PHÂN TÍCH KHUNG THÉP PHẲNG CÓ LIÊN KẾT NỬA CỨNG
Phần 1: Mô Hình Liên Kết

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 khuôn khổ của bài báo này, các tác giả giới thiệu về mô hình 3 thông số của Kishi-Chen, là mô hình thể hiện được quan hệ giữa mômen và góc xoay của liên kết một cách đơn giản và chính xác. Trên cơ sở lý thuyết đó, tác giả đã xây dựng một chương trình máy tính viết bằng ngôn ngữ Matlab để tự động hóa việc tính 3 thông số của liên kết. Hai ví dụ được đưa ra để minh họa cách sử dụng chương trình. Dữ liệu xuất ra của chương trình cũng chính là dữ liệu đầu vào của chương trình ***phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng*** *sẽ được trình bày trong phần 2.*

I. MỞ ĐẦU

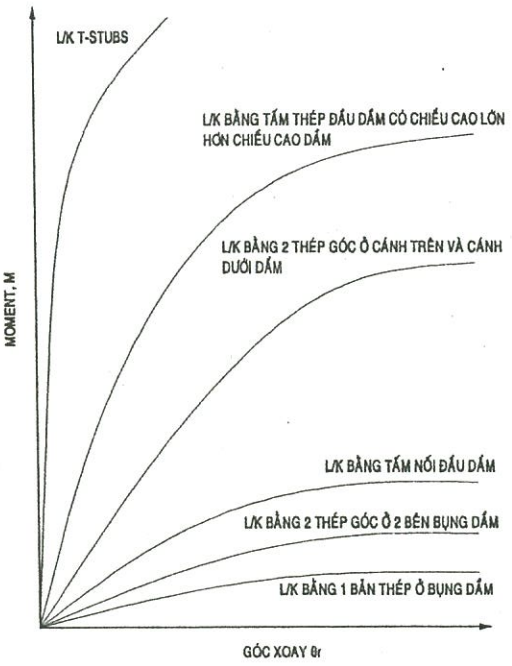
Trên thế giới hiện nay, khung thép là một trong những kết cấu xây dựng thông dụng nhất. Để phân tích khung này, theo phương pháp truyền thống, liên kết giữa cột và dầm được giả thiết là ngàm hoàn toàn hoặc là khớp lý tưởng. Tuy nhiên, ứng xử thật sự của nó lại nằm giữa hai trạng thái đó [10]. Một liên kết như thế gọi là liên kết nửa cứng. Giải quyết bài toán khung có liên kết nửa cứng là vấn đề bức thiết cần đặt ra hiện nay và hai vấn đề cần quan tâm: đó là *mô hình liên kết nửa cứng* và thứ hai là nghiên cứu *phương pháp phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng*. Trong khuôn khổ bài báo này, các tác giả sẽ tập trung vào vấn đề nghiên cứu một mô hình ứng xử liên kết nửa cứng của Kishi-Chen [4].

II. ỨNG XỬ CỦA KHUNG CÓ LIÊN KẾT NỬA CỨNG [1], [6], [7]

Các nhân tố chính ảnh hưởng đến ứng xử của khung thép phẳng có thể nhóm thành 3 loại:

1. Phi tuyến liên kết:

Trong kết cấu, liên kết là một phương tiện trung gian để qua đó các lực và mômen truyền từ cấu kiện này tới cấu kiện khác. Đối với liên kết dầm-với-cột, toàn bộ hệ lực phải truyền gồm có: lực dọc, lực cắt, mômen uốn và mômen xoắn. Riêng đối với bài toán phẳng, ảnh hưởng của mômen xoắn có thể bỏ qua. Hơn nữa, đối với hầu hết các liên kết, biến dạng do lực cắt và lực dọc thường là nhỏ so với biến dạng xoay. Do vậy, với mục đích thực hành, ta chỉ cần xem xét biến dạng xoay của liên kết mà thôi. Hình 1 phác họa ứng xử mômen-góc xoay (M-θ_r) của một số loại liên kết nửa cứng thường gặp. Liên kết dùng một bản thép góc nối bụng dầm với cột là liên kết mềm nhất và liên kết dùng T-stub là liên kết tương đối cứng hơn cả.



