

DAO ĐỘNG CỦA KẾT CẤU KHUNG THÉP CÓ LIÊN KẾT MỀM PHI TUYẾN

ThS. **NGUYỄN HỒNG SƠN**

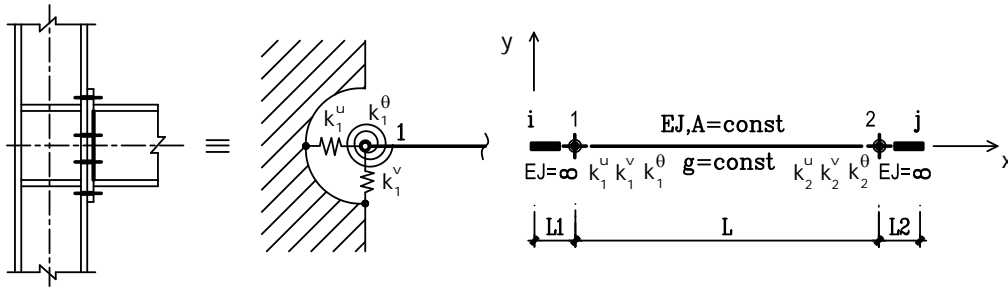
Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

ThS. **VÕ THANH LƯƠNG**

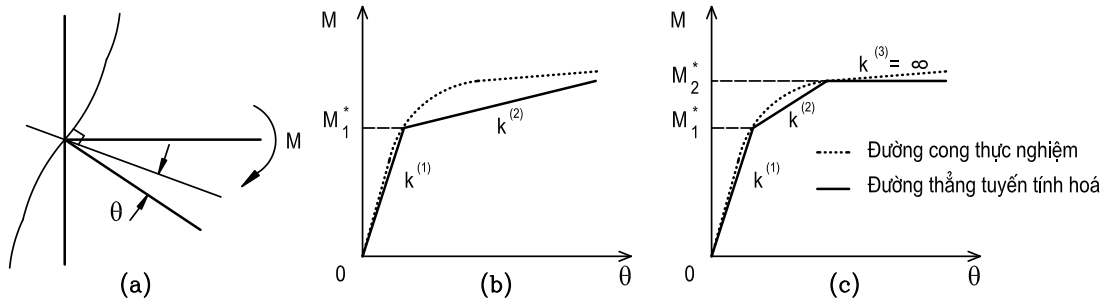
Học viện Kỹ thuật Quân sự

1. Mở đầu

Các mối nối dầm-cột trong kết cấu khung thép đều có độ mềm nhất định. Để phản ánh độ mềm này trong sơ đồ tính toán, tác giả mô hình hoá liên kết bằng ba lò xo, hai lò xo cho chuyển vị thẳng và một lò xo cho chuyển vị xoay, hình 1. Qua nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về mối nối dầm-cột của nhiều tác giả [5], [7], thấy rằng quan hệ giữa chuyển vị và nội lực có dạng phi tuyến và thường được tuyến tính hoá bằng đường song tuyến hoặc tam tuyến, hình 2b,c. Bài toán dao động của khung thép có liên kết mềm phi tuyến có ý nghĩa thực tiễn khi nghiên cứu về khung thép chịu tải trọng động, qua đó có thể thay đổi độ cứng kết cấu, tránh hiện tượng cộng hưởng [6].



Hình 1. Phần tử thanh liên kết mềm có kể đến vùng cứng của nút khung



Hình 2. Mô hình đường đặc tính của liên kết

2. Bài toán kết cấu hệ thanh có liên kết mềm phi tuyến chịu tải trọng động

2.1. Phương trình vi phân chuyển động

Phương trình cơ bản của phương pháp phần tử hữu hạn viết cho bài toán hệ thanh liên kết mềm chịu tải trọng động có dạng:

$$\ddot{\mathbf{M}}\mathbf{U} + \dot{\mathbf{C}}\mathbf{U} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R}(t) \quad (1)$$

với:

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^n \mathbf{K}_e^L = \sum_{e=1}^n \mathbf{L}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{L}_e,$$

$$\mathbf{M} = \sum_{e=1}^n \mathbf{M}_e^L = \sum_{e=1}^n \mathbf{L}_e^T \mathbf{M}_e \mathbf{L}_e,$$

