

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

LÊ VĂN BÌNH

PHÂN TÍCH PHI TUYẾN KHUNG THÉP BÁN CỨNG KHÔNG GIAN  
CHỊU TẢI TRỌNG TÍNH VÀ ĐỘNG BẰNG  
PHƯƠNG PHÁP VÙNG DẸO

Ngành: **Kỹ thuật Xây dựng Công trình Dân dụng và Công nghiệp**  
Mã số ngành: **62580208**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2024

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn: PGS.TS NGÔ HỮU CƯỜNG

Phản biện độc lập:

Phản biện độc lập:

Phản biện:

Phản biện:

Phản biện:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án hạp tại

.....

.....

vào lúc            giờ            ngày            tháng            năm

# CHƯƠNG 1 MỞ ĐẦU

## 1.1 Sự cần thiết của nghiên cứu

Trong phân tích phi tuyến kết cấu thép, hai phương pháp thường được áp dụng là phương pháp khớp dẻo (plastic-hinge method) và phương pháp vùng dẻo (plastic-zone method). Phương pháp khớp dẻo xây dựng phần tử dầm - cột (beam-column element) dựa trên các hàm ổn định (stability functions) từ nghiệm giải tích chính xác của phương trình vi phân cân bằng, mô tả đầy đủ yếu tố phi tuyến hình học. Sự chảy dẻo được giả thiết chỉ xảy ra ở hai đầu phần tử được gọi là các khớp dẻo, trong khi vật liệu bên trong phần tử vẫn hoàn toàn đàn hồi. Chính vì sự đơn giản hóa của phương pháp khớp dẻo nên khi tiến hành phân tích không cần rời rạc cấu kiện dầm hoặc cột thành nhiều phần tử, làm cho khối lượng tính toán giảm và thời gian phân tích cũng cải thiện đáng kể. Mặc dù có những ưu điểm nêu trên nhưng phương pháp này vẫn có những hạn chế nhất định. Cụ thể là khi hệ chịu lực phức tạp, trên phần tử có nhiều loại tải trọng tác động thì phần tử dầm-cột không thể mô phỏng chính xác sự chảy dẻo trên từng mặt cắt ngang bất kỳ cũng như không theo dõi được sự chảy dẻo dọc theo chiều dài cấu kiện. Do đó, trong các nghiên cứu theo phương pháp khớp dẻo, các nhà nghiên cứu chỉ trình bày kết quả đạt được chủ yếu là quan hệ lực – chuyển vị trong bài toán tĩnh và quan hệ chuyển vị - thời gian trong bài toán động. Các biểu đồ này chỉ thể hiện một phần phản ứng của hệ kết cấu dưới tác động của ngoại lực, nhưng không thể cung cấp đầy đủ các thông tin về các vị trí có khả năng chảy dẻo, sự lan truyền dẻo theo chiều dài, tỉ lệ phần trăm chảy dẻo của tiết diện bất kỳ và khả năng hình thành khớp dẻo dưới tác dụng của tải trọng ngoài... nên chưa đáp ứng được các yêu cầu thực tiễn khi thiết kế kết cấu.

Phương pháp vùng dẻo mô phỏng cấu kiện bằng nhiều phần tử hữu hạn với các điểm tích phân dọc theo chiều dài và trên mặt cắt ngang để theo dõi ứng xử phi tuyến vật liệu. Dưới tác động của tải trọng bất kỳ, quá trình phân tích sẽ dễ dàng xác định được các vị trí chảy dẻo và cung cấp thông tin đầy đủ nhất cho người thiết kế. Hơn nữa, phương pháp vùng dẻo có thể mô phỏng các ứng xử biến dạng phức tạp, tác động qua lại lẫn nhau khi xây dựng phần tử nên cũng đảm bảo chính

xác ứng xử phi tuyến hình học của cấu kiện. Ngoài ra, phương pháp này có thể xét đến các yếu tố khác như sự sai lệch hình học ban đầu, ứng suất dư trong quá trình chế tạo cũng như ảnh hưởng của tác động nén, uốn và xoắn đồng thời. Với các điểm tích phân, việc gán ứng suất dư và theo dõi ứng xử tại mọi vị trí trên phần tử trở nên dễ dàng cũng như mô phỏng được với nhiều loại tiết diện đa dạng của thép hình, đồng thời cũng thuận tiện khi lập chương trình tính toán. Do đó, phương pháp phần tử hữu hạn (vùng dẻo) được các tác giả tập trung nghiên cứu và phát triển liên tục qua nhiều nghiên cứu đã công bố trong thời gian gần đây.

## **1.2 Mục tiêu nghiên cứu**

Từ các phân tích nêu trên, mục tiêu nghiên cứu trong đề tài này được xác định như sau: (i) Xây dựng một phần tử hữu hạn lai (hybrid finite element) mới cho bài toán phân tích phi tuyến khung thép bán cứng không gian chịu tải trọng tĩnh và động có xét đầy đủ các yếu tố phi tuyến gồm: phi tuyến hình học, phi tuyến liên kết và phi tuyến vật liệu. (ii) Xây dựng một chương trình tính toán đáng tin cậy và áp dụng các thuật toán giải phi tuyến mới khi giải hệ phương trình cân bằng phi tuyến cho bài toán tĩnh và động.

## **1.3 Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn**

Về mặt khoa học, đề tài này đóng góp thêm một cách tiếp cận mới cho bài toán phân tích phi tuyến khung thép với mô hình không gian ba chiều tổng quát và có xét đầy đủ các yếu tố phi tuyến chủ đạo nhất, điều chưa từng được tìm thấy ở các nghiên cứu trước đây. Kết quả tính toán đạt được sẽ là cơ sở để kiểm chứng cho những nghiên cứu dùng mô hình đơn giản hóa (như phương pháp khớp dẻo).

Về mặt thực tiễn, mặc dù phương pháp này sử dụng tài nguyên phân cứng nhiều hơn cho việc lưu trữ dữ liệu, tốc độ tính toán sẽ chậm hơn nhưng sẽ có nhiều thông tin hơn về đáp ứng của kết cấu để phục vụ thiết kế. Điều này đáp ứng cho yêu cầu quản lý thông tin của kết cấu trong thời đại công nghệ số. Hơn nữa, chương trình tính toán được xây dựng có thể áp dụng trong thiết kế thực hành cũng như được sử dụng cho yêu cầu gia cố và sửa chữa các công trình hiện hữu nếu dự đoán chính xác được các hư hỏng có thể xảy ra.

## 1.4 Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu sử dụng trong đề tài này là phương pháp nghiên cứu lý thuyết. Trên cơ sở tổng quan các tài liệu nghiên cứu đã công bố có liên quan, nghiên cứu này đề xuất một phần tử hữu hạn mới áp dụng cho bài toán phân tích phi tuyến khung thép không gian có liên kết bán cứng chịu tải trọng tĩnh và động.

## 1.5 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: là ứng xử phi tuyến của hệ kết cấu khung thép không gian có liên kết bán cứng dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và động.

Phạm vi nghiên cứu: Mô hình kết cấu là mô hình phẳng hoặc không gian; tải trọng tác dụng là tĩnh hoặc động; phần tử được xây dựng trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli; không xét sự mất ổn định cục bộ và mất ổn định ngang - xoắn; biến dạng trong phần tử là nhỏ nhưng chuyển vị của hệ có thể rất lớn.

## 1.6 Cấu trúc của Luận án

Luận án này được trình bày thành 05 chương: Chương 1 – Mở đầu; Chương 2 – Phần tử khung thép bán cứng không gian; Chương 3 – Chương trình phân tích PZNASS; Chương 4 – Các ví dụ số kiểm chứng chương trình phân tích đã phát triển; Chương 5 – Kết luận; Tài liệu tham khảo;

# CHƯƠNG 2 PHẦN TỬ KHUNG THÉP BÁN CỨNG KHÔNG GIAN

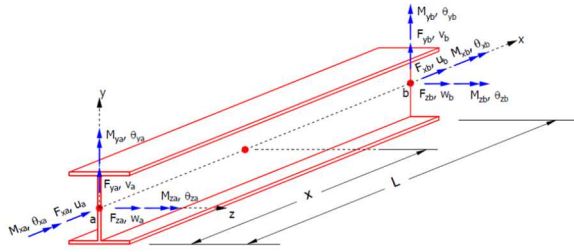
## 2.1 Các giả thiết

Phần tử được xây dựng dựa trên các giả thiết sau: (i) Phần tử ban đầu thẳng và có tiết diện không đổi; (ii) Phần tử được xây dựng trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli; (iii) Không xét sự mất ổn định cục bộ và mất ổn định ngang - xoắn; (iv) Biến dạng trong phần tử là nhỏ nhưng chuyển vị của hệ có thể rất lớn.

## 2.2 Xây dựng phần tử khung thép không gian

### 2.2.1 Quan hệ biến dạng - chuyển vị

Xét một phần tử khung không gian 2 nút trong hệ tọa độ địa phương như trên Hình 2.1. Trục  $x$  là trục đi qua trọng tâm của tiết diện, hợp với trục  $y$  và  $z$  tạo thành các mặt phẳng uốn.

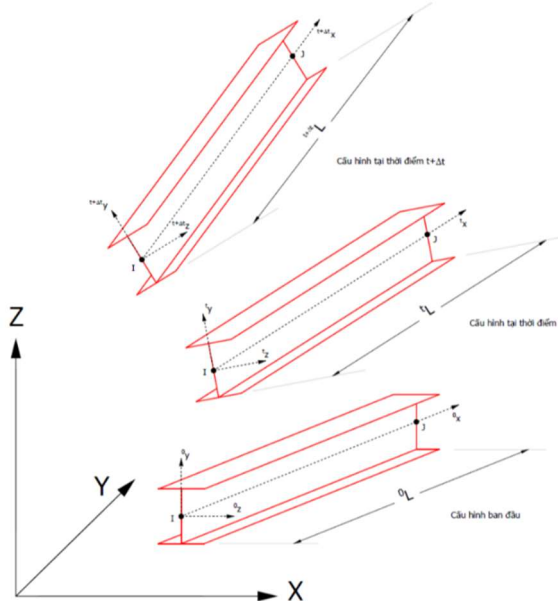


Hình 2.1. Phần tử trong hệ tọa độ địa phương

Trong phương pháp Lagrange cập nhật, dạng tuyến tính của phương trình công ảo chuyển từ cấu hình  $C_t$  đến cấu hình  $C_{t+\Delta t}$  như trên Hình 2.2 được biểu diễn như sau [1], [2] :

$$\int_V {}_t C_{ijkl} {}_t \mathbf{e}_{kl} \delta {}_t \mathbf{e}_{ij} {}_t dV + \int_V {}_t \boldsymbol{\tau}_{ij} \delta {}_t \boldsymbol{\eta}_{ij} {}_t dV = {}_t \boldsymbol{\delta} \mathbf{d}^T ({}^{t+\Delta t} \mathbf{f} - {}_t \mathbf{f}) \quad (2.1)$$

trong đó:  ${}_t C_{ijkl}$  là ma trận hệ số vật liệu;  ${}_t \mathbf{e}_{ij}$  và  ${}_t \boldsymbol{\eta}_{ij}$  lần lượt là các thành phần tuyến tính và phi tuyến của tensor biến dạng gia tăng Green-Lagrange;  ${}_t \boldsymbol{\tau}_{ij}$  là tensor ứng suất Cauchy;  $\mathbf{d}$  và  $\mathbf{f}$  lần lượt là véc-tơ chuyển vị và nội lực phần tử.



