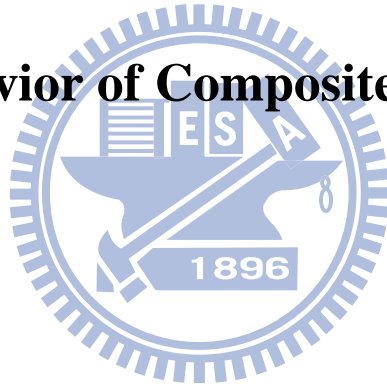


國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

火害下合成梁之撓曲行為

Flexural Behavior of Composite Beams in Fire



研究生：區錦輝

指導教授：陳誠直博士

中華民國九十九年七月

火害下合成梁之撓曲行為

Flexural Behavior of Composite Beams in Fire

研究生：區錦輝

Student : Kam-Fai Ao

指導教授：陳誠直博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

國立交通大學

土木工程學系



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

July 2010
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

火害下合成梁之撓曲行為

研究生：區錦輝

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

鋼材具有強度高自重輕之優點，但鋼材溫度升高時其強度即會大幅減少，所以火害對於鋼構造會造成嚴重之影響。本研究以試驗方法探討合成梁於防火被覆保護下在高溫下之撓曲行為，並建立合理之分析方法。在試驗方面，共進行三組試體之試驗，試體參數為防火被覆厚度及有無加載，探討在高溫下參數於撓曲行為之影響。分析方法是建立一套分析合成梁在高溫下撓曲行為之模型，利用試驗時獲得之數據，進行合成梁熱膨脹及材料力學性質折減之分析，計算合成梁在加溫試驗時之撓度。由試驗結果發現，施加鋼梁之設計載重對試體行為影響不大；另外防火被覆越厚者，鋼梁之溫度上升較慢，從而使試體之撓曲度較小。分析結果顯示，分析方法能合理分析試體之行為。

關鍵詞：加溫試驗、合成梁、撓曲行為、防火被覆、加載試驗

Flexural Behavior of Composite Beams in Fire

Student: Kam-Fai Ao

Adviser: Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Steel material possesses the advantage of high strength but light weight. However, the strength decreases significantly while temperature rises, and therefore the fire has severe effect on the steel structure. This research aims to experimentally investigate the flexural behavior of composite beams with fireproof coating in fire, and develop analytical model. With variables of the thickness of the fireproof coating and subjected to load or not, three specimens were tested under elevated temperature to study the effect of the variables on flexural behavior. An analytical model was developed to evaluate the flexural behavior of the composite beams subjected to temperature rising. Utilizing the recorded temperature on the steel beam during the test to consider the thermal expansion and the reduction of the mechanical properties of the materials, the flexural deflection was calculated. The test results indicated that applied design load of the steel beam had minor effect on the behavior, and the thicker fireproof coating resulted in slow temperature rising on the steel beam and less deflection of the specimen. Analytical results demonstrated the model can reasonably predict the flexural behavior of the specimen.

Keywords: elevated temperature test, composite beam, flexural behavior, fireproof coating, loading test

致謝

承蒙恩師 陳誠直博士於學生在修讀研究所及大學期間悉心教導，不辭勞苦地灌輸學生專業的知識，讓學生學習到正確之處事態度，使愚生獲益良多，令學生更有自信面對日後的各種挑戰，於研究方面上亦給予很多寶貴之意見與教導，使學生能得以順利畢業，在此敬上萬分感謝。

論文口試期間，感謝本校 鄭復平教授、趙文成教授給予本論文寶貴的意見與指導，使本論文更為完善，在此萬分感謝。

本研究承蒙內政部建築研究所補助經費，謹致謝忱。內政部建築研究所陳建忠組長、蔡銘儒實驗室負責人、李鎮宏副研究員諸多協助，特此致謝。永記造漆工業股份有限公司邱志銘先生、方豐洲先生的協助試體製作，謹致謝忱。

感謝學長 南交、政甯、政億於研究期間的教導與幫助，使研究得以順利進行，並且對生活上的照顧；感謝璿至、俞燐、嘉儀、孟暉、岳勳、致潔，同窗好友顯嘉、霏琳，以及學弟偉乾、士庭、易宸更是這段艱辛日子的好伙伴。

感謝家人對學生從小到大的支持與鼓勵，讓學生身在異鄉也能感

受到溫暖，讓學生好好學習；感謝父親 潤鴻及母親 佩兒的悉心照料下，使家中三兄妹能在健康快樂的環境下成長，並一直教導我們很多人生經驗；感謝兄 錦豪一直以來的關心與照顧；感謝妹 麗盈在艱辛的日子使我快樂，陪伴我每個寂寞的時刻。感謝女友 婷婷從大學到現在對我一直的支持，陪伴我渡過每一個重要的時刻。感謝好友 世豪、宥儀、志豪在我每次傷心失意的時候對我的鼓勵與支持，有你們的支持使我在這一段時光更加多彩多姿。

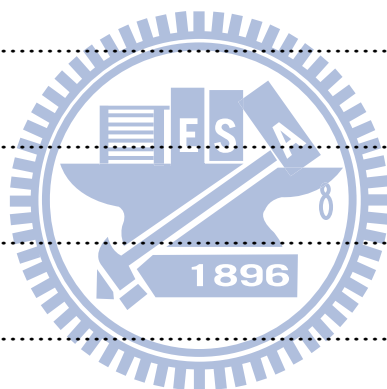
在修讀研究所課程兩年的時間，特別感謝恩師 陳誠直博士與南交學長的照顧，以及所有一直支持我的家人及朋友，在此萬分感謝！



錦輝 九十九年七月

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	v
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究方法.....	2
1.4 論文內容.....	3
第二章 國內外相關規範及文獻回顧.....	4
2.1 國內外相關水平承重構造耐火試驗規範.....	4
2.1.1 國際標準組織 ISO 834 規範.....	4
2.1.2 英國BS 476 規範.....	5
2.1.3 美國UL 263 規範.....	5
2.1.4 國內CNS 12514 規範.....	5
2.2 國內外相關文獻回顧.....	6



第三章	鋼梁構造耐火性能之試驗.....	10
3.1	試驗規劃.....	10
3.2	試體設計.....	10
3.2.1	鋼梁試體.....	10
3.2.2	防火被覆.....	11
3.3	試體製作.....	12
3.4	試驗設置.....	14
3.5	量測系統.....	14
3.5.1	熱電偶設置.....	14
3.5.2	位移計設置.....	15
3.6	試驗步驟.....	15
3.7	性能基準與判定.....	16
3.8	試驗結果與討論.....	17
3.8.1	試體行為.....	17
3.8.1.1	試體 1.....	18
3.8.1.2	試體 2.....	19
3.8.1.3	試體 3.....	20
3.8.2	試驗結果.....	21
3.8.2.1	試體 1.....	22



3.8.2.2	試體 2	23
3.8.2.3	試體 3	23
3.8.3	試驗結果討論	24
3.8.3.1	加載之影響	24
3.8.3.2	防火被覆厚度之影響	25
第四章	分析模式	27
4.1	分析模式介紹	27
4.2	分析基本假設	27
4.3	合成梁之熱膨脹分析	28
4.3.1	熱膨脹係數	28
4.3.2	熱膨脹分析	28
4.4	合成梁在高溫下材料力學行為折減之分析	31
4.4.1	Eurocode 3 對於鋼材在高溫下之力學性質折減	32
4.4.2	合成梁加載下材料高溫力學性質折減分析方法	32
4.4.3	合成梁加載下材料高溫力學性質折減分析步驟	34
4.5	分析結果與討論	35
4.5.1	試體 1	36
4.5.2	試體 2	37
4.5.3	試體 3	37

第五章	結論與建議.....	39
5.1	結論.....	39
5.2	建議.....	41
參考文獻	42
附錄一	噴附式防火被覆特性簡介.....	89
附錄二	鋼梁載重能力計算 (容許應力法).....	91
附錄三	合成梁設計容許彎矩計算 (容許應力法).....	93
附錄四	分析計算例.....	96



表目錄

表 2-1 各國水平承重構造耐火試驗規範比較	45
表 3-1 試體規劃.....	46
表 3-2 試驗結果簡表.....	46
表 3-3 試體各斷面加溫 1 小時後之溫度 (°C).....	47
表 3-4 試驗結果與防火時效判定	48
表 4-1 Eurocode 3 鋼材高溫下之力學性質折減係數.....	49



圖目錄

圖 3-1 試體之鋼承板、剪力釘、鋼絲網設置	50
圖 3-2 試體樓板混凝土澆注施工	50
圖 3-3 試體樓板混凝土施工完成	51
圖 3-4 鋼梁腹板熱電偶線設置	51
圖 3-5 鋼梁下翼板熱電偶線設置	52
圖 3-6 鋼梁鋼網施工	52
圖 3-7 鋼梁防火被覆施工 (一)	53
圖 3-8 鋼梁防火被覆施工 (二)	53
圖 3-9 鋼梁防火被覆施工 (三)	54
圖 3-10 鋼梁防火被覆完成施工	54
圖 3-11 鋼梁翼板FLANGE -1 應力應變曲線	55
圖 3-12 鋼梁翼板FLANGE -2 應力應變曲線	55
圖 3-13 鋼梁腹板WEB -1 應力應變曲線	56
圖 3-14 鋼梁腹板WEB -2 應力應變曲線	56
圖 3-15 試體安裝於加溫爐內情況	57
圖 3-16 試驗設置上視圖	57
圖 3-17 試驗設置B-B視圖	58
圖 3-18 試驗設置A-A視圖	58

圖 3-19 支承端之細部機制.....	59
圖 3-20 北側支撐.....	59
圖 3-21 南側支撐.....	60
圖 3-22 位移計設置.....	60
圖 3-23 加溫爐與試驗設置.....	61
圖 3-24 鋼梁表面熱電偶測點配置位置	61
圖 3-25 試體縱向熱電偶測點配置位置	62
圖 3-26 位移計與陶瓷棒的設置	62
圖 3-27 標準加熱溫度-時間曲線.....	63
圖 3-28 試體 1 之斷面 1 時間與溫度關係圖	63
圖 3-29 試體 1 之斷面 2 時間與溫度關係圖	64
圖 3-30 試體 1 之斷面 3 時間與溫度關係圖	64
圖 3-31 試體 1 之斷面 4 時間與溫度關係圖	65
圖 3-32 試體 1 之斷面 5 時間與溫度關係圖	65
圖 3-33 試體 2 之斷面 1 時間與溫度關係圖	66
圖 3-34 試體 2 之斷面 2 時間與溫度關係圖	66
圖 3-35 試體 2 之斷面 3 時間與溫度關係圖	67
圖 3-36 試體 2 之斷面 4 時間與溫度關係圖	67
圖 3-37 試體 2 之斷面 5 時間與溫度關係圖	68

圖 3-38 試體 3 之斷面 1 時間與溫度關係圖	68
圖 3-39 試體 3 之斷面 2 時間與溫度關係圖	69
圖 3-40 試體 3 之斷面 3 時間與溫度關係圖	69
圖 3-41 試體 3 之斷面 4 時間與溫度關係圖	70
圖 3-42 試體 3 之斷面 5 時間與溫度關係圖	70
圖 3-43 試體 1 之加溫爐升溫曲線	71
圖 3-44 試體 1 試驗後試體在爐內情況	71
圖 3-45 試體 1 試驗後防火被覆裂縫	72
圖 3-46 試體 2 之加溫爐升溫曲線	73
圖 3-47 試體 2 試驗時裂縫出現情況	73
圖 3-48 試體 2 試驗後試體在爐內情況	74
圖 3-49 試體 2 試驗後防火被覆裂縫	74
圖 3-50 試體 2 試驗後試體之永久變形	75
圖 3-51 試體 3 之加溫爐升溫曲線	75
圖 3-52 試體 3 試驗時裂縫出現情況	76
圖 3-53 試體 3 支撐端扭轉情況	76
圖 3-54 試體 3 試驗後在爐內情況	77
圖 3-55 試體 3 試驗後防火被覆裂縫	77
圖 3-56 試體 1 之時間-試體跨距中點撓曲度-鋼梁表面熱電偶測點平	

均溫度圖	78
圖 3-57 試體 2 之時間-試體跨距中點撓曲度-鋼梁表面熱電偶測點平	
均溫度圖	78
圖 3-58 試體 3 之時間-試體跨距中點撓曲度-鋼梁表面熱電偶測點平	
均溫度圖	79
圖 3-59 三組試體試驗結束後永久變形情形	79
圖 3-60 試體 2 與試體 3 之時間-試體跨距中點撓曲度圖	80
圖 4-1 試體縱向溫度分佈	80
圖 4-2 熱膨脹分析時試體斷面溫度分佈	81
圖 4-3 試體熱膨脹斷面應變	81
圖 4-4 Eurocode 3 鋼材在高溫下力學性質折減係數	82
圖 4-5 轉換斷面	82
圖 4-6 分析時試體 1 在斷面 1 輸入之溫度數據	83
圖 4-7 分析時試體 1 在斷面 3 輸入之溫度數據	83
圖 4-8 分析時試體 2 在斷面 1 輸入之溫度數據	84
圖 4-9 分析時試體 2 在斷面 3 輸入之溫度數據	84
圖 4-10 分析時試體 3 在斷面 1 輸入之溫度數據	85
圖 4-11 分析時試體 3 在斷面 2 輸入之溫度數據	85
圖 4-12 分析流程圖	86

圖 4-13 試體 1 之撓曲分析與試驗結果比較	87
圖 4-14 試體 2 之撓曲分析與試驗結果比較	87
圖 4-15 試體 3 之撓曲分析與試驗結果比較	88



第一章 緒論

1.1 研究背景

全球各地高速發展，過度的開發使土地資源大幅減少，建築物必須往高空發展才能滿足需求，因而造成高樓林立。鋼構造能夠有效減少建築物之自重，鋼材強度大能減少構件之斷面積，而且有良好的韌性，以及能夠使建築物有效抵抗地震的侵襲，保障人民的性命及財產，故鋼構造已廣泛被使用於高層建築物。

鋼構造縱使擁有上述等之優點，但伴隨而來的是鋼材的不耐熱，當溫度提高時鋼材的材料強度就會逐漸減少。近年內美國 911 事件世貿大樓之倒塌肇因於大火，與國內東帝士大樓之嚴重火害，使人們再一次關注鋼構造的耐火能力，國內及國外學者也紛紛對這方面進行很多研究。當鋼材溫度超過 500°C 時，鋼材的強度會大幅下降，而一般火災的環境溫度約 1000°C ，故鋼結構規範也要求鋼構造必須進行防火被覆材施工，目的在於減慢火災時熱能傳遞到鋼材，以確保在一定防火時效下結構物的安全。所以鋼構造受嚴重火害時會有機會發生倒塌，故研究鋼構造在高溫下之行為成為了一項重要之課題。

1.2 研究目的

本研究之目的在於探討合成梁在高溫下之撓曲行為，以不同防火被覆厚度，及有否載重的情況下，探討對合成梁撓曲行為之影響，並建立一套合理之分析模型，分析合成梁在高溫下之撓曲行為。

1.3 研究方法

本研究按照 CNS 12514 (經濟部標準檢驗局 1997) 對水平承重構造的耐火性能進行試驗，以兩組相同條件 UL 認證 1 小時防火時效厚度的防火被覆試體分別進行載重及無載重條件的試驗，以判定兩組試體的耐火性能。進行一組按 CNS 要求使用 UL 規定防火時效之防火被覆厚度時，必須以 1.25 倍厚度之防火被覆試體以載重條件的試驗進行測試，測試不同厚度之防火被覆材料對耐火性能的影響。

分析方法是基本的材料力學方法推導一套合理之分析模型，以熱膨脹及材料力學性質折減的方法進行分析，再將前述兩者之分析結果疊加即為合成梁之撓度。利用試驗時獲得之鋼梁表面溫度數據，輸入至這分析模型，分析的撓曲結果與試驗時實際量測的數據進行比較，驗證此分析模型之合理性。

1.4 論文內容

本文共分為五章。第一章介紹鋼構造防火之重要性與本研究之目的及研究方法。第二章回顧國內外相關耐火性能判定之規範及有關本研究之相關文獻。第三章介紹試驗之規劃，詳細說明試體之製作、試驗設置、量測儀器設置、試驗步驟及試驗結果與討論。第四章為說明分析方法之建立，包括合成梁之熱膨脹分析與高溫下材料力學性質折減之分析，及以試驗中所量測之數據驗證分析模型。第五章為本研究之結論與建議。



第二章 國內外相關規範及文獻回顧

由於國內對於鋼構造之火害研究缺乏充分研究成果，所以國內行使之「建築物構造部分耐火試驗法」中對水平構造相關試驗規定的訂定大多參考國外相關規範。國內外水平承重構造耐火試驗規範比較如表 2-1 所示。本章將回顧國內外相關水平構造之耐火試驗規範及關於本研究之相關研究文獻。

2.1 國內外相關水平承重構造耐火試驗規範

目前國內的「建築物構造部分耐火試驗法」之修訂大多參照 ISO 834 (International Organization for Standardization)，而國外相關主要規範包括英國 BS 476 (British Standards Institution) 及美國 UL 263 (Underwriters Laboratories Inc.)。

2.1.1 國際標準組織 ISO 834 規範

ISO 834 規範為國內 CNS 12514 規範修訂的主要參考，其加熱溫度曲線為 $T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$ 。評定破壞基準與國內 CNS 12514 規範一樣，但對於試體受熱長度沒有要求。梁試體之破壞溫度為單點容許最高溫度為 550°C ，平均溫度為 500°C ；承重破壞為最大撓曲度為 $L^2/400d$ (mm)，最大撓曲速率為 $L^2/9000d$ (mm/min)。

2.1.2 英國 BS 476 規範

英國 BS 476 規範加熱溫度曲線為 $T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$ 。要求試體受熱長度至少 4 m。進行加載試驗時，容許最大撓度為 $L/20$ (mm)，容許最大撓曲速率為 $L^2/9000d$ (mm/min)，單點溫度不超過 650°C 及平均溫度不超過 550°C 。

2.1.3 美國 UL 263 規範

美國 UL 263 加熱條件為 30 分鐘爐內溫度須達到 843°C ，1 小時須達到 927°C 。要求試體受熱長度至少 3.7 m。進行載重或無載重試驗時，並沒有以撓曲度及撓曲速率作為試驗之破壞基準。進行有載重試驗時，單點容許最高溫度為 704°C ，容許平均溫度為 593°C 。

2.1.4 國內 CNS 12514 規範

CNS 12514 加熱溫度曲線為 $T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$ ，要求試體受熱長度至少 4 m，對於邊界條件並沒有特定的要求。進行載重試驗時，破壞基準為撓曲度不超過 $L^2/400d$ (mm)，最大撓曲速率不超過 $L^2/9000d$ (mm/min)。進行無載重試驗，破壞基準為單點容許最高溫度為 550°C ，平均溫度為 500°C 。

2.2 國內外相關文獻回顧

Allam (2002) 等人進行試驗及分析提出簡單分析受熱鋼梁巨大撓曲之模型，此模型考慮懸鏈作用 (Catenary Action)，能夠預測跨距中點之撓度及受熱鋼梁因懸鏈作用產生巨大撓曲時之軸張力。其研究發現，周遭之束制條件對於鋼梁在加溫過程中之懸鏈作用影響甚大。

Bednarek and Kamocka (2004) 對於結構鋼在可變熱場中的熱應變進行分析研究，以試驗的方法探討不同升溫速率對結構鋼之熱膨脹的影響。其研究結果發現，結構鋼之熱應變行為在不同之升溫速率有所不同，升溫速率越快，結構鋼之熱應變較小，即相同溫度下，升溫速率較高的結構鋼之熱應變比升溫速率較慢的結構鋼之熱應變較少。

Benedetti and Mangoni (2006) 使用傅立葉級數展開 (Fourier Series Expansion) 建立合成梁在火害下反應之分析模型，該分析模型主要利用合成梁中混凝土樓板與鋼梁之間之可變形接合器的滑移，及斷面之變形諧合，產生斷面的曲率，計算合成梁之撓度。

Bradford (2007) 等人使用數值分析方法分析鋼構架中鋼梁在升溫時之行為，其研究利用非線性分析鋼梁在彈性範圍內之行為。其研究發現，鋼梁之細長比及束制條件對鋼梁之軸力及跨距中點之撓度有影響，鋼梁的細長比越小，在升溫過程中其內部產生之軸力及撓度較

小；勁度較大的束制元件會使鋼梁在升溫過程中產生之軸力較大，但相對產生跨距中點之撓度較少。

Ghojel and Wong (2005) 對於三面受熱的 I 型梁之複合構造建立簡化之分析模型，分析複合構造中 I 型梁之熱反應，此分析模型包括對流和傳播之熱轉移模組 - 鋼梁熱傳導之熱阻方程及估計上翼板至混凝土樓板熱傳導之相互關係，從而預測 I 型梁在火場中的溫度。並利用有限差分熱分析 (Finite Difference Thermal Analysis) 軟體進行相關之熱分析，與所建立之分析模型進行比較。

Wang (1997) 以有限元素分析軟體研究合成梁以部份防火被覆保護之可行性，只對合成梁中鋼梁之下翼板及 1/4 之腹板施加防火被覆。研究結果顯示在高溫下合成梁鋼梁部份施加部份防火被覆，防火被覆厚度為完全施加防火被覆厚度的 2 倍至 3 倍，能提供合成梁 30% 至 70% 之塑性彎矩能力。

許獻鐘 (2003) 利用非線性有限元素軟體 ANSYS 分析鋼結構在高溫下之行為，分別以不同形式之梁柱進行分析模擬，探討受高溫下承载力及防火被覆材料對結構元件之影響，及探討 ANSYS 在研究上之可行性，並以相關之研究文獻及規範進行比較。其研究結果顯示 ANSYS 中之部分元素能有效進行分析，及說明防火材料之設置對鋼

構架有良好之效果。

張燕如 (2007) 以向量式有限元素法 (Vector Form Intrinsic Finite Element, 簡稱 VFIFE) 對鋼結構高溫下之反應進行研究, 探討以不同載重比、溫度場分佈及束制條件對結構元件之行為影響, 並將單跨框架結構置於理想溫度場與模擬火場之溫度場進行模擬分析及比較。其研究結果顯示鋼梁斷面之溫度增量分佈對於鋼梁之撓曲行為有很大之影響; 而束制條件對高溫下鋼梁之行為影響甚大, 載重比影響相比較小; 並發現理想之溫度場與真實火場之溫度場對於結構行為之差別甚大, 建議設計時需以真實火場之溫度場為依據。

鄭紹材 (2007) 研究建築鋼結構防火被覆耐火性能與驗證機制, 以實驗方法研究出耐火塗料之熱分析, 並對不同地區之防火被覆性能之評估方式進行研究及比較。其研究之熱分析是使塗料受熱後分解, 產生之化學熱反應, 可獲得其熱重分析 (Thermogravimetric Analysis) 及熱差分析 (Differential Thermal Analysis) 之圖譜, 從而有效鑑別施工之材料與原設計之材料是否一致。

