

PHÂN TÍCH SỤP ĐỔ LAN TRUYỀN TRONG CẦU DÂY VĂNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

PGS.TS. NGUYỄN HỮU HƯNG

Trường đại học Giao thông vận tải

Tóm tắt: Trong cầu dây văng, hệ dây văng làm nhiệm vụ đỡ dầm giúp cầu có thể vượt được những khẩu độ lớn cho nên hiện tượng lan truyền đứt cáp từ một cáp bị sự cố đứt cáp là bài toán thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học. Bên cạnh đó, khi cáp bị đứt dầm sẽ bị phá hoại hoặc do ứng suất vượt quá giới hạn cho phép hoặc do mất ổn định cục bộ. Bài báo này phân tích các kịch bản đứt cáp trong cầu và phân tích hiện tượng mất ổn định cục bộ của dầm tương ứng với các kịch bản đứt cáp nói trên. Hiện tượng đứt cáp được mô hình bằng lực thay đổi đột ngột theo thời gian. Kết quả của bài báo chỉ ra hiện tượng lan truyền đứt cáp trong cầu và khi nào hiện tượng sụp đổ lan truyền sẽ xảy ra.

Từ khóa: sụp đổ lan truyền (Sập đổ dây chuyền, sập đổ lũy tiến), phân tích lịch sử thời gian phi tuyến, đứt cáp, phân tích mất ổn định

Abstract: In the cable-stayed bridge, the cable-stayed system support girder helps the bridge to overcome large span so the phenomena of cable rupture progressive from a ruptured cable is the problem attracted the attention of scientists. Besides, when the cable is ruptured, the beam will be damaged either due to the stress exceeding the allowed limit or due to local instability. This paper analyzes the cable rupture scenarios in the bridge and analyzes buckling of beams corresponding to the above cable rupture scenarios. The phenomenon of cable rupture is modeled by force changed over time. The results of the paper show that the phenomenon of cable rupture in the bridge and when the phenomenon of progressive collapse will happen.

Keywords: Progressive collapse, Nonlinear time history analysis, Cable rupture, Buckling analysis

1. Giới thiệu

Cầu dây văng đã và đang được xây dựng phổ biến tại Việt Nam, từ cầu dây văng đầu tiên được hoàn thành năm 2000 (cầu Mỹ Thuận) đến nay Việt

Nam đã có khoảng 20 cầu dây văng nhịp lớn hơn 150m. Trong kết cấu cầu dây văng hệ cáp văng là kết cấu được quan tâm nhiều vì chính hệ này đem lại sự ưu việt vượt trội của cầu dây văng so với các loại kết cấu khác. Trong thiết kế cầu dây văng một sự cố đã được đưa vào tính toán trong giai đoạn thiết kế đó là sự cố đứt cáp. Theo hướng dẫn của PTI (Post-Tensioning Institute) [1] coi lực đứt cáp như là lực tĩnh độ lớn bằng lực căng cáp và nhân thêm hệ số bằng 2 (hệ số xung kích) hoặc là phân tích lịch sử thời gian phi tuyến với hiện tượng này. Cách tính coi đứt cáp như lực tĩnh thuận lợi cho kỹ sư thiết kế nhưng chưa phản ánh hết được tương tác giữa cáp đứt với các cáp còn lại cũng như đối với các bộ phận của kết cấu khác. Trong hướng dẫn của PTI cho phép khi bị đứt một cáp bất kỳ thì cầu vẫn phải giữ được ổn định không xảy ra sụp đổ lan truyền trong kết cấu. Như vậy, khi nào cầu dây văng xảy ra hiện tượng sụp đổ lan truyền trở thành vấn đề được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, như các nghiên cứu của M. Wolff và U. Starossek [2,3]. Trong nghiên cứu của mình tác giả đã sử dụng mô hình phi tuyến để phân tích ứng xử của các bộ phận cầu dây văng dưới tác dụng của tải trọng đứt cáp, tác giả tập trung phân tích phản ứng của dầm và tháp với các trường hợp hệ số cản khác nhau để tìm ra hệ số động phù hợp cho các bộ phận này. Thông qua phân tích phi tuyến nhóm tác giả này cũng chỉ ra với trường hợp đứt một cáp thì cầu vẫn ổn định, chỉ khi đứt 3 cáp liên kề nhau cầu mới xảy ra sụp đổ. Qua phân tích cũng chỉ ra cách tăng cường chống lại sụp đổ lan truyền cho cầu dây văng bằng cách bố trí khoảng cách giữa các dây văng gần nhau hơn. Bên cạnh những nghiên cứu chuyên sâu của M. Wolff và U. Starossek về sụp đổ lan truyền trong cầu dây văng, hiện tượng lan truyền đứt cáp từ một cáp bị sự cố ban đầu là bài toán phức tạp thu hút nhiều sự quan tâm [4-8]. Trên thế giới nghiên cứu về bài toán đứt cáp đã được thực hiện từ những năm 1994 bởi E. Hyttinen và các cộng sự [4]. Bên cạnh những nghiên cứu của

các nhà khoa học, bài toán này được quan tâm đặc biệt sau sự kiện 11/9/2001 ở Mỹ và đã có các hướng dẫn như những qui định về chống sụp đổ lan truyền đối với tòa nhà [9], và các hướng dẫn thiết kế sụp đổ lan truyền [10].

Nghiên cứu về bài toán đứt cáp cầu dây văng hay sụp đổ lan truyền trong cầu dây văng tại Việt Nam chưa có nhiều, một số bài báo có đóng góp của tác giả Việt Nam có thể kể đến như bài báo của tác giả Hoàng Vũ và các cộng sự [5], trong bài báo này nhóm tác giả vừa nghiên cứu lý thuyết vừa nghiên cứu thực nghiệm hiện tượng đứt cáp. Các nghiên cứu thực nghiệm làm rõ hơn cơ chế phá hoại cũng như độ lớn của hệ số động lấy vào khi phân tích tĩnh, cách làm hay được các kỹ sư sử dụng khi thiết kế cầu dây. Ngoài ra, bài báo cũng phân tích được sự ảnh hưởng của số lượng cáp đứt đến các bộ phận của kết cấu cầu dây. Bài báo của tác giả Nguyễn Trọng Nghĩa và Vanja Samec [6] cũng phân tích bài toán đứt cáp nhưng tập trung vào ảnh hưởng của một số tham số đến hệ số động khi đưa vào phân tích tĩnh, bài báo cũng minh họa một vài kết quả phân tích với thông số của một số công trình cầu ở Việt Nam. Tuy nhiên các bài báo cũng chưa đề cập đến sự lan truyền hiện tượng đứt cáp theo thời gian (tương tác lực căng giữa các cáp trước và sau khi đứt theo thời gian), phản ứng của kết cấu theo thời gian và chưa xét đến các ảnh hưởng điều kiện ban đầu khi phân tích đứt cáp (cáp đứt khi chịu tải trọng gì trước đó). Do đó trong các nghiên cứu này cũng chưa làm rõ mối quan hệ giữa cáp đứt với các cáp còn lại, hay làm rõ hơn cáp kế tiếp có nguy cơ bị đứt là cáp nào. Chưa chỉ rõ số lượng, vị trí cáp đứt nào thì cầu dây văng sẽ gặp nguy hiểm.

Gần đây hơn trong những năm 2016, 2017 một số tác giả cũng công bố nghiên cứu của mình cho bài toán sụp đổ lan truyền do đứt cáp như R. Das và các cộng sự [7], Harshil Jani và Jignesh Amin [8]. Trong nghiên cứu của mình R. Das và các cộng sự đã nghiên cứu được nhiều trường hợp đứt cáp và chỉ ra được vị trí cáp đứt nguy hiểm cho công trình cầu, tuy nhiên mô hình nghiên cứu là 3D nhưng tác giả vẫn giả thiết cáp đứt theo từng mặt cắt (đồng thời cả thượng lưu và hạ lưu cầu) chưa mô tả từng cáp riêng lẻ đứt. Đối với Harshil Jani và Jignesh Amin nghiên cứu thêm ảnh hưởng của sự ăn mòn

làm thay đổi cơ tính của cáp trước khi bị đứt cáp, và kết quả cũng chỉ dừng lại thay đổi lực căng trong cáp và chuyển vị ứng với các sơ đồ bố trí dây văng khác nhau.

