

# 建築物受火害之安全評估影響因子探討

\*田恬 (TIAN TIAN)

中國科技大學建築系碩士生

陳映汝(YING-JU CHEN)

中國科技大學建築系碩士生

## 摘要

近年來一般建築物或廠房受到意外之火災或人為蓄意縱火的機率越來越大，除了對人員造成傷亡外，對建築物或廠房結構在高溫熱應力影響下，亦產生無可避免的損害。但是結構物受火害作用後，由於火害造成之結構構件內部之破壞型式及力學行為改變等現象，無法由外觀初步檢視正確判斷其受損程度，必須經由各種試驗結果釐清結構物之梁、柱、板、牆及接合材（螺栓、鉸材、鋼筋續接器等）結構強度減損程度。因此受火害後之結構物是否能夠繼續使用或需經修復補強後方可繼續使用，尚須經由火害安全鑑定與評估等程序，方可決定。本文分別對鋼構造及鋼筋混凝土構造物來探討那些因素在評估建築物受火害作用時會影響其安全，以提供評估人員判斷結構安全之依據。

**關鍵詞：**火害建築物，安全評估，結構元件

## Discussion on factors affecting safety assessment of buildings affected by fire damage

### Abstract

In recent years, the likelihood of accidental fires or deliberate arson incidents affecting general buildings or industrial facilities has been increasing. Apart from causing harm to individuals, these incidents unavoidably cause damage to the structural integrity of buildings or facilities due to high-temperature thermal stress. However, after structural fire damage, changes in the internal destruction patterns and mechanical behavior of structural components due to the fire make it difficult to accurately assess the extent of damage through initial visual inspection. Various test results are necessary to clarify the reduction in structural strength of elements such as beams, columns, slabs, walls, and connection materials (bolts, welding materials, rebar splicers, etc.). Therefore, determining whether a fire-damaged structure can continue to be used or requires repair and reinforcement depends on processes such as fire safety appraisal and assessment before a decision can be made. This article separately examines factors that affect the evaluation of building safety under fire damage for both steel structures and reinforced concrete structures, offering evaluators a basis for judging structural safety.

**Keywords :** Fire-damaged buildings, safety assessment, structural elements.

## 一、前言

近年來一般建築物或廠房受到意外之火災或人為蓄意縱火的機率越來越大，除了對人員造成傷亡外，對建築物或廠房結構在高溫熱應力影響下，亦產生無可避免的損害。但是結構物受火害作用後，由於火害造成之結構構件內部之破壞型式及力學行為改變等現象，無法由外觀初步檢視正確判斷其受損程度，必須經由各種試驗結果釐清結構物之梁、柱、板、牆及接合材（螺栓、鉸材、鋼筋續接器等）結構強度減損程度。因此受火害後之結構物是否能夠繼續使用或需經修復補強後方可繼續使用，尚須經由火害安全鑑定與評估等程序，方可決定。本文主要探討那些因素對建築物受火害作用時會影響其安全，以提供評估人員判斷之依據。

## 二、構造物勘查工作項目

1、

混凝土構造物 (RC)	鋼骨構造物 (SC)
構造物受火害分佈範圍勘查	構造物受火害分佈範圍勘查
受損混凝土顏色變化狀況勘查	鋼材變形及撓曲狀況勘查
混凝土裂縫分佈狀況勘查	鋼材顏色變化狀況勘查
混凝土剝落及鋼筋外露狀況勘查	混凝土鋼承板受損狀況勘查
混凝土結構物主鋼筋外露受損狀況勘查	接頭（鉸道、螺栓等）受損狀況勘查
混凝土結構物構件開裂及撓曲狀況勘查	防火被覆受損狀況勘查
構材變形及撓曲狀況勘查	其他附屬構造、設備等受損狀況勘查
其他附屬構造、設備等受損狀況勘查	裝修材受損狀況勘查
裝修材受損狀況勘查	建築物及結構桿件之傾斜率及水準測量
建築物及結構桿件之傾斜率及水準測量	

## 三、火害勘查區域劃分

由於火害現場非常凌亂，構造物受到高溫後可能產生損害，亦有可能僅於表面發現薰黑現象但未侵害至構造物材料內部，因此勘查後，將整個火害現場依火害影響程度簡化成四個區域區域劃分如表一 所示。

