

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 鋼骨構件薄膜防火塗料耐火時效驗證評估模式之研究(1)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2218-E-216-001-

執行期間：94年03月01日至95年07月31日

執行單位：中華大學營建工程學系

計畫主持人：鄭紹材

計畫參與人員：邱瑞深、黃冠雄、余家均

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 4 日

## 摘要

鋼骨構件是主要構造材料之一，對於鋼骨構件的防火問題，一直是所有建築人員重視的課題，更是營建工程材料研究者所致力研究發展的項目，防火被覆材料是為了在火害發生時保護鋼骨構件，有足夠的防火時效，而不致於發生變形、崩塌，影響火場中人員的逃生。然而在過去由於國內缺乏完善之試驗設備，防火被覆材料絕大多數皆引用國外之評估報告，評估程序與結果常造成許多爭議及盲點。

因此本計畫預計以目前國內普遍使用之薄膜型防火塗料為試驗材料，結合內政部建築研究所防火實驗群之試驗設備，依照 CNS 12514 標準之耐火試驗，以及數值模擬方法整理分析並建立防火時效之驗證評估模式，驗證的結果在三根梁試體之差異在-9.8~15.8%之間，且屬於保守且偏安全測，本文之推估模式可以提供評估之參考。

**關鍵詞：** 鋼骨 H 型梁構件、防火塗料、防火時效、評估模式

## Abstract

**Keyword:** steel structure, fire-resistive coating, fire rating, assessment

The steel structure is mainly one of the building structures. The issue of fireproofing to steel materials is the important subject to the building designer all the time, still more build researcher's project devoted to studying which development of fireproofing material. Elastic modulus and tensile strength of the steel structure of buildings could be reduced by the high temperature in fire. Fire-resistive coating materials on the surface of the steel could be a critical issue for delaying the deformation and collapse of the construction.

The perfect testing equipment were lack in the past, the majority quoted the foreign assessment reports of fire-resistive coating materials. The appraisal procedures and results often caused a lot of disputes and scotomas. Therefore in this study applied intumescent fire-resistive coating which a popular material to the steel structure. Fire resistance test in accordance with CNS 12514:2005 (Method of fire resistance test for structural parts of building) on H-section beam, test place is in Center of Fire Research of ABRI of Ministry of Internal Affairs. The numerical simulation method is used to analysis and to found fire rating formulation of the fire-resistive coating material. Results showed to predictable temperature variation in between -9.8 and 15.8% of H-section steel beam specimens. This research offer the way of assessment steel temperature of coating fire-resistive material.

## 一、前言

國內內政部營建署對於鋼結構防火塗料之檢測，主要以國外檢驗單位之測試報告為主，如依據英國 BS 476、美國 UL 263 等經國內相關單位指定之國外機構所檢具之證明文件，由於國內測試實驗之經驗較少，對於鋼構件耐火之研究試驗回饋至測試標準之檢討相形見拙。

基於防火塗料對於鋼結構建築防火性能上之重要性，以及國內對於防火塗料檢測之現況，透過以鋼結構中之鋼梁構件為主要對象，配合膨脹型防火被覆塗料，測試在火災環境中，鋼梁構件之溫度及物理變化，以實例驗證熱傳導公式，做為國內單位在評估使用鋼結構防火塗料耐火性能時之依據，以提供國內對於鋼結構防火塗料方面設計應用之參考。

## 二、研究目的

本研究之目的，主要如下所示：

1. 蒐集整理國內外鋼結構防火之相關規範及文獻，參考耐火處理後鋼梁構件所使用之相關熱傳導公式。
2. 探討不同斷面及防火被覆厚度的情況下，H 型梁構件之溫度變化。
3. 歸納分析試驗結果，加以驗證鋼梁構件熱傳導公式之可行性，提供鋼梁構件耐火性能評估之預測參考。

## 三、研究方法

本研究之研究方法主要分成「文獻回顧」、「試驗分析」、「實例驗證」三部分，詳細內容說明如下：

- 一、文獻回顧法：透過蒐集國內外鋼結構之相關文獻資料及防火規範，加以整理與歸納，作為推導鋼梁構件熱傳導公式之依據，並掌握國內外目前鋼結構防火之現況，以作為後續試驗計畫之依據與準備。
- 二、試驗分析法：利用鋼梁構件之耐火試驗，配合膨脹型防火塗料，收集在受火害時鋼梁構件之溫度及物理變化資料，並加以整理、分析。
- 三、實例驗證法：將經由整理分析之相關公式與實例之結果，進行驗證及比對，以證明該經驗公式之可行性。

## 四、文獻回顧

### 4.1 鋼材高溫下之特性

鋼結構在常溫及高溫下的受力行為受其機械性質影響，如極限強度、降伏強度及彈性模數會隨著溫度的升高而下降，如圖 4-1【1】，了解鋼材本身在高溫下的機械性質將有助於研究鋼構材或結構系統之結構行為。由圖 4-1 中可得知當溫度為 500°C 左右，鋼材其降伏強度約為室溫時降伏強度之 2/3，當溫度為 600°C 時，其降伏強度約為室溫時降伏強度之 1/2，彈性係數的折減只剩 1/5 左右【1,2】，會造成軟化或坍塌。因此鋼結構受火害時的保護材料或技術，即為重要之課題。

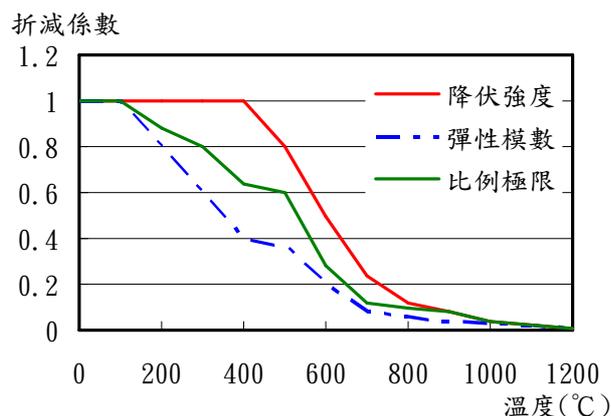


圖4-1 高溫下鋼材應力應變關係折減係數【1】

#### 4.2 防火被覆塗料之特性

防火被覆(Fire Protection)材料即是在鋼材表面加作一隔熱良好之不燃材料，使之可阻絕外界之高溫，降低熱源傳導速率，使鋼材構件在特定時間內不致達到其強度降低及軟化之溫度。使用防火被覆之目的可分成三點【3】：

- (1) 提供耐火保護，使鋼材在火害中維持安全結構功能，保持強度不顯著減失。
- (2) 保護建築物結構體，使之能提供一定時效以上之結構安全。
- (3) 延緩建築物倒塌之危險，以便於人員之疏散及火場之灌救。

鋼材構件用之膨脹型防火塗料的主要作用機理，即是形成膨脹碳化層，阻止熱量傳遞。防火塗料於鋼材上形成隔熱反應之流程，可分成起始階級、傳播階段、終止階段等三階段【3】，如圖 4-2 所示。防火機理為膨脹碳化層的形成會經過以下過程：在起始階段防火塗料成份中的酸類受熱放出無機酸，使得多元醇類產生酯化現象；在傳播階段進而造成脫水碳化，反應生成的水蒸氣及一些不燃性氣體使碳層膨脹；在終止階段形成一層多微孔的碳層，達到阻隔火場溫度之傳遞。

不同的組成材料，受熱時的反應溫度與膨脹程度皆不同，平均大約可以膨脹原塗佈厚度的 100 被左右，在討論薄膜塗料之防火隔熱計算，也因為熱常數，如熱傳導係數、比熱、熱容量等不易量測，而迭生困難。

#### 4.3 各國鋼構件試驗標準

各國對於鋼構件之試驗標準各有所不同規定，以下針對我國、英國、美國及 ISO 標準等之依據規範做說明，我國之鋼構件試驗標準以中國國家標準 CNS 12514【4】為主要依據；英國之鋼構件試驗標準以英國國家標準 British Standard (BS)中，BS476-21、BS476-22【5】為試驗之依據；美國之鋼構件試驗標準主要為依據美國保險實驗所(Underwriters Laboratories, UL)，所出版之“UL263 - Fire test of building construction and materials”【6】為主。將美國 UL263、英國 BS 476，與我國之 CNS 12514 試驗標準比較之，如表 4-1 所示。

