

KHẢO SÁT LỰC KÉO GIỚI HẠN CỦA CỤM CỐ ĐỊNH ĐẦU CÁP TRÊN TANG BẰNG TẮM ĐỆM

Nguyễn Văn Tịnh^{a,*}, Trần Văn Long^b, Trần Văn Việt^c

^a*Khoa Cơ khí, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Công ty CP Đầu tư Phát triển Công nghiệp Việt Nam,
số 16, Ngõ Nhân Hòa, đường Hải Bối, Xã Hải Bối, Huyện Đông Anh, Hà Nội, Việt Nam*

^c*Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội,
Km 10, Đường Nguyễn Trãi, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 23/9/2022, Sửa xong 25/11/2022, Chấp nhận đăng 22/12/2022

Tóm tắt

Tang cuốn cáp loại một lớp cáp, có xẻ rãnh và sử dụng bu lông cùng với tấm đệm để cố định đầu cáp trên tang được dùng phổ biến trên cầu trục và cổng trục. Việc tính toán thiết kế cụm cố định đầu cáp trên tang đã được chỉ dẫn trong các tài liệu kỹ thuật và tiêu chuẩn liên quan. Tuy nhiên, trong các tài liệu đó và các công trình nghiên cứu trước chưa thấy khảo sát lực kéo giới hạn của cụm cố định cáp thông qua việc xem xét ảnh hưởng của các thông số thiết kế cũng như tối ưu chúng như góc ôm giữa các điểm kẹp, lực ép trên các tấm đệm và số lượng bu lông tạo lực ép. Bài viết này sẽ giải quyết vấn đề đó. Ngoài ra, ứng xử của các chi tiết trong cụm cố định cũng được xem xét khi xét đến độ giãn dài của cáp thép ở trạng thái tiệm cận giới hạn trượt. Từ đó, đề xuất những giải pháp kỹ thuật nhằm tăng khả năng làm việc và độ bền lâu của cụm cố định đầu cáp bằng tấm đệm.

Từ khóa: cáp thép; tang cuốn cáp; kẹp đầu cáp; lực kẹp đầu cáp; lực ma sát.

INVESTIGATING SLIDING FORCE OF END FIXING TERMINATIONS ON A DRUM BY CLAMPS

Abstract

A single-layer rope drum that is slotted and uses bolts and clamps to fix the rope end is commonly used on overhead cranes and gantry cranes. The design calculation of rope end fixing assemblies on drums is indicated in the relevant technical documents and standards. However, in those documents and previous literature, the limited tensile force of rope fixing assemblies has not been investigated by considering the influence of design parameters as well as their optimization, such as the contact angle between clamping points, the pressure force on clamps, and the number of clamping bolts. This article will solve that problem. In addition, the behavior of the elements in the fixed assembly is also explored when considering the steel rope elongation at the asymptotic sliding state. Then, the technical solutions are proposed to increase the working capacity and the long-term durability of the rope end fixing assembly.

Keywords: steel rope; rope drum; rope end clamp; rope end clamping force; friction force.

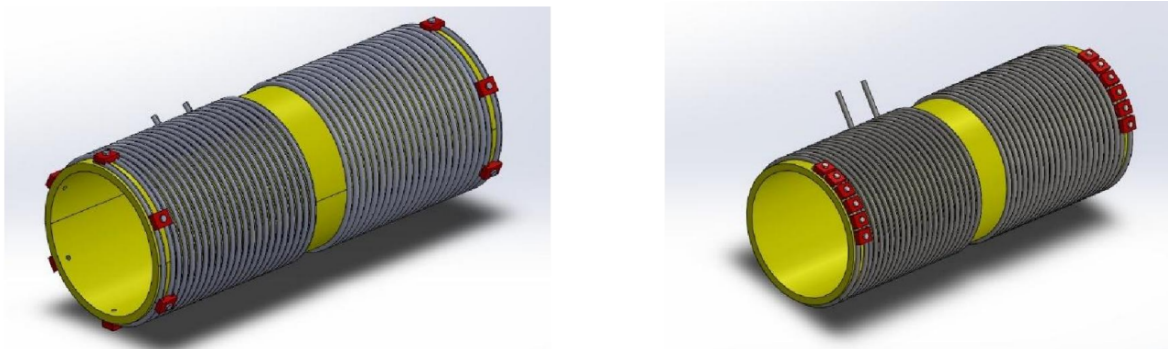
[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2023-17\(1V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2023-17(1V)-04) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Cầu trục và cổng trục được sử dụng ở hầu hết các nhà xưởng, kho bãi và bến cảng với nhiệm vụ nâng hạ, xếp dỡ và vận chuyển các vật có khối lượng lớn. Yếu tố an toàn từ khâu thiết kế, chế tạo đến vận hành chúng luôn được đặt lên hàng đầu vì nếu sự cố xảy ra sẽ gây ra thiệt hại khủng khiếp. Các

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tinhnv@huce.edu.vn (Tịnh, N. V.)

