

(科技部 GRB 編號)

PG10702-0004

鋼構造建築物防火設計技術參考手冊之研究

受委託者：國立交通大學
研究主持人：陳誠直 教授
協同主持人：楊國珍 教授
研究助理：洪政鴻、莊鎬璟
研究期程：中華民國 107 年 1 月至 107 年 12 月
研究經費：新臺幣 99 萬元

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 107 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

目次	I
表次	III
圖次	V
摘要	VII
第一章 概論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的	1
第三節 研究方法	1
第二章 規範與文獻回顧	3
第一節 建築技術規則	3
第二節 建築物構造防火性能驗證技術手冊	4
第三節 美國 AISC	6
第四節 歐洲規範 EUROCODE 3	11
第五節 日本「鋼構造耐火設計指針」	20
第六節 中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」	22
第七節 耐火試驗法	26
第三章 鋼構造建築物防火設計技術參考手冊架構	29
第四章 結論與建議	31
第一節 結論	31
第二節 建議	31
附錄一 鋼構造建築物防火設計技術參考手冊(草案)	33
附錄二 審查意見與答覆	107
參考書目	123

表次

表 2-1	建築物防火構造應具有之防火時效	3
表 2-2	溫度變化下鋼材之材料性質與折減係數	8
表 2-3	溫度變化下螺栓之材料性質與折減係數	9
表 2-4	溫度變化下鋼材之力學性質與折減係數	15
表 2-5	單、多層和高層建築構件之耐火極限	23
表 2-6	高溫下鋼材之物理參數	24

圖次

圖 1-1	研究流程圖	2
圖 2-1	建築物防火性能驗證流程	4
圖 2-2	構造防火性能驗證程序	5
圖 2-3	火災繼續時間計算流程	6
圖 2-4	歐洲規範 Eurocode 3 設計流程圖	11
圖 2-5	溫度變化下鋼材之應力應變關係	14
圖 2-6	受溫度影響之鋼材熱傳導係數	16
圖 2-7	受溫度影響之鋼材比熱	17
圖 2-8	受溫度影響之鋼材熱伸長量	18
圖 2-9	標準升溫曲線	27

摘要

關鍵詞：鋼構造建築物、防火設計、防火時效

一、研究緣起

鋼構造建築物因易受高溫影響而造成其強度與剛度隨溫度上升而折減，於防火被覆喪失功能時更易遭受破壞，故鋼構造建築物防火性能之研究有其重要性。現行國內建築物之防火時效規定於「建築技術規則」內，條列鋼骨構件之防火時效，規定覆以混凝土、鐵絲網水泥粉刷、磚、石或空心磚之防火時效，或經中央主管建築機關認可具有之防火性能。鋼構造建築物防火性能化設計並未規定於「建築技術規則」，亦未在「鋼結構極限設計法規範及解說」內。國外對於鋼構造建築物防火設計則大多有專屬的規範，詳細規定鋼構造建築物的防火相關設計。因此本研究著重於鋼構造建築物防火性能化設計，草擬「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」(草案)。

二、研究方法與過程

鋼構造建築物的防火設計涵蓋多項，如防火區劃、防火避難設施及消防設備等。研究方法首先是蒐集國外如美國、中國大陸、歐洲與日本等先進國家之鋼構造防火設計技術規範，藉由探討與比較各國規範內容與設計方法，並透過專家學者諮詢匯集各方意見，再彙整結果後完成「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」之草擬。

三、重要發現

各國鋼構造防火設計相關規範皆根據鋼結構或構件於高溫下之承載能力為基礎制定的，規範都以鋼結構或構件於受火時之承載力、耐火時間、臨界溫度的其一作為判別依據，而內容多為基於公式與參數之計算式做為防火設計分析方法，且針對分析方法作解釋及說明，並亦可以程式分析或實驗之方式評估該防火設計是否符合標準。分析為基於規範所給予的鋼材於高溫之材料性質，依其加溫方式、受熱環境、分析之構件或構造的邊界條件等，搭配規定中相應之計算式以計算其防火時效。實驗方式則須依耐火試驗法規規定之方式進行，藉由破壞準則判定其耐火性能，並判斷設計是否達規範要求。因國內鋼構造建築物於常溫之設計大都依據美國 AISC 規範，故防火時效內承載力之驗算主要依據美國 AISC (2016)

附錄之鋼構造防火設計，並參考歐洲、日本及中國大陸之規範內容，再彙整相關研究成果，草擬「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」，增進業界對鋼構造建築物防火設計的瞭解與參考。

四、主要建議事項

1. 建議一

鋼構造建築物整體構造防火性能分析程式之研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

本研究草擬之手冊為參考各國規範基於公式與參數之計算式所建立之防火設計分析方法，惟計算式僅針對構件，整體構造仍需藉由程式分析。然而目前分析程式多採歐洲規範規定分析鋼構造之防火性能，國內外相關研究則多採如 FDS (Fire Dynamics Simulator) 搭配有限元素軟體分析，故發展整體構造之分析程式有其必要性。

2. 建議二

建築物常用防火保護材料熱性質參數建立之研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

鋼骨造梁、柱之耐火性能未滿足防火需求時，需有防火保護。如美國、歐洲、日本與中國大陸等先進國家之鋼構造防火設計規範皆有提供多種常用之防火保護材料相關熱性質參數，以進行受保護構造或構件之升溫分析。故可藉由建立國內常用防火保護材料熱性質參數資料庫，供設計者參考並進行分析受保護鋼結構或構件之升溫。

Abstract

Keywords: Structural steel building, fire resistant design, fire resistance rating.

Structural steel buildings are vulnerable to elevated temperatures because their strength and stiffness will decrease due to the temperature increase. The loss of the fire-protection for the steel will lead to the failure of the steel buildings. Thus, the study of the fire performance of the structural steel buildings is important. The current Taiwan's fire resistance ratings for buildings are regulated in "Building Code and Regulations" which stipulates the fire resistance rating for steel members. The fire resistance ratings are specified for steel members covered with concrete, wire mesh cement, brick, stone or hollow brick, or approve by the central competent authority of construction. Fire performance-based design for steel buildings is missing on either "Building Code and Regulations" or "Limit Design Specification and Commentary for Steel Structures". In foreign countries, fire resistant design for steel buildings is mostly exclusive specifications that amply regulate related design. Therefore, this research is conducted concentrating in fire performance-based design for structural steel buildings and composes "Technical Guidelines of Fire Resistant Design for Structural Steel Buildings (Draft)".

The fire resistance design for structural steel buildings includes various fields, such as fire compartment, fire-prevention refuge facilities, and fire-fighting equipment. This research is conducting to collect the fire design specifications of steel buildings from foreign countries; explore and compare the specifications in various countries; collect comments from academic and practical engineers; and draft "Technical Guidelines of Fire Resistant Design for Structural Steel Buildings (Draft)".

Fire design specifications of various countries are mostly regulated in accordance with the basis of the load-bearing capacity of the structures and members at elevated temperature. One of the load-bearing capacity, fire duration, and critical temperature of the structures and members is used as the criterion to evaluate the fire resistance rating. The analysis method for fire design is mainly based on the calculation from formula and parameters. The detailed explanation for the analysis method is also implemented in the specifications. Whether or not the fire design is satisfactory can be also evaluated by either computer program or experiment. Based on the material properties of the steel at elevated temperature stipulated in the specifications, the fire resistance rating of the

structures and members can be calculated according to their fire scenario, heat input, thermal response, and boundary conditions. In addition, standard fire test can be conducted to estimate the fire resistance rating by evaluating the failure criteria and further to assess the satisfaction. The current Taiwan's design code for structural steel buildings at ambient temperature is mostly according to the US AISC specifications. Therefore, the calculation of load-bearing capacity within the fire resistance rating is referred to the US AISC specifications Appendix 4 "Structural Design for Fire Conditions." Fire design specifications of steel buildings from European countries, Japan and mainland China are also referred to compose "Technical Guidelines of Fire Resistant Design for Structural Steel Buildings (Draft)". This design guideline is intended to enhance the practical engineers' understanding and further usage of the fire resistant design for the structural steel buildings.

According to this research result, the following suggestions are proposed.

For immediate strategy:

The design guidelines drafted in this study is mainly used to calculate the fire resistance rating of the members based on formula and parameters. The fire resistance rating of the entire structures requires a computer program. However, most computer programs analyze the fire performance based on Eurocode. Research work generally use such as FDS (Fire Dynamics Simulator) associated with finite element analysis program. Therefore, the study of the computer program to analyze the fire performance of the entire structural steel buildings is necessary.

While the fire performance of the steel members cannot satisfy the fire resistance rating, the fire-protection is needed. Most fire design specifications of the various countries provide thermal properties of miscellaneous fire-protection, which used to proceed the thermal analysis for the protected structures and members. It is needed to establish the database of the thermal properties of the fire-protection frequently used in Taiwan, which can be used to analyze the temperature increase of the protected structures and members.

第一章 概論

第一節 研究緣起與背景

建築物遭受火災時，因高溫、濃煙、有毒氣體等，將嚴重威脅人員生命與建築結構安全，不少建築物因火災而損壞或倒塌。為了避免造成財產損失及人員傷亡，國內外近年來對於結構耐火性能之研究有日漸增加的趨勢。建築防火是以結構物受火害時，必須在一定時間內能夠持續提供承載能力，期間不會造成結構崩塌，使人員有足夠的逃生時間並且將災害傷亡程度降至最低。

鋼結構由於具有強度高、自重輕、施工速度快等優點，因此常使用於中高樓層建築。但由於鋼結構相對於鋼筋混凝土結構耐火性能較差，使鋼構造建築物遭受火害時，因其強度與剛度會隨溫度上升而折減，於防火被覆喪失功能時造成結構體更易遭受破壞。

現行國內建築物之防火時效規定於建築技術規則內，而國外先進國家於鋼構造之防火性能則大多有專屬的設計規範，詳細規定鋼構造建築物的防火設計。然而我國針對鋼構造建築物防火性能之設計並無明確的設計規範，因此鋼構造建築物防火設計技術參考手冊之研擬值得進行。

第二節 研究目的

本研究目的為草擬「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」，以蒐集國外如美國、歐洲、日本與中國大陸等國家之鋼構造防火設計規範，及藉由探討與比較各國規範的內容，並透過專家學者諮詢匯集意見，最終為彙整並完成鋼構造防火設計技術參考手冊。

第三節 研究方法

鋼構造建築物的防火設計涵蓋多項，如防火區劃、防火避難設施及消防設備等，本研究將針對火害下的構造防火設計。「鋼構造建築物防火設計技術參

考手冊」草擬之詳細研究流程詳如圖 1-1。

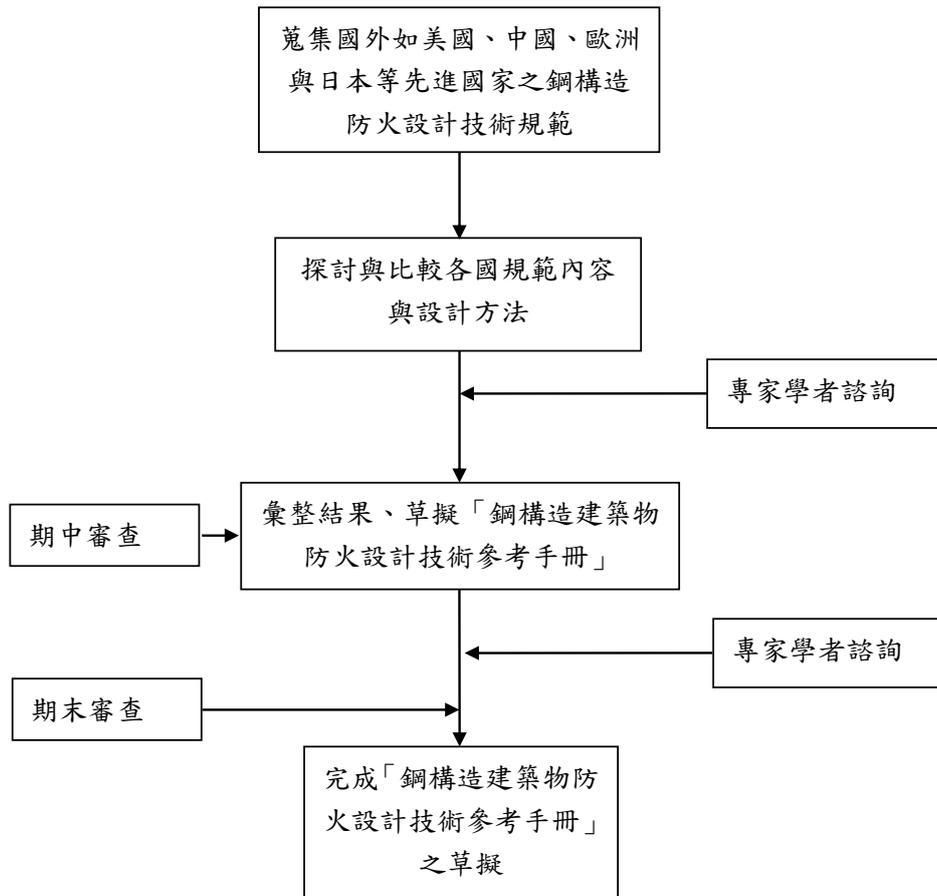


圖 1-1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 規範與文獻回顧

本章節簡述國內外相關規範及文獻，藉由彙整國外如美國、中國大陸、歐洲與日本等先進國家之鋼構造防火設計技術規範，及藉由探討與比較各國規範內容與設計方法，以確定各國鋼構造建築物防火設計規範之專屬規定及架構。國內有「建築技術規則」(2018)與「建築物構造防火性能驗證技術手冊」(2008)。國外重要的鋼構造防火技術相關規範有美國 AISC (2016)、歐規 Eurocode 3 (2005)、日本的「鋼構造耐火設計指針」(日本建築學會 2017)及中國大陸的「建築鋼結構防火技術規範」(住房和城鄉建設部 2017)。

第一節 建築技術規則

「建築技術規則」(2018)於「建築設計施工編第三章：建築物之防火」內，針對防火時效有詳細規定，並條列鋼骨構件之防火時效，規定覆以混凝土、鐵絲網水泥粉刷、磚、石或空心磚之防火時效，或經中央主管建築機關認可具有之防火性能，即可符合國家規定。「建築技術規則」對於建築物構件之防火時效有明確規定。第 70 條規定為防火構造之建築物，主要構造之柱、梁、承重牆壁、樓版及屋頂應具有之防火時效，如表 2-1 所示。第 71 條規定具有三小時以上防火時效之鋼骨造梁、柱，需有混凝土或水泥保護層之厚度，或其他具有同等以上防火性能之保護；第 72 條、第 73 條則規定具有兩小時及一小時以上防火時效鋼骨造梁、柱及樓版之條件。

表 2-1 建築物防火構造應具有之防火時效

主要構造部分	自頂層算起 不超過四層 之各樓層	自頂層算起超過 第四層至第十四層 之各樓層	自頂層算起 第十五層以上 之各樓層
承重牆壁	1 小時	1 小時	2 小時
梁	1 小時	2 小時	3 小時
柱	1 小時	2 小時	3 小時
樓地板	1 小時	2 小時	2 小時
屋頂	0.5 小時		

(資料來源：建築技術規則 2018)

第二節 建築物構造防火性能驗證技術手冊

「建築物構造防火性能驗證技術手冊」(2008)提供木構造、鋼骨構造、鋼筋混凝土構造之梁、柱、牆和樓版等建築物構造之防火性能、驗證方法與說明計算例等，讓設計者完成防火設計後可藉此進行驗證。防火性能設計目的在於防止建築物內延燒擴大及建築物主體損壞；防止建築物內延燒擴大稱為防火區劃性能，而防止建築損壞稱為構造防火性能。防火性能設計須同時考慮防火區劃性能及構造防火性能，如圖 2-1 所示。

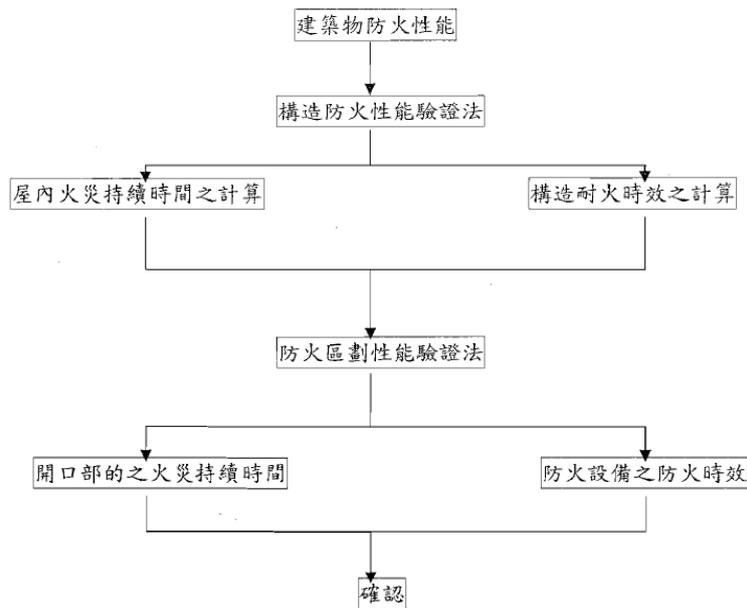


圖 2-1 建築物防火性能驗證流程

(資料來源：建築物構造防火性能驗證技術手冊 2008)

防火區劃性能係針對構造開口部防火設備遮焰能力為驗證對象。防火區劃驗證法是對於發生室內火災時確保防火設備防火時效不小於開口部火災持續時間之驗證方法。地板與牆等區劃材料與梁、柱等構造是相輔相成各有重要功能，區劃材料防止延燒的功能可以防範架構整體同時受高溫而破壞，構架材料若不夠穩固，其支撐的區劃材料易產生過度變形甚至破壞，防止延燒的功能則無法發揮。

構造防火性能係以確認防火建築物主要構造耐燃性(承重能力、隔熱性、遮焰性)之驗證方法。構造防火性能驗證法須先釐清驗證部位，並計算火災繼續時

間及屋內火災構造保有耐火時間，其結果須滿足屋內火災構造保有耐火時間不小於火災繼續時間之驗證要求。驗算程序如圖 2-2 所示。

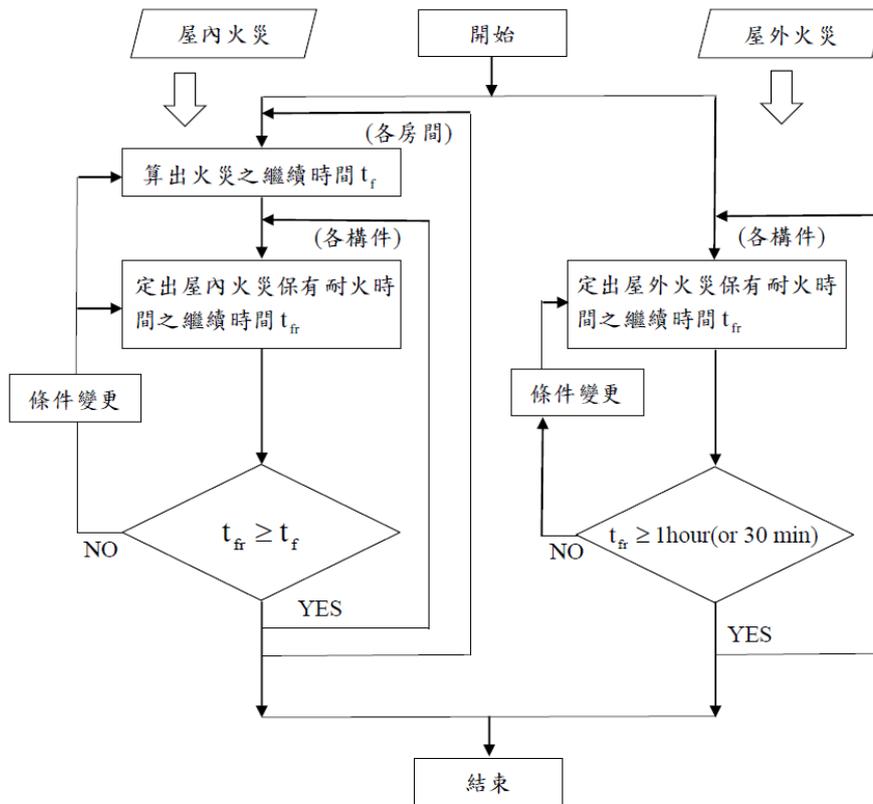


圖 2-2 構造防火性能驗證程序

(資料來源：建築物構造防火性能驗證技術手冊 2008)

火災繼續時間之計算，如圖 2-3 所示。火災繼續時間為室內可燃物燃燒殆盡之時間，時間長短依可燃物總量決定，而溫度上升幅度視房間開口與牆壁構造而定。房間火災繼續時間須以房間作為單位設定火災情境，並依可燃物材料、燃燒因子、開口因子及可燃物表面積決定起火影響的發熱量計算之。

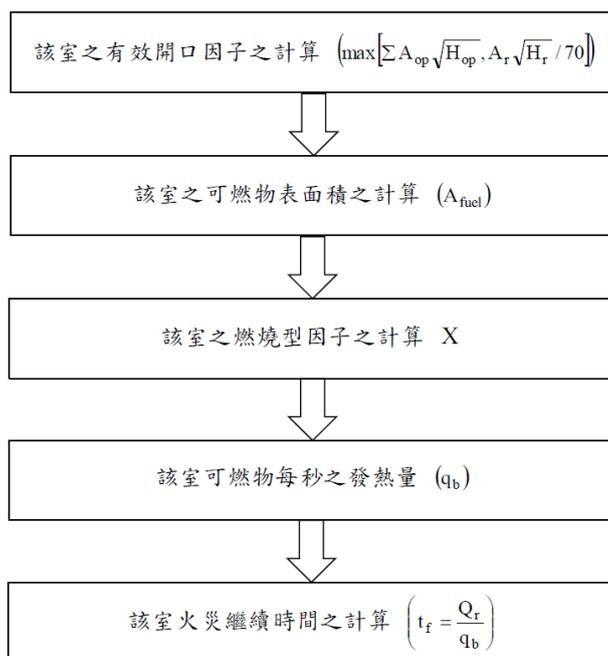


圖 2-3 火災繼續時間計算流程

(資料來源：建築物構造防火性能驗證技術手冊 2008)

屋內火災構造保有耐火時間之計算因構造材料而有所不同。鋼骨構造之梁、柱依有無防火被覆分為四種情形，所有情形皆須考慮火災溫度上升係數、構件溫度上升係數及臨界溫度。若鋼柱無防火被覆，其臨界溫度須依整體與局部挫屈及熱變形溫度上限之最小值決定，構件溫度上升係數以其長度與截面積決定；若鋼梁無防火被覆，其臨界溫度須考慮梁高溫耐力所制定的溫度上限及熱變形溫度上限之最小值決定。若鋼柱或鋼梁皆具防火被覆，其溫度上升的延遲係數與構件溫度上升係數皆須依被覆材料、斷面形狀及大小決定，而臨界溫度之計算方式分別與無防火被覆之情形相同。

第三節 美國 AISC

美國 AISC (American Institute of Steel Construction) 的鋼構造規範 Specification for structural steel Buildings (2016)，於附錄 4 Structural Design for Fire Conditions 制定鋼結構與構件於火害下的設計及評估準則。

壹、一般規定

附錄的架構分為三大項：(1)一般規定；(2)以分析進行防火設計；(3)以實驗進行防火設計。一般規定包含防火設計的性能目標、載重組合與設計載重。分析方法包含設計火源的說明、材料性質以及計算方式。實驗方法則規定防火設計須依據 ASCE/SFPE 的 Standard calculation methods for structural Fire Protection 的第五節進行設計，也包含如何判別構造為束制構造的方法。

達防火性能設計所需目標須滿足三項規定：(1)構造及構件於設計火源 (Design-Basis Fire) 的影響下，須保持其承載能力；(2)進行防火設計時，須評估受載結構之變形是否符合變形標準；(3)在起火點的隔間內，由設計火源造成的力量與變形不能對建築物的區劃造成水平或垂直的破壞。在載重組合部分，此附錄將由設計火源造成的力量與變形納入考量，提出適用於防火性能設計之載重組合與設計載重。而規定結構物的防火設計有兩種方法，(1)以分析 (Structural Design for Fire Conditions by Analysis)；(2)以實驗 (Design by Qualification Testing)。

貳、以分析進行防火設計

分析方法須先決定設計火源，以描述構造或構件的加熱條件。此加熱條件與於假設火災區域內的可燃物質和空間區劃有關。此規範將設計火源分為三種：(1)局部火災 (Localized Fire)；(2)閃燃後區劃火災 (Post-Flashover Compartment Fires)；(3)外部火災 (Exterior Fires)。當火災的熱釋放率不足以造成閃燃時，則假設為局部火災。此火災對結構造成的輻射熱通量由可燃物的成分、空間排列與可燃物佔有的樓地板面積來決定。當火災的熱釋放率足以造成閃燃時，則假設為閃燃後區劃火災。此火災引起的溫度與時間關係曲線應由可燃物荷載、空間通風特性、隔間尺寸以及邊界的熱特性來決定。不論是局部火災或閃燃後區劃火災，其火災持續時間皆由可燃物的總質量除以質量消失的速率來確定。外部火災則為外部構造曝火而導致。於構造內部的火焰經由窗戶或牆開口向外投影至外部構造，熱輻射也隨之傳到外部，此情況稱為外部構造曝火。此附錄規定須利用火焰投影的形狀、長度以及火焰與外部鋼構造間的距離來決定熱通量。

在設定完設計火源之後，須以熱傳分析計算構造或構件的溫度。經由此附錄給予的材料性質，如鋼材及螺栓於溫度變化下之材料性質與折減係數分別列於表

2-2 及表 2-3 所示，進而計算出構造或構件的承載力，且此承載力須大於載重組合的載重設計。此附錄除規定於受火時須保持承載力及符合變形標準外，並規定結構物的設計須能承受局部破壞及維持整體構造的穩定性。

表 2-2 溫度變化下鋼材之材料性質與折減係數

鋼材溫度 °F (°C)	$k_E = E(T)/E = G(T)/G$	$k_p = F_p(T)/F_y$	$k_y = F_y(T)/F_y$	$k_u = F_u(T)/F_y$
68 (20)	1.00	1.00	*	*
200 (93)	1.00	1.00	*	*
400 (200)	0.90	0.80	*	*
600 (320)	0.78	0.58	*	*
750 (400)	0.70	0.42	1.00	1.00
800 (430)	0.67	0.40	0.94	0.94
1000 (540)	0.49	0.29	0.66	0.66
1200 (650)	0.22	0.13	0.35	0.35
1400 (760)	0.11	0.06	0.16	0.16
1600 (870)	0.07	0.04	0.07	0.07
1800 (980)	0.05	0.03	0.04	0.04
2000 (1100)	0.02	0.01	0.02	0.02
2200 (1200)	0.00	0.00	0.00	0.00

註：當鋼材降伏強度超過 450 MPa，表 2-2 之材料性質將不適用於分析中。

*採常溫性質。

E = 常溫之鋼材彈性模數

$E(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材彈性模數

G = 常溫之鋼材剪力模數

$G(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材剪力模數

$F_p(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱比例限度

F_y = 常溫之鋼材標稱降伏強度

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度

$F_u(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱抗拉強度

(資料來源：本研究整理 AISC 2016)

