

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

構架側推分析行為探討

Behavior of Pushover Analysis of Frame

研究生：賴志瑜

指導教授：林昌佑 博士

中華民國一百零一年十二月

# 構架側推分析行為探討

Behavior of Pushover Analysis of Frame

研究生：賴志瑜

Student : Zhi - Yu Lai

指導教授：林昌佑 博士

Advisor : Dr. Chang-Yu Lin

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis  
Submitted to Department of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
For the Degree of  
Master of Science  
In  
Civil Engineering

December 2012  
HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年十二月

# 構架側推分析行為探討

研究生：賴志瑜

指導教授：林昌佑 博士

國立交通大學 土木工程學系碩士班

## 摘要

本研究藉由 OpenSees 分析軟體探討構架側推分析基本力學行為。主要以 RC 構架為例，依照國家地震工程研究中心建議塑性鉸之定義，進行 RC 構架受側向水平載重時之側推分析。

進行側推分析在 OpenSees 上採用集中塑性模型，塑性鉸視為長度為零的彎矩彈簧。模型驗證採用懸臂梁和 1x1 Frame 進行側推分析，並以基本力學公式與結構分析做其驗證，由分析結果與力學行為之驗證，可知模型之模擬有其參考價值。

最後，以 1x1、2x1 與 2x8 Frame 進行實例探討考慮實際 RC 構架樑柱接頭之剛性行為，進行側推分析，並與 ETABS 套裝軟體進行驗證與比較。由結果可知 OpenSees 與 ETABS 在極限點前行為一致，但在極限點後，OpenSees 停止分析，ETABS 容量曲線產生下降端。

關鍵字：側推分析、塑性鉸、OpenSees

# Behavior of Pushover Analysis of Frame

Student: Zhi - Yu Lai

Adviser: Dr. Chang-You Lin

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

The study is to explore the fundamental mechanical behavior on pushover analysis of frame by using the finite element software OpenSees. Taking RC frames as examples subjected to lateral horizontal load, with the definition of plastic hinge as recommended by National Center for Research on Earthquake Engineering.

Pushover analysis on OpenSees is proceed by considering the plastic hinge as zero in length of rotational spring and use of concentrated plasticity model. Model validation is by cantilever and 1x1 frame to conduct pushover analysis. Moreover, it is verified by basic mechanical formula and structural analysis and it can be seen as the value of reference with the results of the simulation on mechanical behavior of structural analysis.

Finally, conduct the practical discussion on RC framework of beam-column joint of rigid zone through 1x1, 2x1, 2x8 frames and pushover analysis to compare with ETABS software packages. According to the results, it is consistent up to the ultimate point on OpenSees and ETABS; but over the ultimate point, OpenSees stopped and capacity curve from ETABS decreased.

Keyword : Pushover 、 Plastic Hinge 、 OpenSees

## 誌謝

首先感謝我的指導教授林昌佑老師，於碩士求學生涯中很有耐心一步步地指導我，對於學術研究、論文撰寫的教導，能順利的完成論文和口試真的要非常感謝老師。以及感謝口試委員，趙文成教授、洪士林教授嚴謹專業的指教及建議，得以使本論文更加完整與充實。

感謝於求學期間中，學長呈祥、冠寰、江祥、賜豪、筱卉、林恩、偉松、咏麟的幫忙，在論文研究上的指導以及提供豐富寶貴的經驗；同學秉坤、文平、哲豪、煥鈞在研究期間所給予的支持與協助，並一起為論文打拼；以及感謝我的好友們顥薰、彥銘、子桓、躬吏、昱良、祥恩與騰毅等人，謝謝你們在我求學過程中的陪伴與鼓勵。

最後要感謝在我求學過程中一直扮演重要角色的家人，感謝爸爸、媽媽、哥哥一路上的支持、鼓勵與包容，讓我將挫折與痛苦化為前進的動力，使得我能順利的完成論文。在此將本論文及所有的榮耀獻給你們，感謝你們一路上的支持，才能成就今日成功的我，如今苦盡甘來的成果願與你們一同分享。

賴志瑜

謹致於 國立交通大學

中華民國一〇一年十二月



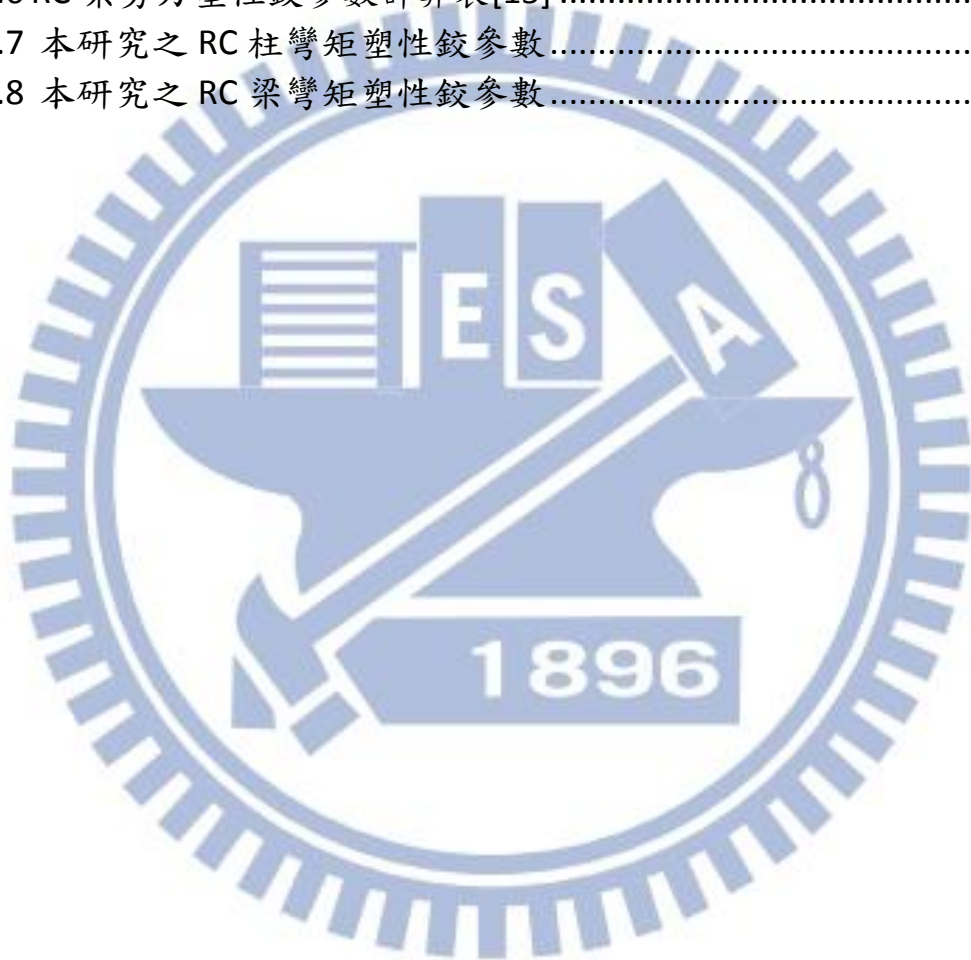
# 目 錄

	頁次
摘 要.....	I
英文摘要.....	II
誌 謝.....	III
目 錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
<b>第一章 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機與目的.....	1
1.3 論文架構.....	2
<b>第二章 文獻回顧.....</b>	<b>4</b>
2.1 側推分析(PUSHOVER ANALYSIS).....	4
2.1.1 介紹.....	4
2.1.2 側推分析方法原理.....	5
2.1.3 側推分析方法步驟.....	5
2.1.4 側推分析方法的基本假設.....	6
2.1.5 側推分析方法的用途.....	7
2.1.6 側向力分布方式.....	7
2.1.7 容量曲線.....	9
2.2 ETABS 程式之側推分析.....	9
2.3 RC 柱之塑性鉸設定.....	10
2.3.1 彎矩塑性鉸參數.....	11
2.3.2 剪力塑性鉸參數.....	13
2.4 RC 梁之塑性鉸設定.....	14
2.4.1 彎矩塑性鉸.....	14
2.4.2 剪力塑性鉸.....	15
<b>第三章 OPENSEES 簡介與驗證.....</b>	<b>16</b>
3.1 OPENSEES 簡介.....	16
3.2 OPENSEES 架構.....	16

3.3	OPENSEES 基本指令 .....	17
3.3.1	Model-Building Objects.....	17
3.3.2	Analysis Objects .....	23
3.3.3	Recorder Objects.....	26
3.4	RC 非線性行為分析模式 .....	28
3.5	範例驗證.....	30
3.5.1	塑性鉸定義 .....	30
3.5.2	懸臂梁之側推分析.....	33
3.5.3	2D 1x1 Frame 之側推分析 .....	35
<b>第四章</b>	<b>構架側推範例.....</b>	<b>43</b>
4.1	1X1 RC FRAME 之側推分析 .....	43
4.1.1	OpenSees 建模.....	44
4.1.2	ETABS 建模 .....	44
4.1.3	驗證與討論.....	45
4.2	2X1 RC FRAME 之側推分析 .....	48
4.3	2X8 RC FRAME 之側推分析.....	51
<b>第五章</b>	<b>結論與建議.....</b>	<b>54</b>
5.1	結論.....	54
5.2	建議.....	55
	<b>參考文獻.....</b>	<b>56</b>
	<b>圖表附錄.....</b>	<b>59</b>
	<b>側推範例程式碼.....</b>	<b>106</b>
	<b>1X1.....</b>	<b>106</b>
	<b>2X1.....</b>	<b>112</b>
	<b>2X8.....</b>	<b>119</b>

## 表目錄

	頁次
表2.1 RC 柱彎矩塑性鉸之參數[1].....	59
表2.2 RC 柱剪力塑性鉸之參數[1].....	59
表2.3 RC 梁彎矩塑性鉸之參數[15].....	60
表2.4 RC 梁彎矩塑性鉸參數計算表[15].....	60
表2.5 RC 剪力塑性鉸之參數[15].....	61
表2.6 RC 梁剪力塑性鉸參數計算表[15].....	61
表2.7 本研究之 RC 柱彎矩塑性鉸參數.....	61
表2.8 本研究之 RC 梁彎矩塑性鉸參數.....	62



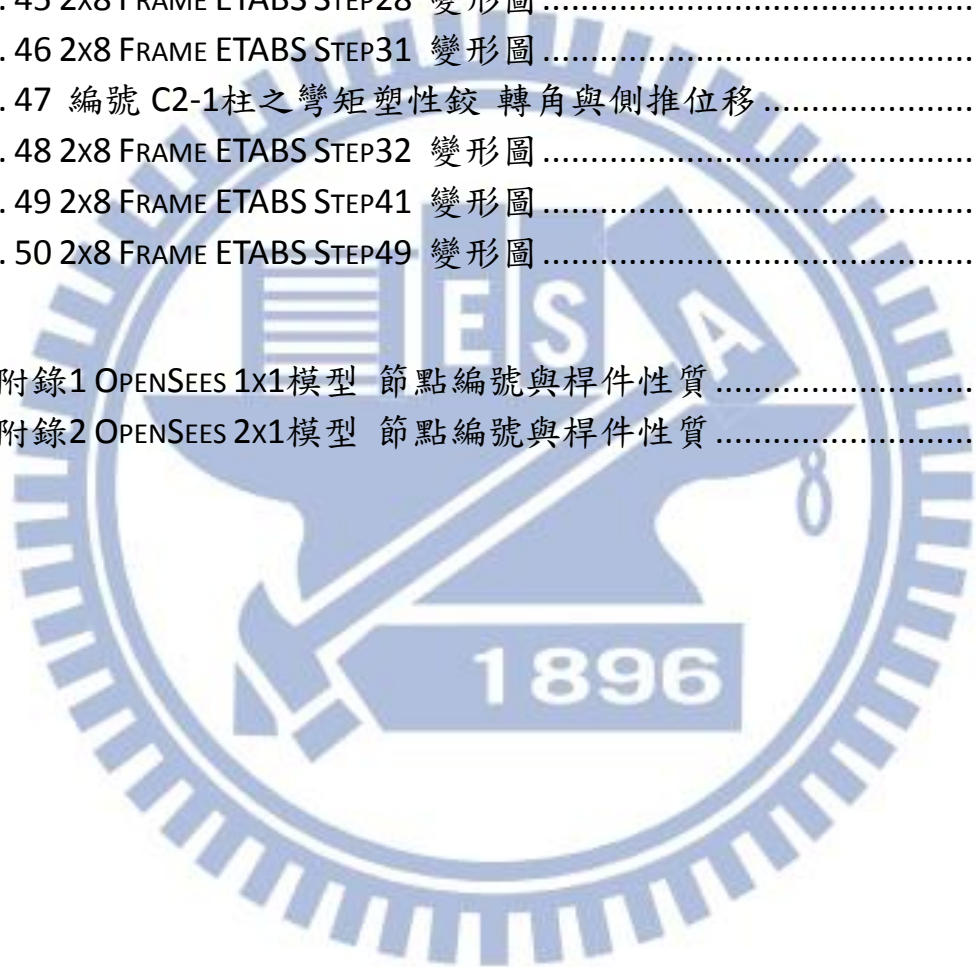


## 圖目錄

	頁次
圖2.1 側推分析之容量曲線[1].....	63
圖2.2 雙曲率柱破壞過程[1].....	63
圖2.3 柱彎矩塑性鉸性質與側向載重位移曲線[1].....	64
圖2.4 軸向破壞時的變位角之修正係數 $K'$ [1] .....	64
圖2.5 柱剪力塑性鉸性質與側向載重位移曲線[1].....	65
圖2.6 ASCE 41-06建議之 RC 梁彎矩塑性鉸載重位移曲線[15] .....	65
圖2.7 ASCE 41-06建議之 RC 梁剪力塑性鉸載重位移曲線[15] .....	66
圖3.1 OPENSEES 主要物件[1].....	66
圖3.2 OPENSEES MODELBUILDER OBJECT[19] .....	67
圖3.3 OPENSEES ANALYSIS OBJECT[19] .....	67
圖3.4 BILIN MATERIAL [17] [19].....	68
圖3.5 ELEMENT CLASSES OBJECT[19] .....	68
圖3.6 載重模式分類圖[19] .....	69
圖3.7 OPENSEES 分析物件.....	69
圖3.8 集中塑性模型.....	69
圖3.9 BEAM WITH HINGES COMMAND.....	70
圖3.10 梁、柱斷面圖.....	70
圖3.11 RC 柱彎矩塑性鉸性質.....	70
圖3.12 RC 梁彎矩塑性鉸性質.....	71
圖3.13 懸臂梁示意圖與節點編號 .....	71
圖3.14 OPENSEES 懸臂梁容量曲線圖 .....	72
圖3.15 塑性鉸之彎矩與轉角關係圖 .....	72
圖3.16 1X1 FRAME 示意圖 .....	72
圖3.17 1X1 FRAME 節點編號與塑性鉸編號圖.....	73
圖3.18 1X1 FRAME 容量曲線圖 .....	73
圖3.19 1X1 FRAME 塑性鉸之彎矩與側推位移圖 .....	74
圖3.20 1X1 FRAME 塑性鉸之彎矩與轉角圖.....	75
圖3.21 1X1 FRAME 驗證之模型1.....	76
圖3.22 1X1 FRAME 驗證之模型2.....	76

圖4.1 1X1 FRAME 示意圖 .....	77
圖4.2 1X1 FRAME 節點編號與桿件性質 .....	77
圖4.3 1X1 FRAME ETABS 3D 立體圖 .....	78
圖4.4 ETABS 梁柱開裂勁度折減修改 .....	78
圖4.5 ETABS 剛域修改 .....	79
圖4.6 ETABS 梁 END LENGTH OFFSETS .....	79
圖4.7 ETABS 柱 END LENGTH OFFSETS .....	80
圖4.8 ETABS 柱之彎矩塑性鉸設定 .....	80
圖4.9 ETABS 梁之彎矩塑性鉸設定 .....	81
圖4.10 ETABS 塑性鉸分布位置 .....	81
圖4.11 ETABS PUSHOVER CURVE .....	82
圖4.12 1X1 FRAME OPENSEES PUSHOVER CURVE .....	82
圖4.13 ETABS STEP3 變形圖 .....	83
圖4.14 柱底端編號 C1-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	83
圖4.15 柱底端編號 C2-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	84
圖4.16 ETABS STEP5 變形圖 .....	84
圖4.17 柱頂端編號 C1-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	85
圖4.18 柱頂端編號 C2-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	85
圖4.19 OPENSEES 柱彎矩塑性鉸 MOMENT-ROTATION 圖 .....	86
圖4.20 ETABS 柱彎矩塑性鉸 MOMENT-ROTATION 圖 .....	87
圖4.21 2X1 FRAME 示意圖 .....	88
圖4.22 2X1 ETABS PUSHOVER CURVE .....	89
圖4.23 2X1 OPENSEES PUSHOVER CURVE .....	89
圖4.24 ETABS STEP3 變形圖 .....	90
圖4.25 編號 B1-1梁彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	90
圖4.26 ETABS STEP4 變形圖 .....	91
圖4.27 柱底端編號 C2-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	91
圖4.28 ETABS STEP5 變形圖 .....	92
圖4.29 柱底端編號 C1-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	92
圖4.30 柱頂端編號 C2-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	93
圖4.31 ETABS STEP9 變形圖 .....	93
圖4.32 OPENSEES 編號 C2-1之柱彎矩塑性鉸 MOMENT-ROTATION 圖 .....	94
圖4.33 ETABS STEP10 變形圖 .....	94
圖4.34 柱頂端編號 C1-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖 .....	95
圖4.35 ETABS STEP11 變形圖 .....	95
圖4.36 ETABS STEP12 變形圖 .....	96

圖 4. 37 2x8 FRAME 示意圖 .....	97
圖 4. 38 OPENSEES 2x8 FRAME PUSHOVER CURVE .....	98
圖 4. 39 ETABS 2x8 FRAME PUSHOVER CURVE.....	98
圖 4. 40 ETABS 2x8 FRAME PUSHOVER CURVE TABLE .....	99
圖 4. 41 2x8 FRAME ETABS STEP14 變形圖 .....	100
圖 4. 42 編號 B1-1梁正彎矩塑性鉸之側推位移與彎矩.....	100
圖 4. 43 2x8 FRAME ETABS STEP15 變形圖 .....	101
圖 4. 44 編號 C2~C6-1、C8-1 柱彎矩塑性鉸之側推位移與彎矩圖 .....	102
圖 4. 45 2x8 FRAME ETABS STEP28 變形圖 .....	103
圖 4. 46 2x8 FRAME ETABS STEP31 變形圖 .....	103
圖 4. 47 編號 C2-1柱之彎矩塑性鉸 轉角與側推位移 .....	104
圖 4. 48 2x8 FRAME ETABS STEP32 變形圖 .....	104
圖 4. 49 2x8 FRAME ETABS STEP41 變形圖 .....	105
圖 4. 50 2x8 FRAME ETABS STEP49 變形圖 .....	105
圖 附錄1 OPENSEES 1x1模型 節點編號與桿件性質 .....	106
圖 附錄2 OPENSEES 2x1模型 節點編號與桿件性質 .....	112





# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

國內早期建築物大致皆為鋼筋混凝土結構，直至現今的低矮型建築物或是校舍建築物，且台灣位處於兩大板塊交界上，每年大小地震頻繁，在九二一大地震慘痛教訓後，有將近五分之一的校舍損壞，之後建築物耐震能力一直都是許多人關心的一個話題。

在強震作用下，鋼筋混凝土建築之構件降伏破壞時會產生塑性鉸 (Plastic Hinge)，塑性鉸的性質會決定整體結構的韌性，而考慮結構韌性問題應重視結構構件的塑性鉸力學行為之預估方法。而側推分析 (Pushover Analysis) 是將構件降伏時視為塑性鉸來處理，所以塑性鉸的研究是側推分析的一個重要內容，故國家地震工程研究中心出版「校舍結構耐震評估與補強技術手冊」，針對低矮樓層或校舍根據 ATC-40 與 FEMA 273 做其塑性鉸設定之建議。

國家地震工程研究中心「校舍結構耐震評估與補強技術手冊」採用 ETABS 軟體進行側推分析，並設定其構件塑性鉸予相對之位置，在分析後可知其構件需補強。

## 1.2 研究動機與目的

本研究的出發點為閱讀有關側推分析和塑性鉸的相關文獻和資料時，大多數採用的分析軟體為套裝軟體，如 ETABS、MIDAS、SAP2000

等，其軟體都是有權限的。故本研究嘗試為開放性原始碼(Open Source)的 OpenSees 分析軟體供學術使用，定義塑性鉸並進行側推分析，且與 ETABS 比較其分析結果之差異並探討基本力學之行為。

因 OpenSees 在模型建構與分析上有相當大的自由性，可供使用者以現有內建指令做其模型之變化，模擬結構分析之行為，相當適合研究生做其研究。

而本研究之目的為，以側推分析之模型概念將其建構於 OpenSees 模型上，並探討 ETABS 與 OpenSees 兩者之塑性鉸與整體結構之行為。

### 1.3 論文架構

本論文共分為五章，第一章為緒論、第二章為文獻回顧、第三章為 OpenSees 簡介與驗證、第四章為構架側推範例、第五章為結論與建議等五個部分，各章內容分別敘述如下：

#### 第一章、 緒論

詳述本論文的研究背景、研究動機與目的與論文架構，並簡易論述側推分析與塑性鉸之關係，以及為何使用 OpenSees 分析軟體。

#### 第二章、 文獻回顧與背景資料探討

把相關的知識與文獻進行彙整，內容包含側推分析介紹，ETABS 程式之側推分析，RC 柱與梁塑性鉸之設定。

#### 第三章、 OpenSees 簡介與驗證



介紹本研究所採用 OpenSees 有限元素分析軟體之簡介與架構和側推分析中所使用的相關指令，並將懸臂梁與1x1 Frame 以基本力學概念做其範例驗證。

#### 第四章、 構架側推範例

考慮實際構架其樑柱接頭之行為，以1x1 Frame、2x1 Frame 與2x8 Frame 作為側推範例，並與 ETABS 軟體做其驗證與討論。

#### 第五章、 結論與建議

根據本研究，提出結論與建議。



## 第二章 文獻回顧

此章節將以國家地震工程研究中心「校舍結構耐震評估與補強技術手冊-第二版」[1]之建議進行塑性鉸設定，並作為本研究之背景，其為一套針對低矮型校舍的耐震詳細評估法，此套評估方法，需用側推分析，其分析套裝軟體如 MIDAS、SAP2000及 ETABS 等皆能進行此種分析。並針對其非線性鉸之設定予以介紹。

而此手冊中之主要使用的有限元素分析套裝軟體為 ETABS，並以 MATLAB 撰寫一套耐震能力詳細評估輔助程式，以方便使用者針對各種梁柱狀況，設定其塑性鉸進行分析。

### 2.1 側推分析(Pushover Analysis)

#### 2.1.1 介紹

側推分析(Pushover Analysis)，亦可稱為推垮分析。此分析目的為找出建築物在地震力作用下的破壞機制，得知在不同地震級數侵襲下，建築物的破壞程度、預知建築物由何處開始崩塌，讓設計者可以針對較脆弱的的環節進行健康監測、修復或補強。

美國 ATC-40[2]與 FEMA 273[3]建議同時考量結構物的側力抵抗能力及非線性位移能力。以倒三角形給整體結構之側力，以位移控制之方式從零逐步增加，直到結構失去垂直承載之能力，將其定義為倒榻。在側推分析的過程中記錄每一步之基底剪力  $V$  及非線性側推分析中所

得之屋頂側向位移  $\Delta_{roof}$  的關係曲線，即為容量曲線(Capacity Curve)，其中屋頂側向位移  $\Delta_{roof}$  為建築物之最大之節點位移為依據。如圖2.1所示，容量曲線圖可代表結構物的抗震能力，當側向力不大時，結構物能保持在線彈性範圍內；當側向力逐漸增加時，結構物中的某些桿件進入非線性階段，造成容量曲線的斜率開始變緩，直到結構物韌性用盡，最後基底剪力急遽下降。藉由此容量曲線可分析出塑性鉸產生順序、位置等，預測結構物發生降伏後的行為，並進一步推估在不同地震力下，建築物破壞的情形與程度。

### 2.1.2 側推分析方法原理

側推分析為一種結構耐震能力評估的新方法，該方法是在Freeman[4]等人先提出。Saiidi Mehdi[5]等人提出了用等效單自由度體系進行非線性地震分析的簡化方法。主要對現有結構或設計方案進行抗側能力的計算，從而估計其耐震能力，主要原理為，在結構上給予倒三角之水平側向力分布形式[6]，並逐漸增加水平力使結構各構件進入塑性，進而改變整體結構之耐震特性，直到結構達到預定之側推位移或成為不穩定結構。

### 2.1.3 側推分析方法步驟

1. 將結構簡化為一個等效單自由體系，計算在設計地震作用下之最大彈塑性位移。



2. 建立結構分析的二維或三維模型，確實輸入構件的物理參數及各構件的塑性鉸。
3. 將地震作用簡化為倒三角形並將其作用在結構的計算模型上。
4. 以增量控制方程式，逐漸增加水平荷載進行結構的側推分析，直到結構之控制點位移達到目標位移值或結構不穩定。
5. 在側推分析過程中找出塑性鉸生成之位置與破壞之位置。

#### 2.1.4 側推分析方法的基本假設

側推分析方法基本假設主要有[7]：

1. 實際結構的地震反應與其等效單自由度系統相關，也就是說結構的地震反應僅由結構的第一振態控制。
2. 結構沿高度的變形由形狀向量表示，在整個地震作用過程中，不管結構的變形大小，形狀向量保持不變。
3. 樓板在自身平面內的勁度無限大。視為剛性樓板，在樓板平面中只有剛體位移的平移和轉動，不改變其形狀。

朱杰江[8]等人提出了上述假設的缺陷，在實際結構相對位移向量是由所有振態共同決定的，且各階段振態是隨著結構勁度的改變而改變，當結構較弱環節進入降伏階段後整體結構的性能會發生改變，此時若仍採用彈性階段的位移向量其分析結果會有誤差。

## 2.1.5 側推分析方法的用途

側推分析除了可用於檢驗新設計的建築結構，亦可評估現有建築之結構性能是否滿足在地震作用下的設計性能目標，其主要的用途包括：[9]

1. 結構行為分析：側推分析可以預測結構在側向力作用下，其結構從彈性、開裂、降伏、彈塑性及承载力下降的過程，並可知塑性鉸生成的先後順序與位置分布。
2. 判斷結構耐震承载力：側推分析可以得到結構的基底剪力與頂點位移曲線，此曲線可表現出結構整體性的抵抗側向力之能力。在耐震設計中，結構必須先滿足承载力的要求，若結構具有的承载力大於地震作用下的基底剪力，則滿足承载力要求；若小於，則須修改設計，於現有建築就需要耐震補強。
3. 建立結構整體位移與構件局部變形間之關係：結構之頂點位移是由構件變形產生，由靜力彈塑性分析，可以得到結構在控制位移時之桿端塑性鉸轉角值，從而確定對桿端塑性鉸區的約束要求，以保證桿件有足夠的變形能力。

## 2.1.6 側向力分布方式

側向力的分布方式是為了反應出地震作用下個結構層慣性力的分布特徵，使所求之側推位移能真實地反應地震作用下的結構狀況。側



向力所採用的分布形式會影響到容量曲線的建立，以下為三種側向力的分配形式：

$$F_x = \frac{w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} V (\text{我國建築設計規範})$$

$$F_x = \frac{w_x \phi_x}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_i} V (\text{ATC-40規範})$$

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V (\text{FEMA 273})$$

其中， $V$ ：為側向地震力

$w_x$ ：為第  $x$  層重量

$w_i$ ：為第  $i$  層重量

$h_x$ ：為基底至第  $x$  層樓高

$h_i$ ：為基底至第  $i$  層樓高

$\phi_x$ ：為正規化基本振態振形

$k=1.0$ ， $T \leq 0.5$  秒

$k=2.0$ ， $T \leq 2.5$  秒

$T$ ：為結構物之基本震動週期

介於  $0.5 \text{ 秒} \leq T \leq 2.5 \text{ 秒}$  之間時， $k$  可採用線性內插求得。[9]

而本論文因不考慮結構物自重，故側向力為自行假設，而其分布型態為倒三角。

## 2.1.7 容量曲線

Fajfar 和 Kilar[10]經由逐步分析過程建立基底剪力和頂層變位關係，用來求取結構體的容量曲線(Capacity Curve)。建築物容量曲線是指建築物基底剪力與頂層變為之關係圖，其代表的是建築物的耐震能力，本論文主要重點就是如何使用 OpenSees 軟體估算建築物容量曲線，並與基本力學觀念和 ETABS 軟體進行比較與驗證，從容量曲線之關係進而探討塑性鉸於結構上的行為。

ATC-40是以非線性靜力分析的側推法求容量曲線之關係，此方法是對建築物採用逐步增加側力的方式來進行側推，在側推過程中，若有構件進入降伏或破壞，元素的勁度矩陣必須不斷修正，直到結構達到不穩定為止。

## 2.2 ETABS 程式之側推分析

ETABS 是美國 CSI 公司(Computer and Sciences, Inc.)所發展之結構應用軟體，廣泛應用於工程界的結構分析上。

進行側推分析時，需先定義材料性質與結構元件，接著建立結構物分析模型、邊界束制條件與載重型式；在設定塑性鉸性質及塑性鉸作用位置；最後利用側推分析可算出結構物之容量曲線。

分析程式中，建物的非線性變形完全由結構元件上設置的塑性鉸來表現。ETABS 分析程式提供兩種塑性鉸設定方式非別為，採用 ATC-40

與 FEMA 273的建議值做為塑性鉸特性的預設值、使用者定義的塑性鉸。ETABS 內建的塑性鉸有四種：

1. 軸力塑性鉸(axial hinge)：P
2. 與軸力互制之彎矩塑性鉸(P-M-M hinge)：PMM。
3. 彎矩塑性鉸(moment hinge)：M3(X 向) 、M2(Y 向)。
4. 剪力塑性鉸(shear hinge)：V2(X 向) 、V3(Y 向)。

使用者可依照實際構件之受力行為，選擇適當的塑性鉸性質。

### 2.3 RC 柱之塑性鉸設定

Elwood 與 Moehle 等人在2005年的研究[11][12]，在雙曲率柱承受側向力  $V$  與側力  $P$  的作用下(圖2.2)，當主筋降伏時，其側向位移  $\Delta$  會到達  $\Delta_y$ ，可稱其  $\Delta_y$  為降伏位移；當柱端的塑性鉸區產生明顯剪力斜裂縫時，側向位移  $\Delta$  會到達  $\Delta_s$ ，其為撓剪破壞(flexure-shear failure)；在柱完全失去軸向承载力時，側向位移  $\Delta$  會到達  $\Delta_a$ ，以致發生軸向破壞(axial failure)。

建築物在非線性反應的過程中，由於柱的反曲點位置會改變，故進行分析前，並無法指定柱的破壞模式。因此在塑性鉸的設定，需在柱的中間設置剪力塑性鉸，以表現剪力破壞；在柱的兩端設置彎矩塑性鉸，以表現撓曲破壞或撓剪破壞。本研究根據國家地震中心報告書[1]之建議，定義塑性鉸之參數，以供 ETABS 和 OpenSees 使用。



### 2.3.1 彎矩塑性鉸參數

將反曲點假設在淨間距長度為  $H$  的柱之中間點來定義塑性鉸性質，在撓剪破壞模式下的側向載重位移曲線，計算其塑性變位部分，定義彎矩塑性鉸參數。其彎矩塑性鉸參數與側向載重位移曲線關係如(圖2.3)，參數之設定值如(表2.1)，表中 SF(Scale Factor)所相對應之 Moment SF 為  $M_n$ ；Rotation SF 固定為1。

(表2.1)中之參數定義如下：

$$a = \frac{\Delta_s}{H} - \frac{\Delta_y}{H} \quad (2.1)$$

$$b = \max \left\{ \frac{\Delta_a}{H}, \frac{\Delta_s}{H} \right\} \quad (2.2)$$

$$\Delta_y = \frac{V_b}{k} = \frac{V_b H^3}{12(EI)_c} \quad (2.3)$$

其中， $H$  為柱高；

$\Delta_s$  為撓剪破壞位移；

$\Delta_a$  為軸向破壞位移；

$\Delta_y$  為降伏位移；

$(EI)_c$  為柱開裂斷面的撓曲勁度，根據美國 ACI 318-05 規範[13]，在考慮開裂斷面狀況下，梁柱皆用  $0.35E_c I_g$ ， $E_c$  為混凝土彈性模數， $I_g$  為梁、柱斷面慣性矩。

依照以上彎矩塑性鉸之參數，可以在 ETABS 中定義出新的塑性鉸。

而 ETABS 中塑性鉸是由 A~E 五個點來定義，但根據國家地震中心報

告書中，只需要四個點即可，因塑性鉸的設定，將 D 與 E 點的值皆設定為到達軸向破壞位移時之參數。且為使側推分析較不易造成非線性求解發散，將 E 點之位移值放大10倍，此項設定不會影響分析結果之準確性。[1]

(2.1)式中 $\frac{\Delta_s}{H}$ 為撓剪時的破壞變位角，根據美國 Elwood 及 Moehle 的研究[14]，可由下式計算：

$$\frac{\Delta_s}{H} = \frac{3}{100} + 4\rho'' - \frac{1}{133} \frac{v_m}{\sqrt{f'_c}} - \frac{1}{40} \frac{P}{A_g f'_c} \geq \frac{1}{100} \quad (2.4)$$

(2.4)式中， $H$  為柱淨高；

$\rho'' = \frac{A_{st}}{b \times s}$  為剪力箍筋體積比；

$A_{st}$  為剪力筋總斷面積，計算剪力鋼筋於箍筋間距( $s$ )內之斷面積；

$v_m = \frac{V_b}{b \times d}$  為剪應力；

$V_b$  為雙曲率柱撓曲強度所對應之作用剪力，根據材料力學，可由下式

計算 $V_b = \frac{2M_n}{H}$ ；

$d$  為柱斷面的有效深度，可設為柱深  $h$  的0.8倍；

$f'_c$  為混凝土抗壓強度；

$A_g$  為柱斷面積；

$P$  為柱承受之軸力。

(2.2)式中 $\frac{\Delta_a}{H}$ 為軸向破壞時的變位角，根據 Elwood 與 Moehle[14]的試驗，可由下式求得：



$$\frac{\Delta_a}{H} = \frac{4}{100} \frac{1+(\tan\theta)^2}{\tan\theta + p \frac{s}{k'A_{st}f_{yt}d_c \tan\theta}} \quad (2.5)$$

(2.5)式中  $f_{yt}$  為鋼筋降伏強度；

$d_c$  為柱核心混凝土的深度，由箍筋中心置中心計算；

$\theta$  為剪力裂縫與水平的夾角一般可定為65度，但不可超過  $\tan^{-1}(H/h)$ ；

$A_{st}$  為剪力鋼筋於箍筋間距(s)內之斷面積；

$k'$  為折減90度彎鉤對於箍筋剪力強度之影響， $k'$  隨著韌性比增加，由1變化到0.7(圖2.4)。[1]

### 2.3.2 剪力塑性鉸參數

塑性鉸參數與側向載重位移曲線(圖2.5)，參數之設定值(表2.2)，所相對應之 Force SF 為  $V_n$ ；Disp. SF 為柱淨長  $H$ 。

$V_n$  鋼筋混凝土結構的剪力強度，根據美國 ACI 318-05 規範[13]，其為混凝土剪力強度  $V_c$  加上箍筋混凝土強度  $V_s$ 。

$$V_n = V_c + V_s = 0.53 \left( 1 + \frac{P}{140A_g} \right) \sqrt{f'_c} b d + \frac{A_{st} f_{yt} d}{s} \cot \alpha \quad (2.6)$$

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\tan^{-1} \left( \frac{\sigma}{2f_t \sqrt{1+\sigma/f_t}} \right)}{2} \quad (2.7)$$

(2.6)(2.7)式中， $\alpha$  為剪力裂縫之夾角；

$\sigma = P/A_g$  為軸壓應力；

$f_t = 1.06\sqrt{f'_c}$  kgf/cm<sup>2</sup> 為混凝土抗拉強度。

(表2.2)中之參數定義為：

$$c = \min \left\{ \frac{\Delta_a}{H}, 0.04 \right\} \quad (2.8)$$

上式中軸向破壞時的變位角 $\frac{\Delta_a}{H}$ ，可由(2.5)式計算，考慮柱剪力破壞模式之下，韌性比 $\mu$ 常小於2，故在(2.5)式中軸向破壞時的變位角之修正係數取 $k'=1$ 。

在圖2.5中可以發現只需要三點即可定義出剪力塑性鉸曲線，而C、D、E點在(圖2.5)中階設定為到達軸向破壞位移時之參數。為了使側推分析較不易造成非線性求解發散，在此會將E點之位移值放大為D點的10倍，此項設定不會影響分析結果之準確性。[1]

## 2.4 RC 梁之塑性鉸設定

根據 ACI 318-05 規範[13]，若分析模型中，梁使用矩形斷面替代 T 型梁斷面作為輸入，則開裂斷面之撓曲勁度應設為矩形斷面之兩倍， $0.7E_cI_g$ 。

### 2.4.1 彎矩塑性鉸

由 ASCE 41-06[15]，RC 梁彎矩塑性鉸載重位移關係曲線(圖2.6)和 RC 梁之彎矩塑性鉸參數設定值(表2.3)，設定 RC 梁彎矩塑性鉸。參數計算可參考 RC 梁彎矩塑性鉸參數計算表(表2.4)，其中相對應 Moment SF 為  $M_n$ ；而 Rotation SF 固定為1。[1]

(表2.4)中， $\rho$ 為受拉鋼筋比；

$\rho'$  為受壓鋼筋比；

$V = (M_{ni}^+ + M_{nj}^-)/L$  或  $V = (M_{ni}^- + M_{nj}^+)/L$ ， $L$  為梁淨跨距， $M_{ni}^+$ 、 $M_{ni}^-$  為梁左端正負彎矩強度， $M_{nj}^+$ 、 $M_{nj}^-$  為梁右端正負彎矩強度。

## 2.4.2 剪力塑性鉸

由 ASCE 41-06[15]，RC 梁剪力塑性鉸載重位移關係曲線(圖2.7)和 RC 梁之剪力塑性鉸參數設定值(表2.5)，設定 RC 梁剪力塑性鉸。參數計算可參考(表2.6)，其中相對應 Force SF 為  $V_n$ ；而 Disp. SF 為梁淨跨距  $L$ ； $b_w$  為梁腹寬度； $V_n = V_s + V_c = \frac{A_{st}f_yt d}{s} + 0.53\sqrt{f'_c}b_w d$ 。[1]



## 第三章 OpenSees 簡介與驗證

### 3.1 OpenSees 簡介

OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)是美國加州大學柏克萊分校的太平洋地震工程研究中心，是以 C++所建構的物件導向有限元素分析軟體。OpenSees 為開放性的原始碼(Open Source)，其具有高擴充性與維護性，研究人員可以在不更動主程式的情況下針對程式中的物件進行增加或替換的動作。本研究所使用之版本為 OpenSees 2.3.2。

OpenSees 在分析時的命令值都是利用 TCL(Tool Command Language)所建立，TCL 為一跨平台，可擴充的高階命令式語言，在 OpenSees 程式中所有的指令名稱及所需的參數都是利用 TCL所建立的函數進行讀取。

### 3.2 OpenSees 架構

OpenSees 可以依照使用者需求而使用程式中的程式庫，在 OpenSees 的架構下，其有限元素分析主要是由四個物件組成(圖3.1)：Domain Object、ModelBuilder Object、Analysis Object、Recorder Object，其中 ModelBuilder、Analysis 及 Recorder 三個部分由使用者自行輸入。

#### 1. Domain Object：

為提供給 Analysis Object、Recorder Object 做為存取之用。



## 2. ModelBuilder Object :

在 OpenSees 中 ModelBuilder Object 聚集了元素、節點、單點與多點束制和載重型態的物件。ModelBuilder Object 並負責將節點、質量、材料性質、元素、荷載型態、節點束制等物件建立在模組中，並將這些物件加入並儲存於 Domain Object(圖3. 2)。

## 3. Analysis Object :

在 OpenSees 中，分析是一種物件其由原件物件之聚集而成(圖3. 3)，是用來定義模組上執行分析的原件物件。

## 4. Recorder Object :

用來監控紀錄 Domain 各元件在分析歷程中各項資訊並將這些資訊寫入檔案中。[16]

### 3.3 OpenSees 基本指令

OpenSees 指令即為繁雜，本節以基本靜力分析與側推分析為主，介紹 OpenSees 之基本相關指令。並分成 Model-Building Objects、Analysis Objects、Recorder Objects 三個部分。

#### 3.3.1 Model-Building Objects

##### 1. Basic Model Builder :

指令定義為 Model BasicBuilder -ndm \$ndm <-ndf \$ndf>。

\$ndm 為維數問題(1,2 or 3)，1為點或線，2為平面，3為3D；\$ndf

為在節點上的自由度數，其預設值為  $ndm=1 \rightarrow ndf=1$ ， $ndm=2 \rightarrow ndf=3$ ， $ndm=3 \rightarrow ndf=6$ 。

Example :

Model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3，表示此模型為二維平面，每個節點有三個自由度。

## 2. Node Command :

指令定義為 `node $nodeTag $posX $posY $posZ`。

`$nodeTag` 代表節點編號；`$posX $posY $posZ` 代表節點的三軸座標，OpenSees 中要注意所有的編號，包括節點編號、材料編號等等，都不可以重複，否則會引起 OpenSees 出錯。

Example :

Node 1 0 0 0，表示節點1座標為(0,0,0)。

## 3. Fix Command (Single-Point Constraints) :

指令定義為 `fix $nodeTag (ndf $constrValues)`。

`$nodeTag` 為欲被束制節點；`$constrValues` 為束制類型(0 or 1)，0為無束制，1為束制。

Example :

`fix 1 1 1 1`、`fix 3 1 1 1`，1號節點與3號節點為固定端，其3個自由度皆為 fixed。

#### 4. equalDOF Command (Multi-Point Constraints) :

指令定義為 `equalDOF $rNodeTag $cNodeTag $dof1 $dof2 ...$dof6`。

`$rNodeTag` 為主節點；`$cNodeTag` 為次節點；`$dof1 $dof2...$dof6` 為次節點之指定自由度與主節點相同。

Example :

`equalDOF 1 12 1 2`，節點12之1、2自由度和節點1之1、2自由度相同。此指令是使用在所有 OpenSees 上節點座標相同時使用，在定義塑性鉸為彎矩彈簧其長度為零，故每個彈簧位置會產生兩個節點之座標相同，在此必須設定每個彈簧前後的兩個節點座標其1、2自由度相同。

#### 5. Geometric Transformation Command :

指令定義為 `geomTransf $transfType $transfTag`。

`$transfType` 分為 Linear、P-Delta 與 Corotational Transformation；

`$transfTag` 為物件編號。

Example :

`geomTransf PDelta 1`、`geomTransf Linear 2`，考慮 P-Delta 效應為編號1，線性編號為2。

#### 6. Elastic Beam Column Element Command :

指令定義為 `element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A`

$E$   $I_z$   $transfTag$ 。

$SeleTag$  為桿件編號； $SiNode$   $SjNode$  為桿件兩端節點； $A$  為桿間斷面積； $E$  為彈性模數； $I_z$  為側推方向之慣性矩； $transfTag$  為  $geomTransf$  類型之編號，1 為考慮 P-Delta 效應，2 為線性行為。

Example：

Element elasticBeamColumn 1221 12 2121 1500 189736.7 39375 1，  
編號1221桿件，其桿件兩端節點為12與2121，桿件斷面積為1500、  
彈性模數為189736.7、慣性矩為39375，並考慮 P-Delta 效應。

#### 7. uniaxialMaterial Bilin Command(圖 3. 4)：

指令定義為 uniaxialMaterial Bilin  $matTag$   $K_0$   $\sigma_{s\_Plus}$   $\sigma_{s\_Neg}$   
 $\sigma_{My\_Plus}$   $\sigma_{My\_Neg}$   $\lambda_S$   $\lambda_C$   $\lambda_A$   $\lambda_K$   
 $\sigma_{c\_S}$   $\sigma_{c\_C}$   $\sigma_{c\_A}$   $\sigma_{c\_K}$   $\theta_{p\_Plus}$   $\theta_{p\_Neg}$   $\theta_{pc\_Plus}$   
 $\theta_{pc\_Neg}$   $\sigma_{Res\_Pos}$   $\sigma_{Res\_Neg}$   $\theta_{u\_Plus}$   $\theta_{u\_Neg}$   
 $\sigma_{D\_Plus}$   $\sigma_{D\_Neg}$ 。

$matTag$  為材料編號； $K_0$  為彈性勁度； $\sigma_{s\_Neg}$ 、 $\sigma_{My\_Plus}$  為正、  
負方向應變硬化比； $\lambda_S$ 、 $\lambda_C$ 、 $\lambda_A$ 、 $\lambda_K$   
為循環退化參數； $\theta_{p\_Plus}$ 、 $\theta_{p\_Neg}$  為塑性鉸開始破壞點  
之轉角值； $\theta_{pc\_Plus}$ 、 $\theta_{pc\_Neg}$  為塑性鉸最終轉角與開始  
破壞點之轉角差值； $\theta_{u\_Plus}$ 、 $\theta_{u\_Neg}$  為塑性鉸之最終轉