sự cố nguy hiểm có thể kể đến là đứt cáp nâng sau một thời gian dài sử dụng, tuột tải khỏi móc treo và cáp bị tuột khỏi cụm cố định đầu cáp trên tang khi chịu tải động lớn. Đối với hai sự cố đầu tiên, hoàn toàn có thể phòng tránh được bằng cách tuân thủ tuyệt đối quy trình vận hành và bảo dưỡng thiết bị. Để tránh sự cố còn lại, cần phải xử lý tốt ngay từ khâu thiết kế đối với cụm cố định đầu cáp trên tang như ứng dụng lực từ trường để tăng khả năng bám của cáp và đồng thời giảm tải cho kẹp cáp [1], cuốn các vòng cáp giảm tải phía trước cụm kẹp [2] và áp dụng các quy định thiết kế trong [3–5]. Tang xẻ rãnh, cuốn một lớp, có sử dụng các tấm đệm và bu lông để cố định đầu cáp là loại tang phổ biến nhất trên các cần trục kiểu cầu. Cụm cố định đầu cáp trên tang bằng tấm đệm và bu lông đã có hướng dẫn tính toán thiết kế, song việc coi cáp thép có tiết diện tròn và không thay đổi khi chịu tải như trong [2, 4, 5] là chưa thật chính xác. Thực tế, khi cáp chịu tải kéo lớn, cáp có xu hướng bị giảm tiết diện [6] và dẫn đến giảm khả năng làm việc của cụm cố định đầu cáp [7]. Các tiêu chuẩn thiết kế cụm cố định cáp tương tự trên tang của cơ cấu nâng cũng sử dụng các hệ số an toàn khá cao để tính toán lực kéo giới hạn [8, 9]. Sự tương tác giữa bề mặt tang, cáp thép và các tấm đệm kẹp khi chúng làm việc ở trạng thái giới hạn (cáp bắt đầu bị trượt) chưa được tìm hiểu cận kẽ. Bechtold và Saal đã tiến hành mô phỏng cũng như thử nghiệm tương tác giữa các tấm kẹp cáp và cáp thép tại điểm cố định cáp trong kết cấu thép công trình có sử dụng phần tử cáp thép [10], Smyth đã mô phỏng tương tác giữa cáp đường kính 20 mm và tang đường kính 400 mm để tìm ra được ứng suất uốn và ứng suất kéo trên cáp [11], nhóm tác giả trong [12] đã nghiên cứu xây dựng và thiết kế chế tạo một mô hình thí nghiệm khảo sát lực kẹp đầu cáp trên tang bằng tấm đệm nhằm quan sát và có những khảo nghiệm đối với cụm cố định đầu cáp này. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên cũng chưa chỉ ra các yếu tố thiết kế ảnh hưởng và tối ưu với lực kéo giới hạn của cụm cố định đầu cáp chẳng hạn như số lượng bu lông kẹp, vị trí các tấm đệm và lực ép trên mỗi điểm kẹp.



(a) Các điểm kẹp cáp cách đều nhau

(b) Các điểm kẹp liên tiếp sát nhau

Hình 1. Các phương án bố trí kẹp cáp trên tang

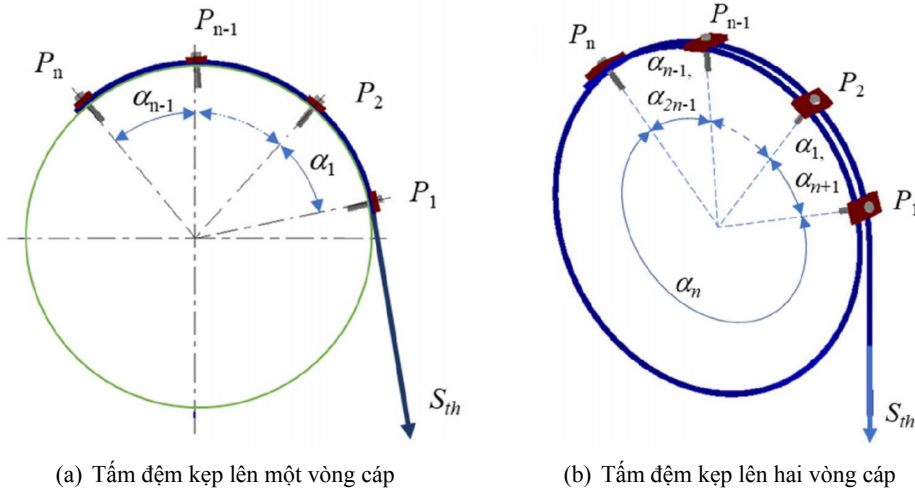
Các phương án thiết kế cụm cố định cáp trên tang thể hiện trong các bằng sáng chế như sử dụng bu lông và các tấm đệm cạnh nhau, tại mỗi điểm kẹp trên bề mặt tang có tấm cách trung gian giữa nửa tấm đệm kẹp trên và nửa dưới để ngăn ngừa lực ép quá lớn làm hỏng cáp thép [13], hay các tấm đệm xếp cạnh nhau và nằm trên thành tang, ép một cáp thép [14], cáp thép được gấp lại và tấm đệm kẹp lên hai cáp [15]. Các công trình này là giải pháp kỹ thuật tương ứng với các thiết bị và có xét đến điều kiện thiết kế cụ thể của từng loại. Ngoài ra, thực tế hiện nay có hai phương án bố trí các điểm kẹp cáp như trên Hình 1 đang song song tồn tại và ứng dụng vào thiết kế và chế tạo. Vậy mô hình nào cho hiệu quả tốt hơn? Để xây dựng thành một cơ sở lý luận khoa học cho việc thiết kế hợp lý cụm cố định đầu cáp trên tang và trả lời câu hỏi trên cần có sự khảo sát các yếu tố ảnh hưởng và đánh giá khả