表 2-3 溫度變化下螺栓之材料性質與折減係數

螺栓溫度°F (°C)	$F_m(T)/F_m$ 或 $F_{nv}(T)/F_{nv}$
68 (20)	1.00
200 (93)	0.97
300 (150)	0.95
400 (200)	0.93
600 (320)	0.88
800 (430)	0.71
900 (480)	0.59
1000 (540)	0.42
1200 (650)	0.16
1400 (760)	0.08
1600 (870)	0.04
1800 (980)	0.01
2000 (1100)	0.00
$F_m(T)$ = 溫度為 T 時之螺栓標稱拉應力強度 F_m = 常溫之螺栓標稱拉應力強度 $F_{nv}(T)$ = 溫度為 T 時之螺栓標稱剪應力強度 F_{nv} = 常溫之螺栓標稱剪應力強度	

(資料來源：AISC 2016)

計算方式分為對整體結構的進階分析法(Advanced methods of analysis)與對構件的簡單分析法(Simple methods of analysis)。進階分析法須包含設計火源對於結構所造成的熱反應(thermal response)與力學性質反應(mechanical response)。透過熱反應與力學性質反應的分析，其結果須列出所有可能的極限狀態，例如過大的變形、構件連接處的破壞以及整體或局部的挫屈等，進而判斷是否符合規定。簡單分析法則是利用一維的熱傳導方程式分析設計火源對於構件的熱反應，並根據附錄所提供之材料性質與公式計算出構件的承载力，此承载力須大於載重組合的設計載重。此附錄亦提到當構件溫度小於 200°C 時，構件與其連接點設計強度

的計算不需考量溫度效應；然而載重組合的設計載重仍須考量由高溫造成的力量與變形。

參、以實驗進行防火設計

以實驗驗證防火之構造設計須依據 ASCE/SFPE 的 Standard calculation methods for structural Fire Protection 的第五節，並依 ASTM E119 流程要求進行實驗。此附錄規定對於建築物地板、屋頂的構件及單根梁，當其周圍或支撐結構能抵抗由熱膨脹導致的力量或變形時，其存在著束制條件(restrained condition)。當支撐混凝土版的鋼梁與構架用銲接或栓接固定至可抵抗溫度效應之構件時，應視為束制構造(restrained construction)，若否，則視為非束制構造。

肆、AISC APPENDIX 4 目錄

APPENDIX 4. STRUCTURAL DESIGN FOR FIRE CONDITIONS

4.1. General Provisions

1. Performance Objective
2. Design by Engineering Analysis
3. Design by Qualification Testing
4. Load Combinations and Required Strength

4.2. Structural Design for Fire Conditions by Analysis

1. Design-Basis Fire
 - 1a. Localized Fire
 - 1b. Post-Flashover Compartment Fires
 - 1c. Exterior Fires
 - 1d. Active Fire Protection Systems

4.2.2.a Temperatures in Structural Systems under Fire Conditions

3. Material Strengths at Elevated Temperatures
 - 3a. Thermal Elongation
 - 3b. Mechanical Properties at Elevated Temperatures

- 4. Structural Design Requirements
 - 4a. General Structural Integrity
 - 4b. Strength Requirements and Deformation Limits
 - 4c. Design by Advanced Methods of Analysis
 - 4d. Design by Simple Methods of Analysis
- 4.3. Design by Qualification Testing
 - 1. Qualification Standards
 - 2. Restrained Construction
 - 3. Unrestrained Construction

第四節 歐洲規範 Eurocode 3

歐洲規範 Eurocode 3 分別制定常溫下與火災下之鋼構造規範，Eurocode 3 Part 1-1 (2005a)為提供常溫下構件於極限狀態與使用狀態下之計算規定等，而 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)則規定受火構件設計流程、計算與評估方法，其設計流程如圖 2-4 所示。Eurocode 3 Part 1-2 (2005)之架構可分為：(1)設計基本規定；(2)受火構造設計；(3)材料性質。

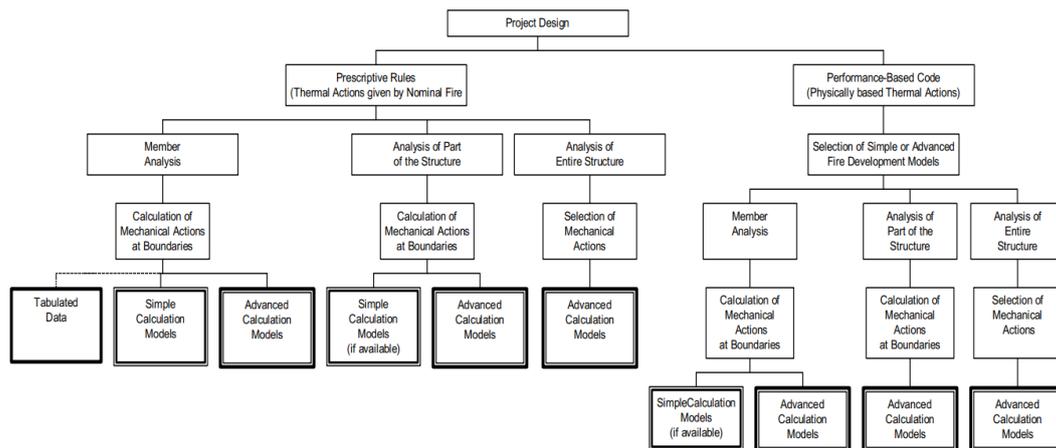


圖 2-4 歐洲規範 Eurocode 3 設計流程圖

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

壹、設計基本規定

Eurocode 3 (2005b)規定，鋼結構或構件須於受火時保持其承载力並符合變形破壞判定標準，其受火形式可分為 Nominal fire exposure 或 Parametric fire exposure。Nominal fire exposure 形式之構造或構件承载力僅需考慮材料本身的防火能力，於曝火後之所需時間內仍維持承载能力。Parametric fire exposure 形式之構造或構件若包含受火期間之衰減階段或於受火後一段時間內能防止坍塌，則表示其具足夠承载能力。

於規範中設計採用之結構模型應反映火災時的預期性能，但規範之計算驗證方法僅適用於標準火災暴露情形，而驗證於標準火災下之防火需求僅須做構件分析即足夠。除以計算設計外，防火設計可以基於防火試驗的結果，或亦可以基於防火試驗與計算結合的結果驗證。分析方式可分為構件分析(Member analysis)、子結構分析(Analysis of part of structure)及整體結構分析(Global structural analysis)。

構件分析(Member analysis)僅考慮構件橫斷面之熱變形，可忽略軸向或平面膨脹之變形，並假設曝火期間構件支承處及末端的邊界條件不變之方式分析。子結構分析(Analysis of part of structure)須考慮其可能的破壞模式、溫度變化下之材料性質及構件剛度變化、熱膨脹及熱變形，並應考慮受火期間子結構潛在的熱膨脹及變形行為；受火期間支承處之受力、構件之內力及子結構邊界處之力矩皆可視為固定大小，而此受力情形則為常溫下結構分析之結果。整體結構分析(Global structural analysis)應考慮受火時可能的破壞模式，溫度變化下之材料性質及構件剛度變化、熱膨脹及熱變形量，並考慮受火期間結構潛在的熱膨脹及變形行為。

貳、受火構造設計

Eurocode 3 (2005b)設計須考慮鋼構造受防火材料保護或受熱屏障遮蔽之有無，而其設計方法有：(1)簡易計算法(simple calculation models)；(2)進階計算法(advanced calculation models)；(3)實驗方式(testing)。而於規範中之說明僅針對簡易計算法及進階計算法。

簡易計算法(simple calculation models)

簡易計算法(simple calculation models)是保守假設單一構件之簡化設計方法，鋼構件須於受火之所需時間內維持承載能力。構件之溫度可假設為均勻分佈，以均溫情形下之溫度變化的材料性質進行驗證；若接頭處較任一構件有更佳之耐火性能，則可將栓接或銲接接頭視為具足夠之耐火性能，接頭處之耐火性能可依 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)附錄 D 確認。

構件斷面依 Eurocode 3 Part 1-1 (2005a)規定分為 Class 1~Class 4 四種等級，依不同斷面等級給予受拉構件、受壓構件、梁構件、同時承受彎矩與軸壓力構件之計算式，用以評估構件之耐火性能。而構件耐火性能之判定除須符合變形破壞標準及維持穩定性外，亦可將鋼材之臨界溫度視為性能失效之標準。鋼材之溫度變化可依構件防火材料保護或受熱屏障遮蔽的有無，亦或為間接受熱之外部鋼構件等情形分為四種受熱情形，並依不同情形分別給予相對應之計算式。

進階計算法(advanced calculation models)

進階計算法(advanced calculation models)是將工程原理以實際方式用於特定應用的設計方法，可提供對受火構造之真實分析。為有效的預期相關結構部件受火行為，其行為應基於物理原則，且應採用適當的方法消除進階計算法未涵蓋的任何潛在破壞模式，如局部挫屈和剪力破壞等。規範表示，此計算法可應用於任何斷面形式之模型，且若材料性質於特定溫度範圍內為已知前提下，可使用任何升溫曲線做為加溫方式。而計算法之模型須包含構件內溫度發展及分佈的熱反應模型(thermal response model)，與構造或構件性能的力學性質反應模型(mechanical response model)。

熱反應模型之計算法須基於公認的原理及熱傳導理論的假設，模型須考慮於 Eurocode 1 Part 1-2 (2002)規定的相關熱作用及溫度變化下之材料性質，傳熱方式可能包含非均勻熱輻射及與相鄰構造或構件間熱對流的影響。而模型若含防火材料，其中之水分含量及水分變動影響可被保守的忽略。

力學性質反應模型須基於公認的結構力學原理及溫度變化下材料性質的假設，並考慮構件受溫差產生之應力應變的影響，模型尚須考慮：(1)材料行為、幾何缺陷和熱作用的綜合作用下的影響；(2) 溫度變化下之材料性質；(3)幾何非線

性效應；(4)含加載和卸載對結構剛度不利之非線性材料特性的影響。為確保結構所有部分間具有相容性，因此極限狀態下之變形須受到限制，故應考慮最終極限狀態，若超過該極限狀態，將會以構造的計算變形量認為該構件因承載力不足而判定達破壞標準。

計算設計法之驗證須考慮：(1)計算模型的準確性須根據相關試驗結果；(2)計算結果可能涉及溫度、變形和耐火時間；(3)為確保模型符合的工程原理，任何參數皆須經過嚴謹的檢查並確認；(4)臨界參數可意指如挫屈長度、元件的尺寸及承載能力。

參、材料性質

Eurocode 3 (2005b)高溫下的鋼材強度與變形性質為每分鐘 2 至 50K 加熱速率的情形下所得之應力應變關係，如圖 2-5 所示。由應力應變曲線所得之鋼材性能指標，包括有效降伏強度 (effective yield strength)、極限強度與彈性模數，於 Eurocode 3 (2005b)規範所建議之折減係數列於表 2-4。

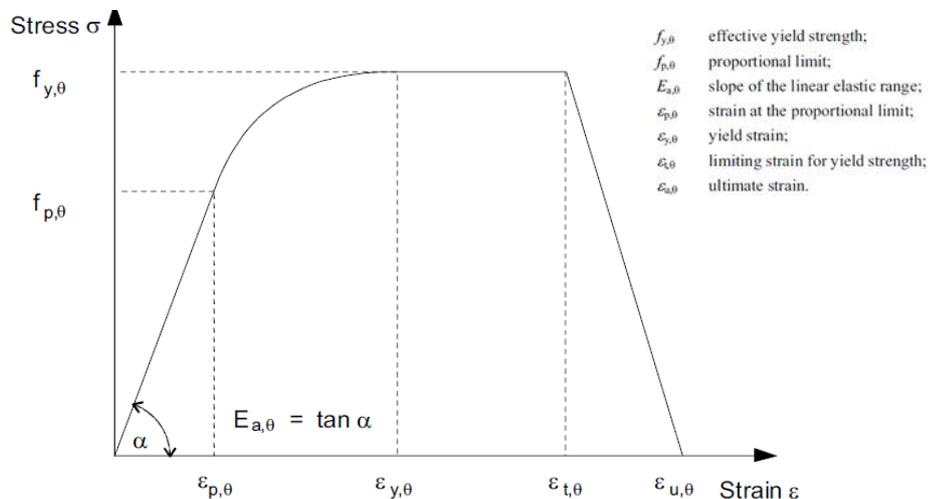


圖 2-5 溫度變化下鋼材之應力應變關係

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

表 2-4 溫度變化下鋼材之力學性質與折減係數

Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
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

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

熱傳導(Thermal conductivity)為物質傳導熱能之性能，而隨溫度變化，其熱傳導也隨之不同，由 Eurocode 3 (2005b)規定之簡易計算鋼材熱傳導係數為 45 W/mK；各溫度階段之熱傳導係數可由公式 (2-1)與公式(2-2)計算，結果如圖 2-6 所示。

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 800^\circ\text{C} \quad (2-1)$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad \text{for } 800^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2-2)$$

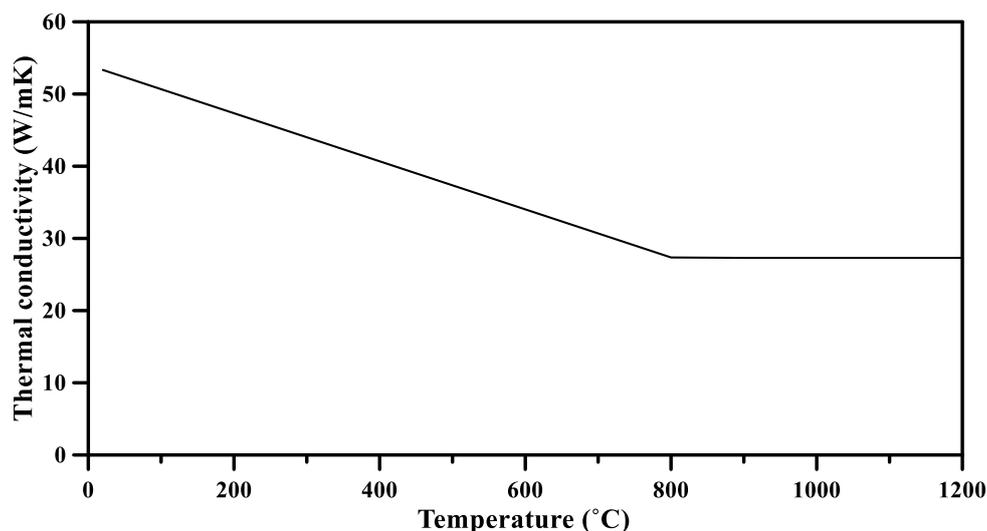


圖 2-6 受溫度影響之鋼材熱傳導係數

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

比熱(Specific heat)的定義為單位物質升高 1°C 所需之熱能，隨溫度變化下鋼材之比熱(J/kgK)如圖 2-7 所示，可知當溫度約 750°C 時鋼材比熱突然升高。

依據 Eurocode 3 (2005b)規定，鋼材之比熱可由公式(2-3)至(2-6)計算。

$$C_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C} \quad (2-3)$$

$$C_a = 666 - \left(\frac{13002}{\theta_a - 738} \right) \quad \text{for } 600^\circ\text{C} < \theta_a \leq 735^\circ\text{C} \quad (2-4)$$

$$C_a = 545 + \left(\frac{17820}{\theta_a - 731} \right) \quad \text{for } 735^\circ\text{C} < \theta_a \leq 900^\circ\text{C} \quad (2-5)$$

$$C_a = 650 \quad \text{for } 900^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2-6)$$

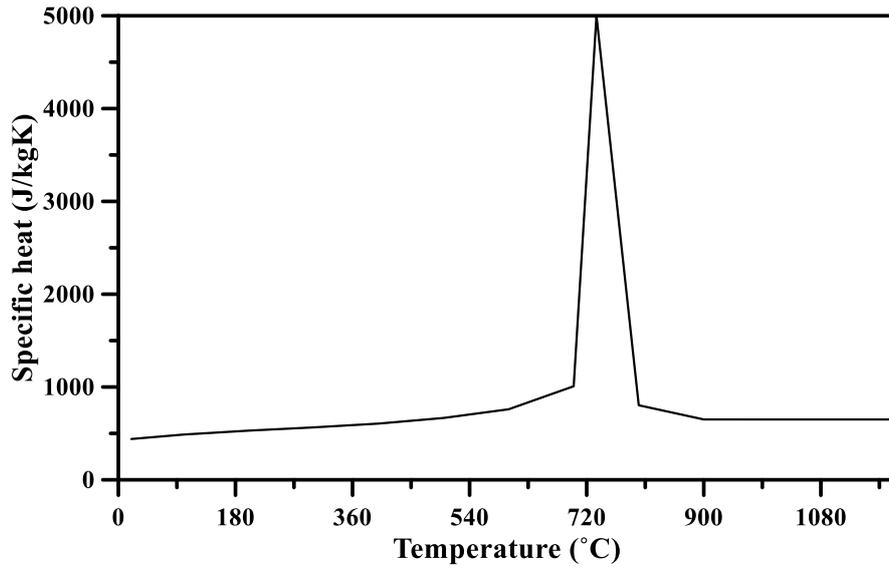


圖 2-7 受溫度影響之鋼材比熱

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

熱膨脹係數為單位溫度變化所導致的體積變化，而 Eurocode 3 (2005b)規定之鋼材熱伸長率為溫度變化時，其長度的變化與鋼材於 20°C 溫度下長度之比值。熱膨脹係數可由熱伸長率求得，計算方式如公式(2-7)至公式(2-10)所示，熱伸長率與溫度之關係如圖 2-8 所示。

$$\Delta l / l = -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 750^\circ\text{C} \quad (2-7)$$

$$\Delta l / l = 11 \times 10^{-3} \quad \text{for } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C} \quad (2-8)$$

$$\Delta l / l = -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta_a \quad \text{for } 860^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2-9)$$

$$\alpha_a = \frac{\Delta l}{l \times \Delta \theta_a} \quad (2-10)$$

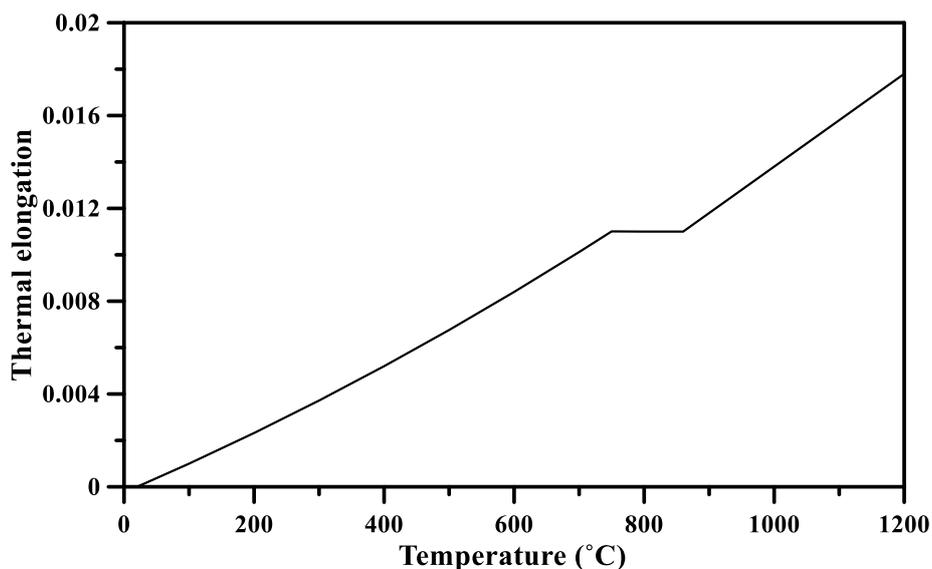


圖 2-8 受溫度影響之鋼材熱伸長量

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

防火材料於溫度變化下之材料性質，則可參考 ENV 13381-1 (2001)、ENV 13381-2 (2002)或 ENV 13381-4 (2002)規定。

肆、Eurocode 3 Part 1-2 目錄

1 General

- 1.1 Scope
- 1.2 Normative references
- 1.3 Assumptions
- 1.4 Distinction between principles and application rules
- 1.5 Terms and definitions
- 1.6 Symbols

2 Basis of design

- 2.1 Requirements
 - 2.1.1 Basic requirements
 - 2.1.2 Nominal fire exposure

2.1.3 Parametric fire exposure

2.2 Actions

2.3 Design values of material properties

2.4 Verification methods

2.4.1 General

2.4.2 Member analysis

2.4.3 Analysis of part of the structure

2.4.4 Global structural analysis

3 Material properties

3.1 General

3.2 Mechanical properties of carbon steels

3.2.1 Strength and deformation properties

3.2.2 Unit mass

3.3 Mechanical properties of stainless steels

3.4 Thermal properties

3.4.1 Carbon steels

3.4.2 Stainless steels

3.4.3 Fire protection materials

4 Structural fire design

4.1 General

4.2 Simple calculation models

4.2.1 General

4.2.2 Classification of cross-sections

4.2.3 Resistance

4.2.4 Critical temperature

4.2.5 Steel temperature development

4.3 Advanced calculation models

4.3.1 General

4.3.2 Thermal response

4.3.3 Mechanical response

4.3.4 Validation of advanced calculation models

第五節 日本「鋼構造耐火設計指針」

日本的「鋼構造耐火設計指針」(2017)，此規範在 Harada (2003)「日本新建築標準的結構抗火設計」介紹了鋼構造抗火基本原則，為承重構件的強度在火災過程中必須大於工作荷載，並給予性能評估，方法是以火災持續時間與構造構件臨界破壞時間計算。火災溫度與時間曲線的計算由總火災荷載、熱釋放率、火災溫度係數、局部火災溫度係數得到。在計算極限狀態的臨界溫度時，需考慮到梁、柱破壞模式，柱需考慮整體挫屈、局部挫屈、過大變形及節點破壞；梁需考慮彎曲破壞、過大變形及節點破壞。由破壞模式選擇極限狀態的臨界溫度計算方式。

日本「鋼構造耐火設計指針」目錄

第一章 總則

1.1 目的

1.2 適用範圍

1.3 基本構成

1.4 留意事項

1.5 用語

第二章 鋼材

2.1 鋼材於高溫之有效降伏強度

2.2 鋼材於高溫之應力應變關係

2.3 高強度螺栓於高溫之拉力強度

第三章 荷重

3.1 荷重的種類

3.2 火災荷重

3.3 工作荷重

第四章 火災性質與構件的加熱條件

4.1 火災性質的選擇

4.2 局部火災

4.3 移動火災

4.4 全區域內火災

4.5 開口噴出火焰

第五章 火災時鋼材之溫度

5.1 鋼材溫度之計算方法

5.2 無防火被覆構件

5.3 防火披覆構件

第六章 構架的崩壞溫度

6.1 概要

6.2 崩壞溫度的計算概要

6.3 構架之基本崩壞溫度

6.4 支撐構架之基本崩壞溫度

6.5 高溫潛變的影響

6.6 柱挫屈之構架崩壞溫度

6.7 柱局部挫屈之構架崩壞溫度

6.8 整體構架之臨界溫度對應力再分配的影響

6.9 梁破壞之構架崩壞溫度

6.10 合成梁於火災時的極限強度

6.11 高強度螺栓之摩阻型接合的構架崩壞溫度

6.12 銲接接合的高溫強度

第七章 耐火設計例

7.1 概要

7.2 建物概要

7.3 基本計畫

7.4 構件荷載及柱軸力

7.5 火災性質

7.6 鋼材溫度

7.7 臨界溫度計算

7.8 構架之結構穩定性

7.9 利用外圍構架之應力再分配計算崩壞溫度

7.10 考慮梁之剪力破壞計算崩壞溫度

7.11 合成梁之崩壞溫度計算

7.12 梁上接頭處高強度螺栓之耐火設計例

第六節 中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」

中國大陸的「建築鋼結構防火技術規範」為於 2017 年制定的住房和城鄉建設部之標準。該規範的編制為依據中國大陸的研究成果與工程實務經驗，參考國外現行鋼構造防火標準與國內外專家的意見。規範內容涵蓋各種材料(鋼材、混凝土、防火塗料與防火板)於高溫下的熱性質與力學性質、鋼結構與組合結構防火驗算與防火保護設計、與防火保護工程的施工與驗收等。該規範制定構造或構件的防火設計為滿足三項要求之一：承載力、耐火時間、臨界溫度，其中的驗算皆是基於公式與參數的計算式(李國強 2001)。

壹、防火設計及要求

鋼結構或構件應依耐火承载力極限狀態進行防火驗算與設計。防火設計及驗算分為耐火極限法、承载力法及臨界溫度法。耐火極限法之要求為鋼結構或構件在設計載重作用下，於火災時其耐火極限(即耐火時間)不得小於設計耐火極限(即防火時效)，其中鋼結構或構件設計耐火極限須依建築耐火等級按表 2.5 決定。承载力法之要求為於設計耐火極限內承载力不得小於最不利載重組合設計值。臨界溫度法之要求為，於設計耐火極限內鋼結構或構件最高溫度不得高於臨界溫度。

當鋼結構或構件承载力降至相等於各種作用組合效應時，或產生足夠塑性鉸造成變形達無法繼續承載時，亦或是整體喪失穩定性時，即構造承載能力達到極限狀態，而當受火至承載能力極限狀態所需時間為構造耐火時間；當構造達到承載能力極限狀態時之溫度為臨界溫度，故防火設計時僅需滿足上述其一方法即可。鋼結構或構件於驗算後若不滿足上述方法之驗算要求，應採取防火保護措施延緩鋼結構或構件升溫並提高耐火極限。

表 2-5 單、多層和高層建築構件之耐火極限

構件類型	建築耐火等級					
	一級	二級	三級		四級	
柱、柱間支撐	3.00	2.50	2.00		0.50	
樓面梁、樓面桁架、樓蓋支撐	2.00	1.50	1.00		0.50	
樓板	1.50	1.00	廠房、倉庫	民用建築	廠房、倉庫	民用建築
			0.75	0.50	0.50	不要求
屋頂承重構件、屋蓋支撐、系桿	1.50	1.00	廠房、倉庫	民用建築	不要求	
			0.50	不要求		
上人平屋面板	1.50	1.00	不要求		不要求	
疏散樓梯	1.50	1.00	廠房、倉庫	民用建築	不要求	
			0.75	0.50		

(資料來源：建築鋼結構防火技術規範 2017)

貳、材料特性

藉由參考如美國、歐洲、日本等國家規範及結合相關研究成果，內容涵蓋各種材料(鋼材、混凝土、防火塗料與防火板)於高溫下的熱性質與力學性質。鋼材高溫之材料性質可依 GB 50017 (2003) 「鋼結構設計規範」之常溫材料性質搭配相關參數及計算式求得，一般鋼材之物理參數、高溫下彈性模數及降伏強度之折減係數如表 2-6 所示。

表 2-6 高溫下鋼材之物理參數

參數名稱	符號	數值	單位
熱膨脹係數	α_s	1.4×10^{-5}	m/(m·°C)
導熱係數	λ_s	45	W/(m·°C)
比熱容	C_s	600	J/(kg·°C)
密度	ρ_s	7850	Kg/m ³