Hình 2.2. Chuyển động của phần tử khung không gian

Dựa trên giả thuyết dầm Euler-Bernoulli, biến dạng dọc trục  $\varepsilon_{xx}$  và hai thành phần biến dạng trượt  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{xz}$  tại một điểm trên tiết diện được biểu diễn [2]:

$$\varepsilon_{xx} = e_{xx} + \eta_{xx} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{xy} = e_{xy} + \eta_{xy} \quad (2.3)$$

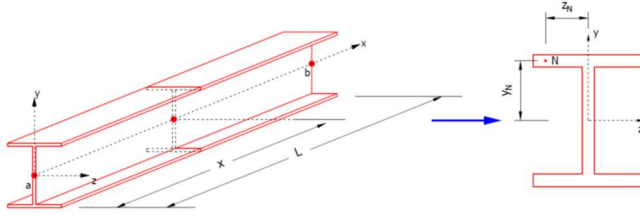
$$\varepsilon_{xz} = e_{xz} + \eta_{xz} \quad (2.4)$$

Thay các phương trình (2.2), (2.3) và (2.4) vào (2.1) và sử dụng định luật Hooke, phương trình công ảo được viết lại như sau:

$$\int_V (E e_{xx} \delta e_{xx} + 4G e_{xy} \delta e_{xy} + 4G e_{xz} \delta e_{xz}) dV + \int_V (\tau_{xx} \delta \eta_{xx} + 2\tau_{xy} \delta \eta_{xy} + 2\tau_{xz} \delta \eta_{xz}) dV = \delta \mathbf{d}^T ({}^{t+\Delta t} \mathbf{f} - {}^t \mathbf{f}) \quad (2.5)$$

Các thành phần biến dạng tại điểm N( $y_N$ ,  $z_N$ ) như trên Hình 2.3 được biểu diễn theo thành phần chuyển vị như sau [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ e_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ e_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \eta_{xx} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \right] \approx \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \eta_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \eta_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \end{array} \right. \quad (2.6)$$



Hình 2.3. Biến dạng tại điểm N

Chuyển vị của điểm N biểu diễn theo chuyển vị của trọng tâm tiết diện như sau:

$$u_x = u - y \frac{\partial v}{\partial x} - z \frac{\partial w}{\partial x}; u_y = v - z \theta_x; u_z = w + y \theta_x \quad (2.7)$$

Thay (2.7) vào (2.6), thực hiện các phép toán đạo hàm và thay vào các phương trình (2.2), (2.3) và (2.4), bỏ qua các vô cùng bé bậc cao, biến dạng được biểu diễn theo chuyển vị điểm trọng tâm tiết diện của phần tử:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} - y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - 2z \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + z^2 \left( \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \quad \quad \quad + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2y \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + y^2 \left( \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \varepsilon_{xy} = -\frac{1}{2} z \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( -\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \theta_x \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} y \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( -\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} - \theta_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Lấy vi phân của 3 thành phần biến dạng trong (2.8) ta được [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta \varepsilon_{xx} = (\delta u' - y \delta v'' - z \delta w'') + [v' \delta v' + w' \delta w' + (y^2 + z^2) \theta'_x \delta \theta'_x] \\ \quad \quad \quad + (y w' \delta \theta'_x + y \theta'_x \delta w' - z v' \delta \theta'_x - z \theta'_x \delta v') \\ 2 \delta \varepsilon_{xy} = -z \delta \theta'_x - u' \delta v' - v' \delta u' + w' \delta \theta_x + \theta_x \delta w' - v'' \delta w' - w' \delta v'' \\ 2 \delta \varepsilon_{xz} = y \delta \theta'_x - u' \delta w' - w' \delta u' - v' \delta \theta_x - \theta_x \delta v' + v'' \delta w' + w' \delta v'' \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Với kí hiệu “ ’ ” chỉ đạo hàm theo biến x. Các số hạng  $(\delta u' - y \delta v'' - z \delta w'')$ ,  $-z \delta \theta'_x$  và  $y \delta \theta'_x$  trong (2.9) là thành phần biến dạng tuyến tính, các số hạng còn lại biểu diễn thành phần phi tuyến trong quan hệ biến dạng – chuyển vị.



## 2.2.2 Ma trận biến dạng – chuyển vị

Với phần tử khung 3D, nếu bỏ qua phần biến dạng xoắn không đều dọc trục phần tử thì các thành phần chuyển vị  $u, v, w, \theta_x$  có thể nội suy qua chuyển vị nút phần tử bằng các hàm nội suy thông thường như trong phương pháp phần tử hữu hạn:

$$\begin{cases} u = H_1 u_a + H_2 u_b \\ v = H_3 v_a + H_4 \theta_{za} + H_5 v_b + H_6 \theta_{zb} \\ w = H_3 w_a + H_4 \theta_{ya} + H_5 w_b + H_6 \theta_{yb} \\ \theta_x = H_1 \theta_{xa} + H_2 \theta_{xb} \end{cases} \quad (2.10)$$

trong đó các hàm dạng  $H_i$  là:

$$\begin{aligned} H_1 &= 1 - \left(\frac{x}{L}\right); H_2 = \left(\frac{x}{L}\right); H_3 = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3; H_4 = L \left[ \left(\frac{x}{L}\right) - 2\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right] \\ H_5 &= 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3; H_6 = L \left[ -\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

Thay các phương trình (2.11), (2.10) vào (2.9) và thực hiện các phép toán đạo hàm, các vi phân biến dạng được biểu diễn theo vi phân chuyển vị nút phần tử thông qua ma trận biến dạng – chuyển vị  $\mathbf{B}$  như sau:

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \delta \bar{\mathbf{d}} \quad (2.12)$$

với  $\boldsymbol{\varepsilon} = \left\{ \varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{xz} \right\}^T$  và ma trận  $\mathbf{B}$  được biểu diễn:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{NL}(\bar{\mathbf{d}}) \quad (2.13)$$

trong đó  $\mathbf{B}_0$  chứa các thành phần tuyến tính và  $\mathbf{B}_{NL}$  chứa các thành phần phi tuyến trong quan hệ của biến dạng – chuyển vị. Ma trận  $\mathbf{B}_{NL}$  phụ thuộc vào chuyển vị của cấu hình hiện tại.

Tiến hành khai triển phương trình (2.13), ta tìm được ma trận  $\mathbf{B}_0$  và  $\mathbf{B}_{NL}$ :

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} H'_1 & -yH''_3 & -zH''_3 & 0 & zH''_4 & -yH''_4 & H'_2 & -yH''_5 & -zH''_5 & 0 & zH''_6 & -yH''_6 \\ 0 & 0 & 0 & -zH'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -zH'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & yH'_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & yH'_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{B}_{NL1} = \begin{bmatrix} H'_1 & -yH''_3 & -zH''_3 & 0 & zH''_4 & -yH''_4 & H'_2 & -yH''_5 & -zH''_5 & 0 & zH''_6 & -yH''_6 \\ 0 & H'_5 & 0 & 0 & 0 & -H'_4 & 0 & -H'_5 & 0 & 0 & 0 & -H'_6 \\ 0 & 0 & H'_5 & 0 & H'_4 & 0 & 0 & 0 & -H'_5 & 0 & H'_6 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{B}_{NL2} = \begin{bmatrix} 0 & H'_3 & 0 & zH'_2 & 0 & H'_4 & 0 & H'_5 & 0 & zH'_1 & 0 & H'_6 \\ 0 & 0 & 0 & H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

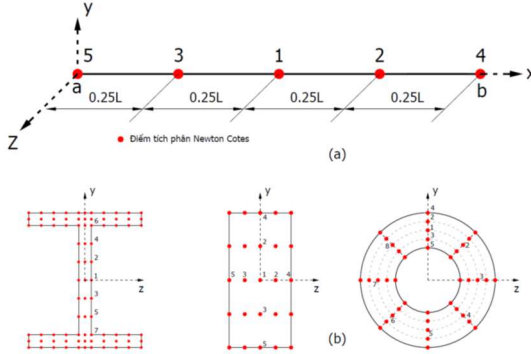
$$\mathbf{B}_{NL3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & H'_3 & yH'_1 & -H'_4 & 0 & 0 & 0 & H'_5 & -yH'_1 & -H'_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -H_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.2.3 Ma trận độ cứng phần tử

Phương trình cân bằng của phần tử được viết lại như sau:

$$(\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_L) \delta \bar{\mathbf{d}} = \mathbf{K}_e \delta \bar{\mathbf{d}} = \delta \mathbf{f} \quad (2.18)$$

trong đó:  $\mathbf{K}_e = (\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_L)$  là ma trận độ cứng tiếp tuyến và  $\delta \mathbf{f}$  là véc-tơ tải gia tăng của phần tử trong hệ tọa độ địa phương.



Hình 2.4. Sơ đồ điểm tích phân Newton Cotes: (a) dọc chiều dài; (b) trên tiết diện

Áp dụng tích phân số Newton Cotes với các điểm tích phân bố trí như Hình 2.4, các ma trận trên được tính toán như sau [3]:

$$\delta \mathbf{f} = \mathbf{K}_\sigma \delta \bar{\mathbf{d}} = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i w_j w_k \mathbf{B}_{NLijk}^T \delta \boldsymbol{\tau}_{ijk} \quad (2.19)$$

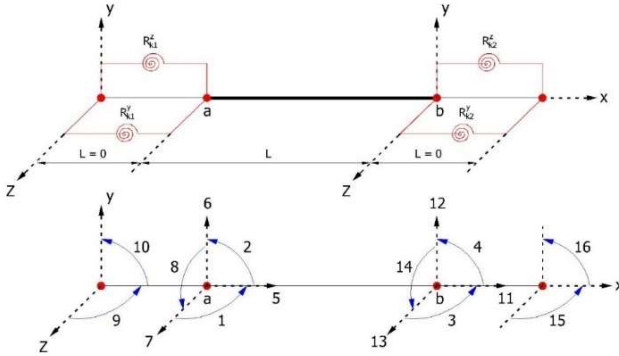
$$\mathbf{K}_0 = \int_V \mathbf{B}_0^T \mathbf{D}_e \mathbf{B}_0 dV = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i w_j w_k \mathbf{B}_{0ijk}^T \mathbf{D}_{eijk} \mathbf{B}_{0ijk} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_L &= \int_V (\mathbf{B}_0^T \mathbf{D}_{ep} \mathbf{B}_L + \mathbf{B}_L^T \mathbf{D}_{ep} \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_L^T \mathbf{D}_{ep} \mathbf{B}_0) dV \\ &= \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i w_j w_k (\mathbf{B}_{0ijk}^T \mathbf{D}_{epijk} \mathbf{B}_{NLijk} + \mathbf{B}_{NLijk}^T \mathbf{D}_{epijk} \mathbf{B}_{NLijk} + \mathbf{B}_{NLijk}^T \mathbf{D}_{epijk} \mathbf{B}_{0ijk}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

với  $q, m, n$  là số điểm tích phân dọc theo chiều dài và trên mặt cắt ngang của phần tử.

### 2.2.4 Ma trận độ cứng phần tử có kể đến liên kết bán cứng

Ma trận độ cứng phần tử có liên kết bán cứng được xây dựng bằng cách lắp ghép phần tử với các lò xo xoay có chiều dài bằng 0 ở hai đầu phần tử. Phần tử lai mới được tạo ra sẽ có 16 bậc tự do và được đánh chỉ số như trên Hình 2.5.



