

火害後梁柱接頭十字試體 反覆載重行為之研究

鍾興陽／國立成功大學土木工程學系副教授

方柏淳、胡雅鈞／國立成功大學土木工程學系研究生

摘要

為了研究火害後梁柱接頭銲接區於反覆載重作用下的力學行為與破壞模式，本研究製作三組簡化的梁柱接頭十字試體，每種試體分別以三種不同的溫度處理（即：未受火害、受 900°C 高溫後空氣冷卻、受 900°C 高溫後水中冷卻）來模擬鋼構建築之梁柱接頭受到火害高溫前後，其母材與銲材可能造成的材質變化，此三組梁柱接頭十字試體先進行硬度試驗，了解火害前後十字試體於梁柱接頭銲接區的硬度（強度）變化，再進行反覆載重實驗，藉以探討火害前後梁柱接頭銲接區的巨觀機械性質與破壞模式。本研究發現：水冷的十字試體斷裂於銲道或銲道附近的熱影響區，其原因為十字試體的受到 A_1 變態溫度（723°C）以上高溫後淬火，其銲道強度反而低於母材強度。

Abstract

In order to study the post-fire mechanical behaviors and failure modes of the steel beam-to-column welded joints under cyclic loadings, this research fabricated three beam-to-column welded cruciform joint specimens. The three specimens experienced three different temperature treatments, which were room-temperature treating, air-cooling after reaching 900°C and water-cooling after reaching 900°C, respectively to simulate the possible material property variations of weld metal and base metal in the beam-to-column welded connections of steel buildings after fire. We conducted hardness test and cyclic loading test for the three specimens to investigate macro mechanical properties and failure modes of the pre-fire and post-fire

beam-to-column welded joints. This research found that the water-cooled specimen fractured at the weld metal or the HAZ. The reason is that the weld metal strength was lower than the base metal strength after the beam-to-column welded cruciform joint specimen with the temperature higher than A_1 transformation temperature (723°C) was water-quenched.

火害後的梁柱接頭耐震能力如何？

「鋼構建築的梁柱接頭受到火害侵襲後，若梁柱接頭外觀並無明顯變形或破壞，此火害後的梁柱接頭耐震能力如何？」此問題一直是工程界在鋼構大樓火災後進行結構安全鑑定時常遭遇到且想要解決的重要課題，尤其是在鋼構建築數量日益增加且地震頻繁的我國，此課題更顯重要。一般來說，鋼構建築遭遇到火害後的降溫方式不外乎有兩種，一是自然冷卻到常溫，一是受到消防水柱澆灌後急速冷卻到常溫，事

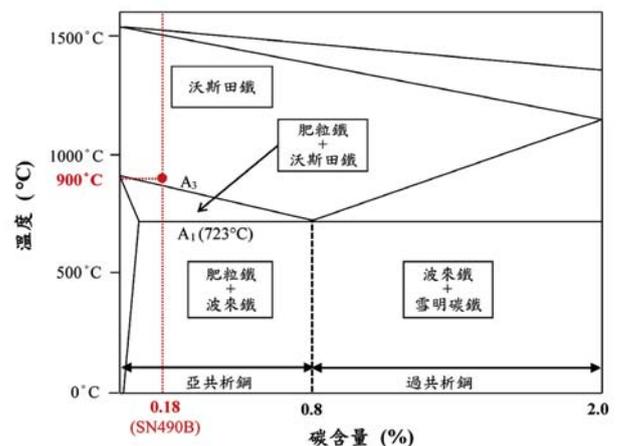


圖 1 鐵碳平衡圖

實上，如圖 1 的鐵碳平衡圖所示，結構用鋼材（如：SN490B 鋼材）在 A3 溫度以上的火場高溫時，鋼材內部已變態為沃斯田鐵組織，由沃斯田鐵組織自然冷卻到常溫肥粒鐵與波來鐵組織的過程，類似於熱處理（Heat Treatment）中的退火（Annealing）或正常化（Normalizing），將使鋼材軟化，另外，如果鋼材在 A₃ 溫度以上火害高溫，受到消防水柱的澆灌而急速冷卻，這種過程將類似熱處理中的淬火（Quenching），淬火後的鋼材強度雖然提高，但是材質變硬且脆，韌性也變差。因此，梁柱接頭的鋼材或銲道於火害後有可能受到類似退火或正常化的作用而變軟，也可能受到類似淬火的作用而變硬變脆，這些材質上的變化將嚴重影響到梁柱接頭未來的耐震能力。

