

# Nghiên cứu ứng xử của trụ cầu bê tông cốt thép chịu tải trọng lặp

ThS. NGUYỄN HUY CƯỜNG  
ThS. LÊ ĐĂNG DŨNG  
ThS. PHẠM THỊ THANH THỦY  
Trường Đại học Giao thông vận tải

**Tóm tắt:** Bài báo trình bày nghiên cứu về ứng xử của trụ cầu bê tông cốt thép (BTCT) chịu tải trọng lặp. Các đặc trưng của ứng xử phi tuyến được nhận dạng trong ứng xử trễ của trụ cầu BTCT chịu tải trọng lặp. Một mô hình mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) được sử dụng để kiểm chứng kết quả thực nghiệm.

**Từ khóa:** Ứng xử trễ, hiệu ứng thắt, trụ cầu, tải trọng lặp, OpenSees...

**Abstract:** The work reported in this paper deals with the analytical model, proposed to predict the nonlinear behavior of reinforced concrete bridge column subjected to cyclic loading. The numerical investigation is required to capture the inelastic responses for the purpose of finite element validation.

## 1. Giới thiệu chung

Đối với các công trình xây dựng dân dụng và giao thông, việc nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng động (gió, bão, động đất...) là một vấn đề rất quan trọng. Ở Việt Nam, vấn đề này ngày càng được các kỹ sư cũng như các nhà nghiên cứu chú trọng nhiều hơn. Sử dụng phương pháp mô phỏng dựa trên các phần mềm PTHH là hướng đi cần thiết hỗ trợ hướng nghiên cứu này.

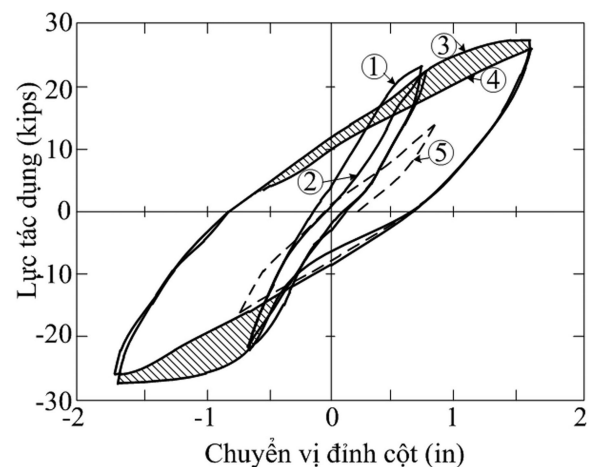
Theo quan điểm thiết kế công trình chịu động đất hiện đại, việc thiết kế một công trình xây dựng cần đảm bảo hai tiêu chí liên quan chặt chẽ với nhau: Đảm bảo kết cấu có khả năng chịu lực lớn trong miền đàn hồi; đảm bảo cho kết cấu có khả năng phân tán năng lượng do động đất truyền vào, thông qua biến dạng dẻo trong giới hạn cho phép hoặc thông qua các thiết bị hấp thụ năng lượng. Khi cho phép công trình làm việc ngoài giới hạn đàn hồi, có nghĩa là chấp nhận sự làm việc phi tuyến của kết cấu BTCT. Bê tông là vật liệu phi tuyến, tính phi tuyến thể hiện ngay ở cấp tải trọng thấp. Các đặc trưng của ứng xử phi tuyến như sự suy giảm độ cứng, khả năng phân tán năng lượng, hiệu ứng thắt... xuất hiện trong ứng xử trễ của kết cấu trụ cầu BTCT chịu tải trọng lặp. Việc xác định các ứng xử phi tuyến này của kết cấu BTCT rất quan trọng, nhằm mục đích đánh giá phản ứng của kết cấu dưới tác động của tải trọng lặp. Tuy nhiên, việc nhận dạng các ứng xử này vẫn là một thách thức bởi tính phức tạp của nó.

