

NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ỐNG COMPOSITE CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG DI ĐỘNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ VÀ THỰC NGHIỆM

Nguyễn Việt Hà^{a,*}, Phạm Tiến Đạt^b, Lê Trường Sơn^b

^a*Khoa Kỹ thuật Cơ sở, Trường Đại học Trần Đại Nghĩa,
189 đường Nguyễn Oanh, quận Gò Vấp, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

^b*Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 đường Hoàng Quốc Việt, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 19/02/2019, Sửa xong 29/07/2019, Chấp nhận đăng 29/07/2019

Tóm tắt

Bài báo tiến hành thiết lập phương trình phi tuyến động lực học của ống composite chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động, trong đó ống được đặt trên liên kết cứng và trên liên kết đàn hồi. Xây dựng mô hình thực nghiệm xác định đáp ứng động của ống composite trên liên kết cứng và đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động trong ống. Kết quả thí nghiệm cho phép mở rộng hướng nghiên cứu mô phỏng số nhằm lựa chọn được các thông số hợp lý cho các kết cấu dạng ống trụ. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm này làm cơ sở cho việc kiểm chứng mức độ phù hợp của phương pháp lý thuyết và thực nghiệm. Qua so sánh, kết quả thực nghiệm và tính toán lý thuyết là khá tương đồng về quy luật, sai số có thể chấp nhận được với điều kiện và trang thiết bị thí nghiệm hiện có.

Từ khoá: ống composite; tải trọng di động; thực nghiệm; liên kết cứng; liên kết đàn hồi.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHOD TO STUDY DYNAMIC RESPONSES OF THE COMPOSITE TUBE UNDER INSIDE MOVING LOAD

Abstract

The paper establishes the dynamic nonlinear equation of composite tube under moving pressure, in which the tube is placed on the fixed and elastic foundation. The experimental model to determine the dynamic response of composite tube on fixed and elastic foundation under inside moving load is built. Experimental results allow to expand the direction of numerical simulation to select reasonable parameters for cylindrical structures. This experimental result is the basis for verifying the relevance of the theoretical and experimental methods. Experimental results and theoretical calculations are in a good agreement, the errors are acceptable with the conditions and existing laboratory equipment.

Keywords: composite tube; moving load; experimental; fixed foundation; elastic foundation.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(3V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-08) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Kết cấu dạng ống làm bằng vật liệu composite chịu tác dụng của tải trọng di động bên trong ngày càng được sử dụng nhiều trong các lĩnh vực kỹ thuật như thủy nông, chuyển tải nước, nhiên liệu ... Nghiên cứu đáp ứng động lực học của ống composite chịu tác dụng của tải trọng di động bên trong là một hướng nghiên cứu thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới.

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: nguyenvietha12121980@gmail.com (Hà, N. V.)

Một số nghiên cứu về lĩnh vực này được chỉ ra, Hà và cs. [1–4] đã phân tích đáp ứng động học của ống composite trên nền đàn hồi dưới tác dụng của áp suất di động, khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng động học của ống composite. Sülü [5] tính toán số và có được một số kết quả về trường ứng suất, biến dạng tại mặt cắt bất kỳ khi nghiên cứu ứng xử của ống composite chịu áp suất tĩnh tác dụng đều lên mặt trong ống. Huang và Wang [6] nghiên cứu phương pháp số và thực nghiệm xác định đáp ứng động của ống composite. Xia và cs. [7] phân tích động học của ống composite nhiều lớp dưới tác dụng áp suất bên trong. Dey và Ramachandra [8] phân tích dao động phi tuyến của vỏ trụ composite nhiều lớp. Ansari và cs. [9] phân tích động lực học các ống composite nhiều lớp dưới tác dụng áp suất bên trong và nhiệt độ...