為了研究火害後梁柱接頭（特別是銲接區）於反覆載重作用下的行為與破壞模式，本研究製作三組簡化的梁柱銲接接頭十字試體，每種試體分別以三種不同的溫度處理（即：未受火害、受 900°C 高溫後空氣冷卻、受 900°C 高溫後水中冷卻）來模擬梁柱接頭受到火害高溫前後，其母材與銲材可能造成的材質變化，再將此三組十字試體進行硬度試驗與單軸反覆載重實驗，藉以探討火害前後梁柱接頭銲接區的巨觀機械性質與破壞模式，國外文獻如：Kaufmann 和 Fisher^[1]、Kaufmann 等人^[2]、Ricles 等人^[3]曾採用類似的梁柱銲接接頭拉板（pull-plate）試體進行單軸快速拉伸實驗，來研究常溫梁柱接頭銲道區於動力作用下的韌性與破壞模式。

梁柱銲接接頭十字試體製作

本研究依照國內常見的 H 型梁與箱型柱的梁柱接頭銲接方式，製作梁柱銲接接頭十字試體來研究梁柱接頭銲接區於火害前後承受反覆載重行為之差異，梁柱銲接接頭十字試體是由梁柱銲接接頭簡化試體切割製成，如圖 2 所示，梁柱銲接接頭簡化試體由內隔板、柱板、梁翼板三部份依照國內 H 型梁與箱型柱的銲接方法製作組成，內隔板與柱板採用電熱熔渣銲（Electroslag Welding, ESW）銲接，梁翼板與柱板則採用包藥銲線電弧銲（Flux-Cored Arc Welding, FCAW）的全滲透銲接，梁柱銲接接頭簡化試體之內

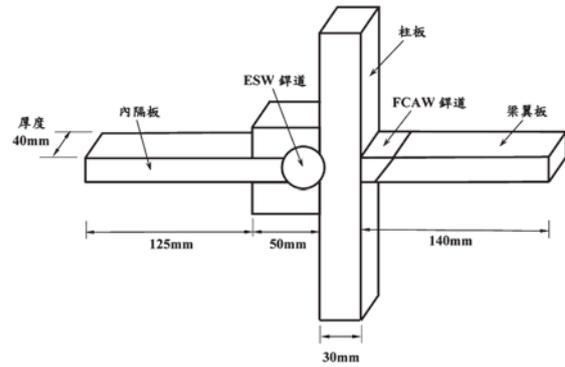


圖 2 梁柱銲接接頭十字試體示意圖

隔板、柱板、梁翼板皆為國內常用的建築結構用耐震鋼材 SN490B，試體之內隔板與柱板的 ESW 銲道以 PS-56 銲線搭配 YF-15i 銲藥銲接完成，而試體梁翼板與柱板的 FCAW 全滲透銲道以 SFC-71 包藥銲線銲接完成，本研究由簡化試體切割製成三組十字試體以因應後續熱處理與實驗所需。

三組梁柱銲接接頭十字試體分別施予三種不同的溫度處理，藉以模擬梁柱接頭在火場中可能經歷的升溫與降溫過程，第一組 N-R2 試體不做任何溫度處理，是為未受火害的對照組，第二組 N-A9 試體將升溫至 900°C，持溫 1 小時後，靜置於空氣中冷卻至常溫，藉以模擬梁柱接頭於火害後於火場自然冷卻，第三組 N-W9 試體將升溫至 900°C，持溫 1 小時後，迅速置於水中冷卻至常溫，藉以模擬梁柱接頭於火害後受到消防水柱噴灑而急速冷卻，三組十字試體的編號與溫度處理方式如表 1 所示。

表 1 試體編號與溫度處理方式

試體編號	溫度處理方式
N-R2	未受火害之常溫梁柱銲接接頭十字試體
N-A9	受 900°C 高溫火害後空氣冷卻之梁柱銲接接頭十字試體
N-W9	受 900°C 高溫火害後水中冷卻之梁柱銲接接頭十字試體