## 2. Các đặc trưng của ứng xử phi tuyến

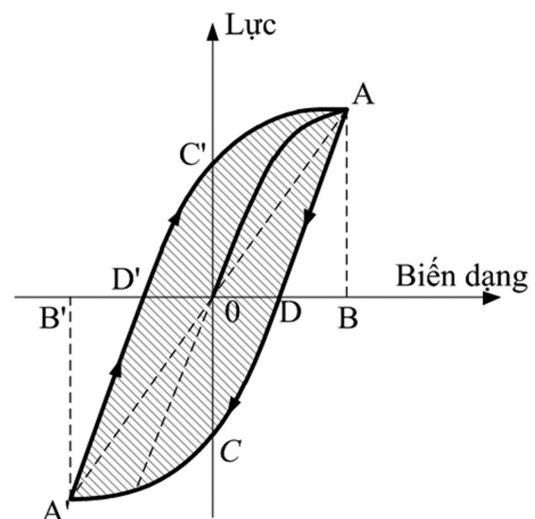
### 2.1. Sự suy giảm độ cứng

Độ cứng là khả năng chống lại biến dạng của một cấu kiện, bộ phận kết cấu hoặc hệ kết cấu dưới tác dụng của ngoại lực. Giá trị của độ cứng biểu diễn mối quan hệ giữa tải trọng và biến dạng. Độ cứng không phải là một giá trị bất biến mà thay đổi trong quá trình

làm việc của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng. Các nghiên cứu về sự làm việc ngoài giới hạn đàn hồi của vật liệu BTCT đã cho thấy vật liệu có khả năng làm việc ở ngoài giới hạn đàn hồi và bên cạnh đó độ cứng của hệ cũng suy giảm sau mỗi vòng chất tải - dỡ tải - chất tải theo chiều ngược lại. Hình 1 là kết quả thí nghiệm với cấu kiện cột BTCT chịu tải trọng lặp của Otani [2], cho thấy phản ứng không đàn hồi của cột dưới tác dụng của tải trọng lặp đổi chiều. Một số kết luận được Otani rút ra: (a) vết nứt do kéo của bê tông và chảy của cốt thép làm giảm độ cứng; (b) sau mỗi vòng chất tải - dỡ tải - và chất tải theo chiều ngược lại (ví dụ vòng 3 và 4), độ cứng của các cấu kiện bị suy giảm, thể hiện ở sự gia tăng biến dạng sau mỗi vòng gia tải trong khi tải trọng tăng lên không đáng kể.



Hình 1: Phản ứng phi tuyến của cột BTCT [2]



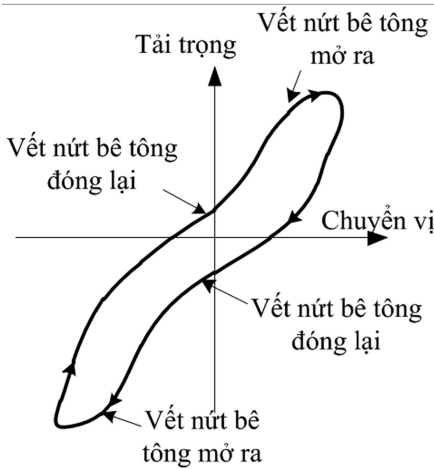
Hình 2: Khả năng phân tán năng lượng

Trên thực tế, sự suy giảm độ cứng của cấu kiện BTCT xảy ra ở trước cả giai đoạn làm việc dẻo của vật liệu. Trong quá trình gia tăng của tải trọng, khi tải trọng còn bé, kết cấu làm việc hoàn toàn đàn hồi với độ cứng ban đầu. Khi tải trọng đủ lớn để gây ra ứng suất kéo lớn hơn cường độ chịu kéo của bê tông, trên cột sẽ xuất hiện các vết nứt. Sự xuất hiện của các vết nứt sẽ làm giảm phần diện tích hiệu dụng của bê tông, kết quả là làm giảm nhanh mô men quán tính của tiết diện và do đó làm suy giảm độ cứng của cấu kiện cũng như độ cứng tổng thể của kết cấu.

