

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ CỦA LIÊN KẾT DÀM - CỘT UHPC LẮP GHÉP CHỊU TẢI TRỌNG LẶP

## EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF PRECAST UHPC BEAM-COLUMN JOINTS SUBJECTED TO CYCLIC LOADING

Đỗ Tiến Thịnh<sup>1</sup>, Phạm Anh Tuấn<sup>2</sup>, Nguyễn Phương Tùng<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: <sup>1</sup> [thinhibst@gmail.com](mailto:thinhibst@gmail.com), <sup>2</sup> [anhantuanpham.vn@gmail.com](mailto:anhantuanpham.vn@gmail.com), <sup>3</sup> [nguyentunge.ibst@gmail.com](mailto:nguyentunge.ibst@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.59382/pro.intl.con-ibst.2023.ses1-17>

**TÓM TẮT:** Bê tông siêu tính năng (UHPC) là một loại vật liệu mới với nhiều tính năng vượt trội như cường độ chịu nén và chịu kéo đều rất cao so với bê tông thông thường. Trong kết cấu khung BTCT lắp ghép thì liên kết dầm – cột là một trong những bộ phận quan trọng nhất. Trong loại liên kết này thì dầm được liên kết với cột thông qua thanh thép ứng suất trước cường độ cao căng sau, giúp cho liên kết có khả năng chịu mô men uốn cũng như lực cắt. Bài báo này trình bày ứng xử của loại liên kết này dưới tác dụng của tải trọng lặp trên các tiêu chí: khả năng chịu uốn, quan hệ mô men – góc xoay, sự thay đổi của ứng suất trước của thanh thép ứng suất trước trong và sau khi chịu tải trọng lặp.

**TỪ KHÓA:** UHPC, tải trọng lặp, liên kết dầm – cột ứng suất trước.

**ABSTRACTS:** Ultra-performance concrete (UHPC) is a new material with many outstanding features such as compressive and tensile strength that are both very high compared to conventional concrete. In precast reinforced concrete structures, the beam-column joint is one of the most important parts. In this type of connection, the beam is connected to the column through post-tensioned prestressing steel bars (PC bars), making the connection resistant to bending moments as well as shear forces. This paper presents the behavior of this type of connection under the effect of seismic loads on the following criteria: flexural resistance, moment-rotational relationship, change of PC bars' prestress during and after cyclic loading.

**KEYWORDS:** UHPC, cyclic loading, beam-column connection.

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Theo [1], bê tông cốt sợi tính năng siêu cao (UHPC) là loại bê tông được đặc trưng bởi cường độ chịu nén cao, lớn hơn hoặc bằng 130 MPa, cường độ chịu kéo sau nứt cao (cường độ chịu kéo đặc trưng lớn hơn 6.0 MPa), đem lại sự làm việc dẻo khi chịu kéo và sự mất đi tính giòn của loại bê tông này. Ngoài ra, do có độ đặc chắc rất cao, bê tông UHPC có độ bền lâu vượt trội so với bê tông thông thường trong khu vực môi trường xâm thực như tại các khu vực hải đảo và ven biển.

Mặt khác, công nghệ lắp ghép đang ngày càng được áp dụng rộng rãi cho các công trình xây dựng. Đặc biệt tại các khu vực có điều kiện vận chuyển, thi công khó khăn như các đảo xa thì công nghệ lắp ghép có nhiều ưu điểm như tăng tiến độ thi công, quản lý chất lượng thi công tốt hơn, giảm nhân công, giảm thiểu tác động của thời tiết đến quá trình thi công. Tuy nhiên, trong các giải pháp lắp ghép thì giải pháp mới nổi khô sẽ đáp ứng được các ưu điểm của phương pháp lắp ghép.