角值；\$Res\_Pos、\$Res\_Neg 為正、負載重方向之殘留強度比；  
\$D\_Plus、\$D\_Neg 為正、負載重方向之循環退化比，若遲滯反應為  
對稱使用預設值為1。

#### 8. Zero-Length Element Command(圖3. 5)：

指令定義為 `element zeroLength $eleTag $iNode $jNode -mat $matTag -dir $dir1 $dir2 $dir3 ...$dir6`。

\$eleTag 為桿件編號；\$iNode、\$jNode 為桿件兩端之節點編號；  
\$matTag 為先前定義 UniaxialMaterials 關聯的編號；\$dir1 \$dir2  
\$dir3...\$dir6為材料方向，1、2、3為沿著 Local X、Y、Z 軸之方向，  
4、5、6為 Local X、Y、Z 軸之轉角。

Example：

`element zeroLength 12 1 12 -mat 1 -dir 6`，在節點1與節點12間定義  
為編號12之桿件並使用 UniaxialMaterial 編號1之材料，其材料方向  
 $M_z$  為自由度6。

在本研究中，此指令為旋轉彈簧(Rotational Spring)，並應用於集  
中塑性模型上，視其旋轉彈簧為塑性鉸(Plastic Hinge)。

#### 9. Load Command：

指令定義為 `pattern Plain $patternTag ($stsTag) {$Loadpattern}`。

\$patternTag為載重型態之編號；\$stsTag為在載重形態中這標籤為

TimeSeries所使用；\$Loadpattern包含了桿件載重(eleLoad)、節點載重(Load)、單點束制(sp) (圖3.6)。

其中NodalLoad指令定義為load \$nodeTag(ndf \$LoadValues)。

\$nodeTag為載重所對應的節點編號；\$LoadValues為載重值，需對應載重方向之自由度。

Example：

pattern Plain 2 {load 2 60000 0 0}其指令說明為，在2號節點 X 方向施側向力60000kgf，定載重型態為編號為。

#### 10.Region Command：

指令定義為 region \$regTag <-ele \$ele1 \$ele2...> <eleRange \$startEle \$endEle> <-node (\$node1 \$node2...)> <-nodeRange \$startNode \$endNode>。

\$regTag 為區域編號；\$ele1 \$ele2...為在所定義的區域編號中包含所選擇之桿件編號；\$node1 \$node2...為在所定義的區域編號中包含所選擇之節點編號；\$startEle \$endEle 為開始桿件編號到結束桿件編號；\$startNode \$endNode 為開始節點編號到結束節點編號。

Example：

region 1 -ele 12 21 34 43為編號為12、21、34與43之桿件編為一個區域，定為區域1。以方便 output 時讀取。若為較大型結構時，本

研究建議將每根梁柱的塑性鉸，個別分為一個區域。

### 3.3.2 Analysis Objects

OpenSees 分析(analysis)元件可以從簡單靜力線性分析到非線性的瞬態分析(variable transient)。OpenSees 分析元件(objects)可分為以下本研究主要使用到的分析元件 (圖3.7)：

#### 1. 分析類型(Analysis Model)：

Analysis command 定義為 `analysis $analysisType`。其中 `$analysisType` 可分為：Static(靜力分析)、Transient(瞬態分析)與 Variable Transient(非線性的瞬態分析)。本研究所採用之分析為靜力分析，故 `$analysisType` 為 Static。

Analyze command 定義為 `Analyze $numIncr`，`$numIncr` 為分析總步數，該指令用於決定執行分析步數。

Example：

`Analyze 100`，此分析總步數為 100 步，若為位移增加控制 (Displacement Control)，而總位移為每一步之位移增加量乘上 100。

#### 2. 約束處理(Constraints Handler)：

ConstraintsHandler object 作用為在分析中定義節點自由度與決定束制方程式，其定義為 `constraints $constraintType`。其中 `$constraintType` 可分為：Plain Constraints、Lagrange Multipliers、Penalty Method 及

Transformation Method 指令。

本研究約束指令只使用到 fix command 與 equalDOF command，故分析模式採用普通約束(Plain Constraints)即可。

### 3. 迭代算法(Solution Algorithm)：

SolutionAlgorithm object 為決定求解非線性方程式的演算法，定義為 algorithm \$algorithmType。其中\$algorithmType 可分為：Linear Algorithm、Newton Algorithm、Newton with Line Search Algorithm 等指令。

本研究迭代算法採用 Newton 法來求解結構的不平衡力及所對應之位移，一般為非線性處理結果。

### 4. 收斂類型(Convergence Type)：

Convergence Test Object 定義為 test \$testType。\$testType 可分為：Norm Unbalance Test、Norm Displacement Increment Test、Energy Increment Test、Relative Norm Unbalance Test 等指令，是用來確定在收斂過程中是否已經得到收斂的結果

本研究使用的收斂類型指令為能量準則(Energy Increment)，其指令定義為 test EnergyIncr \$tol \$iter。\$tol 為收斂容許誤差，\$iter 為損壞狀態前檢查的最大迭代數。

Example：



Test EnergyIncr 1.0E-008 1000，收斂類型採用能量準則，容許誤差為1.0E-008，最大迭代為1000步。

#### 5. 系統方程式(System of Equation)：

SystemOfEquation object 在分析中用於儲存與求解系統方程式，其定義為 system \$systemType，\$systemType 可分為：BandGeneralSOE、BandSPD SOE、ProfileSPD SOE 等指令。本研究採用的為 Band General 指令，是用來建構一個非對稱帶狀方程組物件，分析過程中使用 Lapack 套件來求解。[16]

#### 6. 積分方式(Integrator)：

Integrator object 用於決定控制分析的方式，在靜態分析指令中包括荷載控制 (Load Control)、位移控制 (Displacement Control Command)、弧長控制(Arc-Length Control)等，瞬態分析指令中包括中央差分(Central Difference)、Newmark 法、Hilbert-Hughes-Taylor 法等。

本研究為側推分析，故主要的分析模式採取位移控制(Displacement Control)，指令定義為 integrator DisplacementControl \$node \$dof \$incr，\$node 為位移控制之節點，\$dof 為位移控制之自由度方向，\$incr 為每一步之位移增加量。

Example：

integrator DisplacementControl 2 1 0.1，為對節點2之 X 方向位移控制，每一步之位移增加量為0.1。

#### 7. Numberer :

Numberer object 用於建構 DOF\_Numberer object，用於決定方程式編號對應自由度，定義為 numberer \$numbererType，\$numbererType 包括 Plain Numberer、Alternative\_Minimum\_Degree Numberer 等指令，本研究節點自由度編號採用輸入節點的順序，為一般結構使用故在此物件採用 Plain Numberer 指令即可。

### 3.3.3 Recorder Objects

Recorder objects 包括 Node Recorder、Drift Recorder、Element Recorder 及 Drift Recorder 等指令，較為常用的為 Node Recorder 與 Element Recorder。

#### 1. Node Recorder :

指令定義為 recorder Node <-file \$fileName> <-time> <-node(\$node1 \$node2...)> <-nodeRange \$startNode \$endNode> <-region \$RegTag> <-dof (\$dof1 \$dof2...) \$respType。

\$fileName 為欲存取之檔案名稱，輸入內容須包括副檔名(.txt or .out)，\$node1 \$node2...為欲存取之節點編號，\$startNode 為欲存取節點之起始點編號，\$endNode 為欲存取節點之終點編號，\$RegTag 為區域編號，\$dof1 \$dof2...為欲存取之節點自由度，\$respType 為節

點反應的類型，其指令包括 disp(節點位移)、reaction(節點反力)與 incrDisp(節點位移增量)等。

Example :

Recorder Node -file Node2.out -time -node 2 -dof 1 2 3 disp，為讀取2號節點之 X、Y 及 Z 方向位移，並存為 Node2.out 檔。

## 2. Element Recorder :

指令定義為 recorder Element <-file \$fileName> <-time> <-ele (\$ele1 \$ele2...)> <-eleRange \$startEle \$endEle> <-region \$regTag> \$resType。

\$fileName 為欲存取之檔案名稱，輸入內容須包括副檔名(.txt or .out)，\$ele1 \$ele2...為欲存取之桿件編號，\$startEle 為欲存取桿件之起始編號，\$endEle 為欲存取桿件之最終編號，\$regTag 為區域編號，\$resType 為桿件反應的類型，其指令包括 globalForce、localForce、deformation 等。

桿件的 globalForce 與 localForce 在2D 中三個自由度依序為  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$ ，3D 中六個自由度依序為  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 。

Example :

Recorder Element -file RotationB.out -region 2 deformation，讀取桿件為區域2轉角，並存為 RotationB.out 檔。



### 3.4 RC 非線性行為分析模式

RC 非線性分析模式在 OpenSees 有限元素分析軟體上，主要可分為三種分析模型，集中塑性模型(Concentrated Plasticity Model)、分布式塑性模型(Distributed Plasticity Model)與纖維斷面模型(Fiber Section Model)，以下為三種模型之介紹：

#### 1. 集中塑性模型(Concentrated Plasticity Model)

此分析模型架構為採用 elastic beam-column elements 做為梁柱的桿件，以 zeroLength elements 連接各桿件並視為旋轉彈簧以反應結構的非線性行為，其旋轉彈簧根據 Modified Ibarra Krawinkler Deterioration Model [17]採用 bilinear 遲滯反應材料。

如圖3.8梁柱兩端為長度為零的旋轉彈簧以表示塑性鉸之行為，梁柱則以其斷面性質建立彈性桿件。

#### 2. 分布式塑性模型(Distributed Plasticity Model)

分布式塑性模型是以 element beamWithHinges 指令來定義梁柱桿件。由圖3.9可知其梁柱桿件兩端為塑性區，其塑性區  $L_{pi}$  與  $L_{pj}$  為使用者定義之長度；塑性區之材料使用者可自行定義；桿件中間為線彈性材料，需輸入梁柱斷面性質的彈性模數( $E$ )、斷面積( $A$ )與慣性矩( $I_z$ )。

分布式塑性模型之兩端塑性材料，根據 Modified Ibarra Krawinkler



Deterioration Model[17]採用 bilinear 遲滯反應材料以表示非線性行為。

### 3. 纖維斷面模型(Fiber Section Model)

纖維斷面模型是將梁柱斷面細分成多個元素，這些元素在斷面中有其位置、面積即應力應變曲線。

在 OpenSees 中纖維斷面的指令定義為 `section Fiber $secTag{fiber $yLoc $zLoc $A $matTag}`，`$secTag` 為纖維斷面編號；`$yLoc` 為纖維斷面的 Y 座標；`$zLoc` 為纖維斷面的 Z 座標；`$A` 為纖維的斷面積；`$matTag` 為纖維所使用的材料編號。

由此指令纖維斷面可根據真實梁柱斷面，建構出每根鋼筋所在斷面之位置、面積與材料性質，並分出無圍束混凝土與圍束混凝土所使用的混凝土材料性質，來反應真實材料行為。

分布式塑性模型，因其塑性區長度大小會影響整體結構分析之結果，故塑性區之概念較為複雜；另外纖維斷面模型則是將整個梁柱桿件以非線性方式分析，並且無法加入塑性鉸探討其破壞點。故本研究側推分析採用集中塑性模型，因其模型之架構與側推分析概念較為符合，並可將旋轉彈簧視為彎矩塑性鉸。而本研究將於第四章以集中塑性模型之延伸，考慮真實結構樑柱接頭為剛性之行為。

## 3.5 範例驗證

範例驗證將採國家地震中心蕭輔沛博士之建議，先以最簡單構件懸臂梁做其模型驗證，再以基本力學觀念做其結果驗證。

而本研究所建立之模型架構為每個塑性鉸包含2個相同座標之節點，其節點間長度為零，其假設塑性鉸為一個彎矩彈簧，彈簧使用 bilinear 遲滯反應的材料，並連接框架的梁柱節點，此分析方法為集中塑性模型(Concentrated Plasticity Model)。

### 3.5.1 塑性鉸定義

此節將介紹本研究所使用 RC 梁柱斷面所對應的彎矩塑性鉸之計算，和如何在 OpenSees 中使用 Bilin Material 遲滯材料定義塑性鉸 A~E 點之設定。

#### ■ RC 梁柱塑性鉸計算：

##### 斷面介紹

而本研究所採用之柱斷面為圖3.10(a)，

斷面尺寸  $b=50\text{cm}$ 、 $h=30\text{cm}$ ；

材料強度  $f'_c=160\text{kgf/cm}^2$ 、 $f_y=2800\text{kgf/cm}^2$ ；

主筋4-#7 + 8-#6；

箍筋#3@25cm；

柱承受軸力  $P = 43135.63\text{kgf}$ ；

柱斷面彎矩強度  $M_n=1351510 \text{ kgf} - \text{cm}$  ；

有效柱高  $H = 300 \text{ cm}$  。

梁斷面為圖3. 10(b) ，

斷面尺寸  $b = 30\text{cm}$  、  $h = 60\text{cm}$  ；

材料強度  $f'_c=160\text{kgf}/\text{cm}^2$  、  $f_y=2800 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  ；

主筋11-#7；箍筋#3@25cm；

梁斷面彎矩強度  $M_n^+ = 1845540\text{kgf} - \text{cm}$  、  $M_n^- = 4407730 \text{ kgf} - \text{cm}$  ；

有效梁跨距  $H = 370 \text{ cm}$  。

#### 1. RC 柱 X 向彎矩塑性鉸：

由(表2.1)RC 柱彎矩塑性鉸之參數，必須算出表中 a 與 b 值，而其計算方式可以透過國家地震中心所提供之耐震能力詳細評估輔助程式或由第二章之公式計算，可得  $a=0.0166$  、  $b=0.0263$  。

#### 2. RC 梁 X 向彎矩塑性鉸：

由(表2.3)RC 梁彎矩塑性鉸之參數，必須算出表中 a、b 與 c 值，而其計算方可以透過國家地震中心所提供之耐震能力詳細評估輔助程式或由第二章之公式計算，可得  $a=0.02$  、  $b=0.03$  、  $c=0.2$  。

#### ■ OpenSees 塑性鉸設定：

在 OpenSees 中，必須在眾多的材料指令中，找尋一個可以定義塑性鉸 A~E 點的材料，由 Lignos[17]所提出，在 OpenSees 上為 Bilin



Material(圖3.4)。

而各數值之設定會因每個斷面性質不同，故在下列分為柱彎矩塑性鉸和梁彎矩塑性鉸介紹其相關設定。

#### 1. 柱彎矩塑性鉸之設定：

由圖3.11和RC柱彎矩塑性鉸參數之a與b值定義，其中\$K0為彈性勁度，在圖3.11中前段為rigid，設其勁度為極大值，\$as\_Plus、\$as\_Neg為應變硬化比設為0，\$My\_Plus、\$My\_Neg為柱斷面正負彎矩強度，值為1351510與-1351510，\$Lamda\_S、\$Lamda\_C、\$Lamda\_A、\$Lamda\_K為循環衰退參數，設其值為1000，\$c\_S、\$c\_C、\$c\_A、\$c\_K設其值為預設值1.0即可，\$theta\_p\_Plus、\$theta\_p\_Neg其值 $\theta_p$ 為a=0.0166，\$theta\_pc\_Plus、\$theta\_pc\_Neg其值 $\theta_{pc}$ 為b-a=0.0097，\$Res\_Pos、\$Res\_Neg殘留強度比為0，\$theta\_u\_Plus、\$theta\_u\_Neg最終轉角為b=0.0263，\$D\_Plus、\$D\_Neg循環退化比，因對稱設值為1，並將此材料定為1號材料。

#### 2. 梁彎矩塑性鉸之設定：

梁的正彎矩為1845540kgf-cm，負彎矩為-4407730kgf-cm，在OpenSees此指令中的彎矩值須對稱，本研究將梁的彎矩塑性鉸分成正彎矩塑性鉸與負彎矩塑性鉸。將unifixMaterial Bilin 2設為梁正彎矩塑性鉸，unifixMaterial Bilin3設為梁負彎矩塑性鉸，其相關設定



依據(表2.8)之 A~E 點值，由圖3.12 和 RC 梁彎矩塑性鉸參數之 a、b、c 值定義，指令中 \$K0 為彈性勁度，在圖3.12中前段為 rigid，設其勁度為極大值，\$theta\_p\_Plus、\$theta\_p\_Neg 其值  $\theta_p$  為 a=0.02，\$theta\_pc\_Plus、\$theta\_pc\_Neg 其值  $\theta_{pc}$  為 0，但在程式中設定 0 會不可執行，故給予極小值 0.0001，\$Res\_Pos、\$Res\_Neg 殘留強度比為 c=0.2，\$theta\_u\_Plus、\$theta\_u\_Neg 最終轉角為 b=0.03。

### 3.5.2 懸臂梁之側推分析

此分析模型高為 360cm 並使用柱斷面，將採 X 方向為側推方向，在底部為固定端定為 1 號節點，頂部為自由端定為 2 號節點受側向推力  $P=60000\text{kgf}$ ，3 號節點與 1 號節點為相同座標(0,0,0)。(圖3.13)

柱彎矩塑性鉸位於 1 號節點與 3 號節點間，1 號節點與 3 號節點間為高度 360cm 之柱彈性桿件，其材料性質如下：

斷面積  $A = 1500\text{cm}^2$ ；

混凝土抗壓強度  $f'_c = 160\text{kgf/cm}^2$ ；

彈性模數  $E = 1500 \times \sqrt{160} = 189736.7\text{kgf/cm}^2$ ；

側推方向之慣性矩  $I_y = \frac{bh^3}{12} = \frac{50 \times 30^3}{12} = 112500\text{cm}^4$ ；

柱開裂斷面的撓曲勁度  $(EI)_c = 0.35EI_y$ 。

以下將針對此模型於 OpenSees 執行後結果之驗證與塑性鉸探討。

#### ■ 結果探討：

OpenSees 的側推容量曲線，本研究讀取 output 檔節點2之頂層位移為 X 軸，其基底剪力 Y 軸為節點1之剪力並採取絕對值，繪出容量曲線(圖3. 14)。分析結果可以從容量曲線，看出第一個轉折點為塑性鉸產生點，其位移約為7.8cm，則懸臂梁進入塑性狀態，其塑性鉸開始完全破壞時，其位移約為13.8cm。

因懸臂梁只有一個塑性鉸，故其塑性鉸破壞點即為懸臂梁破壞點，可以透過讀取 OpenSees 塑性鉸之 Rotation 與 Moment(圖3. 15)，查看所定義之塑性鉸其發展，可從圖中看出塑性鉸有達到定義的 C 點 Rotation=0.0166。

#### ■ 結果驗證：

因塑性鉸產生前懸臂梁為線性發展，塑性鉸產生後為塑性狀態，由圖3. 14側推容量曲線在構件達到降伏點其 $\Delta_y=7.8\text{cm}$ 、 $V_{max}=3754.1943\text{kgf}$ ，故可由材料力學公式 $\Delta=\frac{P \times H^3}{3EI}$ 做其驗證， $P$ 為基底剪力最大值 $V_{max}=3754.1943\text{kgf}$ ， $H$ 為柱高360cm， $EI$ 為柱開裂斷面的撓曲勁度 $(EI)_c=0.35EI_y$ ，計算如下：

$$\Delta = \frac{P \times H^3}{3EI} = \frac{V_{max} \times H^3}{3(EI)_c} = \frac{3754.1943 \times 360^3}{3 \times 0.35 \times 189736.7 \times 112500} = 7.81\text{cm} \quad (3.1)$$

因懸臂梁只有一個彎矩塑性鉸，故其構件降伏彎矩( $M_y$ )應與塑性鉸之標稱彎矩( $M_n$ )相等，降伏彎矩( $M_y$ )=基底剪力最大值( $V_{max}$ )×柱高( $H$ )；

$$M_y = V_{max} \times H = 3754.1943 \times 360 = 1351509.94 \text{kgf} \cdot \text{cm} \quad (3.2)$$

由圖3.14容量曲線，塑性鉸產生點(降伏點)為7.8cm 到塑性鉸開始破壞點為13.8cm 為構件塑性狀態，其塑性狀態之位移量為塑性鉸產生點與塑性鉸開始破壞點之差值 $\Delta_p = 6\text{cm}$ ，可由材料力學公式做其驗證，

$$\Delta_p = \theta_p \times H, \text{ 柱之彎矩塑性鉸 C 點轉角值 } \theta_p = 0.0166;$$

$$\Delta_p = \theta_p \times H = 0.0166 \times 360 = 5.976\text{cm} \quad (3.3)$$

由(3.1)、(3.2)和(3.3)材料力學公式之計算值與 OpenSees 之結果驗證，在本研究之懸臂梁模型中，其誤差為極小。

### 3.5.3 2D 1x1 Frame 之側推分析

圖3.16為此分析之模型為一個2D 1x1 Frame，柱高為360cm 之柱斷面(圖3.10)，梁跨距為400cm 之梁斷面(圖3.10)，1號節點與3號節點為固定支承，頂部2號節點受  $P=60000\text{kgf}$  之側向推力，並於柱上下端加入柱之彎矩塑性鉸，梁左端為梁之正彎矩塑性鉸，梁右端則為梁之負彎矩塑性鉸，此分析模型共有六個彎矩塑性鉸(圖3.17)，其設定採用3.5.1節之資料。

高360cm 之柱彈性桿件，其材料性質與3.5.2節相同，跨距400cm 之梁彈性桿件，其材料性質如下：

$$\text{斷面積 } A = 1800\text{cm}^2;$$

$$\text{混凝土抗壓強度 } f'_c = 160\text{kgf}/\text{cm}^2;$$



彈性模數  $E = 1500 \times \sqrt{160} = 189736.7 \text{kgf/cm}^2$  ;

側推方向之慣性矩  $I_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{30 \times 60^3}{12} = 540000 \text{cm}^4$  ;

梁開裂斷面的撓曲勁度  $(EI)_c = 0.35EI_z$  。

■ 結果探討：

OpenSees 的側推容量曲線，頂層位移 X 軸為2號節點位移，基底剪力 Y 軸為1號節點與3號節點之剪力並採取絕對值，繪出容量曲線(圖3.18)。

從容量曲線約在4.2cm 為第一個轉折點，代表會有塑性鉸產生，其產生塑性鉸之位置，可從 OpenSees 中讀取六個塑性鉸之彎矩與側推位移繪出(圖3.19)，以便查看各塑性鉸在側推分析中於何時達到其標稱彎矩強度，即為產生塑性鉸，從圖3.19可觀察出在4.2cm 時，塑性鉸產生之位置為兩根柱底端編號12與34柱之彎矩塑性鉸。

容量曲線約在4.9cm 容量曲線停止爬升，此時整體結構進入塑性狀態，可從圖3.19觀察出在4.9cm 時，塑性鉸產生之位置為兩根柱頂端，其編號為21與43柱之彎矩塑性鉸。

從 OpenSees 之塑性鉸 Output 檔讀取每個柱彎矩塑性鉸之彎矩與轉角並繪出(圖3.20)，OpenSees 容量曲線在側推位移為9.8cm 時，程式不再執行，此時程式判別結構物開始倒塌，可從圖3.20各塑性鉸之轉角觀察出編號12與34柱彎矩塑性鉸之轉角達到塑性鉸開始破壞之 C 點



$\theta = 0.0166$ 。故此側推分析中在9.8cm時，因兩根柱底端之彎矩塑性破壞而停止。

■ 結果驗證：

(一) 側推位移0~4.2cm

此模型分析在側推位移4.2cm前還未有塑性鉸產生，故側推位移在0~4.2cm時為線性發展，可由結構學之傾角變位法驗證其基底剪力在

14466kgf時，側推位移為4.2cm。其驗證模型(圖3.21)為在B點施予

$P=14466\text{kgf}$ ， $E = 189736.7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ 、 $I_1 = 0.35 \times 112500\text{cm}^4$ 、

$I_2 = 0.35 \times 540000\text{cm}^4$ 、 $L_1 = 360\text{cm}$ 、 $L_2 = 400\text{cm}$ ，計算如下：

傾角變位式為：

$$M_{AB} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( \theta_B - 3 \frac{\Delta}{L_1} \right) \quad (3.4)$$

$$M_{BA} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( 2\theta_B - 3 \frac{\Delta}{L_1} \right) \quad (3.5)$$

$$M_{BC} = \frac{2EI_2}{L_2} (2\theta_B + \theta_C) \quad (3.6)$$

$$M_{CB} = \frac{2EI_2}{L_2} (2\theta_C + \theta_B) \quad (3.7)$$

$$M_{CD} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( 2\theta_C - 3 \frac{\Delta}{L_1} \right) \quad (3.8)$$

$$M_{DC} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( \theta_C - 3 \frac{\Delta}{L_1} \right) \quad (3.9)$$

設 $K_1 = \frac{2EI_1}{L_1}$ 、 $K_2 = \frac{2EI_2}{L_2}$ 、 $R = \frac{\Delta}{L_1}$ ；

由變形反對稱得知 $\theta_B = \theta_C$ ，柱剪力 $V_A = V_D = 14462/2 (\leftarrow)$ ；

B 點：

$$\text{由 } \sum M_B = 0, 2K_1(2\theta_B - 3R) + 6K_2\theta_B = 0 \quad (3.10)$$

(3.10)整理可得

$$(2K_1 + 3K_2)\theta_B - 3K_1R = 0 \quad (3.11)$$

依整體結構：

$$\sum F_x = 0, \frac{M_{AB} + M_{BA}}{L_1} = \frac{-14466}{2} \quad (3.12)$$

(3.12)整理可得

$$6K_1\theta_B - 12K_1R = -7233L_1 \quad (3.13)$$

由(3.11)、(3.13)解聯立方程式，可得

$$\theta_B = 2.3298 \times 10^{-3}, R = 0.011617, \Delta = R \times L_1 = 4.18 \text{ cm}$$

代回傾角變位式(3.4)~(3.9)，可得

$$M_{AB} = M_{DC} = 1349789 \text{ kgf} \cdot \text{cm};$$

$$M_{BA} = M_{CD} = -1253091 \text{ kgf} \cdot \text{cm}。$$

由傾角變位法之計算結果可知：

1. 在側推力為14466kgf時，其側推位移為4.18cm與OpenSees之側推位移4.20cm相當接近。
2. 當側推位移為4.18cm時，柱底端 $M_{AB} = M_{DC} = 1349789 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 與柱彎矩塑性鉸之標稱彎矩強度 $M_n = 1351510 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 相當接近，柱頂端 $M_{BA} = M_{CD} = -1253091 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 則未達。

3. 由以上兩點可知，在此模型中側推位移約為4.18cm 時，基底剪力為14466kgf，並在柱底端產生塑性鉸，塑性鉸發展與 OpenSees 相同。

### (二) 側推位移4.2~4.9cm

從圖3. 18，側推位移從4.2cm~4.9cm 時之差值為0.7cm，並令其差值為 $\Delta_1$ ，基底剪力差值為551kgf。

在側推位移達4.2cm 時，兩柱底端產生塑性鉸，在此將它們視為 Hinge，故驗證模型為 A 與 D 點為 Hinge，B 點受側推力551kgf (圖3. 22)，以傾角變位法計算出 $\Delta_1$ 、 $M_{BC}$ 與 $M_{CB}$ ，計算如下：

傾角變位式為：

$$M_{AB} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( 2\theta_A + \theta_B - 3\frac{\Delta}{L_1} \right) = 0 \quad (3.14)$$

$$M_{BA} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( 1.5\theta_B - 1.5\frac{\Delta}{L_1} \right) \quad (3.15)$$

$$M_{BC} = \frac{2EI_2}{L_2} (2\theta_B + \theta_c) \quad (3.16)$$

$$M_{CB} = \frac{2EI_2}{L_2} (2\theta_c + \theta_B) \quad (3.17)$$

$$M_{CD} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( 1.5\theta_c - 1.5\frac{\Delta}{L_1} \right) \quad (3.18)$$

$$M_{DC} = \frac{2EI_1}{L_1} \left( 2\theta_D + \theta_c - 3\frac{\Delta}{L_1} \right) = 0 \quad (3.19)$$

由變形反對稱得知 $\theta_B = \theta_c$ ，柱剪力 $V_A = V_D = 551/2$  (←)；

B 點：

$$\text{由 } \sum M_B = 0, M_{BA} + M_{BC} = 0 \quad (3.20)$$

(3.20)整理可得

$$(3K_1 + 6K_2)\theta_B - 3K_1R = 0 \quad (3.21)$$

依整體結構：

$$\sum F_x = 0, \frac{M_{AB} + M_{BA}}{L_1} = \frac{-551}{2} \quad (3.22)$$

(3.22)整理可得

$$6K_1\theta_B - 6K_1R = -551L_1 \quad (3.23)$$

由(3.21)、(3.23)解聯立方程式，可得

$$\theta_B = 1.8438 \times 10^{-4}、R = 1.778 \times 10^{-3}、\Delta_1 = 0.64cm$$

代回傾角變位式(3.4)~(3.9)，可得

$$M_{BA} = M_{CD} = -99214kgf \cdot cm；$$

由(3.14) $M_{AB} = 0$ ，求 $\theta_A$ ；

可得， $\theta_A = 2.57 \times 10^{-3}$ ；

由傾角變位法之計算結果可知：

1. 在側推力為551kgf時，其側推位移為0.64cm與OpenSees之側推位移0.7cm誤差為0.06cm，有可能受到在OpenSees中有設定P-Delta效應之影響。
2. 在側推位移為4.9cm時，OpenSees之 $\theta_A = 2.75 \times 10^{-3}$ 、 $\theta_B = 1.95 \times 10^{-4}$ ，由傾角變位式求出之 $\theta_A = 2.57 \times 10^{-3}$ 、 $\theta_B = 1.8438 \times 10^{-4}$ 。



3. OpenSees 容量曲線(圖3. 18)中側推位移為4.9cm 時之基底剪力為 $14466+551=15017\text{kgf}$ ，為柱頂端產生塑性鉸。故此驗證中柱頂端彎矩 $M_{BA}$ 與 $M_{CD}$ 為 $-1253091 - 99214 = -1352305\text{kgf}\cdot\text{cm}$ ，其值可說明在側推位移為4.9cm 時柱頂端彎矩 $M_{BA}$ 與 $M_{CD}$ 有達到柱彎矩塑性鉸之標稱彎矩強度 $M_n = -1351510\text{kgf}\cdot\text{cm}$ ，即為產生塑性鉸。

### (三) 側推位移4.9~9.8cm

側推位移從4.9cm~9.8cm 時為整體結構進入塑性狀態，其差值為4.9cm，並令其差值為 $\Delta_2$ 。

$\Delta_2$ 為編號12與34塑性鉸之轉角達C點轉角達到 $\theta_p = 0.0166$ ，而編號12與34塑性鉸在側推位移為4.9cm 時之轉角為 $\theta_A$ ，故 $\Delta_2 = (\theta_p - \theta_A) \times L_1$ 。

在側推位移為4.9cm 時，為柱頂端塑性鉸生成，此時柱子所有彎矩塑性鉸皆為降伏，故在側推位移到9.8cm， $\Delta\theta_A = \Delta\theta_B = \theta_B$ 其計算如下：

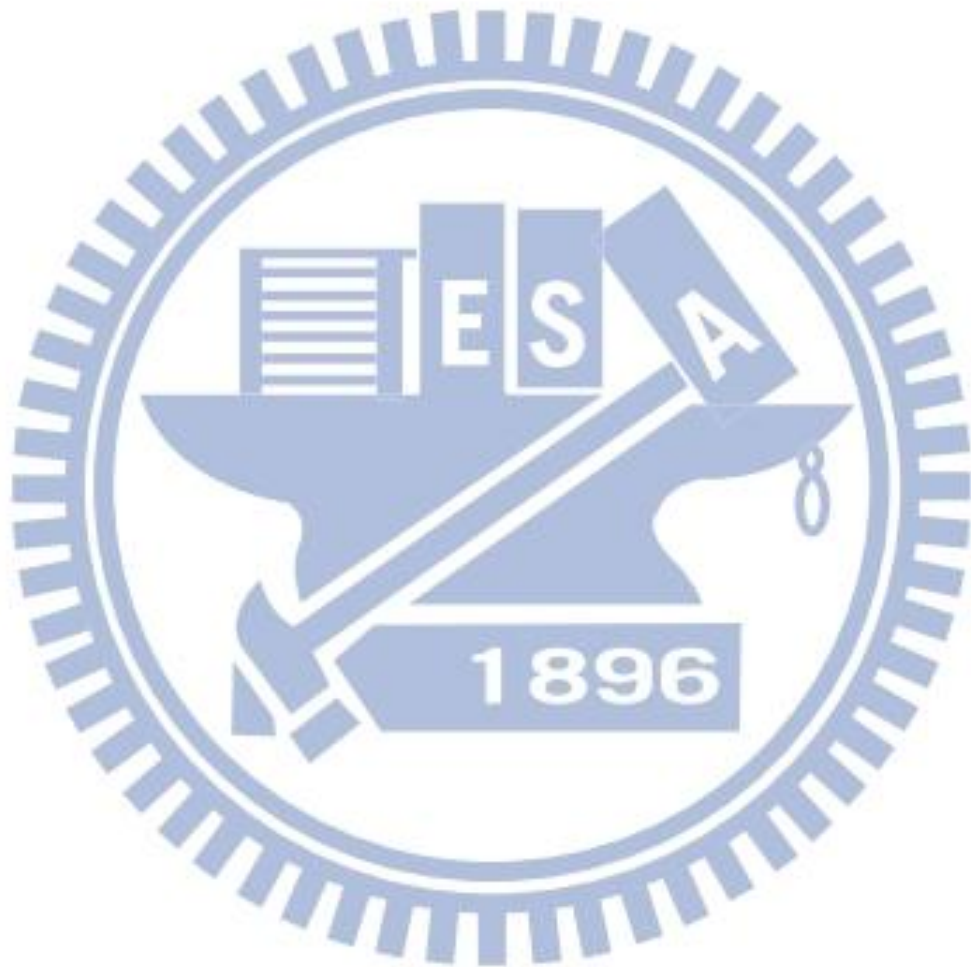
$$\Delta\theta_A = \Delta\theta_B = \theta_B = \theta_p - \theta_A = 0.0166 - 2.57 \times 10^{-3} = 1.4 \times 10^{-3} ;$$

$\Delta\theta_A$ 、 $\Delta\theta_B$ 為側推位移4.9cm~9.8cm 之 $\theta_A$ 、 $\theta_B$ 轉角變化量；

$$\Delta_2 = (0.0166 - 2.57 \times 10^{-3}) \times 360 = 5.05\text{cm}。$$

以傾角變位式算出之 $\Delta_2 = 5.05\text{cm}$ 與 OpenSees 之 $\Delta_2 = 4.98\text{cm}$ ，此誤差值尚可接受。而2D 1x1 Frame 在 OpenSees 的分析中，整體結構進

入塑性狀態時，其側推位移量為4.9cm，直到9.8cm 柱底端彎矩塑性鉸之轉角達到0.0166，以傾角變位式算出柱底端塑性鉸達之轉角達到0.0166時之側推總位移為 $4.18 + 0.64 + 5.05 = 9.87\text{cm}$ 。



## 第四章 構架側推範例

此章之模型分析以集中塑性模型(Concentrated Plasticity Model)做為延伸，考慮實際結構物梁柱接頭為剛性行為，梁柱兩端加入彎矩塑性鉸，而剪力破壞產生的塑性鉸在真實結構中，本研究認為是一個不該發生的行為，故不加入剪力塑性鉸於模型中進行探討。

本研究所採用 OpenSees 的模型分析方法與塑性鉸指令，較為接近真實結構之狀況，故採用於工程界在建築結構上較具參考性的套裝軟體 ETABS 執行側推分析進行比較和塑性鉸探討，以確立此模型分析於真實結構中之可行性。

此章範例分為 1x1 Frame、2x1 Frame 與 2x8 Frame 三個部分探討，並以 1x1 Frame 介紹 ETABS 建模所須注意事項，OpenSees 之建模方法與指令可參考本研究之 3.3 節，而本章之 OpenSees 完整程式碼皆在本論文附錄。

### 4.1 1x1 RC Frame 之側推分析

此分析之模型為一個 2D 1x1 Frame(圖 4.1)，柱高為 360cm 其斷面為圖 3.10，梁跨距為 400cm 其斷面為圖 3.10，頂部受  $P=60000\text{kgf}$  之側向推力，此分析模型並考慮樑柱接頭為 Rigid 之性質，故柱頂部向下 Offset 為 60cm，梁兩端 Offset 為 15cm，梁與柱之彎矩塑性鉸與斷面性質，使用 3.3.1 節資料。

### 4.1.1 OpenSees 建模

圖4.2為本節 OpenSees 模型之節點編號與使用桿件性質，梁柱兩端各加入2個彎矩塑性鉸，此模型共有6個彎矩塑性鉸，並每個塑性鉸包含2個節點，其節點間長度為0，此分析方法為集中塑性模型 (Concentrated Plasticity Model)，其為假設塑性鉸為一個彎矩彈簧，彈簧需使用 bilinear 遲滯反應的材料，而其塑性鉸位置並非與前述章節在連接框架的梁柱接點，因考慮樑柱接頭為剛性行為，故塑性鉸位置會隨著有效長度而改變，塑性鉸位置與編號可參考圖4.1。

### 4.1.2 ETABS 建模

ETABS 建立分析模型，由圖4.1可知模型長短向尺寸、樓層高度及梁的跨距，在 ETABS 中依實際尺寸繪製格線，柱與梁斷面尺寸以圖3.10 定義，其3D 立體圖如圖4.3所示，ETABS 相關結構模型建立時有下面幾項設定上需注意：

#### 1. 梁柱開裂勁度折減

依據 ACI 318之建議，進行側推分析時，會造成桿件之混凝土開裂，為使柱開裂後斷面之勁度折減比例符合此狀況，梁柱勁度折減為  $0.35E_cI_g$ ，選取所有柱桿件之後，將  $I$  值做設定為0.35(圖4.4)，在此不對其  $E$  值做修改是怕影響到其他參數的設定。



## 2. 剛域修改

為模擬梁柱端點剛性區域對於剪力與彎矩之影響，將 Rigid-zone factor 該項修改為1，參考圖4. 5，修改後可於每根桿件上點選右鍵 Assignment 中，查看梁(圖4. 6)和柱(圖4. 7)offset 的長度和位置是否與 OpenSees 相同，柱 offset 的長度應為梁深，梁 offset 的長度應為二分之一梁寬。

## 3. 加入梁柱彎矩塑性鉸

柱彎矩塑性鉸 ABCDE 點依據表2.7輸入，梁彎矩塑性鉸 ABCDE 點依據表2.8輸入，Moment SF 為梁柱斷面之標稱彎矩強度，柱  $M_n=1351510$  kgf-cm(圖4. 8)，梁  $+M_n=1845540$  kgf-cm、 $-M_n=4407730$  kgf-cm(圖4. 9)。各別選取梁柱桿件後，新增相對距離為0和1之梁柱之彎矩塑性鉸。分析模型塑性鉸位置為圖4. 10。

### 4.1.3 驗證與討論

ETABS 的側推容量曲線為圖4. 11。OpenSees 的側推容量曲線，頂層位移 X 軸為2號節點位移，基底剪力 Y 軸為60000kgf 乘上荷載倍數並繪出(圖4. 12)，從 OpenSees 與 ETABS 之側推容量曲線可看出兩者相當吻合。

從容量曲線在側推位移為3.17cm 時，有塑性鉸生成而產生第一個轉折點；第二個轉折點約在側推位移為3.8cm 時，基底剪力達最大值

18020 kgf，整體結構達到降伏狀態；側推位移約在7.9cm 時，結構開始倒塌為第三個轉折點。

#### ■ 驗證

從 ETABS 中 Step3 位移 = 3.1764 cm 為兩根柱之底端塑性鉸生成(圖4. 13)，從 ETABS 與 OpenSees 中讀取柱底端塑性鉸之彎矩與側推位移並繪出(圖4. 14)(圖4. 15)，可看出在 OpenSees 與 ETABS 都在第一個轉折點側推位移約為3.17 cm 時，兩根柱底端之塑性鉸達到標稱彎矩，即為塑性鉸生成。

從 ETABS 中 Step5 側推位移 = 3.8016cm 為兩根柱之頂端的塑性鉸生成(圖4. 16)，從 ETABS 與 OpenSees 中讀取兩根柱子頂端塑性鉸之彎矩與側推位移並繪出(圖4. 17)(圖4. 18)，OpenSees 與 ETABS 都在第二個轉折點側推位移約為 3.8cm 時，兩根柱之頂端塑性鉸達到標稱彎矩強度。

容量曲線從第二個轉折點開始，位移增加時基底剪力不增加，整體結構進入降伏狀態，直到側推位移增加到約7.9 cm，結構開始倒塌。從 OpenSees 之塑性鉸 Output 檔讀取每個柱彎矩塑性鉸之彎矩與轉角並繪出(圖4. 19)。由 OpenSees 的側推容量曲線(圖4. 12)在側推位移為7.85cm 時，容量曲線之基底剪力直線往下掉，結構無法再承受側向力，故在 7.85cm 時判別為結構物倒塌，而判別塑性鉸破壞之位置，可從圖4. 19

中柱底端之彎矩塑性鉸轉角達到0.0166後破壞。

#### ■ 小結：

在1x1 2D Frame 中，塑性鉸的發展過程，先由兩根柱底端的塑性鉸達到塑性狀態，會使容量曲線產生第一個轉折點，並直到兩根柱頂端塑性鉸達到塑性狀態後，容量曲線停止爬升，整體結構進入降伏狀態，即為位移增加基底剪力不增加，直到兩根柱底端的塑性鉸破壞時，整體結構開始倒塌，OpenSees 容量曲線則在柱底端之彎矩塑性鉸轉角達到0.0166，基底剪力在下一步變為零，ETABS 容量曲線則會開始產生下降端。

#### ■ 探討 ETABS 容量曲線下降端之塑性角行為

從 ETABS 容量曲線(圖4. 11)編號為1之區域，側推位移為 Step8=7.892cm 至 Step10=8.0857cm，此區域1容量曲線有些微上升段，此上升段為編號 C2-1柱之彎矩塑性鉸轉角從0.01657到0.0166，可從圖4. 20編號 C2-1塑性鉸之轉角與彎矩圖看出塑性鉸發展，而此模型為對稱，故從結構學理論兩端柱所受之彎矩與轉角應為相同，在此本研究認為圖4. 11區域1之上升段為 ETABS 之誤差。

在柱底端編號為 C1-1與 C2-1彎矩塑性鉸破壞時，側推位移為 Step11=8.0858cm，其柱頂端編號為 C1-2 與 C2-2彎矩塑性鉸其轉角為0.01368，彎矩從標稱彎矩強度1351510kgf-cm 降至約850000kgf-cm(圖



4. 20)，此時彎矩重新分配。在側推位移從 Step11=8.0858cm 至 Step13=10.4462cm 為在容量曲線(圖4. 11)區域2之上升段，其柱頂端編號為 C1-2 與 C2-2彎矩塑性鉸之彎矩從850000kgf-cm 至標稱彎矩強度1351510kgf-cm(圖4. 20)。

側推位移為 Step11=8.0858cm 時，柱頂端編號為 C1-2 與 C2-2彎矩塑性鉸回到塑性狀態，並在側推位移為 Step14=11.3195cm 時，其轉角達到0.0166後破壞，故在容量曲線(圖4. 11)區域3為整體結構再次進入降伏狀態，並至柱頂端之彎矩塑性鉸破壞後，分析不再執行。

## 4.2 2x1 RC Frame 之側推分析

### ■ 模型簡介

圖4. 21為2x1模型示意圖與塑性鉸編號圖，其模型為在第一層樓2號節點位置施予30000kgf 之側向力，頂層為5號節點位置施予60000kgf 之側向力，並由5號節點做為位移控制進行側推分析，每步0.1cm 共分析150步，其梁柱兩端各設置彎矩塑性鉸，此模型共有12個塑性鉸編號。

### ■ 驗證與討論

圖4. 22為 ETABS 的側推容量曲線。OpenSees 的側推容量曲線，頂層位移 X 軸為控制節點之位移，基底剪力 Y 軸為60000 kgf + 30000 kgf = 90000 kgf 乘上荷載倍數並繪出(圖4. 23)。

從容量曲線在側推位移為4.1cm 時，有塑性鉸生成而產生第一個轉



折點；在容量曲線第一個轉折點後，容量曲線持續爬升至約側推位移為11.3cm時，基底剪力達到最大值17894 kgf，此時結構有塑性鉸破壞，而產生下降端。

#### 1. 驗證：

由 ETABS 變形圖(圖4. 24)在 Step3=4.1306cm 產生第一個塑性鉸，其第一個塑性鉸為編號 B1-1之梁彎矩塑性鉸，從 ETABS 與 OpenSees 中讀取編號 B1-1梁彎矩塑性鉸之側推位移與彎矩繪出(圖4. 25)，可看出 OpenSees 與 ETABS 在側推位移約為4.1cm時，編號 B1-1之梁彎矩塑性鉸達到最大標稱彎矩1845540kgf-cm，即為塑性鉸生成。

從 ETABS 變形圖(圖4. 26)在第二個轉折點 Step4=5.4790cm 產生第二個塑性鉸，為編號 C2-1之柱彎矩塑性鉸，從 ETABS 與 OpenSees 中讀取 C2-1塑性鉸之側推位移與彎矩繪出(圖4. 27)，可看出 OpenSees 與 ETABS 在第二個轉折點側推位移為5.47cm時，編號 C2-1之柱彎矩塑性鉸達到標稱彎矩強度1351510kgf-cm。

