

Nghiên cứu tính toán khung thép có liên kết nửa cứng theo mô hình của Kishi - Chen

Research calculation the semi-rigid connections steel frame with Kishi - Chen's model

> TS NGUYỄN HẢI QUANG¹, TS LÊ THANH TOÀN¹, PGS. TS VŨ QUỐC ANH², LÊ DŨNG BẢO TRUNG²

¹GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Điện Lực; Email: quangnh@epu.edu.vn, toanlt@epu.edu.vn

²GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; Email: vquocanh@gmail.com, Trungldb@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Để phân tích kết cấu khung thép chịu các trường hợp tải trọng, theo các phương pháp truyền thống thông thường các liên kết dầm - cột được giả định là liên kết cứng hoặc khớp. Điều này giúp cho việc tính toán kết cấu khung đơn giản hơn. Các nghiên cứu gần đây cho rằng khi phân tích khung thép cần phải kể đến sự làm việc của liên kết dầm - cột. Bài báo trình bày nghiên cứu tính toán khung thép có liên kết nửa cứng theo mô hình của Kishi - Chen chịu các trường hợp tải trọng tĩnh thay đổi lặp và tải trọng động, lập ra chương trình tính bằng ngôn ngữ lập trình Matlab để so sánh với các kết quả phân tích khung có liên kết dầm - cột là liên kết nửa cứng đàn hồi tuyến tính bằng phần mềm SAP2000.

Từ khóa: Khung thép; liên kết nửa cứng; mô hình Kishi - Chen.

ABSTRACT

To analyze steel frame structures subjected to load cases, according to conventional methods, beam-column connections are assumed to be rigid or joint. This makes the calculation of the frame structure more simple. Recent studies suggest that when analyzing steel frames, it is necessary to take into account the working of beam-column connections. This paper presents a study on calculating the steel frame with semi-rigid connections according to Kishi - Chen's model, subjected to the cases of cyclic static loads and dynamic loads, establish a program using Matlab programming language to compare the results of frame analysis with beam-column connections as linear elastic semi-rigid connections using SAP2000 software.

Keywords: Steel frame; semi-rigid connections; Kishi - Chen model.

1. KHÁI NIỆM VỀ LIÊN KẾT NỬA CỨNG

Thông thường, khi tính toán kết cấu khung thép, các liên kết thường được lý tưởng hóa thành dạng ngàm hoặc khớp. Sau khi đối chiếu kết quả tính với thực tế làm việc của kết cấu người ta thấy rằng hầu hết các trường hợp kết quả tính toán và thực tế làm việc có sự sai khác nhau đáng kể.

Mặt khác, trong kết cấu thép các cấu kiện dầm, cột thường được chế tạo từ trong nhà máy. Sau đó chúng được mang tới công trường, lắp ráp lại với nhau bằng các liên kết bu lông, đinh tán, liên tiếp hàn hoặc hỗn hợp. Vì vậy, để chế tạo thành các liên kết lý tưởng như cứng tuyệt đối hoặc khớp tuyệt đối là khó khăn. Trong thực tế, sự làm việc của các liên kết dầm - cột là dạng trung gian giữa liên kết ngàm lý tưởng và khớp lý tưởng, gọi là liên kết nửa cứng.

Căn cứ vào mối quan hệ giữa mô men và góc xoay của liên kết người ta thường phân loại liên kết thành các mức: ngàm lý tưởng (cứng tuyệt đối); cứng; nửa cứng; mềm và khớp lý tưởng. Trong [1] đưa ra quan niệm đơn giản hơn, nếu mô men $M \neq 0$ và góc xoay của liên kết $\theta = 0$ thì liên kết được xem là cứng (ngàm lý tưởng), nếu $\theta \neq 0$ và $M = 0$ thì được xem là liên kết khớp, nếu $M \neq 0$ và $\theta \neq 0$ thì được xem là liên kết nửa cứng.

Mối quan hệ giữa mô men và góc xoay đã được nhiều các nhà nghiên cứu quan tâm nghiên cứu như nghiên cứu thí nghiệm hoặc nghiên cứu lý thuyết.

Về thí nghiệm, năm 1985 Nethercot đã tập hợp hơn 700 thí nghiệm riêng biệt trên các liên kết dầm - cột thép, hầu hết các mẫu thí nghiệm là các liên kết bu lông. Từ đó, tác giả đã phân tích và chọn lọc ra được các thông tin dữ liệu phục vụ cho công việc nghiên cứu, sau đó đã đưa ra hệ thống phân loại liên kết [6].

