Gs. ĐOÀN ĐỊNH KIẾN (Chủ biên)
PHẠM VĂN TƯ, NGUYỄN QUANG VIÊN

THIẾT KẾ KẾT CẤU THÉP NHÀ CÔNG NGHIỆP

NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Gs. ĐOÀN ĐỊNH KIẾN *(chủ biên)*
PHẠM VĂN TƯ, NGUYỄN QUANG VIÊN

THIẾT KẾ KẾT CẤU THÉP NHÀ CÔNG NGHIỆP

NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Lời nói đầu

Cuốn "Thiết kế kết cấu thép nhà công nghiệp" được xuất bản lần đầu năm 1974 ở Trường đại học xây dựng, và sau đó được in lại nhiều lần ở Trường đại học xây dựng và Trường đại học kiến trúc Hà Nội. Lần này, sách được viết lại hoàn toàn với nội dung đầy đủ hơn và sử dụng những tài liệu mới nhất ở nước ta trong lĩnh vực thiết kế kết cấu thép.

Phân công biên soạn như sau :

Giáo sư Đoàn Định Kiến chủ biên và viết các chương 1, 2.

Giảng viên chính Phạm Văn Tư viết chương 4.

Giảng viên chính Nguyễn Quang Viên viết chương 3 và phần phụ lục.

Sách sử dụng các quy phạm, tiêu chuẩn hiện hành của nước ta : Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép TCVN 5575 – 91 ; Tiêu chuẩn tải trọng TCVN 2737 – 90 ; các tiêu chuẩn thép cán nóng TCVN 1564 – 75 đến 1657 – 75. Với những quy phạm tiêu chuẩn ta không có thì dùng các quy phạm, tiêu chuẩn tương ứng mới nhất của nước ngoài.

Sách dùng cho kỹ sư xây dựng, cán bộ kỹ thuật và sinh viên ngành xây dựng.

Các tác giả mong nhận được những ý kiến đóng góp của bạn đọc.

Các tác giả

CHƯƠNG 1

CÁC BỘ PHẬN CỦA KẾT CẤU THÉP NHÀ CÔNG NGHIỆP

§1.1. Đại cương về kết cấu thép nhà công nghiệp

Kết cấu thép của nhà công nghiệp gồm những cấu kiện bằng thép tạo nên sườn chịu lực của nhà công nghiệp như: khung, cột, mái, dầm đỡ cầu trục v.v... Nhà công nghiệp hay nhà xưởng, trong đó tiến hành các quá trình sản xuất, có những đặc điểm riêng khác nhà dân dụng thông thường. Loại nhà xưởng phổ biến nhất là nhà một tầng, với các yêu cầu đặc biệt: nhịp nhà thường rộng, chiều cao lớn và có cầu trục hoạt động.

Để tạo nên kết cấu chịu lực của nhà xưởng, hiện nay ở nước ta dùng chủ yếu hai loại vật liệu: *thép* và *bê tông cốt thép*. Việc lựa chọn loại vật liệu dựa trên sự phân tích hợp lý về mặt kinh tế - kỹ thuật, căn cứ vào kích thước nhà, sức nâng của cầu trục,các yêu cầu của công nghệ sản xuất và cả vấn đề cung cấp vật tư, thời hạn xây dựng công trình. Vật liệu thép có tính năng cơ học cao, kết cấu thép nhẹ và khỏe, nên nói chung thép thích hợp nhất để làm kết cấu nhà xưởng. Nhưng thép cũng là vật liệu quý và còn hiếm; phần lớn thép xây dựng của ta là nhập ngoại. Bêtông cốt thép hoàn toàn có thể ứng dụng trong nhiều loại kết cấu chịu lực của nhà xưởng, giá rẻ hơn, chống ăn mòn tốt hơn nhưng trọng lượng nặng, thời gian và công xây dựng thường lớn hơn so với dùng kết cấu bằng thép. Việc cân nhắc dùng loại vật liệu nào cho các bộ phận của kết cấu nhà xưởng - thép, bê tông cốt thép hay hỗn hợp cả hai - là vấn đề cần giải quyết ngay từ lúc chọn phương án kết cấu.

Nói tổng quát, kết cấu thép áp dụng hợp lý cho nhà công nghiệp trong những trường hợp sau đây:

- Nhà có độ cao lớn, nhịp rộng, bước cột lớn, cầu trục nặng - do thép có tính năng cơ học cao.
- Nhà có cầu trục hoạt động liên tục (chế độ làm việc nặng hay rất nặng) - vì kết cấu thép làm việc chịu tác động lặp của tải trọng động lực được an toàn đảm bảo hơn các loại kết cấu khác.
- Nhà trên nền đất lún không đều,vì kết cấu thép vẫn chịu lực tốt trong điều kiện móng lún không đều.
- Nhà xây dựng tại những vùng xa, điều kiện vận chuyển đến khó khăn. Kết cấu thép nhẹ, dễ vận chuyển.
- Khi cần xây dựng nhanh, sớm đưa công trình vào sử dụng.

Ngoài ra, kết cấu thép còn một số ưu điểm khác khi áp dụng vào nhà công nghiệp:

- Làm việc trong điều kiện nhiệt độ cao (dưới 200^0) tốt hơn so với bê tông cốt thép.
- Ít bị hư hại do các tác động cơ học.
- Tiện liên kết các thiết bị, đường ống.
- Dễ gia cố khi tải trọng tăng hoặc khi bị hư hại.

Xét riêng về mặt tiết kiệm vật liệu, kết cấu khung toàn thép áp dụng có lợi khi nhà xưởng cao (chiều cao lòng nhà $H \geq 15$m) nhịp L rộng ($L \geq 24$m), bước cột B lớn ($B \geq 12$m), cầu trục nặng ($Q \geq 50$ t). Các trường hợp khác thì có thể dùng kết cấu khung hỗn hợp thép - bêtông, hoặc kết cấu bêtông, có thể cho giá thành vật liệu rẻ hơn. Tuy nhiên, như trên đã nói, tiêu chuẩn để lựa chọn vật liệu làm kết cấu không chỉ căn cứ vào giá tiền vật liệu, mà phải dựa trên các chỉ tiêu kinh tế đầy đủ hơn. Ở nước ta, phần lớn lượng thép dùng cho kết cấu xây dựng là được áp dụng trong các nhà xưởng

Kết cấu thép của nhà xưởng phải đáp ứng hoàn toàn mục đích sử dụng của nhà, phải an toàn, bền vững và kinh tế.

Trước hết, việc bố trí lưới cột trên mặt bằng, bố trí thiết bị nâng cẩu phải phù hợp với dây chuyền công nghệ, với vị trí các thiết bị sản xuất; khung nhà phải đủ độ cứng cho cầu trục hoạt động bình thường. Công trình phải có tuổi thọ, có độ bền lâu cần thiết phụ thuộc vào mức độ xâm thực của môi trường.

Ảnh hưởng quan trọng nhất đến sự làm việc của kết cấu nhà là các cầu trục. Tải trọng cầu trục là loại tải trọng lặp, động lực, dễ gây hư hại và hao mòn cho kết cấu. Bởi vậy, khi thiết kế, cần chú ý đến cường độ hoạt động của cầu trụ, được gọi tên là *chế độ làm việc của cầu trục*.

Cầu trục nhà xưởng làm việc theo bốn chế độ sau (không phụ thuộc sức trục):

- *Chế độ nhẹ*: thời gian mở máy ít, rất hiếm khi cẩu vật nặng hết sức tải Q. Đó là cầu trục dùng để sửa chữa, lắp đặt thiết bị.
- *Chế độ vừa*: cầu trục của dây chuyền sản xuất hàng loạt nhỏ, của xưởng cơ khí lắp ráp.
- *Chế độ nặng*: cầu trục của xưởng sản xuất hàng loạt lớn, của nhà kho, xưởng rèn dập.
- *Chế độ rất nặng*: thời gian làm việc hầu như liên tục, thường xuyên cẩu vật có trọng lượng bằng với sức tải tối đa, ví dụ của các xưởng luyện kim, cán thép.

Kết cấu của nhà xưởng có chế độ làm việc nặng và rất nặng chịu những tác động xung kích liên tục, nên khi thiết kế phải chú ý đảm bảo những yêu cầu đặc biệt về tính toán và cấu tạo quy định trong quy phạm.

Yêu cầu về kinh tế, như trên đã nói, là sao cho giá thành xây dựng thấp, bao gồm giá tiền vật liệu, giá của công chế tạo, vận chuyển, dựng lắp kết cấu. Rộng hơn, phải xét thêm hiệu quả đem lại do việc rút ngắn thời gian xây dựng, xét các phí tổn bảo dưỡng công trình trong suốt thời kỳ sử dụng. Một biện pháp quan trọng để giảm giá thành xây dựng là tiêu chuẩn hóa kết cấu, một phương phướng cơ bản của thiết kế hiện nay. Kết cấu thép nhà xưởng có thể được tiêu chuẩn hóa toàn bộ sơ đồ kết cấu hoặc tiêu chuẩn hóa từng cấu kiện. Tiêu chuẩn hóa kết cấu làm giảm số lượng cấu kiện khác nhau, có thể sản xuất hàng loạt trên những dây chuyền riêng, có thể chuyên chở và dựng lắp bằng những thiết bị chuyên dùng.

Xét đầy đủ các yếu tố kinh tế khi thiết kế kết cấu nhà xưởng là vấn đề rất phức tạp; các yếu tố kinh tế thường trái ngược nhau. Giải pháp tối ưu là giải pháp đáp ứng tốt nhất mọi yếu tố đó, trên cơ sở so sánh các phương án mà chọn ra

§1.2. Khung ngang

Kết cấu chịu lực của nhà xưởng gồm có các khung ngang cơ bản, liên hệ với nhau bằng các kết cấu dọc như hệ giằng, dầm cầu trục, kết cấu của mái, kết cấu đỡ tường. Khung ngang gồm có cột và dàn (ít khi dùng dầm đặc vì trọng lượng dầm nặng và không thích hợp với nhịp lớn). Việc chọn giải pháp khung ngang bao gồm trước hết là định sơ đồ khung, xác định các kích thước cơ bản của khung và bố trí khung trên mặt bằng.

1. Sơ đồ khung ngang

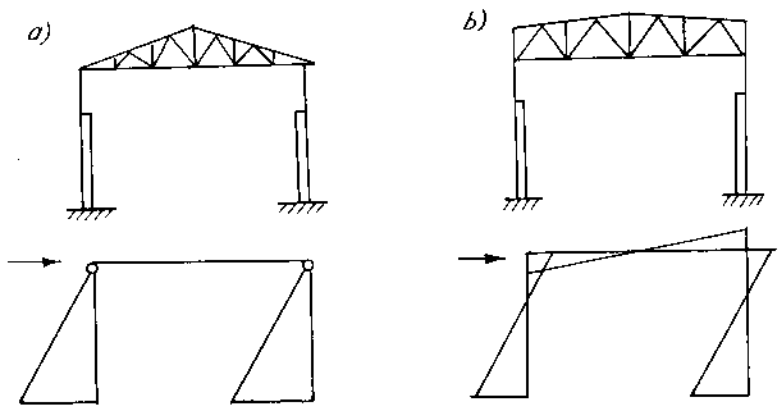
Khung ngang có một nhịp hoặc nhiều nhịp, phù hợp với mặt cắt ngang của nhà.

Liên kết dàn và cột có thể là khớp hoặc cứng. Liên kết khớp (h.1.1a) dùng phổ biến vì chế tạo, lắp ráp thuận tiện. Khung liên kết khớp có độ cứng thấp, nên thích hợp với các nhà xưởng cầu trục nhẹ, chiều cao nhỏ. Khung nhiều nhịp hay dùng liên kết khớp vì bản thân độ cứng của khung đã lớn, ngoài ra, khó giải quyết cấu tạo của các nút cứng ở các cột giữa của khung. Khung hỗn hợp với cột bêtông cốt thép thì luôn luôn dùng liên

kết khớp, với dàn đặt tự do lên đỉnh cột.

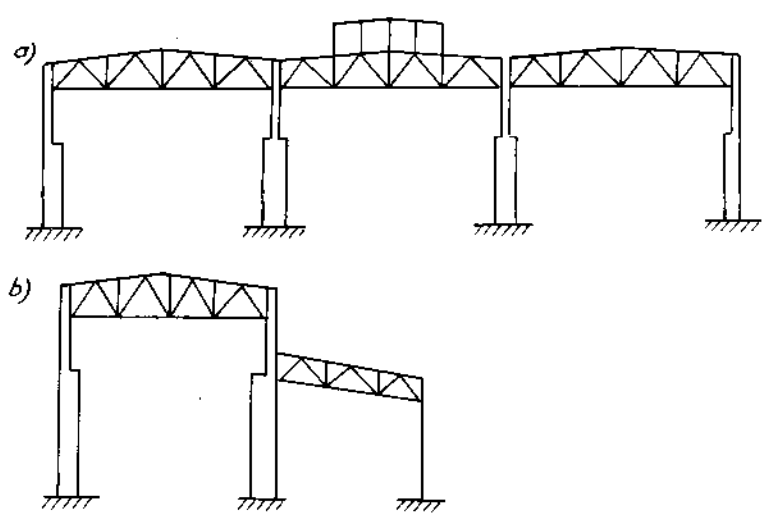
Liên kết cứng tạo độ cứng lớn cho khung, được áp dụng khi yêu cầu độ cứng cao như đối với xưởng một nhịp chịu tải trọng cầu trục lớn hoặc khi chế độ làm việc nặng (h. 1.1b).

