

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

鋼骨鋼筋混凝土梁腹板開孔

之實驗研究



**Experimental Study of
Steel Reinforced Concrete Beams
with Web Openings**

研究生：郭明昌

指導教授：陳誠直博士

中華民國九十六年十月

鋼骨鋼筋混凝土梁腹板開孔
之實驗研究

**Experimental Study of
Steel Reinforced Concrete Beams
with Web Openings**

研究生：郭明昌

Student : Ming-Chang Kuo

指導教授：陳誠直博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen



Submitted to Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Civil Engineering

October 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年十月

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 土木工程 學系碩士班 郭明昌 君

所提論文：鋼骨鋼筋混凝土梁腹板開孔之實驗研究

Experimental Study of Steel Reinforced Concrete Beams
with Web Openings

合於碩士資格標準、業經本委員會評審認可。

口試委員：_____

周中哲

鄭復平

林克強

指導教授：陳誠直

系主任：洪士坤 教授

中華民國 九十六年 九月 六日

鋼骨鋼筋混凝土梁腹板開孔之實驗研究

研究生：郭明昌

指導教授：陳誠直 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

建築結構體因埋設空調、機電、供水、消防等管路，而導致梁腹板開孔，本研究藉由鋼骨鋼筋混凝土 (Steel Reinforce Concrete) 梁腹板開孔試驗，探討不同開孔形狀與不同彎矩-剪力交互作用下之力學行為。實驗以 13 組實尺寸之 SRC 開孔梁試體，試驗參數為開孔形狀、彎矩-剪力之比值。實驗結果顯示，在相同開孔深度下，矩形開孔之撓曲與剪力強度折減較開方孔及圓孔多。實驗結果亦顯示，彎矩-剪力比值較大之試體，因箍筋與鋼骨對混凝土之圍束，試體延展性較佳，在持續變形下能維持其強度；彎矩-剪力比值較小之試體，當剪力裂縫擴寬強度即開始下降。當剪力強度部份採用鋼骨與 RC 之剪力線性疊加，SRC 開孔梁彎矩-剪力呈現交互作用關係。

關鍵詞：鋼骨鋼筋混凝土、梁腹板開孔、彎矩-剪力交互作用

Experimental Study of Steel Reinforced Concrete Beams with Web Openings

Student: Ming-Chang Kuo

Adviser: Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The openings in the webs of beams in building are necessary for the passage of utility ducts. This study aims to investigate the behavior of steel reinforced concrete (SRC) beams with opening, including the effects of various opening shapes on the strength, and flexure-shear interaction. Thirteen full-scale SRC beams were designed to have different opening shapes and tested with different flexure-shear (M/V) ratios. Test results indicate that rectangular opening in the SRC beam results in a more decrease of the flexural and shear strengths than square and circular openings having the same opening depth. Specimens with higher M/V ratio demonstrate ductile behavior due to the confinement attributed to the stirrups and structural steel. Specimens with lower M/V ratio failed owing to the shear cracking, and the shear strength dropped when shear cracking became wider. An interaction between flexure and shear is expected when the shear strength at the opening is calculated by superposing the shear strength of the reinforced concrete and structural steel.

Keywords: steel reinforced concrete, SRC, web opening, flexure-shear interaction

誌謝

研究所的兩年生活，承蒙恩師 陳誠直博士在待人處事以及學業上細心指導與教誨；令學生在此領域上更加專業；而在老師不厭其煩的叮囑之下，使得研究與論文撰寫能夠順利完成，在此致上最誠摯的感謝。

論文口試期間承蒙 鄭復平教授、周中哲教授、林克強博士，提供寶貴意見與指導，使本論文更臻完善，特此致謝。

能夠順利完成此實驗，特別感謝 中彥學長、群洲學長及南交學長的指點與教導及提供寶貴的經驗；同學紀勛、政甯、耀邦、益鴻、建霖的鼎力相助；學妹嘉儀、學弟煒銘、俞燐、璿至於實驗期間，不分晝夜的協助，並給予我最大的支持及鼓勵，因為大家的幫助與陪伴，使得研究的路途溫暖不孤單，也更加多采多姿。

最後感謝家人及女友的關懷與鼓勵，爸爸、媽媽及姊姊在我人生道路上給我最大的協助與支持，女友思惇長期來對我的包容，讓我在情緒低落時有最大的慰藉與依靠。

明昌 九十六年十月

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	viii
圖目錄	ix
照片目錄	xiv
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
1.3 研究方法	2
1.4 論文內容	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 鋼骨鋼筋混凝土梁撓曲強度之設計規範	3
2.2 梁開孔國內外研究現況	4
2.2.1 鋼骨梁開孔之研究	4
2.2.2 鋼筋混凝土梁開孔之研究	6
2.2.3 鋼骨鋼筋混凝土梁開孔之研究	7



第三章 鋼骨鋼筋混凝土梁開孔試驗	9
3.1 試驗規劃.....	9
3.2 試驗設計與製作.....	9
3.2.1 試體設計.....	9
3.2.2 試體製作過程.....	11
3.3 材料性質試驗.....	11
3.3.1 混凝土.....	11
3.3.2 鋼骨及鋼筋.....	12
3.4 試驗裝置與步驟.....	12
3.4.1 試驗設置.....	12
3.4.2 量測儀器與資料擷取.....	13
3.4.3 試驗程序.....	13
第四章 試驗結果與討論	15
4.1 試體破壞行為.....	15
4.1.1 未開孔試體.....	15
4.1.2 受純彎作用之開孔試體.....	16
4.1.3 受剪力-彎矩聯合作用之開孔試體.....	20
4.2 試體破壞行為比較.....	28
4.2.1 試體受純彎破壞系列.....	28

4.2.2 試體受剪力-彎矩聯合作用破壞系列	28
4.3 試體載重-位移曲線關係	31
4.3.1 試體受純彎矩破壞系列.....	31
4.3.2 試體受彎矩-剪力聯合作用破壞系列	32
4.4 SRC梁開孔中央之應變分佈	33
4.4.1 試體受純彎矩破壞系列.....	33
4.4.2 試體受彎矩-剪力聯合作用破壞系列	34
4.4.3 試體受彎矩剪力聯合作用之剪力強度分配	38
4.5 SRC開孔梁加載階段之撓度分佈	40
4.6 SRC開孔梁之曲率	41
4.7 SRC開孔梁之剪力變形量	42
4.8 SRC開孔梁彎矩剪力聯合作用行為	43
第五章 結論與建議	49
5.1 結論.....	49
5.2 建議.....	50
參考文獻.....	52
表.....	55
圖.....	61
照片.....	109



表目錄

表 3.1 純彎試體編號	55
表 3.2 彎矩-剪力聯合作用之開孔試體編號	56
表 3.3 混凝土配合比例設計表	57
表 3.4 混凝土標稱及實際抗壓強度	57
表 3.5 鋼骨、鋼筋及箍筋實際降伏與極限強度	58
表 4.1 C1 及 R1 試體之撓曲強度與撓曲延展性	58
表 4.2 試體試驗值	59



圖目錄

圖 2.1 SRC梁撓曲強度分析模式之斷面應力分佈.....	60
圖 3.1 試體配置圖之一	61
圖 3.2 試體配置圖之二	61
圖 3.3 試體側視示意圖	62
圖 3.4 方形開孔試體斷面圖	63
圖 3.5 圓形開孔試體斷面圖	63
圖 3.6 長方形開孔試體斷面圖	64
圖 3.7 應變計位置及編號	64
圖 3.8 三軸應變計之位置及編號	65
圖 3.9 SRC梁單向載重試驗配置圖.....	66
圖 3.10 開孔處量測儀器圖之一	67
圖 3.11 開孔處量測儀器圖之二	67
圖 3.12 試體N1 之位移感應器量測位置圖	68
圖 3.13 試體S1、C1、R1 之位移感應器量測位置圖.....	68
圖 3.14 其他試體之位移感應器量測位置圖	68
圖 4.1 N1 試體極限載重破壞時之狀態	69
圖 4.2 S1 試體極限載重破壞時之狀態	69
圖 4.3 C1 試體極限載重破壞時之狀態.....	70

圖 4.4 R1 試體極限載重破壞時之狀態.....	70
圖 4.5 S2 試體極限載重破壞時之狀態.....	71
圖 4.6 S3 試體極限載重破壞時之狀態.....	71
圖 4.7 S4 試體極限載重破壞時之狀態.....	72
圖 4.8 C2 試體極限載重破壞時之狀態.....	72
圖 4.9 C3 試體極限載重破壞時之狀態.....	73
圖 4.10 C4 試體極限載重破壞時之狀態.....	73
圖 4.11 R2 試體極限載重破壞時之狀態.....	74
圖 4.12 R3 試體極限載重破壞時之狀態.....	74
圖 4.13 R4 試體極限載重破壞時之狀態.....	75
圖 4.14 N1 試體梁中點載重-位移關係.....	76
圖 4.15 S1 試體開孔中點載重-位移關係.....	76
圖 4.16 C1 試體開孔中點載重-位移關係.....	77
圖 4.17 R1 試體開孔中點載重-位移關係.....	77
圖 4.18 S2 試體開孔中點載重-位移關係.....	78
圖 4.19 S3 試體開孔中點載重-位移關係.....	78
圖 4.20 S4 試體開孔中點載重-位移關係.....	79
圖 4.21 C2 試體開孔中點載重-位移關係.....	79
圖 4.22 C3 試體開孔中點載重-位移關係.....	80

圖 4.23 C4 試體開孔中點載重-位移關係	80
圖 4.24 R2 試體開孔中點載重-位移關係	81
圖 4.25 R3 試體開孔中點載重-位移關係	81
圖 4.26 R4 試體開孔中點載重-位移關係	82
圖 4.27 受彎矩破壞試體開孔中點載重-位移關係	82
圖 4.28 S系列試體開孔中點載重-位移關係	83
圖 4.29 C系列試體開孔中點載重-位移關係	83
圖 4.30 R系列試體開孔中點載重-位移關係	84
圖 4.31 P_y 、 P_{u1} 、 P_u 之定義	85
圖 4.32 N1 試體不同載重下之斷面應變分佈	86
圖 4.33 S1 試體不同載重下之斷面應變分佈	86
圖 4.34 C1 試體不同載重下之斷面應變分佈	87
圖 4.35 R1 試體不同載重下之斷面應變分佈	87
圖 4.36 S2 試體不同載重下之斷面應變分佈	88
圖 4.37 S3 試體不同載重下之斷面應變分佈	88
圖 4.38 C2 試體不同載重下之斷面應變分佈	89
圖 4.39 C4 試體不同載重下之斷面應變分佈	89
圖 4.40 R2 試體不同載重下之斷面應變分佈	90
圖 4.41 R3 試體不同載重下之斷面應變分佈	90

圖 4.42 R4 試體不同載重下之斷面應變分佈.....	91
圖 4.43 S2 試體剪力強度分配百分比.....	91
圖 4.44 S3 試體剪力強度分配百分比.....	92
圖 4.45 C2 試體剪力強度分配百分比.....	92
圖 4.46 C4 試體剪力強度分配百分比.....	93
圖 4.47 R2 試體剪力強度分配百分比.....	93
圖 4.48 R3 試體剪力強度分配百分比.....	93
圖 4.49 R4 試體剪力強度分配百分比.....	94
圖 4.50 γ_u 之定義.....	95
圖 4.51 N1 試體不同載重下之撓度分佈.....	95
圖 4.52 S1 試體不同載重下之撓度分佈.....	96
圖 4.53 C1 試體不同載重下之撓度分佈.....	96
圖 4.54 R1 試體不同載重下之撓度分佈.....	97
圖 4.55 S2 試體不同載重下之撓度分佈.....	97
圖 4.56 S3 試體不同載重下之撓度分佈.....	98
圖 4.57 S4 試體不同載重下之撓度分佈.....	98
圖 4.58 C2 試體不同載重下之撓度分佈.....	99
圖 4.59 C3 試體不同載重下之撓度分佈.....	99
圖 4.60 C4 試體不同載重下之撓度分佈.....	100

圖 4.61 R2 試體不同載重下之撓度分佈.....	100
圖 4.62 R3 試體不同載重下之撓度分佈.....	101
圖 4.63 R4 試體不同載重下之撓度分佈.....	101
圖 4.64 構件曲率圖	102
圖 4.65 C1 試體彎矩-曲率關係圖	103
圖 4.66 R1 試體彎矩-曲率關係圖	103
圖 4.67 開孔處對角線相對位移與剪力變形關係示意圖	104
圖 4.68 S系列試體開孔處剪力變形圖	104
圖 4.69 C系列試體開孔處剪力變形圖.....	105
圖 4.70 R系列試體開孔處剪力變形圖.....	105
圖 4.71 鋼骨開孔梁之彎矩-剪力交互作用關係.....	106
圖 4.72 方孔開孔試體彎矩-剪力曲線關係.....	106
圖 4.73 圓孔開孔試體彎矩-剪力曲線關係.....	107
圖 4.74 長方孔開孔試體彎矩-剪力曲線關係.....	107
圖 4.75 S、C、R系列試體之彎矩-剪力曲線關係	108

照片目錄

照片 1.1 臺北國際金融中心 (TAIPEI 101)鋼梁開孔情形	109
照片 1.2 臺北信義計畫區SRC群樓鋼梁開孔情形.....	109
照片 3.1 應變計	110
照片 3.2 鋼骨及鋼筋之組裝	110
照片 3.3 模板之組裝	111
照片 3.4 定位在模板中	112
照片 3.5 試體灌漿	112
照片 3.6 試體灌漿後抹平	113
照片 3.7 製作圓柱抗壓試體	113
照片 3.8 試驗設置	114
照片 3.9 資料擷取器及設備	115
照片 3.10 量測儀器之架設	115
照片 4.1 N1 試體兩側之剪力裂縫	116
照片 4.2 N1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎	116
照片 4.3 N1 試體極限載重破壞時之狀態	117
照片 4.4 N1 試體極限載重破壞時主筋及鋼骨上翼板挫屈	117
照片 4.5 N1 試體之加載過程	118
照片 4.6 S1 試體開孔角隅處之裂縫	119

照片 4.7 S1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎	119
照片 4.8 S1 試體極限載重破壞時之狀態	120
照片 4.9 S1 試體之加載過程	121
照片 4.10 C1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎	122
照片 4.11 C1 試體開孔邊緣裂縫照	122
照片 4.12 C1 試體極限載重破壞時之狀態	123
照片 4.13 C1 試體之加載過程	124
照片 4.14 R1 試體開孔角隅處之裂縫	125
照片 4.15 R1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎	125
照片 4.16 R1 試體極限載重破壞時之狀態	126
照片 4.17 R1 試體之加載過程	126
照片 4.18 S2 試體開孔處之剪力裂縫與梁下緣之撓曲裂縫	128
照片 4.19 S2 試體極限載重破壞時之狀態	128
照片 4.20 S2 試體之加載過程	128
照片 4.21 S3 試體開孔角隅處之剪力裂縫	130
照片 4.22 S3 試體極限載重破壞時之狀態	130
照片 4.23 S3 試體之加載過程	131
照片 4.24 S4 試體開孔角隅處之剪力裂縫	132
照片 4.25 S4 試體極限載重破壞時之狀態	132

照片 4.26 S4 試體極限載重破壞後之剪力變形照	133
照片 4.27 S4 試體之加載過程	134
照片 4.28 C2 試體開孔處之剪力裂縫	135
照片 4.29 C2 試體極限載重破壞時之狀態	135
照片 4.30 C2 試體之加載過程	135
照片 4.31 C3 試體開孔處之剪力裂縫	137
照片 4.32 C3 試體極限載重破壞時之狀態	137
照片 4.33 C3 試體之加載過程	138
照片 4.34 C4 試體開孔處之剪力裂縫	139
照片 4.35 C4 試體極限載重破壞時之狀態	139
照片 4.36 C4 試體極限載重破壞時之剪力變形照	140
照片 4.37 C4 試體之加載過程	141
照片 4.38 R2 試體開孔角隅處之剪力裂縫	142
照片 4.39 R2 試體極限載重破壞時之狀態	142
照片 4.40 R2 試體之加載過程	142
照片 4.41 R3 試體開孔角隅處之剪力裂縫	144
照片 4.42 R3 試體極限載重破壞時之狀態	144
照片 4.43 R3 試體之加載過程	145
照片 4.44 R4 試體開孔角隅處之剪力裂縫	146

照片 4.45 R4 試體極限載重破壞時之狀態.....	146
照片 4.46 R4 試體極限載重破壞後之剪力變形.....	147
照片 4.47 R4 試體之加載過程.....	148
照片 4.48 N1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形	149
照片 4.49 S1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形	149
照片 4.50 C1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形	150
照片 4.51 R1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形	150



第一章 緒論

1.1 研究背景

隨著台灣經濟的發展，人口密度增加，土地成本高漲及逐漸不足，受限於可利用之土地面積，因此高樓層建築廣泛被採用。台灣屬於多震區，位於環太平洋之地震帶上，高層樓之結構強度、勁度及耐震能力顯得非常重要。

鋼骨鋼筋混凝土 (Steel Reinforced Concrete，以下簡稱 SRC) 結合了鋼骨與鋼筋混凝土兩種材料性質相異甚大的材料，有效發揮這兩種材料之優點。相對於純鋼骨構造，SRC 構造勁度較大，可減少結構體之側向位移；且混凝土提供鋼骨肢材良好之束制能力，降低鋼骨部分之局部挫屈或整體挫屈發生，亦是鋼骨材料良好之防火被覆，並且可減少鋼骨用量。在兩種材料相輔相成下，將使得 SRC 結構體之斷面積較小、跨度較大及舒適性較佳，並增進結構體空間之經濟性。

因建築結構體有樓層淨高之限制，為確保樓層有足夠之淨高，在結構體本身需求外之配置，如空調、機電、供水、消防等管路，時常導致梁之開孔，如照片 1.1、1.2 所示，致使梁撓曲強度、剪力強度、撓曲勁度之降低及撓度之增加，且目前國內外尚缺乏對 SRC 梁開孔之完整性研究。為確保結構體強度、勁度與使用性符合設計需求，故 SRC 梁開孔之構件行為有其探討之必要。

1.2 研究目的

本研究的目的為以試驗探討 SRC 梁開孔在不同彎矩與剪力比值及形狀下，開孔對 SRC 梁之撓曲強度、剪力強度及其兩者之交互關

係，以及其載重-變形行為；並且設計不同之開孔形狀，進行試驗並加以驗證，以作為未來建立 SRC 梁開孔理論分析模型之基礎。

1.3 研究方法

本研究採用實驗的方式，探討 SRC 梁不同開孔在單向載重作用下之力學行為與破壞模式。試驗規劃以開孔形狀、試體跨距、開孔處之彎矩剪力比值作為試驗參數。

1.4 論文內容

本文共分為五章。第一章主要介紹 SRC 結構之特色，及開孔梁之研究目的與方法。第二章為文獻回顧，分為兩部份，設計規範規定之 SRC 梁撓曲強度計算、梁開孔之文獻回顧，其中梁開孔之文獻回顧又分為鋼骨梁開孔之研究、鋼筋混凝土梁開孔之研究、鋼骨鋼筋混凝土梁開孔之研究，了解開孔梁在不同結構材料下之行為。第三章為試驗規劃與執行，介紹試體製作過程、試驗方法、試體配置及儀器架設等。第四章為試驗結果與討論，討論各試體之破壞行為及其間之關係。第五章為結論與建議。

第二章 文獻回顧

2.1 鋼骨鋼筋混凝土梁撓曲強度之設計規範

鋼骨鋼筋混凝土梁之撓曲強度設計規範主要有三種方式，分別為疊加法，以日本 AIJ 採用二次設計法，以極限強度疊加為基礎及國內 SRC 設計規範為主；美國 ACI 法，其將 SRC 梁視同鋼筋混凝土 (Reinforced Concrete，以下簡稱 RC) 梁處理；最後為全斷面塑性應力法，以 AISC LRFD (2005) 及國內極限強度設計規範為主，採用全斷面塑性應力分佈，如圖 2.1 所示。以下敘述此三種方法。

疊加法

其原理乃忽略鋼骨與鋼筋混凝土 RC 之合成作用，將 SRC 梁斷面分成鋼骨與 RC 兩種斷面，分別計算兩種斷面之撓曲強度。鋼骨之撓曲強度假設全斷面皆降伏，藉由力平衡求得，其撓曲強度即為塑性彎矩；而 RC 之撓曲強度為假設混凝土之極限應變為 0.003 及構材變形後平面維持平面，混凝土壓應力分佈採 Whitney 矩形應力塊，依據此原理求得撓曲強度，鋼骨與 RC 之中性軸不在相同位置，分別將兩者之撓曲強度相加，即為 SRC 梁之撓曲強度。

ACI 法

將鋼骨視為等值之鋼筋，以 RC 之撓曲構件方式計算，平面保持平面，符合應變相合之關係，即鋼骨與 RC 之界面無相對滑動，所求之斷面彎矩即為 SRC 梁之撓曲強度。

全斷面塑性應力分析法

假設鋼骨與混凝土之應變相合，並假設全斷面鋼骨應力分佈均達降伏階段，將混凝土應力以等值矩形應力塊分佈計算其強度，藉由力平衡求得 SRC 開孔梁斷面塑性之中性軸位置，各應力對塑性中性軸取力矩所得彎矩即為 SRC 梁之撓曲強度。

2.2 梁開孔國內外研究現況

SRC 開孔梁之行為，本研究之文獻蒐集分為三大部份。2.2.1 節敘述鋼骨梁開孔之研究，主要為開孔梁強度之分析及開孔梁補強研究，例如 Darwin (1990)在鋼骨梁腹板開孔之研究，發展出一套完整之設計準則，由美國鋼結構協會 (AISC)出版“Steel and composite beams with web openings”設計叢書，以 LRFD 為原理進行設計與分析，為鋼骨開孔梁強度設計與分析之主要依據。2.2.2 節敘述鋼筋混凝土梁開孔之研究，在美國混凝土協會設計規範 ACI-318 (American Concrete Institute)設計規範 (2005)中僅規定開孔之大小、位置不得影響結構強度，且限制開孔之最大孔徑及間距，對於開孔梁之分析模式及設計並無規定。2.2.3 節敘述鋼骨鋼筋混凝土梁開孔之研究，國內外研究成果甚少，而國內 SRC 開孔梁卻相當普遍。以下將介紹開孔梁分別在這三部份下之行為及研究發展過程。

2.2.1 鋼骨梁開孔之研究

Bower (1966)研究不同腹板開孔受均佈載重之寬翼簡支梁，分別以開矩形、圓形孔作為試驗變數，分析開孔附近之彈性應力分佈。試驗結果顯示，彈性應力分佈與開孔區、開孔大小之剪力-彎矩比值有關；探討受集中載重之寬翼簡支梁開孔周圍應力分佈與 Vierendeel 應

力分佈比較，Vierendeel 應力為撓曲應力與剪應力直接疊加，預測斷面撓曲應力及分析開孔邊緣切線方向應力結果較為保守，而彈性應力在孔徑小於梁深之半時，可準確預測斷面撓曲應力與開孔邊緣切線方向之應力。

Redwood、McCutcheon (1968) 進行未補強梁腹板開孔試驗，以開孔形狀、大小、相鄰距離作為變數。試驗結果顯示，剪力將導致開孔處彎矩強度下降，當剪力彎矩比值下降，則梁開孔處之彎矩容量與未受剪力純彎段塑性彎矩容量之比值增加，兩者變化之趨勢呈線性。建議設計時需考慮剪力彎矩之交互作用關係。

Cooper、Robert (1972) 研究鋼骨腹板開孔梁之補強，以 M/V 比值分別為 80、60、40、20 英吋為變數，進行 16 組實尺寸載重試驗，探討開孔補強後之彈性應力分布與極限載重作用下之行為。其彈性應力分布分析結果與極限載重作用下之行為相同，可準確預測出其行為。

ASCE Subcommittee on beams with web opening of task committee on flexural members of structural division (1971) 建議梁開孔之容許應力設計法與極限強度設計法設計公式，提供當時工程界可行之評估公式。

Darwin (1990) 由美國鋼結構協會 (AISC) 出版 “Steel and composite beams with web openings” 設計叢書，在鋼骨梁腹板開孔研究中發展出一套完整分析及補強設計準則，依照 AISC-LRFD 之原理分析，成為鋼骨梁開孔強度分析與補強設計之主要依據。

劉育明 (1995) 以塑性能量累積觀點，探討同型試體於不同載重型式作用下之韌性差異，進而討論腹板開孔對梁桿件韌性之影響。以

開孔形狀、加載型式作為變數，研究 9 組實尺寸腹板開孔梁進行單向及反覆載重試驗，就矩形開孔梁試驗結果，得知桿件勁度不因載重型式不同而有差異，判定不同載重型式作用下之同型桿件有相同之韌性，藉以探討梁腹板開孔對塑性區發展之影響。

葉木中 (1996) 探討開孔梁桿件受單向載重及反覆載重下之行為，研究建立一評估梁桿件韌性之能量準則，再討論此評估能量準則於腹板開孔梁之適用性。除了利用 8 組腹板開孔梁破壞試驗外，亦配合有限元素理論分析，模擬實際開孔梁受外力加載後之行為，找出較佳之腹板開孔梁設計準則。

2.2.2 鋼筋混凝土梁開孔之研究

Karin 等人 (1967) 探討鋼筋混凝土梁腹板大型開孔之設計與行為，試驗 10 組鋼筋混凝土開孔梁，將鋼筋混凝土梁開孔中心線模擬為鉸接點，取鋼筋混凝土梁之自由體圖，由力平衡原理計算梁開孔上下兩端桿件所受之軸壓力與軸拉力，並依試驗結果分別對鋼筋混凝土梁開孔上下兩端桿件作剪力分配，並由此軸力與剪力設計梁開孔上下兩端所需配置之鋼筋。

Mansur 等人 (1984) 研究鋼筋混凝土大型矩形開孔梁，建立崩塌載重之理論分析模式，將鋼筋混凝土開孔梁之上下兩端模擬成兩根桿件，當桿端行成塑角後，計算開孔梁之極限載重。分析 22 組試體之結果顯示，開孔尺寸將影響上下兩端桿件之受力，且鋼筋混凝土梁開孔處之彎矩剪力比值越大，所承受之極限載重越小。

Mansur 等人 (1985) 研究鋼筋混凝土大型矩形開孔梁，試驗 12 組試體，由研究結果顯示，得知以下結論，開孔長度、寬度及開孔中央

之剪力-彎矩比之增加，而梁裂縫之寬度及梁之最大變位量也隨著增加。在對稱鋼筋配置之斷面下，開孔梁上下兩端桿件撓曲變形之反曲點，位於開孔中心線附近。鋼筋混凝土大型矩形開孔梁其破壞在於開孔兩端形成塑性鉸之四鉸破壞機制。以鋼筋混凝土桿件設計方式，計算桿件承受軸力、剪力及彎矩下之承载力，將開孔梁之上下兩端模擬成兩根混凝土桿件。

Mansur 等人 (1991)研究以塑性破壞機制計算鋼筋混凝土梁開孔之力學行為及變位，試驗 20 組試體，分別為單跨度、雙跨度、三跨度之簡支梁，並將撓曲變形與開孔處剪力引致之 Vierendeel 效應變形加以疊加，分析結果顯示，可準確預測鋼筋混凝土開孔梁之載重-變形行為。

2.2.3 鋼骨鋼筋混凝土梁開孔之研究

蘇明鴻 (1999)研究鋼骨鋼筋混凝土腹板開孔梁之承載行為，以 19 組實尺寸之鋼骨鋼筋混凝土梁腹板開孔及腹板開孔以鋼管與鋼線網加勁補強進行單向載重試驗。研究結果得知以下結論，開孔面積越大時，在達到極限強度後之承載能力，比開孔面積較小之試體下降的快，推論出腹板開孔與開孔面積有相當之關係。鋼管及鋼線網加勁補強，其試體強度有明顯之提升。AISC-LRFD 規範中對鋼梁開孔之間距限制，在鋼骨鋼筋混凝土開孔梁中也適用。規範對於鋼骨鋼筋混凝土開孔梁彎矩強度之規定普遍都趨於保守。在開孔梁與未開孔梁試體之韌性比較時，開孔試體之韌性都較低。

許協隆與李建輝 (2002)研究不同鋼骨比與不同孔徑腹板開孔鋼骨鋼筋混凝土梁受反覆載重作用下之行為，以開孔直徑作為變數，試

驗 12 組試體，由試驗結果得知，在相同斷面下，試體之勁度衰減隨著開孔比之增加而增加，勁度之損失主要發生在加載初期，斷面鋼骨比也與勁度衰減相關，當斷面鋼骨比越大，試體之韌性行為較佳，勁度衰減相對減小，推求開孔對構件承載行為之影響及反覆載重下開孔斷面之彎矩強度折減公式。



第三章 鋼骨鋼筋混凝土梁開孔試驗

3.1 試驗規劃

本研究以 13 組實尺寸鋼骨鋼筋混凝土梁試體進行單向載重試驗，試驗變數為開孔形狀、試體跨距、開孔處之彎矩剪力比值；試體編號與參數詳見圖 3.1、3.2 及表 3.1、3.2，S 表示 SRC 梁開方孔之試體，C 表示 SRC 梁開圓孔之試體，R 表示 SRC 梁開長方孔之試體，各系列試體之四種彎矩剪力比值以 1~4 表示。所有 SRC 梁試體之斷面尺寸、H 型鋼尺寸、主筋號數與數量、箍筋間距均固定，藉由試體規劃的參數，以及試體內部應變計與外部力與撓度的量測，探討 SRC 開孔處之力傳遞機制。

配合試體規劃，本試驗以分析模式與實尺寸試驗探討 SRC 梁開孔之力傳遞機制與強度分析模式，主要以全斷面塑性應力分析法來分析，分析出斷面之塑性中性軸位置及撓曲強度。藉由試驗驗證分析理論並與實務能夠相輔相成。

SRC 梁試體之材料，鋼骨與鋼筋為鋼鐵廠訂購，混凝土則採用預拌混凝土，鋼骨、鋼筋及混凝土均依照 ASTM 規定之鋼材抗拉強度試驗與混凝土圓柱抗壓強度試驗得到各材料之實際強度。

3.2 試驗設計與製作

3.2.1 試體設計

本研究之 13 組 SRC 開孔梁斷面尺寸為參考工程上常使用之斷面，SRC 梁斷面尺寸為 300×500 mm，大小為實尺寸。SRC 梁試體之

鋼骨型式均採 H 型鋼骨斷面，材質為 A36 鋼材，鋼骨標稱強度為 247 MPa，鋼骨尺寸採 H300×150×6.5×9；鋼骨上翼板焊剪力釘，剪力釘設計參考 AISC Specification (2005) 中之剪力釘之強度設計公式

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc} F_u \quad (3-1)$$

式中 Q_n 為埋於混凝土內單一剪力釘之標稱強度， A_{sc} 為剪力釘之斷面積， f'_c 為混凝土之標稱抗壓強度， E_c 為混凝土之彈性模數， F_u 為剪力釘之最小拉力強度，由計算結果試體剪力釘採 13 ϕ ×50，其間距為 150 mm。混凝土採用標稱強度 21.4 MPa 之預拌混凝土。SRC 梁試體所配置鋼筋之主筋採用 8 號竹節鋼筋，試體之四個角落各配置一根，在 SRC 梁開孔之上下兩端各配置 6 號竹節鋼筋，其標稱強度均為 412 MPa (60 ksi)。箍筋則為 3 號竹節鋼筋，其標稱強度為 274 MPa (40 ksi)。箍筋之設計是參考一般 SRC 梁常用之箍筋號數，並配合 SRC 梁之設計規範，在塑性鉸區域內箍筋之間距不得大於梁深之四分之一，所以箍筋間距設為 120 mm。試體側視如圖 3.3 所示。

本研究之試體配置如圖 3.4 至 3.6 所示，SRC 梁試體開孔分為 ϕ 150 mm 圓孔、150 mm 方孔及 150×300 mm 長方孔三大類，為探討開孔處彎矩-剪力比值對 SRC 開孔梁行為之影響，對於不同形狀之 SRC 開孔梁設定開孔處之彎矩-剪力比值，每種開孔形狀分成四組彎矩剪力之比值分別探討。

本研究先進行理論分析為配置合理之試體，以全斷面塑性應力法分析計算 SRC 開孔梁之撓曲強度，而剪力強度之計算是分別將鋼骨腹板與 RC 開孔處之剪力強度疊加，依此法分析各組試體。

3.2.2 試體製作過程

試體製作過程如下：

1. 鋼骨、鋼筋、箍筋由鋼構廠製作。
2. 以砂輪機將要黏貼應變計之位置磨平，再以丙酮將黏貼表面擦拭乾淨，使用專用之快乾膠黏貼應變計於鋼骨及鋼筋上，如照片 3.1 所示，圖 3.7、3.8 為各試體之鋼骨及鋼筋應變計黏貼位置。
3. 製作鋼骨保護層之 100 mm 混凝土墊塊。
4. 鋼骨及鋼筋之組裝，如照片 3.2 所示。
5. 製作試體之模板及在模板內塗模板油以利拆模，如照片 3.3 所示。
6. 吊裝鋼骨置於模板內並定位，如照片 3.4 所示。
7. 澆製預拌混凝土，並以振動棒及搗棒充份搗實，如照片 3.5 至 3.7 所示。
8. 試體養護。
9. 七日後拆模，並持續進行養護。
10. 進行混凝土圓柱試體抗壓試驗，分 7、28 天、56 天及 SRC 開孔梁試體測試期間。

3.3 材料性質試驗

3.3.1 混凝土

本研究採用之預拌混凝土，由國產混凝土預拌廠生產，其標稱強

度為 21.4 MPa，混凝土配合比例設計如表 3.3 所示，混凝土由預拌車送至交通大學大型結構實驗室進行現場澆製，同時製作 30 組 $\phi 150 \times 300$ mm 之混凝土圓柱試體，圓柱試體養護方式與時間均和 SRC 開孔梁試體一致，為確保試驗條件相同。圓柱試體抗壓強度試驗，分別進行 7、28 天、56 天及 SRC 開孔梁試體測試期間，各取三組圓柱試體之平均值，以了解混凝土實際抗壓強度，混凝土之標稱及實際抗壓強度如表 3.4 所示。

3.3.2 鋼骨及鋼筋

本研究鋼骨型式均採 H 型鋼骨斷面，材質為 A36 鋼材，鋼骨標稱強度為 247 MPa，鋼骨尺寸採 H300 \times 150 \times 6.5 \times 9。鋼筋則採用 3 種號數之竹節鋼筋，分別為 3、6、8 號竹節鋼筋。為求得 H 型鋼之實際強度，於同一批次型鋼取得翼板與腹板之拉力試片，依照 ASTM 規定試片之斷面尺寸及量測標距，分別由型鋼之翼板與腹板切割取得。試驗中所採用之鋼筋為隨機取樣作為鋼筋拉力強度試驗使用，其尺寸及量測標距也皆依照 ASTM 之規定。鋼骨、鋼筋之標稱及實際降伏強度及極限強度如表 3.5 所示。

3.4 試驗裝置與步驟

3.4.1 試驗設置

本研究試驗方式以 MTS 油壓致動器施力加載，採用位移控制為加載方式，油壓致動器的施力容量為 981 kN。SRC 開孔梁試體置於鋼梁組成的反力基座上，基座放置於強力地板上，基座上設置滾支承，滾支承之間距依試體之不同而有所改變。油壓致動器則固定於反力鋼架上，反力鋼架固定於強力地板上，油壓致動器下方用螺栓鎖轉

接鋼梁。圖 3.9 為 SRC 開孔梁單向載重試驗配置圖，及照片 3.8 所示。

3.4.2 量測儀器與資料擷取

試驗過程中，為瞭解外力作用下，SRC 開孔梁之開孔與整體之變位情況，以及試體內部應變計之相對關係，擷取油壓致動器之力量與位移，以及 SRC 開孔梁試體上測點之垂直位移與黏貼於鋼骨、鋼筋之應變計。

SRC 開孔梁之開孔部份量測，主要配置如圖 3.10、3.11，用來量測開孔處變位情形，進而計算曲率及剪應變。

SRC 開孔梁之變位以線性變化位移感應器 (LVDT、Dial-Gage 及拉線式位移計)量測，圖 3.12 為試體 N1 之移感應器量測位置圖，圖 3.13 為試體 S1、C1、R1 之移感應器量測位置圖，圖 3.14 為剩下試體之移感應器量測位置圖，照片 3.9 為量測儀器之設備與裝置。

3.4.3 試驗程序

SRC 開孔梁試體進行單向載重試驗程序簡述如下：

1. 將 SRC 開孔梁試體表面塗上白色水泥漆並劃線，方便於觀察裂縫發展情況。
2. 安裝轉接梁於油壓製動器，並調整油壓制動器之位置。
3. 將 SRC 開孔梁試體以天車吊至試驗區，安裝試體並定位及架設位移量測系統，如照片 3.10 所示。
4. 架設資料擷取系統接線工作。

5. 將 MTS 油壓致動器設定以位移控制進行加載，加載速率為 0.03 mm/sec 及 0.01 mm/sec 兩種，依試體受彎矩或剪力大小之不同而改變，並由資料擷取系統同步讀取實驗數據。
6. 觀察 SRC 開孔梁試體表面裂縫增長與混凝土剝落情況，以簽字筆描繪裂縫分佈情形，當試體強度下降至 70%，或任何突發狀況危害到安全時，則停止試驗。



第四章 試驗結果與討論

4.1 試體破壞行為

本次試驗程序採位移歷時控制，所有試體之試驗觀察情形敘述如下，為方便描述及比較各試體之行為，觀察試體撓度與跨距之關係，其中本文對 Δ/L 定義為梁之開孔中點撓度 Δ 與試體跨距 L 之比值。

4.1.1 未開孔試體

試體 N1

試體 N1 為未開孔且受純彎作用之試體。當試驗開始時，載重加至 150 kN，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫，發生在梁下緣受拉側。隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，載重加至 295 kN，梁中點位移 8 mm ($\Delta/L=0.21\%$)時，SRC 梁撓曲裂縫變得較明顯，試體兩側也出現輕微之剪力裂縫，如照片 4.1 所示。直到載重加至 590 kN，梁中點位移 29 mm ($\Delta/L=0.74\%$)時，梁中點受壓區出現橫向平行梁之裂縫，而梁下緣受拉處撓曲裂縫開始變多且加大，直到載重加至 620 kN 時，梁中點位移 45 mm ($\Delta/L=1.15\%$)，SRC 梁中點受壓區混凝土壓碎，如照片 4.2 所示，此時載重開始下降，當載重降至 600 kN 時，梁中點位移 53 mm ($\Delta/L=1.36\%$)，發生第二次 SRC 梁中點受壓區壓碎且混凝土剝落，而下方梁下緣受拉側裂縫還在持續擴大。

當載重降至 600 kN，梁中點位移 64 mm ($\Delta/L=1.64\%$)時，梁中點受壓區混凝土再度剝落，因 SRC 梁上緣混凝土保護層壓碎，使得力量往下降，但藉由箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應，讓試體在持續變形下能維持其強度，此時力量開始漸漸爬升，力量爬升至 610 kN，

位移 74 mm ($\Delta/L=1.90\%$)，梁中點受壓區混凝土剝落，受壓區裂縫延伸至加載下方支承處，而梁受拉處撓曲裂縫寬度已經到達 5 mm，且裂縫持續增加。

載重加至 640 kN，位移 125mm ($\Delta/L=3.21\%$)時，兩點加載之間受壓區保護層已經開始和鋼筋漸漸分離，當載重加至 660 kN，位移 200 mm ($\Delta/L=5.13\%$)，到達極限載重，受壓區破壞嚴重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.1 及照片 4.3 所示，此時力量開始緩慢下降，直到載重下降至 620 kN，位移 234 mm ($\Delta/L=6.00\%$)時，梁中點受壓區保護層已經和鋼筋分離且剝落，箍筋外露，直到載重到達 580 kN，位移 245 mm ($\Delta/L=6.28\%$)時，受壓區鋼骨上翼板及主筋發生挫屈，如照片 4.4 所示，力量開始急速下降，降至 70%極限載重時，停止試驗，試體為彎矩破壞，試體之加載過程如照片 4.5 所示。

4.1.2 受純彎作用之開孔試體

試體 S1

試體 S1 為開方孔之試體並受純彎載重作用，開孔大小為 150×150 mm，開孔位置為梁之中心。當試驗開始時，載重加至 110 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫，發生在梁下緣受拉側，隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，載重加至 295 kN，梁中點位移 8 mm ($\Delta/L=0.21\%$)時，SRC 梁撓曲裂縫變得較明顯且在開孔兩旁距離開孔約 500 mm 處及試體兩側出現些微之剪力裂縫，開孔及上緣角隅處也出現裂縫，如照片 4.6 所示。

載重加至 490 kN，位移 17 mm ($\Delta/L=0.44\%$)時，載重下方支承處出現微小裂縫，當載重到達 550 kN，位移 20 mm ($\Delta/L=0.51\%$)時，SRC

梁勁度改變，開孔兩旁裂縫增加且延伸至開孔處，直到載重到達 610 kN，位移 40 mm ($\Delta/L=1.03\%$)期間，開孔處裂縫增加，開孔兩旁之裂縫擴寬，而梁下緣撓曲裂縫增加且擴寬，SRC 梁中點受壓處出現裂縫，當載重到達 620 kN，位移 45 mm ($\Delta/L=1.15\%$)，混凝土中點受壓區壓碎，如照片 4.7 所示，剪力及撓曲裂縫持續增加，載重開始下降，載重下降至 600 kN，位移 65 mm ($\Delta/L=1.67\%$)時，SRC 梁中點受壓區再度壓碎且剝落，受壓處裂縫延伸至加載下方支承處，開孔處裂縫變寬，裂縫持續增加。因 SRC 梁上緣混凝土保護層壓碎，使得力量往下降，但藉由箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應，讓試體在持續變形下能維持其強度，此時力量開始慢慢爬升，當力量爬升至 610 kN，位移 110 mm ($\Delta/L=2.82\%$)時，SRC 梁中點受壓處之裂縫從梁上到下延伸至開孔處，撓曲裂縫擴寬及增加。

當力量到達 620 kN，位移 128 mm ($\Delta/L=3.28\%$)時，兩點加載之間受壓區保護層已經開始和鋼筋漸漸分離，直到載重加至 635 kN，位移 180 mm ($\Delta/L=4.62\%$)時，為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.2 及照片 4.8 所示，梁中點受壓區保護層已經和鋼筋分離且剝落，載重開始緩慢下降。直到載重降至 570 kN，位移 246 mm ($\Delta/L=6.31\%$)時，受壓區主筋挫屈，期間受壓區混凝土保護層不斷剝落且有開裂聲，力量開始急速下降，降至 70%極限載重時，梁中點位移約 268 mm ($\Delta/L=6.87\%$)，停止試驗，試體為彎矩破壞，試體之加載過程如照片 4.9 所示。

試體 C1

試體 C1 為開圓孔之試體並受純彎載重作用，開孔直徑為 150 mm，開孔位置為梁之中心。當試驗開始時，載重加至 120 kN 時，混

凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫，發生在梁下緣受拉側，隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，載重加至 295 kN，梁中點位移 8 mm ($\Delta/L=0.21\%$)時，SRC 梁撓曲裂縫變得較明顯且在開孔兩旁距離開孔約 600 mm 處及試體兩側出現些微之剪力裂縫。載重加至 490 kN，位移 15 mm ($\Delta/L=0.38\%$)時，SRC 梁下緣受拉處撓曲裂縫增加，開孔及孔上緣處出現微小裂縫及開孔兩旁裂縫增加。

當載重加至 590 kN，位移 26 mm ($\Delta/L=0.67\%$)時，SRC 梁中點受壓區出現裂縫及加載下方支承處出現微小裂縫，直到載重到達 620 kN，位移 42 mm ($\Delta/L=1.08\%$)，SRC 梁中點受壓區壓碎，如照片 4.10 所示，梁下緣受拉側撓曲裂縫增加及擴寬，距離開孔處 150 mm 之撓曲裂縫寬度約為 3 mm，開孔兩旁撓曲裂縫也隨之變多擴寬及延伸至開孔處，撓曲裂縫約為 0.65 mm，開孔處裂縫慢慢變寬，載重開始下降。當載重下降至 595 kN，位移 76 mm ($\Delta/L=1.95\%$)時，載重下方混凝土及 SRC 梁中點受壓區壓碎變嚴重，開孔周圍裂縫密佈，距離開孔處約 350 mm 之裂縫擴大至 1 mm，而距離開孔處 150 mm 之撓曲裂縫擴大至 6.5 mm。直到載重降至 590 kN，位移 80 mm ($\Delta/L=2.05\%$)時，因 SRC 梁上緣混凝土保護層壓碎，使得力量往下降，但藉由箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應，讓試體在持續變形下能維持其強度，此時力量開始往上爬升。力量爬升至 600 kN，位移 130 mm ($\Delta/L=3.33\%$)時，距離開孔約 50 mm 處之裂縫已經達到約 3 mm 及梁中點開孔處下方之撓曲裂縫約 5 mm，如照片 4.11 所示，距離開孔處 150 mm 之撓曲裂縫擴大至 10 mm 寬。

載重加至 615 kN，位移 160 mm ($\Delta/L=4.10\%$)時，為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.3 及照片 4.12 所示，受壓區混凝土保護層嚴重剝落且有開裂聲，主筋外露，距離開孔約 50 mm 處之裂縫已經

達到約 5.5 mm，距離開孔處 150 mm 之撓曲裂縫寬度約為 15 mm，載重開始緩慢下降。載重下降至 605 kN，位移 180 mm ($\Delta/L=4.62\%$) 時，受壓區主筋發生挫屈，到達 590 kN，位移 187 mm ($\Delta/L=4.79\%$) 時，受壓區 3 號箍筋與 6 號補助筋也發生挫屈及受壓區保護層分離剝落，力量開始急速下降，降至 70%極限載重時，梁中點位移約 205 mm，停止試驗，試體為彎矩破壞，試體之加載過程如照片 4.13 所示。

試體 R1

試體 R1 為開長方孔之試體並受純彎載重作用，開孔大小為 150 x 300 mm，開孔位置為梁之中心。當試驗開始時，載重加至 110 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫，發生在梁下緣受拉側，隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，載重加至 295 kN，梁中點位移 10 mm ($\Delta/L=0.26\%$) 時，SRC 梁撓曲裂縫變得較明顯且在開孔兩旁距離中心線約 500 mm 處及試體兩側出現些微之剪力裂縫，開孔及上緣角隅處也出現裂縫，如照片 4.14 所示。

