

MÔ HÌNH SỐ KỸ THUẬT CHO CẦU ĐÚC SẴN SỬ DỤNG TRONG THIẾT KẾ ĐỊNH HƯỚNG CHẾ TẠO VÀ LẮP DỰNG

Nguyễn Duy Cường^a, Chang-su Shim^a, Nguyễn Thế Quân^{b,*}

^aKhoa Kỹ thuật xây dựng và Môi trường, Trường Đại học Tổng hợp Chung Ang, Hàn Quốc

^bKhoa Kinh tế & Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 26/3/2021, Sửa xong 21/9/2021, Chấp nhận đăng 14/10/2021

Tóm tắt

Xây dựng cầu sử dụng cấu kiện đúc sẵn đang là xu hướng công nghệ chủ đạo để nâng cao năng suất, chất lượng và hiệu quả sử dụng chi phí. Từ giai đoạn thiết kế đến các giai đoạn sản xuất và lắp dựng, việc chuyển giao thông tin theo các cấu kiện đúc sẵn là một thách thức kỹ thuật lớn do hiệu ứng silo cản trở việc trao đổi thông tin giữa các giai đoạn. Nghiên cứu này xem xét tác dụng của chuyển đổi số, một xu hướng sử dụng mô hình kỹ thuật số kết hợp với các tri thức khác trong các dự án xây dựng đối với vấn đề này. Mô hình số kỹ thuật (Digital Engineering Model - DEM) cho cầu sử dụng cấu kiện đúc sẵn đã được nghiên cứu đề xuất để kết nối các dòng chảy kỹ thuật từ mô hình kỹ thuật số cho thiết kế, đến mô hình số cho chế tạo và lắp dựng. Để minh họa, bài báo trình bày kết quả thử nghiệm áp dụng Phương pháp Thiết kế định hướng Chế tạo và Lắp dựng (Design for Manufacturing and Assembly - DfMA) và BIM (Building Information Modelling) cho giai đoạn thiết kế cầu sử dụng cấu kiện đúc sẵn, cho một trụ cầu tiền chế. Kết quả thử nghiệm chứng minh các mô hình này giúp tăng tính hiệu quả trong việc phối hợp và giao tiếp giữa các bên hữu quan dự án.

Từ khoá: mô hình thông tin công trình (BIM); mô hình số kỹ thuật (DEM); thiết kế cho chế tạo (DfM); thiết kế cho lắp dựng (DfA); phương pháp thiết kế định hướng chế tạo và lắp dựng (DfMA).

DIGITAL ENGINEERING MODEL FOR PREFABRICATED BRIDGES WITH DESIGN FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY

Abstract

Prefabricated bridge construction is the key trend technology to improve productivity, quality and cost efficiency. From design process to fabrication and assembly, information delivery for the prefabricated members is essential technical challenge because of the silos effects which prevent the information exchange between phases. Digital transformation by combining domain knowledge with digital modeling has become increasingly significant in construction projects. In this paper, digital engineering model (DEM) for prefabricated bridge are proposed to connect engineering workflow from digital design model, digital fabrication and digital assembly model. For piloting, Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) concept and Building Information Modelling technology are adopted for the design process of a prefabricated pier. The findings confirm the increased effective coordination and communication among participants.

Keywords: Building Information Modelling (BIM); Digital Engineering Model (DEM); Design for Manufacturing (DfM); Design for Assembly (DfA); Design for Manufacturing and Assembly (DfMA).

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7V\)-15](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-15) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: quannt@nuce.edu.vn (Quân, N. T.)

1. Đặt vấn đề

Trong nhiều công nghệ xây dựng mới đã và đang được áp dụng trong việc xây dựng cầu, việc sử dụng cầu kiện đúc sẵn là một trong những công nghệ đã được chứng minh là có rất nhiều ưu điểm. Ưu điểm điển hình của công nghệ đúc sẵn được Ezy và cộng sự tổng kết lại thành ba nhóm lớn về tổ chức, về tài chính, về môi trường, và được chi tiết thành 6 nhóm nhỏ [1]: các ưu điểm về lãnh đạo và lập kế hoạch, các ưu điểm về thiết kế và xây dựng, các ưu điểm về năng suất - tài chính, các ưu điểm về văn hóa, môi trường, an toàn lao động. Các ưu điểm nổi bật bao gồm đảm bảo chất lượng, giảm chi phí, thời gian lắp dựng nhanh và an toàn hơn so với việc thi công đổ tại chỗ. Các ưu điểm này mang lại hiệu quả cao trong việc nâng cao năng suất, rút ngắn thời gian thi công, nâng cao chất lượng công trình so với cách làm truyền thống.

Tuy vậy, công nghệ đúc sẵn cũng có một số nhược điểm. Việc sử dụng cầu kiện đúc sẵn sẽ bị giới hạn bởi kích thước, khó khăn trong việc kiểm soát sai số chế tạo và lắp dựng tại công trường và vận chuyển. Nó cũng đòi hỏi phải quản lý liên tục các yêu cầu đặt ra đối với cầu kiện, công trình, yêu cầu sai lỗi sản xuất thấp, chi phí (kể cả chi phí đầu tư ban đầu và chi phí thiết kế) tăng lên, khó sử dụng công nghệ thông tin do địa điểm phân tán, kém đa dạng về kỹ thuật, tăng ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường do việc sản xuất và lắp dựng sử dụng nhiều máy móc thiết bị lớn, tăng mức độ mất an toàn do phải làm việc với kết cấu lớn, rủi ro về sai lỗi, khuyết tật của cầu kiện và mối nối lớn [1]. Về mặt kỹ thuật, nhiều nhược điểm trong số trên đưa đến yêu cầu quản lý liên tục để đảm bảo các thông tin được chuyển giao xuyên suốt từ quá trình thiết kế, qua giai đoạn sản xuất và lắp dựng. Tuy nhiên, do hiệu ứng silo (việc chuyên môn hóa dẫn đến hạn chế hợp tác và chia sẻ thông tin), những thông tin kỹ thuật này còn thiếu tính liên mạch xuyên suốt quá trình thiết kế, sản xuất và lắp dựng các cầu kiện đúc sẵn, chúng thường bị mất mát và giảm độ chính xác trong quá trình trao đổi thông tin qua từng giai đoạn triển khai.

Có nhiều nghiên cứu đã được tiến hành để giải quyết các hạn chế đã đề cập của việc sử dụng công nghệ đúc sẵn. Đã có một số nghiên cứu tập trung vào phát triển công nghệ liên kết và ứng xử tổng thể của cầu kiện cầu sau khi lắp ghép [2–6]. Có một số nghiên cứu khác được thực hiện để khống chế độ chính xác hình học của cầu kiện, là nhân tố có vai trò quan trọng trong quá trình kiểm soát sai số lắp ghép [7, 8]. Tuy nhiên, thực tiễn việc sử dụng công nghệ đúc sẵn vẫn chưa giải quyết được hạn chế về trao đổi, đảm bảo thông tin liên mạch trong suốt quá trình như trên đã chỉ ra.

Phương pháp Thiết kế định hướng Chế tạo và Lắp dựng (Design for Manufacturing and Assembly - DfMA) là phương pháp tập trung vào việc thiết kế để tăng tính thuận tiện cho chế tạo và lắp dựng cho các cầu kiện đúc sẵn, ví dụ như cầu kiện cầu bê tông cốt thép [9]. Phương pháp DfMA chú trọng đến việc tạo ra nền tảng hỗ trợ để tích hợp tối đa thông tin kỹ thuật từ giai đoạn thiết kế sang giai đoạn sản xuất, chế tạo và lắp dựng các cầu kiện đúc sẵn, nhằm giảm thiểu việc mất thông tin và đảm bảo độ chính xác xuyên suốt. Từ đó, để triển khai DfMA có hiệu quả, cần sử dụng một mô hình kỹ thuật số làm nơi tích hợp các thông tin kỹ thuật đã được số hóa và lưu trữ chúng trên một cơ sở dữ liệu trung tâm, được quản lý tập trung và sử dụng xuyên suốt vòng đời dự án.