Dàn của khung ngang có dạng tam giác, hoặc hình thang (hai mái dốc), hoặc cánh song song. Dàn tam giác chỉ áp dụng cho khung khớp; hai loại sau dùng được cho cả khung khớp và khung cứng (xem các hình 1.1, 1.2). Cột của nhà có cầu trục thường là cột giật bậc, tiết diện thay đổi từ vai đỡ cầu trục. Khi cầu trục nhẹ (Q < 15 - 20 t), nên dùng cột tiết diện không đổi, có cấu tạo đơn giản hơn.



Hình 1.1. Sơ đồ khung ngang

Khung nhiều nhịp của nhà xưởng có thể có các hình dạng khác nhau tùy theo chiều cao mỗi nhịp và cách lấy ánh sáng bên trên, cách thoát nước mái. Phổ biến nhất và có cấu tạo thuận tiện nhất là khung nhiều nhịp có cùng độ cao (h. 1.2a): các cấu kiện dàn cột, cũng như các nút liên kết có thể dễ dàng được thống nhất hóa. Khi chiều cao nhà ở hai nhịp lân cận chênh nhau nhiều ví dụ từ 1,8m trở lên, do yêu cầu bố trí đường cầu trục hoặc để lấy ánh sáng từ phía bên vào thì dùng khung có chiều cao khác nhau (h.1.2b). Dàn ở các gian biên có thể có hai mái dốc (thoát nước bên trong) hoặc có một mái dốc (thoát nước bên ngoài).



Hình 1.2. Khung nhiều nhịp

2. Kích thước chính của khung ngang

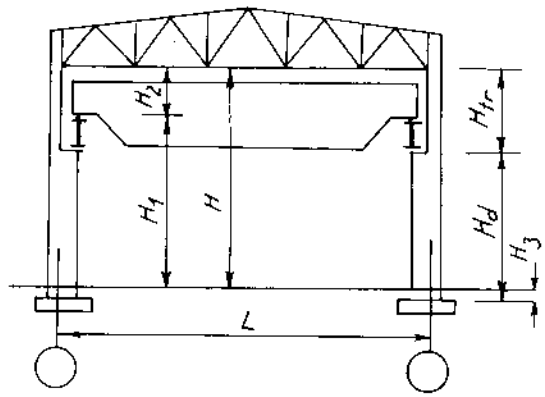
Khung ngang có các kích thước chính theo phương nằm ngang liên quan đến bề rộng nhà (nhịp khung) và kích thước theo phương thẳng đứng, liên quan đến chiều cao có ích của nhà (h.1.3).

a) Kích thước theo phương nằm ngang

Kích thước cơ bản là nhịp khung L, (khoảng cách giữa các trục định vị dọc). Nhịp L có môđun là 3m khi nhịp dưới 18m và môđun 6m khi nhịp lớn hơn.

Ở cột biên, trục định vị cách mép ngoài cột một khoảng a bằng 250 hoặc 500 mm, hoặc trùng với mép ngoài cột ($a = 0$).

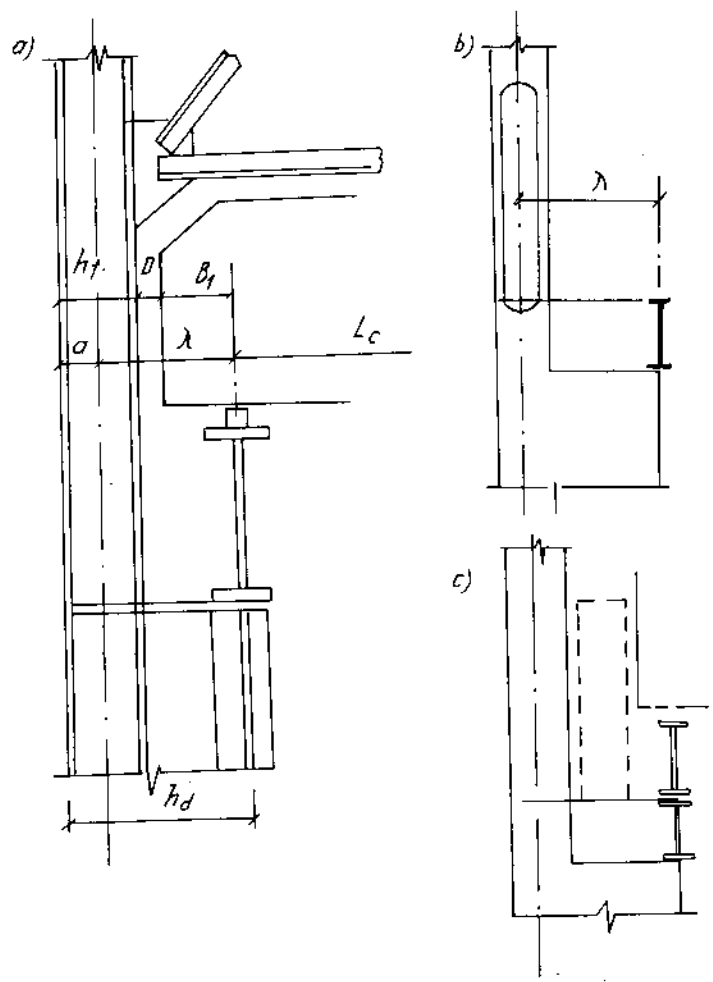
Trường hợp $a = 0$ áp dụng cho nhà xưởng không cầu trục hoặc cầu trục nhẹ, sức trục từ 30t trở xuống.



Hình 1.3. Kích thước chính của khung một nhịp

Khoảng cách $a = 500$ mm áp dụng cho nhà có cầu trục $Q > 75$t, hoặc cầu trục chế độ làm việc nặng, cần tổ chức lối cho người đi trên mặt dầm cầu trục (h.1.4). Các trường hợp còn lại thì $a = 250$ mm.

Bề rộng phần trên của cột giật bậc h_t, do yêu cầu độ cứng, lấy vào khoảng 1/10 đến 1/12 chiều cao phần cột trên H_t, vào khoảng 400 đến 1000 mm. Bề rộng 1000 mm áp dụng khi cần trổ lỗ cho người đi qua bụng cột. Lỗ có kích thước 1800 x 400 mm.



Hình 1.4. Liên hệ giữa các kích thước ngang:
a) Trường hợp chung; b) Có lối đi xuyên qua cột; c) Lối đi bên cạnh cột.

Đối với cột giữa của khung nhiều nhịp, trục định vị trùng với trục cột.

Để cho cầu trục khi chuyển động không chạm vào cột, khoảng cách λ từ trục ray đến trục định vị phải đảm bảo đủ lớn

$\lambda \geq B_1 + (h_t - a) + D$,

trong đó B_1 - phần đầu của cầu trục bên ngoài ray, lấy theo catalô cầu trục, khoảng 200~500mm; D- khe hở an toàn giữa cầu trục và mặt trong cột, lấy bằng 60 - 75mm.

Nhịp của cầu trục L_c là khoảng cách giữa hai tim ray

$$L_c = L - 2\lambda.$$

L_c có môđun 0,5m nên λ phải lấy chẵn 250mm. Do đó, λ có các trị số:

$\lambda = 750$mm khi nhà có cầu trục $Q \leq 75$t;

$\lambda = 1000$mm khi cầu trục lớn hơn 75t, hoặc khi có lối đi xuyên qua cột; $\lambda = 1250$mm khi cầu trục rất nặng, hoặc khi có lối

đi bên ngoài cột.

Bề rộng phần cột dưới h_d, do điều kiện độ cứng, không lấy nhỏ hơn (1/15 - 1/20) H, H là chiều cao toàn cột, xem h.1.3. Trục của nhánh cột đỡ dầm cầu trục thường trùng với trục dầm cầu trục, khi đó, bề rộng phần cột dưới là $h_d = a + \lambda$, tức là bằng 750, 1000, 1250... mm. Đối với khung dùng cột tiết diện không đổi, bề rộng cột không được nhỏ hơn 1/25 H.

b) Kích thước theo phương thẳng đứng

Kích thước cơ bản là khoảng cách nhỏ nhất H_1 từ mặt nền đến mặt ray cầu trục; H_1 được cho trong nhiệm vụ thiết kế, căn cứ vào công nghệ sản xuất.

Kích thước H_2 từ mặt ray đến đáy kết cấu chịu lực (cánh dưới của dàn) được quyết định bởi gabarit của cầu trục:

$$H_2 = (H_c + 100) + f$$

trong đó H_c - kích thước gabarit của cầu trục, từ mặt ray đến điểm cao nhất của xe con cầu trục; 100 - khe hở an toàn giữa xe con và kết cấu; f- khe hở phụ, xét độ võng của kết cấu, việc bố trí thanh giằng, lấy bằng 200 - 400mm.

Kích thước H_2 lấy chẵn 200mm.

Chiều cao của xưởng, từ nền nhà đến đáy của vì kèo:

$$H = H_1 + H_2$$

Kích thước H, theo Quy phạm QP XD 57 - 73, lấy là bội số của 1,2m khi nhỏ dưới 10,8m,và của 1,8m khi lớn hơn.

Kích thước thực của cột trên H_t từ vai đỡ dầm cầu trục đến dạ vì kèo:

$$H_t = H_2 + H_{dct} + H_r,$$

trong đó H_{dct} - chiều cao dầm cầu trục, lấy theo thiết kế điển hình hoặc cho sơ bộ khoảng (1/8 - 1/10) nhịp dầm (bước cột); H_r - chiều cao ray và đệm: sơ bộ lấy là 200mm.

Chiều cao phần dưới cột tính từ bản đế chân cột (từ mặt móng) đến chỗ đổi tiết diện

$$H_d = H - H_1 + H_3,$$

H_3 = 600 - 1000 mm, phần cột chôn bên dưới cốt mặt nền.

Chiều cao cột ở đầu dàn bằng chiều cao dàn tại gối tựa. Dàn hình thang thường lấy chiều cao phủ bì ở gối tựa là 2250mm, dàn cánh song song là 3150mm

Đối với khung nhiều nhịp cùng độ cao, kích thước đứng và ngang của cột biên và cả cột giữa lấy theo như vừa trình bày, bề rộng phần dưới cột giữa bằng 2λ, dùng λ của nhịp có trị số lớn hơn. Khung nhiều nhịp có chênh độ cao thì kích thước đứng của từng nhịp H, H_1, H_2; H', H'_1, H'_2 xác định riêng biệt như cách trên. Bề rộng phần dưới cột giữa là $h_d = \lambda + \lambda'$, cột không đối xứng với trục định vị.

3. Bố trí khung ngang

Khung ngang bố trí theo phương ngang nhà, các cột khung tạo nên lưới cột. Bước khung (khoảng cách cột dọc nhà) có môđun 6m. Bước cột biên thường là 6m để dễ giải quyết kết cấu bao che; bước cột giữa có thể là 6m, hoặc 12m, thậm chí lớn hơn. Trường hợp trốn cột giữa, thì ngoài các khung hoàn toàn gồm đủ các cột, còn có các khung không hoàn toàn: dàn ở hàng cột giữa đặt lên dàn đỡ kèo (h.1.5b).

Khi nhà có kích thước mặt bằng quá lớn, để giảm ứng suất do thay đổi nhiệt độ, nhà được chia cắt bởi những khe nhiệt độ thành những khối riêng biệt, gọi là khối nhiệt độ. Khoảng cách giữa các khe nhiệt độ được quy định như sau: với khung toàn thép, khoảng cách dọc nhà là 200m, khoảng cách ngang nhà là 120m. Với nhà khung hỗn hợp thì các kích thước trên chỉ là 45m.

Trục của khe nhiệt đô ngang lấy trùng vào trục định vị. Cột tại chỗ khe nhiệt độ cũng như tại đầu hồi nhà phải dịch về phía trong 500mm (h.1.5 a,b), với mục đích để cho kết

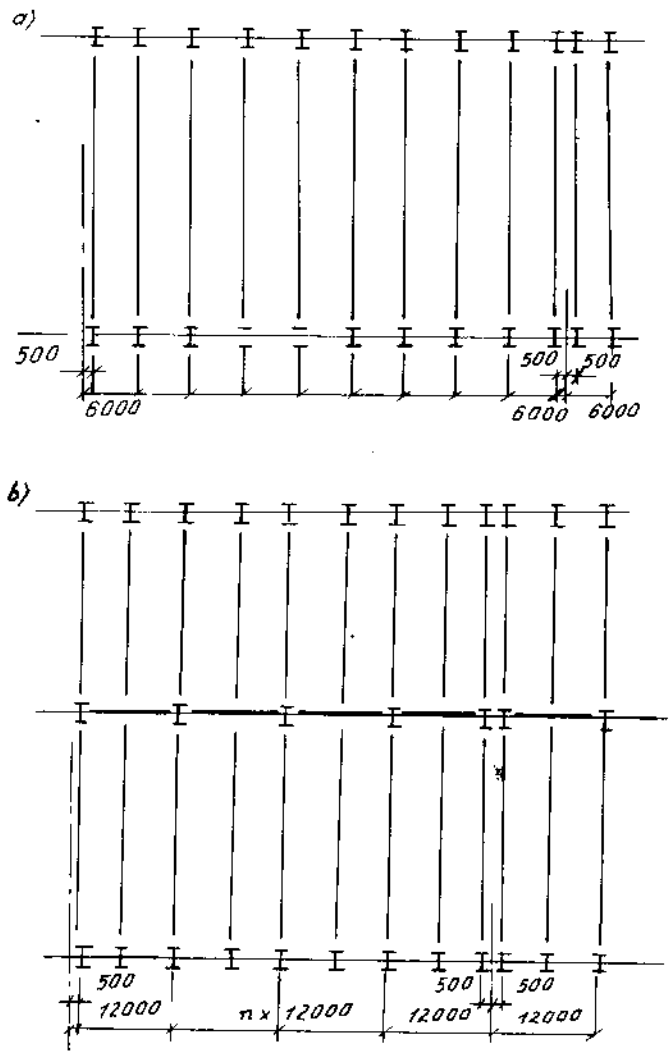
cấu bao che giữ được kích thước thống nhất.

