

Thiết kế kết cấu dàn phẳng liên hợp thép - bê tông theo tiêu chuẩn Eurocode 4

Design of steel - concrete composite plane truss structures according to Eurocode 4

> TS HOÀNG HIẾU NGHĨA

Khoa Công nghệ và Kỹ thuật, Trường Đại học Hải Phòng

Email: nghiahh@dhhp.edu.vn

TÓM TẮT

Tại Việt Nam, đến nay vẫn chưa có tiêu chuẩn thiết kế riêng cho kết cấu liên hợp thép - bê tông (LHT-BT). Tuy nhiên, loại kết cấu này ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng. Trong thực tế thiết kế và tính toán, các kỹ sư hiện đang tham khảo và áp dụng nhiều tiêu chuẩn nước ngoài khác nhau, như Eurocode 4, ANSI/AISC 360 và GB 55004-2021. Đối với các kết cấu có nhịp lớn, việc sử dụng kết cấu dàn LHT-BT mang lại nhiều hiệu quả kỹ thuật và kinh tế, đồng thời phù hợp với yêu cầu của các công trình hiện đại. Nhưng việc tính toán loại kết cấu này hiện vẫn chưa được đề cập nhiều trong các tài liệu nghiên cứu tại Việt Nam.

Bài báo trình bày tổng quan về kết cấu LHT-BT, trong đó tập trung làm rõ đặc điểm của kết cấu dàn liên hợp, ứng dụng thực tế của loại kết cấu này trong xây dựng ở Việt Nam và trên thế giới, cũng như đánh giá ưu điểm và hạn chế khi áp dụng trong công trình xây dựng. Ngoài ra, bài báo còn vận dụng lý thuyết tính toán kết cấu LHT-BT theo tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 4, từ đó đề xuất quy trình tính toán và thiết lập các công thức tính toán cho kết cấu dàn liên hợp, có thể áp dụng trong thiết kế thực tế.

Từ khóa: Kết cấu liên hợp, dàn liên hợp, dàn thép.

ABSTRACT

In Vietnam, there are currently no national design standards for steel-concrete composite structures. However, this type of structural system has been increasingly applied in construction projects. The design and analysis of such structures are presently conducted using various international standards such as Eurocode 4, ANSI/AISC 360, and GB 55004-2021. For large-span structures, the use of steel-concrete composite truss systems offers significant advantages and suitability. However, the analysis and design methods for this type of composite truss structure have not been extensively addressed in existing Vietnamese references. This paper presents an overview of steel-concrete composite structures, with a particular focus on composite truss systems, and reviews their applications in construction practice both in Vietnam and worldwide. It also evaluates the advantages and limitations of composite truss structures when used in building and infrastructure systems. The study adopts the structural design theory for composite structures according to Eurocode 4, proposes a calculation procedure, and establishes design equations for steel-concrete composite truss structures, which can be applied to practical engineering design problems.

Keywords: Steel-concrete composite structures, steel-concrete composite truss structures, steel truss.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu LHT-BT là loại kết cấu mới và được sử dụng cho các công trình là các tòa nhà cao tầng và siêu cao tầng. Trên thế giới loại kết cấu này được biết từ rất sớm, nó đã đánh dấu một bước ngoặt mới về giải pháp kết cấu và công nghệ xây dựng. Loại kết cấu này đã tích hợp được những ưu điểm nổi bật của hai loại vật liệu khác nhau là thép và bê tông để tạo thành một hệ kết cấu có khả năng chịu lực tốt hơn, tăng độ dai, độ ổn định cho kết cấu, tăng khả năng kháng chấn và khả năng chịu lửa so với việc chỉ sử dụng kết cấu thép hoặc bê tông đơn thuần.

Tại Việt Nam, có nhiều tác giả đã nghiên cứu về loại kết cấu này như GS.TS Phạm Văn Hội [1], PGS.TS Vũ Quốc Anh [5],

PGS.TS Nguyễn Xuân Huy [4], TS Hoàng Hiếu Nghĩa [6] và một số tác giả khác. Tuy nhiên các nghiên cứu và lý thuyết tính toán chủ yếu tập trung vào cấu kiện cột, dầm, sàn liên hợp, với loại cấu kiện này thì khả năng vượt nhịp lớn còn hạn chế.

Hệ dàn LHT-BT được xem xét để vượt các nhịp lớn trên 12 m, có thể tạo ra không gian rất rộng cho các công trình. Việc ứng dụng loại kết cấu này đã được ứng dụng trong tòa nhà Hud Tower (Hình 1). Ở Việt Nam chưa có bộ tiêu chuẩn đầy đủ cũng như hướng dẫn tính toán về kết cấu LHT-BT. Do vậy việc nghiên cứu quy trình thiết kế kết cấu dàn phẳng LHT-BT dựa theo tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 4 là cần thiết nhằm đưa ra một quy trình tính toán, thiết lập các công thức tính toán đầy đủ cho loại kết cấu này.



Hình 1. Tòa nhà Hud Tower (37 đường Lê Văn Lương - Hà Nội)

2. ƯU NHƯỢC ĐIỂM CỦA KẾT CẤU DÀN PHẪNG LHT-BT

2.1. Ưu điểm

Hệ dàn LHT-BT là sự kết hợp hiệu quả của dàn và sự tiết kiệm chi phí xây dựng của sàn liên hợp. Hệ dàn tập trung vật liệu vào những vị trí truyền lực chính, do đó với cùng nhịp hệ dàn LHT-BT có khối lượng thép ít hơn bất cứ hệ kết cấu thép nào. Ngoài ra hệ dàn LHT-BT tạo ra không gian mở rất lớn cho hệ thống kỹ thuật do đó chiều cao thông thủy của sàn có thể tận dụng đến tận sát dàn, làm giảm chiều cao tầng.

- Tiết kiệm thép so với dàn thép: Bê tông tham gia chịu nén nên các thanh chịu nén (hoặc phần chịu nén của tiết diện) có thể giảm tiết diện thép so với dàn thép.

- Tăng độ cứng và giảm võng (độ võng nhỏ hơn rõ rệt): Bê tông bọc góp phần tăng mômen quán tính hiệu dụng (EI) của các thanh chịu nén/uốn, do đó độ võng trung bình giảm.

- Cải thiện khả năng chống buckling (ổn định): Khi thanh thép bị bọc hoặc liên kết với bê tông, chiều dài mảnh tự do/ hệ số mảnh giảm, tăng tải tới hạn chống buckling; do đó có thể dùng tiết diện mảnh hơn mà không bị mất ổn định. Ứng dụng rõ ở thanh nén của dàn nhịp lớn

- Bảo vệ thép-chống ăn mòn và chống cháy: Lớp bê tông bao che làm giảm tốc độ ăn mòn do độ pH, hơi ẩm và khí ăn mòn; đồng thời cung cấp khả năng chống cháy thụ động (thời gian chịu lửa phụ thuộc vào độ dày lớp bảo vệ và mác bê tông).

- Tuổi thọ và chi phí duy tu thấp hơn: Giảm diện tích thép hở và lớp bảo vệ bê tông làm giảm nhu cầu sơn, chống ăn mòn định kỳ; về dài hạn có thể giảm chi phí bảo trì.

