ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG - TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

KHOA XÂY DỰNG CẦU ĐƯỜNG

TÓM TẮT ĐỒ ÁN

THIẾT KẾ CẦU ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ TRÊN TUYẾN METRO 2 HÀ NỘI ĐOẠN VÀO NHÀ GA TÂY HỒ VÀ NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU TIẾT DIỆN DẦM HỘP BÊ TÔNG CỐT THÉP ỨNG SUẤT TRƯỚC NHỊP GIẢN ĐƠN.

DESIGN OF AN URBAN RAILWAY BRIDGE ON HANOI METRO LINE 2 IN THE SECTION APPROACHING TAY HO STATION AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF THE CROSS-SECTION OF A SIMPLY SUPPORTED PRESTRESSED CONCRETE BOX GIRDER.

SVTH/STUDENT : ĐOÀN VĂN DUY

: HÀ VĂN HUY

MSSV/STUDENT ID : 109210177 – 109210185

GVHD 1/ADVISOR 1 : PGS.TS. PHAN HOÀNG NAM

GVHD 2/ADVISOR 2 : PGS.TS. NGUYỄN VĂN MỸ

BẢN GIỚI THIỆU TÓM TẮT NỘI DUNG ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

ĐỀ TÀI: THIẾT KẾ CẦU ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ TRÊN TUYẾN METRO 2 HÀ NỘI ĐOẠN VÀO NHÀ GA TÂY HỒ VÀ NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU TIẾT DIỆN DẦM HỘP BÊ TÔNG CỐT THÉP ỨNG SUẤT TRƯỚC NHỊP GIẢN ĐƠN

Sinh viên thực hiện: Đoàn Văn Duy – Hà Văn Huy

Mã số sinh viên: 109210188 – 109210185

Lớp: 21X3B

Giảng viên hướng dẫn: PGS.TS. Phan Hoàng Nam – PGS.TS. Nguyễn Văn Mỹ

Khoa Xây dựng Cầu đường – Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

1. GIỚI THIỆU ĐỀ TÀI

Sự phát triển nhanh của hệ thống đường sắt đô thị đặt ra yêu cầu ngày càng cao đối với thiết kế kết cấu cầu cạn và nhà ga: công trình không chỉ phải đảm bảo khả năng chịu lực, độ bền và an toàn khai thác mà còn phải đáp ứng yêu cầu về tốc độ thi công, tính công nghiệp hóa, hiệu quả sử dụng vật liệu và khả năng tích hợp với không gian đô thị.

Trên cơ sở đó, đồ án lựa chọn **đoạn cầu cạn tiếp cận Nhà ga Tây Hồ thuộc tuyến Metro số 2 Hà Nội** làm đối tượng nghiên cứu. Đây là khu vực có sự chuyển tiếp rõ rệt từ kết cấu cầu cạn thông thường sang kết cấu nhà ga, tạo nên một bài toán tổng hợp bao gồm kết cấu nhịp, trụ cầu, móng sâu, khung đỡ nhà ga, tải trọng đoàn tàu, tải trọng gió, động đất và giải pháp thi công.

Điểm khác biệt của đồ án là không dừng lại ở thiết kế một cấu kiện riêng lẻ mà xây dựng một quy trình tương đối đầy đủ từ **lựa chọn giải pháp kết cấu – phân tích – thiết kế – kiểm toán – mô hình BIM – thi công – khái toán** và tiếp tục phát triển sang **tự động hóa thiết kế và tối ưu hóa đa mục tiêu tiết diện dầm hộp BTCT ứng suất trước**.

Có thể xem đồ án gồm hai lớp nội dung liên kết với nhau:

Lớp 1 – Thiết kế công trình thực tế: Xác lập được một phương án kết cấu hoàn chỉnh và kiểm chứng khả năng làm việc của các cấu kiện chủ yếu.

Lớp 2 – Nghiên cứu và số hóa thiết kế: Sử dụng chính bài toán dầm hộp của phần thiết kế làm nền tảng để xây dựng công cụ tự động, sinh dữ liệu và lựa chọn phương án tối ưu.

Thông điệp chính: Từ một bài toán thiết kế cầu Metro cụ thể, đồ án hướng đến xây dựng một quy trình thiết kế có khả năng tính toán, kiểm chứng và hỗ trợ ra quyết định một cách hệ thống.



Hình 1. Diễn họa phối cảnh nhà ga Tây Hồ và đoạn đường dẫn

2. KHỐI LƯỢNG VÀ PHẠM VI ĐỒ ÁN

2.1. Đồ án được triển khai với hai phần chính:

PHẦN I – THIẾT KẾ CẦU ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ: 70%

Bao gồm:

- Nghiên cứu tổng quan và cơ sở thiết kế;
- Phân tích điều kiện địa hình, địa chất và điều kiện xây dựng;
- Đề xuất giải pháp kết cấu;
- Thiết kế sơ bộ toàn bộ đoạn cầu;
- Thiết kế kỹ thuật dầm hộp BTCT DƯL nhịp giản đơn;
- Thiết kế trụ cầu P9 ngoài nhà ga;
- Thiết kế móng cọc khoan nhồi P9;

- Thiết kế trụ P12 trong phạm vi nhà ga;
- Thiết kế móng cọc khoan nhồi P12;
- Thiết kế khung đỡ tầng trung chuyển;
- Thiết kế khung đỡ tầng ke ga và phần tàu chạy;
- Tính toán tải trọng gió đối với cầu, trụ và kết cấu nhà ga;
- Phân tích động đất;
- Thiết kế biện pháp thi công kết cấu nhịp;
- Tính toán vận chuyển và cẩu lắp dầm;
- Khái toán một số hạng mục chính;
- Xây dựng mô hình BIM 3D.

PHẦN II – NGHIÊN CỨU KHOA HỌC: 30%

- Xây dựng workbook thiết kế tự động;
- Chuyển workbook thành engine tính toán;
- Kiểm chứng kết quả theo nguyên tắc cell-by-cell;
- Thiết kế thí nghiệm số DoE;
- Sinh bộ dữ liệu **1.000 phương án thiết kế khả thi**;
- Xây dựng hệ thống tỷ số kiểm toán;
- Tối ưu đồng thời bốn mục tiêu;
- Xây dựng Pareto front;
- Xếp hạng phương án bằng Balanced Score và TOPSIS;
- Phân tích các kịch bản dự trữ kết cấu;
- Lựa chọn phương án thiết kế đại diện.

3. CƠ SỞ VÀ TRIẾT LÝ THIẾT KẾ

3.1. Qui mô công trình

Công trình được xem xét với quy mô **vĩnh cửu**, tốc độ thiết kế **100 km/h**, đường sắt khổ tiêu chuẩn **1.435 mm**, khoảng cách giữa tim hai tuyến ray **4,5 m**.

Các khu vực có bề rộng kết cấu khác nhau do yêu cầu chức năng:

+ Ngoài nhà ga: **12,5 m**;

+ Khu vực tầng trung chuyển và ke ga: **23 m**;

+ Phần tàu chạy trong nhà ga: **9,5 m**.

Hoạt tải đường sắt sử dụng mô hình **LM71**, với hệ số phân loại **α = 1,33**. Ngoài tải trọng đoàn tàu, thiết kế còn xét tải trọng người, gió, động đất, co ngót, từ biến và các tác động tương ứng với từng trạng thái thiết kế.

