

Nghiên cứu liên kết cọc – bản trong công trình cầu

Nguyễn Phương Nhung^{1*}

Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

TỪ KHOẢ

Kết cấu cầu cọc sàn
Nút liên kết
Đường cao tốc

TÓM TẮT

Với sự phát triển liên tục của công nghệ xây dựng, hệ kết cấu cọc – bản, vốn được phát triển ban đầu cho kỹ thuật đường sắt, ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong kỹ thuật đường bộ. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một thiết kế mới cho các nút nối cọc – bản. Điểm đổi mới nằm ở việc tích hợp các phần tử tiêu tán năng lượng tại các nút nối này, giúp tăng khả năng hấp thụ và giảm tác động của tải trọng động lên kết cấu. Bên cạnh đó, việc sử dụng bê tông không co ngót tại các mối nối đảm bảo nâng cao độ bền và ổn định lâu dài, khắc phục các vấn đề thường gặp ở các mối nối bê tông thông thường. Những cải tiến này cho thấy sự nâng cao đáng kể về hiệu suất kết cấu cũng như khả năng chống chịu của hệ cọc – bản trong các ứng dụng đường bộ hiện đại.

KEYWORDS

Pile-plate bridge
Connecting node
Highway

ABSTRACT

With the continuous advancement of construction technology, the pile-plate structural system, originally developed for railway engineering, has increasingly found applications in highway engineering. In this study, we propose a novel design for the pile-plate connection nodes. The innovation lies in the integration of energy-dissipating elements at these nodes, which enhance the structure's ability to absorb and mitigate dynamic loads. Additionally, the use of non-shrinkage concrete at the joints ensures improved durability and long-term stability, addressing common issues associated with conventional concrete connections. Together, these enhancements demonstrate a significant improvement in both the structural performance and resilience of pile-plate systems in modern highway applications.

1. Giới thiệu

Là một loại kết cấu mới, nền đường cọc sàn được đề xuất để tái thiết đường cao tốc quy mô lớn (Hình 1) (Bao Yuchan (2018). Zhong-Wei và Yan (2020) chỉ rõ: Trong xây dựng đường, việc cung cấp tài nguyên đất ngày càng trở nên căng thẳng, mâu thuẫn giữa không có đất cho đến chiếm giữ rất nổi bật. So với nền đường đắp truyền thống, nền đường cọc sàn có đặc điểm ít lấp đất và ít lún sau thi công, và kết cấu cọc sàn có ưu điểm lớn trong việc xử lý các cấu trúc địa chất như đất yếu sâu, đất yếu rời và hoang thổ sụp đổ sâu. Nền đường cọc sàn là kết cấu lắp ghép bao gồm các dầm sàn đúc sẵn tại nhà máy và cọc ống. Vì vậy, các học giả trên thế giới đã tiến hành nhiều nghiên cứu về cấu trúc này.

Những năm 1990, Phần Lan đi đầu trong việc áp dụng kết cấu nền móng cọc-sàn vào lĩnh vực đường sắt. Do khu vực Ermanninsuo của Phần Lan từng là đầm lầy nên để kiểm soát độ lún một cách hiệu quả và đáp ứng yêu cầu vận hành tàu, thiết kế sử dụng kết cấu cọc-sàn. Sau đó, để giải quyết vấn đề đất giãn nở trên tuyến Nuremberg-Ingolstadt mới ở Đức, kết cấu cọc-sàn đã được sử dụng để kiểm soát độ lún của móng. Toivolaet và cộng sự (2005) đã nghiên cứu nội lực kết cấu, đặc điểm dao động và quy luật lún của kết cấu cọc-sàn trên đường nối hầm tàu ngầm Anh – Pháp và thu được nhiều số liệu quý giá và kết luận hữu ích. Bakeer, Shutt, và Zhong và cộng sự (2010) đã theo dõi

nhiều kết cấu cọc-sàn ở phía đông nam Louisiana, Hoa Kỳ, để xác định các yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu quả hoạt động lâu dài của chúng.



Hình 1. Ứng dụng kết cấu sàn cọc.

