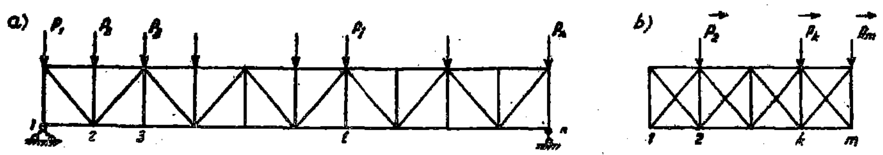
Tạp chí CƠ HỌC 1980 số 1 (trang 1 – 8)

MỘT CÁCH TÍNH KẾT CẤU NHỊP CẦU GIÀN CHỊU TẢI TRỌNG THẲNG ĐỨNG CÓ KỂ ĐẾN SỰ LÀM VIỆC CỦA HỆ LIÊN KẾT NGANG

NGUYỄN NHƯ KHẢI, LỀU THỌ TRÌNH

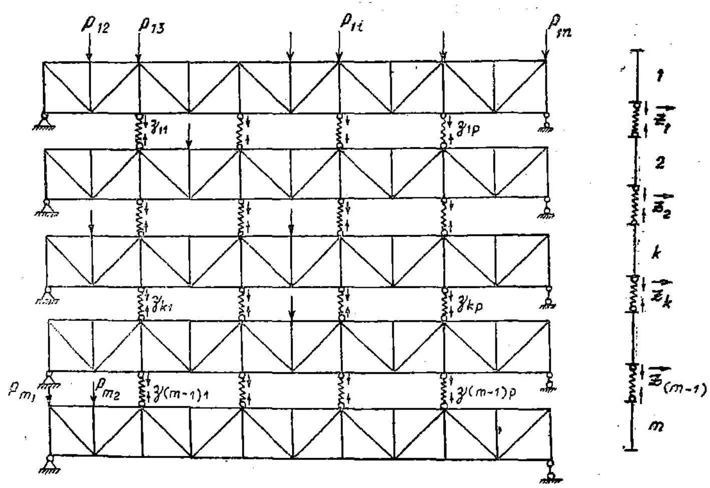
I – ĐẶT BÀI TOÁN VÀ SƠ ĐỒ TÍNH TOÁN

Xét kết cấu nhịp có m giàn chủ được liên kết lại với nhau bằng các hệ liên kết ngang, chịu tải trọng thẳng đứng đặt tại các mắt (hình 1).



Hình 1

Ngoài các giả thiết cơ bản của cơ học kết cấu, ta thừa nhận rằng *các chuyển vị ngang của giàn không đáng kể so với chuyển vị đứng và có thể bỏ qua.*



Hình 2

Như vậy kết cấu giàn không gian có thể có mô hình tính toán là một hệ giàn phẳng nhiều tầng, trong đó vai trò của các liên kết ngang được thay thế bằng các liên kết đàn hồi (hình 2), Các ký hiệu:

1) Các vectơ P_1, P_2,..., P_k,..., P_m là các vectơ ngoại lực tác dụng trên các giàn chủ 1, 2, ..., k, ..., m;

$$P_k = \left\| \begin{matrix} P_{k_1} \\ \vdots \\ P_{k_2} \\ P_{k_n} \end{matrix} \right\|$$

Ở đây P_{k_i} là tải trọng tác dụng lên mắt i của giàn chủ k.

2) Các vectơ Z_1, Z_2, ..., $Z_{(m-1)}$ biểu thị phản lực trong các liên kết đàn hồi giữa các giàn chủ. Ta có:

$$Z_k = \left\| \begin{matrix} z_{k_1} \\ z_{k_2} \\ \vdots \\ z_{k_p} \end{matrix} \right\|$$

Mỗi vectơ Z_k có p hàng, với p là số liên kết ngang nối các giàn chủ. z_{k_i} là phản lực trong liên kết đàn hồi giữa giàn chủ k và giàn chủ k+1 đặt tại mắt i. Các phản lực này chưa xác định.