- Thích hợp cho nhịp lớn và tải phức tạp: Kết cấu liên hợp tận dụng ưu điểm thép (kéo, nhẹ) và bê tông (nén, cứng) nên rất thích hợp cho dàn mái, dàn chịu nhịp lớn, dàn chuyển (transfer truss) trong tòa nhà cao tầng.

2.2. Nhược điểm

- Thi công phức tạp hơn, nhiều công đoạn: So với dàn thép thuần (lắp ghép & siết bu-lông), dàn liên hợp cần thêm cốp pha, đổ bê tông, chờ đóng rắn, hàn/cài bu lông neo/đinh stud - làm gia tăng công tác tại hiện trường và yêu cầu phối hợp nhiều đội nghề.

- Yêu cầu kiểm soát chất lượng cao cho liên kết (shear connectors): Để thép và bê tông làm việc liên hợp cần số lượng và bố trí bu-lông neo hoặc đinh stud đúng tiêu chuẩn; nếu

thiếu/không đạt thì sẽ xảy ra partial interaction-mất khả năng liên hợp, giảm năng lực thiết kế.

- Kiểm soát hàn stud, neo, rỗ rỉ bê tông, kết dính đều cần QC/QA chặt chẽ.

- Khó sửa chữa, thay thế các thanh bị hỏng

- Thiết kế phức tạp hơn (phân tích partial interaction, slip): Thiết kế đòi hỏi xét đến độ trượt giữa thép-bê tông, hiệu ứng shear connector, phân tích kết cấu liên hợp phức tạp hơn so với bài toán dàn thép thuần, cần kỹ sư có kinh nghiệm.

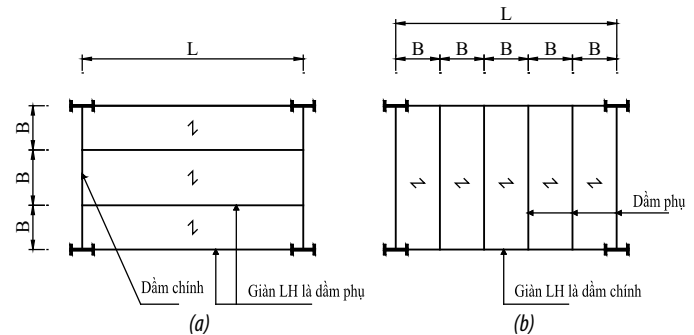
3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT THIẾT KẾ KẾT CẤU DÀN PHẪNG LHT-BT

3.1. Bố trí hệ dàn LHT-BT

Hai cách bố trí hệ kết cấu cho hệ dàn LHT-BT thường được sử dụng [9].

+ Bố trí dầm liên hợp là dầm chính và dầm phụ đỡ trực tiếp sàn (Hình 2a).

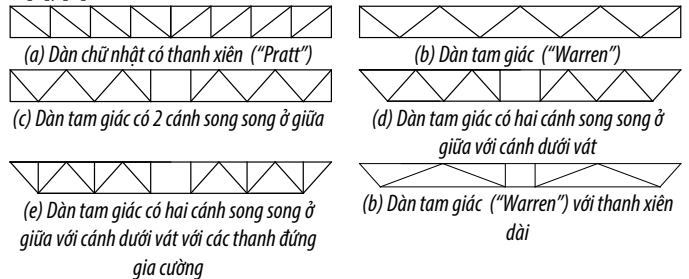
+ Bố trí dàn LHT-BT là dầm chính đỡ các dầm phụ, các dầm phụ sử dụng các dầm thép thông thường để chia nhỏ ô sàn (Hình 2b).



Hình 2. Bố trí hệ kết cấu sử dụng dàn LHT-BT

3.2. Hình dạng dàn LHT-BT

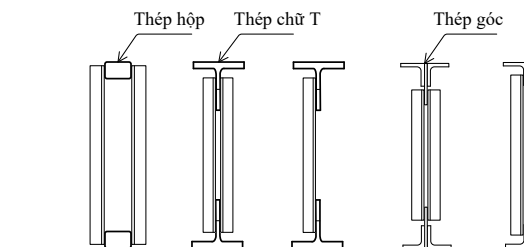
Có rất nhiều loại hình dạng dàn có thể được xem xét để áp dụng cho hệ kết cấu dàn LHT-BT dựa vào tiêu chí về khả năng chịu lực hợp lý và tiêu chí dùng vật liệu hiệu quả, được thể hiện tại Hình 3 [2], [9].



Hình 3. Hình dạng dàn trong hệ kết cấu dàn LHT-BT

3.3. Tiết diện các thanh dàn

Tất cả các loại tiết diện đều có thể được sử dụng cho cả các thanh cánh trên và thanh cánh dưới của dàn. Các loại tiết diện được lựa chọn cho thanh cánh là thép hộp, thép chữ T, thép góc như Hình 4 [9].



Hình 4. Các dạng tiết diện ngang của thanh dàn

3.4. Phương pháp thiết kế hệ dàn LHT-BT

3.4.1. Các phương pháp phân tích

Phương pháp phân tích 1: Thiết kế tất cả các cấu kiện sử dụng phương pháp cân bằng lực cho tất cả các trường hợp, giả thiết tất cả các liên kết là khớp. Đây là phương pháp tính tay.

Phương pháp phân tích 2: Thiết kế tất cả các cấu kiện với sự kết hợp của kết quả phân tích lực từ phân tích dàn hồi của tải trọng áp đặt cho hệ dàn không liên hợp cộng với kết quả phân tích lực từ các hoạt tải áp đặt lên hệ dàn liên hợp. Đây là phương pháp phân tích bằng máy.

Phương pháp phân tích 3: Phân tích dẻo của dàn, phương pháp phân tích này được tính khi các khớp dẻo phát triển trong các cấu kiện. Phương pháp này chỉ thực hiện bằng máy tính.

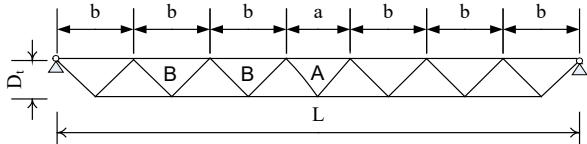
3.4.2. Quy trình thiết kế dàn LHT-BT

Xây dựng quy trình thiết kế theo phương pháp phân tích 1

- b1. Xác định số liệu đầu vào
- b2. Thiết lập sơ đồ tính của cấu kiện dàn
- b3. Tính toán tải trọng và xác định các trường hợp tải trọng
- b4. Xác định nội lực các thanh dàn
- b5. Tính toán và kiểm tra dàn LH trong giai đoạn thi công
 - + Kiểm tra khả năng chịu mô men tổng thể của dàn
 - + Kiểm tra dàn khi vận chuyển, cầu lắp
- b6. Tính toán và kiểm tra dàn LH trong giai đoạn liên hợp
 - + Kiểm tra khả năng chịu mô men tổng thể của dàn
 - + Kiểm tra khả năng chịu lực của các thanh bụng
 - + Kiểm tra độ võng của dàn
 - + Kiểm tra dao động của dàn
- + Tính toán số lượng bu lông liên kết

3.4.2.1. Sơ đồ tính toán hệ dàn LHT-BT

Với hệ kết cấu nhịp 15-20 m ta sử dụng hệ kết cấu dàn dạng tam giác cho kết cấu dàn LH. Hai đầu dàn liên kết khớp (Hình 5). Nhịp của thanh cánh trên b nằm trong khoảng 2 m ÷ 2.5 m [9].



