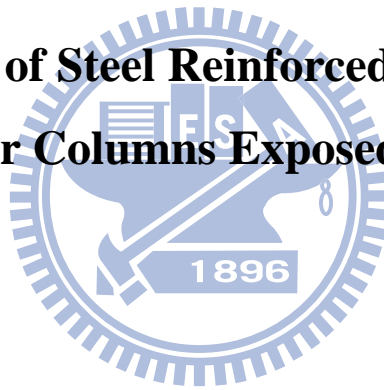


國立交通大學
土木工程學系
碩士論文

鋼骨鋼筋混凝土邊柱之火害行為

**Behavior of Steel Reinforced Concrete
Exterior Columns Exposed to Fire**



研究生：林家毅

指導教授：陳誠直博士

中華民國一零一年八月

鋼骨鋼筋混凝土邊柱之火害行為

**Behavior of Steel Reinforced Concrete
Exterior Columns Exposed to Fire**

研 究 生：林 家 毅

Student : Chia-Yi Lin

指導教授：陳 誠 直 博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen



A Thesis

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

August 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 零 一 年 八 月

鋼骨鋼筋混凝土邊柱之火害行為

研究生：林家毅

指導教授：陳誠直 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究利用實驗及分析方法探討鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)邊柱於火害下之行為。實驗方面分為兩階段：第一階段為高溫試驗，於小型複合高溫爐進行，並以熱電偶量測鋼骨、鋼筋及混凝土之升溫狀況；試驗規劃4支鋼骨鋼筋混凝土柱研究SRC邊柱於不同參數下之斷面溫度分佈，參數包括混凝土強度以及柱斷面形狀。第二階段為載重試驗，利用大型萬能試驗機進行軸壓載重試驗。高溫試驗之4支受火害試體可得到SRC柱受火害後之殘餘強度，另外4支未受火害試體則可得到未受火害之軸壓強度，兩組試體對照比較後可知SRC柱試體受火害後之強度折減程度。分析部分採高溫試驗得到之試體斷面溫度分佈數據，以熱傳學塊狀系統之概念推估SRC柱試體火害後之殘餘強度，並與實驗值比較。

研究結果顯示，高溫下圓形柱受火面之混凝土保護層嚴重爆裂，反之方形柱僅於受火面角隅處混凝土剝落，可知斷面幾何形狀影響試體之耐火能力。不同強度混凝土對於斷面溫度分佈及升溫速率並無明顯影響；鋼骨腹板之溫度高於鄰近混凝土測點溫度，是由於鋼骨熱傳導係數較混凝土高，熱能傳遞過程中產生蓄熱、溫度上升情形。載重試驗之結果顯示，強度較高混凝土之柱試體殘餘強度折減程度大於普通強度混凝土之試體。殘餘剛度折減程度方面，試體參數為方形斷面及普通強度混凝土之組合，折減程度最小。韌性方面，火害後試體之韌性皆有不同程度之增加。本研究提出合理之分析方式計算受火害試體之殘餘軸壓強度，分析之結果與實驗數據相符。包覆型SRC柱由於混凝土之包覆可降低火害之影響且具優異之防火性能。

關鍵字：十字型鋼骨、SRC柱、高溫、殘餘強度

Behavior of Steel Reinforced Concrete Exterior Columns Exposed to Fire

Student : Chia-Yi Lin

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This paper employs both experimental and numerical methods to investigate the behavior of steel reinforced concrete (SRC) columns subjected to fire. The experimental work was divided into two phases. Phase one was to test four column specimens under standard fire condition and to study the temperature distribution on the cross section. Test parameters included shape of the cross section (square and circular) and concrete strength. Phase two was to conduct axial compression test of eight column specimens and to study the residual properties after expose to fire. An analytical method was developed to predict the residual strength of SRC columns subject to fire by adopting the temperature distribution data from test results.

Test results show that the concrete cover of circular SRC columns severely spalled, however the spalling occurred only at corners for square columns. The concrete strength had insignificant effect on temperature distribution and rate of the temperature rise. Temperatures on the steel were higher than nearby concrete that was attributed to the heat transfer of the steel. The axial compression test results indicate that specimens with high strength concrete had greater reduction on residual strength than specimens with normal strength concrete. Specimens exposed to fire demonstrated increase of the ductility. The analytical predictions for axial residual strength agreed closely with the experimental result. Concrete encased steel SRC columns demonstrated excellent fire resistance performance due to the encase of the concrete.

Keywords: cross-H steel, SRC column, elevated temperature, residual strength

誌謝

研究所期間幸蒙恩師 陳誠直博士兩年來於研究及課業上悉心指導與教誨，使得本論文得以順利完成，在此致上最高的敬意與感謝。口試期間，承蒙 方一匡教授及 郭詩毅教授於百忙中撥冗審閱，並提供諸多寶貴意見使得論文更加完善，特此感謝。

本研究承蒙內政部建築研究所補助研究經費，特此感謝。實驗期間特別感謝內政部建築研究所防火實驗中心李鎮宏研究員及諸位職員、替代役弟兄協助與幫忙，以及劉彥廷先生之協助，也感謝建築研究所材料試驗中心陶其駿主任及諸位職員、替代役弟兄、詹鎧慎先生與蘇清波先生協助實驗進行。

感謝研究室 政億學長在研究上指點迷津與生活上許多寶貴經驗分享；研究室夥伴偉乾、士庭、易宸、政勳、政哲、凡皓、宗勝、榮軒、桓緯、耀光的陪伴與幫助，對各位獻上最誠摯的祝福。

最後，給我最親愛的父母與姊姊，謝謝你們的支持與鼓勵，也感謝你們在我需要幫助時的義不容辭，讓我可以無後顧之憂堅持到底完成學業，小弟無以回報，謹以本文獻給你們。

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
符號說明.....	ix
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.....	1
1.4 論文內容.....	2
第二章 國內外相關規範及文獻回顧.....	3
2.1 耐火試驗規範.....	3
2.1.1 國外耐火試驗規範.....	3
2.1.2 國內耐火試驗規範.....	3
2.1.3 國內外耐火試驗規範比較.....	4
2.2 鋼骨鋼筋混凝土規範.....	4
2.2.1 我國 SRC 設計規範.....	4
2.2.2 AISC-LRFD 設計規範.....	6
2.3 文獻回顧.....	7
第三章 鋼骨鋼筋混凝土火害高溫試驗.....	12
3.1 試驗規劃.....	12
3.2 試體設計.....	12
3.3 試體製作.....	13
3.4 試驗與量測儀器設置.....	14
3.4.1 試驗設備與試體設置.....	14
3.4.2 量測儀器設置.....	14
3.5 試驗步驟.....	15
3.5.1 試驗過程.....	15
3.5.2 量測與觀察.....	15
3.5.3 試驗終止條件.....	15
第四章 鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之軸壓載重試驗.....	16
4.1 試驗規劃.....	16
4.2 試驗與量測儀器設置.....	16
4.2.1 試驗設備與試體設置.....	16

4.2.2	位移計設置	16
4.3	試驗步驟	17
4.3.1	試驗過程	17
4.3.2	量測與觀察	17
4.3.3	試驗終止條件	17
第五章	試驗結果與討論	18
5.1	試體行為	18
5.1.1	高溫試驗結果	18
5.1.2	載重試驗結果	22
5.2	參數影響與比較	25
5.2.1	高溫試驗	25
5.2.2	載重試驗參數影響與比較	26
第六章	分析模式與結果討論	30
6.1	材料性質與參數	30
6.1.1	火害後混凝土材料性質	30
6.1.2	火害後鋼筋材料性質	30
6.1.3	火害後鋼骨材料性質	31
6.2	火害後殘餘強度分析	31
6.2.1	分析基本假設	31
6.2.2	溫度區間劃分	32
6.2.3	分析方法	32
6.3	分析結果與討論	33
第七章	結論與建議	34
7.1	結論	34
7.2	建議	35
參考文獻	36

表目錄

表 2-1 承重柱耐火規定與評定.....	39
表 3-1 試體規劃.....	39
表 3-2 鋼筋拉伸試驗.....	40
表 3-3 鋼骨拉伸試驗.....	40
表 3-4 混凝土抗壓試驗.....	40
表 5-1 試體 SN3 高溫試驗結果	41
表 5-2 試體 SH3 高溫試驗結果	42
表 5-3 試體 CN2 高溫試驗結果.....	43
表 5-4 試體 CH2 高溫試驗結果.....	44
表 5-5 試體 SN3 溫度歷時	45
表 5-6 試體 SH3 溫度歷時	45
表 5-7 試體 CN2 溫度歷時.....	46
表 5-8 試體 CH2 溫度歷時.....	46
表 5-9 載重試驗結果.....	47
表 5-10 規範預測常溫下 SRC 柱試體軸壓強度與實驗值比較	47
表 5-11 高溫試驗時試體軸向變形與柱端板間相對轉角	48
表 5-12 試體殘餘強度比較.....	48
表 5-13 4 面受火試體殘餘強度比較(黃政勳 2012).....	49
表 5-14 試體殘餘剛度比較.....	49
表 5-15 試體殘餘韌性比較.....	50
表 6-1 SRC 柱殘餘強度分析值與實驗值比較	50

圖目錄

圖 3-1 方形邊柱 3 面受火示意圖.....	51
圖 3-2 圓形邊柱 2 面受火示意圖.....	51
圖 3-3 十字型鋼骨設計圖.....	52
圖 3-4 方形斷面設計圖.....	52
圖 3-5 圓形斷面設計圖.....	53
圖 3-6 柱試體設計圖.....	54
圖 3-7 柱試體施工照片.....	55
圖 3-8 鋼筋拉伸應力應變曲線.....	58
圖 3-9 小型複合高溫爐.....	58
圖 3-10 高溫試驗設置示意圖.....	59
圖 3-11 方形 SRC 邊柱熱電偶點位配置圖	59
圖 3-12 圓形 SRC 邊柱熱電偶點位配置圖	60
圖 3-13 柱頂位移計架設.....	60
圖 3-14 CNS 12514 標準升溫曲線.....	61
圖 4-1 30MN-MTS 萬能試驗機.....	62
圖 4-2 載重試驗設置示意圖.....	62
圖 4-3 試驗設置.....	63
圖 4-4 載重試驗位移計架設圖.....	64
圖 4-5 位移計量測位置示意圖.....	65
圖 5-1 試體 SN3 測點溫度歷時.....	66
圖 5-2 試體 SH3 測點溫度歷時.....	68
圖 5-3 試體 CN2 測點溫度歷時.....	70
圖 5-4 試體 CH2 測點溫度歷時.....	72
圖 5-5 高溫試驗軸向伸長量與時間關係圖.....	74
圖 5-6 高溫試驗柱端板間相對轉角與時間關係圖.....	74
圖 5-7 試體 SN3 高溫試驗後損害情形	75
圖 5-8 試體 SH3 高溫試驗後損害情形	76
圖 5-9 試體 CN2 高溫試驗後損害情形	77
圖 5-10 試體 CH2 高溫試驗後損害情形	78
圖 5-11 試體 SN0 軸壓強度與變位關係.....	79
圖 5-12 試體 SH0 軸壓強度與變位關係	79
圖 5-13 試體 CN0 軸壓強度與變位關係.....	80
圖 5-14 試體 CH0 軸壓強度與變位關係.....	80
圖 5-15 試體 SN3 軸壓強度與變位關係	81
圖 5-16 試體 SH3 軸壓強度與變位關係	81
圖 5-17 試體 CN2 軸壓強度與變位關係.....	82

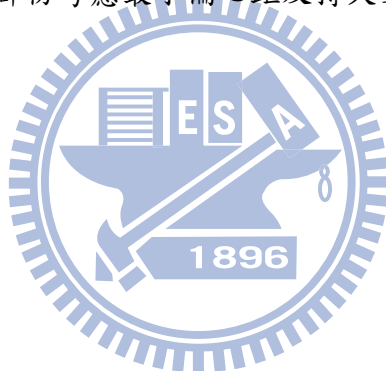
圖 5-18 試體 CH2 軸壓強度與變位關係	82
圖 5-19 試體 SN0 載重試驗後損害情形	83
圖 5-20 試體 SH0 載重試驗後損害情形	84
圖 5-21 試體 CN0 載重試驗後損害情形	85
圖 5-22 試體 CH0 載重試驗後損害情形	86
圖 5-23 試體 SN3 載重試驗後損害情形	87
圖 5-24 試體 SH3 載重試驗後損害情形	88
圖 5-25 試體 CN2 載重試驗後損害情形	89
圖 5-26 試體 CH2 載重試驗後損害情形	90
圖 5-27 試體 SN3 與 SH3 測點溫度歷時比較	91
圖 5-28 試體 SH3 與 CH2 測點溫度歷時比較	92
圖 5-29 試體 SN 系列軸壓強度與應變比較	94
圖 5-30 試體 SH 系列軸壓強度與應變比較	94
圖 5-31 試體 CN 系列軸壓強度與應變比較	95
圖 5-32 試體 CH 系列軸壓強度與應變比較	95
圖 5-33 韌性指標計算	96
圖 6-1 混凝土火害後殘餘抗壓強度折減	96
圖 6-2 鋼筋火害後殘餘降伏強度折減	97
圖 6-3 鋼骨火害後殘餘降伏強度折減	97
圖 6-4 模擬方形 SRC 柱三面受火之斷面溫度分佈(陳誠直 2011)	98
圖 6-5 方形柱斷面溫度區間劃分	99
圖 6-6 方形柱斷面溫度區間與溫度測點	99
圖 6-7 模擬圓形 SRC 柱二面受火之斷面溫度分佈(陳誠直 2011)	100
圖 6-8 圓形柱斷面溫度區間劃分	101
圖 6-9 圓形柱斷面溫度區間與溫度測點	101
圖 6-10 未受火害試體材料強度百分比	102
圖 6-11 受火害試體材料強度百分比	102

符號說明

A_c	混凝土部份之全斷面積 (mm^2)。
$A_{c,i}$	混凝土溫度區間面積 (mm^2)。
A_g	SRC構材全斷面積(mm^2)。
A_r	鋼筋部份之全斷面積 (mm^2)。
$A_{r,i}$	鋼筋溫度區間面積 (mm^2)。
A_s	鋼骨部份之全斷面積 (mm^2)。
$A_{s,i}$	鋼骨溫度區間面積 (mm^2)。
C	ISO 834規範規定性能基準之最大軸壓縮量 (mm)。
C_l	合成承壓構件之有效剛度係數。
E_c	混凝土彈性模數 (MPa)。
EI_{eff}	合成斷面有效勁度。
$(EI)_{rc}$	鋼筋混凝土部分之撓曲剛度, $(EI)_{rc} = E_c I_g / 5$
E_s	鋼骨彈性模數 (MPa)。
$EA_{fi,test}$	受火害後構材彈性剛度試驗值。
$EA_{unfi,test}$	未受火害構材彈性剛度試驗值。
F_{yr}	鋼筋降伏強度 (MPa)。
$F_{yr,T}$	火害後鋼筋降伏強度 (MPa)。
F_{ys}	鋼骨降伏強度 (MPa)。
$F_{ys,T}$	火害後鋼骨降伏強度 (MPa)。
I_c	混凝土對合成斷面之慣性矩 (mm^4)。
I_g	構材全斷面積之慣性矩 (mm^4)。
I_s	鋼骨對合成斷面之慣性矩 (mm^4)。

I_{sr}	鋼筋對合成斷面之慣性矩 (mm^4)。
K	有效長度因子。
KL	構材有效長度。
L	構材全長 (mm)。
$N_{fi,calc}$	受火害試體之軸壓強度計算值 (kN)。
$N_{fi,test}$	受火害試體之軸壓強度試驗值 (kN)。
$N_{unfi,code}$	未受火害試體之軸壓強度規範預測值 (kN)。
$N_{unfi,test}$	未受火害試體之軸壓強度試驗值 (kN)。
P_{ns}	鋼骨部分之標稱受壓強度 (MPa)。
P_{nrc}	鋼筋混凝土部分之標稱受壓強度 (MPa)。
P_{nsrc}	鋼骨鋼筋混凝土柱之標稱受壓強度 (MPa)。
T	高溫試驗達到之最高溫 ($^{\circ}\text{C}$)。
T_f	平均爐內溫度 ($^{\circ}\text{C}$)。
f'_c	混凝土抗壓強度 (MPa)。
$f_{c,T}$	火害後混凝土抗壓強度 (MPa)。
r_{eff}	SRC構材之有效迴轉半徑， $r_{eff}=r_s+\alpha\sqrt{\frac{I_g}{A_g}}$
r_s	鋼骨斷面之迴轉半徑(mm)。
t	試驗經過時間 (min)。
α	鋼骨斷面有效迴轉半徑修正因子，在此為0.3。
Δ_y	載重試驗於鋼骨降伏時對應之變形量(mm)。
Δ_u	載重試驗於70%軸壓強度對應之變形量(mm)。
ε_N	達軸壓強度對應之應變。
$\varepsilon_{0.7}$	70%軸壓強度對應之應變。

- $\varepsilon_{0.5}$ 50%軸壓強度對應之應變。
- $\varepsilon_{0.25}$ 25%軸壓強度對應之應變。
- λ_c 最大細長比。
- λ_c 耐震設計斷面之鋼骨肢材寬厚比上限。
- $\mu_{fi,test}$ 火害後構件韌性指標試驗值。
- $\mu_{unfi,test}$ 未受火害構件韌性指標試驗值。
- ϕ_c 構材之強度折減係數。
- ϕ_{crc} 鋼筋混凝土部分之強度折減係數， $\phi_{crc}=0.65$ 。
- ϕ_{cs} 鋼骨部分之強度折減係數， $\phi_{cs}=0.85$ 。
- ϕ_e 鋼筋混凝土部份考慮最小偏心距及持久載重影響之強度折減係數。



第一章 緒論

1.1 研究背景

鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)為結合鋼骨(Steel, S)與鋼筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)兩種材料優點之合成結構；鋼骨增加構件之韌性，且受鋼筋混凝土之包覆，延緩鋼骨受壓之挫屈行為，鋼骨並提高構件之勁度，縮小斷面尺寸。因SRC在建築方面之改革性優點，國內近十年高樓結構多採用SRC構件。

然而，結構材料於高溫下力學性質將會折減，因此建築物受到火害時，構件之強度折減可能會導致建築物局部或整體的崩塌。國內對SRC火害下行為之研究尚未普及，國人對於此領域需更加瞭解；再者，政府相關單位所出版的構造防火性能驗證技術手冊中針對防火時效之計算雖已有鋼構造與RC，但尚缺SRC部分，因此SRC構造之耐火能力有必要更深入探討。國外包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱多為包覆H型鋼，國內工程相對較多採用包覆十字型鋼骨，故進行包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱火害研究將可提供國內工程業界之參考依據。

1.2 研究目的

本文主要探討鋼骨鋼筋混凝土邊柱受火害下之行為，藉由瞭解火害下之斷面溫度分佈以及試體火害後之殘餘強度，以合理分析方法推估試體之殘餘強度，並與實驗結果比較。

1.3 研究方法

依本研究目的設計之研究內容共分為兩階段試驗：(1)高溫試驗、(2)載重試驗。鋼骨鋼筋混凝土柱之試體設計參考我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」相關規定進行設計。關於兩階段試驗簡述如下：第一階段高溫試驗之設計參數包括普通強度混凝土(Normal Strength Concrete)與強度較高混凝土(Higher Strength Concrete)、方形斷面與圓形斷面；規劃4支試體進行高溫火害試驗，模擬火災高溫環境則依據我國CNS12514「建築物構造部分耐火試驗法」相關規定。

第二階段進行載重試驗，包含前述高溫試驗之4支受火試體，與4支未受高溫試驗之對照組試體，故兩階段試驗共規劃8支試體。最後，本研究採用高溫試驗斷面溫度分布數據，代入火害後材料強度公式，推算火害後柱試體殘餘強度，並與實驗值比較。

1.4 論文內容

第一章為緒論，包含研究緣起與背景、研究目的、及研究方法，略述研究題目之背景與動機，並介紹研究之目的及方法。第二章為國內外相關規範及文獻回顧，介紹國內外相關規範，包括耐火試驗規範及國內鋼骨鋼筋混凝土規範。由於火害方面已有不少研究成果，因此接著回顧國內外之文獻，以瞭解目前研究成果與尚需深入探討之部分為何。第三章為鋼骨鋼筋混凝土柱斷面溫度分佈之高溫試驗，包含試驗規劃、試體設計、試體製作、試驗設置及試驗步驟，總括完整之試驗資訊。第四章為鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之載重試驗，包含試驗規劃、試驗設置及試驗步驟，總括完整之試驗資訊。第五章為試驗結果與討論，陳列第三、第四章之試驗結果，整理並歸納出試驗參數之比較並提出研究發現成果。第六章為分析模式與結果討論，介紹分析模式之建立以及鋼骨、鋼筋、混凝土火害中、後之材料性質，並與試驗值相互比較。第七章為結論與建議，總結本研究試驗與分析結果之重要發現與其對後續研究之建議。

第二章 國內外相關規範及文獻回顧

2.1 耐火試驗規範

耐火試驗為研究構件火害行為中常用方法之一，不論國內外皆致力發展並制定相關的規範。本章節將針對國際間最常採用之規範做介紹，包括ISO 834 (International Organization for Standardization)、美國 UL 263 (Underwriters Laboratories Inc.)以及我國耐火試驗規範CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」。

2.1.1 國外耐火試驗規範

ISO

國際標準組織ISO 834規範之標準升溫曲線為 $T_f=345\log_{10}(8t+1)+20$ ，其中 T_f 為平均爐內溫度(°C)、 t 為試驗時間(min)，但柱試體受熱長度並無要求。試體破壞基準為最大軸向壓縮量 C ， $C=h/100$ (mm)，與最大軸向壓縮速率 dC/dt ， $dC/dt=3h/1000$ (mm/min)。

UL 263

美規UL 263規定，柱試體之高溫耐火試驗，試體長度最少需2.7公尺，性能基準則根據不同試驗分類而有不同，規範並要求在設定之耐火時效內柱試體需維持承載能力。升溫曲線方面，規範並沒有提供公式，但有以下之限制：5分鐘須達到538°C、10分鐘須達到704°C、30分鐘須達到843°C、60分鐘須達到927°C、120分鐘須達到1010°C、240分鐘須達到1093°C、480分鐘須達到1260°C。

2.1.2 國內耐火試驗規範

CNS12514

我國CNS 12514規範主要參考ISO 834規範修訂。對於上述各項規定，除柱試體受熱長度至少3公尺之規定與ISO 834規範不同，其餘皆相同。而國內之耐火試驗除了為模擬特殊受火情境之外，如化學火災，大都採用CNS 12514之標準升溫曲線。

2.1.3 國內外耐火試驗規範比較

國內外承重柱之高溫試驗標準比較如表1-1所示，由於我國CNS 12514規範主要參考ISO 834規範修訂，因此除試體長度CNS 12514規定至少3公尺外，並無不同。美規UL 263則規定承重柱試體長度至少2.7公尺。升溫曲線方面，加熱時間60分鐘前兩者曲線相近，60分鐘後UL 263略小於CNS 12514，加熱至240分鐘時，兩者差距約為60°C。

2.2 鋼骨鋼筋混凝土規範

2.2.1 我國 SRC 設計規範

鋼骨鋼筋混凝土為結合鋼骨與鋼筋混凝土兩種材料優點之合成結構，且為了有效發揮鋼骨與RC的優點，我國之SRC規範對於受軸壓力作用之構材，其一般規定如下。鋼骨比需大於2%，若小於2%則應依內政部所定之「混凝土工程設計規範與解說」之規定設計。鋼骨鋼筋混凝土柱中之保護層厚度與鋼骨斷面肢材寬厚比均應符合規範之相關規定。鋼骨鋼筋混凝土柱中之鋼骨其規定降伏應力不宜大於345 MPa，鋼筋之規定降伏應力不宜大於549 MPa，混凝土規定抗壓強度不宜小於21 MPa。

柱試體之軸壓強度計算則採用強度疊加法，其計算如下：
 $\phi_c P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{crc} P_{nrc}$ 。其中： P_{ns} 為鋼骨部分之標稱受壓強度。 P_{nrc} 為鋼筋混凝土部分之標稱受壓強度。 ϕ_{cs} 為鋼骨部分之強度折減係數， $\phi_{cs} = 0.85$ 。 ϕ_{crc} 為鋼筋混凝土部分之強度折減係數，對於包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱配置橫箍筋， $\phi_{crc} = 0.65$ 。

計算承壓柱構件之軸壓強度採用強度疊加法，其計算流程如下：

$$\phi_c P_n = \phi_{cs} P_{ns} + \phi_{crc} P_{nrc} \quad (2-1)$$

其中，

P_{ns} 為鋼骨部分之標稱受壓強度。

P_{nrc} 為鋼筋混凝土部分之標稱受壓強度。

ϕ_{cs} 為鋼骨部分之強度折減係數， $\phi_{cs}=0.85$ 。

ϕ_{crc} 為鋼筋混凝土部分之強度折減係數，在此 $\phi_{crc}=0.65$ 。

鋼骨之標稱強度計算流程如下：

當 $\lambda_c \leq 1.5$

$$P_{ns} = [\exp(-0.419\lambda_c^2)] F_{ys} A_s \quad (2-2)$$

當 $\lambda_c > 1.5$

$$P_{ns} = (0.877/\lambda_c^2) F_{ys} A_s \quad (2-3)$$

其中，

F_{ys} 為鋼骨之降伏應力(MPa)

A_s 為鋼骨之斷面積(mm²)

$$\lambda_c = KL / \pi r_{eff} \sqrt{F_{ys} / E_s}$$

KL 為 SRC 構材有效長度(mm)

E_s 為鋼骨之彈性模數(MPa)

$$r_{eff} \text{為SRC構材之有效迴轉半徑，} r_{eff} = r_s + \alpha \sqrt{I_g / A_g}$$

r_s 為鋼骨斷面之迴轉半徑(mm)

I_g 為 SRC 構材全斷面之慣性矩(mm⁴)

A_g 為 SRC 構材全斷面之面積(mm²)

α 為鋼骨斷面有效迴轉半徑修正因子，在此為 0.3

鋼筋混凝土部分之標稱受壓強度為下列兩式之較小者

$$P_{nrc} = \phi_e (0.85 f'_c A_c + A_r F_{yr}) \quad (2-4)$$

$$P_{nrc} = \phi_e [\pi^2 (EI)_{rc} / KL^2] \quad (2-5)$$

其中，

ϕ_c 配置橫箍筋時為 0.8

f'_c 為混凝土之規定抗壓強度(MPa)

A_c 為混凝土部分之斷面積(mm²)

F_{yr} 為鋼筋之規定降伏應力(MPa)

A_r 為鋼筋之斷面積(mm²)

KL 為 SRC 構材之有效長度(mm)

$(EI)_{rc}$ 為鋼筋混凝土部分之撓曲剛度， $(EI)_{rc}=E_c I_g/5$

E_c 為混凝土之彈性模數(MPa)

I_g 為全斷面之慣性矩(mm⁴)

2.2.2 AISC-LRFD 設計規範

美國 AISC-LRFD (2010)設計規範，其計算合成構件承壓強度之概念為轉換鋼筋混凝土材料為同等強度與勁度之鋼骨，並以鋼結構設計方法計算構件之軸壓強度。

計算流程如下

$\phi_c=0.75$ (LRFD)

$P_{n0}/P_e \leq 2.25$

$$P_{nsrc}=P_{n0}(0.685^{P_{n0}/P_e}) \quad (2-6)$$

$P_{n0}/P_e > 2.25$

$$P_{nsrc}=0.877P_e \quad (2-7)$$

其中，

$$P_{n0}=F_y A_s + F_{yr} A_{sr} + 0.85 f'_c A_c$$

$$P_e = \pi^2 (EI_{eff}) / (KL)^2 \quad (N)$$

A_c 為斷面混凝土面積(mm²)

