

ẢNH HƯỞNG CỦA ĐIỀU KIỆN BIÊN GỐI ĐỠ ĐẾN ĐẶC TRƯNG DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA DÀM BÊ TÔNG - PHÂN TÍCH BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

TS. HOÀNG THỊ TUYẾT

Trường Đại học Giao thông Vận tải

Email: tuyetht@utc.edu.vn

Phản biện: PGS.TS. Nguyễn Hữu Thuận
PGS.TS. Nguyễn Trọng Hiệp

TÓM TẮT

Dao động riêng của dầm bê tông là một trong những cơ sở quan trọng trong phân tích động lực học kết cấu và quan trắc sức khỏe công trình. Trong nhiều nghiên cứu, điều kiện biên tại gối đỡ thường được giả thiết là gối cứng lý tưởng. Tuy nhiên, trong thực tế công trình cầu, gối đỡ luôn tồn tại độ mềm nhất định, dẫn đến sự thay đổi đáng kể phổ và bản chất dao động riêng của kết cấu. Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của điều kiện biên gối cứng và gối đàn hồi đến các đặc trưng dao động riêng của dầm bê tông thông qua mô hình phần tử hữu hạn ba chiều. Kết quả cho thấy, khi xét đến độ cứng hữu hạn của gối đỡ, các mode dao động bậc thấp không còn do biến dạng uốn của dầm chi phối, mà chủ yếu là các mode chuyển động cứng của hệ dầm-gối. Các mode uốn chi phối của bản thân dầm chỉ xuất hiện ở các bậc dao động cao hơn, kéo theo sự thay đổi thứ tự xuất hiện của các mode so với trường hợp gối cứng. Kết quả nghiên cứu làm rõ vai trò của điều kiện biên thực tế trong phân tích dao động dầm bê tông và có ý nghĩa quan trọng trong việc diễn giải và nhận dạng mode từ số liệu đo dao động trong thực tế.

Từ khóa: Dầm bê tông, dao động riêng, gối đàn hồi, phần tử khối, phần tử lò xo - giảm chấn, ANSYS.

ABSTRACT

The natural vibration characteristics of concrete beams constitute an important basis for structural dynamic analysis and structural health monitoring. In many studies, the boundary conditions at supports are commonly idealized as rigid supports. However, in practical bridge structures, bearings always exhibit a certain degree of flexibility, which can significantly alter both the spectrum and the nature of the natural vibrations of the structure. This paper investigates the influence of rigid and elastic support boundary conditions on the natural vibration characteristics of a concrete beam using a three-dimensional finite element model. The results indicate that when the finite stiffness of the supports is taken into account, the lower-order vibration modes are no longer dominated by the bending deformation of the beam, but are primarily governed by rigid-body motion modes of the coupled beam-support system. The bending-dominated modes of the beam appear only at higher vibration orders, leading to a noticeable change in the sequence of mode occurrence compared with the rigid support case. The findings clarify the role of realistic boundary conditions in the vibration analysis of concrete beams and are of significant importance for the interpretation and mode identification of vibration measurement data in practical applications.

Keywords: Concrete beam; natural vibration; elastic support; solid element; spring-damper element; ANSYS.

1. GIỚI THIỆU

Phân tích dao động là một nội dung then chốt trong nghiên cứu động lực học kết cấu, góp phần đánh giá trạng thái làm việc, độ an toàn và tuổi thọ công trình. Khi chịu tác động của các dạng tải trọng biến thiên theo thời gian như hoạt tải giao thông, gió, va chạm hoặc động đất, kết cấu sẽ xuất hiện các trạng thái dao động với những đặc

trung cơ bản là tần số dao động riêng và dạng dao động tương ứng [1]. Các đặc trưng này phụ thuộc chặt chẽ vào độ cứng, khối lượng và điều kiện liên kết của kết cấu, vì vậy thường được sử dụng làm chỉ tiêu đánh giá trong phân tích động lực học cũng như trong các hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu [2].

Trong nhiều nghiên cứu lý thuyết và số, dầm bê tông thường được mô hình hóa với điều kiện biên gối cứng lý tưởng. Giả thiết này giúp đơn giản hóa bài toán. Tuy nhiên, trong thực tế cầu đường, dầm bê tông thường được đặt trên các loại gối như gối cao su cốt bản thép, gối chậu hoặc các lớp vật liệu trung gian, cho phép kết cấu có khả năng biến dạng và quay nhất

định tại vị trí gối. Do đó, điều kiện biên thực tế có thể mềm hơn so với giả thiết gối cứng.