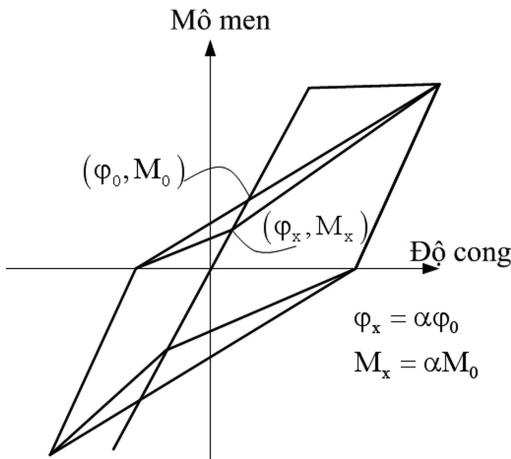
**2.2. Khả năng phân tán năng lượng**

Đường cong trễ của kết cấu BTCT chịu tải trọng lặp có dạng điển hình như ở Hình 2 [3]. Phần năng lượng được phân tán trong mỗi chu kỳ chất tải dưới dạng nhiệt do cản nhớt và biến dạng nhiệt của vật liệu được biểu thị bằng diện tích phần gạch chéo. Sự phân tán năng lượng này được định nghĩa là cản trễ. Nó không bị ảnh hưởng bởi tốc độ chuyển động của kết cấu mà tăng cùng với sự gia tăng trị số chuyển vị ngang. Diện tích vòng trễ càng lớn thì mức độ biến dạng của vật liệu càng cao và phần năng lượng được phân tán cũng như lực cản càng lớn. Nói cách khác, khả năng phân tán năng lượng của kết cấu phụ thuộc rất lớn vào diện tích của vòng trễ, hoặc tổng quát hơn vào hình dạng của vòng trễ [3]. Các kết cấu có vòng trễ dạng nhọn hoặc mảnh có khả năng phân tán năng lượng kém nhất.

**2.3. Hiệu ứng thắt**



Hình 3: Quá trình mở/đóng vết nứt bê tông khi chịu tải trọng lặp đối chiều



Hình 4: Hiệu ứng thắt

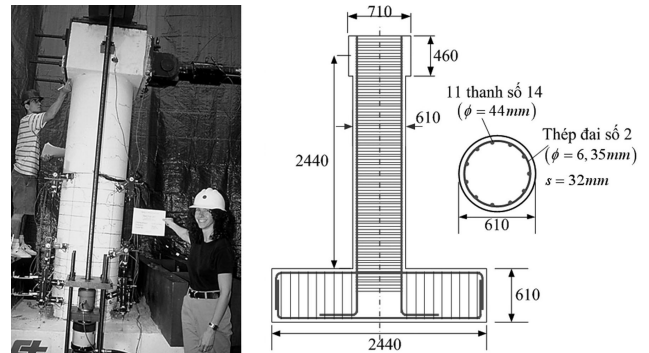
Hiệu ứng thắt (pinching effect) xuất hiện khi xảy ra sự đóng/mở vết nứt liên tục và sự trượt của cốt thép trong các kết cấu BTCT chịu tải trọng lặp [1]. Như thể hiện ở Hình 3, khi cấu kiện chịu tải trọng lặp, vết nứt do cắt xuất hiện trong vùng không đàn hồi có ứng suất cắt lớn. Khi đó, lực cắt chỉ được truyền qua các vết nứt thông qua lực chốt trong các thanh thép dọc, dẫn đến độ cứng của kết cấu giảm. Sau khi tải trọng đảo chiều, vết nứt có xu hướng đóng lại, hiệu ứng cài khóa cốt liệu và lực ma sát sẽ tạo nên sự gia tăng đáng kể độ cứng của kết cấu.

Hiệu ứng thắt (Hình 4) được sử dụng để định nghĩa tỉ lệ giữa độ cứng còn lại và độ cứng ban đầu trên đường dỡ tải của tải trọng lặp đối chiều. Đường dỡ tải được chia làm 2 đoạn. Đoạn đầu tiên kết thúc tại điểm vết nứt đóng lại (φₓ, Mₓ), đoạn thứ 2 bắt đầu từ (φₓ, Mₓ) đến (φₐ, Mₐ). Hệ số thắt (pinching factor) a được xét đến để điều chỉnh vị trí của vết nứt đóng lại. Giá trị của a biến thiên từ 0,0 (thắt nhiều) đến 1,0 (không thắt), phụ thuộc vào tỷ lệ chiều dài chịu cắt so với chiều cao có hiệu  $\frac{a}{d}$ .

