

鋼結構電熱熔渣銲接之安全性探討

陳正平技師

一、前言

國內鋼結構高層房屋之結構柱，設計時為使有效承載二水平方向之地震力，有普遍使用箱型鋼柱的情形，因柱構材除須用來承載垂直載重外，還須承載地震力，因此高層房屋結構柱之柱板厚度須較厚才能滿足高樓結構柱之載重需求。

然而箱型鋼柱與鋼梁之接頭處，梁翼板-箱型柱板-橫隔板間之銲道為重要的傳力路徑(見圖 1 及 2)，該位置因箱型柱內之橫隔板，在箱型柱組合後須採用電熱熔渣銲接(Electroslag Welding ESW)或電熱氣體電弧銲接(Electrogas Welding EGW)，才有辦法進行柱內橫隔板銲接，而該等方法產生之入熱量甚高(各種銲接方法入熱量比較詳見表 1)，容易造成銲接熱影響區內之鋼板材質金相組織晶粒粗化現象，對梁柱接頭之韌性有顯著的不利影響，因此其相關設計與施工應該謹慎為之，以免大幅影響結構安全。如何避免或降低其影響程度，本文針對電熱熔渣全滲透銲接，提出設計與施工應考慮之重點探討，供工程師參考。

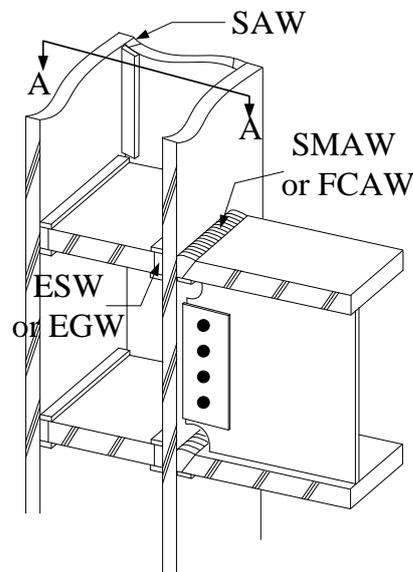


圖 1 鋼結構梁-柱構造示意圖

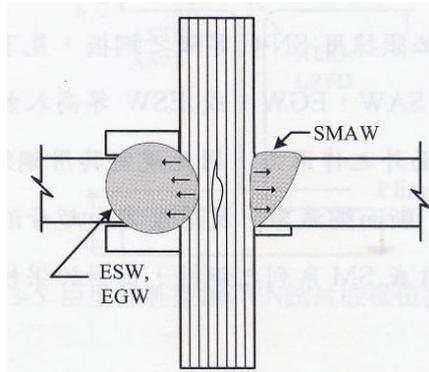


圖 2 鋼結構梁-柱接頭梁翼板-箱型柱板-橫隔板間之銲道傳力路徑示意圖

銲接方法	說明	入熱量
遮護金屬電弧銲接 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)	俗稱「手銲」,用於工地較多;方便不需氣體。	約 35 KJ/cm
包藥銲線電弧銲接 Flux Cored Arc Welding (FCAW)	最近工地銲也被要求,優點外觀較美,入熱量較少。	約 25-30 KJ/cm
氣體遮護金屬電弧銲接(非短路移行) Gas Metal Arc Welding (GMAW) (Non-Short Circuiting Transfer)	工廠用最多,優點外觀較美,入熱量較少。	約 25-30 KJ/cm
潛弧銲接 Submerged Arc Welding (SAW)	適用組合型鋼(BH、BOX)之自動銲接。	約 100 KJ/cm
電熱氣體電弧銲接 Electrogas Welding (EGW)	美式:效率快,品質較不穩定。(目前僅剩中鋼構在用)用於BOX內隔板之直立式銲接	約 400-600 KJ/cm
電熱熔渣銲 Electroslag Welding (ESW)	日式:效率差,但品質較穩定,(目前國內鋼構廠都在用)用於BOX內隔板之直立式銲接	約 450-900 KJ/cm
非消耗性電極簡易電熱熔渣銲接或短尺接縫簡易電熱熔渣銲接(Simplified Electro Slag Welding Process with Non-consumable Elvating Tip (SESNET))	ESW 銲機,無具橫向擺弧功能,較大之銲接尺寸會產生熔透不足之現象。SESNET 具擺幅功能,且含蓋上列優點	約 450-900 KJ/cm