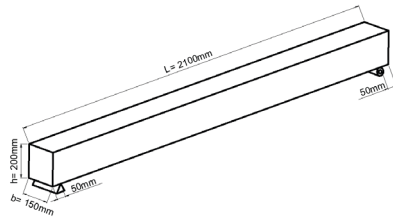
Khi xét đến độ mềm của gối đỡ, hệ dầm-gối có thể được xem như một hệ động lực học ghép, trong đó xảy ra tương tác giữa kết cấu dầm và gối đỡ [3]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các mode dao động bậc thấp của hệ kết cấu đặc biệt nhạy cảm với điều kiện biên [3-7], và sự tồn tại của gối đàn hồi có thể làm xuất hiện các mode chuyển động cứng với tần số thấp. Điều này đặt ra vấn đề trong việc diễn giải các kết quả phân tích dao động cũng như nhận dạng mode từ số liệu đo dao động thực tế.

Trước những vấn đề đặt ra nêu trên, bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của điều kiện biên gối cứng và gối đàn hồi đến các đặc trưng dao động riêng của dầm bê tông bằng phương pháp phần tử hữu hạn ba chiều. Mục tiêu của nghiên cứu là làm rõ sự thay đổi bản chất và thứ tự xuất hiện của các mode dao động khi xét đến độ cứng của gối đỡ, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc phân tích và diễn giải dao động dầm bê tông trong điều kiện thực tế.

2. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

2.1. Hình học và vật liệu dầm

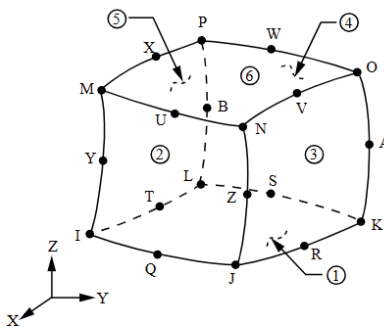
Đối tượng nghiên cứu trong bài báo là dầm bê tông có chiều dài 2,1 m, chiều dài nhịp tính toán $L = 2,0$ m (Hình 1). Dầm được đặt trên 2 gối cách đầu dầm 50 mm. Mặt cắt ngang của dầm là hình chữ nhật có kích thước $b \times h = 0,15$ m \times 0,20 m. Dầm không bố trí cốt thép, được chế tạo trong điều kiện phòng thí nghiệm. Bê tông được giả thiết là vật liệu đàn hồi tuyến tính, đẳng hướng, với các thông số: hệ số Poisson được lấy là 0.18, khối lượng riêng là 2500kg/m³ và mô đun đàn hồi là 27 GPa.



Hình 1. Kích thước dầm bê tông.

2.2. Mô hình phần tử hữu hạn

Dầm bê tông được mô hình hóa bằng phần tử khối ba chiều SOLID186 trong phần mềm ANSYS Mechanical APDL 15.0 [8]. SOLID186 là phần tử khối bậc cao với 20 nút, mỗi nút có ba bậc tự do chuyển vị theo các phương x, y, và z (Hình 2). Phần tử này cho phép mô phỏng chính xác các trạng thái biến dạng không gian của kết cấu và thường được sử dụng trong phân tích dao động của các kết cấu khối đặc. Lưới phần tử được chia đều theo ba phương với kích thước phần tử là 1.25 cm. Kích thước lưới được lựa chọn trên cơ sở khảo sát ảnh hưởng của độ mịn của lưới đến các tần số dao động riêng, nhằm đảm bảo sự hội tụ của kết quả tính toán.



Hình 2. Phần tử khối SOLID186 [8].

Phân tích dao động riêng được thực hiện bằng phương pháp giải bài toán trị riêng (modal analysis), với mục tiêu xác định các tần số dao động riêng và dạng mode tương ứng của hệ kết cấu.

2.3. Mô hình điều kiện biên gối đỡ

2.3.1. Gối cứng

Trong trường hợp gối cứng, dầm được giả thiết kê trên hai gối lý tưởng tại hai đầu dầm. Chuyển vị

thẳng đứng tại các gối bị khống chế, trong khi các chuyển động quay được cho phép. Đây là giả thiết thường được sử dụng trong các mô hình dầm lý thuyết.