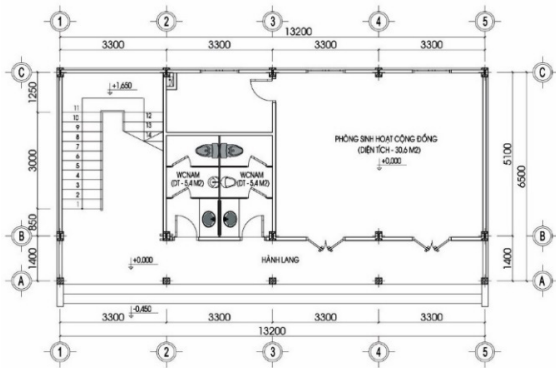
Trong khuôn khổ [1], giải pháp kết cấu khung bê tông UHPC lắp ghép với liên kết dầm – cột ứng suất trước đã được nghiên cứu và lựa chọn áp dụng. Loại liên kết này được phát triển dựa trên kết quả nghiên cứu trong [2]. Trong nghiên cứu này, dầm được liên kết với cột thông qua các thanh thép cường độ cao căng sau không bám dính. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của loại liên kết này dưới tác dụng của tải trọng lặp đảo chiều.

Mục đích thí nghiệm: Xác định khả năng chịu uốn, độ cứng của liên kết dầm – cột, khả năng xoay, kiểm tra sự thay đổi của lực căng trước trong thanh PC.

## 2. CÔNG TRÌNH THỰC

### 2.1. Tổng thể công trình thực

Công trình thực là Nhà sinh hoạt cộng đồng hai tầng, diện tích mặt bằng (6,5 × 13,2) m. Kết cấu chịu lực chính là hệ khung theo phương ngang nhà, kết cấu móng đơn. Toàn bộ các kết cấu chịu lực chính như cột, dầm, sàn đều là cấu kiện bê tông UHPC đúc sẵn và lắp ghép tại hiện trường. Mặt bằng công trình thực được cho trong Hình 1.



**Hình 1. Mặt bằng tầng 1 công trình thực**

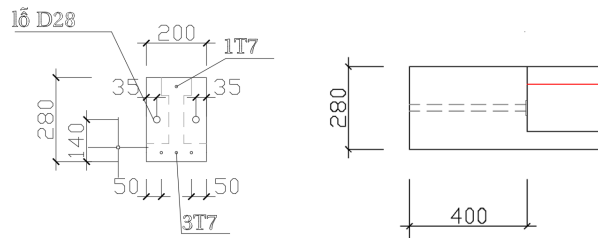
**Bảng 1. Thông số cấu kiện chịu lực chính**

STT	Cấu kiện	Chiều dài nhịp (m)	Kích thước tiết diện		Loại tiết diện	Cốt thép
			Rộng (mm)	Cao (mm)		
1	Dầm ngang	5,1	200	280	Chữ T /chữ nhật	4T7-UST
2	Dầm dọc	3,3	200	280	Chữ T	4T7-UST
3	Cột	3,3	200	280	Chữ I/chữ nhật	2T7-UST
4	Sàn	3,3	540	100	Chữ U	2T5-UST

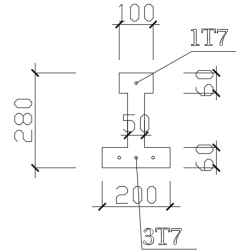
Dầm có tiết diện chữ T ngược, riêng phần đầu dầm với độ dài 400 mm có tiết diện chữ nhật. Mục đích để có không gian bố trí hai thanh PC. Cốt thép dọc bao gồm 3 thanh T7 cường độ cao ở mặt dưới và 1 thanh T7 cường độ cao ở mặt trên dầm. Cột có tiết diện chữ I, riêng phần đầu cột có tiết diện chữ nhật và vai cột để đỡ dầm. Cốt thép dọc bao gồm 2 thanh T7 cường độ cao. Cốt thép chờ đỉnh cột là 4 thanh D16 CB400. Các cấu kiện dầm, cột hoàn toàn không có cốt đai. Thông số chính của các cấu kiện được cho trong Bảng 1. Mặt cắt tiết diện dầm được cho trong Hình 2. Mặt đứng và mặt bên đỉnh cột được cho trong Hình 3.

