

國立交通大學

土木工程學系



構架非線性側推分析模式探討

Frame Model of Nonlinear Pushover Analysis

研究生：謝秉坤

指導教授：林昌佑 博士

中華民國一百零二年六月

構架非線性側推分析模式探討

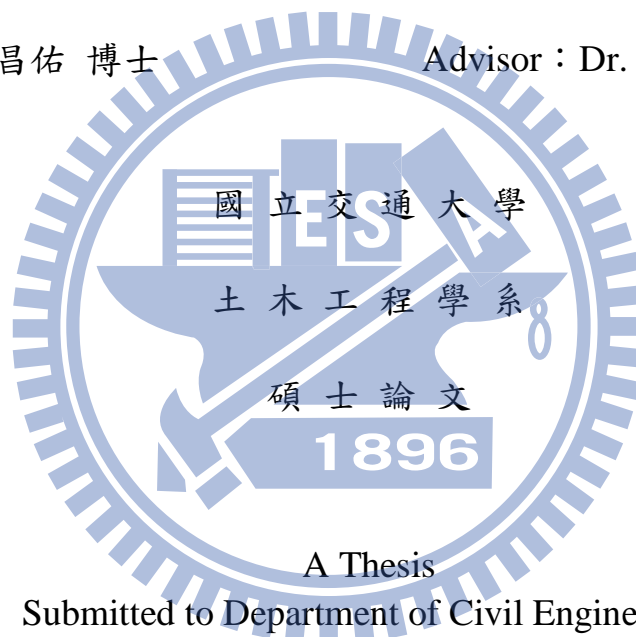
Frame Model of Nonlinear Pushover Analysis

研究生：謝秉坤

Student : Bing-Kun Xie

指導教授：林昌佑 博士

Advisor : Dr. Chang-Yu Lin



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

July 2013

HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年六月

構架非線性側推分析模式探討

研究生：謝秉坤

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

本研究以不同非線性分析方法模擬鋼筋混凝土構架，並整理出側推分析方法之流程與應用，一是考慮鋼筋混凝土材料非線性，將斷面切割成數元素以進行分析，二是計算鋼筋混凝土斷面彎矩與曲率非線性關係，並利用彎矩與曲率來進行構架分析，最後則是先將鋼筋混凝土柱進行非線性側推分析，利用容量曲線圖定義以模擬集中彈簧彎矩與轉角行為分析方式模擬。

本研究以所建立非線性分析程式與國家地震工程研究中心所模擬塑性鉸模式進行門型構架之非線性側推分析，並討論之間差異。最後則進行較大構架實例分析，以非線性材料之側推分析導出集中彈簧係數進行分析，將分析結果之容量曲線圖與彎矩位移關係圖進行比對判斷塑性鉸發生位置與順序。

關鍵字：非線性側推分析、鋼筋混凝土、OpenSees。

Frame Model of Nonlinear Pushover Analysis

Student: Bing-Kun Xie

Adviser: Dr. Chang-You Lin

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This research simulates the reinforced concrete frame in different nonlinear analysis method, and reorganizes the flow and the application pushover analysis method; first, to consider the reinforced concrete material nonlinear, cuts the round number element by to analyze the cross section; second, to calculate the reinforced concrete cross section bending moment and curvature nonlinear relationship, and carries on the frame analysis using the bending moment and curvature, finally first carries on the nonlinear pushover analysis the reinforced concrete column, to simulate the centralized spring bending moment and corner behavioral analysis way simulation using the capacity diagram of curves definition.

This research by establishes the nonlinear analysis program and national center for research on earthquake engineering the simulation plastic hinge pattern carries on the portal frame the nonlinear pushover analysis, and discussed the difference. Finally carries on big frame case study, derives the centralized spring constant to analyze by pushover of analysis the nonlinear material, capacity of diagram of curves and bending moment displacement relational graph the results analysis will carry on the contrast judgment plastic hinge to have the position and order.

Keyword : Nonlinear pushover 、 Reinforced concrete 、 OpenSees.

誌謝

在交大研究所期間，首先感謝我的指導教授 林昌佑老師在課業及生活上的辛勤指導與悉心教誨，在我為學與處事上多有啟迪；老師耐心指導論文研究方向並提供研究資訊，幫助我順利完成研究論文，師恩浩瀚，學生銘記在心。

同時，論文口試期間，承蒙交通大學土木工程學系老師，洪士林教授及趙文成教授於口試期間提供寶貴的意見，使本文更臻完善，在此表達最由衷的謝意。

研究期間承蒙學長陳冠寰、蔡呈祥的照顧與提攜；文平、志瑜兩位好夥伴一起互相勉勵與支持；感謝社團上的學長、學弟、學妹們陪伴與支持，使在研究生生活上多采多姿；交大室友好夥伴維志、閔邑等，謝謝你們提點與鼓勵我。謝謝大家生活中的相伴，豐富我的研究生活！

同時感謝我的家人爸爸、媽媽、外公、外婆、舅舅們，在我研究所求學期間的照顧及支持，讓我在學業上無後顧之憂，專心致力於論文的研究。

最後再次感激於交大所結識的師長及朋友們，衷心祝福你們萬事順利、平安。

目 錄

	頁次
中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目 錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 論文架構.....	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 側推分析介紹與原理.....	5
2.2 鋼筋混凝土斷面之非線性分析行為.....	6
2.3 耐震評估之相關研究.....	7
2.3.1 鋼筋混凝土柱之非線性塑性鉸定義.....	8
第三章 OpenSees之介紹與應用	11
3.1 OpenSees簡介.....	11
3.2 OpenSees分析架構.....	12
3.2.1 Model Object.....	12
3.2.2 Output Object.....	12
3.2.3 Anslysis Object.....	13
3.3 OpenSees指令功能.....	13
3.3.1 建模指令.....	13

3.3.2 輸出指令.....	22
3.3.3 分析指令.....	23
3.4 OpenSees側推分析流程.....	27
第四章 非線性側推分析流程.....	29
4.1 材料非線性之分析程式.....	29
4.2 鋼筋混凝土斷面非線性行為分析.....	30
4.2.1 鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之基本假設.....	31
4.2.2 計算鋼筋混凝土斷面彎矩與曲率之流程.....	32
4.2.3 彎矩與曲率非線性關係之定義與建立.....	34
4.3 非線性集中彈簧之側推分析.....	36
4.3.1 集中彈簧之分析建立.....	37
第五章 側推分析實例展示行為及討論.....	40
5.1 懸臂柱.....	40
5.2 門型構架.....	43
5.3 二樓-五跨構架.....	47
第六章 結論與建議.....	50
6.1 結論.....	50
6.2 建議.....	51
參考文獻.....	52
圖表附錄.....	57
附錄 OpenSees之程式碼.....	98
附錄一 懸臂柱(材料非線性之側推分析).....	98
附錄二 懸臂柱(鋼筋混凝土斷面非線性行為分析).....	103
附錄三 懸臂柱(非線性集中彈簧之側推分析).....	108
附錄四 懸臂柱(非線性塑性區之側推分析).....	112

附錄五	門型構架(材料非線性之側推分析).....	116
附錄六	門型構架(鋼筋混凝土斷面非線性行為分析).....	123
附錄七	門型構架(非線性集中彈簧之側推分析).....	129
附錄八	門型構架(非線性塑性區之側推分析).....	134
附錄九	二樓-五跨構架之鋼筋混凝土柱(材料非線性之側推分析).....	138
附錄十	二樓-五跨構架(非線性集中彈簧之側推分析).....	143



表目錄

	頁次
表2.1 鋼筋混凝土柱彎矩非線性鉸之參數[22].....	57
表2.2 鋼筋混凝土柱剪力非線性鉸之參數[22].....	57
表4.1 材料非線性之鋼筋混凝土柱建模指令.....	58
表4.2 自重分析之建構指令.....	58
表4.3 側推分析之建構指令.....	59
表4.4 鋼筋混凝土斷面之彎矩與曲率.....	59
表4.5 彎矩與曲率之鋼筋混凝土柱建模指令.....	60
表4.6 集中彈簧之鋼筋混凝土柱建模指令.....	61
表4.7 塑性區之鋼筋混凝土柱建模指令.....	62



圖目錄

	頁次
圖 2.1 側推分析之容量曲線[22].....	63
圖 2.2 鋼筋混凝土斷面之纖維元素[17].....	63
圖 2.3 彎矩非線性鉸性質與側向載重位移曲線[22]	64
圖 2.4 軸向破壞時的變未繳之修正係數 k' [22]	64
圖 2.5 剪力非線性鉸性質與側向載重位移曲線[22]	65
圖 3.1 OpenSees 主要物件[26].....	65
圖 3.2 OpenSees 模型物件[26].....	66
圖 3.3 OpenSees 分析物件[26].....	66
圖 3.4 Steel01 Material [26].....	67
圖 3.5 Concrete01 Material [26].....	67
圖 3.6 Bilin Material [26].....	68
圖 3.7 Quad Fiber Section [26].....	69
圖 3.8 Rect Fiber Section [26]	69
圖 3.9 Circ Fiber Section [26].....	70
圖 3.10 Straight Steel [26].....	70
圖 3.11 Circ Steel [26].....	71
圖 3.12 Aggregator Section [26].....	71
圖 3.13 Element Classes Object [26].....	72
圖 3.14 BeamWithHinges Element [26].....	72
圖 3.15 載重模式架構圖[26].....	73
圖 4.1 鋼筋混凝土斷面.....	73
圖 4.2 鋼筋混凝土斷面之元素切割.....	74

圖 4.3 鋼筋混凝土柱之桿件元素切割.....	74
圖 4.4 鋼筋混凝土斷面之彎矩—曲率關係圖.....	75
圖 4.5 彎矩與曲率關係之歷程曲線圖[19].....	75
圖 4.6 鋼筋之應力—應變曲線.....	76
圖 4.7 混凝土之應力—應變曲線.....	76
圖 4.8 鋼筋混凝土之斷面幾何.....	77
圖 4.9 混凝土斷面開裂但仍為彈性階段.....	77
圖 4.10 門型構架之模擬	78
圖 4.11 彎矩—轉角關係曲線圖.....	78
圖 4.12 鋼筋混凝土柱之建模圖.....	79
圖 4.13 鋼筋混凝土柱之容量曲線圖.....	79
圖 4.14 降伏破壞點之剪力(V_y)與位移(Δ_y).....	80
圖 4.15 極限破壞點之剪力(V_c)與位移(Δ_c).....	80
圖 4.16 非線性彈簧模擬.....	81
圖 5.1 材料非線性之側推分析之模型.....	81
圖 5.2 鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之模型.....	82
圖 5.3 懸臂柱之側推分析曲線圖.....	82
圖 5.4 懸臂柱之側推分析曲線圖.....	83
圖 5.5 集中彈簧之彎矩—轉角曲線圖.....	83
圖 5.6 懸臂柱之側推分析曲線圖.....	84
圖 5.7 懸臂柱之側推分析曲線圖.....	84
圖 5.8 懸臂柱之側推分析曲線圖.....	85
圖 5.9 門型構架之模型.....	85
圖 5.10 集中彈簧之構架模型.....	86
圖 5.11 塑性區之構架模型.....	86

圖 5.12 門型構架之側推分析曲線圖.....	87
圖 5.13 門型構架之集中彈簧側推分析曲線圖.....	87
圖 5.14 門型構架之彎矩—位移關係曲線圖.....	88
圖 5.15 塑性鉸發生順序與位置.....	88
圖 5.16 門型構架之彎矩—轉角關係曲線圖.....	89
圖 5.17 門型構架之側推分析曲線圖.....	89
圖 5.18 鋼筋混凝土斷面之元素切割.....	90
圖 5.19 鋼筋混凝土柱之側推分析曲線圖.....	90
圖 5.20 二樓-五跨構架之模型.....	91
圖 5.21 二樓-五跨構架之側推分析曲線圖.....	91
圖 5.22 二樓-五跨構架之柱編號.....	92
圖 5.23 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖.....	92
圖 5.24 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖.....	93
圖 5.25 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖.....	93
圖 5.26 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖.....	94
圖 5.27 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖.....	94
圖 5.28 二樓-五跨構架之塑性鉸發生順序與位置.....	95
圖 5.29 二樓-五跨構架之塑性鉸發生順序與位置.....	96
圖 5.30 二樓-五跨構架之塑性鉸發生順序與位置.....	97

第一章 緒論

1.1 研究背景

經九二一大地震慘痛教訓後，台灣位於歐亞板塊和菲律賓板塊的聚合交界地帶，經常發生中、小型地震，而近年來台灣對耐震設計越來越重視與要求，並做了許多相關耐震研究。

耐震設計理念以大地震不倒塌，小地震不壞，強柱弱梁為原則，並考慮結構韌性設計，而結構分析是以非線性側推分析(Nonlinear Pushover Analysis)模式模擬，需考慮許多條件，如材料性質、斷面幾何、元素切割等等，並可反應出真實結構狀況，在分析上是非常可靠，若是遇到大型結構就相當麻煩，會花費太多時間與成本，為了節省時間與成本上的問題，在ATC-40[1]與FEMA273[2]之建議針對老舊建築物的耐震評估與補強。

台灣建築物有一半以上都是用鋼筋混凝土構造，尤其是低矮樓層建築物受到地震力影響很大，而老舊建築物的鋼筋混凝土柱通常箍筋不足或是間距太大，在評估上須要鑑定與補強，並加強建築物之耐震能力，而在評估建築物時，須要一份詳細數據與試驗報告，才能有效掌握結構分析準確度，及預測建築物的破壞位置及順序，並有效提高老舊建築物的耐震評估與補強。

1.2 研究動機與目的

近年來資訊發達，結構分析軟體便利與使用者需求也越來越多，如今市面上結構分析軟體比較常見有 ETABS、SPA2000、MIDAS 等等；本文研究則採用有限元素法分析軟體 OpenSees，而 OpenSees 分析軟體所提供資源上可以任意使用，可由 OpenSee 網站參訪。

由於使用 OpenSees 軟體分析在建立分析模式非常多元，在分析上非常可靠，但是在建立過程沒有像商業分析設計軟體有圖形前處理方式，所以在建立前必須先構思，才能避免在建立過程中錯亂。

在國家地震工程研究中心所模擬非線性塑性鉸定義較為保守，可能會造成補強上浪費，而本研究提出不同側推分析方法模擬鋼筋混凝土構架，其一是考慮鋼筋與混凝土材料非線性組成來進行分析，其二是以計算鋼筋混凝土斷面之彎矩與曲率，並以彎矩與曲率來進行分析，最後則是以集中彈簧方式模擬，並由 OpenSees 分析軟體來分析模擬，並詳敘說明如何應用 OpenSees 分析軟體來建立與定義，以及整理出側推分析流程。

本研究先以鋼筋混凝土柱與門型構架為例子說明，並討論側推分析模式與分析結果，並了解在分析上是否有達到預期效果及在使用上準確與方便，最後則是用集中彈簧方式模擬進行大型構架為實例展示。

1.3 論文架構

本論文共分五個章節。第一章緒論、第二章文獻回顧、第三章 OpenSees 之介紹與應用、第四章非線性側推分析流程、第五章側推分析實例展示行為及討論、第五章結論與建議，其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、論文架構，並探討耐震重要性，以及為何使用 OpenSee 分析軟體。

第二章、 文獻回顧

把相關的知識與文獻進行彙整，內容主要以側推分析介紹、鋼筋混凝土斷面之非線性行為及相關耐震評估研究，並概述對側推分析的發展與應用。

第三章、 OpenSees 之介紹與應用

此章大概講述 OpenSees 分析軟體與應用，並說明分析架構與分析建立流程，以及相關指令功能說明及應用。

第四章、 非線性側推分析流程

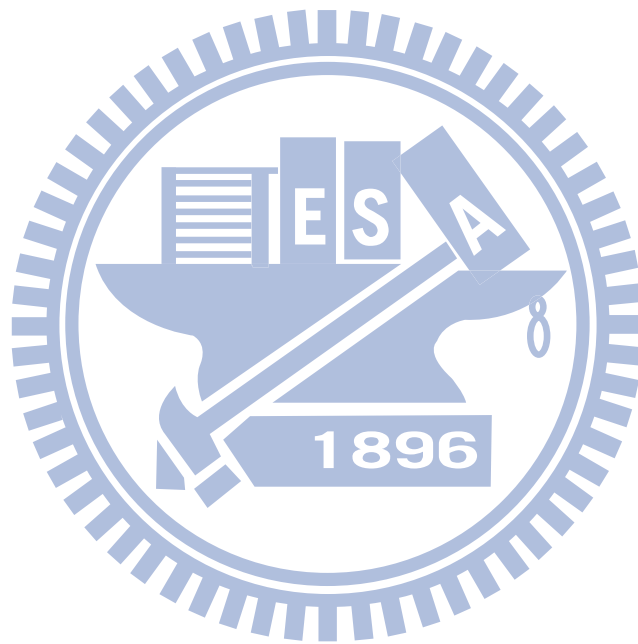
此章敘述非線性側分析方法及流程，並說明流程之建立與定義，最後統整建模指令與分析指令建立。

第五章、 側推分析實例展示行為及討論

此章將用實例展示側推分析模式，並探討分析模式行為。

第六章、 結論與建議

此章是對側推分析模式與 OpenSees 分析軟體的結論及建議。



第二章 文獻回顧

2.1 側推分析介紹與原理

側推分析(Pushover analysis)模式是以特定豎向比例於每一層樓之側向力，並以位移控制方式增加，直到結構物無法承受承載能力，即為倒塌。目前側推分析是以美國ATC-40[1]與FEMA273[2]建議同時考量結構物的側力抵抗能力及非線性位移能力，是將結構物在側推過程中把每一層樓層側力總和，即為基底剪力，並與在非線性側推分析過程中所得屋頂側向位移來建立關係曲線，此關係曲線定義為容量曲線(Capacity curve)，如圖2.1。

容量曲線圖是以基底剪力與屋頂位移的關係曲線，可用來評估結構物耐震能力，由容量曲線圖了解結構物的破壞狀況，並預測結構物行為及梁、柱桿件上的塑性鉸發生位置；而目前分析軟體具備了側推分析能力如ETABS、SAP2000、PISA3D、MIDAS、NASTRAN、PERFORM-3D等商業軟體，在分析上使用非常方便與可靠。

側推分析方法是由Freeman和Nicoletti[3]等人最先提出，而Saïidi Mehdi[4]提出等效單自由度體進行非線性地震分析簡化方法，使分析上方便使用；而在非線性側推分析上所使用之豎向力分配方式，由Miranda[5]和FEMA440[6]建議將地震力簡化成倒三角形型式分配做為側向力或是用耐震設計規範[7]建議用水平地震力之豎向分配方式，用位移控制方式逐步增

加，直到結構物倒塌。

在側推分析基本假設有三個部分[8]：

1. 實際結構的地震反應與等效單自由度相關，是說結構的地震反應僅由結構的第一振態控制；
2. 在地震作用過程中，不管結構變形大小，其形狀向量保持不變；
3. 樓板在本身平面內的勁度無限大，所以在樓板平面內只有剛體位移、平移和轉動，不改變形狀；

但在朱杰江和呂西林等人[9]卻提出了該假設上缺失，認為實際結構相對位移是由所有振態共同決定，且各振態會隨結構勁度的改變而改變。

另外在側推分析方法中可用來檢驗新設計的建築結構，評估結構性能是否滿足在地震力作用下的性能目標[10、11]，經由Fajfar和Kilar[12]建議之分析過程建立基底剪力與頂層變位關係，可用來檢驗結構損害程度。

2.2 鋼筋混凝土斷面之非線性分析行為

近年來鋼筋混凝土結構之非線性側推分析是熱門研究，一般中、低層結構物都由鋼筋與混凝土組成，在分析鋼筋混凝土結構行為須三大原則力平衡(Equilibrium)、材料組成律(Constitutive Law)、變形諧和(Compatibility)；另外須透過實驗，分別建構鋼筋與混凝土的應力-應變關係並建立其數學模

式[13、14]，在與三大原則配合可分析得到鋼筋混凝土構材的力學行為。

構材之韌性可行為由斷面變形決定出曲率，在Park與Paulay[15、16]之研究出梁、柱桿件斷面之彎矩-曲率關係，且詳細定義梁、柱桿件斷面於降伏及極限變形的情況下所對應之降伏曲率與極限曲率；宋裕祺教授、劉光晏等人[17、18]研究提出用纖維元素法來分析柱斷面彎矩-曲率的方法，將斷面切成很多纖細的條狀纖維元素(圖2.2)，當梁、柱桿件斷面受到撓曲行為，先假設中性軸位置，在最外層壓應變已知前提下，線性內插求得各纖維元素之應變，再利用鋼筋與混凝土材料組成律，計算每一元素內力，分別將鋼筋與混凝土的應力乘以相對應纖維元素並進行累加；另外在「土木406-100 鋼筋混凝土學」[19]裡有詳細介紹用鋼筋混凝土斷面計算出彎矩與曲率並建立關係。

2.3 耐震評估之相關研究

近年來國內做了許多相關耐震評估研究，用側推分析方法來進行評估老舊建築物，在ATC-40[1]規範採用容量震譜法(Capacity Spectrum Method)做為建築物耐震評估之標準程序，用容量震譜(Capacity Spectrum)與需求震譜(Demand Spectrum)之分析結果繪於ADRS(Acceleration-Displacement Response Spectra)[20]之同一張圖上，而兩個震譜圖之交點可求得崩塌時之

需求點(Demand point)，以判定建築物之韌性容量；在內政部建築研究所於民國88年公布了「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估及推廣」[21]，檢核個別構件的破壞模式是屬於剪力破壞或撓曲破壞，再檢核每一節點是梁或是柱先破壞。

國內校舍的耐震評估是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」[22]之建議，是由理論分析、數值模擬、試驗驗證及文獻比較等之探討，並對結構物之梁、柱及磚牆來定義非線性塑性鉸之性質，並與MATLAB撰寫一套耐震詳細評估輔助分析程式搭配，方便於評估者設定非線性塑性鉸性質，並對鋼筋混凝土耐震補強設計為參考。

2.3.1 鋼筋混凝土柱之非線性塑性鉸定義

在地震力作用下所造成鋼筋混凝土柱有三種破壞可能撓剪破壞(flexure-shear failure)、剪力破壞(shear failure)、撓曲破壞(flexure failure)，在分析上相當麻煩，無法決定鋼筋混凝土柱破壞模式，為了能表現鋼筋混凝土柱破壞分析模擬，在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」[22]建議鋼筋混凝土柱之塑性鉸模擬方式，在鋼筋混凝土柱兩端考慮撓剪或撓曲模式，而剪力設置在鋼筋混凝土柱中間，其塑性鉸參數定義說明如下：

1. 彎矩塑性鉸參數定義，如圖2.3：

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

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

其中(2.1)式中 $\frac{\Delta_s}{H}$ 是由Elwood及Moehle等人研究[23]，用最小平方差法的數值方法，歸納出撓剪破壞的變位角，其算法：

$$\frac{\Delta_s}{H} = \frac{3}{100} + 4\rho'' - \frac{v_m}{133\sqrt{f'_c}} - \frac{P}{40A_g f'_c} \geq \frac{1}{100} \quad (2.3)$$

H為柱淨高；

ρ'' 為剪力箍筋體積比；

v_m 為剪應力；

f'_c 為混凝土抗壓強度；

P為柱承受之軸力；

A_g 柱之斷面積。

且在(2.1)式中 Δ_y 是由側向位移達到時所造成主筋降伏狀態，其計算：

$$\Delta_y = \frac{v_b}{k} = \frac{v_b H^3}{12(EI)_c} \quad (2.4)$$

v_b 為柱之撓曲強度；

k為柱勁度；

H為柱淨高；

$(EI)_c$ 為柱開裂斷面的撓曲勁度，由ACI318-05規範[24]所建議為0.35。

另外在(2.2)式中也由Elwood及Moehle等人[25]在試驗得到軸向與變位角關係，其計算：

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

H為柱淨高；

θ 為剪力裂縫與水平的夾角，一般定為 65° ；

P為柱承受之軸力；

s為箍筋間距；

A_{st} 為剪力箍筋總斷面積；

f_{yt} 為箍筋降伏強度；

d_c 為柱核心混凝土的深度，由箍筋中心至中心間距；

k' 為Moehle等人[26]所提出對箍筋剪力強度之影響，如圖2.4。

最後將(2.3)、(2.4)、(2.5)式子結果代入(2.1)、(2.12)得到a、b值，將其a、

b值填入表2.1中，然後定出如圖2.3。

2. 剪力塑性鉸參數定義，如圖2.5：

$$c = \min \left(\frac{\Delta_a}{H} \right), 0.04 \quad (4.6)$$

其中 Δ_a 是由(2.5)式代入，並得到c，將c值填入表2.2中，並定出如圖2.5。

第三章 OpenSees之介紹與應用

3.1 OpneSees 簡介

本研究所採用有限元素分析軟體 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)，並以 OpenSees 分析軟體進行側推分析，更詳細 OpenSees 分析軟體應用及資源，可參照官網[27]。

OpenSees 是由 1999 年由美國加州柏克萊分校的太平洋地震工程研究中心所發表，可用在結構與岩石方面地震模擬。OpenSees 提供開放性的源代碼(Open Source)，且具有高擴充性與維護性，而研究人員可在不更動主程式下利用程式中物件進行增加與替換，分析上使用非常自由，而且資源上完全免費。

OpenSees 是物件導向有限元素法分析軟體，利用 TCL(Tool Command Language)建立，以 C++所建構物件導向和 Fortran 數值庫。OpenSees 提供基本的命令與控制結構，可撰寫 C 程式與之鍵結增加新命令，在程式中所有指令名稱與所需參數可從 TCL 所建立的函數讀取。

在官方網站上可取得有限元素法分析軟體 OpenSees 程式，而指令運用與說明必須要從官方網站上取得，在官方網站上也有許多有關側推分析例子，還可應用結構分析也可能用在大地工程方面。

另外可從官方網站上下載 OpenSeesNavigator 軟體程式，它與 Matlab

程式相容應用，其優點為模型建立可顯示於視窗上，節點與桿件編號自動定義，而材料性質、斷面幾何及桿件元素選用是以下拉式選單方式，使用上非常方便，但缺點是版本更新慢，軟體視窗較簡潔，而選單項目並不完整。

OpenSees 在非線性功能與數值分析非常可靠，可進行靜力和動力線彈性分析、模態分析、靜力非線性分析、動力非線性分析。

3.2 OpenSees分析架構

OpenSees 分析架構可分為四個物件，分別是 Domain Object、Model Object、Analysis Object、Output Object 四個物件，如圖 3.1，其中 Model Object 所建立建模指令儲存到 Domain Object，而 Analysis Object 提供了不同分析指令物件，以及 Output Object 取得模型輸出資料。

3.2.1 Model Object

此物件是由建模指令所組成，而建模指令物件定義分別有節點定義、單軸材料定義、斷面定義、桿件元素定義等等，如圖 3.2，依據資料條件與使用者需求輸入建模指令條件，另外可自行定義建模指令條件，最後並將這些建模指令物件儲存 Domain Object。

3.2.2 Output Object

此物件是由輸出指令組成，可將分析結果建立於記錄檔供使用者利用，而使用者可依造所需要分析結果，寫入所需讀取資料之輸出指令，而資料之資訊由 Domain 監控記錄，並寫入檔案中[28]，得到輸出結果，而輸出檔案只顯示數據部分，若要建立圖表必須要用輔助工具，可用 Excel、Matlab 等。

3.2.3 Anslysis Object

此物件是由分析指令所組成，如圖 3.3，並將分析結果更新至 Domain Object，而分析模式可依照模型需求與喜好建立分析指令，可節省分析時間，並提高分析結果。

3.3 OpenSees指令功能

OpenSees分析指令有很多種，在結構分析建立可由使用者喜好選擇所需分析指令，除此之外也可以自行自定條件，使用上非常自由與方便，而 OpenSees指令是利用記事本方式輸入與修改，在輸入上必須注意指令大小寫之分，其本文所應用到指令說明如下：

3.3.1 建模指令

建模指令有些部分可依照使用者需要方式來建立，在此大概介紹幾個在本文研究所用到部分，若要詳細部分或是資訊可以透過 OpenSees 網站上

得到，建模指令說明如下：

1. 模型定義：

此指令定義功用在於決定構架維度與自由度，而 OpenSees 指令輸入定義為 `model BasicBuilder - ndm $ndm -ndf $ndf`，`$ndm` 為維度空間；`$ndf` 為自由度；使用方式如：

`model BasicBuilder - ndm 2 -ndf 3`；`ndm 2` 指在二維空間，`ndf 3` 指構架上的桿件兩端點各自由度為 3。

2. 節點定義：

本指令定義功用在於決定節點位置，而使用者先自行座標象限定義，才能決定節點位置，並定義長度單位，一般採用為 X 水平向右、Y 垂直向上，而 Z 為右手定則拇指方向，其 OpenSees 指令輸入定義為 `node $nodeTag $coords`，`$nodeTag` 為節點編號定義；`$coords` 為 X、Y、Z 三個方向；使用方式如：

`node 1 400 360`，在節點 1，X 水平距離向右為 400 公分，Y 垂直距離向上為 360 公分。

3. 邊界條件定義：

功用在於決定邊界條件是否為束制，其 OpenSees 指令輸入定義為 `fix $nodeTag $constrValues`，`$nodeTag` 為所對應的節點編號定義；

\$constrValues 根據使用者所定義 X、Y、Z 座標像限方向對應節點的束制條件，0 為未束制，1 為束制；使用方式如：

fix 1 1 1 0，若構架假設為二維，其座標像限定義為 X 水平向右，Y 垂直向上，Z 為右手定則拇指方向；其在節點 1，X 與 Y 為束制無法在左右與上下移動，Z 為未束制可旋轉，如同鉸支承型式。

4. 單軸材料定義：

此指令功用在於定義材料性質與材料種類，在有些材料種類除了可以定義應力-應變關係，也可以做為力-變形關係方式；OpenSees 指令輸入定義為 uniaxialMaterial \$matType，\$matType 根據使用者喜好選擇材料種類與定義材料性質，如 Steel01、Steel02、Concrete01、Concrete02 等；在本研究 \$matType 材料種類選擇為 Steel01、Concrete01、Bilin，分別說明如下：

(1) Steel01，此材料定義可當作一般鋼筋應力-應變關係，另外也可以轉換成力-變形關係，如圖 3.4，而 OpenSees 指令輸入定義為 uniaxialMaterial Steel01 \$matTag \$Fy \$E0 \$b；\$matTag 為材料編號定義；\$Fy 為降伏應力；\$E0 為彈性模數；\$b 為應變硬化比例，官方網站建議[27]為 0.01。

(2) Concrete01，此材料定義為混凝土應力-應變關係，忽略拉應力影響，

如圖 3.5，其 OpenSees 指令輸入定義為 uniaxialMaterial Concrete \$matTag \$fpc \$epsc0 \$fpcu \$epsU；\$matTag 為材料編號定義；\$fpc 為降伏應力；\$epsc0 為降伏應變；\$fpcu 為極限應力；\$epsU 為極限應變。

- (3) Bilin，此材料指令用在定義彎矩-轉角關係，如圖 3.6，其 OpenSees 指令輸入定義為 uniaxialMaterial Bilin \$matTag \$Ke \$as_Plus \$as_Neg \$My_Plus \$My_Neg \$Lamda_S \$Lamda_C \$Lamda_A \$Lamda_K \$c_S \$c_C \$c_A \$c_K \$theta_p_Plus \$theta_p_Neg \$theta_pc_Plus \$theta_pc_Neg \$Res_Pos \$Res_Neg \$theta_u_Plus \$theta_u_Neg \$D_Plus \$D_Neg；\$matTag 為材料定義編號；\$Ke 為彈性勁度；\$as_Plus、\$as_Neg 為正、負應變硬化比例；\$My_Plus、\$My_Neg 為正、負彎矩；\$Lamda_S、\$Lamda_C、\$Lamda_A、\$Lamda_K 為循環退化參數；\$c_S、\$c_C、\$c_A、\$c_K 為預設值 1；\$theta_p_Plus、\$theta_p_Neg 為正、負轉角值從降伏到塑性；\$theta_pc_Plus、\$theta_pc_Neg 為正、負轉角值從塑性到極限；\$Res_Pos、\$Res_Neg 為正、負殘留強度比值；\$theta_u_Plus、\$theta_u_Neg 為正、負極限轉角；\$D_Plus、\$D_Neg 為預設值 1。

5. 斷面定義：

本指令定義功用除了取決於斷面種類及幾何條件，另外特定斷面指令定義可將單軸材料定義應力-應變關係轉換成力-變形關係，其 OpenSees 指令輸入定義為 `section $secType`，`$secType` 根據使用者喜好選擇斷面種類與幾何條件；而本文採用斷面種類 `$secType` 為 Elastic、Fiber、Uniaxial、Aggregator，分別說明如下：

- (1) Elastic，此斷面種類功用為斷面幾何條件性質，而 OpenSees 指令輸入定義為 `section Elastic $secTag $E $A $Iz`；`$secTag` 為斷面編號定義；`$E` 為彈性模數；`$A` 為斷面面積；`$Iz` 為斷面慣性矩。
- (2) Fiber，此斷面種類功用在於非線性材料性質定義與位置、斷面幾何條件定義，並將斷面幾何條件元素進行切割，其 OpenSees 指令輸入定義為 `section Fiber $sctTag {patch $patch layer $layer}`；`$sctTag` 為斷面編號定義；`$patch` 為斷面幾何形狀，其指令有 `quad`(圖 3.7)、`rect`(圖 3.8)、`circ`(圖 3.9)，圖中 I、J、K、L 代表區域座標位置，而將區域位置所圍成元素切成小元素，且每塊元素對應材料性質；`$layer` 為斷面幾何的鋼筋排列方式，其指令有 `straight`(圖 3.10)、`circ`(圖 3.11)，在將鋼筋位置座標、鋼筋面積、鋼筋數量輸入，其指令使用方式如：`section Fiber 1 {patch rect $concreteMaterial 10 1 -25 -15 25 15 layer $SteelMaterial 3 $As_8 19 -9 19 9}`，斷面纖維編號定

義為 1，\$concreteMaterial 為混凝土材料，並將混凝土材料區域座標為 (-25, -15)至(25, 15)，並切成 10x1=10 塊元素，而\$As_8 為鋼筋號數 #8，且排列位置從(19, -9)至(19, 9)為縱向排放 3 根鋼筋。

(3) Uniaxial ，此斷面種類功用對應單軸材料，可將單軸材料應力-應變關係轉換成力-變形關係；OpenSees 指令輸入定義為 section Uniaxial \$sctTag \$matTag \$quantity；\$sctTag 為斷面編號定義；\$matTag 為對應材料編號定義；\$quantity 為力與變形關係。

(4) Aggregator ，此斷面種類功用將可以數個力-變形關係做為疊加，如圖 3.12；OpenSees 指令輸入定義為 section Aggregator \$secTag \$matTag \$quantity -section \$secionTag；\$secTag 為斷面編號定義；\$matTag 為對應材料編號定義；\$quantity 為力與變形關係；\$secionTag 為對應先前斷面編號定義。

6. 幾何定義：

此指令功用定義座標轉換，OpenSees 指令輸入定義為 geomTransf \$transfType，\$transfType 為幾何轉換種類，如 Linear、Corotational、PDelta，

本文所採用 \$transfType 為 PDelta，說明如下：

geomTransf PDelta \$transfTag；\$transfTag 為幾何轉換編號定義，座標轉換為 PDelta 效應。

7. 桿件元素定義：

此指令功用在於建立桿件元素，而桿件元素是由材料性質與斷面幾何條件所構成，如圖 3.13，其 OpenSees 指令輸入定義為 `element $eleType`，`$eleType` 根據使用者桿件元素種類與斷面條件組成，本文所採用的元素 `zeroLength`、`elasticBeamColumn`、`nonlinearBeamColumn`、`beamWithHinges`，分別說明如下：

- (1) `zeroLength`，此功能定義在為在相同位置有兩個節點存在，而兩節點間所連接是由單軸材料定義的力-變形關係；此指令輸入定義為 `element zeroLength $eleTag $iNode $jNode - mat $matTag - dir $dir`；`$eleType` 為桿件元素編號定義；`$iNode`、`$jNode` 為桿件元素的首尾兩端所對應節點編號；`$matTag` 為對應材料編號定義；`$dir` 為材料方向，1、2、3 為對應區域座標 x、y、z 軸方向移動，4、5、6 為對應區域座標 x、y、z 軸方向旋轉。
- (2) `elasticBeamColumn`，將桿件元素視為線彈性，指令輸入定義 `element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $Iz $transfTag`；`$eleTag` 為桿件元素編號定義；`$iNode`、`$jNode` 為桿件元素首尾兩端所對應節點編號；`$A` 為桿件元素的斷面面積；`$E` 為桿件元素的彈性模數；`$Iz` 為桿件元素的斷面慣性矩；`$transfTag` 為桿件元素對應幾

何轉換編號定義。

- (3) `nonlinearBeamColumn`，將桿件元素視為非線性，指令輸入定義
- ```
element nonlinearBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgtPts
$secTag $transfTag
```
- ；`$eleTag` 為桿件元素編號定義；`$iNode`、`$jNode` 為桿件元素首尾兩端所對應節點編號；`$numIntgtPts` 為積分點數量，另外在 Michael H. Scoot[29]提出積分點使用；`$secTag` 為桿件元素所對應斷面編號定義；`$transfTag` 為桿件元素所對應幾何轉換編號定義。

- (4) `beamWithHinges`，此指令功用在於端點桿件元素為非線性，而中間桿件元素為線彈性，如圖 3.14，其指令輸入定義為
- ```
element beamWithHinges $eleTag $iNode $jNode $secTagi $Lpi $secTagj $Lpj  
$E $A $Iz $transfTag
```
- ；`$eleTag` 為桿件元素編號定義；`$iNode`、`$jNode` 為桿件元素首尾兩端所對應節點編號；`$secTagi`、`$secTagj` 為桿件元素首尾兩端所對應斷面編號定義；`$Lpi`、`$Lpj` 為桿件元素首尾兩端塑性鉸長度；`$E` 為桿件元素的彈性模數；`$A` 為桿件元素的斷面面積；`$Iz` 為桿件元素的斷面慣性矩；`$transfTag` 為桿件元素對應幾何轉換編號定義。

8. 對應節點定義：

此指令功用在於將兩節點自由度一致性，其指令輸入定義為 `equalDOF $rNodeTag $cNodeTag $dof`；`$rNodeTag`、`$cNodeTag` 分別為對應節點編號；`$dof` 為自由度；使用方式如：

`equalDOF 3 4 1 2`；節點 3 和節點 4 的自由度 1、2 的 x 與 y 方向相同。

9. 區域定義：

此功用在於將某一段區域定義為相同材料性質，指令輸入定義為 `region $regTag -ele $ele`；`$regTag` 為區域編號定義；`$ele` 為區域所對應桿件元素編號定義；使用方式如：

`Region 1 -ele 12`，區域編號定義 1；區域所對應桿件元素編號定 12。

10. 載重型態定義：

此指令功用定義在於載重形式及時間對載重變化，而載重模式命令架構為圖 3.15，其指令輸入定義為 `pattern Plain $patternTag $stsType {load $nodeTag $nodeForce eleLoad -ele $eleTag -type $beamType}`；`$patternTag` 為載重型態編號定義；`$stsTag` 對時間函數類型；`$nodeTag` 為對應節點編號定義；`$nodeForce` 為節點上受力型式；`$eleTag` 為對應桿件元素編號定義；`$beamType` 為桿件元素上之載重型式種類，使用方式如：

