững.

Tóm lại, nguy cơ địa chấn tại các khu vực phát triển ĐSCT rất khác nhau, từ rất cao (Nhật, Indonesia, Thổ Nhĩ Kỳ, California...) đến thấp (Tây Âu, Úc...). Dù ở mức nào, việc đánh giá chính xác nguy cơ và áp dụng yêu cầu thiết kế

tương ứng là tối quan trọng. Các quốc gia cần xây dựng quy chuẩn kháng chấn phù hợp với điều kiện địa phương – như Việt Nam đang nghiên cứu cập nhật quy phạm thiết kế động đất riêng – để đảm bảo các tuyến đường sắt cao tốc tương lai vừa hiệu quả về kinh tế vừa an toàn trước mối đe dọa động đất.

## 5. KẾT LUẬN

Động đất là một tác nhân thiên nhiên khắc nghiệt, có thể gây ra những hậu quả thảm khốc cho cơ sở hạ tầng nếu không được lường trước trong thiết kế và vận hành. Qua nghiên cứu tổng quan về động đất nói chung và ảnh hưởng của nó tới ĐSCT nói riêng, một số kết luận chính được rút ra như sau:

- Về cơ chế động đất: Động đất chủ yếu sinh ra do sự tích lũy và giải phóng năng lượng đột ngột trên các đứt gãy thuộc ranh giới mảng kiến tạo. Hiện tượng này tuân theo thuyết phục hồi đàn hồi, giải thích được quy luật phát sinh các trận động đất lặp lại trên cùng một đứt gãy sau những chu kỳ dài tích tụ ứng suất. Hiểu biết về bản chất và đặc điểm sóng địa chấn giúp kỹ sư dự báo được tác động rung động nền đất lên công trình.

- Về tác động đến đường sắt cao tốc: ĐSCT là hệ thống đòi hỏi ổn định cao và không được gián đoạn, do đó tác động của động đất đến nó mang tính chất đặc thù. Động đất có thể làm biến dạng đường ray, hư hỏng cầu cạn, hầm và các công trình dọc tuyến, đe dọa an toàn chạy tàu. Các yêu cầu thiết kế kháng chấn cho ĐSCT vì vậy nghiêm ngặt hơn công trình thông thường, đòi hỏi công trình không sập ngay cả dưới động đất cực lớn, đồng thời duy trì được chức năng vận hành an toàn dưới động đất thường xuyên. Tiêu chuẩn kháng chấn chuyên ngành (như GB 50111-2006 của Trung Quốc) và các hướng dẫn thiết kế cầu ĐSCT hiện đại đều nhấn mạnh các tiêu chí này.

- Về bài học kinh nghiệm: Các thảm họa động đất lớn trong quá khứ (Kobe 1995, Chi-Chi 1999, Tứ Xuyên 2008, v.v.) đã thúc đẩy sự cải tiến mạnh mẽ trong tư duy thiết kế và quản lý rủi ro. Những bài học quan trọng bao gồm: cần cấu tạo kết cấu dẻo dai để tránh cơ chế phá hoại giòn; chú ý đến ổn định nền đất (tránh hóa lỏng, trượt lở); tăng cường gia cố công trình cũ; và ứng dụng công nghệ cảnh báo sớm để giảm thiểu hậu quả. Các sự kiện này cũng cho thấy tầm quan trọng của việc xây dựng tiêu chuẩn kháng chấn đồng bộ và cập nhật - ví dụ kinh nghiệm từ động đất 2008 đã được Trung Quốc cập nhật ngay vào quy chuẩn đường sắt.

- Về nguy cơ địa chấn cho các dự án ĐSCT tương lai: Mỗi khu vực có mức độ nguy hiểm động đất riêng, do đó không thể chủ quan ở bất kỳ đâu. Các nước có động đất mạnh thì càng phải đầu tư cho an toàn địa chấn (như Nhật, Trung Quốc, Indonesia); nhưng ngay cả nơi ít động đất (châu Âu, châu Phi) cũng cần có phương án phòng ngừa cho các kịch bản hiểm gặp. Đối với Việt Nam, tuy nguy cơ ở mức trung bình, việc đánh giá kỹ lưỡng và tuân thủ các yêu cầu thiết kế kháng chấn trong dự án ĐSCT Bắc - Nam là bắt buộc để đảm bảo an toàn lâu dài.

Một hệ thống ĐSCT bền vững không chỉ nằm ở công nghệ đoàn tàu hay quản lý vận hành, mà còn ở khả năng chống chịu với thảm họa thiên nhiên. Với đà phát triển hạ tầng giao thông hiện nay, việc tiếp tục nghiên cứu chuyên sâu và trao đổi kinh nghiệm quốc tế về động đất và công trình ĐSCT sẽ góp phần hiện thực hóa các tuyến đường sắt cao tốc an toàn, hiệu quả trong tương lai.

## **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Bruce A. Bolt (2006), EARTHQUAKES – 5th Edition, W.H. Freeman and Company, New York.
- [2] GB 50111-2006 (2009), Code for Seismic Design of Railway Engineering, China Ministry of Railways.
- [3] José Romo, Alejandro Pérez-Caldentey, Manuel Cuadrado (2024), High-Speed Railway Bridges – Conceptual Design Guide, Ernst & Sohn (Wiley), Germany.
- [4] TB 10621-2014 – Quy phạm thiết kế đường sắt cao tốc Trung Quốc.