năng chịu tải kéo dựa trên phân tích ứng xử của các phần tử khi chịu tải đến các giá trị tới hạn.

Trong bài viết này, nhóm nghiên cứu tiến hành khảo sát lực kéo giới hạn khi thay đổi khoảng cách giữa các điểm kẹp, giá trị lực trên các điểm kẹp và đánh giá sự dịch chuyển tương đối giữa cáp thép với các bu lông tạo lực ép lên các tấm đệm. Từ đó, nghiên cứu chỉ ra các thông số thiết kế tối ưu và đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm nâng cao khả năng làm việc và độ bền lâu của cụm cố định đầu cáp.

2. Mô hình tính toán lực kéo giới hạn của cụm cố định đầu cáp

Mô hình tính toán lực kéo giới hạn được xây dựng với n điểm kẹp phân bố đều trên đường tròn của bề mặt tang. Trên Hình 2 là hai phương án cố định đầu cáp trên tang với n tấm đệm và chúng kẹp lên một vòng cáp như Hình 2(a), kẹp lên hai vòng cáp như Hình 2(b).



Hình 2. Hai phương án cố định đầu cáp trên tang bằng bu lông và tấm đệm

Lực kéo giới hạn S_{th} được xác định chính xác có tính đến lực ma sát giữa cáp và tang tại các cung có góc ôm α_i như sau:

$$\begin{cases} S_{th} = S_1 + F_1 \\ S_1 = (S_2 + F_2)e^{\mu \cdot \alpha_1} \\ \dots\dots\dots \\ S_{n-2} = (S_{n-1} + F_{n-1})e^{\mu \cdot \alpha_{n-2}} \\ S_{n-1} = F_n e^{\mu \cdot \alpha_{n-1}} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó F_i là lực ma sát tại tấm đệm thứ i , (N); α_i là góc ôm của cáp trên tang tại cung thứ i , (rad) và S_i là lực căng của cáp thép tại vị trí ngay sau tấm đệm thứ i , (N).

Giá trị lực ma sát giới hạn tại tấm đệm thứ i được xác định bởi

$$F_i = \mu_0 \cdot P_i \quad (2)$$

trong đó P_i là lực nén lên cáp thép tại vị trí tấm đệm thứ i , (N); μ_0 là hệ số ma sát tính toán giữa đệm kẹp với cáp thép và giữa cáp thép với tang.

Tấm đệm thông dụng nhất hiện nay có rãnh hình thang và rãnh dạng cung tròn, hệ số ma sát tính toán được xác định tương ứng với hai loại này như sau:

$$\mu_0 = \mu + \frac{\mu_1}{\sin \gamma} \quad (3)$$

$$\mu_0 = \mu + \frac{4\mu_1 \sin \gamma}{2\gamma + \sin(2\gamma)} \quad (4)$$

trong đó μ là hệ số ma sát giữa bề mặt cáp và tang; μ_1 là hệ số ma sát giữa bề mặt cáp và tấm kẹp; γ là một nửa góc kẹp đối với kẹp có rãnh hình thang hoặc một nửa góc tiếp xúc giữa cáp và rãnh dạng cung tròn, (rad).

Biến đổi các công thức (1) ta được

$$S_{th} = (...((F_n e^{\mu\alpha_{n-1}} + F_{n-1})e^{\mu\alpha_{n-2}} + F_{n-2})e^{\mu\alpha_{n-3}} + ... + F_2)e^{\mu\alpha_1} + F_1 \quad (5)$$

Điều kiện ràng buộc về góc ôm giữa các điểm kẹp

$$\sum_1^{n-1} \alpha_i = 2\pi - \alpha_n \quad (6)$$

với α_n là góc của cung tròn được giới hạn bởi kẹp cáp cuối cùng và kẹp cáp đầu tiên.

Điều kiện biên của các góc ôm viết dưới dạng véc tơ như sau:

$$\alpha_{\min} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \leq \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_{n-1} \end{bmatrix}^T \leq (2\pi - (n-1)\alpha_{\min} - \alpha_n) \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

với α_{\min} là góc ôm nhỏ nhất được xác định khi hai kẹp cáp đặt sát cạnh nhau và giá trị của nó phụ thuộc vào kích thước các tấm đệm.

