

THÍ NGHIỆM TẢI TRỌNG TÁC ĐỘNG DO TRỌNG VẬT RƠI TỐC ĐỘ THẤP VỚI NĂNG LƯỢNG TĂNG VÀ KHÔNG ĐỔI

LOW-VELOCITY DROP-WEIGHT IMPACT LOADING EXPERIMENT WITH INCREASED AND CONSTANT ENERGY

TS. Lê Huy Sinh - Giảng viên Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
ĐT: 0983145428 / Email: sinhlh@hau.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo này tập trung vào phương pháp dán tấm polyme cốt sợi aramid (AFRP) để nghiên cứu ảnh hưởng của năng lượng đầu vào gia tăng và không đổi sau mỗi bước tải đến khả năng chịu tải và chế độ phá hoại của dầm bê tông cốt thép (BTCT) gia cường chịu tải trọng tác động do trọng vật rơi tốc độ thấp. Tám dầm được thí nghiệm chịu tải trọng động: sáu dầm BTCT được gia cường với khối lượng tấm 415g/m² và hai dầm BTCT không được gia cường để so sánh. Chiều cao rơi của trọng vật đã được thí nghiệm là H= 0.5; 1.0; 2.0; 2.5 và 3.0 m. Sau đây là những phát hiện của nghiên cứu này: (1) Lịch sử thời gian của các phản ứng động của các dầm BTCT có hoặc không gia cường gần như giống nhau bất kể số lần tải; (2) Trong trường hợp dầm BTCT không được gia cường, các chuyển vị cực đại/dư gần như giống nhau bất kể số lần tải; (3) Trong trường hợp dầm BTCT được gia cường, các chuyển vị dư có xu hướng giảm, trong khi các chuyển vị cực đại có xu hướng tăng sau mỗi bước tải; và (4) Ở cùng giá trị năng lượng đầu vào tích lũy, độ chuyển vị tuyệt đối của các dầm chịu tải trọng tác động với năng lượng không đổi nhỏ hơn đáng kể so với các dầm chịu tải trọng tác động với năng lượng gia tăng.

Từ khóa: Tấm polyme cốt sợi, Gia cường, Tải trọng tác động do trọng vật rơi, Dầm bê tông cốt thép, Năng lượng không đổi và gia tăng.

1. Giới thiệu

Trong các nghiên cứu trước [1-6], các tấm AFRP được áp dụng để gia cường dầm BTCT chịu tải trọng tác động. Các thí nghiệm được tiến hành bằng phương pháp tải trọng đơn [1-3] hoặc phương pháp tải trọng liên tiếp [4-6] cho mỗi dầm. Ảnh hưởng của thể tích tấm và năng lượng tác động đầu vào đã được nghiên cứu và thảo luận.

Tuy nhiên, trên thực tế, các kết cấu BTCT có thể chịu tải trọng tác động do trọng vật rơi ở tốc độ thấp với năng lượng gia tăng và không đổi sau mỗi bước tải. Trong bài báo này, nghiên cứu tập trung vào các đặc tính chống tác động của các dầm BTCT, các thí nghiệm chịu tải trọng tác động do trọng vật rơi ở tốc độ thấp với năng lượng gia tăng và không đổi sau mỗi bước tải đã được thực hiện trên các dầm BTCT được gia cường uốn bằng các

Abstract: This paper focuses on the aramid fiber-reinforced polymer (AFRP) bonding method to investigate the effects of increased and constant input energy after each loading step on the load-carrying capacity and failure modes of reinforced RC beams subjected to impact loading by low-velocity drop-weight. Eight beams were subjected to impact loading: six reinforced RC beams with a sheet volume of 415 g/m² and two unreinforced RC beams for comparison. The drop-height of the tested weight is H= 0.5; 1.0; 2.0; 2.5 and 3.0m. The following are the findings of this study: (1) The time histories of the dynamic responses of reinforced and unreinforced RC beams were almost the same regardless of the number of loading steps; (2) In the case of unreinforced RC beams, the maximum/residual displacements were almost the same regardless of the number of loading steps; (3) In the case of reinforced RC beams, the residual displacements tend to decrease, while the maximum displacements tend to increase after each loading step; and (4) At the same cumulative input energy, the absolute displacements of beams subjected to constant-energy impact loads are significantly smaller than those subjected to incremental-energy impact loads.