(1) `pattern Plain 1 Linear {load 2 500 -20 0}`；若座標象限 X 為水平向

右，Y 為垂直向上，Z 為右上定則拇指方向，單位為 kgf，載重型態

編號為 1，則在節點 2 上力量 500 為 X 向右正方向、-20 為 Y 向下負方向力量，0 為在 Z 上沒有力量作用，Linear 是指載重時間函數為線性變化。

3.3.2 輸出指令

依據分析方式，可讀取構架資訊部分，如節點位移、桿件內力、層間位移等，其大概如下：

1. 節點記錄器定義：

此指令功用在於記錄在節點上狀態變化，如節點受力狀況或是節點位移等等，其指令輸入定義為 `recorder Node -file $fileName -time -node $node -dof $dof $respType`；`$fileName` 為檔案名稱；`$node` 為輸出節點編號定義；`$dof` 為輸出節點定義編號的自由度對應使用者所定義 X、Y、Z 座標象限；`$respType` 為節點反應的類型，其類型有 `disp`(位移)、`vel`(速度)、`reaction`(節點反力) 等等；使用方式如：

```
Recorder Node -file Force.out -time -node 1 3 -dof 1 disp ; file  
Force.out 是指檔案名稱為 Force.out，time 是指時間過程變化，node 1 3  
是指輸出節點 1 與節點 3 之變化，dof 1 disp 是指自由度 1 為 X 位移方  
向。
```

2. 桿件元素記錄器定義：

此功用在於記錄桿件元素受力狀態的變化，如桿件元素之內力等等，其指令輸入定義為 `recorder Element - file - time - ele $ele $respType`；`$ele` 為輸出桿件元素定義編號；`$respType` 為輸出桿件元素的類型，類型有 `globalForce`、`localForce` 等等；使用方式如：

`Recorder Element - file ColForce . out - time - ele 12 globalForce`；`file ColForce . out` 是指檔名稱為 `ColForce . out`，`time` 是指時間過程變化，`ele 12 globalForce` 是指輸出桿件元素編號定義為 12 的全域座標桿件元素力量。

3.3.3 分析指令

OpenSees 結構分析方程式系統處理條件必須需要由束制分析定義、數值分析定義、積分分析定義、演算法分析定義、系統分析定義、收斂分析定義、分析模式定義、分析總步數定義，這八種分析類型，缺一不可，而由這八種分析類型組成分析系統架構，這樣才能有效完成執行系統分析。

1. 束制分析定義：

此分析功用在於處理邊界條件是否有束制，並將束制方程式執行指定自由度，其指令輸入定義為 `constraints $constraintsType`；`$constraintsType` 依照使用者需求可以選擇束制條件處理與選擇方式，如 `Plain`、`Lagrange`、`Penalty`、`Transformation`；本文研究束制條件用一般方

式處理，constraints Plain。

2. 數值分析定義：

此分析功用決定方程式數量與自由度的關係處理方式，並可節省分析時間，其指令定義指令輸入定義為 `numberer $numbererType`；`$numbererType` 依照使用者需求選擇數值分析方式種類，如 Plain、RCM、AMD；本文採用一般方式處理，`numberer Plain`。

3. 系統分析定義：

此分析功用在於建構 LinearSOE 和 LinearSolver 物件，並在分析上將 LinearSOE 和 LinearSolver 物件來儲存與解決方程式系統，其指令輸入定義為 `system $systemType`；`$systemType` 依照使用者需求選擇系統種類，如 BandGeneral、BandSPD、ProfileSPD、SparseGEN、UmfPack、SparseSYM；本文為一般方式系統處理，`system BandGeneral`。

4. 收斂分析定義：

此分析功用處理收斂條件，並應用在矩陣方程式($AX=B$)，再將矩陣方程式存儲於 LinearSOE；其指令輸入定義為 `test $testType`；`$testType` 依照使用需求選擇收斂方式處理，本文自重分析系統與側推分析系統採用不同收斂方式處理，使用方式如：

(1) `test NormDispIncr $tol $iter`；此功用在於位移增量，其 `$tol` 為收斂

之公差標準檢驗，\$iter 為最大迭代數量來檢驗之前返回失敗狀況；

此指令用在自重分析系統部分，其\$tol 為+1.000000E-0.006 及\$iter 為 200。

- (2) test EnergyIncr \$tol \$iter；此功用為能量增量，其\$tol 與\$iter 說明如上，此指令用在側推分析系統部分，其\$tol 為+1.000000E-0.008 及\$iter 為 2000。

5. 迭代分析定義：

此分析功用在於處理解決非線性方程式每一步程序，其指令輸入定義為 algorithm \$algorithmType；\$ algorithmType 依照需求選擇演算法分析方式，如 Linear、Newton、NewtonLineSearch、ModifiedNewton、KrylovNewton、BFGS、Broyden；而本文指令，algorithm Newton。

6. 積分分析定義：

此分析功用為決定預測時間步調或是方程式系統物件之期間表示，並配合靜力分析或是動力分析方式，其指令輸入定義為 integrator \$integratorType；\$ integratorType 依照使用者需求選擇積分分析方式，而本文採用積分分析定義方式，分別用自重與側推來建構不同行為模式，使用方式如：

- (1) integrator LoadControl \$lambda；\$lambda 為控制載重因素每一步增

量，此指令用在自重分析系統，其 λ 為 $+1.000000E-002$ 。

(2) integrator DisplacementControl \$node \$dof \$incr；\$node 為使用者需求選擇對應節點編號，\$dof 為自由度，依據使用者定義座標象限方向，\$incr 為控制每一步位移增量，此指令用在側推分析系統。

7. 分析模式定義：

此分析功用在於決定做何種型態分析，分別有靜力、動力及動力變化分析這三種分析，其指令輸入定義為 analysis \$analysisType；\$analysisType 依照使用者喜好決定分析模式種類，如 Static、Transient、VariableTransient；本文所做側推分析是用靜力分析型態方式，analysis Static。

8. 分析總步數定義：

此分析功用為分析總步數，並配合每一步載重或是位移控制量，而分析總量=分析總步數乘以每一步位移控制量，此會影響分析時間，指令輸入定義為 analyze \$numIncr；\$ numIncr 為總步數數量，其指令使用方式如：

analyze 100；100 為分析總步數，假設每一步位移控為 0.1cm，則 $100 \times 0.1 = 10$ ，故 10 為分析總量。

3.4 OpenSees側推分析流程

除了 OpenSees 三大分析架構之外，在建立架構必須要有系統上規劃，而側推分析基本建立參考流程如下：

1. 決定構架維度與自由度，模型定義 (Model Command)。
2. 依座標象限定義來決定構架桿件與節點位置，節點定義 (Node Command)。
3. 依照構架邊界條件來決定束制條件，邊界條件定義 (Fix Command)。
4. 在 OpenSees 材料指令，必須對應步驟 5 指令用法，材料指令除了是應力與應變關係，也可以當作力與變形關係，其應用可參照官方網站之單軸材料定義 (Uniaxial Material Command)。
5. 斷面定義 (Section Command) 用法分為兩種型式，一種是以材料性質應力與應變關係，而斷面幾何指令當作斷面幾何方式，另外一種是把材料性質關係是用力與變形關係，則斷面幾何指令轉為受力有關方式。
6. 幾何條件轉換，幾何定義 (Geometric Transformation Command)。
7. 桿件元素定義 (Element Command)。
8. 建立與讀取構架分析結果，輸出指令 (Output Command)。
9. 考慮自重之載重型態定義 (Pattern Command) 與自重分析指令 (Analysis

Command)。

10. 保持自重荷載不變，LoadConst - time 0。

11. 考慮側向力之載重型態定義 (Pattern Command) 與側推分析指令 (Analysis Command)。



第四章 非線性側推分析流程

本研究藉由 OpenSees 非線性分析功能，針對鋼筋混凝土構架建立材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析及非線性集中彈簧之側推分析為三種方式進行分析，並對這三種不同方式所應用 OpenSees 分析指令及注意事項，敘述說明。

4.1 材料非線性之分析程式

此法是將斷面分成非線性元素所組成，由主筋與混凝土材料部分組成，但忽略箍筋影響，此建立方式及注意事項如下：

1. 材料性質定義與建立：

一開始先建立與定義材料應力-應變關係，而鋼筋混凝土柱之材料選用主筋與混凝土組成，忽略側向箍筋材料性質，在 OpenSees 指令選用主筋採用 Steel01，而混凝土指令為 Concrete01，此兩者指令應用與詳細說明可參考第三章之建模指令 3.3.1。

2. 斷面幾何定義與建立：

實際上鋼筋混凝土斷面有混凝土、主筋、箍筋三種材料組成，但本研究鋼筋混凝土柱材料考慮主筋與混凝土部分，並忽略箍筋影響，對於真實狀況會有些差異，在 OpenSees 斷面指令採用 Fiber；首先考慮

主筋排列位置與斷面幾何條件，其主筋排列位置與斷面幾何方式如圖 4.1，在將圖 4.1 之鋼筋混凝土斷面切成一小塊元素，如圖 4.2。

3. 桿件元素定義與建立：

完成材料定義與斷面幾何關係之後，建立鋼筋混凝土柱桿件元素，其 OpenSees 桿件元素指令採用 nonlinearBeamColumn，而將鋼筋混凝土柱切成一小塊桿件元素，如圖 4.3，並將每塊桿件元素定義積分點數量，本研究之積分點採用為 3。

4. 將步驟 1~3 建立完成後，考慮側向推力，並忽略桿件自重影響，而鋼筋混凝土柱建模指令整理為表 4.1。
5. 在建模整個完成後，考慮分析指令選用，其自重與側推分析為表 4.2、表 4.3。

4.2 鋼筋混凝土斷面非線性行為分析

此法主要是計算鋼筋混凝土斷面的彎矩與曲率部分，並建立彎矩與曲率關係，如圖 4.4，可由彎矩與曲率關係過程中得知斷面破壞行為變化，且有幫助了解構材之韌性，在鋼筋混凝土斷面彎矩與曲率關係可用材料力學基本理論與極限設計法做為計算。

在「土木 406-100 鋼筋混凝土學」[19]裡有詳細介紹彎矩與曲率理論

與計算方式，並將彎矩與曲率關係分為四個階段（圖 4.5），未開裂且為彈性變形階段($M \leq M_{cr}$)、已開裂但仍為彈性變形階段($M_{cr} < M \leq M_{el}$)、已開裂且為非彈性階段($M_{el} < M < M_u$)、極限階段($M = M_n$)；但在本文分析研究考慮已開裂但仍為彈性變形階段及極限階段為這兩個階段部分。

4.2.1 鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之基本假設

在建立彎矩與曲率關係前，須考量計算斷面彎矩與曲率之方便性，首先先假設材料性質與斷面幾何部分，其假設有：

1. 材料性質：

一般鋼筋混凝土結構斷面材料是由鋼筋與混凝土組成，在計算斷面彎矩與曲率中，需要將鋼筋與混凝土兩者之應力與應變關係轉換為理想化曲線，其鋼筋與混凝土之應力-應變曲線分別為圖4.6、圖4.7。

2. 斷面幾何：

大部分結構柱斷面形狀有矩形與圓形，還要考慮鋼筋在斷面上排列位置，在此斷面形狀採用矩形，而鋼筋位置，如圖4.8。

3. 鋼筋與混凝土力學行為：

鋼筋與混凝土之力學行為不同，鋼筋可承受拉、壓力行為，而混凝土在受力中，以抗壓行為較佳，對於拉力作用影響有限；當考慮混凝土開裂行為時，計算斷面彎矩與曲率中，拉力行為通常是忽略不計。

4.2.2 計算鋼筋混凝土斷面彎矩與曲率之流程

將對已開裂但仍為彈性變形階段及極限階段兩個階段作為計算斷面彎矩與曲率，而已開裂但仍為彈性變形階段用材料力學理論計算，極限階段用極限設計法計算，而混凝土極限應變一般介於0.003~0.004，在此混凝土極限應變(ϵ_{cu})採用為0.004。

其中鋼筋混凝土斷面尺寸如圖4.8所示：

1. 斷面寬(b) = 30 cm；
2. 斷面深(h) = 50 cm；
3. 保護層間距(d_s) = 6 cm；
4. 壓力筋(A_{sc}) = 3 - #8；
5. 拉力筋(A_{st}) = 3 - #8；

材料性質定義如圖4.6、圖4.7所示：

1. 混凝土抗壓強度(f') = 280 kgf/cm²；
2. 混凝土彈性模數(E_c) = 15000 $\sqrt{f'}$ kgf/cm²；
3. 鋼筋降伏強度(f_y) = 4200 kgf/cm²；
4. 鋼筋彈性模數(E_s) = 2040000 kgf/cm²；

而彎矩與曲率之計算流程如下：

1. 假設混凝土開裂破壞但仍為彈性階段時之中性軸深度為 x cm，其彈性

模數比 $n = E_s/E_c$ ，用鋼筋轉換斷面法和拉壓斷面一次矩相同(圖4.9)：

$$(bx) \left(\frac{x}{2}\right) + (n - 1)(A_{sc})(x - d_s) = (nA_{st})(d - x)$$

將已知條件代入，得

$$(15x) \left(\frac{x}{2}\right) + (8 - 1)(15.201)(x - 6) = (8)(15.201)(44 - x)$$

求解得

$$x = 13.778 \text{ cm}$$

2. 求混凝土開裂二次慣性矩(I_{cr})：

$$I_{cr} = \frac{bx^3}{3} + (n - 1)A_{sc}(x - d_s)^2 + nA_{st}(d - x)$$

將已知條件代入，得

$$I_{cr} = \frac{30x^3}{3} + (8 - 1)(15.201)(x - 6)^2 + (8)(15.201)(44 - x)^2$$

將 $x=13.778$ 代入，得開裂慣性矩

$$I_{cr} = 143665.5763 \text{ cm}^4$$

3. 降伏彎矩 (M_y) 和降伏曲率 (ϕ_y) 的計算：

假設鋼筋已降伏，則 $f_s = f_y$ ， $M = M_y$

$$M_y = \frac{f_y I_{cr}}{n(d-x)} = \frac{(4200)(143665.5763)}{(8)(44-13.778)} = 2495679.557 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_{sy}}{(d-x)} = \frac{(f_y/E_s)}{(d-x)} = \frac{(4200/2040000)}{(44-13.778)} = 6.81233 \times 10^{-5}$$

4. 混凝土壓力側計算依據Whitney[30]矩形應力塊方式，並假設中性軸深

度為 x cm：

$$C_c = 0.85f'_c b a = 0.85f'_c b(\beta_1 x) = 0.85(280)(30)(0.85x) = 6069x$$

$$(\beta_1 = 0.85 - \frac{(f'_c - 280)}{70} = 0.85 - \frac{(280 - 280)}{70} = 0.85)$$

5. 假設壓力筋未降伏：

$$C_s = f_s A_{sc} = \left\{ [E_s] \left[\frac{(x - d_s) \epsilon_{cu}}{x} \right] \right\} A_{sc} = \left\{ [2040000] \left[\frac{(x - 6) 0.004}{x} \right] \right\} \quad (15.201)$$

6. 假設拉力筋已降伏：

$$T = A_{st} f_y = (15.201)(4200) = 63844.2 \text{ kgf}$$

7. 力平衡， $C_c + C_s = T$

求解得 $x = 7.174 \text{ cm}$

8. 檢查是否壓力筋為未降伏(ϵ_{sc})與拉力筋為降伏(ϵ_{st})：

(1) 壓力筋為

$$\epsilon_{sc} = \frac{(x - d_s) \epsilon_{cu}}{x} = \frac{(7.174 - 6)(0.004)}{7.174} = 0.00065 \leq \frac{f_y}{E_s} = \frac{4200}{2040000} = 0.002 \text{ (O.K)}$$

(2) 拉力筋為

$$\epsilon_{st} = \frac{(d - x) \epsilon_{cu}}{x} = \frac{(44 - 7.174)(0.004)}{7.174} = 0.02050 \geq \frac{f_y}{E_s} = \frac{4200}{2040000} = 0.002 \text{ (O.K)}$$

9. 極限彎矩(M_n)和極限曲率(ϕ_u)的計算

$$\begin{aligned} M_n &= A_{st} f_y \left(d - \frac{0.85x}{2} \right) \\ &= (15.201)(4200) \left[44 - \frac{6.0979}{2} \right] = 2614487.026 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{x} = \frac{0.004}{7.174} = 0.000557$$

4.2.3 彎矩與曲率非線性關係之定義與建立

在OpenSees採用非線性桿件元素指令做為分析，需要兩種方式才能執

行，否則在執行OpenSees軟體分析上會有問題，第一種方式，斷面指令須採用Fiber，可由單一材料或是兩種以上不同材料性質條件組成，如鋼結構材料、鋼筋與混凝土材料組合；第二種方式，在OpenSees分析軟體可將材料指令定義轉為力-變形關係，若採用力-變形關係建立，須兩種以上力-變形關係模式，並用疊加方式；在此法研究中，採用第二種方式建立，其建立方式及注意事項如下：

1. 材料指令定義與建立：

將由 4.2.2 之鋼筋混凝土斷面計算出降伏彎矩(M_y)、降伏曲率(ϕ_y)、極限彎矩(M_n)、極限曲率(ϕ_u)四個部分整理如表 4.4，並建立彎矩與曲率關係圖(圖 4.4)，在 OpenSees 材料指令須選用除了能當應力-應變關係，另外也可能用在力-變形關係，在此本研究指令採用 Steel01，如圖 3.4，指令輸入定義條件須有 \$Fy、\$E0、\$b，其 \$Fy 當作為降伏彎矩(M_y)，\$E0 斜率計算為 $E0 = M_y / \phi_y$ ，而 \$b 與斜率有關，其在圖 3.4 中 $b * E0 = \frac{(M_y - M_n)}{(\phi_y - \phi_u)}$ ，故 $b = \frac{(M_y - M_n)}{E0(\phi_y - \phi_u)}$ 。

2. 斷面指令應用：

為了將材料指令做為力-變形關係建立須要有斷面指令對應，此 OpenSees 材料指令採用 section Aggregator，此斷面指令可將材料指令定義轉為力-變形關係，且疊加影響，但為了表現出彎矩與曲率所建立

關係曲線，必須把另一個力-變形關係條件改變，可減少疊加過程中影響，如 $\kappa = \frac{M}{(EI)_1} + \frac{M}{(EI)_2}$ ，當 M 彎矩力量相同，若要表現出 $\frac{M}{(EI)_1}$ ，則將 $(EI)_2$ 定義條件給改變。

3. 桿件元素建立：

此法桿件元素指令採用 nonlinearBeamColumn 做為分析，而鋼筋混凝土柱分成一小塊桿件元素，如圖 4.3，並將每塊桿件元素定義積分點數量。

4. 將步驟 1~3 定義與建立用於鋼筋混凝土柱建模方式，並考慮側向推力，忽略自重影響，而鋼筋混凝土柱建模指令整理為表 4.5。
5. 最後考慮自重與側推分析模式建立，其分析模式建立與材料非線性之側推分析為一致，表 4.2 與表 4.3。

4.3 非線性集中彈簧之側推分析

此法是在側推分析最為普遍，一般來說，當構架受到側向力慢慢作用時，構架上桿件上某個端點會發生塑性鉸，使構架靜不定數減少，且彎矩重分配，直到構架整個崩塌；在梁柱接頭區域視為剛性，所以會在桿件端點定義塑性鉸時會有 Offset 部分，並用集中彈簧方式模擬，如圖 4.10；在本研究中構架之梁柱接頭忽略剛性影響，不考慮 Offset 部分，塑性鉸定義是以

彎矩-轉角關係方式建立，如圖4.11，並且用集中彈簧方式模擬，而塑性鉸會在桿件端點發生，另外在OpenSees分析軟體提供另一種用塑性區方式模擬塑性鉸，在此會一一說明敘述。

4.3.1 集中彈簧之分析建立

此法建立方式及注意事項如下：

1. 彎矩與轉角之定義與計算：

將以鋼筋混凝土柱來模擬塑性鉸，其建模為圖4.12，首先鋼筋混凝土柱須做材料非線性之側推分析，並將分析結果之容量曲線圖給繪出，如圖4.13；在鋼筋混凝土柱分析過程中，鋼筋混凝土柱會慢慢先達到降伏，如圖4.14之基底剪力為 V_y 與位移為 Δ_y ，此時鋼筋混凝土柱未破壞，當位移再持續慢慢增加，直到鋼筋混凝土柱破壞，此時達到極限，其圖4.15之基底剪力為 V_c 與位移為 Δ_c ；在把圖4.14與圖4.15之兩個點計算出彎矩與轉角，而轉角(θ)計算可由圖4.16中概念得到，其彎矩與轉角計算方式為：

彎矩(M) = 基底剪力(V) * 柱高(H)；

轉角(θ) = 位移(Δ)/柱高(H)；

最後將圖4.14與圖4.15之兩個點計算結果整理。

2. 材料指令選用與定義：

步驟1完成後，在圖4.12中A段來模擬集中彈簧，並定義此段，在OpenSees材料指令採用Bilin，並建立彎矩與轉角關，如圖3.6，須定義有 K_e 、 M_y 、 θ_p 之斜率、 θ_p 之線段、 θ_{pc} 之線段、 κ 、 θ_u ，其餘為OpenSees之預設值，正負值相同；將 K_e 勁度視為剛性， M_y 為 $V_y \times H$ ， θ_p 之斜率計算方式為 $\frac{(M_c - M_y)}{K_e(\theta_c - \theta_y)}$ ， θ_p 之線段為 $\theta_c - \theta_y$ ， θ_{pc} 之線段為0， κ 為0， θ_u 視為 θ_c 。

3. 桿件元素之建立：

在圖4.12中A段之節點1與節點2位置一致，所以在A段區域上採用OpenSees指令為zeroLength，可表現出節點1與節點2位置相同，且在A段區域須指定模式行為，並與材料指令定義行為上對應；在此A段區域採用集中彈簧模式行為，而定義行為在步驟2；另外在B段區域視為線彈性之桿件元素，其考慮指令為elasticBeamColumn。

4. 雖然節點1與節點2位置相同，但須考量束制條件行為，其節點1與節點2束制條件的X、Y方向相同，並將節點1與節點2之間區域定義為集中彈簧區。

5. 步驟1~4完成後，考慮側向推力，並忽略自重，其鋼筋混凝土柱之建模指令為表4.6。

6. 最後建立自重與側推分析指令，其表4.2與表4.3。

除了上述所用集中彈簧方式模擬塑性鉸，另外在OpenSees提供另一種方式模擬，若塑性鉸定義是彎矩與轉角關係，則塑性鉸會發生在桿件上端點，其OpenSees桿件元素指令為beamWithHinges，如圖3.14，此指令兩端點為非線性可視為塑性區，中間為線彈性，適合用來模擬塑性鉸，但必須考慮兩端點非線性段之長度；此法建立方式與上述步驟1、2、6做法相同及步驟順序不變，其步驟3、步驟4、步驟5做法如下：

步驟3：在步驟2所採用彎矩-轉角關係建立，須與斷面指令相互對應，在此斷面指令採用Uniaxial，可將材料指令轉為力-變形關係。

步驟4：桿件元素指令改用為beamWithHinges，並考慮塑性區之長度，在OpenSees官方網站上建議採用0.4%之塑性區長度比例，其塑性區計算方式：

塑性區長度(PL) = 0.4% × 桿件長度(L)。

步驟5：只有鋼筋混凝土柱之建模指令不同，其表4.7。

第五章 側推分析實例展示行為及討論

此章將以材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析及非線性集中彈簧之側推分析之三種方法呈現，用懸臂柱、門型構架來展示行為，並加以討論三種方法之分析模式，最後在以集中彈簧模擬大型構架，而容量曲線圖之基底剪力與位移單位分別採用 kgf 與 cm。

5.1 懸臂柱

此例題將鋼筋混凝土柱視為懸臂柱(Cantilever Column)方式進行側推分析模擬，柱高為 360 公分，在頂部自由端施加 60000 kgf 之側向推力，材料性質與斷面幾何採用第四章之 4.2.2 節條件，將不同非線性側推分析方法，依照第四章側推分析流程建立與分析，其材料非線性之側推分析與鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之模型，分別為圖 5.1 與圖 5.2，及非線性塑性鉸之側推分析之模型如圖 4.12，A 之長度為 0 公分，B 之長度為 360 公分，並將其討論與結果如下：

1. 只有材料非線性之側推分析之容量曲線圖無法判定鋼筋混凝土行為，鋼筋混凝土斷面行為分析是以彎矩-曲率關係建立，其計算結果降伏彎矩為 2495679.56 kgf·cm 與極限彎矩為 2614487.03 kgf·cm，可用來判定非線性側推分析之斷面元素分析法之鋼筋混凝土斷面狀況，其兩者容量

曲線結果為圖 5.3，從圖中得知，兩者曲線在降伏階段為一致，這表示鋼筋混凝土斷面行為是在混凝土開裂且仍為彈性階段，而鋼筋混凝土斷面行為分析之位移在 3.0 公分，基底剪力為 6956.11 kgf，彎矩為 2504200 kgf·cm，並達到預期之計算結果降伏彎矩，當懸臂柱達到極限狀態，此時兩條曲線之位移為 88.6 公分，而鋼筋混凝土斷面行為分析之基底剪力為 10088.1 kgf，彎矩為 3631730 kgf·cm，並沒有達到預期計算結果之極限彎矩，由此可知，鋼筋混凝土斷面非線性行為分析較為保守。

2. 在非線性側推分析之塑性鉸中，彎矩-轉角關係建立是以材料非線性之側推分析之容量曲線圖結果計算得來，其計算結果之降伏點彎矩為 2547260 kgf·cm 與轉角為 0.000557，極限點之彎矩為 4083210 kgf·cm 與轉角為 0.246111，在以集中彈簧方式進行側推分析模擬，其兩者容量曲線如圖 5.4，圖中集中彈簧達到預期降伏破壞點位置，當達到最大基底剪力之位移，兩者位移分別為 88.6 公分與 90.3 公分，差距不大，可在容許範圍內；在整體來看，集中彈簧之容量曲線圖有達到預期，另外將集中彈簧之彎矩與轉角建立關係圖，如圖 5.5，降伏點之彎矩為 2548140 kgf·cm 與轉角為 0.000136，及極限點之彎矩為 4081650 kgf·cm 與轉角為 0.237258，都有達到預期所定義的位置。

3. 同樣是以非線性材料之側推分析之容量曲線圖結果來計算彎矩-轉角及建立關係，並由 OpenSees 所提供用塑性區方式模擬側推分析，此法與集中彈簧相似，OpenSees 官方網站所建議 0.4% 之塑性區長度比例，另外考慮 0.2% 之比例，其塑性區之長度計算結果分別為 1.44 公分、0.72 公分，透過塑性區長度不同之分析結果與集中彈簧之容量曲線作為比較，如圖 5.6；在圖 5.6 中可知，在同樣 0.1 位移控制，當懸臂柱達到降伏時，位移與基底剪力為相近，在圖 5.6 中，當懸臂柱極限破壞時，0.2%、0.4% 之基底剪力分別為 11335.9 kgf、11339.0 kgf，及位移分別為 66.4 公分、128.0 公分，不管塑性區比例多少，降伏破壞點與極限破壞點之基底剪力值都能達到預期所定義位置，但在極限破壞點的位移會依塑性區長度比例越大而越大，相反的，塑性區長度越小，位移越小。
4. 將塑性區比例之容量曲線圖與集中彈簧之容量曲線相互對應用，並以集中彈簧之容量曲線為依據，從圖 5.6 得知，0.2%、0.4% 之容量曲線與集中彈簧有很大差異，在最大基底剪力之位移有很大差異，須修正，用試誤法方式來校正塑性區之長度，故校正結果為 0.278% 塑性區長度之比例，如圖 5.7。
5. 將材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析、非線性集中彈簧之側推分析、非線性塑性區之側推分析之四種容量曲線整理為圖

5.8，從圖可知，由這四種非線性側推分析中，材料非線性之側推分析為準確，可從建模方式得知，須考量材料性質與組成，並將斷面與桿件元素切割；鋼筋混凝土斷面非線性行為分析可由彎矩與曲率計算出結果，並判別與檢驗材料非線性之側推分析之鋼筋混凝土斷面行為；若不考慮材料組成，可用集中彈簧方式最為方便，且在分析結果上可達到預期效果；塑性區是將集中彈簧模擬方式給簡化，若塑性鉸定義要在桿件中間就不適用。

5.2 門型構架

此例題為門型構架(Portal Frame)模式進行側推分析，柱桿件之材料性質、斷面幾何及桿件長度採用 5.1 之懸臂柱條件，並建立於構架之桿件柱，梁桿件採用為線彈性行為，其長度為 400 公分，並對門型構架施加 60000 kgf 之側向推力，如圖 5.9；從 5.1 之懸臂柱討論與結果可知，集中彈簧、塑性區之容量曲線圖，可與材料非線性之側推分析之容量曲線達到預期效果，在由鋼筋混凝土斷面非線性行為分析得知，鋼筋混凝土斷面行為在降伏階段為開裂且仍為彈性階段，集中彈簧與塑性區之塑性鉸定義與建模方式為圖 5.10、圖 5.11，而材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之構架建立模式，如圖 5.9，其中構架之桿件柱建立，分別圖 5.1 與圖

5.2，並討論分析結果，其如下：

1. 用材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析、非線性集中彈簧之側推分析、非線性塑性區之側推分析四種方法進行構架之側推分析，並將分析結果之容量作為比較，其圖 5.12，從圖可知，當柱兩端達到降伏階段，四條容量曲線為相近，當構架達到最大基底剪力時，材料非線性之側推分析與鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之位移為 45.0 公分，非線性集中彈簧之側推分析、非線性塑性區之側推分析之位移為 45.2 公分，基底剪力值為 44974.2 kgf，並達預定位置。
2. 從圖 5.12 來看，當構架在降伏階段，當第一個塑性鉸產生時，集中彈簧、塑性區、材料非線性之側推分析之發生破壞點是一致，柱的底端先發生塑性鉸，且柱達到降伏，此時容量曲線產生第一個破壞點，在一小段 B 之轉折，此時柱的另一端也發生塑性鉸及達到降伏，而容量曲線產生第二個破壞點，直到構架受到最大基底剪力時，其柱的底端達到極限而破壞，且容量曲線產生第三個破壞點，由此可知，可以推斷材料非線性之側推分析構架行為。
3. 對 OpenSees 分析軟體而言，只有數據上結果，構架之塑性鉸發生順序與位置，須建立圖表方式對應，在簡單構架可容易判斷出，若是大型結構就很麻煩，先將容量曲線圖之繪出，在與集中彈簧分析結果之建立彎

矩-位移關係曲線圖來對應；由集中彈簧之容量曲線圖 5.13 中，當位移 1.9 公分之產生破壞點 a，在對應圖 5.14 中 A 點之彎矩為降伏，此時構架發生第一個破壞點在柱之底端；當圖 5.13 中位移達到 2.8 公分產生破壞點 b，對應圖 5.14 中 B 點，此時構架第二個破壞點發生在柱之上端點；此時構架還未破壞，當位移 45.2 公分為圖 5.13 中 c 點，對應圖 5.14 中 C，柱之底端已達到極限彎矩，發生第三個破壞點，此時構架為最大基底剪力；而位移仍在持續增加，但構架已無法承受，最後位移達到 49.7 公分之圖 5.13 中破壞點 d，對應圖 5.14 中 D 點，此時構架第四個破壞點之彎矩為極限，其發生位置在柱之上端點；由此可見，其構架發生塑性鉸位置與順序如圖 5.15，另外由圖 5.16 之彎矩與轉角關係曲線圖可知，柱之兩端點都達到預期所定義位置，且都以降伏與極限狀態。

4. 另外補充，若用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」[22]之建議定義柱非線性鉸，建模為圖 5.10，其參數條件與建立如下：

(1) 降伏彎矩：以材料非線性之側推分析對鋼筋混凝土柱做側推分析，

並用得到容量曲線圖結果計算降伏彎矩，如圖 4.14，彎矩值計算式：

$$\text{彎矩}(M_y) = \text{基底剪力}(V_y) * \text{柱高}(H),$$

其計算結果為 $7075.72 * 360 = 2547260 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 。

- (2) 鋼筋混凝土斷面：採用第四章之 4.2.2 節條件；另外箍筋假設為 #3@25cm、忽略軸力影響。
- (3) 塑性鉸定義：將(1)、(2)之條件代入第二章文獻回顧之 2.3.1，鋼筋混凝土柱之非線性塑性鉸定義中彎矩塑性鉸定義，並將計算結果 a、b 定義表 2.1(圖 2.4)，其計算結果分別 $a=0.0274$ 、 $b=0.10467$ 。
- (4) 彎矩與轉角建立：採用 Bilin 指令，正負值相同，指令須定義有 K_e 、 M_y 、 θ_p 之斜率、 θ_p 之線段、 θ_{pc} 之線段、 κ 、 θ_u ，其餘為 OpenSees 之預設值； K_e 勁度視為剛性， M_y 為 2547260 kgf·cm， θ_p 之斜率視為水平， θ_p 之線段為 a， θ_{pc} 之線段為 $b-a$ ， $\kappa=0$ ， $\theta_u=10*b$ 。
- (5) 梁桿件採用線彈性行為，且梁之桿件長度 400 公分，並在頂部施加 60000 kgf 之側向推力，建模指令、自重分析指令、側推分析指令與表 4.6、表 4.2、表 4.3 相同。
5. 由上述 4 之條件來進行分析，其結果與圖 5.13 之容量曲線相互比較，如圖 5.17 中得知，在鋼筋混凝土柱之兩端點都達到降伏，兩者容量曲線皆相同，當構架崩塌時，兩者容量曲線之最大基底剪力與位移有很大差異，由此可知，國家地震工程研究中心之容量曲線很保守，對於結構物的補強，可能造成浪費。

5.3 二樓-五跨構架

在懸臂柱、門型構架之結論得知，先用材料非線性之側推分析進行鋼筋混凝土柱之非線性側推分析，並由分析結果之容量曲線計算出彎矩與轉角及建立關係，再用集中彈簧方式模擬，可預測桿件之塑性鉸發生，及達到定義位置與分析效果，不過梁桿件斷面須線彈性行為，此套側推分析方法及流程，將以大型構架來進行說明，並預測塑性鉸發生位置，構架是以兩層樓，五個跨距之結構，柱桿件長度為 360 公分、梁桿件長度為 400 公分，忽略自重影響，施加於在節點上之側向推力，分別一樓為 60000 kgf，二樓為 120000 kgf，其分析流程與討論如下：

1. 鋼筋材料性質定義(圖 3.4)：鋼筋降伏應力 (F_y) 為 4200 kgf/cm²，應變硬化(b)為 0.01，彈性模數(E_0)為 2040000 kgf/cm²。
2. 混凝土材料性質定義(圖 3.5)：降伏壓應力(f_{pc})為 280 kgf/cm²，降伏壓應變(ϵ_{psc0})為 0.002，極限壓應力(f_{pcu})為 80 kgf/cm²，極限壓應變(ϵ_{psU})為 0.004。
3. 斷面幾何條件：斷面為 30×30 公分，主筋採用 4 支#6 號，並將柱斷面切成 6×6 公分大小矩形元素，如圖 5.18。
4. 將 1、2、3 之鋼筋混凝土柱斷面條件，用非線性側推分析之斷面元素分析法來進行非線性側推分析，其分析流程以第四章之 4.1.1 節方式，並

將分析結果之容量曲線圖繪出與點出降伏點、極限點；當位移(Δ_y)5.6公分，到達降伏點位置，基底剪力(V_y)1435.54 kgf；當位移(Δ_c)23.6公分，此點為極限點，基底剪力(V_c)1821.61 kgf，如圖 5.19 中 A(降伏點)、B(極限點)兩點。

5. 依照第四章之 4.3.1 節側推分析流程方式，先將圖 5.19 中 A、B 兩點計算出彎矩與轉角，並定義彎矩-轉角關係，A 點彎矩與轉角分別為 $M_y = 516794.4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 、 $\theta_y = 0.015556$ ，則 B 點為 $M_c = 655779.6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 、 $\theta_c = 0.065556$ 。
6. 建立兩層樓五個跨距構架模型，柱桿件之兩端點以塑性鉸方式模擬，如圖 5.20，a、b、c、e、d、f 代表每行柱，1、2 代表每列樓層位置，梁斷面 30x60 之矩形，並進行分析。
7. 將分析結果之容量曲線繪出，並找出破壞點，如圖 5.21 中 A、B、C，位移控制採用 0.1 公分，從容量曲線圖中 A 區位置很難判定塑性鉸發生位置。由於結構為對稱，只要讀取結構左半部分，如圖 5.22，將 a1 柱、a2 柱、b1 柱、b2 柱、c1 柱、c2 柱之之彎矩與位移建立關係圖，其曲線圖分別為圖 5.23、圖 5.24、圖 5.25，由這些圖可知，a1 柱、b1 柱、c1 柱之兩端點已達到預定降伏與極限狀態。
8. 在圖 5.21 之 A 破壞區，先由 a1 柱、b1 柱、c1 柱的柱底端先發生降伏，

如圖 5.26，接著是 a1 柱、b1 柱、c1 柱的柱頂端也開始降伏，如圖 5.27。

可由圖 5.26 及圖 5.27 得知，當彎矩達到降伏，塑性鉸發生順序位置先由 b1 柱之底端、c1 柱底端、a1 柱底端、b1 柱之頂端、c1 柱頂端、a1 柱頂端。

9. 在圖 5.21 之容量曲線圖中 B 點位置之位移 14.8 公分，對結構而言，基底剪力為最大，而 b1 柱之頂端、c1 柱頂端、a1 柱頂端之彎矩還未到

達極限，當位移繼續增加，結構已崩塌，但在 17.1 公分時候，b1 柱之頂端、c1 柱頂端、a1 柱頂端之彎矩才達到極限，造成圖 5.21 中 C 點位置稍微爬升。

10. 將用圖表示塑性鉸發生位置及順序，塑性鉸先從一樓柱底端開始先發生，如圖 5.28，之後再慢慢從一樓柱頂端開始發生，如圖 5.29，最後彎矩達到極限，其位置順序發生如圖 5.30。

第六章 結論與建議

本研究是以OpenSees分析軟體來進行側推分析，並對材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析及非線性集中彈簧之側推分析三種方法來呈現，在此作為結論。

6.1 結論

1. 無論是懸臂柱、門型構架，非線性集中彈簧之側推分析可與材料非線性之側推分析之容量曲線圖相近符合，並且在定義上都能到預測效果，而集中彈簧可以預測塑性鉸發生位置與順序。
2. 在非線性塑性區之側推分析模擬下，不管塑性區長度大小如何，都能達到容量曲線之基底剪力值。
3. 無論是材料非線性之側推分析、鋼筋混凝土斷面非線性行為分析及非線性集中彈簧之側推分析，在懸臂柱或是門型構架之容量曲線圖中，在降伏階段曲線為一致。
4. 在大型構架中，先以懸臂柱分析與定義，在以集中彈簧模擬構架，而集中彈簧模擬只有在桿件柱的兩個端點，並沒有考慮梁的部分，對於構架評估只能參考

6.2 建議

以下對本研究側推分析方法及 OpenSees 分析軟體給予建議：

1. 由於 OpenSees 在使用上非常自由，指令功能多樣化，而官方網站例題並沒有很多，對於官方網站上指令使用與說明可能有些不清楚或是不完整，在分析上使用須花費很大時間與嘗試，須藉由其他分析軟體來參考證明與檢驗建模對錯。
2. 本研究集中彈簧模擬只考慮彎矩與轉角條件，只在於柱兩端點模擬，並沒有考量剪力、梁桿件之塑性鉸模擬。
3. 對 OpenSees 而言，在塑性鉸模擬的建立，塑性區比集中彈簧還要方便與簡化，但缺點是塑性區的長度未知。
4. 本研究構架採用 2D 方式，並以柱桿件為主，而梁桿件為線彈性行為，梁柱接頭沒有考慮 Offset 部分，後續可以考慮加入其他條件，如自重、剪力牆、樓板等等來進行研究。
5. 本研究鋼筋混凝土斷面只考量鋼筋與混凝土，混凝土沒有考慮拉力行為，後續研究可以考慮加混凝土拉應力、箍筋的影響、鋼筋混凝土斷面之圍束等等。

參考文獻

1. ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report No. SSC 96-1, Applied Technology Council, 1996.
2. FEMA 273, NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C. , 1997.
3. Freeman, S. A. , Nicoletti, J. P. , “Evaluations to existing building for seismic risk-A case study of Puget Sound Naval Shipyard, ” Washington, Proceeding of 1st U. S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Berkeley, 113-122, 1975.
4. Saiedi, M. , M. A. Sozen. , “Simple nonlinear seismic analysis of R/C structures, ” Journal of Structure Division, 107(8), pp. 937-953, 1981.
5. Miranda, E. , “Seismic evaluation and upgrading of existing buildings, ” Ph. D. Dissertation, University of California at Berkeley, California, 1991.
6. FEMA 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C. , 2004.
7. 內政部, 「建築物耐震設計規範及解說」, 台北, 2006 年。
8. 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。

9. 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。
10. 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。
11. 陳政予，「側推分析於耐震能分析研究」，碩士論文，國立台灣科技大學，
2005。
12. Kilar, V., and Fajfar, P., “Simple pushover analysis of asymmetric
buildings,” *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,
Vol. 26, pp. 223-249, 1997.
13. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., “Theoretical
Stress-Strain Model of Confined Concrete,” *Journal of Structural Division*,
ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1998.
14. Hoshikuman, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W.,
“Stress-Strain Model for Confined Concrete in Bridge Piers,” *Journal of
Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 5, 1997.
15. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., “Seismic Design of Reinforced
Concrete and Masonry Buildings,” Jone Wilty & Sons Inc. 1992.
16. Park, R., “A Static Forced - Based Procedure for the Seismic Assessment

of Existing Reinforced Concrete Moment Resisting Frame,” Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 30, No. 3, September, 1997.

