

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

火害下合成梁撓曲行為之
有限元素分析

**Finite Element Analysis of Flexural Behavior of
Composite Beams in Fire**

研究生：葉顯嘉

指導教授：陳誠直博士

中華民國九十九年七月

火害下合成梁撓曲行為之有限元素分析

**Finite Element Analysis of Flexural Behavior of
Composite Beams in Fire**

研究生：葉顯嘉

Student : Hsien-Chia Yeh

指導教授：陳誠直博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文



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

火害下合成梁撓曲行為之有限元素分析

研究生：葉顯嘉

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

國內廣泛使用鋼結構，於鋼梁上部鋪設鋼承板，以剪力釘連接，後澆製混凝土形成合成梁。本研究以有限元素分析方法研究不同參數對於高溫下合成梁撓曲行為之影響。研究依序為建立分析模型，藉由實尺寸試驗，驗證有限元素模型之正確性；並設定分析參數，包括有無樓板、載重大小與橫斷面溫度分佈等。研究結果顯示數值模型能有效模擬合成梁於高溫下變形行為。參數研究結果得知樓板於溫度較低時，對於撓曲勁度的提供並不明顯；溫度提高後，合成梁材料強度降低，樓板能有效減緩合成梁撓曲變形速率。載重比分析得知施加载重越大時，伴隨著溫度的提高材料強度漸減，促使合成梁提早產生大變形。合成梁橫斷面溫度分佈結果顯示合成梁撓曲變形深受鋼梁上下翼板溫度之差異而影響。

關鍵詞：合成梁、火害、有限元素分析、撓曲變形

Finite Element Analysis of Flexural Behavior of Composite Beams in Fire

Student : Hsien-Chia Yeh

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

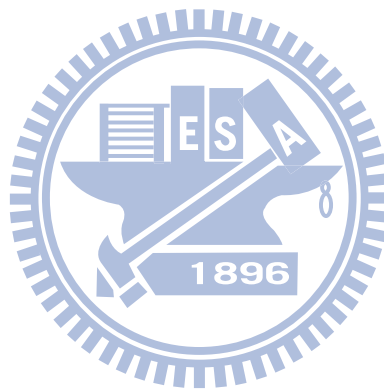
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Composite beams formed with steel deck, shear studs and concrete are commonly used in steel buildings. Utilizing the finite element method, this study aims to investigate the effect of parameters on flexural behavior of composite beams at elevated temperatures. The research was conducted by establishing and validating the analysis model by comparing the results with full-scale test results, and setting-up the parameters including the existing or not of the concrete slab, load ratio, and cross-sectional temperature distribution. The results showed that numerical model can effectively simulate the deformation behavior of composite beams in fire. The parametric study demonstrated that the slab could effectively reduce the deflection rate of the composite beams, with decrease of the material strength, at high temperature although the effectiveness was not apparent at lower temperature. The analysis results of load ratio indicated that increasing the applied load, accompanied with the strength decrease due to high temperature, resulted in detrimental deformation of the composite beams. The analysis results of the

cross-sectional temperature distribution showed that the flexural deformation of the composite beams greatly influenced by the temperature difference between top and bottom flanges of the steel beam.

Keywords: composite beam, in fire, finite element analysis, flexural deformation



誌謝

感謝恩師 陳誠直教授兩年來的指導，使學生在學業與待人處世上受益匪淺，並能以更嚴謹的態度去面對問題，在此致上由衷的感謝。論文口試期間，承蒙鄭復平教授與趙文成教授給予寶貴的意見與指教，使得論文內容能更臻完備。

感謝學長 南交、政甯、政億於研究期間給予我諸多指導與建議；學長 俞燦、璿至、岳勳、孟暉與學姐 嘉儀、致潔在學業與生活上給予我莫大的幫助；研究室夥伴錦輝、霏琳、士庭、偉乾、易宸在修業期間的相互扶持與砥礪。

最後，僅將本論文獻給我最摯愛的父母，感謝你們二十多年來的養育與栽培，每當我困頓迷惘時，你們總是能給予我正確的觀念與支持，才能造就今日的我。願你們一起分享我獲得碩士學位的榮耀與喜悅。

顯嘉 九十九年七月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
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 文獻回顧.....	4
2.1 國外火害研究文獻回顧.....	4
2.2 國內火害研究文獻回顧.....	6
第三章 合成梁於高溫下之數值模擬.....	8
3.1 鋼材高溫材料性質.....	8
3.1.1 鋼材在高溫下之應力應變關係.....	8
3.1.2 鋼材在高溫下之力學性質折減係數.....	10

3.1.3	鋼材之熱傳導係數.....	10
3.1.4	鋼材之比熱.....	11
3.1.5	鋼材之熱膨脹係數.....	12
3.2	混凝土高溫材料性質.....	12
3.2.1	混凝土在高溫下之應力應變關係.....	12
3.2.2	混凝土在高溫下之力學性質折減係數.....	13
3.2.3	混凝土之熱傳導係數.....	13
3.2.4	混凝土之比熱.....	14
3.2.5	混凝土之熱膨脹係數.....	14
3.3	數值模擬方法與步驟.....	15
第四章	分析模式驗證.....	19
4.1	分析模型介紹.....	19
4.2	分析結果與討論.....	21
第五章	合成梁於高溫下之參數研究.....	23
5.1	分析控制組模型分析與討論.....	23
5.2	無樓板鋼梁模型之數值分析與討論.....	24
5.3	載重比之數值分析與討論.....	25
5.4	梁斷面溫度分佈之數值分析與討論.....	26
5.5	梁斷面溫度分佈數值分析結果比較.....	29

第六章 結論與建議	32
6.1 結論	32
6.2 建議	33
參考文獻	34



表目錄

表 3-1 Eurocode 3 鋼材在高溫下之應力應變關係.....	37
表 3-2 鋼材在高溫下之力學性質折減係數.....	38
表 3-3 混凝土在高溫下之力學性質折減係數.....	39
表 3-4 ABAQUS 有限元素分析單位表.....	40
表 4-1 試體試驗資料表.....	40
表 5-1 合成梁火害參數分析列表.....	41
表 5-2 Sectemp 系列模型分析結果比較列表.....	42



圖目錄

圖 3-1 Eurocode 3 鋼材在高溫下考慮應變硬化之應力應變關係	43
圖 3-2 Eurocode 3 鋼材在高溫下之力學性質折減係數.....	43
圖 3-3 Eurocode 3 鋼材熱傳導係數.....	44
圖 3-4 Eurocode 3 鋼材比熱.....	44
圖 3-5 鋼材熱膨脹係數 (Touloukian et al. 1977)	45
圖 3-6 Eurocode 2 混凝土在高溫下之應力應變關係.....	45
圖 3-7 混凝土在高溫下之彈性模數折減係數 (Li and Purkiss 2005) .	46
圖 3-8 Eurocode 2 混凝土在高溫下之力學性質折減係數.....	46
圖 3-9 Eurocode 2 混凝土熱傳導係數.....	47
圖 3-10 Eurocode 2 混凝土比熱.....	47
圖 3-11 混凝土熱膨脹係數 (Lie 1994)	48
圖 3-12 ABAQUS 分析流程圖.....	49
圖 3-13 鋼梁模型	50
圖 3-14 樓板模型	50
圖 3-15 合成梁組合模型	51
圖 3-16 合成梁網格劃分模型.....	51
圖 3-17 鋼材雙線性材料模式.....	52
圖 4-1 試體縱向熱電偶測點配置位置 (趙文成與陳誠直 2009).....	52

圖 4-2 鋼梁橫斷面熱電偶測點配置位置 (趙文成與陳誠直 2009).....	53
圖 4-3 試體樓板混凝土施工完成 (趙文成與陳誠直 2009).....	53
圖 4-4 鋼梁熱電偶線設置 (趙文成與陳誠直 2009).....	54
圖 4-5 防火被覆施工完成 (趙文成與陳誠直 2009).....	54
圖 4-6 標準加熱溫度—時間曲線 (CNS 12514 1997)	55
圖 4-7 三組試體試驗後永久變形情形 (趙文成與陳誠直 2009).....	55
圖 4-8 試體 1 之斷面 1 時間與溫度關係圖	56
圖 4-9 試體 1 之斷面 2 時間與溫度關係圖	56
圖 4-10 試體 1 之斷面 3 時間與溫度關係圖	57
圖 4-11 試體 1 之斷面 4 時間與溫度關係圖	57
圖 4-12 試體 1 之斷面 5 時間與溫度關係圖	58
圖 4-13 試體 2 之斷面 1 時間與溫度關係圖	58
圖 4-14 試體 2 之斷面 2 時間與溫度關係圖	59
圖 4-15 試體 2 之斷面 3 時間與溫度關係圖	59
圖 4-16 試體 2 之斷面 4 時間與溫度關係圖	60
圖 4-17 試體 2 之斷面 5 時間與溫度關係圖	60
圖 4-18 試體 3 之斷面 1 時間與溫度關係圖	61
圖 4-19 試體 3 之斷面 2 時間與溫度關係圖	61
圖 4-20 試體 3 之斷面 3 時間與溫度關係圖	62

圖 4-21 試體 3 之斷面 4 時間與溫度關係圖.....	62
圖 4-22 試體 3 之斷面 5 時間與溫度關係圖.....	63
圖 4-23 樓板表面施加溫度 (Huang et al.1995).....	63
圖 4-24 試體 1—試驗與分析之中點撓度比較.....	64
圖 4-25 試體 2—試驗與分析之中點撓度比較.....	64
圖 4-26 試體 3—試驗與分析之中點撓度比較.....	65
圖 5-1 Control 模型縱向溫度配置.....	66
圖 5-2 Control 模型斷面 1 溫度分佈.....	66
圖 5-3 Control 模型斷面 2 溫度分佈.....	67
圖 5-4 Control 模型斷面 3 溫度分佈.....	67
圖 5-5 Control 模型橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖.....	68
圖 5-6 Control 與 Steelbeam 模型時間-模型跨距中點撓度比較圖.....	68
圖 5-7 Ldratio 系列模型時間-模型跨距中點撓度比較圖.....	69
圖 5-8 Sectemp 系列模型使用之分析溫度.....	69
圖 5-9 Sectemp01 橫斷面溫度分佈圖.....	70
圖 5-10 Sectemp01 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖.....	70
圖 5-11 Sectemp01 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖.....	71
圖 5-12 Sectemp02 橫斷面溫度分佈圖.....	72
圖 5-13 Sectemp02 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖.....	72

圖 5-14 Sectemp02 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖	73
圖 5-15 Sectemp03 橫斷面溫度分佈	74
圖 5-16 Sectemp03 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖	74
圖 5-17 Sectemp03 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖	75
圖 5-18 Sectemp04 橫斷面溫度分佈	76
圖 5-19 Sectemp04 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖	76
圖 5-20 Sectemp04 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖	77
圖 5-21 Sectemp05 橫斷面溫度分佈	78
圖 5-22 Sectemp05 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖	78
圖 5-23 Sectemp05 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖	79
圖 5-24 Sectemp06 橫斷面溫度分佈	80
圖 5-25 Sectemp06 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖	80
圖 5-26 Sectemp06 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖	81
圖 5-27 Sectemp01 與 Sectemp03 時間-模型跨距中點撓度比較圖	81
圖 5-28 Sectemp02~Sectemp04 時間-模型跨距中點撓度比較圖	82
圖 5-29 Sectemp02 與 Sectemp06 時間-模型跨距中點撓度比較圖	82
圖 5-30 Sectemp05 與 Sectemp06 時間-模型跨距中點撓度比較圖	83

第一章 緒論

1.1 研究背景

台灣地狹人稠，經濟快速發展，使得人口大量集中於都會區，為了利用有限的空間，建築物有逐漸向上發展的趨勢，加上台灣地處環太平洋地震帶，而鋼骨結構具有低自重、高強度、材料均質、耐震性能佳與施工快速等優點，因此其被廣泛的用於高樓建築中。

鋼梁與樓板組合而成之合成梁 (Composite Beam)，普遍使用於鋼結構建築中。其作法為於鋼梁翼板鋪設鋼承板並銲接剪力釘固定鋼承板，鋼承板功能是做為混凝土澆置之模型，混凝土澆置完成與鋼承板結合成為樓板，樓板與鋼梁形成合成梁。樓板除了能提供鋼梁有效的側向支撐，更能防止鋼梁產生側向扭轉挫屈。

鋼骨結構具備結構耐震優點，但卻有著一項致命性的缺點，就是耐火性能不佳，當鋼材溫度到達 500°C 時，彈性模數降為室溫下的六成，溫度到達 600°C 時，降伏強度大幅下降至室溫的一半以下，可見高溫對於鋼結構強度影響是相當的重大。

依據內政部消防署統計資料顯示，民國 98 年台灣地區一年發生 2621 件火災，造成 413 人傷亡與 7 億 6 千多萬的財物損失，由以上

數據可知，火災對於生命財產造成相當嚴重的傷害，因此，應當正視鋼結構於火害下之行為。

1.2 研究目的

進行合成梁高溫下實尺寸試驗有著許多問題，如試體製作與試驗設備昂貴，試驗須耗費許多時間，高溫試驗對於相關數據量測不易等。現今電腦運算能力已較過去有大幅度的進步，分析軟體技術也日漸成熟，有限元素分析已廣泛用於鋼結構火害之研究。雖然數值模擬可考慮一些現場試驗無法達成之條件，但仍需要試驗結果來驗證數值模擬之可行性。由實尺寸試驗結果配合合理的有限元素分析模型，可減少因試驗設計不當重複試驗所造成人力與資金的耗費。實尺寸試驗與有限元素分析兩者相輔相成，期望能正確預測合成梁火害下之行為，並藉由有限元素分析進行參數研究，探討參數對合成梁行為之影響。

1.3 研究方法

本研究以 ABAQUS 有限元素分析軟體作為分析工具，參考實尺寸合成梁試驗數據，建立有限元素分析模型，將分析結果與試驗結果相互比較，驗證模型準確性。模型驗證完成後，進行參數分析，考慮載重大小、樓板有無與斷面溫度分佈不同對於合成梁變形行為影響。

1.4 論文內容

本論文共分為六個章節，第一章介紹研究背景、目的、方法及內容；第二章為文獻回顧，介紹國內外學者對鋼結構於火害下相關之研究；第三章介紹鋼材與混凝土之材料性質，有限元素分析步驟與分析方法；第四章將分析結果與試驗結果比較，驗證分析模型之準確性；第五章進行合成梁參數分析，研究參數改變後對於合成梁撓度之影響；第六章為結論與建議，綜合分析結果歸納本研究之結論，並建議後續相關研究方向。



第二章 文獻回顧

鋼結構雖然有低自重、高強度、耐震性能佳與施工快速等諸多優點，但在高溫環境下材料強度會迅速降低，以致於火災發生時造成嚴重的生命財產損失，因此鋼結構火害行為研究也成為相當重要的課題。

2.1 國外火害研究文獻回顧

Buchanan et al. (2004)以 SAFIR 分析軟體進行鋼梁及鋼與混凝土樓板合成構造之三面受熱分析模擬。分析使用歐洲規範 Eurocode 3 (2005)高溫下之鋼材性質。改變梁之邊界條件形式，研究不同邊界條件下受火害梁之行為。分析結果顯示，軸向束制梁相對於長向能自由伸展梁有較好的耐火性能。

Dharma and Tan (2005)以有限元素法分析梁於高溫下不同比例之旋轉容量 (Rotational Capacity)與轉角關係，並研究梁翼板與腹板長細比對於梁之旋轉容量影響。研究結果顯示，對於梁提供更多的側向束制，在側向扭轉挫屈破壞模式下，能增加梁在高溫環境下的旋轉容量。

Ghojel and Wong (2005)針對 I 型梁與混凝土樓板合成構造受火害進行分析模擬。將分析模式與其他學者所做實驗資料作比對，建立一

套預測高溫下鋼梁溫度分佈的分析模式。

Liu et al. (2002)進行 16 組鋼梁受高溫試驗，在試體兩端提供軸向以及旋轉束制，藉由試驗了解鋼梁破壞的模式以及兩種不同束制在加熱情況下所呈現的反應。研究發現懸鏈效應 (Catenary Action)在低載重、高束制的試體中較為顯著。

Rubert and Schaumann (1986)進行實尺寸簡支梁試驗，改變加熱速率、載重率、斷面尺寸，將試驗結果與 DIN 4102 (1981)、ECCS (1983)規範比對，以了解簡支梁於高溫下之撓度變化情形。

Touloukian et al. (1977)提出一套以三階多項式計算鋼材的熱膨脹係數 (Coefficient of Thermal Expansion)公式。

Vimonsatit et al. (2007)進行大規模高溫鋼梁試驗，研究剪力破壞現象、剪力挫屈後腹板產生的張力場效應 (Tension-Field Action)。研究發現，高溫時由於鋼材材料處在高度非線性狀態，鋼梁發生剪力挫屈破壞行為變得較不明顯。

Zhao and Shen (1999)對於無防火被覆鋼構架暴露在真實火場中之情形進行試驗，共有三組試體，都為單跨距單層構架，進行構架在高溫下行為研究。試驗結果顯示，高溫情形下鋼材強度下降，材料產

生非線性行為，溫度分佈不均造成構架的大變形及內力重新分配。

2.2 國內火害研究文獻回顧

林慶元與林銅柱(1993)進行小尺度鋼材耐火試驗，就不同尺度耐火試驗之相關關係進行理論探討，以斷面展開的概念及斷面形狀因子來表示兩者間的關連性，並將試驗結果與 CNS 12514 與 UL 263 耐火規範進行比對。由研究結果建立起以小尺度試體檢驗耐火被覆材料之試驗方法與判定基準。

張燕如(2005)以向量式有限元素法模擬鋼結構於火害下之行為，模擬以簡支梁、簡支柱為基本構件，參數為不同載重、邊界條件、溫度場分佈狀況加以比較討論，並與 BSI 規範進行比較。研究結果顯示規範僅能使用於鋼結構束制條件為簡支承且溫度場為全均溫之情形，一但溫度場改變，規範定義之臨界溫度及無法適用。

鄭紹材(2007)研究建築鋼結構防火被覆耐火性能與驗證機制，對耐火塗料進行熱分析試驗，並對不同地區防火被覆性能之評估方式進行研究及比較。提出耐火塗料品質性能檢驗需求之項目。

許晉璋(2007)依據實尺寸鋼結構梁柱接頭高溫試驗進行模擬，以 ANSYS 分析軟體進行有限元素數值模擬，材料組成率選用歐洲規範

S355 鋼材性質以及國內 Gr 50W 鋼材性質，由分析比較國內外鋼材於梁柱接頭試驗之差異性。分析結果顯示，當試體在定溫下載重升高時，歐洲規範 S355 鋼材分析結果過於保守。

林振吉(2008)進行 3 組 H 型鋼梁與箱型鋼柱相接之梁柱接頭於高溫下之載重試驗，試驗採用 SN490B 耐震 B 級鋼與 SN490C-FR 耐震 C 級耐火鋼，並以 ABAQUS 有限元素分析軟體進行數值分析與試驗結果進行比較，模擬實際環境下不同受熱面結構型式之火害行為。數值分析結果顯示，四面受熱方式較三面受熱方式不安全，兩面受熱之接頭結構發生扭轉情形而提早破壞，其原因是梁柱接頭受熱面勁度因加熱而漸減，非受熱面勁度維持不變，導致梁上翼板傳熱不均勻而有偏心效應，發生扭轉現象。

第三章 合成梁於高溫下之數值模擬

本研究數值模擬採用試驗 (趙文成與陳誠直 2009)之實際材料試驗結果，並配合 Eurocode 2 (2004)、Eurocode 3 (2005)、Touloukian et al. (1977)、Lie (1994)與 Li and Purkiss (2005)所建議之分析所需相關參數，補足試驗未獲得之數據。分析所需材料性質可分為兩類，分別為力學性質 (Mechanical Property)與熱性質 (Thermal Property)資料。力學性質資料可包括鋼材於不同溫度相對於常溫之鋼材線彈性範圍折減係數、有效降伏強度折減係數與比例限度折減係數，混凝土於不同溫度下相對於常溫之抗拉、抗壓強度。熱性質資料為不同溫度下材料之比熱 (Specific Heat)、熱傳導性 (Thermal Conductivity)與熱膨脹性 (Thermal Expansion)等性質。分析採用 ABAQUS 有限元素分析軟體，介紹數值研究方法與步驟，並說明 ABAQUS 軟體之特殊設定。

3.1 鋼材高溫材料性質

3.1.1 鋼材在高溫下之應力應變關係

歐洲規範 Eurocode 3 高溫下之鋼材強度與變形性質在每分鐘 2 至 50K 加熱速率之情形下所得之應力應變關係如表 3-1 及圖 3-1 所示，鋼材溫度在 400°C 以下考慮應變硬化的情形，圖 3-1 中 $\epsilon_{s,0}$ 為應變硬化段的應變，範圍在從 0.02 到 0.04。其他對應圖 3-1 的參數計算

如下：

當 $T < 300^{\circ}\text{C}$ 時，

$$f_{u,\theta} = 1.25f_{y,\theta} \quad (3-1)$$

當 $300^{\circ}\text{C} \leq T < 400^{\circ}\text{C}$ 時，

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}(2 - 0.0025T) \quad (3-2)$$

當 $T \geq 400^{\circ}\text{C}$ 時，

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} \quad (3-3)$$

當 $0.02 < \varepsilon < 0.04$ 時，

$$\sigma_a = 50(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})\varepsilon + 2f_{y,\theta} - f_{u,\theta} \quad (3-4)$$

當 $0.04 \leq \varepsilon \leq 0.15$ 時，

$$\sigma_a = f_{u,\theta} \quad (3-5)$$

當 $0.15 \leq \varepsilon \leq 0.20$ 時，

$$\sigma_a = f_{u,\theta}[1 - 20(\varepsilon - 0.15)] \quad (3-6)$$

當 $\varepsilon \geq 0.20$ 時，

$$\sigma_a = 0.00 \quad (3-7)$$

其中 T 為鋼材溫度 ($^{\circ}\text{C}$)， $f_{u,\theta}$ 為鋼材的極限強度， $f_{y,\theta}$ 為鋼材的降伏強度， ε 為鋼材的應變， σ_a 為鋼材的應力。

3.1.2 鋼材在高溫下之力學性質折減係數

歐洲規範 Eurocode 3 訂出鋼材在不同溫度下彈性模數 $E_{a,\theta}$ 與常溫下彈性模數 E_a 之比值，以及鋼材在不同溫度下比例極限 $f_{p,\theta}$ 與降伏強度 $f_{y,\theta}$ 和常溫下降伏強度之比值，如表 3-2 與圖 3-2 所示。當鋼材溫度到達 500°C 時，彈性模數降為常溫時的 60%；當鋼材溫度到達 600°C 時，降伏強度降為常溫時的一半以下，由此可知溫度對於鋼材強度有相當大的影響。



3.1.3 鋼材之熱傳導係數

熱傳導係數決定於材料的熱傳導率、密度與熱容，本研究參考歐洲規範 Eurocode 3 訂出鋼材熱傳導係數，如圖 3-3 所示，計算公式如下：

當 $20^{\circ}\text{C} \leq T < 800^{\circ}\text{C}$ 時，

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T \quad (3-8)$$

當 $800^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$ 時，

$$\lambda_a = 27.3 \quad (3-9)$$

其中 λ_a 為鋼材的熱傳導係數 (W/mK)。

3.1.4 鋼材之比熱

比熱的定義為單位物質升高 1°C 所需之熱能。歐洲規範 Eurocode 3 鋼材之比熱如圖 3-4 所示，由圖可知當溫度約 750°C 時鋼材比熱突然升高，計算公式如下：

當 $20^{\circ}\text{C} \leq T < 600^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_a = 425 \times 7.73 \times 10^{-1} T - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 2.22 \times 10^{-6} T^3 \quad (3-10)$$

