

PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA CƯỜNG ĐỘ LIÊN KẾT GIỮA CÁC LỚP TRONG CÁC CẤU KIỆN BÊ TÔNG IN 3D BẰNG THỰC NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

ANALYSIS OF THE EFFECT OF BOND STRENGTH BETWEEN LAYERS IN 3D PRINTED CONCRETE STRUCTURES BY EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHODS

➔ Ths. Đặng Ngọc Tân - Khoa Xây dựng - Trường Đại học Xây dựng Miền Trung

Tóm tắt: Trong những năm gần đây, việc sử dụng in bê tông 3D đã tăng lên đáng kể trong ngành xây dựng. Tuy nhiên, việc áp dụng và các tính năng cơ học của bê tông in vẫn phụ thuộc vào nhiều yếu tố ảnh hưởng. Mục đích của nghiên cứu này là để kiểm tra tác động của liên kết giữa các lớp lên hành vi cơ học ảnh hưởng đến khả năng làm việc: nén, uốn, liên kết giữa các lớp. Các đặc tính cơ học của mẫu bê tông in 3D đã được thử nghiệm, và kết quả cho thấy rằng cường độ nén và uốn phụ thuộc mạnh mẽ vào hướng tải tác dụng lên các bề mặt lớp. Mô hình phân tích của các mẫu đã được thực hiện bằng công cụ phương pháp phần tử hữu hạn để xác nhận thêm tính chính xác kết quả thực nghiệm.

Từ khóa: In bê tông 3D, nén, giao diện liên kết, uốn cong

Abstract: In recent years, the use of 3D concrete printing has significantly increased in the construction industry. However, the application and mechanical properties of printed concrete still depend on many influencing factors. The purpose of this research is to examine the impact of the bond between layers on the mechanical behavior affecting workability: compression, bending, and interlayer bonding. The mechanical properties of 3D printed concrete specimens were tested, and the results showed that the compressive and flexural strength strongly depends on the load direction applied to the layer surfaces. The analysis model of the specimens was carried out using the finite element method tool to further confirm the accuracy of the experimental results

Keywords: 3D concrete printing, Compression, Interlocking interfaces, Flexure

Đặt vấn đề

Sự phát triển nhanh chóng của xã hội diễn ra song song với những tiến bộ trong quá trình đô thị hóa và công nghiệp hóa. Tuy nhiên, một số thách thức trong ngành xây dựng, bao gồm thiếu hụt lao động, cạn kiệt tài nguyên và an toàn, tiếp tục hạn chế đáng kể sự mở rộng của lĩnh vực xây dựng. Từ góc độ này, in bê tông 3D mang lại nhiều lợi ích tiềm năng trong xây dựng, bao gồm chi phí thấp, hiệu quả cao, tính linh hoạt trong thiết kế, cường độ lao động thấp và thân thiện với môi trường. Nhiều hỗn hợp bê tông in 3D khác nhau đã được tạo ra, chẳng hạn như vật liệu composite hiệu suất cao, hỗn hợp gia cố bằng sợi và vật liệu composite xi măng, bao gồm cả việc sử dụng chất thải rắn. Một số công trình quy mô lớn đã được hoàn thành, bao gồm một khu dân cư năm tầng được in bởi một doanh nghiệp xây dựng Trung Quốc, một lâu đài bê tông được làm từ các mảnh riêng lẻ in 3D, dự án Big Delta, các đặc điểm kiến trúc dạng lớp cong và những công trình khác. Các dự án này đã chứng minh triển vọng và tính khả thi của in 3D cho việc xây dựng các thành phần kiến trúc quy mô lớn.

1. Tình hình nghiên cứu

Mặc dù in 3D được coi là một quy trình đầy hứa hẹn, nhưng vẫn còn nhiều vấn đề tiếp tục ảnh hưởng đến hiệu suất in. Ví dụ, hiệu suất in chịu ảnh

hưởng lớn bởi các phẩm chất của bê tông tươi như tính lưu biến và cường độ ban đầu[3], và bởi các yếu tố in như tốc độ vòi phun, chiều cao vòi phun, khoảng thời gian giữa các lớp và tốc độ đùn[4,5]. Những cân nhắc này cũng ảnh hưởng đến các đặc tính cơ học của bê tông in 3D đã đóng rắn.

Perrot và cộng sự [8] và Wangler và cộng sự [9] đã tiên phong một mô hình chính xác hơn bằng cách so sánh ứng suất chảy lưu biến (như một hàm của thời gian hoặc tốc độ cấu trúc) với sự gia tăng tải trọng lũy tiến do việc bổ sung các lớp in. Như một giải pháp thay thế, các nhà khoa học đã xây dựng một mô hình phần tử hữu hạn để sao chép in vật phẩm bằng cách sử dụng kỹ thuật cơ học chất rắn và các thuộc tính phụ thuộc vào thời gian được tìm hiểu thông qua thử nghiệm thực nghiệm nghiêm ngặt. Đồng thời, Suiker đã phát triển một mô hình cơ học tham số cho phép đặc trưng hiệu quả hành vi cường độ và ổn định của các cấu trúc dạng tường được in dưới nhiều yếu tố quy trình khác nhau, bao gồm tốc độ in, tốc độ bảo dưỡng và đặc điểm hình học của vật thể. Hiểu đầy đủ mối quan hệ giữa các đặc tính giao diện của bê tông in 3D và các đặc tính cơ học của nó, cũng như sự biến đổi của hành vi không đẳng hướng của bê tông in 3D, là chìa khóa cho thiết kế xây dựng in 3D trong tương lai. Do đó, mục tiêu chính của nghiên cứu

này là ước tính thực nghiệm liên kết giữa các lớp trong bê tông in 3D và dự đoán ảnh hưởng của nó bằng mô hình phần tử hữu hạn. Các thí nghiệm bắt đầu với hai mẫu, C-0 và C-90, chịu nén đơn trục; sáu mẫu (B-0, B-90, S-0, S-90) chịu uốn; và một mẫu (A-0) được in để nghiên cứu ảnh hưởng của cường độ bám dính giữa các lớp. Sau đó, một mô hình phần tử hữu hạn (FEM) đã được tạo để nghiên cứu phản ứng của các mẫu dưới tải trọng nén và uốn. Các nghiên cứu này đã được sử dụng để xác nhận các phản ứng mô phỏng.