Hình 2.5. Phần tử khung không gian có liên kết bán cứng

Thực hiện ghép nối các phương trình đặc trưng của lò xo xoay và phương trình cân bằng của phần tử, ta có hệ phương trình được viết gọn ở dạng sau:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{aa} & \mathbf{K}_{ab} \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}_a \\ \mathbf{d}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{r}_a \\ \mathbf{r}_b \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

trong đó:

$$\mathbf{K}_{aa} = \begin{bmatrix} (k_{5,5} + R_{k1}^y) & k_{5,6} & k_{5,11} & k_{5,12} \\ & (k_{6,6} + R_{k1}^z) & k_{6,11} & k_{6,12} \\ & & (k_{11,11} + R_{k2}^y) & k_{11,12} \\ sym & & & (k_{12,12} + R_{k2}^z) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{K}_{ab} = \begin{bmatrix} k_{1,5} & k_{2,5} & k_{3,5} & k_{4,5} & -R_{k1}^y & 0 & k_{5,7} & k_{5,8} & k_{5,9} & k_{5,10} & 0 & 0 \\ k_{1,6} & k_{2,6} & k_{3,6} & k_{4,6} & 0 & -R_{k1}^z & k_{6,7} & k_{6,8} & k_{6,9} & k_{6,10} & 0 & 0 \\ k_{1,11} & k_{2,11} & k_{3,11} & k_{4,11} & 0 & 0 & k_{7,11} & k_{8,11} & k_{9,11} & k_{10,11} & -R_{k2}^y & 0 \\ k_{1,12} & k_{2,12} & k_{3,12} & k_{4,12} & 0 & 0 & k_{7,12} & k_{8,12} & k_{9,12} & k_{10,12} & 0 & -R_{k2}^z \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{K}_{bb} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} & k_{1,4} & 0 & 0 & k_{1,7} & k_{1,8} & k_{1,9} & k_{1,10} & 0 & 0 \\ & k_{2,2} & k_{2,3} & k_{2,4} & 0 & 0 & k_{2,7} & k_{2,8} & k_{2,9} & k_{2,10} & 0 & 0 \\ & & k_{3,3} & k_{3,4} & 0 & 0 & k_{3,7} & k_{3,8} & k_{3,9} & k_{3,10} & 0 & 0 \\ & & & k_{4,4} & 0 & 0 & k_{4,7} & k_{4,8} & k_{4,9} & k_{4,10} & 0 & 0 \\ & & & & R_{k1}^y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & R_{k1}^z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & k_{7,7} & k_{7,8} & k_{7,9} & k_{7,10} & 0 & 0 \\ & & & & & & & k_{8,8} & k_{8,9} & k_{8,10} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & k_{9,9} & k_{9,10} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & k_{10,10} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & R_{k2}^y & \\ & & & & & & & & & & & R_{k2}^z \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{d}_a = \{d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4\}^T \quad (2.26)$$

$$\mathbf{d}_b = \{d_5 \quad d_6 \quad d_7 \quad d_8 \quad d_9 \quad d_{10} \quad d_{11} \quad d_{12} \quad d_{13} \quad d_{14} \quad d_{15} \quad d_{16}\}^T \quad (2.27)$$

Áp dụng kỹ thuật rút gọn tĩnh được đề xuất bởi Lui và Chen [4], ma trận độ cứng rút gọn  $\mathbf{K}'$  và véc-tơ tải rút gọn  $\mathbf{r}'$  lần lượt là:

$$\mathbf{K}' = \mathbf{K}_{bb} - \mathbf{K}_{ab}^T \mathbf{K}_{aa}^{-1} \mathbf{K}_{ab} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r}_b - \mathbf{K}_{ab}^T \mathbf{K}_{aa}^{-1} \mathbf{r}_a$$

### 2.2.5 Ma trận khối lượng

Trong nghiên cứu này, ma trận khối lượng của hệ kết cấu được lắp ghép từ các ma trận khối lượng tương thích của phần tử cộng với các khối lượng tập trung:

$$\mathbf{M}_{\text{sys}} = \sum \mathbf{M}_e + \sum \mathbf{M}_{\text{lump}} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{M}_e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 156 & 0 & 0 & 0 & 22L & 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & -13L \\ & & 156 & 0 & 22L & 0 & 0 & 0 & 54 & 0 & -13L & 0 \\ & & & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ & & & & 4L^2 & 0 & 0 & 0 & 13L & 0 & -3L^2 & 0 \\ & & & & & 4L^2 & 0 & 13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 \\ & & & & & & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 156 & 0 & 0 & 0 & -22L \\ & & & & & & & & 156 & 0 & -22L & 0 \\ & & & & & & & & & 140 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 4L^2 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

### 2.3 Ma trận chuyển trục tọa độ

Trong phương pháp Lagrange cập nhật, ma trận chuyển trục tọa độ từ hệ tọa độ địa phương sang hệ tọa độ tổng thể trong không gian 3 chiều phải thực qua hai bước:

Bước 1: Xác định ma trận chuyển trung gian **BS** được tính toán theo các chuyển vị thẳng:

$$\mathbf{BS} = \mathbf{N}_2 \times \mathbf{N}_1 \times \mathbf{T}_0 \quad (2.31)$$

trong đó:

$$\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x & \cos \beta_x & \cos \gamma_x \\ \cos \alpha_y & \cos \beta_y & \cos \gamma_y \\ \cos \alpha_z & \cos \beta_z & \cos \gamma_z \end{bmatrix} \quad (2.32); \quad \mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{XZ} & 0 & \sin \theta_{XZ} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{XZ} & 0 & \cos \theta_{XZ} \end{bmatrix} \quad (2.33);$$

$$\mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{XY} & \sin \theta_{XY} & 0 \\ -\sin \theta_{XY} & \cos \theta_{XY} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Bước 2: Xác định ma trận xoay **R** từ cấu hình tại thời điểm  $(t)$  (bước trước đó) đến cấu hình hiện tại  $(t + \Delta t)$  được tính toán theo các chuyển vị xoay.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

trong đó:

$$\varphi = [\cos \alpha_x \quad \cos \beta_x \quad \cos \gamma_x] \times \begin{Bmatrix} \Delta \theta_{xa} + \Delta \theta_{xb} \\ \Delta \theta_{ya} + \Delta \theta_{yb} \\ \Delta \theta_{za} + \Delta \theta_{zb} \end{Bmatrix} \quad (2.36)$$

và  $\Delta \theta = \Delta \theta^{t+\Delta t} - \Delta \theta^t$  là gia số góc xoay của hai điểm nút phần tử ở 2 cấu hình liên kế.

Ma trận chuyển trục tọa độ cuối cùng được xác định:

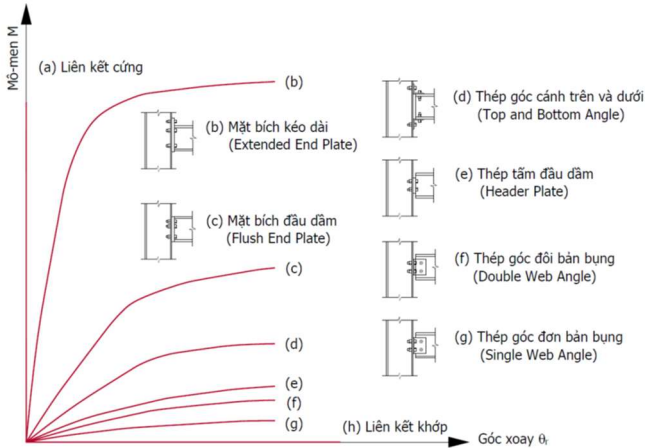
$$\mathbf{T}_{(12 \times 12)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

với  $\mathbf{A} = \mathbf{R} \times \mathbf{BS}$   
 $(3 \times 3) \quad (3 \times 3) \quad (3 \times 3)$

## 2.4 Phi tuyến liên kết

### 2.4.1 Các mô hình liên kết bán cứng

Ứng xử phi tuyến của liên kết bán cứng được biểu diễn bởi đường cong quan hệ mô-men – góc xoay được xác định từ thực nghiệm đối với mỗi kiểu liên kết cụ thể như trên Hình 2.6.



Hình 2.6. Quan hệ M-θ của một số kiểu liên kết chịu tải trọng tĩnh

Để thuận tiện trong phân tích số, quan hệ này thường được mô phỏng bằng các hàm số toán học. Nhiều mô hình toán học đã được đề xuất và trình bày khá chi tiết trong tài liệu của Chan và Chui [5], cụ thể:

Mô hình tuyến tính:

$$M = R_{ki} \theta_r \quad (2.38)$$

Mô hình Kishi-Chen [6]:

$$M = \frac{R_{ki} \theta_r}{\left[ 1 + \left( \frac{\theta_r}{\theta_0} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (2.39)$$

Mô hình hàm mũ Chen-Lui [7][8]:

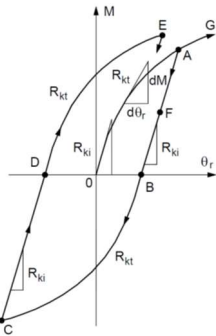
$$M = M_0 + \sum_{j=1}^n C_j \left( 1 - e^{-\frac{|\theta_r|}{2j\alpha}} \right) + R_{kf} |\theta_r| \quad (2.40)$$

Mô hình Richard-Abbott [5]:

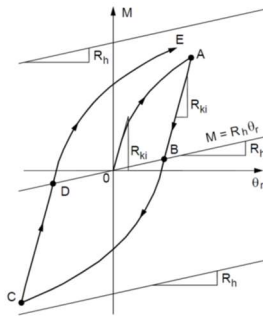
$$M = \frac{(R_{ki} - R_{kp}) |\theta_r|}{\left\{ 1 + \left| \frac{(R_{ki} - R_{kp}) |\theta_r|^n}{M_0} \right| \right\}^{\frac{1}{n}}} + R_{kp} |\theta_r| \quad (2.41)$$

### 2.4.2 Mô hình ứng xử vòng trễ của liên kết bán cứng

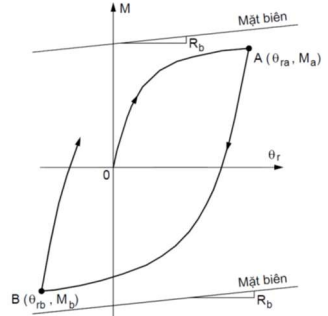
Kết quả thực nghiệm chứng minh rằng khả năng hấp thụ và tiêu tán năng lượng của tải trọng động được thông qua ứng xử lặp trễ của liên kết bán cứng. Có 3 phương pháp thường được sử dụng để mô phỏng ứng xử vòng trễ trong phân tích: (i) phương pháp tái bền độc lập (independent hardening method - Hình 2.7; (ii) phương pháp tái bền động học (kinematic hardening method - Hình 2.8); (iii) phương pháp mặt biên (bounding surface method - Hình 2.9).



Hình 2.7  
PP Tái bền độc lập



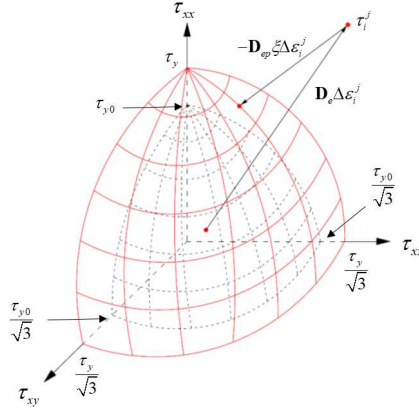
Hình 2.8  
PP Tái bền động học



Hình 2.9  
PP Mặt biên

## 2.5 Phi tuyến vật liệu

Mô hình mặt chày chéo Orbison (Hình 2.10) được mở rộng cho trường hợp 3 chiều và sử dụng tiêu chuẩn chảy dẻo von Mises với thuật toán Backward Euler để đánh giá khả năng chảy dẻo của vật liệu.