Đối với trường hợp kẹp cáp trên hai vòng cáp cuốn liên tiếp, lực kéo cáp giới hạn, điều kiện ràng buộc và điều kiện biên được xác định tương tự như trường hợp trên và liệt kê như sau đây:

$$S_{th} = (...((F_{2n} e^{\mu\alpha_{2n-1}} + F_{2n-1})e^{\mu\alpha_{2n-2}} + F_{2n-2})e^{\mu\alpha_{2n-3}} + ... + F_2)e^{\mu\alpha_1} + F_1 \quad (8)$$

$$\sum_1^{2n-1} \alpha_i = 4\pi - \alpha_{2n} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \alpha_{n+i}, \quad i = 1 \div n - 1 \quad (10)$$

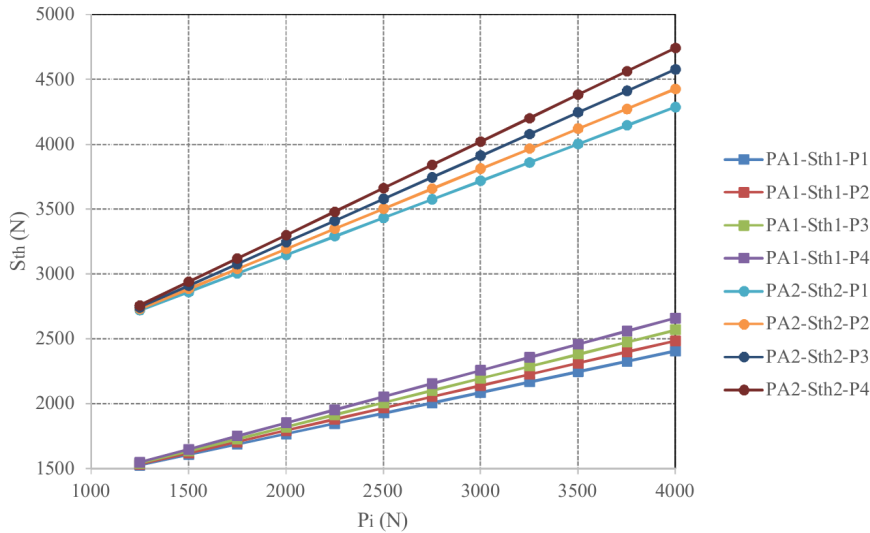
$$\alpha_{\min} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \leq \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_{2n-1} \end{bmatrix}^T \leq (2\pi - (n-1)\alpha_{\min} - \alpha_n) \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

3. Khảo sát và tối ưu một số thông số ảnh hưởng đến lực kéo giới hạn

3.1. Ảnh hưởng của các lực ép tại các vị trí điểm kẹp cáp khác nhau

Khảo sát sự thay đổi lực kéo giới hạn cho cả hai phương án bố trí các điểm kẹp. Lực ép trên mỗi điểm kẹp lần lượt được điều chỉnh tăng dần lên làm cho lực kéo giới hạn cũng tăng dần lên nhưng ở các mức độ tăng khác nhau. Trên Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa giá trị lực kéo giới hạn và lực ép ở mỗi vị trí kẹp của cụm kẹp đầu cáp gồm bốn điểm kẹp cách đều nhau 30° cho phương án PA1 – Hình 2(a) và phương án PA2 – Hình 2(b). Khi một giá trị lực ép thay đổi từ 1000 N đến 4000 N, các giá trị lực ép của các điểm kẹp còn lại giữ ở giá trị 1000 N. Hệ số ma sát tính toán giữa bề mặt tang và cáp là 0,15 và tại vị trí kẹp cáp là 0,32.

Từ kết quả khảo sát cho thấy, lực kéo giới hạn tăng tuyến tính theo giá trị lực ép. Tốc độ tăng nhanh hơn khi điều chỉnh tăng lực ép ở các điểm kẹp gần phía cuối đầu cáp hơn.



Hình 3. Ảnh hưởng của lực ép trên mỗi điểm kẹp tới lực kéo giới hạn

3.2. Ảnh hưởng của giá trị các góc ôm giữa các điểm kẹp cáp

Công thức (5) và (8) xác định lực kéo giới hạn cho hai trường hợp cụm kẹp cáp đang xem xét. Thông số góc ôm giữa các điểm kẹp trong các công thức trên nằm ở vị trí số mũ của cơ số logarit tự nhiên do đó nó có ảnh hưởng rất lớn đến giá trị lực kéo giới hạn. Các góc chịu sự ràng buộc lẫn nhau. Giá trị một góc thay đổi kéo theo các góc khác cũng thay đổi. Do đó, khảo sát lực giới hạn của cụm kẹp cáp với nhiều góc ôm giữa các điểm kẹp là rất khó. Ở đây, nghiên cứu sẽ tìm ra giá trị các góc ôm để tạo ra lực kéo giới hạn lớn nhất với các cấu hình cụm cố định đầu cáp như trên Hình 2.