Hình 5. Sơ đồ tính toán dàn tam giác

3.4.2.2. Tải trọng tác dụng lên hệ dàn LHT-BT

Tải trọng tính toán cho kết cấu dàn LH gồm các loại tải trọng dưới đây [9]:

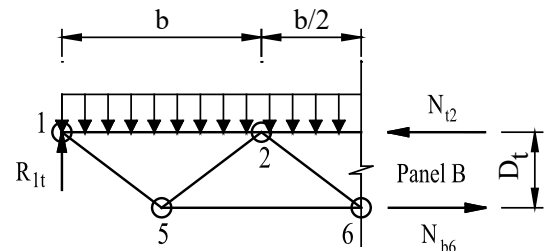
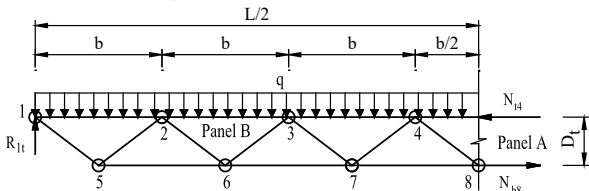
- Tải trọng bản thân dàn và tấm tôn (giả thiết)	= 0.4 kN/m ²	(DL1)
- Trọng lượng bản thân sàn bê tông	= 2.3 kN/m ²	(DL2)
- Tải trọng thi công	= 0.5 kN/m ²	(CL1)
- Tải trọng thi công	= 4 kN	(CL2)
- Tĩnh tải	= 0.85 kN/m ²	(DL3)
- Hoạt tải	= 4.35 kN/m ²	(LL)

3.4.2.3. Phân tích nội lực hệ dàn LHT-BT

- Nội lực của các thanh cánh trên và thanh cánh dưới [2], [13]:

Thanh cánh trên và thanh cánh dưới chịu tác dụng đồng thời của cả lực nén và mô men uốn.

Lực dọc trong các đoạn thanh được xác định từ các bài toán cân bằng tĩnh học, lấy cân bằng mô men với gối trái (Hình 6):

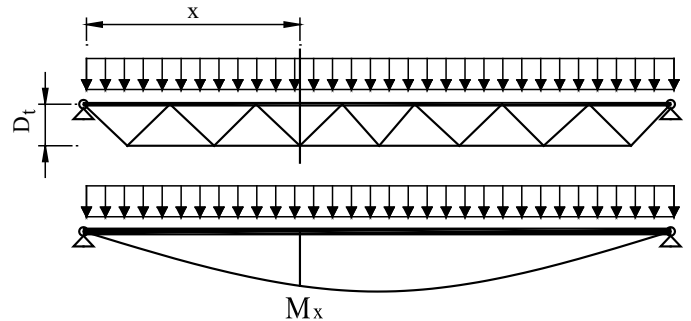


Hình 6. Sơ đồ lực nén các thanh trên và thanh dưới dàn

$$N_{44} = N_{88} = \left(R_{1t} - \frac{q \times (L/2)^2}{2} \right) \times \frac{1}{D_t} \quad (1)$$

$$N_{23} = N_{67} = \left(R_{1t} - \frac{q \times (3b/2)^2}{2} \right) \times \frac{1}{D_t} \quad (2)$$

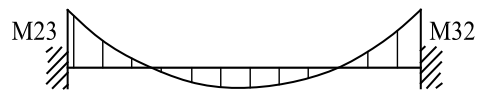
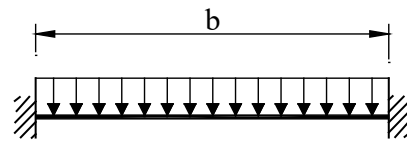
Từ các công thức (1) và (2) có thể đơn giản hóa việc tính toán lực kéo và nén của thanh cánh thông qua giá trị mô men của tiết diện xem xét trong một dầm đơn giản tương đương (Hình 7).



Hình 7. Biểu đồ nội lực của hệ dàn khi coi như dầm đơn giản

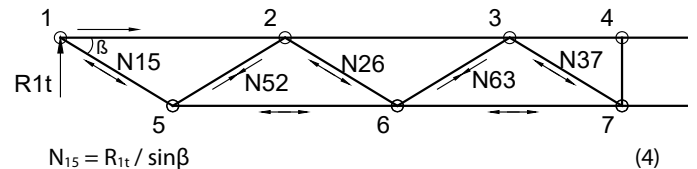
Khi đó giá trị lực dọc trong thanh cánh sẽ bằng: $N = M_x / D_t$ (3)

Mô men trong các thanh cánh trên của các đoạn panel B được xác định từ mô men cục bộ do tải trọng tác dụng trong phạm vi panel B với sơ đồ ngàm đàn hồi hai đầu (Hình 8):



Hình 8. Biểu đồ mô men cục bộ do tải trọng tác dụng trong phạm vi panel B

- Lực dọc trong các thanh xiên: được tính toán đơn giản từ cân bằng lực dọc trong các nút (Hình 9).



$$N_{15} = R_{1t} / \sin \beta$$

$$N_{52} = N_{15} = N_{26} = N_{63} = N_{37}$$

Hình 9. Biểu đồ xác định lực dọc trong các thanh xiên của dàn

- Thiết kế kiểm tra tiết diện thanh dàn

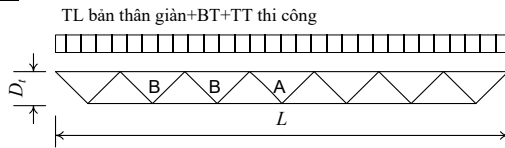
+ Thanh cánh trên và dưới của dàn được kiểm tra theo bài toán chịu nén và uốn đồng thời.

+ Các thanh xiên kiểm tra với bài toán kéo nén dọc trục.

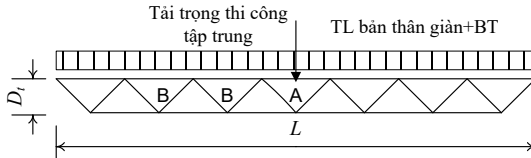
3.4.2.4. Tính toán dàn LHT-BT trong giai đoạn thi công

Các trường hợp tải trọng trong giai đoạn thi công [9]:

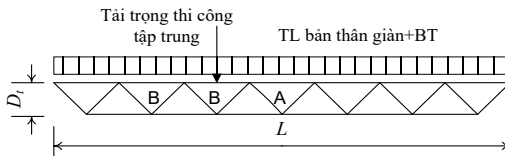
Tổ hợp 1:



Tổ hợp 2:



Tổ hợp 3:

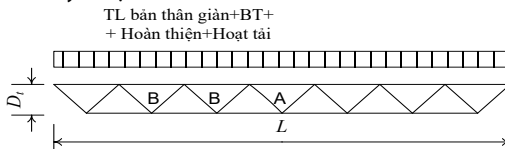


Hình 10. Các trường hợp tải trọng trong giai đoạn thi công

Trong giai đoạn thi công sàn và dầm làm việc độc lập. Việc kiểm tra khả năng chịu mômen tổng thể của dầm tương đương với việc kiểm tra khả năng chịu lực của các thanh cánh trên và thanh cánh dưới. Do tổng tải trọng trong giai đoạn thi công nhỏ hơn tổng tải trọng khai thác nên việc kiểm tra khả năng chịu mômen tổng thể của dầm tương đương với việc kiểm tra khả năng chịu lực của thanh cánh trên.