Hình 2.10. Thuật toán Backward Euler cho vật liệu đẳng hướng

Tiêu chuẩn chảy dẻo von Mises được biểu diễn bằng phương trình:

$$\tau_{ef} - \tau_y = 0 \quad (2.42)$$

trong đó:

$$\tau_{ef} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (2.43)$$

$$\tau_y = \tau_{y0} + \int_0^{\varepsilon_p} H' d\varepsilon_p \quad (2.44)$$

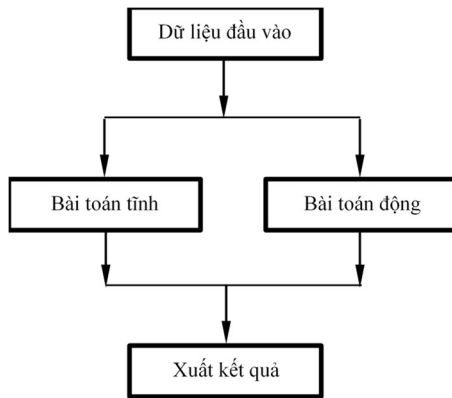
với  $\tau_{ef}$  là ứng suất hiệu quả tại điểm đang xét;  $\tau_y$  là ứng suất chảy dẻo tương ứng với biến dạng dẻo tương đương;  $H'$  là thông số tái bền;  $d\varepsilon_p$  là biến dạng dẻo tương đương.



## CHƯƠNG 3    CHƯƠNG TRÌNH PHÂN TÍCH PZNASS

### 3.1    Cấu trúc chương trình PZNASS

Một chương trình máy tính viết bằng ngôn ngữ Matlab đã được tác giả phát triển để phân tích phi tuyến cho bài toán khung thép bán cứng không gian chịu tải trọng tĩnh và động bằng phương pháp phần tử hữu hạn với tên gọi là PZNASS (**P**lastic-**Z**one **N**onlinear **A**nalysis of **S**pace **S**emi-**R**igid **S**teel **F**rames). Các công thức thành lập phần tử, các yếu tố phi tuyến đã được trình bày chi tiết trong Chương 2.

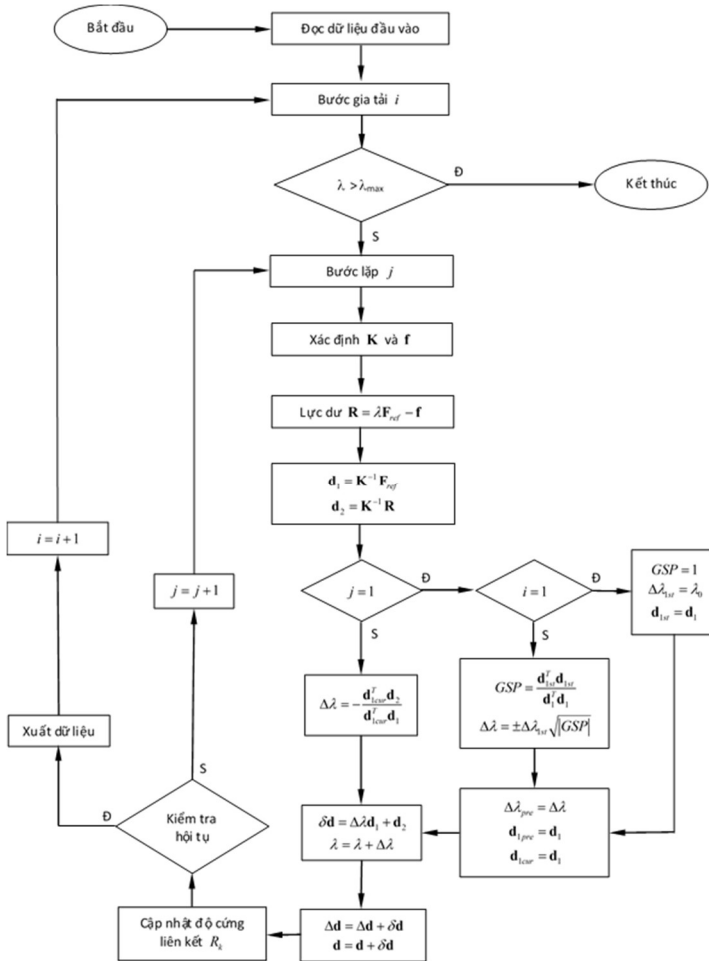


Hình 3.1. Cấu trúc chương trình PZNASS

### 3.2    Thuật toán giải hệ phương trình phi tuyến

#### 3.2.1    Thuật toán phi tuyến tĩnh

Thuật toán giải hệ phương trình phi tuyến tĩnh bằng phương pháp điều khiển chuyển vị tổng quát (generalized displacement control method - GDCM) được đề xuất bởi Yang và Shieh [9] và được nhiều tác giả sử dụng để dò tìm đường cân bằng của hệ. Nghiên cứu của Leon và cộng sự [10] đã đề xuất phương pháp điều khiển chuyển vị tổng quát hiệu chỉnh (modified generalized displacement control method – MGDCM). Lưu đồ thuật toán trình bày trên Hình 3.2.

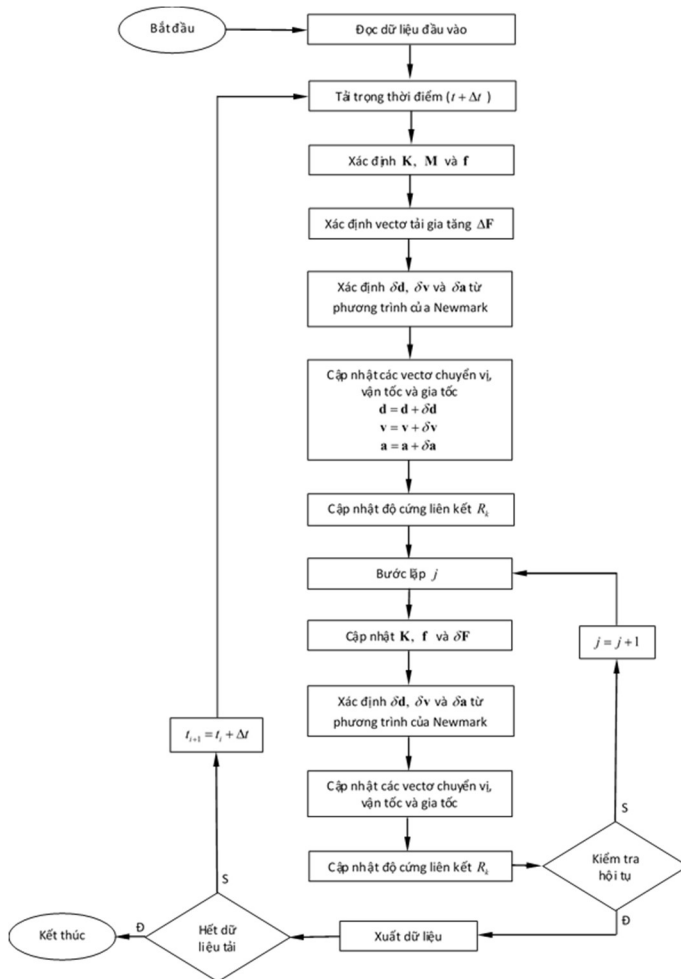


Hình 3.2. Lưu đồ thuật toán tìm MGDCM

### 3.2.2 Thuật toán phi tuyến động

Bài toán động đã biết trước tải trọng tác dụng là hàm theo thời gian. Do đó, trong một bước thời gian từ thời điểm  $t$  đến thời điểm  $t + \Delta t$  cần phải tính toán lặp để khử sai số lực dư không cân bằng giữa nội lực và ngoại lực và thỏa mãn các tiêu chuẩn hội tụ. Để khử lực dư không cân bằng giữa nội lực và ngoại lực, phương pháp Newmark được kết hợp với thuật toán Newton Raphson với tiêu chuẩn hội

tự là cực tiểu hóa chuyển vị dư. Lưu đồ thuật toán trình bày trên Hình 3.3. Sai số dùng cho điều kiện hội tụ cho phân tích tĩnh và động là  $\varepsilon = 10^{-5}$ .



Hình 3.3. Lưu đồ thuật toán động Newmark kết hợp Newton Raphson

### 3.3 Định nghĩa các biến dữ liệu

Dữ liệu đầu vào của các ví dụ được nhập trong tập tin **Example.m** theo một cấu trúc thống nhất. Mô tả các biến được trình bày chi tiết trong Luận án.

### 3.4 Xây dựng các hàm phân tích

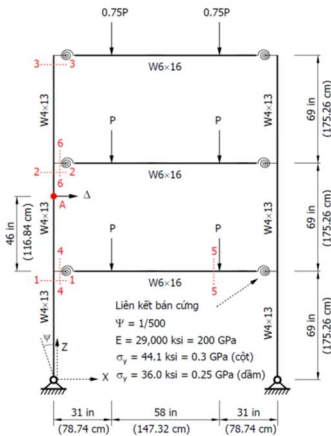
Sau khi đọc dữ liệu đầu vào trong **Example.m**, chương trình **PZNASS** sẽ thực hiện các bước tính toán theo sơ đồ khối của bài toán tĩnh (Hình 3.2) và bài toán động (Hình 3.3) bằng cách gọi các hàm tương ứng. Chi tiết các hàm phân tích được trình bày trong Luận án.

## CHƯƠNG 4 CÁC VÍ DỤ SỐ KIỂM CHỨNG CHƯƠNG TRÌNH PHÂN TÍCH ĐÃ PHÁT TRIỂN

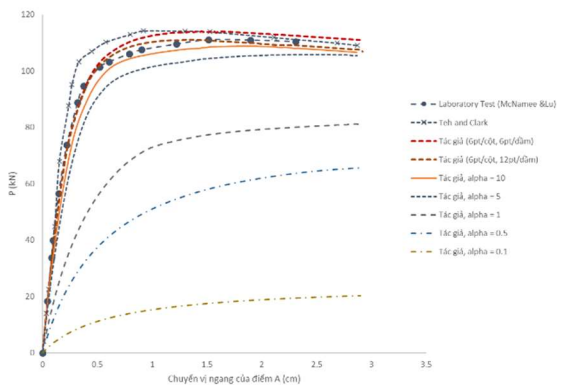
### 4.1 Phân tích tĩnh

#### 4.1.1 Khung phẳng 1 nhịp 3 tầng

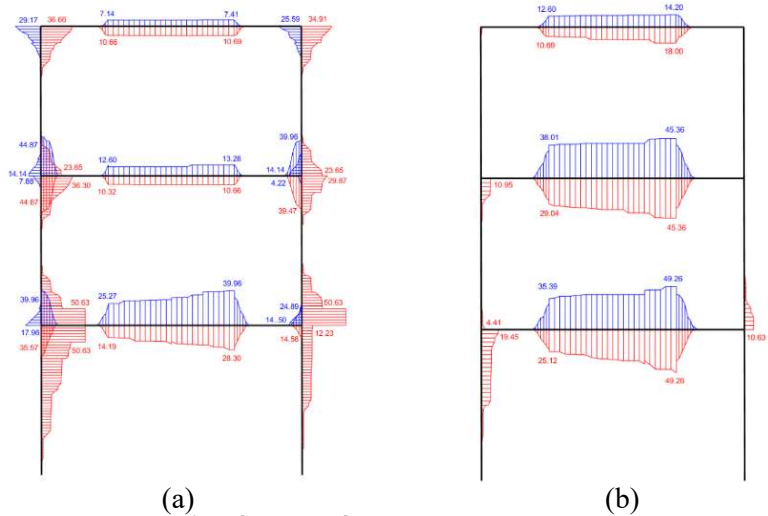
Mô hình khung phẳng 3 tầng (Hình 4.1) đã được McNamee và Lu [11] tiến hành thực nghiệm để xác định ứng xử mất ổn định phi đàn hồi của hệ. Sau đó, khung này được phân tích số với phần tử dầm-cột do Teh và Clarke [12] đề xuất. Tác giả sử dụng phần tử lai đã xây dựng để kiểm chứng độ tin cậy của chương trình tính toán đồng thời bổ sung thêm nghiên cứu ứng xử của hệ khi xét thêm độ mềm của liên kết dầm – cột. Độ cứng liên kết được giả định là tuyến tính và tỉ lệ theo độ cứng đơn vị của dầm  $\alpha EI/L$ .