Keywords: Fiber-reinforced polymer sheets, Reinforcement, Drop-weight impact loading, Reinforced concrete beams, Constant and increased energy

tấm polyme cốt sợi aramid (AFRP) dán kết bên ngoài. Dầm BTCT không gia cường cũng được thí nghiệm với năng lượng đầu vào không đổi để so sánh. Thể tích tấm và năng lượng tác động đầu vào tích lũy đã được nghiên cứu để đánh giá hiệu quả gia cường của dầm. Thể tích tấm được sử dụng 415g/m². Chiều cao rơi của trọng vật đã được sử dụng là H = 0.5 và 1.0m cho các mẫu thử với mức năng lượng đầu vào không đổi. Chiều cao rơi từ 1.0 đến 3.0 m được dùng để thí nghiệm các dầm với mức năng lượng đầu vào gia tăng. Dựa trên kết quả thí nghiệm, lịch sử thời gian của các phản ứng động và mối quan hệ giữa chuyển vị cực đại/dư và năng lượng tác động đầu vào đã được thảo luận.

2. Phương pháp thí nghiệm

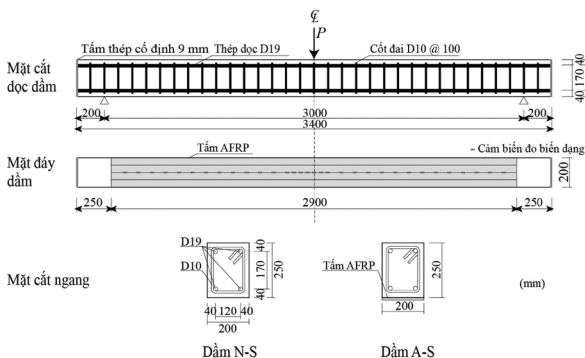
Các mẫu vật được sử dụng trong thí nghiệm

Bảng 1. Danh sách các mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm	Số lần tải	Chiều cao rơi thiết lập H (m)	Vận tốc rơi đo được v (m/s)	Năng lượng đầu vào thực tế E_r (kJ)	Cường độ nén của bê tông f'_c (MPa)	Cường độ chịu kéo của cốt thép dọc f_y (MPa)
N-C-H0.5	6	0.5	3.19*	1.53	34.3	393.7
N-C-H1.0	3	1.0	4.59*	3.15		
A415-C-H0.5	9	0.5	3.14*	1.48	34.3	393.7
A415-C-H1.0	4	1.0	4.48*	3.01		
A415-I-H1	2	1	4.45	2.97	33.7	371.0
		2	6.12	5.61		
A415-I-H2	2	2	6.24	5.85		
		2.5	6.99	7.33		
A415-I-H2.5	2	2.5	6.99	7.33		
		3.0	7.72	8.95		
A415-I-H3	1	3	7.52	8.5		

* Giá trị trung bình cho toàn bộ các mẫu thí nghiệm

này được liệt kê trong Bảng 1. Trong bảng này, tên danh nghĩa của mẫu vật được chỉ định theo thứ tự vật liệu gia cường (A: AFRP), phương pháp gia tải (C: tải trọng tác động liên tiếp với năng lượng không đổi và I: tải trọng tác động liên tiếp với năng lượng tăng dần) và chiều cao rơi của trọng vật Hn (n: chiều cao rơi theo đơn vị mét) với dấu gạch nối. Trong Bảng này, năng lượng đầu vào thực tế ($E_r = mv^2/2$) được ước tính dựa trên trọng lượng của trọng vật rơi ($m = 300$ kg) và tốc độ rơi đo được của trọng vật (v) ngay trước khi tác động với bề mặt trên của dầm. Cường độ chịu nén của bê tông và cường độ chịu kéo của cốt thép dọc cũng được liệt kê trong bảng này.



Hình 1. Kích thước mẫu thí nghiệm và bố trí cốt thép và tấm AFRP

Hình 1 mô tả kích thước thí nghiệm, bố trí cốt thép dọc, cốt đai và tấm AFRP. Bê tông trộn sẵn được sử dụng để đúc dầm tại công trường với bảng

Bảng 2. Bảng tỷ lệ trộn bê tông

W/C (%)	S/a (%)	Trọng lượng đơn vị (kg/m ³)				
		Nước W	Xi măng	Cốt liệu nhỏ S	Cốt liệu lớn G	Phụ gia Ad
52.4	43.0	154	294	812	1064	2.940