梁柱銲接接頭十字試體之硬度試驗與單軸反覆載重實驗

三組梁柱銲接接頭十字試體先進行硬度試驗，再進行單軸反覆載重實驗，硬度試驗與單軸反覆載重實驗過程簡述如下。

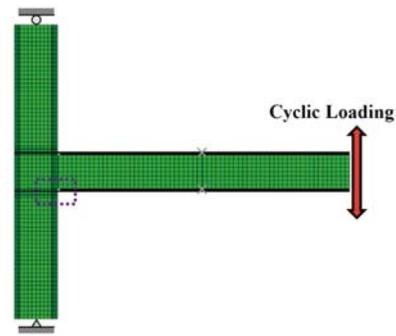
硬度試驗

由於金屬材料的硬度與其抗拉強度有正比的關係，因此常對金屬材料進行硬度試驗，以間接獲得其材料強度，本研究採用可攜型里氏硬度計（Leeb Hardness Tester）來對三組十字試體進行里氏硬度試驗，里氏硬度試驗是一種回彈式的硬度試驗，此種硬度試驗是將材料性質已知的小撞錘以一定速度撞擊待測材料表面，撞錘的回彈高度或速度越高代表受測材料硬度越高，本研究使用的可攜型里氏硬度計攜帶方便且操作簡便，不需切割試體，可維持試體完整性。每支十字試體的里氏硬度試驗步驟如下：

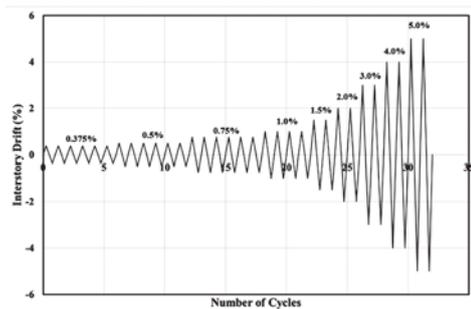
- 將十字試體表面以 60 號、120 號、180 號、220 號砂紙研磨除銹。
- 於十字試體表面之中心線（即：由梁翼板中心線通過 FCAW 銲道、柱板、ESW 銲道至內隔板中心線）標記硬度計加載點位。
- 依照步驟 (2) 標記點位，以可攜型里氏硬度計逐一加載點位並記錄每個點位的里氏硬度值。
- 將十字試體拍照。

單軸反覆載重實驗

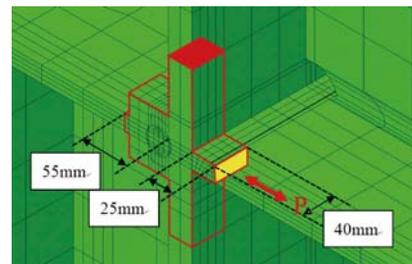
本研究以較經濟的梁柱接頭十字試體單軸反覆載重實驗取代實尺寸梁柱接頭試體的反覆載重實驗，來研析火害前與火害後梁柱接頭銲接區於反覆載重作用下強度與破壞模式的變化，在進行十字試體單軸反覆載重實驗前，吾人先透過實尺寸梁柱接頭試體之三維非線性有限元素數值模型（如圖 3(a) 所示）進行反覆載重分析，分析時以「位移控制」方法於梁之自由端加載，加載歷程採用美國 AISC 2010 年耐震規定^[4]中梁柱接頭反覆載重實驗的層間位移角（Interstory Drift Angle）歷時圖（如圖 3(b) 所示），待梁柱接頭試體的反覆載重數值分析完成後，取出梁柱接頭試體模型中與十字試體相同部位所受到的單軸反覆加載歷程（如圖 3(c) 所示），並將此單軸反覆加載歷程施加於實際十字試體中，以「力量控制」的方式來進行十字試體的單軸反覆載重試驗（如圖 3(d) 所示），當十字試體承受壓力而有挫屈之虞時，隨即停止施加壓力，直接將十字試體拉至斷裂。