Hình 1 Quan hệ momen-góc xoay của các loại liên kết nửa cứng thường dùng

Từ hình vẽ ta có thể thấy, liên kết càng mềm khi mômen cực hạn càng bé và góc xoay liên kết càng lớn. Một điểm nữa cần lưu ý đối với liên kết nửa cứng là hiện tượng chất tải liên kết và dỡ tải liên kết. Nghĩa là, nếu ta đổi chiều mômen tác dụng vào liên kết, tức là dỡ tải khỏi liên kết, thì đường cong cũng đổi chiều và có dạng gần như tuyến tính với góc nghiêng bằng với góc nghiêng ban đầu của đường cong M-θ_r. Mô hình Kishi-Chen có thể mô tả chính xác và đơn giản quan hệ mômen-góc xoay của liên kết nửa cứng đồng thời cũng thể hiện được đặc tính chất tải và dỡ tải liên kết trên.

2. Phi tuyến hình học :

Cột-dầm trong khung chịu cả mômen uốn và nén dọc trục. Mômen uốn trong cột-dầm gồm có mômen sơ cấp và mômen thứ cấp. Mô men uốn sơ cấp là mô men do mômen ở đầu cấu kiện và/hoặc tải trọng ngang tác dụng vào cấu kiện gây ra. Mômen uốn thứ cấp là mô men do lực nén dọc ứng với chuyển vị ngang của cấu kiện gây ra [2]. Các ảnh hưởng bậc hai này có thể tìm được trực tiếp bằng cách dùng hàm ổn định.

Độ lệch về hình học là sai số không thể tránh được trong suốt quá trình chế tạo hoặc lắp ráp. Đối với các cấu kiện trong kết cấu, có hai loại độ lệch về hình học: loại võng giữa cấu kiện và loại lệch tâm ở đầu mút cấu kiện. Hai độ lệch hình học này sẽ gây ra các mômen phụ trong cấu kiện cột và làm giảm thêm nữa độ cứng uốn của nó. Để xem xét ảnh hưởng này, ta có thể sử dụng cách *giảm dần môđun tiếp tuyến của cấu kiện.*

3. Phi tuyến vật liệu :

Phi tuyến vật liệu có thể xuất phát từ các ứng suất dư. Ứng suất dư làm giảm dần độ cứng dọc trục của cấu kiện. Ứng suất dư tồn tại trong thép hình là do trong quá trình chế tạo, thép hình thường được gia nhiệt liên tục tới một giai đoạn nào đó. Khi được làm nguội, quá trình nguội không như nhau ở từng mặt cắt tạo ra một bộ ứng suất tự cân bằng trong mặt cắt ngang. Những ứng suất này là ứng suất "dư". Các thớ có ứng suất dư chịu nén nhiều nhất sẽ chảy dẻo trước, sau đó là tới các thớ có ứng suất dư chịu nén ít hơn. Điều này dẫn đến một quá trình *lan truyền chảy dẻo* dọc theo cấu kiện dẫn đến việc giảm dần độ cứng dọc trục của cấu kiện. Ảnh hưởng này có thể được xét đến qua khái niệm *môđun tiếp tuyến.*

Khi một tiết diện cánh rộng (*W-section*) chịu uốn thuần túy, quan hệ mômen-độ cong của một tiết diện sẽ thoải dần từ đàn hồi cho tới lúc dẻo hoàn toàn. Lý do là vì tiết diện bắt đầu chảy dẻo dần dần từ thớ ngoài cùng, nơi có ứng suất lớn nhất, cho tới khi tiết diện chảy dẻo hoàn toàn. Đây chính là quá trình hình thành khớp dẻo dần dần trong cấu kiện chịu uốn. Ảnh hưởng chảy dẻo dần dần này có thể xét đến bằng cách sử dụng hàm giảm độ cứng có dạng parabol đơn giản.