何明錦與陳生金 (2007) 以 6 組鋼結構梁柱接頭進行高溫結構試驗, 分別進行定溫加載及定載升溫之試驗, 以試驗結果探討鋼結構梁柱接頭在火場中之行為。其中 4 組試體無施加防火被覆, 另外 2 組為

施加 3 小時防火被覆厚度之試體。其研究結果顯示，定溫加載對於有防火被覆保護之試體之變位影響甚微，而對於無防火被覆之試體影響較大，強度有一定的折減；定載加溫對於試體有無防火被覆影響甚大，兩者有一定之溫度差異，無防火被覆之試體因為升溫較快，故材料軟化之行為嚴重，當溫度到達 400°C 後，試體之變形量劇增，而含有防火被覆之試體的變形量明顯較少。



第三章 鋼梁構造耐火性能之試驗

3.1 試驗規劃

本研究共進行 3 組鋼梁試體，如表 3-1 所示之耐火性能試驗，試體兩端支撐皆是以非束制形式進行試驗。其中 2 組試體施加相同厚度之防火被覆，為 UL 認證 1 小時防火時效厚度的 1 倍，分別進行載重及無載重條件之試驗；另外一組則施加 UL 認證 1 小時防火時效厚度的 1.25 倍防火被覆進行載重條件的試驗。藉由這三組試驗對載重與無載重條件試驗比較其耐火性能，即可得到鋼梁受不同厚度之防火被覆保護情況下對防火時效的影響，並能得到試體進行升溫試驗時之撓曲行為。本研究之試驗按照 CNS 12514 之規定進行。

3.2 試體設計

3.2.1 鋼梁試體

本研究共進行 3 組鋼梁試體之試驗，使用國內鋼構造常用鋼梁斷面 RH588×300×12×20，鋼材為 A36 材料。按照 CNS 12514 規定，若試驗未包含樓板，梁試體上方須對稱放置標準化之頂蓋板。該頂蓋板須以輕質混凝土厚板構成，密度 $650\pm 200 \text{ kg/m}^3$ ，每塊最大長度 1 m，厚度 $150\pm 25 \text{ mm}$ ，寬度至少為試體寬度之 3 倍。本次試驗則使用

樓板，以鋼承板 2W - 0.76、混凝土、剪力釘及鋼絲網製作，尺寸則按照標準化頂蓋板設計，寬度 90 cm，厚度為 15 cm。試體如圖 3-1 所示。

根據 CNS 對試體之要求，任一構造部分在實際使用中，若端部或周邊束制條件不同，則應分別對不同束制條件進行試驗，以及梁試體須採簡單支撐或對其邊界加以束制。本研究把試體梁設定為簡支梁，試體總長度為 9 m，支撐點跨距為 8 m，試體則有 6.5 m 長在加熱爐裏，滿足 CNS 12514 要求試體須至少加熱長度為 4 m 之要求。試體有 7.5 m 受到被覆包裹。試體在支撐處並提供側向支撐。

鋼梁在加載點處設置加勁板，避免鋼梁承受過大集中載重造成腹板發生壓皺，橫向加勁板之設置對試體梁撓曲變形與撓曲速率之影響甚小。

3.2.2 防火被覆

防火被覆是鋼材表面覆蓋一層隔熱良好的不燃材料，使降低熱傳導速率，即減慢外界高溫之傳導，使構件在防火時效內不致達到其強度及軟化之溫度，此即為防火被覆材料。防火被覆主要分為三大類：噴附式防火被覆材料、防火被覆板、膨脹型耐火塗料，這三種防火被覆各有優缺點。

噴附式防火被覆材料優點在於施工快、設計彈性大，但施工時污染性高及裝飾性低；防火被覆板施工快速，並可取代部份隔間板材，施工時不會造成污染，但設計彈性低，自重亦很大；膨脹型耐火塗料施工快速便利，施工時污染性低，裝飾性高，自重甚低，但單價卻較昂貴。三類防火被覆材料其防火的機理都不一樣，所含的成份也不一樣，但最終也能為構件提供一定的防火時效。

本次試驗採用國內常用之防火被覆種類及防火被覆材料，噴附式防火被覆材料為國內較常用的防火被覆材料，由於其便利性、成本低及效果顯著，廣泛應用國內鋼結構，故本計畫採用噴附式防火被覆材料（附錄一）。



3.3 試體製作

試體製作程序如下：

1. 製作鋼梁及鋼承板；
2. 安裝熱電偶線；
3. 樓板灌漿；
4. 防火被覆施工；
5. 防火被覆養護。

鋼梁及鋼承板組裝後運往台南縣歸仁鄉內政部建築研究所防火實驗中心，在鋼承板上澆灌混凝土為樓板，如圖 3-2 與 3-3 所示。之後進行熱電偶之安裝，熱電偶線安裝完成後進行檢測，以確定熱電偶線安裝後能正常傳輸訊號，熱電偶施工後如圖 3-4 與 3-5 所示。

防火被覆施工前，在鋼梁上設置鋼網，如圖 3-6 所示，以增加附著力降低發生剝落分離的情況。鋼梁設置鋼網後進行防火被覆施工，如圖 3-7 至 3-10 所示。防火被覆施工後按照規定要求，能以適當方法確認達到規定要求達到氣乾狀態平衡，得縮短其乾燥時間，否則按照要求濕式工法施工者需養護二個月以上。按照 CNS 12514 第 3.11.2 節對氣乾狀態要求，氣乾狀態係指構成材料之含水率如木材為 15% 以下，石膏等含有結晶水材料在 40°C 達到恆重時，為 2% 以下，其他材料則為 5% 以下，但試體置於室內其含水率達到一定之平衡者則不在此限。本試驗試體以含水率達到一定之平衡為要求。

本研究進行材料性質試驗，混凝土圓柱試體抗壓試驗及鋼梁鋼材拉力試片試驗。預拌混凝土強度為 20.7 MPa (3,000 psi)。混凝土圓柱試體以抗壓試驗測得 28 天強度為 27.2 MPa。進行試體耐火試驗時混凝土強度為 30.2 MPa (4,380 psi)。

鋼梁翼板與腹板切割取得之鋼材拉力試片進行拉力試驗，進行兩

組翼板之試片 Flange 1 及 Flange 2，兩組腹板之試片 Web 1 及 Web 2。拉力試片之應力應變曲線圖如圖 3-11 至圖 3-14 所示。測得 Flange 1 降伏強度為 335 MPa 及彈性模數為 202 GPa；Flange 2 降伏強度為 342 MPa 及彈性模數為 202 GPa；Web 1 降伏強度為 354 MPa 及彈性模數為 199 GPa；Web 2 降伏強度為 374 MPa 及彈性模數為 206 GPa。所以鋼材平均降伏強度為 351 MPa，平均彈性模數為 202 GPa。

3.4 試驗設置

經過養護後之試體吊裝到試驗設備中，試體設置於加溫爐內之情況如圖 3-15 所示，試驗設置如圖 3-16 至 3-18 所示，試體兩端設置支承端之細部機制如圖 3-19 所示，北側及南側支撐如圖 3-20 及 3-21 所示。試體吊裝完畢後蓋上爐蓋板，之後把位移計安裝在試體上，如圖 3-22 所示。最後將加載設備吊裝到試驗框架上，如圖 3-23 所示。之後把位移計及熱電偶線連接資料擷取器，最後把所有空隙填塞防火棉防止試驗進行時高溫氣體冒出產生危險。

3.5 量測系統

3.5.1 熱電偶設置

依 CNS 規定，試體需設置熱電偶監測溫度，熱電偶測點配置在

跨度中間，及另外兩處從爐邊起算 50 cm 點與跨度中間之中點處。按照規定每一處試體斷面之熱電偶測點有 4 點，所以按照規定測點共 12 點。試驗法中規定需使用 0.75 級性能以上及直徑 0.65 mm 之 K 型熱電偶線。本次試驗分別在離試體支撐點 1.5 m 處增加熱電偶測點，即共增加兩處量測點，故測點共 20 點，試體內部熱電偶測點之配置位置如圖 3-24 及圖 3-25 所示。

3.5.2 位移計設置

本次試驗需監測最大撓曲度及最大撓曲速率，在鋼梁跨距中點處進行量測。因為位移計 (Linear Variable Differential Transducer, LVDT) 不耐高溫，故需在試體上方設置一根陶瓷棒，再利用位移計量測陶瓷棒的相對變位，從而監測鋼梁的撓曲度，位移計與陶瓷棒的設置如圖 3-26 所示。在淨跨距的 1/4 及 3/4 處亦會使用相同方法量測撓曲度。

3.6 試驗步驟

試驗設備安裝完成後開始進行試驗，當進行加載試驗時，按照規定試驗載重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。本次試驗施加服務性載重，按照試驗法要求加載點位於試體支撐間距的 1/8、3/8、5/8 及 7/8 的地方，即分別距左右支撐點 1 m 及 3 m 處設置加載點。根據鋼梁之標稱強度以容許應力法

計算 (附錄二)，此斷面尺寸的試體在常溫下每個加載點需施加 95.2 kN (9.7 tf) 的力量，而試驗時實際加載的力量為 98.1 kN (10 tf)。

當試驗正式開始時爐內按照下式所示進行數值控制加熱，依據 CNS 標準加熱溫度-時間曲線，如圖 3-27 所示。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$$

式中，T = 平均爐內溫度 (°C)

t = 試驗經過時間 (分)

3.7 性能基準與判定

三組試體根據標準加熱溫度-時間曲線加溫 1 小時後結束試驗。

本次試驗量測試體梁跨距中點之撓度為最重要部份，因試驗法 CNS

15241 評定防火時效有兩個方法：

1. 無載重條件之下鋼材溫度最高值若超過 550°C 或平均值 500°C 即表示試體構造已達破壞溫度，視為耐火性能失敗。
2. 載重時試體撓度超過最大撓曲度規定或撓曲速率超過最大撓曲速率規定，即視為承重能力失敗。

按照 CNS 15241 對水平承重構造承重能力規定為以下所示：

最大撓曲度 (mm)， $D = L^2 / 400d$

最大撓曲速率 (mm/min)， $\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d}$


式中， L = 試體之淨跨度 (支承點間距)，(mm)。

d = 試體構造斷面之壓縮側緣至拉伸側緣之距離，(mm)。

鋼梁 RH588×300×12×20 以 8 m 淨跨距在試驗時所容許的撓曲度為 272.1 mm，最大撓曲速率為 12.1 mm/min。

3.8 試驗結果與討論

3.8.1 試體行為



本次研究共進行 3 組加載及無加載之加溫試驗，試體 1 為 11 mm 防火被覆厚度進行無載重之加溫試驗，試體 2 為 14 mm 防火被覆厚度進行載重之加溫試驗，試體 3 為 11 mm 防火被覆厚度進行載重之加溫試驗。三組試體按升溫曲線加溫 1 小時後，爐內溫度約為 945°C。本次試驗按照 CNS 12514 標準規定之判定基準，無加載之加溫試驗之破壞基準為鋼梁表面任一測點之溫度超過 550°C 或平均溫度超過 500°C；加載之加溫試驗破壞為試體最大撓曲度超過 272.1 mm 或最大撓曲速率超過 12.1 mm/min。本次試驗結果彙整於表 3-2。三組試驗的熱電偶線在加溫試驗過程中量測到鋼梁表面的溫度數據如圖 3-28

至圖 3-42 所示。

3.8.1.1 試體 1

本組試體為 UL 規定 1 小時防火時效之試體，防火被覆厚度為 11 mm，進行無加載之加溫試驗。試驗加溫 1 小時，量測到爐內之升溫曲線如圖 3-43 所示。

加溫進行約 16 分鐘，爐內平均溫度約 760.3°C ，鋼梁熱電偶測點平均溫度為 134.4°C ，最高溫處達到 193.6°C 。試驗進行約 48 分鐘，鋼梁熱電偶測點 2B 量測溫度超過 550.0°C 。試驗加溫 1 小時，爐內平均溫度為 942.5°C ，最高溫處達到 954.0°C ，鋼梁熱電偶測點最高溫發生在編號為 2B 點，溫度為 635.9°C 比規定要求高出 85.9°C ，平均溫度為 500.2°C ，稍為高出規定要求 0.2°C ，試體跨距中點之撓曲度為 36.1 mm，最大撓曲速率為 1.2 mm/min。

試驗結束後加溫爐內之溫度下降到 50°C 以下時，觀察到試體之防火被覆出現很多裂縫，散佈在試體腹板及梁下翼板處，另外亦觀察到試體存有永久變形（試體跨距中點 23 mm），混凝土樓板出現裂縫，鋼承板出現局部挫屈，試驗後等待冷卻後試體情況如圖 3-44，防火被覆裂縫如圖 3-45 所示。

3.8.1.2 試體 2

本組試體之防火被覆厚度是以 UL 認證 1 小時防火時效的 1.25 倍設計，此設計符合 CNS 若取用 UL 所認證厚度之要求，所以防火被覆厚度為 14 mm。

這組試驗四點加載點各加載 98.1 kN，此力量在試驗前 15 分鐘加載到試體上。力量之加載分為三個步驟進行，每點加載點先加載到 29.4 kN，等待力量加載穩定後加載到 49.1 kN，最後再加載到 98.1 kN。當加載力量穩定後，試體跨距中點產生 8.2 mm 之撓曲度。等待 15 分鐘即進行加溫試驗。試驗加溫 1 小時升溫曲線如圖 3-46 所示。

當加溫進行約 20 分鐘後，從觀視窗觀察到試體中部加勁板間及其他部份下翼板之防火被覆產生明顯裂縫，如圖 3-47 所示，但從熱電偶測點監測溫度沒有明顯加快，這些裂縫推測是由於試體撓曲度較大而產生。加溫約 30 分鐘，撓曲度變化逐漸增大，此時平均溫度約為 200.0°C，測點最高溫則達到 278.7°C，鋼梁腹板溫度較其他位置測點高，溫度在 217.2°C 至 278.7°C 之間。加溫 1 小時，爐內平均溫度為 944.2°C，最高溫為 961.2°C，熱電偶測點最高溫為 538.2°C，平均溫度為 412.6°C；試體梁跨距中點之撓曲度為 32.0 mm，最大撓曲速率為 1.8 mm/min。

為進一步探討試體加溫超過 1 小時效之行為，延續進行加溫試驗至 2 小時。於加溫 62 分鐘時出現鋼梁熱電偶測點溫度達到 550°C 。加溫 75 分鐘時熱電偶測點平均溫度超過 500°C 。最終撓曲度為 183.0 mm。

試驗結束後，發現有明顯之永久變形（試體跨距中點 98 mm），混凝土樓板出現細微裂縫，鋼承板局部挫屈，並觀察到防火被覆損壞嚴重，如圖 3-48 至圖 3-50 所示。

3.8.1.3 試體 3

此組試體之防火被覆厚為 11 mm，載重條件與試體 2 相同，施加载重後試體跨距中點產生 6.9 mm 之撓曲度。試驗加溫 1 小時升溫曲線如圖 3-51 所示。

試驗進行到約 22 分鐘後，試體跨距中點之撓曲速率逐漸加快，此時熱電偶測點最高溫度達 267.5°C ，平均溫度約 206.2°C 。加溫約 27 分鐘，試體之防火被覆陸續出現裂縫，散佈在腹板及梁下翼板處，如圖 3-52 所示。加溫試驗進行 46 分鐘，熱電偶測點 3B 已超過 550°C 。58 分鐘時平均溫度超過 500°C 。試驗加溫 1 小時後，跨距中點之撓曲度為 42.8 mm，最大撓曲速率為 1.0 mm/min。鋼梁熱電偶最高溫測點 3B 測出溫度為 650.9°C ，平均溫度為 514.3°C 。在加溫試驗進行中從

兩側支承處觀察到試體有出現扭轉的情況，如圖 3-53 所示。

為進一步探討試體加溫超過 1 小時效之行為，延續進行加溫試驗至 93 分鐘。最終跨距中點之撓曲度為 262.2 mm。等待爐內溫度降低後，觀察到防火被覆出現裂縫，以及試體有明顯之永久變形（試體跨距中點 150 mm），如圖 3-54 及圖 3-55 所示。

3.8.2 試驗結果

三組試體加溫 1 小時後其各斷面加溫 1 小時後之溫度數據整理於表 3-3。試驗結果與國內外規範比較如表 3-4 所示。三組試體撓曲度與時間之關係如圖 3-56 至圖 3-58 所示。三組試體永久變形如圖 3-59 所示。

從試驗過程中量測到的溫度，發現鋼梁腹板的溫度最高，下翼板次之，上翼板溫度最高。由於本次試驗是三面加熱（左右兩側及底部），腹板是兩面受熱且較薄，熱傳導較快，所以溫度較高；上翼板因為如樓板連接，樓板能減少上翼板之溫度，且頂部並沒有直接的加溫，故上翼板之溫度最低。

加溫試驗過程中防火被覆出現裂縫，主要原因是因為其屬於脆性材料，試體因為受熱產生變形，黏附在鋼梁上的防火被覆沒有足夠的

延展性跟隨鋼梁變形，故產生裂縫。

根據圖 3-28 至圖 3-43 中 3 組體試體熱電偶線量測到的溫度顯示，試體溫度達到約 100°C 時，其溫度會出現短暫的持平狀況，之後溫度才繼續上升，原因在於防火被覆材料內的水份吸收足夠熱能後蒸發，故升溫曲線出現了短暫的持平，等待全部水份蒸發後，溫度才繼續上升。

從圖 3-56 至圖 3-58 可以看到當試體溫度達到 200°C 後，試體之撓曲速率加快，原因是鋼材達到 200°C 時，其彈性模數開始衰減，而且在 200°C 後，試體斷面之溫度差逐漸加大，撓曲因為熱膨脹的影響而增加。



3.8.2.1 試體 1

試體 1 無加載，以 CNS 12514 判定耐火性能破壞條件為以破壞溫度為基準，因熱電偶測點 2B 在 48 分鐘時最高溫度已超過 550°C；並且在未達到 1 小時的時候，平均溫度亦超過容許之 500°C，故此組試體並不滿足 1 小時防火時效之要求。本組試體完成 1 小時加熱後，其熱電偶測點最高溫度為 635.9°C，平均溫度為 500.2°C，並未超過 UL 規範之最高溫度 649°C 及平均溫度 538°C，所以此組試體滿足 UL 之 1 小時防火時效。1 小時後此組試體跨度中點之撓曲度為 36.1 mm。

3.8.2.2 試體 2

試體 2 之防火被覆厚度為 14 mm，為 UL 規範 1 小時防火時效所需防火被覆厚度的 1.25 倍，亦為 CNS 之要求。本組試體進行加載試驗，按照 CNS 12514 進行載重試驗是以承重破壞為破壞基準。當加溫試驗進行 1 小時，鋼梁跨度中點之撓曲度為 32.0 mm 及撓曲速率 1.8 mm/min 均未超過容許之要求，未達到規範定義之承重破壞，所以本組試體滿足 1 小時防火時效。若以 CNS 無載重試驗之破壞溫度判定基準來討論，本組試體經過 60 分鐘加溫後，其熱電偶測點最高溫度為 538.2°C，平均溫度 412.6°C，均沒有達到破壞溫度；所以，此組試體若以破壞溫度判別亦滿足 1 小時防火時效所要求。

若以 UL 263 規範來討論，試體在加溫 1 小時並沒有超過單點最高容許溫度 704°C 及平均容許溫度 593°C；當加溫 92 分鐘後，熱電偶測點最高溫度出現超過 704°C；約 95 分鐘後則出現平均溫度超過 593°C，故本組試體滿足 UL 規範 1 小時防火時效。

3.8.2.3 試體 3

試體 3 之防火被覆厚度為 11 mm，為 UL 規範 1 小時防火時效所需之防火被覆厚度，但並不滿足 CNS 的 1 小時防火時效所需厚度。本組試體進行載重試驗，根據 CNS 為以承重破壞為破壞基準。試驗

1 小時，跨距中點之撓曲度為 42.8 mm，撓曲速率為 1.0 mm/min，並沒有超過規定的最大撓曲度 272.1 mm 及最大撓曲速率 12.1 mm/min，所以滿足 1 小時防火時效。但若以無載重試驗之破壞溫度基準，試驗進行到 46 分鐘時，熱電偶最高溫測點已超過 550°C，58 分鐘時平均溫度超過 500°C，所以以破壞溫度基準判定，此試體 3 不符合 1 小時防火時效。

若以 UL 263 規範討論，同樣地，試體 3 在 1 小時內並沒有出現單點超過 704°C 及平均溫度超過 593°C；加溫到 73 分鐘時才出現單點超過 704°C；74 分鐘則出現平均溫度剛達到 593°C，故此組試體滿足 UL 之 1 小時防火時效。

3.8.3 試驗結果討論

3.8.3.1 加載之影響

試驗時各點實際加載的力量為 98.1 kN (10 tf)，換算為試體承受單位長度載重為 $w_{\text{test}} = 5.38 \text{ tf/m}$ 。依據試體之標稱強度計算的單位長度載重為 $w_{\text{a,specified}} = 5.25 \text{ tf/m}$ 。若以試體的實際強度計算的單位長度載重為 $w_{\text{a,steel}} = 5.79 \text{ tf/m}$ 。附錄三為以合成梁依據試體的實際強度計算的單位長度載重為 $w_{\text{a,composite}} = 15.2 \text{ tf/m}$ 。由此可見實驗時施加的載重對應於鋼梁實際強度之比值 $w_{\text{test}} / w_{\text{a,steel}}$ 為 93%。實驗時施加的載

重對應於合成梁實際強度之比值 $W_{\text{test}} / W_{\text{a,composite}}$ 為 35%。

試體 1 與試體 3 具有相同防火被覆厚度 11 mm，試體 1 無加載，試體 3 為加載試驗。從熱電偶線監測到這兩試體之溫度接近，兩組試體達到單點破壞溫度 550°C 及平均破壞溫度 500°C 時間只相差 2 分鐘。顯示在有樓板之試體加載實際強度之 35% 對鋼梁溫度之影響甚小，但依目前 CNS 規範，試體未能通過破壞溫度者，卻能通過載重試驗之 1 小時防火時效。從位移計量測兩組試體之撓曲度，試體 3 受到載重影響，令 1 小時加溫時其跨距中點撓曲度為 42.8 mm，試體 1 則為 36.1 mm。