Do đó, công việc nghiên cứu chi tiết ảnh hưởng của cáp đứt dẫn đến sụp đổ lan truyền trong kết cấu cầu dây văng bằng phương pháp phần tử hữu hạn với mô hình phi tuyến 3D là công việc cần được nghiên cứu thêm. Theo M. Wolff và U. Starossek đối với dầm cầu dây văng ngoài bị phá hoại do ứng suất vượt quá giới hạn cho phép thì hiện tượng mất ổn định cục bộ cũng cần được quan tâm, đặc biệt là khi nội lực trong dầm có cả lực dọc chịu nén, mô men uốn và lực cắt. Do vậy, bài báo này đi phân tích các kịch bản đứt cáp trong cầu và kiểm tra hiện tượng mất ổn định cục bộ của dầm tương ứng với các kịch bản đứt cáp nói trên. Hiện tượng đứt cáp được mô hình bằng lực thay đổi đột ngột theo thời gian. Kết quả của bài báo chỉ ra đối với số liệu đưa vào mô hình cầu dây văng thì khi nào xuất hiện hiện tượng lan truyền đứt cáp trong cầu và khi nào hiện tượng sụp đổ lan truyền sẽ xảy ra đối với công trình cầu dây văng.

2. Cơ sở lý thuyết [11]

Phản ứng động lực học của kết cấu có thể xác định thông qua giải phương trình dạng tổng quát sau:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (1)$$

trong đó:

$\mathbf{M}$ - ma trận khối lượng;

$\mathbf{C}$ - ma trận cản;

$\mathbf{K}$ - ma trận độ cứng;

$\mathbf{F}$ - Véc tơ tải trọng tác dụng.

$\ddot{\mathbf{U}}, \dot{\mathbf{U}}, \mathbf{U}$ - lần lượt là véc tơ gia tốc, vận tốc và chuyển vị.

Đối với bài toán phi tuyến để giải quyết bài toán trên bài báo sử dụng cách phân tích lịch sử thời gian phi tuyến (Nonlinear Time-History Analysis) trong đó thuật toán giải là sự kết hợp phương pháp Hilber–Hughes–Taylor (HHT) với phương pháp Newton–Raphson.

2.1 Tóm tắt phương pháp HHT

Công thức xác định gia tốc và vận tốc ở bước thứ $n+1$ như sau:

$$\ddot{U}_{n+1} = \frac{1}{\Delta t^2 \beta} (U_{n+1} - U_n) - \frac{1}{\Delta t \beta} \dot{U}_n + \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right) \ddot{U}_n \quad (2)$$

$$\dot{U}_{n+1} = \frac{\gamma}{\Delta t \beta} (U_{n+1} - U_n) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{U}_n + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{U}_n \quad (3)$$

với $\beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4}$; $\gamma = \frac{1}{2} - \alpha$; $\alpha \in \left[-\frac{1}{3}, 0\right]$

sau đó thay vào phương trình (4) để giải ra U_{n+1} :

$$M\ddot{U}_{n+1} + (1+\alpha)C\dot{U}_{n+1} - \alpha C\dot{U}_n + (1+\alpha)KU_{n+1} - \alpha KU_n = F_{n+1} \quad (4)$$

sau khi thay vào và rút gọn lại có thể viết dưới dạng:

$$K^*U_{n+1} = F_{n+1}^* \quad (5)$$

với:

$$K^* = \frac{1}{\Delta t^2 \beta} M + \frac{\gamma(1+\alpha)}{\Delta t \beta} C + (1+\alpha)K \quad (6)$$

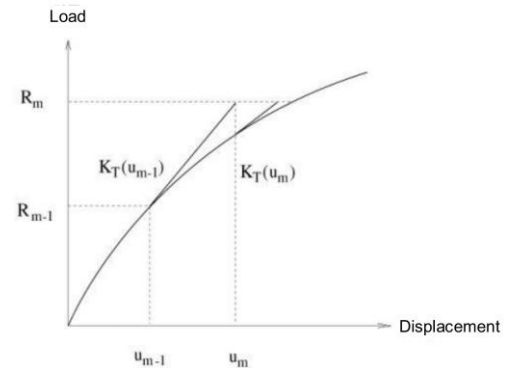
$$F_{n+1}^* = F_{n+1} + M \left[\frac{1}{\Delta t^2 \beta} U_n + \frac{1}{\Delta t \beta} \dot{U}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{U}_n \right] -$$

$$(1+\alpha)C \left[\frac{\gamma}{\Delta t \beta} U_n + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \dot{U}_n + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \ddot{U}_n \right] + \alpha C \dot{U}_n + \alpha KU_n \quad (7)$$

Sau khi giải được U_{n+1} thay vào phương trình (2), (3) giải được $\ddot{U}_{n+1}, \dot{U}_{n+1}$ nếu bài toán tuyến tính phương trình (5) có thể giải trực tiếp ra kết quả, nếu bài toán là phi tuyến thì sẽ áp dụng phương pháp Newton–Raphson để giải ra kết quả.

2.2 Tóm tắt phương pháp Newton - Raphson

Phương pháp lập được minh họa như hình sau:



Hình 1. Phương pháp Newton - Raphson

$$K_T(u_{m-1})(u_{m-1} + \Delta u_m) = R_m; K_T = K + K_\sigma; K_\sigma = f(u) \quad (8)$$

theo khai triển Taylor ta có:

$$K_T(u_{m-1})(u_{m-1} + \Delta u_m) = K_T(u_{m-1})(u_{m-1}) + \frac{dR}{du_{m-1}} \Delta u_m \quad (9)$$

với $\frac{dR}{du_{m-1}} = K_T(u_{m-1}); R_m - R_{m-1} = R^R; u_m = u_{m-1} + \Delta u_m$

$$\text{Viết lại có được } K_T(u_{m-1})\Delta u_m = R^R \quad (10)$$

trong đó:

$K_T(u_{m-1})$ - ma trận độ cứng ứng với chuyển vị u_{m-1} ;

R^R - lực dư; Δu_m - bước chuyển vị; R - tải trọng tác dụng; u - chuyển vị.

2.3 Phân tích mất ổn định

Phương trình cơ bản bài toán phân tích mất ổn định thể hiện như sau:

$$[K - \lambda G(r)] \Psi = 0 \quad (11)$$

Ở đây: K - ma trận độ cứng; λ - ma trận giá trị riêng;

$G(r)$ - ma trận độ cứng hình học dưới tác dụng của véc tơ tải trọng r ; Ψ - ma trận véc tơ riêng tương ứng (dạng mode).

Trong bài toán ma trận độ cứng và ma trận độ cứng hình học được đưa vào tính toán ở thời điểm sau chịu tải trọng bản thân và bị đứt cáp. Giá trị riêng là cơ sở tính ra hệ số mất ổn định, hệ số lớn

hơn 1 có nghĩa kết cấu chưa bị mất ổn định dưới tác dụng của tải trọng đang xét, hệ số nhỏ hơn 1 có nghĩa là kết cấu bị mất ổn định dưới tác dụng của tải trọng đang xét.

3. Mô phỏng số và kết quả

3.1 Thông số đầu vào mô phỏng số

Để minh họa, bài báo tiến hành phân tích với cầu dây văng với các số liệu chính như sau:

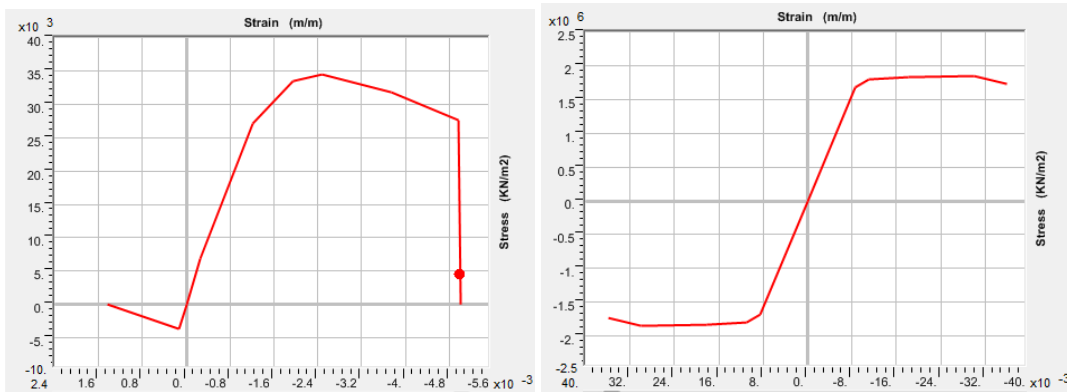
Sơ đồ kết cấu nhịp cầu: 130m+300m+130m.