§1.3. Hệ giằng

Hệ giằng là một bộ phận trọng yếu của kết cấu nhà, có các tác dụng:

- Bảo đảm sự bất biến hình và độ cứng không gian của kết cấu chịu lực của nhà.
- Chịu các tải trọng tác dụng theo phương dọc nhà, vuông góc với mặt phẳng khung như gió lên tường hồi, lực hãm của cầu trục.
- Bảo đảm ổn định cho các cấu kiện chịu nén của kết cấu: thanh dàn, cột v.v...
- Làm cho dựng lắp an toàn, thuận tiện.

Hệ thống giằng của nhà xưởng được chia thành hai nhóm: *giằng mái* và *giằng cột*.



Hình 1.5. Bố trí khung và khe nhiệt độ:
a) Trường hợp chỉ có khung cơ bản; b) Trường hợp có khung không hoàn toàn và dàn đỡ kèo

1. Hệ giằng ở mái

Hệ giằng ở mái bao gồm các thanh giằng bố trí trong phạm vi từ cánh dưới dàn trở lên. Chúng được bố trí nằm trong các mặt phẳng cánh trên dàn, mặt phẳng cánh dưới dàn và mặt phẳng đứng giữa các dàn (h.1.6).

a) Giằng trong mặt phẳng cánh trên

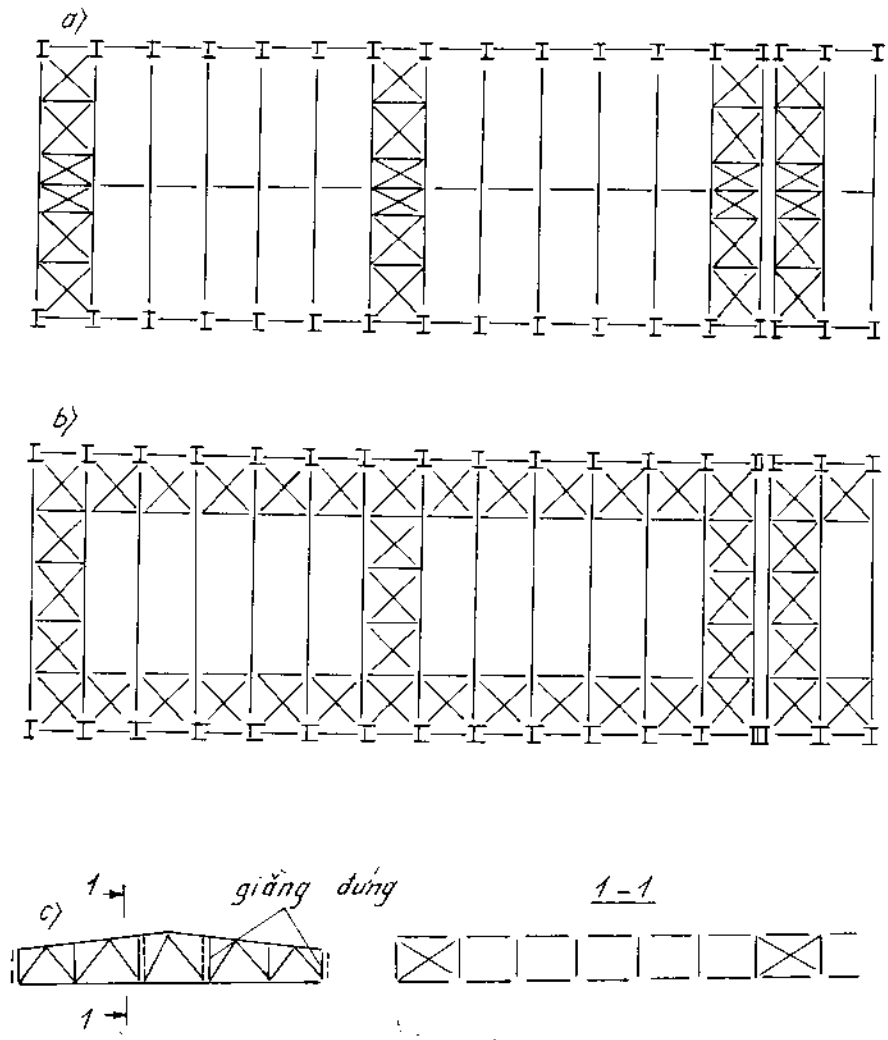
Giằng trong mặt phẳng cánh trên gồm các thanh chéo chữ thập trong mặt phẳng cánh trên và các thanh chống dọc nhà. Tác dụng chính của chúng là bảo đảm ổn định cho cánh trên chịu nén của dàn, tạo nên những điểm cố kết không chuyển vị ra ngoài mặt phẳng dàn. Các thanh giằng chữ thập nên bố trí ở hai đầu khối nhiệt độ. Khi khối nhiệt độ quá dài thì bố trí thêm ở quãng giữa khối, sao cho khoảng cách giữa chúng không quá 50 - 60m. Các dàn còn lại được liên kết vào các khối cứng bằng xà gồ hay sườn của tấm mái.

Thanh chống dọc nhà dùng để cố định những nút quan trọng của nhà: nút đỉnh nóc (bắt buộc), nút đầu dàn, nút dưới chân cửa trời. Những thanh chống dọc này cần thiết để bảo đảm cho độ mảnh của cánh trên trong quá trình dựng lắp không vượt quá 220.

b) Giằng trong mặt phẳng cánh dưới

Giằng trong mặt phẳng cánh dưới được đặt tại các vị trí có giằng cánh trên, nghĩa là

ở hai đầu của khối nhiệt độ và ở khoảng giữa, cách 50 - 60m. Nó cùng với giằng cánh trên tạo nên các khối cứng không gian bất biến hình. Hệ giằng cánh dưới tại đầu hồi nhà dùng làm gối tựa cho cột hồi, chịu tải trọng gió thổi lên tường hồi, nên còn gọi là dàn gió.



Hình 1.6. Hệ giằng mái:
a) giằng cánh trên; b) giằng cánh dưới; c) giằng đứng

Trong những nhà xưởng có cầu trục $Q \geq 10t$, hoặc có cầu trục chế độ làm việc nặng, để tăng độ cứng cho nhà, cần có thêm hệ giằng cánh dưới theo phương dọc nhà. Hệ giằng này bảo đảm sự làm việc cùng nhau của các khung, truyền tải trọng cục bộ tác dụng lên một khung sang các khung lân cận. Bề rộng của hệ giằng thường lấy bằng chiều dài của khoang đầu tiên của cánh dưới dàn. Trong nhà xưởng nhiều nhịp, hệ giằng dọc được bố trí dọc hai hàng cột biên và tại một số hàng cột giữa, cách nhau 60-90m theo phương bề rộng nhà.

c) Hệ giằng đứng

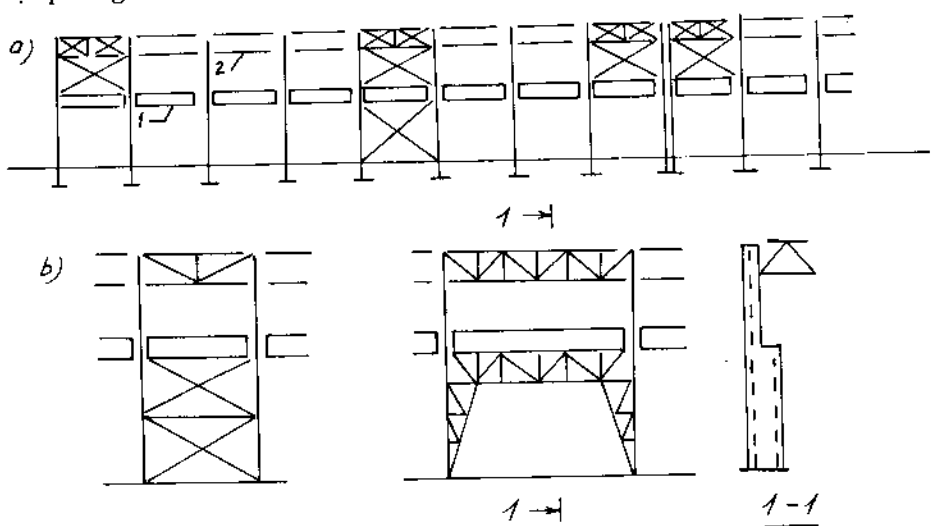
Hệ giằng đứng đặt trong mặt phẳng các thanh đứng, có tác dụng cùng với các giằng nằm tạo nên khối cứng bất biến hình; giữ vị trí và cố định cho dàn vì kèo khi dựng lắp. Thông thường hệ giằng đứng được bố trí tại các thanh đứng đầu dàn, thanh đứng giữa dàn (hoặc dưới chân cửa trời), cách nhau 12 - 15m theo phương ngang nhà. Theo

phương dọc nhà, chúng được đặt tại những gian có giằng nằm ở cánh trên và cánh dưới.

Kết cấu chịu lực của cửa trời cũng có các hệ giằng cánh trên, hệ giằng đứng như đối với dàn mái.

2. Hệ giằng ở cột

Hệ giằng ở cột bảo đảm sự bất biến hình học và độ cứng của toàn nhà theo phương dọc, chịu các tải trọng tác dụng dọc nhà và bảo đảm ổn định của cột. Trong mỗi trục dọc một khối nhiệt độ cần có ít nhất một tấm cứng; các cột khác tựa vào tấm cứng bằng các thanh chống dọc. Tấm cứng gồm có hai cột, dầm cầu trục, các thanh ngang và các thanh chéo chữ thập. Các thanh giằng cột bố trí suốt chiều cao của hai cột đỉa cứng: trong phạm vi đầu dàn - chính là hệ giằng đứng của mái; lớp trên từ mặt dầm cầu trục đến nút gối tựa dưới của dàn kèo; lớp dưới, bên dưới dầm cầu trục cho đến chân cột. Các thanh giằng lớp trên đặt trong mặt phẳng trục cột; các thanh giằng lớp dưới đặt trong hai mặt phẳng của hai nhánh (h.1.7a.b).



Hình 1.7. Bố trí giằng cột:
a) bố trí, b) sơ đồ tấm cứng;
1- dầm cầu trục; 2- thanh chống

Tấm cứng phải đặt vào khoảng giữa chiều dài của khối nhiệt độ để không cản trở biến dạng nhiệt độ của các kết cấu dọc. Nếu khối nhiệt độ quá dài , một tấm cứng không đủ để giữ ổn định cho toàn bộ các khung thì dùng hai tấm cứng, sao cho khoảng cách từ đầu khối đến trục tấm cứng không quá 75m và khoảng cách giữa trục hai tấm cứng không lớn quá 50m. Sơ đồ các thanh của tấm cứng có nhiều dạng: chéo chữ thập một tầng - đơn giản nhất - hoặc hai tầng khi cột cao; kiểu khung cổng (h.1.7.b) khi bước cột 12m hoặc khi cần làm lối đi thông qua.

Trong các gian đầu và gian cuối của khối nhiệt độ, cũng thường bố trí giằng lớp trên. Giằng này tăng độ cứng dọc chung, truyền tải trọng gió từ dàn gió đến đỉa cứng. Các thanh giằng lớp trên này tương đối mảnh nên có thể bố trí ở hai đầu khối mà không gây ứng suất nhiệt độ đáng kể.

CHƯƠNG 2

TÍNH TOÁN KHUNG NGANG

§2.1. Tải trọng tác dụng lên khung ngang

Các tải trọng tác dụng lên khung ngang là: tải trọng thường xuyên do trọng lượng kết cấu chịu lực và kết cấu bao che; tải trọng tạm thời do cầu trục; tải trọng gió; các tải trọng đặc biệt khác như động đất, nổ v.v... Để tiện cho việc tính khung, dưới đây sẽ xét tải trọng tác dụng lên dàn, tải trọng tác dụng lên cột và tải trọng gió.

