

# MÔ PHỎNG ỨNG XỬ CỤC BỘ TẠI VỊ TRÍ GÓC KHẮC CỦA DẦM SUPER-T TRONG GIAI ĐOẠN SẢN XUẤT

Bùi Đức Vinh<sup>a,b,\*</sup>, Lê Nguyễn Phương<sup>c</sup>, Chu Thị Hải Vinh<sup>a,b</sup>,

Lê Văn Phước Nhân<sup>a,b</sup>, Nguyễn Thanh Hải<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh,  
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>b</sup>Đại học Quốc gia TP. HCM, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>c</sup>Công ty cổ phần Beton 6, Km1877 Quốc Lộ 1K, phường Bình An, TP. Dĩ An, Bình Dương, Việt Nam

<sup>d</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Trung,  
195 đường Hà Huy Tập, Tp. Tuy Hòa, Phú Yên, Việt Nam

Nhận ngày 21/3/2022, Sửa xong 01/6/2022, Chấp nhận đăng 08/7/2022

## Tóm tắt

Dầm bê tông cốt thép dự ứng Super Tee (Super-T) được biết đến với ưu điểm vượt nhịp lớn, khả năng giữ ổn định lật trong mặt phẳng làm việc và chịu xoắn cao. Bên cạnh đó, quá trình thi công dầm nhanh và không quá phức tạp. Việc tìm hiểu quá trình phát triển ứng suất trong suốt các giai đoạn thi công và xác định cơ chế tạo ra vết nứt đang được quan tâm. Bài viết này trình bày phương pháp mô phỏng bằng phần mềm Atena để xác định cơ chế hình thành vết nứt xiên ở góc khắc. Kết quả mô phỏng cho thấy sự phát triển ứng suất theo trình tự các bước sản xuất dầm và xác định ứng suất tại vị trí đầu dầm, từ đó chỉ ra những nguyên nhân có thể dẫn đến sự hình thành của vết nứt tại khu vực góc khắc của dầm.

**Từ khóa:** dầm Super-T; vết nứt xiên góc khắc; ứng suất; mô phỏng bằng Atena.

SIMULATION THE LOCAL BEHAVIOR AT THE RE-ENTRANT CORNER ZONE OF DAPPED-END SUPER T BEAM IN THE PRODUCTION STAGE

## Abstract

The prestressed reinforced concrete girder super Tee (Super-T) is known for their advantages of large span, ability to keep tipping stability in the working plane, and high torsion resistance. Besides, the beam construction process is implemented fast and not too complicated. Determining the stress development process during construction stages and the mechanism of cracks has been being researched. This article presents a simulation method using Atena software to determine the mechanism of the diagonal crack. The results show the stress development according to the sequence of beam manufacturing steps and determine the stress at the beam end position, thereby indicating possible causes leading to forming the cracks in areas notch corner.

**Keywords:** dapped-end super T beam; diagonal cracks; stress; simulation by Atena.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(3V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(3V)-08) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Dầm Super-T được sử dụng rộng rãi cho kết cấu phần trên của các cầu dẫn vượt sông lớn, các cầu cạn vượt nút giao và đường cao tốc. Nguyên mẫu dầm Super-T được xây dựng từ T-Slab với nhịp khởi đầu 19m, sau đó được phát triển dần và sử dụng phần lớn cho các cầu thuộc Dự án M2 Motorway,

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [vinhbd@hcmut.edu.vn](mailto:vinhbd@hcmut.edu.vn) (Vinh, B. Đ.)

Tây Bắc Úc với khẩu độ từ 16 đến 38 m, chiều cao dầm từ 0,75 m đến 1,50 m [1]. Tại Việt Nam, dầm Super-T áp dụng lần đầu tiên tại dự án cầu Mỹ Thuận (1998). Từ đó đến nay, rất nhiều dự án đã sử dụng loại kết cấu này với chiều dài nhịp là 38,2 m, hai đầu dầm có dạng cắt khắc hoặc không cắt khắc và được thi công theo phương pháp đúc sẵn và cạp dự ứng lực được căng kéo trước. Kể từ lần đầu tiên được áp dụng cho đến các dự án gần đây, hiện tượng vết nứt tại khu vực đầu dầm Super-T vẫn tiếp tục xuất hiện trong giai đoạn sản xuất dầm, chưa thể khắc phục triệt để mặc dù đã có sự điều chỉnh thiết kế về cấu tạo và bố trí cốt thép chống nứt.

Bộ Giao thông vận tải đã tổ chức các cuộc họp xem xét chỉ đạo và báo cáo các vấn đề liên quan đến việc tính toán thiết kế và khắc phục các vết nứt của dầm [2, 3]. Các báo cáo đã chỉ ra rằng cần phải bổ sung các lưới cốt thép xiên tại vị trí góc khắc để hạn chế sự phát triển của vết nứt xiên với các kết quả phân tích cường độ làm việc của các lưới thép. Việc tính toán khả năng chịu lực tổng thể của Dầm super-T cũng như phân tích trạng thái ứng suất cục bộ khu vực đầu dầm bằng phương pháp tính toán thủ công sẽ cho kết quả thiếu chính xác và không phản ánh đúng ứng xử của kết cấu. Do đó, việc sử dụng các phần mềm kết cấu để phân tích ứng suất, biến dạng khu vực đầu dầm là giải pháp khả thi nhất hiện nay.

Các vết nứt đầu dầm xuất hiện trong giai đoạn sản xuất (Hình 1) bao gồm: Nứt ngang bầu dưới dầm (1); Nứt xiên tiếp giáp giữa cánh và phần đặc đầu dầm (2); Nứt xiên, dọc tiếp giáp giữa cánh và sườn dầm (3); Nứt xiên ở góc khắc (4) vẫn chưa được khắc phục triệt để. Các vết nứt (1), (2), (3) đã được đánh giá là không gây ảnh hưởng đến khả năng chịu lực cũng như chất lượng công trình.



Hình 1. Các dạng vết nứt đầu dầm Super-T

Vết nứt số (4) xuất hiện sau khi truyền dự ứng lực, mặc dù đã có điều chỉnh về cấu tạo, bố trí thép chống nứt khu vực đầu dầm nhưng vẫn chưa khắc phục triệt để. Sau khi xuất hiện, các vết nứt tại vùng góc khắc của dầm Super-T tiếp tục được ghi nhận và theo dõi. Do đó, việc nghiên cứu khắc phục hiện tượng nứt xiên cần thiết được thực hiện nhằm hoàn thiện hơn chất lượng của dầm, tạo ra cơ sở vững chắc cho các quyết định lựa chọn giải pháp kết cấu trong từng dự án cụ thể.

Bài viết này làm rõ các quy trình sản xuất, phân tích sự hình thành và tác dụng lực trong mỗi giai đoạn sản xuất cho dầm cầu Hóa An tỉnh Đồng Nai (Hình 2). Từ đó xây dựng mô hình phân tích gần đúng nhất cho bài toán mô phỏng bằng cách sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn Atena [4]. Mô hình kết cấu 3D được xây dựng và mô phỏng các bước xuất hiện lực tác dụng lên kết cấu dầm. Từ các kết quả phân tích đó tiến hành đề xuất các giải pháp nhằm hạn chế nứt tại khu vực góc khắc dầm.



(a) Hình dạng đầm



(b) Bố trí cốt thép khu vực đầu đầm

Hình 2. Đầm Super T cầu Hóa An (Đồng Nai)

## 2. Các giai đoạn sản xuất đầm Super-T

Hiện nay đầm Super – T được sản xuất khá rộng rãi tại các nhà máy và công trường với trình tự 7 bước sản xuất cơ bản [5–8]. Dựa vào các bước cơ bản này có thể mô tả quá trình sản xuất đầm được chia thành 04 giai đoạn, được thể hiện như Hình 3.