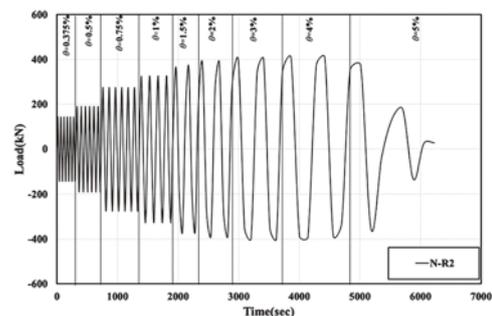
(a) 建立實尺寸梁柱接頭試體模型



(b) 梁柱接頭試體反覆載重模擬之層間位移角歷時圖



(c) 梁柱接頭試體之十字銲接區取力示意圖



(d) 十字試體之單軸反覆載重實驗之加載歷時圖



(e) 十字試體單軸反覆載重實驗

圖 3 梁柱銲接接頭十字試體示意圖

實驗結果

硬度試驗結果

由於鋼材與鐸道的硬度值與其抗拉強度值成正比關係，因此鋼材與鐸道的硬度變化亦可視為鋼材與鐸道的抗拉強度變化，本研究採用可攜型里氏硬度計，由十字試體的梁翼板端至內隔板端，沿著中心線，每隔固定距離以里氏硬度計施打試體表面，並記錄每一施打點的里氏硬度值，三組未受火害與受火害十字試體的硬度值如圖 4(a) 至圖 4(c) 所示，圖 4(d) 為三組未受火害與受火害十字試體之里氏硬度值比較圖，比較結果顯示：火害前 FCAW 鐸道與 ESW 鐸道的強度皆高於母材強度，受到 900°C 高溫後空冷，雖然鐸道強度仍略大於母材強度，但是整體鐸道與母材強度皆已下降，且鐸道強度下降幅度較大，受到 900°C 高溫後水冷，十字試體的母材因淬火造成其強度劇幅上升，使得母材強度遠高於鐸道強度，因此，梁柱鐸接頭之母材與鐸道受 900°C 火害高溫侵襲後，材料性質皆會受到影響，且不同的降溫方式對結構用鋼材的材料機械性質影響甚大。

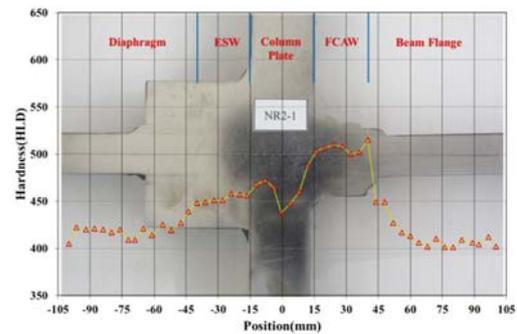
單軸反覆載重實驗結果

除了 NR2 試體在反覆載重過程中斷裂，其餘 NA9 試體與 NW9 試體因為在反覆載重過程中有挫屈之虞，因此在試體到達最大壓力後，隨即於下一個迴圈之拉力加載時直接拉至斷裂，圖 5 顯示三組十字試體單軸反覆載重實驗之遲滯迴圈結果與破壞模式，圖 6 顯示三組十字試體反覆載重實驗遲滯迴圈之拉力包絡線圖，表 2 則是整理出圖 6 中每組試體包絡線的最大拉力值 P_{max} 、最大延伸位移 Δ_{max} 、韌性模數 U_T ，以為後續比較之用，三組十字試體反覆載重實驗之結果可以歸納如下：

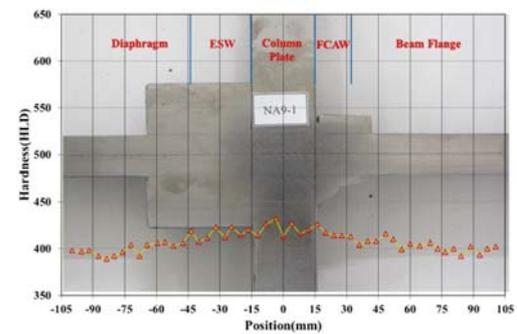
1. 未受火害的 NR2 試體與受 900°C 空冷的 NA9 試體在反覆載重過程中有棘輪現象發生，兩組試體在反覆加載後期，每承受一個迴圈的加載，試體就累積延伸的塑性變形，受 900°C 水冷的 NW9 試體之棘輪現象較不明顯。
2. 相較於未受火害的 NR2 試體，受 900°C 空冷的 NA9 試體有軟化且延伸率與韌性變佳的現象，其最大拉力值 P_{max} 較 NR2 試體略為減少 1.7%，但是其最大延伸位移 Δ_{max} 較 NR2 試體大幅增加 43.5%，其韌性模數 U_T 較 NR2 試體大幅增加 35.8%。
3. 受 900°C 火害空冷的 NA9 試體與未受火害的 NR2 試體皆斷裂於母材，圖 4(d) 的硬度值比較顯示，其