2. Chương trình thử nghiệm

a. Phương pháp

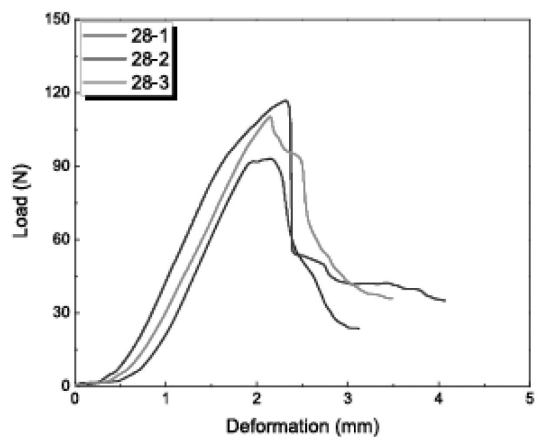
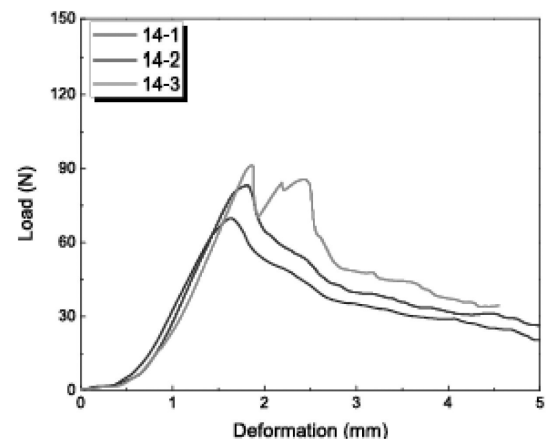
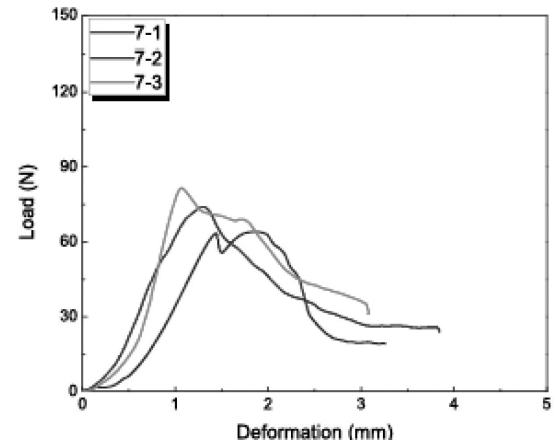
Công trình này đã sử dụng kỹ thuật contour crafting, với chiều rộng vòi phun đường kính 60mm và độ dày 22mm ở tốc độ vòi phun 30mm/s. Hệ thống này bao gồm bốn thành phần chính: bộ điều khiển máy tính, hệ thống giàn, phần vòi phun và nền tảng [1,2,3]. Hệ thống giàn đỡ phần vòi phun trên hai đường ray song song, cho phép nó di chuyển theo cả trục x và y. Ngoài ra, trong suốt quá trình in, độ cao của vòi phun có thể được điều chỉnh theo hướng z. Như được biết, vòi phun đường kính 60mm được kết nối với một thùng chứa có dung tích 0,05m³. Bên trong thùng chứa, một thanh ren dọc di chuyển trong quá trình in được lắp đặt để duy trì khả năng đùn và tính công tác của sợi vữa.

b. Đặc tính vật liệu

Một mẫu thử nghiệm chịu nén đã được chế tạo và thử nghiệm theo Tiêu chuẩn ASTM C109 để đánh giá cường độ chịu nén thuần túy của vật liệu vữa xi măng in 3D. Mẫu có kích thước 50 × 50 × 50mm và thời gian bảo dưỡng là 7, 14 và 28 ngày. Cường độ chịu nén của vữa là giá trị trung bình của ba mẫu. Dựa trên Tiêu chuẩn ASTM C109, kết quả thử nghiệm của mẫu sẽ được xác định bằng cách tính cường độ trung bình của ba mẫu. Phần trăm sai lệch cá nhân không được vượt quá 15% giá trị trung bình. Mối quan hệ giữa tải trọng và độ dịch chuyển đã được thể hiện cho ba mẫu vật, như được minh họa trong Hình 1. Vào các ngày bảo dưỡng 7, 14 và 28, cường độ chịu nén trung bình lần lượt là 29,29 MPa, 32,59 MPa và 42,69 MPa. Giá trị cường độ chịu nén vào ngày 7 và 14 lần lượt là 70% và 80% cường độ chịu nén dự đoán là 42 MPa vào ngày bảo dưỡng thứ 28. Giá trị cường độ chịu nén sau 28 ngày tương đương với giá trị cường độ chịu nén 42 MPa ban đầu được dự kiến tại thời điểm thiết kế.

c. Phương pháp chuẩn bị và thử nghiệm mẫu

Chín cấu kiện bê tông đã được chế tạo để kiểm tra khả năng thi công và các đặc tính cơ học của bê tông in 3D [2,3,4]. Từ mặt nhìn trên, tất cả các cấu trúc đều được in thành hình dạng tương chữ nhật.