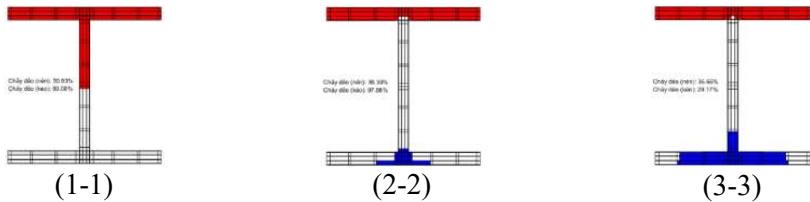
Hình 4.1. Sơ đồ khung



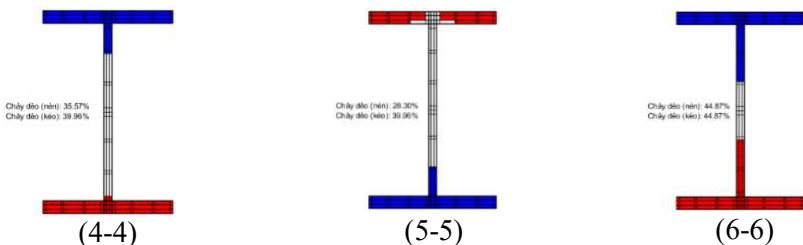
Hình 4.2. Chuyển vị ngang - $\Delta$  của điểm A



Hình 4.3. Biểu đồ tỉ lệ phần trăm chảy dẻo của khung tại  $P_u$ :  
 (a) Liên kết cứng,  $P_u = 24.75$  kips (110.09 kN);  
 (b) Liên kết bán cứng ( $\alpha=1$ ),  $P_u = 18.88$  kips (83.98 kN)



Hình 4.4. Biểu đồ chảy dẻo trên các mặt cắt cột tại  $P_u = 110.09$  kN



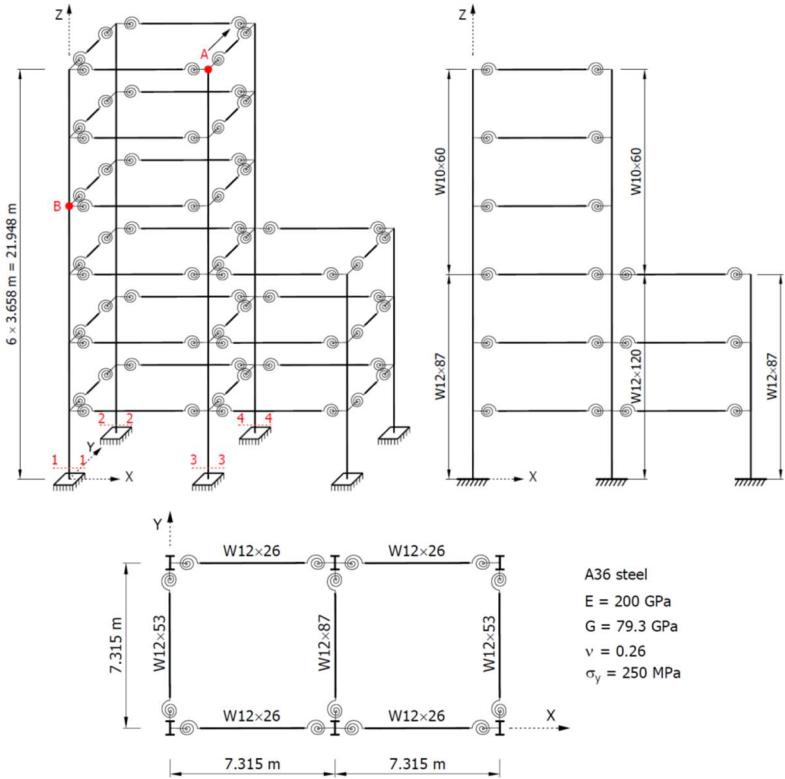
Hình 4.5. Biểu đồ chảy dẻo trên các mặt cắt dầm tại  $P_u = 110.09$  kN

Kết quả trên Hình 4.2 cho thấy khi sử dụng 06 phần tử/cột và 12 phần tử/dầm thì kết quả bám sát với kết quả thực nghiệm, chính xác hơn so với kết quả của Teh và Clark. Hơn nữa, biểu đồ chảy dẻo tại lực giới hạn  $P_u = 24.75$  kips (110.09 kN)

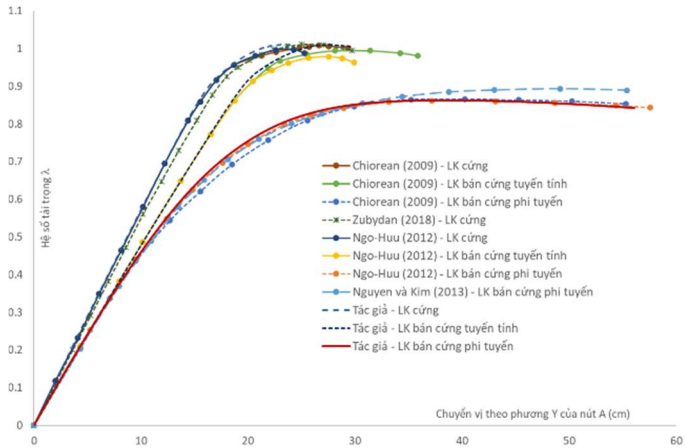
cho thấy sự chảy dẻo không chỉ tập trung ở hai đầu cầu kiện mà còn chảy dẻo suốt chiều dài cầu kiện. Trường hợp phân tích khung có liên kết bán cứng, khi tham số độ cứng  $\alpha$  giảm dần thì khả năng chịu lực của hệ cũng giảm theo.

#### 4.1.2 Khung không gian Orbison 6 tầng (Orbison's Six-storey Space Frame)

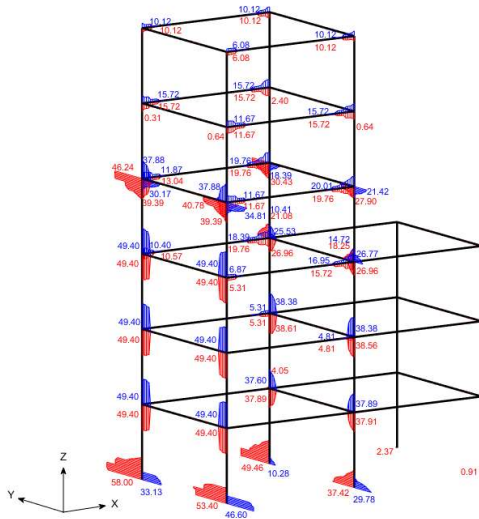
Khung không gian 6 tầng (Hình 4.6) được Orbison [13] phân tích lần đầu và sau đó được rất nhiều tác giả sử dụng để tham chiếu kết quả nghiên cứu như Liew và cộng sự [14], Jiang và cộng sự [3], Zubyan và cộng sự [15]... Đối với trường hợp xem xét liên kết bán cứng trong khung Orbison, chỉ có một số ít tác giả nghiên cứu chủ yếu dựa trên phương pháp khớp dẻo như Chiorean [16], Ngo-Huu và cộng sự [17], Nguyen và Kim [18]. Liên kết bán cứng được sử dụng mô hình hàm mũ ba thông số của Kishi-Chen.



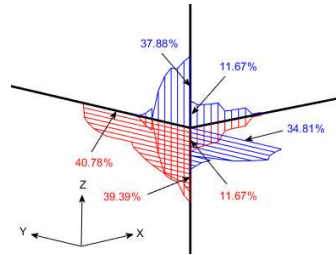
Hình 4.6. Khung Orbison 6 tầng có liên kết bán cứng



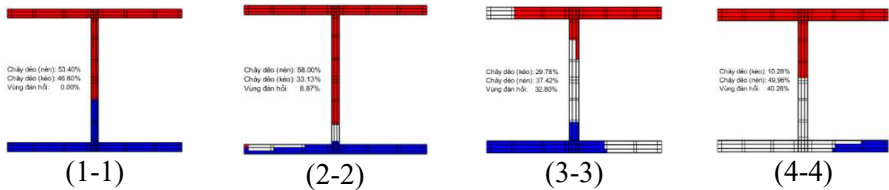
Hình 4.7. Đường cân bằng của khung Orbison



Hình 4.8. Biểu đồ chảy dẻo của khung cứng



Hình 4.9. Chảy dẻo tại nút B



Hình 4.10. Biểu đồ chảy dẻo trên các mặt cắt chân cột tại  $\lambda_{max}$

Bảng 4.1. So sánh giá trị hệ số tải giới hạn của khung Orbison

Loại liên kết	Hệ số tải giới hạn $\lambda_{max}$			Sai số (%)
	Chiorean	Ngo-Huu	Tác giả	
Cứng	1.008	0.997	1.012	+ 0.40
Bán cứng tuyến tính	0.994	0.979	1.009	+ 1.51
Bán cứng phi tuyến	0.866	0.862	0.863	- 0.35

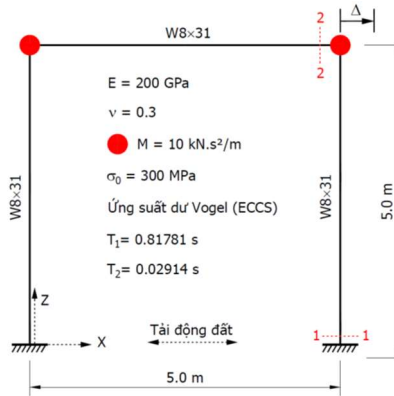
Bảng 4.1 cho thấy kết quả hệ số tải giới hạn đạt được từ phần tử đề xuất của tác giả có sai số rất nhỏ so với các kết quả tính theo phương pháp khớp dẻo. Tại tiết diện 1-1 tỉ lệ chảy dẻo đạt 100% nên hình thành khớp dẻo lý tưởng, trong khi các chân cột còn lại (tiết diện 2-2, 3-3, 4-4) cũng xảy ra chảy dẻo khá lớn. Đối với cấu kiện dầm, sự chảy dẻo tập trung ở hai đầu dầm biên theo phương trục Y của các tầng 1, 2, 3 và 4 trong khi các dầm theo phương trục X chảy dẻo không đáng kể. Chi tiết chảy dẻo nút B ở Hình 4.9 cho thấy cột tầng dưới đã chảy dẻo đến 75.59% trong khi cột tầng trên vẫn trong trạng thái đàn hồi. Tương tự, dầm theo trục Y tại nút B chảy dẻo 77.27% còn dầm theo trục X chảy dẻo 23.34%.