3.8.3.2 防火被覆厚度之影響

比較試體 2 與試體 3 (如圖 3-60 所示)，兩者皆為加載試驗，試體 2 防火被覆厚度為 14 mm，試體 3 為 11 mm。試驗結果顯示從鋼梁熱電偶測點量測加溫 1 小時之單點溫度與平均溫度分別為試體 2：538.2°C 與 412.6°C，試體 3：650.9°C 與 514.3°C。明顯看出防火被覆之影響，防火被覆越厚，熱傳導越慢，試體升溫較慢。若以 CNS 破壞溫度判定，試體 2 可達 1 小時防火時效，而試體 3 則不符合。

試體 2 與試體 3 加溫 1 小時，試體跨距中點之撓曲度分別為 32.0 mm 與 42.8 mm。此時試體 2 鋼梁熱電偶測點之平均溫度為 412.6°C，

試體 3 則為 514.3°C 。依據 Eurocode 3 規範所列之比例限度與彈性模數折減係數分別為試體 2：0.412 與 0.687，試體 3：0.334 與 0.559。因而防火被覆厚度厚者，將延緩試體鋼梁之升溫，進而影響鋼材之有效降伏強度、比例限度與彈性模數，導致撓曲度與撓曲速率之減緩。



第四章 分析模式

4.1 分析模式介紹

鋼梁斷面存在溫度差時，鋼梁因斷面從上至下不同的溫度，產生不同之熱膨脹，使鋼梁產生額外之撓曲行為。根據 Eurocode 3 所提供之鋼材在高溫下力學性質之折減係數顯示，鋼材力學性質隨著溫度提高而逐漸衰減，所以材料的力學性質逐漸衰減，也會使鋼梁撓度逐漸增加。所以合成梁在高溫下，影響其撓度行為的因子為斷面溫度差與其材料的力學性質衰減。故本研究所建立之分析分成兩個主要步驟：熱膨脹之分析及加載下材料高溫力學性質折減之分析。經過前述兩者之分析，合成梁之總撓度為兩分析結果之疊加。

4.2 分析基本假設

進行合成梁高溫下之撓曲度分析，其基本假設如下所示：

1. 試體的縱向溫度分佈為線性且對稱。
2. 進行熱膨脹分析時試體之斷面溫度變化為線性分佈。
3. 斷面中每一肢材的溫度為均勻，但所有肢材之溫度並不一定相同。
4. 鋼梁與樓板完全接合。
5. 試體之變形滿足尤拉梁理論 (Bernoulli-Euler)。

6. 假設樓板曲率變化與鋼梁一致。
7. 忽略自重之影響。

4.3 合成梁之熱膨脹分析

4.3.1 熱膨脹係數

鋼材之熱膨脹性質對於鋼構造在高溫下時之行為影響甚大，故在分析及設計時必需考慮。各國相關規範對於鋼材熱膨脹係數之規定不同，如歐洲規範 Eurocode 3 是給予鋼材之熱膨脹係數為一定值，另外如美國規範 ASCE 是定義鋼材之熱膨脹係數為一關於溫度之函數。本研究則採用歐洲規範 Eurocode 3 建議之鋼材熱膨脹係數。

4.3.2 熱膨脹分析

根據前述之假設條件，試體溫度分佈條件如圖 4.1 及圖 4.2 所示。以下將推導合成梁之熱膨脹分析方法。

由於試體縱向溫度之分佈為線性及對稱，故各肢材縱向溫度分佈之函數 $T(x)$ 如下

$$T(x) = T_1 + \frac{x - L_1}{L_2 - L_1} (T_2 - T_1) \quad (4-1)$$

其中：

$$T(x) = \begin{bmatrix} T_{\text{top}}(x) \\ T_{\text{bot}}(x) \end{bmatrix} \quad T_1 = \begin{bmatrix} T_{1,\text{top}} \\ T_{1,\text{bot}} \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} T_{2,\text{top}} \\ T_{2,\text{bot}} \end{bmatrix}$$

$T_{1,\text{bot}}$ = 斷面 1 之下翼板溫度

$T_{1,\text{top}}$ = 斷面 1 之上翼板溫度

$T_{2,\text{bot}}$ = 斷面 2 (為試體跨距中點的斷面) 之下翼板溫度

$T_{2,\text{top}}$ = 斷面 2 之上翼板溫度

L_1 = 斷面 1 與端點之距離。

L_2 = 斷面 2 與端點之距離。

由於不同之溫度會令鋼材產生不同之伸長量，故根據假設條件中的斷面溫度線性分佈，而且鋼材之熱膨脹係數為常數，所以斷面之應變亦因溫度線性分佈呈線性，如圖 4.3 所示，所以斷面便會產生一曲率

$$\phi(x) = \frac{\alpha[T_{\text{bot}}(x) - T_{\text{top}}(x)]}{d} \quad (4-2)$$

其中，

$T_{\text{bot}}(x)$ = 斷面在 x 處中翼板之溫度。

$T_{\text{top}}(x)$ = 斷面在 x 處中翼板之溫度。

d = 鋼梁斷面之深度。

α = 鋼之熱膨脹係數。

故在某一時間下，曲率縱向變化之函數為

$$\begin{aligned}\phi_1(x) &= \frac{\alpha}{d} \left\{ \left[T_{1,\text{bot}} + \frac{x-L_1}{L_2-L_1} (T_{2,\text{bot}} - T_{1,\text{bot}}) \right] - \left[T_{1,\text{top}} + \frac{x-L_1}{L_2-L_1} (T_{2,\text{top}} - T_{1,\text{top}}) \right] \right\} \\ &= \frac{\alpha}{d} \left[(T_{1,\text{bot}} - T_{1,\text{top}}) + \frac{x-L_1}{L_2-L_1} (T_{2,\text{bot}} - T_{1,\text{bot}} - T_{2,\text{top}} + T_{1,\text{top}}) \right] \\ &= \frac{\alpha(x-L_1)}{d(L_2-L_1)} (T_{2,\text{bot}} - T_{1,\text{bot}} - T_{2,\text{top}} + T_{1,\text{top}}) + \frac{\alpha(T_{1,\text{bot}} - T_{1,\text{top}})}{d}\end{aligned}$$

$$\text{令 } A_1 = \frac{\alpha}{d(L_2-L_1)} (T_{2,\text{bot}} - T_{1,\text{bot}} - T_{2,\text{top}} + T_{1,\text{top}}) \quad (4-3)$$

$$A_2 = \frac{\alpha(T_{1,\text{bot}} - T_{1,\text{top}})}{d} - A_1 L_1 \quad (4-4)$$

$$\therefore \phi_1(x) = A_1 x + A_2 \quad (4-5)$$

根據材料力學公式

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \phi(x) = A_1 x + A_2$$

$$\therefore \frac{dv}{dx} = \frac{1}{2} A_1 x^2 + A_2 x + c_1 \quad (4-6)$$

當 $x = L_2$ 時，轉角 $v'(L_2) = 0$ ，所以

$$c_1 = -\left(\frac{1}{2} A_1 L_2^2 + A_2 L_2 \right) \quad (4-7)$$

$$\therefore v(x) = \frac{1}{6} A_1 x^3 + \frac{1}{2} A_2 x^2 + c_1 x + c_2 \quad (4-8)$$

當 $x = 0$ 時，撓度 $v = 0$ ，所以

$$c_2 = 0$$

$$\text{因此， } v(x) = \frac{1}{6}A_1x^3 + \frac{1}{2}A_2x^2 + c_1x \quad (4-9)$$

$$\therefore v(L_2) = \frac{1}{6}A_1L_2^3 + \frac{1}{2}A_2L_2^2 + c_1L_2 \quad (4-10)$$

從本次試驗研究中所得到的鋼梁表面溫度數據，把試體中斷面 1 及斷面 5 的上翼板及下翼板的溫度分別取平均值，此平均值為分析模型中斷面 1 之溫度數據，這是為了使左右兩側溫度在分析時呈對稱。然後將不同時間點所計算的平均值與斷面 3 的上翼板及下翼板溫度數據，分別輸入至 (4-3)、(4-4)、(4-7) 及 (4-10) 式，平均值代入的是建立公式中的斷面 1，而試驗中的斷面 3 則代入公式中的斷面 2，通過計算便可求出加溫過程中因熱膨脹使試體跨距中點產生之撓度。

4.4 合成梁在高溫下材料力學行為折減之分析

眾所周知，鋼材的力學性質會隨着溫度的升高而衰減。根據 Eurocode 3 所提供之鋼材在高溫下之力學性質折減係數所示，當鋼材溫度達到 200°C 時，鋼材之彈性模數開始進行折減；當溫度上升至 500°C 時，鋼材之有效降伏強度亦開始進行折減，此時之有效降伏強度為常溫時的 0.780，彈性模數為常溫下的 0.600。Eurocode 3 對於鋼材在不同溫度之有效降伏強度折減係數、比例限度以及線彈性範圍斜率折減係數如表 4-1 及圖 4-4 所示。所以施加在試體上的力量條件不改變時，試體亦會因為溫度造成材料的力學性質衰減而使撓曲度逐漸

增加。由於自重的力量較載重少，故忽略自重所產生之影響。

4.4.1 Eurocode 3 對於鋼材在高溫下之力學性質折減

各國規範對於鋼材在高溫下力學性質折減之規定都不大相同，一些規範會給予公式來計算折減係數；另外則有一些是以列表的方式給予特定溫度的折減係數，在這些特定的溫度點之間進行線性內插，計算所需溫度之折減係數，歐洲規範 Eurocode 3 則屬此類。本研究所使用之鋼材力學性質折減係數將依據 Eurocode 3 之規定。

4.4.2 合成梁加載下材料高溫力學性質折減之分析方法

合成梁除了因為斷面之溫度差產生撓度之外，由於溫度之提升使材料之強度不斷減弱亦會使撓度不斷增加。下文將介紹材料力學性質折減分析方法與步驟。

透過材料力學的線彈性公式 $EIv'' = M(x)$ ，解此微分方程可得到試體對於縱向之撓度函數 $v(x)$ 。在一般情況下鋼材之彈性模數 E 及慣性矩 I 都是定值。但當試體放在加溫爐中進行加溫時，因加溫爐中的溫度場並不均勻及鋼材熱傳導的性質，使分佈在試體上的溫度並不均勻，這亦令不同位置的試體所使用的折減係數都不一樣，故彈性模數也不再是定值。 $M(x)$ 則是試體縱向承受之彎矩函數。

根據假設條件，進行材料力學性質分析時，合成梁斷面中每一肢材的溫度為均勻，而且所有肢材之溫度並不一定相同，所以鋼梁斷面的上翼板、腹板及下翼板的溫度都不一樣，因此所使用之折減係數是不一樣。材料力學公式 $EIv'' = M(x)$ 中的 E 值都是代表一個斷面的彈性模數，所以無法直接代入三個肢材的彈性模數。

故此可使用材料力學中線彈性的另一方法 - 轉換斷面，轉換斷面方法常用在計算合成梁中樓板與梁接合時的應力情況。由於樓板及梁的彈性模數並不一樣，透過樓板及梁兩者的彈性模數的比值，計算時透過此比值改變樓板或梁的寬度大小，使斷面中兩元件變成單一材料，便於計算。

在本研究中，試體為合成梁，斷面中鋼梁與樓板兩元件的材料具有不同的彈性模數。在加溫試驗進行時，因溫度場不均所造成試體溫度的不均勻，使鋼梁斷面各肢材因不同溫度之彈性模數折減係數產生不同之彈性模數。所以透過各部份彈性模數之比值，改變斷面中各元件之寬度，轉換成一個相同彈性模數的斷面，其彈性模數為常溫下鋼之彈性模數，如圖 4-5 所示，從而改變原本合成斷面之 I 值，而彈性模數之比值是以常溫下鋼材的彈性模數為基準。使用此方法既可以簡化不同彈性模數之問題，且可以把材料升溫時的力學性質衰減也考

慮。

4.4.3 合成梁加載下材料高溫力學性質折減之分析步驟

由於 Eurocode 3 提供之計算折減係數方法是透過兩特定溫度之間進行線性內插，所以即溫度到達一特定點後 (100°C、200°C、300°C、.....)，折減係數在下一特定溫度區間之斜率就會改變。

因假設條件中，試體縱向之溫度分佈是線性，即試體溫度從支撐點往試體跨距中點遞增，所以在支撐點與試體跨距中點之間可能會出現這些折減係數斜率改變點。故每個時間點進行此分析時，必須找出上翼板、腹板、下翼板的折減係數斜率改變點位置。因各肢材的升溫速率不一樣，所以出現的斜率改變點位置都不一樣，所以試體支撐點至跨距中點之間會出現多點之斜率改變點。

找出這些特定點後，便可依這些點之位置及溫度區間，給予不同位置相應的折減係數進行轉換斷面。進行轉換斷面時，彈性模數之比值是以常溫下鋼之彈性模數為基準。轉換斷面後，便建立中性軸 (neutral axis) 關於縱向之函數，之後建立慣性矩沿試體縱向之函數。

轉換斷面及建立慣性矩函數後，建立彎矩 $M(x)$ 之函數。建立彎矩函數後，可解微分方程 $v'' = M(x)/EI(x)$ 。因力量及溫度場分佈為

對稱，故邊界條件為跨距中點之轉角 $v'(L)$ 為 0，以及支撐點之變位 $v(0)$ 為 0。解此微分方程後即可計算到試體跨距中點之撓度。

合成梁高溫下材料力學性質折減分析流程如下：

1. 輸入合成梁之溫度數據；
2. 建立溫度分佈函數；
3. 找出試體縱向折減係數函數曲線曲率改變點；
4. 建立折減係數函數；
5. 轉換斷面後，建立慣性矩函數 $I(x)$ ；
6. 建立彎矩函數 $M(x)$ ；
7. 解微分方程 $EI(x)v'' = M(x)$ 並計算跨距中點之撓度。

4.5 分析結果與討論

分析是以試驗時從鋼梁表面熱電偶所量測到的溫度數據，以及鋼梁與樓板的尺寸和彈性模數，每個加載點加載到試體上的力量及位置，輸入至前述之所建立之分析模型。由於實際之加溫試驗進行時，試體兩端的溫度並不會是一樣，故把兩端之溫度取平均，轉換成一對稱之溫度分佈，所以以試驗研究中試體的斷面 1 及斷面 5 中的溫度取平均，斷面 3 在正中間故不用平均。試體 1 至試體 3 輸入次之溫度數據如圖 4-6 至圖 4-11。經過熱膨脹分析及高溫下材料力學性質折減之

分析所得到之結果，把這兩結果疊加即為分析之總撓度。分析方法之流程如圖 4-12 所示。

本研究按照所建立之分析模型，以 Matlab 撰寫程式，以每筆時間點讀取之溫度數據進行計算，計算出該時間點之撓曲度。最後把每個時間點的分析結果，組成時間-撓曲曲線。

4.5.1 試體 1

試體 1 為無加載之加溫試驗，故試體 1 只需進行熱膨脹分析。分析結果與試驗結果比較如圖 4-13 所示。根據圖 4-13 所示，加溫試驗進行 0 至 20 分鐘之間，分析結果比實際量測數據較大，相差最大約 5 mm。原因可能是在加溫爐開始加溫時，溫度上升只集中在某幾點，熱能並未擴散到試體的其他區域，而分析方法並未考慮這點，故造成試驗初期之分析結果較試驗量測數據大。

當加溫試驗進行到 20 分鐘後，從圖 4-13 中看出分析結果與實際量測的時間-撓曲曲線的斜率都改變，撓曲速率加快。20 分鐘以後，分析結果與試驗結果差距變少，且撓曲-時間曲線相約。故分析結果與試驗量測數據相當接近。加溫試驗進行 60 分鐘，試體跨距中點之撓曲度為 36.1 mm，分析結果則為 33.9 mm。

4.5.2 試體 2

試體 2 為加載之加溫試驗，所以需進行熱膨脹分析及高溫下材料力學性質折減分析。在常溫 4 點加載 98.1 kN 後，試體跨距中點產生 5.6 mm 之撓度。分析與試驗的結果比較如圖 4-14 所示。根據圖 4-14 所示，試驗進行初期的 0 至 25 分鐘，分析與試驗的時間-撓曲曲線的斜率也是有些差距，原因與試體 1 一樣。在 17 分鐘至 20 分鐘，因為斷面之溫度出現了持平，故分析結果亦出現短暫的持平。

加溫試驗進行 25 分鐘後，兩者曲線的曲率開始接近，即兩者的撓曲速率加快。雖然兩者曲線之斜率接近，唯兩者之撓度稍有差距，其原因可能是在試驗進行時，試體發生扭轉，試體支撐端的上翼板與下翼板分別別兩邊之側支撐接觸，從而影響試驗時撓曲之行為。加溫試驗進行 60 分鐘，試體跨距中點之撓曲度為 32.0 mm，分析結果為 29.4 mm。

4.5.3 試體 3

本組試驗為加載加溫之試驗，故分析方法與試體 2 相同。在常溫 4 點加載 98.1 kN 後，試體跨距中點產生 5.6 mm 之撓度。本組試驗的分析與試驗結果比較如圖 4-15 所示。根據圖 4-15，本組試驗之分析結果與試驗結果相差甚大，原因在於試驗時量測到試體上翼板的溫度

都較下翼板的溫度高，如圖 3-38 至圖 3-42 所示，這會造成熱膨脹分析時，斷面之曲率與分析模式所建立之假設相反，使試體之撓曲度減少；且本組試驗量測到左右端溫度有一定之差異性，故造成分析之不準確。



第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究主要探討火害下合成梁之撓曲行為，共進行 3 組試體之加溫試驗。試體參數為不同防火被覆厚度與加載與否，試體為非束制之簡支梁。綜合結果提出結論如下：

1. 含樓板之鋼梁試體在相同防火被覆厚度下，試驗 1 小時加載鋼梁之設計載重對鋼梁之溫度影響甚小。試體 1 進行無載重的加溫試驗，其熱電偶溫度在 1 小時的加溫試驗過程中，未能達到不超過規範之容許最高溫度，故未能滿足 1 小時防火時效；然而相同條件之試體 3 進行加載試驗時，試體溫度雖超過 CNS 規範之容許最高溫度，但試體之撓曲度與撓曲速率仍能符合規範之要求，因此採用加載之試驗對含樓板之試體仍能達 1 小時防火時效。
2. 試體之防火被覆越厚，熱傳導之速率越慢，鋼梁之溫度上升越慢，故鋼材之有效降伏強度、比例限度及彈性模數衰減較慢，所以撓曲度與撓曲速率相對較少。
3. 從 3 組試體觀察到當試體平均溫度接近 200°C 時，試體跨距中點之撓曲速率因材料之彈性模數開始折減而漸增。從試體 3 亦觀察

到，當試體平均溫度超過 600°C 時，試體跨距中點之撓曲度急劇增加。

4. 本研究試體使用鋼承板混凝土樓板，對鋼梁試體能提高撓曲強度。實驗時施加的載重對應於鋼梁實際強度之比值為 93%。實驗時施加的載重對應於合成梁實際強度之比值為 35%，於此情況下載重對試體行為影響甚小。
5. 由試驗結果中得知，試體 3 與試體 1 差異在於有無施加载重，試驗 60 分鐘後兩者撓曲度差為 6.7 mm；試體 3 與試體 2 差異在於防火被覆厚度，試驗 60 分鐘後兩者撓曲度差為 10.8 mm。由以上比較得知，防火被覆的厚度比施加設計載重與否對於試體撓曲度影響較大，說明熱膨脹與熱彎曲對於試體的撓曲度有著關鍵性的影響。
6. 分析模型的假設條件為縱向溫度線性分佈且對稱，斷面溫度由上至下增加。分析結果顯示，與假設條件相近的試驗，能夠有效分析試體之撓度。
7. 分析結果顯示，熱膨脹對於試體之撓曲行為影響甚大，且當試體斷面之溫度差越大時，試體跨距中點之撓度越大。

8. 分析結果顯示，當試體之平均溫度達到 200°C 時，試體跨距中點之撓曲速率增加，與試驗行為一致。
9. 分析模型能夠有效分析材料性質在彈性範圍內的試體撓曲行為。

5.2 建議

1. 建議將來以更多不同種類之防火被覆（防火被覆板、膨脹型耐火塗料等）進行相關之研究，探討不同種類之防火被覆之影響對試體行為之影響。
2. 建議將來可進行較長時之防火時效之試驗，可觀察到加載與否在較長時間之試驗對鋼梁之溫度影響。
3. 本次研究使用樓板，提高了試體之勁度，建議將來可以其他方式之頂蓋板代替樓板進行試驗，比較對試體撓曲行為之影響。
4. 建議對 CNS 12514 水平承重構造耐火性能試驗法中的破壞基準進行研究及修訂，避免不同破壞基準之間出現矛盾的情況。
5. 本次研究的分析模型是以基本之材料力學方法所建立，所限制的條件是材料要在線性範圍內。建議將來可以利用彈性力學及塑性力學等方法，建立一套考慮非線性行為之分析模型。

參考文獻

- Allam, A.M., Burgess, I.W., and Plank, R.J., (2002), “Performance-Based Simplified Model for a Steel Beam at Large Deflection in Fire.” Proc. 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Melbourne.
- ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.78 (1992), “Structural Fire Protection,” ASCE, New York.
- Bednarek, Z., and Kamocka, R. (2004). “Analysis of thermal strain of structural steels in variable thermal field.” Journal of Civil Engineering and Management, Vol. X, Suppl 1, 19-22.
- Benedetti, A., and Mangoni, E. (2007). “Analytical prediction of composite beams response in fire situations.” Journal of Constructional Steel Research, 63, 221-228.
- Bradford, M. A., Luu, K. T., Heidarpour, A. (2007). “Numerical studies of a steel beam in a frame sub-assembly at elevated temperatures.” MDCMS 1 1st International Conference on Modern Design, Construction and Maintenance of Structures - Hanoi, Vietnam.
- BS 476 Part 8 (1972), “Fire tests on building materials and structures – Part 8: Test methods and criteria for the fire resistance of elements of building construction.”
- BS 476 Part 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 Part 21 (1987), “Fire tests on building materials and structures – Method for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction.”

Eurocode 3 (2005), “Design of Steel Structures – Part 1.2 : General Rules – Structural Fire Design.”

Ghojel, J. I., and Wong, M. B. (2005). “Three-sided heating of I-beams in composite construction exposed to fire.” *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 834-844.

ISO 834-1 (1999), “Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements.”

Wang, Y. C. (1998). “Composite beams with partial fire protection.” *Fire Safety Journal*, 30, 315-332.

UL 263 (2003), “Fire Tests of Building Construction and Materials.” Underwriters Laboratories Inc.