## 2.2. Liên kết dầm – cột

Trong công trình thực thi hệ khung sẽ chịu toàn bộ tải trọng đứng và tải trọng ngang. Vì vậy, liên kết dầm – cột và liên kết cột – cột phải có khả năng chịu mô men uốn và lực cắt. Để đáp ứng yêu cầu thi công nhanh thì liên kết khô được sử dụng. Trong đó, liên kết cột – cột được thiết kế với thép chờ tại đỉnh cột tầng 1 và lỗ chờ tại chân cột tầng 2. Sau khi lắp cột tầng 2 sẽ tiến hành rót vữa không co vào lỗ chờ này. Với liên kết dầm – cột thì sử dụng thanh thép cường độ cao căng trước để tạo ra khả năng chịu mô men và lực cắt. Hai thanh thép cường độ cao được bố trí tại vị trí chính giữa chiều cao tiết diện dầm. Tại vị trí này bố trí hai lỗ chờ D28 khi đổ bê

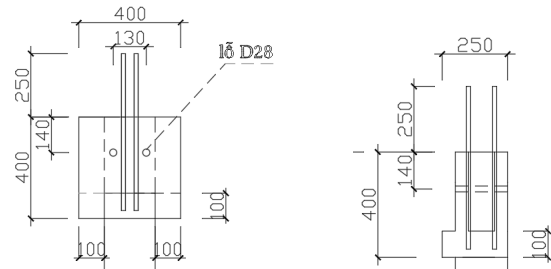


a) Đầu dầm



b) Giữa dầm

**Hình 2. Tiết diện dầm**



a) Mặt trước

b) Mặt bên

**Hình 3. Tiết diện đầu cột**

tông dầm. Tương tự tại vị trí đầu cột cũng bố trí hai lỗ D28 để thanh PC đi qua. Tại vị trí gần đỉnh cột tầng dưới bố trí vai cột để đỡ tạm dầm trong quá trình lắp dựng và đồng thời chịu lực cắt từ dầm truyền xuống trong quá trình sử dụng. Giữa đầu dầm và mặt cột được thiết kế khe hở thi công 20 mm và được chèn bằng vữa bê tông UHPC. Thanh PC cấp bền 830/1030, đường kính D18 có ren trên bề mặt cùng với ê cu và bản đệm chuyên dụng, làm việc như một thanh thép ứng suất trước căng sau không bám dính. Yêu cầu đối với loại liên kết này là phải chịu được mô men, lực cắt tại vị trí đầu dầm và khả năng xoay của đầu dầm dưới tác dụng của tổ hợp tải trọng đứng và tải trọng ngang. Ngoài ra, các biến dạng, hư hỏng sẽ được tập trung vào thanh thép cường độ cao và giảm thiểu hư hỏng tại cấu kiện dầm, cột.

Nội lực tác dụng lên liên kết dầm cột đang xét:

Công trình thực được giả định xây dựng tại khu vực có phân vùng áp lực gió là vùng V theo [7]. Việc tính toán xác định tải trọng được tiến hành theo bộ tiêu chuẩn châu Âu Eurocodes có xét đến điều kiện đầu vào Việt Nam. Mô men tại tiết diện đầu dầm tiếp giáp mặt cột ở trạng thái giới hạn cực hạn là

51,6 kNm, ở trạng thái giới hạn sử dụng là 34,4 kNm. Lực dọc trong cột ở TTGH cực hạn là 150 kN.

### 3. THIẾT KẾ MẪU THÍ NGHIỆM

Các cấu kiện dầm, cột trong mẫu thí nghiệm liên kết được lấy theo đúng tỉ lệ 1:1 so với cấu kiện thực trong công trình nhà mẫu. Trong đó cột tầng 1 và cột tầng 2 được chế tạo sao cho điểm liên kết với sàn trùng với điểm giữa của cột nhà, dầm được chế tạo sao cho điểm đặt kích gia tải ứng với điểm giữa của dầm.

