

ỨNG DỤNG TẤM VÁN KHUÔN BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO (UHPC) THI CÔNG BẢN MẶT CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP

Cù Việt Hưng^{a,*}, Phạm Duy Hòa^a, Nguyễn Công Thắng^b, Nguyễn Đức Phúc^a, Nguyễn Tiến Phát^a,
Phạm Sỹ Đồng^c, Nguyễn Hùng Sơn^a, Nguyễn Hoàng Nam^d

^aKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^dCông ty TNHH MTV Bê tông Xuân Mai,
Thôn Xuân Trung, xã Thủy Xuân Tiên, huyện Chương Mỹ, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 13/05/2019, Sửa xong 30/05/2019, Chấp nhận đăng 31/05/2019

Tóm tắt

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong ngành xây dựng bởi những ưu điểm vượt trội về tính chất cơ học và độ bền lâu so với bê tông thường. Bài báo này trình bày về kết quả thực nghiệm và ứng dụng tấm ván khuôn UHPC thi công bản mặt cầu bê tông cốt thép (BTCT) cầu An Thượng, thành phố Hưng Yên (thuộc chương trình khoa học và công nghệ cấp Bộ về Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình - CTB-2017-01), trong đó tấm bản mỏng được mô hình bằng phần tử hữu hạn (FEM) bởi phần mềm ABAQUS, đồng thời so sánh giữa thực nghiệm với kết quả phân tích từ mô hình FEM. Kết quả của nghiên cứu cho thấy việc sử dụng vật liệu UHPC trong chế tạo tấm ván khuôn sẽ là một hướng đi tiềm năng trong thi công bản mặt cầu BTCT.

Từ khoá: bê tông chất lượng siêu cao; tấm bản mỏng; tấm ván khuôn; bản mặt cầu; phần tử hữu hạn (FEM); phần mềm ABAQUS.

APPLICATION UHPC FORMWORK FOR CAST-IN-SITU REINFORCED CONCRETE BRIDGE DECK SLAB

Abstract

Nowadays, Ultra High Performance Concrete (UHPC) has been being widely used in the field of civil engineering due to its outstanding mechanical properties and durability compared to conventional concrete. This article presents experimental results and an application of UHPC for making slab formwork in the construction of cast-in-situ reinforced concrete (R.C) deck slab of An Thuong bridge in Hung Yen city, which applies thin-slab model using finite element method (FEM) by ABAQUS software, and compares experimental results with results from the FEM model. The results of the study indicate that application of UHPC materials to fabricate slab formwork will open a potential direction in the construction of the cast-in-situ R.C bridge deck slab.

Keywords: ultra high performance concrete; thin-slab; formwork; R.C bridge deck slab; finite element model FEM; ABAQUS software.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(2V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(2V)-01) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: hungcv@nuce.edu.vn (Hưng, C. V.)

1. Giới thiệu

Bê tông thường là một loại vật liệu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng bởi công nghệ chế tạo đơn giản và giá thành rẻ do tận dụng được nguồn nguyên liệu địa phương. Tuy nhiên, nhược điểm cơ bản của loại bê tông này có cường độ chưa cao, do vậy vấn đề chính gặp phải với kết cấu sử dụng bê tông thường là có kích thước lớn và nặng nề. Để khắc phục những nhược điểm này, trong những thập kỷ gần đây một thể hệ bê tông mới, bê tông chất lượng siêu cao (Ultra High Performance Concrete - UHPC) với những tính chất vượt trội về tính chất cơ học và độ bền lâu [1] đã được nghiên cứu và ứng dụng. Sự ra đời của UHPC đã đánh dấu một bước ngoặt, mở ra một cơ hội và tiềm năng lớn để phát triển cũng như ứng dụng loại bê tông này vào thực tế.

Trên thế giới, vật liệu UHPC đã và đang được ứng dụng trong các công trình xây dựng. Trong lĩnh vực xây dựng công trình cầu, tấm ván khuôn UHPC được sử dụng đầu tiên vào năm 2005 với chiều dày 25 mm để đổ bản mặt cầu bê tông cốt thép (BTCT) dày 170 mm cho cầu Shepherd's Creek (Australia) [2]. Hiệp hội kỹ sư dân dụng Pháp (AFGC SETRA) [3] và Trung tâm cải tiến và nghiên cứu giao thông bang Virginia (Mỹ) [4] đã ban hành bộ khuyến nghị và báo cáo nghiên cứu về các đặc trưng của tấm bản mỏng UHPC. Từ đó, các nghiên cứu sau này cũng bắt đầu đi sâu hơn vào việc đưa ra các số liệu về thiết kế, thí nghiệm và so sánh hiệu quả khi áp dụng tấm ván khuôn UHPC với BTCT thông thường. Tại Đức và Cộng hòa Séc, tấm ván khuôn UHPC sử dụng vật liệu địa phương có thêm sườn tăng cường [5, 6] và đã được đưa vào áp dụng cho cầu đi bộ ở Týnec nad Sázavou [7]. Tiếp theo đó, Tej và cs. [8] đã tiến hành nghiên cứu các tấm mỏng bằng các thử nghiệm và phân tích mô hình trên máy tính. Một bước tiến tiếp theo là việc so sánh thử nghiệm khi nghiên cứu ứng dụng tấm UHPC bản mỏng có và không có cốt thép thường trong thí nghiệm của Moreillon và cs. [9] cũng như của Kang và cs. [10]. Năm 2017, từ các nghiên cứu về cấp phối sử dụng sợi thép và quy trình trộn, Slaby và cs. [11] tiến hành chế tạo các tấm bản mỏng với nhiều mục đích sử dụng khác nhau. Gần đây, Falbr [12] đã tiến hành nghiên cứu thí nghiệm xác định sức kháng uốn tại hiện trường của tấm UHPC có sử dụng cốt thép thường với kích thước (5×3×0,045) m, nghiên cứu cho thấy các đặc tính đặc biệt của UHPC và chứng minh việc sử dụng nó cho các công trình cầu là an toàn. Tại Malaysia, công ty Dura cũng đã nghiên cứu và ứng dụng thành công tấm ván khuôn UHPC cho các công trình cầu [13]. Với những tính chất vượt trội về cường độ và độ bền lâu, việc ứng dụng UHPC trong chế tạo tấm ván khuôn (để lại vĩnh viễn) cho đổ bản bê tông là một hướng đi mới hứa hẹn và hiệu quả trong thi công bản mặt cầu bởi ngoài ưu điểm giảm kích thước mặt cắt ngang so với bê tông thường thì tấm ván khuôn UHPC còn có thể cải thiện tính năng kết cấu, chẳng hạn như khả năng chống nứt, giảm độ võng, tăng độ bền và tăng tuổi thọ cho kết cấu [10].