在第三個轉折點 Step5=6.5609cm 時產生兩個塑性鉸(圖4. 28)，分別為編號 C1-1與 C2-2之柱彎矩塑性鉸，從 ETABS 與 OpenSees 中讀取 C1-1與 C2-2塑性鉸之側推位移與彎矩繪出(圖4. 29)(圖4. 30)，可看出 OpenSees 與 ETABS 在第三個轉折點側推位移為6.5cm時，編號 C1-1與 C2-2之柱彎矩塑性鉸達到標稱彎矩強度1351510kgf-cm。

在 ETABS 側推位移 Step9=11.3136cm(圖4. 31)，可知柱底端編號 C2-1 彎矩塑性鉸開始破壞，讀取 OpenSees 編號 C2-1 塑性鉸之彎矩與轉角關係繪出(圖4. 32)，編號 C2-1 柱之彎矩塑性鉸達開始破壞點 C 點 ( $\theta = 0.0166$ )。

## 2. 探討 ETABS 容量曲線下降端之塑性角行為

Step10=11.3131cm(圖4. 33)為柱頂端編號 C1-2 彎矩塑性鉸生成(圖4. 34)與柱底端編號 C2-1 塑性鉸無法再承受彎矩( $\theta > 0.0263$ )；在 Step11=11.3205cm(圖4. 35)與 Step12=11.3204cm (圖4. 36)編號 C1-1 塑性鉸無法再承受彎矩( $\theta > 0.0263$ )，在此視為兩根柱底端編號 C1-1 與 C2-1 塑性鉸同時破壞。

在 ETABS 分析中柱底端塑性鉸破壞時，整體結構之彎矩重新分配，而容量曲線圓圈區域之上升段過程(圖4. 22)側推位移為 Step12=11.3204cm 至 Step14=13.3394cm，其編號 C2-2 彎矩塑性鉸之彎矩約從 100000kgf-cm 再次達到標稱彎矩強度 1351510kgf-cm，即回到塑性狀態(圖4. 30)，且整體結構於 Step15=13.5733cm 無法承受側向推力。

### ■ 小結

在 OpenSees 與 ETABS 同樣執行 2x1 Frame 的側推分析在基底剪力最大值前其結果相當接近，誤差值為極小，但 OpenSees 在此模型分析中並不會產生下降端，OpenSees 在第 112 步停止分析判別結構物為倒

塌，其側推位移量為11.2cm。

### 4.3 2x8 RC Frame 之側推分析

#### ■ 模型簡介

圖4. 37為此分析模型示意圖，共有八個跨距，每跨距長為400cm，樓層高為360cm，樓層一受30000kgf 側向推力，樓層二受60000kgf 側向推力，共定義68個彎矩塑性鉸，其塑性鉸編號與位置可參考圖4. 37。

#### ■ 驗證與討論

圖4. 38與圖4. 39為 OpenSees 與 ETABS 之容量曲線，OpenSees 在側推位移為10.35cm 時，程式不再執行且不會產生下降端，其基底剪力為81084kgf。ETABS 在側推位移為10.517cm 時，程式開始產生下降端，其基底剪力為81081kgf(圖4. 40)。可知兩者容量曲線在側推位移與基底剪力相當接近，以下將進一步探討塑性鉸發展與驗證。

#### 1. 驗證

由 ETABS 變形圖(圖4. 41)在第一個轉折點 Step14=5.2211cm 時，第一個塑性鉸生成，其編號為 B1-1 梁之正彎矩塑性鉸，由圖4. 42在 OpenSees 中，此塑性鉸在側推位移約為5.22cm 時達到梁之正標稱彎矩強度  $M_n^+ = 1845540 \text{kgf} \cdot \text{cm}$ ，即為 OpenSees 在第一個轉折點側推位移約 5.22cm 此塑性鉸生成。



由 ETABS 變形圖(圖4. 43)在第二個轉折點 Step15=5.5113cm 時，共有六個塑性鉸生成，其編號為 C2-1、C3-1、C4-1、C5-1、C6-1、C7-1 與 C8-1柱之彎矩塑性鉸，由圖4. 44在 OpenSees 中，此六個塑性鉸在第二個轉折點側推位移約為 5.5cm 時，達到柱之標稱彎矩強度  $M_n^+ = 1351510 \text{ kgf-cm}$ ，即為 OpenSees 在 5.5cm 此六個塑性鉸生成。

由變形圖(圖4. 45)在 Step28=9.5435cm 時，此模型第一層樓之柱兩端皆產生彎矩塑性鉸，由變形圖(圖4. 46)可知在第三個轉折點 Step31=10.5169cm 時，編號 C2-1柱之彎矩塑性鉸開始破壞，圖4. 47為 OpenSees 編號 C2-1彎矩塑性鉸之側推位移與轉角關係可知，編號 C2-1之轉角有達到開始破壞點 C 點( $\theta = 0.0166$ )，OpenSees 在此塑性鉸開始破壞後即停止分析。

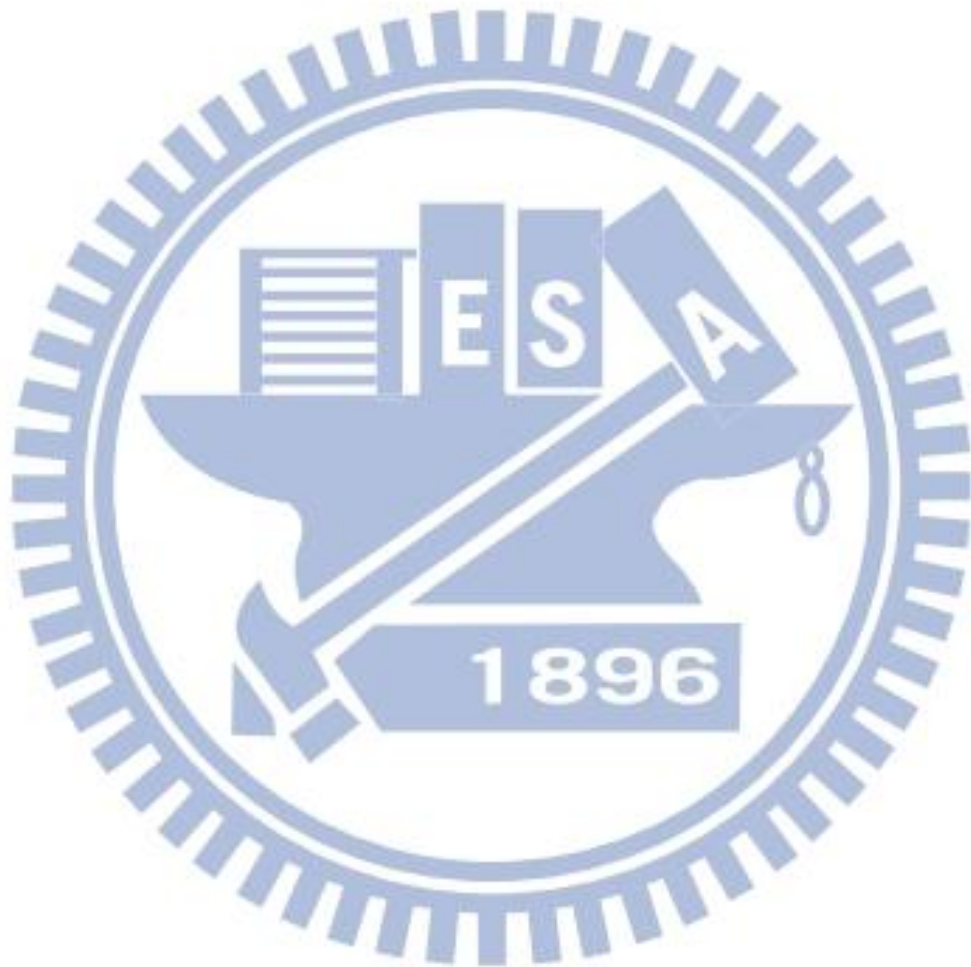
## 2. 探討 ETABS 容量曲線下降端之塑性角行為

ETABS 容量曲線區域1(圖4. 39)之轉折點為 Step32=10.5171cm，此時第一層樓之柱底端彎矩塑性鉸皆達破壞點 D 點( $\theta = 0.0263$ )(圖4. 48)，而彎矩重新分配。ETABS 容量曲線區域2到區域3的下降端(圖4. 39)為 C2~C8柱之頂端彎矩塑性鉸破壞(圖4. 49)，故基底剪力下降，彎矩重新分配。區域4之轉折點為 Step49=14.3726cm，C1柱頂端彎矩塑性鉸破壞(圖4. 50)，此時第一層樓之柱彎矩塑性鉸皆破壞，此結構完全倒塌。



## ■ 小結

在 OpenSees 與 ETABS 同樣執行 2x8 Frame 的側推分析在基底剪力最大值前其結果相當吻合，但 OpenSees 在此模型分析中並不會產生下降端，C2-1 之塑性鉸轉角達到 C 點，OpenSees 即停止分析。



## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究以 OpenSees 分析軟體為主軸進行側推分析，其塑性鉸定義採用國家地震工程研究中心之建議，其模型架構在 OpenSees 上稱為集中塑性模型(Concentrated Plasticity Model)，並藉由各範例之分析得到其結論與建議，以下為本研究結論：

1. 本研究採用的集中塑性模型其分析結果與基本力學觀念做其驗證，可得其結果幾乎為一致，且在簡單構架中容量曲線每個轉折點間之線段，可以視為一個線性行為，其塑性鉸生成為其束制條件之改變，所以能轉變成另一個模型以基本力學之觀念進行模擬與驗證。
2. 在本研究之側推分析中，當彎矩達到標稱彎矩時，塑性鉸生成並產生轉角，並開始降伏，而塑性鉸破壞時，整體結構彎矩重新分配，整體結構的變形都是由每個塑性鉸的性質和生成位置所影響著。
3. 由本研究可知在 OpenSees 上當第一個塑性鉸達到塑性鉸之參數 C 點時程式便不再進行位移控制而停止分析，故容量曲線則會停在基底剪力最大值。
4. 在考慮實際構架的樑柱接頭為剛性下，進行側推分析並與 ETABS 分析軟體進行比較，其容量曲線在最大值前，容量曲線變化與塑性鉸生成順序和位置其結果都相當接近。

## 5.2 建議

以下為本研究採用 OpenSees 之集中塑性模型(Concentrated Plasticity Model)執行側推分析，並提供參考與改良之建議：

1. 在 OpenSees 分析軟體上，使用者必須具備有一定的基本程式撰寫能力，且必須清楚其指令的使用方式，而使用者在程式的模型建構上自由度相當高，可以藉由各種概念建構模型並進行分析，最後在進行其模型分析結果驗證，確認模型之可行性。
2. 在本研究之模型中皆未考慮結構本身自重，後續研究者可嘗試加入自重與活載重等。本研究除了懸臂梁為3D模型，其餘範例皆為2D，後續研究者可嘗試創建3D模型和加入樓板元件，並考慮剛性樓板之設定。
3. 在本研究中有幾個範例，在分析結果中，容量曲線並未產生下降端，後續研究者可以從 Analysis Object 物件中的 ConvergenceTest type object 與 SolutionAlgorithm object 嘗試改變其收斂方式和迭代算法。

## 參考文獻

1. 鐘立來、葉勇凱、簡文郁 等，「校舍結構耐震評估與補強技術手冊第二版」，國家地震中心，NCREE-09-023，2009。
2. ACT40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report No. SSC 96-1, Applied Technology Council, 1996.
3. FEMA 273, NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
4. Freeman, Nicoletti, J.P., “Evaluations to existing buildings for seismic risk-A case study of Puget Sound Naval Shipyard”, Washington, Proceeding of 1<sup>st</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Berkeley, 113-122, 1975.
5. Saiidi, M., M. A. Sozen., “Simple nonlinear seismic analysis of R/C structures”, Journal of Structural Division , 107(8), pp. 937-953, 1981.
6. Miranda, E., “Seismic evaluation and upgrading of existing buildings”, Ph. D. Dissertation, University of California at Berkeley, California, 1991.
7. 張凡，「高層建築結構的 Pushover 分析方法及應用研究」，碩士論文，西安建築科技大學，中國，2005。
8. 朱杰江、呂西林、容柏生，「繁雜體型高層結構的推覆分析方法和應用」，地震工程與工程震動期刊，23(2)：26-36，中國，2003。
9. 何象鏞，「含牆鋼筋混凝土結構側推分析之研究」，博士論文，國立中央大學，2007。



10. Kilar and Fajfar, "Simple pushover analysis of asymmetric buildings", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 223-249, 1997.
11. Elwood, K. J., Moehle, J. P., "Axial capacity model for shear damaged columns", *ACI Structural Journal*, Vol. 102, NO. 4, 578-587, 2005.
12. Elwood, K. J., Moehle, J. P., "Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement," *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 1, 71-89, 2005.
13. ACI Committee 318, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.
14. Moehle, J. P.; Elwood, K. J.; and Sezen, H., "Gravity Load Collapse of Building Frames during Earthquakes," *S. M. Uzumeri Symposium: Behavior and Design of Concrete Structures for Seismic Performance*, SP-197, S. A. Sheikh and O. Bayrak, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 215-238, Mich., 2002.
15. ASCE 41-06, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, ASCE, 2006.
16. 楊元森、謝東儒，「地震工程模擬之 GPGPU 超多核心平行化研究」，國科會多年期專題研究計畫期中研究成果，NSC 99-2221-E-027-042，2010。
17. Lignos, D.G., and Krawinkler, "Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 137 (11), 1291-1302., 2011.

18. Fenves. G. L., "Annual Workshop on Open System for Earthquake Engineering Simulation", Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, 2001.
19. <http://opensees.berkeley.edu> , 柏克萊大學地震研究中心。
20. Zhong, "Model-Based Simulation of Reinforced-Concrete Plane Stress Structures," Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of Huston, 2005.
21. 楊元森、許國志, 「非線性動力結構分析之 GPGPU 平行化與效能評估」, 國家地震中心, NCREE-11-023, 2011。
22. Elwood, J. P., K. J., Sezen, H., "Gravity Load Collapse of Building Frames during Earthquakes," S. M. Uzumeri Symposium: Behavior and Design of Concrete Structures for Seismic Performance, SP-197, S. A. Sheikh and O. Bayrak, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, pp. 215-238, Mich., 2002.

## 圖表附錄

表2.1 RC 柱彎矩塑性鉸之參數[1]

Points	Moment/SF	Rotation/SF
A	0	0
B	1	0
C	1	a
D	0	b
E	0	10b

表2.2 RC 柱剪力塑性鉸之參數[1]

Points	Force/SF	Disp./SF
A	0	0
B	1	0
C	0	c
D	0	10c
E	0	10c

表2.3 RC 梁彎矩塑性鉸之參數[15]

Points	Moment/SF	Rotation/SF
A	0	0
B	1	0
C	1	a
D	c	a
E	c	b

表2.4 RC 梁彎矩塑性鉸參數計算表[15]

$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	箍筋	$\frac{0.27V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	a	b	c
$\leq 0.0$	有圍束	$\leq 3$	0.025	0.05	0.2
$\leq 0.0$	有圍束	$\geq 6$	0.02	0.04	0.2
$\geq 0.5$	有圍束	$\leq 3$	0.02	0.03	0.2
$\geq 0.5$	有圍束	$\geq 6$	0.015	0.02	0.2
$\leq 0.0$	無圍束	$\leq 3$	0.02	0.03	0.2
$\leq 0.0$	無圍束	$\geq 6$	0.01	0.015	0.2
$\geq 0.5$	無圍束	$\leq 3$	0.01	0.015	0.2
$\geq 0.5$	無圍束	$\geq 6$	0.005	0.01	0.2



表2.5 RC 剪力塑性鉸之參數[15]

Points	Force/SF	Disp/SF
A	0	0
B	1	0
C	1	a
D	c	a
E	c	b

表2.6 RC 梁剪力塑性鉸參數計算表[15]

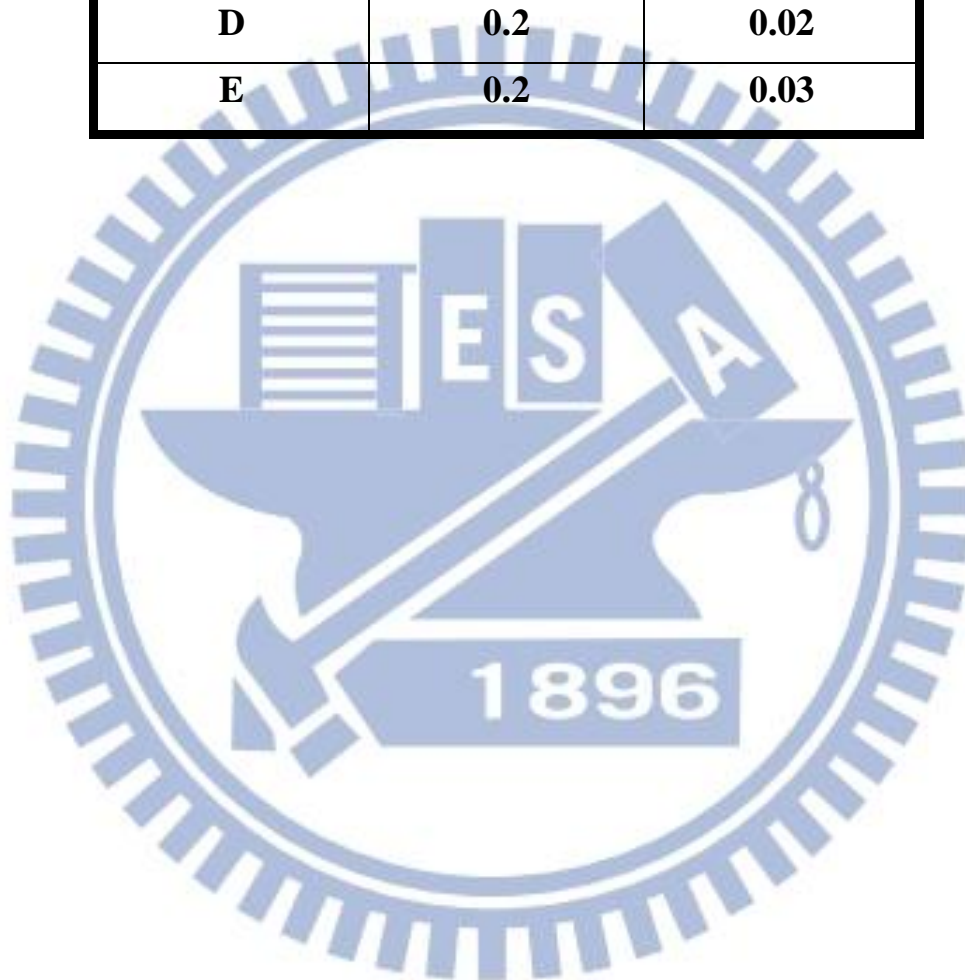
箍筋間距	a	b	c
箍筋間距 $\leq (d/2)$	0.003	0.02	0.2
箍筋間距 $> (d/2)$	0.003	0.01	0.2

表2.7 本研究之 RC 柱彎矩塑性鉸參數

Point	Moment/SF	Rotation/SF
<b>A</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>B</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0.0166</b>
<b>D</b>	<b>0</b>	<b>0.0263</b>
<b>E</b>	<b>0</b>	<b>0.2626</b>

表2.8 本研究之 RC 梁彎矩塑性鉸參數

<b>Point</b>	<b>Moment/SF</b>	<b>Rotation/SF</b>
<b>A</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>B</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>0.02</b>
<b>D</b>	<b>0.2</b>	<b>0.02</b>
<b>E</b>	<b>0.2</b>	<b>0.03</b>



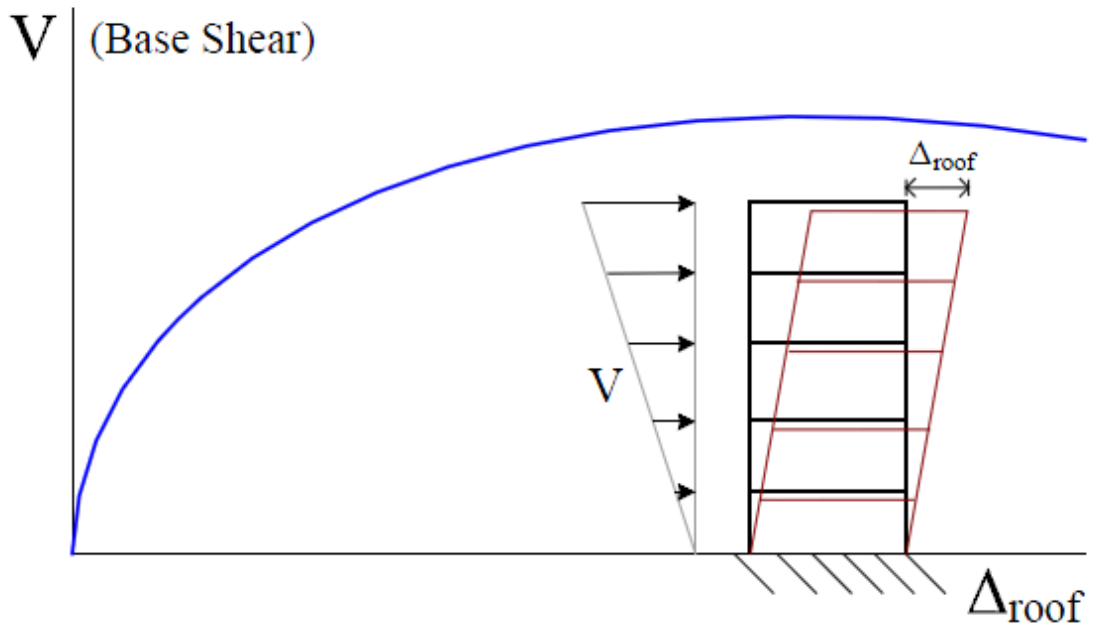


圖2.1 側推分析之容量曲線[1]

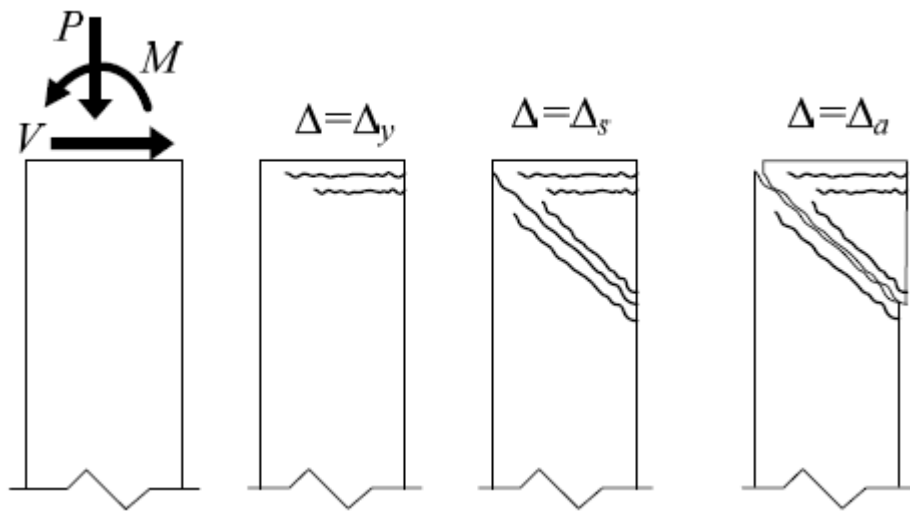


圖2.2 雙曲率柱破壞過程[1]

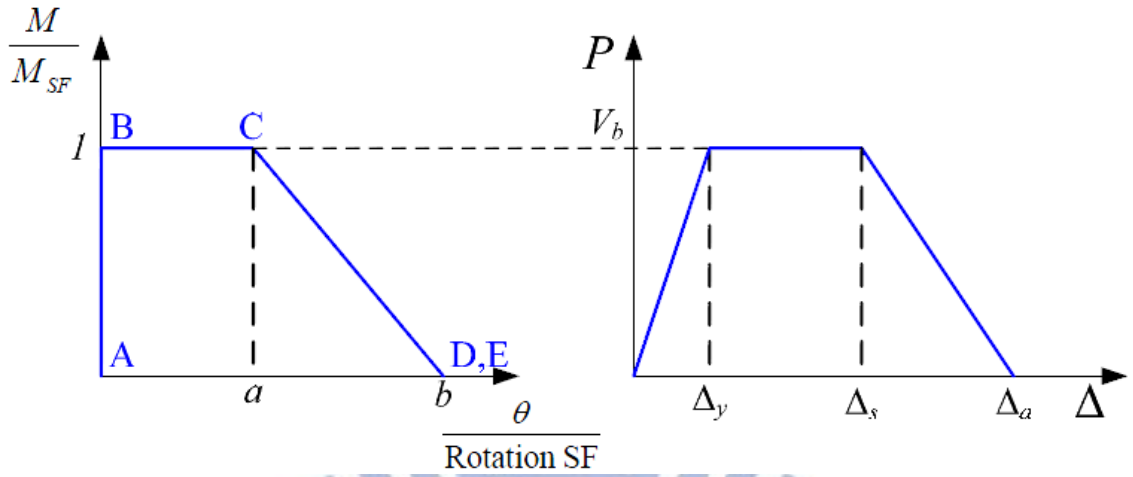


圖2.3 柱彎矩塑性鉸性質與側向載重位移曲線[1]

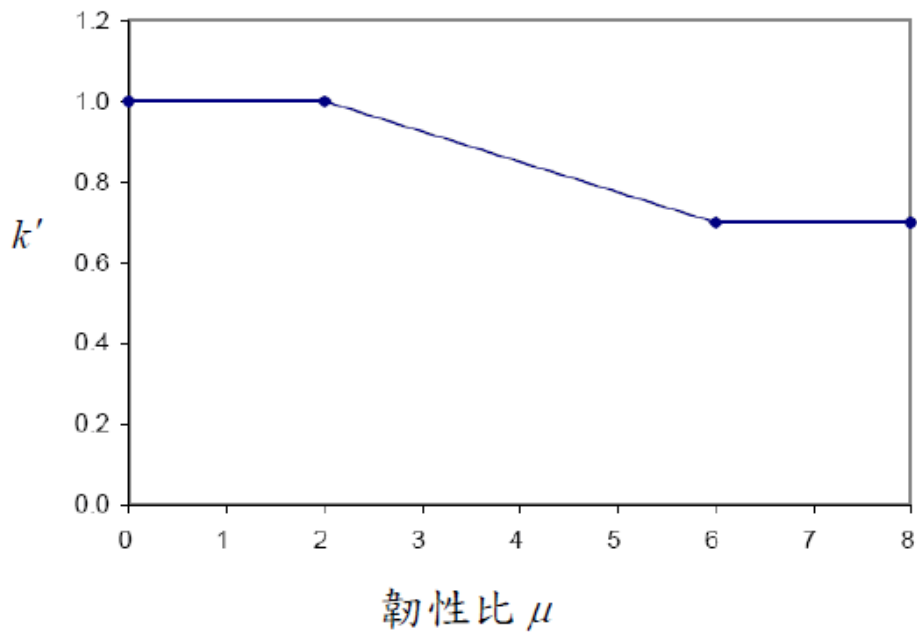


圖2.4 軸向破壞時的變位角之修正係數  $k'$ [1]



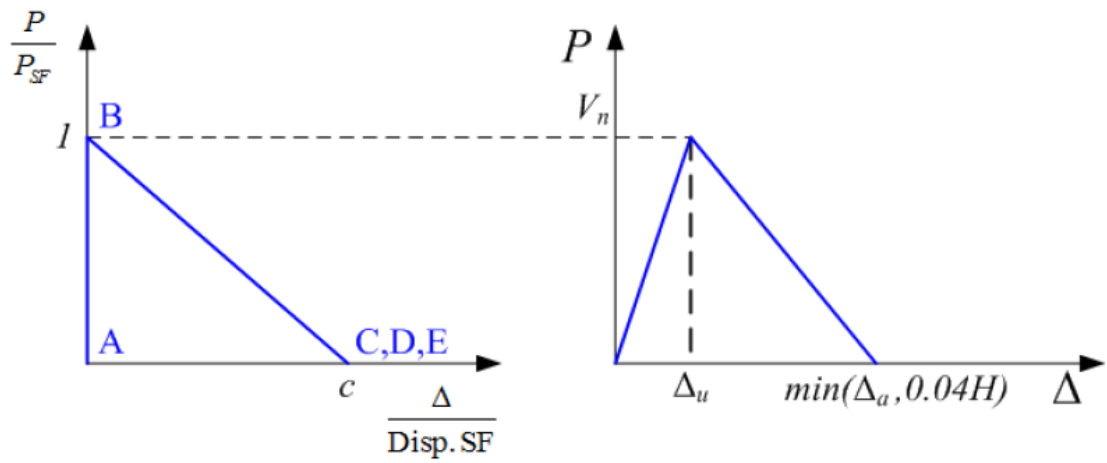


圖2.5 柱剪力塑性鉸性質與側向載重位移曲線[1]

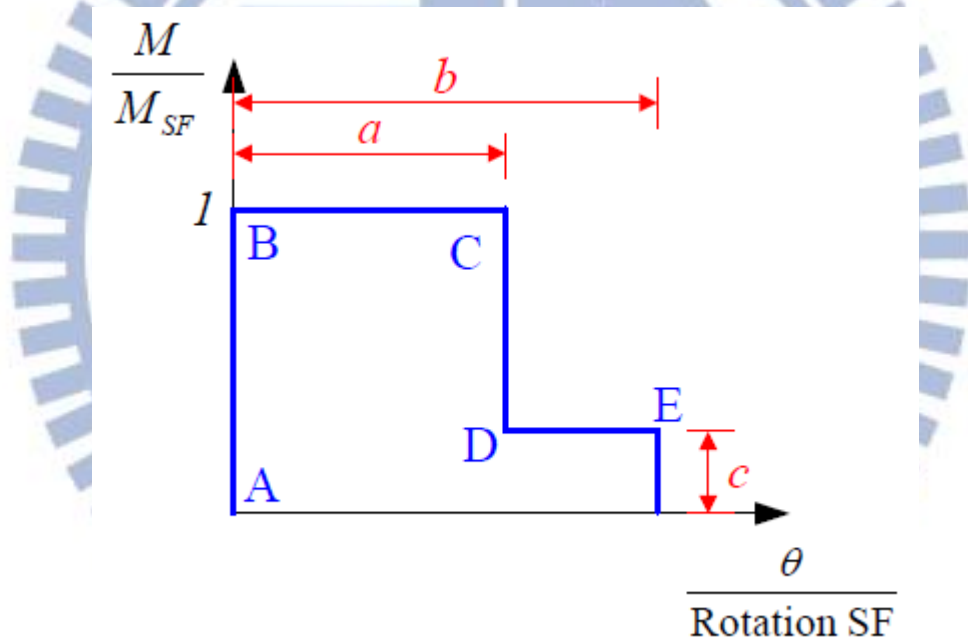


圖2.6 ASCE 41-06建議之 RC 梁彎矩塑性鉸載重位移曲線[15]

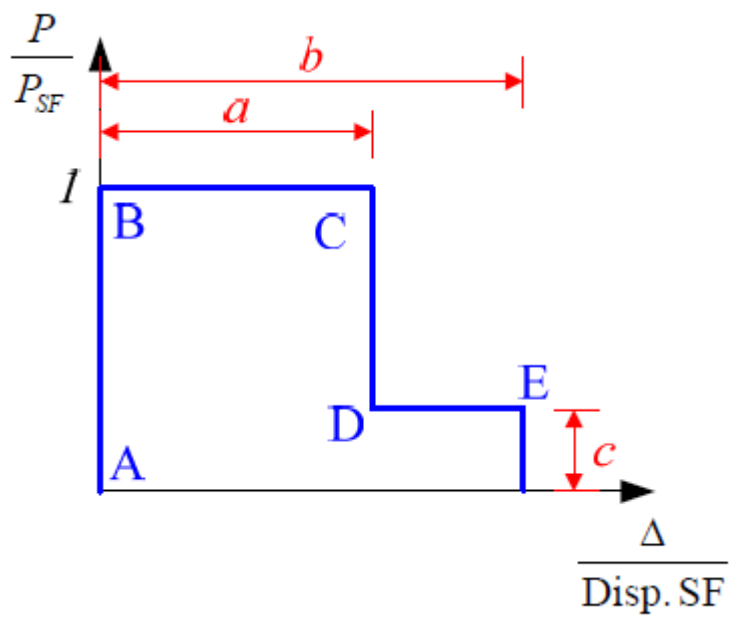


圖2.7 ASCE 41-06建議之 RC 梁剪力塑性鉸載重位移曲線[15]

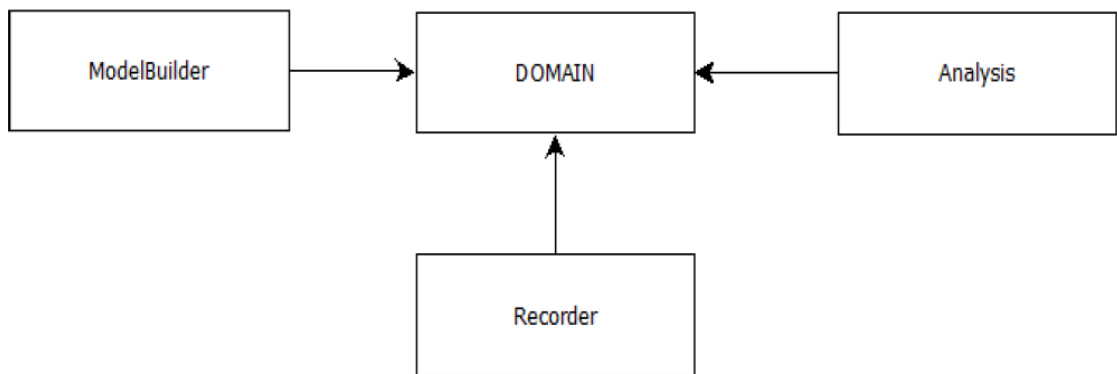


圖3.1 OpenSees 主要物件[1]

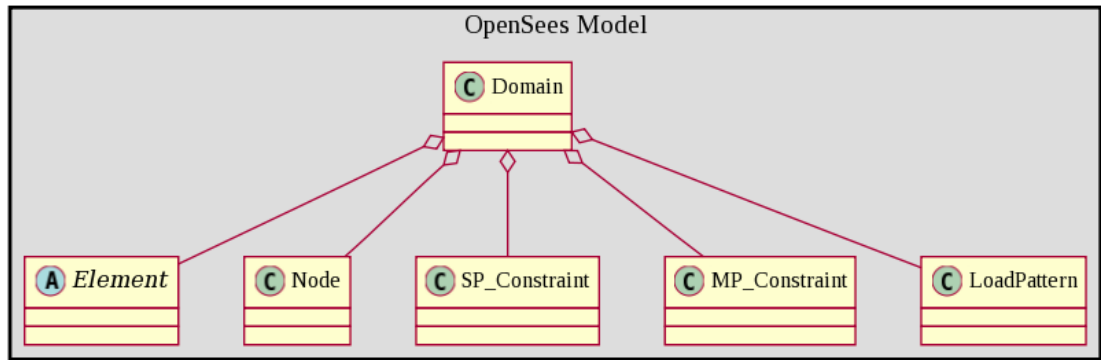


圖 3. 2 OpenSees ModelBuilder Object[19]

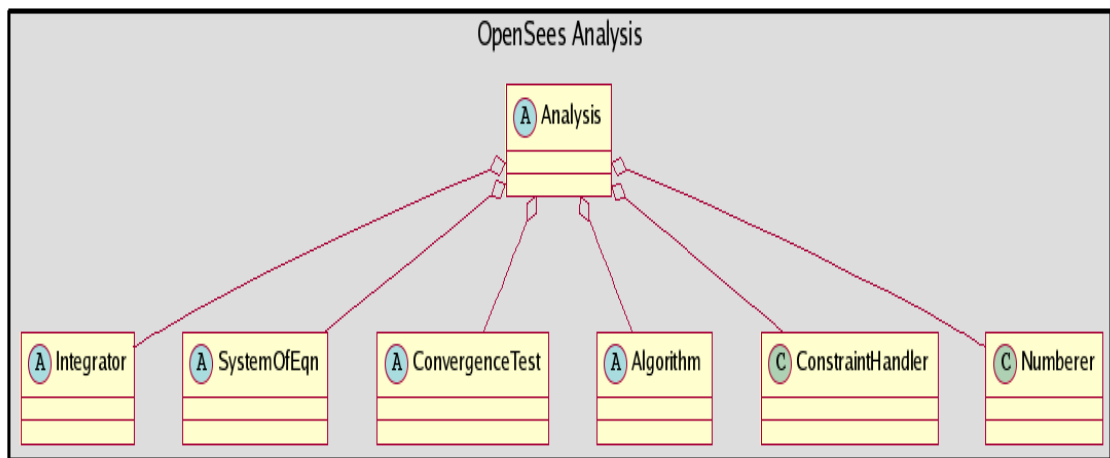


圖 3. 3 OpenSees Analysis Object[19]

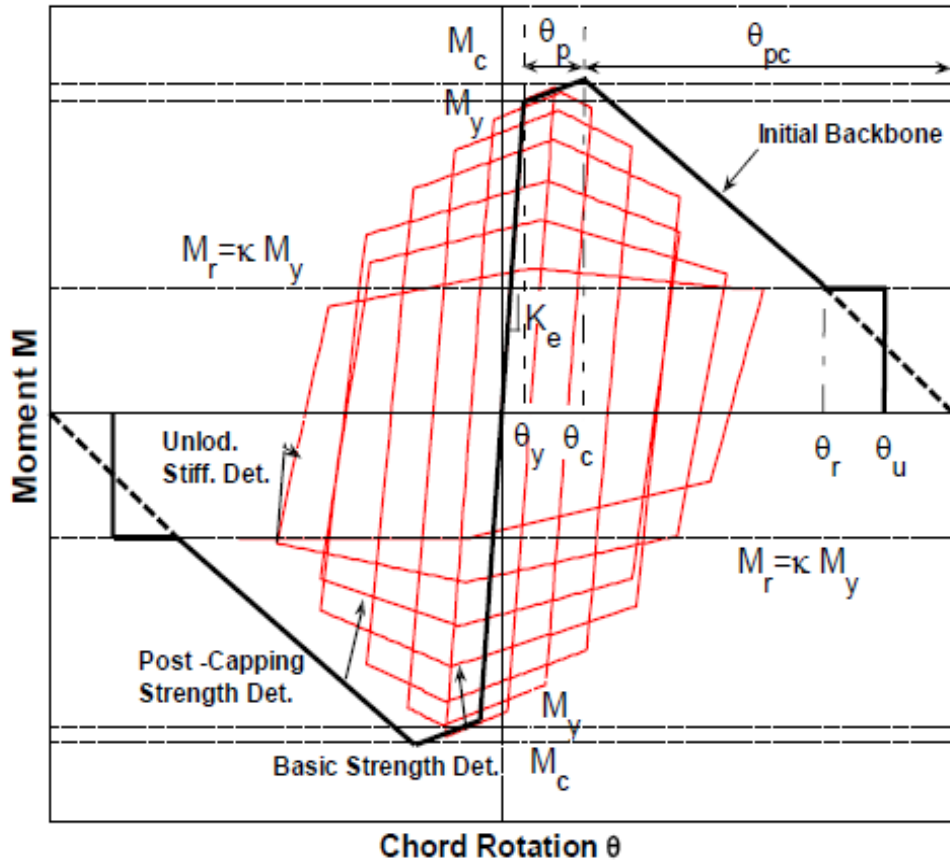


圖 3. 4 Bilinear Material [17] [19]

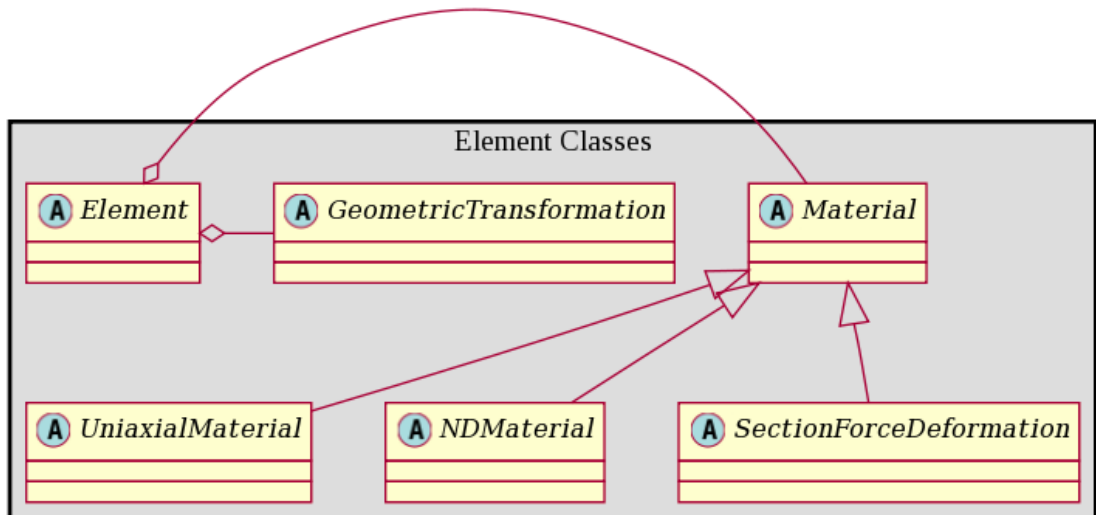


圖 3. 5 Element Classes Object[19]



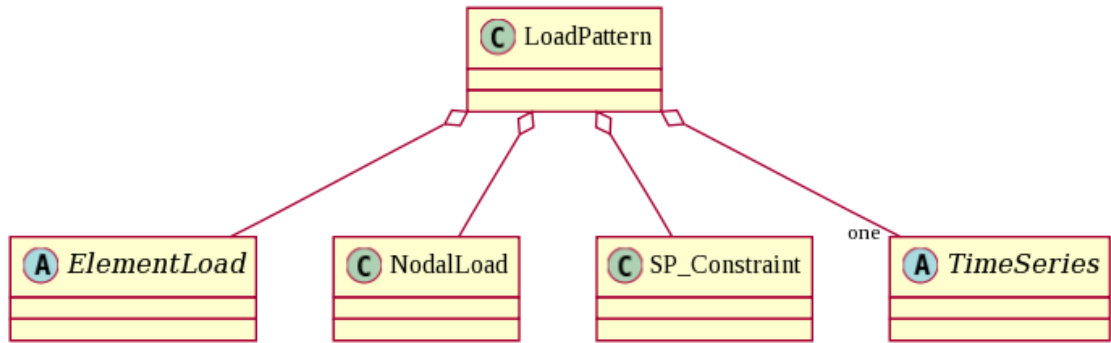


圖3.6 載重模式分類圖[19]

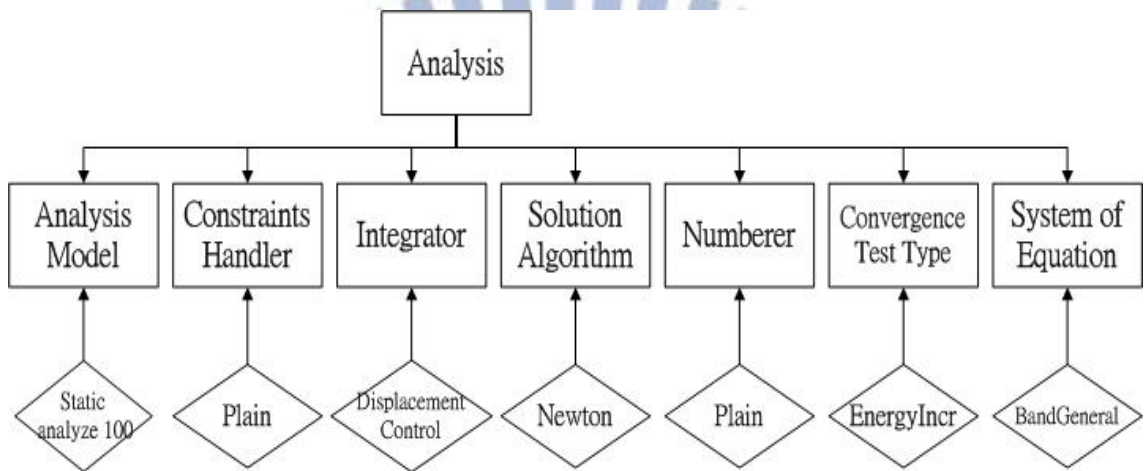


圖3.7 OpenSees 分析物件

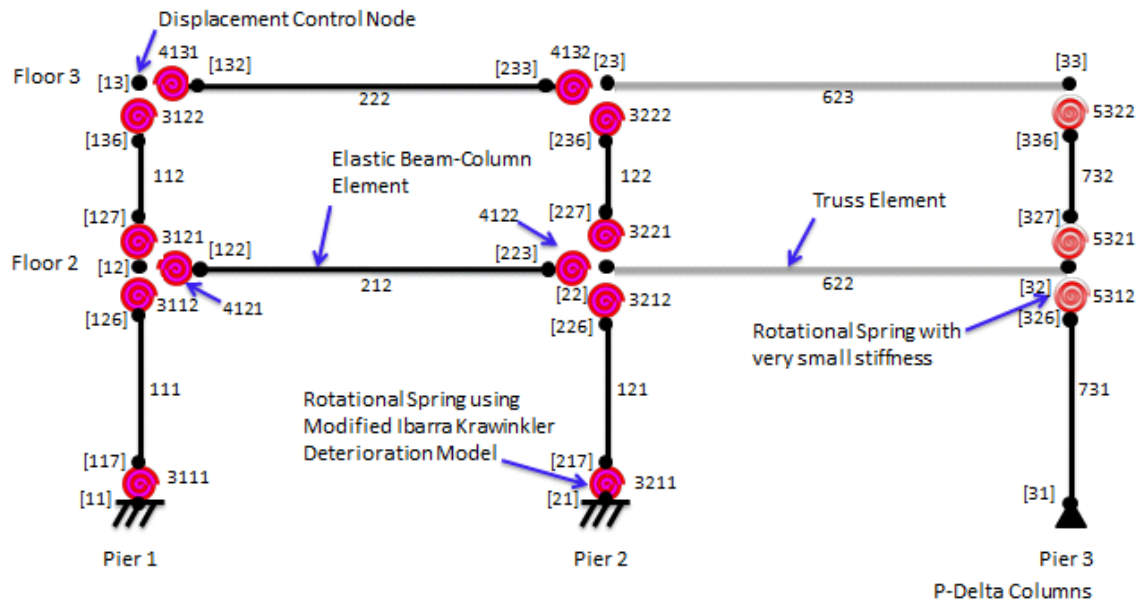


圖3.8 集中塑性模型

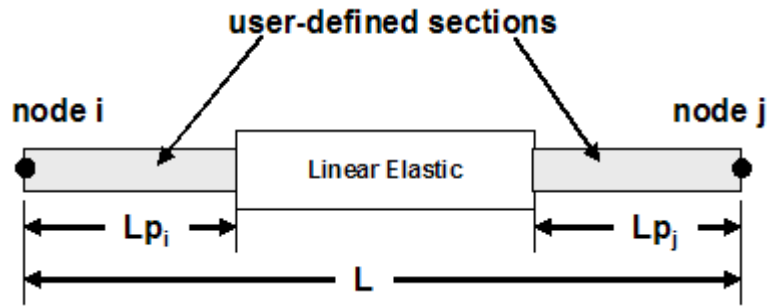
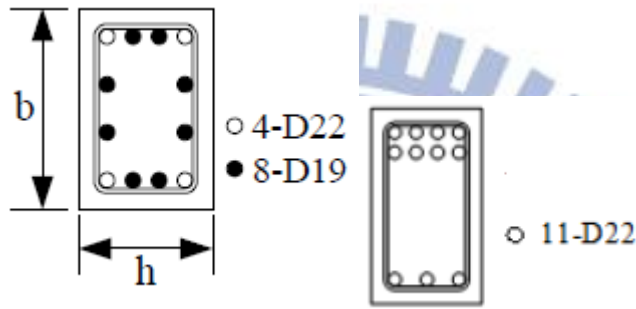