### 4. CHẾ TẠO, LẮP DỰNG MẪU THÍ NGHIỆM

Mẫu thí nghiệm được chế tạo theo từng cấu kiện riêng lẻ: dầm, cột tầng 1, cột tầng 2. Mẫu thí nghiệm dầm – cột được chế tạo để nghiên cứu ứng xử của nút liên kết nên sử dụng giá thiết mô men bằng không tại điểm giữa nhịp. Vì vậy, các cấu kiện dầm, cột được chế tạo có chiều dài bằng một nửa cấu kiện trong công trình thực. Các cấu kiện dầm, cột được liên kết với nhau mô phỏng theo thực tế thi công như sau:

Bước 1: Cố định cột tầng 1 theo phương thẳng đứng;

Bước 2: Dán hai phiến đo biến dạng vào hai thanh cốt thép chờ đỉnh cột tầng một để ghi nhận biến dạng của các thanh cốt thép này trong quá trình thí nghiệm. Lắp chân cột tầng hai với đỉnh cột tầng một, căn chỉnh độ thẳng đứng của hai đoạn cột, rót vữa không co vào các lỗ chờ.

Bước 3: Lắp dầm vào vị trí vai cột, căn chỉnh tim, trục, để một khoảng hở 2 cm giữa đầu dầm và mặt cột, dán băng dính xung quanh để tạo cốp pha; rót bê tông UHPC vào khoảng hở 2 cm. Chờ 28 ngày để UHPC đạt cường độ thiết kế.

Bước 4: Dán phiến đo biến dạng vào hai thanh thép cường độ cao (PC), mỗi thanh hai phiến. Lực kéo trong các thanh thép cường độ cao được ghi nhận gián tiếp thông qua biến dạng, mô đun đàn hồi và tiết diện ngang của thanh. Lắp thanh thép cường độ cao vào lỗ chờ của dầm và cột, lắp kích thủy lực và hệ thống gia tải kéo cho thanh cường độ cao.

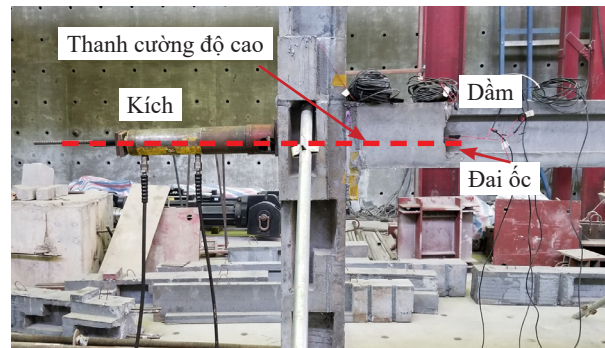
Bước 5: Gia tải cho 02 thanh thép cường độ cao đến giá trị lực yêu cầu  $P_{yc}$ .  $P_{yc}$  của một thanh thép được lấy bằng 70% lực chảy danh định của thanh như trong Bảng 2,  $P_{yc} = 0,7 \cdot 211 = 147,7$  kN. Quy trình gia tải kéo được thực hiện theo 4 lần như sau:

- Lần 1: Gia tải thanh số 1 đến 50%  $P_{yc}$ , xiết ê cu;
- Lần 2: Gia tải thanh số 2 đến 50%  $P_{yc}$ , xiết ê cu;
- Lần 3: Gia tải thanh số 1 đến 100%  $P_{yc}$ , xiết ê cu;
- Lần 4: Gia tải thanh số 2 đến 100%  $P_{yc}$ , xiết ê cu.

Ghi nhận giá trị lực kéo và biến dạng của thanh cường độ cao tại cùng thời điểm để xây dựng biểu đồ quan hệ lực kéo – biến dạng. Tại thời điểm kết

thúc quá trình gia tải, lực căng trong hai thanh PC là 143 kN, tương ứng với ứng suất là 564 MPa. Giá trị lực căng thực tế bằng 97%  $P_{yc}$ .