17. 宋裕祺、劉光晏、蘇進國、蔡益超、張國鎮，「鋼筋混凝土柱側推分析之研究與探討」，中華民國建築學會建築學報，第 46 期，pp.47-65，2004。
18. 宋裕祺，「高強度鋼筋混凝土應用在超高樓層建築物之耐震性能探討」，內政部建築研究所，2011。
19. 中國土木工程學會，「鋼筋混凝土學(406-100)」，台北，2011。
20. Mahaney J. A., “Freeman, S. A., Paret, T. F., and Kehoe, B. E. , “The Capacity Spectrum Method of Evaluating Structural Response During the Loma Prieta Earthquake” Proc. 1993 National Earthquake Conference, pp. 501~510, Memphis, 1993.
21. 「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估法及推廣」，內政部建築研究所，民國88年12月。
22. 鐘立來等，「校舍結構耐震評估與補強技術手冊第二版」，國家地震工程研究中心，NCREE-09-023，2009。
23. Elwood, K. J., and Moehle, J. P., “Axial capacity model for shear damaged columns,” ACI Structural Journal, Vol .102, No.4, 578-587, 2005.

24. ACI Committee 318 , Building code requirements for structural concrete (ACI318-05) and commentary(ACI 318R-05). America Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011.
25. Elwood, K. J. , and Moehle, J. P. , “Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement,” Earthquake Spectra, Vol. 21, No. 1, 71-89, 2005.
26. 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.
27. <http://opensees.berkeley.edu.tw> , 柏克萊大學地震研究中心。
28. 楊元森、謝東儒 , 「地震工程模擬 GPGPU 超多核心平行化研究」, 國科會多年期專題研究計劃其中研究成果 , NSC99-2221-E-027-042 。
29. Michael H. Scott. , “Numerical Integration Options for the Force-Based Beam-Column Element in OpenSees,” 2011.
30. Whitney, C. S. , “Design of Reinforced Concrete Members under Flexure or Combined Flexure and Direct Compression,” J. ACI, Vol. 33, Mar-Apr,

pp. 438–498, 1937.



圖表附錄

表2.1 鋼筋混凝土柱彎矩非線性鉸之參數[22]

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

表2.2 鋼筋混凝土柱剪力非線性鉸之參數[22]

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

表4.1 材料非線性之鋼筋混凝土柱建模指令

Model Object	Command Type
Node	node
Fix	fix
Uniaxial Material	Concrete01
	Steel01
Section	Fiber
Geometric Transformation	PDelta
Element	nonlinearBeamColumn

表4.2 自重分析之建構指令

Constraints	Plain
Test	NormDispIncr
Integrator	LoadControl
Algorithm	Newton
Numbered	Plain
System	BandGeneral
Analysis	Static
Analyze	1

表4.3 側推分析之建構指令

Constraints	Plain
Test	EnergyIncr
Integrator	DisplacementControl
Algorithm	Newton
Numbered	Plain
System	BandGeneral
Analysis	Static
Analyze	1000

表4.4 鋼筋混凝土斷面之彎矩與曲率

降伏彎矩(M_y)	2495679.557 kgf·cm
降伏曲率(ϕ_y)	6.81233×10^{-5}
極限彎矩(M_n)	2614487.026 kgf·cm
極限曲率(ϕ_u)	0.000557

表4.5 彎矩與曲率之鋼筋混凝土柱建模指令

Model Object	Command Type
Node	node
Fix	fix
Uniaxial Material	Steel01
Section	Elastic
	Aggregator
Geometric Transformation	PDelta
Element	nonlinearBeamColumn

表4.6 集中彈簧之鋼筋混凝土柱建模指令

Model Object	Command Type
Node	node
Fix	fix
Uniaxial Materia	Bilin
Section	
Geometric Transformation	PDelta
Element	elasticBeamColumn
	zeroLength

表4.7 塑性區之鋼筋混凝土柱建模指令

Model Object	Command Type
Node	node
Fix	fix
Uniaxial Material	Bilin
Section	Uniaxial
Geometric Transformation	PDelta
Element	beamWithHinges

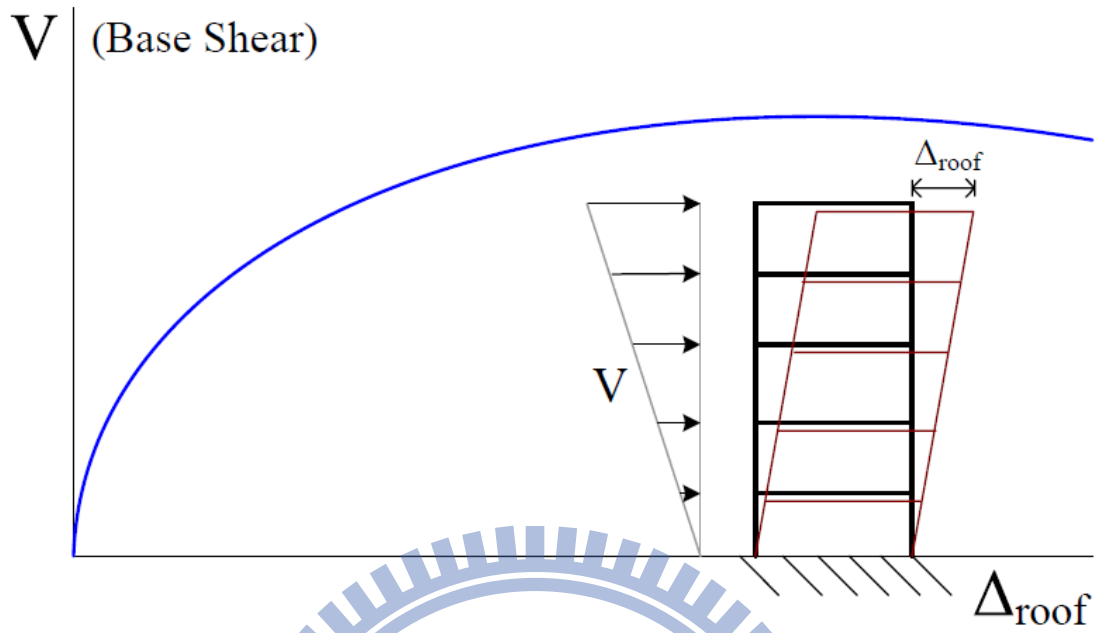


圖2.1 側推分析之容量曲線[22]

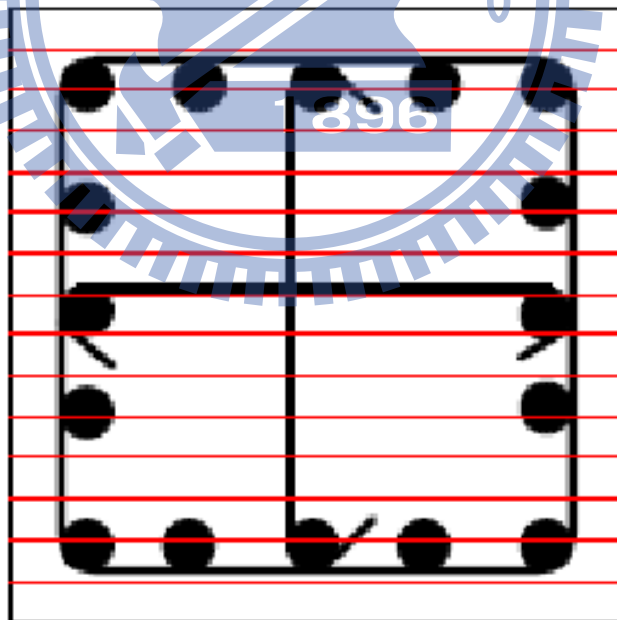


圖2.2 鋼筋混凝土斷面之纖維元素[17]

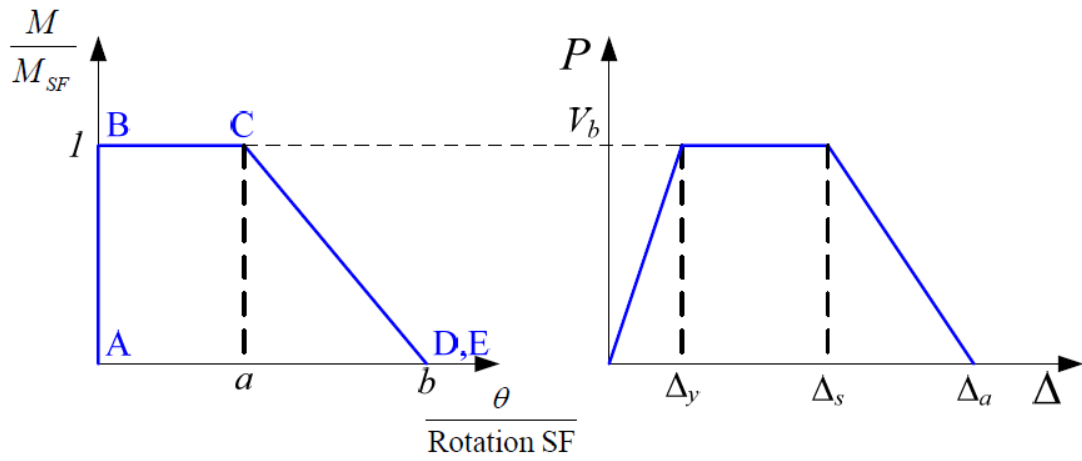


圖2.3 彎矩非線性鉸性質與側向載重位移曲線[22]

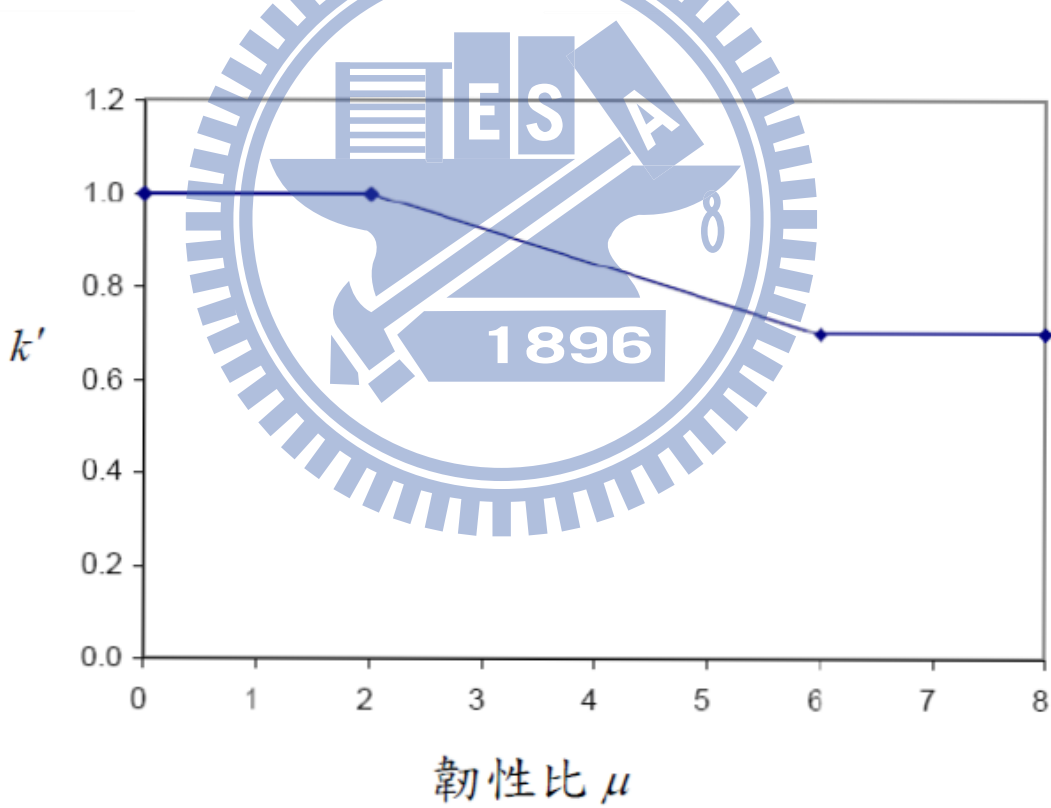


圖2.4 軸向破壞時的變位角之修正係數 k' [22]

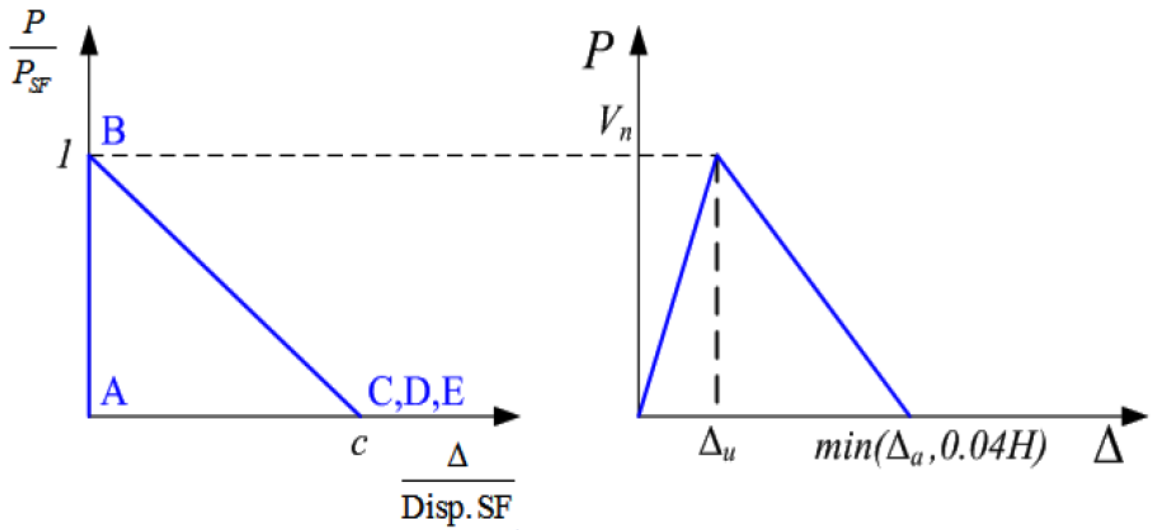


圖2.5 剪力非線性鉸性質與側向載重位移曲線[22]

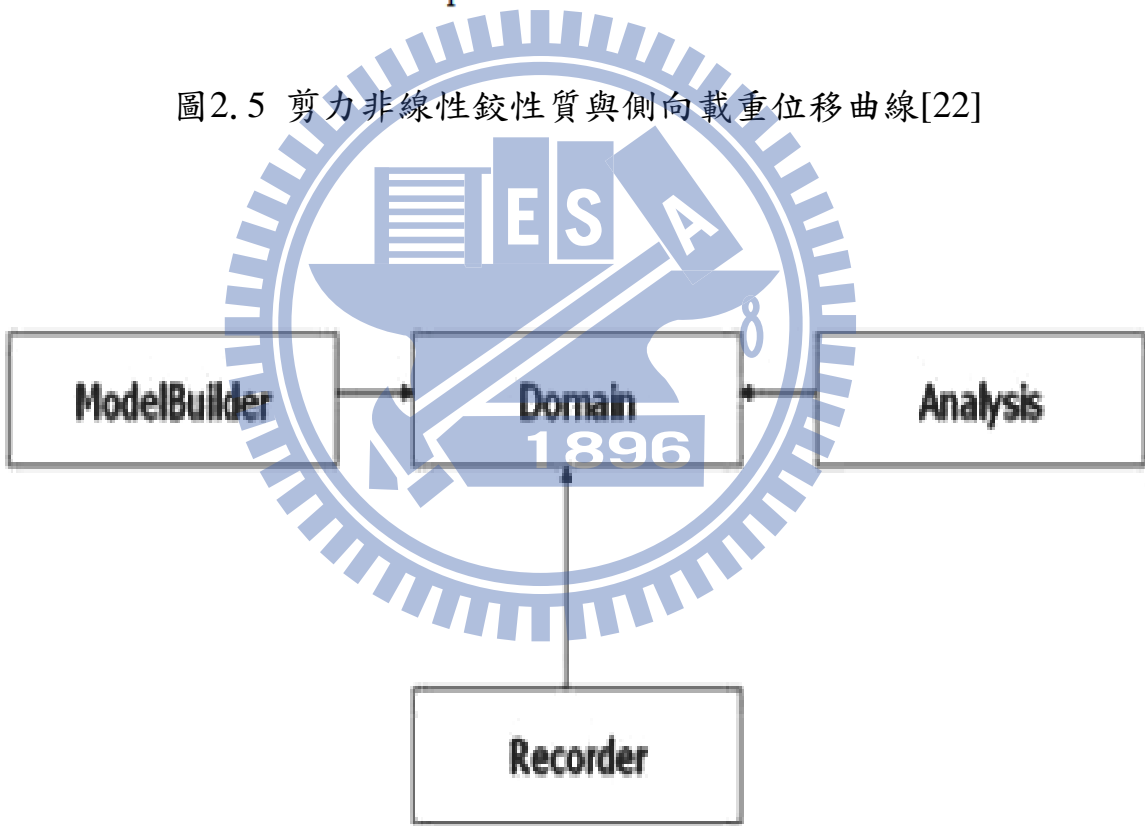


圖3.1 OpenSees主要物件[26]

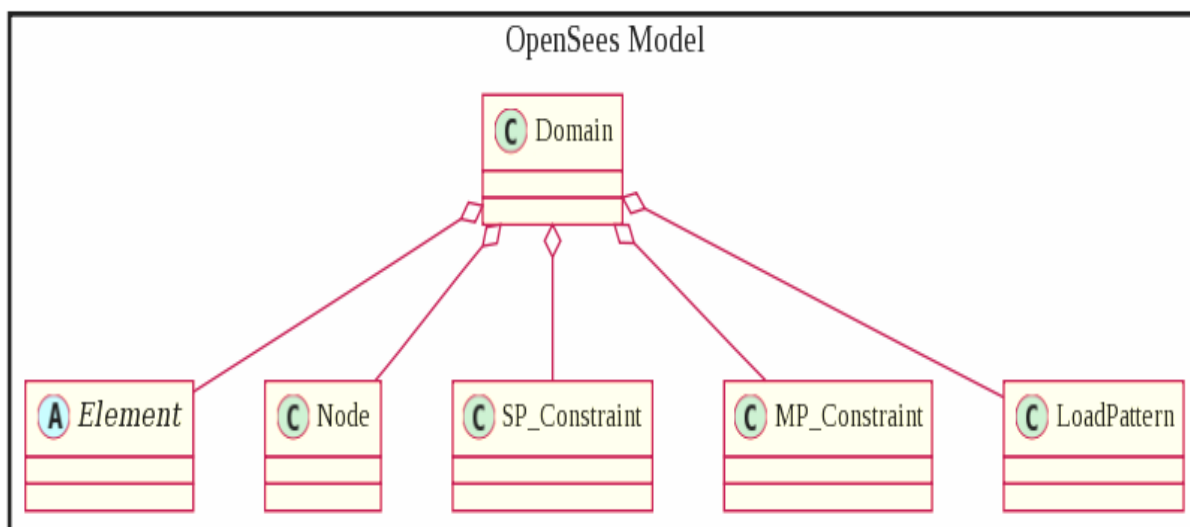


圖3.2 OpenSees模型物件[26]

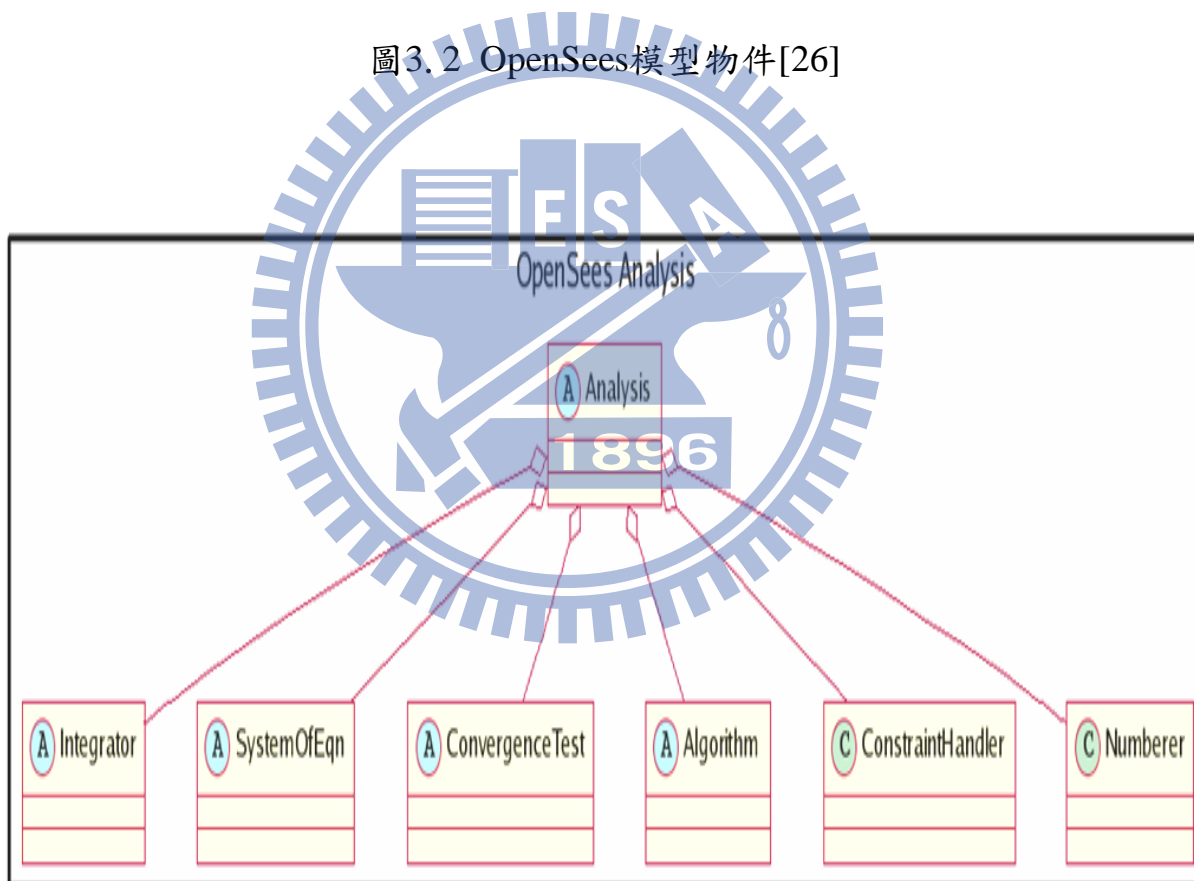


圖3.3 OpenSees分析物件[26]

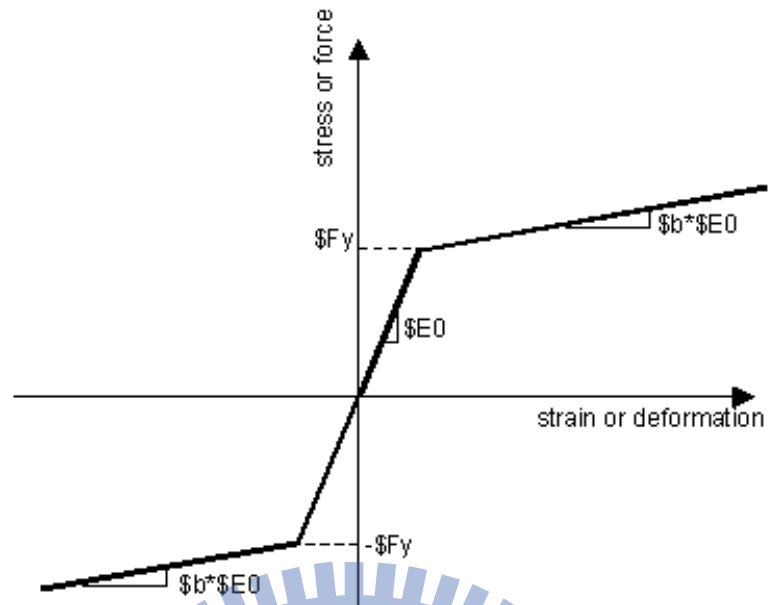


圖 3.4 Steel01 Material [26]

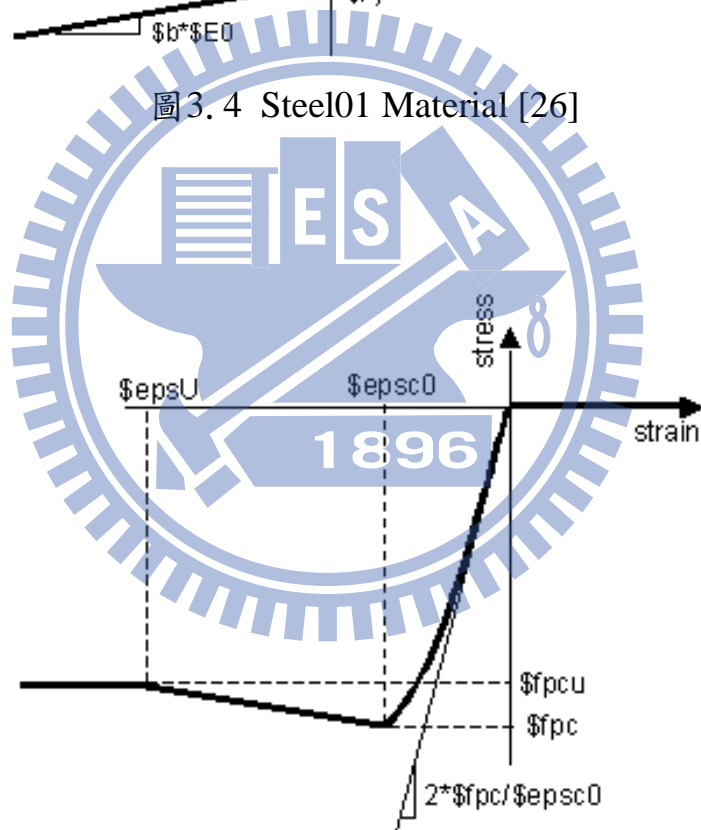
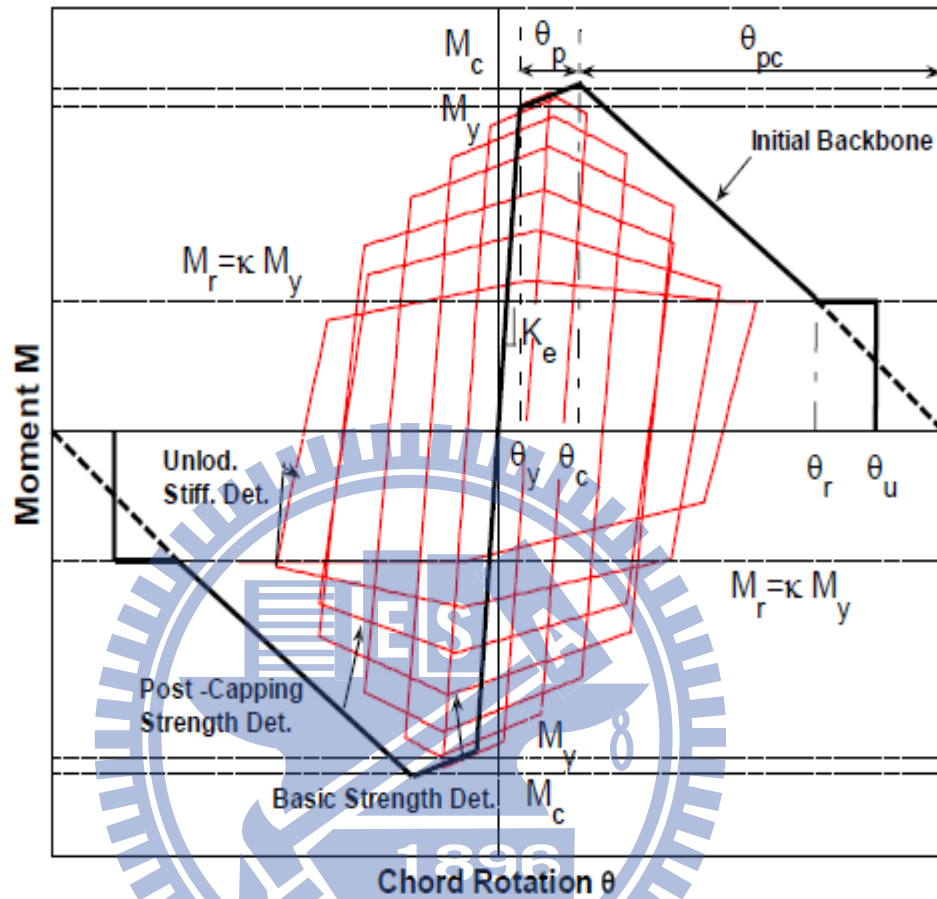


圖 3.5 Concrete01 Material [26]

Modified Ibarra Krawinkler Deterioration Model



- Effective yield strength and rotation (M_y and θ_y)
- Effective stiffness $K_e = M_y / \theta_y$
- Capping strength and associated rotation for monotonic loading (M_c and θ_c)
- Pre-capping rotation capacity for monotonic loading θ_p
- Post-capping rotation capacity θ_{pc}
- Residual strength $M_r = \kappa M_y$
- Ultimate rotation capacity θ_u

圖 3. 6 Bilin Material [26]

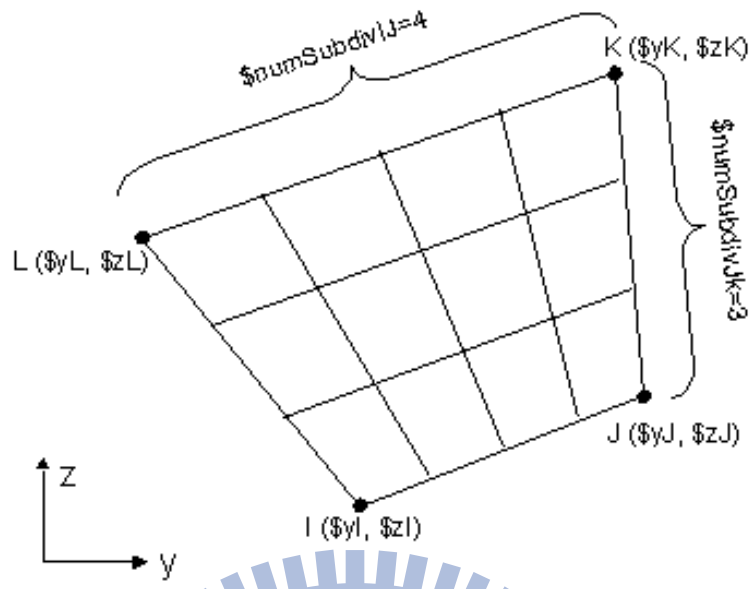


圖 3.7 Quad Fiber Section [26]

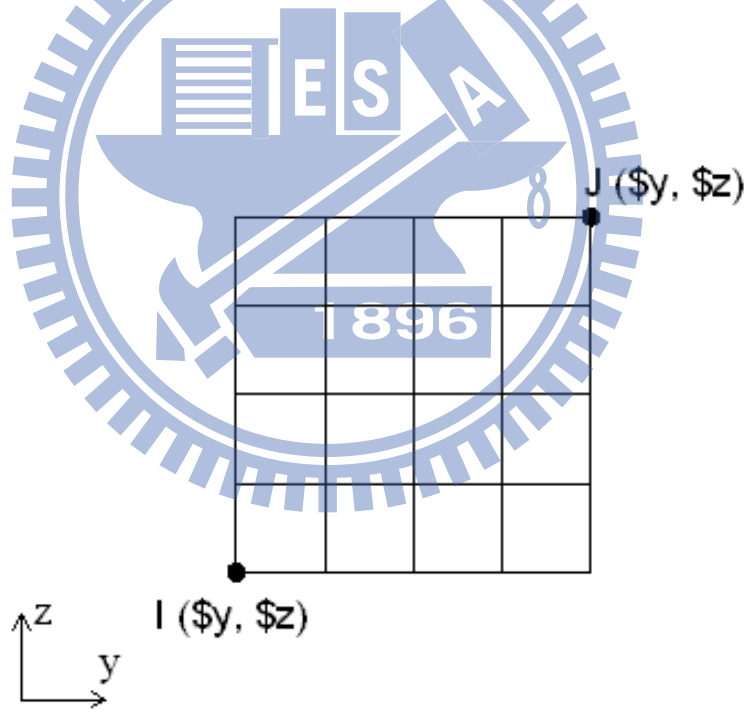


圖 3.8 Rect Fiber Section [26]

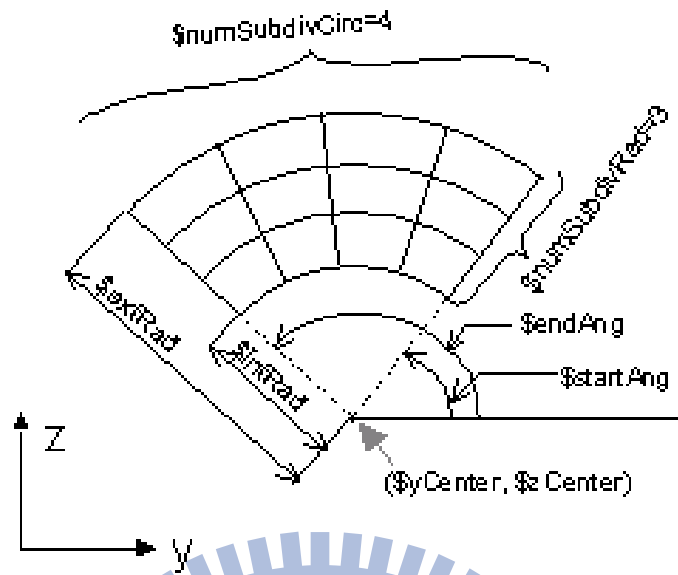


圖 3.9 Circ Fiber Section [26]

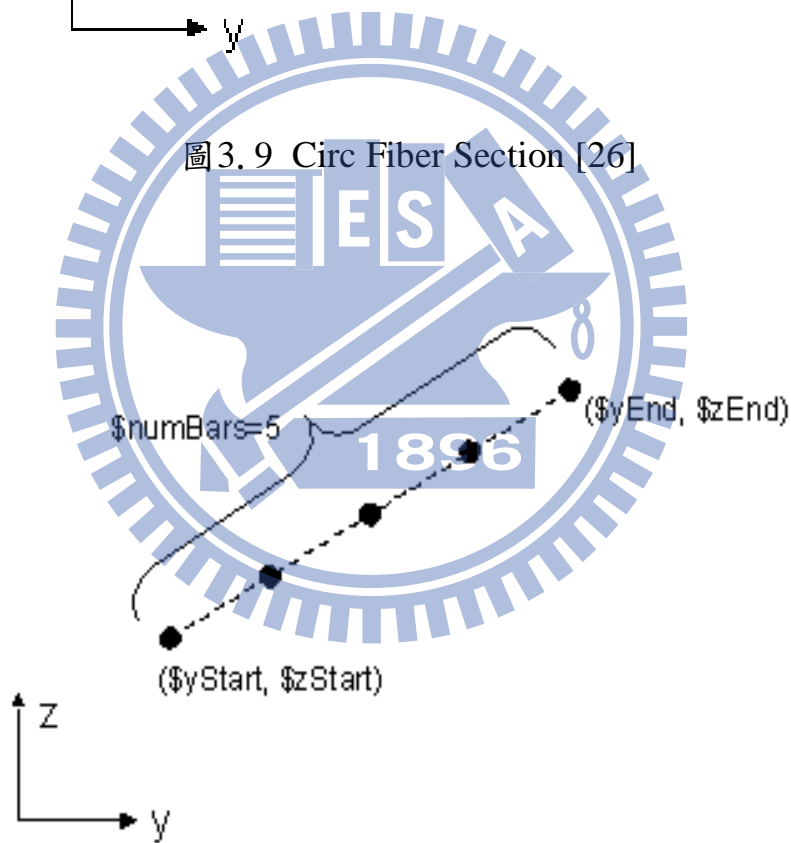


圖 3.10 Straight Steel [26]