「建築物構造部分耐火試驗法」 (1997)，中華民國國家標準 CNS 12514。經濟部標準檢驗局。

許獻鍾 (2003)，「高溫中鋼結構行為之研究」，朝陽科技大學營建工程系碩士論文，金文森指導。

內政部 (2007), 「鋼結構容許應力設計法規範及解說」。

鄭紹材 (2007), 「建築物結構耐火技術之研究(I)－建築物鋼結構防火被覆耐火性能評估與驗證機制之研究」, 內政部建築研究所委託研究報告。

張燕如 (2007), 「鋼結構火害反應之向量式有線元素法分析」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 邱耀正指導。

何明錦、陳生金 (2007), 「鋼結構梁柱接頭高溫載重行為研究篇二：鋼結構梁柱接頭火害試驗研究」, 內政部建築研究所研究報告。



表 2-1 各國水平承重構造耐火試驗規範比較

	CNS 12514	ISO 834	BS 476	UL 263
試體梁受熱長度	≥ 4 m	-	≥ 4 m	≥ 3.7 m
載重試驗破壞基準	(1)最大撓曲度超過 $L^2/400d$ (mm) ; (2)或最大撓曲速率超過 $L^2/9000d$ (mm/min)。	(1)最大撓曲度超過 $L^2/400d$ (mm) ; (2)最大撓曲速率超過 $L^2/9000d$ (mm/min)。	(1)最大撓曲度超過 $L/20$ (mm) ; (2)最大撓曲速率超過 $L^2/9000d$ (mm/min) ; (3)鋼梁熱電偶測點溫度超過 620°C ; (4)鋼梁熱電偶測點平均溫度超過 550°C 。	(1)鋼梁熱電偶測點溫度超過 704°C ; (2)鋼梁熱電偶測點平均溫度超過 593°C 。
無載重試驗破壞基準	(1)鋼梁熱電偶測點溫度超過 550°C ; (2)鋼梁熱電偶測點平均溫度超過 500°C 。	(1)鋼梁熱電偶測點溫度超過 550°C ; (2)鋼梁熱電偶測點平均溫度超過 500°C 。	-	-

表 3-1 試體規劃

試體編號	被覆材厚度	載重條件
1	11 mm	無
2	14 mm	有
3	11 mm	有

表 3-2 試驗結果簡表

編號	防火被覆厚度	加載點載重	爐內 1 小時試體平均溫度	熱電偶測點最高溫度	1 小時最大撓曲度	依 CNS 判定 1 小時防火時效
1	11 mm	無	942.5°C	635.9°C(2B)	36.13 mm	不通過
2	14 mm	97.5 kN	944.2°C	538.2°C(2B)	32.01 mm	通過
3	11 mm	97.5 kN	943.6°C	650.9°C(3B)	42.78 mm	通過

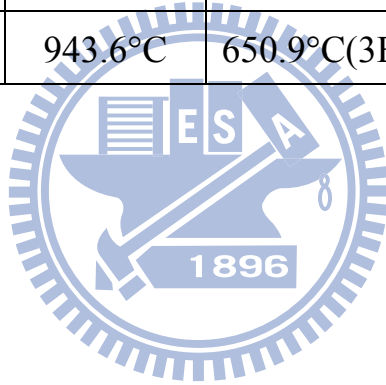


表 3-3 試體各斷面加溫 1 小時後之溫度 (°C)

試體各斷面加溫 1 小時後之溫度 (°C)			
熱電偶線編號	試體 1	試體 2	試體 3
1A	350.2	286.1	370.9
1B	616.7	470.4	373.2
1C	552.3	403.4	378.2
1D	527.4	385.7	341.1
2A	293.6	260.7	373.1
2B	635.9	538.2	589.2
2C	555.1	448.1	602.6
2D	532.1	412.8	613.3
3A	357.9	296.3	611.0
3B	603.6	520.1	650.9
3C	561.8	457.1	511.0
3D	525.2	437.3	569.8
4A	305.1	276.6	542.0
4B	627.7	502.4	554.2
4C	572.9	462.0	566.3
4D	532.7	438.3	490.1
5A	325.2	267.7	540.5
5B	560.9	502.8	517.3
5C	481.6	458.3	542.4
5D	486.0	428.0	549.4
試體平均溫度	500.2	412.6	514.3
單點最高溫度	635.9	538.2	650.9

表 3-4 試驗結果與防火時效判定

	CNS 性能基準與判定				UL 性能基準與判定	
	破壞溫度之結果		加溫 1 小時 加載試驗之結果		加載試驗 加溫 1 小時之結果	
	單點溫度 (容許 550°C)	平均溫度 (容許 500°C)	撓曲度 (容許 272.1 mm)	撓曲速率 (容許 12.1 mm/min)	單點溫度 (容許 704°C)	平均溫度 (容許 593°C)
試體 1	635.9°C (在 48 分達 550°C) (Fail)	500.2°C (在 59 分達 500°C) (Fail)	N/A		N/A	
試體 2	538.2°C (Pass)	412.6°C (Pass)	32.0 mm	1.8 mm/min (Pass)	538.2°C (Pass)	412.6°C
試體 3	650.9°C (在 46 分達 550°C) (Fail)	514.3°C (在 58 分達 500°C) (Fail)	42.8 mm	1.00 mm/min (Pass)	650.9°C (Pass)	514.3°C

表 4-1 Eurocode 3 鋼材高溫下之力學性質折減係數

鋼材溫度 θ_a	在 θ_a 溫度相對於 20°C 之降伏強度 f_y 或彈性係數 E_a 之折減係數		
	有效降伏強度 折減係數 (相對於 f_y) $K_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	比例限度 折減係數 (相對於 f_y) $K_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	線彈性範圍斜 率折減係數 (相對於 E_a) $K_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1.000	1.000	1.000
100°C	1.000	1.000	1.000
200°C	1.000	0.807	0.900
300°C	1.000	0.613	0.800
400°C	1.000	0.420	0.700
500°C	0.780	0.360	0.600
600°C	0.470	0.180	0.310
700°C	0.230	0.075	0.130
800°C	0.110	0.050	0.090
900°C	0.060	0.0375	0.0675
1000°C	0.040	0.0250	0.0450
1100°C	0.020	0.0125	0.0225
1200°C	0.000	0.0000	0.0000

註：可由線性內插求得介於以上特定溫度間之值。



圖 3-1 試體之鋼承板、剪力釘、鋼絲網設置



圖 3-2 試體樓板混凝土澆注施工



圖 3-3 試體樓板混凝土施工完成



圖 3-4 鋼梁腹板熱電偶線設置



圖 3-5 鋼梁下翼板熱電偶線設置



圖 3-6 鋼梁鋼網施工



圖 3-7 鋼梁防火被覆施工 (一)



圖 3-8 鋼梁防火被覆施工 (二)



圖 3-9 鋼梁防火被覆施工 (三)



