

PHÂN TÍCH KHUNG THÉP PHẪNG CÓ LIÊN KẾT NỬA CỨNG Phần 2 : Phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng

Trần Tuấn Kiệt⁽¹⁾, Bùi Công Thành⁽²⁾

⁽¹⁾ Trường ĐH Sư Phạm Kỹ Thuật Tp. HCM, ⁽²⁾ Trường ĐH Bách Khoa – ĐHQG-HCM
(Bài nhận ngày 23 tháng 7 năm 2003)

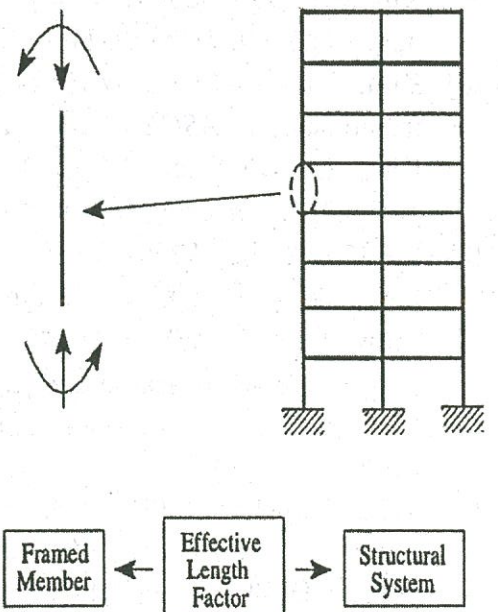
TÓM TẮT: Trong bài báo này, tác giả trình bày phương pháp hiệu chỉnh khớp dẻo (là phương pháp phân tích nâng cao) để phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng. Phương pháp này có thể giải quyết đồng thời bài toán phi tuyến hình học (bằng cách dùng hàm ổn định), phi tuyến vật liệu (dùng môđun tiếp tuyến CRC (Column Research Council) cùng với hàm parabol thể hiện sự chảy dẻo dần dần) và phi tuyến liên kết (dùng mô hình 3 thông số của Kishi-Chen). Trên cơ sở lý thuyết đó, tác giả đã xây dựng được một chương trình máy tính bằng ngôn ngữ Visual Basic để phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng. Ba bài toán ví dụ được giải ở hai trường hợp khung cứng (khung có các liên kết được giả thiết là cứng) và khung nửa cứng (khung có các liên kết là nửa cứng) để so sánh sự khác biệt của nó.

I. MỞ ĐẦU [3], [5], [6]

Ở Hoa Kỳ hiện nay, người ta sử dụng ba phương pháp sau đây để thiết kế kết cấu thép: thiết kế theo ứng suất cho phép (*Allowable Stress Design - ASD*), thiết kế dẻo (*Plastic Design - PD*) và thiết kế theo hệ số an toàn tải trọng và hệ số an toàn vật liệu (*Load and Resistance Factor Design - LRFD*).

Tất cả 3 phương pháp đều yêu cầu phải kiểm tra riêng rẽ từng cấu kiện nhất là phải tính đến hệ số K , hệ số chiều dài ảnh hưởng (*effective length factor*). Và phương pháp chiều dài ảnh hưởng này gặp phải một số khó khăn sau:

1. Phương pháp chiều dài ảnh hưởng không thể xem xét một cách chính xác tác dụng tương quan giữa hệ kết cấu và các cấu kiện thành phần. Điều này là do tác dụng tương quan trong một hệ kết cấu lớn là hết sức phức tạp, và không thể thể hiện chỉ bằng một hệ số chiều dài ảnh hưởng K đơn giản được. Kết quả, phương pháp này không dự đoán chính xác độ bền thật sự của các cấu kiện khi liên kết với nhau thành khung.
2. Phương pháp chiều dài ảnh hưởng không phản ánh được quá trình tái phân phối về nội lực do dẻo trong hệ kết cấu, bởi vì phân tích đàn hồi bậc nhất với các hệ số B_1 và B_2 chỉ xét tới ảnh hưởng bậc 2 mà không xét tới sự tái phân phối nội lực kể trên.



3. Phương pháp chiều dài ảnh hưởng không thể dự đoán được *mode* phá hoại của hệ kết cấu vì phương trình tương quan LRFD không cung cấp bất cứ thông tin nào về *mode* phá hoại của hệ kết cấu sau khi chịu tải.
4. Phương pháp chiều dài ảnh hưởng không thân thiện với người sử dụng muốn dùng máy tính để phân tích.
5. Phương pháp chiều dài ảnh hưởng đòi hỏi quá nhiều thời gian để kiểm tra từng cấu kiện riêng lẻ qua việc tính toán các hệ số K .

Vì vậy, ngày nay với sự phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật máy tính, hai khía cạnh ổn định của các cấu kiện riêng lẻ và ổn định tổng thể của hệ kết cấu có thể được xử lý đồng thời để xác định trực tiếp độ bền lớn nhất của kết cấu và được gọi là *phương pháp trực tiếp* hay *phương pháp phân tích nâng cao (advanced analysis)*. Điểm nổi bật của phương pháp trực tiếp này là ta không cần phải tính toán hệ số chiều dài ảnh hưởng K và không cần tiến hành các kiểm tra cho từng cấu kiện riêng lẻ theo như quy phạm bắt buộc nữa. Lý do là phương pháp phân tích nâng cao đã xét đến sự phi tuyến về mặt hình học và về mặt vật liệu một cách trực tiếp trong quá trình phân tích tổng thể chứ không phải trong các phương trình thiết kế các cấu kiện. Bằng phương pháp này, người ta hy vọng quá trình thiết kế sẽ trở nên đơn giản và nhẹ nhàng hơn các phương pháp thiết kế truyền thống trước đây (ASD, PD và LRFD) mà thường phải đòi hỏi kiểm tra tới lui các cấu kiện riêng lẻ hết sức đơn điệu nhàm chán và dễ gây nhầm lẫn.