Gần đây hơn, Van Duijnen (2005) đã sử dụng phần mềm số Plaxis 3D để phân tích các đặc tính ứng suất và biến dạng của kết cấu cọc-sàn sử dụng trên đường sắt cao tốc Hà Lan-Bỉ và chứng minh rằng kết cấu cọc-sàn có thể làm giảm độ lún rất tốt do đường hầm đi qua đường sắt cao tốc gây ra. Thông qua các phương pháp phân tích số, O'Riordan (2004) cùng cộng sự cuối cùng đã đạt được đặc tính lún của kết cấu cọc-sàn chịu tải trọng dài hạn.

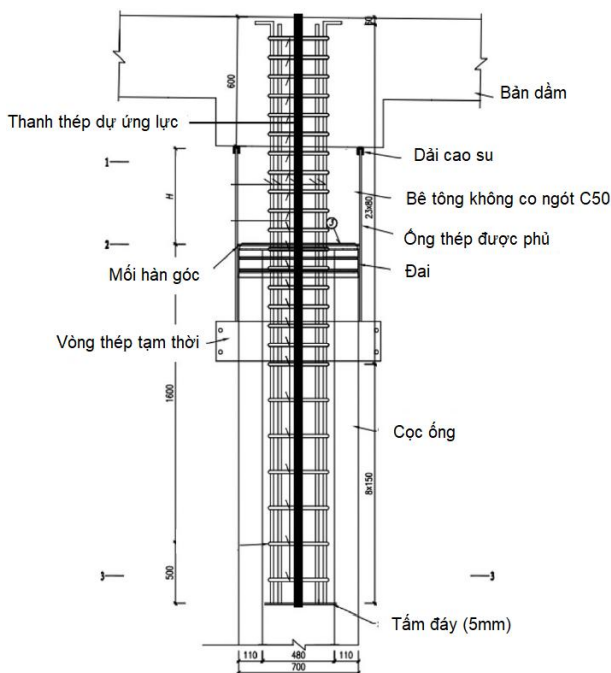
*Liên hệ tác giả: nhungnp@utt.edu.vn

Nhận ngày 07/08/2025, sửa xong ngày 25/08/2025, chấp nhận đăng ngày 26/08/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2025.1083>

Ngoài ra, Yang (2017) đã đề xuất hai dạng kết cấu kết cấu sàn cọc và cầu dầm sàn rộng cho cầu đường bộ thuộc đường sắt cao tốc trên vùng đất yếu và thực hiện nghiên cứu mô phỏng số. Với điều kiện đáp ứng các yêu cầu về bảo vệ kết cấu đường sắt cao tốc và an toàn vận hành, kết cấu sàn cọc có tính toàn vẹn tốt hơn và khối lượng công việc bảo trì ít hơn so với dầm sàn rộng. Xu và cộng sự (2017) đưa ra kết cấu cầu dầm cọc-sàn. Các ý tưởng thiết kế liên kết cọc-sàn, sàn và lớp nền móng hiện có được cung cấp. Zheng (2018) đã kết nối các phần tử khối và phần tử dầm trong cột cọc tích hợp bằng cách sử dụng dầm cứng MPC184 để đạt được mục đích ứng suất cộng hưởng, truyền lực, mômen lực và phối hợp chuyển vị, biến dạng của cọc ống với các dạng phần tử khác nhau. Dựa trên nền móng của đường cao tốc Hefei-Zongyang, Zhu & Ding (2018) và những người khác đã thực hiện tính toán sơ bộ về độ mỏi của liên kết cọc-sàn và xác minh rằng độ mỏi của phương thức liên kết sàn cọc bọc đầy lõi có thể đáp ứng các yêu cầu của thông số kỹ thuật liên quan. Yang (2018) lấy việc đúc sẵn và lắp đặt kết cấu sàn cọc làm đối tượng nghiên cứu và giới thiệu quy trình thi công kết cấu sàn cọc mới áp dụng cho đường cao tốc. Lei (2019) đã thiết lập mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến của kết cấu liên kết sàn cọc dựa trên dự án xây dựng lại và mở rộng đoạn nút giao Lintou – Longxi của đường cao tốc G5011 Wuhe và xác minh kết cấu liên kết sàn cọc được thiết kế đáp ứng ứng dụng thực tế của dự án. Tuy nhiên, những nghiên cứu này chủ yếu được áp dụng cho đường sắt. Việc ứng dụng và phân tích kết cấu sàn cọc trên đường cao tốc ít liên quan hơn (Li S., cùng cộng sự, 2021).