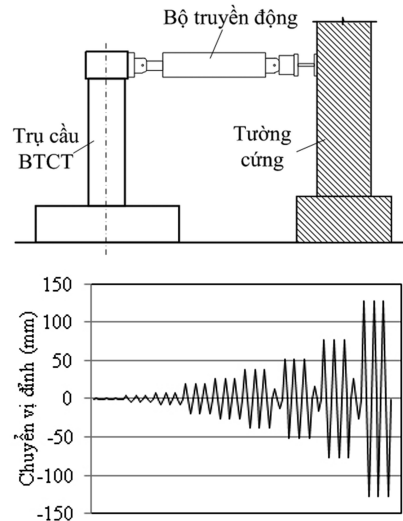
$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{khi } \frac{a}{d} \leq 1,5 \\ 0,4 \frac{a}{d} - 0,6 & \text{khi } 1,5 < \frac{a}{d} \leq 4,0 \\ 1 & \text{khi } \frac{a}{d} > 4,0 \end{cases} \quad (1)$$

**3. Mô hình hóa trụ cầu BTCT chịu tải trọng lặp**

**3.1. Mô hình thực nghiệm**



Hình 5: Cấu tạo trụ cầu BTCT [4]



Hình 6: Thiết lập thí nghiệm tải trọng lặp và lịch sử gia tải

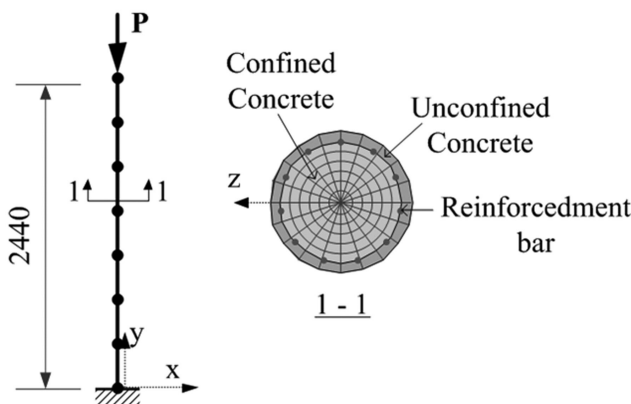
Mẫu thí nghiệm là một trụ cầu bằng BTCT liên khối, được đúc và tiến hành thí nghiệm tại phòng thí nghiệm của Trung tâm Nghiên cứu Động đất Thái Bình Dương như [4]. Cụ thể, trụ cầu có chiều cao 2,44m, tiết diện tròn đường kính 610mm (24 in), cốt thép chủ gồm 11 thanh đường kính 44mm (thanh số 14). Cốt thép đai đường kính 6,35mm (thanh số 2) được bố trí suốt chiều cao cột, với khoảng cách giữa các thanh là 32mm (1,25 in). Bê tông có cường độ chịu nén  $f'_c = 30\text{MPa}$ , cốt thép có giới hạn chảy  $f_y = 450\text{MPa}$ .

Thí nghiệm được thiết lập với tải trọng tác dụng là chuyển vị lặp theo phương ngang tại đỉnh cột theo lịch sử gia tải như Hình 6.