(a) GĐ1. Căng cáp và lắp đặt cốt thép



(b) GĐ2. Đổ bê tông đầm



(c) GĐ3. Cắt cáp truyền ứng lực vào đầm



(d) GĐ4. Cầu đầm ra khỏi ván khuôn

Hình 3. Các giai đoạn sản xuất đầm Super-T

- Giai đoạn 1: cốt thép dự ứng lực sẽ được căng đến lực thiết kế  $P$ . Quá trình căng cáp được kiểm soát bằng độ giãn dài tương ứng với từng cấp lực, nếu bị mất mát ứng suất do thiếu hụt độ giãn dài thì phải tiến hành căng vượt nhưng giá trị này không vượt quá  $1,05P$  và giới hạn cho phép của cáp.

- Giai đoạn 2: bê tông đầm được đổ bằng xe bê tông chuyên dùng, thời gian đổ trong khoảng 03 tiếng. Đầm lên bê tông được sử dụng kết hợp giữa đầm rung và đầm dùi. Tại khu vực đầu đầm sử dụng các loại đầm dùi đường kính nhỏ D30 để đảm bảo độ đặc chắc cho bê tông.

- Giai đoạn 3: Khi bê tông đạt cường độ cho phép, tiến hành tháo dỡ ván khuôn trong và cắt cáp truyền ứng suất trước vào đầm. Cắt cáp được thực hiện bằng gió đá, cắt các tảo cáp từ ngoài vào trong, từ trên xuống dưới và phải tuyệt đối đảm bảo các điểm cắt trên mỗi tảo cáp được cắt đồng thời.

- Giai đoạn 4: ngay sau khi cắt cáp, đầm được cẩu ra khuôn thông qua 02 móc cẩu. Trọng tải cẩu phải đảm bảo nhắc được tải trọng bản thân đầm (70 tấn) và ma sát giữa thành khuôn với bê tông đầm, đầm được nhắc bằng 02 cầu trục với sức nâng của một cầu trục là 50 tấn.

Giai đoạn sản xuất 1 và 2 sẽ không được mô phỏng vì thực tế bê tông đầm đang hình thành cường độ nên chưa chịu tác dụng của các ngoại lực đang xét. Giai đoạn này đầm chỉ đang chịu ảnh hưởng của nhiệt độ, co ngót và các yếu tố môi trường khác nhưng các yếu tố này lại không nằm trong phạm vi nghiên cứu. Khi cắt cáp truyền ứng suất trước (giai đoạn 3), đầm mới bắt đầu chịu tác dụng. Do đó, trong mô phỏng bằng phần mềm Atena có thể chia thành 02 giai đoạn thi công như sau:

Giai đoạn 1: Truyền ứng suất trước vào đầm:

- Giai đoạn 1.1: Lực tác dụng gồm trọng lượng bản thân đầm, 60% dự ứng lực, lực ma sát giữa ván khuôn và đầm.

- Giai đoạn 1.2: Bao gồm tải trọng trong giai đoạn 1.1 và lực tác dụng đặt mới gồm 40% dự ứng lực 2.

Giai đoạn 2: Cẩu đầm ra khỏi ván khuôn. Bao gồm tải trọng tác dụng trong giai đoạn 1 và Lực tác dụng đặt mới gồm lực (mô phỏng) nhắc đầm ra khỏi ván khuôn.

### 3. Mô phỏng phần tử hữu hạn cho đầm Super-T

#### 3.1. Khai báo mô hình cho đầm Super-T

Mô hình kết cấu 3D được xây dựng bằng phần mềm ATENA [4]. Atena là bộ phần mềm chuyên phân tích kết cấu phi tuyến dựa trên lý thuyết phần tử hữu hạn được phát triển bởi Cervenka Consulting, gồm 6 module: static 2D và 3D, Creep 2D và 3D, Temperature 2D và 3. Đặc biệt Atena cung cấp các công cụ đặc biệt để mô phỏng kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, trong đó nổi bật là đa dạng các mô hình vật liệu bê tông.

Trong bài viết này, kết cấu đầm super-T của dự án cầu Hóa An (vượt sông Đồng Nai được xây dựng năm 2013) sẽ được dùng để mô phỏng với các thông số liệt kê ở Bảng 1, kích thước chi tiết và dạng hình học của đầm được thể hiện ở Hình 4.

Một số chi tiết làm đẹp của đầm thực sẽ được loại bỏ trong mô hình để tránh các yếu tố phức tạp liên quan đến quá trình sinh lưới phần tử hữu hạn. Do kết cấu có tính đối xứng và để giảm khối lượng tính toán, mô hình phân tích sẽ được xây dựng cho 1/2 đầm. Bê tông đầm sẽ được mô hình như các phần tử khối ba chiều (3D solid), cốt thép thường và dự ứng lực sẽ được khai báo như là các phần tử thanh 1 chiều (Hình 5).

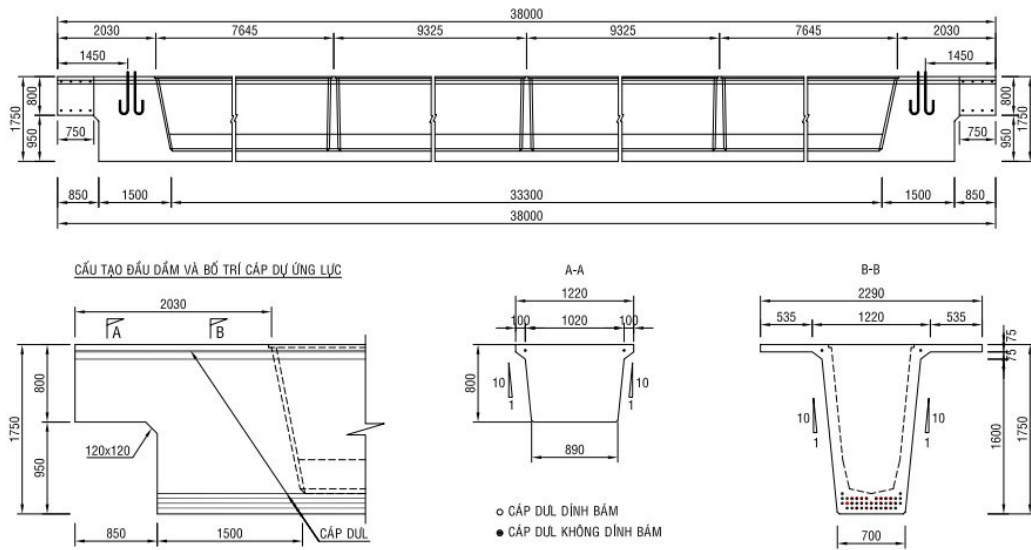
Lực ma sát giữa thành ván khuôn và bề mặt đầm bê tông tiếp xúc được khai báo như là một lò xo có độ cứng  $k$ , điểm đặt tại nút phần tử mặt bên (spring for point), chiều theo phương  $z$ .

Đối với đầm bê tông cốt thép việc phân chia lưới sẽ được thực hiện qua 02 giai đoạn, phân lưới cho phần tử solid 3D (bê tông) sẽ được thực hiện trong pre-processor, trong bước này các thanh thép

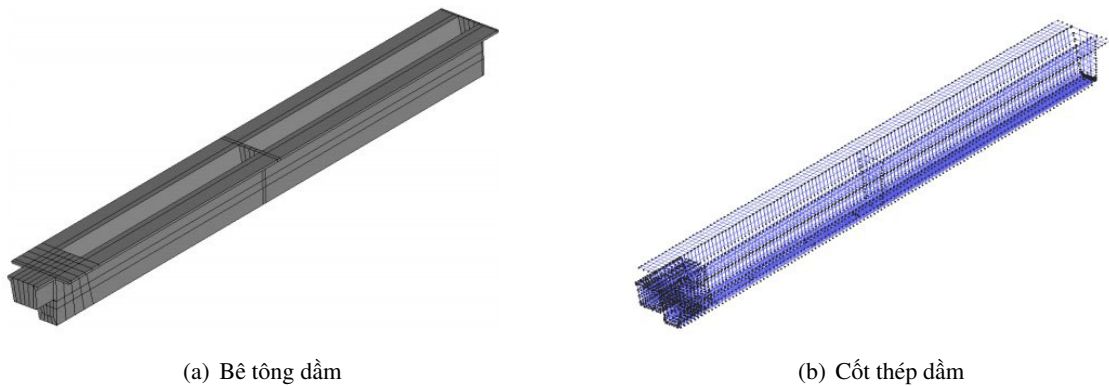


Bảng 1. Bảng thông số cơ bản của dầm Super-T (Hóa An)

