NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SỰ MẤT ỔN ĐỊNH CỦA CỘT THỔI PHỒNG

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BUCKLING OF AN INFLATABLE COLUMN

Nguyễn Quang Tùng*

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam[1]

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nqtung@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 27/3/2023; Sửa bài / Revised: 10/5/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 19/5/2023)

Tóm tắt - Trong bài báo này, công thức xác định lực tới hạn cho cột màng mỏng thổi phồng chịu nén đã được tổng hợp. Giá trị lực tới hạn không những phụ thuộc vào mô men quán tính của tiết diện, chiều dài cột, điều kiện liên kết mà còn phụ thuộc vào áp suất thổi phồng, định hướng của vật liệu. Các phép đo thực nghiệm cũng đã được thực hiện với các cột thổi phồng có kích thước hình học đồng nhất, được cấu tạo từ một loại vải kỹ thuật duy nhất, tuy nhiên được định hướng khác nhau. Các phép đo cũng được thực hiện với các giá trị áp suất thổi phồng khác nhau để định lượng quan hệ giữa lực tới hạn - áp suất thổi phồng; lực tới hạn - định hướng vật liệu. Các kết quả thu được từ thực nghiệm sau đó được kiểm chứng với các giá trị lý thuyết. Sự chênh lệch giữa kết quả thực nghiệm và giải tích là không lớn. Điều đó khẳng định tính đúng đắn của lý thuyết đã được phát triển trước đây cũng như sự chính xác của các phép đo thực nghiệm.

Từ khóa - Cột thổi phồng; mất ổn định; lực tới hạn; màng trực giao; định hướng bất kỳ

Abstract - In this paper, the formula for determining the critical force for the inflatable column under compression has been synthesized. This critical force depends not only on the moment of inertia of the section, the length of the column, and the boundary conditions, but also on the inflation pressure and material orientation. Experimental measurements were also performed with inflatable columns that have uniform geometric dimensions and are made from the same technical fabric, but different material orientations. Measurements are also made with different internal pressure values to quantify the relation between the critical force - inflate pressure; critical force - material orientation. The experimental results are then verified with theoretical values. The difference between experimental and analytical results is not large. That confirms the correctness of the previously developed theory as well as the accuracy of experimental measurements.

Key words - Inflatable column; buckling; critical force; orthotropic membrane; arbitrary orientation

1. Giới thiệu chung

Ngày nay, bên cạnh các các loại vật liệu cổ điển được dùng trong xây dựng như bê tông cốt thép và thép, nhiều loại vật liệu composite cũng đã và đang được sử dụng rộng rãi, một trong số đó là vật liệu vải kỹ thuật. Các tấm vải kỹ thuật này thường được tạo hình thành những ống kín, được thổi khí vào để có thể chịu được tải trọng bản thân cũng như chịu các tải trọng khác gọi là các ống thổi phồng. Các ống thổi phồng này được liên kết với nhau để tạo nên khung chịu lực chính trong rất nhiều công trình xây dựng trên thế giới như mái vòm sân vận động, nhà triển lãm, các nhà tạm dùng trong trường hợp khẩn cấp hoặc các lều trại quân đội, các cầu tạm,...

Hình 1. *Kết cấu nhà thổi phồng [1]*

Dạng kết cấu này được gọi chung là kết cấu thổi phồng. Ưu điểm của dạng kết cấu mới này là quá trình xây dựng nhanh, có thể tháo dỡ và chuyển đến nơi khác một cách nhanh chóng, tiện lợi. Tải trọng bản thân của kết cấu nhỏ nên sẽ giảm thiểu trọng lượng bản thân công trình...

Hình 2. *Kết cấu cầu có sử dụng ống thổi phồng [2]*

Với tầm quan trọng như vậy, ngày càng có nhiều nghiên cứu về ứng xử của kết cấu thổi phồng. Những nghiên cứu đầu tiên được tập trung vào ứng xử của dầm màng mỏng thổi phồng. Comer và Levy [3] đã đề xuất những biểu thức giải tích đầu tiên về quan hệ ứng suất - biến dạng cũng như tải trọng gây phá hoại một ống công-xôn màng mỏng thổi phồng ở áp suất thấp. Trong nghiên cứu đó, tác giả đã xây dựng mô hình ống tuân theo quy luật chuyển động cổ điển của Euler-Bernoulli; vật liệu là đẳng hướng và đàn hồi tuyến tính. Trong những năm tiếp theo, Webber [4] đã mở rộng lý thuyết của Comer và Levy trong trường hợp dầm màng mỏng thổi phồng chịu một tác động phức hợp uốn-

[1] The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Quang Tung)

xoắn để dự đoán các ảnh hưởng của mô-men xoắn lên độ võng và tải trọng gây phá hoại công trình.