Có một số mô hình toán học thường được sử dụng để biểu diễn các đường cong quan hệ giữa mô men với góc xoay của các liên kết. Cụ thể, chúng là mô hình tuyến tính (Arbabi, 1982; Kawashima và Fujimoto, 1984; Chan, 1994), mô hình song tuyến tính (Sivakumaran, 1988; Youssef-Agha, 1989), mô hình ba tuyến tính (Stelmack et al., 1986; Gerstle, 1988), mô hình đa mô hình đa thức (Frye và Morris, 1975), mô hình khối B-spline (Cox, 1972; Jones et al., 1980), mô hình đường giới hạn (A1-Bermani và cộng sự,

1994; Zhu và cộng sự, 1995), Kishi và Chen, 1987a; King và Chen, 1993), mô hình Ramberg-Osgood (Ramberg và Osgood, 1943; Shi và Atluri, 1989), mô hình Richard-Abbott (Richard và Abbott, 1975; Gao và Haldar, 1995), mô hình mũ Chen-Lui (Lui và Chen, 1988) [2, 3, 4, 5, 6, 9, 10].

Trong bài báo này lựa chọn mô hình Kishi - Chen ở liên kết giữa dầm với cột để phân tích khung thép chịu các trường hợp tải trọng tĩnh thay đổi lặp, tải trọng động để so sánh kết quả tính với trường hợp là liên kết nửa cứng đàn hồi tuyến tính do phần mềm SAP2000 tính toán.

2. MÔ HÌNH KISHI - CHEN [2, 8, 9]

Mô hình liên kết của Kishi - Chen (1987a, 1987b) đã đề xuất công thức xác định góc xoay của liên kết là:

$$\theta_r = \frac{M}{K_i \left[1 - \left(\frac{M}{M_u} \right)^n \right]^{1/n}} \quad (1)$$

trong đó

- M : là mô men của liên kết;
- M_u là mô men cực hạn của liên kết;
- K_i là độ cứng ban đầu của liên kết;
- n là thông số hình dạng của liên kết.

Độ cứng tiếp tuyến của liên kết trong quá trình gia tải là:

$$K_r = \frac{dM}{d\theta_r} = K_i \left[1 - \left(\frac{M}{M_u} \right)^n \right]^{-\frac{(n+1)}{n}} \quad (2)$$

Vì độ cứng tiếp tuyến của liên kết và góc xoay của liên kết chỉ phụ thuộc vào ba tham số ban đầu là: M_u, K_i, n cho nên mô hình Kishi - Chen thường được gọi là mô hình ba tham số.

Rõ ràng, số mũ n có giá trị càng nhỏ đường cong chuyển biến từ độ cứng khởi đầu tới mô men 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 đoạn thẳng: đường thứ nhất có độ dốc là độ cứng khởi đầu và đường thứ hai nằm ngang tương ứng với mô men cực hạn M_u .

Trong thực hành tính toán, khi sử dụng mô hình ba thông số, nhiệm vụ quan trọng hàng đầu là phải xác định được ba thông số của liên kết K_i, M_u, n ứng với hai kiểu liên kết: Liên kết bằng 2 thép góc nối bản cánh trên và bản cánh dưới của dầm với cột và liên kết bằng 2 thép góc nối bản cánh trên và dưới của dầm với cột đồng thời với hai thép góc nửa nối bụng dầm với cột.

3. ỨNG XỬ CỦA LIÊN KẾT KHI CHỊU TẢI TRỌNG LẶP [13]

Trong quá trình chịu tải trọng thay đổi lặp, quan hệ giữa mô men và góc xoay của liên kết được thể hiện như hình 2. Quan hệ giữa Mô men và góc xoay trải qua các giai đoạn như sau:

Quá trình tăng mô men OA, quá trình giảm mô men AB và CD, tăng mô men theo chiều ngược lại BC, tăng mô men tiếp DE và cứ như vậy ở các chu kỳ sau.

Quá trình tăng mô men OA, độ cứng ban đầu là K_i . Ở các bước gia tải, độ cứng tiếp tuyến được xác định theo công thức (2)

Quá trình giảm mô men AB và CD, độ cứng của liên kết được xác định là độ cứng ban đầu K_i .