Đồ án sử dụng đồng thời hệ thống tiêu chuẩn:

EN 1990 – cơ sở thiết kế và tổ hợp tải trọng;

EN 1991-1-1, EN 1991-2, EN 1991-1-4 – tải trọng chung, tải trọng đường sắt và tải trọng gió;

EN 1992-1-1 – kết cấu bê tông và bê tông dự ứng lực;

TCVN 13594-3:2022 – tải trọng và tác động đối với cầu đường sắt;

TCVN 11823:2017 – thiết kế cầu;

TCVN 9386:2012 – thiết kế công trình chịu động đất;

TCVN 1651:2008 – thép cốt bê tông.

Việc kết hợp Eurocode và hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam giúp đồ án tiếp cận bài toán theo hướng vừa đảm bảo yêu cầu trong nước, vừa làm quen với phương pháp thiết kế của các dự án hạ tầng giao thông quốc tế.

4. GIẢI PHÁP KẾT CẤU TỔNG THỂ

4.1. Kết cấu được chia thành hai vùng làm việc có đặc điểm khác nhau.

4.1.1. Khu vực ngoài nhà ga

Sử dụng **dầm hộp BTCT dự ứng lực nhịp giản đơn**, chiều dài dầm điển hình **30 m**, chiều cao kết cấu **2,10 m**, bề rộng cầu **12,50 m**.

Dầm hộp được lựa chọn do có độ cứng xoắn lớn, khả năng phân phối tải trọng tốt và hình thức kết cấu gọn, phù hợp với cầu đường sắt đô thị chịu tải trọng động và tải trọng lệch tâm.

4.1.2. Khu vực trong nhà ga

Do yêu cầu không gian và chức năng kiến trúc, hệ kết cấu được chuyển đổi:

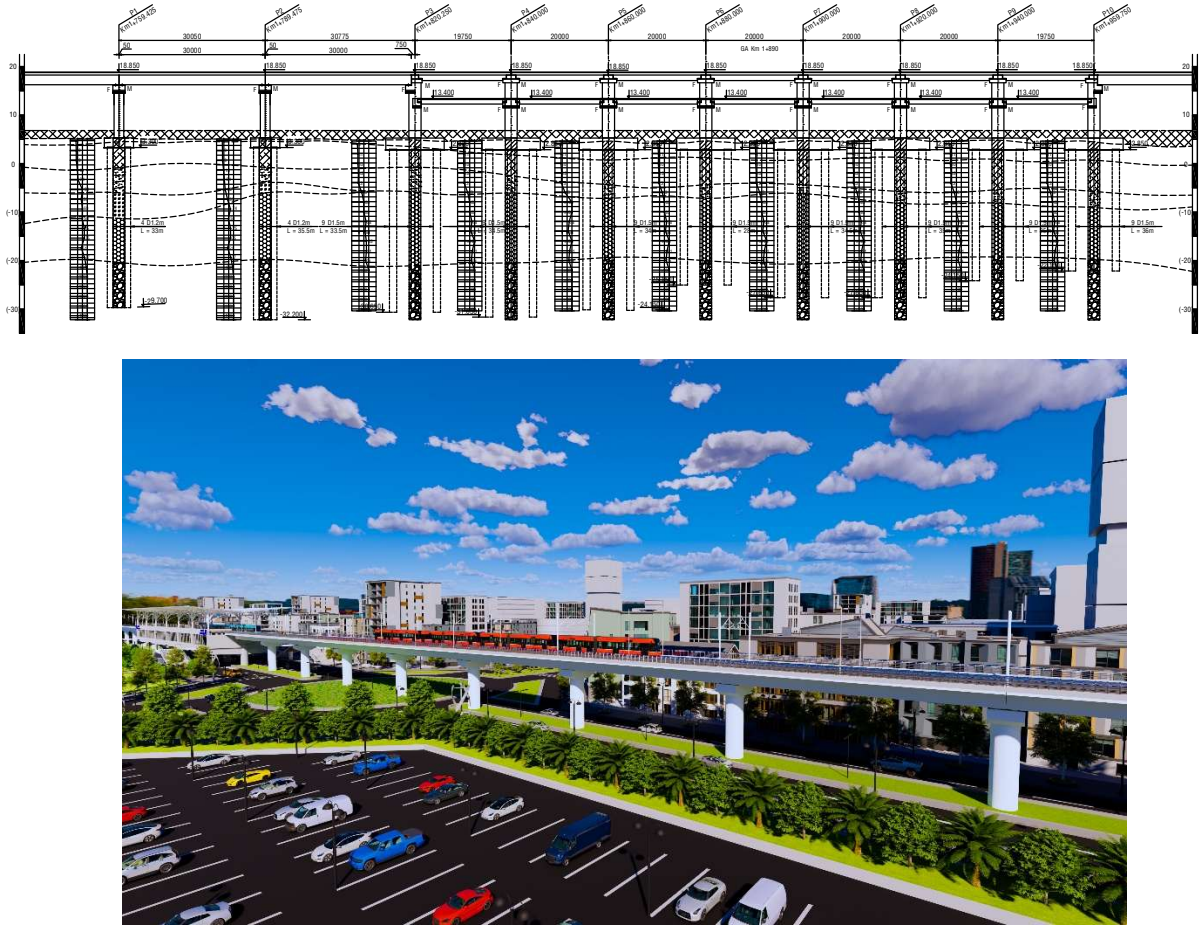
+ Dầm I BTCT DUL nhịp **21 m** cho phần tàu chạy và tầng trung chuyển;

+ Dầm thép chữ I nhịp khoảng **23 m** cho khu vực ke ga;

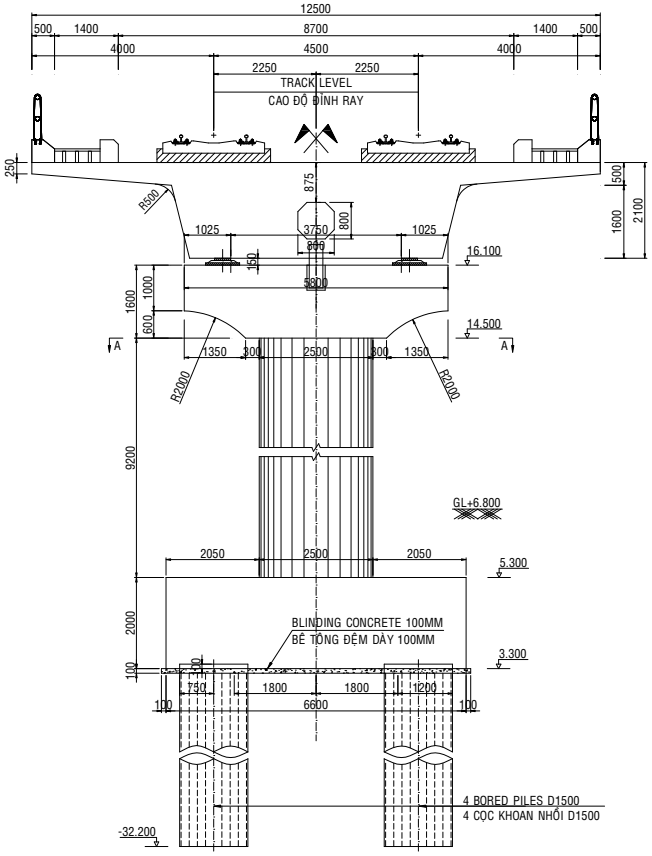
+ Hệ khung bê tông cốt thép đỡ các tầng chức năng;

+ Hệ mái với cấu kiện thép và vật liệu ETFE.