A_s 為鋼骨面積(mm²)

E_c 為混凝土彈性模數， $E_c=0.043\omega_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ (MPa)

EI_{eff} 為合成斷面有效勁度， $EI_{eff}=E_sI_s+0.5E_sI_{sr}+C_I E_c I_c$ (N-mm²)

C_I 為受壓合成構件之有效剛度係數， $C_I=0.1+2(A_s/(A_c+A_s))\leq 0.3$

E_s 為鋼之彈性模數， $E_s=200,000$ MPa

F_y 為鋼骨降伏強度(MPa)

F_{yr} 為鋼筋降伏強度(MPa)

I_c 為混凝土對合成斷面之慣性矩(mm⁴)

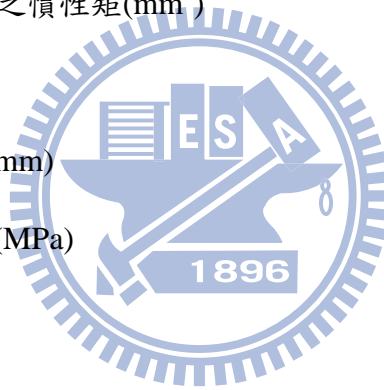
I_s 為鋼骨對合成斷面之慣性矩(mm⁴)

I_{sr} 為鋼筋對合成斷面之慣性矩(mm⁴)

K 為有效長度因子

L 為側向未支撐長度(mm)

f'_c 為混凝土抗壓強度(MPa)



2.3 文獻回顧

包覆十字型鋼骨SRC柱之研究較稀少，但包覆I形鋼骨SRC柱行為則有較多之研究。高溫下之試驗研究不同參數對於防火時效之影響，考慮之參數包含載重比、偏心距、混凝土強度、火害情境、鋼骨比、斷面尺寸、細長比等。高溫後之試驗研究不同參數對於材料殘餘性質包含殘餘強度及殘餘剛度之影響，考慮之參數包含火害延時、火害最高溫度、混凝土強度、保護層厚度等。本節將分別就材料火害性質、火害下柱構件試驗與分析、火害後柱構件試驗與分析與火害後結構物安全性評估等項目回顧國內外相關文獻。

材料火害性質

洪敏盛(2006)以實驗方式研究混凝土及鋼筋受火害後之殘餘強度，並計算火害後RC短梁之殘餘抗剪強度。其中混凝土受火害溫度分別為室溫、200°C、300°C、400°C、500°C、600°C、700°C、800°C，共八種；鋼筋考慮之火害溫度分別為常

溫、400°C、700°C、800°C，共四種。試驗結果顯示，研究建議之混凝土殘餘抗壓強度公式可得到合理之結果，而鋼筋之殘餘降伏強度則驗證楊旻森建立之預測公式之可行性。

李其忠(2010)以實驗及分析方式探討自充填混凝土受高溫作用後之材料性質。試驗規劃之火害溫度分別為200°C、400°C、600°C、800°C，共四種，冷卻方式則分為強制冷卻及自然冷卻。實驗結果顯示，混凝土受高溫作用後其力學性質均大致隨溫度升高而降低，且由結果可知自然冷卻之混凝土試體殘餘抗壓強度與楊旻森提出之混凝土殘餘抗壓強度結果相近，驗證楊旻森所提出之混凝土殘餘強度預測公式。

Ali等人(2004)以實驗方式探討混凝土柱之耐火性能。99支RC柱試體分別於不同載重比、不同軸向束制程度、不同加熱速率、不同混凝土強度等參數之影響。研究結果顯示，混凝土爆裂發生於試驗開始45分鐘內，普通強度與高強度混凝土顯示出類似之爆裂性質，且升溫速率較低可降低爆裂機率。另外使用合成纖維可降低爆裂程度，而柱之軸向束制並不會使柱較容易爆裂。

張焱(2010)探討含濕量對混凝土結構抗火性能試驗之影響。研究整理文獻中含濕量之影響，顯示含濕量對於混凝土材料熱、力學性能、溫度場分佈、混凝土爆裂、結構變形(內部水分移動)、耐火時效等皆有不同程度之影響。研究並指出烘乾為降低試體含濕量方法，但烘乾過程會對材料性能產生影響，建議可進行更深入之研究。

火害下柱構件試驗與分析

Lie (1994)以數值模型研究圓形鋼管內灌混凝土柱之耐火能力，得到溫度、變形量與耐火能力之計算值，此計算值與實驗值比較結果顯示相當吻合。此數值模型可代入各種參數如載重、柱斷片尺寸、柱長度、鋼骨比，並合理預測圓形鋼管內灌混凝土柱之耐火能力。

Yu等人(2007)以實驗及數值方法研究鋼骨鋼筋混凝土柱受火害之行為；藉由12支試體分別於常溫及高溫下試驗，其實驗值與分析值吻合。分析方法結合有限元素法及有限差分法，建立預測方法以得到柱斷面溫度分佈與柱之軸壓強度。研究並指出，SRC柱耐火能力之分析十分複雜，包含斷面形狀、斷面尺寸、試體裂

縫、細長比、偏心距皆會對柱試體之耐火能力造成影響。試驗最後並提出由數據迴歸而得到火害後之軸壓強度建議公式。

黃彰斌(2006)以數值方法研究鋼筋混凝土梁受火害之溫度分佈與殘餘強度，試體內部熱傳行為以塊狀系統之概念描述，推導出之方程式以Patankar (1980)提出之SIMPLE數值方法計算。分析考慮混凝土矩形梁受1面、2面、3面火之斷面材料性質變化造成之強度折減，結果顯示不同受火面情況下，鋼筋混凝土梁內部溫度之分佈非常不均勻，將會影響受壓混凝土之抗壓強度與受拉鋼筋之降伏強度。

賴政忠(2006)以有限元素分析軟體ANSYS分析火害中鋼筋混凝土梁、柱構件高溫下之行為。研究首先建立ANSYS模型，預測鋼筋混凝土梁、柱構件之斷面溫度分佈，再將分析之結果與CEB-FIP(1982)提供之數據比對，以確認建立之模型可得到合理之預測結果，進而模擬火害中梁與柱構件之強度變化，以評估其耐火時效。

Franssen等人(2003)以實驗方式研究圓形RC柱耐火性能，共4支試體，其中試驗參數包括不同鋼筋比與不同載重比。結果顯示，試驗開始20至60分鐘可觀測到試體爆裂情形，且不同鋼筋比對於試體爆裂情形無顯著影響；比較兩種簡易防火時效計算公式，發現簡易之計算公式用於計算圓柱之防火時效可得到偏保守之預測結果。

Huang 等人(2008)透過數值方法分析包覆I型SRC柱之防火時效，探討斷面尺寸及載重比對防火時效之影響。試驗參數為試體斷面尺寸與載重比；分為4種斷面尺寸(250、300、350、400 mm)與4種載重比(0.2、0.3、0.4、0.5)，共16種組合。分析結果顯示較小斷面尺寸與高載重比試體之耐火能力較差。另外研究藉由4支合成柱試體進行實驗，以驗證分析模型；結果顯示分析結果與實驗值相當一致。Eurocode 4與分析模型之預測值也相當吻合。

Ellobody與Young (2010)採用非線性三維有限元素模型分析鋼骨鋼筋混凝土柱高溫下之行為與耐火能力。此模型考慮之參數分別為斷面尺寸、鋼骨尺寸、骨材種類以及不同載重比；同時，該模型亦考慮鋼骨、鋼筋、混凝土以及混凝土圍束作用於常溫與高溫下之性質。分析結果顯示減少細長比以及增加鋼骨比可得到較佳之防火時效。分析結果與Eurocode 4相比，可發現在高載重比及高細長比時，

Eurocode 4之防火時效計算結果較不保守，而在其他情形中，則顯示Eurocode 4之防火時效計算結果則較保守。

Mao與Kodur (2010)以實驗方式進行7支SRC柱於3面及4面受火情況下之耐火能力試驗，試驗參數包括斷面尺寸、載重大小及偏心距離。結果顯示，3面受火試體相較於4面受火試體，表現出較佳之耐火能力，並且載重大小及偏心程度對於耐火能力皆有明顯之影響。文獻最後檢討現行規範，結果指出在某些情況下，例如表層混凝土剝落及大偏心距，規範預測之防火時效可能較不保守。

Raut與Kodur (2011)進行6支RC柱試驗，以探討高強度混凝土柱火害下之行為。試驗參數分別為混凝土強度、升溫曲線、載重比與是否添加聚合纖維。實驗結果顯示普通強度混凝土柱相強度較高混凝土柱，表現出較佳之耐火能力。研究並發現載重比對於高強度混凝土試體之爆裂有顯著影響，加入聚合纖維即可減少混凝土爆裂以提升防火時效。

火害後柱構件試驗與分析

林草英(2000)以試驗方式研究雙H型鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之強度，考慮之參數分別為不同混凝土強度、不同保護層厚度和不同火害時程。實驗結果顯示，由於鋼骨導熱性佳，內部傳熱方式為鋼骨腹板傳入試體中心混凝土，因此斷面溫度分佈相較於RC斷面有明顯不同。研究並指出火害時程與保護層厚度皆與SRC柱火害後之殘餘強度有密切關係。

徐瑞祥等人(2004)以數值模擬火害後鋼筋混凝土梁之剪力強度。作者模擬試體內部之熱傳行為採塊狀系統(Lumped System)之概念，將斷面分割為均溫且無溫度梯度存在之微小單元，此微小單元內之力學性質也不隨位置而變。因此以單元中心點之溫度及力學性質代表整體單元，並利用簡化之ACI公式將各單元之剪力強度疊加得到該斷面之殘餘剪力強度。分析與實驗值相比，分析模型可得合理計算結果，並且模型也適用含剪力筋、不含剪力筋、高強度混凝土之試體。

張雲妃(2006)利用有限差分法分析火害後鋼筋混凝土柱之雙軸彎曲行為，為求解斷面溫度分佈之熱傳方程式，利用有限差分法得到之近似值替換方程式中之偏導數，再利用Peaceman與Rachford(1955)提出之交替隱含法(A.D.I)進行求解，得到試體斷面溫度分佈與火害後試體最高溫度。研究並探討108個混凝土圓柱試

體，得到常溫及高溫後之混凝土應力應變曲線，配合前述分析結果可預測高溫後鋼筋混凝土試體之殘餘強度與剛度。

火害後結構物安全性評估

沈得憲與林英俊(1996)提出火害後混凝土結構物安全性評估作業流程，分為初勘、複勘、與結構安全鑑定三階段。初勘調查分析構材受損是否影響結構安全，初勘調查報告包含結構物受損部位定性之描述，須觀察記錄項目如混凝土顏色、裂縫分佈、剝落是否導致鋼筋外露、主筋情況、開裂與撓度等。初勘結果分為輕微、中度、嚴重損害等三級，其中輕微損害可經修復而恢復使用，中度與嚴重則須進行複勘。複勘調查報告包含現場取樣進行之各種試驗，鋼筋測試降伏與極限強度、冷彎試驗、伸長量等，混凝土則利用超音波、反彈槌試驗、燒失量、x光繞射、孔隙指數、壓汞試驗、鑽心取樣試體強度試驗。複勘評估結果有安全無虞、可能危險及顯有危險等三種情況。安全無虞者經核准進行補強後可恢復使用，顯有危險者應立即拆除，可能危險者將依評估程序進行第三階段之結構安全鑑定。結構物安全鑑定則依據流程判定實施何種措施，如受損部位是否符合最低使用條件或符合耐久性要求，是則進行補強或補救措施，否則有安全堪慮應拆除重建。



第三章 鋼骨鋼筋混凝土火害高溫試驗

3.1 試驗規劃

高溫試驗之目的主要在於探討鋼骨鋼筋混凝土邊柱於火害中之斷面溫度分佈狀況，故本試驗將採高溫爐模擬邊柱於火場中之受火情境，觀察並記錄柱試體斷面之溫度分佈；其中方形斷面試體於火場中為3面受火，受火方式如圖3-1所示；圓形試體於火場中為2面受火，其受火方式如圖3-2所示。試體設計依照我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」相關規定進行設計，升溫曲線則依據我國CNS12514「建築物構造部分耐火試驗法」模擬火災情境，但由於高溫爐限制，因此進行高溫試驗之加熱時間至多為五小時。高溫試驗之參數包含混凝土強度以及柱體斷面形狀；其中混凝土強度包含普通強度混凝土、強度較高混凝土，而柱體斷面形狀則分為方形與圓狀。試體規劃如表3-1所示，第一位字母表示斷面形狀，S為方形、C為圓形，第二位字母為混凝土強度，N為普通強度混凝土、H為強度較高混凝土，第三位數字為受火面數量。

3.2 試體設計

本研究試驗規劃共8支包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱，其中4支試體進行高溫試驗及火害後載重試驗，另外4支試體僅進行載重試驗，以作為高溫試驗試體之對照組。詳細試體尺寸如圖3-3至圖3-5所示，鋼骨鋼筋混凝土柱試體總長2030 mm，其中柱試體上下兩端端板尺寸為450×450×15 mm。方形柱斷面尺寸為360×360 mm，圓形柱斷面之直徑為400 mm。


試體使用之鋼骨、鋼筋以及混凝土分別簡述如下，十字型鋼骨是以兩支RH 250×125×6×9型鋼填角銲接合而成，長度為2000 mm，採用A36之鋼材，鋼骨上下皆銲接厚度15 mm之鋼板，其中位於上部之端板開一直徑200 mm之混凝土澆置孔；試體之主筋選用4支6號竹節鋼筋，並依斷面形狀不同分別選用方型及圓形箍筋，箍筋尺寸選用3號竹節鋼筋，箍筋之配置如圖3-6(b)所示。混凝土保護層部分根據建築技術規則，達3小時防火時效之混凝土保護層厚度為60 mm，達2小時防火時效之混凝土保護層厚度為50 mm，而本文為了觀察試體斷面之溫度分佈，適度調整鋼骨之保護層厚度，避免鋼骨溫度難以上升。另外試體之鋼骨比分別為

方柱5.62%、圓柱5.79%，皆大於SRC規範規定之2%，因此受壓強度之計算適用SRC規範之規定。

3.3 試體製作

試體製作程序如下：

- 1.訂做十字型鋼骨以及縱向主筋、橫向箍筋。
- 2.銲接上下端板於鋼骨及主筋。
- 3.安裝熱電偶測點。
- 4.綁紮箍筋並測試熱電偶測點是否功能正常。
- 5.訂做模板與組立。
- 6.混凝土澆置。
- 7.混凝土養護。
- 8.不受火面包覆防火棉



試體之製作程序如下所示，於上下端板與鋼骨、主筋銲接之接合工作完成後，安裝熱電偶測點於預定位置並確定固定牢固，以免澆置混凝土時造成點位滑移進而影響實驗結果。所有熱電偶測點經測試皆可正常作用後，開始綁紮箍筋並組立模板，其中圓形柱選用保麗龍圓形模。灌漿時透過上部端板預留之開孔澆置混凝土，澆置位置以十字型鋼骨分為四部分，其中未配置混凝土熱電偶部分可使用振動棒，配合橡膠槌適度敲打試體模板，可避免蜂窩現象。灌漿同時也製作10×20 mm之圓柱試體，柱試體施工步驟如圖3-7所示。另外試體規劃不受火的部分，利用50 mm之陶瓷纖維防火棉包覆，並於柱試體外纏繞電偶線以加強固定防火棉，避免噴膠黏性不足或是混凝土表面爆裂使防火棉脫落，以確保試體與試驗設計受火方式相符。

材料試驗分為鋼骨、鋼筋以及混凝土，鋼筋之拉力試驗結果如圖3-8、表3-2所示，Test 1抗拉強度 $\sigma_u=700$ MPa、降伏強度 $\sigma_y=542$ MPa；Test 2抗拉強度 $\sigma_u=711$ MPa、降伏強度 $\sigma_y=548$ MPa；鋼筋之平均抗拉強度為 $\sigma_u=705$ MPa、平均降伏強度為 $\sigma_y=545$ MPa。鋼骨之拉力試驗結果如表3-3所示：試驗分三組為Test 1與Test

2及Test3。Test 1抗拉強度 $\sigma_u=455$ MPa、降伏強度 $\sigma_y=362$ MPa；Test 2抗拉強度 $\sigma_u=451$ MPa、降伏強度 $\sigma_y=359$ MPa，；Test 3抗拉強度 $\sigma_u=455$ MPa、降伏強度 $\sigma_y=367$ MPa，所以鋼骨之平均抗拉強度為 $\sigma_u=454$ MPa、平均降伏強度為 $\sigma_y=362$ MPa。混凝土之平均抗壓強度如表3-4所示，高溫試驗前普通強度混凝土為39 MPa，強度較高混凝土為50 MPa。載重試驗前一般混凝土為38 MPa，強度較高混凝土為46 MPa。進行載重試驗時由混凝土圓柱試體抗壓強度試驗得知強度與高溫試驗時相比有降低之現象，可能原因為進行載重試驗時混凝土齡期近350天，試體乾縮現象導致強度降低。

3.4 試驗與量測儀器設置

3.4.1 試驗設備與試體設置

本研究高溫試驗使用內政部建築研究所防火實驗室之小型高溫複合爐，其內部容量大小為1200×1200×1200 mm，以瓦斯為燃料，並經由爐內4個噴火孔進行加溫，如圖3-9所示。爐上方安裝有加载能力為981 kN之油壓千斤頂，如圖3-10所示，試體上下皆為鉸支承分別與油壓千斤頂與反力鋼架相連結。

試體設置於爐內時，由於加溫爐之大小尺寸限制，試體上下端各350 mm將伸出爐外為未受熱段。試體吊裝至爐內後，蓋上爐蓋板，並將高溫爐與試體及高溫爐本身之接縫處以防火棉填塞密實，維持爐內之氣密性。試體安裝完畢後連接熱電偶線，以對接延長至資料擷取器，確認訊號傳輸與資料儲存正常並確認各連接處皆確實固定，待設備及儀器確認就緒之後，即可開始試驗。

3.4.2 量測儀器設置

根據CNS 12514規定，試體溫度測定使用0.75級性能以上及直徑0.65 mm之K型熱電偶線，本文規劃熱電偶測點皆位於柱之中段，詳細測溫點配置如圖3-11、圖3-12所示。熱電偶測點配置主要考慮試體斷面受熱之對稱性，故僅於對稱軸之一側配置點位，並觀測熱由受火面傳入於試體內部之傳遞情況。油壓千斤頂出力大小由載重計(Load Cell)進行監測，柱試體之軸向位移及柱端轉角則由配置於柱兩端之位移計(LVDT)進行量測，如圖3-13所示。

3.5 試驗步驟

3.5.1 試驗過程

根據CNS 12514規定，對於承重構造試體，試驗載重須在試驗開始之前至少15分鐘加載至試體，並保持加載不變直至變形不再增加，每支試體於試驗前皆加載至883 kN，並維持定載直至試驗結束。當溫度控制程式依循標準加熱曲線開始加溫之際即視為試驗開始，其中標準加熱曲線為 $T=345\log_{10}(8t+1)+20$ ， T =平均爐內溫度(°C)； t =試驗經過時間(min)，如圖3-14所示。

3.5.2 量測與觀察

由於試體於高溫時會受熱膨脹，而膨脹過程將影響油壓千斤頂之載重大小，因此將試驗過程需注意載重計之讀數，必要時調整以維持恆定載重。熱電偶測點溫度與位移計之讀數每10秒紀錄一次，並持續注意數據是否有異常。試驗過程中尚需注意試體之狀況，例如爆裂聲，保護層剝落等，試驗結束之後，試體外觀變化應詳實記錄。

3.5.3 試驗終止條件

根據CNS 12514，試驗終止條件如下：

- 1.試驗達到設定指標
- 2.達試驗設定時間
- 3.人員安全或設備可能遭受破壞

本文考量高溫爐之限制，試驗終止條件將以5小時為限，或是內部鋼骨溫度達550°C。

第四章 鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之軸壓

載重試驗

4.1 試驗規劃

載重試驗目的為瞭解火害前後SRC柱試體抗壓強度之折減程度，試驗規劃4支受火害試體及4支未受火害試體，共8支試體進行軸壓載重試驗；高溫試驗與載重試驗相隔約224天，試體編號如表3-1所示。結合前述高溫試驗之設計參數，包含混凝土強度及試體斷面幾何形狀，試驗並規劃比較未受火害以及受火害各4支試體，以作為火害前後試體性質之對照。

4.2 試驗與量測儀器設置

4.2.1 試驗設備與試體設置

本研究載重試驗採用內政部建築研究所材料試驗中心加載能力30MN-MTS萬能試驗機，如圖4-1所示。試驗利用台車作為運送試體之載具，再配合經緯儀準確定位試體，使得試體中心對齊萬能試驗機中央，如此可避免偏心載重產生。試體設置示意圖如圖4-2所示。

試體設置方面，首先於柱試體上下兩端板以石膏蓋平，下部端板與台車之承壓鋼板相連，上部端板則覆蓋一承壓鋼板，避免應力過於集中，試驗設置過程如圖4-3所示。試體安裝完成後測試量測設備，確認資料擷取器訊號傳輸與儲存正常，實驗紀錄設備也設置完畢，確認就緒即可開始試驗。

4.2.2 位移計設置

由於試體僅中段約1200 mm為受火段，其受火段強度將因高溫折減小於未受火段。當試體承受軸壓載重，總變形量為受火與未受火兩區段之和，如欲瞭解受火段之勁度折減程度，需設置量測受火段變形量之位移計，因此分別於試體東面及西面兩端距端部350 mm處鑽孔，灌入黏著劑固定牙桿於孔中，位移計則安裝在牙桿上，設置完成如圖4-4所示。另外柱之整體變形量則由萬能試驗機內建之

位移計量測，位移計之量測位置如圖4-5所示。

4.3 試驗步驟

4.3.1 試驗過程

試驗初始需施加一預載重，此後加載速率逐漸增加至預定加載速率。試驗之加載方式為位移控制，加載速率為0.0015 mm/s，推算油壓千斤頂位移達40 mm需耗時約45分鐘，試驗途中達到試驗終止條件即停止試驗。

4.3.2 量測與觀察

試驗過程觀察方面，外觀變化以一台DV全程錄影及兩台照相機分別拍照記錄。試體變形量以兩組位移計以及萬能試驗機內建位移計記錄之，試驗中並於控制室內觀察監控試體之行為，隔一段時間或是於特定階段如加載變位曲線達峰值，則廣播該時刻加載於試體之載重值。

4.3.3 試驗終止條件

當載重試驗達以下條件即中止試驗

- 1.試體達軸壓強度後強度折減至軸壓強度之70%時。
- 2.試體軸向變位達應變2%時，即40mm。

第五章 試驗結果與討論

5.1 試體行為

本章將呈現試驗結果並討論參數之影響。各組試體高溫試驗結果如表5-1至表5-4所示，各試體之溫度歷時如表5-5至表5-8所示；載重試驗結果如表5-9所示，規範預測未受火害試體軸壓強度與實驗值之比較如表5-10所示。

5.1.1 高溫試驗結果

1. 高溫試驗之測點溫度歷時

試體SN3

混凝土測點溫度超過 100°C 之後，出現一溫度平台，應是混凝土內部孔隙水產生汽化之現象吸收了部分能量，之後混凝土溫度持續緩慢上升。加熱持續至240分鐘時，受火面混凝土深度較淺之C4測點已趨 300°C ，較深測點C3也接近 250°C ，可是遠離受火面之混凝土測點C1與C2則不超過 200°C ，如圖5-1(a)所示。鋼骨溫度分佈，於 100°C 附近亦有明顯之溫度平台， 100°C 後位於受火面翼板之S1、S5測點溫度上升迅速，最高溫度超過 550°C ，由圖5-1(b)可知。由圖可看出測點溫度之分佈受到與受火面距離影響，且最高溫與最低溫相差將近 300°C 。鋼筋測點之溫度歷時如圖5-1(c)所示，鋼筋測點溫度平台較不明顯，最高溫發生在靠受火面之箍筋測點R1達 680°C ，靠受火面之主筋測點R5次之約 560°C 。

由鋼骨與混凝土之比較圖5-1(d)發現，加熱一小時內，鋼骨受火面翼板之S5測點升溫速率最高，並於一小時後脫離溫度平台加速升溫。而鋼骨腹板之測點如鋼骨中心及遠離受火面測點，分別將其升溫曲線與位置臨近但較外側之混凝土測點升溫曲線比較，結果顯示兩者曲線相近，可知鋼骨由於良好熱傳性質，在熱由試體表面傳入試體中心之過程中，中心鋼骨之溫度來自外側受火面翼板。

試體SH3

混凝土近受火面測點C3與C4得知，加溫30分鐘內混凝土溫度上升較快速且超過 100°C 後出現溫度平台，如圖5-2(a)；遠離受火面之混凝土測點C1與C2升溫速率較慢且無明顯溫度平台；加熱持續至300分鐘時，近受火面之混凝土測點C4

溫度達382°C；但距試體表面同樣深度，遠離受火面之混凝土測點C2溫度僅280°C。鋼骨溫度測點於靠近受火面之翼板測點S5溫度高於其他測點，加溫300分鐘時，達525°C，此時遠離受火面之翼板測點S2溫度僅244°C。由圖5-2(b)可知，鋼骨測點溫度之分佈，與相距受火面之距離一致，依序為S5、S4、S3及S2，最高溫與最低溫相差280°C。鋼筋測點溫度歷時如圖5-2(c)所示，最高溫發生於靠近受火面之箍筋測點R4，加熱300分鐘時達710°C，最低溫發生於遠離受火面之箍筋測點R3，僅309°C。主筋之溫度位於前述兩者之間，平均溫度為443°C。

由圖5-2(d)可知鋼骨與混凝土之溫度歷時，其中鋼骨受火面翼板測點溫度於脫離溫度平台後維持恆定速率上升直到試驗結束，腹板測點S4則高於較外側之混凝土C4測點，顯示腹板之升溫熱源來自翼板。同樣由不受火面翼板測點S2也可看出此現象，S2溫度大於與受火面距離較近之混凝土C1測點，顯示內部鋼骨相較混凝土擁有較高之熱傳效率。

試體CN2

混凝土測點溫度如圖5-3(a)所示，圓形試體內部混凝土測點，皆可於超過100°C後觀察到溫度平台。加熱240分鐘後，最高溫為靠近受火面之測點C3，達407°C；最低為遠離受火面之C1測點180°C。鋼骨溫度歷時如圖5-3(b)所示，靠近受火面之鋼骨測點S4於加熱40分鐘後升溫速率穩定，在加熱240分鐘時溫度達到621°C，此時遠離受火面之翼板測點S2為440°C，位於中心之S3測點則為372°C。鋼筋測點方面，靠近受火面之箍筋測點R3於加熱開始後溫度快速上升，加熱至90分鐘後升溫速率稍緩，加熱至240分鐘時溫度已達1018°C，如圖5-3(c)所示。主筋測點R4則穩定升溫，於加熱240分鐘時達468°C；遠離受火面之R1、R2測點溫度於90分鐘後升溫速率出現明顯差異，應是保護層爆裂導致熱由縫隙傳入試體內所置，R1測點加熱240分鐘後約為523°C，R2加熱240分鐘後約784°C。

鋼骨與混凝土之溫度歷時如圖5-3(d)所示，受火面鋼骨測點S4相較於同位置方形試體溫度歷時，測點S4之溫度平台較短，溫度脫離溫度平台後也以更快之升溫速率繼續上升。試體中心之鋼骨測點S3，其溫度顯示略高於附近但距離受火面較近之混凝土測點C2，是因為鋼骨翼板溫度較高，熱由外傳入鋼骨中心。另外，受火面混凝土保護層剝落，防火棉與試體間產生間隙，導致受火面之鋼骨翼板測點S2溫度過高，使溫度分佈之結果可能與預測有落差。