Phương pháp phân tích nâng cao có thể chia làm 2 nhóm: nhóm phương pháp vùng dẻo (*plastic-zone method*) và nhóm phương pháp khớp dẻo (*plastic hinge method*). Trong đó, nhóm phương pháp vùng dẻo được xem là "phương pháp chính xác" nhưng lại không được dùng trong thực hành tính toán vì quá cầu kỳ trong tính toán. Trong khi đó, nhóm phương pháp khớp dẻo mà phương pháp ứng dụng nhất hiện nay là phương pháp hiệu chỉnh khớp dẻo (*refined plastic-hinge method*) vừa giữ lại được tính hiệu quả và tính đơn giản của phương pháp khớp dẻo vừa đạt được tính chính xác như phương pháp vùng dẻo. Và đây cũng chính là phương pháp sử dụng trong bài báo này.

II. PHƯƠNG PHÁP HIỆU CHỈNH KHỚP DẸO [3], [4], [7], [8], [9]

1. Hàm ổn định xét tới ảnh hưởng bậc 2:

Để có thể xét tới ảnh hưởng bậc 2, chúng ta dùng các hàm ổn định vì các hàm này có thể xét được ảnh hưởng của lực dọc làm giảm độ cứng uốn của cấu kiện. Điểm thuận lợi khi dùng các hàm này là chỉ bằng một phần tử cho một cấu kiện thôi, ta có thể tìm được chính xác ảnh hưởng bậc 2 của từng cấu kiện trong khung.

2. Môđun tiếp tuyến xét tới ảnh hưởng của ứng suất dư làm giảm độ cứng :

Để xem xét sự chảy dẻo dần dần do ứng suất dư dọc theo chiều dài cấu kiện dưới tải trọng dọc trục giữa hai khớp dẻo người ta dùng khái niệm môđun tiếp tuyến E_t . Môđun đàn hồi E (thay vì mômen quán tính I) được cho giảm đi để xét tới sự giảm phần đàn hồi của tiết diện ngang vì sự giảm môđun đàn hồi dễ sử dụng hơn một mômen quán tính mới cho từng tiết diện khác nhau. Ở đây ta sử dụng môđun tiếp tuyến CRC qua công trình của Chen và Lui [1].

3. Mô hình giảm độ cứng hai mặt (*two-surface stiffness*) xét tới sự giảm độ cứng do uốn:

Mô hình môđun tiếp tuyến thích hợp với phần tử chỉ chịu lực dọc trục nhưng lại không thích hợp với trường hợp cấu kiện chịu nén uốn đồng thời. Vì vậy cần phải tìm một mô hình thể hiện việc giảm độ cứng dần dần do ảnh hưởng dẻo hóa từ từ khi bị uốn. Ở đây

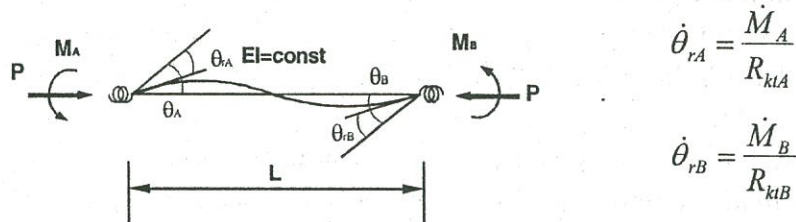
ta sử dụng mô hình giảm độ cứng hai mặt kết hợp với hàm có dạng parabol để thể hiện quá trình phát triển từ khớp đàn hồi trở thành khớp dẻo:

$$\begin{Bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{Bmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{bmatrix} \eta_A \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_B) \right] & \eta_A \eta_B S_2 & 0 \\ \eta_A \eta_B S_2 & \eta_B \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_A) \right] & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

với: $\dot{M}_A, \dot{M}_B, \dot{P}$: mômen và lực dọc gia tăng ở đầu phần tử tương ứng; S_1, S_2 : hàm ổn định; E_t : mô đun tiếp tuyến; I : mômen quán tính của mặt cắt ngang; L : chiều dài phần tử; A : diện tích mặt cắt ngang; η_A, η_B : các thông số vô hướng thể hiện sự giảm độ cứng dẻo dần dần; $\dot{\theta}_A, \dot{\theta}_B$: góc xoay gia tăng tại đầu A và B; \dot{e} : biến dạng dọc trục gia tăng.

4. Ảnh hưởng của liên kết nửa cứng :

Có thể dùng mô hình lò xo quay để mô hình liên kết nửa cứng như sau :



Hình 1 Phần tử cột-dầm với các liên kết nửa cứng

Phương trình (1) sau khi đã tích hợp ảnh hưởng của độ mềm liên kết trở thành :

$$\begin{Bmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{Bmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{bmatrix} S_{ii}^* & S_{ij}^* & 0 \\ S_{ij}^* & S_{jj}^* & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

trong đó:

$$S_{ii}^* = \frac{\left(S_{ii} + \frac{E_t I S_{ij} S_{jj}}{LR_{klB}} - \frac{E_t I S_{ij}^2}{LR_{klB}} \right)}{R^*} \quad (3a)$$

$$S_{jj}^* = \frac{\left(S_{jj} + \frac{E_t I S_{ij} S_{ii}}{LR_{klA}} - \frac{E_t I S_{ij}^2}{LR_{klA}} \right)}{R^*} \quad (3b)$$

$$S_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{R^*} \quad (3c)$$

$$R^* = \left(1 + \frac{E_t I S_{ii}}{LR_{klA}} \right) \left(1 + \frac{E_t I S_{jj}}{LR_{klB}} \right) - \left(\frac{E_t I}{L} \right) \frac{S_{ij}^2}{R_{klA} R_{klB}} \quad (3d)$$

R_{klA}, R_{klB} - lần lượt là độ cứng tiếp tuyến của liên kết ở đầu A và B; S_{ii}, S_{ij} - các hàm ổn định; S_{ii}^*, S_{jj}^* - các hàm ổn định đã hiệu chỉnh để xét đến các liên kết nửa cứng.