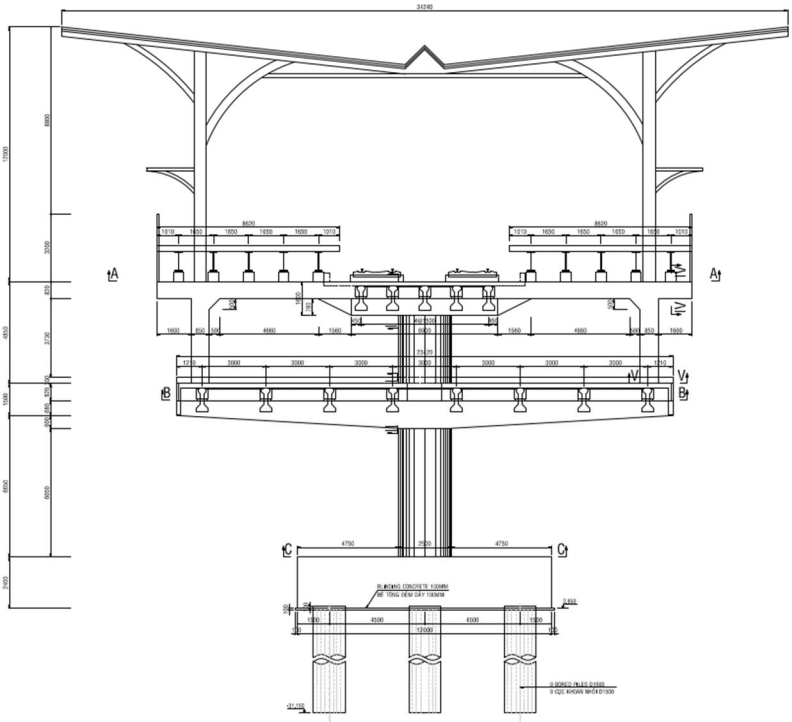
Sự chuyển đổi kết cấu từ cầu cạn thông thường vào nhà ga là một trong những nội dung quan trọng của đồ án vì tải trọng không còn chỉ gồm đoàn tàu mà còn xuất hiện tải trọng tầng trung chuyển, ke ga, hành khách, mái và hệ thống phụ trợ.



Hình 4.1 – Bố trí chung cầu.



Hình 4.2 – Mặt cắt P9.



Hình 4.3 – Mặt cắt P12.

5. MÔ HÌNH HÓA VÀ BIM

Đồ án không tách rời công tác tính toán kết cấu với mô hình hóa công trình. Các phần mềm được sử dụng theo chức năng:

MIDAS Civil 2024

→ Mô hình kết cấu, phân tích nội lực, biến dạng, co ngót – từ biến và các trường hợp tải trọng.

SPColumn

→ Kiểm toán khả năng chịu nén – uốn của tiết diện trụ.

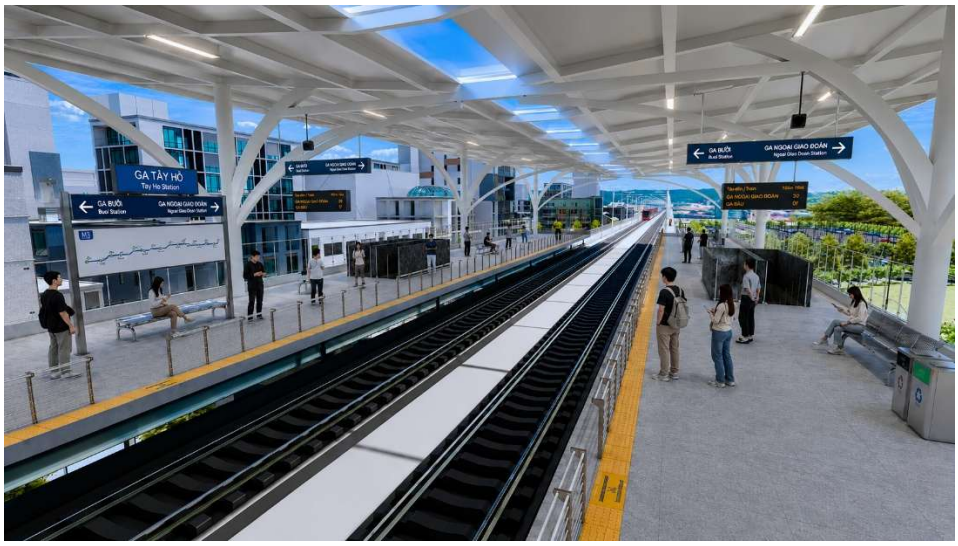
Revit 2026

→ Xây dựng mô hình BIM cho các cấu kiện cầu và nhà ga, kiểm soát hình học và hình dung mối quan hệ không gian giữa các tầng kết cấu.

Workbook tính toán

→ Xây dựng các mô-đun tính độc lập, phục vụ thiết kế và làm nền tảng cho phần tự động hóa.

Điểm quan trọng của BIM trong đồ án không chỉ nằm ở mục đích diễn họa. Mô hình 3D giúp liên kết giải pháp kiến trúc với hệ chịu lực, kiểm tra khả năng bố trí cấu kiện, đánh giá hình học của kết cấu và thể hiện trực quan phương án cuối cùng.



Hình 5.1. Khu vực ke ga đợi tàu đến



Hình 5.2. Khu vực tầng trung chuyển mua vé

6. THIẾT KẾ DẦM HỘP BTCT DỰ ỨNG LỰC

Kết cấu nhịp điển hình ngoài nhà ga là dầm hộp BTCT DUL:

L = 30 m

B = 12,5 m

H = 2,10 m

Tiết diện được phân chia thành nhiều mặt cắt đại diện nhằm phản ánh đúng sự thay đổi chiều dày bản đáy, sườn và vách ngang theo chiều dọc dầm.

Đặc trưng hình học được xác định từ tọa độ các điểm gãy của tiết diện, bao gồm:

+ Diện tích tiết diện;

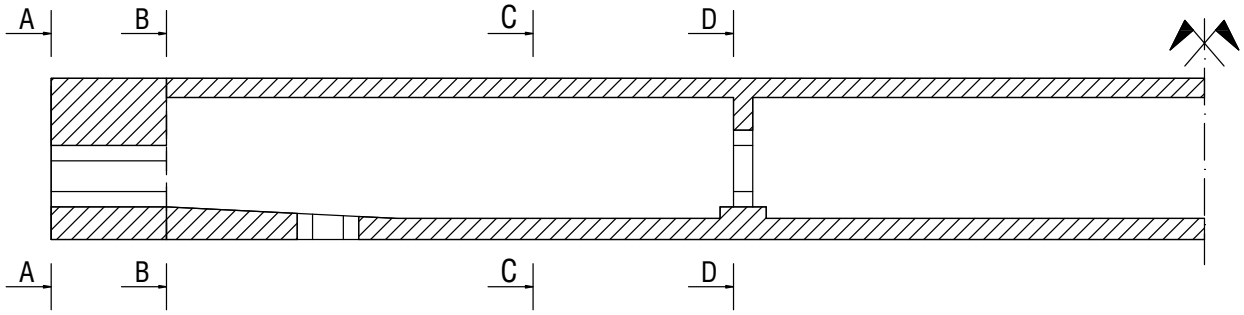
+ Tọa độ trọng tâm;

+ Mô men quán tính;