Ở Việt Nam, những năm gần đây, vật liệu UHPC cũng đã và đang được quan tâm nghiên cứu, đặc biệt là sử dụng vật liệu địa phương để chế tạo UHPC [14–17]. Cùng với đó là việc ứng dụng vật liệu UHPC trong xây dựng các công trình cầu. Một số công trình cầu giao thông nông thôn như Đập Đá (Hậu Giang), Năng An (Ninh Bình) đã được xây dựng thành công bởi Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng [18, 19]. Gần đây nhất, nghiên cứu về dự báo ứng xử kháng uốn của vật liệu UHPC của Hưng và cs. [20] góp phần thúc đẩy việc áp dụng UHPC tại Việt Nam. Tuy nhiên, những nghiên cứu này chỉ tập trung áp dụng vào kết cấu dầm cầu, còn những nghiên cứu về tấm ván khuôn UHPC đổ bản mặt cầu thì vẫn đang bị bỏ ngỏ. Do vậy, việc nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu lực của tấm bản mỏng sử dụng vật liệu UHPC và so sánh với kết quả bằng phân tích mô hình sử dụng phần tử hữu hạn (FEM) là cần thiết và có ý nghĩa khoa học, từ đó đưa ra ứng dụng cho việc sản xuất tấm ván khuôn (để lại vĩnh viễn) thi công bản mặt cầu BTCT đổ tại chỗ trong thực tế.

2. Thí nghiệm tấm bản mỏng UHPC

Hình ảnh thí nghiệm tấm bản mỏng UHPC được thể hiện trên Hình 1.



(a) Lắp đặt hệ gia tải và bố trí thiết bị thí nghiệm tấm bản mỏng UHPC



(b) Thí nghiệm thử tải tấm bản mỏng UHPC

Hình 1. Hình ảnh thí nghiệm tấm bản mỏng UHPC trong phòng thí nghiệm

2.1. Thông số mẫu thí nghiệm và vật liệu

Tấm bản mỏng UHPC thí nghiệm có chiều dài $\times$ chiều rộng $\times$ chiều dày là $(2200 \times 1000 \times 40)$ mm (Hình 1(a)). Thành phần cấp phối của UHPC sử dụng trong thí nghiệm được thể hiện chi tiết trong Bảng 1. Tính chất sợi thép được thể hiện trong Bảng 2 và của UHPC được thống kê trong Bảng 3.

Bảng 1. Cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu

Hàm lượng cốt sợi thép (theo thể tích bê tông)	Lượng vật liệu tính cho một m^3 bê tông, kg				
	Nước	Xi măng	Silica fume	Cát quắc	Phụ gia siêu dẻo (%)
2%	162	886	222	1109	39,5

Bảng 2. Tính chất của cốt sợi thép sử dụng trong nghiên cứu

d_f (mm)	L_f (mm)	Tỷ lệ hướng sợi L_f/d_f	$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	f_t (MPa)	E_f (GPa)	Ảnh
0,2	13,0	65,0	7,9	2500	200	

Ghi chú: d_f, L_f, f_t, ρ, E_f lần lượt là đường kính, chiều dài, cường độ kéo, khối lượng riêng và mô đun đàn hồi của cốt sợi thép.

Ghi chú:

- Cường độ chịu nén được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C39M trên mẫu trụ có kích thước $d \times h$ là 100×200 mm.

- Cường độ chịu uốn được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C1609M trên mẫu dầm kích thước $100 \times 100 \times 400$ mm.

Bảng 3. Bảng tính chất vật liệu UHPC

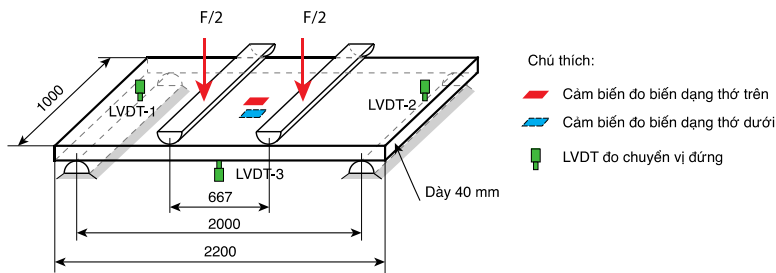
Cường độ chịu nén f'_c (MPa)	Cường độ chịu uốn f_t (MPa)	Mô đun đàn hồi E (GPa)
120	15	48

- Mô đun đàn hồi được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C469M trên mẫu trụ có kích thước $d \times h$ là 100×200 mm.

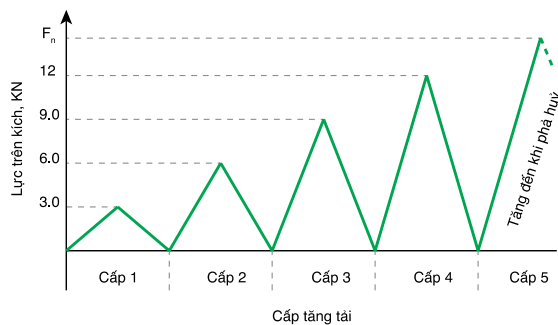
- Các giá trị cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi trong bảng được làm tròn để đưa vào tính toán lý thuyết.