3.4.2.5. Tính toán dầm LHT-BT trong giai đoạn sàn làm việc liên hợp

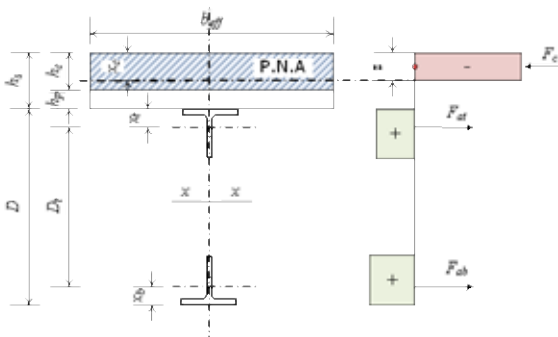
Trong giai đoạn sàn làm việc liên hợp, vai trò chịu nén của thanh cánh trên giảm dần, khi bê tông đạt cường độ, với liên kết chốt đủ để tạo một liên kết hoàn toàn thì sàn chủ yếu chịu nén thay cho thanh cánh trên. Với trạng thái chịu lực cuối cùng trước khi phá hoại thanh cánh trên chuyển sang chịu kéo. Với hệ kết cấu trên, thanh cánh trên trong giai đoạn này chỉ có tác dụng như là một thanh truyền lực [9].



Hình 11. Trường hợp tải trọng trong giai đoạn sàn làm việc liên hợp

Các tính toán kiểm tra trong giai đoạn này bao gồm:

- + Kiểm tra khả năng chịu mômen tổng thể của dầm
- + Kiểm tra khả năng chịu lực của các thanh bụng
- + Tính toán số lượng bu lông liên kết
- Khả năng chịu mômen tổng thể của dầm trong giai đoạn liên hợp [9], [14]:



Hình 12. Biểu đồ ứng suất dẻo khi trục trung hòa đi qua bản bê tông (mặt cắt giữa nhịp)

Khả năng chịu kéo, F_{ab} , của thanh cánh dưới được tính theo công thức:

$$F_{ab} = A_b f_y \tag{5}$$

Khả năng chịu kéo, F_{at} , của thanh cánh trên được tính theo công thức:

$$F_{at} = A_t f_y \tag{6}$$

Khả năng chịu nén bê tông

$$F_c = 0.85f_{cd} b_{eff} h_c \tag{7}$$

Trong hầu hết các trường hợp ta có: $F_a = F_{ab} + F_{at} < F_c$, Vị trí trục trung hòa đi qua bản bê tông. Khả năng chịu mômen dẻo của dầm LH được tính theo lực kéo của thanh cánh dưới nhân với cánh tay đòn đến hợp lực chịu nén của sàn. Vì vậy:

$$x_c = (F_{ab} + F_{at}) / (0.85f_{cd} b_{eff}) \tag{8}$$

$$M^{+}_{pl,Rd} = F_{ab} (D - x_b + h_s - x_c/2) + F_{at} (x_t + h_s - x_c/2) \tag{9}$$

Kiểm tra khả năng chịu mômen tổng thể của dầm:

$$M^{+}_{pl,Rd} > M^{+}_{max nhjp} \tag{10}$$

3.4.2.6. Kiểm tra độ võng của dầm

Độ võng của dầm được tính bằng công thức tính độ võng của dầm đơn giản [2], [9],[13],[14]:

$$\delta = \frac{5ql^4}{384EI_{xx}} \tag{11}$$

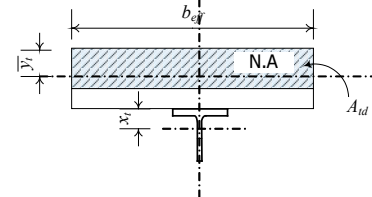
Độ võng của dầm được tính toán qua 2 giai đoạn: giai đoạn thi công (δ_1) và giai đoạn làm việc liên hợp (δ_2)

Tải trọng tính toán độ võng trong giai đoạn thi công gồm tải trọng bản thân dầm và tải trọng bê tông.

Mômen quán tính I_{xx} được tính với thanh trên và thanh dưới.

Tải trọng tính toán độ võng trong giai đoạn liên hợp là hoạt tải, tính với mômen quán tính của tiết diện liên hợp.

Tính toán mômen quán tính của tiết diện liên hợp I_{xx}



Tiết diện quy đổi tương đương của phần bê tông hiệu quả

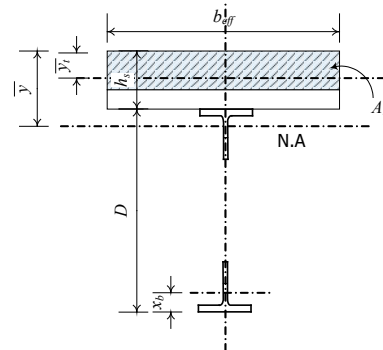
sang thép:
$$A_{td} = \frac{b_{eff} h_c E_s}{2E_{cm}} \tag{12}$$

Vị trí trục trọng tâm của tiết diện liên hợp cánh trên:

$$\bar{y}_t = \frac{A_{td} h_c / 2 + A_t (x_t + h_s - h_c / 2)}{(A_{td} + A_t)} \tag{13}$$

Mômen quán tính của tiết diện liên hợp cánh trên đối với trục trọng tâm của tiết diện liên hợp cánh trên:

$$I_{td} = \frac{b_{eff} h_c^3}{12} \times \frac{E_{cm}}{2E_s} + A_{td} (\bar{y}_t - h_c / 2)^2 + I_t + A_t (h_s + x_t - \bar{y}_t)^2 \tag{14}$$



Hình 13. Vị trí trục trọng tâm của tiết diện dầm liên hợp

Vị trí trục trọng tâm của tiết diện liên hợp dầm (kể đến thanh cánh dưới):

$$\bar{y} = \frac{(A_{td} + A_t)\bar{y}_t + A_b(D_t + x_t + h_s)}{(A_{td} + A_t + A_b)} \quad (15)$$

Mômen quán tính của tiết diện liên hợp dầm (kể đến thanh cánh dưới):

$$I_{xx} = I_{td} + (A_{td} + A_t)(\bar{y} - \bar{y}_t)^2 + I_b + A_b(D_t + x_t + h_s - \bar{y})^2 \quad (16)$$

Điều kiện về giới hạn độ võng của dầm: $\delta < L/250$ và $\delta_2 < L/360$

3.4.2.7. Kiểm tra dao động của dầm [9]

Tải trọng tham gia vào dao động riêng của dầm bao gồm tĩnh tải và 10% Hoạt tải.

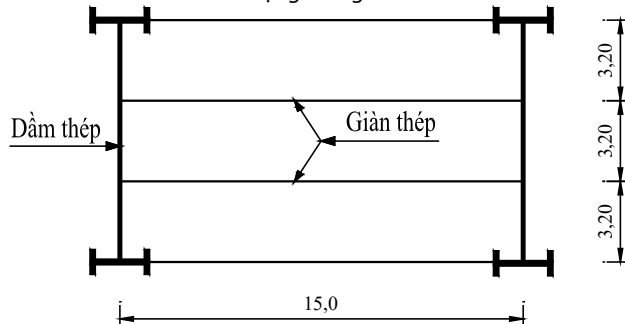
Gọi độ võng do tải trọng trên gây ra là δ_w (mm).