表 1 各種銲接方法入熱量之比較

二、電熱熔渣銲接簡介

箱型柱柱內橫隔板與柱板間之銲道必須採用全滲透銲接，但是全滲透銲接有很多種銲法，可以採用被覆電弧銲接（SMAW）、包藥電弧銲接（FCAW）、氣體遮護金屬電弧銲接（GMAW）、電熱熔渣銲接（ESW）及電熱氣體電弧銲接（EGW）等銲接方法（見表 1），其入熱量各有不同，其中以電熱熔渣銲接為最高。

不論使用哪一種銲接方法，銲道都可能或多或少會對鋼板材質產生影響，也都須要通過非破壞檢驗來確認銲接品質。不過，由於箱型柱內橫隔板之銲接除了受到箱型柱之柱板封閉，致橫隔板之銲道僅能有一方向採用手銲方式接合，另一向則必須採用電熱熔渣銲接（示意圖見圖 3 至 6），亦常有因箱型柱內橫隔板之間距太密，而產生銲接施工性的問題，而必須 4 面均使用電熱熔渣銲接或電熱氣體電弧銲接，俗稱釣魚銲之情況。電熱熔渣銲接之效率，較電熱氣體電弧銲接為差，但品質較穩定，國內鋼構廠大都使用電熱熔渣銲接，文章後段以 ESW 簡稱。因 ESW 銲接入熱量較高（約為 450-900 KJ/cm），致有影響鋼板銲接品質的疑慮，若設計或施工不當，常會產生開裂破壞的現象。