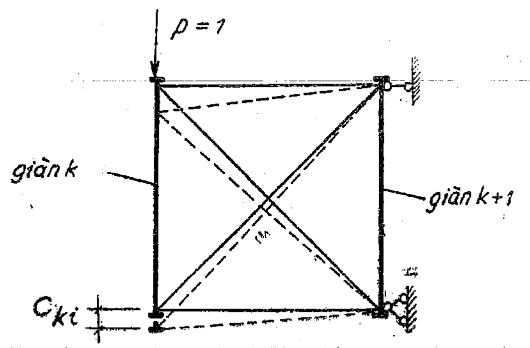
3) Các vectơ V_1, V_2,... V_m biểu thị chuyển vị của các mắt thuộc các giàn chủ. Mỗi vectơ có n hàng:

$$V_k = \left\| \begin{matrix} v_{k_1} \\ v_{k_2} \\ \vdots \\ v_{k_n} \end{matrix} \right\|$$

Với V_{k_i} là chuyển vị của mắt i thuộc giàn k. Các đại lượng này cũng chưa biết.

4) Các ma trận L_{v_1}, L_{v_2}, ..., L_{v_m} là các ma trận ảnh hưởng độ võng của các giàn. Trong trường hợp tổng quát các ma trận này có thể khác nhau, nhưng trong thực tế thường các giàn chủ được cấu tạo như nhau nên chúng thường giống nhau. Các ma trận này có thể xác định dễ dàng theo các phương pháp cơ học kết cấu:

$$L_{v_k} = \left\| \begin{matrix} \bar{v}^k_{11} & \bar{v}^k_{12} & \cdots & \bar{v}^k_{1n} \\ \bar{v}^k_{21} & \bar{v}^k_{22} & \cdots & \bar{v}^k_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \bar{v}^k_{n1} & \bar{v}^k_{n2} & \cdots & \bar{v}^k_{nn} \end{matrix} \right\|$$



Hình 3

Với $\bar{v}^k_{ij}$ là độ võng tại mắt i của giàn k do tải trọng đơn vị đặt tại mắt j của giàn đó.

5) Các ma trận C_1, C_2, ..., $C_{(m-1)}$ biểu thị hệ số đàn hồi của các liên kết ngang nối những giàn chủ với nhau. Giữa hai giàn chủ k và k+1 có:

$$C_k = \left\| \begin{matrix} C_{k_1} & & & \\ & C_{k_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & C_{k_p} \end{matrix} \right\|$$

Đó là ma trận chéo có p phần tử. C_{k_i} là hệ số đàn hồi tại liên kết i thuộc hệ liên kết giữa hai giàn chủ k và k+1. Hệ số đàn hồi này phụ thuộc dạng và độ cứng của liên kết ngang giữa các giàn chủ. Thực tế các hệ số đàn hồi này thường giống nhau trong mỗi kết cấu nhịp giàn, song ta xét trường hợp tổng quát coi chúng là khác nhau, đó là chuyển vị tương đối giữa hai giàn chủ cạnh nhau (hình 3).

II — CÁCH TÍNH TOÁN VỚI TRƯỜNG HỢP TẢI TRỌNG BẤT ĐỘNG

Khảo sát biến dạng của hai giàn cạnh nhau k và k+1 ta có điều kiện là chuyển vị tương đối giữa chúng bằng biến dạng đàn hồi của hệ liên kết ngang. Với cách ký hiệu như đã nói ở trên sẽ được đẳng thức sau:

$$H.(V_{k+1} - V_k) = C_k . Z_k \tag{1}$$

$$k = 1, 2, \dots, (m-1).$$

Ở đây H là ma trận biến đổi, dùng để cân bằng số hàng trong phương trình, vì vecto V_k có n hàng biểu thị chuyển vị tại tất cả các mắt của giàn chủ, trong khi các liên kết ngang có thể chỉ đặt ở một số mắt ít hơn là p bằng số hàng của vecto phản lực liên kết Z_k. Do đó ma trận H được xây dựng sao cho tích $H . V_k$ là một vecto cũng chỉ có p hàng và chỉ biểu thị chuyển vị tại các mắt có đặt những liên kết ngang. Như vậy:

$$H = \left\| h_{ij} \right\| \quad \begin{matrix} (i = 1,2,\dots, p) \\ (j = 1,2,\dots, n) \end{matrix}$$

Với $h_{ij} = 1$ nếu tại mắt thứ j có liên kết ngang thứ i;

$h_{ij} = 0$ nếu tại mắt thứ j không có liên kết ngang thứ i.