當 $600^{\circ}\text{C} \leq T < 735^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - T} \quad (3-11)$$

當 $735^{\circ}\text{C} \leq T < 900^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_a = 545 + \frac{17820}{T - 731} \quad (3-12)$$

當 $900^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_a = 650 \quad (3-13)$$

其中 c_a 為鋼材的比熱 (J/kgK)。

3.1.5 鋼材之熱膨脹係數

本研究採用 Touloukian et al. (1977)所提供的鋼材熱膨脹係數公式，採用此公式可得知不同溫度所對應的熱膨脹係數，如圖 3-5 所示，公式以三階多項式計算熱膨脹係數，公式如下：

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 \quad (3-14)$$

其中， $\alpha_0 = 7.3633 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ ；

$$\alpha_1 = 1.8723 \times 10^{-8} (\text{°C})^{-2}；$$

$$\alpha_2 = -9.8382 \times 10^{-12} (\text{°C})^{-3}；$$

$$\alpha_3 = 1.6718 \times 10^{-16} (\text{°C})^{-4}。$$

3.2 混凝土高溫材料性質

3.2.1 混凝土在高溫下之應力應變關係

混凝土應力應變參考歐洲規範 Eurocode 2，高溫下混凝土承壓之應力應變曲線如圖 3-6 所示，計算公式如下：

$$\sigma = \frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{ct,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cl,\theta}} \right)^3 \right)} \quad (3-15)$$

其中 σ 為混凝土高溫下的應力， ε 為混凝土的應變， $f_{c,\theta}$ 為混凝土的抗壓強度， $\varepsilon_{cl,\theta}$ 為混凝土到達抗壓強度時的應變。

3.2.2 混凝土在高溫下之力學性質折減係數

Li and Purkiss (2005)建議混凝土在不同溫度下彈性模數 $E(T)$ 與常溫下彈性模數 E_0 之比值，如圖 3-7 所示，計算如下，

當 $T \leq 60^\circ\text{C}$ 時，

$$E(T) = E_0 \quad (3-16)$$

當 $60^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}$ 時，

$$E(T) = \frac{800 - T}{740} E_0 \quad (3-17)$$

其中 $E(T)$ 為混凝土高溫下彈性模數， E_0 為混凝土常溫下彈性模數。

歐洲規範 Eurocode 2 訂出混凝土在不同溫度下抗壓、抗拉強度與常溫下抗壓、抗拉強度之比值，如表 3-3 與圖 3-8 所示。當溫度到達 600°C 時，混凝土的彈性模數與抗壓強度都降至常溫的一半以下，溫度對於混凝土強度影響甚鉅。

3.2.3 混凝土之熱傳導係數

歐洲規範 Eurocode 2 訂出混凝土熱傳導係數，如圖 3-9 所示，計算公式如下：

$$\lambda_c = 2 - 0.2451(\theta/100) + 0.0107(\theta/100)^2 \quad (3-18)$$

其中 λ_c 為鋼材的熱傳導係數 (W/mK)。

3.2.4 混凝土之比熱

歐洲規範 Eurocode 2 混凝土之比熱 c_p 如圖 3-10 所示，計算公式如下：

當 $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_p(\theta) = 900 \quad (3-19)$$

當 $100^{\circ}\text{C} < T \leq 200^{\circ}\text{C}$ 時，

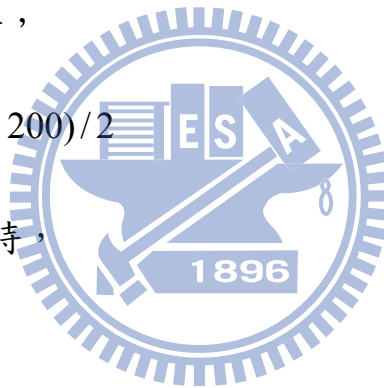
$$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \quad (3-20)$$

當 $200^{\circ}\text{C} < T \leq 400^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \quad (3-21)$$

當 $400^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C}$ 時，

$$c_p(\theta) = 1100 \quad (3-22)$$



3.2.5 混凝土之熱膨脹係數

Lie (1994) 研究建議混凝土在不同溫度下熱膨脹係數公式，如圖 3-11 所示，計算公式如下：

$$\alpha_c = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (3-23)$$

其中 α_c 為混凝土的熱膨脹係數 $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

3.3 數值模擬方法與步驟

科技發展迅速，電腦輔助設計與有限元素分析軟體不斷演進，提供給研究人員與工程師更經濟且更有效率的分析工具。本研究使用 ABAQUS 有限元素軟體進行分析。ABAQUS 不僅能夠進行線性或非線性的結構分析，而且能夠分析包括熱傳導、質量擴散、電子元件的熱控制、聲學、土壤力學和壓電等各種廣闊領域中的問題。ABAQUS 對於組合構件問題，經由給予每個合適的材料模型，並且定義構件之間的交互作用，能夠簡易的組裝成型進行分析。在非線性分析中，ABAQUS 能自動選擇合適的負載增量和收斂準則，並在分析過程中也能不斷調整這些參數，以確保能獲得正確的分析結果。ABAQUS 中沒有固定的單位系統，分析時必須指定一致性的單位如表 3-4，本研究採用 SI 單位系統。

分析基本假設

使用 ABAQUS 分析軟體進行分析模擬，其細節及假設如下：

1. 忽略試體於製作或銲接等因素產生殘留應力之影響。
2. 試體在加溫爐加熱時，忽略加溫爐噴嘴經由熱對流及熱輻射方式將熱傳導至試體之過程。

3. 忽略剪力釘的分析，假設鋼梁與樓板有完全之握裹。
4. 忽略鋼承板的分析。施作樓板時，鋼承板是做為混凝土的模型，對於合成梁抗撓曲之貢獻略為不計。

分析步驟

對於鋼梁與樓板結合之合成梁在高溫環境下行為進行數值分析。所使用的分析分別為熱傳分析、非線性應力分析以及結合兩者的接續性耦合分析(Sequentially Coupled Thermal-Stress Analysis)。分析流程如圖 3-12 所示，有限元素模型如圖 3-13 至圖 3-16 所示

熱傳分析

根據熱電偶線量測所得數據，對合成梁模型各部份個別施加溫度歷時。分析使用熱傳分析元素 DC3D8 (為八個節點的六面體的元素)。模型中節點溫度歷時被儲存在熱傳分析結果內，供接續性耦合分析之用。

非線性應力分析

模擬合成梁受四點加載情形。在非線性應力分析中，對模型施加載重及邊界條件。分析使用三維應力分析元素 C3D8R (為八個節點的六面體的元素)。經由非線性應力分析，可得到試體在每個時間點的

位移、應力及應變等反應。

接續性耦合分析

試體在試驗中同時受到溫度及載重的作用，接續性耦合分析即是結合熱傳分析以及非線性應力分析兩種分析結果，將溫度及載重效應同時反應出來的分析方法。在接續性耦合分析中熱傳分析結果不會受到非線性應力分析所影響。先進行熱傳分析得到節點溫度資料，再進行非線性應力分析得到常溫下試體加載後之反應，再將熱分析結果輸入非線性應力分析中進行接續性耦合分析，求得合成梁受溫度及載重與之反應。



材料性質設定

ABAQUS 有限元素分析中將鋼材設定為均質材料，其應力應變曲線簡化為雙線性，線性階段採用 Linear Isotropic 材料模型，彈性模數 (Elastic Modulus, E) 依據章節 3.1.2 設定；塑性階段採用 Plastic 中 Hardening 為 Isotropic 材料模型，在塑性應變發生時各方向之應力改變量皆相同，塑性模數 (Plastic Modulus, E_{sh}) 依據章節 3.1.1 設定，如圖 3-17 所示。

ABAQUS 模型對於混凝土之應力應變關係採用章節 3.2.1 建議。

混凝土在初始線性階段過後之曲線採用 Concrete Damaged Plasticity 材料模型，其 Plasticity 中設定參數參照 ABAQUS 手冊，當中傾斜角 (Dilation Angle) 手冊建議設定為 30；偏心率 (Eccentricity) 會影響模型之收斂性，手冊建議為 0.1；初始雙軸壓應力與單軸壓應力之比值設定為 1.16；K 值與降伏面有關，手冊建議為 0.67；黏制性參數 (Viscosity Parameter) 設定則與勁度與韌性改變之收斂性有關，設定為 0，表示不考慮此參數之影響。



第四章 分析模式驗證

本研究參考實尺寸試體試驗資料 (趙文成與陳誠直 2009)，該研究共進行三組含有防火被覆之合成梁載重試驗，試驗變數為不同防火被覆厚度與有無施加载重。本研究依照該研究試驗資料作為分析模式之驗證。

4.1 分析模型介紹

試體製作

試體採用國內常用鋼梁斷面 RH 588×300×12×20，長度 9 m。樓板是將鋼承板內澆置混凝土構成，鋼承板尺寸 2W-0.76，樓板長度 7 m，寬度 90 cm，厚度 15 cm。鋼梁與樓板以剪力釘連接。合成梁組裝完成後，依照 CNS 12514 規範規定佈置熱電偶線，配置如圖 4-1 至圖 4-2 所示。熱電偶線設置完成後，對鋼梁進行防火被覆施作，試體製作完成，如圖 4-3 至圖 4-5 所示。

試驗程序與試驗變數

一共進行三組試驗，試驗變數為是否施加载重與防火被覆厚度。加載試驗為四點加載，加載點位於試體支撐間距 1/8、3/8、5/8 及 7/8 的位置，試體支撐間距為 8 m，每個加載點施加 95.2 kN 的力量，加

載完成後，爐內依照 CNS 標準加熱溫度－時間曲線進行加熱試驗，CNS 標準加熱溫度－時間曲線如圖 4-6 所示。防火被覆厚度分為 11 mm 與 14 mm 兩種。三支試體有無加載、被覆厚度與試驗時間彙整於表 4-1。試驗後情形如圖 4-7 所示。

材料與溫度輸入

鋼材常溫下之彈性模數為 202,000 MPa，鋼材拉力試片經拉力試驗所得降伏強度為 350 MPa，混凝土常溫下之彈性模數為 25,800 MPa，抗壓強度為 30.2 MPa，高溫下彈性模數、降伏強度與極限強度由前一章節公式計算，整理於表 3-2 與表 3-3，分析之熱傳導係數、比熱、熱膨脹係數等參數參考前一章節。

分析溫度擷取試驗熱電偶線所量測數值輸入分析模型中，三組試體熱電線量測溫度如圖 4-8 至圖 4-22 所示。由於試體縱向熱電偶線測點間距大，因此將縱向兩相鄰熱電偶線所量測溫度做平均，使分析溫度能更加合理。試驗時樓板無埋設熱電偶線，本研究採用 Huang et al. (1995) 試驗資料，將溫度輸入樓板表面，如圖 4-23 所示。

4.2 分析結果與討論

試體 1

由時間-撓度關係 (圖 4-24)可知，開始加熱至 20 分鐘後，分析模式之變形曲線與試驗之變形曲線有差異，可能原因是分析所採用樓板溫度於分析前期與實際樓板溫度有差異，而造成曲線不規則變化；加熱 20 分鐘後，分析曲線與試驗曲線之變形速率皆開始加快；在 20 分至 60 分鐘期間內，試驗曲線和分析曲線斜率皆為維持一致的情形，分析與試驗結果相當吻合。試驗所得試體跨距中點撓度為 36.1 mm，分析所得試體跨距中點撓度為 33.5 mm。



試體 2

由時間-撓度關係 (圖 4-25)可知，開始加熱至 20 分鐘後，試驗曲線與分析模式之變形曲線維持平緩；加熱 20 分鐘後，分析模式和試驗結果升溫變形速率開始增快；加熱 80 分鐘後試驗曲線斜率產生改變，由熱電偶線資料可知，1 號至 5 號測點腹板溫度，除 1 號測點腹板溫度接近 600 度，2 至 5 號測點腹板溫度皆超過 600 度，由表 3-2 知，當鋼材溫度到達 600 度時，降伏強度只有常溫時的 47%，彈性模數更大幅下降為常溫時的 31%，使得試體撓度增加；加熱 100 分鐘至 120 分鐘後，分析模式曲線斜率急劇增加，而試驗曲線下降較緩，可

能原因是分析樓板溫度與實際試驗樓板溫度不同，實際樓板溫度受熱也並非均勻，未埋設熱電偶線部位之鋼梁溫度在分析時是採取接近兩測點熱電偶線溫度取平均值，可能與實際情形有所不同，而使兩條曲線於末段產生差異。試驗所得試體跨距中點撓度為 184 mm，分析所得試體跨距中點撓度為 236 mm。

試體 3

由時間-撓度關係 (圖 4-26)可知，開始加熱至 20 分鐘後，分析模式之變形曲線與試驗之變形曲線走勢皆相當平緩，加熱 20 分鐘後，分析曲線與試驗曲線斜率都有增大的趨勢，此時有多個測點溫度超過 200 度，當鋼材溫度到達 200 度時，彈性模數開始折減；加熱 20 分鐘至 70 分鐘，分析曲線與試驗曲線雖然都有下降的趨勢，但分析曲線撓曲速率較慢，可能原因是上翼板熱電偶線測點溫度較高，但上翼板溫度分佈並非如是，分析採用測點溫度，因梁上翼板溫度過高，梁上部熱膨脹使得撓度增加速率較緩；加熱 70 分鐘至 93 分鐘，分析曲線與試驗曲線皆開始急降，由熱電偶線資料得知，除了測點 1 可能因加熱爐的因素造成測點溫度偏低外，測點 2 至測點 5 之熱電偶線溫度幾乎都超過 600 度，造成撓度急速增加。試驗所得試體跨距中點撓度為 260.8 mm，分析所得試體跨距中點撓度為 240 mm。

第五章 合成梁於高溫下之參數研究

在實際火場中，火場溫度上升，結構物受熱並非完全均勻，由試驗熱電偶線資料數據中得知，試驗時因熱對流、熱輻射、試驗爐噴火口輸出熱量不同、防火被覆產生破損等因素，造成試體受熱並非對稱均勻。本章將進行合成梁參數分析，故先訂定受熱對稱之基準模型，再依照基準模型進行參數變化之分析比對，包括改變載重比分析與無樓板鋼梁分析；另一組參數分析是改變模型橫斷面上下翼板與腹板之溫度，縱斷面維持均勻溫度，由試驗熱電偶線量測數據中選出有可能發生之溫度組合，施加於模型分析，探討橫斷面溫度不同對於模型撓度之影響。參數分析列表如表 5-1 所示。

5.1 分析控制組模型分析與討論

分析模型說明

基準模型編號為 Control。在分析模型四個載重點分別施加 95.2 kN 載重。分析溫度採用試體 2 量測溫度，將測點 1 與測點 5 溫度作平均，測點 2 與測點 4 溫度作平均，使模型溫度左右對稱，溫度分佈示意圖如圖 5-1，平均後的溫度如圖 5-2 至 5-4 所示，樓板使用 Huang et al. (1995)建議之溫度輸入，分析時間為 120 分鐘。

分析結果

由時間-撓度關係 (圖 5-5)可知，開始加熱至 20 分鐘後，分析模型曲線維持平緩；加熱 20 分鐘後，曲線斜率改變，變形速率開始增快；加熱 20 分鐘至 100 分鐘，變形速率維持固定；加熱 100 分鐘後，曲線斜率產生改變，由溫度資料 (圖 5-2 至圖 5-4)可知，有多個測點溫度超過 600 度。由表 3-2 可知，當鋼材溫度到達 600 度時，降伏強度只有常溫時的 47%，彈性模數更大幅下降為常溫時的 31%，使得試體撓度增加，加熱 100 分鐘至 120 分鐘，曲線變形速率維持固定。Control 分析模型跨距中點撓度為 240.6 mm。

5.2 無樓板鋼梁模型之數值分析與討論

分析模型說明

模型編號為 Steelbeam。將基準模型除去樓板做純鋼梁分析，模型施加之載重、溫度分佈與分析時間同基準模型。

分析結果

由時間-撓度關係 (圖 5-6)可知，開始加熱至 20 分鐘後，分析模型曲線維持平緩；加熱 20 分鐘後，曲線斜率改變，變形速率開始增快；加熱 20 分鐘至 100 分鐘，變形速率維持固定。從開始加熱至 100

分鐘後 Control 曲線與 Steelbeam 曲線走勢相當接近；加熱 100 分鐘後，Control 曲線與 Steelbeam 曲線斜率都產生改變，但是 Steelbeam 曲線變形較 Control 來得急劇，變形量也急速增加；加熱 111 分鐘後達到破壞。由分析結果得知合成梁與純鋼梁在分析前段溫度不高時撓度與變形行為差異不大，到分析後段溫度提升，鋼材強度大為減弱，造成模型變形量遽增，此時樓板提供一定的撓曲強度與勁度，抑制梁的變形，使變形量減少。

5.3 載重比之數值分析與討論

分析模型說明

以 Control 模型為標準，改變載重大小，編號從 Ldratio01 至 Ldratio10，Ld 表示 Load，ratio01 到 ratio10 表示載重比從 0.1 到 1.0 共十組。載重比定義如下：

$$R = \frac{M}{M_a}$$

其中，R 為載重比，M 為彎矩， M_a 採常溫下合成梁之彎矩 762.6 kN-m。

將不同載重比施加於基準模型，模型施加溫度分佈與分析時間同 Control 模型，比較載重不同對於高溫下合成梁之影響。

分析結果

由時間-撓度關係 (圖 5-7)可知，載重比小於 0.6 之模型，在到達 120 分鐘時，未產生破壞；載重比在 0.6 以上之模型，產生破壞的時間依序是 111 分鐘，103 分鐘，97 分鐘，92 分鐘，89 分鐘，由分析結果得知，當合成梁於高溫下，載重越高，造成合成梁提早產生破壞。

5.4 梁斷面溫度分佈之數值分析與討論

由於各試驗場所試驗環境不盡相同，試體溫度分佈也會有所差異。本章節根據 3.3 節之模擬方法分析，經由國內外學者研究，選出 6 種可能的橫斷面溫度分佈進行參數研究，模擬合成梁橫斷面可能的溫度分佈情況。模型編號從 Sectemp01 至 Sectemp06，Sec 表示 Section，temp 表示 Temperature。使用有防火被覆合成梁溫度資料，將合成梁橫斷面分成上翼板、下翼板與腹板三個部份，分別改變三個部份之溫度分佈情形，試體縱方向則採用全均溫，樓板使用 Huang et al. (1995)建議之溫度，於模型支撐間距 1/8、3/8、5/8 及 7/8 位置均施加 95.2 kN 的力量，分析時間為 120 分鐘，由分析了解不同橫斷面溫度分佈對於合成梁行為之影響。分析使用溫度如圖 5-8 所示。

Sectemp01 模型數值分析結果

Sectemp01 溫度分佈如圖 5-9 所示，分析結果如圖 5-10、圖 5-11 所示。模型 Sectemp01 從開始加熱至 20 分鐘後，變形曲線維持平緩，加熱 20 分鐘後，模型撓度開始增加；加熱 20 分鐘至 100 分鐘，變形速率穩定，撓度漸增；加熱在 100 分鐘左右時，變形曲線斜率改變，此時上翼板溫度約為 750 度，降伏強度為常溫時的 17%，彈性模數下降為常溫時的 11%，腹板溫度約為 600 度，降伏強度為常溫時的 47%，彈性模數下降為常溫時的 31%，材料強度與彈性模數大幅降低，使得撓曲速率增加。分析所得模型跨距中點撓度為 196.3 mm。

Sectemp02 模型數值分析結果

Sectemp02 溫度分佈如圖 5-12 所示，分析結果如圖 5-13、圖 5-14 所示。模型 Sectemp02 從開始加熱至 15 分鐘後，變形曲線維持平緩；加熱 15 分鐘後，模型撓度開始增加；加熱 15 分鐘至 80 分鐘，變形速率穩定，撓度漸增；加熱在 80 分鐘左右時，變形曲線斜率改變，此時上翼板溫度約為 540 度，降伏強度為常溫時的 66%，彈性模數下降為常溫時的 48%，下翼板與腹板溫度約為 680 度，降伏強度為常溫時的 28%，彈性模數下降為常溫時的 17%，材料強度與彈性模數大幅降低，使得撓度急劇增加。模型於 98 分鐘時因變形過大而破壞。

Sectemp03 模型數值分析結果

Sectemp03 溫度分佈如圖 5-15 所示，分析結果如圖 5-16、圖 5-17 所示。模型 Sectemp03 從開始加熱至 15 分鐘後，變形曲線維持平緩；加熱 15 分鐘後，模型撓度開始增加；加熱 15 分鐘至 80 分鐘，變形速率穩定，撓度漸增；加熱在 80 分鐘左右時，變形曲線斜率改變，下翼板與腹板溫度約為 680 度，降伏強度為常溫時的 28%，彈性模數下降為常溫時的 17%，材料強度與彈性模數大幅降低，使得撓度急劇增加。模型於 101 分鐘時因變形過大而破壞。

Sectemp04 模型數值分析結果

Sectemp04 溫度分佈如圖 5-18 所示，分析結果如圖 5-19、圖 5-20 所示。模型 Sectemp04 從開始加熱至 60 分鐘後，變形曲線維持平緩；加熱 60 分鐘後，模型撓度開始增加；加熱 60 分鐘至 80 分鐘，變形速率穩定，撓度漸增；加熱在 80 分鐘左右時，變形曲線斜率改變，上翼板，下翼板與腹板溫度約為 680 度，降伏強度為常溫時的 28%，彈性模數下降為常溫時的 17%，材料強度與彈性模數大幅降低，使得撓度急劇增加。模型於 97 分鐘時因變形過大而破壞。

Sectemp05 模型數值分析結果

Sectemp05 溫度分佈如圖 5-21 所示，分析結果如圖 5-22、圖 5-23 所示。模型 Sectemp05 從開始加熱至 20 分鐘後，變形曲線維持平緩；加熱 20 分鐘後，模型撓度開始增加；加熱 20 分鐘至 120 分鐘，變形速率穩定，撓度漸增加。分析所得模型跨距中點撓度為 108 mm

Sectemp06 模型數值分析結果

Sectemp06 溫度分佈如圖 5-24 所示，分析結果如圖 5-25、圖 5-26 所示。模型 Sectemp06 從開始加熱至 120 分鐘後，變形曲線維持平緩，模型撓度緩慢增加。分析所得模型跨距中點撓度為 59.9 mm。

5.5 梁斷面溫度分佈數值分析結果比較

將 Sectemp01 至 Sectemp06 模型分析結果整理並做分析比較，分析結果比較如表 5-2 所示。

Sectemp01 與 Sectemp03 分析結果比較

Sectemp01 與 Sectemp03 模型分析結果如圖 5-27 所示。兩組模型差異在於腹板施加溫度不同。兩分析曲線在 80 分鐘前，曲線走勢差異不大；在 80 分鐘後 Sectemp03 撓度急速增加，此時 Sectemp03 模型腹板溫度為 680 度，降伏強度為常溫時的 28%，彈性模數下降為常

溫時的 17%，而 Sectemp01 模型腹板溫度為 540 度，降伏強度為常溫時的 66%，彈性模數下降為常溫時的 48%，Sectemp03 模型腹板因高溫造成強度大幅下降，使得模型撓度大幅增加。

Sectemp02、Sectemp03 與 Sectemp04 分析結果比較

Sectemp02、Sectemp03 與 Sectemp04 模型分析結果如圖 5-28 所示。三組模型差異在於上翼板施加溫度不同。分析曲線在 15 分鐘前，曲線走勢差異不大，在 15 分鐘後三組模型撓曲速率均增加，撓曲速率 Sectemp03 最大，Sectemp02 次之，Sectemp04 最小，造成此現象是因為 Sectemp04 上翼板溫度雖較另外兩模型高，溫度高雖然會使材料強度減弱，但因上下翼板溫度相同，鋼材受熱膨脹模型的曲率小，撓度就較小。

Sectemp02 與 Sectemp06 分析結果比較

Sectemp02 與 Sectemp06 模型分析結果如圖 5-29 所示。兩組模型差異在於下翼板施加溫度不同。兩分析曲線在 20 分鐘前，曲線走勢差異不大；在 20 分鐘後 Sectemp02 撓曲速率快速增加，Sectemp06 撓曲速率緩慢增加，造成此現象是由於 Sectemp06 鋼梁下翼板溫度較 Sectemp02 低，下翼板因熱造成的伸長量也較 Sectemp02 少，由材料力學曲率觀念可得知，下翼板伸長量較少，模型整體曲率也較小，撓

曲變形量也較小，故下翼板溫度較低抑制模型的撓曲變形。

Sectemp05 與 Sectemp06 分析結果比較

Sectemp05 與 Sectemp06 模型分析結果如圖 5-30 所示。兩組模型差異在於上翼板施加溫度不同。兩分析曲線在 20 分鐘前，曲線走勢差異不大；在 20 分鐘後 Sectemp06 撓曲速率較 Sectemp05 慢，原因是 Sectemp06 上下翼板溫度相同，曲率較小；而 Sectemp05 上翼板溫度較下翼板小，曲率較大，導致撓度較大。惟因兩者下翼板溫度較其他模型小，故撓度曲率皆較平緩。



第六章 結論與建議

本研究藉由有限元素分析軟體模擬高溫下合成梁載重分析，與實尺寸之試驗試體驗證比較，進而設定分析參數，進行分析並相互比較。依據分析結果，得下述之結論與建議：

6.1 結論

- 1 採有限元素分析軟體 ABAQUS 建立分析模型，在適當假設下進行運算分析，分析結果與實際試驗比較，確實能準確模擬與反應試驗之行為，進而以分析模型作為參數分析之用。
- 2 透過相同溫度合成梁與純鋼梁二小時升溫分析模擬發現，兩組模型撓曲曲線在加溫初期與中期走勢差異不大，至加溫後期因材料強度大幅下降，純鋼梁撓度急遽增加。由分析結果得知，樓板能有效提高合成梁撓曲勁度，減緩合成梁變形速率，延後大變形發生的時間。
- 3 本研究經由高溫下合成梁改變載重比分析模擬得知，合成梁溫度隨著時間逐漸提高，材料強度漸減，施加载重越大，使合成梁提早產生大變形，進而發生破壞。
- 4 由改變合成梁橫斷面溫度分析發現，上下翼板溫度相同時，因熱

- 5 梁橫斷面溫度分析顯示，下翼板溫度較低者，在相同加熱時間下，材料強度與彈性模數較大，因熱膨脹產生的伸長量也較少，合成梁整體的曲率較小，相較於下翼板溫度較高模型，能有效的抑制合成梁撓曲變形。由分析結果得知，合成梁撓曲行為，溫度分佈扮演很重要的因素。

6.2 建議

- 1 目前國內鋼材於高溫下之力學性質與熱性質資料並不完備，國內鋼材尚待完備的高溫試驗，使得分析能更符合國內鋼材高溫之行為。
- 2 載重大小對於高溫環境下防火被覆開裂之影響，有待後續更進一步之研究。
- 3 實際火場合成梁溫度會受熱輻射與熱對流影響，本研究並未考慮，建議後續研究可對此部份做更進一步之研究

參考文獻

ABAQUS (2007), ABAQUS/Explicit User's Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Version 6.7.

