

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

鋼骨鋼筋混凝土構件
扭矩強度與行為研究



**Torsional Strength and Behavior of
Steel Reinforced Concrete
(SRC) Members**

研究生：陳璿至

指導教授：陳誠直博士

中華民國九十八年四月

鋼骨鋼筋混凝土構件
扭矩強度與行為研究

**Torsional Strength and Behavior of
Steel Reinforced Concrete
(SRC) Members**

研究生：陳璿至

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

April 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年四月

鋼骨鋼筋混凝土構件扭矩強度與行為研究

研究生：陳璿至

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

本研究以實驗方式探討鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)梁構件承受純扭矩作用之強度與行為與 SRC 梁構件扭矩強度之計算模式。設計 16 組 SRC 梁試體，試體之設計參數有鋼骨、橫向扭力筋與縱向主筋。試驗結果顯示 SRC 試體包覆 H 型鋼骨，因鋼骨之扭矩強度甚小，故 SRC 試體較 RC 試體於極限扭矩強度僅有些微的提昇；然而 SRC 試體之扭矩-扭轉角行為異於 RC 試體，SRC 試體於達到極限扭矩強度後，強度呈現較緩慢之下降，能有較佳的韌性行為。SRC 試體內之橫向扭力筋量之增大將提昇試體之扭矩強度，配置 #3@10 cm 橫向扭力筋系列試體之實驗值幾乎皆高於規範計算值，然而配置雙排 #3@10 cm 之橫向扭力筋試體之實驗值遠小於規範之計算值。包覆不同鋼骨深度的 SRC 試體之極限扭矩強度無一致性的試驗結果。增加縱向扭力筋能提昇 SRC 試體的極限扭矩強度，惟於橫向扭力筋量越高之情況下，縱向扭力筋於 SRC 試體的扭矩強度之影響越小。SRC 梁試體於達到其極限扭矩強度時，H 型鋼骨尚未降伏，其於扭矩強度之貢獻相對於 RC 梁甚小，於實務設計上可保守的忽略 H 型鋼的扭矩強度。

關鍵詞：鋼骨鋼筋混凝土構件、扭矩強度、橫向扭力筋

Torsional Strength and Behavior of Steel Reinforced Concrete (SRC) Members

Student: Syuan-Jhih Chen Adviser: Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

This study experimentally investigates the strength, behavior and calculation of torsional strength of steel reinforced concrete (SRC) members subjected to pure torsion. Sixteen beam specimens were designed to include design parameters of structural steel, closed stirrup, and longitudinal reinforcement. Test results indicate that the SRC beams, enclosed the H-shaped structural steel, reached slightly higher torsional strength than reinforced concrete beams did due to the low torsional resistance of the H-shaped structural steel. However, the torque-twist curves for SRC specimens were different from those for RC specimens. The torsional strength of the SRC specimens gradually decreased and possessed better toughness after reached the peak strength as indicated in the torque-twist curves. Increasing the amount of closed stirrups can enhance the torsional strength of the SRC specimens. Specimens with No. 3@10 cm closed stirrups can develop higher torsional strength than calculated strength followed the code, while specimens with 2-No. 3@10 cm closed stirrups can not even attain the strength calculated by the code. Specimens enclosed different size of the structural steel did not achieve consistent test results. In addition, increasing the amount of longitudinal reinforcement can increase the torsional strength. Nevertheless, the effect becomes little for specimens with higher amount of closed stirrups. The structural steel did not yield while the SRC specimens reached the ultimate torsional strength. Because the negligible contribution to the torsional strength compared with RC beam, the H-shaped structural steel can be conservatively neglected to calculate the torsional strength of SRC beam in practical design.

Keywords: steel reinforced concrete (SRC) member, torsional strength, closed stirrup

誌謝

承蒙恩師 陳誠直博士於研究所兩年多來的指導，其認真負責之態度讓學生欽佩萬分，也讓學生學習許多專業知識與為人處事之態度，於研究上更給予許多的指導與協助，讓學生得以順利完成研究，在此敬上最高的謝意。

論文口試期間，承蒙本校 劉俊秀教授、鄭復平教授，給予本論文諸多寶貴的意見與指教，使本論文可以更為完備，在此敬上萬分謝意。

感謝南交學長、政甯學長、政億學長、建霖學長、明昌學長、紀勛學長的協助指導，使試驗與撰寫論文之過程更為順利，感謝同窗好友俞燐、煒銘以及嘉儀於學業與研究上互相的幫助與建議，感謝學弟妹孟暉、致潔、岳勳、顯嘉、錦輝於試驗期間之幫助。

家人一路以來的支持與關心，是求學在外的我最大的鼓勵。在父親 家富對子女們的期許下，家中的四兄弟姊妹在一個完善環境中成長，不僅使我們生活無虞，也傳授許多人生經驗，培育我們高尚之品德，由衷感謝父親的細心栽培。感謝紅顏知己婕妤對我的鼓勵，陪伴我度過這段日子，讓我有繼續前進之動力。

在研究所 900 多個日子裡，特別感謝恩師 陳誠直博士與南交學長的照顧，以及身邊所有人對我的支持，能有今天的成就，我願與你們一起分享這份喜悅。

目錄

摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
相片目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究方法.....	2
1.4 報告內容.....	2
第二章 國內外相關規範與文獻回顧.....	4
2.1 國外SRC規範.....	4
2.1.1 美國AISC設計規範.....	4
2.1.2 美國ACI 318 設計規範.....	4
2.1.3 日本建築學會(AIJ) SRC設計規範.....	5

2.2	國內鋼骨鋼筋混凝土構造(SRC)設計規範與解說.....	5
2.3	鋼筋混凝土扭矩強度.....	5
2.4	鋼骨扭矩強度.....	10
2.5	國內外相關重要文獻回顧.....	11
第三章	SRC梁構件之扭矩實驗.....	16
3.1	實驗規劃.....	16
3.2	試體設計.....	16
3.3	試體製作.....	19
3.4	試驗設置.....	19
3.5	量測系統.....	20
3.6	試驗程序.....	20
第四章	試驗結果與討論.....	22
4.1	試體行為.....	22
4.1.1	SRC系列試體.....	22
4.1.2	RC系列試體.....	23
4.2	試體扭矩-扭轉角行為.....	24
4.2.1	扭轉角計算.....	24
4.2.2	試體扭矩-扭轉角行為.....	24
4.3	試體參數於扭矩強度與行為之影響.....	25

4.4	試體局部行為討論.....	27
4.5	試體極限扭矩強度計算.....	28
第五章	結論與建議.....	29
5.1	結論.....	29
5.2	建議.....	30
	參考文獻.....	31
附錄	試體扭矩強度計算例.....	86



表目錄

表 3.1 試體編號	35
表 3.2 以標稱強度計算之試體扭矩強度	36
表 3.3 鋼骨與鋼筋材料性質試驗結果	37
表 3.4 試體之混凝土強度	37
表 4.1 扭矩強度與扭轉角實驗值	38
表 4.2 開裂扭矩強度規範計算值與實驗值之比較	38
表 4.3 扭矩強度規範計算值與實驗值之比較	39



圖目錄

圖 2.1 斜彎理論(Wang and Salmon, 1992).....	40
圖 2.2 (a)薄壁管; (b)剪力流徑所包圍之面積(ACI 318-95).....	40
圖 2.3 空間桁架分析(ACI 318-95)	41
圖 3.1 試體圖.....	41
圖 3.2 試體斷面圖	42
圖 3.3 試驗設置圖	43
圖 3.4 試驗設置細部圖	44
圖 3.5 圓弧形支承座圖	45
圖 3.6 試體 t_1 系列橫向與縱向鋼筋應變計配置圖	46
圖 3.7 試體 t_2 系列橫向與縱向鋼筋應變計配置圖	47
圖 3.8 試體 t_3 系列橫向與縱向鋼筋應變計配置圖	48
圖 3.9 S1 系列試體鋼骨應變計配置圖	49
圖 3.10 S2 系列試體鋼骨應變計配置圖	50
圖 3.11 變位量測裝置配置圖	51
圖 4.1 SRC試體扭矩-扭轉角示意圖	51
圖 4.2 SRC系列試體裂縫生成次序示意圖	52
圖 4.3 RC試體扭矩-扭轉角示意圖.....	53

圖 4.4 RC系列試體裂縫生成次序示意圖	53
圖 4.5 試體S1-RCt1l1 扭矩與扭轉角關係圖	54
圖 4.6 試體S1-RCt2l1 扭矩與扭轉角關係圖	54
圖 4.7 試體S1-RCt3l1 扭矩與扭轉角關係圖	55
圖 4.8 試體S1-RCt1l2 扭矩與扭轉角關係圖	55
圖 4.9 試體S1-RCt2l2 扭矩與扭轉角關係圖	56
圖 4.10 試體S1-RCt3l2 扭矩與扭轉角關係圖	56
圖 4.11 試體S2-RCt1l1 扭矩與扭轉角關係圖	57
圖 4.12 試體S2-RCt2l1 扭矩與扭轉角關係圖	57
圖 4.13 試體S2-RCt3l1 扭矩與扭轉角關係圖	58
圖 4.14 試體S2-RCt1l2 扭矩與扭轉角關係圖	58
圖 4.15 試體S2-RCt2l2 扭矩與扭轉角關係圖	59
圖 4.16 試體S2-RCt3l2 扭矩與扭轉角關係圖	59
圖 4.17 試體RCt2l1 扭矩與扭轉角關係圖	60
圖 4.18 試體RCt2l2 扭矩與扭轉角關係圖	60
圖 4.19 S1 與S2 之扭矩-扭轉角比較圖	61
圖 4.20 試體編號S1-RCt1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	61
圖 4.21 試體編號S1-RCt2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	62
圖 4.22 試體編號S1-RCt3 系列之扭矩-扭轉角比較圖	62

圖 4.23	試體編號S2-RCt1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	63
圖 4.24	試體編號S2-RCt2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	63
圖 4.25	試體編號S2-RCt3 系列之扭矩-扭轉角比較圖	64
圖 4.26	試體編號RCt2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	64
圖 4.27	試體編號S1-RCl1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	65
圖 4.28	試體編號S1-RCl2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	65
圖 4.29	試體編號S2-RCl1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	66
圖 4.30	試體編號S2-RCl2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	66
圖 4.31	試體編號RCt1l1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	67
圖 4.32	試體編號RCt2l1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	67
圖 4.33	試體編號RCt3l1 系列之扭矩-扭轉角比較圖	68
圖 4.34	試體編號RCt1l2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	68
圖 4.35	試體編號RCt2l2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	69
圖 4.36	試體編號RCt3l2 系列之扭矩-扭轉角比較圖	69

相片目錄

照片 3.1 試體S2-RCt1l1	70
照片 3.2 試體S1-RCt3l2	70
照片 3.3 試體S1-RCt1l2 之斷面	71
照片 3.4 試體S2-RCt3l1 之斷面	71
照片 3.5 試驗設置照片	72
照片 3.6 扭矩束制端照片	72
照片 3.7 扭矩施力端照片	73
照片 3.8 圓弧型支承座照片	73
照片 3.9 荷重元(Load Cell)配置照片	74
照片 3.10 位移計(π Gauge)裝置配置照片	74
照片 3.11 角度計(Tiltmeter)裝置配置照片	75
照片 4.1 試體S1-RCt3l2 裂縫生成次序照片	76
照片 4.2 試體S1-RCt2l2 產生約 45° 裂縫	77
照片 4.3 試體S1-RCt1l2 形成約 45° 螺旋破壞面	77
照片 4.4 試體S1-RCt3l1 形成約 45° 螺旋破壞面	78
照片 4.5 試體S1-RCt2l2 裂縫寬度達 10 mm	78
照片 4.6 試體S1-RCt3l1 主裂縫間形成細小裂縫	79
照片 4.7 試體S2-RCt3l1 主裂縫裂縫寬度達 15 mm	79

照片 4.8 試體S1-RCt3l1 主裂縫延伸至試體內部	80
照片 4.9 試體S1-RCt1l2 主裂縫破壞情形	80
照片 4.10 試體S2-RCt2l1 產生非 45° 之斜裂縫	81
照片 4.11 試體S2-RCt3l2 產生非 45° 之斜裂縫	81
照片 4.12 試體RCt2l1 裂縫生成次序照片	82
照片 4.13 試體RCt2l1 產生約 45° 裂縫	83
照片 4.14 試體RCt2l2 形成約 45° 螺旋破壞面	83
照片 4.15 試體RCt2l1 主裂縫形成約 45° 螺旋破壞面	84
照片 4.16 試體RCt2l1 主裂縫明顯破壞之情形	84
照片 4.17 試體RCt2l2 主裂縫明顯破壞之情形	85



第一章 緒論

1.1 前言

近年來鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)結構已逐漸受到重視及採用，SRC 結構為複合結構，結合鋼骨(Steel, S)與鋼筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)兩種材料，結合鋼與鋼筋混凝土的優點，鋼骨可增加構件之韌性，而鋼骨受混凝土包覆，延緩鋼骨因受壓而產生挫屈行為。SRC 構件勁度較純鋼骨大，可有效增加建築物之側向勁度，降低建築物側向位移；相同設計強度下，使用 SRC 柱可減小構件之斷面，增加可用空間；與鋼構造相比，包覆鋼骨的混凝土可為良好之防火被覆。

結構之設計可能因建築物平面或外觀因素考量，導致結構的不對稱，於遭受地震力作用時柱構件將承受扭矩；即使對稱結構仍會因偏心載重之作用，梁構件亦將承受扭矩。於 SRC 構件扭矩強度之計算，日本建築學會 AIJ 設計規範採疊加鋼骨與鋼筋混凝土之扭矩強度；美國 AISC 鋼構造設計規範與 ACI 混凝土設計規範，則沒有 SRC 構件扭矩強度計算相關規定；國內 SRC 設計規範亦無明確 SRC 構件扭矩強度之計算，故本研究擬對 SRC 構件受扭矩作用下之強度與行為深入探討。

1.2 研究目的

目前國內SRC結構已逐漸應用於中高層建築物，為了能使國內建築物的設計均能達到經濟且安全之期望，因此一套完善之設計規範是相當重要的。本計畫將針對SRC構材受扭矩行為深入探討，研究不同參數，如橫向扭力筋間距、縱向主筋、鋼骨深度，於SRC梁構件的扭矩強度及其行為之影響，預期建立SRC構件扭矩強度計算式，供日後SRC構造設計規範條文修正時之參考，以提升國內SRC構造的設計品質，達到安全與經濟之目標。

1.3 研究方法

SRC構件為鋼筋混凝土與鋼骨之複合結構，雖然鋼筋混凝土構件與鋼骨構件均有力學模式以計算各自之扭矩強度，但文獻上未見力學模式預測SRC梁構件之扭矩強度。若從理論分析進行預測，有其難行之處，因此本研究以實驗方式比較不同參數影響下，SRC梁構件之扭矩強度及行為。

1.4 報告內容

本報告主要內容如下。第一章介紹 SRC 結構與本研究之目的與研究方法。第二章為回顧國內外鋼構件、RC 構件以及 SRC 構件之扭矩

相關設計規範與重要文獻，並將探討相關扭矩力學模式。第三章介紹實驗計畫的規劃，詳細說明試體之設計與製作、及試驗的步驟流程。第四章說明試驗結果與討論試體之扭矩行為與破壞模式。最後第五章則為本研究的結果。



第二章 國內外相關規範與文獻回顧

2.1 國外SRC規範

國外與 SRC 相關之設計規範有美國鋼結構學會 AISC (American Institute of Steel Construction)設計規範、美國鋼筋混凝土學會 ACI 318 (American Concrete Institute)設計規範以及日本建築學會 AIJ (Architectural Institute of Japan) SRC 設計規範。

2.1.1 美國AISC設計規範

美國 AISC 設計規範主要採用複合構造 (Composite Construction) 之設計概念。依據此概念，將 SRC 構材斷面中 RC 部分轉換為等值強度與勁度之鋼骨量，再以純鋼骨構造之方式進行設計，計算出其極限強度。利用此種方式設計，設計概念上較為簡單，此結果也會偏於保守，惟並未明確 SRC 構造之設計細節。

2.1.2 美國ACI 318 設計規範

美國 ACI 318 設計規範之設計概念與美國 AISC 設計規範剛好相反，是將 SRC 構材斷面中鋼骨部分轉換為等值之鋼筋量，再以鋼筋混凝土構造之方式進行設計。於設計上，假設混凝土之極限應變為 0.003，並假設斷面應變諧和，以及運用力平衡之基本觀念，其計算

過程較美國 AISC 設計規範複雜。

2.1.3 日本建築學會(AIJ) SRC設計規範

日本建築學會 AIJ SRC 設計規範主要係以強度疊加之設計概念，其強度疊加之觀念有兩種設計方法，分為簡單疊加法(Simple Superposed Method, SSM)與一般化疊加法(Generalize Superposed Method, GSM)。前者是將 RC 與鋼骨視為獨立個體，分別計算個別之強度，再予以疊加，過程較為簡單，結果偏為保守；而後者是以極限設計法分別計算 RC 與鋼骨之極限強度，再予以疊加，過程較前者為複雜，惟可有較經濟之設計。

2.2 國內鋼骨鋼筋混凝土構造(SRC)設計規範與解說

國內於 2004 年公布之「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」大多參考國外之設計規範而制定，採 AIJ 強度疊加與 ACI 設計概念併行，惟設計規範中並未明確 SRC 構件扭矩強度之計算。

2.3 鋼筋混凝土扭矩強度

近十幾年內 ACI 有兩種扭矩強度之設計方法，分為斜彎(Skew Bending)理論，如圖 2.1 所示，與空間桁架類比(Space Truss Analogy)理論。

於 1971~1989 年，ACI 規範係根據斜彎理論進行扭力設計，此種設計概念是將扭矩之一部分混凝土承載，其餘部份乃由閉合橫向扭力筋承載，故扭矩強度為

$$T_n = T_c + T_s \quad (2.1)$$

其中 T_c 為混凝土提供之標稱扭矩強度， T_s 為橫向扭力筋提供之標稱扭矩強度，分別計算如下：

$$T_c = \frac{0.067\sqrt{f'_c} \sum x^2 y}{\sqrt{1 + \left(\frac{0.4V_u}{C_t T_u}\right)^2}} \quad (2.2)$$

$$T_s = \frac{A_t \alpha_t x_1 y_1 f_y}{s} \quad (2.3)$$

其中：

x = 矩型斷面寬度之總尺寸。

x_1 = 閉合矩形箍筋斷面寬度中心至中心之尺寸。

y = 矩型斷面深度之總尺寸。

y_1 = 閉合矩形箍筋斷面深度中心至中心之尺寸。

f'_c = 混凝土抗壓強度(MPa)。

V_u = 斷面之設計剪力。

C_t = 剪力與扭矩應力特性之關係因子。

$$C_t = \frac{b_w d}{\sum x^2 y}, \text{ 且 } 2A_t \geq \frac{50b_w s}{f_y}。$$

f_y = 橫向扭力筋之降伏強度。

s = 閉合橫向扭力筋之間距。

$$\alpha_t = 0.66 + 0.33(y_1/x_1) \leq 1.5。$$

A_t = 閉合橫向扭力筋之斷面積。

於 1995 年後，ACI 範例則依據薄壁管(Thin-Walled Tube)理論之設計觀念，如圖 2.2 所示，再以空間桁架類比理論，如圖 2.3 所示，加以分析，此種分析模式對於實心及空心斷面斷面皆可視為薄壁管，由於扭力裂縫形成後，斷面中央部份對扭矩強度之貢獻甚小，故可忽略不計。

當閉合薄壁管承受扭矩時，剪力流路徑將沿著薄壁管厚度中心作用，剪力流為剪應力 τ 與薄壁管厚度 t 之乘積，因此可得扭力 T 與剪力流 q 間之關係式：

$$q = \tau t = \frac{T}{2A_o} \quad (2.4)$$

A_o 為剪力流徑所包圍之總面積，須由分析決定或等於 $0.85 A_{oh}$ ，再由扭力所造成之剪力，可推導出扭矩強度如下：

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_{yv}}{s} \cot \theta \quad (2.5)$$

其中：

A_{oh} = 閉合橫向扭力筋中心線所包圍之面積。

f_{yv} = 閉合橫向扭力筋之降伏強度。

θ = $30^\circ \sim 60^\circ$ ，非預力構件建議取 45° 。

美國 ACI 318-95 設計規範中，提及關於 θ 之計算，可參考 Hsu (1990) 研究鋼筋混凝土在受扭矩下之剪力流域。此文獻根據空間桁架類比理論提出一簡單之理論方法計算剪力流厚度 t_d ，假設應變分佈為線性，由表面最大應變與曲率間之關係，得

$$t_d = \frac{A_o \zeta^2}{p_o \sin^2 \theta \cos^2 \theta} \quad (2.6)$$

其中

$$A_o = A_c - \frac{t_d}{2} p_c + \xi t_d^2 \quad (2.7)$$

$$P_o = P_c - 4\xi t_d \quad (2.8)$$

p_o 為剪力流中心線之周長， p_c 為混凝土斷面之外緣周長，若為矩形斷面 ξ 之值等於 1，圓形斷面則等於 $\pi/4$ ，混凝土開裂後，強度會因此而降低，必須乘上一係數，稱為軟化係數 ζ ，計算式如下：

$$\zeta = \frac{\left(\frac{A_\ell f_{\ell y}}{p_o}\right) + \left(\frac{A_t f_{ty}}{s}\right)}{0.80 f'_c t_d} \quad (2.9)$$

依據混凝土軟化之應力與應變關係之概念，再利用諧和平衡方程式，
便可得 θ 值，如下式：

$$\cos^2 \theta = \frac{\left(\frac{A_\ell f_{\ell y}}{p_o}\right)}{\left(\frac{A_\ell f_{\ell y}}{p_o}\right) + \left(\frac{A_t f_{ty}}{s}\right)} \quad (2.10)$$

美國 ACI 318-95 設計規範中，對於開裂扭矩強度(T_{cr})之計算如下：

$$T_{cr} = \frac{1}{3} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.11)$$

其中：

A_{cp} = 由混凝土斷面外周邊所包圍之面積。

P_{cp} = 由混凝土斷面外周邊之周長。

關於扭力鋼筋之配置，美國 ACI 318-95 設計規範中，縱向扭力鋼筋不得小於如下規定：

$$A_\ell = \frac{A_t}{s} p_h \left(\frac{f_{yv}}{f_{y\ell}} \right) \cot^2 \theta \quad (2.12)$$

p_h 為最外閉合橫向扭力鋼筋中心線周長， $f_{y\ell}$ 為縱向扭力鋼筋之降伏

強度。對於最小扭矩鋼筋量之限制亦有如下規定：

$$(A_v + 2A_t) = \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_{yv}} \quad (2.13)$$

$$A_{\ell, \min} = \frac{0.083 \times 5 \sqrt{f'_c} A_{cp}}{f_{y\ell}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) p_h \frac{f_{yv}}{f_{y\ell}} \quad (2.14)$$

其中：

A_v = 剪力鋼筋於 s 距離內之面積。

$A_{\ell, \min}$ = 抵抗扭力之最少縱向鋼筋面積。

b_w = 梁腹寬度。

2.4 鋼骨扭矩強度

薄壁管與箱型斷面為最有效率的抵抗扭矩的斷面，然而設計於 SRC 梁構件之鋼骨一般為 H 型鋼。就非圓形斷面而言，扭矩可分為 Saint-Venant 扭矩(Pure Torsion)與翹曲扭矩(Warping Torsion)。Boresi (1993)提出對 H 型鋼若不考慮翹曲扭矩強度情況下，全斷面塑性扭矩(Fully Plastic Torque)為

$$T_p = \tau_y \left[t_f^2 \left(b_f - \frac{t_f}{3} \right) + \frac{t_w^2}{2} \left(d + \frac{t_w}{3} \right) - t_f t_w^2 \right] \quad (2.15)$$

其中：

τ_y = 降伏剪應力。

b_f = H 型鋼構材之寬度。

d = H 型鋼構材之深度。

t_f = 翼板厚度。

t_w = 腹板厚度。

2.5 國內外相關重要文獻回顧

(1) 鋼骨構材扭矩行為之相關文獻回顧

在鋼結構領域，有關扭矩或扭矩結合彎矩、軸力的行為已有廣泛的研究，近期內有關 H 型鋼受扭矩作用之研究如下所述。

Pi 與 Trahair (1994) 研究 I 型鋼梁受扭矩與彎矩作用下之非彈性行為，研究中使用有限元素法(Finite-Element Method)分析 I 型鋼樑之行為。結論中提到，最大扭矩與彎矩強度與鋼梁之細長比、側向支撐以及對試體施加扭矩與彎矩之比例有關。

Pi 與 Trahair (1995) 研究 I 型鋼梁受扭矩之非彈性行為，研究中使用有限元素法分析 I 型鋼樑之行為，建立一套模型有效預測 I 型鋼梁受非均勻扭矩產生之非線性彈塑性行為。

Trahair 與 Pi (1997) 研究 I 型鋼梁受扭矩、彎矩與挫屈之行為，研

究以彈性分析分析構件之非均勻扭矩，並以兩種塑性設計去分析試體，最終提出設計 I 型鋼梁受扭矩與彎矩作用下之設計式。

(2) RC 構材扭矩行為之相關文獻回顧

近二十年內研究 RC 構件受扭矩行為或建立模型預測 RC 構件扭矩強度有 Hsu (1990, 1991)、Rahal 與 Collins (1995, 1996)、Bhatti 與 Almughrabi (1996)、Wang 與 Hsu (1997)、Leu 與 Lee (2000)、Phatak 與 Dhonde (2003)、Tavio 與 Teng (2004)，利用分析方法研究 RC 構件受扭矩行為，建立模型預測 RC 構件扭矩強度。其中 Hsu (1990) 依據空間桁架與薄壁管之理論計算出精確扭矩強度。Bhatti 與 Almughrabi (1996) 依據美國 ACI 318-89 設計規範，以有限元素法建立一套精確之模型，有效的預測 RC 梁扭矩強度。Wang 與 Hsu (1997) 利用極限分析法預測 RC 構件之扭矩強度。

Ashour 等人(1999)研究高強度混凝土深梁受扭矩作用下之行為，實驗參數為跨深比、混凝土強度以及縱向主筋數量，共 20 組試體。實驗結果顯示位於梁深中間之縱向主筋對扭矩強度並無太大貢獻，減少跨深比將增加試體扭轉勁度與強度。

方一匡等人(1999)研究高性能混凝土預力梁之抗扭矩行為，考慮變數為混凝土抗壓強度、抗扭箍筋量、軸向預力量以及保護層厚度，總共規劃 30 組試體。扭轉勁度分別採未開裂扭轉勁度以及已開裂扭轉

勁度表示。而結果顯示，若採用 ACI 318-95 規範計算極限扭矩強度時，因未考慮保護層厚度，而顯得過於保守，對於 T 形斷面梁之極限扭矩強度若依 ACI 318-95 規範及斜彎矩理論計算時，將低估許多。

Rasmussen 與 Baker (1995)、Wafa 等人(1995)、Koutchoukali 與 Belarbi (2001)、Fang 與 Shiau (2004)研究高強度混凝土(High-Strength Concrete, HSC) RC 梁與普通強度混凝土(Normal-Strength Concrete, NSC) RC 梁受扭行為。實驗發現，高強度混凝土 RC 梁因為主筋的降伏造成明顯的裂縫；當 RC 梁的主筋降伏後，RC 梁扭矩強度與混凝土強度無關。相同的主筋數量下，HSC 梁可抵抗較高的扭矩強度。NSC 梁之扭矩韌性行為(Ductile Behavior)較好，HSC 梁扭矩強度超過其極限(Peak)強度後，強度衰減較為劇烈，主筋較多的試體此種行為更為明顯。HSC 梁開裂前與開裂後之扭轉勁度皆大於 NSC 梁，HSC 梁未開裂扭矩勁度約為 NSC 梁之 2 倍，開裂後約為 1.4 倍。NSC 梁混凝土表面壓應變與主拉應變皆大於 HSC 梁，極限狀態下，HSC 梁縱向伸長量也較大。