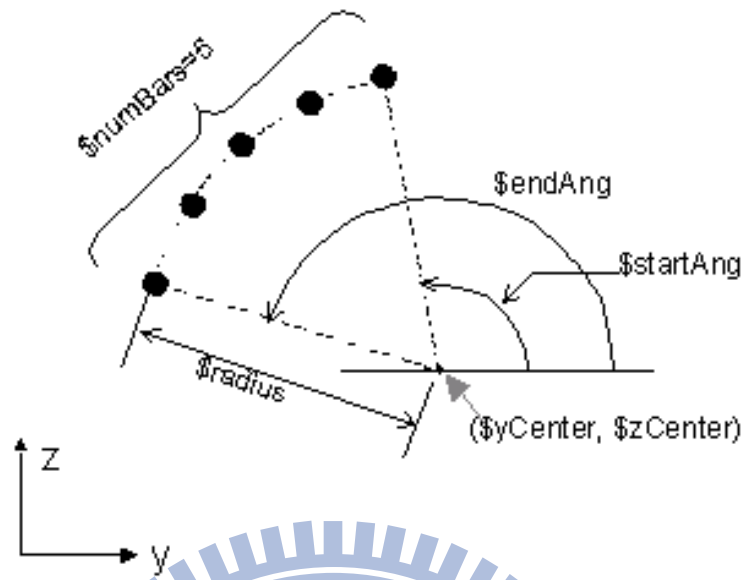


圖3.11 Circ Steel [26]

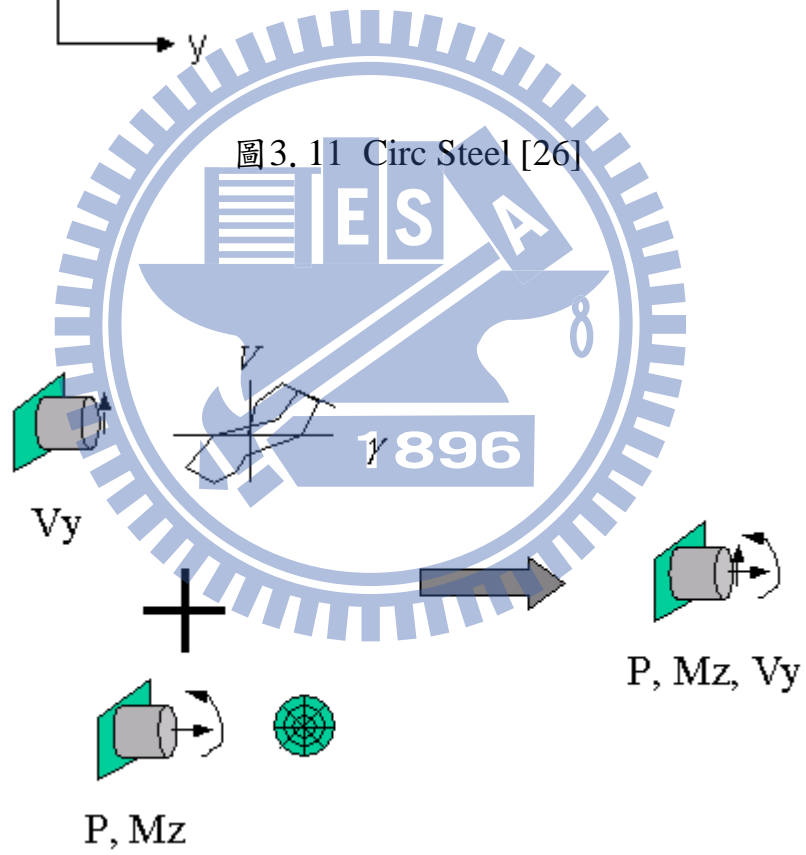


圖3.12 Aggregator Section [26]

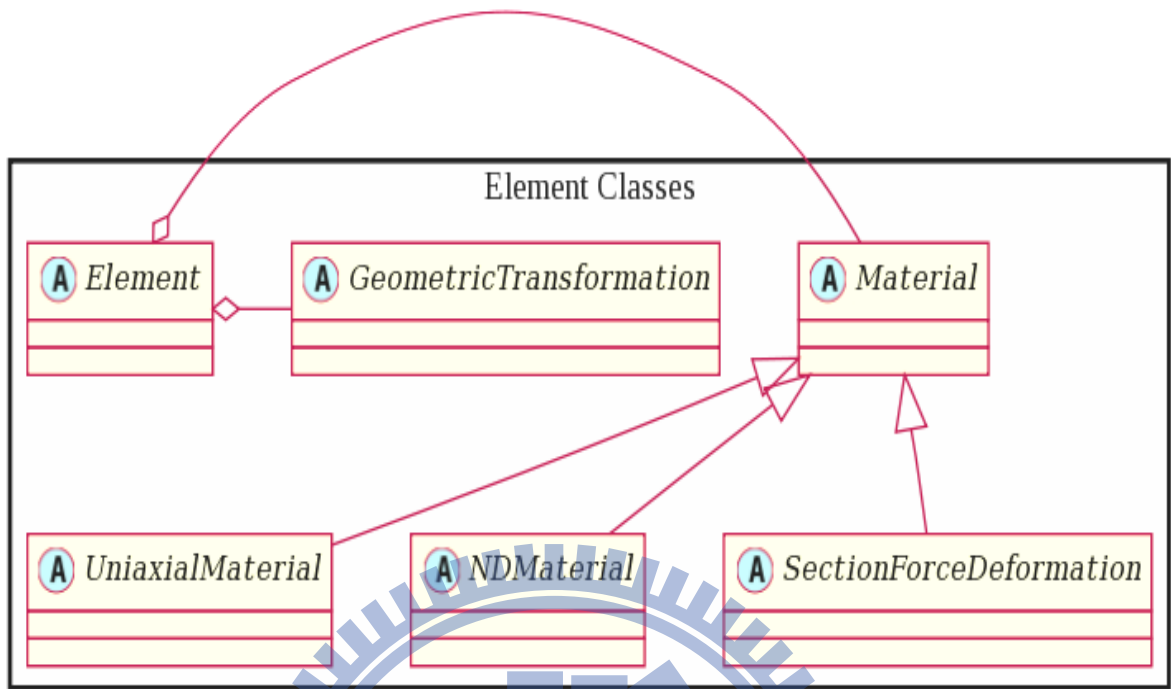


圖 3.13 Element Classes Object [26]

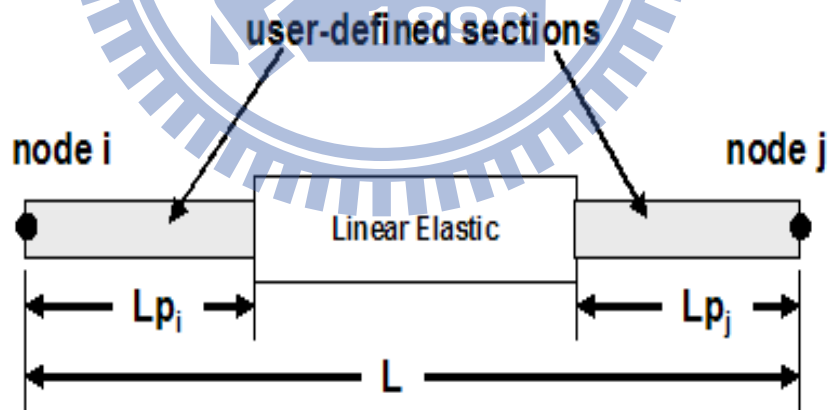


圖 3.14 BeamWithHinges Element [26]

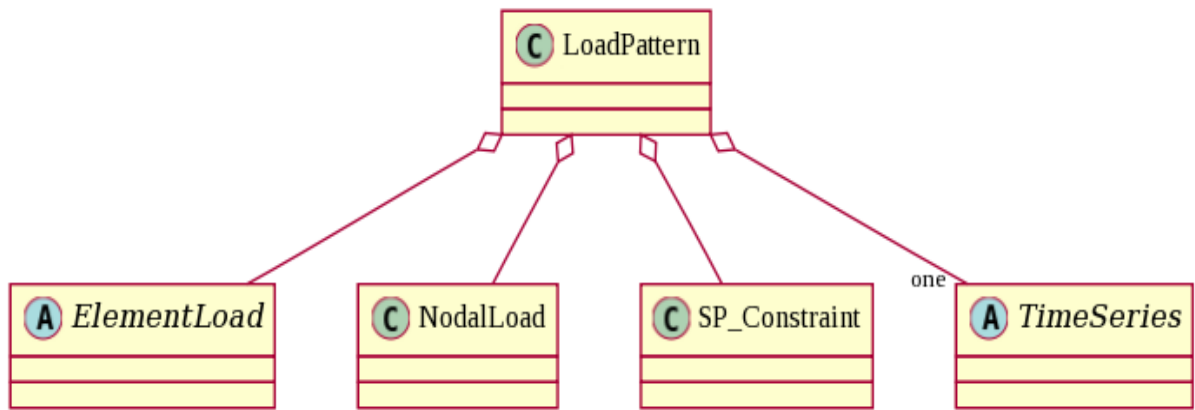


圖3.15 載重模式架構圖 [26]

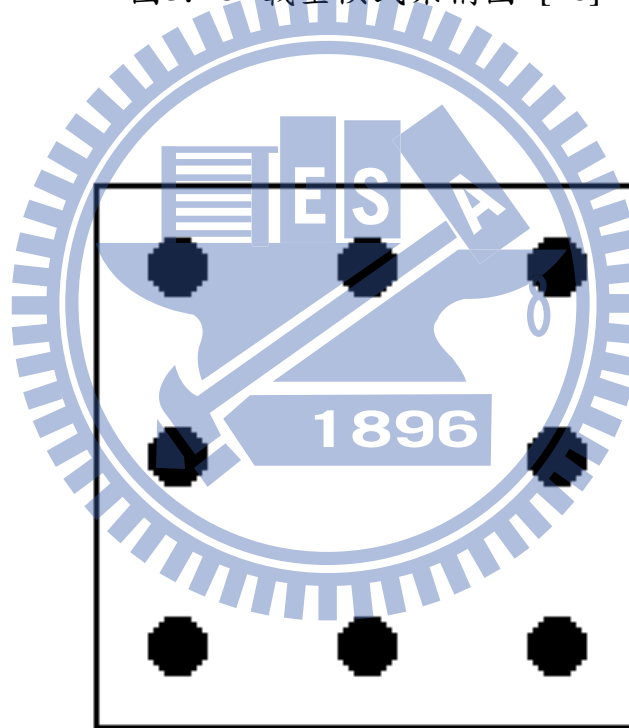


圖4.1 鋼筋混凝土斷面

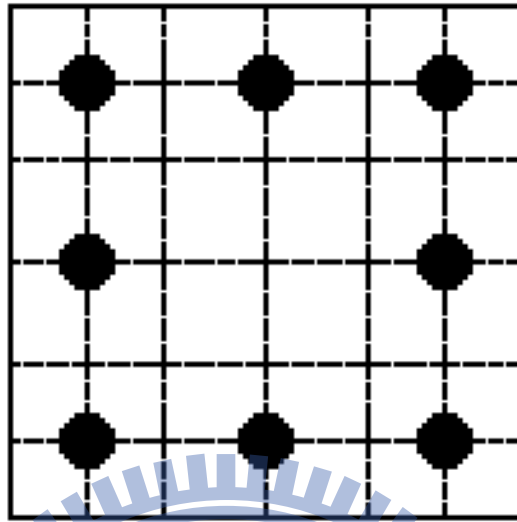


圖4.2 鋼筋混凝土斷面之元素切割

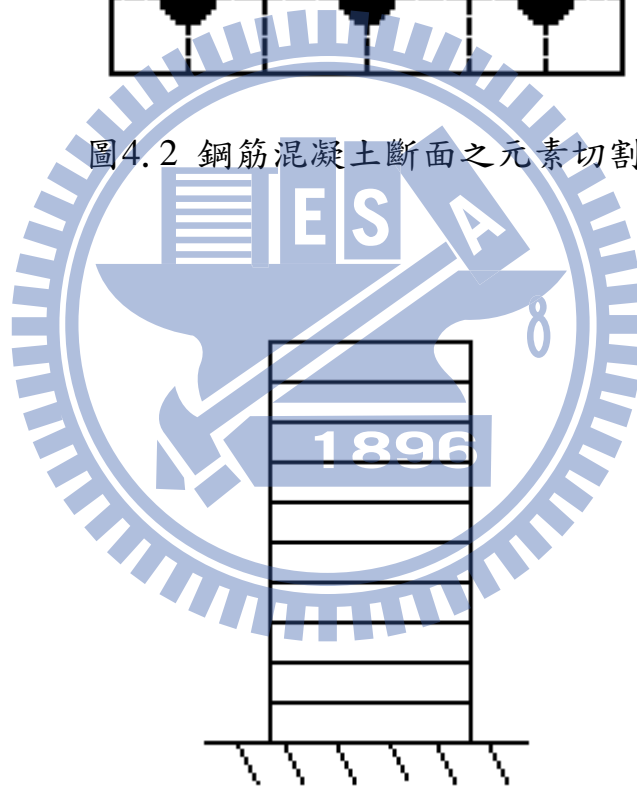


圖4.3 鋼筋混凝土柱之桿件元素切割

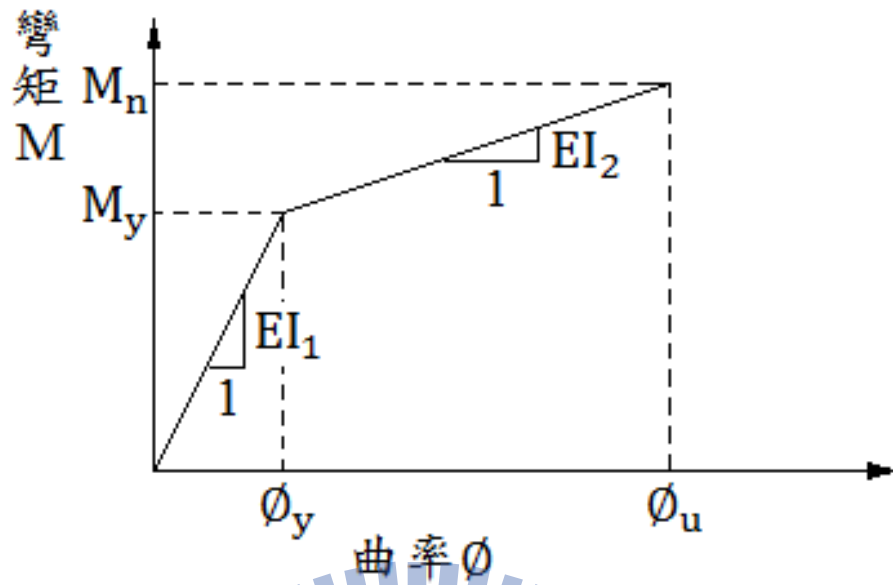


圖4.4 鋼筋混凝土斷面之彎矩-曲率關係圖

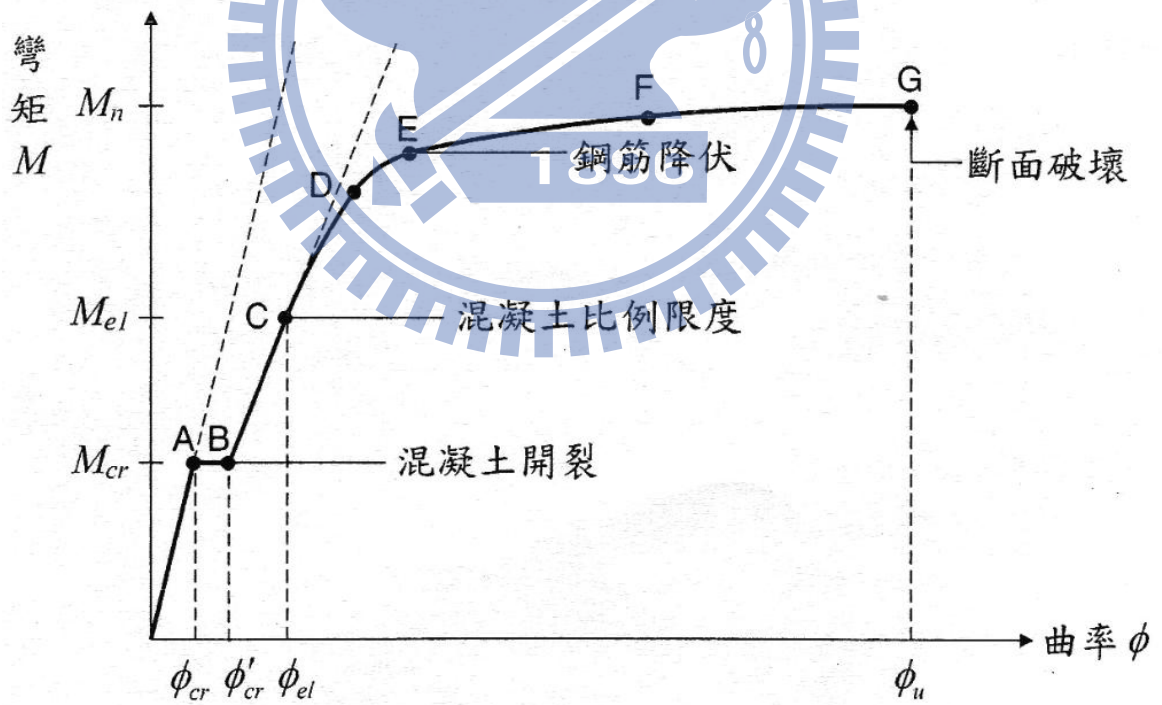


圖4.5 彎矩與曲率關係之歷程曲線圖[19]

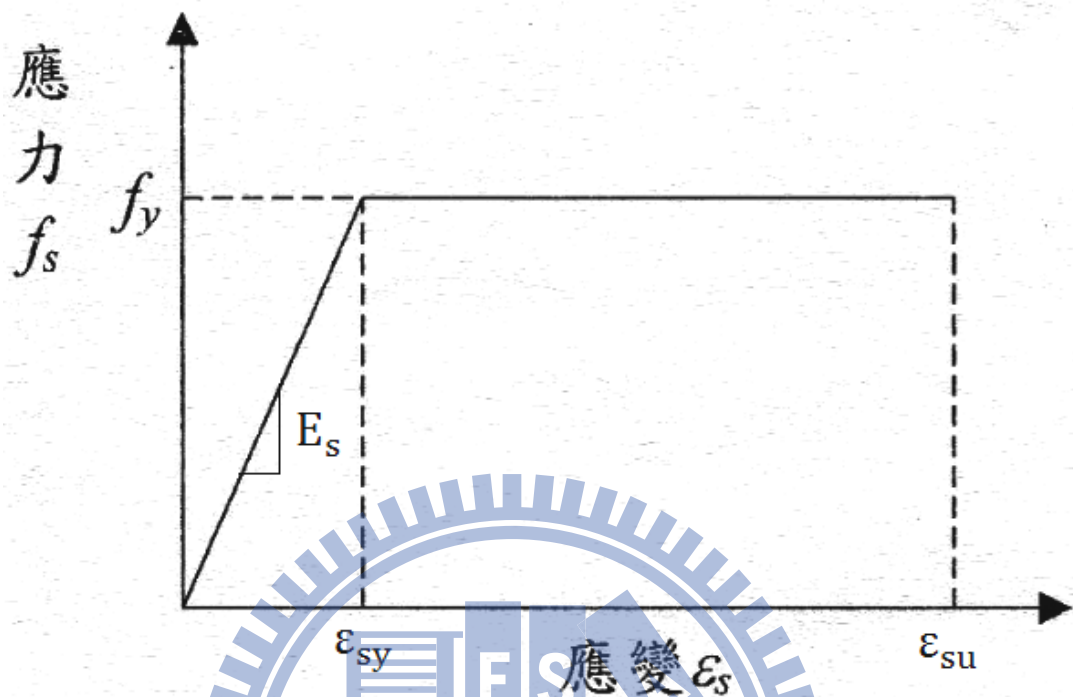


圖4.6 鋼筋之應力-應變曲線

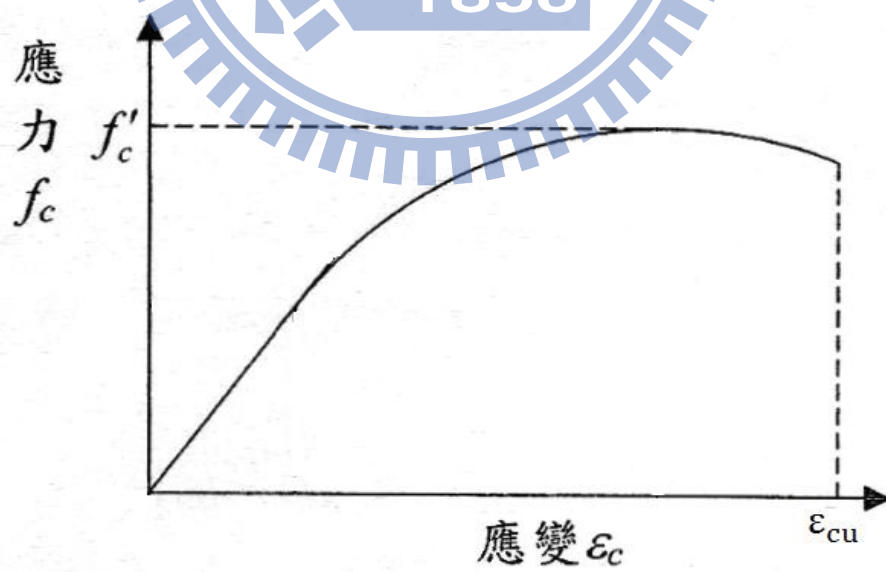


圖4.7 混凝土之應力-應變曲線

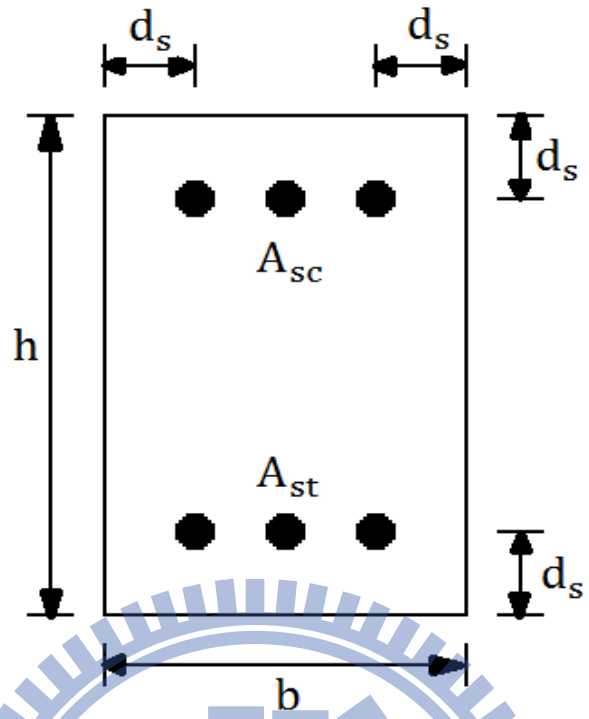


圖4.8 鋼筋混凝土之斷面幾何

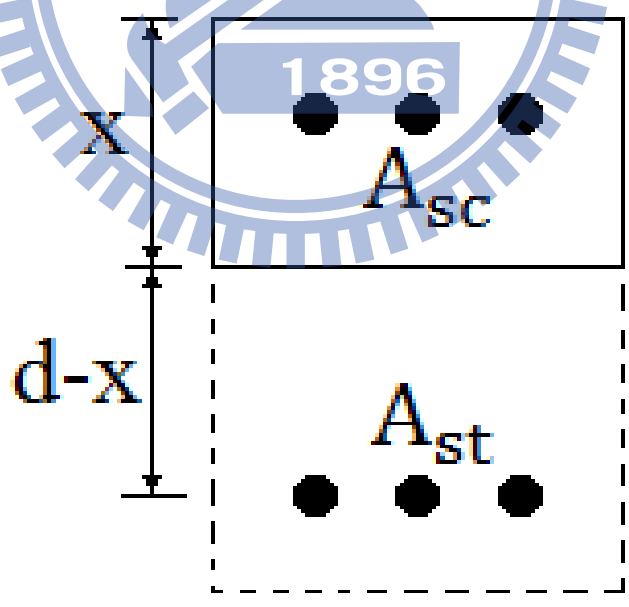


圖4.9 混凝土斷面開裂但仍為彈性階段

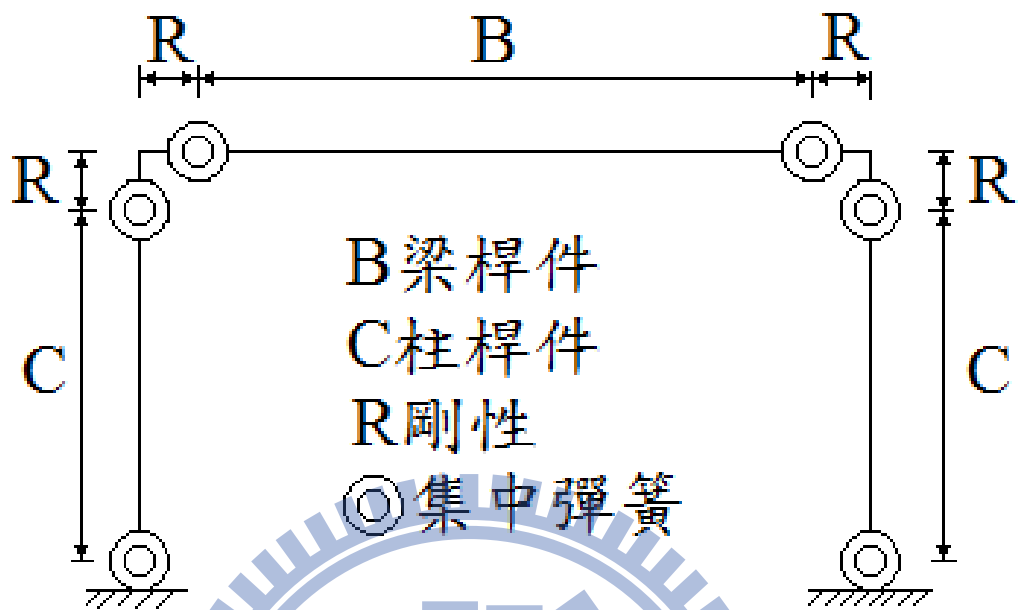


圖4.10 門型構架之模擬

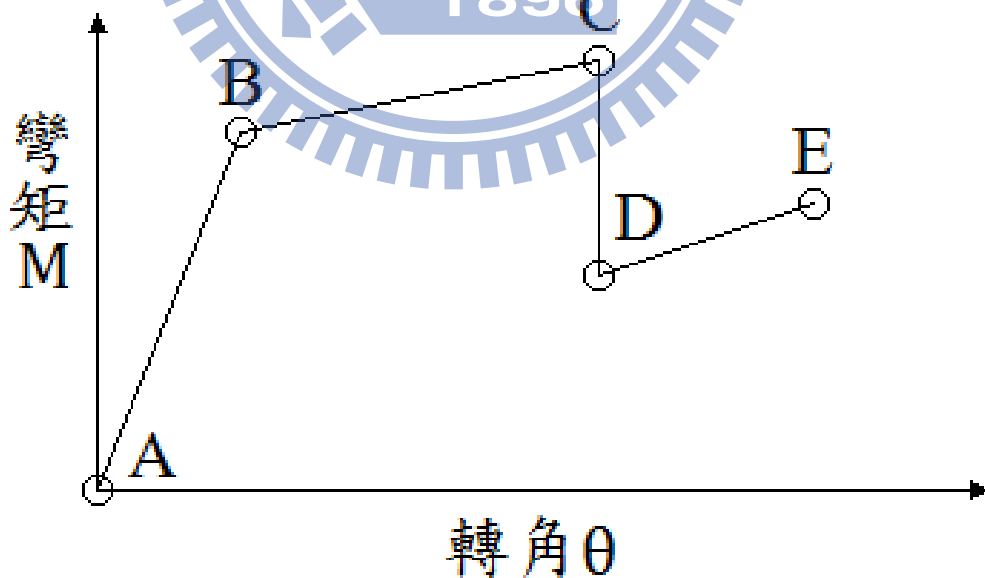


圖4.11 彎矩-轉角關係曲線圖

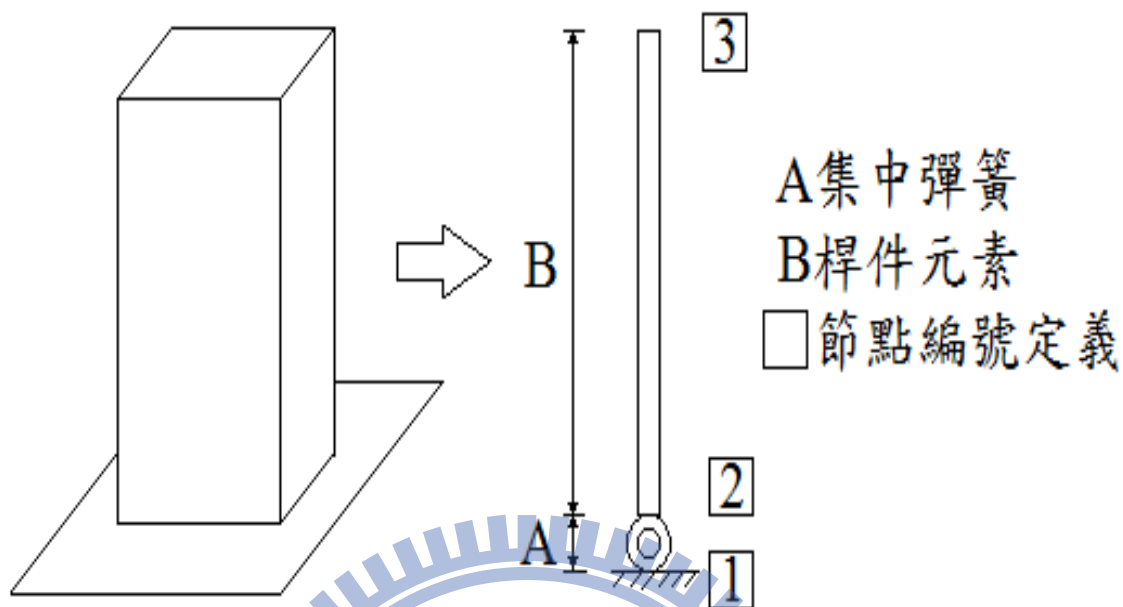


圖4.12 鋼筋混凝土柱之建模圖

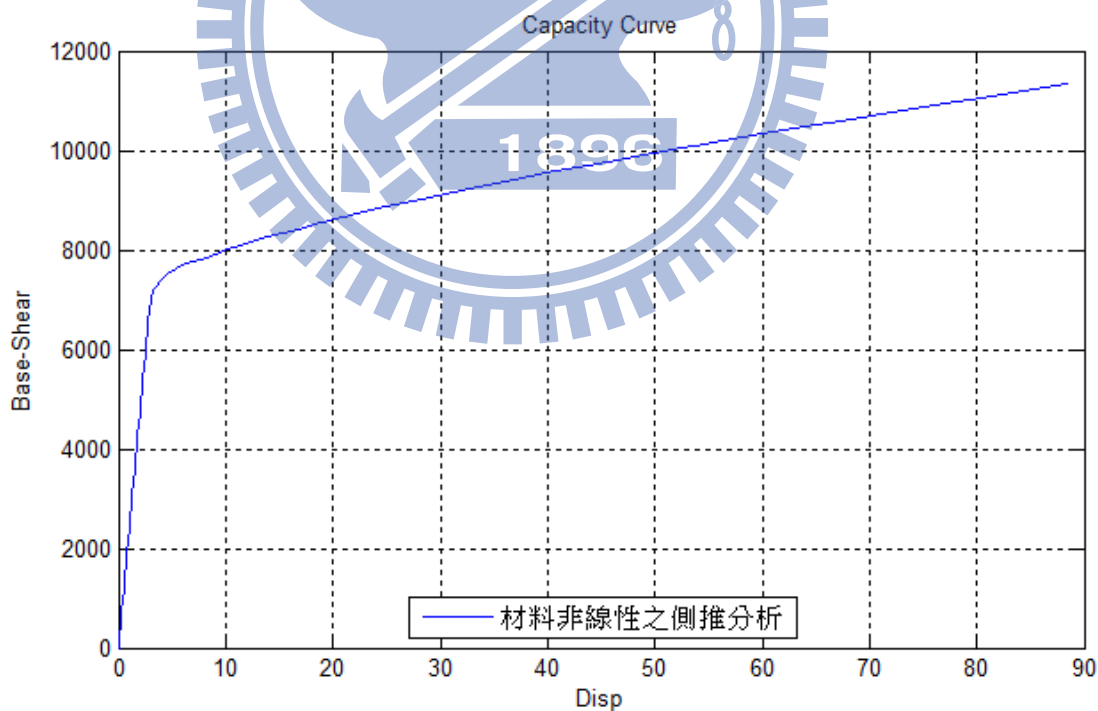


圖4.13 鋼筋混凝土柱之側推分析曲線圖

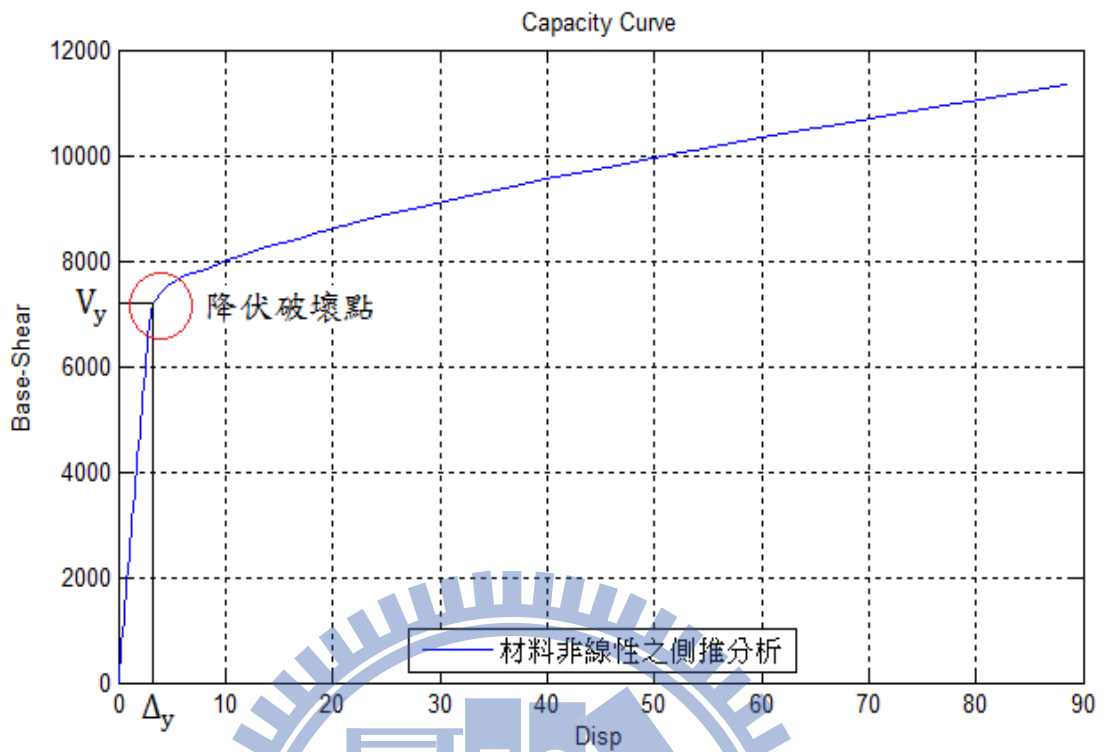


圖4.14 降伏破壞點之剪力(V_y)與位移(Δ_y)

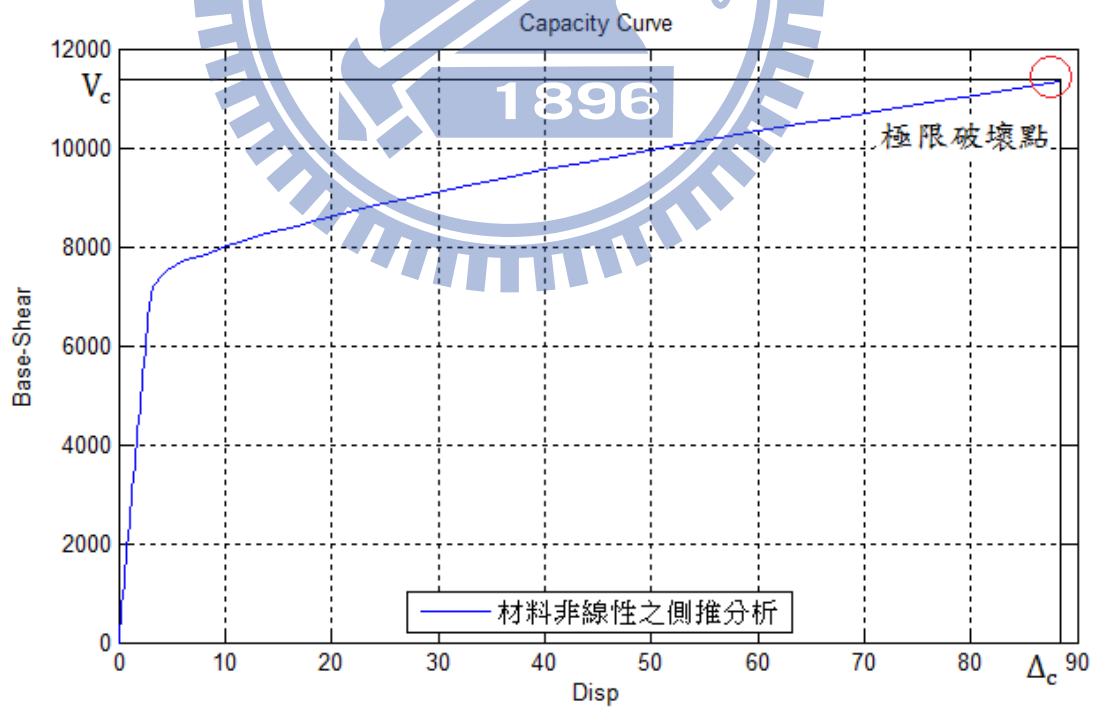
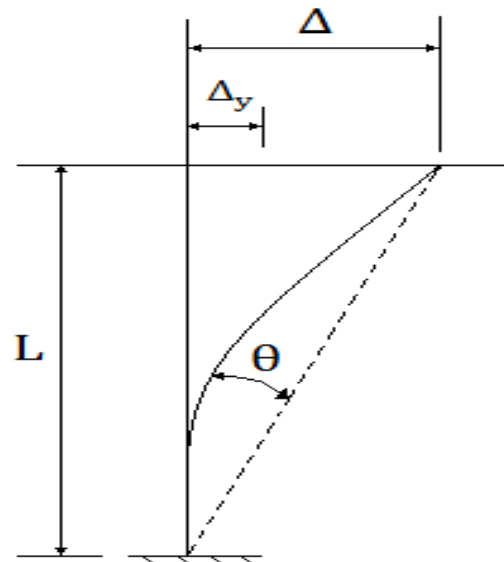