Bên cạnh dầm thổi phồng, cột và vòm thổi phồng cũng là những cấu kiện chịu lực chính trong công trình. Tuy nhiên, ứng xử của cột màng mỏng thổi phồng chưa được đầu tư nghiên cứu nhiều. Đặc biệt là hiện tượng uốn dọc, một chỉ tiêu quan trọng cần được đánh giá đối với các cấu kiện chịu nén như cột, vòm trong công trình thổi phồng.

Fichter [5] đã sử dụng nguyên lý cực tiểu hóa thế năng toàn phần để tính toán lực tới hạn cho cột thổi phồng được cấu tạo từ vật liệu đồng chất, đẳng hướng. Trong đó, áp suất thổi phồng đã làm tăng khả năng chống lại biến dạng cắt cho tiết diện. Những năm sau đó, NASA [6] đã tiếp tục công bố các chuyên khảo, đề xuất các quy trình để dự đoán sự uốn dọc của ống màng mỏng thổi phồng dưới tác dụng của các loại tải trọng tĩnh khác nhau.

Dựa trên nguyên lý cân bằng công ảo, David và Zhang [7] đã xây dựng mô hình phần tử hữu hạn để phân tích ứng xử phi tuyến của kết cấu thổi phông dạng thanh. Mô hình tính toán này đã kể đến công do áp suất thổi phồng, biến dạng thể tích kết cấu cũng như hiệu ứng $P-\Delta$. Các mô phỏng số đã chỉ ra rằng, việc kể đến công của áp suất thổi phồng chính là nhân tố cơ bản để tính toán chính xác độ cứng và khả năng chịu lực của kết cấu thổi phồng. Ngoài ra, dưới tác dụng của lực nén dọc trục, sự xuất hiện các vết nhăn của tấm vải ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn dọc của cột thổi phồng.

Cùng trong khuôn khổ sử dụng vật liệu đồng chất, đẳng hướng, Le van và Wielgosz [8], đã cải tiến lý thuyết tính toán của Fichter bằng cách phát triển các công thức trong hệ quy chiếu Lagrange trên cơ sở cân bằng công ảo. Tác giả và cộng sự đã giải bài toán với giả thiết chuyển vị và biến dạng lớn để có thể kể đến tất cả các thành phần phi tuyến và ảnh hưởng của áp suất trong các phương trình cân bằng. Từ đó có thể đề xuất được các công thức giải tích cho phép xác định được quan hệ tải trọng – chuyển vị của cấu kiện dạng thanh chịu uốn và chịu nén dọc trục.

Apedo và cộng sự [9], [10] đã sử dụng mô hình dầm Timoshenko 3D để xây dựng lý thuyết tính toán kết cấu màng mỏng thổi phồng được cấu tạo từ vật liệu có ứng xử trực giao. Các công thức được phát triển trong hệ quy chiếu Lagrang, sử dụng nguyên lý cân bằng công ảo để đề xuất các phương trình cân bằng phi tuyến. Từ đó phân tích ứng xử của các kết cấu dạng thanh trong các lều thổi phồng.

TT Nguyen và cộng sự [11], [12] đã mở rộng các nghiên cứu của Apedo và cộng sự [9], [10] để xây dựng lý thuyết tính toán và mô hình phần tử hữu hạn cho bài toán mất ổn định của thanh thổi phồng chịu uốn dọc. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã phân tích được ảnh hưởng của áp suất thổi phồng đến lực tới hạn của thanh chịu nén. Ảnh hưởng của mô hình vật liệu trực giao cũng được ước lượng từ việc so sánh với các mô hình lý thuyết được phát triển bởi Fichter [5], Le van và Wielgosz [8].

Nguyen [13], đã mở rộng lý thuyết tính toán của Le van và Wielgosz [8] bằng cách áp dụng mô hình ứng xử vật liệu trực giao cho bài toán thanh thổi phồng chịu nén. Nhóm nghiên cứu đã đề xuất phương trình tính toán lực tới hạn cho thanh chịu nén trong trường hợp vật liệu trực giao có các phương trực giao trùng với trục làm việc của cột thổi phồng.