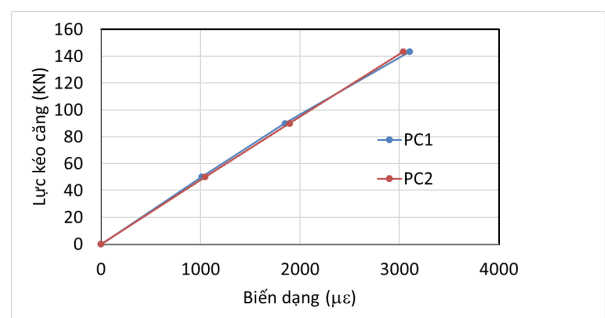
Lực dọc trong cột được tạo thông qua kích thủy lực và hệ thống khung phản lực. Lực dọc được kiểm soát trong suốt quá trình thí nghiệm thông qua loadcell.



Hình 4. Gia tải cho thanh thép cường độ cao

Bảng 2. Thông số thanh thép cường độ cao (PC)

Thanh PC	
Cấp	PSB 830/1030
Số lượng	02
Đường kính danh định (mm)	18
Diện tích tiết diện danh định (mm <sup>2</sup> )	254
Cường độ chảy danh định (N/mm <sup>2</sup> )	830
Cường độ bền danh định (N/mm <sup>2</sup> )	1030
Cường độ chảy thực tế (N/mm <sup>2</sup> )	920
Cường độ bền thực tế (N/mm <sup>2</sup> )	1080
Lực chảy danh định (kN)	211
Lực bền danh định (kN)	262
<b>Vữa UHPC chèn khe đầu dầm</b>	
Cường độ nén (N/mm <sup>2</sup> )	130



Hình 5. Quan hệ ứng suất – biến dạng của thanh PC trong quá trình kéo căng

### 5. HỆ THỐNG THIẾT BỊ ĐO ĐẠC, THU NHẬN SỐ LIỆU

Đo chuyển vị ngang đỉnh dầm: đầu đo chuyển vị của kích thủy lực và đầu đo chuyển vị độc lập gắn vào khung đỡ độc lập.

Đo lực ngang đỉnh dầm: Loadcell của kích thủy lực gia tải.

Đo lực dọc trong cột: Loadcell.

Đo góc xoay của dầm tại vị trí tiếp giáp mặt cột: đầu đo chuyên vị LVDT được bố trí theo cặp đối xứng nhau.

Đo góc xoay của chân cột tầng 2 tại vị trí tiếp giáp đỉnh cột tầng 1: đầu đo chuyên vị LVDT được bố trí theo cặp đối xứng nhau.

Đo biến dạng của thanh thép cường độ cao: thông qua các phiến đo biến dạng dán lên các thanh PC và kết nối với bộ thiết bị đo ghi số liệu.

## 6. SƠ ĐỒ THÍ NGHIỆM

Để thuận tiện cho quá trình thí nghiệm và liên kết mẫu với sàn phản lực và kích, mẫu thí nghiệm được bố trí với cột theo phương ngang, dầm theo phương đứng. Mẫu được neo vào sàn phản lực và liên kết với kích thủy lực thông qua các liên kết bằng kết cấu thép. Hình ảnh mẫu và sơ đồ thí nghiệm được cho trong Hình 6.

Lịch sử gia tải: Gia tải lặp đảo chiều với biên độ tăng dần cho đến khi mô men tại tiết diện đầu dầm đạt đến 73,2 kNm thì chuyển sang gia tải theo một chiều để xác định mô men cực hạn của liên kết.

## 7. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

### 7.1. Hiện trạng nứt và hư hỏng

Nhìn chung không xuất hiện vết nứt tại cấu kiện dầm, cột và khu vực nút liên kết. Chỉ có một vết