## 4.2 Phân tích động

### 4.2.1 Khung phẳng 1 tầng 1 nhịp 1 tầng chịu tải động đất

Khung phẳng 1 tầng 1 nhịp có các thông số kích thước hình học, vật liệu như trên Hình 4.11. Khung được phân tích dưới tải động tác dụng theo phương X của các trận động đất El Centro (1940), Loma Prieta (1989), Northridge (1994) và San Fernando (1971). Lực cản được tính toán theo 2 mode dao động đầu tiên của hệ ứng với chu kỳ  $T_1$  và  $T_2$  được phân tích từ chương trình đề xuất và so sánh với kết quả của phần mềm ABAQUS (Bảng 4.2) với tỉ số cản  $\xi = 0.05$ . Ứng suất dư trong cấu kiện được lấy theo mô hình Vogel (ECCS, 1985). Phi tuyến vật liệu được phân tích theo mô hình đàn dẻo lý tưởng với ứng suất chảy dẻo là 300MPa. Kết quả phân tích chuyển vị đỉnh theo lịch sử thời gian cho trường hợp đàn hồi và phi đàn hồi được trình bày trên Hình 4.12, Hình 4.13 và so sánh với kết quả của Thai và Kim [19] và phần mềm ABAQUS.

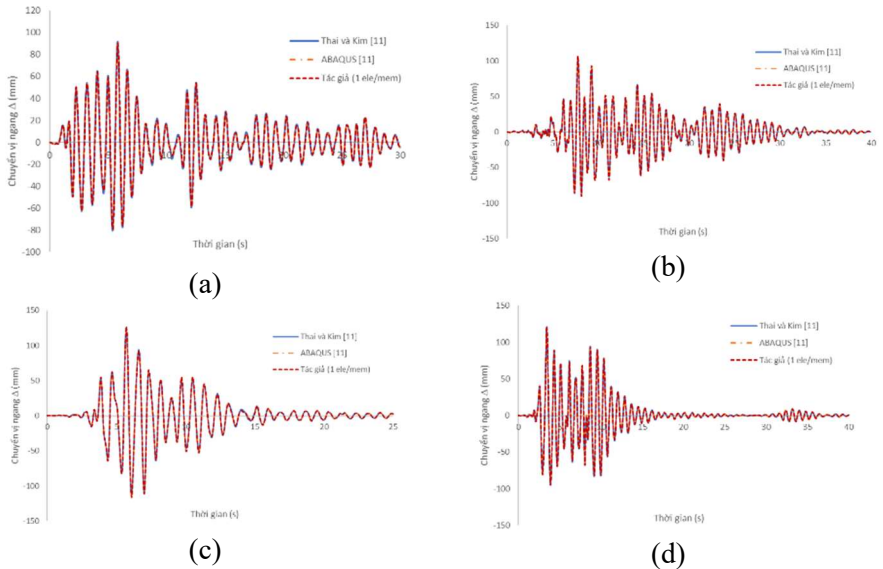




Hình 4.11. Khung phẳng 1 tầng

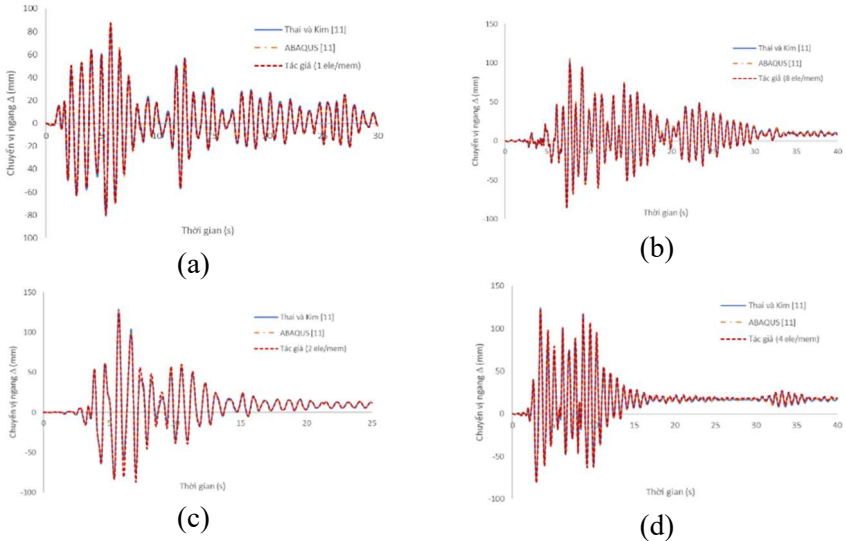
Bảng 4.2. So sánh giá trị 2 chu kỳ dao động đầu tiên (s)

Mode	ABAQUS	Tác giả	Sai số (%)
1	0.8162	0.8178	0.196
2	0.0290	0.0291	0.345

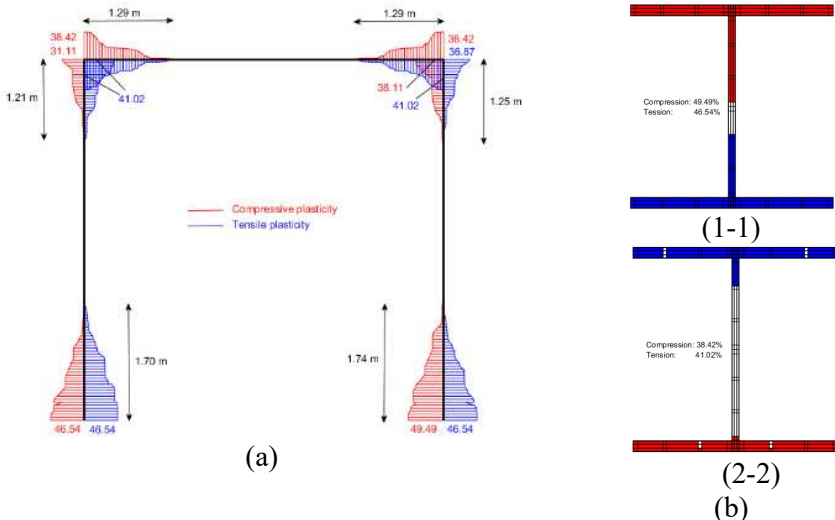


Hình 4.12. Chuyển vị ngang đỉnh khung trong phân tích đàn hồi:

(a) ElCentro 1940; (b) Loma Prieta 1989; (c) Northridge 1994; (d) San Fernando 1971



Hình 4.13. Chuyển vị ngang đỉnh khung trong phân tích phi đàn hồi: (a) ElCentro; (b) Loma Prieta; (c) Northridge; (d) San Fernando



Hình 4.14. (a) Biểu đồ chảy dẻo (t=3.48s, San Fernando); (b) Trên tiết diện

Kết quả phân tích đàn hồi ở Hình 4.12 cho thấy chỉ cần sử dụng 1 phần tử để xuất/cấu kiện là đã đạt được kết quả tốt khi so với kết quả từ chương trình ABAQUS với 10 phần tử B22. Trường hợp phân tích phi đàn hồi, do có sự chảy

đeo nên cần số lượng phần tử nhiều hơn so với trường hợp phân tích đàn hồi. Cụ thể, đối với tải Northridge và San Fernando cần sử dụng từ 2 đến 4 phần tử/cấu kiện, trong khi cần phải sử dụng đến 8 phần tử/cấu kiện khi khung chịu tải Loma Prieta. Hình 4.14 cho thấy sự chẩy dẻo tại thời điểm chuyển vị đạt được lớn nhất khi chịu tải San Fernando lan truyền dọc theo chiều dài các cấu kiện.

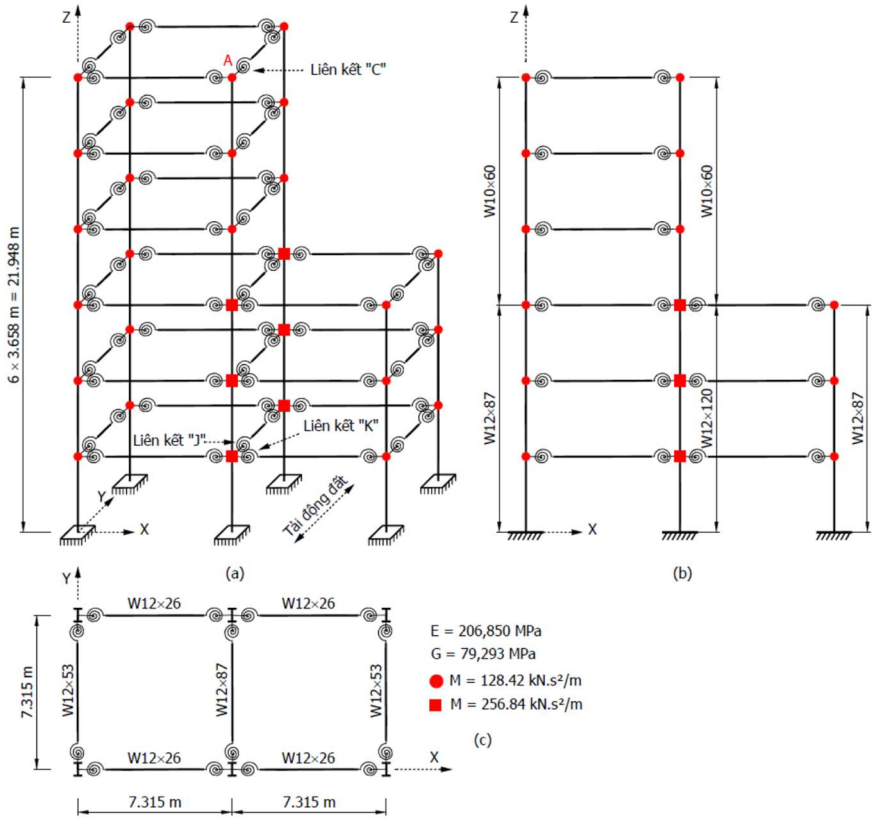
**4.2.2 Khung không gian bán cứng 6 tầng (Khung Orbison)**

Khung không gian 6 tầng (khung Orbison) có liên kết bán cứng chịu tải trọng tĩnh đã được phân tích ở mục 4.1.2. Đối với bài toán động, chỉ có nhóm tác giả Nguyen và Kim [20] xem xét bài toán trong giới hạn đàn hồi. Tác giả tiến hành phân tích động cho bài toán này, đồng thời bổ sung kết quả cho trường hợp xem xét yếu tố phi tuyến vật liệu. Tải trọng phân bố đều trên sàn là 9.6 kN/m<sup>2</sup> được chuyển thành các khối lượng tập trung tại các nút khung (Hình 4.15). Tải trọng động đất sử dụng tải El Centro và San Fernando tác dụng theo phương Y. Ma trận cản được tính toán theo Chopra dựa theo hai chu kỳ dao động tự nhiên đầu tiên của hệ kết cấu với tỉ số cản là 0.05, được so sánh với kết quả của Nguyen và Kim [20] trong Bảng 4.3.