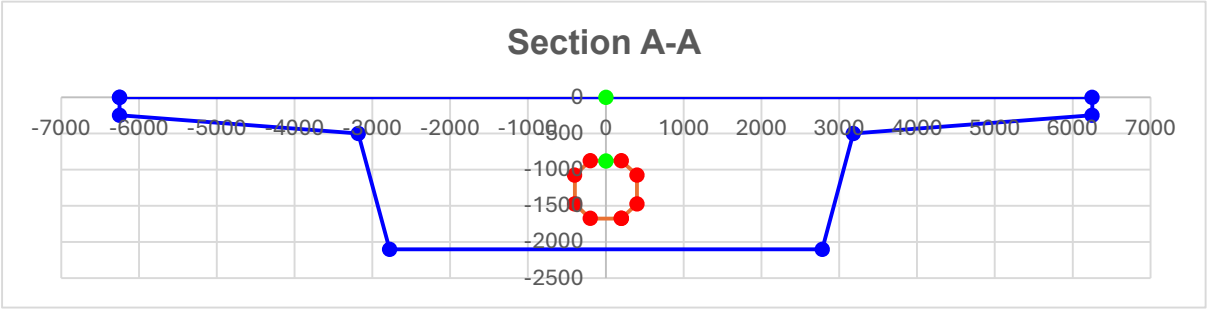
+ Mô men kháng uốn thớ trên và thớ dưới.

Việc xác lập hình học theo phương pháp tọa độ thay vì sử dụng duy nhất một tiết diện quy ước cho phép mô hình tính toán phản ánh tương đối đầy đủ sự thay đổi độ cứng của dầm.

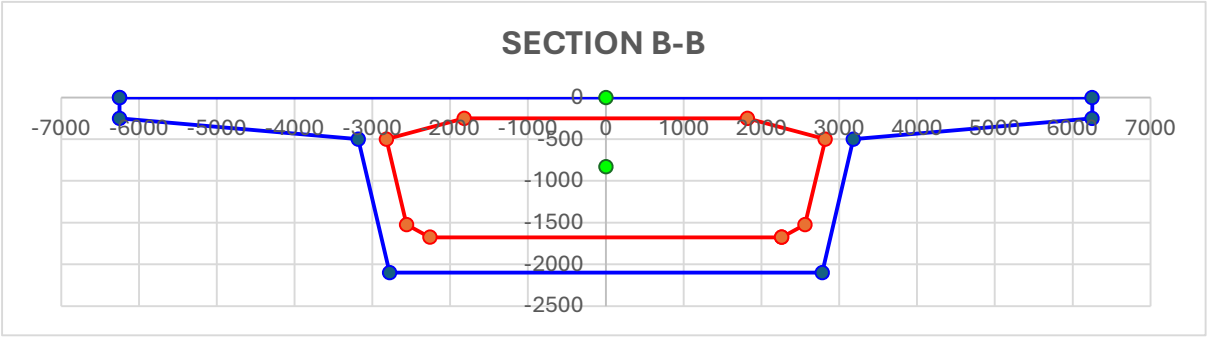
Tại giữa nhịp, tiết diện có diện tích khoảng **6,864 m²**, mô men quán tính khoảng **4,067 m⁴**.



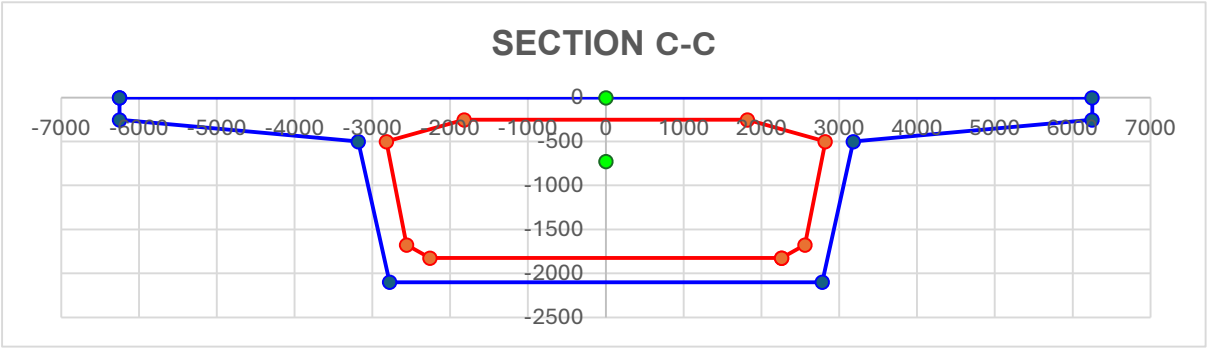
Hình 6.1. Sơ đồ mặt cắt



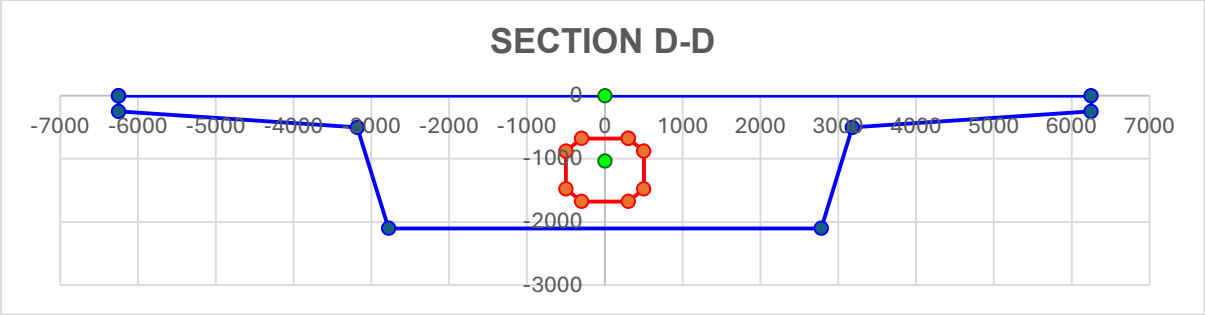
Hình 6.2. Mặt cắt A-A



Hình 6.3. Mặt cắt B-B



Hình 6.3. Mặt cắt C-C



Hình 6.3. Mặt cắt D-D

7. TẢI TRỌNG VÀ PHÂN TÍCH NỘI LỰC DẦM

Ngoài trọng lượng bản thân dầm, mô hình xét đến:

+ Lan can, tay vịn và làn công vụ;

+ Ray UIC60 và phụ kiện;

+ Tà vẹt và bản nền;

+ Hệ thống thoát nước;

+ Cột cấp điện;

+ Tải trọng người;

+ Tải trọng gió;

+ Hoạt tải đoàn tàu LM71.

Mô hình LM71 gồm **4 tải trọng tập trung 250 kN** kết hợp tải trọng phân bố **80 kN/m**, được xét trên hai tuyến ray và nhân hệ số phân loại α.

Sau khi xét hệ số động lực và tổ hợp theo EN 1990, nội lực thiết kế bất lợi của dầm đạt:

ULS:

+ Mô men giữa nhịp: **75.630,79 kN.m**

+ Lực cắt tại gối: **10.808,48 kN**

SLS đặc trưng:

+ Mô men: **60.838,28 kN.m**

+ Lực cắt: **8.710,90 kN**

+ Các nội lực này là cơ sở trực tiếp để xác định lượng dự ứng lực, thiết kế cốt thép thường và kiểm toán trạng thái giới hạn.