**3.2. Mô hình phần tử hữu hạn**

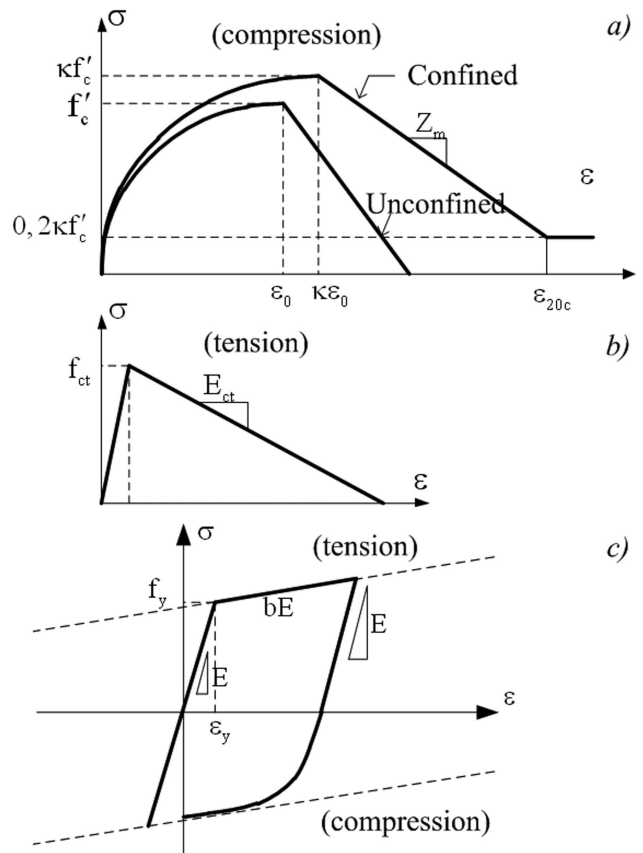
Sử dụng phương pháp mô phỏng dựa trên các phần mềm PTHH là công cụ đắc lực trong việc phân tích trạng thái làm việc của các kết cấu BTCT. Phần mềm OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) được lựa chọn để mô hình hóa ứng xử của kết cấu trụ cầu BTCT chịu tải trọng lặp. OpenSees là một nền tảng phần mềm mã nguồn mở, phục vụ cho việc nghiên cứu và ứng dụng mô phỏng các hệ thống kết cấu và địa kỹ thuật chịu tải trọng động đất, được thiết kế bởi Quỹ Khoa học Quốc gia (National Science Foundation) và Trung tâm Nghiên cứu Kỹ thuật Thái Bình Dương của Đại học Berkeley ở California [5]. OpenSees là phần mềm mạnh, có khả năng xử lý các vấn đề phức tạp như: bài toán tiếp xúc, bài toán phi tuyến, bài toán động...

Mô hình PTHH của trụ cầu BTCT được thể hiện như Hình 7. Phần tử dầm-cột chia thớ phi tuyến (nonlinear fiber beam-column element) được sử dụng để mô tả kết cấu trụ cầu BTCT. Mặt cắt trụ cầu được rời rạc hóa bằng một dãy các thớ thể hiện các vùng bê tông nở ngang, vùng hạn chế nở ngang và thanh cốt thép dọc.



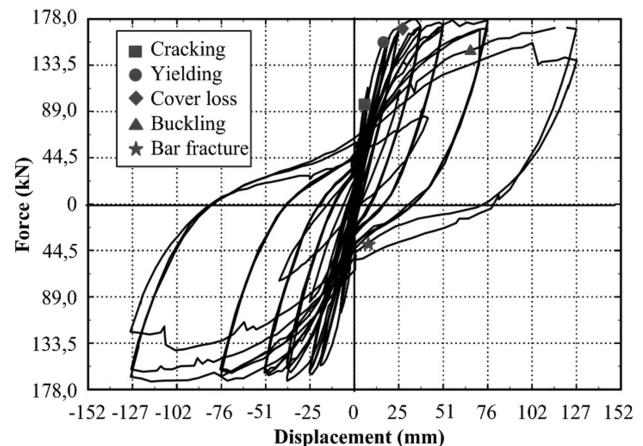
Hình 7: Mô hình PTHH trên OpenSees

Các mô hình vật liệu (bê tông, thép) được sử dụng trong mô hình mô phỏng đều xét đến khả năng làm việc phi tuyến. Bê tông được mô tả bằng phần tử vật liệu Concrete02 [5], có quan hệ ứng suất biến dạng khi chịu kéo, nén một trục được thể hiện như trên Hình 8 (a và b). Phần tử vật liệu Concrete02 sử dụng mô hình của Kent - Scott - Park [6], đồng thời bổ sung cường độ chịu kéo cho bê tông, do đó có thể mô tả được các vết nứt ban đầu của lớp bê tông bảo vệ.