試體CH2

混凝土測點溫度如圖5-4(a)所示，試體CH2內部混凝土測點與CN2相同於超過100°C後皆可觀察到溫度平台。於加熱300分鐘後，最高溫為靠近受火面之測點C3，達401°C；最低為遠離受火面之C1測點194°C。鋼骨溫度歷時如圖5-4(b)所示，靠近受火面之鋼骨測點S4於加熱60分鐘後升溫速率穩定，在加熱300分鐘時溫度達到550°C，此時遠離受火面之翼板測點S2僅201°C，位於中心之S3測點則達303°C。鋼筋測點方面，靠近受火面之箍筋測點R3於加熱開始後溫度快速上升，加熱至90分鐘後升溫速率稍緩，加熱至300分鐘時溫度已達994°C，如圖5-4(c)所示。主筋測點R4則穩定升溫，於加熱300分鐘時達609°C。遠離受火面之R1、R2測點溫度相近，平均約244°C。

鋼骨與混凝土之溫度歷時如圖5-4(d)所示，受火面鋼骨翼板測點S4溫度於加熱初期快速上升至100°C之後，受內部含水汽化影響，溫度停滯上升，但於加熱60分鐘後繼續穩定上升。鋼骨中心腹板測點S3及不受火面翼板測點S2之溫度皆與附近但距離受火面較近之混凝土測點C2及C1接近，印證試體內部鋼骨之溫度分佈受到外側翼板傳入熱能之影響。

2. 高溫試驗之試體軸向變形及柱端板間相對轉角

柱試體於高溫下，由於材料之熱膨脹性質，使試體產生膨脹伸長現象，但同時材料也因高溫使力學性質折減。隨著溫度升高，柱之勁度遞減，當柱之膨脹速率小於壓縮速率時，柱試體將進入壓縮階段直至破壞。由於本研究高溫試驗所施加之軸向力過小，僅883 kN，導致4支試體在試驗期間持續膨脹，直到試驗結束仍未進入壓縮階段。試體軸向伸長對加熱時間之關係，如圖5-5所示；由圖可看出試體SN3與SH3在加熱時間120分鐘以內，伸長量大致相同約為3 mm，直至120分鐘後，試體SN3之伸長量才逐漸大於SH3，但兩者仍然維持一定差距約0.3 mm；試體CN2與CH2於加熱其間之軸向變形則顯現出較大之差距，於加熱時間30分鐘後，兩者差距逐漸增大。其中試體CN2於加熱時間240分鐘時即到達試驗停止標準，並且於試驗結束後觀測試體CN2發現大量的混凝土保護層剝落，由此可知保護層的剝落，使得爐溫更快速的傳至試體內，造成試體CN2伸長速率較高。

試驗結果並發現，柱試體於高溫下產生撓曲現象，乃因試體非4面受火，其

中方形柱試體為3面受火(圓形柱試體為2面受火)，此受熱面差異將使試體斷面呈現不均勻溫度分佈，故於試體受火面及不受火面兩側產生膨脹差異。高溫試驗試體束制條件為鉸支承，使試體得以量測撓曲變形；配置於上下端板南北兩側之位移計，可記錄南北兩側之伸長量，

計算其伸長量差異並除以端板長度可得端板之轉角，將兩端端板轉角疊加即為柱端板間相對轉角，端板間相對轉角與時間關係圖如圖5-6所示；高溫試驗中試體最大伸長量與最大相對轉角如表5-11所示。由圖5-6可知，試體CN2於加熱初期約30分鐘內，柱端板間相對轉角漸增，於30至90分鐘間速率漸緩，90分鐘後相對轉角繼續上升，加熱約167分鐘時達最大值，此後柱端板間相對轉角則漸漸減小，原因推測為不受火面之防火棉受到爆裂影響其包覆性，熱傳入不受火面使其溫度漸漸上升增加熱膨脹伸長量，導致與受火面伸長量差距漸漸縮小，而膨脹量差異減小使柱端板間相對轉角減小，如圖所示。SN3與SH3柱端板間相對轉角隨時間變化之趨勢相近，同樣於30分鐘前較快速增加，30至90分鐘間趨緩並於90分鐘後繼續增加，最後於加熱時間210分鐘後又趨於平緩直到試驗結束，其間試體SN3之柱端板間相對轉角皆大於試體SH3。試體CH2之柱端板間相對轉角隨時間變化則為較其他試體穩定之速率上升，並且於試驗加熱其間無明顯趨緩之現象。

3. 高溫試驗後試體損害情形

試體SN3

試體SN3加熱時間約為4時39分，高溫試驗終止後冷卻21小時開爐門觀察，如圖5-7所示。受火面之顏色呈淺黃色，不受火面則未有顯著變化，呈淺灰色。由圖可知試體之受火面一側角隅處保護層混凝土脫落，但並未露出鋼筋。試體表面並有顆粒狀突起，應是混凝土中之粗骨材受熱膨脹，顆粒狀突起大多集中在角隅處，如圖5-7所示。試體裂縫寬度約略1 mm，大致呈網格狀分佈，不受火面之裂縫分佈較少，且裂縫寬度大都小於5 mm。

試體SH3

試體SH3加熱時間約為5小時，高溫試驗終止後冷卻21小時開爐門觀察，如圖5-8所示。受火面之顏色呈淺黃色，不受火面則未有顯著變化，呈淺灰色。由

圖可知保護層混凝土於試體各面皆未脫落，但表面有顆粒狀突起，應是混凝土中之粗骨材受熱膨脹，其分佈大多集中在角隅處，如圖5-8所示。試體裂縫寬度約略1 mm，大致呈網格狀分佈，不受火面之裂縫分佈較少，且裂縫寬度大都小於5 mm。

試體CN2

試體CN2加熱時間約為4小時，高溫試驗終止後冷卻21小時開爐門觀察，如圖5-9所示。試體外觀之顏色呈淺黃色，不受火之部分則未有顯著變化，呈淺灰色。由圖可知受火面保護層混凝土嚴重剝落，造成部分箍筋外露，剝落之混凝土大多呈片狀，而不受火面保護層則由於包覆之防火棉脫落導致規劃之不受火面也觀察到保護層爆裂之情形，於試體CN2之溫度歷時圖也可觀察到不受火面測點之異常高溫。

試體CH2

試體CH2加熱時間約為5小時，高溫試驗終止後冷卻21小時開爐門觀察，如圖5-10所示。受火面之顏色呈淺黃色，不受火面則未有顯著變化，呈淺灰色。由圖可知受火面保護層混凝土嚴重剝落，造成部分箍筋外露，剝落之混凝土大多呈片狀，而不受火面保護層則大致完好。

5.1.2 載重試驗結果

1. 載重試驗之軸壓強度與變位曲線

未受火害試體

以下討論之載重試驗結果試體變形量，皆以位移計量測數據之平均為準，僅包含受火段之變形量，而非整體變形量。

試體SN0之軸壓強度為6309 kN，其對應峰值之變形量為3.35 mm，最大變形量為28.42 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-11所示。由圖可知，當試體達軸壓強度後，位移持續增加，即觀察到試體之強度驟降，由6309 kN降至5388 kN，此後試體之強度則緩慢下降直至試驗結束。

試體SH0之軸壓強度為7084 kN，對應峰值之變形量為3.21 mm，最大變形量

為20.05 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-12所示。由圖可知，當試體達軸壓強度後，位移持續增加，即觀察到試體之強度驟降，由7084 kN降至5950 kN，此後試體之強度則緩慢下降直至試驗結束。

試體CN0之軸壓強度為6334 kN，對應峰值之變形量為3.17 mm，最大變形量為21.4 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-13所示。由圖可知，當試體達軸壓強度後，位移持續增加，試體之強度緩慢下降。當強度下降至5153 kN後，出現一驟降由5153 kN降至4716 kN，此後試體之強度則緩慢下降直至試驗結束。

試體CH0之軸壓強度為7275 kN，對應峰值之變形量為3.2 mm，最大變形量為22.15 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-14所示。由圖可知，當試體達軸壓強度後，位移持續增加，即觀察到試體之強度驟降，由7275 kN降至6251 kN，此後試體之強度則緩慢下降直至試驗結束。

由以上可知未受火害之試體，其峰值對應之變位平均約為3.2 mm，應變為 2.5×10^{-3} ，最大之變形量約為23 mm，應變為 1.8×10^{-2} 。且除了試體CN2，其餘未受火害試體行為較接近，皆為達軸壓強度後接著強度驟降，其後強度緩慢下降直至試驗結束。

受火害試體

試體SN3軸壓強度為5189 kN，對應之峰值變形量為20.67 mm，最大變形量為47.64 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-15所示。由圖可知，當試體強度達4407 約 $0.85N_{f_i, test}$ 後，即觀察到試體之強度上升速度趨緩；達軸壓強度後試體之強度則緩慢下降直至試驗結束。

試體SH3軸壓強度為5171 kN，對應之峰值變形量為17.55 mm，最大變形量為45.65 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-16所示。由圖可知，當試體強度達4285 約 $0.83N_{f_i, test}$ 後，即觀察到試體之強度上升速度趨緩；達軸壓強度後試體之強度則緩慢下降直至試驗結束。

試體CN2軸壓強度為5061 kN，對應之峰值變形量為22.36 mm，最大變形量為42.86 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-17所示。由圖可知，當試體強度達3746 約 $0.74N_{f_i, test}$ 後，即觀察到試體之強度上升速度趨緩；達軸壓強度後試體之強度則穩定下降直至試驗結束。

試體CH2軸壓強度為5376 kN，對應之峰值變形量為8.39 mm，最大變形量為36.18 mm，軸壓強度與變位關係如圖5-18所示。由圖可知，當試體達軸壓強度後，位移持續增加，即觀察到試體出現一較小程度之強度驟降，由5376 kN降至5151 kN；此後試體之強度繼續上升至5364 kN，此時變形量為20.7 mm，接下來則進入下降段，直至試驗結束前，曲線則又出現兩次驟降之情形。

由以上可知受火害之試體，其峰值對應之變位平均約為17.24 mm，應變為 1.3×10^{-2} ，最大之變形量約為23 mm，應變為 3.3×10^{-2} 。受火害試體之軸壓強度與變位關係，其曲線之趨勢較為平滑，並無如同未受火試體過軸壓強度後出現強度驟降之情形。

2. 載重試驗後試體損害情形

未受火害試體

SN0試驗後外觀如圖5-19所示，破壞位置主要約位於試體中段，由圖可觀察出保護層破壞之情形；混凝土剝落之方式為由箍筋以外之部分呈現片狀破裂，且由西面可觀察出裂縫延伸至試體之中上部分，SH0試驗後外觀如圖5-20所示，破壞位置主要約位於試體中段之下，並發現試體東、西與北面鋼骨翼板及主筋產生局部挫屈，且東北面之混凝土剝落延伸至試體上部，而南面之混凝土剝落則是往試體下部發展。CN0試驗後外觀如圖5-21所示，破壞位置主要約位於試體上段；由東北面發現主筋挫屈且將箍筋拉斷；西面之鋼骨翼板與西南面之主筋也可觀察出局部挫屈。CH0試驗後外觀如圖5-22所示，破壞位置主要約位於試體上部偏下方，並發現試體東北面主筋以及東面、北面之鋼骨翼板可觀察局部挫屈現象。

受火害試體

SN3試驗後外觀如圖5-23所示，破壞位置約位於試體中段，由西北面發現主筋與鋼骨翼板產生局部挫屈並拉斷箍筋；東南面主筋與東、南面鋼骨翼板亦產生局部挫屈，但挫屈程度不如西北面。SH3試驗後外觀如圖5-24所示，破壞位置約位於試體中段，由東北面發現主筋與東、北面鋼骨翼板產生局部挫屈；西南面主筋與西、南面鋼骨翼板亦產生局部挫屈，但其挫屈程度不如東北面。CN2試驗後外觀如圖5-25所示，破壞位置約位於試體中段，由圖發現東北面與西北面主筋，以及東面與北面鋼骨翼板產生局部挫屈；西南面與東南面主筋，以及西、南面之

鋼骨翼板產生局部挫屈。CH2試驗後外觀如圖5-26所示，破壞位置約位於試體中段偏下方，西北面主筋，以及西、北面之鋼骨翼板產生局部挫屈並將箍筋拉斷；東南面主筋，以及東、南面之鋼骨翼板亦產生局部挫屈，但其挫屈程度不如西北面。由以上試驗結果發現，受火害試體北面局部挫屈程度較嚴重，但南面混凝土保護層剝落範圍較大。此原因為受火害試體，高溫試驗中規畫北面為不受火面，其殘餘強度高於其餘三面。南面殘餘強度較低，因此載重試驗中混凝土保護層剝落之範圍較大。

5.2 參數影響與比較

5.2.1 高溫試驗

1. 不同混凝土強度之影響

不同混凝土強度之SN3與SH3試體斷面溫度分佈比較，如圖5-27所示。鋼骨溫度方面，鋼骨中心溫度、升溫速率兩者相近，惟外側鋼骨翼板測點試體SN3略高於試體SH3。混凝土溫度測點方面，試體SN3於100°C附近溫度急速上升，出現溫度平台後測點溫度緩緩上升；試體SH3則無明顯之溫度平台，溫度維持一定速率緩慢上升，兩者於加溫初期SN3高於SH3，但加溫60分鐘後之溫度與升溫速率大致相同。鋼筋溫度部分，受火面主筋測點之溫度試體SN3明顯大於試體SH3，可能是因為試體SN3之受火面角隅混凝土剝落，進而影響測點溫度。其餘測點兩者則無明顯差異。綜合以上可知，不同強度之混凝土，其熱傳性置之不同將會影響鋼骨鋼筋混凝土試體斷面之溫度分佈，但由試驗結果顯示，此變因並未造成顯著之影響。

2. 試體斷面幾何形狀之影響

斷面幾何形狀對柱試體表面保護層混凝土之剝落有顯著影響，就方柱而言，裂縫於角隅處相對較密集，且試體SN3受火面角隅處出現混凝土保護層剝落，其餘保護層混凝土大致完好；反之，圓形柱試體於高溫試驗中，未受防火棉包覆的部分，保護層混凝土皆嚴重剝落，並且可觀察到數根箍筋外露，導致溫度快速傳入試體內部，影響斷面之溫度分佈，故推測造成此情形之原因可能與試體內部熱應力分佈狀況有關。方形斷面試體，其熱應力集中於角隅，因此可觀察到角隅混

凝土剝落或是較高密度分佈之裂縫，而圓形斷面試體，熱應力平行於表面分佈，則沿平行於表面方向之混凝土皆受到徑向往外之合力，因此可觀察到表層混凝土沿平形受熱面方向劈裂成片狀剝落。

SH3與CH2之溫度歷時比較如圖5-28所示。以混凝土溫度為例，試體SH3近受火面之混凝土測點C3以及CH2之C2，其混凝土測點溫度CH2-C2大於SH3-C3，此差異可能為保護層狀態所致。但深度較深之混凝土測點SH3-C3與CH2-C2，其測點溫度為SH3-C3高於CH2-C2，可能之原因為SH3實際之受熱面積大於CH2。大致而言，混凝土內部溫度圓形柱與方形柱比較，其溫度之差異程度遠小於鋼筋溫度，顯示混凝土受高溫下其阻熱之特性。鋼骨溫度方面，近受火面之鋼骨翼板測點SH3-S5與CH2-S4，測點溫度CH2-S4高於SH3-S5，應是爆裂之保護層加速熱能進入圓形斷面。試體中心鋼骨測點SH3-S3與CH2-S3，測點溫度為SH3-S3高於CH2-S3，推測原因為另一受火面之面積方形斷面大於圓形斷面。由翼板測點SH3-S1與CH2-S1也可看出，其測點溫度則是SH3-S1高於CH2-S1，原因同上。鋼筋測點方面，由於圓柱保護層之剝落，圓形柱近受火面之鋼筋測點溫度皆明顯高於方形柱，如SH3-R4、SH3-R5與CH2-R3、CH2-R4。

5.2.2 載重試驗參數影響與比較

1. 火害後殘餘強度比較

火害後之殘餘強度比較如表5-12所示，而火害後之軸壓強度與應變比較如圖5-29至圖5-32所示。為方便比較，將試體分為四組系列：SN系列(包含SN0及SN3)、SH系列(包含SH0及SH3)、CN系列(包含CN0及CN2)、CH系列(包含CH0及CH2)，作為火害前後之對照比較。各試體之試驗結果簡述如下，試體SN系列之SN0軸壓強度為6309 kN，對應之峰值應變為0.0026，SN3殘餘強度為5185 kN，對應之峰值應變為0.016；試體SH系列之SH0軸壓強度為7084 kN，對應之峰值應變為0.0025，SH3殘餘強度為5171 kN，對應之峰值應變為0.014；試體CN系列之CN0軸壓強度為6334 kN，對應之峰值應變為0.0024，CN2殘餘強度為5061 kN，對應之峰值應變為0.017；試體CH系列之CH0軸壓強度為7275 kN，對應之峰值應變為0.0025，CH2殘餘強度為5376 kN對應之峰值應變為0.0065。

不同強度混凝土試體對殘餘強度折減程度之比較，如採強度較高混凝土之未

受火柱試體SH0及CH0，其軸壓軸壓強度平均約為7179 kN；採普通強度混凝土之柱試體SN0及CN0，其軸壓軸壓強度平均約為6321 kN。另外，採強度較高混凝土之火害後柱試體SH3及CH2，其殘餘強度平均約為5273 kN；使用普通強度混凝土之柱試體SN3及CN2，其殘餘強度平均約為5123 kN。對於試體火害後之殘餘強度折減，由以上結果可看出使用強度較高混凝土之柱試體，其火害前之軸壓強度大於採普通強度混凝土之柱試體，但火害後殘餘強度折減程度，強度較高混凝土試體則高於普通強度混凝土，其強度較高混凝土試體火害後殘餘強度折減為未受火之70%，而普通強度混凝土試體火害後殘餘強度僅折減為未受火之80%。

試體斷面形狀對於殘餘強度折減之影響方面，由表5-12可知。使用普通強度混凝土之試體SN3及試體CN2，其殘餘強度殘餘強度折減差距為2%；強度較高混凝土之試體SH3及試體CH2，其殘餘強度殘餘強度折減差距為1%，綜合以上可知，試體斷面形狀對於殘餘強度之折減並無明顯影響。

對應殘餘載重之峰值應變，於未受火試體中，強度較高及普通強度混凝土試體皆相當接近，平均為0.0025。受火害試體之峰值應變則大致落在0.014到0.017之間，但其中CH2試體峰值應變值為0.0065，不論與不受火試體或是受火害試體之峰值應變皆有明顯差距。

除此之外，本研究將參考黃政勳(2012)之4面受火試體載重試驗結果與本文之3面受火(方柱)與2面受火(圓柱)試體互相比較；4面受火試體載重試驗結果如表5-13所示。由表可知4面受火試體SN4之殘餘軸壓強度為4474 kN，試體SH4之殘餘軸壓強度為4878 kN，試體CN4之殘餘軸壓強度為4902 kN，試體CH4之殘餘軸壓強度為5001 kN。

4面受火試體與邊柱試體之殘餘強度折減如下所示，方形柱4面受火試體SN4殘餘強度折減為未受火之71%，試體SH4殘餘強度折減為未受火之69%。3面受火試體SN3殘餘強度折減為未受火之82%，試體SH3殘餘強度折減為未受火之73%。圓形柱4面受火試體CN4殘餘強度折減為未受火之77%，試體CH4殘餘強度折減為未受火之69%，2面受火試體CN2殘餘強度折減為未受火之80%，試體CH2殘餘強度折減為未受火之74%。由以上可知殘餘強度折減方面，除了試體SN3與SN4之殘餘強度折減相差11%外，其餘4面受火與邊柱試體殘餘強度折減差距在3%至

5%之間，4面受火試體之殘餘強度折減程度較高，顯示4面受火相較邊柱受熱方式，對於火害後之殘餘強度折減程度影響較嚴重。

2. 火害後殘餘剛度比較

殘餘剛度取法為，將軸壓強度與應變關係圖中0.05N及0.4N區段數據做迴歸分析，得到該區段數據之迴歸線斜率，此斜率即為所求之殘餘剛度，計算結果如表5-14所示。由表可知鋼骨鋼筋混凝土邊柱受火害後之殘餘剛度皆有大幅度折減，觀察四組系列(SN、SH、CN以及CH系列)之殘餘剛度可知，火害後試體之殘餘剛度皆為未受火試體之50%以下。由表亦發現方形斷面之SN系列及SH系列殘餘剛度平均折減為未受火試體之43%，而圓形斷面之CN系列及CH系列殘餘剛度平均折減為未受火試體之31%，顯示圓形斷面柱試體火害後殘餘剛度折損較嚴重；另外採用普通強度混凝土之SN系列殘餘剛度折減為未受火試體之47%，其殘餘剛度小於採用強度較高混凝土之SH系列殘餘剛度折減為未受火試體之39%，顯示使用強度較高混凝土之柱試體火害後殘餘剛度折損較嚴重。

3. 火害後韌性指標比較

韌性指標(Ductility Index)之計算方式如圖5-33所示， Δ_u 為軸壓強度與變位關係圖中70%軸壓強度與曲線之交點得到對應之變位， Δ_y 為鋼骨降伏時對應之變位，取法為材料試驗結果得到鋼骨降伏應變，由軸壓強度與應變比較圖中找出鋼骨降伏應變對應之軸壓強度，再由軸壓強度與變位關係圖找出對應之變位 Δ_y 。其中 Δ_y 與 Δ_u 之比值 Δ_u/Δ_y 即為韌性指標 μ ，各試體之韌性指標計算結果如表5-15所示。其中試體SN系列SN0之韌性指標為6.2，試體SN3之韌性指標為13.9，因此火害前後韌性指標比值2.2。試體SH系列SH0之韌性指標為4.4，試體SH3之韌性指標為13.6，火害前後韌性指標比值3.1。試體CN系列CN0之韌性指標為4.4，CN3之韌性指標為14.0，火害前後韌性指標比值3.1。試體CH系列CH0之韌性指標為4.2，CH3之韌性指標為10.0，火害前後韌性指標比值2.4。

由以上可知，火害後試體之韌性指標皆有不同程度之增加，推測原因是由於試體受火害使得混凝土保護層因高溫而強度折減或是剝落，使試體軸壓強度僅由核心混凝土以及鋼骨、鋼筋共同作用，此結果導致鋼骨與鋼筋提供強度之比例增加，使試體偏向韌性行為，因此於載重試驗可觀察到火害後試體相較於未受火害

試體其提升之韌性。



第六章 分析模式與結果討論

本章節探討分析SRC柱受火害後之殘餘軸壓強度；由於SRC構件為鋼骨、鋼筋與混凝土等材料組成，而材料因火害造成強度折減各不相同。首先介紹火害後各材料之殘餘強度折減公式，再進行基本假設，分析之方法與步驟，最後將其分析結果與實驗比較。

6.1 材料性質與參數

6.1.1 火害後混凝土材料性質

楊旻森等人(1995)，提出火害後混凝土應力應變曲線及火害後剩餘抗壓強度與火害最高溫度之關係式。由式6-1至式6-3可知混凝土於火害最高溫400°C之情況其殘餘強度將折減為常溫抗壓強度之62%，而火害最高溫達600°C之下，其殘餘強度將折減為常溫抗壓強度之24%，如圖6-1所示。

$$25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$f_{c,T} = f'_c \times [1.02 - 0.001 \times T] \leq f'_c \quad (6-1)$$

$$400^{\circ}\text{C} < T \leq 600^{\circ}\text{C}$$

$$f_{c,T} = f'_c \times [1.38 - 0.0019 \times T] \quad (6-2)$$

$$600^{\circ}\text{C} < T$$

$$f_{c,T} = f'_c \times [0.66 - 0.0007 \times T] \geq 0.05 f'_c \quad (6-3)$$

6.1.2 火害後鋼筋材料性質

楊旻森等人(1995)提出鋼筋受火害後之殘餘降伏強度公式。由式6-4至式6-6可知鋼筋火害後將回復相當程度之強度，即便受火害之最高溫高於750°C，鋼筋之降伏強度依然恢復至常溫強度之73%，如圖6-2所示。

$$T \leq 500^{\circ}\text{C}$$

$$f_{yr,T} = f_{yr} \quad (6-4)$$

$$500^{\circ}\text{C} < T \leq 750^{\circ}\text{C}$$

$$f_{yr,T} = f_{yr} \times (-0.108 \times T + 154.217) \times 10^{-2} \quad (6-5)$$

$$750^{\circ}\text{C} < T$$

$$f_{yr,T} = 0.73 f_{yr} \quad (6-6)$$

6.1.3 火害後鋼骨材料性質

Han (2002)提出鋼骨受火害後之殘餘降伏強度公式。由式6-7至式6-8可知鋼材受火害最高溫於400°C以下時強度將完全回復。本文之高溫試驗終止條件為鋼骨之最高溫達到550°C，在此高溫下鋼骨亦可回復約96%之強度，可知鋼骨之強度折減程度較輕微，於火害後可為SRC構件提供相當於未受火害之強度，如圖6-3所示。

$$T \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$f_{ys,T} = f_{ys} \quad (6-7)$$

$$400^{\circ}\text{C} < T$$

$$f_{ys,T} = f_{ys} \times [1 + 2.33 \times 10^{-4} (T - 20) - 5.88 \times 10^{-7} (T - 20)^2] \quad (6-8)$$

6.2 火害後殘餘強度分析

6.2.1 分析基本假設

1. 平面保持平面
2. 火害後試體之混凝土保護層強度不計
3. 分割之混凝土溫度區間內部溫度視為均溫

4. 混凝土溫度分別取各區間內所包含測點溫度之平均。
5. 鋼骨溫度分別取四片翼板及其相鄰之腹板之測點溫度平均。
6. 鋼筋溫度分別取主筋測點溫度為平均溫度。

6.2.2 溫度區間劃分

溫度區間之劃分參考林草英(2000)之包覆十字型鋼骨 SRC 柱火害後之柱斷面溫度分佈曲線，並與陳誠直等人(2012)所建立之有限元素模型分析結果比較，。結果顯示在 SRC 柱在 4 面受火情況下，林草英與陳誠直等人建立之有限元素模型分析結果相近。因此本文參考陳誠直等人邊柱受火之 SRC 柱斷面溫度分佈分析結果，如圖 6-4、圖 6-7 所示，以近似方法劃分邊柱受火之 SRC 邊柱斷面溫度區間。

劃分方法基於章節 6.2.1 之假設，火害後混凝土保護層視為已失去強度，分析不計箍筋外之混凝土保護層，殘餘強度之計算也僅考慮箍筋內之材料強度。本研究參考 SRC 邊柱之有限元素模型分析結果，分別劃分方形柱與圓形柱之溫度區間，配合邊柱受火情形之對稱性，分割時考慮試體斷面之 1/2 模型，如圖 6-5 與 6-8 所示。其中方形柱分別由縱向及橫向方向分為 5 等分，等溫線考慮熱由受火面傳入，溫度向不受火面遞減。圓形柱則依縱向分為五等分，考慮圓柱 2 面受火之情形，以圓弧形等溫線模擬試體斷面之溫度分佈。

平均溫度之取法方面，鋼骨、鋼筋、混凝土之間略有不同，混凝土分割為若干溫度區間，每區間皆以包含於內之測點溫度取平均，如圖 6-6 與 6-9 所示；鋼骨以鋼骨中心為界分為四部分，每部分以腹板及翼板之測點溫度取平均；鋼筋則以主筋測點之溫度為鋼筋斷面平均溫度。