Nguyen [14] đã tiếp tục mở rộng nghiên cứu kết cấu màng mỏng thổi phồng được cấu tạo từ vật liệu trực giao cho trường hợp tổng quát – phương trực giao của vật liệu không trùng với hệ trục làm việc của cột. Nhóm đã thực hiện các phép thay đổi trục tọa độ để đề xuất biểu thức tính giá trị lực tới hạn của cột màng mỏng thổi phồng.

Trong các nghiên cứu trước [6], [7], [8], [11], [12], [13], [14] ứng xử của cột màng mỏng thổi phồng chỉ được nghiên cứu bằng phương pháp giải tích và mô phỏng số, chưa có nghiên cứu thực nghiệm thông qua đo đạc thực tế. Trong bài báo này, cột thổi màng mỏng thổi phồng được đo đạc thực nghiệm để nghiên cứu ứng xử khi chịu uốn dọc. Kích thước của các cột thổi phồng được thí nghiệm là đồng nhất, cùng được cấu tạo từ một loại vải kỹ thuật như nhau nhưng với nhiều định hướng vật liệu khác nhau. Các phép đo cũng được thực hiện với các giá trị áp suất thổi phồng khác nhau để định lượng quan hệ giữa lực tới hạn – áp suất thổi phồng; lực tới hạn – định hướng vật liệu. Các kết quả thu được từ thực nghiệm sau đó được so sánh với các giá trị lý thuyết [14], để kiểm chứng lý thuyết cũng như đánh giá sự chính xác của các phép đo thực nghiệm.

2. Mất ổn định của cột màng mỏng thổi phồng

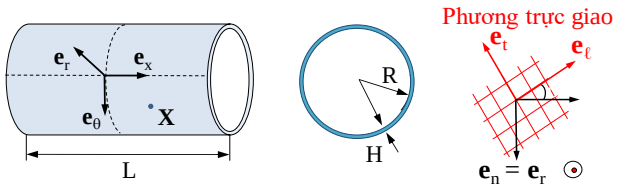
2.1. Kích thước hình học của cột ở trạng thái thổi phồng

Lý thuyết về sự thổi phồng của cột màng mỏng đã được nhóm nghiên cứu Nguyen và cộng sự [15] thực hiện. Theo đó:

- Cột màng mỏng thổi phồng có bán kính R và chiều dài L.

- Cột được tạo bởi vật liệu trực giao, góc tạo bởi phương trực giao và trục cột được gọi là góc định hướng vật liệu và ký hiệu là α, (xem Hình 3).

- Cột được thổi phồng đến giá trị áp suất p.



Hình 3. *Kích thước hình học ban đầu của ống*

Ở trạng thái thổi phồng, cột có bán kính $r=k_\theta R$ và chiều dài $\ell=k_x L$. Trong đó, k_θ, k_x lần lượt là các hệ số biểu hiện sự thay đổi bán kính và chiều dài của cột ở trạng thái thổi phồng.

2.2. Mất ổn định của cột màng mỏng thổi phồng

Xét cột màng mỏng được liên kết khớp hai đầu, có bán kính r, chiều dài ℓ, góc định hướng vật liệu là α, chịu áp suất thổi phồng p và chịu lực nén dọc trục F.

Theo Nguyen [14], lực dọc tới hạn sẽ được trích xuất từ phương trình bậc 2 (1):

$$F^2\frac{\Omega^2 I_0}{S_0}-F\left[\Omega^2\left(E_x+\frac{P}{S_0}\right)I_0+\left(P+kG_{\theta x}S_0\right)\left(1+\frac{\Omega^2 I_0}{S_0}\right)\right] +\Omega^2\left(E_x+\frac{P}{S_0}\right)I_0\left(P+kG_{\theta x}S_0\right)=0 \quad (1)$$

Trong đó:

- I_0 : Là mô men quán tính của tiết diện ngang;
- S_0 : Là diện tích tiết diện ngang;
- p : Áp suất thổi phồng cột màng mỏng;
- $P = p\pi r$: Hợp lực của áp suất thổi phồng tại đầu cột;
- r : Là bán kính của tiết diện ngang của cột;
- ℓ : Là chiều dài cột;
- $\Omega = \dfrac{n\pi}{\ell}$
- k : Là hệ số điều chỉnh biến dạng cắt, lấy bằng 0,5 trong trường hợp cột có tiết diện tròn;
- E_x : Mô đun đàn hồi của vật liệu theo phương trục cột;
- $G_{\theta x}$: Mô đun chống cắt của vật liệu trong mặt phẳng làm việc.