圖3.9 beam WithHinges command



(a)柱斷面 (b)梁斷面

圖3.10 梁、柱斷面圖

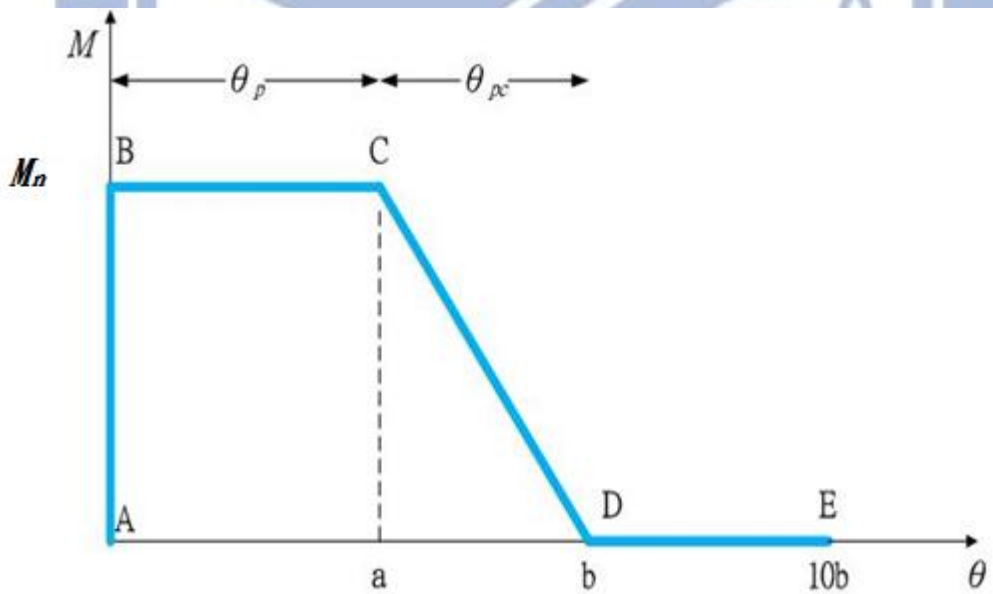


圖3.11 RC 柱彎矩塑性鉸性質

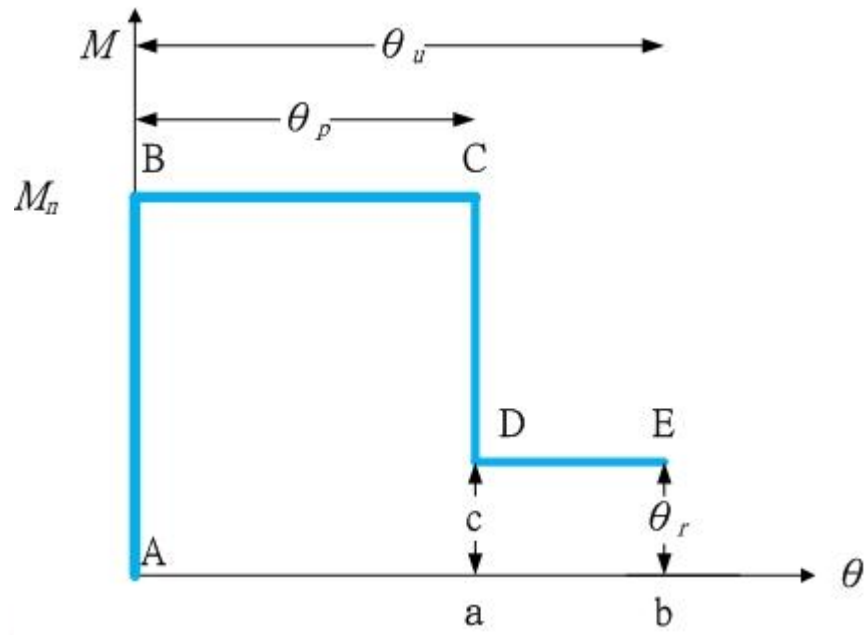


圖3.12 RC 梁彎矩塑性鉸性質

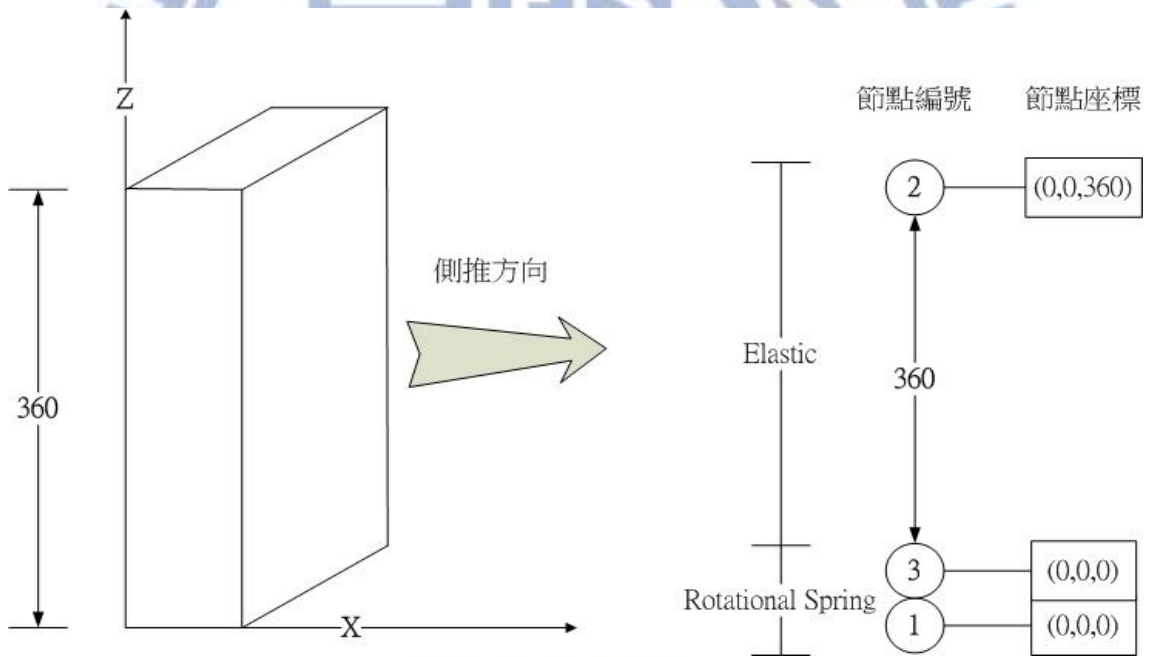


圖3.13 懸臂梁示意圖與節點編號

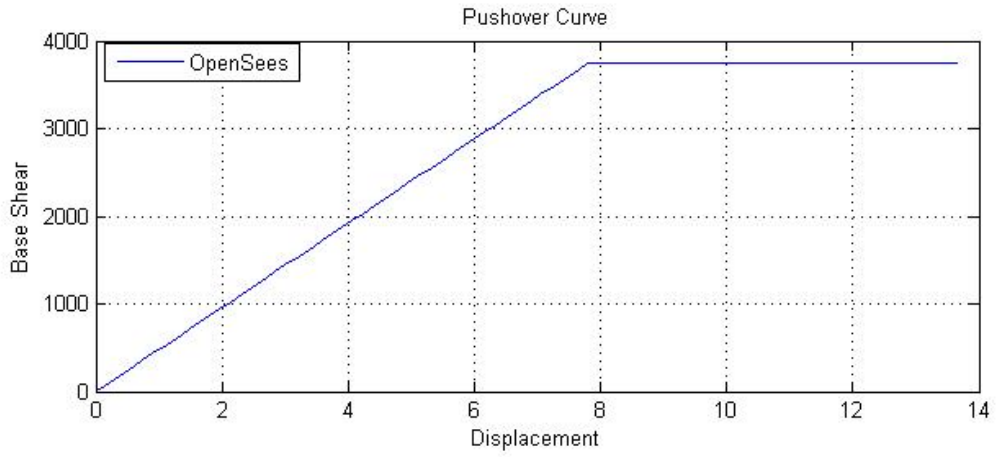


圖3. 14 OpenSees 懸臂梁容量曲線圖

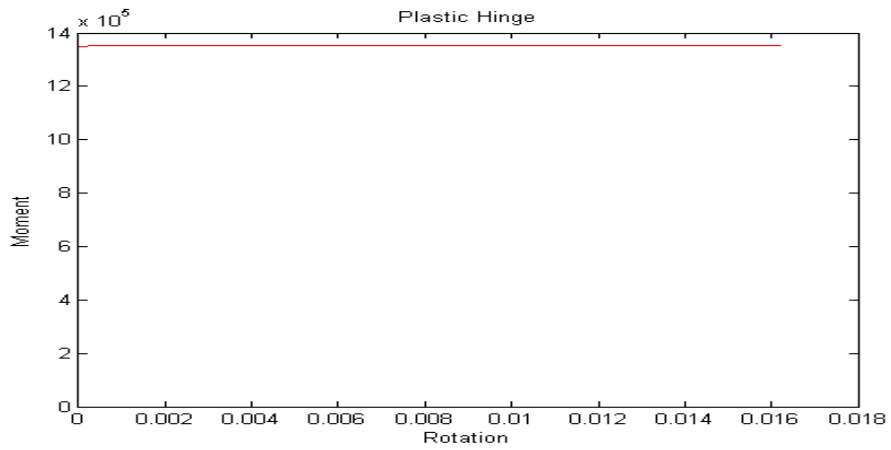


圖3. 15 塑性鉸之彎矩與轉角關係圖

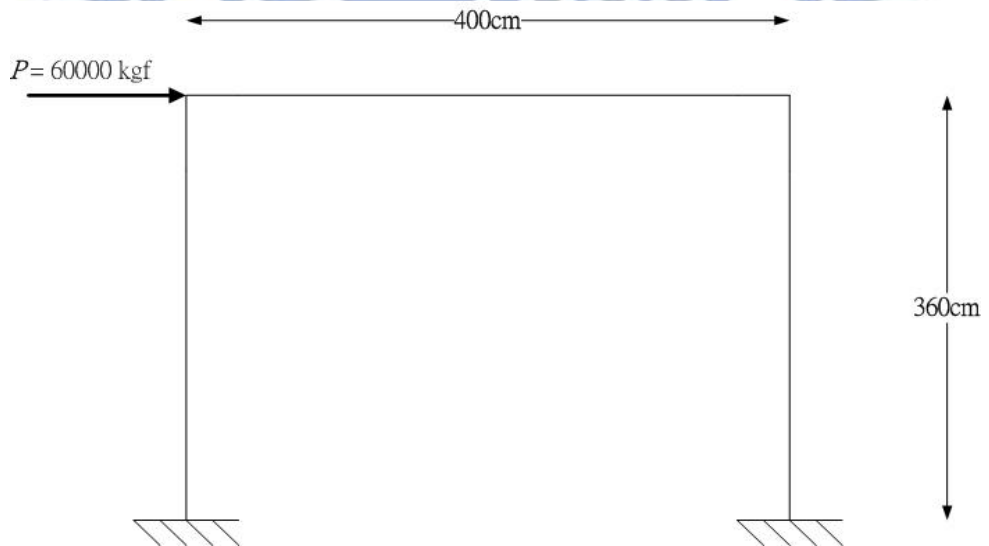


圖3. 16 1x1 Frame 示意圖



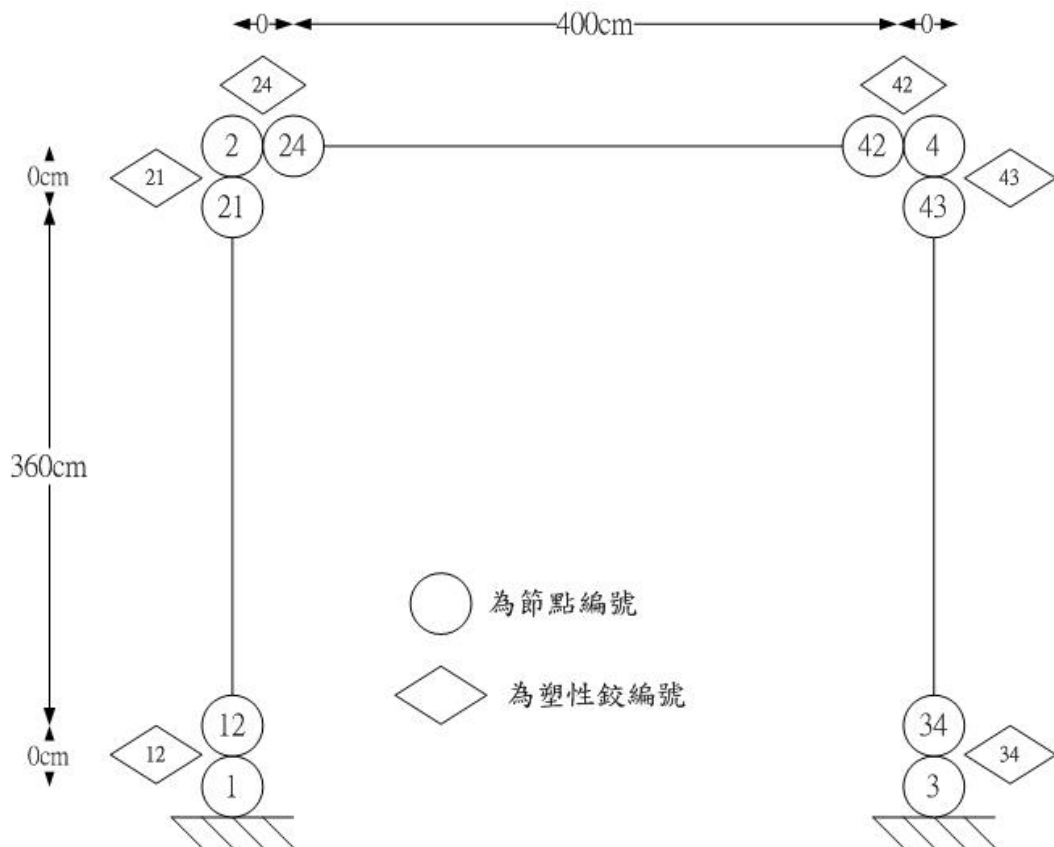


圖3.17 1x1 Frame 節點編號與塑性鉸編號圖

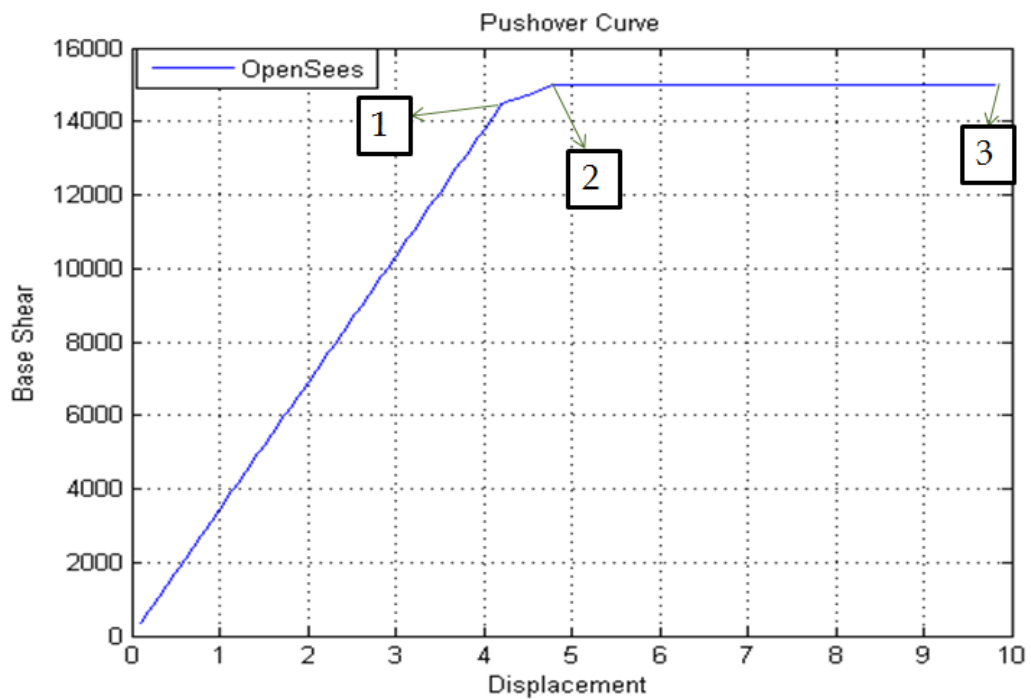


圖3.18 1x1 Frame 容量曲線圖

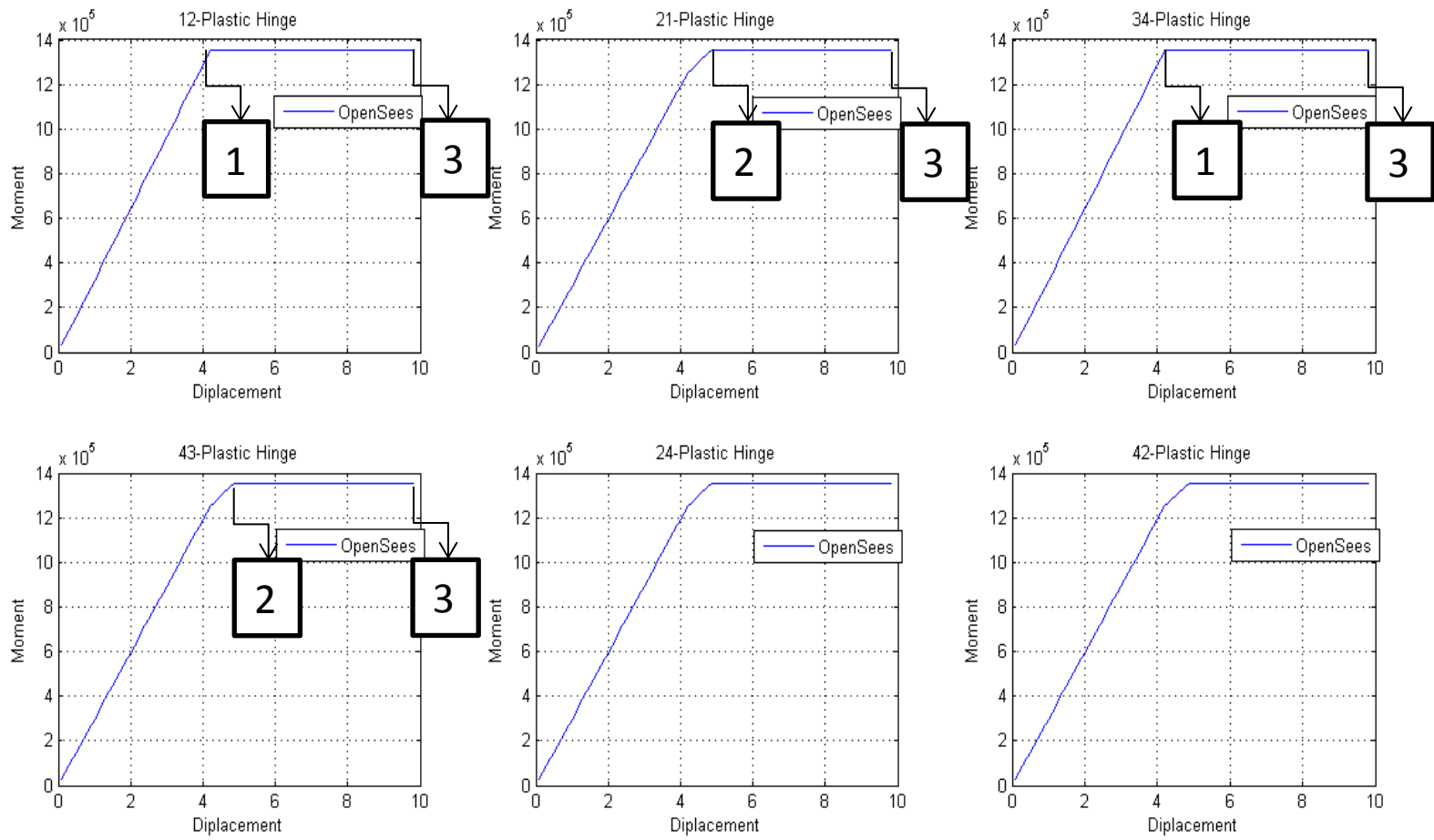


圖3. 19 1x1 Frame 塑性鉸之彎矩與側推位移圖

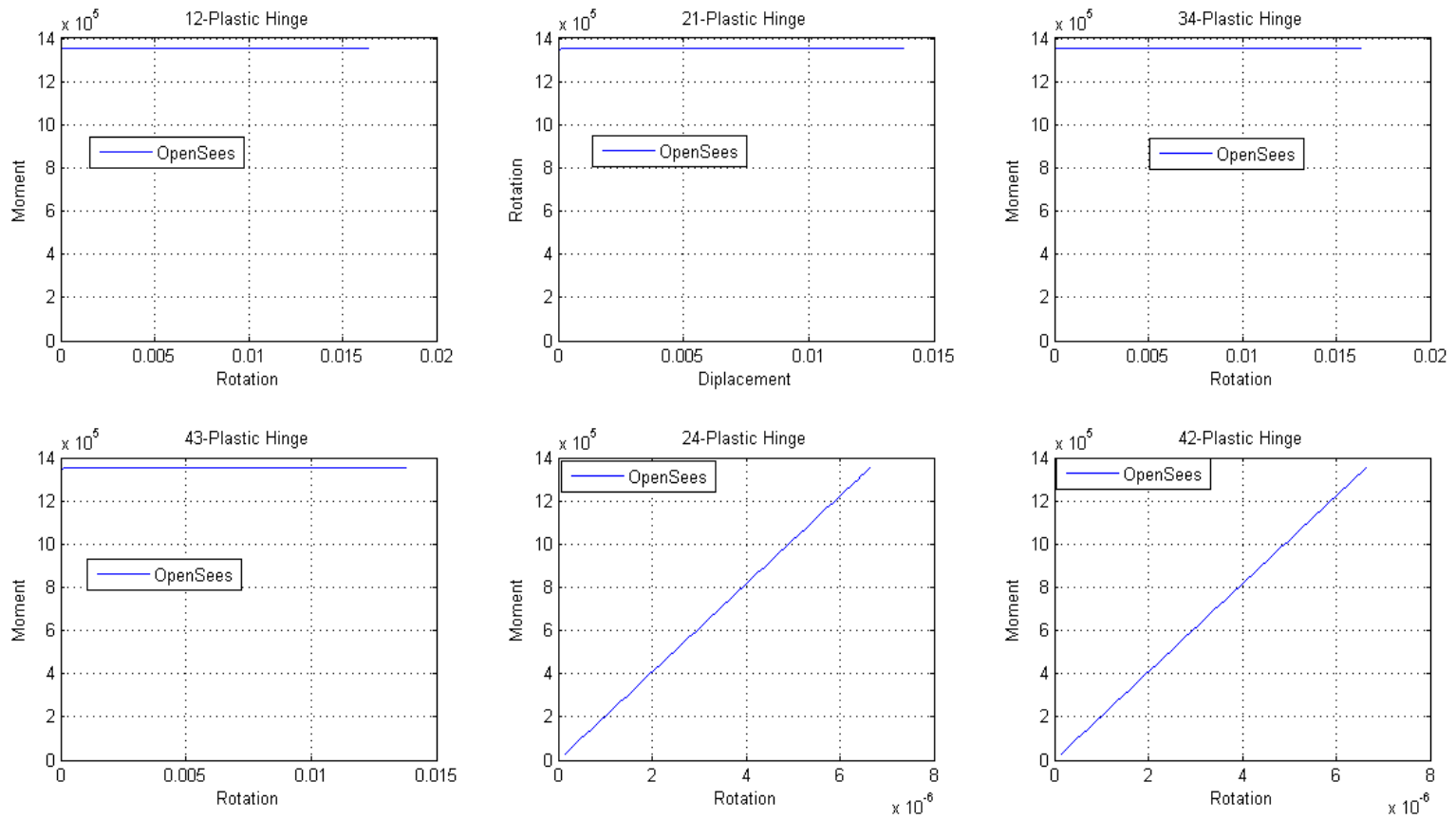


圖3.20 1x1 Frame 塑性鉸之彎矩與轉角圖

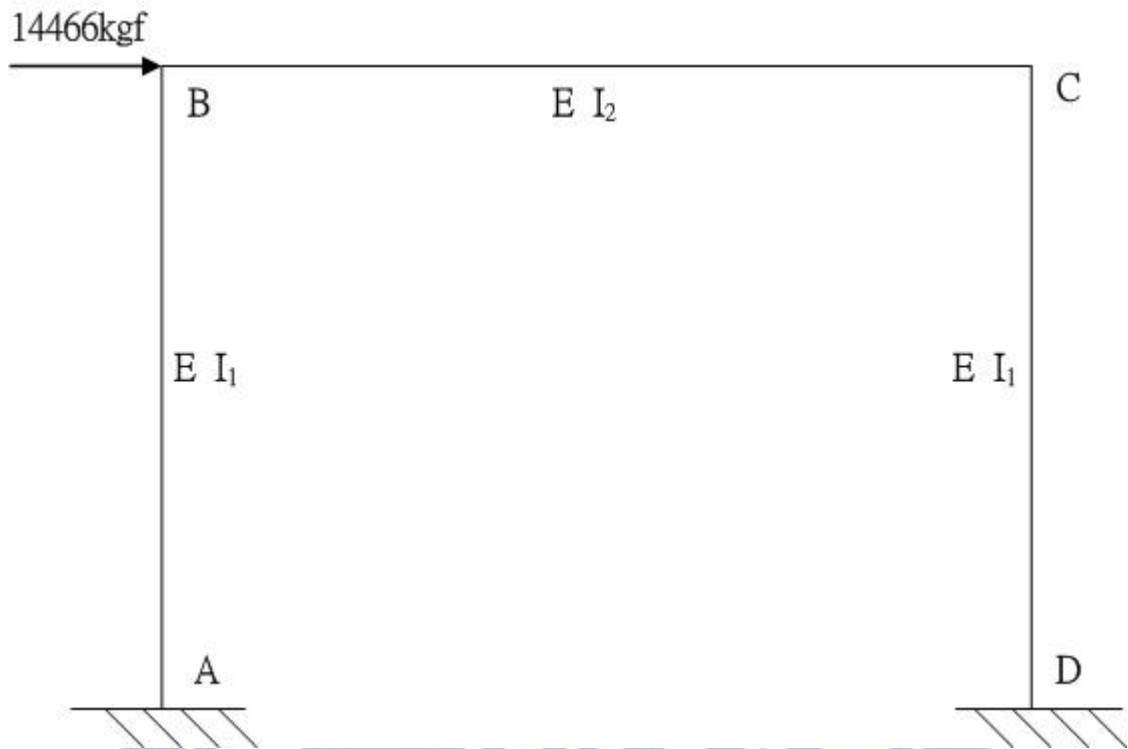


圖3.21 1x1 Frame 驗證之模型1

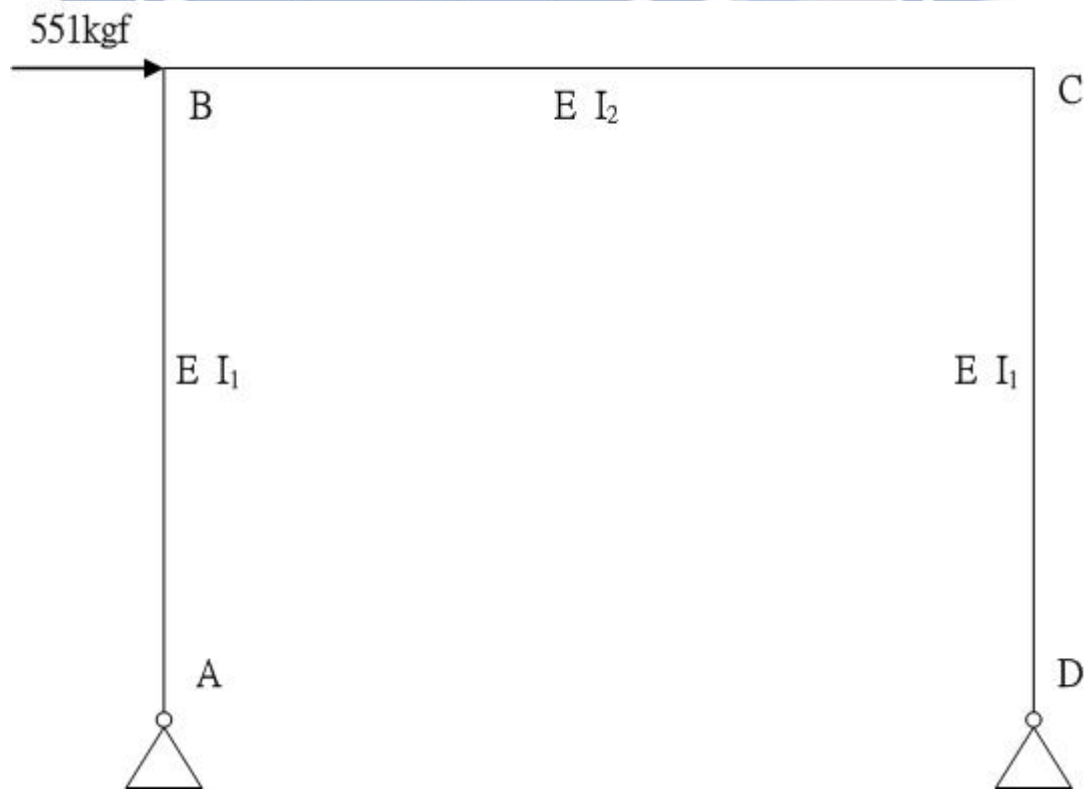


圖3.22 1x1 Frame 驗證之模型2



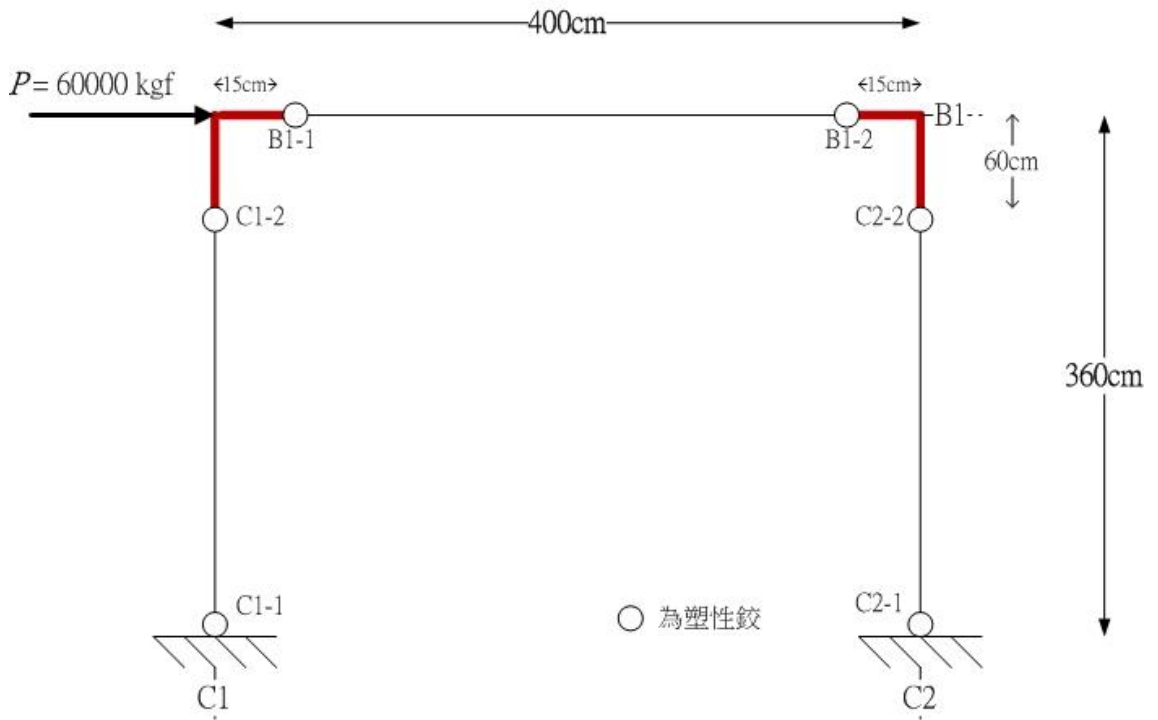


圖4.1 1x1 Frame 示意圖

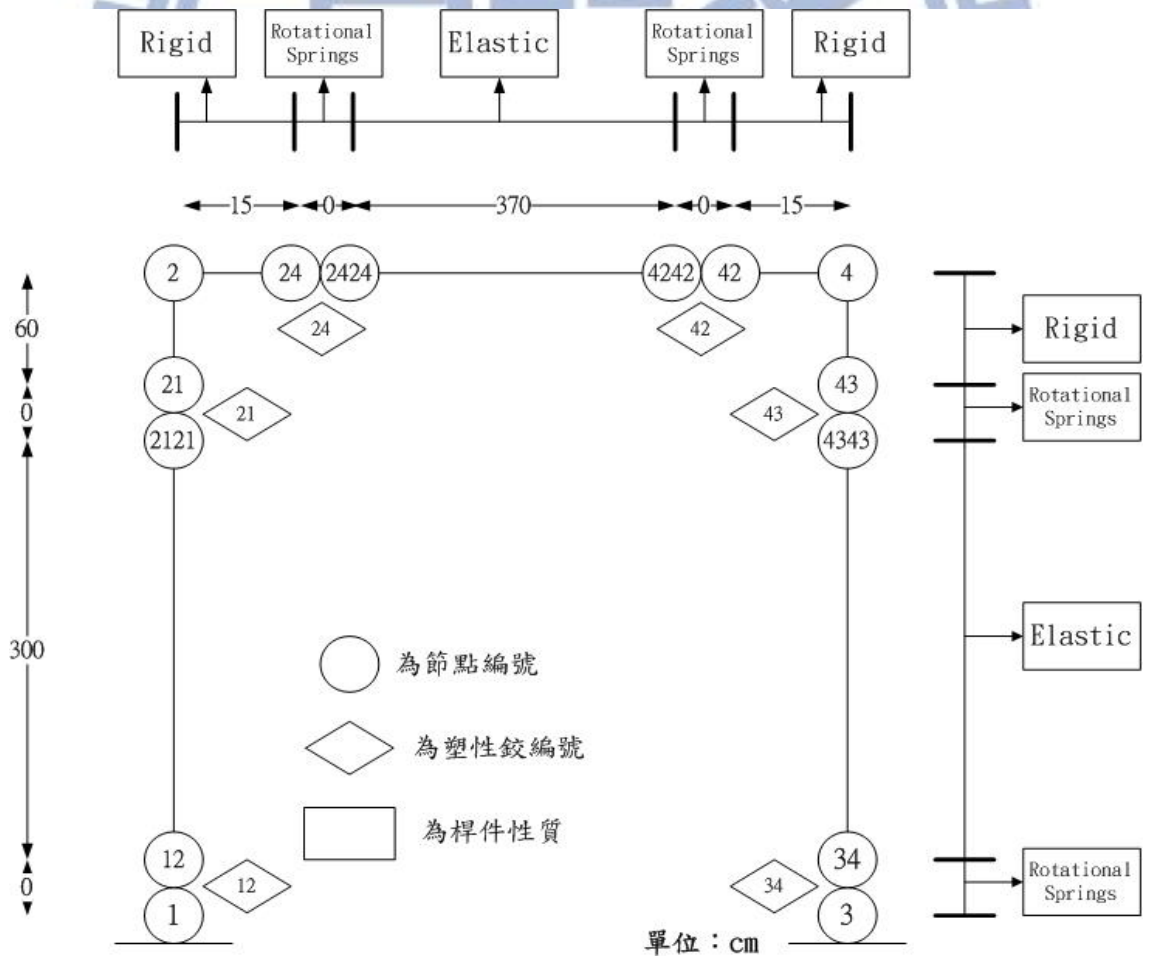


圖4.2 1x1 Frame 節點編號與桿件性質

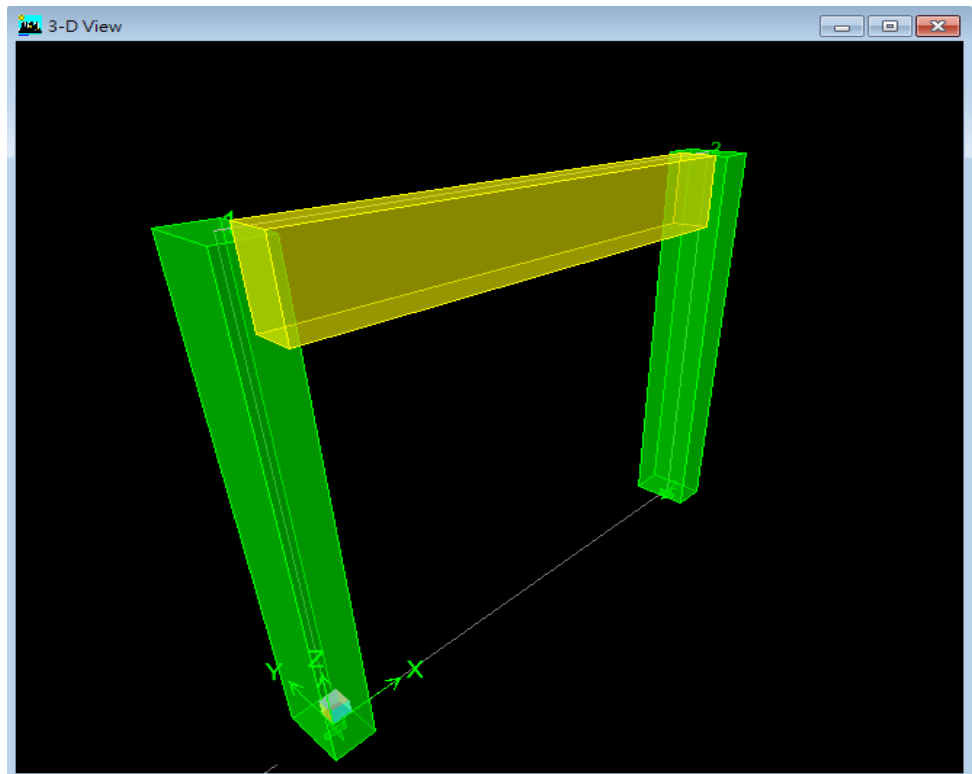


圖4.3 1x1 Frame ETABS 3D 立體圖

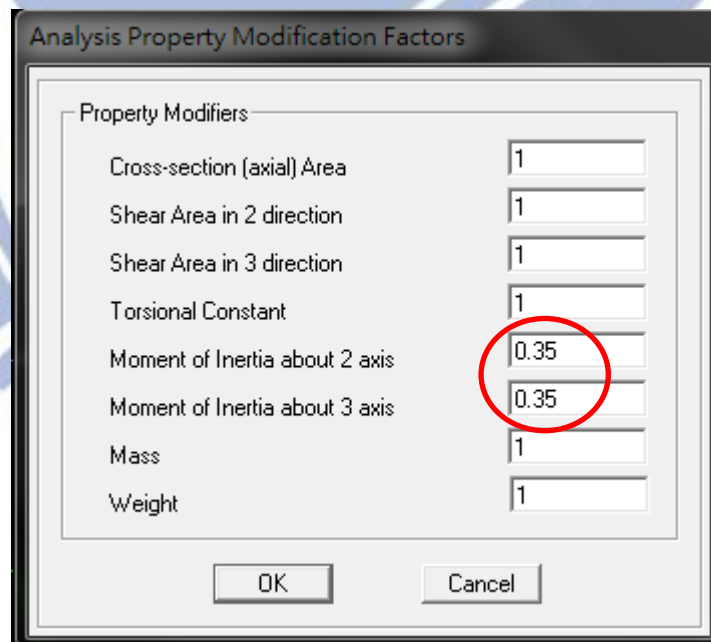


圖4.4 ETABS 梁柱開裂勁度折減修改

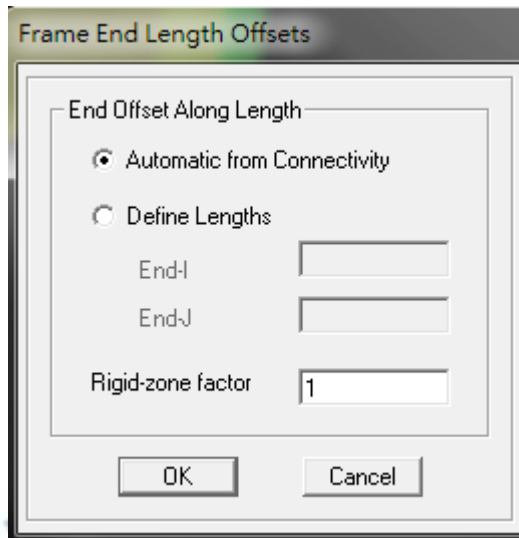


圖4.5 ETABS 剛域修改

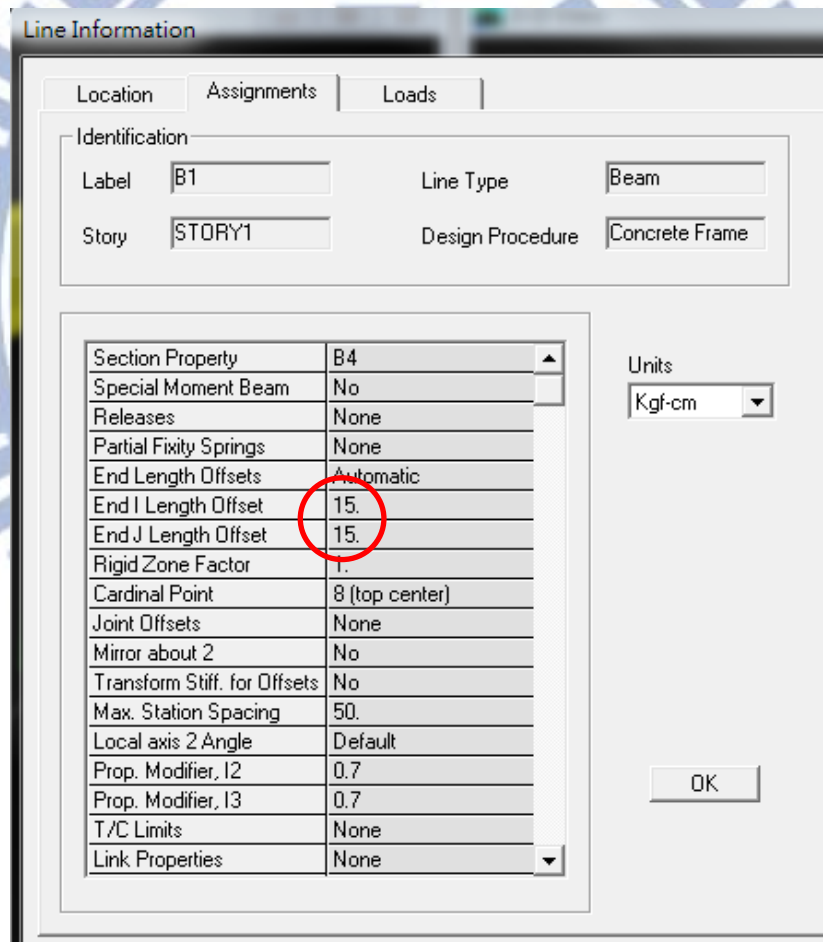


圖4.6 ETABS 梁 End Length Offsets

Line Information

Location Assignments Loads

Identification

Label C1 Line Type Column

Story STORY1 Design Procedure Concrete Frame

Section Property	C1L
Special Moment Beam	No
Releases	None
Partial Fixity Springs	None
End Length Offsets	Automatic
End I Length Offset	0.
End J Length Offset	60.
Rigid Zone Factor	1.
Cardinal Point	10 (centroid)
Joint Offsets	None
Mirror about 2	No
Min. Number Stations	3
Local axis 2 Angle	Default
Prop. Modifier, I2	0.35
Prop. Modifier, I3	0.35
T/C Limits	None
Link Properties	None
Nonlinear Hinge	COLUM at 0.