Gần đây, BIM được giới thiệu và phát triển, ứng dụng rộng rãi trong ngành xây dựng trên thế giới, và cũng đã được giới thiệu và tiếp cận ở Việt Nam [10]. Với các ưu điểm của mình, BIM trở thành công nghệ nền tảng để tạo điều kiện và phát triển việc áp dụng phương pháp DfMA [11]. Mô hình số kỹ thuật (Digital Engineering Model - DEM, dịch đầy đủ là “mô hình kỹ thuật kỹ thuật số” hay “mô hình kỹ thuật được số hóa”, gọi tắt là “mô hình số kỹ thuật” để tránh lặp từ) là mô hình kỹ thuật đã được số hóa và được xây dựng trên nền tảng mô hình BIM để hạn chế được các nhược điểm của từng loại mô hình, đặc biệt là vấn đề trong việc số hóa, cập nhật và chia sẻ, chuyển giao thông tin của các bên hữu quan tại từng giai đoạn trong quá trình thiết kế, sản xuất, lắp dựng đã được đề xuất sử dụng

trong DfMA.

Dựa vào nền tảng công nghệ BIM và phương pháp DfMA, bài báo này đề xuất ý tưởng lý thuyết về mô hình số kỹ thuật DEM cho các cấu kiện cầu bê tông cốt thép đúc sẵn. Kết quả nghiên cứu được minh họa trong một trường hợp thí điểm sử dụng DEM trong một trụ cầu bê tông cốt thép đúc sẵn ở Hàn Quốc.

2. Tổng quan về phương pháp thiết kế định hướng chế tạo và lắp dựng

Thiết kế định hướng Chế tạo và Lắp dựng, hay còn gọi là Thiết kế cho Chế tạo và Lắp dựng (DfMA), lúc đầu là một phần mềm do Công ty Boothroyd Dewhurst Inc. đóng tại Ireland phát triển vào năm 1980 để phân tích khả năng có thể chế tạo được của các thiết kế cơ khí [12]. Sau đó, nó đã phát triển thành một tư duy mới trong việc triển khai các dự án, bao gồm cả dự án xây dựng. Đây là một khái niệm tổng hợp, được kết hợp từ hai khái niệm trong thiết kế: thiết kế cho chế tạo (DfM - Design for Manufacturing) và thiết kế cho lắp dựng (DfA - Design for Assembly) [9]. DfM là thiết kế nhằm đảm bảo sự dễ dàng cho việc chế tạo, sản xuất các thành phần mà sẽ được sử dụng để lắp dựng/lắp ráp thành sản phẩm cuối cùng, trong khi đó DfA là thiết kế sản phẩm định hướng việc lắp dựng/lắp ráp được dễ dàng [13].

Thiết kế cho lắp dựng (DfA) cần được xem xét trước nhằm mục đích tìm ra các giải pháp đơn giản hóa cấu kiện để đáp ứng yêu cầu dễ thi công. Thiết kế cho lắp dựng đòi hỏi có những phương án tối ưu hóa chi phí lắp dựng và vật liệu đi kèm để xem xét bài toán một cách đầy đủ. Sau đó, tư duy Thiết kế cho chế tạo (DfM) cần được áp dụng nhằm giảm chi phí chế tạo các cấu kiện và tiêu chuẩn hóa cấu kiện để phục vụ cả việc sản xuất và lắp dựng. Một cách tổng hợp, DfMA sẽ giúp phân tích, đánh giá phương án thiết kế dưới góc độ lắp dựng và sản xuất/chế tạo. Nhờ có DfMA, sản phẩm sẽ được đơn giản hóa, có độ tin cậy cao hơn, chi phí thấp hơn trong các giai đoạn lắp dựng và sản xuất. Việc giảm thiểu được số lượng các thành phần đưa ra lắp dựng sẽ đưa đến hiệu ứng “quả cầu tuyết” trong việc giảm chi phí, ví dụ các chi phí được cắt giảm kéo theo do không phải thực hiện các bản vẽ và tài liệu quy cách kỹ thuật, giảm chi phí làm việc với nhà cung cấp cũng như chi phí lưu kho [9].

Tuy nhiên, việc triển khai sản xuất xây dựng theo hướng tiền chế sử dụng cách tiếp cận DfMA cũng vẫn phải giải quyết các vấn đề nảy sinh do bản chất của việc chuyên môn hóa. Thứ nhất, do không có sự tham gia của những người làm công tác chế tạo trong quá trình thiết kế, có thể dẫn đến hậu quả là sản phẩm thiết kế có thể chưa thực sự thuận tiện cho công tác sản xuất/chế tạo. Thứ hai, hiệu ứng silo, hậu quả của việc chuyên môn hóa sâu xuất hiện làm hạn chế quá trình trao đổi thông tin, khiến thông tin không được thông suốt. Các yêu cầu, quy tắc, rủi ro có thể nảy sinh và giải pháp phòng tránh khi lắp dựng mà đơn vị sản xuất đã nhận thức được thông qua việc phân tích quá trình lắp ghép, ví dụ thông qua mô phỏng cũng có thể không được truyền đạt đầy đủ và hiệu quả đến đơn vị sản xuất và đơn vị lắp ghép. Các giải pháp để giải quyết như tăng cường hợp tác giữa các bên, tăng cường làm việc nhóm, mời chuyên gia lắp dựng tham gia góp ý trong giai đoạn thiết kế, hoặc đơn vị sản xuất/chế tạo tổ chức đào tạo để đảm bảo đơn vị lắp dựng nắm bắt được tất cả các yêu cầu, quy tắc cũng như cách thức tiến hành lắp dựng theo thiết kế của họ không phải bao giờ cũng đạt hiệu quả mong muốn [13].

Kỹ thuật số hóa (Digital Engineering - viết tắt là DE), là một kỹ thuật được giới thiệu bởi Kostopoulos vào năm 1975 [14], lúc đầu, được phát triển cho ngành điện tử. Mục đích chính của DE là tạo ra mỗi chuỗi dữ liệu và thông tin liên mạch trong suốt vòng đời của sản phẩm. DE đã được ứng dụng cho DfMA thông qua việc sử dụng các mô hình số 3D được dựng lên từ thiết kế, được tích hợp tối đa thông tin kỹ thuật để hỗ trợ việc chuyển giao thông tin từ giai đoạn thiết kế sang giai đoạn sản xuất, chế tạo và lắp dựng các cấu kiện đúc sẵn [11]. Tuy nhiên, ứng dụng này vẫn chưa giải quyết

được triệt để vấn đề tạo điều kiện dễ dàng để các chuyên gia ở giai đoạn sau có thể tham gia ý kiến, chia sẻ kinh nghiệm ở các giai đoạn trước. Có thể nói, dù đã sử dụng DE, DfMA vẫn thiếu vắng một giải pháp hiệu quả để giải quyết triệt để vấn đề trao đổi và quản lý thông tin, tri thức.

Gần đây, ngành xây dựng các nước trên thế giới đã tiếp cận và áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM). Với các ưu điểm của mình, Mô hình BIM có thể sử dụng như một loại mô hình DE tiên tiến hỗ trợ các hoạt động DfMA. Thông tin về mua sắm, kỹ thuật sản xuất, vận chuyển, lắp dựng, kiểm tra và đánh giá có thể được liên kết và tích hợp vào mô hình BIM để tạo một mô hình giàu dữ liệu (Data-rich model) [15]. Sử dụng BIM, các mô hình kỹ thuật số thành phần của DfMA có thể được dựng trên nền tảng BIM và sẽ được kết hợp tốt hơn với mục đích hợp lý hóa quy trình sản xuất và lắp dựng. Ngoài ra, các tính năng ưu việt sẵn có của BIM như khả năng kiểm tra xung đột, mô phỏng quá trình lắp dựng trên công trường để phát hiện các vấn đề mất an toàn, v.v... có thể được khai thác để nâng cao hiệu quả của cách tiếp cận DfMA trong ngành xây dựng [16, 17].