1. Tải trọng tác dụng lên dàn

Tải trọng tác dụng lên dàn gồm trọng lượng của mái, của cửa trời, của trọng lượng bản thân kết cấu, ngoài ra là tải trọng tạm thời trên mái khi sử dụng. Các tải trọng này được tính ra N trên m^2 mặt bằng nhà, sau đó qui về phân bố đều trên dàn.

Tải trọng thường xuyên gồm các loại

a) Trọng lượng mái:

Dựa vào cấu tạo cụ thể của mái để tính trọng lượng từng lớp (đơn vị N/m^2 mặt dốc mái); đổi ra N/m^2 mặt bằng bằng cách chia cho $\cos\alpha$, α là góc dốc. Có thể tham khảo những số liệu sau đây:

Tấm pa nen cỡ lớn	150	daN/m^2 mái
Bêtông chống thấm	2500	daN/m^3
Vữa trát, lót	1800	daN/m^3
Gạch lá nem	2000	daN/m^3
Lớp cách nước 2 giấy 3 dầu	20	daN/m^2 mái
Bê tông nhẹ cách nhiệt	500–1000	daN/m^3

Chú ý là hệ số vượt tải của trọng lượng lớp cách nước, cách nhiệt, lớp lót, đều là 1,2.

Tính trọng lượng mái nên làm dưới dạng bảng, ví dụ như sau

Đổi ra phân bố trên mặt bằng với độ dốc 1 : 8, $\cos\alpha = 0{,}9922$

Tải trọng do các lớp mái	Tải trọng tiêu chuẩn g_m^c, daN/m^2 mái	Hệ số vượt tải	Tải trọng tính toán g_m, daN/m^2 mái
Tấm mái 1,5 x 6m	150	1,1	165
Lớp cách nhiệt dày 12cm bằng bêtông xỉ g = 500kG/m3	60	1,2	72
Lớp xi măng lót 1,5 cm	27	1,2	32
Lớp cách nước 2 giấy 3 dầu	20	1,2	24
Hai lớp gạch lá nem 4cm	80	1,1	88
Cộng	337		381

$$g_m^c = \frac{337}{0,9922} = 340 \text{ daN/m}^2 \text{ mặt bằng;}$$

$$g_m = \frac{381}{0,9922} = 384 \text{ daN/m}^2 \text{ mặt bằng.}$$

b) Trọng lượng bản thân dàn và hệ giằng

Theo công thức kinh nghiệm

$$g_d^c = 1,2\,\alpha_d\,L, \text{ daN/m}^2 \text{ mặt bằng,} \qquad (2.1)$$

trong đó: L - nhịp dàn, m; α_d - hệ số trọng lượng bản thân dàn, lấy bằng 0,6 đến 0,9 đối với dàn nhịp 24 ~ 36m; 1,2 - hệ số kể đến trọng lượng các thanh giằng.

c) Trọng lượng kết cấu cửa trời

Theo công thức kinh nghiệm $g_{ct}^c = \alpha_{ct} \cdot l_{ct}$ daN/m^2 mặt bằng nhà,
trong đó $\alpha_{ct} = 0,5$; l_{ct} - nhịp của cửa trời, m.

Có thể dùng trị số 12 - 18 daN/m^2 cửa trời, khi muốn tính chính xác hơn tải trọng nút dàn

d) Trọng lượng cánh cửa trời và bậu cửa trời

Các tải trọng này tập trung ở chân cửa trời. Để tiện tính khung, cũng nên quy đổi thành phân bố trên mặt bằng nhà. Trọng lượng bậu cửa bằng 100 - 150 daN/m bậu; trọng lượng cửa kính và khung cánh cửa bằng 35 - 40 daN/m^2 cánh cửa.

Các tải trong ở điểm b, c, d đều có hệ số vượt tải 1,1

e) Tải trọng tạm thời

Tải trọng tạm thời do sử dụng trên mái lấy theo nhiệm vụ thiết kế. Khi không có yêu cầu đặc biệt, thì lấy theo TCVN 2737 - 90, ví dụ với mái bằng không có người lên thì $p' = 75$ daN/m^2 mặt bằng, với hệ số vượt tải 1,3.

Để tính tải trọng phân bố đều trên dàn, chỉ việc nhân tổng các tải trọng phân bố trên mặt bằng với bước khung B, m.

Tải trọng thường xuyên

$$g \text{ (daN/m)} = B \cdot \sum g_i \text{ (daN/m}^2\text{)}$$

Tải trọng tạm thời

$$p \text{ (daN/m)} = B.p' \text{ (daN/m}^2\text{)}$$

2. Tải trọng tác dụng lên cột

a) Do phản lực của dàn

$$A = \frac{gL}{2} \text{ do tải trọng thường xuyên;}$$

$$A' = \frac{pL}{2} \text{ do tải trọng tạm thời.}$$

(Đối với cột giữa thì phải xét dàn ở cả hai bên)

Trường hợp bước cột 12m và có dàn đỡ kèo thì phải kể thêm trọng lượng dàn đỡ kèo và phản lực của dàn trung gian.

Trọng lượng dàn đỡ kèo tính theo công thức kinh nghiệm:

$$G_{dd} = \alpha_{dd}\, l_{dd}^2, \text{ daN,} \qquad (2.3)$$

trong đó l_{dd} - nhịp dàn đỡ kèo (12m); $\alpha_{dd} = 4,4$ khi lực tập trung tiêu chuẩn lên dàn đỡ

là 100 kN; α_{dd} = 10,4 khi lực là 400 kN; các trường hợp khác thì nội suy.

Lực tập trung tiêu chuẩn lên dàn đỡ chính là tổng các phản lực của dàn trung gian chia cho hệ số vượt tải; phản lực của dàn trung gian A_{tg}, A'_{tg} có thể coi bằng phản lực của dàn chính A và A'.

Như vậy, lực đứng do mái truyền lên cột, ví dụ cột biên sẽ là

do tải trọng thường xuyên: $V = A + A_{tg} + G_{dd}$,

do tải trọng tạm thời $V' = A' + A'_{tg}$.

Lực đứng do mái truyền xuống cột V, V' gần đúng coi như đặt vào trục cột trên.

b) Do trọng lượng dầm cầu trục

Công thức kinh nghiệm:

$$G_{dct} = \alpha_{dct} L_{dct}^2, \text{ (daN)} \qquad (2.4)$$

trong đó l_{dct} - nhịp dầm cầu trục, m; α_{dct} - hệ số trọng lượng bản thân dầm cầu trục,

α_{dct} = 24 - 37 với cầu trục sức trục trung bình ($Q \leq 75$t); α_{dct} = 35 - 47 với cầu trục nặng hơn.

G_{dct} đặt tại chỗ vai đỡ dầm cầu trục, là tải trọng thường xuyên. Trị số của nó không lớn so với áp lực của bánh xe cầu trục, nên đôi lúc được nhập luôn vào trị số áp lực bánh xe, coi như là tải trọng tạm thời.

c) Do áp lực đứng của bánh xe cầu trục

Áp lực bánh xe truyền qua dầm cầu trục thành lực tập trung vào vai cột. Tải trọng đứng của cầu trục lên cột được xác định do tác dụng của chỉ hai cầu trục hoạt động trong một nhịp, bất kể số cầu trục thực tế trong nhịp đó. Nhà nhiều nhịp thì cột giữa được tính với không quá bốn cầu trục (mỗi nhịp có hai cầu trục).

Áp lực lớn nhất của một bánh xe cầu trục lên ray xảy ra khi xe con mang vật nặng ở vào vị trí sát nhất với cột phía đó. Trị số tiêu chuẩn P^c_{max} được cho trong catalô cầu trục (xem bảng VI.1,2 phụ lục). Khi đó, phía ray bên kia có áp lực nhỏ nhất

$$P^c_{min} = \frac{Q + G}{n_o} - P^c_{max} \qquad (2.5)$$

trong đó Q - trọng lượng vật cẩu nặng nhất (sức trục của cầu trục, tính theo đơn vị lực daN hoặc kN); G - trọng lượng toàn bộ cầu trục; n_o - số bánh xe ở một bên ray (hai hoặc bốn).

Áp lực lớn nhất D_{max} của cầu trục lên cột do các lực P^c_{max}, được xác định theo đường ảnh hưởng của phản lực tựa của hai dầm cầu trục ở hai bên cột. Ở đây, phải kể thêm hệ số vượt tải n = 1,2 và hệ số tổ hợp n_c (xét xác suất xảy ra đồng thời tải trọng tối đa của nhiều cầu trục); n_c = 0,85 khi xét tải trọng do hai cầu trục chế độ nhẹ và vừa; n_c = 0,9 khi chế độ nặng và rất nặng; với bốn cầu trục thì n_c tương ứng bằng 0,7 và 0,8.

Với vị trí bất lợi nhất của các bánh xe trên dầm (h.2.1):

$$D_{max} = n n_c \sum P^c_{max} y,$$

y là tung độ của đường ảnh hưởng.

Tương ứng ở phía bên kia có áp lực D_{min}

$$D_{min} = n n_c \sum P^c_{min} y.$$

D_{max}, D_{min} (và cả G_{dct}) đặt vào trục nhánh cầu trục, nên lệch tâm so với trục cột dưới một khoảng z xấp xỉ bằng $b_d/2$. Mômen lệch tâm tại vai cột:

$$M_{max} = D_{max}.e; \quad M_{min} = D_{min}.e$$

Trong D_{max}, D_{min}, có thể quy ước bao gồm cả G_{dct}.

d) Do lực hãm của xe con

Khi xe con hãm, phát sinh lực quán tính tác dụng ngang nhà theo phương chuyển động. Lực hãm của xe con, qua các bánh xe cầu trục, truyền lên dầm hãm và vào cột.

Lực ngang tiêu chuẩn của một bánh xe cầu trục do hãm:

$$T_1^c = \frac{0,05(Q + G_{xc})}{n_o}, \qquad (2.6)$$

trong đó: G_{xc} - trọng lượng xe con; n_o - số bánh xe ở một bên cầu trục.

Các lực ngang T_1^c truyền lên cột thành lực T đặt ở cao trình dầm hãm; giá trị T cũng xác định bằng cách xếp bánh xe trên đường ảnh hưởng như khi xác định D_{max}, D_{min}:

$$T = nn_c \sum T_1^c y.$$

Giá trị T được tính với tác dụng của nhiều nhất là hai cầu trục, nằm trong một nhịp hoặc trong hai nhịp khác nhau.

Ví dụ 2.1. Xác định D_{max}, D_{min} và T do hai cầu trục sức nâng 125t, với nhịp nhà 36m, nhịp dầm cầu trục 12m, chế độ vừa.

Theo bảng cầu trục ở phụ lục:

P^c_{1max} = 550 kN; P^c_{2max} = 580 kN; trọng lượng cầu trục G = 1750 kN, trọng lượng xe con G_{xc} = 430 kN; bề rộng cầu trục B_{ct} = 9350mm, khoảng cách giữa các bánh xe 800 + 4600 + 800, số bánh xe ở một bên n_o = 4.

Đặt các bánh xe lên đường ảnh hưởng của phản lực tựa như hình 2.1, tính được:

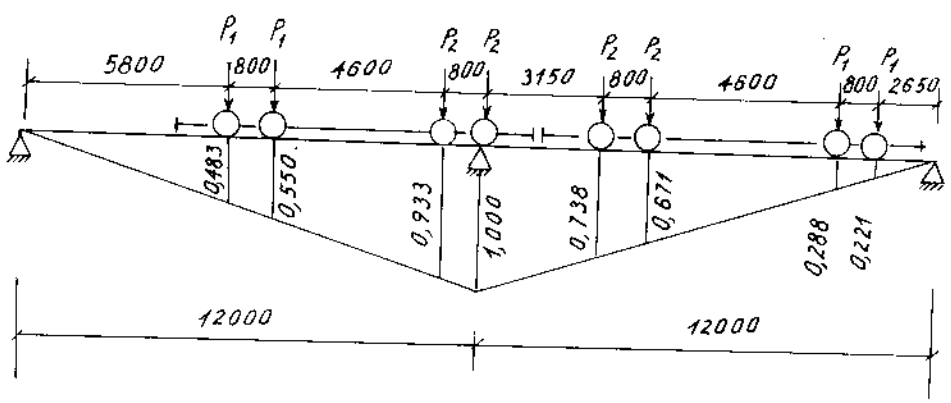
$$D_{max} = nn_c (P^c_{1max} \sum y + P^c_{2max} \sum y) =$$
$$= 1,2.0,85 [550 (0,483 + 0,55 + 0,288 + 0,221) +$$
$$+ 580 (0,933 + 1 + 0,738 + 0,671)] = 2842 \text{ kN}$$

Áp lực nhỏ nhất của bánh xe

$$P^c_{1min} = \frac{Q + G}{n_o} - P^c_{1max} = \frac{1250 + 1750}{4} - 550 = 200 \text{ kN};$$

$$P^c_{2min} = \frac{1250 + 1750}{4} - 580 = 170 \text{ kN}.$$

Vậy: D_{min} = 1,2.0,85 (200.1,542 + 170.3,342) = 894 kN.



Hình 2.1. Hình cho ví dụ 2.1

Lực hãm ngang của một bánh xe

$$T_1^c = 0,05 (Q + G_{xc}) = \frac{0,05 (1250 + 430)}{4} = 21 \text{ kN}$$

Vậy $T = n\, n_c \sum T_i^c y = 1,2 \,.\, 0,85 \,.\, 21(1,542 + 3,342) = 105$ kN.

