

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 構架結構材料非線性分析之廣義塑鉸法 General Plastic-Hinge Method for Material Nonlinear Analysis of Framed Structures

計畫編號: NSC 90-2211-E-002-059

執行期限: 90年8月1日至91年7月31日

主持人: 呂良正 國立台灣大學土木工程學系(E-mail: ljleu@ce.ntu.edu.tw)

### 一、中文摘要

在進階分析中，有很多效應必需考慮，其中以塑性擴展、殘餘應力、幾何瑕疵及幾何非線性等四項效應最為重要，其中又以前兩項效應更需要妥善的模擬。目前有改良式塑鉸法，塑性區法及擬塑鉸法等三種方法可茲運用。塑性區法雖然最為精確，但計算量太大，並不適用於一般設計使用；改良式塑鉸法最為簡單，雖然已經可以延伸到三維，不過其衰減規則必須隨著材料模型、斷面種類的不同而重新迴歸，較為不便；改良式擬塑鉸法雖然目前只能應用到平面鋼構架分析，但可以輕鬆的由平面構架延伸至空間構架分析。

本研究之目的在於延伸二維改良式擬塑鉸法，使之成為一個空間鋼構架進階分析工具。為達此目的，二維改良式擬塑鉸法所使用的完全塑性面將重新修正，使能反映三維構架軸力與強弱軸彎矩之互制效應。因為對於空間鋼構架，數值及試驗結果都非常少，因此以 ABAQUS 用來檢核本研究所提方法之精確性。

關鍵詞：改良式擬塑鉸法、空間鋼構架、進階分析、極限狀態、塑性擴展

### Abstract

Four major aspects should be considered in an advanced analysis, including spread-of-plasticity, residual stresses, geometrical imperfections, and geometric nonlinearity, among which the first two effects should be carefully modeled especially. In the literature, three approaches have been proposed to model the effects of spread-of-plasticity and residual stresses,

including the refined plastic hinge method, the plastic zone method, and the quasi-plastic hinge method. The plastic zone method is the most accurate method but it is too time-consuming to be used for engineering practice. The refined plastic hinge method is the simplest one and is also possible to be extended to analyze space steel frames, but its degradation rules must be re-calibrated by curve fitting due to changes in material models and section types. The refined quasi-plastic hinge method has been originally developed for planar frames, but it can be extended to space steel frames easily.

The goal of this study is to extend the two-dimensional refined quasi-plastic hinge method so that it can be used to calculate the ultimate strength of space steel frames. To this end, the full plastification surface used in two-dimensional refined quasi-plastic hinge method is revised to take interactions of axial forces, strong axis moment and weak axis moment into account. Because few numerical and test results are available for space steel frames, results from the plastic zone method of ABAQUS will be employed for comparisons.

**Keywords:** Refined Quasi-plastic hinge Method, Space Steel Frames, Advanced Analysis, Limit States, Spread-of-plasticity

### 二、緣由與目的

進階分析之目的在於求出結構物的極限承載能力和在此之前完整的外力與位移反應，為達到此一目的，則必須盡量在分析過程中模擬所有可能影響結構物強

度的效應，其中較重要的包括幾何非線性效應、材料非線性效應(塑性效應)、殘餘應力)、幾何瑕疵、梁柱接頭性質以及結構物建造方式等等。幾何非線性目前以幾何勁度矩陣(例如 Yang and Kuo 1994)來考慮此效應，已相當方便且正確。幾何瑕疵可由擾動初始結構幾何模擬之，較為單純。至於塑性擴展及殘餘應力效應一般是同時考慮的。傳統上以所謂的零長度塑鉸法來考慮，此法假設塑性變形(轉角)集中於元素端點，雖然實用上簡單，但是卻往往高估了極限承載力，尤其是當彎矩是對弱軸時，此乃由於塑性變形實際是發生在一個所謂的塑性區，而非一個點。文獻中欲考慮此種塑性擴展，一般用所謂的纖維元素(例如 Clarke et al. 1992)，將桿件斷面做離散，除此外，沿著桿件軸向也必須做較細之切割，這些方法可統稱為塑性區法或分佈塑性法，其計算量可能為傳統塑鉸法之數百或數千倍，實用上有困難，尤其應用到空間構架分析時。

