

## Analyze influence of bridge foundation stiffness to dynamic behavior of the bridge pier

Phung Tang Nghi\*, Do Van Nguyen, Vu Tran Linh

University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc, Thanh Xuan, Hanoi 100000, Vietnam

### Article info

#### Type of article:

Original research paper

#### \*Corresponding author:

E-mail address:

[nghipt@utt.edu.vn](mailto:nghipt@utt.edu.vn)

#### Received:

30/11/2021

#### Accepted:

16/05/2022

#### Published:

30/05/2022

**Abstract:** Condition assessment of the bridge pier is an important problem, this work helps to early detect the irregularities of the piers as well as the link system of the piers to propose timely solutions. During the assessment process, it is very important to choose parameters that are sensitive to changes in the structure. In this paper, we focus on analyzing the effect of bridge foundation stiffness to dynamic behavior of the bridge pier. Through simulation by finite element method, the paper also shows the obvious changes of piers and beam frequency when the bridge foundation stiffness changes. This result is useful for diagnosing the bridge foundations and piers later.

**Keywords:** Pier, dynamic behavior; Bridge foundation stiffness; Finite element method.

## Phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền móng đến ứng xử động lực học của trụ cầu

Phùng Tăng Nghị\*, Đỗ Văn Nguyên, Vũ Trần Linh

Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc Thanh Xuân, Hà Nội 100000

**Thông tin bài viết**

**Dạng bài viết:**

Bài báo nghiên cứu

**\*Tác giả liên hệ:**

Địa chỉ E-mail:

[nghipt@utt.edu.vn](mailto:nghipt@utt.edu.vn)

**Ngày nộp bài:**

30/11/2021

**Ngày chấp nhận:**

16/05/2022

**Ngày đăng bài:**

30/05/2022

**Tóm tắt:** Đánh giá trạng thái làm việc của trụ cầu là công việc quan trọng, công việc này giúp sớm phát hiện ra những bất thường của trụ cũng như hệ thống các kết cấu liên kết với trụ từ đó đề xuất các giải pháp kịp thời. Trong quá trình đánh giá, việc lựa chọn các tham số nhạy với các thay đổi trong kết cấu là rất quan trọng. Trong bài báo này tập trung đi phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền móng đến ứng xử động lực học của trụ cầu. Thông qua mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) bài báo cũng chỉ ra được những thay đổi rõ rệt của tần số dao động thân trụ khi độ cứng nền móng cầu thay đổi. Kết quả này giúp ích cho việc chẩn đoán nền móng cầu và trụ cầu sau này.

**Từ khóa:** Trụ cầu; Ứng xử động lực học; Độ cứng nền móng; Phương pháp PTHH.

### 1. Giới thiệu

Công trình cầu sau một thời gian khai thác không tránh được những tác động bất lợi không lường trước được như xói cục bộ, tàu thuyền va xô hay chịu tải trọng quá tải trong khai thác. Trước những tác động bất thường đối với kết cấu công trình, việc đánh giá lại hiện trạng công trình để đưa ra các giải pháp là rất cần thiết. Trong các phương pháp đánh giá, phương pháp đánh giá không phá hủy thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới hơn cả, như thể hiện trong nghiên cứu của Christiane Maierhofer và các cộng sự [1]. Trong tài liệu này gần như toàn bộ các phương pháp không phá hủy được C. Maierhofer và cộng sự trình bày một cách tương đối tổng quan. Trong nhóm các phương pháp không phá hủy thì phương pháp đánh giá dựa trên kết quả dao động được quan tâm hơn cả như thể hiện trong tài liệu của Larry D. Olson [2]. Trong tài liệu này thể hiện tổng quan các kỹ thuật đánh giá kết cấu bên dưới dựa trên kết quả dao động.