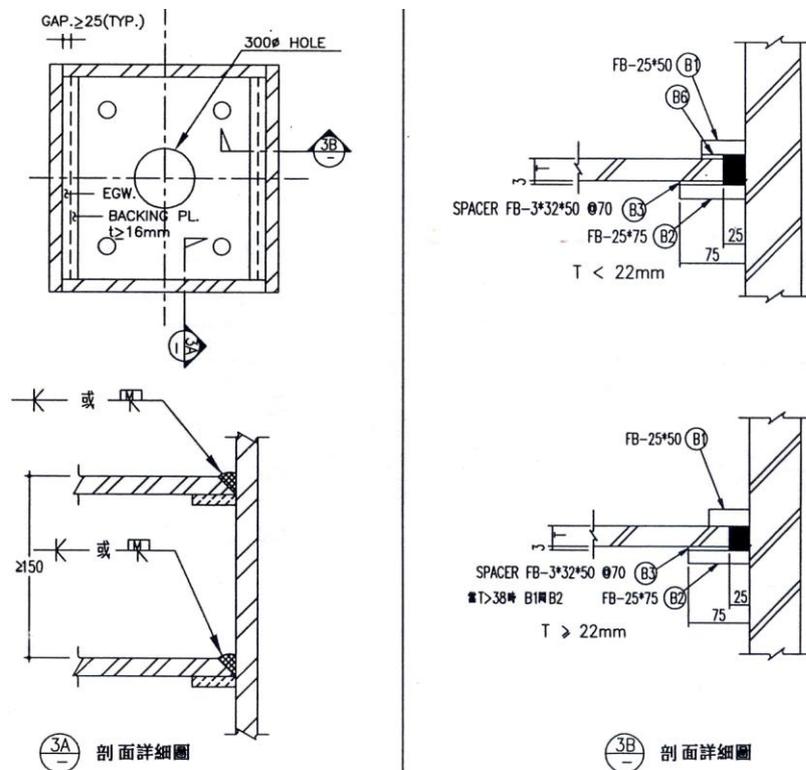


圖 3 電熱熔渣銲相關細部示意圖

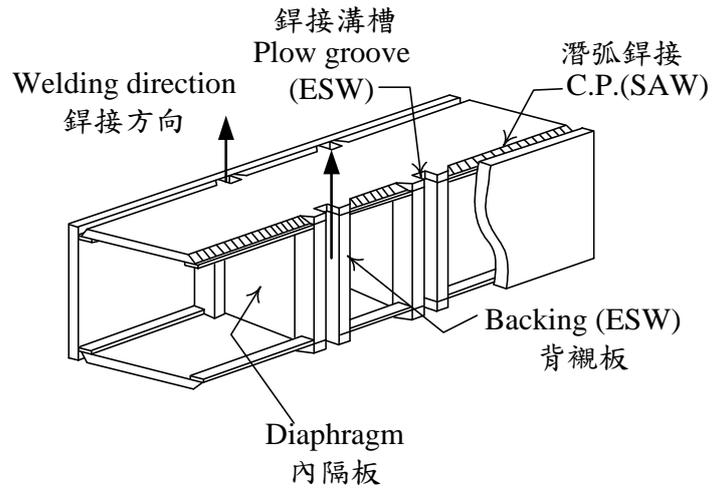


圖 4 電熱熔渣銲柱內橫隔板相關細部立體示意圖[1]

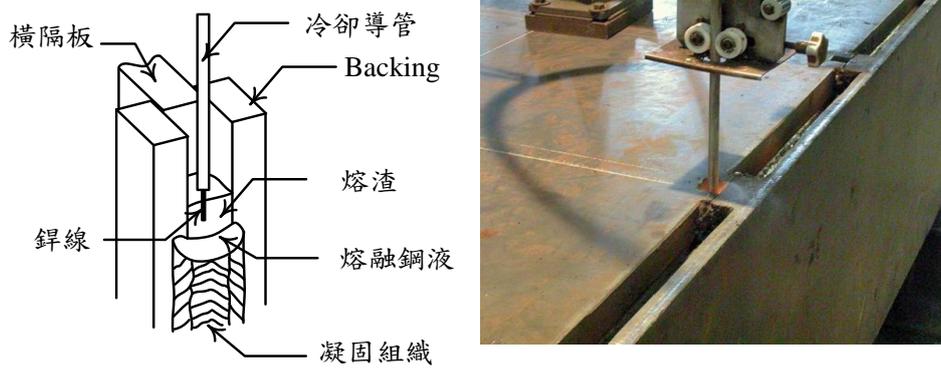


圖 5 電熱熔渣銲相關細部立體示意圖[1]

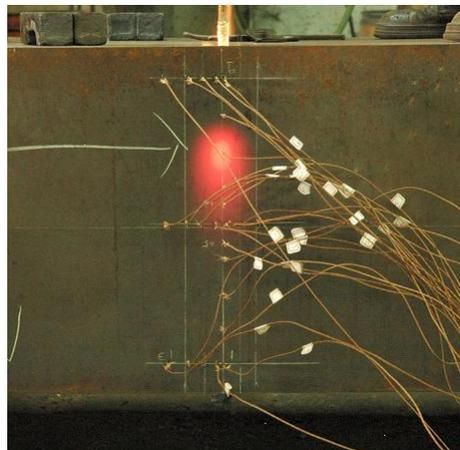


圖 6 電熱熔渣銲柱板表面溫度實驗[1]