載重加至 570 kN，位移 18 mm ($\Delta/L=0.46\%$) 時，SRC 梁下緣受拉處撓曲裂縫及試體兩側剪力裂縫增加。當載重加至 630 kN，位移 28 mm ($\Delta/L=0.72\%$) 時，SRC 梁中點受壓區出現裂縫，開孔處出現微小裂縫及開孔兩旁裂縫增加及擴寬，距離中心線約 150 mm 之撓曲裂縫寬度約為 4 mm，開孔兩旁之裂縫也隨之變多擴寬及延伸至開孔處，裂縫約為 1.5 mm，開孔處裂縫慢慢變寬，在梁受拉處剪力與撓曲裂縫之間出現橫向平行梁之裂縫。

當載重到達 650 kN，位移 38 mm ($\Delta/L=0.97\%$) 時，SRC 梁中點受壓區壓碎，如照片 4.15 所示，開孔邊距離中心線約 150 mm 之裂縫寬

度約 3 mm，距離中心線約 150 mm 之撓曲裂縫寬度約為 5 mm，載重開始下降。當載重下降至 590 kN，位移 60 mm ($\Delta/L=1.54\%$)時，梁中點受壓區再度壓碎且混凝土剝落，梁下緣受拉側裂縫持續擴大，距離中心線約 150 mm 之撓曲裂縫寬度約為 8 mm，在梁受拉處剪力與撓曲裂縫間之橫向平行梁之裂縫也持續增加及擴大，開孔處之裂縫也隨之增加，因 SRC 梁上緣混凝土保護層壓碎，使得力量往下降，但藉由箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應，讓試體在持續變形下能維持其強度，此時力量開始爬升。

當載重爬升至 650 kN，位移 140 mm ($\Delta/L=3.59\%$)時，為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.4 及照片 4.16 所示，梁中點受壓區嚴重壓碎，混凝土保護層開始分離且嚴重剝落，距離中心線約 150 mm 之撓曲裂縫寬度約為 12 mm，開孔形狀些微變形，開孔裡裂縫寬度約 7 mm，力量開始緩慢下降。當載重下降至 600 kN，位移 160 mm ($\Delta/L=4.10\%$)，受壓區混凝土保護層分離，3 號箍筋外露，開孔區混凝土不斷剝落，裂縫佈滿整個孔，開孔處變形嚴重。當載重到達 570 kN，位移 168 mm ($\Delta/L=4.31\%$)時，受壓區主筋發生挫屈，力量開始急速下降，降至 70%極限載重時，梁中點位移約 180 mm，停止試驗，試體為彎矩破壞，試體之加載過程如照片 4.17 所示。

4.1.3 受剪力-彎矩聯合作用之開孔試體

試體 S2

試體 S2 為開方孔之試體，開孔大小為 150×150 mm，開孔位置距左端支承 1200 mm，彎矩剪力之比值為 1.2 m。當試驗開始時，載重加至 120 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫及剪力裂縫，

撓曲裂縫發生在梁下緣受拉側，剪力裂縫發生在開孔處，如照片 4.18 所示。隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，直到載重加至 245 kN，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔之對角處。當載重達到 490 kN，開孔處位移 7 mm ($\Delta/L=0.23\%$)，梁下緣受拉側之撓曲裂縫明顯增加。

載重 615 kN，位移 19 mm ($\Delta/L=0.63\%$)時，載重-位移圖之曲線斜率改變，開始進入非線性，此時撓曲裂縫及剪力裂縫也慢慢擴大，裂縫寬度約為 1 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.5 及照片 4.19 所示。隨著位移增加，裂縫持續擴大，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，下降至 590 kN，剪力裂縫擴大至 8 mm，開孔處明顯變形，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，避免實驗數據誤差及危害到安全，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞，試體之加載過程如照片 4.20 所示。

試體 S3

試體 S3 為開方孔之試體，開孔大小為 150×150 mm，開孔位置距左端支承 500 mm，彎矩剪力之比值為 0.5 m。當試驗開始時，載重加至 290 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫及剪力裂縫，撓曲裂縫發生在梁下緣受拉側，剪力裂縫發生在開孔處。隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，直到載重加至 490 kN，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔之對角處，如照片 4.21 所示。

當載重達到 600 kN，開孔處位移 7 mm ($\Delta/L=0.26\%$)，梁下緣受

拉側之撓曲裂縫明顯增加，剪力裂縫擴寬至 3 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.6 及照片 4.22 所示。隨著位移增加，剪力裂縫持續在擴大，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，撓曲裂縫不在增加，當載重下降至 520 kN，開孔處明顯變形，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，SRC 梁掉落，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞，試體之加載過程如照片 4.23 所示。

試體 S4

試體 S4 為開方孔之試體，開孔大小為 150×150 mm，開孔位置距左端支承 200 mm，彎矩剪力之比值為 0.2 m。當試驗開始時，載重加至 540 kN 時，混凝土已經開始出現微小之剪力裂縫，發生在開孔處，如照片 4.24 所示。隨著載重增加，剪力裂縫也慢慢增加，直到載重加至 765 kN，開孔處位移 4 mm ($\Delta/L=0.33\%$)，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔之對角處。當載重達到 835 kN，開孔處位移 10 mm ($\Delta/L=0.83\%$)，出現輕微之撓曲裂縫，發生梁下緣受拉側，剪力裂縫則擴寬至 4 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.7 及照片 4.25 所示。

隨著位移之增加，剪力裂縫持續在增加及擴大，而撓曲裂縫並未繼續增加及擴寬，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，當載重下降至 775 kN，開孔處位移 27 mm ($\Delta/L=2.25\%$)，開孔處明顯變形，上下錯動成菱形的形狀，開孔上方剪力裂縫寬度為 30 mm，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，

則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞。試驗觀察鋼骨腹板明顯受剪力作用產生之剪力變形，如照片 4.26 所示，試體之加載過程如照片 4.27 所示。

試體 C2

試體 C2 為開圓孔之試體，開孔直徑為 150 mm，開孔位置距左端支承 1200 mm，彎矩剪力之比值為 1.2 m。當試驗開始時，載重加至 120 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫及剪力裂縫，撓曲裂縫發生在梁下緣受拉側，剪力裂縫發生在開孔處。隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，直到載重加至 275 kN，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔斜角約 45 度處。當載重達到 590 kN，開孔處位移 11 mm ($\Delta/L=0.37\%$)，梁下緣受拉側之撓曲裂縫與開孔處之剪力裂縫明顯增加，如照片 4.28 所示。

載重 650 kN 及位移 18 mm ($\Delta/L=0.6\%$)時，載重-位移圖之曲線斜率改變，開始進入非線性，此時撓曲裂縫及剪力裂縫也慢慢擴大，剪力裂縫由開孔處延伸至加載處，裂縫寬度約為 1 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.8 及照片 4.29 所示。隨著位移增加，裂縫持續擴大，開孔上下緣因受剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，下降至 570 kN，剪力裂縫擴大至 8 mm，開孔處明顯變形，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞，試體之加載過程如照片 4.30 所示。

試體 C3

試體 C3 為開圓孔之試體，開孔直徑為 150 mm，開孔位置距左端支承 400 mm，彎矩剪力之比值為 0.4 m。當試驗開始時，載重加至 390 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫及剪力裂縫，撓曲裂縫發生在梁下緣受拉側，剪力裂縫發生在開孔處。隨著載重增加，撓曲及剪力裂縫也慢慢增加，直到載重加至 785 kN，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔斜角 45 度處，如照片 4.31 所示。當載重達到 880 kN，開孔處位移 10 mm ($\Delta/L=0.63\%$)，梁下緣受拉側之撓曲裂縫明顯增加，剪力裂縫擴寬至 2 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.9 及照片 4.32 所示。

隨著位移增加，剪力裂縫持續在擴大，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，撓曲裂縫不在增加，當載重下降至 715 kN，開孔處明顯變形，開孔處至梁底因剪力裂縫過大而使開孔下方整塊混凝土剝落，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞，試體之加載過程如照片 4.33 所示。

試體 C4

試體 C4 為開圓孔之試體，開孔直徑為 150 mm，開孔位置距左端支承 200 mm，彎矩剪力之比值為 0.2 m。當試驗開始時，載重加至 245 kN，位移 2.8 mm ($\Delta/L=0.13\%$)時，混凝土已經開始出現微小之剪力裂縫，發生在開孔處。隨著載重增加，剪力裂縫也慢慢增加，直到載重加至 685 kN，開孔處位移 6 mm，在開孔處出現較明顯之剪力裂

縫，發生在開孔之斜角 45 度處，如照片 4.34 所示。當載重達到 840 kN，開孔處位移 9 mm ($\Delta/L=0.42\%$)，出現輕微之撓曲裂縫，發生梁下緣受拉側，剪力裂縫則擴寬至 2 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.10 及照片 4.35 所示。

隨著位移增加，剪力裂縫持續在增加及擴大，而撓曲裂縫並未繼續增加及擴寬，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，當載重下降至 715 kN，開孔處位移 23 mm ($\Delta/L=1.07\%$)，開孔處明顯變形，上下錯動成橢圓形的形狀，如照片 4.36 所示。開孔上方剪力裂縫寬度為 20 mm，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞。試驗觀察鋼骨腹板明顯受剪力作用產生之剪力變形。試體之加載過程如照片 4.37 所示。



試體 R2

試體 R2 為開長方孔之試體，開孔大小為 150×300 mm，開孔位置為梁之中心，彎矩剪力之比值為 1.95 m。當試驗開始時，載重加至 110 kN 時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫及剪力裂縫，撓曲裂縫發生在梁下緣受拉側，剪力裂縫發生在開孔角隅對角處。隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，直到載重加至 295 kN，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔之對角處，如照片 4.38 所示。當載重達到 410 kN，開孔處位移 16 mm ($\Delta/L=0.41\%$)，梁下緣受拉側之撓曲裂縫明顯增加。載重 485 kN，位移 24 mm ($\Delta/L=0.62\%$)時，載重-位移圖之曲線斜率改變，開始進入非線性，此時撓曲裂縫及剪力裂縫也慢慢擴大，裂縫寬度約為 3 mm，此時為載重之最高值，即為極限

載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.11 及照片 4.39 所示。

隨著位移增加，裂縫持續擴大，開孔上下緣因受剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，下降至 370 kN，剪力裂縫擴大至 30 mm，開孔處明顯變形，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，開始使 SRC 梁產生水平之反力，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞，試體之加載過程如照片 4.40 所示。

試體 R3

試體 R3 為開長方孔之試體，開孔大小為 150×300 mm，開孔位置距左端支承 900 mm，彎矩剪力之比值為 0.9 m。當試驗開始時，載重加至 150 kN，開孔處位移 1.5 mm ($\Delta/L=0.05$)時，混凝土已經開始出現微小之撓曲裂縫及剪力裂縫，撓曲裂縫發生在梁下緣受拉側，剪力裂縫發生在開孔處。隨著載重增加，撓曲裂縫也慢慢增加，直到載重加至 295 kN，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔之對角處，如照片 4.41 所示。當載重達到 480 kN，開孔處位移 8.5 mm ($\Delta/L=0.29\%$)，梁下緣受拉側之撓曲裂縫明顯增加，剪力裂縫擴寬至 4 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.12 及照片 4.42 所示。

隨著位移增加，剪力裂縫持續在擴大，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，撓曲裂縫不再增加，當載重下降至 380 kN，開孔處嚴重變形，開孔處至梁上緣之剪力裂縫擴大至 40 mm，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，SRC 梁

掉落，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞，試體之加載過程如照片 4.43 所示。

試體 R4

試體 R4 為開長方孔之試體，開孔大小為 150×300 mm，開孔位置距左端支承 270 mm，彎矩剪力之比值為 0.27 m。當試驗開始時，載重加至 150 kN，開孔處位移 1.4 mm ($\Delta/L=0.10\%$)時，混凝土已經開始出現微小之剪力裂縫，發生在開孔處。隨著載重增加，剪力裂縫也慢慢增加，直到載重加至 340 kN，開孔處位移 6 mm ($\Delta/L=0.45\%$)，在開孔處出現較明顯之剪力裂縫，發生在開孔之對角處，如照片 4.44 所示。當載重達到 520 kN，開孔處位移 12 mm ($\Delta/L=0.90\%$)，出現輕微之撓曲裂縫，發生梁下緣受拉側，剪力裂縫則擴寬至 7 mm，此時為載重之最高值，即為極限載重，試體破壞及裂縫情況如圖 4.13 及照片 4.45 所示。

隨著位移增加，剪力裂縫持續在增加及擴大，而撓曲裂縫並未繼續增加及擴寬，開孔上下緣受因剪力與彎矩作用，保護層逐漸分離，鋼骨和鋼筋發生局部挫屈，載重開始緩慢下降，當載重下降至 460 kN，開孔處位移 30 mm，開孔處嚴重變形，明顯上下錯動，如照片 4.46 所示。開孔上方剪力裂縫寬度為 30 mm，油壓制動器施載點之轉接梁開始旋轉，導致施載點偏移，使 SRC 梁產生水平之反力，則停止試驗，試體為剪力彎矩交互作用破壞。試驗觀察鋼骨腹板明顯受剪力作用產生之剪力變形，試體之加載過程如照片 4.47 所示。

4.2 試體破壞行為比較

4.2.1 試體受純彎破壞系列

試體 N1、S1、C1、R1 為受彎矩破壞之試體，由試驗觀察得知，試體裂縫發展情形大致相同，差別在於降伏之後的行為，N1 試體因未開孔，在混凝土保護層壓碎後，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應最佳，其梁中點位移最大，P- Δ 圖所圍面積最大，韌性最佳。S1、C1 試體因開孔，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應顯然無 N1 試體來的好，但開孔大小並不大，其圍束效果還算佳，皆使載重下降後仍繼續爬升至極限載重，R1 試體因開孔寬度為 S1 試體之兩倍，在混凝土保護層壓碎後，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應為最差，載重雖然有在爬升，但無法超過極限值，且其梁中點位移最小，韌性最差。N1、S1、C1、R1 試體之圍束如照片 4.48~4.51 所示。

4.2.2 試體受剪力-彎矩聯合作用破壞系列

4.2.2.1 試體 S 系列 (方孔系列)

試體 S1、S2、S3、S4 為 S 系列之試體，S1 試體在混凝土保護層壓碎後，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應最佳，S2 (M/V=1.2 m) 試體開孔處除了受彎矩作用還受剪力作用。SRC 梁之剪力傳遞機制與鋼骨剪力傳遞機制和鋼筋混凝土剪力傳遞機制有關，在鋼骨部分是由腹板來承受剪力作用，其剪力變形為均勻分佈，而在鋼筋混凝土部分受剪力後會產生開裂，混凝土開裂會使得剪力剛度下降而改變其剪力傳遞機制，其剪力會有突然之變化，SRC 梁由於鋼骨之存在，受到鋼骨剪力變形之影響，使得試體達破壞時，在持續變形下載重不會有突然之

變化，為緩慢降低。

S2 ($M/V=1.2$ m) 試體因受剪力作用，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應明顯降低，無法使試體在持續變形下能維持其強度，當剪力影響作用越大時，這種情況越明顯，如 S3 ($M/V=0.5$ m)、S4 ($M/V=0.2$ m) 試體，主要為受剪力作用產生之變形及破壞，彎矩作用已漸漸減小。S4 ($M/V=0.2$ m) 試體受剪力作用影響最顯著，極限載重下開孔處破壞嚴重，實驗結束後將試體開孔處之混凝土敲落，開孔部分明顯上下錯動，剪力變形嚴重，呈現菱形的形狀，如照片 4.26。

由試體 S 系列實驗得知，受彎矩作用影響越大之試體，其箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應越佳，因受彎矩作用下，SRC 梁斷面上下兩側分別承受壓力與拉力，使得受壓力區箍筋內混凝土可承受之抗壓能力，不會因受剪力作用而使梁斷面之混凝土與鋼骨、鋼筋錯開或滑動，造成混凝土抗壓能力降低，且混凝土可提供鋼骨肢材良好之束制能力，降低鋼骨部分之局部挫屈發生。受剪力作用影響越大之試體，SRC 梁斷面之混凝土與鋼骨、鋼筋錯動或滑移越多，造成混凝土受壓區抗壓能力降低，其剪力變形越嚴重。

4.2.2.2 試體 C 系列 (圓孔系列)

試體 C1、C2、C3、C4 為 C 系列之試體，C1 試體在混凝土保護層壓碎後，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應最佳，C2 ($M/V=1.2$ m) 試體開孔處除了受彎矩作用還受剪力作用，試體因受剪力作用，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應明顯降低，無法使試體在持續變形下能維持其強度。由試驗結果得知，C2 與 S2 試體其跨距與彎矩剪力之比值皆相同，C2 試體之圍束效應比 S2 試體佳，且受剪力作用下試體剪力變

形行為比 S2 試體輕微，開孔形狀影響箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應及剪力作用。C3 ($M/V=0.4$ m)、C4 ($M/V=0.2$ m)之試體主要為受剪力作用產生之變形及破壞，C4 試體受彎矩作用已非常微小，受剪力作用影響最顯著，極限載重下開孔處破壞嚴重，開孔部分明顯上下錯動，剪力變形嚴重，呈現橢圓形的形狀，如照片 4.36 所示。

由試體 C 系列試驗得知，整體之行為類似 S 系列之試體，受彎矩作用影響越大之試體，其箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應越佳，受剪力作用影響越大之試體，SRC 梁斷面之混凝土與鋼骨、鋼筋錯動或滑移越多，造成混凝土受壓區抗壓能力降低，其剪力變形越嚴重。

4.2.2.3 試體 R 系列 (長方孔系列)

試體 R1、R2、R3、R4 為 R 系列之試體，R1 試體在混凝土保護層壓碎後，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應最佳。R2 ($M/V=1.95$ m) 試體開孔處受彎矩與剪力之作用，因 R2 試體開孔寬度為 S2 試體之 2 倍，原本因受剪力之作用，而使其箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應明顯降低，無法使試體在持續變形下能維持其強度，現又於開孔寬度為 S2 試體之 2 倍，因開孔較其它試體大，試體達破壞載重時，混凝土剝落較其它開孔小的嚴重，使得 R2 試體無法產生很好的圍束效果，行為與 R3 ($M/V=0.9$ m)、R4 ($M/V=0.27$ m)試體類似，因鋼骨之存在，受到鋼骨剪力變形之影響，使得試體達破壞時，在持續變形下載重不會有突然之變化，為緩慢降低。

鋼結構針對梁腹板開孔有其設計叢書，如 Darwin (1990)由美國鋼結構協會(AISC)出版 “Steel and composite beams with web openings” 設計叢書，依照 AISC-LRFD 之原理來分析，在鋼骨梁腹

板開孔研究中發展出一套完整分析及補強設計準則，成為鋼骨梁開孔強度分析與補強設計之主要依據。此書對於不同開孔寬度之強度提出一折減係數 α (本論文 4.8 節詳述)，因本試驗所有試體鋼骨材料性質、斷面尺寸及開孔高度皆相同且開孔位置無偏心皆在斷面之中央處， α 值僅與開孔寬度相關，試體開孔越寬，強度折減越多，由於 R 系列試體開孔大小較其它試體大， α 值折減越多，相對發生變形也較其它試體來的明顯。

4.3 試體載重-位移曲線關係

試體載重-位移關係為油壓致動器之荷重與梁開孔處中心點位移計讀取之位移，受彎矩破壞系列之試體，其開孔處中心點即為梁之中點。試驗為位移控制，資料擷取頻率為每秒一次。以下分別對不同參數試體之載重-位移關係加以描述，如圖 4.14~4.26 所示。

4.3.1 試體受純彎矩破壞系列

受彎矩破壞之試體，其梁中點載重-位移關係，如圖 4.14~4.17 所示，當試驗載重還在彈性階段，梁中點之載重-位移關係曲線無明顯差異，試體降伏之後，N1、S1、C1、R1 之試體皆達到第一個載重最大值，因 SRC 梁上緣混凝土保護層壓碎，使得載重下降，但藉由箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應，讓試體在持續變形下能維持其強度，此時力量開始漸漸爬升，N1、S1、C1 之試體載重爬升皆超過第一個載重最大值，達到極限載重值，惟獨 R1 試體在第一個載重最大值就是極限載重，其原因大致分為三部份，一、在圍束效應下，R1 試體在持續變形下之力量爬升並無超過第一個載重最大值，因梁開孔比其它試體來的大，顯然圍束效應較其他 3 支試體差，二、開孔寬度越大

之試體，比開孔寬度較小之試體在梁開孔上方受壓區越易破壞及挫屈，三、如本論文 4.2.2 節所敘述鋼骨梁開孔設計叢書裡提到開孔之折減係數 α 值，試體開孔越寬，強度折減越多，因 R1 試體開孔寬度最寬，強度折減最多。受純彎矩破壞試體之載重-位移關係如圖 4.27 所示。

未開孔與開孔之試體其強度，未開孔之試體要比開孔試體來的大，如表 4.1 及圖 4.27 中得知，在試體達降伏強度前即彈性階段時，受純彎試體 P- Δ 圖之斜率大致相同，即勁度相同。當試體降伏後達到第一個極限強度時，R1 試體極限強度反而比 S1、C1 試體高，且發生在混凝土保護層壓碎後，載重開始下降時，而非發生在圍束效應下，載重緩慢爬升後的極限點，而 S1 試體在圍束效應下，其強度延展性比 C1 試體佳，這些現象可能為實驗上之變異，但依據許協隆與蘇明鴻 (1999) 研究鋼骨鋼筋混凝土腹板開孔梁之承載行為所述，上述行為可能取決於試驗時混凝土的剝落程度。R1 試體相較於其他 3 組試體，在達降伏階段時，並無混凝土剝落，直到混凝土壓碎，載重到達極限值時，混凝土才開始剝落，而其他 3 組試體在達降伏後，混凝土就開始持續剝落，所以在保護層壓碎前，R1 試體強度為最高，混凝土保護層壓碎後，在圍束效應下，其 C1 試體之混凝土剝落程度比 S1 試體多，所以 S1 試體之延展性較 C1 佳。

4.3.2 試體受彎矩-剪力聯合作用破壞系列

S、C、R 系列之試體，其梁開孔中點之載重-位移關係，如圖 4.28~4.30 所示，其共有之特性為試體受彎矩影響越大者，試體降伏後，其勁度軟化導致載重-位移曲線斜率改變越緩慢，如編號 1 試體之載重-位移關係圖。編號 2 及 3 試體受剪力之影響逐漸增加，編號 4

試體為受剪力影響最大之試體，使得試體降伏後之載重-位移曲線斜率改變越急促。S2、C2 同為編號 2 之試體，其試體條件皆相同，試驗變數為開孔形狀，藉由載重-位移曲線關係圖知，C2 試體韌性比 S2 佳，抵抗之極限載重也優於 S2。

4.4 SRC 梁開孔中央之應變分佈

本試驗應變計之安排乃欲求得試體開孔垂直中心線斷面之應變分佈，進而推求試體斷面中性軸之位置，及驗證斷面是否平面保持平面狀態。試驗難免有誤差，但以整體之趨勢來說，試體斷面接近平面保持平面。應變分佈繪製方式，在受純彎矩破壞之試體分成 $1/4 P_y$ 、 $1/2 P_y$ 、 $3/4 P_y$ 、 P_y 及 P_{u1} ；在其他試體分成 $1/4 P_y$ 、 $1/2 P_y$ 、 $3/4 P_y$ 、 P_y 及 P_u ，各階段載重分別繪製，X 軸為應變量，Y 軸為試體斷面之深度，拉力鋼筋之應變位於最下方，其餘皆為鋼骨之應變，其中 P_y 為降伏載重， P_y 定義為試體 P- Δ 曲線彈性階段之斜率改變起始點， P_{u1} 為試體產生塑性變形後第一個極限載重， P_u 為極限載重，如圖 4.31 所示。

4.4.1 試體受純彎矩破壞系列

對於受彎矩作用之梁上下兩斷面分別承受壓力與拉力，但隨著中性軸位置的改變，壓應力與拉應力並非相同，藉由試體內部之應變計來了解受載重過程中應變變化情形，如圖 4.32~4.35 所示，圖中 Y 軸起始點為梁斷面頂部，在未加載狀態下，中性軸因當位於斷面之中間，深度 250 mm，梁上下緣應變皆相同，但混凝土抗拉力為抗壓力之 8~15% (約為 10%)，受彎矩之影響，梁下緣受拉區先產生撓曲裂縫，試體在加載過程中，SRC 梁之拉力側混凝土開裂，造成斷面之中性軸從斷面中間處上移，隨著載重之增加，梁下緣受拉區應變增大，

混凝土裂縫也隨之變大及增加，裂縫越往上移，中性軸也隨之上移。載重增加從開始至 P_y 時，受純彎矩破壞之試體中性軸深度皆大約從 250 mm 上升至 145 mm，當達到載重 P_{u1} 時，中性軸深度皆大約在 135 mm 距斷面頂部之距離。

SRC 開孔梁上緣受壓區混凝土壓碎，受純彎矩破壞系列試體藉由應變計之觀察，當載重到達 P_{u1} 時，壓力側外緣混凝土應變約為 0.0023。極限強度後，混凝土受到箍筋與鋼骨之圍束效應，讓試體在持續變形下，能維持其強度，甚至提升強度；明顯可見 SRC 開孔梁在壓力側混凝土壓碎後之應變超越 ACI 規範之 0.003 極限應變。

4.4.2 試體受彎矩-剪力聯合作用破壞系列

4.4.2.1 試體 S 系列



S 系列試體開孔中點處斷面之應變分佈，如圖 4.34、4.36、4.37 所示。S1 試體開孔處因受彎矩作用，造成拉力側之混凝土開裂，使得在加載階段，斷面之中性軸不斷上移，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 P_y 時，中性軸深度從 175 mm 上升至 145 mm，達到載重 P_{u1} 時，中性軸深度皆大約在 130 mm。S2 (M/V=1.2 m) 試體在試驗開始時，斷面之中性軸漸漸上升，藉由應變計之觀察，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $3/4 P_y$ 時，中性軸深度從 205 mm 上升至 180 mm，當加載快至降伏荷重時，中性軸開始有下降之趨勢，載重在 P_y 時，中性軸深度皆大約在 195 mm，荷重達到極限載重 P_u 時，中性軸明顯下降，中性軸深度皆大約在 215 mm。

由試驗觀察試體之破壞情形，S2 (M/V=1.2 m) 試體分別所受彎矩

與剪力之影響差不多，因梁下緣受拉側應變較大，彎矩影響先顯現，造成試驗過程中試體拉力側先出現撓曲裂縫，中性軸上移，載重快到達降伏載重時，因剪力影響出現，SRC 梁開孔處受到剪力作用，開孔處上下方之剪力裂縫擴寬，使得中性軸不再上升，反而有下降的趨勢，藉由應變計之觀察，載重在降伏時，中性軸已經下降了一些，當荷重達到極限載重時，SRC 外緣混凝土已經開裂，抵抗強度改由鋼骨及鋼骨內之混凝土來支撐，所以中性軸明顯下降。

S3 ($M/V=0.5$ m) 試體在試驗開始時，斷面之中性軸漸漸上升，藉由應變計之觀察，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $3/4 P_y$ 時，中性軸深度從 235 mm 上升至 205 mm，載重至降伏載重時，中性軸已經明顯往下降，載重在 P_y 時，中性軸深度皆大約在 235 mm 與載重在 $1/4 P_y$ 時相同，荷重達到極限載重 P_u 時，中性軸深度皆大約在 255 mm。由試驗觀察試體之破壞情形，S3 ($M/V=0.5$ m) 試體所受剪力之影響大於彎矩，試驗開始時，彎矩影響先顯現，造成試驗過程中試體拉力側先出現撓曲裂縫，使得中性軸上移，因剪力影響和 S2 ($M/V=1.2$ m) 試體相較下，增加了許多，使得載重在未達降伏時，開孔處上下方之剪力裂縫已經擴寬，中性軸開始下降，下降時機比 S2 試體來的早。S4 ($M/V=0.2$ m) 試體之應變計在試驗過程中損壞，所以無法得到此試體之資料。

4.4.2.2 試體 C 系列

C 系列試體開孔中點處斷面之應變分佈，如圖 4.34、4.38、4.39 所示，C1 試體開孔處因受彎矩作用，造成拉力側之混凝土開裂，因混凝土的開裂，在加載過程中，斷面之中性軸不斷上移，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 P_y 時，中性軸深度從 175 mm 上升至 145 mm，達到載重 P_{u1} 時，中性軸深度皆大約在 130 mm。C2 ($M/V=1.2$ m) 試體在試驗開始時，

斷面中性軸有上升之趨勢，從應變圖知，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $3/4 P_y$ 時，中性軸深度從 200 mm 上升至 175 mm，當試體加載快達降伏載重時，中性軸開始有下降之趨勢，載重在 P_y 時，中性軸深度皆大約在 220 mm，載重達到極限載重 P_u 時，中性軸明顯下降，中性軸深度皆大約在 225 mm。

觀察試體之破壞情形，C2 ($M/V=1.2$ m) 試體所受之彎矩與剪力影響差不多，因梁下緣受拉側應變較大，彎矩影響先顯現，造成試驗過程中試體拉力側先出現撓曲裂縫，使得中性軸上移，隨著載重增加快達到降伏載重時，剪力影響漸漸出現，梁開孔處受到剪力作用，開孔處上下方之剪力裂縫擴寬，使得中性軸不再上升，反而有下降的趨勢，由應變圖知，載重在降伏時，中性軸已經下降了一些，當載重達到極限載重時，SRC 外緣混凝土已經開裂，抵抗強度改由鋼骨及鋼骨內之混凝土來支撐，所以中性軸明顯下降。

C3 ($M/V=0.4$ m) 試體之應變計在試驗過程中損壞，所以無法得到此試體之資料。C4 ($M/V=0.2$ m) 試體在試驗開始時，斷面之中性軸漸漸上升，藉由應變計之觀察，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $1/2 P_y$ 時，中性軸深度從 190 mm 上升至 145 mm，載重至 $3/4$ 降伏載重時，中性軸已經明顯往下降，中性軸深度約 170 mm，達到極限載重 P_u 時，中性軸深度皆大約在 240 mm。由試驗觀察試體之破壞情形，C4 ($M/V=0.2$ m) 試體所受剪力之影響遠大於彎矩，試驗開始時，彎矩影響先顯現，造成試驗過程中試體拉力側先出現撓曲裂縫，使得中性軸上移，因剪力影響和 C2 ($M/V=1.2$ m)、C3 ($M/V=0.4$ m) 試體相較下，增加了許多，使得載重在未達降伏時，開孔處上下方之剪力裂縫已經擴寬，中性軸開始下降，下降時機為最早。

4.4.2.3 試體 R 系列

R 系列試體開孔中點處斷面之應變分佈，如圖 4.35、4.40~4.42 所示，R1 試體開孔處因受彎矩作用，造成拉力側之混凝土開裂，在加載階段，斷面之中性軸不斷上移，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 P_y 時，中性軸深度從 180 mm 上升至 145 mm，達到載重 P_{u1} 時，中性軸深度皆大約在 135 mm。R2 (M/V=1.95 m) 試體之應變圖類似 S2 (M/V=1.2 m)、C2 (M/V=1.2 m) 試體，斷面之中性軸一開始先上升，從應變圖知，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $3/4 P_y$ 時，中性軸深度從 185 mm 上升至 173 mm，載重增加快至降伏載重時，中性軸開始下降，載重在 P_y 時，中性軸深度皆大約在 220 mm，載重達到極限載重 P_u 時，中性軸深度皆大約在 225 mm。

由試驗觀察試體之破壞情形，R2 (M/V=1.95 m) 試體所受彎矩之影響大於剪力，斷面之中性軸應該要比 S2 (M/V=1.2 m) 及 C2 (M/V=1.2 m) 試體來的晚下降，但 R2 試體開孔寬度為 S2 試體之兩倍，剪力作用造成之影響較大，使得中性軸提早下降。R3 (M/V=0.9 m) 試體在試驗開始時，斷面中性軸有上升之趨勢，從應變圖知，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $3/4 P_y$ 時，中性軸深度從 220 mm 上升至 200 mm，當試體加載快達降伏載重時，中性軸開始有下降之趨勢，載重達到極限載重時，中性軸明顯下降，載重在 P_y 時，中性軸深度皆大約在 215 mm，載重達到極限載重 P_u 時，中性軸深度皆大約在 240 mm。

觀察試體之破壞情形，R3 (M/V=0.9 m) 試體所受之彎矩與剪力影響差不多，因梁下緣受拉側應變較大，彎矩影響先顯現，造成試驗過程中試體拉力側先出現撓曲裂縫，使得中性軸上移，隨著載重增加快

達到降伏載重時，剪力影響漸漸出現，梁開孔處受到剪力作用，開孔處上下方之剪力裂縫擴寬，使得中性軸不再上升，反而有下降的趨勢，由應變圖知，載重在降伏時，中性軸已經下降了一些，當載重達到極限載重時，SRC 外緣混凝土已經開裂，抵抗強度改由鋼骨及鋼骨內之混凝土來支撐，所以中性軸明顯下降。

R4 (M/V=0.27 m) 試體所受剪力之影響遠大於彎矩，試驗開始時，彎矩影響先顯現，造成試驗過程中試體拉力側先出現撓曲裂縫，使得中性軸上移，從應變圖知，載重從 $1/4 P_y$ 加載至 $1/2 P_y$ 時，中性軸深度從 180 mm 上升至 160 mm，因剪力影響和 R2 (M/V=1.95 m)、R3 (M/V=0.9 m) 試體相較下，增加了許多，使得載重在未達降伏時，開孔處上下方之剪力裂縫已經擴寬，中性軸開始下降，下降時機為最早。載重在 $3/4 P_y$ 、 P_y 及 P_u 時，中性軸深度分別為 195 mm、220 mm 及 245 mm。

4.4.3 試體受彎矩剪力聯合作用之剪力強度分配

為瞭解 SRC 梁剪力強度分配之情況，因此於運算上假設 SRC 梁之剪力分別由鋼骨及 RC 部份所提供之剪力強度疊加，本 SRC 開孔梁試驗試體之剪力強度，鋼骨部分剪力強度藉由型鋼之三軸應變計所量得之應變值計算而得，為圖 3.7 編號 5 和 6 之應變計；而 RC 部分剪力強度為試驗之剪力強度扣除鋼骨剪力強度。

參考材料力學計算鋼骨部分之平均剪力強度，藉由三軸應變計所量得之應變值，三軸應變計編號如圖 3.8 所示，剪應變 γ_{xy} 計算方式如下

$$\gamma_{xy} = 2R_{45} - R_x - R_y \quad (4-1)$$

其中

R_{45} ：45 度方向之應變計讀數

R_x ：水平方向之應變計讀數

R_y ：垂直方向之應變計讀數

而剪應力 τ_{xy} 可由所對應之剪應變 γ_{xy} 求得，如下所示

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (4-2)$$

其中

G ：剪力模數

最後梁腹板之平均剪力強度 V_{sav} 可由下式估算

$$V_{sav} = \tau_{xy} A_e \quad (4-3)$$

其中

A_e ：鋼骨腹板之有效面積

圖 4.43~4.49 為 S、C、R 系列試體開孔斷面處之剪力強度分配百分比圖，X 軸為試體之剪應變比率，以試體剪力極限值所對應之剪應變 γ_u 為分母，如圖 4.50 所示（詳述於 4.7 節）；Y 軸為試體之剪力比率，顯示鋼骨與 RC 佔剪力之百分比。分別取 25%、50%、75% 及 100% 之剪應變 γ_u ，觀察鋼骨與 RC 之剪力所佔比重。圖中空白處因三軸應變計損壞，導致無法繪製。

S、C、R 系列之試體剪力強度分配擁有共同之特性，在加載之初

大部分剪力由 RC 來承受，隨著載重之增加，RC 部分裂縫也逐漸產生，故鋼骨所承受之剪力相對提升，從圖 4.43~4.49 明顯可看出鋼骨所承受之剪力百分比也隨之提升。

S 系列試體之剪力強度分配百分比如圖 4.43、4.44 所示，試體所承受之彎矩剪力比值不同，鋼骨與 RC 所提供之剪力強度亦有所不同，S2 ($M/V=1.2$ m) 試體在剪應變百分比 75% 時，鋼骨提供之剪力約 25%，而 S3 ($M/V=0.5$ m) 試體在剪應變百分比 75% 時，鋼骨提供之剪力約 42%，當剪應變百分比 100% 時，鋼骨提供之剪力約 77%。

C 系列試體之剪力強度分配百分比如圖 4.45、4.46 所示，C2 ($M/V=1.2$ m) 試體在剪應變百分比 75% 時，鋼骨提供之剪力約 60%，而 C4 ($M/V=0.2$ m) 試體在剪應變百分比 75% 時，鋼骨提供之剪力約 90%。

R 系列試體之剪力強度分配百分比如圖 4.47~4.49 所示，R2 ($M/V=1.95$ m) 試體在剪應變百分比 100% 時，鋼骨提供之剪力約 30%，R3 ($M/V=0.9$ m) 試體在剪應變百分比 100% 時，鋼骨提供之剪力約 55%，R4 ($M/V=0.27$ m) 試體在剪應變百分比 50% 時，鋼骨提供之剪力約 69%。

藉由觀察圖 4.43~4.49，發現受彎矩剪力聯合作用試體之剪力強度分配在同一系列試體中，彎矩剪力比值較小之試體，鋼骨所承受之剪力明顯大於彎矩剪力比值較大之試體，即鋼骨之剪力抵抗越早顯現。

4.5 SRC 開孔梁加載階段之撓度分佈

本試驗受純彎矩破壞之試體，除了量測梁中點 (即是開孔中點處)

之位移外，還在開孔兩端及載重下設測點量測位移變化情形，如圖 3.12 所示，測點之安排乃欲求得 SRC 梁整體之撓度變化及開孔處之撓度變化狀況。其它試體，則量測開孔中點及兩端之位移變化情形，如圖 3.13、3.14 所示，測點之安排乃欲求得 SRC 梁開孔處之撓度變化狀況。撓度分佈繪製方式在受彎矩破壞之試體分成 $1/4 P_y$ 、 $1/2 P_y$ 、 $3/4 P_y$ 、 P_y 、 P_{u1} 及 P_u ；在其他試體分成 $1/4 P_y$ 、 $1/2 P_y$ 、 $3/4 P_y$ 、 P_y 及 P_u ，各階段載重分別繪製一次。各試體撓度分佈如圖 4.51~4.63 所示，圖中 X 軸為以 SRC 梁開孔中心處為原點，兩端為支承處，支承內部為各測點，Y 軸即為測點撓度。

受純彎矩破壞之試體，即為編號 1 之試體，其撓度分佈圖屬於典型 SRC 梁受撓曲作用之變形情形，梁中點撓度最大。因 R1 試體開孔寬度最寬，在極限載重 P_u 時，撓度分佈最小，最早發生破壞。當試體受彎矩剪力聯合作用時，撓曲裂縫先產生，再產生剪力裂縫，開孔處撓度分佈圖最後因受剪力之影響，呈現出明顯之剪力變形，如圖 4.54~4.62 所示。SRC 梁開孔處受剪力作用影響越大之試體，其撓度分佈圖越接近典型 SRC 梁受單點集中載重之變形情況。

4.6 SRC 開孔梁之曲率

依據材料力學之理論，分析梁時，常須區別單純彎曲與不均勻彎曲。單純彎曲指梁在固定彎矩下之彎曲，只發生在梁內剪力為零之區域；不均勻彎矩則指有剪力存在之彎曲，表示沿梁之軸線移動，彎矩也隨之改變。對受單純彎曲區段之梁取一小段 d_x ，變形視為一圓弧，中性軸所對應之弧長為 ds ，如圖 4.64 所示，圖中 O 點為曲率中心，O 點至中性軸之距離為曲率半徑 ρ ，曲率半徑之倒數為曲率 κ ，此段小構件對應之圓心角為 $d\theta$ ，由弧 OAB 得

$$\rho d\theta = ds \quad (4-4)$$

又因曲率半徑之倒數為曲率 κ

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad (4-5)$$

本研究 SRC 開孔梁曲率之量測如圖 3.10 所示，量測 SRC 梁開孔處上下兩支鋁桿間之相對位移，以相對位移之差除以上下鋁桿之距離即為量測區段之相對轉角，相對轉角除以量測長度即為量測區段之平均曲率，圖 4.65、4.66 為試體 C1、R1 之彎矩-曲率圖。圖 4.65 中 C1 試體降伏時之彎矩與曲率分別稱為 M_y 及 ϕ_y ， M_y 定義為試體彎矩-曲率曲線彈性階段之斜率改變起始點，所對應之曲率為 ϕ_y ，亦定義極限彎矩強度 M_u 下降至 80% 為試體之極限狀態，對應之曲率為 ϕ_u 。為表示撓曲延展性，一般採用曲率延展性係數 μ 表示

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (4-6)$$

由圖 4.65、4.66 及表 4.1 所示，受純彎試體之撓曲延展性甚高，其中 C1 試體之曲率延展性係數 μ 大於 R1 試體，明顯可見 C1 試體撓曲延展性較 R1 試體佳，試體降伏進入塑性後箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應較佳，使試體在持續變形下較能維持其強度。

4.7 SRC 開孔梁之剪力變形量

本研究 SRC 開孔梁之剪力變形量 γ ，依據配置於開孔處對角線上之位移計，所量測到開孔處對角線之身長與縮短量 (δ_1 與 δ_2)，經幾何關係換算而得，如圖 4.67 所示，假設其變形為一平行四邊形，

根據平行四邊形對角線伸長或縮短量相等之特性，則可經由平行四邊形簡化之幾何關係推導而得下式

$$[(a + \gamma b)^2 + b^2]^{1/2} = (a^2 + b^2)^{1/2} + \delta_{av} \quad (4-7)$$

其中 a 、 b 分別為開孔處量測區之寬與高， γ 為開孔處之剪力變形， δ_{av} 為平行四邊形對角線伸長量與縮短量差值之半，即 $(\delta_1 - \delta_2)/2$ 。將 (4-7) 式之高次項忽略不計可得

$$\gamma = \frac{D\delta_{av}}{ab} \quad (4-8)$$

其中 D 為開孔處變形前之對角線長度， $D = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。

SRC 開孔梁之 S、C、R 系列試體開孔處剪力變形量如圖 4.68~4.70 所示。SRC 開孔梁試體在進入塑性後，其韌性還是很好，承受之剪力強度並不會急速下降。應用於目前結構構件中，能有效提供預警作用，增加其使用之安全性。

4.8 SRC 開孔梁彎矩剪力聯合作用行為

依據 Darwin (1990) 鋼結構針對梁腹板開孔設計叢書 “Steel and composite beams with web openings”，在鋼骨梁腹板開孔研究中發展出一套完整分析及補強設計準則，鋼骨開孔梁之分析，主要係採計算梁開孔處之撓曲強度及剪力強度，再利用彎矩-剪力交互作用之關係分析開孔梁之安全性，如圖 4.71 所示。圖中之曲線為三次方曲線，為彎矩-剪力交互作用下之鋼骨梁腹板開孔設計公式。Darwin 認為彎矩與剪力同時作用下之腹板開孔梁試體其強度下降，比單獨受到純彎或純剪破壞之腹板開孔梁試體來的多，因彎矩與剪力之互制作用，使得

開孔斷面之彎矩與剪力標稱強度隨著減弱；但幸運的在腹板開孔梁中彎矩-剪力交互作用不顯著，換言之當腹板開孔梁受彎矩與剪力交互作用下，其彎矩與剪力強度並非迅速下降。彎矩與剪力互制之方程式為

$$\left(\frac{M_u}{\phi M_m}\right)^3 + \left(\frac{V_u}{\phi V_m}\right)^3 \leq 1 \quad (4-9)$$

其中

$$\phi=0.9$$

M_u = 開孔中點因數化之彎矩強度

M_m = 開孔中點之最大標稱彎矩強度

V_u = 開孔中點因數化之剪力強度

V_m = 開孔中點之最大標稱剪力強度

鋼骨腹板開孔梁之設計可依此彎矩-剪力交互關係公式，確保開孔位置是否安全。

由試驗結果顯示，試體 S、C、R 系列之彎矩-剪力曲線關係如圖 4.72~4.75 所示，試驗之彎矩-剪力實際值如表 4.2 所示。雖然試體數量不足，亦可見試體 S、C、R 系列之彎矩-剪力曲線關係非三次方曲線，與 Darwin (1990) 彎矩-剪力交互作用之方程式有所不同。因 SRC 開孔梁之剪力傳力機制在目前尚未有完整理論分析架構，對於剪力強度之計算大都採用鋼骨與 RC 之線性疊加。Darwin (1990) 鋼骨腹板開孔梁之最大標稱剪力強度 V_m 計算如下

$$V_m = V_{mb} + V_{mt} \quad (4-10)$$

其中

V_{mb} = 鋼骨腹板開孔下方 T 型斷面標稱剪力容量

V_{mt} = 鋼骨腹板開孔上方 T 形斷面之標稱剪力容量

(4-10)式中之 V_{mb} 與 V_{mt} 計算如下

$$V_{mb} = \alpha_v \times V_{pb} \quad (4-11)$$

$$V_{mt} = \alpha_v \times V_{pt} \quad (4-12)$$

其中

α_v = 鋼骨腹板開孔上 (下) 方 T 形斷面之標稱剪力容量折減係數

$$\alpha_v = \frac{V_{mb}}{V_{pb}} \text{ 或 } \frac{V_{mt}}{V_{pt}} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{\nu + \sqrt{3}} \leq 1 \quad (4-13)$$

V_{pb} = 鋼骨腹板開孔下方 T 形斷面之塑性剪力強度

V_{pt} = 鋼骨腹板開孔上方 T 形斷面之塑性剪力強度

$$V_{pb} \text{ 或 } V_{pt} = \frac{F_y t_w s}{\sqrt{3}} \quad (4-14)$$

其中

ν = 鋼骨腹板開孔上 (下) 方 T 形斷面之縱橫比 = $\frac{a_0}{s}$

a_0 = 鋼骨腹板開孔之寬度

s = 鋼骨腹板開孔上 (下) 方 T 形斷面之深度

若鋼骨腹板開孔有補強時

$$v = \frac{a_0}{s} \quad (4-15)$$

$$\bar{s} = s - \frac{A_r}{2b_f}$$

A_r = 補強肢之斷面積

b_f = 鋼骨翼板之寬度

μ = 補強肢提供之二次彎矩與開孔上 (下) 方 T 形斷面塑性剪力強度與深度乘積之比值

$$\mu = \frac{2P_r d_r}{V_p s} \quad (4-16)$$



其中

P_r = 沿著開孔邊緣補強肢之力

$$P_r = F_y \times A_r \leq \frac{F_y t_w a_0}{2\sqrt{3}} \quad (4-17)$$

d_r = 鋼骨翼板外緣至開孔補強肢中心距離

$V_p = V_{pb}$ 或 V_{pt}

而 RC 之標稱剪力強度計算如下

$$V_n = V_s + V_c \quad (4-18)$$

(4-18)式之 V_s =垂直腹筋之剪力強度

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (4-19)$$

其中

A_v =腹筋之斷面積

f_y =腹筋之降伏強度

d =有效深度

S =腹筋間距

(4-18)式之 V_c =混凝土之剪力強度

若 V_c 為保守式

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4-20)$$



其中

f'_c =混凝土之抗壓強度

b_w =斷面之寬度

若 V_c 為精確式

$$V_c = \left(0.16 \sqrt{f'_c} + 175 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4-21)$$

其中

ρ_w = 鋼筋比

V_u = 極限剪力強度

M_u = 極限彎矩強度

SRC 開孔梁之剪力強度為

$$V_p = V_m + V_n \quad (4-22)$$

試驗結果顯示試體 S、C、R 系列之彎矩-剪力關係曲線並非呈現三次方曲線，原因可能為 SRC 開孔梁之剪力傳力機制在目前尚未有完整理論分析架構，對於剪力強度之計算多用於鋼骨與 RC 之線性疊加，忽略鋼骨與 RC 之合成作用，使剪力強度無法精確分析出，造成剪力強度太保守。

在鋼骨部分，Darwin (1990) 所提之標稱剪力容量折減係數 α_v 是針對純鋼而言，然而 SRC 構件中之混凝土可提供鋼骨肢材良好束制能力，能有效降低鋼骨部分之局部挫屈或整體挫屈發生。在 RC 部分，混凝土之剪力強度分析建議採用精確式，如 (4-21) 式所示，使 SRC 開孔梁之剪力分析能更準確。

第五章 結論與建議

本研究完成 13 組實尺寸鋼骨鋼筋混凝土梁開孔試體進行單向載重試驗，探討在不同開孔形狀與彎矩-剪力作用下之行為。依據試驗結果，得下述之結論與建議：

5.1 結論

1. 受純彎作用之試體，在壓力區混凝土保護層壓碎後，藉由箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應，使試體在持續變形下能維持其強度。
2. 受彎矩與剪力作用之試體，SRC 梁之剪力傳遞機制與鋼骨和鋼筋混凝土剪力傳遞機制有關，在鋼骨部分是由腹板來承受剪力作用，其剪力變形為均勻分佈。在鋼筋混凝土部分受剪力後會產生開裂，混凝土開裂後由於鋼骨之存在，受到鋼骨剪力變形之影響，使得試體達極限強度後，有持續變形，載重不會有突然之變化而緩慢降低。
3. 本試驗受彎矩剪力作用之試體，因彎矩-剪力比值之差異反應出試驗之情況有所不同，比值較大之試體因彎矩作用影響較顯著，箍筋與鋼骨對混凝土之圍束效應較佳，使試體在持續變形下較能維持其強度；比值較小之試體，因剪力作用影響顯著，當剪力裂縫開始擴寬時，強度即開始下降，剪力變形明顯。
4. 本試驗所有試體鋼骨材料性質、斷面尺寸及開孔高度皆相同且開孔位置無偏心皆在斷面之中央處， α 值僅與開孔寬度相

關，試體開孔越寬，強度折減越多，由於 R 系列試體開孔大小較其它試體大， α 值折減越多，相對發生變形也較 S 與 C 系列試體來的明顯。

5. 本 SRC 開孔梁試驗，在載重到達極限強度前，鋼骨與混凝土間之握裹力足以使 SRC 斷面近似平面保持平面。SRC 開孔梁之中性軸變化情形，在彎矩與剪力之影響下，中性軸之升降因其作用而隨之改變。
6. 受彎矩剪力聯合作用試體之剪力強度分配，在同一系列試體彎矩剪力比值較小之試體，鋼骨所承受之剪力比率明顯大於彎矩剪力比值較大之試體，即鋼骨之剪力抵抗越早顯現。
7. SRC 梁開孔之試驗，當開孔處受彎矩與剪力交互作用下，試體彎矩剪力關係曲線，無法符合鋼構腹板開孔之三次方曲線，可能為採用強度疊加法計算 SRC 梁之剪力強度及 SRC 開孔梁之剪力強度無法精確計算。

5.2 建議

1. 本 SRC 開孔梁試驗只針對單向載重，對於 SRC 開孔梁之反覆載重試驗尚待後續之研究。
2. 全斷面塑性應力法已能準確分析出 SRC 開孔梁之撓曲強度，但剪力強度分析目前尚未有完整之理論分析架構，大多採用鋼骨與 RC 規範規定之剪力分析線性疊加，忽略其合成效應。應對 SRC 開孔梁研究能更精確探討其力學行為與強度分析模式。

3. 一般 SRC 開孔補強模式有多種，如鋼骨腹板貼版補強，角鋼水平加勁補強、設水平加勁板、設水平及垂直加勁板以及設垂直與斜向剪力鋼筋補強等方式，可於後續研究探討。



參考文獻

ACI committee 318, (2002), “Building code requirement for structural concrete (ACI318-02) and commentary (ACI318R-02),” American concrete institute.