Nanni (1990)、Wafa 等人(1992)、EI-Niema (1993)、Rao 與 Seshu (2003)研究鋼纖維 RC (SFRC)構材之受扭矩行為。實驗結論指出，增加適量的鋼纖維可以增加扭矩勁度以及韌性，也可提高極限扭矩強度，而且使用鋼纖維比使用高強度混凝土更為經濟。

粟文楷(1999)研究鋼筋混凝土箱形梁受純扭矩作用之行為，該結果顯示對於開裂扭矩強度之預測，以桁架模式理論之預測結果最佳，ACI 318-95 規範次之，ACI 318-89 規範對試驗之預測結果較不保守；而對於極限扭矩強度之預測，ACI 318-95 及 ACI 318-89 規範之預測結果皆略為不保守。

吳家偉(2001)研究鋼筋混凝土受彎矩與扭矩作用下之行為，該研究顯示 RC 構件受扭矩作用時，其行為非常類似於一桁架系統，箍筋為主要受扭剪力元素，因此增加主筋對抗扭影響有限，構件之抗扭能力主要還是決定於箍筋。

(3) SRC 構材扭矩行為之相關文獻回顧

SRC 構材受扭矩作用之研究非常有限，相關之文獻如下。

王志倫(1996)研究扭轉撓曲影響下鋼骨鋼筋混凝土構件行為，當中提到 H 型鋼受混凝土束制作用，使 H 型鋼翹曲作用降低。若以 45 度角破壞面為基礎，將 RC 之斜彎理論值與鋼骨之全塑性扭矩予以疊加，可有效預測 SRC 構件極限抗扭強度值。

梁禮麟(2000)研究中空鋼骨鋼筋混凝土扭轉撓曲行為，該結果顯示中空鋼骨鋼筋混凝土構件之開裂扭轉角與極限容許扭轉角皆較傳統之鋼筋混凝土構件大，且開裂之單位長度扭轉角與到達極限值之容許

單位長度扭轉角，不會因包覆混凝土壁厚及內鋼管尺寸大小之不同而有太大差異。

謝宗成(2001)研究含斜拉鋼筋之鋼骨鋼筋混凝土扭轉撓曲行為，該結果顯示對於鋼筋混凝土的抗扭強度理論式，由於規範 ACI318-95 忽略保護層厚度以及核心混凝土之影響，故使理論值過於保守。

林秉儀(2004)研究輕質骨材鋼骨鋼筋混凝土扭轉撓曲行為，該結果顯示輕質骨材混凝土構件受純扭矩作用時，開裂扭矩之實驗值與理論值相差甚遠，且其比值亦較常重混凝土大，故以規範計算之值略為保守；而鋼骨之不同對開裂扭矩有一定之影響，表示以疊加法計算開裂扭矩時，將低估鋼骨所造成之影響。



第三章 SRC梁構件之扭矩實驗

3.1 實驗規劃

本計畫設計 16 組試體，包含 12 組 SRC 梁試體、2 組 RC 梁試體以及 2 組鋼梁試體，進行單向純扭矩載重試驗。12 組 SRC 梁試體參數為鋼骨尺寸、橫向扭力筋間距、縱向主筋數量，2 組 RC 梁試體參數為縱向主筋數量，2 組鋼梁尺寸採用 SRC 梁試體中的兩種鋼梁尺寸。實驗目的在於測試 SRC 梁構件的純扭矩強度與受純扭矩作用的破壞行為，藉由 2 組 RC 梁與 2 組鋼梁之試體，探討 SRC 梁試體扭矩強度之計算模式。

3.2 試體設計

本計畫之試體將設計為僅承受純扭矩，著重於梁構件，而承受軸力之梁柱構件不在本研究範圍，有待後續之研究。SRC 梁構件一般皆與 SRC 柱結合，故 SRC 梁構件兩端為扭轉束制。依據相關規範進行試體之設計如圖 3.1 之配置，考量試體受扭矩後一完整的螺旋狀破壞面與試驗兩端的非試驗區，試驗區長度為 1800 mm，試體總長度為 3200 mm。為使試體確保於試驗區破壞，於非試驗區配置更緊密的橫向扭力筋，以提高非試驗區之扭矩強度。12 組 SRC 梁試體與 2 組 RC

梁試體斷面尺寸均為 350×550 mm，保護層厚度為 40 mm。

試體之編號如表 3.1 所示，試體之斷面如圖 3.2 所示。試體之設計參數有鋼骨、橫向扭力筋與縱向主筋。各試體間可相互比較試驗結果，以探討參數於扭矩行為之影響。本計畫之混凝土著重於普通強度混凝土，鋼筋混凝土構件採用普通強度混凝土，試體僅採用一種混凝土標稱強度為 27.6 MPa (4000 psi)。

SRC 梁試體設計以鋼骨尺寸為其參數之一，用以探討鋼骨深度變化對試體扭矩強度與行為之影響，兩組不同尺寸的鋼骨只有深度不同，寬度、腹板厚度以及翼板皆相同。鋼骨 S1 尺寸為 $H250 \times 140 \times 9 \times 14$ 由 $H250 \times 250 \times 9 \times 14$ 切割之型鋼，S2 尺寸為 $H450 \times 140 \times 9 \times 14$ 由 $H450 \times 200 \times 9 \times 14$ 切割之型鋼。鋼骨皆為 ASTM A36 之鋼材。S1 系列 SRC 試體之鋼骨比為 3.1%，S2 系列 SRC 試體之鋼骨比為 4.0%。

SRC 試體與 RC 試體設計參數之二為橫向扭力筋，因試體承受純扭矩作用，橫向鋼筋僅考量扭矩所需。橫向扭力筋皆為 #3 Gr. 40 鋼筋，配置有 #3@15 cm ($t1$ 系列試體)、#3@10 cm ($t2$ 系列試體) 與雙排 #3@10 cm ($t3$ 系列試體)。 $t1$ 系列試體其橫向扭力筋間距大於 RC 試體梁開裂扭矩強度 (T_{cr}) 所需之間距 (11 cm)，預期探討試體受扭矩開裂之破壞行為。 $t2$ 系列試體之橫向扭力筋間距則小於 T_{cr} 所需之間距。 $t3$ 系列試體則採用雙排 #3@10 cm 橫向扭力筋，在於探討緊密的橫向扭

力筋於 SRC 梁試體扭矩強度之影響。

試體設計參數之三為縱向主筋，乃用 RC 梁之扭矩強度會因縱向主筋數量增加而提高。因試體將承受純扭矩， $\ell 1$ 系列試體之縱向主筋為依據 RC 設計規範，依配置之橫向扭力筋計算所得(公式 2.12 與公式 2.14)，因而縱向主筋不包括撓曲作用所需之鋼筋。提高 $\ell 2$ 系列試體之縱向主筋量以研究縱向主筋於扭矩強度之影響。縱向主筋配置於斷面上下層與兩側，配置如圖 3.2 所示。試體實際情形，如照片 3.1 至 3.4 所示。

非預力 RC 構件縱向主筋之計算可假設混凝土壓桿角度 $\theta = 45^\circ$ ，依此可計算最小縱向主筋量，編號 $\ell 1$ 系列之試體則依此設計。編號 $\ell 2$ 系列之試體則增加縱向主筋數量，根據 Hsu (1990) 之建議，計算 θ 值(公式 2.6 至公式 2.10)，試體之扭矩強度將隨之增大。

表 3.2 為試體扭矩強度之計算值，為依據美國 ACI 318-89 與 ACI 318-95 規範計算出試體中 RC 部分之扭矩強度，並且根據 Hsu (1990) 所建立之分析模型，考慮混凝土強度與縱向主筋之影響所計算出 RC 構件之扭矩強度，以及鋼骨之全斷面塑性扭矩強度。試體 S1-RC $\ell 2\ell 1$ 與 S1-RC $\ell 2\ell 2$ 之扭矩強度計算例詳述於附錄。

3.3 試體製作

試體製作程序如下：

1. 定做鋼骨、縱向主筋以及橫向扭力筋。
2. 黏貼應變計。
3. 製作鋼骨鋼筋籠。
4. 製作與組裝模板。
5. 澆置預拌混凝土。
6. 拆模與試體養護。

在試體製作期間，將依據規範規定進行材料性質試驗，鋼筋進行拉力試驗，鋼材拉力試片由鋼骨之翼板與腹板切割取得，拉力試驗結果如表 3.3 所示，依養護時間不同進行混凝土圓柱試體抗壓試驗，試體之混凝土強度如表 3.4。

3.4 試驗設置

本計畫試體將承受純扭矩作用，試驗設置如圖 3.3 與圖 3.4 所示。試驗設置說明如下，以夾具固定於試體之兩端，將兩端夾具放置於圓弧形支承座上，此圓弧形支承座目的為使 SRC 梁試體繞其斷面之中心軸旋轉，確保試體受純扭矩作用，圖 3.5 為圓弧型支承座之尺寸。

圓弧形支承座放置在具有圓型鋼棒之鋼板基座上，以允許試體之縱向變形。扭轉束制端以鋼棒固定於強力地板，使此端不產生扭轉變形，並設置荷重元(Load Cell)以量測施加作用力。油壓致動器加載於扭矩施力端，使試體受純扭矩作用。試驗設置之照片如照片 3.5 至 3.9 所示。

3.5 量測系統

SRC 梁試體為閉合斷面，但 H 型鋼骨為開放式斷面，兩種斷面受扭矩作用下之應力分佈截然不同，為了解 SRC 梁試體中鋼骨受扭矩作用下其應力分布之情形，於鋼骨翼板與腹板黏貼應變計。於縱向主筋黏貼應變計，以測量試體受扭矩作用縱向主筋之應變。於橫向扭力筋黏貼應變計，以測量因扭矩作用產生之拉應變。應變計黏貼詳細位置如圖 3.6 至圖 3.10。於兩端試體試驗區與非試驗區交會處之側邊中心安裝角度計(Tiltmeter)以量測試體受扭矩作用之扭轉角。在試驗區中點處側邊架設三組位移計，角度分別為 0° 、 45° 與 135° ，詳細裝置如圖 3.11，架設如照片 3.10 與 3.11。

3.6 試驗程序

試驗程序如下：

1. 放置鋼板基座與圓弧形支承座於試驗區。
2. 以固定式吊車將試體吊至試驗區，放置於圓弧形支承座上。
3. 以夾具夾住兩端非試驗區。
4. 架設量測儀器與資料擷取系統接線工作。
5. 將 MTS 垂直油壓致動器設定以位移控制(Displacement Control)進行加載，並由資料擷取系統讀取試驗數據。
6. 觀察並記錄試體表面受扭矩作用下之破壞情形，當載重驟降至極限強度之 70%時或扭轉角過大時，則停止試驗。



第四章 試驗結果與討論

4.1 試體行為

試驗程序採位移歷時控制，以利試體達極限扭矩強度後繼續擷取其破壞後之數據，試體於試驗區表面粉刷白漆並繪製 10 cm×10 cm 之方格以利觀察裂縫。於試驗過程中以色筆繪出混凝土表面之裂縫，以便觀察與記錄混凝土開裂之情形。

4.1.1 SRC 系列試體

SRC 試體受純扭矩作用其行為大致相同，試體扭矩-扭轉角示意圖如圖 4.1；A 點為原點，B 點為試體勁度改變處，C 點為極限扭矩強度處，D 點為試驗停止處。AB 段為線性行為，此時試體混凝土表面尚未產生裂縫，當施加扭矩強度接近 B 點時，混凝土表面開始產生細小裂縫，到達 B 點時產生數條約 45° 斜裂縫，此時試體勁度改變，因試體混凝土表面開裂後勁度下降。

施加扭矩持續增加，於 BC 段時裂縫快速成長延伸，試驗區上方與兩側之裂縫逐漸形成約 45° 螺旋破壞面。當施加扭矩逐漸接近 C 點時，已出現數條主要裂縫，裂縫寬度已接近數 mm。

CD 段為試體到達極限扭矩強度後之行為，在 CD 段之前半，試

體主要裂縫寬度已達 10 mm，此時混凝土表面除主要裂縫外另外產生其他細小裂縫。CD 段之後半，試體混凝土表面，主要裂縫寬度已達 20 mm，並延伸至試體內部。進而混凝土表面數條主要裂縫中間之細小裂縫，逐漸延伸成一非 45°破壞面，造成角隅混凝土塊剝落。裂縫生成次序示意圖如圖 4.2 所示，實際情形如照片 4.1 所示。SRC 試體破壞之照片如照片 4.2 至 4.11 所示。

4.1.2 RC 系列試體

RC 試體受純扭矩作用其試體扭矩-扭轉角示意圖如圖 4.3 所示，RC 系列試體 AB 段與 SRC 系列試體差異不大，於 AB 段為線性。混凝土表面產生裂縫後勁度下降，如 BC 段所示，其與 SRC 試體之不同處在於 BC 段較為線性，到達極限扭矩強度前，產生約 45°螺旋狀破壞面，主要裂縫持續成長。

RC 系列試體於 CD 段時與 SRC 系列試體不同處，主要裂縫持續增大，主裂縫與主裂縫中間並不會產生許多細小裂縫，因 RC 系列試體主要裂縫之螺旋破壞面，試體中心並無鋼骨加勁，當主要裂縫延伸至試體中心後，CD 段扭矩-扭轉角圖之曲線下降較為急速。裂縫生成次序圖如圖 4.4 所示，實際情形如照片 4.12 所示。RC 試體破壞之照片如圖 4.13 至 4.17 所示。

4.2 試體扭矩-扭轉角行為

4.2.1 扭轉角計算

試驗結果經由角度計所量測之資料進一步分析計算，以求得試體單位長度扭轉角，藉此了解試體受扭矩作用下與單位長度扭轉角之關係。該計算如下。

$$\phi = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{L} \times \frac{\pi}{180} \quad (4.1)$$

其中：

θ_1 、 θ_2 = 角度計量測之角度。

L = 試驗區之長度。

ϕ = 梁受扭矩作用下，每單位長度之扭轉角(rad/m)。

4.2.2 試體扭矩-扭轉角行為

表 4.1 標示各試體間之開裂扭矩強度與極限扭矩強度及其對應之扭轉角。開裂扭矩強度對應之單位開裂扭轉角(ϕ_{cr})平均約為 0.002 rad/m。當施加载重達梁之極限扭矩強度(T_u)時，對應之單位極限扭轉角(ϕ_u)增加許多，較開裂單位長度扭轉角(ϕ_{cr})增加約超過 10 倍。在純扭矩試驗中，當施加载重達開裂扭矩強度(T_{cr})前，由試體之扭矩與扭轉角關係圖(圖 4.5 至 4.18)中，可發現 SRC 與 RC 試體開裂前，相

當接近線性之行為。SRC 梁達開裂扭矩後，隨著扭轉角之增加，扭矩強度則顯得緩降的趨勢，此現象較 RC 梁有延遲其扭力破壞行為。試驗結果顯示 SRC 試體內之鋼骨並未達降伏，故 SRC 的韌性較好並非因鋼骨的降伏，推測其原因可能因 SRC 試體產生裂縫且延伸至試體中心時，鋼骨於 SRC 試體中心具有加勁之效果。

圖 4.19 所示為鋼梁試體 S1 與 S2 之扭矩-扭轉角關係。因油壓制動器行程之限制與 H 型鋼梁扭矩勁度很小之緣故，試驗無法獲得鋼梁之極限扭矩強度。

試驗結果顯示當試體到達極限扭矩強度(T_u)後，RC 系列試體強度下降快其韌性最差；包覆鋼骨系列之試體扭矩-扭轉角關係圖呈一平緩下降曲線，試體具有較好之韌性。 $t3$ 系列試體採用緊密的橫向扭力筋較 $t1$ 、 $t2$ 系列有效提高扭矩強度，極限扭矩強度對應之扭轉角也較小，故相對提昇扭矩勁度。 $l2$ 系列試體採用增加主筋數量，能提高扭矩強度，扭矩勁度也較 $l1$ 系列高。

4.3 試體參數於扭矩強度與行為之影響

縱向扭力筋之影響(A_e)

如圖 4.20 至 4.26 所示，可比較縱向主筋於扭矩強度與行為之影響。在較多量的縱向主筋 $l2$ 配置下，其極限扭矩強度能提昇，扭矩

行為之趨勢則與 $l1$ 系列大致相同。

縱向扭力筋對於本研究之三種不同之 A/s 之影響， $t1$ 系列若採用 $l2$ 之配置，其極限扭矩強度約為採用 $l1$ 配置之 1.2 倍，而 $t2$ 系列約為 1.06 倍，說明 A/s 越高之情況下，縱向扭力筋之影響越小。於 $t3$ 系列試體中，縱向扭力筋之影響不大，如圖 4.22 所示。然而試體 S2-RC $t3l1$ 極限扭矩強度高於試體 S2-RC $t3l2$ ，與試體 S1-RC $t1l1$ 高於 S1-RC $t1l2$ ，乃因試體混凝土強度不同造成，此時縱向扭力筋之影響甚小。

橫向扭力筋之影響(A/s)

三種不同橫向扭力筋於扭矩-扭轉角行為之影響顯示於圖 4.27 至 4.30，較多的橫向扭力筋有助於扭矩強度的提昇。尤其是圖 4.28 與圖 4.29，明顯顯示 $t3$ 系列試體(橫向扭力筋 2-#3 @10 cm)有最大的極限扭矩強度，且 $t2$ 系列試體(橫向扭力筋#3 @10 cm)的極限扭矩強度高於 $t1$ 系列試體(橫向扭力筋#3 @15 cm)。

鋼骨之影響(S)

圖 4.31 至 4.36 所示為不同鋼骨下試體之扭矩-扭轉角比較圖。除 S1-RC $t1l2$ 與 S2-RC $t1l2$ 系列之試體外，含 S2 鋼骨(較大型鋼)之 SRC 試體之極限扭矩強度低於含 S1 鋼骨之 SRC 試體。推測其原因可能為

含 S1 鋼骨之 SRC 試體因鋼骨翼板與橫向扭力筋有較大之距離，增大剪力流之厚度，又因含 S2 鋼骨之 SRC 試體之鋼骨翼板與橫向扭力筋接觸，導致 S1 系列 SRC 試體有較大之極限扭矩強度。

4.4 試體局部行為討論

為探討試體局部行為，以四組試體 S1-RCt2l1、S1-RCt2l2、S2-RCt2l1、RCt2l1 之應變計資料為例。於試體混凝土表面開裂前，縱向主筋與橫向扭力筋幾乎沒有應變，待混凝土表面開裂後，橫向扭力筋開始受到扭矩作用，應變值明顯提高，縱向主筋為最晚受到扭矩作用。故 SRC 構件在尚未開裂前，可視為由外圍混凝土承受扭矩，開裂後，橫向扭力筋與縱向主筋才開始承受扭矩作用。

試體 S1-RCt2l1 橫向扭力筋之應變計顯示大多數皆已降伏，黏貼於縱向扭力筋之應變計有少數已降伏。試體 S1-RCt2l2 橫向扭力筋之應變計顯示少數已降伏，而黏貼於縱向扭力筋之應變計則因配置較高量的縱向主筋，顯示皆未達降伏應變。

於三組試體包覆之鋼骨翼板共黏貼九組應變計，鋼骨腹板共黏貼六組應變計，試驗結果顯示皆尚未達其降伏應變，且其近乎未受扭矩作用，應變值幾乎沒有提昇。

4.5 試體極限扭矩強度計算

對於 SRC 試體之扭矩強度計算，日本 AIJ 規範建議疊加 RC 與鋼骨之扭矩強度。依拉力試片計算所得之 S1 與 S2 鋼骨全斷面塑性扭矩強度(公式 2.15)分別為 6.80 kN-m 與 8.84 kN-m。然而試驗結果顯示 SRC 試體於達到其極限扭矩強度時之扭轉角 ϕ_u (表 4.1) 所對應之鋼骨扭矩強度遠小於鋼骨全斷面塑性扭矩強度，因而依試體之 ϕ_u 扭轉角由圖 4.19 計算鋼骨之扭矩強度。

表 4.2 為開裂扭矩強度規範計算值與實驗值之比較，對於各系列之試體並無一致性之結果，推測應為開裂前只由混凝土承受扭矩，與試體內鋼筋與鋼骨之配置無關，由於各試體混凝土強度不一致，故無一致性之結果。

表 4.3 為極限扭矩強度計算值與實驗值之比較，結果顯示 $t1$ 系列試體之實驗值幾乎皆高於計算值，而 $t3$ 系列試體之實驗值皆低於計算值。 $t3$ 系列試體之橫向扭力筋為雙排 #3 @10 cm，試體無法發揮如同計算所得之扭矩強度，值得後續之研究。表 4.3 亦顯示 ACI 318-95 能提供最為保守之計算值。基於 H 型鋼於扭矩強度之貢獻相對於 RC 甚小，於設計上可保守的忽略型鋼的扭矩強度。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究主要探討鋼筋混凝土(SRC)梁構件承受扭矩作用之強度與行為，進行 16 組試體之試驗。試體承受純扭矩，邊界條件較為理想化與實際 SRC 梁端與柱之連接條件不同。研究成果結論如下。

1. SRC 試體之扭矩-扭轉角行為異於 RC 試體，SRC 試體於達到極限扭矩強度後，呈現較緩慢之強度下降，能有較佳的韌性行為。
2. SRC 試體包覆 H 型鋼骨，因鋼骨之扭矩強度低，故 SRC 試體較 RC 試體於極限扭矩強度僅有些微的提昇。
3. SRC 試體內之橫向扭力筋量之增大將實質提昇試體之扭矩強度。配置#3@10 cm 橫向扭力筋系列試體之實驗值幾乎皆高於規範計算值，然而配置雙排#3 @10 cm 之橫向扭力筋試體之實驗值遠小於規範之計算值，尚待後續之研究。
4. 包覆不同鋼骨深度的 SRC 試體之極限扭矩強度無一致性的試驗結果。
5. 增加縱向扭力筋能提昇 SRC 試體的極限扭矩強度，惟於橫向扭力筋量越高之情況下，縱向扭力筋於 SRC 試體的扭矩強度之影響越

小。

5.2 建議

1. 試驗結果顯示 SRC 試體於達到其極限扭矩強度時，H 型鋼骨尚未降伏，其扭矩強度遠小於鋼骨全斷面塑性扭矩強度；H 型鋼於扭矩強度之貢獻相對於 RC 甚小，於設計上可保守的忽略 H 型鋼的扭矩強度。
2. SRC 試體之橫向扭力筋為雙排#3 @10 cm 無法發揮規範計算之扭矩強度，值得後續之研究以確保極限扭矩強度計算式之準確性。



參考文獻

- American Concrete Institute. (2005) Building Code Requirements for structural concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05). Detroit..
- American Institute of Steel Construction. (2005) Seismic Provisions for structural steel buildings. Chicago (IL).
- American Institute of Steel Construction. (2005) Specification for structural steel buildings. Chicago (IL).
- Ashour, S. A., Samman, T. A., and Radain, T. A., (1999) Torsional Behavior of High-Strength Concrete Deep Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 6, November-December 1999, pp. 1049-1058.
- Bhatti, M. A., and Almughrabi, A., (1996) Reined Model to Estimate Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 5, September-October 1996, pp. 614-622.
- Boresi, A. P., Schmidt, R. J., and Sidebottom, O. M., (1993) *Advanced Mechanics of Materials*.
- El-Niema, E. I., (1993) Fiber Reinforced Concrete Beams under Torsion. *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 5, September-October 1993, pp. 489-495.
- Fang, I.-K., and Shiau, J.-K., (2004) Torsional Behavior of Normal- and High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 3, May-June 2004, pp. 304-313.
- Hsu, H.-L., and Wang, C.-L., (2000) Flexural-Torsional Behaviour of Steel Reinforced Concrete Members Subjected to Repeated Loading. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 667-682.

- Hsu, T. T. C., (1990) Shear Flow Zone in Torsion of Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 11, pp. 3206-3226.
- Hsu, T. T. C., (1991) Nonlinear Analysis of Concrete Torsional Members. *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, November-December 1991, pp. 674-682.
- Koutchoukali, N.-E., and Belarbi, A., (2001) Torsion of High-Strength Reinforced Concrete Beams and Minimum Reinforcement Requirement. *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 4, July-August 2001, pp. 462-469.
- Leu, L.-J., and Lee, Y.-S., (2000) Torsion Design for Reinforced Concrete Rectangular Members. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 2, February 2000, pp. 210-218.
- Nanni, A., (1990) Design for Torsion Using Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 6, November-December 1990, pp. 556-564.
- Phatak, D. R., and Dhonde, H.B., (2003) Dimensional Analysis of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 11, November 2003, pp. 1559-1563.
- Pi, Y.-L., and Trahair, N. S., (1994) Inelastic Bending and Torsion of Steel I-Beams. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 12, December 1994, pp. 3397-3417.
- Pi, Y.-L., and Trahair, N. S., (1995) Inelastic Torsion of Steel I-Beams. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 4, April 1995, pp. 609-620.
- Rahal, K. N., and Collins, M. P., (1995) Analysis of Sections Subjected to Combined Shear and Torsion – A Theoretical Model. *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 4, July-August 1995, pp. 459-469.

- Rahal, K. N., and Collins, M. P., (1996) Simple Model for Predicting Torsional Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Sections. *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 6, November-December 1996, pp. 658-666.
- Rao, T. D. G., and Seshu, D. R., (2003) Torsion of Steel Fiber Reinforced Concrete Member. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1783-1788. 2877-2895.
- Rasmussen, L. J., and Baker, G., (1995) Torsion in Reinforced Normal and High-Strength Concrete Beams – Part 1: Experimental Test Series. *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 1, January-February 1995, pp. 56-62.
- Rasmussen, L. J., and Baker, G., (1995) Torsion in Reinforced Normal and High-Strength Concrete Beams – Part 2: Theory and Design. *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 2, March-April 1995, pp. 149-156.
- Tavio, and Teng, S., (2004) Effective Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 2, March-April 2004, pp. 252-260.
- Trahair, N. S., and Pi, Y.-L. (1997) Torsion, Bending and Buckling of Steel Beams. *Engineering Structural*. Vol.19, No.5, pp. 372-377.
- Wafa, F. F., Hasnat, A., and Tarabolsi, O. F., (1992) Prestressed Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Torsion. *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 272-283.
- Wafa, F. F., Shihata, S. A., Ashour, S. A., and Akhtaruzzaman, A. A., (1995) Prestressed High-Strength Concrete Beams Under Torsion. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 9, September 1995, pp. 1280-1286.
- Wang, C.-K. and Salmon, C. G. (1992) Reinforce Concrete Design. Harper Collins Publishers.

Wang, W., and Hsu, C.-T. T., (1997) Limit Analysis of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion. Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 1, January 1997, pp. 86-94.