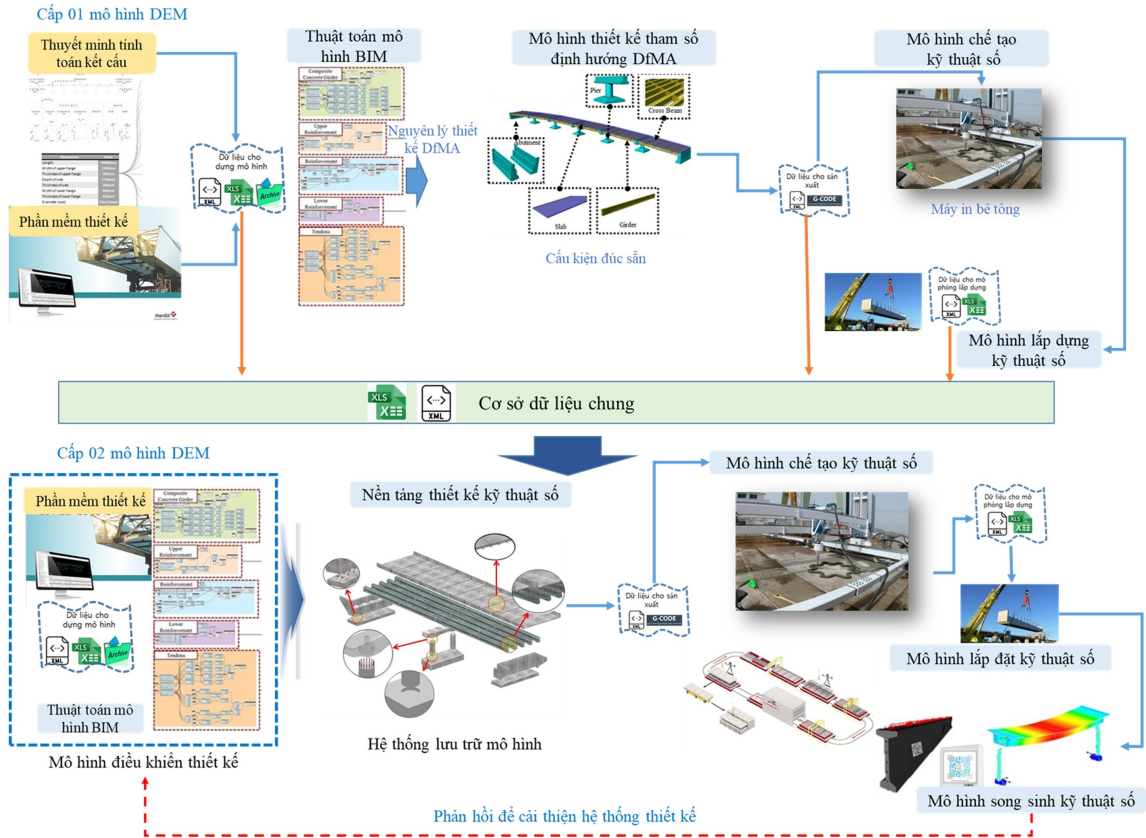
DfMA dựa trên nền tảng BIM đã được nghiên cứu và thử nghiệm áp dụng rộng rãi trong xây dựng mô đun hóa và xây dựng tiền chế công trình nhà cửa, như ở Singapore [18], Úc, Vương quốc Anh [19], và Malaysia [20] v.v... Tuy nhiên, việc khảo sát các cơ sở dữ liệu về các công bố khoa học như Scopus, Google Scholar cho thấy, chưa có kết quả nghiên cứu nào được công bố rộng rãi về việc sử dụng DfMA dựa trên nền tảng BIM cho các công trình cầu. Mặt khác, việc sử dụng BIM trong các dự án xây dựng nói chung và cả khi sử dụng trong phương pháp DfMA nói riêng cũng vẫn còn các vấn đề tồn tại cần khắc phục, trong đó tồn tại lớn nhất là do mô hình BIM được phát triển vào từng giai đoạn riêng của dự án, nên gây ra các hạn chế trong khả năng tương tác và trao đổi thông tin giữa các mô hình ở các giai đoạn khác nhau [21]. Việc các nhà thầu và đơn vị thiết kế dùng các phần mềm BIM khác nhau cho công việc của mình gây mất mát thông tin khi chuyển giao, và các nguyên nhân không đảm bảo được khả năng tương tác của các mô hình. (interoperability) cũng là nguyên nhân gây ra tồn tại nói trên.

Do đó, nghiên cứu này đề xuất sử dụng Mô hình số kỹ thuật (Digital Engineering Model – DEM) như một giải pháp tiên tiến hơn, tích hợp được các ưu điểm và hạn chế được các nhược điểm của việc sử dụng DE và cả BIM trong cách tiếp cận DfMA, áp dụng cho các công trình cầu.

3. Đề xuất Mô hình số kỹ thuật (DEM)

Mô hình số kỹ thuật (DEM) được đề xuất sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình DE được phát triển trên nền tảng BIM có cải tiến (Hình 1). Nó kế thừa đặc tính của DE là tạo ra chuỗi dữ liệu và thông tin liên mạch trong suốt vòng đời của sản phẩm. DEM tập trung hơn vào phát triển một hệ thống tích hợp toàn diện toàn bộ vòng đời dự án, có sự cải tiến hơn Mô hình BIM trong việc đảm bảo khả năng tương tác và trao đổi thông tin giữa các giai đoạn của dự án. DEM trở thành một môi trường kỹ thuật số được tạo ra với mục tiêu tăng cường tính hợp tác, là nơi tất cả các bên hữu quan của dự án cung cấp thông tin vào dự án, những thông tin này được lưu trữ tại cơ sở dữ liệu chung có tính hệ thống và liên kết giữa các mô hình. Do đó, DEM có thể mở ra môi trường mở để chia sẻ thông tin, mô phỏng chi tiết và tạo ra một nền tảng cho việc hợp tác toàn diện dự án từ thiết kế, chế tạo, lắp đặt đến giai đoạn hoạt động và bảo trì.

Hình 1 thể hiện tổng thể hai cấp độ phát triển của DEM. Cấp một của DEM bao gồm mô hình thiết kế kỹ thuật số, mô hình chế tạo kỹ thuật số và mô hình lắp dựng kỹ thuật số. Từ thuyết minh tính toán kết cấu, các thông tin hình học và vật liệu được trích xuất và lưu trữ dưới định dạng trao đổi thông tin BCF (BIM Collaboration Format) như bảng tính Excel hoặc tệp tin XML (Extensible Markup Language) trong cơ sở dữ liệu chung của DEM. Mô hình BIM được tạo ra bởi phương pháp mô hình tham số (Parametric Modelling). Phương pháp này liên kết các tham số hình học với thuật



Hình 1. Cấp độ phát triển của mô hình số kỹ thuật DEM

toán trong công cụ BIM để tạo ra mô hình. Khi xuất hiện các thay đổi thiết kế, tham số hình học được điều chỉnh và mô hình BIM sẽ tự động được cập nhật dựa trên thuật toán kết nối giữa mô hình và cơ sở dữ liệu. Các nguyên lý thiết kế DfMA cần được tích hợp trong các thuật toán mô hình hóa. Từ đó mô hình thiết kế kỹ thuật số sẽ chứa các thông tin hình học, thông tin vật liệu, phương pháp lắp dựng và sai số cho phép cho quá trình sản xuất và lắp dựng. Mô hình thiết kế kỹ thuật số sẽ được đồng bộ với mô hình chế tạo kỹ thuật số. Với mục tiêu nâng cao năng suất, tăng tính tự động hóa, giảm thiểu chi phí và chế tạo những cấu kiện có tính thẩm mỹ cao, công nghệ in bê tông 3D được sử dụng để in ván khuôn bê tông cố định cho cấu kiện đã được nghiên cứu áp dụng. Trong cơ sở dữ liệu chung, từ thông tin hình học và vật liệu từ mô hình thiết kế, các tham số cho quá trình in bê tông sẽ được tính toán như đường dẫn in, chiều rộng và độ dày lớp in bê tông, thời gian in và cấp phối vật liệu. Mô hình thiết kế sẽ được sử dụng để tính toán những tham số in. Mô hình kỹ thuật số lắp dựng chứa đựng trong đó hướng dẫn cho công tác lắp ghép và tiêu chuẩn sai số lắp ghép được tính hợp vào mô hình và cơ sở dữ liệu chung. Tiêu chuẩn sai số lắp ghép cho cấu kiện cầu đúc sẵn như trong đề xuất của Culmo và cs. [7] đã được đánh giá trong mô hình mô phỏng quá trình lắp dựng. Tất cả các thông tin từ các mô hình thiết kế, chế tạo và lắp dựng đều được chuyển đến cơ sở dữ liệu chung để đảm bảo tính liên mạch thông tin.