AISC, (2005), “Specification for structural steel buildings,” American institute of construction.

ASCE Subcommittee on beams with web openings of task committee on flexural members of structural division, (1971), “Suggested design guides for beams with web holes,” Journal of the structural division, ASCE, V. 97, No. ST11, pp. 2707-2727.

Bower, J. E., (1966), “Elastic stresses around holes in wide-flange beams,” Journal of the Structural Division, ASCE, V. 92, No. ST2, pp. 85-101.

Bower, J. E., (1966), “Experimental stresses in wide-flange beams with holes,” Journal of the Structural Division, ASCE, V. 92, No. ST5, pp. 167-186.

Cooper, P. B., Snell, R. R., (1972), “Tests with unreinforced web openings,” Journal of the Structural Division, ASCE, V. 98, No. ST3, pp. 611-632.

Darwin, D., (1990), “Steel and composite beams with web openings,” American Institute of Steel Construction.

Karin, W. N., Acavalos, A, Daniel, H. R., (1967), “Behavior and design of large openings in reinforced concrete beams,” ACI Journal, January, pp. 25-33.

Mansur, M. A., Tan, K. H., Lee, S. L., (1984), "Collapse load of R/C beams with large openings," Journal of the Structural Engineering, ASCE, V. 110, No. 11, pp. 2602-2618.

Mansur, M. A., Tan, K. H., Lee, S. L., (1985), "Design method for reinforced concrete beams with large openings," ACI Journal, ACI, July-August, pp. 517-524.

Mansur, M. A., Tan, K. H., Lee, Y. F., Lee, S. L., (1991), "Piecewise linear behavior of RC beams with openings," Journal of the Structural Engineering, ASCE, V. 117, No. 6, pp. 1607-1621.

PCA, (1999), "Notes on ACI 318-99," Portland Cement Association, pp. 14-23-14-26.

Redwood, R. G., McCutcheon, J. O., (1968), "Beam tests with unreinforced web openings," Journal of the Structural Division, ASCE, V. 94, No. ST1, pp. 1-17.



劉育明 (1995), 「腹板開孔鋼梁之結構行為」, 陳生金教授指導, 國立台灣工業技術學院營建工程技術系碩士論文。

葉木中 (1996), 「腹板開孔鋼梁在單向及反覆荷重下之行為」, 陳生金教授指導, 國立台灣工業技術學院營建工程技術系碩士論文。

蔡克銓, 孔祥嵐, 林克強 (1998), 「鋼骨梁柱交會區受力變形行為與力學模型」, NCREE-98-014, 國家地震工程研究中心報告。

蘇明鴻 (1999), 「鋼骨鋼筋混凝土腹板開孔梁之承載行為」, 許協隆教授指導, 國立中央大學土木工程研究所碩士論文。

內政部營建署 (2001), 「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範(二)」

鋼結構極限設計法規範及解說」。

陳正誠、陳建中（2001），「包覆型鋼骨鋼筋混凝土梁之撓曲行為特性」，中國土木水利工程學刊，第 13 卷，第 2 期，第 263—275 頁。

許協隆、李建輝（2002），「腹板開孔之鋼骨鋼筋混凝土梁反覆載重試驗研究」，中國土木水利工程學刊，第 14 卷，第 4 期，第 581—590 頁。

內政部營建署（2003），「鋼骨鋼筋混凝土工程設計規範及解說」。



表 3.1 純彎試體編號

試體名稱	x_1 (cm)	x_2 (cm)	斷面尺寸 (cm)	鋼骨斷面 (mm)	主筋號數	輔助筋號數	箍筋號數
N1	145	50	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
S1	145	50	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
C1	145	50	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
R1	145	50	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3

1. x_1 、 x_2 之定義詳圖 3.1

2. N：未開孔對照組

S：開方孔

C：開圓孔

R：開長方孔

表 3.2 彎矩-剪力聯合作用之開孔試體編號

試體 名稱	x ₁ (cm)	x ₂ (cm)	x ₃ (cm)	斷面尺寸 (cm)	鋼骨斷面 (mm)	主筋 號數	輔助筋 號數	箍筋 號數
S2	120	30	150	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
S3	50	20	200	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
S4	20	20	80	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
C2	120	30	150	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
C3	40	20	100	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
C4	20	20	175	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
R2	195	30	165	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
R3	90	40	165	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
R4	27	27	80	30×50	H300×150×6.5×9	#8	#6	#3
x ₁ 、x ₂ 、x ₃ 之定義詳圖 3.2								

表 3.3 混凝土配合比例設計表

設計 強度	21.4 MPa	細粒料細度模數 FM	2.70
坍度	150 mm	細粒料面乾內飽和比重	2.64
水膠比	0.625	粗粒料面乾內飽和比重	2.65
粒料最大 粒徑	20 mm	空氣含量	1%
水泥比重	3.15	水泥廠牌	台泥



表 3.4 混凝土標稱及實際抗壓強度

標稱強度 (MPa)	28 天強度 (MPa)	56 天強度 (MPa)	實驗期間強度 (MPa)
21.4	18.9	21.0	24.9

表 3.5 鋼骨、鋼筋及箍筋實際降伏與極限強度

	規格	降伏強度 (MPa)	極限強度 (MPa)
鋼骨翼板	H300×150×6.5×9	330.2	434.7
鋼骨腹板	H300×150×6.5×9	382.1	441.1
主筋	#8	475.6	623.5
輔助筋	#6	537.9	650.9
箍筋	#3	419.7	532.4



表 4.1 C1 及 R1 試體之撓曲強度與撓曲延展性

試體名稱	M_y (kN-m)	$0.8M_u$ (kN-m)	ϕ_y (1/m)	ϕ_u (1/m)	μ
C1	380	358	0.0066	0.1970	29.8
R1	415	352	0.0076	0.1609	21.2

表 4.2 試體試驗值

試體名稱	P (kN)	M (kN-m)	V (kN)	M/V (m)
N1	664	481	0	-
S1	635	460	0	-
S2	615	369	308	1.20
S3	598	221	443	0.50
S4	834	111	556	0.20
C1	618	448	0	-
C2	648	389	324	1.20
C3	891	223	557	0.40
C4	842	137	686	0.20
R1	654	474	0	-
R2	484	399	205	1.95
R3	476	239	266	0.90
R4	524	84	312	0.27

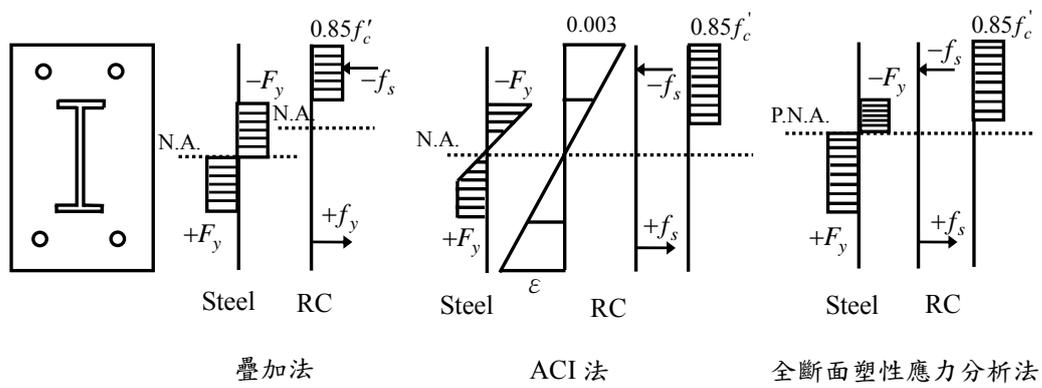


圖 2.1 SRC 梁撓曲強度分析模式之斷面應力分佈



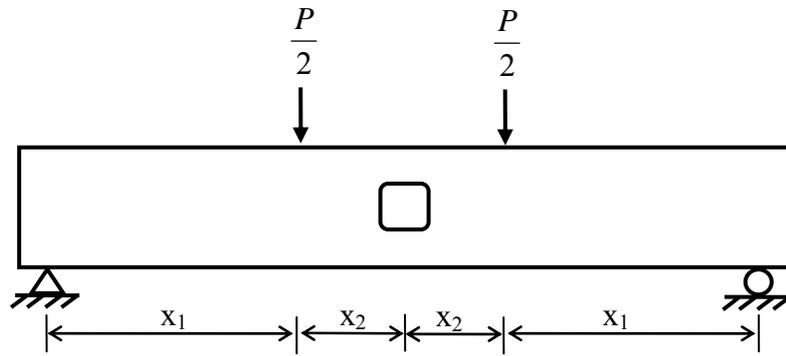


圖 3.1 試體配置圖之一

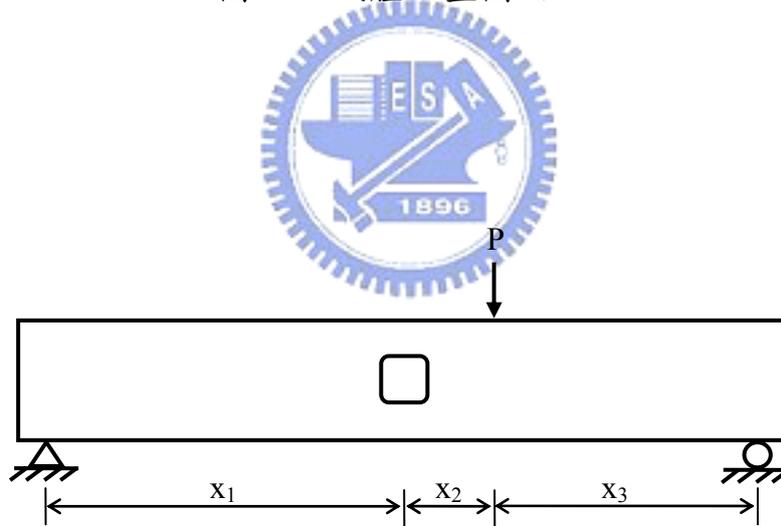
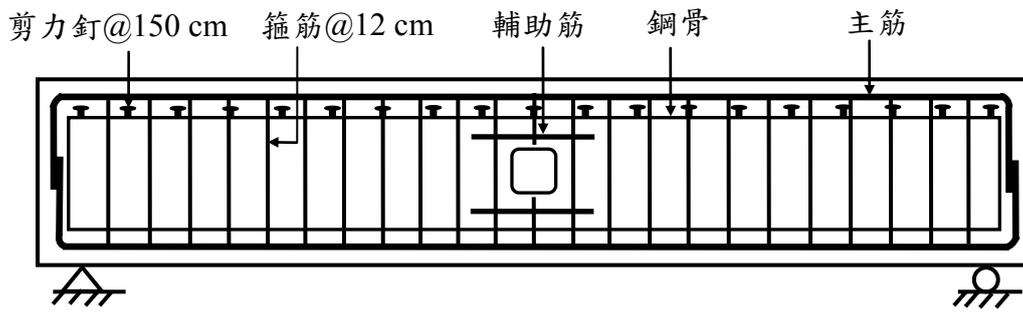
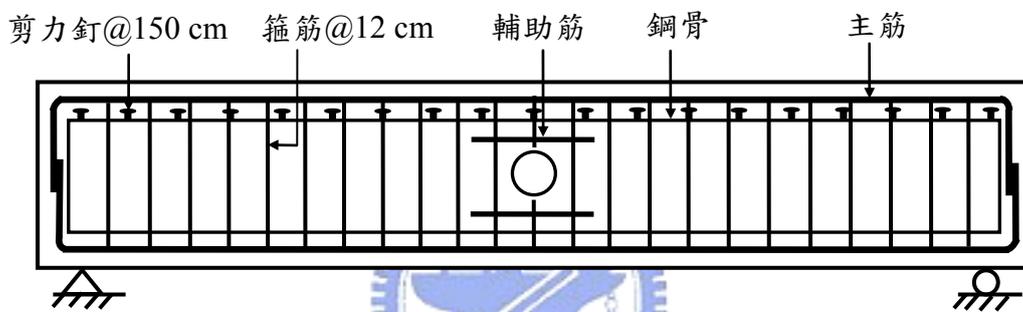