Bảng 3. Đặc trưng cơ học của các tấm AFRP

Khối lượng diện tích (g/m ²)	Chiều dày (mm)	Cường độ kéo (GPa)	Mô đun đàn hồi Ef (Gpa)	Biến dạng phá hoại ϵ_{fu} (%)
415	0.286	2.06	118	1.75

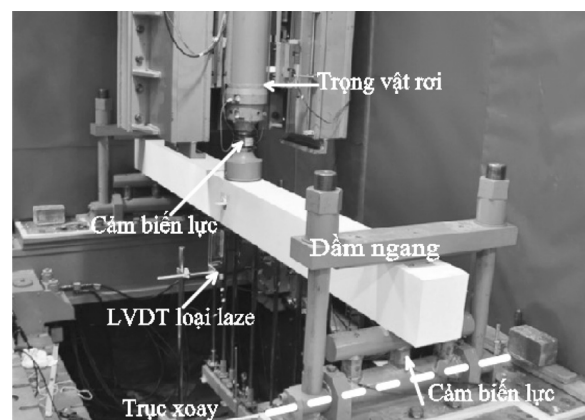
Bảng 4. Đặc trưng cơ học của nhựa epoxy

Cường độ uốn (MPa)	Cường độ nén (MPa)	Cường độ cắt uốn (MPa)	Cường độ chất kết dính (MPa)
40	35	10	1.5

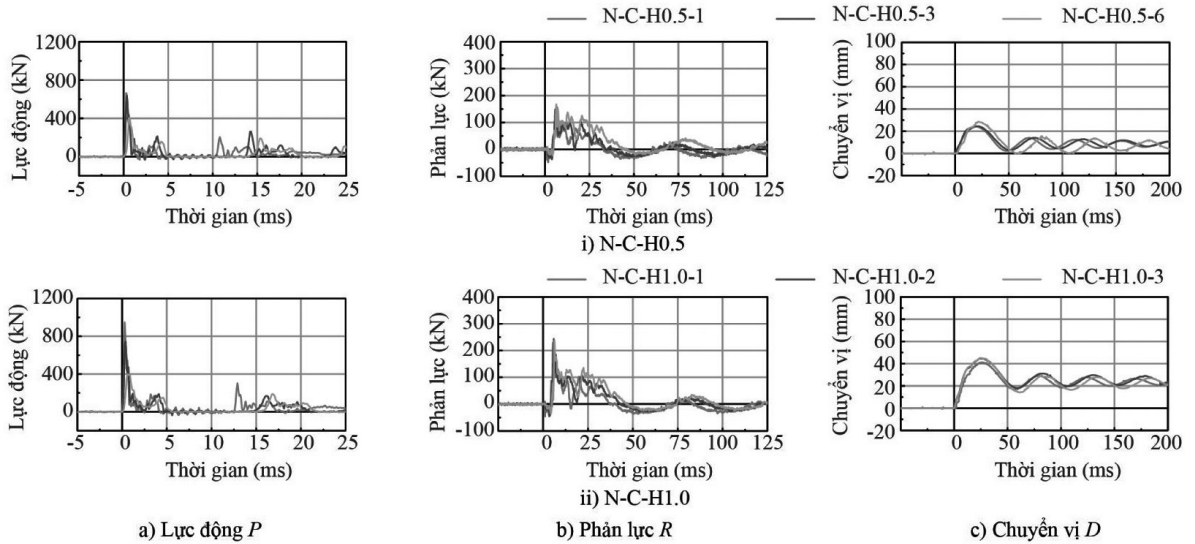
tỷ lệ trộn như trong Bảng 2. Các tấm AFRP được dán với các bề mặt chịu lực của dầm, để lại 50mm giữa phần cuối của mỗi tấm và điểm gối tựa. Dầm gia cường được dán bởi một tấm AFRP trên một lớp có khối lượng diện tích là 415 g/m², cách thức thực hiện tuân thủ theo "Hướng dẫn thiết kế và thi công hệ thống FRP liên kết ngoài để gia cường kết cấu bê tông" [7]. Bảng 3 liệt kê các thông số vật liệu của các tấm AFRP, do nhà sản xuất Fibex cung cấp [8]. Thí nghiệm dựa trên JIS K 7165 [9] để xác định các tham số này. Chất kết dính được sử dụng để liên kết tấm với nền bê tông là nhựa epoxy có các đặc trưng cơ học được liệt kê trong Bảng 4.