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{T}_e^T \bar{\mathbf{H}}_e \bar{\mathbf{K}}_e^* \bar{\mathbf{H}}_e \mathbf{T}_e,$$

$$\mathbf{M}_e = \mathbf{T}_e^T \bar{\mathbf{M}}_e^* \mathbf{T}_e, \quad \mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_{vt} P(t) \quad (2)$$

trong đó $\bar{\mathbf{K}}_e^*$, $\bar{\mathbf{M}}_e^*$ là ma trận độ cứng và ma trận khối lượng tương đương của phần tử thanh hai đầu liên kết mềm trong hệ tọa độ địa phương do tác giả thiết lập và các kí hiệu quen thuộc khác, có thể tham khảo trong các tài liệu [2], [3].

2.2. Phương pháp giải phương trình chuyển động hệ thanh có liên kết mềm

Đối với kết cấu hệ thanh có liên kết mềm tuyến tính, phương trình chuyển động (1) là hệ phương trình vi phân tuyến tính, tác giả sử dụng phương pháp tích phân trực tiếp theo Newmark [4], xác định véc tơ chuyển vị nút \mathbf{U} của hệ, từ đó xác định được nội lực trong các phần tử thanh.

Đối với kết cấu hệ thanh có liên kết mềm phi tuyến sau khi đã tuyến tính hoá thành đường song tuyến hoặc tam tuyến thì phương trình (1) là tập hợp các hệ phương trình vi phân tuyến tính, tác giả phối hợp phương pháp Newmark và phương pháp lặp Newton-Raphson cải tiến để giải [4], [6].

2.3. Dấu hiệu toán học về trạng thái liên kết ở hai đầu phần tử thanh

Đối với bài toán liên kết đàn hồi tuyến tính, các hệ số độ mềm của liên kết tại các đầu phần tử thanh là các hằng số.

Đối với bài toán liên kết đàn hồi phi tuyến, các hệ số độ mềm của liên kết thay đổi trong quá trình giải lập, phụ thuộc vào trạng thái nội lực ở hai đầu thanh. Sau mỗi bước lặp khi đã xác định được nội lực ở hai đầu 1, 2 của phần tử, kiểm tra trạng thái liên kết đầu thanh có độ mềm là $k^{(1)}$ hay $k^{(2)}$ hoặc $k^{(3)}$ thông qua trạng thái nội lực ở đầu thanh 1 và 2 được biểu diễn qua biểu thức toán học sau đây:

$$M_j^* < |M_i| \leq M_{j+1}^* \text{ có } k^{(j+1)} \text{ với } i=1,2 \text{ và } j=0,1,2.$$

3. Lập trình và ví dụ bằng số

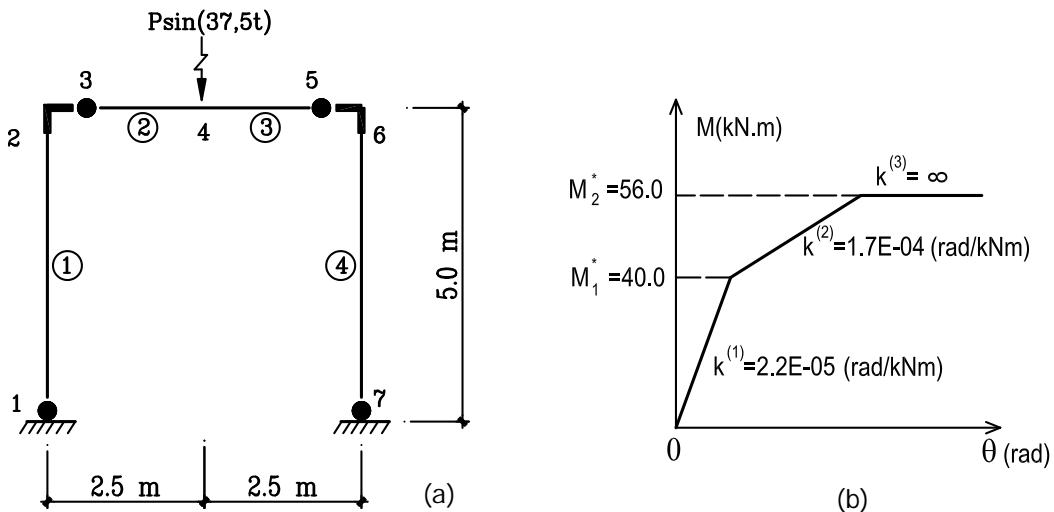
3.1. Lập trình phân tích dao động khung thép có liên kết mềm phi tuyến

Tác giả đã xây dựng chương trình DASF (*Dynamic Analysis of Steel Frame*) để phân tích dao động hệ thanh khối lượng phân bố có liên kết mềm phi tuyến chịu lực kích thích tuần hoàn bằng ngôn ngữ MATLAB.