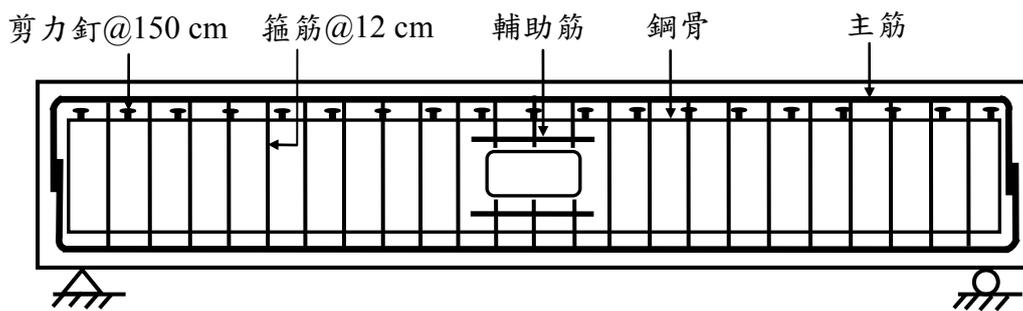
圖 3.2 試體配置圖之二



(a) 開方孔試體



(b) 開圓孔試體



(C) 開長方孔試體

圖 3.3 試體側視示意圖

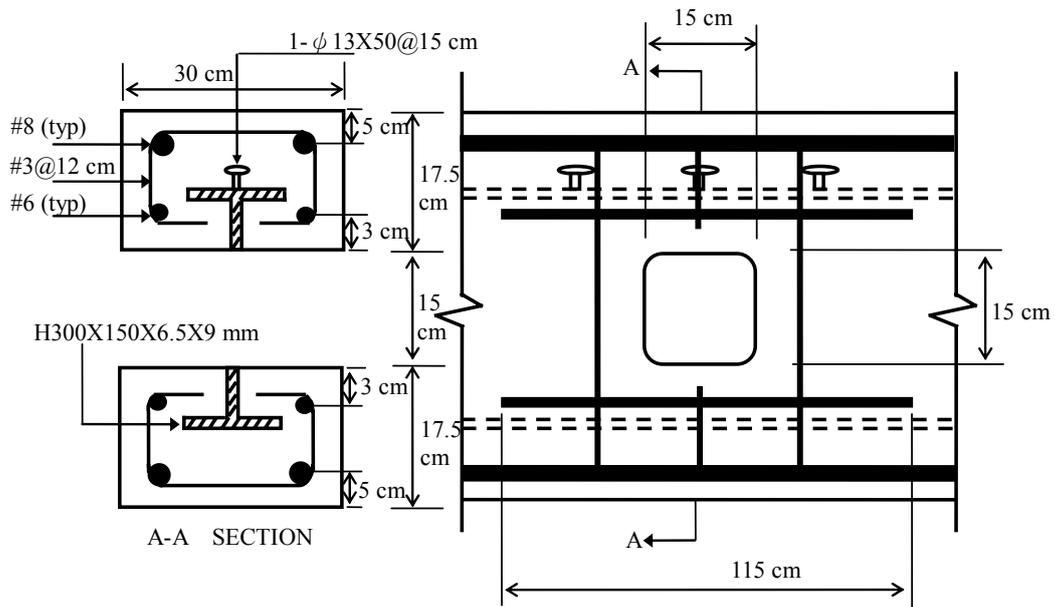


圖 3.4 方形開孔試體斷面圖

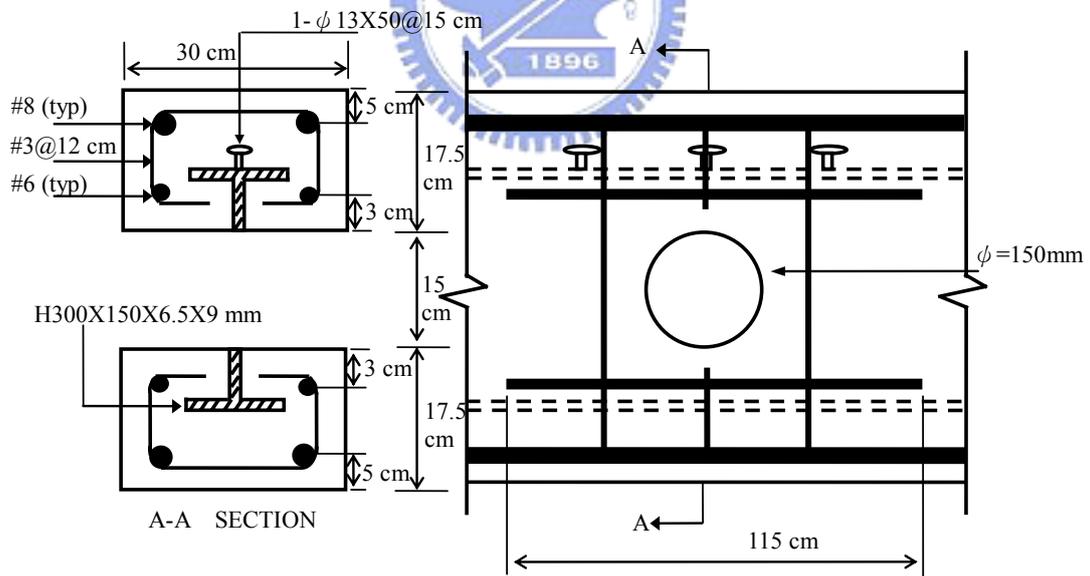


圖 3.5 圓形開孔試體斷面圖

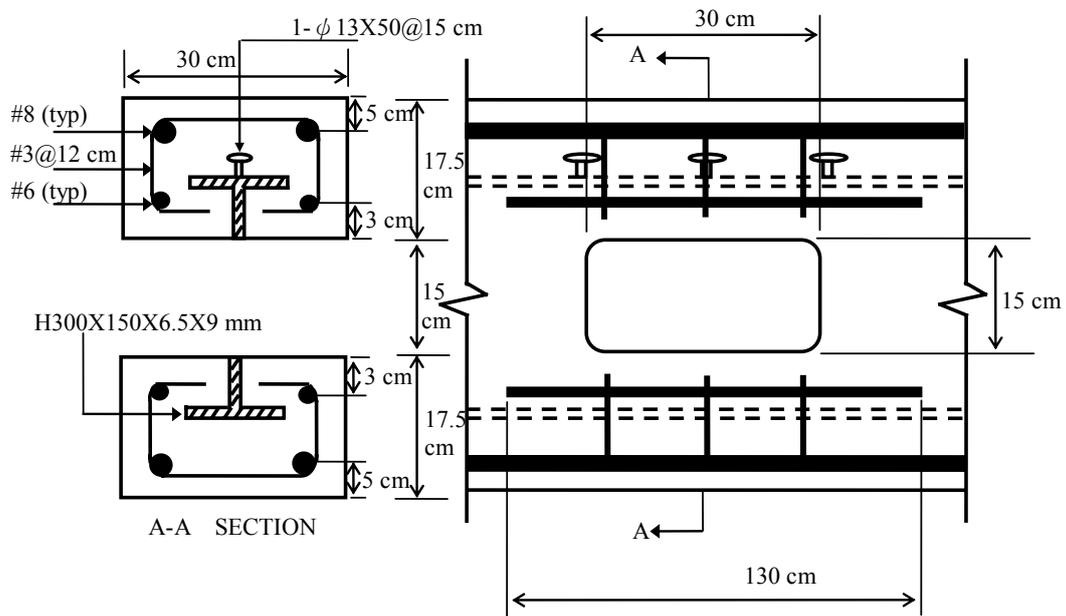


圖 3.6 長方形開孔試體斷面圖

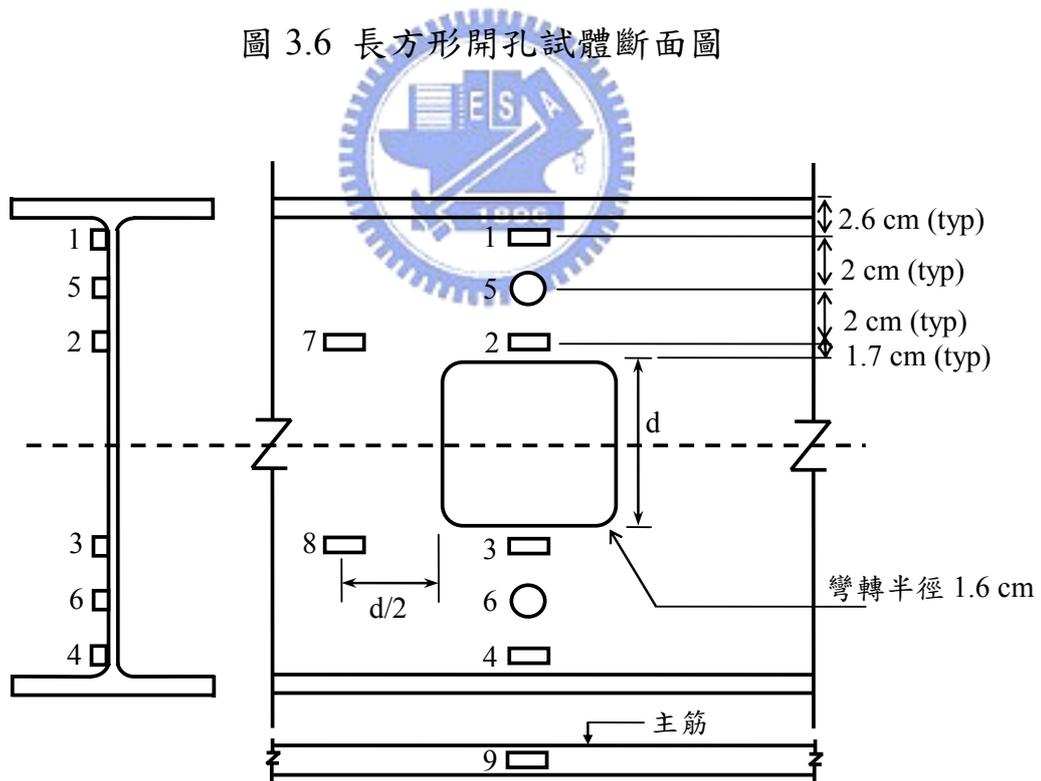


圖 3.7 應變計位置及編號

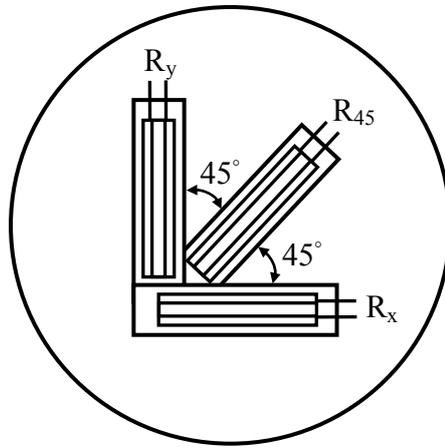


圖 3.8 三軸應變計之位置及編號



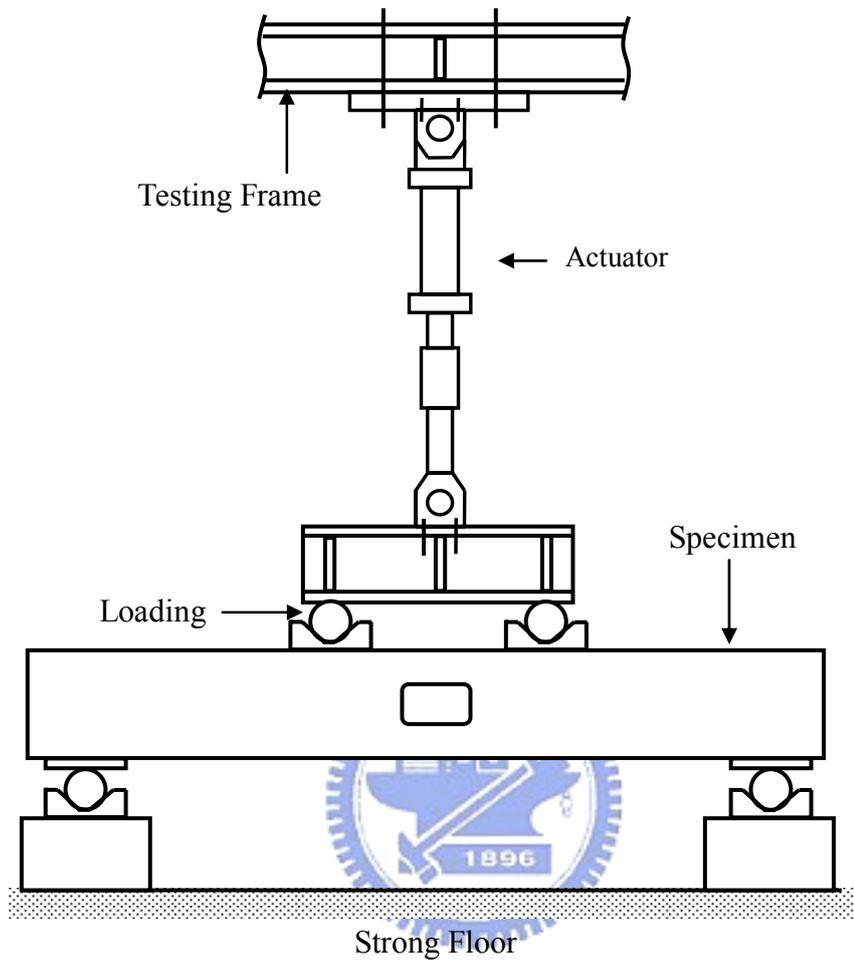


圖 3.9 SRC 梁單向載重試驗配置圖

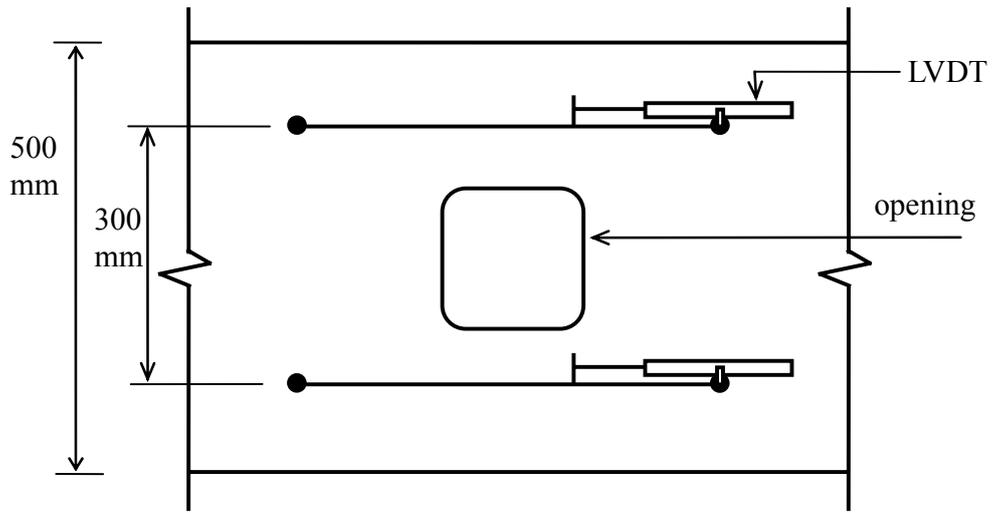


圖 3.10 開孔處量測儀器圖之一

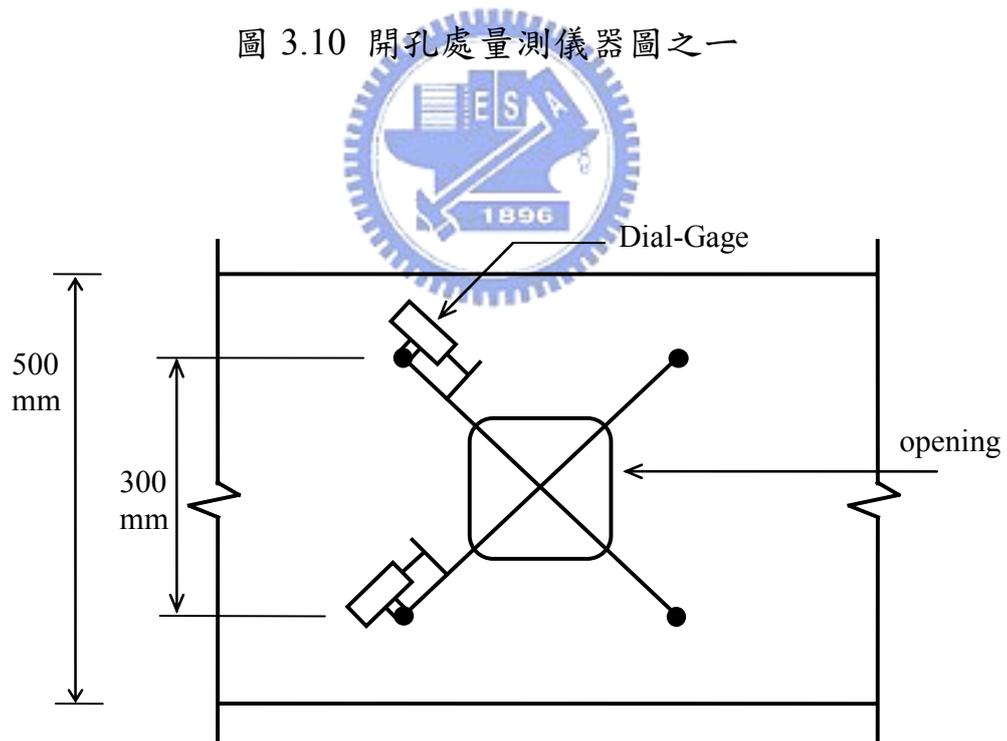


圖 3.11 開孔處量測儀器圖之二

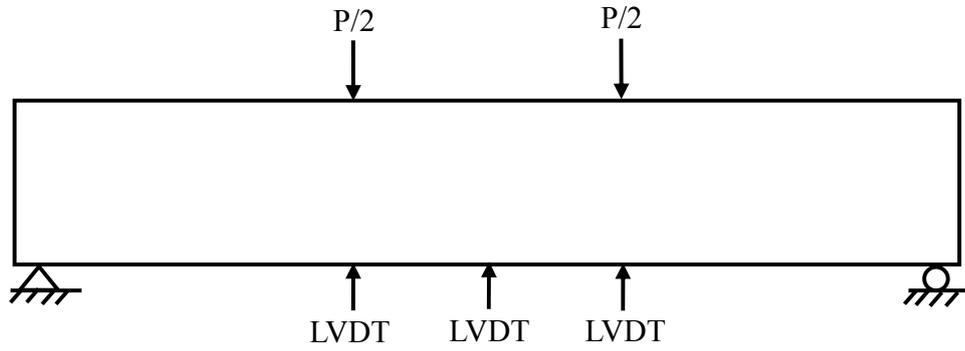


圖 3.12 試體 N1 之位移感應器量測位置圖

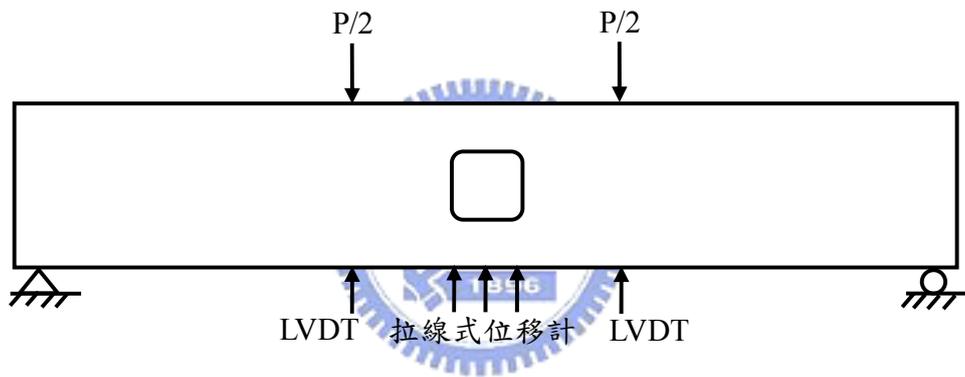


圖 3.13 試體 S1、C1、R1 之位移感應器量測位置圖

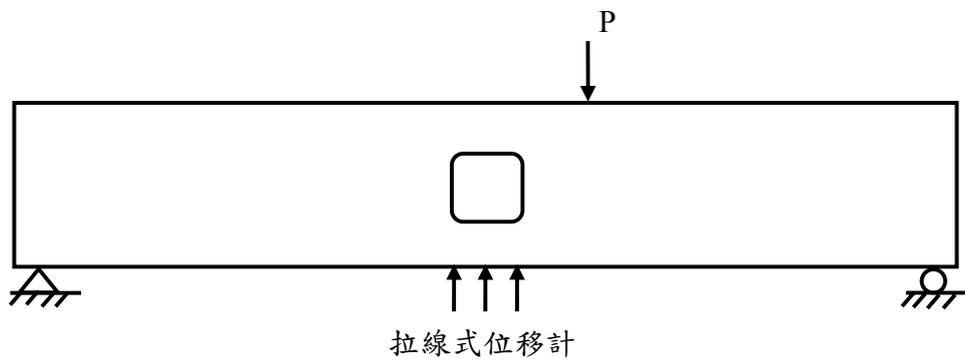


圖 3.14 其他試體之位移感應器量測位置圖

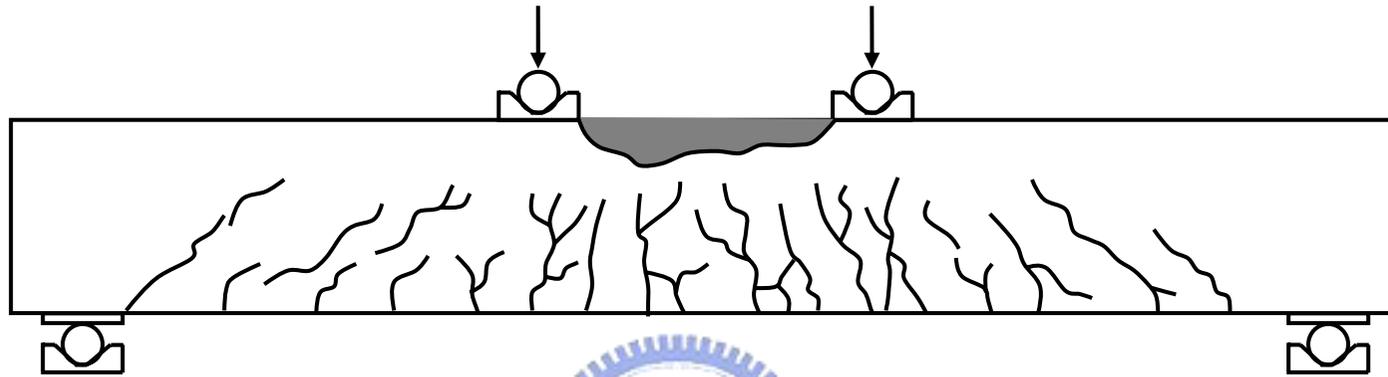


圖 4.1 N1 試體極限載重破壞時之狀態

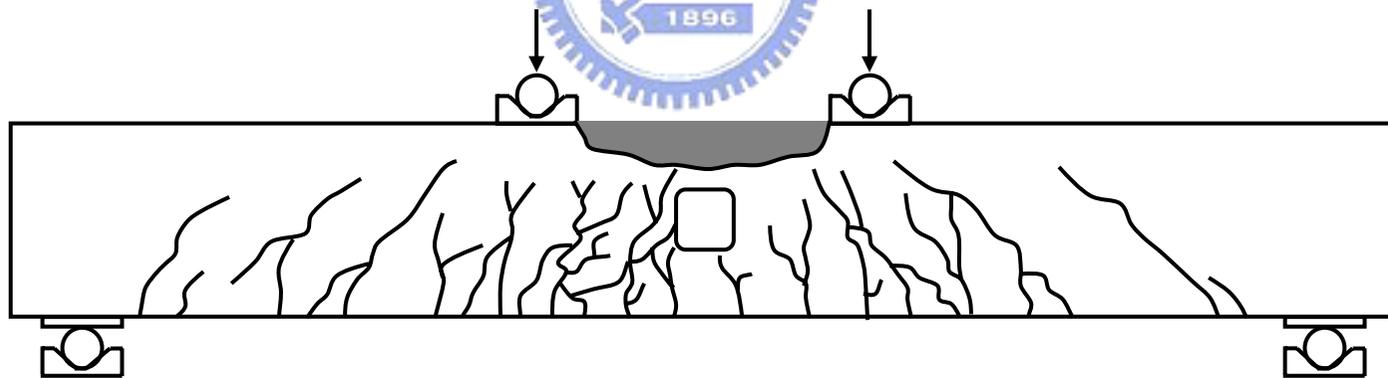


圖 4.2 S1 試體極限載重破壞時之狀態

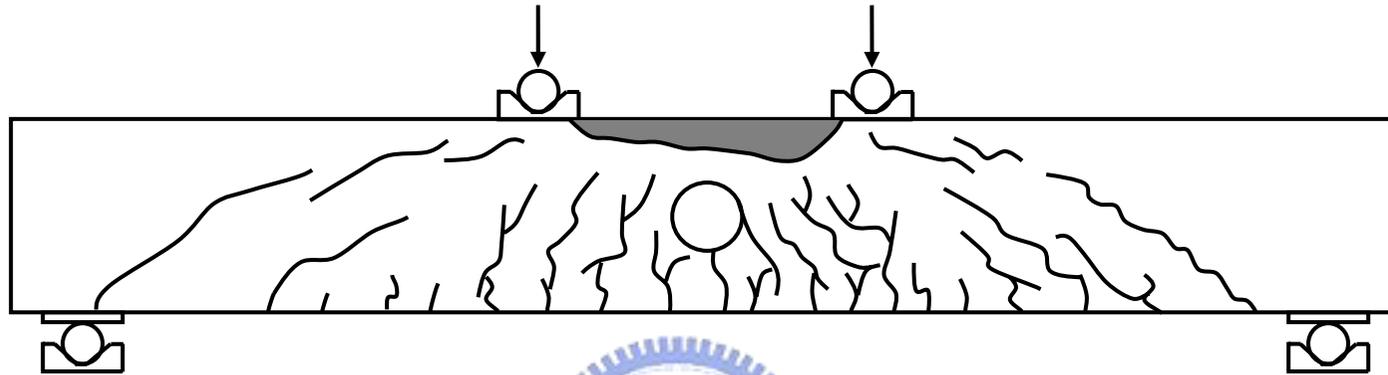


圖 4.3 C1 試體極限載重破壞時之狀態

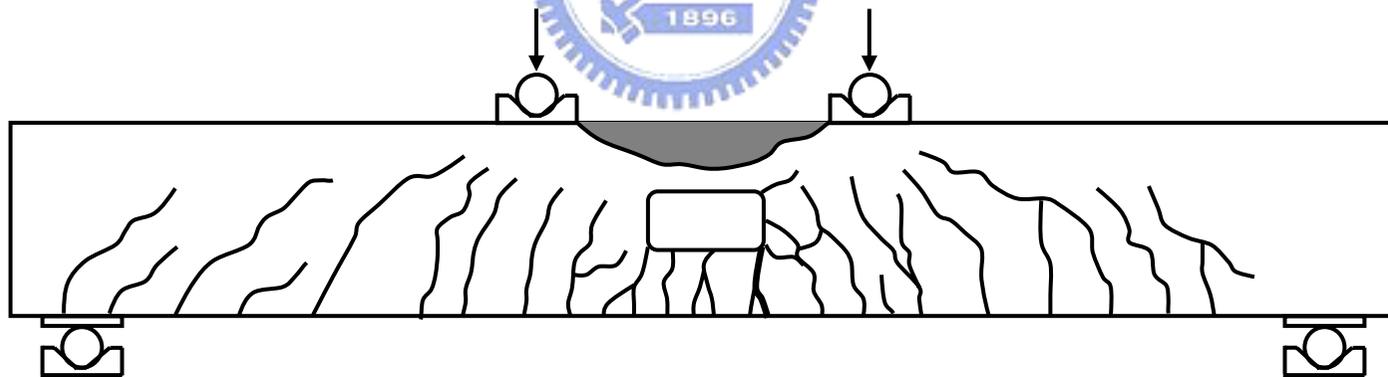


圖 4.4 R1 試體極限載重破壞時之狀態

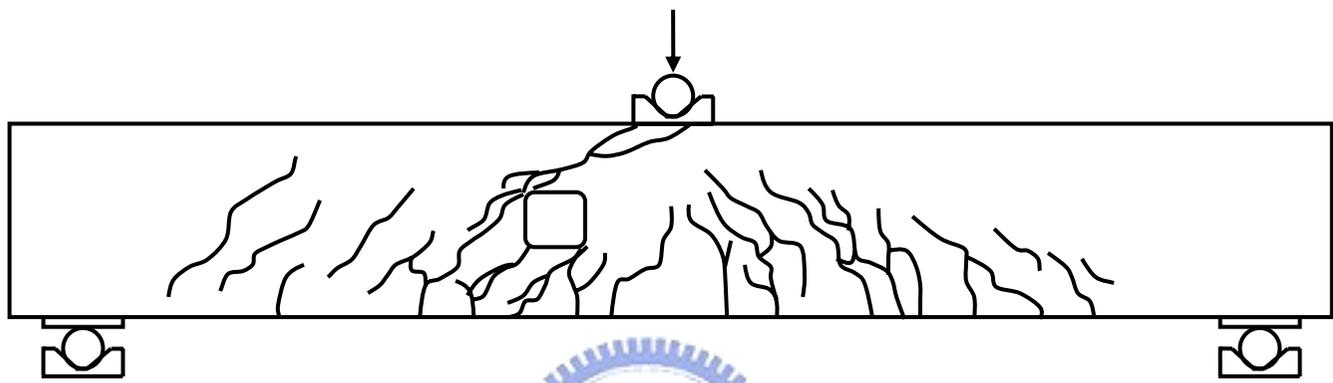


圖 4.5 S2 試體極限載重破壞時之狀態

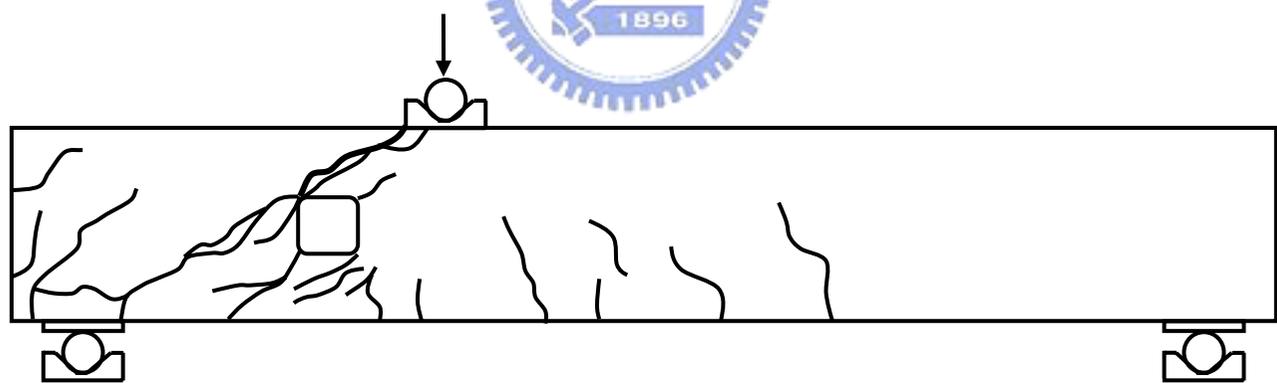


圖 4.6 S3 試體極限載重破壞時之狀態

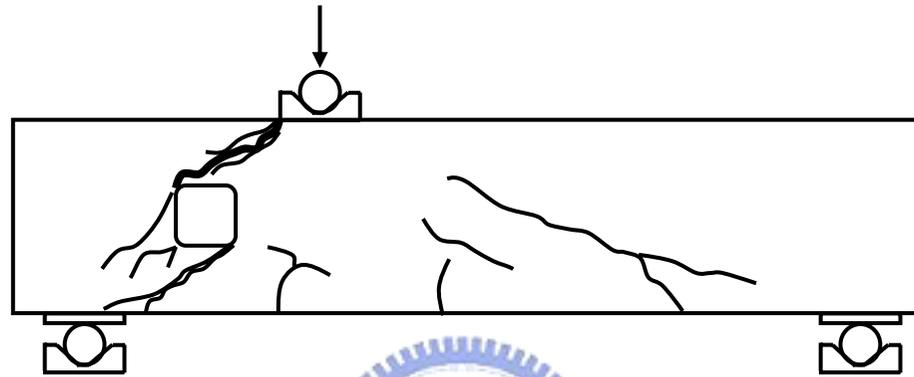


圖 4.7 S4 試體極限載重破壞時之狀態

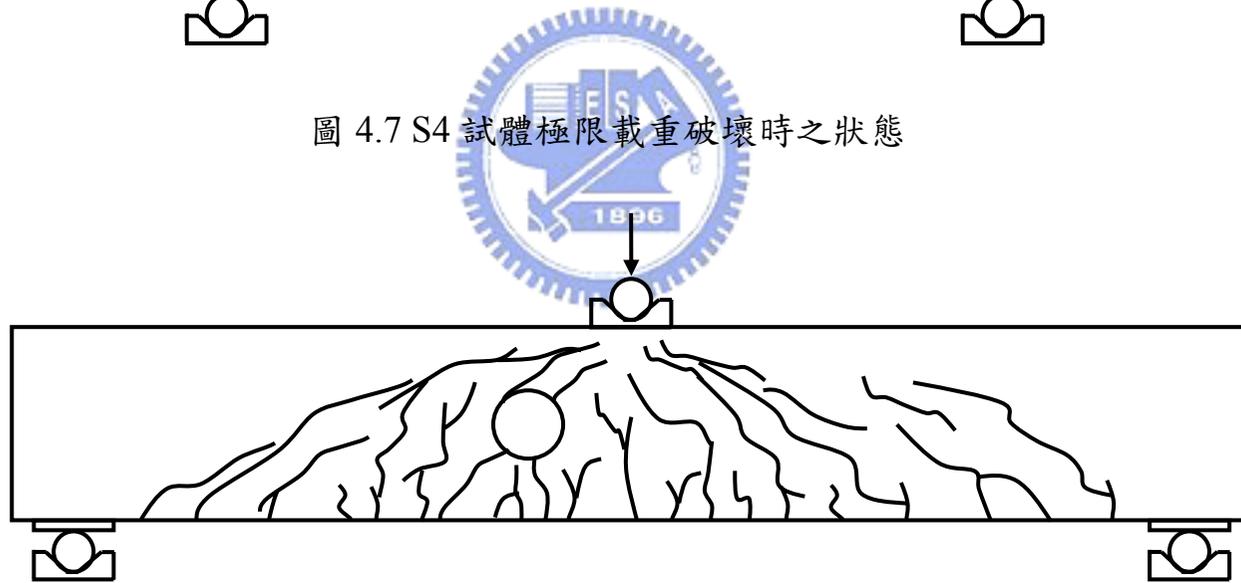


圖 4.8 C2 試體極限載重破壞時之狀態

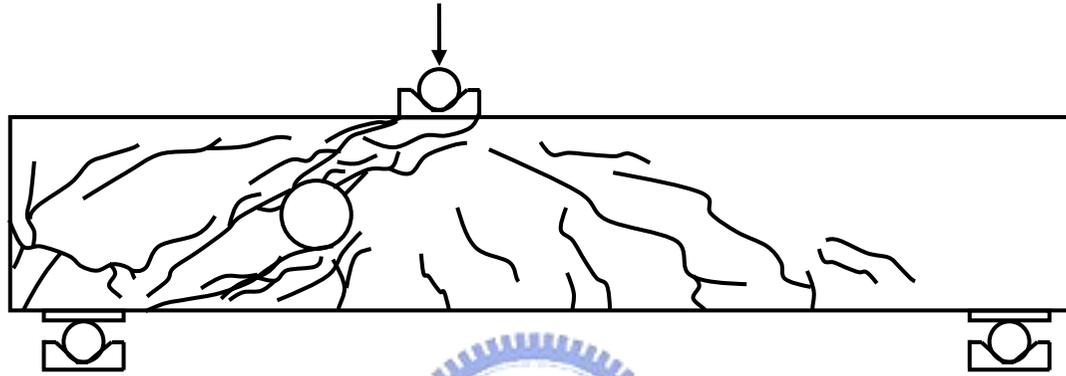


圖 4.9 C3 試體極限載重破壞時之狀態

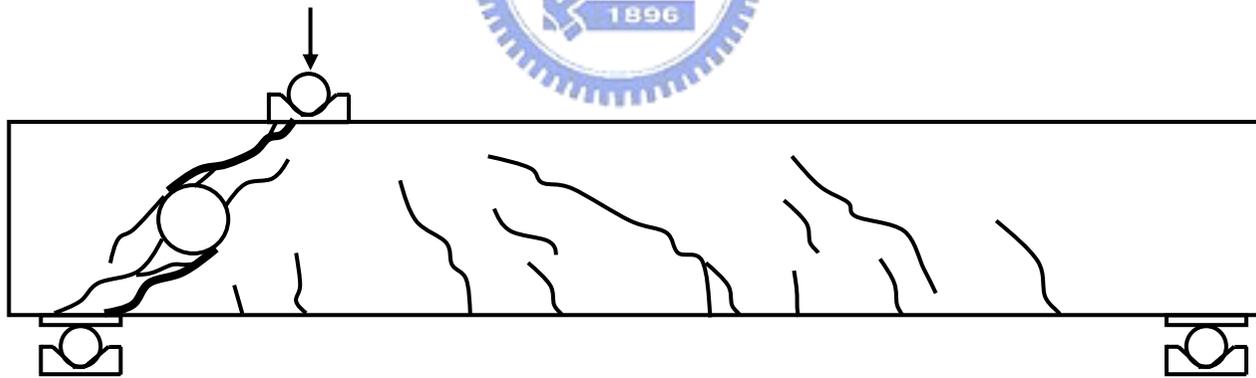


圖 4.10 C4 試體極限載重破壞時之狀態

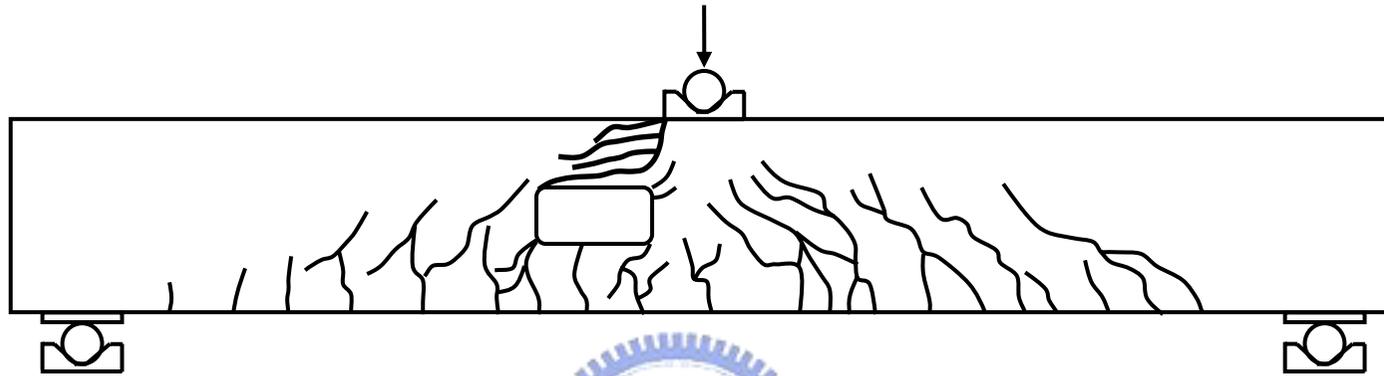


圖 4.11 R2 試體極限載重破壞時之狀態

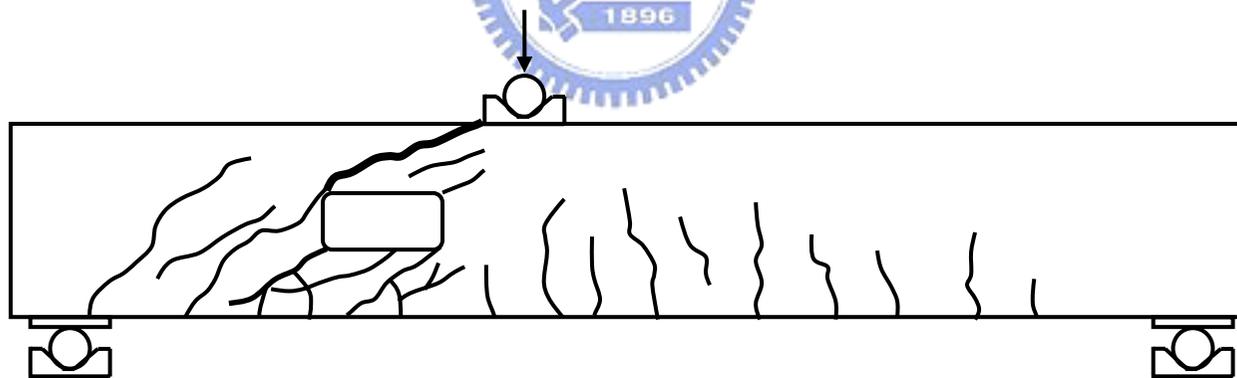


圖 4.12 R3 試體極限載重破壞時之狀態

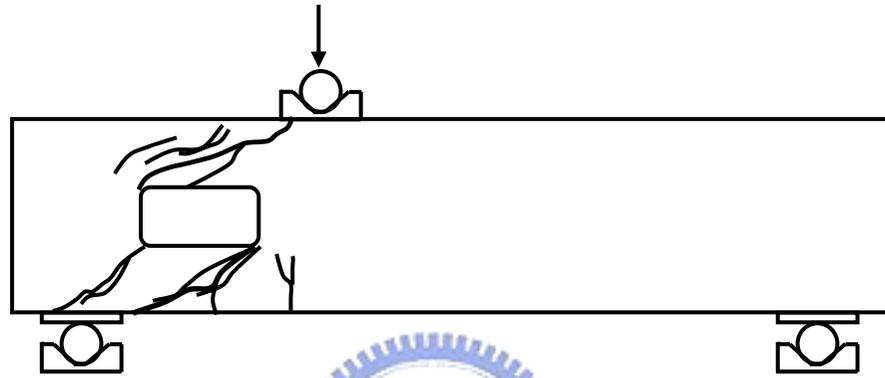


圖 4.13 R4 試體極限載重破壞時之狀態



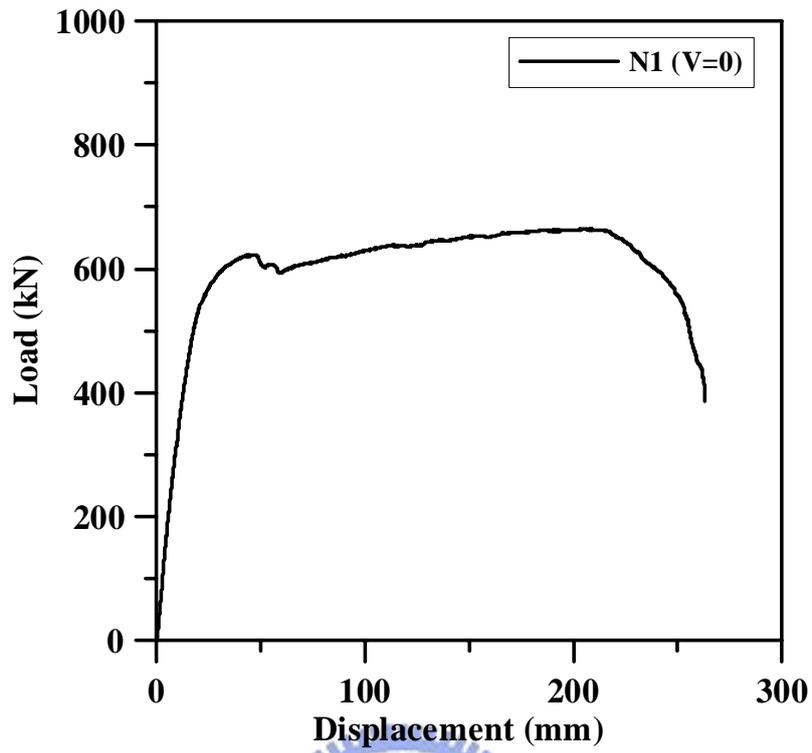


圖 4.14 N1 試體梁中點載重-位移關係

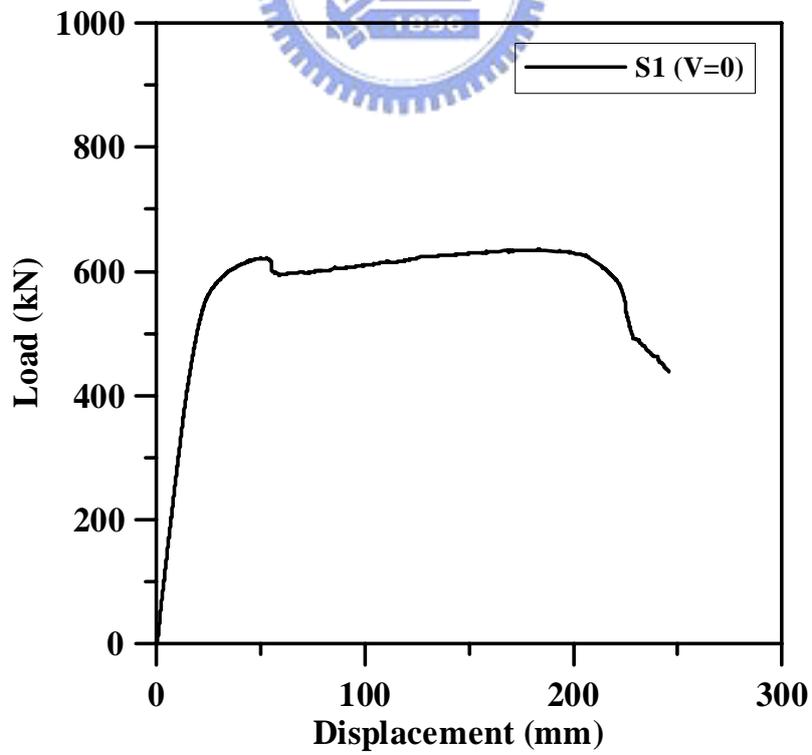


圖 4.15 S1 試體開孔中點載重-位移關係

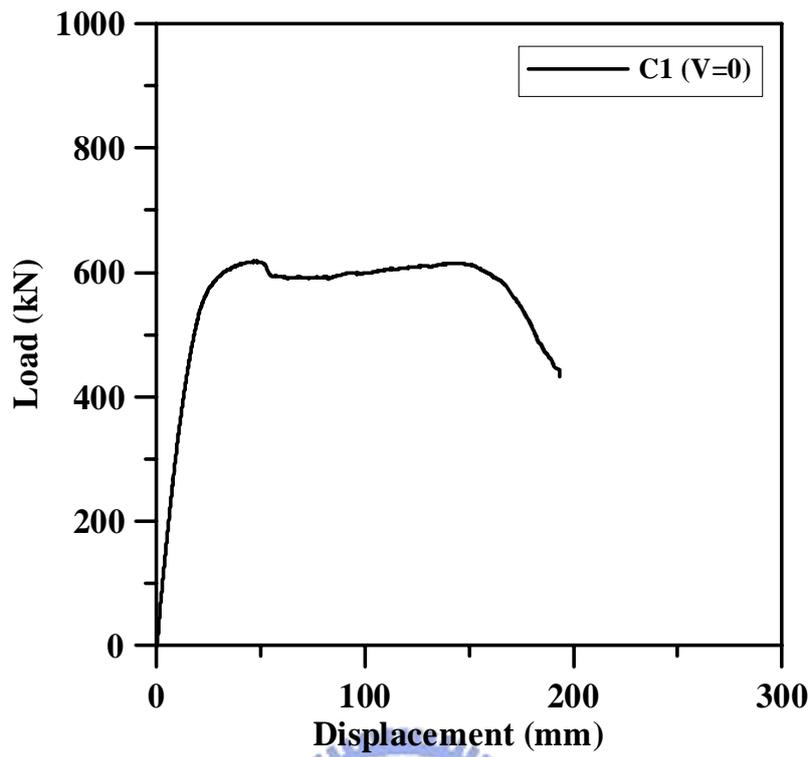


圖 4.16 C1 試體開孔中點載重-位移關係

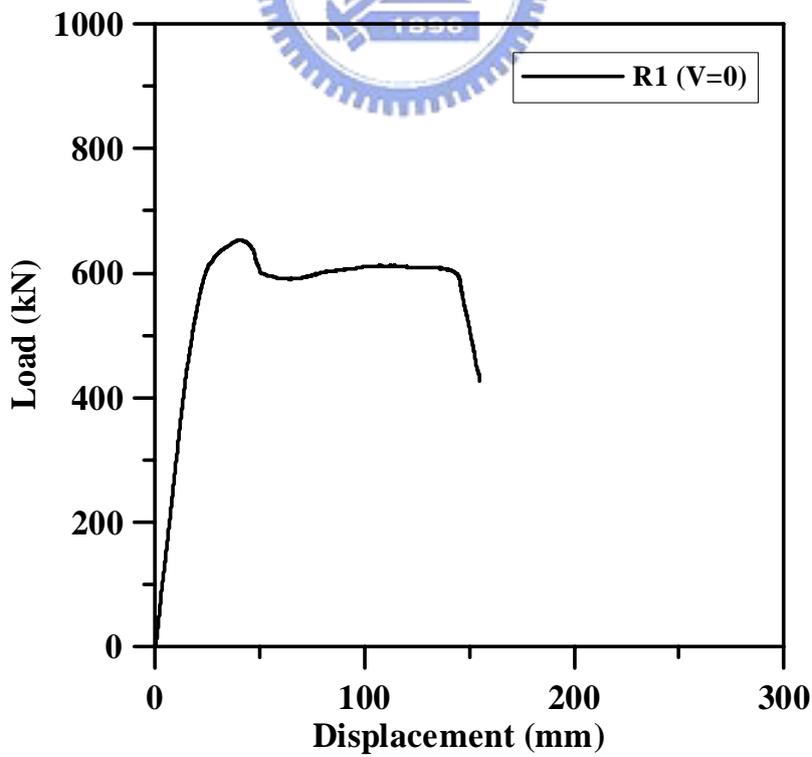


圖 4.17 R1 試體開孔中點載重-位移關係

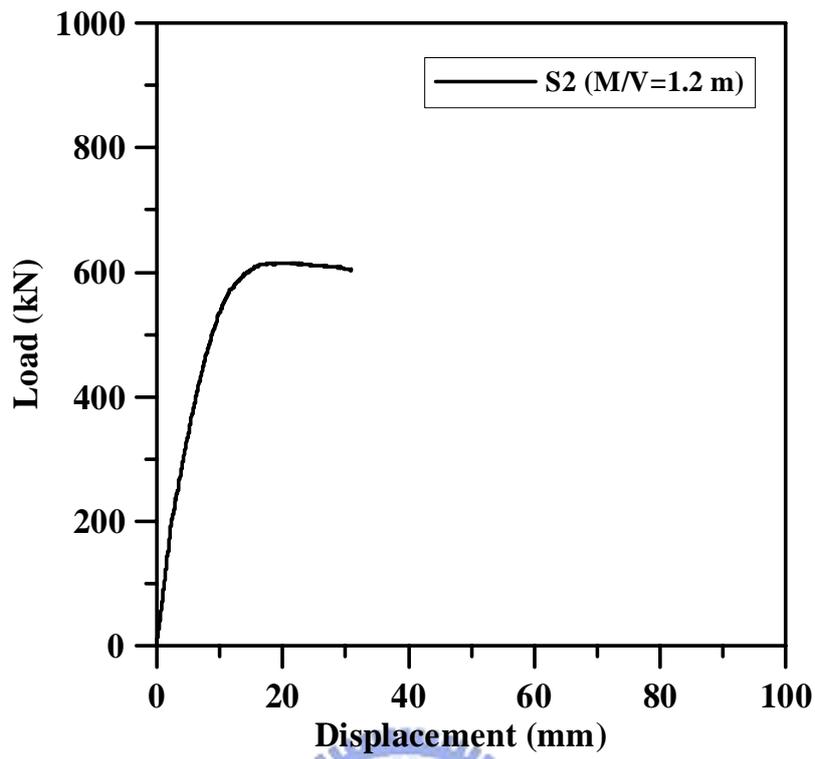


圖 4.18 S2 試體開孔中點載重-位移關係

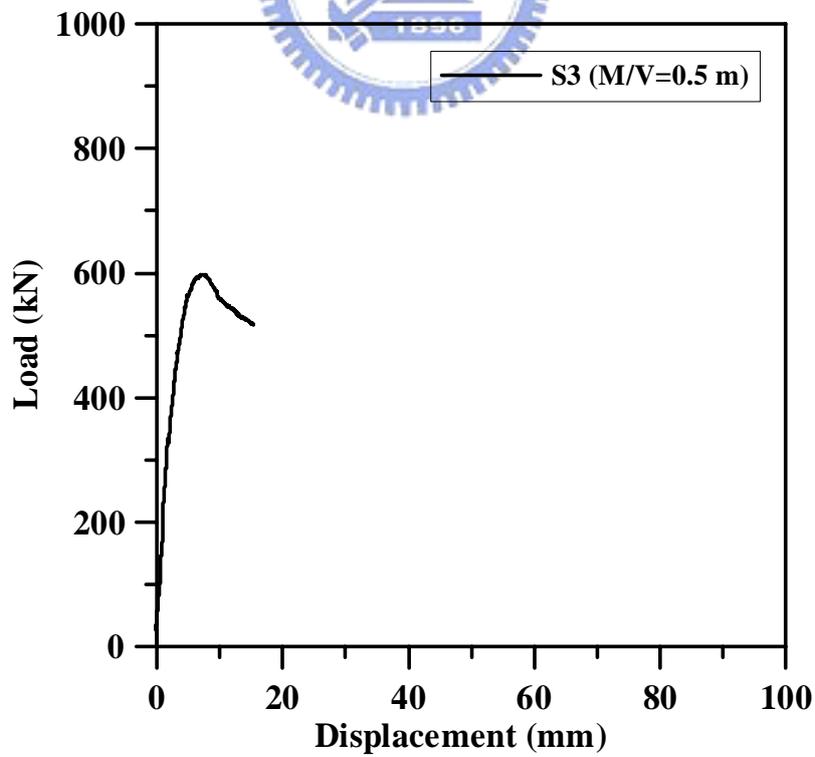


圖 4.19 S3 試體開孔中點載重-位移關係

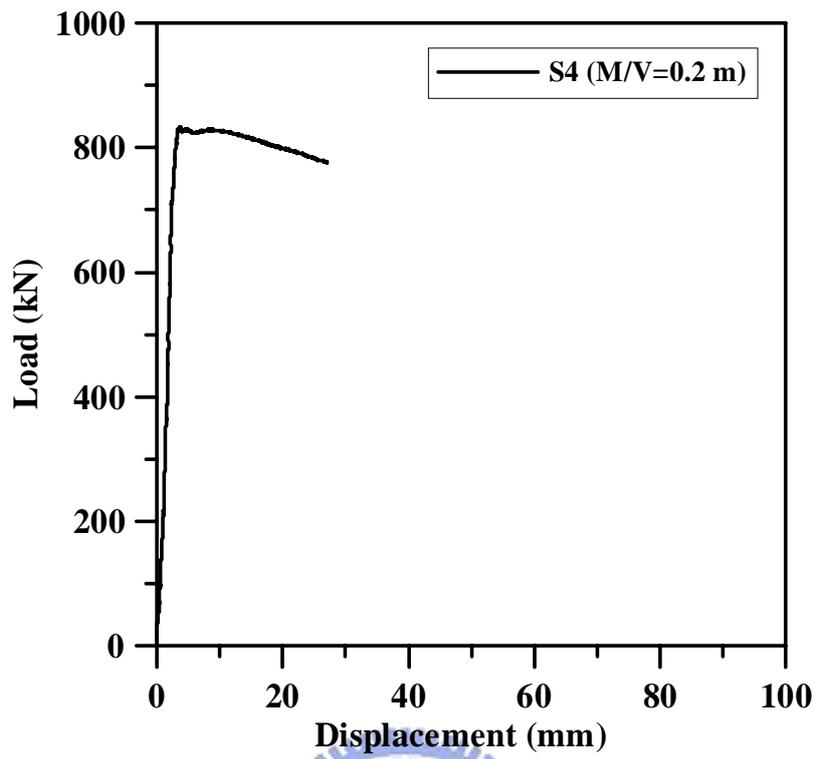


圖 4.20 S4 試體開孔中點載重-位移關係

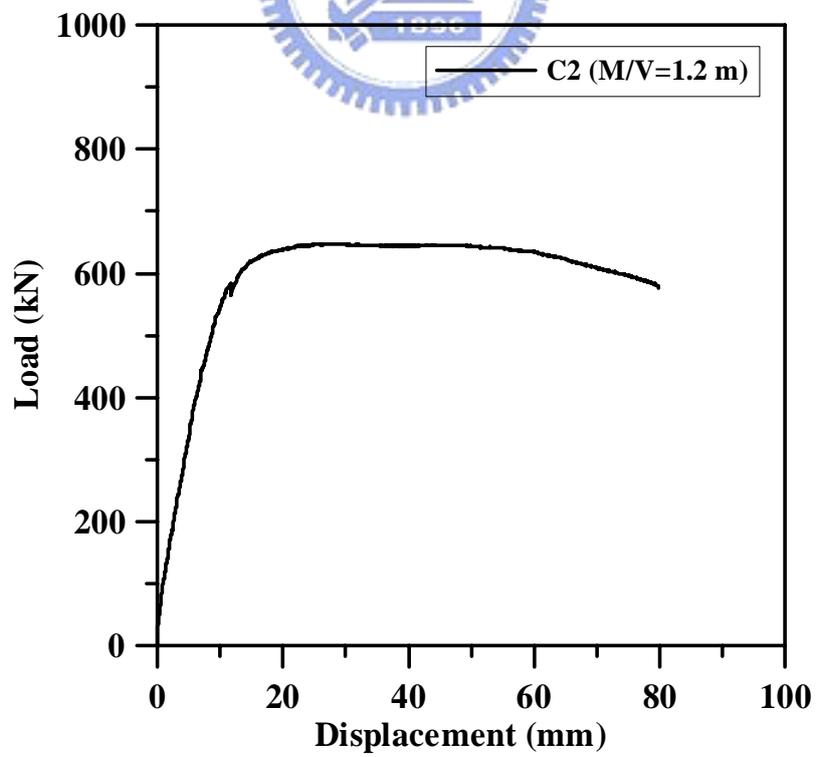


圖 4.21 C2 試體開孔中點載重-位移關係

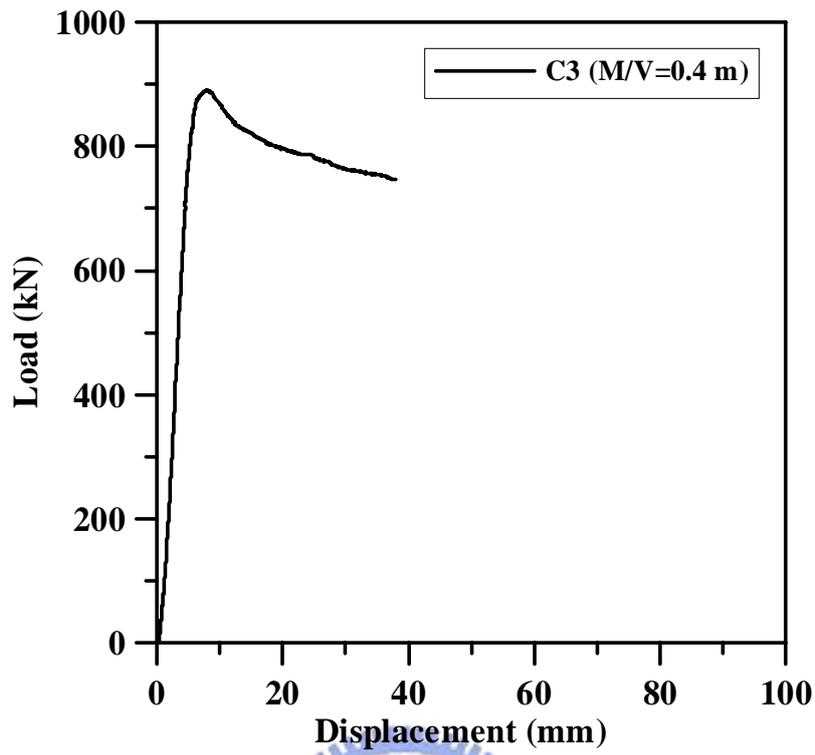


圖 4.22 C3 試體開孔中點載重-位移關係

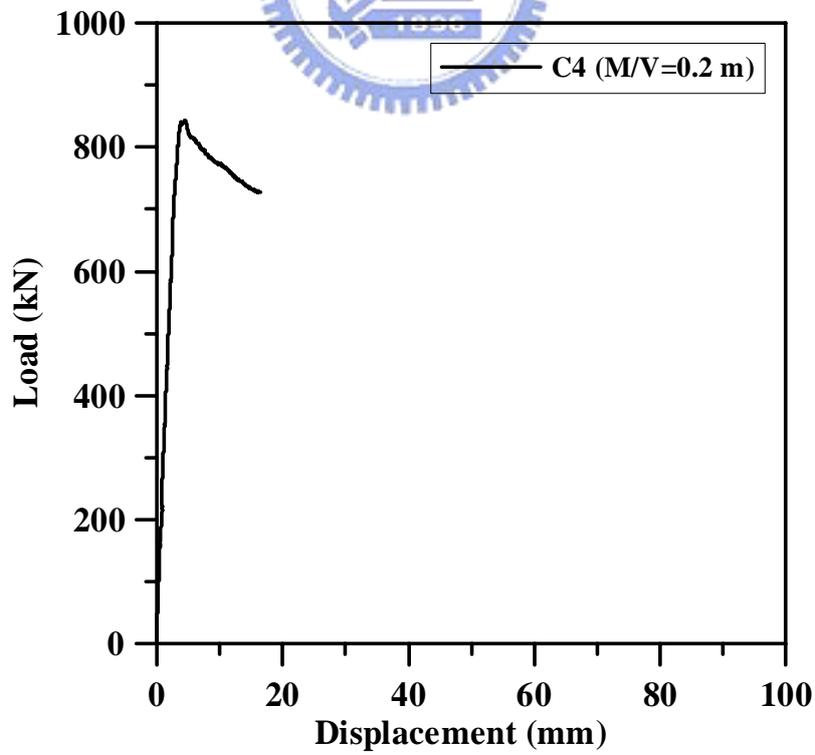


圖 4.23 C4 試體開孔中點載重-位移關係

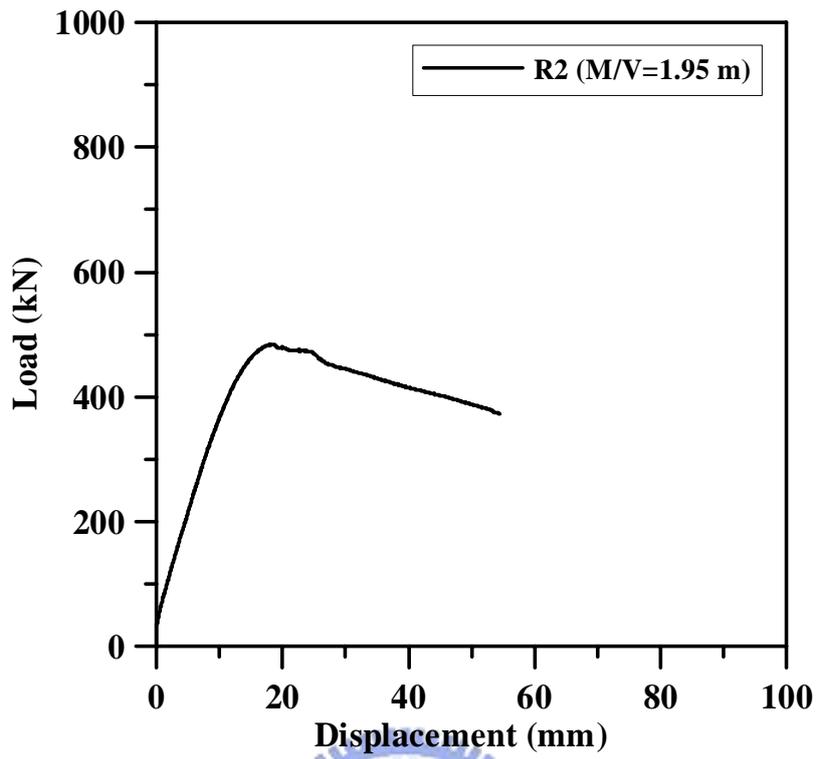


圖 4.24 R2 試體開孔中點載重-位移關係

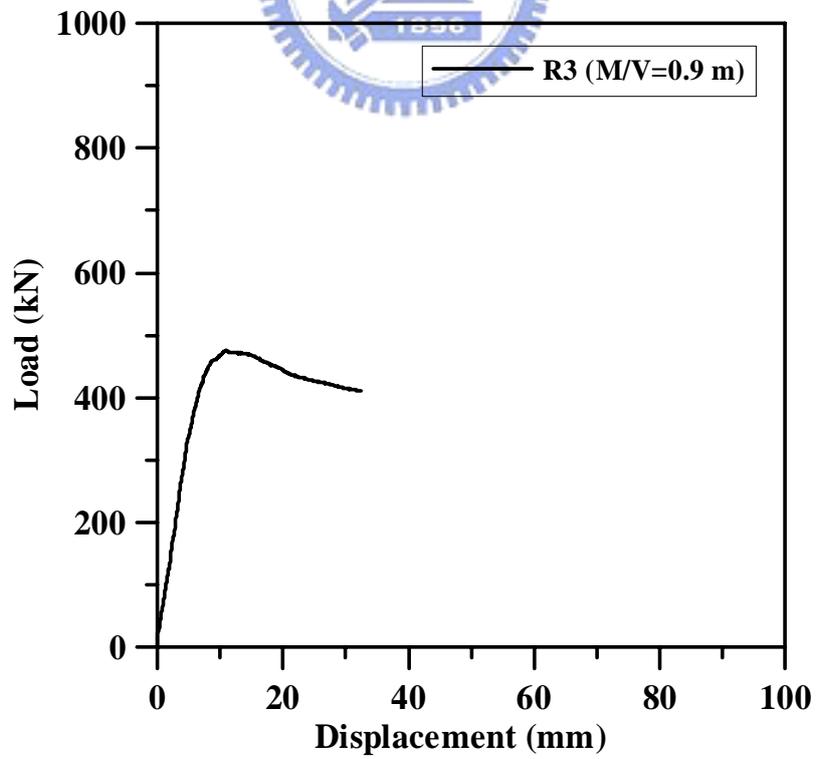


圖 4.25 R3 試體開孔中點載重-位移關係

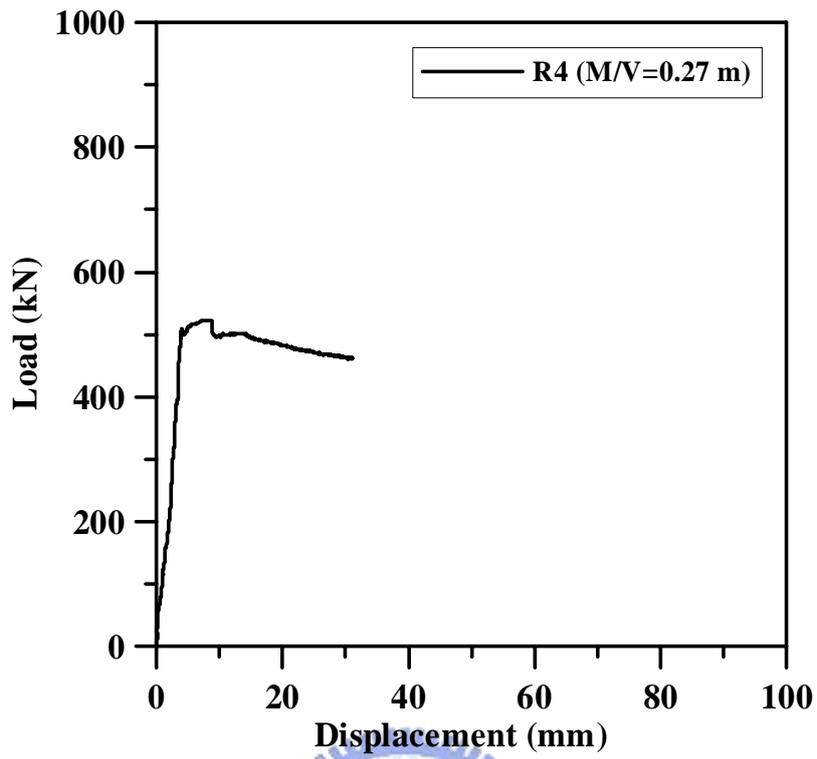


圖 4.26 R4 試體開孔中點載重-位移關係

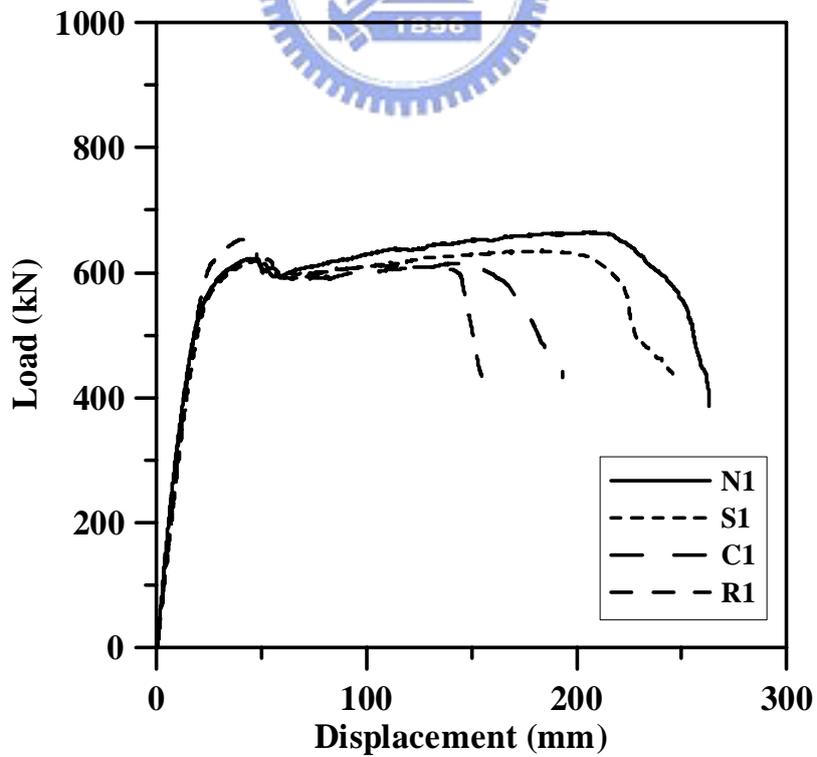


圖 4.27 受彎矩破壞試體開孔中點載重-位移關係

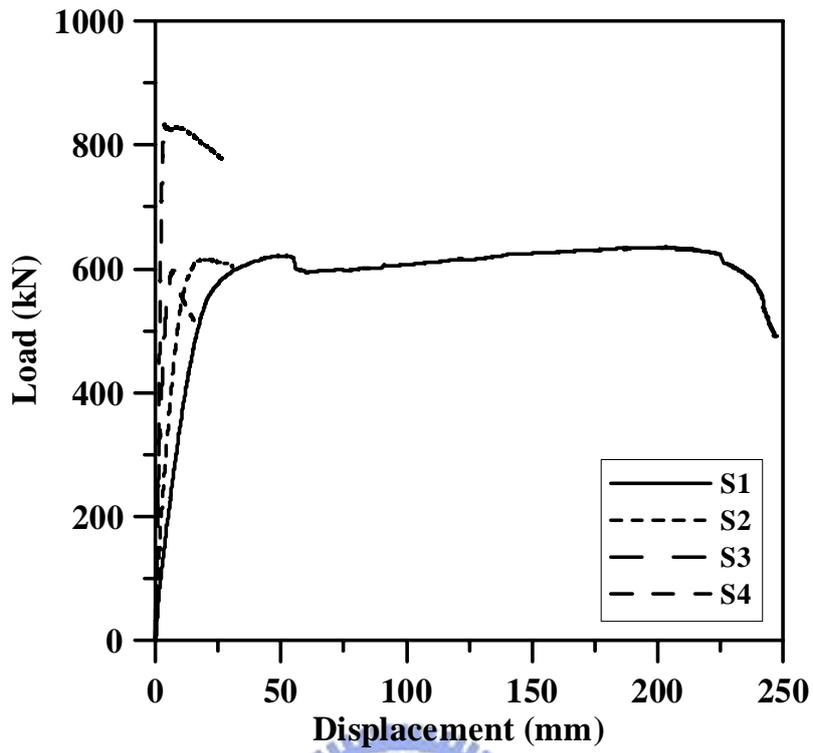


圖 4.28 S 系列試體開孔中點載重-位移關係

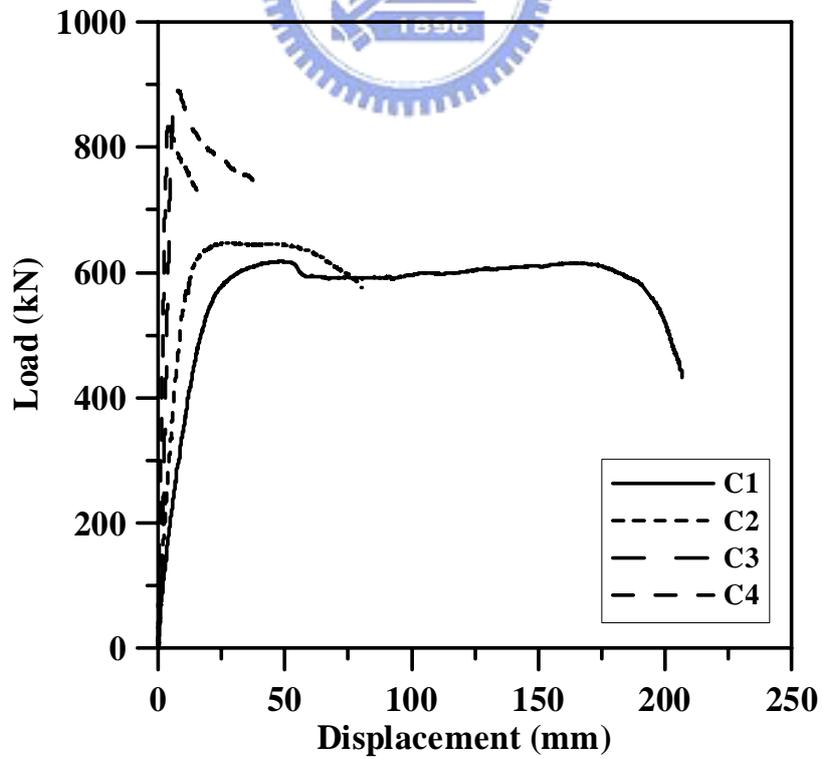


圖 4.29 C 系列試體開孔中點載重-位移關係

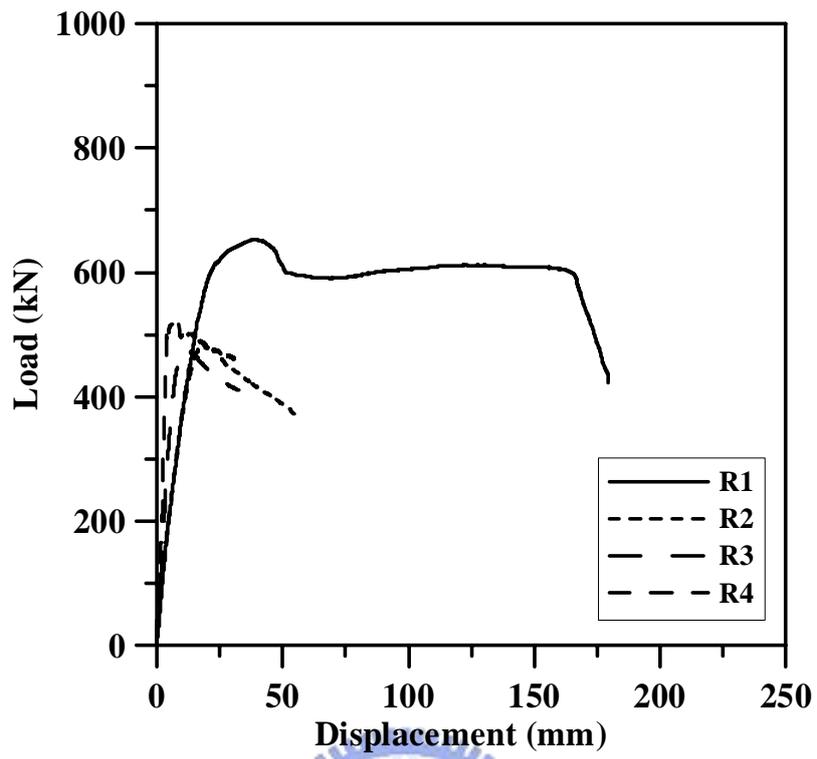
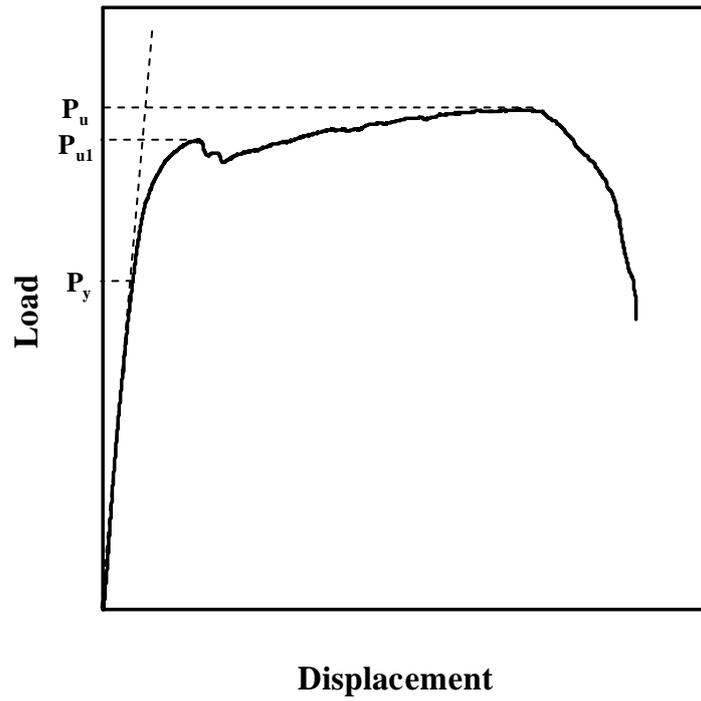
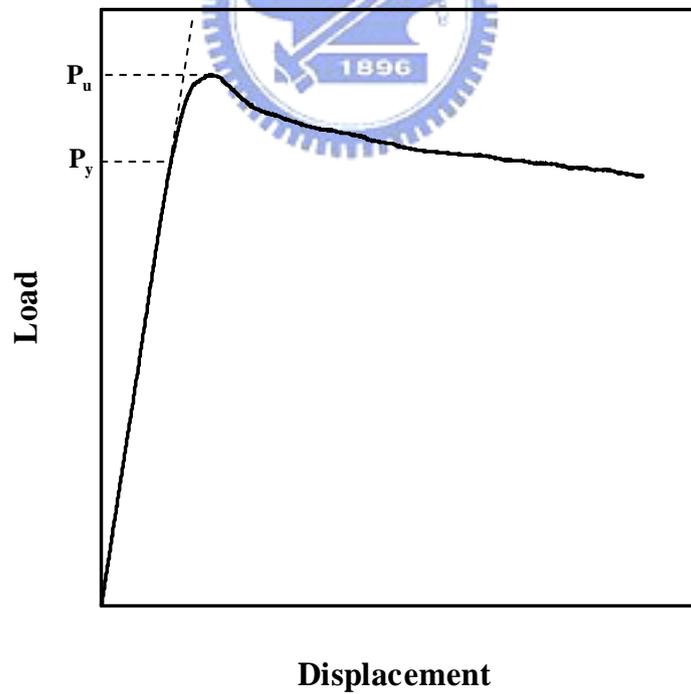