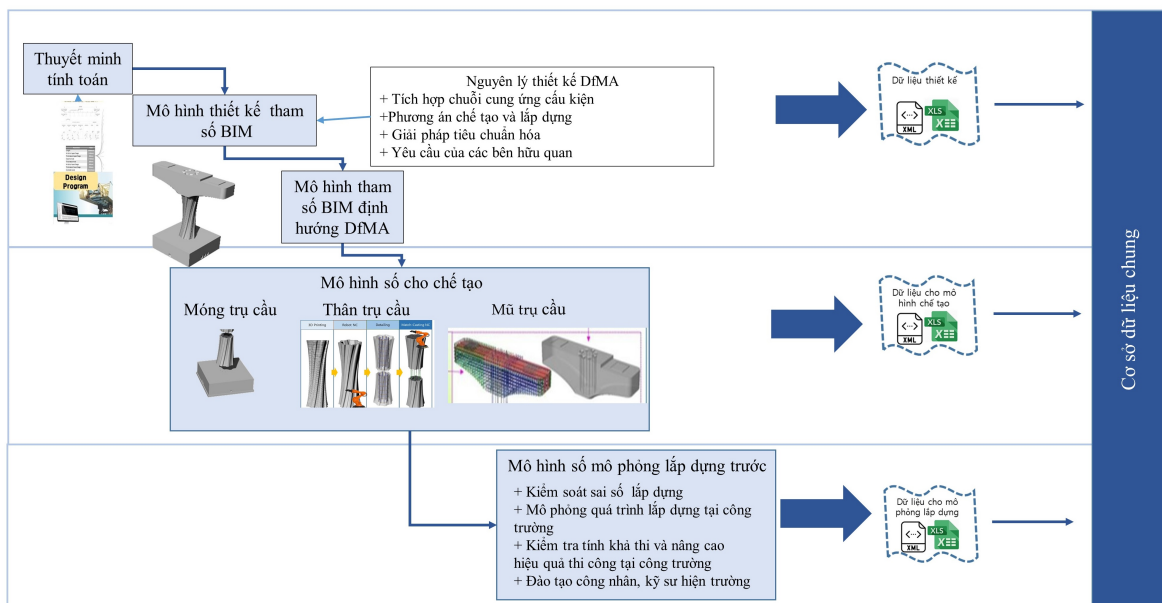
Mô hình số kỹ thuật song sinh (Digital Twin Model) sử dụng để theo dõi quá trình làm việc của các cấu kiện sẽ được thiết lập cho DEM cấp 2. Cấu kiện được lắp cảm biến để theo dõi các chỉ số trong quá trình cấu kiện làm việc. Dữ liệu thu được từ cảm biến sẽ được sử dụng để phát triển mô

hình kỹ thuật số song sinh. Quá trình làm việc của cấu kiện trong giai đoạn vận hành sẽ được lưu trữ và số hóa bởi hệ thống bảo trì. Dựa vào kết quả theo dõi quá trình hoạt động, cần rút ra các phản hồi để cải tiến mô hình thiết kế được thực hiện. Tại cấp 2 của DEM, dữ liệu lớn trong quá trình hoạt động cần được số hóa và phân tích.

4. Thử nghiệm Mô hình số kỹ thuật cho một trụ cầu bê tông cốt thép đúc sẵn

4.1. Tổng quan mô hình

Quá trình phát triển mô hình số kỹ thuật DEM cấp 1 cho trụ cầu bê tông cốt thép được trình bày tại Hình 2. DEM cấp 1 được phát triển bao gồm mô hình tham số BIM dựa trên nguyên lý thiết kế DfMA, mô hình chế tạo kỹ thuật số và mô hình lắp dựng kỹ thuật số. Cơ sở dữ liệu chung được thiết lập để lưu trữ, liên kết và phân tích dữ liệu xuyên suốt các quá trình từ thiết kế, chế tạo đến lắp dựng. Trong giai đoạn thiết kế, mức độ phát triển mô hình LOD (Level of Development) của mô hình chế tạo được thiết lập ở mức tối thiểu là LOD400, để đảm bảo có đủ thông tin phục vụ các giai đoạn sản xuất và lắp dựng. Mô hình tham số BIM định hướng DfMA được khởi tạo để chuyển sang mô hình chế tạo. Những thông tin về nhà cung ứng cấu kiện, phương án vận chuyển, giới hạn công trường và sai số lắp dựng sẽ được tính hợp vào mô hình chế tạo.

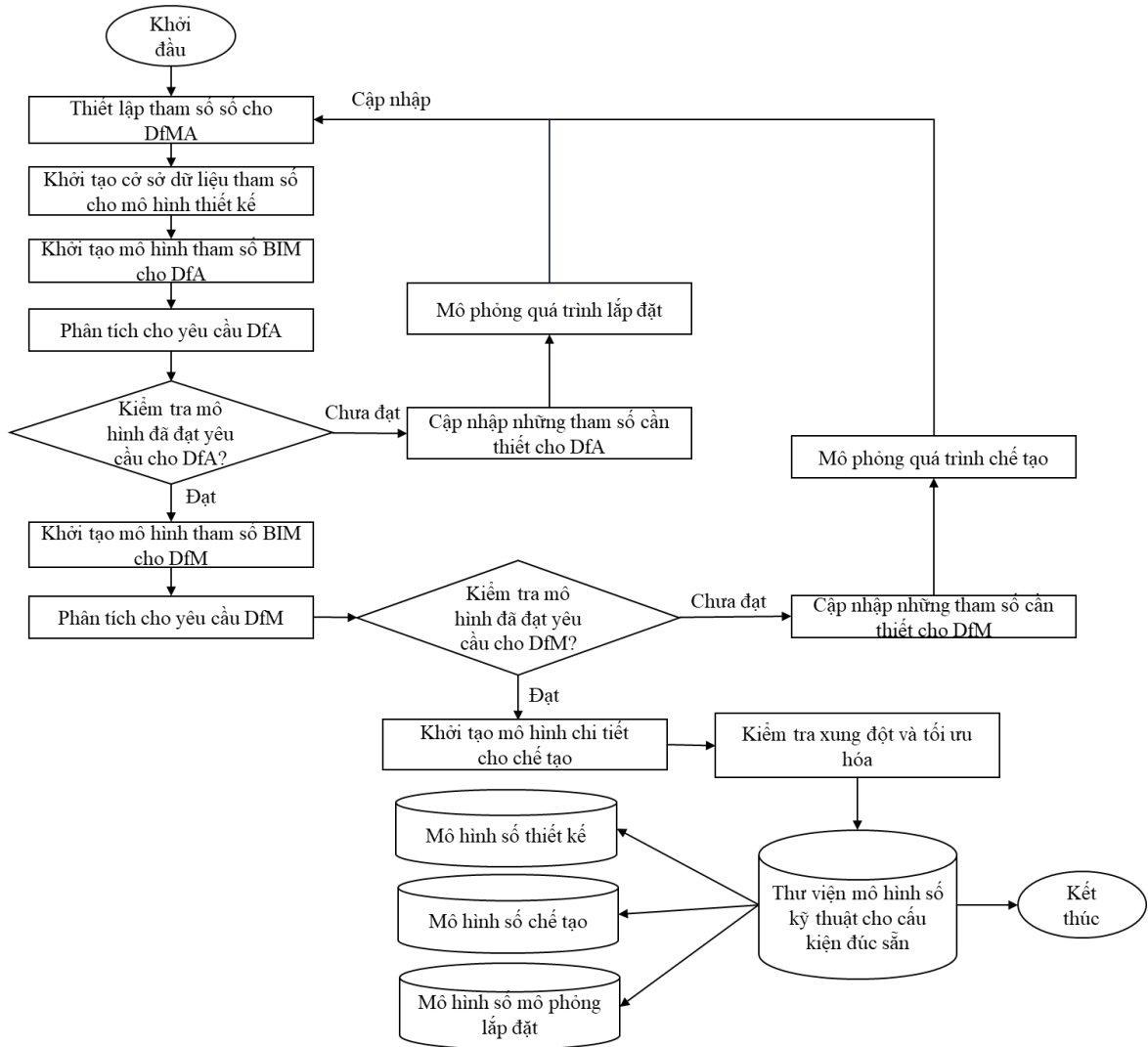


Hình 2. Mô hình số kỹ thuật cấp 1 cho trụ cầu

4.2. Mô hình thiết kế tham số định hướng DfMA

Mô hình số thiết kế định hướng DfMA là mô hình trung tâm trong việc thiết lập mô hình DEM. Mô hình được thiết lập dựa trên nền tảng mô hình tham số BIM thỏa mãn các điều kiện cho lắp dựng DfA và cho sản xuất DfM.