日本建築學會 (2001) ，「鋼骨鐵筋混凝土構造計算規準同解說」。

內政部 (2004) ，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」。

方一匡、蕭志坤、李俊興 (1999) ，「高性能混凝土預力樑之抗扭行為研究」，中國土木水利工程學刊，第十一卷，第三期， 493-501 頁。

王志倫 (1996) ，「扭矩影響下之鋼骨鋼筋混凝土構件行為」，國立中央大學土木工程學系研究所碩士論文。

粟文楷 (1999) ，「鋼筋混凝土箱形梁受純扭矩作用之行為研究」，私立中原大學土木工程研究所碩士論文。

梁禮麟 (2000) ，「中空鋼骨鋼筋混凝土扭轉撓曲行為研究」，國立中央大學土木工程學系研究所碩士論文。

謝宗成 (2001) ，「含斜拉鋼筋之鋼骨鋼筋混凝土撓曲扭轉行為研究」，國立中央大學土木工程學系研究所碩士論文。

吳家偉 (2001) ，「鋼筋混凝土受彎矩與扭矩作用下之行為研究」，私立中原大學土木工程研究所碩士論文。

林秉儀 (2004) ，「輕質骨材鋼骨鋼筋混凝土撓曲扭轉行為」，國立中央大學土木工程學系研究所碩士論文。

表 3.1 試體編號

Specimen	Steel	Transverse reinforcement	Longitudinal reinforcement
S1-RCt1l1	H 250×140×9×14	#3@15 cm	6-#4
S1-RCt2l1	H 250×140×9×14	#3@10 cm	8-#4
S1-RCt3l1	H 250×140×9×14	2-#3@10 cm	10-#5
S1-RCt1l2	H 250×140×9×14	#3@15 cm	6-#5
S1-RCt2l2	H 250×140×9×14	#3@10 cm	8-#5
S1-RCt3l2	H 250×140×9×14	2-#3@10 cm	10-#6
S2-RCt1l1	H 450×140×9×14	#3@15 cm	6-#4
S2-RCt2l1	H 450×140×9×14	#3@10 cm	8-#4
S2-RCt3l1	H 450×140×9×14	2-#3@10 cm	10-#5
S2-RCt1l2	H 450×140×9×14	#3@15 cm	6-#5
S2-RCt2l2	H 450×140×9×14	#3@10 cm	8-#5
S2-RCt3l2	H 450×140×9×14	2-#3@10 cm	10-#6
RCt2l1	—	#3@10 cm	8-#4
RCt2l2	—	#3@10 cm	8-#5
S1	H 250×140×9×14	—	—
S2	H 450×140×9×14	—	—

表 3.2 以標稱強度計算之試體扭矩強度

specimen	RC					Steel
	ACI 318-05	ACI 318-89	ACI 318-05 $\theta=45^\circ$	Hsu		T_p (kN-m)
	T_{cr} (kN-m)	T_n (kN-m)	T_n (kN-m)	θ	T_n (kN-m)	
S1-RCt1l1	36.04	43.17	26.62	45.12	26.51	5.10
S1-RCt2l1	36.04	52.91	39.93	46.46	37.94	5.10
S1-RCt3l1	36.04	82.11	79.85	45.92	77.33	5.10
S1-RCt1l2	36.04	43.17	26.62	38.63	33.31	5.10
S1-RCt2l2	36.04	52.91	39.93	39.90	47.75	5.10
S1-RCt3l2	36.04	82.11	79.85	34.14	117.78	5.10
S2-RCt1l1	36.04	43.17	26.62	45.12	26.51	6.26
S2-RCt2l1	36.04	52.91	39.93	46.46	37.94	6.26
S2-RCt3l1	36.04	82.11	79.85	45.92	77.33	6.26
S2-RCt1l2	36.04	43.17	26.62	38.63	33.31	6.26
S2-RCt2l2	36.04	52.91	39.93	39.90	47.75	6.26
S2-RCt3l2	36.04	82.11	79.85	34.14	117.78	6.26
RCt2l1	36.04	52.91	39.93	46.46	37.94	—
RCt2l2	36.04	52.91	39.93	39.90	47.75	—
S1	—	—	—	—	—	5.10
S2	—	—	—	—	—	6.26

表 3.3 鋼骨與鋼筋材料性質試驗結果

鋼骨與鋼筋材料		降伏強度 (MPa)	極限強度 (Mpa)
型鋼 H 450×140×9×14	翼板	317	446
	腹板	326	459
型鋼 H 250×200×9×14	翼板	384	480
	腹板	334	465
縱向扭力筋	#6	514	630
	#5	533	753
	#4	425	640
橫向扭力筋	#3	404	570

表 3.4 試體之混凝土強度

Specimen	f'_c (MPa)
S1-RCt1l1	28.73
S1-RCt2l1	30.69
S1-RCt3l1	30.11
S1-RCt1l2	27.75
S1-RCt2l2	30.69
S1-RCt3l2	30.11
S2-RCt1l1	26.48
S2-RCt2l1	30.20
S2-RCt3l1	30.69
S2-RCt1l2	27.26
S2-RCt2l2	29.13
S2-RCt3l2	28.24
RCt2l1	31.19
RCt2l2	25.60

表 4.1 扭矩強度與扭轉角實驗值

Specimen	開裂扭矩強度 T_{cr} (kN-m)	極限扭矩強度 T_u (kN-m)	開裂扭矩強度 對應之扭轉角 ϕ_{cr} (rad/m)	極限扭矩強度 對應之扭轉角 ϕ_u (rad/m)
S1-RC1l1	35.08	64.99	0.0023	0.0446
S1-RC1l2	43.18	68.17	0.0040	0.0370
S1-RC1l3	43.51	91.18	0.0026	0.0347
S1-RC2l1	30.28	56.61	0.0011	0.0282
S1-RC2l2	35.54	82.34	0.0018	0.0309
S1-RC2l3	30.28	93.04	0.0013	0.0250
S2-RC1l1	29.51	55.48	0.0017	0.0183
S2-RC1l2	36.05	68.37	0.0022	0.0232
S2-RC1l3	36.25	77.38	0.0016	0.0300
S2-RC2l1	39.14	66.8	0.0026	0.0227
S2-RC2l2	38.80	72.49	0.0024	0.0273
S2-RC2l3	27.13	72.75	0.0013	0.0328
RC1l1	41.28	65.04	0.0028	0.0259
RC1l2	40.01	69.83	0.0018	0.0239

表 4.2 開裂扭矩強度規範計算值與實驗值之比較

specimen	f'_c (MPa)	$T_{cr(test)}$ (kN-m)	$T_{cr(calc)}$ (kN-m)	$T_{cr(test)} / T_{cr(calc)}$
S1-RC1l1	28.73	35.08	36.78	0.95
S1-RC1l2	30.69	43.18	38.02	1.14
S1-RC1l3	30.11	43.51	37.65	1.16
S1-RC2l1	27.75	30.28	36.15	0.84
S1-RC2l2	30.69	35.54	38.02	0.93
S1-RC2l3	30.11	30.28	37.65	0.80
S2-RC1l1	26.48	29.51	35.31	0.84
S2-RC1l2	30.20	36.05	37.71	0.96
S2-RC1l3	30.69	36.25	38.02	0.95
S2-RC2l1	27.26	39.14	35.83	1.09
S2-RC2l2	29.13	38.80	37.03	1.05
S2-RC2l3	28.24	27.13	36.47	0.74
RC1l1	31.19	41.28	38.32	1.08
RC1l2	25.60	40.01	34.72	1.15

表 4.3 扭矩強度規範計算值與實驗值之比較

Specimen	f'_c (MPa)	Test $T_{ti(test)}$ (kN-m)	Superposition of RC and steel						$T_{ti(test)} / T_{ti(calc)}$				
			$T_{ti(calc)}$			Steel (kN-m)	RC Hsu (kN-m)	RC Hsu (kN-m)	ACI 318-89	ACI 318-95	ACI 318-89	ACI 318-95	Hsu
			RC ACI 318-89 (kN-m)	RC ACI 318-95 (kN-m)	RC Hsu (kN-m)								
S1-RCt1Ø1	28.73	64.99	52.72	39.00	40.36	1.67	1.19	1.60	1.19	1.60	1.55		
S1-RCt2Ø1	30.69	68.17	67.80	58.50	57.79	1.57	0.98	1.13	0.98	1.13	1.15		
S1-RCt3Ø1	30.11	91.18	110.34	117.00	134.88	1.45	0.82	0.77	0.82	0.77	0.67		
S1-RCt1Ø2	27.75	56.61	52.31	39.00	57.70	1.26	1.06	1.41	1.06	1.41	0.96		
S1-RCt2Ø2	30.69	82.34	67.80	58.50	82.72	1.36	1.19	1.38	1.19	1.38	0.98		
S1-RCt3Ø2	30.11	93.04	110.34	117.00	161.72	1.15	0.83	0.79	0.83	0.79	0.57		
S2-RCt1Ø1	26.48	55.48	51.75	39.00	40.50	1.34	1.04	1.38	1.04	1.38	1.33		
S2-RCt2Ø1	30.20	68.37	67.60	58.50	57.84	1.58	0.99	1.14	0.99	1.14	1.15		
S2-RCt3Ø1	30.69	77.38	110.58	117.00	134.63	1.98	0.69	0.65	0.69	0.65	0.57		
S2-RCt1Ø2	27.26	66.80	52.09	39.00	57.76	1.56	1.24	1.65	1.24	1.65	1.13		
S2-RCt2Ø2	29.13	72.49	67.15	58.50	83.05	1.83	1.05	1.20	1.05	1.20	0.85		
S2-RCt3Ø2	28.24	72.75	109.56	117.00	163.05	2.14	0.65	0.61	0.65	0.61	0.44		
RCt2Ø1	31.19	65.04	68.00	58.50	57.75	—	0.96	1.11	0.96	1.11	1.13		
RCt2Ø2	25.60	69.83	65.62	58.50	83.91	—	1.06	1.19	1.06	1.19	0.83		

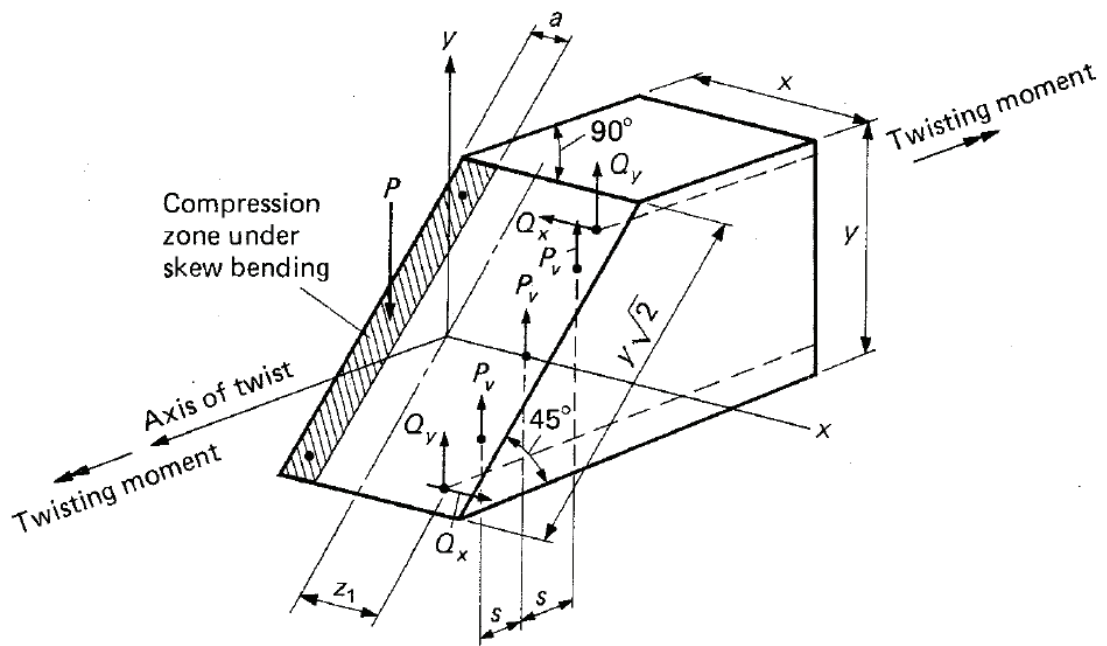


圖 2.1 斜彎理論(Wang and Salmon, 1992)

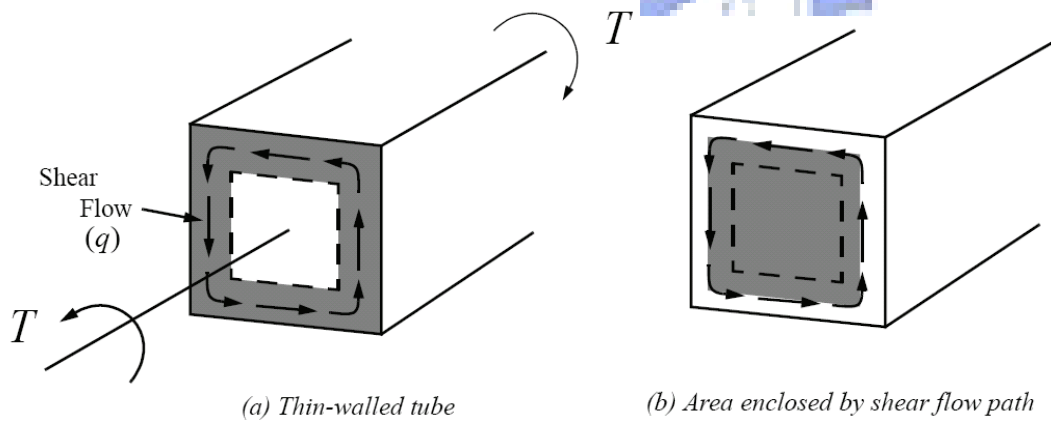


圖 2.2 (a)薄壁管; (b)剪力流徑所包圍之面積(ACI 318-95)

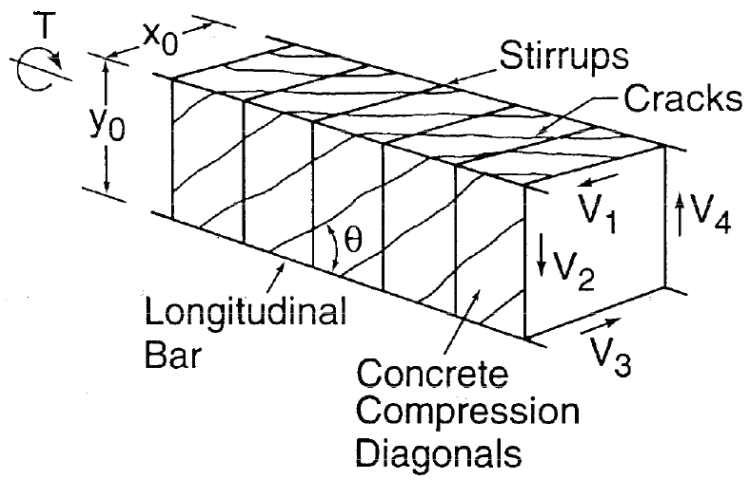


圖 2.3 空間桁架分析(ACI 318-95)