5. Giảm thêm nữa môđun tiếp tuyến CRC để xét đến sai số hình học:

Giảm thêm môđun tiếp tuyến E_i nhằm xét đến sự giảm độ cứng thêm do sai số hình học gây ra. Sự giảm độ cứng cấu kiện do các sai số hình học có thể được mô phỏng bằng sự giảm độ cứng cấu kiện tương đương và điều này đạt được qua việc giảm trị số của môđun tiếp tuyến. Hệ số giảm được dùng ở đây là 0.85 và dùng trên môđun tiếp tuyến E_i của CRC.

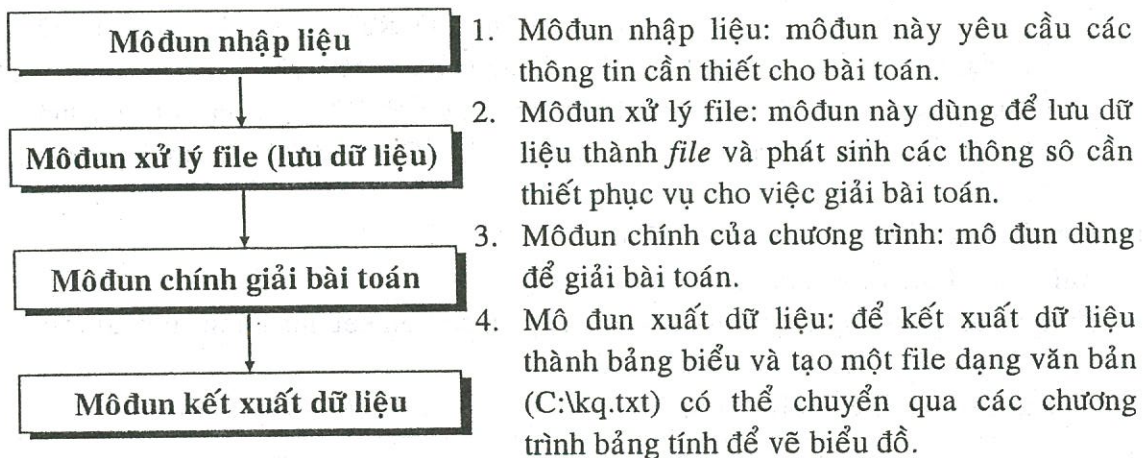
III. CHƯƠNG TRÌNH PHÂN TÍCH KHUNG THÉP PHẪNG CÓ LIÊN KẾT NỬA CỨNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP NÂNG CAO [11] :

Trên cơ sở lý thuyết trên, tác giả đã xây dựng được chương trình để phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng, bằng ngôn ngữ lập trình Visual Basic. Tinh thần chính của chương trình là giải quyết bài toán phi tuyến dựa trên phương pháp ma trận độ cứng, qua đó phải giải phương trình thể hiện quan hệ giữa độ gia tăng của lực và độ gia tăng của chuyển vị sau đây:

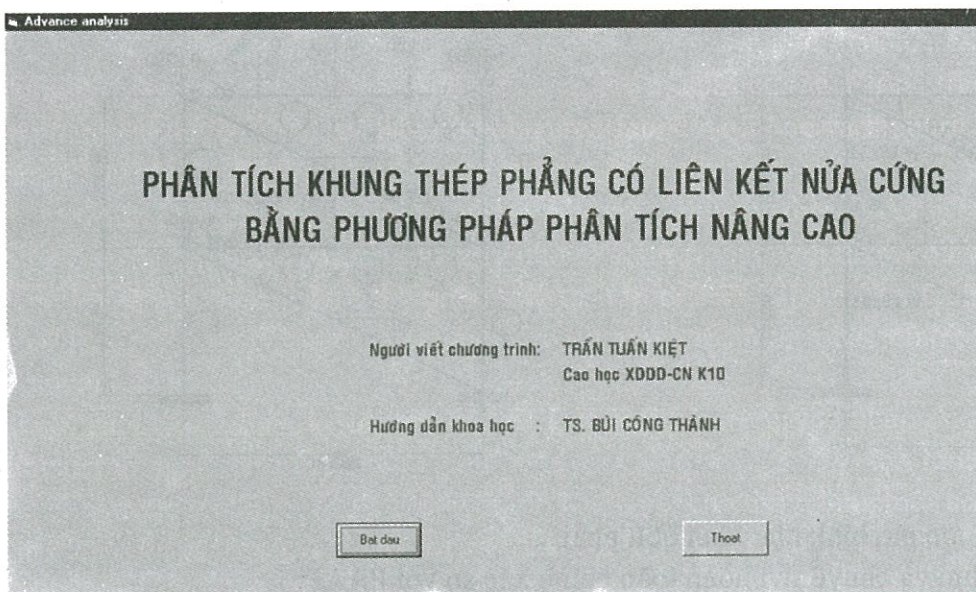
$$[K_i]\{d\} = \{f\} \tag{4}$$

trong đó: $\{d\}$ - vectơ chuyển vị nút gia tăng cần tìm; $\{f\}$ - vectơ tải nút gia tăng đã biết; $[K_i]$ - ma trận độ cứng tiếp tuyến tổng thể, phản ánh độ cứng của kết cấu.