6.2.3 分析方法

1. 試體各點之最高溫度採用高溫試驗得到之斷面溫度分佈數據。
2. 將試體斷面劃分成若干溫度區間，並將各區間內包含之測點溫度平均作為此區間之平均溫度。

3. 將各區間之平均溫度分別帶入混凝土火害後材料性質公式 6-1 至式 6-3，得到混凝土因高溫而折減之強度。分別乘上各區間面積後即可算出各區間混凝土提供之殘餘強度。
4. 配合章節 6.2.2 所述之方法求出將鋼骨與鋼筋之平均溫度。
5. 將鋼骨與鋼筋之平均溫度代入鋼骨與鋼筋火害後材料性質公式 6-4 至 6-8，得到鋼骨與鋼筋之因高溫折減之強度，乘上面積後即可算出鋼骨與鋼筋提供之殘餘強度。
6. 利用以下公式將所有部份之強度疊加，計算出預測之試體殘餘強度。
7.
$$N_{fi,calc} = \sum 0.85f_{c,T}A_{c,i} + \sum f_{ys,T}A_{s,i} + \sum f_{yr,T}A_{r,i} \quad (6-9)$$

6.3 分析結果與討論

由6-1表可知，分析結果與實驗值相符，其中使用普通強度混凝土之火害後SRC柱殘餘強度之預測較不準確，而使用強度較高混凝土之火害後SRC柱殘餘強度之預測與實驗值相當接近。4支試體中CN2之分析結果與實驗值相差較大，原因由第五章試驗所示，試體CN2於高溫試驗發生保護層爆裂脫落，影響包覆於表面之防火棉，以致試體表面與防火棉產生縫隙而使熱由縫隙傳入，因此CN2之由高溫試驗結果可知其不受火面產生不合理之高溫，此結果顯著影響斷面之溫度分佈而使分析假設之溫度分佈情形不適用於CN2。

由分析之結果亦可知，SRC合成結構包含鋼骨、鋼筋與混凝土，各材料提供強度之百分比如圖6-10、圖6-11所示。火害前各材料提供殘餘強度之百分比如混凝土提供約57%之強度，其中混凝土強度較高之試體提供強度之百分比也較高；鋼骨則提供約35%之強度，鋼筋則為8%；火害後各材料提供殘餘強度之百分比如混凝土提供約31%之強度，其中混凝土強度較高之試體提供強度之百分比也較高；鋼骨則提供約56%之強度，鋼筋則為13%，由此現象得知包覆型SRC柱表面混凝土保護層受高溫影響而剝落或因高溫導致強度折減，其內部鋼骨由於受到混凝土之包覆可降低受火害影響之程度，並仍能提供一定強度，顯示包覆型SRC柱優異之耐火性能，實為SRC合成結構之好處。

第七章 結論與建議

7.1 結論

1. 圓形柱於高溫試驗初中期約一小時內皆觀測到爆裂之情形，受火面混凝土保護層幾乎完全剝落，然而方形柱僅於角隅處出現混凝土保護層剝落，由於加熱中於高溫爐內火會沿阻抗較小的面延伸或包覆，圓形柱之阻抗較小可能為其爆裂原因之一。試體斷面幾何形狀為 SRC 柱火害行為之重要影響參數。
2. 不同混凝土強度對於柱試體斷面溫度分佈與升溫速率之影響，由試驗結果可知並無明顯影響。
3. 由於試體非 4 面受火，高溫下試體斷面產生不均勻溫度分佈，造成熱膨脹量差異，此膨脹量差異由位移計量測記錄，根據數據計算柱端板間相對轉角，可知試體產生撓曲現象。
4. 由於鋼材熱導性良好，且觀測到鋼骨腹板之測點溫度皆高於鄰近混凝土測點，顯示試體中心升溫主要貢獻來源為鋼骨。其原因為鋼骨之熱傳導係數大於混凝土，於熱能傳遞過程中將產生蓄熱、溫度上升之現象。
5. 火害後殘餘強度折減程度，為強度較高混凝土試體高於普通強度混凝土。強度較高混凝土試體火害後殘餘強度折減為未受火之 70%，而普通強度混凝土試體火害後殘餘強度折減為未受火之 80%。至於試體斷面形狀對於殘餘強度之折減則無明顯影響。
6. 比較火害前後試體之軸壓強度-位移曲線圖可知，未受火害試體於加載時軸力快速上升，並於達到最大軸壓強度後出現驟降之情形；然而火害後試體，加載時軸力上升較緩慢，且達最大軸壓強度後並無驟降之情形，整體曲線之趨勢與未受火害試體相比強度較低且較平滑。

7. 包覆型 SRC 柱表面混凝土保護層受高溫影響將折減其強度，但內部鋼骨由於混凝土之包覆可降低火害影響，並由分析之結果可知，火害後柱試體之軸壓殘餘強度約 52% 為鋼骨貢獻，其顯示包覆型 SRC 柱優異之防火性能，實為 SRC 合成結構之好處。

7.2 建議

1. 本文之 3 面受火試體，其未受火面包覆陶瓷纖維防火棉，且試體置於高溫爐內，但許多文獻指出不受火面觀測到有水汽滲出，因此建議未受火面置於外接觸室溫，並可觀察試體水汽移動。
2. 本文進行之 SRC 柱高溫試驗並無設置剪力釘，而剪力釘對於高溫試驗之影響尚缺乏相關研究成果，應可做進一步之研究。
3. 由實驗結果得知圓形柱保護層較易爆裂，對於防火設計，圓形柱之保護層厚度是否須修正可繼續深入探討。



參考文獻

- AISC. (2010). "Specification for structure steel buildings." American institute of steel construction, Chicago.
- Ali, F., Nadjai, A., Silcock, G., Abu-Tair, A. (2004). "Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns." *Fire Safety Journal*, 39(6), 433-445.
- BS 476-20 (1987). "Fire tests on building materials and structures, Part 20, Method of determination of the fire resistance of elements of construction (general principles)." *BS 476-20:1987*, British Standards Institution, London.
- BS 476-21 (1987). "Fire tests on building materials and structures, Part 21, Method for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction." *BS 476-21:1987*, British Standards Institution, London.
- Ellobody, E., Young, B. (2010). "Investigation of concrete encased steel composite columns at elevated temperatures." *Thin-Walled Structures*, 48(8), 597-608.
- Franssen, J. M., Dotreppe, J. C. (2003). "Fire tests and calculation methods for circular concrete columns." *Fire Technology*, 39(1), 89-97.
- Han, L. H., Yang, Y. F., Yang, H., Huo, J. S. (2012). "Residual strength of concrete-filled RHS columns after exposure to the ISO-834 standard fire." *Thin-Walled Structures*, 40(12), 991-1012.
- Huang, Z. F., Tan, K. H., Toh, W. S., Phng, G. H. (2008). "Fire resistance of composite columns with embedded I-section steel-effects of section size and load level." *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 312-325.
- ISO 834 (1999). "Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements." *International Standard ISO 834*, Geneva.
- Lie, T. T. (1994). "Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(5), 1489-1509.
- Mao, X. Y., Kodur, V. K. R. (2011). "Fire resistance of concrete encased steel column under 3- and 4-side standard heating." *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 270-280.
- Raut, N. K., Kodur, V. K. R. (2011). "Response of high strength concrete columns

under design fire exposure.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 67(4), 69-79.

UL 263 (2003). “Fire Tests of building construction and materials.” Underwriters Laboratories Inc.

Yu, J. T., Lu, Z. D., Xie, Q. (2007). “Nonlinear analysis of SRC columns subjected to fire.” *Fire Safety Journal*, 42(1), 1-10.

陳舜田、林英俊、楊旻森(1995)，「火害後鋼筋混凝土桿件之扭力行為」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，國立台灣工業技術學院營建工程技術系，民國八十四年。

沈得憲、林英俊(1996)，「混凝土結構物火害後安全性能評估方法之探討」，內政部建築研究所研究報告，民國八十五年。

林草英(2000)，「雙 H 鋼骨鋼筋混凝土柱火害後之強度評估」，國家科學委員會專題研究計畫報告 NSC89-2211-E011-010。

內政部營建署(2004)，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計與解說」。

洪敏盛(2006)，「火害後混凝土受壓應力應變曲線與鋼筋混凝土短梁之抗剪強度研究」，國立成功大學建築學系碩士論文，許茂雄指導。

張雲妃(2006)，「火害後雙軸彎曲鋼筋混凝土柱之試驗與分析」，國立成功大學建築學系博士論文，許茂雄指導。

賴政忠(2006)，「鋼筋混凝土梁柱構件於火害中強度評估之研究」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，方一匡指導。

黃彰斌、林誠興、徐瑞祥(2006)，「鋼筋混凝土梁受火害之溫度分佈與殘餘強度分析」，技術學刊，第二十一卷，第二期，pp. 175-188，民國九十五年。

徐瑞祥、林誠興、黃彰斌(2004)，「鋼筋混凝土樑受火害後之剪力強度數值模擬」，中華民國建築學會「建築學報」，第四十八期，pp. 59-73，民國九十三年。

經濟部標準檢驗局(2010)，「建築物構造部分耐火試驗法」，中華民國國家標準 CNS12514。

李其忠(2010)，「鋼骨鋼筋混凝土構造火害後材料性質之研究-以自充填混凝土為例 3/5」，內政部建築研究所研究成果報告。

張焱、徐志勝(2010) 「含濕量對混凝土結構抗火性能試驗影響的探討」，火災科學，第十九卷，第四期，pp. 176-182，民國九十九年。

陳誠直、趙文成(2011)，「鋼骨鋼筋混凝土高溫材料性質之研究」，內政部建築研究所研究成果報告。

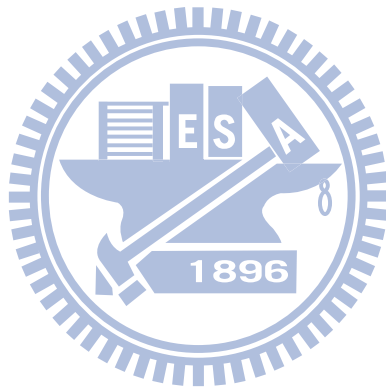


表 2-1 承重柱耐火規定與評定

項目	CNS 12514	ISO 834	UL 263
升溫曲線	標準升溫曲線	標準升溫曲線	須於規定時間內達特定溫度
試體受熱長度	$\geq 3 \text{ m}$	無要求	$\geq 2.7 \text{ m}$
載重試驗破壞基準	(1) 最大軸向壓縮量超過 $h/100$ (2) 最大軸向壓縮速率超過 $3h/1000$	(1) 最大軸向壓縮量超過 $h/100$ (2) 最大軸向壓縮速率超過 $3h/1000$	(1) 以不同試驗分類要求。於設計之防火時效內需維持承載能力

表 3-1 試體規劃

試體編號	柱斷面形狀	混凝土強度	受熱面
SN3	方	普通	3
SH3	方	高	3
CN2	圓	普通	2
CH2	圓	高	2
SN0	方	普通	N/A
SH0	方	高	N/A
CN0	圓	普通	N/A
CH0	圓	高	N/A

表 3-2 鋼筋拉伸試驗

鋼筋規格	降伏強度 (MPa)	抗拉強度 (MPa)
SD 420W	545	705

表 3-3 鋼骨拉伸試驗

鋼骨規格	降伏強度(MPa)	抗拉強度(MPa)
RH 250×125×6×9	362	454

表 3-4 混凝土抗壓試驗

齡期	SN&CN 系列 MPa (kgf/cm ²)	SH&CH 系列 MPa (kgf/cm ²)
28 天	40 (412)	49 (498)
84~129 天 (高溫試驗)	39 (401)	50 (510)
349~384 天 (載重試驗)	38 (389)	46 (469)

表 5-1 試體 SN3 高溫試驗結果

試體編號:SN3	
試驗時間(hr.)	4.6
混凝土中心相對濕度 (% RH)	97.7
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	6.74
鋼筋是否外露	否
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	輕微
試驗終止時爐溫(°C)	1074
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	263
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	307
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S5 溫度(°C)	551
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	296
試驗終止時包防火棉側主筋測點 R2(°C)	415
試驗終止時受火面主筋測點 R5(°C)	568
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	244
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	249
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	316
試驗終止時受火面延對角向外 2/3 處混凝土測點 C4(°C)	358

表 5-2 試體 SH3 高溫試驗結果

試體編號:SH3	
試驗時間(hr.)	5
混凝土中心相對濕度 (% RH)	86
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	6.40
鋼筋是否外露	否
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	輕微
試驗終止時爐溫(°C)	1170
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	244
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	328
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S5 溫度(°C)	526
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	309
試驗終止時包防火棉側主筋測點 R2(°C)	419
試驗終止時受火面主筋測點 R5(°C)	466
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	204
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	287
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	335
試驗終止時受火面延對角向外 2/3 處混凝土測點 C4(°C)	382

表 5-3 試體 CN2 高溫試驗結果

試體編號:CN2	
試驗時間(hr.)	4
混凝土中心相對濕度 (% RH)	9.5
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	6.50
鋼筋是否外露	是
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	嚴重
試驗終止時爐溫(°C)	1143
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	440
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	372
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	621
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	1018
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R2(°C)	785
試驗終止時受火面主筋測點 R5(°C)	1145
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	180
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	366
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	407

表 5-4 試體 CH2 高溫試驗結果

試體編號:CH2	
試驗時間(hr.)	5
混凝土中心相對濕度 (% RH)	83.5
試驗終止時最大軸向伸長量(mm)	5.33
鋼筋是否外露	是
混凝土外觀顏色變化	淺黃
爆裂程度	嚴重
試驗終止時爐溫(°C)	1173
試驗終止時包防火棉側鋼骨翼板中心測點 S2 溫度(°C)	200
試驗終止時鋼骨中心測點 S3 溫度(°C)	303
試驗終止時鋼骨翼板外端測點 S4 溫度(°C)	550
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R3(°C)	994
試驗終止時包防火棉側箍筋測點 R2(°C)	260
試驗終止時受火面主筋測點 R4(°C)	608
試驗終止時包防火棉側延對角向外 1/3 處混凝土測點 C1(°C)	193
試驗終止時包防火棉側延對角向外 2/3 處混凝土測點 C2(°C)	314
試驗終止時受火面延對角向外 1/3 處混凝土測點 C3(°C)	400

表 5-5 試體 SN3 溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	278 min.
S1	119.4	167.3	302.9	373.2	402.8	449.5
S2	35.7	89.3	113.2	131.3	199.5	259.6
S3	42.5	98.7	122.9	162.8	243.8	306.7
S4	54.0	106.9	136.0	198.3	293.8	361.3
S5	120.3	149.3	315.8	408.1	491.5	551
R1	159.4	302.0	471.7	558.5	634.0	681.2
R2	110.7	125.4	187.5	259.4	341.7	411.7
R3	37.9	91.0	114.0	146.9	229.9	292.6
R4	109.6	205.7	391.2	497.6	552.1	555.4
R5	117.3	133.8	263.2	355.3	489.1	564.7
C1	104.8	118.4	109.8	127.8	187.9	240.9
C2	112.1	118.5	111.9	132.0	186.8	245.9
C3	75.6	115.8	116.9	151.4	246.0	312.6
C4	104.2	119.6	125.0	176.1	286.1	355.7
平均爐溫	850.9	943.2	1044.3	1105.7	1139.4	1171.8

表 5-6 試體 SH3 溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	300 min.
S1	115.3	126.8	215.3	293.4	382.6	477.6
S2	46.3	115.6	115.6	129.1	173.0	244.7
S3	40.2	99.3	121.2	163.3	238.0	327.8
S4	60.5	112.9	141.2	207.0	296.8	394.3
S5	117.3	129.0	220.8	318.4	420.8	525.6
R1	138.8	236.9	443.7	525.2	592.1	663.4
R2	58.9	119.5	158.5	245.5	332.4	419.8
R3	33.4	70.2	112.6	141.8	213.4	309.2
R4	144.2	260.9	462.8	557.9	635.9	710.5
R5	92.8	116.7	230.4	286.7	375.3	466.1
C1	31.3	28.5	81.1	103.2	138.0	204.1
C2	34.7	81.7	119.6	141.9	202.3	287.0
C3	116.1	118.3	117.7	161.4	242.8	335.6
C4	99.4	118.4	128.6	191.4	284.9	382.7
平均爐溫	840.7	946.2	1047.4	1104.7	1139.0	1170.9

表 5-7 試體 CN2 溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)				
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.
S1	109.2	144.4	283.1	409.8	551.2
S2	30.5	52.5	138.1	287.3	440.8
S3	37.2	72.8	131.1	228.9	372.4
S4	111.8	204.2	380.4	501.6	523.5
R1	37.9	104.8	228.1	374.7	621.1
R2	34.7	62.3	353.1	653.2	784.5
R3	293.6	614.0	831.2	940.6	1018.5
R4	102.1	113.3	214.5	331.4	468.5
C1	30.6	47.8	70.8	103.9	179.8
C2	47.2	78.5	124.9	222.2	365.5
C3	81.8	97.5	134.6	247.7	407.2
平均爐溫	837.6	943	1041.0	1094.3	1142.6

表 5-8 試體 CH2 溫度歷時

測點溫度 (°C)	時程(min.)					
	30 min.	60 min.	120 min.	180 min.	240 min.	300 min.
S1	60.4	108.8	149.9	212.6	277.5	354.8
S2	29.7	46.0	105.0	136.6	155.9	201.1
S3	38.5	80.0	115.8	165.9	230.0	302.8
S4	119.3	131.8	253.3	358.6	456.3	550.4
R1	29.6	50.2	105.9	136.1	167.4	227.1
R2	36.6	64.1	123.3	161.3	192.1	261.7
R3	228.5	502.1	745.4	865.4	948.0	994.8
R4	117.8	202.7	336.2	425.7	517.9	609.2
C1	28.8	47.1	105.3	130.9	149.1	194.0
C2	36.6	97.3	106.2	152.2	223.3	315.3
C3	109.9	110.3	123.1	209.0	305.5	401.3
平均爐溫	878.1	964.0	1049.5	1117.7	1151.6	1030.5

表 5-9 載重試驗結果

Specimen	$N_{unfi,test}$ (kN)	$N_{fi,test}$ (kN)	ε_N	$0.7N_{unfi,test}$ (kN)	$0.7N_{fi,test}$ (kN)	$\varepsilon_{0.7}$	破壞 位置
SN0	6309	-	0.0026	4416	-	0.022	中
SH0	7084	-	0.016	4959	-	0.037	中下
CN0	6334	-	0.0025	4434	-	0.015	上
CH0	7275	-	0.014	5093	-	0.035	中上
SN3	-	5185	0.0024	-	3629	0.016	中
SH3	-	5171	0.017	-	3620	0.033	中
CN2	-	5061	0.0025	-	3542	0.017	中
CH2	-	5376	0.0065	-	3763	0.028	中

表 5-10 規範預測常溫下 SRC 柱試體軸壓強度與實驗值比較

Specimen	SRC Code (2004)			AISC-LRFD (2010)	
	(1)	(2)	(1)	(3)	(1)
	$N_{unfi,test}$ (kN)	$N_{unfi,code}$ (kN)	$\frac{(1)}{(2)}$	$N_{unfi,code}$ (kN)	$\frac{(1)}{(3)}$
SN0	6308	6191	1.09	6705	0.94
SH0	7085	6853	1.03	7446	0.95
CN0	6335	6092	1.04	6563	0.97
CH0	7276	6734	1.08	7276	1.00
AVG	-	-	1.06	-	0.97

表 5-11 高溫試驗時試體軸向變形與柱端板間相對轉角

Specimen	火害中最大 軸向變位 (mm)	火害中最大 柱端板間相 對轉角(rad)	火害延時 (min.)
SN3	6.74	0.125	280
SH3	6.40	0.096	300
CN2	6.50	0.113	240
CH2	5.33	0.117	300

表 5-12 試體殘餘強度比較

Specimen	$N_{unfi,test}$ (kN)	$N_{fi,test}$ (kN)	Residual Strength Ratio, RSR $\frac{N_{fi,test}}{N_{unfi,test}}$
SN0	6309	-	0.82
SN3	-	5185	
SH0	7084	-	0.73
SH3	-	5171	
CN0	6334	-	0.80
CN2	-	5061	
CH0	7275	-	0.74
CH2	-	5376	

表 5-13 4 面受火試體殘餘強度比較(黃政勳 2012)

Specimen	$N_{unfi,test}$ (kN)	$N_{fi,test}$ (kN)	Residual Strength Ratio, RSR $\frac{N_{fi,test}}{N_{unfi,test}}$
SN0	6309	-	0.71
SN4	-	4474	
SH0	7084	-	0.69
SH4	-	4878	
CN0	6334	-	0.77
CN4	-	4902	
CH0	7275	-	0.69
CH4	-	5001	

表 5-14 試體殘餘剛度比較

Specimen	0.05 $N_{unfi,test}$ (kN)	0.05 $N_{fi,test}$ (kN)	0.4 $N_{unfi,test}$ (kN)	0.4 $N_{fi,test}$ (kN)	$EA_{unfi,test}$ (MN)	$EA_{fi,test}$ (MN)	$\frac{EA_{fi,test}}{EA_{unfi,test}}$
SN0	315	-	2524	-	3182	-	0.47
SN3	-	259	-	2074	-	1501	
SH0	354	-	2834	-	3776	-	0.39
SH3	-	259	-	2069	-	1480	
CN0	317	-	2534	-	3520	-	0.30
CN2	-	253	-	2025	-	1058	
CH0	364	-	2910	-	3700	-	0.31
CH2	-	269	-	2151	-	1155	

表 5-15 試體殘餘韌性比較

Specimen	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	韌性指標		$\frac{\mu_{fi,test}}{\mu_{unfi,test}}$
			$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$		
			$\mu_{unfi,test}$	$\mu_{fi,test}$	
SN0	5.53	34.32	6.2	-	2.2
SN3	3.81	52.84	-	13.9	
SH0	5.82	25.53	4.4	-	3.1
SH3	3.8	51.72	-	13.6	
CN0	5.82	25.81	4.4	-	3.1
CN2	3.5	48.88	-	14.0	
CH0	6.01	25.4	4.2	-	2.4
CH2	4.5	44.85	-	10.0	

表 6-1 SRC 柱殘餘強度分析值與實驗值比較

Specimen	$N_{fi,test}$ (kN)	$N_{fi,calc}$ (kN)	$\frac{N_{fi,test}}{N_{fi,calc}}$
SN3	5185	4599	1.13
SH3	5171	4908	1.05
CN2	5061	4328	1.17
CH2	5376	5005	1.07

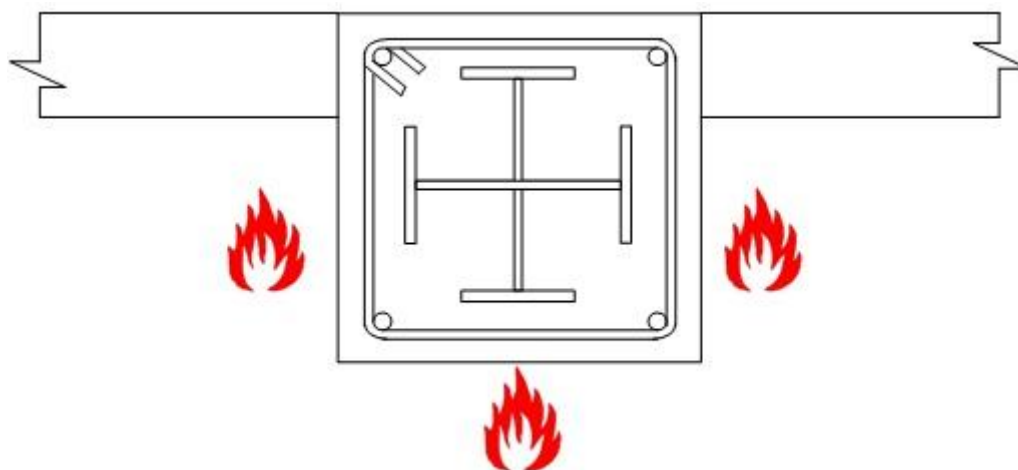


圖 3-1 方形邊柱 3 面受火示意圖

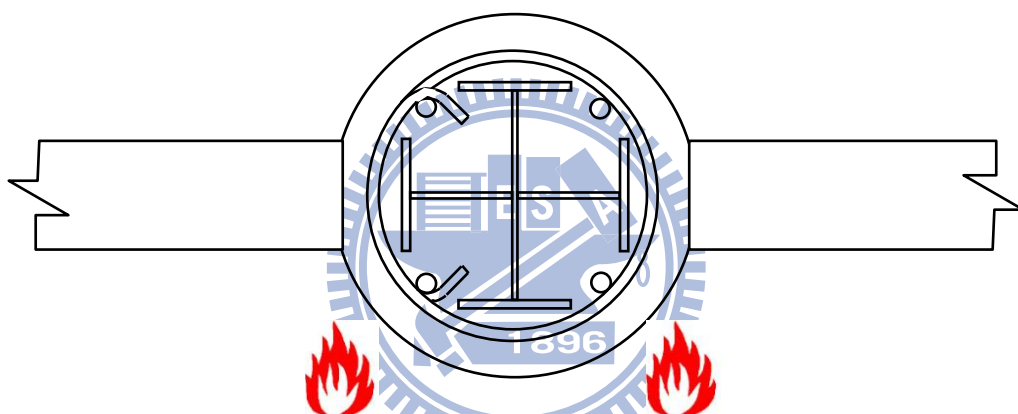
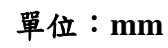