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Chiều dài dầm	m	38
Chiều cao dầm	m	1,75
Bề rộng cánh dầm	m	2,29
Cường độ bê tông 28 ngày tuổi	MPa	45
Cường độ bê tông khi cắt cáp	MPa	40
Tổng số tạo cáp dự ứng lực	tao	40
Loại cáp dự ứng lực		15,24
Lực căng 01 tao	kN	198

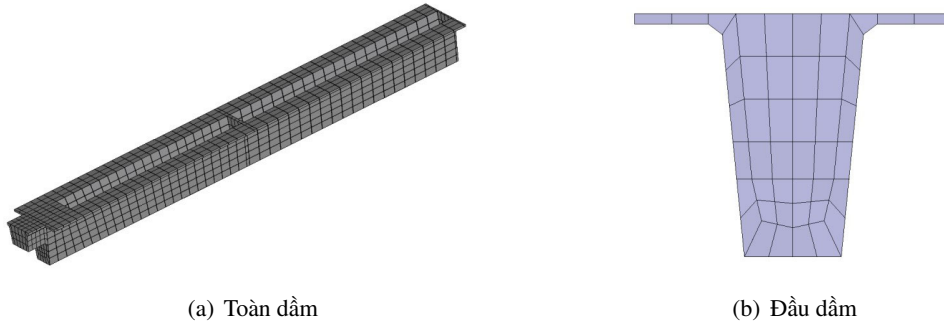


Hình 4. Kích thước cơ bản dầm Super-T Hóa An



Hình 5. Mô hình phần tử hữu hạn dầm

thường và dự ứng lực vẫn sẽ là các đối tượng hình học. Trong giai đoạn phân tích, các thanh thép sẽ được định nghĩa là các phần tử thanh được chôn sẵn (embedded elements) trong phần tử solid 3D bê tông. Đối với dầm super-T sẽ được sử dụng phần tử hexahedra để chia lưới, mô hình chia lưới cho dầm được thể hiện như Hình 6.

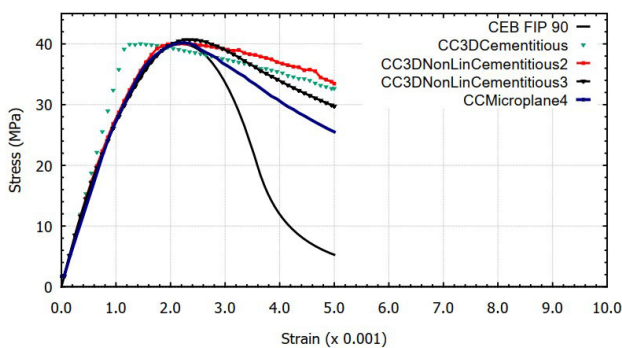


Hình 6. Mô hình lưới phần tử cho dầm

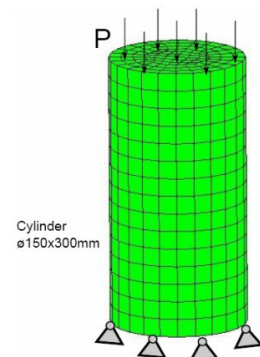
### 3.2. Mô hình vật liệu cho bê tông và cốt thép

Phần mềm Atena hỗ trợ nhiều mô hình vật liệu cho bê tông khác nhau tùy thuộc vào tính chất và đặc tính thực tế của từng loại. Trong nghiên cứu này, mô hình vật liệu Microplane M4L [9] sẽ được áp dụng cho vật liệu bê tông. Mô hình Microplane M4L có khoảng 33 thông số, bao gồm 2 thông số vật liệu – mô đun đàn hồi  $E$ , hệ số Poisson  $\nu$  và 31 thông số được xác định ở cấp độ vi mô:  $k_1 \rightarrow k_4, c_1 \rightarrow c_{27}$ , có nhiều thông số không thể xác định từ thực nghiệm. Các thông số  $k$  và  $c$  xác định quan hệ cường độ và chuyển vị đặc trưng cho một loại bê tông cụ thể.

Nhằm đảm bảo tính chính xác của bài toán mô phỏng, các thông số mô hình vật liệu sẽ được khai báo vào phần mềm Atena, các hệ số này được thiết lập bằng cách hiệu chỉnh lại mô hình mẫu bê tông chịu nén với mẫu trụ tròn kích thước ( $\phi 150 \text{ mm} \times H300 \text{ mm}$ ) như thể hiện ở Hình 7, cường độ  $f'_{ci} = 40 \text{ MPa}$ . Ứng xử của mẫu ở cấp độ vật liệu được so sánh với Ceb-fip 90 [10]. Các thông số cơ bản được trình bày như trong Bảng 2.



(a) Kết quả mô phỏng thí nghiệm nén đơn



(b) Mẫu mô phỏng thí nghiệm

Hình 7. Hiệu chỉnh mô hình vật liệu

Bảng 2. Thông số cơ bản của Mô hình Microplane sử dụng cho bê tông đầm

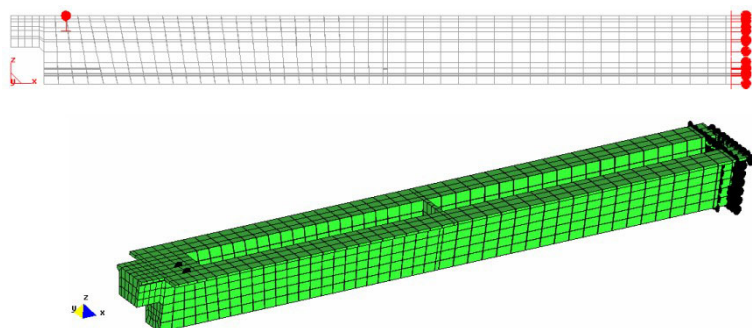
Thông số	Đơn vị	Giá trị
Cường độ chịu nén $f'_{ci}$	MPa	40
Mô đun đàn hồi $E_c$	MPa	34129
Hệ số poisson		0,2
Khối lượng riêng	kN/m <sup>3</sup>	25
Số mặt Microplane NP		21

Cốt thép thường và thép dự ứng lực được ứng xử như các phần tử thanh chôn sẵn trong khối solid bê tông khi phân tích kết cấu, giữa bê tông và cốt thép được xem như dính bám lý tưởng và tuân theo mô hình đàn - dẻo lý tưởng. Để đơn giản khi mô hình và cũng nhằm hạn chế lỗi khi phân tích, cốt thép sẽ được bỏ qua bán kính uốn, xem thép như các thanh thẳng. Cốt thép thường sử dụng là loại cốt thép gân phù hợp TCVN 165:2008, giới hạn chảy 400 MPa [11] với quan hệ ứng suất – biến dạng giả thiết theo mô hình đàn – dẻo lý tưởng. Tổng cộng sẽ có 05 loại đường kính thép khác nhau được sử dụng, các thông số cơ bản của cốt thép thường và cáp sử dụng cho mô hình [12] được khai báo chi tiết như trong Bảng 3.