(資料來源：建築鋼結構防火技術規範 2017)

參、鋼結構耐火驗算

鋼結構耐火驗算分別為承載力法與臨界溫度法。

承載力法為依假定防火被覆厚度，以構件內部溫度、載重組合及高溫下鋼材之材料性質等條件驗算其抗火承載力極限狀態是否滿足規範之要求。構件內部溫度須由室內溫度決定，規範提供兩種室內溫度之計算方式：(1)以纖維類物質為主的火災，採 ISO 834-1 (2012)標準升溫曲線公式；(2)以煙類物質為主的火災，須使用規範所提供之公式。高溫下鋼材之材料性質須由構件內部溫度計算求得，而載重組合須依鋼結構或構件最不利情形計算。若驗算結果不滿足設計耐火極限內承載力不得小於最不利載重組合之要求，須重新假定防火被覆厚度重新驗算。

臨界溫度法係以臨界溫度驗算是否滿足規範之要求。臨界溫度須根據構件受力情形計算截面強度荷載比並查表確認，其中構件受力情形包含軸心受拉、軸心受壓、單軸受彎、拉彎及壓彎等。若臨界溫度大於設計耐火極限內之最高溫度則

符合規範要求；若臨界溫度小於設計耐火極限內之最高溫度，則須依規範提供之公式以臨界溫度與防火被覆性質等計算防火被覆厚度。

肆、中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」目錄

- 1 總則
- 2 術語和符號
 - 2.1 術語
 - 2.2 符號
- 3 基本規定
 - 3.1 防火要求
 - 3.2 防火設計
- 4 防火保護措施與構造
 - 4.1 防火保護措施
 - 4.2 防火保護構造
- 5 材料特性
 - 5.1 鋼材
 - 5.2 混凝土
 - 5.3 防火保護材料
- 6 鋼結構的溫度計算
 - 6.1 火災升溫曲線
 - 6.2 鋼構件升溫計算
- 7 鋼結構耐火驗算與防火保護設計
 - 7.1 承載力法
 - 7.2 臨界溫度法
- 8 組合結構耐火驗算與防火保護設計

8.1 鋼管混凝土柱

8.2 壓型鋼板組合樓版

8.3 鋼與混凝土組合梁

9 防火保護工程的施工與驗收

9.1 一般規定

9.2 防火保護材料進場

9.3 防火塗料保護工程

9.4 防火板保護工程

9.5 柔性氈狀材料防火保護工程

9.6 混凝土、砂漿和砌體防火保護工程

9.7 複合防火保護工程

9.8 防火保護分項工程驗收

第七節 耐火試驗法

對於鋼結構或構件，國外學者普遍依照 ASTM E119 (2018)或 ISO 834-1 (2012)規定之方法，進行耐火性能試驗研究。我國則須依照 CNS 12514-1 (2014)「建築物構造構件耐火試驗法-第 1 部：一般要求事項」之規定進行耐火試驗研究。各試驗法簡述如下。

壹、ASTM E119

ASTME119(2018)為建築物構造與材料耐火試驗標準方法，主要規定耐火試驗時之加溫爐溫度、試體尺寸及試體破壞判定標準。加溫爐平均溫度於加熱 5 分鐘須達到 538°C，10 分鐘達到 704°C，30 分鐘達到 843°C，1 小時須達到 927°C，2 小時須達到 1010°C，4 小時須到達 1093°C。試體耐火性能為依試驗類別要求與鋼骨溫度判定構件是否破壞，如鋼材平均溫度超過 538°C 或任一鋼材量測點之溫度超過 649°C，則試體發生破壞。

貳、ISO 834-1

ISO 834-1 (2012)規定耐火性能試驗之設備、標準升溫曲線、測量裝置、試驗步驟以及試驗終止條件等。進行耐火試驗時，初始平均溫度須小於 50°C，加溫爐內溫度須符合標準升溫曲線 $T = 345\log_{10}(8t + 1) + 20$ ，其中 T 為攝氏溫度，t 為時間(分)，如圖 2-9 所示。性能基準之試體承重能力以變形量及變形速率判定。

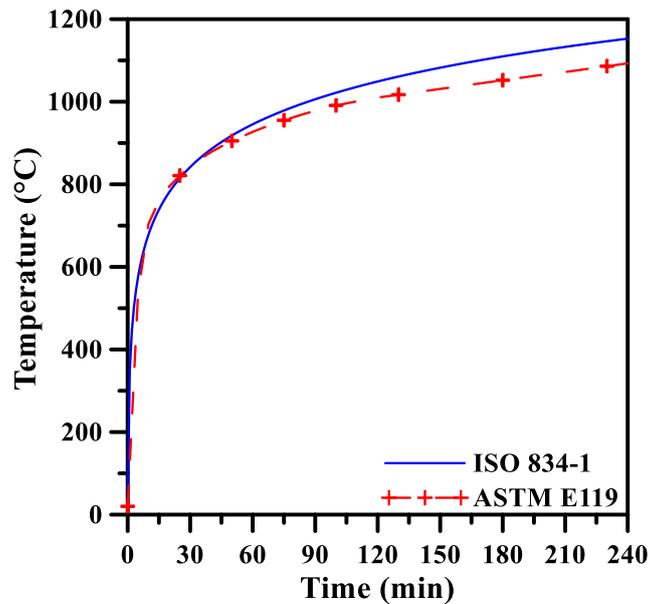


圖 2-9 標準升溫曲線

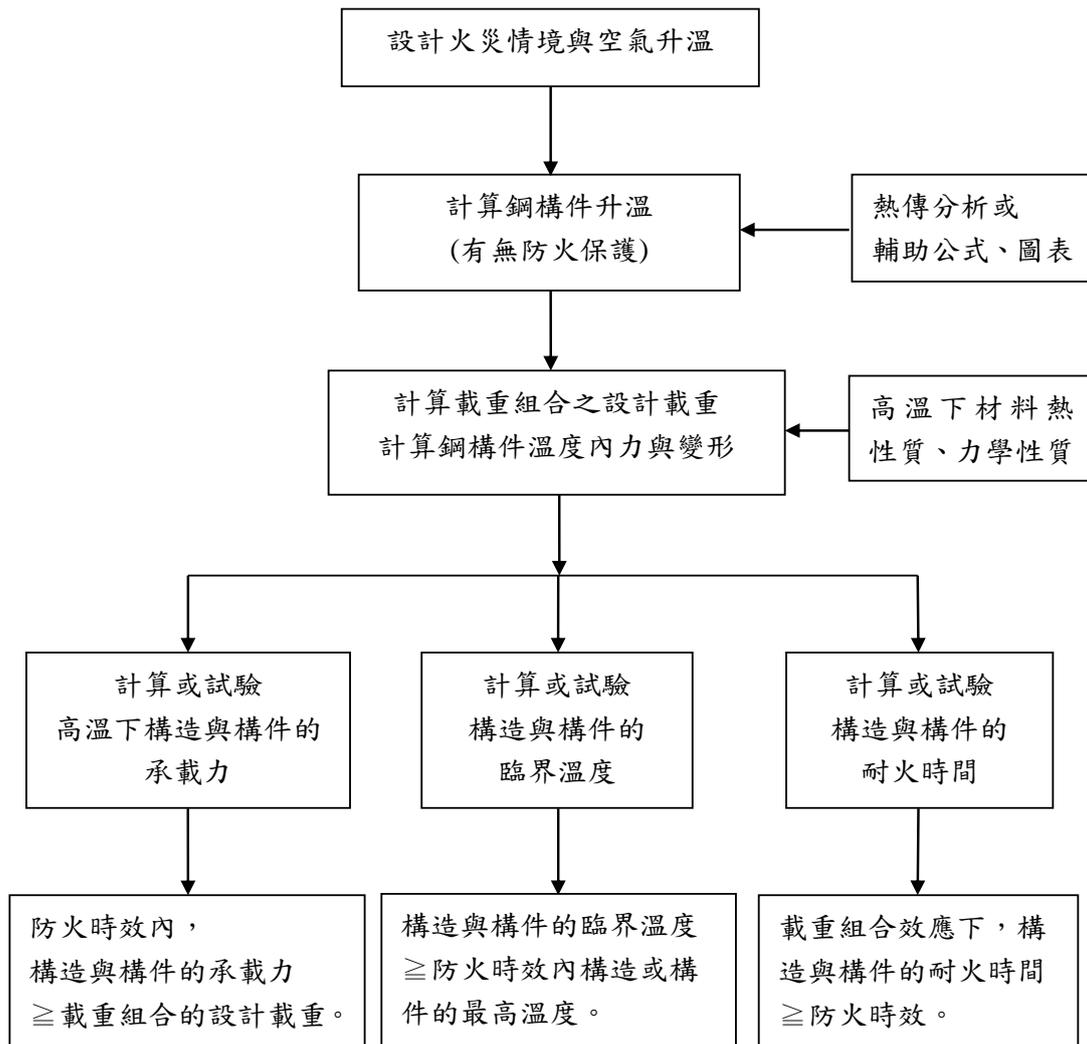
(資料來源：本研究整理)

參、CNS 12514-1 一般要求事項

目前我國標準 CNS 12514-1 (2014)對於試驗設備(包含加熱爐、載重設備、束制及支撐框架)、環境溫度、爐內壓力、量測及破壞準則皆有明確規定。加溫爐溫度依照標準升溫曲線進行加溫；進行耐火試驗時，試體需配置足夠之熱電偶測點以及位移量測測點，試體承重能力以變形量及變形速率判定，與 ISO 834 之規定相同。

第三章 鋼構造建築物防火設計技術參考手冊架構

鋼構造建築物的防火設計涵蓋多項，如防火區劃、防火避難設施及消防設備等。本研究將針對火害下的構造防火設計，「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」之架構如下：



第四章 結論與建議

第一節 結論

本研究主要為依據美國 AISC (2016)鋼構造設計規範附錄之防火設計規定，並參考歐洲、日本及中國大陸之規範內容，再彙整相關研究成果，完成鋼構造建築物防火設計技術參考手冊之草案。總結本研究成果提出以下結論。

1. 各國鋼構造防火設計相關規範顯示，其規定皆根據鋼結構或構件於高溫下之承載能力為基礎的原則制定，並都以鋼結構或構件於受火時之承載力、耐火時間、臨界溫度的其一作為防火性能之判定依據。
2. 鋼結構或構件於受火後除須可持續提供承載力至所需時間外，仍須符合變形破壞判定標準及維持整體之穩定性，若否則亦視為已破壞。
3. 各國規範之內容多為基於公式與參數之計算式做為防火設計分析方法，並表示亦可以程式分析或實驗方式評估該防火設計是否符合標準。各國規範之計算式皆依各別規定之鋼材於溫度變化下之材料性質等參數，依其加溫方式、受熱環境、分析之構件或構造的邊界條件進行防火性能的評估。
4. 本研究草擬之鋼構造建築物防火設計技術參考手冊提供防火性能設計與驗證之方法。防火設計流程圖範例與設計範例有助於設計者瞭解，並增進業界對鋼構造建築物防火設計的瞭解與參考。

第二節 建議

1. 建議一

鋼構造建築物整體構造防火性能分析程式之研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

本研究草擬之手冊為參考各國規範基於公式與參數之計算式所建立之防火設計分析方法，惟計算式僅針對構件，整體構造仍需藉由程式分析。然而目前分析程式多採歐洲規範規定分析鋼構造之防火性能，國內外相關研究則多採如 FDS

(Fire Dynamics Simulator)搭配有限元素軟體分析，故發展整體構造之分析程式有其必要性。

2. 建議二

建築物常用防火保護材料熱性質參數建立之研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

鋼骨造梁、柱之耐火性能未滿足防火需求時，需有防火保護。如美國、歐洲、日本與中國大陸等先進國家之鋼構造防火設計規範皆有提供多種常用之防火保護材料相關熱性質參數，以進行受保護構造或構件之升溫分析。故可藉由建立國內常用防火保護材料熱性質參數資料庫，供設計者參考並進行分析受保護鋼結構或構件之升溫。

附錄一 鋼構造建築物防火設計技術參考手冊(草案)

目錄

第一章 總則.....	35
1.1 適用範圍.....	35
1.2 用語.....	35
1.3 符號.....	37
第二章 鋼材性質.....	43
2.1 鋼材高溫機械性質.....	43
2.2 鋼材熱性質.....	55
2.2.1 熱膨脹.....	55
2.2.2 比熱.....	56
2.2.3 熱傳導.....	57
第三章 防火設計基本規定.....	59
3.1 載重組合與需求強度.....	59
3.2 防火設計要求.....	59
3.2.1 一般規定.....	59
3.2.2 承载力.....	60
3.2.3 耐火時間.....	60
3.2.4 臨界溫度.....	60
第四章 以分析進行防火設計.....	61
4.1 設計火災情境與空氣升溫.....	61
4.2 鋼構件升溫計算.....	63
4.3 鋼構件內力計算.....	66
4.4 鋼結構與構件防火承载力驗算.....	68
4.5 鋼結構與構件耐火時間驗算.....	72
4.6 鋼結構與構件臨界溫度驗算.....	73

第五章 以驗證試驗進行防火設計	75
5.1 驗證試驗標準	75
5.2 承重能力性能基準	75
5.3 鋼材破壞溫度	76
參考文獻	79
附錄一 防火設計流程圖範例	83
附錄二 設計範例	95

第一章 總則

1.1 適用範圍

本手冊適用於鋼構造建築物之防火設計，本手冊僅針對火災下的構造防火設計。除本手冊外，鋼構造建築物之防火設計應符合現行建築技術規則之規定。

解說：

本手冊是以鋼構造建築物耐火性能為基準之防火設計方法。性能基準的設計方法提供設計者可考慮建築物的特性與用途而訂定建築物之耐火性能，於符合現行建築技術規則之規定下，以更多的專業知識促進防火工程的創新與成本的節省。

根據 SFPE (2007)規定，基於性能基準的防火設計之評估流程包含：

1. 確定預期目標，以降低建築物火災時對生命損失、財產成本、運營及環境影響，或對建築物之最大允許條件。允許條件包含：結構穩定性、隔板完整性、構造或構件之最高溫度、火勢與煙霧蔓延程度，及燃燒有害產物之擴散情形。
2. 製定性能標準，即分配建物材料與氣體溫度的閾值(threshold values)、有毒氣體排放、構造之熱反應、火勢蔓延、防火屏障損壞、結構完整性、暴火性質和及環境影響等。
3. 依據受火情形，制定火災情境與空氣升溫。
4. 發展具防火功能之相關設計試驗，及制定符合耐火性能基準之設計程序。
5. 評估並選擇具有效性、可靠性、實用性和符合成本為最終設計。

鋼構造建築物的防火設計涵蓋多項，如防火區劃、防火避難設施及消防設備等，本手冊僅針對火災下的構造防火設計。

1.2 用語

「臨界溫度」(critical temperature)：

鋼結構或構件因高溫達到承載力極限狀態時之溫度。

「耐火時間」(duration of fire resistance)：

依 CNS 14652 (2008)，為在耐火試驗條件下，建築構件或結構從受到火之作用時起，到失去穩定性、遮焰性或阻熱性時止之時間。

「防火區劃」(fire compartment)：

依 CNS 14996 (2006)，為用耐火建築構件，將建築物加以分隔，在一定時間內限制火災於起火區之措施。

「火載量」(fire load)：

依 CNS 14652 (2008)，為在一個空間內所有可燃物品在完全燃燒時之總釋放熱量。

「火載量密度」(fire load density)：

依 CNS 14652 (2008)，為單位樓地板面積之火載量。

「防火性能」(fire performance)：

依 CNS 14996 (2006)，為當物體暴露於火源或熱源時，顯現防火之反應。

「防火性能試驗」(fire performance test)：

依 CNS 14651 (2008)，為材料、構件、構造等在控制之燃燒條件下對熱或火焰反應之測試。

「防火時效」(fire rating)：

依建築技術規則，為建築物主要結構構件、防火設備及防火區劃構造遭受火災時可耐火之時間。依 CNS 14652 (2008) 「建築物防火語彙-防火試驗用語」，為在特定條件下，材料、構件、構造等能持續維持耐火性所經過之時間。

「耐火性」(fire resistance)：

依 CNS 14652 (2008)，為材料、構件、構造等能持續維持遮焰性、穩定性、及阻熱性之耐火性能。

「防火構造」(fire structure)：

具有建築技術規則設計施工編第三章第三節所定防火性能與時效之構造。

「閃燃」(flash-over)：

依 CNS 14996 (2006)，為在一區劃內之可燃物其總表面突然轉變成著火

之狀態。

「熱通量」(heat flux)：

依 CNS 14652 (2008) ，為單位面積、單位時間內釋放、傳遞或吸收之熱能。例如單位為 $\text{cal}/(\text{cm}^2)$ 、 W/m^2 。

「載重比」(load ratio)：

鋼結構或構件於火災時承受之載重與其常溫下的設計強度之比值。

「承重能力」(load-bearing capacity)：

承重構件試體支撐其試驗載重而未超過變形量、變形速率規定值所能承受之載重。

1.3 符號

A = 受火構件截面積

A_r = 由 4.1 節定義之設計火災情境造成的力量

C_b = 撓曲修正係數

D = 靜載重，結構物構件重量及永久附加物重量；參閱第 3.1 節

D = 構件斷面受熱之周長；參閱第 4.2 節，m

E = 常溫之鋼材彈性模數

E_T = 溫度為 $\frac{T_1 + T_2}{2}$ 時鋼材之彈性模數

E_t = 溫度變化下應變硬化之鋼材彈性模數

$E(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材彈性模數

F_{nt} = 常溫之螺栓標稱拉應力強度

F_{nv} = 常溫之螺栓標稱剪應力強度

F_y = 常溫下鋼材標稱降伏強度

$F_{cr}(T)$ = 溫度為 T 時之臨界應力

$F_e(T)$ = 溫度為 T 時之彈性挫屈應力

$F_m(T)$ = 溫度為 T 時之螺栓標稱拉應力強度

$F_{mv}(T)$ = 溫度為 T 時之螺栓標稱剪應力強度

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度

$F_u(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材抗拉強度

I = 受火構件面積慣性矩

J = 扭矩常數

L = 活載重，包括室內人員、傢俱、設備、貯存物品、活動隔間等。

L_c = 構件有效長度

M_{Te} = 溫度造成的彎矩內力

M_{fi} = 常溫之構件彎矩強度

M_n = 常溫之標稱撓曲強度

$M_n(T)$ = 溫度為 T 時之標稱撓曲強度

$M_p(T)$ = 溫度為 T 時之塑性撓曲強度

N_{Te} = 溫度造成的軸向內力

N_f = 常溫方式分析所得之構件軸力

$R_n(T)$ = 溫度為 T 時之標稱強度

$R_{u,fi}$ = 受火時之設計載重

S_B = Stefan-Boltzmann 常數 = 5.67×10^{-8} , $W/m^2 \cdot ^\circ C^4$

S_x = 對強軸之斷面模數

$T_{a,cr}$ = 鋼材之臨界溫度， $^\circ C$

T_F = 火災溫度， $^{\circ}\text{C}$

T_{FK} = 火災溫度， $^{\circ}\text{K}$

$T_{RT} = 20^{\circ}\text{C}$

T_S = 不同曝火時間下之鋼材溫度， $^{\circ}\text{C}$

T_{SK} = 不同曝火時間下之鋼材溫度， $^{\circ}\text{K}$

$T_g(t)$ = 時間為 t 時之空氣平均溫度， $^{\circ}\text{C}$

T_0 = 受火前構件之溫度， $^{\circ}\text{C}$

T_1 = 使降伏強度維持在定值的上限溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；參閱第 2.1 節

T_2 = 鋼材降伏強度為 0 時之溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；參閱第 2.1 節

T_1 、 T_2 = 受火構件兩側或上下翼緣之溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；參閱第 4.3 節

V_n = 常溫下標稱剪力強度

$V_n(T)$ = 溫度 T 時之標稱剪力強度

W = 單位長度之重量(質量)

Z_x = 對強軸之斷面塑性模數

a = 熱傳係數 = $a_c + a_r$ ， $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$

a_c = 對流熱傳導係數

a_r = 輻射熱傳導係數

c = 中性軸至最外受壓纖維之距離

c_p = 防火保護材料之比熱， $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

c_s = 鋼材比熱， $\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$

d_p = 防火保護材料之厚度， m

f = 鋼材常溫之強度設計值

h = 受火構件截面高度

h_o = 上下翼板形心之距離

k_b = 螺栓拉應力強度或剪應力強度之折減係數

k_E = 鋼材彈性模數之折減係數

k_p = 鋼材比例限度之折減係數

k_p = 防火保護材料之熱導率， $W/m \cdot ^\circ C$ ；參閱第 4.2 節

k_u = 鋼材抗拉強度之折減係數

k_w = 鐸道強度折減係數

k_y = 鋼材降伏強度之折減係數

$k(T)$ = 溫度為 T 時鋼材降伏強度之折減係數

l = $20^\circ C$ 時之鋼材長度

n = 無因次指數

q'' = 鋼構件上淨入射熱通量

r = 對斷面挫屈軸之迴轉半徑

$r(T)$ = 下翼板溫度為 T 時之保留因子(retention factor)

t = 加熱時間，min

α_s = 鋼材熱膨脹係數， $1/^\circ C$

γ_R = 鋼構件抗力分項係數

ε_F = 火焰發射率與視野係數

Δl = 溫度變化下之鋼材伸長量

Δt = 時間間隔，s

ϕ = 強度折減係數

ϕR_n = 常溫下之設計強度

$\phi R_n(T)$ = 溫度為 T 時之設計強度

λ_a = 鋼材熱傳導係數，W/mK

μ_0 = 使用程度係數

ρ_p = 防火保護材料之密度，kg/m³

χ_T = 溫度變化下鋼材彈性模數之折減係數

第二章 鋼材性質

2.1 鋼材高溫機械性質

鋼材之機械性質會因溫度改變而隨之改變，使得不同溫度下有不同的應力應變關係，而導致彈性模數及降伏強度發生改變。一般以高溫下性質與常溫下性質的比值作為彈性模數和降伏強度受高溫之影響程度。

1. 彈性模數之折減係數 k_E

$$k_E = \frac{E(T)}{E} \quad (2.1-1)$$

2. 比例限度之折減係數 k_p

$$k_p = \frac{F_p(T)}{F_y} \quad (2.1-2)$$

3. 降伏強度之折減係數 k_y

$$k_y = \frac{F_y(T)}{F_y} \quad (2.1-3)$$

4. 抗拉強度之折減係數 k_u

$$k_u = \frac{F_u(T)}{F_y} \quad (2.1-4)$$

表 2.1-1 高溫下鋼材機械性質的折減係數

鋼材溫度 $^{\circ}\text{C}$	降伏強度 $k_y = F_y(T) / F_y$	比例限度 $k_p = F_p(T) / F_y$	彈性模數 $k_E = E(T) / E$
20	1.0	1.0	1.0
100	1.0	1.0	1.0
200	1.0	0.807	0.9
300	1.0	0.613	0.8
400	1.0	0.42	0.7
500	0.78	0.36	0.6
600	0.47	0.18	0.31
700	0.23	0.075	0.13
800	0.11	0.05	0.09
900	0.06	0.0375	0.0675
1000	0.04	0.025	0.045
1100	0.02	0.0125	0.0225
1200	0.00	0.00	0.00

解說：

表 2.1-1 高溫下鋼材機械性質為 Eurocode 3 (2005)所建議，與 AISC (2016)所列的機械性質一致。

考慮鋼材種類不同，鋼材之機械性質亦可參考日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)、AISC (2016)、中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)之相關規定與國內之研究成果分別如下：

1. 日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)

因日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)所規定之鋼材材料與國內常用之鋼材如 SS400、SN400、SN490、SM490 等相同，故其鋼材之機械性質較適合作為國內鋼構造建築物防火設計的依據。日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)依據鋼材種類參數之建議值及溫度變化下鋼材應力應變之各項因素分別如式(C2.1-1)至式(C2.1-11)、表 C2.1-1 及表 C2.1-2 所示。

國內常用鋼材如 SS400、SN400、SN490、SM490 於溫度變化下之降伏強度計算式如下：

$$F_y(T) = F_y \cdot k(T) \quad (C2.1-1)$$

當 $T_{RT} \leq T \leq T_1$

$$k(T) = 1 \quad (C2.1-2)$$

當 $T_1 < T < T_2$

$$k(T) = 1 - \frac{T_s - T_1}{T_2 - T_1} \quad (C2.1-3)$$

其中，

T_s = 鋼材溫度，°C

T_{RT} = 20°C

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度

F_y = 常溫下鋼材標稱降伏強度

$k(T)$ = 溫度為 T 時鋼材降伏強度之折減係數

T_1 = 使降伏強度維持在定值的上限溫度，°C

T_2 = 鋼材降伏強度為 0 時之溫度，°C

國內常用鋼材 SS400、SN400、SN490、SM490 溫度變化下之應力應變曲線如下：

$$\sigma(\varepsilon) = \max \{ \sigma_1(\varepsilon), \sigma_2(\varepsilon) \} \quad (C2.1-4)$$

$$\sigma_1 = \min \{ E\varepsilon, F_y(T) \} \quad (C2.1-5)$$

$$\sigma_2 = f_1(\varepsilon) + f_2(\varepsilon) \quad (C2.1-6)$$

$$f_1 = \frac{E_0 \varepsilon}{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (C2.1-7)$$

$$f_2 = \frac{E_t \varepsilon}{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2}\right)^2}} \quad (C2.1-8)$$

其中，

$$E_0 = E - E_t \quad (C2.1-9)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{F_u(T)}{E_0} \quad (C2.1-10)$$

$$\varepsilon_2 = 0.05 \quad (C2.1-11)$$

E = 常溫之鋼材彈性模數

E_t = 溫度變化下應變硬化之彈性模數

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度

$F_u(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材抗拉強度

n = 無因次指數

表 C2.1-1 鋼材種類之建議值(鋼構造耐火設計指針，2017)

鋼材種類	SS400	SM490	BCR295
	SN400 BCP235*	SN490 BCP325*	
F_y (N/mm ²)	235**	325**	295
T_1 (°C)	300	250	300
T_2 (°C)	700	700	750
*：日本鋼鐵聯盟產品規定			
**：當板厚超過40mm時,SS400及SN400為215, SM490及SN490為295			
註：1 kgf/cm ² = 0.098 N/mm ²			

表 C2.1-2 定義鋼材高溫下應力應變的各項因素(鋼構造耐火設計指針，2017)

鋼材種類	SS400 SN400 BCP325	SM490 SN490 BCP325	BCR295
E (N/mm ²)	$(1-10^{-6}T^2) \times 205000$	$(1-10^{-6}T^2) \times 205000$	$(1-10^{-6}T^2) \times 205000$
E_t (N/mm ²)	(0°C, 4500 N/mm ²) (300, 5200) (600, 700) (1000, 0)	(0°C, 4500 N/mm ²) (250, 4500) (500, 600) (1000, 0)	(0°C, 3000 N/mm ²) (300, 3000) (500, 200) (1000, 500)
$F_y(T)$ (N/mm ²)	$T \leq 500^\circ\text{C}$ $(1-4 \times 10^{-6}T^2) \times 235$ $T > 500^\circ\text{C} : 0$	$T \leq 500^\circ\text{C}$ $(1-4 \times 10^{-6}T^2) \times 325$ $T > 500^\circ\text{C} : 0$	0
$F_u(T)$ (N/mm ²)	(0°C, 190 N/mm ²) (300, 160) (570, 90) (750, 0)	(0°C, 270 N/mm ²) (270, 270) (550, 110) (700, 0)	(0°C, 265 N/mm ²) (300, 270) (570, 113) (750, 0)
n	1.5	1.5	3.0
註：1 kgf/cm ² = 0.098 N/mm ²			