Dao động riêng của dầm LH được tính gần đúng bằng

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta_{sw}}} (Hz) > 4 (Hz) \quad (17)$$

3.5. Ví dụ tính toán dầm phẳng LHT-BT

Thiết kế dầm LHT-BT dạng tam giác như sơ đồ kết cấu Hình 14.



Hình 14. Mặt bằng kết cấu ô sàn điển hình

* Sơ đồ tính: Dầm LHT-BT có liên kết khớp ở hai đầu.

* Các đặc trưng vật liệu sử dụng:

Bê tông cấp độ bền C30/37: $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$; $E_{cm} = 33.000 \text{ N/mm}^2$

Thép kết cấu S355 có: $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$; $E_a = 210.000 \text{ N/mm}^2 = 21.000 \text{ kN/cm}^2$; $I_a = 35.100 \text{ cm}^4$; $W_{pl,a} = 2.000 \text{ cm}^3$

Sàn liên hợp dày $h_s = 140\text{mm}$, sử dụng tôn sóng cao $h_p = 60\text{mm}$.

* Số liệu tải trọng:

Tĩnh tải hoàn thiện và hệ thống kỹ thuật: $0,85 \text{ kN/m}^2$.

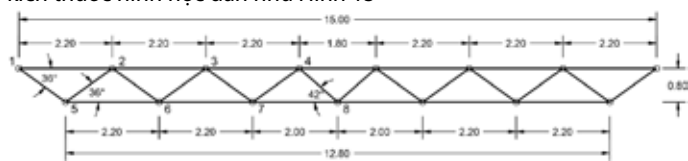
Hoạt tải sử dụng: $4,35 \text{ kN/m}^2$.

3.5.1. Lựa chọn kích thước dầm

- Chiều cao dầm: $D = \left(\frac{1}{20} \sim \frac{1}{15}\right)L = \left(\frac{1}{20} \sim \frac{1}{15}\right)15 = (0,75 \sim 1)(m)$;

Chọn chiều cao dầm $D = 0,85\text{m}$.

- Lựa chọn hình dạng dầm tam giác. Để đảm bảo góc nghiêng của các thanh xiên trong khoảng 30° , tỷ lệ giữa khoảng cách nút dầm: nhịp dầm xấp xỉ bằng 3:1. Do đó ta chọn khoảng cách giữa các nút dầm $b=2,2 \text{ m}$. Khoảng cách này được bố trí đồng đều từ 2 phía của dầm vào giữa, khoảng cách nút tại giữa: $a = 15 - 2 \times 2 \times 6 = 1,8 \text{ m}$, kích thước hình học dầm như Hình 15



Hình 15. Kích thước hình học dầm

B (mm)	d (mm)	T (mm)	t (mm)	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	C _x (mm)	i _x (mm)	i _y (mm)	Z _{xt} (cm ³)	Z _{xb} (cm ³)	W _{pl} (cm ³)
124.3	153.3	12.1	8.0	26.6	568	38.5	46.2	27.0	147	49.5	88.9

Lựa chọn sơ bộ kích thước hình học của các thanh dầm:

- Thanh cánh trên: T127x152x21 kG/m

- Thanh cánh dưới: T165x152x27 kG/m

- Thanh xiên: 2L80x80x8

3.5.2. Tải trọng tác dụng

Xác định tải trọng tác dụng lên dầm:

Tải trọng quy về tải phân bố trên dầm (tính với bước dầm là $B = 3,2 \text{ m}$)

- Tải trọng bản thân dầm và tấm tôn (giả thiết)	= $0,4 \times 3,2 = 1,28 \text{ kN/m (DL1)}$
- Trọng lượng bản thân sàn bê tông	= $2,3 \times 3,2 = 7,36 \text{ kN/m (DL2)}$
- Tải trọng thi công	= $0,5 \times 3,2 = 1,60 \text{ kN/m (CL1)}$
- Tĩnh tải	= $0,85 \times 3,2 = 2,72 \text{ kN/m (DL3)}$
- Hoạt tải	= $4,35 \times 3,2 = 13,92 \text{ kN/m (LL)}$

3.5.3. Tính toán khả năng chịu lực của dầm

Xác định tải trọng tác dụng lên dầm:

3.5.3.1. Giai đoạn thi công

Giai đoạn thi công, dầm làm việc độc lập với sàn bê tông. Các bài toán kiểm tra gồm:

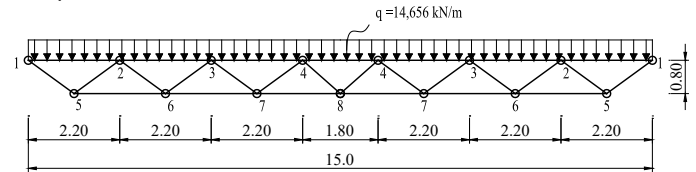
- Kiểm tra khả năng chịu lực cục bộ của các thanh cánh trên và cánh dưới.

- Kiểm tra khả năng chịu mômen uốn của dầm.

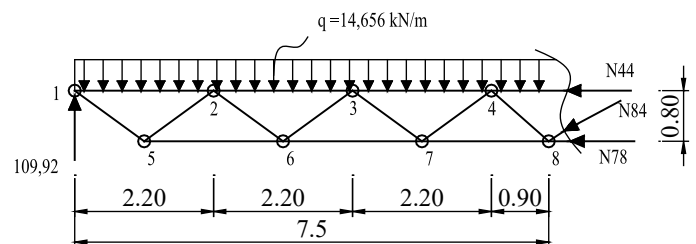
Sơ đồ trường hợp tải trọng tác dụng trong giai đoạn thi công như sau:

Tổ hợp 1: Tải trọng bản thân $\times 1,4$ + tải trọng thi công $\times 1,6$

$$q = (1,28 + 7,36) \times 1,4 + 1,60 \times 1,6 = 14,656 \text{ (kN/m)}$$



Hình 16. Sơ đồ tải trọng tác dụng lên dầm



Hình 17. Cân bằng lực xác định nội lực các thanh dầm

Theo mục 3.4.2.3, xác định được nội lực các thanh dầm như sau:

$N_{44} = 529,14 \text{ (kN)}$ (nén)

$N_{23} = 363,2 \text{ (kN)}$; $N_{34} = 491,5 \text{ (kN)}$ (nén)

$N_{56} = 206,4 \text{ (kN)}$; $N_{67} = 341,8$; $N_{78} = 406,26 \text{ (kN)}$ (kéo)

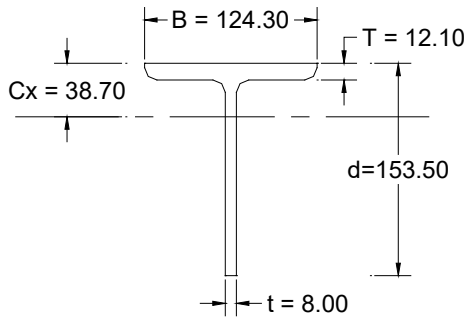
$M_{34} = 14,656 \times 2,2 \times 2,2 / 12 = 5,91 \text{ (kNm)}$

$M_{44} = 14,656 \times 1,8 \times 1,8 / 12 = 3,96 \text{ (kNm)}$

a) Kiểm tra khả năng chịu lực của thanh cánh trên.