除了塑性區法外，近來在鋼構非線性分析方面有不少學者提出不同的方法來修正傳統的塑鉸法使之能近似考慮塑性擴展效應，較為成功者為改良式塑鉸法(Liew et al. 1993; Leu and Chen 1999)，其基本想法是定義一個由斷面起始降伏面到極限強度面之勁度衰減規則，此法雖然簡單，但上述之衰減規則為半經驗公式。Leu and Chen(1999)所提出的改良式塑性鉸法較具物理意義之衰減規則，成功模擬平面構架的塑性行為，能提供一個快速且精準的進階分析。然而在空間構架的進階分析方面，卻因為直接使用由平面構架所迴歸的衰減規則，而使得此衰減規則在物理意義上的立足點稍嫌薄弱。此外，由於扭轉與翹曲勁度等項的衰減規則訂定的不易，而在薄壁梁斷面分析上也遭遇一些問題。

Attalla et al. (1994) 及 Attalla (1995) 提出了所謂的擬塑鉸法(quasi-plastic hinge method)，該法能精確地考慮塑性擴展及殘餘應力效應，且計算效率與一般塑鉸法相當。其主要觀念是利用斷面之  $M-\Phi-P$  (彎矩-曲率-軸力) 及  $P-\varepsilon-M$  (軸力-軸應變-彎矩) 兩曲線，先推導元素之切線彈塑性柔度矩陣，從而求得切線彈塑性勁度矩陣。而 Attalla (1995)之原方法雖可應用於空間構架，但程式編寫上仍非常繁複，其應用不易推廣。因此空間構架的進階分析，仍然是有待解決的一項課題。

綜合以上之討論，本研究希望以增量式的擬塑鉸法為工具，將鋼結構構架之進階分析由二維擴展至三維，以期對構架的承載能力能夠達到最忠實的模擬。

### 三、結果與討論

#### 三維問題之完全塑性面

斷面之完全塑性面形式可表示為：

$$f(p, m) = 1$$

其中  $p = P/P_y$ ， $m = \sqrt{m_y^2 + m_z^2}$ ， $m_y = M_y/M_{py}$ ，且  $m_z = M_z/M_{pz}$ 。而  $f(p, m)$  的表示式為 (Attalla et al. 1994)：

$$f(p, m) = a_1 p^6 + a_2 m^6 + a_3 p^4 + a_4 m^4 + a_5 p^2 + a_6 m^2$$

其中， $a_i (i=1\sim6)$  可表示為：

$$a_i = b_{i1} \sin^2 \beta + b_{i2} \cos^2 \beta + b_{i3} \sin^2 \beta \cos^2 \beta$$

其中，係數  $b_{ij} (i=1\sim6, j=1,3)$  請參見 Attalla et al. (1994)； $\beta$  為兩軸正規化彎矩比例角，表示式如下：

$$\tan \beta = m_y / m_z$$

如欲考慮挫曲效應，則上述之完全塑性面必須對該端所承受之雙彎矩(Bimoment，記為  $B$ )折減。詳細的折減方式請參閱 Attalla(1995)或李(2002)。

### 強軸及弱軸之彎矩-曲率關係

本研究採用的彎矩-曲率關係如下：

$$\begin{aligned}\phi_y(M_y) &= \phi_{ey}(M_y) + \phi_{py}(M_y) \\ \phi_z(M_z) &= \phi_{ez}(M_z) + \phi_{pz}(M_z)\end{aligned}$$

其中  $\phi_{ey}(M_y)$  及  $\phi_{ez}(M_z)$  為兩軸的彈性曲率， $\phi_{py}(M_y)$  及  $\phi_{pz}(M_z)$  為兩軸的塑性曲率， $\phi_{ey}(M_y)$  及  $\phi_{py}(M_y)$  計算方式如下：

$$\phi_{ey}(M_y) = \frac{M_y}{EI_y}$$

$$\phi_{py}(M_y) = \frac{c_y}{M_{pcy} - M_{rcy}} \int_{M_{rcy}}^{M_y} \left( \frac{M - M_{rcy}}{M_{pcy} - M} \right)^{n_y} dM$$