Ví dụ bằng số

Xác định chu kỳ dao động riêng, nội lực và chuyển vị động cực đại của khung cho ở hình 3a. Biết tiết diện cột và dầm có kích thước bản cánh (20x0.6)cm, bụng (18x0.6)cm; vật liệu thép có trọng lượng riêng $g=7,85T/m^3$, $E=2,1.10^8 kN/m^2$, $\nu=0,3$; đường đặc tính liên kết mềm dầm-cột cho chuyển vị xoay ở hình 3.b, các độ mềm cho chuyển vị thẳng bằng không; hệ số cản tới hạn $\xi_1=\xi_2=0,05$.

Kết quả tính toán cho ở các bảng 1. 2 và 3.



Hình 3. Sơ đồ tính toán khung thép và đường đặc tính liên kết

Bảng 1. Kết quả tính toán chu kỳ dao động của khung
(Trường hợp liên kết cứng $k=0$ và bỏ qua ảnh hưởng lực cắt Q)

Chu kỳ (s)	1. Kiểm chứng so với [1]			2. Theo SAP2000 ^(*)		
	DASF	Theo [1]	Chênh(%)	4 phần tử	120 phần tử	Chênh(%)
T ₁	0.112835	0.114905	-1.83	0.127139	0.114976	9.56
T ₂	0.027890	0.029058	-4.18	0.026755	0.029282	-9.44
T ₃	0.011132	0.007052	36.65	0.005253	0.017862	-240.03

Ghi chú: (*) Khung được chia với lượng phần tử khác nhau.

Bảng 2. Kết quả tính toán chu kỳ dao động của khung
(Trường hợp liên kết mềm tuyến tính $k^{(0)}=2,2 \cdot 10^{-5}$ rad/kNm)

Chu kỳ (s)	3. Kể đến lực cắt Q			4. Không kể đến lực cắt Q		
	DASF	SAP2000	Chênh(%)	DASF	SAP2000	Chênh(%)
T ₁	0.118910	0.118896	0.012	0.117537	0.117537	0.000
T ₂	0.030211	0.030205	0.020	0.029647	0.029647	0.000
T ₃	0.018989	0.018983	0.032	0.018351	0.018351	0.000

Ghi chú: Sử dụng ma trận khối lượng tập trung tương đương.

Bảng 3. Kết quả tính mômen động M, chuyển vị $u_{4max}(m)$ cực đại tại các vị trí mặt cắt
(Liên kết mềm phi tuyến $k^{(1)}=2,2 \cdot 10^{-5}$ rad/kNm, $k^{(2)}=1,7 \cdot 10^{-4}$ rad/kNm, $k^{(3)}=\infty$)

Bài toán		5. Phân tích với P=40kN.			6. Phân tích với P=160kN		
Theo		SAP2000	DSF	Chênh(%)	SAP2000	DSF	Chênh(%)
Mômen động (kNm)	1	9.1520	9.3377	-2.029	36.6080	37.3506	-2.029
	2	17.1100	17.4613	-2.053	68.4400	69.8450	-2.053
	3	15.5000	15.7800	-1.806	62.0000	56.0000	9.677
	4	34.6400	35.0809	-1.273	138.5600	140.3236	-1.273
	5	15.5000	15.7800	-1.806	62.0000	56.0000	9.677
	6	17.1100	17.4613	-2.053	68.4400	69.8450	-2.053
	7	9.1520	9.3377	-2.029	36.6080	37.3506	-2.029
Chu kỳ	T ₁	0.118896	0.118200	0.585	0.118896	0.118200	0.586

	T ₂	0.030205	0.0283 43	6.165	0.030205	0.028343	6.165
	T ₃	0.018983	0.0114 91	39.467	0.018983	0.011491	39.465
C.v i	u ₄ (m)	0.011700	0.0120 00	-2.564	0.046800	0.048000	-2.564
Ghi chú: Có kể đến lực cắt Q và lực cản, SAP2000 không có phân tích phi tuyến.							