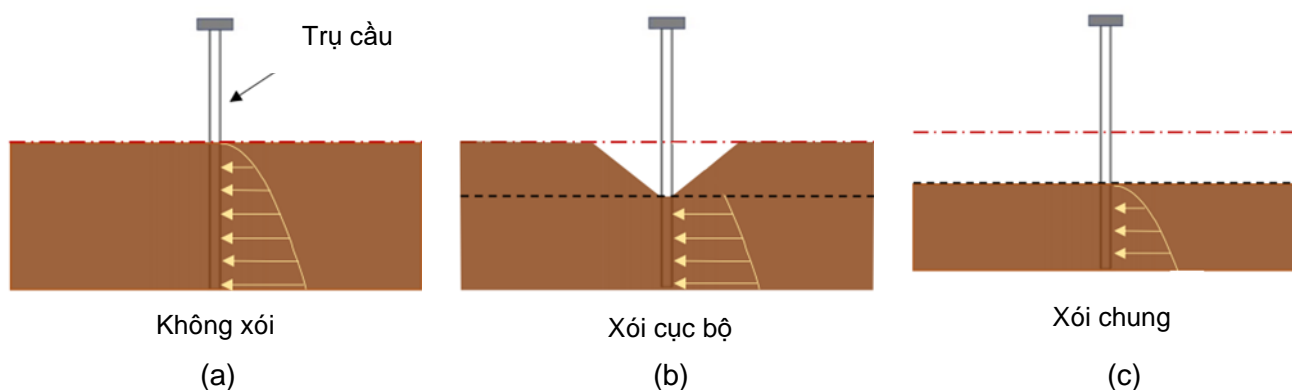
Đánh giá điều kiện làm việc thực tế của trụ cầu gần đây đã thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới. Trong bài báo của mình Qiang Mao và cộng sự [3] trình bày tính khả thi của việc tận dụng các kỹ thuật nhận dạng kết cấu để mô tả các kết cấu bên dưới và nền móng cầu. Một cây cầu ba nhịp giản đơn được đặt tại Mossy, West Virginia, Hoa Kỳ, được sử dụng làm trường hợp nghiên cứu. Phân tích modal và các kỹ thuật cập nhật mô hình phần tử hữu hạn được sử dụng để điều tra và ước tính độ không đảm bảo và điều kiện của kết cấu. Mô hình phần tử hữu hạn được cập nhật cho kết cấu này cung cấp thông tin có giá trị để đánh giá điều kiện cầu và chứng minh cách nhận dạng kết cấu là một công cụ hữu hiệu cho trường hợp được xem xét. Một nghiên cứu trình bày rõ hơn về kỹ thuật đánh giá trụ cầu được Masahiro SHINODA và các cộng sự [4] trình bày trong bài báo của mình. Trong bài báo mô tả đánh giá không phá hủy thông thường của các kết cấu bên dưới cầu đường sắt bằng thử nghiệm bộ gõ.

Bằng thử nghiệm bộ gõ, tần số tự nhiên của kết cấu phần dưới cầu có thể được đo với độ chính xác cao và được áp dụng cho nhiều công trình kết cấu bên dưới cầu đường sắt ở Nhật Bản. Cũng nghiên cứu thông qua phương pháp kích thích dao động bằng bộ gõ J.W. Zhan và cộng sự [5] đã tiến hành đo dao động của thân trụ và nền móng, độ cứng thân trụ, độ cứng gối cầu và độ cứng dưới đất được sử dụng làm tham số điều kiện. Sự nhạy của các phản ứng theo chiều dọc dưới tác động của lực xung đã được phân tích. Tiêu chí đảm bảo chỉ số hư hỏng (SAC) dựa trên hàm phản ứng tần số (FRF) được sử dụng để đánh giá hư hỏng có tồn tại hay không và để xác định mức độ hư hỏng toàn cầu. Với các phản ứng tác động theo chiều dọc đã được thử nghiệm và các tham số modal làm mục tiêu, các tham số gối cầu, tham số độ cứng và các tham số dưới mặt đất được lấy bằng phương pháp cập nhật mô hình phần tử hữu hạn. Do đó, các trạng thái làm việc của các kết cấu bên dưới cầu có thể được đánh giá.