Sử dụng hàm Fmincon trong Matlab để tìm góc ôm trong khi giữ nguyên số bu lông và lực nén tại mỗi điểm kẹp. Các giá trị thông số đầu vào, điều kiện biên và kết quả thu được sau khi chạy chương trình thể hiện trong Bảng 1.

Như vậy có thể thấy, góc ôm giữa các điểm kẹp có ảnh hưởng đến lực kéo giới hạn của cụm cố định đầu cáp. Lực kéo giới hạn đạt giá trị lớn nhất khi điểm kẹp cáp từ thứ 2 đến thứ n gần nhau nhất và gần đầu cuối cùng của cáp thép. Giá trị tăng 6% và 5% so với trường hợp cố định cáp ban đầu tương ứng với trường hợp Hình 2(a) và Hình 2(b).

Bảng 1. Giá trị tối ưu góc ôm giữa các điểm kẹp

Trường hợp xét	Kẹp cáp như Hình 2(a)	Kẹp cáp như Hình 2(b)
Thông số đầu vào	$n = 4; \alpha_n = 270^\circ; P_i = 1000 \text{ N};$ $\mu = 0,15; \mu_0 = 0,32,$ $5^\circ \leq \alpha_i \leq 80^\circ$	$n = 4; \alpha_n = 270^\circ; P_i = 1000 \text{ N};$ $\mu = 0,15; \mu_0 = 0,32;$ $5^\circ \leq \alpha_i \leq 80^\circ$
Kết quả thu được	$\alpha_1 = 80^\circ; \alpha_2 = 5^\circ; \alpha_3 = 5^\circ;$ $S_{th \max} = 1,52 \cdot 10^3 \text{ N}$	$\alpha_1 = 80^\circ; \alpha_2 = 5^\circ;$ $\alpha_3 = 5^\circ; S_{th \max} = 2,71 \cdot 10^3 \text{ N}$
Lực kéo giới hạn ban đầu	$S_{th} = 1,44 \cdot 10^3 \text{ N}$	$S_{th} = 2,58 \cdot 10^3 \text{ N}$
Tỷ lệ tăng lực kéo giới hạn	106%	105%

Tuy nhiên, với kết quả tối ưu thu được, do điểm kẹp cáp đầu tiên cách xa so với các điểm kẹp còn lại dẫn đến cần phải lưu ý về sự tương quan giữa biến dạng đàn hồi của cáp thép và của bu lông kẹp.

3.3. Tối ưu đồng thời lực ép và góc ôm

Theo quy định số bu lông cố định đầu cáp không được nhỏ hơn hai [2, 4]. Để lực ép lên cáp thép không quá lớn, các nhà thiết kế có thể thiết kế nhiều điểm kẹp với lực ép ở mỗi vị trí nhỏ. Vậy liệu rằng số bu lông kẹp lớn có lợi cho lực kéo giới hạn hay không? Sau đây, nghiên cứu tiến hành xây dựng bài toán tìm giá trị lớn nhất của lực kéo giới hạn khi biến số là các giá trị lực ép và góc ôm. Lực ép do các bu lông tạo ra thỏa mãn điều kiện nhỏ hơn lực giới hạn (gây bẹp cáp và điều kiện bền của bu lông) và lớn hơn hoặc bằng không. Khi giá trị lực ép bằng không, đồng nghĩa với việc bu lông tại điểm kẹp cáp đó không có tác dụng ép cáp và có thể loại bỏ.

Bảng 2. Giá trị tối ưu đồng thời lực ép và góc ôm

Trường hợp xét	Kẹp cáp như Hình 2(a)	Kẹp cáp như Hình 2(b)
Thông số đầu vào	$n = 4; \alpha_n = 270^\circ; \mu = 0,15;$ $\mu_0 = 0,32; 0 \leq P_i \leq 2000 \text{ N};$ $\sum P_i = 4000 \text{ N}; 5^\circ \leq \alpha_i \leq 80^\circ$	$n = 4; \alpha_n = 270^\circ; \mu = 0,15;$ $\mu_0 = 0,32; 0 \leq P_i \leq 2000 \text{ N};$ $\sum P_i = 4000 \text{ N}; 5^\circ \leq \alpha_i \leq 80^\circ$
Kết quả tối ưu	$\alpha_3 = 5^\circ; P_1 = P_2 = 0;$ $P_3 = P_4 = 2000 \text{ N};$ $S_{th\max} = 1,61 \cdot 10^3 \text{ N}$	$\alpha_3 = 5^\circ; P_1 = P_2 = 0;$ $P_3 = P_4 = 2000 \text{ N};$ $S_{th\max} = 2,87 \cdot 10^3 \text{ N}$
Tỷ lệ tăng lực kéo so với lực kéo giới hạn ban đầu	112%	111%
Tỷ lệ tăng lực kéo so với lực kéo giới hạn tối ưu góc ôm	106%	106%