表一 火害勘查區域劃分

現象及標示 方式 火害分類	受損狀況說明	分區劃定顏色 標示方式	參考照片

第 I 區 未受火害區	該區未受火害區，該區未受火災波及，故未受任何火災影響	綠色	無
第 II 區 輕微火害區	該區已受火災波及，但未產生爆裂、剝落之程度	橘色	照片①
第 III 區 次要火害區	該區構造已受火害，表面產生爆裂、剝落，但未達崩塌傾倒之程度	黃色	照片②
第 IV 區 主要火災區	該區構造受火害後產生嚴重彎曲、已達崩塌傾倒之程度	紅色	照片③、④

#### 四、結構物受火害安全評估檢測作業

##### 一、混凝土構造物

現場勘查量測項目：

- (1) 裂縫數量與分佈之描繪。(2) 裂縫寬度及深度之量測。(3) 混凝土剝落部位與範圍之量測。(4) 混凝土爆裂部位與範圍之量測。(5) 鋼筋外露情況之量測。(6) 構材撓度之量測。

試驗項目：

- (1) 混凝土之鑽心取樣及試驗。(2) 混凝土燒失量測試。(3) 鋼筋降伏與極限強度試驗、彎曲試驗及伸長量試驗。(4) 鋼筋與混凝土間握裹力試驗。(5) 裂縫深度超音波試驗或敲擊回音法試驗。(6) 混凝土中性化試驗。(7) SA 級鋼筋續接器需進行強度及滑動試驗。(8) 載重試驗。

##### 二、鋼骨構造物

現場勘查量測項目：

- (1) 鋼承板 (Deck) 混凝土爆裂部位與範圍量測。(2) 鋼承板變形及撓度之量測。(3) 防火被覆受損部位與範圍量測。(4) 構材扭曲、傾斜或撓度量測。

試驗項目：若有國家標準得依其標準進行試驗

- (1) 鐸道超音波 (UT) 或磁粉探傷 (MT) 裂縫檢測。(2) 混凝土鑽心試體強度、中性化試驗。(3) 混凝土燒失量試驗。(4) 鋼材油漆影響試驗。(5) 鋼材強度試驗 (拉力、剪力、耐衝擊、硬度等)。(6) 結構鋼材各位置顯微組織金相試驗 (含微觀及巨觀)。(7) 螺栓試驗 (拉力、剪力、耐衝擊、硬度、預力損失等)。(8) 鐸材接合處材料強度試驗。(9) 載重試驗。(10) 敲擊迴音法試驗。

#### 五、建築物受火害安全評估因子項目

##### (一) 混凝土構造物

- 1、混凝土火害後，混凝土結構的強度損失取決於受火溫度。當受火溫度低於 300

°C時，由於水泥水化作用加速，水泥漿體凝結，並促使水泥顆粒緊密結合，強度可能不下降，甚至有時會提升。溫度超過 300°C時，碳酸鈣水化物(C-S-H)分解，混凝土產生裂縫，強度降低；超過 400°C，C-S-H 膠體嚴重破壞，強度迅速降低。溫度達到 580°C，混凝土中的氫氧化鈣 Ca(OH)脫水分解，超過 600°C，微觀結構崩解，導致整體崩潰。

混凝土受火害後之抗壓殘留強度 ( $f_{cr}$ ) 與火害溫度 ( $T$ ) 的關係〔1〕〔沈進發、陳舜田〕：

$$f_{cr} = (1.02 - 0.001T)f'_c \leq f'_c \quad \text{當 } 25^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C}$$

$$f_{cr} = (1.38 - 0.0019T)f'_c \quad \text{當 } 400^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$f_{cr} = (0.66 - 0.0007T)f'_c \geq 0.05f'_c \quad \text{當 } T > 600^\circ\text{C}$$