Trong thời gian khai thác trụ cầu không tránh bị xói, để đánh giá nhanh tình trạng xói dưới chân trụ nhiều tác giả đã dùng phương pháp phân tích dao động trụ để đánh giá. Trong nghiên cứu của Ko, Y. Y và các cộng sự [6] nhóm nghiên cứu đã

đánh giá xói trụ cầu thông qua đo dao động thân trụ. Trong nghiên cứu này kết hợp đo đạc ngoài hiện trường và mô phỏng số để kiểm tra kết quả. Gần đây hơn, Kasun D. Kariyawasam và cộng sự [7] cũng sử dụng kết quả đo tần số dao động của cầu để đánh giá tình trạng xói của trụ cầu, kết quả đo cũng cho thấy tần số dao động rất nhạy để đánh giá tình trạng xói của trụ cầu.

Thông qua các nghiên cứu trên cho thấy việc sử dụng kết quả đo dao động thân trụ để đánh giá tình trạng của thân trụ và nền móng bên dưới là xu hướng nghiên cứu trên thế giới. Qua nghiên cứu cho thấy việc tìm ra được tham số ảnh hưởng chính đến các kết quả đo là công việc hết sức cần thiết giúp các nhà nghiên cứu tránh được các sai lầm khi đánh giá. Với các điều kiện đã nêu như trên việc bài báo đi tiến hành phân tích một tham số ảnh hưởng lớn đến sự làm việc của trụ cầu đó là độ cứng của nền móng cầu. Mục đích nghiên cứu là tìm ra mối quan hệ giữa độ cứng nền móng với dao động của trụ qua đó phục vụ bài toán chẩn đoán sau này và phạm vi nghiên cứu ở đây là đối với trụ cầu dầm giản đơn. Phân tích của bài báo góp phần không chỉ đánh giá sự làm việc của trụ cầu còn có thể đánh giá ngược tình trạng của nền móng cầu bên dưới.



Hình 1. Minh họa các trường hợp có xói và không xói [7]: (a) không xói; (b) xói cục bộ; (c) xói chung

## 2. Cơ sở lý thuyết

Trụ cầu trong giai đoạn khai thác làm việc có thể đơn giản hóa coi như một dầm có một đầu liên kết đàn hồi với bộ móng và có đầu tự do liên kết đàn hồi với kết cấu nhịp thông qua gối cầu. Từ việc đơn giản hóa sơ đồ làm việc, theo lý thuyết của Rayleigh [8], tần số dao động của kết cấu có thể

biểu diễn dưới dạng “công thức (1)”.

$$\omega = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}} \tag{1}$$

$$m^* = \int_0^L m(x)\psi(x)^2 dx + \sum m_i \psi(x_i)^2 + \sum J_i \psi'(x_i)^2 \tag{2}$$

$$k^* = \int_0^L k(x)\psi(x)^2 dx + \int_0^L EI(x)\psi''(x)^2 dx + \sum k_i \psi(x_i)^2 \tag{3}$$

Trong đó  $k^*$  là độ cứng suy rộng và  $m^*$  là khối lượng suy rộng phụ thuộc vào kết cấu và hàm dạng lựa chọn trong hệ tọa độ suy rộng.

- $\psi(x)$ : hàm dạng mode dao động tương ứng.
- $m(x)$ : khối lượng trên một đơn vị chiều dài
- $m_i$ : các khối lượng chất thêm tại vị trí  $x_i$
- $J_i$ : các mô men quán tính khối lượng chất thêm tại vị trí  $x_i$
- $k(x)$ : độ cứng nền đàn hồi trên một đơn vị chiều dài
- $EI(x)$ : độ cứng chống uốn của dầm
- $k_i$ : độ cứng gối đàn hồi tại vị trí  $x_i$
- $x_i$ : vị trí khối lượng chất thêm, mô men quán tính khối lượng chất thêm (gối đàn hồi)
- $\psi''(x)$ : đạo hàm bậc hai theo biến  $x$  của hàm dạng.