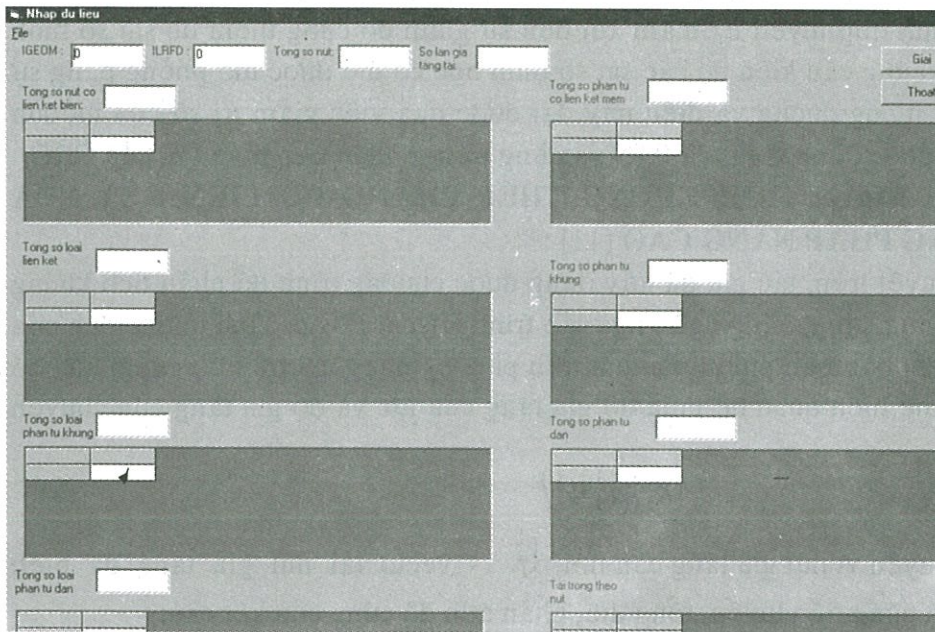
Về mặt tổ chức, chương trình được chia thành các môđun cơ bản sau đây:



Hình 2 Tổ chức chương trình



Hình 3 Sau khi khởi động chương trình



Hình 4 Nơi nhập các dữ liệu cho chương trình

Chương trình được kiểm tra qua 2 chương trình sau đây:

- Chương trình **PHINGE** viết bằng ngôn ngữ FORTRAN, là kết quả nghiên cứu của đại học quốc gia Singapore và đại học Purdue (Mỹ) [2].
- Chương trình **PAAP** cũng viết bằng ngôn ngữ FORTRAN, là kết quả luận văn tiến sĩ của Kim Seung-Ock, do giáo sư W.F. Chen (đại học Purdue) hướng dẫn [3].

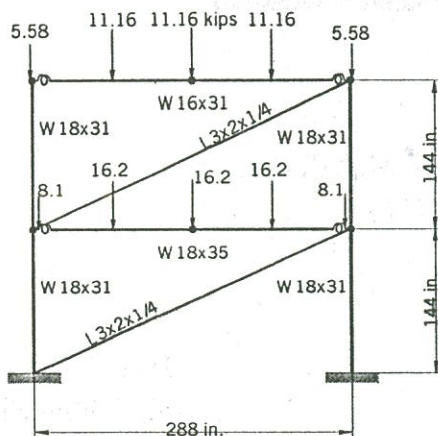
IV. CÁC VÍ DỤ MINH HỌA KIỂM TRA :

1. Bài toán ví dụ 1 : Bài toán khung nửa cứng

Phân tích một khung 2 tầng 1 nhịp có giằng và có liên kết nửa cứng chịu tải trọng như hình vẽ. Tất cả các liên kết được cho như sau:

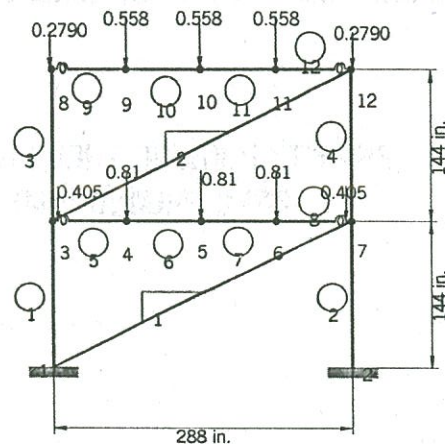
Liên kết nửa cứng ở dầm tầng

$$M_u = 1773, R_{ki} = 954013, n = 0.8$$



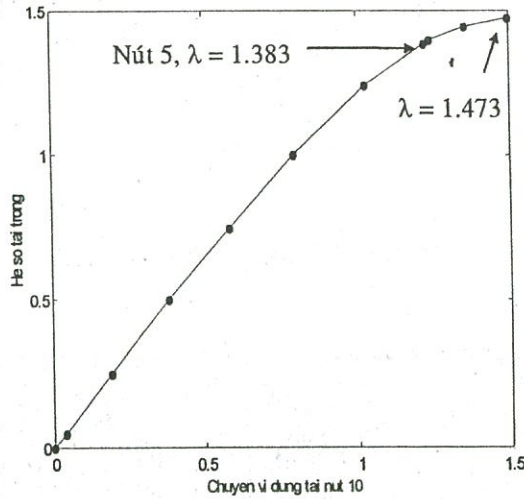
Liên kết ở dầm mái

$$M_u = 814, R_{ki} = 205924, n = 1.57$$



- Hệ kết cấu được mô hình như hình bên phải.
- Kết quả nội lực và chuyển vị hoàn toàn chính xác so với PAAP:

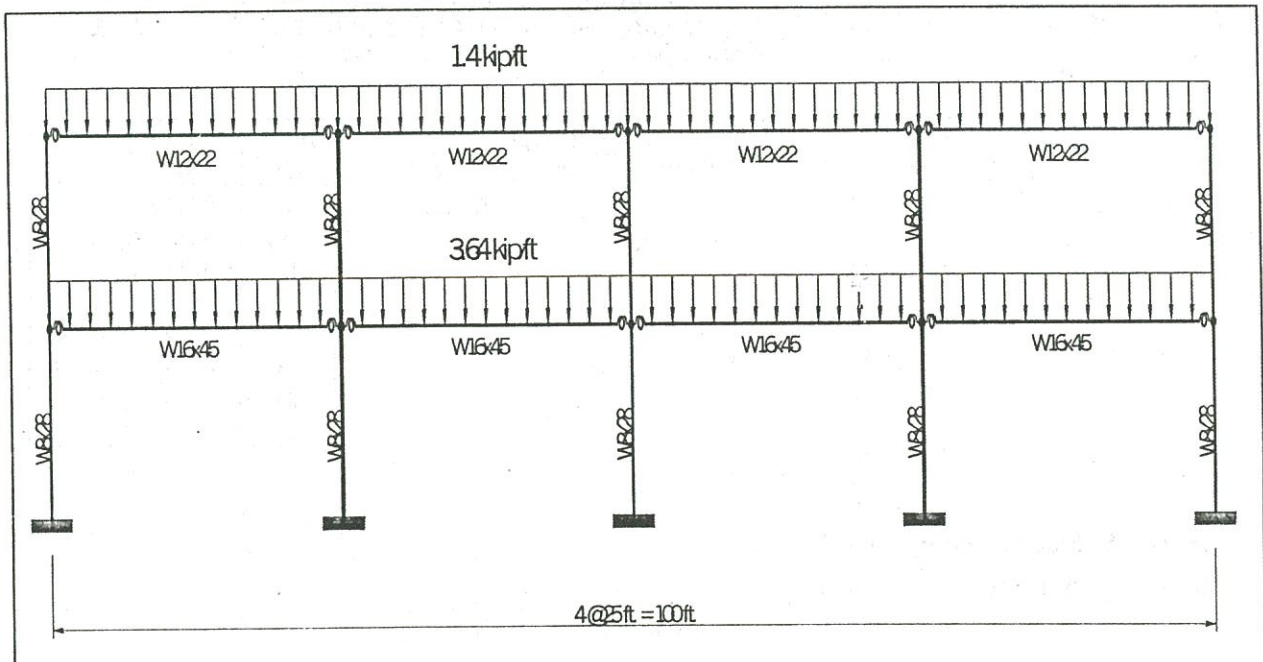
TRÌNH TỰ HÌNH THÀNH KHOP ĐEO				
KHOP ĐEO THU:	TẠI PHAN TỬ:	KHOP ĐEO TẠI ĐẦU B	O BƯỚC TẠI THU	
1	6	KHOP ĐEO TẠI ĐẦU B	O BƯỚC TẠI THU	29
2	10	KHOP ĐEO TẠI ĐẦU B	O BƯỚC TẠI THU	38



Bước tải	Chuyển vị	λ
1	-0.0375	0.05
5	-0.189	0.25
10	-0.382	0.5
15	-0.582	0.75
20	-0.795	1
25	-1.029	1.238
29	-1.22	1.383
30	-1.239	1.393
35	-1.356	1.443
38	-1.498	1.473

Hình 5 Đường cong tải trọng-chuyển vị

2. Bài toán ví dụ 2 : Khung nửa cứng có số nhịp nhiều hơn số tầng.



Phân tích một khung 2 tầng 4 nhịp có liên kết nửa cứng và chịu tải trọng như hình vẽ. 3 thông số của liên kết nửa cứng được tính sẵn:

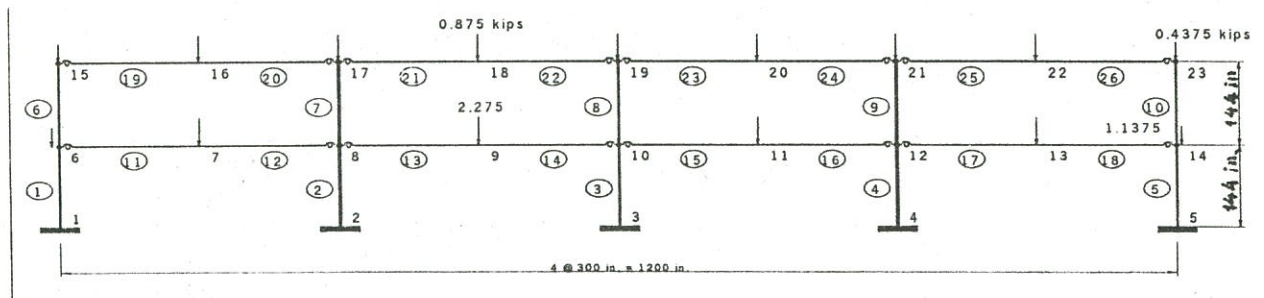
Liên kết nửa cứng ở dầm sàn tầng

$$M_u = 1361, R_{ki} = 607384, n = 0.927$$

Liên kết nửa cứng ở dầm mái

$$M_u = 446, R_{ki} = 90887, n = 1.403$$

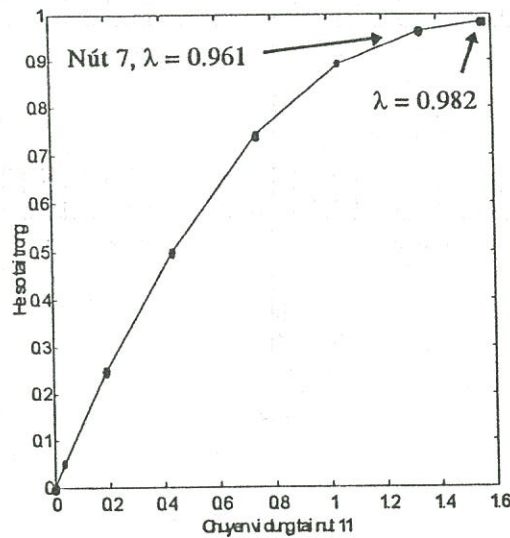
- Hệ kết cấu được mô hình:



- Kết quả nội lực và chuyển vị hoàn toàn chính xác so với PAAP:

TRÌNH TỰ HÌNH THÀNH KHỚP ĐEO

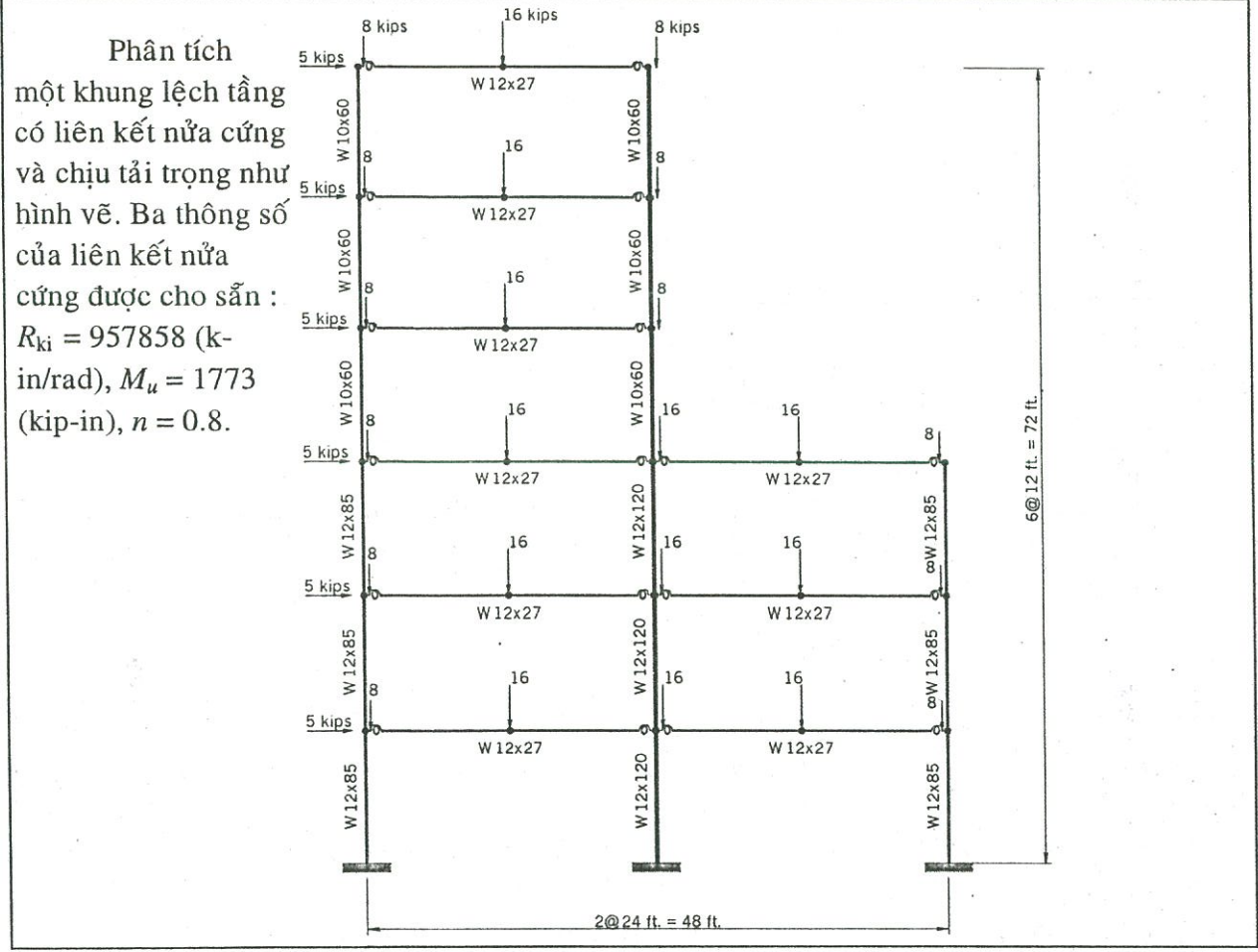
KHỚP ĐEO THU:	TÀI PHÂN TỬ:	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	
1	11	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	23
2	17	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	23
3	19	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	24
4	25	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	24
5	21	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	25
6	23	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	25
7	13	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	26
8	15	KHỚP ĐEO TẠI ĐẦU B	Ø BƯỚC TẠI THỦ	26



Bước tải	Chuyển vị	λ
1	-0.0352	0.05
5	-0.192	0.25
10	-0.435	0.5
15	-0.743	0.742
20	-1.043	0.892
23	-1.336	0.961
25	-1.563	0.981
26	-1.577	0.982