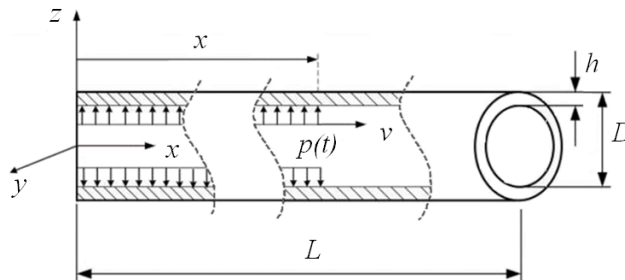
Các nghiên cứu bước đầu đã thu được những kết quả, song vẫn chưa đáp ứng được yêu cầu thực tiễn. Mô hình tính còn ít và các liên kết còn đơn giản, kết quả nghiên cứu thực nghiệm đối với bài toán dạng này còn rất hạn chế, chủ yếu là một số kết quả thí nghiệm tĩnh đối với ống chịu áp suất trong hoặc áp suất phân bố trên thành ống. Các kết cấu ống composite đặt trên các liên kết đàn hồi và liên kết tuyệt đối cứng chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động với cường độ áp suất thay đổi theo thời gian là những vấn đề đến nay còn rất ít được nghiên cứu.

Trong bài báo này, tác giả tiến hành thiết lập phương trình phi tuyến động lực học của ống composite chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động, trong đó ống được đặt trên liên kết cứng tuyệt đối và trên liên kết đàn hồi. Xây dựng mô hình, thiết kế chế tạo mẫu, xác định cơ tính vật liệu và tiến hành thí nghiệm đo đáp ứng động lực học của ống composite trên gối cứng và gối đàn hồi, xử lý số liệu thực nghiệm và so sánh với kết quả lý thuyết.

2. Đáp ứng động lực học của ống composite dưới tác dụng của tải trọng di động

2.1. Đặt bài toán, các giả thiết

Ống dẫn composite chiều dài L , đường kính ngoài D , chiều dày h , chịu tải trọng di động với áp suất $p(t)$ phân bố đều theo chu vi ở bên trong ống và di chuyển dọc trục ống với vận tốc v (Hình 1).



Hình 1. Mô hình ống dẫn composite lớp chịu áp suất di động

Các giả thiết: ống composite lớp với vật liệu các lớp đàn hồi tuyến tính, bố trí đối xứng qua mặt trung bình và bám dính lý tưởng với nhau. Tại mỗi thời điểm, áp suất $p(t)$ phân bố đều và liên tục trong ống đến một mặt cắt ngang trong ống. Kích thước chiều dày ống thỏa mãn lý thuyết Reissner - Mindlin.

Áp suất tại mỗi điểm thuộc ống cho bởi quy luật [1–3]:

$$p(x, t) = p_0 u(t - x/v) = \begin{cases} 0 & \text{khi } t < \frac{x}{v}, t > \frac{L}{v} \\ p_0 & \text{khi } \frac{x}{v} \leq t \leq \frac{L}{v} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó p_0 là biên độ áp suất, u là hàm bước đơn vị Heaviside, v là vận tốc di chuyển dọc ống composite của áp suất.

Áp dụng nguyên lý Hamilton, phương trình dao động của ống composite chịu tác dụng của tải trọng di động:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f_m\} \quad (2)$$

trong đó $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ tương ứng là vectơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của kết cấu. $[M]$, $[K]$, $[C]$, $\{f_m\}$ tương ứng là ma trận khối lượng, ma trận độ cứng, ma trận cản và vectơ lực nút của kết cấu. Các đại lượng này được xác định như sau:

$$[M] = \sum_{e=1}^{N_e} [M]^e, [K] = \sum_{e=1}^{N_e} [K]^e, \{f_m\} = \sum_{e=1}^{N_{em}} \{f_m\}^e \quad (3)$$

$$[C] = \alpha_R[M] + \beta_R[K]$$

trong đó $[M]^e$, $[K]^e$, $\{f_m\}^e$ tương ứng là ma trận độ cứng phần tử, ma trận khối lượng phần tử và vectơ lực nút của phần tử kết cấu. α_R, β_R là các hằng số cản Rayleigh được xác định theo [2].