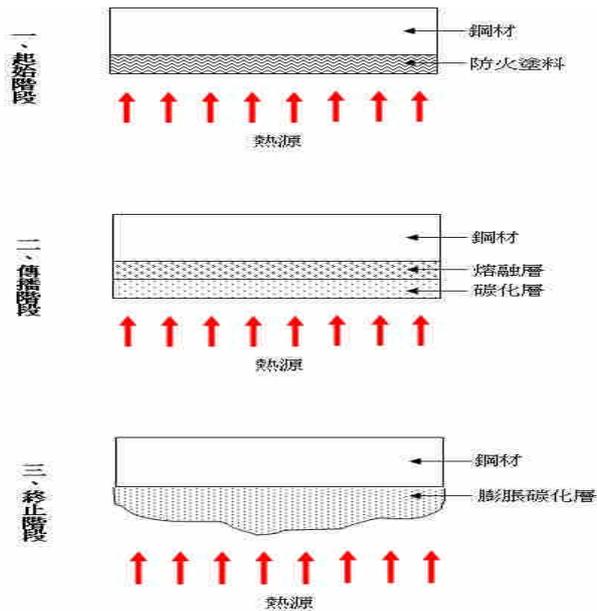


圖 4-2 防火塗料阻燃階段

表 4-1 各國鋼梁構件試驗規範比較（資料來源：本研究整理）

	項目	CNS 12514	ISO834	BS476	UL 263
試體及 加熱條件	試體長度	≥3m	≥3m	≥3m	≥2.7m
	1hr	945°C	945°C	945°C	927°C
測溫點	翼板處	≥3 點	≥3 點	6 點	≥3 點
	腹板處	≥1 點	≥1 點	4 點	≥1 點
	總數	≥16 點	≥16 點	10 點	≥16 點
溫度判定 (破壞溫度)	平均溫度	>500°C	>500°C	>550°C	>538°C
	單點溫度	>550°C	>550°C	>650°C	>649°C

### 五、鋼構件之昇溫計算模式

依據本研究之實際條件，參考學者Purkiss J.A.之“Developments in the Fire Safety Design of Structural Steel Work”【7】及文獻“鋼梁抗火計算與設計的實用方法”【8】中之鋼梁抗火計算公式，所使用之熱傳導公式則依據傅立葉方程式及ISO834之試驗用標準升溫曲線計算之，則可將本試驗之基本設定條件列出如下：

- (1)按照國際標準組織(ISO)所推薦的標準升溫曲線採用為試驗升溫標準，等同我國CNS12514中所規定之標準溫度時間曲線，即如下所示：

$$T_c = 345 * \log_{10} \left( \frac{8t}{60} + 1 \right) + 20 \dots\dots\dots(1)$$

式中：

$T_c$ ：平均爐內溫度(°C)

$t$ ：試驗經過時間(秒)

- (2)鋼梁內部的溫度在各暫態都是均勻分佈的。  
 (3)鋼梁為等截面構件，且防火被覆均勻分佈。  
 (4)構件內部溫度：

由本文之假設確定，參考文獻【8】之微分方程式：

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{F\lambda}{Vd} \frac{1}{C_s\rho_s} (T_c - T_s) \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- $T_s$ ：鋼材構件表面溫度(°C)  
 $C_s$ ：鋼比熱(J/kg°C)  
 $\rho_s$ ：鋼材的密度(kg/m<sup>3</sup>)  
 $t$ ：經過時間(s)  
 $F$ ：單位長度構件受火表面積(m<sup>2</sup>/m)  
 $V$ ：單位長度構件體積(m<sup>3</sup>/m)  
 $\lambda$ ：防火塗料之熱傳導係數(W/m°C)  
 $d$ ：防火塗料之厚度(m)

由初始條件 $T_s(0)=T_c(0)=20^\circ\text{C}$ 及標準升溫曲線公式，可得解：

$$T_s = e^{-\frac{B}{C_s\rho_s}} \left\{ 20 + \int_0^t \frac{B}{C_s\rho_s} [20 + 345 \log_{10} \left( \frac{8t}{60} + 1 \right)] * e^{-\frac{B}{C_s\rho_s}} dt \right\} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$$B = \frac{F\lambda}{Vd} \dots\dots\dots(4)$$

由於該式不便於工程應用，因此採用曲線擬合(Curve Fitting)方法【8】，得出鋼構件的表面溫度 $T_s$ 的近似計算公式，如下所示：

$$T_s = (\sqrt{0.04 + 0.7 * 10^{-4} B} - 0.197) * t + 20 \dots\dots\dots(5)$$

由式中可解得

$$B = 1.43 * 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right] \dots\dots\dots(6)$$

以下則針對本研究之基本條件，推導關於熱傳導係數值之計算方程式，其中 $F$ 值為單位長度構件受火表面積(m<sup>2</sup>/m)， $V$ 值為單位長度構件體積(m<sup>3</sup>/m)，當兩值相除，即相當於構件之 $Hp/A$ 值，因此可將上述公式改寫為：

$$B = \frac{F\lambda}{Vd} = 1.43 * 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right] \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{1.43 * 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right]}{(Hp/A)} \dots\dots\dots(8)$$

由於膨脹型防火塗料在受到高溫時體積及厚度將會產生膨脹而增加，則防火

塗料之熱傳導係數( $\lambda$ )可依據推導之公式，簡化為下列解：

$$\lambda = \frac{1.43 * 10^4 [(\frac{T_s - 20}{t} + 0.197)^2 - 0.04]}{(Hp/A)} * d \dots\dots\dots(9)$$

其中：

$\lambda$ ：防火塗料之熱傳導係數(W/m°C)。

(Hp/A)：斷面因素(m<sup>-1</sup>)。

T<sub>s</sub>：鋼構件內部溫度(°C)。

t：經過時間(s)。

d：防火塗料之厚度(m)。

藉由試驗數據代入公式(9)，即可求出熱傳導係數( $\lambda$ )之數值解，當已知熱傳導係數( $\lambda$ )後即可代入公式(7)求得 B 值，再代入公式(5)以推估出預測之鋼材構件表面溫度(T<sub>s</sub>)。

## 六、試驗規劃

本研究原計畫預計將進行數次不同斷面之鋼梁耐火試驗，但在核定之經費範圍內只能進行二次鋼梁耐火試驗。另外，再徵得塗料廠商之同意與協助，提供相關之鋼梁耐火試驗做為本學術研究之參考與分析，因此可讓本研究能順利規劃為分析用試驗與驗證用試驗兩類型。本研究之鋼梁耐火試驗皆依據中國國家標準 CNS12514 進行，於鋼梁構件試體表面噴塗鋼結構用膨脹型防火塗料，進行耐火試驗，試驗數據如表 6-1、圖 6-1~2 所示。膨脹型防火塗料之種類類型依公開招標採購，以得標廠商之生產塗料為主。

表 6-1 鋼梁構件耐火試驗之試驗變數

試驗變數	變數數據					
試體編號	K1	K2	K3	K4	K5	K6
鋼材斷面(Hp/A)	120	150	190	190	169	169
塗料厚度(mm)	1.10	1.34	1.28	1.40	1.31	1.25
防火時效	預計 1 小時					
試驗基準	CNS 12514					
載重型式	非加載					
受火型式	四面受火				三面受火	
測溫點及斷面	每斷面 4 測溫點， 共 4 斷面				每斷面 6 測溫點， 共 3 斷面	
備註	廠商提供				本案試驗	

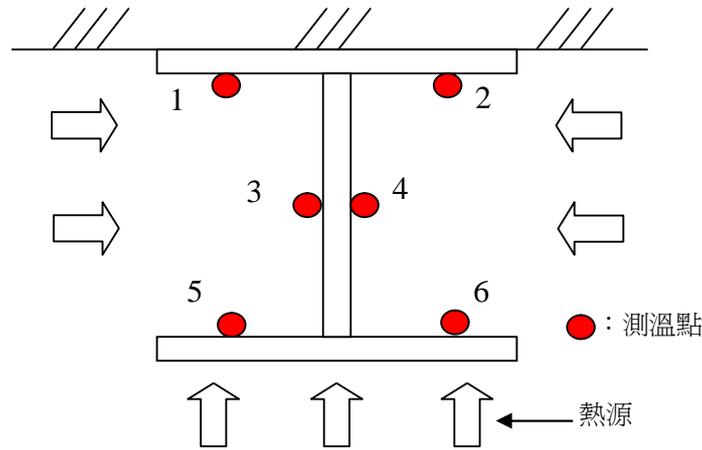


圖 6-1 三面受火鋼梁斷面測溫點配置圖

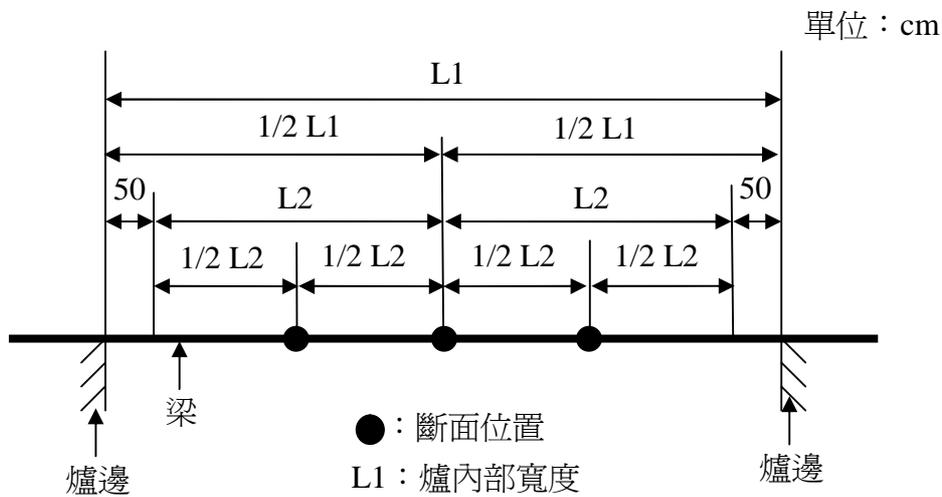


圖 6-2 鋼梁試體測溫斷面配置圖

## 七、試驗結果分析

### 7.1 耐火試驗分析

在廠商提供之試驗數據雖然在四面受火的情況下燒測，其試驗條件比三面受火方式較為嚴苛，作為分析的母體數據會屬於保守、安全之範圍，可符合以保護人員生命、財產安全為原則之目的。依據 K1、K2、K3 中，各試驗之成果，並使用本文之計算式(9)「鋼材昇溫計算式」，考慮現實之試驗狀況，首先將所使用之膨脹型防火塗料厚度作如下基本假設：