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Sử dụng sơ đồ thí nghiệm uốn 4 điểm như thể hiện trong Hình 2(a) và quá trình gia tải được thực hiện với 5 cấp như thể hiện trên Hình 2(b). Chuyển vị theo phương đứng tương ứng với mỗi cấp tải được xác định tại 2 vị trí gối tựa và 1 vị trí giữa nhịp của tấm bởi thiết bị đo chuyển vị LVDT (Hình 2(a)). Giá trị chuyển vị theo phương đứng ở giữa nhịp được xác định bằng giá trị LVDT 3 trừ đi giá trị trung bình của LVDT 1 và LVDT 2. Biến dạng ở thớ trên và dưới của tấm được ghi lại bằng 2 cảm biến biến dạng điện tử (strain gauge) như thể hiện trên Hình 2(a). Các LVDT và cảm biến biến dạng điện tử được kết nối với bộ Data logger cho phép ghi số liệu tự động và đồng thời các giá trị đo.



(a) Kích thước và sơ đồ thí nghiệm uốn bản mỏng UHPC (đơn vị mm)

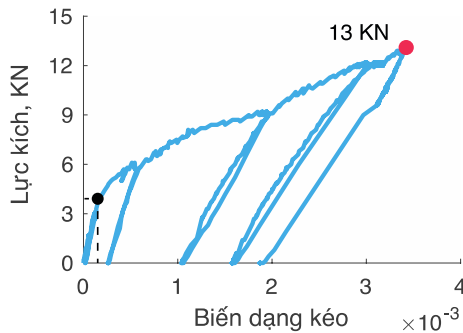


(b) Sơ đồ cấp gia tải thí nghiệm

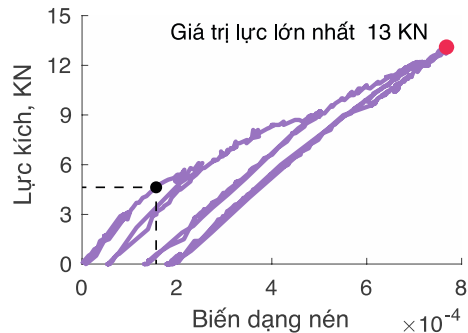
Hình 2. Thông số mẫu thí nghiệm và phương pháp gia tải

3. Kết quả thí nghiệm

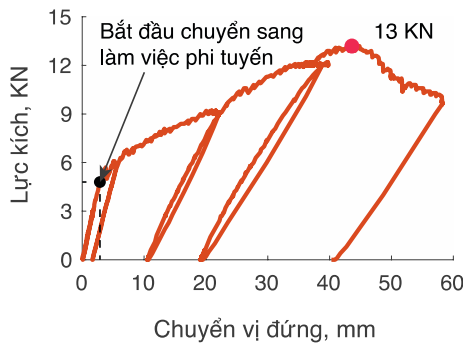
Hình 3 thể hiện kết quả của thí nghiệm uốn tấm bản mỏng UHPC. Có thể thấy rằng tấm có ứng xử tuyến tính khi lực trên kích dưới 5 KN. Khi lực trên kích tăng vượt quá 5 KN tấm bắt đầu chuyển sang giai đoạn làm việc phi tuyến. Khả năng chịu lực của tấm được xác định dựa trên kết quả giá trị lực lớn nhất trên kích là xấp xỉ 13 KN. Tấm hoàn toàn bị phá hoại khi chuyển vị đứng ở giữa nhịp là 55 mm (Hình 3(c)).



(a) Biến dạng kéo thớ dưới tấm bản mỏng tương ứng với giá trị lực trên kích

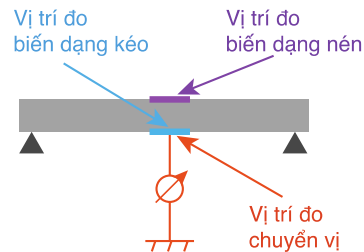


(b) Biến dạng nén thớ trên tấm bản mỏng tương ứng với giá trị lực trên kích



(c) Chuyển vị ở vị trí giữa nhịp tấm tương ứng với lực trên kích

Chú thích:



Hình 3. Kết quả thí nghiệm uốn

Quan hệ lực – biến dạng kéo và nén ở thớ dưới và thớ trên tấm được thể hiện trong Hình 3(a) và 3(b). Trong khi bê tông trong vùng kéo thể hiện rất rõ ràng sự làm việc phi tuyến (Hình 3(a)) thì sự làm việc của bê tông trong vùng nén gần như vẫn trong giai đoạn đàn hồi (Hình 3(b)). Điều này là đã được dự báo bởi vì cường độ chịu nén của UHPC là vượt trội so với cường độ chịu kéo của loại vật liệu này.

Kết quả thí nghiệm cho thấy mặc dù bê tông vùng nén vẫn làm việc trong giai đoạn đàn hồi cho đến khi tấm bị phá hoại, tuy nhiên sự làm việc chung của tấm lại chủ yếu nằm ngoài miền đàn hồi (Hình 3(c)). Kết quả này thể hiện rằng khả năng chịu kéo của bê tông và cốt sợi thép đóng góp lớn vào sự làm việc chung của tấm. Đây là một ưu điểm vượt trội của tấm bản UHPC so với tấm bê tông sử dụng bê tông thường.