Hình 1- Mối quan hệ giữa lực và chuyển vị cho ba mẫu 7, 14 và 28 ngày

Chín cấu trúc bê tông in 3D được chia thành bốn loại. Các mẫu C-0 và C-90 được in để kiểm tra ảnh hưởng của hướng tải trọng trong quá trình nén đơn trục. Bốn mẫu đã được in để khám phá ảnh hưởng của hướng tải trọng dưới tác dụng uốn điểm giữa: B-0, B-90, S-0 và S-90. Các mẫu F-0 và F-90 được chế tạo để nghiên cứu ảnh hưởng của hướng tải trọng dưới tác dụng uốn ba điểm. Cuối cùng, mẫu A-0 được in để nghiên cứu ảnh hưởng của cường độ bám dính giữa các lớp in.

d. Thử nghiệm cường độ chịu nén

Các thử nghiệm cường độ chịu nén được tiến hành trên các mẫu in 3D kích thước 198 × 198 ×

60mm (chiều cao × chiều dài × chiều rộng) dựa trên Tiêu chuẩn ASTM C1314, và sau khi bảo dưỡng trong 7 ngày và 28 ngày. Trong thử nghiệm cường độ chịu nén, tải trọng theo phương thẳng đứng được đặt với tốc độ tải 1mm/giây bằng máy 200 tấn, và cường độ chịu nén tại thời điểm mẫu bị phá hủy được đo. Cường độ chịu nén được tính theo phương trình (1).

$$f_c = P/A_1 \quad (1)$$

với f_c (N/mm²), P và A_1 lần lượt là cường độ chịu nén, tải trọng tối đa và diện tích mặt cắt ngang.

Cường độ chịu nén của bê tông in 3D được xác định bằng hai phương pháp trong nghiên cứu này: cường độ chịu nén của bề mặt lớp trong mặt phẳng và cường độ chịu nén của bề mặt lớp ngoài mặt phẳng (xoay 90°). Khi thiết lập mẫu, một thiết bị đo độ dịch chuyển tuyến tính (LVDT) đã được lắp đặt trên cả hai đồ gá bên ngoài mẫu để đo độ dịch chuyển của mẫu dưới tải trọng nén, như được hiển thị trong Hình 2.



Mẫu C-0

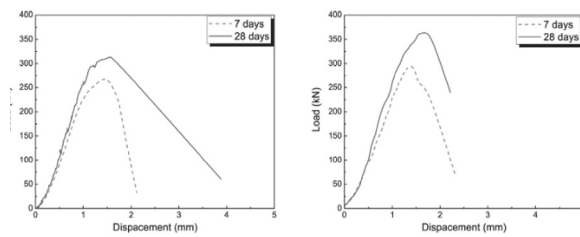


Mẫu C-90

Hình 2 - Thiết lập thí nghiệm nén của bê tông in 3D

Cường độ tối đa của các mẫu C-0 và C-90 được tìm thấy trong khoảng từ 186 kN đến 356 kN và 301 kN đến 322 kN, tương ứng, dựa trên các thí nghiệm vào ngày thứ 7. Giá trị trung bình đo được

cho các mẫu C-0 là 277 kN và 298 kN cho các mẫu C-90. Độ dịch chuyển lớn nhất của các mẫu C-0 và C-90 được xác định là 1,255 mm đến 1,605 mm và 1,418 mm đến 1,463 mm, tương ứng. Vào ngày thứ 7, cường độ chịu nén trung bình của bề mặt lớp là 23,34 MPa cho các mẫu C-0 và 25,11 MPa cho các mẫu C-90. Độ lệch tối đa về tải trọng được tìm thấy là đáng kể, điều này được cho là do thời gian bảo dưỡng tương đối ngắn 7 ngày, trong đó một số mẫu thể hiện cường độ trong khi những mẫu khác thì không, như được thấy trong Hình 3.



Mẫu C-0

Mẫu C-90

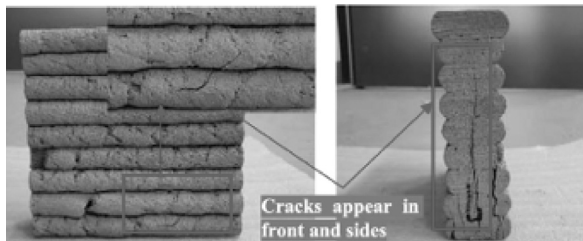
Hình 3- Đồ thị miêu tả sự thay đổi tải trọng và chuyển vị hai mẫu C-0 và C-90

Cường độ tối đa thay đổi từ 284 kN đến 370 kN và 353 kN đến 383 kN cho các mẫu C-0 và C-90, tương ứng, do kết quả thí nghiệm vào ngày thứ 28. Cường độ tối đa trung bình cho các mẫu C-0 và C-90 lần lượt là 313 kN và 365 kN. Độ dịch chuyển lớn nhất của các mẫu C-0 và C-90 được xác định là 1,385mm đến 1,760mm và 1,556mm đến 1,665mm, tương ứng. Sự phân bố các giá trị cường độ tối đa vào ngày thứ 28 được tìm thấy là rất giống với ngày thứ 7. Vào ngày thứ 28, cường độ chịu nén trung bình của bề mặt lớp là 26,35 MPa cho C-0 và 29,15 MPa cho các mẫu C-90, tương ứng, cao hơn 11,42% và 16,09% so với 7 ngày trước đó (23,34 MPa và 25,11 MPa, tương ứng). Ứng suất nén trung bình của các mẫu C-90 được tìm thấy là hiệu quả hơn so với các mẫu C-0 dưới cùng một tải trọng nén và thời gian bảo dưỡng. Sau 7 và 28 ngày bảo dưỡng, ứng suất nén giảm lần lượt khoảng 7,58% và 10,63%. Hơn nữa, một mô hình tương tự đã được nhìn thấy trong phần tuyến tính trước khi phá hủy giòn sau khi đạt đến cường độ tối đa. Do ảnh hưởng của các lỗi về dụng cụ, con người, quy trình và môi trường trong quá trình thử nghiệm, có một số sai sót trong các thử nghiệm mẫu C-0, với sai số giữa giá trị trung bình và độ lệch cá nhân vượt quá 15% với 22,1% và 32,9%, tương ứng, cho mẫu 1 và mẫu 2 của thời gian bảo dưỡng 7 ngày.

Mô hình phá hủy do nén được tiết lộ sau các thử nghiệm cho thấy rằng, sau khi đạt đến tải trọng tối đa, sự nghiền xảy ra trong mẫu do sự gia tăng tải trọng nén, và cường độ của nó giảm nhanh chóng.