Nhận xét về kết quả tính toán:

- Chương trình tính kết cấu chịu tải trọng động do tác giả lập đã sử dụng ma trận khối lượng tương đương, nên khi phân tích khung có sơ đồ tính toán cho ở hình 3, chỉ cần mô hình hoá bằng 4 phần tử.
- Nếu sử dụng phần mềm SAP2000 giải bài toán trên, để kết quả tính chu kỳ dao động riêng và nội lực động đạt độ chính xác tương đương, cần phải chia thanh ra nhiều phần tử, do trong phần mềm SAP2000 khối lượng phân bố được quy về khối lượng tập đặt ở hai đầu phần tử theo cách phân lực trong tĩnh học và bỏ qua lực quán tính do chuyển vị xoay;
- Đối với kết cấu chỉ chịu khối lượng tập trung thì kết quả tính chu kỳ dao động của hai phần mềm DSF và SAP2000 hoàn toàn trùng khớp;
- So sánh kết quả tính chu kỳ dao động riêng ứng với dạng dao động thứ nhất cho trường hợp thanh liên kết cứng (k=0) cho bởi DASF so với [1] và SAP2000 (chia mỗi thanh thành 40 phần tử) hoàn toàn phù hợp. Kết quả tính theo DASF có T₍₁₎=0.112835(s); [1] có T₍₁₎=0.114905(s), chênh 1.83%; SAP2000 có T₍₁₎=0.11497(s), chênh 1.9%. Do đó, chương trình DASF có đủ độ tin cậy để phân tích dao động;
- Khi phân tích kết cấu có liên kết mềm tuyến tính với k⁽⁰⁾= 2,2.10⁻⁵rad/kNm và P=40kN, so sánh DASF và SAP2000 thì kết quả sai khác lớn nhất về mômen nút là 2.05%, chuyển vị động cực đại theo phương đứng tại nút 4 của khung là 2,56% và chu kỳ dao động thứ nhất là 0,59%, giá trị chênh lệch này chấp nhận được. Khi phân tích liên kết mềm phi tuyến với k⁽¹⁾=2,2.10⁻⁵rad/kNm, k⁽²⁾=1,7.10⁻⁴rad/kNm, P=160kN cho kết quả sai khác về mômen nút đến 9,677% vì SAP2000 chỉ có phân tích liên kết tuyến tính và mômen nút tại 3 và 5 đạt M₂^{*}=56kNm. Như vậy phần mềm DASF đã thể hiện việc phân tích phi tuyến của liên kết.

4. Kết luận

- Khi phân tích dao động kết cấu hệ thanh theo SAP2000, cần thiết phải chia thanh thành nhiều phần tử; do ma trận khối lượng phân bố đưa về khối lượng tập trung ở hai đầu thanh và bỏ qua lực quán tính của chuyển vị xoay;
- Khi phân tích dao động kết cấu hệ thanh theo DASF, không cần chia thanh thành nhiều phần tử; do khối lượng phân bố đưa về khối lượng tương đương có kể tới lực quán tính do chuyển vị xoay;
- Từ kết quả tính toán bằng số có thể kết luận phần mềm DASF do tác giả lập, có đủ độ tin cậy để phân tích dao động khung thép có liên kết mềm phi tuyến.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. NGUYỄN VĂN PHƯƠNG. Động lực học công trình. NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2005.
2. NGUYỄN HỒNG SƠN. Phân tích đàn dẻo khung thép có liên kết mềm phi tuyến kể đến ảnh hưởng của lực dọc và lực cắt. Tạp chí Xây dựng, số 6/2006.
3. NGUYỄN HỒNG SƠN. Xây dựng ma trận khối lượng tương đương phần tử thanh có liên kết đàn hồi khối lượng phân bố. Tạp chí Thủy lợi, số 6/2006.
4. Bathe K.J. Finite element procedures. Prentice-Hall International, Inc, 1996.
5. CEN: Eurocode 3. Design of steel structures-Part I-I-General rules and rules for building. CEN ENV, 1992.
6. Clough R.W, Penzien J. Dynamic of structures. McGraw-Hill Book Co, New York, 1993.
7. Fael I.a.C, Piluso.V, Rizzano.V. Structural steel semirigid connections. Theory, design, software. CRC Press, Boca Raton, FL,2000.