(Trong ví dụ này, sức cẩu của cầu trục 125t tính chuyển ra trọng lượng vật cẩu gần đúng bằng 1250 kN).

Tác dụng lên cột còn có các tải trọng khác:

- Trọng lượng kết cấu bao che, tường, cửa... mà cách xác định tùy thuộc cấu tạo của chúng và cách liên kết với cột.
- Trọng lượng bản thân cột, có thể xác định gần đúng trước khi tính toán tiết diện cột (xem chương 3).

3. Tải trọng gió tác dụng lên khung

Tải trọng gió tác dụng lên khung gồm:

- Gió thổi lên mặt tường dọc, được chuyển về thành phân bố trên cột khung.
- Gió trong phạm vi mái, từ cánh dưới dàn vì kèo trở lên, được chuyển thành lực tập trung nằm ngang đặt ở cao trình cánh dưới vì kèo.

Tiêu chuẩn TCVN 2737 - 90 qui định áp lực tốc độ gió q_0 (daN/m^2) cho bốn vùng khác nhau của nước ta; trị số q_0 coi như không đổi trong khoảng độ cao dưới 10m, với độ cao lớn hơn thì nhân thêm với hệ số độ cao k (bảng V. 4. Phụ lục V).

Tải trọng gió phân bố lên cột được tính bằng công thức:

phía đón gió: $q = n\, q_0\, k\, c\, B$, daN/m;

phía trái gió: $q' = n\, q_0\, k\, c'\, B$, daN/m,

trong đó: n - hệ số vượt tải bằng 1,3; B - bước khung, m; c, c' - hệ số khí động phía đón gió và trái gió lấy theo bảng V.5 phụ lục.

Như vậy tải trọng q, q' là phân bố đều trong phạm vi độ cao dưới 10m, phân bố tuyến tính trong mỗi khoảng độ cao 10m (h.2.3).

Để tiện tính toán, có thể đổi tải trọng này thành phân bố đều suốt chiều cao cột, bằng cách nhân trị số q ở độ cao dưới 10m với hệ số α như sau: $\alpha = 1$ khi chiều cao cột $H < 10$m; $\alpha = 1,04$ khi $H < 15$m; $\alpha = 1,1$ khi $H \le 20$m

Trong phạm vi mái, hệ số k có thể lấy không đổi, là trung bình cộng của giá trị ứng với độ cao đáy vì kèo và giá trị ở độ cao điểm cao nhất của mái. Lực tập trung nằm ngang W của gió mái tính bằng công thức

$$W = n\, q_0\, k\, B \sum c_i h_i,$$

h_i - là chiều cao của từng đoạn có các hệ số khí động c_i (h.2.2.a)

Trường hợp giữa các cột khung có các cột sườn tường thì tải trọng phân bố lên cột khung q,q' vẫn theo các công thức trên, nhưng trong đó thay bước khung B bằng khoảng cách B_1 giữa các cột tường. Phần tải trọng gió lên cột tường (diện tích F_1) sẽ truyền vào khung dưới dạng lực tập trung S và S'

$$S = nq_0 kcF_1 = nq_0 kcB_1 H/2;$$

$$S' = nq_0 kc'F_1 = nq_0 kc'BH/2.$$

Lực gió lên mái W vẫn theo công thức trên, với B vẫn là bước khung. Lực tập trung ở chỗ cánh dưới dàn sẽ là $W + mS + mS'$, với m là số cột tường giữa hai cột khung (h.2.2b).

Ví dụ 2.2. Tính tải trọng gió lên khung nhà cho ở hình 2.3.

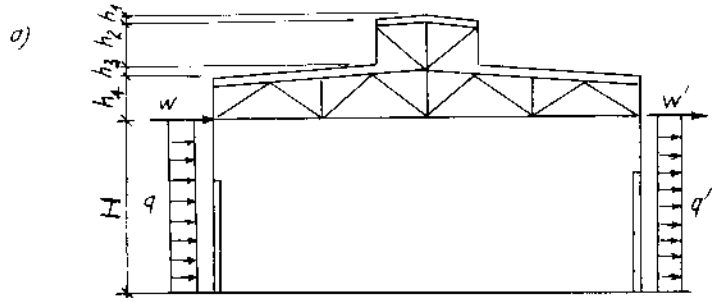
Địa điểm xây dựng: thành phố Hà Nội. Bước khung: 12m.

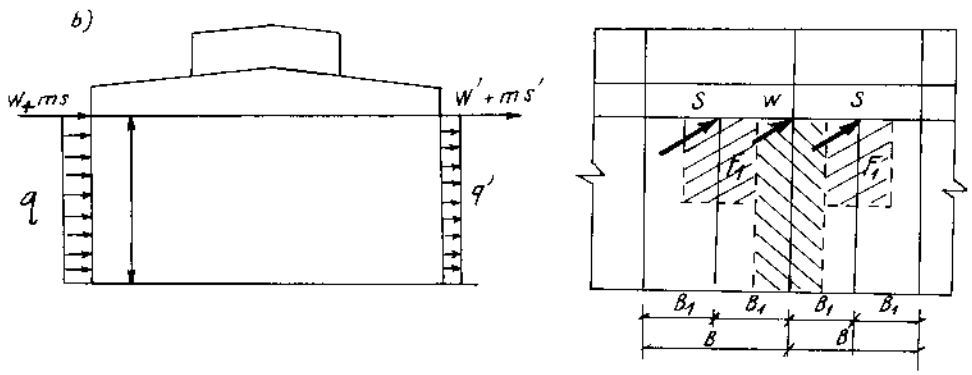
Áp lực tốc độ gió ở khu vực II là $q_0 = 70$ daN/m^2. Hệ số k, với địa hình che khuất là: 0,65 ở độ cao 10m; 0,9 ở 20m và 1,2 ở 40m. Nội suy ở 16m, $k = 0,8$; ở 25m (điểm cao nhất của mái) $k = 0,975$. Các hệ số khí động được lấy theo tiêu chuẩn (phụ lục V), ghi trên hình vẽ, trong đó -0,54 là trị số c_1 được nội suy với góc dốc của mái là $i = 1 : 10$ hay $\alpha = 6^o$.

Tải trọng gió phân bố đều lên cột (với hệ số qui đổi ra phân bố đều là 1,05):

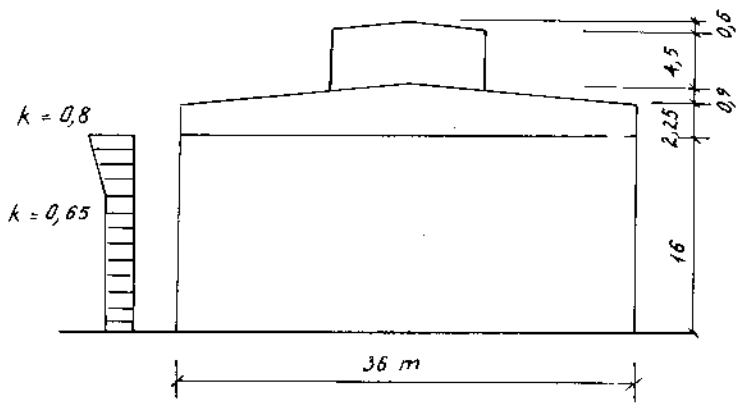
q = 1,3 . 0,65 . 70 . 0,8 . 12 . 1,05 = 596 daN/m;

q' = 1,3 . 0,65 . 70 . 0,6 . 12 . 1,05 = 447 daN/m.





Hình 2.2 - Sơ đồ tải trọng gió



Hình 2.3. Hình cho ví dụ 2.2

Trong khoảng từ độ cao 16m đến 25m, dùng hệ số trung bình của k:

$$k = \frac{0,8 + 0,975}{2} = 0,888$$

Lực tập trung W ở mức cánh dưới vì kèo:

W = 1,3 . 0,888 . 70 . 12 [2,25 . 0,8 - 0,9 . 0,54 +

+ 4,5 . 0,7 - 0,6 . 0,8 + 0,6(0,6 + 4,5 + 0,9 + 2,25)] = 8863kN.

§2.2. Tính nội lực khung

1. Sơ đồ tính khung

Tính khung nhằm mục đích xác định các nội lực: mômen uốn, lực dọc, lực cắt trong các tiết diện khung. Việc tính khung cứng có các thanh rỗng như dàn, cột khá là phức tạp, nên trong thực tế, đã thay sơ đồ tính toán thực của khung bằng sơ đồ đơn giản hóa, với các giả thiết sau:

- Thay dàn bằng một xà ngang đặc có độ cứng tương đương đặt tại cao trình cánh dưới của dàn. Chiều cao khung tính từ đáy cột (mặt trên móng) đến mép dưới cánh dưới vì kèo. Độ cứng của xà ngang tương đương với dàn được tính bằng công thức:

$$J_d = (F_{tr} z_{tr}^2 + F_d z_d^2)\,\mu, \qquad (2.7)$$

trong đó F_{tr}, F_d - tiết diện của cánh trên và cánh dưới của dàn kèo; z_{tr}, z_d - khoảng cách từ trọng tâm của cánh trên và cánh dưới đến trục trung hòa của dàn ở tiết diện giữa nhịp; μ - hệ số kể đến độ dốc của cánh trên và sự biến dạng của các thanh bụng. Với các độ dốc $i = 1/8$, $\mu = 0,7$; $i = 1/10$, $\mu = 0,8$; $i = 0$, $\mu = 0,9$.

- Đối với cột bậc, trục cột dưới được làm trùng với trục cột trên; nhịp tính toán là khoảng cách giữa hai trục cột trên (h.2.4a). Khi đó đối với tải trọng đứng truyền từ cột trên xuống phải kể thêm mômen lệch tâm ở chỗ đổi tiết diện cột:

$$M = V.e_0 \text{ với } e_0 \approx \frac{h_d - h_{tr}}{2}, \text{ (h.2.4b)}$$

Cột được ngàm ở bản đế chân cột (ở độ sâu dưới mặt nền $H_3 = 600 \div 1000$mm như đã nói ở §2.1). Chiều cao tính toán khung lấy từ bản đế cột đến đáy vì kèo.

Để tính khung, cần sơ bộ cho trước độ cứng J của dàn, của các phần cột, hay ít ra, cần biết tỉ số các độ cứng này. Có thể sơ bộ tính áng chừng theo các công thức sau:

- Mômen quán tính của dàn

$$J_d = \frac{M_{max} \cdot h_{dàn}}{2R}\,\mu,$$

trong đó M_{max} - mômen uốn lớn nhất trong xà ngang, coi như dầm đơn giản dưới tác dụng của toàn bộ tải trọng đứng tính toán; $h_{dàn}$ - chiều cao của dàn tại tiết diện có mômen M_{max}; R - cường độ tính toán của thép; μ - hệ số trong công thức (2.7).

- Mômen quán tính cột dưới

$$J_1 = \frac{N_A + 2D_{max}}{k_1 R}\, h_d^2$$

trong đó N_A - lực dọc tính toán tại tiết diện chân cột do tải trọng tác dụng lên mái; D_{max} - áp lực do cầu trục; h_d - bề rộng cột dưới; k_1 - hệ số tùy thuộc bước cột: $k_1 = 2,5 \sim 3$ khi bước cột 6m; $k_1 = 3,2 \sim 3,8$ khi bước 12m.

+ Mômen quán tính phần cột trên

$$J_2 = \left(\frac{J_1}{k_2}\right).\left(\frac{h_t}{h_d}\right)^2,$$

hệ số k_2 lấy bằng 1,2 - 1,8 khi dàn liên kết cứng với cột, và bằng 1,8 ÷ 2,3 khi liên kết khớp.

Tỷ số giữa các độ cứng J_d, J_1, J_2 cũng có thể dựa theo kinh nghiệm mà giả thiết trước như sau:

$$J_1 : J_2 = 7 \sim 10; \quad J_d : J_2 = 25 \sim 40$$

Đối với khung nhiều nhịp, gọi J_3 và J_4 là mômen quán tính của phần dưới và phần trêncủa cột giữa thì có tỷ số gần đúng

$$J_3 : J_4 = 7 \sim 10; \quad J_3 : J_2 = 10 \sim 30,$$

khi bước cột giữa gấp đôi bước cột ngoài thì tỉ số này là 20 ~ 60.

Nếu tỷ lệ độ cứng thực tế sai lệch với độ cứng giả thiết không quá 30% thì nội lực tính được không sai khác mấy, không cần phải tính lại.