Chẳng hạn đối với kết cấu nhịp giàn như trên hình 2 thì ma trận H sẽ là:

$$H = \left\| \begin{matrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \right\|$$

Để biểu thị các vecto V_k theo các tải trọng, ta sử dụng ma trận ảnh hưởng của các chuyển vị L_{v_k}. Nếu cô lập giàn chủ k thì ngoài vecto tải trọng P_k, còn có các vecto phản lực đàn hồi tác dụng là Z_{k-1} và Z_k. Ta có thể viết:

$$V_k = L_{v_k} (P_k + H' . Z_k - H' . Z_{k-1}) \tag{2}$$

Tương tự đối với giàn k + 1:

$$V_{k+1} = L_{v_{k+1}} (P_{k+1} + H' . Z_{k+1} - H' . Z_k) \tag{3}$$

ở đây H' là ma trận chuyển trí của ma trận H.

Thay (2) và (3) vào điều kiện biến dạng (1), và sau khi biến đổi sẽ được:

$$\begin{aligned} & H . L_{v_k} . H' . Z_{k-1} - (H . L_{v_k} . H' + H . L_{v_{k+1}} . H' + C_k) Z_k + \\ & H . L_{v_{k+1}} . H' . Z_{k+1} = H . L_{v_k} . P_k - H . L_{v_{k+1}} . P_{k+1} \end{aligned} \tag{4}$$

Đặt

$$L^*_{v_k} = H . L_{v_k} . H' \text{ và } \overline{L}_{v_k} = H . L_{v_k}$$

Phương trình (4) có thể viết gọn lại như sau:

$$L^*_{v_k} . Z_{k-1} - (L^*_{v_k} + L^*_{v_{k+1}} + C_k) Z_k + L^*_{v_{k+1}} . Z_{k+1} = \overline{L}_{v_k} . P_k - \overline{L}_{v_{k+1}} . P_{k+1} \tag{4'}$$

Lần lượt xét từng giàn chủ và tương tự cũng làm như trên, ta sẽ được một hệ thống các phương trình dạng (4') mà có thể viết gộp lại thành:

$$A \cdot Z^* = P^* \tag{5}$$

Trong đó:

$$Z^* = \left\|\begin{matrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_{(m-1)} \end{matrix}\right\| ; \quad P^* = \left\|\begin{matrix} \overline{L}_{v_1} \cdot P_1 - \overline{L}_{v_2} \cdot P_2 \\ \overline{L}_{v_2} \cdot P_2 - \overline{L}_{v_3} \cdot P_3 \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \overline{L}_{v_{m-1}} \cdot P_{m-1} - \overline{L}_{v_m} \cdot P_m \end{matrix}\right\| ;$$

$$A = \left\|\begin{matrix} -(L^*_{v_1} + L^*_{v_2} + C_1) & L^*_{v_2} & & \\ L^*_{v_2} & -(L^*_{v_2} + L^*_{v_3} + C_2) & L^*_{v_3} & \\ \ddots & \ddots & \ddots & \\ & L^*_{v_{m-1}} & & -(L^*_{v_{m-1}} + L_{v_m} + C_{m-1}) \end{matrix}\right\|$$

Z^* là ma trận khối cột; mỗi khối của ma trận này có p hàng. Như vậy Z^* có **px(m − 1)** hàng và đóng vai trò các ẩn số;

P^* là ma trận khối cột; mỗi khối là một ma trận có p hàng. Như vậy P^* có px(m − 1) hàng và là ma trận xác định (phụ thuộc các tải trọng và độ cứng của các giàn chủ);

A là ma trận khối ba giải chéo; mỗi ma trận phần tử là một ma trận vuông cấp pxp. Ma trận này cũng là xác định và phụ thuộc độ cứng của các giàn chủ, độ cứng của hệ thống liên kết ngang.

Từ (5) có thể giải được các ẩn số Z^*:

$$Z^* = A^{-1} \cdot P^* \tag{6}$$

Như vậy, theo (6) ta xác định được ma trận các phản lực Z^* trong các liên kết đàn hồi, tức là các phản lực truyền từ giàn chủ nọ sang giàn chủ kia qua hệ liên kết ngang. Từ đó có thể xác định được nội lực và chuyển vị của hệ giàn theo các biểu thức sau đây:

Nội lực trong giàn chủ k:

$$S_k = L_{s_k} \cdot (P_k + H' \cdot Z_k - H' \cdot Z_{k-1}) \tag{7}$$

Chuyển vị của giàn chủ k:

$$V_k = L_{v_k} \cdot (P_k + H' \cdot Z_k - H' \cdot Z_{k-1}) \tag{8}$$

Ở đây L_{s_k} và L_{v_k} là ma trận ảnh hưởng nội lực và ma trận ảnh hưởng chuyển vị của giàn k. Ma trận L_{s_k} có số cột bằng n là số mắt giàn mà tải trọng tác dụng, và số hàng bằng số thanh cần tính nội lực. Ma trận L_{v_k} đã được nói ở trên.