Đặt:

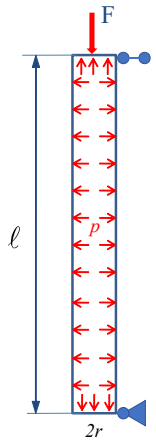
$$A = \frac{\Omega^2 I_0}{S_0}$$

$$B = -\left[\Omega^2\left(E_x + \frac{P}{S_0}\right)I_0 + \left(P + kG_{\theta x}S_0\right)\left(1 + \frac{\Omega^2 I_0}{S_0}\right)\right]$$

$$C = \Omega^2\left(E_x + \frac{P}{S_0}\right)I_0\left(P + kG_{\theta x}S_0\right)$$

Phương trình bậc 2 này cho hai giá trị của F . Trong thực tế, với các giá trị số hiện tại, ta nhận được một giá trị hữu hạn và một giá trị khác quá cao để có thể chấp nhận được về mặt vật lý. Do đó, lực tới hạn được lấy theo công thức (2):

$$F_{cr} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2)$$



Hình 4. *Cột màng mỏng thổi phồng chịu uốn dọc*

3. Thí nghiệm uốn dọc cột màng mỏng thổi phồng

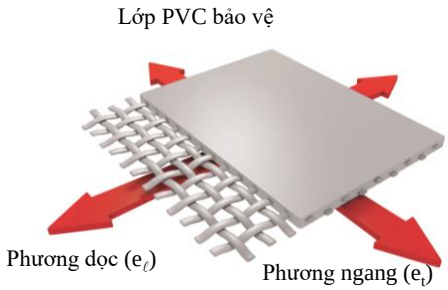
Trong nghiên cứu này, ứng xử của cột màng mỏng thổi phồng sẽ được nghiên cứu bằng các phép đo thực nghiệm. Cột thổi phồng có bán kính $R = 0,1m$, dài $L = 2,5m$, được cấu tạo vật liệu vải kỹ thuật có hệ số đàn hồi như sau:

- $E_\ell H = 300kN/m$;
- $E_t H = 300kN/m$;
- $G_{\ell t} H = 9,5kN/m$
- $\nu_{\ell t} = 0,25$.

Góc định hướng vật liệu α được thay đổi từ 0° cho đến 90° với số gia 15°. Áp suất thổi phồng p thay đổi từ 0 đến 60 kPa với số gia 10 kPa.

3.1. Định hướng vật liệu vải kỹ thuật

Vải kỹ thuật được cấu tạo từ 3 thành phần: Lớp PVC bảo vệ và hai phương trực giao được hợp bởi sợi vải theo phương ngang, sợi vải theo phương dọc (xem Hình 5).



Hình 5. *Các phương trực giao của vải kỹ thuật*

Trong quá trình tạo hình, nếu cắt các khuôn vải theo các phương khác nhau, hợp với phương dọc của cuộn vải các góc định hướng α khác nhau sẽ cho phép tạo được các cột màng mỏng có định hướng vật liệu khác nhau (xem Hình 6). Góc định hướng này được đo bằng thước đo độ, có độ chính xác đến 1°.

Hình 6. *Định hướng khuôn vải so với trục dọc cuộn vải*

3.2. Dụng cụ thí nghiệm

3.2.1. Thiết bị điều chỉnh áp suất

Một máy nén khí được sử dụng để cung cấp không khí liên tục, đảm bảo áp suất bên trong ống luôn ổn định. Giá trị áp suất này được điều chỉnh thủ công bằng cách sử dụng van điều khiển (xem Hình 7a), được kết nối với đồng hồ đo áp suất BOURDON VV 24364 (xem Hình 7b). Một phép đo khác chính xác hơn thu được từ cảm biến áp suất HBM P8AP, cho phép đo chính xác áp suất ở nhiệt độ từ −40°C đến 80°C (xem Hình 7c). Thiết bị này được kết nối với bộ thu tín hiệu HBM Spider8® để ghi lại các biến thể áp suất theo thời gian.