Dạng mặt cắt ngang: dạng chữ π , chiều cao 3m, chiều rộng mặt cầu 30m, khoảng cách giữa hai dầm dọc là 24m; Vật liệu bê tông với các tham số $f'_c=35\text{Mpa}$; $E_c= 27789\text{Mpa}$.

Trụ tháp dạng kim cương chiều cao tháp 100m tính từ mặt cầu, trụ cao 35m; Vật liệu bê tông với các tham số $f'_c=35\text{Mpa}$; $E_c= 27789\text{Mpa}$.

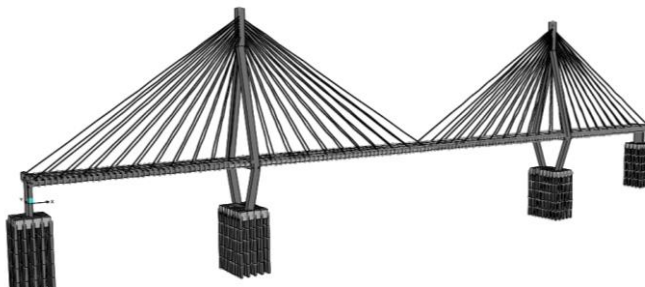
Hai mặt phẳng dây bố trí theo sơ đồ harp, diện tích bó cáp $5,027 \times 10^{-3} \text{m}^2$; $F_u=1861\text{Mpa}$; $F_y=1690\text{Mpa}$; mô đun đàn hồi ban đầu $E=196500\text{Mpa}$; Cốt thép thường và dự ứng lực không xét đến trong bài báo này.

Trong bài báo sử dụng phần tử shell cho hệ dầm cầu, phần tử cáp có xét đến biến dạng (độ võng của cáp) cho cáp văng và phần tử thanh cho tháp cầu. Các thông số phi tuyến vật liệu được thể hiện như hai hình sau:

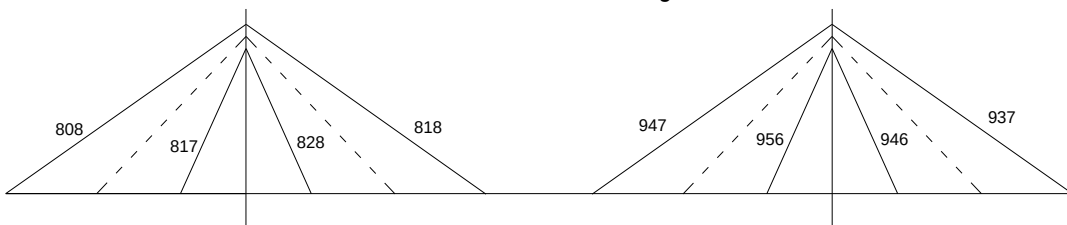


Hình 2. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cáp văng

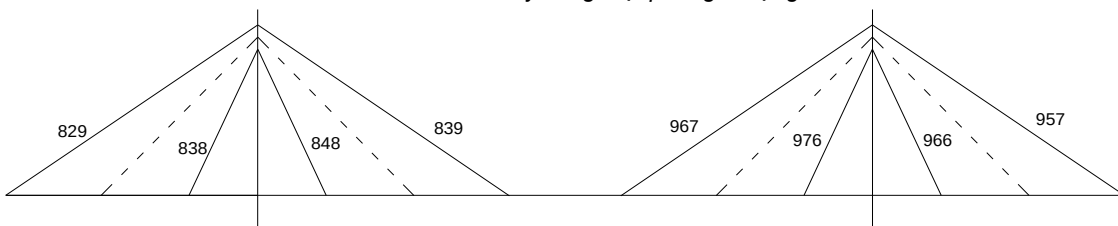
Mô hình kết cấu có dạng như sau:



Hình 3. Mô hình kết cấu công trình cầu



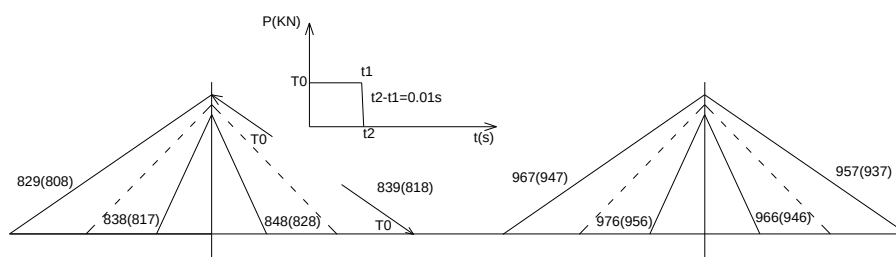
Hình 4. Sơ đồ dây văng mặt phẳng thượng lưu



Hình 5. Sơ đồ dây văng mặt phẳng hạ lưu

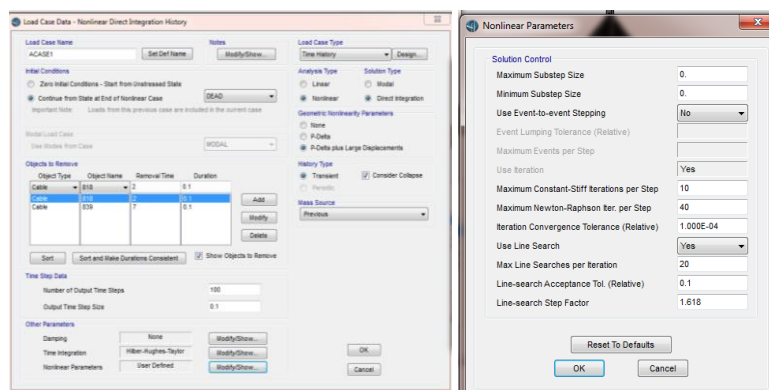
Tải trọng tác dụng ban đầu là trọng lượng bản thân của kết cấu.

Tải trọng đứt cáp được miêu tả là tải trọng thay đổi theo thời gian độ lớn bằng lực căng, hiện tượng đứt xảy ra trong 0,01s như minh họa ở hình bên dưới.



Hình 6. Minh họa tải trọng đứt cáp

Bài toán phân tích: đứt cáp với các kịch bản khác nhau đồng thời chịu tác dụng của trọng lượng bản thân. Quá trình tính toán được hỗ trợ bằng phần mềm CSI bridge v20 [11], với các thông số phi tuyến như sau:



Hình 7. Các tham số khi phân tích phi tuyến

3.2 Các trường hợp tính toán và kết quả

a. Các trường hợp tiến hành phân tích như sau:

Do sau thời gian khai thác cáp văng bị hư hỏng, ăn mòn và bị mối nên hiện tượng đứt cáp là một sự cố (tai nạn) đối với công trình vậy bài báo giả thiết đứt cáp theo các kịch bản như sau:

- Trường hợp 1: đứt dây dài phía trụ neo (cáp 808, 829) hoặc phía giữa nhịp (cáp 818, 839);
- Trường hợp 2: đứt dây ngắn phía trụ neo (cáp 817, 838) hoặc phía giữa nhịp (cáp 828, 848);
- Trường hợp 3: đứt dây dài và dây kế tiếp phía trụ neo (cáp 808, 809 và 829, 830) hoặc phía giữa nhịp (cáp 818, 819 và 839, 840);
- Trường hợp 4: đứt dây dài và 02 dây kế tiếp phía trụ neo (cáp 808, 809, 810 và 829, 830, 831) hoặc phía giữa nhịp (cáp 818, 819, 820 và 839, 840, 841).