圖 3-2 圓形邊柱 2 面受火示意圖



RH 250×125×6×9

40 15

360

360

單位：mm

圖 3-4 方形斷面設計圖

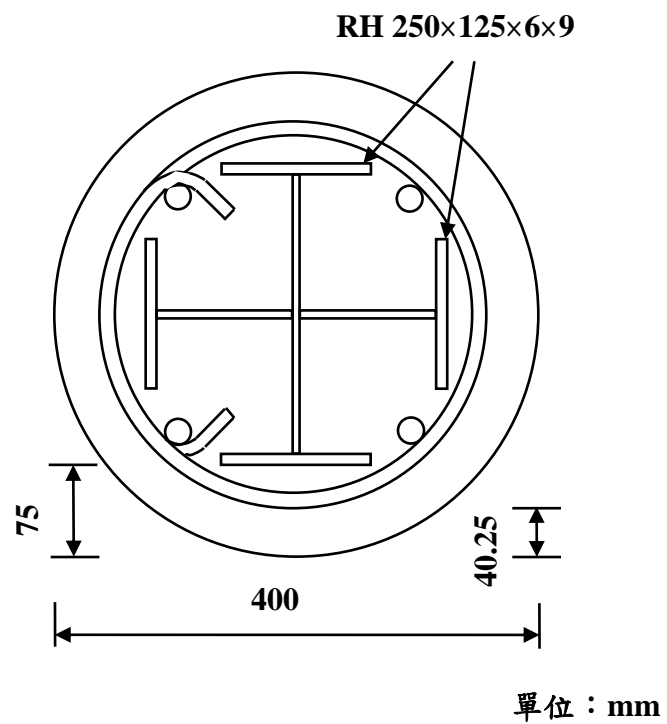


圖 3-5 圓形斷面設計圖



(a)鋼柱設計圖

(b)箍筋設計圖

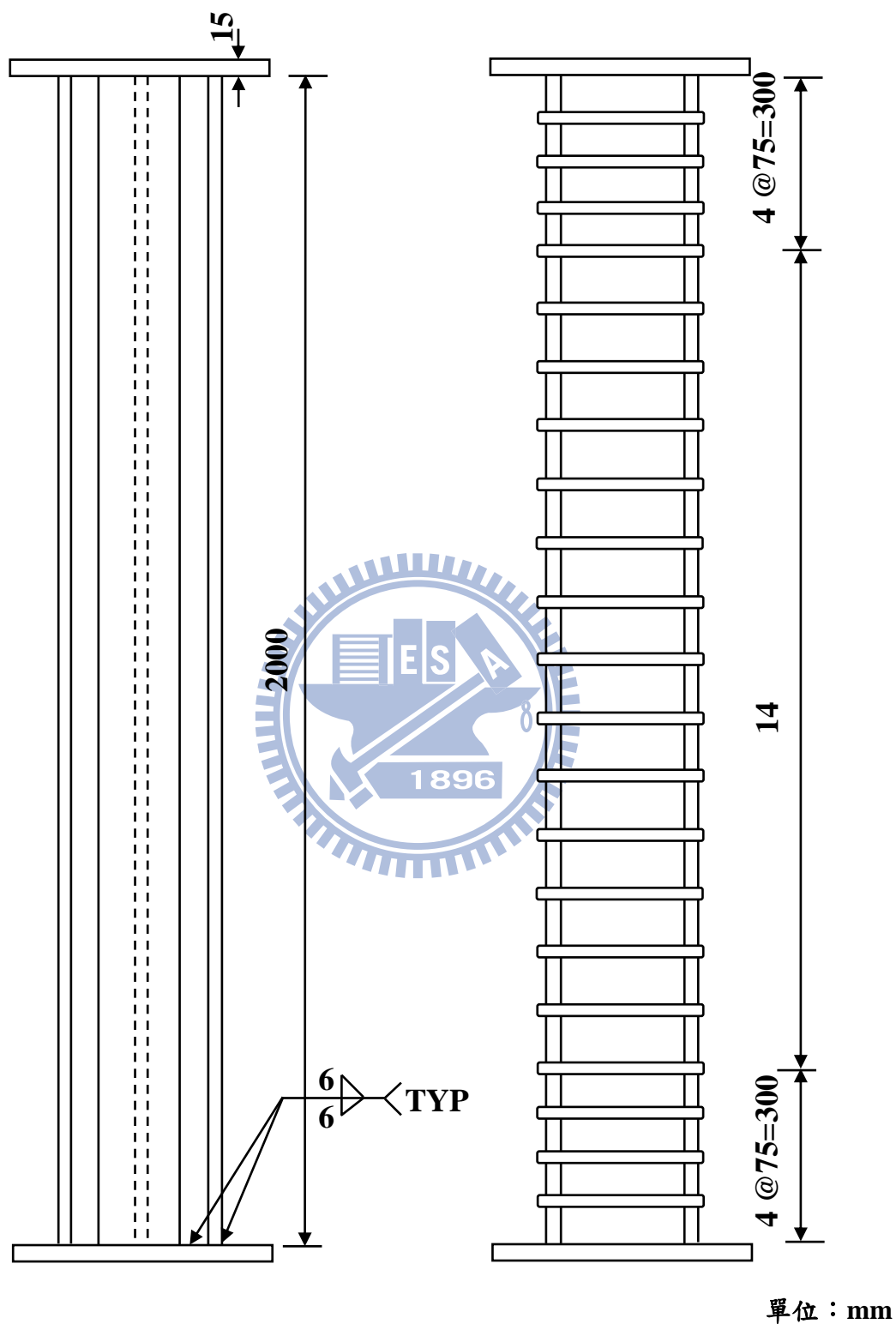


圖 3-6 柱試體設計圖

(a) 方形斷面



(b) 圓形斷面



(c) 試體灌漿



圖 3-7 柱試體施工照片

(d)圓柱試體



(e)試體拆模



圖 3-7 柱試體施工照(續)

(f)防火棉包覆示意圖



圖 3-7 柱試體施工照(續)



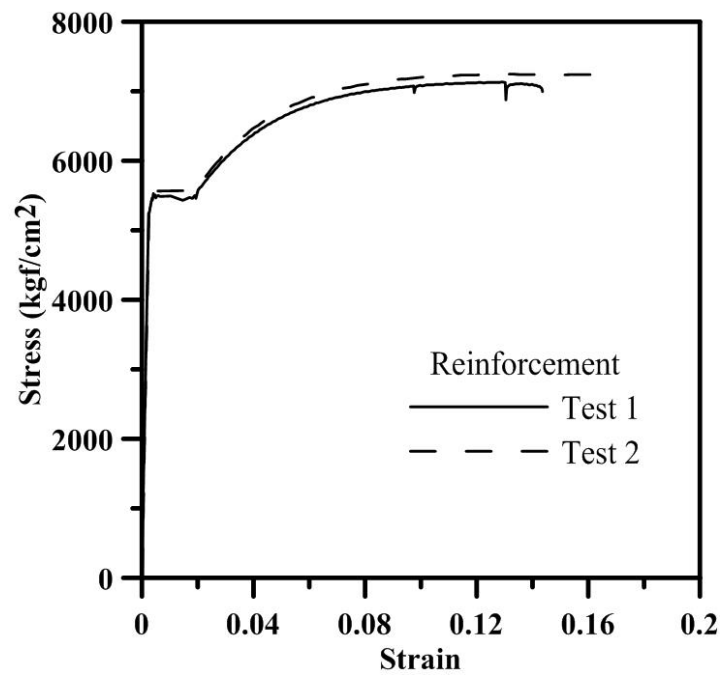


圖 3-8 鋼筋拉伸應力應變曲線



圖 3-9 小型複合高溫爐

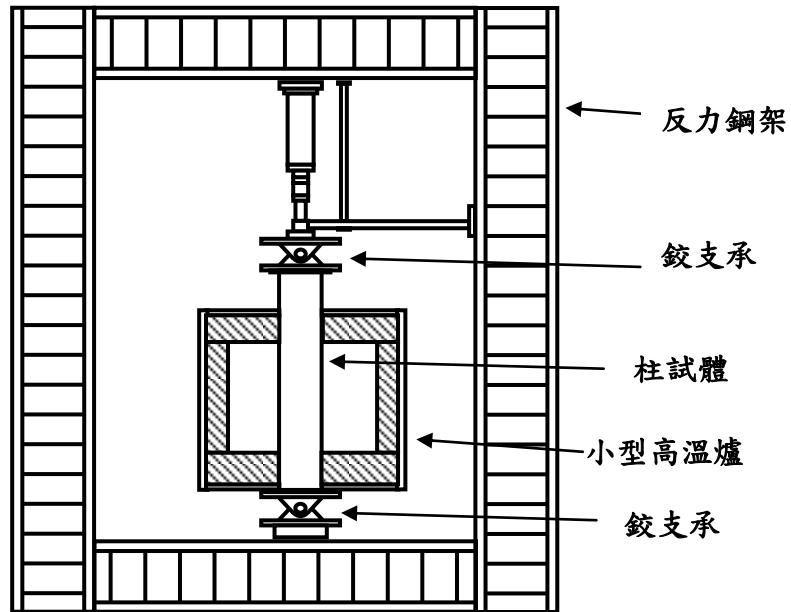


圖 3-10 高溫試驗設置示意圖

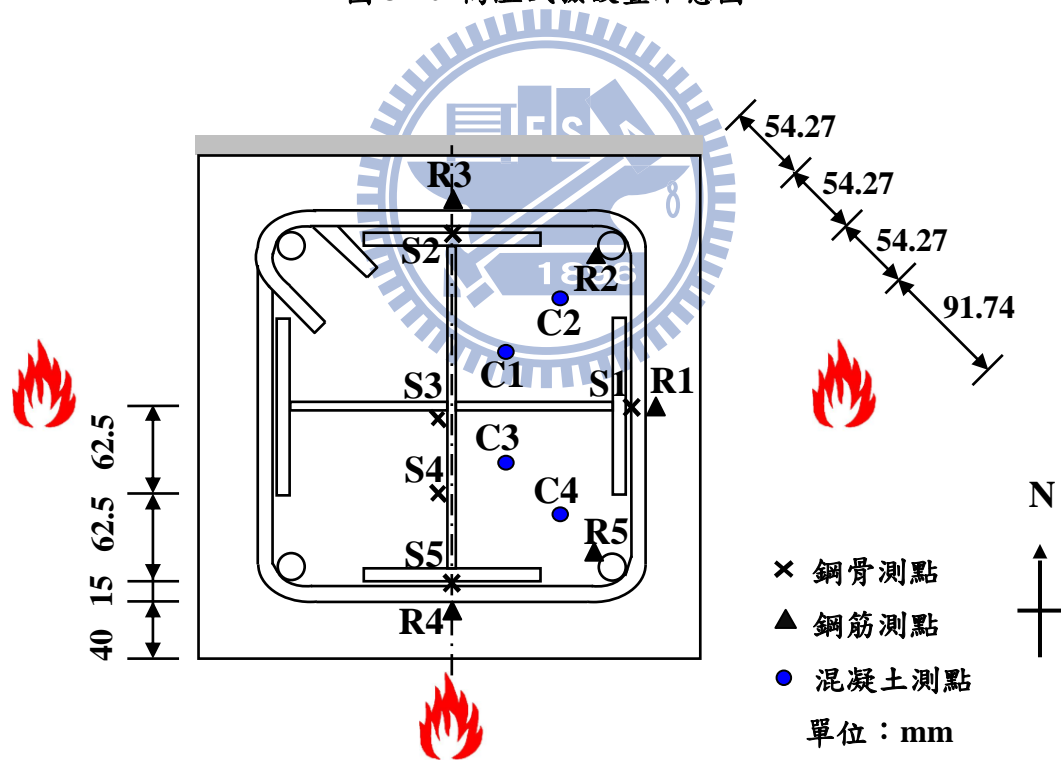


圖 3-11 方形 SRC 邊柱熱電偶點位配置圖

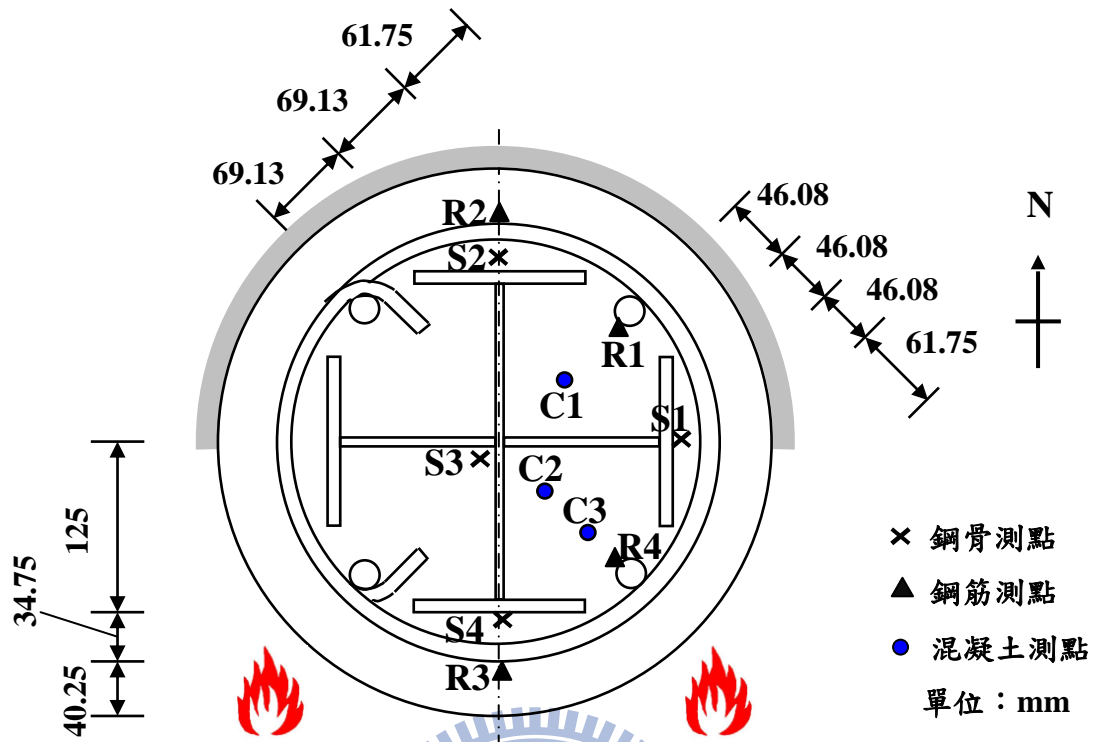


圖 3-12 圓形 SRC 邊柱熱電偶點位配置圖



圖 3-13 柱頂位移計架設

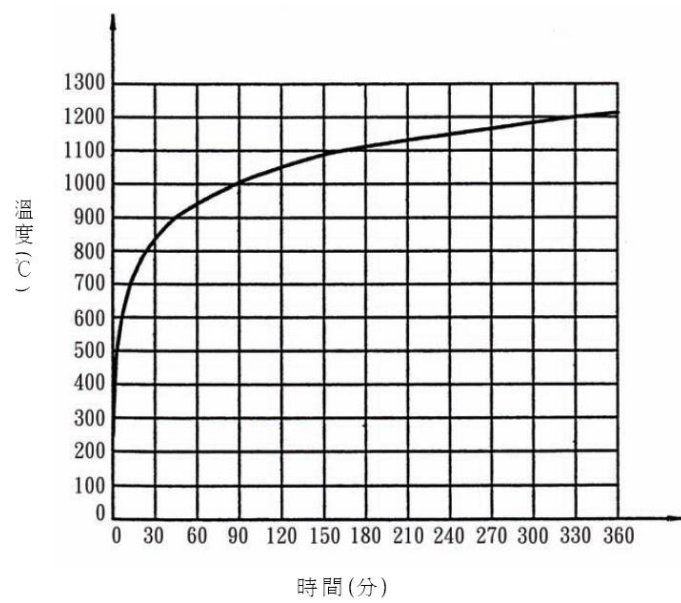


圖 3-14 CNS 12514 標準升溫曲線





圖 4-1 30MN-MTS 萬能試驗機

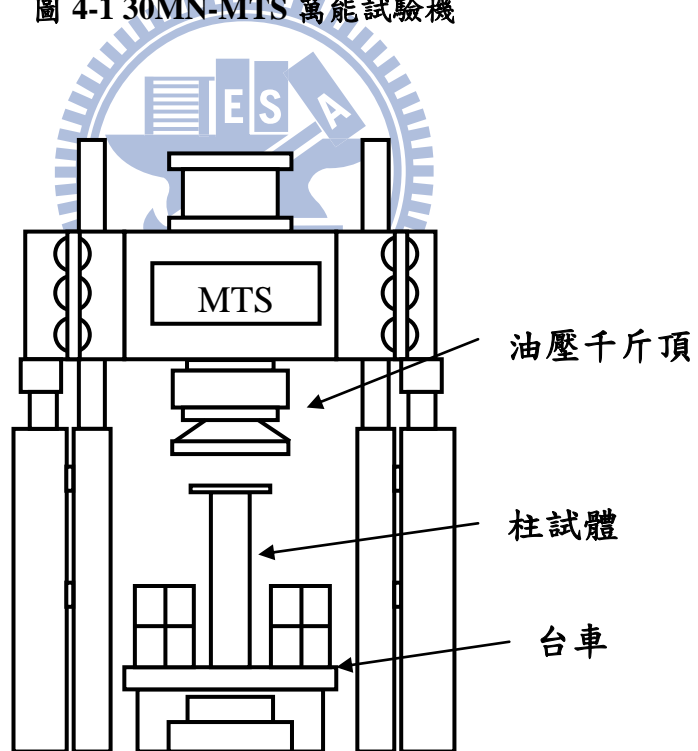


圖 4-2 載重試驗設置示意圖

(a) 台車



(b) 試體上下端石膏蓋平



圖 4-3 試驗設置

(c) 經緯儀

(d) 設置完成示意圖



圖 4-3 試驗設置(續)



圖 4-4 載重試驗位移計架設圖

(b)Dial Gauge

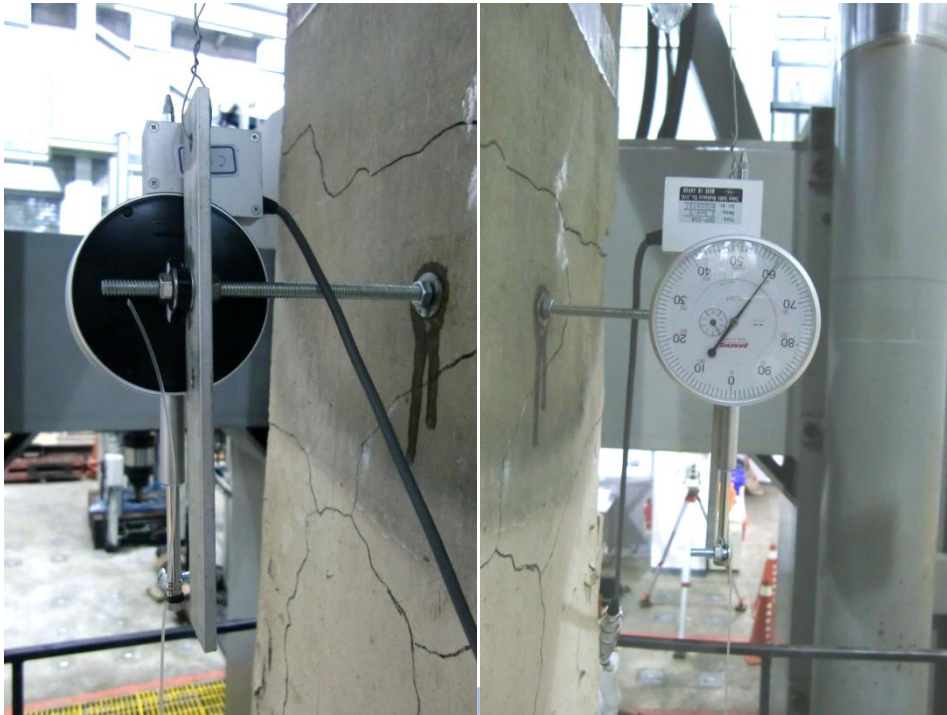


圖 4-4 載重試驗位移計架設圖(續)

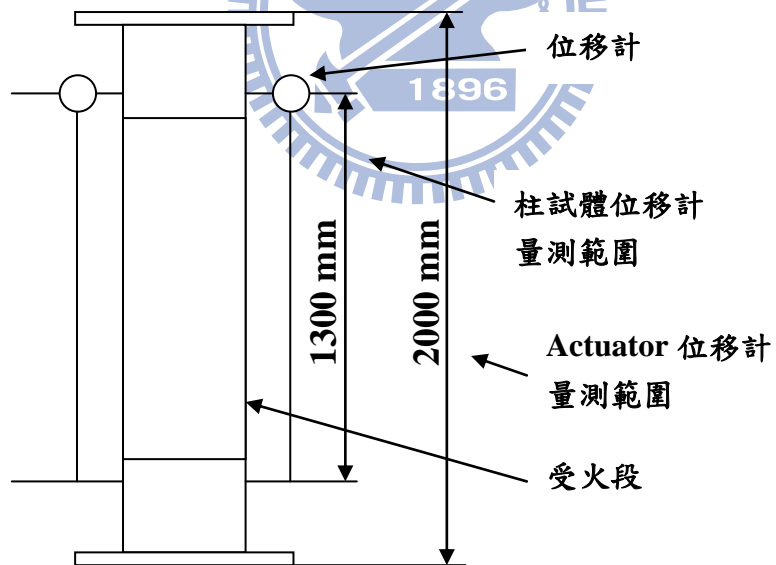
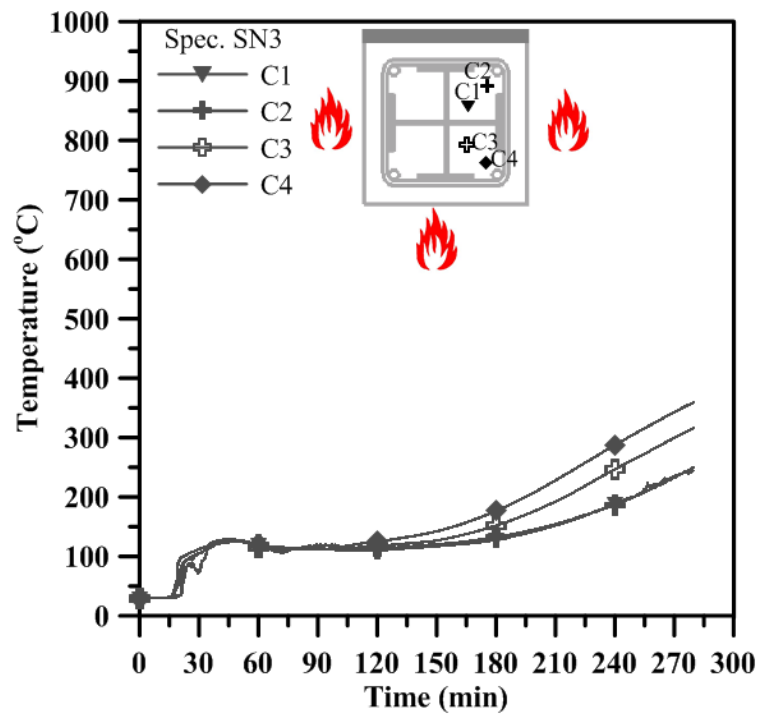


圖 4-5 位移計量測位置示意圖

(a) 試體 SN3 混凝土測點溫度歷時



(b) 試體 SN3 鋼骨測點溫度歷時

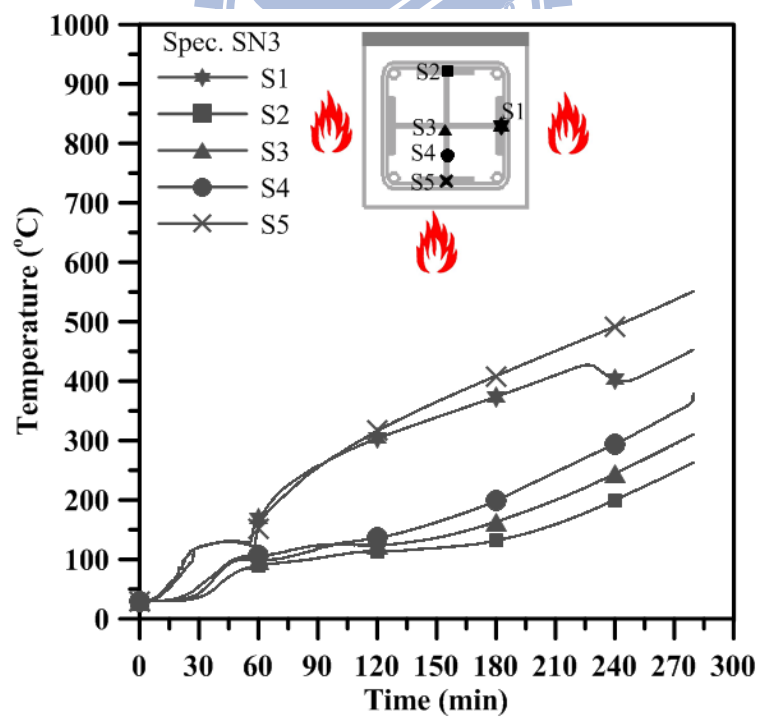
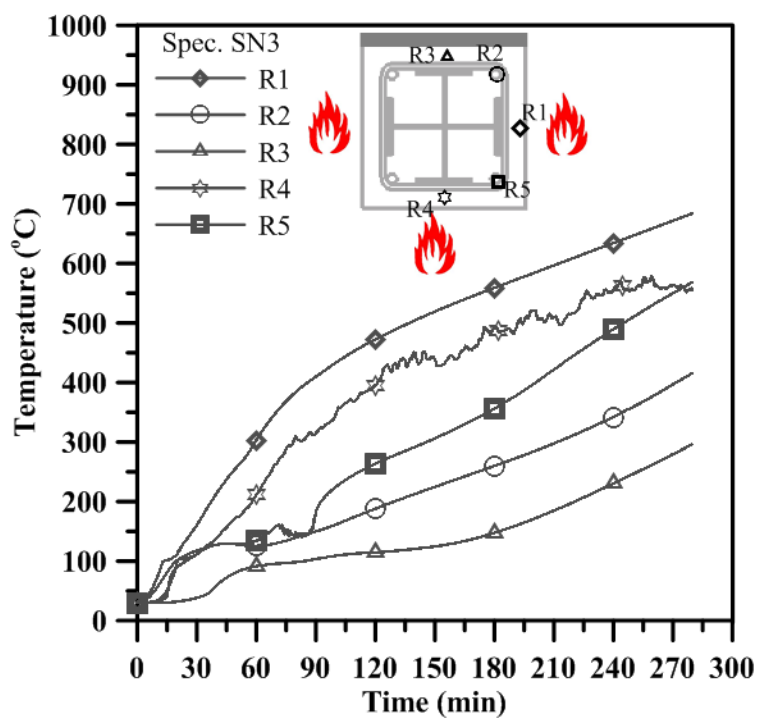


圖 5-1 試體 SN3 測點溫度歷時

(c) 試體 SN3 鋼筋測點溫度歷時



(d) 試體 SN3 鋼骨與混凝土溫度歷時

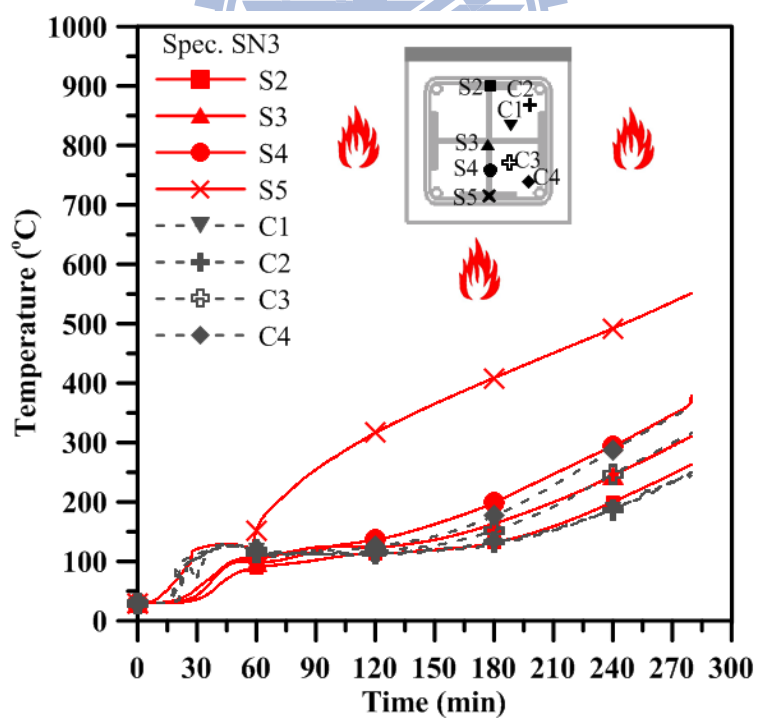
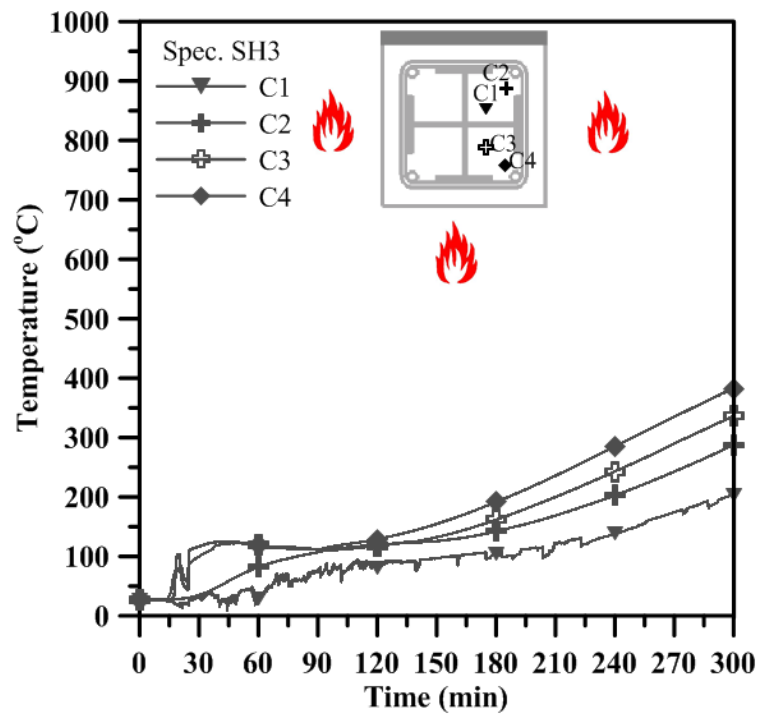