Thí nghiệm tải trọng tác động (xem Hình 2) được thực hiện bằng cách thả liên tục một trọng vật thép có khối lượng 300 kg và đường kính đầu là 200mm ở độ cao rơi không đổi ($H = 0.5$ và 1.0m) hoặc gia tăng ($H = 1; 2; 2.5$ và 3.0m) cho đến khi dầm đạt đến trạng thái tới hạn.

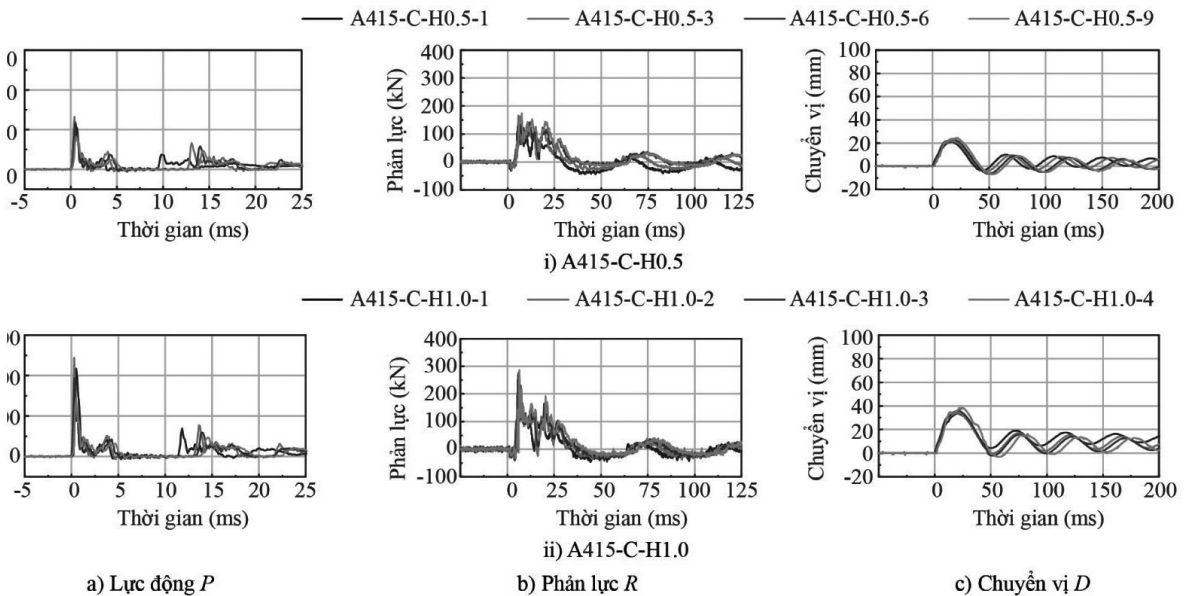
Trong thí nghiệm này, lịch sử thời gian của lực động P, lực phản ứng R và chuyển vị giữa nhịp D (sau đây gọi là chuyển vị) và phân bố ứng suất dọc



Hình 2. Thiết lập thí nghiệm tải trọng động



Hình 3. So sánh lịch sử thời gian của lực tác động P, lực phản ứng R và chuyển vị D giữa các bước tải cho dầm N-C-H0.5/N-C-H1.0



Hình 4. So sánh lịch sử thời gian của lực tác động P, lực phản ứng R và chuyển vị D giữa các bước tải cho Dầm A415-C-H0.5/A415-C-H1.0

của các tấm AFRP đã được đo. Chuyển vị của dầm, bao gồm cả chuyển vị dư sau khi chịu tải trọng tác động, đã được đo bằng cách sử dụng Bộ chuyển đổi chuyển vị tuyến tính biến thiên (Linear Variable Displacement Transducers-LVDT) loại laser. Dữ liệu đầu ra này được ghi lại liên tục bằng cách sử dụng máy ghi dữ liệu kỹ thuật số với thời gian lấy mẫu là 0,1 ms.