III. MÔ HÌNH LIÊN KẾT [1], [3], [4]

Quan hệ mômen-góc xoay của một liên kết thể hiện ứng xử của liên kết đó. Rất nhiều thí nghiệm về các liên kết đã được thực hiện trước đây và đã hình thành nên một kho dữ liệu hết sức phong phú về quan hệ M-θ_r (Goverdhan, 1983; Nethrcot, 1985; Kishi và Chen, 1986; Chen và Kishi, 1989). Từ kho dữ liệu này, người ta đã phát triển nhiều mô hình M-θ_r khác nhau như mô hình tuyến tính, mô hình đa thức, mô hình B-spline, mô hình lũy thừa và mô hình số mũ. Trong bài báo này, chúng ta sử dụng mô hình 3 thông số do Kishi và Chen phát triển. Ba thông số này là: độ cứng liên kết khởi đầu R_{ki}, mômen liên kết cực hạn - M_u và thông số hình dạng n. Công thức như sau:

$$m = \frac{\theta}{\left(1+\theta^{\,n}\right)^{1/n}}, \text{ khi } \theta > 0, m > 0 \qquad (1)$$

trong đó: $m = M/M_u$: mômen tại liên kết, dạng không thứ nguyên; $\theta = \theta_r/\theta_0$: góc xoay tươ

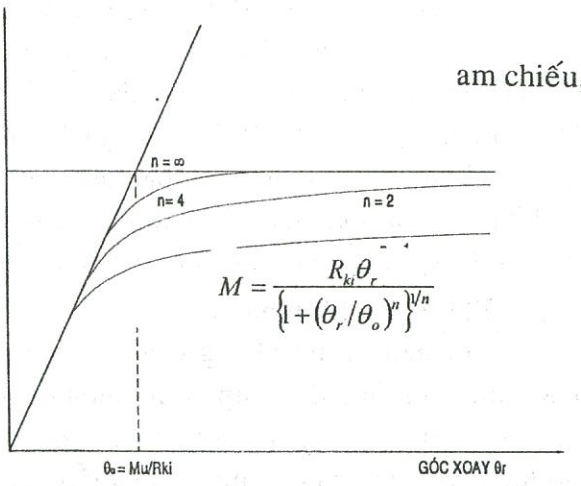
am chiếu,

Khi liên kết được gia tải, bằng phương trình vi phân đơn giản sau đây có thể tìm được độ cứng tiếp tuyến của liên kết R_{kt} tại một góc xoay bất kỳ θ_r :

$$R_{kt} = \frac{dM}{d|\theta_r|} = \frac{M_u}{\theta_0\left(1+\theta^{\,n}\right)^{1+1/n}} \qquad (2)$$

Còn khi liên kết bị dỡ tải, độ cứng tiếp tuyến bằng với độ cứng khởi đầu:

$$R_{kt} = \frac{dM}{d|\theta_r|_{\theta_r=0}} = \frac{M_u}{\theta_0} = R_{ki} \qquad (3)$$



Hình 2 Ứng xử mômen-góc xoay của mô hình 3 thông số

Rõ ràng, số mũ n có giá trị càng nhỏ đường cong chuyển biến từ độ cứng khởi đầu tới mômen cực hạn M_u càng thoải. Ngược lại, số mũ n càng lớn sự chuyển biến càng gấp gáp hơn. Khi $n = \infty$, đường cong gồm hai đường thẳng: đường thứ nhất có độ dốc là độ cứng khởi đầu và đường thứ hai nằm ngang tương ứng với mômen cực hạn M_u.

Mô hình này là một công cụ hiệu quả giúp cho người thiết kế giải quyết nhanh chóng và chính xác bài toán phân tích kết cấu phi tuyến bậc hai. Lý do là độ cứng liên kết tiếp tuyến R_{kt} và góc xoay tương đối θ_r có thể được xác định trực tiếp từ phương trình (2) mà không cần phải tính lặp.

Trong thực hành tính toán, khi sử dụng mô hình 3 thông số, nhiệm vụ quan trọng hàng đầu là phải xác định cho được 3 thông số của liên kết đã cho. Phần tiếp theo sẽ giới thiệu tóm tắt công thức tính 3 thông số theo mô hình Kishi và Chen (1990) cho 2 kiểu liên kết sau đây:

- Liên kết bằng 2 thép góc nối bản cánh trên và bản cánh dưới của dầm với cột.
- Liên kết bằng 2 thép góc nối bản cánh trên và dưới của dầm với cột đồng thời cả với 2 thép góc nữa nối bụng dầm với cột.

Độ cứng khởi đầu R_{ki} và mômen liên kết cực hạn M_u tìm được qua phân tích, còn thông số hình dạng n tìm được bằng kỹ thuật xấp xỉ đường cong.