- (1)膨脹型防火塗料之膨脹率：依據所使用之膨脹型防火塗料特性，其完全膨脹之厚度約為原始厚度之100倍。
- (2)膨脹型防火塗料之膨脹過程：依據所使用之膨脹型防火塗料特性，約於試驗開始15分鐘(約739°C)內完全膨脹。

分析 K1、K2、K3 等試驗，獲得熱傳導係數受溫度變化如圖 7-1~7-3 所示，呈現非定值的變化，顯現受膨脹之碳化層影響複雜。

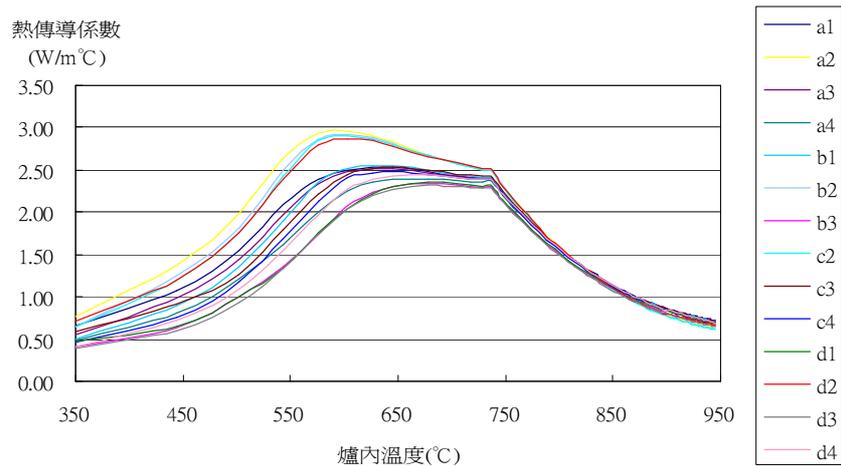


圖7-1 K1試驗防火塗料熱傳導係數與時間溫度關係

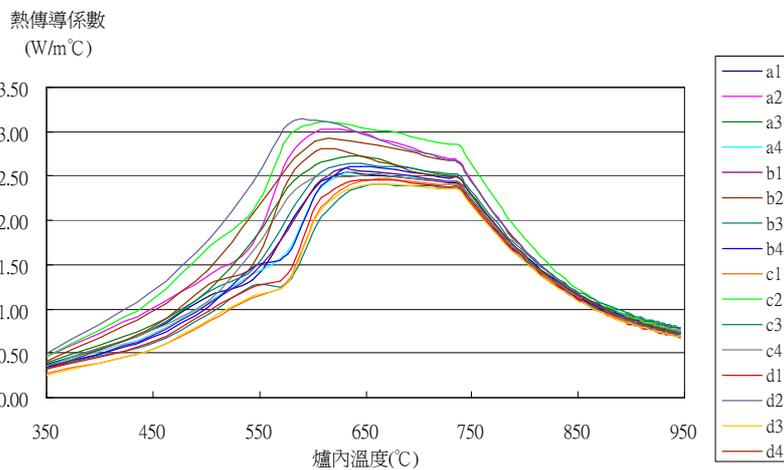


圖7-2 K2試驗防火塗料熱傳導係數與時間溫度關係

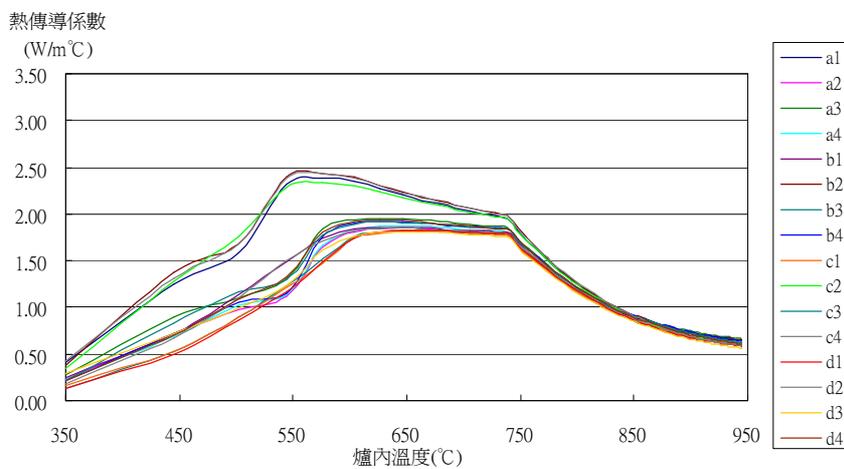


圖 7-3 K3 試驗防火塗料熱傳導係數與時間溫度關係

## 7.2 鋼材溫度之模擬計算

藉由上述分析試驗之數據，由於防火塗料塗佈在鋼梁之上、下翼緣與腰部受熱情況被非均勻，因此分別推估應用分析之 $\lambda$ 值如圖 7-4 所示。以熱傳導公式求得在試驗狀況下，K4~K6 試驗之鋼材上下翼板與腹板間溫度變化曲線，與實際 K4~K6 試驗之數據對照，以驗證該熱傳導計算公式之可行性。

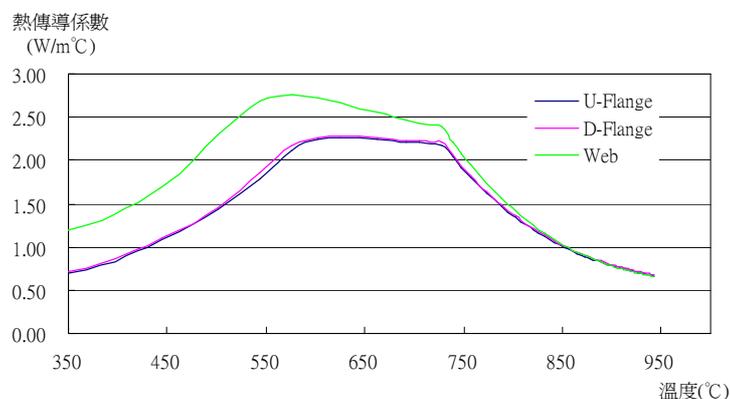


圖 7-4 防火塗料熱傳導係數與爐內溫度變化曲線(預測)

### (一) K4~K6 試驗與驗證

K4~K6 試驗之試驗實際值 (T) 與預測值 (P) 之差異，分別就上翼板 (UFlange)、下翼板 (DFlange)、腹板 (Web) 等不同位置，分析如表 7-1~表 7-3 所示，結果繪製如圖 7-5~7-7 所示。

表 7-1 K4 試驗預測值與實際值比較

時間(分)	U-Flange		D-Flange		Web	
	預測值	實際值	預測值	實際值	預測值	實際值
20	311.8	291.0	313.7	292.6	326.2	304.8
40	382.6	367.2	387.5	370.4	383.4	372.6
60	469.6	465.9	475.3	467.4	467.0	476.4

表 7-2 K5 試驗預測值與實際值比較

時間(分)	U-Flange		D-Flange		Web	
	預測值	實際值	預測值	實際值	預測值	實際值
20	301.3	268.1	303.1	292.7	315.3	294.1
40	368.6	339.5	373.4	376.3	369.5	352.2
60	451.9	423.2	457.4	507.0	449.4	458.6

表 7-3 K6 試驗預測值與實際值比較

時間(分)	U-Flange		D-Flange		Web	
	預測值	實際值	預測值	實際值	預測值	實際值
20	311.0	238.1	312.9	270.0	325.4	268.1
40	381.5	319.1	386.4	351.8	382.4	329.0
60	468.2	404.5	473.9	456.7	465.7	410.3