原因為 NA9 試體的 ESW 鐸道與 FCAW 鐸道在受 900°C 高溫空冷後，其強度仍略高於母材，故拉伸斷裂於母材處，觀察 NA9 試體與 NR2 試體之斷口，皆有頸縮後斷裂現象，是為韌性斷裂。

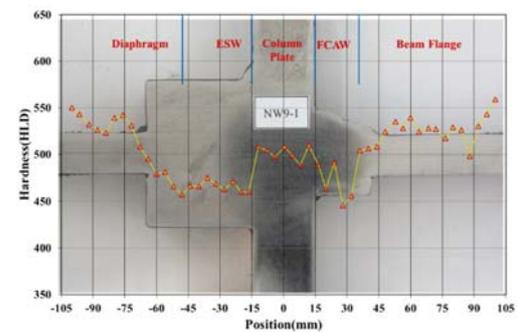
4. 相較於未受火害的 NR2 試體，受 900°C 水冷的 NW9 試體有強化但延伸率與韌性變差的現象，其最大拉



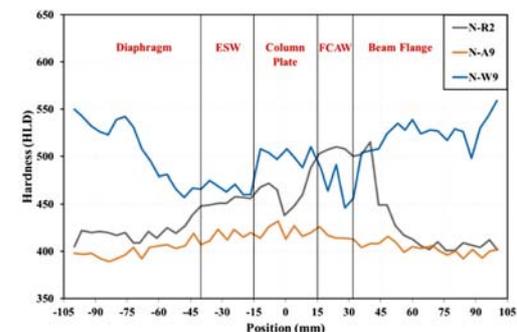
(a) 未受火害之 NR2 試體



(b) 受 900°C 高溫後空冷之 NA9 試體

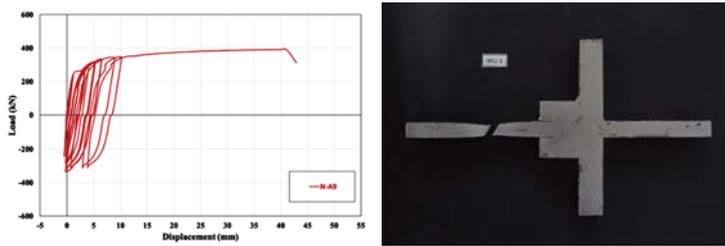


(c) 受 900°C 高溫後水冷之 NW9 試體

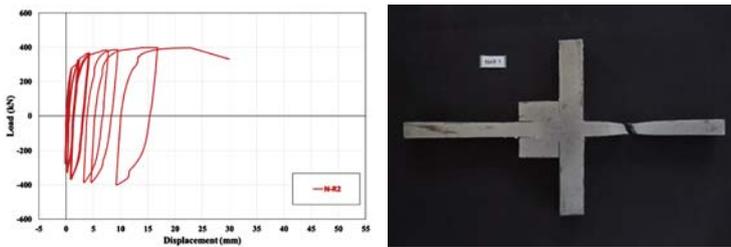


(d) 三組十字試體硬度值比較

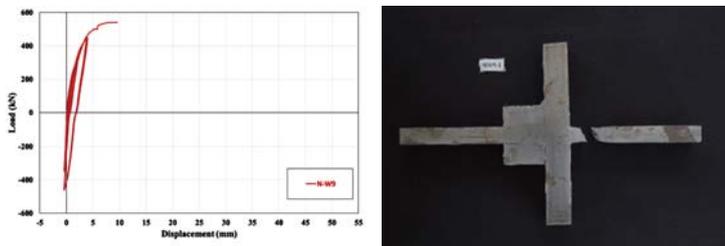
圖 4 三組梁柱鐸接頭十字試體之硬度試驗結果



(a) 未受火害之 NR2 試體



(b) 受 900°C 高溫後空冷之 NA9 試體



(c) 受 900°C 高溫後水冷之 NW9 試體

圖 5 三組十字試體反覆載重實驗之力—位移遲滯迴圈圖與試體破壞圖

力值 P_{max} 較 NR2 試體大幅增加 35.9%，但是其最大延伸位移 Δ_{max} 較 NR2 試體驟減 67.2%，其韌性模數 U_r 較 NR2 試體亦大幅減少 63.9%。