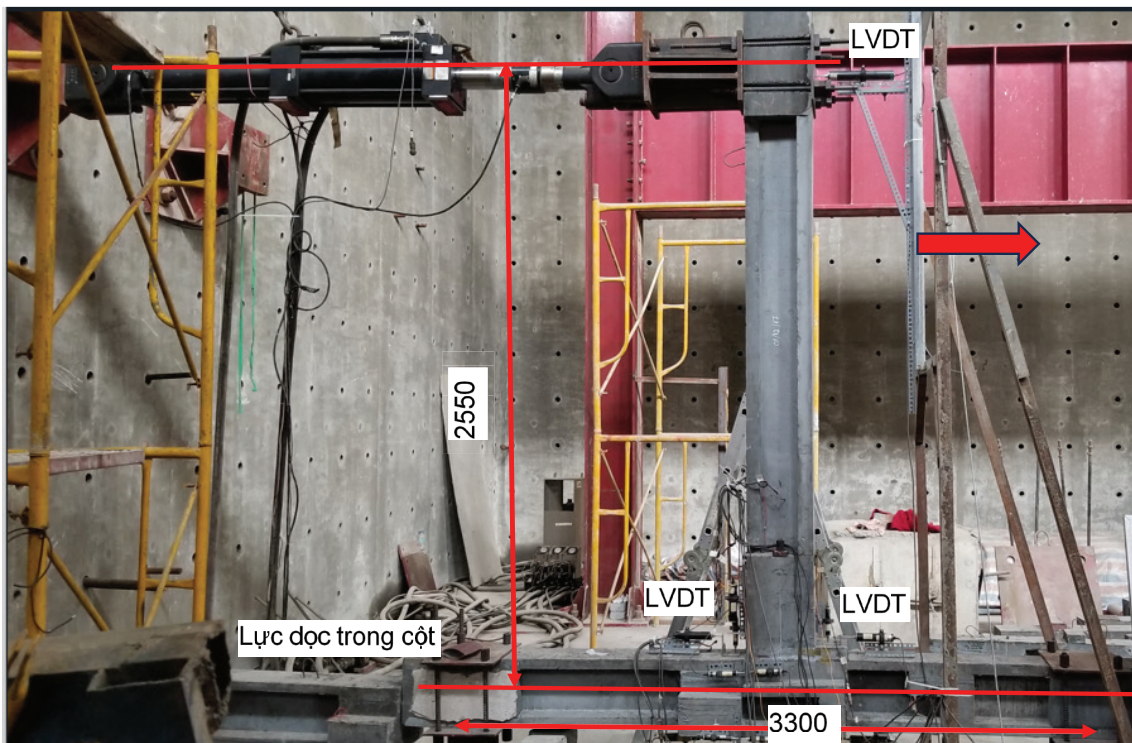
nứt tách tại tiết diện dầm sát mặt cột tại thời điểm mô men tại tiết diện này là 40 kNm. Sau đó, vết nứt tách mở rộng về phía vùng nén của dầm khi tải trọng tăng dần. Khi tải trọng đảo chiều thì vết nứt khép lại và xuất hiện tại phía đối diện của tiết diện dầm. Như vậy liên kết đã ứng xử đúng như dự kiến ban đầu, hạn chế tối đa hư hỏng xuất hiện trong các cấu kiện dầm, cột. Hình 7 thể hiện bề mặt cột và đầu dầm sau khi kết thúc thí nghiệm. Có thể thấy là cấu kiện dầm và cột hầu như chưa bị hư hỏng hay phá hoại. Kết quả đạt được là do bê tông UHPC có cường độ chịu nén và độ dẻo dai rất cao, góp phần hạn chế sự phá hoại của bê tông ở trạng thái cực hạn.



a) Mặt cột

b) Đầu dầm

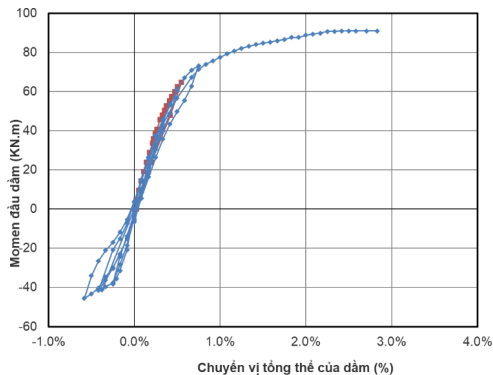
**Hình 7. Bề mặt liên kết sau khi kết thúc thí nghiệm**