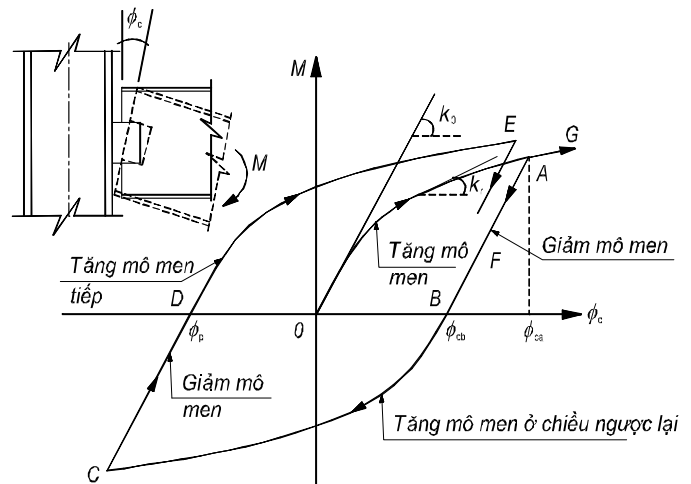
Quá trình tăng mô men theo chiều ngược lại BC, độ cứng của liên kết được xác định theo công thức (2). Tuy nhiên, góc xoay ϕ_c được xác định như sau:

$$\phi_c = \phi_{cb} - \phi_r \quad (3)$$

Quá trình tăng mô men tiếp DE, độ cứng của liên kết được xác định theo công thức (2). Tuy nhiên, góc xoay ϕ_c được xác định như sau:

$$\phi_c = \phi_r - \phi_d \quad (4)$$

Trong công thức (3), (4) ϕ_r là góc xoay của liên kết



Hình 1. Ứng xử của liên kết khi chịu tải trọng lặp [2]

4. HỆ PHƯƠNG TRÌNH VI PHÂN DAO ĐỘNG VÀ PHƯƠNG PHÁP GIẢI

Theo cách làm thông thường của phương pháp phần tử hữu hạn ta nhận được phương trình dao động của kết cấu như sau:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P_t \quad (5)$$

trong đó

M là ma trận khối lượng;

C là ma trận cản;

K là ma độ cứng;

P_t là véc tơ tải trọng nút quy đổi;

u, \dot{u}, \ddot{u} lần lượt là véc tơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của các nút khung.

Các ma trận khối lượng, độ cứng được sử dụng trong [1].

Hệ phương trình (5) là hệ phương trình vi phân phi tuyến, các hệ số M, C, K phụ thuộc vào độ cứng của liên kết, mà độ cứng của liên kết phụ thuộc vào quan hệ giữa mô men và góc xoay của liên kết. Để đảm bảo hội tụ của kết quả tính toán sử dụng phương pháp Newmark kết hợp với Newton-Raphson như trong [1] và [2].

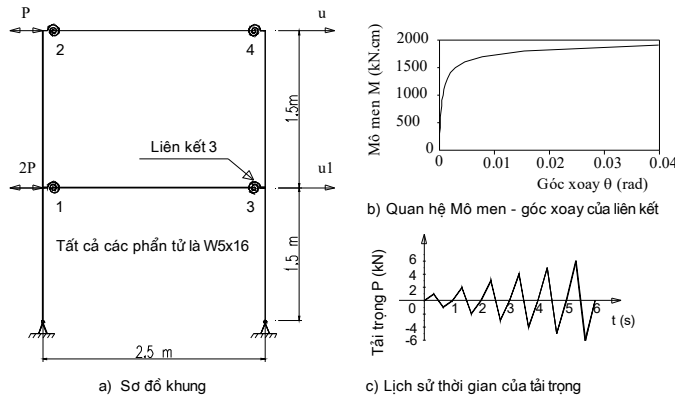
5. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

Xét khung hai tầng một nhịp, các phần tử dầm và cột được làm bằng thép A36 có mô đun đàn hồi $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$. Tiết diện của các dầm và cột đều là W5x16, kích thước của các dầm, cột là

thép như trên Hình 2a.

Liên kết giữa cột với móng là liên kết khớp, liên kết giữa cột với cột là liên kết cứng.