Tiết diện thanh cánh trên: $127 \times 152 \times 21 \text{ kg/m}$

Thông số hình học của tiết diện:



Phân loại tiết diện:

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{p_y} \right)^{1/2} = \left(\frac{235}{355} \right)^{1/2} = 0.81$$

Cánh: $\frac{B/2}{T} = \frac{124.3/2}{12.1} = 5.16 < 9\varepsilon = 9 \times 0.81 = 7.32$

Bụng: $\frac{d}{t} = \frac{153.3}{8.0} = 19.16 < 33\varepsilon = 33 \times 0.81 = 26.85$

Tiết diện thuộc loại 1.

Tính khả năng chịu lực nén của thanh 34, 44

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9\varepsilon = 76.399$$

$$\bar{\lambda}_{(34)} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2200}{46.2} \times \frac{1}{76.399} = 0.623; \bar{\lambda}_{(44)} = \frac{1800}{46.2} \times \frac{1}{76.399} = 0.510$$

Tiết diện chữ T ứng với đường cong c,

→ α = 0.49; (EN 1993-1-1, hình 6.4)

$$\phi_{(34)} = 0.5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0.798$$

$$\phi_{(44)} = 0.5 \times \left[1 + 0.49(0.51 - 0.2) + 0.51^2 \right] = 0.706$$

Hệ số giảm khả năng chịu nén của các thanh được tính theo

công thức:

B (mm)	d (mm)	T (mm)	t (mm)	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	C _x (mm)	i _x (mm)	i _y (mm)	Z _{xf} (cm ³)	Z _{xb} (cm ³)	W _{pl} (cm ³)
166,9	155,1	13,7	7,9	34,4	642	32,1	43,2	39,3	200	52,2	92,8

Thanh cánh dưới chịu kéo nên không xét tới ảnh hưởng của độ mảnh:

$$N_{b,Rd} = A f_y / \gamma_{M1} = 34,4 \times 10^2 \times 355 \times 10^{-3} / 1 = 1.221 \text{ (kN)}$$

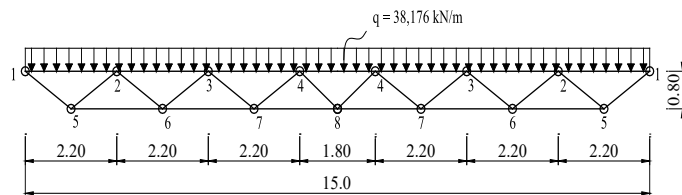
→ Thanh cánh dưới đảm bảo khả năng chịu lực trong giai đoạn

thi công.

3.5.3.2. Giai đoạn sàn làm việc liên hợp

(Tải trọng bản thân + tĩnh tải hoàn thiện) × 1.4 + Hoạt tải sử dụng × 1.6

$$q = (1,28 + 7,36 + 2,72) \times 1,4 + 13,92 \times 1,6 = 38,176 \text{ (kN/m)}$$



Hình 18. Tải trọng tác dụng lên dầm LHT-BT

Mô men uốn lớn nhất tại giữa nhịp:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{38,176 \times 15^2}{8} = 1.073,7 \text{ (kNm)}$$

- Xác định vị trí trục trung hòa dầm

$$\chi_{(34)} = \frac{1}{\phi_{(34)} + \sqrt{\phi_{(34)}^2 - \bar{\lambda}_{34}^2}} = 0.771 ;$$

$$\chi_{(44)} = \frac{1}{\phi_{(44)} + \sqrt{\phi_{(44)}^2 - \bar{\lambda}_{44}^2}} = 0.837$$

Khả năng chịu lực dọc của các thanh 34 và thanh 44:

$$N_{b,Rd(34)} = \frac{\chi_{(34)} A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.771 \times 26.6 \times 10^2 \times 355 / 10^3}{1} = 728 \text{ (kN)}$$

$$N_{b,Rd(44)} = \frac{\chi_{(44)} A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.837 \times 26.6 \times 10^2 \times 355 / 10^3}{1} = 791 \text{ (kN)}$$

Kiểm tra ổn định tổng thể thanh chịu mômen và nén:

β_m = 1.3 (ENV -1-1, hình 5.3.3)

$$\mu_{y(34)} = \bar{\lambda}_{(34)} (2\beta_m - 4) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right] = -1.26$$

$$k_{y(34)} = 1 - \frac{\mu_{y(34)} N_{sd}}{\chi_y A f_y} = 1 - \frac{-1,26 \times 488,8}{728} = 1,8 > 1,5$$

→ lấy k_y = 1.5 để kiểm tính toán kiểm tra ổn định tổng thể

$$M_{pl,y} = W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M0} = 31.56 \text{ (kNm)}$$

Kiểm tra ổn định tổng thể của mômen kết hợp với lực nén theo công thức:

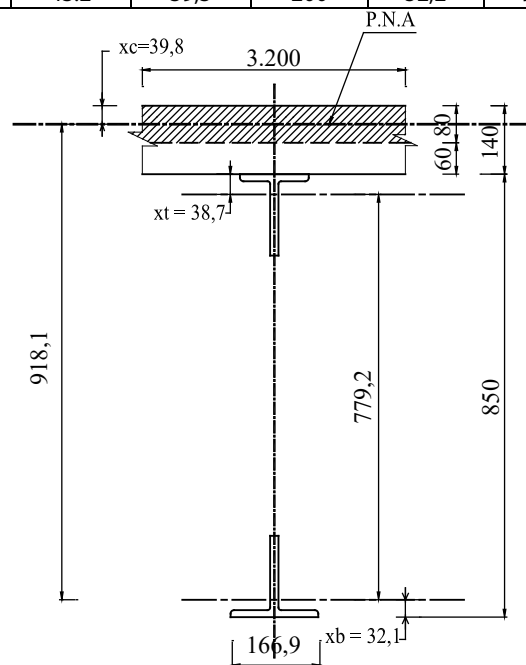
Thanh 34: $\frac{N_{sd}}{N_{b,Rd,y}} + k_y \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,y}} = \frac{491,5}{728} + 1,5 \times \frac{5,91}{31,56} = 0,956 < 1$

Thanh 44: $\frac{N_{sd}}{N_{b,Rd,y}} + k_y \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,y}} = \frac{529,14}{791} + 1,5 \times \frac{3,96}{31,56} = 0,857 < 1$

→ Thanh cánh trên đảm bảo khả năng chịu lực trong giai đoạn thi công.

- Kiểm tra khả năng chịu lực thanh cánh dưới:

Tiết diện thanh cánh dưới: 165×152×27 kg/m



Khả năng chịu nén của phần bê tông, F_c

$$F_c = 0.85f_{cd}Bh_c = 4.352.000 \text{ N} = 4.352 \text{ (kN)}$$

Khả năng chịu kéo của lớn nhất của thép, F_a

$$F_a = A_{tfy} + A_{bfy} = 944 + 1.221 = 2.165 \text{ (kN)}$$

$F_c > F_a$, do đó trục trung hòa dẻo nằm trong phần bê tông.