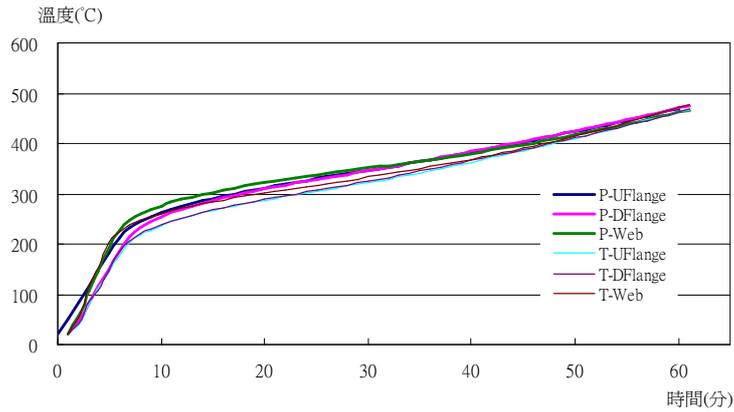


圖 7-5 K4 試驗預測與實際溫度關係

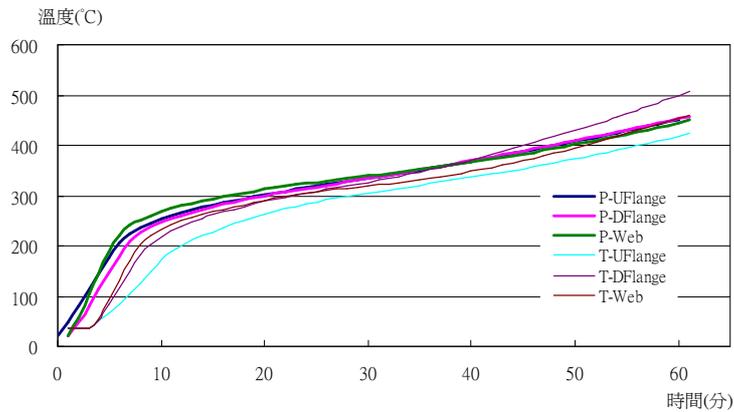


圖 7-6 K5 試驗預測與實際溫度關係

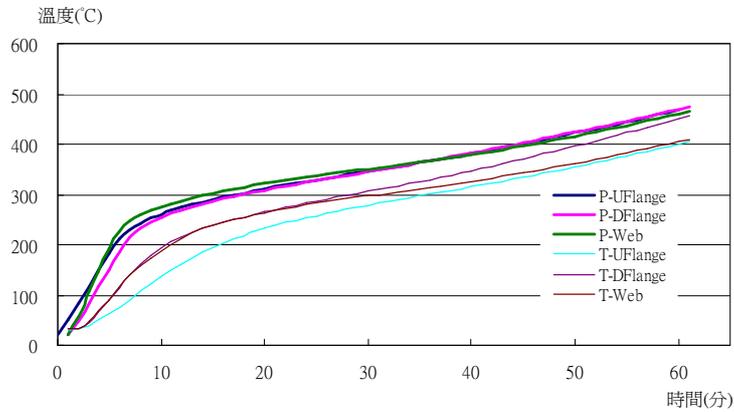


圖 7-7 K6 試驗預測與實際溫度關係

為確認防火塗料膨脹程度假設之合理性，表 7-4 所示為 K5 試體防火塗料之原始厚度與膨脹厚度比較，符合完全膨脹 100 倍之基本假設。

表 7-4 K5 試體防火塗料膨脹厚度比較

	A 斷面		B 斷面		C 斷面	
原始厚度(mm)	1.25	1.24	1.30	1.25	1.24	1.24
膨脹厚度(mm)	125	125	126	125	124	123

## (二) 差異度分析

比較預測溫度與實際試驗溫度後可發現，估計之差異百分比如表 7-5 所示，在上翼版部份大約 0.8~15.8%，在下翼版部份約-9.8~3.8%，在腹版部份約-2.0~13.5%，正值代表預測值高於實際值，負值代表實際值高於預測值。在表 7-5 中平均偏向正值，顯示預測溫度較高，以此作為設計，會較趨向保守、偏安全側。而在預測溫度變化曲線上，仍相近於實際試驗溫度曲線之變化，可驗證鋼構件昇溫計算公式在使用、參考上之可行性。因此，本研究之鋼材昇溫計算模式，在溫度計算之基礎上，即可應用在相同防火時效之鋼構防火設計，在不同的鋼構斷面，分別求取所需塗佈之薄膜厚度。

表 7-5 驗證用試驗之預測與實際試驗溫度之差異百分比

分鐘	K4			K5			K6		
	U-Flag	D-Flag	Web	U-Flag	D-Flag	Web	U-Flag	D-Flag	Web
10	7.2	7.3	6.3	34.4	11.1	13.0	73.5	27.7	40.8
20	7.1	7.2	7.1	12.4	3.6	7.2	30.6	15.9	21.4
30	6.4	6.2	5.2	8.4	2.1	6.3	22.2	12.4	17.7
40	4.2	4.6	2.9	8.6	-0.8	4.9	19.6	9.9	16.2
50	2.1	3.2	0.5	8.1	-5.1	1.4	17.7	6.8	15.0
60	0.8	1.7	-2.0	6.8	-9.8	-2.0	15.8	3.8	13.5

註：溫度差異(%) = (預測值 - 實際值) / 實際值

## 八、結論與建議

### 8.1 結論

透過本研究之進行過程，提出以下數點結論：

1. 本研究藉由少量之耐火試驗，透過公式推導以求得防火塗料熱傳導係數之數值解，於試驗中可見在預測鋼材溫度變化曲線上，近似於實際鋼材溫度變化，可驗證本研究相關公式使用上之可行性。
2. 由四面受火之試驗數據推導三面受火試驗時，因四面受火條件較嚴苛，預測之溫度約高於實際溫度-9.8~15.8%，結果較趨於保守，偏安全之範圍。

### 8.2 建議

經由上述結論，以下提出數點建議：

1. 本研究應用熱傳導公式推導膨脹型防火塗料之熱傳導係數，對於不同之鋼構件用防火材料，同樣也可藉由少量耐火試驗進行公式推導，求取相關之熱傳導係數。
2. 由於本研究之防火塗料熱傳導係數 $\lambda$ 值，為使用公式所推導出之數值解，再加以進行溫度預測，若能透過相關防火塗料試驗掌握實際之熱傳導係數，則更能降低在預測溫度上之誤差。
3. 在火場中鋼梁構件處於熱傳導學上之暫態環境，膨脹型防火塗料本身之熱傳

導係數也處於非線性變化，對於在推導各種斷面因素下之防火塗料使用厚度，仍需透過相關試驗之驗證，此為後續研究可進行之方向。

### 致謝

本研究為國科會計畫案(NSC 94-2218-E-216-001)，特此感謝國科會經費補助與國碳科技股份有限公司之鼎力相助，本研究得以順利完成，在此一併申謝。

### 參考文獻

1. EUROCODE 3, "Design of steel structures---Part 1.2 : General rules -Structural fire design," ( DD ENV 1993-1-2 : 2001 Corrected and reprinted September 2001 ).
2. British Standards Institution , BS 5950-8:2003 Structural use of steelwork in building. Code of practice for fire resistant design , 2003.
3. 林慶元、張大鵬、郭武彥，防火時效用膨脹型塗料之研究，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，2003。
4. 經濟部中央標準檢驗局，中國國家標準CNS 12514 建築物構造部分耐火試驗法，2005。
5. British Standards Institution , BS 476-Fire test on building materials and structures , Part 22: Method for determination of the fire resistance of non-load bearing elements of construction , 1987。
6. 美國火災保險試驗所(Underwriters Laboratories , UL) , UL263 - Fire test of building construction and materials , 美國火災保險試驗所，。
7. Purkiss J.A. , "Developments in the Fire Safety Design of structural steel work" , Journal of Constructional Steel Research vol.11 ,1988。
8. 李國強，鋼梁抗火計算與設計的實用方法，工業建築，P43-46，1994。
9. 黃冠雄、鄭紹材，數值模擬防火塗料之鋼梁耐火性能之研究，第十屆營建管理學術交流論文研討會-D營建材料與品質管制-D02，2006。(研討會發表)
10. 黃冠雄，鋼結構防火塗料評估模式之建立，中華大學營建管理研究所碩士論文，2006。(學生畢業論文引用)

## 計畫成果自評

本計畫在核定的經費與有限的資源，透過採購程序，順利覓得配合的廠商，並在其贊助下，提供四組試驗數據作為學術分析之用，使得今年度之研究得以在展延後順利完成。在計畫成果中較顯著者有以下二點：

- 一、獲得膨脹型防火塗料熱傳導係數之實驗值。由於薄膜塗料在受熱時會膨脹，不似水泥系無機質被覆材料，可以經由熱線法試驗求得，雖然膨脹型防火塗料碳化層在高溫下抗火阻熱之微觀機理仍需繼續研究外，但在本計畫中，已獲得分析值，可應用數值分析，是一項防火工程的突破。
- 二、初步建立塗佈薄膜防火塗料之鋼梁昇溫數值分析模式。雖然本計畫之試驗樣本略顯不足，但是數值分析的預測值，具有高度的再現性，足可以利用部分試驗數據，推估在相同防火時效應用條件下，在不同的鋼梁斷面，評估所需的塗佈厚度，提供防火設計之應用。

其他方面，在研究進行中，對於防火研究人才的訓練與培育，皆能在研究團隊（包含試驗執行人員），不斷經由計畫、執行、檢核與修正回饋的過程中學習。對於國內的防火研究與防火試驗都做到人才培育與經驗訓練。惟本計畫為鋼梁構件，對於鋼柱（受壓構件）仍須繼續投入研究與試驗，方能使國內鋼結構之防火工程獲得更完整的研究資料與設計應用。

### 附錄

黃冠雄、鄭紹材，數值模擬防火塗料之鋼梁耐火性能之研究，第十屆營建管理學術交流論文研討會，中央大學，D02- pp. 1~ 10，2006年7月。（發表之研討會論文，獲營建材料與品質管制領域發表論文優等獎）