III — CÁCH TÍNH TOÁN VỚI TRƯỜNG HỢP TẢI TRỌNG DI ĐỘNG

Trong các công trình cầu, ngoài phần tải trọng bất động là trọng lượng bản thân của kết cấu nhịp, còn có phần tải trọng quan trọng là hoạt tải có thể tác dụng tại vị trí bất kỳ, sao cho tình trạng làm việc của kết cấu bất lợi nhất. Do đó cần phải xây dựng các mặt ảnh hưởng của các nội lực và chuyển vị.

Nguyên tắc tính toán trong trường hợp này cũng tương tự như với trường hợp tải trọng bất động. Các ma trận L_{V_k}, H, C_k vẫn như cũ. Ở đây chỉ cần:

1) Thay các vectơ tải trọng P_k bằng các ma trận tải trọng P_k. Vì khi vẽ các mặt ảnh hưởng của nội lực và chuyển vị, ta phải cho tải trọng đơn vị $P = 1$ lần lượt đặt tại từng mắt giàn chủ ở phần mặt cầu, do đó các ma trận P_k đều là các ma trận đơn vị cấp nxn;

2) Thay các vectơ Z_k bằng các ma trận ảnh hưởng của các phản lực đàn hồi thuộc hệ liên kết ngang k khi tải trọng đơn vị $P = 1$ đặt ở các mắt của giàn chủ i:

$$L_{Z_k^i} = \begin{Vmatrix} \bar{z}_{k1}^{i1} & \bar{z}_{k1}^{i2} & \dots & \bar{z}_{k1}^{in} \\ \bar{z}_{k2}^{i1} & \bar{z}_{k2}^{i2} & \dots & \bar{z}_{k2}^{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{z}_{kp}^{i1} & \bar{z}_{kp}^{i2} & \dots & \bar{z}_{kp}^{in} \end{Vmatrix}$$

Các ma trận $L_{Z_k^i}$ là các ma trận chữ nhật cấp pxn với p là số lượng liên kết ngang thuộc hệ liên kết k nối hai giàn chủ k và k + 1, n là số mắt giàn mà tải trọng lần lượt tác dụng. Các ma trận này đóng vai trò các ẩn số cần xác định.

Các phần tử $\bar{z}_{kr}^{ij}$ biểu thị phản lực tại liên kết đàn hồi r thuộc hệ liên kết ngang k nối hai giàn chủ k và k + 1 khi tải trọng $P = 1$ đặt tại mắt j của giàn chủ i gây nên.

Cũng diễn giải như ở mục II trong trường hợp này (4') sẽ trở thành:

$$L_{V_k}^* \cdot Lz_{k-1} - (L_{V_k}^* + L_{V_{k+1}}^* + C_k)Lz_k + L_{V_{k+1}}^* \cdot Lz_{k+1} = \bar{L}_{V_k} - \bar{L}_{V_{k+1}} \quad (9)$$

Và ta cũng có dạng của (5) sẽ là:

$$A \cdot L_Z^* = L_P \quad (10)$$

Trong đó:

$$L_Z^* = \begin{Vmatrix} Lz_1^1 & Lz_1^2 & \dots & Lz_1^m \\ Lz_2^1 & Lz_2^2 & \dots & Lz_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Lz_{m-1}^1 & Lz_{m-1}^2 & \dots & Lz_{m-1}^m \end{Vmatrix}; \quad L_P = \begin{Vmatrix} \bar{L}_{V_1} - \bar{L}_{V_2} & & & \\ & \bar{L}_{V_2} - \bar{L}_{V_3} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \bar{L}_{V_{m-1}} - \bar{L}_{V_m} \end{Vmatrix}$$

Ma trận L_Z^* là ma trận khối có (m−1) hàng và m cột. Các ma trận phần tử Lz_k^i là các ma trận đã được nói ở trên.

Ma trận L_P là ma trận khối hai giải chéo có (m−1) hàng và m cột. Các ma trận phần tử $\bar{L}_{V_k}$ đã giới thiệu trong mục II.

Ma trận A ở đây vẫn giữ nguyên dạng như cũ.