Xác định vị trí trục trung hòa dẻo:

$$x_c = \frac{F_a}{0.85f_{cd}b} = \frac{2.165}{0.85 \times 30 / 1,5 \times 3.200} = 39,8 \text{ (mm)}$$

Khả năng chịu mômen của dầm LH:

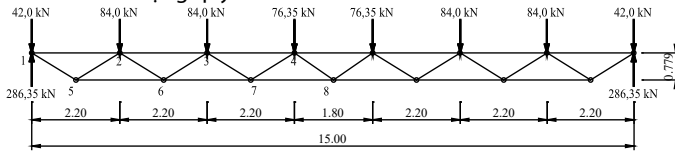
$$M_c = F_{ab} (D + x_t + h_s - x_c/2) + F_{at} (x_t + h_s - x_c/2) = 1.294,8 \text{ kNm} >$$

1.073,7 kNm

→ Trong giai đoạn liên hợp, thanh cánh trên và thanh cánh dưới đủ khả năng chịu mômen uốn tổng thể.

- Kiểm tra khả năng chịu lực của các thanh xiên:

Sơ đồ tải trọng quy về nút



Lực dọc trong các thanh xiên:

$$N_{15} = 286,35 / \sin(36^\circ) = 487,2 \text{ (kN)}, \text{ Kéo}$$

$$N_{25} = N_{15} = 487,2 \text{ (kN)}, \text{ Nén}$$

$$N_{48} = N_{47} \times \sin(36^\circ) / \sin(42^\circ) = 114,1 \text{ (kN)}, \text{ Nén}$$

$$N_{26} = N_{25} - 84,0 / \sin(36^\circ) = 487,2 - 143 = 344,2 \text{ (kN)}, \text{ Kéo}$$

$$N_{36} = N_{26} = 323 \text{ (kN)}, \text{ Nén}$$

Chọn chung tiết diện cho các thanh xiên của dầm là 2 thép góc, sơ bộ chọn tiết diện thanh xiên của dầm : 2L80×80×8.

- Kiểm tra khả năng chịu lực của thanh $N_{25} = 487,2 \text{ kN}$, chịu nén.

Phân loại tiết diện thanh, tiết diện thanh xiên tối thiểu phải nằm trong lớp 3 theo điều kiện trong bảng 5.2 của EC3-1-1:

$$a/t = 80 / 8 = 10 < 15\epsilon = 15 \times 0.81 = 12,15, \text{ thỏa mãn}$$

$$(a+a) / 2t = (80 + 80) / (2 \times 8) = 10 < 11.5 \epsilon = 9.315, \text{ không thỏa mãn.}$$

Tiết diện không thỏa mãn các điều kiện.

Cần tăng bề dày cánh của thanh, chọn lại tiết diện thanh xiên: 2L80×80×10.

Khi đó: $(a + a) / (2t) = (80 + 80) / (2 \times 10) = 8 < 11.5 \epsilon = 9.315$, thỏa mãn.

Kiểm tra khả năng chịu nén của thanh xiên theo điều kiện:

$$N_{ed} / N_{b,Rd} \leq 1$$

$$\text{Thông số hình học của thanh xiên: } L = 0.8 / \sin(36^\circ) = 1,36 \text{ (m)}$$

a (mm)	t (mm)	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)	C _x (mm)	r _x (mm)
80	10	15,1	87,5	2,43	2,41

$$\bar{\lambda}_{(25)} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1.360}{24,1} \times \frac{1}{76,399} = 0,739;$$

Tiết diện chữ L ứng với đường cong b,

$$\rightarrow \alpha = 0,34; \text{ (EN 1993-1-1, hình 6.4)}$$

$$\phi_{(25)} = 0.5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,865$$

Hệ số giảm khả năng chịu nén của các thanh được tính theo công thức:

$$\chi_{(25)} = \frac{1}{\phi_{(25)} + \sqrt{\phi_{(25)}^2 - \bar{\lambda}_{25}^2}} = 0,756$$

Khả năng chịu lực dọc của các thanh 25:

$$N_{b,Rd(25)} = \frac{\chi_{(25)} A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,756 \times 15,1 \times 2 \times 10^2 \times 355 / 10^3}{1} = 810 \text{ (kN)} > 487,2 \text{ (kN)}$$

→ Thanh xiên đủ khả năng chịu nén.

Để nhận thấy thanh xiên N_{15} đủ khả năng chịu kéo.

Vậy các thanh đủ khả năng chịu lực.

3.5.3.3. Thiết kế chịu cắt

Liên kết giữa sàn liên hợp và thanh cánh trên của dầm cần được thiết kế để chịu được lực cắt tương tác giữa thép và bê tông: $Q = F_c$.

$$F_c = 0.85f_{cd}Bx_c = 0.85 \times 30 / 1,5 \times 3.200 \times 39,8 / 10^3 = 2.165 \text{ (kN)}$$

Chọn 1 bu lông đường kính $d=16\text{mm}$, chiều cao bu lông $h_{sc} = 80\text{mm}$.

Tính toán khả năng chịu cắt của một bu lông đơn:

$$P_{Rd}^{(1)} = 0,8 f_u \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \frac{1}{\gamma_v} = 0,8 \times 355 \times \left(\frac{\pi 16^2}{4} \right) \frac{1}{1,25} = 59,19 \text{ (kN)}$$

$$P_{Rd}^{(2)} = 0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \frac{1}{\gamma_v} =$$

$$= 0,29 \times 1 \times 16^2 \times \sqrt{30 \times 33000} \times 10^{-3} / 1,25^3 = 59,09$$

Hệ số giảm khả năng chịu cắt đối với sàn deck:

$$k_t = \min \left(\frac{0,7 b_o}{\sqrt{n_r} h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right); 1 \right) = \min \left(\frac{0,7 \cdot 300}{\sqrt{1} \cdot 60} \left(\frac{80}{60} - 1 \right); 1 \right) =$$

$$= \min(1,167; 1) = 1$$

Khả năng chịu cắt của một bu lông đơn:

$$P_{Rd} = \min(k_t P_{Rd}^{(1)}, k_t P_{Rd}^{(2)}) = 59,09$$

Số lượng bu lông cần thiết:

$$n_{bl} = Q / P_{Rd} = 2.165 / 59,09 = 36,6$$

Chọn khoảng cách giữa các bu lông $a = 300\text{mm}$, số lượng bu lông thực tế:

$$15.000 / 300 = 45 \text{ bulông, thỏa mãn điều kiện chịu cắt.}$$

3.5.3.4. Kiểm tra độ võng của dầm

Liên kết giữa sàn liên hợp và thanh cánh trên của dầm cần được thiết kế để chịu được lực cắt tương tác giữa thép và bê tông: $Q = F_c$.