Hình 10 mô tả hành vi phá hủy của thử nghiệm cường độ chịu nén sau 7 và 28 ngày bảo dưỡng. Các vết nứt xuất hiện đầu tiên ở phía trước và dọc theo các cạnh của mẫu nơi lực nén tác dụng, và kích thước của các vết nứt dần dần mở rộng từ vết nứt đầu tiên đến khu vực xung quanh. Tiếp theo đó, cường độ của mẫu giảm khi các vết nứt trở nên đủ lớn để có thể nhìn thấy bằng mắt thường. Sự tiếp xúc giữa các lớp bị phá vỡ khi các mẫu chịu tải nén bên ngoài bề mặt lớp, như được thấy trong Hình 4.

Cường độ của mẫu bê tông in 3D chủ yếu được xác định bởi cường độ chịu nén của chúng dưới tác dụng nén. Sự phá hủy giao diện của mẫu chịu tải theo hai hướng chủ yếu bị chi phối bởi lực cắt tại giao diện ở cạnh. Điều này chủ yếu là do sự xuất hiện không thể tránh khỏi của sự trượt ngang giữa các lớp in dưới tác dụng nén. Các vết nứt được tìm thấy xuất hiện dễ dàng hơn trong các mẫu chịu tải theo hướng trong mặt phẳng của bề mặt lớp so với các mẫu chịu tải theo hướng ngoài mặt phẳng. Điều này cuối cùng dẫn đến sự phá vỡ liên kết giữa các lớp[8]. Do đó, tải trọng nén tác dụng bên ngoài có tác động lớn hơn đến bề mặt lớp được định hướng ngoài mặt phẳng so với bề mặt lớp được định hướng trong mặt phẳng, bất kể thời gian bảo dưỡng.



Mẫu C-0



Mẫu C-90

Hình 4- Hình thành vết nứt trong khi nén 2 mẫu C-0 và C-90

e. Thử nghiệm uốn

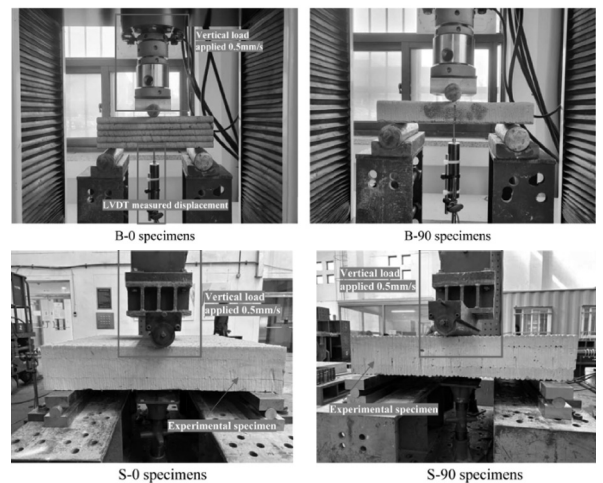
Thử nghiệm uốn với tải trọng điểm giữa

Các mẫu thử nghiệm uốn được chế tạo dưới dạng lớp với kích thước 400 × 110 × 60mm (chiều rộng × chiều dài × chiều sâu) cho mẫu đầm và 1100 × 1100 × 200mm (chiều rộng × chiều dài × chiều sâu) cho mẫu tấm dựa trên Tiêu chuẩn ASTM C1609. Phân tích được thực hiện sau thời gian bảo dưỡng 7 ngày và 28 ngày đối với mẫu đầm và thời

gian bảo dưỡng 28 ngày đối với mẫu tấm[4,6,7]. Mặt khác, tấm composite in 3D được ép lớp ở cả hai mặt và được lắp đầy bằng đường kính 6mm (khoảng cách lưới, 200 × 200mm) và vữa xi măng ở giữa để tăng cường độ. Tại thời điểm này, tải trọng được điều chỉnh đến 0,5mm/phút và được tính bằng phương trình (2):

$$fr = 3PL / 2bd^2 \quad (2)$$

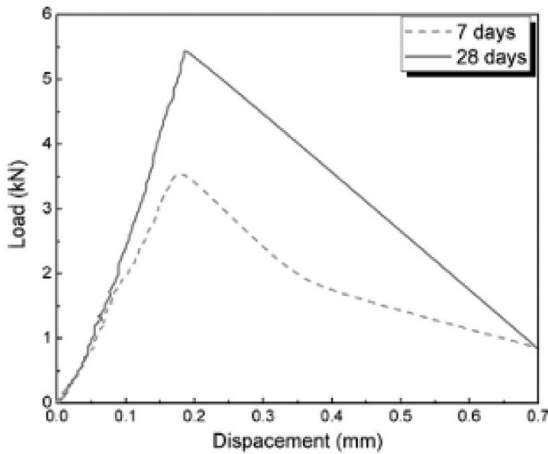
trong đó fr là cường độ uốn (N/mm^2), P là tải trọng tối đa (kN), L là chiều dài của mẫu (mm), b là chiều rộng của mẫu (mm), d là chiều sâu của mẫu (mm). Trong công trình này, cường độ uốn của bê tông in 3D đã được thử nghiệm bằng hai phương pháp: cường độ uốn trong mặt phẳng của bề mặt lớp và cường độ uốn ngoài mặt phẳng của bề mặt lớp sau khi xoay 90°. Cường độ uốn được đo bằng cách tác dụng tải trọng lên bê tông in 3D, thường được ép lớp. Một đồng hồ đo độ dịch chuyển tuyến tính (LVDT) đã được gắn ở tâm của phần dưới của mẫu để đo chính xác độ dịch chuyển tùy thuộc vào trọng lượng của mẫu khi thiết lập mẫu, như được minh họa trong Hình 5.