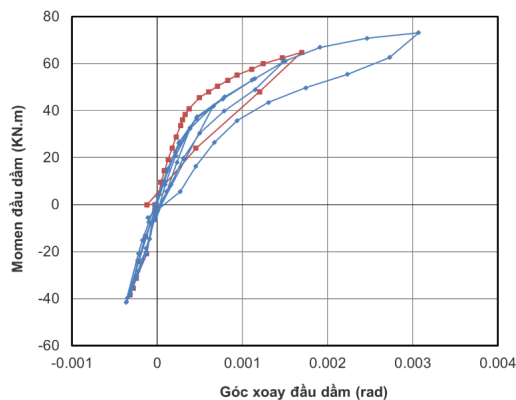
**Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm**

## 7.2. Quan hệ mô men – chuyển vị tổng thể dầm

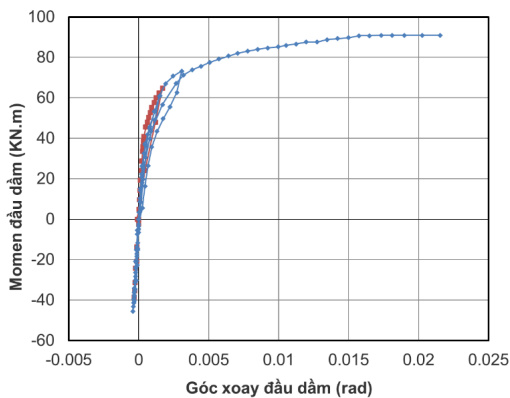
Hình 8 thể hiện quan hệ mô men – chuyển vị tổng thể dầm. Mô men tại tiết diện đầu dầm được xác định bằng lực ngang trong kích nhân với khoảng cách từ điểm gia tải tới tiết diện đầu dầm (2,41 m). Chuyển vị tổng thể dầm, được tính bằng chuyển vị ngang đầu dầm chia cho nhịp dầm (2,41 m), tính bằng %. Kết quả thí nghiệm cho thấy về tổng thể, trong giai đoạn gia tải lập phần lớn chuyển vị của dầm là đàn hồi, biến dạng dư rất nhỏ. Đây là một trong những đặc trưng ứng xử của loại liên kết này.



Hình 8. Quan hệ mô men – chuyển vị tổng thể dầm



Hình 9. Quan hệ mô men – góc xoay đầu dầm, gia tải lập



Hình 10. Quan hệ mô men – góc xoay đầu dầm, gia tải một chiều.

## 7.3. Quan hệ mô men – góc xoay đầu dầm

Cơ chế chịu lực của liên kết dầm – cột lắp ghép ứng suất trước: Mô men trong dầm được chịu bởi 02 thanh thép cường độ cao. Mô tả chung về sự làm việc của loại liên kết này như sau:

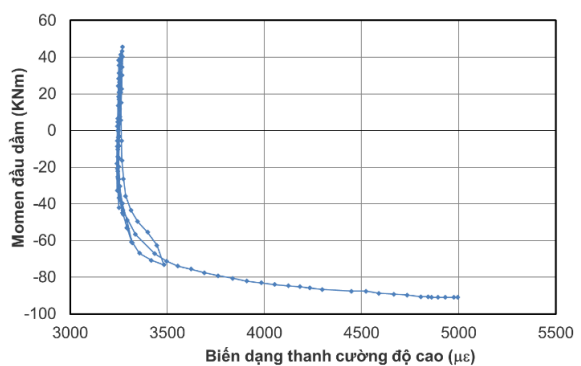
Ở thời điểm sau khi kéo căng: lực căng P trong 02 thanh thép cường độ cao sẽ tạo ra ứng suất nén đều trên tiết diện đầu dầm. Khi dầm chịu tác dụng của mô men, ứng suất kéo tại biên chịu kéo tăng dần. Khi ứng suất kéo này vượt quá ứng suất nén trước do ứng lực trước thì tiết diện đầu dầm bắt đầu xuất hiện vết nứt tách tại biên chịu kéo. Mô men càng tăng thì bề rộng vết nứt càng tăng và vết nứt ăn sâu xuống vùng bê tông chịu nén. Độ cứng của nút giảm. Dầm đạt mô men cực hạn khi ứng suất kéo trong thanh cường độ cao đạt đến cường độ bền hoặc bê tông vùng nén bị phá vỡ.