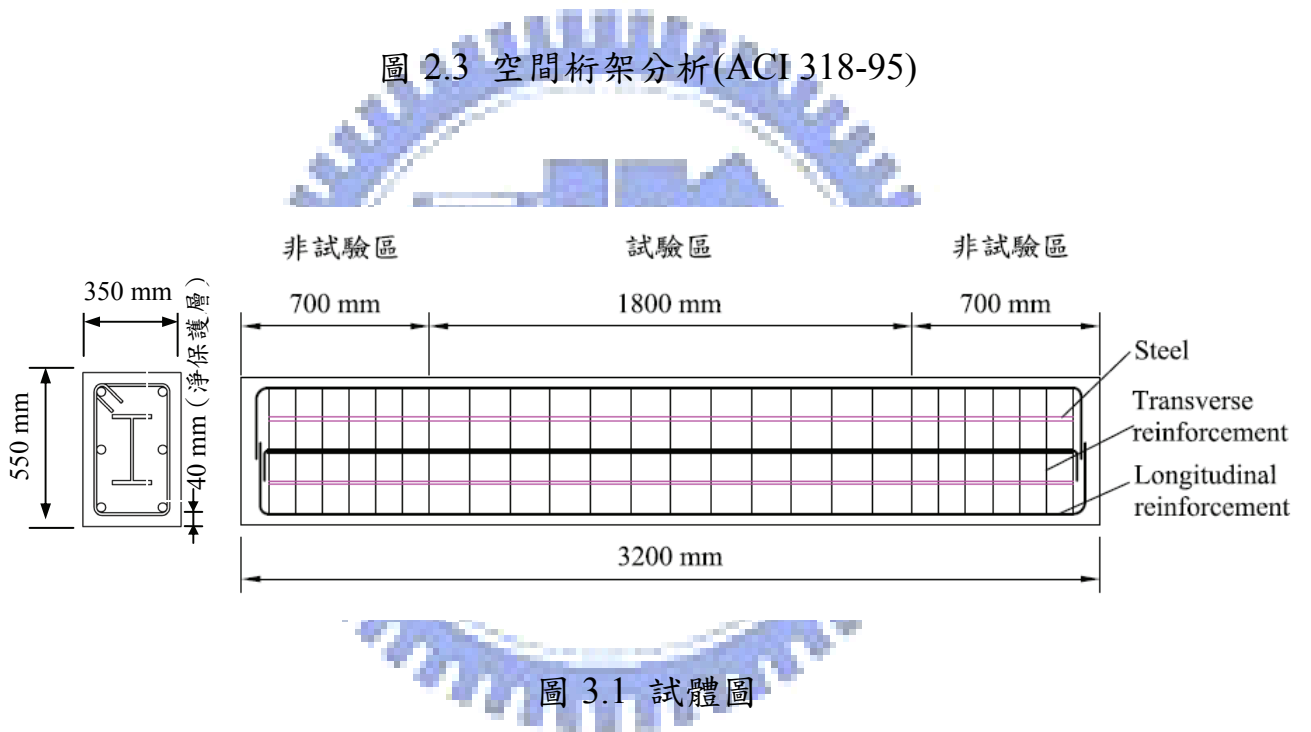


圖 3.1 試體圖

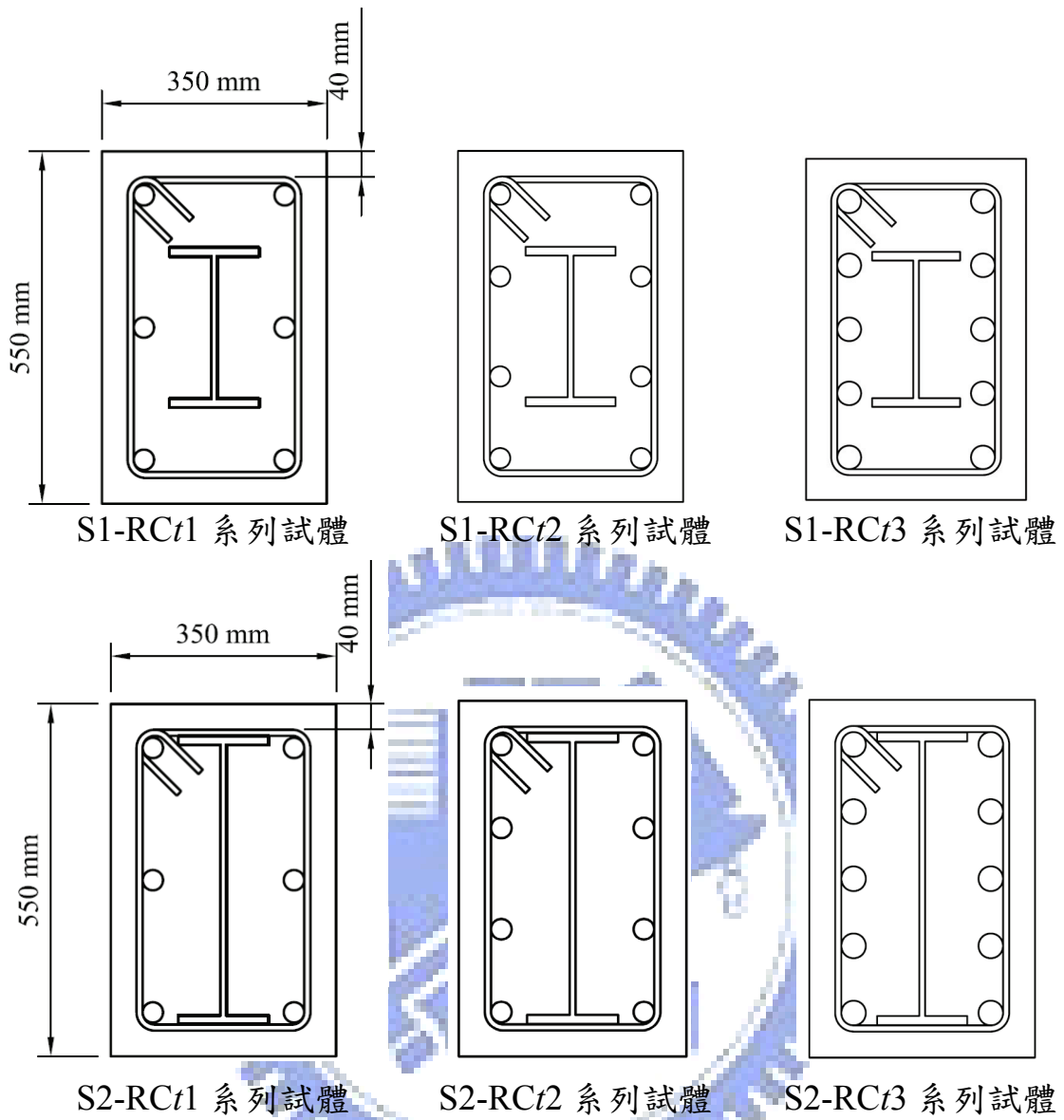


圖 3.2 試體斷面圖

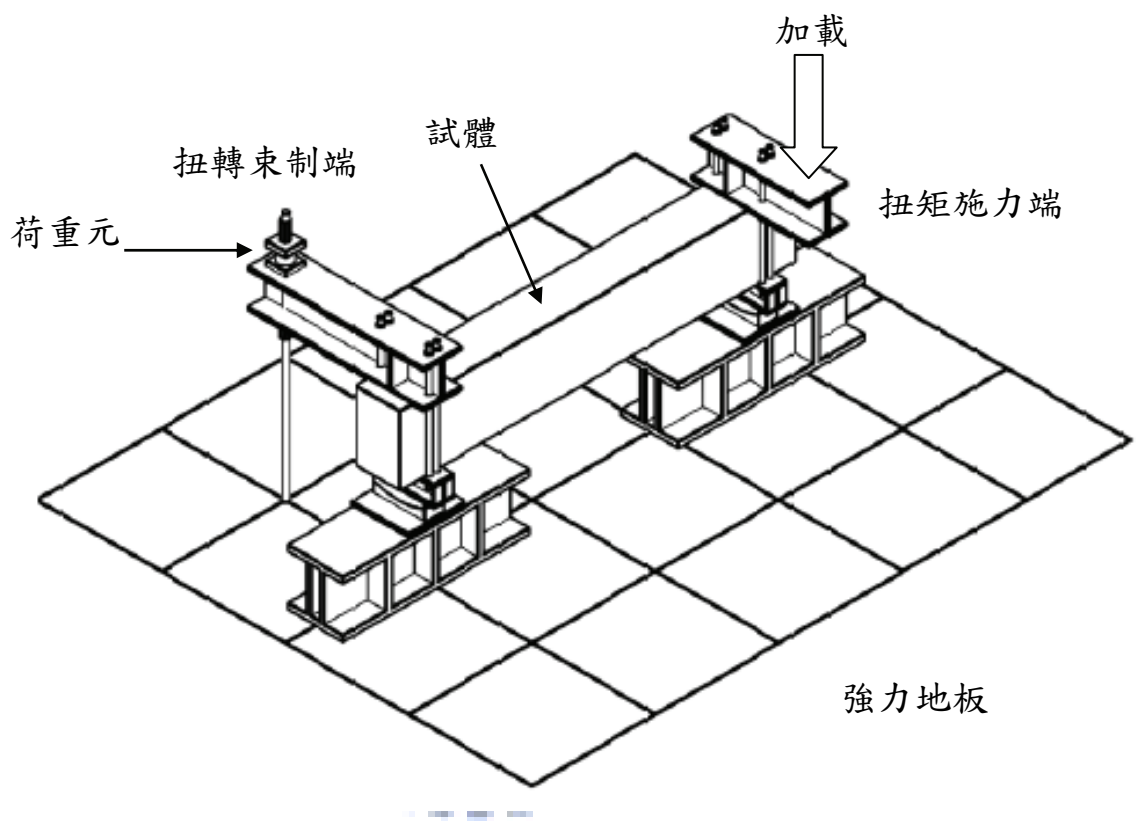


圖 3.3 試驗設置圖

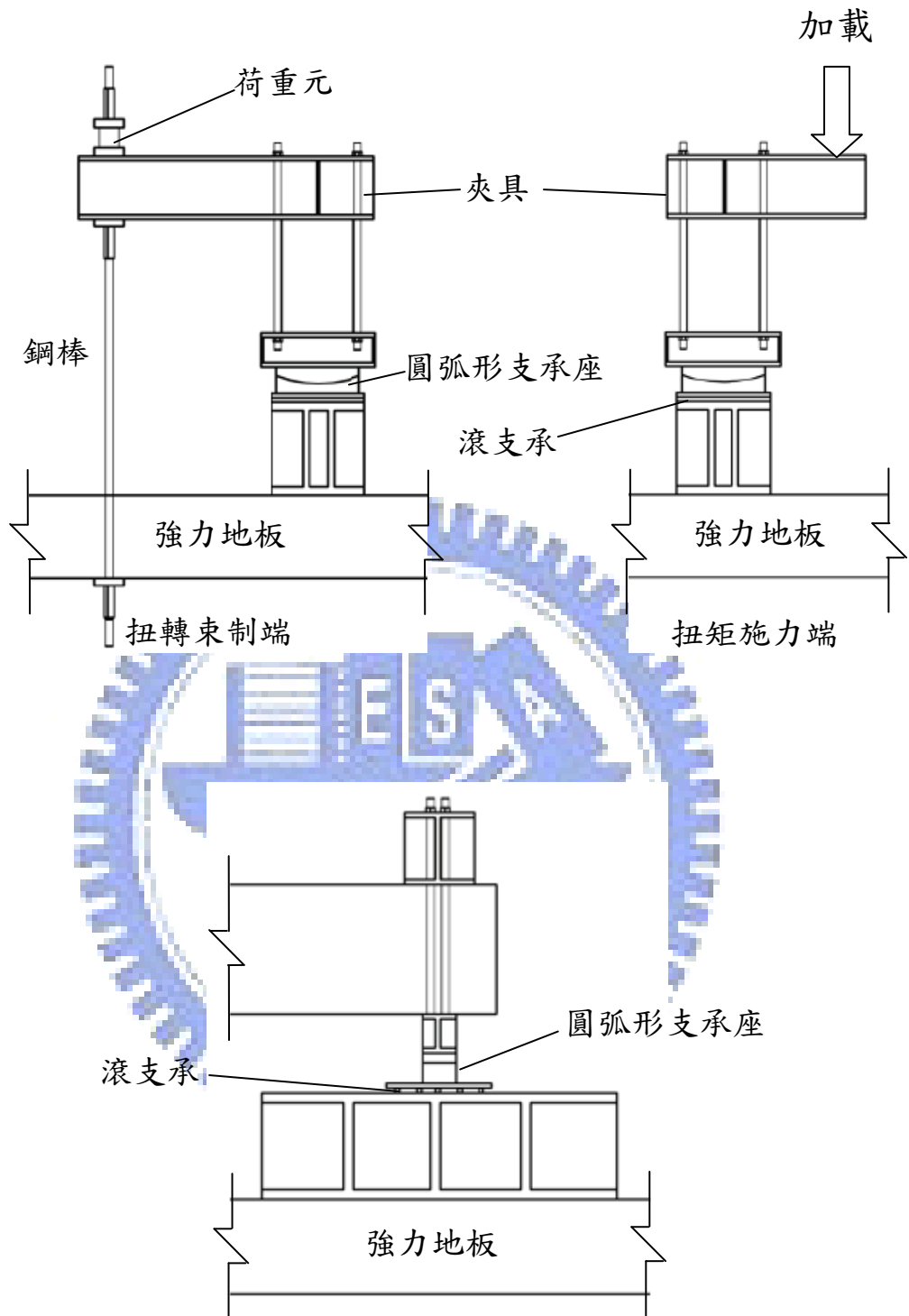


圖 3.4 試驗設置細部圖

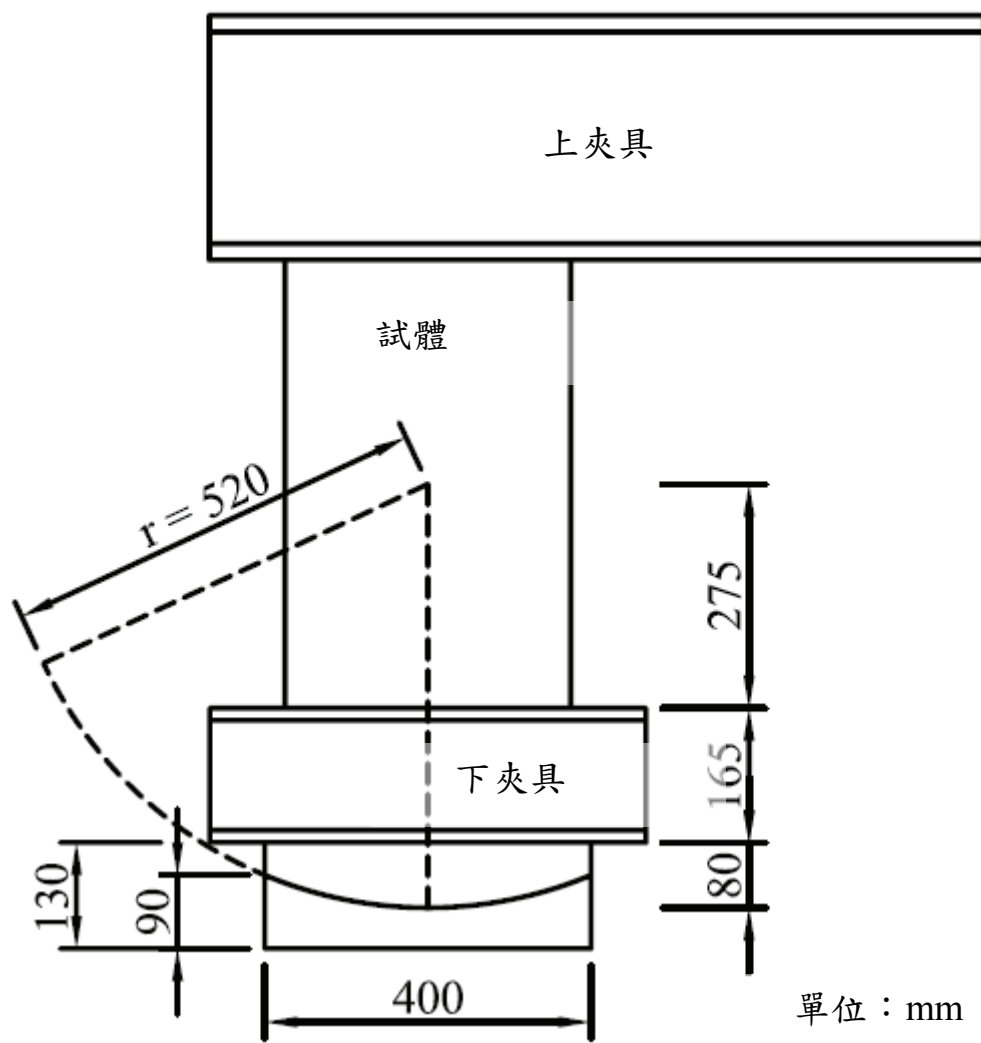


圖 3.5 圓弧形支承座圖

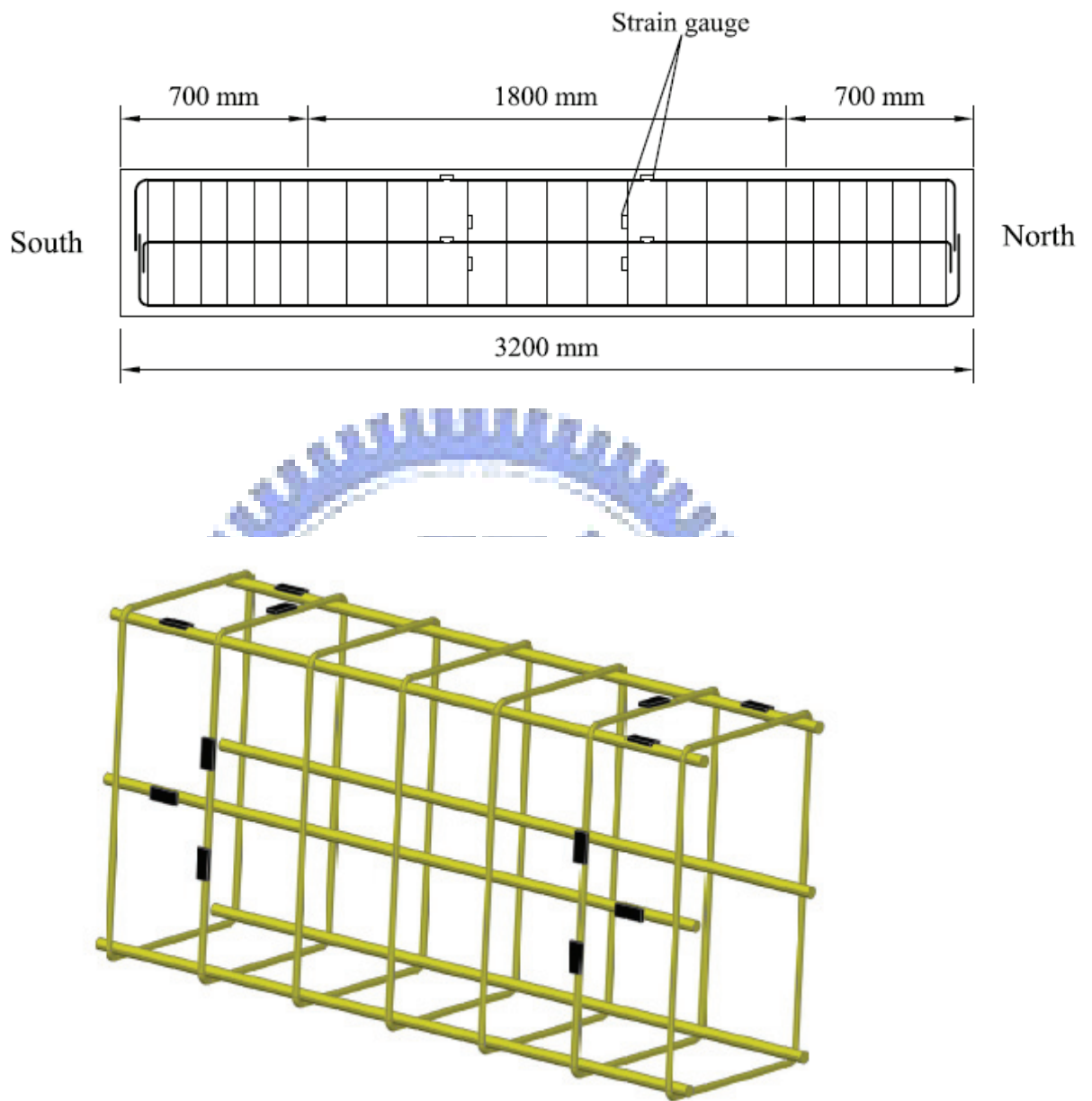


圖 3.6 試體 $t1$ 系列橫向與縱向鋼筋應變計配置圖

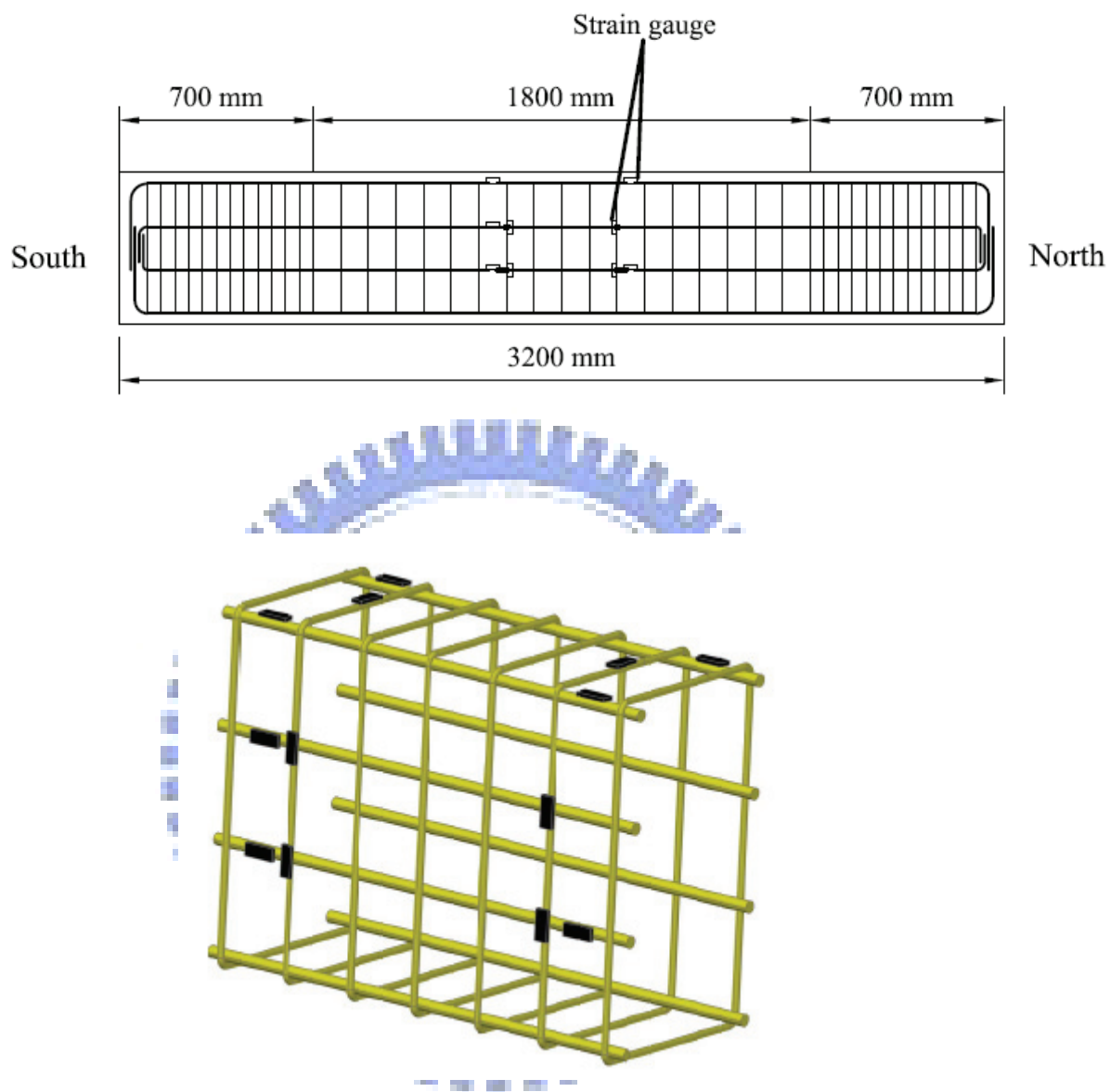


圖 3.7 試體*t*2 系列橫向與縱向鋼筋應變計配置圖

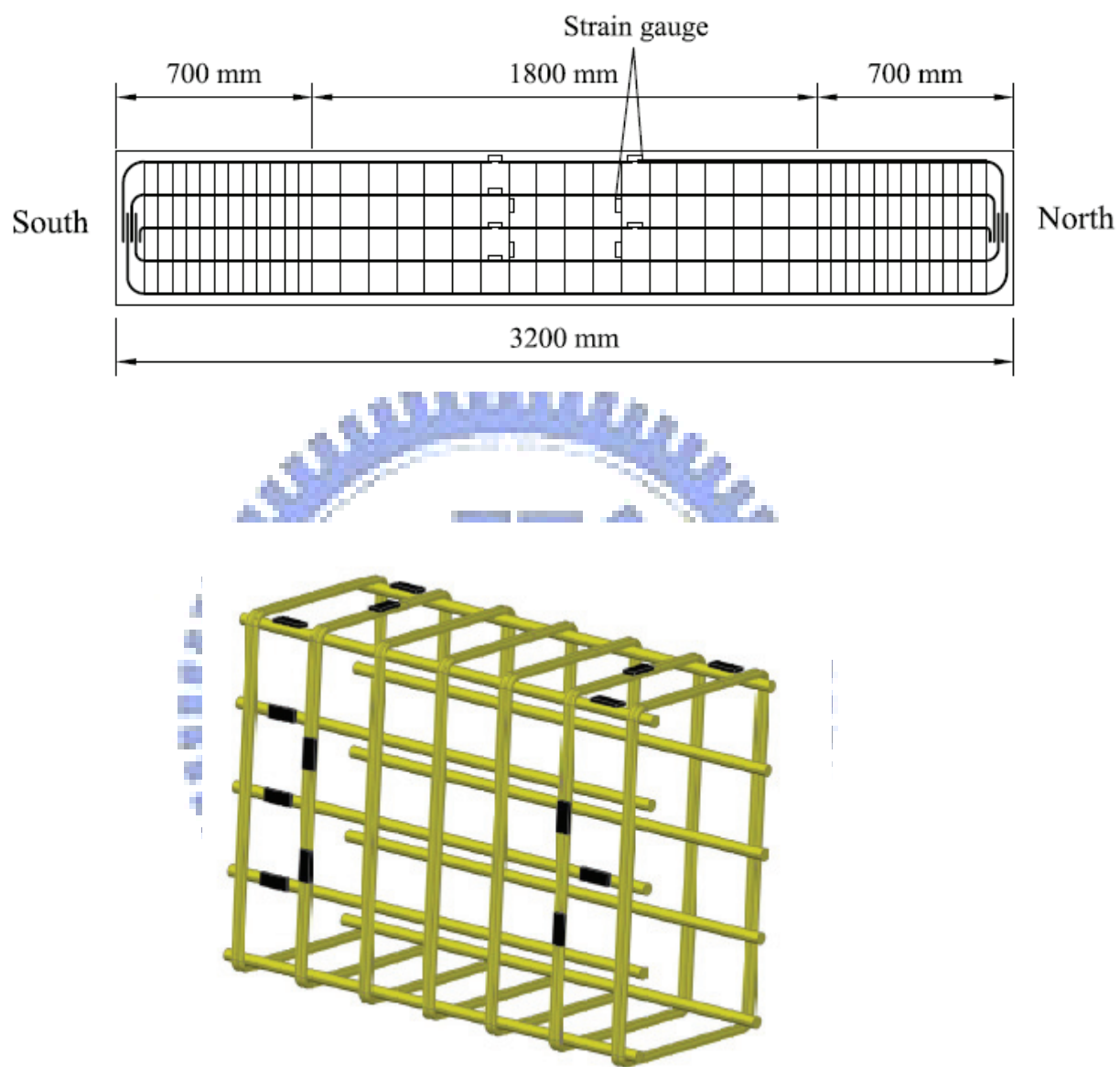


圖 3.8 試體*t3* 系列橫向與縱向鋼筋應變計配置圖

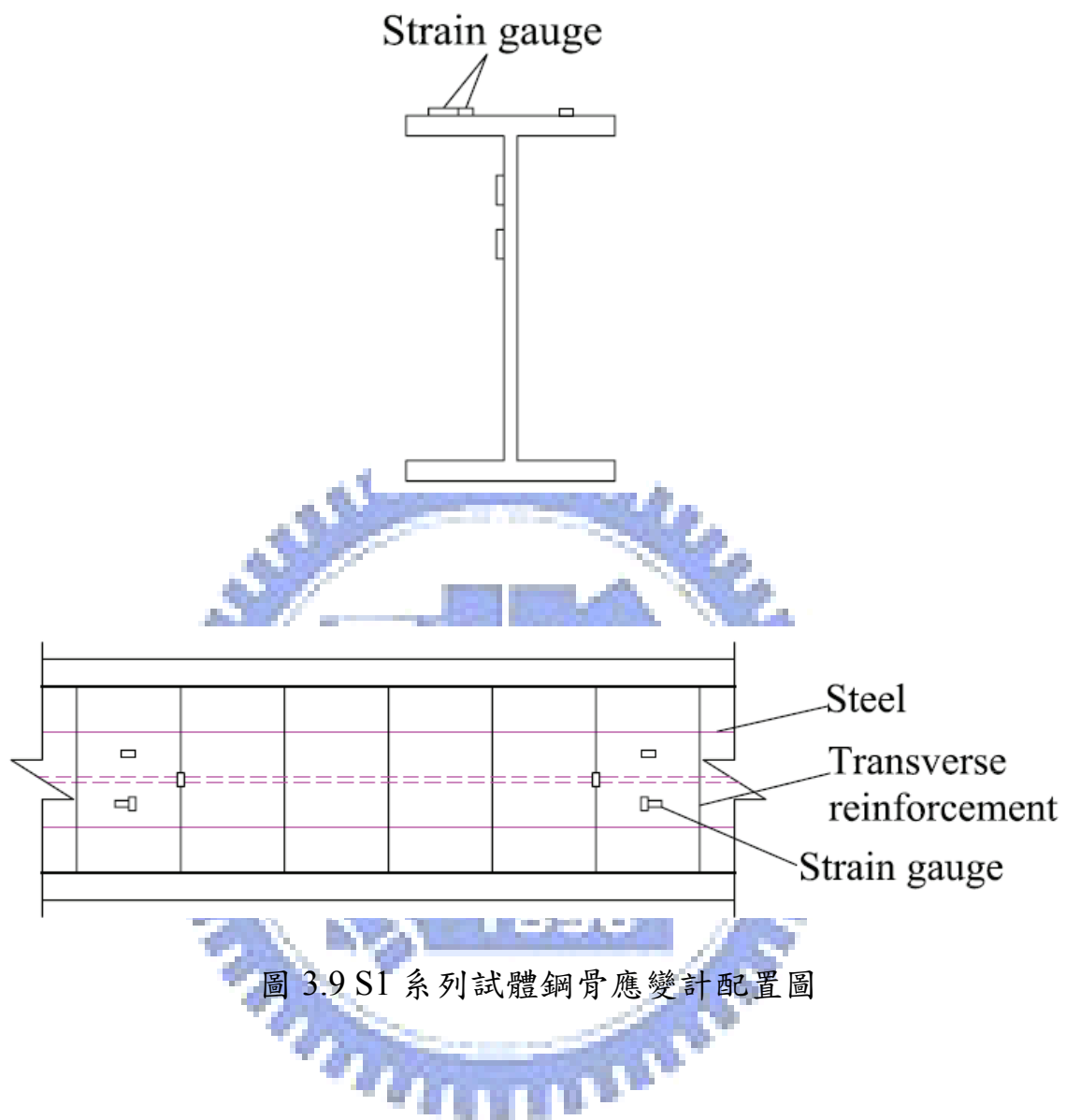


圖 3.9 S1 系列試體鋼骨應變計配置圖

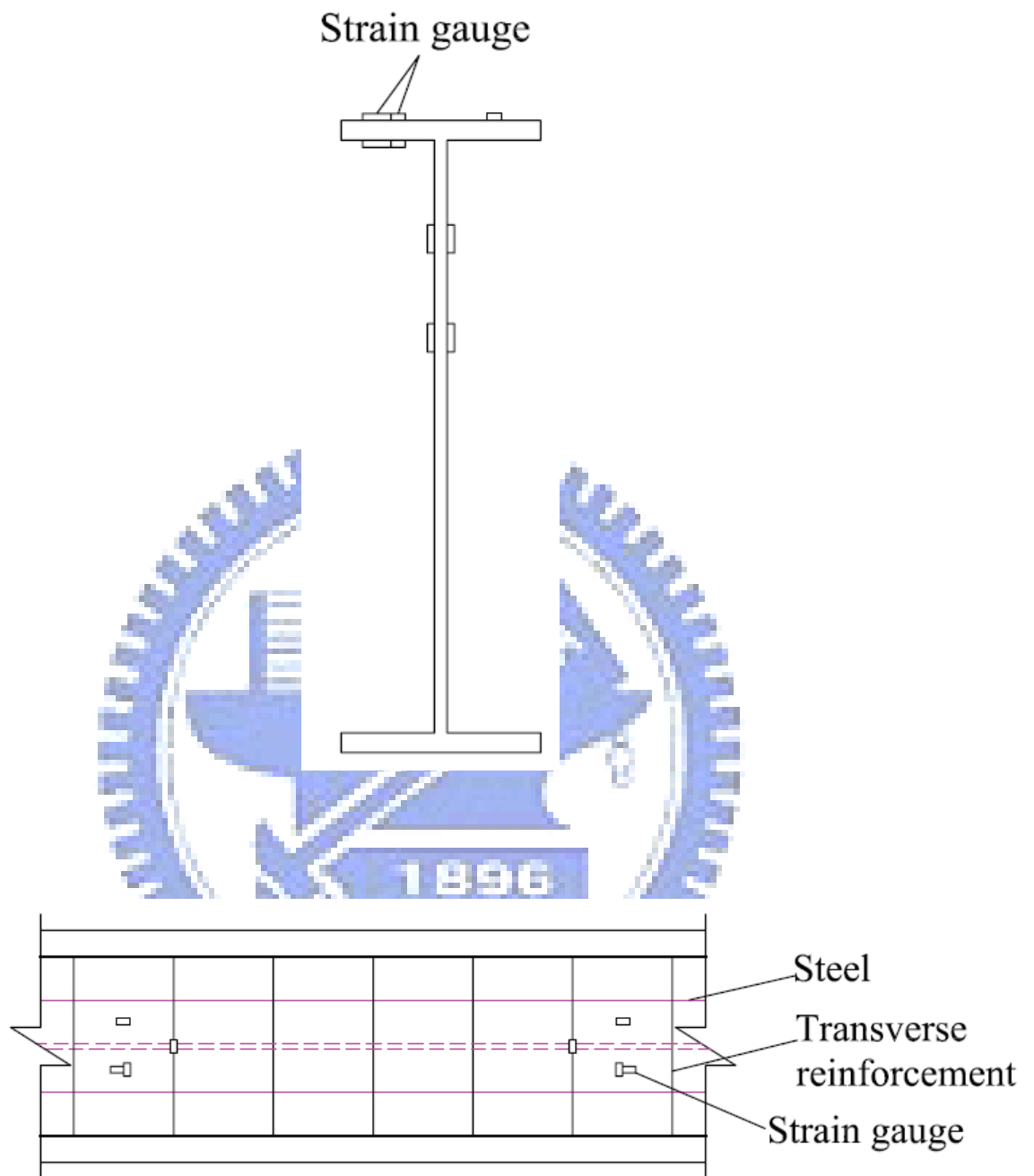


圖 3.10 S2 系列試體鋼骨應變計配置圖

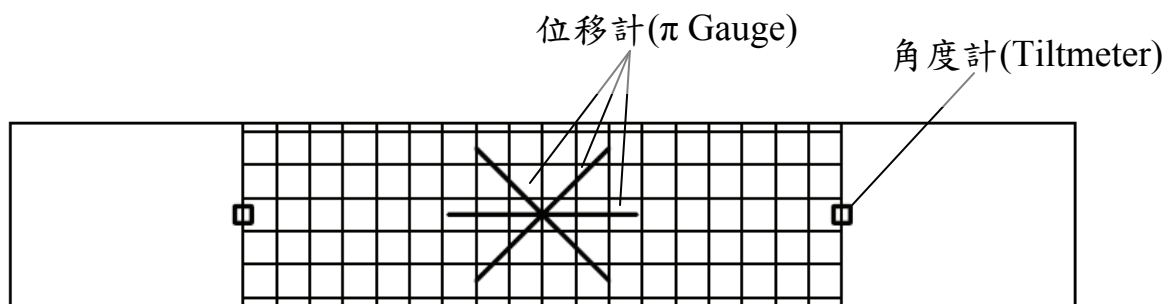


圖 3.11 變位量測裝置配置圖

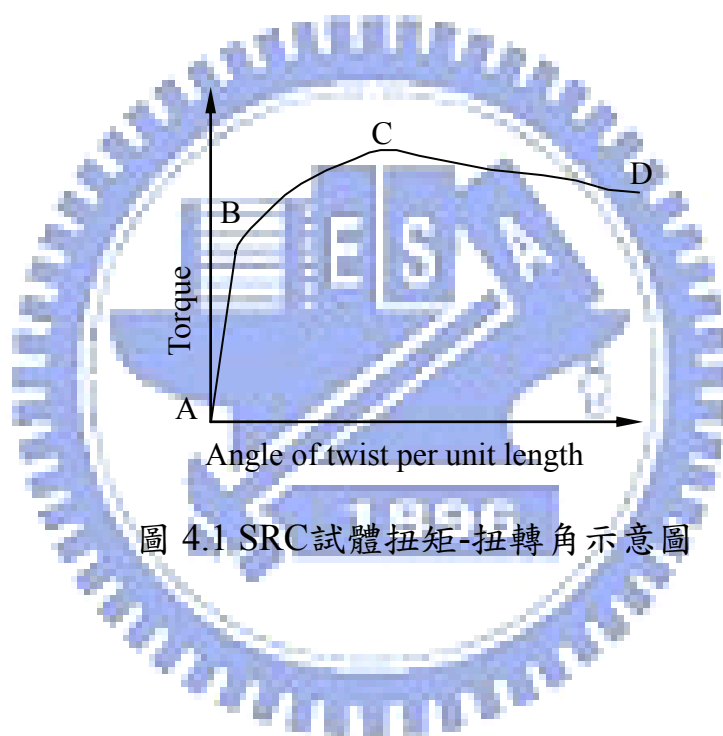


圖 4.1 SRC 試體扭矩-扭轉角示意圖

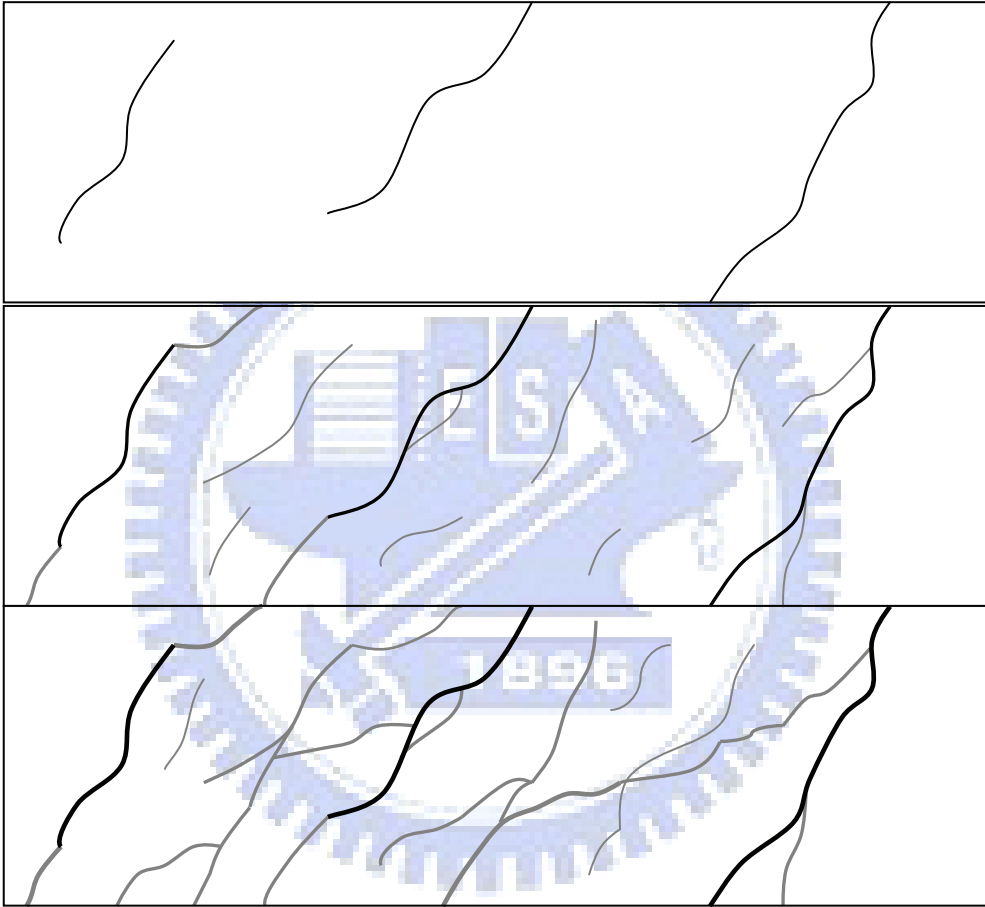


圖 4.2 SRC系列試體裂縫生成次序示意圖

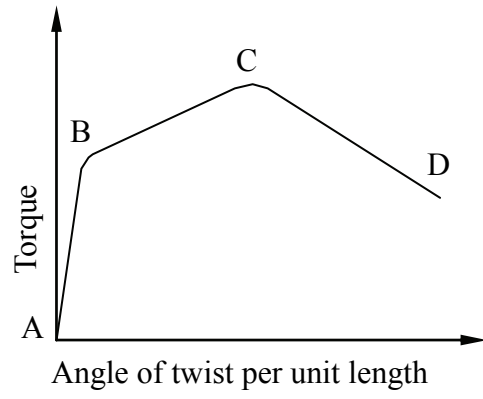


圖 4.3 RC試體扭矩-扭轉角示意圖

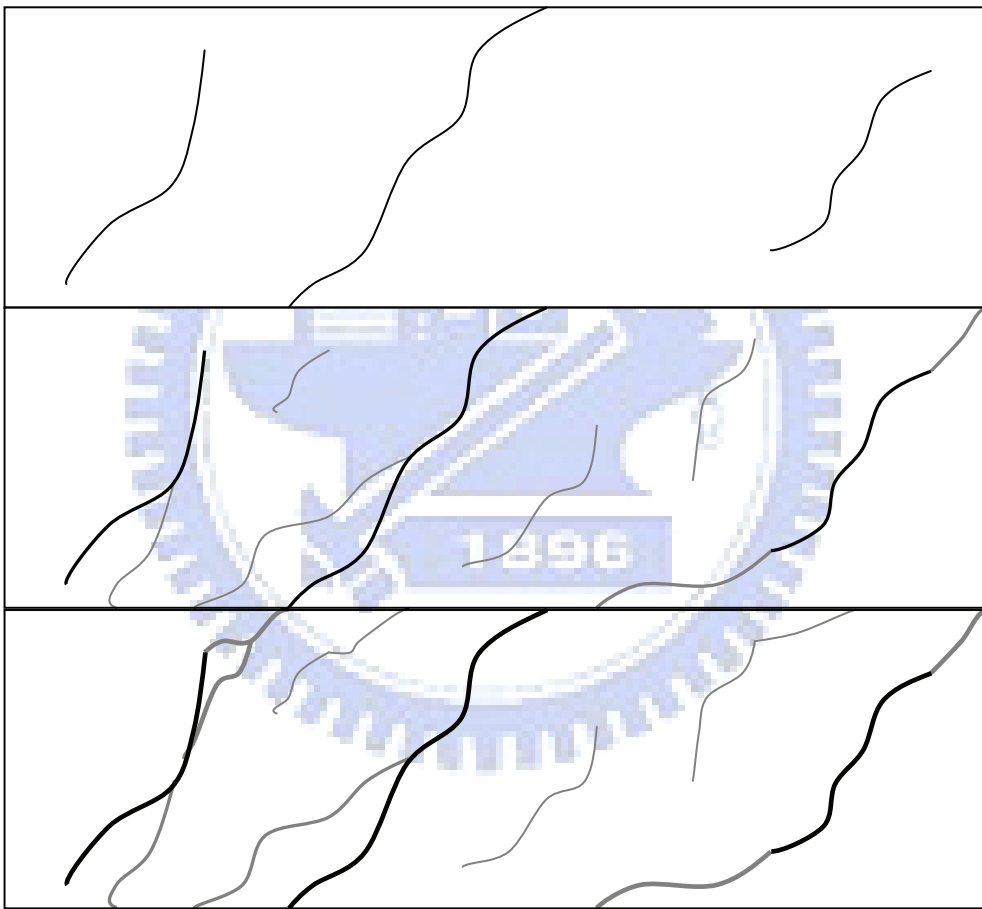


圖 4.4 RC系列試體裂縫生成次序示意圖

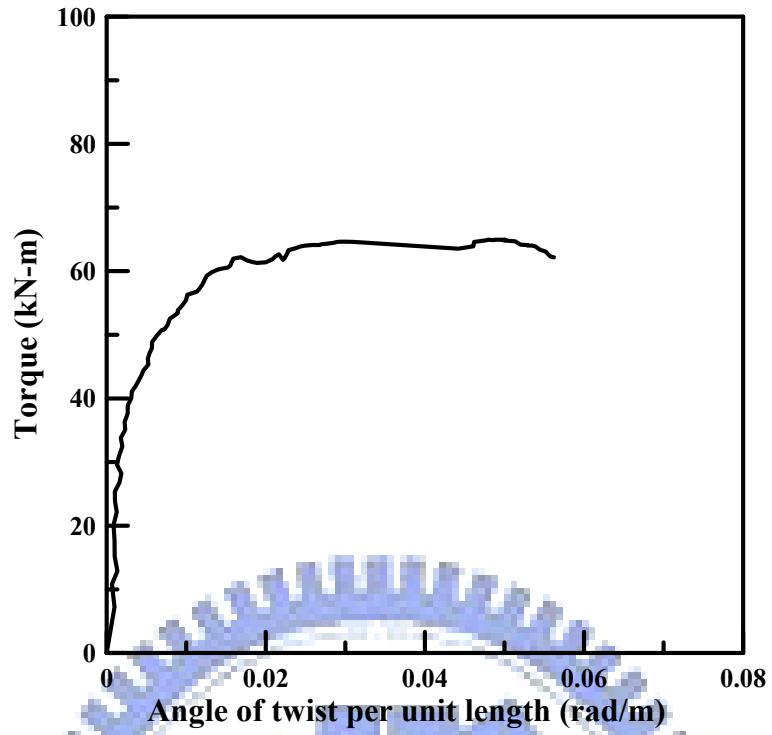


圖 4.5 試體S1-RCt1l1 扭矩與扭轉角關係圖

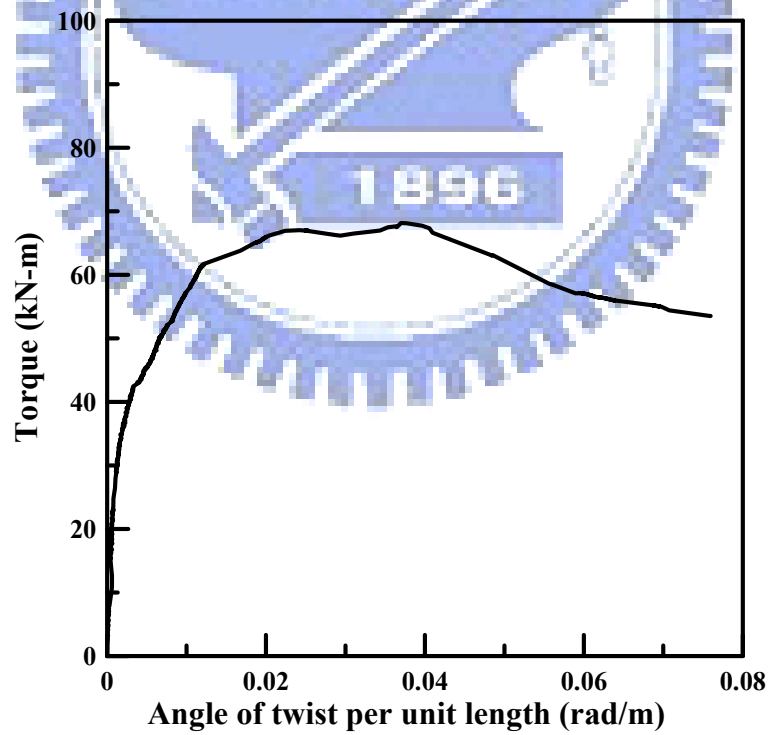


圖 4.6 試體S1-RCt2l1 扭矩與扭轉角關係圖

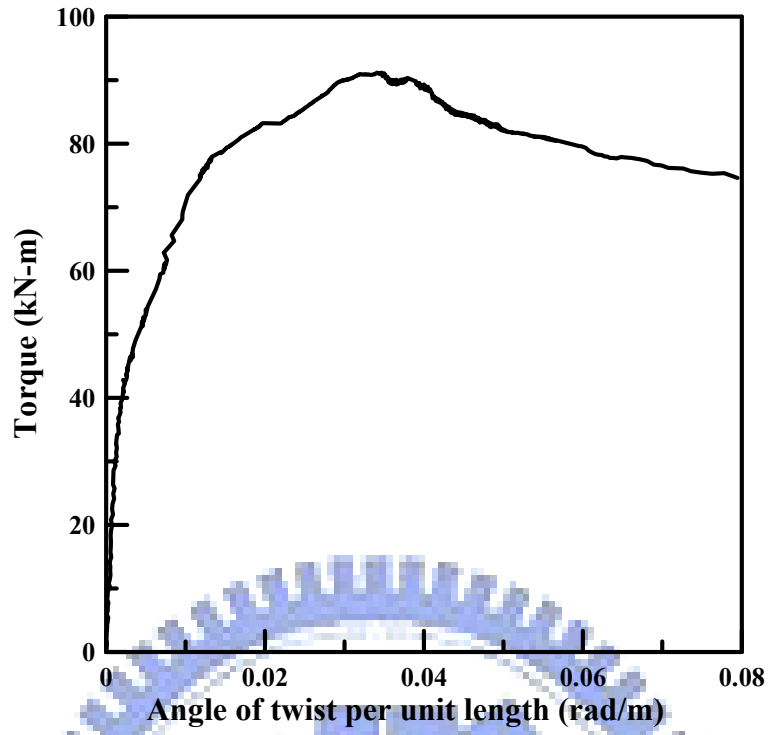


圖 4.7 試體S1-RCt3l1 扭矩與扭轉角關係圖

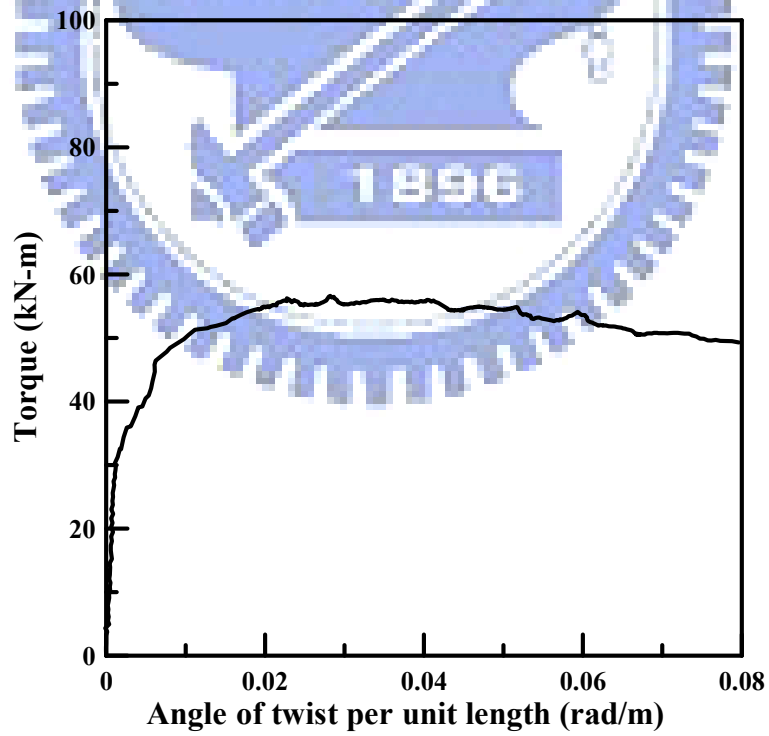


圖 4.8 試體S1-RCt1l2 扭矩與扭轉角關係圖

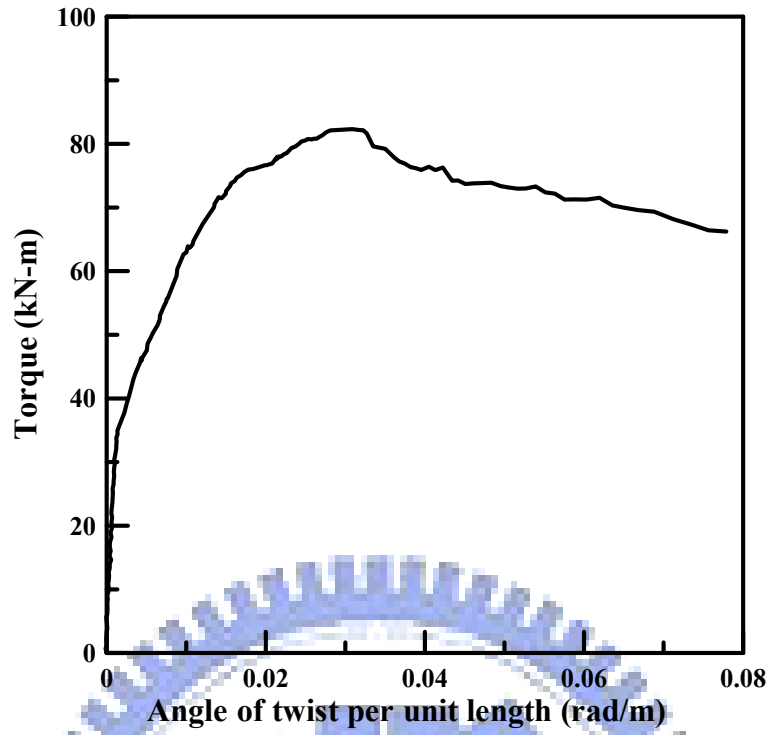


圖 4.9 試體S1-RCt2l2 扭矩與扭轉角關係圖

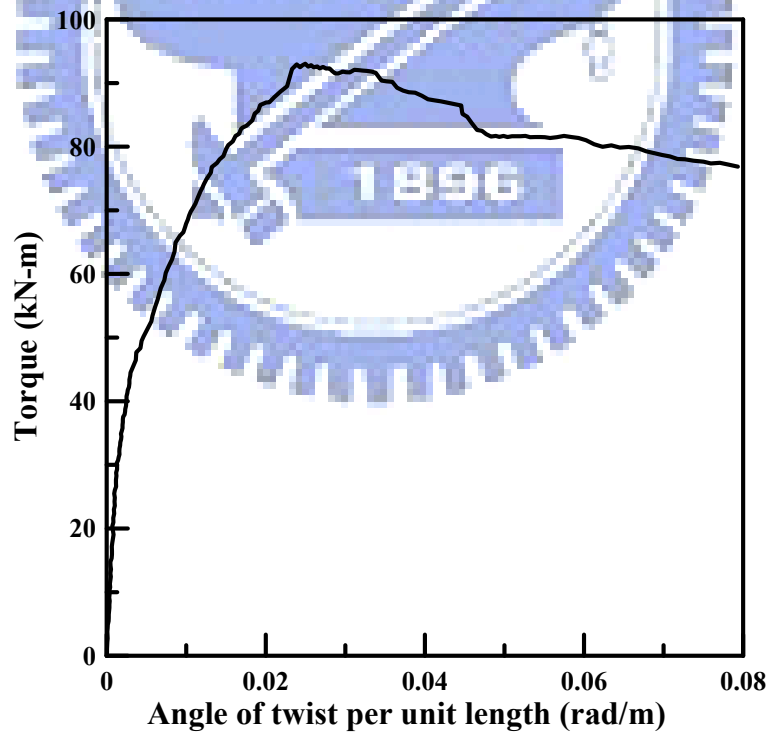


圖 4.10 試體S1-RCt3l2 扭矩與扭轉角關係圖

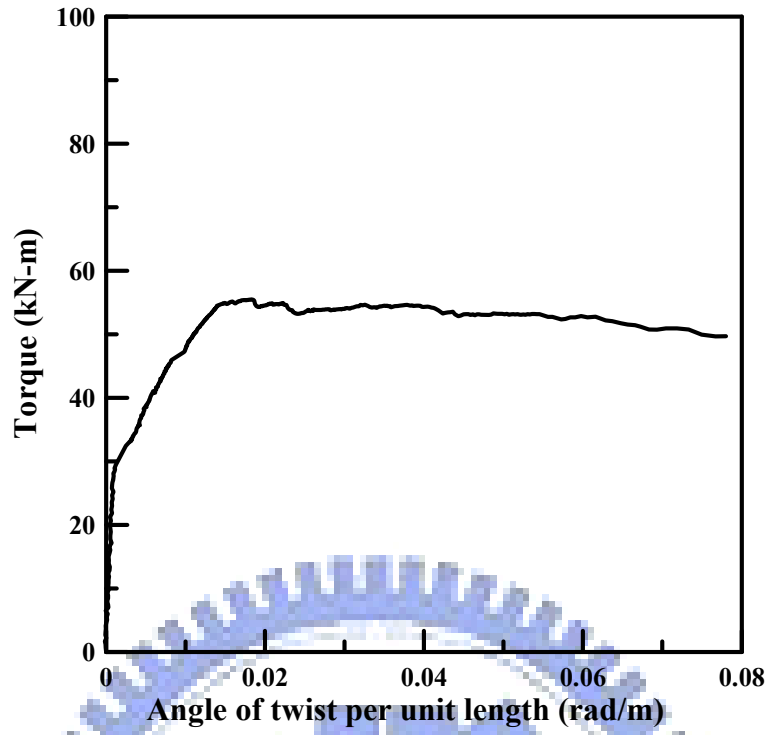


圖 4.11 試體S2-RCt1l1 扭矩與扭轉角關係圖

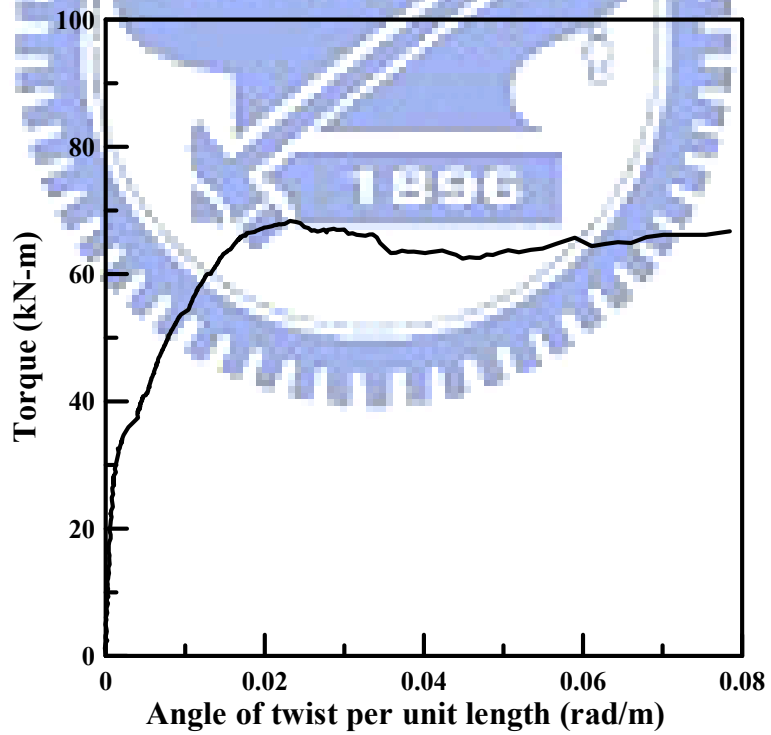


圖 4.12 試體S2-RCt2l1 扭矩與扭轉角關係圖

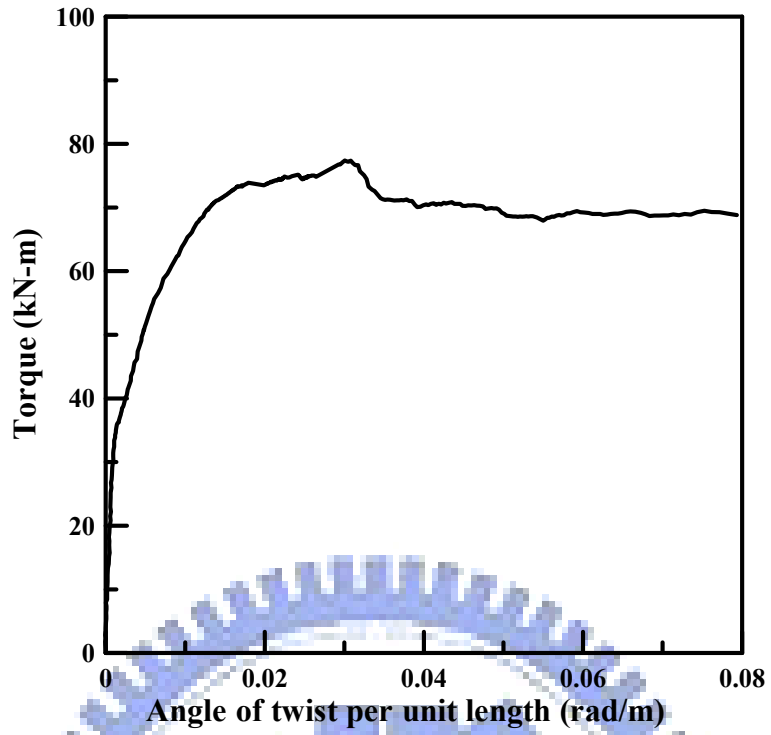


圖 4.13 試體S2-RCt3l1 扭矩與扭轉角關係圖

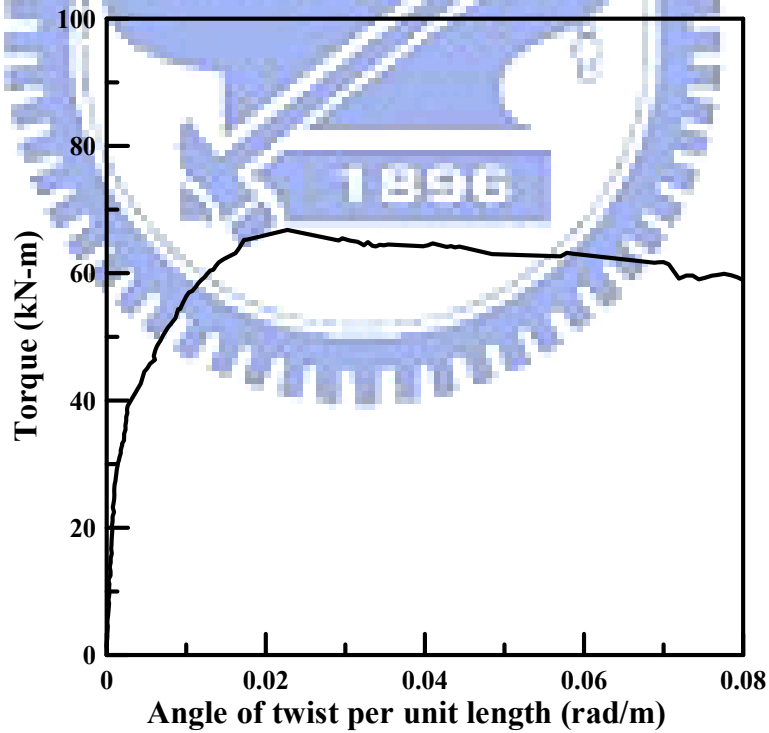


圖 4.14 試體S2-RCt1l2 扭矩與扭轉角關係圖

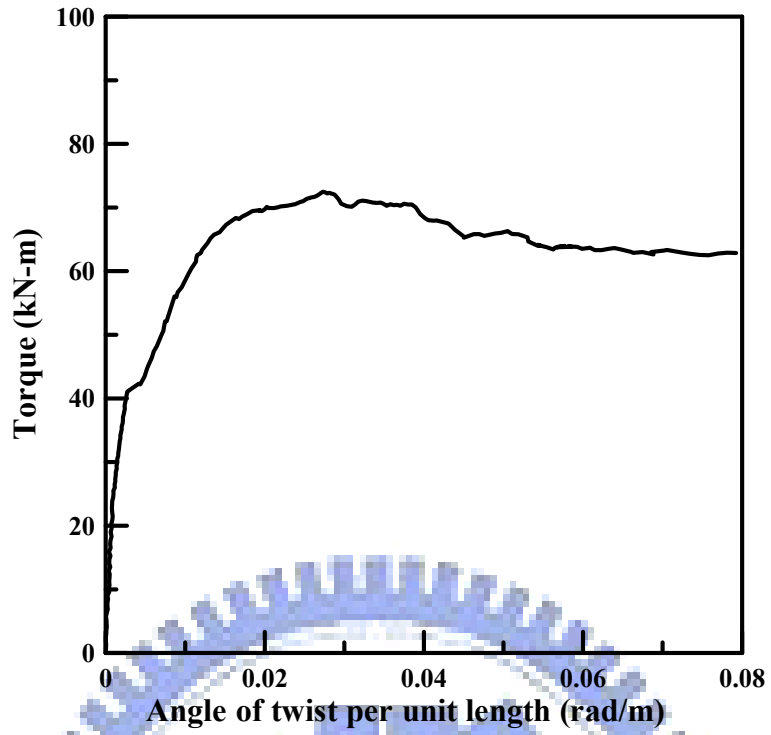


圖 4.15 試體S2-RCt2l2 扭矩與扭轉角關係圖

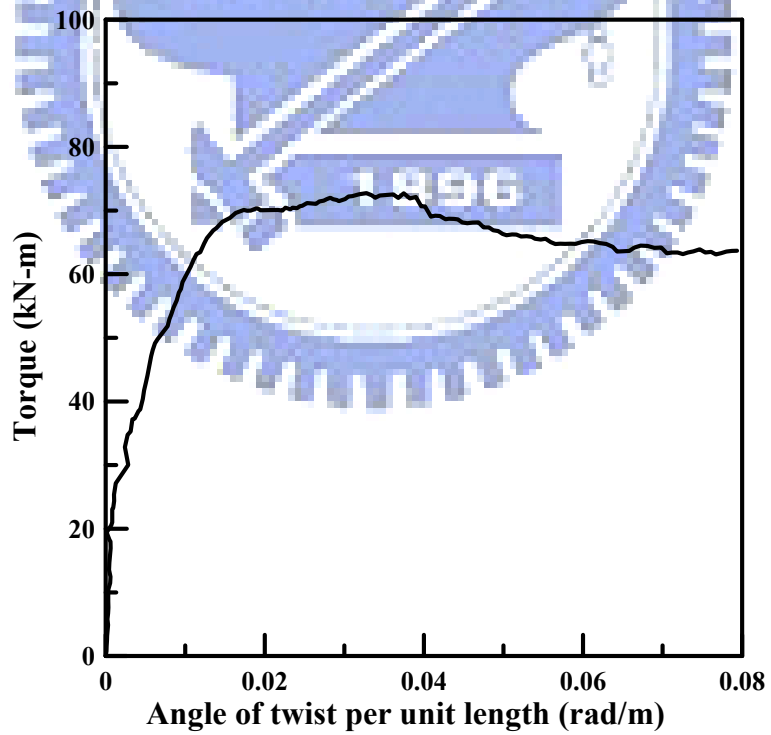


圖 4.16 試體S2-RCt3l2 扭矩與扭轉角關係圖

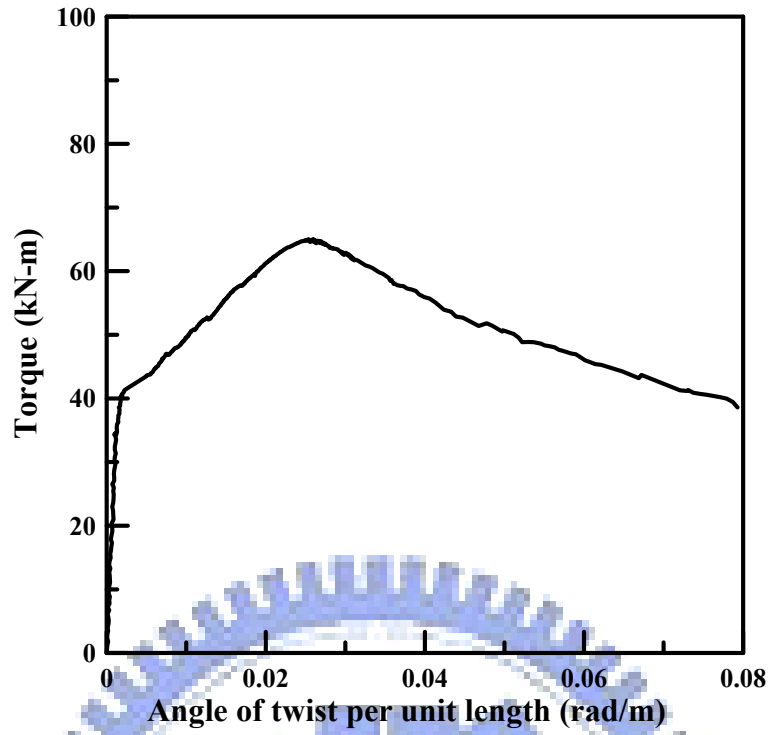


圖 4.17 試體RCt2l1 扭矩與扭轉角關係圖