Bảng 3. Bảng thông số kỹ thuật cốt thép

Thông số	Đơn vị	D12/D16/D20/D28/D32	D15.24
Loại thép		Thép thường	Cáp dự ứng lực
Diện tích $A_s$	mm <sup>2</sup>	113/201/314/616/804	140
Giới hạn chảy $f_y$	MPa	400	1670
Giới hạn bền $f_u$	MPa	570	1860
Mô đun đàn hồi $E_s$	MPa	200000	197000
Biến dạng tại $f_y$	%	0,2	0,848
Tiêu chuẩn		TCVN 1651-2008 [11]	ASTM A416 [12]
Mác thép		CB400V	Gr270

### 3.3. Điều kiện biên



Hình 8. Khai báo điều kiện biên cho mô hình

Điều kiện biên của các nút ở giữa nhịp sẽ được ràng buộc chống chuyển vị theo phương dọc (trục 1) và phương ngang dầm (trục 2). Vị trí gối (trùng với móc cầu) sẽ được ràng buộc chuyển vị theo phương đứng (trục 3) và phương ngang dầm (trục 2). Các điều kiện biên như thể hình trong Hình 8.

## 4. Kết quả

### 4.1. Kết quả phân tích tổng thể dầm

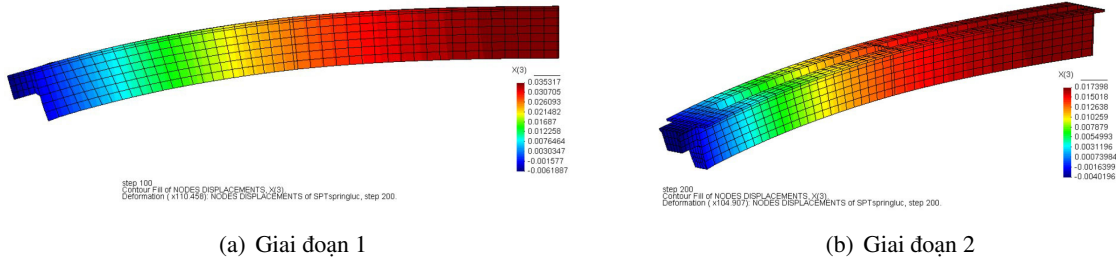
Việc so sánh giữa số liệu từ mô hình và số liệu lý thuyết trong phần phân tích tổng thể dầm sẽ làm cơ sở tin cậy để đánh giá ứng xử cục bộ của khu vực đầu dầm, đặc biệt là ở vị trí góc khắc. Các kết quả phân tích dầm super-T bằng Atena được so sánh với kết quả tính toán lý thuyết dầm theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Các chỉ tiêu so sánh này bao gồm độ võng và ứng suất tại các mặt cắt đặc trưng, trong đó các giới hạn ứng suất cho phép của bê tông được lấy theo tiêu chuẩn 22TCN 272-05 [13] như sau:

$$\text{Ứng suất cho phép về nén } \sigma = -0,60f'_{ci} \quad (1)$$

$$\text{Ứng suất cho phép về kéo } \sigma = 0,58\sqrt{f'_{ci}} \quad (2)$$

#### a. Độ chuyển vị - Độ võng dầm

Hình 9 biểu diễn chuyển vị của dầm tại load step thứ 100 (cuối giai đoạn 1 - cắt cáp truyền ứng suất trước) và load step thứ 200 (cuối Giai đoạn 2 - cầu dầm ra khỏi khuôn).



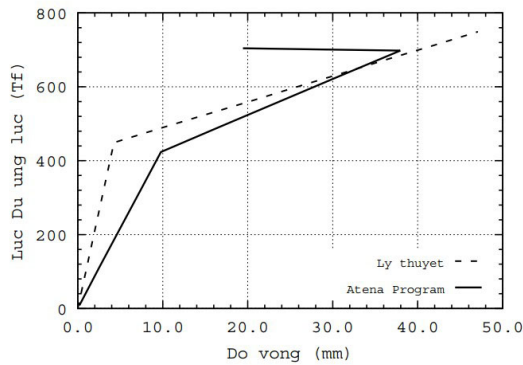
Hình 9. Chuyển vị của dầm

Căn cứ vào số liệu tính toán chuyển vị dầm từ Atena, lập biểu đồ quan hệ Lực - chuyển vị để so sánh kết quả thu được so với các giá trị tính toán lý thuyết theo sức bền vật liệu và tiêu chuẩn 22TCN 272-05, được thể hiện trong Hình 10.

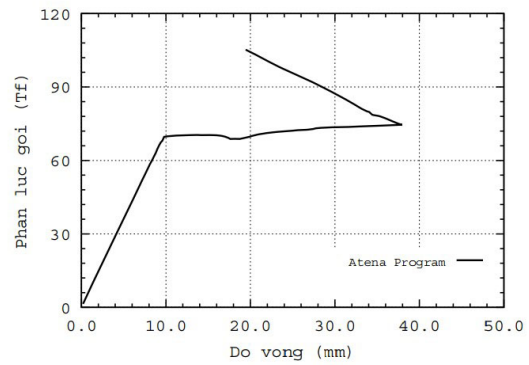
Hình 10(a) thể hiện quan hệ Lực dự ứng lực và độ võng dầm giữa Tính toán lý thuyết và Atena. Kết quả Atena thể hiện kết quả độ võng dầm tăng từ 0 → 38 mm (kết thúc Giai đoạn 1 trong Atena), so với giá trị 47 mm của lý thuyết và thực nghiệm đo được khi cắt cáp cầu dầm ra khỏi ván khuôn. Giá trị này tương đối chấp nhận được vì Atena còn xét đến ma sát ván khuôn thành và dầm nên sẽ làm giảm giá trị độ võng dầm.

Hình 10(b) thể hiện quan hệ Phản lực tại gối và độ võng dầm. Trong giai đoạn 1 (truyền ứng lực 1.1 và 1.2), phản lực gối đạt 74,57 tấn (trong đó do trọng lượng dầm khoảng 70 tấn, còn lại phát sinh do bù trừ lực dự ứng lực và ma sát khuôn). Trong giai đoạn 2 (mô phỏng cầu nhấc dầm), phản lực gối tăng lên 105,22 tấn.





(a) Quan hệ Lực dư ứng lực – Độ võng dầm

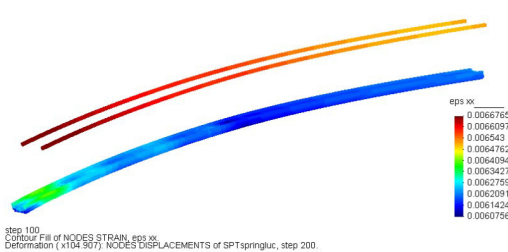


(b) Quan hệ Phản lực tại gối – Độ võng dầm

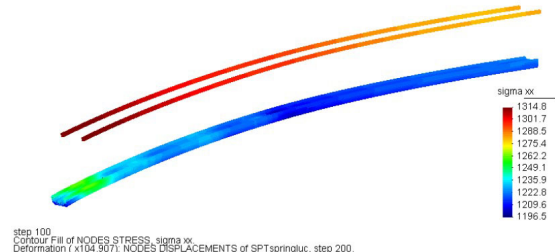
Hình 10. Độ võng của dầm

## b. Ứng suất trước trong cáp dự ứng lực

Lực dự ứng lực được khai báo bằng cách đặt biến dạng ban đầu cho tất cả các tao cáp  $\varepsilon = 0,00666$  ( $\sigma = 1311$  MPa). Hình 11 và Hình 12 hiển thị kết quả phân tích từ Atena cho thấy giai đoạn 1: ứng suất trung bình các tao cáp 1204 MPa, biến dạng trung bình 0,00611 và giai đoạn 2: ứng suất trung bình các tao cáp 1234 MPa, biến dạng trung bình 0,00626. So với giá trị ban đầu, sau khi cắt cáp truyền ứng lực (GD1) các tao cáp bị mất mất ứng suất khoảng 8%. Đây là phần mất mất ứng suất tương ứng của co ngắn đàn hồi [13]. Đồng thời quan sát thấy rằng các tao cáp phía trên vì nằm trong miền chịu kéo nên các giá trị ứng suất biến dạng sẽ lớn hơn giá trị ban đầu đặt vào cáp; các tao cáp nằm trong vùng chịu nén sẽ cho kết quả ngược lại.