Dựa trên cơ sở trên, bài báo đề xuất một loại nút liên kết mới cho kết cấu cọc-sàn như trên Hình 2. Các mối nối sàn cọc sẽ không thể tránh khỏi bị hư hỏng do tác động tổng hợp của tải trọng tĩnh và tải trọng động trong quá trình sử dụng.

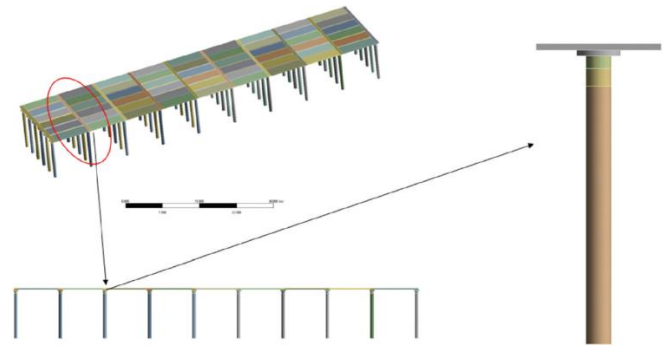


Hình 2. Sơ đồ kết cấu cọc ống.

2. Thiết kế mẫu

2.1. Đề xuất cấu trúc

Kết cấu sàn cọc sử dụng kết cấu xoay, cọc ống và sàn dầm được đúc sẵn tại nhà máy và lắp ráp tại chỗ. Phần khớp được làm bằng bê tông nhựa, giúp tăng cường độ bền, đồng thời tăng khả năng biến đổi dẻo, đồng thời đóng vai trò bản lề dẻo trong kết cấu tổng thể. Trong quá trình sử dụng bình thường lực cắt tác dụng lên phần nối sẽ rất lớn. Để ngăn ngừa hư hỏng cục bộ, trụ thép được sử dụng để bảo vệ bê tông chung. Dưới sự bảo vệ của trụ thép, phần mối nối của sàn cọc ở trạng thái nén ba chiều sẽ cải thiện đáng kể cường độ của mối nối. Phần tiêu tán năng lượng của kết cấu sàn cọc gồm các thanh dọc, cốt đai và các thanh thép dự ứng lực ở giữa các nút (He, cùng cộng sự (2012)). Các thanh thép dự ứng lực được nối với tấm đáy để phân tán sự tập trung ứng suất do các bó cốt thép dự ứng lực trong bê tông gây ra. Mô hình tổng thể và mô hình nút cục bộ được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Sàn cọc và nút sàn cọc.

2.2. Thông số vật liệu

2.2.1. Đặc tính vật liệu bê tông

Do tính chất cơ học phức tạp của vật liệu bê tông và tính dị hướng của tính chất cơ học vật liệu, hiện tại mối quan hệ cấu thành không thể được mô tả chính xác. Tuy nhiên, việc xác định mối quan hệ cấu thành của bê tông là tiền đề và là chìa khóa để phân tích lực của kết cấu bê tông cốt thép. Hiện nay, hầu hết các mô hình cấu thành của bê tông đều áp dụng mô hình đàn hồi phi tuyến (Zhang và cộng sự 2013) và mô hình cấu thành đàn hồi-dẻo. Mối quan hệ ứng suất-biến dạng bê tông trong mô phỏng phần tử hữu hạn (Li, cùng cộng sự (2021)) trong Biểu thức (1), (2), (3), (4). Đường cong ứng suất - biến dạng được thể hiện trên Hình 4 (lấy bê tông C40 làm ví dụ):

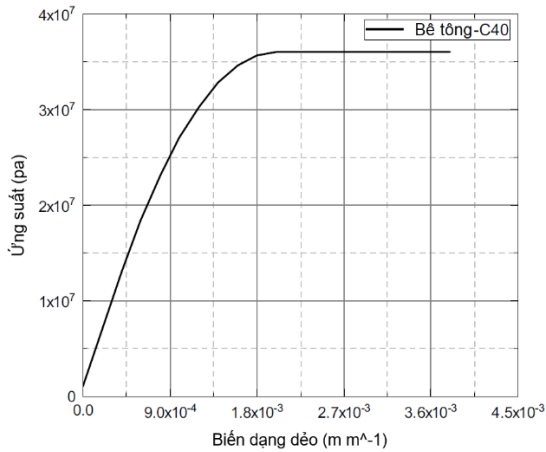
$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right] & \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ f_c & \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu,k} - 50) \quad (2)$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (4)$$