3. Kết quả thí nghiệm

3.1 Lịch sử thời gian của lực động, lực phản ứng và chuyển vị

Hình 3 cho thấy sự so sánh lịch sử thời gian của lực động P, tổng lực phản ứng (sau đây gọi là phản lực) R và chuyển vị D đối với dầm N-C-H0.5 và N-C-H1.0 sau các thí nghiệm tải trọng tác động liên

tiếp năng lượng không đổi. Ở độ cao rơi của trọng vật H = 0.5 và 1.0m, số lần tải cho đến khi dầm đạt đến trạng thái tới hạn lần lượt là 3 và 6 lần. Ở đây, kết quả được hiển thị cho dầm N-C-H0.5 ở bước tải thứ 1, thứ 3 và thứ 6 và cho dầm N-C-H1.0 ở tất cả các bước tải. Trong các so sánh này, mỗi lịch sử thời gian chỉ dành cho bước tải đã chỉ định và các phản ứng tích lũy do tải trọng liên tiếp không đổi không được đưa vào.

Hình 3 (i) cho thấy kết quả phản ứng động đối với dầm N-C-H0.5 ở độ cao rơi H = 0.5m. Từ kết quả lực tác động P, có thể thấy rằng: 1) Lực tác động cực đại xấp xỉ 660, 635 và 400kN ở bước tải thứ nhất, thứ ba và thứ sáu. Lực tác động cực đại ở mỗi bước tải giảm dần do diện chịu tải hư hại từ tải tác động liên tiếp; và 2) Thời gian phản ứng đối với

Bảng 5. Giá trị phản ứng động lực học cực đại của dầm chịu tải trọng tác động

Mẫu thí nghiệm	Bước tải	Chiều cao rơi thiết lập H (m)	Năng lượng đầu vào thực tế Ei (kJ)	Lực động cực đại Pmax (kN)	Phản lực cực đại Rmax (kN)	Chuyển vị cực đại Dmax (mm)	Chuyển vị dư Dres (mm)
N-C-H0.5	1	0.5	1.53	663	105	24	8.62
	3		1.56	635	156	25.5	9.0
	6		1.49	403	168	28.8	10.01
N-C-H1	1	1.0	3.15	948	229	41.2	23.77
	2		3.15	745	244	45	24.71
	3		3.15	400	238	45	21.63
	2		3.15	793	283	38.8	22.2
A415-C-H0.5	1	0.5	1.46	487	130	20.9	3.94
	3		1.53	528	166	21.6	3.52
	6		1.46	475	150	22.9	2.30
	9		1.46	330	174	24.4	1.36
A415-C-H1.0	1	1.0	2.97	869	250	33.8	12.68
	2		3.06	976	271	33.9	9.70
	3		2.97	775	277	36.2	7.68
	4		3.06	578	287	38.5	7.22

sóng thứ hai khoảng 10 đến 15ms có xu hướng bị chậm lại trong vài ms khi tăng số lần tải vì độ cứng uốn gần vùng tải giảm do hư hại tích tụ.

Trong trường hợp lực phản ứng R, giá trị cực đại xấp xỉ 105, 155 và 170 kN ở bước tải thứ nhất, thứ ba và thứ sáu. Lực phản ứng cực đại có xu hướng tăng dần khi tăng số lần tải. Từ phản ứng chính, có thể thấy điểm tải bị hư hại đáng kể ở lần tải thứ 6, kéo dài hơn khoảng 10ms so với lần tải thứ nhất. Vì vậy, chu kỳ dao động tự nhiên của dầm sau khi dỡ tải có xu hướng kéo dài.

Trong trường hợp chuyển vị D, giá trị cực đại là khoảng 24, 25 và 28 mm cho mỗi bước tải trên

và chuyển vị dư lần lượt là khoảng 8.5, 9 và 10mm. Chuyển vị cực đại và chuyển vị dư có xu hướng tăng theo số lần tải.

Hình 3 (ii) cho thấy kết quả của các phản ứng động đối với dầm N-C-H1.0 ở độ cao rơi H = 1.0m. So sánh lịch sử thời gian của lực tác động, lực phản ứng và chuyển vị với trường hợp H = 0.5m, có thể thấy rằng không có sự khác biệt đáng kể nào trong từng trường hợp, ngoại trừ chu kỳ. Các giá trị phản ứng cực đại được mô tả trong Bảng 5. Từ bảng này, có thể thấy rằng lực tác động và lực phản tác cực đại có cùng xu hướng với trường hợp H = 0.5m. Tuy nhiên, chuyển vị cực đại/dư hầu như không đổi khi tăng số lần tải.