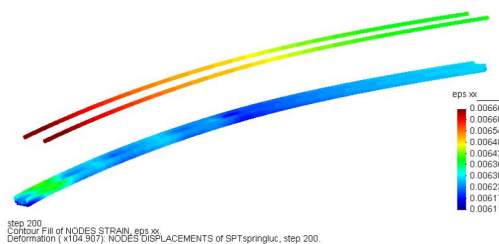


(a) Biến dạng

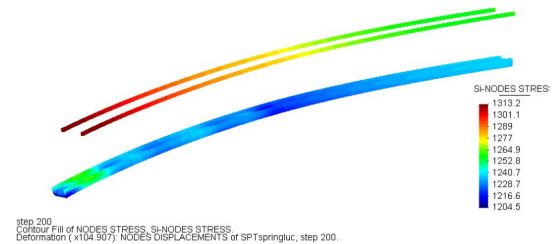


(b) Ứng suất trước

Hình 11. Giai đoạn 1



(a) Biến dạng



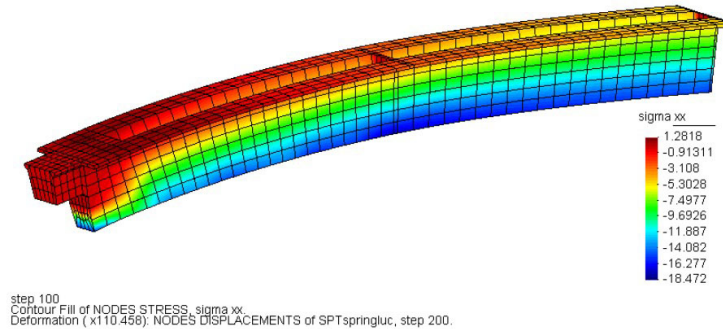
(b) Ứng suất trước

Hình 12. Giai đoạn 2

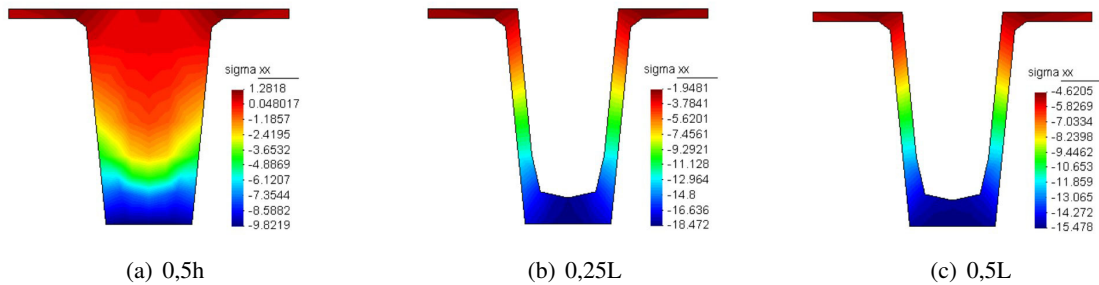
Các kết quả này cho thấy ứng xử của mô hình khi truyền dự ứng lực hoàn toàn phù hợp với thực tế. Hay nói cách khác, các giá trị độ võng của dầm và ứng suất trong cáp dự ứng lực đang thể hiện đúng bản chất ứng xử của một kết cấu dầm bê tông cốt thép dự ứng lực.

#### c. Ứng suất thớ trên và thớ dưới dầm khi truyền ứng lực

Kết quả phân bố ứng suất theo chiều dọc dầm ngay sau khi cắt cáp truyền ứng lực trước được biểu diễn như Hình 13 và Hình 14, theo đó có thể thấy rõ vùng thớ trên sẽ chịu kéo và vùng thớ dưới sẽ chịu nén.



Hình 13. Ứng suất thớ trên và thớ dưới



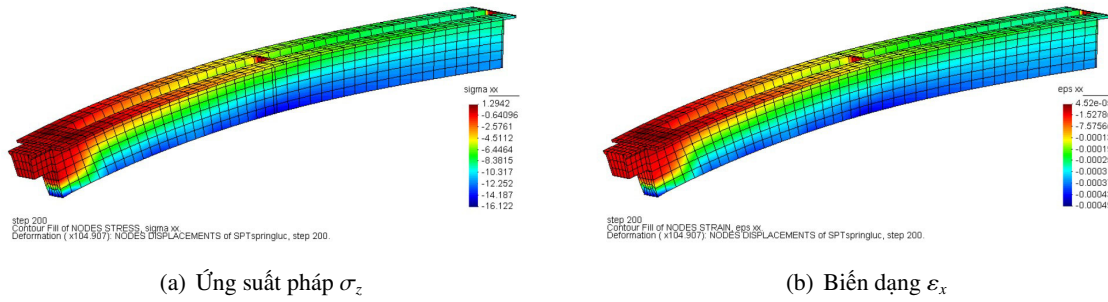
Hình 14. Phân bố ứng suất tại các mặt cắt dầm

Với giá trị ứng suất tại các mặt cắt của dầm, so sánh với ứng suất nén lớn nhất và kéo với giá trị ứng suất cho phép (nén:  $-0,6f'_{ci} = -0,6 \times 40 = -24 \text{ MPa}$ ; kéo:  $0,58\sqrt{f'_{ci}} = 0,58 \times \sqrt{40} = 3,67 \text{ MPa}$ ) thì dầm vẫn đảm bảo các giới hạn ứng suất, không bị nứt, vỡ khi truyền ứng lực.

#### d. Ứng suất và biến dạng tổng thể dầm trong giai đoạn sản xuất

Sau khi cắt cáp, dầm sẽ được nhấc ra khỏi ván khuôn thông qua 02 móc cẩu đầu dầm, phân bố ứng suất và biến dạng theo phương dọc dầm tại load step 200 (cuối giai đoạn 2) được thể hiện ở Hình 15.

Theo số liệu phân tích tổng thể dầm trong Giai đoạn 1 và Giai đoạn 2, nhận xét thấy ứng suất nén, biến dạng nén thớ dưới có xu hướng giảm tại tất cả các mặt cắt. Ứng suất nén, biến dạng nén thớ trên có xu hướng tăng tại các mặt cắt 0,25L và 0,5L; ứng suất kéo, biến dạng kéo có xu hướng giảm tại mặt cắt 0,5h (Bảng 4). Điều này phù hợp vì khi cẩu ra khỏi ván khuôn, dầm chịu một tải trọng ma sát khuôn phân bố đều hướng xuống dưới (có thể hiểu dầm sẽ được tăng tải trọng bản thân do ma sát



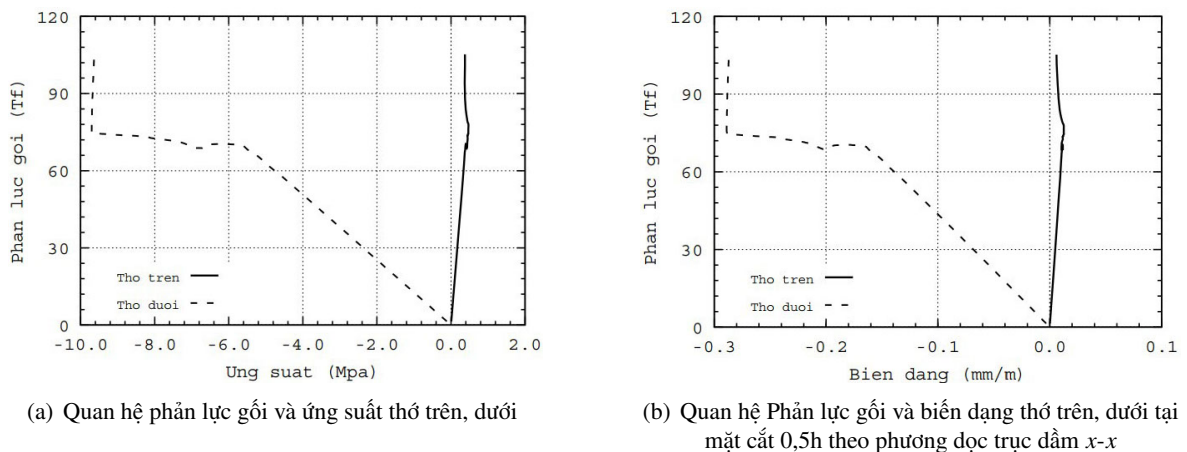
Hình 15. Kết quả phân tích dầm ở giai đoạn cầu dầm ra khỏi ván khuôn

khuôn) gây kéo thớ dưới và nén thớ trên. Khi so sánh ứng suất lớn nhất của nén và kéo với giá trị ứng suất cho phép, giá trị tính toán được cho thấy dầm vẫn đảm bảo các giới hạn ứng suất, không bị nứt, vỡ khi cầu dầm ra khỏi khuôn.