4. Mô hình tấm bản mỏng sử dụng FEM

Sử dụng mô hình phần tử hữu hạn (Finite Element Model – FEM) để mô phỏng ứng xử của kết cấu mang lại nhiều lợi ích như việc tiết kiệm thời gian và vật chất. Tuy nhiên, phương pháp mô phỏng chỉ có ý nghĩa khi mà kết quả mô phỏng đủ độ tin cậy. Do đó, một mục tiêu của nghiên cứu này là tìm ra một mô hình tin cậy để dự báo khả năng làm việc của tấm ván khuôn UHPC. Kết quả thí nghiệm tấm ván khuôn sử dụng vật liệu UHPC cho thấy rằng tấm làm việc chủ yếu ở ngoài miền đàn hồi của vật liệu cho đến khi bị phá hoại hoàn toàn. Điều này dẫn đến việc dự báo khả năng chịu lực của kết cấu này tương đối phức tạp. Chen và Graybeal [21] đã sử dụng mô hình bê tông phá hoại dẻo (Concrete Damaged Plasticity – CDP) trong ABAQUS để mô phỏng dầm bê tông sử dụng vật liệu UHPC. Kết quả của nghiên cứu của các tác giả này cho thấy mô hình phần tử hữu hạn (Finite Element Model – FEM) là khá sát với thí nghiệm. Tuy nhiên, thành phần vật liệu cũng như dạng kết cấu được sử dụng trong nghiên cứu này khác so với nghiên cứu của Chen và Graybeal nên sẽ là vấn đề cần thiết để kiểm chứng về ứng xử và khả năng dự báo sự làm việc của tấm bản mỏng UHPC sử dụng mô hình FEM.

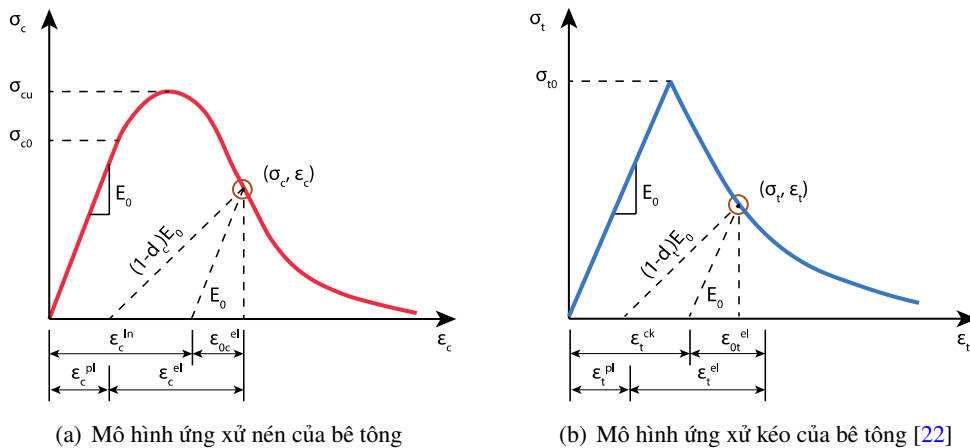
4.1. Mô hình bê tông phá hoại dẻo - CDP

Đặc điểm của sự phá hoại trong kết cấu bê tông là sự suy giảm về mô đun đàn hồi của vật liệu. Một mô hình phá hoại dẻo đã được giới thiệu trong ABAQUS [22] để mô phỏng sự suy giảm mô đun đàn hồi của bê tông, như trong công thức (1):

$$\sigma = E_0(1 - d)(\epsilon - \epsilon^{pl}) \quad (1)$$

trong đó σ là ứng suất, ϵ là tổng biến dạng và ϵ^{pl} là biến dạng dẻo; E_0 là mô đun đàn hồi ban đầu của bê tông và d là hệ số phá hoại có giá trị từ 0 (bê tông chưa bị phá hoại) đến 1 (bê tông bị phá hoại hoàn toàn).

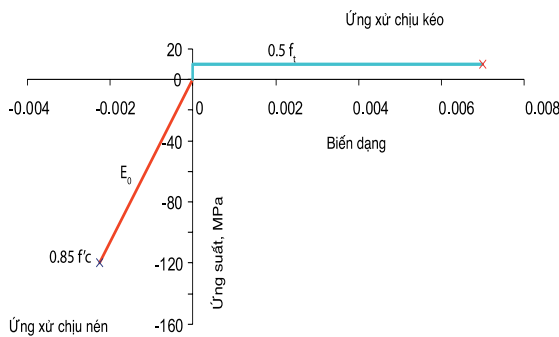
Hình 4 là mô hình CDP được giới thiệu trong ABAQUS [22]. Có thể thấy rằng mô đun đàn hồi của vật liệu giảm dần khi biến dạng tăng. Chú ý là trong Hình 4 chỉ thể hiện cách định nghĩa các tham số của mô hình CDP. Đường cong ứng suất – biến dạng tương ứng với mỗi loại bê tông cụ thể được nhập vào mô hình bởi người sử dụng. Do đó mô hình CDP của ABAQUS là tương đối phù hợp với việc mô hình vật liệu mới như UHPC.



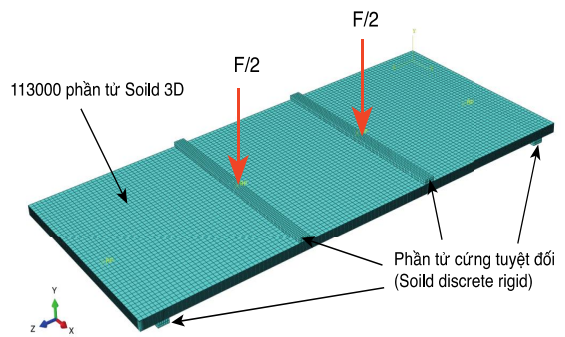
Hình 4. Mô hình CDP trong ABAQUS

4.2. Quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu

Trong trường hợp lý tưởng đó là sử dụng kết quả thí nghiệm kéo và nén của mẫu bê tông cho mô hình FEM. Tuy nhiên, do hạn chế về số liệu về quan hệ ứng suất – biến dạng của mẫu thí nghiệm kéo và nén, một mô hình đơn giản được đề xuất bởi Chen và Graybeal [21] cái mà chỉ yêu cầu số liệu đầu vào là f'_c và f_t đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Theo mô hình của Chen và Graybeal quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu UHPC được thể hiện như trong Hình 5. Ứng xử chịu nén của bê tông được mô tả bằng quan hệ tuyến tính với giá trị ứng suất nén lớn nhất bằng $0,85f'_c$, giá trị này được sử dụng là thiên về an toàn [23], trong khi đó ứng xử chịu kéo được giả thiết là tuyệt đối đàn hồi, khi biến dạng tăng ứng suất kéo được giữ nguyên không đổi bằng $0,5f_t$. Mặc dù mô hình này không hoàn toàn giống với quan hệ ứng suất – biến dạng thực tế của vật liệu UHPC, nhưng đây là một mô hình đơn giản và là quan trọng cho sự hội tụ của kết quả theo phương pháp FEM.