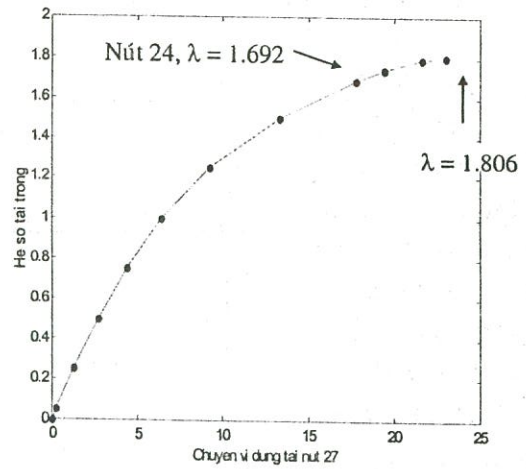
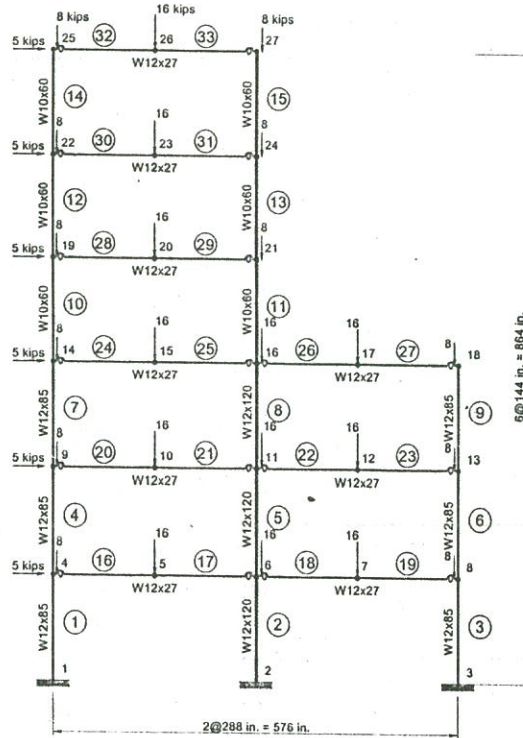
Hình 6 Đường cong tải trọng-chuyển vị

3. Bài toán ví dụ 3 : Khung nửa cứng lệch tầng có tải trọng ngang.



- Hệ kết cấu được mô hình :

- Kết quả nội lực hoàn toàn chính xác so với PAAP :

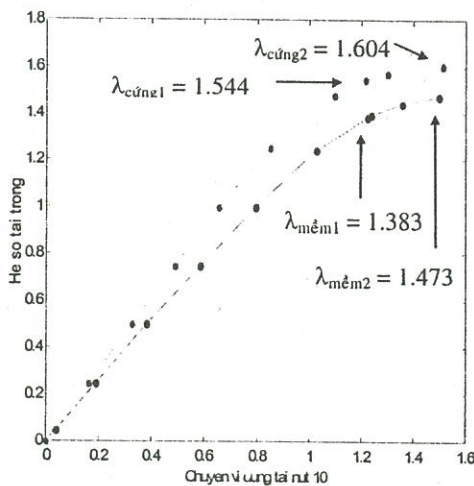


Hình 7 Đường cong tải trọng-chuyển vị theo phương X

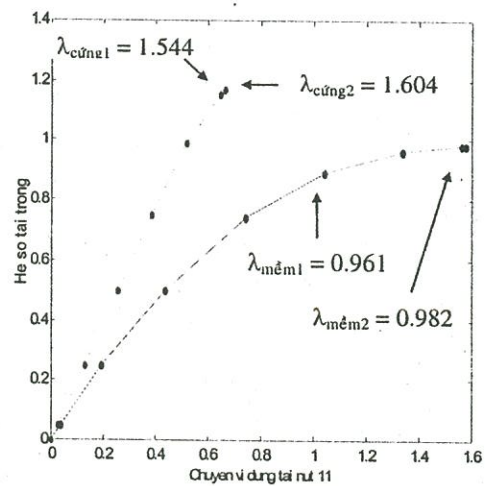
Bước tải	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Chuyển vị (in.)	0.25	1.296	2.72	4.37	6.42	9.25	13.34	17.81	19.41	21.56	23
λ	0.05	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.692	1.743	1.793	1.806

V. SO SÁNH KHUNG CỨNG VÀ KHUNG NỬA CỨNG:

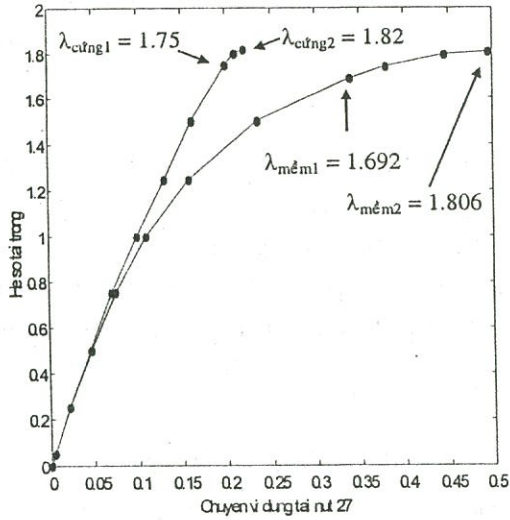
Giải lại 3 ví dụ trên với trường hợp liên kết cứng và so sánh với trường hợp liên kết nửa cứng ta có kết quả như sau:



Hình 8 Bài toán ví dụ 1



Hình 9 Bài toán ví dụ 2



λ	Chuyển vị X (cứng) (in.)	Chuyển vị X (mềm) (in.)
0.05	0.23	0.25
0.25	1.155	1.296
0.5	2.34	2.72
0.75	3.54	4.37
1	4.78	6.42
1.25	6.06	9.25
1.5	7.48	13.34
1.692	9.3	17.81

