

承受無偏心載重含繫桿填充式箱型鋼柱之高溫行為研究

Behavior of Axially Loaded Concrete-filled Steel Box Columns with Tie Rods Exposed to Fire

李其忠¹ 何明錦² 方一匡³ 陳誠直⁴ 林政億⁵

¹內政部建築研究所副研究員 E-mail:chichung@abri.gov.tw, 06-2392755#1206

²內政部建築研究所所長

³國立成功大學土木工程學系教授

⁴國立交通大學土木工程學系教授

⁵國立交通大學土木工程學系博士

摘要

本文旨在探討含繫桿填充式箱型鋼柱承受不同無偏心載重下之高溫中行為，製作 2 根含繫桿填充式箱型鋼柱試體，柱斷面尺寸為 600×600×19 mm (B×H×t)，高度 3060 mm，鋼材為 A572 Grade 50 及自充填混凝土，繫桿尺寸用 A325 材質，直徑 25 mm，柱兩端為固定，柱施加载重比為 0.2 及 0.5 (載重比定義為施加载重除以填充式箱型鋼柱標稱強度)，依據 CNS 12514-1 進行耐火試驗，實驗結果發現柱試體施加载重比為 0.2，具有 2 小時防火時效，而施加载重比為 0.5，未達 1 小時防火時效，試體承受之軸向載重大小對防火時效影響很大。另繫桿可以減緩試體壓縮變形速率，但對於試體膨脹伸長變形之行為較無影響。

關鍵字：填充式箱型鋼柱、高溫、繫桿

Abstract

To study the behavior of axially loaded concrete-filled steel box columns with tie rods subjected to elevated temperature. Two specimens were tested under concentric load and elevated temperature according to CNS 12514-1. The length of the specimens was 3060 mm and the cross section was 600 mm square. The tie rod was ϕ 25 mm. The concrete was self-compacting concrete. Axial compression, corresponding to either 0.2 or 0.5 times column axial compressive strength, was applied to the specimens

The test results showed that the concrete-filled steel box columns with tie rods axially expanded and elongated due to the increase of furnace temperature. The elongation changed to shortening after the specimens reached their maximum elongation. However, the temperature of the concrete filled inside the box columns was still low, and the axial deformation of the specimens maintained a stable state. Finally, the rate of axial compressive deformation increased and the specimens reached their failure. The specimens subjected to load ratio of 0.2 revealed that the concrete filled inside the box columns effectively enhanced the fire resistance. The specimens with smaller load ratio resulted in a better fire resistance.

Keywords: concrete filled steel box column, fire, tie rod

一、前言

鋼骨鋼筋混凝土構造(SRC)兼具鋼骨(SS)與鋼筋混凝土(RC)的特性與優點，經由適當設計之構造具備良好的耐震能力。SRC結構體中，柱構件係支承其他承受荷重桿件(如梁、版)，在火害作用下，柱塌陷將會影響其它構件之穩定性。國內高樓層建築普遍採用填充式箱型鋼柱(Concrete Filled Box Column, CFBC)，為四片鋼板銲接組裝成箱型鋼柱並於柱內填充混凝土。填充式箱型鋼柱受高溫時，由於鋼材與混凝土熱性質不同，以致其結構行為複雜，有必要探討填充式箱型鋼柱在高溫中之行為。內政部建築研究所自100年展開「鋼骨鋼筋混凝土構造火害及耐火性能設計研究計畫」，進行一系列有關全尺寸無防火被覆的填充式箱型鋼柱耐火試驗與研究[1-4]，探討填充式箱型鋼柱之耐火性能影響參數及其影響程度，其結果顯示，影響其耐火性能參數之影響程度依序為軸向載重大小、有無配置縱向主筋與斷面尺寸。剪力釘可些微增加填充式箱型鋼柱受軸壓力時之耐火性能時間，並提出無防火被覆的填充式箱型鋼柱防火時效評估公式。