Từ (10) ta sẽ giải ra:

$$L_Z^* = A^{-1} \cdot L_P \quad (11)$$

Sau khi tìm được ma trận L_Z^* ta sẽ dựng được các mặt ảnh hưởng của các phản lực đàn hồi, tức là các mặt ảnh hưởng của các phản lực truyền giữa các giàn chủ qua hệ thống liên kết ngang.

Các mặt ảnh hưởng của các nội lực trong hệ giàn xác định bởi biểu thức:

$$L_N = \Lambda_N \cdot L_Z^* + \Lambda_N^0 \tag{12}$$

Trong đó:

L_Z^* – ma trận đã xác định được theo (11)

L_N – ma trận biểu thị các mặt ảnh hưởng của các nội lực trong hệ giàn. Đó là một ma trận khối vuông có m hàng và m cột. Mỗi khối cột biểu thị nội lực trong các thanh từng giàn chủ khi tải trọng P = 1 di động trên giàn chủ mang chỉ số của cột đó. Cụ thể là:

$$L_N = \begin{Vmatrix} L_{N_{11}} & L_{N_{12}} \cdots & L_{N_{1m}} \\ L_{N_{21}} & L_{N_{22}} \cdots & L_{N_{2m}} \\ L_{N_{m1}} & L_{N_{m2}} \cdots & L_{N_{mm}} \end{Vmatrix}$$

Như vậy mỗi ma trận phần tử $L_{N_{ij}}$ biểu thị nội lực trong các thanh của giàn chủ i khi tải trọng P = 1 di động trên giàn chủ j gây ra. Ma trận này có cấp t×n, với t là số thanh cần xác định nội lực của giàn chủ và n là số mắt lần lượt đặt tải trọng;

Λ_N – ma trận ảnh hưởng của các nội lực trong hệ giàn do các phản lực đàn hồi đơn vị gây ra. Đó là ma trận khối chữ nhật có m hàng và (m – 1) cột, gồm hai vệt chéo có dạng như sau:

$$\Lambda_N = \begin{Vmatrix} \Lambda_{1p}^* & & & \\ -\Lambda_{2p}^* & \Lambda_{2p}^* & & \\ & -\Lambda_{3p}^* & \Lambda_{3p}^* & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & & \Lambda_{(m-1)p}^* \\ & & & -\Lambda_{mp}^* \end{Vmatrix}$$

Ở đây các ma trận phần tử xác định theo biểu thức:

$$\Lambda_{kp}^* = \Lambda_{kp} \cdot H'$$

Với H' là ma trận chuyển trí của ma trận H đã nói ở mục II; Λ_{kp} là ma trận ảnh hưởng của nội lực trong giàn chủ k do tải trọng P = 1 di động trên giàn đó gây ra, có số hàng bằng t (số thanh trong giàn chủ cần xác định nội lực) và số cột bằng n (số mắt đặt tải trọng).

$$\Lambda_{kp} = \begin{Vmatrix} \overline{N}_{11}^k & \overline{N}_{12}^k & \cdots & \overline{N}_{1n}^k \\ \overline{N}_{21}^k & \overline{N}_{22}^k & \cdots & \overline{N}_{2n}^k \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \overline{N}_{t1}^k & \overline{N}_{t2}^k & & \overline{N}_{tn}^k \end{Vmatrix}$$

$\overline{N}_{ij}^k$ là nội lực trong thanh i của giàn chủ k do tải trọng P = 1 đặt tại mắt j của giàn đó gây ra.

Λ_N° — ma trận ảnh hưởng của nội lực trong hệ cơ bản của kết cấu nhịp giàn (tức là hệ iàn chủ sau khi đã bỏ tất cả liên kết ngang). Ma trận này là ma trận khối chéo có m ıa trận phần tử.

$$\Lambda_N^\circ = \begin{Vmatrix} \Lambda_{1p} & & & \\ & \Lambda_{2p} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Lambda_{mp} \end{Vmatrix}$$

Sau khi xác định được ma trận L_N bằng công thức (12), ta sẽ được các mặt ảnh ıưởng của các nội lực trong hệ giàn.