Từ phương trình trên cho thấy kết quả dao động của trụ sẽ ảnh hưởng lớn từ độ cứng của các liên kết đàn hồi với trụ, trong trường hợp này đó là các gối cầu và độ cứng của nền móng (các giá trị  $k_i$  trong công thức 3). Để thể hiện một cách tường minh bài báo đi tiến hành phân tích trên bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

### 3. Số liệu đưa vào phân tích

Để thấy rõ được các tham số chính ảnh hưởng đến dao động của trụ cầu, bài báo tiến hành

phân tích dao động một hệ kết cấu như sau: Cầu dầm giản đơn, mặt cắt ngang cầu được cấu tạo bởi ba dầm chữ I dài 33m đặt cách nhau 2.4m; một đầu dầm bố trí gối cố định (trụ 1), một đầu dầm bố trí gối di động (trụ 2). Trụ có cấu tạo là trụ 2 thân cột BTCT, đường kính 1m, đặt cách nhau 2.4m; xà mũ có kích thước mặt cắt ngang là 1.5x1m.

Kết cấu trên được phân tích dao động với 2 trường hợp khác nhau (trường hợp thứ nhất thay đổi độ cứng gối cầu các phương-trừu phương dọc cầu, trường hợp thứ hai thay đổi độ cứng phương chuyển vị của gối cầu-phương dọc cầu).

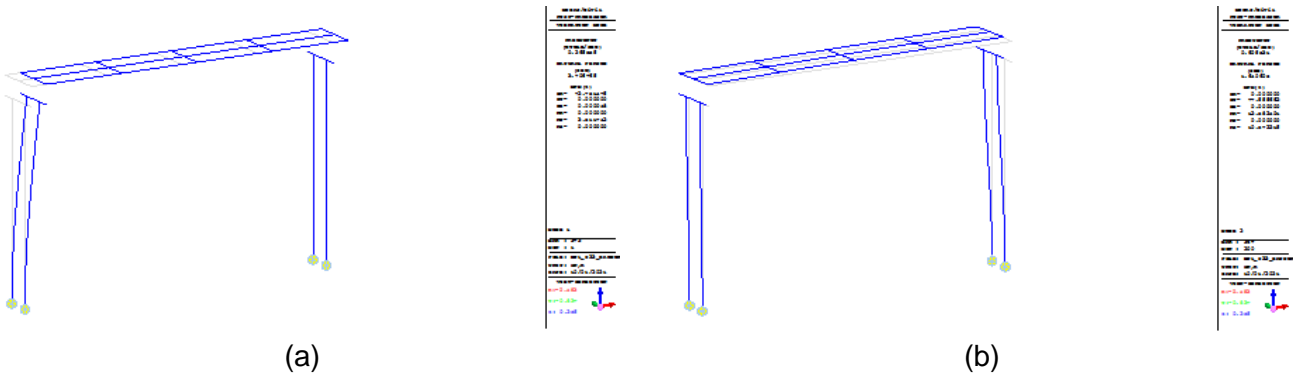
Để thể hiện hiện tượng xói xảy ra tại nền móng, trong nghiên cứu này giả thiết chân trụ ngâm với đất có độ cứng thay đổi từ 100,000,000kN/m đến 100,000 kN/m theo các phương chuyển vị  $D_x$  và  $D_y$ ; độ cứng xoay giả thiết thay đổi từ 100,000,000kN.m/rad đến 100,000 kN.m/rad, đối với trục  $D_x$  và  $D_y$ . Các giá trị độ cứng theo phương thẳng đứng.

Ma trận độ cứng của nền móng, gối cầu, dầm cầu được chương trình phần tử hữu hạn tự động tính toán cho mô hình kết cấu cầu dầm giản đơn có xét đến trụ và độ cứng của nền móng.