Phương trình (2) là hệ phương trình vi phân cấp hai phi tuyến. Phương pháp tích phân trực tiếp Newmark kết hợp với phương pháp lặp Newton – Rapson được sử dụng để giải bài toán, thiết lập chương trình tính trong môi trường Matlab. Chương trình có khả năng phân tích phi tuyến tĩnh và động lực học kết cấu ống composite trên các liên kết đàn hồi và cứng tuyệt đối chịu tác dụng của tải trọng di động.

3. Mô hình và các thiết bị thí nghiệm

3.1. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm được thiết kế, chế tạo là ống composite gồm 4 lớp có trật tự xếp lớp $45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ$, vật liệu chế tạo là cốt sợi thủy tinh, nền nhựa Epoxy; chiều dài $L = 4200$ mm, đường kính trong $d = 50$ mm, chiều dày $h = 4$ mm. Ống được đặt trên liên kết cứng và liên kết đàn hồi (Hình 2).

- Trường hợp liên kết cứng, ống composite được liên kết chặt bằng ốp và được hàn chặt với tấm thép dày nhằm tạo liên kết cứng.

- Trường hợp liên kết đàn hồi, ống composite được liên kết với hệ gồm 44 lò xo đàn hồi có tính chất cơ lý tính giống nhau và đồng nhất về độ cứng, chiều dài mỗi lò xo là 50 mm, đường kính ngoài $D = 16$ mm, bước lò xo 6 mm, đường kính sợi lò xo 1,5 mm, độ cứng $k = 5000$ N/mm. Việc xác định các tính chất cơ lý của vật liệu kết ống và độ cứng lò xo được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Cơ học

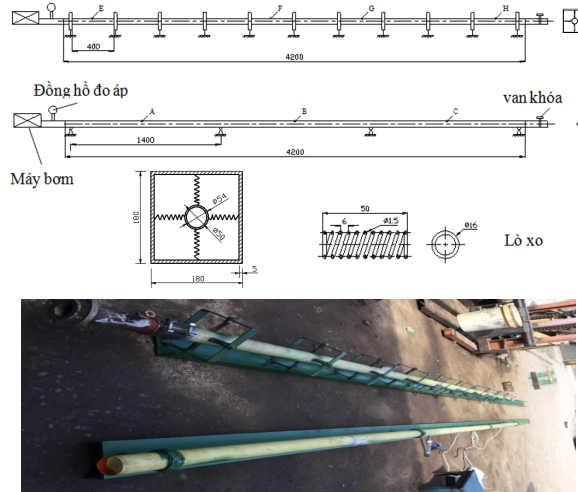
- Bộ môn Cơ học vật rắn, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

3.2. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị gây tải là máy bơm công nghiệp IRCEM của Công ty cổ phần Thương mại và dịch vụ Cường Thịnh Vương, với các thông số công suất 1,5 KW, lưu lượng nước $2 \text{ m}^3/\text{h}$, áp lực 98 m nước (Hình 3).

Trên kết cấu tại các vị trí của ống đã được xác định trên mô hình ở Hình 1, tiến hành gắn các thiết bị cảm biến gia tốc để đo gia tốc dịch chuyển theo phương hướng kính của các điểm cần xác định.

Cảm biến gia tốc dung trong thí nghiệm là cảm biến PV – 90T của Nhật với các thông số sau: khối lượng 2 g, độ nhạy: $0,5 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$, dải tần số đo: 1 đến $12000 (\pm 10 \%)$ Hz, đỉnh cộng hưởng:



Hình 2. Mô hình thí nghiệm ống composite đặt trên gối cứng và gối đàn hồi



(a) Thiết bị gây tải

(b) Cảm biến gia tốc

(c) Đầu đo biến dạng

Hình 3. Thiết bị thí nghiệm

50 kHz, vật liệu chế tạo: Titanium, sai số đo: 0,05% hoặc nhỏ hơn. Đầu đo biến dạng sử dụng là loại tấm điện trở loại KFG -5 - 120 - C1- 11 của hãng Kyowa Nhật Bản, chuẩn đo 5 mm, $120,2 \pm 0,3 \Omega$, hệ số gage: $k = 2, 10 \pm 1, 0 \%$. Các tấm điện trở được liên kết với bề mặt của kết cấu vỏ tại vị trí đo, theo phương đo bằng keo dán chuyên dụng.