Hình 5. Quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu [21]



Hình 6. Mô hình tấm ván khuôn trong ABAQUS

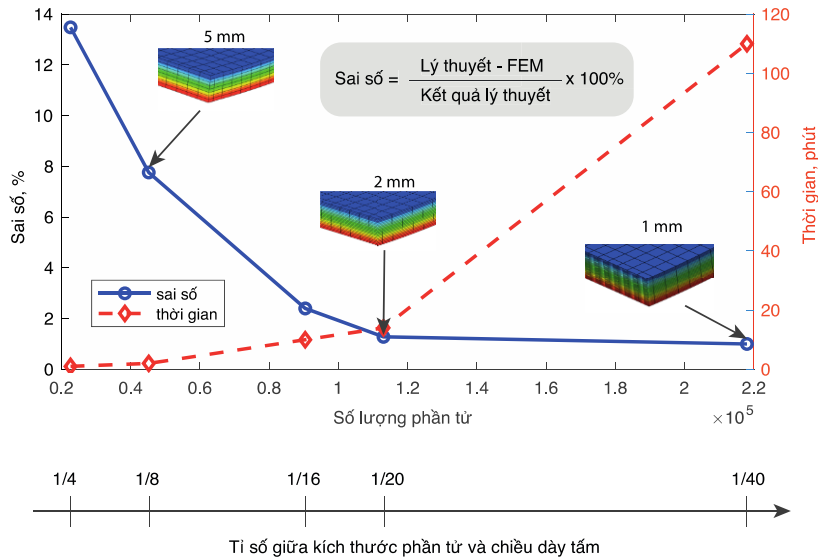
Mô hình kết cấu tấm UHPC trong ABAQUS là được thể hiện trên Hình 6 với tổng cộng 113000 phần tử khối 3 chiều được sử dụng. Thời gian phân tích phi tuyến là 18 giờ với cấu hình máy tính Intel Core i7, 16 GB RAM.

4.3. Kết quả của FEM

Độ chính xác của mô hình FEM bị ảnh hưởng lớn bởi kích thước phần tử. Kích thước phần tử càng nhỏ kết quả càng chính xác tuy nhiên thời gian phân tích cũng như yêu cầu cấu hình về phần cứng máy tính cao hơn. Do đó, trước khi đi vào phân tích ứng xử của kết cấu, kích thước hợp lý của phần tử cần được lựa chọn trước. Hình 7 thể hiện kết quả phân tích độ hội tụ của mô hình. Kết quả của Hình 7 là sai số giữa ứng suất thớ dưới của tấm dưới tác dụng của lực bằng 2 KN (mỗi điểm đặt lực là 1 KN) và giá trị tính toán từ lý thuyết là 2,5 MPa (giả thiết tấm làm việc trong giai đoạn đàn hồi).

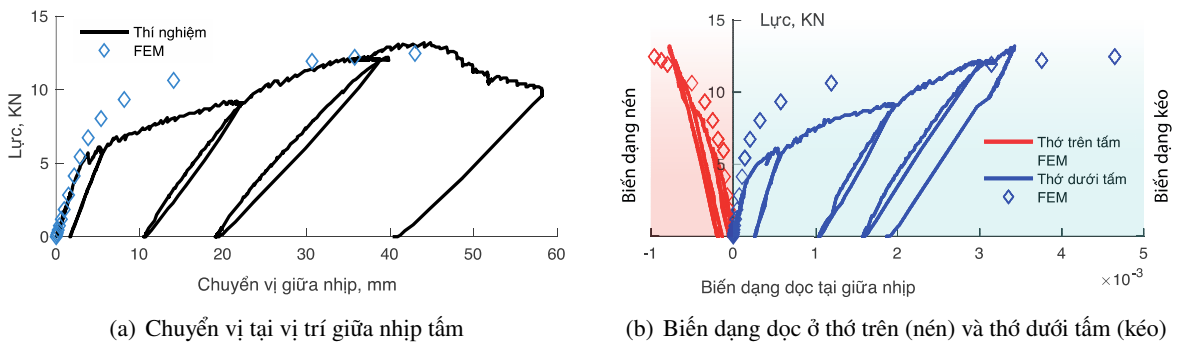
Khi tăng số lượng phần tử, kết quả của mô hình FEM tiệm cận đến giá trị tính toán lý thuyết tuy nhiên thời gian phân tích tăng nhanh. Khi kích thước phần tử nhỏ hơn 2 mm, kết quả gần như không thay đổi. Điều này cho thấy sẽ là không hiệu quả khi tăng số lượng phần tử để cải thiện kết quả của mô hình FEM. Do đó, trong nghiên cứu này kích thước phần tử được lựa chọn là 2 mm cho giai đoạn phân tích tiếp theo.

Kết quả so sánh giữa số liệu thí nghiệm và mô hình FEM là được thể hiện trong Hình 8. Nhìn chung mô hình FEM mô phỏng khá sát với thực tế làm việc của tấm. Hình 8(a) thể hiện kết quả so sánh chuyển vị giữa nhịp tấm. Có thể thấy rằng trong giai đoạn tấm làm việc đàn hồi, kết quả từ mô hình FEM và từ thí nghiệm là hoàn toàn trùng khớp. Tuy nhiên khi tấm bắt đầu có ứng xử phi tuyến,



Hình 7. Phân tích độ hội tụ của kết quả FEM

mô hình FEM cho kết quả dự báo chuyển vị nhỏ hơn so với thí nghiệm. Kết quả từ mô hình FEM cho thấy khi chuyển vị tấm lớn hơn 30 mm, sức kháng của tấm gần như không tăng. Ở thời điểm mô hình FEM không thể hội tụ (tấm bị phá hoại theo mô hình), kết quả dự báo sức kháng là 12,5 KN (nhỏ hơn khoảng 4% so với số liệu thí nghiệm).