現在工程界使用填充式箱型鋼柱，施工時必須加上繫桿，以避免箱型柱因混凝土壓力向外變形，陳正誠等人[5]研究將繫桿作為結構用途，試驗結果發現，經由適當設計並配置圍束繫桿後，挫屈形狀被侷限在繫桿之間，隨著繫桿對混凝土提供之圍束應力增加，試體局部挫屈與開裂也越晚發生，而且開裂形式由縱向裂縫轉為縱向及橫向裂縫，因此能有效提升挫屈強度、延後挫屈發生時間及提升填充式箱型鋼柱撓曲韌性。然而，繫桿對其耐火性能之影響尚未明瞭，值得進一步探討。

本研究目的為探討含繫桿填充式箱型鋼柱於火害下之行為與耐火性能，及瞭解繫桿於耐火能力之影響。期能藉由本研究實驗成果，提供國內業界於建築構件防火設計之參考。

二、試驗規劃

2.1 試體設計

本研究試體依據「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」[6]設計，鋼柱板為4片A572 Grade 50規格鋼材，板厚19mm，長3060mm，柱板銲接採單斜槽開槽銲接型式，開槽角度為35度，根部間隙為7mm銲接組合成600×600mm之箱型斷面。另於柱板各面沿縱向每20cm設置直徑為25mm繫桿(A325鋼材)，如圖1所示。鋼材經拉力試驗，其降伏強度為3.85 tf/cm²，抗拉強度為5.23 tf/cm²。試體混凝土採用自充填混凝土材料，混凝土配比如表1所示，其28天之標準圓柱試體抗壓強度為526 kgf/cm²，定載加熱試驗時，混凝土抗壓強度為635 kgf/cm²。

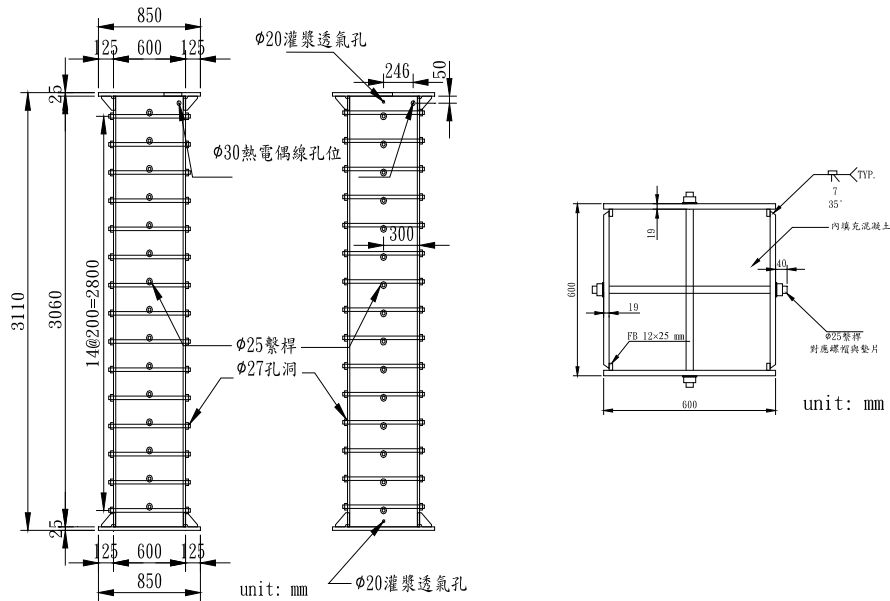


圖1 試體斷面及繫桿配置圖

表1 自充填混凝土配比

各成分的含量(kg/m ³)						
水泥	爐石	飛灰	粗粒料	細粒料	水	化學添加物
329	66	44	780	992	175	7.03 (強塑劑)
備註：空氣含量為 1.5%，最大粒料直徑為 19 mm，水膠比 W/(C+P) 為 0.3977。						

2.2 試體熱電偶設置

為量測試體內部溫度，於試體受熱段之 4 個斷面高度位置預先埋設 K-Type 型式的熱電偶線，以量測試體加熱期間鋼材、混凝土與繫桿溫度變化及分佈情形，3 個斷面高度位置分別為距試體頂端 630、1230 與 1830 mm。每個斷面分別在混凝土埋設 4 個熱電偶、鋼材埋設 3 個熱電偶及繫桿埋設 5 個熱電偶，相關細節如圖 2 所示。