Bảng 1. Tổng hợp tải trọng tác dụng lên dầm hộp

STT	Tổ hợp tải trọng	Lực cắt (Gối)	Mô men (L/2)
		V	My
		(kN)	(kN.m)
1	Tổ hợp (ULS)	10808.48	75630.79
2	Tổ hợp (SLS_C)	8710.90	60838.28
3	Tổ hợp (SLS_F)	7148.24	50138.30
4	Tổ hợp (SLS_Q)	3534.15	25402.25

8. THIẾT KẾ HỆ CÁP DỰ ỨNG LỰC

+ Cáp DƯL sử dụng tao **15,2 mm – Grade 270**, cường độ kéo đứt **1.860 MPa**.

+ Mỗi bó gồm **17 tao**, diện tích một bó khoảng **2.380 mm²**.

+ Trên cơ sở kiểm toán ULS và SLS, đồ án bố trí tổng cộng:

14 BÓ CÁP DỰ ỨNG LỰC

Hệ cáp được bố trí theo đường cong phù hợp biểu đồ mô men, tập trung về vùng đáy dầm tại giữa nhịp và nâng dần lên tại vùng đầu dầm.

Không chỉ xác định số lượng cáp, đồ án còn tính:

+ Tọa độ từng nhóm cáp;

+ Chiều dài từng bó;

+ Chiều dài tổng tao DƯL;

+ Độ giãn dài khi căng;

+ Ống gen;

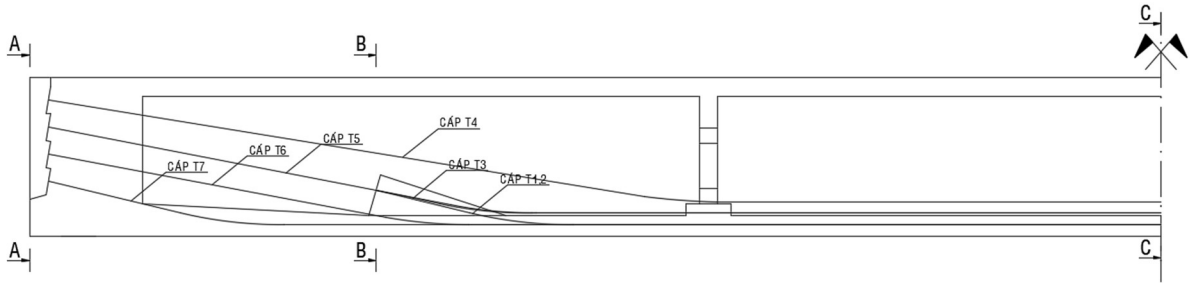
+ Neo;

+ Vữa bơm;

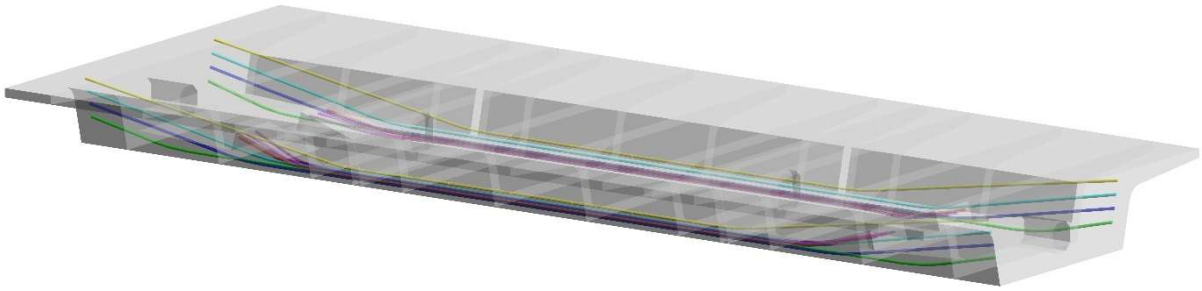
+ Các giai đoạn làm việc của tiết diện.

+ Tổng chiều dài tao DƯL trong cấu kiện thiết kế đạt trên **6.600 m**.

Đây là phần quan trọng thể hiện thiết kế đã được triển khai từ cấp độ sơ bộ xuống đến cấp độ cấu tạo và kiểm toán cụ thể.



8.1. Sơ đồ bố trí cáp theo phương dọc cầu



8.2. Sơ đồ bố trí trên BIM 3D

9. KIỂM TOÁN DẦM THEO CÁC TRẠNG THÁI LÀM VIỆC

Dầm được kiểm tra theo cả **trạng thái giới hạn cường độ – ULS** và **trạng thái giới hạn sử dụng – SLS**.

Đối với dự ứng lực, đồ án xem xét các mất mát chính:

+ Biến dạng tức thời của bê tông;

+ Ma sát;

+ Trượt neo;

+ Co ngót;

+ Từ biến;

+ Chùng thép dự ứng lực.

Đặc trưng tiết diện được cập nhật theo từng giai đoạn làm việc, từ tiết diện trước khi vữa đông kết đến tiết diện liên hợp với cáp sau khi bơm vữa.

Sau khi xác định lực dự ứng hữu hiệu, kết cấu tiếp tục được kiểm tra:

+ Ứng suất thớ trên và thớ dưới tại SLS

+ Khả năng chịu uốn tại ULS

+ Khả năng chịu cắt

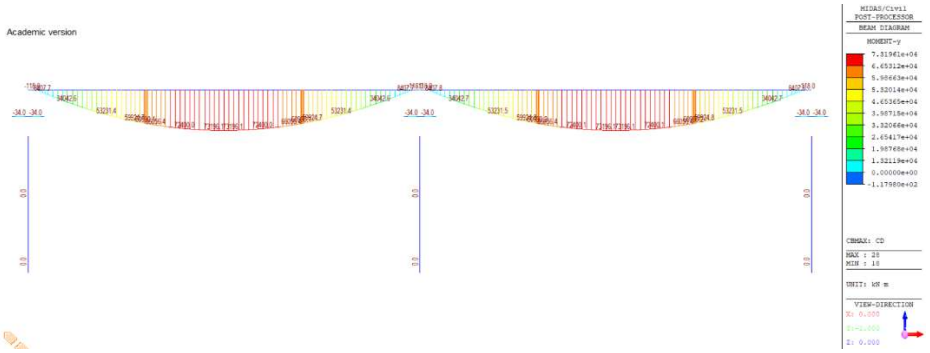
+ Cốt thép tối thiểu – tối đa

+ Độ võng

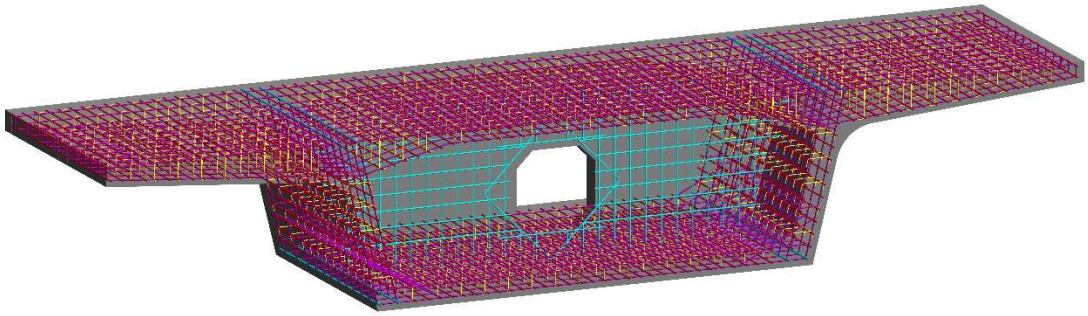
+ Xoắn

+ Tương tác cắt – xoắn

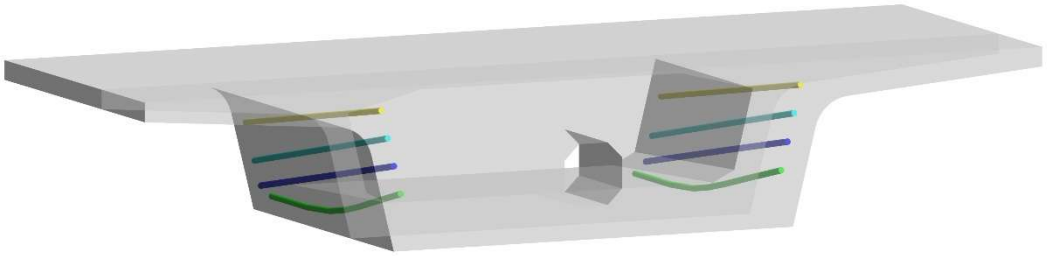
Như vậy, việc đánh giá dầm không dựa vào một kiểm toán đơn lẻ mà bao gồm toàn bộ chuỗi trạng thái từ thi công, căng kéo đến khai thác.



Hình 9.1. Sơ đồ nội lực dầm hộp



Hình 9.2. Bố trí thép thường cho dầm hộp



Hình 9.3. Bố trí cáp DUL cho đầu dầm



Hình 9.4. Bố trí cáp DƯL cho giữa dầm

10. THIẾT KẾ TRỤ P9 – CẦU CẠN NGOÀI NHÀ GA

P9 được lựa chọn làm trụ đại diện cho phần cầu cạn ngoài nhà ga.

Khác với dầm, trụ phải đồng thời tiếp nhận:

+ Phản lực tĩnh tải của hai nhịp;

+ Hoạt tải đoàn tàu;

+ Tải trọng người;

+ Lực hãm, lực ly tâm và các tác động đường sắt;

+ Tải trọng gió lên kết cấu nhịp và bản thân trụ;

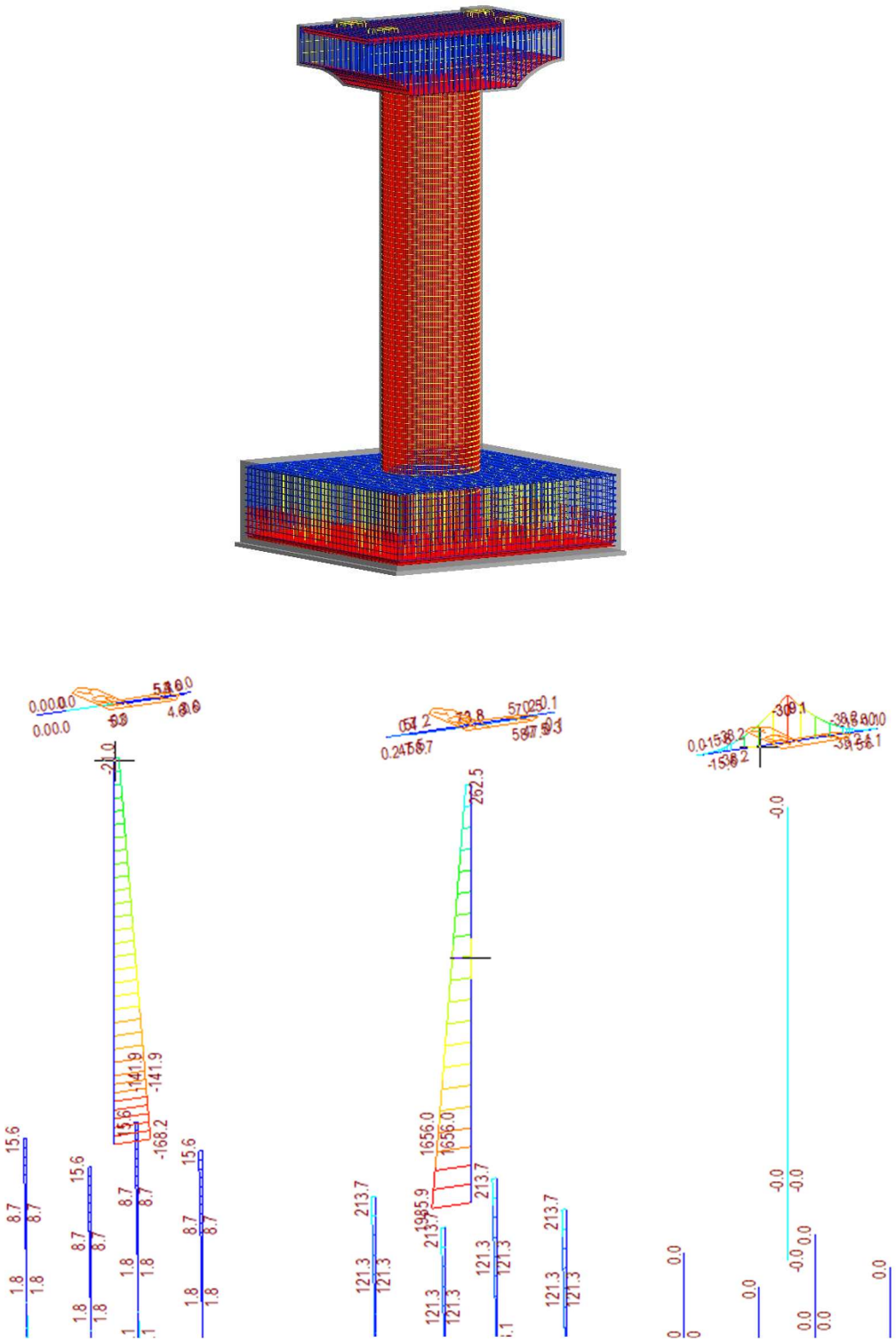
+ Động đất;

+ Co ngót và từ biến.

Tải trọng gió được triển khai theo EN 1991-1-4, xét ảnh hưởng của hình dạng tiết diện và trạng thái có/không có đoàn tàu.

Nội lực tại chân trụ được tổ hợp theo nhiều trạng thái giới hạn. Tại tổ hợp ULS, tải trọng thẳng đứng truyền xuống móng đạt khoảng: **25.484 Kn** kèm mô men theo hai phương lên đến khoảng: **Mx = 23.605 kN.m My = 55.219 kN.m**

Khả năng chịu nén – uốn của thân trụ được kiểm tra bằng SPColumn.



Hình 10.1. Nội lực phát sinh từ Midas

11. TRỤ P12 – BÀI TOÁN KẾT CẤU NHÀ GA

Nếu P9 đại diện cho một trụ cầu cạn thông thường thì P12 là cấu kiện có mức độ phức tạp cao hơn đáng kể.

P12 đồng thời đóng vai trò:

Trụ cầu + trụ đỡ phần tàu chạy + tầng ke ga + tầng trung chuyển + hệ mái nhà ga.