4. Trình tự xác định gia tốc, chuyển vị của kết cấu

Để đo gia tốc dao động tại vị trí nào đó thuộc kết cấu ống composite, tiến hành gắn đầu đo gia tốc cố định tại điểm cần đo, hướng trục đầu đo theo phương cần đo (Hình 4). Dưới tác dụng của tải trọng, ống dao động, và đồng nghĩa đầu đo gia tốc dao động theo, tín hiệu đáp ứng gia tốc theo thời gian được truyền về máy tính xử lý.

Kết quả mỗi lần đo, tương ứng với một đầu đo có được bộ số liệu thể hiện đáp ứng gia tốc theo thời gian tại vị trí trên kết cấu mà tại đó gắn đầu đo gia tốc. Từ đáp ứng gia tốc - thời gian, với bộ xử lý deflection analysis được tích hợp trong máy tính, tiến hành phân tích (tích phân số hai lần) và kết quả



Hình 4. Gắn cảm biến đo

là có được đáp ứng chuyển vị theo phương hướng kính tại điểm đo theo thời gian. Để đo biến dạng tại một điểm, tiến hành dán tấm điện trở tại vị trí cần đo, phương chiều dài tấm điện trở trùng với phương cần đo biến dạng. Dưới tác dụng của tải trọng, ống bị biến dạng làm cho tấm điện trở biến dạng theo, tín hiệu biến dạng được máy tính xử lý và kết quả có được đáp ứng biến dạng theo thời gian.

5. Phân tích và xử lý kết quả thí nghiệm

Việc thu thập, tích hợp số liệu (đáp ứng gia tốc, vận tốc, chuyển vị và biến dạng tại những điểm cần đo theo thời gian) của mỗi lần thí nghiệm được máy tính chuyên dụng của bộ thiết bị đo LMS thực hiện. Để có được kết quả đo trung bình, tác giả phải tiến hành đo đặc nhiều lần rồi xử lý thống kê, trình tự các bước như sau [6, 10–14]:

Giả sử tiến hành đo n lần các giá trị gia tốc hoặc biến dạng tại mỗi vị trí cần xác định, mỗi lần đo có được bộ số liệu $[t_i, N_i]$, với i là bước thời gian trích mẫu thí nghiệm của máy đo, N_i là đại lượng đo tại bước thời gian thứ i .

- Bước 1: Xuất bộ số liệu của n lần đo từ phần mềm máy tính.
- Bước 2: Xác định trung bình $\overline{N}_i$ của mỗi giá trị điểm đo trên dãy số liệu $(N_i)_j$ với $j = \overline{1, n}$.
- Bước 3: Tập hợp bộ số liệu $[t_i, \overline{N}_i]$, vẽ đáp ứng theo thời gian của bộ số liệu đo sau khi xử lý thống kê.
- Bước 4: Vẽ đáp ứng theo thời gian, xác định giá trị lớn nhất và giá trị nhỏ nhất $\overline{N}_{\max}, \overline{N}_{\min}$ của bộ số liệu đo.
- Bước 5: Làm tương tự đối với đáp ứng vận tốc, chuyển vị tại điểm đo theo thời gian.
- Bước 6: Đánh giá, nhận xét kết quả.

6. Thí nghiệm và kết quả đạt được

Mô hình thí nghiệm được gá chặt tương ứng liên kết trên gối cứng và đàn hồi, đảm bảo mô hình ổn định vị trí trong quá trình thí nghiệm. Lắp đặt thiết bị đo gia tốc, đo biến dạng tại các điểm đo tương ứng trên ống. Việc liên kết các đầu đo với bộ máy đo thông qua bộ cáp tín hiệu tiêu chuẩn đồng bộ với máy.

Tiến hành thí nghiệm đo đáp ứng động (đo biến dạng và gia tốc) của ống composite đặt trên liên kết cứng và liên kết đàn hồi, với các trường hợp áp lực trong ống khác nhau.