Để đảm bảo an toàn trong quá trình thí nghiệm, áp suất bên trong cột thổi phồng được giới ở mức 70kPa thông qua bộ giới hạn áp suất, xem Hình 8.

a) Van điều chỉnh

b) Đồng hồ đo áp suất

c) Cảm biến đo áp suất HBM P8AP/500bar

Hình 7. *Van điều chỉnh áp suất và hai thiết bị đo áp suất*

Hình 8. *Bộ giới hạn áp suất*

Hệ thống cấp khí, van điều chỉnh áp suất cũng như các cảm biến áp suất được tổ hợp lại trong một bảng điều khiển như Hình 9.

Hình 9. *Bảng điều chỉnh áp suất*

3.2.2. Cảm biến đo chuyển vị

Cảm biến đo chuyển vị loại HBM WA/50mm được sử dụng (xem Hình 10). Đây là các cảm biến có lõi pít tông có dịch chuyển 0,625mm cho 1mV/V. Phạm vi nhiệt độ là −40°C đến 80°C. Các cảm biến này được kết nối với bộ thu nhận HBM Spider8®, cho phép ghi lại các giá trị dưới dạng hàm thời gian.

Hình 10. *Cảm biến đo chuyển vị HBMWA/50mm*

3.2.3. Cảm biến đo lực

Cảm biến đo lực sử dụng cho nghiên cứu này là loại Thame Side 650 S-Type (xem Hình 11). Cảm biến này cho phép đo được lực có độ lớn tối đa 500kg. Phạm vi nhiệt độ là −40°C đến 95°C. Các cảm biến này được kết nối với bộ thu nhận HBM Spider8®, cho phép ghi lại các giá trị dưới dạng hàm thời gian.

Hình 11. *Cảm biến đó lực 650 S-Type Thames Side*

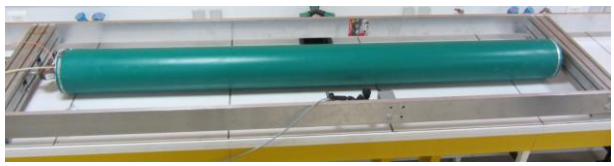
3.2.4. Trung tâm thu nhận tín hiệu HBM Spider8®

HBM Spider8® là một hệ thống đo lường điện tử cho phép so khớp các đại lượng điện với các đại lượng cơ và nhiệt khác nhau (xem Hình 12). Bộ thu nhận này được hỗ trợ tám kênh đầu vào cho phép kết nối với các cảm biến khác nhau. Toàn bộ hệ thống được kết nối với máy tính thông qua phần mềm Catman. Các kết quả đo được lưu trong một tệp ở định dạng ASCII cho phép đọc trực tiếp thông tin trong Excel.

Hình 12. *Bộ thu nhận tín hiệu HBM Spider8®*

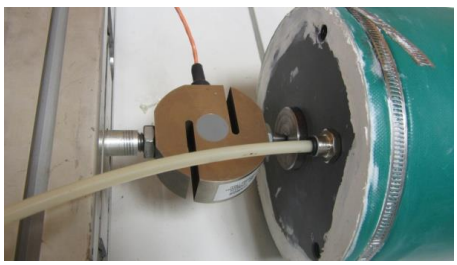
3.3. Mô hình thí nghiệm

Mô hình cột màng mỏng thổi phồng liên kết hai đầu khớp chịu lực dọc trục được thực hiện nhờ một khung nhôm định hướng (xem Hình 13).



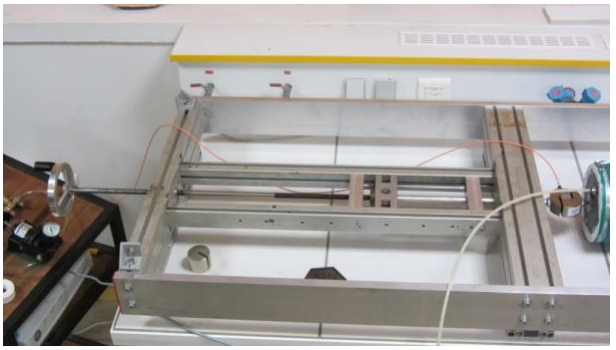
Hình 13. *Mô hình thí nghiệm*

Hai đầu của cột màng mỏng thổi phồng được tựa lên các mũi nhọn, đảm bảo đầu cột có thể xoay tự do tại điểm liên kết. Trong đó, một đầu cột được liên kết với hệ thống gia tải và cảm biến đo lực (xem **Hình 14**).