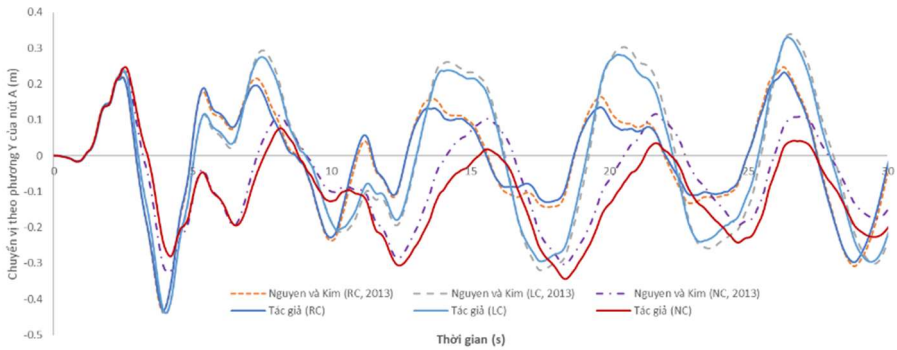
Bảng 4.3. So sánh chu kỳ dao động tự nhiên

Liên kết	Chu kỳ (s)	Tác giả	Nguyen và Kim [20]	Sai số (%)
Cứng	T <sub>1</sub>	5.4675	5.5386	-1.284
	T <sub>2</sub>	1.9757	1.9959	-1.012
Bán cứng	T <sub>1</sub>	6.0129	6.0797	-1.099
	T <sub>2</sub>	2.1230	2.1338	-0.506

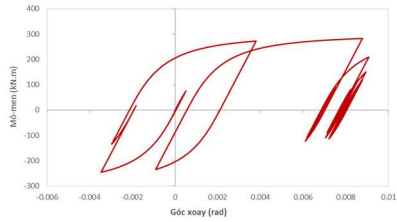
Tác giả tiến hành phân tích bài toán này cho các trường hợp liên kết cứng (RC), liên kết bán cứng tuyến tính (LC) và liên kết bán cứng phi tuyến (NC). Liên kết bán cứng trong hệ kết cấu được sử dụng mô hình ba thông số của Kishi-Chen, với việc xem xét ứng xử động của liên kết bán cứng trong cả hai mặt phẳng uốn chính và phụ của phần tử dầm. Ứng xử lặp trở của các liên kết bán cứng “C”, “J” và “K” (Hình 4.15) cũng được khảo sát.



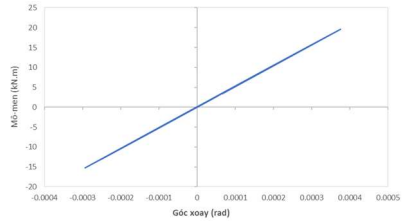
Hình 4.15. Khung Orbison chịu tải trọng động đất



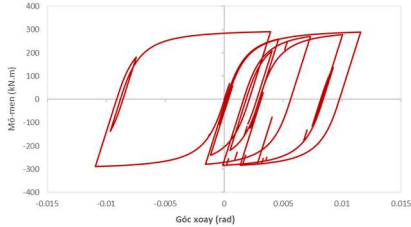
Hình 4.16. Lịch sử chuyển vị đàn hồi của nút A do tải El Centro



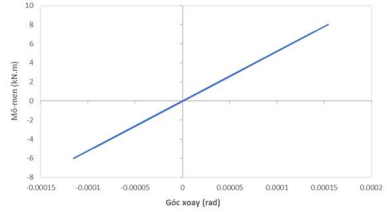
(a.1) Trục chính



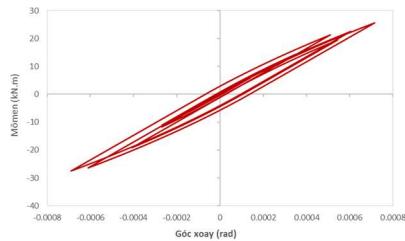
(a.2) Trục phụ



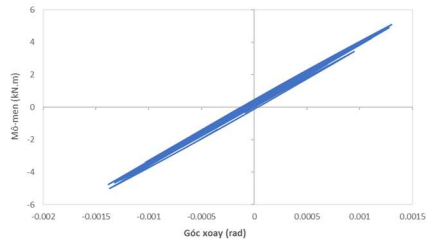
(b.1) Trục chính



(b.2) Trục phụ

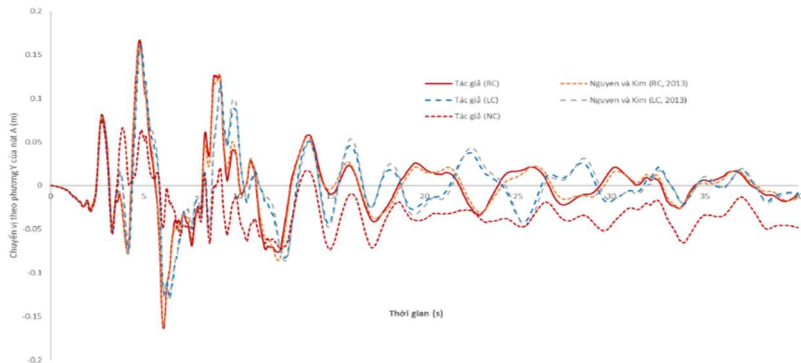


(c.1) Trục chính

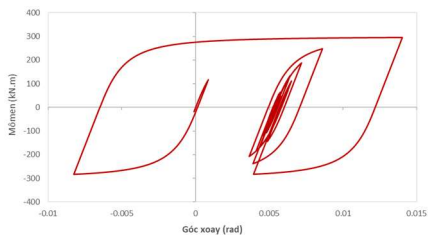


(c.2) Trục phụ

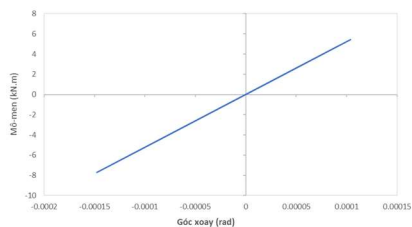
Hình 4.17. Ứng xử vòng trễ do tải El Centro tại liên kết: (a) “C”; (b) “J”; (c) “K”



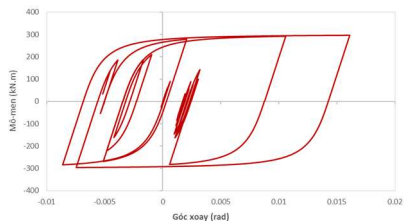
Hình 4.18. Lịch sử chuyển vị đàn hồi của nút A do tải San Fernando



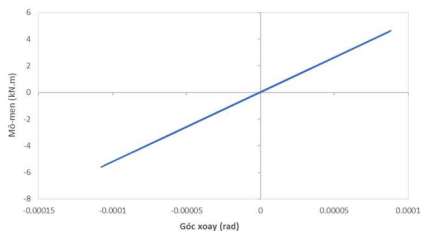
(a.1) Trục chính



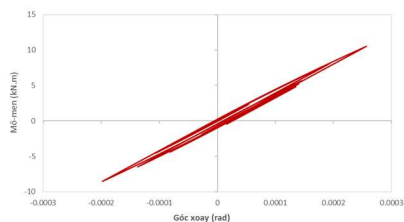
(a.2) Trục phụ



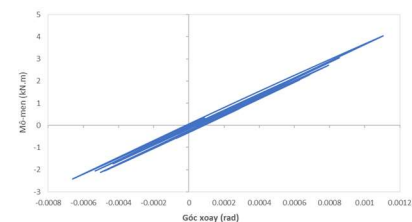
(b.1) Trục chính



(b.2) Trục phụ



(c.1) Trục chính

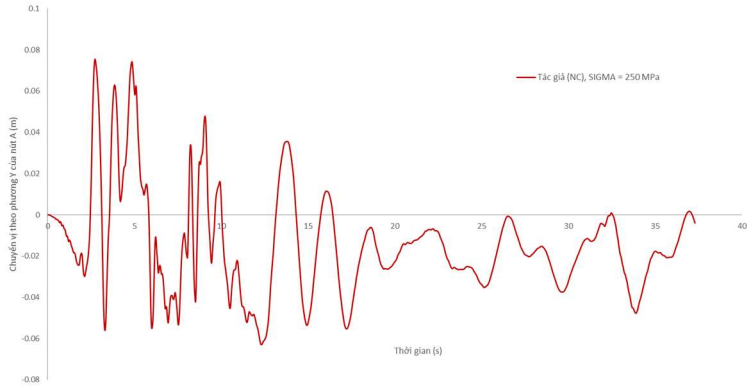


(c.2) Trục phụ

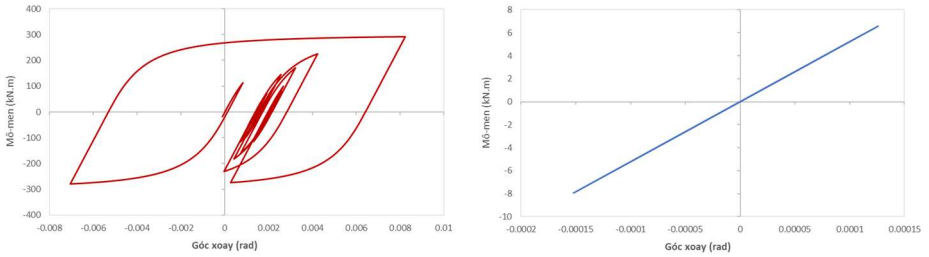
Hình 4.19. Ứng xử vòng trễ do tải San Fernando tại liên kết:

(a) “C”; (b) “J”; (c) “K”

Kết quả phân tích cho thấy sự tương đồng về lịch sử chuyển vị đàn hồi ở đỉnh khung giữa tác giả và phương pháp khớp dẻo (Hình 4.16 và Hình 4.18). Với liên kết bán cứng phi tuyến, ứng xử mô-men-góc xoay trong mặt phẳng uốn chính (trục chính) của liên kết tạo thành một chu trình kín, thể hiện khả năng hấp thụ và tiêu tán năng lượng của tải động đất. Với trường hợp phi đàn hồi với liên kết bán cứng phi tuyến, giả định ứng suất chảy dẻo là 250 MPa, kết quả trình bày trên Hình 4.20 và Hình 4.21. Trường hợp này đã xem xét đầy đủ các yếu tố phi tuyến chủ đạo trong kết cấu thép.



Hình 4.20. Lịch sử chuyển vị phi đàn hồi của nút A do tải San Fernando



(a) Trục chính

(b) Trục phụ

Hình 4.21. Ứng xử vòng trễ phi đàn hồi tại tại liên kết C do tải San Fernando

## CHƯƠNG 5 KẾT LUẬN

### 5.1 Kết luận

Các đóng góp mới của Luận án như sau:

1. Xây dựng được một phần tử hữu hạn lai mới cho bài toán phân tích phi tuyến kết cấu khung thép không gian có xét đầy đủ các yếu tố phi tuyến chủ đạo bao gồm phi tuyến hình học, phi tuyến vật liệu và phi tuyến liên kết. Ma trận độ cứng tiếp tuyến và véc-tơ nội lực phần tử được thiết lập có khả năng xem xét cả bài toán chuyển vị lớn và có thể giải quyết các bài toán chịu lực phức tạp trên phần tử. Liên kết bán cứng được xem xét trong cả hai mặt phẳng uốn của phần tử đánh giá một cách đầy đủ ứng xử của liên kết trong hệ không gian khi chịu tải trọng tĩnh và động. Ma trận khối lượng tương thích được thiết lập có thể mô phỏng bài toán chịu tải trọng động với khối lượng phân bố dọc chiều dài phần tử.

2. Sự chảy dẻo vật liệu trên mặt cắt ngang và dọc theo chiều dài phần tử được theo dõi thông qua các điểm tích phân, sử dụng tiêu chuẩn chảy dẻo von Mises cho bài toán 3 chiều, do đó đánh giá toàn diện ứng xử của vật liệu tại mọi vị trí trên phần tử và có thể khảo sát với nhiều loại tiết diện khác nhau cùng với nhiều mẫu ứng suất dư khác nhau.
3. Xây dựng thành công chương trình máy tính PZNASS để phân tích phi tuyến hệ kết cấu thép không gian chịu tải trọng tĩnh và động, kể cả tải trọng động đất. Chương trình này có thể dùng để lấy số liệu tham khảo khi thiết kế, đặc biệt là trong thiết kế kháng chấn hoặc thiết kế theo yêu cầu làm việc của hệ kết cấu.