圖 3-10 鋼梁防火被覆完成施工

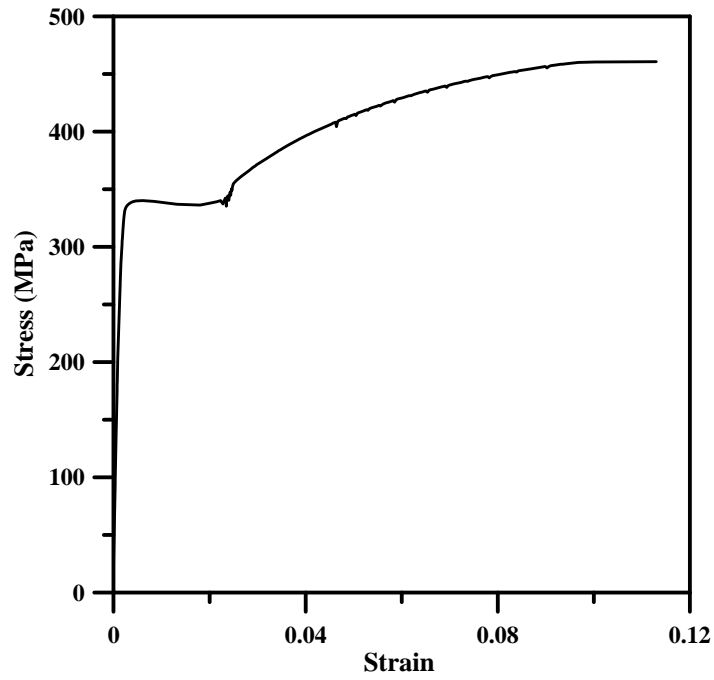


圖 3-11 鋼梁翼板 FLANGE -1 應力應變曲線

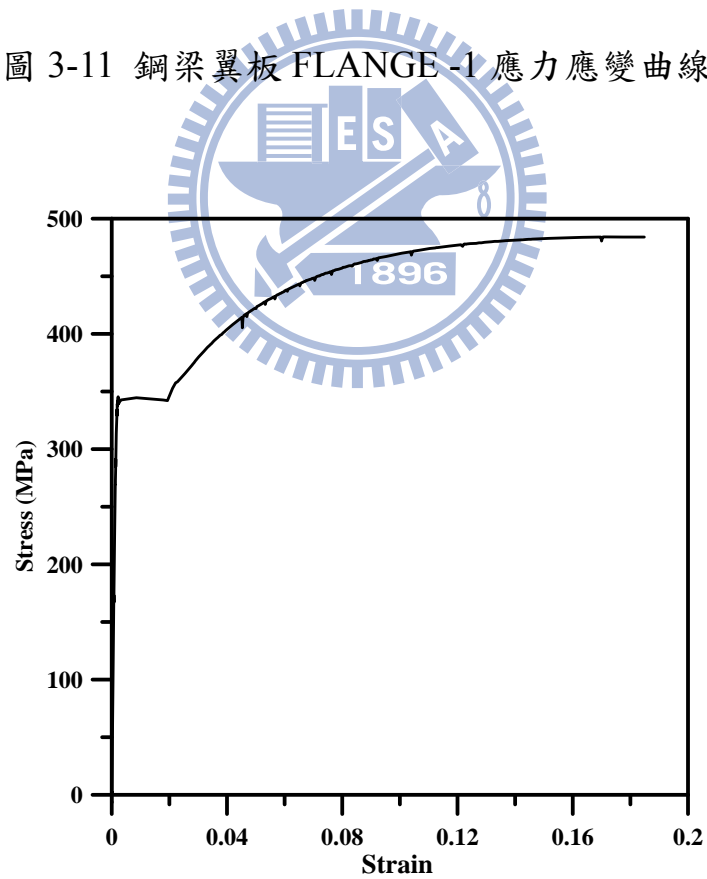


圖 3-12 鋼梁翼板 FLANGE -2 應力應變曲線

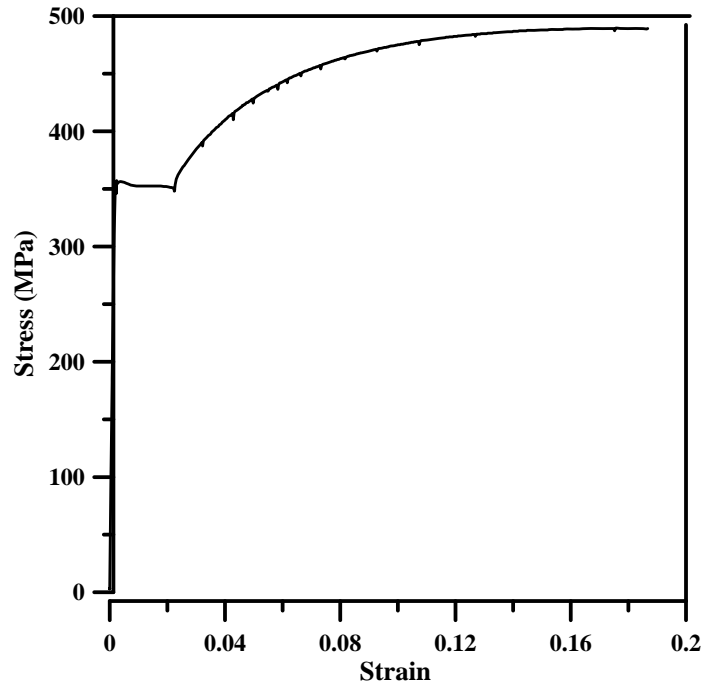


圖 3-13 鋼梁腹板 WEB-1 應力應變曲線

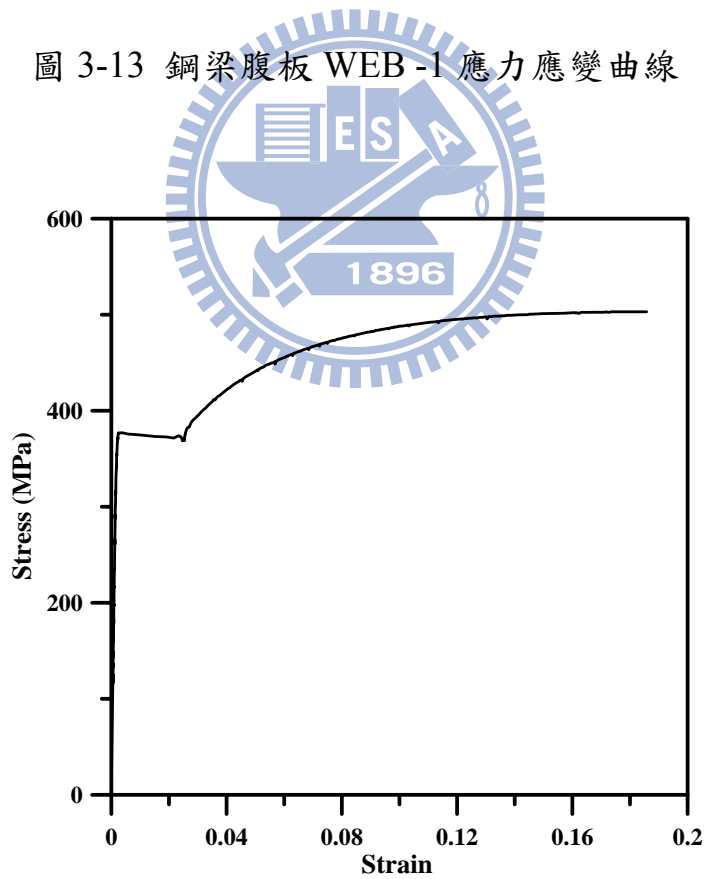


圖 3-14 鋼梁腹板 WEB-2 應力應變曲線



圖 3-15 試體安裝於加溫爐內情況

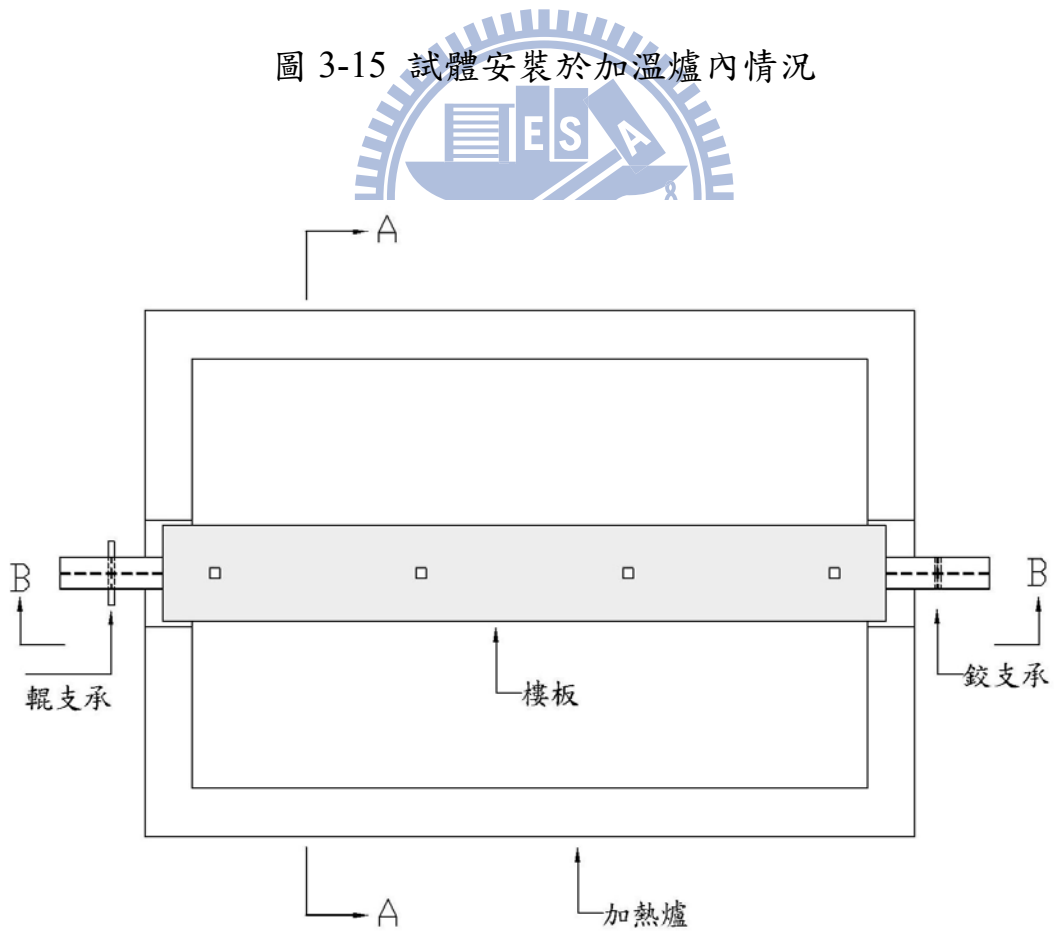


圖 3-16 試驗設置上視圖

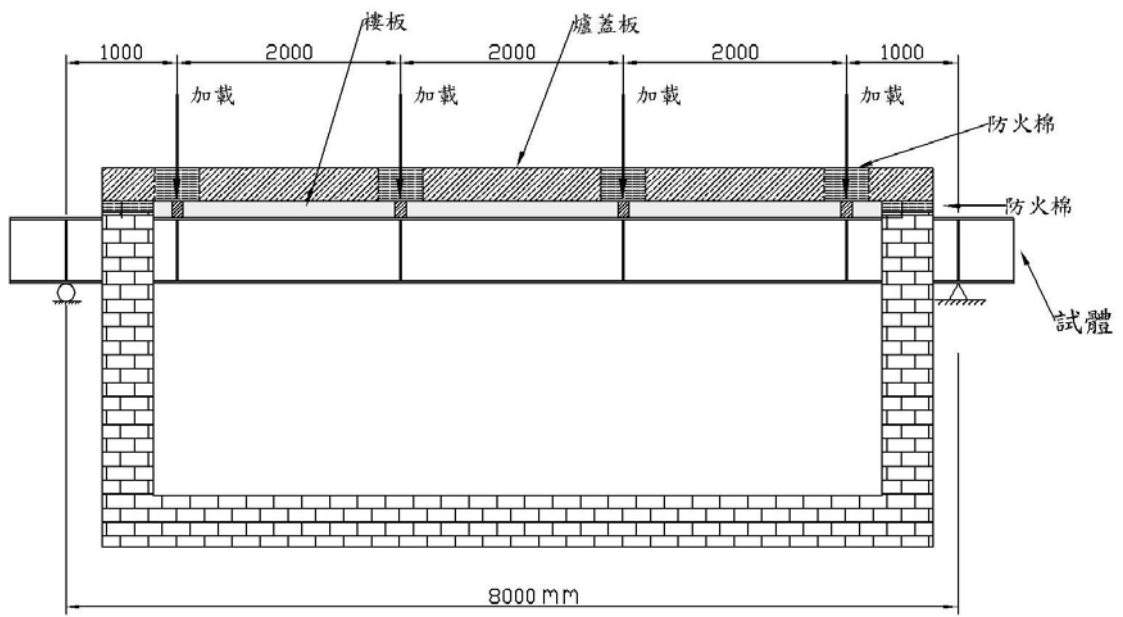


圖 3-17 試驗設置 B-B 視圖

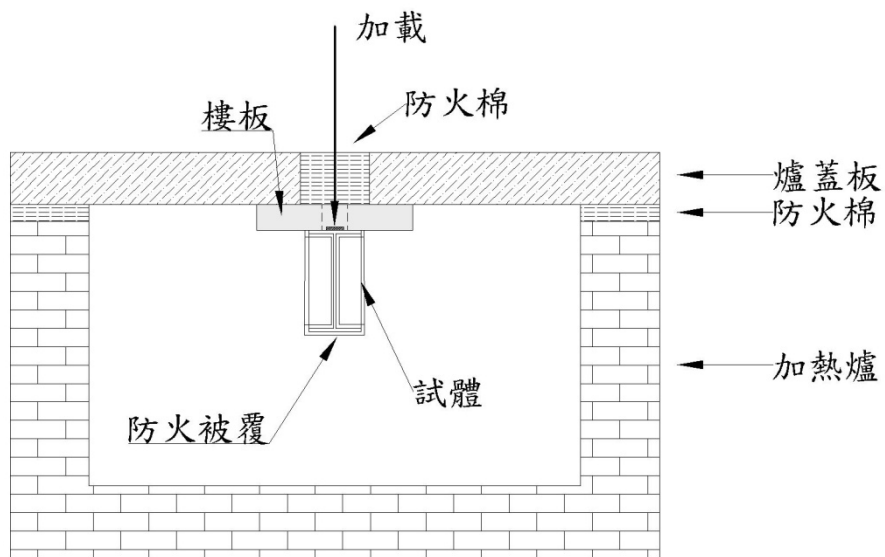


圖 3-18 試驗設置 A-A 視圖

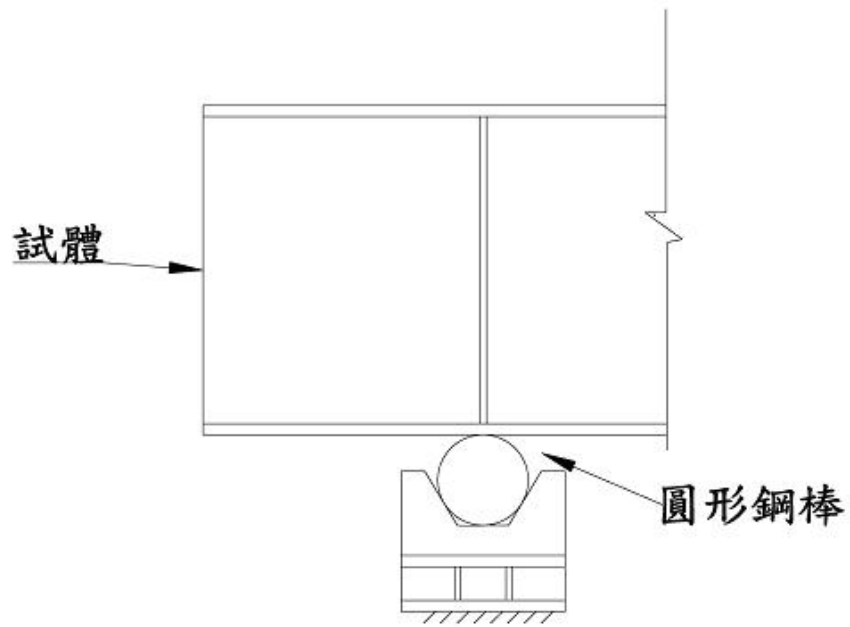


圖 3-19 支承端之細部機制



圖 3-20 北側支撐



圖 3-21 南側支撐



圖 3-22 位移計設置



圖 3-23 加溫爐與試驗設置

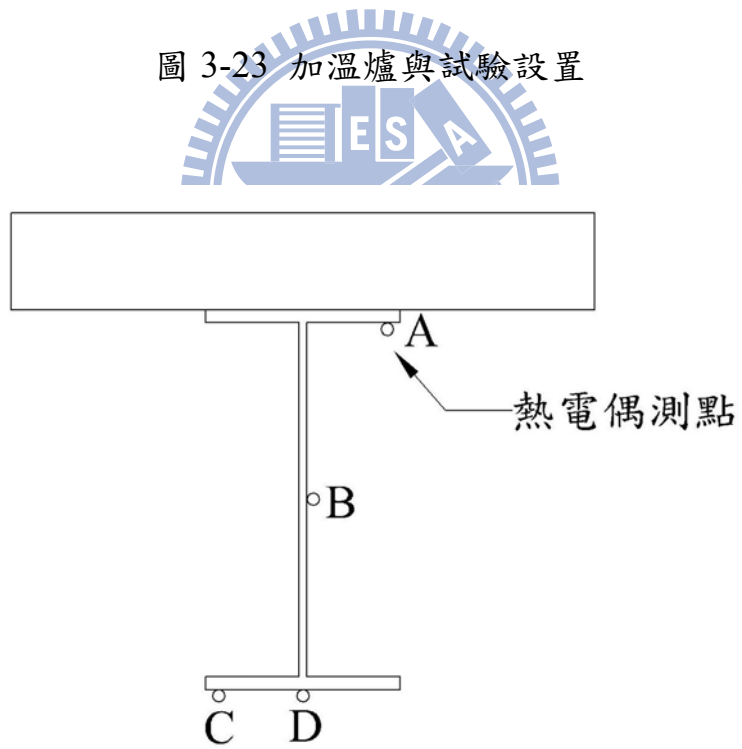


圖 3-24 鋼梁表面熱電偶測點配置位置

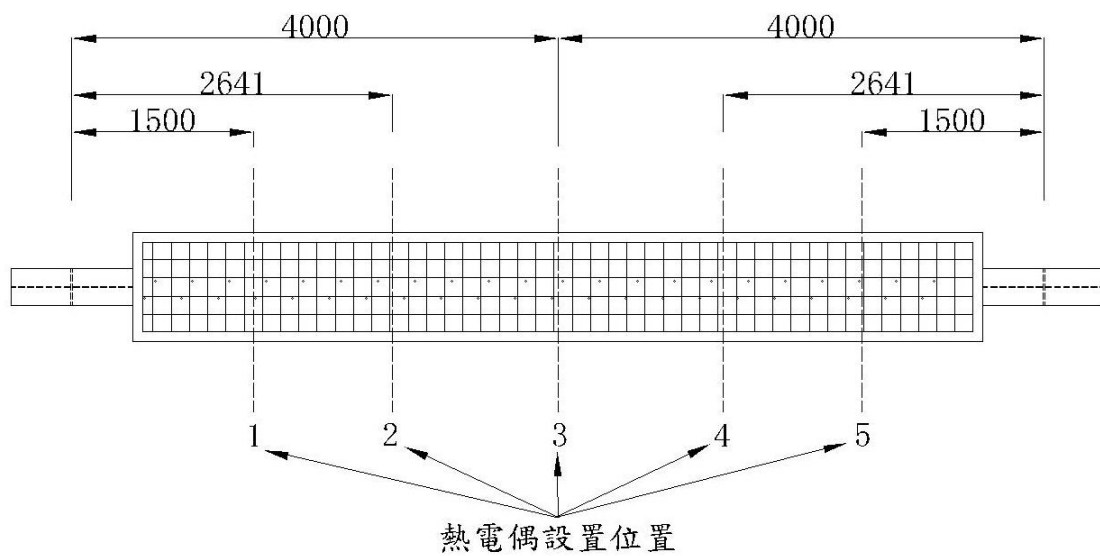


圖 3-25 試體縱向熱電偶測點配置位置

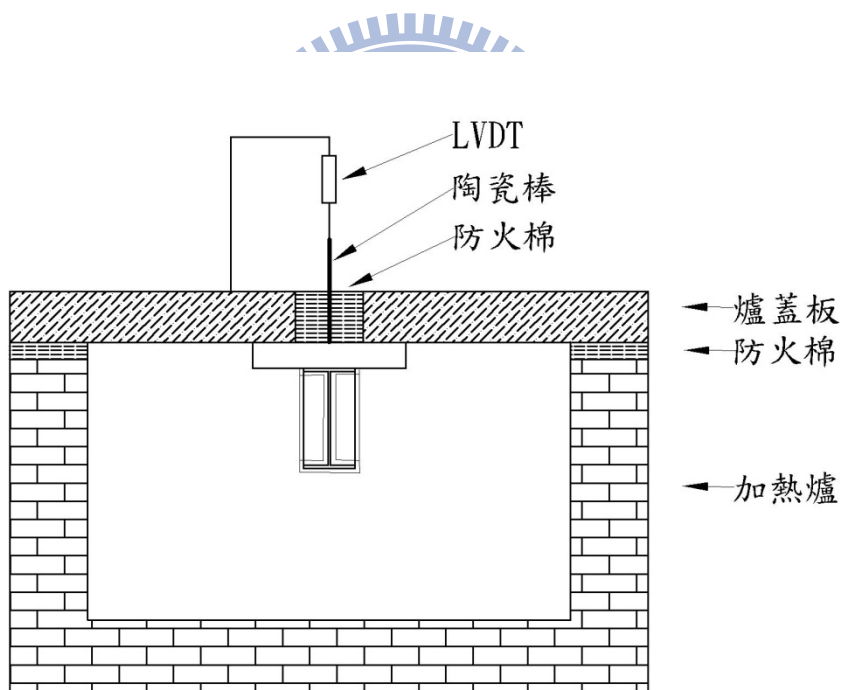


圖 3-26 位移計與陶瓷棒的設置

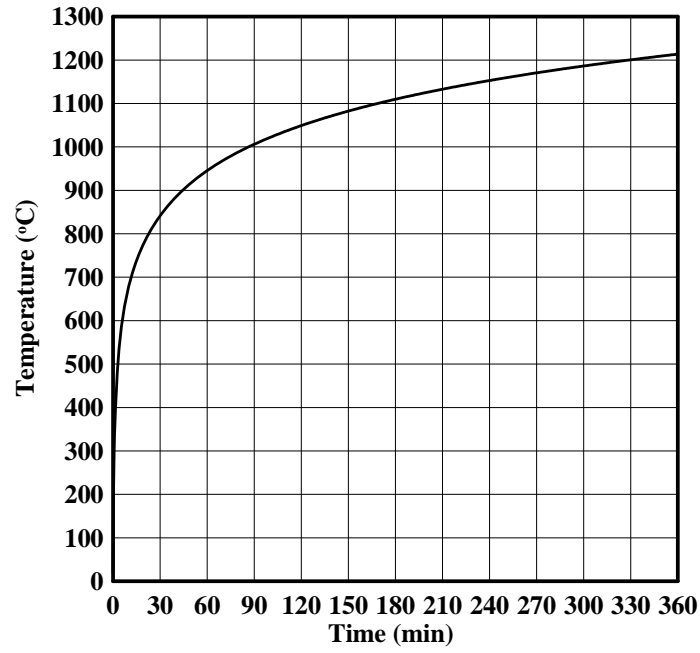


圖 3-27 標準加熱溫度-時間曲線

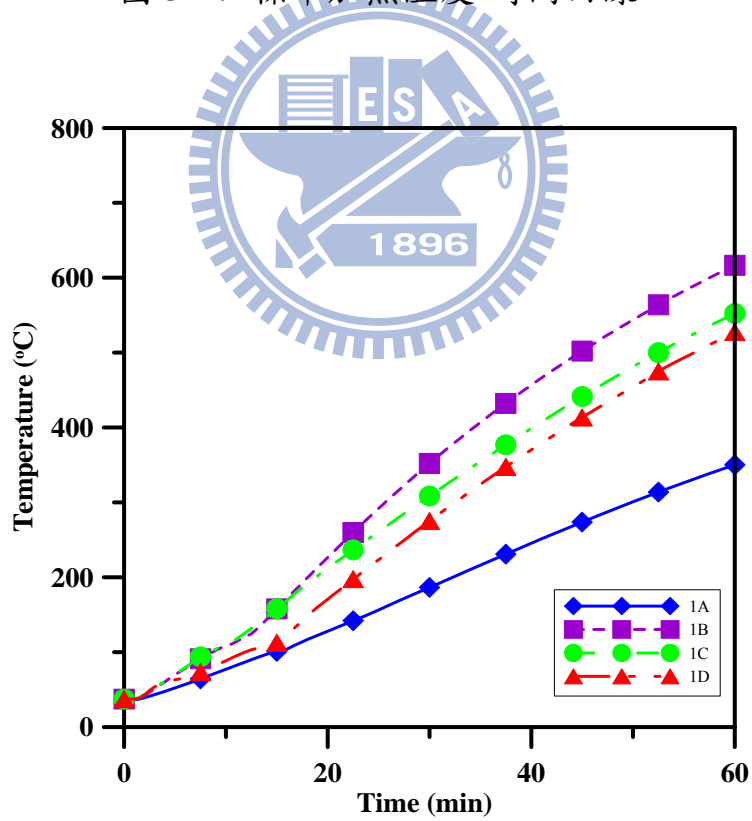


圖 3-28 試體 1 之斷面 1 時間與溫度關係圖

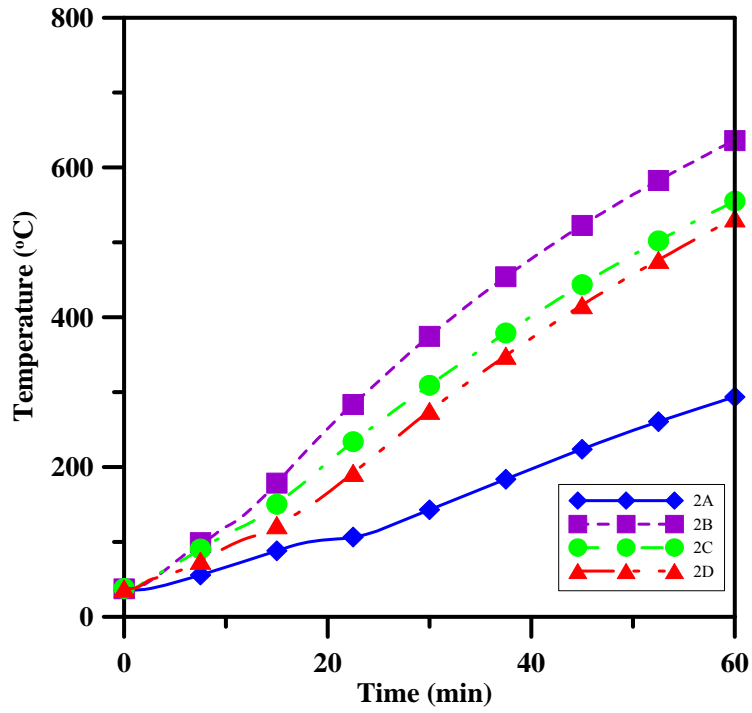


圖 3-29 試體 1 之斷面 2 時間與溫度關係圖