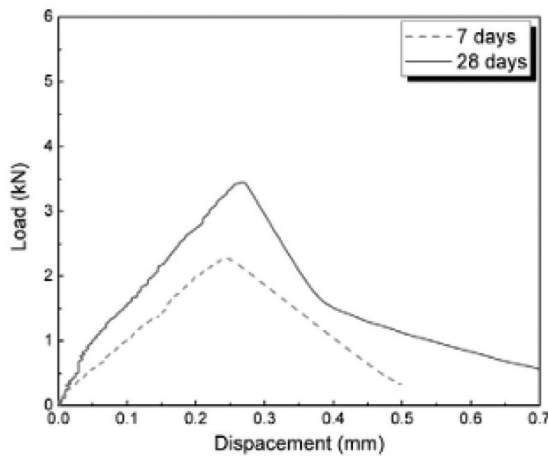
Hình 5- Mô hình thí nghiệm chịu uốn cho các mẫu B-0, B-90, S-0 và S90

Kết quả thí nghiệm ở Hình 6 cho thấy các đường cong tải trọng-độ dịch chuyển cho các mẫu B-0 và B-90 với các khoảng thời gian bảo dưỡng khác nhau. Dựa trên kết quả thí nghiệm ngày thứ bảy, cường độ tối đa của các mẫu B-0 và B-90 được xác định là trong khoảng từ 3,309kN đến 3,981kN và 1,950kN đến 2,480kN, tương ứng. Giá trị trung bình là 3,54kN được ghi lại cho các mẫu B-0 và 2,24 kN, trung bình cho các mẫu B-90. Độ dịch chuyển lớn nhất lần lượt là 0,155mm đến 0,215mm cho các mẫu B-0 và 0,200mm đến 0,315mm cho các mẫu B-90. Như được hiển thị trong Bảng 4, cường độ uốn trung bình của bề mặt lớp vào ngày thứ bảy là 2,2MPa cho các mẫu B-0 và 2,55MPa cho các mẫu B-90. Cường độ đỉnh của các mẫu B-0 và B-90

dao động từ 4,257kN đến 6,258kN và 3,040kN đến 3,810kN, tương ứng, dựa trên kết quả thí nghiệm vào ngày thứ 28. Cường độ tối đa của các mẫu B-0 và B-90 trung bình lần lượt là 5,47kN và 3,38kN. Độ dịch chuyển lớn nhất của các mẫu B-0 và B-90, như được hiển thị trong Hình 6, lần lượt là 0,150mm đến 0,205mm và 0,250mm đến 0,270mm.



(a) B-0 specimens



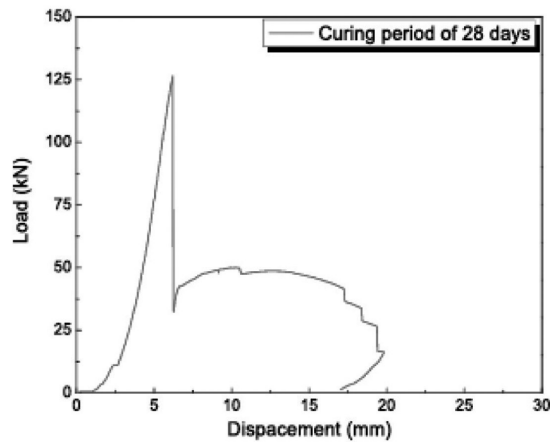
(b) B-90 specimens

Hình 6- Đồ thị thể hiện sự thay đổi tải trọng và chuyển vị ở 2 mẫu đầm B-0 và B90

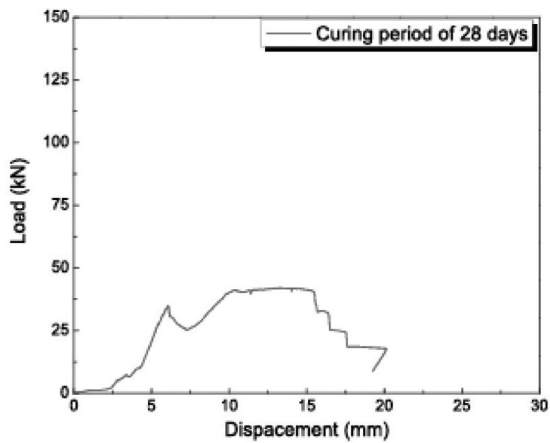
Vào ngày thứ 28 của quá trình bảo dưỡng, sự phân bố các giá trị cường độ tối đa được tìm thấy là tương tự như những ngày thứ 7. Cường độ uốn trung bình của bề mặt lớp vào ngày thứ 28 lần lượt là 3,39 MPa cho các mẫu B-0 và 3,84 MPa cho các mẫu B-90, cao hơn 53,74% và 50,59% so với 7 ngày trước đó (1,47MPa và 1,70MPa, tương ứng). Ứng suất nén trung bình của các mẫu B-90 được tìm thấy là cao hơn so với các mẫu B-0 trong các điều kiện tải và bảo dưỡng giống nhau. Như được chứng minh, ứng suất uốn giảm khoảng 15,91% và 13,27% sau 7 và 28 ngày bảo dưỡng, tương ứng. Việc kiểm tra mô hình phá hủy do uốn sau các thử nghiệm cho thấy rằng sau khi đạt được tải trọng tối đa, các

vết nứt xuất hiện ở tâm dưới, và cường độ giảm nhanh chóng, như được minh họa trong Hình 14. Vết nứt đầu tiên có thể được nhìn thấy xuất hiện ở phần dưới do lực căng trên bề mặt dưới gây ra bởi lực uốn trên bề mặt lớp. Hơn nữa, khi trọng lượng tăng dần, kích thước của vết nứt ở phía dưới tăng lên và lan đến phía trên. Tiếp theo đó, cường độ của mẫu giảm xuống khi các vết nứt nhìn thấy được xuất hiện.