Hình 9 thể hiện quan hệ mô men – góc xoay đầu dầm ứng với tải trọng lập theo chu kỳ. Có thể thấy trước khi mô men đạt giá trị 40 kNm, góc xoay của dầm thay đổi tuyến tính theo mô men tác dụng. Liên kết có thể coi như là liên kết ngàm. So sánh với giá trị mô men tính toán ở trạng thái giới hạn sử dụng 34,4 kNm thì có thể thấy là liên kết hoàn toàn đáp ứng được điều kiện sử dụng. Sau khi mô men đạt giá trị 40 kNm thì giá trị góc xoay tăng nhanh trong khi mô men tăng chậm, thể hiện độ cứng của liên kết giảm, liên kết dầm – cột ứng xử như một khớp dẻo. Mô men lớn nhất đạt 73,2 kNm. Giá trị mô men này tương ứng với góc xoay là 0,003 rad. So với giá trị mô men cực hạn là 51,6 kNm thì giá trị này gấp 1,42 lần.

Hình 10 thể hiện quan hệ mô men – góc xoay đầu dầm khi gia tải theo một chiều. Có thể thấy là góc xoay đầu dầm đạt đến giá trị lớn là 0,02 rad, tương ứng với mô men 90,7 kNm. Điều này cho thấy khả năng xoay của dầm là rất tốt.

## 7.4. Quan hệ mô men – biến dạng thanh PC

Hình 11 thể hiện quan hệ mô men – biến dạng thanh PC. Có thể thấy khi mô men nhỏ hơn 40 kNm



Hình 11. Quan hệ mô men – biến dạng thanh PC trong quá trình thí nghiệm

thì biến dạng của thanh PC là hoàn toàn đàn hồi. Khi mô men tăng lên 72,3 kNm thì bắt đầu xuất hiện biến dạng dẻo. Tại thời điểm kết thúc thí nghiệm biến dạng trong thanh PC đạt 5000  $\mu\epsilon$ . Mô men đạt giá trị đỉnh và bắt đầu giảm.

## 8. KẾT LUẬN

Từ kết quả thí nghiệm có thể rút ra một số kết luận sau:

1) Liên kết dầm – cột đã có khả năng chịu uốn đạt yêu cầu đề ra, về cả khả năng chịu mô men cũng như góc xoay của dầm, hạn chế tối đa hư hỏng xảy ra trong dầm, cột.

2) Công tác gia tải thanh PC đã đạt yêu cầu đề ra với độ chính xác cao, sự thay đổi của lực căng trước cũng được kiểm soát tốt trong suốt quá trình thí nghiệm.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Viện KHCN Xây dựng – Bộ Xây dựng đã hỗ trợ về kinh phí và trang thiết bị để thực hiện nghiên cứu này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Báo cáo tổng kết đề tài “Nghiên cứu giải pháp kết cấu lắp ghép sử dụng bê tông tính năng cao cho công trình xây dựng trên đảo”, Viện KHCN XD, 2019.
- [2] Thinh Tien, DO, K. Kusunoki, A. Tasai, 2011, *Experimental study on improved precast unbonded post-tensioned beam-column joint system*, J. Constr. Eng., AIJ, Vol. 76, No, 659, 149-156.
- [3] Báo cáo tổng kết đề tài “Nghiên cứu cơ sở khoa học xây dựng tiêu chuẩn bê tông cốt sợi tính năng siêu cao (UHPC)-Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử”, Hội BTVN, 2022.
- [4] AFNOR NF P18-470 “Concrete-Ultra-High performance fibre reinforced concrete - Specification and conformity”. France standard, 2016.
- [5] AFNOR NF P18-710 *National addition to Eurocode 2 “Design of Concrete structure: Specification rule for Ultra-High performance fibre reinforced concrete”*. France standard, 2016.
- [6] QCVN 02:2009/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên, 2009.