# 數值模擬防火塗料之鋼梁耐火性能之研究

黃冠雄<sup>1</sup>、鄭紹材<sup>2</sup>

1 中華大學營建管理研究所碩士生，[m09316005@cc.chu.edu.tw](mailto:m09316005@cc.chu.edu.tw)

2 中華大學營建管理研究所助理教授，[shaotsai@chu.edu.tw](mailto:shaotsai@chu.edu.tw)

## 摘要

鋼結構工程用之鋼鐵材料本身由於耐火性能不佳，對於建築物防火上較為不利，一般鋼材處於溫度達 593°C 之環境時，鋼材本身之降伏強度及抗拉強度約下降至原始設計強度之 50%，遠低於一般設計強度，而無法提供承載能力，往往造成鋼材變形、建築物崩塌等現象產生，進而影響人員生命財產安全。

鋼結構工程之防火方式，皆以隔熱性為首要目標，膨脹型防火被覆塗料因具有施工性之優點，成為普遍使用之鋼構防火材料。

本研究透過 H 型鋼梁構件噴塗膨脹型防火被覆塗料，依照 CNS 12514 建築物構造部分耐火試驗法，進行耐火性能試驗，以部份試驗數據推估分析塗料受熱之重要參數，進而評估應用於數值模擬之可行性

**關鍵詞：**鋼結構、膨脹型防火塗料、數值模擬

## 一、緒論

國內內政部營建署對於鋼結構防火塗料之檢測，主要以國外檢驗單位之測試報告為主，如依據英國 BS 476、美國 UL 263 等經國內相關單位指定之國外機構所檢具之證明文件，由於國內測試實驗之經驗較少，對於鋼構件耐火之研究試驗回饋至測試標準之檢討相形見拙。

基於防火塗料對於鋼結構建築防火性能上之重要性，以及國內對於防火塗料檢測之現況，透過以鋼結構中之鋼梁構件為主要對象，配合膨脹型防火被覆塗料，測試在火災環境中，鋼梁構件之溫度及物理變化，以實例驗證熱傳導公式，做為國內單位在評估使用鋼結構防火塗料耐火

性能時之依據，以提供國內對於鋼結構防火塗料方面設計應用之參考。

## 二、鋼材機械性質

### 2.1 強度性質

鋼材在高溫中應力應變曲線無明顯降伏點，所以各國家規範也有不同的方法取得常溫及高溫下降伏強度之值，英國 BS 5850：Part 8[5]規範是分別以 0.5、1.5、2% 之應變值為標準，求取高溫下鋼的降服強度折減係數，如圖 2-1 所示。

由圖中可得知當溫度為 500°C 左右，鋼材其降伏強度約為室溫時降伏強度之 1/3，當溫度為 600°C 時，其降伏強度約為

室溫時降伏強度之 1/2。

5850、歐洲規範 EUROCODE3[7]、日本建築物綜合防火設計[8]等，各採用之數值如圖 2-2~2-3 所示。

2.2 熱傳導性、比熱

鋼材之熱傳導係數及比熱，英國 BS

折減係數

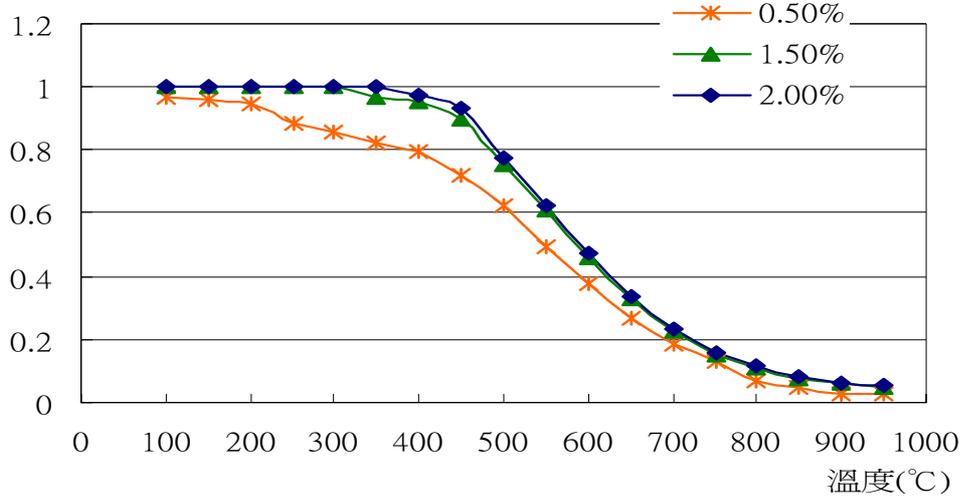


圖 2-1 鋼材在相對應溫度下之降服強度折減係數

熱傳導係數  
(W/m°C)

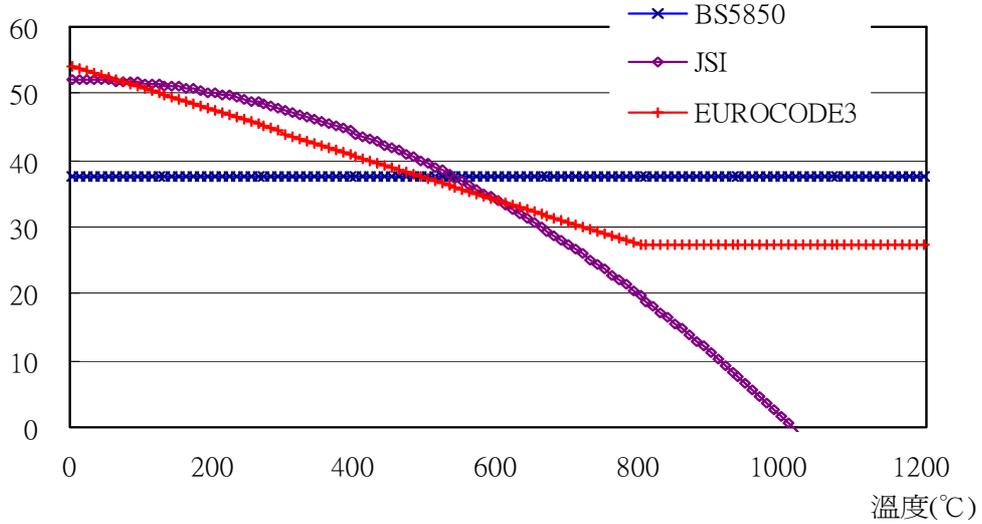


圖 2-2 鋼之熱傳導係數與溫度

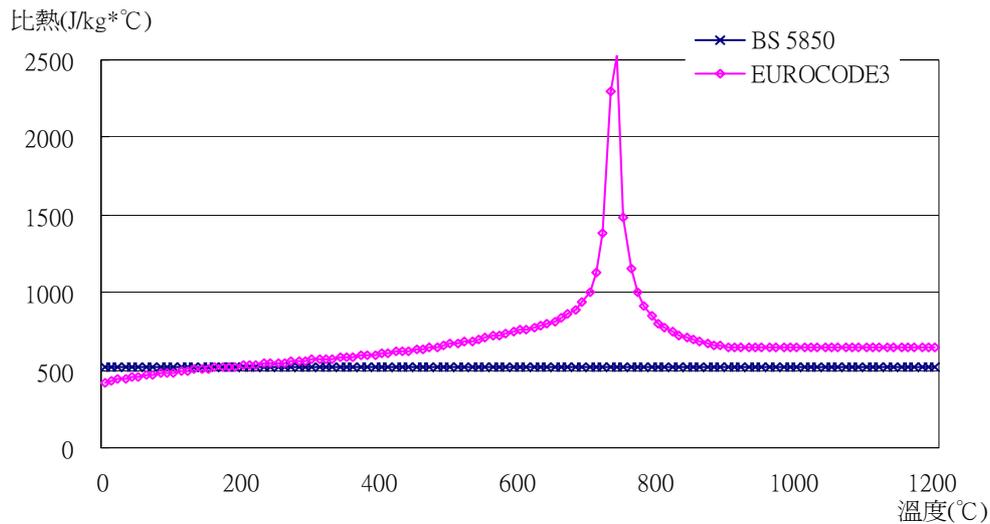


圖 2-3 鋼之比熱與溫度關係圖

### 2.3 防火被覆塗料之特性

防火被覆材料即是在鋼材表面加作一隔熱良好之不燃材料，使之可阻絕外界之高溫，降低熱源傳導速率，使鋼材構件在有效時間內不致達到其強度降低及軟化之溫度。

鋼構用之膨脹型防火塗料的主要作用，大多為受熱形成膨脹碳化層，阻止熱量傳遞。以機理上言，首先防火塗料成份中的酸類受熱放出無機酸，使得多元醇類產生酯化現象，進而造成脫水碳化，反應生成的水蒸氣及一些不燃性氣體使碳層膨脹，最終形成一層多微孔的碳層，達到阻隔火場溫度之傳遞。防火塗料於鋼材上形成隔熱反應之流程，可分成三大階段[2]，如圖 2-4 所示。