2. AISC (2016)

表 C2.1-3 所示為 AISC (2016) 高溫下鋼材機械性質折減係數。

表 C2.1-3 AISC (2016) 高溫下鋼材之機械性質折減係數

鋼材溫度 °F (°C)	$k_E = E(T) / E$ $= G(T) / G$	$k_p = F_p(T) / F_y$	$k_y = F_y(T) / F_y$	$k_u = F_u(T) / F_y$
68 (20)	1.00	1.00	*	*
200 (93)	1.00	1.00	*	*
400 (200)	0.90	0.80	*	*
600 (320)	0.78	0.58	*	*
750 (400)	0.70	0.42	1.00	1.00
800 (430)	0.67	0.40	0.94	0.94
1000 (540)	0.49	0.29	0.66	0.66
1200 (650)	0.22	0.13	0.35	0.35
1400 (760)	0.11	0.06	0.16	0.16
1600 (870)	0.07	0.04	0.07	0.07
1800 (980)	0.05	0.03	0.04	0.04
2000 (1100)	0.02	0.01	0.02	0.02
2200 (1200)	0.00	0.00	0.00	0.00

附註：表 C2.1-3 之機械性質將不適用於降伏強度超過 450 MPa 之鋼材。
* 採用常溫的機械性質。

表 C2.1-4 所示為 AISC (2016) 高溫下螺栓機械性質折減係數。

表 C2.1-4 AISC (2016) 高溫下螺栓之機械性質折減係數

螺栓溫度°F (°C)	$F_{nt}(T)/F_{nt}$ 或 $F_{nv}(T)/F_{nv}$
68 (20)	1.00
200 (93)	0.97
300 (150)	0.95
400 (200)	0.93
600 (320)	0.88
800 (430)	0.71
900 (480)	0.59
1000 (540)	0.42
1200 (650)	0.16
1400 (760)	0.08
1600 (870)	0.04
1800 (980)	0.01
2000 (1100)	0.00

3. Eurocode 3 (2005b)

表 C2.1-5 所示為 Eurocode 3 (2005b) 高溫下螺栓及鉸道之機械性質折減係數。

表 C2.1-5 Eurocode 3 (2005b) 高溫下螺栓及鉸道之機械性質折減係數

溫度°C	螺栓拉應力強度或剪應力強度折減係數 k_b	鉸道強度折減係數 k_w
20	1.000	1.000
100	0.968	1.000
150	0.952	1.000
200	0.935	1.000
300	0.903	1.000
400	0.775	0.876
500	0.550	0.627
600	0.220	0.378
700	0.100	0.130
800	0.067	0.074
900	0.033	0.018
1000	0.000	0.000

4. 中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)

中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)規定之鋼材各溫度有效降伏強度可由式(C2.1-12)至式(C2.1-16)計算：

$$F_y(T) = k(T)F_y \quad (\text{C2.1-12})$$

當 $20^\circ\text{C} \leq T_s < 300^\circ\text{C}$

$$k(T) = 1 \quad (\text{C2.1-13})$$

當 $300^\circ\text{C} \leq T_s < 800^\circ\text{C}$

$$k(T) = 1.24 \times 10^{-8} T_s^3 - 2.096 \times 10^{-5} T_s^2 + 9.228 \times 10^{-3} T_s - 0.2168 \quad (\text{C2.1-14})$$

當 $800^\circ\text{C} \leq T_s < 1000^\circ\text{C}$

$$k(T) = 0.5 - T_s / 2000 \quad (\text{C2.1-15})$$

$$F_y = \gamma_R f \quad (\text{C2.1-16})$$

其中，

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度

F_y = 常溫下鋼材標稱降伏強度 常溫下鋼材標稱降伏強度

f = 鋼材常溫之強度設計值 鋼材常溫之強度設計值

γ_R = 鋼構件抗力分項係數， $\gamma_R = 1.1$

$k(T)$ = 溫度為 T 時鋼材降伏強度之折減係數

鋼材溫度變化下之彈性模數可由式(C2.1-17)至式(C2.1-19)計算：

$$E(T) = \chi_T E \quad (\text{C2.1-17})$$

$$\chi_T = \frac{7T_s - 4780}{6T_s - 4760} \quad (\text{C2.1-18})$$

$$\chi_T = \frac{1000 - T_s}{6T_s - 2800} \quad (\text{C2.1-19})$$

其中，

T_s = 鋼材溫度， $^\circ\text{C}$

$E(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材彈性模數

E = 常溫之鋼材彈性模數

χ_T = 溫度變化下鋼材彈性模數之折減係數

5. 國內研究成果

國內對於鋼材於高溫環境下材料性質之相關研究包含莊有清(2004)及 Chung 等人(2010)之研究成果。莊有清(2004)及 Chung 等人(2010)分別以我國一般常用鋼材 A572 Grade 50、SN490C 及 SN490B 進行各溫度下的拉伸試驗，Chung 等人(2010)量測得於溫度變化下鋼材 SN490B 機械性質如圖(C2.1-1)所示；鋼材 A572 Gr.50、SN490C 及 SN490B 降伏強度、抗拉強度及彈性模數之折減係數如表 C2.1-6 至表 C2.1-8 所示。

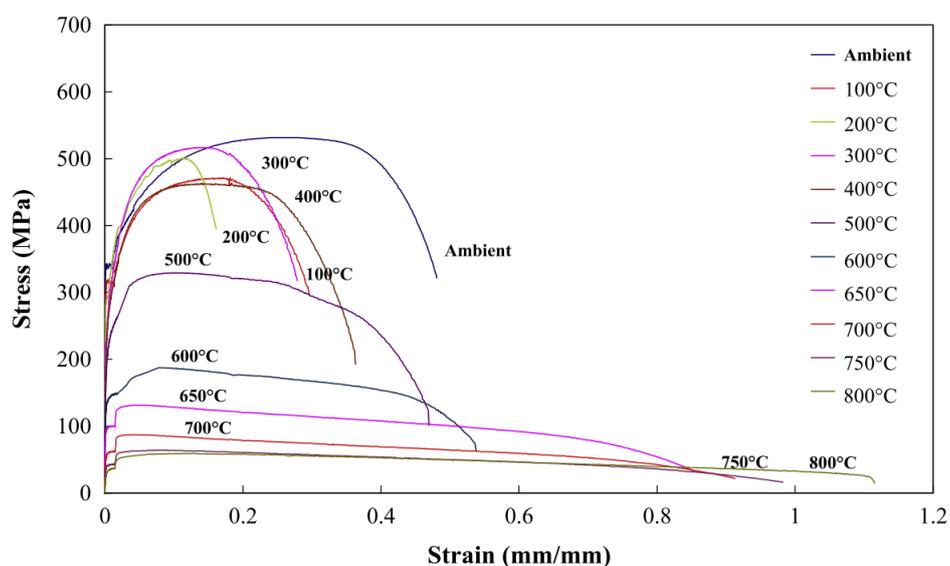


圖 C2.1-1 溫度變化下鋼材 SN490B 應力應變曲線圖(Chung 等人，2010)

表 C2.1-6 溫度變化下鋼材 A572 Gr.50 之機械性質與折減係數(莊有清，2004)

溫度(°C)	$F_y(T)/F_y$	$F_u(T)/F_y$	$E(T)/E$
25	1.000	1.000	1.000
200	0.956	1.000	0.916
300	0.772	1.000	0.824
400	0.696	1.000	0.853
500	0.631	0.948	0.675
600	0.389	0.567	0.575
700	0.201	0.281	0.400

表 C2.1-7 溫度變化下鋼材 SN490C 之機械性質與折減係數(莊有清，2004)

溫度(°C)	$F_y(T)/F_y$	$F_u(T)/F_y$	$E(T)/E$
26	1.000	1.000	1.000
100	0.917	1.000	0.973
200	0.816	1.000	0.899
300	0.693	1.000	0.908
400	0.656	1.000	0.882
500	0.584	0.952	0.761
600	0.421	0.576	0.573
700	0.224	0.277	0.421

表 C2.1-8 溫度變化下鋼材 SN490B 之機械性質與折減係數(Chung 等人，2010)

溫度(°C)	$F_y(T) / F_y$	$F_u(T) / F_y$	$E(T) / E$
20	1.00	1.00	1.00
100	0.92	0.89	0.89
200	0.84	0.94	0.81
300	0.72	0.97	0.77
400	0.67	0.87	0.78
500	0.58	0.62	0.58
600	0.39	0.35	0.35
700	0.17	0.16	0.24
800	0.09	0.11	0.05

AISC (2016)、Eurocode3 (2005b)、日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)及中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)建議之降伏強度及彈性模數折減係數比較分別如圖(C2.1-2)及圖(C2.1-3)所示。

降伏強度方面，AISC (2016)、Eurocode 3 (2005b)及中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)折減幅度相近，於 400°C後逐漸衰減；日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)因建議之有效降伏強度為高溫下崩壞的強度指標而與其他國家規定有所差異。

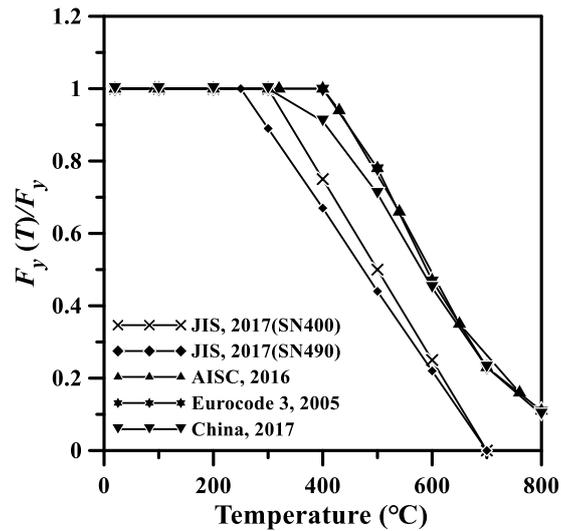


圖 C2.1-2 溫度變化下鋼材降伏強度折減係數之比較

彈性模數方面，AISC (2016)與 Eurocode 3 (2005b)曲線趨勢相同，中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)則較低；而日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)與其他規範差異較大，因於計算彈性模數時，將非線性線段之影響考慮在內，使其預估值高於其他規範值。

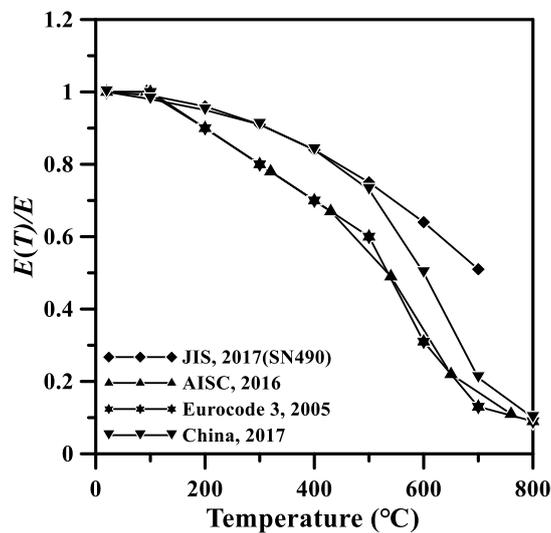


圖 C2.1-3 溫度變化下鋼材彈性模數折減係數之比較

AISC (2016)、Eurocode3 (2005b)、日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)建議之降伏強度及彈性模數折減係數與 SM400、SM490、SN490 之降伏強度及彈性模數折減係數比較分別如圖(C2.1-4)及圖(C2.1-5)所示。降伏強度折減係數高於

1.0 的，建議保守取 1.0。

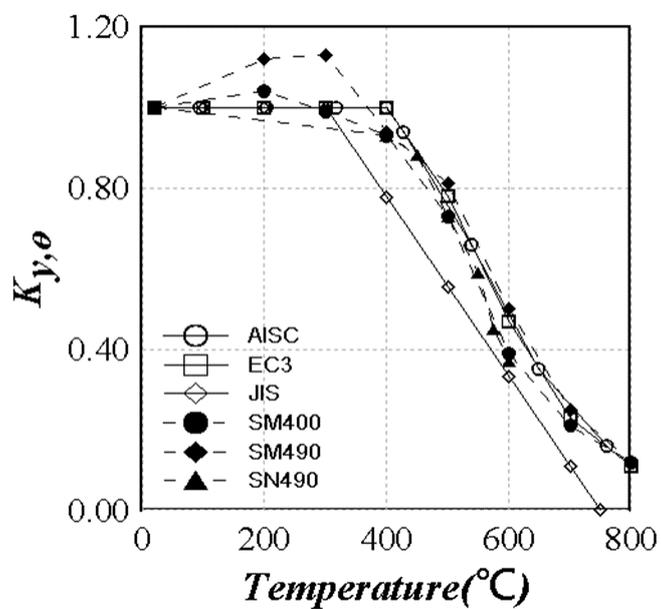


圖 C2.1-4 溫度變化下鋼材降伏強度折減係數比較圖(許睿佳，2007)

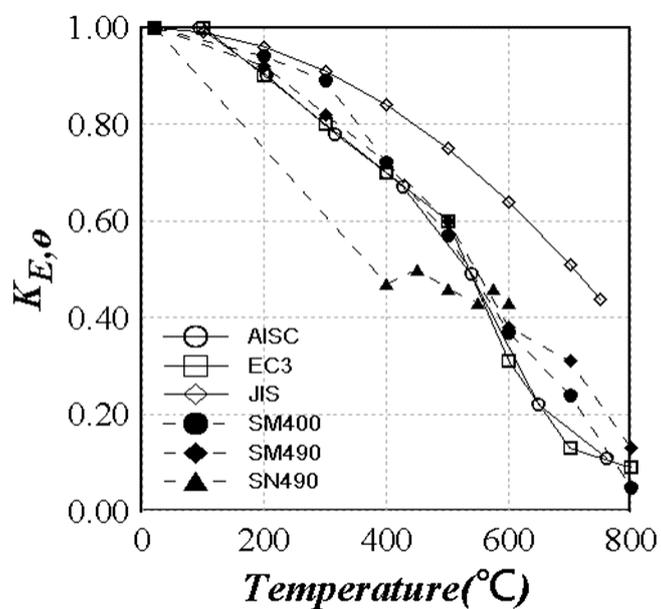


圖 C2.1-5 溫度變化下鋼材彈性模數折減係數比較圖(許睿佳，2007)

2.2 鋼材熱性質

2.2.1 熱膨脹

高溫下鋼材熱膨脹係數 α_s 為定值 $1.4 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

解說：

熱膨脹係數為單位溫度變化所導致的體積變化。

Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)之熱膨脹係數約介於 12×10^{-6} 至 $15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 間。當溫度於 750°C 至 850°C 時，熱膨脹係數呈現下降的趨勢，再於後轉為成長的趨勢，如圖 C2.2.1-1 所示。而中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)及 AISC (2016)規定之熱膨脹係數皆為定值 $1.4 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，日本「鋼構造耐火設計指針」(2017)規定之熱膨脹係數則為定值 $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)規定之溫度變化下鋼材熱膨脹係數可由式(C2.2.1-1)至式(C2.2.1-4)計算：

當 $20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 750^\circ\text{C}$

$$\Delta l / l = -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} T_s + 0.4 \times 10^{-8} T_s^2 \quad (\text{C2.2.1-1})$$

當 $750^\circ\text{C} \leq T_s \leq 860^\circ\text{C}$

$$\Delta l / l = 11 \times 10^{-3} \quad (\text{C2.2.1-2})$$

當 $860^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1200^\circ\text{C}$

$$\Delta l / l = -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} T_s \quad (\text{C2.2.1-3})$$

其中，

$$\alpha_s = \frac{\Delta l}{l \times \Delta T_s} \quad (\text{C2.2.1-4})$$

l = 20°C 時之鋼材長度

Δl = 溫度變化下之鋼材伸長量

T_s = 鋼材溫度， $^\circ\text{C}$

ΔT_s = 鋼材之溫度變化量， $^\circ\text{C}$

α_s = 鋼材熱膨脹係數， $1/^\circ\text{C}$

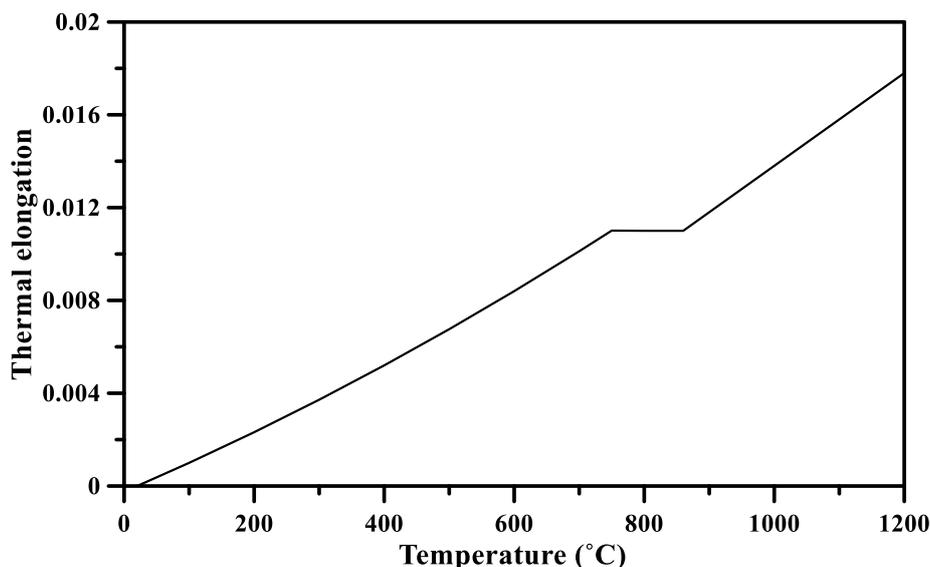


圖 C2.2.1-1 受溫度影響之鋼材熱伸長量(Eurocode 3，2005b)

2.2.2 比熱

鋼材比熱 c_s 為 600 J/kgK 。

解說：

比熱或稱為比熱容，定義為單位質量物質升高 1°C 所需之熱能，因此比熱越大則受熱或冷卻時之溫度較難上升或下降。

Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)於溫度變化下之鋼材比熱，於 20°C 至 600°C 及 800°C 以上變化不大，但於 735°C 時鋼材比熱驟升至 5000 J/kgK ，如圖(C2.2.2-1)所示。中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017) 規定之鋼材比熱性質為定值 600 J/kgK 。

Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)於各溫度階段之比熱性質可由式(C2.2.2-1)至式(C2.2.2-4)計算：

當 $20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 600^\circ\text{C}$

$$c_s = 425 + 7.73 \times 10^{-1} T_s - 1.69 \times 10^{-3} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} T_s^3 \quad (\text{C2.2.2-1})$$

當 $600^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 735^{\circ}\text{C}$

$$c_s = 666 - \left(\frac{13005}{T_s - 738} \right) \quad (\text{C2.2.2-2})$$

當 $735^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 900^{\circ}\text{C}$

$$c_s = 545 + \left(\frac{17820}{T_s - 731} \right) \quad (\text{C2.2.2-3})$$

當 $900^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$c_s = 650 \quad (\text{C2.2.2-4})$$

其中，

T_s = 鋼材溫度， $^{\circ}\text{C}$

c_s = 鋼材比熱， $\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$

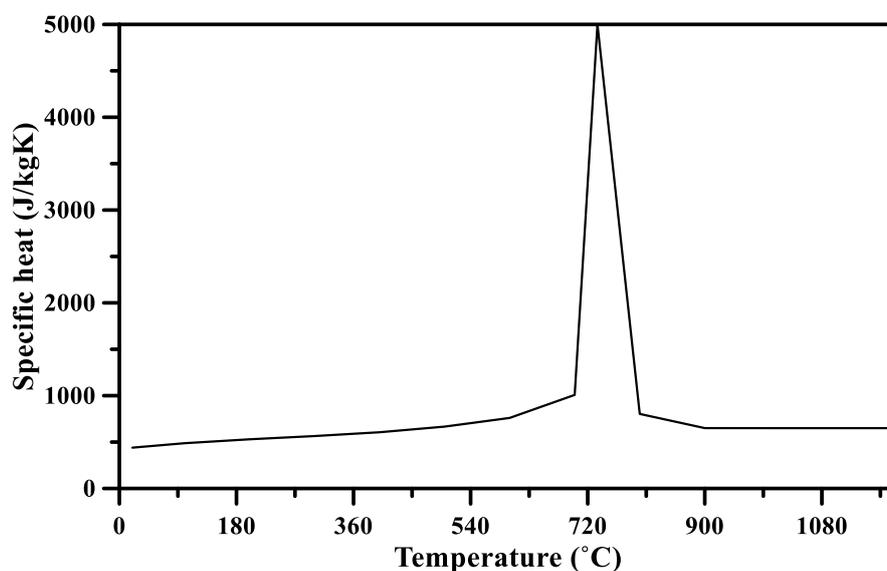


圖 C2.2.2-1 受溫度影響之鋼材比熱(Eurocode 3，2005b)

2.2.3 熱傳導

鋼材熱傳導係數 λ_a 為 45 W/mK 。

解說：

熱傳導為物質傳導熱能之性能，材料熱導性以熱傳導係數表示，當熱傳導係數越高，熱量傳遞越快，即代表物體為良好的熱導體。

圖(C2.2.3-1)所示為 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)溫度變化下之熱傳導係數，其值介於 27 W/mK 至 53 W/mK，隨著溫度增加而線性遞減，於 800°C 後維持定值；而中國大陸「建築結構防火技術規範」(2017)規定之熱傳導係數為定值 45 W/mK。

Eurocode 3 (2005b)規定之簡易計算鋼材熱傳導係數為 45 W/mK；各溫度階段之熱傳導係數可由公式(C2.2.3-1)與公式(C2.2.3-2)計算得知。

當 $20^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 800^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s \quad (\text{C2.2.3-1})$$

當 $800^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_a = 27.3 \quad (\text{C2.2.3-2})$$

其中，

λ_a = 鋼材熱傳導係數，W/mK

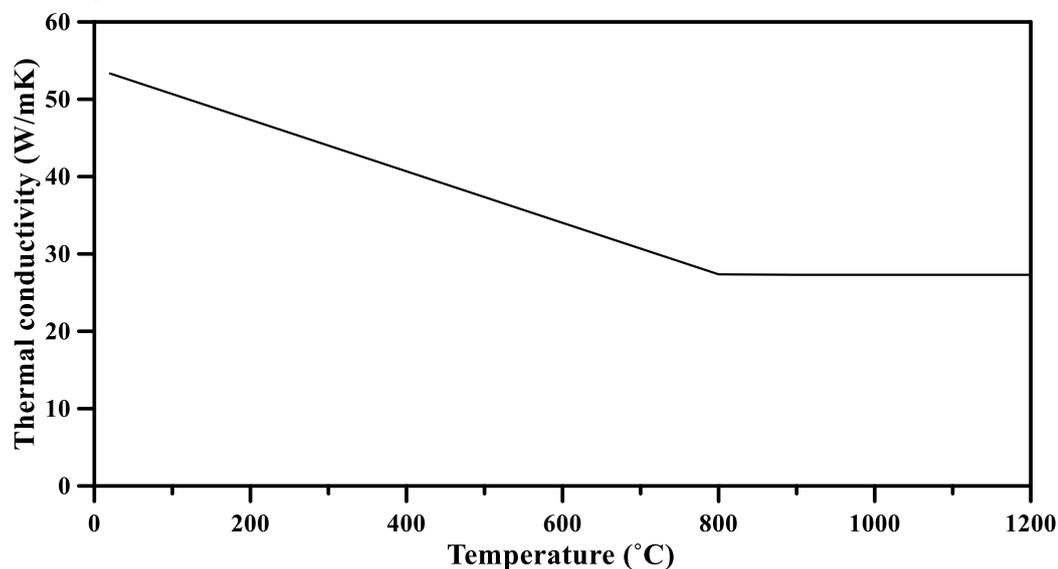


圖 C2.2.3-1 受溫度影響之熱傳導係數(Eurocode 3, 2005b)

第三章 防火設計基本規定

3.1 載重組合與需求強度

構造及其構件所需提供之強度，須依下列之重力載重組合決定：

$$(0.9 \text{ or } 1.2)D + A_T + 0.5L \quad (3.1-1)$$

其中，

A_T = 由 4.1 節定義之設計火災情境造成的力量。

D = 靜載重，結構物構件重量及永久附加物重量。

L = 活載重，包括室內人員、傢俱、設備、貯存物品、活動隔間等。

解說：

式(3.1-1)之載重組合係參考 AISC (2016)用於防火設計時之載重組合為：

$$(0.9 \text{ or } 1.2)D + A_T + 0.5L + 0.2S \quad (C3.1-1)$$

其中，

S = 雪載重

考量我國位處亞熱帶地區而降雪情形鮮少發生，故不考量雪載重之影響。

當靜載重有穩定結構之效果，靜載重之係數為 0.9；若否，其係數則為 1.2。活載重之係數反映當火災發生時，活載重隨時間變化至峰值的機率可忽略 (Ellingwood and Corotis, 1991)。

3.2 防火設計要求

3.2.1 一般規定

鋼結構或構件的防火設計須於建築技術規則建築設計施工編第三章規定之防火時效內，變形須未達破壞判定標準並滿足三項要求其一：承载力、耐火時間、臨界溫度，即可確保火災下構造或構件之安全。

解說：

防火時效為建築物主要構件、防火設備及防火區劃構造遭受火災時可耐火之時間。防火時效可由「建築技術規則」(2018)「建築設計施工編第三章：建築物

之防火」第七十條之規定，依主要構造柱、梁、承重牆壁、樓地板、屋頂及建築物樓層數決定，如表 C3.2.1-1 所示。

變形破壞標準可依 5.2 節之相關規定判定。

表 C3.2.1-1 建築物防火構造應具有之防火時效(建築技術規則，2018)

主要構造部分	自頂層算起 不超過四層 之各樓層	自頂層算起超過 第四層至第十四層 之各樓層	自頂層算起 第十五層以上 之各樓層
承重牆壁	1 小時	1 小時	2 小時
梁	1 小時	2 小時	3 小時
柱	1 小時	2 小時	3 小時
樓地板	1 小時	2 小時	2 小時
屋頂	0.5 小時		

3.2.2 承載力

於規定之防火時效內，鋼結構或構件之承載力不得小於載重組合之設計載重。

3.2.3 耐火時間

耐火時間為鋼結構或構件因高溫達到承載力極限狀態時之時間。故鋼結構或構件之耐火時間不得小於規定之防火時效。

3.2.4 臨界溫度

臨界溫度為鋼結構或構件因高溫達到承載力極限狀態時之溫度。為維持高溫下鋼構造建築物有足夠之承載力，於防火時效內構造或構件之臨界溫度不得低於防火時效內構造或構件最高溫度。