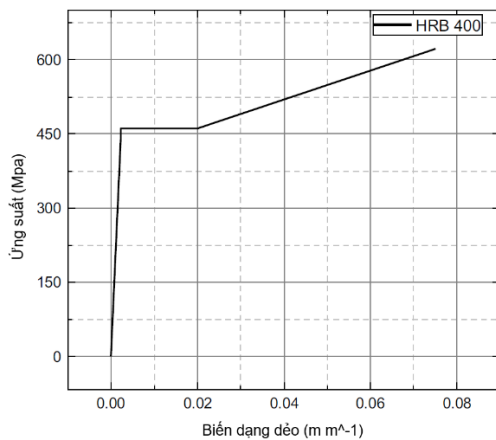
trong đó: σ_c là ứng suất nén của bê tông khi biến dạng nén của bê tông là ε_c ; f_c là giá trị thiết kế cường độ chịu nén dọc trục của bê tông, đo được trong thí nghiệm này là 25,4 Mpa; ε_0 là giá trị biến dạng nén của bê tông, khi giá trị tính toán của ε_0 nhỏ hơn 0,002 thì lấy bằng 0,002; ε_{cu} là biến dạng nén cực hạn của bê tông trong tiết diện chuẩn, khi giá trị tính toán lớn hơn 0,0033 thì lấy bằng 0,0033; $f_{cu,k}$ là giá trị tiêu chuẩn cường độ chịu nén của khối bê tông, là giá trị đo được bằng 33,4 Mpa trong thí nghiệm này; n là hệ số, được lấy bằng 2,0, khi giá trị tính toán lớn hơn 2,0 thì lấy bằng 2,0.



Hình 4. Đường cong quan hệ cấu thành bê tông.

2.2.2. Đặc tính thép

Thanh thép trong bài viết này là thanh thép HRB400. Để hỗ trợ tính toán hội tụ phần tử hữu hạn phi tuyến, các mối quan hệ cấu thành của thanh cốt thép được mô hình hóa bằng mô hình đàn hồi-dẻo với giai đoạn tăng bền. Như thể hiện trong Hình 5.



Hình 5. Đường cong quan hệ cấu thành thép.

Mối quan hệ giữa σ_c và ε được thể hiện trong Biểu thức (5):

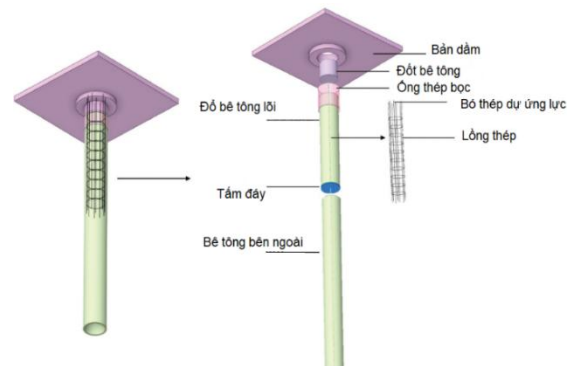
$$\sigma_c = \begin{cases} E_s \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_h \\ f_y + E'_s (\varepsilon - \varepsilon_h) & \varepsilon \geq \varepsilon_h \end{cases} \quad (5)$$

trong đó: E_s là mô đun đàn hồi của thanh thép, σ_c là ứng suất của thanh thép, ε là biến dạng của thanh thép, f_y là giá trị đại diện cho giới hạn chảy của thanh thép.

3. Mô hình phần tử hữu hạn

3.1. Thiết lập mô hình phần tử hữu hạn

Trình tự lắp ráp các nút sàn cọc như sau: đổ bê tông bên ngoài, đặt tấm đáy thép vào vị trí thích hợp, đặt lồng thép lên khay đỡ bê tông lõi, chừa vị trí bó thép dự ứng lực ở giữa, dùng phương pháp căng ngược để đạt ứng suất trước, đổ bê tông mối nối bản dầm đúc sẵn với bê tông nút. Tất cả các tiếp điểm khối trong mô hình FE đều là các tiếp điểm có biên đa giác, xác định rằng không có sự tách biệt hoặc trượt tương đối giữa các mặt. Cốt thép và bê tông được kết nối bằng các nút nối và độ trượt tương đối giữa cốt thép và khối bê tông không được xem xét. Mô hình hình học cụ thể được thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Mô hình phần tử hữu hạn cọc-sàn-nút.