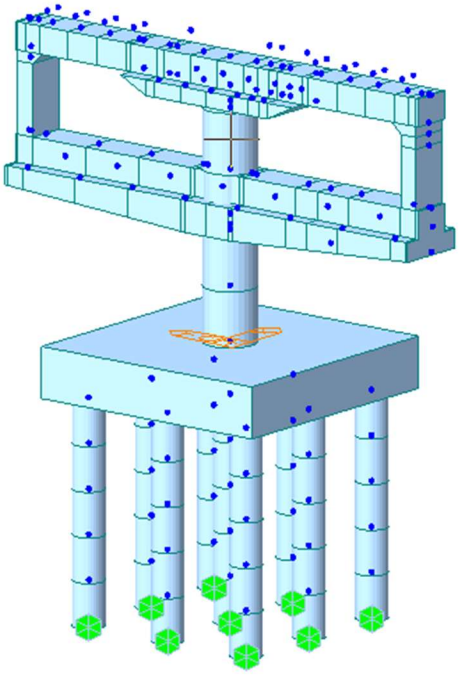
Do đó, hệ tải trọng tác dụng lên P12 bao gồm nhiều nhóm hơn so với P9:

+ Dầm và phần tàu chạy;
+ Dầm tầng trung chuyển;
+ Ke ga;
+ Hành khách;
+ Hệ thống ray;
+ Mái vòm;
+ Hệ thống điện;
+ Gió tác dụng lên nhịp;
+ Gió lên thân trụ;
+ Gió lên xà mũ;
+ Gió lên mái vòm và trụ mái;
+ Động đất.

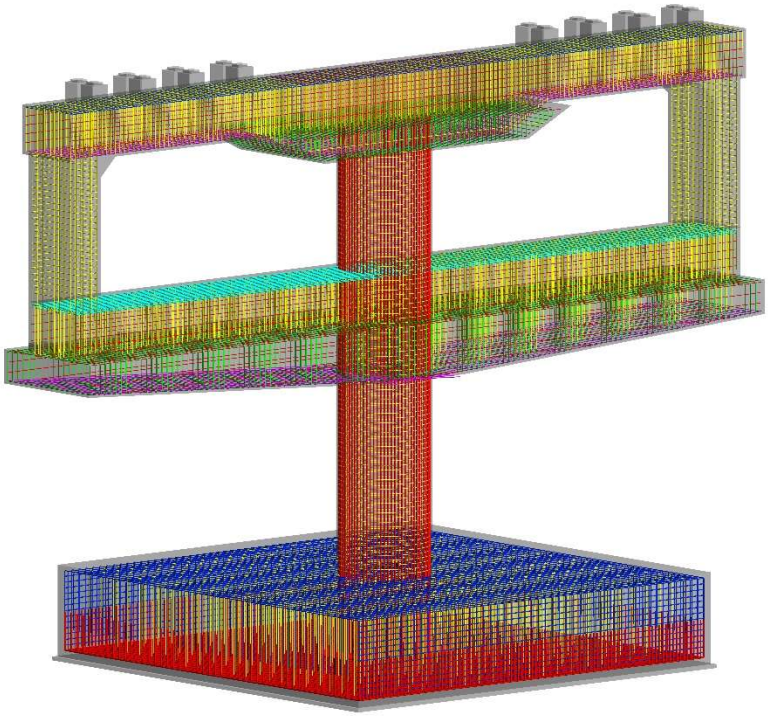
Chỉ riêng khối lượng bản thân hệ trụ và kết cấu liên quan được thống kê trong mô hình đạt trên **16.400 kN**.

Tổ hợp ULS tại móng P12 cho tải trọng thẳng đứng:**47.065,58 kN**

với mô men: **Mx ≈ 35.236 kN.m My ≈ 45.058 kN.m**



Hình 11.1. Mô phỏng trụ P12



Hình 11.2. Bố trí thép trụ P12

12. THIẾT KẾ KHUNG ĐỠ NHÀ GA

Một trong những nội dung có khối lượng tính toán lớn của đồ án là **hệ khung đỡ Nhà ga Tây Hồ**.

Hai tầng kết cấu chính được thiết kế riêng:

- Khung đỡ tầng trung chuyển
- Kiểm toán tại các mặt cắt C-C và D-D, bao gồm:

+ Tổ hợp nội lực;

+ Xác định đặc trưng hình học;

+ Thiết kế cáp DƯL;

+ Tính mất mát ứng suất;

+ Kiểm tra SLS;

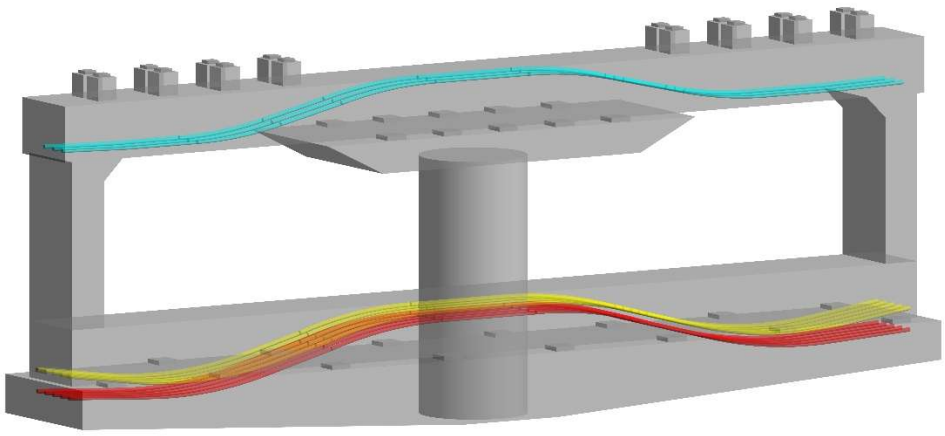
+ Bố trí cốt thép thường;

+ Kiểm tra sức kháng uốn.

+ Khung đỡ tầng ke ga và tàu chạy

+ Tiếp tục thực hiện tương tự tại các mặt cắt E-E và F-F.

Đặc biệt, xà mũ có kích thước lớn được thiết kế theo nguyên lý **BTCT dự ứng lực**, thay vì chỉ sử dụng BTCT thường. Điều này cho phép kiểm soát nứt và biến dạng đối với cấu kiện vượt nhịp lớn trong không gian nhà ga.



Hình 12.1. Bố trí cáp cho trụ cầu P12

13. THIẾT KẾ BIỆN PHÁP THI CÔNG

Sau khi hoàn thành thiết kế kết cấu, đồ án tiếp tục phát triển đến giai đoạn thiết kế thi công kết cấu nhịp.

Phương án được nghiên cứu bao gồm:

1. Chuẩn bị mặt bằng và kiểm tra hồ sơ;
2. Chế tạo dầm hộp BTCT dự ứng lực;
3. Căng kéo cáp;
4. Hoàn thiện dầm;
5. Vận chuyển dầm từ bãi đúc;
6. Tiếp nhận dầm tại công trường;
7. Kết nối dầm với hệ thống nâng;
8. Nâng dầm;
9. Di chuyển dầm bằng cẩu giàn;
10. Hạ dầm chính xác lên gối;
11. Kiểm tra hình học và ổn định.

Đồ án không chỉ mô tả công nghệ mà còn kiểm toán:

- Trọng lượng cấu kiện khi nâng;
- Lực căng cáp nâng;
- Sức nâng của cẩu giàn;
- Ổn định khi vận chuyển;
- An toàn lao động;
- Kiểm soát chất lượng thi công.

Qua đó, phương án thiết kế được kiểm tra thêm dưới góc độ **khả năng chế tạo – vận chuyển – lắp dựng thực tế**, thay vì chỉ tồn tại trên mô hình tính toán.

14. KHÁI TOÁN VÀ HIỆU QUẢ KINH TẾ

Khái toán được thực hiện cho hai nhóm kết cấu điển hình nhằm lượng hóa trực tiếp kết quả thiết kế.