第四章 以分析進行防火設計

4.1 設計火災情境與空氣升溫

設計火災情境為描述鋼結構之升溫情況。此升溫情況與於假設火災區域內的可燃物質和空間區劃有關。當決定火載量時，須考慮空間佔有之火載量密度。升溫條件須根據熱通量或由火災造成之上層氣體溫度來規定。升溫情況隨時間之變化應由火災持續時間確定，並依設計火災之情境以對應之空氣升溫曲線分析。

解說：

火載量密度之計算，可參考 Eurocode 1 Part 1-2 (2002) 附錄 E 之規定。

設計火災情境依加熱狀況、可燃物質及空間區劃的不同可分為：

1. 區劃火災(compartment fires)

於建築物內單層或多層以上受隔離之封閉空間內的火災，使火勢於火災期間無法蔓延到隔間以外之情形，稱為區劃火災。

自然火災與 ISO 834-1 (2012) 標準升溫曲線之比較如圖(C4.1-1)。自然火災在低通風之情況下，可燃物沒有足夠空氣可以燃燒，因此氣體溫度會緩慢增加。高通風情況下之自然火災由於有足夠的空氣可於加熱階段迅速消耗火載量，並且有較大的通風口可使氣體溫度於冷卻階段迅速下降，因此高通風情況下之自然火災為發生時間較短之火災(Liew 等人，1998)。

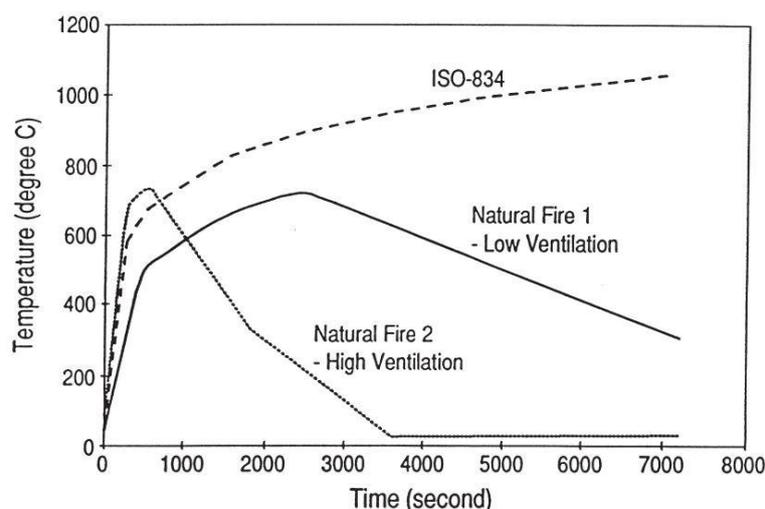


圖 C4.1-1 自然火災與 ISO 834-1 標準升溫曲線比較(Liew 等人，1998)

AISC (2016)空氣升溫可依 ASTM E119 (2018)之標準升溫曲線作為設計火源 (Design-Basis Fire)。圖(C4.1-1)所示為 ASTM E119 (2018)及 ISO 834-1 (2012)之標準升溫曲線比較圖。

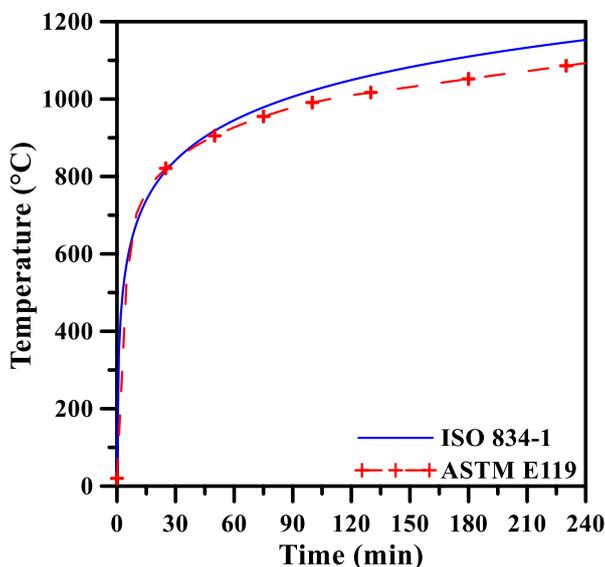


圖 C4.1-2 標準升溫曲線

Eurocode 1 Part 1-2 (2002)及中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)區劃火災之空氣升溫曲線，其曲線相同於 ISO 834-1 (2012)標準升溫曲線，對流熱傳導係數 α_c 為 $25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ，空氣升溫曲線即：

$$T_g(t) = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (\text{C4.1-1})$$

其中，

t = 加熱時間，min

$T_g(t)$ = 時間為 t 時之空間內平均溫度， $^\circ\text{C}$

2. 局部火災(localized fire)

當火災的熱釋放率不足以造成閃燃時，則假設為局部火災。此火災對構造造成的輻射熱通量由可燃物的成分、空間排列與可燃物佔有之樓地板面積來決定。

對於開放面積大於 465 m^2 之大空間或長寬比大於 5 之矩形房間不會發生閃燃。發生於此空間之火災可能為影響大跨度結構中一或二支柱的局部火災，如機

場航廈、商場、倉庫與工廠(NIST, 2014)。

局部火災之空氣升溫分析方式可參考 Eurocode 1 Part 1-2 (2002) 附錄 C 及日本「鋼構造耐火設計指針」(2017) 4.2 節。

3. 閃燃後區劃火災(post-flashover compartment fires)

當火災的熱釋放率足以造成閃燃時，則假設為閃燃後區劃火災。此火災引起的溫度與時間關係曲線應由可燃物荷載、空間通風特性、隔間尺寸以及邊界的熱特性來決定。

4. 外部火災(exterior fires)

外部火災為外部構造曝火而導致。於構造內部的火焰經由窗戶或牆開口向外投影至外部構造，熱輻射也隨之傳到外部，此情況稱為外部構造曝火。須利用火焰投影之形式、長度以及火焰與外部鋼結構之間的距離來決定熱通量。

Eurocode 1 Part 1-2 (2002) 外部火災之對流熱傳導係數 α_c 為 $25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ，空氣升溫曲線為：

$$T_g(t) = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) + 20 \quad (\text{C4.1-2})$$

其中，

t = 加熱時間，min

$T_g(t)$ = 時間為 t 時之空間內平均溫度， $^\circ\text{C}$

決定設計火災情境時，須考慮主動防火系統(active fire-protection systems)之效果。當安裝自動灑水系統時，可降低多達百分之六十的總火載量(Eurocode 1, 1991)。對於設置自動排煙與排熱系統之空間，應使用電腦模擬並計算空氣升溫(SFPE, 2002)。

4.2 鋼構件升溫計算

鋼構件之溫度依據由熱傳分析決定。

鋼構件之升溫 ΔT_s ，亦可依下列規定計算之：

1. 鋼構件未受防火保護時：

$$\Delta T_s = \frac{a}{c_s \left(\frac{W}{D} \right)} (T_F - T_s) \Delta t \quad (4.2-1)$$

其中，

$$a = \text{熱傳係數} = a_c + a_r, \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

a_c = 對流熱傳導係數。對流熱傳導係數

$$a_r = \text{輻射熱傳導係數} = \frac{S_B \varepsilon_F}{T_F - T_s} (T_{FK}^4 - T_{SK}^4)$$

c_s = 鋼材比熱，J/kg·°C

D = 構件斷面受熱之周長，m

S_B = Stefan-Boltzmann 常數 = 5.67×10^{-8} , W/m²·°C⁴

T_F = 火災溫度，°C

T_{FK} = 火災溫度，°K

T_s = 不同曝火時間下之鋼材溫度，°C

T_{SK} = 不同曝火時間下之鋼材溫度，°K

W = 單位長度之重量(質量)

ε_F = 火焰發射率與視野係數(emissivity of fire and view coefficient)

Δt = 時間間隔，s

於標準曝火時，對流熱傳係數 a_c 大約為 25 W/m²·°C。為了計算精確，建議最大之時間間隔 Δt 為 5 秒。

火災溫度須依設計火災分析之結果決定。對於建築物火災亦可選擇標準升溫曲線。

2. 鋼構件受防火保護時：

當

$$c_s W / D > 2d_p \rho_p c_p \quad (4.2-2)$$

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{c_s d_p \left(\frac{W}{D} \right)} (T_F - T_s) \Delta t \quad (4.2-3)$$

當

$$c_s W / D \leq 2d_p \rho_p c_p \quad (4.2-4)$$

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{d_p} \left[\frac{T_F - T_s}{c_s \left(\frac{W}{D} \right) + \frac{c_p \rho_p d_p}{2}} \right] \Delta t \quad (4.2-5)$$

為了計算精確，建議最大之時間間隔 Δt 為 5 秒。

其中，

c_p = 防火保護材料之比熱，J/kg·°C

d_p = 防火保護材料之厚度，m

k_p = 防火保護材料之熱導率，W/m·°C

ρ_p = 防火保護材料之密度，kg/m³

為了計算精確，建議最大之時間間隔 Δt 為 5 秒。

3. 外部鋼構件：

$$\Delta T_s = \frac{q''}{c_s \left(\frac{W}{D} \right)} \Delta t \quad (4.2-6)$$

其中 q'' 為鋼構件上淨入射熱通量。

解說：

式(4.2-1)至式(4.2-6)為 AISC (2016)附錄 4 解說所建議以計算鋼構件的升溫，並規定火焰發射率與視野係數 ϵ_f 之估算準則為依表 C4.2-1 所示計算。

表 C4.2-1 AISC 火焰發射率與視野係數之估算準則

構件種類		ϵ_F
周圍皆曝火之柱		0.7
樓版梁： 嵌入至混凝土樓版且只有下翼板曝火		0.5
樓版梁： 混凝土樓版置於 上翼板之上	翼板寬對梁深之比 ≥ 0.5	0.5
	翼板寬對梁深之比 < 0.5	0.7
箱型梁與桁架		0.7

未受防火保護之鋼構件升溫與鋼構件單位長度之重量（質量）與鋼構件斷面之周長的比值、火災與鋼材之溫差及熱傳係數有關。熱傳係數為對流與輻射係數之總和。受防火保護之鋼構件升溫公式適用於沿著構件斷面形狀做防火保護之鋼構件。式(4.2-3)與式(4.2-5)應用於箱型方式保護時，會高估鋼材之溫度。防火保護表面外之溫度假設為火災溫度，鋼材溫度由防火保護材料之熱傳導決定。AISC (2016)提供兩種公式，根據是否可以忽略防火保護材料之熱容量來決定之。理想情況下，所使用之材料性質應與溫度有關。但如果這些關係未知，則可使用防火保護材料於 500°C 之材料性質與鋼材於 300°C 之材料性質(NIST, 2014)。

鋼構件升溫計算亦可依 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b) 4.2.5 節或中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)規定之計算式計算。

外部鋼構件應考慮來自火源與周圍空氣輻射與對流之熱通量，及構件位置與尺寸。外部鋼構件升溫計算可參考 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)附錄 B 設計並依 Eurocode 1 Part 1-2 (2002)附錄 B 之規定計算。

4.3 鋼構件內力計算

構件內力可由火災下整體結構分析或子結構分析計算。

構件內力亦可依式(4.3-1)至(4.3-4)計算：

1. 載重及溫度變化所造成軸向內力：

$$N_T = N_{Te} - N_f \quad (4.3-1)$$

$$N_{Te} = \alpha_s E_T A \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_0 \right) \quad (4.3-2)$$

2. 載重及溫度變化所造成彎矩內力：

$$M_{Ti} = M_{Te} - M_{fi} \quad (4.3-3)$$

$$M_{Te} = \frac{E_T I}{h} \alpha_s (T_2 - T_1) \quad (4.3-4)$$

其中：

N_{Te} = 溫度造成的軸向內力

N_f = 按等效作用力以常溫方式分析所得之構件軸力

M_{Te} = 溫度造成的彎矩內力

M_{fi} = 按等效作用力以常溫方式分析所得之構件彎矩

T_0 = 受火前構件之溫度，°C

T_1 、 T_2 = 受火構件兩側或上下翼緣之溫度，°C；

若有防火保護，則 $T_1 = T_2$

E_T = 溫度為 $\frac{T_1 + T_2}{2}$ 時鋼材之彈性模數

A = 受火構件截面積

I = 受火構件面積慣性矩

h = 受火構件截面高度

α_s = 鋼材熱膨脹係數， $1/^\circ\text{C}$

解說：

中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)表示，火災一般只發生於建築

物局部，故可採用子結構分析模型計算火災下局部結構之內力與變形。子結構包含火災區域結構與其適當延伸部分，其邊界條件由常溫下之結構分析得出並假設燃燒過程保持不變。

4.4 鋼結構與構件防火承载力驗算

鋼結構或構件防火承载力驗算須滿足：

$$R_{u,fi} \leq \phi \cdot R_n(T) \quad (4.4-1)$$

其中，

$R_{u,fi}$ = 受火時之設計載重

$R_n(T)$ = 溫度為 T 時之標稱強度

ϕ = 強度折減係數

鋼結構或構件溫度為 T 時之標稱強度 $R_n(T)$ 須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質與下列規定計算：

1. 受拉構材

受拉構材高溫下之標稱強度須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質與鋼結構極限設計法規範及解說第五章受拉構材之規定計算之。構件斷面溫度假設為均溫，此溫度為鋼構件之最高溫。

2. 受壓構材

受壓構材高溫下之標稱強度須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質與鋼結構極限設計法規範及解說第六章受壓構材之規定計算之，並以公式(4.4-2)取代鋼結構極限設計法規範及解說公式(6.2-2)及(6.2-3)：

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_c(T)}} \right] F_y(T) \quad (4.4-2)$$

其中，

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \quad (4.4-3)$$

其中，

$F_{cr}(T)$ = 溫度為 T 時之臨界應力

$F_e(T)$ = 溫度為 T 時之彈性挫屈應力

$E(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材彈性模數

$F_y(T)$ 及 $E(T)$ 參照本手冊第二章鋼材性質之規定。

3. 撓曲構材

對於鋼梁，可假設構件斷面為均溫，其溫度為下翼板溫度。

撓曲構材高溫下之標稱強度須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質與鋼結構極限設計法規範及解說第七章撓曲構材之規定計算之，並以公式(4.4-4)、(4.4-5)、(4.4-6)、(4.4-7)、(4.4-8)、(4.4-9)及(4.4-10)取代鋼結構極限設計法規範及解說公式(7.2-1)、(7.2-4)、(7.2-5)及(7.2-11)：

當側向無支撐段長度 $L_b \leq L_r(T)$

$$M_n(T) = C_b \left\{ M_r(T) + [M_p(T) - M_r(T)] \left[1 - \frac{L_b}{L_r(T)} \right]^{c_x} \right\} \leq M_p(T) \quad (4.4-4)$$

當側向無支撐段長度 $L_b > L_r(T)$

$$M_n(T) = F_{cr}(T) S_x \leq M_p(T) \quad (4.4-5)$$

其中，

$$F_{cr}(T) = \frac{C_b \pi^2 E(T)}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (4.4-6)$$

$$L_r(T) = 1.95 r_{ts} \frac{E(T)}{F_L(T)} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76 \left[\frac{F_L(T)}{E(T)}\right]^2}} \quad (4.4-7)$$

$$M_r(T) = F_L(T) S_x \quad (4.4-8)$$

$$F_L(T) = F_y (k_p - 0.3k_y) \quad (4.4-9)$$

$$M_p(T) = F_y(T) Z_x \quad (4.4-10)$$

$$c_x = 0.6 + \frac{T_s}{250} \leq 3.0 \quad (4.4-11)$$

T_s = 不同曝火時間下之鋼材溫度，°C

$F_{cr}(T)$ = 溫度為 T 時之臨界應力

高溫下之材料性質 $E(T)$ 、 $F_y(T)$ 、 k_p 及 k_y 參照本手冊第二章鋼材性質之規定，其他撓曲構材之規定參照鋼結構極限設計法規範及解說第七章。

4. 撓曲合成構材

撓曲合成構材高溫下之標稱強度須依鋼材於高溫下的降伏應力，及鋼結構極限設計法規範及解說第九章合成構材之規定計算之。

撓曲合成構材之標稱強度 $M_n(T)$ 亦可使用下翼板溫度 T 計算：

$$M_n(T) = r(T) M_n \quad (4.4-12)$$

其中，

M_n = 常溫之標稱撓曲強度

$r(T)$ = 下翼板溫度為 T 時之保留因子(retention factor)；參閱表 C4.4-1

5. 受剪構材

受剪構材高溫下之標稱強度須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質與鋼結構極限設計法規範及解說 7.3.2 節設計剪力強度之規定計算之，並假設構件斷面溫度為均溫。

6. 構材承受組合力及扭矩

受軸力與撓曲構材高溫下之標稱強度，須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質、本手冊 4.4 節之規定與鋼結構極限設計法規範及解說(2010)第八章構材承受組合力及扭矩之規定計算之。受扭矩構材高溫下之標稱強度，須依本手冊第二章鋼材高溫下的性質與鋼結構極限設計法規範及解說第八章構材承受組合力及扭矩之規定計算之，並假設構件斷面溫度為均溫。

7. 接合

接合高溫下之標稱強度須依螺栓及鉚道於高溫下之強度，及鋼結構極限設計法規範及解說第十章接合設計之規定計算之。

解說：

各國相關鋼構造建築物防火設計規範高溫下承载力之驗算多僅針對鋼構件提供計算式，子結構或結構之驗證分析須考慮受火時可能的破壞模式、溫度變化下之材料性質及構件剛度變化、熱膨脹及熱變形量，並考慮受火期間結構潛在的熱膨脹及變形行為。

本手冊鋼構件防火承载力之驗算方式係參考 AISC (2016)之相關規定。承载力驗算亦可參考 Eurocode 3 Part 1-2 (2005) 第四章 Structural fire design 進行驗算。

由於重力柱的高使用比例使其容易達到臨界溫度與發生破壞，因此受火結構之穩定性依重力柱的耐火性決定(Agarwal and Varma, 2011, 2014)。重力柱之耐火性可由上、下樓層溫度較低的柱對其提供之旋轉束制而提高。由此造成設計強度之增加可由降低柱之長細比(L_c / r)說明：

$$\left(\frac{L_c}{r}\right)_T = \left(1 - \frac{T_s - 32}{n(3600)}\right) \left(\frac{L_c}{r}\right) - \frac{35}{n(3600)}(T_s - 32) \geq 0 \quad .(C4.4-1)$$

其中，

T_s = 不同曝火時間下之鋼材溫度，°C

$n = 1$ ，當上、下樓層皆為溫度較低的柱時。

$n = 2$ ，當只有上、下樓層其中之一為溫度較低的柱時。

撓曲合成構材之標稱強度 $M_n(T)$ 可依式(4.4-12)計算之。 $r(T)$ 如表 C4.4-1 所示。

表 C4.4-1 下翼板溫度為 T 時之保留因子(retention factor)

下翼板溫度°F (°C)	$r(T)$
68 (20)	1.00
300 (150)	0.98
600 (320)	0.95
800 (430)	0.89
1000 (540)	0.71
1200 (650)	0.49
1400 (760)	0.26
1600 (870)	0.12
1800 (980)	0.05
2000 (1100)	0.00

鋼結構接頭耐火性能之驗算可參考 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b) 附錄 D。若接頭與構件之防火效果相同時，因接合處有如剪力板、螺栓等附加材料影響，其溫度會低於構件，故不論是以栓接或銲接型式，皆可視接頭之耐火性能優於構件。

4.5 鋼結構與構件耐火時間驗算

鋼結構或構件之耐火時間不得小於其防火時效。

解說：

「建築物構造防火性能驗證技術手冊」(2008)規定鋼構件之火災保有耐火時間不得小於火災之繼續時間，為防火性能設計之理念。故鋼構件之耐火時間可依手冊之「第三章：屋內火災構造保有耐火時間之計算」之有關條文進行計算，手冊依梁、柱有無防火被覆分為四種計算流程，所有計算流程皆須考慮火災溫度上升係數與臨界溫度。若鋼梁或鋼柱具防火被覆則依防火被覆種類考慮溫度上升延遲時間係數。若鋼梁或鋼柱無防火被覆則考慮構件附近火災溫度上升係數。

4.6 鋼結構與構件臨界溫度驗算

鋼結構或構件於防火時效內未達變形破壞標準並維持結構穩定性之情況下，鋼結構與構件之溫度不得高於臨界溫度：

$$T_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 \quad (4.6-1)$$

其中，

μ_0 = 使用程度係數，不得小於 0.013

$T_{a,cr}$ = 鋼材之臨界溫度，°C

當為拉力構材時：

$$\mu_0 = R_{u,fi} / \phi R_n \quad (4.6-2)$$

其中，

$R_{u,fi}$ = 受火時之設計載重

ϕR_n = 常溫下之設計強度

解說：

臨界溫度之計算可參考 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b) 4.2.4 節之相關說明。受火情形下之設計載重比 η_{fi} 應依構造或構件潛在之熱膨脹及變形分析，構造或構件間相互作用可以受火期間之支承情形及邊界條件進行分析。 μ_0 為 0.22 至 0.80 所對應之臨界溫度 $T_{a,cr}$ 如表 C4.6-1 所示。

表 C4.6-1 使用程度係數 μ_0 對應之臨界溫度 $T_{a,cr}$ (Eurocode 3, 2005b)

μ_0	$T_{a,cr}$	μ_0	$T_{a,cr}$	μ_0	$T_{a,cr}$
0.22	711	0.42	612	0.62	549
0.24	698	0.44	605	0.64	543
0.26	685	0.46	598	0.66	537
0.28	674	0.48	591	0.68	531
0.30	664	0.50	585	0.70	526
0.32	654	0.52	578	0.72	520
0.34	645	0.54	572	0.74	514
0.36	636	0.56	566	0.76	508
0.38	628	0.58	560	0.78	502
0.40	620	0.60	554	0.80	496

中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)亦規定鋼構件與鋼框架梁、柱之臨界溫度，依載重比可查表確定構件與框架之臨界溫度。

第五章 以驗證試驗進行防火設計

5.1 驗證試驗標準

我國國家標準 CNS 12514-1「建築物構造耐火試驗法，第 1 部：一般要求事項」規定耐火試驗法，鋼結構或構件須符合 5.2 節承重能力性能基準或 5.3 節鋼材之破壞溫度。

解說：

現今國外學者進行耐火性能試驗普遍依照 ASTM E119 (2018)或 ISO 834-1 (2012)規定之耐火試驗法。我國則須依照 CNS 12514-1 (2014)「建築物構造構件耐火試驗法-第 1 部：一般要求事項」之規定進行耐火試驗。耐火試驗法一般以試體之性能基準或以材料之破壞溫度作為破壞判定依據。

CNS 12514-1 (2014)對於試驗設備(包含加熱爐、載重設備、束制及支撐框架)、環境溫度、爐內壓力、量測及破壞準則皆有明確規定。加溫爐溫度依照標準升溫曲線進行加溫；進行耐火試驗時，試體需配置足夠之熱電偶測點以及位移量測測點，試體承重能力以變形量及變形速率判定，與 ISO 834-1 (2012)之規定相同。

5.2 承重能力性能基準

性能基準是設定來量測承重構造的穩定性及區劃構造作為阻隔的有效性。本手冊僅針對火害下的構造防火設計，考量之性能基準為承重能力。

承重能力為試體在試驗過程中維持支承試驗載重能所經過的時間。試驗載重的支承能力以變形量及變形速率兩者決定。由於快速變形將在超出穩定條件時發生，因此變形速率基準在變形量已達到 $L/30$ 時才會被應用。當超過以下兩項基準時視為破壞：

1. 撓曲構件

最大撓曲量：

$$D = \frac{L^2}{400d}, \text{ (mm)} \quad (5.2-1)$$

最大撓曲速率：

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d}, (\text{mm/min}) \quad (5.2-2)$$

其中：

L = 試體之淨跨度，mm

D = 試體構造斷面之壓縮側緣至拉伸側緣之距離，mm

2. 軸向承載構件

最大軸向壓縮量：

$$C = \frac{h}{400}, (\text{mm}) \quad (5.2-3)$$

最大軸向壓縮速率：

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000}, (\text{mm/min}) \quad (5.2-4)$$

其中：

h = 軸向承載構件之初始高度，mm

解說：

評估建築構造在標準耐火試驗條件下之性能基準涵蓋：承重能力、遮焰性與阻熱性。遮焰性與阻熱性兩項性能與建築構造之區劃功能有關，承重能力則為判定承重構造或構件之承載力與穩定性。

5.3 鋼材破壞溫度

鋼結構或構件之耐火性能，得以標準耐火試驗測定其鋼材強度之破壞溫度。

解說：

ASTME119(2018)標準耐火試驗法測定試體之耐火性能，得測定構造中鋼材之溫度，其鋼材溫度最高值或平均值若超過規定值，即表示試體構造已達破壞溫度，視為承重能力失效，如表 C5.3-1 所示。

表 C5.3-1 鋼材破壞溫度之標準(ASTM E119, 2018)

構件	測定之受火時間	耐火性能標準
無承重鋼柱構件	防火時效	任一斷面之平均溫度 $\leq 538^{\circ}\text{C}$ 或任一量測點溫度 $\leq 649^{\circ}\text{C}$
承重束制鋼梁	最初 1 小時或防火時效之起始一半時間之大值	任一斷面之平均溫度 $\leq 593^{\circ}\text{C}$ 或任一量測點溫度 $\leq 704^{\circ}\text{C}$
承重未束制鋼梁	防火時效	任一斷面之平均溫度 $\leq 593^{\circ}\text{C}$ 或任一量測點溫度 $\leq 704^{\circ}\text{C}$
無承重有防火保護之鋼梁	防火時效	任一斷面之平均溫度 $\leq 538^{\circ}\text{C}$ 或任一量測點溫度 $\leq 649^{\circ}\text{C}$

參考文獻

- Agarwal, A. and Varma, A.H. (2011). “Design of Steel Columns for Fire Loading Including Effects of Rotational Restraints.” *Engineering Journal, AISC*, Vol. 48, No.4, 297-314.
- Agarwal, A. and Varma, A.H. (2014). “Fire Induced Progressive Collapse of Steel Building Structures: The Role of Interior Gravity Columns.” *Engineering Structures, Special Issue on Fire Analysis of Structures, Elsevier*, Vol. 58, 129-140.
- AISC (2016). “Specification for structural steel buildings.” ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- ASTM E119 (2018). “Standard test methods for fire tests of building construction and materials.” American Society for Testing and Materials.
- Chung, H. Y., Lee, C. H., Su, W. J., Lin, R. Z. (2010). “Application of fire-resistant steel to beam-to-column moment connections at elevated temperatures.” *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 289–303.
- Ellingwood, B. and Corotis, R.B. (1991). “Load Combinations for Building Exposed to Fires.” *Engineering Journal, AISC*, Vol. 28, No. 1, 37-44.
- Eurocode 1 (1991), “Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures”, EC1 1991-2-2, Comite Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- Eurocode 1 (2002). “Actions on structures, Part 1.2, General actions – Actions on structures exposed to fire”, Eurocode 1 DD ENV 1991-1-2 : 2002, British Standards Institution, London.
- Eurocode 3 (2005a). “Design of steel structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings”, Eurocode 3 DD ENV 1993-1-1 : 2005, British Standards Institution, London.
- Eurocode 3 (2005b). “Design of steel structures, Part 1.2, General rules - Structural fire design” Eurocode 3 DD ENV 1993-1-2 : 2005, British Standards Institution, London.
- Franssen, J. M. and Real, P. V. (2015). “Fire design of steel structures”, 2nd ed.,