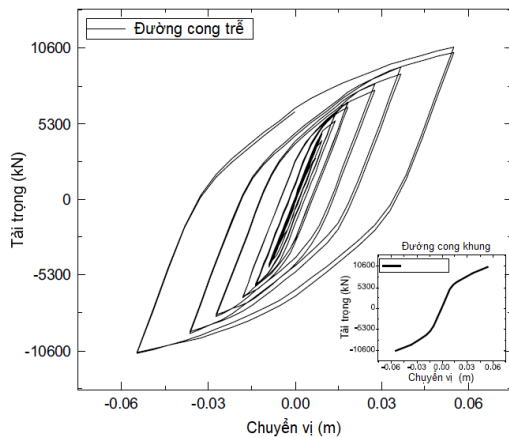
Tất cả các kết nối thực thể trong mô hình phần tử hữu hạn đều là các kết nối bề mặt với bề mặt. Thanh thép và bê tông được kết nối bằng các nút liên kết và việc triển khai cụ thể được thực hiện bằng cách liên kết bán kính pinball vào điểm tiếp xúc (Verma và Mishra, 2019). Phương pháp này không xét đến độ trượt tương đối giữa thanh thép và phần tử bê tông. Các thông số chi tiết khác của mô hình được thể hiện trong Bảng 1:

Bảng 1. Chi tiết từng bộ phận trong mô hình.

Bộ phận	Vật liệu
Bê tông bên ngoài	C80
Bê tông nhồi lõi	C80
Tấm đáy	Kết cấu thép
Dầm dọc cầu	HRB400
Cốt thép đai	HRB400
Bó thép dự ứng lực	HRB400
Ống thép bọc	Q235
Bán dầm	C50
Đốt bê tông	C40

4.2. Đường cong trễ

Sau khi áp dụng chuyển vị tuần hoàn theo hệ tải trọng trên, đường cong quan hệ tải trọng và chuyển vị của bề mặt đoạn dầm được trích xuất như Hình 10. Khi bắt đầu tải trọng, quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị là tuyến tính. Với sự gia tăng tải chuyển vị ở cuối dầm, phản lực mặt cắt ngang có xu hướng đi lên thẳng ngắn và sau đó bước vào giai đoạn đường cong, và kết cấu bước vào giai đoạn dẻo. Trong quá trình loại bỏ dần chuyển vị tiếp theo, phản lực trên mặt cắt giảm tuyến tính. Đường cong trễ thường có dạng hình thoi và có hiệu suất địa chấn tốt.



Hình 10. Đường cong trễ và đường cong khung.

Sơ đồ đường cong của mô hình được lấy từ đường cong tải trọng-chuyển vị của phân tích hầu như tĩnh của mô hình. Như được hiển thị trong Hình 9, trong pha đàn hồi, sơ đồ đường cong là thẳng. Với sự gia tăng chuyển vị tại mặt cắt ngang, kết cấu sàn cọc bắt đầu có biến dạng lớn, bê tông bắt đầu xuất hiện các vết nứt nhỏ và rút dần khỏi quá trình chịu lực. Sau đó, lực tác dụng lên thanh thép tăng dần và kết cấu tổng thể bước vào giai đoạn dẻo. Độ cứng của các nút sàn cọc tuy giảm nhưng vẫn ổn định, sơ đồ đường cong không có tiết diện giảm dần.

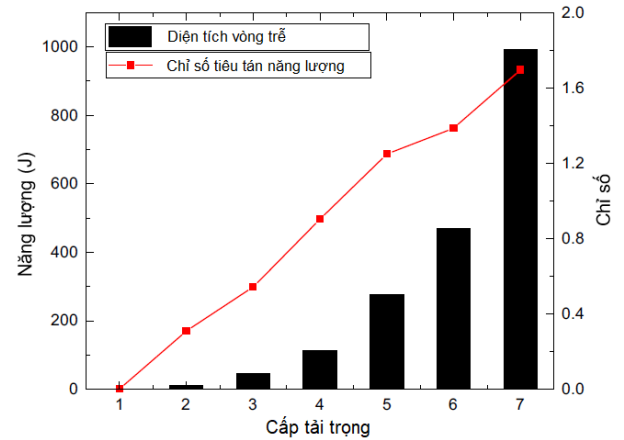
4.3. Công suất tiêu thụ năng lượng

Trong đường cong trễ, u được dùng để biểu thị diện tích vòng trễ. Giá trị của u phản ánh trực tiếp mức độ khả năng tiêu thụ năng lượng của mẫu vật. Sự tiêu tán năng lượng của từng giai đoạn của mẫu dưới tải trọng 7 mức được thể hiện trên Hình 11. Hệ số tiêu tán năng lượng được tính theo Công thức (8). Các giá trị của $S_{(ABC+CDA)}$, $S_{(OBE+ODF)}$ và E theo hệ thống tải ở tất cả các cấp được thể hiện trong Bảng 2.