圖4.15 極限破壞點之剪力(V_c)與位移(Δ_c)



$$\theta_y = \frac{\Delta_y}{L} \quad \theta = \frac{\Delta}{L}$$

圖4.16 非線性彈簧模擬

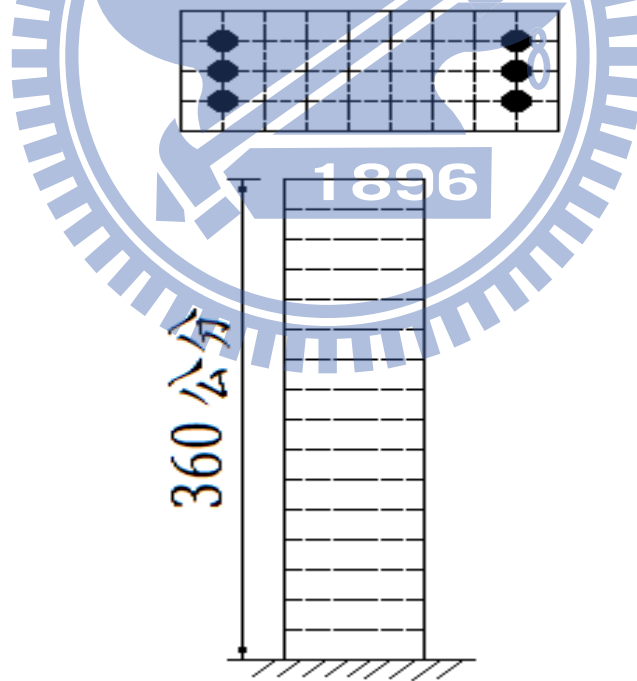


圖5.1 材料非線性之側推分析之模型

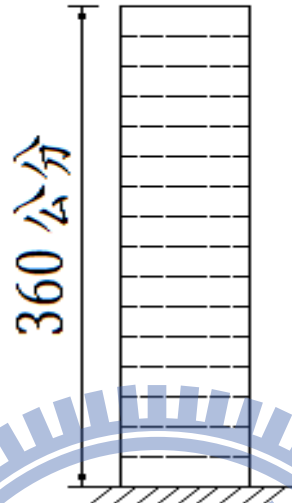


圖5.2 鋼筋混凝土斷面非線性行為分析之模型

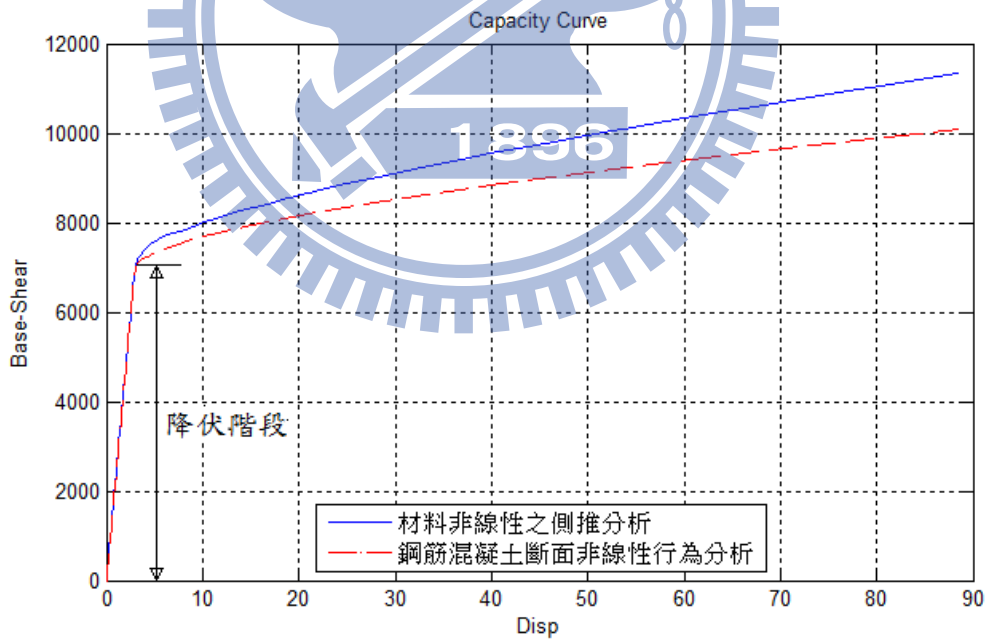


圖5.3 懸臂柱之側推分析曲線圖

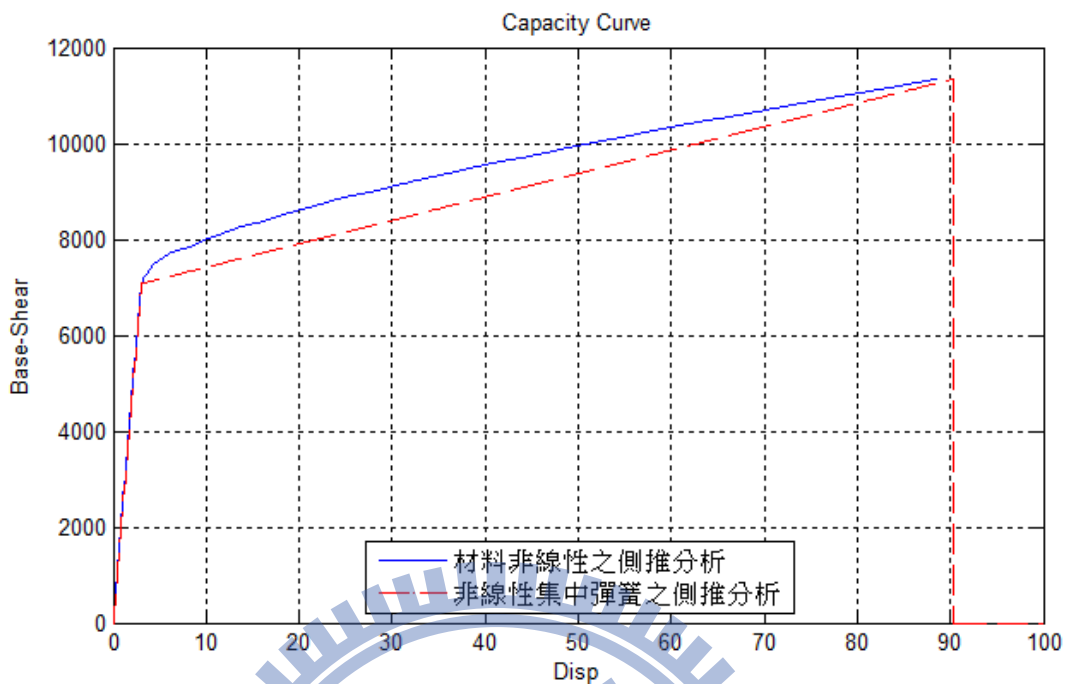


圖5.4 懸臂柱之側推分析曲線圖

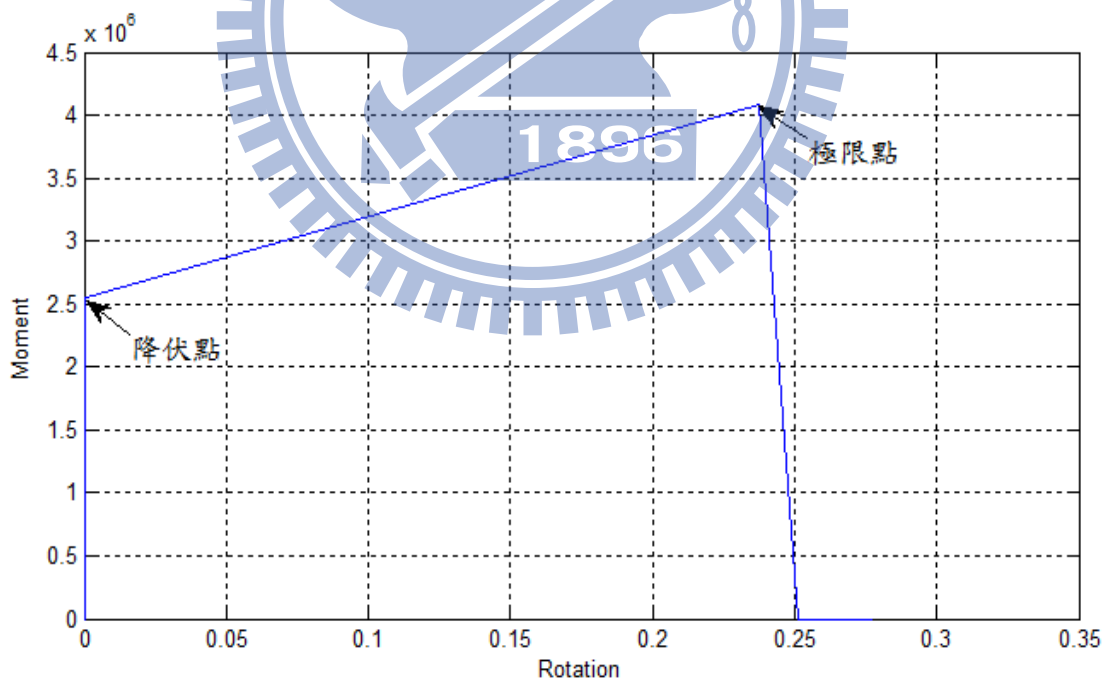


圖5.5 集中彈簧之彎矩—轉角曲線圖

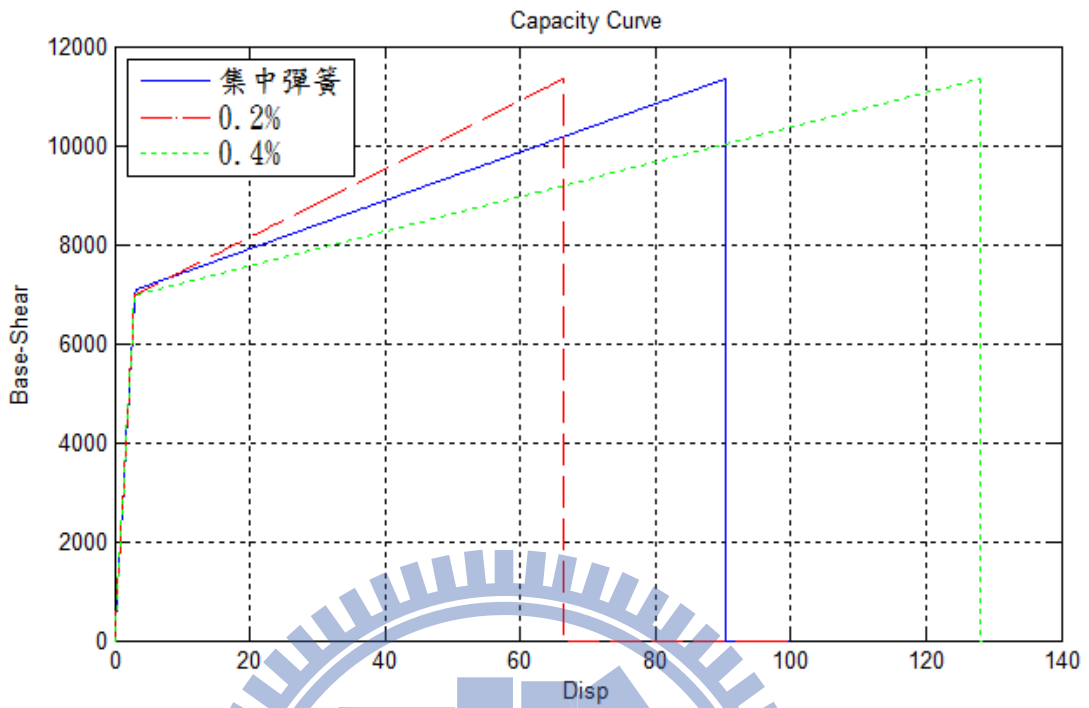


圖5.6 懸臂柱之側推分析曲線圖

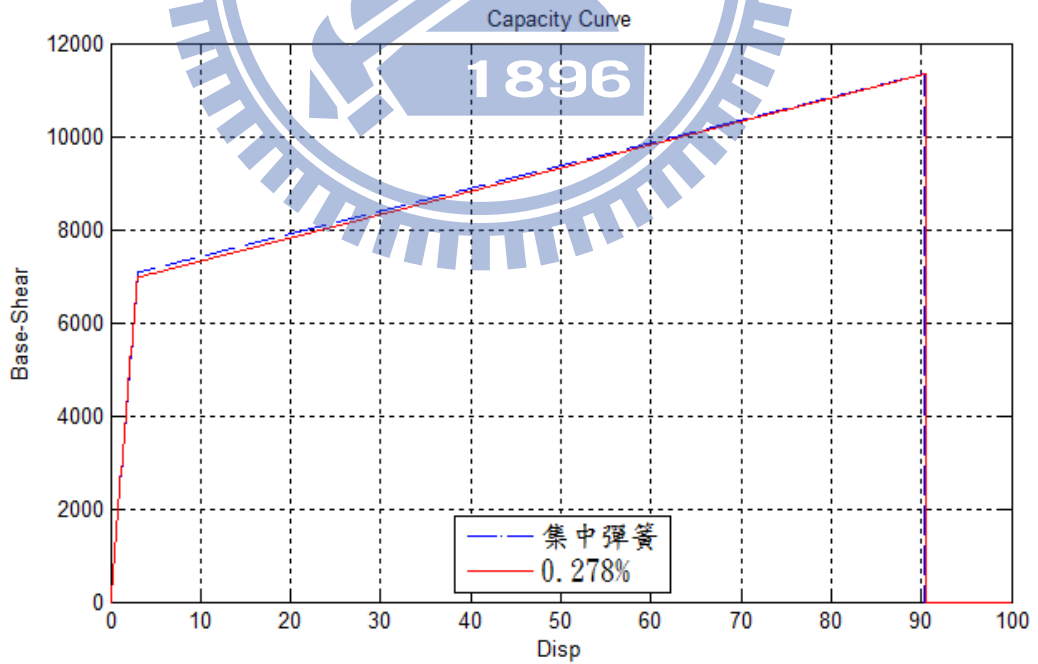


圖5.7 懸臂柱之側推分析曲線圖

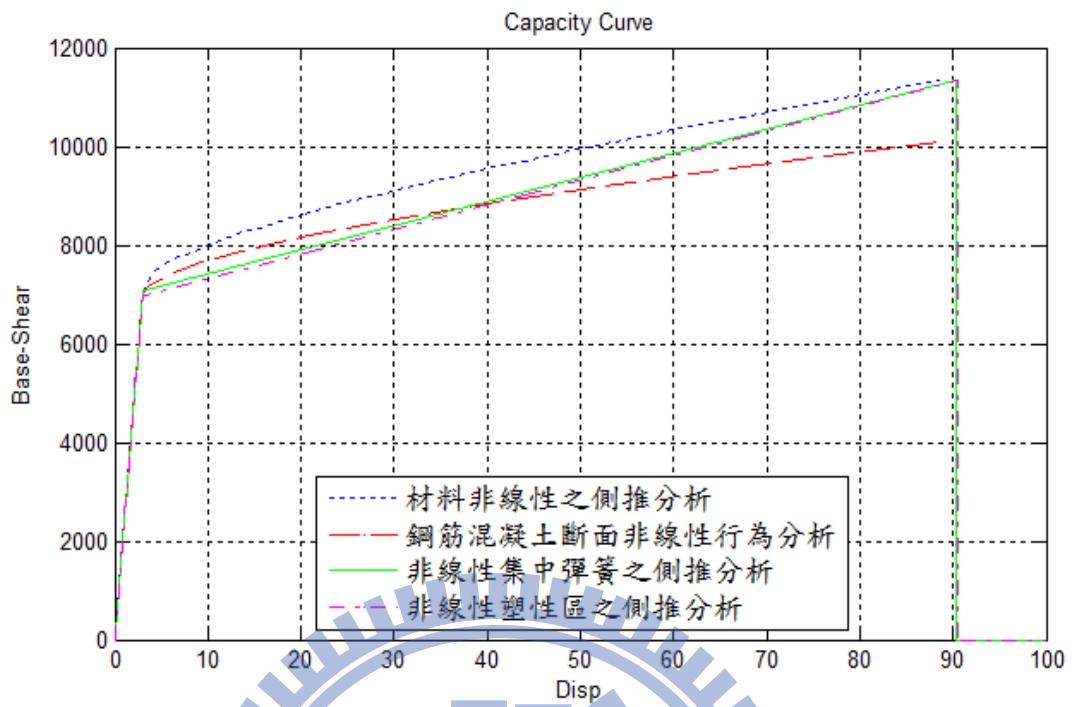


圖5.8 懸臂柱之側推分析曲線圖

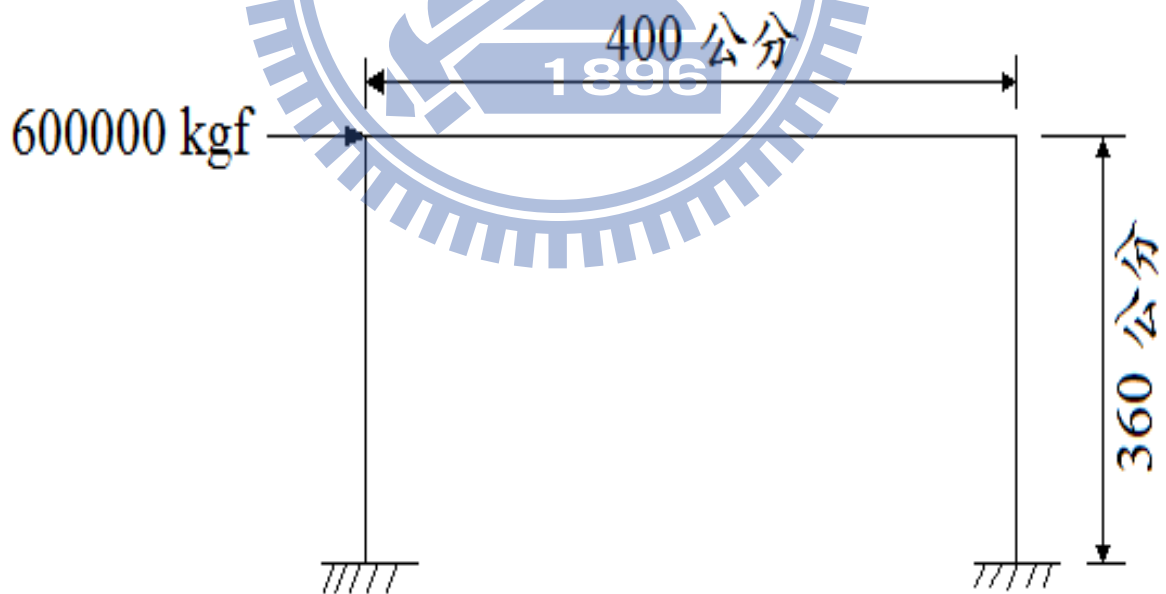


圖5.9 門型構架之模型

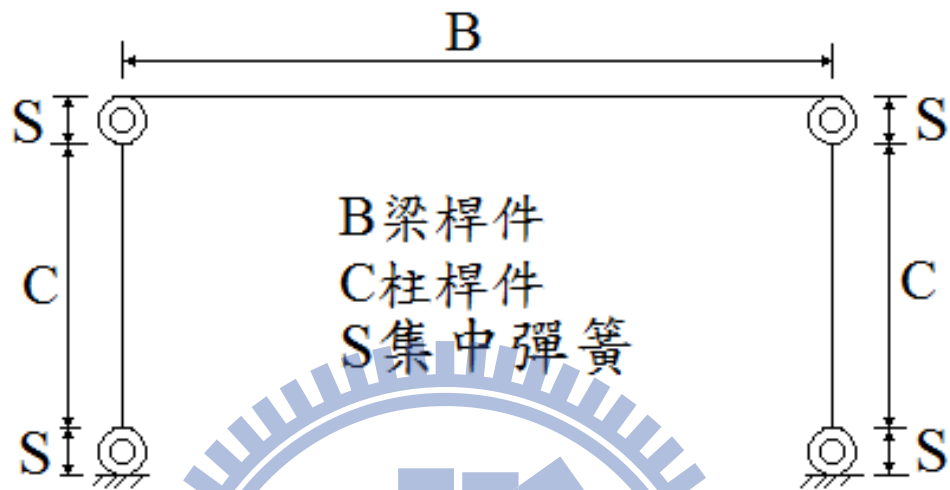


圖5.10 集中彈簧之構架模型

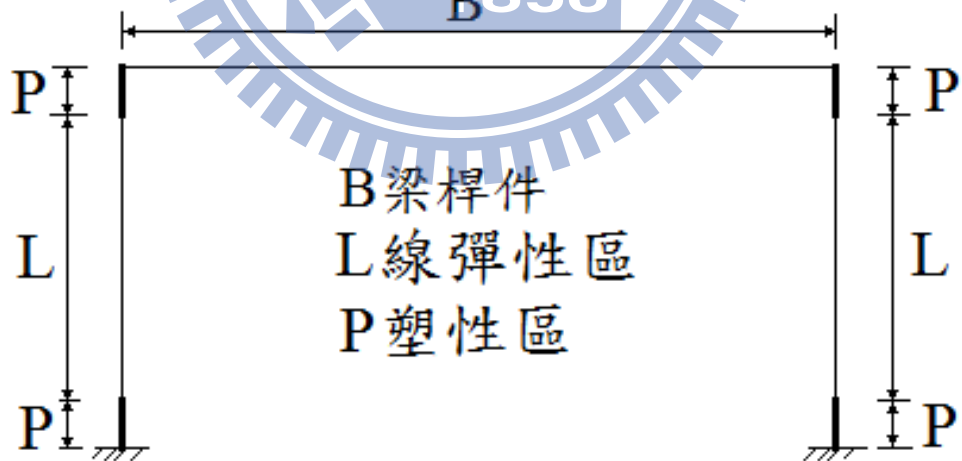


圖5.11 塑性區之構架模型

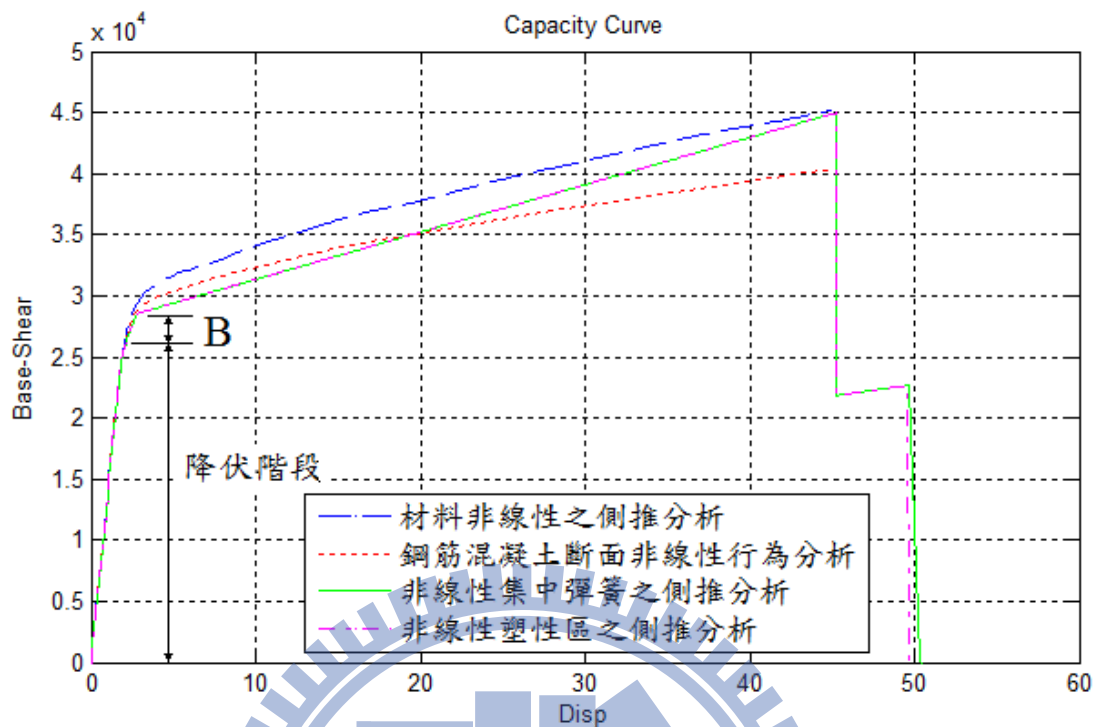


圖5.12 門型構架之側推分析曲線圖

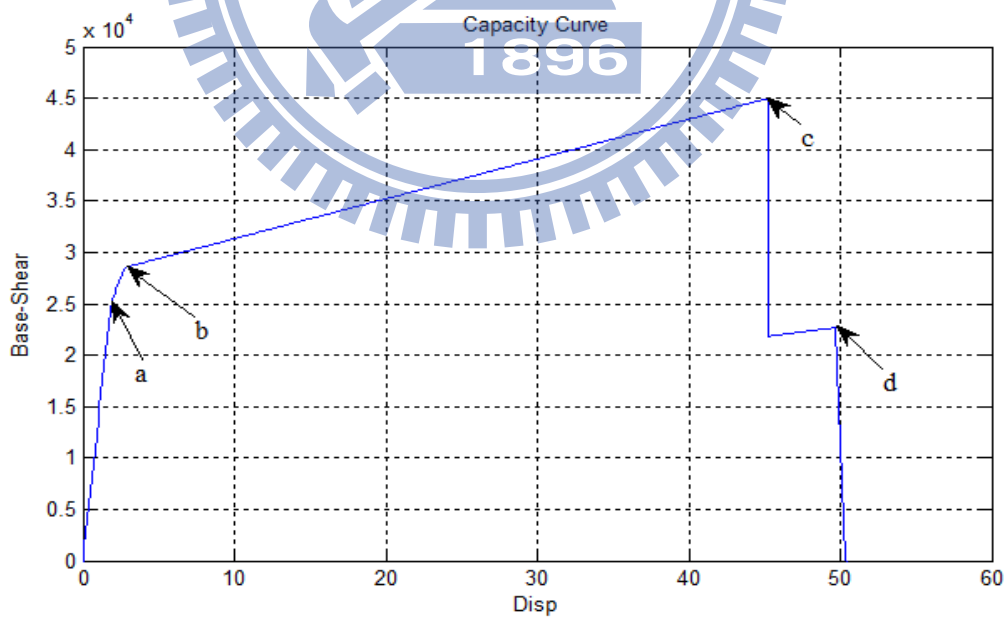


圖5.13 門型構架之集中彈簧側推分析曲線圖

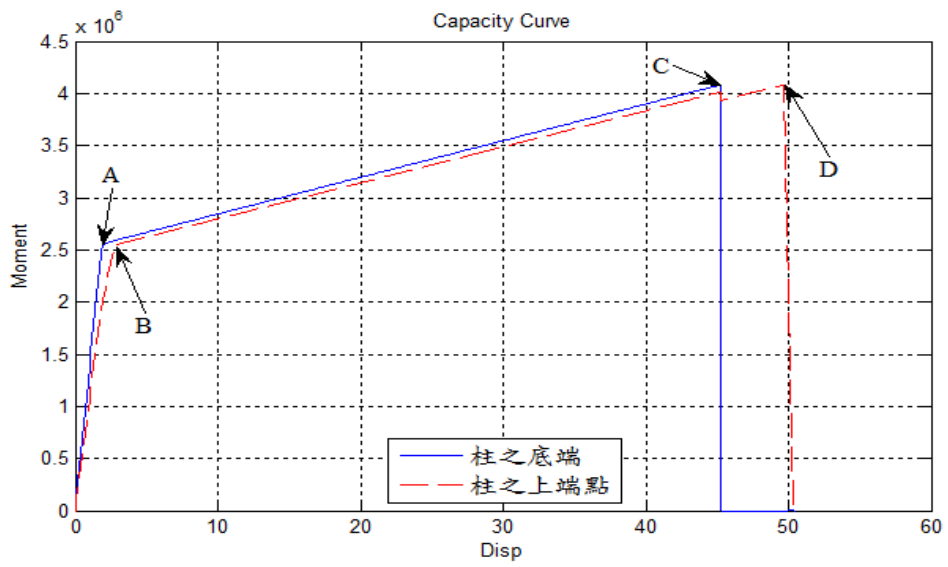


圖5.14 門型構架之彎矩-位移關係曲線圖

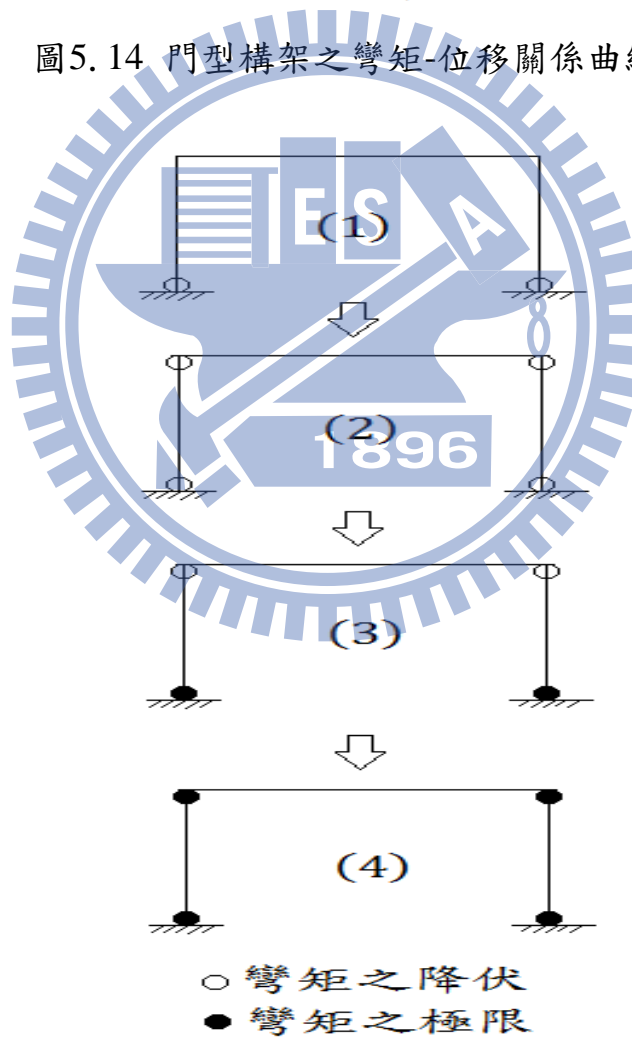


圖5.15 塑性鉸發生順序與位置

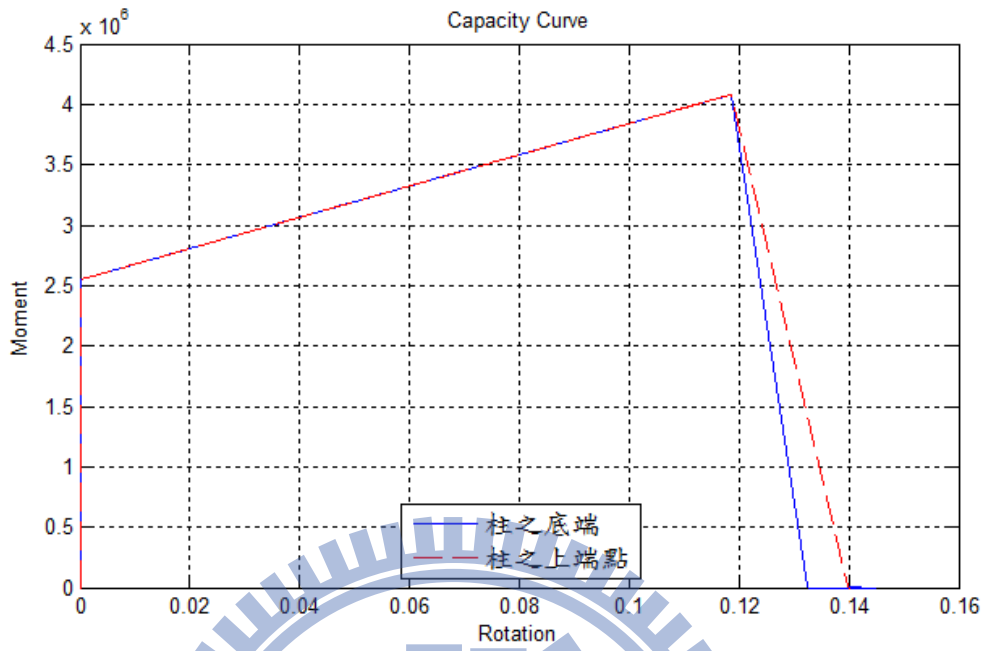


圖5.16 門型構架之彎矩-轉角關係曲線圖

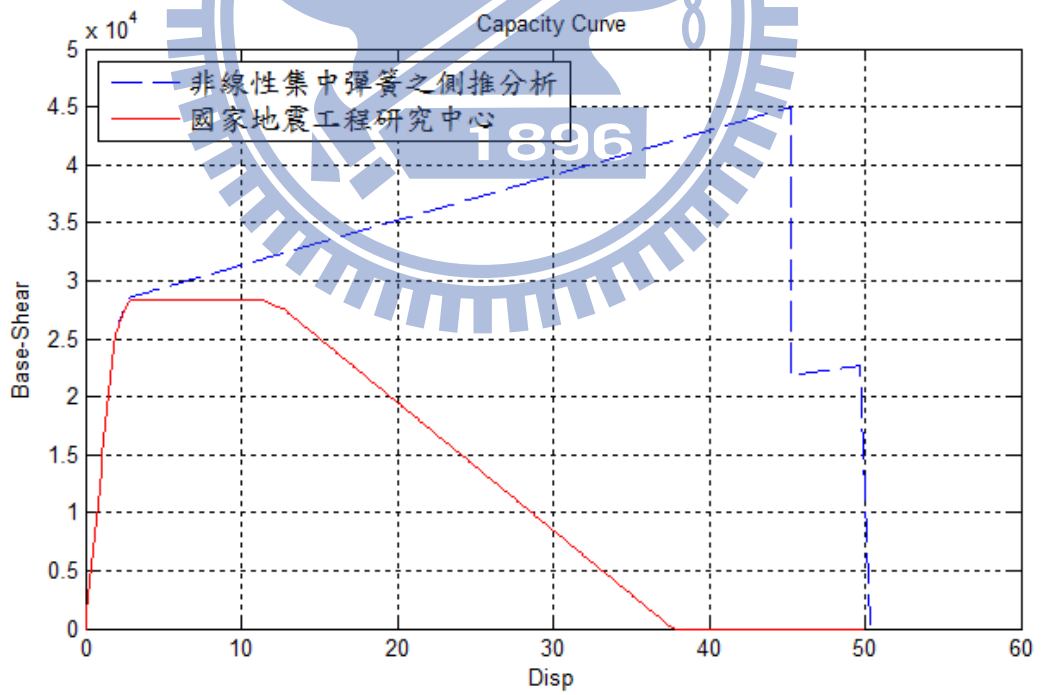


圖5.17 門型構架之側推分析曲線圖

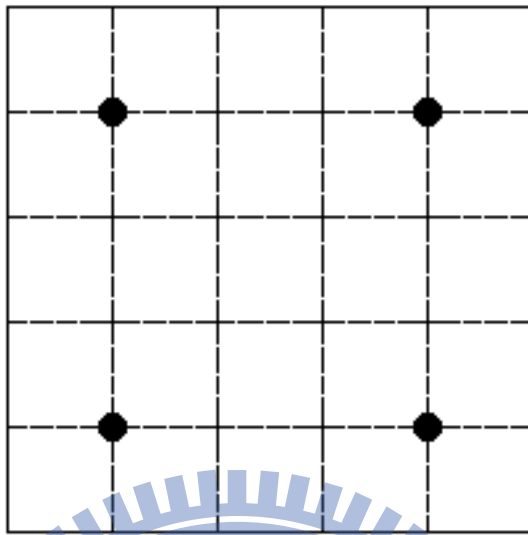


圖5.18 鋼筋混凝土斷面之元素切割

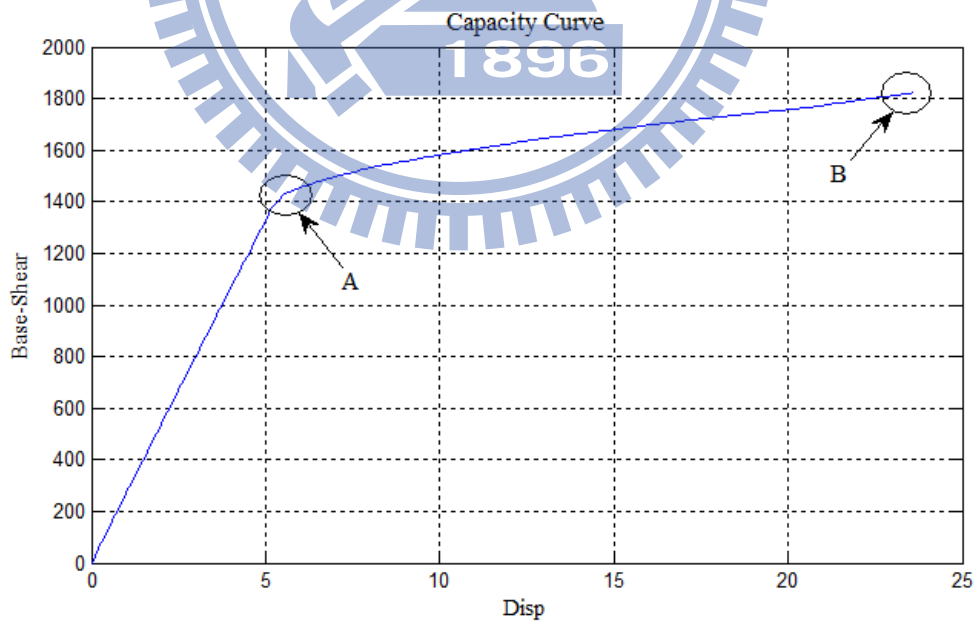


圖5.19 鋼筋混凝土柱之側推分析曲線圖

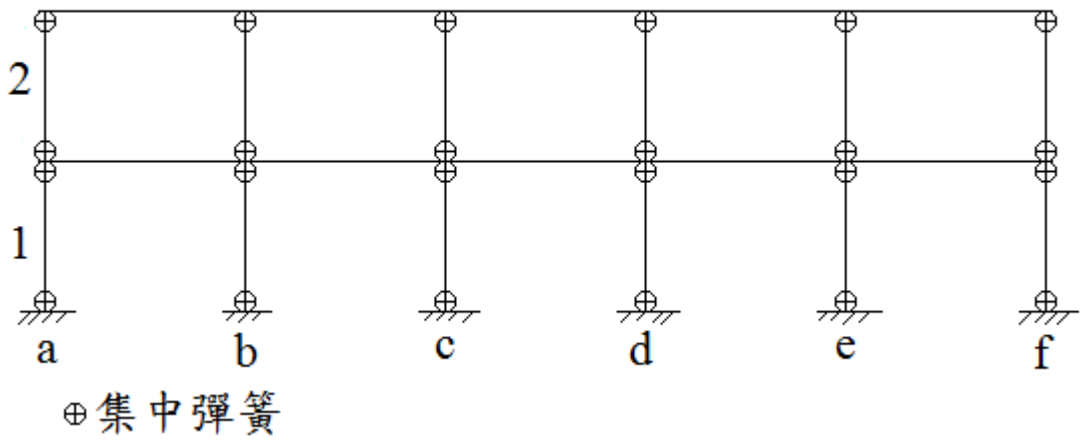


圖5.20 二樓-五跨構架之模型

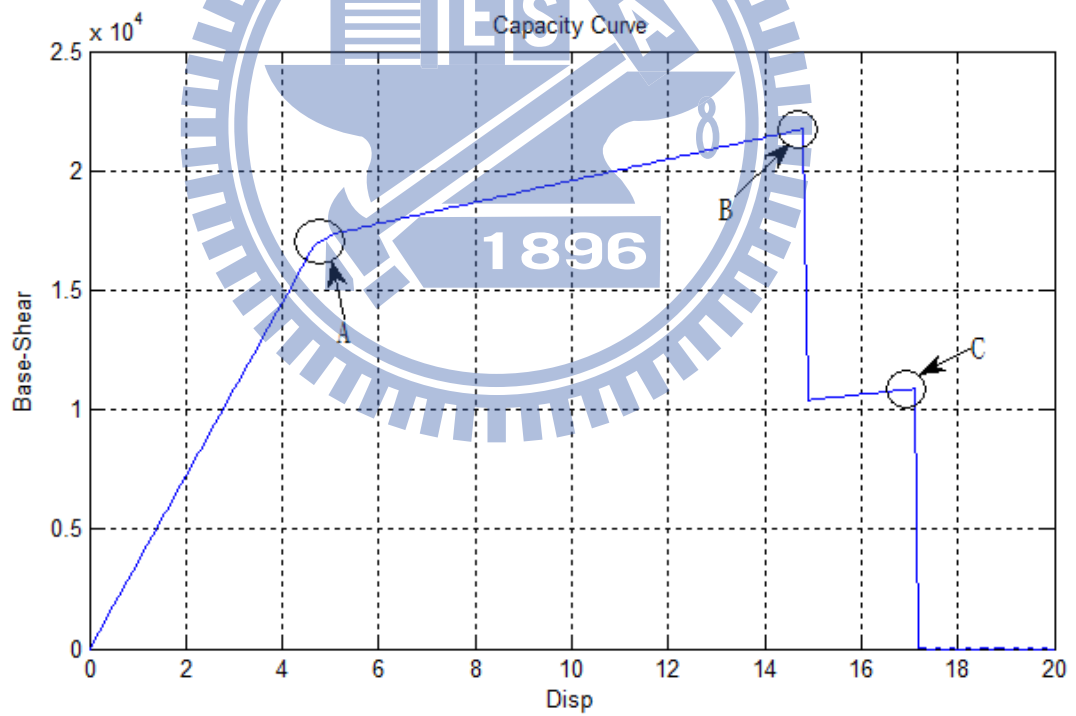


圖5.21 二樓-五跨構架之側推分析曲線圖

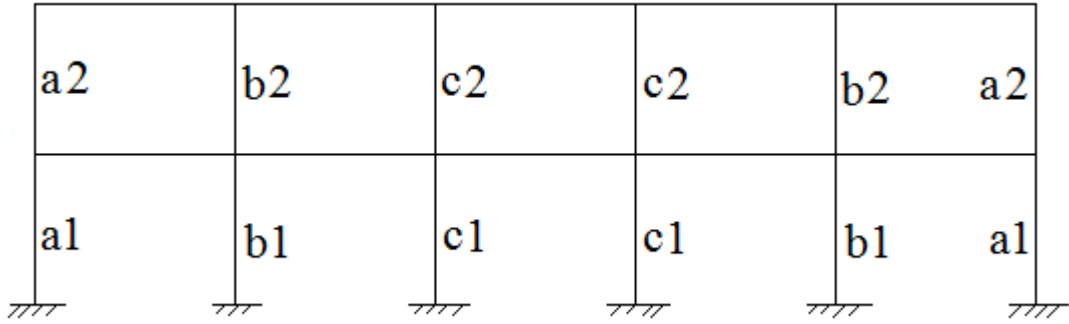


圖5.22 二樓-五跨構架之柱編號

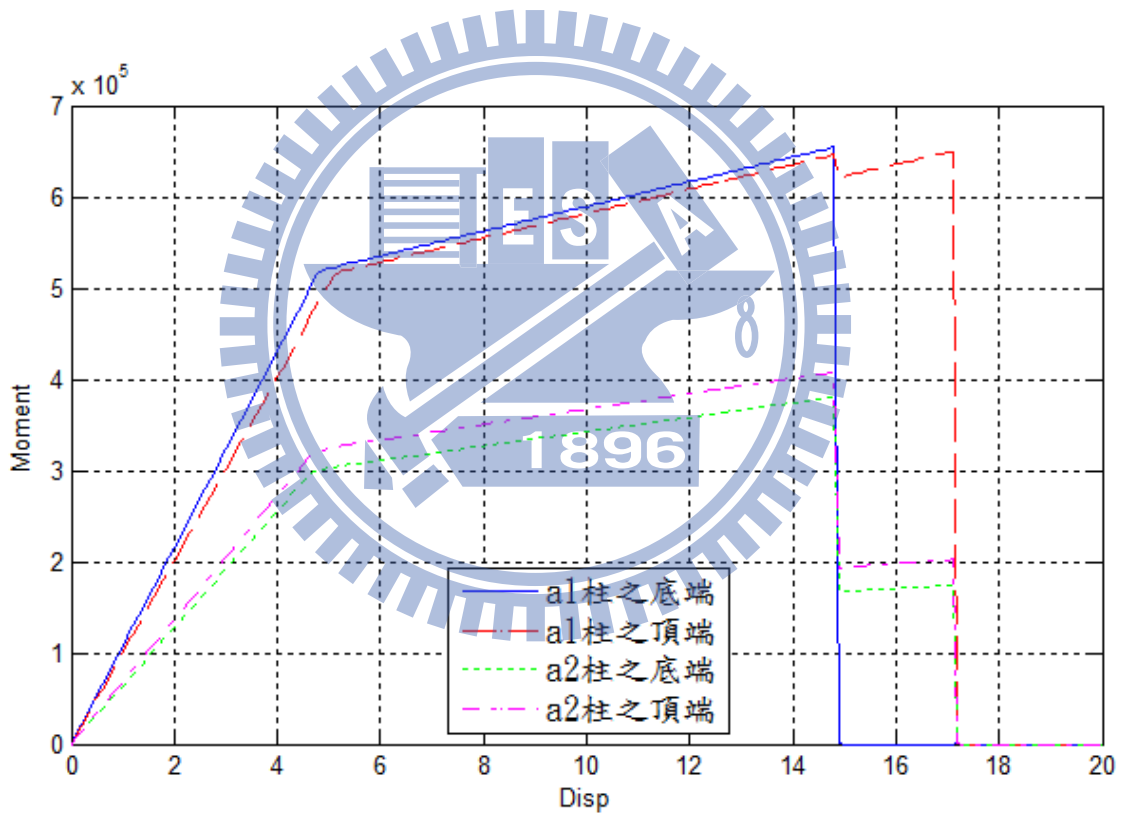


圖5.23 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖

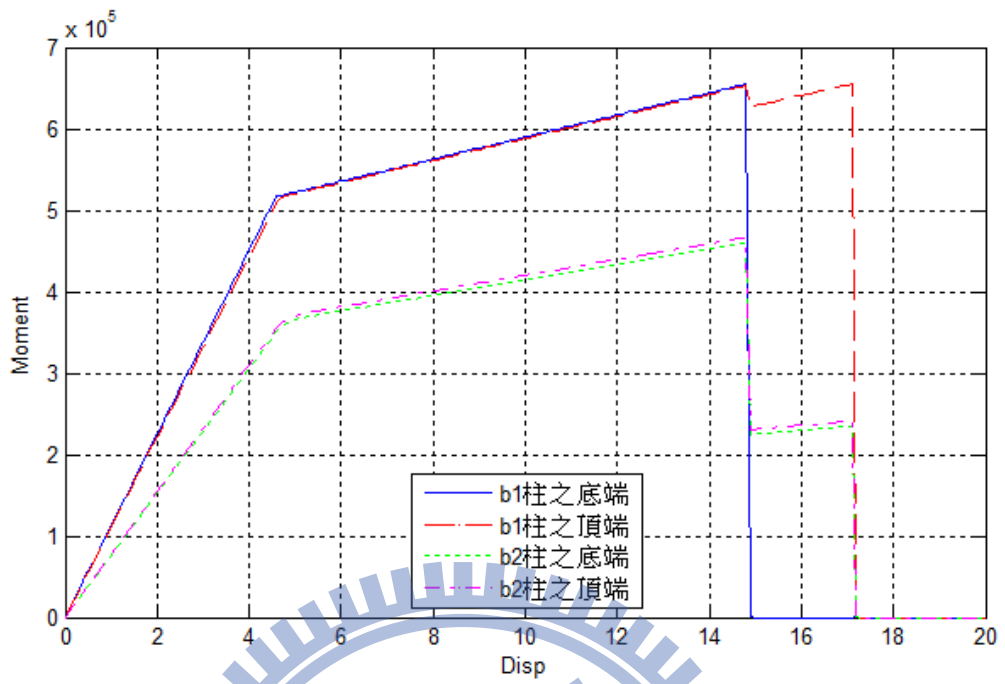


圖5.24 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖

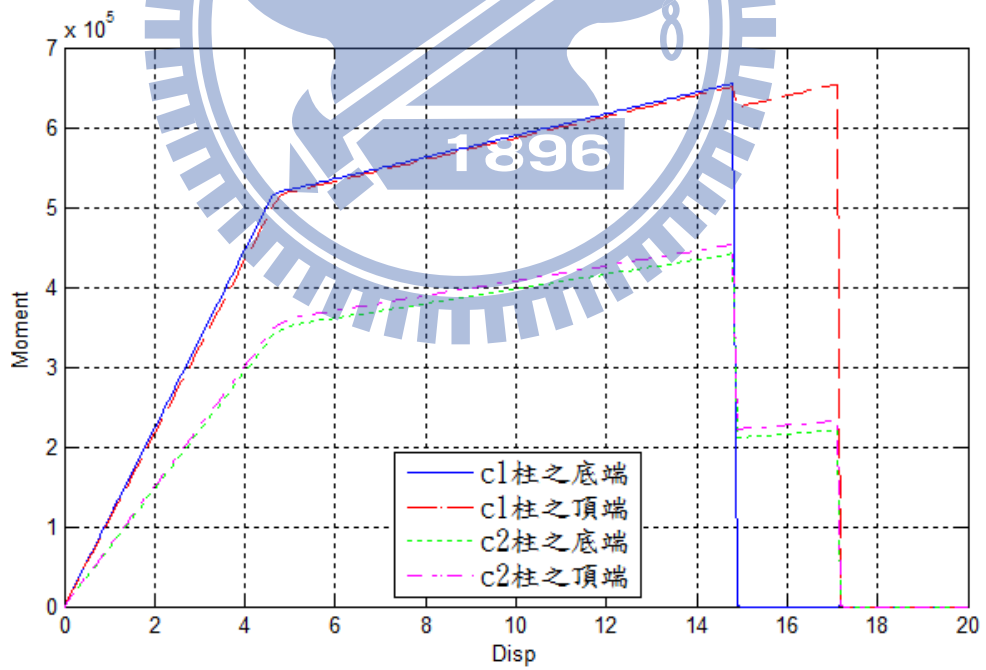


圖5.25 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖

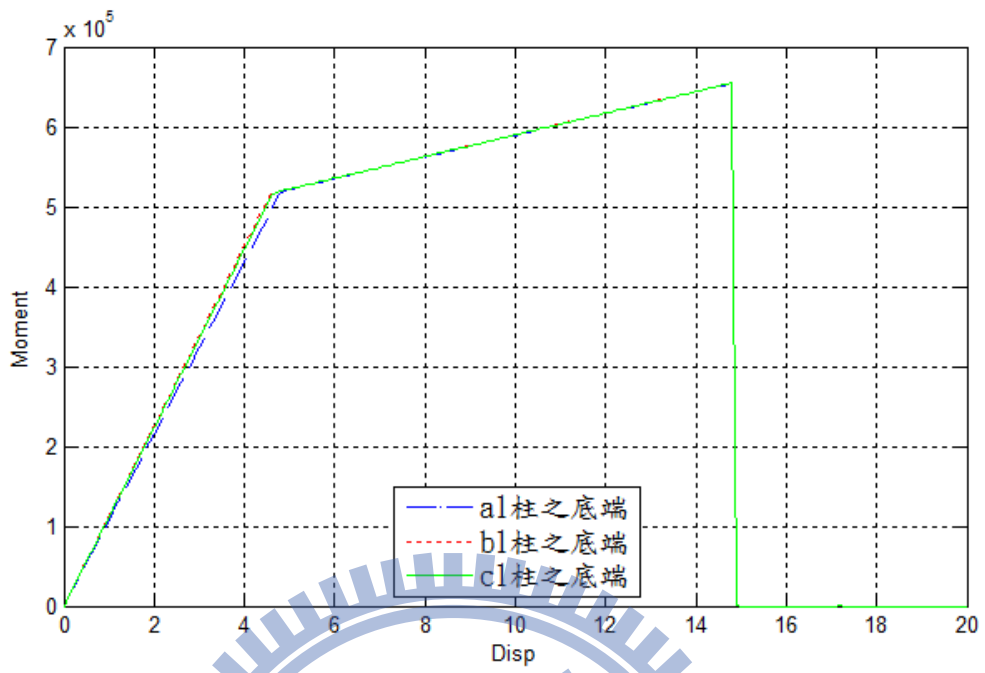


圖5.26 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖

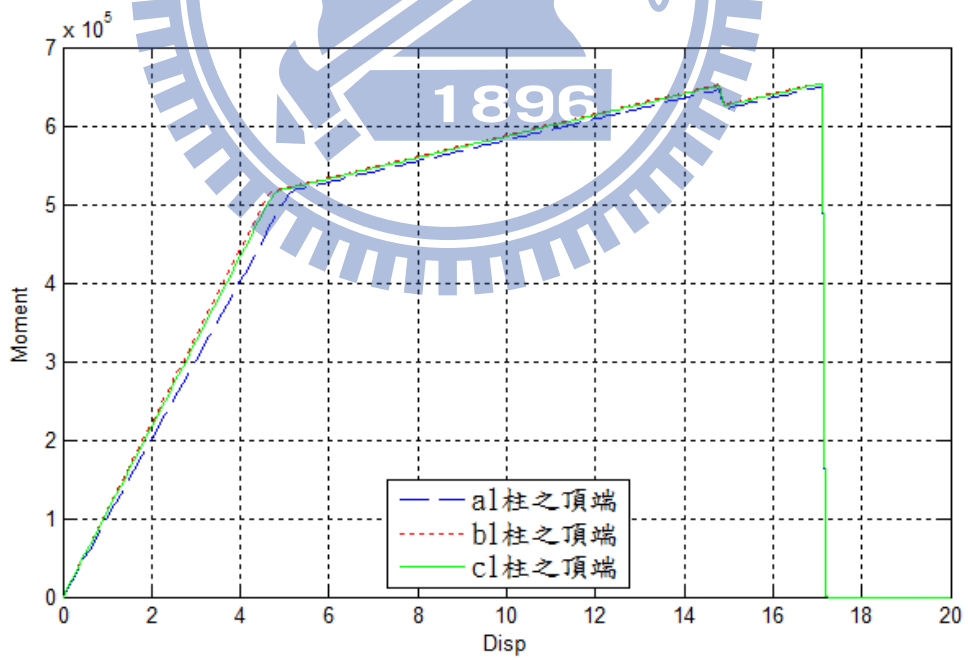
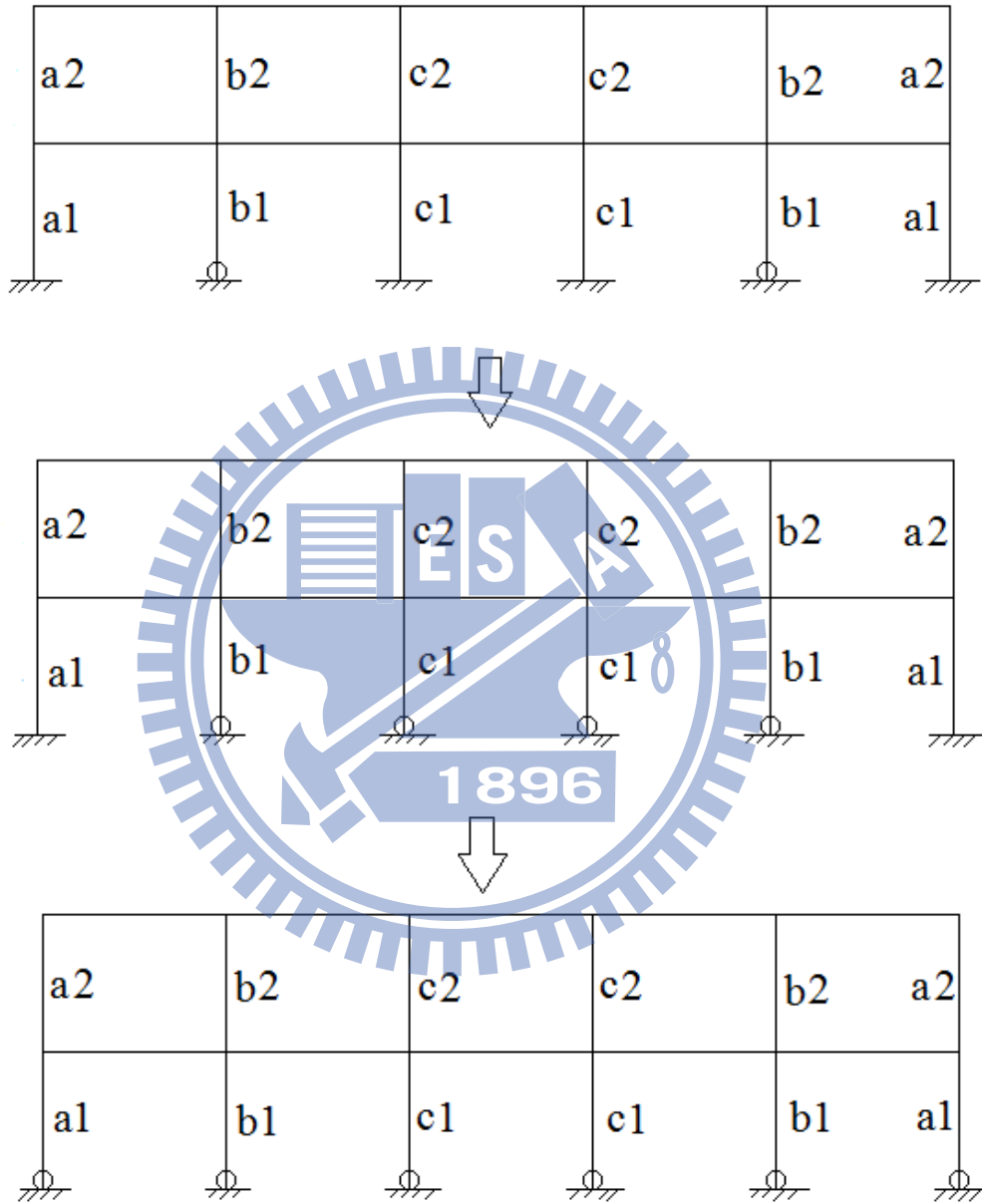
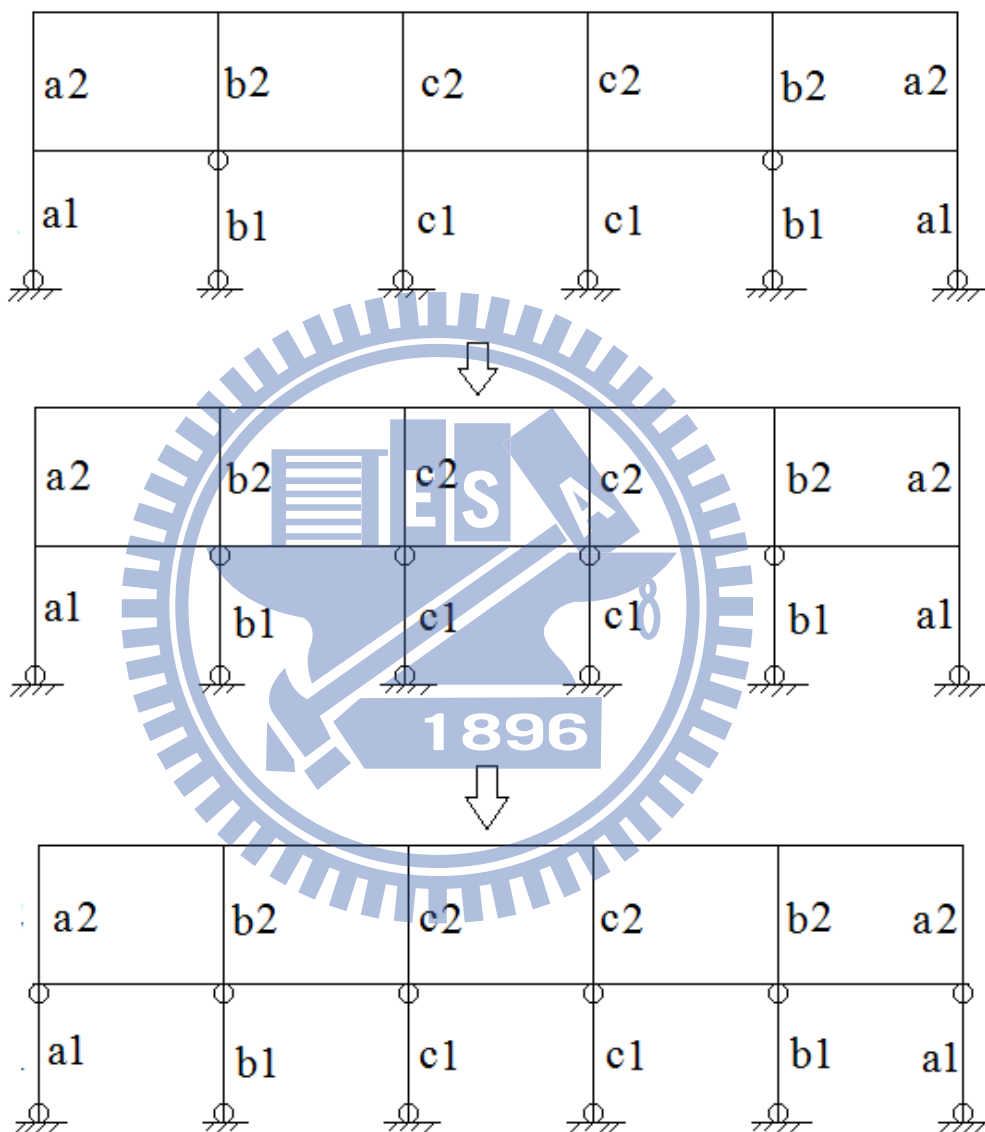


圖5.27 二樓-五跨構架之彎矩-位移關係曲線圖



○ 彎矩之降伏

圖5.28 二樓-五跨構架之塑性鉸發生順序與位置



○ 彎矩之降伏

圖5.29 二樓-五跨構架之塑性鉸發生順序與位置

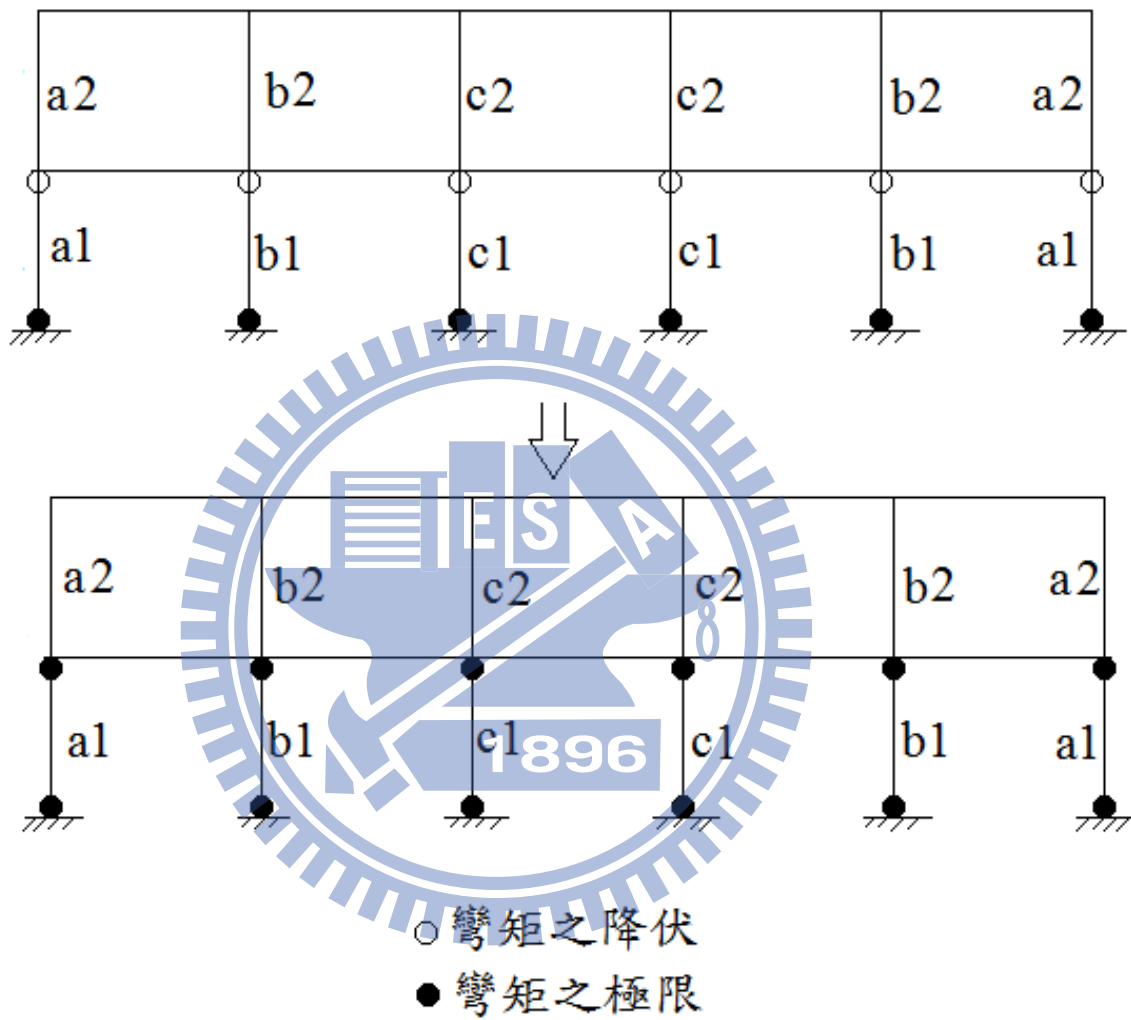


圖5.30 二樓-五跨構架之塑性鉸發生順序與位置

附錄 OpenSees之程式碼

附錄一 懸臂柱(材料非線性之側推分析)

```
1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set Bc 30.0           ;#Column Width
6. set Hc 50.0           ;#Column Depth
7. set Conc 1            ;#Material ID
8. set fc 280.0          ;#Concrete Yield Stress
9. set ey 0.002          ;#Concrete Yield Strain
10. set fu 80.0           ;#Concrete Crushing Stress
11. set eu 0.004          ;#Concrete Crushing Strain
12. set Steel 2           ;#Material ID
13. set fy 4200.0         ;#Steel Yield Stress
14. set Es 2040000.0      ;#Steel Modulus Of Elastic
15. set b 0.01           ;#Steel Strain-Hardening Ratio
16. set ColSection 1     ;#Section ID
17. set As_8 5.067       ;#Steel Area (#8)
18. set PDelta 1         ;#Geometric Transformation ID
19. set Int_c 3          ;#Number Of Integration Points
20. set EQ 60000         ;#Node Force
21. #-----
22. #           Create Model
23. #-----
24. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
25. #-----
26. #           Node Coordinates
27. #-----
28. node 1 0.0 0.0
29. node 2 0.0 22.5
30. node 3 0.0 45.0
31. node 4 0.0 67.5
32. node 5 0.0 90.0
33. node 6 0.0 112.5
```

34. node 7 0.0 135.0
 35. node 8 0.0 157.5
 36. node 9 0.0 180.0
 37. node 10 0.0 202.5
 38. node 11 0.0 225.0
 39. node 12 0.0 247.5
 40. node 13 0.0 270.0
 41. node 14 0.0 292.5
 42. node 15 0.0 315.0
 43. node 16 0.0 337.5
 44. node 17 0.0 \$Lc

45. #-----

46. # Boundary Conditions

47. #-----

48. fix 1 1 1 1

49. fix 2 0 0 0

50. fix 3 0 0 0

51. fix 4 0 0 0

52. fix 5 0 0 0

53. fix 6 0 0 0

54. fix 7 0 0 0

55. fix 8 0 0 0

56. fix 9 0 0 0

57. fix 10 0 0 0

58. fix 11 0 0 0

59. fix 12 0 0 0

60. fix 13 0 0 0

61. fix 14 0 0 0

62. fix 15 0 0 0

63. fix 16 0 0 0

64. fix 17 0 0 0

65. #-----

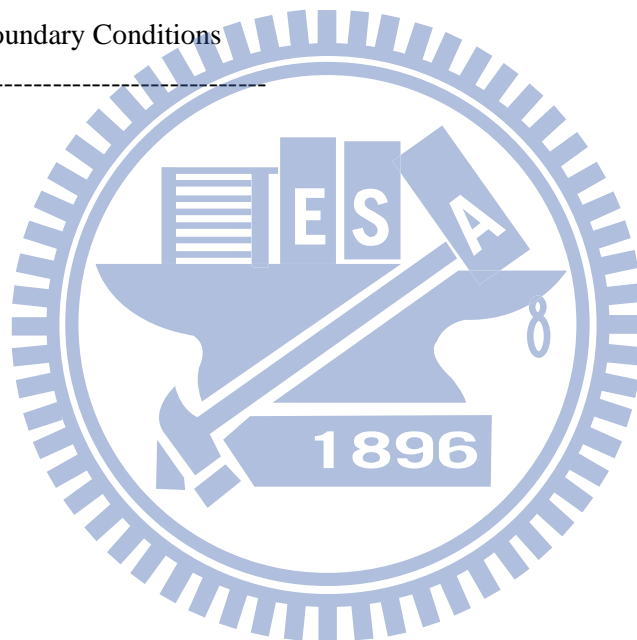
66. # Define Material

67. #-----

68. uniaxialMaterial Concrete01 \$Conc -\$fc -\$ey -\$fu -\$eu

69. uniaxialMaterial Steel01 \$Steel \$fy \$Es \$b

70. #-----



```

71. #           Define Column Section
72. #-----
73. section Fiber $ColSection {
74. patch rect $Conc 1 1 -25 -15 -19 -9
75. patch rect $Conc 1 1 -25 9 -19 15
76. patch rect $Conc 1 1 19 9 25 15
77. patch rect $Conc 1 1 19 -15 25 -9