Sử dụng hàm fmincon trong Matlab để tối ưu đồng thời lực ép và góc ôm. Các giá trị thông số đầu vào, điều kiện biên và kết quả thu được sau khi chạy chương trình thể hiện trong Bảng 2. Kết quả cho thấy, lực kéo giới hạn lớn nhất khi chỉ cần sử dụng hai bu lông (thay vì bốn bu lông như ban đầu) ở vị trí hai tấm đệm đặt sát cạnh nhau và gần với đầu cáp tự do nhất với lực ép lớn nhất lên mỗi tấm đệm. Tỷ lệ tăng giá trị lực giới hạn là đáng kể so với giá trị tính toán ban đầu (112% ở PA1 và 111% ở PA2).

4. Dịch chuyển của cáp thép ở trạng thái tiệm cận giới hạn

Vi phân chuyển vị dw của cáp thép trên một đoạn vi phân chiều dài cáp dz được xác định như sau:

$$dw = \frac{S}{EA} dz \quad (12)$$

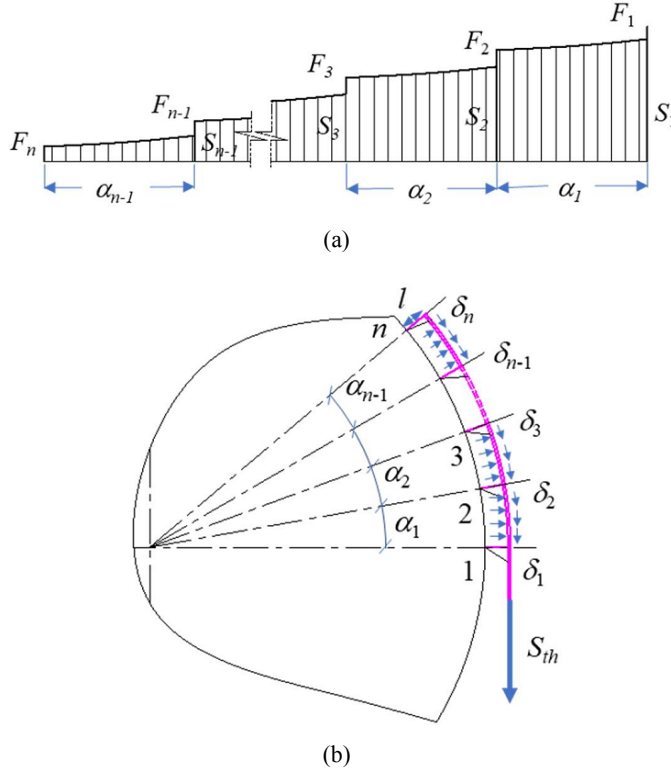
trong đó S là lực căng, (N); E là mô đun đàn hồi, N/m^2 ; A là tiết diện mặt cắt ngang của cáp thép, m^2 .

Trên mỗi khoảng cung tương ứng với góc ôm $\alpha_i = \alpha$ sẽ có một hàm xác định lực căng S_i . Phân bố lực căng trên cáp thép và lực ma sát tại các điểm kẹp đặt cách đều và sát nhau như mô tả trên Hình 4(a), dịch chuyển của các đỉnh bu lông do chịu uốn như trên Hình 4(b).

Công thức (12) được viết lại thành

$$dw_i = \frac{S_i R}{EA} d\alpha_i \quad (13)$$

với R là bán kính uốn cong cáp (tính đến tâm cáp), (m).



Hình 4. Lực căng cáp phân bố dọc theo chiều dài và chuyển vị của đỉnh bu lông

Khi các tấm đệm đặt gần sát nhau, góc ôm nhỏ khoảng $5^\circ - 10^\circ$, thành phần lực căng gây bởi lực ma sát giữa hai tấm đệm rất nhỏ. Vì vậy, để đảm bảo an toàn mà tính toán vẫn đáp ứng độ chính xác cần thiết, trong tính toán chuyển vị dài của cáp sẽ không xét đến thành phần này.

Chuyển vị tại đỉnh bu lông kẹp thứ i được xác định như sau:

$$\delta_i = \frac{64l^3 F_i}{3\pi E_{bl} d_{bl}^4} \quad (14)$$

trong đó l là chiều dài phần thân bu lông kẹp cáp chịu uốn, m; E_{bl} là mô đun đàn hồi của vật liệu chế tạo bu lông, N/m²; d_{bl} là đường kính chân ren của bu lông kẹp cáp, m.