Tại một điểm đo, để xác định bộ số liệu đáp ứng gia tốc hoặc biến dạng theo thời gian, tác giả tiến hành đo 25 lần ($n = 25$), chọn ra 15 lần đo có kết quả hội tụ. Bộ số liệu đo được thu thập, phân tích

và xử lý thống kê, cuối cùng ta sẽ có được đáp ứng biến dạng, gia tốc, vận tốc và chuyển vị theo thời gian tại các điểm đo là trung bình cộng của 15 lần.

Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối cứng chịu tải trọng di động, khi áp lực trong ống $p_1 = 5 \text{ Kg/cm}^2$ chuyển động với vận tốc $v_1 = 5,48 \text{ m/s}$.

Kết quả thực nghiệm sau khi được xử lý thống kê bằng phần mềm chuyên dụng và so sánh với kết quả tính toán bằng chương trình Matlab được thể hiện trên Bảng 1.

Bảng 1. Đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu đặt trên gối cứng

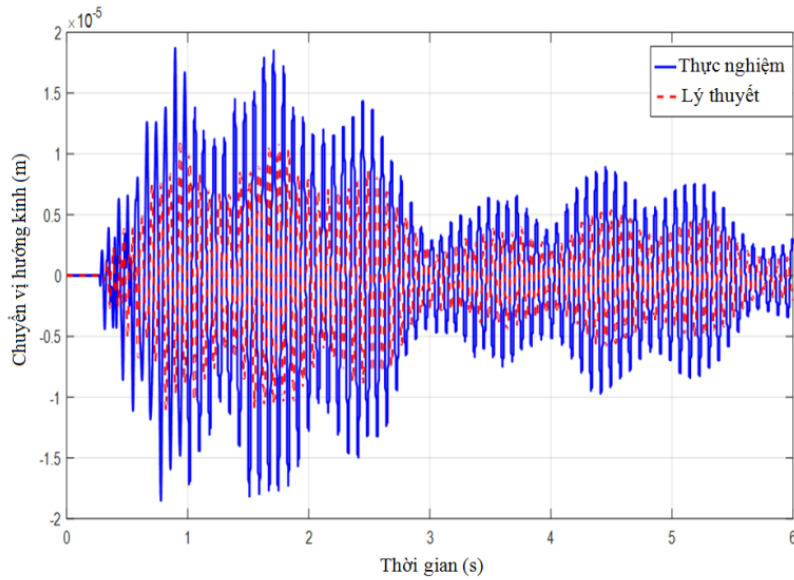
	Điểm đo	Thực nghiệm	Lý thuyết	Sai số [%]
Chuyển vị hướng kính (m)	A	$1,45 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^{-5}$	22,5
	B	$2,20 \times 10^{-5}$	$1,61 \times 10^{-5}$	26,6
	C	$1,84 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-5}$	24,2
Gia tốc (m/s^2)	A	17,53	13,55	22,7
	B	24,20	17,54	27,5
	C	19,76	14,58	26,2
Biến dạng dọc trục	A	$3,89 \times 10^{-8}$	$2,92 \times 10^{-8}$	24,9
	B	$5,00 \times 10^{-8}$	$3,68 \times 10^{-8}$	26,4
	C	$4,24 \times 10^{-8}$	$3,14 \times 10^{-8}$	25,8

Tương tự thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối đàn hồi chịu tải trọng di động, khi áp lực trong ống $p_2 = 3 \text{ Kg/cm}^2$ chuyển động với vận tốc $v_2 = 5,46 \text{ m/s}$. Kết quả đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu tại các điểm đo được thể hiện trên Bảng 2 và Hình 5–7.