Các trường hợp trên miêu tả theo trật tự thời gian như sau: dây đầu tiên (thượng lưu) đứt ở thời

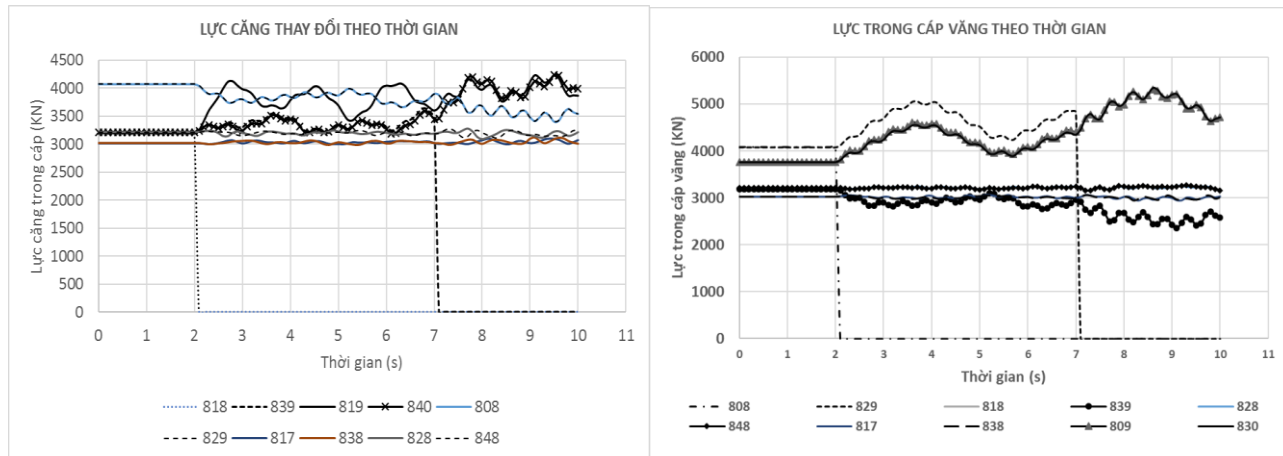
điểm 2s, dây tiếp theo (hạ lưu) đứt ở 5s (7s), tiếp tục các dây tiếp theo đứt ở thời điểm 8s, 11s, 14s và 17s.

Để thấy được phản ứng uốn xoắn đồng thời của dầm chuyển vị tại hai điểm phía thượng lưu và hạ lưu được thể hiện để phân tích (tương ứng là nút 2019 và 1717). Để làm rõ phản ứng của tháp, chuyển vị đỉnh tháp theo phương dọc cầu và ngang cầu được thể hiện (tương ứng là nút số 6). Để thấy rõ sự lan truyền hiện tượng đứt cáp bài báo thể hiện sự thay đổi theo thời gian lực căng trong dây ứng với các trường hợp đứt cáp miêu tả ở trên. Cuối cùng để có thể kiểm tra xem kết cấu có sụp đổ hay không bài toán phân tích ổn định cục bộ được tiến hành sau mỗi kịch bản đứt cáp như đã miêu tả ở trên.

b. Kết quả tính toán

Trường hợp 1:

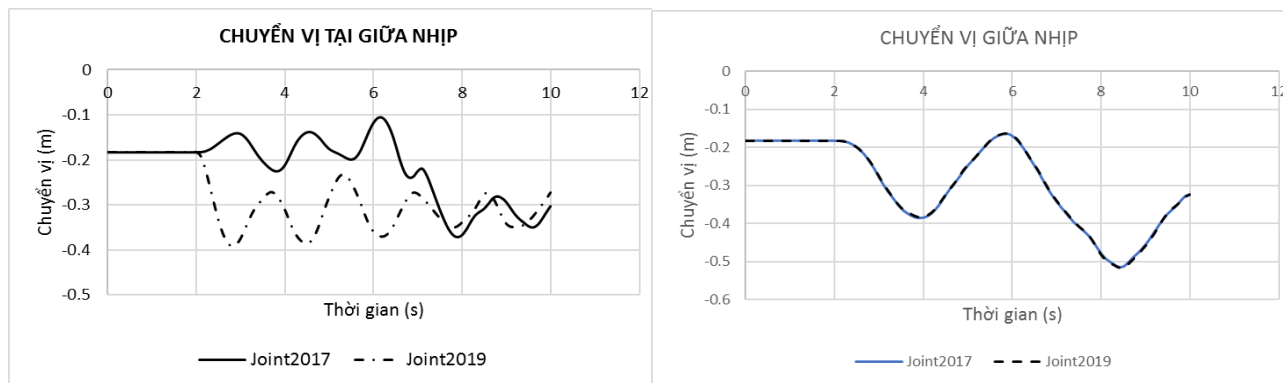
Các kết quả tính toán như sau:



Hình 8. Lực trong cáp văng thay đổi theo thời gian khi đứt cáp 818, 839 và 808, 829

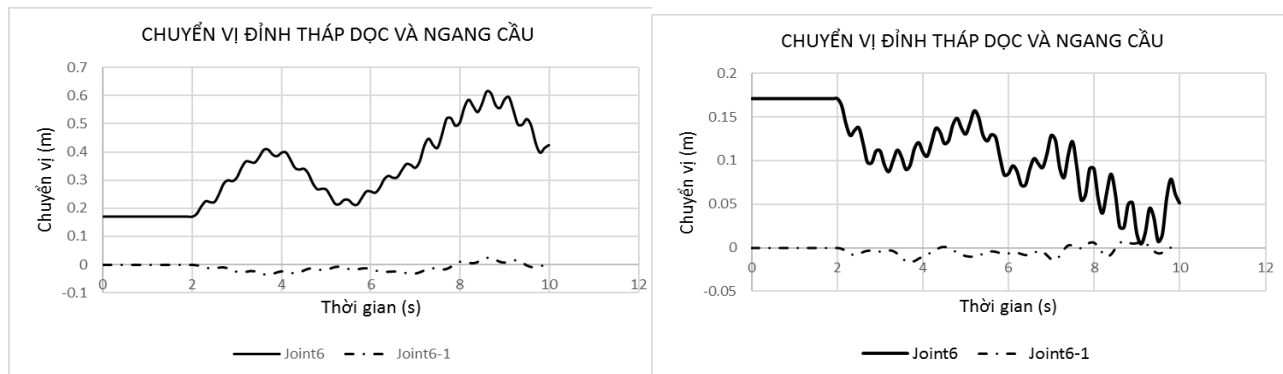
Kết quả tính toán trên cho thấy khi xảy ra đứt cáp dài phía trụ neo hoặc phía giữa nhịp lực căng cáp còn lại đối xứng qua tim cầu sẽ thay đổi và lực căng trong cáp tại thời điểm đứt tăng với lực căng ban đầu, như vậy nếu phân tích bằng mô hình 2D sẽ không thể hiện được cáp đứt trước, cáp đứt sau

như trên và phương pháp phân tích coi lực cáp đứt là lực tĩnh không thể thấy được hiện tượng lực căng cáp tăng trước khi bị đứt. Hơn nữa, lực căng trong cáp lân cận của cáp đứt tăng và thay đổi lớn hơn so với các cáp còn lại, nguy cơ đứt tiếp là cao hơn các cáp còn lại.



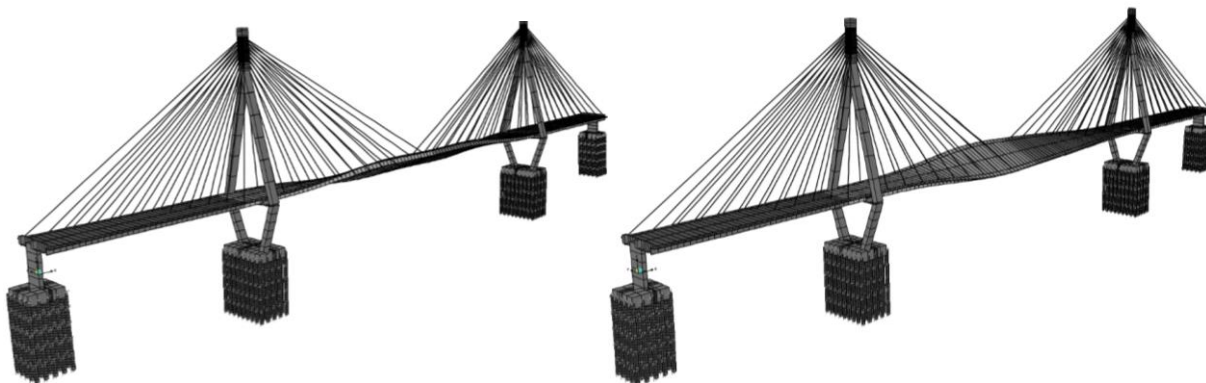
Hình 9. Chuyển vị tại giữa nhịp khi đứt cáp 818, 839 và cáp 808, 829

Kết quả chuyển vị tại hai điểm giữa nhịp khi đứt cáp dài ở giữa nhịp sẽ gây ra dao động uốn xoắn dầm tại giữa nhịp và khi đứt cáp dài phía trụ neo chỉ gây ra dao động uốn tại giữa nhịp (chuyển vị theo thời gian hai điểm này gần như trùng khớp nhau).