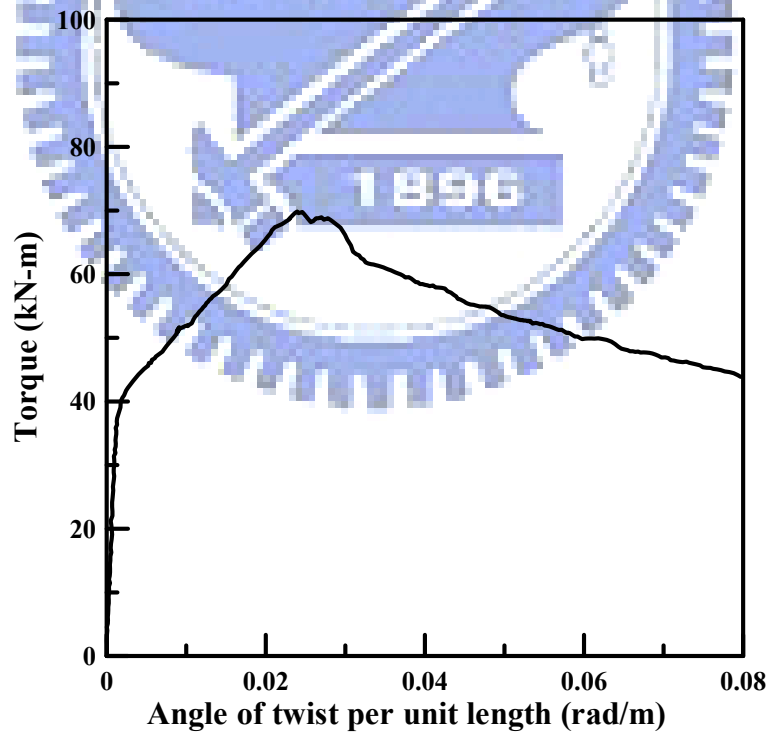


圖 4.18 試體 RCt2l2 扭矩與扭轉角關係圖

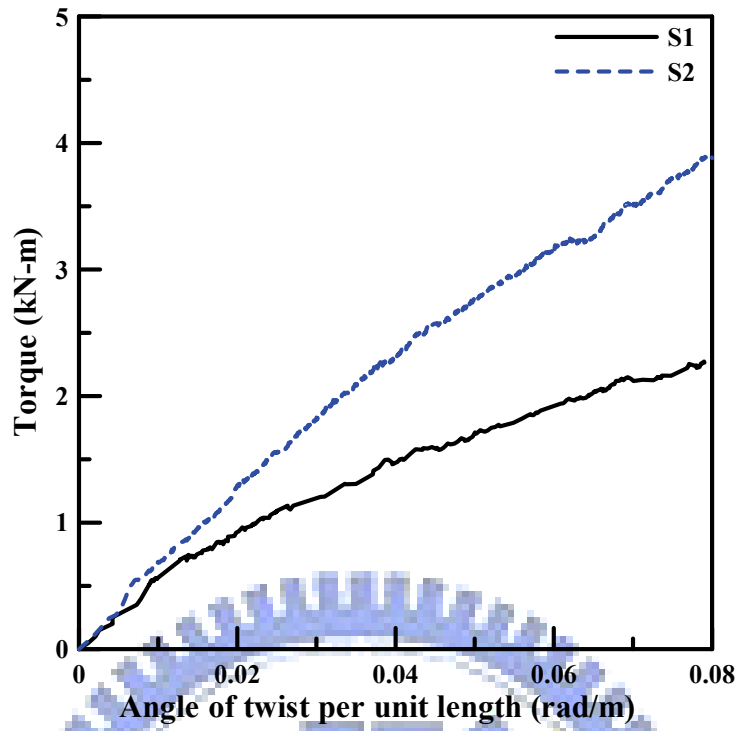


圖 4.19 S1 與 S2 之扭矩-扭轉角比較圖

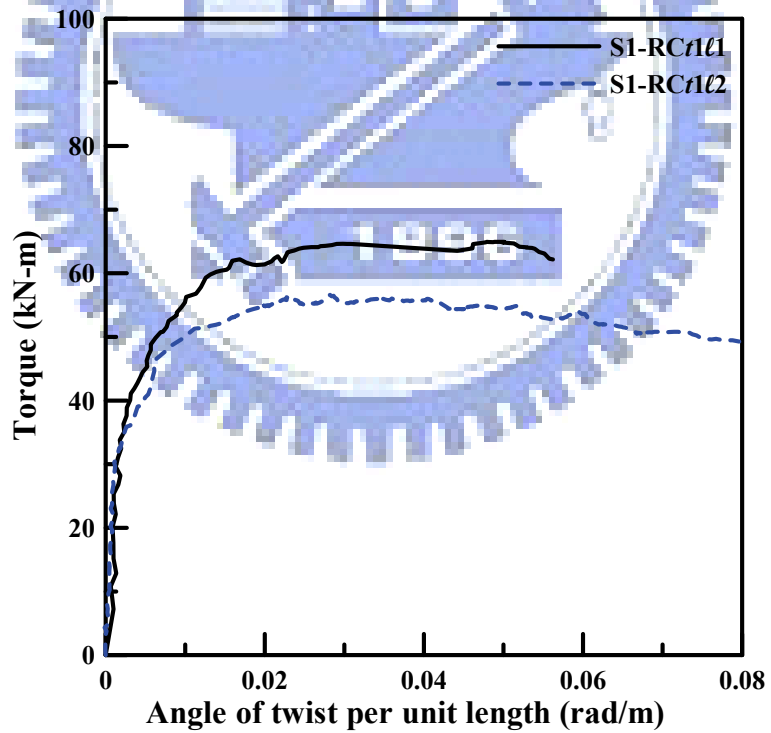


圖 4.20 試體編號 S1-RC11 系列之扭矩-扭轉角比較圖

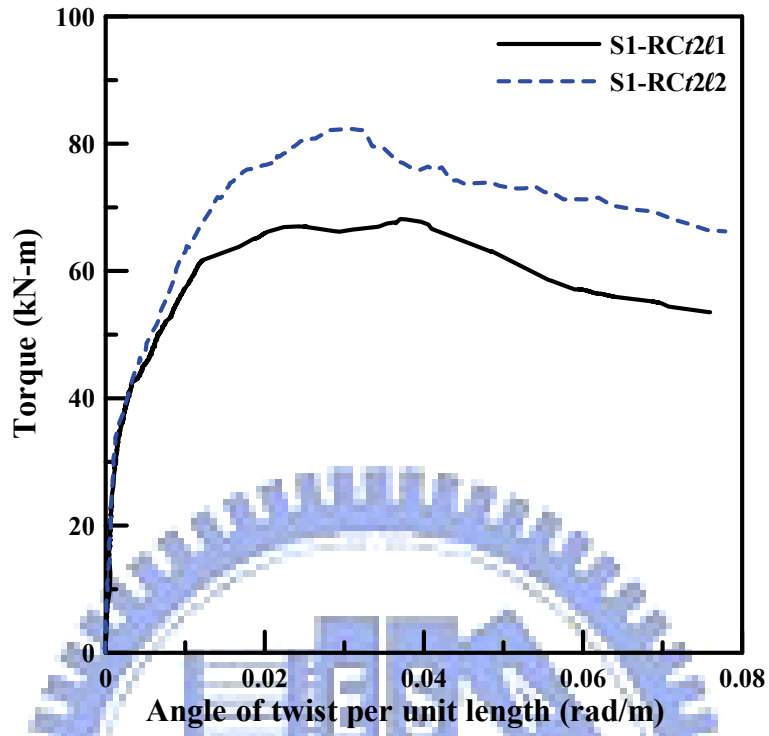


圖 4.21 試體編號S1-RCt2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

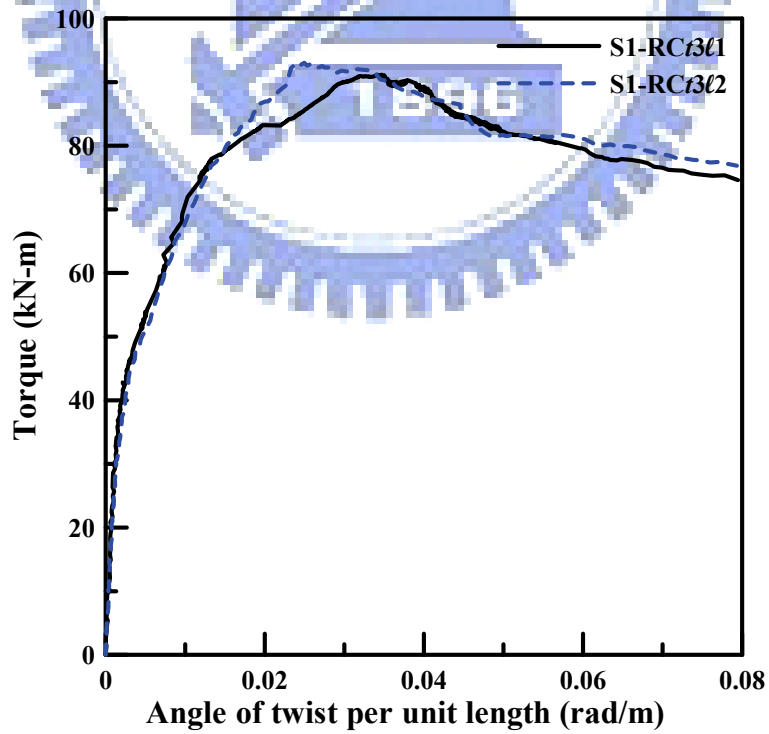


圖 4.22 試體編號S1-RCt3 系列之扭矩-扭轉角比較圖

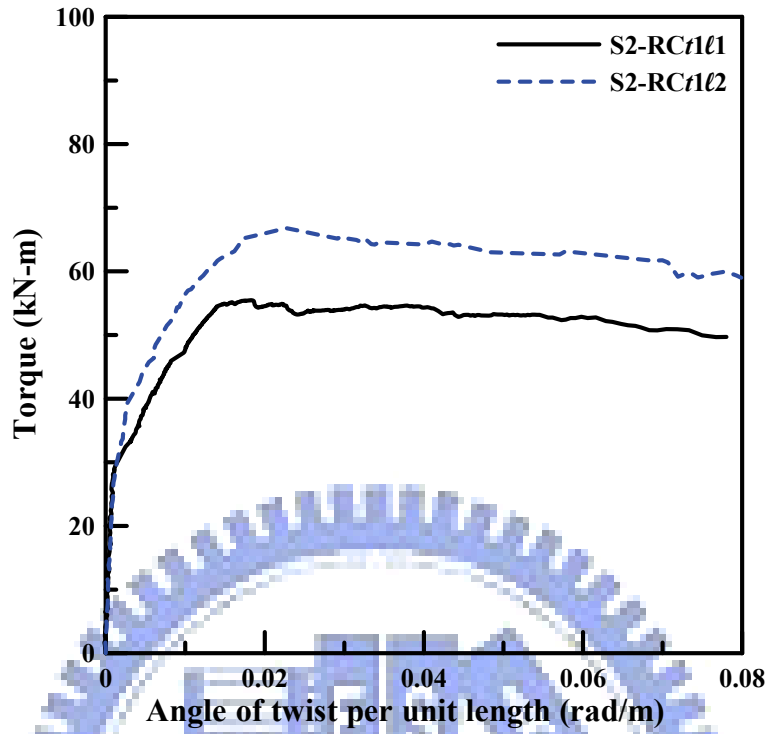


圖 4.23 試體編號S2-RCt1 系列之扭矩-扭轉角比較圖

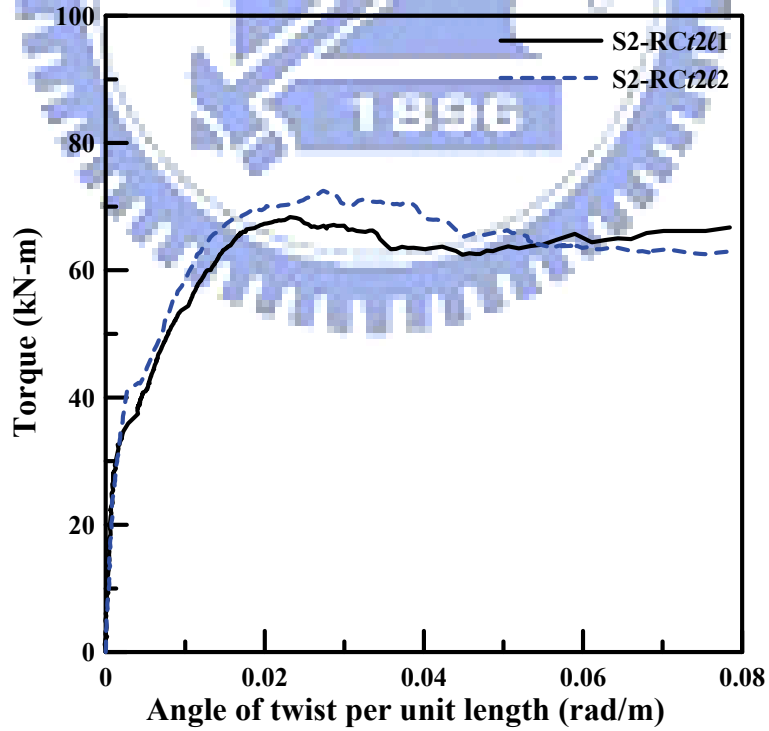


圖 4.24 試體編號S2-RCt2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

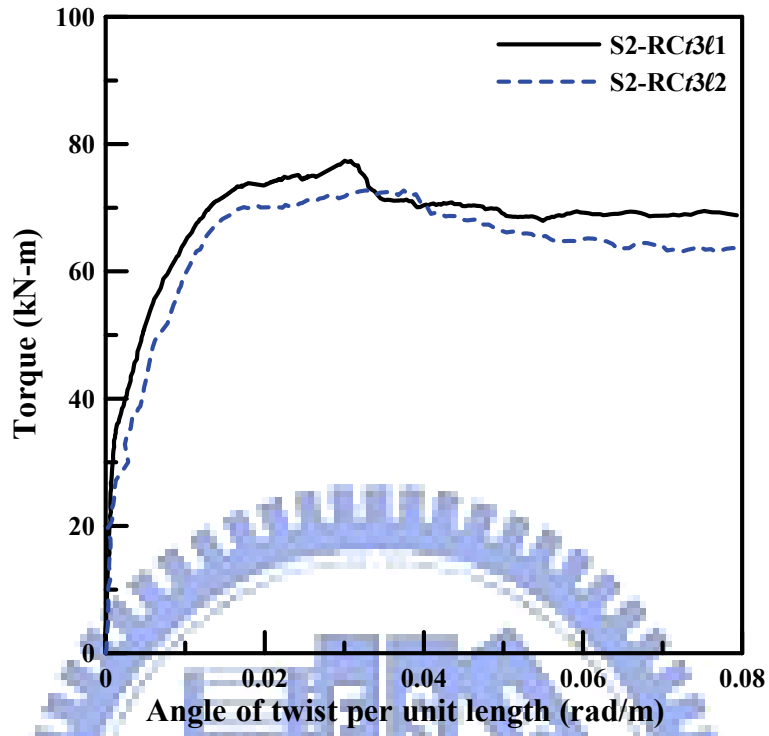


圖 4.25 試體編號S2-RCt3 系列之扭矩-扭轉角比較圖

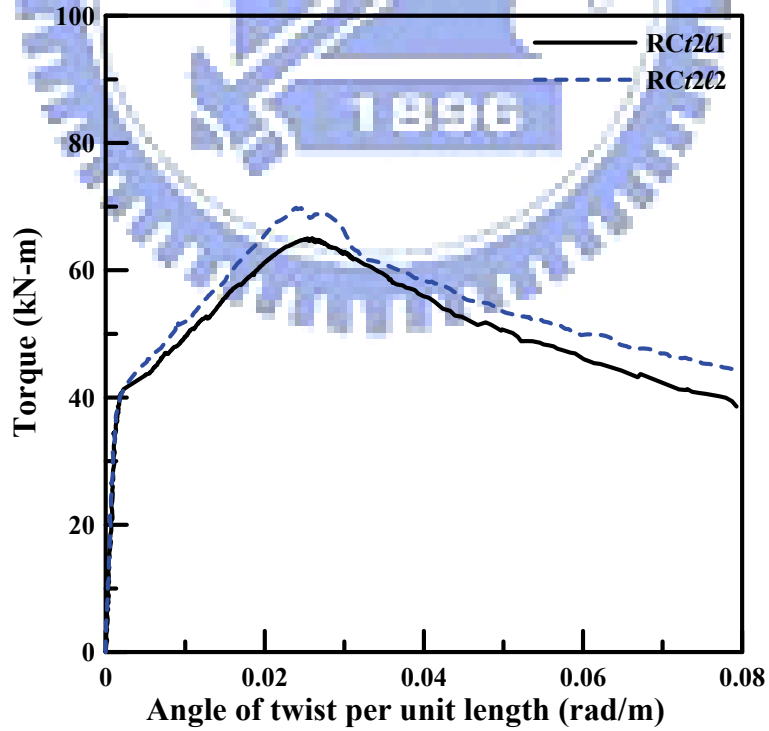


圖 4.26 試體編號RCt2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

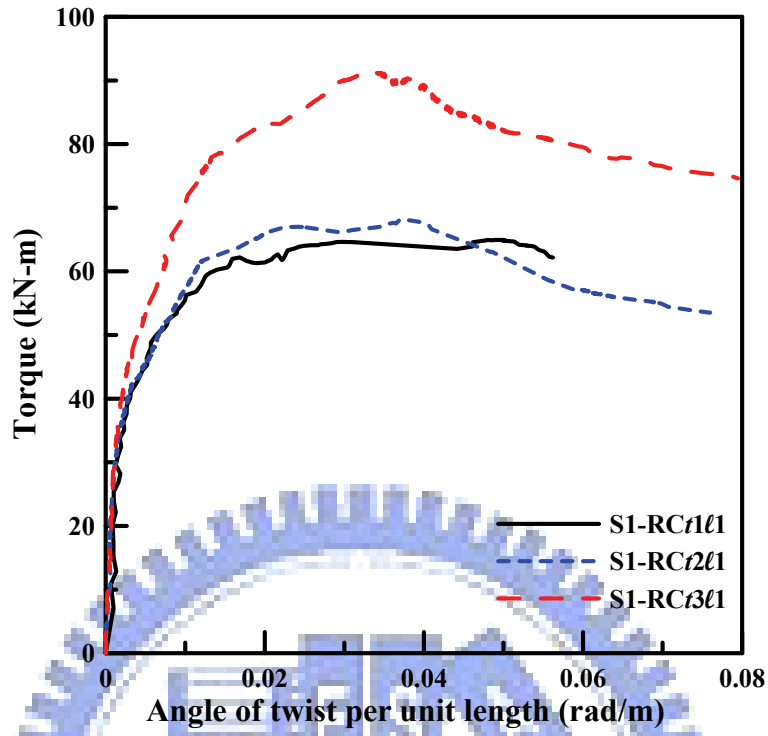


圖 4.27 試體編號S1-RC1 系列之扭矩-扭轉角比較圖

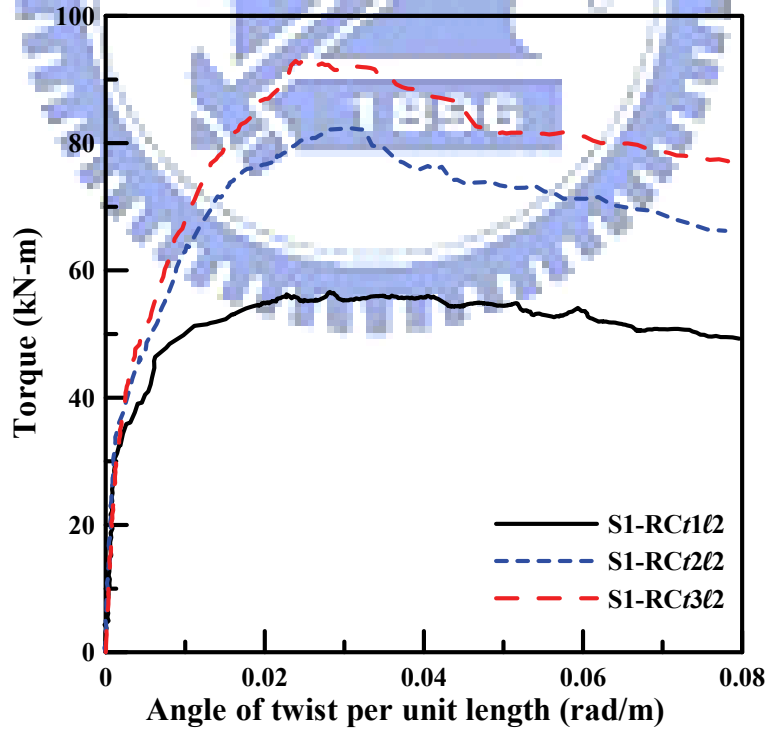


圖 4.28 試體編號S1-RC2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

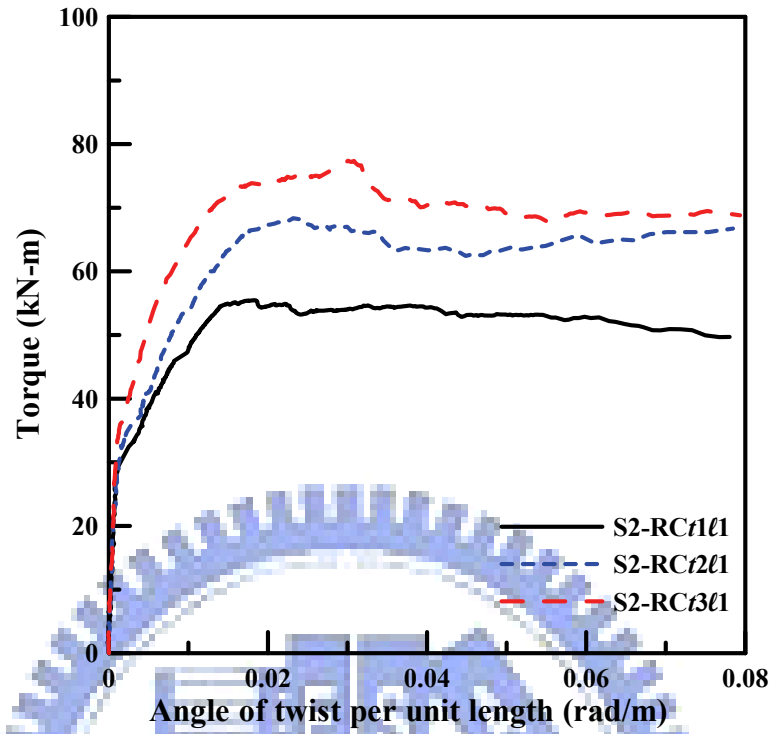


圖 4.29 試體編號S2-RC1 系列之扭矩-扭轉角比較圖

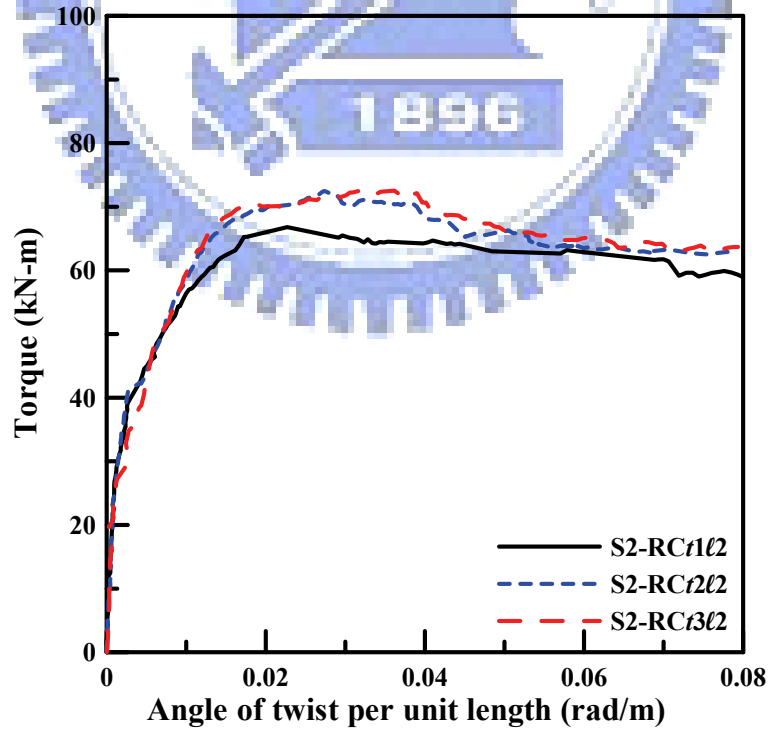


圖 4.30 試體編號S2-RC2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

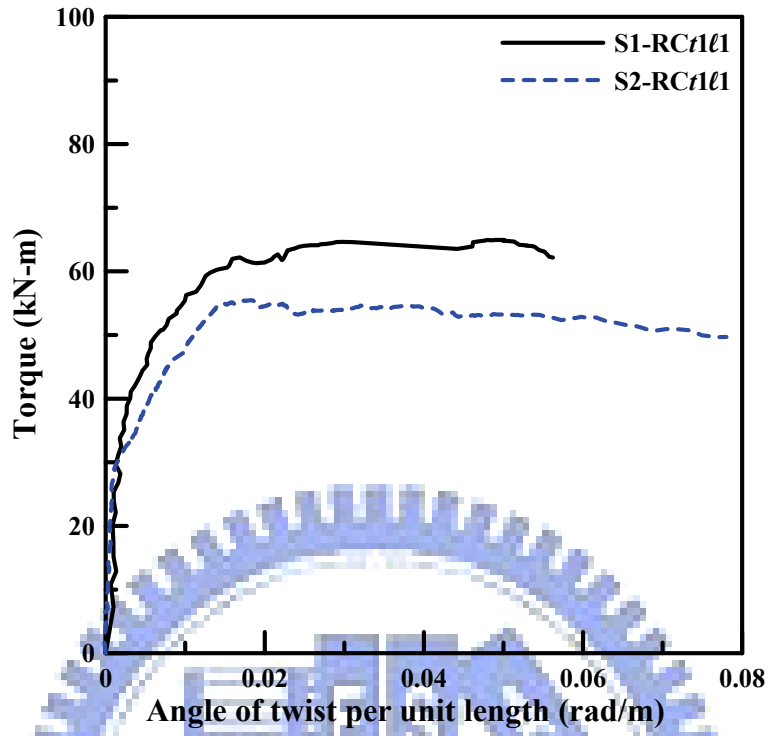


圖 4.31 試體編號RCt1l1 系列之扭矩-扭轉角比較圖

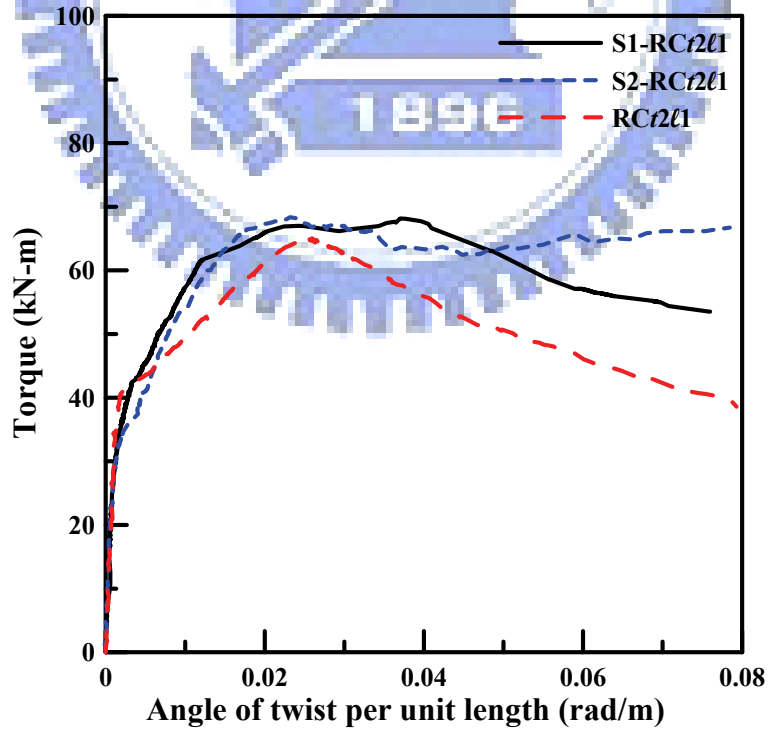


圖 4.32 試體編號RCt2l1 系列之扭矩-扭轉角比較圖

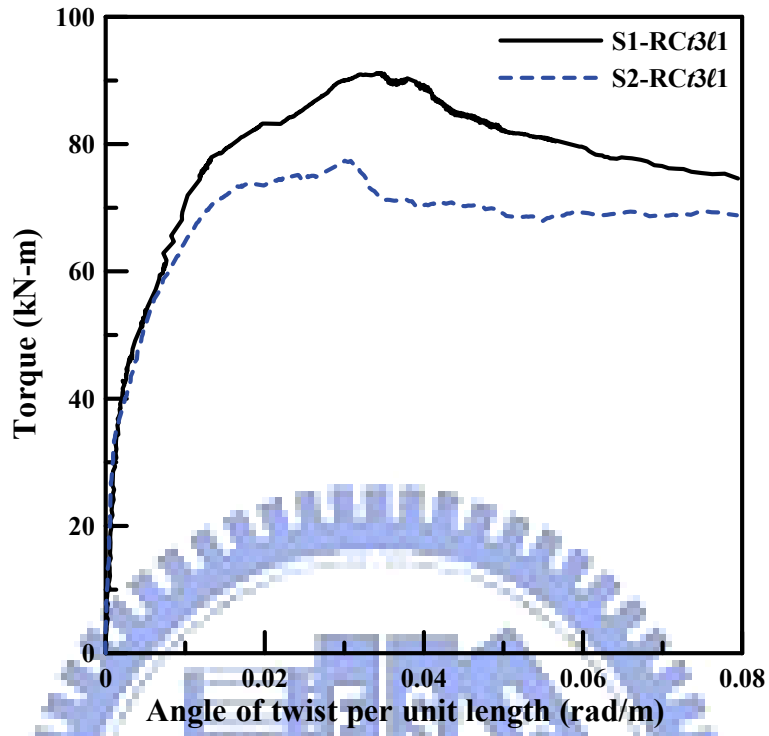


圖 4.33 試體編號RCt3l1 系列之扭矩-扭轉角比較圖

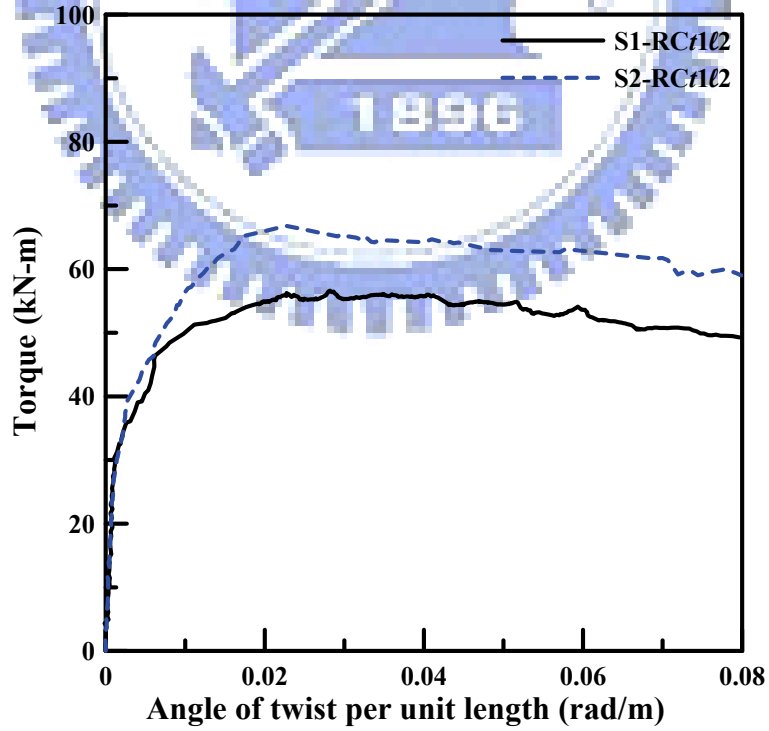


圖 4.34 試體編號RCt1l2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

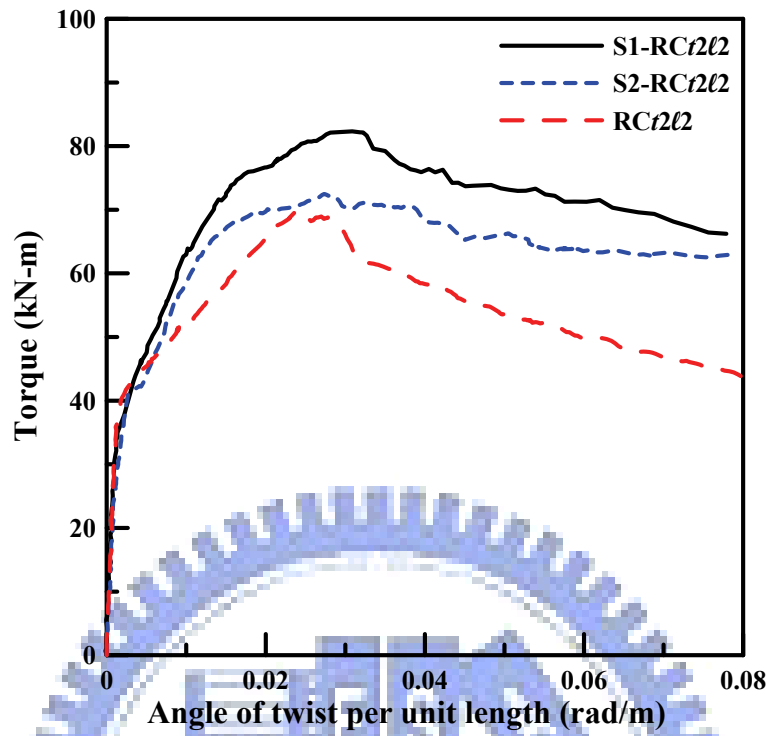


圖 4.35 試體編號RCt2l2 系列之扭矩-扭轉角比較圖

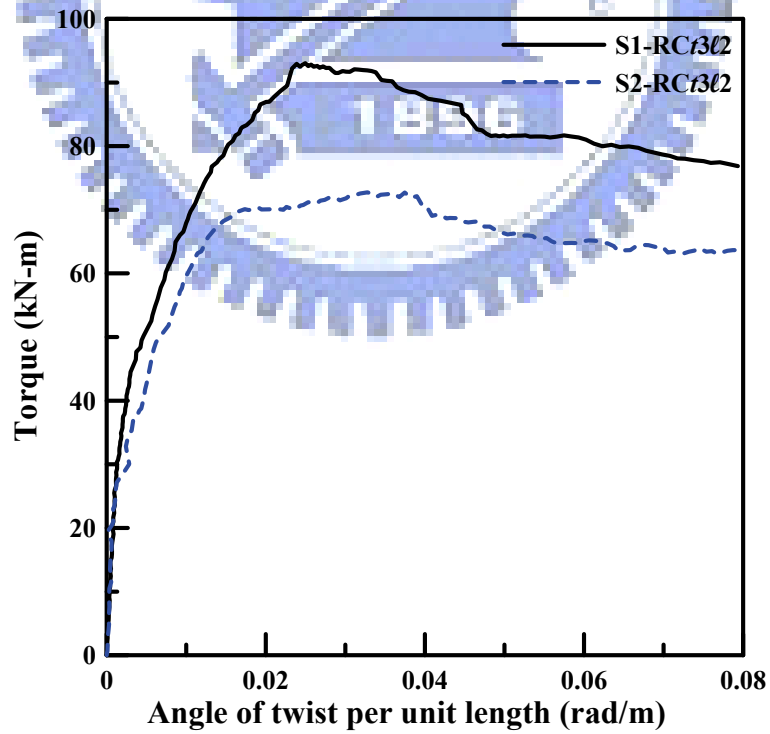


圖 4.36 試體編號RCt3l2 系列之扭矩-扭轉角比較圖



照片 3.1 試體S2-RCt101



照片 3.2 試體S1-RCt302



照片 3.3 試體S1-RC102 之斷面



照片 3.4 試體S2-RC1301 之斷面



照片 3.5 試驗設置照片



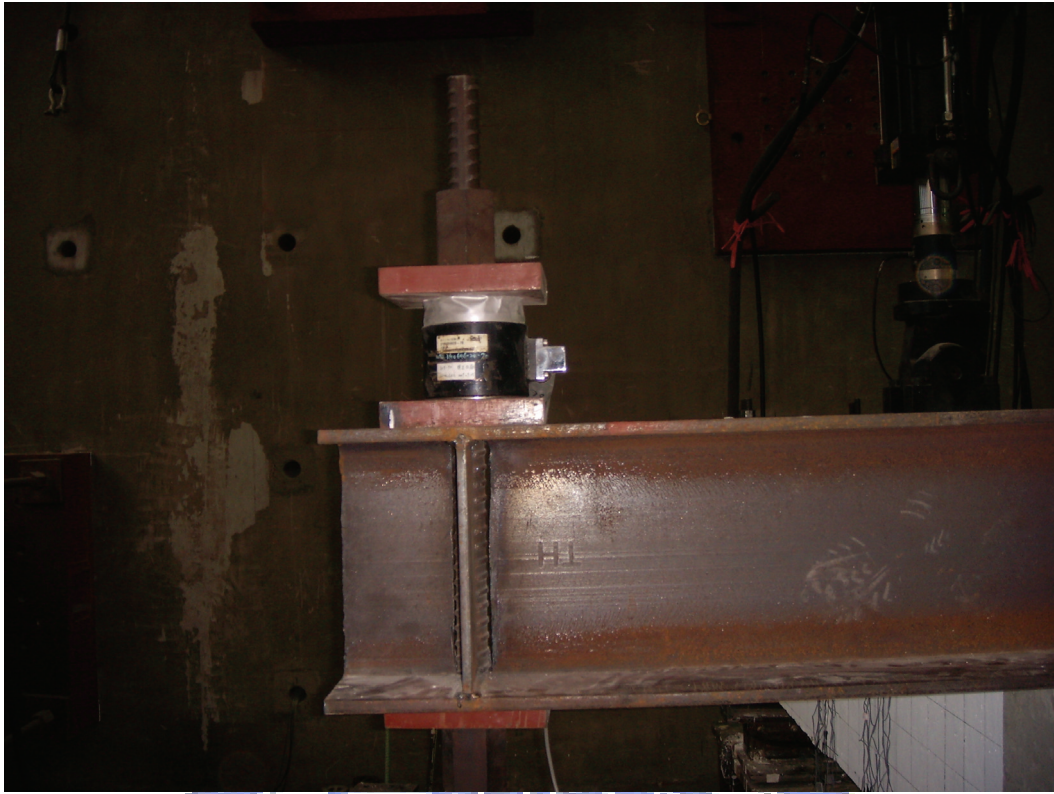
照片 3.6 扭矩束制端照片



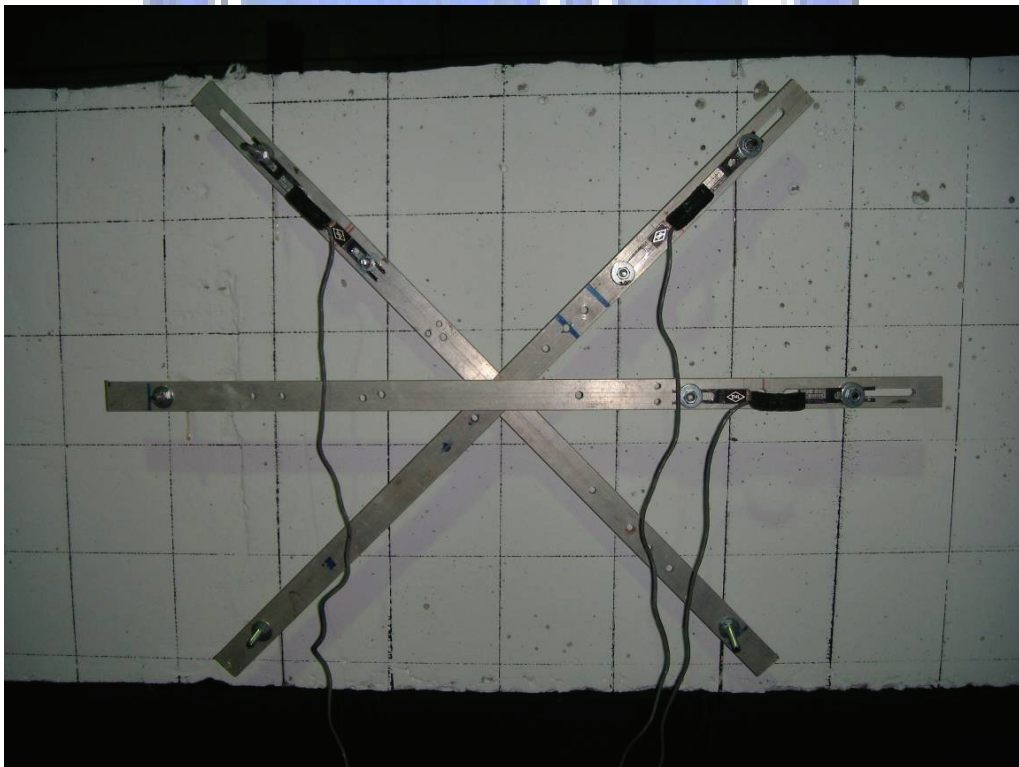
照片 3.7 扭矩施力端照片



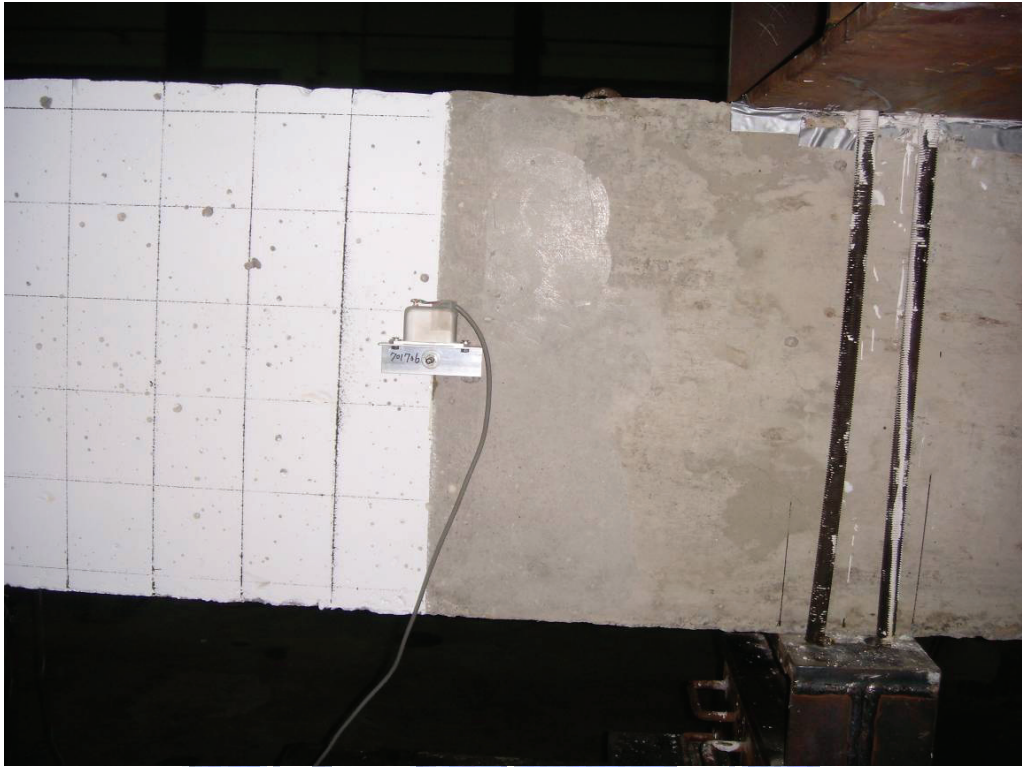