同理可得  $\phi_{ez}(M_z)$  及  $\phi_{pz}(M_z)$ 。其中參數  $c_y, c_z, n_y, n_z$  的計算方式請參見 Attalla et al. (1994)。而  $M_{pcy}, M_{pcz}$  為所受軸力  $P$  之下的塑性彎矩容量，可經由完全塑性面求得； $M_{rcy}, M_{rcz}$  為所受軸力  $P$  之下的初始降伏彎矩，可經由初始降伏面求得。

由於桿件兩端之  $y$  及  $z$  軸之彎矩比例不一定相同，所以桿件兩端的完全塑性面及初始降伏面亦不同，因此，桿件兩端所建構之彎矩-曲率關係也隨之不同。

### 兩端具不同彎矩-曲率關係桿件之彈塑性勁度矩陣

由於桿件兩端彎矩-曲率關係的不同，蔡(2000)首先提出二維變斷面增量方程式理論，簡述如下：

首先，元素之撓曲彈塑性柔度矩陣定義為

$$\begin{Bmatrix} \Delta\theta_a \\ \Delta\theta_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta M_a \\ \Delta M_b \end{Bmatrix}$$

用共軛梁法得增量曲率表示之增量轉角：

$$\Delta\theta_{na} = -\frac{1}{L} \int_0^L \Delta\phi(x; \Delta M_a, \Delta M_b)(L-x) dx$$

$$\Delta\theta_{nb} = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta\phi(x; \Delta M_a, \Delta M_b) x dx$$

當建構了  $y, z$  軸方向之桿件兩端完

全塑性面及彎矩-曲率關係後，用上兩式，可導得  $[d]$  (解析示見蔡 2000)，進而得到簡支撓曲彈塑性勁度矩陣  $[k] = [d]^{-1}$ 。

### 彈塑性勁度矩陣及切線勁度矩陣

元素之簡支彈塑性勁度矩陣可表為：

$$[k_m] = \begin{bmatrix} [k_z] & & \\ & [k_y] & \\ & & k_\delta \end{bmatrix}$$

其中  $[k_y]$  及  $[k_z]$  為上述應用蔡(2000)之二維變斷面理論所求得之關於  $y$  及  $z$  軸撓曲勁度矩陣，在此並假設塑性並不影響軸向勁度，故令  $k_\delta$  為  $EA/L$ 。

如欲考慮挫曲效應，除了配合折減的(因為雙彎矩)完全塑性面之外，其有簡支的彈塑性勁度矩陣亦應改寫為：

$$[k_m] = \begin{bmatrix} [k_{zB}] & & & \\ & [k_{yB}] & & \\ & & k_\delta & \\ & & & [k_w] \end{bmatrix}$$

其中下標  $B$  表示配合折減的完全塑性面所計算出之撓曲勁度矩陣，而  $[k_w]$  為對應於兩端軸向轉角一次微分  $(\theta'_x)$  之彈塑性勁度矩陣(李 2002)。本研究中，假設彈塑性挫曲常數  $C_{wr}$  與  $I_{y'}$  呈線性關係如下

$$C_{wr} = \frac{1}{4} h^2 I_{y'}$$

其中對  $y$  軸之彈塑性慣性矩可由  $[k_y]$  近似求得：

$$I_{y'} = \frac{1}{2} ([k_{yB}]_{11} + [k_{yB}]_{22}) \frac{L}{4E}$$

故  $[k_w]$  可寫為：

$$[k_w] = \frac{EC_{wr}}{L} \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}$$