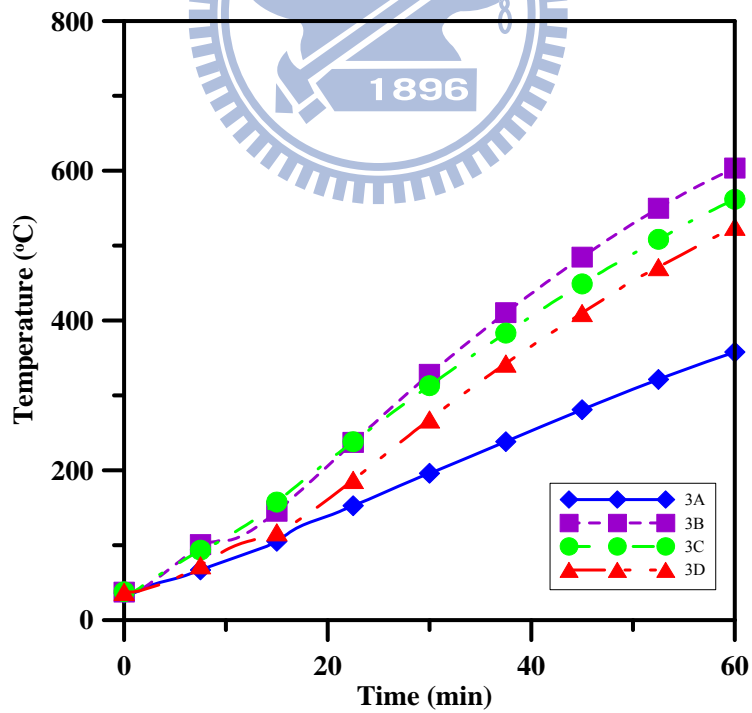


圖 3-30 試體 1 之斷面 3 時間與溫度關係圖

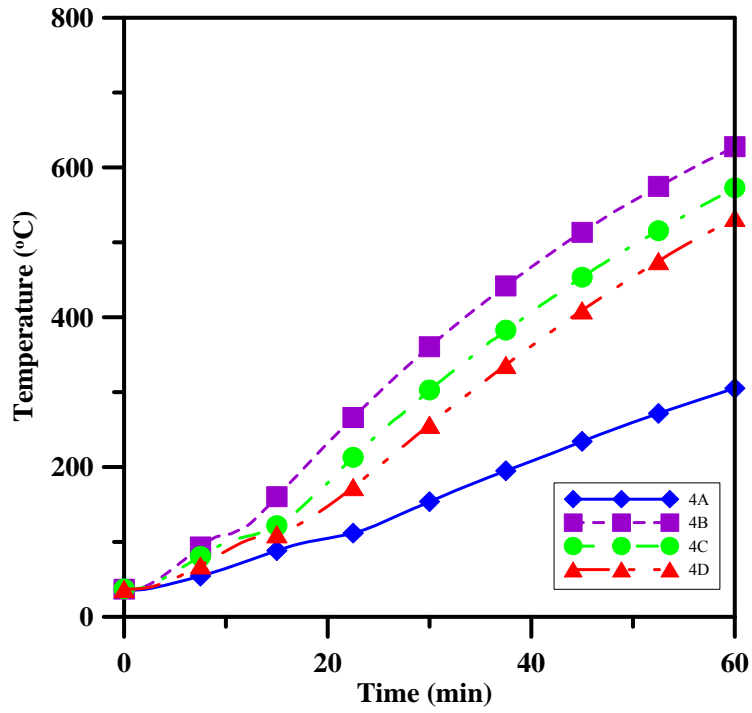


圖 3-31 試體 1 之斷面 4 時間與溫度關係圖

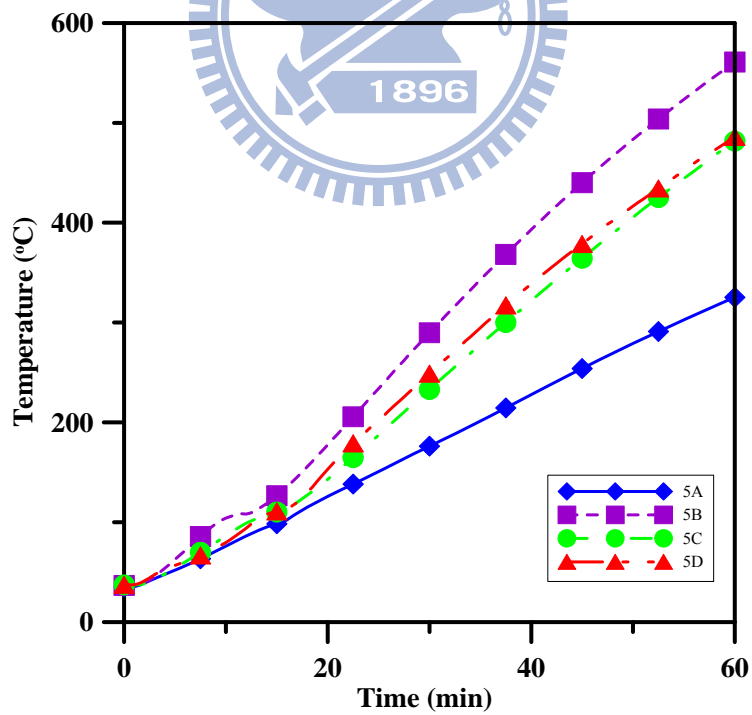


圖 3-32 試體 1 之斷面 5 時間與溫度關係圖

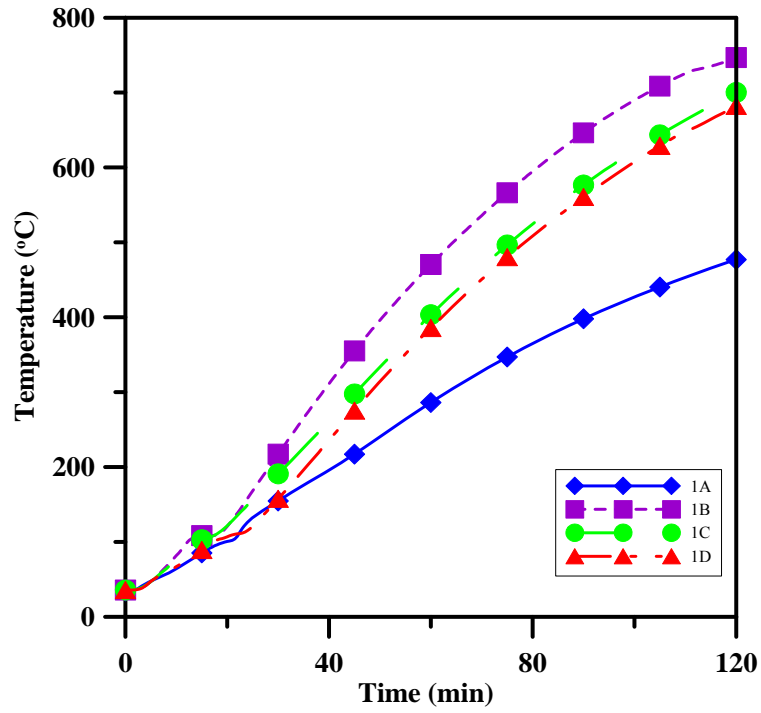


圖 3-33 試體 2 之斷面 1 時間與溫度關係圖

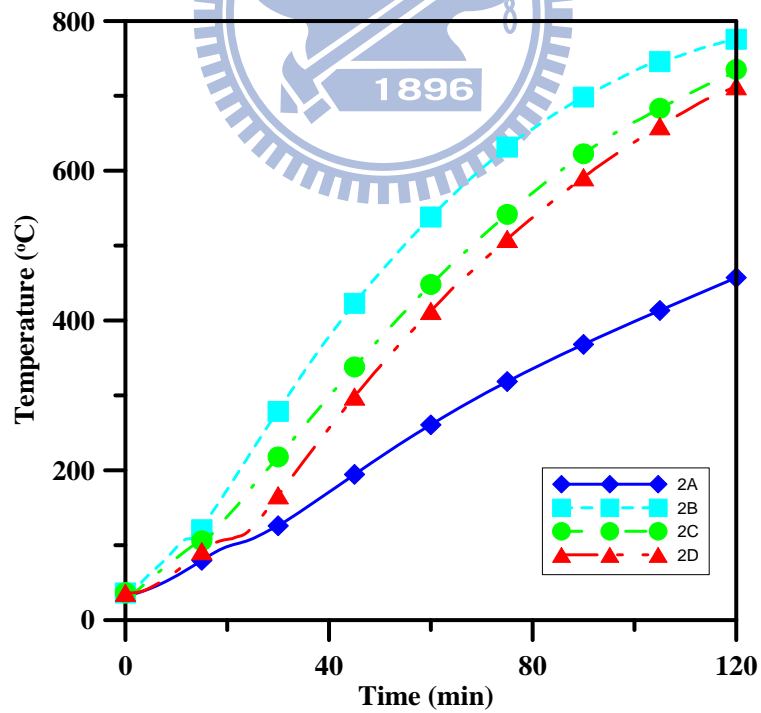


圖 3-34 試體 2 之斷面 2 時間與溫度關係圖

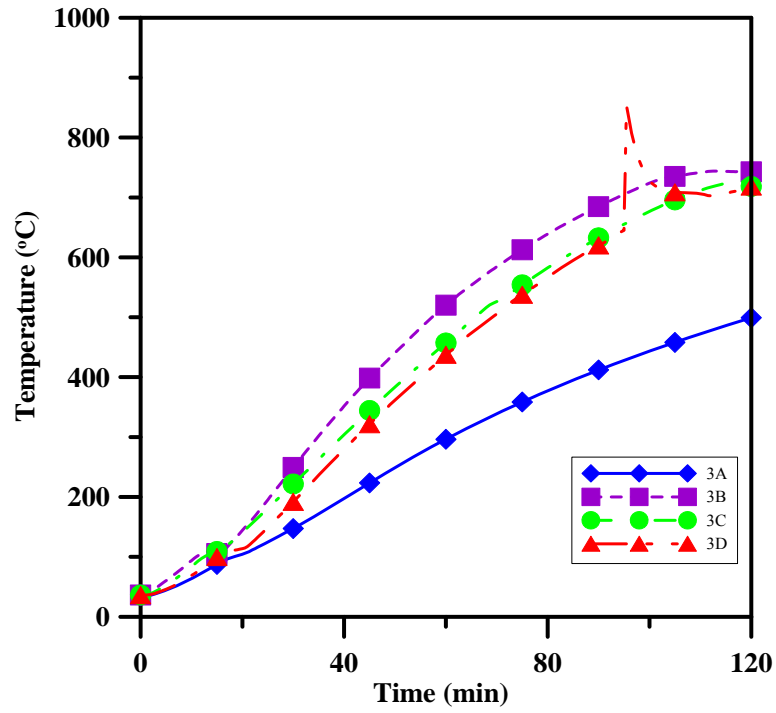


圖 3-35 試體 2 之斷面 3 時間與溫度關係圖

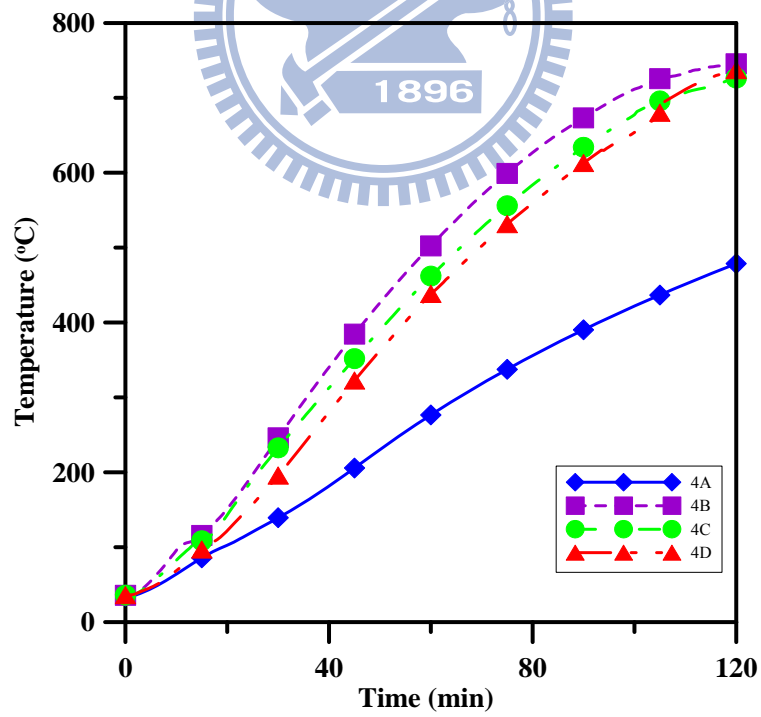


圖 3-36 試體 2 之斷面 4 時間與溫度關係圖

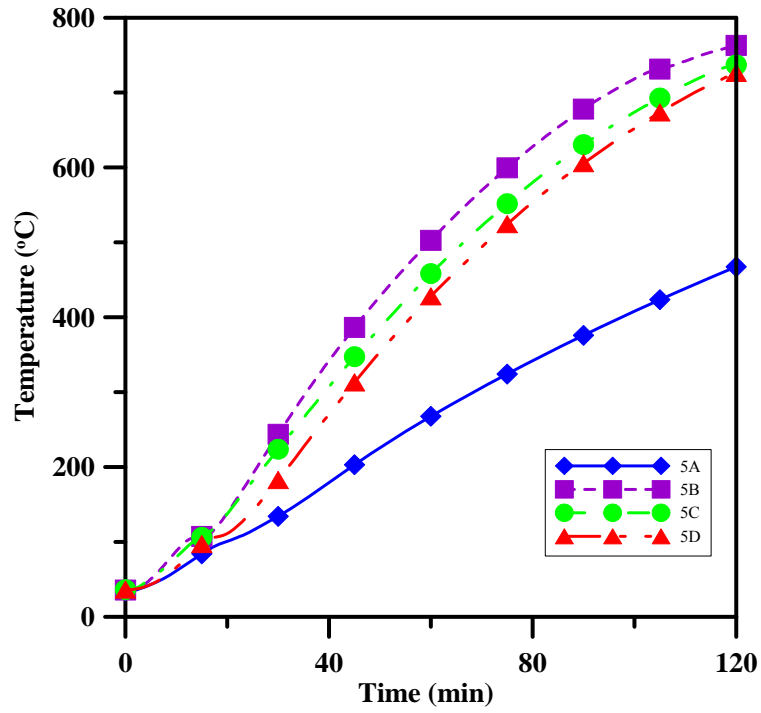


圖 3-37 試體 2 之斷面 5 時間與溫度關係圖

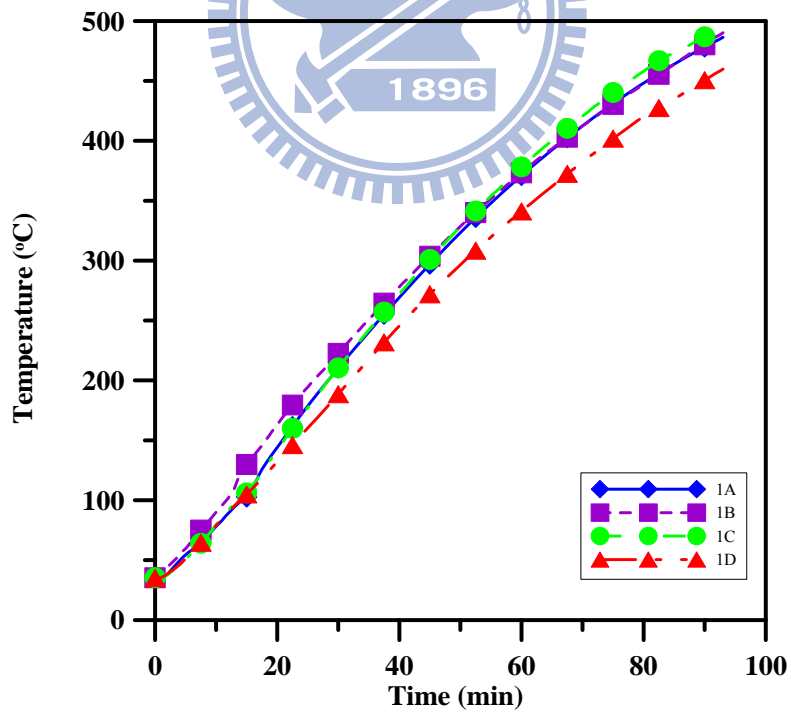


圖 3-38 試體 3 之斷面 1 時間與溫度關係圖

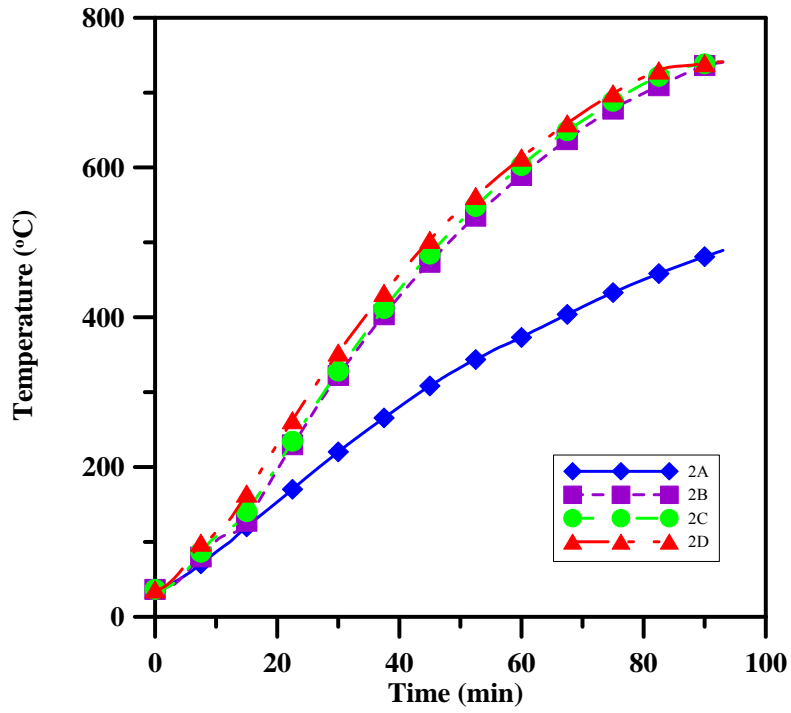


圖 3-39 試體 3 之斷面 2 時間與溫度關係圖

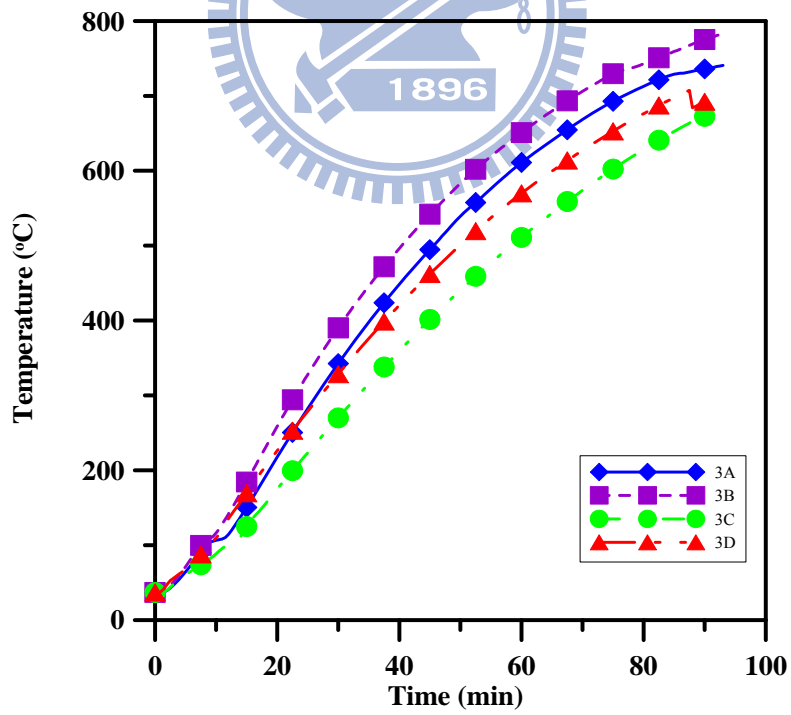


圖 3-40 試體 3 之斷面 3 時間與溫度關係圖

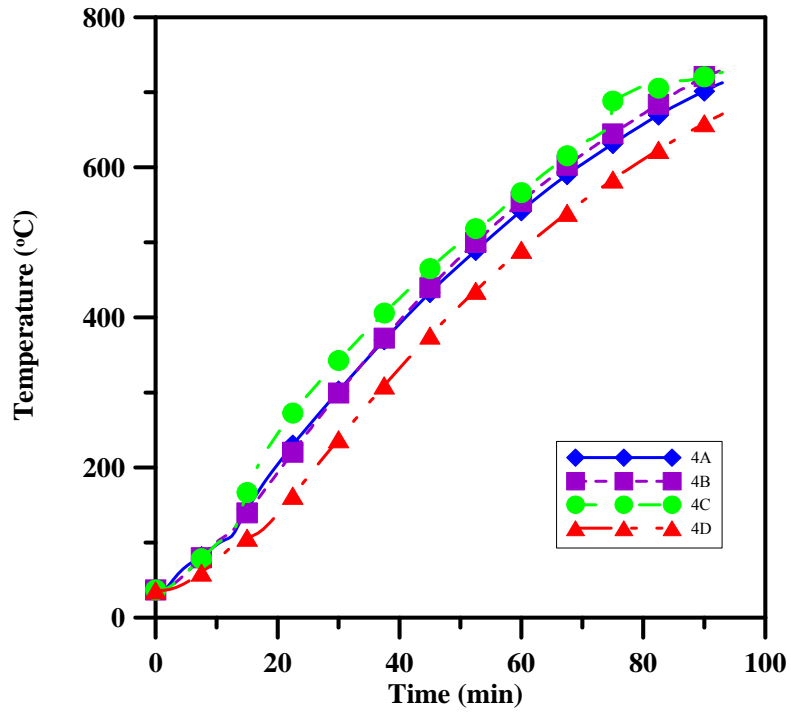


圖 3-41 試體 3 之斷面 4 時間與溫度關係圖

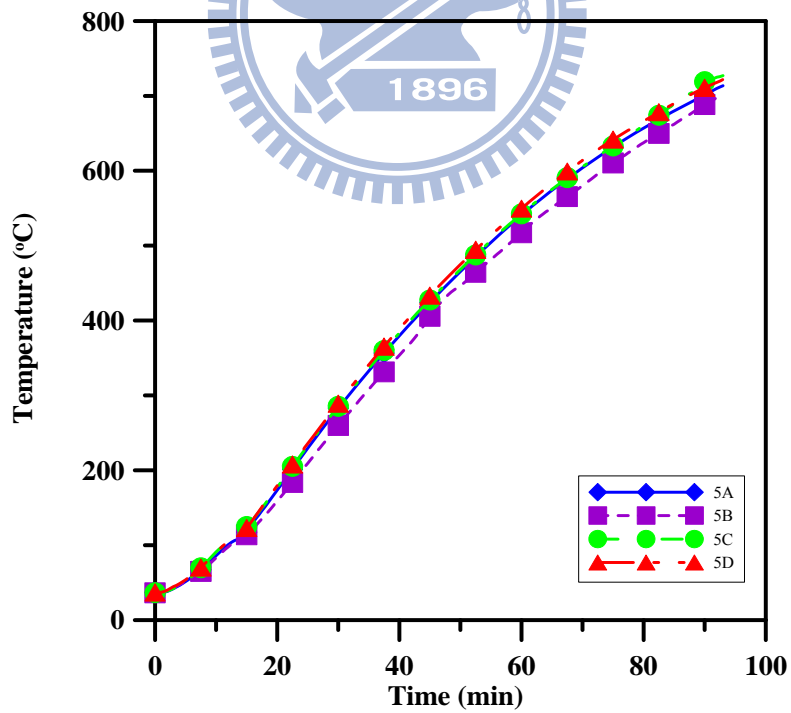


圖 3-42 試體 3 之斷面 5 時間與溫度關係圖

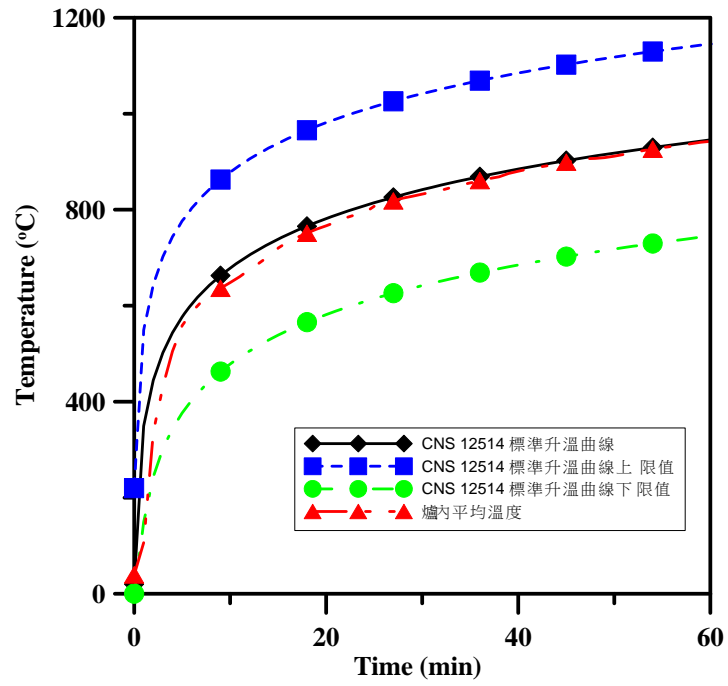


圖 3-43 試體 1 之加溫爐升溫曲線



圖 3-44 試體 1 試驗後試體在爐內情況

(a)



(b)