2.3 實驗裝置

本研究使用內政部建築研究所防火試驗中心梁柱複合耐火爐（柱爐區）及 19620kN 加載系統。柱爐區加熱尺寸為 400W×400H×360L (cm)，兩側各有 9 個噴火孔，共 18 個燃燒機提供熱能，使用燃料為液化石油瓦斯 (LPG)，每一個燃燒機配置 UV 火焰監視器，火焰熄火時自動切斷瓦斯供應，即時停止燃燒。並配置瓦斯配管緊急遮斷閥、燃燒器前電磁閥、點火控制器、瓦斯及空氣用壓力指示器等。耐火爐爐溫控制由可程式數值控制器(PLC)，經伺服馬達，控制空氣控制閥的開度，再利用管內空氣壓力，控制燃料瓦斯比例控制閥開度，達成燃料瓦斯與空氣配比的控制。爐內溫度，則經由爐內的熱電偶，回饋至前述之

可程式數值控制器內，構成一閉迴路控制，並時使用位於梁柱複合耐火爐下方加載能力為19620kN，其採用日本油研的伺服電磁式方向閥，控制流量及壓力，及伺服油壓缸作為作動器，油壓缸行程500mm，且在柱端上方設置19620kN荷重計，以便試驗時控制加載力大小，試體、耐火爐及加載位置如圖3所示。

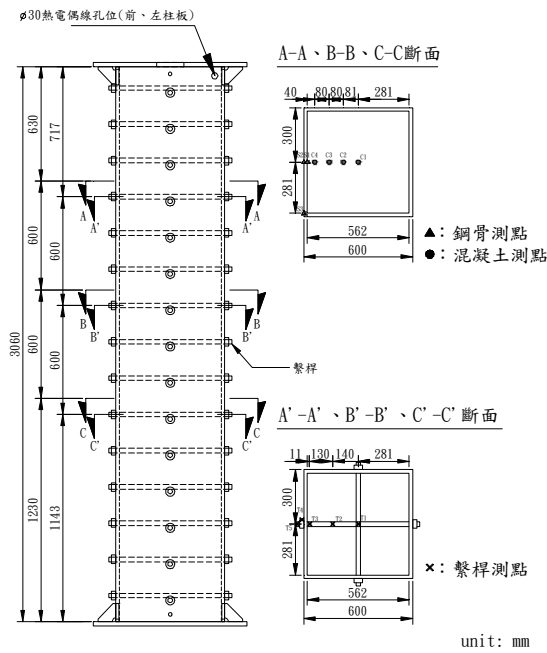


圖2 試體內部熱電偶線配置圖

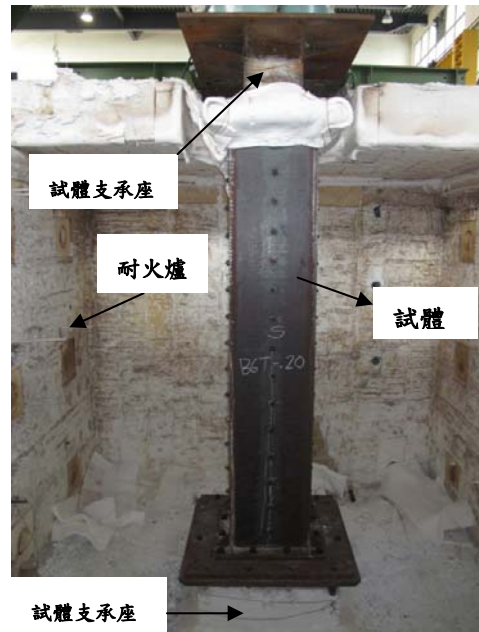


圖3 試體、加載設備與耐火爐裝置

2.4 加溫與加載方法

高溫試驗前將柱墩安裝於耐火爐內，以墊高柱試體，為重複使用，以耐火陶瓷纖維保溫材覆蓋，避免高溫試驗時破壞，影響試驗時安全。試體吊入耐火爐內後，再組裝支撐短柱並以耐火陶瓷纖維保溫材覆蓋，如圖3所示，安裝溫度及位移量測儀器，與資料蒐集器聯線。加載試驗前進行圓柱試體抗壓強度試驗，取其平均值作為評估柱加載之依據。安裝耐火爐之爐頂蓋板及中隔板，以耐火陶瓷纖維保溫材填補試體與耐火爐體間縫隙，避免高溫試驗時，熱氣洩漏造成人員受傷及量測儀器損壞。