圖 4.30 R 系列試體開孔中點載重-位移關係





(a) 受純彎矩之試體



(b) 受彎矩-剪力聯合作用之試體

圖 4.31 P_y 、 P_{u1} 、 P_u 之定義

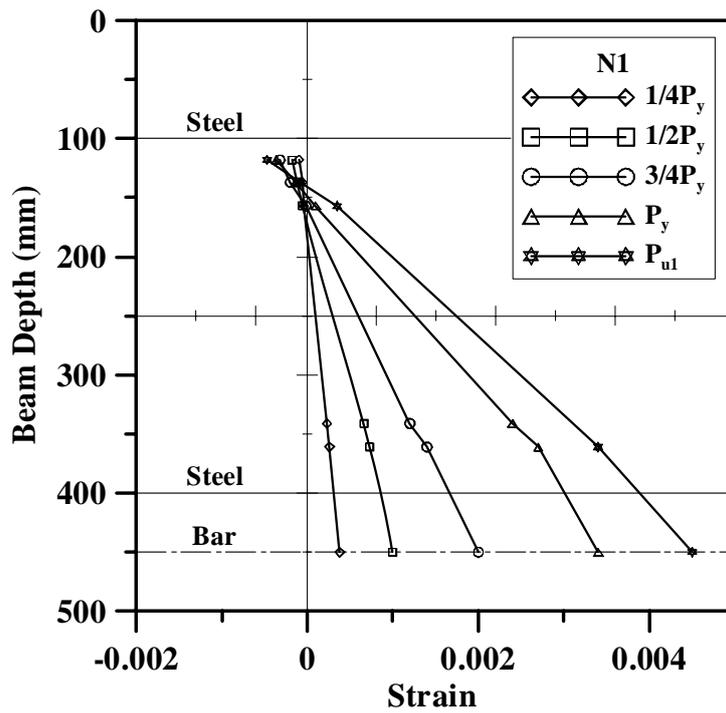


圖 4.32 N1 試體不同載重下之斷面應變分佈

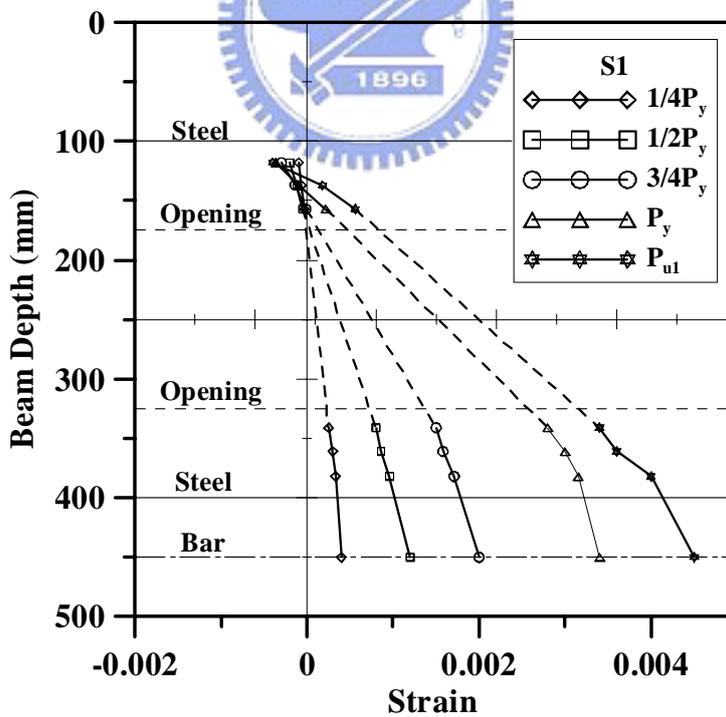


圖 4.33 S1 試體不同載重下之斷面應變分佈

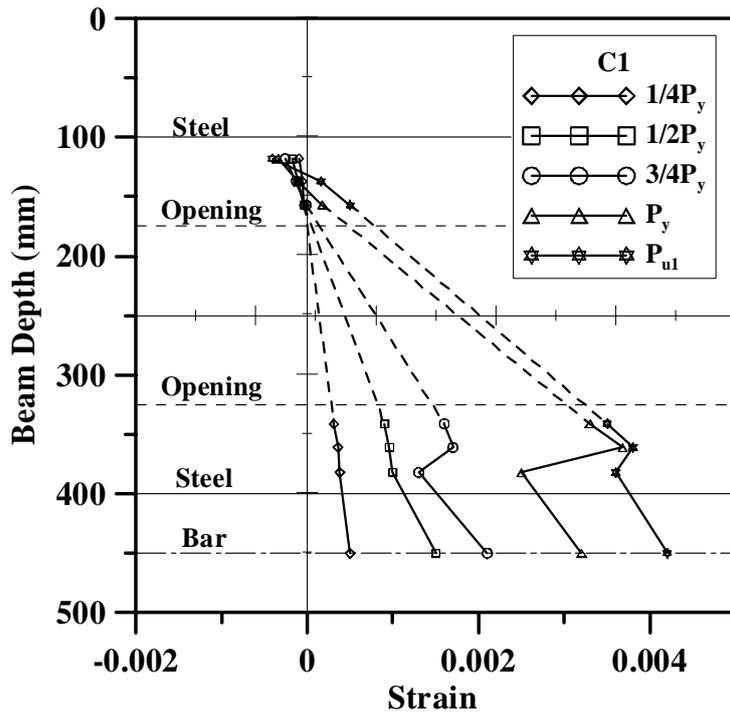


圖 4.34 C1 試體不同載重下之斷面應變分佈

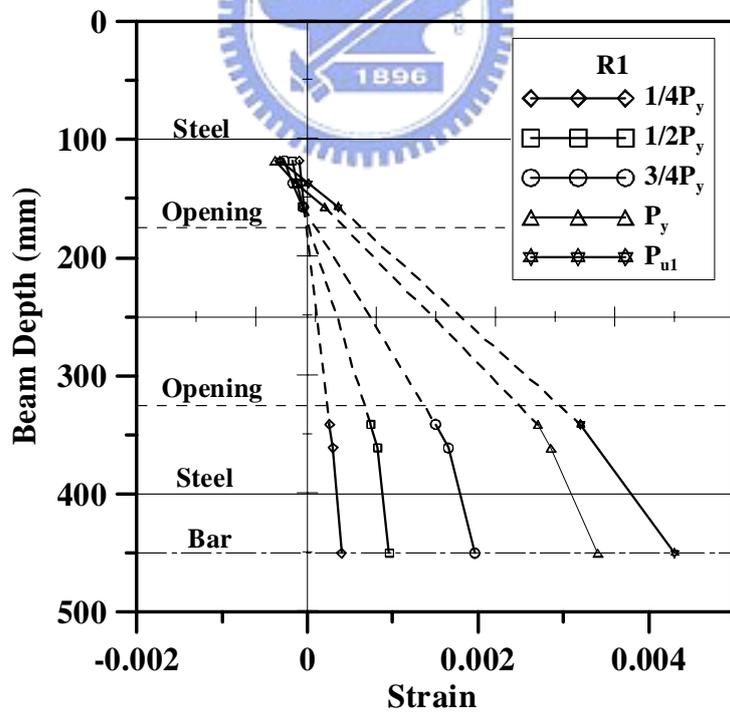


圖 4.35 R1 試體不同載重下之斷面應變分佈

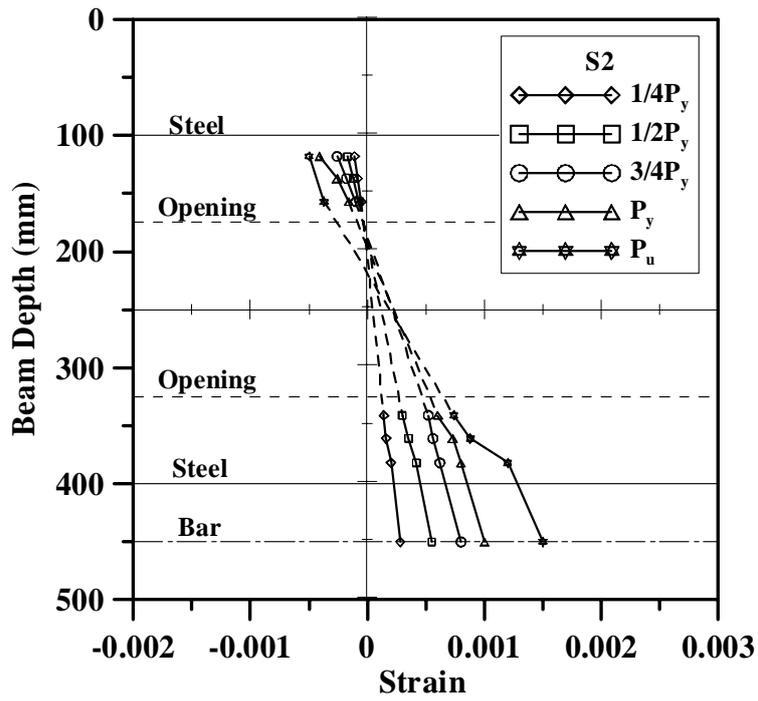


圖 4.36 S2 試體不同載重下之斷面應變分佈

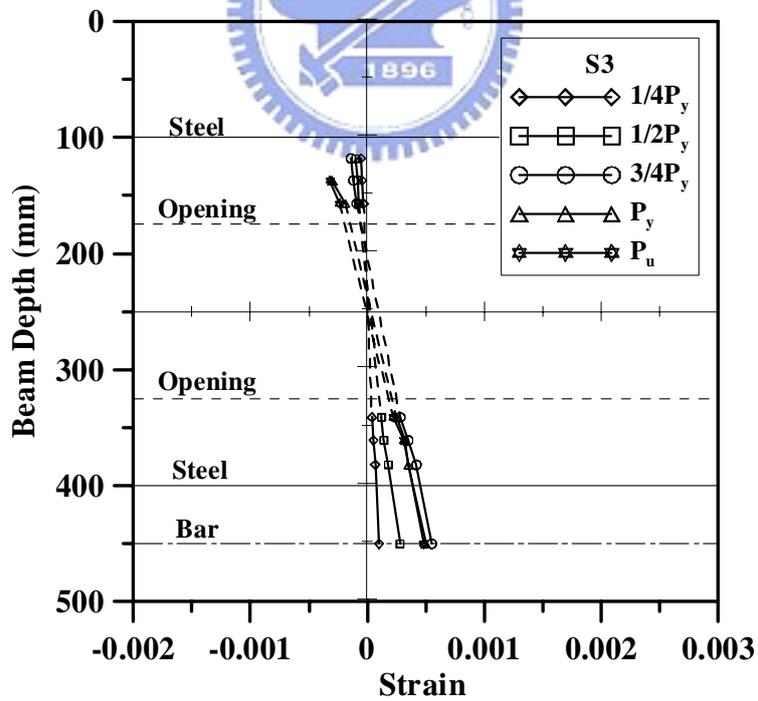


圖 4.37 S3 試體不同載重下之斷面應變分佈

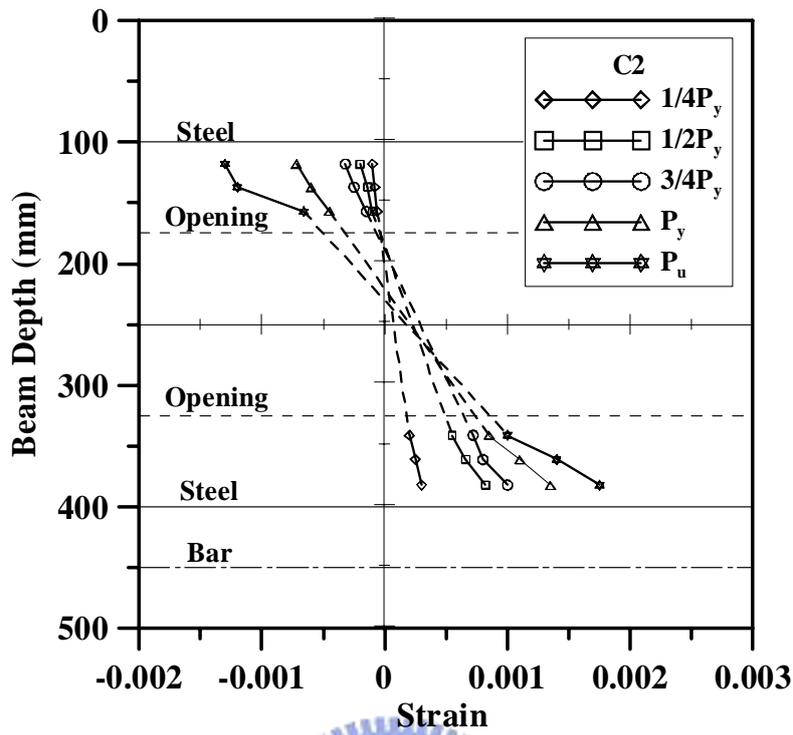


圖 4.38 C2 試體不同載重下之斷面應變分佈

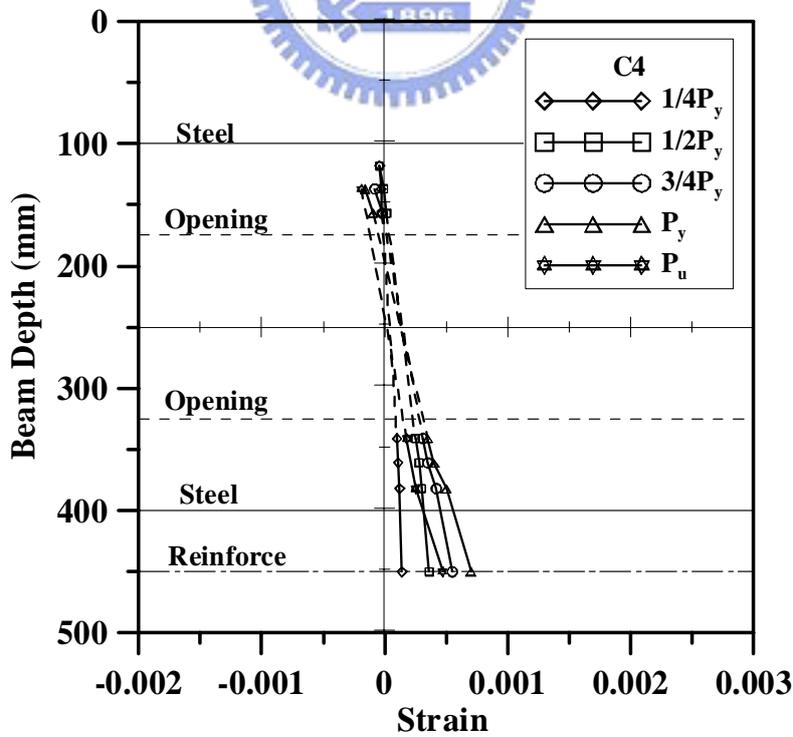


圖 4.39 C4 試體不同載重下之斷面應變分佈

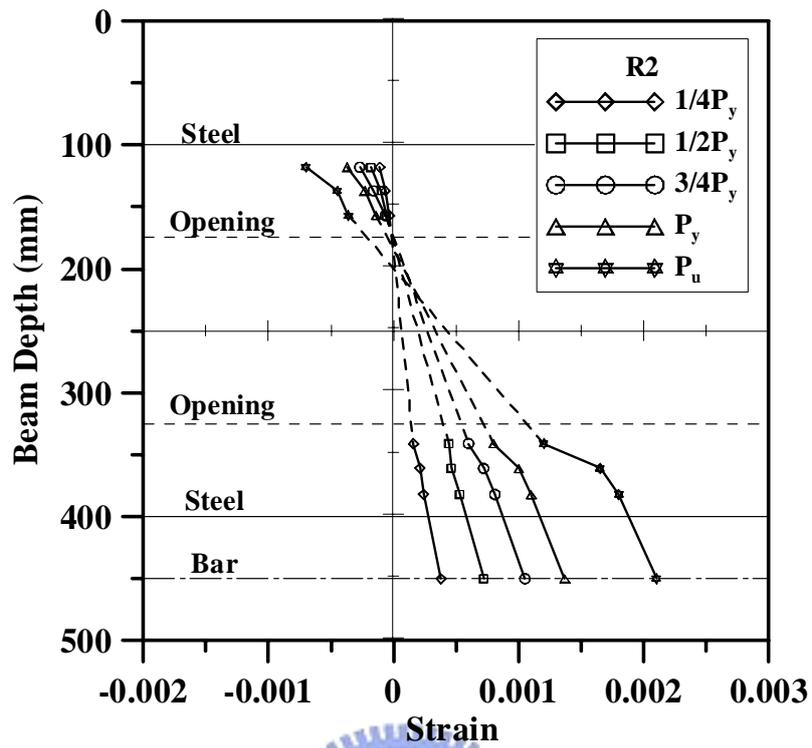


圖 4.40 R2 試體不同載重下之斷面應變分佈

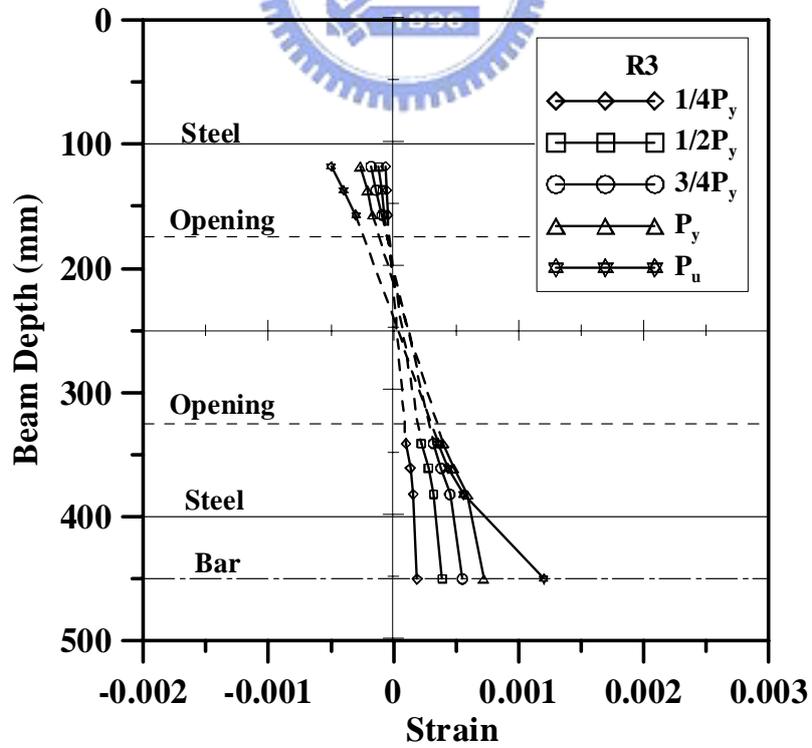


圖 4.41 R3 試體不同載重下之斷面應變分佈

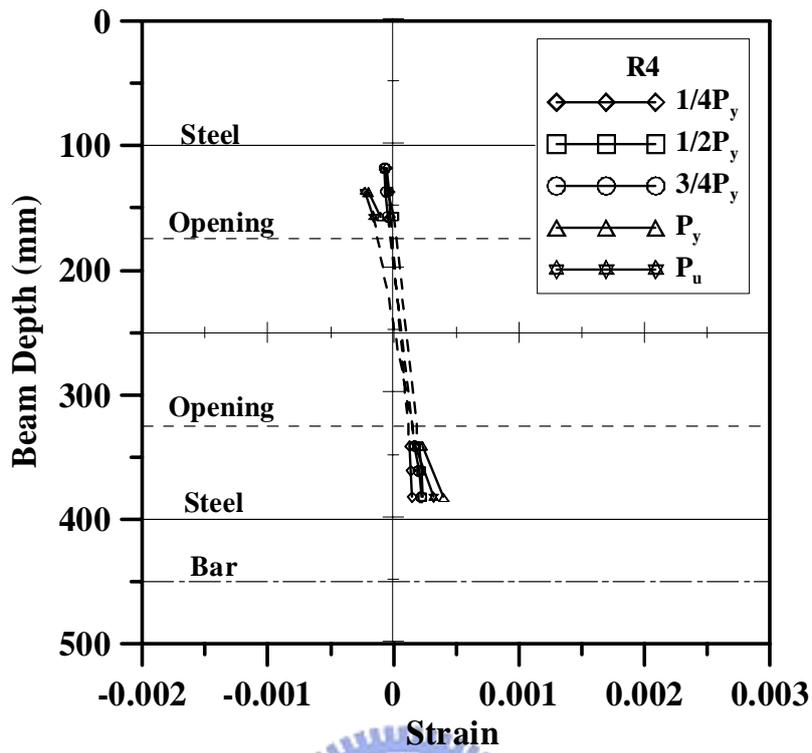


圖 4.42 R4 試體不同載重下之斷面應變分佈

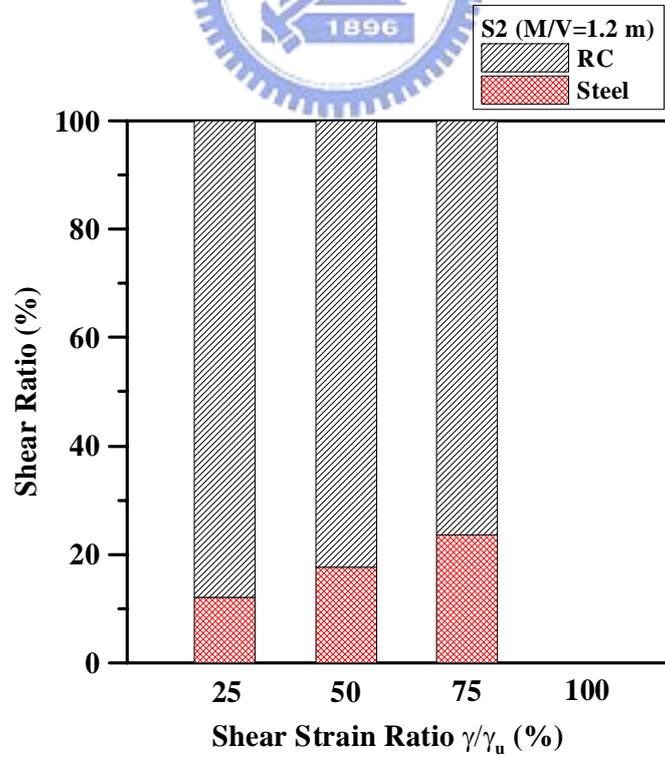


圖 4.43 S2 試體剪力強度分配百分比

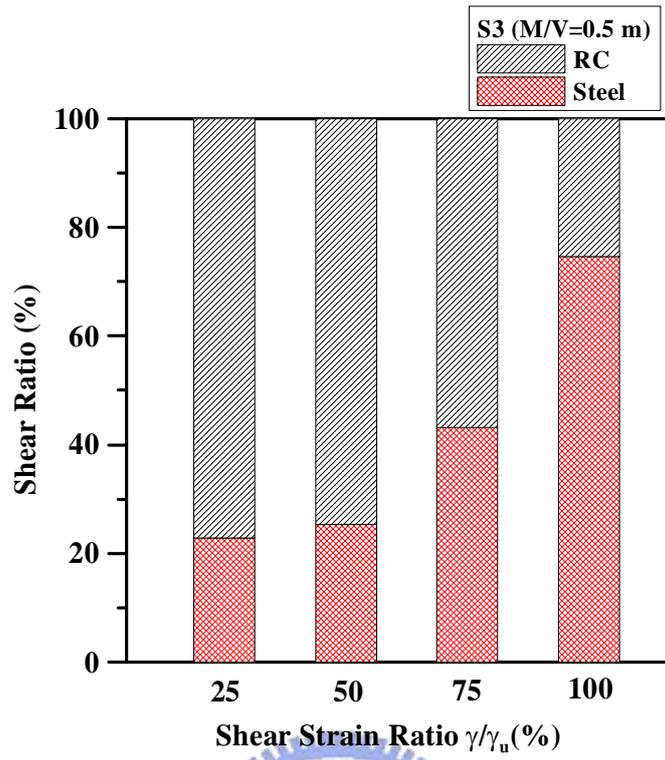


圖 4.44 S3 試體剪力強度分配百分比

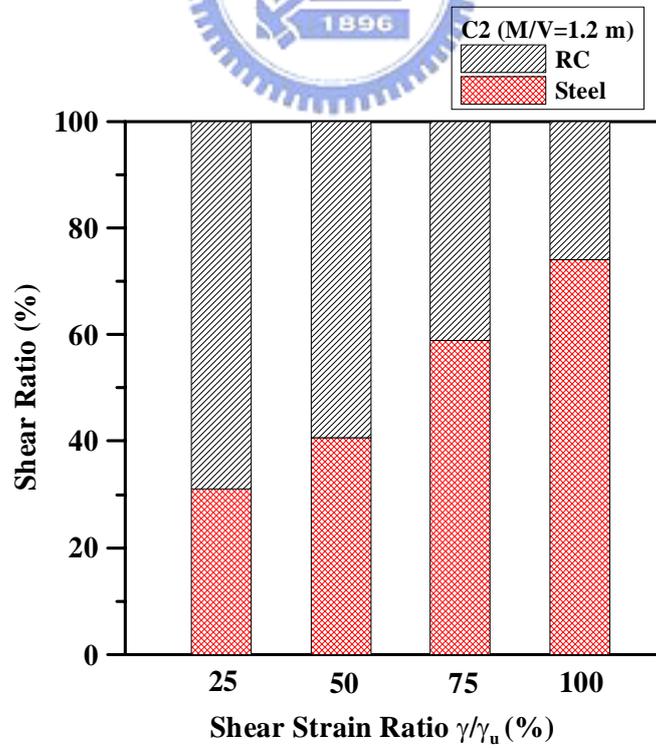


圖 4.45 C2 試體剪力強度分配百分比

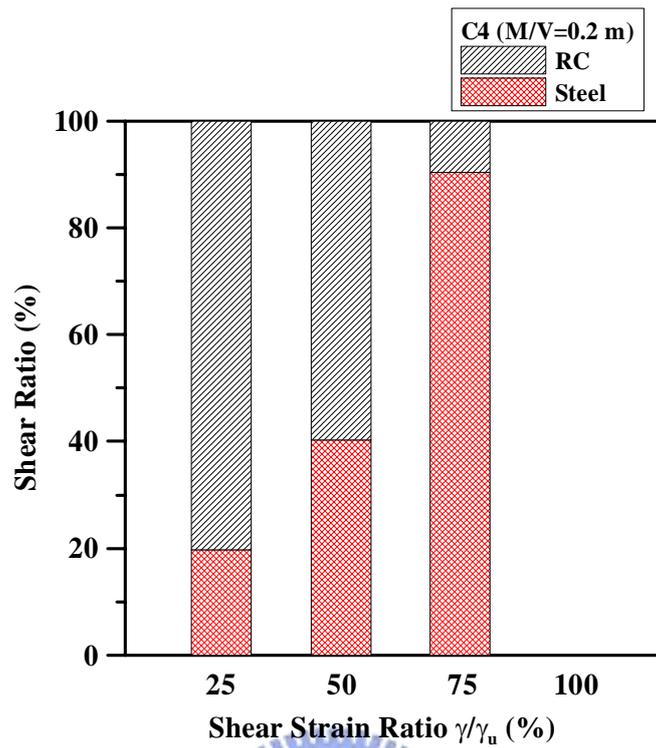


圖 4.46 C4 試體剪力強度分配百分比

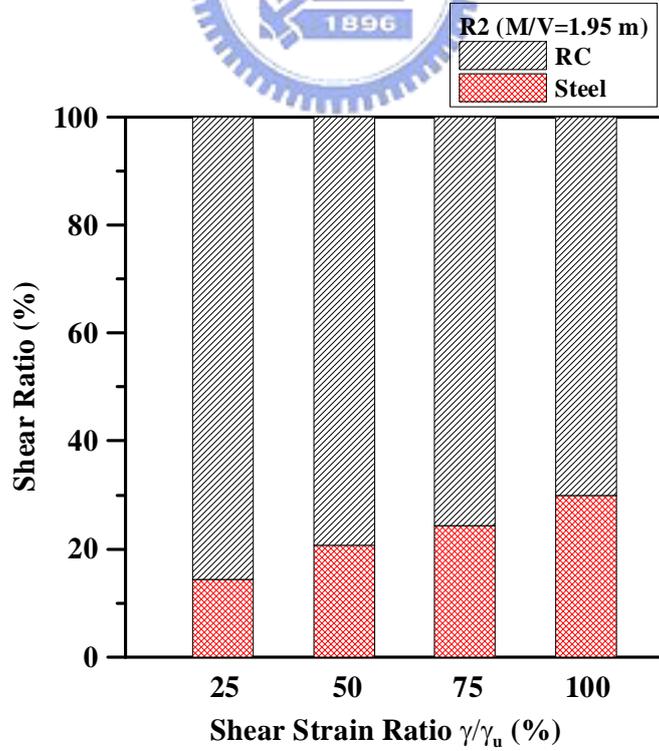


圖 4.47 R2 試體剪力強度分配百分比

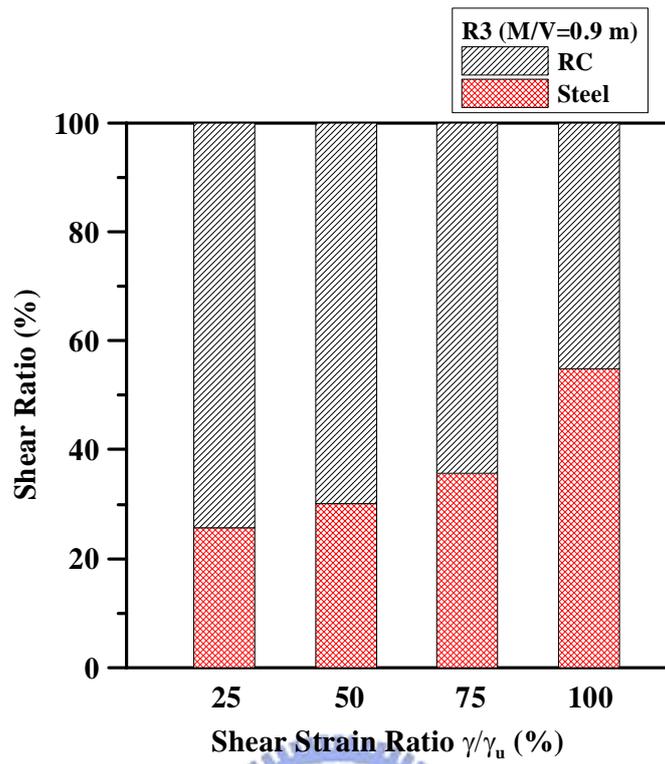


圖 4.48 R3 試體剪力強度分配百分比

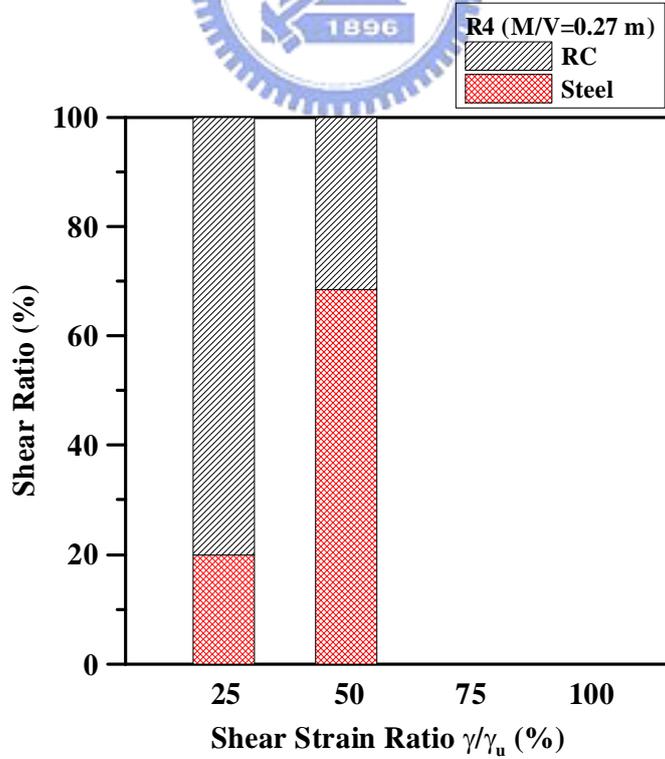


圖 4.49 R4 試體剪力強度分配百分比

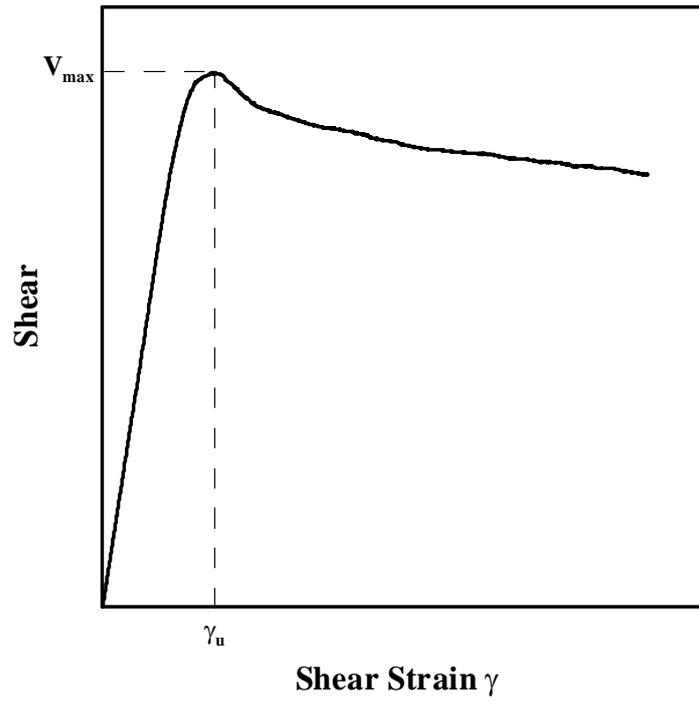


圖 4.50 γ_u 之定義

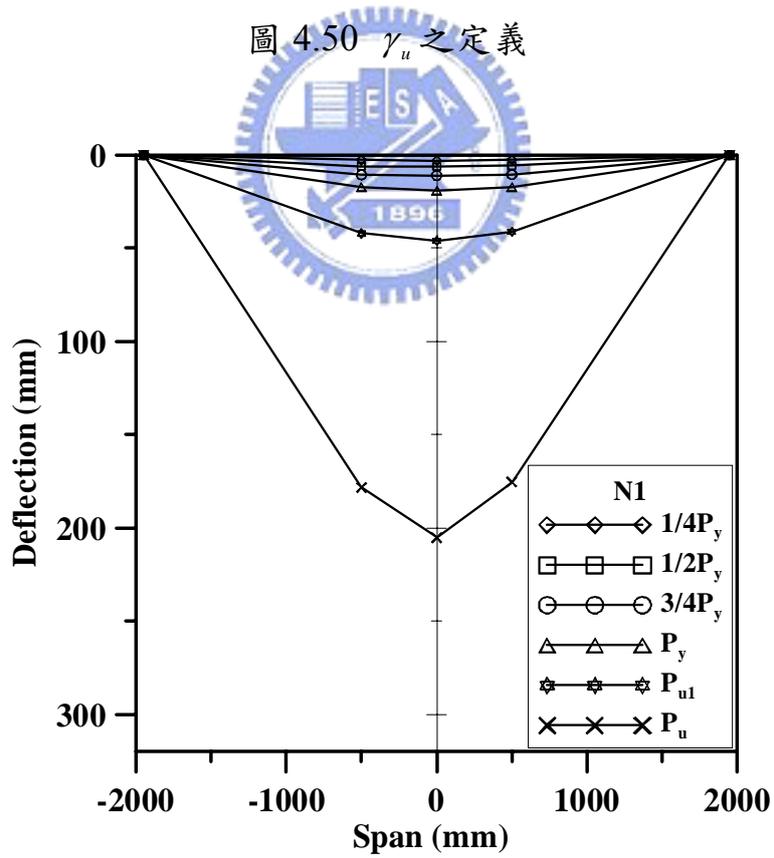


圖 4.51 N1 試體不同載重下之撓度分佈

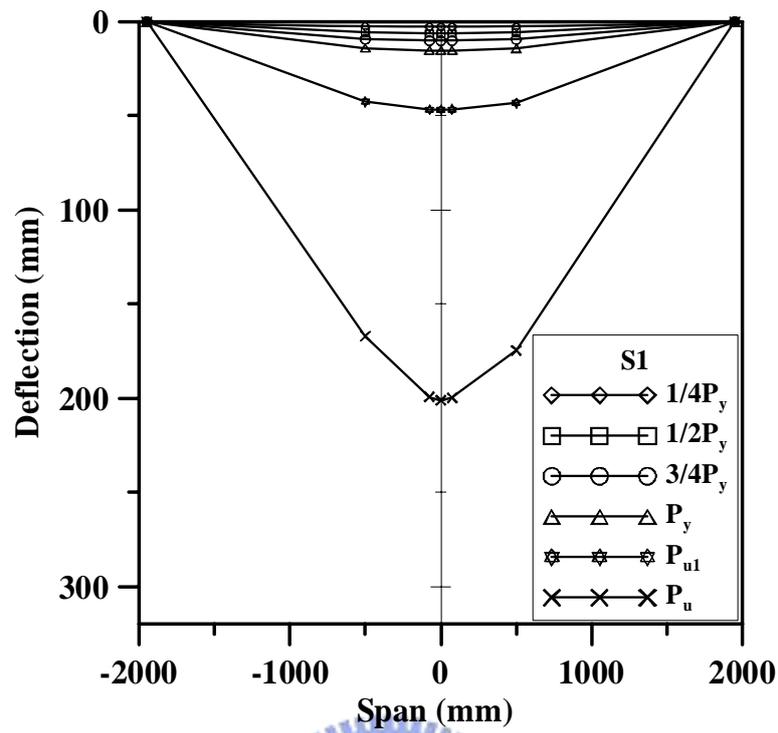


圖 4.52 S1 試體不同載重下之撓度分佈

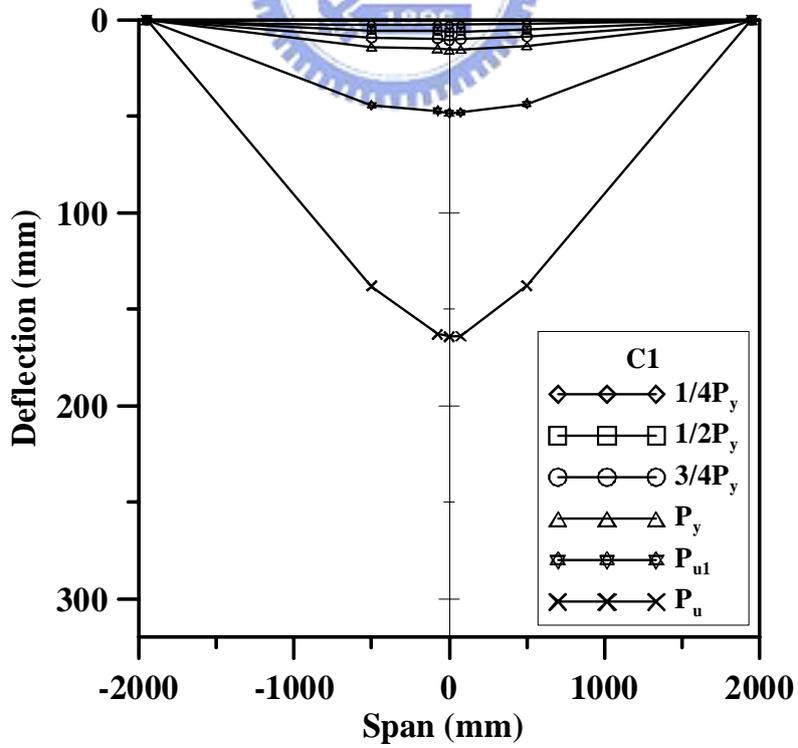


圖 4.53 C1 試體不同載重下之撓度分佈

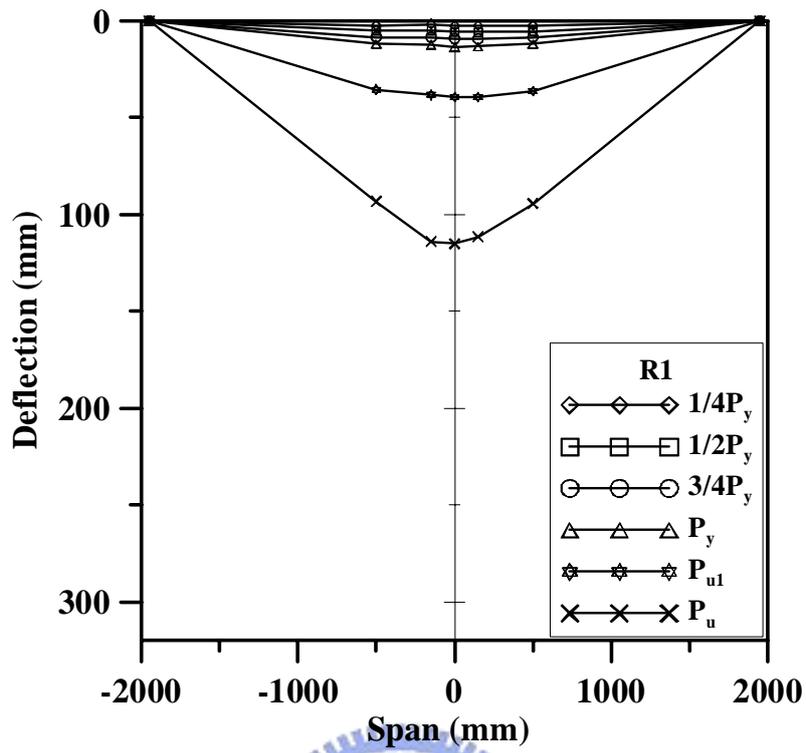


圖 4.54 R1 試體不同載重下之撓度分佈

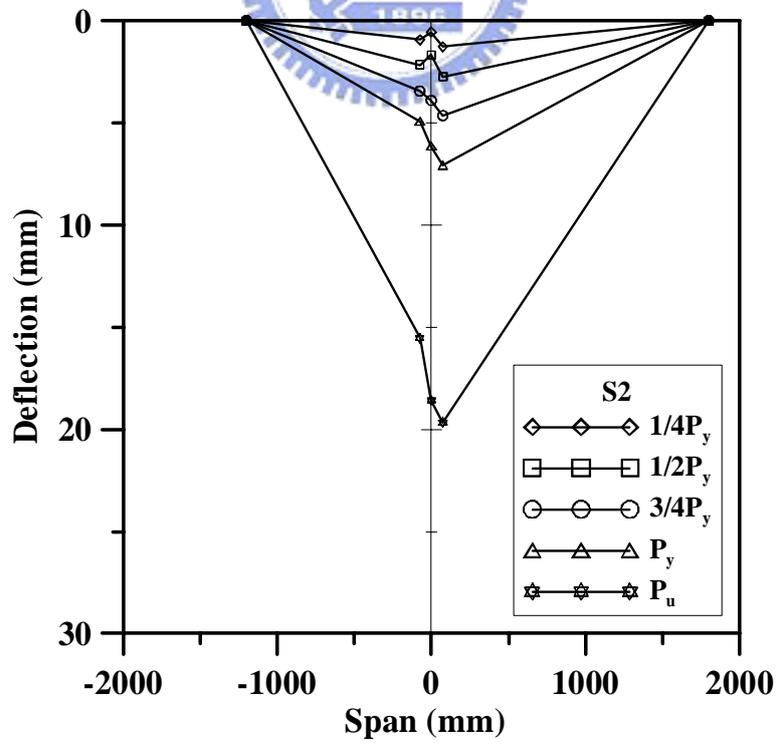


圖 4.55 S2 試體不同載重下之撓度分佈

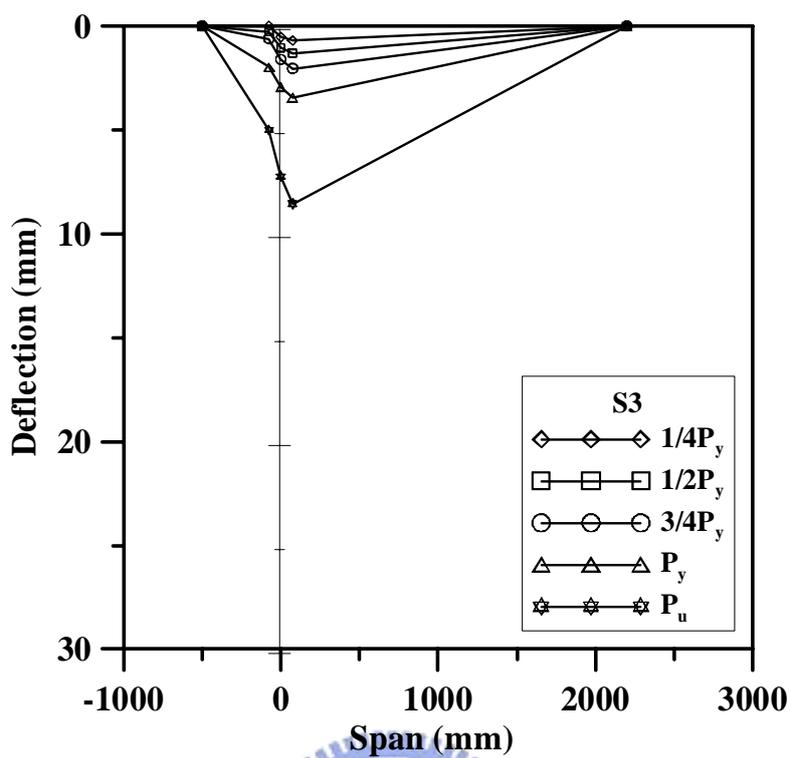


圖 4.56 S3 試體不同載重下之撓度分佈

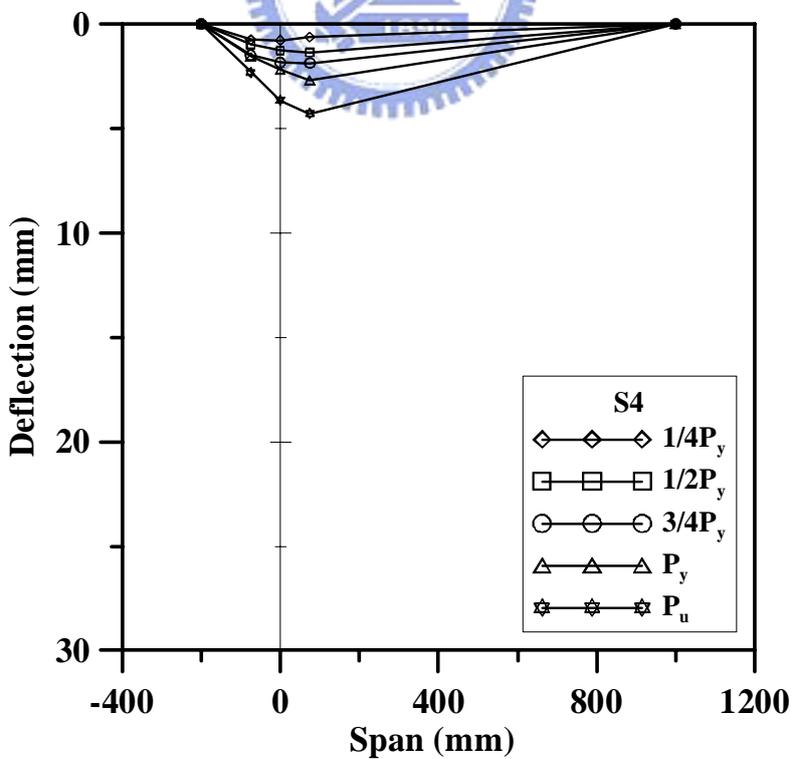