圖 3-45 試體 1 試驗後防火被覆裂縫

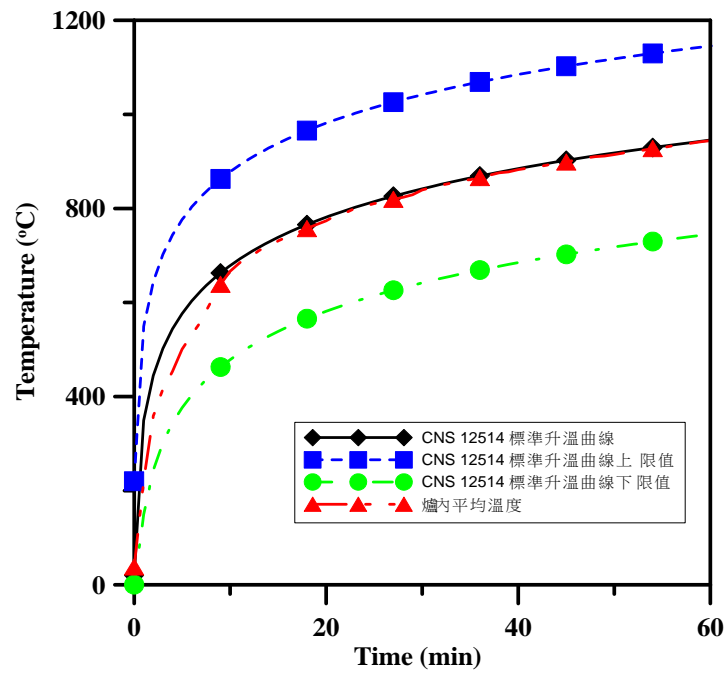


圖 3-46 試體 2 之加溫爐升溫曲線



圖 3-47 試體 2 試驗時裂縫出現情況



圖 3-48 試體 2 試驗後試體在爐內情況



圖 3-49 試體 2 試驗後防火被覆裂縫



圖 3-50 試體 2 試驗後試體之永久變形

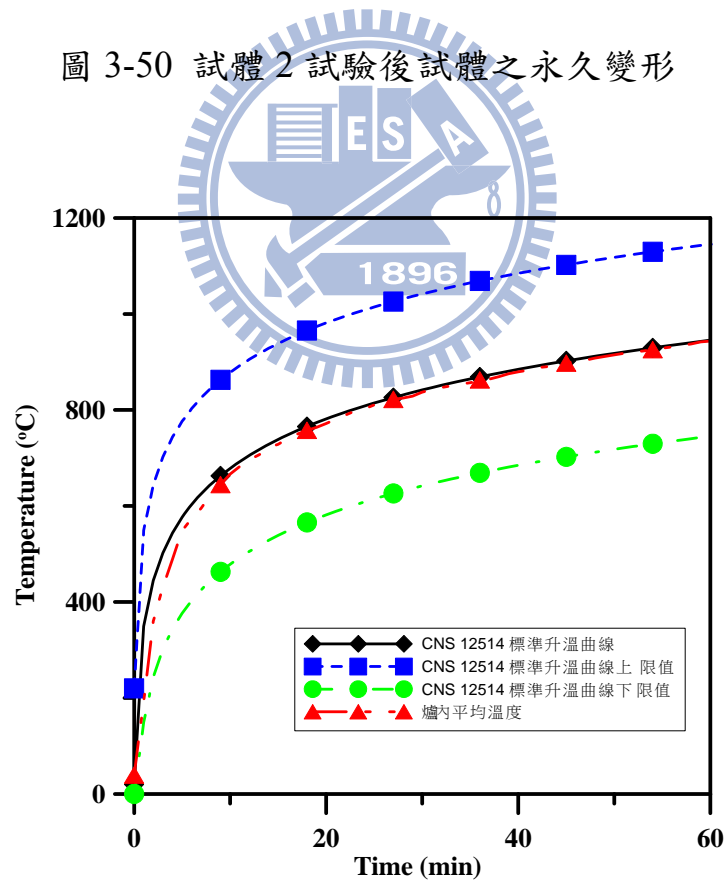


圖 3-51 試體 3 之加溫爐升溫曲線

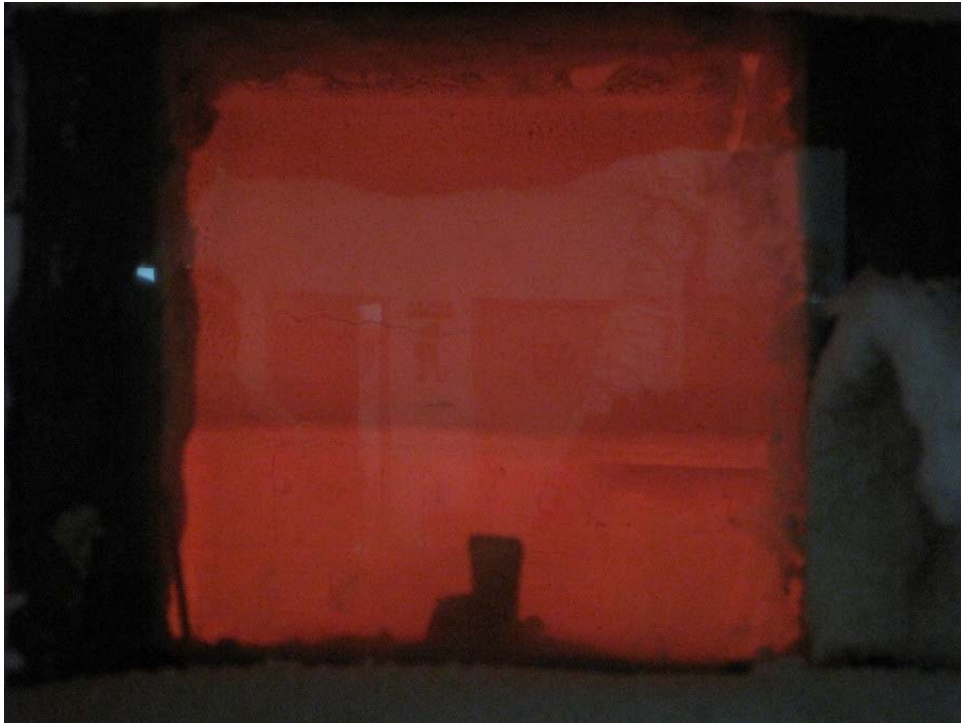


圖 3-52 試體 3 試驗時裂縫出現情況



圖 3-53 試體 3 支撐端扭轉情況



圖 3-54 試體 3 試驗後在爐內情況



圖 3-55 試體 3 試驗後防火被覆裂縫

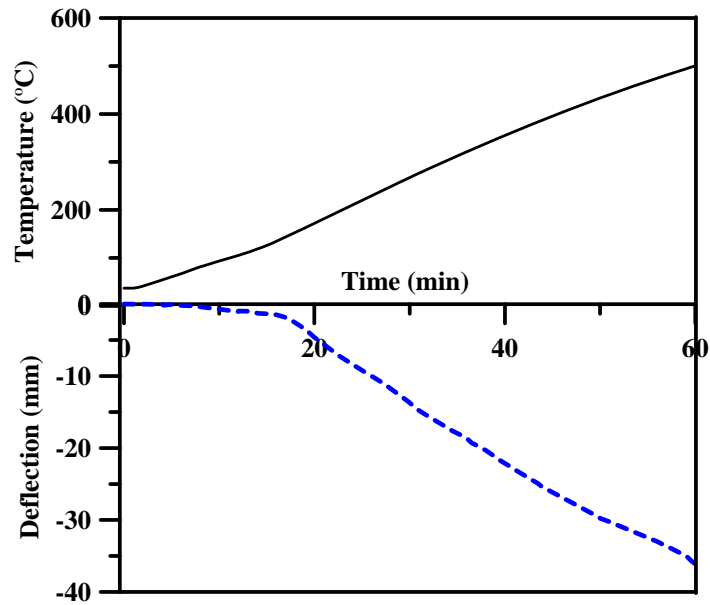


圖 3-56 試體 1 之時間-試體跨距中點撓曲度-鋼梁表面熱電偶測點平均溫度圖

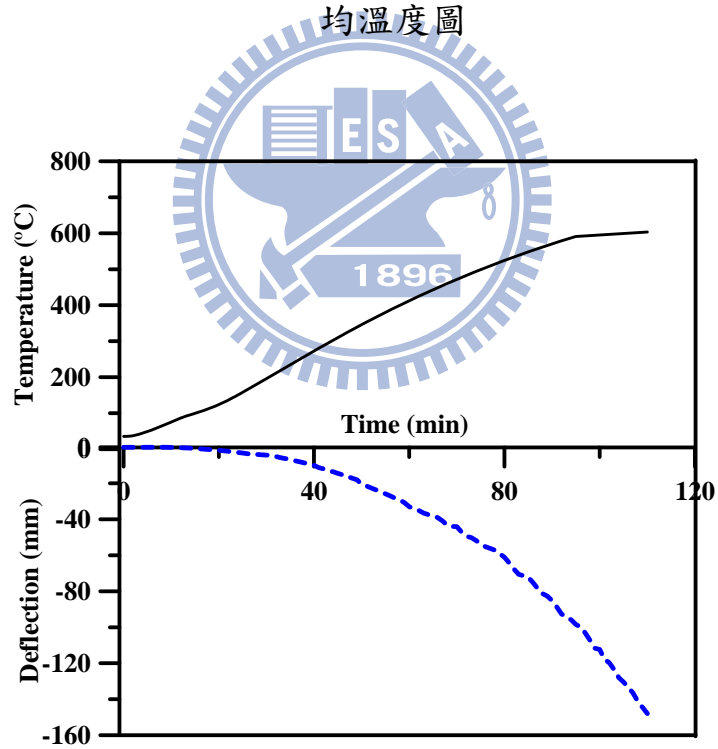


圖 3-57 試體 2 之時間-試體跨距中點撓曲度-鋼梁表面熱電偶測點平均溫度圖

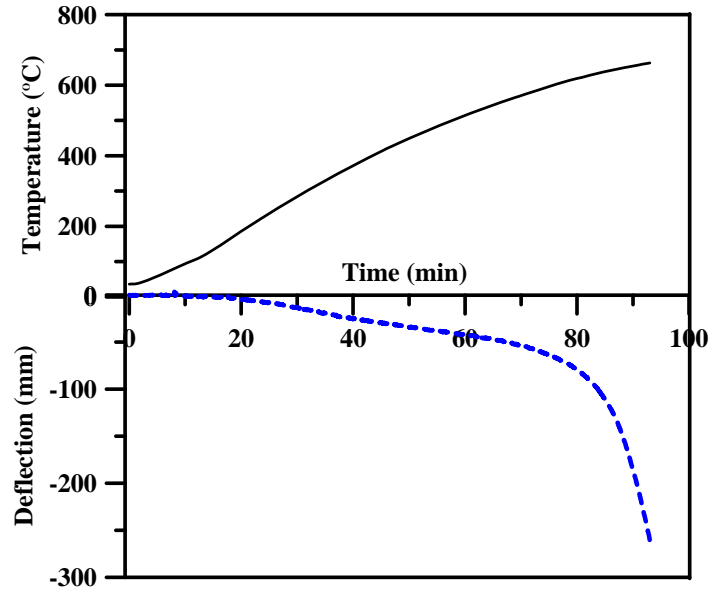


圖 3-58 試體 3 之時間-試體跨距中點撓曲度-鋼梁表面熱電偶測點平均溫度圖



圖 3-59 三組試體試驗結束後永久變形情形

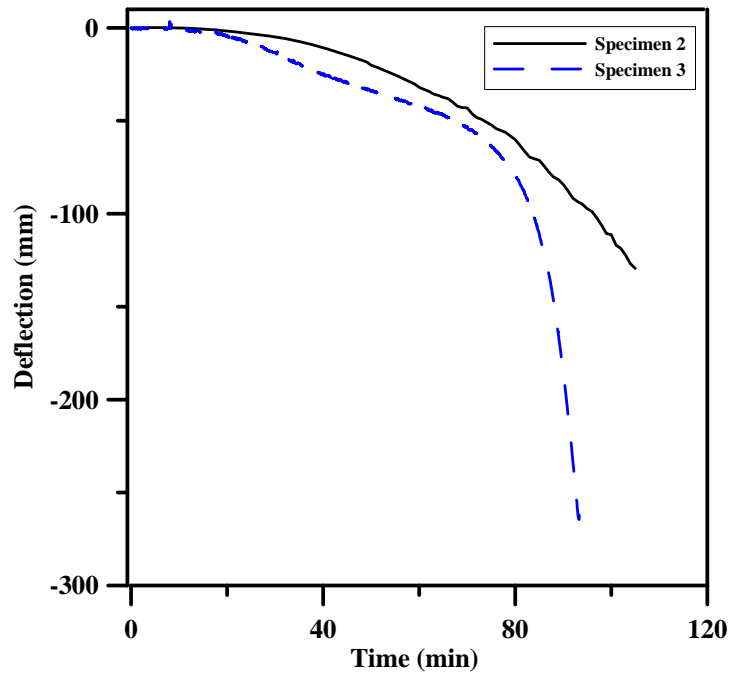


圖 3-60 試體 2 與試體 3 之時間-試體跨距中點撓曲度圖

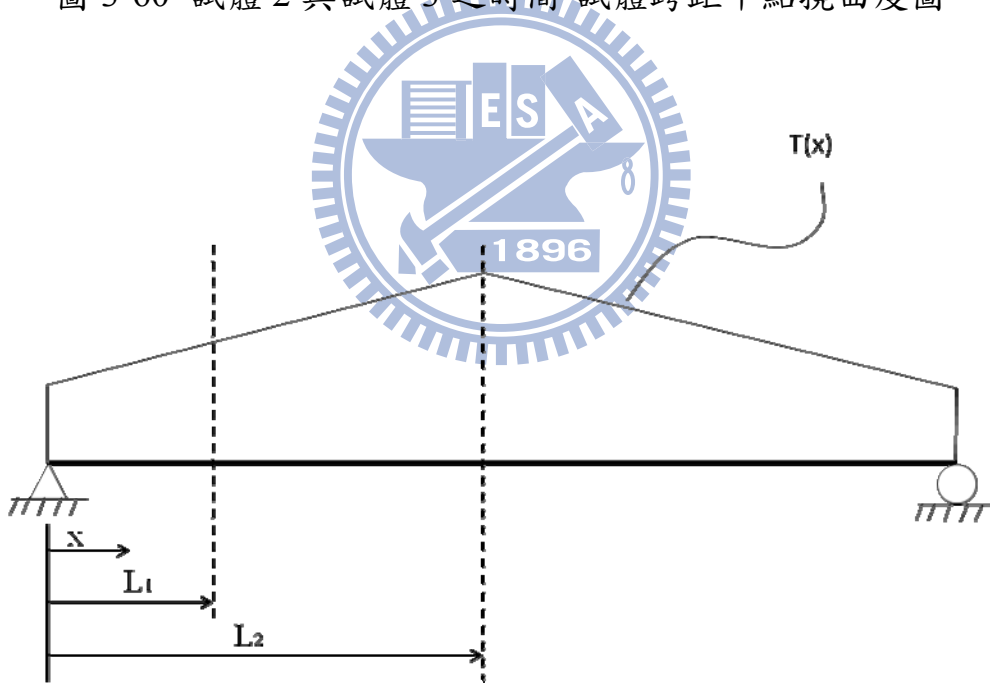


圖 4-1 試體縱向溫度分佈

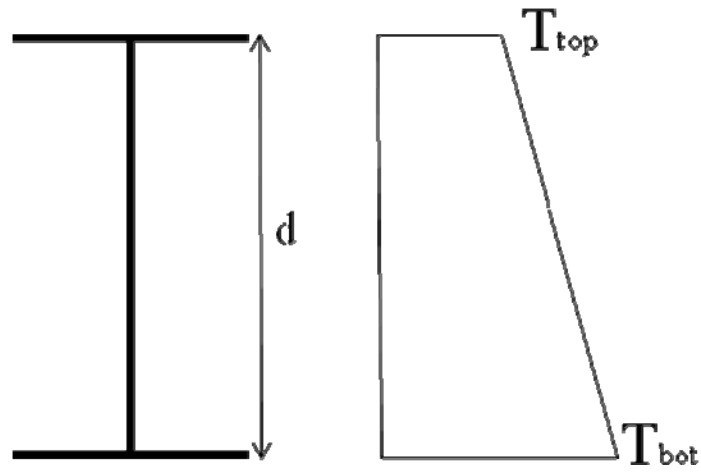


圖 4-2 熱膨脹分析時試體斷面溫度分佈

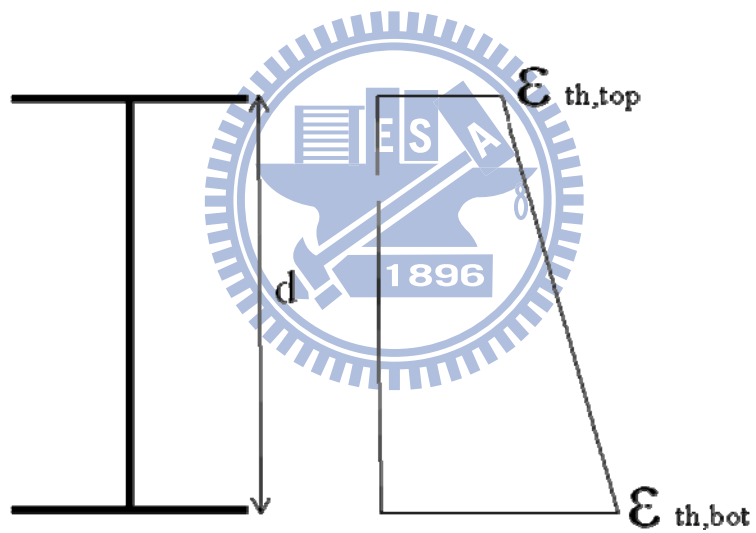


圖 4-3 試體熱膨脹斷面應變

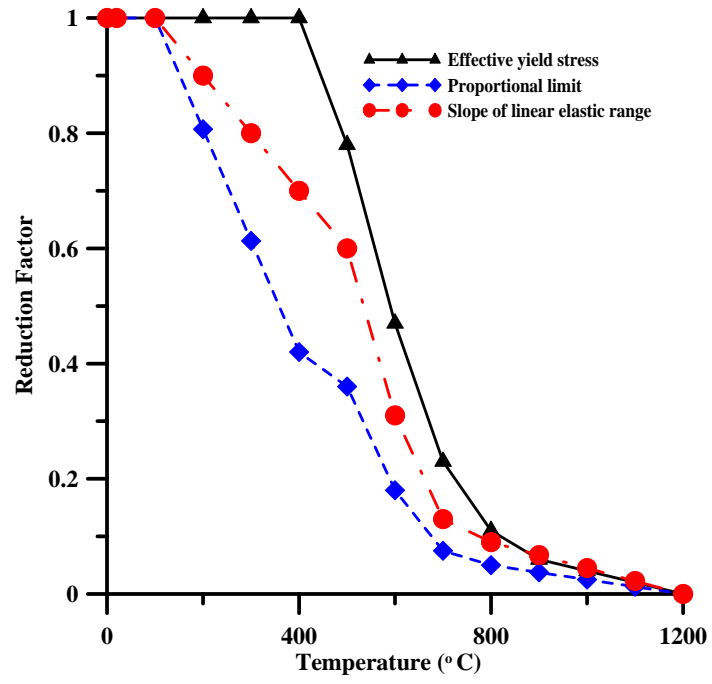


圖 4-4 Eurocode 3 鋼材在高溫下力學性質折減係數

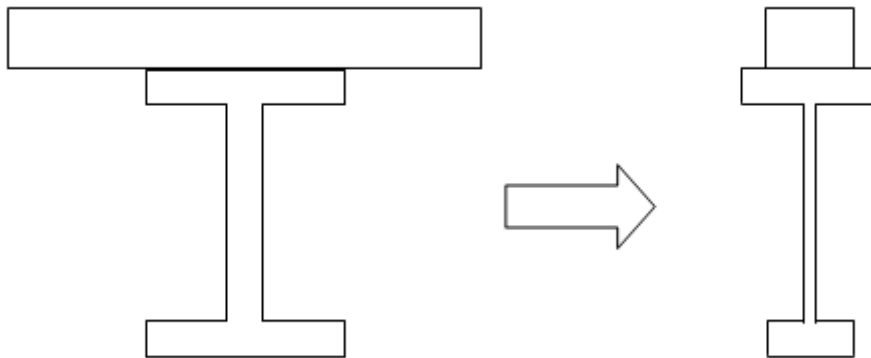


圖 4-5 轉換斷面

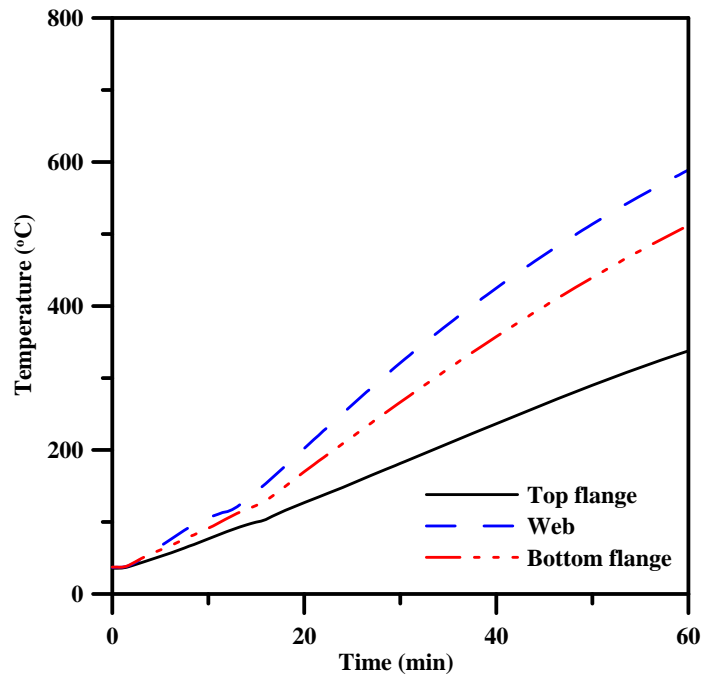


圖 4-6 分析時試體 1 在斷面 1 輸入之溫度數據

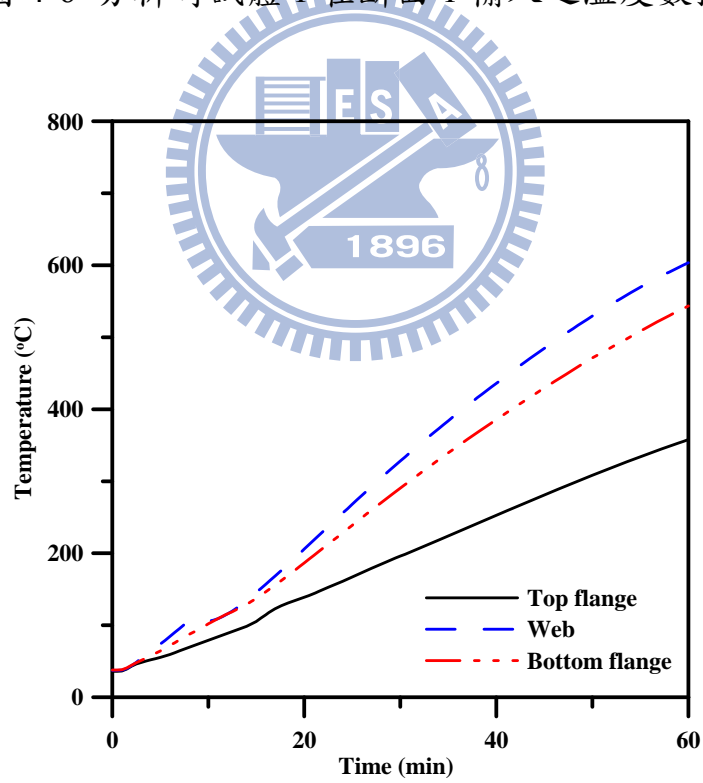


圖 4-7 分析時試體 1 在斷面 3 輸入之溫度數據

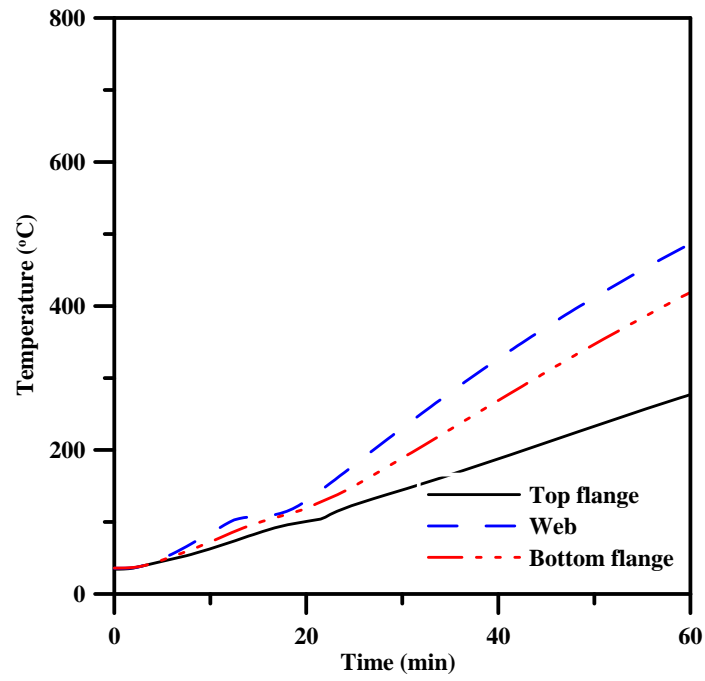


圖 4-8 分析時試體 2 在斷面 1 輸入之溫度數據

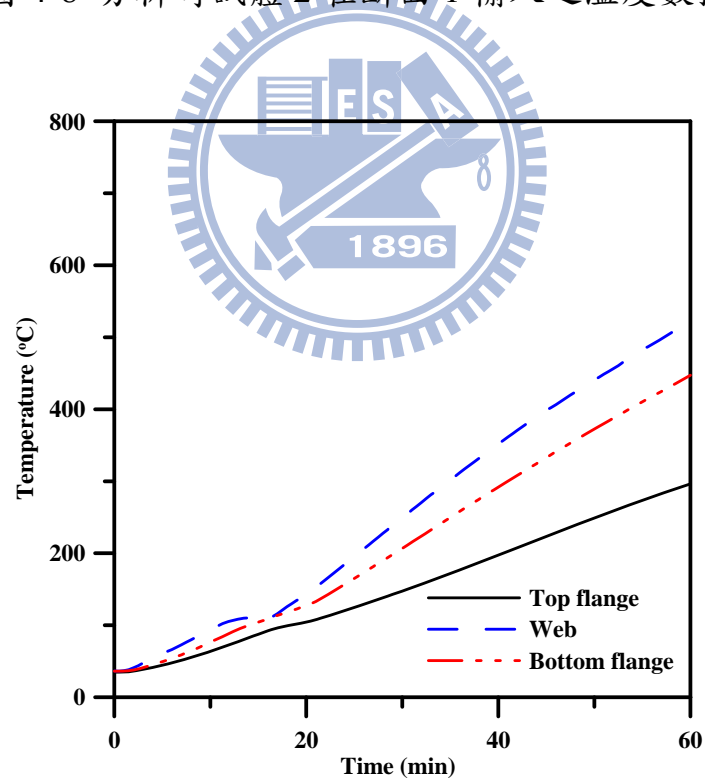


圖 4-9 分析時試體 2 在斷面 3 輸入之溫度數據

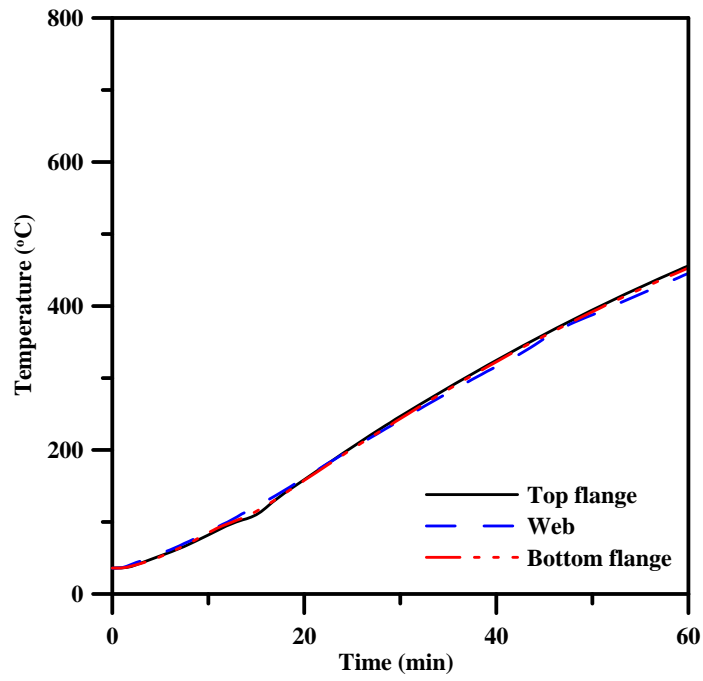


圖 4-10 分析時試體 3 在斷面 1 輸入之溫度數據

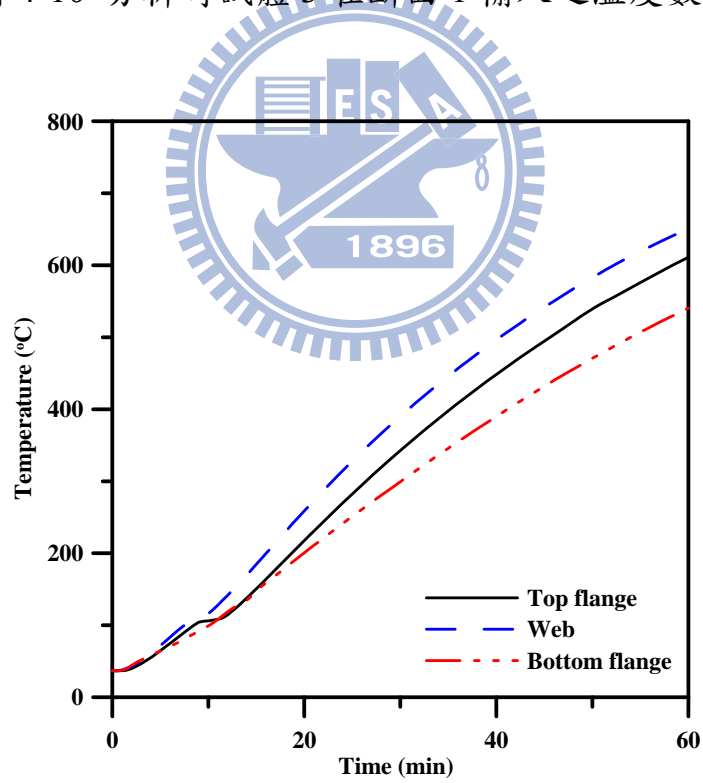


圖 4-11 分析時試體 3 在斷面 2 輸入之溫度數據

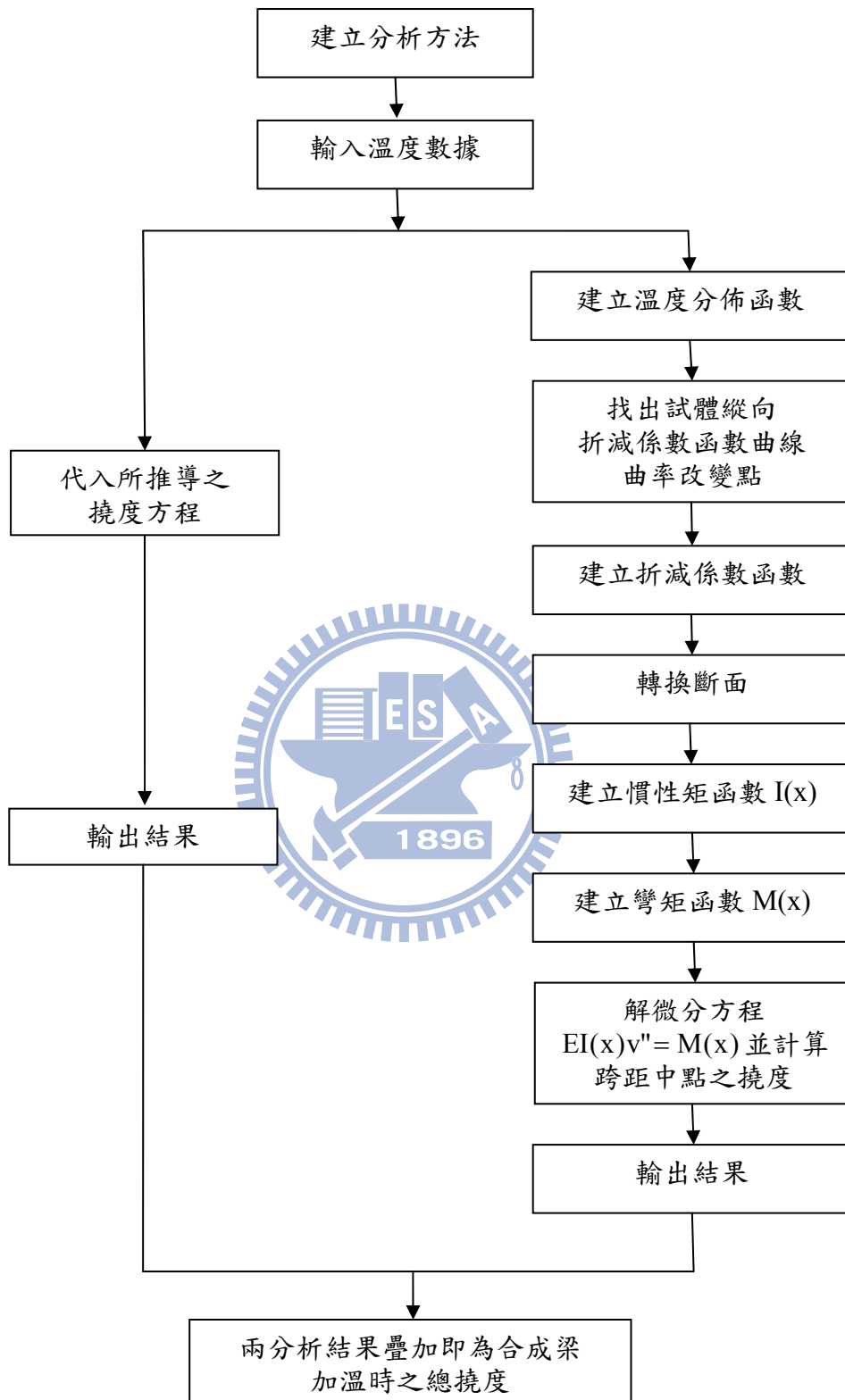


圖 4-12 分析流程圖

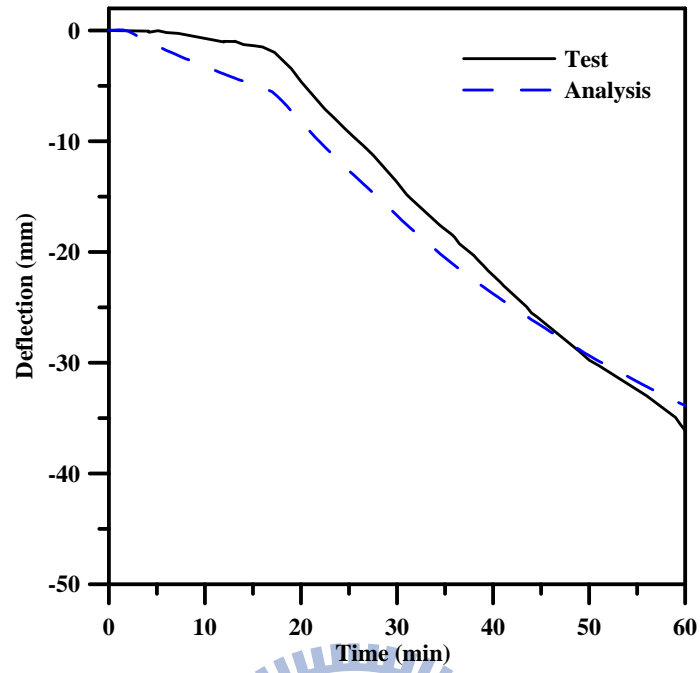


圖 4-13 試體 1 之撓曲分析與試驗結果比較

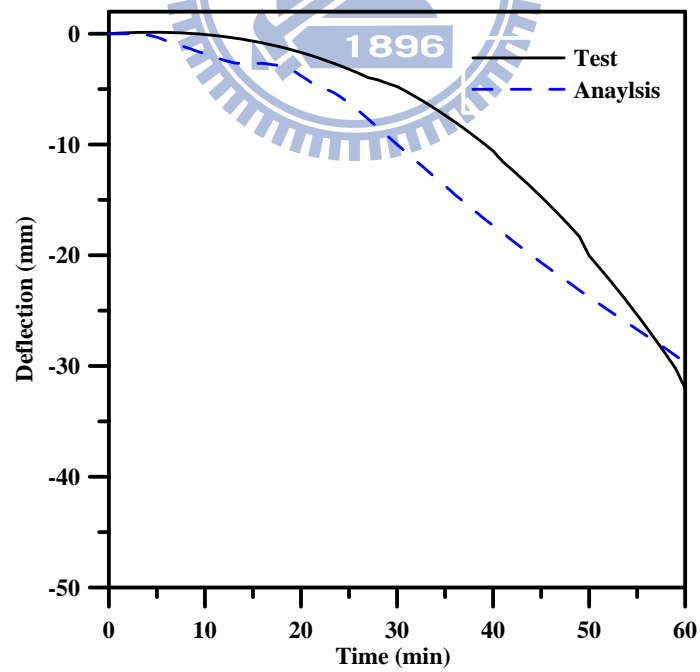


圖 4-14 試體 2 之撓曲分析與試驗結果比較

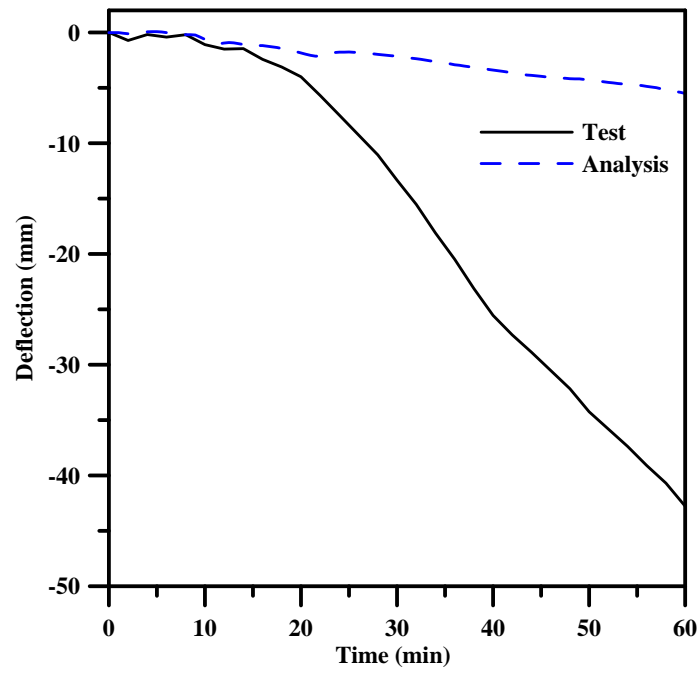
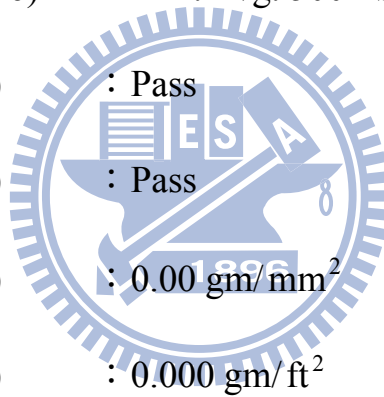


圖 4-15 試體 3 之撓曲分析與試驗結果比較



附錄一 噴附式防火被覆特性簡介

顏色 (施工乾燥後)	: 灰白色
成分	: 水泥、蛭石及抗裂纖維
水灰比	: 1.13~1.40 L/kg
乾密度 (ASTM E 605)	: 26 PCF/28 PCF (Min. Ind./ Avg.)
燃燒測試 (560°C/ 30 mins)	: 無 CO、CO ₂ 氣體產生
抗壓強度 (ASTM E 761)	: Min. Avg. 5,000 PSF
附著強度 (ASTM E 736)	: Min. Avg. 500 PSF
抗撓曲 (ASTM E 759)	: Pass
抗衝擊 (ASTM E 760)	: Pass
抗銹蝕 (ASTM E 937)	: 0.00 gm/mm ²
落塵量 (ASTM E 859)	: 0.000 gm/ft ²
火焰擴散率 (ASTM E 84)	: 0 (上塗 1 道透明漆仍為零)
煙發展量 (ASTM E 84)	: 0 (上塗 1 道透明漆仍為零)
不燃性 (ASTM E 136)	: 不燃
熱傳導係數 (JIS A 1412)	: 0.079 kcal/mh°C at Avg. 30°C
吸音係數 (ASTM C 423)	: NRC = 0.60 at 25 mm
不垂流厚度 (噴覆一道)	: 每道 15 mm 以上 (正常操作下)
PH 值 (加水攪拌)	: 12 左右



施工方法	：噴塗、手工鏟塗	
適用底材	：鋼材或混凝土	
硬化時間 (20°C/50% RH)	：粗凝	：2~6 小時
	達 50%強度	：5~7 天
	達 70%強度	：10~12 天
	達 98%強度	：28 天以上

優點：由水泥、蛭石及抗裂纖維等材料組成，具有水泥的剛性強度及纖維交錯網狀之韌性，施工固化後堅固而質輕、耐衝擊、抗壓及抗彎能力強。熱傳導係數低，與蛭石相近，隔熱性佳。被覆內之成分可抑制鐵之氧化作用，直接接觸鋼材不會造成腐蝕。產品中完全不含石棉成分。加水攪拌後即可噴塗或鏟圖，工作性佳，厚噴亦不垂流（一次可噴厚度達 25 mm 以上）。對底材附著力強，不需噴附增進劑。

附錄二 鋼梁載重能力計算 (容許應力法)

根據內政部之鋼結構容許應力設計法規範及解說(2007)的規定以公制單位計算。

鋼梁尺寸與型式：RH588×300×12×20 簡支梁

鋼材性質與斷面性質：

先行以標稱強度計算， F_y 標稱降伏強度為 2.5 tf/cm^2 ， $L_b = 800 \text{ cm}$

$A = 187 \text{ cm}^2$ ，單位重量 = 147 kg/m ， $I_x = 114000 \text{ cm}^4$ ， $S_x = 3890 \text{ cm}^3$ ，

(1) 檢核是否 $L_b < L_c$

$$L_c = \frac{1400}{(d/A_f)F_y} = \frac{1400}{(58.8/60)(2.5)} = 571 \text{ cm}$$

$$L_c = \frac{20b_f}{\sqrt{F_y}} = \frac{20(30)}{\sqrt{2.5}} = 379 \text{ cm} \quad (\text{控制})$$

由於 $L_b = 800 \text{ cm} > L_c = 379 \text{ cm}$

$$\text{故 } r_t \approx \sqrt{\frac{(t_f/12)(b_f)^3}{\left(b_f t_f + \frac{1}{6}(d - 2t_f)t_w\right)}} = \sqrt{\frac{(2/12)(30)^3}{\left\{30(2) + \frac{1}{6}[58.8 - 2(2)](1.2)\right\}}} = 7.96 \text{ cm}$$

(2) 檢核是否 $\sqrt{\frac{7160C_b}{F_y}} < \frac{L}{r_t} < \sqrt{\frac{35800C_b}{F_y}}$

$$\frac{L}{r_t} = \frac{800}{7.96} = 100.5$$

因為梁內任一點彎矩大於兩端支撐點，故 $C_b = 1.0$ 。

$$\sqrt{\frac{7160C_b}{F_y}} = \sqrt{\frac{7160(1)}{2.5}} = 53.5$$

$$\sqrt{\frac{35800C_b}{F_y}} = \sqrt{\frac{35800(1)}{2.5}} = 119.7$$

$$\sqrt{\frac{7160C_b}{F_y}} < \frac{L}{r_t} < \sqrt{\frac{35800C_b}{F_y}}$$

(3) 計算容許彎矩

$$F_b = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y(L/r_t)^2}{107600C_b} \right] F_y$$

$$= \left[\frac{2}{3} - \frac{2.5(800/7.96)^2}{107600(1)} \right] (2.5) = 0.434F_y = 1.08 \text{ tf/cm}^2$$

$$M_a = F_b S_x = 1.08 \times 3890 = 4201 \text{ tf-cm}$$

$$w_{a,\text{specified}} = \frac{8M_a}{L^2} = \frac{8(4201)}{800^2} = 0.0525 \text{ tf/cm} = 5.25 \text{ tf/m}$$

各點施加力量為

$$P = (w_{a,\text{specified}} - \text{鋼梁自重} - \text{樓板自重} \times 7/8) \times L/4$$

$$= (5.25 - 0.147 - 2.4 \times 0.9 \times 0.125 \times 7/8) \times 8/4$$

$$= 9.7 \text{ tf}$$

$$= 95.2 \text{ kN}$$