Liên kết giữa dầm với cột được tính toán ứng với số liệu của mô hình Kishi - Chen có $K_i = 337316,2(kN.cm/rad)$, $M_u = 2090,219(kN.cm)$, $n = 1,65$ thể hiện trên Hình 2b.



Hình 2. Sơ đồ tính của khung

Để kiểm chứng kết quả tính toán, sử dụng phần mềm Sap2000 tính toán kết quả về chuyển vị của u, mô men tại liên kết A theo thời gian và so sánh với kết quả của nhóm nghiên cứu.

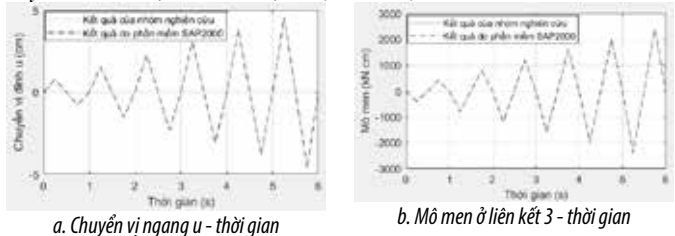
Tải trọng tác dụng thay đổi theo thời gian như trong Hình 2c và Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị của tải trọng ứng với các thời điểm đặc biệt

Thời điểm (s)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
Giá trị lực	0	P	0	-P	0	2P	0	-2P	0
Thời điểm (s)	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
Giá trị lực	0	3P	0	-3P	0	4P	0	-4P	0
Thời điểm (s)	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
Giá trị lực	0	5P	0	-5P	0	6P	0	-6P	0

• Khảo sát với trường hợp P=2 kN

Để đánh giá tính chính xác của phần mềm do nhóm tác giả lập ra thì so sánh kết quả tính toán do phần mềm SAP2000 tính với kết quả của nhóm nghiên cứu lập ra ứng với trường hợp liên kết là nửa cứng đàn hồi tuyến tính có độ cứng không đổi $K_i = 337316,2(kN.cm/rad)$ được thể hiện trên Hình 3.

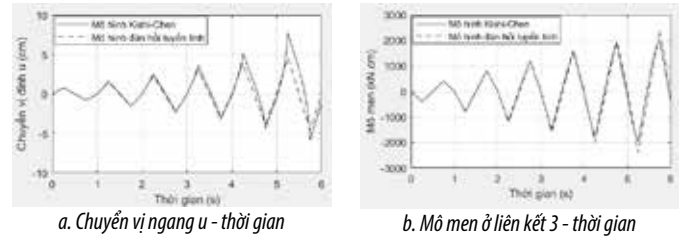


Hình 3. So sánh kết quả tính với SAP2000 trường hợp tải trọng lập

Từ kết quả tính toán trên cho thấy phần mềm nhóm tác giả lập ra là đáng tin cậy, có thể sử dụng để khảo sát cho một số trường hợp sau:

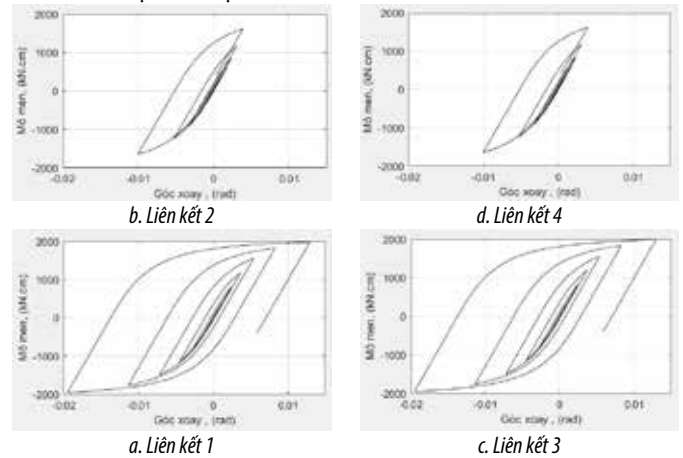
Để đánh giá hiệu ứng của liên kết nửa cứng khi tính theo mô

hình Kishi - Chen trong trường hợp chịu tải trọng tĩnh thay đổi lặp, thì tính toán khung có liên kết dầm với cột theo mô hình Kishi - Chen và so sánh với trường hợp liên kết là nửa cứng đàn hồi tuyến tính có độ cứng không đổi $K_i = 337316,2(kN.cm/rad)$, kết quả tính toán được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. So sánh tính theo mô hình Kishi - Chen và đàn hồi tuyến tính tải trọng lặp