Đối với phần kết cấu ngoài nhà ga, chi phí xây dựng được tính:

Trước VAT: khoảng **5,028 tỷ đồng**

Sau VAT: khoảng **5,431 tỷ đồng**

Đối với phần kết cấu trong nhà ga:

- Chi phí trực tiếp: khoảng **5,050 tỷ đồng**;
- Chi phí gián tiếp: khoảng **0,550 tỷ đồng**;
- Thu nhập chịu thuế tính trước: khoảng **0,308 tỷ đồng**;
- Chi phí trước VAT: khoảng **5,908 tỷ đồng**.

Việc đưa khái toán vào đồ án có ý nghĩa quan trọng: kích thước tiết diện và lượng vật liệu không chỉ được đánh giá bằng khả năng chịu lực mà còn được nhìn nhận dưới góc độ kinh tế.

Đây chính là cầu nối trực tiếp sang phần nghiên cứu tối ưu hóa phía sau.

15. TỪ THIẾT KẾ TRUYỀN THỐNG ĐẾN THIẾT KẾ TỰ ĐỘNG

Phần nghiên cứu khoa học bắt đầu từ một vấn đề rất thực tế:

Trong thiết kế truyền thống, kỹ sư thường lựa chọn một tiết diện ban đầu, tính toán, kiểm toán, điều chỉnh và lặp lại. Khi số lượng biến thiết kế tăng, không gian phương án trở nên rất lớn và việc thử thủ công không còn hiệu quả.

Để giải quyết vấn đề đó, đồ án phát triển quy trình:

WORKBOOK → ENGINE → DoE → DATASET → OPTIMIZATION

Workbook được chia thành các mô-đun:

Input hình học và vật liệu

↓

Đặc trưng tiết diện

↓

Tải trọng và nội lực

↓

SLS Stress

↓

ULS Flexure

↓

ULS Shear + Reinforcement

↓

Pass/Fail

↓

Dataset

Một điểm quan trọng là engine không được xây dựng bằng cách xấp xỉ kết quả workbook. Các đại lượng quan trọng được đối chiếu **cell-by-cell** để đảm bảo chương trình tự động tái lập logic tính toán gốc.

Đây là bước chuyển từ **"một bảng tính thiết kế"** thành **"một công cụ có khả năng sinh hàng loạt phương án thiết kế"**.

16. DoE – 1.000 PHƯƠNG ÁN – PARETO ĐA MỤC TIÊU

Không gian thiết kế được lấy mẫu bằng phương pháp **Latin Hypercube Sampling – LHS**.

Sau quá trình sinh và kiểm tra, bộ dữ liệu cuối cùng gồm:

1.000 PHƯƠNG ÁN EXACT-PASS

Tức là toàn bộ 1.000 phương án đều đáp ứng các điều kiện kiểm toán được đặt ra.

Mỗi phương án chứa đồng thời:

+ Thông số hình học;
+ Vật liệu;
+ Bố trí cáp;
+ Nội lực;
+ Ứng suất;
+ Sức kháng;
+ Tỷ số kiểm toán;
+ Trạng thái pass/fail.

Bốn mục tiêu tối ưu:

1. Giảm khối lượng bê tông

2. Giảm lượng dự ứng lực

3. Giảm chỉ số cốt thép thường Asw/s

4. Giảm mức sử dụng kết cấu Umax

Kết quả:

- Pareto 2 mục tiêu: **1 phương án**;
- Pareto 3 mục tiêu: **19 phương án**;
- Pareto 4 mục tiêu: **51 phương án**.

Trong 1.000 thiết kế, kiểm toán chi phối là:

- **ULS Flexure:** 506 phương án;
- **SLS Stress:** 486 phương án;
- **ULS Shear:** 8 phương án.

Điều này cho phép xác định không chỉ phương án nào đạt, mà còn **cơ chế chịu lực nào đang điều khiển thiết kế**.

17. PHƯƠNG ÁN TỐI ƯU VÀ KẾT LUẬN

Sau khi phân tích Pareto, chuẩn hóa các mục tiêu và xếp hạng bằng Balanced Score kết hợp TOPSIS, phương án đại diện cuối cùng được lựa chọn là:

SAMPLE ID 396

Các chỉ tiêu chính:

Khối lượng bê tông proxy: 250,415 m^3

Prestress Tendon Index: 16

Asw/s: 62,832 mm^2/mm

Umax: 0,820

Điều đáng chú ý là ID 396 **không phải phương án cực tiểu tuyệt đối của riêng một mục tiêu**. Giá trị của nó nằm ở việc tạo ra một trạng thái cân bằng giữa:

ÍT VẬT LIỆU – HỢP LÝ VỀ DỰ ỨNG LỰC – HỢP LÝ VỀ CỐT THÉP – VẪN CÒN DỰ TRỮ CHỊU LỰC.

Umax = 0,820 tương ứng với khoảng **18% dự trữ so với ngưỡng kiểm toán 1,0**.

KẾT QUẢ CHÍNH CỦA ĐỒ ÁN

Đồ án đã:

01. Xây dựng phương án kết cấu cho đoạn cầu đường sắt đô thị tiếp cận Nhà ga Tây Hồ.

02. Thiết kế và kiểm toán dầm hộp BTCT DƯL nhịp 30 m theo hệ thống trạng thái giới hạn.

03. Thiết kế trụ P9 và móng 4 cọc khoan nhồi.

04. Thiết kế trụ P12 cùng móng 9 cọc khoan nhồi chịu đồng thời tải trọng cầu và nhà ga.

05. Thiết kế hệ khung DƯL đỡ tầng trung chuyển và tầng ke ga.

06. Xét tải trọng đặc thù của công trình đường sắt gồm LM71, gió, động đất và tải trọng khai thác nhà ga.

07. Xây dựng mô hình BIM hỗ trợ kiểm soát giải pháp kết cấu.

08. Nghiên cứu quy trình chế tạo, vận chuyển và cẩu lắp kết cấu nhịp.

09. Thực hiện khái toán các hạng mục kết cấu chính.

10. Phát triển workbook thiết kế tự động và engine tính toán có khả năng truy vết.

11. Xây dựng bộ dữ liệu gồm 1.000 thiết kế khả thi.

12. Tối ưu hóa đồng thời 4 mục tiêu và xác định 51 nghiệm Pareto.

13. Lựa chọn phương án cân bằng ID 396 làm thiết kế đại diện.

GIÁ TRỊ CỐT LÕI

Giá trị của đồ án không chỉ nằm ở việc hoàn thành thiết kế một đoạn cầu Metro mà còn ở sự kết nối giữa tư duy thiết kế kết cấu truyền thống với BIM, tự động hóa tính toán và tối ưu hóa dựa trên dữ liệu.

Quy trình nghiên cứu cho thấy một hướng tiếp cận mà trong đó kỹ sư không còn chỉ kiểm tra một phương án đã lựa chọn, mà có thể tạo – kiểm toán – so sánh hàng trăm hoặc hàng nghìn phương án và lựa chọn giải pháp hợp lý trên cơ sở định lượng.

Đây cũng là định hướng có khả năng tiếp tục phát triển sang các bước nghiên cứu tiếp theo như mô hình thay thế, phân tích độ nhạy, tối ưu vòng lặp trực tiếp và ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong hỗ trợ thiết kế kết cấu cầu đường sắt đô thị.

Từ thiết kế một công trình cụ thể đến xây dựng một phương pháp hỗ trợ ra quyết định thiết kế – đó là định hướng xuyên suốt của đồ án.