圖 4.57 S4 試體不同載重下之撓度分佈

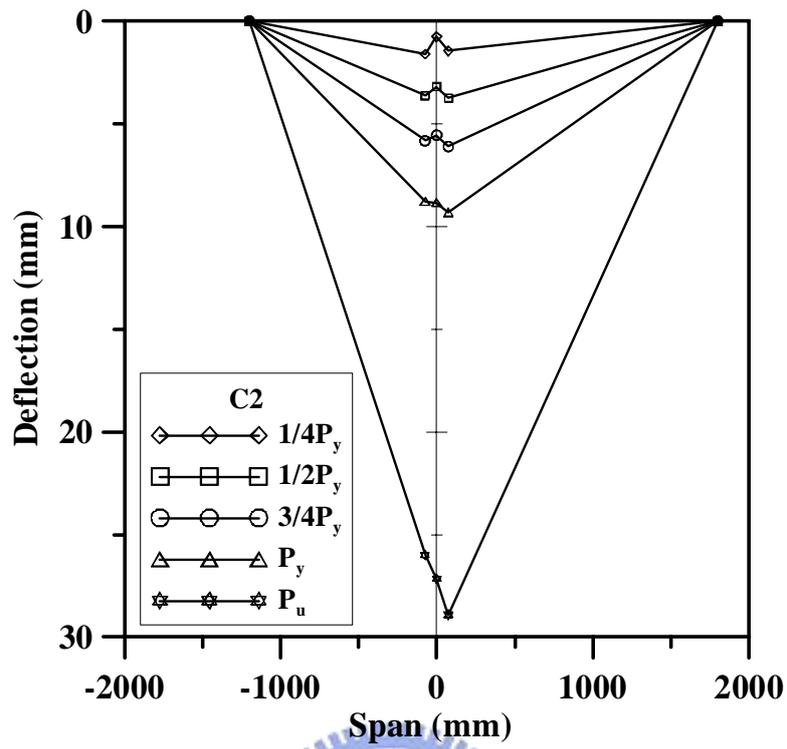


圖 4.58 C2 試體不同載重下之撓度分佈

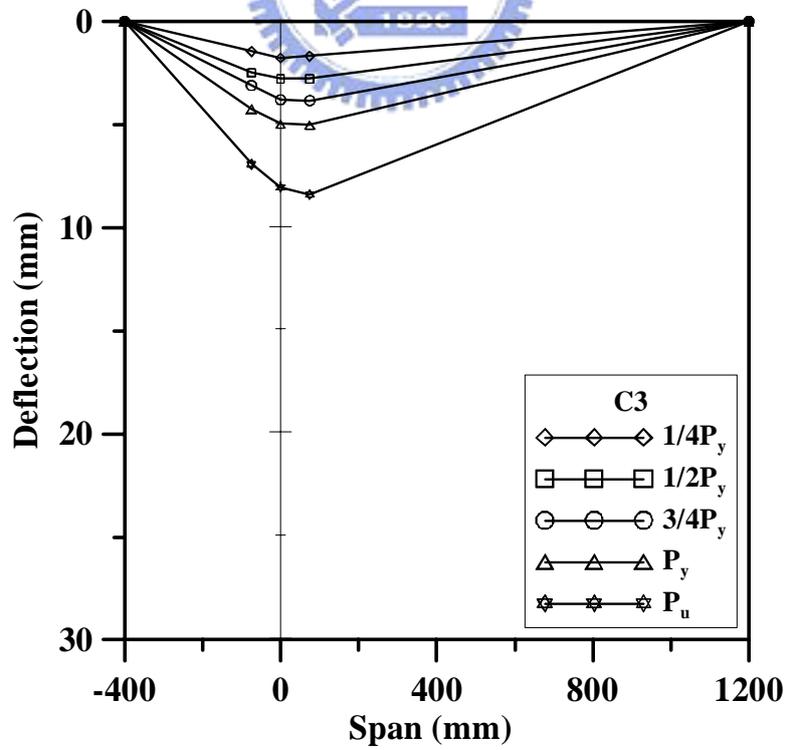


圖 4.59 C3 試體不同載重下之撓度分佈

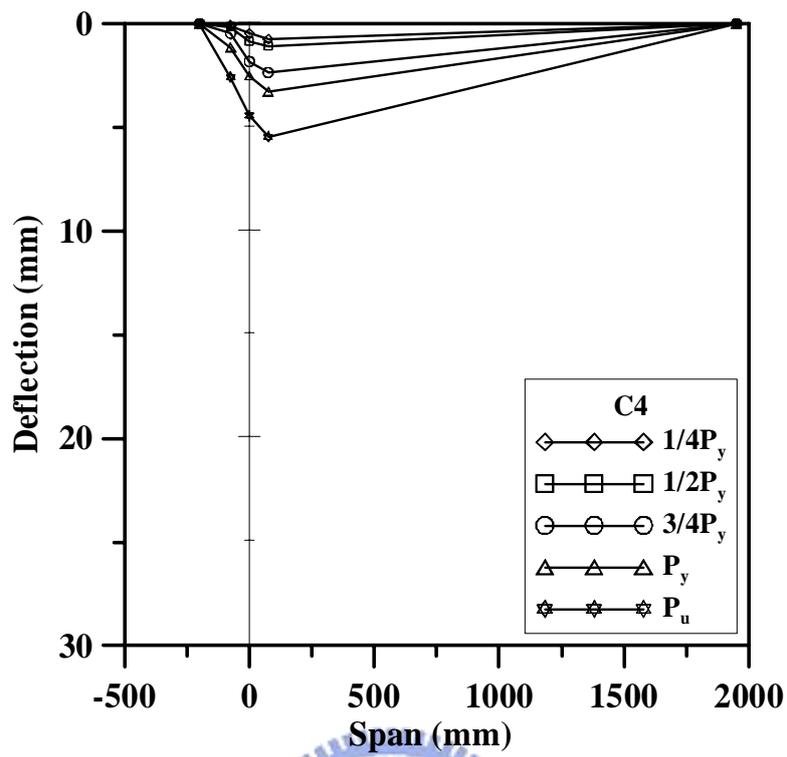


圖 4.60 C4 試體不同載重下之撓度分佈

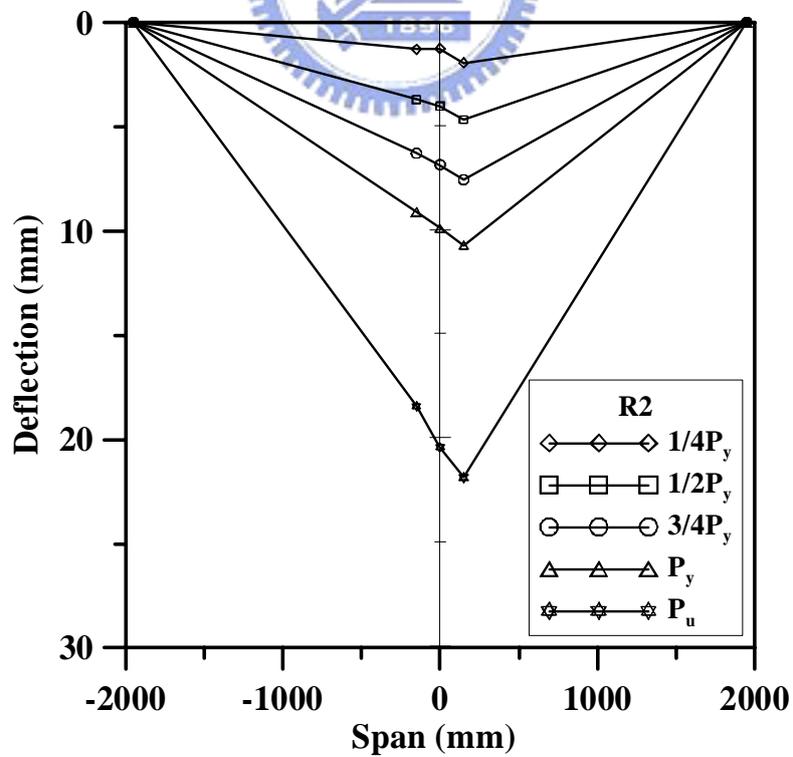


圖 4.61 R2 試體不同載重下之撓度分佈

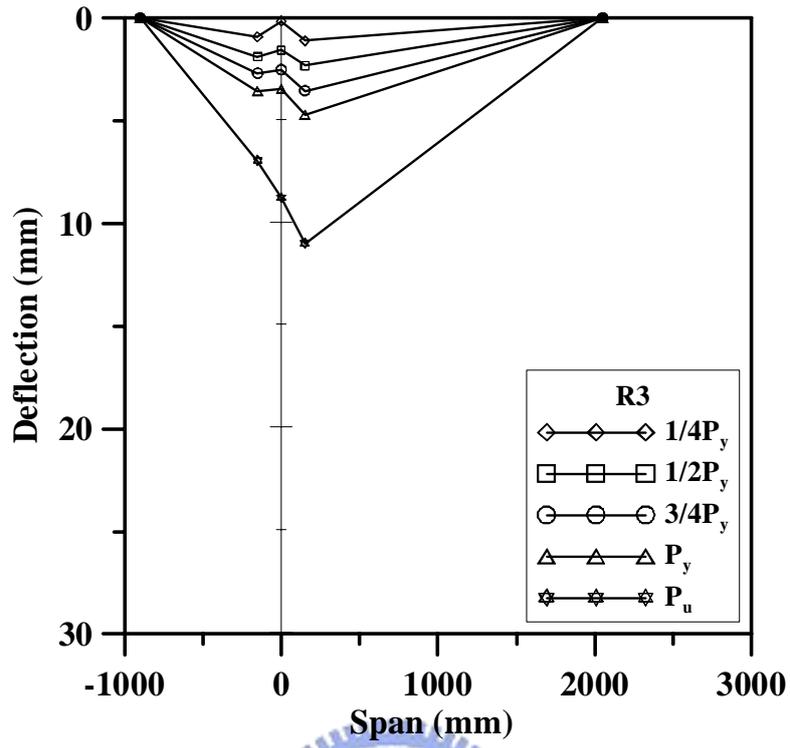


圖 4.62 R3 試體不同載重下之撓度分佈

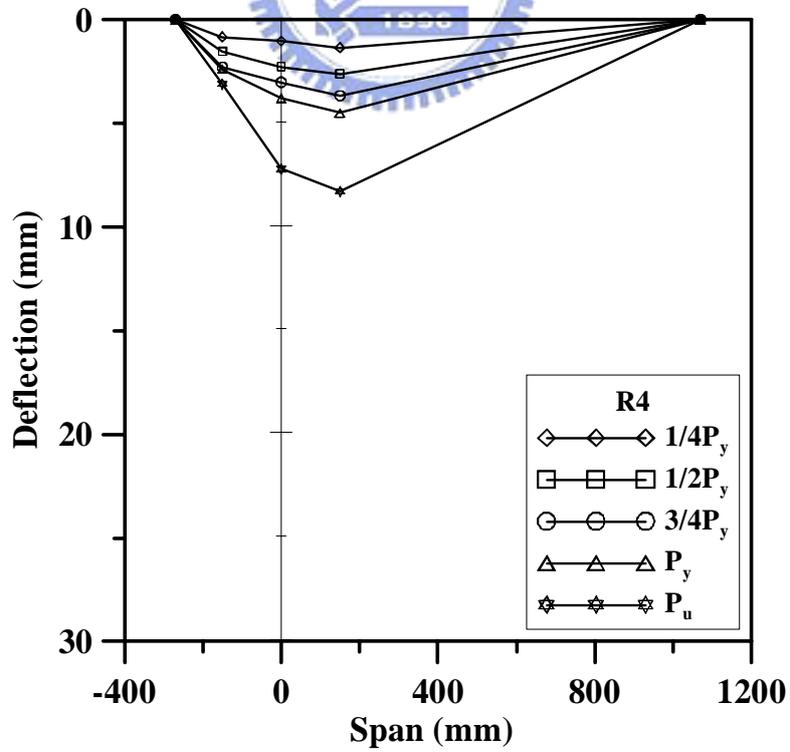


圖 4.63 R4 試體不同載重下之撓度分佈

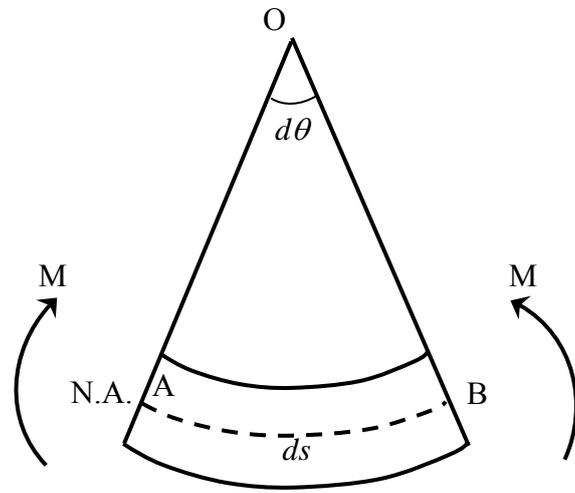


圖 4.64 構件曲率圖

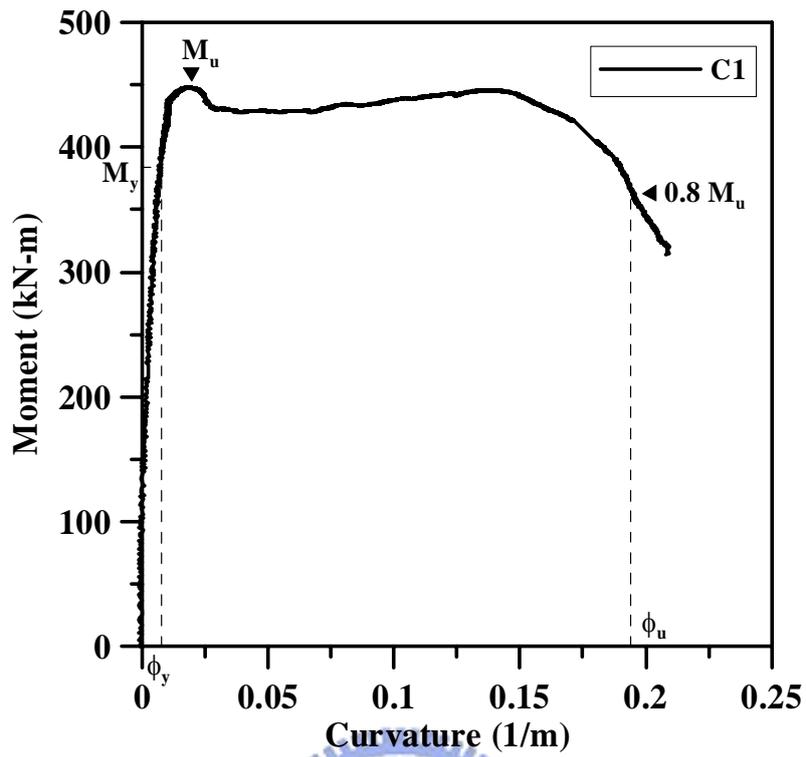


圖 4.65 C1 試體彎矩-曲率關係圖

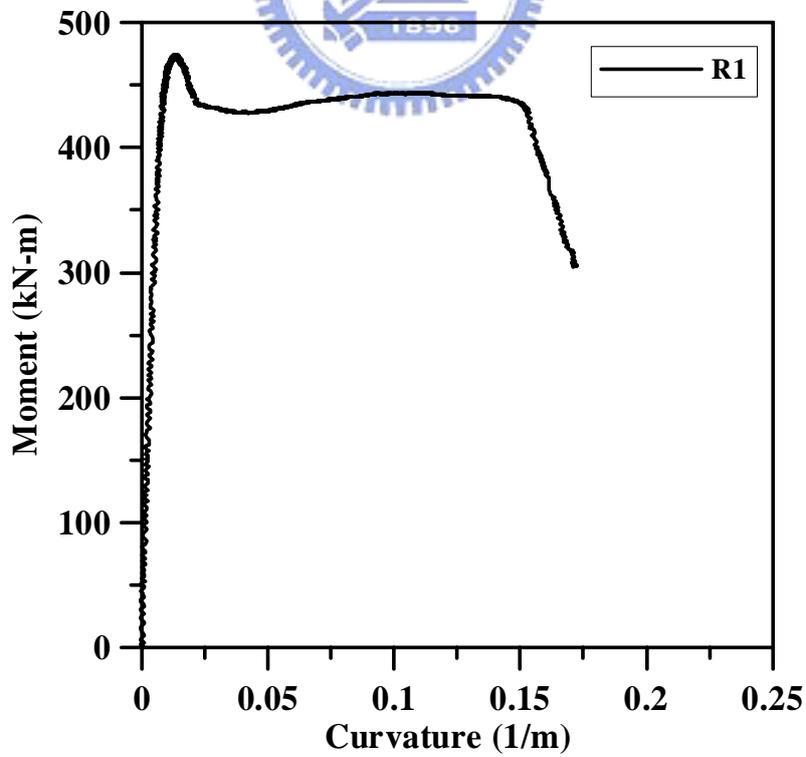


圖 4.66 R1 試體彎矩-曲率關係圖

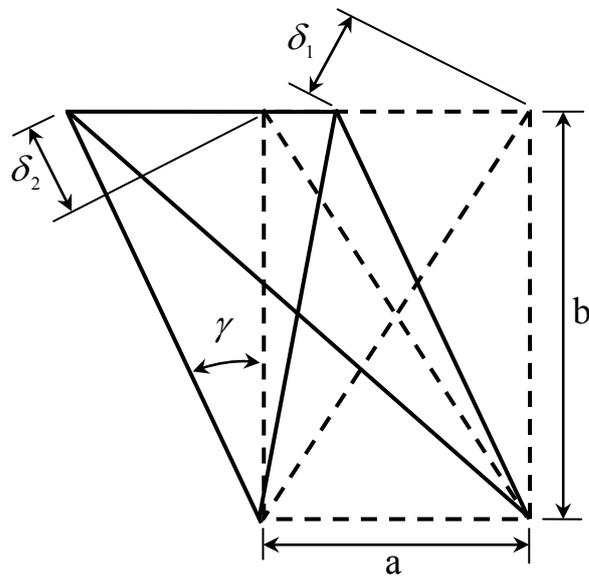


圖 4.67 開孔處對角線相對位移與剪力變形關係示意圖

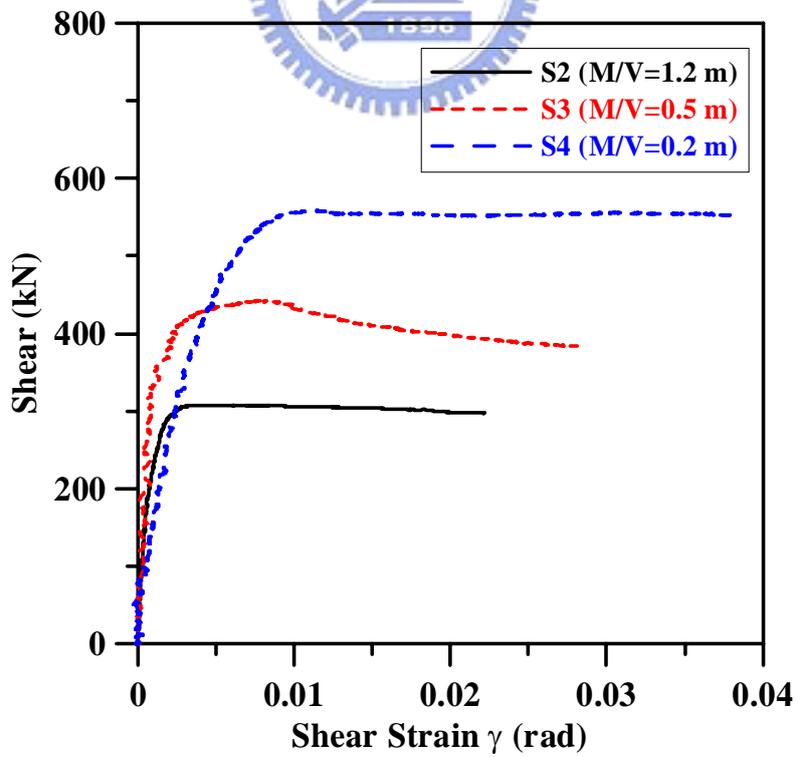


圖 4.68 S 系列試體開孔處剪力變形圖

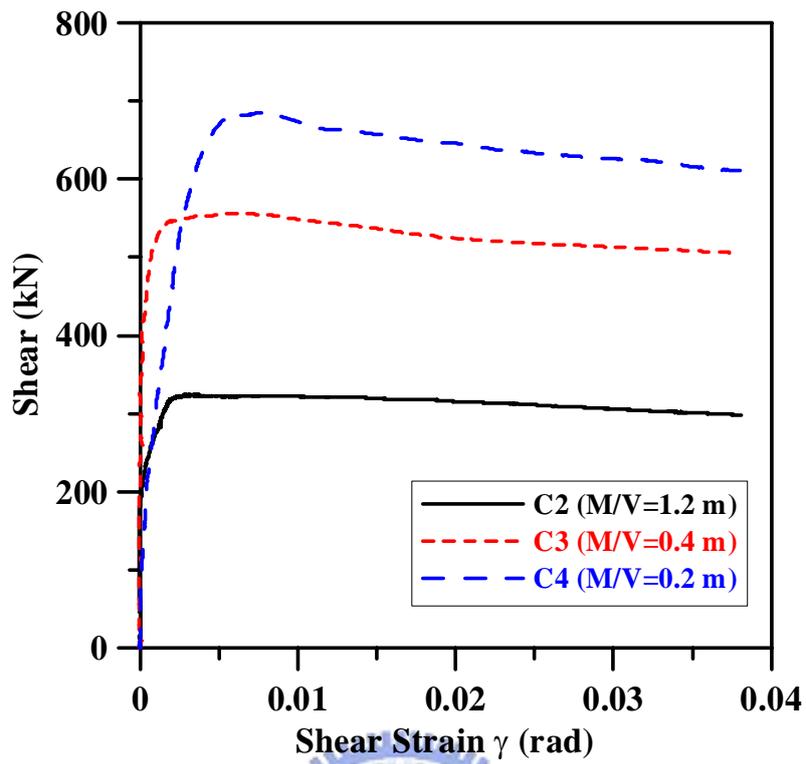


圖 4.69 C 系列試體開孔處剪力變形圖

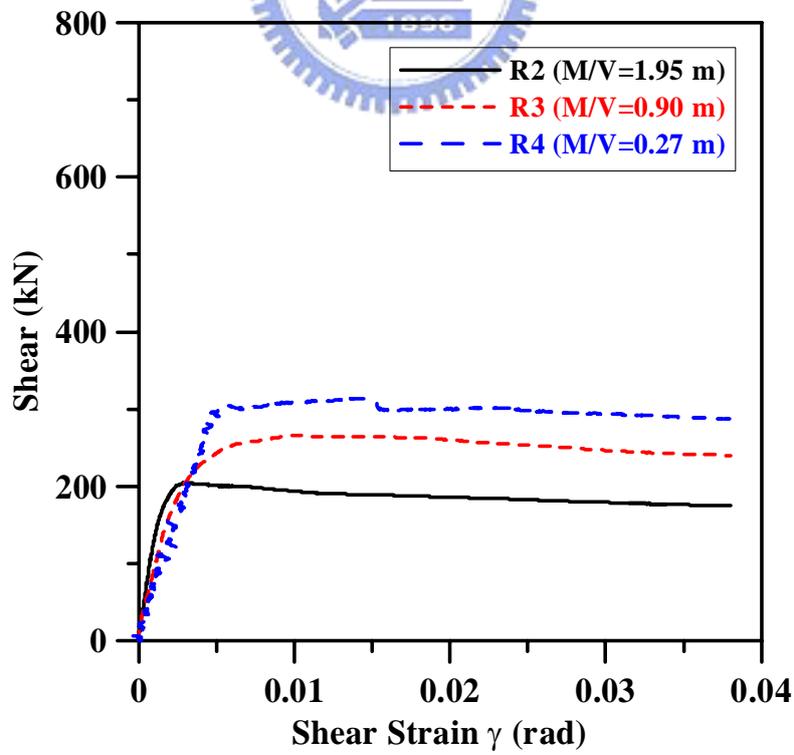
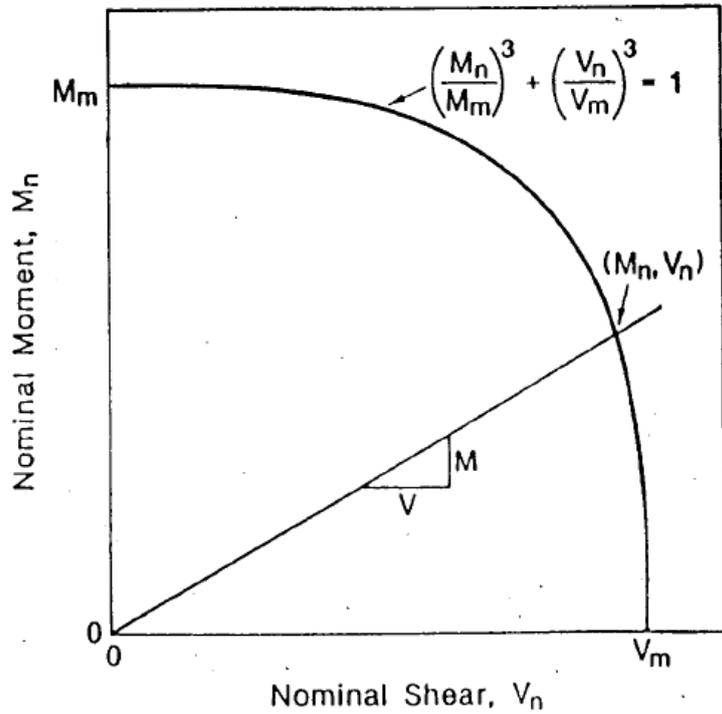


圖 4.70 R 系列試體開孔處剪力變形圖



(Darwin 1990)

圖 4.71 鋼骨開孔梁之彎矩-剪力交互作用關係

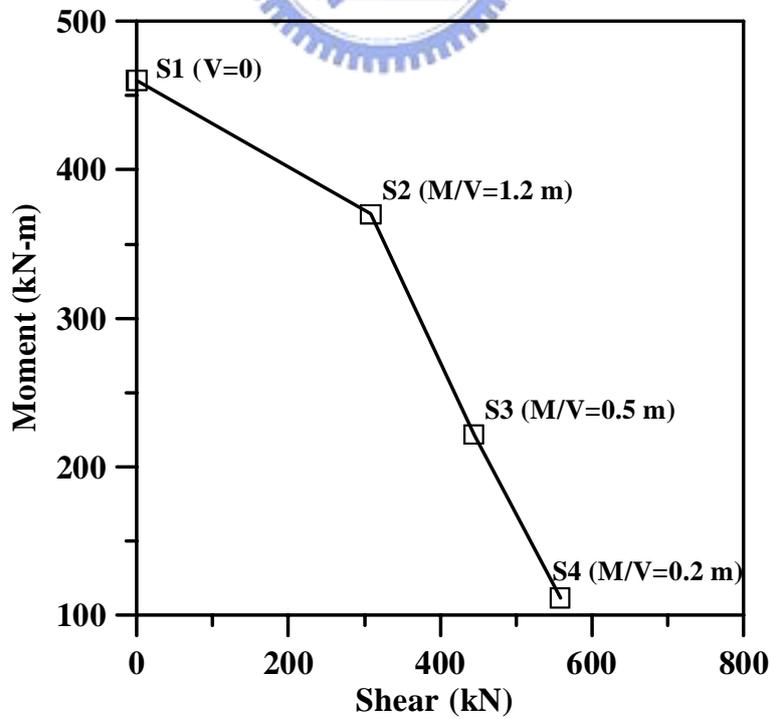


圖 4.72 方孔開孔試體彎矩-剪力曲線關係

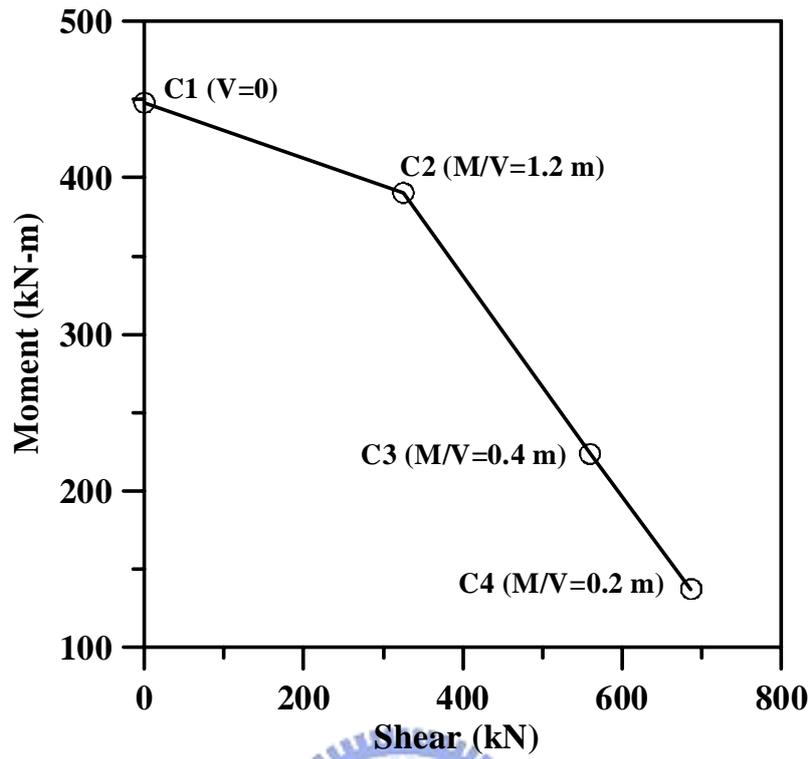


圖 4.73 圓孔開孔試體彎矩-剪力曲線關係

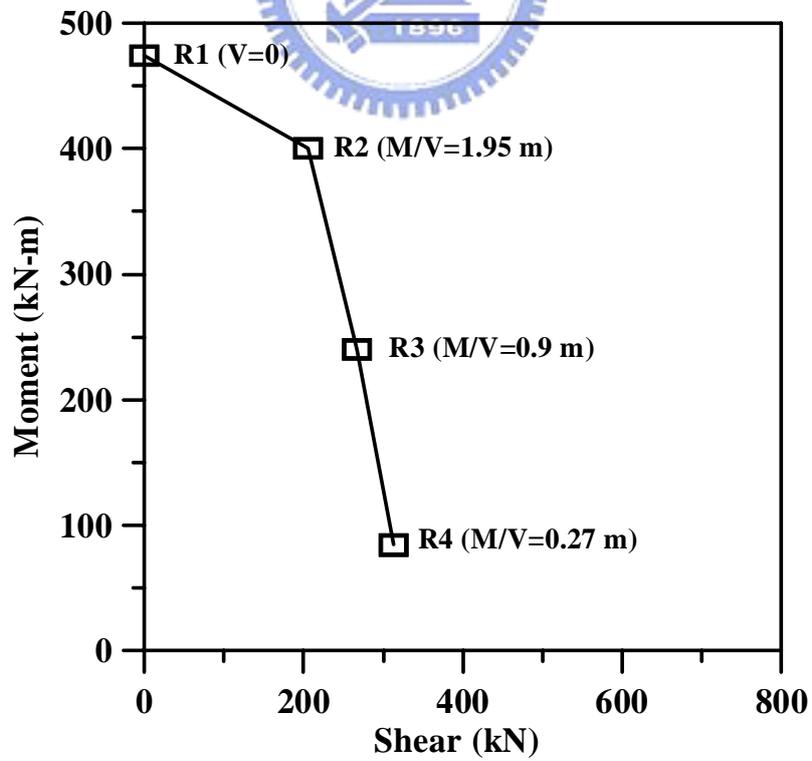


圖 4.74 長方孔開孔試體彎矩-剪力曲線關係

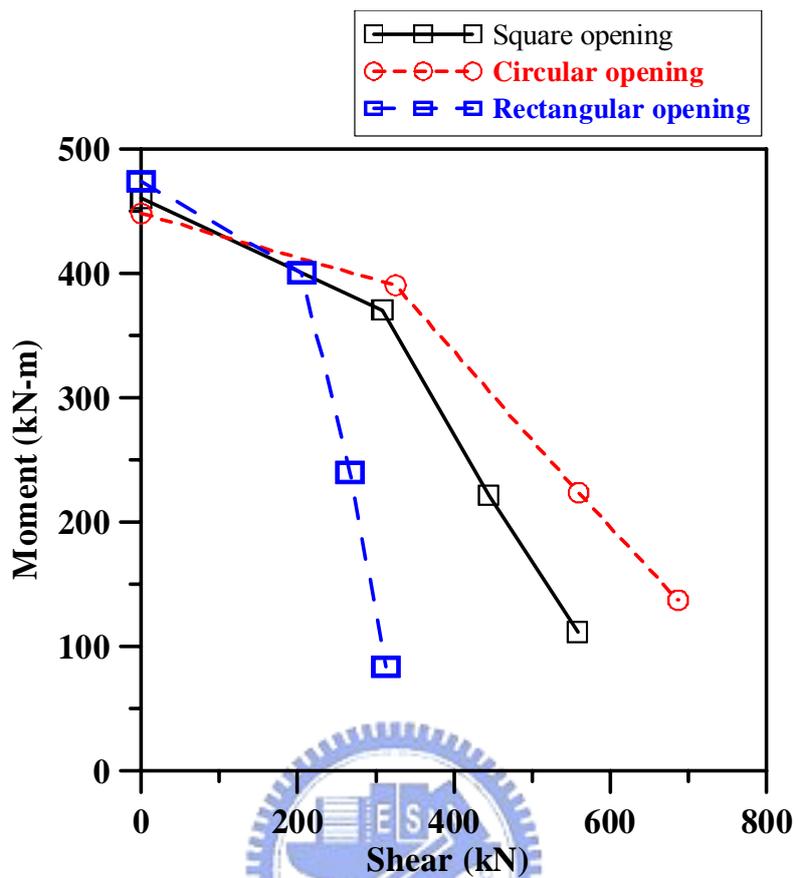


圖 4.75 S、C、R 系列試體之彎矩-剪力曲線關係



照片 1.1 臺北國際金融中心 (TAIPEI 101)鋼梁開孔情形



照片 1.2 臺北信義計畫區 SRC 群樓鋼梁開孔情形



照片 3.1 應變計



照片 3.2 鋼骨及鋼筋之組裝



照片 3.3 模板之組裝



照片 3.4 定位在模板中



照片 3.5 試體灌漿



照片 3.6 試體灌漿後抹平



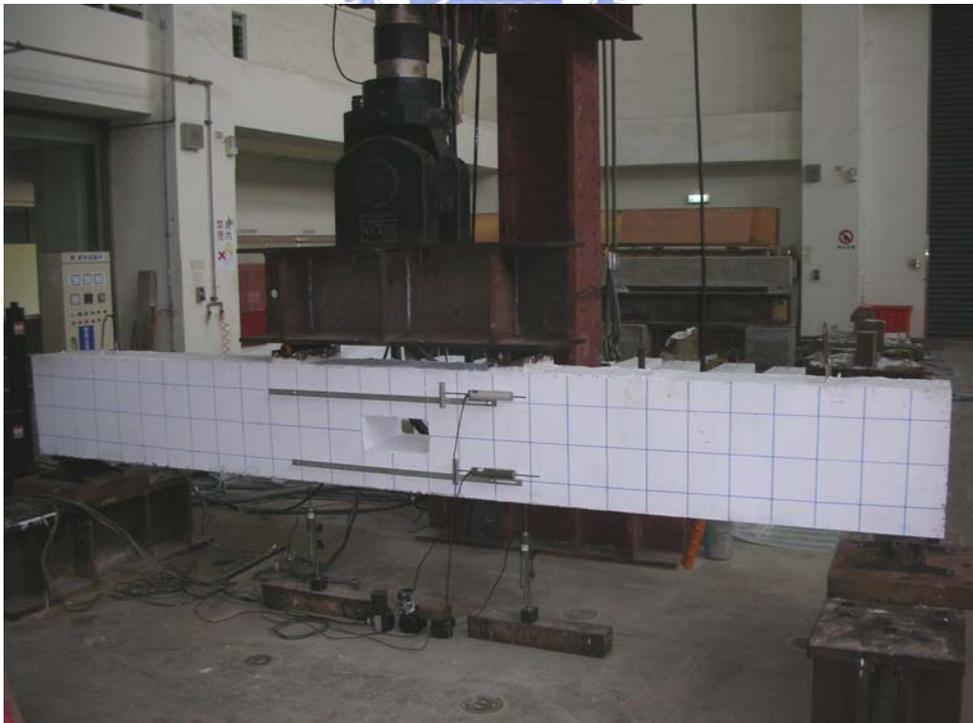
照片 3.7 製作圓柱抗壓試體



照片 3.8 試驗設置



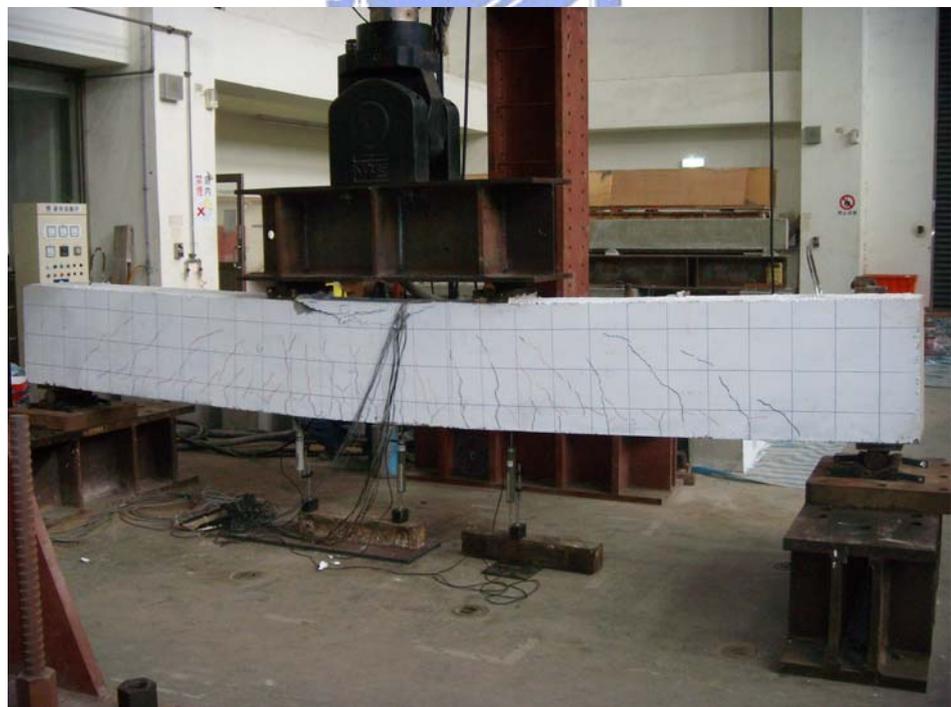
照片 3.9 資料擷取器及設備



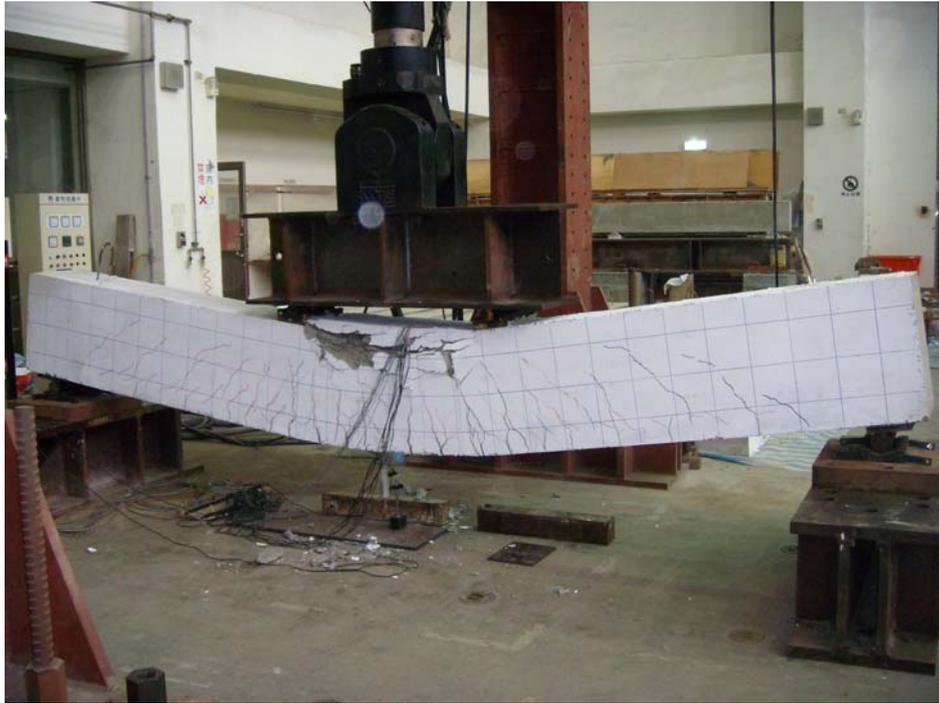
照片 3.10 量測儀器之架設



照片 4.1 N1 試體兩側之剪力裂縫



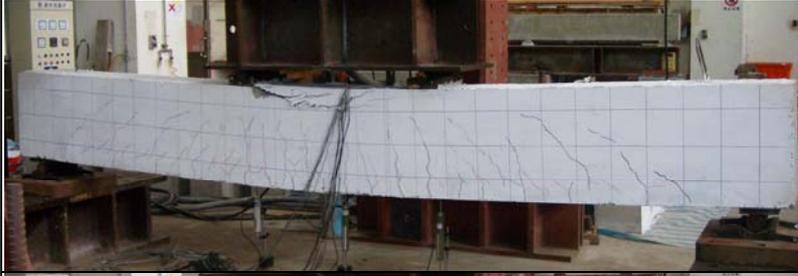
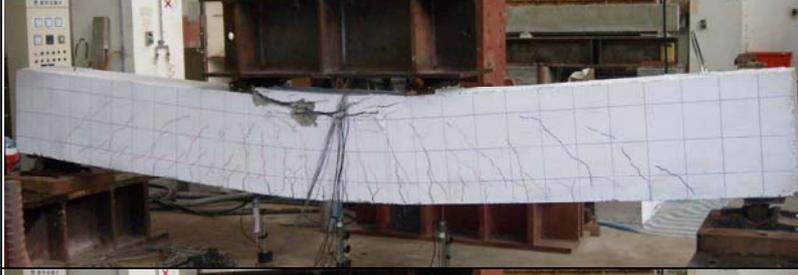
照片 4.2 N1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎



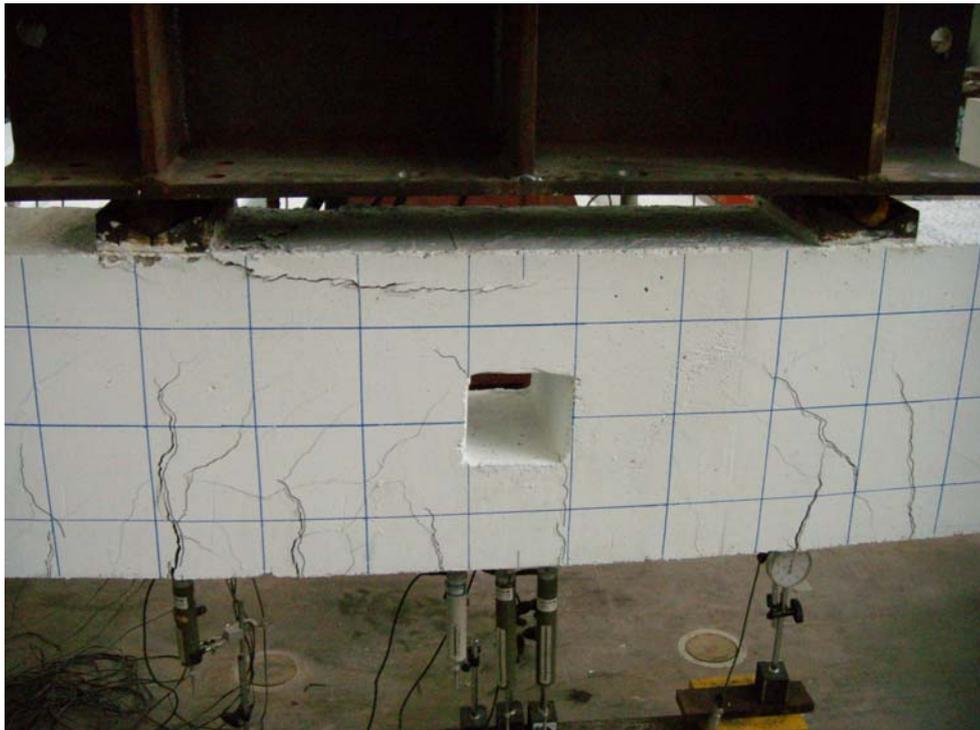
照片 4.3 N1 試體極限載重破壞時之狀態



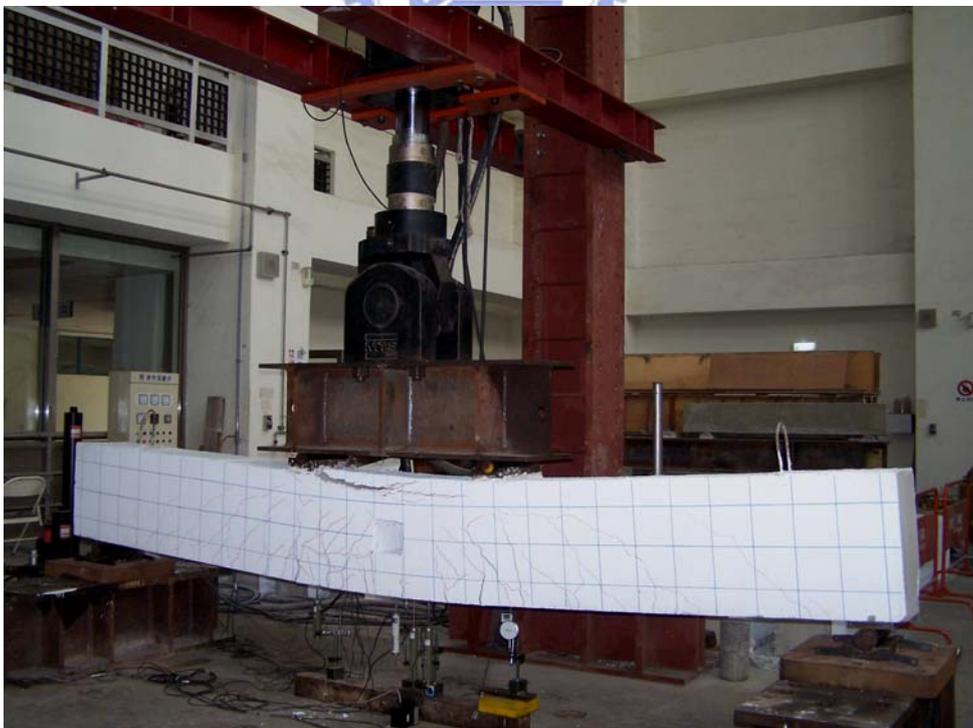
照片 4.4 N1 試體極限載重破壞時主筋及鋼骨上翼板挫屈

N1 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=295 \text{ kN}$ $\Delta=8 \text{ mm}$
	$P=590 \text{ kN}$ $\Delta=29 \text{ mm}$
	$P=620 \text{ kN}$ $\Delta=45 \text{ mm}$
	$P=600 \text{ kN}$ $\Delta=64 \text{ mm}$
	$P=660 \text{ kN}$ $\Delta=200 \text{ mm}$
	$P=580 \text{ kN}$ $\Delta=245 \text{ mm}$

照片 4.5 N1 試體之加載過程



照片 4.6 S1 試體開孔角隅處之裂縫

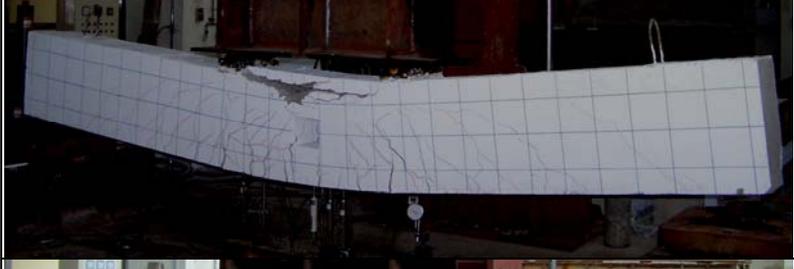


照片 4.7 S1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎

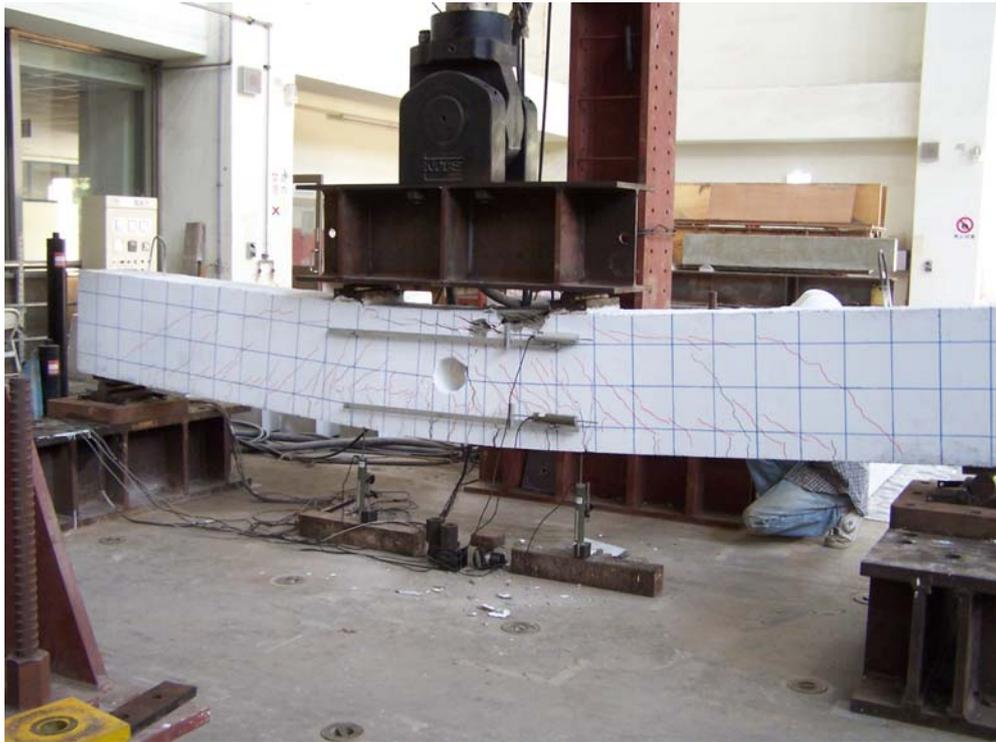


照片 4.8 S1 試體極限載重破壞時之狀態



S1 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=295 \text{ kN}$ $\Delta=8 \text{ mm}$
	$P=490 \text{ kN}$ $\Delta=17 \text{ mm}$
	$P=620 \text{ kN}$ $\Delta=45 \text{ mm}$
	$P=600 \text{ kN}$ $\Delta=65 \text{ mm}$
	$P=635 \text{ kN}$ $\Delta=180 \text{ mm}$
	$P=570 \text{ kN}$ $\Delta=246 \text{ mm}$

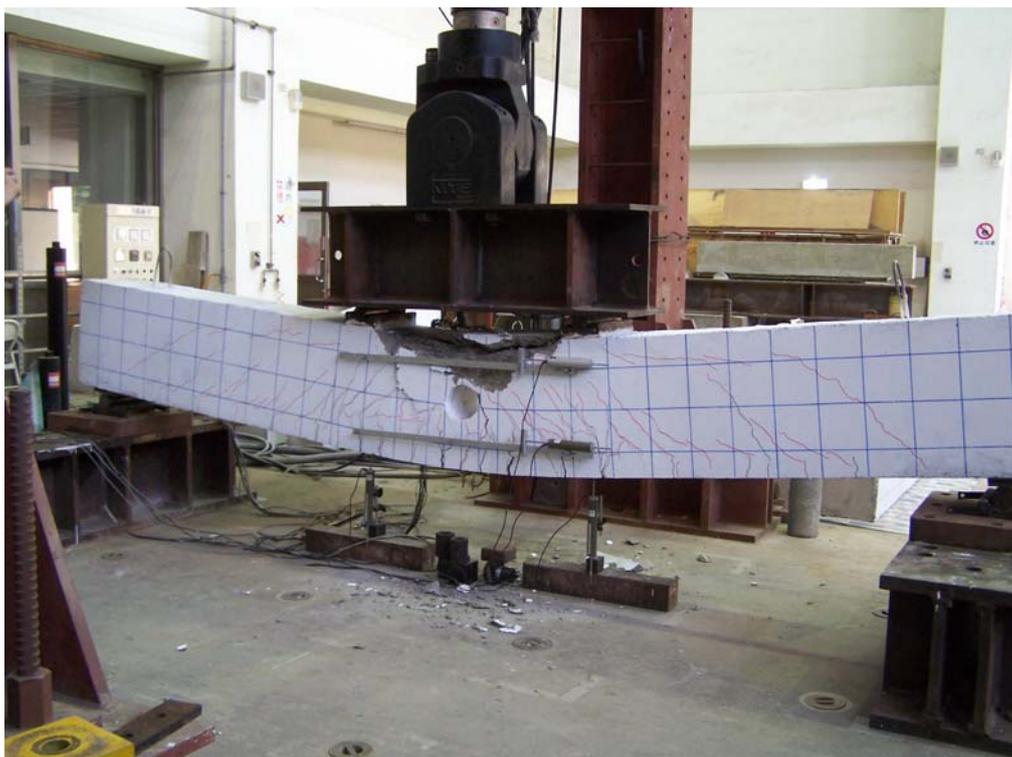
照片 4.9 S1 試體之加載過程



照片 4.10 C1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎

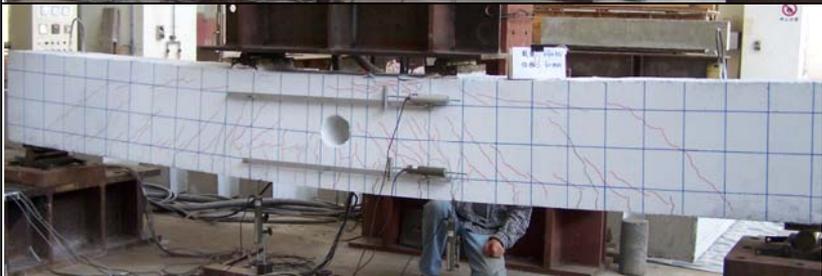
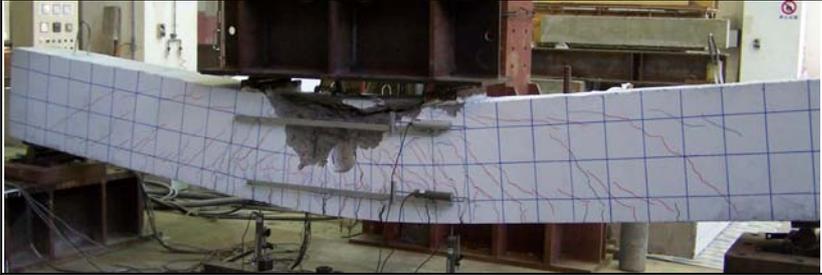


照片 4.11 C1 試體開孔邊緣裂縫照



照片 4.12 C1 試體極限載重破壞時之狀態

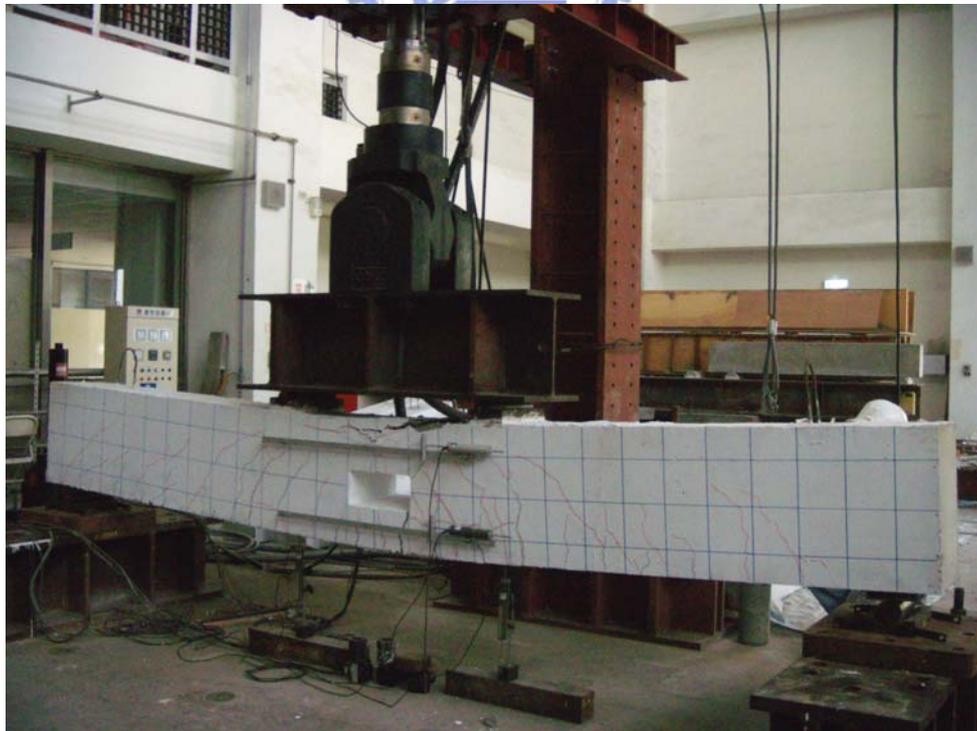


C1 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=295 \text{ kN}$ $\Delta=8 \text{ mm}$
	$P=490 \text{ kN}$ $\Delta=15 \text{ mm}$
	$P=620 \text{ kN}$ $\Delta=42 \text{ mm}$
	$P=595 \text{ kN}$ $\Delta=76 \text{ mm}$
	$P=615 \text{ kN}$ $\Delta=160 \text{ mm}$
	$P=430 \text{ kN}$ $\Delta=205 \text{ mm}$

照片 4.13 C1 試體之加載過程



照片 4.14 R1 試體開孔角隅處之裂縫

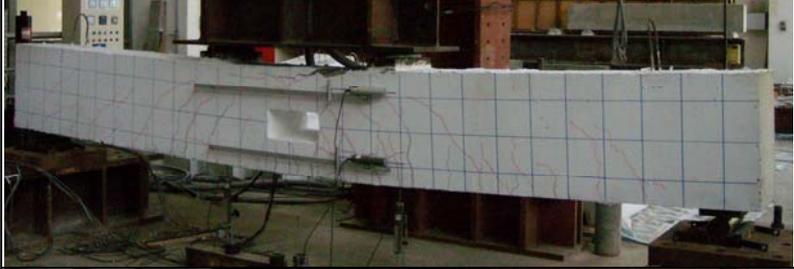
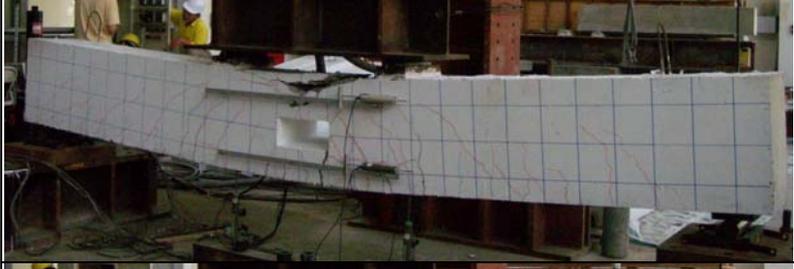


照片 4.15 R1 試體上緣受壓區混凝土保護層壓碎

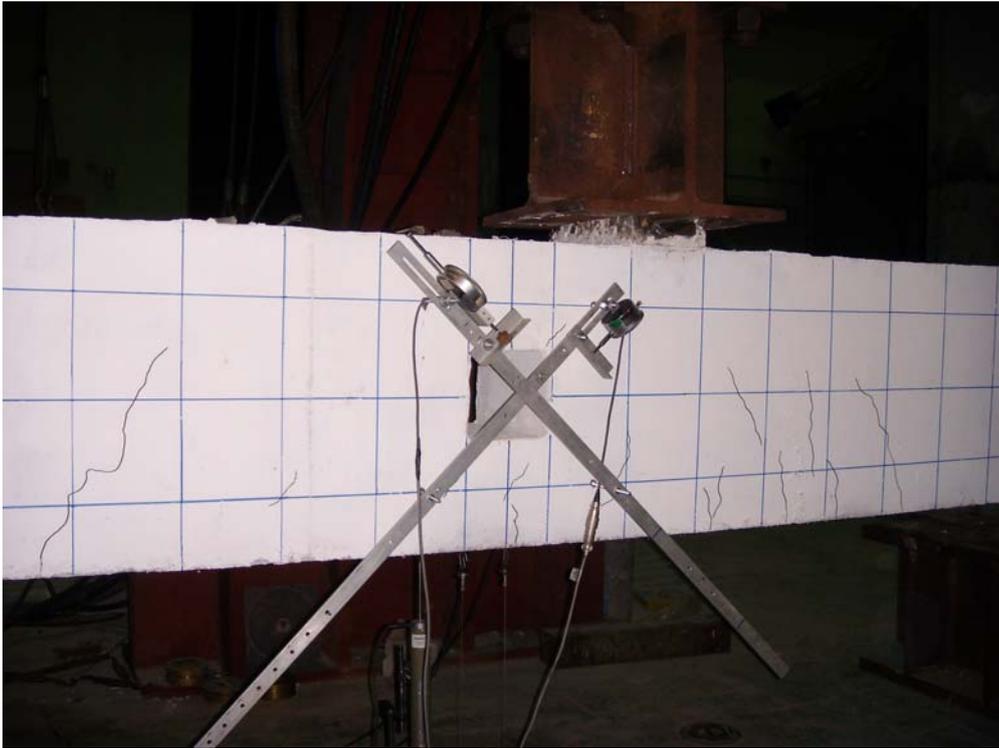


照片 4.16 R1 試體極限載重破壞時之狀態

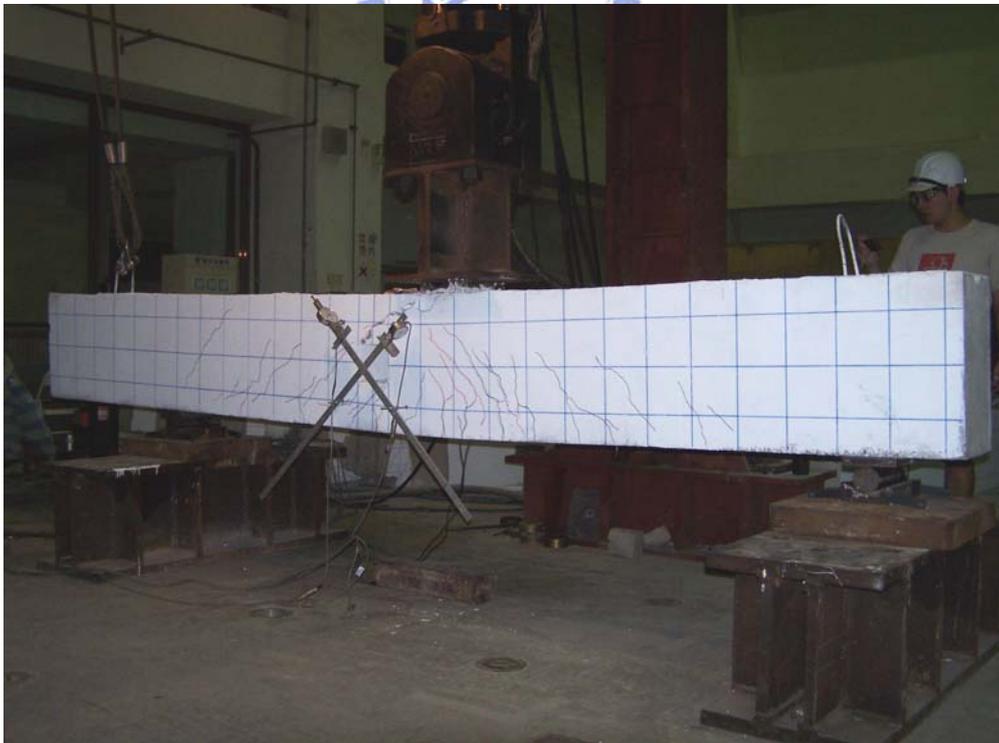


R1 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=295 \text{ kN}$ $\Delta=10 \text{ mm}$
	$P=630 \text{ kN}$ $\Delta=28 \text{ mm}$
	$P=650 \text{ kN}$ $\Delta=38 \text{ mm}$
	$P=590 \text{ kN}$ $\Delta=60 \text{ mm}$
	$P=650 \text{ kN}$ $\Delta=140 \text{ mm}$
	$P=455 \text{ kN}$ $\Delta=180 \text{ mm}$

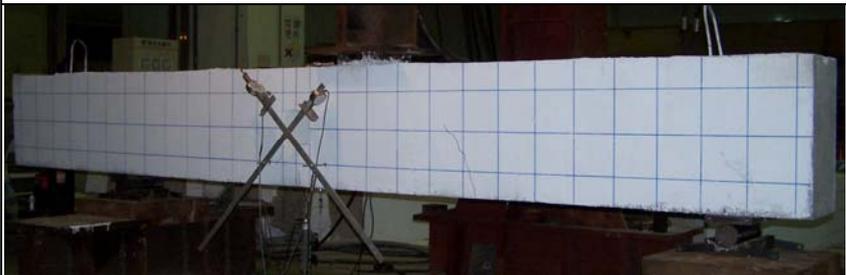
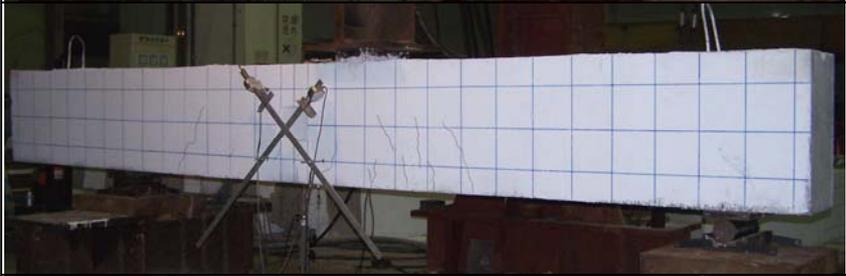
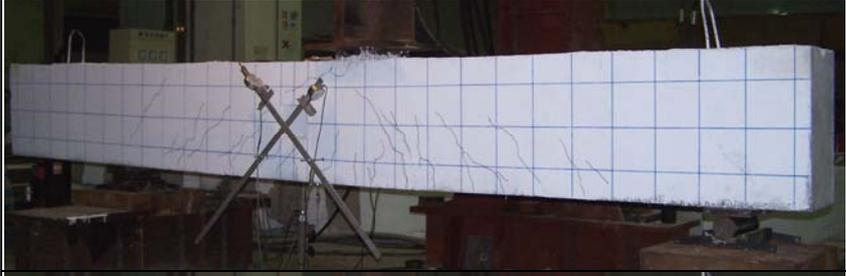
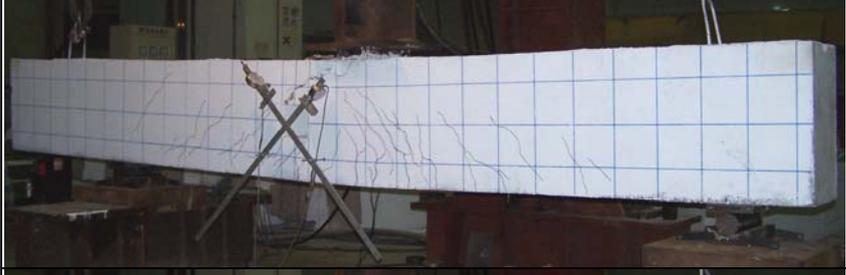
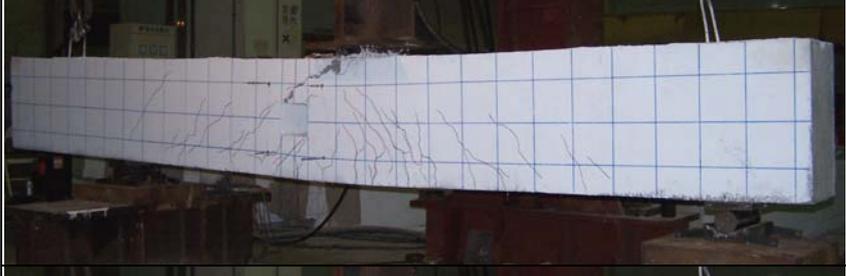
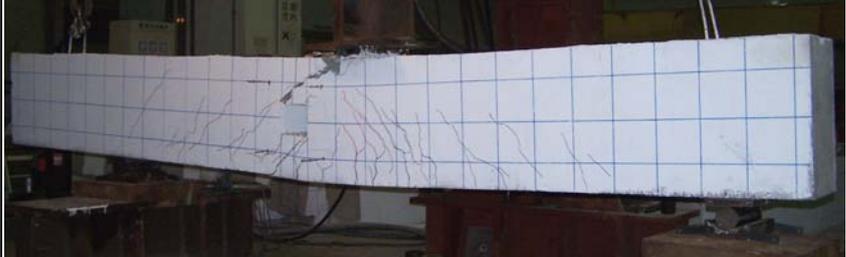
照片 4.17 R1 試體之加載過程



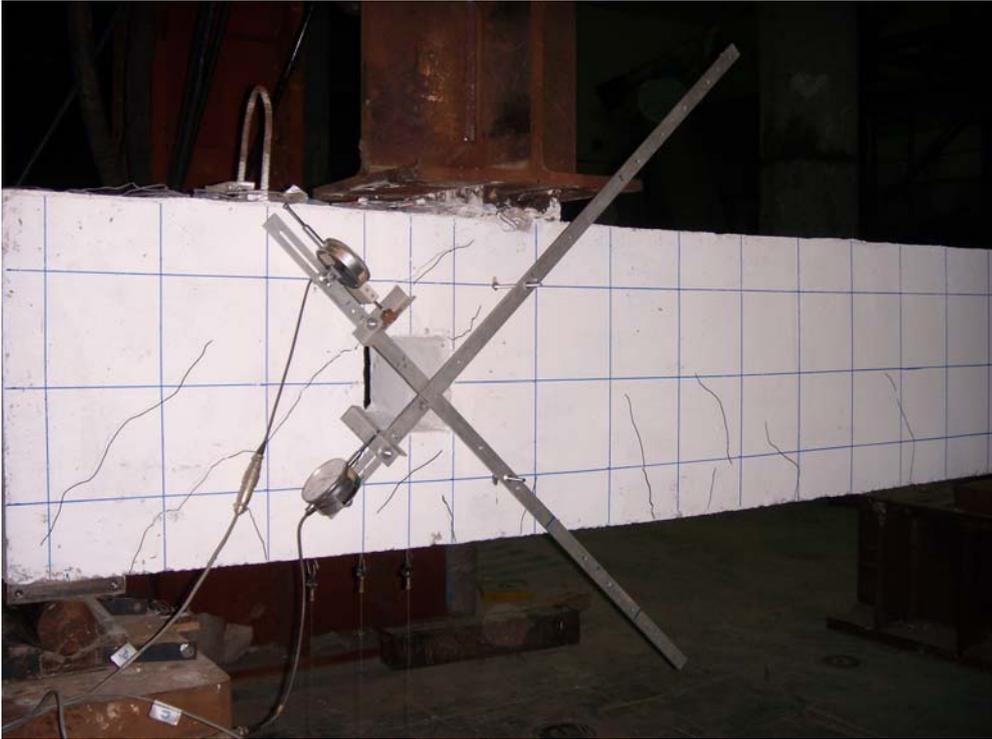
照片 4.18 S2 試體開孔處之剪力裂縫與梁下緣之撓曲裂縫



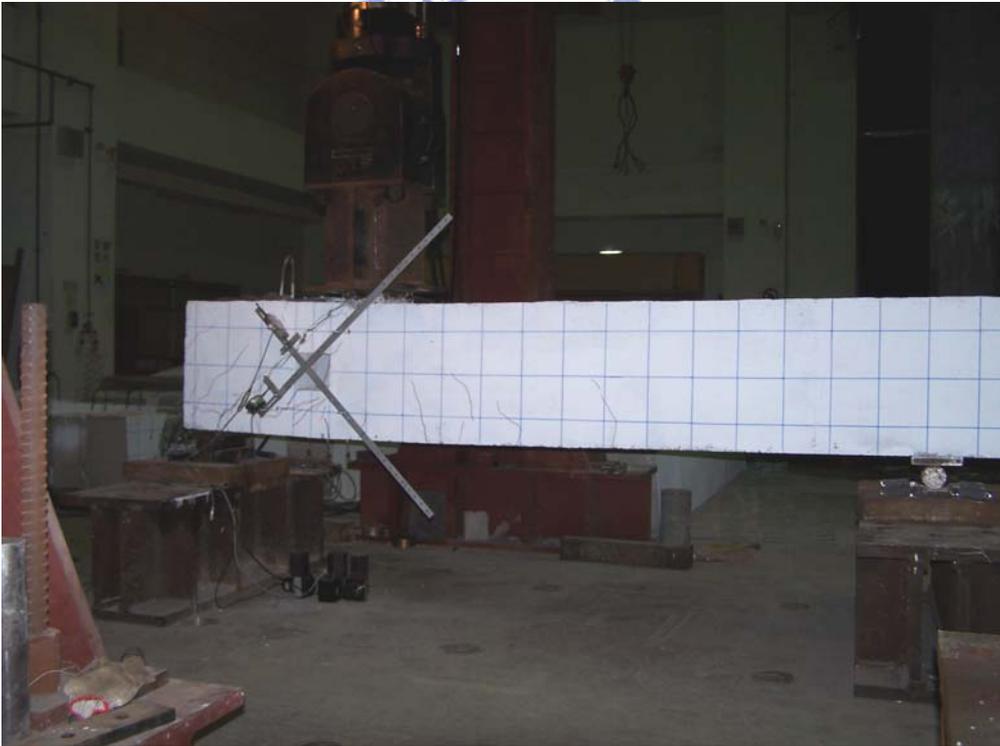
照片 4.19 S2 試體極限載重破壞時之狀態

S2 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=120 \text{ kN}$ $\Delta=0.8 \text{ mm}$
	$P=245 \text{ kN}$ $\Delta=3.0 \text{ mm}$
	$P=490 \text{ kN}$ $\Delta=7.0 \text{ mm}$
	$P=615 \text{ kN}$ $\Delta=19.0 \text{ mm}$
	$P=600 \text{ kN}$ $\Delta=22.0 \text{ mm}$
	$P=590 \text{ kN}$ $\Delta=28.0 \text{ mm}$

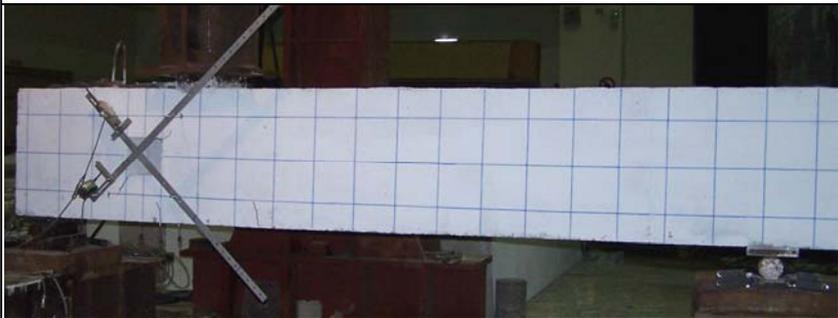
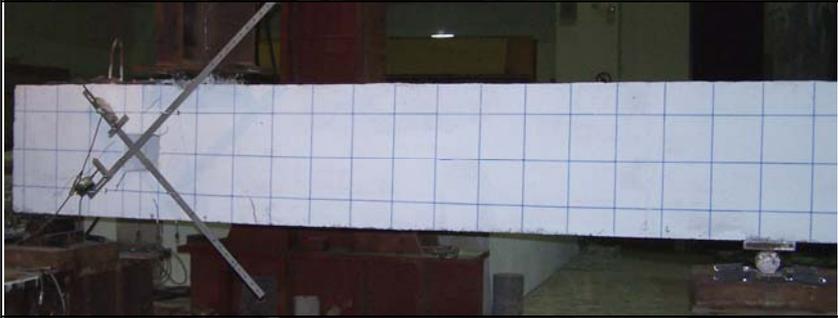
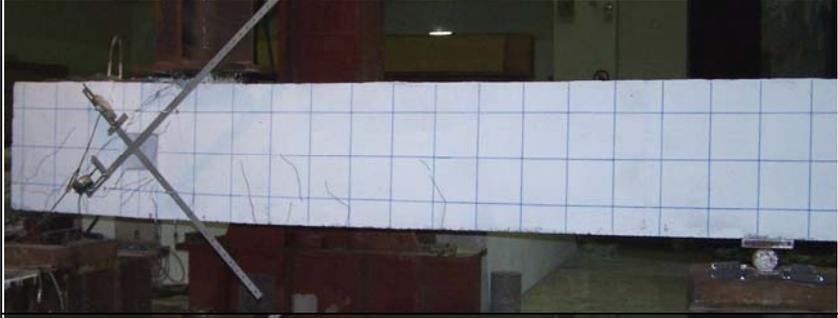
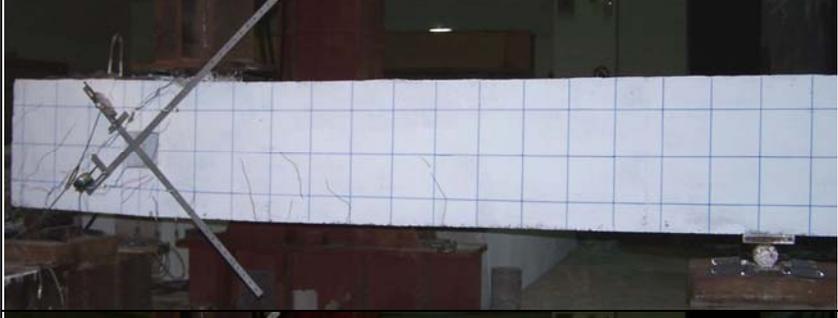
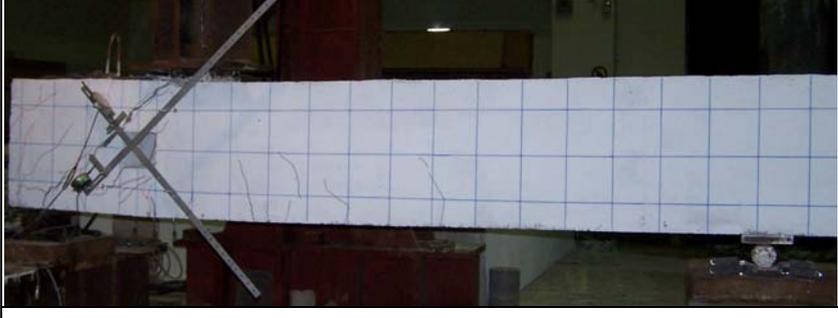
照片 4.20 S2 試體之加載過程



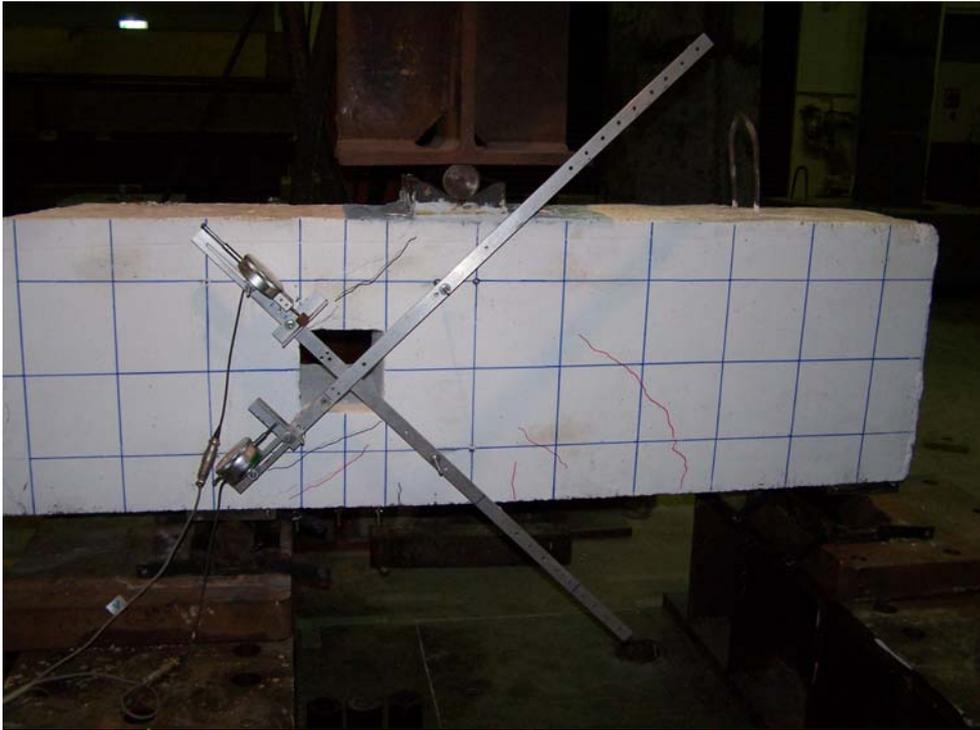
照片 4.21 S3 試體開孔角隅處之剪力裂縫



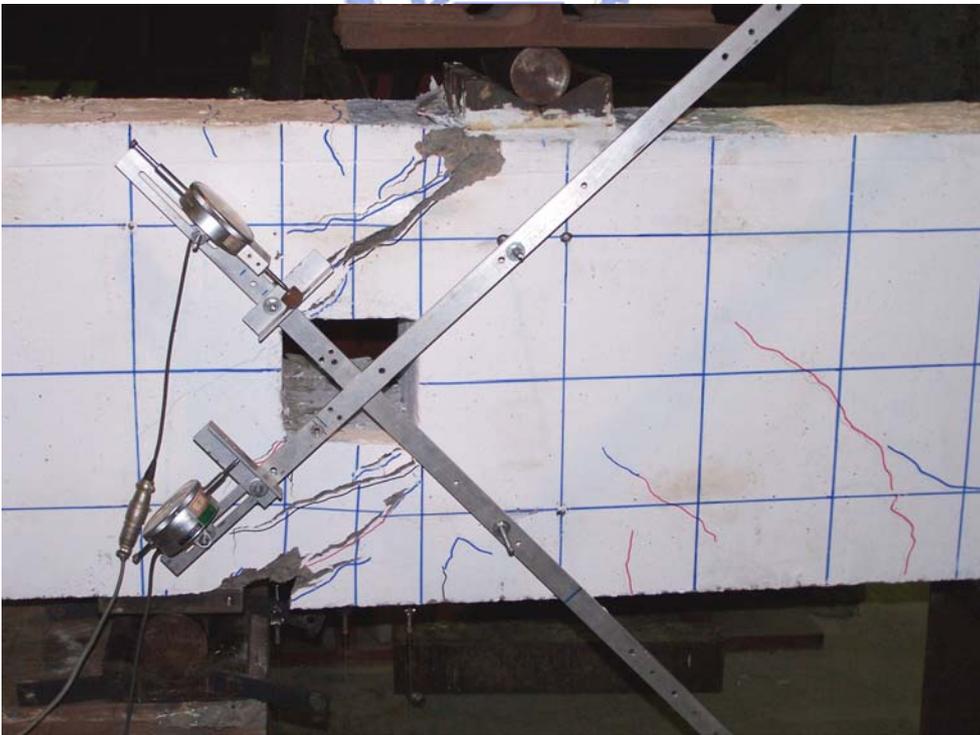
照片 4.22 S3 試體極限載重破壞時之狀態

S3 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=290$ kN $\Delta=0.7$ mm
	$P=490$ kN $\Delta=4.7$ mm
	$P=600$ kN $\Delta=7.0$ mm
	$P=570$ kN $\Delta=8.6$ mm
	$P=520$ kN $\Delta=9.7$ mm

照片 4.23 S3 試體之加載過程



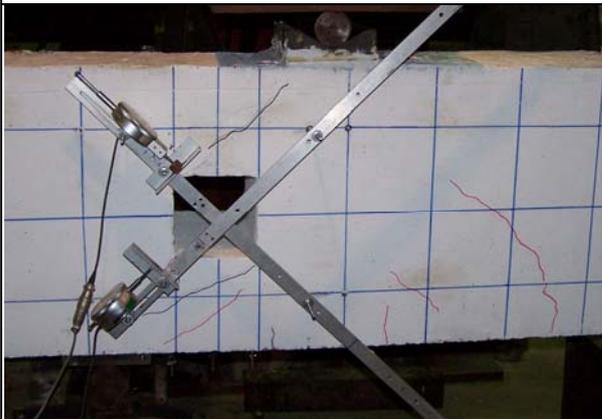
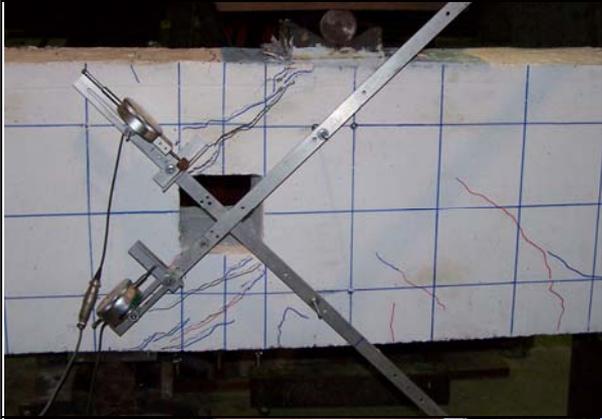
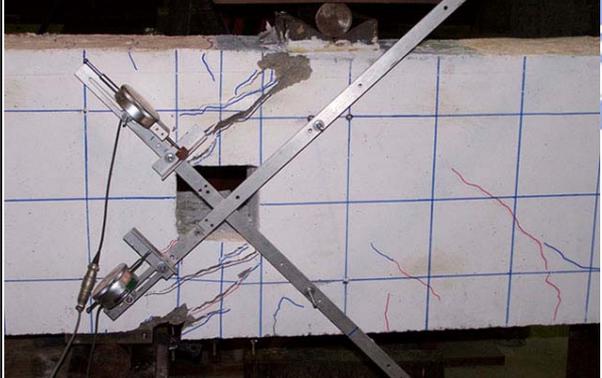
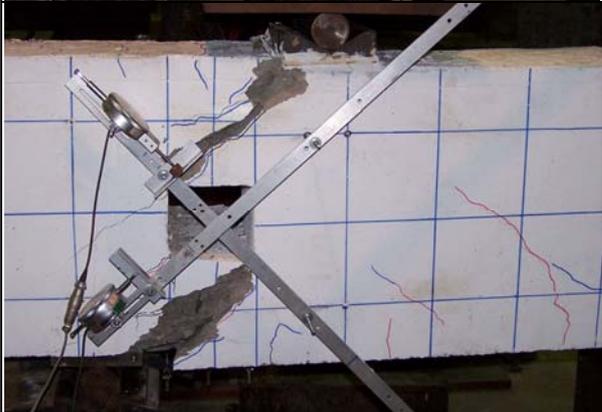
照片 4.24 S4 試體開孔角隅處之剪力裂縫