Hình 10. Chuyển vị đỉnh tháp khi đứt cáp 808, 829 và cáp 818, 839

Kết quả tính toán trên cho thấy chuyển vị của tháp khi đứt cáp dài phía trụ neo ảnh hưởng nhiều hơn so với đứt cáp dài phía giữa nhịp.

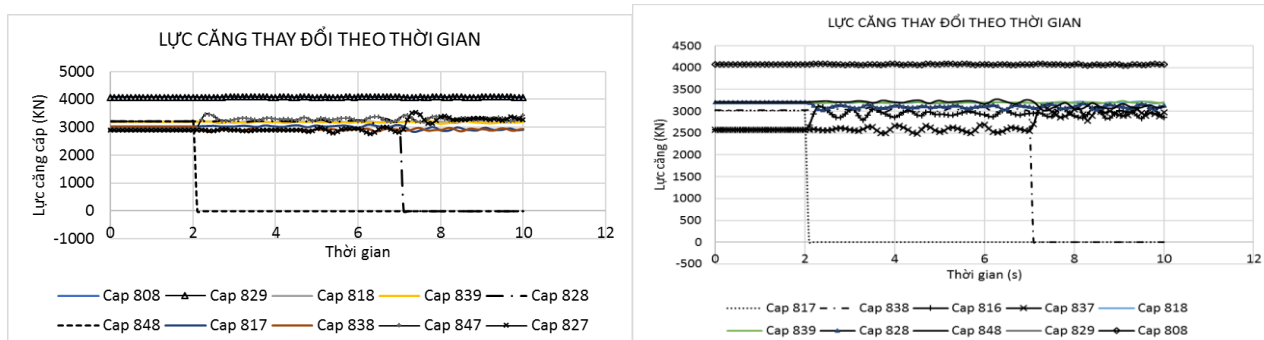


Hình 11. Dạng mất ổn định do trọng lượng bản thân khi chưa mất cáp (hệ số 3,064); khi mất 2 cáp 818 và 839 (hệ số 2,003); khi mất 2 cáp 808 và 829 (hệ số 2,057).

Kết quả trên cho thấy khi bị mất hai cáp dài cầu vẫn chưa bị mất ổn định nhưng hệ số ổn định đã giảm nhiều so với trước khi đứt cáp.

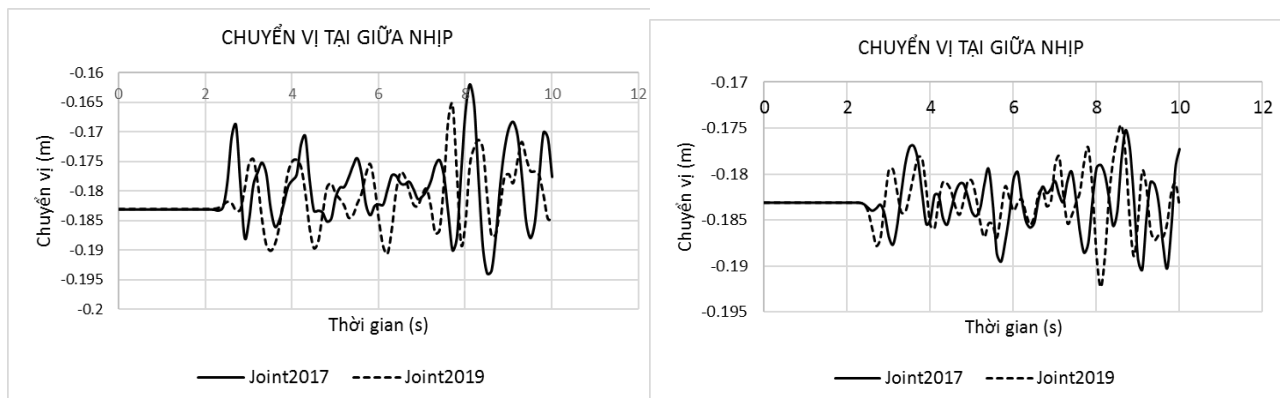
Trường hợp 2:

Các kết quả tính toán như sau:



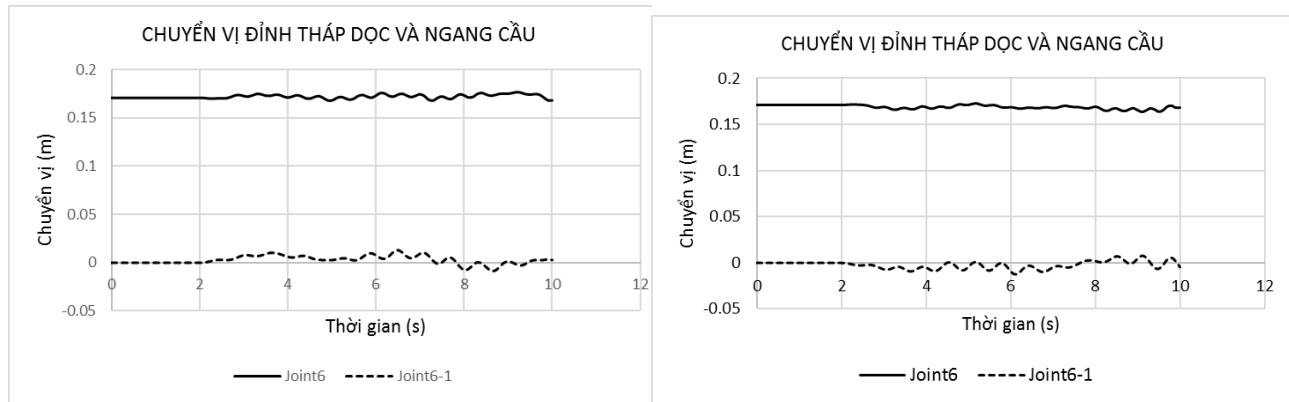
Hình 12. Lực trong cáp vắng thay đổi theo thời gian khi đứt cáp 848, 828 hay 817, 838

Kết quả trên cho thấy ảnh hưởng của sự cố đứt các cáp gần gần trụ tháp không gây ra ảnh hưởng nhiều so với các cáp còn lại mà chỉ ảnh hưởng nhỏ đến các cáp liền kề.



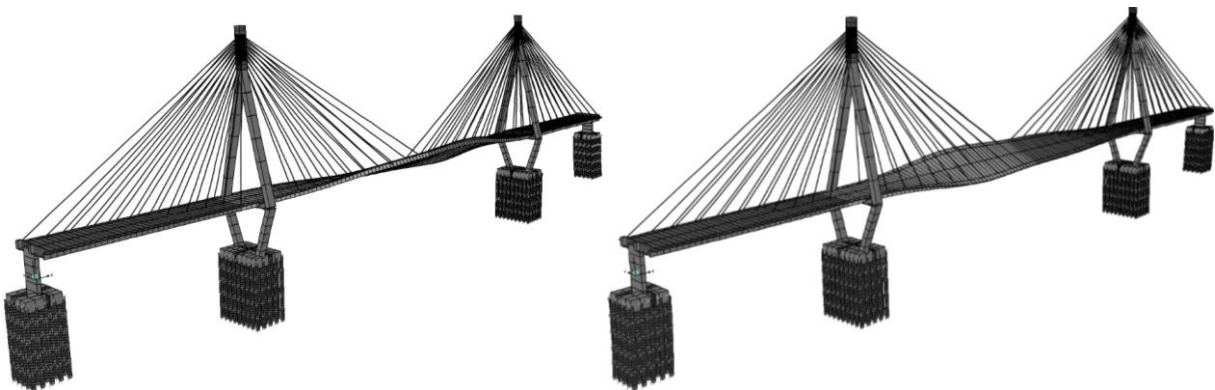
Hình 13. Chuyển vị tại giữa nhịp khi đứt cáp 828, 848 hay cáp 817, 838

Kết quả trên cho thấy chuyển vị dao động xung quanh vị trí cân bằng là vị trí trước khi xảy ra đứt cáp, kết quả cho thấy ảnh hưởng không đáng kể khi xảy ra đứt hai tổ hợp cáp này.