照片 3.8 圓弧型支承座照片



照片 3.9 荷重元(Load Cell)配置照片

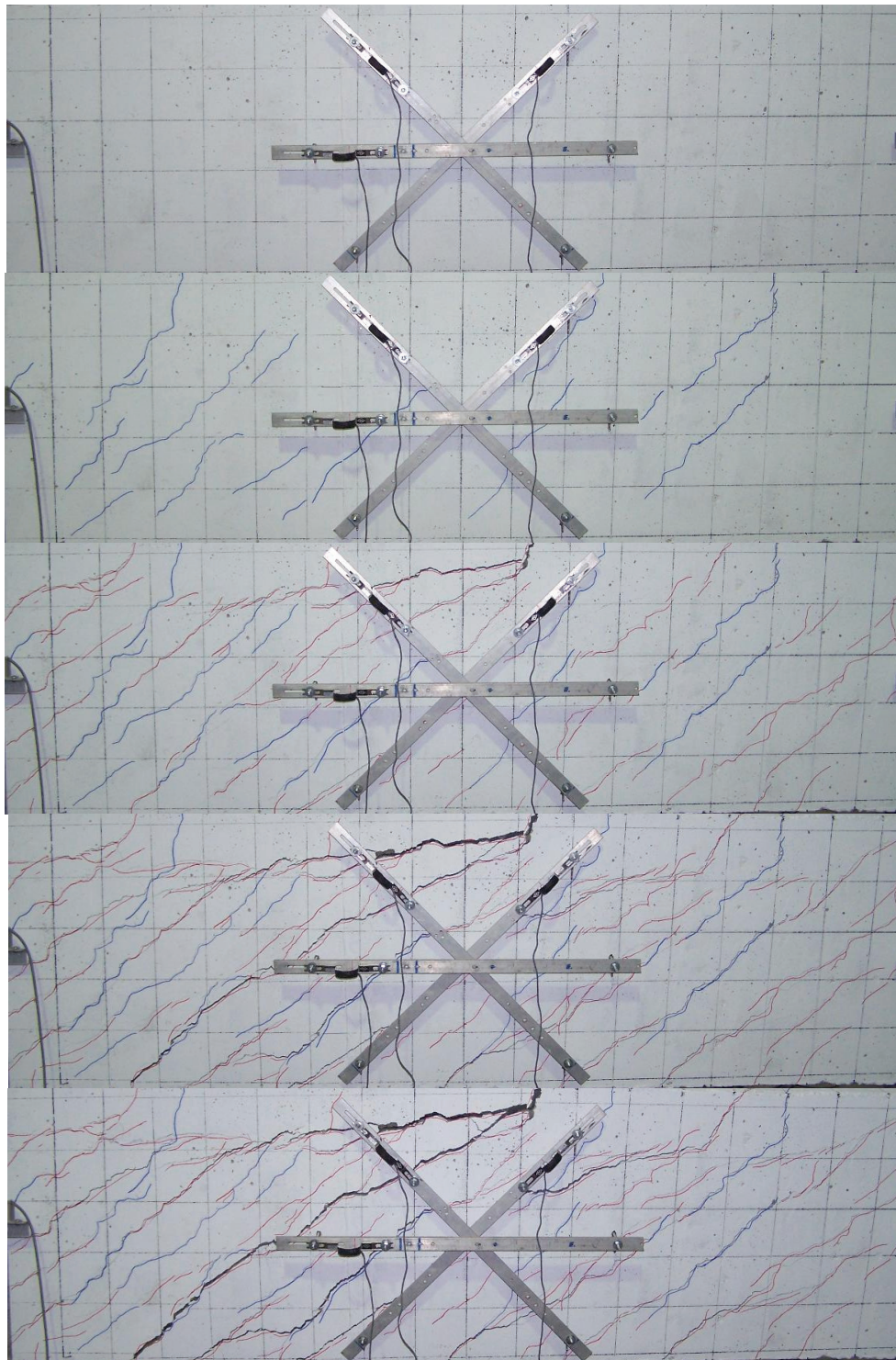


照片 3.10 位移計(π Gauge)裝置配置照片

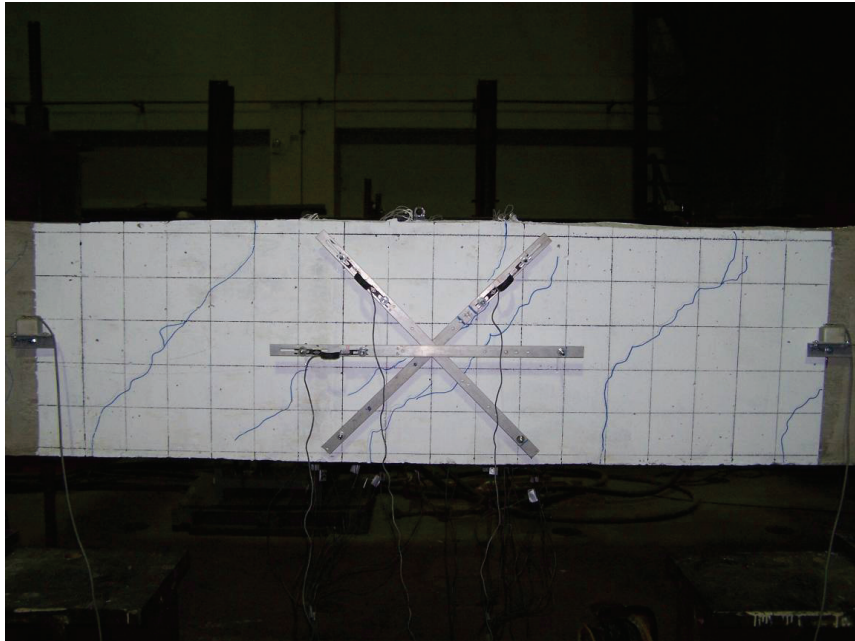


照片 3.11 角度計(Tiltmeter)裝置配置照片

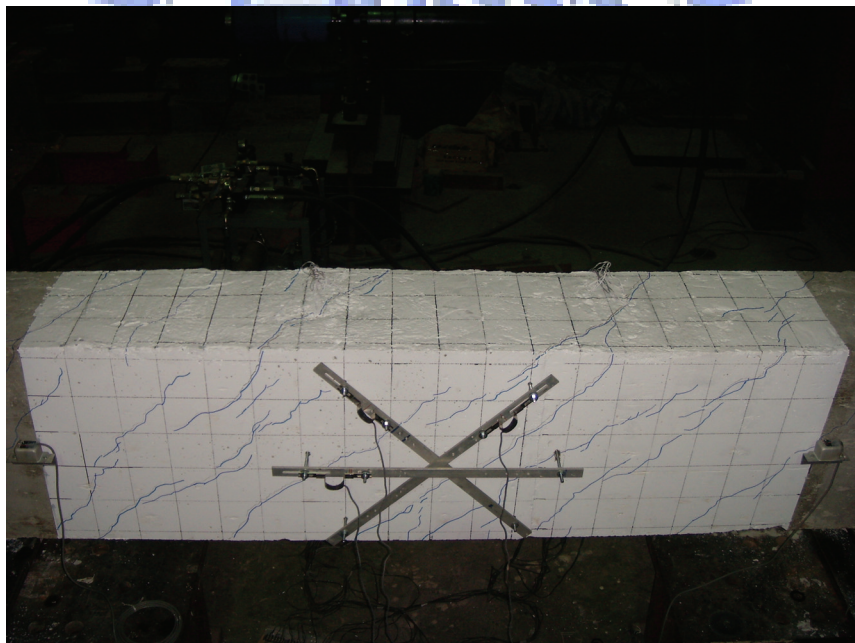




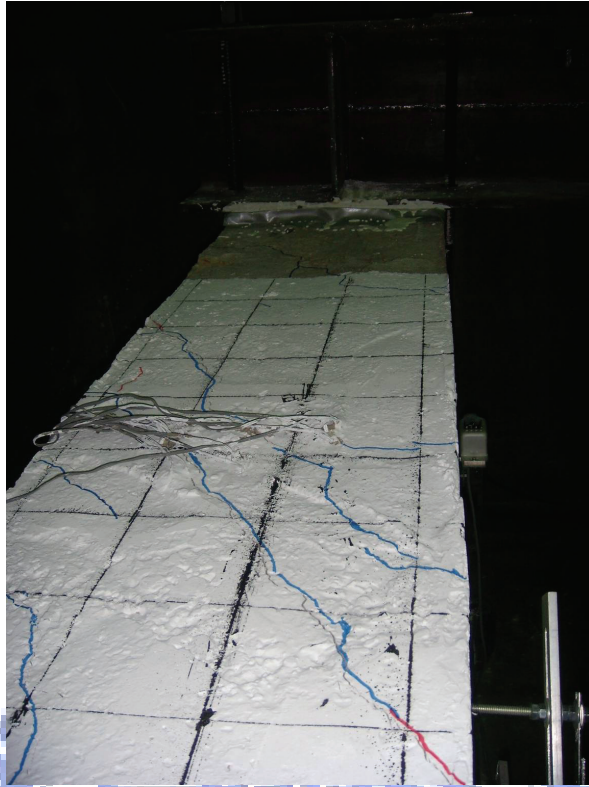
照片 4.1 試體S1-RC1302 裂縫生成次序照片



照片 4.2 試體S1-RCt2l2 產生約 45° 裂縫



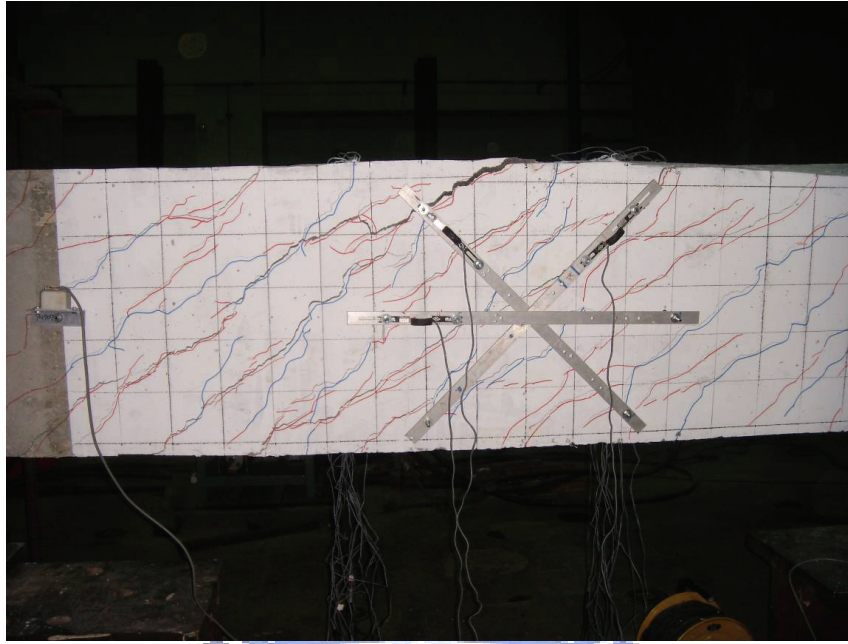
照片 4.3 試體S1-RCt1l2 形成約 45° 螺旋破壞面



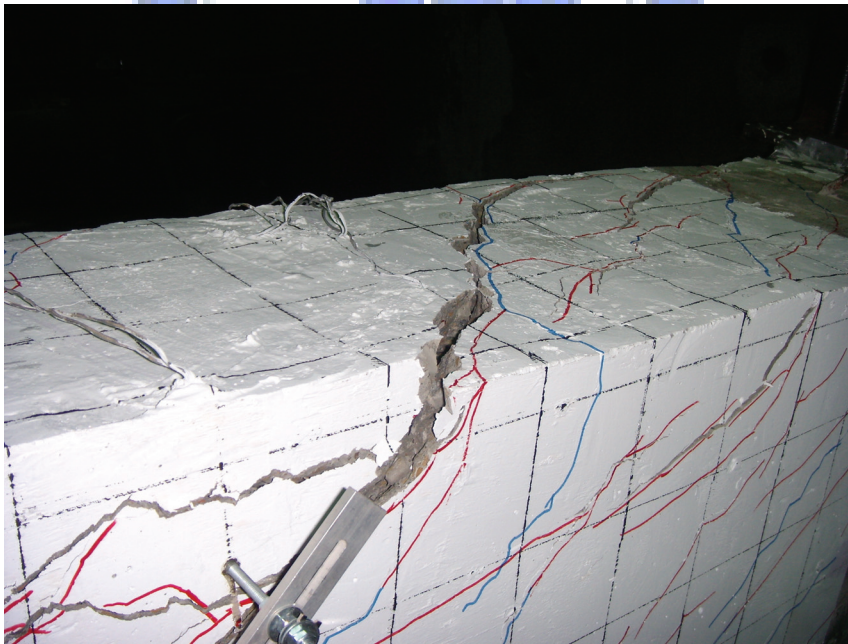
照片 4.4 試體S1-RCβ1 形成約 45°螺旋破壞面



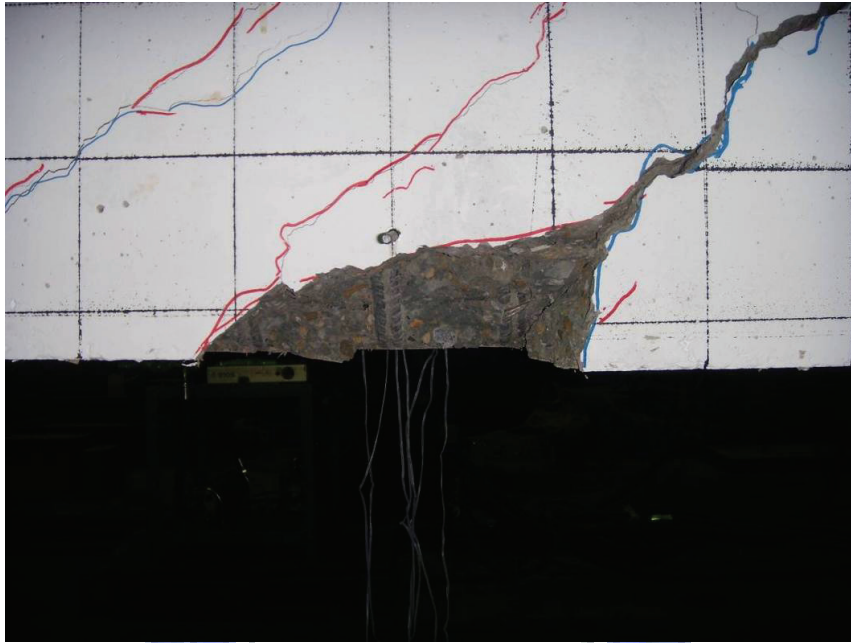
照片 4.5 試體S1-RCγ2 裂縫寬度達 10 mm



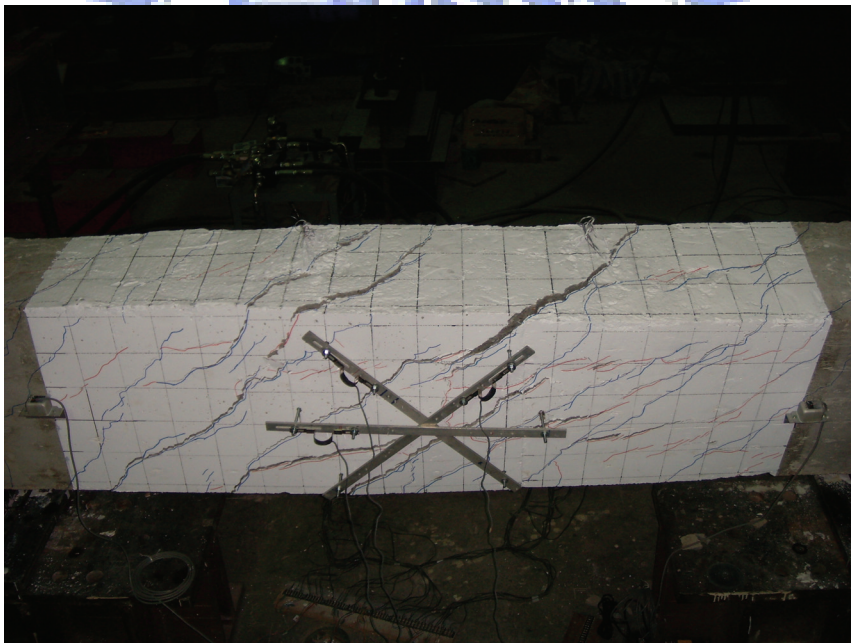
照片 4.6 試體S1-RCt3l1 主裂縫間形成細小裂縫



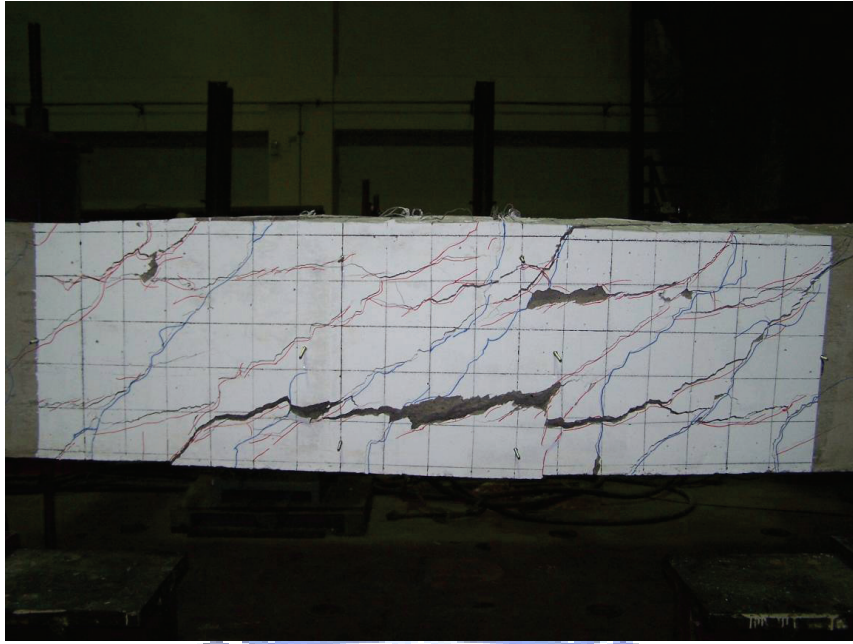
照片 4.7 試體S2-RCt3l1 主裂縫裂縫寬度達 15 mm



照片 4.8 試體S1-RCt3l1 主裂縫延伸至試體內部



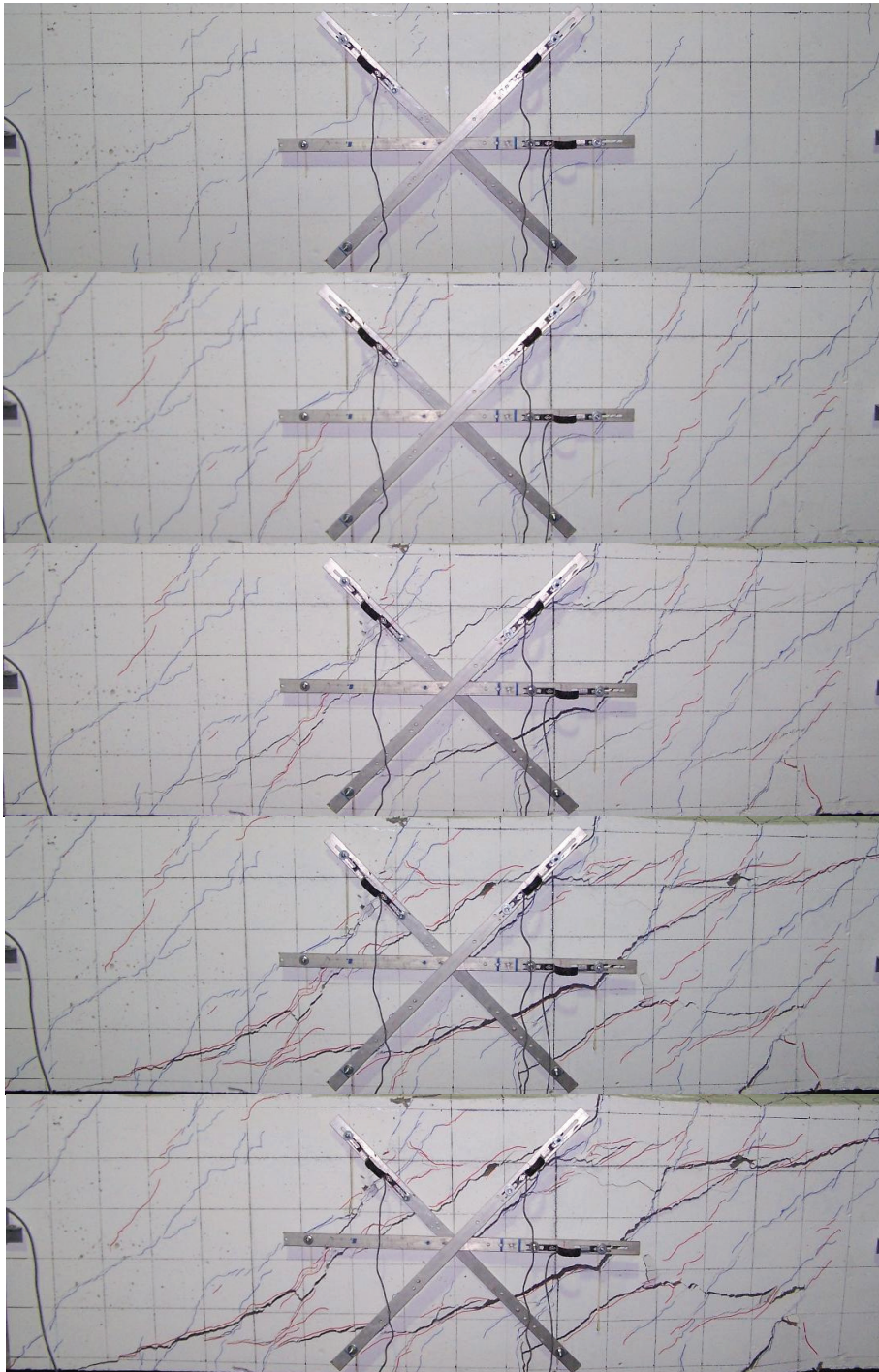
照片 4.9 試體S1-RCt1l2 主裂縫破壞情形



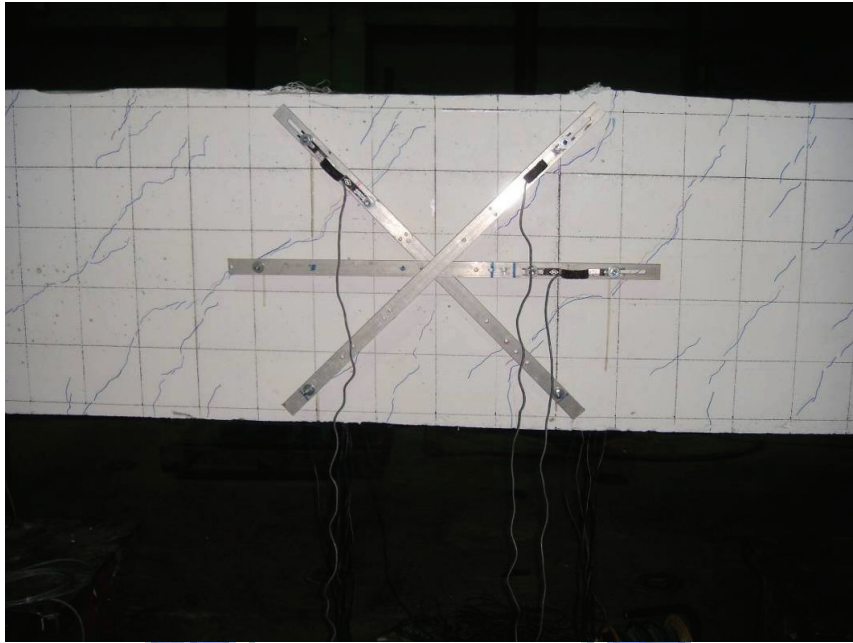
照片 4.10 試體S2-RCt2l1 產生非 45°之斜裂縫



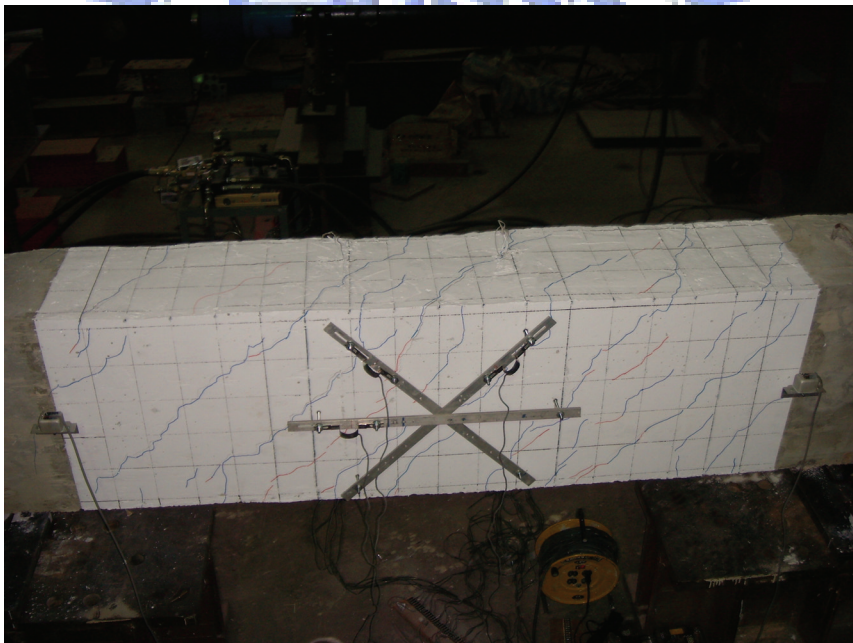
照片 4.11 試體S2-RCt3l2 產生非 45°之斜裂縫



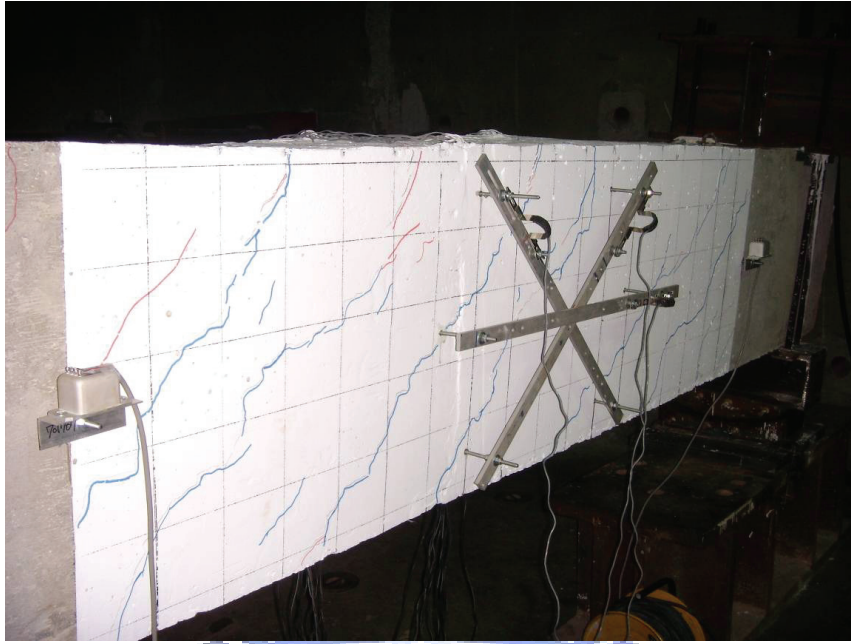
照片 4.12 試體RCt2l1 裂縫生成次序照片



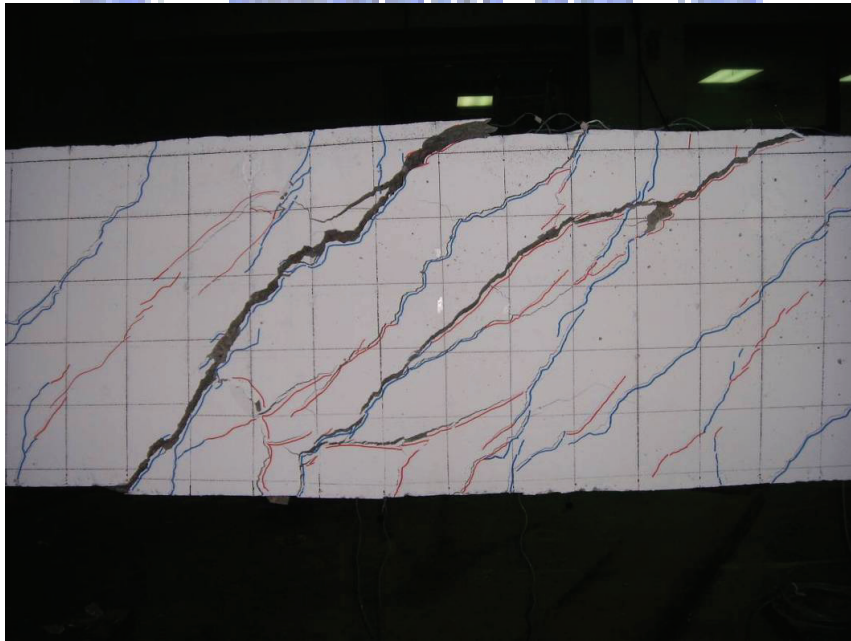
照片 4.13 試體RCt2l1 產生約 45° 裂縫



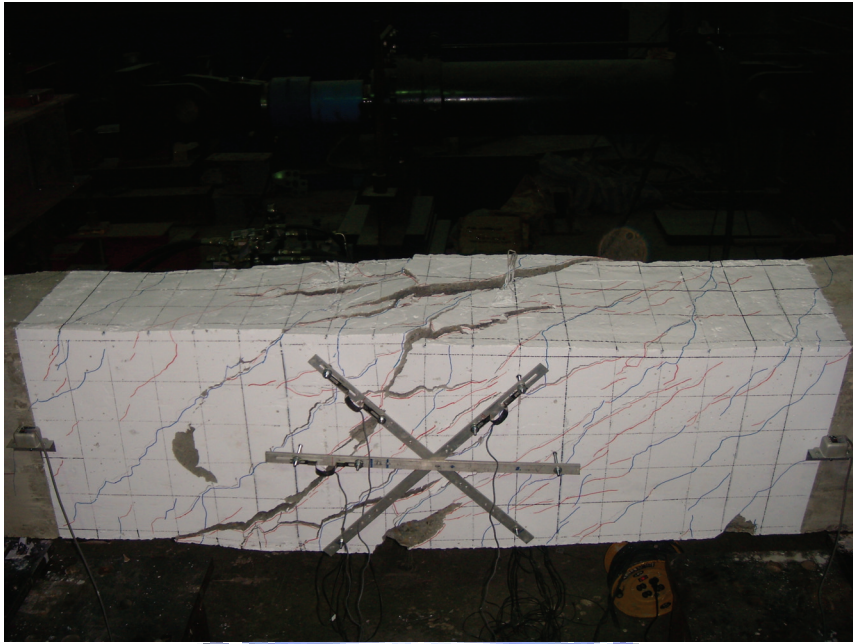
照片 4.14 試體RCt2l2 形成約 45° 螺旋破壞面



照片 4.15 試體RCt2l1 主裂縫形成約 45° 螺旋破壞面



照片 4.16 試體RCt2l1 主裂縫明顯破壞之情形



照片 4.17 試體RCt2l2 主裂縫明顯破壞之情形



附錄 試體扭矩強度計算例

表 3.2 試體扭矩強度之計算，取兩組試體 S1-RCt2l1 與 S1-RCt2l2 為例，計算如下。RC 部份之扭矩強度分別以 ACI 318-89、ACI 318-95 與 Hsu (1990)之公式計算，鋼骨部份之扭矩強度則以全斷面塑性扭矩計算。

B.1 試體 S1-RCt2l1

(一) 依據 ACI 318-89 規範

$$T_c = \frac{0.067\sqrt{f'_c}\sum x^2y}{\sqrt{1+\left(\frac{0.4V_u}{C_tT_u}\right)^2}} = \frac{0.067 \times (350)^2 \times 550 \times \sqrt{27.58}}{\sqrt{1+\left(\frac{0.4V_u}{C_tT_u}\right)^2}} = 23.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$T_s = \frac{A_t\alpha_t x_1 y_1 f_y}{s} = \frac{\left[0.66 + 0.33\left(\frac{460.48}{260.48}\right)\right] \times 260.48 \times 460.48 \times 71 \times 275.79}{100} = 29.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$T_n = T_s + T_c = 52.91 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(二) 依據 ACI 318-95 規範