- European Convention for Constructional Steelwork.
- ISO 834-1. (2012). “Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements.” International Standard ISO 834, Geneva.
- Liew, J. Y. R., Tang, L.K., Holmaas, T., Choo, Y.S. (1998). “Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire”, Journal of Constructional Steel Research.
- NIST (2014). “Structural design for fire : A survey of building codes and standards”, NIST Technical Note 1842, National Institute of Standards and Technology.
- Ruddy, J.L., Marlo, J.P., Ioannides, S.A. and Alfawakhiri, F. (2003). “Design guide 19 : Fire resistance of structural steel framing”, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- SFPE (2002). “Handbook of Fire Protection Engineering”, 3rd ed., P.J. DiNenno (ed.), NFPA, Quincy, MA.
- SFPE (2007). “Standard calculation methods for structural fire protection”, ASCE/SEI/SFPE 29-05, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- 中華人民共和國國家標準 GB 51249 (2017), 「建築鋼結構防火技術規範」, 中國計劃出版社。
- 中華民國國家標準 CNS 12514-1 (2014), 「建築物構造構件耐火試驗法, 第 1 部: 一般要求事項」, 經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 14651 (2008), 「建築物防火詞彙—一般火災現象用語」, 經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 14652 (2008), 「建築物防火詞彙—防火試驗用語」, 經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 14996 (2006), 「建築物防火詞彙—防火安全用語」, 經濟部標準檢驗局。
- 內政部建築研究所(2008), 「建築物構造防火性能驗證技術手冊」, 內政部建築研究所。
- 內政部營建署(2010), 「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範鋼結構極限設計法規

範及解說」。

內政部營建署(2018)，「建築技術規則」，台北，台灣。

日本建築學會(2017)，「鋼構造耐火設計指針」，東京。

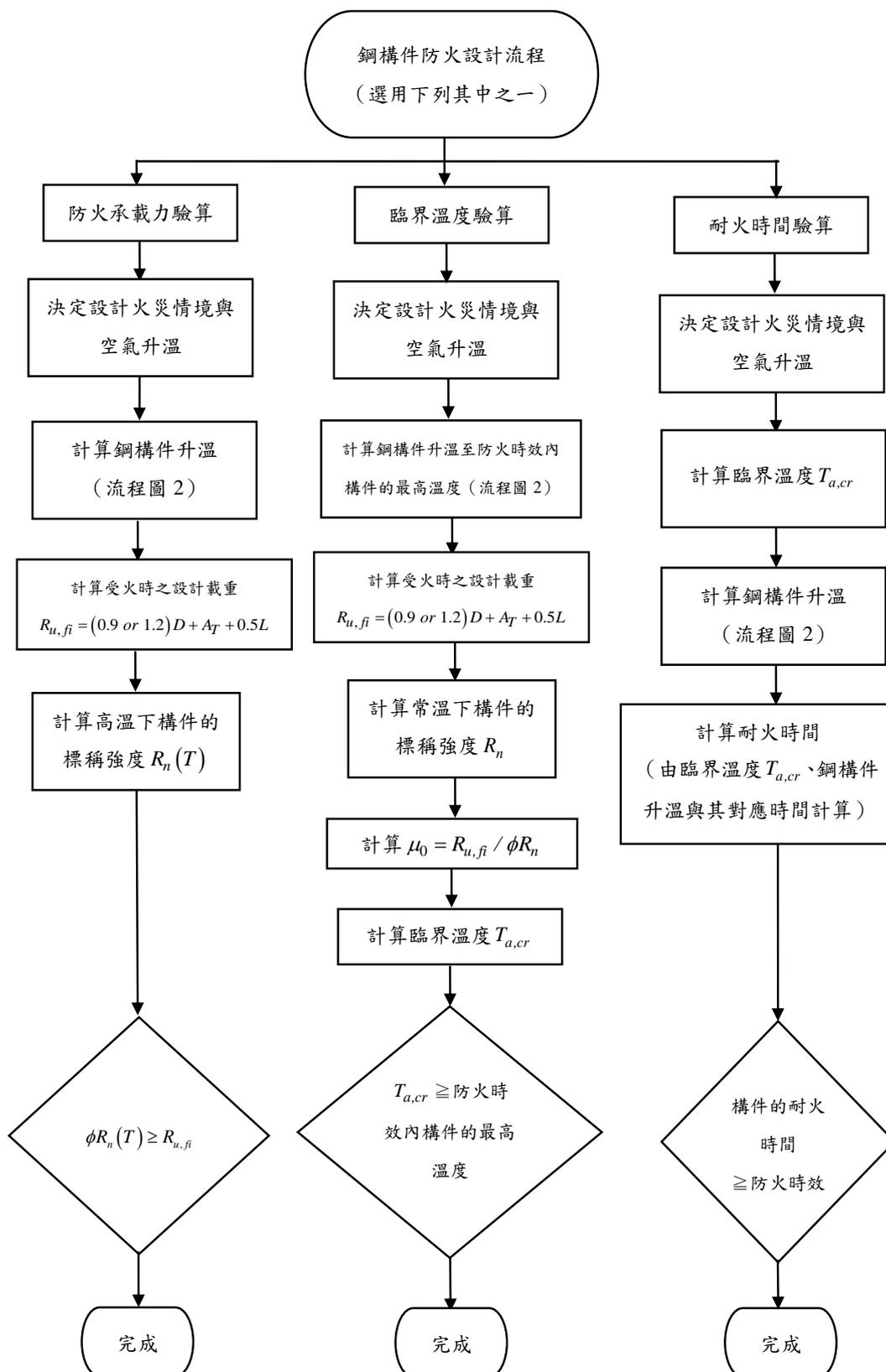
莊有清，「鋼材在高溫環境下之行為探討」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，
(2004)，邱耀正指導。

許睿佳，「SN490 銲接 H 型鋼柱高溫結構行為研究」，國立高雄第一科技大學營
建工程系碩士論文，(2007)，楊國珍指導。

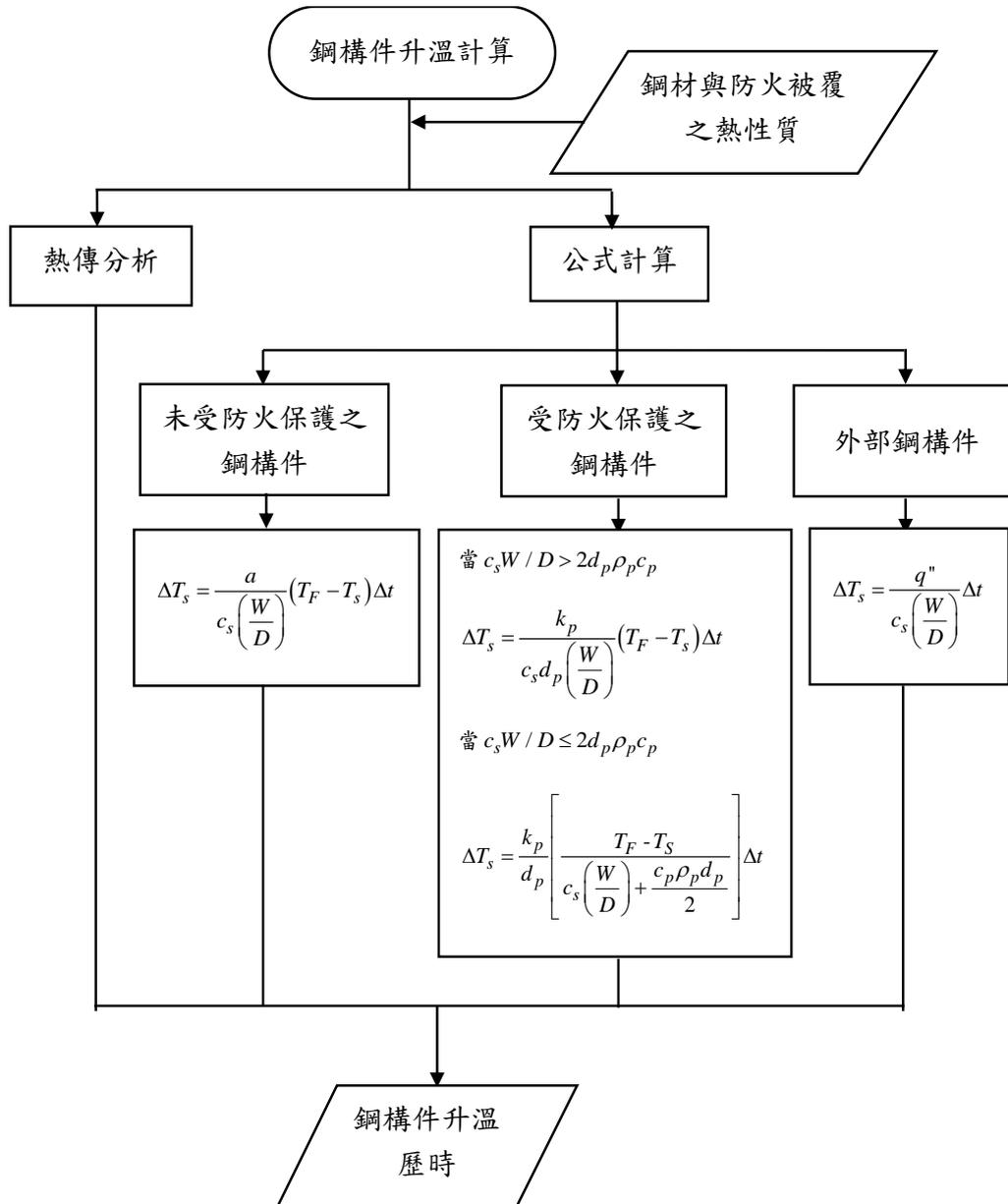
附錄一 防火設計流程圖範例

流程圖 1	鋼構件防火設計流程圖	84
流程圖 2	鋼構件升溫計算流程圖	85
流程圖 3	防火承载力驗算流程圖：受拉構件	86
流程圖 4	防火承载力驗算流程圖：受壓構件	87
流程圖 5	防火承载力驗算流程圖：撓曲構件	88
流程圖 6	防火承载力驗算流程圖：承受組合力及扭矩構件	89
流程圖 7	臨界溫度驗算流程圖：受拉構件	90
流程圖 8	臨界溫度驗算流程圖：受壓構件	91
流程圖 9	臨界溫度驗算流程圖：不發生側向扭轉挫屈之撓曲構件	92
流程圖 10	耐火時間驗算流程圖	93