Units: Kgf-cm

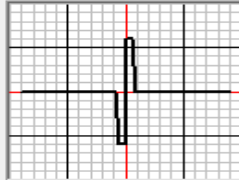
OK

圖4.7 ETABS 柱 End Length Offsets

Frame Hinge Property Data for COLUM - M3

Edit

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	0	-0.2626
D-	0	-0.0263
C-	-1	-0.0166
B-	-1	0.
A	0.	0.
B	1.	0.
C	1.	0.0166
D	0.	0.0263
E	0.	0.2626



Hinge is Rigid Plastic  
 Symmetric

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment Moment SF 1351510. Positive Negative

Use Yield Rotation Rotation SF 1. Positive Negative

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy Positive 100. Negative

Life Safety Positive 200. Negative

Collapse Prevention Positive 300. Negative

OK

Cancel

圖4.8 ETABS 柱之彎矩塑性鉸設定



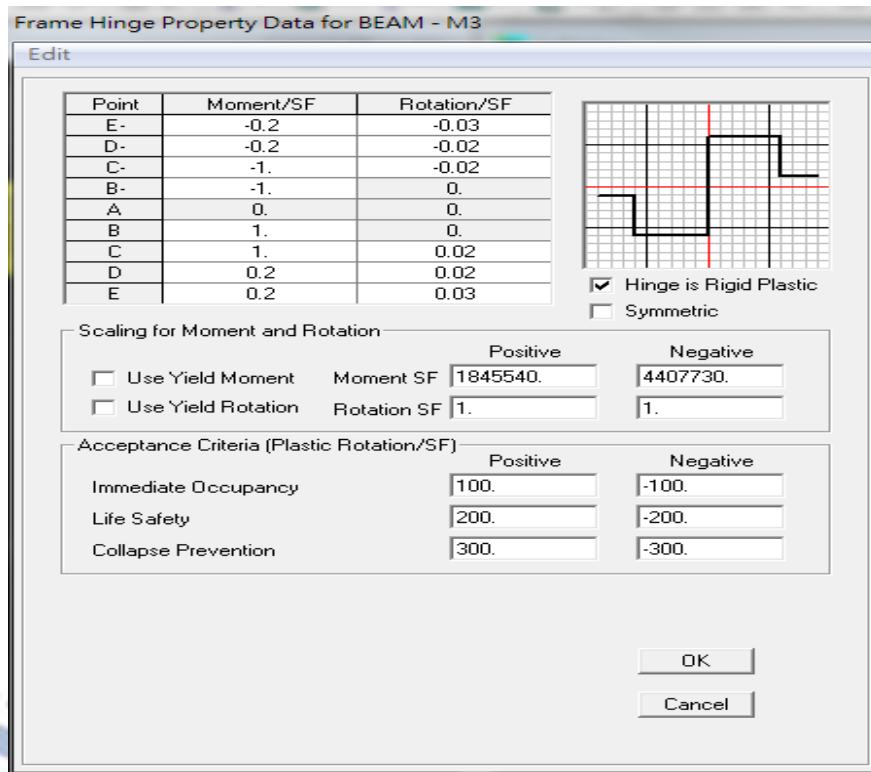


圖4.9 ETABS 梁之彎矩塑性鉸設定

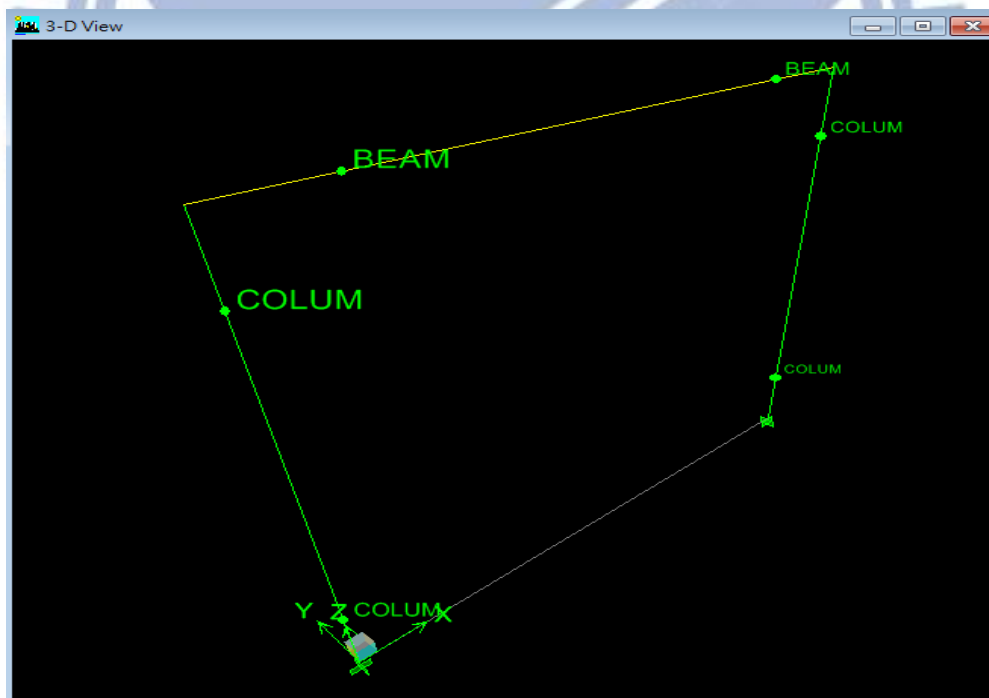


圖4.10 ETABS 塑性鉸分布位置

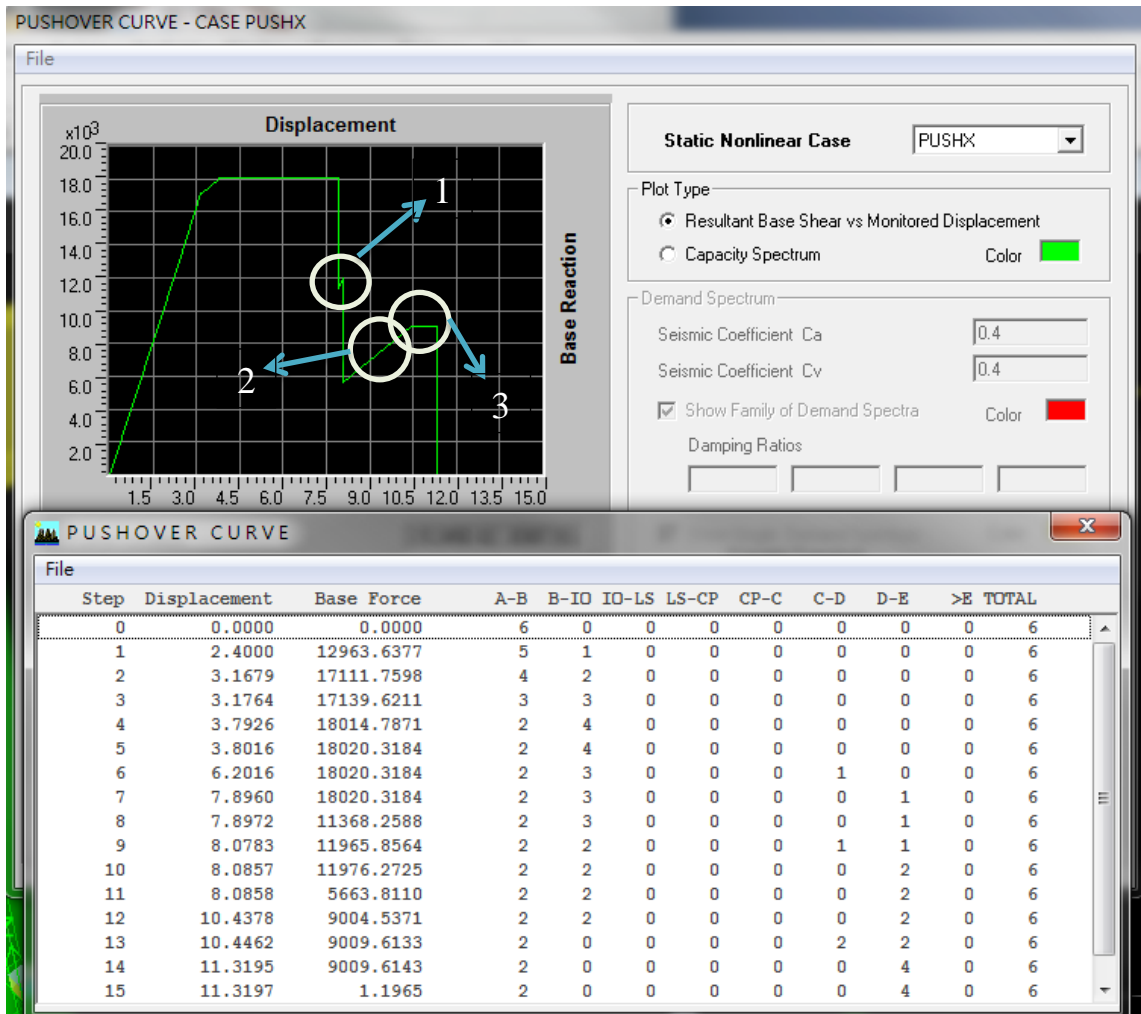


圖4. 11 ETABS Pushover Curve

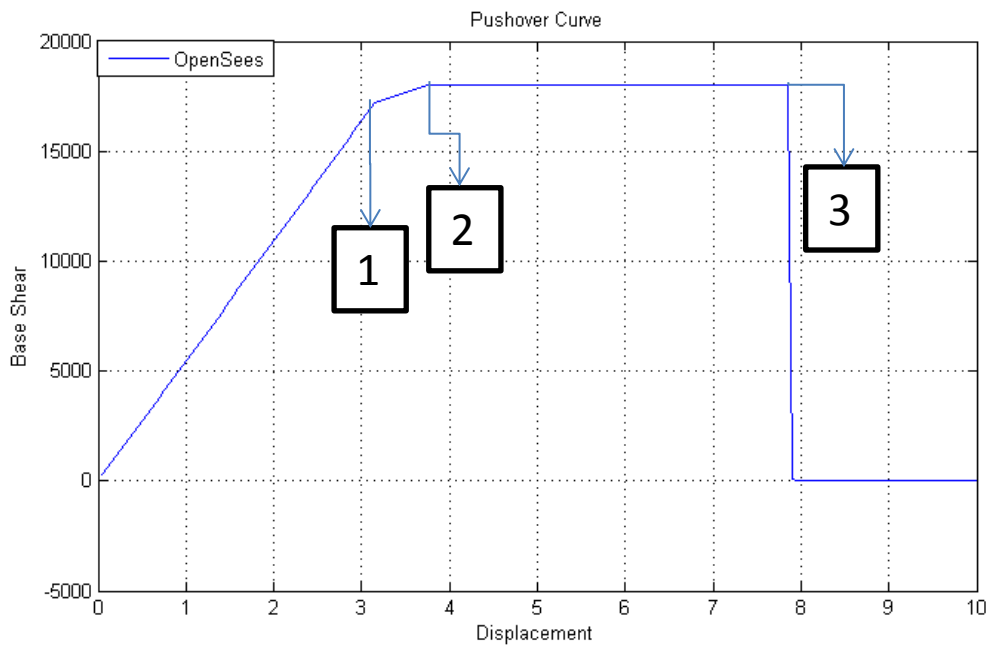


圖4. 12 1x1 Frame OpenSees Pushover Curve

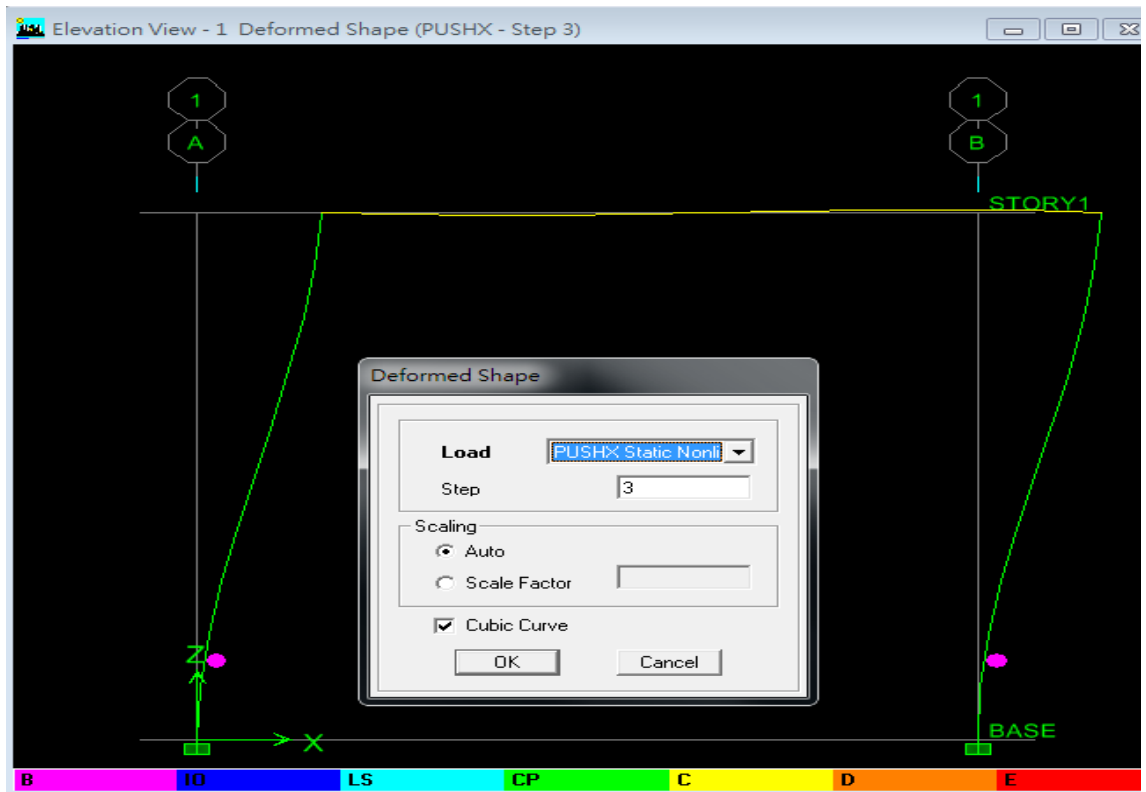


圖4.13 ETABS Step3 變形圖

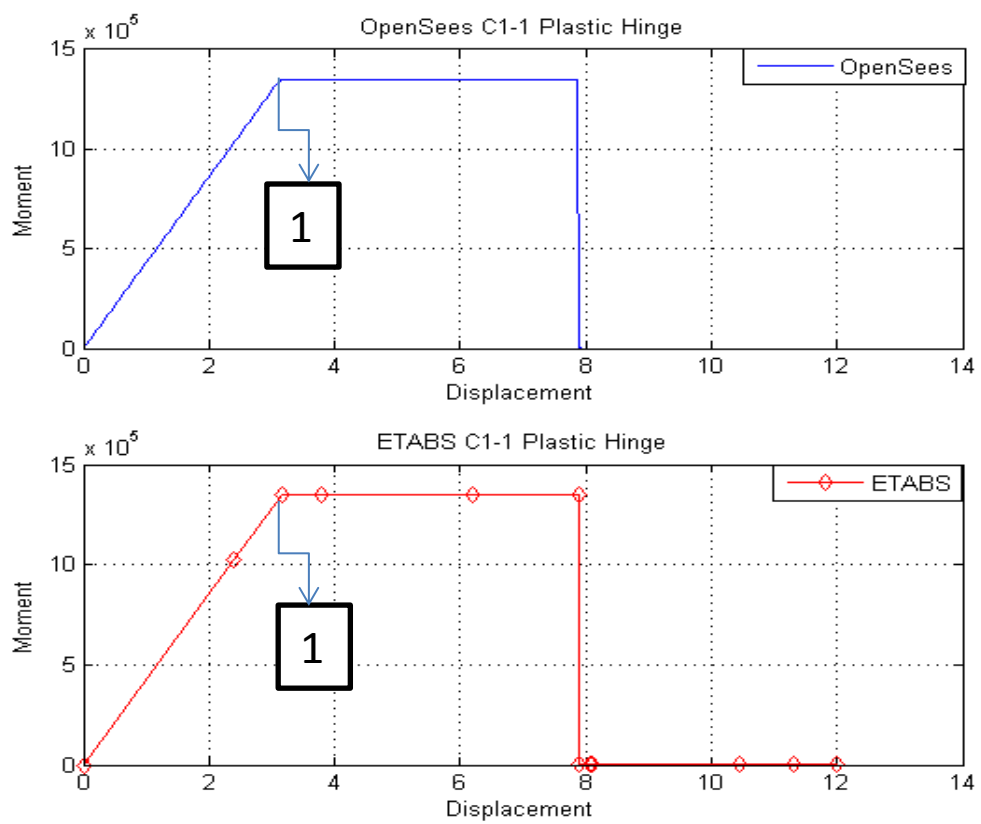


圖4.14 柱底端編號 C1-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

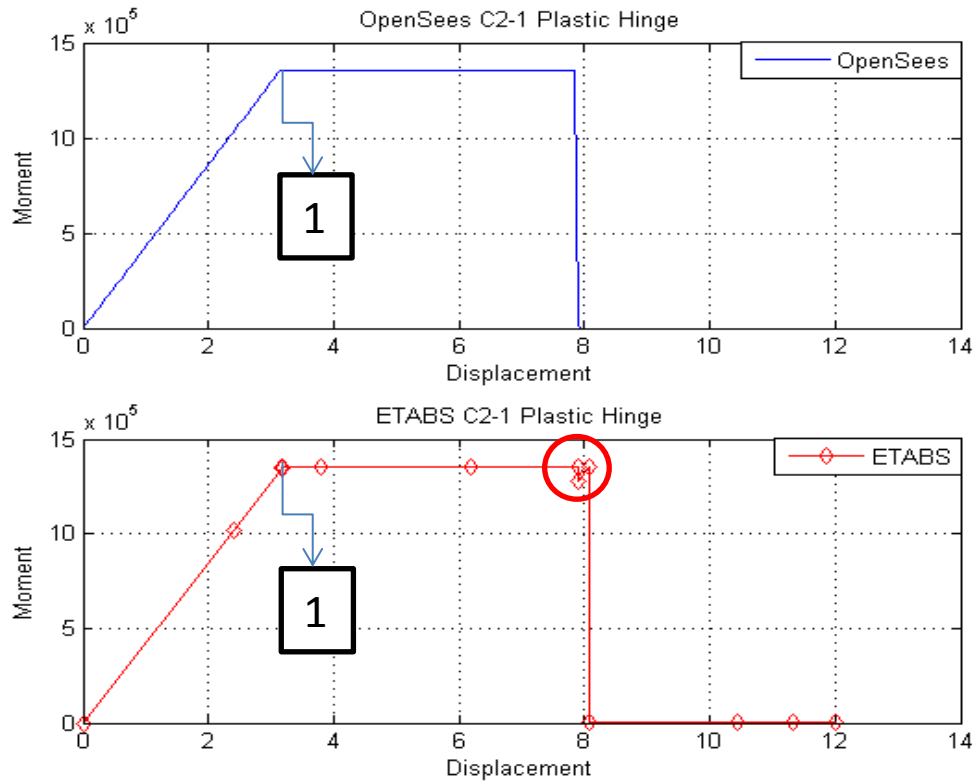


圖4.15 柱底端編號 C2-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

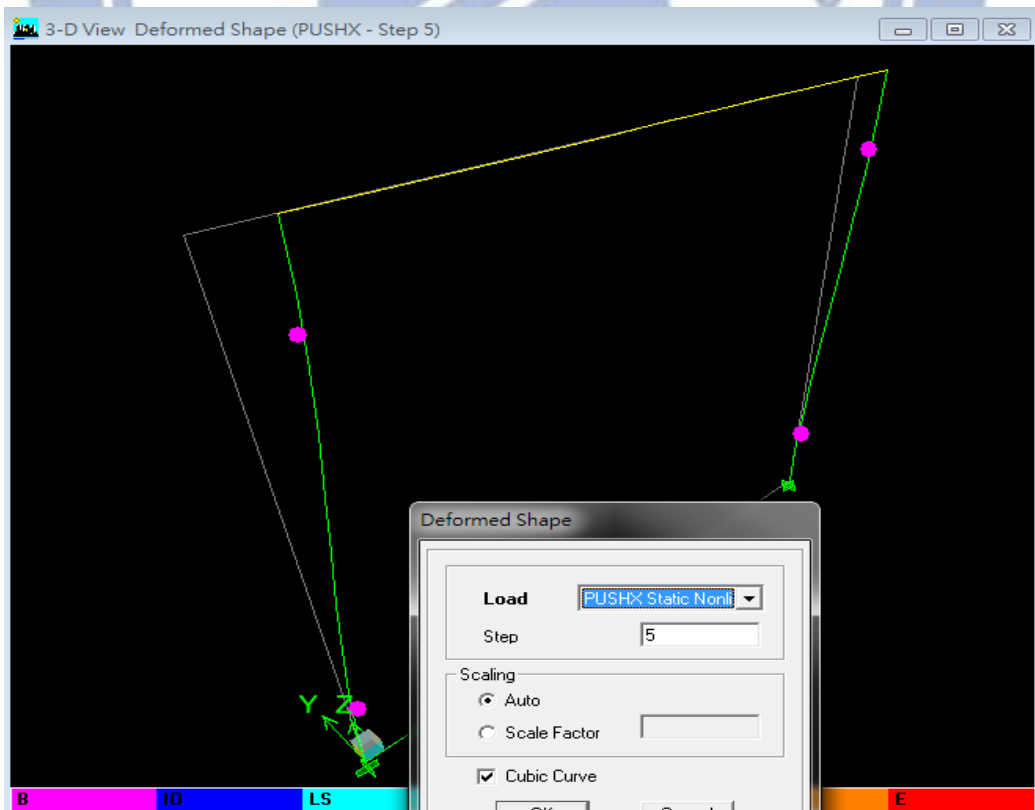


圖4.16 ETABS Step5 變形圖



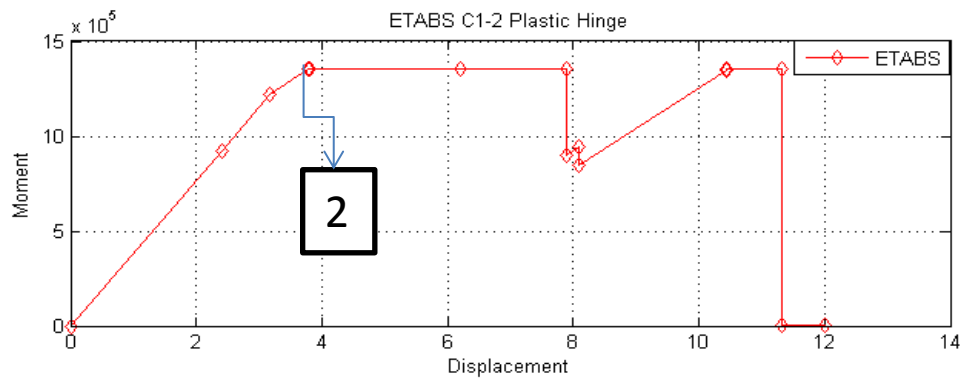
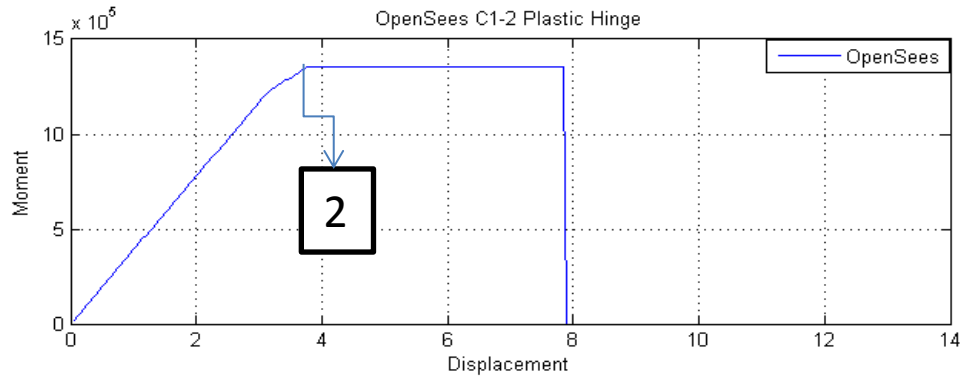


圖4.17 柱頂端編號 C1-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

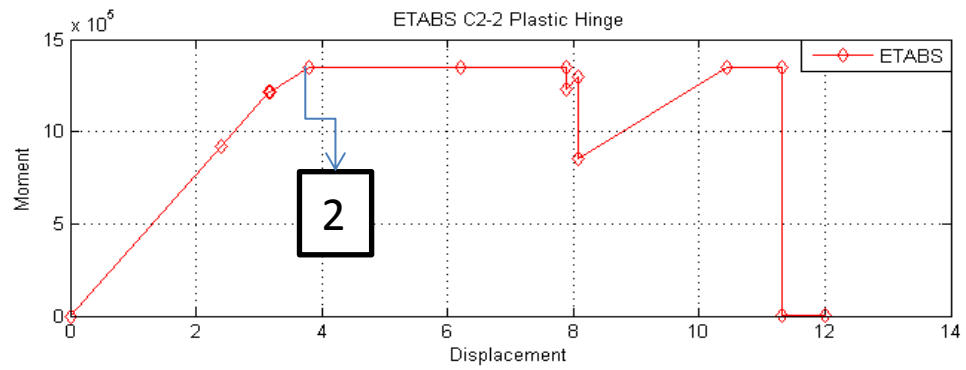
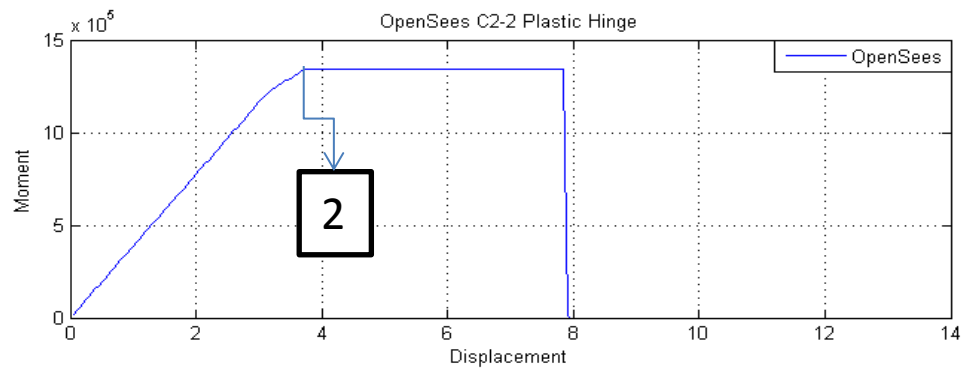


圖4.18 柱頂端編號 C2-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

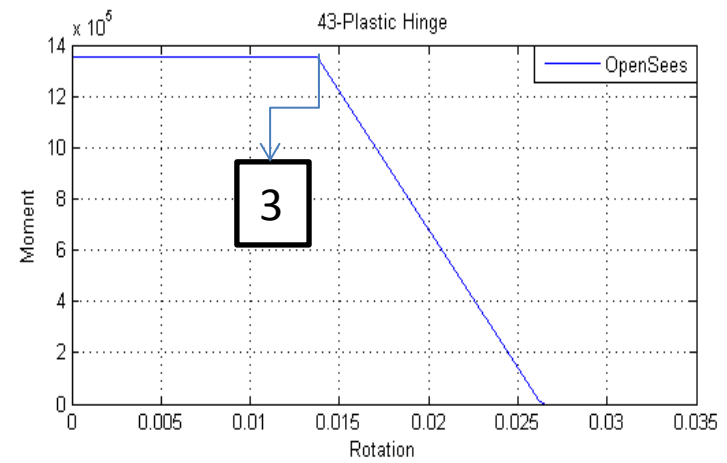
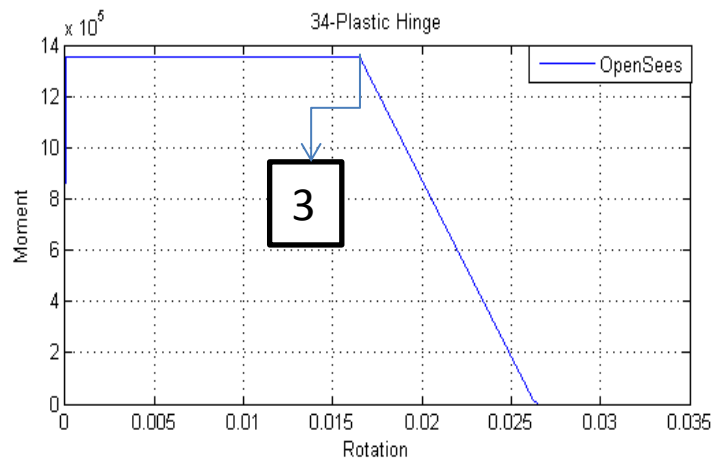
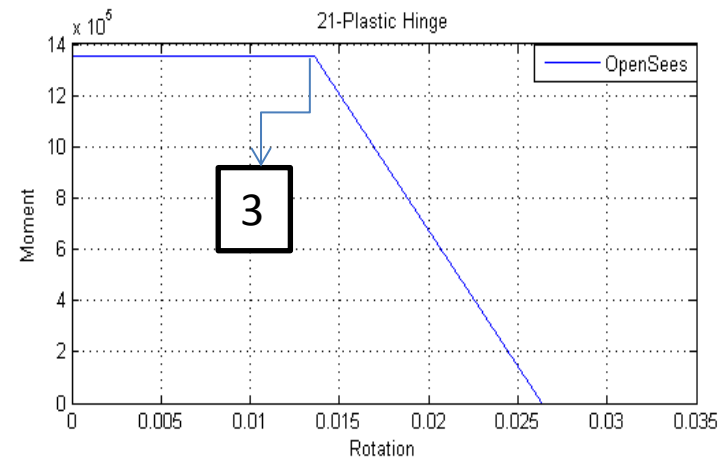
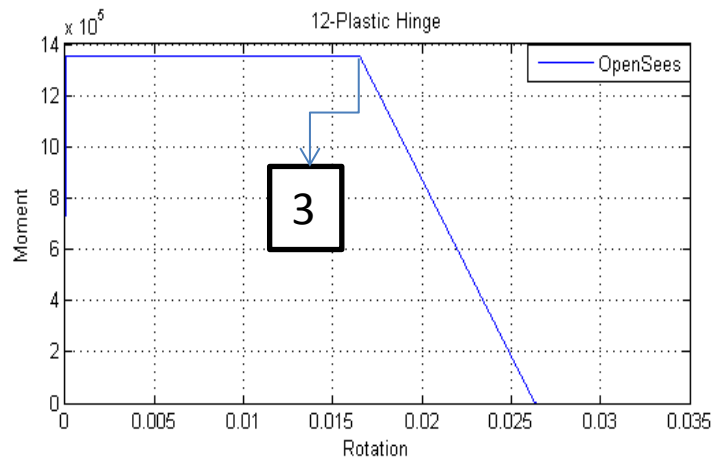


圖4. 19 OpenSees 柱彎矩塑性鉸 Moment-Rotation 圖

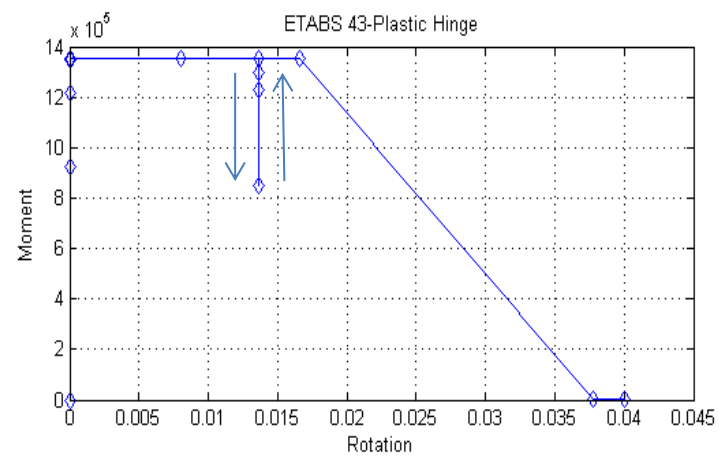
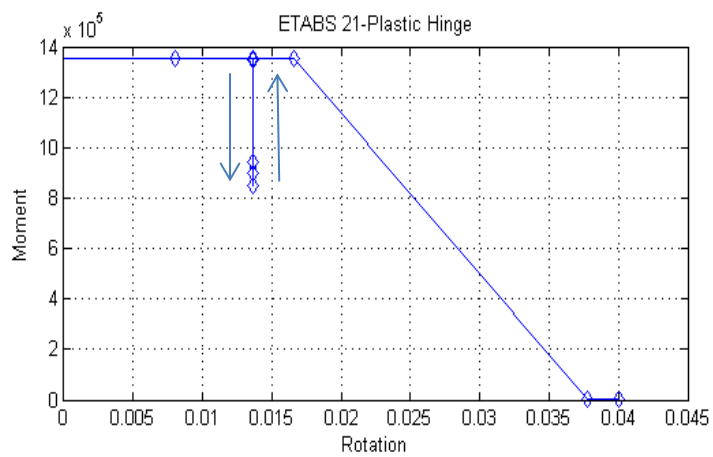
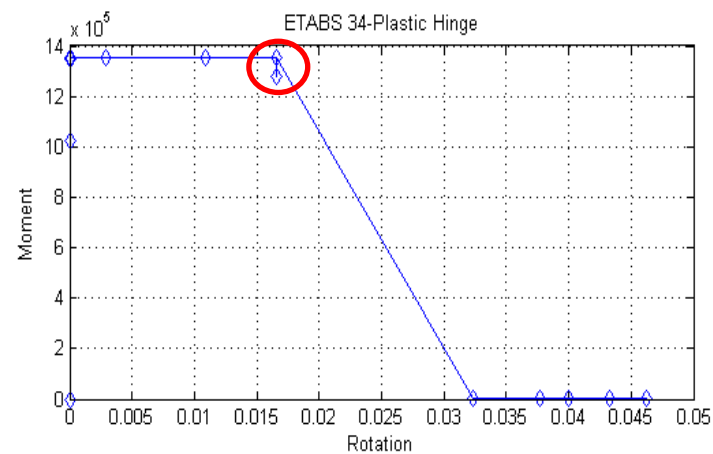
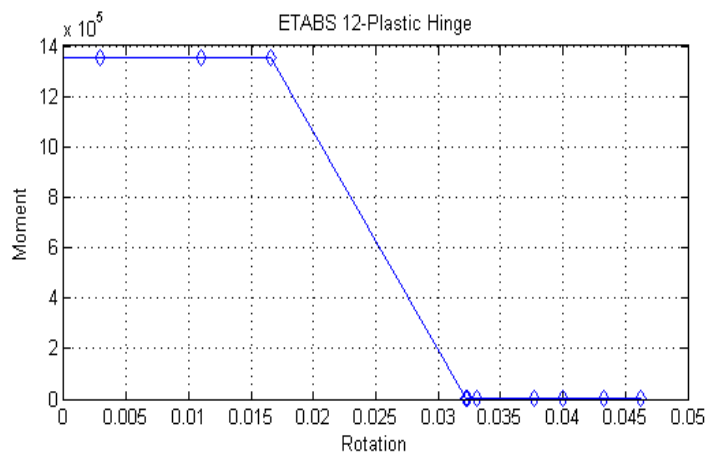