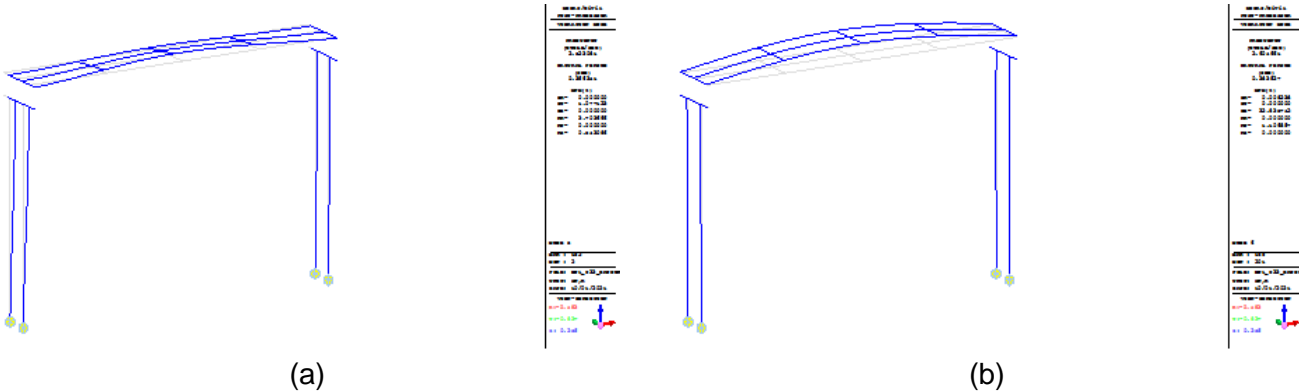
Kết quả phân tích tần số dao động (Hz) được thể hiện thông qua các Bảng 1 và hình minh họa dưới đây.

**Bảng 1.** Kết quả các tần số dao động khi độ cứng nền móng thay đổi

Mode	ĐỘ CỨNG CỦA NỀN MÓNG						
	K=10 <sup>5</sup>	K=5*10 <sup>5</sup>	K=10 <sup>6</sup>	K=5*10 <sup>6</sup>	K=10 <sup>7</sup>	K=5*10 <sup>7</sup>	K=10 <sup>8</sup>
1	0.153449	0.228922	0.247126	0.265008	0.267509	0.269559	0.247172
2	0.413881	0.530190	0.564168	0.600003	0.605219	0.609531	0.610045
3	0.430213	0.661681	0.721009	0.780699	0.789160	0.796113	0.721223
4	0.630423	0.794033	0.843039	0.895128	0.902738	0.909035	0.909626
5	2.438171	2.485053	2.500731	2.518254	2.520888	2.523081	2.523331
6	2.602437	2.603987	2.604302	2.604590	2.604629	2.604661	2.604311
7	3.514496	3.949164	3.950087	3.950971	3.951093	3.951193	3.951120
8	3.944976	4.201791	4.407081	4.429779	4.432867	4.435381	4.425563
9	4.179804	4.382954	4.476250	4.820027	4.875444	4.922386	4.493516
10	4.273577	4.910063	5.210852	5.597217	5.660473	5.714260	5.234380
11	4.903540	5.690457	6.010182	6.415075	6.480392	6.535639	6.103376
12	4.939782	5.776785	6.113072	6.525484	6.592045	6.648442	6.159577



Hình 2. Dạng mode dao động thứ nhất và thứ hai- dao động trụ



Hình 3. Các dạng mode dao động thứ năm và thứ sáu- dao động dầm

**4. Kết quả phân tích và thảo luận**

**4.1. Trường hợp phân tích dao động của trụ**

Kết quả phân tích từ mô hình PTHH thu được kết quả như hình 4, hình 5.

Trên cơ sở các số liệu trên tiến hành vẽ các biểu đồ quan hệ giữa tần số dao động của trụ với độ cứng của nền móng.

Từ kết quả phân tích trên cho thấy tần số dao động của trụ bố trí gối cố định, và gối di động đều có xu hướng thay đổi tần số khi thay đổi độ cứng của nền móng. Qua phân tích trên có thể rút ra được kinh nghiệm, khi bố trí thiết bị đo đặc tại trụ bố trí gối di động hay bố trí thiết bị đo tại trụ có bố trí gối cố định đều có thể đánh giá được độ suy giảm độ cứng của nền móng.