本研究高溫試驗依據 CNS 12514-7「建築物構造構件耐火試驗法—第7部：柱特定要求」[7]規定之測試柱耐火性能試驗步驟將柱的軸力依序增加，每個階段記錄柱的載重及各位移計之讀數，柱軸力加到試驗所需設定值後持壓穩定15分鐘以上，當所有變形達於穩定，開始點火加熱。根據 CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法—第1部：一般要求事項」[8]升溫曲線加熱，並記錄所有熱電偶傳送來的溫度資料及位移計傳送來的變形資料。直到柱發生破壞後，停止加載及加熱。

三、試驗結果

本研究試體製作完成後，置放於通風良好之室內養護約 86~93 天，試體試驗資料整理如表 2 所示。

表 2 試體試驗資料

試體編號	混凝土型式	測試時之試體齡期 (天)	載重比	加熱時柱端加載 (tf)	加熱時間
B6T-0.2	SCC	86	0.2	617.8	132 分
B6T-0.5	SCC	93	0.5	1544.5	36 分

註：1.柱試體上、下端均為固定端。

2.載重比定義為施加载重(P)除以填充式箱型鋼柱標稱強度(P_n)。

3.1 耐火爐溫度

本研究之高溫試驗依據 CNS 12514-1 之標準加熱曲線進行加熱，本研究 2 支試體在加熱試驗的爐內平均溫度與標準升溫曲線比較，如圖 4 所示，兩者十分接近，符合規範要求。

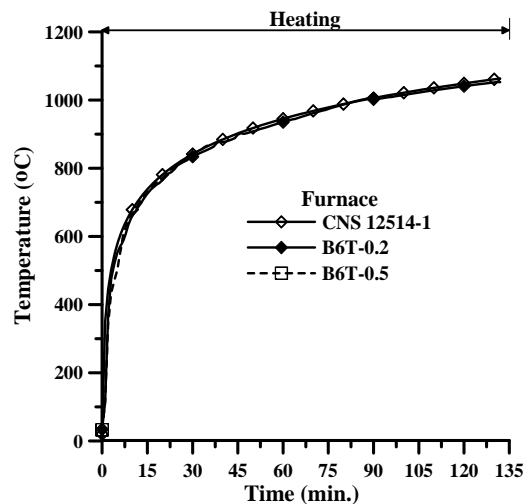


圖 4 耐火爐溫度與 CNS 12514-1 升溫曲線比較

3.2 高溫試驗觀察

加熱試驗時藉由耐火爐視窗，觀察柱試體表面現象，加熱結束後約 1 天，將爐蓋打開後觀察火害後試體表面及破壞現象。試體 B6T-0.2 在加熱試驗時試體未發生爆裂聲音，與陳誠直等人[3]試驗不同，可能是繫桿提供混凝土內部水分蒸發通道，舒解混凝土內部水蒸氣壓力，降低爆裂。火害後試體表面多處有向外凸起之局部挫屈現象（大多集中於試體上端），鏢道無開裂，多個繫桿的螺帽斷裂脫落，如圖 5 所示。試體 B6T-0.5 試體於試驗中如同試體 B6T-0.2 未發生爆裂聲音，試體破壞時發出巨響，火害後試體表面多處有向外凸起之局部挫屈現象（大多集中於