Bảng 4. Ứng suất và biến dạng của dầm trong giai đoạn sản xuất

Mặt cắt	Thớ	Ứng suất (MPa)		Biến dạng (mm/m)	
		Giai đoạn 1	Giai đoạn 2	Giai đoạn 1	Giai đoạn 2
0,5h	Dưới	-9,69	-9,63	-0,289	-0,287
	Trên	0,47	0,38	0,013	0,006
0,25L	Dưới	-17,76	-15,48	-0,544	-0,478
	Trên	-2,27	-5,08	-0,068	-0,156
0,5L	Dưới	-15,31	-12,06	-0,463	-0,368
	Trên	-4,89	-8,81	-0,146	-0,270

Căn cứ vào hình dạng biểu đồ Hình 16, cho thấy ứng suất và biến dạng có quan hệ tuyến tính, hay nói cách khác về tổng thể dầm đang làm việc trong giai đoạn đàn hồi.



Hình 16. Ứng suất và biến dạng của dầm

Qua các số liệu so sánh về độ võng, ứng suất trong cáp, ứng suất thớ trên, dưới của dầm giữa tính toán lý thuyết và phân tích bằng Atena, có thể nhận xét rằng mô phỏng kết dầm super-T bằng Atena cho kết quả tương đối chính xác, tin cậy và phản ánh đúng ứng xử trong thực tế sản xuất. Căn cứ vào độ tin cậy về ứng xử tổng thể, dầm sẽ tiếp tục được tiến hành phân tích các trạng thái ứng suất, biến dạng cục bộ ở khu vực đầu dầm để tìm nguyên nhân gây ra vết nứt xiên ở góc khác của dầm.

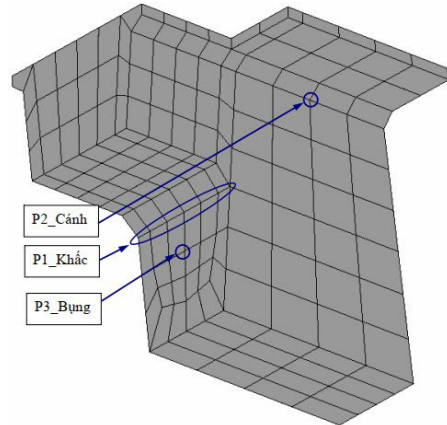
#### 4.2. Kết quả phân tích cục bộ khu vực đầu dầm

Vết nứt xiên ở góc khác đầu dầm có thể xuất hiện một mình hoặc đồng thời cùng với các vết nứt khác, đặc biệt là vết nứt ngang tại bụng dầm (khu vực tập trung cáp dự ứng lực) và vết nứt dưới nách dầm. Vì vậy, 02 dạng vết nứt này cũng sẽ được phân tích đồng thời với vết nứt xiên. Các vị trí phân tích số liệu khu vực đầu dầm như thể hiện trong Hình 17.

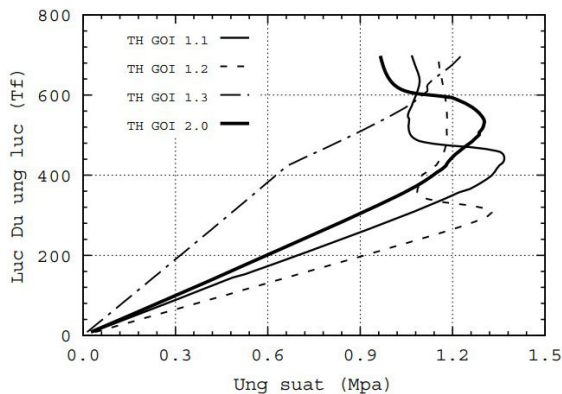
Có thể nhận thấy rằng:

- Trái ngược với kết quả phân tích tổng thể dầm tại các mặt cắt, khu vực đầu dầm có hình dạng biểu đồ quan hệ Lực - ứng suất và Lực - biến dạng (Hình 18, 19, 20) khác nhau cho thấy ứng suất và biến dạng có quan hệ phi tuyến.

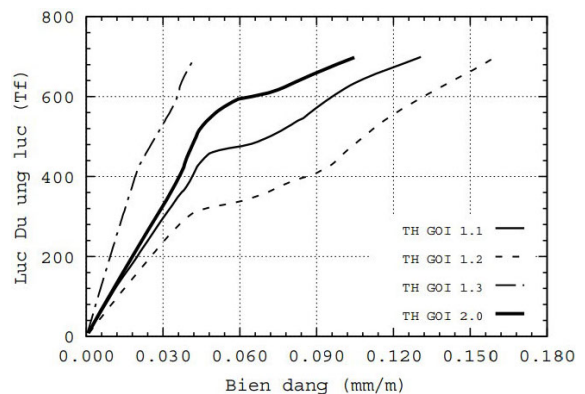
- So sánh ứng suất kéo lớn nhất (1,823 MPa) với giá trị ứng suất cho phép, dầm vẫn đảm bảo các giá trị ứng suất, không bị nứt /vỡ khi truyền ứng lực. Tuy nhiên, biến dạng kéo theo phương chính vượt quá giá trị 0,15 mm/m [10] đối với vị trí khác đầu dầm của TH gói 1.1 và 1.2; đối với vị trí bụng đầu dầm của 04 TH gói hay nói cách khác các vị trí này có khả năng xuất hiện vết nứt ngay sau khi cắt cáp.



Hình 17. Các điểm kiểm tra ứng suất (check point) đầu dầm: P1 cho vết nứt xiên, P2 cho vết nứt dưới nách dầm, P3 cho vết nứt bụng đầu dầm



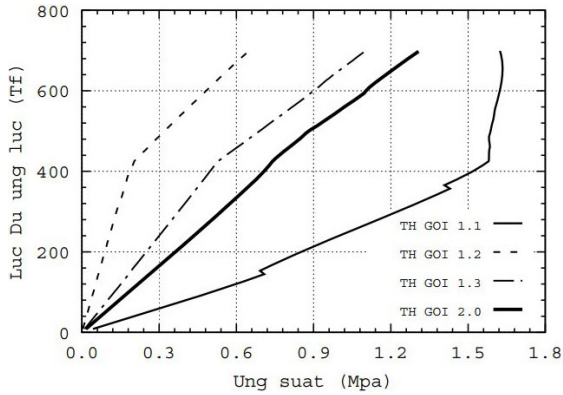
(a) Quan hệ Phản lực gối và ứng suất chính I-I



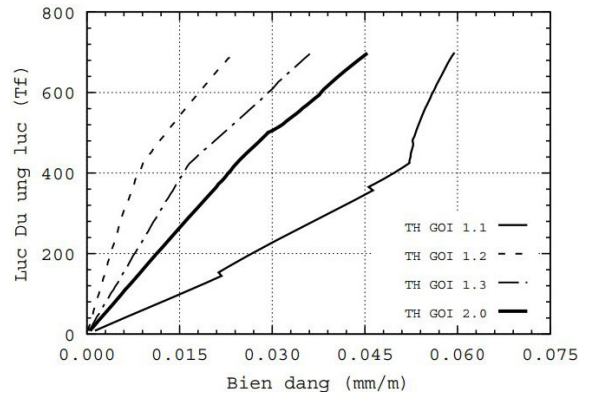
(b) Quan hệ Phản lực gối và biến dạng theo phương chính I-I tại điểm P1-Khác