Hình 8. So sánh kết quả thí nghiệm và mô hình FEM

Hình 8(b) thể hiện kết quả so sánh biến dạng ở thớ trên và thớ dưới tấm. Ở vùng nén của tấm, kết quả mô hình FEM và thí nghiệm là khá trùng khớp. Ở giai đoạn tấm gần bị phá hoại, có thể nhìn thấy rằng vùng nén cũng đã bắt đầu có ứng xử phi tuyến. Tuy nhiên, so sánh với vùng chịu kéo của tấm, có thể thấy rằng vùng kéo gần như hoàn toàn bị chảy dẻo. Biến dạng kéo ở thời điểm tấm bị phá hoại theo mô hình FEM là gần 5×10^{-3} .

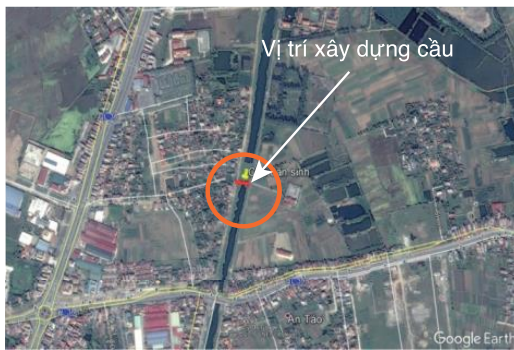
Sử dụng quan hệ ứng suất – biến dạng như trong Hình 5 có thể cho kết quả không hoàn toàn trùng khớp với thí nghiệm. Tuy nhiên, quan hệ đơn giản này giúp tăng tốc độ hội tụ của mô hình FEM cũng như sự ổn định về kết quả.

5. Ứng dụng UHPC cho tấm ván khuôn đổ bản mặt cầu BTCT

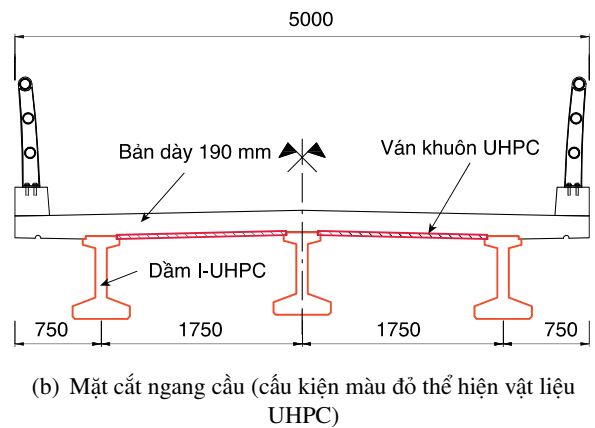
Kết quả thí nghiệm tấm bản mỏng sử dụng vật liệu UHPC cho thấy nhiều ưu điểm về mặt làm việc so với tấm ván khuôn BTCT thông thường. Sử dụng mô hình FEM để dự báo khả năng làm việc của tấm ván khuôn là tin cậy và an toàn. Những kết quả này là cơ sở để nhóm tác giả ứng dụng UHPC cho tấm ván khuôn thi công bản mặt cầu BTCT của cầu dân sinh An Thượng (thành phố Hưng Yên).

5.1. Giới thiệu về thiết kế cầu An Thượng (Hưng Yên)

Cầu dân sinh An Thượng vượt kênh thủy lợi tại phường An Tảo, thành phố Hưng Yên, tỉnh Hưng Yên (Hình 9(a)). Cầu có chiều dài tổng cộng là 31,1 m; bề rộng cầu 5,0 m bao gồm 4,4 m mặt đường xe chạy và $2 \times 0,3$ m lề lan can. Tải trọng thiết kế 0,5 HL93 theo Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272:05. Kết cấu nhịp sử dụng 3 dầm I-UHPC dài 21 m, khoảng cách giữa các dầm chủ là 1,75 m, bản mặt cầu bằng BTCT dày 0,19 m đổ tại chỗ (Hình 9(b)).



(a) Vị trí xây dựng cầu (ảnh Google Earth chụp ngày 25/12/2018)



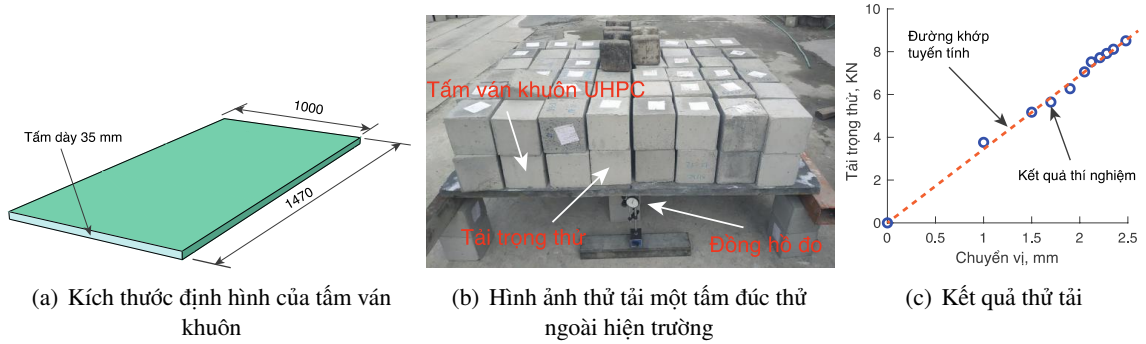
(b) Mặt cắt ngang cầu (cầu kiện màu đỏ thể hiện vật liệu UHPC)