78. patch rect $Conc 1 3 -25 -9 -19 9
79. patch rect $Conc 1 3 19 -9 25 9
80. patch rect $Conc 6 1 -19 -15 19 -9
81. patch rect $Conc 6 1 -19 9 19 15
82. patch rect $Conc 6 3 -19 9 19 9
83. layer straight $Steel 3 $As_8 -19 -9 -19 9
84. layer straight $Steel 3 $As_8 19 -9 19 9
85. }
86. #-----
87. #           Geometric Transformation
88. #-----
89. geomTransf PDelta $PDelta
90. #-----
91. #           Define Element
92. #-----
93. element nonlinearBeamColumn 12 1 2 $Int_c $ColSection $PDelta
94. element nonlinearBeamColumn 23 2 3 $Int_c $ColSection $PDelta
95. element nonlinearBeamColumn 34 3 4 $Int_c $ColSection $PDelta
96. element nonlinearBeamColumn 45 4 5 $Int_c $ColSection $PDelta
97. element nonlinearBeamColumn 56 5 6 $Int_c $ColSection $PDelta
98. element nonlinearBeamColumn 67 6 7 $Int_c $ColSection $PDelta
99. element nonlinearBeamColumn 78 7 8 $Int_c $ColSection $PDelta
100. element nonlinearBeamColumn 89 8 9 $Int_c $ColSection $PDelta
101. element nonlinearBeamColumn 910 9 10 $Int_c $ColSection $PDelta
102. element nonlinearBeamColumn 1011 10 11 $Int_c $ColSection $PDelta
103. element nonlinearBeamColumn 1112 11 12 $Int_c $ColSection $PDelta
104. element nonlinearBeamColumn 1213 12 13 $Int_c $ColSection $PDelta
105. element nonlinearBeamColumn 1314 13 14 $Int_c $ColSection $PDelta
106. element nonlinearBeamColumn 1415 14 15 $Int_c $ColSection $PDelta
107. element nonlinearBeamColumn 1516 15 16 $Int_c $ColSection $PDelta

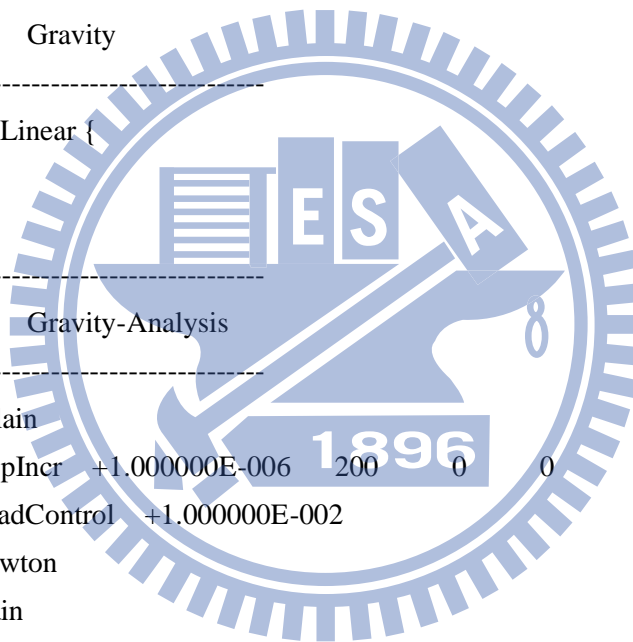
```



```

108. element nonlinearBeamColumn 1617 16 17 $Int_c $ColSection $PDelta
109. #-----
110. #           Recorder
111. #-----
112. set data Nonlinear(CantileverRC) ;
113. file mkdir $data
114. #-----
115. recorder Node -file $data/DFree.out -time -node 17 -dof 1 2 3 disp;
116. puts "DFree"
117. recorder Node -file $data/VBase.out -time -node 1 -dof 1 2 3 reaction;
118. puts "VBase"
119. #-----
120. #           Gravity
121. #-----
122. pattern Plain 1 Linear {
123. load 2 0 0 0
124. }
125. #-----
126. #           Gravity-Analysis
127. #-----
128. constraints Plain
129. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
130. integrator LoadControl +1.000000E-002
131. algorithm Newton
132. numberer Plain
133. system BandGeneral
134. analysis Static
135. analyze 1
136. loadConst -time 0.0
137. #-----
138. #           Lateral-Load
139. #-----
140. pattern Plain 2 Linear {
141. load 17 $EQ 0 0
142. }
143. #-----
144. #           Pushover-Analysis

```



```

145. #-----
146. constraints Plain
147. test EnergyIncr +1.000000E-008 8000 0 0
148. integrator DisplacementControl 17 1 0.1
149. algorithm Newton
150. numberer Plain
151. system BandGeneral
152. analysis Static
153. analyze 1000
154. #-----
155. #           Display Data
156. #-----
157. print node
158. print ele

```



附錄二 懸臂柱(鋼筋混凝土斷面非線性行為分析)

```

1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set Bc 30.0           ;#Column Width
6. set Hc 50.0           ;#Column Depth
7. set Ac [expr $Bc*$Hc] ;#Column Area
8. set Ig [expr $Bc*pow($Hc,3)/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9. set Iz [expr 1000000*$Ig] ;#Modified Moment Of Inertia
10. set Mat_1 1           ;#Material ID
11. set fc 280.0         ;#Concrete Yield Stress
12. set Ec [expr 15000.0*sqrt($fc)] ;#Concrete Modulus Of Elastic
13. set My 2495679.557   ;#Yield Moment (Reinforced Concrete)
14. set uy 0.0000681233 ;#Yield Curvature
15. set EIy [expr $My/$uy] ;#Calculate Crack EI
16. set Mp 2614487.026   ;#Ultimate Moment
17. set up 0.000557     ;#Ultimate Curvature
18. set EIu [expr ($Mp-$My)/($up-$uy)] ;#Calculate Ultimate EI
19. set b [expr $EIu/$EIy] ;#Strain-Hardening Ratio
20. set Sec_1 1          ;#Section ID
21. set Sec_2 2          ;#Section ID
22. set PDelta 1         ;#Geometric Transformation ID
23. set Int_c 3          ;#Number Of Integration Points
24. set EQ 60000         ;#Node Force
25. #-----
26. #           Create Model
27. #-----
28. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
29. #-----
30. #           Node Coordinates
31. #-----
32. node 1 0.0 0.0
33. node 2 0.0 22.5
34. node 3 0.0 45.0
35. node 4 0.0 67.5

```

36. node 5 0.0 90.0
 37. node 6 0.0 112.5
 38. node 7 0.0 135.0
 39. node 8 0.0 157.5
 40. node 9 0.0 180.0
 41. node 10 0.0 202.5
 42. node 11 0.0 225.0
 43. node 12 0.0 247.5
 44. node 13 0.0 270.0
 45. node 14 0.0 292.5
 46. node 15 0.0 315.0
 47. node 16 0.0 337.5
 48. node 17 0.0 \$Lc