## 5.2 Kiến nghị

Một số nội dung kiến nghị có thể áp dụng như sau:

1. Các kết quả phân tích trong Luận án có thể được sử dụng làm kết quả kiểm chứng các phương pháp đơn giản hóa đã phát triển trước đây (như phương pháp khớp dẻo), đặc biệt là với các bài toán có tải trọng phức tạp tác dụng vào cấu kiện.
2. Chương trình PZNASS với khả năng phản ánh được ứng xử phi tuyến hình học, độ mềm của liên kết và tác động lan truyền dẻo cho các tiết diện có hình dạng khác nhau với các mẫu ứng suất dư khác nhau có thể được áp dụng trong phân tích các hệ kết cấu chịu tải trọng phức tạp trên cấu kiện để đảm bảo đánh giá chính xác nhất ứng xử của hệ kết cấu (thay vì giả thiết vật liệu chỉ chảy dẻo ở 2 đầu phần tử); điều này đặc biệt hữu ích trong việc thiết kế các hệ kết cấu phức tạp, không đều đặn cả về mặt bằng lẫn mặt đứng, mà không có sẵn hệ số ứng xử (behavior factor) để thiết kế kháng chấn.
3. Áp dụng chương trình phân tích PZNASS vào thiết kế trực tiếp kết cấu thép để đảm bảo độ tin cậy và an toàn cho thiết kế; thêm nữa, chương trình có thể cung cấp kết quả sự lan truyền dẻo của hệ không gian một cách trực quan sinh động để người thiết kế có thể hình dung rõ ràng về ứng xử của hệ trong suốt quá trình chịu lực, đặc biệt là ứng xử của hệ ở trạng thái giới hạn, để có thể cân chỉnh thiết kế.



### 5.3 Hướng phát triển tiếp theo của Luận án

Một số vấn đề cần tập trung nghiên cứu để bổ sung, hoàn thiện để xem xét đầy đủ tính chất phức tạp của ứng xử phi tuyến kết cấu thép trong thực tế như sau:

1. Phát triển phần tử theo lý thuyết dầm Timoshenko thay cho Euler-Bernoulli như đã đề xuất để xem xét ảnh hưởng của tác động cắt và từ đó mở rộng phạm vi ứng dụng của phần tử.
2. Có thể phát triển các hàm dạng ở dạng hàm ổn định đa thức bậc cao thay vì sử dụng hàm Hermit bậc 3 thông thường như đã áp dụng để xây dựng các phần tử bậc cao nhằm giảm bớt số phần tử cần chia trên một cấu kiện và từ đó tăng tốc độ tính toán của chương trình máy tính. Ngoài ra có thể sử dụng thuật toán rút gọn tĩnh để lắp ghép các phần tử chia trên một cấu kiện thành một phần tử chủ (master element) giúp giảm bậc tự do tổng thể của hệ kết cấu.
3. Phần tử được xây dựng có thể theo dõi ứng xử của vật liệu trên toàn bộ phần tử, do đó có thể mở rộng để khảo sát bài toán kết cấu chịu tải trọng và các tác động phức tạp, đặc biệt có thể xem xét ứng xử hệ chịu tải cơ – nhiệt đồng thời bằng cách đưa thêm biến dạng do nhiệt vào các công thức tính biến dạng đã thiết lập, từ đó xây dựng ma trận độ cứng phần tử có xét biến dạng do nhiệt độ. Đây là điều cần quan tâm trong thực tiễn khi các công trình nhà xưởng lớn thường xuyên phải giải quyết vấn đề tải trọng cơ – nhiệt khi thiết kế chịu lửa.
4. Ứng xử phi tuyến của liên kết bán cứng trong hai mặt phẳng uốn được xem xét độc lập nhau, chưa xét sự tương tác mô-men uốn và góc xoay trong hai mặt phẳng này. Độ cứng của liên kết bán cứng ngoài mặt phẳng uốn chính chưa có kết quả thực nghiệm để xây dựng mô hình quan hệ mô-men-góc xoay, hiện nay chỉ giả định theo độ cứng trong mặt phẳng uốn chính. Trong thực tế, ứng xử xoay của liên kết quanh các trục uốn có sự liên hệ với nhau và phụ thuộc lớn vào cấu tạo chi tiết của liên kết mà cần có nghiên cứu thực nghiệm để mô hình hóa. Do đó, khi có kết quả thực nghiệm cần cập nhật mô hình ứng xử này vào chương trình đã có để đảm bảo bài toán phân tích phi tuyến chính xác hơn.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

### Tạp chí quốc tế

1. **Binh Le-Van**, Cosmin-Gruia Chiorean, Seung-Eock Kim, Cuong Ngo-Huu, “Nonlinear Inelastic Analysis of Space Semi-Rigid Steel Frames Subjected to Static Loads using Plastic-Zone Method”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2274963>

### Tạp chí trong nước

1. Đoàn Ngọc Tịnh NghiêM, Lê Nguyễn Công Tín, **Lê Văn Bình**, Ngô Hữu Cường, “Phân tích đàn hồi bậc hai khung thép phẳng chịu tải trọng tĩnh và động bằng phần tử đồng xoay”, *Tạp chí Xây dựng*, số 10-2016, trang 89-94 (2016) - ISSN: 0866-0762.
2. **Lê Văn Bình**, Nguyễn Văn Hải, Đoàn Ngọc Tịnh NghiêM, Mai Châu Anh, Ngô Hữu Cường, “Phân tích chuyển vị lớn khung thép phẳng nửa cứng chịu tải trọng tĩnh bằng phần tử hữu hạn đồng xoay”, *Tạp chí Xây dựng*, số 09-2018, trang 377-380, (2018) - ISSN: 0866-0762.
3. Nguyen Van Hai, **Le Van Binh**, Doan Ngoc Tinh Nghiem, Ngo Huu Cuong, “Large displacement elastic static analysis of semi-rigid planar steel frames by corotational Euler–Bernoulli finite element”, *Journal of Science and Technology in Civil Engineering NUCE*, 13 (2): 24-32, (2019) - ISSN: 1859-2996.
4. Nguyen Van Hai, Doan Ngoc Tinh Nghiem, **Le Van Binh**, Le Nguyen Cong Tin, Ngo Huu Cuong, “Large displacement elastic static analysis of planar steel frames with flexible beam-to-column connections under static loads by corotational beam-column element”, *Journal of Science and Technology in Civil Engineering NUCE*, 13 (3): 85-94 (2019) - ISSN: 1859-2996.
5. Lê Minh Hoàng, **Lê Văn Bình**, Ngô Hữu Cường, “Khảo sát ứng xử của dầm có lỗ mở nhỏ bằng phương pháp số”, *Tạp chí Xây dựng*, số 08-2019, trang 56-60 (2019) - ISSN: 0866-0762.
6. **Lê Văn Bình**, Nguyễn Văn Hải, Đoàn Ngọc Tịnh NghiêM, Nguyễn Thanh Phụng, Ngô Hữu Cường, “Phân tích tĩnh chuyển vị lớn dầm thép không gian có kê đến sự trượt bulông liên kết”, *Tạp chí Xây dựng*, số 02-2020, trang 29-35 (2020) - ISSN: 0866-0762.
7. **Lê Văn Bình**, Đoàn Ngọc Tịnh NghiêM, Ngô Hữu Cường, Lê Phương Bình, “Phân tích dẻo phân bố của dầm thép – bê tông liên hợp”, *Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng*, số 04-2020, trang 3-13 (2020) - ISSN: 1859-1566.

8. Lê Phương Bình, **Lê Văn Bình**, Đinh Thế Hưng, Ngô Hữu Cường, “Phân tích vùng dẻo bậc hai khung thép phẳng với dầm thép – bê tông liên hợp”, *Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng*, số 01-2021, trang 13-24 (2021) - ISSN: 1859-1566.

### Kỷ yếu hội nghị quốc tế

1. **Binh Le-Van**, Hai Nguyen-Van, Tinh Nghiem Doan-Ngoc, Cuong Ngo-Huu, “Large displacement analysis of planar steel frames under static load by corotational finite element”, *7th International Conference on Protection of Structures Against Hazards*, Hanoi, Vietnam, pp. 1-12 (2018) - ISBN: 978-981-11-7778-1.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. B. Yang and S. R. Kuo, *Theory & Analysis of Nonlinear Framed Structures*: Prentice Hall, 1994.
- [2]. K. J. Bathe, *Finite element procedures*: Prentice-Hall, 2006.
- [3]. X. M. Jiang, H. Chen, and J. R. Liew, “Spread-of-plasticity analysis of three-dimensional steel frames,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 58, pp. 193-212, 2002.
- [4]. E. Lui and W. Chen, “Steel frame analysis with flexible joints,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 8, pp. 161-202, 1987.
- [5]. S. L. Chan and P. T. Chui, *Non-linear static and cyclic analysis of steel frames with semi-rigid connections*: Elsevier, 2000.
- [6]. W. F. Chen and N. Kishi, “Semirigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 115, pp. 105-119, 1989.
- [7]. E. Lui and W. F. Chen, “Analysis and behaviour of flexibly-jointed frames,” *Engineering Structures*, vol. 8, pp. 107-118, 1986.
- [8]. E. Lui and W. Chen, "Steel frame analysis with flexible joints," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 8, pp. 161-202, 1987.
- [9]. Y. B. Yang and M. S. Shieh, “Solution method for nonlinear problems with multiple critical points,” *AIAA journal*, vol. 28, pp. 2110-2116, 1990.
- [10]. S. E. Leon, E. N. Lages, C. N. de Araújo, and G. H. Paulino, “On the effect of constraint parameters on the generalized displacement control method,” *Mechanics Research Communications*, vol. 56, pp. 123-129, 2014.
- [11]. B. M. McNamee and L.-W. Lu, “Inelastic multistory frame buckling,” *Journal of the Structural Division*, vol. 98, pp. 1613-1631, 1972.
- [12]. L. H. Teh and M. J. Clarke, “Plastic-zone analysis of 3D steel frames using beam elements,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, pp. 1328-1337, 1999.

- [13]. J. G. Orbison, "Nonlinear static analysis of three-dimensional steel frames," Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 82-6, 1982.
- [14]. J. R. Liew, H. Chen, N. E. Shanmugam, and W. Chen, "Improved nonlinear plastic hinge analysis of space frame structures," *Engineering Structures*, vol. 22, pp. 1324-1338, 2000.
- [15]. A. H. Zubyan, A. I. ElSabbagh, T. Sharaf, and A.-E. Farag, "Inelastic large deflection analysis of space steel frames using an equivalent accumulated element," *Engineering Structures*, vol. 162, pp. 121-134, 2018.
- [16]. C. Chiorean, "A computer method for nonlinear inelastic analysis of 3D semi-rigid steel frameworks," *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 3016-3033, 2009.
- [17]. C. Ngo-Huu, P. C. Nguyen, and S. E. Kim, "Second-order plastic-hinge analysis of space semi-rigid steel frames," *Thin-Walled Structures*, vol. 60, pp. 98-104, 2012.
- [18]. P. C. Nguyen and S. E. Kim, "An advanced analysis method for three-dimensional steel frames with semi-rigid connections," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 80, pp. 23-32, 2014.
- [19]. H. T. Thai and S. E. Kim, "Second-order inelastic dynamic analysis of steel frames using fiber hinge method," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, pp. 1485-1494, 2011.
- [20]. P. C. Nguyen and S. E. Kim, "Nonlinear elastic dynamic analysis of space steel frames with semi-rigid connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 84, pp. 72-81, 2013.