2、普通鋼筋在 200°C 以下的火害下，強度幾乎不會變化。當火害溫度超過 200°C 時，鋼筋會軟化，其極限強度和降伏強度等特性會隨著溫度升高而急劇降低，可能導致結構破壞。但鋼筋混凝土結構由於混凝土保護層的隔離作用，高溫冷卻後鋼筋的極限強度和降伏強度等特性與未受火害時變化不大。根據研究〔1〕〔陳舜田〕鋼筋之降伏強度與溫度具有下列關係。

$$f_{yr} = f_y \quad \text{當 } T \leq 500^\circ\text{C}$$

$$f_{yr} = 0.01f_y(-0.108T + 154.27) \quad \text{當 } 500^\circ\text{C} < T \leq 750^\circ\text{C}$$

$$f_{yr} = 0.01f_y(0.196T - 73.863) \quad \text{當 } 750^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}$$

$$f_{yr} = 0.83f_y \quad \text{當 } T > 800^\circ\text{C}$$

此處， $f_{yr}$  為受火害後鋼筋之殘留降伏應力； $f_y$  為常溫時鋼筋之降伏應力； $T$  為受火害位置之最高溫度。

### 3、鋼筋與混凝土間之握裹應力

火害後，鋼筋的局部握裹力會衰退。火害時，界面溫度在 200°C 時，最大局部握裹應力約為常溫的 75-85%；400°C 時約為 40-60%；500°C 時僅剩 15-35%；600°C 以上幾乎為零。因此，火害後的鋼筋需要增加錨定長度，以確保足夠的握裹力使鋼筋能夠承受降伏應力並發揮功能。當火害程度超過 400°C 時，ACI 規範建議的錨定長度不足，需要增加鋼筋的錨定長度。同時，在相同荷重下，火害程度增加，鋼筋的滑移量也增加，顯示火害後鋼筋更容易被拔出。

### 4、結構構件

梁、柱及樓板係鋼筋混凝土結構物之主要承力構件，通常鋼筋混凝土構件之耐火性能與混凝土種類、構件形狀、保護層厚度、構件之支承狀態及載重型式有

關。各混凝土構件受火害作用後其受損情況並不相同，說明如下：

(1) 鋼筋混凝土梁受火害時，梁的斷面通常在三面受火的情況下，梁底部受火最嚴重，可能出現沿主筋方向的縱向裂縫，或在支承間出現橫向裂縫。直接受火載荷作用的區域可能導致梁面或側面混凝土剝落、爆裂，以及鋼筋外露等現象。

(2) 鋼筋混凝土柱的受火情況有單面受火（如外牆柱）、雙面受火（如牆角柱）、三面受火（如牆邊柱）和四面受火（如室內柱）。一般情況下，柱的中上部受火害最嚴重。

(3) 鋼筋混凝土樓板樓板通常處於最不利的位置，受火面積最大。在短時間內（約 5~15 分鐘），樓板溫度可以急劇上升至約 600°C。由於樓板底面溫度迅速升高，混凝土的熱慣性大，且保護層較薄，因此樓板的破壞通常比梁和柱更嚴重。顯著的裂縫甚至爆裂可能更容易在樓板表面出現。這些不同構件在火害下的反應和受損程度，需要綜合考慮其受火情況以及結構特點。

## 二、鋼骨構造物

可藉由鋼材油漆影響試驗或混凝土燒失量試驗推估現場之火場溫度分佈。

表一 油漆受不同溫度火害時表面受損現況

溫度 (°C)	油漆受損現況
200 °C	無明顯顏色變化
300 °C	表面顯現暗灰色並有氣泡隆起
400 °C	表面顯現暗黑色並產生龜裂及剝離現象
500 °C	表面顯現淡粉紅色並產生龜裂剝離現象
600 °C	表面顯現淡粉紅色並有龜裂及輕微斑點現象
650 °C	表面顯現灰白色並有龜裂及斑點現象

以上摘自台北市土木技師公會 96 年度鑑定講習會

### 1、鋼材受到高溫火害作用前及作用後之行為比較

鋼結構雖為非燃燒材料，但不耐火。溫度為 400°C 時鋼材之降伏強度降至室溫之一半，但到 600°C 時其強度及剛度幾乎完全喪失，其它之性質如延展性、耐衝擊能力等亦隨溫度而變化。