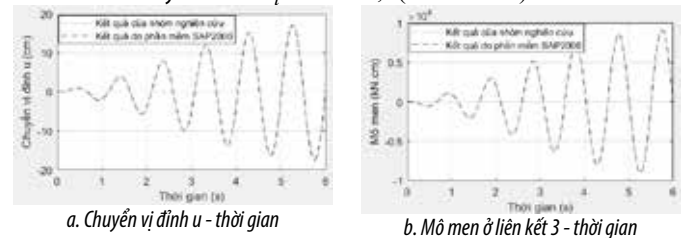
Qua Hình 4 cho thấy, trong trường hợp chịu tải trọng tĩnh, chuyển vị đỉnh của khung khi tính theo mô hình Kishi - Chen tăng lên đáng kể so với khi tính theo mô hình đàn hồi tuyến tính. Nhưng giá trị mô men thì bị giới hạn bởi giá trị mô men cực hạn do vậy giá trị mô men ở liên kết 3. Để giải thích vấn đề này, xem xét mối quan hệ giữa mô men và góc xoay của các liên kết. Các giá trị tính toán được thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Quan hệ giữa mô men và góc xoay của các liên kết trường hợp tải trọng lặp

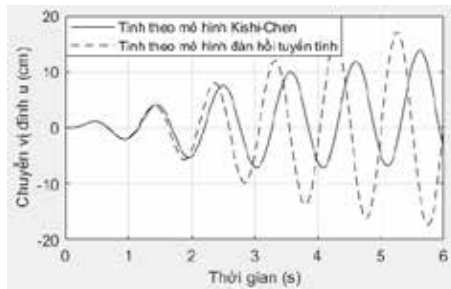
Từ kết quả ở Hình 5 cho thấy độ cứng của liên kết khi tính theo mô hình Kishi - Chen thay đổi trong cả quá trình chịu tải trọng. Thời gian mà độ cứng của liên kết có giá trị bằng độ cứng ban đầu là không nhiều do vậy kết cấu "yếu" hơn khi tính theo mô hình đàn hồi tuyến tính.

• Khảo sát với trường hợp P = 2 kN, các nút đều có khối lượng là $m = 0,04 kN.s^2/cm$, độ cứng của các liên kết dầm - cột theo mô hình đàn hồi tuyến tính $K_i = 337316,2(kN.cm/rad)$

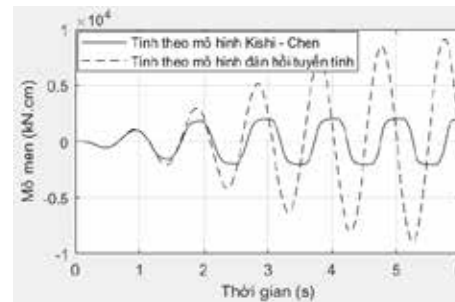


Hình 6. So sánh kết quả tính với SAP2000 trong trường hợp tải trọng động

Từ kết quả tính toán trên cho thấy phần mềm nhóm tác giả lập ra là đáng tin cậy, có thể sử dụng để khảo sát cho trường hợp sau:

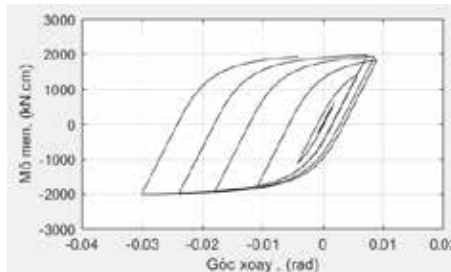


a. Chuyển vị đỉnh - thời gian

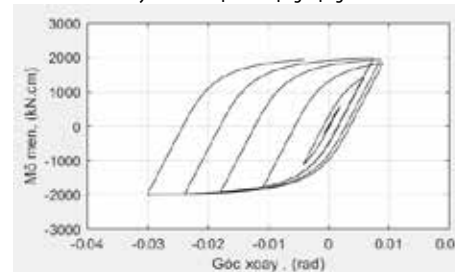


b. Mô men ở liên kết 3 - thời gian

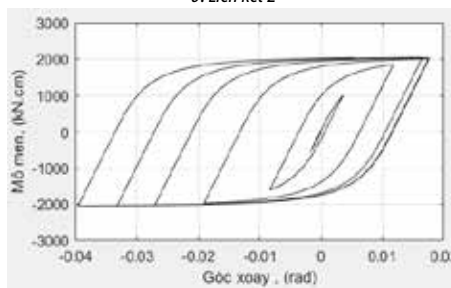
Hình 7. So sánh tính theo mô hình Kishi - Chen với đàn hồi tuyến tính chịu tải trọng động