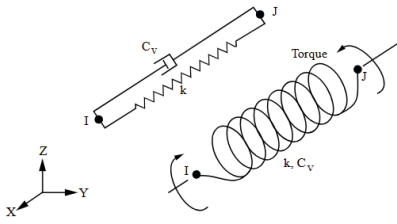
Trong mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) của dầm, gối cứng được mô hình như sau: tại mặt cắt gối bên trái (cách 50 mm từ đầu dầm), 2 nút (node) G1 và G2 ở sát 2 mặt bên của dầm được hạn chế chuyển vị theo phương thẳng đứng z và phương dọc trục dầm x. Riêng G1 được hạn chế thêm chuyển vị theo phương ngang dầm y. Ở gối còn lại (cách đầu dầm bên phải 50 mm), 2 nút G3 và G4 được hạn chế chuyển vị theo phương thẳng đứng z. Cách khống chế chuyển vị nêu trên nhằm loại bỏ chuyển động cứng toàn cục của hệ, đồng thời vẫn đảm bảo đặc trưng làm việc của dầm kê trên hai gối tựa cứng lý tưởng.

2.3.2. Gối đàn hồi

Trong trường hợp gối đàn hồi, mỗi gối được mô phỏng bằng các lò xo tuyến tính theo phương thẳng đứng, sử dụng phần tử COMBIN14 [8]. Độ cứng lò xo được lấy là $k = 5,2 \times 10^6$ N/m, đại diện cho độ mềm của gối trong điều kiện thực tế.

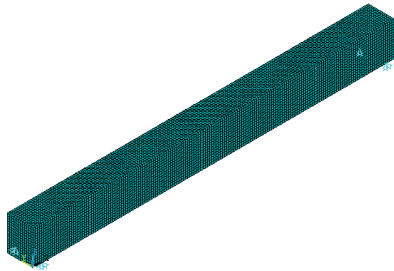
Phần tử COMBIN14 trong ANSYS [8] là phần tử lò xo - giảm chấn, có khả năng làm việc trong các bài toán một chiều, hai chiều và ba chiều (Hình 3). Trong nghiên cứu này, phần tử COMBIN14 được sử dụng ở dạng lò xo dọc trục, mô phỏng liên kết đàn hồi theo phương thẳng đứng tại các vị trí gối đỡ. Các tính năng khác của phần tử không được xét đến.

Phần tử COMBIN14 không có khối lượng riêng, do đó chỉ mô phỏng ảnh hưởng của độ cứng (và/hoặc lực cản nếu được xét) của liên kết đàn hồi. Trong trường hợp cần xét đến khối lượng tập trung tại gối, khối lượng có thể được bổ sung thông qua phần tử khối lượng tương đương. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của khối lượng gối được bỏ qua, và gối đỡ được mô hình hóa thuần túy dưới dạng liên kết đàn hồi tuyến tính.



Hình 3. Phần tử lò xo - giảm chấn COMBIN14 [8].

Trong mô hình PTHH của dầm, các lò xo được gắn tại các nút ở hai mép tiết diện tại vị trí các node G1, G2, G3 và G4. Ngoài ra node G1 được hạn chế chuyển vị theo phương x và y, node G3 được hạn chế chuyển vị theo phương y để đảm bảo dầm vẫn ổn định trên 4 gối đàn hồi. Mô hình PTHH của dầm được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Mô hình PTHH của dầm bê tông.

3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

3.1. Dầm bê tông trên gối cứng

Bảng 1 trình bày các tần số dao động riêng của dầm bê tông trong trường hợp gối cứng. Kết quả cho thấy các mode dao động bậc thấp của dầm trên gối cứng chủ yếu do biến dạng uốn của bản thân dầm chi phối. Thứ tự xuất hiện của các mode phù hợp với trực giác cơ học của mô hình dầm.

3.2. Mô hình dầm bê tông trên gối có độ cứng hữu hạn

Bảng 2 trình bày các tần số dao động riêng của dầm bê tông trong trường hợp gối đàn hồi, với độ cứng gối được chọn là $k = 5,2 \times 10^6$ N/m. Có thể thấy rằng, khi xét đến độ mềm của gối đỡ, các mode dao động bậc thấp không còn do biến dạng uốn của dầm chi phối, mà chủ yếu là các mode chuyển động cứng của toàn khối dầm trên