圖4. 20 ETABS 柱彎矩塑性鉸 Moment-Rotation 圖

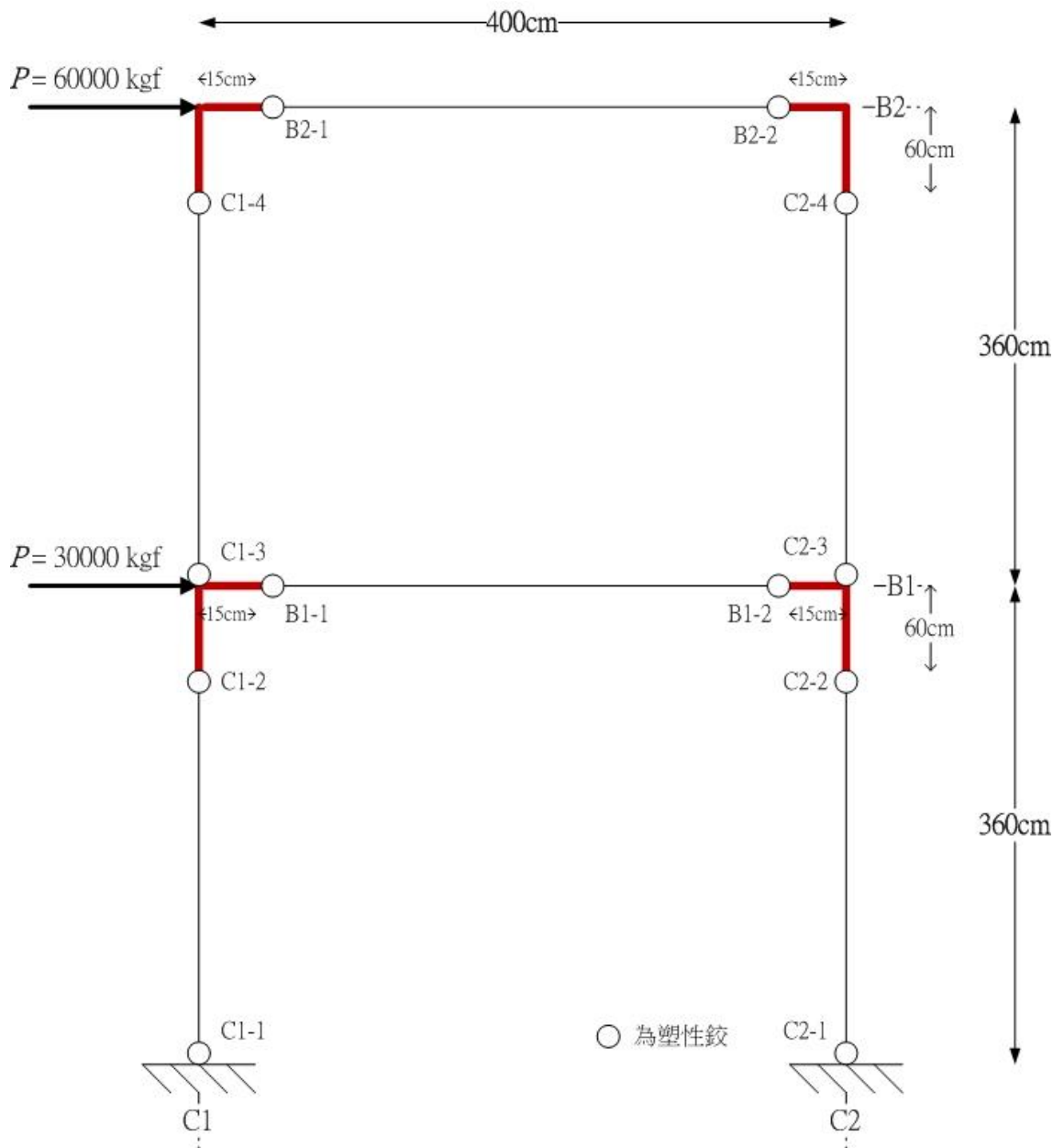


圖4.21 2x1 Frame 示意圖



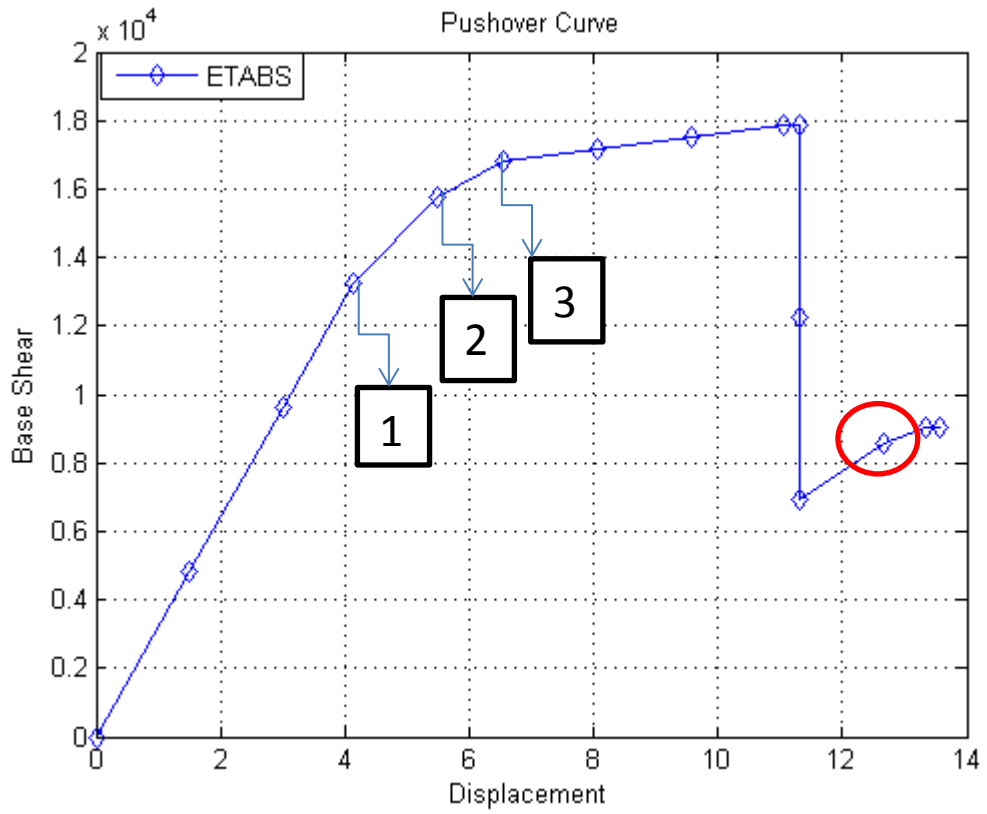


圖4. 22 2x1 ETABS Pushover Curve

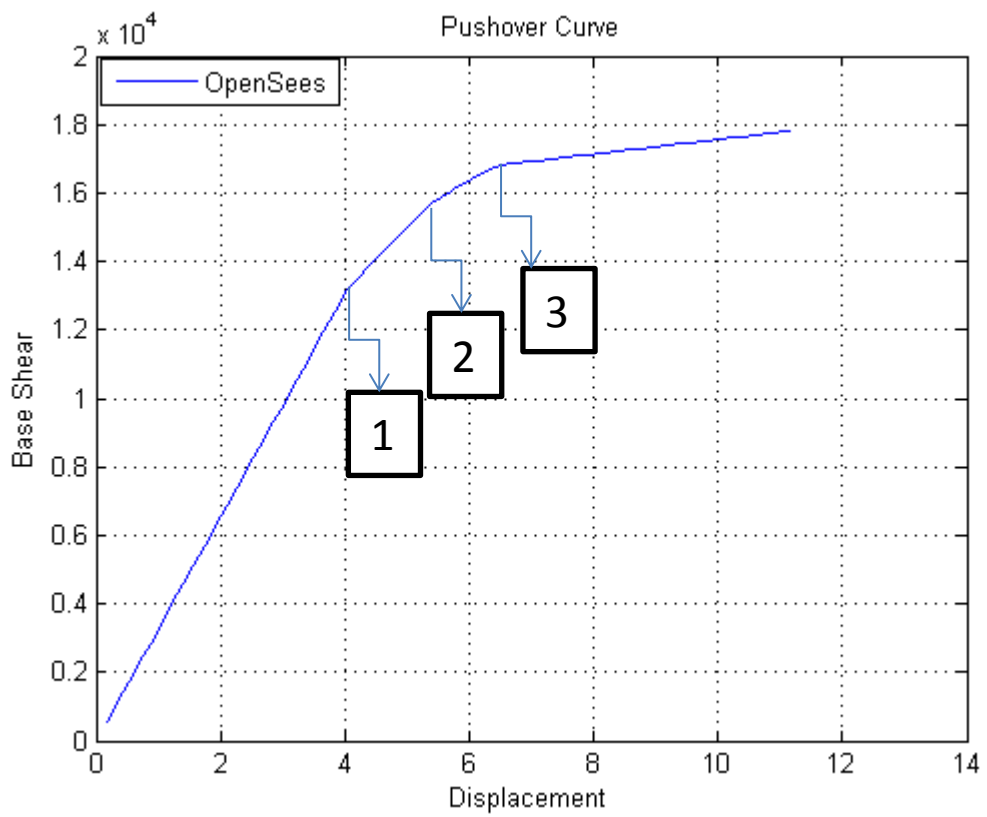


圖4. 23 2x1 OpenSees Pushover Curve

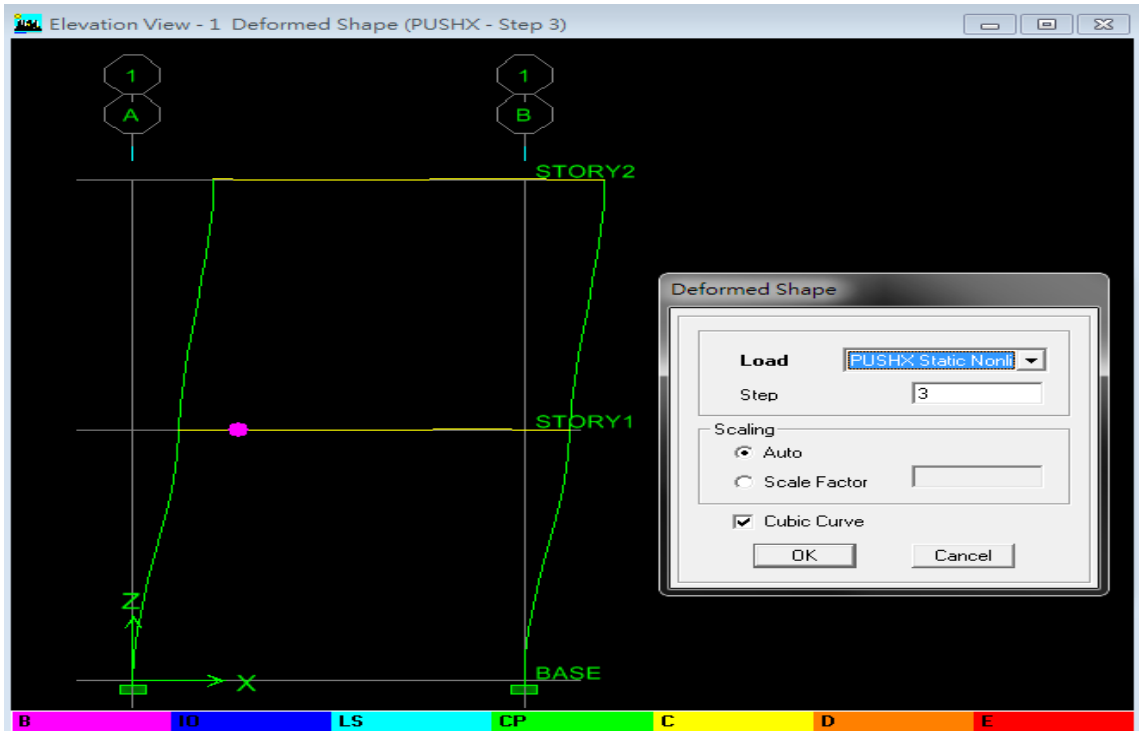


圖4.24 ETABS Step3 變形圖

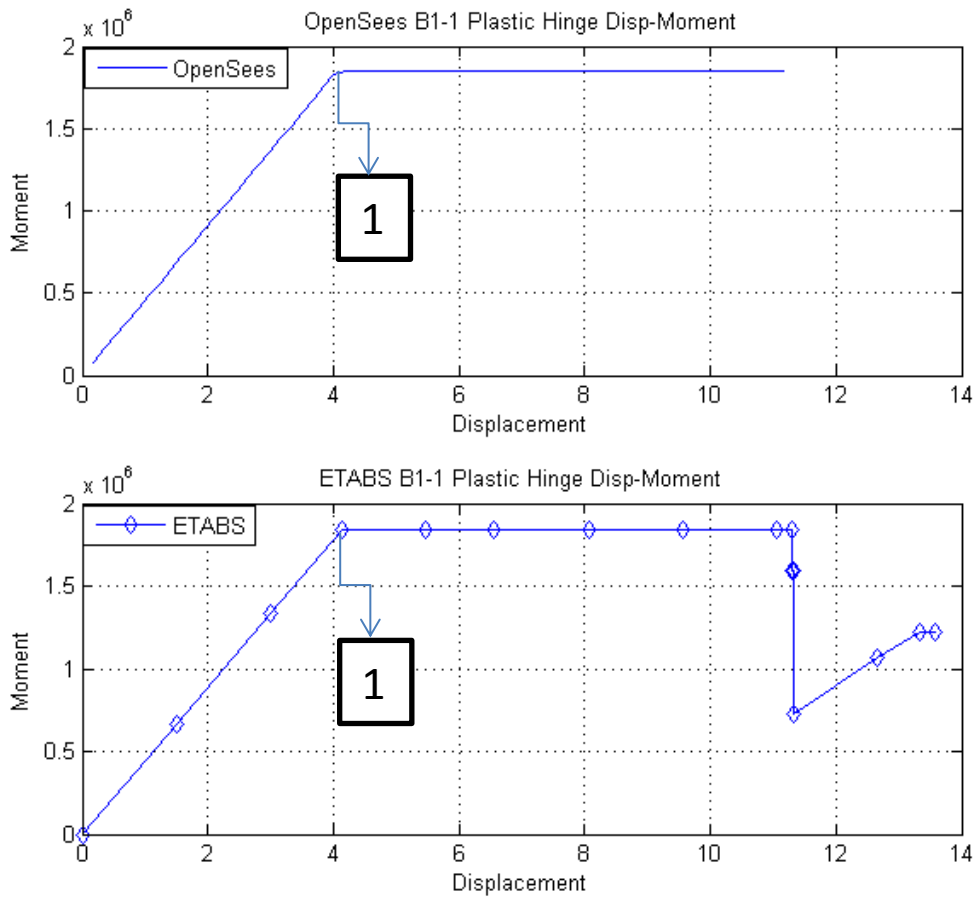


圖4.25 編號 B1-1梁彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

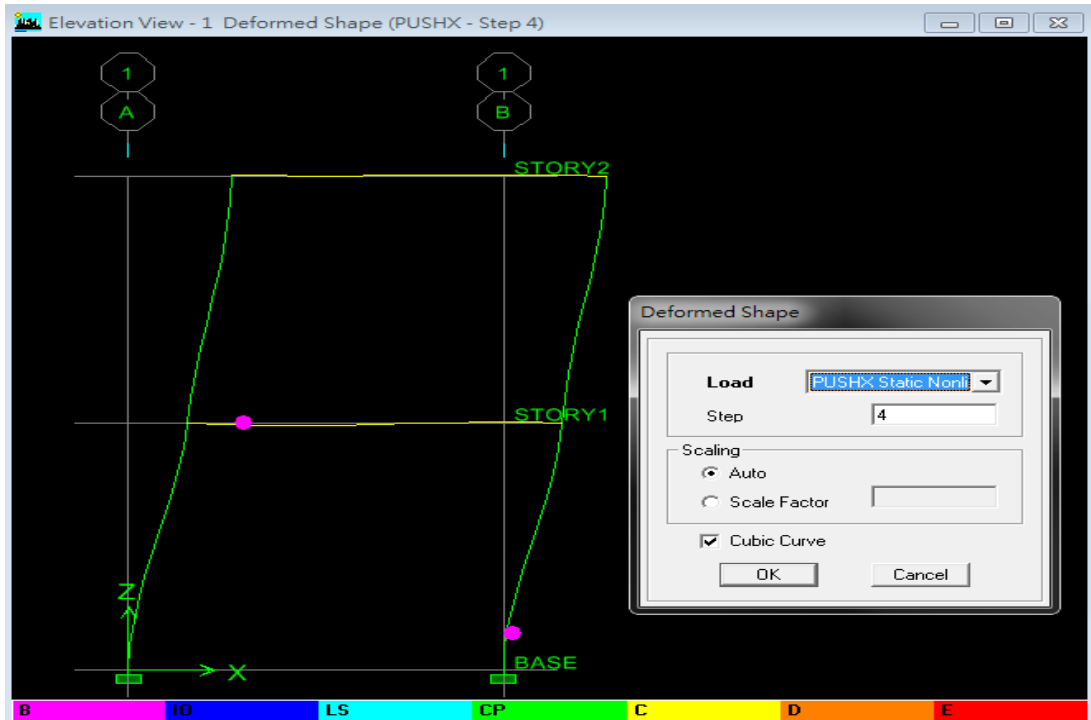


圖4.26 ETABS Step4 變形圖

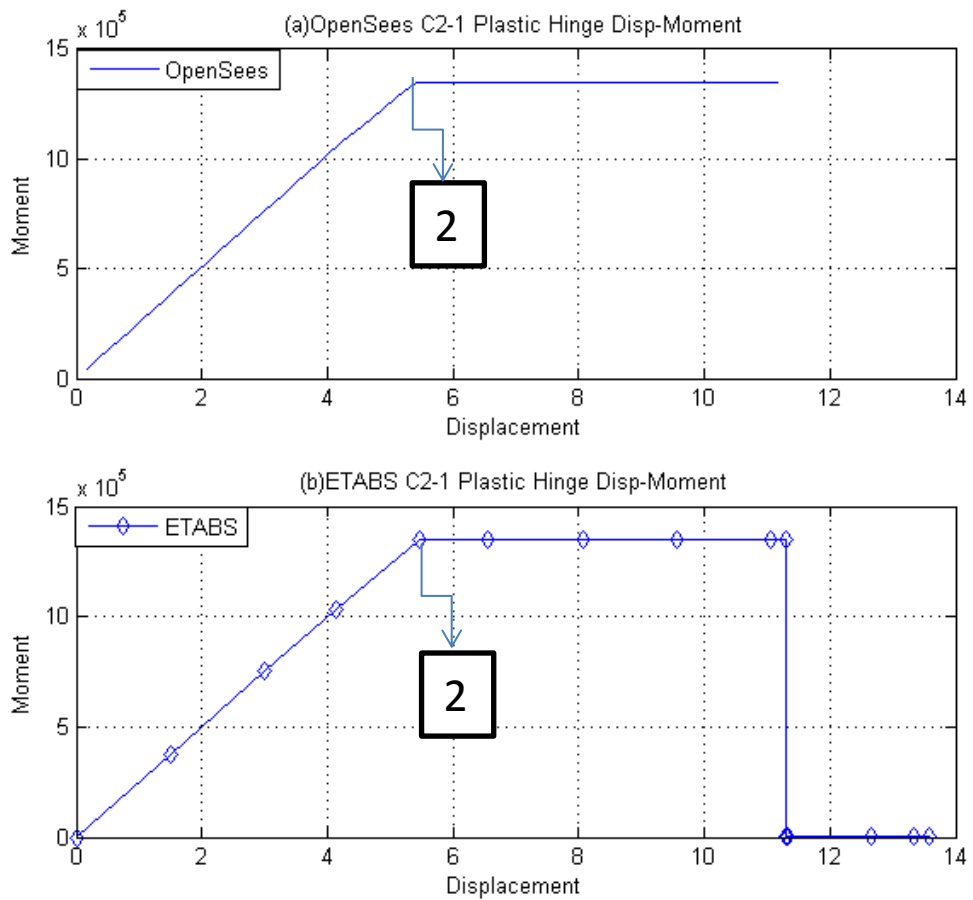


圖4.27 柱底端編號 C2-1彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

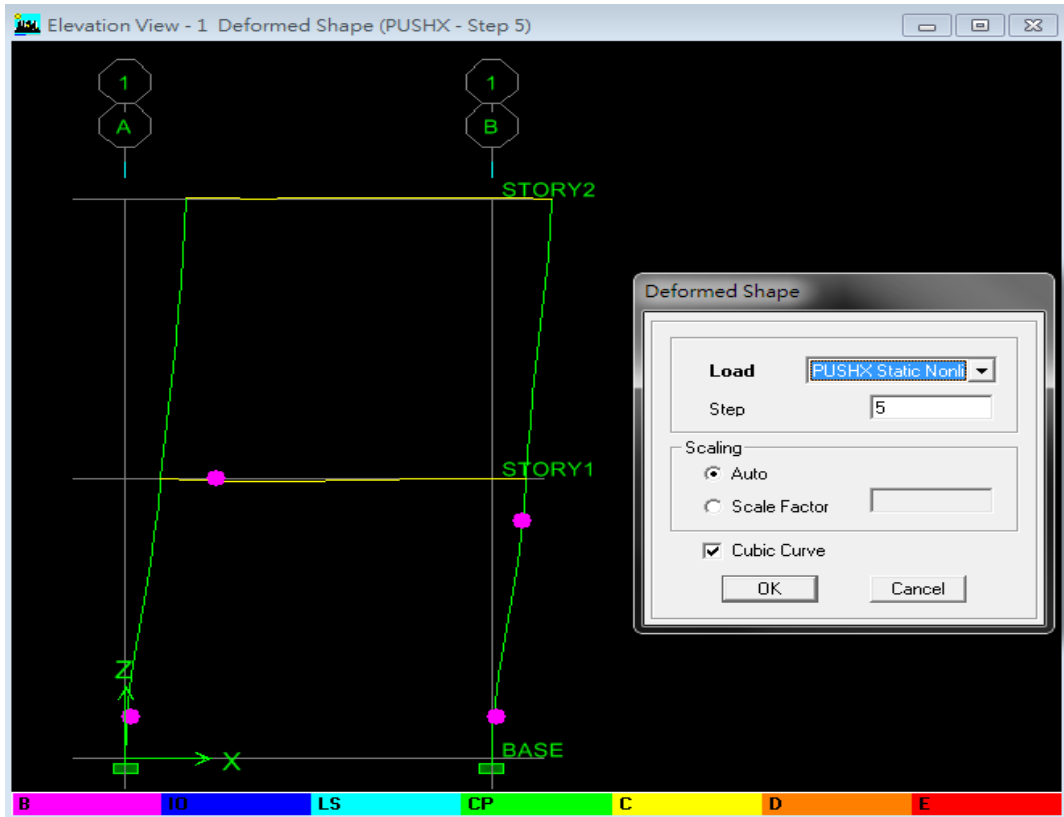


圖4.28 ETABS Step5 變形圖

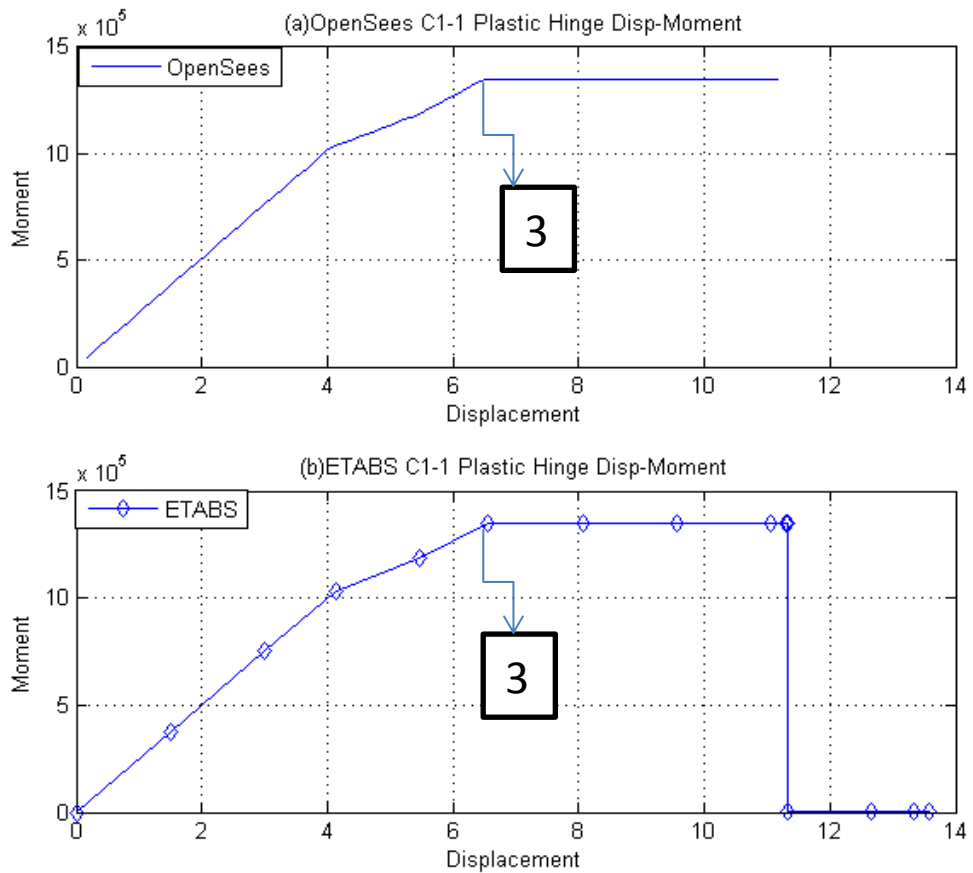


圖4.29 柱底端編號 C1-1 彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖



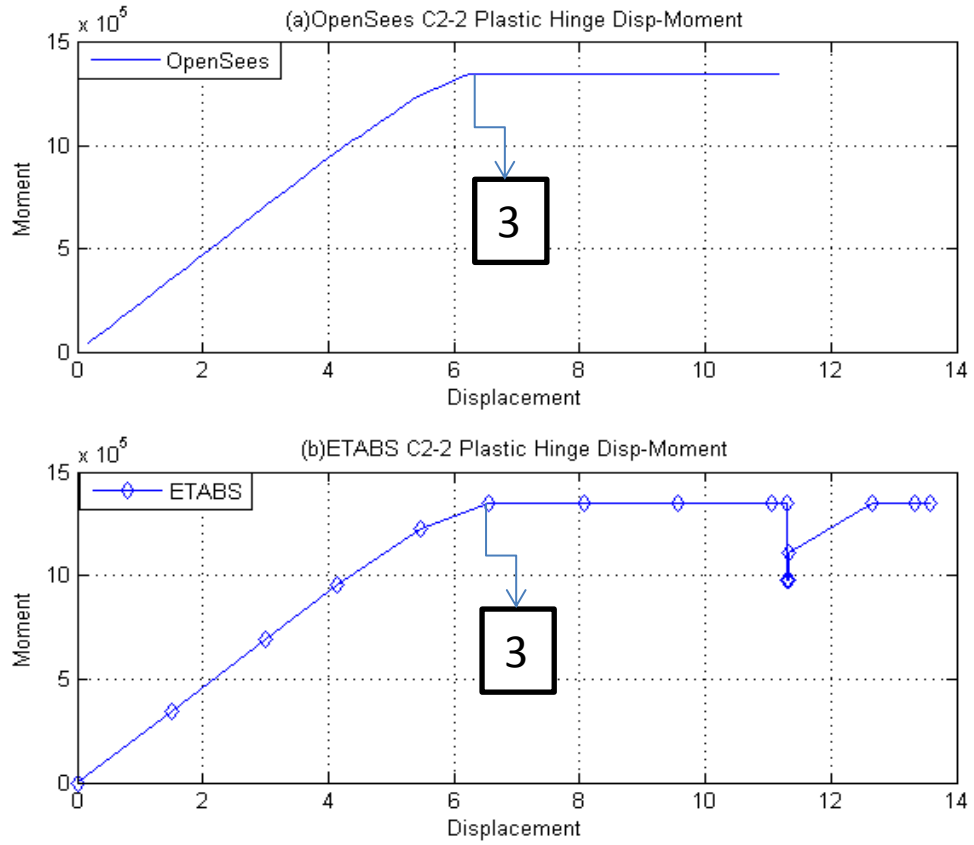


圖4.30 柱頂端編號 C2-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

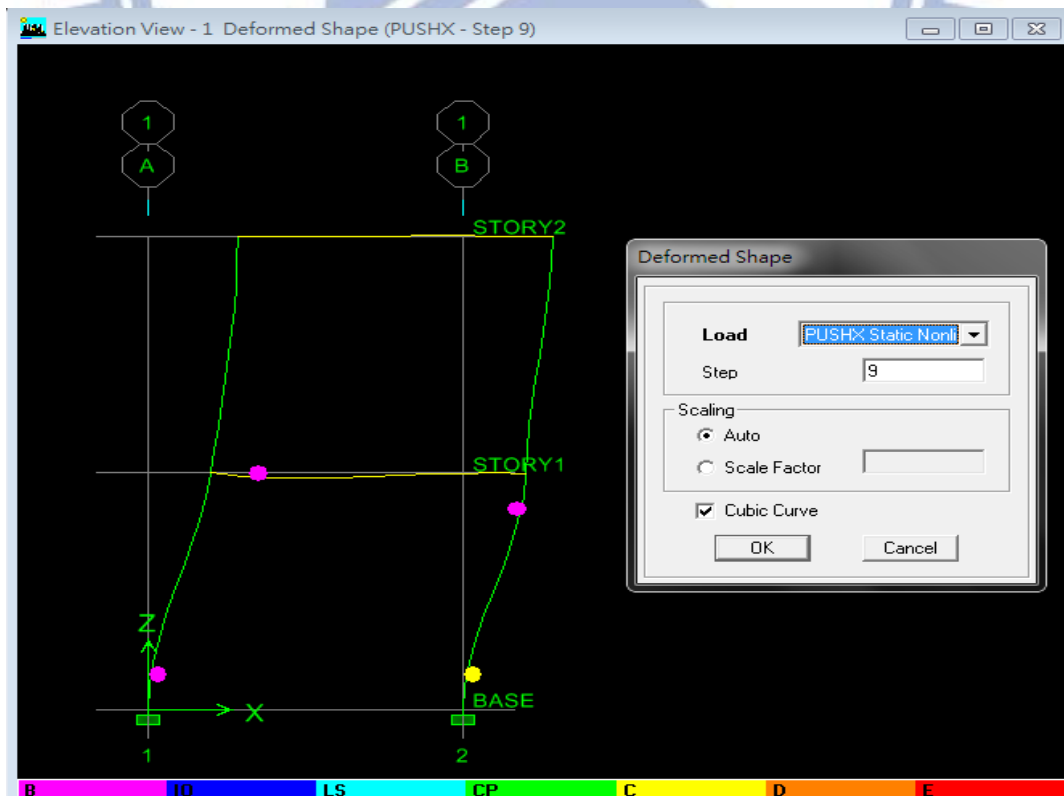


圖4.31 ETABS Step9 變形圖

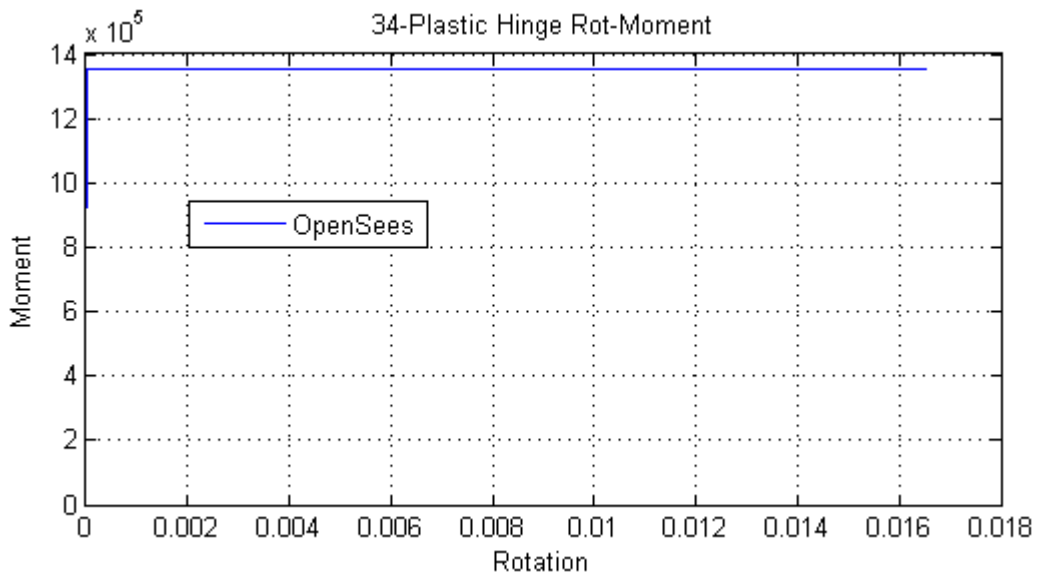


圖4. 32 OpenSees 編號 C2-1之柱彎矩塑性鉸 Moment-Rotation 圖

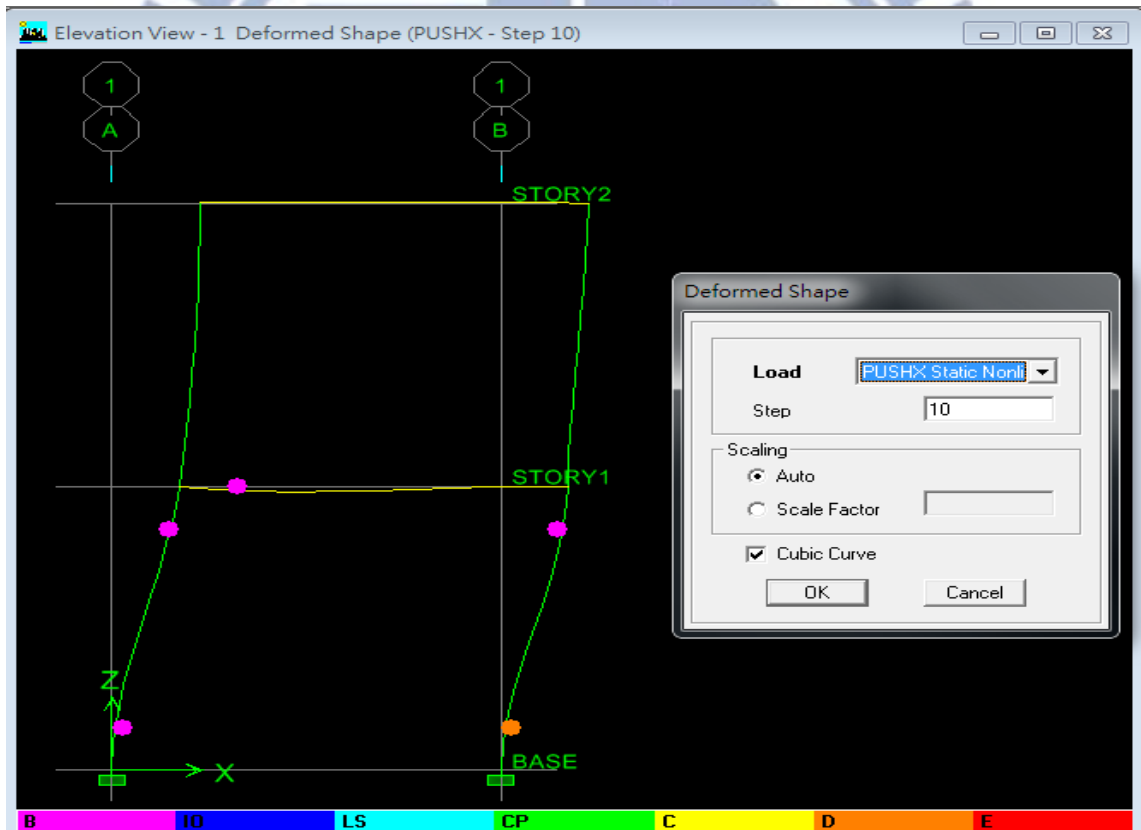


圖4. 33 ETABS Step10 變形圖

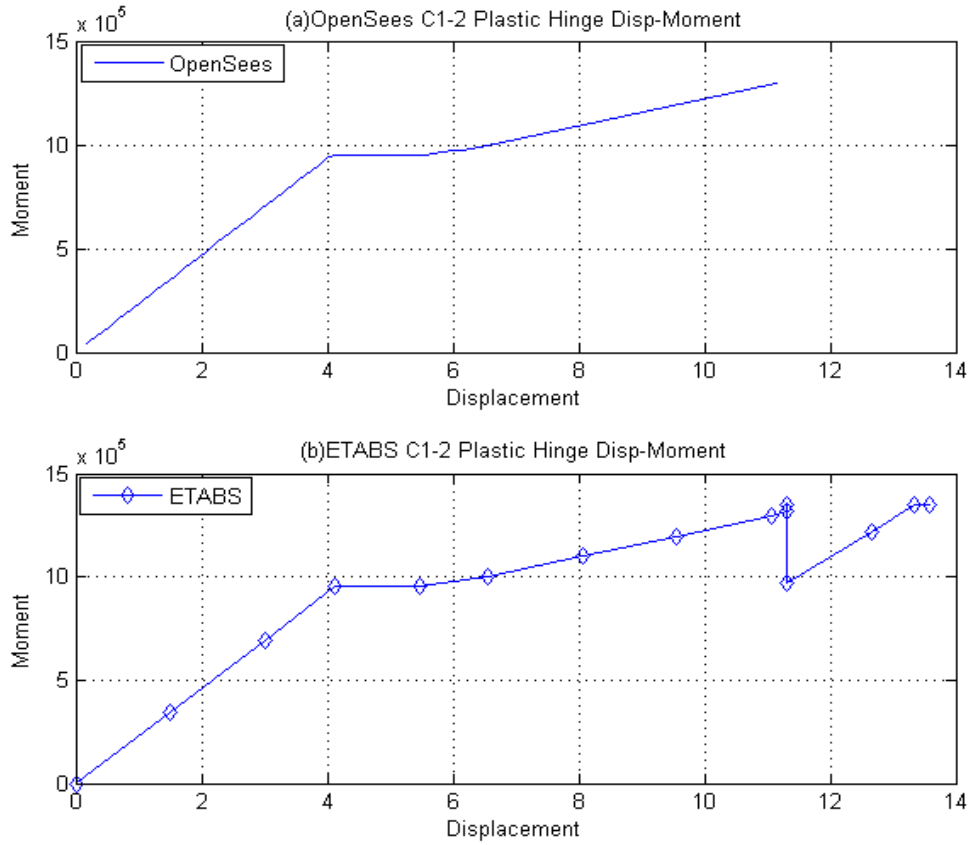


圖4.34 柱頂端編號 C1-2彎矩塑性鉸 側推位移與彎矩圖

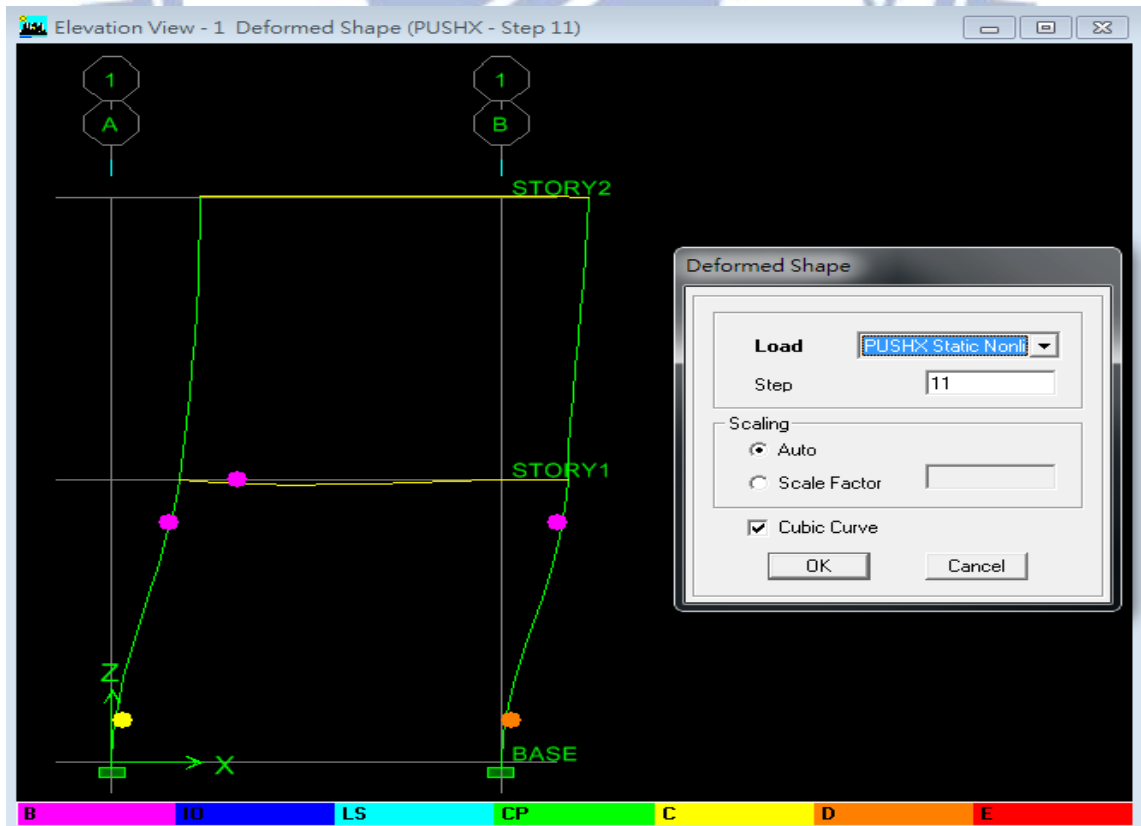


圖4.35 ETABS Step11 變形圖

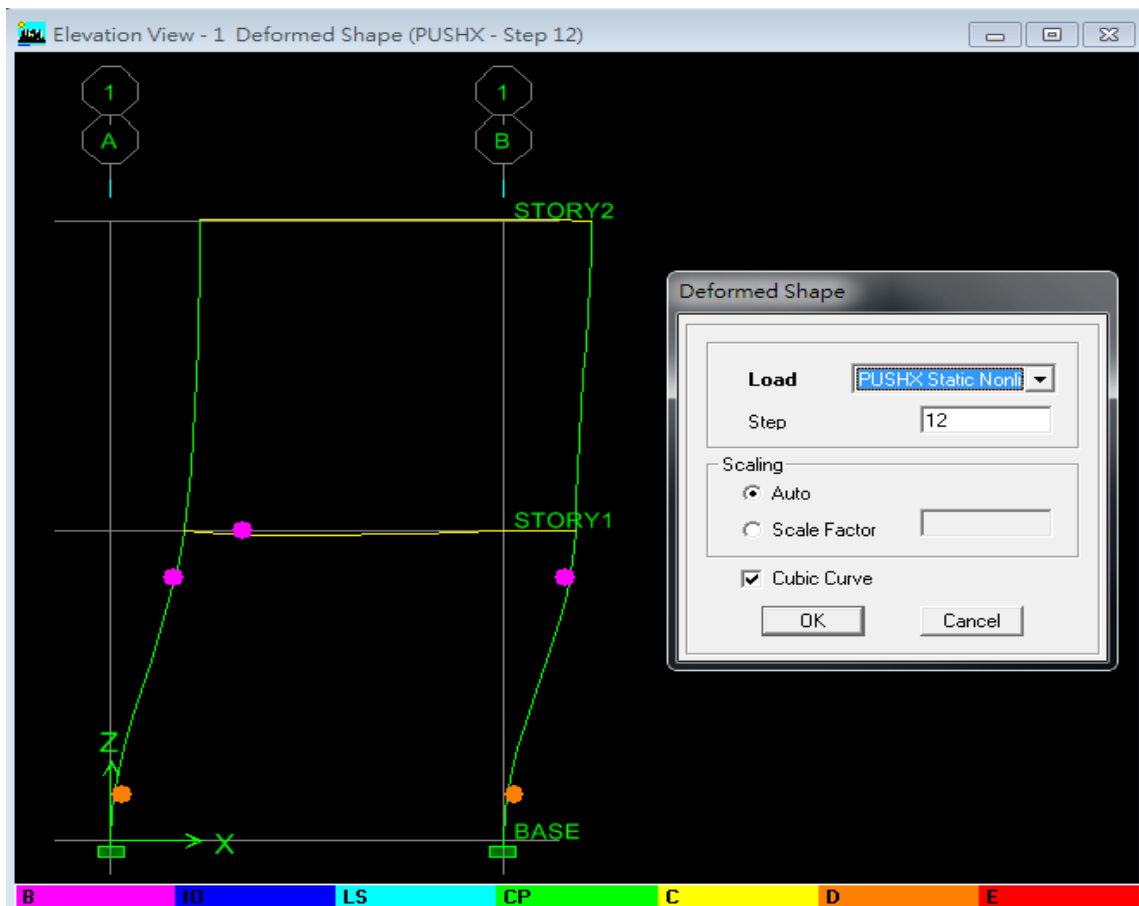


圖4. 36 ETABS Step12 變形圖





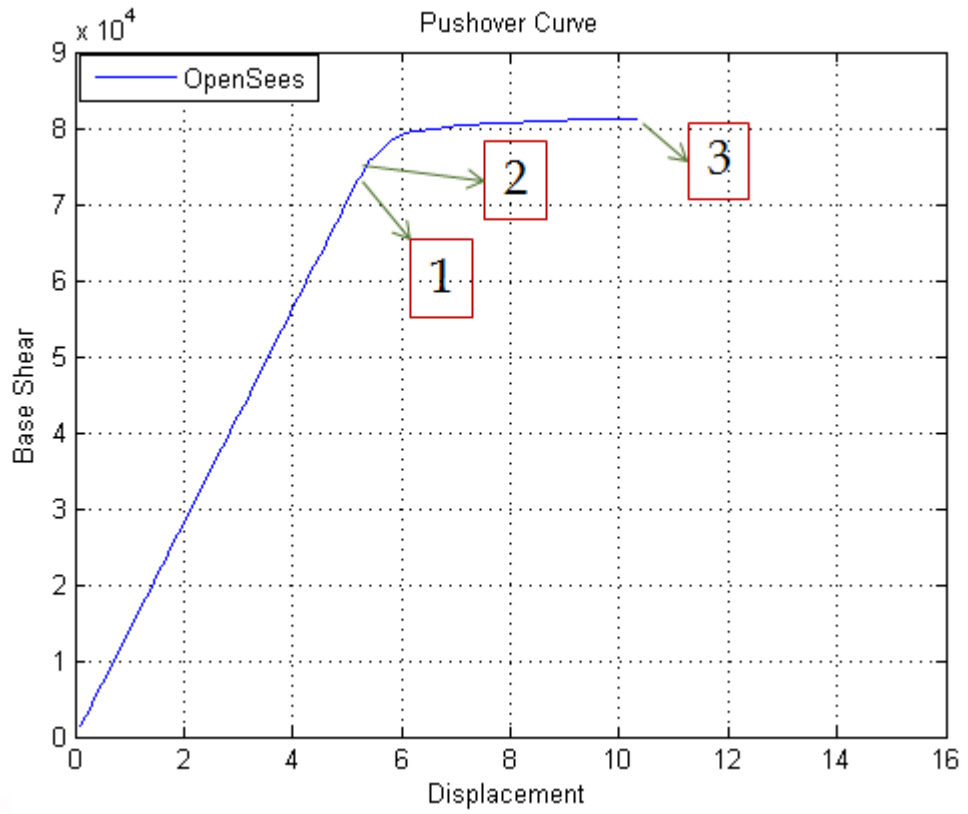


圖4. 38 OpenSees 2x8 Frame Pushover Curve

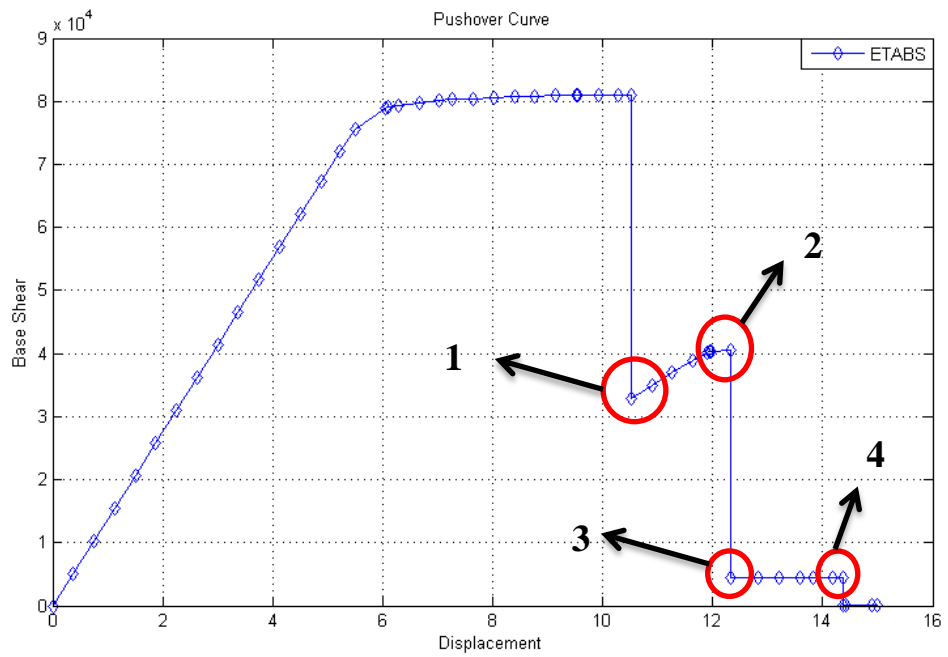


圖4. 39 ETABS 2x8 Frame Pushover Curve

Step	Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
0	0.0000	0.0000	68	0	0	0	0	0	0	0	68
1	0.3750	5176.8501	68	0	0	0	0	0	0	0	68
2	0.7500	10353.7656	68	0	0	0	0	0	0	0	68
3	1.1250	15530.6729	68	0	0	0	0	0	0	0	68
4	1.5000	20707.5957	68	0	0	0	0	0	0	0	68
5	1.8750	25884.5332	68	0	0	0	0	0	0	0	68
6	2.2500	31061.4883	68	0	0	0	0	0	0	0	68
7	2.6250	36238.4570	68	0	0	0	0	0	0	0	68
8	3.0000	41415.4453	68	0	0	0	0	0	0	0	68
9	3.3750	46592.4453	68	0	0	0	0	0	0	0	68
10	3.7500	51769.4648	68	0	0	0	0	0	0	0	68
11	4.1250	56946.5000	68	0	0	0	0	0	0	0	68
12	4.5000	62123.5508	68	0	0	0	0	0	0	0	68
13	4.8750	67300.6172	67	1	0	0	0	0	0	0	68
14	5.2211	72079.0625	61	7	0	0	0	0	0	0	68
15	5.5114	75488.4453	56	12	0	0	0	0	0	0	68
16	6.0591	78905.4766	53	15	0	0	0	0	0	0	68
17	6.0872	79015.8438	51	17	0	0	0	0	0	0	68
18	6.2861	79410.5234	51	17	0	0	0	0	0	0	68
19	6.6611	79758.9219	51	17	0	0	0	0	0	0	68
20	7.0361	80107.3203	50	18	0	0	0	0	0	0	68
21	7.2700	80324.6563	50	18	0	0	0	0	0	0	68
22	7.6450	80449.4766	50	18	0	0	0	0	0	0	68
23	8.0200	80574.2891	50	18	0	0	0	0	0	0	68
24	8.3950	80699.1094	50	18	0	0	0	0	0	0	68
25	8.7701	80823.9297	50	18	0	0	0	0	0	0	68
26	9.1451	80948.7422	50	18	0	0	0	0	0	0	68
27	9.5201	81073.5625	49	19	0	0	0	0	0	0	68
28	9.5435	81081.3516	49	19	0	0	0	0	0	0	68
29	9.9184	81081.3516	49	19	0	0	0	0	0	0	68
30	10.2934	81081.3516	49	18	0	0	0	1	0	0	68
31	10.5169	81081.3438	49	10	0	0	0	0	9	0	68
32	10.5171	32884.4453	49	10	0	0	0	0	9	0	68
33	10.8921	34901.6797	49	10	0	0	0	0	9	0	68
34	11.2671	36918.9180	49	10	0	0	0	0	9	0	68
35	11.6421	38936.1563	49	10	0	0	0	0	9	0	68
36	11.8920	40163.8633	49	10	0	0	0	0	9	0	68
37	11.9412	40275.4609	49	10	0	0	0	0	9	0	68
38	11.9737	40318.3164	49	10	0	0	0	0	9	0	68
39	12.3247	40544.6289	49	9	0	0	0	1	9	0	68
40	12.3346	40544.6250	49	2	0	0	0	0	17	0	68
41	12.3348	4506.1533	49	2	0	0	0	0	17	0	68
42	12.8323	4506.1558	49	2	0	0	0	0	17	0	68
43	13.2073	4506.1577	49	2	0	0	0	0	17	0	68
44	13.5823	4506.1597	49	2	0	0	0	0	17	0	68
45	13.8260	4506.1606	49	2	0	0	0	0	17	0	68
46	14.1738	4506.1626	49	2	0	0	0	0	17	0	68
47	14.1925	4506.1626	49	1	0	0	0	1	17	0	68
48	14.3726	4506.1636	49	1	0	0	0	0	18	0	68
49	14.3728	1.3097	49	1	0	0	0	0	18	0	68
50	14.4143	1.3098	49	1	0	0	0	0	18	0	68
51	14.8896	1.3126	49	1	0	0	0	0	18	0	68
52	15.0001	1.3128	68	0	0	0	0	0	0	0	68