* Giai đoạn thi công:

Tải trọng tiêu chuẩn trong giai đoạn thi công: $q = 1,28 + 7,36 = 8,64 \text{ (kN/m)}$

Giai đoạn này sàn bê tông chưa tham gia chịu lực cùng dầm, mômen quán tính của dầm được tính với cánh trên và cánh dưới của dầm. Vị trí trọng tâm của tiết diện dầm:

$$y = \frac{26.7 \times 3.87 + 34.4 \times (77.9 + 3.87)}{26.7 + 34.4} = 47.74$$

Mômen quán tính với trục trọng tâm tiết diện dầm:

$$I_{xx} = 573 + 26,7 \times 43,87^2 + 642 + 34,4 \times 34,96^2 = 92.485 \text{ (cm}^4\text{)}$$

Độ võng của dầm ở giai đoạn thi công:

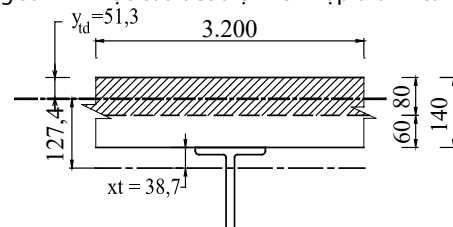
$$\delta_1 = \frac{5ql^4}{384EI_{xx}} = \frac{5 \times 8,64 \times 15.000^4}{384 \times 205.000 \times 92.485 \times 10^4} = 30,04 \text{ (mm)}$$

* Giai đoạn sàn làm việc liên hợp:

Tải trọng tiêu chuẩn thêm vào trong giai đoạn này là tính tải hoàn thiện và hoạt tải:

$$q = 2,72 + 13,92 = 16,64 \text{ (kN/m)}$$

Giai đoạn này sàn và thanh cánh trên làm việc liên hợp. Tính toán thông số hình học của tiết diện liên hợp thanh cánh trên.



Diện tích tương đương của phần bê tông quy đổi sang thép:

$$A_{td} = \frac{320 \times 8 \times 33.000}{2 \times 205.000} = 206(\text{cm}^2)$$

Vị trí trục trọng tâm của tiết diện liên hợp cánh trên

$$y_{td} = \frac{206 \times 8 / 2 + 26,7 \times (3,87 + 14 - 8 / 2)}{(206 + 26,7)} = 5,13(\text{cm})$$

Mômen quán tính của tiết diện cánh trên đối với trục trọng tâm:

$$I_{td} = \frac{320 \times 8^3 \times 33.000}{12 \times 2 \times 205.000} + 206 \times (5,13 - 4,0)^2 + 573 + 26,7 \times 12,74^2 = 6.268,6(\text{cm}^2)$$

Vị trí trục trọng tâm của tiết diện dầm khi kể đến sự làm việc liên hợp (kể đến cả thanh cánh dưới):

$$y_{th} = \frac{(206 + 26,7) \times 5,13 + 34,4 \times (77,92 + 3,87 + 14)}{(206 + 26,7 + 34,4)} = 16,8(\text{cm})$$

Mômen quán tính của tiết diện dầm đối với trục trọng tâm tiết diện (kể đến cả thanh cánh dưới):

$$I_{xx} = 6.268,6 + (206 + 26,7) \times 11,67^2 + 642 + 34,4 \times 74^2 = 226.976(\text{cm}^4)$$

Độ võng thêm trong giai đoạn liên hợp:

$$\delta_2 = \frac{5ql^4}{384EI_{xx}} = \frac{5 \times 16,64 \times 15.000^4}{384 \times 205.000 \times 226.976 \times 10^4} = 23,57(\text{mm})$$

Tổng độ võng của dầm liên hợp:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 30,04 + 23,57 = 53,61(\text{mm}) < L / 250 = 60\text{mm}$$

Kiểm tra độ võng:

$$\delta_2 = 23,57(\text{mm}) < L / 360 = 41,67\text{mm}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 53,61(\text{mm}) < L / 250 = 60\text{mm}$$

Vậy độ võng của dầm LH trong giới hạn cho phép.

3.5.3.5. Kiểm tra dao động của dầm

Tải trọng xem xét vào tính toán dao động riêng của hệ dầm LH:

$$q = \text{Tĩnh tải} + 10\% \text{ Hoạt tải} = 1,28 + 7,36 + 2,72 + 13,92 \times 0,1 = 12,751 (\text{kN/m})$$

Chuyển vị của dầm tương ứng với tải trọng trên:

$$\delta_{sw} = \frac{5ql^4}{384EI_{xx}} = \frac{5 \times 12,752 \times 15.000^4}{384 \times 205.000 \times 226.976 \times 10^4} = 18,1(\text{mm})$$

Dao động của riêng của dầm bằng:

$$\frac{18}{\sqrt{\delta_{sw}}} = \frac{18}{\sqrt{18,1}} = 4,23(\text{Hz}) > 4,0(\text{Hz})$$

Dầm đảm bảo điều kiện giao động riêng cho phép.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày tổng quan về LHT-BT, trong đó tập trung làm rõ đặc điểm của kết cấu dầm LHT-BT, ứng dụng thực tế của loại kết cấu này trong xây dựng ở Việt Nam và trên thế giới, đồng thời đánh giá các ưu, nhược điểm khi áp dụng vào kết cấu công trình. Hệ dầm LHT-BT được xem là giải pháp hiệu quả cho các công trình có nhịp lớn trên 12 m, có khả năng tạo ra không gian sử dụng rộng rãi và linh hoạt. So với dầm thép hoặc dầm thép thông thường, trọng lượng của dầm thép liên hợp giảm đáng kể nhờ sự phối hợp chịu lực hiệu quả giữa thép và bê tông, đồng thời vẫn đáp ứng các yêu cầu về khả năng chịu lực và độ võng theo hướng dẫn tính toán về kết cấu LHT-BT.

Bài báo nghiên cứu và đề xuất quy trình tính toán, đồng thời thiết lập các công thức tính toán cho kết cấu dầm LHT-BT, dựa trên tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 4:2004. Nghiên cứu tập trung vào loại dầm hình thang có hệ thanh bụng dạng tam giác. Nghiên cứu

cũng thực hiện một ví dụ tính toán cụ thể, áp dụng hệ thống công thức được thiết lập theo Eurocode 4, giúp việc tính toán trở nên rõ ràng, dễ hiểu và thuận tiện cho thực hành thiết kế. Kết quả nghiên cứu là bước tiến quan trọng trong việc từng bước hoàn thiện hệ thống tài liệu thiết kế cho loại kết cấu liên hợp hiện đại, hướng tới ứng dụng trong thiết kế nhà cao tầng tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Văn Hội (2010), Kết cấu liên hợp thép bê tông dùng trong nhà cao tầng, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [2]. TCVN 5575:2012. Kết cấu thép. Tiêu chuẩn thiết kế.
- [3]. PGS.TS. Nguyễn Xuân Huy. Tính toán kết cấu liên hợp thép - bê tông cốt thép. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2017.
- [4]. GS.TS Phạm Văn Hội (Chủ biên). Kết cấu liên hợp thép - bê tông. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2018.
- [5]. PGS.TS Vũ Quốc Anh (chủ biên), TS Hoàng Hiếu Nghĩa. Kết cấu liên hợp thép - bê tông. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2025.
- [6]. Viện khoa học Công nghệ xây dựng. Thiết kế kết cấu liên hợp thép - bê tông. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2016.
- [7]. British Standards Institution, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - London:BSI, 2004.
- [8]. BS 5950 (2010), Part 3, Design in Composite Construction, Section 3.1 Code of practice for design of simple and continuous composite beam (BS 5950-3.1-1990 + A1-2010).
- [9]. The Steel Construction Institute (2011), Design of composite Trusses.
- [10]. Eurocode 0: Basic of structural design, 2002, (EN 1990:2002).
- [11]. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, selfweight, imposed loads for buildings, 2002
- [12]. European standard, Eurocode 2 (2001), Design of concrete structures.
- [13]. Eurocode 3, Design of steel structures. Part 1.1: General structural rules (prEN 1993-1-1:2002).
- [14]. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1:2004).