Cáp thép và nhóm bu lông làm việc trong miền đàn hồi là một hệ siêu tĩnh, chuyển vị của chúng phải đảm bảo hệ phương trình

$$\begin{cases} \delta_1 - \delta_2 = w_1 \\ \delta_2 - \delta_3 = w_2 \\ \dots\dots\dots \\ \delta_{n-1} - \delta_n = w_{n-1} \end{cases} \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K(F_1 - F_2) = B(S - F_1) \\ K(F_2 - F_3) = B(S - F_1 - F_2) \\ \\ K(F_{n-1} - F_n) = B(S - F_1 - F_2 - ... - F_{n-1}) \\ F_1 + F_2 + ... + F_n \approx S \end{array} \right. \quad (17)$$
$$\mathbf{H} \cdot [F_1 \quad F_2 \quad \dots \quad F_n]^T = [BS \quad \dots \quad BS \quad S]^T \quad (18)$$

Lực căng cáp tăng dần lên dẫn đến cáp thép bị trượt lần lượt so với các tấm đệm theo thứ tự từ 1 đến n . Thời điểm cáp thép bị trượt so với tấm đệm đầu tiên, lực tác dụng gây uốn bu lông đầu tiên bằng lực ma sát trượt tại điểm đó. Thay giá trị $F_1 = \mu_0 P$ vào (19) ta sẽ tìm được giá trị F_n và S . Tỷ lệ lực kéo uốn bu lông thứ n so với lực kéo uốn bu lông đầu tiên và tỷ lệ lực kéo giới hạn so với lực kéo cáp tại thời điểm cáp bắt đầu trượt ở bu lông đầu tiên lần lượt là

$$z = \frac{F_n}{\mu_0 P} < 1 \quad (20)$$

$$k_a = \frac{n\mu_0 P}{S} < n \quad (21)$$

Bảng 3 khảo sát các tỷ số trên ở một số cụm kẹp có đường kính cáp thép và số bu lông khác nhau. Trong các trường hợp cụ thể này, giá trị hệ số k_a lớn nhất chỉ khoảng 40% - 60% giá trị n . Vậy, khi xem xét kết cấu của cụm cố định cáp cụ thể, hệ số an toàn cần thiết có thể lựa chọn giảm xuống mà vẫn đảm bảo cụm làm việc trong miền đàn hồi. Với số bu lông lớn và cáp thép to, lực gây uốn trên thân bu lông cuối cùng rất nhỏ khi cáp bắt đầu trượt so với tấm đệm đầu tiên.

Bảng 3. Khảo sát tỷ số z và k_a

TT	R (m)	E (N/m ²)	d_c (mm)	A (mm ²)	E_{bl} (N/m ²)	d_{bl} (mm)	$n = 2$		$n = 4$		$n = 6$		$n = 8$	
							z	k_a	z	k_a	z	k_a	z	k_a
1	0,25	1011	9,5	37	$2,1 \cdot 10^{11}$	8,77	0,93	1,04	0,69	1,2	0,45	1,5	0,27	1,9
2	0,35	1011	13	69,3	$2,1 \cdot 10^{11}$	10,77	0,89	1,06	0,56	1,4	0,30	1,8	0,15	2,4
3	0,45	1011	16	105	$2,1 \cdot 10^{11}$	14,16	0,85	1,15	0,45	1,5	0,21	2,1	0,09	2,7
4	0,60	1011	22	198,4	$2,1 \cdot 10^{11}$	18,16	0,78	1,12	0,32	1,7	0,12	2,4	0,04	3,2

Giãn dài của cáp thép trong khu vực cố định cáp và lực căng cáp tại thời điểm này tương ứng như sau:

$$w_{slide1} = K(\mu_0 P - F_n) \quad (22)$$

$$S_{slide1} = \mu_0 P + F_2 + \dots + F_n \quad (23)$$

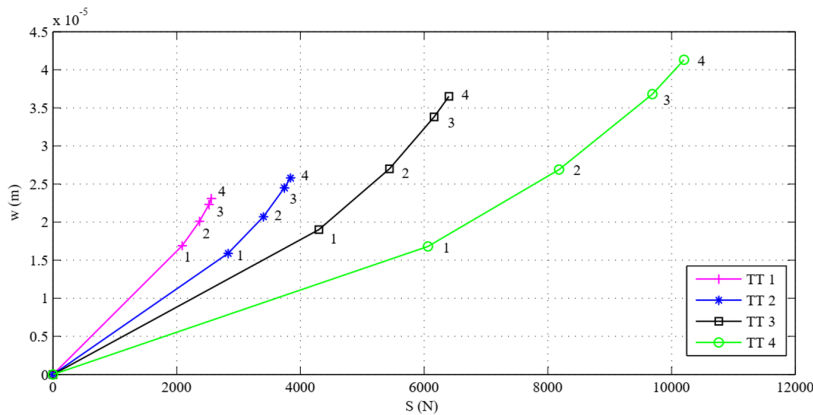
Làm tương tự như trên, tại thời điểm cáp bắt đầu trượt so với tấm đệm thứ hai ($F_1 = F_2 = \mu_0 P$), độ giãn dài và lực căng cáp là

$$w_{slide2} = K(\mu_0 P - F_n) + B(S_{slide2} - \mu_0 P) \quad (24)$$

$$S_{slide2} = 2\mu_0 P + F_3 + \dots + F_n \quad (25)$$

với lưu ý giãn dài của cáp thép trong khoảng giữa tấm đệm 1 và 2 không phụ thuộc vào chuyển vị của bu lông kẹp đầu tiên nữa.