Hình 18. Ứng suất và biến dạng tại vị trí khác dầm

Hình 21 và 22 thể hiện các giá trị ứng suất và biến dạng tại đầu dầm cho Trường hợp gói 1.1 và 1.2. Hai trường hợp gói này mô phỏng cho ván khuôn đầu dầm cố định, không được dịch chuyển hoặc dịch chuyển không đáng kể; điều này dẫn đến cản trở chuyển vị đầu dầm khi cắt cáp, làm tăng ứng

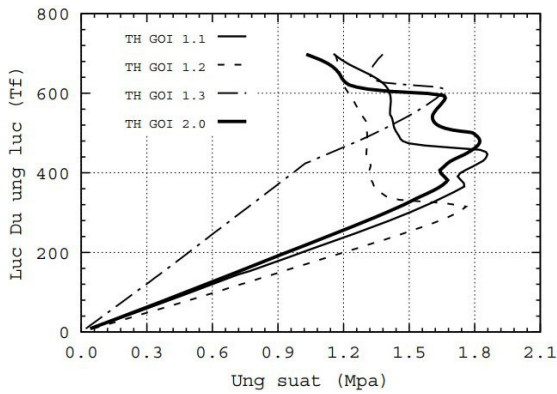


(a) Quan hệ Phản lực gối và ứng suất chính I-I

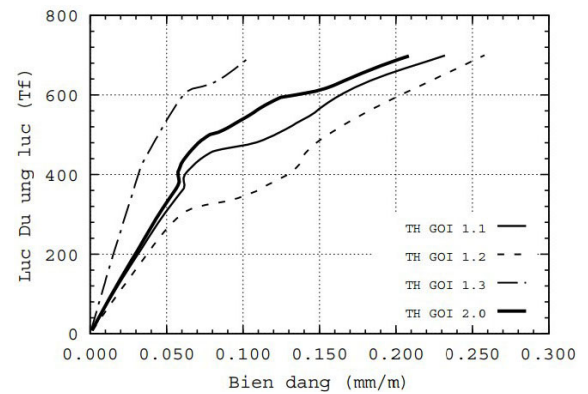


(b) Quan hệ Phản lực gối và biến dạng theo phương chính I-I tại điểm P2-Cánh

Hình 19. Ứng suất và biến dạng tại vị trí khác cánh dầm

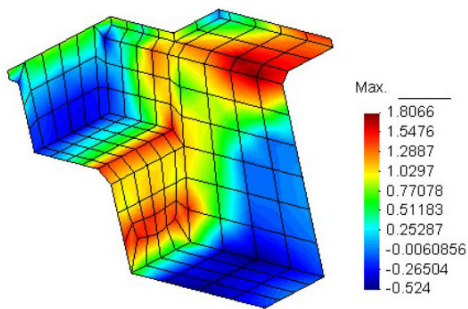


(a) Quan hệ Phản lực gối và ứng suất chính I-I

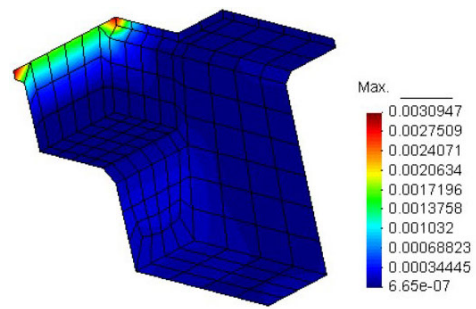


(b) Quan hệ Phản lực gối và biến dạng theo phương chính I-I tại điểm P2-Bụng

Hình 20. Ứng suất và biến dạng tại vị trí bụng dầm



(a) Ứng suất chính I-I

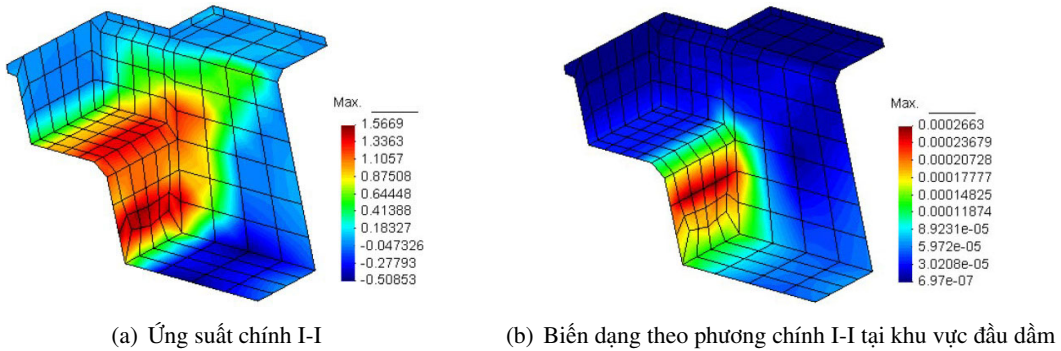


(b) Biến dạng theo phương chính I-I tại khu vực đầu dầm

Hình 21. Trường hợp gối 1.1

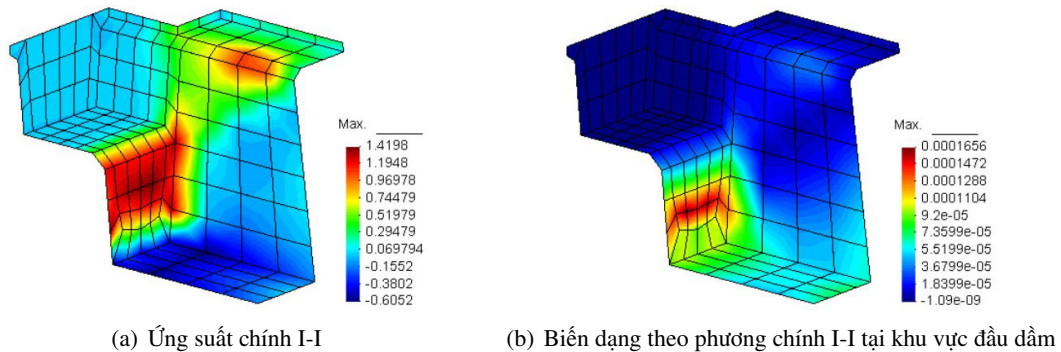


suất và biến dạng tại vị trí góc khắc đầu dầm. Nếu cộng hưởng thêm các yếu tố khác như nhiệt độ, co ngót bê tông làm gia tăng thêm ứng suất kéo (lưu ý bê tông đầu dầm có thể tích tương đối lớn) và dẫn đến dầm có thể xảy ra nứt xiên tại vị trí khắc.

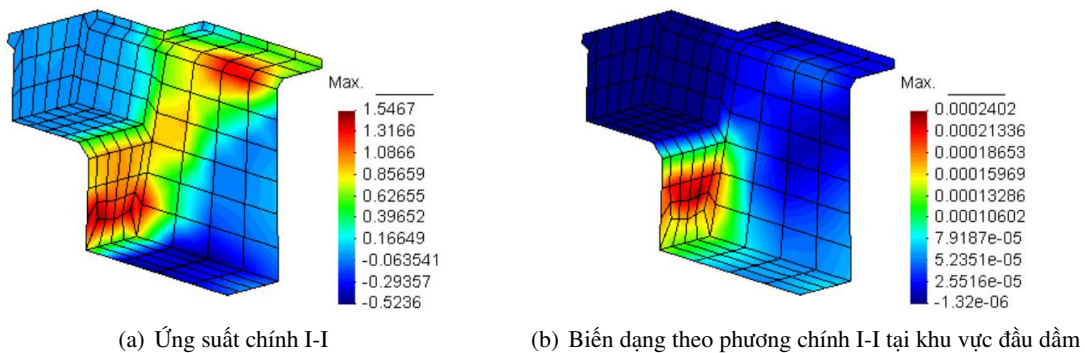


Hình 22. Trường hợp gổ 1.2

Hình 23 và Hình 24 thể hiện các giá trị ứng suất và biến dạng tại đầu dầm cho Trường hợp gổ 1.3 và 2, đây là hai trường hợp gổ mô phỏng cho tháo dỡ ván khuôn đầu dầm và TH gổ 2 mô phỏng cầu nhấc dầm không tiếp xúc với ván khuôn đầu dầm. Về cơ bản đây đều là giải pháp tháo dỡ ván khuôn đầu dầm nhằm không cản trở chuyển vị đầu dầm khi cắt cáp truyền ứng lực. Giải pháp này làm giảm ứng suất và giảm đáng kể biến dạng, ngăn ngừa hiện tượng nứt xiên tại vị trí góc khắc đầu dầm.