Để thấy rõ hơn ảnh hưởng của độ cứng nền móng tới dao động của dầm cầu, bài báo đi phân tích trường hợp thứ hai

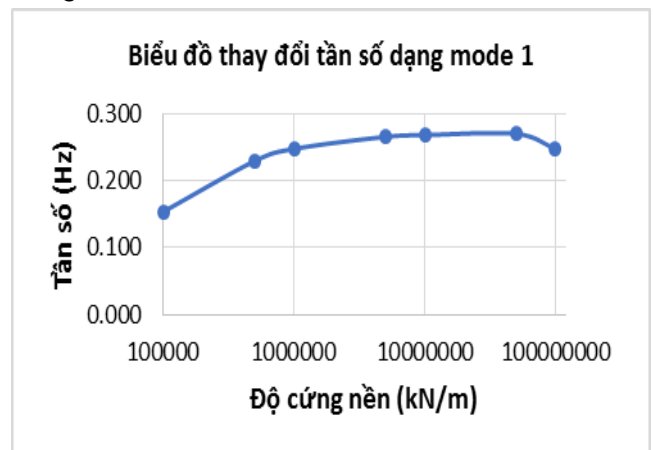
**4.2. Trường hợp phân tích dao động của dầm cầu**

Để thấy rõ hơn ảnh hưởng của độ cứng của nền với trụ, bài báo có phân tích thêm ảnh hưởng của độ cứng nền với dao động của dầm.

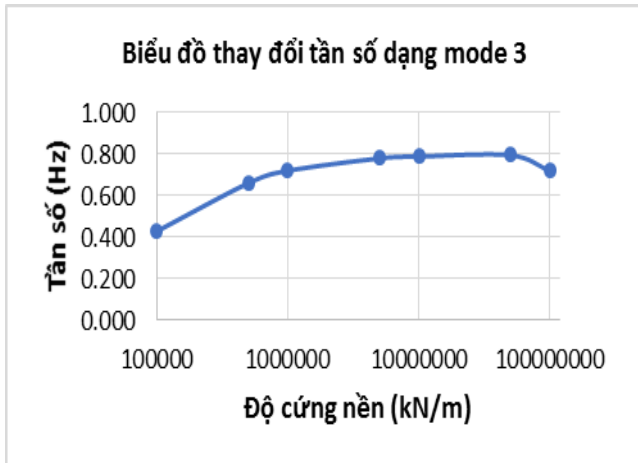
Trường hợp thứ hai sẽ thiết lập mối quan hệ của độ cứng nền móng với dao động của dầm.

Từ các kết quả phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn vẽ được biểu đồ quan hệ giữa tần số dao động và độ cứng nền móng như các hình 4,5,6,7.

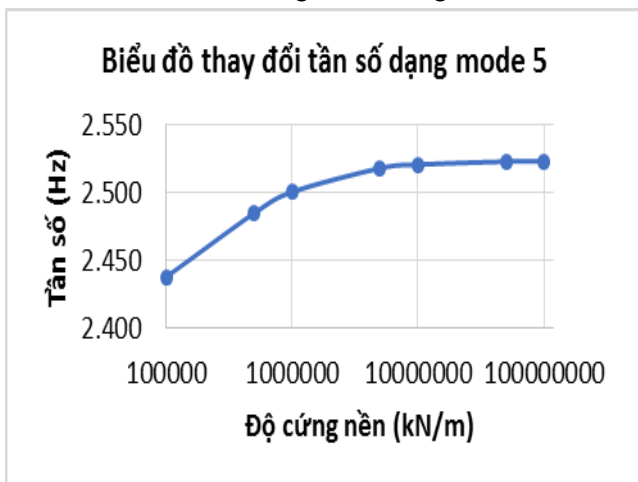
Từ hình 6 và hình 7 trên cho thấy tần số dao động của dầm thay đổi rõ rệt khi độ cứng của nền móng suy giảm, qua đó có thể sử dụng kết quả dao động dầm để đánh giá tình trạng làm việc của nền móng cầu.