Hình 3 diễn tả quy trình hình thành mô hình thiết kế tham số định hướng DfMA. Bước 1 là bước thiết lập các tham số thiết kế cho DfA và DfM. Các tham số được xem xét để đảm bảo sự phù hợp cho lắp dựng và chế tạo, thông tin về các tham số này cần phân tích và tích hợp trong mô hình BIM. Bước

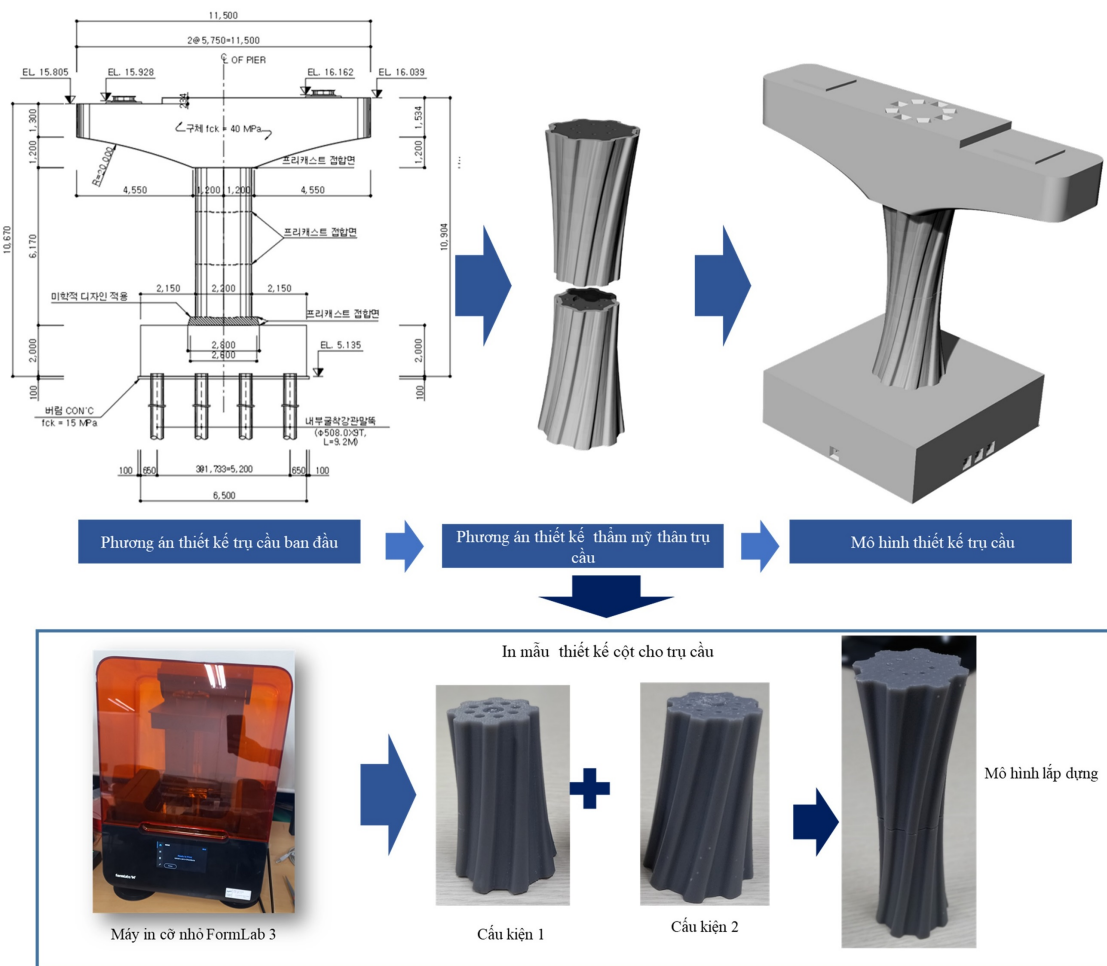


Hình 3. Quy trình thiết lập mô hình tham số định hướng DfMA

tiếp theo, cần thiết lập cơ sở dữ liệu tham số cho việc dựng mô hình với tham số được phân loại theo mức độ LOD từ 200-400. Hoạt động lắp dựng được phân tích để làm rõ các yêu cầu cần thỏa mãn. Một hệ tọa độ các điểm quan trắc cần được thiết lập để hình thành đường căn chỉnh mô hình phục vụ việc lắp dựng cấu kiện. Giới hạn sai số lắp dựng theo trục x, y, z được tích hợp vào mô hình để mô phỏng quá trình lắp dựng. Sau khi mô hình cấu kiện với tham số lắp dựng được thiết lập, bước tiếp theo là phân tích tham số cho yêu cầu chế tạo DfM. Tham số chế tạo được thiết lập dựa trên điều kiện về sản xuất cấu kiện trong nhà máy. Mô hình BIM thỏa mãn các tham số điều kiện DfM sẽ được sử dụng cho việc chế tạo các cấu kiện. Mô hình BIM sẽ được sử dụng để tính toán vật liệu chế tạo như diện tích ván khuôn, khối lượng bê tông cốt thép. Mô hình thân trụ cầu sẽ được sử dụng để thiết lập dữ liệu in cho máy in bê tông. Kết quả cuối cùng các mô hình số sẽ được chuyển giao cho các bên nhà thầu để thực hiện chế tạo. Mô hình số thiết kế, chế tạo và lắp dựng sử dụng cho việc mô phỏng và kiểm soát sai số trong quá trình lắp dựng là kết quả chính của mô hình.

4.3. Mô hình số thiết kế

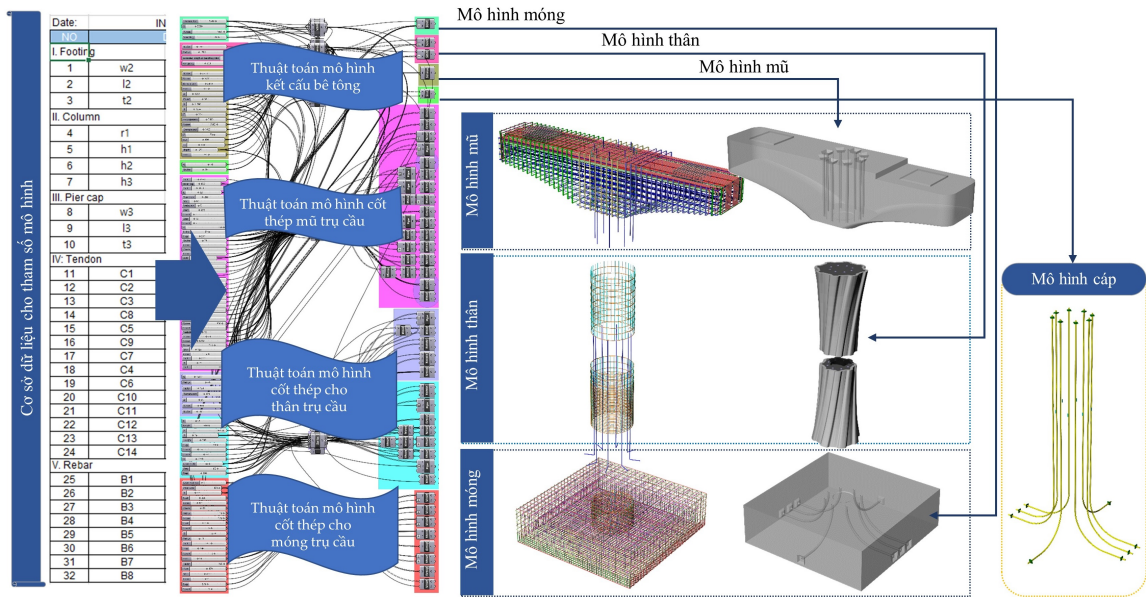
Sử dụng công nghệ in 3D, thân trụ cầu có thể được thiết kế đảm bảo yêu cầu thẩm mỹ. Công nghệ in 3D cho phép chế tạo các cấu kiện có hình dáng hình học tự do, do đó có thể giúp giải phóng tư duy thiết kế khỏi các hình khối bê tông thông thường do hạn chế của kỹ thuật đúc sẵn. Hình 4 thể hiện mô hình thiết kế thẩm mỹ một thân trụ cầu có kiến trúc xoắn. Trong trường hợp này, trụ cầu không được in trực tiếp, mà công nghệ in 3D được sử dụng để in ván khuôn cho trụ cầu. Các tham số thiết kế chính cần được tính toán cho việc sử dụng công nghệ in 3D là góc nhô ra giữa các lớp in, độ cong và mức độ phức tạp hình học. Góc nhô giữa các lớp in được thiết kế trong khoảng $(-15, 15)$ độ để đạt được chất lượng in tốt nhất. Sử dụng phương pháp mô hình tham số giúp cho nhà thiết kế có thể tạo ra các phương án thiết kế với mức độ phức tạp khác nhau. Thuật toán được thiết lập để kiểm soát giới hạn các tham số in và ràng buộc để tạo ra mô hình có thể in được. Mô hình in 3D cỡ nhỏ sử dụng máy in Formlabs3 được sử dụng để kiểm tra khuyết tật hình học, và phương pháp lắp dựng.