試體上端)，但不明顯，銲道無開裂，繫桿的螺帽無斷裂脫落現象，如圖6所示。



圖5 試體B6T-0.2破壞照片

圖6 試體B6T-0.5破壞照片

3.3 試體內部溫度

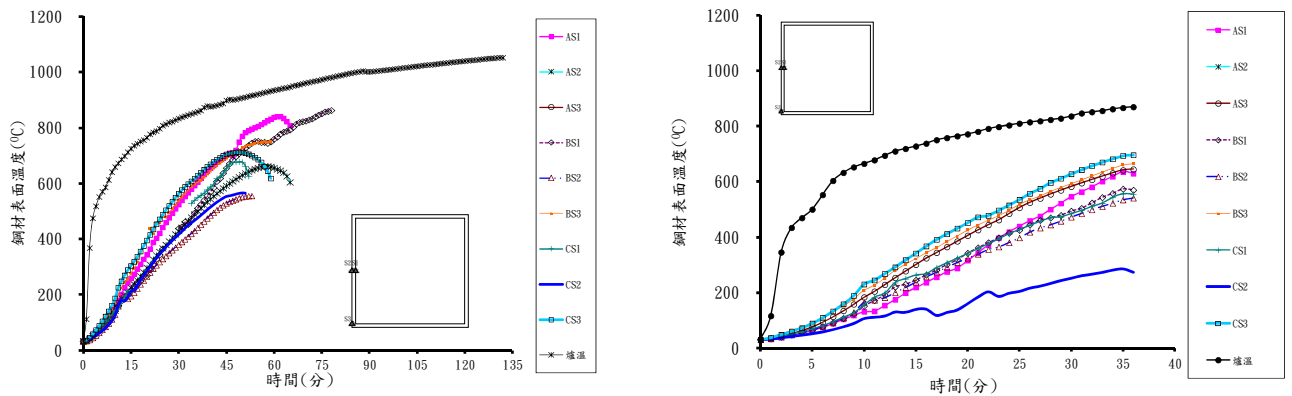
本試體模擬內柱型態，即柱四面受熱，加熱試驗中由埋設試體熱電耦線所量測鋼材、混凝土及繫桿溫度之變化，由於熱電耦線部分曝露在加熱爐內，加熱試驗前以陶瓷綿包覆，以免受熱損毀。

試體鋼材、混凝土及繫桿於加熱期間之溫度變化情形，如圖7至圖9所示。

1、鋼材之溫度變化

試體 B6T-0.2 之鋼材溫度變化，如圖 7(a)所示，由於加熱時間大約 60 分鐘時熱電耦線被燒毀，所得溫度訊號異常跳動，不予討論，從未燒毀前所得溫度資料，可發現鋼材表面溫度隨耐火爐溫增加而上昇，鋼材表面最高溫度，在加熱時間 30 分為 564.1°C ，超過 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」規定之 550°C ，爐溫為 834°C ，鋼材表面平均溫度，在加熱時間 33 分為 503.1°C ，超過 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」[9]規定之 500°C ，爐溫為 847°C 。圖 7(b)為試體 B6T-0.5 之鋼材溫度變化，由該圖發現鋼材表面最高溫度，在加熱時間 26 分為 557.9°C ，超過 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」規定之 550°C ，爐溫為 815.1°C ，鋼材表面平均溫度，在加熱時間 30 分為 507°C ，超過 CNS 12514「建築物構造部分耐火試驗法」規定之 500°C ，爐溫為 836.4°C 。