Hình 14. Chuyển vị tại đỉnh tháp khi đứt cáp 828, 848 hay cáp 817, 838

Kết quả trên cho thấy chuyển vị dao động xung quanh vị trí cân bằng là vị trí trước khi xảy ra đứt cáp, kết quả cho thấy ảnh hưởng không đáng kể khi xảy ra đứt hai cáp này.

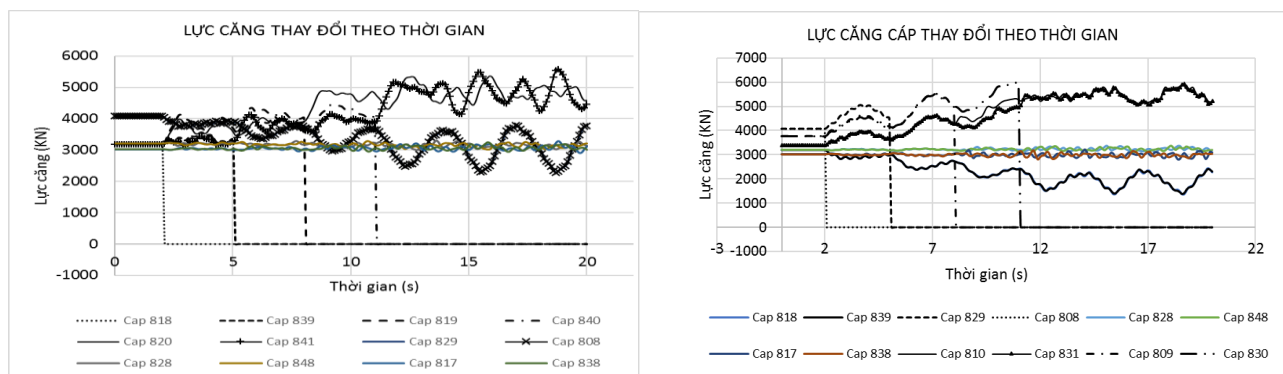


Hình 15. Mất ổn định do trọng lượng bản thân khi mất 2 cáp 828 và 848 (hệ số 3,102) và khi mất 02 cáp 817 và 838 (hệ số 3,010)

Kết quả phân tích mất ổn định trường hợp mất hai cáp gần gần trụ tháp cho thấy khả năng mất ổn định là rất thấp, hệ số này gần như không chênh lệch nhiều so với trường hợp kết cấu khi chưa đứt cáp.

Trường hợp 3:

Các kết quả tính toán như sau:



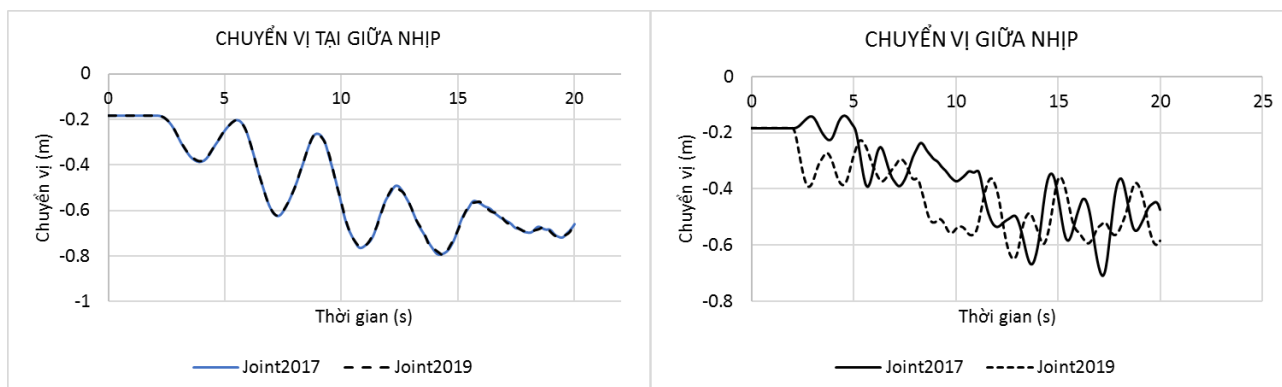
Hình 16. Lực trong cáp vắng khi đứt cáp 818, 819, 839, 840 và 808, 809, 829, 830

Kết quả tính toán trên vẫn cho thấy khi xảy ra đứt cáp dài phía trụ neo hoặc phía giữa nhịp lực căng cáp còn lại đối xứng qua tim cầu sẽ thay đổi và lực căng trong cáp tại thời điểm đứt tăng với lực

căng ban đầu, như vậy nếu phân tích bằng mô hình 2D sẽ không thể hiện được cáp đứt trước, cáp đứt sau như trên và phương pháp phân tích coi lực cáp đứt là lực tĩnh không thể thấy được hiện tượng lực

căng cáp tăng trước khi bị đứt. Hơn nữa, lực căng trong cáp kế tiếp của cáp đứt tăng và thay đổi lớn

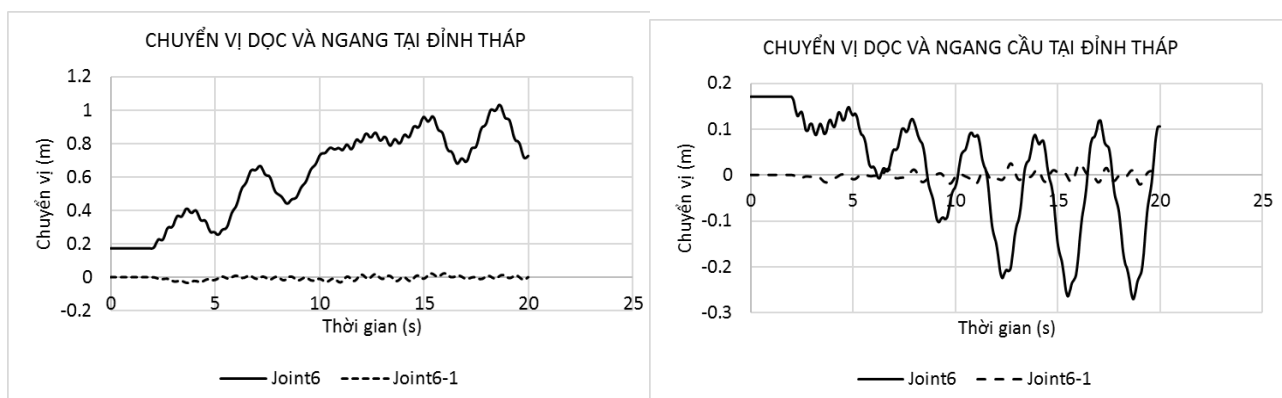
hơn so với các cáp còn lại, nguy cơ đứt tiếp là cao hơn các cáp còn lại.



Hình 17. Chuyển vị giữa nhịp khi đứt cáp 808, 809, 829, 830 và cáp 818, 819, 839, 840

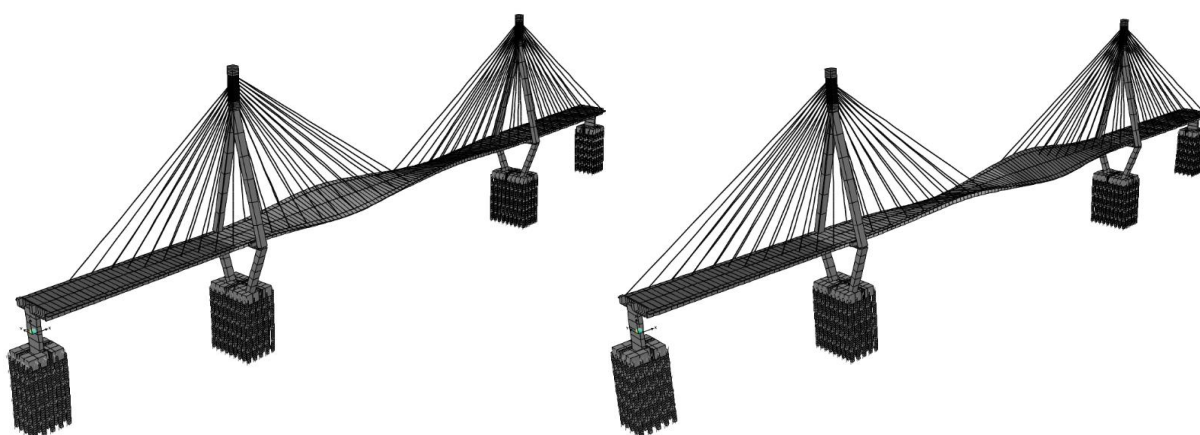
Kết quả chuyển vị tại hai điểm giữa nhịp khi đứt cáp dài ở giữa nhịp sẽ gây ra dao động uốn xoắn dầm tại giữa nhịp và khi đứt cáp dài phía trụ

neo chỉ gây ra dao động uốn tại giữa nhịp (chuyển vị theo thời gian hai điểm này gần như trùng khớp nhau).