Hình 4. Mô hình số thiết kế

Hình 5 diễn giải quá trình khởi tạo mô hình tham số BIM cho DfMA sử dụng phần mềm mô hình tham số Grasshopper và Rhino. Mô hình tham số sử dụng kết hợp các tham số thiết kế đầu vào và các thuật toán dựng dựng mô hình. Cơ sở dữ liệu tham số thiết kế là một phần quan trọng trong mô hình

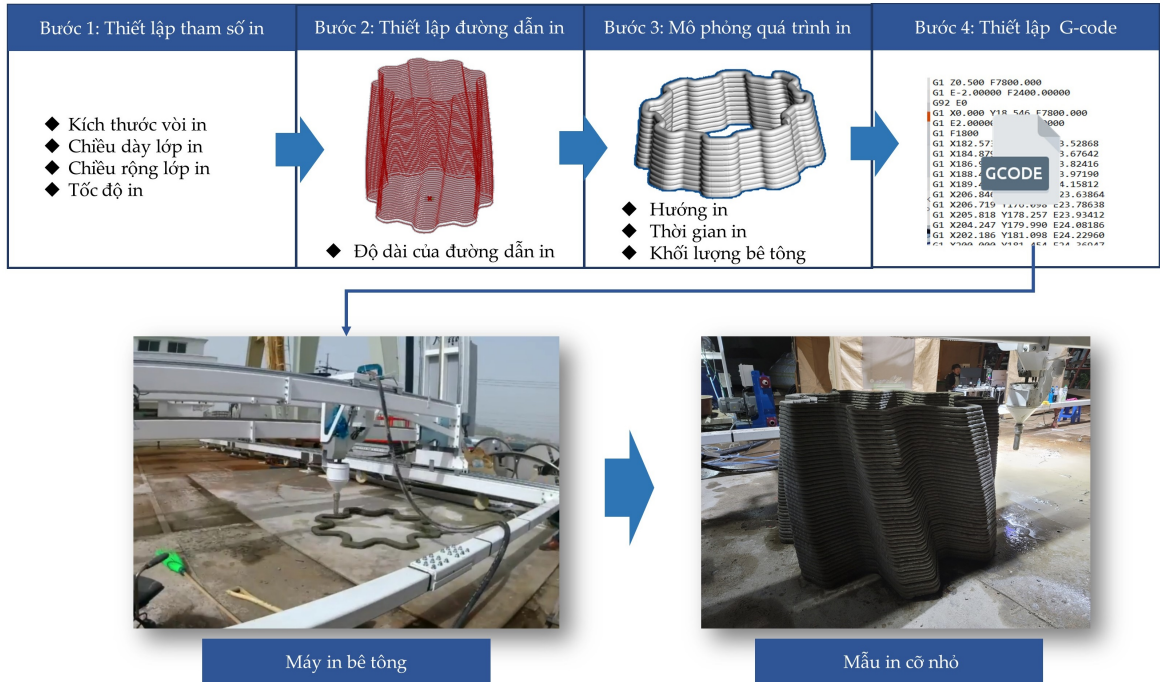
DEM. Quy tắc đặt tên cho các tham số sẽ được thống nhất sử dụng xuyên suốt quá trình thiết kế đến sản xuất và lắp dựng. Tham số chính đến từ thuyết minh tính toán. Các ràng buộc trong thuật toán mô hình là khoảng cách tối thiểu, tối đa của cốt thép, lớp bê tông bảo vệ, sai số cho phép, các tham số cho việc chế tạo và dựng. Các thuật toán được xây dựng cho các mô hình móng, thân, mũ trụ cầu với các kết cấu chi tiết như cốt thép, cáp và ống cáp. Thuật toán mô hình được lập trình trên nguyên lý mô hình hướng đối tượng. Tất cả các cấu kiện có tham số thiết kế, ràng buộc và quan hệ chính – phụ. Khi thay đổi giá trị một tham số thì các tham số khác sẽ tự động thay đổi dựa trên các ràng buộc đã được định nghĩa trước trong thuật toán. Những dữ liệu tham số này cũng được sử dụng cho việc tính toán khối lượng và tạo bản vẽ chi tiết 2D.



Hình 5. Mô hình tham số BIM cho thân trụ cầu

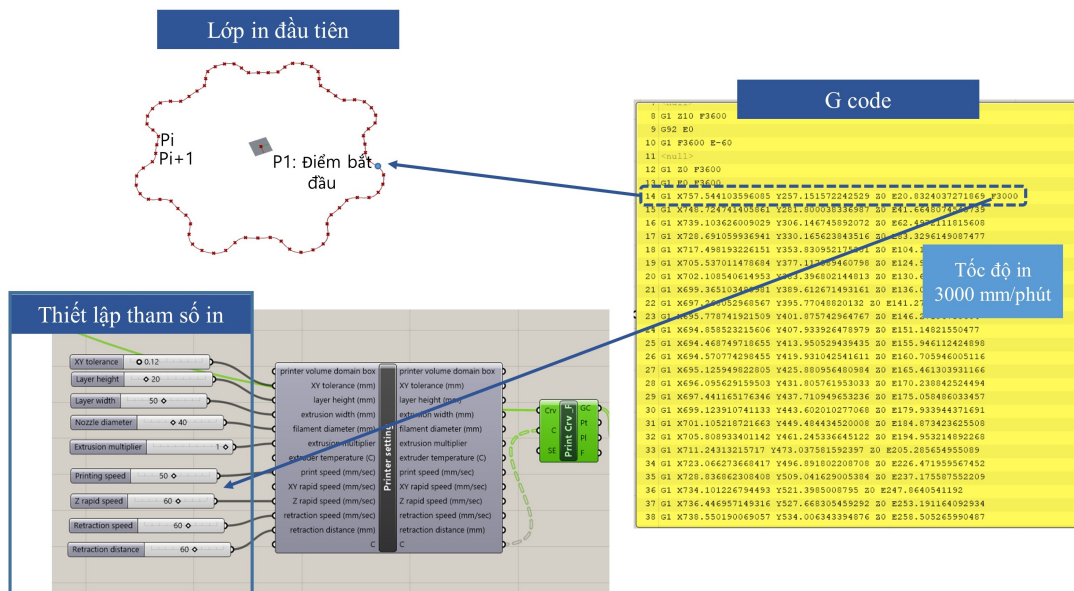
4.4. Mô hình số chế tạo

Mô hình số chế tạo cho móng, thân và mũ trụ cầu được phát triển trên nền tảng mô hình tham số BIM, cho phép tính toán khối lượng các vật liệu chính như bê tông, cốt thép và ván khuôn. Mô hình 3D thép sẽ được chuyển trực tiếp đến máy gia công thép dựa trên nền tảng công nghệ sản xuất dưới sự hỗ trợ của máy tính CAM (Computer-Aided Manufacturing). Thân trụ cầu được chế tạo bằng công nghệ in bê tông 3D sử dụng máy in giàn 3 trục để tạo nên lớp ván khuôn bê tông vĩnh cửu. Sau đó, người ta đặt lồng thép, ống cáp và tiến hành đổ bê tông. Mô hình số thiết kế của thân trụ cầu được sử dụng để tính toán tham số cho quá trình in bê tông. Hình 6 trình bày quá trình tính toán, mô phỏng và tạo ra dữ liệu in cho việc vận hành máy in bê tông. Đường dẫn in được tính toán và thiết lập dựa vào chiều dày và độ rộng lớp in. Quá trình in được mô phỏng dựa vào đường dẫn in và tốc độ in. Dựa vào các tham số in, mã G-Code được khởi tạo cho việc vận hành máy in. Mẫu in cỡ nhỏ cho ván khuôn bê tông đã được thực hiện với độ dày lớp in 20 mm, chiều rộng 50mm và sử dụng vòi phun với đường kính 40 mm. Sử dụng công nghệ in bê tông 3D sẽ giúp giảm thời gian và chi phí sản xuất, so với việc sử dụng ván khuôn định hình truyền thống. Đồng thời có thể chế tạo được những cấu kiện có hình khối phức tạp, có tính thẩm mỹ cao.