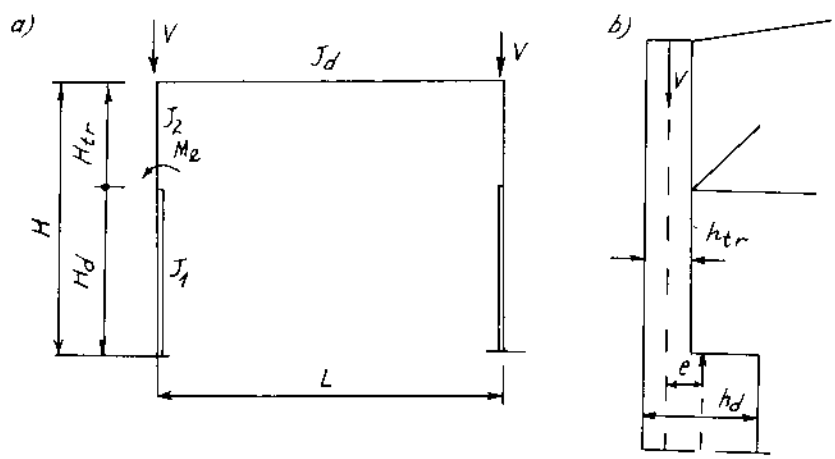
Khi tính khung với các tải trọng không phải là tải trọng thẳng đứng đặt trực tiếp lên dàn, có thể bỏ qua các biến dạng của dàn (coi dàn là cứng vô cùng $J_d = \infty$) nếu thỏa mãn hệ thức

$$\nu \geq \frac{6}{1 + 1{,}1\sqrt{\eta}}, \tag{2.8}$$

với

$$\nu = \frac{J_d}{L} : \frac{J_1}{H}; \quad \eta = \frac{J_1}{J_2} - 1$$

Các ký hiệu xem trên hình 2.4.



Hình 2.4. Sơ đồ tính khung

Với khung có ba nhịp trở lên, khi tính với các tải trọng thẳng đứng hoặc tải trọng ngang đặt cục bộ vào cột (như lực hãm), có thể bỏ qua chuyển vị ngang của đỉnh cột.

2. Tính nội lực khung

Khung được giải lần lượt với mỗi loại tải trọng riêng rẽ đã xét ở trên, dùng các phương pháp của cơ học kết cấu, hoặc các công thức tính sẵn, các bảng số. Dưới đây, giới thiệu một số phương pháp tính thường dùng cho khung có cột bậc. Để tránh nhầm lẫn, quy ước dấu của mômen uốn như sau: mômen dương khi làm căng thớ bên trong của xà và của cột biên, đối với cột giữa thì lấy dấu mômen theo cột biên gần nó nhất (cần chỉ rõ).

a) Tính khung với tải trọng phân bố đều trên xà ngang

Có thể dùng phương pháp chuyển vị, ẩn số là các góc xoay ở nút và chuyển vị ngang của đỉnh cột; chuyển vị này, như trên đã nói, trong nhiều trường hợp có thể bỏ qua.

Ví dụ với khung một nhịp ở hình 2.5.a do đối xứng, ta có các góc xoay

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$$

Phương trình chính tắc:

$$r_{11}\varphi + r_{1p} = 0,$$

trong đó r_{11} - tổng phản lực mômen ở các nút trên của khung khi xoay góc $\varphi = 1$;

r_{1p} - tổng mômen phản lực ở nút đó do tải trọng ngoài.

Quy ước mômen phản lực và góc xoay là dương khi nút cột trái quay theo chiều kim đồng hồ, nút cột phải quay ngược chiều kim.

Cho hai nút trên quay góc $\varphi = 1$: mômen uốn ở hai đầu xà ngang (coi như thanh tiết diện không đổi có hai đầu ngàm bị quay) là:

$$\overline{M}_B^{xà} = \frac{2EJ_d}{l}$$

Tại đầu trên của cột, khi nút trên quay góc $\varphi = 1$, sẽ có mômen $\overline{M}_B^{cột}$.

Vậy $r_{11} = \overline{M}_B^{xà} + \overline{M}_B^{cột}$, (chú ý dấu ±).

$\overline{M}_B^{cột}$ có thể tính công thức ở bảng III.1 phụ lục III.

r_{11} bằng mômen ngàm của dầm chịu tải phân bố đều tức là

$$r_{11} = -\frac{ql^2}{12}.$$

góc xoay ẩn số : $\varphi = \frac{-r_{1p}}{r_{11}}$.

Mômen cuối cùng bằng mômen trong hệ cơ bản do góc xoay đơn vị nhân với góc φ vừa tìm ra, cộng với mômen trong hệ cơ bản

$$\overline{M} = M\varphi + M_p.$$

Như trên đã nói, khi tính với loại tải trọng này, phải kể thêm mômen lệch tâm ở chỗ chuyển tiếp trục $M_e = V.e$. Vì khung không có chuyển vị ngang và dàn được coi là cứng vô cùng nên mômen uốn trong cột được xác định ngay theo sơ đồ cột hai đầu ngàm, dùng công thức ở bảng III.2 phụ lục.

Ví dụ 2.3. Tính khung một nhịp với tải trọng phân bố đều trên xà ngang $q = 20$ kN/m. Nhịp khung $l = 36$m; cột bậc $h_1 = 13{,}6$m, $h_2 = 5{,}6$m và $h = 13{,}6 + 5{,}6 = 19{,}2$m. Bề rộng phần trên cột $b_t = 500$mm, phần dưới $b_d = 1250$mm.

Tỷ số các mômen quán tính chọn là

$$J_1 = 1; J_2 = 1:8; J_d = 4{,}5.$$

Mômen ở đầu xà ngang do $\varphi = 1$

$$\overline{M}_B^{xà} = \frac{2EJ_d}{l} = \frac{2 \cdot E \cdot 4{,}5 J_1}{36} = 0{,}25\, EJ_1$$

Mômen ở các đầu cột do $\varphi = 1$ xác định theo các công thức ở bảng III.1 phụ lục.

Các trị số của công thức:

$$\mu = \frac{J_1}{J_2} \cdot 1 = \frac{1}{1:8} \cdot 1 = 7 ;$$

$$\alpha = \frac{h_2}{h} = \frac{5{,}6}{19{,}2} \approx 0{,}292 ;$$

$$A = 1 + \alpha\mu = 1 + 0{,}292 \cdot 7 = 3{,}044;$$
$$B = 1 + \alpha^2\mu = 1 + 0{,}292^2 \cdot 7 = 1{,}597;$$
$$C = 1 + \alpha^3\mu = 1 + 0{,}292^3 \cdot 7 = 1{,}174;$$
$$F = 1 + \alpha^4\mu = 1 + 0{,}292^4 \cdot 7 = 1{,}051;$$
$$K = 4AC - 3B^2 = 4 \cdot 3{,}044 \cdot 1{,}174 - 3 \cdot 1{,}597^2 = 6{,}643.$$

Vậy $\overline{M}_B^{cột} = \frac{4C}{K} \cdot \frac{EJ_1}{h} = 0{,}0368\, EJ_1$

Phản lực ở đầu cột do $\varphi = 1$

$$\overline{R}_B = \frac{6B}{K} \cdot \frac{EJ_1}{h^2} = \frac{6.1,597}{6,643 \cdot 19,2^2} \cdot EJ_1 = 0,00391 EJ_1 .$$

Hệ số của phương trình chính tắc

$$r_{11} = 0,25\, EJ_1 + 0,0368\, EJ_1 = 0,2868\, EJ_1;$$

$$r_{1p} = M_p^B = -\frac{ql^2}{12} = -\frac{20.36^2}{12} = -2160 \text{kN.m} = M_p^B .$$

Góc xoay $\varphi = -\frac{r_{1p}}{r_{11}} = \frac{2160}{0,2868 EJ_1} = \frac{7531}{EJ_1}$.

Mômen cuối cùng:

- Ở đầu xà $M_B^{xà} = \overline{M}_B^{xà} \cdot \varphi + M_p^B = 0,25 EJ_1 \frac{7531}{EJ_1} \cdot -2160 = -277$ kNm;

- Ở đầu trên cột $M_B^{cột} = \overline{M}_B^{cột} \cdot \varphi = -\frac{7531}{EJ_1} \cdot 0,0368 EJ_1 = -277$ kNm.

Ở các tiết diện khác thì tính bằng cách dùng trị số phản lực

$$R_B = \overline{R}_B \cdot \varphi = 0,00391 \cdot EJ_1 \frac{7531}{EJ_1} = 129,45 \text{ kN}.$$

Vậy mômen ở vai cột

$$M_c = M_B + R_B \cdot h_2 = -277 + 29,45 \cdot 5,6 = -112\text{kNm}.$$

Mômen ở chân cột

$$M_A = M_B + R_B.h = -277 + 29,45 \cdot 19,2 = 288\text{kNm}.$$

Biểu đồ mômen cho ở hình 2.5.b

Mômen lệch tâm chỗ vai cột

$$M_e = V.e = \frac{20 \cdot 36}{2} \cdot \frac{1,25 - 0,5}{2} = 135\text{kNm}.$$

Các công thức ở bảng cho:

$$M_B = -\frac{(1-\alpha)[3B(1+\alpha) - 4c]}{K} M_e = -\frac{(1-0,292)[3.1,597(1+0,292) - 4 \cdot 1,174]}{6,643}(-135)$$

$$= 21,5\text{kNm}.$$

$$R_B = \frac{-6(1-\alpha)[B - A(1+\alpha)]}{K} \cdot \frac{M_e}{h} =$$

$$= \frac{-6(1-0,292)[1,597 - 3,044(1+0,292)]}{6,643} \cdot \frac{(-135)}{19,2} = -10,5\text{kN}.$$

Mômen tại các tiết diện khác:

$$M_C^t = M_B + R_B.h_2 = 21,5 - 10,5 \cdot 5,6 = -37,3\text{kNm};$$

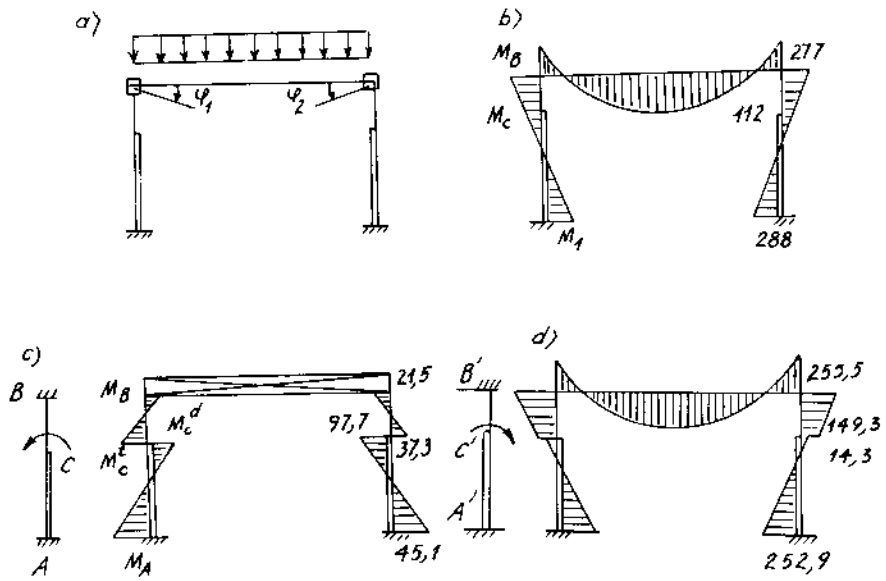
$$M_C^d = M_C^{tr} + M_e = -37,3 + 135 = 97,7\text{kNm};$$

$$M_A = M_B + R_B.h + M_e = 21,5 - 10,5 \cdot 19,2 - 135 = -45,1\text{kNm}.$$

Biểu đồ mômen do M_e cho ở hình 2.5c.

Cộng với biểu đồ ở hình 2.5b, được biểu đồ mômen cuối cùng do tải trọng trên mái gây ra

M_B = -277 + 21,5 = -255,5kNm; M_C^t = -112 - 37,3 = -149,3kNm;
M_O^d = -112 + 97,7 = -14,3kNm; M_A = 288 - 45,1 = 252,9kNm.



Hình 2.5. Hình cho ví dụ 2.3

b) Tính khung với mômen cầu trục

Khung được tính đồng thời với các mômen M_{max} và M_{min} đặt ở hai cột đỡ cầu trục.

Với sơ đồ xà ngang là cứng vô cùng, ẩn số theo phương pháp chuyển vị là chuyển vị ngang của nút trên:

$$r_{11}\Delta + r_{1p} = 0,$$

trong đó r_{11} - phản lực ở trong liên kết đặt thêm, do chuyển vị nút trên bằng 1; r_{1p} - phản lực ở liên kết đó do tải trọng.

Để xác định r_{11}, r_{1p}, cũng dùng các công thức ở bảng III.2 phụ lục III.

Mômen kết quả:

$$M = \overline{M}.\Delta + M_p$$

Trình tự tính toán xem ví dụ 2.4.

Ví dụ 2.4. Tính khung của ví dụ 2.3 với D_{max} = 2840kN; D_{min} = 890kN(lấy từ ví dụ 2.1).

Vẽ biểu đồ mômen do chuyển vị nút trên Δ = 1. Dùng công thức của bảng III.2:

$$\overline{M}_B = \frac{6B}{K} \cdot \frac{EJ_1}{h^2} = \frac{6.1,597}{6,643} \cdot \frac{EJ_1}{h^2} = 1,442 \frac{EJ_1}{h^2};$$

$$\overline{R}_B = \frac{-12A}{K} \cdot \frac{EJ_1}{h^3} = \frac{-12 \cdot 3,044}{6,643} \cdot \frac{EJ_1}{h^3} = -5,499 \frac{EJ_1}{h^3}.$$

(chiều dương của mômen lấy theo hình vẽ của bảng, cũng trùng với qui ước đã chọn về dấu của mômen uốn của cột trái).