### 2.4 各國鋼構件試驗標準

各國對於鋼構件之試驗標準各有所不同規定，以下針對我國、英國、美國及 ISO 標準等之依據規範做說明，我國之鋼構件試驗標準以中國國家標準 CNS12514[3]為主要依據；英國之鋼構件試驗標準以英國國家標準 British Standard (BS)中，BS476-21、BS476-22[6]為試驗之依據；美國之鋼構件試驗標準主要為依據美國保險實驗所(Underwriters Laboratories, UL)，所出版之“UL263 - Fire test of building construction and materials”[9]為主。將美國 UL263、英國 BS 476，與我國之 CNS 12514 試驗標準比較之，如表 2-1 所示。

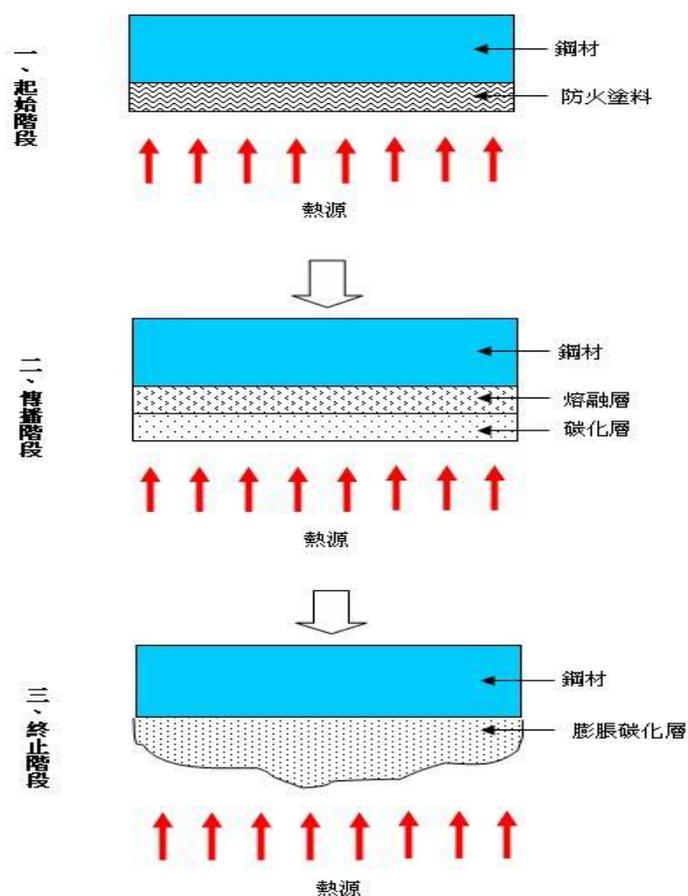


圖 2-4 防火塗料阻燃階段

表 2-1 各國鋼柱構件試驗規範比較

項目	CNS 12514	ISO834	BS476	UL 263	
試體及 加熱條件	試體長度	≥3m	≥3m	≥3m	≥2.7m
	0.5hr	841°C	841°C	841°C	843°C
	1hr	945°C	945°C	945°C	927°C
	2hr	1049°C	1049°C	1049°C	1010°C
測溫點	翼板處	≥3 點	≥3 點	6 點	≥3 點
	腹板處	≥1 點	≥1 點	4 點	≥1 點
	總數	≥16 點	≥16 點	10 點	≥16 點
溫度判定	平均溫度	>500°C	>500°C	>550°C	>538°C
	單點溫度	>550°C	>550°C	>650°C	>649°C

### 三、鋼構件之熱傳導

1. 鋼構件耐火試驗為使用防火塗料之鋼梁構件受火時，鋼構件溫度變化之研究及探討，因此視試體為在一暫態 (unsteady state) 狀況之下進行試驗，將各測溫形式視為一度空間之熱傳導，

即使用一度空間之傅立葉熱傳導方程式進行熱傳導公式之演算。

2. 依據試驗之實際條件，參考大陸學者李國強博士所提之文獻「鋼梁抗火計算與設計的實用方法」 [4] 中指出之鋼梁抗火計算公式，所使用之熱傳導公

式則依據傅立葉方程式及ISO834之試驗用標準升溫曲線計算之，則可將本試驗之基本設定條件列出如下：

- (1)按照國際標準組織(ISO)所推薦的標準升溫曲線採用為試驗升溫標準，等同我國CNS12514中所規定之標準溫度時間曲線，即如下所示：

$$T_c = 345 \cdot \log_{10} \left( \frac{8t}{60} + 1 \right) + 20 \quad (1)$$

式中：

$T_c$ ：平均爐內溫度(°C)

$t$ ：試驗經過時間(秒)

- (2)鋼梁內部的溫度在各暫態都是均勻分佈的。  
 (3)鋼梁為等截面構件，且防火被覆均勻分佈。  
 (4)構件內部溫度：

由本文之假設確定，可建立如下微分方程確定火災下鋼構件的內部溫度：

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{F\lambda}{Vd} \frac{1}{C_s \rho_s} (T_c - T_s) \dots\dots(2)$$

式中：

$T_s$ ：鋼材構件內部溫度(°C)

$C_s$ ：鋼比熱(J/kg°C)

$\rho_s$ ：鋼材的密度(kg/m<sup>3</sup>)

$t$ ：經過時間(s)

$F$ ：單位長度構件受火表面積(m<sup>2</sup>/m)

$V$ ：單位長度構件體積(m<sup>3</sup>/m)

$\lambda$ ：防火塗料之熱傳導係數(W/m°C)

$d$ ：防火塗料之厚度(m)

由初始條件 $T_s(0) = T_c(0) = 20^\circ\text{C}$ 及標準升溫曲線公式，可得解：

$$T_s = e^{-\frac{B}{C_s \rho_s}} \left\{ 20 + \int_0^t \frac{B}{C_s \rho_s} \left[ 20 + 345 \log_{10} \left( \frac{8t}{60} + 1 \right) \right] e^{\frac{B}{C_s \rho_s}} dt \right\} \dots\dots(3)$$

式中：

$$B = \frac{F\lambda}{Vd} \dots\dots(4)$$

由於該式不便於工程應用，因此採用曲線擬合(Curve Fitting)方法，得出如下 $T_s$ 的近似計算公式，如下所示：

$$T_s = (\sqrt{0.04 + 0.7 \cdot 10^{-4} B} - 0.197) \cdot t + 20 \dots\dots(5)$$

由式中可解得

$$B = 1.43 \cdot 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right] \dots\dots(6)$$

以下則針對本研究之基本條件，推導關於熱傳導係數值之計算方程式，其中 $F$ 值為單位長度構件受火表面積(m<sup>2</sup>/m)， $V$ 值為單位長度構件體積(m<sup>3</sup>/m)，當兩值相除，即相當於構件之 $Hp/A$ 值，因此可將上述公式改寫為：

$$B = \frac{F\lambda}{Vd} = 1.43 \cdot 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right] \dots\dots(7)$$

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{1.43 \cdot 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right]}{(Hp/A)} \dots\dots(8)$$

則防火塗料之熱傳導係數( $\lambda$ )可依據推導之公式，簡化為下列解：

$$\lambda = \frac{1.43 \cdot 10^4 \left[ \left( \frac{T_s - 20}{t} + 0.197 \right)^2 - 0.04 \right]}{(Hp/A)} \cdot d \dots\dots(9)$$

其中：

$\lambda$ ：防火塗料之熱傳導係數(W/m°C)。

( $Hp/A$ )：斷面因素(m<sup>-1</sup>)。

$T_s$ ：構件內部溫度(°C)。

$t$ ：經過時間(s)。

$d$ ：防火塗料之厚度(m)。

#### 四、試驗試體

本研究分析之資料為國內某公司於

CNLA 之試驗機構所完成試驗之數據，於鋼梁構件試體表面噴塗鋼結構用膨脹型防火塗料，進行耐火試驗，其中鋼材斷面尺寸依據  $H_p/A$  值為分類；膨脹型防火塗料之厚度，以 1 小時防火時效之塗料厚度

為探討對象，在模擬四面受火，非加載等情況下，鋼梁構件受熱後溫度變化之數據資料及物理現象，以做為防火塗料熱參數之分析，詳細試驗數據如表 4-1、圖 4-1~4-2 所示。

表 4-1 鋼梁構件耐火試驗之試驗變數

試驗變數	變數數據		
鋼材斷面	K1-(120)	K2-(150)	K3-(190)
塗料厚度(T)	$T1_{K1}$	$T1_{K2}$	$T1_{K3}$
防火時效(t)	1 小時		
載重型式	非加載		
受火型式	四面受火		
測溫點及斷面	每斷面 4 測溫點，共 4 斷面		
備註	分析用試驗		驗證用試驗