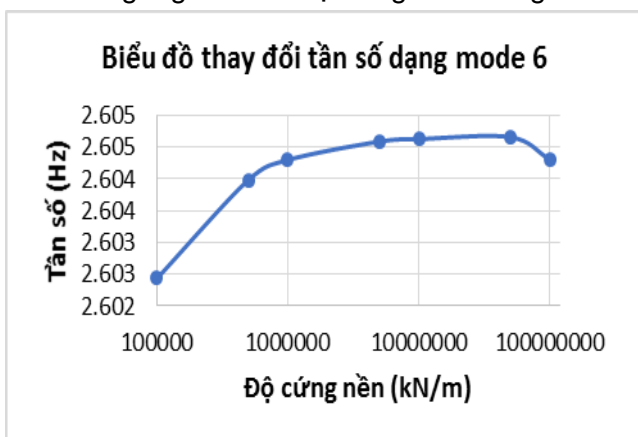
Hình 4. Biểu đồ quan hệ giữa tần số dao động trụ 1 với độ cứng nền móng



Hình 5. Biểu đồ quan hệ tần số dao động trụ 2 với độ cứng nền móng



Hình 6. Biểu đồ quan hệ giữa tần số dao động ngang dầm và độ cứng nền móng



Hình 7. Biểu đồ quan hệ giữa tần số dao động uốn dầm và độ cứng nền móng

#### 4. Kết luận

Bài báo đã đi tiến hành phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền móng cầu đến tần số dao động của công trình cầu gồm kết cấu nhịp, trụ cầu bố trí gối cố định và trụ cầu bố trí gối di động. Trong thực

tế đo đạc dao động trụ cầu thường thu được tần số dao động đầu tiên của trụ cầu do đó kết quả bước đầu chỉ ra ảnh hưởng của sự thay đổi độ cứng của gối cầu đến từng bộ phận trong công trình cầu. Kết quả góp phần trong công tác đo đạc phục vụ bài toán chẩn đoán cầu cũng như trong các bài toán cập nhật mô hình sau này.

Qua phân tích với các giả thiết trên cũng thấy rõ ảnh hưởng của hiện tượng xói nền móng sẽ ảnh hưởng lớn đến kết quả đo dao động của trụ cầu và dầm cầu, từ đó đề ra các thuật toán góp phần chẩn đoán hiện tượng xói mố trụ cầu sau này.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] M. Christiane, H-W. Reinhardt and G. Dobmann (2010). Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. © Woodhead Publishing Limited.
- [2] D. Larry D., P.E. Olson (2005). Dynamic Bridge Substructure Evaluation and Monitoring. FHWA-RD-03-089.
- [3] M. Qiang, M. Matteo, D. John, B. John, Y. Charles, S. Kurt, A. Emin, M. Franklin, B. Ivan (2019). Structural condition assessment of a bridge pier: A case study using experimental modal analysis and finite element model updating. Struct Control Health Monit. 2019; 26: e2273.
- [4] S. Masahiro, H. Hiroshi and M. Seiji (2008). Nondestructive evaluation of railway bridge substructures by percussion test. Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008.
- [5] J.W. Zhan, H. Xia and N. Zhang (2013). A damage evaluation method for bridge substructures using longitudinal impact dynamic responses. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation, © Taylor & Francis Group, London.
- [6] Y. Y. Ko, W.F. Lee, W. K. Chang, H. T. Mei, C. H. Chen (2010). Scour Evaluation of Bridge Foundations Using Vibration Measurement. In: Burns, Susan E.; Bhatia, Shobha K.; Avila,

- Catherine M. C.; Hunt, Beatrice E. (Hg.): Proceedings 5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5), November 7-10, 2010, San Francisco, USA
- [7] D.K. Kasun, R.M. Campbell, M. Gopal, K.H. Stuart, P.T. James (2020). Assessment of bridge natural frequency as an indicator of scour using centrifuge modelling. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*.
- [8] R. W. Clough, J. Penzien (2003). Dynamics of structures. Computers & Structures, Inc., Berkeley, CA 94704.