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (8)$$

Như được hiển thị trên Hình 11, khả năng tiêu thụ năng lượng của mẫu thử cho thấy xu hướng tăng lên nhanh chóng khi hệ thống tải tăng lên. Sau khi gia tải giai đoạn 3, các mối nối bê tông bị nứt và các bộ phận tiêu hao năng lượng được chuyển thành khung cốt thép và

thanh thép dự ứng lực. Do sự có mặt của ứng suất trước nên thời gian nứt của mối nối bê tông bị chậm lại. Khi góc chuyển vị $\theta \geq 0,0067$ rad thì hệ số tiêu hao năng lượng vượt quá 1, chứng tỏ mẫu vẫn có khả năng tiêu hao năng lượng tốt sau khi mối nối bê tông bị nứt.



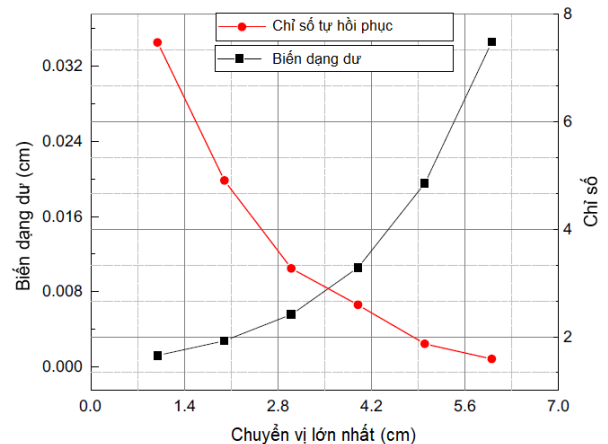
Hình 11. Tiêu thụ năng lượng và các chỉ số.

4.4. Đánh giá khả năng tự phục hồi

Hình 12 cho thấy rằng với chuyển vị lớn nhất của kết cấu, độ dốc tiếp tuyến của đường cong tăng dần và sự thay đổi chuyển vị dư cho thấy xu hướng tăng phi tuyến tính. Công thức (9) được đưa ra để đánh giá khả năng tiêu hao năng lượng của mối nối sàn cọc:

$$\delta = \frac{u}{\lambda} \quad (9)$$

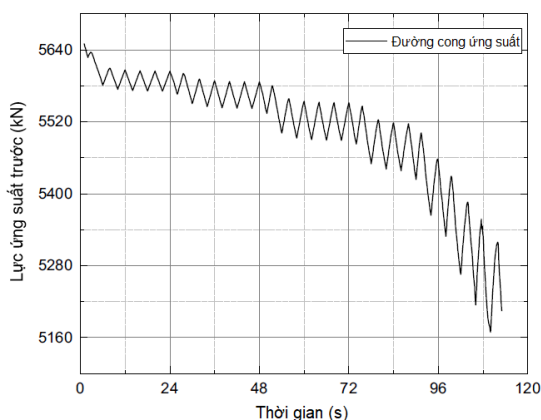
trong đó: λ là chỉ số tự phục hồi, u là biến dạng lớn nhất và δ là biến dạng dư. Khi lượng chuyển vị của đầu dầm tăng lên thì sẽ gây ra sự tích tụ độ dẻo trong nút. Khi độ dẻo tích tụ đến một mức độ nhất định, nút sẽ bị nứt. Lúc này, phần bê tông của phần nút thoát ra khỏi giai đoạn chịu lực, khung cốt thép và các sườn dự ứng lực cùng chịu tải. Khi chuyển vị tiếp tục tăng, cốt thép bước vào pha dẻo. Hiện tại, chỉ số tự thiết lập lại giảm xuống 0 và cấu trúc tạo ra biến dạng không thể đảo ngược.



Hình 12. Đánh giá chỉ số tự phục hồi.