圖 5-1 試體 SN3 測點溫度歷時(續)

(a) 試體 SH3 混凝土測點溫度歷時



(b) 試體 SH3 鋼骨測點溫度歷時

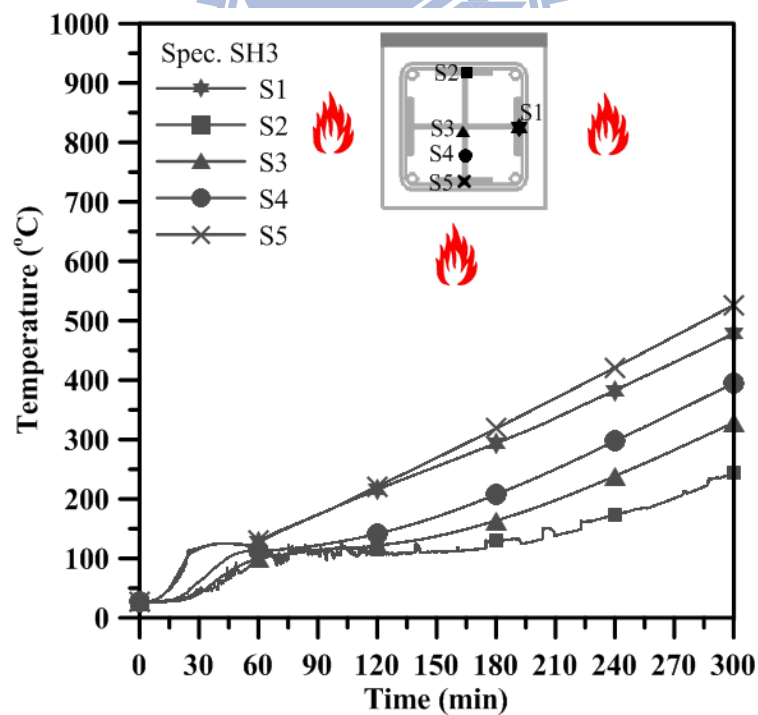
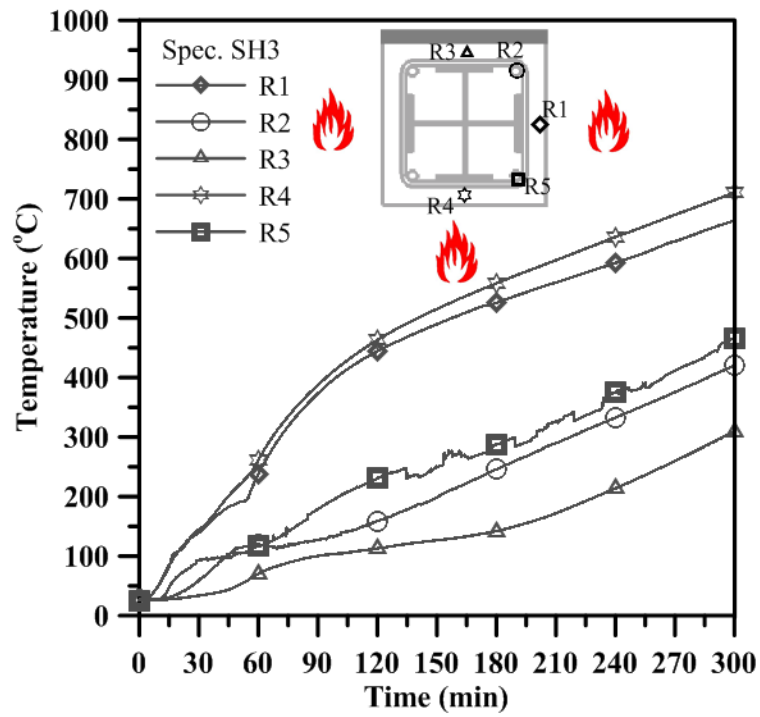


圖 5-2 試體 SH3 測點溫度歷時

(c) 試體 SH3 鋼筋測點溫度歷時



(d) 試體 SH3 鋼骨與混凝土溫度歷時

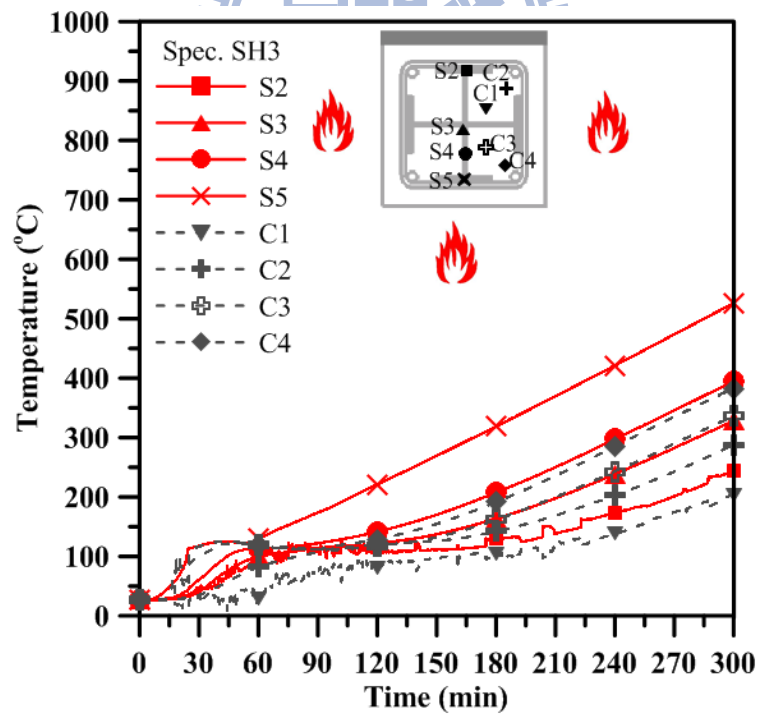
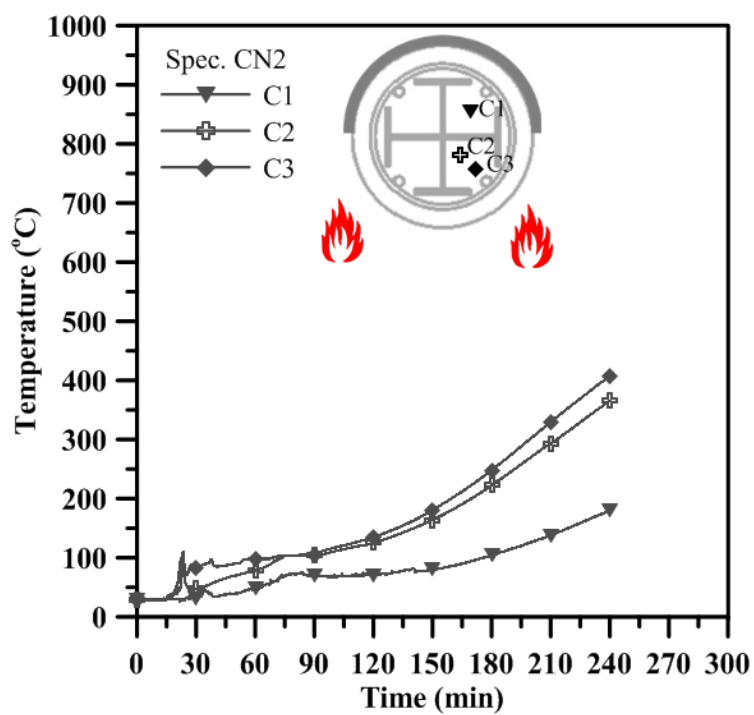


圖 5-2 試體 SH3 測點溫度歷時(續)

(a) 試體 CN2 混凝土測點溫度歷時



(b) 試體 CN2 鋼骨測點溫度歷時

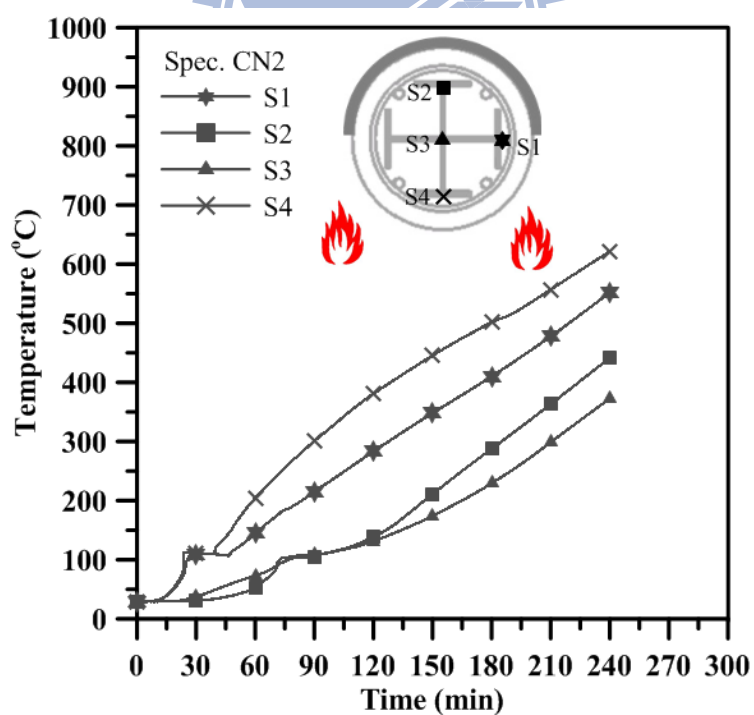
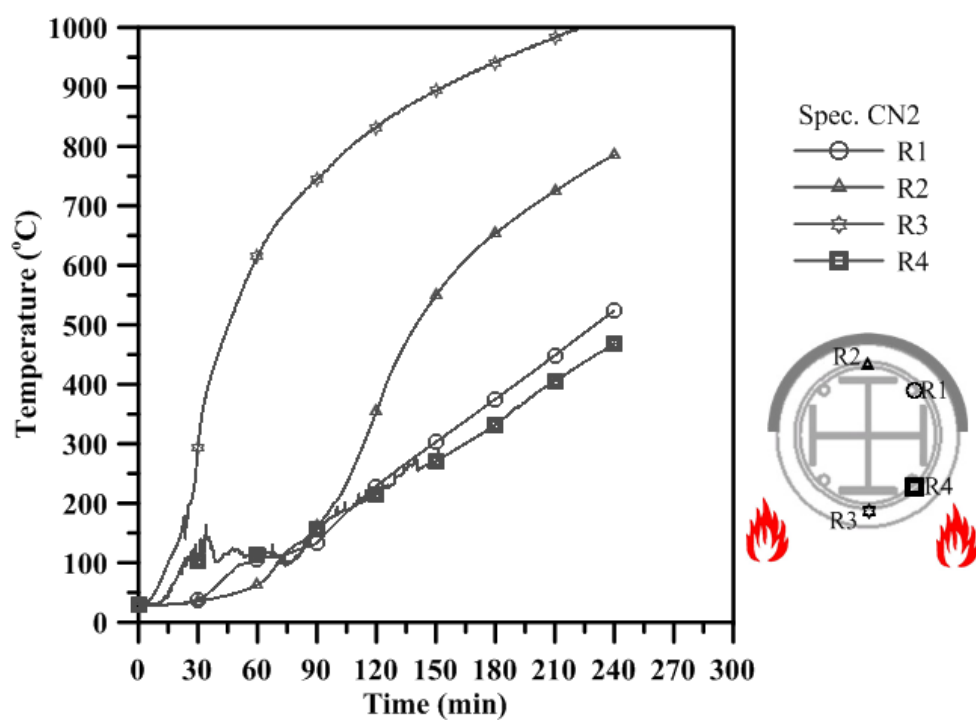


圖 5-3 試體 CN2 測點溫度歷時

(c) 試體 CN2 鋼筋測點溫度歷時



(d) 鋼骨與混凝土溫度歷時

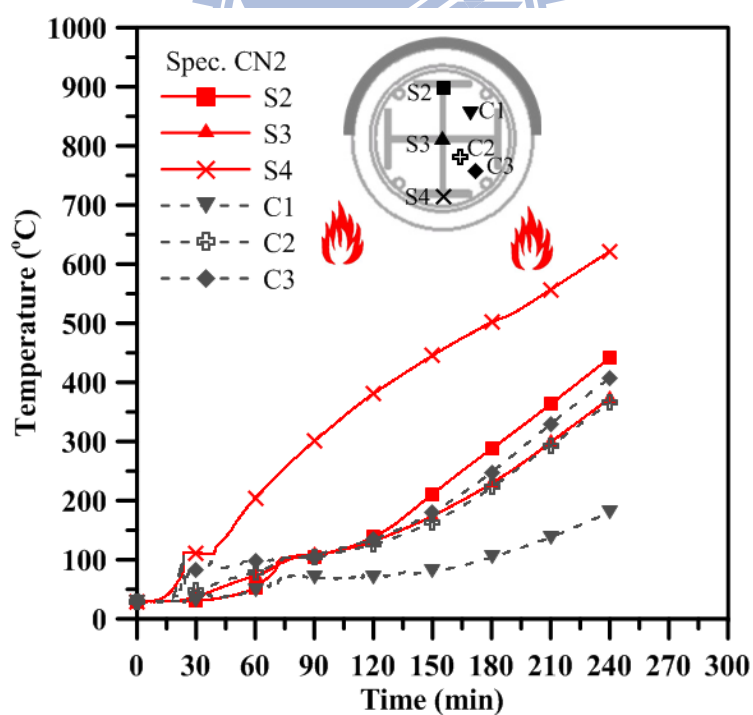
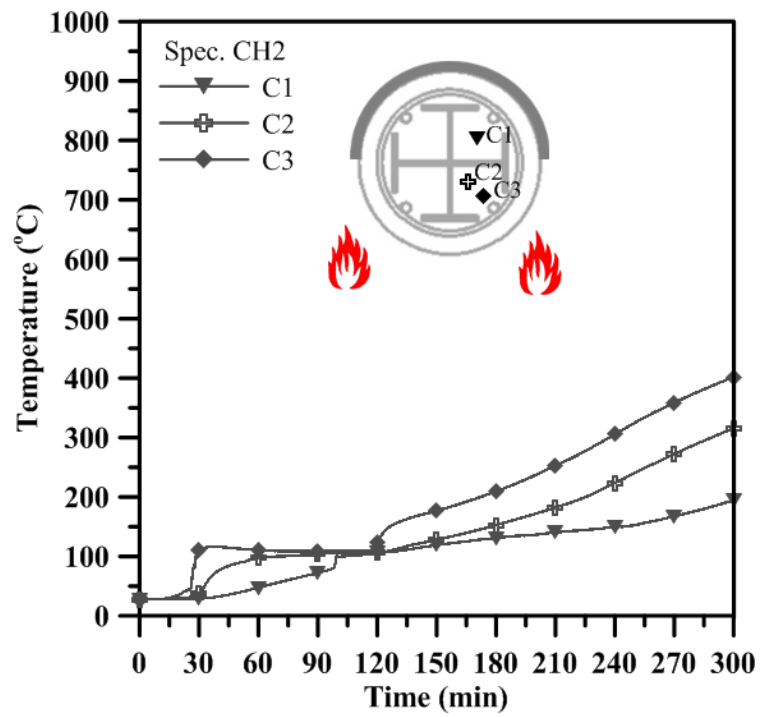


圖 5-3 試體 CN2 測點溫度歷時(續)

(a) 試體 CH2 混凝土測點溫度歷時



(b) 試體 CH2 鋼骨測點溫度歷時

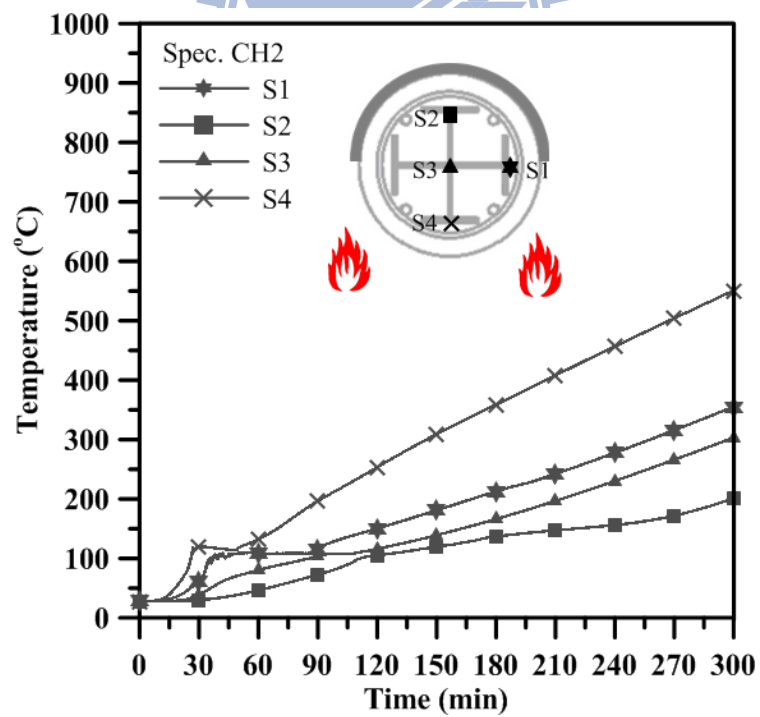
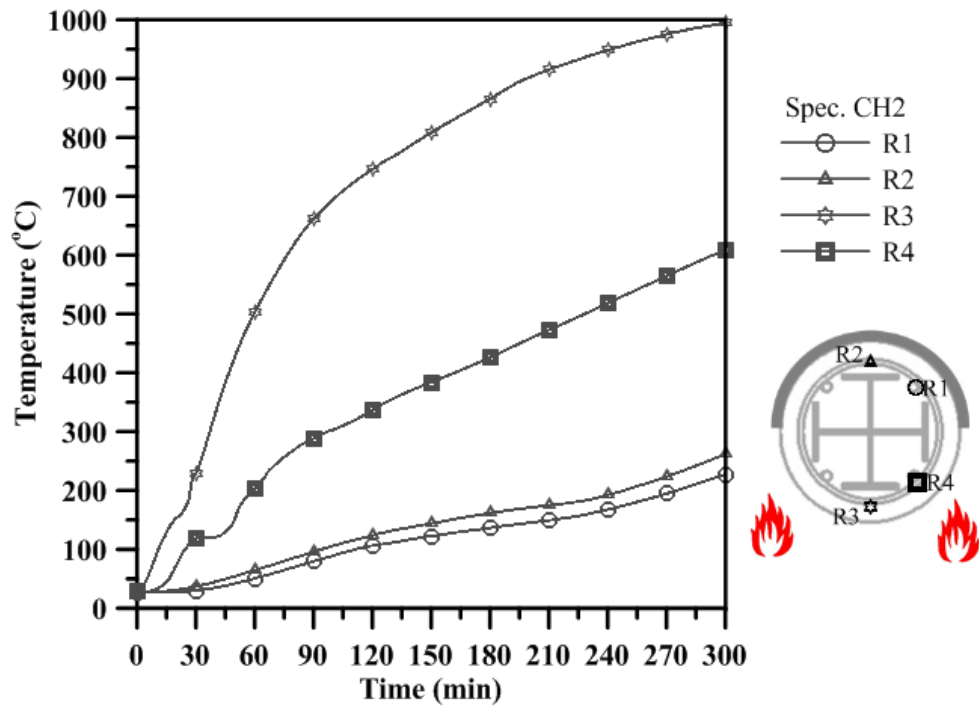


圖 5-4 試體 CH2 測點溫度歷時

(c) 試體 CH2 鋼筋測點溫度歷時



(d) 試體 CH2 鋼骨與混凝土溫度歷時

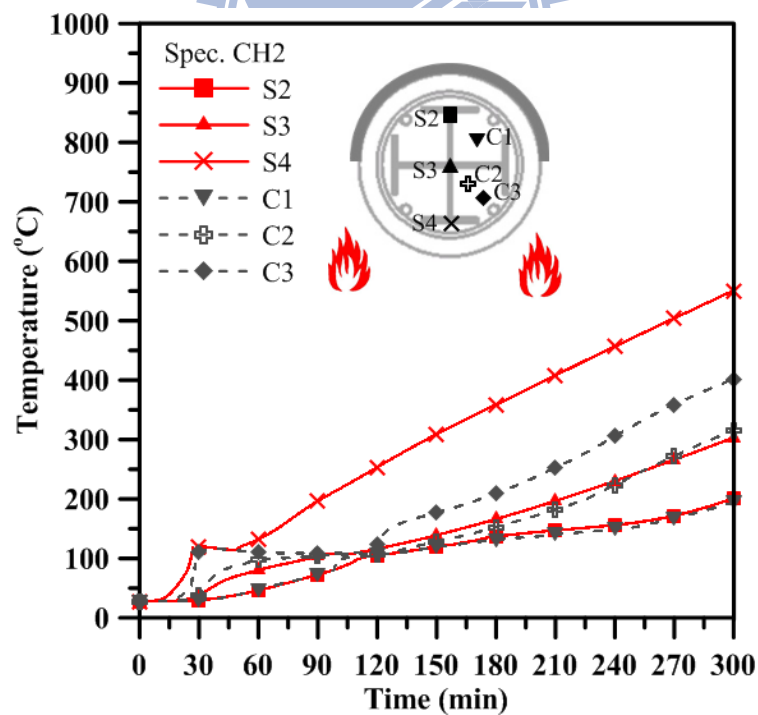


圖 5-4 試體 CH2 測點溫度歷時(續)

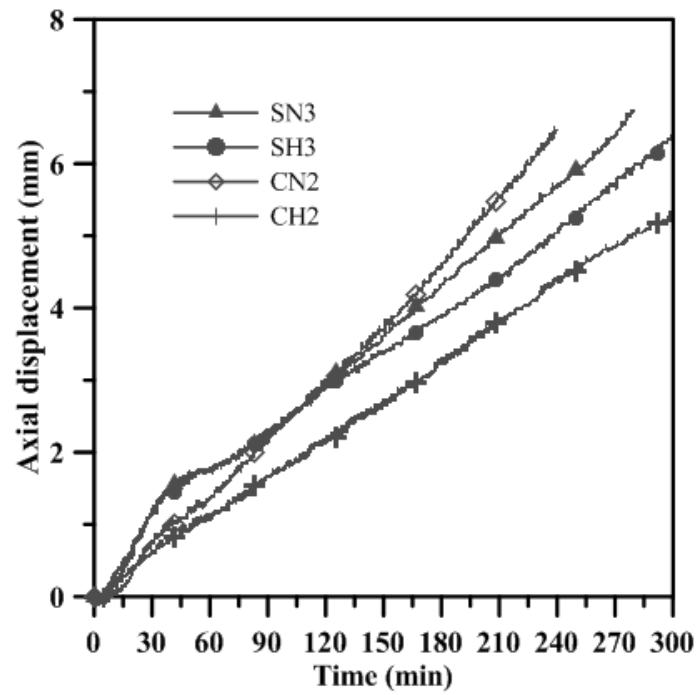


圖 5-5 高溫試驗軸向伸長量與時間關係圖

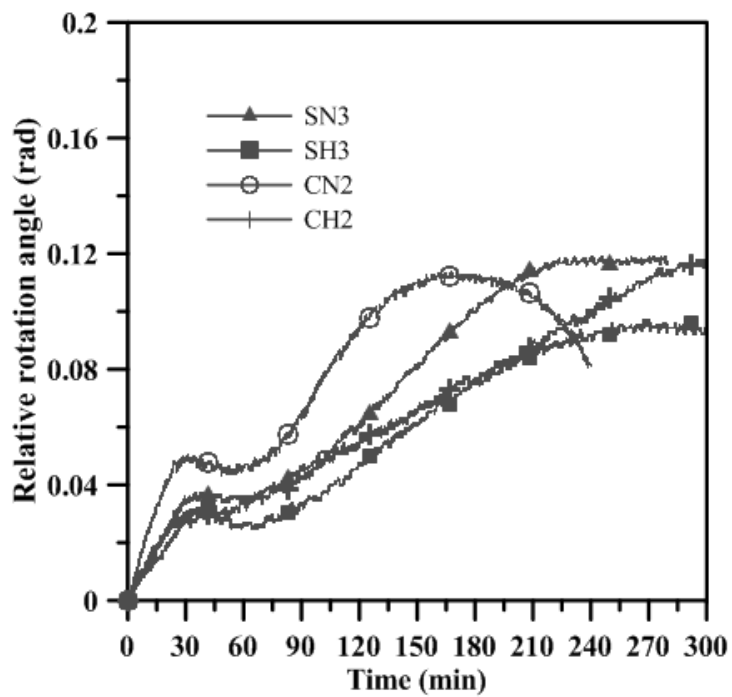
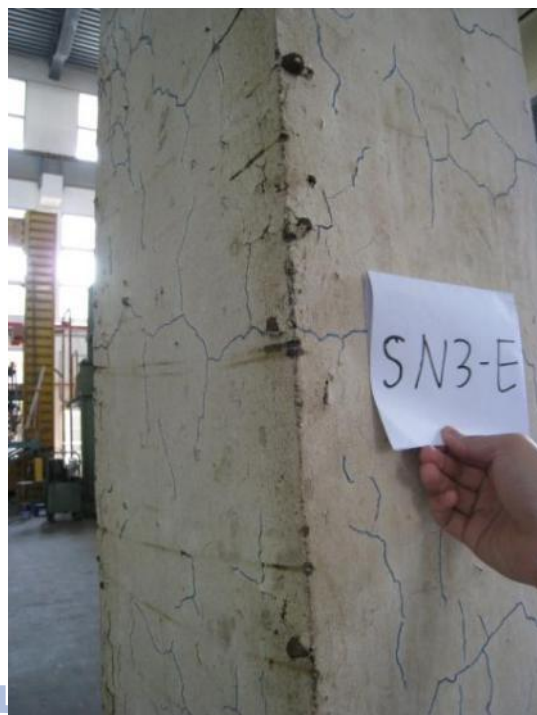


圖 5-6 高溫試驗柱端板間相對轉角與時間關係圖

(a)西面角隅顆粒突起



(b)東面角隅顆粒突起



(c)東南角隅混凝土剝落



(d)不受火面外觀變化



圖 5-7 試體 SN3 高溫試驗後損害情形

(e)受火面外觀變化



圖 5-7 試體 SN3 高溫試驗後損害情形(續)

(a)東面角隅顆粒突起

(b)南面顆粒突起



圖 5-8 試體 SH3 高溫試驗後損害情形

(c)受火面外觀變化



(d)不受火面外觀變化



圖 5-8 試體 SH3 高溫試驗後損害情形(續)