Hình 9. Thiết kế cầu An Thượng

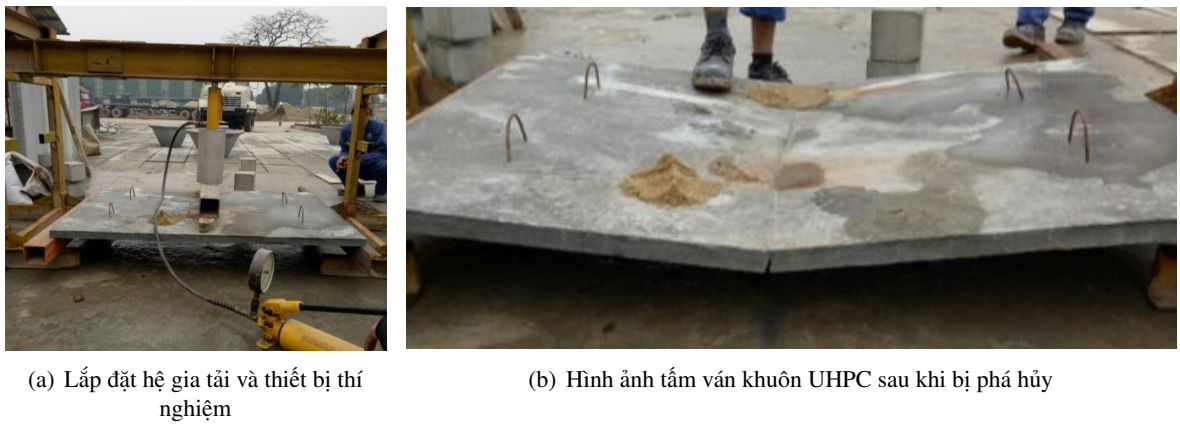
5.2. Thiết kế ván khuôn UHPC đổ bản mặt cầu BTCT

Ngoài việc sử dụng vật liệu UHPC cho dầm chủ, ván khuôn để lại phục vụ thi công bản mặt cầu BTCT cũng được chế tạo bằng UHPC. Toàn cầu sử dụng 44 tấm ván khuôn UHPC có chiều dài 1,47 m, chiều dày 35 mm, trong đó 36 tấm có bề rộng 1,0 m, 4 tấm có bề rộng 0,955 m và 4 tấm có bề rộng 0,1 m. Thành phần cấp phối của UHPC sử dụng cho các tấm ván khuôn cầu An Thượng tương tự như trong thí nghiệm tấm bản mỏng đã nêu ở Mục 2.1.

Để khẳng định khả năng chịu lực và độ an toàn của kết cấu, nghiên cứu thí nghiệm gia tải với một tấm ván khuôn UHPC bất kỳ với kích thước $(1,47 \times 1,0 \times 0,035)$ m như thể hiện trên Hình 10(a). Hình ảnh thí nghiệm và kết quả thí nghiệm uốn ngoài hiện trường của mẫu đúc thử sau 4 ngày tuổi được thể hiện trong Hình 10(b) và 10(c). Tải trọng thử lớn nhất là 868 kg (khoảng $5,8 \text{ KN/m}^2$). Tải trọng này là gấp gần 1,25 lần tải trọng thiết kế của tấm ván khuôn. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng tấm vẫn làm việc trong giai đoạn đàn hồi ở mức tải trọng thiết kế của tấm (Hình 10(c)). Như đã được thảo luận ở Mục 3 và 4, tấm ván khuôn UHPC có khả năng phát triển cường độ ở ngoài miền đàn hồi. Do đó, có thể kết luận rằng thiết kế này là thiên về an toàn và kích thước tấm vẫn có thể giảm bớt để tăng tính hiệu quả về mặt kinh tế. Để chứng minh cho kết luận này, thí nghiệm uốn phá hủy tấm ván



Hình 10. Tấm ván khuôn UHPC cầu An Thượng



Hình 11. Thí nghiệm phá hủy tấm ván khuôn UHPC ngoài hiện trường



Hình 12. Sản xuất đại trà tấm ván khuôn UHPC cho cầu An Thượng



Hình 13. Thi công cầu lắp tấm ván khuôn UHPC tại công trường cầu An Thượng

khuôn sau 28 ngày tuổi được tiến hành như thể hiện trong Hình 11. Giá trị lực kích lớn nhất đạt được tại thời điểm tấm ván khuôn bị phá hủy khoảng 1,6 tấn.

Như đã trình bày ở trên tấm ván khuôn UHPC nhìn chung có nhiều ưu điểm về mặt làm việc cũng

như có một mô hình dự báo khá tin cậy. Bên cạnh đó sử dụng ván khuôn UHPC có thể làm giảm trọng lượng của kết cấu. Do việc không sử dụng cốt thép thường, chiều dày cũng như trọng lượng của tấm ván khuôn giảm đi đáng kể, giúp cho thi công và vận chuyển dễ dàng, thuận tiện hơn. Hình 12 và Hình 13 và thể hiện công tác sản xuất, thi công cầu lắp tấm ván khuôn UHPC cho cầu An Thượng.

6. Kết luận

Qua kết quả thí nghiệm về khả năng chịu uốn của tấm ván khuôn sử dụng vật liệu UHPC và phân tích mô hình tấm mỏng sử dụng phần tử hữu hạn, một số kết luận có thể rút ra như sau:

- Khả năng chịu kéo của bê tông UHPC đã đóng góp một phần lớn vào sự làm việc chung của tấm. Bê tông trong vùng nén của tấm vẫn chưa phát huy hết khả năng làm việc.
- Mô hình FEM của tấm sử dụng mô hình vật liệu bê tông phá hoại dẻo CDP trong ABAQUS cho thấy kết quả từ mô hình FEM là tương đối tin cậy và an toàn. Kết quả phân tích sự hội tụ của mô hình FEM cho thấy kích thước của phần tử khoảng 1/20 của chiều cao là đủ cho sự phân tích.
- Thử nghiệm tấm ván khuôn UHPC cho thi công bản mặt cầu An Thượng cho thấy, dưới tác dụng của tải trọng thiết kế của tấm, tấm ván khuôn vẫn làm việc trong giai đoạn đàn hồi. Điều này có thể kết luận rằng thiết kế này là thiên về an toàn và kích thước của tấm có thể được giảm để nâng cao hiệu quả kinh tế.