4.5. Thay đổi ứng suất trước

Như thể hiện trên Hình 13. Khi áp dụng hiệu ứng nhiệt độ, ứng suất trước ban đầu là 5650 kN. Tải trọng tĩnh tiến chu kỳ thấp được tác dụng vào giằng đầu tiên, khi kết cấu bắt đầu biến dạng và ứng suất trước bắt đầu mất đi. Tại thời điểm thứ hai, chuyển vị đạt giá trị lớn nhất trong chu trình và ứng suất trước cũng trở nên nhỏ nhất. Sau khi dỡ tải về 0, ứng suất trước cũng được khôi phục về 5650 kN. Điều này chứng tỏ thanh thép lúc này đang ở giai đoạn đàn hồi. Sau đó, với sự gia tăng chuyển vị theo chu kỳ, ứng suất trước tổng thể có xu hướng giảm. Sau 90s, với sự phá hủy của bê tông, thanh thép cũng bước vào giai đoạn dẻo, ứng suất trước bắt đầu giảm nhanh. Tiêu thụ năng lượng tổng thể là tốt.



Hình 13. Đường cong thay đổi ứng suất trước.

5. Kết luận

Trong bài báo này, một loại hệ thống đỡ cầu mới được thiết kế – kết cấu sàn cọc. Sau khi mô phỏng số, thu được kết quả về đường cong trễ, độ cứng, khả năng tiêu thụ năng lượng và khả năng tự phục hồi của nút sàn cọc dưới tải trọng tĩnh tiến theo chu kỳ thấp và kết quả chính như sau:

(1) Đường cong trễ của nút sàn cọc thể hiện dạng hình thoi đầy đủ, do có ống bọc thép nên độ cứng của mỗi nối tăng lên và vị trí hư hỏng xuất hiện ở giữa phía dưới của cọc ống. Trong thiết kế tiếp theo, có thể xem xét thay thế bê tông nút bằng bê tông nhựa cường độ thấp và độ dẻo cao, bằng cách tăng cường độ của cọc ống, sao cho vị trí hư hỏng là tại nút, nhằm đáp ứng nhu cầu đặc biệt dự án.

(2) Trong toàn bộ hệ thống tiêu thụ năng lượng, lực dự ứng lực trong thanh thép dự ứng lực đóng vai trò chủ đạo và bị tiêu hao chậm dưới tải trọng tĩnh tiến chu kỳ thấp. Một mặt, sự hiện diện của ứng suất trước sẽ cản trở một phần mô men uốn âm của nút và tránh sự phá hủy nút sớm. Ở khía cạnh thứ hai, nó làm tăng khả năng tự phục hồi của sàn cọc.

Tài liệu tham khảo

- [1]. TCVN 11823:2017. Thiết kế cầu đường bộ.
- [2]. GS.TS. Nguyễn Viết Trung (chủ biên). Giáo trình thiết kế các phương án cầu. Nhà xuất bản Xây dựng – 2010.
- [3]. Hawileh, R. A., A. Rahman, and H. Tabatabai. 2010. “Nonlinear Finite Element Analysis and Modeling of a Precast Hybrid beam-column Connection Subjected to Cyclic Loads.” *Applied Mathematical Modelling* 34 (9): 2562–2583.
- [4]. Lei, J. 2019. “Nonlinear Finite Element Analysis of Connection Structure of Highway Pile Plate Structure Based on ANSYS.” *Engineering and Construction* 33 (5): 780–782.
- [5]. Li, S., et al. 2021. “Finite Element Analysis of Contact between new-built Structure and Old Subgrade in pile-plank Structure.” *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 676 (1): 012128. DOI:10.1088/1755-1315/676/1/012128.
- [6]. Li, L. Q., W. Y. Liao, and B. Y. Huo. 2021. “Finite Element Modeling and Nonlinear Analysis on the Optimum Opening Location for Continuous Composite Beams with Web Openings.” *Tehnicky Vjesnik-Technical Gazette* 28 (3).
- [7]. Xu, D. Q., and J. Xi. 2017. “The Application of pile-plank Bridge in Highway Reconstruction and Expansion Projects.” *Modern Transportation Technology* 14 (6): 40–42.
- [8]. Yang, F. 2017. “Numerical Simulation of pile-plank Structure and Hollow Board Beam Bridge Structure Traversing Construction under High-speed Railway Bridge.” *Highway* 62 (11): 73–79.