Mômen tại các tiết diện khác:

$$\overline{M}_C = \overline{M}_B + \overline{R}_B h_2 = 1,442 \frac{EJ_1}{h^2} - 5,499 \cdot \frac{EJ_1}{h^2} \cdot 5,6 = -0,162 \frac{EJ_1}{h^2},$$

$$\overline{M}_A = \overline{M}_B + \overline{R}_B h = 1,442 \frac{EJ_1}{h^2} - 5,499 \cdot \frac{EJ_1}{h^3} h = -4,057 \frac{EJ_1}{h^2}.$$

Ở cột phải, các trị số mômen bằng như vậy, nhưng khác dấu vì phản đối xứng.

Phản lực trong liên kết thêm là:

$$r_{11} = 2\overline{R}_B = -2 \cdot 5{,}499 \cdot \frac{EJ_1}{h^3} = -10{,}998 \frac{EJ_1}{h^3}$$

(dấu trừ (-) của phản lực qui ước là chiều phản lực ngược với chiều chuyển vị, nghĩa là từ phải sang trái).

Mômen lệch tâm do cầu trục (gần đúng $e \approx b_d/2$):

$$M_{max} = D_{max} \cdot e = 2840 \cdot \frac{1{,}25}{2} = 1775\text{kNm};$$

$$M_{min} = D_{min} \cdot e = 890 \cdot \frac{1{,}25}{2} = 556\text{kNm}.$$

Vẽ biểu đồ mômen do M_{max}, M_{min} trong hệ cơ bản. Có thể dùng kết quả đã tính với M_c ở ví dụ 2.3 (h.2 - 5 c), nhân với hệ số tỷ lệ $-M_{max}/M_c$ và $-M_{min}/M_c$.

$$-\frac{M_{max}}{M_c} = -\frac{1775}{135} = -13{,}148; \quad -\frac{M_{min}}{M_c} = -\frac{556}{135} = -4{,}118.$$

Từ đó, mômen ở cột trái:

$M_B = (-13{,}148) \cdot 21{,}5 = -282{,}7$ kNm; $M_C^t = (-13{,}148) \cdot (-37{,}3) = +490{,}4$ kNm;

$M_C^d = (-13{,}148) \cdot 97{,}7 = -1284{,}6$ kNm; $M_A = (-13{,}148) \cdot (-45{,}1) = 593{,}0$ kNm.

Phản lực $R_B = (-13{,}148)(-10{,}5) = 138$ kN.

Ở cột phải:

$M_{B'} = (-4{,}118) \cdot 21{,}5 = -88{,}5$ kNm; $M_{C'}^t = (-4{,}118)(-37{,}3) = 153{,}6$ kNm;

$M_{C'}^d = (-4{,}118) \cdot (97{,}7) = -402{,}3$ kNm; $M_{A'} = (-4{,}118) \cdot (-45{,}1) = 185{,}7$ kNm.

Phản lực $R_{B'} = (-4{,}118) \cdot (10{,}5) = -43{,}2$ kN, dấu của $R_{B'}$ là trừ vì nó ngược chiều với R_B

Phản lực trong liên kết thêm:

$$r_{1p} = R_B + R_{B'} = 138 - 43{,}2 = 94{,}8 \text{ kN}.$$

Chuyển vị ẩn số:

$$\Delta = -\frac{r_{1p}}{r_{11}} = -\frac{94{,}8}{-10{,}998EJ_1/h^3} = 165{,}5 \cdot \frac{h^2}{EJ_1}.$$

Nhân biểu đồ mômen đơn vị với trị Δ này rồi cộng với biểu đồ mômen trong hệ cơ bản do M_{max}, M_{min}, được kết quả cần tìm.

Cột trái:

$$M_B = 1{,}442 \cdot \frac{EJ_1}{h^2} \times 165{,}5 \frac{h^2}{EJ_1} - 282{,}7 = -93{,}7\text{kNm};$$

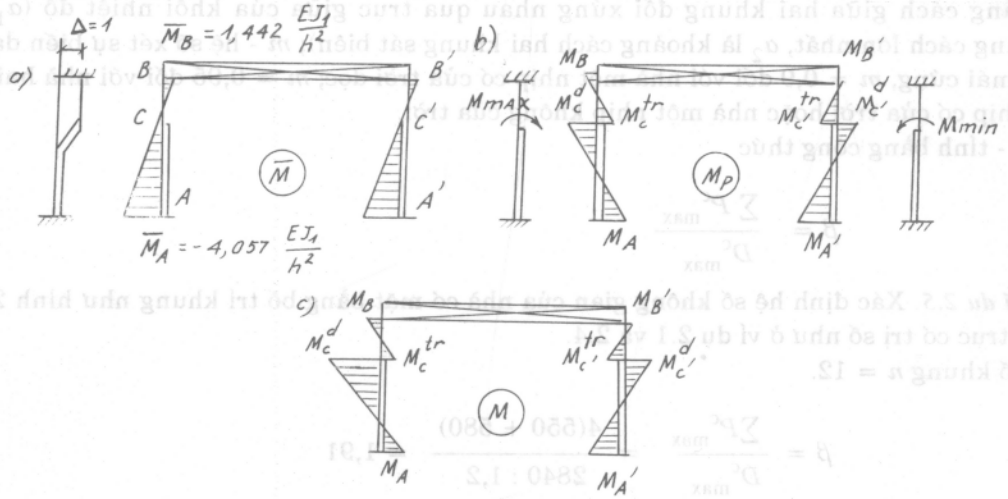
$$M_C^t = -0{,}162 \frac{EJ_1}{h^2} \cdot 165{,}5 \frac{h^2}{EJ_1} + 490{,}4 = 463{,}6\text{kNm};$$

$$M_C^d = -0{,}162 \frac{EJ_1}{h^2} \cdot 165{,}5 \frac{h^2}{EJ_1} - 1284{,}6 = -1311{,}4\text{kNm};$$

$$M_A = -4{,}057 \frac{EJ_1}{h^2} \cdot 165{,}5 \frac{h^2}{EJ_1} + 593{,}0 = -78{,}4\text{kNm}.$$

Làm tương tự như vậy với cột phải. Biểu đồ mômen cuối cùng vẽ ở hình 2.6c. Lực cắt

được suy ra từ biểu đồ mômen. Lực dọc gây bởi D_{max}, D_{min} chỉ có trong phần dưới cột.

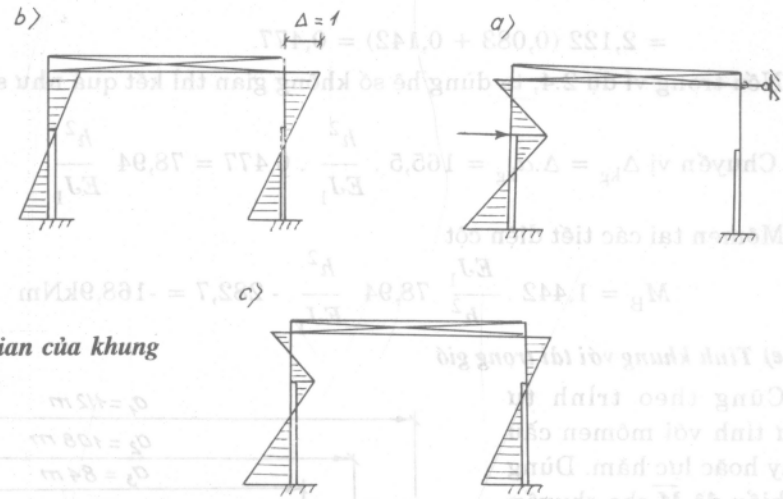


Hình 2.6. Hình cho ví dụ 2.4. Giải khung với mômen cầu trục

c) Tính khung với lực hãm ngang T

Lực T đặt ở cao trình dầm hãm của một trong hai cột đỡ cầu trục. Chiều lực có thể hướng sang trái hoặc sang phải, do đó nội lực của khung luôn có dấu dương (+) hoặc âm (-); dấu (+) ứng với một chiều, dấu (-) ứng với chiều kia.

Trình tự tính toán cũng giống như khi tính với M_{max}, M_{min}. Biểu đồ mômen do chuyển vị $\Delta = 1$, biểu đồ mômen trong hệ cơ bản và biểu đồ mômen cuối cùng được vẽ ở hình 2.7 a, b, c.



Hình 2.7. Tính khung với lực hãm ngang của cầu trục

d) Sự làm việc không gian của khung

Khi tính khung với tải trọng cầu trục (M_{max}, M_{min} và T), có thể xét sự làm việc không gian của khung. Nhờ có hệ giằng dọc ở cánh dưới dàn hoặc nhờ mái cứng (mái bêtông cốt thép đúc toàn khối hoặc lắp ghép từ các tấm mái cỡ lớn) mà tải trọng cục bộ đặt vào một khung sẽ truyền sang các khung lân cận, nhờ đó mà chuyển vị ngang giảm đi. Xét sự làm việc không gian của khung bằng cách nhân hệ số không gian α_{kg} vào chuyển vị Δ tính được từ phương trình chính tắc.

Trường hợp nhà có mái cứng, hệ số α_{kg} được tính bằng công thức:

$$\alpha_{kg} = \frac{\beta}{m}\left(\frac{1}{n} + \frac{a_2^2}{2\sum a_i^2}\right),$$

trong đó n- số khung trong một khối nhiệt độ, được liên hệ nhau bằng mái cứng; a_i - khoảng cách giữa hai khung đối xứng nhau qua trục giữa của khối nhiệt độ (a_1 là khoảng cách lớn nhất, a_2 là khoảng cách hai khung sát biên); m - hệ số xét sự biến dạng của mái cứng, $m = 0,9$ đối với nhà một nhịp có cửa trời dọc; $m = 0,95$ đối với nhà hai và ba nhịp có cửa trời hoặc nhà một nhịp không cửa trời.

β - tính bằng công thức

$$\beta = \frac{\sum P^c_{max}}{D^c_{max}}$$

Ví dụ 2.5. Xác định hệ số không gian của nhà có mặt bằng bố trí khung như hình 2.8. Cầu trục có trị số như ở ví dụ 2.1 và 2.4.

Số khung $n = 12$.

$$\beta = \frac{\sum P^c_{max}}{D^c_{max}} = \frac{4(550 + 580)}{2840 : 1,2} = 1,91$$

Hệ số không gian

$$\alpha_{kg} = \frac{\beta}{m}\left(\frac{1}{n} + \frac{a_2^2}{2\sum a_i^2}\right) =$$

$$= \frac{1,91}{0,9}\left(\frac{1}{12} + \frac{108^2}{2(12^2 + 36^2 + 60^2 + 84^2 + 108^2 + 132^2}\right) =$$

$$= 2,122\ (0,083 + 0,142) = 0,477$$

Nếu trong ví dụ 2.4, ta dùng hệ số không gian thì kết quả như sau:

$$\text{Chuyển vị } \Delta_{kg} = \Delta.\alpha_{kg} = 165,5 \cdot \frac{h^2}{EJ_1} \cdot 0,477 = 78,94\ \frac{h^2}{EJ_1}$$

Mômen tại các tiết diện cột

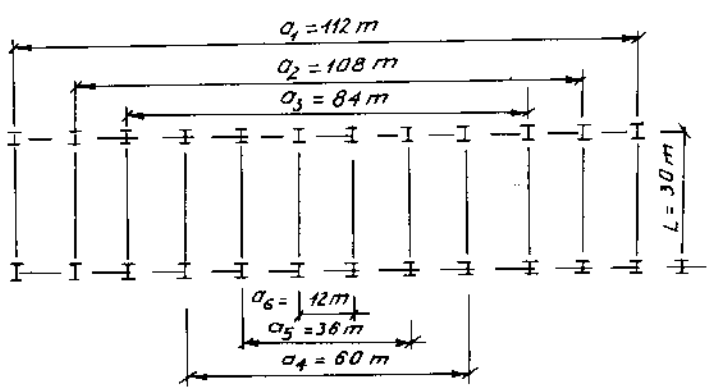
$$M_B = 1,442 \cdot \frac{EJ_1}{h^2}\ 78,94\ \frac{h^2}{EJ_1} - 282,7 = -168,9\text{kNm} \qquad \text{v.v...}$$

e) Tính khung với tải trọng gió

Cùng theo trình tự như tính với mômen cầu chạy hoặc lực hãm. Dùng lại biểu đồ $\overline{M}$ cho chuyển vị $\Delta = 1$ gây ra trong hệ cơ bản và đã có r_{11}.

Vẽ biểu đồ mômen do q, q' gây ra trong hệ cơ bản bằng công thức bảng III-2 phụ lục (h.2.9 a).