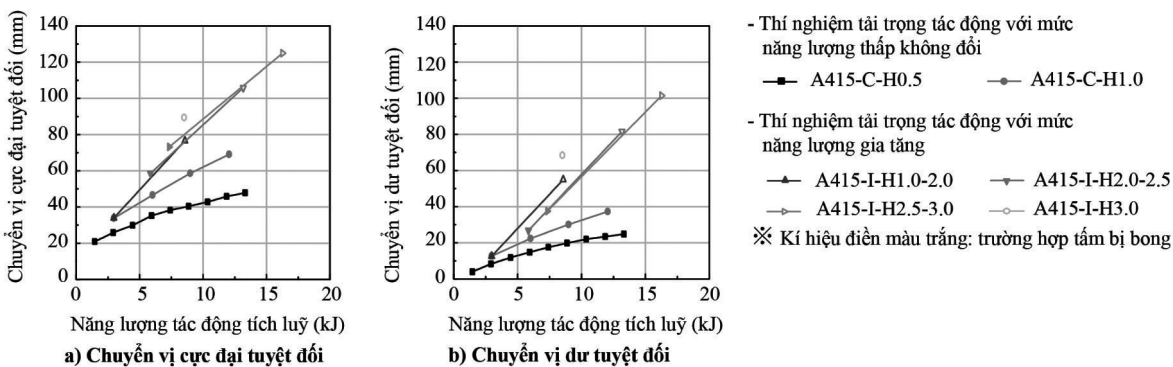
Hình 4 cho thấy sự so sánh về lịch sử thời gian của lực tác động, lực phản ứng và độ chuyển vị đối với dầm A415-C-H0.5 và A415-C-H1.0 sau các thí nghiệm tải trọng tác động liên tiếp năng lượng không đổi. Ở độ cao rơi trọng lượng H = 0.5 và 1.0 m, số lần tải cho đến khi dầm đạt đến trạng thái tới hạn lần lượt là 9 và 4 lần. Ở đây, kết quả được hiển thị cho dầm A415-CI-H0.5 ở bước tải thứ 1, 3, 6 và 9, và cho dầm A415-CI-H1.0 ở tất cả các bước tải.

Hình 4 (i) cho thấy kết quả của các phản ứng động đối với dầm A415-C-H0.5 ở độ cao rơi H = 0.5m. Từ kết quả có thể thấy xu hướng lực tác động/phản lực cực đại và chuyển vị cực đại tương tự như dầm N-C-H0.5 ngoại trừ chuyển vị dư có xu hướng giảm dần tương ứng với số bước tải.

Hình 4 (ii) cho thấy lịch sử thời gian của các phản ứng động đối với dầm A415-C-H1.0 ở độ cao rơi H = 1.0 m. Kết quả cho thấy xu hướng của lực tác động/phản ứng cực đại và chuyển vị cực đại/dư tương tự như của dầm A415-C-H0.5.

Các giá trị phản ứng cực đại của các dầm A415-C-H0.5/1.0 cũng được mô tả trong Bảng 5.

Từ các số liệu trên, các phát hiện chỉ ra rằng: 1) Lịch sử thời gian của các phản ứng động của dầm gần như giống nhau bất kể số lần tải; 2) Trong trường hợp dầm BTCT không được gia cường, các



Hình 5. Mối quan hệ giữa các giá trị phản ứng cực đại tuyệt đối và năng lượng tác động đầu vào tích lũy Ea cho dầm A415: (a) Chuyển vị cực đại tuyệt đối; và (b) Chuyển vị dư tuyệt đối

chuyển vị cực đại/dư gần như giống nhau bất kể số lần tải; và 3) Trong trường hợp dầm BTCT được gia cường, lực tác động gần như cực đại và các chuyển vị cực đại có xu hướng giảm, trong khi lực phản ứng cực đại và các chuyển vị cực đại có xu hướng tăng khi tăng các bước tải.

3.2 Mối quan hệ giữa giá trị phản ứng cực đại và năng lượng tác động tích lũy

Hình 5 cho thấy sự phân bố của chuyển vị cực đại tuyệt đối và chuyển vị dư theo năng lượng tác động đầu vào tích lũy cho tất cả các dầm thuộc về dầm A415.