Buchanan, A., Moss, P., Seputro, J., Welsh, R. (2004), "The Effect of Stress-Strain Relationships on the Fire Performance of Steel Beams," Engineering Structures, Vol. 26 pp. 1505-1515.

Dharma, R. B., and Tan, K. H. (2005), "A Numerical Study of Rotational Capacity of Steel Beams in Fire," Advances in Steel Structures, Vol. 2.

Eurocode 2 (2004), Design of Steel Structures—Part 1.2 : General Rules—Structural Fire Design.

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, Vol. 61, pp. 834-844.

Huang, Z., Platten, A., and Roberts, J. (1995), "Non-linear Finite Element Model to Predict Temperature Histories within Reinforced Concrete in Fires," Building and Environment, Vol. 31, No. 2, pp. 109-118.

Lie, T. T. (1994), "Fire Resistance of Circular Filled with Bar-Reinforced

Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 5, pp. 1489-1509.

Liu, T. C. H., Fahad, M. K., Davies J. M. (2002), “Experimental Investigation of Behavior of Axially Restrained Steel Beams in Fire,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 1211-1230.

Li, L. Y. and Purkiss, J. (2005), “Stress-Strain Constitutive Equations of Concrete Material at Elevated Temperatures,” *Fire Safety Journal*, Vol. 40, pp. 669-686.

Rubert, A., and Schaumann, P. (1986), “Structural Steel and Plane Frame Assemblies under Fire Action,” *Fire Safety Journal*, Vol. 10, pp. 173-184.

Touloukian, Y. S., Kirby, R. K., Taylor, R. E., Desai, P. D. (1977), “Thermal Expansion Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum. New York, NY.

Vimonsatit, V., Tan K. H., and Qian Z. H. (2007), “Testing of Plate Girder Web Panel Loaded in Shear at Elevated Temperature,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 815-824.

Zhao, J.C. and Shen Z.Y. (1999), “Experimental Studies of the Behavior of Unprotected Steel Frames in Fire,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 50, pp. 137-150.

「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。

林慶元、林銅柱(1993)，「鋼骨結構耐火被覆材檢驗基準研究」，內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告。

張燕如(2005)，「鋼結構火害反應之向量式有限元素法分析」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，邱耀正指導。

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。

許晉璋(2007)，「鋼結構梁柱接頭在高溫環境下行為之數值模擬」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，邱耀正指導。

林振吉(2008)，「H型梁-箱型柱彎矩接頭之火害行為研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，邱耀正指導。

趙文成、陳誠直(2009)，「鋼梁構造以不同性能基準判定耐火性能之研究」，內政部建築研究所委託研究報告。



表 3-1 Eurocode 3 鋼材在高溫下之應力應變關係

應變範圍	應力	正切模數
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,0}$	$\varepsilon E_{a,0}$	$E_{a,0}$
$\varepsilon_{p,0} < \varepsilon < \varepsilon_{y,0}$	$f_{p,0} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon)^2]^{0.5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon)^2]^{0.5}}$
$\varepsilon_{y,0} < \varepsilon < \varepsilon_{t,0}$	$f_{y,0}$	0
$\varepsilon_{t,0} < \varepsilon < \varepsilon_{u,0}$	$f_{y,0} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,0}) / (\varepsilon_{u,0} - \varepsilon_{t,0})]$	-
$\varepsilon < \varepsilon_{u,0}$	0	-
參數	$\varepsilon_{p,0} = f_{p,0} / E_{a,0}$ $\varepsilon_{y,0} = 0.02$ $\varepsilon_{t,0} = 0.15$ $\varepsilon_{u,0} = 0.20$	
函數	$a^2 = (\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0} + c/E_{a,0})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})E_{a,0} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,0} - f_{p,0})^2}{(\varepsilon_{y,0} - \varepsilon_{p,0})E_{a,0} - 2(f_{y,0} - f_{p,0})}$	

表 3-2 鋼材在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鋼材溫度間之值。

表 3-3 混凝土在高溫下之力學性質折減係數

混凝土溫度 θ_a	在 θ_a 溫度相對於 20°C 之抗壓強度 f_c 、抗拉強度 f_t 或彈性係數 E_a 之折減係數		
	抗壓強度 折減係數 (相對於 f_c) $K_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	抗拉強度 折減係數 (相對於 f_t) $K_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	彈性模數 折減係數 (相對於 E_0) $K_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1.00	1.00	1.00
100°C	1.00	1.00	1.00
200°C	0.95	0.80	0.95
300°C	0.85	0.60	0.81
400°C	0.75	0.40	0.68
500°C	0.60	0.20	0.54
600°C	0.45	0.00	0.41
700°C	0.30	0.00	0.27
800°C	0.15	0.00	0.14
900°C	0.08	0.00	0.00
1000°C	0.04	0.00	0.00

註：可由線性內插求得介於混凝土溫度間之值。

表 3-4 ABAQUS 有限元素分析單位表

量	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
長度	m	mm	ft	in
力	N	N	lbf	lbf
質量	kg	tonne(10^3 kg)	slug	$\text{lbf s}^2/\text{in}$
時間	s	s	s	s
應力	$\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$	$\text{MPa}(\text{N}/\text{mm}^2)$	lbf/ft^2	$\text{psi}(\text{lbf}/\text{in}^2)$
能量	J	$\text{mJ}(10^{-3} \text{ J})$	ft lbf	in lbf
密度	kg/m^3	tonne/mm^3	slug/ ft^3	$\text{lbf s}^2/\text{in}^4$

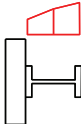
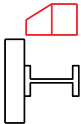
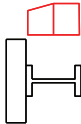
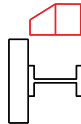
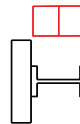
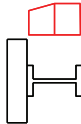
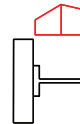
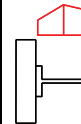
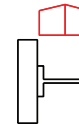
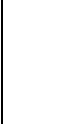
表 4-1 試體試驗資料表

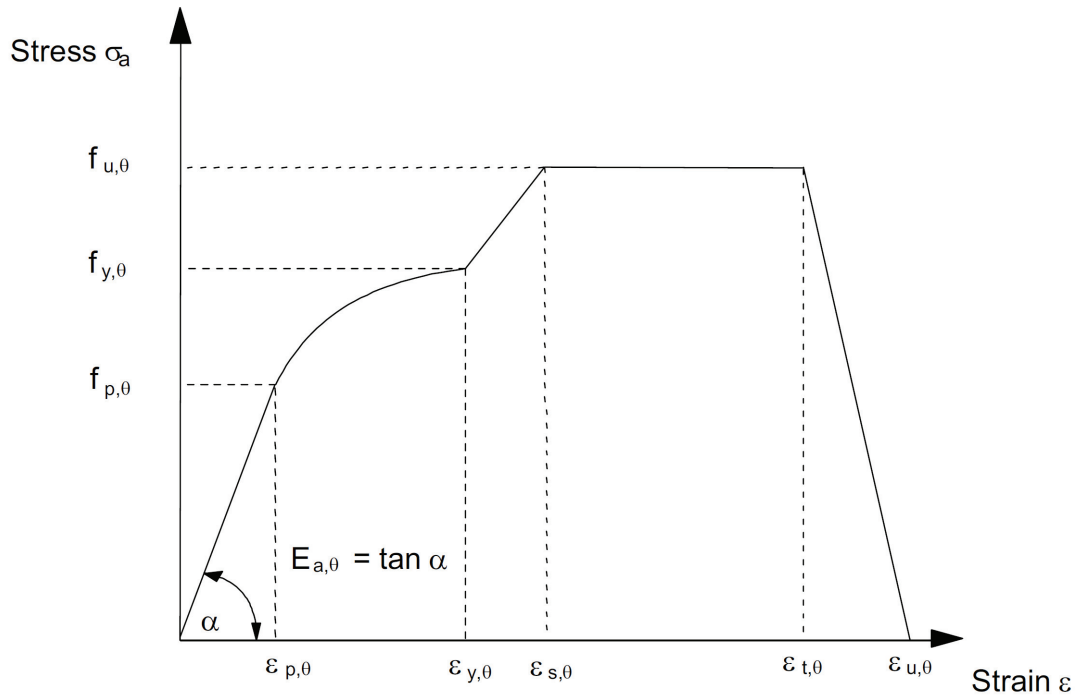
試驗編號	被覆厚度	載重有無	試驗終止時間
1	11 mm	無	60 min
2	14 mm	有	120 min
3	11 mm	有	93 min

表 5-1 合成梁火害參數分析列表

模型名稱	模型編號說明	模型敘述	參數研究目的
Control		控制組模型，每個載重點施加 95.2 kN 載重。	作為控制組模型。
Steelbeam		純鋼梁分析。	樓板有無之影響。
Ldratio01~ Ldratio10	Lr 表示 Load，ratio01 表示載重比為 0.1，ratio02 表示載重比為 0.2 以此類推。	以 Control 模型為基礎，改變載重比，從 0.1 到 1.0。	載重大小對於合成梁之影響。
Sectemp01~ Sectemp06	Sec 表示 Section，temp 表示 Temperature。	改變梁橫斷面溫度，縱斷面溫度為均勻，共 6 種不同的橫斷面溫度組合(如表 5-2 所示)。	模擬不同橫斷面溫度分佈對合成梁之影響。

表 5-2 Sectemp 系列模型分析結果比較列表

編號	模型	溫度分佈 (°C)			下翼板	溫度分佈圖	分析比較圖
		上翼板	腹板	下翼板			
1	Sectemp01	400	640	800		圖 5-27	
	Sectemp03	400	800	800			
2	Sectemp02	640	800	800		圖 5-28	
	Sectemp03	400	800	800			
	Sectemp04	800	800	800			
	Sectemp02	640	800	800			
3	Sectemp06	640	800	640		圖 5-29	
	Sectemp05	400	800	640			
4	Sectemp06	640	800	640		圖 5-30	
	Sectemp05	400	800	640			



(Eurocode 3 2005)

圖 3-1 Eurocode 3 鋼材在高溫下考慮應變硬化之應力應變關係

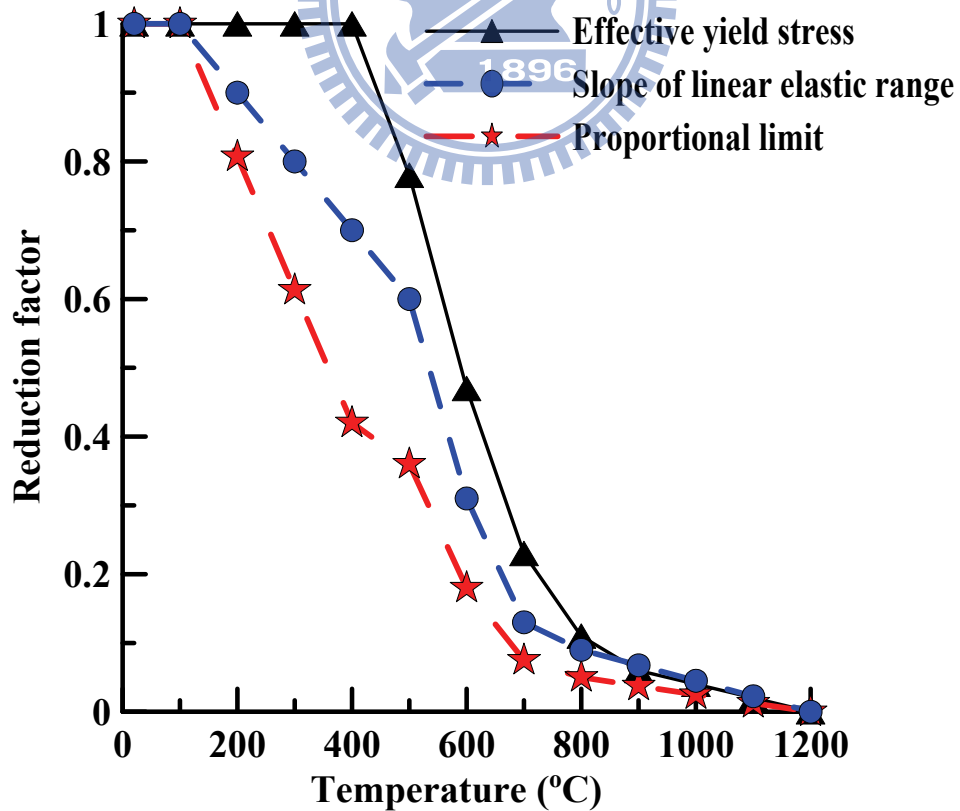


圖 3-2 Eurocode 3 鋼材在高溫下之力學性質折減係數

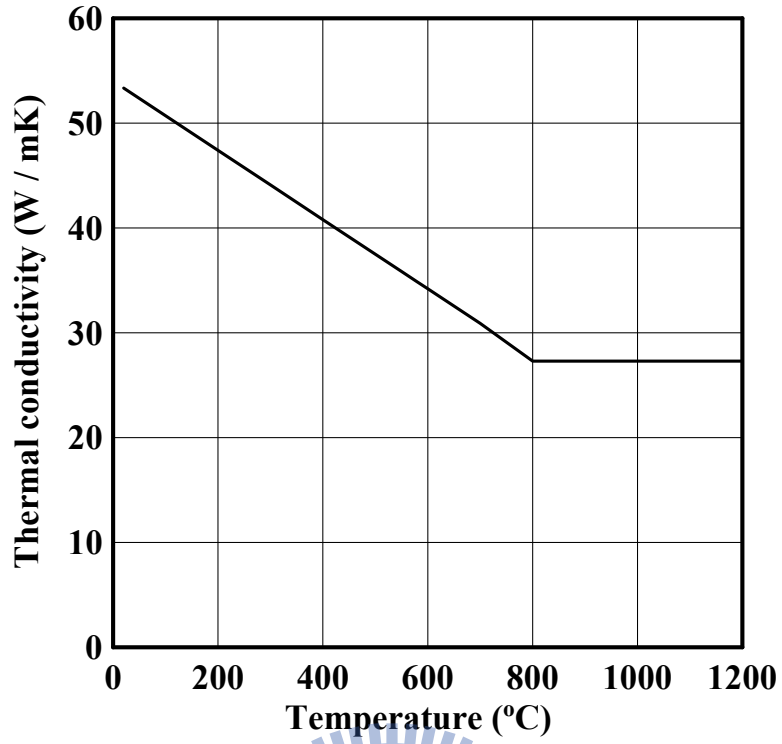


圖 3-3 Eurocode 3 鋼材熱傳導係數

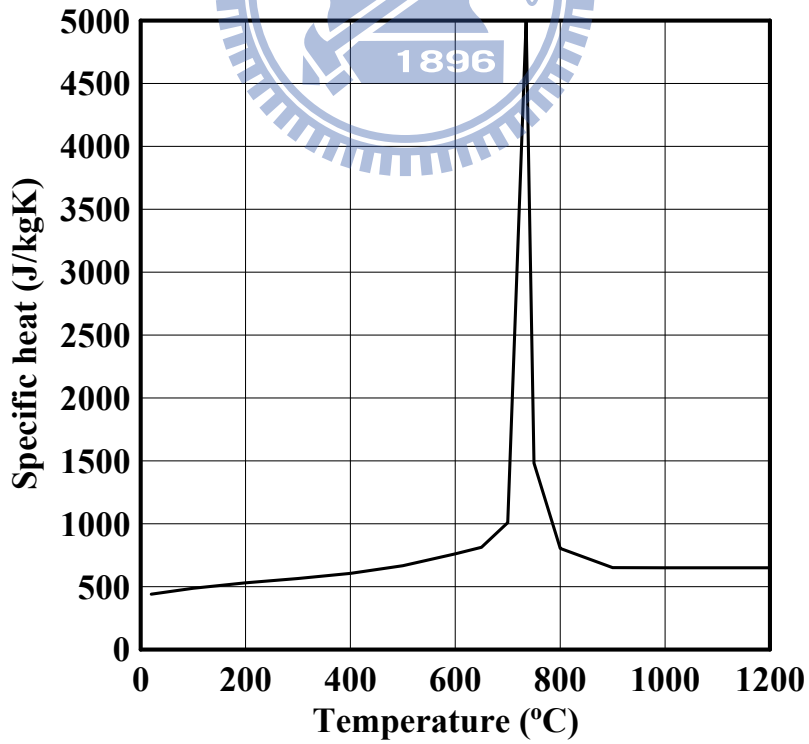


圖 3-4 Eurocode 3 鋼材比熱

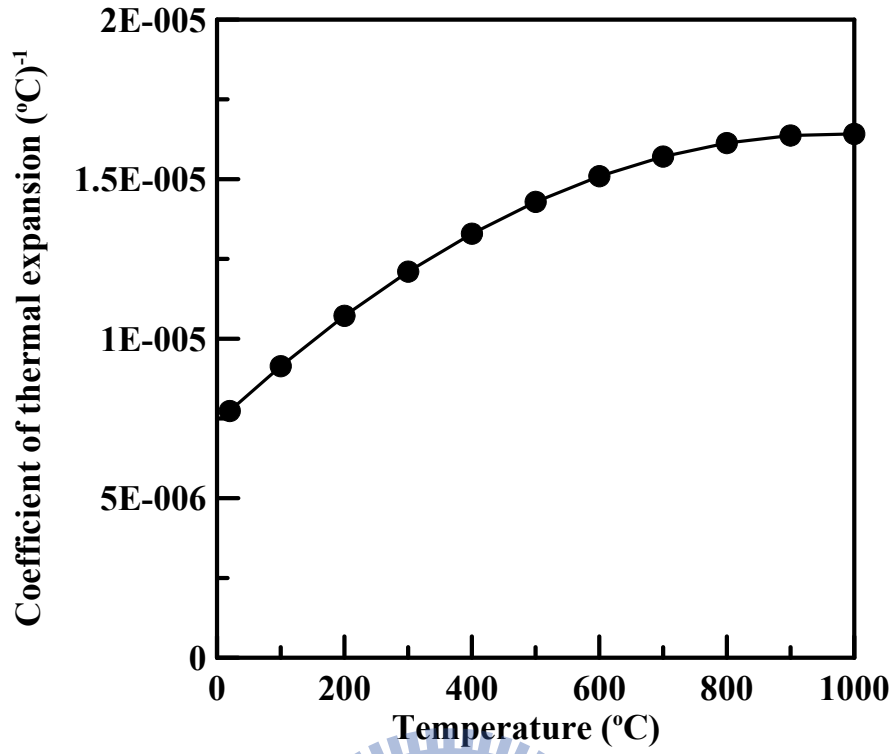


圖 3-5 鋼材熱膨脹係數 (Touloukian et al. 1977)