Khi các mẫu đầm bê tông in 3D được tải theo hướng trong mặt phẳng, hướng ứng suất kéo ở nhịp giữa phù hợp với hướng pháp tuyến của giao diện liên kết giữa các lớp in [1,3,5]. Sự phá hủy giao diện do lực kéo rất dễ xảy ra ở vị trí này. Do đó, cường độ uốn chịu tải theo hướng trong mặt phẳng bị ảnh hưởng đáng kể bởi lực kéo. Tuy nhiên, khi các mẫu chịu tải theo hướng ngoài mặt phẳng, hướng ứng suất kéo ở nhịp giữa không phù hợp với hướng pháp tuyến của bất kỳ giao diện liên kết nào, và ứng suất cắt chỉ xảy ra ở giao diện ngang. Do đó, các đặc tính giao diện có ảnh hưởng rất hạn chế đến cường độ uốn khi chịu tải theo hướng ngoài mặt phẳng, và sự hiện diện của nhiều giao diện



(a) S-0 specimens



(b) S-90 specimens

Hình 7- Đồ thị thể hiện giữa tải trọng và chuyển vị hai mẫu S-0 và S-90 ở tuổi 28 ngày

không làm suy yếu cường độ uốn của các mẫu in 3D. Kết quả là, cường độ uốn của các mẫu chịu tải theo hướng ngoài mặt phẳng lớn hơn các mẫu chịu tải theo hướng trong mặt phẳng. Do đó, cần thiết phải áp dụng tải trọng theo hướng ngoài mặt phẳng khi sử dụng cấu trúc dầm để bị uốn. Hình 8 cho thấy các đường cong tải trọng-độ dịch chuyển cho các khoảng thời gian bảo dưỡng khác nhau cho các mẫu S-0 và S-90. Cường độ tối đa dao động từ 99,76 kN đến 142,40 kN và 30,37 kN đến 47,45 kN cho các mẫu S-0 và S-90, tương ứng, cho các thí nghiệm vào ngày thứ 28. Cường độ tối đa trung bình của các mẫu S-0 và S-90 lần lượt là 125,69 kN và 41,30 kN. Như được chứng minh trong Hình 7, độ dịch chuyển lớn nhất cho các mẫu S-0 và S-90 lần lượt là 5,25 mm đến 7,44 mm và 8,83 mm đến 21,02 mm. Cường độ uốn trung bình của các mẫu S-0 và S-90 lần lượt là 3,85 MPa và 1,26 MPa.

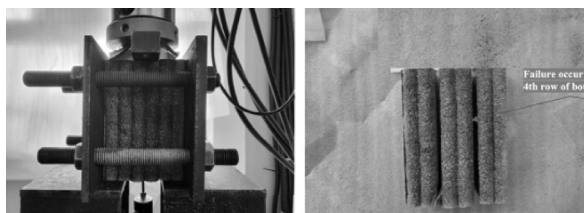
Khi mô hình phá hủy được kiểm tra sau thí nghiệm, các vết nứt được quan sát thấy giữa phần dưới và phần giữa của tất cả các mẫu, và khi tải trọng tăng lên, các vết nứt lan đến phần trên theo hướng thẳng đứng xuống các cạnh dưới, dẫn đến sự phá hủy do uốn của các mẫu S-0. Các vết nứt phát triển ở đỉnh của lớp trong các mẫu S-90 và lan xuống phía dưới theo hướng chéo xuống các cạnh dưới khi tải trọng tăng dần, dẫn đến sự phá hủy tương tác lớp ở phía dưới. Thí nghiệm này chứng minh rằng bề mặt lớp bê tông in 3D bên ngoài có ảnh hưởng cấu trúc đáng kể đến hiệu suất uốn của tường

f. Thử nghiệm cường độ bám dính

Thử nghiệm ở hình 8 để kiểm tra cường độ bám dính bề mặt lớp được tạo ra để đánh giá cường độ liên kết của bề mặt tiếp xúc giữa các lớp khi bê tông in 3D có nhiều lớp và tải trọng xây dựng có thể xảy ra trong quá trình thi công (áp suất ngang, áp suất theo chiều cao chống chất,...). Sau khi đóng rắn trong 7 ngày và 28 ngày, một mẫu 6 lớp kích thước $200 \times 132 \times 60$ mm (chiều rộng \times chiều dài \times chiều sâu) đã được hình thành và đo... Cường độ liên kết được xác định bằng phương trình (3):

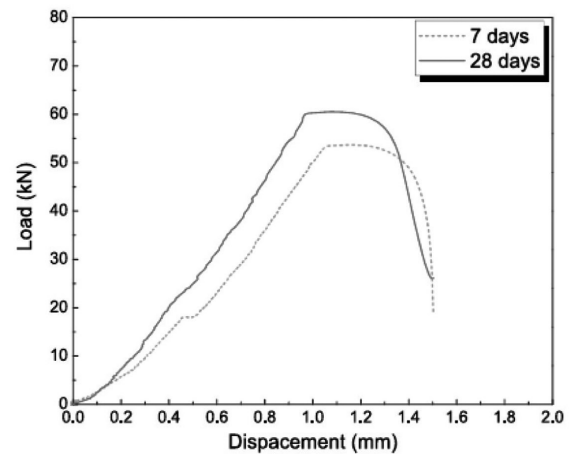
$$f_a = f_{i,max} / 2A_i \quad (3)$$

Trong đó f_a là cường độ liên kết (N/mm^2), $f_{i,max}$ là tải trọng tối đa (kN), A_i là diện tích mặt cắt ngang (mm)

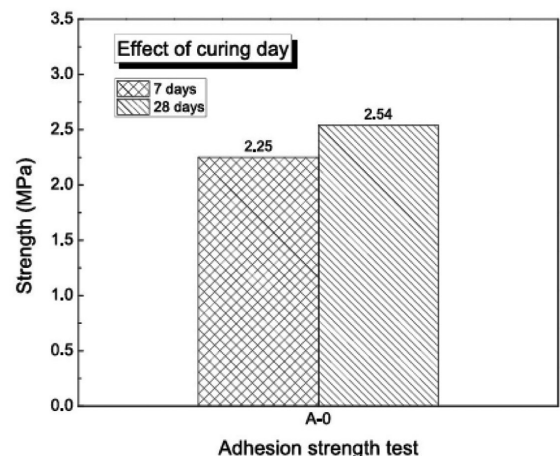


Hình 8- Thí nghiệm kiểm tra độ bám dính của các lớp trong bê tông in 3D

Sau 7 ngày bảo dưỡng, cường độ tối đa được xác định là từ 45,17kN đến 67,18kN, và sau 28 ngày, là từ 45,18kN đến 75,11kN. Giá trị trung bình được đo là 53,95kN sau 7 ngày xử lý và 60,98kN sau 28 ngày. Độ dịch chuyển lớn nhất được ghi nhận cho thời gian bảo dưỡng 7 ngày là 0,85mm đến 2,38mm, và cho thời gian bảo dưỡng 28 ngày là 0,77mm đến 2,37mm. Ở hình 9, cường độ liên kết điển hình là 2,54MPa sau thời gian bảo dưỡng 28 ngày và 2,25 MPa sau thời gian bảo dưỡng 7 ngày.