Từ Hình 5 (a) và (b), có thể quan sát thấy những phát hiện sau: 1) Chuyển vị cực đại tuyệt đối và/hoặc chuyển vị dư cho các dầm chịu tải trọng tác động liên tiếp cũng tăng tuyến tính tương ứng với mức năng lượng tác động đầu vào tích lũy; 2) Tuy nhiên, độ dốc tăng của các dầm trong các thí nghiệm tải trọng tác động với năng lượng thấp không đổi nhỏ hơn đáng kể so với độ dốc của các dầm trong các thí nghiệm tải trọng tác động với năng lượng gia tăng. Điều này cũng có nghĩa là ở cùng một mức năng lượng tích lũy đầu vào, chuyển vị cực đại/dư tuyệt đối có xu hướng tăng khi chiều cao rơi thiết lập gia tăng; và 3) Trong trường hợp các thí nghiệm tải trọng tác động với năng lượng gia tăng, tất cả các dầm đều bị phá hoại do tấm bị tách/nứt, trong khi trong trường hợp các thí nghiệm tải trọng tác động với năng lượng thấp không đổi, tất cả các dầm đều bị phá hủy do bê tông bị nghiền nát gần điểm chịu tải.

4 Kết luận

Trong bài báo này, nghiên cứu tập trung vào các thí nghiệm tải trọng tác động liên tiếp với năng lượng thấp không đổi và gia tăng với các dầm BTCT được/không được gia cường uốn bằng tấm polyme gia cường sợi Aramid (AFRP). Một vật nặng 300kg được rơi liên tiếp cho đến khi dầm đạt đến trạng thái tới hạn. Chiều cao rơi của trọng vật đã được chọn là $H = 0.5$ và 1.0m và từ 1.0 đến 3.0m cho các mẫu thử với mức năng lượng đầu vào không đổi hoặc gia tăng. Các kết quả thu được từ nghiên cứu này như sau:

1. Lịch sử thời gian của các phản ứng động của tất cả các dầm gần như giống nhau bất kể số lần tải;
2. Trong trường hợp dầm BTCT không được gia cường, các chuyển vị cực đại/dư gần như giống nhau bất kể số lần tải;
3. Trong trường hợp dầm BTCT được gia cường, chuyển vị cực đại có xu hướng tăng trong khi chuyển vị dư có xu hướng giảm khi tăng các bước tải;

4. Chuyển vị cực đại tuyệt đối và/hoặc chuyển vị dư cho các dầm chịu tải trọng tác động liên tiếp tăng tuyến tính tương ứng với lượng năng lượng tác động đầu vào tích lũy;

5. Tuy nhiên, độ dốc tăng của dầm trong các thử nghiệm tải trọng tác động với năng lượng thấp không đổi nhỏ hơn đáng kể so với các trường hợp có năng lượng gia tăng. □

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pham, T.; Hao, H. Review of Concrete Structures Strengthened with FRP Against Impact Loading. *Structures* 2016, 7, doi:10.1016/j.istruc.2016.05.003.
- [2]. Fujikake, K.; Soeum, S.; Matsui, T. CFRP Strengthened RC Beams Subjected to Impact Loading. *Perform. Mater. Struct. Extreme Cond.* 2017, 210, 173–181, doi:10.1016/j.proeng.2017.11.063.
- [3]. Kishi, N.; Komuro, M.; Kawarai, T.; Mikami, H. Low-Velocity Impact Load Testing of RC Beams Strengthened in Flexure with Bonded FRP Sheets. *J. Compos. Constr.* 2020, 24, 04020036, doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001048.
- [4]. Sinh, L.H.; Komuro, M.; Kawarai, T.; Kishi, N. Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Aramid Fiber-Reinforced Polymer Sheets under Impact Loading. *Buildings* 2022, 12, 584.
- [5]. Kishi, N.; Komuro, M.; Kawarai, T.; Mikami, H. Experimental study on impact resistance behavior of flexural strengthened RC beams with AFRP sheet under consecutive impact loading. *Struct. Eng. Pap. A* 2019, 65, 901–911.
- [6]. Le Huy, S.; Komuro, M.; Kishi, N.; Kawarai, T. Experimental Study on Dynamic Behaviors of Flexural Strengthened RC Beams with AFRP Sheet Having 1660 g/m² Mass Under Consecutive Impact Loading. In *EASEC16*; Springer, 2021; pp. 863–873.
- [7]. American Concrete Institute; ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures; American Concrete Institute: Farmington Hills, Mich., 2017; ISBN 978-1-945487-59-0.
- [8]. Fibex. Material Properties for Unidirectional AFRP Sheets. 2014.
- [9]. JIS K 7165. Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 5; Test Conditions for Unidirectional Fibre-Reinforced Plastic Composites. 2008.