2、混凝土之溫度變化

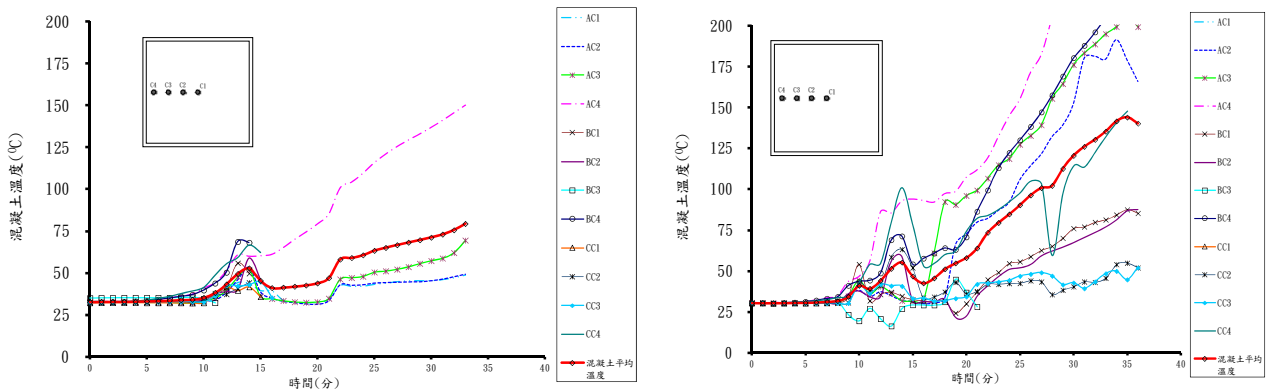


(a) B6T-0.2

(b) B6T-0.5

圖7 試體鋼材溫度-時間曲線圖

圖8為混凝土溫度變化及分佈情形，本研究於柱試體內部設置4個測點，分別距鋼材內側表面40mm(C4)、120mm(C3)、200mm(C2)及柱斷面中心處(C1)。試體B6T-0.2之混凝土溫度變化，如圖8(a)所示，加熱時間15分鐘，溫度訊號異常跳動，可能是熱電偶線燒毀，損壞前，混凝土平均溫度為45.5°C。圖8(b)為試體B6T-0.5之混凝土溫度變化情形，加熱時間15分鐘，溫度訊號異常跳動，可能是熱電偶線燒毀，損壞前，混凝土平均溫度為46.9°C。



(a) B6T-0.2

(b) B6T-0.5

圖8 試體混凝土溫度-時間曲線圖

3、繫桿之溫度變化

圖9為繫桿溫度變化情形，本研究於柱試體繫桿設置5個測點，分別距鋼材內側表面11mm(T3)、141mm(T2)、柱斷面中心處(T1)及螺帽處(T4及T5)。試體B6T-0.2之繫桿溫度變化，如圖9(a)所示，加熱時間60分鐘，同鋼材表面溫度，溫度訊號異常跳動，可能是熱電偶線燒毀，損壞前，螺帽處(T4及T5)溫度可能以陶瓷綿包覆導致量測值偏低。加熱時間60分鐘時，A區繫桿溫度(AT1、AT2、AT3)分別為132.4°C、204.9°C及532.2°C，此時鋼材表面平均溫度751.7°C

及爐溫為 935.5°C，由於混凝土吸熱造成柱內部溫度梯度大。圖 9(b)為試體 B6T-0.5 之繫桿溫度變化情形，加熱時間 30 分鐘時，C 區繫桿溫度(CT1、CT2、CT3)分別為 33.8°C、49.7°C 及 287.9°C，此時鋼材表面平均溫度 507°C 及爐溫為 836.4°C，由於混凝土吸熱造成繫桿溫度偏低。