$$A_o = 0.85 \times A_{oh} = 0.85 \times 460.48 \times 260.48 = 101953.96 \text{ mm}^2$$

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_{yv}}{s} \cot\theta = \frac{2 \times 101953.96 \times 71 \times 275.79}{100} \times 1 = 39.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(三) 依據 Hsu (1990)

假設 $t_d = 50 \text{ mm}$

$$p_0 = p_c - 4\xi t_d = 2(350 + 550) - 4 \times 1 \times 50 = 1600 \text{ mm}$$

$$A_0 = A_c - \frac{t_d}{2} p_c + \xi t_d^2 = 550 \times 350 - 1800 \left(\frac{50}{2}\right) + (50)^2 = 150000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_l f_{ly}}{p_0} = \frac{1032 \times 275.79}{1600} = 177.88$$

$$\frac{A_t f_{ly}}{s} = \frac{71 \times 275.79}{100} = 195.81$$

$$\cos^2 \theta = \frac{\left(\frac{A_l f_{ly}}{p_0} \right)}{\left(\frac{A_l f_{ly}}{p_0} \right) + \left(\frac{A_t f_{ly}}{s} \right)} = \frac{177.88}{177.88 + 195.81} = 0.48$$

$$\sin^2 \theta = 0.52 \quad (\theta = 46.15^\circ)$$

$$\zeta = \frac{\left(\frac{A_l f_{ly}}{p_0} \right) + \left(\frac{A_t f_{ly}}{s} \right)}{0.80 f'_c t_d} = \frac{177.88 + 195.81}{0.8 \times 27.58 \times 50} = 0.34$$

$$t_d = \frac{A_0 \zeta^2}{p_0 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} = \frac{150000 \times (0.34)^2}{1600 \times 0.48 \times 0.52} = 43.42 \text{ mm} \quad \text{N.G.}$$

重複上述步驟，假設 $t_d = 47.62 \text{ mm}$

$$\rightarrow t_d = 47.615 \text{ mm} \doteq 47.62 \text{ mm} \quad \text{O.K.}$$

此時 $\cot \theta = 0.95$ ($\theta = 46.47^\circ$)

$$T_n = \frac{2A_0 A_t f_{yv}}{s} \cot \theta = \frac{2 \times 101953.96 \times 71 \times 275.79}{100} \times 0.95 = 37.94 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(四) 全斷面塑性扭矩

$$T_p = \tau_y \left[t_f^2 \left(b_f - \frac{t_f}{3} \right) + \frac{t_w^2}{2} \left(d + \frac{t_w}{3} \right) - t_f t_w^2 \right]$$