圖4. 40 ETABS 2x8 Frame Pushover Curve table

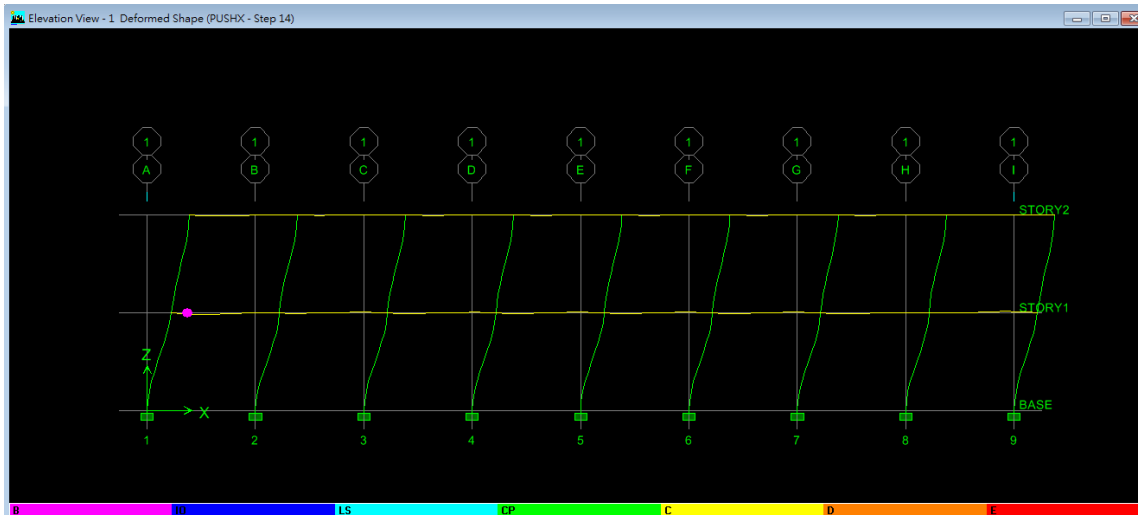


圖4.41 2x8 Frame ETABS Step14 變形圖

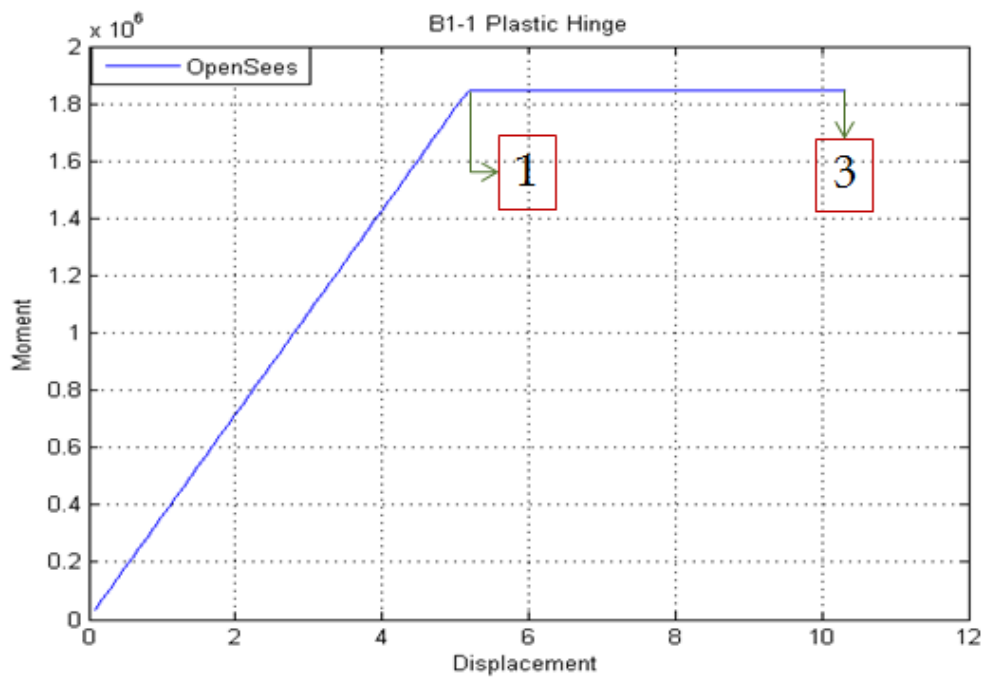


圖4.42 編號 B1-1梁正彎矩塑性鉸之側推位移與彎矩

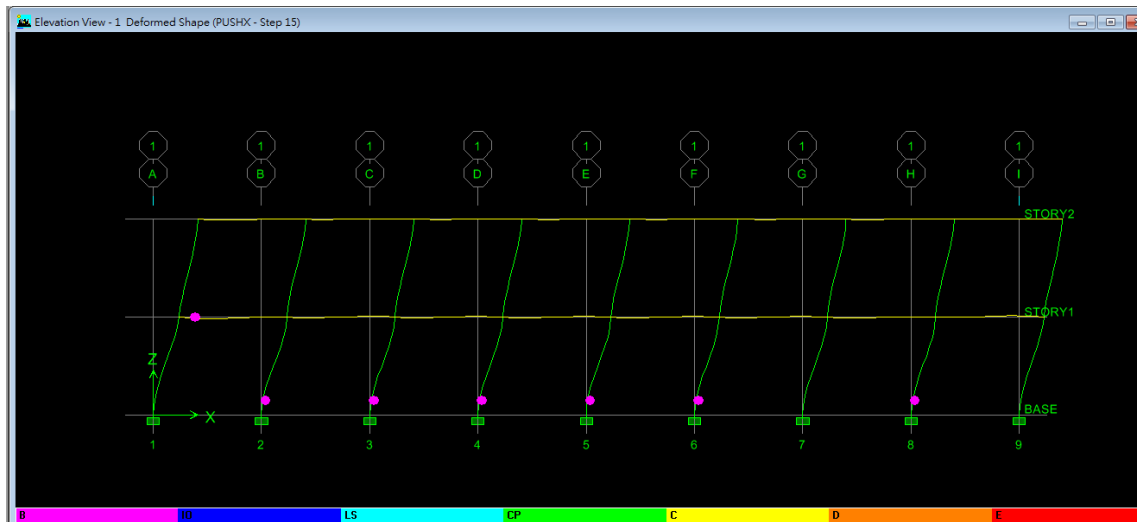


圖4.43 2x8 Frame ETABS Step15 變形圖





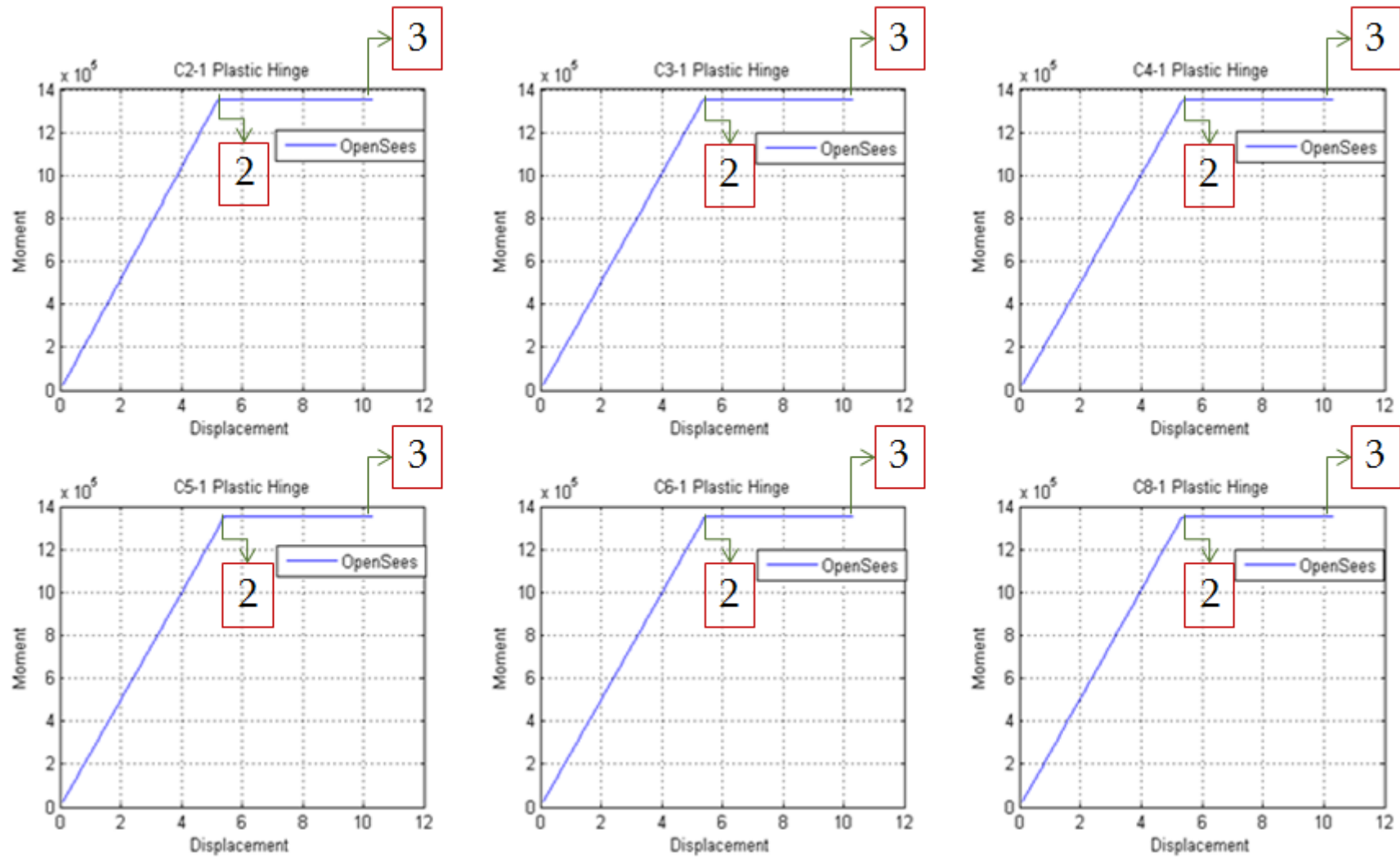


圖4.44 編號 C2~C6-1、C8-1 柱彎矩塑性鉸之側推位移與彎矩圖

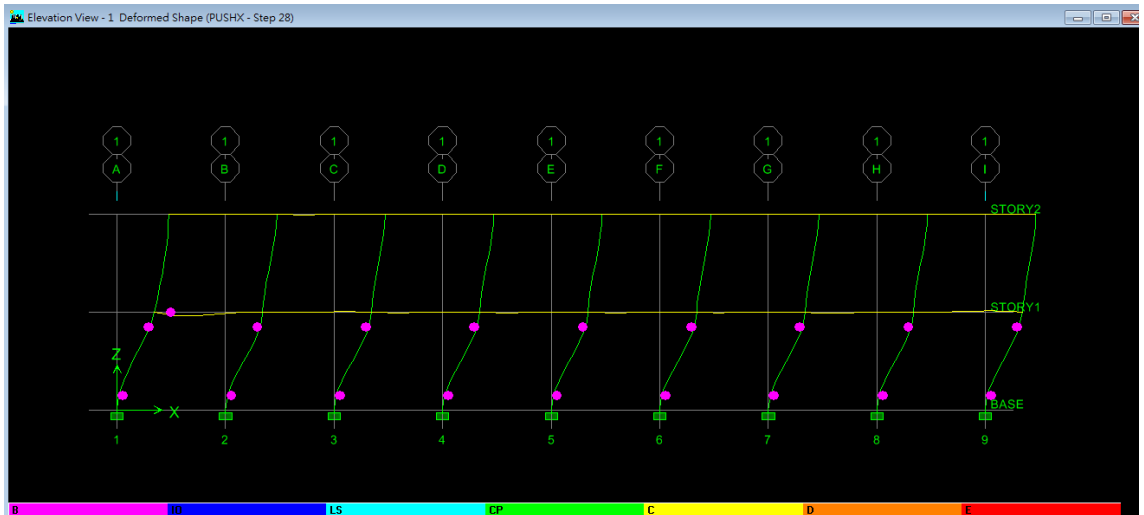


圖 4. 45 2x8 Frame ETABS Step28 變形圖

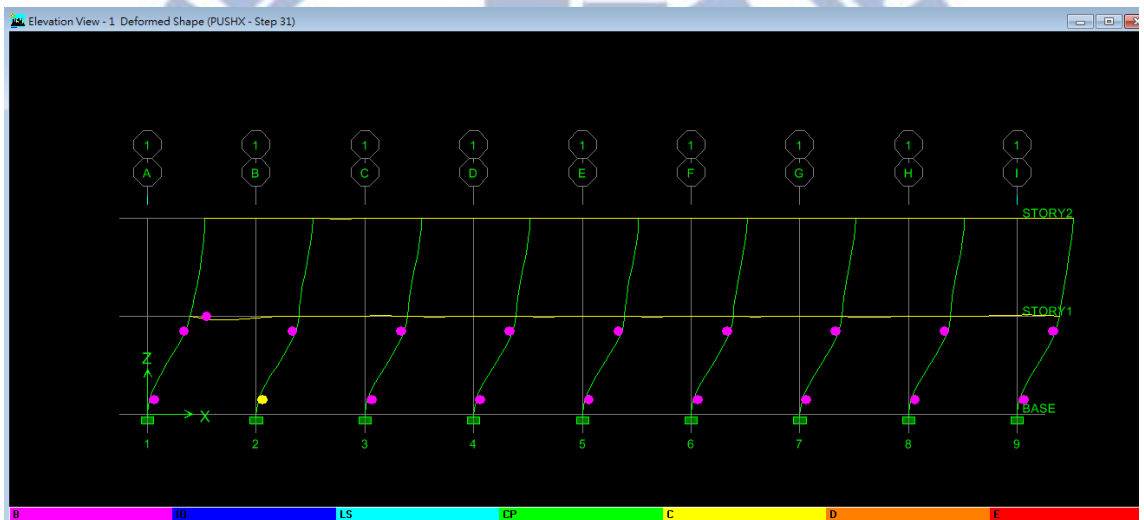


圖 4. 46 2x8 Frame ETABS Step31 變形圖

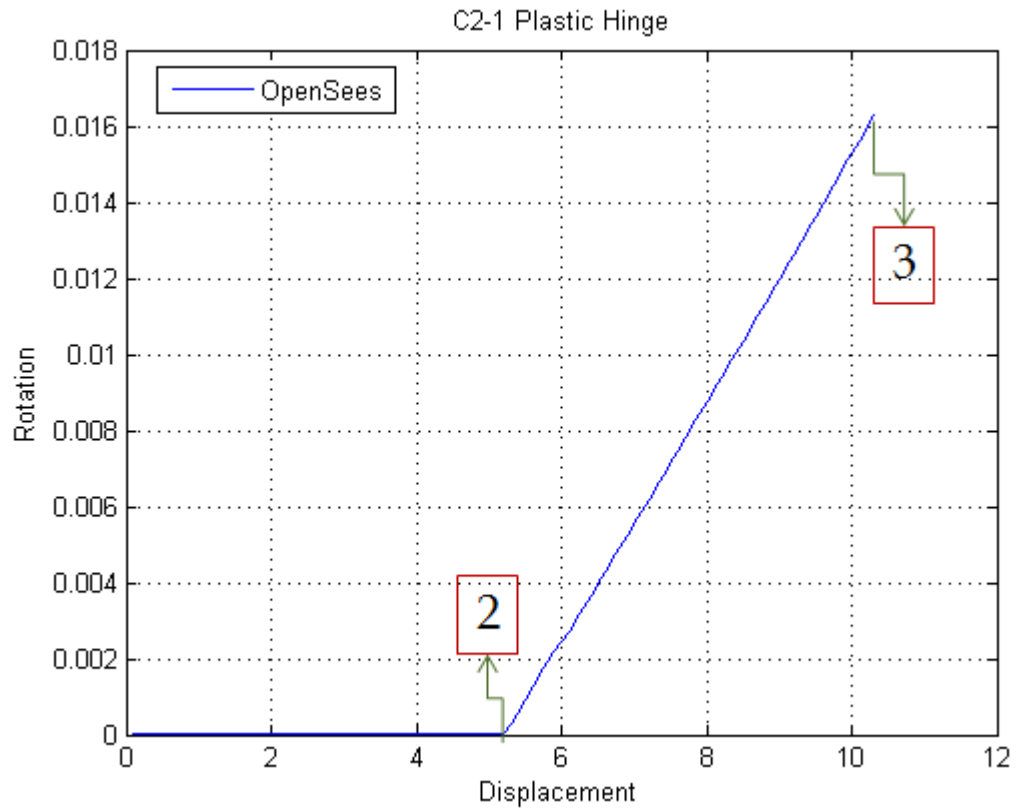


圖4.47 編號 C2-1柱之彎矩塑性鉸 轉角與側推位移

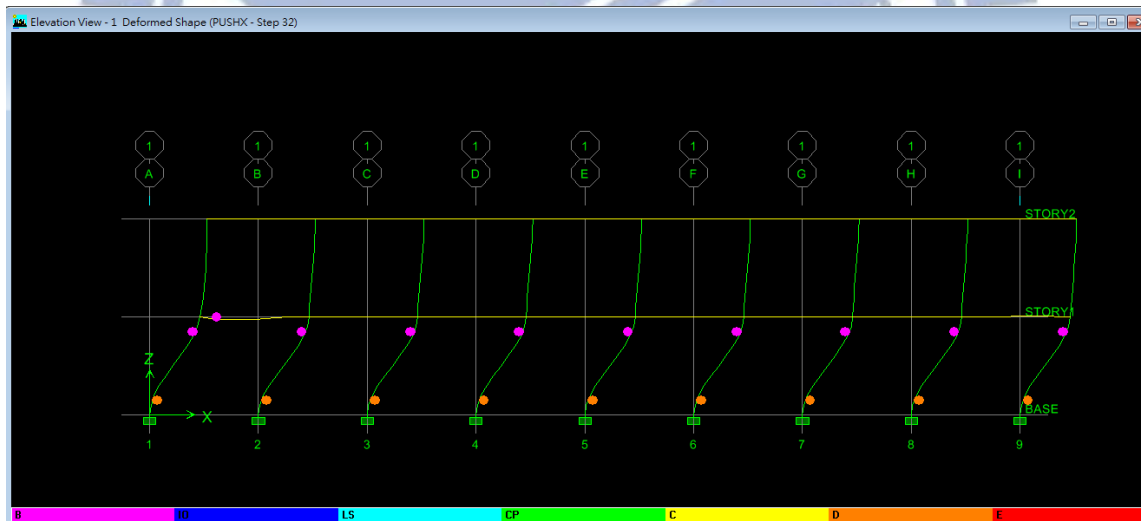


圖4.48 2x8 Frame ETABS Step32 變形圖

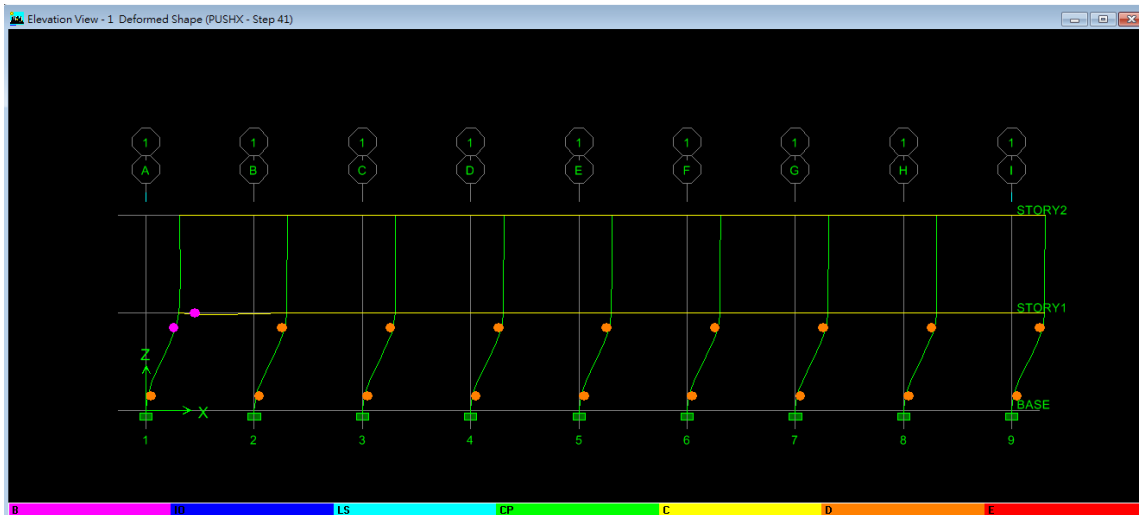


圖 4. 49 2x8 Frame ETABS Step41 變形圖

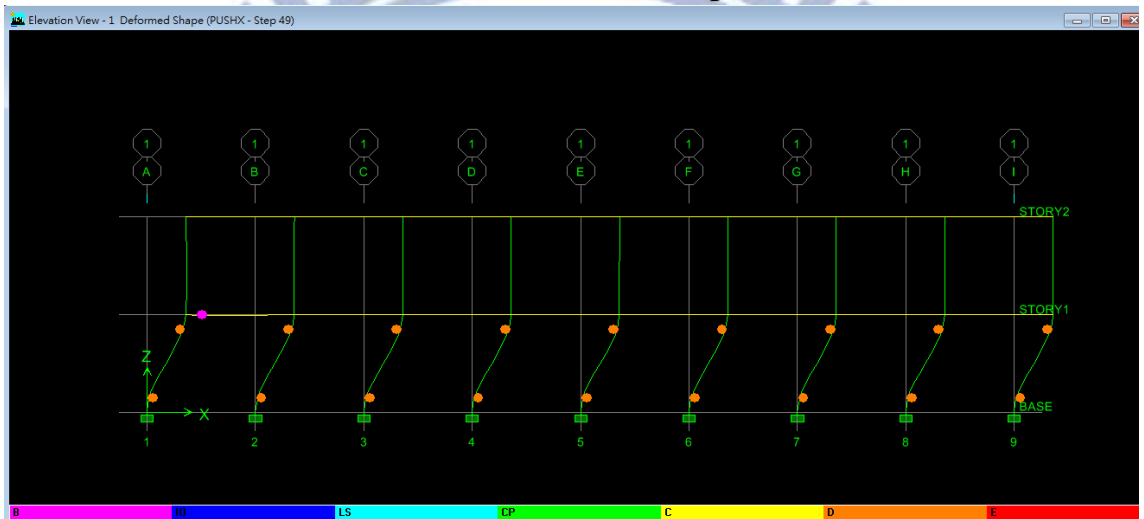


圖 4. 50 2x8 Frame ETABS Step49 變形圖

# 側推範例程式碼

1x1

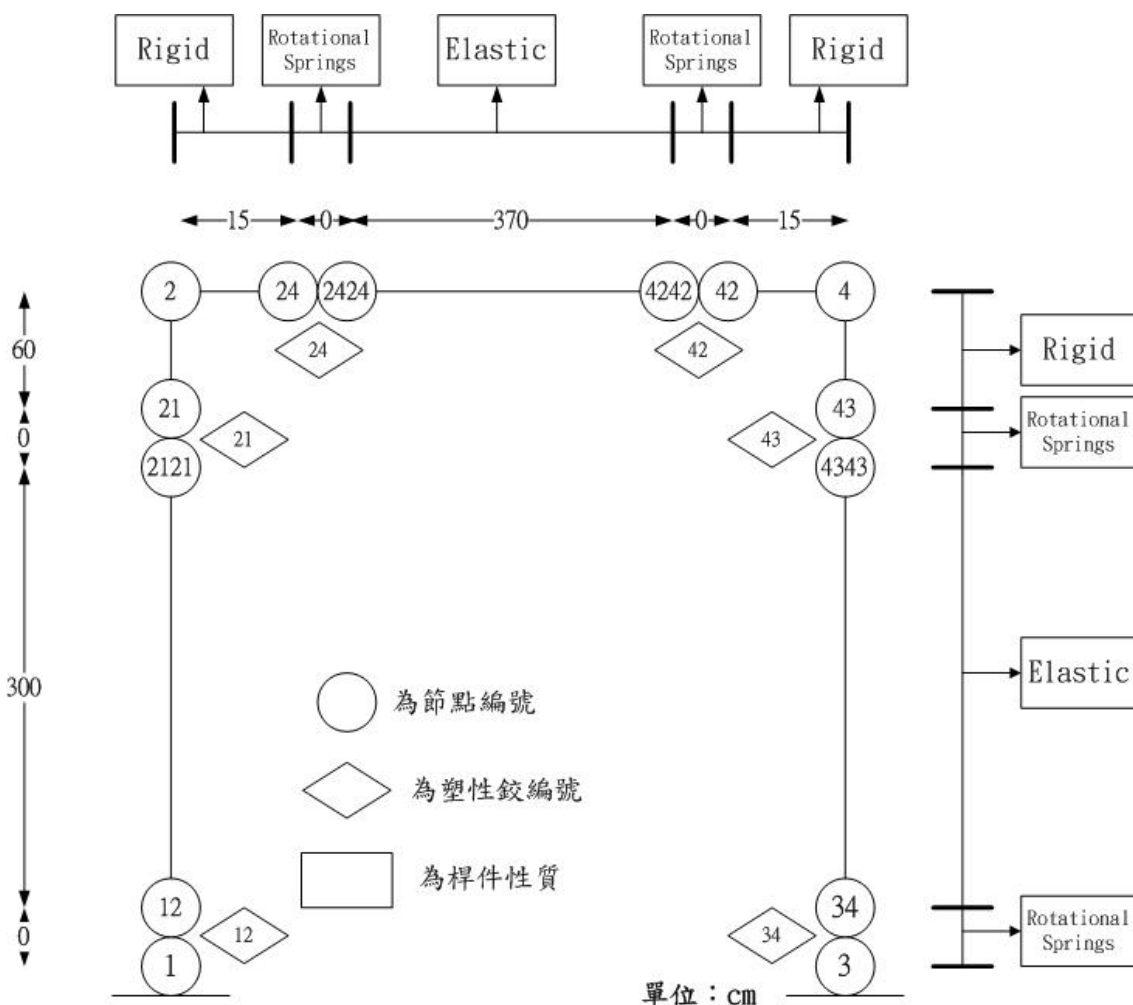


圖 1 OpenSees 1x1 模型 節點編號與桿件性質

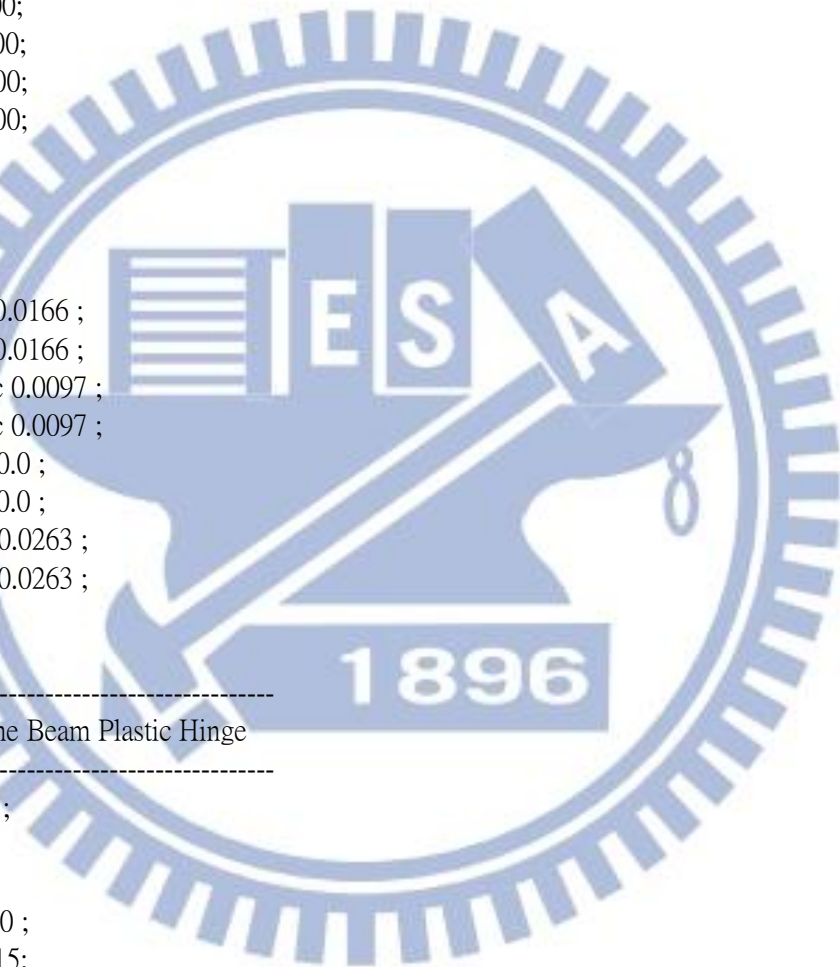
1. wipe
2. #-----
3. #           Concentrated -1X1-Frame
4. #-----
5. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
6. #-----
7. #           Define Parameter
8. #-----
9. #-----
10. #       Define Column Plastic Hinge
11. #-----
12. set Lc 360.0 ;
13. set bc 50.0 ;
14. set hc 30.0 ;
15. set fc\_c 160.0 ;
16. set offset\_c 60 ;



```

17. set Ec_c [expr 15000.0*sqrt($fc_c)] ;
18. set E_c 204000000000;
19. set Ac [expr $bc*$hc] ;
20. set IZc [expr $bc*pow($hc,3)/12.0] ;
21. set IZc_cr [expr 0.35*$IZc] ;
22. set PR_c [expr 1.0*$Lc] ;
23. set Ke_c [expr 6.0*$E_c*$IZc_cr/$PR_c] ;
24. set u_pc 0.0 ;
25. set u_nc 0.0 ;
26. set My_pc 1351510;
27. set My_nc -1351510;
28. set LS_c 1000;
29. set LC_c 1000;
30. set LA_c 1000;
31. set LK_c 1000;
32. set cS_c 1 ;
33. set cC_c 1 ;
34. set cA_c 1 ;
35. set cK_c 1 ;
36. set th_P_pc 0.0166 ;
37. set th_P_nc 0.0166 ;
38. set th_PC_pc 0.0097 ;
39. set th_PC_nc 0.0097 ;
40. set th_R_pc 0.0 ;
41. set th_R_nc 0.0 ;
42. set th_U_pc 0.0263 ;
43. set th_U_nc 0.0263 ;
44. set DP_c 1 ;
45. set DN_c 1 ;
46. #-----
47. #      Define Beam Plastic Hinge
48. #-----
49. set Lb 400.0 ;
50. set bb 30.0 ;
51. set hb 60.0 ;
52. set fc_b 160.0 ;
53. set offset_b 15;
54. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;
55. set E_b 204000000000
56. set Ab [expr $bb*$hb] ;
57. set IZb [expr $bb*pow($hb,3)/12.0] ;
58. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;
59. set PR_b [expr 1.0*$Lb] ;
60. set Ke_b [expr 6.0*$E_b*$IZb_cr/$PR_b] ;
61. set u_pb 0.0 ;
62. set u_nb 0.0 ;
63. set My_pb1 1845540;
64. set My_nb1 -1845540;

```



```

65. set My_pb2 4407730;
66. set My_nb2 -4407730;
67. set LS_b 1000;
68. set LC_b 1000;
69. set LA_b 1000;
70. set LK_b 1000;
71. set cS_b 1 ;
72. set cC_b 1 ;
73. set cA_b 1 ;
74. set cK_b 1 ;
75. set th_P_pb 0.02 ;
76. set th_P_nb 0.02 ;
77. set th_PC_pb 0.0001 ;
78. set th_PC_nb 0.0001 ;
79. set th_R_pb 0.2 ;
80. set th_R_nb 0.2 ;
81. set th_U_pb 0.03 ;
82. set th_U_nb 0.03 ;
83. set DP_b 1 ;
84. set DN_b 1 ;
85. #-----
86. #           Coordinates
87. #-----
88. node 1 0.0 0.0
89. node 2 0.0 360.0
90. node 3 400.0 0.0
91. node 4 400.0 360.0
92. #-----
93. node 12 0.0 0
94. node 21 0.0 [expr 360.0-$offset_c]
95. node 34 400.0 0
96. node 43 400.0 [expr 360.0-$offset_c]
97. #-----
98. node 24 [expr 0.0+$offset_b] 360.0
99. node 42 [expr 400.0-$offset_b] 360.0
100.
101. node 2121 0.0 [expr 360.0-$offset_c]
102. node 4343 400.0 [expr 360.0-$offset_c]
103. node 2424 [expr 0.0+$offset_b] 360.0
104. node 4242 [expr 400.0-$offset_b] 360.0
105. #-----
106. #           Boundary Conditions
107. #-----
108. fix 1 1 1 1
109. fix 3 1 1 1
110. #-----
111. #           Material Column
112. #-----

```

113. uniaxialMaterial Bilin 1 \$E\_c \$u\_pc \$u\_nc \$My\_pc \$My\_nc \$LS\_c \$LC\_c \$LA\_c \$LK\_c  
 \$cS\_c \$cC\_c \$cA\_c \$cK\_c \$th\_P\_pc \$th\_P\_nc \$th\_PC\_pc \$th\_PC\_nc \$th\_R\_pc \$th\_R\_nc  
 \$th\_U\_pc \$th\_U\_nc \$DP\_c \$DN\_c  
 114. #-----  
 115. #                   Material Beam  
 116. #-----  
 117. uniaxialMaterial Bilin 2 \$E\_b \$u\_pb \$u\_nb \$My\_pb1 \$My\_nb1 \$LS\_b \$LC\_b \$LA\_b \$LK\_b  
 \$cS\_b \$cC\_b \$cA\_b \$cK\_b \$th\_P\_pb \$th\_P\_nb \$th\_PC\_pb \$th\_PC\_nb \$th\_R\_pb \$th\_R\_nb  
 \$th\_U\_pb \$th\_U\_nb \$DP\_b \$DN\_b  
 118. uniaxialMaterial Bilin 3 \$E\_b \$u\_pb \$u\_nb \$My\_pb2 \$My\_nb2 \$LS\_b \$LC\_b \$LA\_b \$LK\_b  
 \$cS\_b \$cC\_b \$cA\_b \$cK\_b \$th\_P\_pb \$th\_P\_nb \$th\_PC\_pb \$th\_PC\_nb \$th\_R\_pb \$th\_R\_nb  
 \$th\_U\_pb \$th\_U\_nb \$DP\_b \$DN\_b  
 119.  
 120. #-----  
 121. #                   Geometric Transformation  
 122. #-----  
 123. geomTransf   PDelta 1  
 124. geomTransf   Linear 2  
 125. #-----  
 126. #                   Column Number and Element  
 127. #-----  
 128. #                   1221        3443  
 129. #-----  
 130. element elasticBeamColumn 1221 12 2121 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 131. element elasticBeamColumn 3443 34 4343 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 132. #rigid  
 133. element elasticBeamColumn 221 2 21 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 134. element elasticBeamColumn 443 4 43 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 135. #rigid  
 136. #-----  
 137. #                   Beam Number and   Element  
 138. #-----  
 139. #                                   2442  
 140. #-----  
 141. element elasticBeamColumn 2442 2424 4242 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 142. #rigid  
 143. element elasticBeamColumn 224 2 24 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 144. element elasticBeamColumn 442 4 42 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 145. #rigid  
 146. #-----  
 147. #                   Rotational Springs  
 148. #-----  
 149. element zeroLength 12 1 12 -mat 1 -dir 6  
 150. element zeroLength 21 21 2121 -mat 1 -dir 6  
 151. element zeroLength 24 24 2424 -mat 2 -dir 6  
 152. element zeroLength 34 3 34 -mat 1 -dir 6  
 153. element zeroLength 42 42 4242 -mat 3 -dir 6  
 154. element zeroLength 43 43 4343 -mat 1 -dir 6

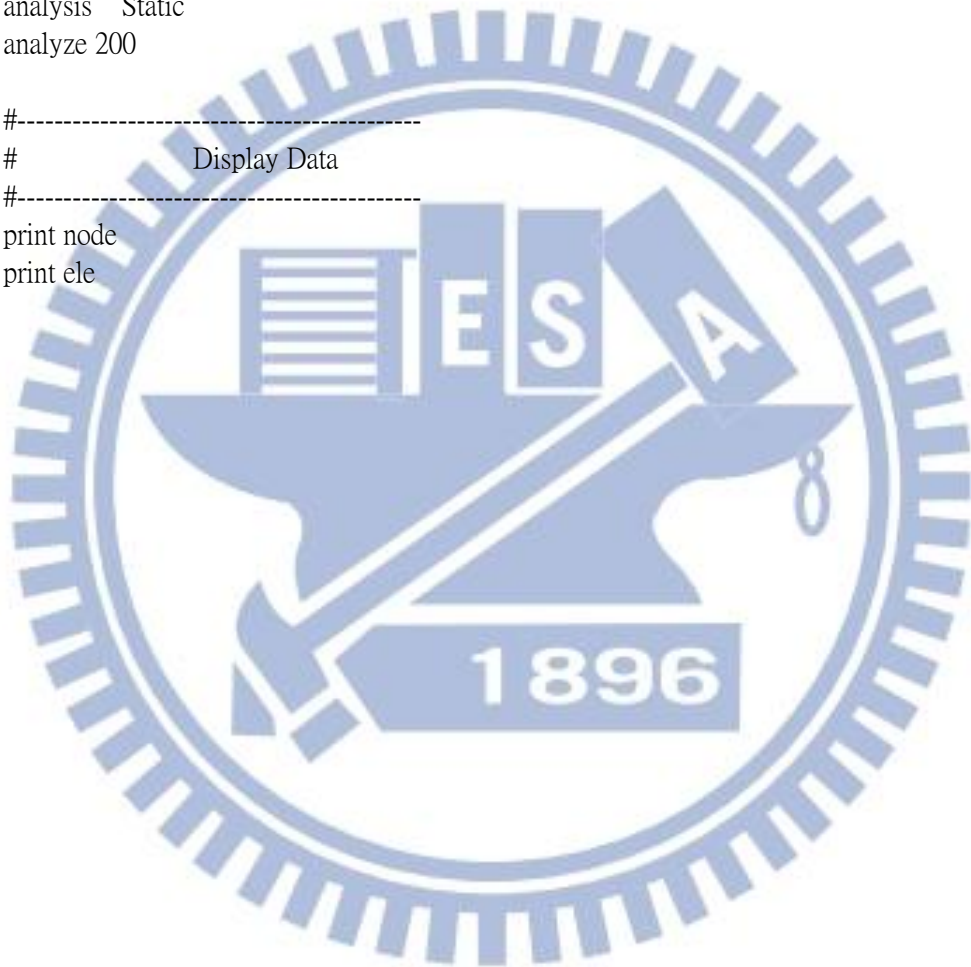
```

155. #-----
156. #           EqualDOF
157. #-----
158. #-----
159. equalDOF 1 12 1 2
160. equalDOF 21 2121 1 2
161. equalDOF 24 2424 1 2
162. equalDOF 3 34 1 2
163. equalDOF 42 4242 1 2
164. equalDOF 43 4343 1 2
165. #-----
166. #           Region Column
167. #-----
168. region 1 -ele 12 21 34 43
169. #-----
170. #           Region Beam
171. #-----
172. region 2 -ele 24 42
173. #-----
174. #           Recorder
175. #-----
176. recorder Node -file Node2.out -time -node 2 -dof 1 2 3 disp
177. recorder Element -file MomentC.out -region 1 force
178. recorder Element -file RotationC.out -region 1 deformation
179. recorder Element -file MomentB.out -region 2 force
180. recorder Element -file RotationB.out -region 2 deformation
181. #-----
182. #           Gravity
183. #-----
184. pattern Plain 1 Linear {
185. load 24 0 0 0
186. }
187. #-----
188. #           Gravity-Analysis
189. #-----
190. constraints Plain
191. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
192. integrator LoadControl +1.000000E-002
193. algorithm Newton
194. numberer Plain
195. system BandGeneral
196. analysis Static
197. analyze 0
198. loadConst -time 0.0
199. #-----
200. #           Lateral-Load
201. #-----
202. pattern Plain 2 Linear {

```



```
203. load 2 60000 0 0
204. }
205. #-----
206. #           Pushover-Analysis
207. #-----
208. constraints Plain
209. test EnergyIncr 1.0e-8 6 200
210. integrator DisplacementControl 2 1 0.05
211. algorithm Newton
212. numberer Plain
213. system BandGeneral
214. analysis Static
215. analyze 200
216.
217. #-----
218. #           Display Data
219. #-----
220. print node
221. print ele
```





## 2x1

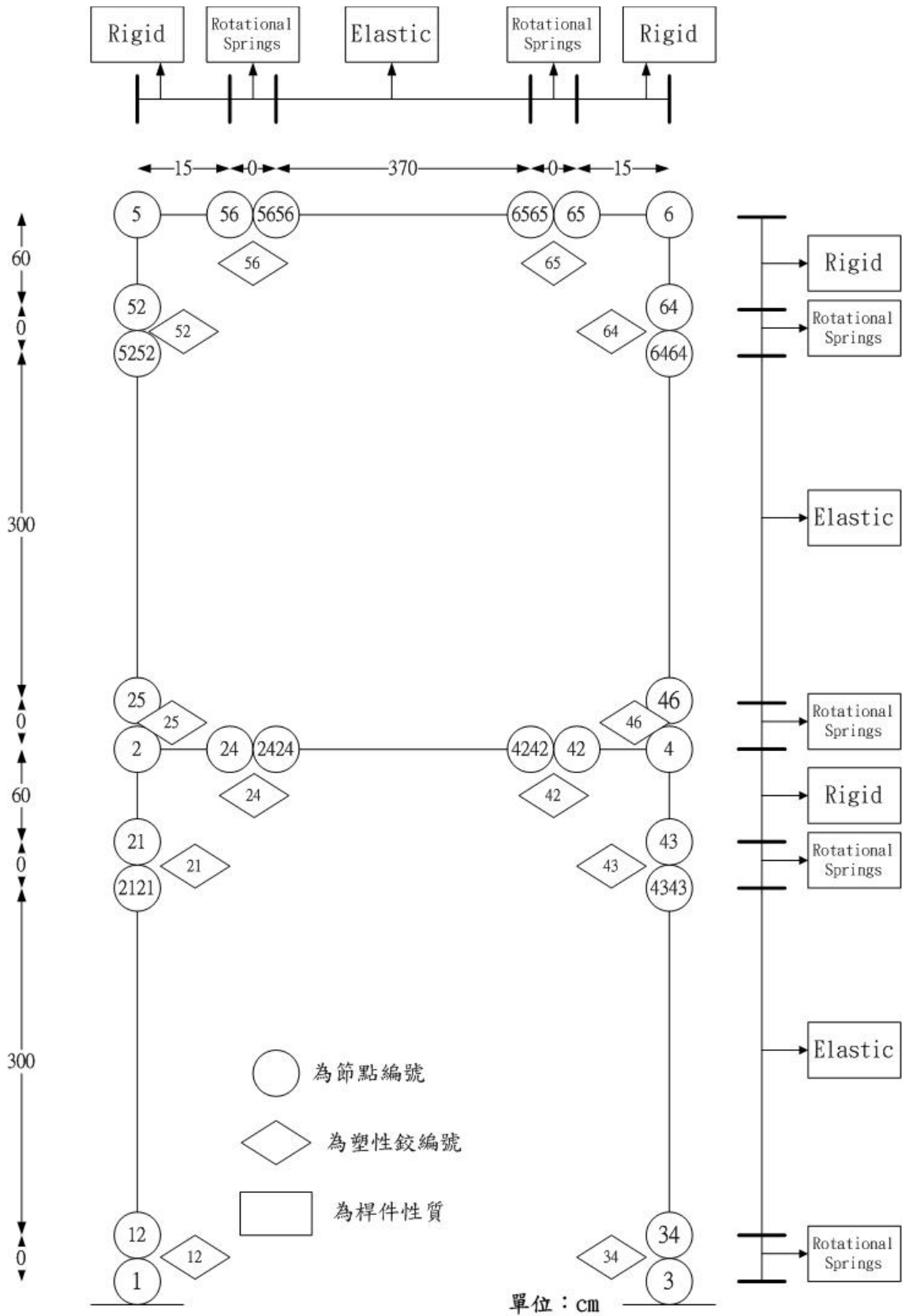


圖 2 OpenSees 2x1模型 節點編號與桿件性質

```

1. wipe
2. #-----
3. #           Concentrated -2X1-Frame
4. #-----
5. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
6. #-----
7. #           Define Parameter
8. #-----
9. #-----
10. #       Define Column Plastic Hinge
11. #-----
12. set Lc 360.0 ;
13. set bc 50.0 ;
14. set hc 30.0 ;
15. set fc_c 160.0 ;
16. set offset_c 0 ;
17. set Ec_c [expr 15000.0*sqrt($fc_c)] ;
18. set E_c 204000000000;
19. set Ac [expr $bc*$hc] ;
20. set IZc [expr $bc*pow($hc,3)/12.0] ;
21. set IZc_cr [expr 0.35*$IZc] ;
22. set PR_c [expr 1.0*$Lc] ;
23. set Ke_c [expr 6.0*$E_c*$IZc_cr/$PR_c] ;
24. set u_pc 0.0 ;
25. set u_nc 0.0 ;
26. set My_pc 1351510;
27. set My_nc -1351510;
28. set LS_c 1000;
29. set LC_c 1000;
30. set LA_c 1000;
31. set LK_c 1000;
32. set cS_c 1 ;
33. set cC_c 1 ;
34. set cA_c 1 ;
35. set cK_c 1 ;
36. set th_P_pc 0.0166 ;
37. set th_P_nc 0.0166 ;
38. set th_PC_pc 0.0097 ;
39. set th_PC_nc 0.0097 ;
40. set th_R_pc 0.0 ;
41. set th_R_nc 0.0 ;
42. set th_U_pc 0.0263 ;
43. set th_U_nc 0.0263 ;
44. set DP_c 1 ;
45. set DN_c 1 ;
46. #-----
47. #       Define Beam Plastic Hinge 1
48. #-----

```

```

49. set Lb 400.0 ;
50. set bb 30.0 ;
51. set hb 60.0 ;
52. set fc_b 160.0 ;
53. set offset_b 15;
54. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;
55. set E_b 204000000000
56. set Ab [expr $bb*$hb] ;
57. set IZb [expr $bb*pow($hb,3)/12.0] ;
58. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;
59. set PR_b [expr 1.0*$Lb] ;
60. set Ke_b [expr 6.0*$E_b*$IZb_cr/$PR_b] ;
61. set u_pb 0.0 ;
62. set u_nb 0.0 ;
63. set My_pb1 1845540;
64. set My_nb1 -1845540;
65. set LS_b 1000;
66. set LC_b 1000;
67. set LA_b 1000;
68. set LK_b 1000;
69. set cS_b 1 ;
70. set cC_b 1 ;
71. set cA_b 1 ;
72. set cK_b 1 ;
73. set th_P_pb 0.02 ;
74. set th_P_nb 0.02 ;
75. set th_PC_pb 0.00001 ;
76. set th_PC_nb 0.00001 ;
77. set th_R_pb 0.2 ;
78. set th_R_nb 0.2 ;
79. set th_U_pb 0.03 ;
80. set th_U_nb 0.03 ;
81. set DP_b 1 ;
82. set DN_b 1 ;
83. #-----
84. #      Define Beam Plastic Hinge 2
85. #-----
86. set My_pb2 4407730;
87. set My_nb2 -4407730;
88. #-----
89. #      Coordinates
90. #-----
91. node 1 0.0 0.0
92. node 2 0.0 360
93. node 3 400.0 0.0
94. node 4 400.0 360
95. node 5 0 720
96. node 6 400 720

```

```

97. #-----
98. #column plastic hinge
99. node 12 0.0 0
100. node 34 400.0 0
101. node 21 0.0 300
102. node 43 400.0 300
103. node 2121 0.0 300
104. node 4343 400.0 300
105. node 52 0 660
106. node 64 400 660
107. node 5252 0 660
108. node 6464 400 660
109. node 46 400 360
110. node 25 0 360
111.
112. #-----
113. #beam plastic hinge
114. node 24 [expr 0.0+$offset_b] 360.0
115. node 42 [expr 400.0-$offset_b] 360.0
116. node 56 [expr 0.0+$offset_b] 720.0
117. node 65 [expr 400.0-$offset_b] 720.0
118. node 2424 [expr 0.0+$offset_b] 360.0
119. node 4242 [expr 400.0-$offset_b] 360.0
120. node 5656 [expr 0.0+$offset_b] 720.0
121. node 6565 [expr 400.0-$offset_b] 720.0
122.
123. #-----
124. #          Boundary Conditions
125. #-----
126. fix 1 1 1 1
127. fix 3 1 1 1
128. #-----
129. #          Material Column
130. #-----
131. uniaxialMaterial Bilin 1 $E_c $u_pc $u_nc $My_pc $My_nc $LS_c $LC_c $LA_c
    $LK_c $cS_c $cC_c $cA_c $cK_c $th_P_pc $th_P_nc $th_PC_pc $th_PC_nc $th_R_pc
    $th_R_nc $th_U_pc $th_U_nc $DP_c $DN_c
132. #-----
133. #          Material Beam
134. #-----
135. uniaxialMaterial Bilin 2 $E_b $u_pb $u_nb $My_pb1 $My_nb1 $LS_b $LC_b $LA_b
    $LK_b $cS_b $cC_b $cA_b $cK_b $th_P_pb $th_P_nb $th_PC_pb $th_PC_nb $th_R_pb
    $th_R_nb $th_U_pb $th_U_nb $DP_b $DN_b
136.
137. uniaxialMaterial Bilin 3 $E_b $u_pb $u_nb $My_pb2 $My_nb2 $LS_b $LC_b $LA_b
    $LK_b $cS_b $cC_b $cA_b $cK_b $th_P_pb $th_P_nb $th_PC_pb $th_PC_nb $th_R_pb
    $th_R_nb $th_U_pb $th_U_nb $DP_b $DN_b
138.