對於無支承之梁柱元素，其彈塑性勁度矩陣可經由同餘轉換及加入扭轉效應的彈性勁度矩陣得到，即

$$[k_{ep}] = [T]^T [k_m] [T] + [k_\theta]$$

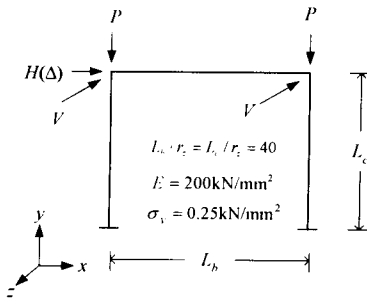
上式中  $[T]$  可應用一般平衡關係求得(李 2002)，而  $[k_\theta]$  為考慮扭轉效應的彈性勁度矩陣。最後，切線勁度矩陣為：

$$[k_t] = [k_{cp}] + [k_g] + [k_i]$$

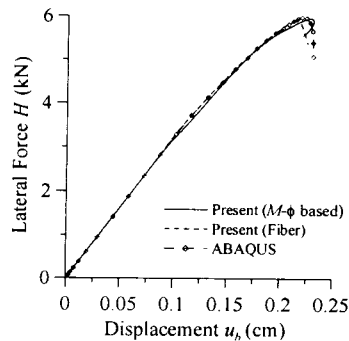
上式中  $[k_g]$  及  $[k_i]$  為幾何勁度及彎矩引入矩陣(Yang and Kuo 1994)。

### 三維問題之驗證

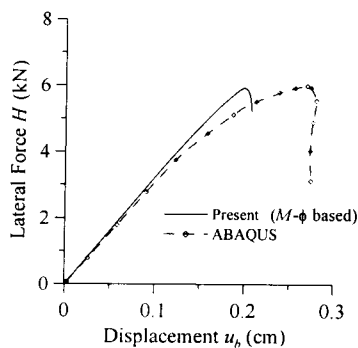
首先利用一單曲率或雙曲率加載支簡支梁(Leu et al. 2002)，及具有幾何瑕疵的簡支梁加以測試本方法，結果都相當好。接下來又利用如下之一層樓結構加以測試(李 2002)：



對於不考慮挫曲效應時的分析結果：



結果相當好(李 2002)。而對於考慮挫曲效應時的分析結果如下：



極限強度值十分吻合，但是其載重-位移圖形仍需加以改進。

### 四、計畫成果自評

本計畫已按原計畫內容執行，研究成果目前發表會議論文一篇(Leu et al. 2002)，近期會擴充投稿到期刊。

### 五、參考文獻

Attalla, M. R., Deierlein, G. G. and McGuire, W. (1994), "Spread of plasticity: quasi-plastic-hinge approach," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 8, 2451-2473.

Attalla, M. R. (1995), *Inelastic Torsional-Flexural Behavior and Three-dimensional Analysis of Steel Frames*, Ph.D. Dissertation, School of Civil Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.

Clarke, M. J., Bridge, R. Q., Hancock, G. J., and Trahair, N. S. (1992), "Advanced analysis of steel building frames," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 23, 1-29.

Leu, L.-J. and Chen C.-Y. (1999), "Refined plastic-hinge approach for advanced analysis of steel frames," *Proceedings of the First International Conference on Advance in Structural Engineering and Mechanics*, Seoul, Korea, August 23-25

Liew, J. R., White, D. W. and Chen, W. F. (1993), "Second-order refined plastic-hinge analysis for frame design, part I," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, 3196-3216.

Yang, Y. B. and Kuo, S. R. (1994), *Theory and Analysis of Nonlinear Framed Structures*, Singapore, Prentice Hall.

蔡明軒(2000)，考慮具軟化彎矩曲率關係之構架及連續梁非線性分析，碩士論文，國立台灣大學土木工程所。

李曉惠(2002)，空間構架之幾何與材料非線性分析，碩士論文，國立台灣大學土木工程所。

Leu, L.-J., Lee, H.-H., and Tsai, M.-H. (2002), "Moment-curvature relationship based method for nonlinear analysis of planar and spatial steel frames," *Proceedings of the Fifteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering*, National University of Singapore, Singapore, December 19-20.