$$= (0.577 \times 248.21) \left[(14)^2 \left(140 - \frac{14}{3} \right) + \frac{(9)^2}{2} \left(250 + \frac{9}{3} \right) - 14 \times (9)^2 \right] = 5.10 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

B.2 試體 S1-RCt2l2

(一) 依據 ACI 318-89 規範計算，其扭矩強度同 S1-RCt2l1

$$T_n = 54.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(二) 依據 ACI 318-05 規範計算，其扭矩強度同 S1-RCt2l1

$$T_n = 39.93 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(三) 依據 Hsu (1990)

假設 $t_d = 70 \text{ mm}$

$$p_0 = p_c - 4\xi t_d = 2(350 + 550) - 4 \times 1 \times 70 = 1520 \text{ mm}$$

$$A_0 = A_c - \frac{t_d}{2} p_c + \xi t_d^2 = 550 \times 350 - 1800 \left(\frac{70}{2} \right) + (70)^2 = 134400 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_l f_{ly}}{p_0} = \frac{1600 \times 275.79}{1520} = 290.31$$

$$\frac{A_t f_{ty}}{s} = \frac{71 \times 275.79}{100} = 195.81$$

$$\cos^2 \theta = \frac{\left(\frac{A_l f_{ly}}{p_0} \right)}{\left(\frac{A_l f_{ly}}{p_0} \right) + \left(\frac{A_t f_{ty}}{s} \right)} = \frac{290.31}{290.31 + 195.81} = 0.60$$

$$\sin^2 \theta = 0.40 \quad (\theta = 39.23^\circ)$$

$$\zeta = \frac{\left(\frac{A_l f_{ly}}{p_0} \right) + \left(\frac{A_t f_{ty}}{s} \right)}{0.80 f_c' t_d} = \frac{290.31 + 195.81}{0.8 \times 27.58 \times 70} = 0.31$$

$$t_d = \frac{A_0 \zeta^2}{p_0 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} = \frac{134400 \times (0.31)^2}{1520 \times 0.4 \times 0.6} = 36.42 \text{ mm} \quad \text{N.G.}$$

重複上述步驟，假設 $t_d = 56.15 \text{ mm}$

$$\rightarrow t_d = 56.14 \text{ mm} \doteq 56.15 \text{ mm} \quad \text{O.K.}$$

$$\cot \theta = 1.20 \quad (\theta = 39.81^\circ)$$

$$T_n = \frac{2A_0 A_t f_{yv}}{s} \cot \theta = \frac{2 \times 101953.96 \times 71 \times 275.79}{100} \times 1.20 = 47.75 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(四) 全斷面塑性扭矩同 S1-RCt2l1， $T_p = 5.10 \text{ kN} \cdot \text{m}$