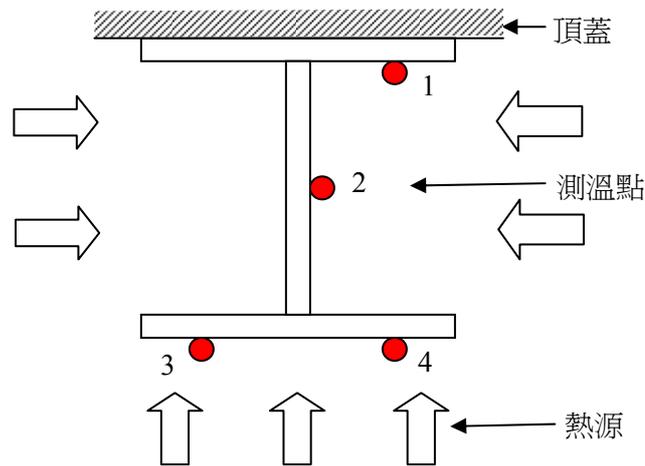


圖 4-1 四面受火鋼梁斷面測溫點配置圖

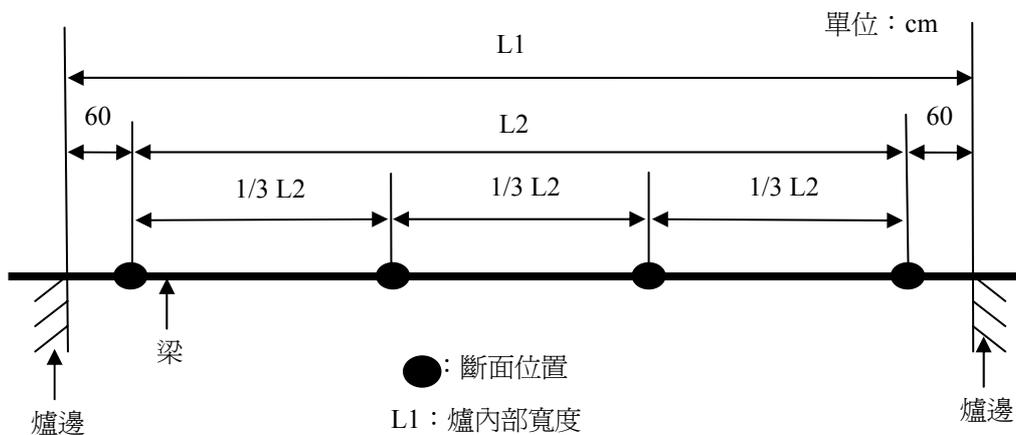


圖 4-2 鋼構件測溫斷面配置圖

### 五、試驗分析與討論

### 5.1 耐火試驗分析

本研究之試驗數據為國內廠商提供，送交通過中華民國實驗室認證體系 CNLA 之試驗機構，依據 CNS12514 進行鋼梁構件耐火試驗。

依據分析試驗中，各試驗之平均溫度如圖 5-1，在試驗開始 10 分鐘內，試體溫度快速上升，皆達到約 250°C，顯示試體受火初期，在防火塗料作用之保護下，各 Hp/A 值之鋼斷面皆維持相同升溫曲線；試驗進行第 30 至 60 分鐘時，各 Hp/A 值鋼斷面間平均溫度之差異已開始顯現，Hp/A 值較高之試體其升溫曲線明顯高於 Hp/A 值較低之試體；而試驗達 60 分鐘終止時，各鋼斷面間之平均溫度為 K1 為 400°C，K2 為 433°C，皆維持在 CNS12514 之各項標準值內，符合 CNS12514 規範要求。

為符合該鋼構件熱傳導公式之基本假設，以及現實之試驗狀況，首先將針對溫度(°C)

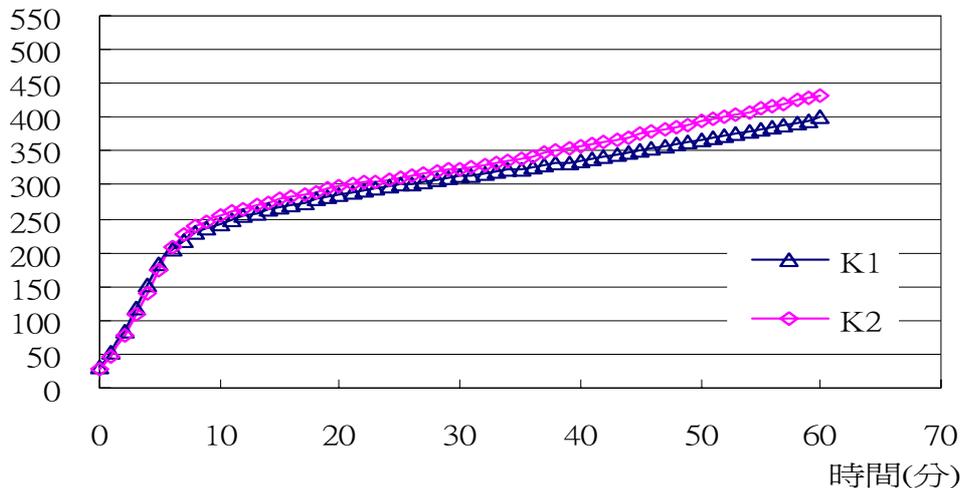


圖 5-1 分析用試體之平均溫度曲線

所使用之膨脹型防火塗料厚度作基本假設，如下所示：

- (1)膨脹型防火塗料之膨脹率：約為原始厚度之100倍。
- (2)膨脹型防火塗料之膨脹過程：約於試驗開始15分鐘內完全膨脹。

因此依據鋼梁構件熱傳導公式及膨脹型防火塗料基本假設，分析K1、K2、等試驗之數據，以判別熱傳導公式之參數，由圖5-2~5-3可見，在試驗開始10分鐘內，K1、K2之 $\lambda$ 值上升至約2.00~3.00 W/m°C之間；試驗開始15分鐘時，膨脹型防火塗料已完全膨脹， $\lambda$ 值皆約由2.50 W/m°C開始下降；試驗開始30分鐘時，K1之 $\lambda$ 值約為1.20 W/m°C，K2之 $\lambda$ 值約為1.10 W/m°C；當試驗達60分鐘時，K1及K2之 $\lambda$ 值平均皆達到約0.67 W/m°C。

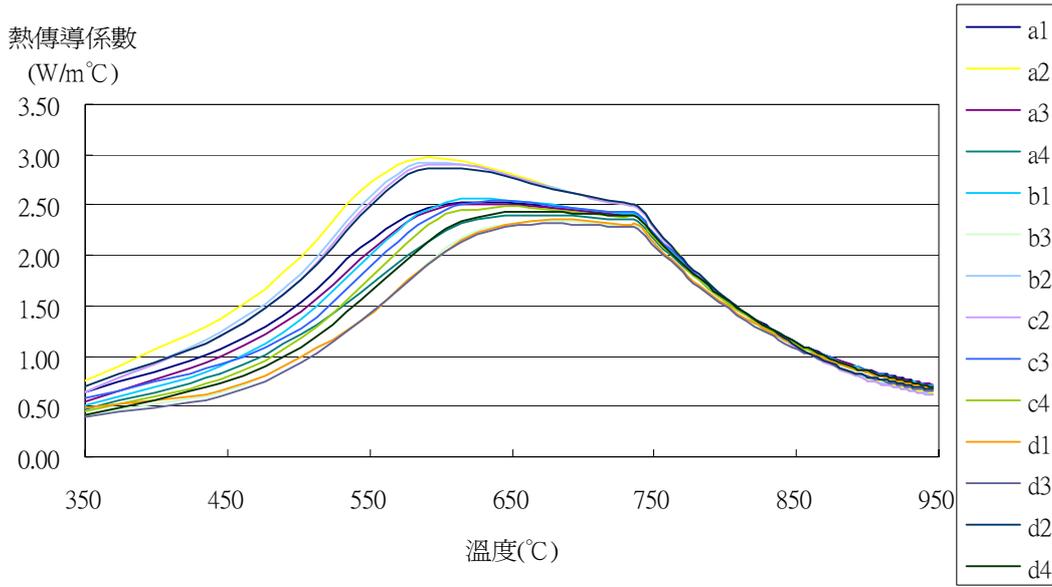


圖5-2 K1試驗防火塗料熱傳導係數與時間溫度關係

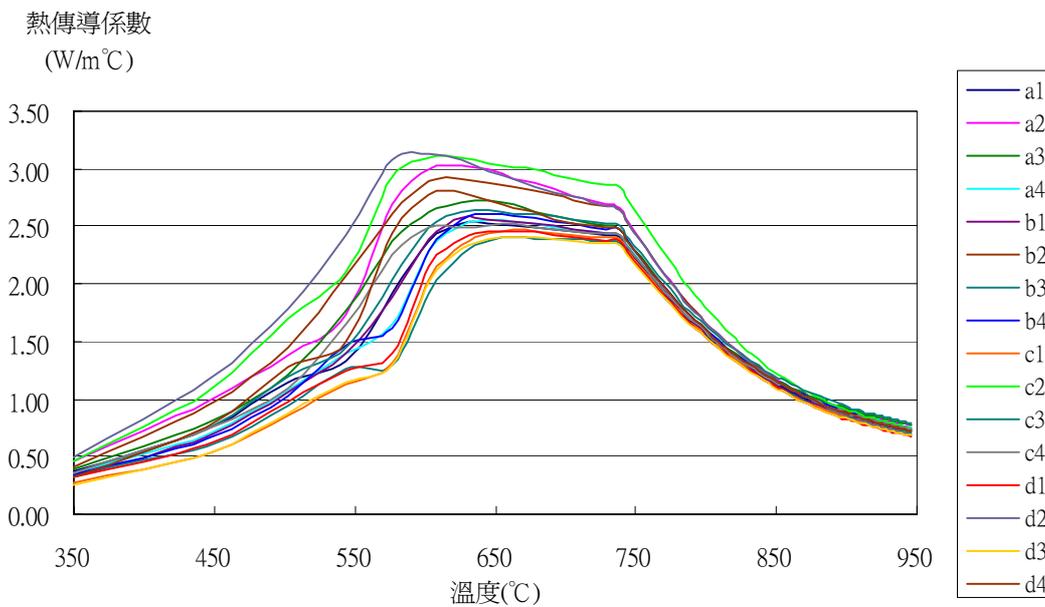


圖5-3 K2試驗防火塗料熱傳導係數與時間溫度關係

### 5.2 鋼材溫度之模擬計算

藉由上述分析試驗之數據，推估防火塗料之 $\lambda$ 值參數，如圖 5-4，以熱傳導公式求得在試驗狀況下，K3 試驗之鋼材上下翼板與腹板間溫度變化曲線，與實際 K3 試驗之數據對照，以驗證該熱傳導公式之可行性