(a) Load-displacement curve

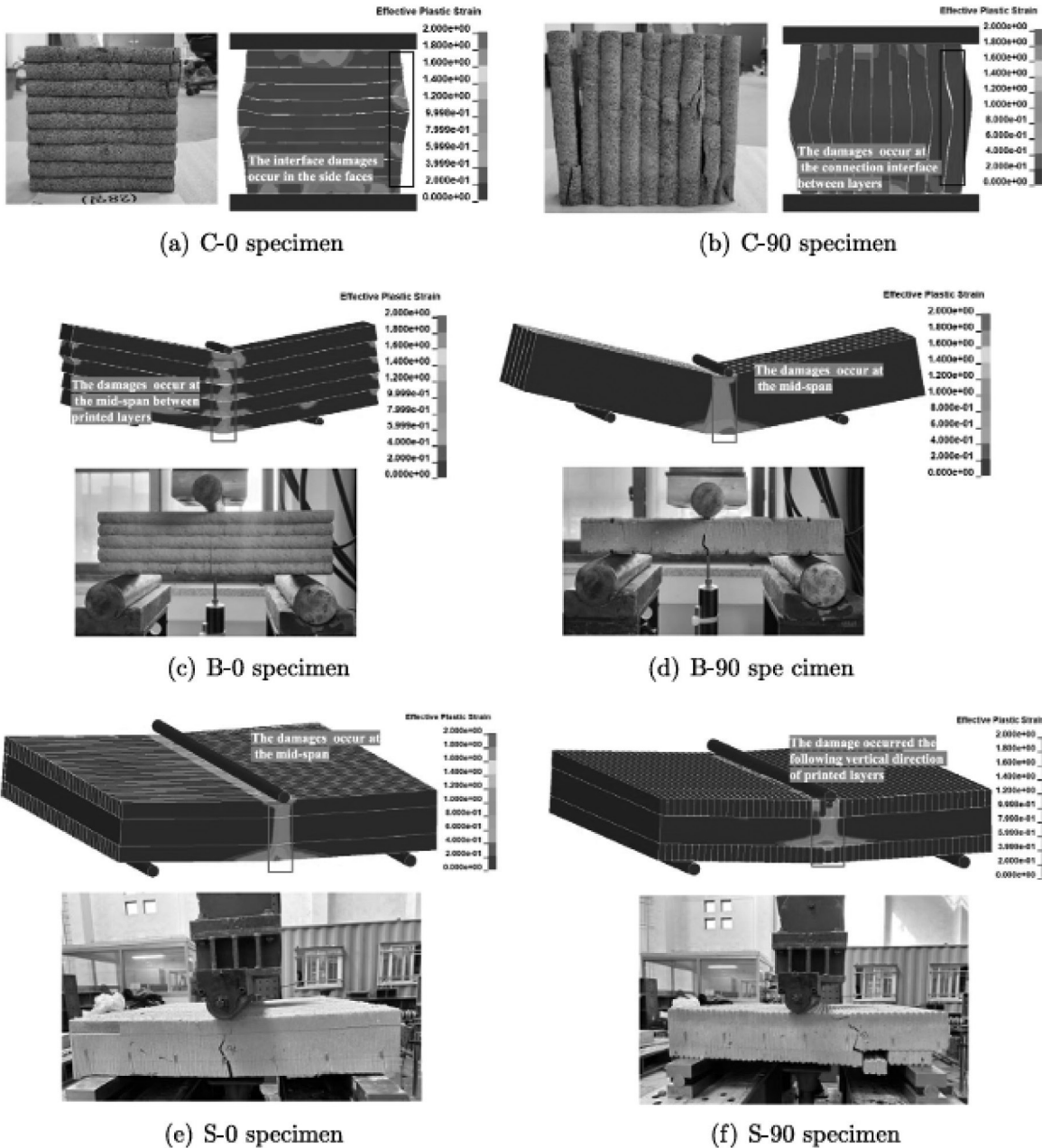


(b) Bonding strength

Hình 9- Kết quả thí nghiệm cường độ bám dính

g. Phân tích bằng phần tử hữu hạn

Dùng phần mềm Abaqus phiên bản 6.3.2 So sánh kết quả tải trọng-chuyển vị từ các phân tích FEM nén và uốn với kết quả thực nghiệm được thể hiện. Tải trọng tối đa thu được từ phân tích FEM cho nén mẫu C-0 và C-90 được phát hiện khác biệt lần lượt là 2.01% và 1.64%, so với kết quả thực nghiệm cho mẫu C-0 và C-90. Độ cứng ban đầu khác biệt lần lượt là 5.91% và 10.71% so với kết quả thử nghiệm cho mẫu C-0 và C-90. Ngoài ra, sự khác biệt về chuyển vị giữa kết quả mô phỏng và thử nghiệm lần lượt là 3.72% và 13.92% cho C-0 và C-90.



Hình 10- Mô hình phân tích bằng phần tử hữu hạn

Tải trọng tối đa thu được từ phân tích FEM cho uốn điểm giữa với B-0 và B-90 được tìm thấy khác biệt lần lượt là 3.64% và 5.88% cho dầm cứng như S-0 và S-90 là 0.27% và 3.92% cho tấm, so với kết quả thực nghiệm. Đối với mẫu B-0 và B-90, độ cứng ban đầu khác biệt so với kết quả thử nghiệm lần lượt là 15.89% và 11.63%, và lần lượt là 11.75% và 28.27% cho mẫu S-0 và S-90. Ngoài ra, sự khác biệt về chuyển vị giữa kết quả mô phỏng và thử nghiệm lần lượt là 16.67% và 4.58% cho B-0 và B-90, cũng như 1.13% và 18.94% cho S-0 và S-90. Tải trọng tối đa được xác định bằng các phân tích FE cho uốn điểm thứ ba với mẫu F-0 và F-90 được tìm thấy khác biệt lần lượt là 3.09% và 2.33% so với kết quả thực nghiệm cho mẫu F-0 và F-90. Độ cứng

ban đầu khác biệt lần lượt là 4.11% và 9.04% so với kết quả thử nghiệm cho mẫu F-0 và F-90. Ngoài ra, sự khác biệt về chuyển vị giữa kết quả mô phỏng và thử nghiệm lần lượt là 5.87% và 7.0782% cho F-0 và F-90, như được hiển thị trong Hình 10.