49. #-----

50. # Boundary Conditions

51. #-----

52. fix 1 1 1 1

53. fix 2 0 0 0

54. fix 3 0 0 0

55. fix 4 0 0 0

56. fix 5 0 0 0

57. fix 6 0 0 0

58. fix 7 0 0 0

59. fix 8 0 0 0

60. fix 9 0 0 0

61. fix 10 0 0 0

62. fix 11 0 0 0

63. fix 12 0 0 0

64. fix 13 0 0 0

65. fix 14 0 0 0

66. fix 15 0 0 0

67. fix 16 0 0 0

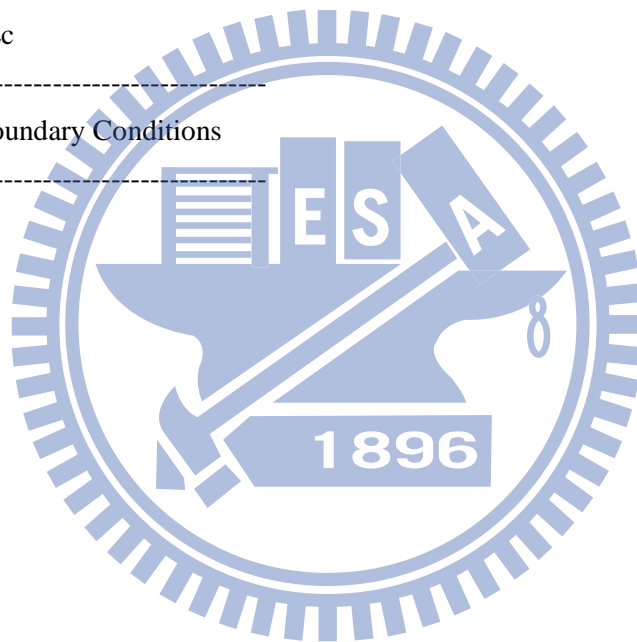
68. fix 17 0 0 0

69. #-----

70. # Define Material

71. #-----

72. uniaxialMaterial Steel01 \$Mat_1 \$My \$EIy \$b



```

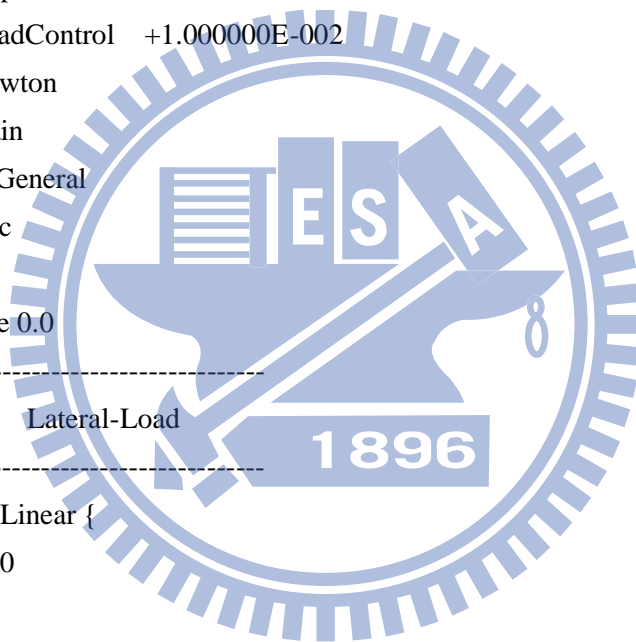
73. #-----
74. #           Define Section
75. #-----
76. section Elastic $Sec_1 $Ec $Ac $Iz
77. section Aggregator $Sec_2 $Mat_1 Mz -section $Sec_1
78. #-----
79. #           Geometric Transformation
80. #-----
81. geomTransf PDelta $PDelta
82. #-----
83. #           Define Element
84. #-----
85. element nonlinearBeamColumn 12 1 2 $Int_c $Sec_2 $PDelta
86. element nonlinearBeamColumn 23 2 3 $Int_c $Sec_2 $PDelta
87. element nonlinearBeamColumn 34 3 4 $Int_c $Sec_2 $PDelta
88. element nonlinearBeamColumn 45 4 5 $Int_c $Sec_2 $PDelta
89. element nonlinearBeamColumn 56 5 6 $Int_c $Sec_2 $PDelta
90. element nonlinearBeamColumn 67 6 7 $Int_c $Sec_2 $PDelta
91. element nonlinearBeamColumn 78 7 8 $Int_c $Sec_2 $PDelta
92. element nonlinearBeamColumn 89 8 9 $Int_c $Sec_2 $PDelta
93. element nonlinearBeamColumn 910 9 10 $Int_c $Sec_2 $PDelta
94. element nonlinearBeamColumn 1011 10 11 $Int_c $Sec_2 $PDelta
95. element nonlinearBeamColumn 1112 11 12 $Int_c $Sec_2 $PDelta
96. element nonlinearBeamColumn 1213 12 13 $Int_c $Sec_2 $PDelta
97. element nonlinearBeamColumn 1314 13 14 $Int_c $Sec_2 $PDelta
98. element nonlinearBeamColumn 1415 14 15 $Int_c $Sec_2 $PDelta
99. element nonlinearBeamColumn 1516 15 16 $Int_c $Sec_2 $PDelta
100. element nonlinearBeamColumn 1617 16 17 $Int_c $Sec_2 $PDelta
101. #-----
102. #           Recorder
103. #-----
104. set data Nonlinear(Cantilever-Concrete) ;
105. file mkdir $data
106. #-----
107. recorder Node -file $data/DFree.out -time -node 17 -dof 1 2 3 disp;
108. puts "DFree"
109. recorder Node -file $data/VBase.out -time -node 1 -dof 1 2 3 reaction;

```

```

110. puts "VBase"
111. #-----
112. #           Gravity
113. #-----
114. pattern Plain 1 Linear {
115. load 2 0 0 0
116. }
117. #-----
118. #           Gravity-Analysis
119. #-----
120. constraints Plain
121. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
122. integrator LoadControl +1.000000E-002
123. algorithm Newton
124. numberer Plain
125. system BandGeneral
126. analysis Static
127. analyze 1
128. loadConst -time 0.0
129. #-----
130. #           Lateral-Load
131. #-----
132. pattern Plain 2 Linear {
133. load 17 $EQ 0 0
134. }
135. #-----
136. #           Pushover-Analysis
137. #-----
138. constraints Plain
139. test EnergyIncr +1.000000E-008 8000 0 0
140. integrator DisplacementControl 17 1 0.1
141. algorithm Newton
142. numberer Plain
143. system BandGeneral
144. analysis Static
145. analyze 1000
146. #-----

```



147. # Display Data

148. #-----

149. print node

150. print ele



附錄三 懸臂柱(非線性集中彈簧之側推分析)

```

1.  #-----
2.  #           Input Data
3.  #-----
4.  set Lc 360.0           ;#Column Length
5.  set Bc 30.0           ;#Column Width
6.  set Hc 50.0           ;#Column Depth
7.  set Ac [expr $Bc*$Hc] ;#Column Area
8.  set IZ [expr ($Bc*pow($Hc,3))/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9.  set IZ_cr [expr 0.35*$IZ] ;#Column Cracked Moment Of Inertia
10. set fc 280.0          ;#Concrete Yield Stress
11. set Ec [expr 15000.0*sqrt($fc)] ;#Concrete Modulus Of Elastic
12. set My 2547260.0      ;#Yield Moment
13. set ey 0.008611      ;#Yield Rotation
14. set Mc 4083210.0     ;#Ultimate Moment
15. set ec 0.246111      ;#Ultimate Rotation
16. set Mr 0              ;#Residual Moment
17. set er 0.246111      ;#Residual Rotation
18. set Ke [expr 1000000000*$My/$ey] ;#Spring Stiffness
19. set u_p [expr (($Mc-$My)/($ec-$ey))/$Ke] ;#Strain-Hardening Ratio (Negative)
20. set u_n [expr (($Mc-$My)/($ec-$ey))/$Ke] ;#Strain-Hardening Ratio (Positive)
21. set My_p $My          ;#Yield Moment (Negative)
22. set My_n -$My         ;#Yield Moment (Positive)
23. set LS 1000           ;#No Hysteresis loop
24. set LC 1000           ;#No Hysteresis loop
25. set LA 1000           ;#No Hysteresis loop
26. set LK 1000           ;#No Hysteresis loop
27. set cS 1              ;#Default Value
28. set cC 1              ;#Default Value
29. set cA 1              ;#Default Value
30. set cK 1              ;#Default Value
31. set th_P_p [expr $ec-$ey] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Negative)
32. set th_P_n [expr $ec-$ey] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Positive)
33. set th_PC_p [expr $er-$ec] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Negative)
34. set th_PC_n [expr $er-$ec] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Positive)
35. set th_R_p [expr $Mr/$My] ;#Residual and Yield Moment Ration (Negative)

```



```

36. set th_R_n [expr $Mr/$My]                ;#Residual and Yield Moment Ration (Positive)
37. set th_U_p $Er                            ;#Residual Rotation (Negative)
38. set th_U_n $Er                            ;#Residual Rotation (Positive)
39. set DP 1                                  ;#Default Value
40. set DN 1                                  ;#Default Value
41. set EQ 60000                              ;#Node Force
42. #-----
43. #          Create Model
44. #-----
45. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
46. #-----
47. #          Node Coordinates
48. #-----
49. node 1 0 0
50. node 2 0 $Lc
51. node 3 0 0
52. #-----
53. #          Boundary Conditions
54. #-----
55. fix 1 1 1 1
56. #-----
57. #          Define Material
58. #-----
59. uniaxialMaterial Bilinear 1 $Ke $u_p $u_n $My_p $My_n $LS $LC $LA $LK $cS $cC $cA $cK
    $th_P_p $th_P_n $th_PC_p $th_PC_n $th_R_p $th_R_n $th_U_p $th_U_n $DP $DN
60. #-----
61. #          Geometric Transformation
62. #-----
63. geomTransf PDelta 1
64. #-----
65. #          Define Element
66. #-----
67. element elasticBeamColumn 1 3 2 $Ac $Ec $IZ_cr 1
68. #-----
69. #          Rotational Springs
70. #-----
71. element zeroLength 11 1 3 -mat 1 -dir 6

```

```

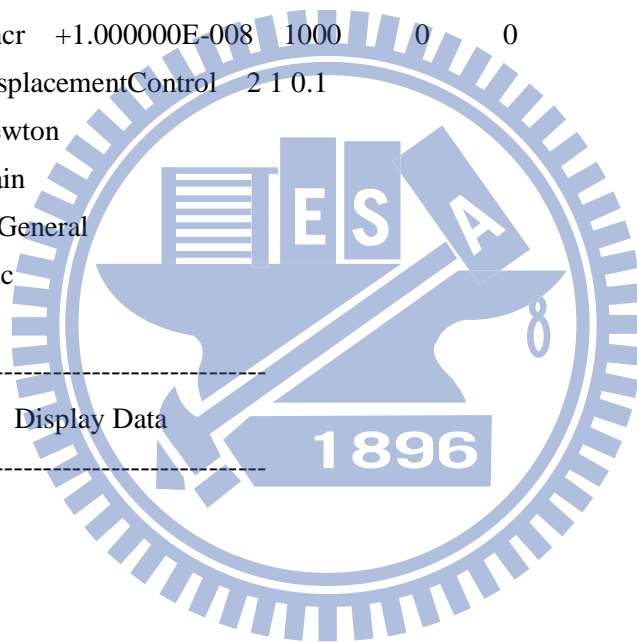
72. #-----
73. #           EqualDOF
74. #-----
75. equalDOF 1 3 1 2
76. #-----
77. #           Region
78. #-----
79. region 1 -ele 11
80. #-----
81. #           Recorder
82. #-----
83. set data Nonlinear(Cantilever-Concentrated) ;
84. file mkdir $data
85. #-----
86. recorder Node -file $data/DFreeC.out -time -node 2 -dof 1 2 3 disp;
87. puts "DFree"
88. recorder Node -file $data/VBaseC3.out -time -node 3 -dof 1 2 3 reaction;
89. puts "VBase"
90. recorder Element -file $data/MomC.out -region 1 force;
91. recorder Element -file $data/RotC.out -region 1 deformation
92. puts "Moment-Rotation"
93. #-----
94. #           Gravity
95. #-----
96. pattern Plain 1 Linear {
97. load 2 0 0 0
98. }
99. #-----
100. #           Gravity-Analysis
101. #-----
102. constraints Plain
103. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
104. integrator LoadControl +1.000000E-002
105. algorithm Newton
106. numberer Plain
107. system BandGeneral
108. analysis Static

```

```

109. analyze 1
110. loadConst -time 0.0
111. #-----
112. #           Lateral-Load
113. #-----
114. pattern Plain 2 Linear {
115. load 2 $EQ 0 0
116. }
117. #-----
118. #           Pushover-Analysis
119. #-----
120. constraints Plain
121. test EnergyIncr +1.000000E-008 1000 0 0
122. integrator DisplacementControl 2 1 0.1
123. algorithm Newton
124. numberer Plain
125. system BandGeneral
126. analysis Static
127. analyze 1000
128. #-----
129. #           Display Data
130. #-----
131. print node
132. print ele

```



附錄四 懸臂柱(非線性塑性區之側推分析)

```

1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set Bc 30.0           ;#Column Width
6. set Hc 50.0           ;#Column Depth
7. set Ac [expr $Bc*$Hc] ;#Column Area
8. set IZ [expr ($Bc*pow($Hc,3))/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9. set IZ_cr [expr 0.35*$IZ] ;#Column Cracked Moment Of Inertia
10. set fc 280.0         ;#Concrete Yield Stress
11. set Ec [expr 15000.0*sqrt($fc)] ;#Concrete Modulus Of Elastic
12. set P_R [expr 0.004*$Lc] ;#Hinge Length
13. set My 2507480.0     ;#Yield Moment
14. set ey 0.008333     ;#Yield Rotation
15. set Mc 4083210.0    ;#Ultimate Moment
16. set ec 0.246111     ;#Ultimate Rotation
17. set Mr 0             ;#Residual Moment
18. set er 0.246111     ;#Residual Rotation
19. set Ke [expr 1000000000*$My/$ey] ;#Spring Stiffness
20. set u_p [expr (($Mc-$My)/($ec-$ey))/$Ke] ;#Strain-Hardening Ratio (Negative)
21. set u_n [expr (($Mc-$My)/($ec-$ey))/$Ke] ;#Strain-Hardening Ratio (Positive)
22. set My_p $My         ;#Yield Moment (Negative)
23. set My_n -$My        ;#Yield Moment (Positive)
24. set LS 1000         ;#No Hysteresis loop
25. set LC 1000         ;#No Hysteresis loop
26. set LA 1000         ;#No Hysteresis loop
27. set LK 1000         ;#No Hysteresis loop
28. set cS 1            ;#Default Value
29. set cC 1            ;#Default Value
30. set cA 1            ;#Default Value
31. set cK 1            ;#Default Value
32. set th_P_p [expr $ec-$ey] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Negative)
33. set th_P_n [expr $ec-$ey] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Positive)
34. set th_PC_p [expr $er-$ec] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Negative)
35. set th_PC_n [expr $er-$ec] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Positive)

```

```

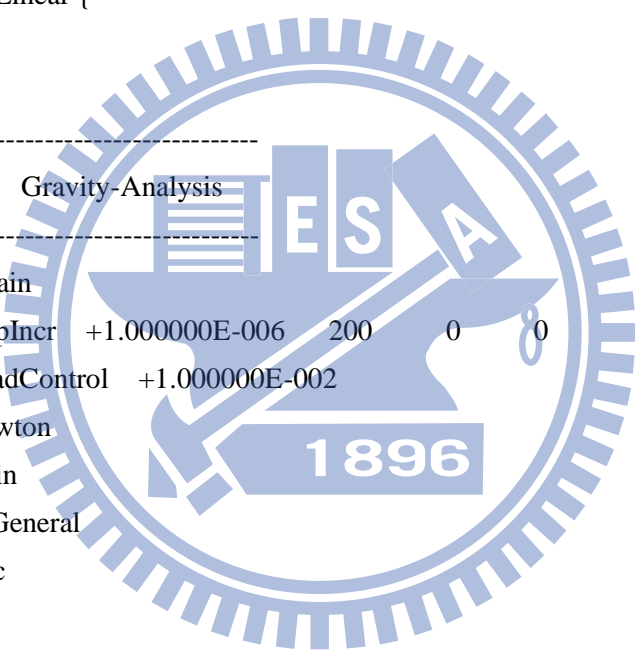
36. set th_R_p [expr $Mr/$My]           ;#Residual and Yield Moment Ration (Negative)
37. set th_R_n [expr $Mr/$My]           ;#Residual and Yield Moment Ration (Positive)
38. set th_U_p $er                       ;#Residual Rotation (Negative)
39. set th_U_n $er                       ;#Residual Rotation (Positive)
40. set DP 1                             ;#Default Value
41. set DN 1                             ;#Default Value
42. set EQ 60000                         ;#Node Force
43. #-----
44. #           Create Model
45. #-----
46. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
47. #-----
48. #           Node Coordinates
49. #-----
50. node 1 0 0
51. node 2 0 $Lc
52. #-----
53. #           Boundary Conditions
54. #-----
55. fix 1 1 1 1
56. #-----
57. #           Define Material
58. #-----
59. uniaxialMaterial Bilin 1 $Ke $u_p $u_n $My_p $My_n $LS $LC $LA $LK $cS $cC $cA $cK
    $th_P_p $th_P_n $th_PC_p $th_PC_n $th_R_p $th_R_n $th_U_p $th_U_n $DP $DN
60. #-----
61. #           Define Section
62. #-----
63. section Uniaxial 1 1 Mz
64. #-----
65. #           Geometric Transformation
66. #-----
67. geomTransf PDelta 2
68. #-----
69. #           Define Element
70. #-----
71. element beamWithHinges 1 1 2 1 $P_R 1 $P_R $Ec $Ac $IZ_cr 2

```

```

72. #-----
73. #           Recorder
74. #-----
75. set data Nonlinear(Cantilever-BeamWithHinge) ;
76. file mkdir $data
77. #-----
78. recorder Node -file $data/DFreeD.out -time -node 2 -dof 1 2 3 disp;
79. recorder Node -file $data/VBaseD.out -time -node 1 -dof 1 2 3 reaction;
80. #-----
81. #           Gravity
82. #-----
83. pattern Plain 1 Linear {
84. load 2 0 0 0
85. }
86. #-----
87. #           Gravity-Analysis
88. #-----
89. constraints Plain
90. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
91. integrator LoadControl +1.000000E-002
92. algorithm Newton
93. numberer Plain
94. system BandGeneral
95. analysis Static
96. analyze 1
97. loadConst -time 0.0
98. #-----
99. #           Lateral-Load
100. #-----
101. pattern Plain 2 Linear {
102. load 2 $EQ 0 0
103. }
104. #-----
105. #           Pushover-Analysis
106. #-----
107. constraints Plain
108. test EnergyIncr +1.000000E-008 1000 0 0

```



109. integrator DisplacementControl 2 1 0.1
110. algorithm Newton
111. numberer Plain
112. system BandGeneral
113. analysis Static
114. analyze 1000
115. #-----
116. # Display Data
117. #-----
118. print node
119. print ele



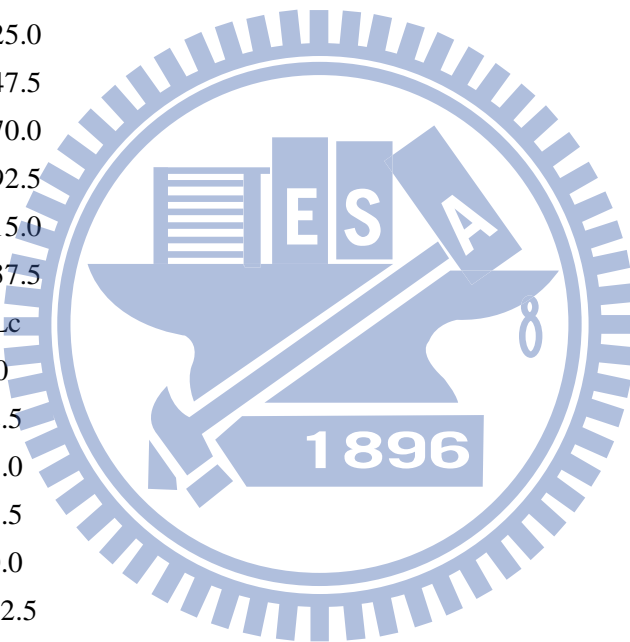
附錄五 門型構架(材料非線性之側推分析)

```

1.  #-----
2.  #           Input Data
3.  #-----
4.  set Lc 360.0           ;#Column Length
5.  set Bc 30.0           ;#Column Width
6.  set Hc 50.0           ;#Column Depth
7.  set Lb 400.0          ;#Beam Length
8.  set Bb 30.0           ;#Beam Width
9.  set Hb 60.0           ;#Beam Depth
10. set Ab [expr $Bb*$Hc] ;#Beam Area
11. set IZb [expr $Bb*pow($Hb,3)/12.0] ;#Beam Moment Of Inertia
12. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;#Beam Cracked Moment Of Inertia
13. set fc_b 280.0        ;#Concrete Yield Stress
14. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;#Concrete Modulus Of Elastic
15. set Conc 1            ;#Material ID
16. set fc 280.0          ;#Concrete Yield Stress
17. set ey 0.002          ;#Concrete Yield Strain
18. set fu 80.0           ;#Concrete Crushing Stress
19. set eu 0.004          ;#Concrete Crushing Strain
20. set Steel 2           ;#Material ID
21. set fy 4200.0         ;#Steel Yield Stress
22. set Es 2040000.0      ;#Steel Modulus Of Elastic
23. set b 0.01            ;#Steel Strain-Hardening Ratio
24. set ColSection 1      ;#Section ID
25. set As_8 5.067        ;#Steel Area (#8)
26. set BeamSection 2     ;#Section ID
27. set PDelta 1          ;#Geometric Transformation ID
28. set Int_c 3           ;#Column Number Of Integration Points
29. set Int_b 5           ;#Beam Number Of Integration Points
30. set EQ 60000         ;#Node Force
31. #-----
32. #           Create Model
33. #-----
34. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
35. #-----

```


36. # Node Coordinates
 37. #-----
 38. node 11 0.0 0.0
 39. node 21 0.0 22.5
 40. node 31 0.0 45.0
 41. node 41 0.0 67.5
 42. node 51 0.0 90.0
 43. node 61 0.0 112.5
 44. node 71 0.0 135.0
 45. node 81 0.0 157.5
 46. node 91 0.0 180.0
 47. node 101 0.0 202.5
 48. node 111 0.0 225.0
 49. node 121 0.0 247.5
 50. node 131 0.0 270.0
 51. node 141 0.0 292.5
 52. node 151 0.0 315.0
 53. node 161 0.0 337.5
 54. node 171 0.0 \$Lc
 55. node 12 \$Lb 0.0
 56. node 22 \$Lb 22.5
 57. node 32 \$Lb 45.0
 58. node 42 \$Lb 67.5
 59. node 52 \$Lb 90.0
 60. node 62 \$Lb 112.5
 61. node 72 \$Lb 135.0
 62. node 82 \$Lb 157.5
 63. node 92 \$Lb 180.0
 64. node 102 \$Lb 202.5
 65. node 112 \$Lb 225.0
 66. node 122 \$Lb 247.5
 67. node 132 \$Lb 270.0
 68. node 142 \$Lb 292.5
 69. node 152 \$Lb 315.0
 70. node 162 \$Lb 337.5
 71. node 172 \$Lb \$Lc
 72. #-----



73. # Boundary Conditions

74. #-----

75. fix 11 1 1 1

76. fix 21 0 0 0

77. fix 31 0 0 0

78. fix 41 0 0 0

79. fix 51 0 0 0

80. fix 61 0 0 0

81. fix 71 0 0 0

82. fix 81 0 0 0

83. fix 91 0 0 0

84. fix 101 0 0 0

85. fix 111 0 0 0

86. fix 121 0 0 0

87. fix 131 0 0 0

88. fix 141 0 0 0

89. fix 151 0 0 0

90. fix 161 0 0 0

91. fix 171 0 0 0

92. fix 12 1 1 1

93. fix 22 0 0 0

94. fix 32 0 0 0

95. fix 42 0 0 0

96. fix 52 0 0 0

97. fix 62 0 0 0

98. fix 72 0 0 0

99. fix 82 0 0 0

100. fix 92 0 0 0

101. fix 102 0 0 0

102. fix 112 0 0 0

103. fix 122 0 0 0

104. fix 132 0 0 0

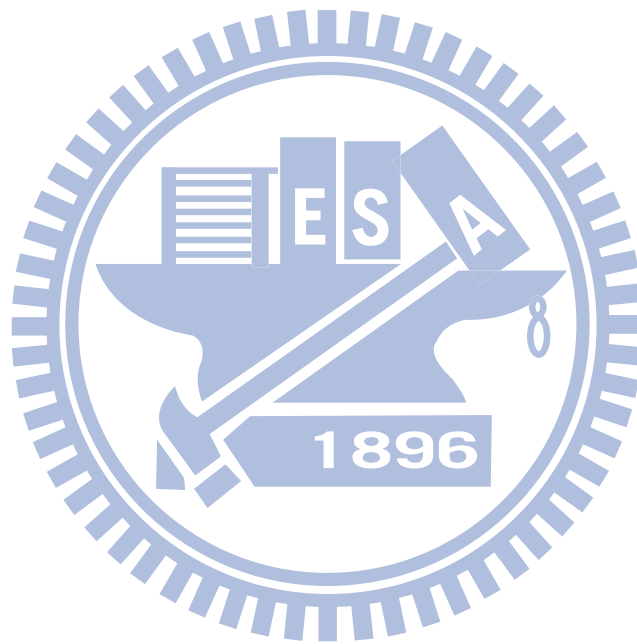
105. fix 142 0 0 0

106. fix 152 0 0 0

107. fix 162 0 0 0

108. fix 172 0 0 0

109. #-----



```

110. #                Define Material
111. #-----
112. uniaxialMaterial Concrete01 $Conc -$fc -$ey -$fu -$eu
113. uniaxialMaterial Steel01 $Steel $fy $Es $b
114. #-----
115. #                Define Section
116. #-----
117. section Fiber $ColSection {
118. patch rect $Conc 1 1 -25 -15 -19 -9
119. patch rect $Conc 1 1 -25 9 -19 15
120. patch rect $Conc 1 1 19 9 25 15
121. patch rect $Conc 1 1 19 -15 25 -9
122. patch rect $Conc 1 3 -25 -9 -19 9
123. patch rect $Conc 1 3 19 -9 25 9
124. patch rect $Conc 6 1 -19 -15 19 -9
125. patch rect $Conc 6 1 -19 9 19 15
126. patch rect $Conc 6 3 -19 9 19 9
127. layer straight $Steel 3 $As_8 -19 -9 -19 9
128. layer straight $Steel 3 $As_8 19 -9 19 9
129. }
130. section Elastic $BeamSection $Ec_b $Ab $Izb_cr
131. #-----
132. #                Geometric Transformation
133. #-----
134. geomTransf PDelta $PDelta
135. #-----
136. #                Define Element
137. #-----
138. element nonlinearBeamColumn 11 11 21 $Int_c $ColSection $PDelta
139. element nonlinearBeamColumn 21 21 31 $Int_c $ColSection $PDelta
140. element nonlinearBeamColumn 31 31 41 $Int_c $ColSection $PDelta
141. element nonlinearBeamColumn 41 41 51 $Int_c $ColSection $PDelta
142. element nonlinearBeamColumn 51 51 61 $Int_c $ColSection $PDelta
143. element nonlinearBeamColumn 61 61 71 $Int_c $ColSection $PDelta
144. element nonlinearBeamColumn 71 71 81 $Int_c $ColSection $PDelta
145. element nonlinearBeamColumn 81 81 91 $Int_c $ColSection $PDelta
146. element nonlinearBeamColumn 91 91 101 $Int_c $ColSection $PDelta

```

```

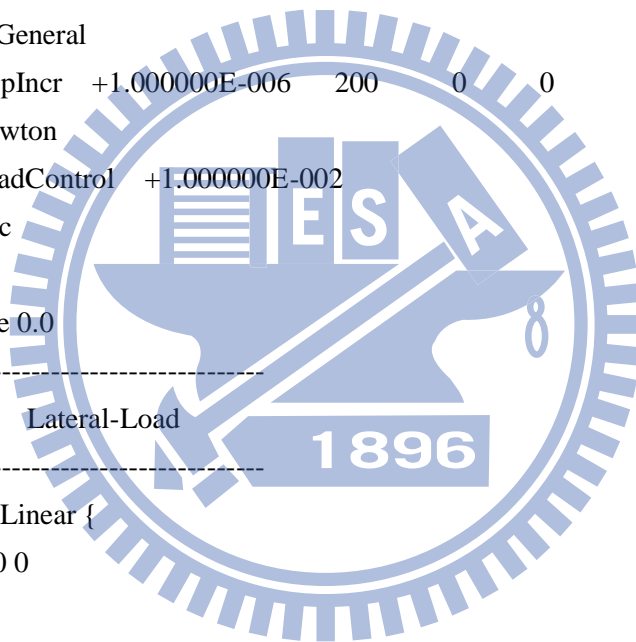
147. element nonlinearBeamColumn 101 101 111 $Int_c $ColSection $PDelta
148. element nonlinearBeamColumn 111 111 121 $Int_c $ColSection $PDelta
149. element nonlinearBeamColumn 121 121 131 $Int_c $ColSection $PDelta
150. element nonlinearBeamColumn 131 131 141 $Int_c $ColSection $PDelta
151. element nonlinearBeamColumn 141 141 151 $Int_c $ColSection $PDelta
152. element nonlinearBeamColumn 151 151 161 $Int_c $ColSection $PDelta
153. element nonlinearBeamColumn 161 161 171 $Int_c $ColSection $PDelta
154. element nonlinearBeamColumn 12 12 22 $Int_c $ColSection $PDelta
155. element nonlinearBeamColumn 22 22 32 $Int_c $ColSection $PDelta
156. element nonlinearBeamColumn 32 32 42 $Int_c $ColSection $PDelta
157. element nonlinearBeamColumn 42 42 52 $Int_c $ColSection $PDelta
158. element nonlinearBeamColumn 52 52 62 $Int_c $ColSection $PDelta
159. element nonlinearBeamColumn 62 62 72 $Int_c $ColSection $PDelta
160. element nonlinearBeamColumn 72 72 82 $Int_c $ColSection $PDelta
161. element nonlinearBeamColumn 82 82 92 $Int_c $ColSection $PDelta
162. element nonlinearBeamColumn 92 92 102 $Int_c $ColSection $PDelta
163. element nonlinearBeamColumn 102 102 112 $Int_c $ColSection $PDelta
164. element nonlinearBeamColumn 112 112 122 $Int_c $ColSection $PDelta
165. element nonlinearBeamColumn 122 122 132 $Int_c $ColSection $PDelta
166. element nonlinearBeamColumn 132 132 142 $Int_c $ColSection $PDelta
167. element nonlinearBeamColumn 142 142 152 $Int_c $ColSection $PDelta
168. element nonlinearBeamColumn 152 152 162 $Int_c $ColSection $PDelta
169. element nonlinearBeamColumn 162 162 172 $Int_c $ColSection $PDelta
170. element nonlinearBeamColumn 1 171 172 $Int_b $BeamSection $PDelta
171. #-----
172. #           EqualDOF
173. #-----
174. equalDOF 171 172 1 2
175. #-----
176. #           Recorder
177. #-----
178. set data Nonlinear(RCFrame) ;
179. file mkdir $data
180. #-----
181. recorder Node -file $data/DFree.out -time -node 171 172 -dof 1 2 3 disp;
182. puts "DFree"
183. recorder Node -file $data/VBase.out -time -node 11 12 -dof 1 reaction;

```

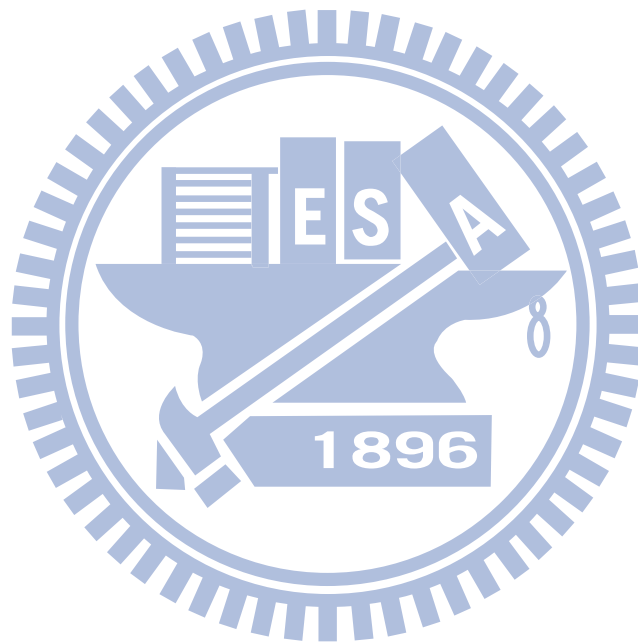
```

184. puts "VBase"
185. #-----
186. #           Gravity
187. #-----
188. pattern Plain 1 Linear {
189. load 171 0 0 0
190. }
191. #-----
192. #           Gravity-Analysis
193. #-----
194. constraints Plain
195. numberer Plain
196. system BandGeneral
197. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
198. algorithm Newton
199. integrator LoadControl +1.000000E-002
200. analysis Static
201. analyze 1
202. loadConst -time 0.0
203. #-----
204. #           Lateral-Load
205. #-----
206. pattern Plain 2 Linear {
207. load 171 $EQ 0 0
208. }
209. #-----
210. #           Pushover-Analysis
211. #-----
212. constraints Plain
213. numberer Plain
214. system BandGeneral
215. test EnergyIncr +1.000000E-008 8000 0 0
216. algorithm Newton
217. integrator DisplacementControl 171 1 0.1
218. analysis Static
219. analyze 1000
220. #-----

```



- 221. # Display Data
- 222. #-----
- 223. print node
- 224. print ele



附錄六 門型構架(鋼筋混凝土斷面非線性行為分析)

```

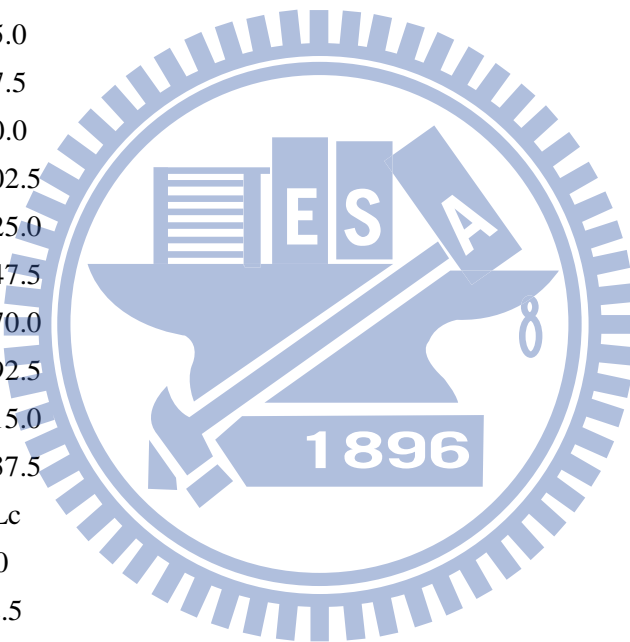
1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set Bc 30.0           ;#Column Width
6. set Hc 50.0           ;#Column Depth
7. set Ac [expr $Bc*$Hc] ;#Column Area
8. set Ig [expr $Bc*pow($Hc,3)/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9. set Iz [expr 1000000*$Ig] ;#Modified Moment Of Inertia
10. set Mat_1 1           ;#Material ID
11. set fc 280.0         ;#Concrete Yield Stress
12. set Ec [expr 15000.0*sqrt($fc)] ;#Concrete Modulus Of Elastic
13. set My 2495679.557   ;#Yield Moment (Reinforced Concrete)
14. set uy 0.0000681233 ;#Yield Curvature
15. set EIy [expr $My/$uy] ;#Calculate Crack EI
16. set Mp 2614487.026   ;#Ultimate Moment
17. set up 0.000557     ;#Ultimate Curvature
18. set EIu [expr ($Mp-$My)/($up-$uy)] ;#Calculate Ultimate EI
19. set b [expr $EIu/$EIy] ;#Strain-Hardening Ratio
20. set Sec_1 1          ;#Section ID
21. set ColSection 2     ;#Section ID
22. set Lb 400.0        ;#Beam Length
23. set Bb 30.0         ;#Beam Width
24. set Hb 60.0         ;#Beam Depth
25. set Ab [expr $Bb*$Hb] ;#Beam Area
26. set IZb [expr $Bb*pow($Hb,3)/12.0] ;#Beam Moment Of Inertia
27. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;#Beam Cracked Moment Of Inertia
28. set fc_b 280.0      ;#Concrete Yield Stress
29. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;#Concrete Modulus Of Elastic
30. set BeamSection 3   ;#Section ID
31. set PDelta 1        ;#Geometric Transformation ID
32. set Int_c 3         ;#Column Number Of Integration Points
33. set Int_b 5         ;#Beam Number Of Integration Points
34. set EQ 60000        ;#Node Force
35. #-----

```

```

36. #                Create Model
37. #-----
38. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
39. #-----
40. #                Node Coordinates
41. #-----
42. node 11 0.0 0.0
43. node 21 0.0 22.5
44. node 31 0.0 45.0
45. node 41 0.0 67.5
46. node 51 0.0 90.0
47. node 61 0.0 112.5
48. node 71 0.0 135.0
49. node 81 0.0 157.5
50. node 91 0.0 180.0
51. node 101 0.0 202.5
52. node 111 0.0 225.0
53. node 121 0.0 247.5
54. node 131 0.0 270.0
55. node 141 0.0 292.5
56. node 151 0.0 315.0
57. node 161 0.0 337.5
58. node 171 0.0 $Lc
59. node 12 $Lb 0.0
60. node 22 $Lb 22.5
61. node 32 $Lb 45.0
62. node 42 $Lb 67.5
63. node 52 $Lb 90.0
64. node 62 $Lb 112.5
65. node 72 $Lb 135.0
66. node 82 $Lb 157.5
67. node 92 $Lb 180.0
68. node 102 $Lb 202.5
69. node 112 $Lb 225.0
70. node 122 $Lb 247.5
71. node 132 $Lb 270.0
72. node 142 $Lb 292.5

```




```

73. node 152 $Lb 315.0
74. node 162 $Lb 337.5
75. node 172 $Lb $Lc
76. #-----
77. #           Boundary Conditions
78. #-----
79. fix 11 1 1 1
80. fix 21 0 0 0
81. fix 31 0 0 0
82. fix 41 0 0 0
83. fix 51 0 0 0
84. fix 61 0 0 0
85. fix 71 0 0 0
86. fix 81 0 0 0
87. fix 91 0 0 0
88. fix 101 0 0 0
89. fix 111 0 0 0
90. fix 121 0 0 0
91. fix 131 0 0 0
92. fix 141 0 0 0
93. fix 151 0 0 0
94. fix 161 0 0 0
95. fix 171 0 0 0
96. fix 12 1 1 1
97. fix 22 0 0 0
98. fix 32 0 0 0
99. fix 42 0 0 0
100. fix 52 0 0 0
101. fix 62 0 0 0
102. fix 72 0 0 0
103. fix 82 0 0 0
104. fix 92 0 0 0
105. fix 102 0 0 0
106. fix 112 0 0 0
107. fix 122 0 0 0
108. fix 132 0 0 0
109. fix 142 0 0 0

```



```

110. fix 152 0 0 0
111. fix 162 0 0 0
112. fix 172 0 0 0
113. #-----
114. #           Define Material
115. #-----
116. uniaxialMaterial Steel01 $Mat_1 $My $EIy $b
117. #-----
118. #           Define Section
119. #-----
120. section Elastic $Sec_1 $Ec $Ac $Iz
121. section Aggregator $ColSection $Mat_1 Mz -section $Sec_1
122. section Elastic $BeamSection $Ec_b $Ab $IZb_cr
123. #-----
124. #           Geometric Transformation
125. #-----
126. geomTransf PDelta $PDelta
127. #-----
128. #           Define Element
129. #-----
130. element nonlinearBeamColumn 11 11 21 $Int_c $ColSection $PDelta
131. element nonlinearBeamColumn 21 21 31 $Int_c $ColSection $PDelta
132. element nonlinearBeamColumn 31 31 41 $Int_c $ColSection $PDelta
133. element nonlinearBeamColumn 41 41 51 $Int_c $ColSection $PDelta
134. element nonlinearBeamColumn 51 51 61 $Int_c $ColSection $PDelta
135. element nonlinearBeamColumn 61 61 71 $Int_c $ColSection $PDelta
136. element nonlinearBeamColumn 71 71 81 $Int_c $ColSection $PDelta
137. element nonlinearBeamColumn 81 81 91 $Int_c $ColSection $PDelta
138. element nonlinearBeamColumn 91 91 101 $Int_c $ColSection $PDelta
139. element nonlinearBeamColumn 101 101 111 $Int_c $ColSection $PDelta
140. element nonlinearBeamColumn 111 111 121 $Int_c $ColSection $PDelta
141. element nonlinearBeamColumn 121 121 131 $Int_c $ColSection $PDelta
142. element nonlinearBeamColumn 131 131 141 $Int_c $ColSection $PDelta
143. element nonlinearBeamColumn 141 141 151 $Int_c $ColSection $PDelta
144. element nonlinearBeamColumn 151 151 161 $Int_c $ColSection $PDelta
145. element nonlinearBeamColumn 161 161 171 $Int_c $ColSection $PDelta
146. element nonlinearBeamColumn 12 12 22 $Int_c $ColSection $PDelta