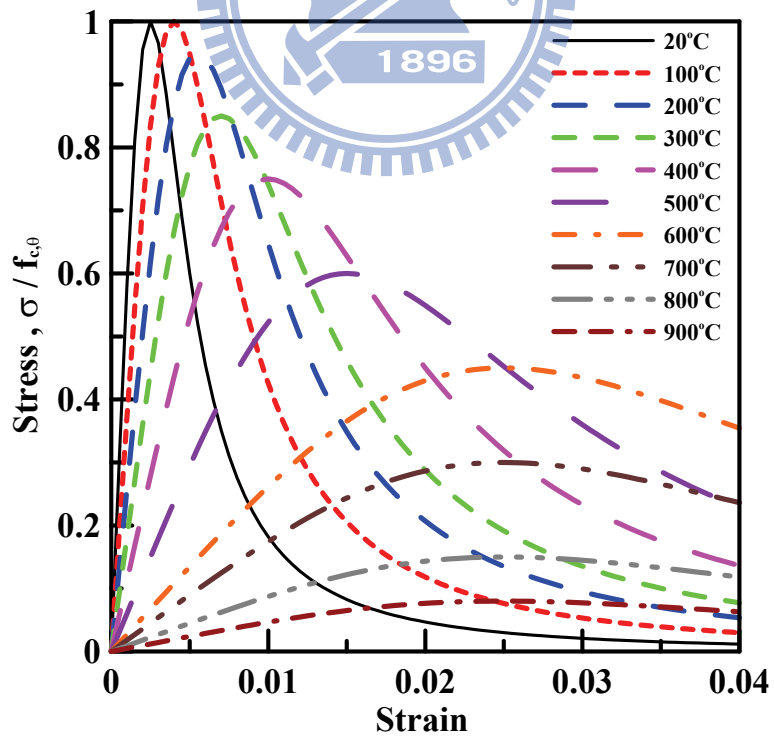


圖 3-6 Eurocode 2 混凝土在高溫下之應力應變關係

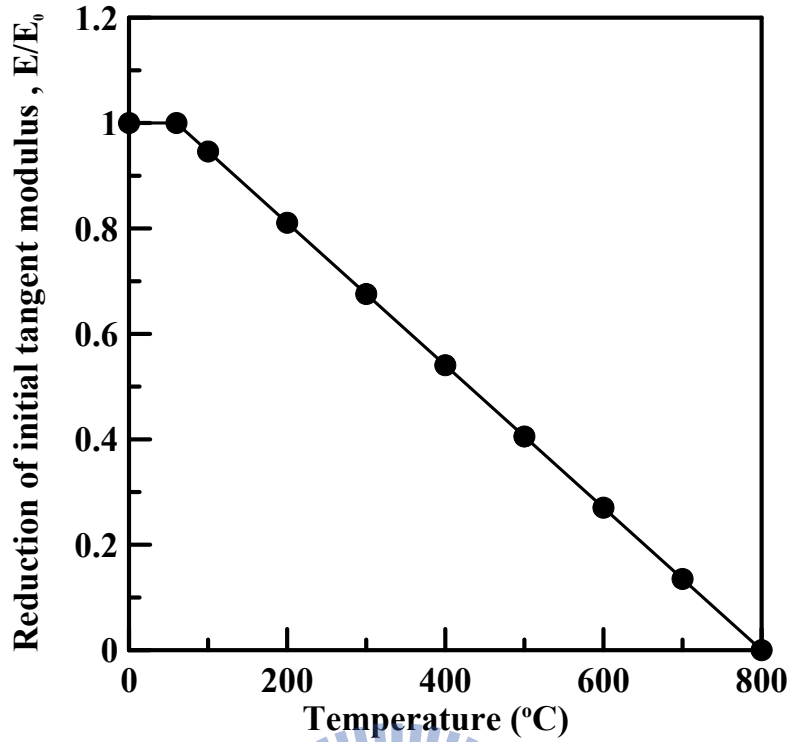


圖 3-7 混凝土在高溫下之彈性模數折減係數 (Li and Purkiss 2005)

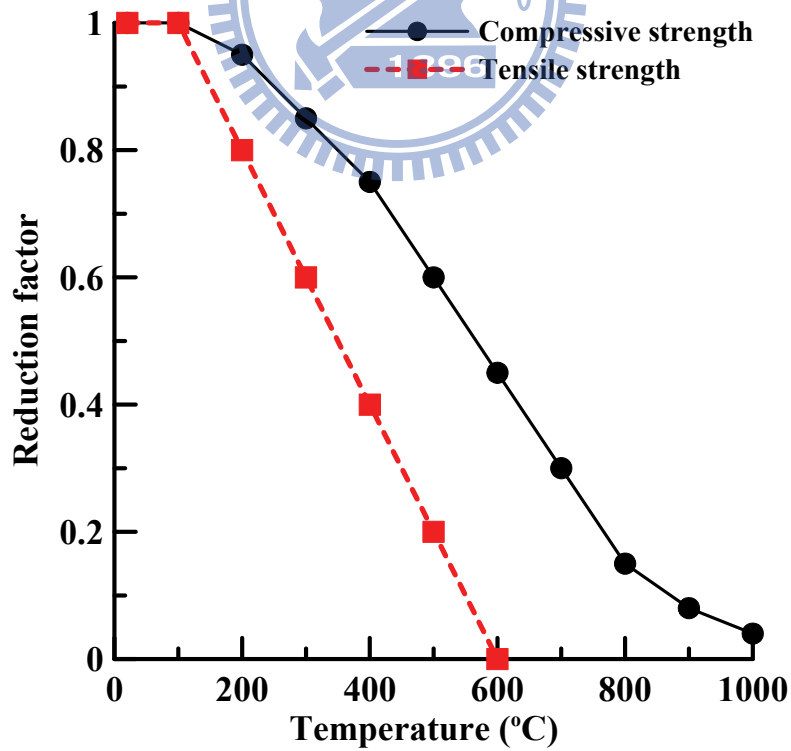


圖 3-8 Eurocode 2 混凝土在高溫下之力學性質折減係數

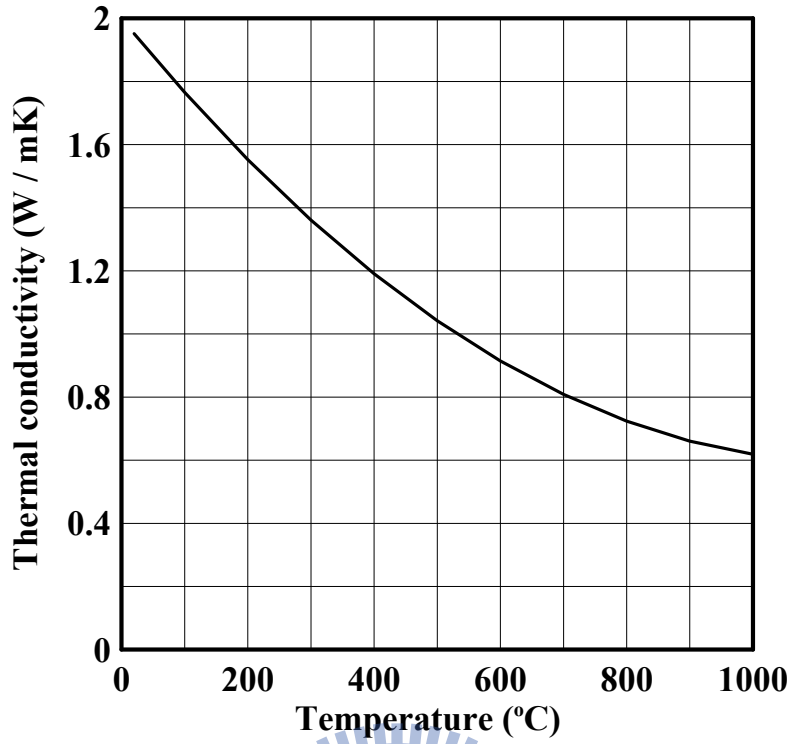


圖 3-9 Eurocode 2 混凝土熱傳導係數

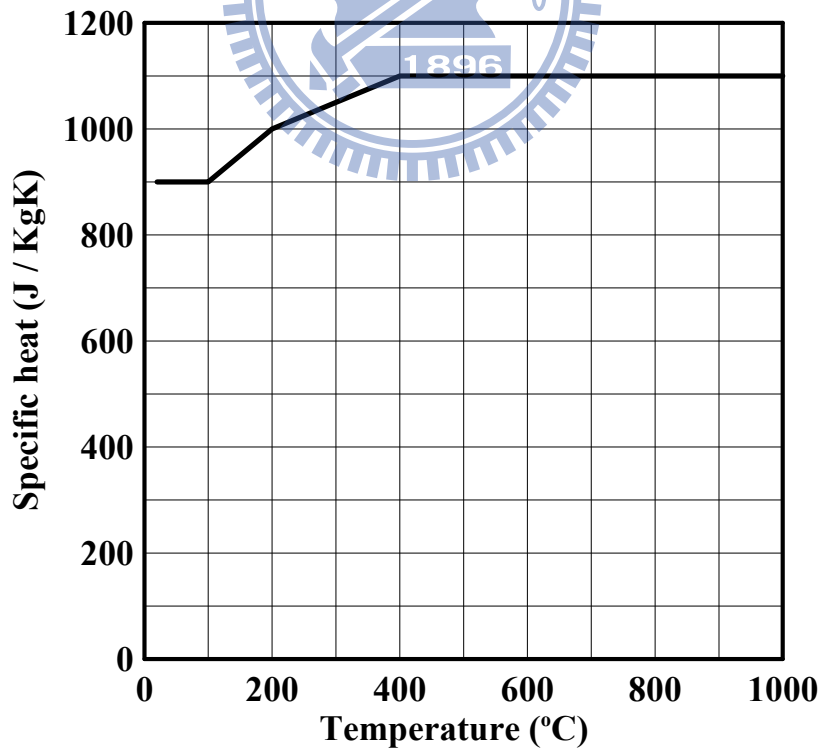


圖 3-10 Eurocode 2 混凝土比熱

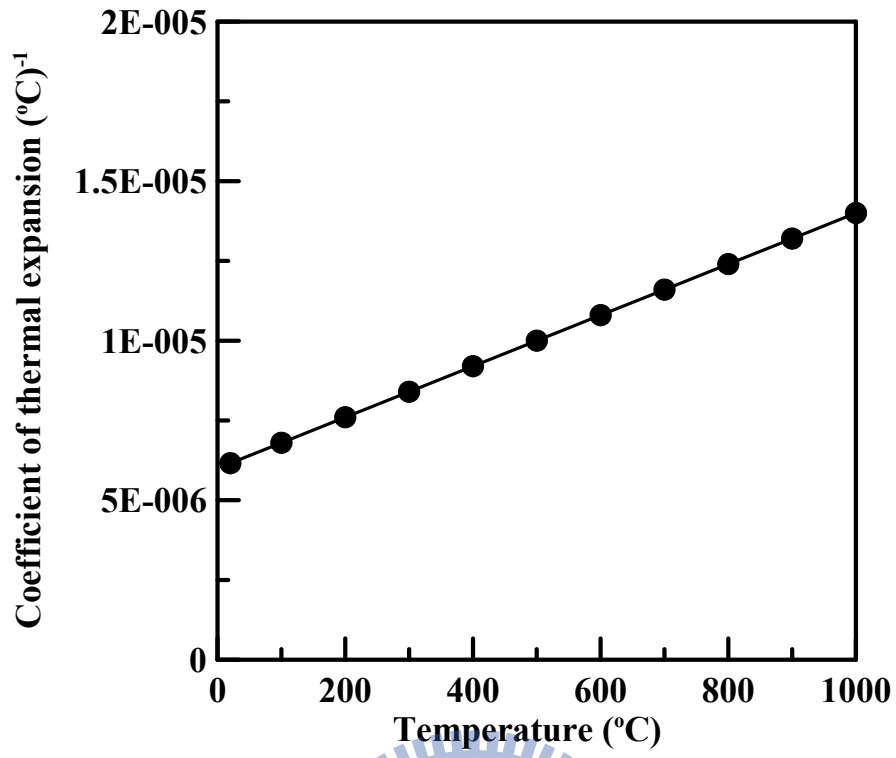


圖 3-11 混凝土熱膨脹係數 (Lie 1994)



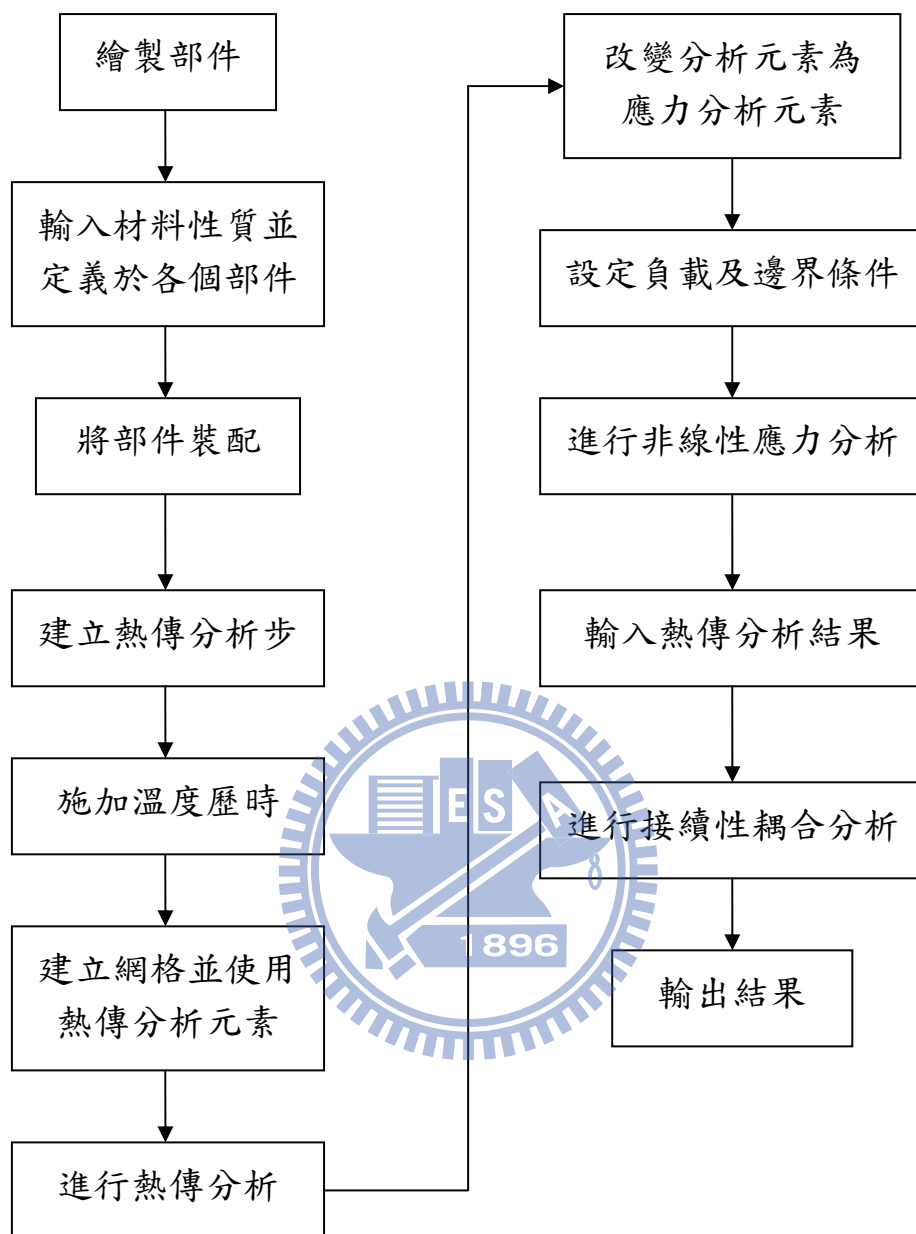


圖 3-12 ABAQUS 分析流程圖

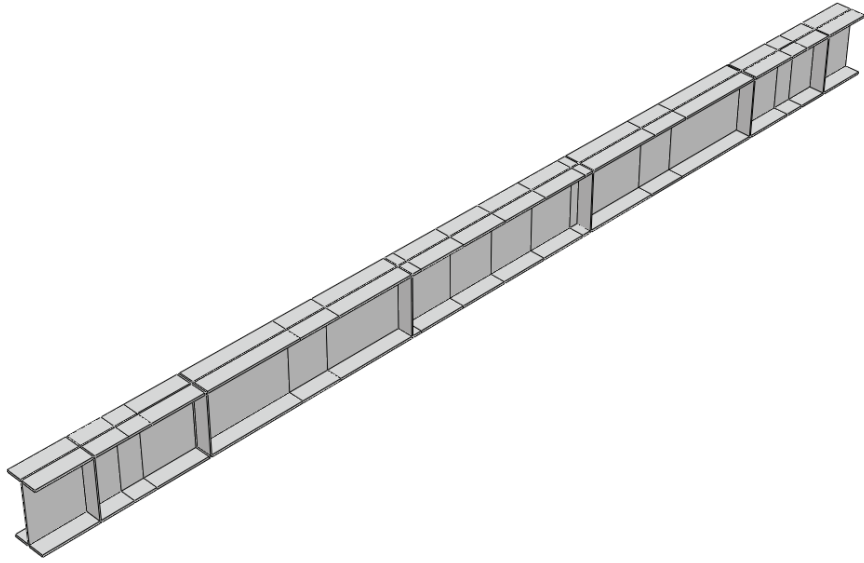


圖 3-13 鋼梁模型

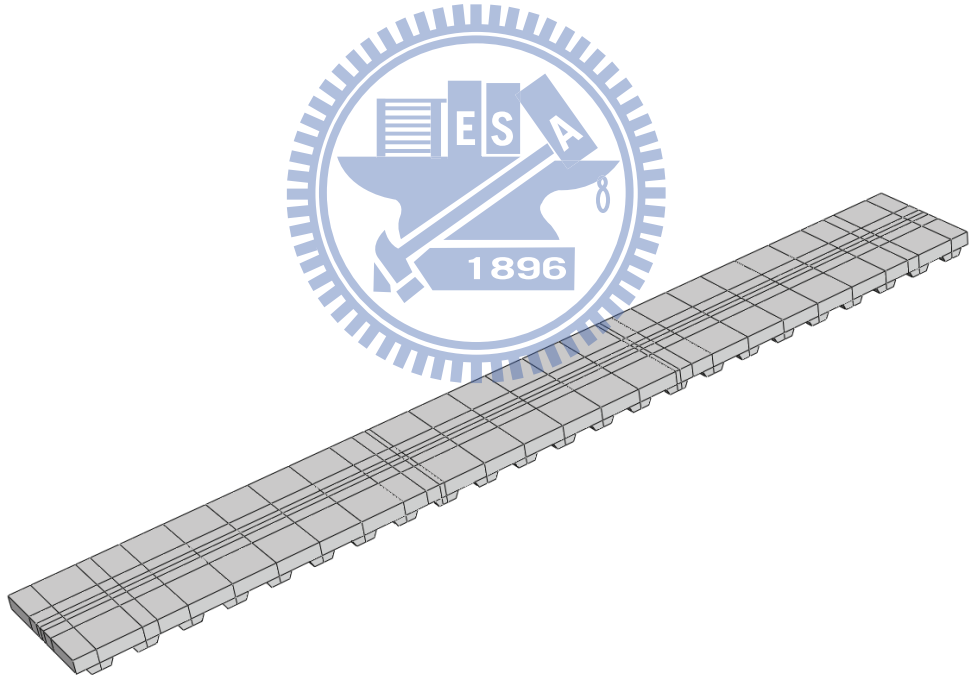


圖 3-14 樓板模型

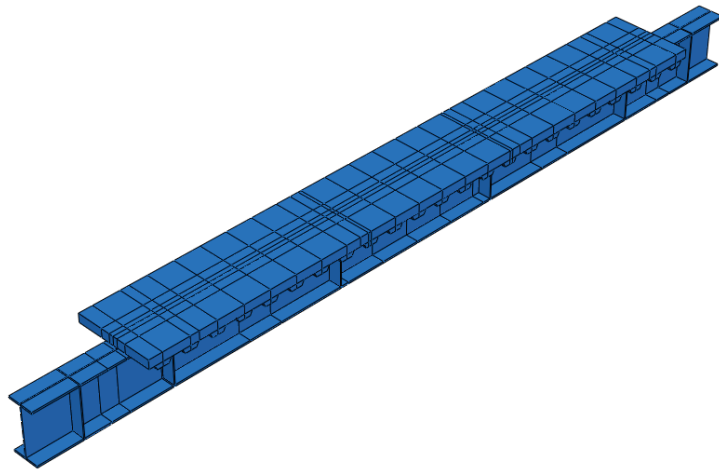


圖 3-15 合成梁組合模型

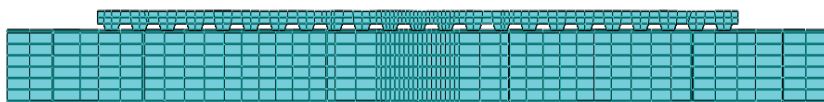
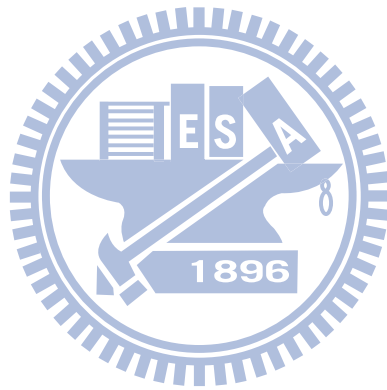


圖 3-16 合成梁網格劃分模型

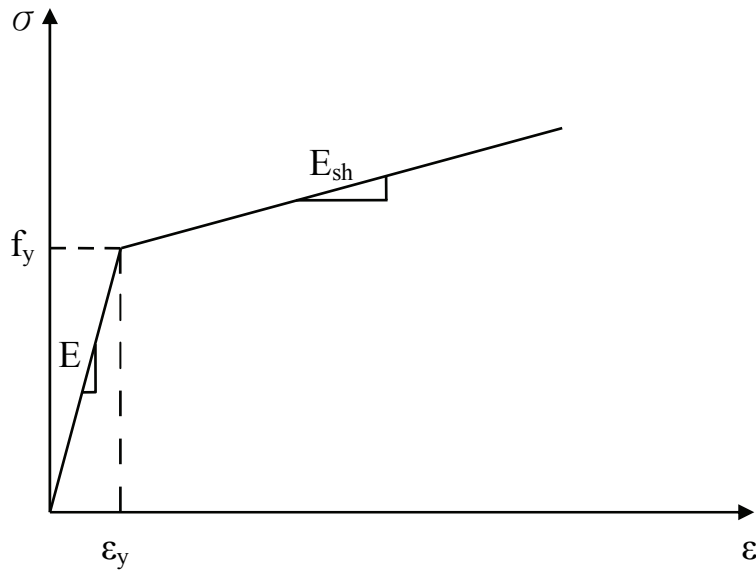


圖 3-17 鋼材雙線性材料模式

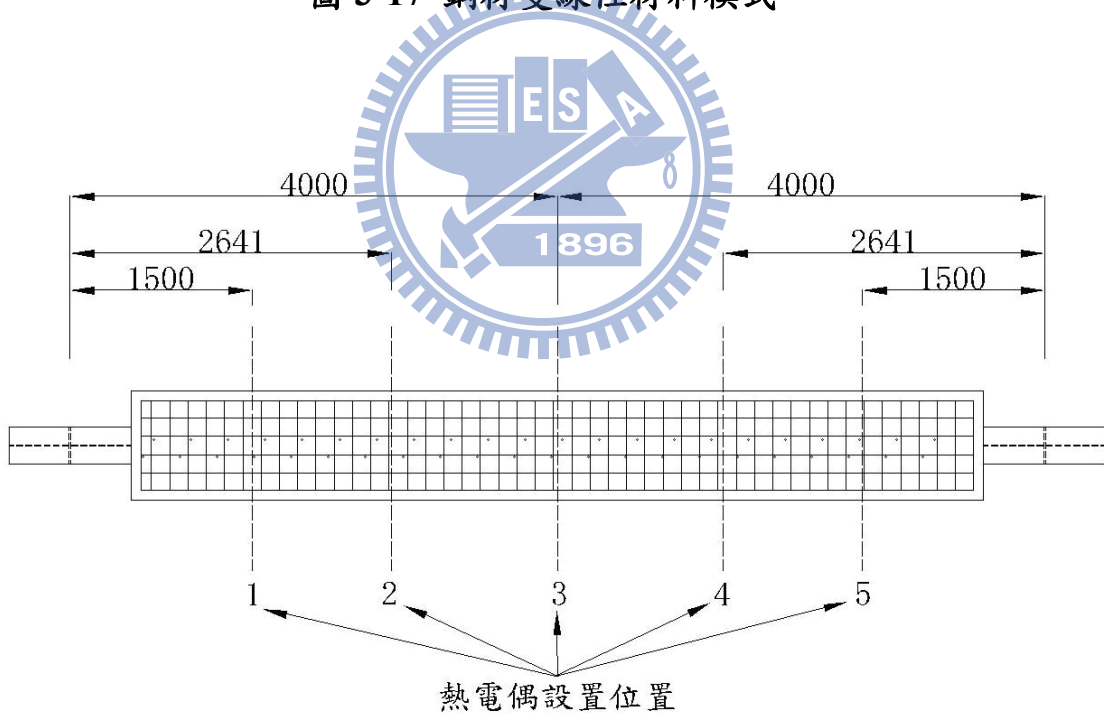


圖 4-1 試體縱向熱電偶測點配置位置 (趙文成與陳誠直 2009)