3. Kết luận

Một chương trình thí nghiệm đã được thực hiện để nghiên cứu liên kết giữa các lớp của bề mặt lớp bê tông in 3D, sử dụng các vật liệu bê tông khác nhau, dưới tác dụng nén và uốn trong và ngoài mặt phẳng, để đánh giá hành vi cơ học không đẳng hướng. Mô hình FEM của bê tông in 3D được sử dụng trong nghiên cứu này đã được xây dựng và hỗ trợ bởi các kết quả thử nghiệm... Các kết luận sau

đây có thể được rút ra:

1. Vì cường độ của mẫu bê tông in 3D phụ thuộc vào cường độ chịu nén dưới tác dụng nén, các vết nứt xuất hiện dễ dàng hơn trong các mẫu chịu tải theo hướng trong mặt phẳng của bề mặt lớp so với hướng ngoài mặt phẳng, và dẫn đến hỏng hóc liên kết giữa các lớp. Do đó, bề mặt lớp chịu tải ngoài mặt phẳng hiệu quả hơn bề mặt lớp chịu tải trong mặt phẳng dưới cùng một tải trọng nén với các thời gian bảo dưỡng khác nhau. Ứng suất nén đã được cải thiện khoảng 8,0% và 11,0% theo thời gian bảo dưỡng 7 ngày và 28 ngày, tương ứng.

2. Khi các mẫu dầm bê tông in 3D được tải theo hướng trong mặt phẳng, sự hỏng hóc giao diện do lực kéo rất dễ xảy ra ở giữa nhịp. Do đó, cường độ uốn chịu tải theo hướng trong mặt phẳng bị ảnh hưởng đáng kể bởi lực kéo. Tuy nhiên, các đặc tính giao diện có ảnh hưởng rất hạn chế đến cường độ uốn khi chịu tải theo hướng ngoài mặt phẳng. Kết quả là, cường độ uốn của các mẫu chịu tải theo hướng ngoài mặt phẳng lớn hơn các mẫu chịu tải theo hướng trong mặt phẳng. Do đó, việc áp dụng tải trọng theo hướng ngoài mặt phẳng là cần thiết khi sử dụng cấu trúc dầm để bị uốn.

3. Đối với các mẫu tấm bê tông in 3D dưới tác dụng uốn, do uốn ở giữa nhịp, trượt ngang sẽ xảy ra giữa các lớp in. Nguyên nhân chính gây ra sự mất cường độ trong các mẫu in 3D là trượt. Giao diện có sự trượt tương đối đáng kể vì hướng tiếp tuyến của giao diện phù hợp với hướng mà mẫu được đặt vào bề mặt lớp ngoài mặt phẳng. Do đó, cường độ của mẫu chịu tải theo hướng trong mặt phẳng của bề mặt lớp lớn hơn bề mặt lớp ngoài mặt phẳng. Do đó, tải trọng được áp dụng theo hướng ngoài mặt phẳng nên được hạn chế khi sử dụng trên các cấu trúc tấm để bị uốn.

4. Mô hình số được xác định là một cách thích hợp để đánh giá hành vi cấu trúc của các vật phẩm bê tông trong quá trình in 3D, bởi vì nó dựa trên các kết quả thử nghiệm nén và uốn. Điều này đã được xác nhận bằng cách tiến hành các thử nghiệm in với các mẫu khác nhau có cấu trúc khác nhau. Mô hình số đã dự đoán thành công chế độ hỏng hóc cũng như hành vi hỏng hóc khác biệt của các mẫu, với tải trọng trong và ngoài mặt phẳng của bề mặt lớp. □

Tài liệu tham khảo

- [1] E.M. Rojas, P. Aramvarekul, Is construction labor productivity really declining? *J. Constr. Eng. Manag.* 129 (1) (2003) 41–46.
- [2] Q.B. To, J. Shin, G. Lee, H. An, K. Lee, Experimental assessment and effective bond length for rc columns strengthened with aramid frp sheets under cyclic loading, *Eng. Struct.* 294 (2023) 116642.
- [3] H. Lingard, T. Cooke, G. Zelic, J. Harley, A qualitative

analysis of crane safety incident causation in the Australian construction industry, *Saf. Sci.* 133 (2021) 105028. [4] T. Huo, M. Tang, W. Cai, H. Ren, B. Liu, X. Hu, Provincial total-factor energy efficiency considering floor space under construction: An empirical analysis of China's construction industry, *J. Clean. Prod.* 244 (2020) 118749.

[5] Q.B. To, K. Lee, S.J. Kim, J. Shin, Quantifying effect of post-tensioned bars for precast concrete shear walls, *Sustainability* 14 (10) (2022) 6141.

[6] Q.B. To, K. Lee, H. An, D.H. Lee, J. Shin, Effective prediction finite element model of pull-out capacity for cast-in-place anchor in high strain rate effects, *Sci. Rep.* 13 (1) (2023) 18070.

[7] M. Xia, J. Sanjayan, Method of formulating geopolymers for 3d printing for construction applications, *Mater. Des.* 110 (2016) 382–390.

[8] A. Perrot, D. Rängeard, A. Pierre, Structural built-up of cement-based materials used for 3d-printing extrusion techniques, *Mater. Struct.* 49 (2016) 1213–1220.

[9] T. Wangler, E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli, N. Rüssel, et al., Digital concrete: opportunities and challenges, *Rilem Techn. Lett.* 1.1 (2017) 67–75.