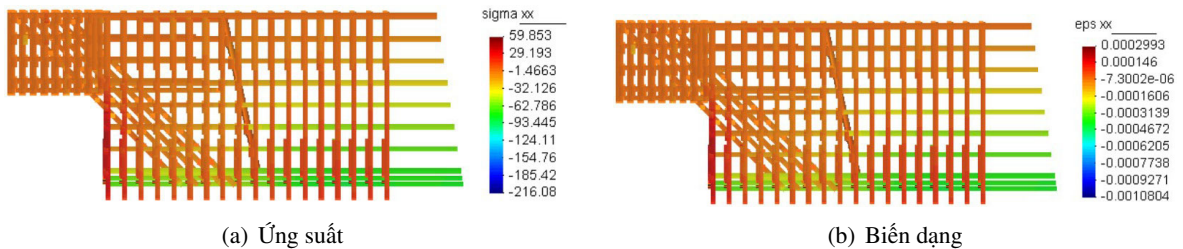


Hình 23. Trường hợp gổ 1.3



Hình 24. Trường hợp gổ 2

Sự phân bố ứng suất của cốt thép tại khu vực đầu dầm được thể hiện ở Hình 25, theo đó giá trị ứng suất của cốt thép thường dao động từ  $-216,08\text{MPa}$  (chịu nén) đến  $59,85\text{MPa}$  (chịu kéo). Hình 25(a) thể hiện 2 lưới thép xiên D28 ngoài cùng phân bố ứng suất từ  $-55,26\text{MPa}$  (chịu nén) đến  $121,26\text{MPa}$  (chịu kéo). Các giá trị này đều nhỏ hơn giới hạn chảy của thép CB400V ( $f_y = 400\text{MPa}$ ). Như vậy, trong giai đoạn sản xuất dầm, cốt thép chưa khai thác hết khả năng chịu lực đặc biệt là cốt thép bố trí khu vực đầu dầm và các lưới cốt thép xiên ở góc khắc.



Hình 25. Ứng suất và biến dạng của cốt thép thường tại khu vực đầu dầm

Kết quả phân tích cục bộ có thể thấy rằng khi dầm bị cản trở chuyển vị do ván khuôn đầu dầm cố định sẽ gây trạng thái ứng suất và biến dạng bất lợi hơn so với trường hợp không bị cản trở (ván khuôn đầu dầm được tháo dỡ trước khi cắt cáp truyền ứng suất trước).

## 5. Nhận xét

Dầm super-T là một trong các giải pháp không thể thiếu cho kết cấu phần trên của các công trình giao thông trọng điểm. Có rất nhiều phần mềm mô phỏng kết cấu có thể sử dụng cho phân tích dầm Super-T, trong đó phần mềm Atena đã chứng minh đây là một giải pháp khả thi. Các số liệu phân tích từ Atena khi so sánh với lý thuyết hoặc thực nghiệm đều cho kết quả tin cậy. Kết quả phân tích trạng thái ứng suất một lần nữa chứng minh dầm Super-T đảm bảo khả năng chịu lực về mặt tổng thể. Độ vòng, ứng suất thớ trên và thớ dưới dầm tương đối phù hợp với các kết quả tính toán lý thuyết đã có trước đó.

Vết nứt xiên ở góc khắc dầm Super-T có khả năng xuất hiện khi ván khuôn đầu dầm được chế tạo cố định, không thể hoặc không được tháo dỡ trước khi tiến hành cắt cáp dự ứng lực truyền ứng suất vào dầm.

Ngoài ra, cũng có thể nhận thấy môi trường là một trong những yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến sự hình thành vết nứt. Với những dầm được sản xuất tại các nhà máy có nhiệt độ môi trường thấp hơn hoặc độ ẩm cao thì vết nứt tại vị trí này giảm đáng kể. Do đó, trong thời gian tới việc phát triển mô hình mô phỏng có thể được cải tiến khi xét thêm các yếu tố nhiệt độ và co ngót ảnh hưởng đến ứng xử của vật liệu.

## 6. Kiến nghị về biện pháp thi công

Mục tiêu của việc mô phỏng bằng phần mềm Atena là nhằm xác định cơ chế hình thành vết nứt xiên ở góc khắc dầm. Trên cơ sở đó đưa ra các giải pháp (kiến nghị) nhằm hạn chế hoặc khắc phục sự xuất hiện vết nứt trong giai đoạn sản xuất dầm như sau:

- Phương pháp 1: Chế tạo ván khuôn đầu dầm di động, trước khi cắt cáp phải tháo dỡ đủ để không tiếp xúc và ngăn cản chuyển vị của dầm theo phương dọc. Với giải pháp này dầm sẽ làm việc theo sơ đồ giản đơn với 02 gối tựa đặt ở đáy dầm.

- Phương pháp 2: Cắt cáp dự ứng lực với khoảng 50 đến 60% tổng lực dự ứng lực truyền vào dầm (để dầm tự cân bằng với trọng lượng bản thân), cầu chớm dầm đủ không tiếp xúc với ván khuôn, tiến hành cắt các cáp còn lại. Với giải pháp này dầm sẽ làm việc theo sơ đồ giản đơn với 02 gối tựa đặt ở móc cầu dầm.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Godfrey Smith, W. M. (1997). *Standardisation and detailing for Super-T bridge girders*. Technical report, Structural Concrete Industries (Aust) Pty.
- [2] Văn bản số 7877/BGTVT-KHCN (2010). *Xử lý hiện tượng nứt đầu dầm Super-T*. Bộ Giao thông vận tải.
- [3] Trung, N. V., Học, B. X. (2011). *Nguyên nhân và biện pháp khắc phục tình trạng nứt đầu dầm Super-T cắt khắc tại một số công trình cầu*. Báo cáo Hội nghị tổng kết KHCN ngành GTVT giai đoạn 2005-2010, p. 384.
- [4] Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J. (2007). *ATENA Program Documentation*. Prague, Czech Republic: Cervenka Consulting.
- [5] Công ty CP Beton 6 (2013). *Tiêu chuẩn cơ sở sản xuất sản phẩm bê tông đúc sẵn*.
- [6] Công ty CP Beton 6 (2013). *Quy trình sản xuất dầm Super-T Cầu Hóa An*.
- [7] Công ty CP Beton 6 (2013). *Quy trình sản xuất dầm Super-T thuộc gói 2 và 3, tuyến cao tốc Long Thành - Dầu Giây*.
- [8] Công ty CP Beton 6 (2013). *Quy trình sản xuất dầm Super-T, tuyến cao tốc Sài Gòn - Trung Lương*.
- [9] Trường, L. N. (2013). *Triển khai mô hình vật liệu Microplane M4L cho phân tích phi tuyến kết cấu bê tông trong phần mềm Ansys*. Luận văn thạc sĩ, Đại học Bách khoa, TP. HCM.
- [10] Design code (1991). *Ceb-fip model code 1990*. Comite Euro-International Du Beton.
- [11] TCVN 1651:2008. *Thép cốt bê tông*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [12] ASTM A416 (2012). *Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete*.
- [13] 22TCN 272-05 (2005). *Tiêu chuẩn thiết kế cầu*. Bộ Giao thông vận tải.