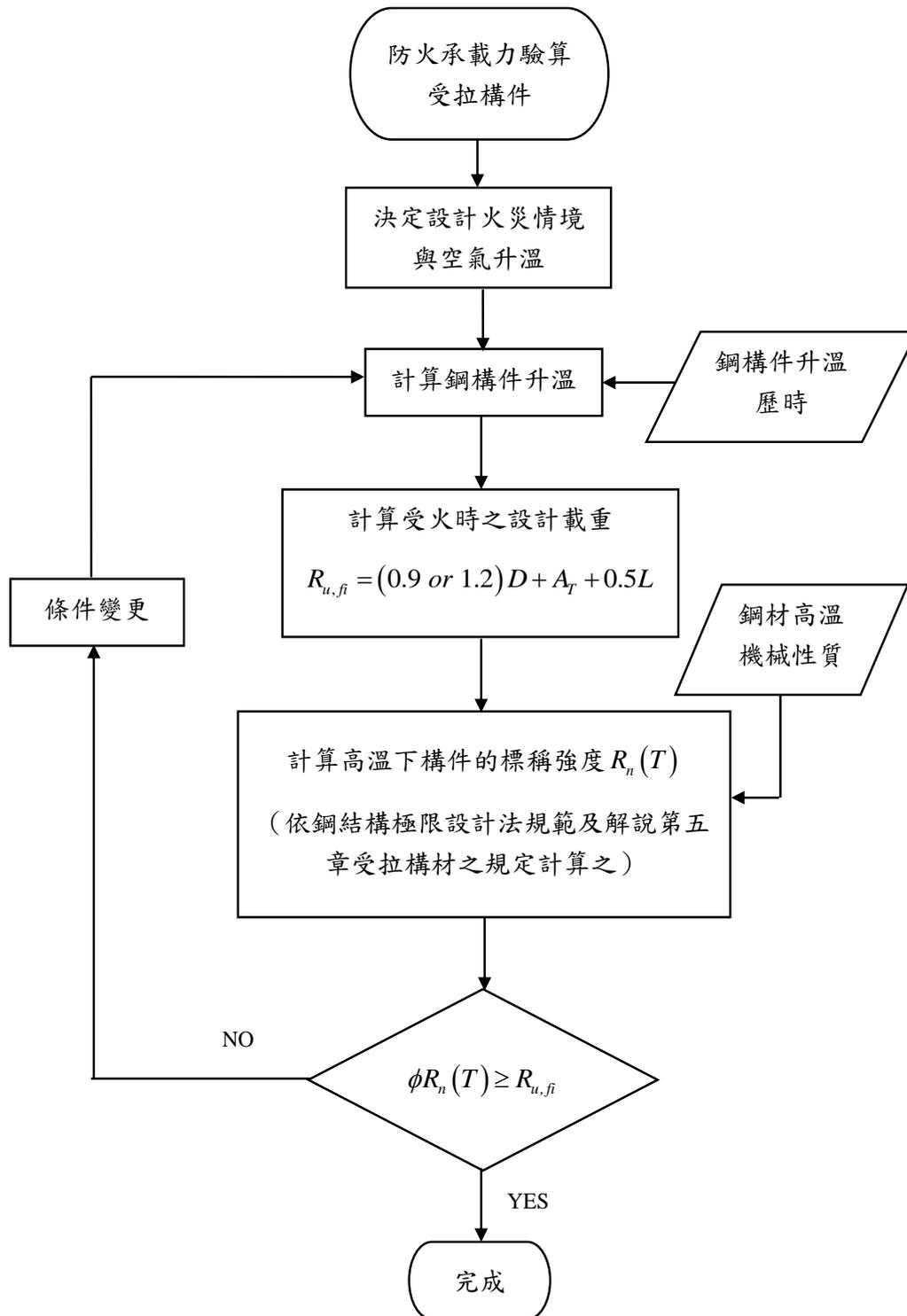
流程圖 1 鋼構件防火設計流程圖



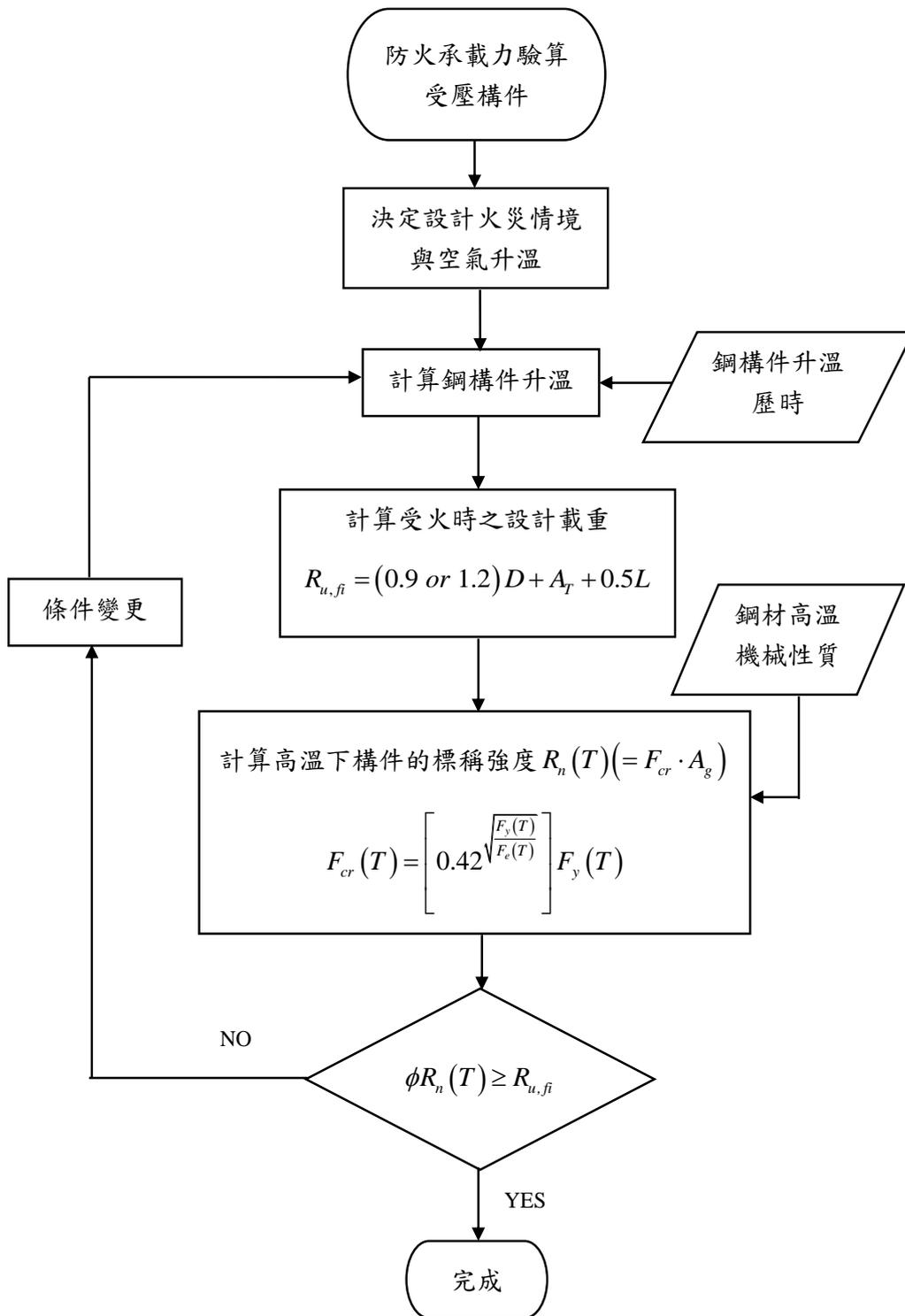
流程圖 2 鋼構件升溫計算流程圖



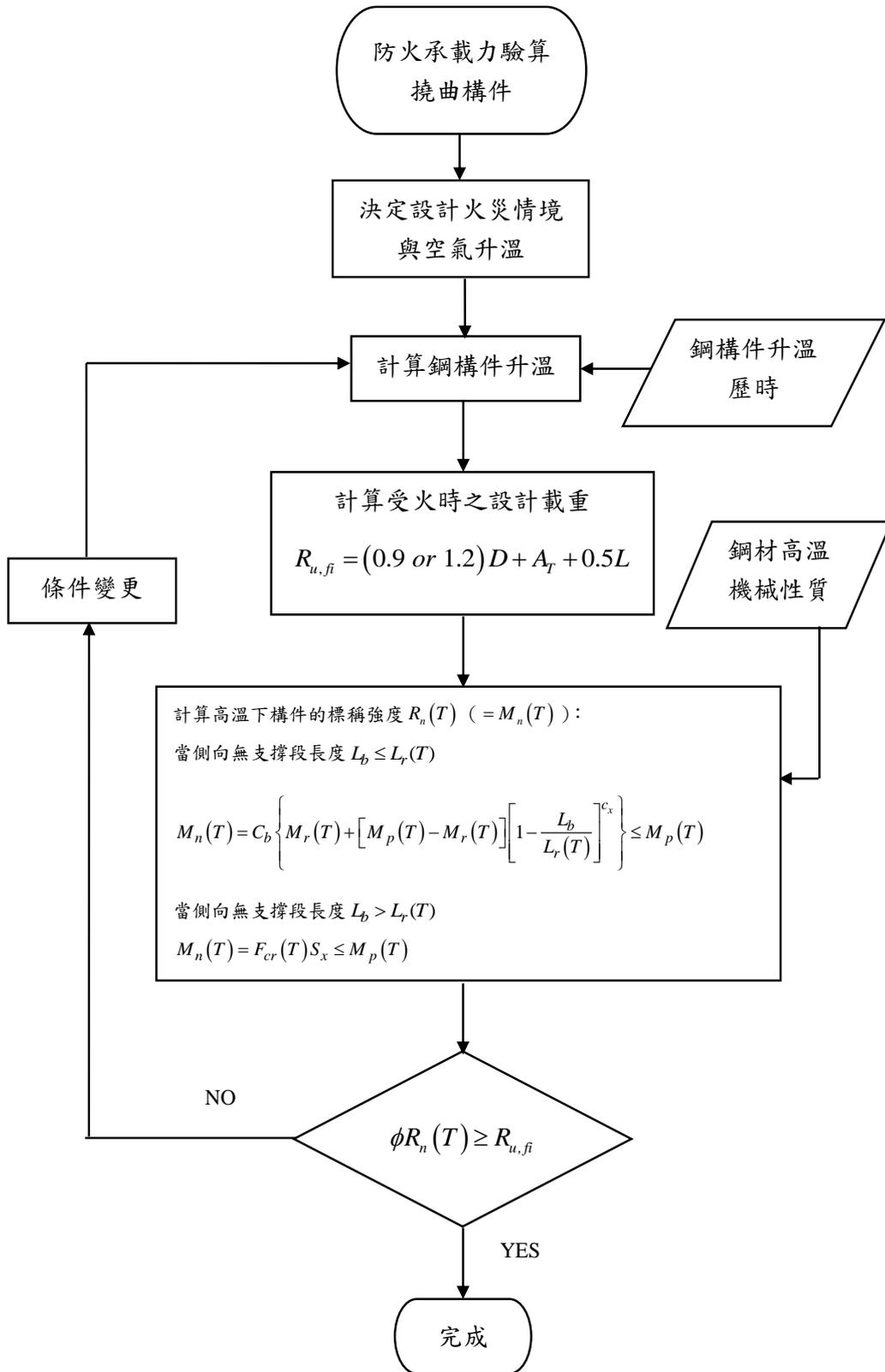
流程圖 3 防火承载力驗算流程圖：受拉構件



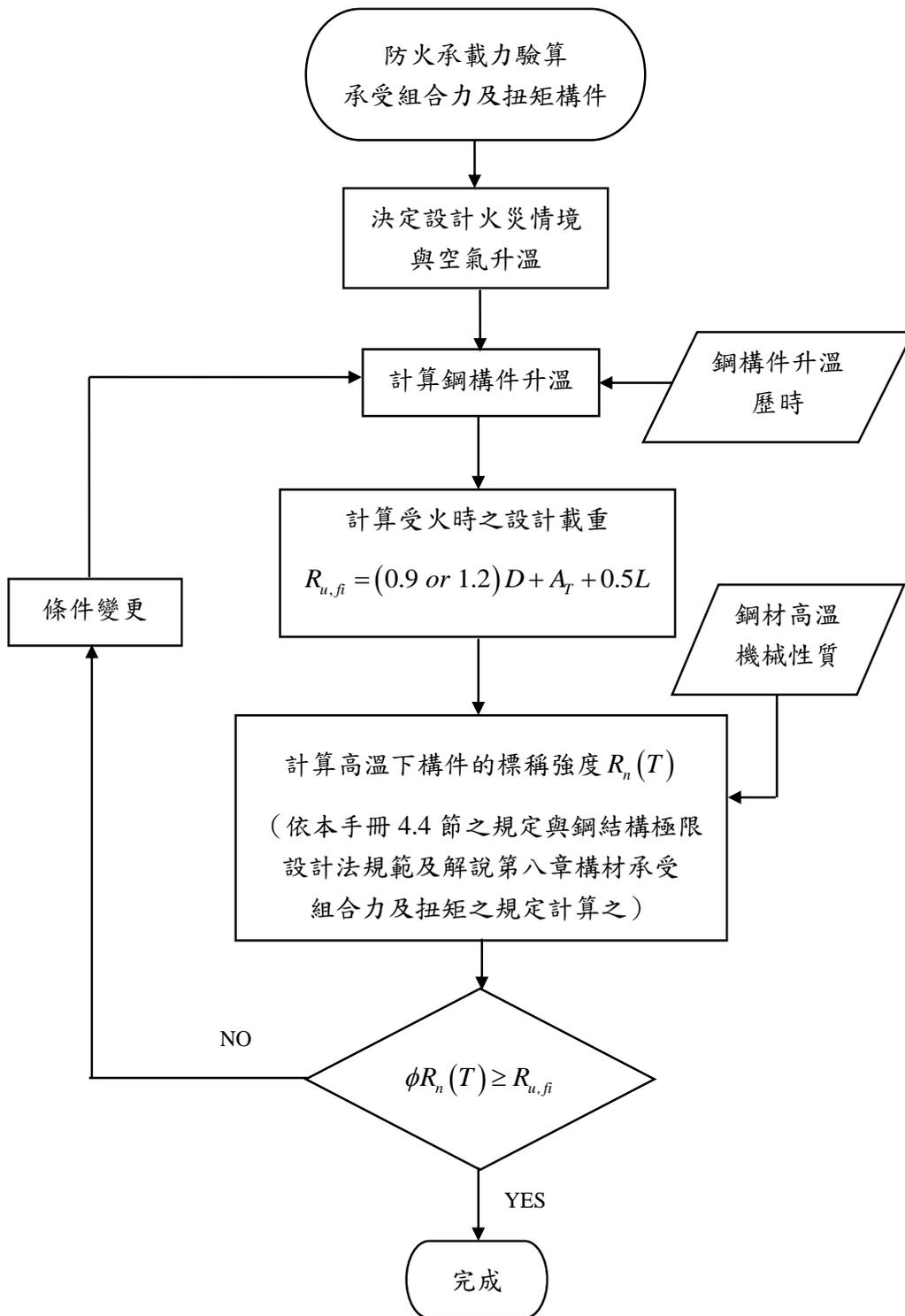
流程圖 4 防火承载力驗算流程圖：受壓構件



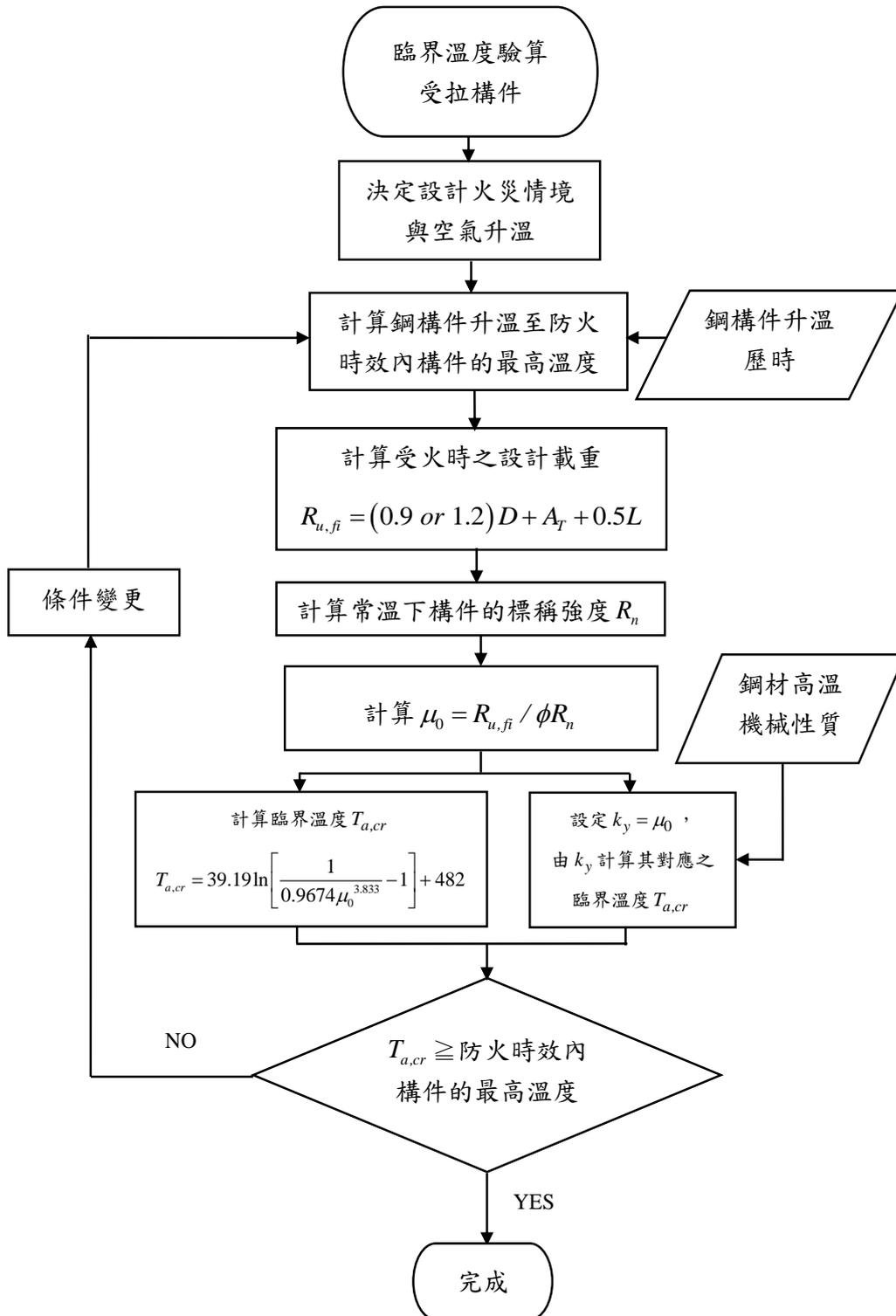
流程圖 5 防火承载力驗算流程图：撓曲構件



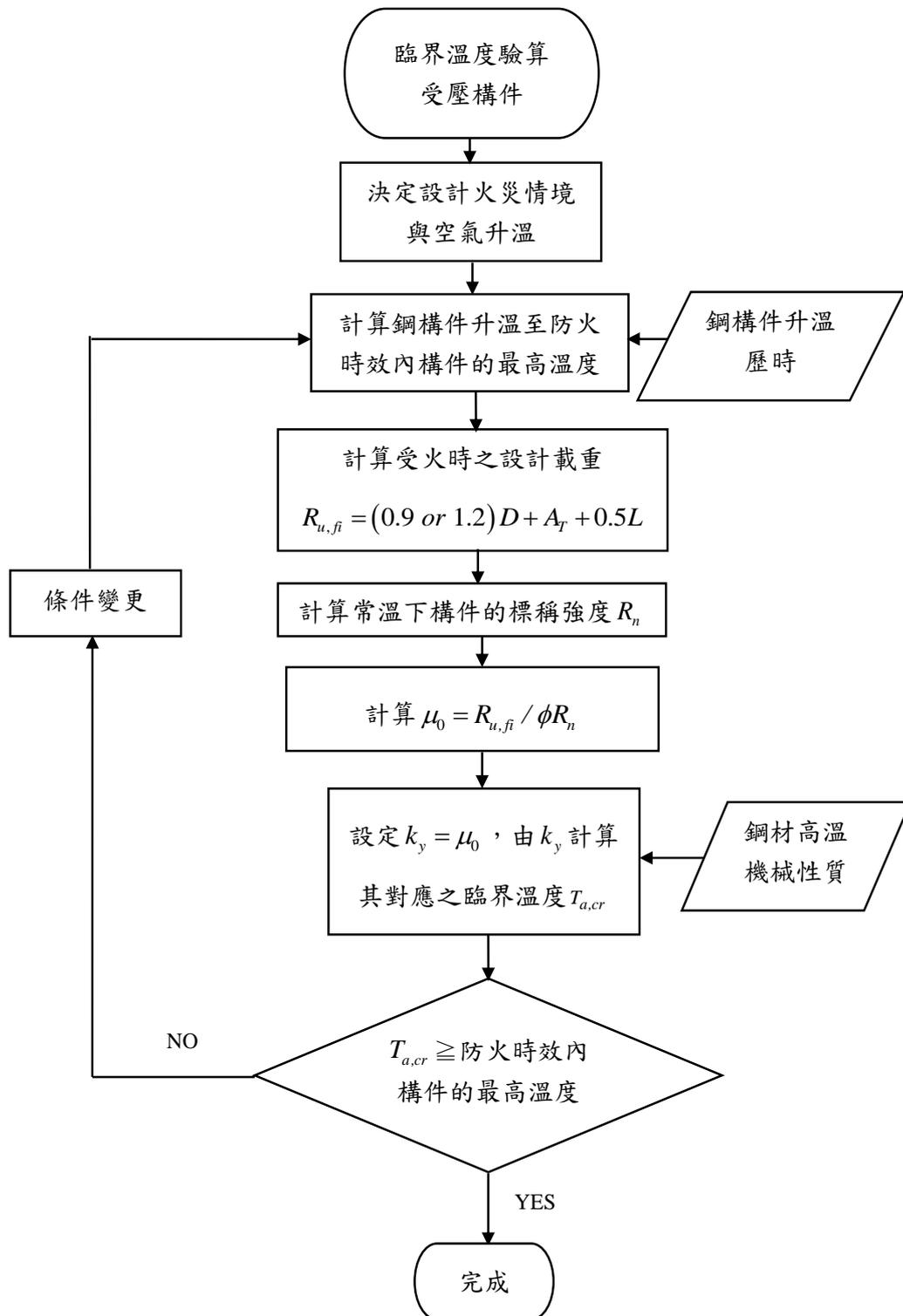
流程圖 6 防火承載力驗算流程圖：承受組合力及扭矩構件



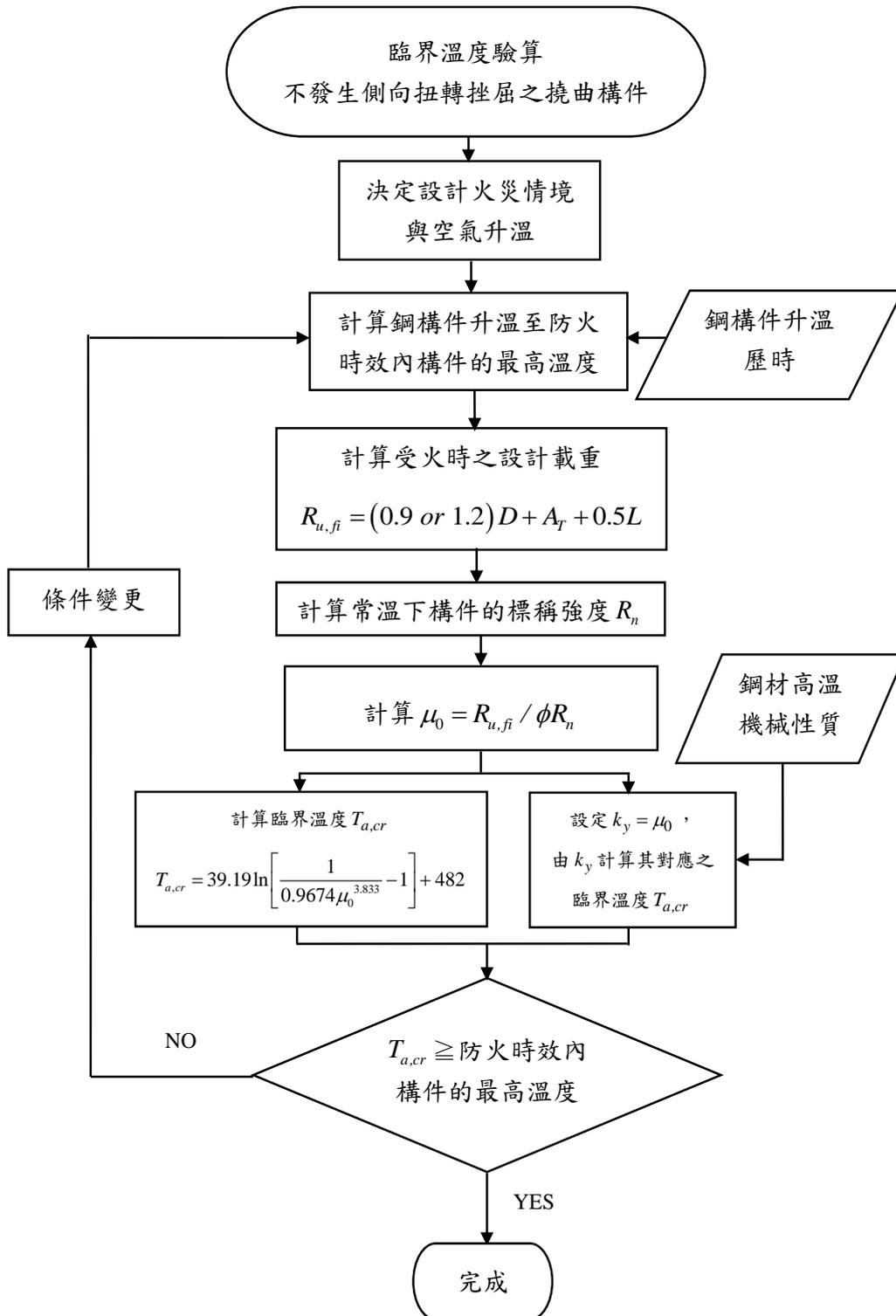
流程圖 7 臨界溫度驗算流程圖：受拉構件



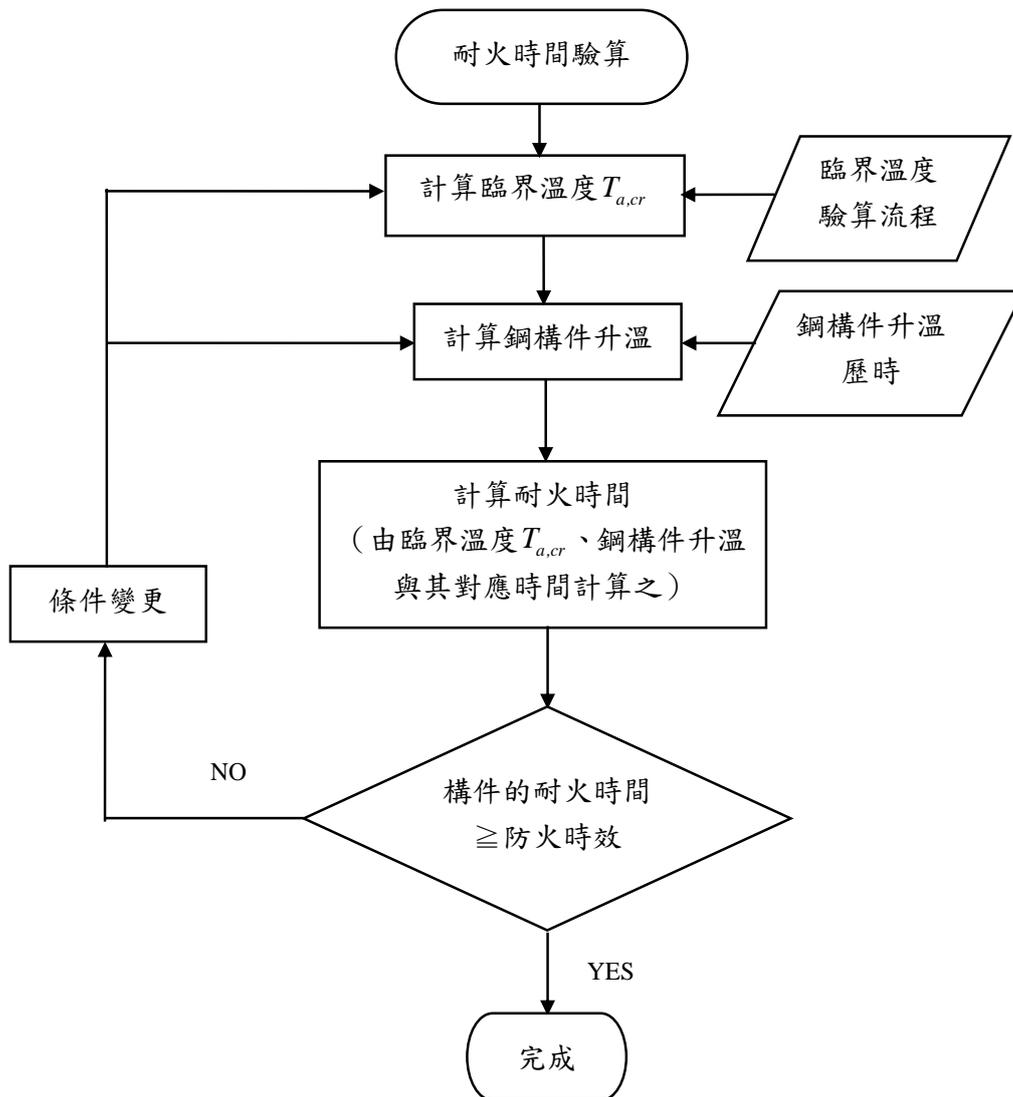
流程圖 8 臨界溫度驗算流程圖：受壓構件



流程圖 9 臨界溫度驗算流程圖：不發生側向扭轉挫屈之撓曲構件



流程圖 10 耐火時間驗算流程圖



附錄二 設計範例

例題 1 受拉構件	96
例題 2 受壓構件	98
例題 3 不發生側向扭轉挫屈之撓曲構件	100
例題 4 不發生側向扭轉挫屈之撓曲構件 (含防火被覆)	101
例題 5 含防火被覆之鋼構件	103
例題 6 受壓構件 (含防火被覆)	104

例題 1 受拉構件

鋼構件斷面為 H190×200×6.5×10 其降伏強度為 2.8 tf/cm²，受火下所承受之軸拉力 $P_{u,fi}$ 為 79.51 tf。此構件未受防火保護且四周皆受火。假設此設計火災情境為區劃火災，升溫曲線使用 ISO 834-1 (2012)標準升溫曲線。其防火時效須達 30 分鐘。

- 計算此構件的臨界溫度
 - 以臨界溫度驗算此構件是否達到規定的耐火性
 - 以耐火時間驗算此構件是否達到規定的耐火性
 - 以承载力驗算此構件是否達到規定的耐火性
- (資料來源：Example 5.1 in Franssen and Real 2015)

解：

- 計算此構件的臨界溫度

$$P_{u,fi} = 79.51 \text{ tf}$$

$$\phi P_n = \phi \cdot F_y \cdot A_g = 0.9 \times 2.8 \times 53.8 = 135.58 \text{ tf}$$

$$\mu_0 = \frac{P_{u,fi}}{\phi P_n} = \frac{79.51}{135.58} = 0.586$$

$$T_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 = 558^\circ\text{C}$$

(以歐規計算之臨界溫度為 576.1°C)

- 以臨界溫度驗算此構件是否達到規定的耐火性

$$W = 42.3 \text{ kg/m}, D = 1.167 \text{ m}, \varepsilon_F = 0.7, c_s = 600 \text{ J/kgK}$$

由手冊 4.2 節之規定計算構件溫度

$$\Delta T_s = \frac{a}{c_s \left(\frac{W}{D} \right)} (T_F - T_s) \Delta t$$

受火 30 分鐘後溫度為 834.2°C。

(以歐規計算受火 30 分鐘後構件溫度為 802°C)

$$558^\circ\text{C} < 834.2^\circ\text{C} \quad \mathbf{NG} \quad (\text{歐規}: 576.1^\circ\text{C} < 802^\circ\text{C} \quad \mathbf{NG})$$

- 以耐火時間驗算此構件是否達到規定的耐火性

由計算構件升溫及臨界溫度可求得構件之耐火時間

$$T_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 = 558^\circ\text{C}$$

耐火時間為 584 s

584 s \div 60 = 9.73 min < 30 min **NG** (歐規 : 14.08 min < 30 min **NG**)

d) 以承载力驗算此構件是否達到規定的耐火性

構件受火 30 分鐘後溫度為 834.2°C

採美國 AISC (2016) 之材料性質 $k_y = 0.1$

$$P_n(T) = k_y \times F_y \times A_g = 0.1 \times 2.8 \times 53.8 = 15.06 \text{ tf (歐規為 16.44 tf)}$$

$$\phi P_n(T) = 0.9 \times 15.06 = 13.55 \text{ tf} < 79.51 \text{ tf} \quad \mathbf{NG}$$

例題 2 受壓構件

有一長 3.5 m 之鋼柱，斷面為 H180×180×8.5×14，其降伏強度為 2.8 tf/cm²，位於中間樓層，受火下所承受之軸壓力 $P_{u,fi}$ 為 50.46 tf。此鋼柱未受防火保護且四周皆受火。假設此設計火災情境為單層之區劃火災，升溫曲線使用 ISO 834-1 (2012) 標準升溫曲線。其防火時效須達 30 分鐘。計算此鋼柱是否達到規定的耐火性。

- 以臨界溫度驗算此構件是否達到規定的耐火性
- 以耐火時間驗算此構件是否達到規定的耐火性
- 以承载力驗算此構件是否達到規定的耐火性

(資料來源：Example 5.4 in Franssen and Real 2015)

解：

已知

$$E = 2040 \text{ tf/cm}^2, F_y = 2.8 \text{ tf/cm}^2, A_g = 65.25 \text{ cm}^2, r = 4.57 \text{ cm}$$

$$L_c = 350 \times 0.5 = 175 \text{ cm}$$

a) 臨界溫度

$$W = 51.2 \text{ kg/m}, D = 1.063 \text{ m}, \varepsilon_F = 0.7, c_s = 600 \text{ J/kgK}$$

由手冊 4.2 節之規定計算構件溫度

$$\Delta T_s = \frac{a}{c_s \left(\frac{W}{D} \right)} (T_F - T_s) \Delta t$$

受火 30 分鐘後溫度為 831.2°C。

(以歐規計算受火 30 分鐘後溫度為 766°C)

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{0.5 \times 350}{\pi \times 4.57} \sqrt{\frac{2.8}{2040}} = 0.452 < 1.5$$

$$F_{cr} = \left(e^{-0.419 \times \lambda_c^2} \right) \times F_y = \left(e^{-0.419 \times 0.452^2} \right) \times 2.8 = 2.57 \text{ tf/cm}^2$$

$$\phi P_n = \phi \cdot F_{cr} \cdot A_g = 0.85 \times 2.57 \times 65.25 = 142.54 \text{ tf}$$

$$\mu_0 = k_y = \frac{P_{u,fi}}{\phi P_n} = \frac{50.46}{142.54} = 0.354$$

可由手冊內表 C2.1-3 內插求得臨界溫度為 648 °C。

(以歐規計算之臨界溫度為 623 °C)

(以建築物構造防火性能驗證技術手冊計算之臨界溫度為 546.2 °C)

648 °C < 831.2 °C **NG** (歐規：623 °C < 766 °C **NG**)

b) 耐火時間

由計算構件升溫及臨界溫度可求得構件之耐火時間

臨界溫度為 648 °C

耐火時間為 838 s

838 s ÷ 60 = 14 min < 30 min **NG** (歐規：17.4 min < 30 min **NG**)

c) 承载力

構件受火 30 分鐘後溫度為 831.2 °C

$$\begin{aligned} \left(\frac{L_c}{r}\right)_T &= \left(1 - \frac{T_s - 32}{n(3600)}\right) \left(\frac{L_c}{r}\right) - \frac{35}{n(3600)}(T_s - 32) \\ &= \left(1 - \frac{831.2 - 32}{1(3600)}\right) \left(\frac{175}{4.57}\right) - \frac{35}{1(3600)}(831.2 - 32) \\ &= 22.02 \end{aligned}$$

使用美國 AISC (2016) 之材料性質 $k_E = 0.084$, $k_y = 0.102$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)_T^2} = \frac{\pi^2 \times 0.084 \times 2040}{22.02^2} = 3.49 \text{ tf/cm}^2$$

$$F_{cr}(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}} \right] F_y(T) = \left[0.42 \sqrt{\frac{0.102 \times 2.8}{3.49}} \right] 0.102 \times 275 = 0.22 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_n(T) = F_{cr}(T) \times A_g = 0.22 \times 65.25 = 14.36 \text{ tf} \quad (\text{歐規為 } 19.67 \text{ tf})$$

$$\phi P_n(T) = 0.85 \times 14.36 = 12.21 \text{ tf} < 50.46 \text{ tf} \quad \mathbf{NG}$$

例題 3 不發生側向扭轉挫屈之撓曲構件

有一長 5 m 之簡支梁，斷面為 H300×150×7.1×10.7，其降伏強度為 2.4 tf/cm²，於受火下所承受之均佈載重 q_{fi} 為 1.272 tf/m。計算其臨界溫度。

(資料來源：Example 5.7 in Franssen and Real 2015)

解：

$$E = 2040 \text{ tf/cm}^2$$

$$F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2$$

$$M_{u,fi} = \frac{q_{fi,Ed} L^2}{8} = \frac{1.272 \times 5^2}{8} = 3.98 \text{ tf-m}$$

$$Z_x = 628.4 \text{ cm}^3$$

$$\phi M_n = \phi M_p = \phi F_y Z_x = 0.9 \times 2.4 \times 628.4 = 1357.344 \text{ tf-cm} = 13.57 \text{ tf-m}$$

$$\mu_0 = \frac{M_{u,fi}}{\phi M_n} = \frac{3.98}{13.57} = 0.293$$

$$T_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 = 667.4^\circ\text{C}$$

(以歐規計算之臨界溫度為 683°C)

(以建築物構造防火性能驗證技術手冊計算之臨界溫度為 550°C)

例題 4 不發生側向扭轉挫屈之撓曲構件（含防火被覆）

有一長 4 m 之簡支梁，斷面為 H300×150×7.1×10.7，降伏強度為 2.4 tf/cm²。其支撐混凝土樓版，於受火下所承受之均佈載重 q_{fi} 為 3.445 tf/m，此梁與混凝土樓版並無交互作用。如果此梁使用水泥纖維防火板（fibre-cement boards）保護，設計火災情境為區劃火災，升溫曲線使用 ISO 834-1 (2012)標準升溫曲線。防火時效須達 90 分鐘，試問防火板的厚度。

（資料來源：Example 5.2 in Franssen and Real 2015）

解：

已知

$$F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2, \quad c_s = 600 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}, \quad W = 42.2 \text{ kg/m}, \quad D = 0.75 \text{ m}$$

$$k_p = 0.15 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}, \quad c_p = 1200 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}, \quad \rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{u,fi} = \frac{q_{fi,Ed} L^2}{8} = \frac{3.445 \times 4^2}{8} = 6.89 \text{ tf-m}$$

$$Z_x = 628.4 \text{ cm}^3$$

$$\phi M_n = \phi M_p = \phi F_y Z_x = 0.9 \times 2.4 \times 628.4 = 1357.344 \text{ tf-cm} = 13.57 \text{ tf-m}$$

$$k_y = \mu_0 = \frac{M_{u,fi}}{\phi M_n} = \frac{6.89}{13.57} = 0.508$$

可由手冊內表 C2.1-3 內插求得臨界溫度為 594 °C。

假設防火被覆厚度為 18 mm（歐規為 15 mm）

$$18 \text{ mm} = 0.018 \text{ m}$$

$$c_s W / D = 600 \times \frac{42.2}{0.75} = 33760$$

$$2d_p \rho_p c_p = 2 \times 0.018 \times 800 \times 1200 = 34560$$

$$c_s W / D < 2d_p \rho_p c_p$$

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{d_p} \left[\frac{T_F - T_s}{c_s \left(\frac{W}{D} \right) + \frac{c_p \rho_p d_p}{2}} \right] \Delta t$$

表 4-1 H300×150×7.1×10.7 鋼材升溫歷時

時間(s)	火災溫度(°C)	鋼材溫度(°C)	ΔT_s
5390	1005.7	590.8	0.4
5395	1005.9	591.2	0.4
5400	1006.0	591.6	0.4

時間至 90 分鐘時，鋼材溫度為 591.6 °C

591.6 °C < 594 °C **OK**

例題 5 含防火被覆之鋼構件

鋼構件斷面為 H203×166×7.2×11.8， $W/D=48 \text{ kg/m}^2$ ，假設設計火災情境為區劃火災，升溫曲線採 ASTM E119 (2018)之標準升溫曲線，並使用厚度為 2.54 cm 輕量防火被覆 (lightweight SFRM)，試問時間於 120 分鐘時，此構件之溫度。

(資料來源：Ruddy, et al., 2003)

解：

已知

$$c_s = 540 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C} , k_p = 0.135 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C} , c_p = 754 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C} , \rho_p = 293 \text{ kg/m}^3$$

使用手冊之式(4.2-3)：
$$\Delta T_s = \frac{k_p}{c_s d_p \left(\frac{W}{D}\right)} (T_F - T_s) \Delta t$$

時間於 120 分鐘時，此構件溫度為 707.3 °C

使用手冊之式(4.2-5)：
$$\Delta T_s = \frac{k_p}{d_p} \left[\frac{T_F - T_s}{c_s \left(\frac{W}{D}\right) + \frac{c_p \rho_p d_p}{2}} \right] \Delta t$$

時間於 120 分鐘時，此構件溫度為 673.2 °C (measured temperature 為 649 °C)

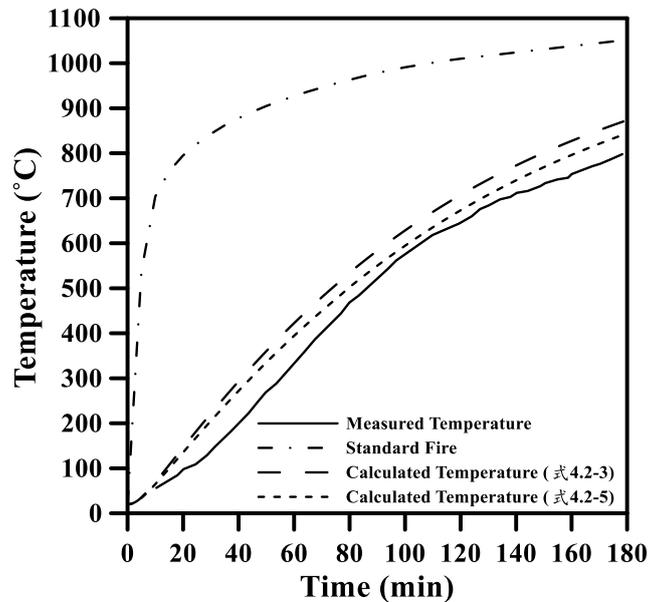


圖 5-1 H203×166×7.2×11.8 鋼材升溫歷時比較圖

例題 6 受壓構件 (含防火被覆)