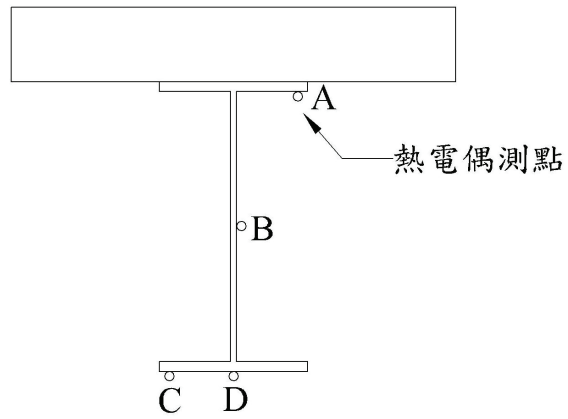


圖 4-2 鋼梁橫斷面熱電偶測點配置位置 (趙文成與陳誠直 2009)

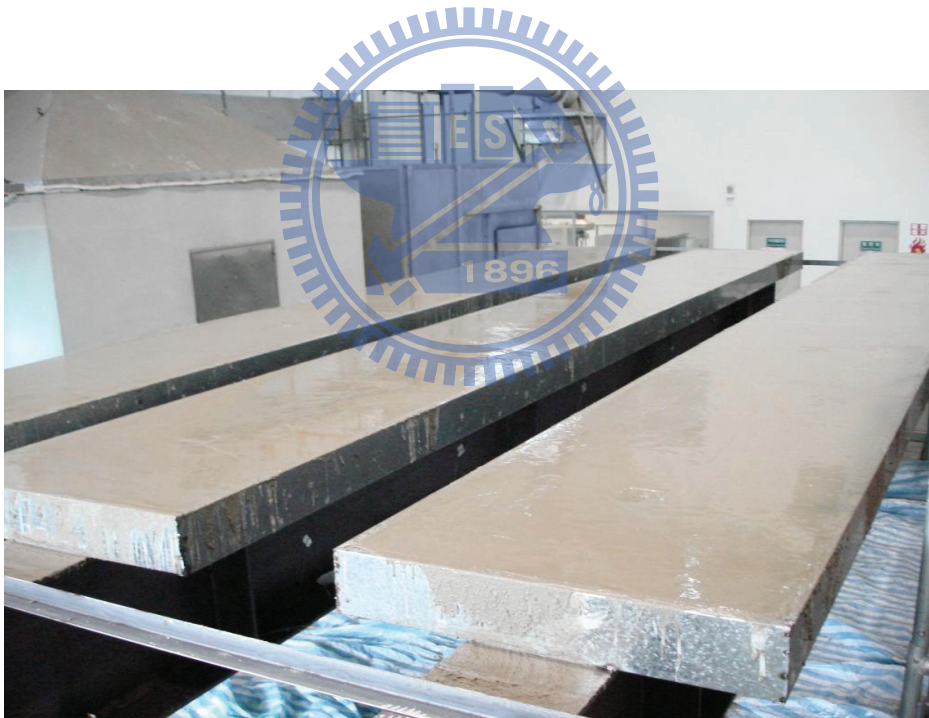


圖 4-3 試體樓板混凝土施工完成 (趙文成與陳誠直 2009)



圖 4-4 鋼梁熱電偶線設置 (趙文成與陳誠直 2009)



圖 4-5 防火被覆施工完成 (趙文成與陳誠直 2009)

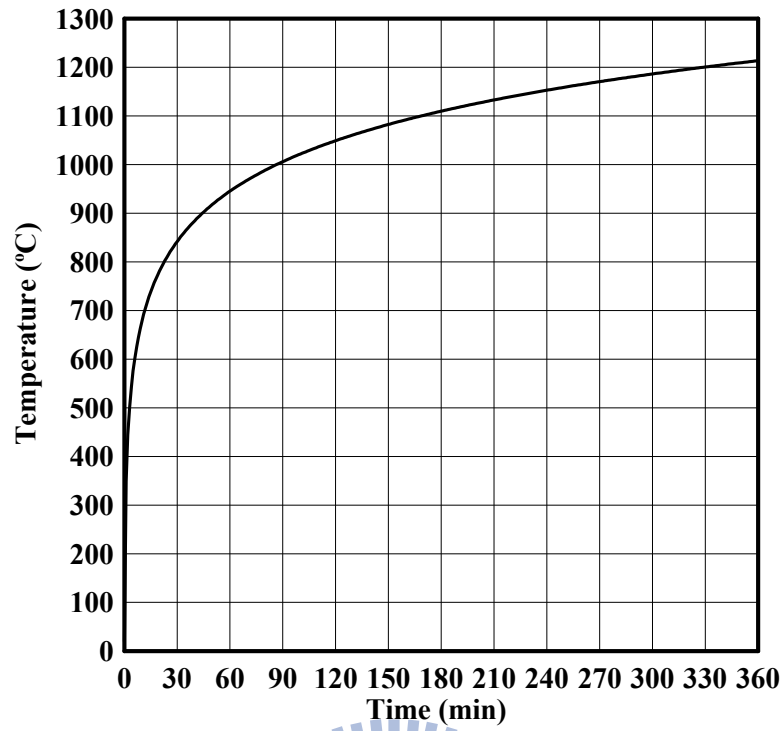


圖 4-6 標準加熱溫度—時間曲線 (CNS 12514 1997)



圖 4-7 三組試體試驗後永久變形情形 (趙文成與陳誠直 2009)