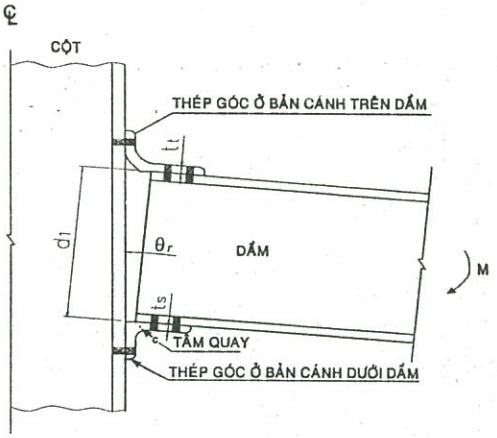
1. Liên kết bằng 2 thép góc nối bản cánh trên và bản cánh dưới của dầm với cột:

- Độ cứng liên kết khởi đầu:

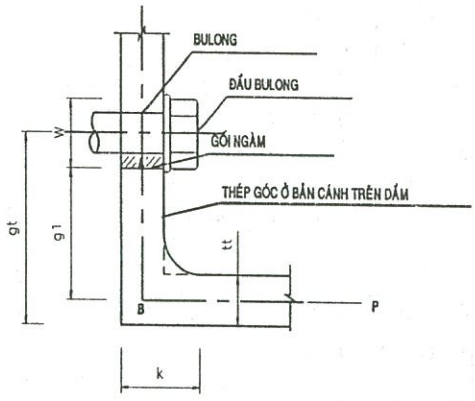
$$R_{ki} = \frac{M}{\theta_r} = \frac{3(EI)}{1+\left(\dfrac{0.78t_t^2}{g_1^2}\right)}\left(\frac{d_1^2}{g_1^3}\right) \qquad (4)$$

với: EI : độ cứng uốn của nhánh thép góc nối với mặt cột; d_1: khoảng cách từ tâm nhánh thép góc bản cánh trên đến tâm nhánh thép góc bản cánh dưới; t_t : chiều dày của thép góc bản cánh trên; $g_1 = g_t - \dfrac{D}{2} - \dfrac{t_t}{2}$ ($D = d_b$, nếu dùng đinh tán để liên kết; $D = W$ nếu dùng bu lông để liên kết); d_b : đường kính của bulông hoặc đinh tán; W: đường kính của đầu bu lông

(*nut*); g_t : khoảng cách từ gót của thép góc đến tâm của lỗ đinh trong nhánh thép góc gắn với cột.



Hình 3 Biến dạng của thép góc cánh trên và cánh dưới



Hình 4 Mô hình dầm consol của thép góc bản cánh trên

-Mômen cực hạn:

$$M_u = M_{0s} + M_p + V_p d_2 \qquad (5)$$

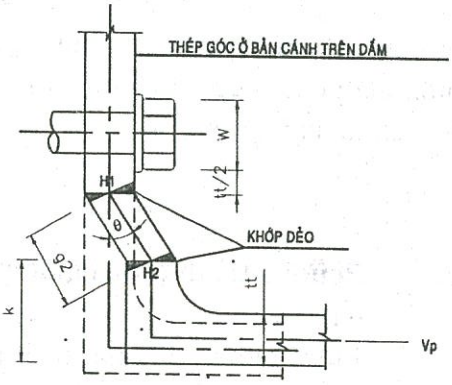
M_{0s} là mômen dẻo tại điểm C của thép góc bản cánh dưới như trong Hình 3:

$$M_{0s} = \frac{\sigma_y l_s t_s^2}{4}$$

với: l_s : chiều rộng của thép góc bản cánh dưới

t_s : chiều dày của thép góc bản cánh dưới.

M_p : mômen dẻo tại điểm H_2 của thép góc bản cánh trên (Hình 5)



Hình 5 Cơ cấu thép góc bản cánh trên trong điều kiện cực hạn

$$M_p = \frac{V_p g_2}{2} \qquad (6)$$

và d_2 được cho bởi: $d_2 = d + t_s/2 + k$ (7)

với : d : chiều cao của dầm

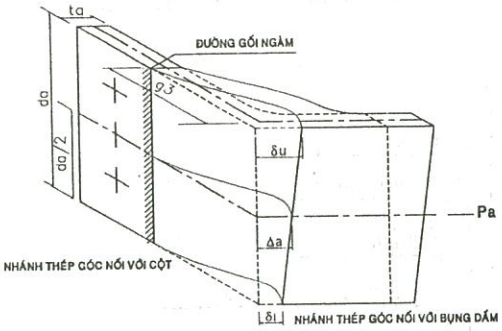
k : khoảng cách từ gót thép góc bản cánh trên đến đoạn gãy như Hình 5.