(a)西面箍筋外露



(b)受火面試體外觀



圖 5-9 試體 CN2 高溫試驗後損害情形

(a)受火面箍筋外露



(b)受火面試體外觀



(c)不受火面試體外觀



圖 5-10 試體 CH2 高溫試驗後損害情形

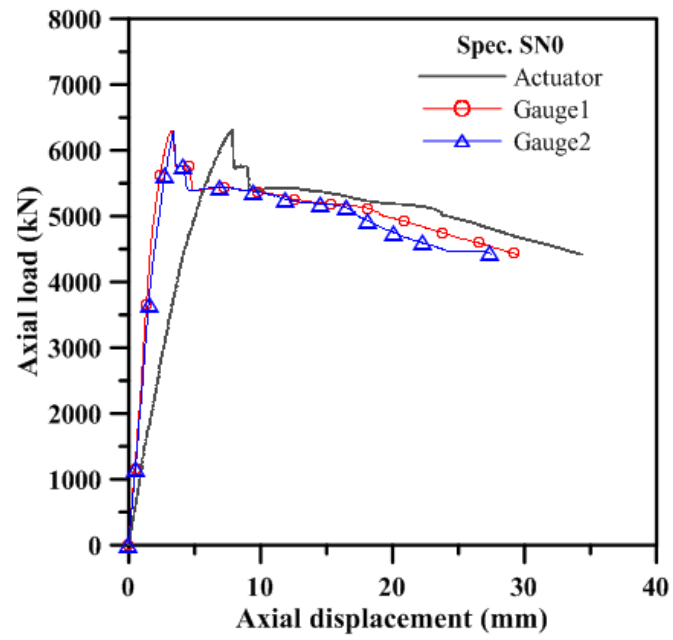


圖 5-11 試體 SN0 軸壓強度與變位關係

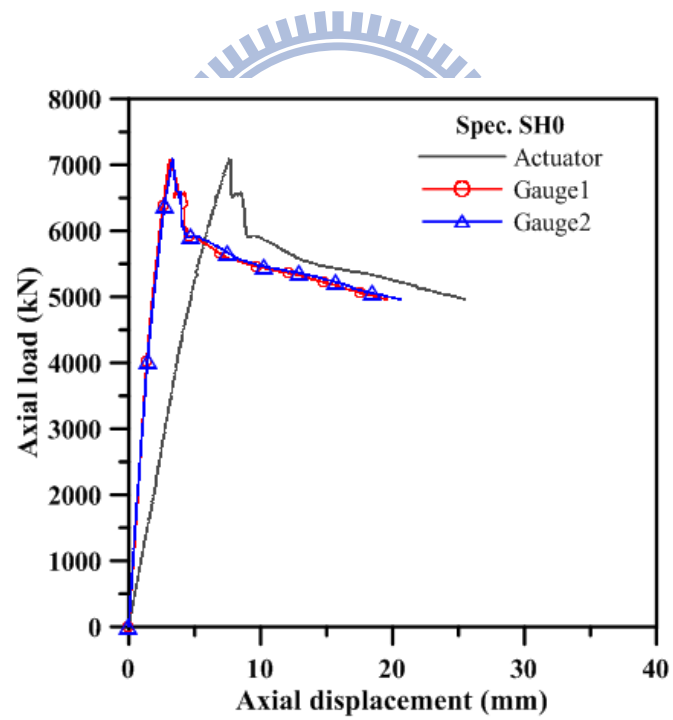


圖 5-12 試體 SH0 軸壓強度與變位關係

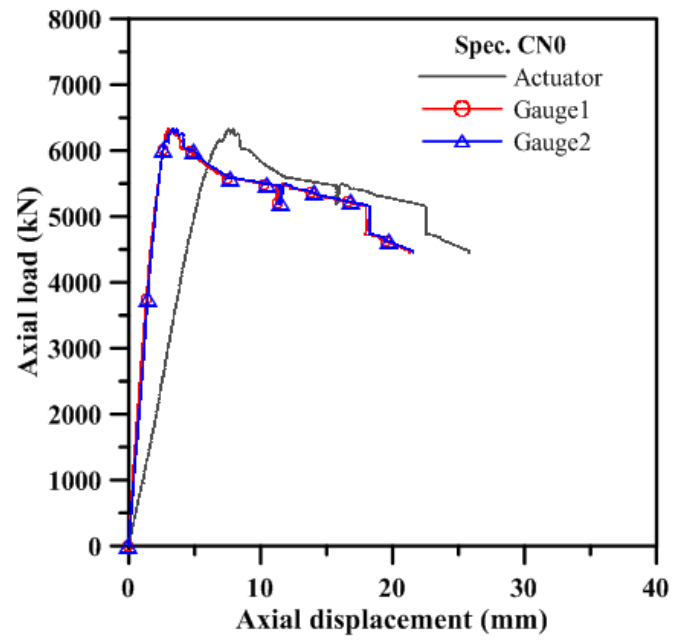


圖 5-13 試體 CN0 軸壓強度與變位關係

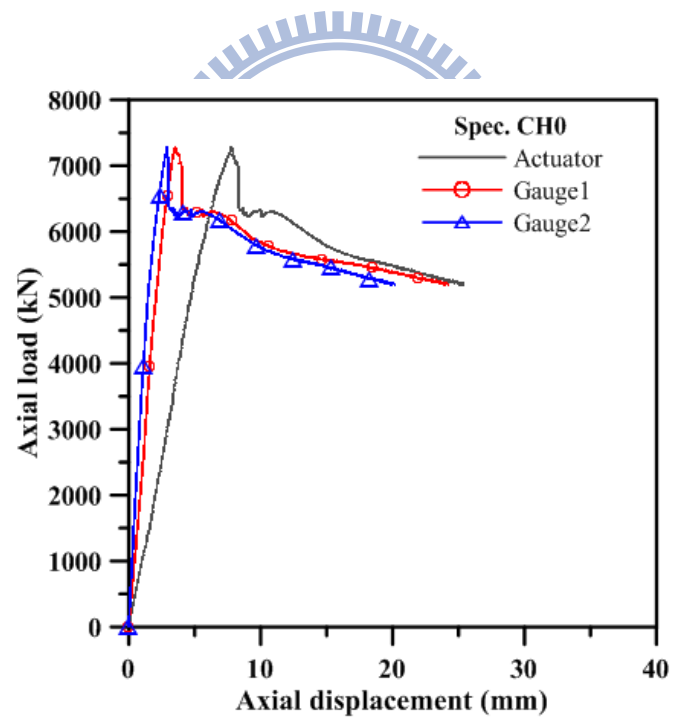


圖 5-14 試體 CH0 軸壓強度與變位關係

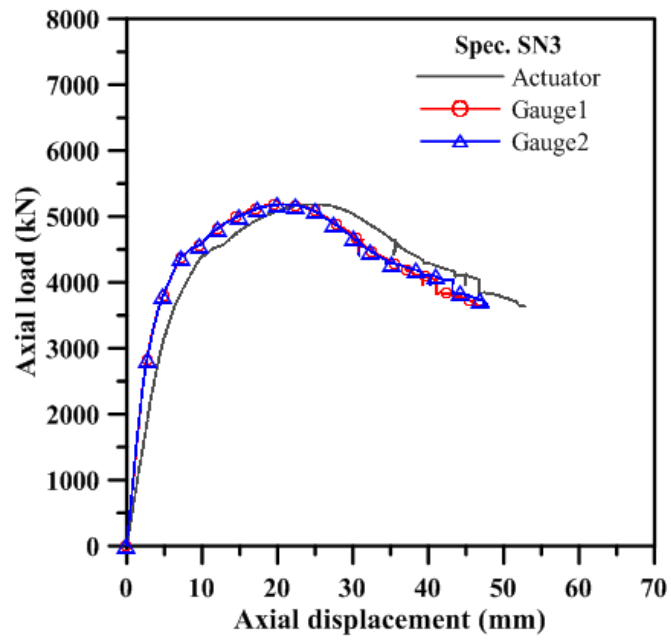


圖 5-15 試體 SN3 軸壓強度與變位關係

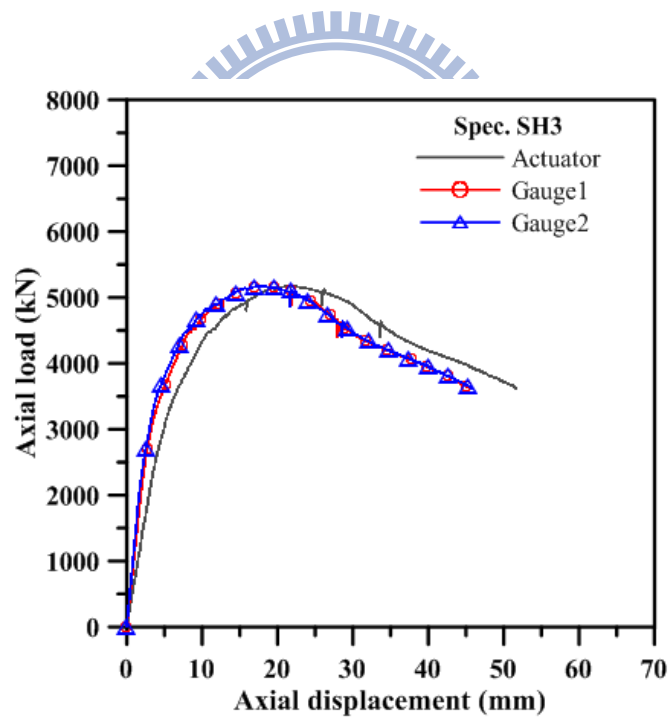


圖 5-16 試體 SH3 軸壓強度與變位關係

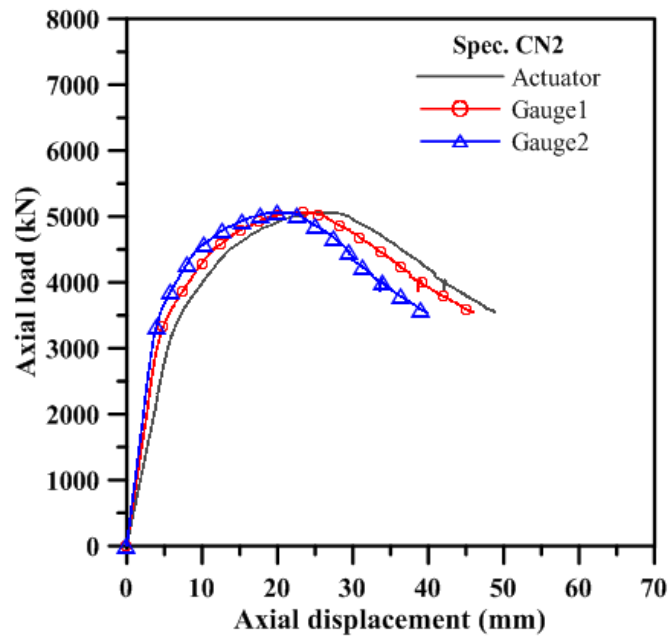


圖 5-17 試體 CN2 軸壓強度與變位關係

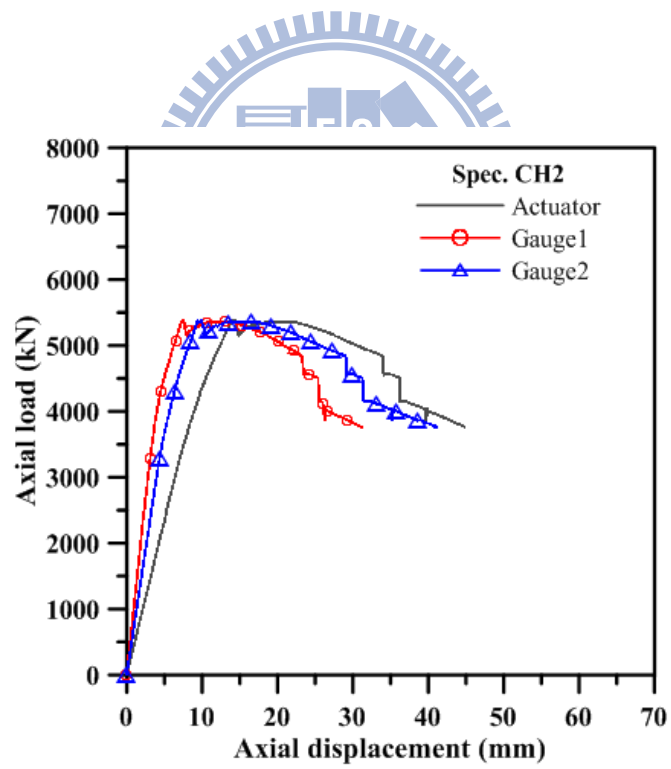


圖 5-18 試體 CH2 軸壓強度與變位關係

(a) 試體西北面整體外觀



(b) 西南面整體外觀



(c) 試體東北面整體外觀



(d) 東南面整體外觀



圖 5-19 試體 SN0 載重試驗後損害情形

(a) 試體東北面整體外觀



(b) 東北面細部外觀



(c) 試體西南面整體外觀



(d) 西南面細部外觀



圖 5-20 試體 SH0 載重試驗後損害情形

(a) 試體東北面整體外觀



(b) 東北面細部外觀



(c) 試體西北面外觀



(d) 西南面外觀



圖 5-21 試體 CN0 載重試驗後損害情形

(a) 試體東北面整體外觀

(b) 東北面細部外觀



(c) 試體西南面整體外觀

(d) 西南面細部外觀



圖 5-22 試體 CH0 載重試驗後損害情形

(a) 試體西北面整體外觀

(b) 西北面細部外觀



(c) 試體東南面整體外觀

(d) 東南面細部外觀



圖 5-23 試體 SN3 載重試驗後損害情形

(a) 試體東北面整體外觀

(b) 東北面細部外觀



(c) 試體西南面整體外觀

(d) 西南面細部外觀



圖 5-24 試體 SH3 載重試驗後損害情形

(a) 試體東北面整體外觀

(b) 東北面細部外觀



(c) 試體西南面整體外觀

(d) 西南面細部外觀



圖 5-25 試體 CN2 載重試驗後損害情形

(a) 試體西北面整體外觀

(b) 西北面細部外觀



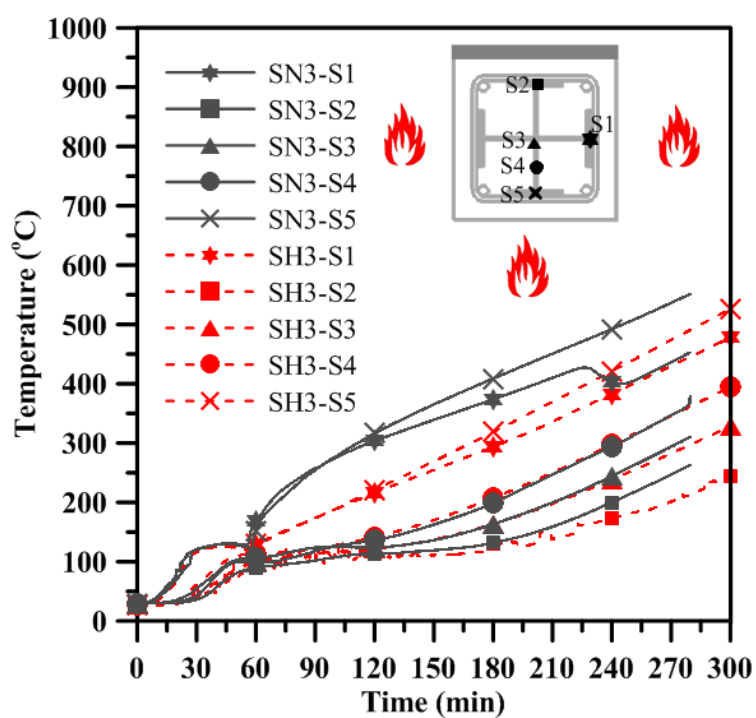
(c) 試體東南面整體外觀

(d) 東南面細部外觀



圖 5-26 試體 CH2 載重試驗後損害情形

(a)鋼骨測點溫度比較



(b)混凝土測點溫度比較

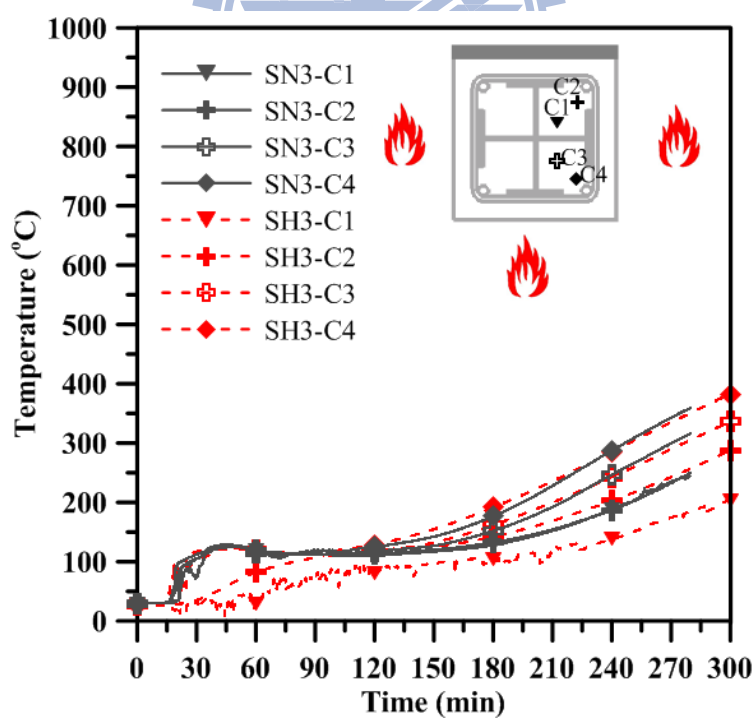


圖 5-27 試體 SN3 與 SH3 測點溫度歷時比較

(c)鋼筋測點溫度比較

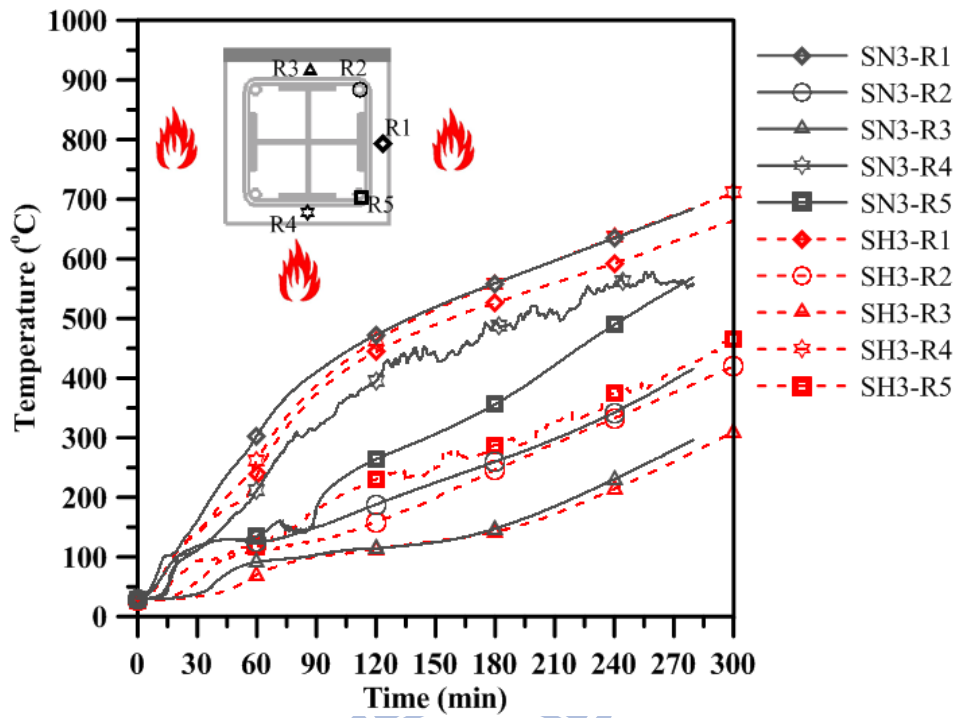


圖 5-27 試體 SN3 與 SH3 測點溫度歷時比較(續)

(a)試體 SH3 與 CH2 混凝土測點溫度歷時

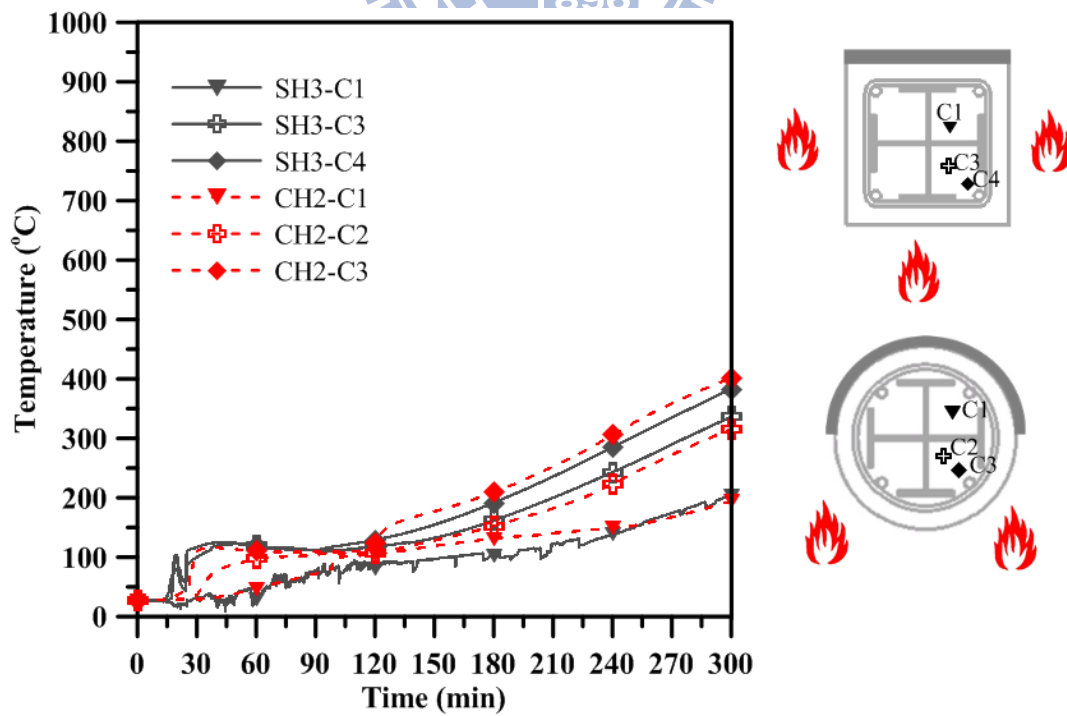
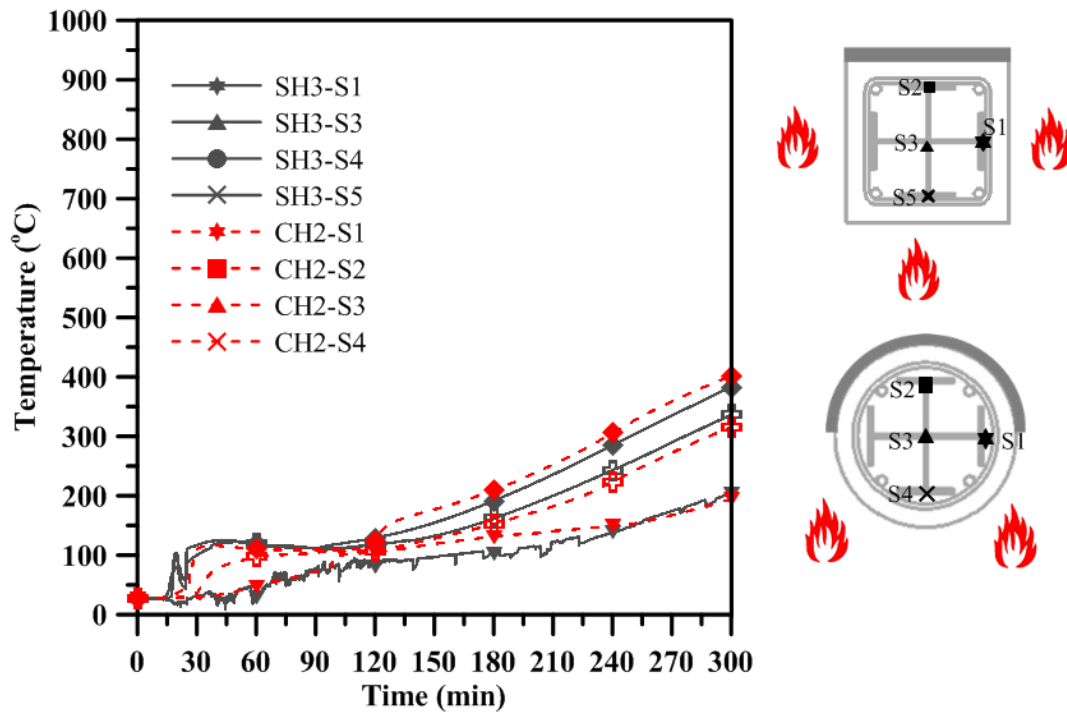


圖 5-28 試體 SH3 與 CH2 測點溫度歷時比較

(b) 試體 SH3 與 CH2 鋼骨測點溫度歷時



(c) 試體 SH3 與 CH2 鋼筋測點溫度歷時

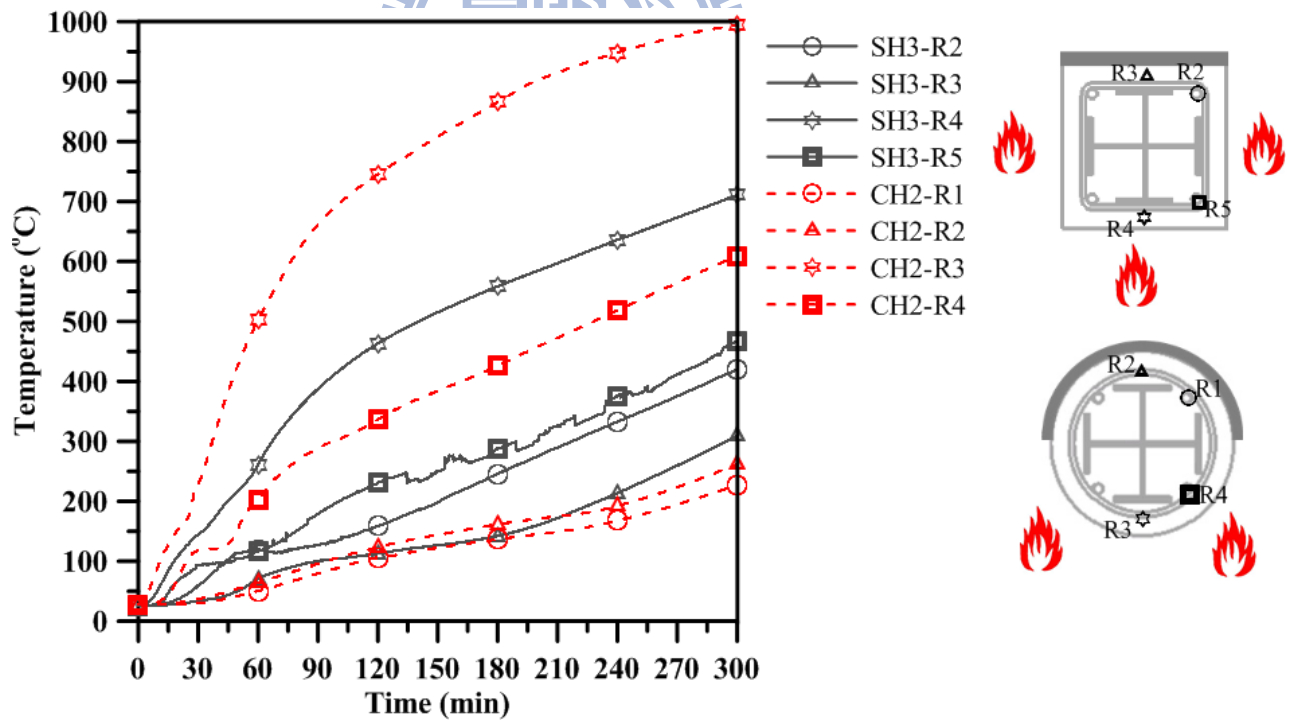


圖 5-28 試體 SH3 與 CH2 測點溫度歷時比較(續)