```

```

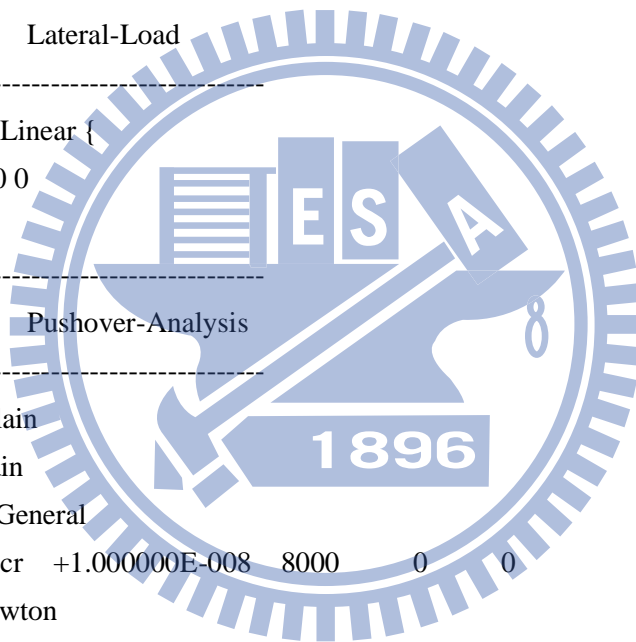
147. element nonlinearBeamColumn 22 22 32 $Int_c $ColSection $PDelta
148. element nonlinearBeamColumn 32 32 42 $Int_c $ColSection $PDelta
149. element nonlinearBeamColumn 42 42 52 $Int_c $ColSection $PDelta
150. element nonlinearBeamColumn 52 52 62 $Int_c $ColSection $PDelta
151. element nonlinearBeamColumn 62 62 72 $Int_c $ColSection $PDelta
152. element nonlinearBeamColumn 72 72 82 $Int_c $ColSection $PDelta
153. element nonlinearBeamColumn 82 82 92 $Int_c $ColSection $PDelta
154. element nonlinearBeamColumn 92 92 102 $Int_c $ColSection $PDelta
155. element nonlinearBeamColumn 102 102 112 $Int_c $ColSection $PDelta
156. element nonlinearBeamColumn 112 112 122 $Int_c $ColSection $PDelta
157. element nonlinearBeamColumn 122 122 132 $Int_c $ColSection $PDelta
158. element nonlinearBeamColumn 132 132 142 $Int_c $ColSection $PDelta
159. element nonlinearBeamColumn 142 142 152 $Int_c $ColSection $PDelta
160. element nonlinearBeamColumn 152 152 162 $Int_c $ColSection $PDelta
161. element nonlinearBeamColumn 162 162 172 $Int_c $ColSection $PDelta
162. element nonlinearBeamColumn 1 171 172 $Int_b $BeamSection $PDelta
163. #-----
164. #           EqualDOF
165. #-----
166. equalDOF 171 172 1 2
167. #-----
168. #           Recorder
169. #-----
170. set data MomCurv(RCFrame) ;
171. file mkdir $data
172. #-----
173. recorder Node -file $data/DFree.out -time -node 171 172 -dof 1 2 3 disp;
174. puts "DFree"
175. recorder Node -file $data/VBase.out -time -node 11 12 -dof 1 reaction;
176. puts "VBase"
177. #-----
178. #           Gravity
179. #-----
180. pattern Plain 1 Linear {
181. load 171 0 0 0
182. }
183. #-----

```

```

184. # Gravity-Analysis
185. #-----
186. constraints Plain
187. numberer Plain
188. system BandGeneral
189. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
190. algorithm Newton
191. integrator LoadControl +1.000000E-002
192. analysis Static
193. analyze 1
194. loadConst -time 0.0
195. #-----
196. # Lateral-Load
197. #-----
198. pattern Plain 2 Linear {
199. load 171 $EQ 0 0
200. }
201. #-----
202. # Pushover-Analysis
203. #-----
204. constraints Plain
205. numberer Plain
206. system BandGeneral
207. test EnergyIncr +1.000000E-008 8000 0 0
208. algorithm Newton
209. integrator DisplacementControl 171 1 0.1
210. analysis Static
211. analyze 1000
212. #-----
213. # Display Data
214. #-----
215. print node
216. print ele

```



附錄七 門型構架(非線性集中彈簧之側推分析)

```

1.  #-----
2.  #           Input Data
3.  #-----
4.  set Lc 360.0           ;#Column Length
5.  set bc 30.0           ;#Column Width
6.  set hc 50.0           ;#Column Depth
7.  set Ac [expr $bc*$hc] ;#Column Area
8.  set IZc [expr $bc*pow($hc,3)/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9.  set IZc_cr [expr 0.35*$IZc] ;#Column Cracked Moment Of Inertia
10. set fc_c 280.0        ;#Column Concrete Yield Stress
11. set Ec_c [expr 15000.0*sqrt($fc_c)] ;#Column Concrete Modulus Of Elastic
12. set offset_c 0.0     ;#Column Hinge Offset
13. set My_c 2547260     ;#Yield Moment
14. set ey_c 0.008611   ;#Yield Rotation
15. set Mc_c 4083210    ;#Ultimate Moment
16. set ec_c 0.246111   ;#Ultimate Rotation
17. set Mr_c 0           ;#Residual Moment
18. set er_c 0.246111   ;#Residual Rotation
19. set Ke_c [expr 1000000*$My_c/$ey_c] ;#Spring Stiffness
20. set u_pc [expr (($Mc_c-$My_c)/(($ec_c-$ey_c)/2))/Ke_c] ;#Strain-Hardening Ratio (Negative)
21. set u_nc [expr (($Mc_c-$My_c)/(($ec_c-$ey_c)/2))/Ke_c] ;#Strain-Hardening Ratio (Positive)
22. set My_pc $My_c     ;#Yield Moment (Negative)
23. set My_nc -$My_c   ;#Yield Moment (Positive)
24. set LS_c 1000      ;#No Hysteresis loop
25. set LC_c 1000      ;#No Hysteresis loop
26. set LA_c 1000      ;#No Hysteresis loop
27. set LK_c 1000      ;#No Hysteresis loop
28. set cS_c 1         ;#Default Value
29. set cC_c 1         ;#Default Value
30. set cA_c 1         ;#Default Value
31. set cK_c 1         ;#Default Value
32. set th_P_pc [expr ($ec_c-$ey_c)/2] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Negative)
33. set th_P_nc [expr ($ec_c-$ey_c)/2] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Positive)
34. set th_PC_pc [expr $er_c-$ec_c] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Negative)
35. set th_PC_nc [expr $er_c-$ec_c] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Positive)

```

```

36. set th_R_pc [expr $Mr_c/$My_c]           ;#Residual and Yield Moment Ration (Negative)
37. set th_R_nc [expr $Mr_c/$My_c]           ;#Residual and Yield Moment Ration (Positive)
38. set th_U_pc $er_c                         ;#Residual Rotation (Negative)
39. set th_U_nc $er_c                         ;#Residual Rotation (Positive)
40. set DP_c 1                               ;#Default Value
41. set DN_c 1                               ;#Default Value
42. set Lb 400.0                             ;#Beam Length
43. set bb 30.0                              ;#Beam Width
44. set hb 60.0                              ;#Beam Depth
45. set fc_b 280.0                           ;#Beam Concrete Yield Stress
46. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)]      ;#Beam Concrete Modulus Of Elastic
47. set Ab [expr $bb*$hb]                   ;#Beam Area
48. set IZb [expr $bb*pow($hb,3)/12.0]       ;#Beam Moment Of Inertia
49. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb]             ;#Beam Cracked Moment Of Inertia
50. set EQ 60000                             ;#Node Force
51. #-----
52. #           Create Model
53. #-----
54. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
55. #-----
56. #           Node Coordinates
57. #-----
58. node 1 0.0 0.0
59. node 2 0.0 $Lc
60. node 3 $Lb 0.0
61. node 4 $Lb $Lc
62. node 12 0.0 0.0
63. node 21 0.0 [expr $Lc-$offset_c]
64. node 34 $Lb 0.0
65. node 43 $Lb [expr $Lc-$offset_c]
66. #-----
67. #           Boundary Conditions
68. #-----
69. fix 1 1 1 1
70. fix 3 1 1 1
71. #-----
72. #           Define Material

```

```

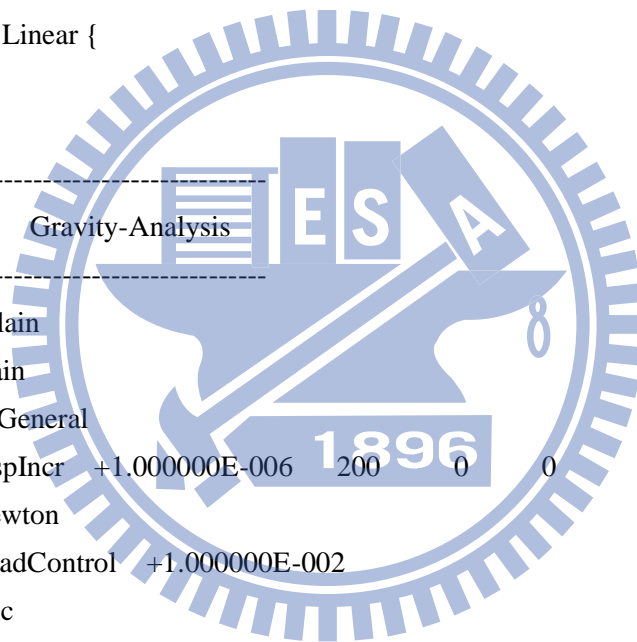
73. #-----
74. uniaxialMaterial Bilin 1 $Ke_c $u_pc $u_nc $My_pc $My_nc $LS_c $LC_c $LA_c $LK_c
    $cS_c $cC_c $cA_c $cK_c $th_P_pc $th_P_nc $th_PC_pc $th_PC_nc $th_R_pc $th_R_nc
    $th_U_pc $th_U_nc $DP_c $DN_c
75. #-----
76. #          Geometric Transformation
77. #-----
78. geomTransf   PDelta 1
79. #-----
80. #          Define Element
81. #-----
82. element elasticBeamColumn 1221 12 21 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
83. element elasticBeamColumn 3443 34 43 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
84. element elasticBeamColumn 24 2 4 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
85. #-----
86. #          Rotational Springs
87. #-----
88. element zeroLength 112 1 12 -mat 1 -dir 6
89. element zeroLength 221 2 21 -mat 1 -dir 6
90. element zeroLength 334 3 34 -mat 1 -dir 6
91. element zeroLength 443 4 43 -mat 1 -dir 6
92. #-----
93. #          EqualDOF
94. #-----
95. equalDOF 2 4 1 2
96. equalDOF 1 12 1 2
97. equalDOF 2 21 1 2
98. equalDOF 3 34 1 2
99. equalDOF 4 43 1 2
100. #-----
101. #          Region Column
102. #-----
103. region 1 -ele 112 334 221 443
104. #-----
105. #          Recorder
106. #-----
107. set data Nonlinear(Frame-Concentrated) ;

```

```

108. file mkdir $data
109. #-----
110. recorder Node -file $data/DFreeC.out -time -node 2 4 -dof 1 2 3 disp;
111. puts "DFree"
112. recorder Node -file $data/VBaseC.out -time -node 12 34 -dof 1 reaction;
113. puts "VBase"
114. recorder Element -file $data/col_Mom.out -region 1 force;
115. recorder Element -file $data/col_Rot.out -region 1 deformation;
116. puts "Moment-Rotation-column"
117. #-----
118. #           Gravity
119. #-----
120. pattern Plain 1 Linear {
121. load 2 0 0 0
122. }
123. #-----
124. #           Gravity-Analysis
125. #-----
126. constraints Plain
127. numberer Plain
128. system BandGeneral
129. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
130. algorithm Newton
131. integrator LoadControl +1.000000E-002
132. analysis Static
133. analyze 1
134. loadConst -time 0.0
135. #-----
136. #           Lateral-Load
137. #-----
138. pattern Plain 2 Linear {
139. load 2 $EQ 0 0
140. }
141. #-----
142. #           Pushover-Analysis
143. #-----
144. constraints Plain

```



145. numberer Plain
146. system BandGeneral
147. test EnergyIncr +1.000000E-008 2000 0 0
148. algorithm Newton
149. integrator DisplacementControl 2 1 0.1
150. analysis Static
151. analyze 1000
152. #-----
153. # Display Data
154. #-----
155. print node
156. print ele



附錄八 門型構架(非線性塑性區之側推分析)

```

1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set bc 30.0           ;#Column Width
6. set hc 50.0           ;#Column Depth
7. set Ac [expr $bc*$hc] ;#Column Area
8. set IZc [expr $bc*pow($hc,3)/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9. set IZc_cr [expr 0.35*$IZc] ;#Column Cracked Moment Of Inertia
10. set fc_c 280.0       ;#Column Concrete Yield Stress
11. set Ec_c [expr 15000.0*sqrt($fc_c)] ;#Column Concrete Modulus Of Elastic
12. set P_R [expr 0.004*$Lc] ;#Hinge Length
13. set My_c 2547260     ;#Yield Moment
14. set ey_c 0.008611   ;#Yield Rotation
15. set Mc_c 4083210    ;#Ultimate Moment
16. set ec_c 0.246111   ;#Ultimate Rotation
17. set Mr_c 0           ;#Residual Moment
18. set er_c 0.246111   ;#Residual Rotation
19. set Ke_c [expr 1000000*$My_c/$ey_c] ;#Spring Stiffness
20. set u_pc [expr (($Mc_c-$My_c)/(($ec_c-$ey_c)/2))/Ke_c] ;#Strain-Hardening Ratio (Negative)
21. set u_nc [expr (($Mc_c-$My_c)/(($ec_c-$ey_c)/2))/Ke_c] ;#Strain-Hardening Ratio (Positive)
22. set My_pc $My_c     ;#Yield Moment (Negative)
23. set My_nc -$My_c    ;#Yield Moment (Positive)
24. set LS_c 1000       ;#No Hysteresis loop
25. set LC_c 1000       ;#No Hysteresis loop
26. set LA_c 1000       ;#No Hysteresis loop
27. set LK_c 1000       ;#No Hysteresis loop
28. set cS_c 1           ;#Default Value
29. set cC_c 1           ;#Default Value
30. set cA_c 1           ;#Default Value
31. set cK_c 1           ;#Default Value
32. set th_P_pc [expr ($ec_c-$ey_c)/2] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Negative)
33. set th_P_nc [expr ($ec_c-$ey_c)/2] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Positive)
34. set th_PC_pc [expr $er_c-$ec_c] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Negative)
35. set th_PC_nc [expr $er_c-$ec_c] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Positive)

```

```

36. set th_R_pc [expr $Mr_c/$My_c] ;#Residual and Yield Moment Ration (Negative)
37. set th_R_nc [expr $Mr_c/$My_c] ;#Residual and Yield Moment Ration (Positive)
38. set th_U_pc $er_c ;#Residual Rotation (Negative)
39. set th_U_nc $er_c ;#Residual Rotation (Positive)
40. set DP_c 1 ;#Default Value
41. set DN_c 1 ;#Default Value
42. set Lb 400.0 ;#Beam Length
43. set bb 30.0 ;#Beam Width
44. set hb 60.0 ;#Beam Depth
45. set fc_b 280.0 ;#Beam Concrete Yield Stress
46. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;#Beam Concrete Modulus Of Elastic
47. set Ab [expr $bb*$hb] ;#Beam Area
48. set IZb [expr $bb*pow($hb,3)/12.0] ;#Beam Moment Of Inertia
49. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;#Beam Cracked Moment Of Inertia
50. set EQ 60000 ;#Node Force
51. #-----
52. # Create Model
53. #-----
54. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
55. #-----
56. # Node Coordinates
57. #-----
58. node 1 0.0 0.0
59. node 2 0.0 $Lc
60. node 3 $Lb 0.0
61. node 4 $Lb $Lc
62. #-----
63. # Boundary Conditions
64. #-----
65. fix 1 1 1 1
66. fix 3 1 1 1
67. #-----
68. # Define Material
69. #-----
70. uniaxialMaterial Bilin 1 $Ke_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

```

```

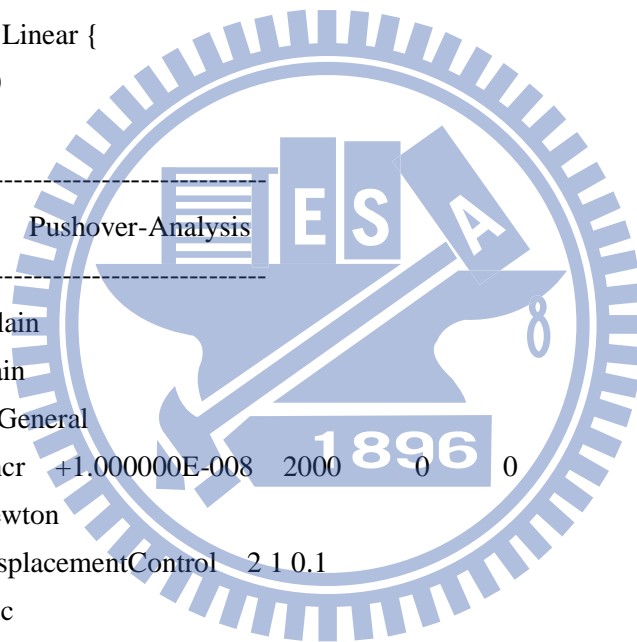
71. #-----
72. #           Define Section
73. #-----
74. section Uniaxial 1 1 Mz
75. #-----
76. #           Geometric Transformation
77. #-----
78. geomTransf   PDelta 1
79. #-----
80. #           Define Element
81. #-----
82. element beamWithHinges 12 1 2 1 $P_R 1 $P_R $Ec_c $Ac $IZc_cr 1
83. element beamWithHinges 34 3 4 1 $P_R 1 $P_R $Ec_c $Ac $IZc_cr 1
84. element elasticBeamColumn 24 2 4 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
85. #-----
86. #           EqualDOF
87. #-----
88. equalDOF 2 4 1 2
89. #-----
90. #           Recorder
91. #-----
92. set data Nonlinear(Frame-BeamWithHinge) ;
93. file mkdir $data
94. #-----
95. recorder Node -file $data/DFreeD.out -time -node 2 4 -dof 1 2 3 disp;
96. puts "DFree"
97. recorder Node -file $data/VBaseD.out -time -node 1 3 -dof 1 reaction;
98. puts "VBase"
99. #-----
100. #           Gravity
101. #-----
102. pattern Plain 1 Linear {
103. load 2 0 0 0
104. }
105. #-----
106. #           Gravity-Analysis
107. #-----

```

```

108. constraints Plain
109. numberer Plain
110. system BandGeneral
111. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
112. algorithm Newton
113. integrator LoadControl +1.000000E-002
114. analysis Static
115. analyze 1
116. loadConst -time 0.0
117. #-----
118. #           Lateral-Load
119. #-----
120. pattern Plain 2 Linear {
121. load 2 $EQ 0 0
122. }
123. #-----
124. #           Pushover-Analysis
125. #-----
126. constraints Plain
127. numberer Plain
128. system BandGeneral
129. test EnergyIncr +1.000000E-008 2000 0 0
130. algorithm Newton
131. integrator DisplacementControl 2 1 0.1
132. analysis Static
133. analyze 1000
134. #-----
135. #           Display Data
136. #-----
137. print node
138. print ele

```



附錄九 二樓-五跨構架之鋼筋混凝土柱(材料非線性之側推分析)

```

1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set Bc 30.0           ;#Column Width
6. set Hc 30.0           ;#Column Depth
7. set Conc 1            ;#Material ID
8. set fc 280.0          ;#Concrete Yield Stress
9. set ey 0.002          ;#Concrete Yield Strain
10. set fu 80.0           ;#Concrete Crushing Stress
11. set eu 0.004          ;#Concrete Crushing Strain
12. set Steel 2           ;#Material ID
13. set fy 4200.0         ;#Steel Yield Stress
14. set Es 2040000.0      ;#Steel Modulus Of Elastic
15. set b 0.01           ;#Steel Strain-Hardening Ratio
16. set ColSection 1     ;#Section ID
17. set As_6 2.865       ;#Steel Area (#6)
18. set PDelta 1         ;#Geometric Transformation ID
19. set Int_c 3           ;#Number Of Integration Points
20. set EQ 60000         ;#Node Force
21. #-----
22. #           Create Model
23. #-----
24. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
25. #-----
26. #           Node Coordinates
27. #-----
28. node 1 0.0 0.0
29. node 2 0.0 22.5
30. node 3 0.0 45.0
31. node 4 0.0 67.5
32. node 5 0.0 90.0
33. node 6 0.0 112.5
34. node 7 0.0 135.0
35. node 8 0.0 157.5

```

```

36. node 9 0.0 180.0
37. node 10 0.0 202.5
38. node 11 0.0 225.0
39. node 12 0.0 247.5
40. node 13 0.0 270.0
41. node 14 0.0 292.5
42. node 15 0.0 315.0
43. node 16 0.0 337.5
44. node 17 0.0 $Lc
45. #-----
46. #           Boundary Conditions
47. #-----
48. fix 1 1 1 1
49. fix 2 0 0 0
50. fix 3 0 0 0
51. fix 4 0 0 0
52. fix 5 0 0 0
53. fix 6 0 0 0
54. fix 7 0 0 0
55. fix 8 0 0 0
56. fix 9 0 0 0
57. fix 10 0 0 0
58. fix 11 0 0 0
59. fix 12 0 0 0
60. fix 13 0 0 0
61. fix 14 0 0 0
62. fix 15 0 0 0
63. fix 16 0 0 0
64. fix 17 0 0 0
65. #-----
66. #           Define Material
67. #-----
68. uniaxialMaterial Concrete01 $Conc -$fc -$ey -$fu -$eu
69. uniaxialMaterial Steel01 $Steel $fy $Es $b
70. #-----
71. #           Define Column Section
72. #-----

```



```

73. section Fiber $ColSection {
74. patch rect $Conc 5 1 -15 -15 15 -9
75. patch rect $Conc 1 3 -15 -9 -9 9
76. patch rect $Conc 5 1 -15 9 15 15
77. patch rect $Conc 1 3 9 -9 15 9
78. patch rect $Conc 3 3 -9 -9 9 9
79. layer straight $Steel 2 $As_6 -9 -9 -9 9
80. layer straight $Steel 2 $As_6 9 -9 9 9
81. }
82. #-----
83. #           Geometric Transformation
84. #-----
85. geomTransf PDelta $PDelta
86. #-----
87. #           Define Element
88. #-----
89. element nonlinearBeamColumn 12 1 2 $Int_c $ColSection $PDelta
90. element nonlinearBeamColumn 23 2 3 $Int_c $ColSection $PDelta
91. element nonlinearBeamColumn 34 3 4 $Int_c $ColSection $PDelta
92. element nonlinearBeamColumn 45 4 5 $Int_c $ColSection $PDelta
93. element nonlinearBeamColumn 56 5 6 $Int_c $ColSection $PDelta
94. element nonlinearBeamColumn 67 6 7 $Int_c $ColSection $PDelta
95. element nonlinearBeamColumn 78 7 8 $Int_c $ColSection $PDelta
96. element nonlinearBeamColumn 89 8 9 $Int_c $ColSection $PDelta
97. element nonlinearBeamColumn 910 9 10 $Int_c $ColSection $PDelta
98. element nonlinearBeamColumn 1011 10 11 $Int_c $ColSection $PDelta
99. element nonlinearBeamColumn 1112 11 12 $Int_c $ColSection $PDelta
100. element nonlinearBeamColumn 1213 12 13 $Int_c $ColSection $PDelta
101. element nonlinearBeamColumn 1314 13 14 $Int_c $ColSection $PDelta
102. element nonlinearBeamColumn 1415 14 15 $Int_c $ColSection $PDelta
103. element nonlinearBeamColumn 1516 15 16 $Int_c $ColSection $PDelta
104. element nonlinearBeamColumn 1617 16 17 $Int_c $ColSection $PDelta
105. #-----
106. #           Recorder
107. #-----
108. set data Nonlinear(CantileverRC) ;
109. file mkdir $data

```

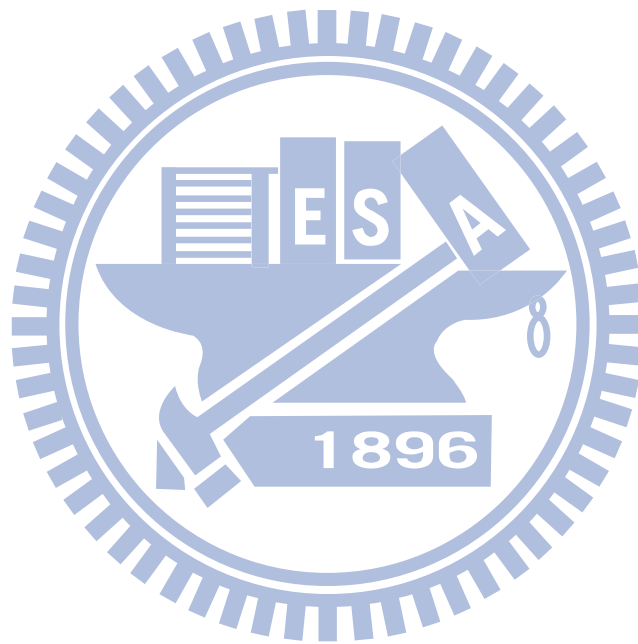


```

110. #-----
111. recorder Node -file $data/DFree.out -time -node 17 -dof 1 2 3 disp;
112. puts "DFree"
113. recorder Node -file $data/VBase.out -time -node 1 -dof 1 2 3 reaction;
114. puts "VBase"
115. #-----
116. #           Gravity
117. #-----
118. pattern Plain 1 Linear {
119. load 2 0 0 0
120. }
121. #-----
122. #           Gravity-Analysis
123. #-----
124. constraints Plain
125. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
126. integrator LoadControl +1.000000E-002
127. algorithm Newton
128. numberer Plain
129. system BandGeneral
130. analysis Static
131. analyze 1
132. loadConst -time 0.0
133. #-----
134. #           Lateral-Load
135. #-----
136. pattern Plain 2 Linear {
137. load 17 $EQ 0 0
138. }
139. #-----
140. #           Pushover-Analysis
141. #-----
142. constraints Plain
143. test EnergyIncr +1.000000E-008 8000 0 0
144. integrator DisplacementControl 17 1 0.1
145. algorithm Newton
146. numberer Plain

```

```
147. system BandGeneral
148. analysis Static
149. analyze 1000
150. #-----
151. #           Display Data
152. #-----
153. print node
154. print ele
```



附錄十 兩樓-五跨構架(非線性集中彈簧之側推分析)

```

1. #-----
2. #           Input Data
3. #-----
4. set Lc 360.0           ;#Column Length
5. set bc 30.0           ;#Column Width
6. set hc 30.0           ;#Column Depth
7. set Ac [expr $bc*$hc] ;#Column Area
8. set IZc [expr $bc*pow($hc,3)/12.0] ;#Column Moment Of Inertia
9. set IZc_cr [expr 0.35*$IZc] ;#Column Cracked Moment Of Inertia
10. set fc_c 280.0       ;#Column Concrete Yield Stress
11. set Ec_c [expr 15000.0*sqrt($fc_c)] ;#Column Concrete Modulus Of Elastic
12. set offset_c 0.0     ;#Column Hinge Offset
13. set My_c 516794.40   ;#Yield Moment
14. set ey_c 0.015556   ;#Yield Rotation
15. set Mc_c 655779.60  ;#Ultimate Moment
16. set ec_c 0.065556   ;#Ultimate Rotation
17. set Mr_c 0           ;#Residual Moment
18. set er_c 0.065556   ;#Residual Rotation
19. set Ke_c [expr 1000000*$My_c/$ey_c] ;#Spring Stiffness
20. set u_pc [expr (($Mc_c-$My_c)/(($ec_c-$ey_c)/2))/Ke_c] ;#Strain-Hardening Ratio (Negative)
21. set u_nc [expr (($Mc_c-$My_c)/(($ec_c-$ey_c)/2))/Ke_c] ;#Strain-Hardening Ratio (Positive)
22. set My_pc $My_c      ;#Yield Moment (Negative)
23. set My_nc -$My_c     ;#Yield Moment (Positive)
24. set LS_c 1000        ;#No Hysteresis loop
25. set LC_c 1000        ;#No Hysteresis loop
26. set LA_c 1000        ;#No Hysteresis loop
27. set LK_c 1000        ;#No Hysteresis loop
28. set cS_c 1           ;#Default Value
29. set cC_c 1           ;#Default Value
30. set cA_c 1           ;#Default Value
31. set cK_c 1           ;#Default Value
32. set th_P_pc [expr ($ec_c-$ey_c)/2] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Negative)
33. set th_P_nc [expr ($ec_c-$ey_c)/2] ;#Yield and Ultimate Rotation Distance (Positive)
34. set th_PC_pc [expr $er_c-$ec_c] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Negative)
35. set th_PC_nc [expr $er_c-$ec_c] ;#Ultimate and Residual Rotation Distance (Positive)

```

```

36. set th_R_pc [expr $Mr_c/$My_c] ;#Residual and Yield Moment Ration (Negative)
37. set th_R_nc [expr $Mr_c/$My_c] ;#Residual and Yield Moment Ration (Positive)
38. set th_U_pc $er_c ;#Residual Rotation (Negative)
39. set th_U_nc $er_c ;#Residual Rotation (Positive)
40. set DP_c 1 ;#Default Value
41. set DN_c 1 ;#Default Value
42. set Lb 400.0 ;#Beam Length
43. set bb 30.0 ;#Beam Width
44. set hb 60.0 ;#Beam Depth
45. set fc_b 280.0 ;#Beam Concrete Yield Stress
46. set Ec_b [expr 15000.0*sqrt($fc_b)] ;#Beam Concrete Modulus Of Elastic
47. set Ab [expr $bb*$hb] ;#Beam Area
48. set IZb [expr $bb*pow($hb,3)/12.0] ;#Beam Moment Of Inertia
49. set IZb_cr [expr 0.35*$IZb] ;#Beam Cracked Moment Of Inertia
50. set EQ 60000 ;#Node Force
51. #-----
52. # Create Model
53. #-----
54. model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
55. #-----
56. # Node Coordinates
57. #-----
58. node 11 0.0 0.0
59. node 111 0.0 [expr 0.0+$offset_c]
60. node 211 0.0 [expr $Lc-$offset_c]
61. node 21 0.0 $Lc
62. node 212 0.0 [expr $Lc+$offset_c]
63. node 312 0.0 [expr 2*$Lc-$offset_c]
64. node 31 0.0 [expr 2*$Lc]
65. node 12 $Lb 0.0
66. node 121 $Lb [expr 0.0+$offset_c]
67. node 221 $Lb [expr $Lc-$offset_c]
68. node 22 $Lb $Lc
69. node 222 $Lb [expr $Lc+$offset_c]
70. node 322 $Lb [expr 2*$Lc-$offset_c]
71. node 32 $Lb [expr 2*$Lc]
72. node 13 [expr 2*$Lb] 0.0

```

73. node 131 [expr 2*\$Lb] [expr 0.0+\$offset_c]
74. node 231 [expr 2*\$Lb] [expr \$Lc-\$offset_c]
75. node 23 [expr 2*\$Lb] \$Lc
76. node 232 [expr 2*\$Lb] [expr \$Lc+\$offset_c]
77. node 332 [expr 2*\$Lb] [expr 2*\$Lc-\$offset_c]
78. node 33 [expr 2*\$Lb] [expr 2*\$Lc]
79. node 14 [expr 3*\$Lb] 0.0
80. node 141 [expr 3*\$Lb] [expr 0.0+\$offset_c]
81. node 241 [expr 3*\$Lb] [expr \$Lc-\$offset_c]
82. node 24 [expr 3*\$Lb] \$Lc
83. node 242 [expr 3*\$Lb] [expr \$Lc+\$offset_c]
84. node 342 [expr 3*\$Lb] [expr 2*\$Lc-\$offset_c]
85. node 34 [expr 3*\$Lb] [expr 2*\$Lc]
86. node 15 [expr 4*\$Lb] 0.0
87. node 151 [expr 4*\$Lb] [expr 0.0+\$offset_c]
88. node 251 [expr 4*\$Lb] [expr \$Lc-\$offset_c]
89. node 25 [expr 4*\$Lb] \$Lc
90. node 252 [expr 4*\$Lb] [expr \$Lc+\$offset_c]
91. node 352 [expr 4*\$Lb] [expr 2*\$Lc-\$offset_c]
92. node 35 [expr 4*\$Lb] [expr 2*\$Lc]
93. node 16 [expr 5*\$Lb] 0.0
94. node 161 [expr 5*\$Lb] [expr 0.0+\$offset_c]
95. node 261 [expr 5*\$Lb] [expr \$Lc-\$offset_c]
96. node 26 [expr 5*\$Lb] \$Lc
97. node 262 [expr 5*\$Lb] [expr \$Lc+\$offset_c]
98. node 362 [expr 5*\$Lb] [expr 2*\$Lc-\$offset_c]
99. node 36 [expr 5*\$Lb] [expr 2*\$Lc]
100. #-----
101. # Boundary Conditions
102. #-----
103. fix 11 1 1 1
104. fix 12 1 1 1
105. fix 13 1 1 1
106. fix 14 1 1 1
107. fix 15 1 1 1
108. fix 16 1 1 1
109. #-----

```

110. #                Define Material
111. #-----
112. uniaxialMaterial Bilin 1 $Ke_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
113. #-----
114. #                Geometric Transformation
115. #-----
116. geomTransf   PDelta 1
117. #-----
118. #                Define Element
119. #-----
120. element elasticBeamColumn 1121 111 211 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
121. element elasticBeamColumn 1222 121 221 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
122. element elasticBeamColumn 1323 131 231 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
123. element elasticBeamColumn 1424 141 241 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
124. element elasticBeamColumn 1525 151 251 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
125. element elasticBeamColumn 1626 161 261 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
126. element elasticBeamColumn 2131 212 312 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
127. element elasticBeamColumn 2232 222 322 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
128. element elasticBeamColumn 2333 232 332 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
129. element elasticBeamColumn 2434 242 342 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
130. element elasticBeamColumn 2535 252 352 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
131. element elasticBeamColumn 2636 262 362 $Ac $Ec_c $IZc_cr 1
132. element elasticBeamColumn 2122 21 22 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
133. element elasticBeamColumn 2223 22 23 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
134. element elasticBeamColumn 2324 23 24 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
135. element elasticBeamColumn 2425 24 25 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
136. element elasticBeamColumn 2526 25 26 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
137. element elasticBeamColumn 3132 31 32 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
138. element elasticBeamColumn 3233 32 33 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
139. element elasticBeamColumn 3334 33 34 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
140. element elasticBeamColumn 3435 34 35 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
141. element elasticBeamColumn 3536 35 36 $Ab $Ec_b $IZb_cr 1
142. #-----
143. #                Rotational Springs
144. #-----

```

- 145. element zeroLength 111 11 111 -mat 1 -dir 6
- 146. element zeroLength 121 12 121 -mat 1 -dir 6
- 147. element zeroLength 131 13 131 -mat 1 -dir 6
- 148. element zeroLength 141 14 141 -mat 1 -dir 6
- 149. element zeroLength 151 15 151 -mat 1 -dir 6
- 150. element zeroLength 161 16 161 -mat 1 -dir 6
- 151. element zeroLength 211 21 211 -mat 1 -dir 6
- 152. element zeroLength 221 22 221 -mat 1 -dir 6
- 153. element zeroLength 231 23 231 -mat 1 -dir 6
- 154. element zeroLength 241 24 241 -mat 1 -dir 6
- 155. element zeroLength 251 25 251 -mat 1 -dir 6
- 156. element zeroLength 261 26 261 -mat 1 -dir 6
- 157. element zeroLength 212 21 212 -mat 1 -dir 6
- 158. element zeroLength 222 22 222 -mat 1 -dir 6
- 159. element zeroLength 232 23 232 -mat 1 -dir 6
- 160. element zeroLength 242 24 242 -mat 1 -dir 6
- 161. element zeroLength 252 25 252 -mat 1 -dir 6
- 162. element zeroLength 262 26 262 -mat 1 -dir 6
- 163. element zeroLength 312 31 312 -mat 1 -dir 6
- 164. element zeroLength 322 32 322 -mat 1 -dir 6
- 165. element zeroLength 332 33 332 -mat 1 -dir 6
- 166. element zeroLength 342 34 342 -mat 1 -dir 6
- 167. element zeroLength 352 35 352 -mat 1 -dir 6
- 168. element zeroLength 362 36 362 -mat 1 -dir 6
- 169. #-----
- 170. # EqualDOF
- 171. #-----
- 172. equalDOF 21 22 1 2
- 173. equalDOF 22 23 1 2
- 174. equalDOF 23 24 1 2
- 175. equalDOF 24 25 1 2
- 176. equalDOF 25 26 1 2
- 177. equalDOF 31 32 1 2
- 178. equalDOF 32 33 1 2
- 179. equalDOF 33 34 1 2
- 180. equalDOF 34 35 1 2
- 181. equalDOF 35 36 1 2


```

219. file mkdir $data
220. #-----
221. recorder Node -file $data/DFreeC.out -time -node 31 32 33 34 35 36 -dof 1 disp;
222. puts "DFree"
223. recorder Node -file $data/VBaseC.out -time -node 111 121 131 141 151 161 -dof 1 reaction;
224. puts "VBase"
225. recorder Element -file $data/col_Mom_1.out -region 1 force;
226. recorder Element -file $data/col_Rot_1.out -region 1 deformation;
227. recorder Element -file $data/col_Mom_2.out -region 2 force;
228. recorder Element -file $data/col_Rot_2.out -region 2 deformation;
229. recorder Element -file $data/col_Mom_3.out -region 3 force;
230. recorder Element -file $data/col_Rot_3.out -region 3 deformation;
231. recorder Element -file $data/col_Mom_4.out -region 4 force;
232. recorder Element -file $data/col_Rot_4.out -region 4 deformation;
233. recorder Element -file $data/col_Mom_5.out -region 5 force;
234. recorder Element -file $data/col_Rot_5.out -region 5 deformation;
235. recorder Element -file $data/col_Mom_6.out -region 6 force;
236. recorder Element -file $data/col_Rot_6.out -region 6 deformation;
237. puts "Moment-Rotation-column"
238. #-----
239. #          Gravity
240. #-----
241. pattern Plain 1 Linear {
242. load 31 0 0 0
243. }
244. #-----
245. #          Gravity-Analysis
246. #-----
247. constraints Plain
248. numberer Plain
249. system BandGeneral
250. test NormDispIncr +1.000000E-006 200 0 0
251. algorithm Newton
252. integrator LoadControl +1.000000E-002
253. analysis Static
254. analyze 1
255. loadConst -time 0.0

```

```

256. #-----
257. #           Lateral-Load
258. #-----
259. pattern Plain 2 Linear {
260. load 21 $EQ 0 0
261. load 31 [expr 2*$EQ] 0 0
262. }
263. #-----
264. #           Pushover-Analysis
265. #-----
266. constraints Plain
267. numberer Plain
268. system BandGeneral
269. test EnergyIncr +1.000000E-008 2000 0 0
270. algorithm Newton
271. integrator DisplacementControl 31 1 0.1
272. analysis Static
273. analyze 300
274. #-----
275. #           Display Data
276. #-----
277. print node
278. print ele

```