Bảng 1. Các tần số dao động riêng của mô hình dầm bê tông trên gối cứng

Dạng dao động (mode)	Tần số (Hz)	Minh họa dạng dao động	Nhận xét dạng dao động
1	52.0		Mode uốn chi phối theo phương ngang
2	66.4		Mode uốn chi phối theo phương đứng
3	121.6	-	Mode biến dạng dọc trục
≥4	-	-	Các mode hỗn hợp

Bảng 2. Các tần số dao động riêng của mô hình dầm bê tông trên gối có độ cứng hữu hạn

Dạng dao động (mode)	Tần số (Hz)	Minh họa dạng dao động	Nhận xét dạng dao động
1	31.2		Mode chuyển động cứng - lắc theo phương ngang
2	46.4		Mode uốn chi phối theo phương đứng, chịu ảnh hưởng của độ mềm gối
3	75.1	-	Mode chuyển động cứng bậc cao
4-6	-	-	Các mode hỗn hợp (uốn - chuyển động cứng kết hợp)
7	185.3		Mode uốn chi phối của dầm (đứng)
≥8	-	-	Các mode hỗn hợp bậc cao

gối đàn hồi. Các mode uốn chi phối của bản thân dầm chỉ xuất hiện ở các bậc cao hơn.

3.3. So sánh ảnh hưởng của điều kiện biên

So sánh hai trường hợp gối cứng và gối đàn hồi cho thấy điều kiện biên có ảnh hưởng rất lớn đến phổ dao động riêng của dầm bê tông. Trong trường hợp gối đàn hồi, sự xuất hiện của các mode chuyển động cứng làm thay đổi đáng kể thứ tự xuất hiện của các mode uốn so với trường hợp gối cứng. Điều này cho thấy việc giả thiết gối cứng có thể dẫn đến sai lệch trong phân tích và diễn giải dao động của dầm bê tông trong điều kiện thực tế. Điều này đặc biệt quan trọng trong các bài toán nhận dạng dao động và quan trắc sức khỏe kết cấu, khi các mode bậc thấp thu được từ số liệu đo dao động có thể không

phản ánh trực tiếp đặc trưng uốn của bản thân dầm.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu ảnh hưởng của điều kiện biên gối cứng và gối đàn hồi đến các đặc trưng dao động riêng của dầm bê tông bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần tử khối (ba chiều). Các kết luận chính rút ra như sau:

1. Trong trường hợp gối cứng, các mode dao động bậc thấp của dầm chủ yếu do biến dạng uốn của bản thân dầm chi phối.
2. Khi xét đến gối có độ cứng hữu hạn (đàn hồi), các mode dao động bậc thấp chủ yếu là các mode chuyển động cứng của hệ dầm-gối, trong khi các mode uốn chi phối của dầm xuất hiện ở các bậc cao hơn.

3. Điều kiện biên gối đỡ có ảnh hưởng đáng kể đến phổ dao động riêng và thứ tự xuất hiện của các mode dao động của dầm bê tông.

Kết quả nghiên cứu cho thấy cần thận trọng khi giả thiết điều kiện biên gối cứng trong phân tích dao động dầm bê tông, đặc biệt khi diễn giải các kết quả đo dao động trong thực tế. Nghiên cứu tiếp theo cần tiến hành thực nghiệm để xác nhận các kết quả ở nghiên cứu này và đồng thời hiệu chỉnh mô hình số cũng như tìm ra các giá trị độ cứng của gối đàn hồi. ■

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số NCUD.02-2023.43.

Ngày nhận bài: 05/02/2026;

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tedesco, J., W.G. McDougal, and C.A. Ross, Structural dynamics. 2000: Pearson Education London, UK.
2. Sohn, H., et al., A review of structural health monitoring literature: 1996-2001. 2003. 1(16): p. 10.12989.
3. Terzi, V.G., Soil-structure-interaction effects on the flexural vibrations of a cantilever beam. Applied Mathematical Modelling, 2021. 97: p. 138-181.
4. Hill, K.O., et al., Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. 1978. 32(10): p. 647-647.
5. Meltz, G., W.W. Morey, and W.H.J.O.I. Glenn, Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. 1989. 14(15): p. 823-825.
6. Chan, T.H., et al., Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation. 2006. 28(5): p. 648-659.
7. Dũng, T.C., Nghiên cứu và thiết kế mô phỏng cách tử bragg sợi cho cảm biến nhiệt độ. Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và Truyền thông, 2022. 1(3): p. 62-70.
8. ANSYS, ANSYS Mechanical APDL Material Reference Release 15.0 2013, Canonsburg, PA