2. Liên kết bằng 2 thép góc nối bản cánh trên và dưới của dầm với cột đồng thời cả với 2 thép góc nữa nối bụng dầm với cột

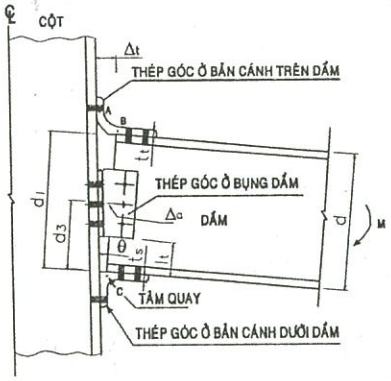
-Độ cứng liên kết khởi đầu:

$$R_{ki} = \frac{M}{\theta_r} = \frac{3(EI_t)d_1^2}{g_1\left(g_1^2 + 0.78t_t^2\right)} + \frac{6(EI_a)d_3^2}{g_3\left(g_3^2 + 0.78t_a^2\right)} \qquad (8)$$

với: EI_t : độ cứng uốn của nhánh thép góc bản cánh trên nối với mặt cột; EI_a : độ cứng uốn của nhánh thép góc bản bụng nối với mặt cột; $g_3 = g_c - W/2 - t_a/2$; W : đường kính đầu bu lông; t_a : chiều dày thép góc bản cánh trên



Hình 6 Biến dạng của mô hình consol đối với thép góc ở bụng

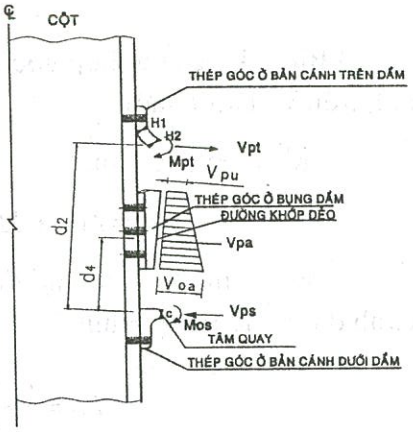


Hình 7 Dạng võng của các thép góc nối dầm với cột trong điều kiện đàn hồi

-Mômen cực hạn:

$$M_u = M_{0s} + M_{pt} + V_{pt}d_2 + 2V_{pa}d_4 \qquad (9)$$

trong đó : M_{pt} : mômen cực hạn của thép góc bản cánh trên; V_{pt}: lực cắt tác dụng ở các khớp dẻo; V_{pa} : tổng hợp lực lực cắt dẻo; $d_4 = \dfrac{(2V_{pu}+V_{0a})}{3(V_{pu}+V_{0a})}d_a + l_i + \dfrac{t_s}{2}$; V_{pu}, V_{oa} : Xem hình 8; l_i: khoảng cách đo từ biên ngoài của bản cánh đáy dầm tới biên dưới của thép góc bụng dầm; t_s : chiều dày của thép góc bản cánh dưới (Hình 8).



Hình 8 Các lực tác dụng ở trạng thái cực hạn của liên kết

3. Phương trình thực nghiệm xác định thông số hình dạng

Một bất tiện của mô hình lũy thừa Kishi-Chen là thông số hình dạng n là một thông số phải được xác định bằng kỹ thuật xấp xỉ đường cong thực nghiệm. Do vậy, muốn xác định được nó, đòi hỏi phải có các dữ liệu thực nghiệm nhưng các dữ liệu thực nghiệm này thường không sẵn có trong quá trình thiết kế. Để vượt qua khó khăn này, Wu và Chen (1990) đã đề nghị công thức thực nghiệm trên cơ sở phân tích thống kê hồi quy các đường cong liên kết thực nghiệm. Các công thức này là các hàm tuyến tính theo góc tham chiếu $\theta_0 = M_u/R_{ki}$. Kishi và Chen (1993) cũng đề nghị một phương trình thực nghiệm khác để xác định thông số hình dạng. Trong khi công thức của Wu và Chen chỉ dùng được cho các liên kết thép góc bản cánh trên và dưới có/hoặc không có thép góc bản bụng, thì công thức của Kishi và Chen dùng được không chỉ cho các liên kết trên mà còn cho cả liên kết một và hai bản thép góc bụng dầm nữa. Ở đây, chúng ta sử dụng phương trình của Kishi và Chen để tìm thông số hình dạng [4]:

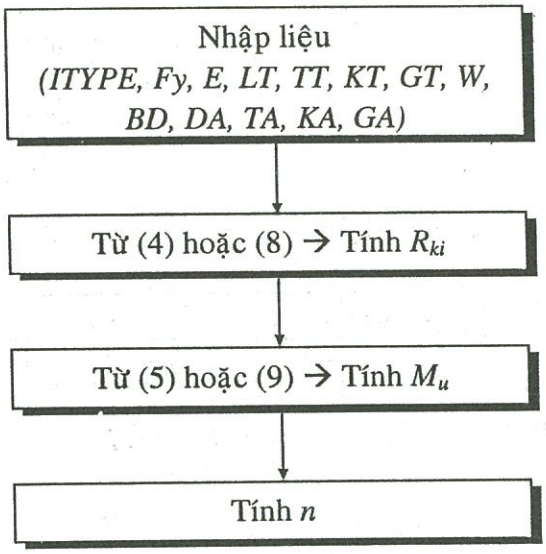
Kiểu liên kết	n	
Liên kết 2 thép góc bản cánh trên và bản cánh dưới của dầm	$2.003 \log_{10}\theta_0 + 6.070$	nếu $\log_{10}\theta_0 > -2.880$
	0.302	nếu $\log_{10}\theta_0 < -2.880$
Liên kết 2 thép góc bản cánh trên và bản cánh dưới của dầm kết hợp 2 thép góc 2 bên bụng dầm	$1.398 \log_{10}\theta_0 + 4.631$	nếu $\log_{10}\theta_0 > -2.721$
	0.827	nếu $\log_{10}\theta_0 < -2.721$

IV. LẬP TRÌNH ỨNG DỤNG [11]

Trên cơ sở lý thuyết trên đây, tác giả đã xây dựng được một chương trình máy tính bằng ngôn ngữ Matlab (được đặt tên là *bathongso.m*) để xác định nhanh chóng 3 thông số của liên kết. Chương trình được viết cho hai kiểu liên kết:

- Liên kết bằng 2 thép góc bản cánh trên và dưới (kiểu 1)
- Liên kết bằng 2 thép góc bản cánh trên và dưới kết hợp với 2 thép góc bản bụng (kiểu 2)

Giải thuật của chương trình có thể tóm tắt qua lưu đồ sau:



n được tính qua các công thức cho trong bảng trên.

Phần nhập liệu được hướng dẫn cụ thể trong chương trình. Các dữ liệu cần nhập vào là:

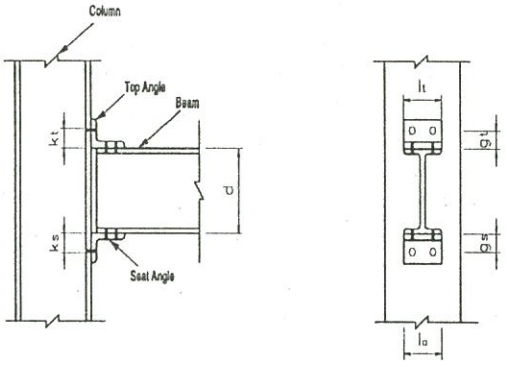
Số tt	Dữ liệu cần đưa vào	Chú thích
1	Loại liên kết F_y E	Tính chất của vật liệu và loại liên kết
2	l_t t_t k_t g_t W d	Dữ liệu của thép góc bản cánh trên và dưới
3	l_a t_a k_a g_a	Dữ liệu của thép góc 2 bên bản bụng

- Đối với kiểu 1, cần nhập dữ liệu (1) và (2).
- Đối với kiểu 2, cần nhập thêm dữ liệu (3).

Chương trình sẽ xuất ra 3 thông số R_{ki}, M_u và n của liên kết và đường cong diễn tả quan hệ mômen-góc xoay của liên kết.