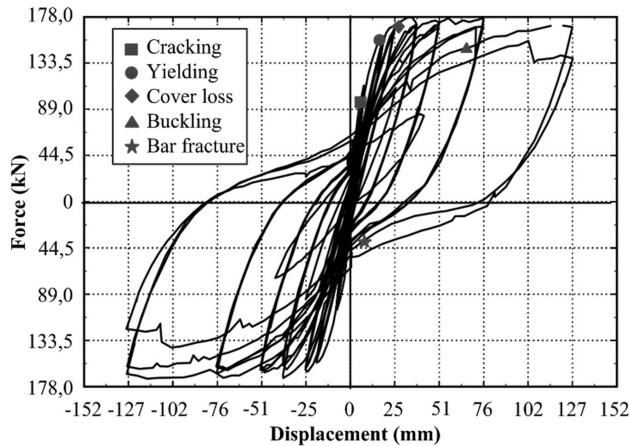
(a) bê tông chịu nén; (b) bê tông chịu kéo; (c) thép  
Hình 8: Mô hình vật liệu

Các thanh cốt thép dọc được phân bố đều xung quanh tiết diện trụ cầu, với các phần tử thép chia thớ được gán cho mỗi thanh thép dọc. Sự trượt của cốt thép tại vùng khớp dẻo tạo thành các chuyển vị xoay bổ sung, dẫn đến tăng chuyển vị của kết cấu. Ứng xử trượt này được mô tả trong mô hình bằng phần tử dính bám (bondslip) có trong Openses [5]. Mô hình vòng lặp trễ của Pinto-Menegotto được dùng để mô phỏng khả năng làm việc phi tuyến của cốt thép khi chịu tải trọng lặp, thông qua phần tử vật liệu Steel02, được thể hiện ở Hình 8-c. Mô hình này có xét đến hiệu ứng Bauschinger thông qua tính liên tục của độ cứng tiếp tuyến trong quá trình gia tải và dỡ tải. Việc xét đến hiệu ứng Bauschinger giúp mô hình dự đoán sát thực tế hơn khả năng phân tán năng lượng của kết cấu chịu tải trọng lặp.



Hình 9: Kết quả thí nghiệm [4]

Đường cong quan hệ giữa lực cắt đáy và chuyển vị đỉnh của mô hình được thể hiện ở Hình 10. So với kết quả thí nghiệm (Hình 9), mô hình mô phỏng đã thể hiện khá chính xác các điểm cực trị cũng như các vòng lặp trễ. Mô hình dự đoán khá chính xác các điểm bắt đầu nứt, điểm chấy và điểm bắt đầu vỡ lớp bê tông bảo vệ. Mô hình phân tích cũng thể hiện được ảnh hưởng của hiệu ứng thắt đến phản ứng của kết cấu trụ cầu BTCT chịu tải trọng lặp.



Hình 10: Kết quả mô phỏng bằng phần mềm OpenSees

#### 4. Kết luận

Việc sử dụng phương pháp mô phỏng thông qua phần mềm OpenSees để phân tích, đánh giá ứng xử của kết cấu trụ cầu BTCT cho kết quả khá phù hợp với kết quả thực nghiệm. Mô hình PTHH đạt được sự

## NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM...

(Tiếp theo trang 22)

#### 3. Kết luận

- Hệ số động khi phanh hãm cổng trục xuất hiện tại nhánh cáp treo đầu đo là  $k_d \approx 1,1$ , hệ số này trong thực tế có thể lớn hơn vì khi thực nghiệm ta bố trí đầu đo tại nhánh cáp cuối cùng của cụm tời nâng. Vì vậy, do lực cản ma sát giữa cáp với cụm puli, do bội suất của cáp ( $z = 12$ ) nên vận tốc di chuyển của cáp đã giảm đi nhiều.

- Trong trường hợp nâng hàng có độ chùng cáp và nâng hàng không có độ chùng cáp thì lực căng cáp động tại vị trí cân bằng thực tế đều lớn hơn lực căng tĩnh toán theo lý thuyết  $F_c = 31,25$  KN là do trong quá trình nâng nên còn phải kể đến lực ma sát tại các cụm pully và độ cứng của cáp khi đi qua các pully.