有一長 2.8 m 之鋼柱，斷面為 H220×220×9.5×16，降伏強度為 2.4 tf/cm²。位於中間樓層，受火時所承受之軸壓力 $P_{u,fi}$ 為 100 tf。此鋼柱使用厚度為 20 mm 的石膏板保護，假設其四周皆受火且設計火災情境為區劃火災，升溫曲線使用 ISO 834-1 (2012)標準升溫曲線，計算其耐火時間。

(資料來源：Example 5.5 in Franssen and Real 2015)

解：

已知

$$F_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2, c_s = 600 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}, W = 71.5 \text{ kg/m}, D = 0.88 \text{ m}$$

$$A_g = 91.04 \text{ cm}^2, r = 5.59 \text{ cm}, L_c = 280 \times 0.5 = 140 \text{ cm}$$

$$k_p = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}, c_p = 1700 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}, \rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{0.5 \times 280}{\pi \times 5.59} \sqrt{\frac{2.4}{2040}} = 0.273 < 1.5$$

$$F_{cr} = \left(e^{-0.419 \times \lambda_c^2} \right) \times F_y = \left(e^{-0.419 \times 0.273^2} \right) \times 2.4 = 2.33 \text{ tf/cm}^2$$

$$\phi P_n = \phi \cdot F_{cr} \cdot A_g = 0.85 \times 2.33 \times 91.04 = 180.3 \text{ tf}$$

$$\mu_0 = k_y = \frac{P_{u,fi}}{\phi P_n} = \frac{100}{180.3} = 0.555$$

可由手冊內表 C2.1-3 內插求得臨界溫度為 577 °C。

(以歐規計算之臨界溫度為 565 °C)

防火被覆厚度為 20 mm

$$20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m}$$

$$c_s W / D = 600 \times \frac{71.5}{0.88} = 48750$$

$$2d_p \rho_p c_p = 2 \times 0.02 \times 800 \times 1700 = 54400$$

$$c_s W / D < 2d_p \rho_p c_p$$

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{d_p} \left[\frac{T_F - T_s}{c_s \left(\frac{W}{D} \right) + \frac{c_p \rho_p d_p}{2}} \right] \Delta t$$

表 6-1 H220×220×9.5×16 鋼材升溫歷時

時間(s)	火災溫度(°C)	鋼材溫度(°C)	ΔT_s
6110	1024.5	575.8	0.4
6115	1024.6	576.2	0.4
6120	1024.7	576.6	0.4

時間至 102 分鐘時，鋼材溫度為 576.6 °C，接近臨界溫度 577 °C，故其耐火時間為 102 分鐘。

(以歐規計算之耐火時間為 105 分鐘)

附錄二 審查意見與答覆

壹、期初審查意見與答覆

會議日期：107年1月17日，上午09時30分

地點：內政部建築研究所會議室

新北市新店區北新路三段200號15樓

項次	審查委員意見	廠商回應
1	建議將內政部建築研究所歷年鋼構方面之研究實驗資料(本土化資料)納入手冊。	遵照辦理。
2	各國規範請以適合我國國情進行分析比較，並依各國規範分別進行示範案例設計較為具體；此外，建議考量防火被覆失效後依此手冊設計仍可具有多少耐火性能。	因國內此方面研究較少，本研究將充分比較與了解各國規範之差異，並考量國內習慣使用的設計規範。惟設計案例將視各國規範之可行進行之。防火被覆失效情況不一，防火設計技術手冊將難以評估其期失效後之耐火性能。
3	設計時以 ISO 834 之標準升溫曲線，但標準升溫曲線講求均溫性，而真實火災依起火點及火災成長過程為非均溫，對於鋼材之情形為何？可否考量檢討。	因實際火災需考量不同環境之熱釋放率、通風等諸多因素，而導致無固定升溫標準。各國規範皆簡化火場的升溫為標準升溫曲線，真實火災之影響應為另案之研究。
4	研究流程建議先完成各國規範分析比較後，研擬出草案，再行召開諮詢會議，以免至年度結束尚未能提出可行之手冊。	遵照辦理。先期之諮詢會議將討論手冊涵蓋之大綱。

5	建議彙整火害後的構件性能折減率，以供火害後抗震能力之評估。	各國防火設計規範皆在評估未曾受火害結構之耐火性能，火害後之結構性能非本手冊之範圍。
6	建議在第一次專家學者諮詢時，完成探討及比較各設計方法，並在期中審查時先提技術參考手冊之初步架構內容。	遵照辦理。
7	關於載重組合下結構構成或構件的耐火時間之問題，建議考量各種災害與火害同時發生之可能性。	國外防火設計規範目前之載重組合並未考量各種災害與火災同時發生。
8	對於本手冊中各種規範之提出，建議附上相關說明、設計或計算例。	遵照辦理。
9	所完成之「防火設計技術參考手冊」與 2008 年之「防火性能驗證技術手冊」未來是並存或是取代。	兩手冊的應用並不相同，未來之並存。
10	未來結構防火設計是一個單獨的設計規範或是併入鋼結構設計規範中。	本研究目前僅研擬技術參考手冊。
11	防火設計是否有針對建築物不同的使用(如住宅或辦公室等)有不同的重要係數？	本研究將參考國內外規範及研究之相關內容，探討及彙整後提供說明。
12	本案主要為彙整各國規範及考量國內施工、材料及設計等因素做成規範建議，並對防火建築物之設計及施工進行探討，有無提前完成之可能性。	手冊之草擬除參考國外設計規範及參酌國內實務習慣使用之設計與研究成果，且尚需數次專家學者諮詢以符合我國國情需要，故仍須充裕時間以至完善。
13	建議於研究之初界定防火設計之目	國外規範對有無防火被覆皆有防

	標是基於有防火被覆或裸鋼情境下的設計方式(因對國內影響可能很大)。	火設計。
14	所謂的性能式設計，請再予以說明是否可於法規間自由選擇使用。	國內目前並無防火性能設計法。
15	請針對有無防火設計之績效差異稍做分析。	鋼構造建築物皆要有防火設計，目前國內為建築技術規則之條列式規定。國外之防火設計規範則可以計算或試驗方式，依防火需求進行防火設計。

貳、第一次專家學者諮詢座談會

會議日期：107年5月4日，下午02時00分

列席：陳博士柏端、李博士其忠

地點：內政部建築研究所會議室

新北市新店區北新路三段200號15樓

委員	專家學者意見	答覆
方教授一匡	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議針對第三章與第四章的相關規定增列設計例，補充說明如何用本手冊的材料熱性質及設計方法。 2. 第三章的防火設計基本規定應是銜接現行建築技術規則中建築施工篇第三章的規定，請註明構件升溫曲線的依據。 3. 附錄一總則的1.2節「用語」，建請加註英文原文，並補充更多手冊中分析方法所用術語納入。 4. 第四章的防火分析方法所用火載量及相關開窗條件如何納入考量。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 遵照辦理。 4. 火載量及相關開窗條件可參考Eurocode 1 Part 1-2 (2002)附錄D之規定。
柯技師鎮洋	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設計例中，請列出設計流程，使用者較易掌握設計正確性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。
鍾教授興陽	<ol style="list-style-type: none"> 1. 有關鋼材與螺栓的高溫折減係數建議可以蒐集一些本土鋼材螺栓的資料。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 目前各國規範對螺栓孔高溫的間距與邊距皆無異於常溫之規

	<ol style="list-style-type: none"> 2. 是否有要將螺栓孔高溫的間距、邊距規定納入？ 3. 是否有載重比與破壞溫度相關性之規定。 	<p>定。</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 本手冊之鋼結構與構件臨界溫度驗算之規定係參考 Eurocode 3 Part 1-2 (2005b)之規定，即為載重比與破壞溫度之相關性。
<p>梁技師宇宸</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設計火災情境與空氣升溫是否有消防署的比對資料，或其它情況之升溫。 2. 適用方法應定義出更為明確，此手冊比較接近性能設計的概念，是否說明與目前規範之差別。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本手冊之設計火災情境與空氣升溫係參考各國規範之相關規定，其規定之升溫較於實際情形相對嚴苛。 2. 目前建築物防火之規定於「建築技術規則」，為條列式的規定。本手冊為防火性能設計之概念。
<p>涂教授耀賢</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 手冊 3.2.1 節規定「變形須未達變形破壞判定標準」，但第三章及第四章未提供相關標準，建議可以提供較確定規定值。 2. 各國規範對於材料性質之差異性大，但附錄一 2.1 節公式中鋼材材料性質採用之數值並未確定，是否為保留工程師自行判斷空間，如此是否造成設計差異大。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 變形破壞判定標準可依據第五章驗證試驗之承重能力性能基準。 2. 於手冊第二章解說提供之各國規範之規定，乃提供設計者可依其使用之鋼材，擇取與其相近鋼材於溫度變化下之材料性質。

參、期中審查意見與答覆

會議日期：107 年 7 月 18 日，上午 09 時 30 分

地點：內政部建築研究所會議室

新北市新店區北新路三段 200 號 15 樓

委員	專家學者意見	答覆
張教授大鵬	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書第 84 頁參考文獻中，建研所、營建署、Eurocode、日本建築學會等若有編號建議列出，並用於本文中(如第 41 頁)。 2. 報告書第 41 頁 2.1 節鋼材高溫機械性列出日本、AISC、Eurocode、中國大陸、國內研究等 5 個機構之相關數據，建議彙整列表並做比較。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理，已將相關比較納入。
黃理事長科銘	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書第二章 2.1 節鋼材高溫機械性質，其中日本與國內均有定義鋼材種類，但其他國家如 AISC (2016)、Eurocode 3 (2005)、中國大陸(2017)並未規定鋼材種類，由於仍有差異，建議於手冊中列出最佳參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供各國規範之鋼材於各溫度下之材料性質，乃提供設計者可依其使用之鋼材，擇取與其相近之鋼材材料性質。
劉技師賢淋	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書第 51 頁「2.2.2 比熱」定義建議修正為單位「質量」物質升高 1°C 所需熱能。第 55 頁「3.1 載重組合與需求強度」3.1-1 式中 $A_T =$ 由 4.1 節定義之設計火災情境造成 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 已於 1.3 節說明引用兩者之章節及代表意義。 3. 符號 T_s 表示為不同曝火時間下之鋼材溫度。

	<p>的力量「與變形」，建議刪除「與變形」3字。</p> <p>2. 報告書第37頁「1.3符號」中D代表靜載重及熱周長2種，建議加下標以做區隔，第59頁有關熱周長D建議增加特別說明與單位。第69頁(5.3-1式)與第70頁(5.3-2式)中D與前述符號重複，建議以d或其他符號表示。</p> <p>3. 報告書「4.2鋼構建升溫計算」各式中T_s = 鋼材溫度是否為「火災前鋼材溫度」？還是各種不同曝火時間者？</p> <p>4. 報告書內容提及參考規範中「中國大陸規範」是否用「中國規範」較適合？</p> <p>5. 鋼材受熱加熱之應力應變曲線在不同冷卻方式後殘留應變問題，請加以描述。</p> <p>6. 各種不同形式鋼材受火害後工程性質變化，建議增加圖形表示較易明瞭。</p>	<p>4. 依國內慣用，以「中國大陸規範」表示。</p> <p>5. 本手冊著重於防火設計，鋼材受熱冷卻後之殘留應變可參考他處之研究成果。</p> <p>6. 已於第二章納入鋼材受熱性質之比較圖。</p>
<p>陳技師正平</p>	<p>1. 火害後以變形超過標準視為破壞，因變形對梁與柱影響程度不同，建議將梁及柱判斷標準做區隔。</p>	<p>1. 第五章5.2節有界定撓曲構件及軸向承重構件之破壞判定基準。</p>

	<ol style="list-style-type: none"> 2. 火害設計之載重組合是否須考慮地震，因為此二種災害機率發生差異性大，建議排除地震力之考量。 3. 報告書第 65 頁 7 接頭：「若接頭之耐火性較任一接合構件優異，...可視為耐火性能滿足防火需求」，但若接合構件不滿足則接頭雖較優異仍不見得可滿足，本項內容說明請再詳加考量。 	<ol style="list-style-type: none"> 2. 由於建築火災時之承載多為使用性載重，因此本手冊之載重組合不包含地震力之影響。 3. 遵照辦理，已修正。
<p>林研究員克強</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本防火設計技術參考手冊，對於防火設計應有設計實務上的效益。 2. 在本設計手冊中，目前較明確的規定主要在承載力上，但在變形與相關構件失敗之評估與檢核著墨較少，請說明規劃的趨勢為何？ 3. 鋼材比熱受溫度之影響在約 735°C 有較顯著差異，本手冊簡易假設為定值 600 J/kgk，其可能影響為何？ 4. 本手冊之適用範圍，建議以更嚴謹的方式定義。另耐火時間如何計算，亦請加以說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的肯定與支持。 2. 構造的防火性能包括結構的穩定與崩塌，一般須以程式分析，可參考國外如歐規的分析。 3. 各國規範皆列舉鋼材熱性質，在各溫度下其性質會有所差異，因此在設計上，可採簡化之定值或各溫度下之數值計算。 4. 遵照辦理。
<p>劉教授光晏</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本報告應以「防火設計」或「耐火設計」為準，宜檢討後再訂定之；針對「結構」、「構造」與「構件」，亦應有明確定義。 2. 目前市面上是否具有合適（簡易且 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本手冊之名詞使用皆依「建築技術規則」及「中國國家標準」之用語。 2. 國外如歐規有相關分析程式可供設計者使用。

	<p>偏安全)分析工具,可進行手冊第四章之分析工作?</p> <p>3. 建議增加附錄,以試算案例教導工程師進行分析工作。</p> <p>4. 若採第五章設計,是否代表建築物構造必須完成CNS 12514-1試驗?則該結構還可繼續使用嗎?又如何控制現地結構之火載條件,可以符合標準升溫曲線?</p>	<p>3. 遵照辦理。</p> <p>4. 建築物可依分析或實驗方式驗證其耐火性能是否符合防火規定。以區劃火災而言,標準升溫曲線一般較為保守。</p>
<p>臺北市結構工程工業技師公會林技師文宗</p>	<p>1. 本設計手冊建議需有解說及案例說明,並與技師相關公會辦理說明會。</p>	<p>1. 遵照辦理。</p>
<p>中華民國全國建築師公會 陳建築師澤修</p>	<p>1. 鋼結構防火設計,針對鋼構件之耐火極限、承載力及臨界溫度之探討,最主要在探討鋼材受熱後應力的折減及其極限狀況,而實際最重要是防火被覆應如何設計,如何阻隔熱度侵害到鋼材料,這部分是否在本研究結論中加以建議。</p>	<p>1. 本手冊於第四章4.2節有提供受防火被覆下之構件升溫計算,並將於附錄中提供相關設計例以供設計者參考。</p>

肆、期末審查意見與答覆

會議日期：107 年 10 月 30 日，下午 02 時 30 分

地點：內政部建築研究所會議室

新北市新店區北新路三段 200 號 15 樓

委員	專家學者意見	答覆
劉教授光晏	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究成果亦使用 Eurocode 3 公式，但報告書摘要文字說明僅列出依據 AISC(2016)附錄之鋼構造防火設計，建議加以補充。 2. 請列出本報告與 2008 年「建築物構造防火性能驗證技術手冊」之主要差異，突顯技術精進處。 3. 報告書第 35 頁 1.1 節適用範圍內容，建議修正為「除本手冊外，鋼構造建築物之防火設計...」。 4. 報告書第 59 頁 3.1 節解說內容，「當靜載重有穩定結構之效果」之情形應如何判定，請詳加說明。 5. 報告書第 96 頁例題 1-例題 3 梁構件計算結果顯示，未受防火保護鋼構件之設計成果均為 NG，雖屬合理，但與規範須有防火被覆規定有落差，建議可多增列有防火保護之案例。 6. 本手冊公式眾多，未來建議可開發程式以評估單一構件之防火設計成果。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 本報告之防火設計可依承载力、耐火時間、臨界溫度之規定進行，而「建築物構造防火性能驗證技術手冊」僅規定構造保有耐火時間不小於火災繼續時間。 3. 遵照辦理。 4. 亦即靜載重的存在對建築物防火性能有利時。 5. 遵照辦理。已增列有防火被覆之範例。 6. 程式的開發有待後續的研究。

<p>張技師清雲</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 防火設計技術手冊與目前使用鋼構防火時效如何搭配使用？ 2. 各種防火材料之防火時效通常以試驗驗證，如果防火分析設計與防火性能驗證技術手冊有衝突時如何處理，請說明。 3. 建築技術規則對構造防火時效有各種規定，此防火設計手冊在將來如何與建築技術規則搭配使用？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 防火設計亦需符合防火時效之要求，本手冊以此概念並參照國外相關設計規範，提供分析方法，驗算承载力、耐火時間或臨界溫度之一，經計算驗證後滿足條件，即符合防火時效。 2. 兩者的不一致將有限，因防火分析設計方法基本上已經實驗驗證過，可採取三種驗算方法之一。而防火性能驗證技術手冊只提供一種驗算方式。 3. 防火設計亦需符合建築技術規則之規定。
<p>陳技師正平</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 以國內全區屬地震帶是否還需進行防火設計，是否符合現行防火時效之規定即可，請詳加說明。 2. 防火時效為逃生用途，建築結構於火害後不可能不需修復，是否還有必要作防火設計。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 防火設計於地震帶的建築物仍是必要的，防火設計仍需符合建築技術規則內防火時效之規定。 2. 防火設計仍使建築物達到防火時效的要求的設計方法。
<p>劉技師賢淋</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告總目錄內未將附錄之設計範例 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設計範例為手冊之一

	<p>1-5(第 95-103 頁)列入，若其為附錄二，則「審查意見與答覆」應為附錄三。</p> <p>2. 附錄一「設計參考手冊」條文內解說部分常有類似以下敘述，如「4.1 設計火災情境與空氣升溫」解說：「火載量密度之計算，可參考 Eurocode 1 Part 1-2 附錄 E 之規定」，請考量這些參考規定是否需附於手冊內，以利工程設計者參閱。</p> <p>3. 建議事項一與二均屬可行，惟建議二「防火保護材料熱性質參數建立之研究」可優先辦理。</p>	<p>部份，因此總目錄之附錄一即包含設計範例。</p> <p>2. 由於各國規範如歐規等，其內容說明及公式眾多，若引用分量多，本報告僅列出參考來源。</p> <p>3. 遵照辦理。</p>
<p>中華民國全國 建築師公會 陳建築師澤修</p>	<p>1. 鋼構件之防火時效與其材質及斷面尺寸有關，若防火需求的尺寸大於結構分析時，要如何取捨，請說明。</p> <p>2. 報告書第 76 頁 5-2 節承重能力性能基準，說明之第二行，「遮驗性」應修正為「遮焰性」。</p>	<p>1. 可增加防火保護材料使用量。</p> <p>2. 已修正。</p>

伍、第二次專家學者諮詢座談會

會議日期：107 年 11 月 15 日上午 10 時 00 分

地點：國立交通大學工程二館 208 室

新竹市大學路 1001 號

委員	專家學者意見	答覆
涂教授耀賢	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究案對工程師很實用，手冊亦提供示範例，對使用者十分友善。 2. 手冊條文之單位採 SI 制，而示範例單位採公制，建議可提供簡易之單位換算。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指教。 2. 遵照辦理。惟諸多公式的計算與採用何種單位並不相關。
廖組長仁壽	<ol style="list-style-type: none"> 1. 「建築技術規則」引用的年份須一致。 2. 設計範例例題 2 的計算有錯誤。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 已修正。
劉教授俊秀	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可參考加拿大的鋼構造防火設計規範。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加拿大的鋼結構防火設計規範與美國相似。
鄭教授復平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議鋼材材料性質之使用以保守為原則。 2. 建議於 2.1 節解說內之表格加入單位換算。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已於手冊本文採用 Eurocode 所建議（與 AISC 一致）的鋼材高溫機械性質。 2. 遵照辦理。

陸、第三次專家學者諮詢座談會

會議日期：107 年 11 月 27 日，下午 03 時 00 分

地點：內政部建築研究所會議室

新北市新店區北新路三段 200 號 15 樓第三會議室

委員	專家學者意見	答覆
涂教授耀賢	1. 本研究及手冊多處說明可參考相關研究故參考文獻至為重要，建議再次確認文中參考文獻表示之正確性。	1. 遵照辦理。
方教授一匡	1. 在摘要中提到本研究主要依據美國 AISC 設計規範附錄相關規定，在本研究附錄所列建議之規範條文解說中有許多地方引用 EC3，建請再分別註明清楚引用資料之來源。 2. 在本研究末尾附有規範條文應用之計算例，對應用本資料者很有幫助。 3. 報告書第 84 頁與第 85 頁，請註明防火設計流程圖可選用其中任何一種，加第 84 頁的流程圖中註明，構件的升溫條件參考第 85 頁的建議方法。	1. 遵照辦理。 2. 感謝指教。 3. 遵照辦理。
林研究員克強	1. 設計手冊中所定義之 Demand 及 Capacity 應一致匹配。 2. 手冊中部分條文與規定無關	1. 遵照辦理。因高溫下承載力的驗算依據 AISC，故鋼材高溫機械性質採與 AISC 所建

	<p>之形容詞建議放至解說中。</p> <p>3. 建議 2.1 節之鋼材高溫機械性質應於條文中明訂一種方法。</p>	<p>議相同的 Eurocode。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> <p>3. 已修正，採 Eurocode（與 AISC 一致）之建議。</p>
陳技師照堂	<p>1. 附錄一第 53 頁圖 C2.1-4 鋼種 SM490 及 SM400 受溫後折減係數有大於 1.0 之情形，請酌著此圖採用之適合性。</p> <p>2. 針對銲道受熱後其機械性質是否有折減係數參考圖表供使用。</p>	<p>1. 實驗所得資料顯示有高於 1.0，建議保守取為 1.0。</p> <p>2. 可參考 2.1 節解說內所附 Eurocode 3 的建議。</p>
梁技師宇宸	<p>1. 高強度鋼種製成異於其他中等強度鋼材，是否也適用可列為將來研究的方向之一。</p>	<p>1. 感謝指教。高強度鋼材的適用性有待後續的研究。</p>

參考書目

- Agarwal, A. and Varma, A.H. (2011). “Design of Steel Columns for Fire Loading Including Effects of Rotational Restraints.” Engineering Journal, AISC, Vol. 48, No.4, 297-314.
- Agarwal, A. and Varma, A.H. (2014). “Fire Induced Progressive Collapse of Steel Building Structures: The Role of Interior Gravity Columns.” Engineering Structures, Special Issue on Fire Analysis of Structures, Elsevier, Vol. 58, 129-140.
- AISC (2016). “Specification for structural steel buildings.” ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- ASCE/SFPE Standard (1999). Standard calculation methods for structural Fire Protection, Structural Engineering Institute.
- ASTM E119 (2018). “Standard test methods for fire tests of building construction and materials.” American Society for Testing and Materials.
- Chung, H. Y., Lee, C. H., Su, W. J., Lin, R. Z. (2010). “Application of fire-resistant steel to beam-to-column moment connections at elevated temperatures.” Journal of Constructional Steel Research, 66, 289–303.
- Ellingwood, B. and Corotis, R.B. (1991). “Load Combinations for Building Exposed to Fires.” Engineering Journal, AISC, Vol. 28, No. 1, 37-44.
- ENV 13381-1 (2001) “Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1 : Horizontal protective membranes”, European Committee for Standardization, 2001.
- ENV 13381-2 (2002) “Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 2 : Vertical protective membranes”, European Committee for Standardization, 2002.
- ENV 13381-4 (2002) “Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 4 : Applied Protection to Steel Members”, European Committee for Standardization, 2002.
- Eurocode 1 (1991), “Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures”, EC1

- 1991-2-2, Comite Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- Eurocode 1 (2002). “Actions on structures, Part 1.2, General actions – Actions on structures exposed to fire”, Eurocode 1 DD ENV 1991-1-2 : 2002, British Standards Institution, London.
- Eurocode 3 (2005a). “Design of steel structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings”, Eurocode 3 DD ENV 1993-1-1 : 2005, British Standards Institution, London.
- Eurocode 3 (2005b). “Design of steel structures, Part 1.2, General rules - Structural fire design” Eurocode 3 DD ENV 1993-1-2 : 2005, British Standards Institution, London.
- Franssen, J. M. and Real, P. V. (2015). “Fire design of steel structures”, 2nd ed., European Convention for Constructional Steelwork.
- Harada, K. (2003). 日本新建築標準的結構抗火設計，建築鋼結構進展，第5卷，第2期，46-56。
- ISO 834-1. (2012). “Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements.” International Standard ISO 834, Geneva.
- Liew, J. Y. R., Tang, L.K., Holmaas, T., Choo, Y.S. (1998). “Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire”, Journal of Constructional Steel Research.
- NIST (2014). “Structural design for fire : A survey of building codes and standards”, NIST Technical Note 1842, National Institute of Standards and Technology.
- Ruddy, J.L., Marlo, J.P., Ioannides, S.A. and Alfawakhiri, F. (2003). “Design guide 19 : Fire resistance of structural steel framing”, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- SFPE (2002). “Handbook of Fire Protection Engineering”, 3rd ed., P.J. DiNenno (ed.), NFPA, Quincy, MA.
- SFPE (2007). “Standard calculation methods for structural fire protection”, ASCE/SEI/SFPE 29-05, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- 中華人民共和國國家標準 GB 50017 (2003)，「鋼結構設計規範」，中華人民共和

- 國建設部、中華人民共和國國家質量監督檢驗檢疫總局。
- 中華人民共和國國家標準 GB 51249 (2017)，「建築鋼結構防火技術規範」，中國計劃出版社。
- 中華民國國家標準 CNS 12514-1 (2014)，「建築物構造構件耐火試驗法，第一部：一般要求事項」，經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 14651 (2008)，「建築物防火詞彙—一般火災現象用語」，經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 14652 (2008)，「建築物防火詞彙—防火試驗用語」，經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS 14996 (2006)，「建築物防火詞彙—防火安全用語」，經濟部標準檢驗局。
- 內政部建築研究所(2008)，「建築物構造防火性能驗證技術手冊」，內政部建築研究所。
- 內政部營建署(2010)，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範鋼結構極限設計法規範及解說」。
- 內政部營建署(2018)，「建築技術規則」，台北，台灣。
- 日本建築學會(2017)，「鋼構造耐火設計指針」，東京。
- 李國強(2001)，「現代鋼結構抗火設計方法」，第二屆海峽兩岸及香港鋼結構技術交流會。
- 莊有清，「鋼材在高溫環境下之行為探討」，國立成功大學土木工程學系碩士論文，(2004)，邱耀正指導。
- 許睿佳，「SN490 銲接 H 型鋼柱高溫結構行為研究」，國立高雄第一科技大學營建工程系碩士論文，(2007)，楊國珍指導。

鋼構造建築物防火設計技術參考手冊之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳誠直、楊國珍、洪政鴻、莊鎬璟

出版年月：107年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-05-7455-5（平裝）