Hình 14. *Đo lực tới hạn*

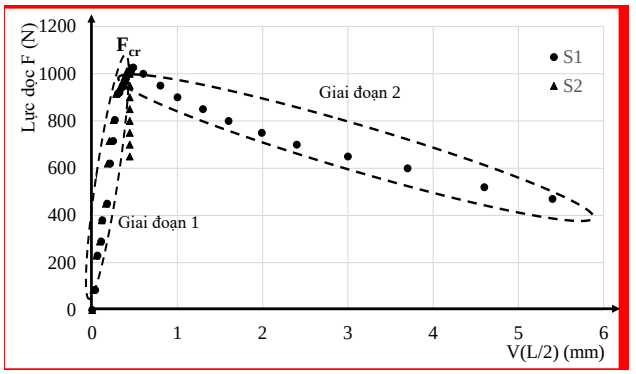
Trong nghiên cứu này, việc gia tải được thực hiện bằng phương pháp chuyển vị. Một van xoay được nối với hệ bulông và cảm biến đo lực. Xoay van cho phép tăng/giảm chuyển vị đầu cột (xem Hình 15), áp lực tác dụng lên cảm biến đo chuyển vị sẽ cho phép đo được lực tác dụng lên cột.



Hình 15. *Hệ thống gia tải dọc trục bằng phương pháp kiểm soát chuyển vị*

Hai cảm biến đo chuyển vị S1 và S2 được canh chỉnh đối xứng trên cùng một tiết diện tại vị trí giữa cột, cho phép đo chuyển ngang vị của cột (xem Hình 16).

Hình 16. *Đo chuyển vị ngang của cột*



Hình 17. $\alpha = 0^0$ - $p = 10kPa$ - *Quan hệ F – V(L/2)*

Tiến hành thí nghiệm nén cột thổi phồng, ta thu được quan hệ giữa lực dọc *F* và biến dạng (bao gồm biến dạng của tiết diện ngang và chuyển vị ngang) tại tiết diện giữa cột V(L/2) - được đo bởi hai cảm biến đo chuyển vị S1 và S2 (xem Hình 17). Đường quan hệ giữa *F – V(L/2)* này bao gồm hai giai đoạn:

- ***Giai đoạn 1***: Lực nén chỉ gây ra biến dạng dọc trục, cột chỉ bị ngắn lại và tăng đường kính. Do đó, trước khi cột bị mất ổn định thì cả hai cảm biến S1 và S2 đều sẽ thu được giá trị tăng dần, tỷ lệ với tải trọng tác dụng.

- ***Giai đoạn 2***: Tiếp tục tăng lực nén dọc trục, khi lực nén vượt qua lực tới hạn F_{cr} của cột. Cột sẽ bị cong hẳn sang một bên – uốn dọc. Theo kết quả đo của trường hợp $\alpha = 0^0$ - $p = 10kPa$, sau khi vượt qua một thời điểm nhất định, chuyển vị đo được của cảm biến S1 tăng nhanh, trong khi đó, chuyển vị đo được của cảm biến S2 không tăng nữa. Điều này chứng tỏ cột đã bị uốn dọc. Ta có thể xác định giá trị lực tới hạn F_{cr} ứng với lúc chuyển vị thu được của cảm biến S2 không thay đổi nữa.

4. Kết quả và thảo luận

Các kết quả thí nghiệm được tổng hợp lại và so sánh với kết quả thu được từ công thức (1) nhằm đánh giá tương đối sự chính xác của lý thuyết cũng như của các phép đo thực nghiệm.

4.1. Ảnh hưởng của áp suất thổi phồng đến lực tới hạn của cột

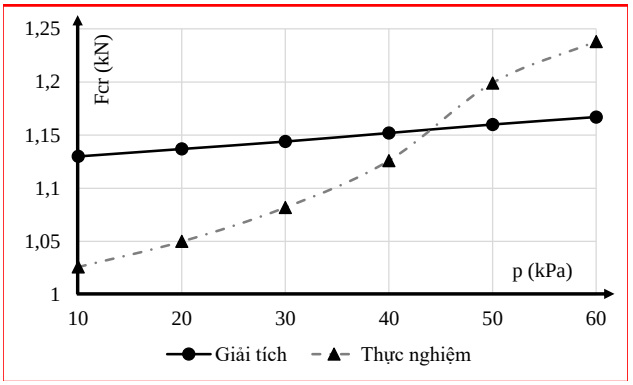
Để nghiên cứu ảnh hưởng của áp suất thổi phồng đến lực tới hạn F_{cr} của cột, các phép đo đã được thực hiện với trường hợp định hướng vật liệu $\alpha = 0^0$, áp suất thổi phồng p thay đổi từ 10 kPa – 60 kPa, số gia 10 kPa. Các kết quả được tổng hợp trong Bảng 1 và Hình 18.