5. 不同於 NR2 試體與 NA9 試體，受 900°C 火害水冷的 NW9 試體斷裂於 FCAW 銲道，由圖 4(d) 的硬度值比較顯示，其原因為 NW9 試體在受 900°C 高溫水冷後母材強度大幅增加，已高於 ESW 銲道與 FCAW 銲道之強度，FCAW 銲道強度甚至比火害前還低，故拉伸斷裂於 FCAW 銲道處，觀察 NW9 試體之斷口，是為脆性斷裂。

結論與建議

本研究的結果顯示：梁柱接頭銲接區受到 A_1 變態點溫度 (723°C) 以上的火害溫度後空冷，相當於正常化處理，使得母材與銲道皆軟化，然銲道強度仍大於母材，故斷裂破壞發生於母材區；梁柱接頭銲接區受到 A_1 變態點溫度 (723°C) 以上的火害溫度後水冷，是最危險的，因為受到此種升溫與降溫的梁柱銲接頭十字試體斷裂在銲道或在銲道附近的熱影響區，其原因可由圖 4 的硬度分佈

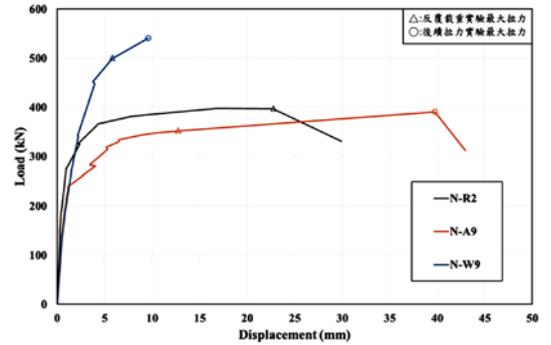


圖 6 三組十字試體反覆載重實驗之遲滯迴圈拉力包絡線圖

表 2 試體編號與溫度處理方式

試體編號	P_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	U_r (MPa)	斷裂位置
N-R2	397.80	29.92	125.32	內隔板
N-A9	390.87	42.93	170.15	梁翼板
N-W9	540.78	9.57	45.19	FCAW 銲道

圖看出，在火害前，梁柱接頭銲接區的銲材強度皆高於母材強度，但是梁柱接頭銲接區在受到 A_1 變態點溫度 (723°C) 以上的火害後水冷，反而會造成母材強度大於銲材強度，其原因在於母材的含碳量較銲材為高，因此受到高於 A_1 變態點的溫度後急速降溫，如同淬火，會使母材生成較多的麻田散鐵組織，麻田散鐵組織强度高、質硬且脆，因而造成母材強度大幅提升，反而使得火害後銲材強度低於母材強度，可能會造成梁柱接頭在受到地震力作用時，斷裂在銲道，如此將不利於火害後鋼結構建築的耐震能力。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會 (現為科技部) 專題研究計畫之補助 (計畫編號: NSC 102-2221-E-006-158)，作者在此謹誌謝意。

參考文獻

1. Kaufmann, E.J. and Fisher, J.W., "A Study of the Effects of Materials and Welding Factors on Moment Frame Weld Joint Performance Using a Small-Scale Tension Specimen," SAC Technical Report 95-08, pp. 2-1-2-29 (1995).
2. Kaufmann, E.J., Xue, M., Lu, L.-W. and Fisher, J.W., "Achieving Ductile Behavior of Moment Connections," Modern Steel Construction, 36, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL (1996).
3. Ricles, J.M., Mao, C., Kaufmann, E.J., Lu, L.-W. and Fisher, J.W., "Dynamic Tension Tests of Simulated Welded Beam Flange Connections, Report No. SAC/BD-00/07, SAC Joint Venture, Sacramento, California (2000).
4. AISC Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, (2005).