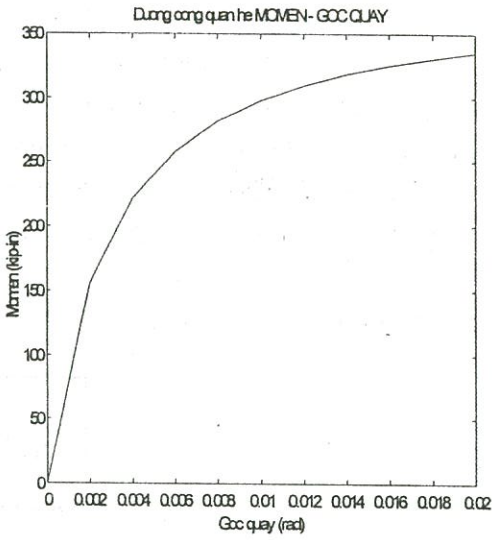
V. VÍ DỤ MINH HỌA :

Ví dụ 1: Tính 3 thông số của liên kết sau đây:



lt = ls = 8 in.
tt = ts = 0.375 in.
kt = ks = 0.875 in.
W = 1.25 in.
d = 14.1 in.

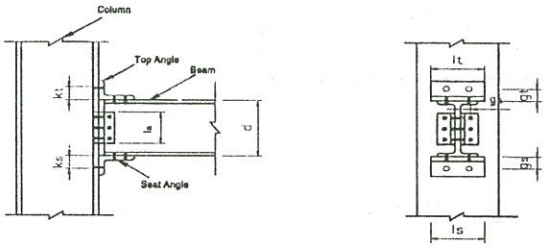
Fy = 36 ksi
E = 29.000 ksi



Kết quả khi chạy chương trình này là:

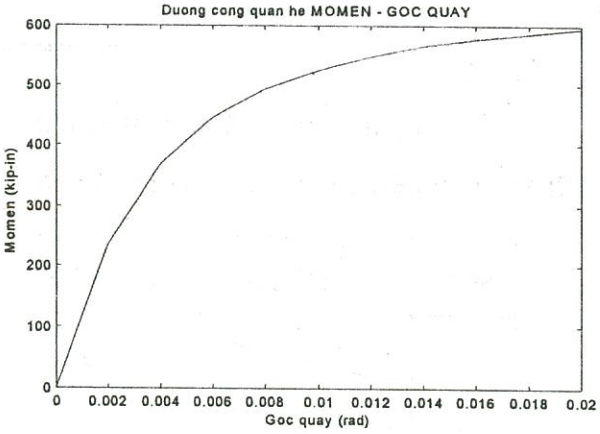
R_{ki} (k-in/rad)	M_u (k-in)	n
1.2841e+005	383.5054	1.0127

Ví dụ 2: Tính 3 thông số của liên kết sau đây:



lt = ls = 8 in.
tt = ts = 0.375 in.
kt = ks = 0.875 in.
W = 1.25 in.
d = 14.1 in.
lg = 8.5 in.
ta = 0.25 in.
ka = 0.6875 in.
ga = 2.5 in.

Fy = 36 ksi
E = 29.000 ksi



Kết quả khi chạy chương trình này là:

R_{ki} (k-in/rad)	M_u (k-in)	n
1.4694e+005	651.8105	1.3415

Kết quả có đơn vị tương ứng với đơn vị của các đại lượng nhập vào chương trình.

3 thông số từ chương trình này sẽ là đầu vào của chương trình phân tích khung thép phẳng có liên kết nửa cứng sẽ được trình bày trong phần 2.

VI. KẾT LUẬN

Từ các kết quả trong hai thí dụ trên ta nhận thấy mô hình 3 thông số của Kishi-Chen rất tiện dụng trong việc nghiên cứu các kết cấu có liên kết nửa cứng. Chương trình xây dựng

trong bài báo đã giúp tính toán tự động các thông số của mô hình kể trên. Các thông số này sẽ được đưa vào chương trình phân tích khung thép phẳng sẽ được đề cập trong phần 2.

PLANE STEEL FRAME ANALYSIS WITH SEMI-RIGID CONNECTIONS Part 1: Connection Model

Tran Tuan Kiet, Bui Cong Thanh

ABSTRACT: *This paper presents the three-parameters model of Kishi-Chen that describes simply and exactly the moment-rotation relationship of semi-rigid connections. From that, by using MATLAB, a three-parameters extimating program was realized. Two examples were used to illustrate the program. The output data will be used in the Plane steel frame analysis with semi-rigid connections program at Part 2 of this paper.*

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 refine 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.