Kết quả cho thấy, giá trị lực tới hạn F_{cr} tỷ lệ thuận với áp suất thổi phồng. Điều này là hợp lý do áp suất thổi phồng càng lớn thì cột có độ cứng càng lớn. Chênh lệch giữa giá trị lực tới hạn ở áp suất p = 10 kPa và 60 kPa là 20,6%.

Các kết quả so sánh lực tới hạn thu được giữa phương pháp giải tích và thực nghiệm cũng có sự tương đồng khi sai số lớn nhất là dưới 10%.

Bảng 1. $\alpha = 0^0$ - *Lực tới hạn* F_{cr} *(kN) vs p (kPa)*

p (kPa)	F_{cr} (kN)		
	Giải tích	Thực nghiệm	Chênh lệch (%)
10	1,130	1,026	-9,15%
20	1,137	1,050	-7,63%
30	1,144	1,082	-5,48%
40	1,152	1,126	-2,25%
50	1,160	1,199	3,41%
60	1,167	1,238	6,05%



Hình 18. $\alpha = 0^0$ - *Lực tới hạn* F_{cr} *(kN) vs p (kPa)*

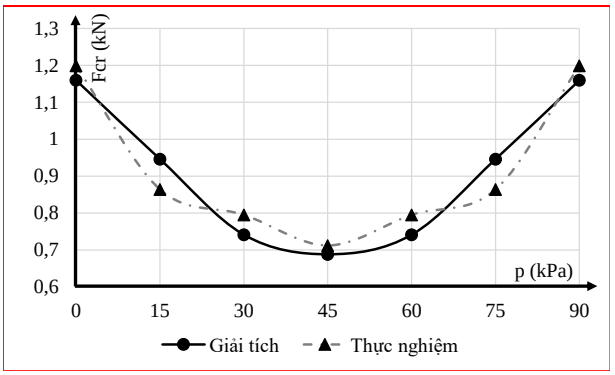
4.2. Ảnh hưởng của định hướng màng mỏng đến lực tới hạn của cột

Để nghiên cứu ảnh hưởng của định hướng màng mỏng đến lực tới hạn của cột, áp suất thổi phồng đã được giữ cố

định ở giá trị p = 50 kPa. Định hướng màng mỏng α của các mẫu thử được thay đổi từ 0º đến 90º với số gia là 15º. Trên thực tế, do vật liệu có tính đối xứng nên chỉ cần chế tạo 4 mẫu thử với các định hướng 0º, 15º, 30º, 45º. Các mẫu thử có định hướng 60º, 75º và 90º sẽ có kết quả đo lần lượt giống với các mẫu 30º, 15º và 0º. Các kết quả được tổng hợp trong Bảng 2 và Hình 19.

Bảng 2. *p = 50 kPa - Lực tới hạn F_{cr} (kN) vs α^0*

α	Fcr (kN)		
	Giải tích	Thực nghiệm	Chênh lệch (%)
0º	1,160	1,199	3,41%
15º	0,946	0,864	-8,62%
30º	0,741	0,795	7,22%
45º	0,688	0,712	3,45%
60º	0,741	0,795	7,22%
75º	0,946	0,864	-8,62%
90º	1,160	1,199	3,41%



Hình 19. *p = 50 kPa - Lực tới hạn F_{cr} (kN) vs α^0*

Giá trị lực tới hạn F_{cr} giảm khi các phương trực giao của tấm vải (phương thớ vải) không trùng với trục cột. Cụ thể, lực tới hạn đạt giá trị lớn nhất khi góc định hướng $\alpha = 0^0; 90^0$. Giá trị lực tới hạn đạt giá trị bé nhất ở góc định hướng $\alpha = 45^0$. Chênh lệch giá trị lớn nhất và bé nhất của lực tới hạn F_{cr} là 68,4%.