- Đặc điểm của dầm cầu bê tông là rất dài ( $L_d = 38$ m) và được treo chỉ ở hai đầu, vì vậy khi cổng trục di chuyển cùng với hàng thì giá trị lực căng cáp có thay đổi và lực căng cáp ở hai đầu đo cũng khác nhau là do quá trình phanh hãm cổng trục làm cho hàng bị dao động theo cả phương ngang và phương dọc do đó áp lực của hàng lên các nhánh cáp sẽ khác nhau.

- Cổng trục lắp đặt trên xà mũ thường xuyên làm việc với tải trọng hàng nâng định mức ( $G = 75$  tấn), trong quá trình làm việc thường phải thực hiện thao tác phanh khi nâng - hạ hàng, phanh khi di chuyển toàn bộ cổng trục cùng với hàng do đó để giảm ảnh hưởng của tải trọng động tác dụng lên kết cấu thì cần phải thiết kế cụm tời nâng và bộ di chuyển có cơ cấu điều

chính xác nhờ có xét đến tính phi tuyến vật liệu, cũng như xét đến một số đặc trưng của ứng xử phi tuyến đối với trụ cầu BTCT chịu tải trọng lặp. Việc sử dụng phần tử chia thớ theo mặt cắt ngang của kết cấu giúp chương trình tính toán trở nên đơn giản hơn □

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. S. Wan, C.-H. Loh, S.Y. Peng (2001), *Experimental and theoretical study on softening and pinching effects of bridge column*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, pp. 75–81.
- [2]. Shunsuke Otani (1980), *Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete building structures*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 7, pp. 333-344.
- [3]. Nguyễn Lê Ninh (2007), *Động đất và thiết kế công trình chịu động đất*, NXB. Xây dựng.
- [4]. Lehman D.E., Moehle J.P. (1998), *Seismic Performance of well-confined concrete bridge columns*, University of California, Berkeley, PEER Report: 98-01.
- [5]. McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., and Jeremic, B. (2000), *Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- [6]. Kent, D.C and Park, R. (1971), *Flexural Members with Confined Concrete*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST7, July, 1971, p. 1969-1990.

Ngày nhận bài: 27/4/2014

Ngày chấp nhận đăng: 9/5/2014

Người phản biện: TS. Nguyễn Xuân Huy  
TS. Lê Minh Cường

hiển mềm (có thể sử dụng biến tần để điều khiển các động cơ nâng - hạ và động cơ di chuyển cổng trục) □

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. TS. Trần Văn Chiến, *Động lực học máy trục*, NXB. Hải Phòng, 2005.
- [2]. PGS. TS. Nguyễn Văn Vịnh, *Động lực học MXD-XD*, Bài giảng - Trường Đại học GTVT, 2004.
- [3]. PGS. TS. Nguyễn Văn Vịnh, ThS. Nguyễn Văn Thuần, *Nghiên cứu thực nghiệm xác định các thông số cơ bản của bộ công tác khoan cọc nhồi lắp trên cần trục bánh xích*, Tạp chí GTVT - tháng 3/2013.
- [4]. PGS. TS. Nguyễn Văn Vịnh, ThS. Nguyễn Hữu Chí, KS. Nguyễn Ngọc Trung, *Nghiên cứu thực nghiệm xác định lực căng cáp động trong cáp hàng của cần trục trên hệ cần trục - phao nổi*, Tạp chí GTVT, số 27, tháng 09/2009.
- [5]. PGS. TS. Nguyễn Văn Hợp, ThS. Phạm Thị Nghĩa, TS. Lê Thiện Thành, *Máy trục vận chuyển*, NXB. GTVT, Hà Nội, 2000.
- [6]. PTS. Trương Quốc Thành, PTS. Phạm Quang Dũng, *Máy và thiết bị nâng*, NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 1999.
- [7]. Phan Văn Tuấn - Bùi Thanh Danh, *Hồ sơ thiết kế cổng trục long môn*, Công ty cổ phần sản xuất - thương mại Đại Dương.

Ngày nhận bài: 10/4/2014

Ngày chấp nhận đăng: 29/4/2014

Người phản biện: TS. Nguyễn Đình Tứ  
PGS. TS. Nguyễn Bình