Các ma trận ảnh hưởng của các độ võng xác định bởi biểu thức:

$$L_y = \Lambda_y \cdot L_z^* + \Lambda_y^\circ \tag{13}$$

Trong đó:

L_y — ma trận biểu thị các mặt ảnh hưởng của các độ võng của hệ giàn, là một ma trận khối vuông cấp mxm. Mỗi ma trận phần tử là một ma trận có n' hàng và n cột, với n' là số điểm mắt của mỗi giàn chủ cần xác định độ võng;

Λ_y — ma trận ảnh hưởng của độ võng trong giàn chủ do các phản lực đàn hồi đơn vị gây ra. Ma trận này là một ma trận khối hai vệt gồm m hàng và (m−1) cột.

$$\Lambda_y = \begin{Vmatrix} L_{V_1}^{**} & & & \\ -L_{V_2}^{**} & L_{V_2}^{**} & & \\ & -L_{V_3}^{**} & L_{V_3}^{**} & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & L_{V_{m-1}}^{**} \\ & & & L_{V_m}^{**} \end{Vmatrix}$$

Ở đây $L_{V_k}^{**}$ là các ma trận chữ nhật cấp nxp và xác định như sau:

$$L_{V_k}^{**} = L_{V_k} \cdot H'$$

với các ma trận L_{V_k} và H' như đã biết ở mục II.

Λ_y° — ma trận ảnh hưởng của các độ võng trong hệ giàn cơ bản. Đó là ma trận khối chéo có m ma trận phần tử, mỗi ma trận phần tử là một ma trận cấp n'xn:

$$\Lambda_y^\circ = \begin{Vmatrix} L_{V_1} & & & \\ & L_{V_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & L_{V_m} \end{Vmatrix}$$

Trên cơ sở ma trận L_y đã xác định ta có thể dựng các mặt ảnh hưởng các độ võng của kết cấu nhịp giàn.

☆

Phương pháp tính kết cấu nhịp cầu giàn có kể đến sự làm việc của hệ liên kết ngang dưới tác dụng của tải trọng trình bày ở trên là một phương pháp tính không gian, phản ánh tương đối chính xác trạng thái thực tế của kết cấu về nội lực và biến dạng.

Qua những ví dụ tính toán cụ thể đối với những kết cấu nhịp thật và so sánh với kết quả tính toán theo phương pháp hệ số phân phối ngang hiện vẫn sử dụng trong thực tế mà yếu tố không gian chỉ kể tới qua hệ số phân phối ngang, có thể rút ra nhận xét sau:

Tính toán kết cấu nhịp cầu giàn theo phương pháp hệ số phân phối ngang có thể chấp nhận được đối với các trường hợp có 2 hoặc 3 giàn chủ trong mặt cắt ngang cầu. Tại khu vực gối tải trọng phân phối cho các giàn chủ gần với nguyên tắc đòn bẩy, trong phần giữa nhịp sự phân phối gần với nguyên tắc nén lệch tâm hoặc nguyên tắc dầm trên các gối đàn hồi tùy theo độ cứng của hệ liên kết ngang. Nội lực để thiết kế tính ra lớn hơn so với tính toán theo phương pháp không gian có kể tới sự làm việc của hệ liên kết ngang là 10 — 30%. Sự chênh lệch này còn tăng lên nữa đối với trường hợp số giàn chủ trong mặt cắt ngang cầu lớn hơn 3 giàn. Trong những trường hợp đó, cách tính toán kết cấu nhịp giàn có kể tới sự làm việc của hệ liên kết ngang chắc chắn sẽ đem lại hiệu quả đáng kể về kinh tế.

Địa chỉ:
Trường Đại học xây dựng

Nhận ngày 30-6-1979

РЕЗЮМЕ

МЕТОД РАСЧЁТА МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ СО СКВОЗНЫМИ ФЕРМАМИ ПОД ВЕРТИКАЛЬНЫМИ НАГРУЗКАМИ С УЧЁТОМ РАБОТЫ ПОПЕРЕЧНЫХ СВЯЗЕЙ

Исходя из предположения о том, что поперечные перемещения ничтожны по сравнению с вертикальными и могут не учитываться при расчёте, Ферменные пространственные конструкций рассматриваются как многоярусные Ферменные плоские системы, в которых поперечные связи заменяются вертикальными пружинами. Из условия совпадения взаимных перемещений ферм с упругими деформациями поперечных связей определяются реакции, которые передаются с одной фермы на другую и вследствия чего определяются усилия и перемещения в отдельных фермах при совместной работе всей системы в целом.

В случае подвижной нагрузки результаты расчёта даются в виде ординат поверхностей влияния усилий и перемещений всей системы. Предлагаемый метод расчёта обеспечивает более точные результаты по сравнению с обычными, основывающимися на коэффициентах поперечной установки нагрузок, что даёт значительную экономию материалов.