### 2、鋼材抗拉強度試驗，現場母材受不同的溫度作用下，其抗拉強度及降伏強度變化的起伏基本上沒有很大，約在 10% 以內。以及衝擊 {Charpy V-Notch (CVN)} 試驗

不同鋼材受不同火害溫度下其衝擊試驗值亦有所差異，惟火害後仍需符合原設計需求。案例：於某一受火害區域抽樣選取 6 個試體及 1 個未受火害試體共 7 個做衝擊 {Charpy V-Notch (CVN)} 試驗，在 21°C 情況下衝擊試驗值均大於 27 焦耳 (Joule)，因此符合原設計需求。

### 3、螺栓高強度螺栓抗剪試驗及硬度試驗一般可由螺栓之抗剪強度及螺栓之硬度

值推估抗拉強度以及高強度螺栓摩擦力試驗，隨著溫度升高，螺栓接合的摩擦力會增加。當加熱到 450°C 時，摩擦力減少約 50-60%，而在 650°C 或 850°C 時，摩擦力減少約 15%。在 450°C 以下，抗剪強度與無火害時相似，但超過此溫度，強度下降，不太可靠。此外，450°C 以下的抗剪強度與無火害時差異不大，但超過此溫度時有上升趨勢，導致材料硬化。最終，溫度超過 450°C 時，螺栓的摩擦力大幅減少，預力損失嚴重，因此預力值較不可靠。

4、焊道及熱影響區材料強度試驗及顯微組織金相試驗，受火害作用後需取樣試驗焊道及熱影響區之材料強度隨溫度變化情況，再者亦可取試片作顯微組織金相試驗（含微觀及巨觀），以了解鐸道金相變化。受火害作用後，於一般溫度為 450°C 以上鐸道與母材互相熔融的邊界處微孔缺陷會較多，這些微孔缺陷將造成鋼結構強度及其韌性降低。

5、測量構材受火害後，由於鋼梁材料之受熱產生體積變化，會發生撓度變化，但通常若鋼材受熱未達軟化點，則其撓度變化不大。但若鋼材已達軟化點，則由於鋼材強度之降低，會產生明顯之撓度，甚至塌陷。

6、鋼柱內混凝土黏結狀況透過敲擊回音法，探測鋼柱內部混凝土黏結狀況，針對火害後柱鋼板與原結構混凝土交界處進行抽樣檢測。此方法透過敲擊表面引入應力波（聲波）至結構內部，評估由瑕疵或邊界反射的應力波來評估破損情況。這種方法可用於檢測鋼筋和預壓混凝土結構中的缺陷，如垂直裂縫、斷層、孔隙和蜂窩的深度，同時準確測量混凝土厚度和介面連接的程度。

## 六、結論

1、進行試驗項目如混凝土燒失量和鋼材油漆影響試驗，可推估火害的最高溫度，並了解混凝土和鋼構件的強度變化。

2、火害後，梁因混凝土鈣化而造成斷面受撓後平面不平，導致梁的撓曲勁度大幅減少。

3、火害後混凝土柱的強度和勁度會有所變化，適當補強可以恢復構材的強度和勁度。

4、受火害後，鋼筋與混凝土之握裹力會減少，造成梁柱接頭產生開裂轉動，需要進一步補強。

5、火害後，混凝土構件的抗扭強度和勁度會大幅減少。小型構件的殘餘強度可能低於 ACI 規範僅由鋼筋提供的抗扭強度，需進一步補強。

6、火害後鐸道材料強度及熱影響區顯微組織金相變化、螺栓強度及摩擦力等均有所改變，因此結合材需作進一步補強。

由於火害對混凝土構造及鋼構造可能造成其構件的強度、勁度及韌性產生變化，因此結論若評定危險者，建議立即拆除；若構件殘餘強度、勁度及韌性有所不足時，則建議予以適當補強。

## 七、參考文獻：

1、陳舜田主編，「建築物火害及災後安全評估法」，國立臺灣科技大學營建工程系，科技圖書，1999。

2、沈榮村（陳舜田，沈進發指導），「混凝土火害溫度推測方法之研究」，國立

臺灣科技大學碩士論文，1989。

3、混凝土工程施工規範與解說 (土木 402-88)

4、內政部建築技術規則

5、96 年度台北市土木技師公會 鑑定講習會

6、86 年 8 月內政部建築研究所 『鋼筋混凝土結構物火害後之安全評估程序』

7、86 年 12 月 27 日 國立中興大學土木工程學系主辦之『混凝土結構火害研討會』