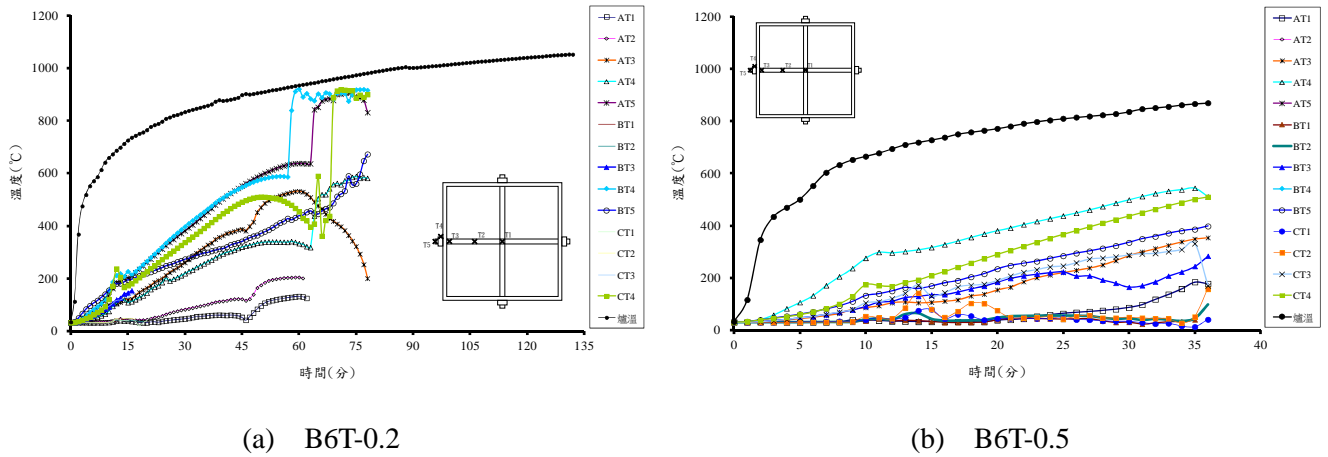


圖9 試體繫桿溫度-時間曲線圖

3.4 試體變位

本研究試體位移以開始加熱時為基準起算點。圖 10 為試體加熱中之軸向變形，試體 B6T-0.2 在加熱 55 分鐘前，軸向變形呈現膨脹伸長現象，加熱 28 至 29 分鐘軸向伸長量達到最大為 14.8 mm，鋼材表面平均溫度 535.3~550°C 及爐溫為 823.3~828.8°C，依據 Eurocode 4 [10]之建議，鋼材之彈性模數將衰減至常溫的 45.5%，之後隨著爐溫上升，鋼材強度持續降低，試體開始壓縮，加熱 55 分鐘試體軸向變形回到開始加熱時位置，加熱 131 分鐘，軸向壓縮量為 30.7 mm，軸向壓縮變形速率為 21.2 mm/min，試體破壞，終止試驗。試體 B6T-0.5 在加熱 27 分鐘前，軸向變形呈現膨脹伸長現象，加熱 11 至 13 分鐘軸向伸長量達到第一次最大伸長量為 1.3 mm，鋼材表面平均溫度 181.2~223.7°C 及爐溫為 678.1~710.1°C，依據 Eurocode 4 [10]之建議，鋼材之彈性模數將衰減至常溫的 88%，隨後試體由伸長變形轉為壓縮變形，加熱 18 至 13 分鐘再轉為伸長變形達到第二次最大伸長量為 1.3 mm，此時鋼材表面平均溫度 308.3~366.4°C 及爐溫為 758.3~780.8°C，依據 Eurocode 4 [10]之建議，鋼材之彈性模數將衰減至常溫的 73%，隨著爐溫上升，鋼材強度持續降低，試體開始壓縮，加熱 27~28 分鐘試體軸向變形回到開始加熱時位置，加熱 37 分鐘，軸向壓縮量為 25.1 mm，軸向壓縮變形速率為 12.3 mm/min，試體破壞，終止試驗。

試體 B6T-0.2 與試體 B6T-0.5，除分別施加 20% 及 50% 的試體標稱強度的軸向載重外，其餘參數皆相同，試體 B6T-0.2 由於承受較小的載重，產生膨脹伸長量較大，加熱 28 至 29 分鐘達最大為 14.8 mm，當試體達最大伸長量後，即進入壓縮階段，試體 B6T-0.5 所承受軸向載重較大，雖然有受熱膨脹伸長，但較小僅為 1.3 mm，且發生時間較試體 B6T-0.2 提前，另外發生熱膨脹伸長與載重壓縮變形相持之狀態，爾後壓縮變形與試體 B6T-0.2 雷同，施加較小載重比可以明顯增加試體最大伸長量、延長壓縮變形時間及提升試體防火時效。

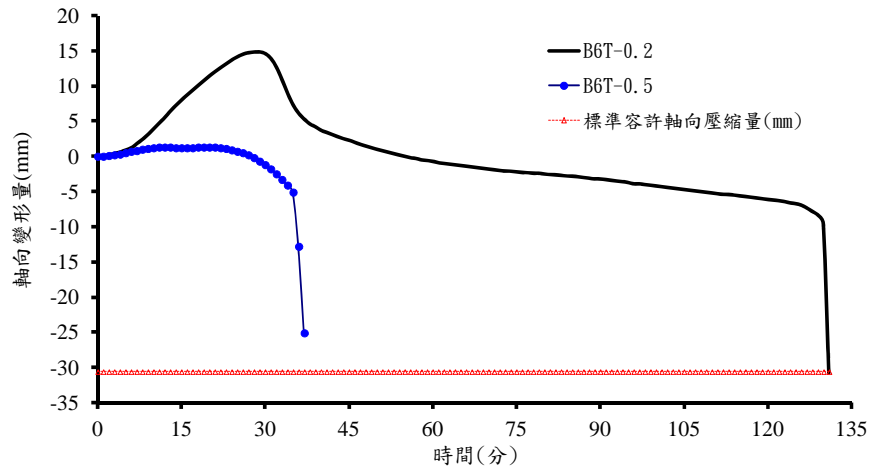


圖 10 試體軸向變形-時間圖

3.5 試體之耐火性能

本研究柱試體之耐火性能及防火時效判定，係參考 CNS 12514-1 第 10 節性能基準與判定規定，柱之承重能力基準要求如下：

$$C \leq \frac{h}{100} (mm) \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} \leq \frac{3h}{1000} (mm/min) \quad (2)$$