Hình 6. Quá trình mô phỏng in bê tông 3D cho thân trụ cầu

Hình 7 trình bày quá trình khởi tạo G-Code cho máy in bê tông trong Grasshopper. G-code là dữ liệu tập hợp tọa độ các điểm (x, y, z) trong không gian sử dụng để xác định vị trí di chuyển cho vòi in từ đường dẫn in. Dựa vào tham số tốc độ in, tọa độ các điểm sẽ được thiết lập trên đường dẫn in. Vòi

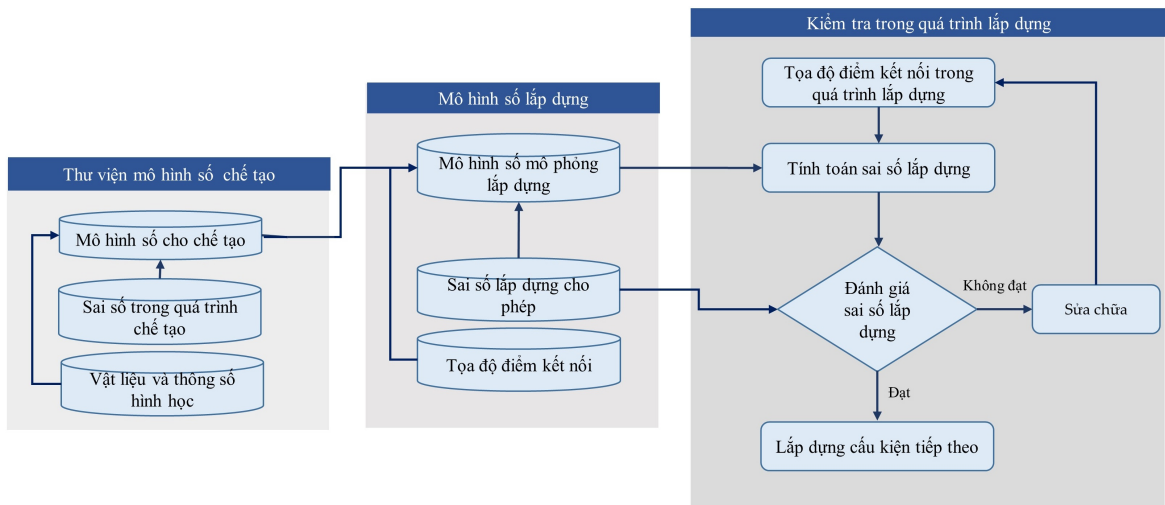


Hình 7. Quá trình khởi tạo G-code cho máy in

in sẽ di chuyển đến vị trí bắt đầu và chuyển động đến các điểm tiếp theo trên đường dẫn in. Lớp in đầu tiên kết thúc khi vòi in di chuyển về vị trí điểm bắt đầu, sau đó vòi in sẽ di chuyển lên lớp in tiếp theo. Đường dẫn in có vai trò quan trọng trong việc định hình hình dáng của mô hình in. Chiều dày lớp in, tốc độ in, thời gian in là những tham số chính cần được thiết lập, tính toán cho quá trình in từ mô hình số thiết kế.

4.5. Mô hình số mô phỏng lắp dựng (Digital preassembly model)

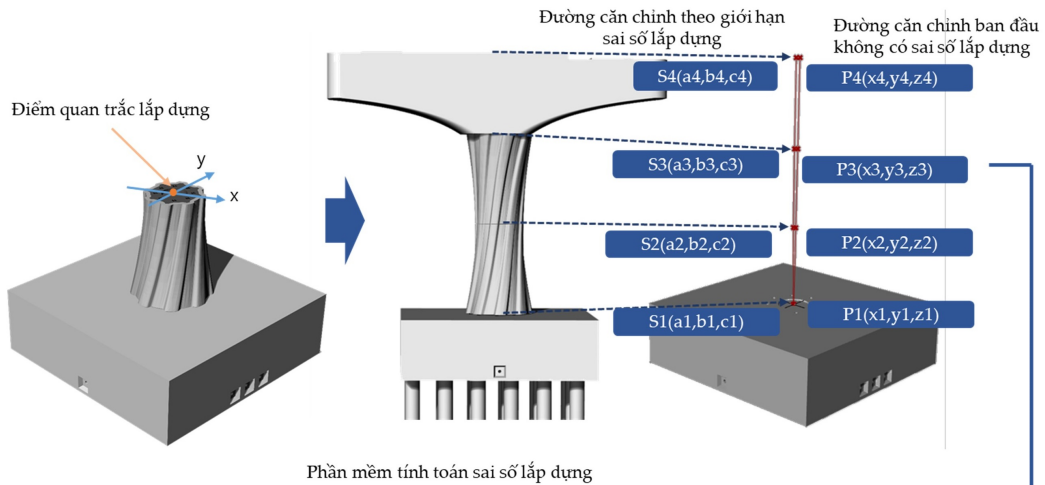
Mô hình số lắp dựng được sử dụng cho việc mô phỏng trước quá trình lắp dựng dựa trên biện pháp lắp dựng và sai số lắp dựng cho phép. Hình 8 thể hiện tổng quan quy trình sử dụng mô hình số cho kiểm soát sai số lắp dựng. Từ mô hình số chế tạo với sai số hình học trong quá trình sản xuất, mô hình sẽ được cập nhật và chuyển sang mô hình số mô phỏng quá trình lắp dựng. Sai số trong quá trình lắp dựng được tính toán dựa vào độ lệch giữa tọa độ điểm kết nối quan trắc liên kết với tọa độ điểm theo mô hình số thiết kế.



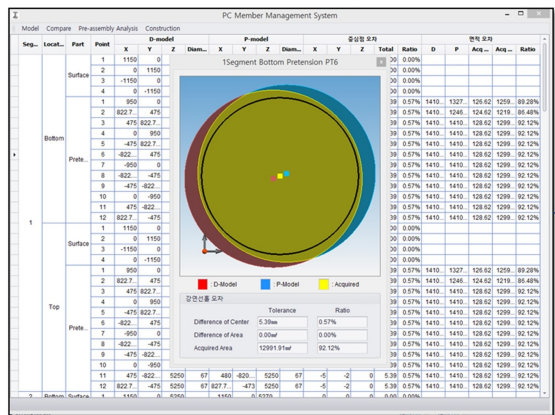
Hình 8. Quy trình sử dụng mô hình số cho kiểm soát sai số lắp dựng

Đường căn chỉnh lắp dựng sẽ được thiết lập dựa vào tọa độ điểm liên kết là trọng tâm dữ liệu cho mô hình số mô phỏng lắp dựng (Hình 9). Điểm quan trắc lắp dựng được xác định là trọng tâm cấu kiện. Việc lắp dựng trụ cầu yêu cầu chặt chẽ về sai số theo chiều cao (trục Z). Sai số lắp dựng cho phép được thiết lập như sau: sai số trục x và y không quá 15 mm và trục Z là 10 mm. Đường căn chỉnh theo giới hạn sai số lắp dựng được thiết lập dựa trên tọa độ điểm lắp dựng với sai số cho phép. Sai số lắp dựng thực tế sẽ được tính toán dựa vào độ lệch tọa độ điểm căn chỉnh trong mô hình số với tọa độ điểm đo được trên công trường.

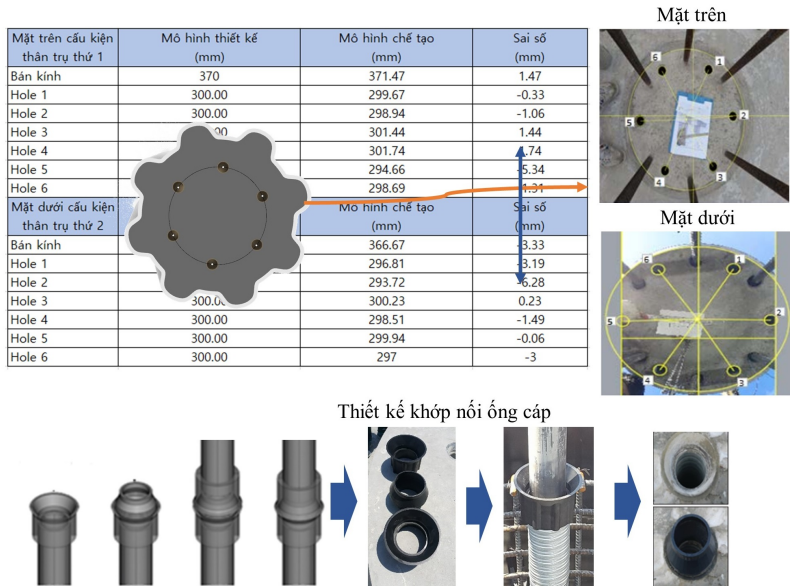
Hình 10 trình bày phương pháp kiểm tra sai số trong việc đặt ống cáp. Sai số được tính toán giữa mô hình thiết kế và chế tạo được đo từ trọng tâm cấu kiện đến từng vị trí ống cáp được xác định tại mặt tiếp giáp của hai cấu kiện. Trong quá trình lắp dựng, yêu cầu không có khe hở trong khớp nối giữa các cấu kiện để tránh việc cáp bị ăn mòn. Mô hình số thiết kế khớp nối được phát triển như trong Hình 10. Sau đó khớp nối được sản xuất từ máy in 3D. Chất lượng khớp nối của ống dẫn cùng với sai số lắp dựng là một trong những yếu tố quyết định độ bền trụ cầu lắp ghép.