若以鋼材拉力試片降伏強度為 3.58 tf/cm^2 (351 MPa) 計算， $w_{a,\text{steel}} = 5.79$

tf/m，各點施加力量為 $10.8 \text{ tf} = 105.8 \text{ kN}$ 。

附錄三 合成梁設計容許彎矩計算 (容許應力法)

根據內政部鋼結構容許應力設計法規範及解說(2007)中的規定計算。

鋼梁斷面尺寸為 RH588×300×12×20，實際降伏強度 F_y 為 3.58 tf/cm^2 。剪力釘數目為 44 支，剪力釘直徑為 19 mm，長度 H_s 為 11.5 cm。鋼承板肋條高度 h_r 為 5.1 cm，肋條寬度 w_r 為 12.7 cm。混凝土寬度為 90 cm，有效高度 9.9 cm，抗壓強度 f'_c 為 308 kgf/cm^2 。

剪力釘強度

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc}F_u$$
$$= 0.5(2.835)\sqrt{0.308 \times 263} = 12.76 \text{ tf} \leq (2.835)(4.57) = 12.96 \text{ tf}$$

$$q = 0.5Q_n = 6.48 \text{ tf}$$

剪力釘強度折減係數

$$\left(\frac{0.85}{\sqrt{N_r}}\right)\left(\frac{w_r}{h_r}\right)\left(\frac{H_s}{h_r} - 1.0\right) \leq 1.0$$

$$\left(\frac{0.85}{\sqrt{N_r}}\right)\left(\frac{w_r}{h_r}\right)\left(\frac{H_s}{h_r} - 1.0\right) = \left(\frac{0.85}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{12.7}{5.1}\right)\left(\frac{11.5}{5.1} - 1.0\right) > 1.0$$

其中， N_r = 每一肋條與鋼梁交接處剪力釘之數量。不考慮折減係數。

$$h/t_w = 58.8/1.2 = 49 < 170/\sqrt{F_{yf}} = 170/\sqrt{3.58} = 89.8，以塑性應力分布計$$

算合成梁之撓曲強度。

以合成斷面塑性應力分布計算 M_n

$$C = A_s F_y = 187 \times 3.58 = 669.5 \text{ tf}$$

$$C = 0.85 f'_c A_c = 0.85(0.308)(9.9 \times 90) = 233.4 \text{ tf}$$

$C = \sum Q_n = 22 \times 6.48 = 142.6 \text{ tf}$ 控制 (試體簡支梁從端點到 $1/2 L$ 處剪力釘數為 22 根)

$$a = \frac{C}{0.85 f'_c b} = \frac{142.6}{0.85 \times 0.308 \times 90} = 6.1 \text{ cm}$$

$$P_y = A_s F_y = 669.5 \text{ tf}$$

PNA 至鋼梁上緣之距離為 12.28 cm

標稱彎矩 $M_n = 20249 \text{ tf-cm}$

設計容許彎矩 M_a

$$M_a = 0.6 M_n = 12149 \text{ tf-cm}$$

施加载重

$$W_{a, \text{composite}} = \frac{8M_a}{L^2} = \frac{8(12149)}{800^2} = 0.152 \text{ tf/cm} = 15.2 \text{ tf/m}$$

$$P = (W_{a, \text{composite}} - \text{鋼梁自重} - \text{樓板自重} \times 7/8) \times L/4$$

$$= \left(15.2 - 0.147 - 2.4 \times 0.9 \times 0.125 \times \frac{7}{8} \right) \times \frac{8}{4}$$

$$= 29.6 \text{ tf}$$

$$= 290.1 \text{ kN}$$



附錄四 分析計算例

以試體 2 在 60 分鐘時之數據進行計算。此時鋼梁的熱電偶測點量測到溫度為：

熱電偶測點	1A	1B	1C	1D	3A	3B	3C	3D
溫度 (°C)	286.1	470.4	403.4	385.7	296.3	520.1	457.1	437.3
熱電偶測點	5A	5B	5C	5D				
溫度 (°C)	267.7	502.8	458.3	428.0				

鋼之熱膨脹係數為 $\alpha = 14 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ ，彈性模數為 200 GPa，鋼梁斷面為 RH588×300×12×20。試體支撐間距的 1/8、3/8、5/8 及 7/8 的地方各受 98.1 kN 載重。

(1) 斷面 1 及斷面 5 各肢材之溫度取平均：

分析時之斷面 1 之上翼板溫度為 276.9°C、腹板為 486.6°C、下翼板為 418.9°C。另外分析時跨距中點之斷面 2 上翼板溫度為 296.3°C、腹板為 520.1°C、下翼板為 447.2°C。

(2) 熱膨脹之分析：

將(1)中之數據代入至第四章中之(4-3)及(4-4)式，

$$A_1 = \frac{\alpha}{d(L_2 - L_1)} (T_{2,\text{bot}} - T_{1,\text{bot}} - T_{2,\text{top}} + T_{1,\text{top}})$$

$$A_1 = 8.5 \times 10^{-9}$$

$$A_2 = \frac{\alpha(T_{1,\text{bot}} - T_{1,\text{top}})}{d} - A_1 L_1$$

$$A_2=3.3\times 10^{-5}$$

將 A_1 及 A_2 代入至(4-7)式得到 c_1 為-0.014，及後將 A_1 、 A_2 及 c_1 分別代入(4-10)式中

$$v(L_2)=\frac{1}{6}A_1L_2^3+\frac{1}{2}A_2L_2^2+c_1L_2$$

得到跨距中點因熱膨脹產生之撓度為 27.8 mm。

(3) 材料力學行為折減之分析：

a. 建立縱向溫度函數

根據 (4-1) 式，對試體的上翼板、腹板及下翼板建立縱向

之溫度分佈函數，所得結果如下：

$$T_{\text{top}}(x)=0.0776x+265.3;$$

$$T_{\text{web}}(x)=0.134x+466.5;$$

$$T_{\text{bot}}(x)=0.1134x+401.8;$$

b. 建立縱向折減係數函數

從已知的表中，看到鋼梁腹板的溫度分佈有超過 Eurocode 3 折減係數曲線曲率改變點，故腹板在建立折減係數函數時要分為兩部份。

利用 a 中建立之溫度函數式及 Eurocode 3 的折減係數規

定，建立出以下折減係數函數

$$R_{\text{top}}(x)=7.76\times 10^{-5}x+0.83$$

$$R_{\text{web}}(x)=-1.34\times 10^{-4}x+0.63 \quad (0\leq x\leq 250)$$

$$R_{\text{web}}(x)=-3.89\times 10^{-4}x+0.70 \quad (250\leq x\leq 400)$$

$$R_{\text{bot}}(x) = 1.13 \times 10^{-4}x + 0.70$$

c. 建立縱向慣性矩函數

透過建立中性軸函數後，便可建立縱向之慣性矩函數，所

建立之函數如下

$$I(x) = (-2.4 \times 10^{31}x^3 + 1.5 \times 10^{36}x^2 - 2.3 \times 10^{40}x + 8.7 \times 10^{43}) / (1.5 \times 10^{15}x - 2.2 \times 10^{19})^2 \text{ (cm}^4) \quad (0 \leq x \leq 250 \text{ cm})$$

$$I(x) = (-4.4 \times 10^{32}x^3 + 1.7 \times 10^{37}x^2 - 1.5 \times 10^{41}x + 3.6 \times 10^{44}) / (5.3 \times 10^{15}x - 4.5 \times 10^{19})^2 \text{ (cm}^4) \quad (250 \text{ cm} < x \leq 400 \text{ cm})$$

d. 建立縱向彎矩函數

$$M(x) = \begin{cases} 196.2x \text{ (kN} \cdot \text{cm)} & (0 \text{ cm} < x \leq 100 \text{ cm}) \\ 98.1(x + 100) \text{ (kN} \cdot \text{cm)} & (100 \text{ cm} < x \leq 300 \text{ cm}) \\ 39240 \text{ (kN} \cdot \text{cm)} & (300 \text{ cm} < x \leq 400 \text{ cm}) \end{cases}$$

e. 計算試體因材料力學行為折減產生之撓度

通過解材料力學公式 $v'' = M/EI$ 這微分方程，可計算試體因材料力學行為折減產生之撓度，由於 M/EI 為一不可直接積分的函數，故需使用數值積分，邊界條為 $v(0) = 0$ 及 $v'(L_2) = 0$ ，扣除初始變位 5.6 mm 計算到產生之變位為 2.1 mm。

(4) 計算總撓度

$$V_{\text{total}} = 27.8 \text{ mm} + 2.1 \text{ mm} = 29.9 \text{ mm}$$

試驗量測到跨距中點之撓度為 32.0 mm。