由圖 5-5 可見，在試驗開始 10 分鐘內，預測翼板與腹板之溫度與實際值以相同

速率上升；試驗第 30 分鐘，預測上翼板溫度(T-UFlange)為 391°C，實際上翼板溫度(R- Flange)為 328°C，預測下翼板溫度(T-DFlange)為 389°C，實際上翼板溫度(R-Flange)為 333°C，預測腹板溫度(T-Web)為 396°C，實際腹板溫度(R-Web)為 325°C；當試驗達 60 分鐘時，預測上翼板溫度為 525°C，實際上翼板溫度為 468°C，預測下翼板溫度為 511°C，實際下翼板溫

度為 477°C，預測腹板溫度為 511°C，實際腹板溫度為 457°C。

比較預測溫度與實際溫度後可發現，預測溫度較趨於保守，在預測溫度變化曲

線上，仍相近於實際試驗溫度曲線之變化，即可驗證鋼構件熱傳導公式在使用、參考上之可行性。

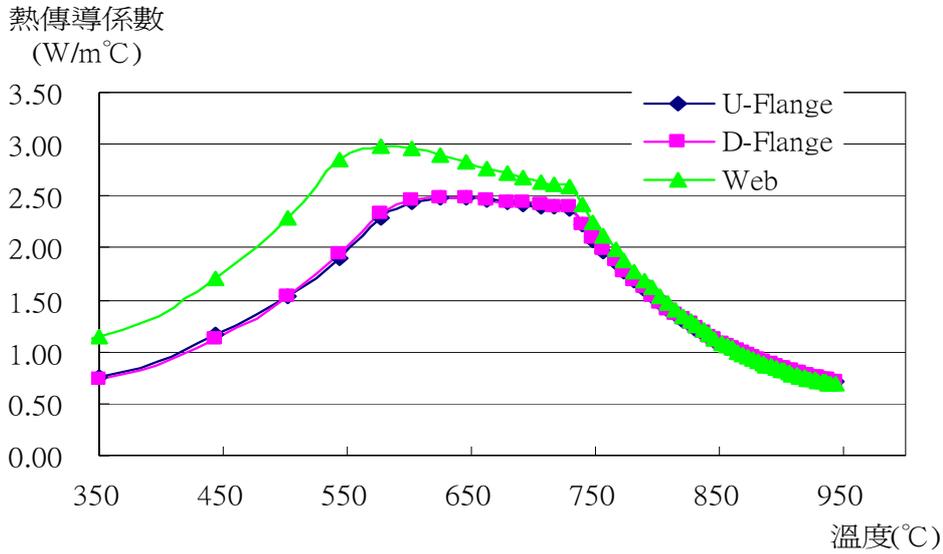


圖5-4 防火塗料熱傳導係數預測

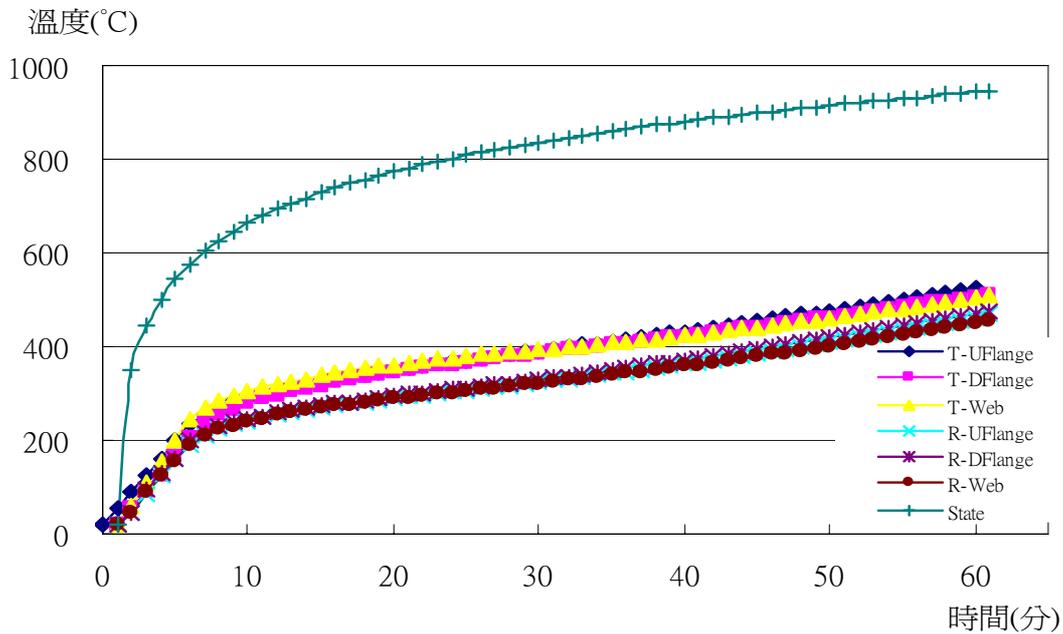


圖5-4 K3試驗預測與實際溫度關係

## 六、結論與結論

### 6.1 結論

透過本研究之進行過程，提出以下數點結論：

1. 目前我國對於鋼結構用防火塗料之檢測，受限於測試設備等因素，多採用經內政部營建署指定之國外機構所測試後，檢具之證明文件為審查依據，對於國內廠商在研發防火塗料上較為

缺乏經濟性、時間性。

2. 透過本研究之鋼梁耐火性能試驗，可發現膨脹型防火塗料在使用之塗料厚度上需謹慎，否則將影響到鋼結構建築物之安全性。
3. 在暫態熱傳導條件、斷面因素及防火塗料厚度等差異之影響下，防火塗料本身之熱傳導係數屬於非線性之變化，而本研究所使用之鋼構件熱傳導公式，經由試驗數據推導之預測溫度較趨於保守，仍可求得相似之鋼構件溫度變化曲線，可見該公式在使用、參考上之可行性。

### 6.2建議

經由上述結論，以下提出數點建議：

1. 藉由本研究所推導之鋼梁構件熱傳導公式，對於國內相關廠商在研發防火塗料，以及國內對於鋼結構防火性能之分析可提供參考、應用。
2. 膨脹型防火塗料之使用厚度尺寸、受火膨脹率等因素，對於保護鋼構件之防火性能相當重要，尤其使用厚度尺寸將會影響到受火膨脹後之隔熱保護層厚度，過薄、過厚也將造成影響，需要特別注意。
3. 在火場中鋼梁構件處於熱傳導學上之暫態環境，膨脹型防火塗料本身之熱傳導係數也處於非線性變化，對於在推導各種斷面因素下之防火塗料使用厚度，仍需透過相關試驗之驗證，此為後續研究可進行之方向。

### 致謝

本研究為國科會計畫案(NSC 94-2218-E-216-001)，特此感謝國碳科技股份有限公司之鼎力相助，讓本研究得以順利進行。

### 參考文獻

1. 李鴻欣、楊國珍，H型鋼柱高溫局部挫屈行為研究，國立高雄第一科技大學營建工程系碩士論文，2004。
2. 林慶元、張大鵬、郭武彥，防火時效用膨脹型塗料之研究，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，2003。
3. 經濟部中央標準檢驗局，中國國家標準CNS 12514 建築物構造部分耐火試驗法，2005。
4. 李國強，鋼梁抗火計算與設計的實用方法，工業建築P43-46，1994。
5. 英國國家標準協會,BSI “Structural Use of Steelwork in Building,” -5850：Part 8, Code of Practice for Fire Resistance Design, 1990.
6. 英國國家標準協會，英國國家標準(British Standard)BS 476-Fire test on building materials and structures，英國國家標準協會，1988。
7. 歐洲標準委員會,EUROCODE 3 “Design of steel structures---Part 1 . 2：General rules Structural fire design,”，2001.
8. Japanese Standards Assoc，日本建築物綜合防火設計JIS G 0567 Japanese Industrial Standards Handbook - Method of high temperature tensile test for steels and heat-resisting alloys，Japanese Standards Assoc，1978
9. 美國火災保險試驗所(Underwriters Laboratories,UL),UL263 - Fire test of building construction and materials，美國火災保險試驗所，。