Hai giá trị trên hoàn toàn xác định được cho lần lượt các điểm kẹp. Trên Hình 5 là khảo sát giá trị của chúng với bốn cụm kẹp như trong Bảng 3 (đồ thị từ trái qua phải ứng với cụm kẹp có thứ tự từ 1 đến 4 và với bốn bu lông kẹp). Khoảng lực căng cáp tăng giữa hai thời điểm cáp trượt so với hai tấm đệm liên tiếp là không đồng đều. Chênh lệch lực căng giữa hai thời điểm cáp trượt ở hai tấm đệm cuối cùng nhỏ hơn rất nhiều so với các điểm còn lại. Giá trị lực căng cáp ở hai thời điểm này chỉ chênh nhau khoảng 2% đến 6%. Như vậy, mặc dù với bốn tấm đệm nhưng cáp đã bị trượt ở tấm thứ 3 thì nó cũng nhanh chóng bị trượt hoàn toàn do lực động.



Hình 5. Giãn dài và lực căng cáp tương ứng khi cáp trượt so với các tấm đệm

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng mô hình toán học tính toán lực kéo giới hạn của cụm cố định đầu cáp trên tang bằng tấm đệm với các điều kiện ràng buộc và điều kiện biên cho cả hai phương án thiết kế cụm cố định ở dạng tổng quát. Mô hình này phục vụ phân tích đánh giá một cách toàn diện các yếu tố ảnh hưởng đến lực giới hạn.

Phân tích cho thấy, sử dụng số bu lông vừa đủ đảm bảo lực ép lớn nhất mà cáp không bị bẹp, các tấm đệm đặt sát nhau với không gian cố định cáp không đổi thì cho hiệu quả nhất.

Nghiên cứu chỉ dẫn việc lựa chọn hệ số an toàn trong thiết kế cụm cố định đầu cáp để đảm bảo cụm làm việc trong miền đàn hồi.

Trường hợp cụm cố định đầu cáp làm việc trong miền tiệm cận giới hạn, lực căng cáp thép và chuyển vị của cáp không đều nhau ở mỗi thời điểm trượt. Khi điểm kẹp cáp sát cuối cùng bị trượt, điểm kẹp cuối cùng ngay sau đó sẽ bị trượt nhanh chóng. Đặc điểm này cần đặc biệt lưu ý để đảm bảo an toàn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Tịnh, N. V., Trang, T. Q. (2020). Nghiên cứu ứng dụng lực từ trên các bộ truyền động bằng cáp thép. *Tạp chí cơ khí Việt Nam*, 10(31-38).
- [2] Vũ Liêm Chính, Phạm Quang Dũng, T. Q. T. (2002). *Cơ sở thiết kế máy xây dựng*. Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [3] Feyrer, K. (2000). *Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit*. Zweite Auflage, Springer.
- [4] SEB 666211 Beiblatt 1:1985-08 (1985). *Fördertechnik - Seiltrommeln - Berechnung der Schraubenverbindung der Seilklemmen*.
- [5] Scheffler, M. (1994). *Grundlagen der Fördertechnik - Elemente und Triebwerke*. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.
- [6] Feyrer, K. (2015). *Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability*. 2nd edition, Springer.
- [7] Ridge, I. M. L., Teissier, J. M., Verreet, R. (2018). *Simulating the effect of wire rope "safety" clamps on rope terminations*. Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH.
- [8] EN 1993-1-11 (2006). *Design of steel structures - Part 1-11: Design of structures with tension components*.
- [9] BS EN 12927:2019 (2004). *Safety requirements for cableway installations designed to carry persons - Ropes*.
- [10] Bechtold, M., Saal, H. (2005). [Tragverhalten lösbarer Seilklemmen für Spiralseile](#). *Stahlbau*, 74(11): 809–819.
- [11] Smyth, A. (2018). Simulation of Overhead Crane Wire Ropes Utilizing LS-DYNA. *Proceedings of the 15th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, MI, USA*, 1–12.
- [12] Tịnh, N. V., Nam, N. T., Dũng, C. T., Minh, P. V., Dũng, P. Q. (2021). Nghiên cứu thiết kế và chế tạo mô hình thí nghiệm khảo sát lực kẹp đầu cáp trên tang bằng tấm đệm. *Tạp chí khoa học công nghệ hàng hải*, 10:310–315.
- [13] Kallenberger, H. J. (1999). *Clamping mechanism for securing a rope to a winch drum*. United States Patent.
- [14] Liebherr-Components Biberach GmbH (2012). *Seiltrommel und Seilrolle für Faserseiltriebe*. Deutsches Patent-und Markenamt.
- [15] Liebherr-Components Biberach GmbH (2017). *Seiltrommel sowie Faserseiltrieb mit einer solchen Seiltrommel*. Deutsches Patent-und Markenamt.