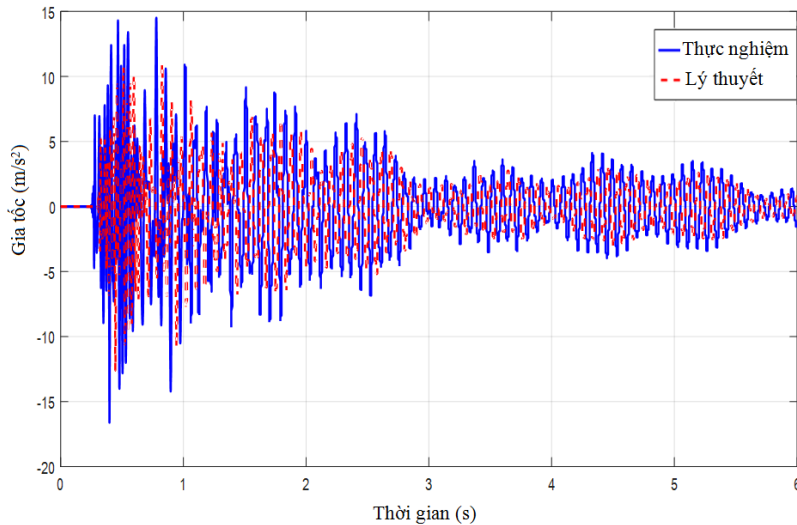
Bảng 2. Đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu đặt trên gối đàn hồi

	Điểm đo	Thực nghiệm	Lý thuyết	Sai số [%]
Chuyển vị hướng kính (m)	E	$1,02 \times 10^{-5}$	$0,77 \times 10^{-5}$	24,2
	F	$1,55 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^{-5}$	26,6
	G	$1,60 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-5}$	25,6
	H	$1,34 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-5}$	22,8
Gia tốc (m/s^2)	E	16,3	12,61	22,7
	F	16,5	12,54	24,1
	G	19,7	14,53	26,2
	H	17,6	13,81	21,5
Biến dạng dọc trục	E	$5,0 \times 10^{-8}$	$3,68 \times 10^{-8}$	26,4
	F	$7,1 \times 10^{-8}$	$5,27 \times 10^{-8}$	25,8
	G	$5,8 \times 10^{-8}$	$4,35 \times 10^{-8}$	25,0
	H	$3,8 \times 10^{-8}$	$2,75 \times 10^{-8}$	27,6

Nhận xét: Với kết quả thể hiện trên Bảng 1, 2 và đồ thị Hình 5–7, ta thấy đáp ứng chuyển vị, gia tốc, biến dạng theo thời gian tại các điểm đo từ kết quả thực nghiệm và lý thuyết là khá tương đồng về quy luật, sai số giữa hai phương pháp có thể là do trong phần thực nghiệm thì sự gá lắp của ống

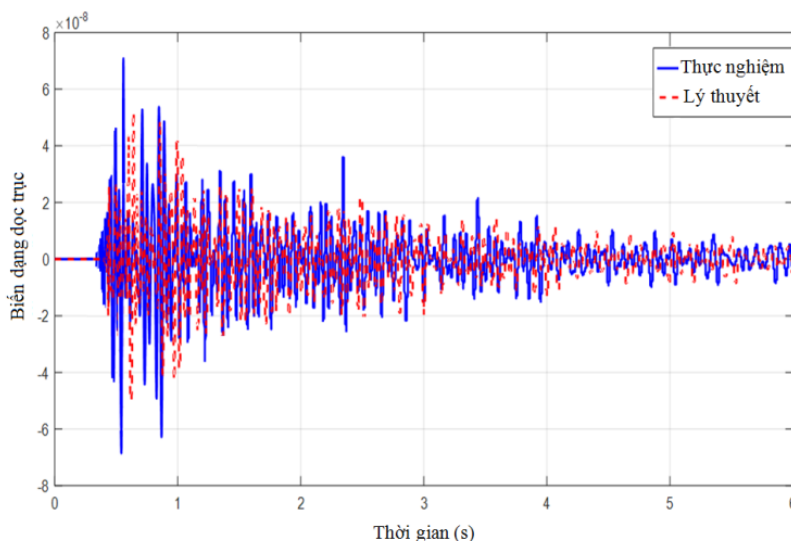


Hình 5. Đáp ứng chuyển vị – thời gian tại điểm F của ống composite



Hình 6. Đáp ứng gia tốc – thời gian tại điểm F của ống composite

trên các liên kết gối cứng và gối đàn hồi chưa đảm bảo độ cứng vững, trong khi tính toán lý thuyết thì mô hình ống trên các liên kết được coi như lý tưởng. Nguyên nhân thứ hai là do trong phần lý thuyết, khi tính toán tải trọng dạng áp suất di động không xét đến khối lượng tải trọng, còn trong phần thực nghiệm tải trọng là áp suất chất lỏng di động, nên với khối lượng của chất lỏng đã làm tăng các giá trị chuyển vị, gia tốc và biến dạng của ống composite, ... Tuy nhiên với điều kiện trang thiết bị thí nghiệm hiện có, theo tác giả kết quả so sánh thí nghiệm và tính toán lý thuyết là có thể chấp nhận được.