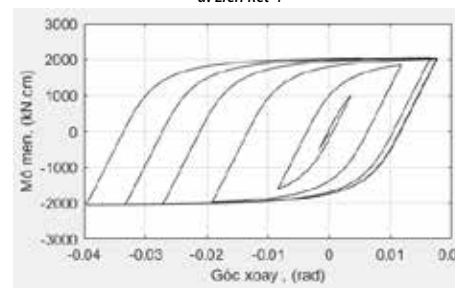
a. Liên kết 1



b. Liên kết 2



c. Liên kết 3



d. Liên kết 4

Hình 8. Quan hệ giữa mô men và góc xoay của các liên kết trường hợp tải trọng động

6. KẾT LUẬN

Để tích phân hệ phương trình vi phân phi tuyến được thành lập bởi khung thép có liên kết nửa cứng chịu tải trọng động thì có thể sử dụng phương pháp Newmark kết hợp với Newton-Raphson như trong [2], hoặc chỉ sử dụng phương pháp Newmark với bước thời gian nhỏ để tính toán vẫn đảm bảo tính hội tụ của kết quả tính toán.

Qua khảo sát ở ví dụ cho thấy ứng với trường hợp tải trọng tĩnh thì chuyển vị ngang ở đỉnh khi tính với mô hình đàn hồi tuyến tính nhỏ hơn khi tính với mô hình Kishi - Chen nhưng khi tính toán với tải trọng động thì kết quả cho thấy ngược lại.

Bài báo này là kết quả nghiên cứu đề tài mã số: ĐTKHCN.08/2022 của Trường Đại học Điện lực năm 2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Hải Quang (2012) Luận án tiến sĩ, "Tính toán khung thép có liên kết nửa cứng theo mô hình đàn - dẻo chịu tải trọng động".
- [2] Chan S.L and Chui P.P.T (2000), "Non-linear static and cyclic analysis of steel frames with semi-rigid connections". Elsevier 2000.
- [3] Chen, WF, Kishi N, (1990). "Semi-rigid steel beam-to-column connections data base and modeling". ASCE Journal of Structural Engineering. Vol. 116-1, pp. 105-119.

- [4] Chen WF, Kishi NN. (1989). "Semirigid steel beam-to-column connections data base and modeling". J Struct Eng, ASCE;120(6):1703-17.

- [5] Chen WF, Kishi N. (1989). "Semi-rigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling". J. Struct. Div. ASCE, 115(1):105-119.

- [6] Kishi N, Chen WF. "Moment-rotation relations of semirigid connections with angles". J. Struct. Eng, ASCE 1990;116(ST7):1813-34.

- [7] Kishi N, Chen WF, Goto Y, Matsuoka KG. (1993). "Design aid of semi-rigid connections for frame analysis". Eng J, AISC. 30(3):90-107.

- [8] Kishi N and Chen WF. (1986). "Data Base of Steel Beam-to-Column Connections". Structural Engineering Report No. CE-STR-93-15.

- [9] Kishi N and Chen WF. (1986). "Steel Connection Data Bank Program". Structural Engineering Report No. CE-STR-86-18.

- [10] Kishi N, Kenichi G. Matsuoka, Chen WF, Nomachi SG. (1987). "Moment - Rotation Relation of Top - and Seat - Angle Connections". Memoirs of the Muroran Institute of Technology. Science and engineering, 163-172.

- [11] Kishi N, Chen WF, Hasan R, and Matsuoka KG. (1993). "Design aid of semi-rigid connections for frame analysis." Engrg. J., 3rd Quarter, 90-107.

- [12] Liwei Gao and Achintya Haldar. (1995). "Nonlinear Seismic Analysis of Space Structures with Partially Restrained Connections". Microcomputers in Civil Engineering 10: 27-37

- [13] Miodrag Sekulovic, Ratko Salatic, Marija Nefovska. (2002). "Dynamic analysis of steel frames with flexible connections". Computers and Structures 80: 935-955.