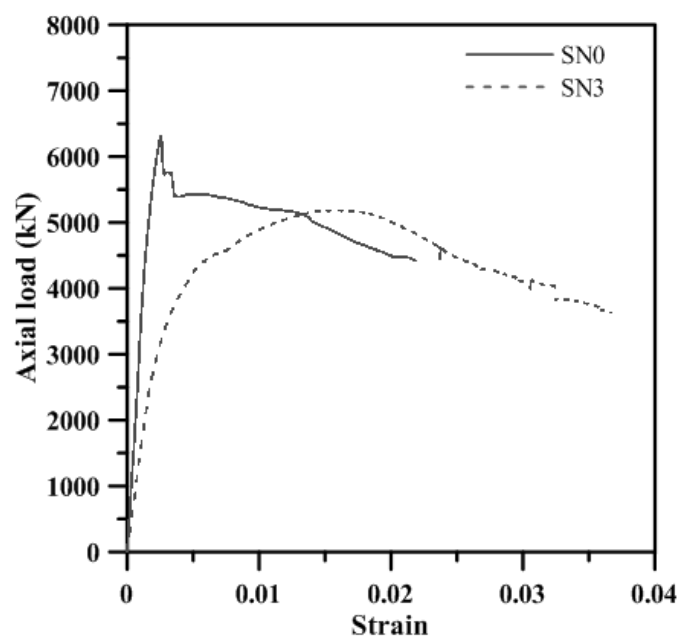


圖 5-29 試體 SN 系列軸壓強度與應變比較

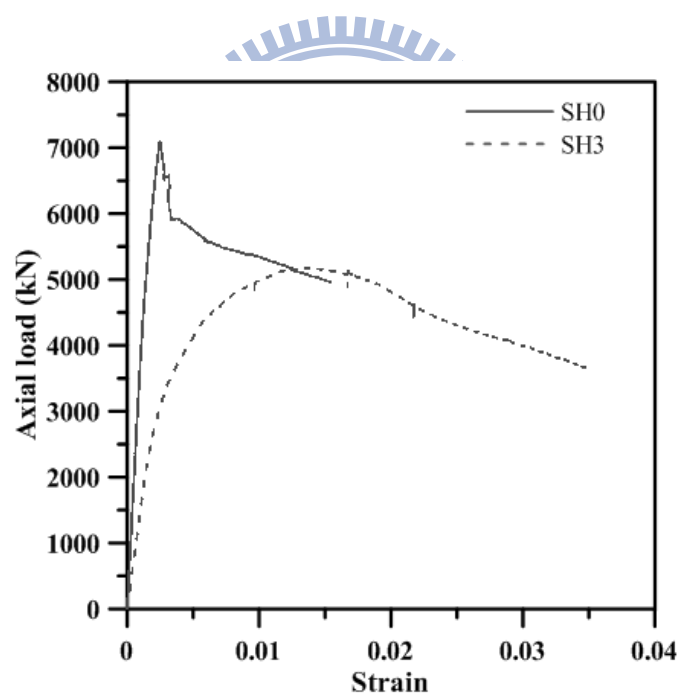


圖 5-30 試體 SH 系列軸壓強度與應變比較

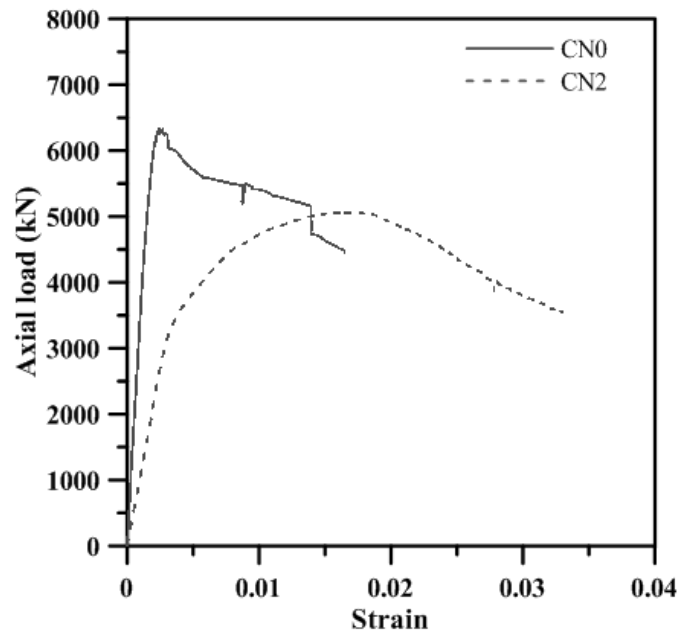


圖 5-31 試體 CN 系列軸壓強度與應變比較

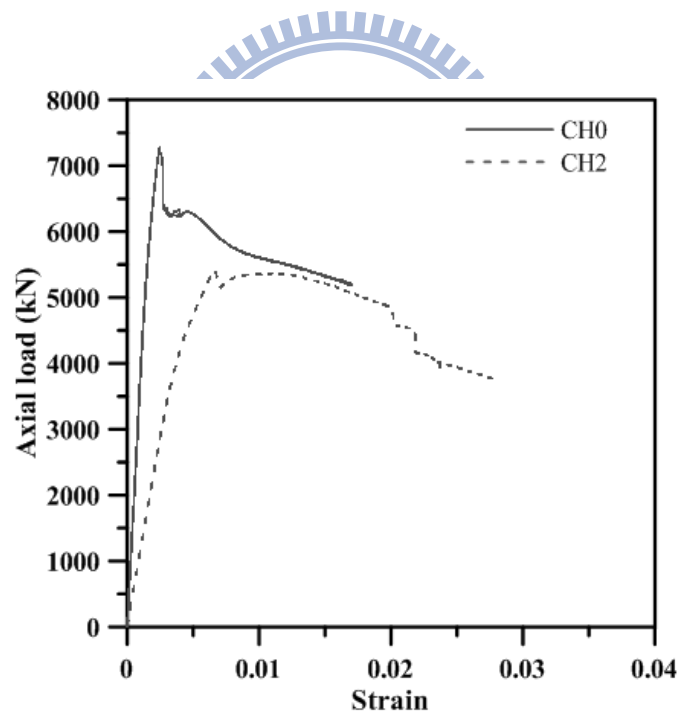


圖 5-32 試體 CH 系列軸壓強度與應變比較

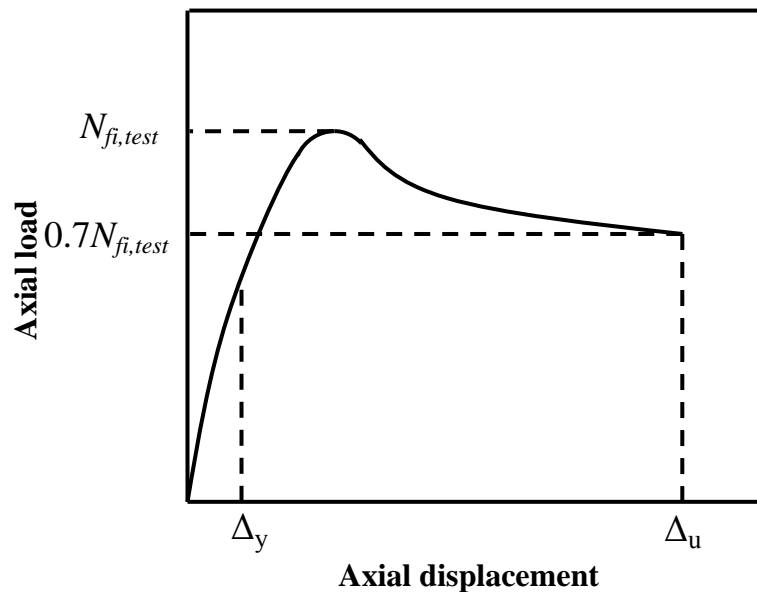


圖 5-33 韌性指標計算

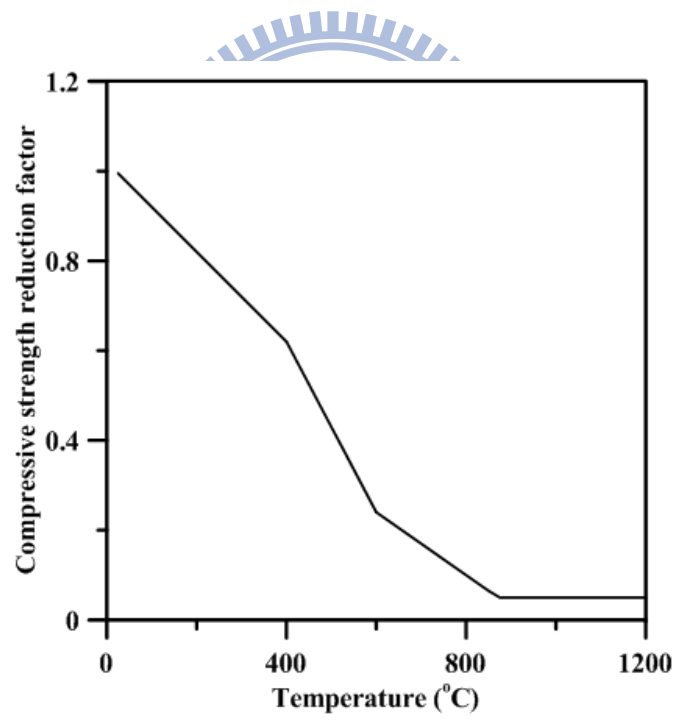


圖 6-1 混凝土火害後殘餘抗壓強度折減

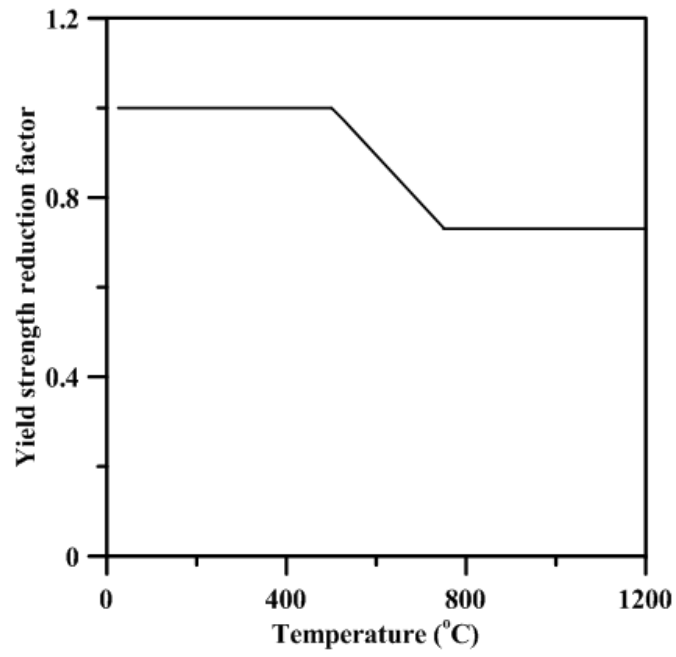


圖 6-2 鋼筋火害後殘餘降伏強度折減

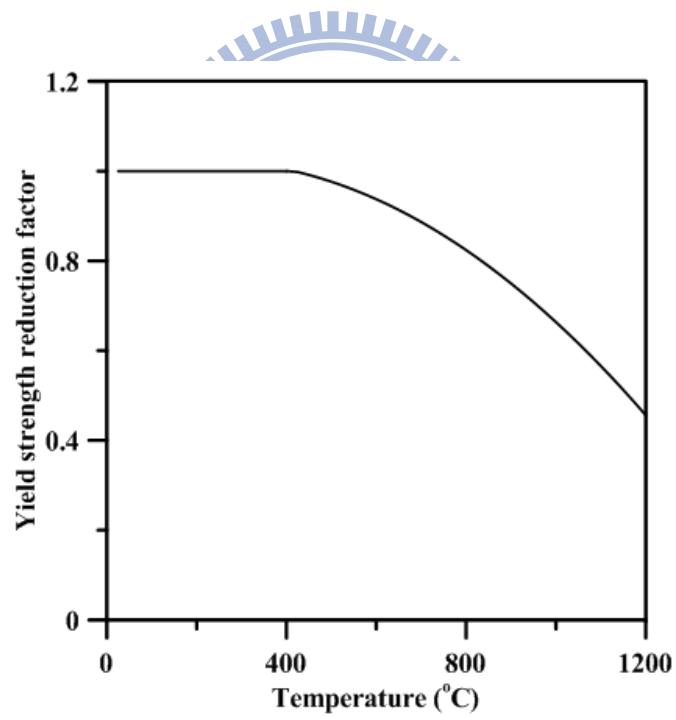


圖 6-3 鋼骨火害後殘餘降伏強度折減

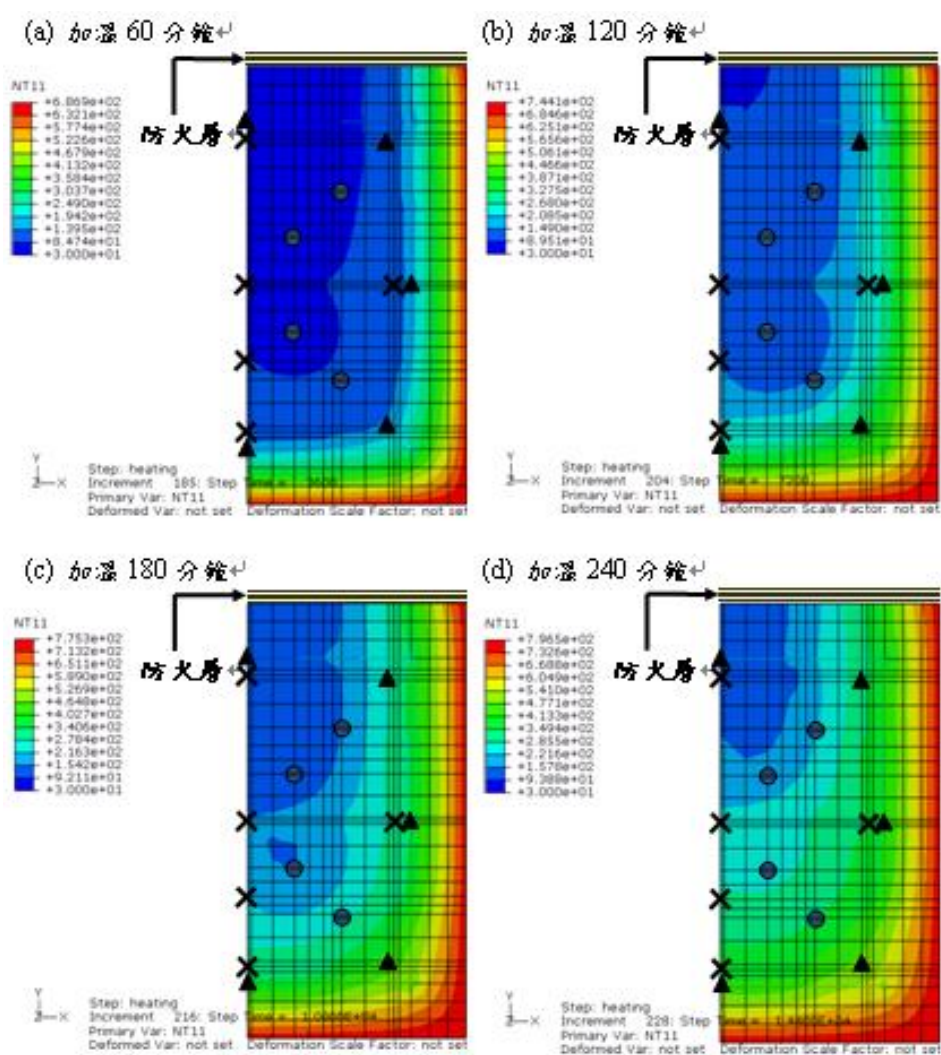


圖 6-4 模擬方形 SRC 柱三面受火之斷面溫度分佈(陳誠直 2011)

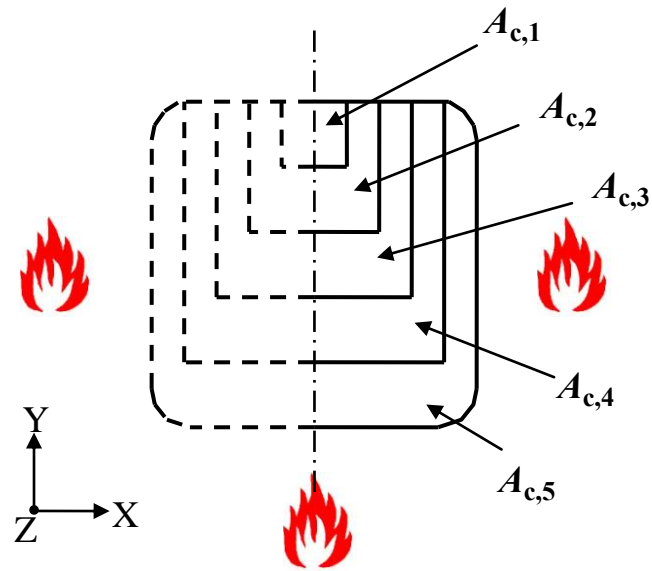


圖 6-5 方形柱斷面溫度區間劃分

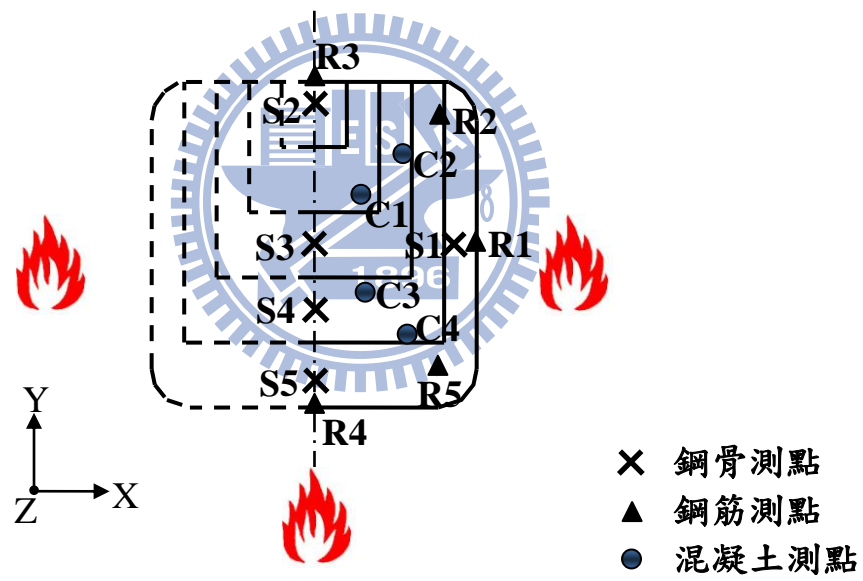


圖 6-6 方形柱斷面溫度區間與溫度測點

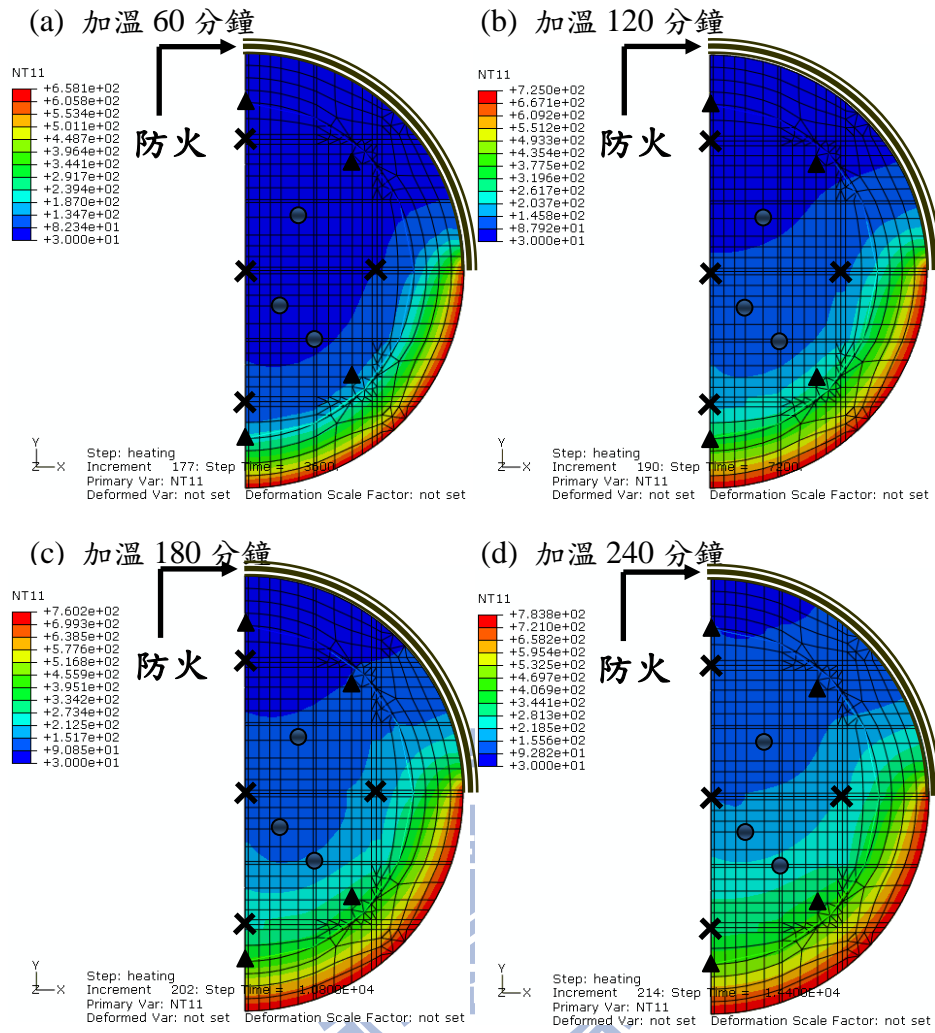


圖 6-7 模擬圓形 SRC 柱二面受火之斷面溫度分佈(陳誠直 2011)

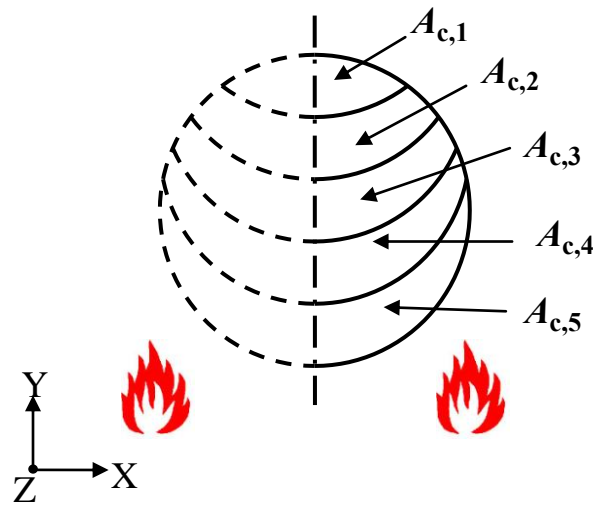


圖 6-8 圓形柱斷面溫度區間劃分

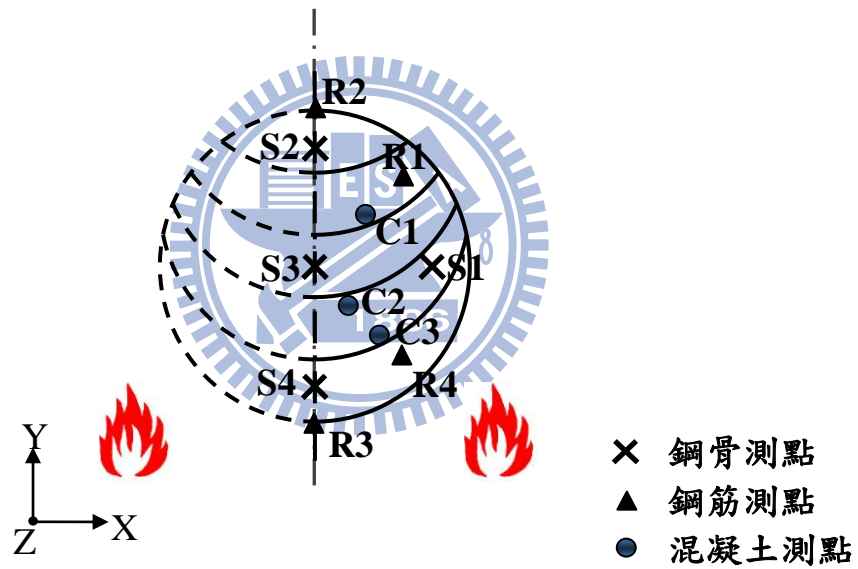


圖 6-9 圓形柱斷面溫度區間與溫度測點

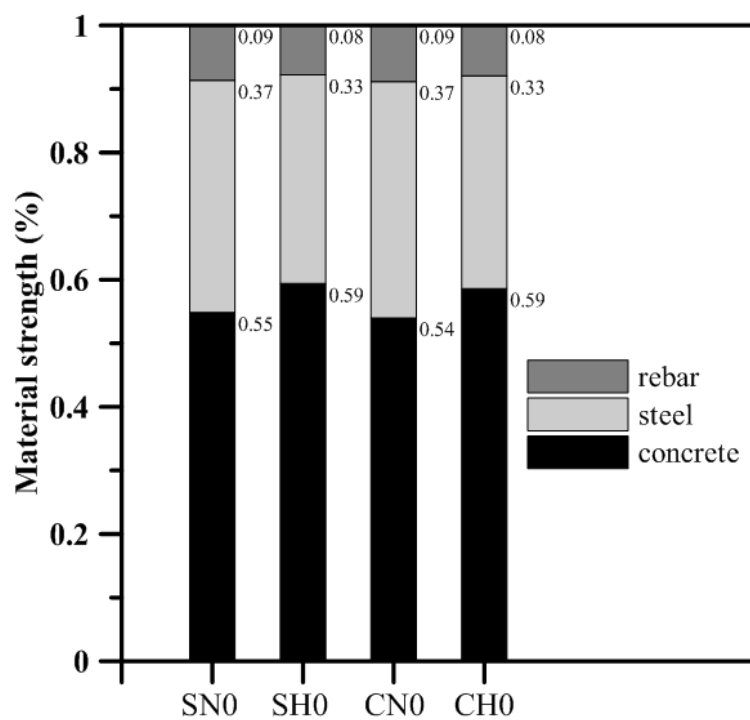


圖 6-10 未受火害試體材料強度百分比

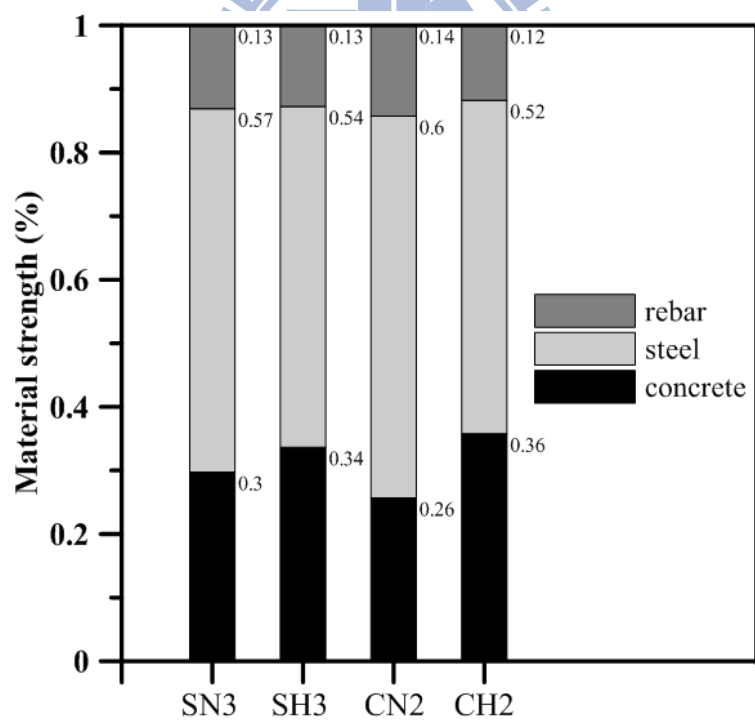


圖 6-11 受火害試體材料強度百分比