Hình 7. Đáp ứng biến dạng – thời gian tại điểm F của ống composite

7. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình thực nghiệm ống composite đặt trên liên kết cứng và liên kết đàn hồi. Tiến hành thí nghiệm đo đáp ứng động với các trường hợp áp lực trong ống khác nhau cho kết quả đường đáp ứng động lực học có dạng tương đồng với phương pháp lý thuyết. Chứng tỏ tiến trình thí nghiệm mà tác giả xây dựng và chương trình khảo sát số bằng phương pháp lý thuyết đảm bảo độ tin cậy. Kết quả so sánh giữa thực nghiệm và lý thuyết có thể sử dụng trực tiếp mô hình thí nghiệm mà tác giả xây dựng để đưa ra các kết quả ban đầu cho đáp ứng động lực học của ống tại các vị trí đo khác nhau.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin chân thành cảm ơn các nhà khoa học, các bạn đồng nghiệp đã có những ý kiến đóng góp quý báu về xây dựng mô hình bài toán, mô hình thực nghiệm và các công tác chuẩn bị cũng như quá trình tiến hành thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hà, N. V., Đạt, P. T., Sơn, L. T. (2016). Phân tích đáp ứng động học của ống composite trên nền đàn hồi dưới tác dụng của áp suất di động. *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học toàn quốc về cơ kỹ thuật và tự động hóa lần thứ 2, kỷ niệm 60 năm thành lập ĐHBK Hà Nội*, 268–273.
- [2] Hà, N. V. (2017). Tính toán ống composite lớp trên liên kết đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động. *Hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về Cơ khí - Động lực, Kỷ niệm 60 năm thành lập ĐHBK Tp HCM*, 118–124.
- [3] Hà, N. V., Đạt, P. T., Sơn, L. T., Thanh, P. T. (2017). Phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng động học của ống composite lớp trên liên kết đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động. *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, (55):190–196.
- [4] Hà, N. V., Đạt, P. T., Thanh, N. T. (2017). [Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn phân tích dao động riêng của ống composite](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 11(4):105–109.

- [5] Sülü, İ. Y. (2016). Stress analysis of multi-layered hybrid composite pipes subjected to internal pressure. *International Journal Of Engineering & Applied Sciences*, 8(4):87–98.
- [6] Huang, J., Wang, X. (2009). [Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes](#). *Composite Structures*, 91(2):222–228.
- [7] Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K. (2001). [Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure](#). *Composite Structures*, 53(4):483–491.
- [8] Dey, T., Ramachandra, L. S. (2017). [Non-linear vibration analysis of laminated composite circular cylindrical shells](#). *Composite Structures*, 163:89–100.
- [9] Ansari, R., Alisafaei, F., Ghaedi, P. (2010). [Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature](#). *Composite Structures*, 92(5):1100–1109.
- [10] Tuyển, N. M. (2005). *Quy hoạch thực nghiệm*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội.
- [11] Thảo, V. V. (2001). *Phương pháp khảo sát nghiên cứu thực nghiệm công trình*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội.
- [12] Quỳ, T. Đ. (2000). *Giáo trình xác suất thống kê*. Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
- [13] Bendat, J. S., Piersol, A. G. (1998). *Analysis and measurement procedures*. Wiley – Interscience New York – London - Sydney - Toronto.
- [14] Bagchi, K., Gupta, S. K., Kushari, A., Iyengar, N. G. R. (2009). [Experimental study of pressure fluctuations and flow perturbations in air flow through vibrating pipes](#). *Journal of Sound and Vibration*, 328 (4-5):441–455.