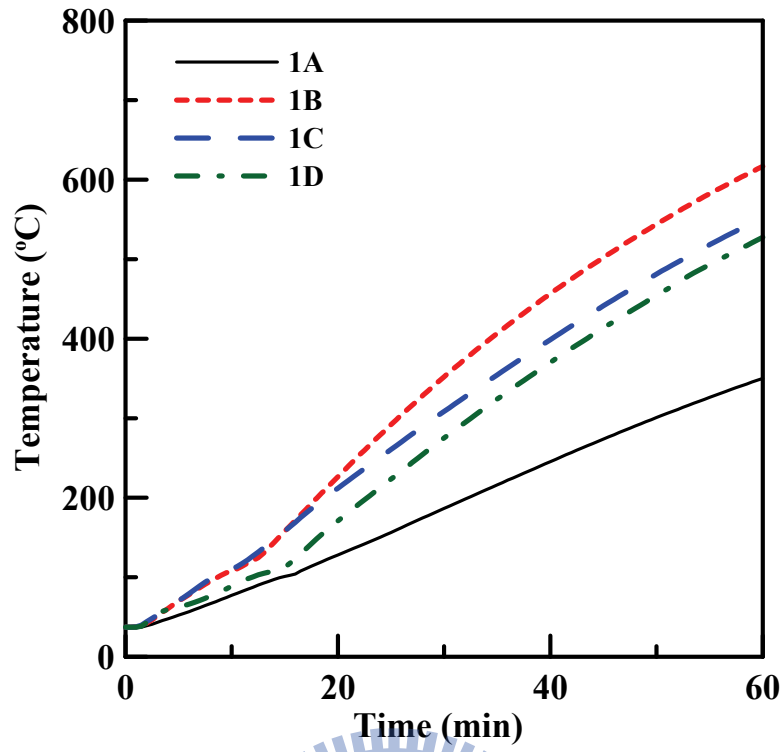


圖 4-8 試體 1 之斷面 1 時間與溫度關係圖

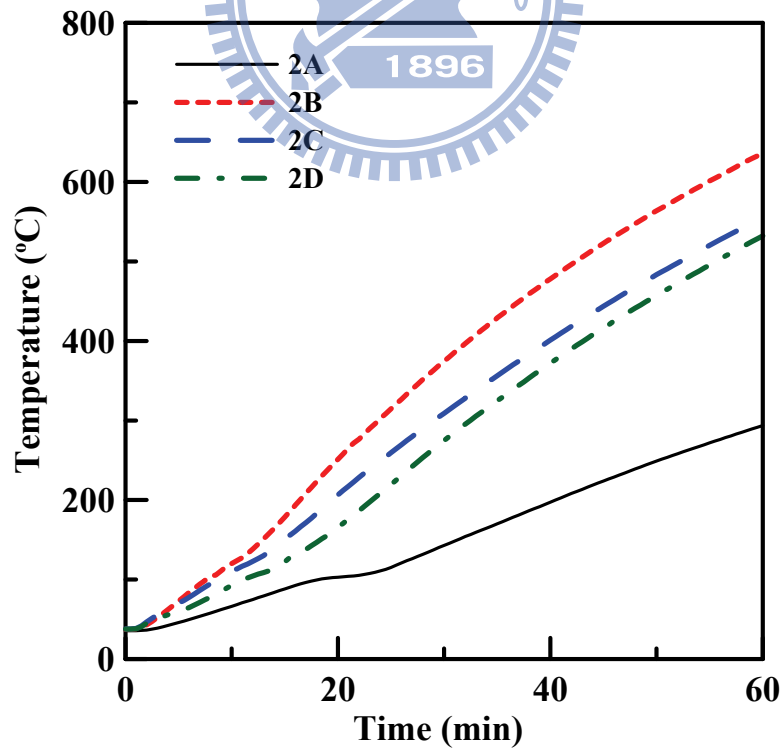


圖 4-9 試體 1 之斷面 2 時間與溫度關係圖

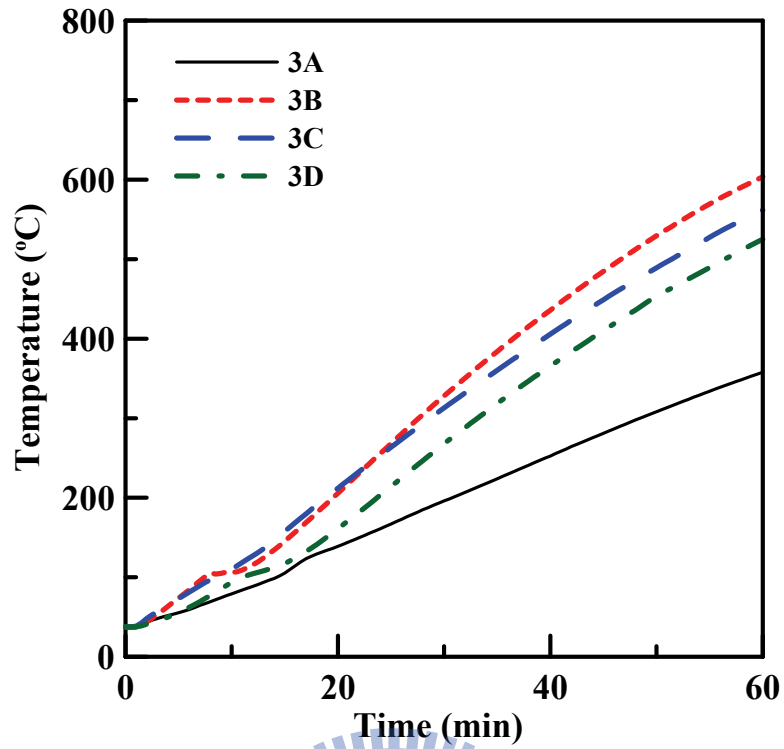


圖 4-10 試體 1 之斷面 3 時間與溫度關係圖

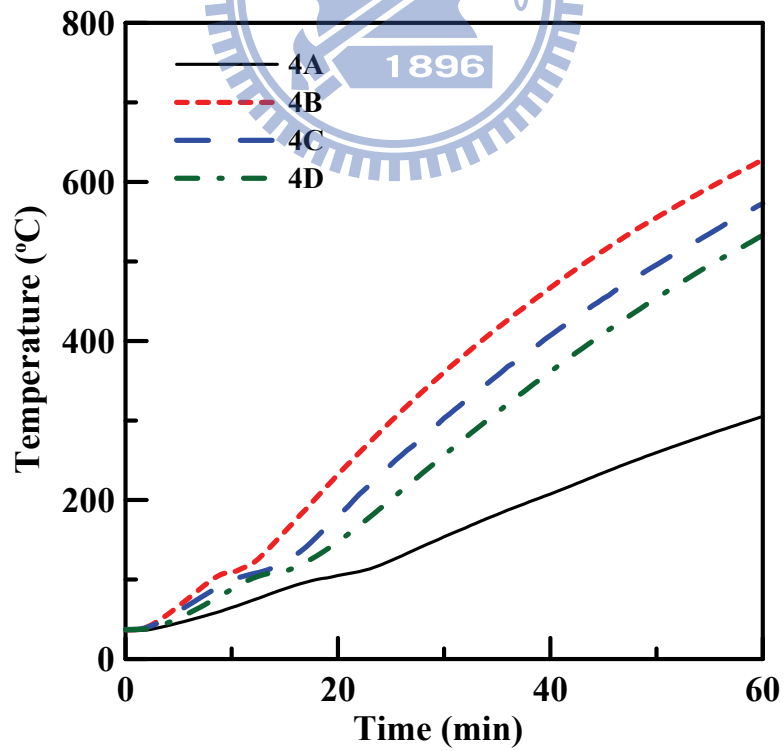


圖 4-11 試體 1 之斷面 4 時間與溫度關係圖

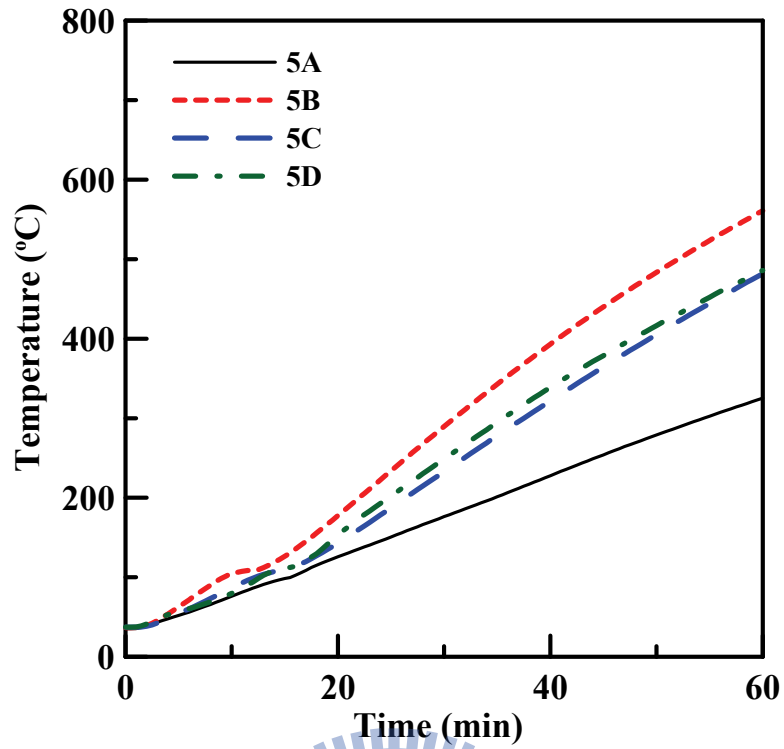


圖 4-12 試體 1 之斷面 5 時間與溫度關係圖

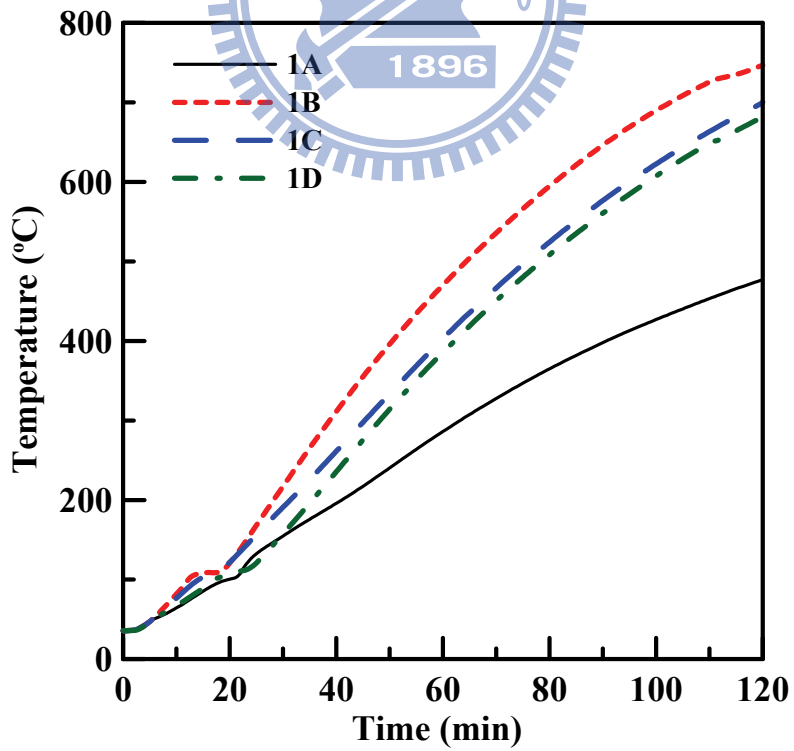


圖 4-13 試體 2 之斷面 1 時間與溫度關係圖

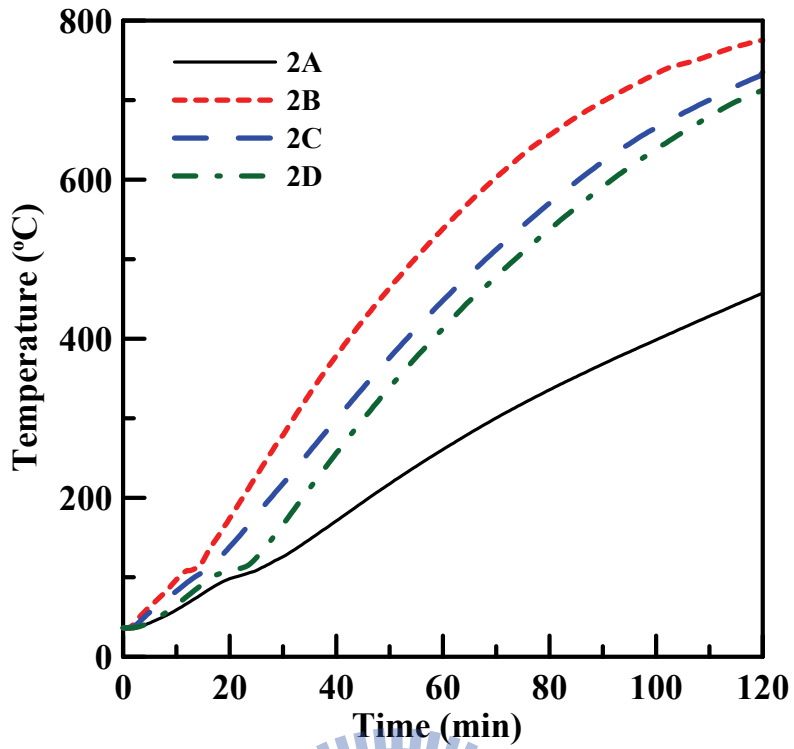


圖 4-14 試體 2 之斷面 2 時間與溫度關係圖

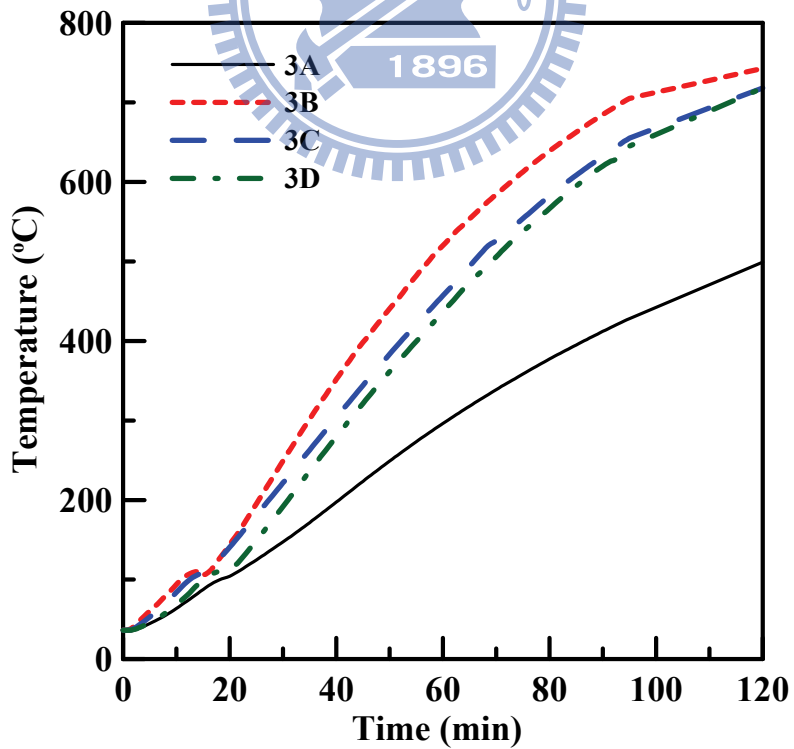


圖 4-15 試體 2 之斷面 3 時間與溫度關係圖

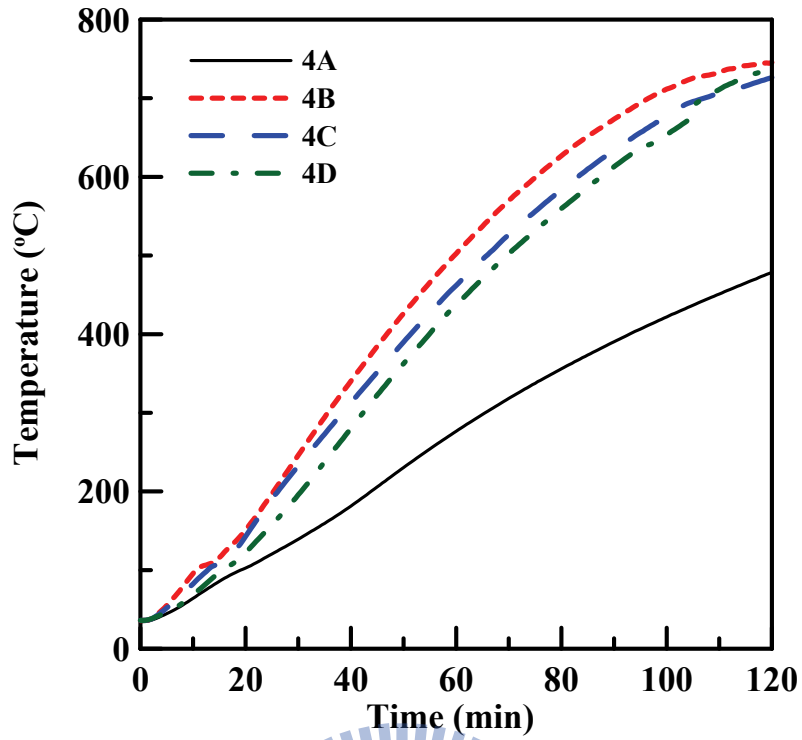


圖 4-16 試體 2 之斷面 4 時間與溫度關係圖

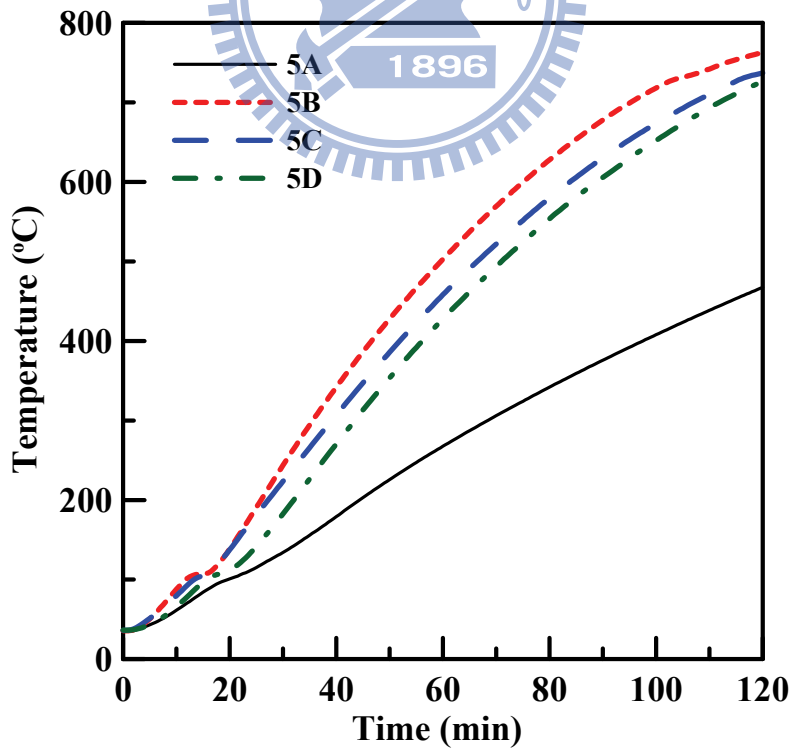


圖 4-17 試體 2 之斷面 5 時間與溫度關係圖

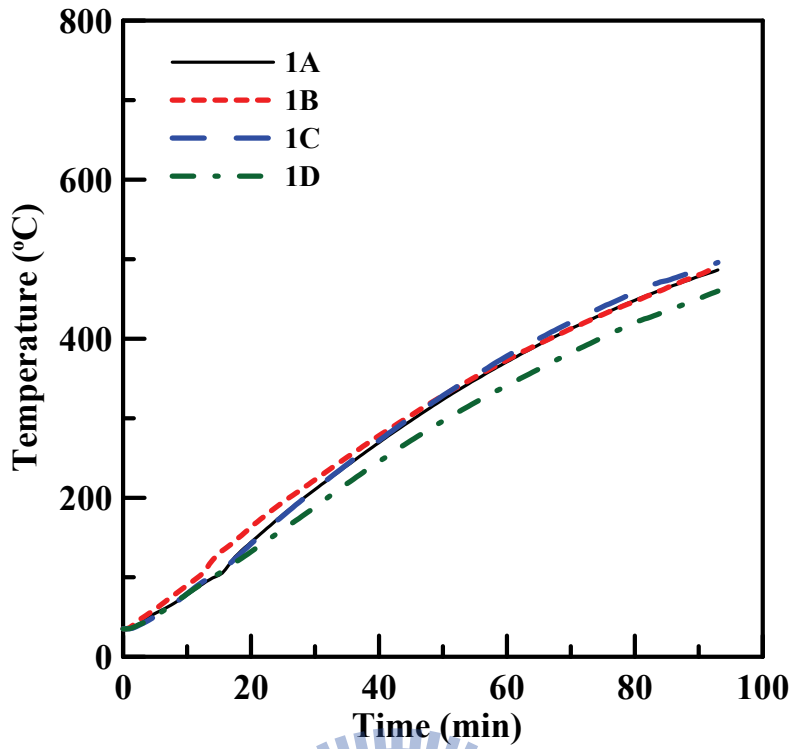


圖 4-18 試體 3 之斷面 1 時間與溫度關係圖

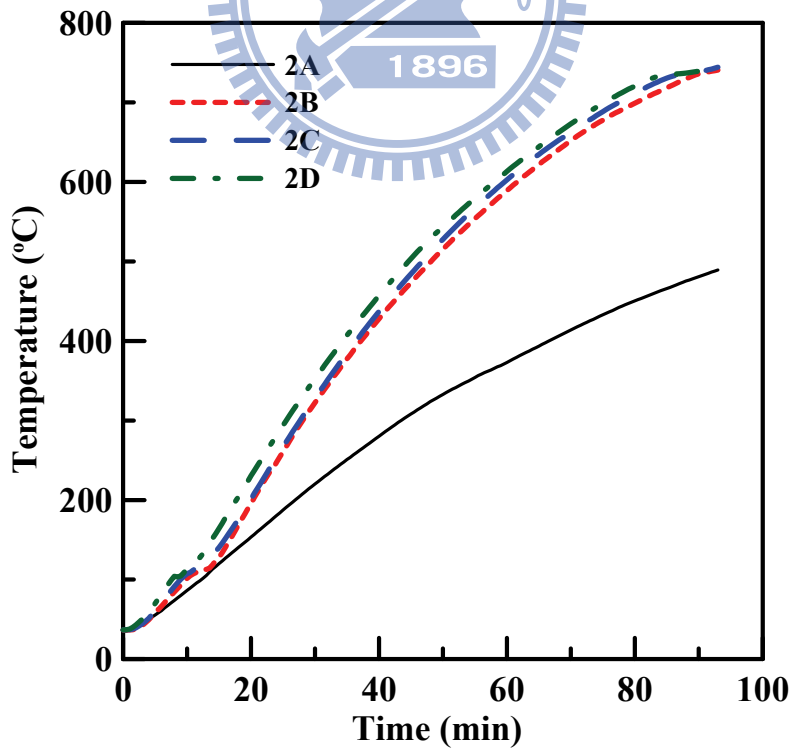


圖 4-19 試體 3 之斷面 2 時間與溫度關係圖

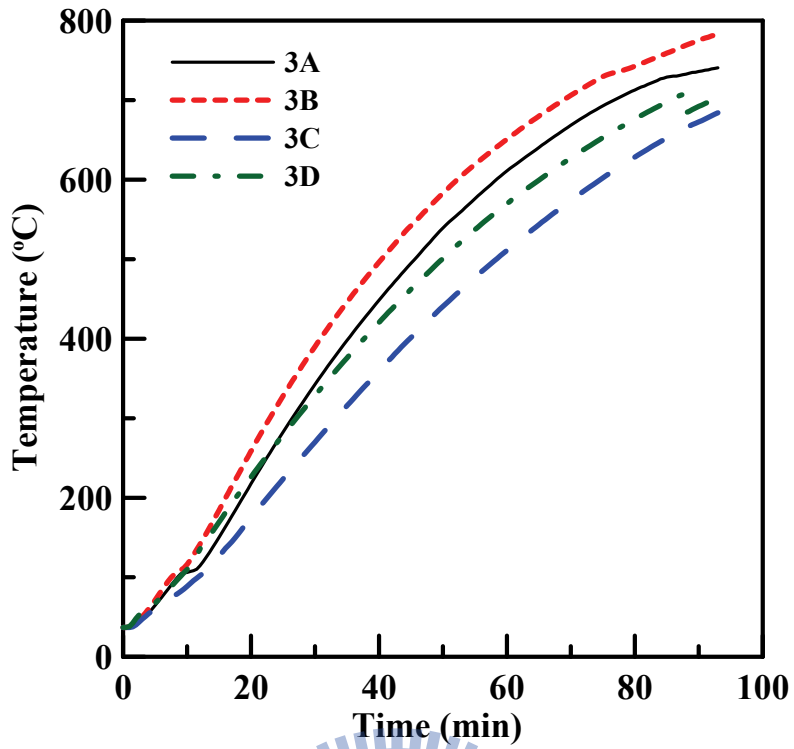


圖 4-20 試體 3 之斷面 3 時間與溫度關係圖

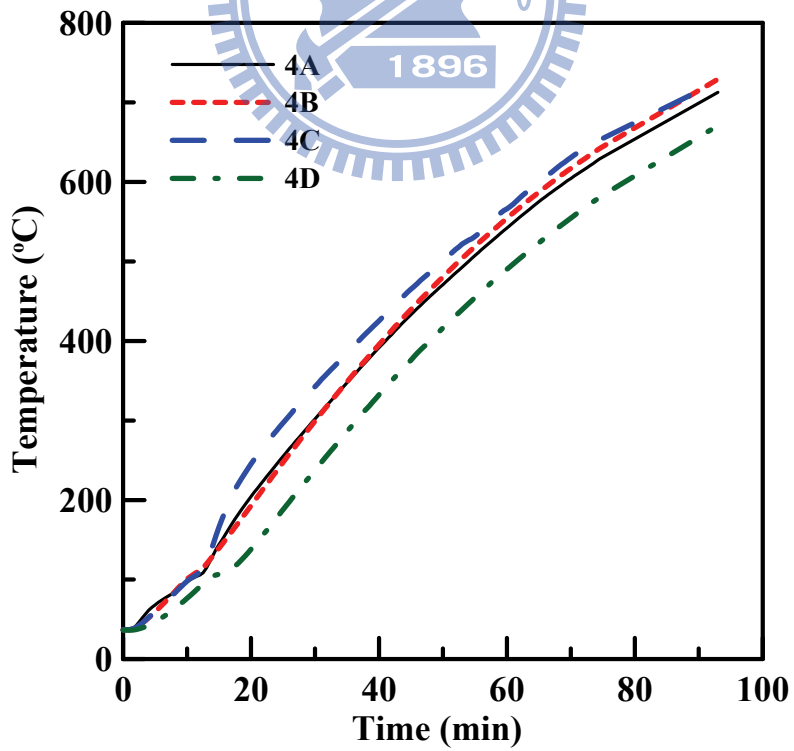


圖 4-21 試體 3 之斷面 4 時間與溫度關係圖

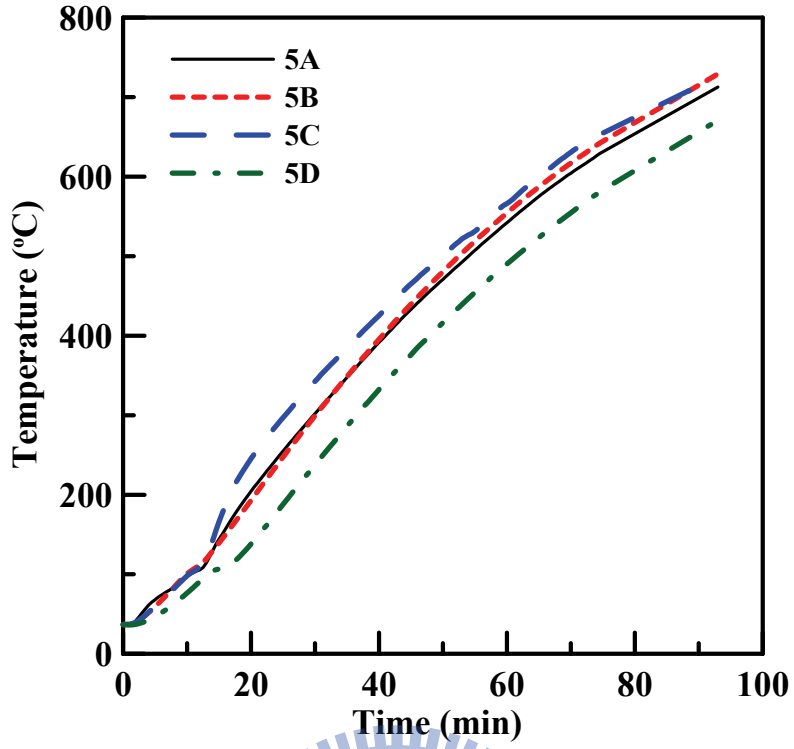


圖 4-22 試體 3 之斷面 5 時間與溫度關係圖

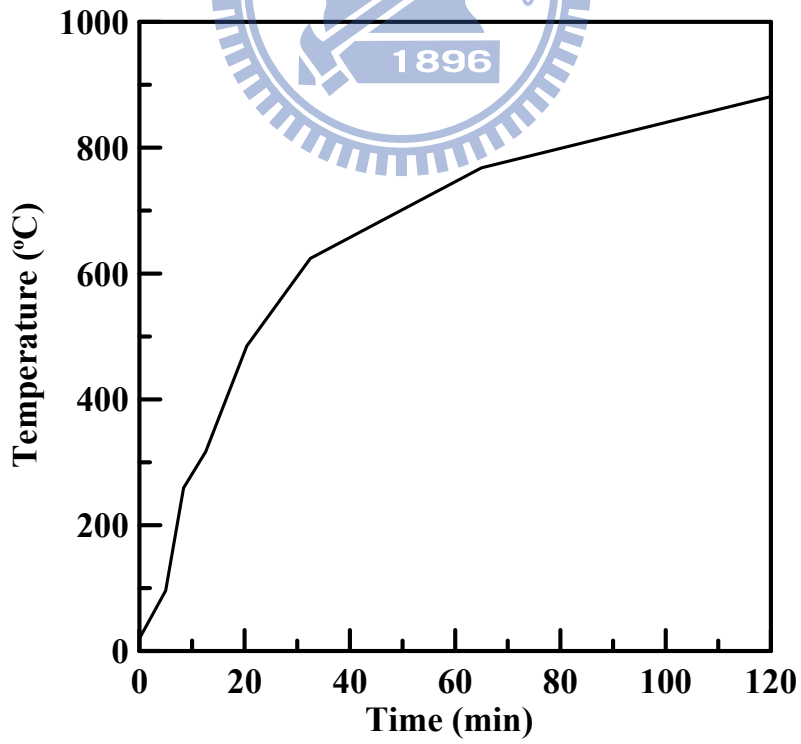


圖 4-23 樓板表面施加溫度 (Huang et al.1995)