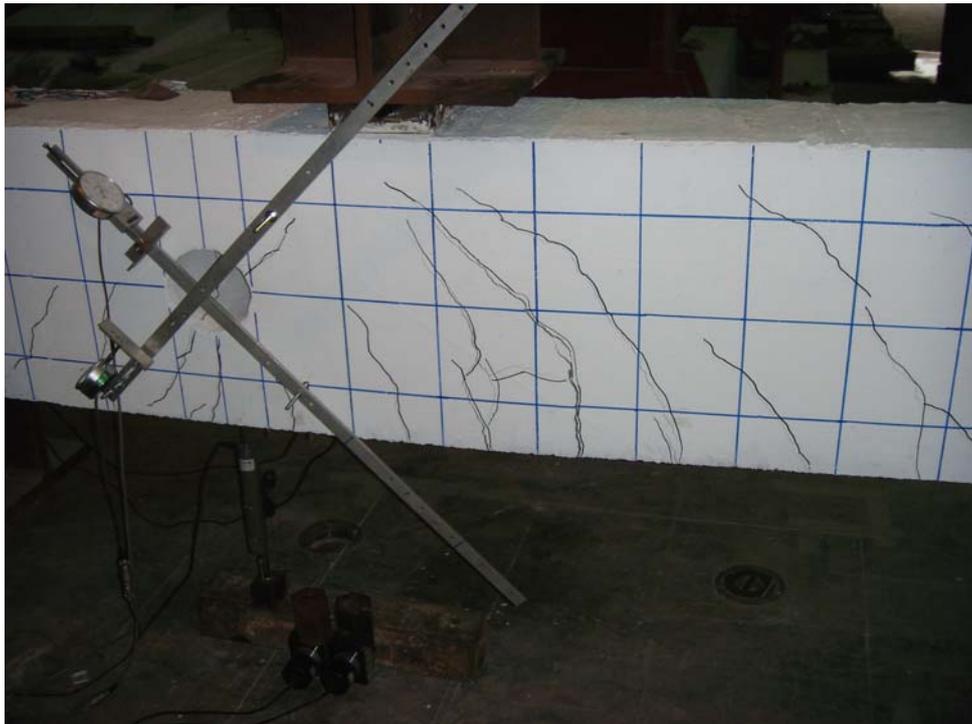
照片 4.25 S4 試體極限載重破壞時之狀態



照片 4.26 S4 試體極限載重破壞後之剪力變形照

S4 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	<p>$P=540 \text{ kN}$ $\Delta=1 \text{ mm}$</p>
	<p>$P=765 \text{ kN}$ $\Delta=4 \text{ mm}$</p>
	<p>$P=835 \text{ kN}$ $\Delta=10 \text{ mm}$</p>
	<p>$P=775 \text{ kN}$ $\Delta=27 \text{ mm}$</p>

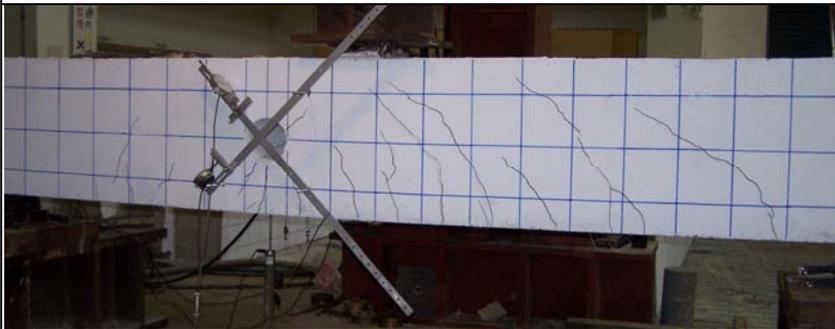
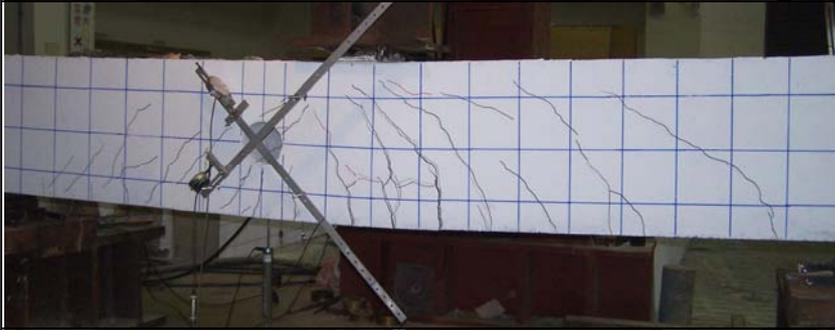
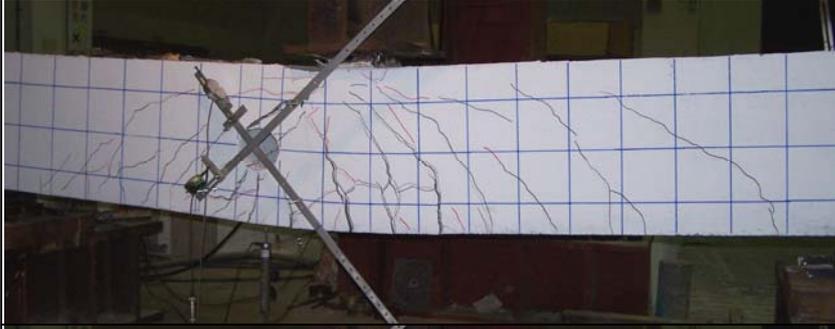
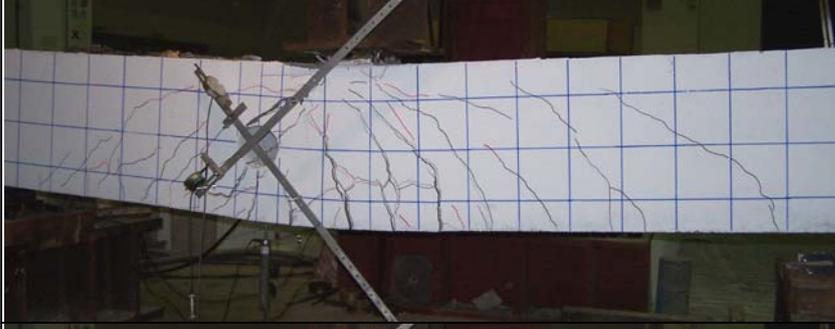
照片 4.27 S4 試體之加載過程



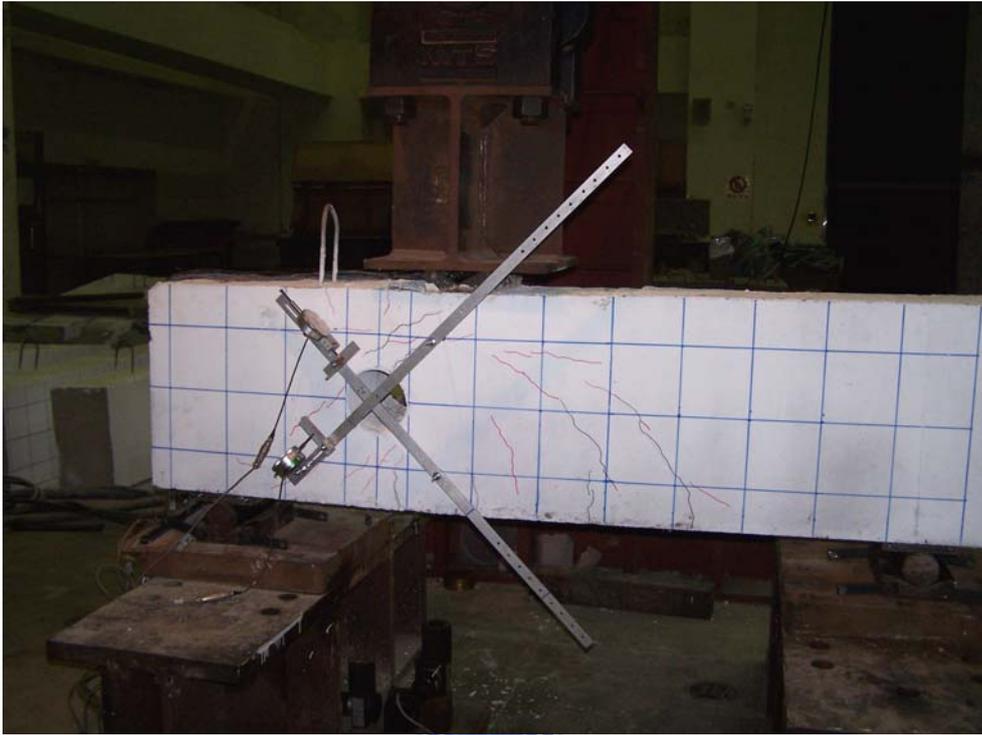
照片 4.28 C2 試體開孔處之剪力裂縫



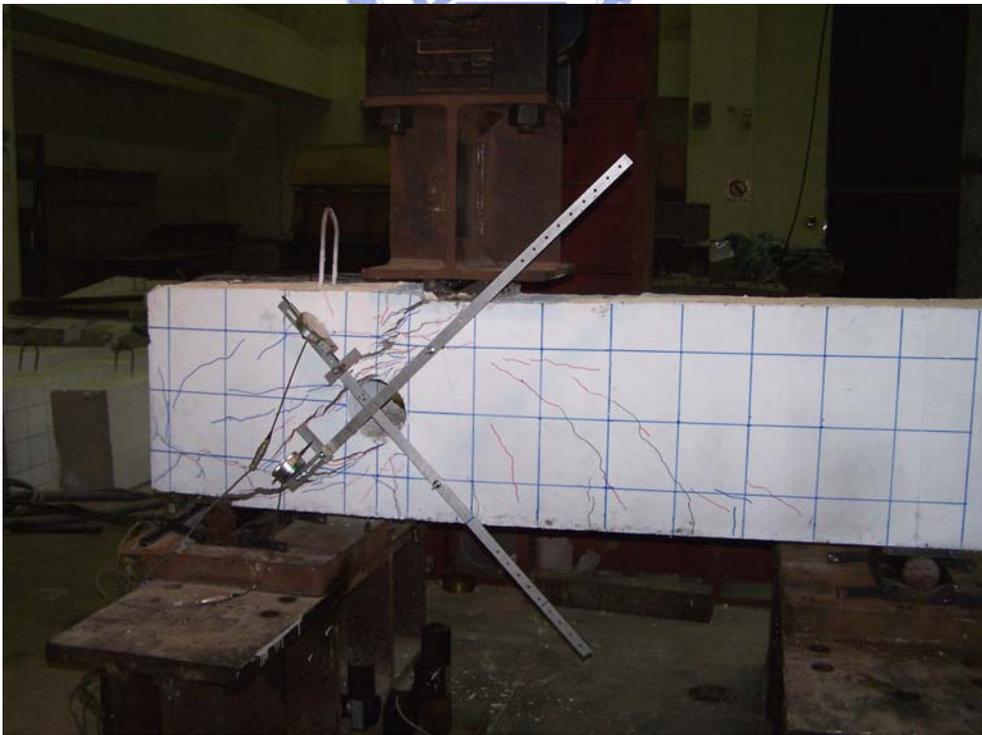
照片 4.29 C2 試體極限載重破壞時之狀態

C2 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=275 \text{ kN}$ $\Delta=3 \text{ mm}$
	$P=590 \text{ kN}$ $\Delta=11 \text{ mm}$
	$P=650 \text{ kN}$ $\Delta=18 \text{ mm}$
	$P=600 \text{ kN}$ $\Delta=65 \text{ mm}$
	$P=570 \text{ kN}$ $\Delta=80 \text{ mm}$

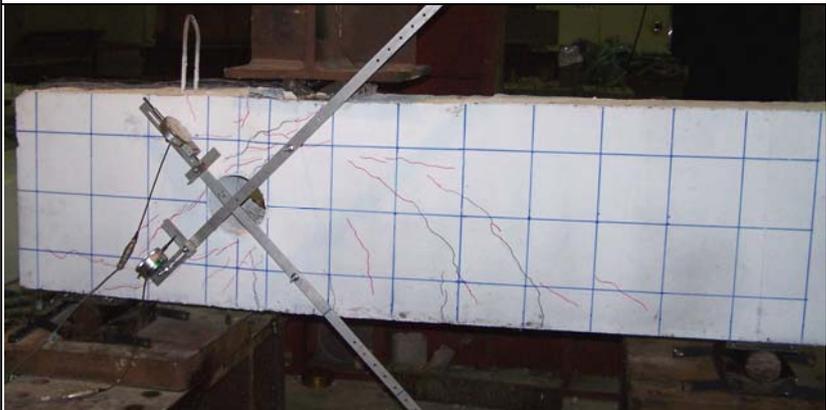
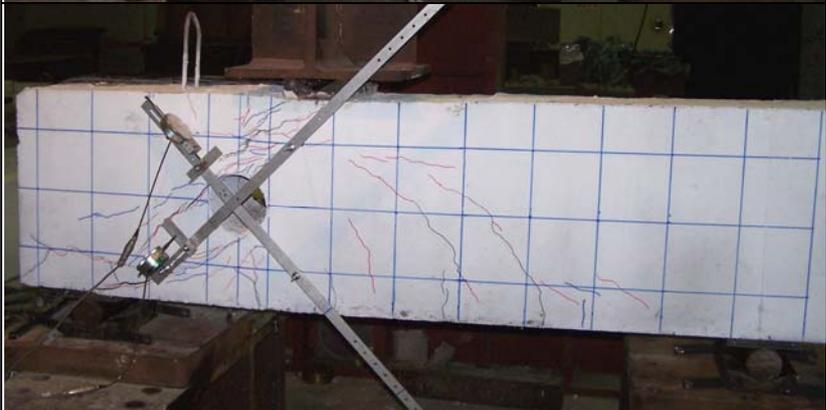
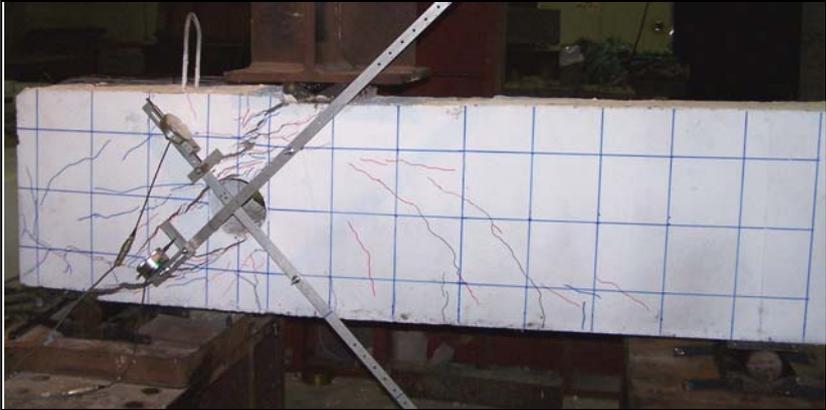
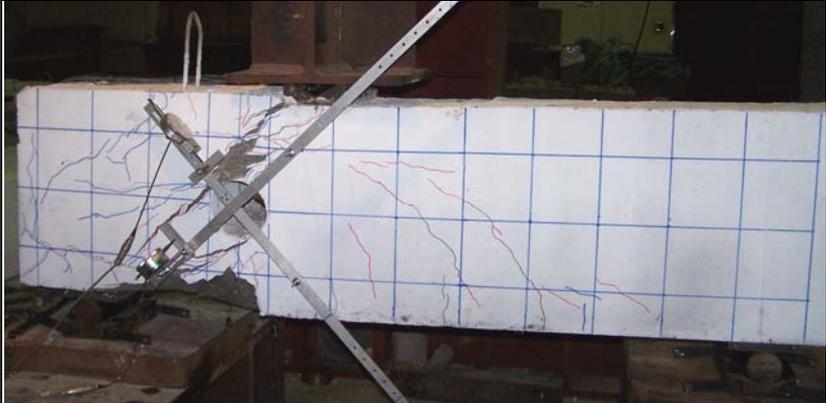
照片 4.30 C2 試體之加載過程



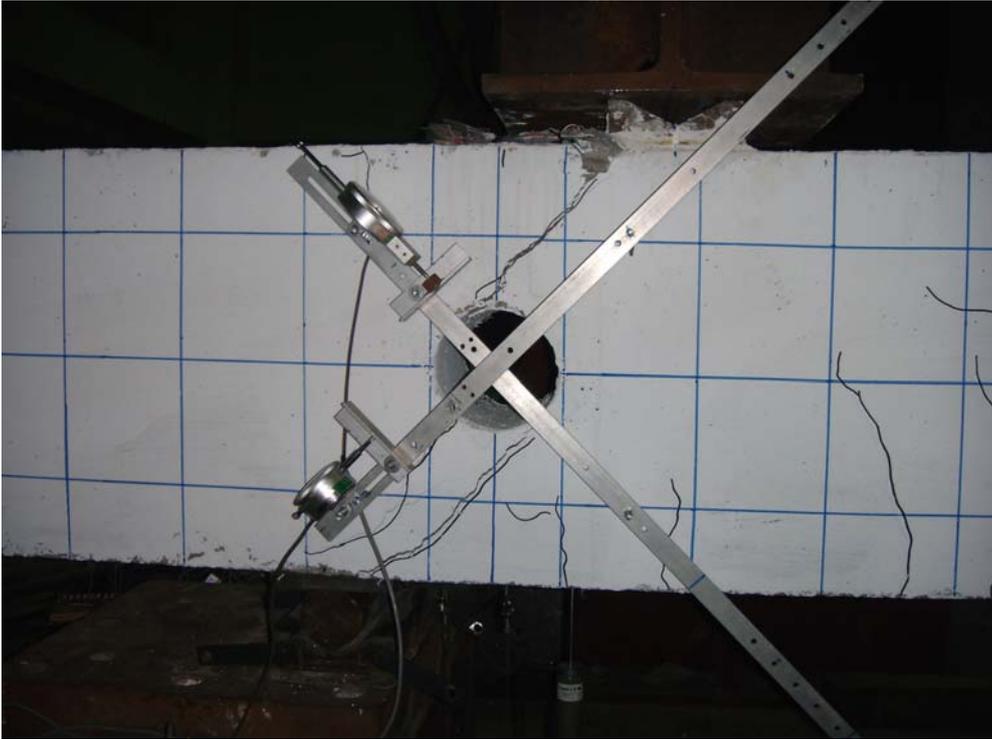
照片 4.31 C3 試體開孔處之剪力裂縫



照片 4.32 C3 試體極限載重破壞時之狀態

C3 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=600 \text{ kN}$ $\Delta=3 \text{ mm}$
	$P=785 \text{ kN}$ $\Delta=6 \text{ mm}$
	$P=880 \text{ kN}$ $\Delta=10 \text{ mm}$
	$P=750 \text{ kN}$ $\Delta=35 \text{ mm}$

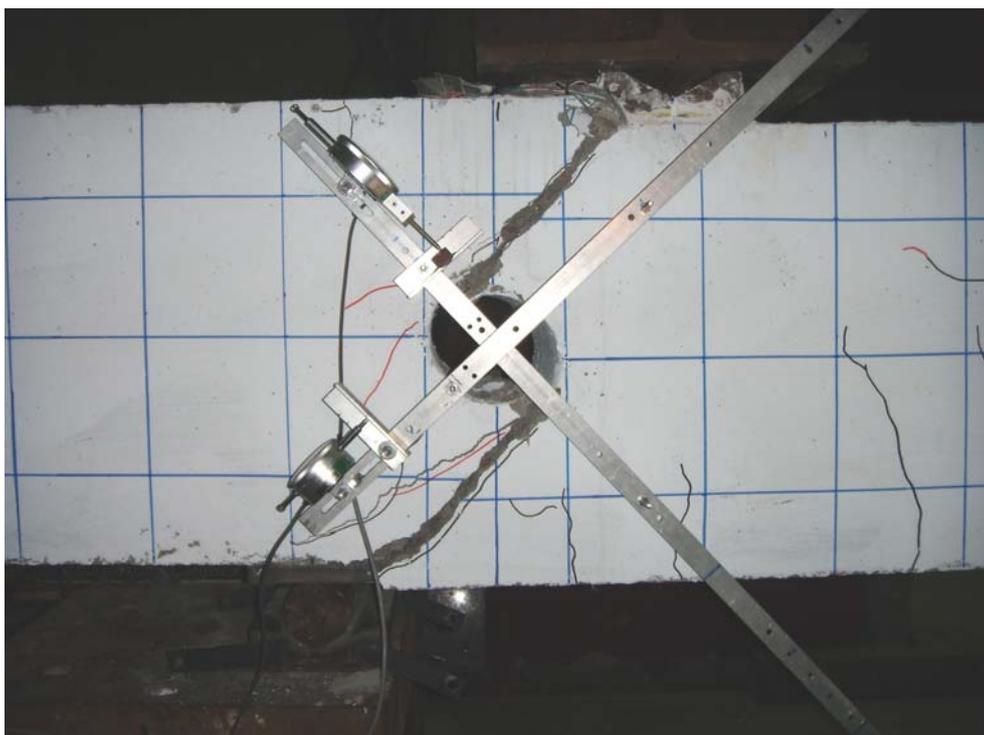
照片 4.33 C3 試體之加載過程



照片 4.34 C4 試體開孔處之剪力裂縫

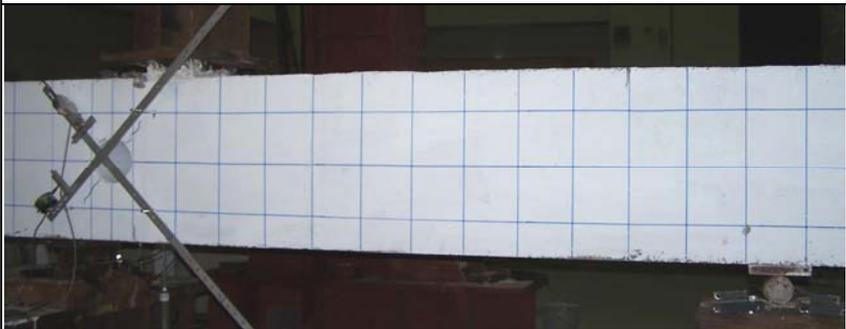
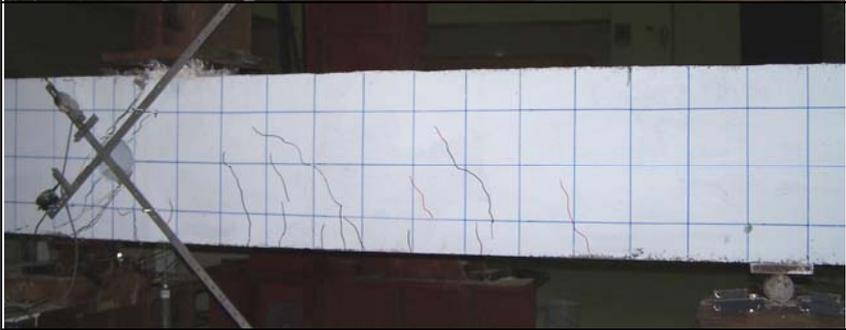
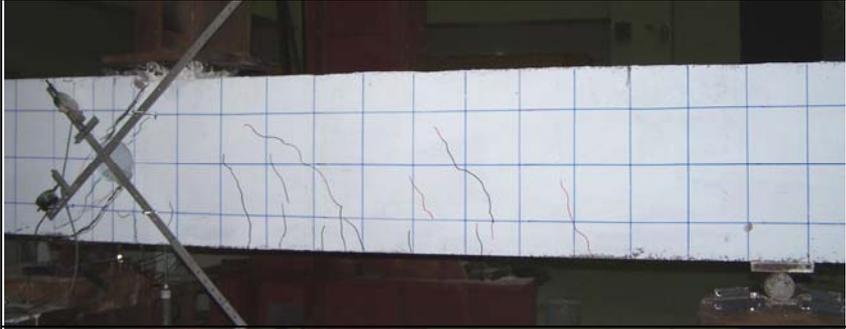
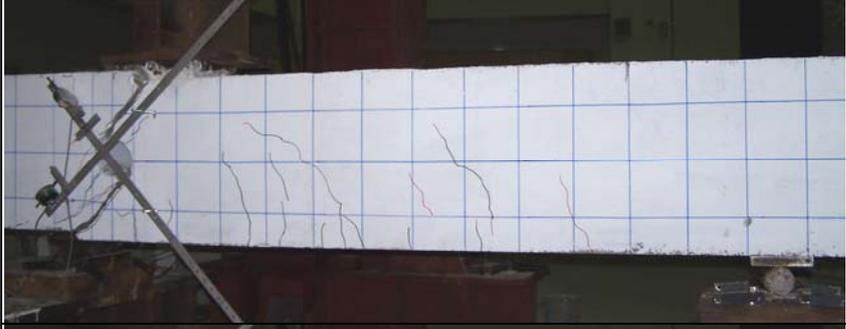
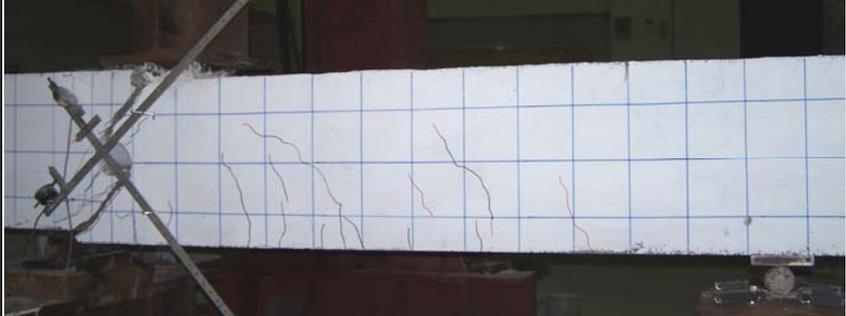


照片 4.35 C4 試體極限載重破壞時之狀態



照片 4.36 C4 試體極限載重破壞時之剪力變形照

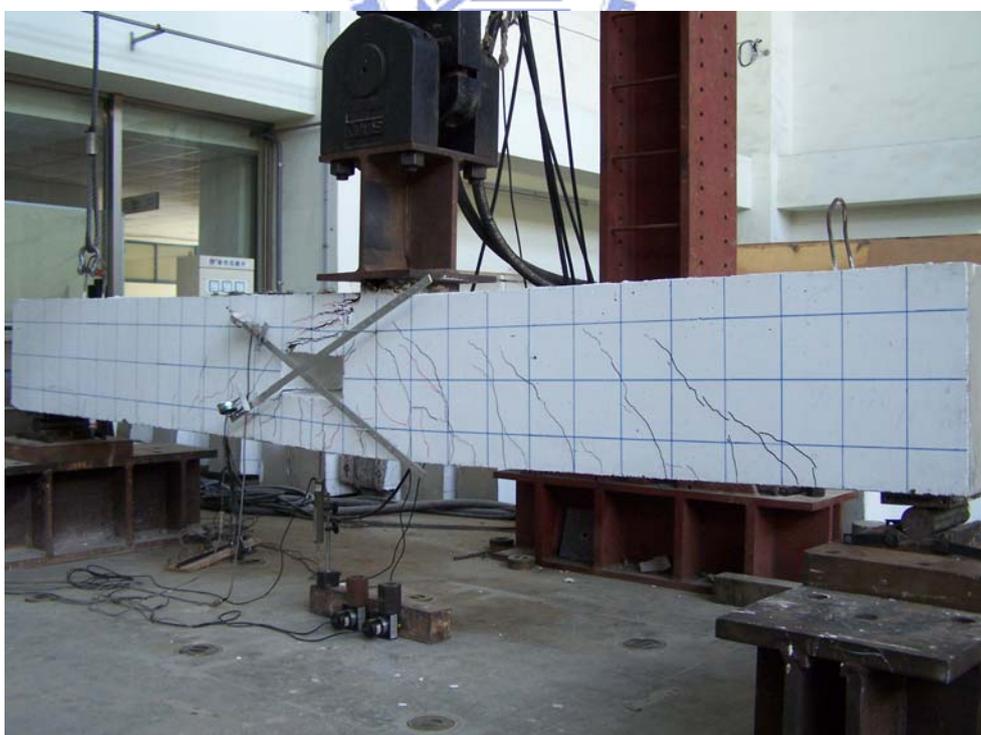


C4 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=245 \text{ kN}$ $\Delta=2.8 \text{ mm}$
	$P=685 \text{ kN}$ $\Delta=6.0 \text{ mm}$
	$P=840 \text{ kN}$ $\Delta=9.0 \text{ mm}$
	$P=780 \text{ kN}$ $\Delta=16.0 \text{ mm}$
	$P=730 \text{ kN}$ $\Delta=19.0 \text{ mm}$

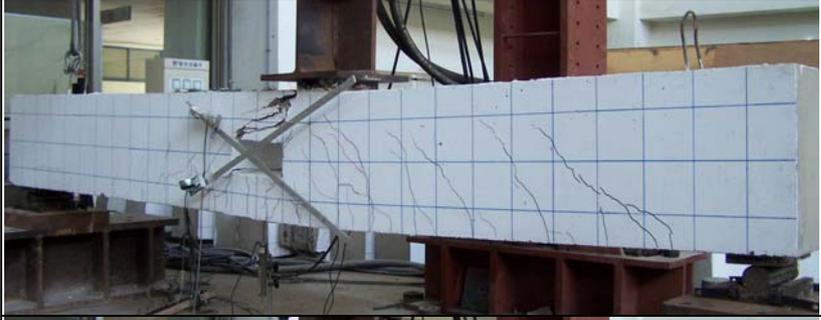
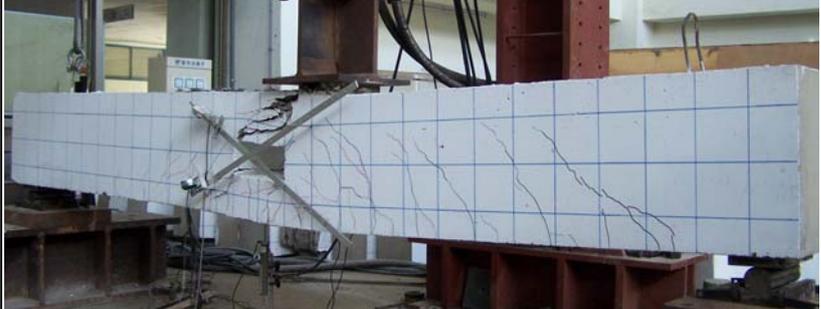
照片 4.37 C4 試體之加載過程



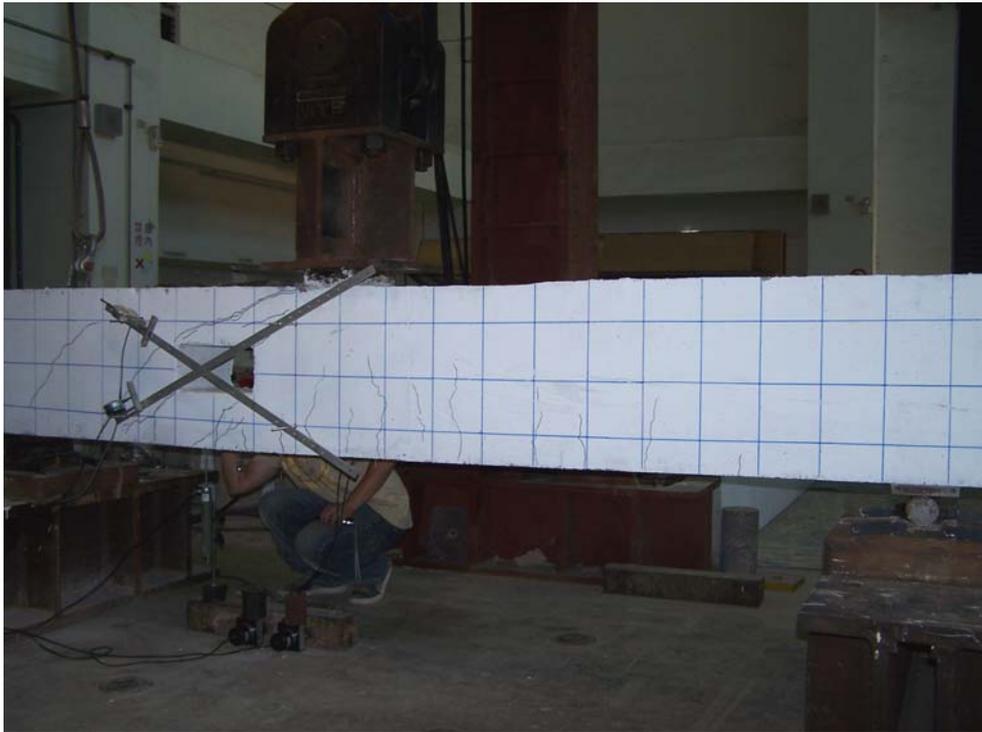
照片 4.38 R2 試體開孔角隅處之剪力裂縫



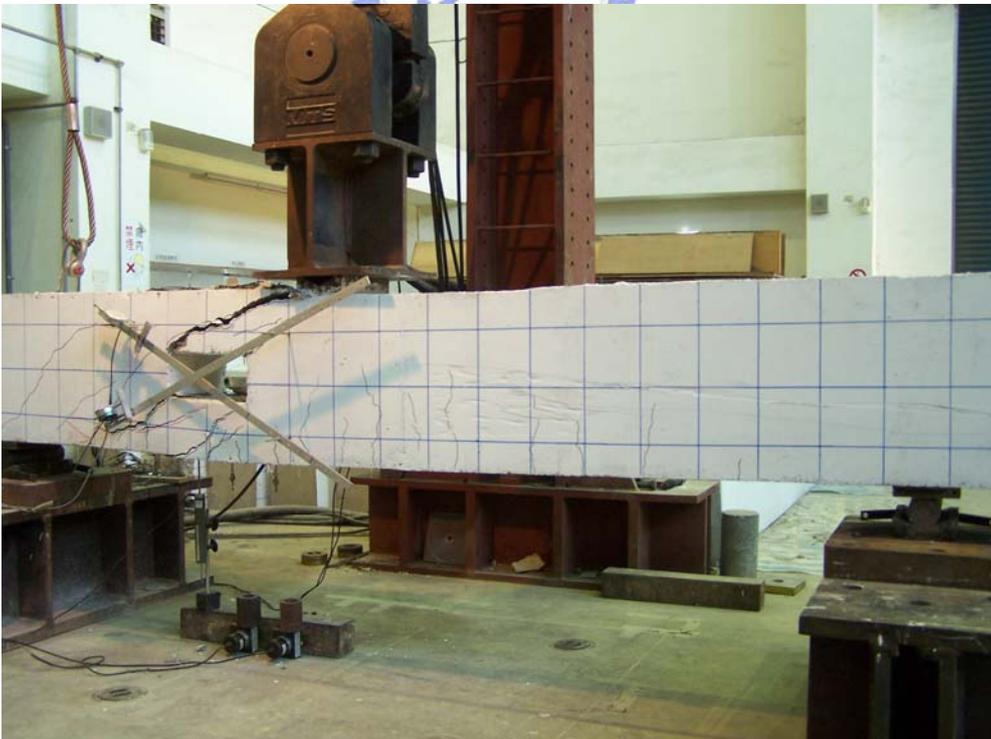
照片 4.39 R2 試體極限載重破壞時之狀態

R2 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=170 \text{ kN}$ $\Delta=2 \text{ mm}$
	$P=295 \text{ kN}$ $\Delta=8 \text{ mm}$
	$P=410 \text{ kN}$ $\Delta=11 \text{ mm}$
	$P=485 \text{ kN}$ $\Delta=24 \text{ mm}$
	$P=370 \text{ kN}$ $\Delta=52 \text{ mm}$

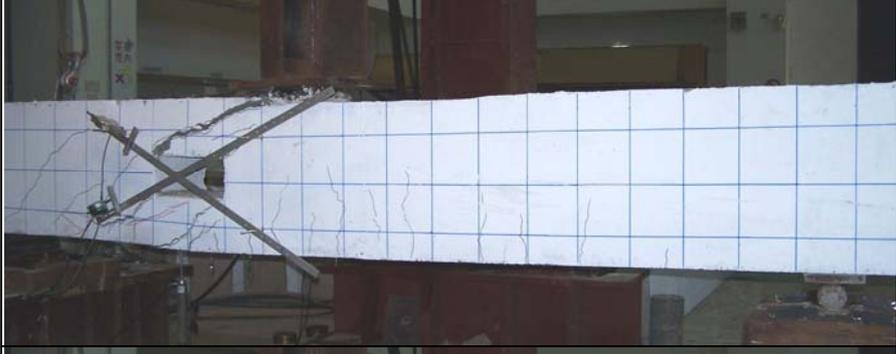
照片 4.40 R2 試體之加載過程



照片 4.41 R3 試體開孔角隅處之剪力裂縫



照片 4.42 R3 試體極限載重破壞時之狀態

R3 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	$P=295 \text{ kN}$ $\Delta=4 \text{ mm}$
	$P=480 \text{ kN}$ $\Delta=8.5 \text{ mm}$
	$P=410 \text{ kN}$ $\Delta=25 \text{ mm}$
	$P=380 \text{ kN}$ $\Delta=40 \text{ mm}$

照片 4.43 R3 試體之加載過程



照片 4.44 R4 試體開孔角隅處之剪力裂縫

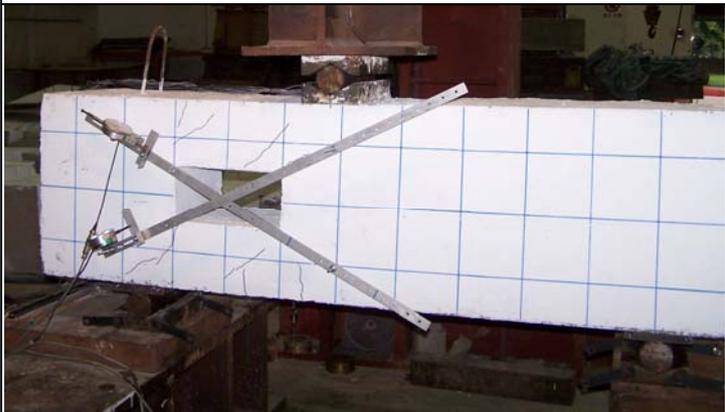
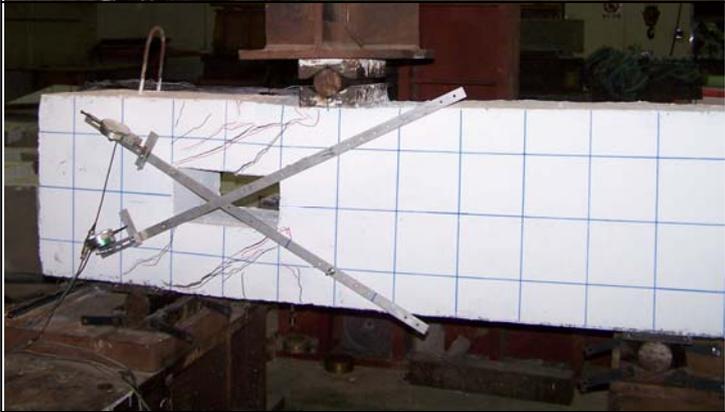
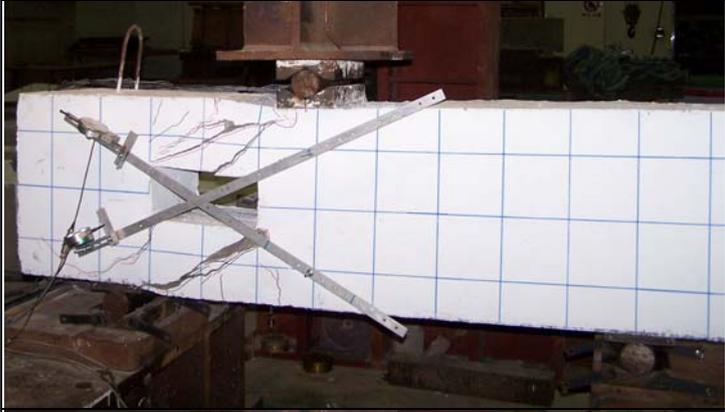
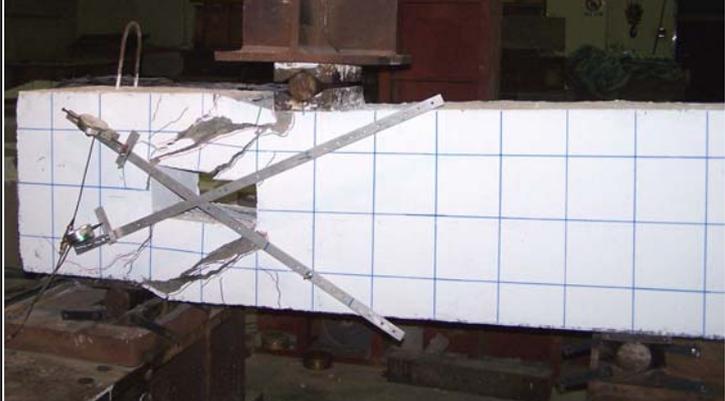


照片 4.45 R4 試體極限載重破壞時之狀態



照片 4.46 R4 試體極限載重破壞後之剪力變形



R4 試體之加載過程	載重 P 與位移 Δ
	<p>$P=150$ kN $\Delta=1.4$ mm</p>
	<p>$P=340$ kN $\Delta=6.0$ mm</p>
	<p>$P=520$ kN $\Delta=12.0$ mm</p>
	<p>$P=460$ kN $\Delta=30$ mm</p>

照片 4.47 R4 試體之加載過程



照片 4.48 N1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形



照片 4.49 S1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形



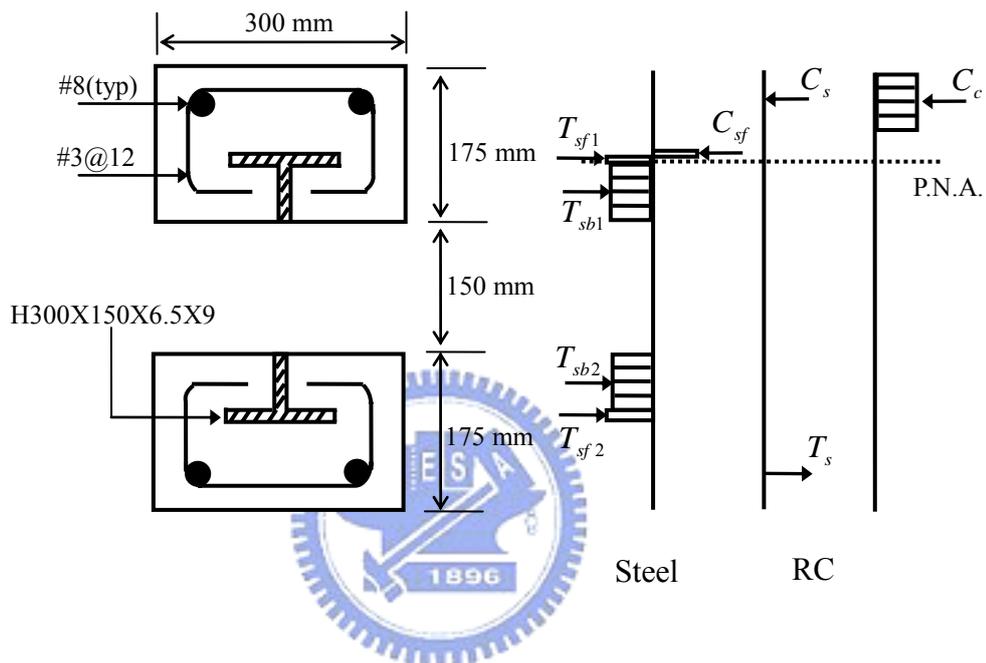
照片 4.50 C1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形



照片 4.51 R1 試體箍筋與鋼骨對混凝土之圍束情形

附錄

以全斷面塑性應力法計算 SRC 開孔梁之撓曲強度，SRC 開孔梁之斷面如下圖所示。



已知條件：

SRC 梁斷面尺寸為 300×500 mm，鋼骨為 $300 \times 150 \times 6.5 \times 9$ ，

鋼骨降伏強度 f_{ys} 為 350 MPa，鋼筋降伏強度 f_{yr} 為 420

MPa，混凝土強度 f'_c 為 28 MPa，箍筋為 3 號竹節鋼筋，主

筋為 8 號竹節鋼筋。

假設中性軸距離斷面頂部為 x cm，且落在上翼板之位置，藉由力平衡求出中性軸之位置。

RC 部分

$$A'_s = A_s = 10.13 \text{ cm}^2$$

$$C_c = 0.85 f'_c b \beta x = 630x \text{ kN}$$

$$C_s = A'_s f_{yr} = 417.4 \text{ kN}$$

$$T_s = A_s f_{yr} = 417.4 \text{ kN}$$

其中

A'_s : 壓力筋斷面積

A_s : 拉力筋斷面積

C_c : 混凝土合壓力

C_s : 鋼筋合壓力

T_s : 鋼筋合拉力



鋼骨部分

$$C_{sf} = A'_{sf1} f_{ys} = [(x - 10)15](350) = 5250x - 52500$$

$$T_{sf1} = A_{sf1} f_{ys} = [(10.9 - x)15](350) = 57225 - 5250x$$

$$T_{sb1} = A_{sb1} f_{ys} = 147.3 \text{ kN}$$

$$T_{sb2} = A_{sb2} f_{ys} = 147.3 \text{ kN}$$

$$T_{sf2} = A_{sf2} f_{yr} = 463.5 \text{ kN}$$

其中

A'_{sf1} : 鋼骨上翼板受壓力之面積

A_{sf1} : 鋼骨上翼板受拉力之面積

A_{sf2} : 鋼骨下翼板受拉力之面積

A_{sb1} : 開孔上方鋼骨腹板受拉力之面積

A_{sb2} : 開孔下方鋼骨腹板受拉力之面積

C_{sf} : 鋼骨上翼板所受之壓力

T_{sf1} : 鋼骨上翼板所受之拉力

T_{sb1} : 開孔上方鋼骨腹板所受之拉力

T_{sb2} : 開孔下方鋼骨腹板所受之拉力

T_{sf2} : 鋼骨下翼板所受之拉力

藉由力平衡壓力等於拉力求中性軸之位置

$$C = T$$

$$C_c + C_{sf} + C_s = T_s + T_{sf1} + T_{sf2} + T_{sb1} + T_{sb2}$$

$$\therefore x = 10.57 \text{ cm}$$

各分力對塑性中性軸取力矩即可求得撓曲強度 M_p

$$\therefore M_p = 382 \text{ kN} - \text{m}$$