So sánh với các giá trị lý thuyết cũng cho thấy sự tương đồng khi sai số lớn nhất là dưới 10%.

5. Các kết luận

Các phép đo thực nghiệm lực tới hạn của cột màng mỏng thổi phồng chịu uốn dọc đã được thực hiện. Theo đó, lực tới hạn phụ thuộc rất lớn vào định hướng vật liệu và áp suất thổi phồng:

- Định hướng vật liệu ảnh hưởng lớn đến các giá trị mô đun dọc theo trục của cột. Do đó, dù được cấu tạo bởi cùng một loại vật liệu, nhưng nếu vật liệu được định hướng khác nhau thì sẽ làm thay đổi khả năng chịu lực của cột. Cụ thể, khi vật liệu được định hướng ở góc 45^0 sẽ có khả năng chịu lực bé nhất.

- Áp suất thổi phồng có ảnh hưởng tích cực đến độ cứng của cột. Áp suất thổi phồng càng lớn thì khả năng chịu lực của cột càng lớn. Tuy nhiên, giá trị áp suất này cũng được giữ ở một mức độ nhất định để đảm bảo an toàn cho kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Dawsongroup, “Tectoniks Excels at The Showman’s Show”, dawsongroup.co.uk, 2022, [Online] Available: https://dawsongroup.co.uk/tectoniks-excels-at-the-showmans-show/, [Accessed May 18, 2023].

[2] Charpente Concept, “Pont de Val Cenis”, charpente-concept.com, 2023, [Online] Available: https://www.charpente-concept.com/realisations/pont-de-val-cenis/, [Accessed 18.05.2023].

[3] R. L. Comer and S. Levy, “Deflections of an inflated circular cylindrical cantilever beam”, *AIAA Journal*, vol. 1, no. 7, pp. 1652–1655, 1963.

[4] JPH. Webber, “Deflections of inflated cylindrical cantilever beams subjected to bending and torsion”, A*eronaut Journal*, vol. 86, no. 858, pp. 306–312, 1982.

[5] WB. Fichter, *A theory for inflated thin-wall cylindrical beams*, NASA Technical Note, 1966.

[6] NASA, *Buckling of thin-walled circular cylinders*. Technical Report, NASA Space vehicle design criteria. NASA SP-8007; 1968.

[7] Davids WG, Zhang H., “Beam finite element for nonlinear analysis of pressurized fabric beam-columns”. *Engineering Structures*, vol. 30, no. 7, pp. 1969 -1980, 2008.

[8] L.V. A and C. Wielgosz, “Bending and buckling of inflatable beams: some new theoretical results”, *Thin-Walled Structures*, vol. 43, no. 8, pp. 1166 -1187, 2005.

[9] K. Apedo, S. Ronel, E. Jacquelin, M. Massenzio, and A. Bennani, “Theoretical analysis of inflatable beams made from orthotropic fabric”, *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 12, pp. 1507-1522, 2009.

[10] KL. Apedo. *Numerical modeling of inflatable structures made of orthotropic technical textiles: application to the frames of inflatable tents*. PhD thesis. University of Claude Bernard Lyon 1; 2010.

[11] T.-T. Nguyen, S. Ronel, M. Massenzio, K.L. Apedo, and E. Jacquelin, “Analytical buckling analysis of an inflatable beam made of orthotropic technical textiles”, *Thin-Walled Structures*, vol. 51, pp. 186–200, 2012.

[12] T.-T. Nguyen, S. Ronel, M. Massenzio, E. Jacquelin, K.L. Apedo, and P.-D. Huan, “Numerical buckling analysis of an inflatable beam made of orthotropic technical textiles”, *Thin-Walled Structures*, vol. 72, pp. 61–75, 2013.

[13] N. Q. Tung, *Contribution à l'étude du gonflage, de la flexion et du flambement de tubes membranaires orthotropes pressurisés*, Doctoral thesis, Ecole Centrale de Nantes, France, 2013.

[14] Q. T. Nguyen, “Buckling of an inflated orthotropic membrane column with an arbitrarily oriented orthotropy basis”, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 18-22, 2022.

[15] Q. T. Nguyen, J. C. Thomas, L. v. A, “An analytical solution for an inflated orthotropic membrane tube with an arbitrarily oriented orthotropy basis”, *Engineering Structures*, vol. 56, pp. 1080-1091, 2013.