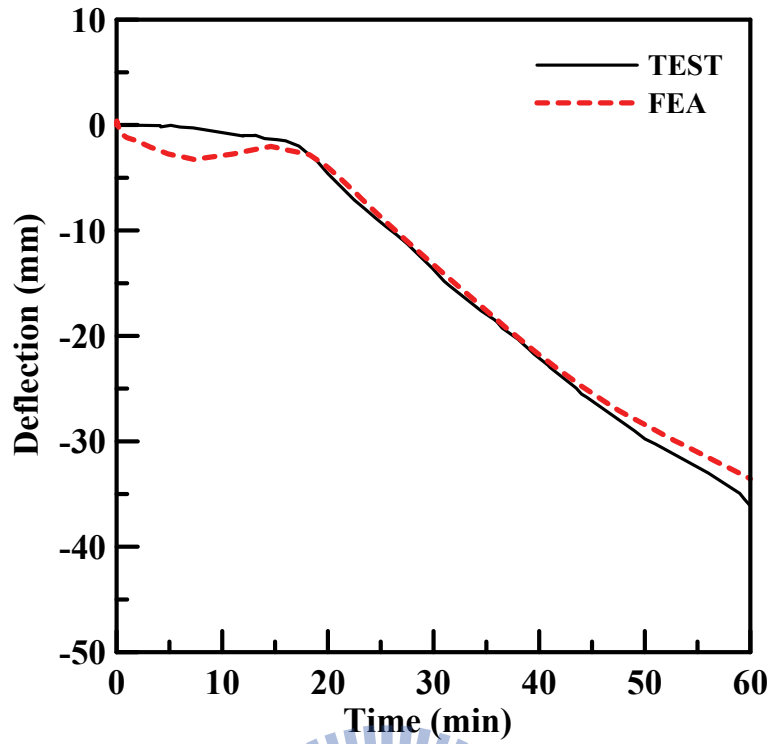


圖 4-24 試體 1—試驗與分析之中點撓度比較

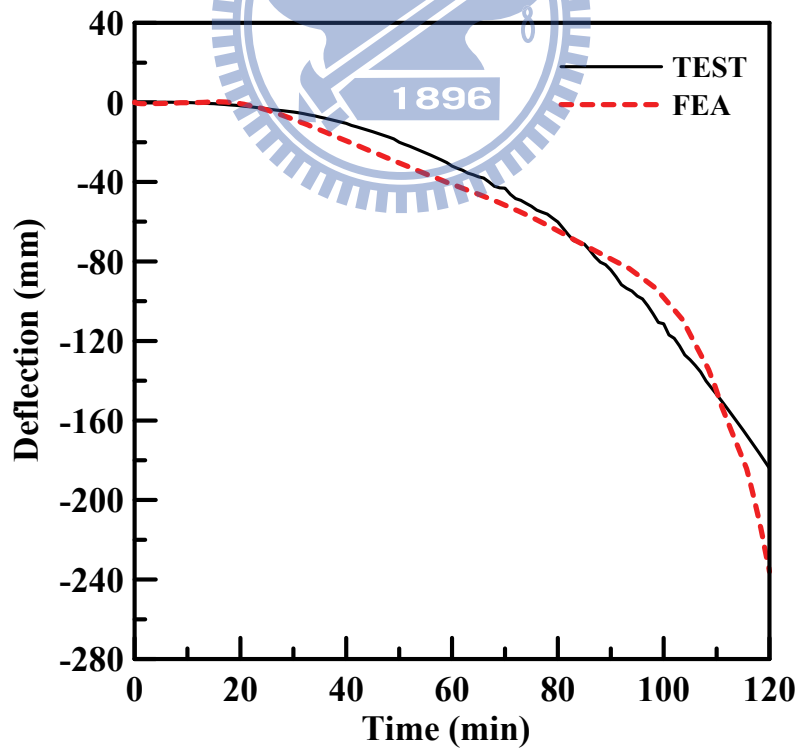


圖 4-25 試體 2—試驗與分析之中點撓度比較

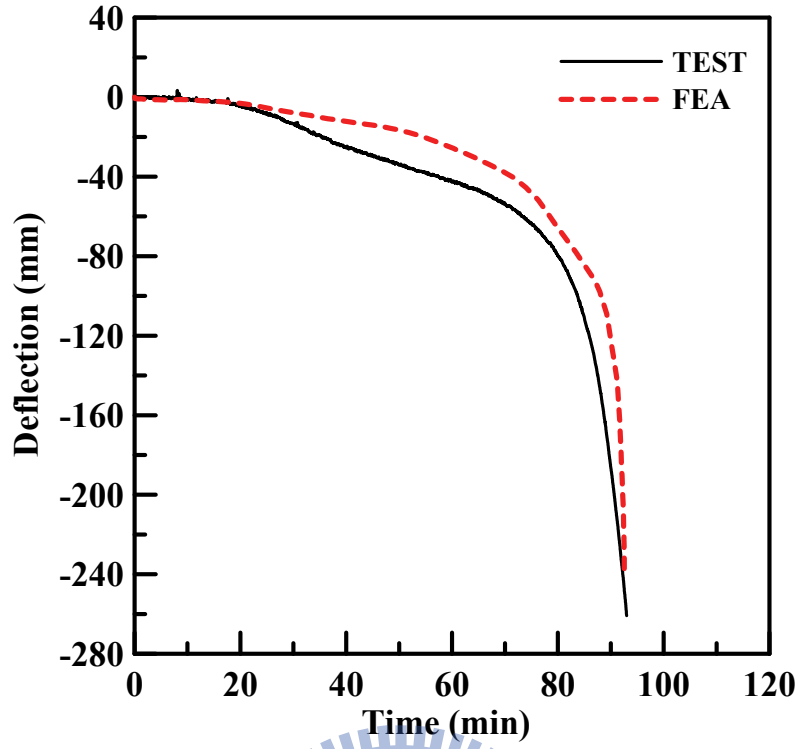


圖 4-26 試體 3—試驗與分析之中點撓度比較



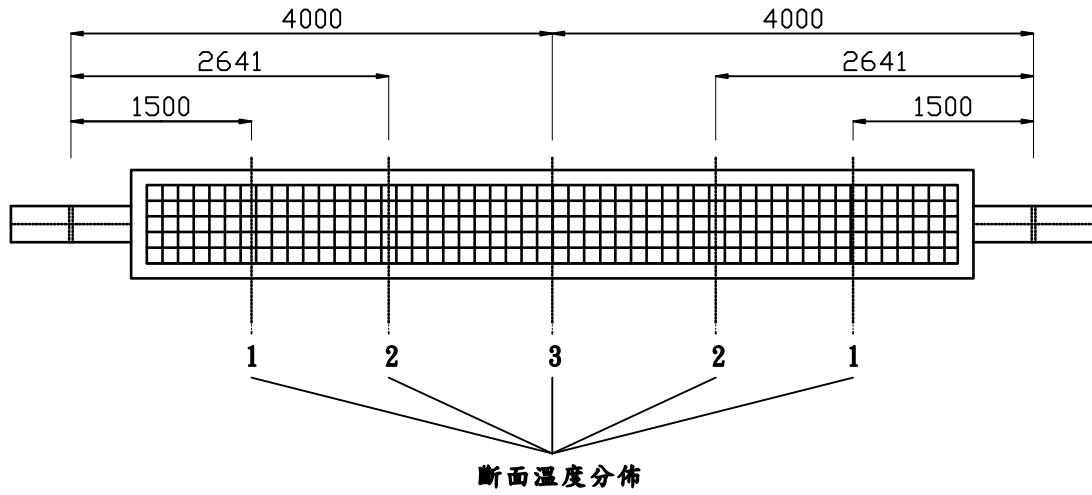


圖 5-1 Control 模型縱向溫度配置

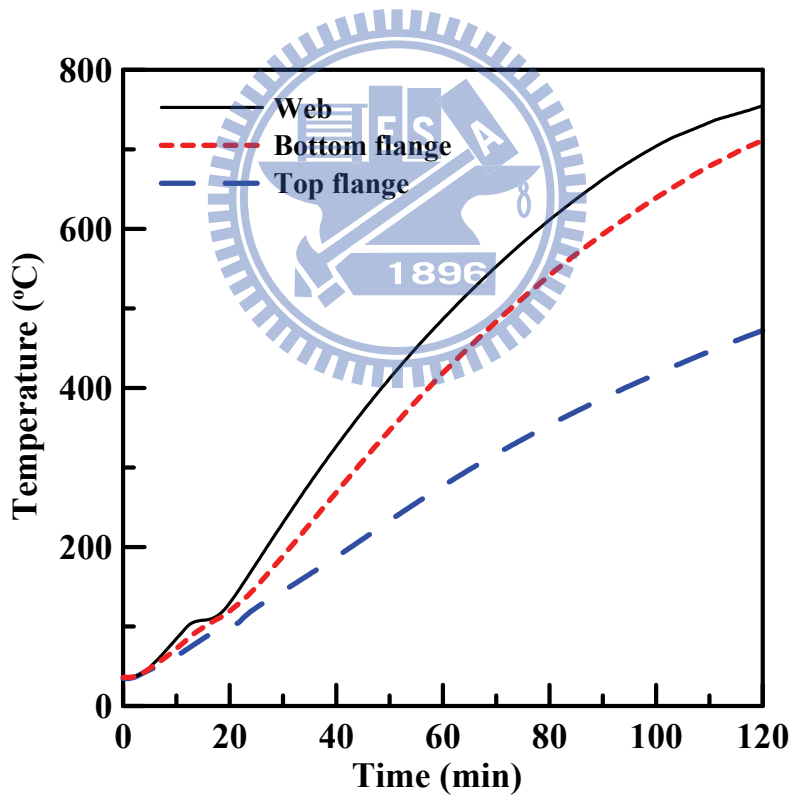


圖 5-2 Control 模型斷面 1 溫度分佈

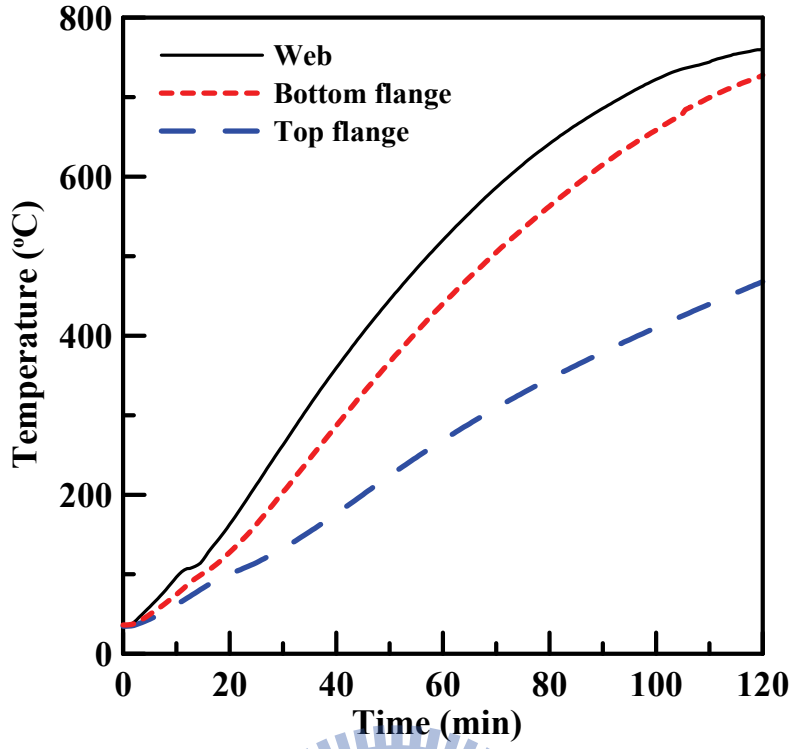


圖 5-3 Control 模型斷面 2 溫度分佈

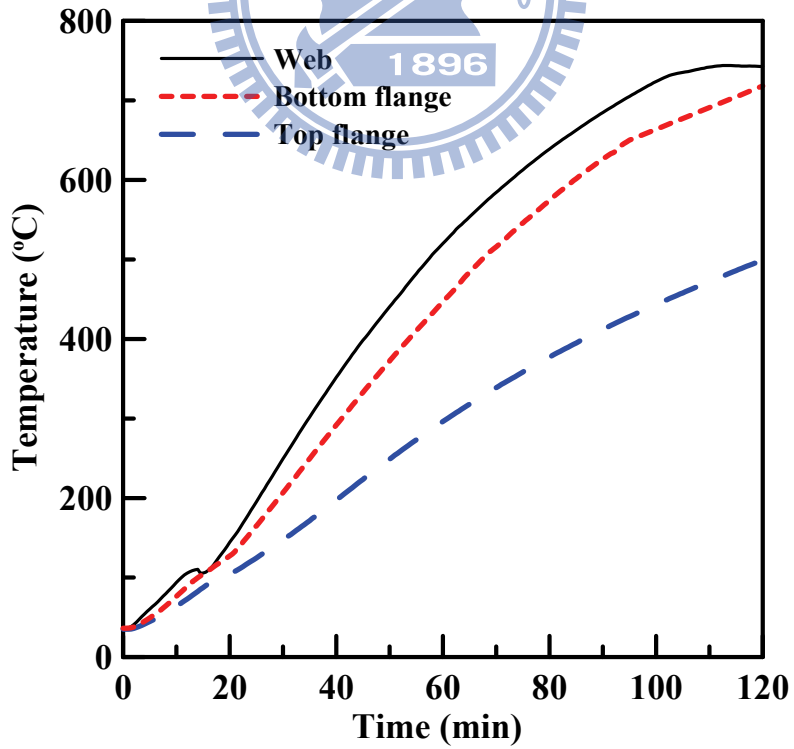


圖 5-4 Control 模型斷面 3 溫度分佈

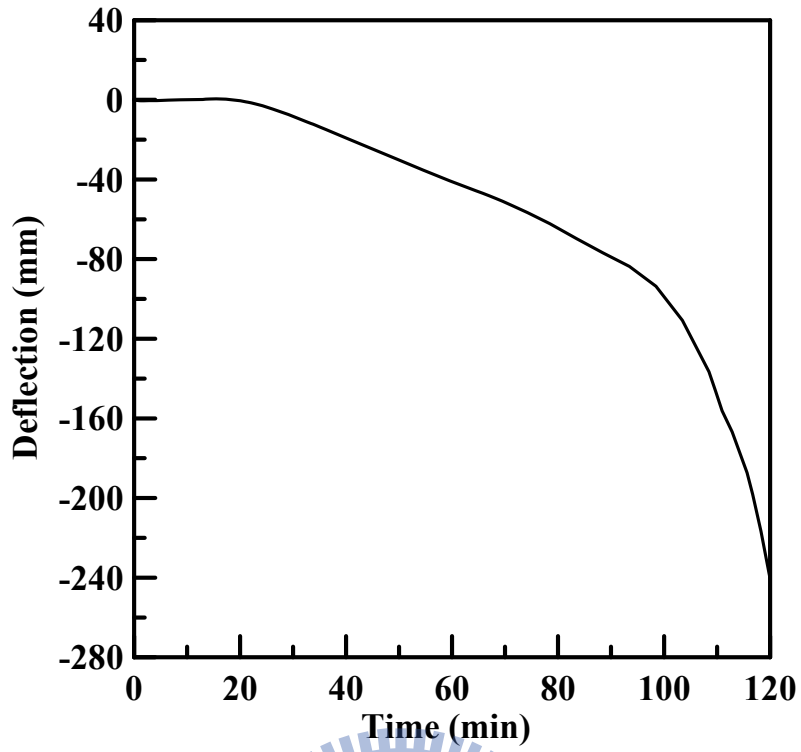


圖 5-5 Control 模型橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

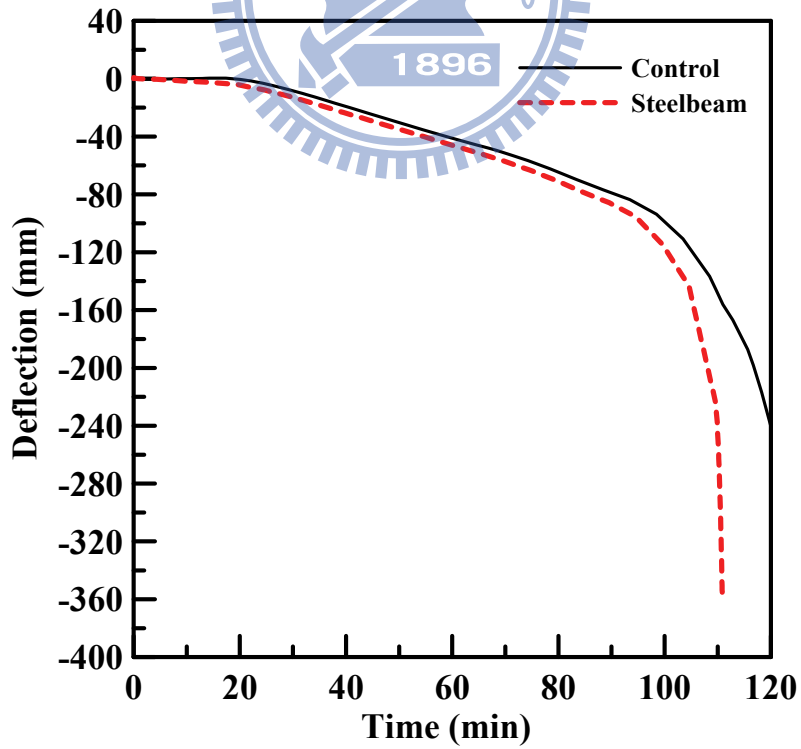


圖 5-6 Control 與 Steelbeam 模型時間-模型跨距中點撓度比較圖

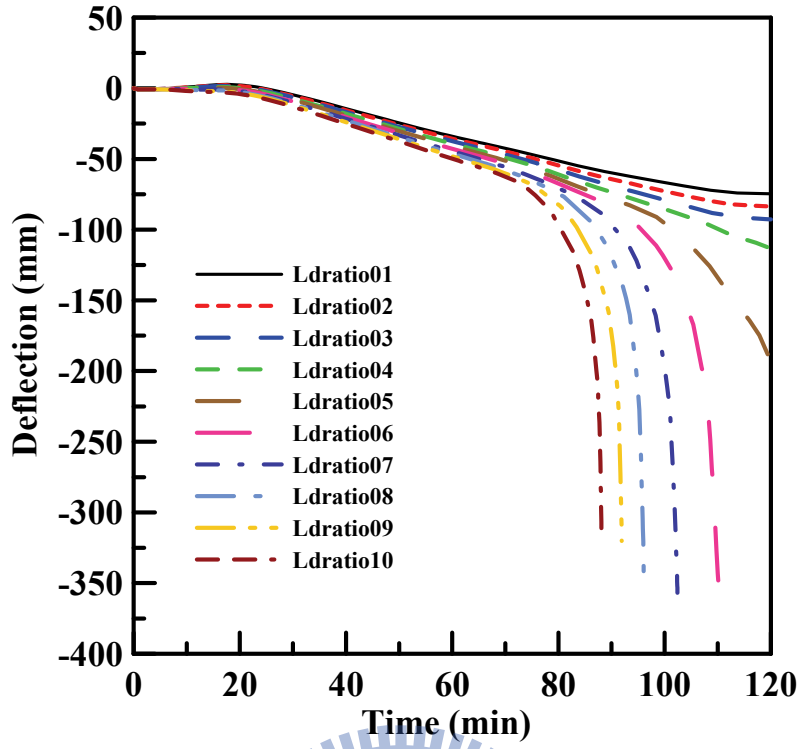


圖 5-7 Ldratio 系列模型時間-模型跨距中點撓度比較圖

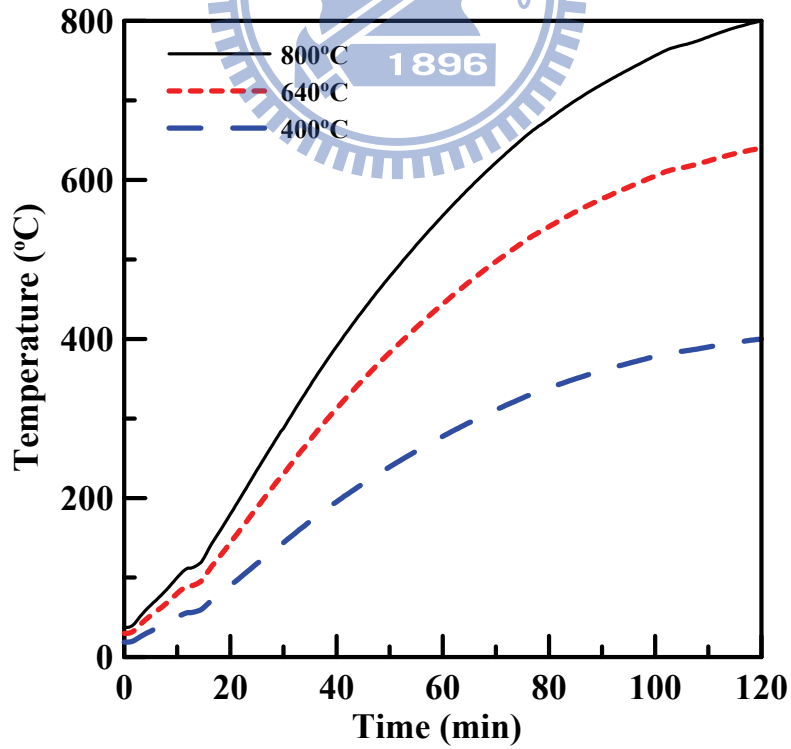


圖 5-8 Sectemp 系列模型使用之分析溫度

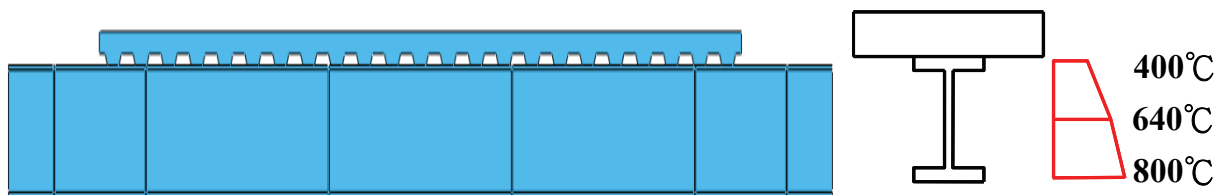


圖 5-9 Sectemp01 橫斷面溫度分佈圖

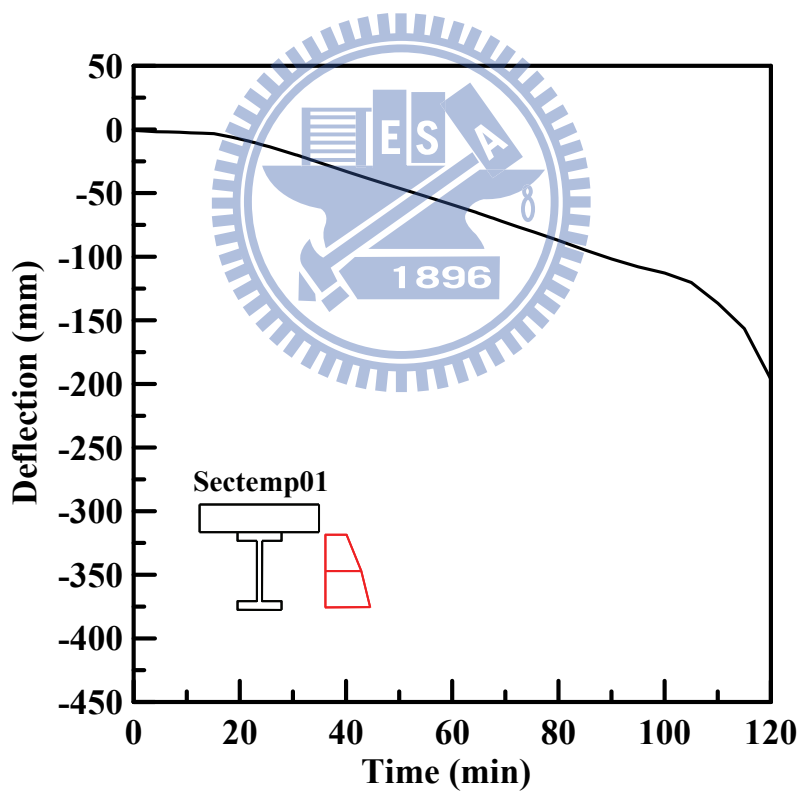


圖 5-10 Sectemp01 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

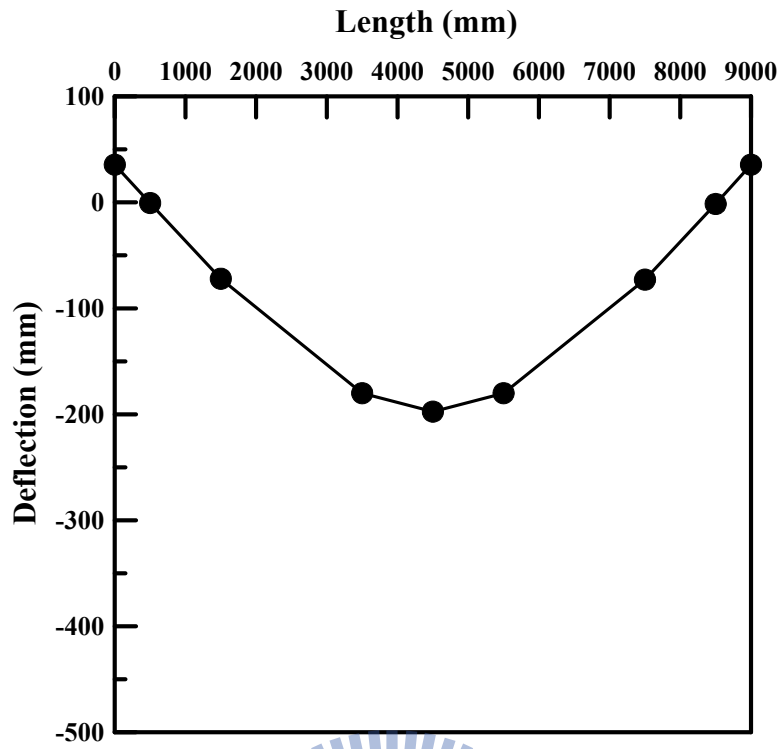


圖 5-11 Sectemp01 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖



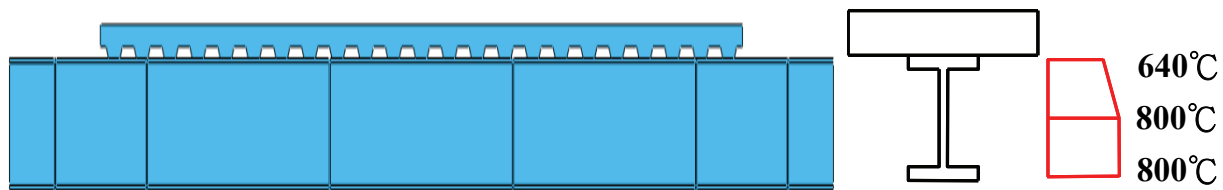


圖 5-12 Sectemp02 橫斷面溫度分佈圖

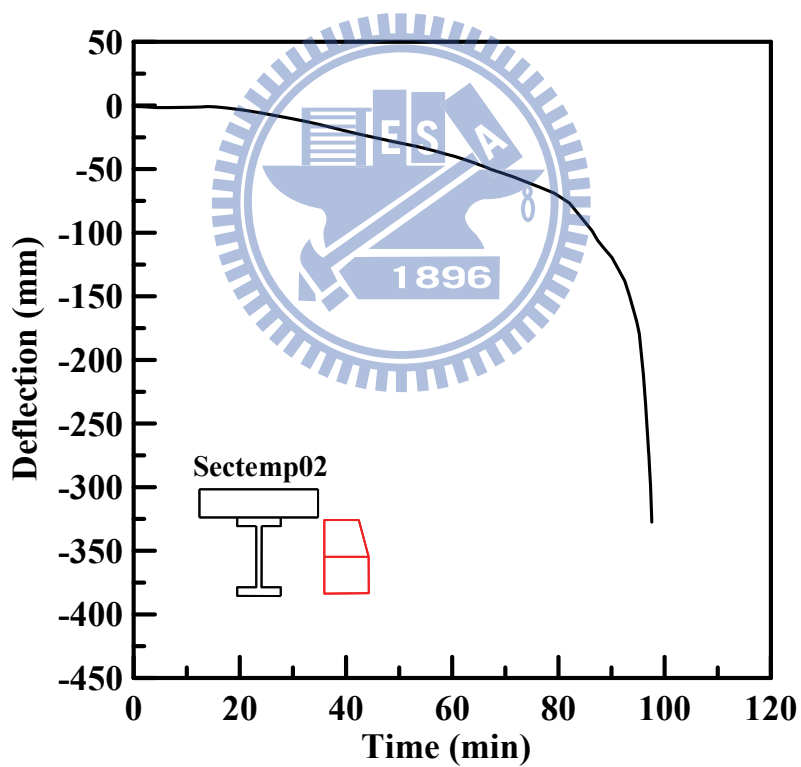


圖 5-13 Sectemp02 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

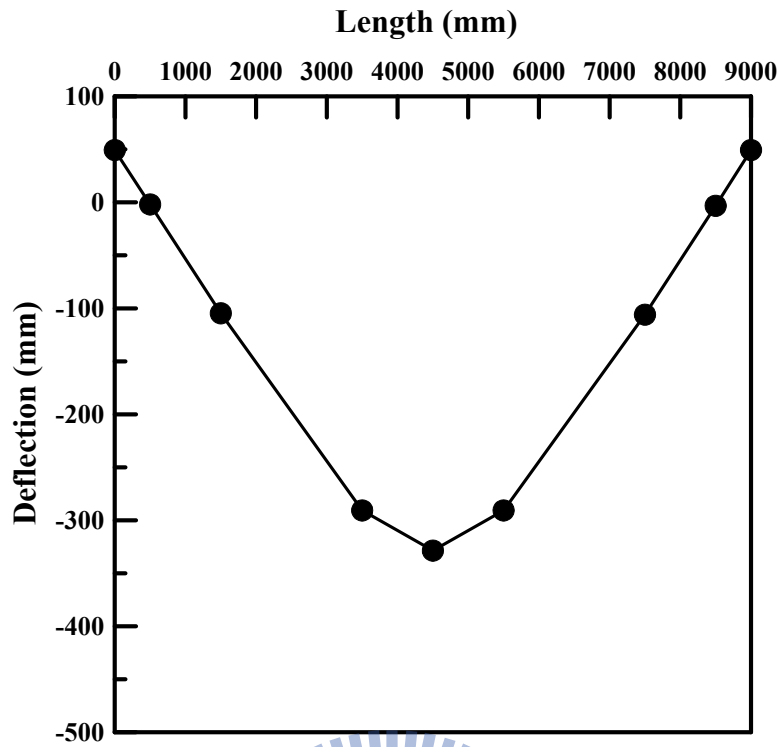


圖 5-14 Sectemp02 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖



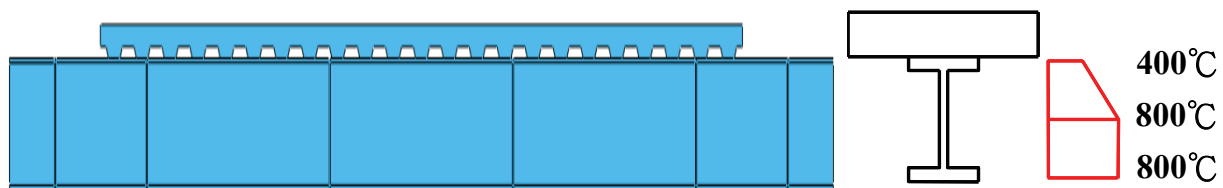


圖 5-15 Sectemp03 橫斷面溫度分佈

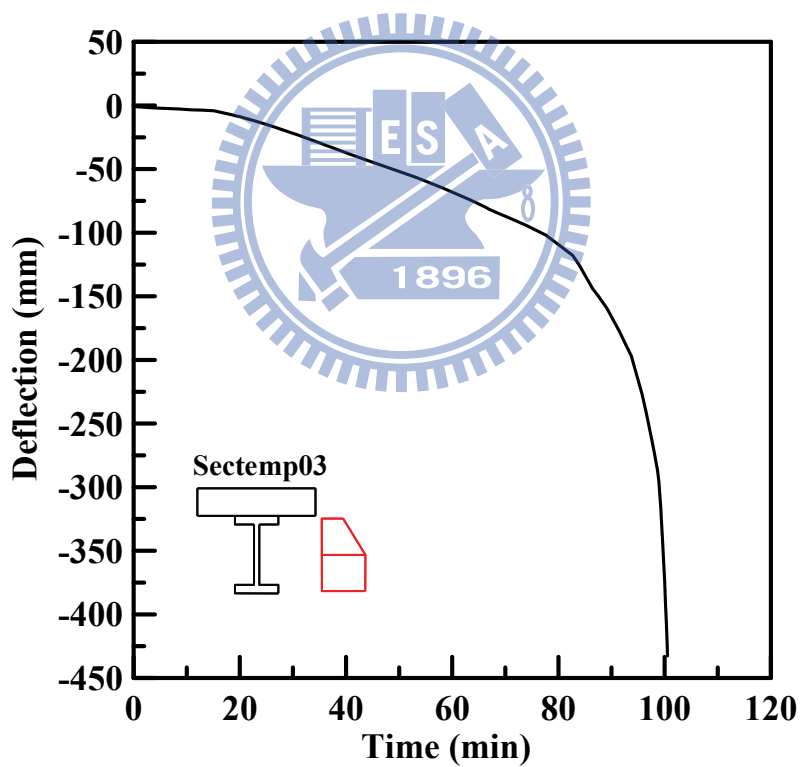


圖 5-16 Sectemp03 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

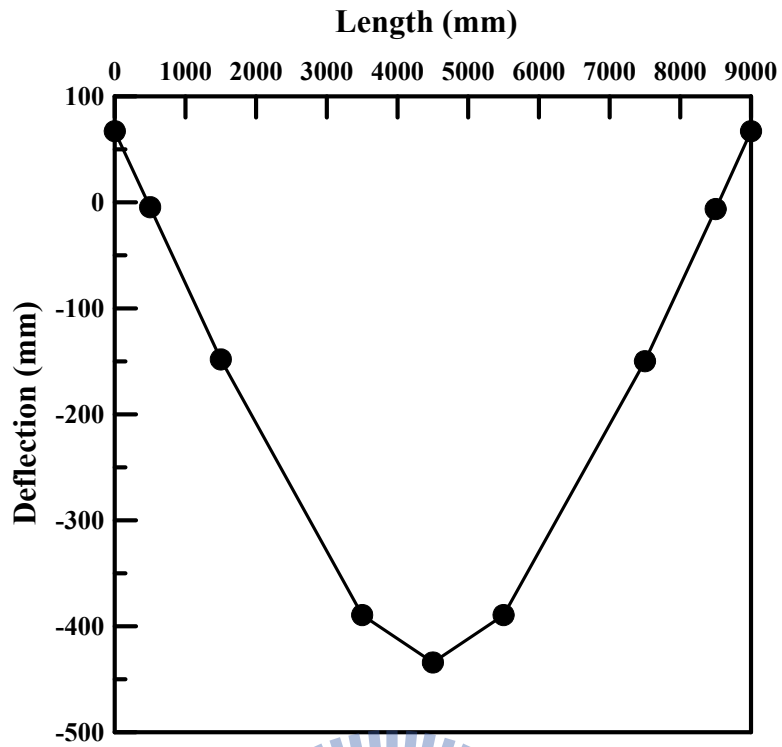


圖 5-17 Sectemp03 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖



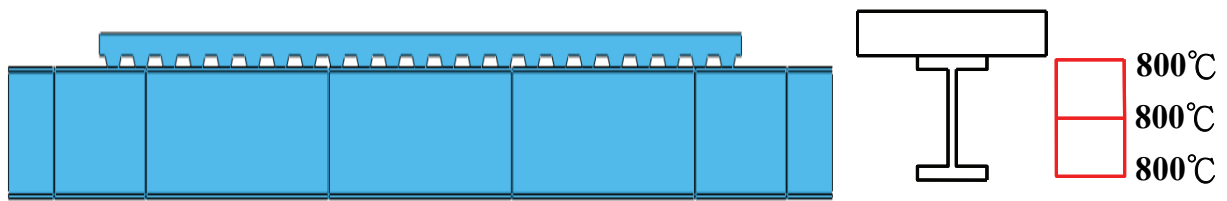


圖 5-18 Sectemp04 橫斷面溫度分佈

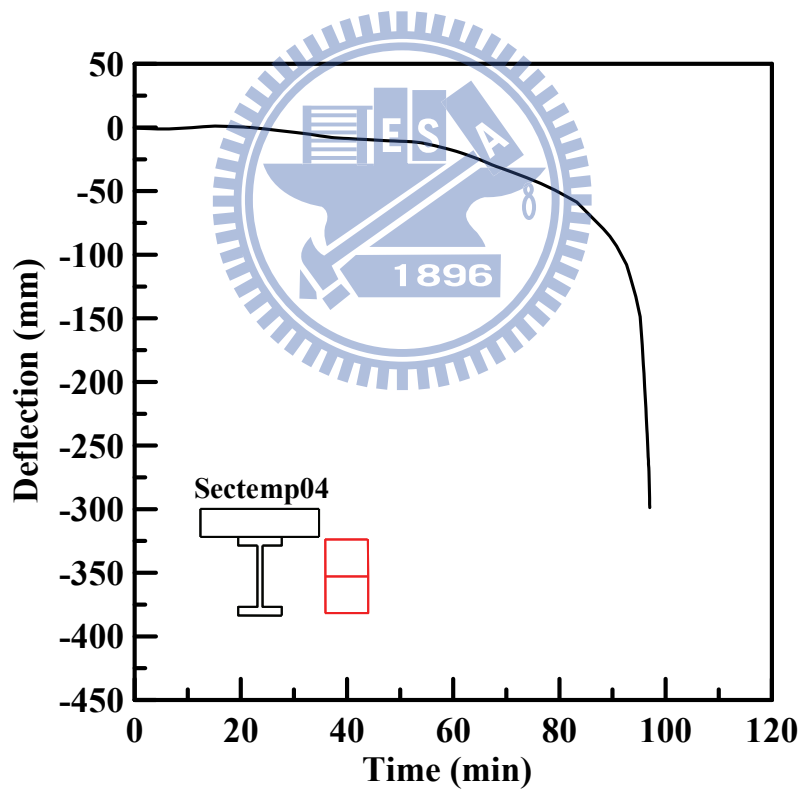


圖 5-19 Sectemp04 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

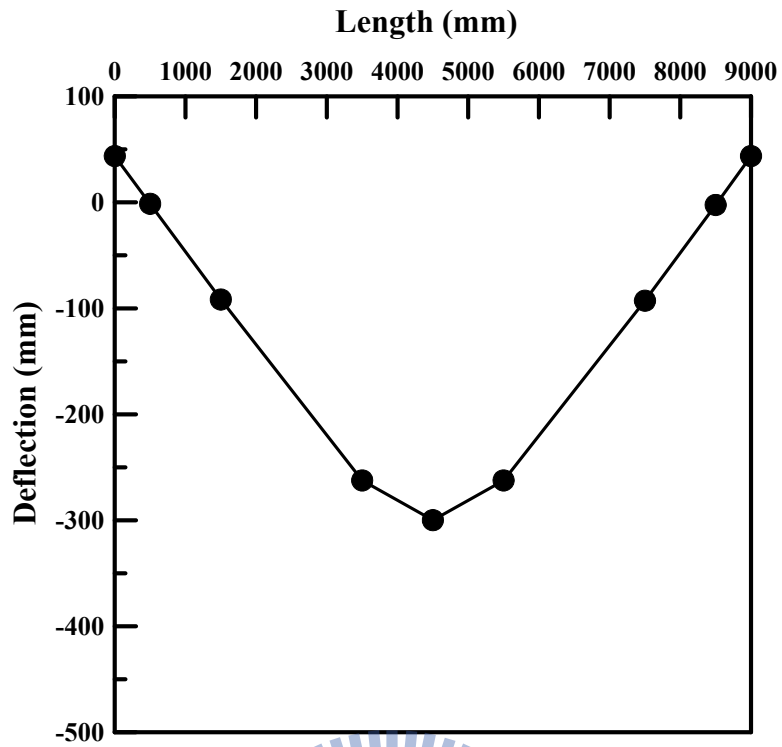


圖 5-20 Sectemp04 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖



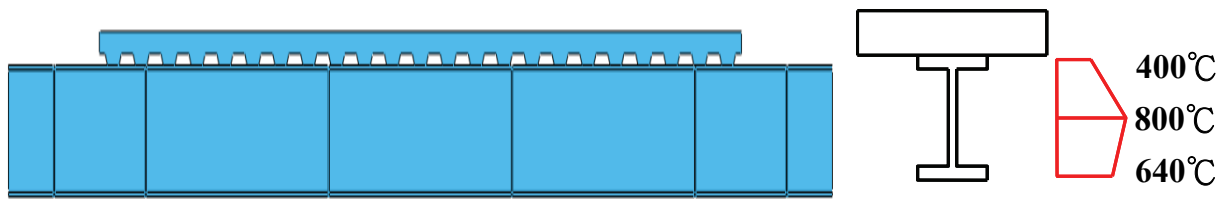


圖 5-21 Sectemp05 橫斷面溫度分佈

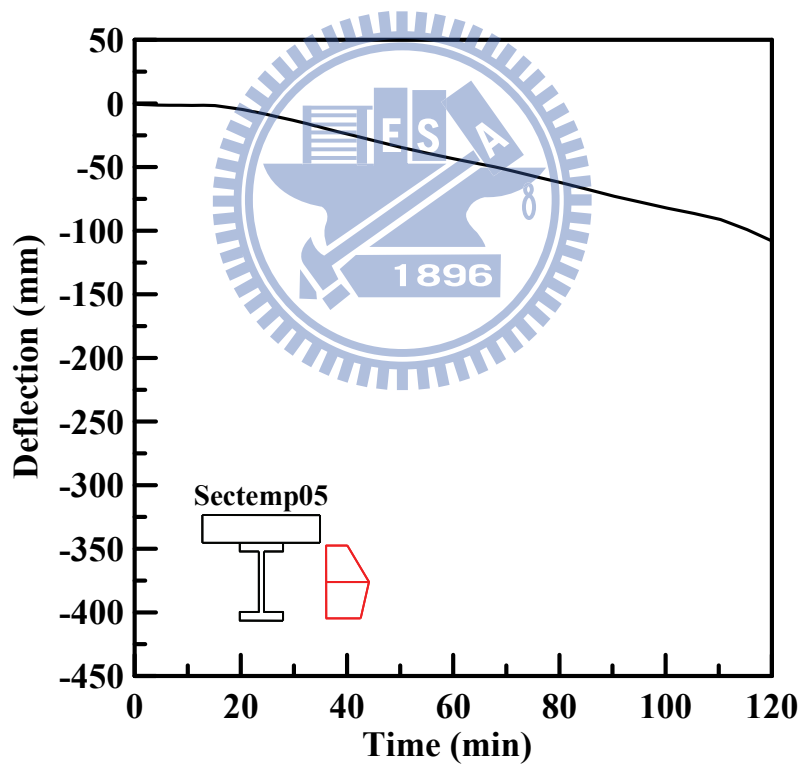


圖 5-22 Sectemp05 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

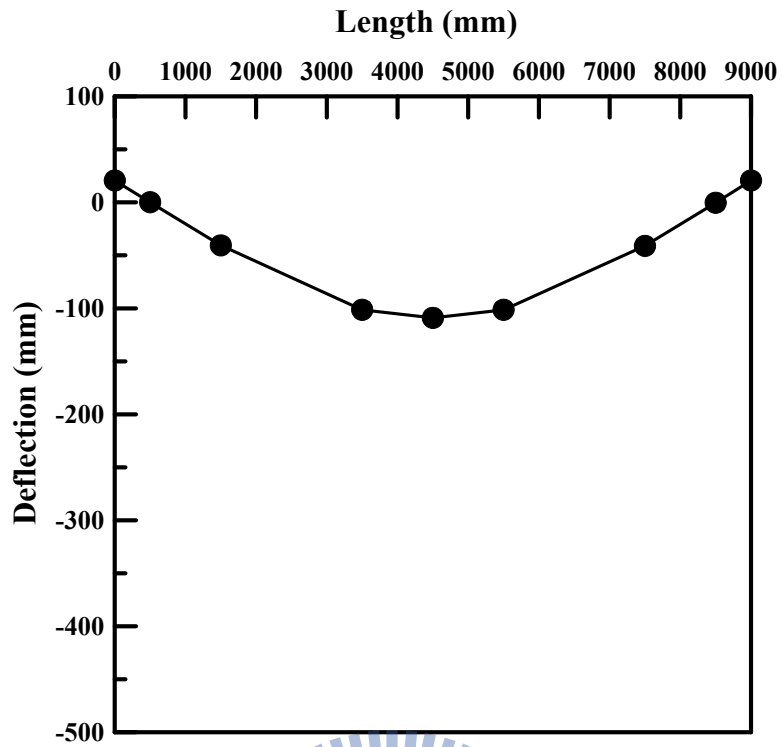


圖 5-23 Sectemp05 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖



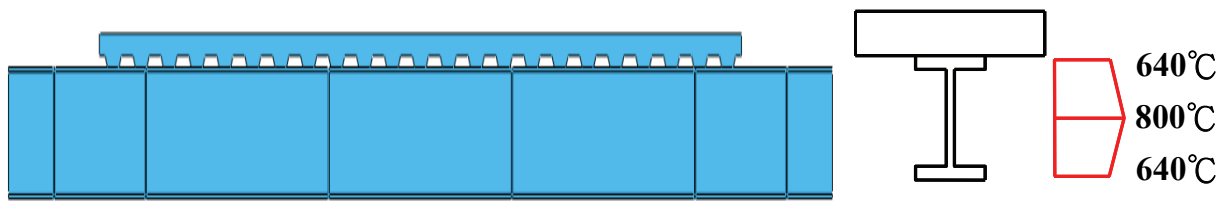


圖 5-24 Sectemp06 橫斷面溫度分佈

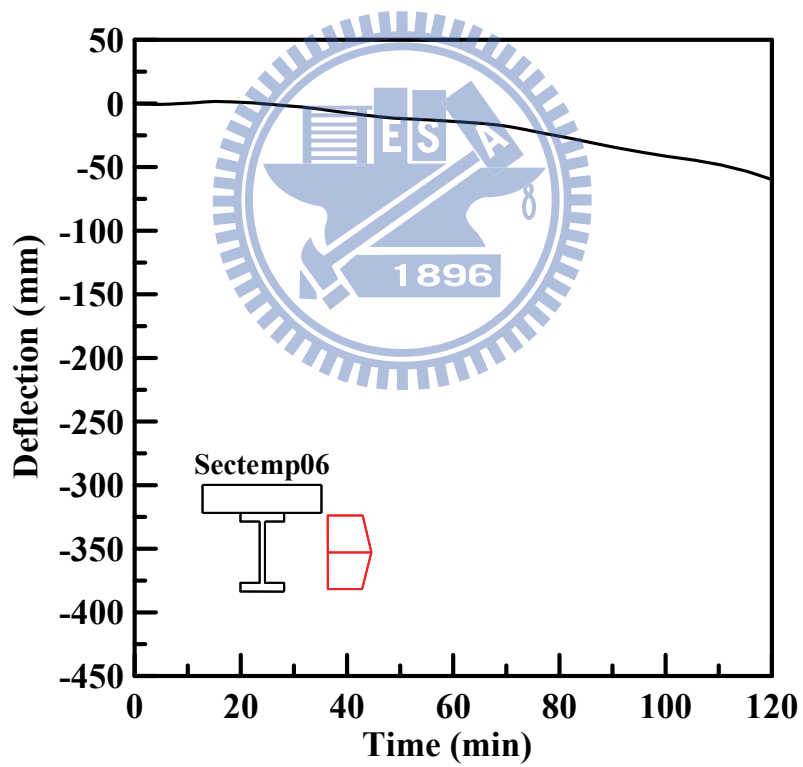


圖 5-25 Sectemp06 橫斷面溫度分佈跨距中點撓度圖

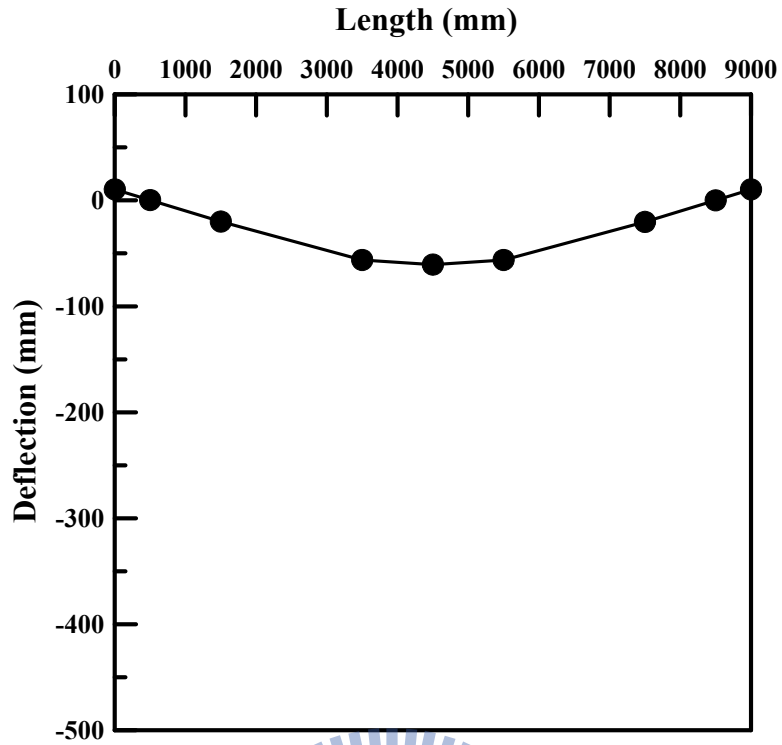


圖 5-26 Sectemp06 橫斷面溫度分佈跨距撓度圖

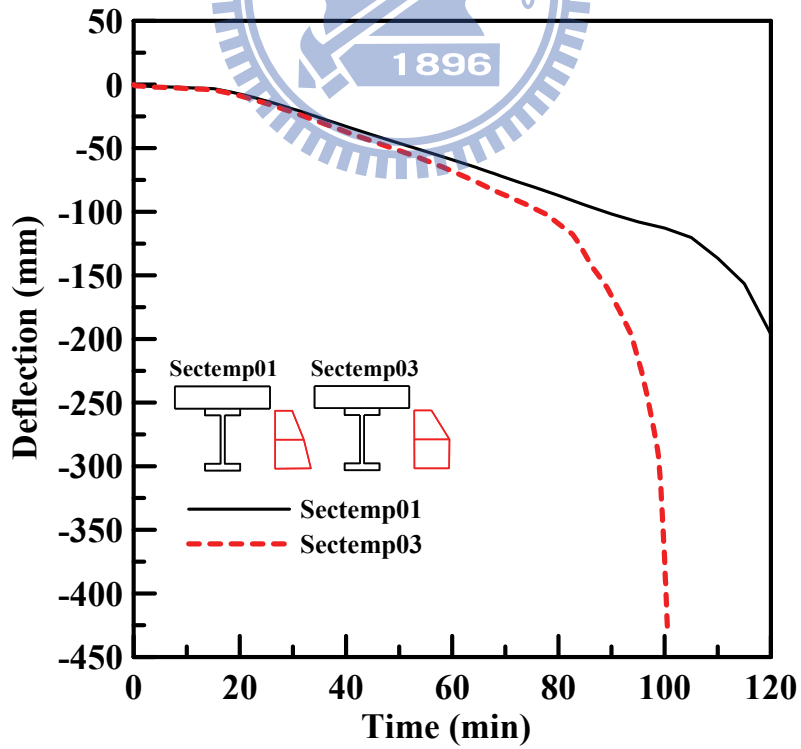


圖 5-27 Sectemp01 與 Sectemp03 時間-模型跨距中點撓度比較圖

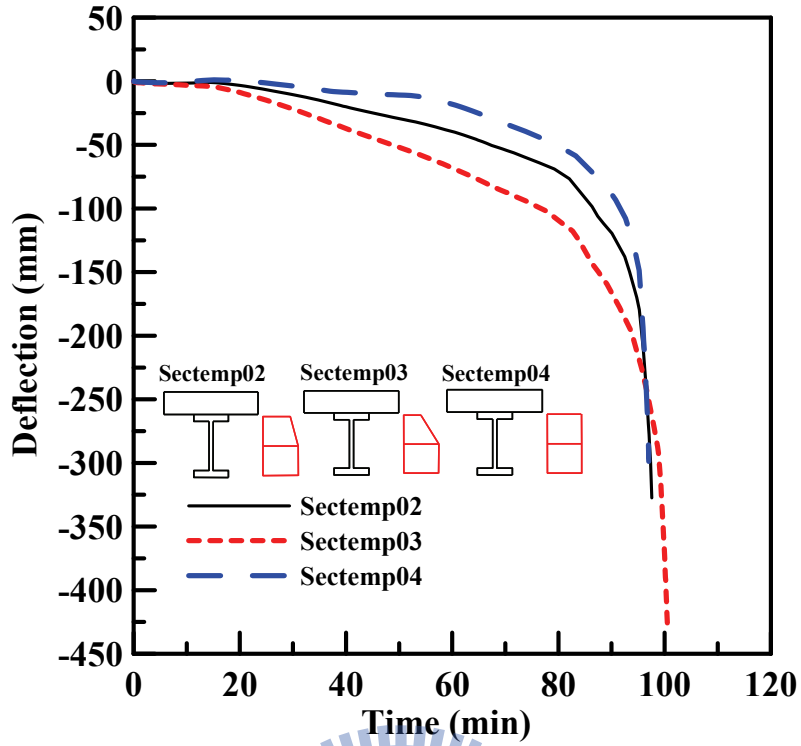


圖 5-28 Sectemp02~Sectemp04 時間-模型跨距中點撓度比較圖

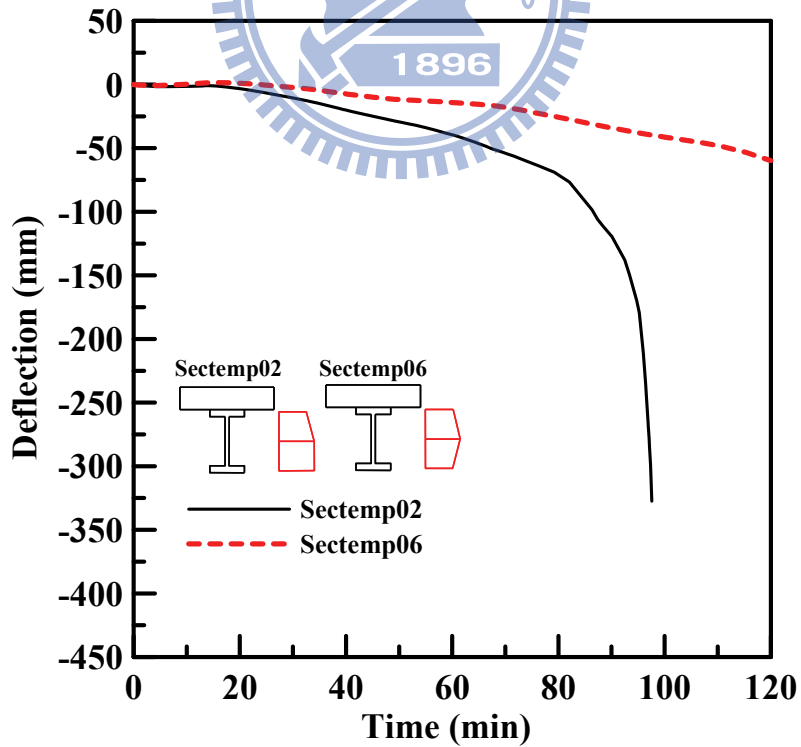


圖 5-29 Sectemp02 與 Sectemp06 時間-模型跨距中點撓度比較圖

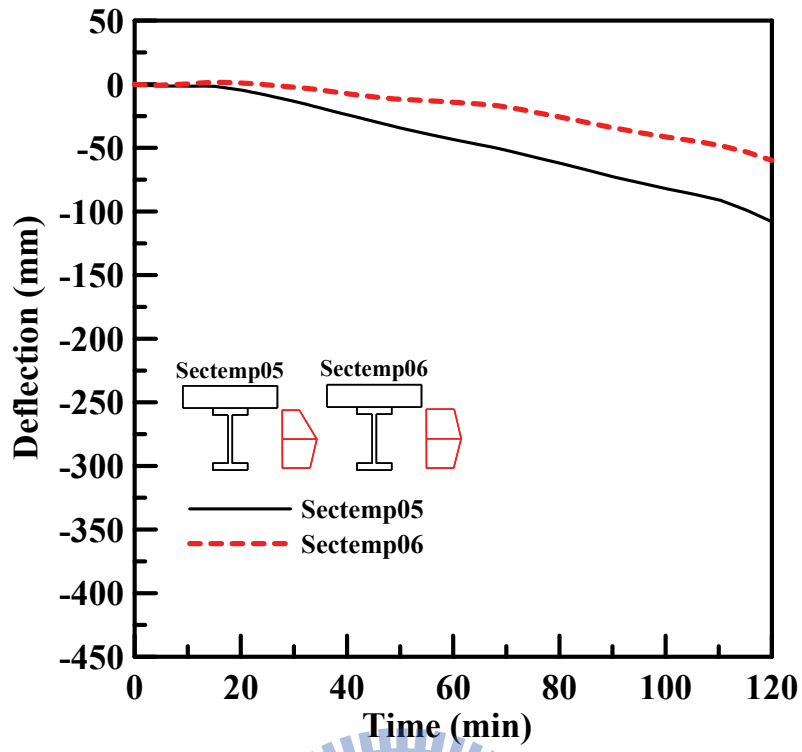


圖 5-30 Sectemp05 與 Sectemp06 時間-模型跨距中點撓度比較圖