Hình 18. Chuyển vị đỉnh tháp khi đứt cáp 808, 809, 829, 830 và 818, 819, 839, 840

Kết quả tính toán trên cho thấy chuyển vị của tháp khi đứt cáp dài phía trụ neo ảnh hưởng nhiều hơn so với đứt cáp dài phía giữa nhịp.

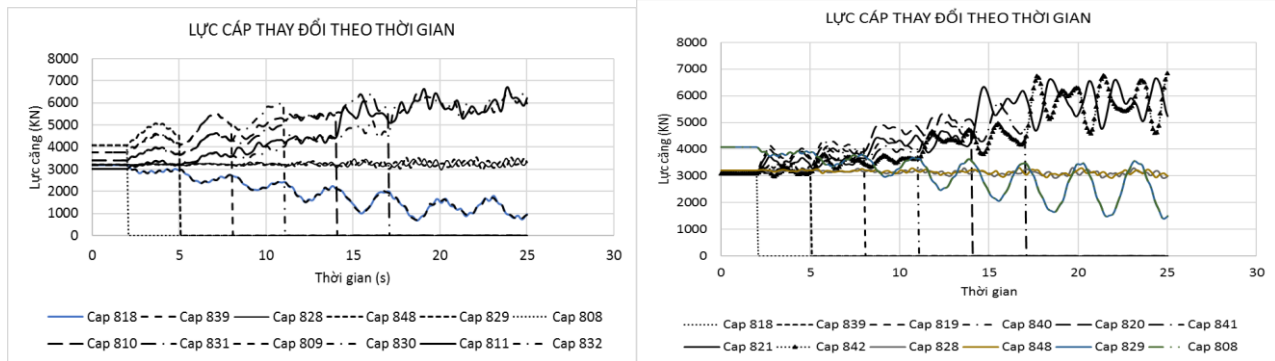


Hình 19. Mất ổn định do trọng lượng bản thân khi mất 04 cáp 808, 809 và 829, 830 (hệ số 1.8158) khi mất 04 cáp 818, 819 và 839, 840 (hệ số 1.2109)

Kết quả tính toán ở trên cho thấy đã có sự giảm rõ rệt về hệ số ổn định khi đứt 02 cáp dài, hay nói cách khác khi đứt hai cáp nguy cơ xảy ra mất ổn định là rất lớn.

Trường hợp 4:

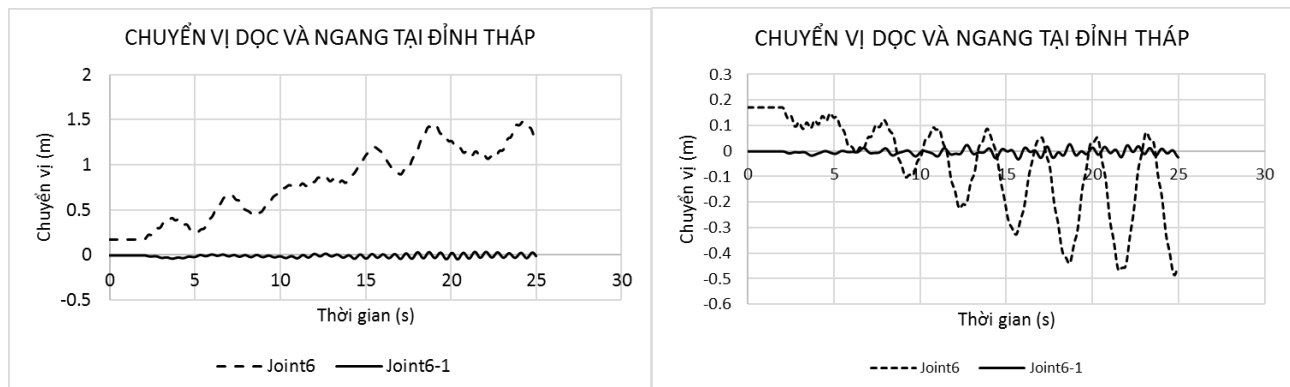
Các kết quả tính toán như sau:



Hình 20. Lực trong cáp vắng khi đứt cáp 808, 809, 810, 829, 830, 831 và 818, 819, 820, 839, 840, 841

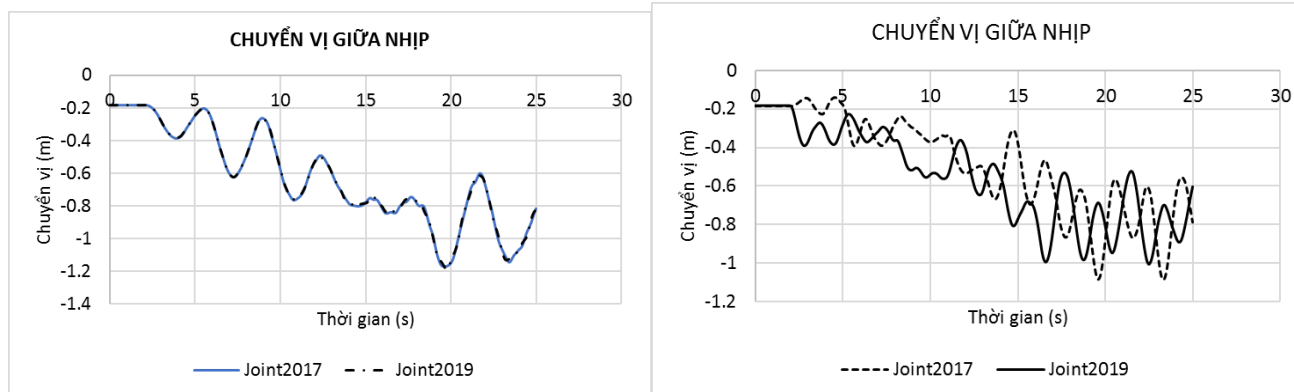
Kết quả tính toán trên vẫn cho thấy khi xảy ra đứt cáp dài phía trụ neo hoặc phía giữa nhịp lực căng cáp còn lại đối xứng qua tim cầu sẽ thay đổi và lực căng trong cáp tại thời điểm đứt tăng với lực căng ban đầu, như vậy nếu phân tích bằng mô hình 2D sẽ không thể hiện được cáp đứt trước, cáp đứt

sau như trên và phương pháp phân tích coi lực cáp đứt là lực tĩnh không thể thấy được hiện tượng lực căng cáp tăng trước khi bị đứt. Hơn nữa, lực căng trong cáp kế tiếp của cáp đứt tăng và thay đổi lớn hơn so với các cáp còn lại, nguy cơ đứt tiếp là cao hơn các cáp còn lại.



Hình 21. Chuyển vị đỉnh tháp khi đứt cáp 808, 809, 810, 829, 830, 831 và 818, 819, 820, 839, 840, 841

Kết quả tính toán trên cho thấy chuyển vị của tháp khi đứt cáp dài phía trụ neo ảnh hưởng nhiều hơn so với đứt cáp dài phía giữa nhịp.