Ở cột trái, sau khi tính được M_B, R_B, tính tiếp mômen tại các tiết diện khác

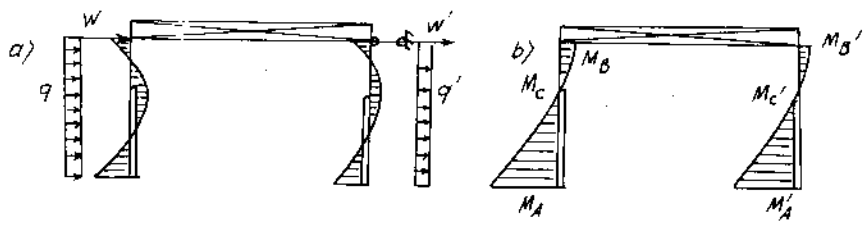


Hình 2.8. Bố trí khung dùng tính hệ số không gian α_{kg} (dùng cho ví dụ 2.8)

$$M_C = M_B + R_B h_2 - \frac{q h_2^2}{2};$$

$$M_A = M_B + R_B h - \frac{q h^2}{2}.$$

Ở cột phải, các trị số mômen, phản lực được suy từ các trị số tương ứng ở cột trái bằng cách nhân với hệ số chuyển q'/q.



Hình 2.9. Tính với tải trọng gió

Phản lực trong liên kết thêm:

$$r_{1p} = R_B + R'_B + W.$$

Chuyển vị $\Delta = -r_{1p}/r_{11}$. Nhân Δ với $\overline{M}$ rồi cộng với mômen trong hệ cơ bản, ta được biểu đồ mômen cuối cùng (h.2.9b). Lực cắt được suy ra từ các tải trọng và phản lực.

Khi gió thổi từ phải sang trái, biểu đồ mômen sẽ là biểu đồ của hình 2.9b lật lại, theo kiểu đối xứng mặt gương.

§2.3. Xác định nội lực tính toán

Sau khi tính xong khung (tính được M, N, Q tại các tiết diện) với từng loại tải trọng, tiến hành tổ hợp các tải trọng một cách bất lợi nhất để xác định được các nội lực tính toán mà chọn tiết diện khung.

Nội lực dọc N trong cột được xác định như là khi dàn liên kết khớp với cột, như vậy chỉ cần dồn tải trọng đứng về cột một cách bình thường. (Việc xác định N bằng cách giải khung cứng, mất nhiều công mà kết quả sai khác không quá 1%). Phần cột trên chịu A, A' (hoặc V, V'), phần cột dưới chịu thêm D_{max}, G_{dct} và trọng lượng tường treo nếu có.

Các kết quả giải khung được ghi vào bảng nội lực. Với mỗi cột, xét bốn tiết diện tiêu biểu; tại mỗi tiết diện ghi trị số M, N do mỗi loại tải trọng gây ra, riêng tiết diện A sát móng thì ghi thêm lực cắt Q. Các trị số M, N, Q của mỗi tải trọng (trừ trọng lượng bản thân) được ghi làm hai dòng: dòng trên ghi trị số đúng, dùng cho tổ hợp cơ bản 1 (hệ số tổ hợp bằng 1); dòng dưới ghi trị số nhân với 0,9 dùng cho tổ hợp cơ bản 2 (hệ số tổ hợp 0,9).

Mẫu bảng nội lực có thể tham khảo như bảng 2.1.

Dựa vào bảng nội lực, tiến hành tổ hợp tải trọng. Đối với nhà công nghiệp, thông thường xét hai loại tổ hợp tải trọng: tổ hợp cơ bản 1, gồm tải trọng thường xuyên và một tải trọng tạm thời; tổ hợp cơ bản 2 gồm tải trọng thường xuyên và nhiều tải trọng tạm thời với hệ số 0,9.

Tại mỗi tiết diện cột, cần tìm ba tổ hợp tải trọng sau:

- Tổ hợp gây mômen dương lớn nhất M^+_{max} và lực nén tương ứng;
- Tổ hợp gây mômen lớn nhất với dấu âm M^-_{max} và lực nén tương ứng;
- Tổ hợp gây lực nén lớn nhất N_{max} và trị số tương ứng M^+ hoặc M^-. Với tổ hợp thứ ba này, cần chú ý là nhiều tải trọng không gây thêm N nhưng có gây M (như gió, lực hãm)

thì cũng cần kể thêm vào cốt sao cho cùng với trị số N_{max}, có được M tương ứng lớn nhất.

Khi tổ hợp tải trọng, cần theo các nguyên tắc sau:

- Tải trọng thường xuyên luôn luôn được kể đến trọng mọi trường hợp, không kể dấu thế nào.

- Không thể đồng thời lấy cả hai tải trọng 3 và 4 (hoặc 5 và 6, hoặc 7 và 8) cùng một lúc vì đã có D_{max} ở bên trái tất không thể đồng thời có D_{max} ở bên phải; đã có gió trái thì thôi gió phải. Chỉ được chọn một trong hai dòng 3 hoặc 4 (5 hoặc 6; 7 hoặc 8);

- Khi đã kể lực hãm T, tất phải kể lực đứng D_{max}, D_{min}. Do điều kiện làm việc thực tế của cầu trục, lực hãm T có thể coi đặt vào cột này hay cột kia dù trên cột có D_{max} hay D_{min}, chứ không phải T chỉ đặt vào cột có D_{max} như thường quan niệm. Lực T có thể thay đổi chiều nên các trị số nội lực sẽ mang dấu ($\pm$). Do tính chất này mà khi đã xét tải trọng cầu trục D tất luôn luôn cộng thêm tải trọng T vì trị số mômen sẽ luôn tăng thêm.

Mẫu bảng tổ hợp nội lực (bảng 2.2) lập theo bảng nội lực (bảng 2.1). Tại mỗi ô của bảng, có ghi rõ số thứ tự của các tải trọng dùng trong tổ hợp để tiện tính toán, kiểm tra. Có một số ô để trắng, ví dụ ô ứng với cặp N, $M^{+}_{tư}$ vì cặp này không xuất hiện.

Ví dụ 2.6. Dựa vào bảng nội lực (bảng 2.1), xác định cặp nội lực M_{max}, $N_{tư}$ tại diết diện A.

Tổ hợp cơ bản 1: được chọn gồm tải trọng thường xuyên (1), cầu trục D_{max} bên phải (4),lực hãm với dấu (+) đặt vào cột trái (5), tất cả đều lấy trị số ở dòng trên, ứng với hệ số tổ hợp bằng 1):

$$M_{max} = 492,1 + 430,0 + 479,0 = 1401,1\text{kNm}; N = 927 + 912 = 1839\text{kN}.$$

Tổ hợp cơ bản 2: gồm các tải trọng của tổ hợp cơ bản 1 thêm tải trọng tạm thời trên mái (2) và gió từ phải sang (8); mọi tải trọng tạm thời (2), (4), (5), (8) đều lấy trị số ở dòng thứ hai, ứng với hệ số tổ hợp 0,9:

$$M_{max} = 492,1 + 387,0 + 431,1 + 189,2 + 1121,4 = 2620,8\text{kNm}$$

$$N = 927 + 226,8 + 820,8 = 1974,6\text{kN}$$

Các kết quả này được ghi vào các ô tương ứng của bảng tổ hợp nội lực. Các ô còn lại được tính toán tương tự.

Tiết diện cột được chọn theo các cặp nội lực bất lợi nhất ghi trong bảng tổ hợp. Trong nhiều trường hợp, khó có thể nhận ra ngay được cặp nội lực bất lợi, ví dụ đối với cột dưới ở bảng, có tới 13 cặp nội lực tính toán (bảy cặp của tổ hợp cơ bản 1, sáu cặp của tổ hợp cơ bản 2). Một cách chọn đơn giản là tính phác lực dọc trong nhánh gây bởi mỗi cặp M, N, dùng công thức gần đúng sau:

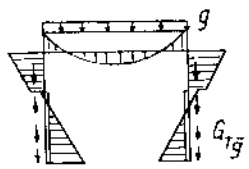
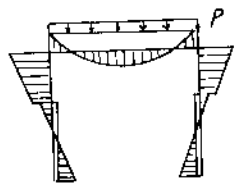
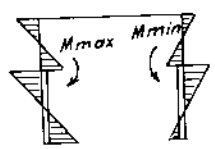
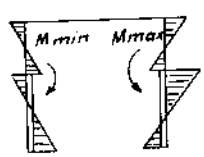
$$N_{nhánh} = \frac{M}{h} + \frac{N}{2}$$

Cặp nào gây $N_{nhánh}$ lớn là cặp dùng để tính toán. Cột đặc hoặc tiết diện đối xứng thì chỉ cần một cặp nội lực. Cột rỗng hoặc cột không đối xứng thì phải chọn hai cặp với M khác dấu nhau dễ gây nội lực lớn cho từng nhánh. Trong điều kiện xây dựng ở nước ta, tải trọng gió lớn mà cầu trục thường nhỏ, nên hầu hết các trường hợp tính toán là thuộc tổ hợp cơ bản 2.

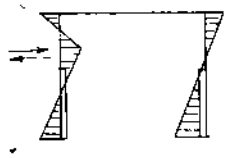
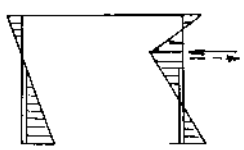
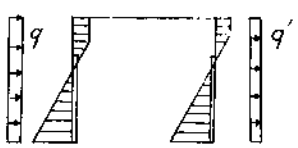
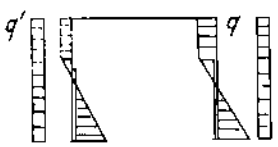
Ở bảng tổ hợp nội lực nêu ra làm ví dụ ở đây, các cặp nội lực để chọn tiết diện cột được đóng khung.

Để tính dàn và tính bulông neo chân cột, sẽ dùng các tổ hợp nội lực khác chưa ghi trong bảng này. Cách xác định sẽ trình bày trong các chương 3 và 4.

Bảng 2.1. **Bảng nội lực**

Thứ tự tải trọng	Loại tải trọng		Hệ số tổ hợp	Cột trên				Cột dưới				
				Tiết diện B		Tiết diện C^t		Tiết diện C^d		Tiết diện A		
				M	N	M	N	M	N	M	N	Q
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Tải trọng thường xuyên		1	-687,5	671,0	-360,4	724,0	-236,9	814,0	49 2.1	927,0	-49,3
2	Tải trọng tạm thời trên mái		1	-297,1	252,0	-159,4	252,0	-96,4	252,0	210,2	252,0	-20,8
			0,9	-267,4	226,8	-143,5	226,8	-86,8	226,8	169,2	226,8	-18,7
3	Mômen cầu trục (móc trục bên trái		1	- 40,3	0	608,2	0	-1165,8	2839,0	294,4	2839,0	-101,4
			0,9	- 36,3	0	547,4	0	-1049,2	2555,1	265,0	2555,1	-91,3
4	Mômen cầu trục (móc trục bên phải)		1	-139,6	0	210,7	0	-359,3	912,0	430,0	912,0	-54,8
			0,9	-125,6	0	189,6	0	-323,4	820,8	387,0	820,8	-49,3

Tiếp bảng 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	Lực hãm lên cột trái		1	$\mp$52,1	0	$\pm$165,1	0	$\pm$165,1	0	$\pm$479,0	0	$\pm$44,1
			0,9	$\mp$46,9	0	$\pm$148,6	0	$\pm$148,6	0	$\pm$ 431,1	0	$\pm$39,7
6	Lực hãm lên cột phải		1	$\mp$88,7	0	$\pm$16,4	0	$\pm$16,4	0	$\pm$252,6	0	$\mp$16,4
			0,9	$\mp$79,8	0	$\pm$14,8	0	$\pm$14,8	0	$\pm$227,3	0	$\mp$14,8
7	Gió trái		1	404,3	0	75,6	0	75,6	0	-1287,8	0	110,3
			0,9	363,9	0	68,0	0	68,0	0	-1159,0	0	99,3
8	Gió phải		1	-419,5	0	-54,5	0	-54,5	0	1246,0	0	-101,9
			0,9	-377,5	0	-49,0	0	-49,0	0	1121,4	0	-91,7

Bảng 2.2. **Bảng tổ hợp nội lực**

Tiết diện	Nội lực	Tổ hợp cơ bản 1				Tổ hợp cơ bản 2			
		M^+_{max}, N	M^-_{max}, N	N_{max}, M		M^+_{max}, N	M^-_{max}, N	N_{max}, M	
				M^+	M^-			M^+	M^-
B	M	–	1,8 -1107,0	–	1,2 -9	–	1, 2, 4, 6, 8 -1535,8	–	1, 2, 4, 6, 8 -1535,8
	N	–	671,0		923,0		897,8		897,8
C^t	M	1, 3, 5 412,9	1, 2 -519,8	–	1, 2 -519,8	1, 3, 5, 7 403,6	1, 2, 8 -552,9	–	1, 2, 8 -552,9
	N	724,0	976,0		976,0	724,0	950,8		950,8
C^d	M	–	1, 3, 5 -1567,8	–	1, 3, 5 -1567,8	–	1, 2, 3, 5, 8 -1570,5	–	1, 2, 3, 5, 8 -1570,5
	N		3653,0		3653,0		3595,9		3595,9
A	M	1, 4, 5 1401,1	–	1, 3, 5 1265,5	–	1, 2, 4, 5, 8 2620,8	1, 3, 5, 7 -833,1	1, 2, 3, 5, 8 2498,7	1, 2, 3, 5, 7 -845,9
	N	1839,0		374,60		1974,6	3482,1	3708,9	3708,9
	Q_{max}	1, 3, 5	-195,3			1, 2, 3, 5, 8		-291,2	