Phần mềm tính toán sai số lắp dựng



Hình 9. Tính toán sai số lắp dựng sử dụng mô hình số



Hình 10. Phương pháp tính toán sai số lắp dựng cấp dự ứng lực

5. Kết luận

Bài báo đã làm rõ sự cần thiết của mô hình số kỹ thuật DEM cho phát triển công nghệ thi công cầu sử dụng cấu kiện đúc sẵn trong bối cảnh yêu cầu về chuyển đổi số trong ngành xây dựng ngày càng trở nên cấp thiết. Khái niệm và cơ chế vận hành của DEM, là kết quả chính của nghiên cứu này, đã tạo ra cơ sở lý thuyết để làm nền tảng cho các nghiên cứu trong tương lai nhằm phát triển một phần mềm hỗ trợ quản lý thông tin kỹ thuật cho toàn bộ vòng đời công trình từ thiết kế, chế tạo, lắp dựng, hoạt động và bảo trì. Mô hình đề xuất cũng đã được triển khai trên thực tế trong một trường hợp cụ thể có phạm vi nhỏ.

Để đẩy nhanh những nỗ lực trong phát triển công nghệ chế tạo cấu kiện đúc sẵn và lắp ghép, mô hình thiết kế tham số định hướng chế tạo và lắp dựng DfMA cùng với công nghệ in 3D đã được nghiên cứu áp dụng trong thực tiễn. Bài báo này đã trình bày kết quả nghiên cứu trong giai đoạn đầu của một dự án nghiên cứu mô hình số kỹ thuật DEM cho cầu sử dụng cấu kiện đúc sẵn. Các mô hình kỹ thuật số cho quá trình thiết kế, chế tạo, lắp dựng cho trụ cầu đã được nghiên cứu và phát triển thử nghiệm. Kết quả nghiên cứu đã chứng tỏ hiệu quả của việc tích hợp các thông tin kỹ thuật cho sản xuất và lắp dựng vào mô hình DEM. Tính kết nối giữa các bên hữu quan của dự án đã được cải thiện nhờ vào việc thiết lập mô hình trung tâm trao đổi thông tin là mô hình thiết kế tham số định hướng DfMA. Những thông tin về thiết kế, sản xuất và lắp dựng đều được tích hợp vào mô hình trung tâm này, được sử dụng để trao đổi thông tin giữa các nhà thầu. Kết quả thử nghiệm khá khả quan, cho thấy mô hình nghiên cứu có thể áp dụng để hỗ trợ việc thi công/xây dựng cầu nhanh (accelerated bridge construction - ABC). Tuy nhiên việc áp dụng mô hình DEM còn tồn tại những hạn chế về việc đồng bộ kỹ thuật của công nghệ BIM giữa chủ đầu tư, đơn vị thiết kế nhà thầu thi công lắp dựng. Mô hình yêu cầu sự tham gia của đơn vị thi công lắp dựng, nhà thầu chế tạo cùng đơn vị thiết kế ngay từ giai đoạn đầu của dự án. Vấn đề này còn nhiều hạn chế trong các dự án đầu tư xây dựng hiện nay ở Việt Nam.

Nghiên cứu tiếp theo cần triển khai là ứng dụng mô hình ở một phạm vi rộng hơn với thử nghiệm thực tế, kể cả ở Việt Nam, để có thể đánh giá được toàn diện ưu, nhược điểm của mô hình. Từ đó làm tiền đề cho các nghiên cứu khả thi về mặt kinh tế, tài chính, từ đó đưa giải pháp vào thực tiễn đảm bảo hiệu quả cao nhất.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ đất đai, cơ sở hạ tầng và giao thông vận tải Hàn Quốc trong dự án nghiên cứu có mã số No.21SMIP-A158708-02.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ezy, M., Saghatforoush, E., Abbasianjahromi, H. (2018). [An investigation of advantages and disadvantages of off-site manufacturing: a meta-synthesis](#). *International Journal of Project Organisation and Management*, 10(4):307.
- [2] Koem, C., Shim, C.-S., Park, S.-J. (2016). [Seismic performance of prefabricated bridge columns with combination of continuous mild reinforcements and partially unbonded tendons](#). *Smart structures and systems*, 17(4):541–557.
- [3] Shim, C. S., Chung, C.-H., Kim, H. H. (2008). [Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section](#). *Engineering Structures*, 30(12):3782–3792.
- [4] Shim, C.-S., Chung, C.-H., Kim, I.-K., Kim, Y.-J. (2010). [Development and Application of Precast Decks for Composite Bridges](#). *Structural Engineering International*, 20(2):126–133.

- [5] Shim, C., Lee, S., Park, S., Koem, C. (2017). [Experiments on prefabricated segmental bridge piers with continuous longitudinal reinforcing bars](#). *Engineering Structures*, 132:671–683.
- [6] Shim, C.-S., Dang, S. N., Park, S. (2018). [Three-Dimensional Information Delivery for Design and Construction of Prefabricated Bridge Piers](#). *Structural Engineering International*, 28(1):6–12.
- [7] Culmo, M. P., Halling, M. W., Maguire, M., Mertz, D. (2017). *Recommended guidelines for prefabricated bridge elements and systems tolerances and recommended guidelines for dynamic effects for bridge systems*. No. NCHRP Project 12-98.
- [8] Culmo, M. P., Marsh, L., Stanton, J. (2018). *Recommended AASHTO Guide Specifications for ABC Design and Construction*. Transportation Research Board.
- [9] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W. A. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly*. CRC Press.
- [10] Quân, N. T., Tâm, T. V. (2018). [Thiết kế chương trình dạy học cho khóa đào tạo giảng viên nguồn về bim tại Việt Nam](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXDH*, 12(1):3–10.
- [11] BCA (2016). *BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide*. Building and Construction Authority (BCA) Singapore: Singapore.
- [12] Boothroyd, G., Knight, W. (1993). [Design for assembly](#). *IEEE Spectrum*, 30(9):53–55.
- [13] Molloy, O., Tilley, S., Warman, E. (1998). *Design for Manufacturing and Assembly*. Springer US.
- [14] Kostopoulos, G. K. (1975). *Digital engineering*. Wiley, New York.
- [15] Wasim, M., Serra, P. V., Ngo, T. D. (2020). [Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review](#). *International Journal of Construction Management*, 1–9.
- [16] Shim, C.-S., Lee, K.-M., Kang, L. S., Hwang, J., Kim, Y. (2012). [Three-Dimensional Information Model-Based Bridge Engineering in Korea](#). *Structural Engineering International*, 22(1):8–13.
- [17] Lee, K. M., Lee, Y. B., Shim, C. S., Park, K. L. (2012). [Bridge information models for construction of a concrete box-girder bridge](#). *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(7):687–703.
- [18] Gao, S., Low, S. P., Nair, K. (2018). [Design for manufacturing and assembly \(DfMA\): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore](#). *Architectural Engineering and Design Management*, 14(6):440–456.
- [19] Arashpour, M., Miletic, M., Williams, N., Fang, Y. (2018). [Design for Manufacture and Assembly in Off-Site Construction: Advanced Production of Modular Façade Systems](#). *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC).
- [20] Tik, L. B., Jhun, K. K., Tatt, S. L., Lin, A. F., Min, T. S. (2019). Design for manufacturing and assembly (DfMA) for Malaysia construction industry. *Malaysian Construction Research Journal (MCRJ)*, 190.
- [21] Hosseini, M. R., Jupp, J., Papadonikolaki, E., Mumford, T., Joske, W., Nikmehr, B. (2020). [Position paper: digital engineering and building information modelling in Australia](#). *Smart and Sustainable Built Environment*.