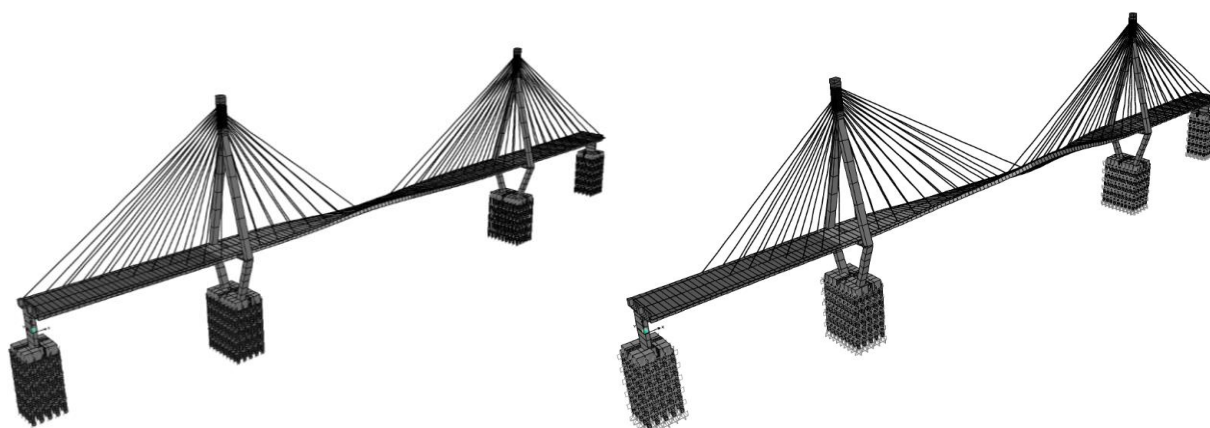


Hình 22. Chuyển vị đỉnh tháp khi đứt cáp 808, 809, 810, 829, 830, 831 và 818, 819, 820, 839, 840, 841

Kết quả chuyển vị tại hai điểm giữa nhịp khi đứt cáp dài ở giữa nhịp sẽ gây ra dao động uốn

xoắn dầm tại giữa nhịp và khi đứt cáp dài phía trụ neo chỉ gây ra dao động uốn tại giữa nhịp (chuyển

vị theo thời gian hai điểm này gần như trùng khớp nhau).



Hình 23. Mất ổn định do trọng lượng bản thân khi mất 6 cáp 818, 819, 820 và 839, 840, 841 (hệ số 0.4222) khi mất 6 cáp 808, 809, 810 và 829, 830, 831 (hệ số 0.8294)

Kết quả thể hiện ở trên cho thấy khi mất 3 cặp dài hai phía liên tiếp thì cầu dây văng với các số liệu như trên sẽ xảy ra hiện tượng sụp đổ do mất ổn định. Như vậy đối với cầu trên sẽ có một kịch bản sụp đổ lan truyền xảy ra đó là đứt lần lượt 6 cáp và cầu bị mất ổn định dẫn đến bị phá hoại.

4. Phân tích kết quả

Từ hình 8 cho thấy ảnh hưởng của sự cố đứt dây cáp dài (808, 818, 829, 839) đối với các cáp liên kề (809, 819, 830, 840) là rất lớn, lực căng trong cáp thay đổi từ (3207KN, 3766KN, 3189KN, 3766KN) tới (4242KN, 5313KN, 4238KN, 5340KN) tăng 32%, 41%, 33%, 42%. Như vậy nguy cơ gặp sự cố đứt các cáp liên kề là rất lớn so với các cáp còn lại.

Từ hình 9, 17 và 22 cho thấy khi xảy ra đứt cáp dài phía giữa nhịp theo kịch bản đã trình bày ở trên tại vị trí giữa nhịp dầm có hiện tượng xoắn uốn kết hợp (chuyển vị theo thời gian của hai điểm trên mặt cắt ngang không đều nhau), tại vị trí nhịp biên không có xuất hiện dao động uốn xoắn kết hợp.

Hình 10, 18 và 21 cho thấy khi đứt cáp chuyển vị theo phương dọc cầu bộ cáp giữa nhịp đứt sẽ ảnh hưởng nhiều đến chuyển vị trụ thấp hơn so với bộ cáp nhịp biên.

Từ hình 12, 13, 14 cho thấy ảnh hưởng của cáp ngắn đứt là không đáng kể, ít ảnh hưởng đến các bộ phận của kết cấu.

Từ hình 16 cho thấy ảnh hưởng của sự cố đứt 02 cặp cáp dài (808, 809; 829, 830; 818, 819; 839, 840) đối với các cáp liên kề (820, 841, 810, 831) là

rất lớn, lực căng thay đổi từ (3140KN, 3139KN, 3395KN, 3395KN) tới (5364KN, 5575KN, 5867KN, 5930KN) tăng 69%, 78%, 73%, 75%. Như vậy nếu các lực trong cáp thiết kế bằng 45% lực tới hạn của bó cáp thì lực căng xuất hiện trong cáp sau khi đứt hai cáp bằng 80% lực tới hạn. Do đó, nguy cơ xảy ra đứt cáp liên kề là rất lớn.

Từ hình 20 cho thấy ảnh hưởng của sự cố đứt 03 cặp cáp dài (808, 809, 810; 829, 830, 831; 818, 819, 820; 839, 840, 841) đối với các cáp liên kề (821, 842, 811, 832) là rất lớn, lực căng thay đổi từ (3102KN, 2995KN, 3016KN, 3016KN) tới (6637KN, 6839KN, 6715KN, 6475KN) tăng 114%, 128%, 123%, 115%. Như vậy nếu các lực trong cáp thiết kế bằng 45% lực tới hạn của bó cáp thì lực căng xuất hiện trong cáp sau khi đứt hai cáp bằng 97-103% lực tới hạn. Do đó có nguy cơ một hiện tượng sụp đổ lan truyền sẽ xảy ra khi hai cáp dài bị đứt. Kết hợp với kết quả hình 23 cho thấy khi ba cáp dài phía giữa nhịp bị đứt nguy cơ xảy ra sụp đổ lan truyền rất lớn vì ngoài nguy cơ đứt thêm cáp kế tiếp thì dầm còn bị mất ổn định uốn ngang.

5. Kết luận

Bài báo đã tiến hành phân tích kết cấu bằng mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến, kết quả có độ tin cậy cao do đưa được vào kết quả ứng suất dư trong kết cấu khi chịu tải trước đó. Qua kết quả phân tích trên cho thấy các cáp liên kề với cáp bị đứt sẽ bị ảnh hưởng lớn hơn so với các cáp còn lại và các cáp dài bị đứt sẽ ảnh hưởng lớn đến phản ứng động lực học của kết cấu. Với mô hình các cáp

đứt theo thời gian khác nhau cho thấy rõ hiện tượng dao động uốn xoắn xuất hiện trong dầm. Đối với cầu dây văng mặt cắt chữ π (mặt cắt hở) sẽ gặp nguy hiểm khi đứt 2 cặp cáp dài và xảy ra sụp đổ lan truyền khi đứt 3 cặp cáp dài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. PTI (2007). Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation. *Post Tension Institute*.
2. Maren Wolff and Uwe Starossek (2009). Cable loss and progressive collapse in cable-stayed bridges. *Bridge Structures Vol. 5, No. 1, March*, 17–28.
3. M. Wolff and U. Starossek (2010). Cable-loss analyses and collapse behavior of cable-stayed bridges. *IABMAS2010, The Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, July 11-15, 2010, Philadelphia, USA*.
4. Hyttinen, E. & Välimäki, J. & Järvenpää, E. (1994). Cable stayed bridges effect, of breaking of a cable. In *Cable stayed and suspension bridges, Proceedings AFPC Conference, October 12-15, 1994*.
5. Vu Hoang, Osamu Kiyomiya, Tongxiang An (2016). Experimental and dynamic response analysis of cable-stayed bridge due to sudden cable loss. *Journal of Structural Engineering Vol.62A*.
6. Nguyen Trong Nghia, Vanja Samec (2016). Cable-Stay Bridges-Investigation of Cable Rupture. *Journal of Civil Engineering and Architecture 10*, 270-279.
7. R. Dasa, A. D. Pandeyb, Soumyac, M. J. Maheshd, P. Sainie, and S. Anvesh (2016). Progressive Collapse of a Cable Stayed Bridge. *Procedia Engineering 144*, 132 – 139.
8. Harshil Jani¹ and Dr. Jignesh Amin (2017). Analysis of cable stayed bridge under cable loss. *International Journal of Bridge Engineering (IJBE)*, Vol. 5, No. 1, pp. 61-78.
9. Unified Facilities Criteria (UFC) (2016). Design of buildings to resist progressive collapse. November.
10. David N. Bilow, Mahmoud Kamara (2004). Progressive Collapse Design Guidelines Applied to Concrete Moment-Resisting Frame Buildings. *ASCE Structures Congress*.
11. Edward L. Wilson (2002). Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. *Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA*.

Ngày nhận bài: 17/6/2019.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 04/7/2019.

**ANALYSIS OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF CABLE STAYED BRIDGE BY FINITE ELEMENT
METHOD**