式中 C 為最大軸向壓縮量 (limiting axial contraction)， $\frac{dC}{dt}$ 為最大軸向壓縮速率 (limiting rate of axial contraction)，h(mm) 為試體之初始高度。

本研究試體柱高 $h=3110$ mm，受熱尺度為 3060 mm，依 CNS 12514-1 之規定可求得， $C=30.6$ mm， $\frac{dC}{dt}=9.18$ mm/min，試體 B6T-0.2 於加熱 131 分鐘，軸向壓縮量為 30.7 mm，軸向壓縮變形速率為 21.2 mm/min，超過最大軸向壓縮量及最大軸向壓縮速率規定，具有 2 小時防火時效。試體 B6T-0.5 於加熱 37 分鐘，軸向壓縮量為 25.1 mm，軸向壓縮變形速率為 12.3 mm/min，超過最大軸向壓縮速率規定，未達 1 小時防火時效。

四、結論

本研究填充式箱型鋼柱試體斷面尺寸為 $600 \times 600 \times 19$ mm (B×H×t)，鋼材為 A572 Grade 50 及自充填混凝土，施加载重比為 0.2 及 0.5 (載重比定義為施加载重(P)除以填充式箱型鋼柱標

稱強度(P_n)，繫桿尺寸用 A325 材質，直徑 25 mm，柱兩端為固定，經由 CNS 12514-1 與 CNS 12514-7 耐火性試驗結果與分析，可得到以下結論：

- 1、試體 B6T-0.2 施加 20% 試體標稱強度的軸向載重，試驗結果具有 2 小時防火時效，而試體 B6T-0.5 施加 50% 試體標稱強度的軸向載重，未達 1 小時防火時效，試體承受之軸向載重大小對防火時效影響很大。
- 2、配置繫桿可以減緩試體壓縮變形速率，但對於試體膨脹伸長變形之行為較無影響。承受較低軸向載重可延長防火時效，但在承受較高軸向載重則影響不大。
- 3、繫桿提供混凝土內部水分蒸發通道，舒解混凝土內部水蒸氣壓力，降低混凝土爆裂。

誌謝

本文為內政部建築研究所 103301070000G0048 研究計畫之部分研究成果，感謝內政部建築研究所防火實驗中心提供完善設備。

五、參考文獻

1. 陳誠直、林政億、柯宗滕、胡耀光，「包覆填充式箱型鋼管混凝土柱火害行為研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北 (2012)。
2. 陳誠直、林政億、謝哲民、王信賢，「箱型鋼管混凝土柱之防火性能驗證技術研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北 (2013)。
3. 陳誠直、林政億、曾暉琰、蔡旻諺，「填充式箱型鋼柱防火性能設計研究」，內政部建築研究所委託研究計劃成果報告，臺北 (2014)。
4. 陳誠直、林政億、陳建忠，「受軸壓力內灌混凝土箱型鋼柱之耐火行為」，中華民國第十二屆結構工程研討會暨第二屆地震工程研討會，高雄 (2014)。
5. 陳正誠、黃國倫，「含繫桿填充型箱型柱高軸力下之撓曲行為與設計」，內政部建築研究所委託計劃成果報告，臺北 (2011)。
6. 內政部營建署，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計與解說」(2011)。
7. CNS12514-7，「建築物構造構件耐火試驗法—第 7 部：柱特定要求」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局(2014)。
8. CNS12514-1，「建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部：一般要求事項」，中華民國國家標準，經濟部標準檢驗局(2014)。
9. CNS 12514，「建築物構造部分耐火試驗法」，經濟部標準檢驗局 (2010)。
10. Eurocode 4. “Design of composite steel and concrete structures, Part 1-2, General rules-structural fire design.” Eurocode 4 DD ENV 1994-1-2 : 2005, British Standards Institution, London (2005).