Hình 10 Bài toán ví dụ 3

Ta có bảng tóm tắt kết quả như sau:

Bài toán		Khung cứng	Khung nửa cứng	$\lambda_{mềm}/\lambda_{cứng}$
1	Khớp dẻo đầu tiên xuất hiện	$\lambda_{cứng1} = 1.544$	$\lambda_{cmềm1} = 1.383$	89.6%
	Khớp dẻo cuối cùng xuất hiện	$\lambda_{cứng2} = 1.604$	$\lambda_{mềm2} = 1.473$	91.8%
2	Khớp dẻo đầu tiên xuất hiện	$\lambda_{cứng1} = 4.603$	$\lambda_{cmềm1} = 2.85$	61.9%
	Khớp dẻo cuối cùng xuất hiện	$\lambda_{cứng2} = 4.618$	$\lambda_{mềm2} = 2.87$	62.1%
3	Khớp dẻo đầu tiên xuất hiện	$\lambda_{cứng1} = 1.75$	$\lambda_{cmềm1} = 1.692$	96.7%
	Khớp dẻo cuối cùng xuất hiện	$\lambda_{cứng2} = 1.82$	$\lambda_{mềm2} = 1.806$	99.2%

Các kết quả trên đây có thể cho ta một vài nhận xét như sau :

- Hệ giằng chéo có thể làm giảm ảnh hưởng của các liên kết nửa cứng. Kết quả của bài toán ví dụ 1 cho thấy sự khác biệt giữa khung cứng và khung mềm là không lớn lắm.
- Liên kết nửa cứng đặc biệt có ý nghĩa ở trường hợp khung chịu tải trọng ngang (bài toán ví dụ 3). Bảng so sánh chuyển vị ngang ở Hình 10 cho thấy chuyển vị ngang của khung có liên kết nửa cứng lớn gấp đôi so với khung cứng.
- Khung cứng so với khung nửa cứng, tải trọng ở cuối giai đoạn đàn hồi (khớp dẻo xuất hiện đầu tiên) có thể lớn hơn tới 40% tùy theo mức độ "mềm" của liên kết (xem bảng tổng kết).

Từ đó, ta thấy khi phân tích khung, việc giả thiết các liên kết khung là cứng hoàn toàn có thể dẫn đến sai số vô cùng nguy hiểm. Vì thế, rõ ràng việc xem xét liên kết nửa cứng trong phân tích khung là hết sức cần thiết.

VI. KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu bằng số có kiểm tra bằng một vài phần mềm nước ngoài, chúng tôi nhận thấy chương trình phân tích khung phẳng có liên kết nửa cứng trình bày trong bài báo này đạt được những kết quả đáng tin cậy có thể sử dụng trong nghiên cứu và phục vụ cho công tác thiết kế kết cấu thép. Tuy bài báo chỉ mới đề cập đến 2 loại liên kết như đã nêu trong phần mở đầu, nhưng sẽ phát triển cho các loại liên kết nửa cứng khác trong tương lai.

PLANE STEEL FRAME ANALYSIS WITH SEMI-RIGID CONNECTIONS

Part 2: Plane Steel Frame Analysis With Semi-Rigid Connections

Tran Tuan Kiet, Bui Cong Thanh

ABSTRACT : Part 2 of this paper presents the Refined Plastic Hinge Method (an advanced analysis also) to analyze plane steel frame with semi-rigid connections. This method can predict accurately the combined nonlinear effects of geometry (using stability functions), material (using Column Research Council (CRC) tangent modulus and a parabolic function for gradual yielding), and connection (using three-parameters model) on the behavior and strength of semi-rigid frames. From that, by using VISUAL BASIC, a Plane Steel Frame Analysis With Semi-Rigid Connections Program was built up. Three examples were used to illustrate the program and make comparison between rigid frame and semi-rigid frame.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Chen, W.F. & Lui, E.M., "Stability design of steel frames", (1991), CRC Press, 1991.
- [2] Chen, W.F. & Sohal, I., (1995), "Plastic Design and Second-Order Analysis of Steel frames", Springer-Verlag New York Inc.
- [3] Chen, W.F. và Kim, S. E., (1997), "LRFD steel design using advanced analysis", CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [4] Chen, W.F., "Practical analysis for semi-rigid frame design", World Scientific, Spbulishing Co.Pte.Ltd. (2000).
- [5] Kim, S.E. và Chen, W.F., (1996a), "Practical advanced analysis for braced steel frame design", ASCE J. Struct. Eng., 122(11): 1266-1274.
- [6] Kim, S.E. và Chen, W.F., (1996b), "Practical advanced analysis for unbraced steel frame design", ASCE J. Struct. Eng., ASCE, 122(11): 1259-1265.
- [7] Kim, S.E. và Chen, W.F., (1996), "Practical advanced analysis for semi-rigid frame design", Engineering Journal/Fourth quarter/1996.

- [8] Liew, J. Y. R., White, D. W., and Chen, W. F., (1993a), "Second-order refined plastic hinge analysis for frame design: Part I." *J. Struct. Engrg., ASCE*, 119 (11), 3196-3216.
- [9] Liew, J. Y. R., White, D. W., and Chen, W. F., (1993b), "Second-order refined plastic hinge analysis for frame design: Part II." *J. Struct. Engrg., ASCE*, 119 (11), 3217-3237
- [10] McGuire, J., (1995), "Notes on semi-rigid connections", *NASA Goddard Space Flight Center*.
- [11] Trần Tuấn Kiệt, "*Phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng bằng phương pháp phân tích nâng cao*", Luận văn Thạc sĩ chuyên ngành Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Đại học Bách Khoa thành phố Hồ Chí Minh, 12-2002.