```

139. #-----  
 140. #           Geometric Transformation  
 141. #-----  
 142. geomTransf   PDelta 1  
 143. geomTransf   Linear 2  
 144. #-----  
 145. #           Column Number and Element  
 146. #-----  
 147. #                   1221       3443  
 148. #-----  
 149. element elasticBeamColumn 1221 12 2121 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 150. element elasticBeamColumn 3443 34 4343 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 151. element elasticBeamColumn 2552 25 5252 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 152. element elasticBeamColumn 4664 46 6464 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 153. #rigid  
 154. element elasticBeamColumn 221 2 21 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 155. element elasticBeamColumn 443 4 43 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 156.  
 157. element elasticBeamColumn 664 6 64 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 158. element elasticBeamColumn 552 5 52 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 159. #rigid  
 160. #-----  
 161. #           Beam Number and   Element  
 162. #-----  
 163. #                   2442  
 164. #-----  
 165. element elasticBeamColumn 2442 2424 4242 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 166. element elasticBeamColumn 5665 5656 6565 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 167. #rigid  
 168. element elasticBeamColumn 224 2 24 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 169. element elasticBeamColumn 442 4 42 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 170. element elasticBeamColumn 556 5 56 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 171. element elasticBeamColumn 665 6 65 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 172. #rigid  
 173. #-----  
 174. #                   Rotational Springs  
 175. #-----  
 176. element zeroLength 112 1 12 -mat 1 -dir 6  
 177. element zeroLength 212121 21 2121 -mat 1 -dir 6  
 178. element zeroLength 242424 24 2424 -mat 2 -dir 6  
 179. element zeroLength 334 3 34 -mat 1 -dir 6  
 180. element zeroLength 424242 42 4242 -mat 3 -dir 6  
 181. element zeroLength 434343 43 4343 -mat 1 -dir 6  
 182. element zeroLength 225 2 25 -mat 1 -dir 6  
 183. element zeroLength 525252 52 5252 -mat 1 -dir 6  
 184. element zeroLength 446 4 46 -mat 1 -dir 6  
 185. element zeroLength 646464 64 6464 -mat 1 -dir 6  
 186. element zeroLength 565656 56 5656 -mat 2 -dir 6



```

187. element zeroLength 656565 65 6565 -mat 3 -dir 6
188. #-----
189. #           EqualDOF
190. #-----
191. equalDOF 5 6 1
192. equalDOF 2 4 1
193. #-----
194. equalDOF 1 12 1 2
195. equalDOF 21 2121 1 2
196. equalDOF 24 2424 1 2
197. equalDOF 3 34 1 2
198. equalDOF 42 4242 1 2
199. equalDOF 43 4343 1 2
200.
201. equalDOF 2 25 1 2 3
202. equalDOF 4 46 1 2 3
203. equalDOF 52 5252 1 2
204. equalDOF 64 6464 1 2
205. equalDOF 56 5656 1 2
206. equalDOF 65 6565 1 2
207.
208. equalDOF 21 2 3
209. equalDOF 24 2 3
210. equalDOF 43 4 3
211. equalDOF 42 4 3
212. equalDOF 56 5 3
213. equalDOF 52 5 3
214. equalDOF 64 6 3
215. equalDOF 65 6 3
216. #-----
217. #           Region Column
218. #-----
219. region 1 -ele 112 212121 334 434343 225 525252 446 646464
220. #-----
221. #           Region Beam
222. #-----
223. region 2 -ele 242424 424242 565656 656565
224. #-----
225. #           Recorder
226. #-----
227. recorder Node -file Node5.out -time -node 5 -dof 1 2 3 disp
228. recorder Element -file MomentC.out -region 1 force
229. recorder Element -file RotationC.out -region 1 deformation
230. recorder Element -file MomentB.out -region 2 force
231. recorder Element -file RotationB.out -region 2 deformation
232. #-----
233. #           Gravity
234. #-----

```

```

235. pattern Plain 1 Linear {
236. load 24 0 0 0
237. }
238. #-----
239. #           Gravity-Analysis
240. #-----
241. constraints Plain
242. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
243. integrator LoadControl +1.000000E-002
244. algorithm NewtonLineSearch
245. numberer Plain
246. system BandGeneral
247. analysis Static
248. analyze 0
249. loadConst -time 0.0
250. #-----
251. #           Lateral-Load
252. #-----
253. pattern Plain 2 Linear {
254. load 5 60000 0 0
255. load 2 30000 0 0
256. }
257. #-----
258. #           Pushover-Analysis
259. #-----
260. constraints Plain
261. test EnergyIncr +1.000000E-008 1000 0 0
262. integrator DisplacementControl 2 1 0.1
263. algorithm Newton
264. numberer Plain
265. system BandGeneral
266. analysis Static
267. analyze 150
268.
269. #-----
270. #           Display Data
271. #-----

```

## 2x8

```
1. wipe
2. #-----
3. #           Concentrated -1X1-Frame
4. #-----
5. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
6. #-----
7. #           Define Parameter
8. #-----
9. #-----
10. #       Define Column Plastic Hinge
11. #-----
12. set Lc 360.0 ;
13. set bc 50.0 ;
14. set hc 30.0 ;
15. set fc_c 160.0 ;
16. set offset_c 60 ;
17. set Ec_c [expr 15000.0*sqrt($fc_c)] ;
18. set E_c 204000000000;
19. set Ac [expr $bc*$hc] ;
20. set IZc [expr $bc*pow($hc,3)/12.0] ;
21. set IZc_cr [expr 0.35*$IZc] ;
22. set PR_c [expr 1.0*$Lc] ;
23. set Ke_c [expr 6.0*$E_c*$IZc_cr/$PR_c] ;
24. set u_pc 0.0 ;
25. set u_nc 0.0 ;
26. set My_pc 1351510;
27. set My_nc -1351510;
28. set LS_c 1000;
29. set LC_c 1000;
30. set LA_c 1000;
31. set LK_c 1000;
32. set cS_c 1 ;
33. set cC_c 1 ;
34. set cA_c 1 ;
35. set cK_c 1 ;
36. set th_P_pc 0.0166 ;
37. set th_P_nc 0.0166 ;
38. set th_PC_pc 0.0097 ;
39. set th_PC_nc 0.0097 ;
40. set th_R_pc 0.0 ;
41. set th_R_nc 0.0 ;
42. set th_U_pc 0.0263 ;
43. set th_U_nc 0.0263 ;
44. set DP_c 1 ;
45. set DN_c 1 ;
46. #-----
```

```

47. #      Define Beam Plastic Hinge 1
48. #-----
49. set Lb 400.0 ;
50. set bb 30.0 ;
51. set hb 60.0 ;
52. set fc_b 160.0 ;
53. set offset_b 15;
54. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;
55. set E_b 204000000000
56. set Ab [expr $bb*$hb] ;
57. set IZb [expr $bb*pow($hb,3)/12.0] ;
58. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;
59. set PR_b [expr 1.0*$Lb] ;
60. set Ke_b [expr 6.0*$E_b*$IZb_cr/$PR_b] ;
61. set u_pb 0.0 ;
62. set u_nb 0.0 ;
63. set My_pb1 1845540;
64. set My_nb1 -1845540;
65. set LS_b 1000;
66. set LC_b 1000;
67. set LA_b 1000;
68. set LK_b 1000;
69. set cS_b 1 ;
70. set cC_b 1 ;
71. set cA_b 1 ;
72. set cK_b 1 ;
73. set th_P_pb 0.02 ;
74. set th_P_nb 0.02 ;
75. set th_PC_pb 0.00001 ;
76. set th_PC_nb 0.00001 ;
77. set th_R_pb 0.2 ;
78. set th_R_nb 0.2 ;
79. set th_U_pb 0.03 ;
80. set th_U_nb 0.03 ;
81. set DP_b 1 ;
82. set DN_b 1 ;
83. #-----
84. #      Define Beam Plastic Hinge 2
85. #-----
86. set My_pb2 4407730;
87. set My_nb2 -4407730;
88. #-----
89. #      Coordinates
90. #-----
91. #C1
92. node 1 0 0
93. node 2 0 360
94. node 3 0 720

```



95. #plastic hinge  
96. node 12 0 0  
97. node 21 0 [expr 360-\$offset\_c]  
98. node 2121 0 [expr 360-\$offset\_c]  
99. node 23 0 360  
100. node 32 0 [expr 720-\$offset\_c]  
101. node 3232 0 [expr 720-\$offset\_c]  
102.  
103. #C2  
104. node 4 400 0  
105. node 5 400 360  
106. node 6 400 720  
107. #plastic hinge  
108. node 45 400 0  
109. node 54 400 [expr 360-\$offset\_c]  
110. node 5454 400 [expr 360-\$offset\_c]  
111. node 56 400 360  
112. node 65 400 [expr 720-\$offset\_c]  
113. node 6565 400 [expr 720-\$offset\_c]  
114.  
115. #C3  
116. node 7 800 0  
117. node 8 800 360  
118. node 9 800 720  
119. #plastic hinge  
120. node 78 800 0  
121. node 87 800 [expr 360-\$offset\_c]  
122. node 8787 800 [expr 360-\$offset\_c]  
123. node 89 800 360  
124. node 98 800 [expr 720-\$offset\_c]  
125. node 9898 800 [expr 720-\$offset\_c]  
126.  
127. #C4  
128. node 10 1200 0  
129. node 11 1200 360  
130. node 121212 1200 720  
131. #plastic hinge  
132. node 1011 1200 0  
133. node 1110 1200 [expr 360-\$offset\_c]  
134. node 11102 1200 [expr 360-\$offset\_c]  
135. node 1112 1200 360  
136. node 1211 1200 [expr 720-\$offset\_c]  
137. node 12112 1200 [expr 720-\$offset\_c]  
138.  
139. #C5  
140. node 13 1600 0  
141. node 14 1600 360  
142. node 15 1600 720



143. #plastic hinge  
144. node 1314 1600 0  
145. node 1413 1600 [expr 360-\$offset\_c]  
146. node 14132 1600 [expr 360-\$offset\_c]  
147. node 1415 1600 360  
148. node 1514 1600 [expr 720-\$offset\_c]  
149. node 15142 1600 [expr 720-\$offset\_c]  
150.  
151. #C6  
152. node 16 2000 0  
153. node 17 2000 360  
154. node 18 2000 720  
155. #plastic hinge  
156. node 1617 2000 0  
157. node 1716 2000 [expr 360-\$offset\_c]  
158. node 17162 2000 [expr 360-\$offset\_c]  
159. node 1718 2000 360  
160. node 1817 2000 [expr 720-\$offset\_c]  
161. node 18172 2000 [expr 720-\$offset\_c]  
162.  
163. #C7  
164. node 19 2400 0  
165. node 20 2400 360  
166. node 212121 2400 720  
167. #plastic hinge  
168. node 1920 2400 0  
169. node 2019 2400 [expr 360-\$offset\_c]  
170. node 20192 2400 [expr 360-\$offset\_c]  
171. node 2021 2400 360  
172. node 2120 2400 [expr 720-\$offset\_c]  
173. node 21202 2400 [expr 720-\$offset\_c]  
174.  
175. #C8  
176. node 22 2800 0  
177. node 232323 2800 360  
178. node 24 2800 720  
179. #plastic hinge  
180. node 2223 2800 0  
181. node 2322 2800 [expr 360-\$offset\_c]  
182. node 23222 2800 [expr 360-\$offset\_c]  
183. node 2324 2800 360  
184. node 2423 2800 [expr 720-\$offset\_c]  
185. node 24232 2800 [expr 720-\$offset\_c]  
186.  
187. #C9  
188. node 252525 3200 0  
189. node 26 3200 360  
190. node 27 3200 720

191. #plastic hinge  
192. node 2526 3200 0  
193. node 2625 3200 [expr 360-\$offset\_c]  
194. node 26252 3200 [expr 360-\$offset\_c]  
195. node 2627 3200 360  
196. node 2726 3200 [expr 720-\$offset\_c]  
197. node 27262 3200 [expr 720-\$offset\_c]  
198. #-----  
199. #B1 plastic hinge  
200. node 25 [expr 0.0+\$offset\_b] 360.0  
201. node 52 [expr 400.0-\$offset\_b] 360.0  
202. node 2525 [expr 0.0+\$offset\_b] 360.0  
203. node 5252 [expr 400.0-\$offset\_b] 360.0  
204.  
205. node 58 [expr 400.0+\$offset\_b] 360.0  
206. node 85 [expr 800.0-\$offset\_b] 360.0  
207. node 5858 [expr 400.0+\$offset\_b] 360.0  
208. node 8585 [expr 800.0-\$offset\_b] 360.0  
209.  
210. node 811 [expr 800.0+\$offset\_b] 360.0  
211. node 118 [expr 1200.0-\$offset\_b] 360.0  
212. node 8112 [expr 800.0+\$offset\_b] 360.0  
213. node 1182 [expr 1200.0-\$offset\_b] 360.0  
214.  
215. node 1114 [expr 1200.0+\$offset\_b] 360.0  
216. node 1411 [expr 1600.0-\$offset\_b] 360.0  
217. node 11142 [expr 1200.0+\$offset\_b] 360.0  
218. node 14112 [expr 1600.0-\$offset\_b] 360.0  
219.  
220. node 1417 [expr 1600.0+\$offset\_b] 360.0  
221. node 1714 [expr 2000.0-\$offset\_b] 360.0  
222. node 14172 [expr 1600.0+\$offset\_b] 360.0  
223. node 17142 [expr 2000.0-\$offset\_b] 360.0  
224.  
225. node 1720 [expr 2000.0+\$offset\_b] 360.0  
226. node 2017 [expr 2400.0-\$offset\_b] 360.0  
227. node 17202 [expr 2000.0+\$offset\_b] 360.0  
228. node 20172 [expr 2400.0-\$offset\_b] 360.0  
229.  
230. node 2023 [expr 2400.0+\$offset\_b] 360.0  
231. node 2320 [expr 2800.0-\$offset\_b] 360.0  
232. node 20232 [expr 2400.0+\$offset\_b] 360.0  
233. node 23202 [expr 2800.0-\$offset\_b] 360.0  
234.  
235. node 2326 [expr 2800.0+\$offset\_b] 360.0  
236. node 2623 [expr 3200.0-\$offset\_b] 360.0  
237. node 23262 [expr 2800.0+\$offset\_b] 360.0  
238. node 26232 [expr 3200.0-\$offset\_b] 360.0

239.  
 240. #B2 plastic hinge  
 241. node 36 [expr 0.0+\$offset\_b] 720.0  
 242. node 63 [expr 400.0-\$offset\_b] 72.0  
 243. node 3636 [expr 0.0+\$offset\_b] 720.0  
 244. node 6363 [expr 400.0-\$offset\_b] 720.0  
 245.  
 246. node 69 [expr 400.0+\$offset\_b] 720.0  
 247. node 96 [expr 800.0-\$offset\_b] 720.0  
 248. node 6969 [expr 400.0+\$offset\_b] 720.0  
 249. node 9696 [expr 800.0-\$offset\_b] 720.0  
 250.  
 251. node 912 [expr 800.0+\$offset\_b] 720.0  
 252. node 129 [expr 1200.0-\$offset\_b] 720.0  
 253. node 9122 [expr 800.0+\$offset\_b] 720.0  
 254. node 1292 [expr 1200.0-\$offset\_b] 720.0  
 255.  
 256. node 1215 [expr 1200.0+\$offset\_b] 720.0  
 257. node 1512 [expr 1600.0-\$offset\_b] 720.0  
 258. node 12152 [expr 1200.0+\$offset\_b] 720.0  
 259. node 15122 [expr 1600.0-\$offset\_b] 720.0  
 260.  
 261. node 1518 [expr 1600.0+\$offset\_b] 720.0  
 262. node 1815 [expr 2000.0-\$offset\_b] 720.0  
 263. node 15182 [expr 1600.0+\$offset\_b] 720.0  
 264. node 18152 [expr 2000.0-\$offset\_b] 720.0  
 265.  
 266. node 1821 [expr 2000.0+\$offset\_b] 720.0  
 267. node 2118 [expr 2400.0-\$offset\_b] 720.0  
 268. node 18212 [expr 2000.0+\$offset\_b] 720.0  
 269. node 21182 [expr 2400.0-\$offset\_b] 720.0  
 270.  
 271. node 2124 [expr 2400.0+\$offset\_b] 720.0  
 272. node 2421 [expr 2800.0-\$offset\_b] 720.0  
 273. node 21242 [expr 2400.0+\$offset\_b] 720.0  
 274. node 24212 [expr 2800.0-\$offset\_b] 720.0  
 275.  
 276. node 2427 [expr 2800.0+\$offset\_b] 720.0  
 277. node 2724 [expr 3200.0-\$offset\_b] 720.0  
 278. node 24272 [expr 2800.0+\$offset\_b] 720.0  
 279. node 27242 [expr 3200.0-\$offset\_b] 720.0  
 280.  
 281. #-----  
 282. #           Boundary Conditions  
 283. #-----  
 284. fix 1 1 1 1  
 285. fix 4 1 1 1  
 286. fix 7 1 1 1

287. fix 10 1 1 1  
 288. fix 13 1 1 1  
 289. fix 16 1 1 1  
 290. fix 19 1 1 1  
 291. fix 22 1 1 1  
 292. fix 252525 1 1 1  
 293. #-----  
 294. # Material Column  
 295. #-----  
 296. uniaxialMaterial Bilin 1 \$E\_c \$u\_pc \$u\_nc \$My\_pc \$My\_nc \$LS\_c \$LC\_c \$LA\_c  
 \$LK\_c \$cS\_c \$cC\_c \$cA\_c \$cK\_c \$th\_P\_pc \$th\_P\_nc \$th\_PC\_pc \$th\_PC\_nc \$th\_R\_pc  
 \$th\_R\_nc \$th\_U\_pc \$th\_U\_nc \$DP\_c \$DN\_c  
 297. #-----  
 298. # Material Beam  
 299. #-----  
 300. uniaxialMaterial Bilin 2 \$E\_b \$u\_pb \$u\_nb \$My\_pb1 \$My\_nb1 \$LS\_b \$LC\_b  
 \$LA\_b \$LK\_b \$cS\_b \$cC\_b \$cA\_b \$cK\_b \$th\_P\_pb \$th\_P\_nb \$th\_PC\_pb \$th\_PC\_nb  
 \$th\_R\_pb \$th\_R\_nb \$th\_U\_pb \$th\_U\_nb \$DP\_b \$DN\_b  
 301.  
 302. uniaxialMaterial Bilin 3 \$E\_b \$u\_pb \$u\_nb \$My\_pb2 \$My\_nb2 \$LS\_b \$LC\_b  
 \$LA\_b \$LK\_b \$cS\_b \$cC\_b \$cA\_b \$cK\_b \$th\_P\_pb \$th\_P\_nb \$th\_PC\_pb \$th\_PC\_nb  
 \$th\_R\_pb \$th\_R\_nb \$th\_U\_pb \$th\_U\_nb \$DP\_b \$DN\_b  
 303.  
 304. #-----  
 305. # Geometric Transformation  
 306. #-----  
 307. geomTransf PDelta 1  
 308. geomTransf Linear 2  
 309. #-----  
 310. # Column Number and Element  
 311. #-----  
 312. #C1  
 313. #Elastic  
 314. element elasticBeamColumn 1 12 2121 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 315. element elasticBeamColumn 10 23 3232 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 316. #rigid  
 317. element elasticBeamColumn 35 2 21 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 318. element elasticBeamColumn 44 3 32 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 319.  
 320. #C2  
 321. #Elastic  
 322. element elasticBeamColumn 2 45 5454 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 323. element elasticBeamColumn 11 56 6565 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 324. #rigid  
 325. element elasticBeamColumn 36 5 54 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 326. element elasticBeamColumn 45 6 65 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 327.  
 328. #C3



329. #Elastic  
 330. element elasticBeamColumn 3 78 8787 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 331. element elasticBeamColumn 12 89 9898 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 332. #rigid  
 333. element elasticBeamColumn 37 8 87 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 334. element elasticBeamColumn 46 9 98 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 335.  
 336. #C4  
 337. #Elastic  
 338. element elasticBeamColumn 4 1011 11102 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 339. element elasticBeamColumn 13 1112 12112 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 340. #rigid  
 341. element elasticBeamColumn 38 11 1110 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 342. element elasticBeamColumn 47 121212 1211 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 343.  
 344. #C5  
 345. #Elastic  
 346. element elasticBeamColumn 5 1314 14132 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 347. element elasticBeamColumn 14 1415 15142 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 348. #rigid  
 349. element elasticBeamColumn 39 14 1413 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 350. element elasticBeamColumn 48 15 1514 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 351.  
 352. #C6  
 353. #Elastic  
 354. element elasticBeamColumn 6 1617 17162 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 355. element elasticBeamColumn 15 1718 18172 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 356. #rigid  
 357. element elasticBeamColumn 40 17 1716 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 358. element elasticBeamColumn 49 18 1817 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 359.  
 360. #C7  
 361. #Elastic  
 362. element elasticBeamColumn 7 1920 20192 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 363. element elasticBeamColumn 16 2021 21202 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 364. #rigid  
 365. element elasticBeamColumn 41 20 2019 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 366. element elasticBeamColumn 50 212121 2120 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 367.  
 368. #C8  
 369. #Elastic  
 370. element elasticBeamColumn 8 2223 23222 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 371. element elasticBeamColumn 17 2324 24232 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 372. #rigid  
 373. element elasticBeamColumn 42 232323 2322 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 374. element elasticBeamColumn 51 24 2423 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 375.  
 376. #C9



377. #Elastic  
 378. element elasticBeamColumn 9 2526 26252 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 379. element elasticBeamColumn 18 2627 27262 \$Ac \$Ec\_c \$IZc\_cr 1  
 380. #rigid  
 381. element elasticBeamColumn 43 26 2625 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 382. element elasticBeamColumn 52 27 2726 \$Ac \$E\_c \$IZc\_cr 2  
 383.  
 384. #-----  
 385. #           Beam Number and   Element  
 386. #-----  
 387. #B1  
 388. #Elastic  
 389. element elasticBeamColumn 19 2525 5252 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 390. element elasticBeamColumn 20 5858 8585 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 391. element elasticBeamColumn 21 8112 1182 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 392. element elasticBeamColumn 22 11142 14112 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 393. element elasticBeamColumn 23 14172 17142 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 394. element elasticBeamColumn 24 17202 20172 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 395. element elasticBeamColumn 25 20232 23202 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 396. element elasticBeamColumn 26 23262 26232 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 397. #rigid  
 398. element elasticBeamColumn 53 2 25 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 399. element elasticBeamColumn 54 5 52 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 400.  
 401. element elasticBeamColumn 55 5 58 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 402. element elasticBeamColumn 56 8 85 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 403.  
 404. element elasticBeamColumn 57 8 811 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 405. element elasticBeamColumn 58 11 118 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 406.  
 407. element elasticBeamColumn 59 11 1114 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 408. element elasticBeamColumn 60 14 1411 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 409.  
 410. element elasticBeamColumn 61 14 1417 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 411. element elasticBeamColumn 62 17 1714 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 412.  
 413. element elasticBeamColumn 63 17 1720 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 414. element elasticBeamColumn 64 20 2017 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 415.  
 416. element elasticBeamColumn 65 20 2023 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 417. element elasticBeamColumn 66 232323 2320 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 418.  
 419. element elasticBeamColumn 67 232323 2326 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 420. element elasticBeamColumn 68 26 2623 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 421. #rigid  
 422.  
 423. #B2  
 424. #Elastic

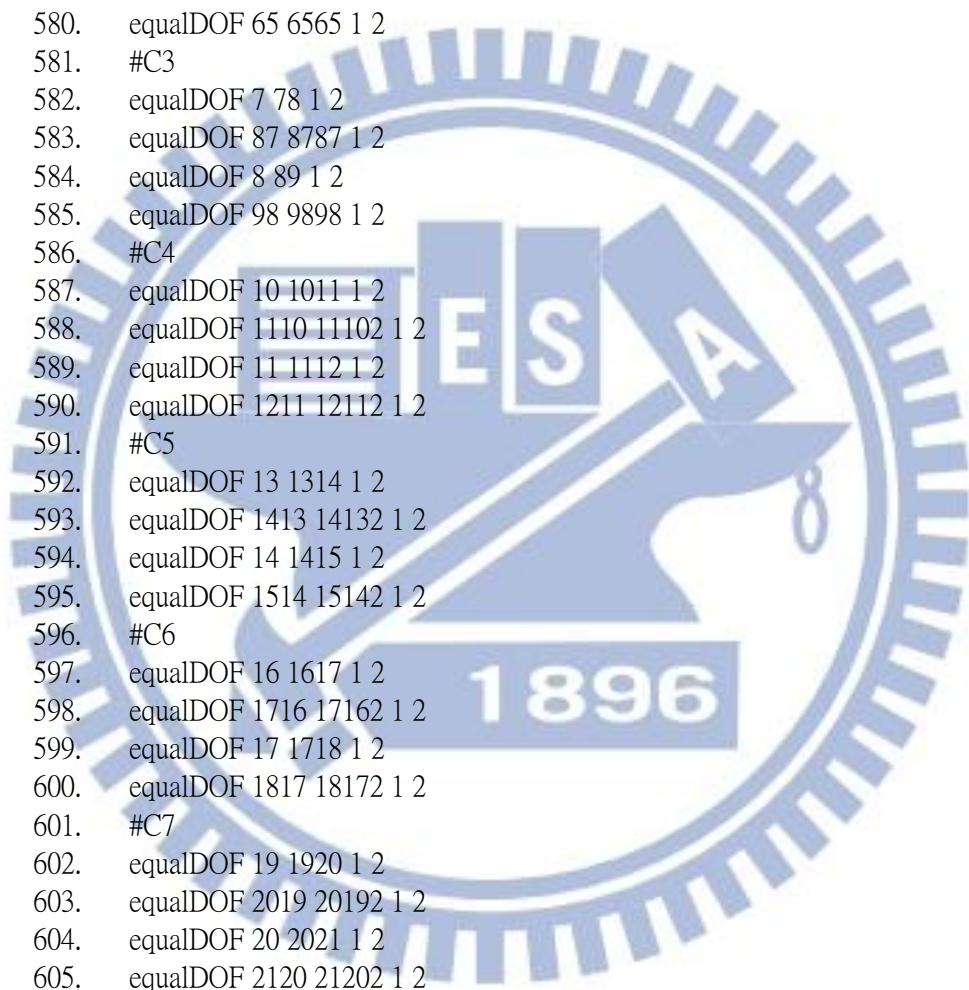
425. element elasticBeamColumn 27 3636 6363 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 426. element elasticBeamColumn 28 6969 9696 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 427. element elasticBeamColumn 29 9122 1292 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 428. element elasticBeamColumn 30 12152 15122 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 429. element elasticBeamColumn 31 15182 18152 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 430. element elasticBeamColumn 32 18212 21182 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 431. element elasticBeamColumn 33 21242 24212 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 432. element elasticBeamColumn 34 24272 27242 \$Ab \$Ec\_b \$IZb\_cr 2  
 433.  
 434. #rigid  
 435. element elasticBeamColumn 69 3 36 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 436. element elasticBeamColumn 70 6 63 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 437.  
 438. element elasticBeamColumn 71 6 69 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 439. element elasticBeamColumn 72 9 96 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 440.  
 441. element elasticBeamColumn 73 9 912 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 442. element elasticBeamColumn 74 121212 129 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 443.  
 444. element elasticBeamColumn 75 121212 1215 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 445. element elasticBeamColumn 76 15 1512 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 446.  
 447. element elasticBeamColumn 77 15 1518 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 448. element elasticBeamColumn 78 18 1815 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 449.  
 450. element elasticBeamColumn 79 18 1821 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 451. element elasticBeamColumn 80 212121 2118 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 452.  
 453. element elasticBeamColumn 81 212121 2124 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 454. element elasticBeamColumn 82 24 2421 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 455.  
 456. element elasticBeamColumn 83 24 2427 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 457. element elasticBeamColumn 84 27 2724 \$Ab \$E\_b \$IZb\_cr 2  
 458.  
 459. #-----  
 460. # Rotational Springs  
 461. #-----  
 462. #C1  
 463. element zeroLength 101 1 12 -mat 1 -dir 6  
 464. element zeroLength 102 21 2121 -mat 1 -dir 6  
 465. element zeroLength 103 2 23 -mat 1 -dir 6  
 466. element zeroLength 104 32 3232 -mat 1 -dir 6  
 467.  
 468. #C2  
 469. element zeroLength 105 4 45 -mat 1 -dir 6  
 470. element zeroLength 106 54 5454 -mat 1 -dir 6  
 471. element zeroLength 107 5 56 -mat 1 -dir 6  
 472. element zeroLength 108 65 6565 -mat 1 -dir 6

473.  
474. #C3  
475. element zeroLength 109 7 78 -mat 1 -dir 6  
476. element zeroLength 110 87 8787 -mat 1 -dir 6  
477. element zeroLength 111 8 89 -mat 1 -dir 6  
478. element zeroLength 112 98 9898 -mat 1 -dir 6  
479.  
480. #C4  
481. element zeroLength 113 10 1011 -mat 1 -dir 6  
482. element zeroLength 114 1110 11102 -mat 1 -dir 6  
483. element zeroLength 115 11 1112 -mat 1 -dir 6  
484. element zeroLength 116 1211 12112 -mat 1 -dir 6  
485.  
486. #C5  
487. element zeroLength 117 13 1314 -mat 1 -dir 6  
488. element zeroLength 118 1413 14132 -mat 1 -dir 6  
489. element zeroLength 119 14 1415 -mat 1 -dir 6  
490. element zeroLength 120 1514 15142 -mat 1 -dir 6  
491.  
492. #C6  
493. element zeroLength 121 16 1617 -mat 1 -dir 6  
494. element zeroLength 122 1716 17162 -mat 1 -dir 6  
495. element zeroLength 123 17 1718 -mat 1 -dir 6  
496. element zeroLength 124 1817 18172 -mat 1 -dir 6  
497.  
498. #C7  
499. element zeroLength 125 19 1920 -mat 1 -dir 6  
500. element zeroLength 126 2019 20192 -mat 1 -dir 6  
501. element zeroLength 127 20 2021 -mat 1 -dir 6  
502. element zeroLength 128 2120 21202 -mat 1 -dir 6  
503.  
504. #C8  
505. element zeroLength 129 22 2223 -mat 1 -dir 6  
506. element zeroLength 130 2322 23222 -mat 1 -dir 6  
507. element zeroLength 131 232323 2324 -mat 1 -dir 6  
508. element zeroLength 132 2423 24232 -mat 1 -dir 6  
509.  
510. #C9  
511. element zeroLength 133 252525 2526 -mat 1 -dir 6  
512. element zeroLength 134 2625 26252 -mat 1 -dir 6  
513. element zeroLength 135 26 2627 -mat 1 -dir 6  
514. element zeroLength 136 2726 27262 -mat 1 -dir 6  
515.  
516. #B1  
517. element zeroLength 137 25 2525 -mat 2 -dir 6  
518. element zeroLength 138 52 5252 -mat 3 -dir 6  
519.  
520. element zeroLength 139 58 5858 -mat 2 -dir 6



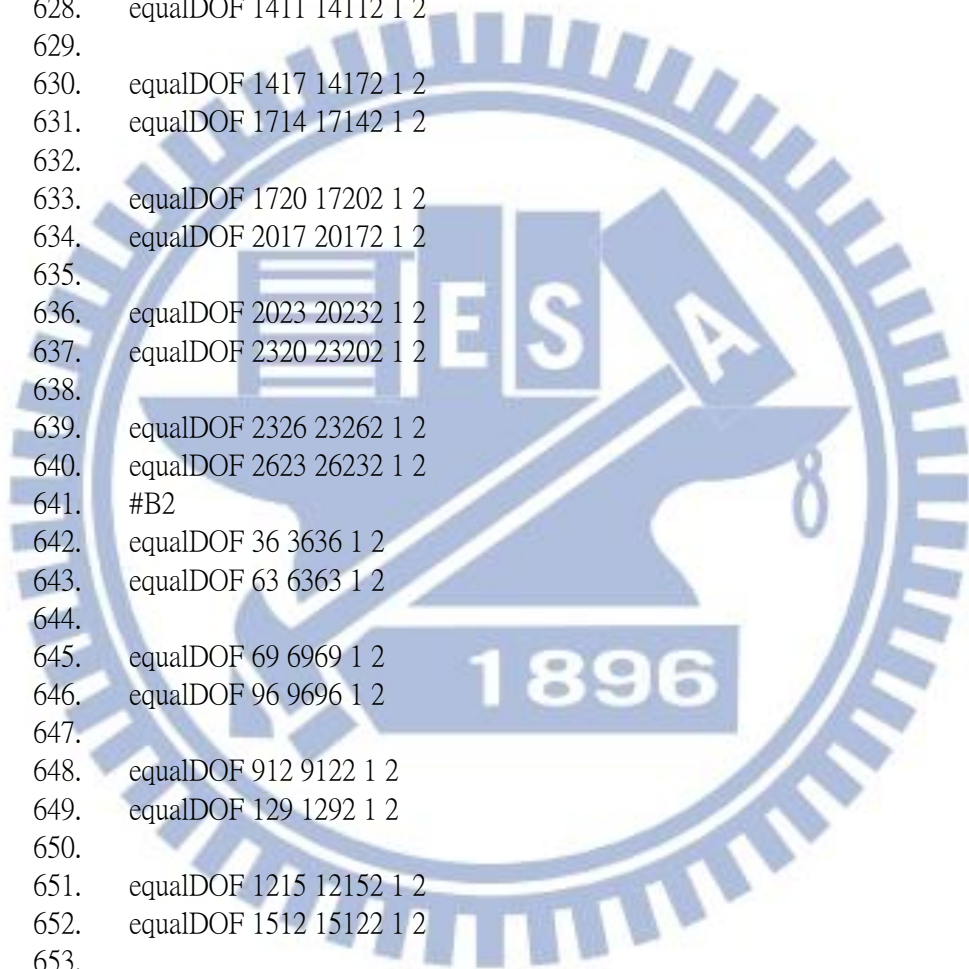
521. element zeroLength 140 85 8585 -mat 3 -dir 6  
 522.  
 523. element zeroLength 141 811 8112 -mat 2 -dir 6  
 524. element zeroLength 142 118 1182 -mat 3 -dir 6  
 525.  
 526. element zeroLength 143 1114 11142 -mat 2 -dir 6  
 527. element zeroLength 144 1411 14112 -mat 3 -dir 6  
 528.  
 529. element zeroLength 145 1417 14172 -mat 2 -dir 6  
 530. element zeroLength 146 1714 17142 -mat 3 -dir 6  
 531.  
 532. element zeroLength 147 1720 17202 -mat 2 -dir 6  
 533. element zeroLength 148 2017 20172 -mat 3 -dir 6  
 534.  
 535. element zeroLength 149 2023 20232 -mat 2 -dir 6  
 536. element zeroLength 150 2320 23202 -mat 3 -dir 6  
 537.  
 538. element zeroLength 151 2326 23262 -mat 2 -dir 6  
 539. element zeroLength 152 2623 26232 -mat 3 -dir 6  
 540.  
 541. #B2  
 542. element zeroLength 153 36 3636 -mat 2 -dir 6  
 543. element zeroLength 154 63 6363 -mat 3 -dir 6  
 544.  
 545. element zeroLength 155 69 6969 -mat 2 -dir 6  
 546. element zeroLength 156 96 9696 -mat 3 -dir 6  
 547.  
 548. element zeroLength 157 912 9122 -mat 2 -dir 6  
 549. element zeroLength 158 129 1292 -mat 3 -dir 6  
 550.  
 551. element zeroLength 159 1215 12152 -mat 2 -dir 6  
 552. element zeroLength 160 1512 15122 -mat 3 -dir 6  
 553.  
 554. element zeroLength 161 1518 15182 -mat 2 -dir 6  
 555. element zeroLength 162 1815 18152 -mat 3 -dir 6  
 556.  
 557. element zeroLength 163 1821 18212 -mat 2 -dir 6  
 558. element zeroLength 164 2118 21182 -mat 3 -dir 6  
 559.  
 560. element zeroLength 165 2124 21242 -mat 2 -dir 6  
 561. element zeroLength 166 2421 24212 -mat 3 -dir 6  
 562.  
 563. element zeroLength 167 2427 24272 -mat 2 -dir 6  
 564. element zeroLength 168 2724 27242 -mat 3 -dir 6  
 565.  
 566. #-----  
 567. # EqualDOF  
 568. #-----

569. equalDOF 3 27 1  
 570. #-----  
 571. #C1  
 572. equalDOF 1 12 1 2  
 573. equalDOF 21 2121 1 2  
 574. equalDOF 2 23 1 2  
 575. equalDOF 32 3232 1 2  
 576. #C2  
 577. equalDOF 4 45 1 2  
 578. equalDOF 54 5454 1 2  
 579. equalDOF 5 56 1 2  
 580. equalDOF 65 6565 1 2  
 581. #C3  
 582. equalDOF 7 78 1 2  
 583. equalDOF 87 8787 1 2  
 584. equalDOF 8 89 1 2  
 585. equalDOF 98 9898 1 2  
 586. #C4  
 587. equalDOF 10 1011 1 2  
 588. equalDOF 1110 11102 1 2  
 589. equalDOF 11 1112 1 2  
 590. equalDOF 1211 12112 1 2  
 591. #C5  
 592. equalDOF 13 1314 1 2  
 593. equalDOF 1413 14132 1 2  
 594. equalDOF 14 1415 1 2  
 595. equalDOF 1514 15142 1 2  
 596. #C6  
 597. equalDOF 16 1617 1 2  
 598. equalDOF 1716 17162 1 2  
 599. equalDOF 17 1718 1 2  
 600. equalDOF 1817 18172 1 2  
 601. #C7  
 602. equalDOF 19 1920 1 2  
 603. equalDOF 2019 20192 1 2  
 604. equalDOF 20 2021 1 2  
 605. equalDOF 2120 21202 1 2  
 606. #C8  
 607. equalDOF 22 2223 1 2  
 608. equalDOF 2322 23222 1 2  
 609. equalDOF 232323 2324 1 2  
 610. equalDOF 2423 24232 1 2  
 611. #C9  
 612. equalDOF 252525 2526 1 2  
 613. equalDOF 2625 26252 1 2  
 614. equalDOF 26 2627 1 2  
 615. equalDOF 2726 27262 1 2  
 616.





617. #B1  
618. equalDOF 25 2525 1 2  
619. equalDOF 52 5252 1 2  
620.  
621. equalDOF 58 5858 1 2  
622. equalDOF 85 8585 1 2  
623.  
624. equalDOF 811 8112 1 2  
625. equalDOF 118 1182 1 2  
626.  
627. equalDOF 1114 11142 1 2  
628. equalDOF 1411 14112 1 2  
629.  
630. equalDOF 1417 14172 1 2  
631. equalDOF 1714 17142 1 2  
632.  
633. equalDOF 1720 17202 1 2  
634. equalDOF 2017 20172 1 2  
635.  
636. equalDOF 2023 20232 1 2  
637. equalDOF 2320 23202 1 2  
638.  
639. equalDOF 2326 23262 1 2  
640. equalDOF 2623 26232 1 2  
641. #B2  
642. equalDOF 36 3636 1 2  
643. equalDOF 63 6363 1 2  
644.  
645. equalDOF 69 6969 1 2  
646. equalDOF 96 9696 1 2  
647.  
648. equalDOF 912 9122 1 2  
649. equalDOF 129 1292 1 2  
650.  
651. equalDOF 1215 12152 1 2  
652. equalDOF 1512 15122 1 2  
653.  
654. equalDOF 1518 15182 1 2  
655. equalDOF 1815 18152 1 2  
656.  
657. equalDOF 1821 18212 1 2  
658. equalDOF 2118 21182 1 2  
659.  
660. equalDOF 2124 21242 1 2  
661. equalDOF 2421 24212 1 2  
662.  
663. equalDOF 2427 24272 1 2  
664. equalDOF 2724 27242 1 2



```

665. #-----
666. #           Region Column
667. #-----
668. #-----
669. #           Region Beam
670. #-----
671. region 1 -ele 137
672. region 2 -ele 105 109 113 117 121 129
673. region 3 -ele 125 133 106 114 130
674. region 4 -ele 110 118 122
675. #-----
676. #           Recorder
677. #-----
678. recorder Node -file Node3.out -time -node 3 -dof 1 2 3 disp
679. recorder Element -file MomentB.out -region 1 force
680. recorder Element -file RotationB.out -region 1 deformation
681. recorder Element -file Moment2.out -region 2 force
682. recorder Element -file Rotation2.out -region 2 deformation
683. recorder Element -file Moment4.out -region 3 force
684. recorder Element -file Rotation4.out -region 3 deformation
685. recorder Element -file Moment5.out -region 4 force
686. recorder Element -file Rotation5.out -region 4 deformation
687.
688. #-----
689. #           Gravity
690. #-----
691. pattern Plain 1 Linear {
692. load 24 0 0 0
693.
694. }
695. #-----
696. #           Gravity-Analysis
697. #-----
698. constraints Plain
699. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
700. integrator LoadControl +1.000000E-002
701. algorithm NewtonLineSearch
702. numberer Plain
703. system BandGeneral
704. analysis Static
705. analyze 0
706. loadConst -time 0.0
707. #-----
708. #           Lateral-Load
709. #-----
710. pattern Plain 2 Linear {
711. load 3 60000 0 0
712. load 2 30000 0 0

```

```
713. }
714.
715. #-----
716. #           Pushover-Analysis
717. #-----
718. constraints Plain
719. test EnergyIncr +1.000000E-008 1000 0 0
720. integrator DisplacementControl 3 1 0.1
721. algorithm Newton
722. numberer Plain
723. system BandGeneral
724. analysis Static
725. analyze 150
```