Kết quả nghiên cứu này cho thấy vẫn còn tồn tại một số điểm cần phát triển thêm, chẳng hạn như sự đa dạng về số lượng mẫu thí nghiệm, đa dạng về kích thước cũng như thành phần vật liệu nghiên cứu, đồng thời rất cần thiết để phát triển một mô hình đơn giản thuận tiện cho công việc thiết kế. Bên cạnh đó, việc tính toán hiệu quả kinh tế - kỹ thuật của việc áp dụng vật liệu UHPC chế tạo tấm ván khuôn cũng cần được thực hiện để đánh giá khả năng ứng dụng vật liệu này trong thực tế. Đây sẽ là hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai của nhóm tác giả.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo cho đề tài “Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình”; Mã số: CTB-2017-01.

Nhóm tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ, phối hợp của Công ty TNHH MTV Bê tông Xuân Mai trong quá trình chế tạo, thí nghiệm tấm ván khuôn UHPC cho cầu An Thượng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Graybeal, B. A. (2006). Material property characterization of ultra-high performance concrete. Technical report, Federal Highway Administration, No. FHWA-HRT-06-103.
- [2] Rebentrost, M., Wight, G., Fehling, E. (2008). Experience and applications of ultra-high performance concrete in Asia. In *2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 10:19–30.
- [3] AFGC/SETRA (2002). *Ultra high performance fiber-reinforced concrete-interim recommendations*. Report, Association Française de Génie Civil, Paris, France.
- [4] Harris, D. K., Roberts-Wollmann, C. L. (2005). *Characterization of the punching shear capacity of thin ultra-high performance concrete slabs*. Virginia Center for Transportation Innovation and Research.
- [5] Kolísko, J., Čech, J., Tej, P., Kněž, P. (2017). UHPC panels utilized as permanent formwork of in-situ cast reinforced concrete deck bridges. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 246(1):012043.
- [6] Kolísko, J., Hunka, P., Rydval, M., Kostelecka, M. (2013). Development of UHPC from materials available in Czech Republic. In *Proceedings of CESB13*, 385–388.

- [7] Brameshuber, W., Brockmann, T., Banholzer, B. (2004). Textile reinforced ultra high performance concrete. In *Proceedings: International Symposium on UHPC, Kassel*, 13–15.
- [8] Tej, P., Kolísko, J., Bouška, P., Bittner, T., Mušutová, V. (2015). Loading tests of thin plates made of ultra-high performance concrete reinforced by PVA fibers and 2D textile glass reinforcement. In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 1095:569–572.
- [9] Moreillon, L., Nseir, J., Suter, R. (2012). Shear and flexural strength of thin UHPC slabs. In *Proceedings of Hipermat*.
- [10] Kang, S.-H., Hong, S.-G., Kwon, Y.-H. (2017). [Effect of permanent formwork using ultra-high performance concrete on structural behaviour of reinforced concrete beam subjected to bending as a function of reinforcement parameter](#). *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 6(2):1000260.
- [11] Slabý, O., Vašková, J., Veselý, V. (2017). Application of UHPC thin-walled elements for multi-purpose use table. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 246(1):012023.
- [12] Falbr, J. (2018). Bending capacity of thin UHPC plates based on theoretical predictions and in-situ testing. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, Springer, 439–446.
- [13] Binard, J. P. (2017). UHPC: A game-changing material for PCI bridge producers. *PCI Journal*, 34–46.
- [14] Thắng, N. C., Tuấn, N. V., Hanh, P. H., Lâm, N. T. (2012). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 12:71–74.
- [15] Thắng, N. C., Thắng, N. T., Hanh, P. H., Tuấn, N. V., Thành, L. T., Lâm, N. T. (2013). [Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng silica fume và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn ở Việt Nam](#). *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 7(1):83–92.
- [16] Ân, V. V. T., Long, H. V., Tuấn, N. K. (2016). Chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia tro trấu-xỉ lò cao. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 4:118–122.
- [17] Hữu, P. D., Sang, N. T., Anh, P. D., Kha, N. L. (2011). Nghiên cứu vật liệu chế tạo bê tông cường độ siêu cao (UHPC). *Tạp chí Giao thông Vận Tải, Bộ Giao thông Vận tải*, 7:15–18.
- [18] Viet, T. B., Long, L. M., Hoa, N. T. (2016). Research design UHPC bridge with HL93 load at the Vietnam township. In *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation “Sustainable concrete for now and the future”*, Hanoi, Vietnam.
- [19] Viet, T. B., Long, L. M., Hoa, N. T. (2016). Studying on the construction of 18m-span UHPC bridge for two-wheel transportation means in Hau Giang, Vietnam. In *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation “Sustainable concrete for now and the future”*, Hanoi, Vietnam.
- [20] Hưng, C. V., Phúc, N. Đ., Thắng, N. C., Tuyển, N. N., Hoà, P. D. (2018). [Dự báo sức kháng uốn của dầm bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\)](#). *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 12(4):1–13.
- [21] Chen, L., Graybeal, B. A. (2010). *Finite element analysis of ultra-high performance concrete: Modeling structural performance of an AASHTO type II girder and a 2nd generation pi-girder*. Federal Highway Administration, United States, No. FHWA-HRT-11-020.
- [22] Hibbitt, H., Karlsson, B., Sorensen, P. (2011). *Abaqus analysis user's manual version 6.10*. Dassault Systèmes Simulia Corp.: Providence, RI, USA.
- [23] Graybeal, B. A. (2006). *Structural behavior of ultra-high performance concrete prestressed I-girders*. United States, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, No. FHWA-HRT-06-115.