三、橫隔板與柱板連接處之銲道產生破壞的主要原因探討

橫隔板與柱板連接處之銲道，若設計或施工不當，可能會產生開裂破壞現象，其主要原因如下：

- 1、ESW 熔融區偏向一側，導致 ESW 全滲透銲道之他側熔透不足，圖 7 所示為銲道偏弧致銲道產生偏斜，並造成熔透不足之示意圖。
- 2、箱型柱外側接人之梁翼板與箱型柱橫隔板之組立精度欠佳，梁翼板與柱翼板厚度中心未確實對齊，而產生偏心現象（如圖 8 所示），此種情形除會導致銲道承受額外的偏心彎矩外，亦會導致其中一側有應力集中現象。
- 3、梁翼板由於採用補強式梁-柱接頭，致接頭處梁翼板加上補強蓋板之總厚度大於柱內橫隔板之厚度（梁翼板、蓋板及橫隔板厚相關位置示意圖見圖 9）、或梁翼板連同翼板下緣填角銲之尺寸總和，大於柱內橫隔板厚度（含補強填角銲道之梁翼板偏心示意圖見圖 10），導致其中一側有應力集中現象。
- 4、箱型柱之柱板太薄，ESW 銲接時柱板表面溫度過高，導致銲接後柱板表面破壞韌性衝擊值（fracture toughness）（韌性衝擊試驗模型示意圖見圖 11）過低。
- 5、柱板材質欠佳，導致銲接後，柱板熱影響區範圍之破壞韌性衝擊值過低。

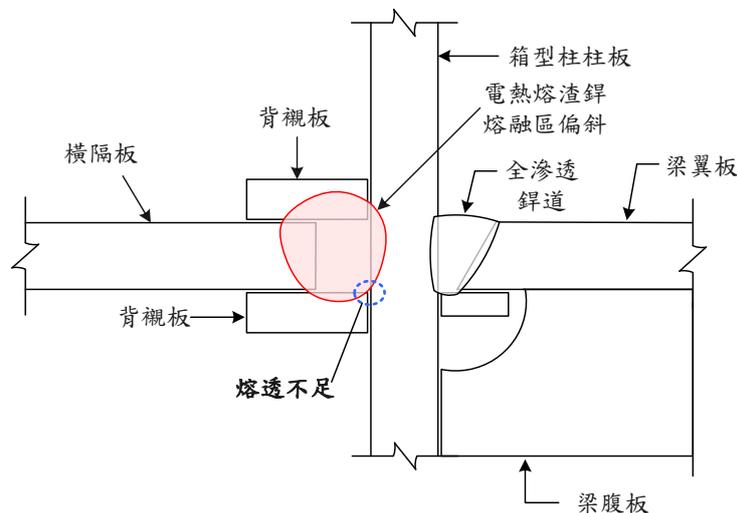


圖 7 ESW 銲道熔透不足之情況

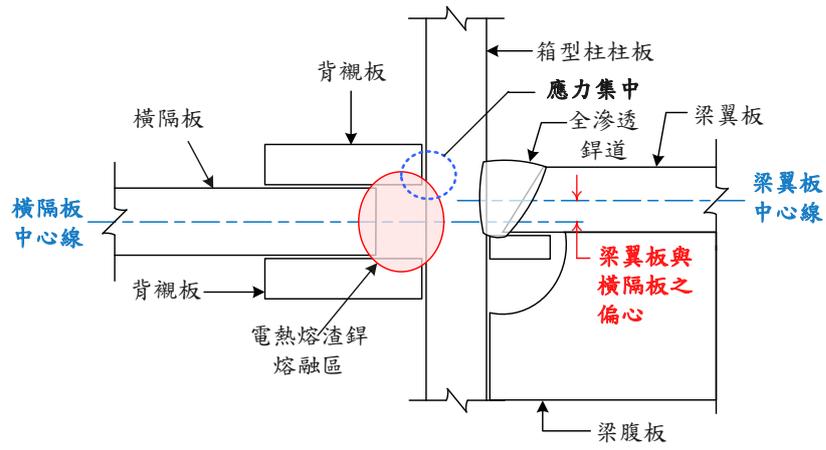


圖 8 梁翼板與橫隔板在厚度方向偏心產生應力集中

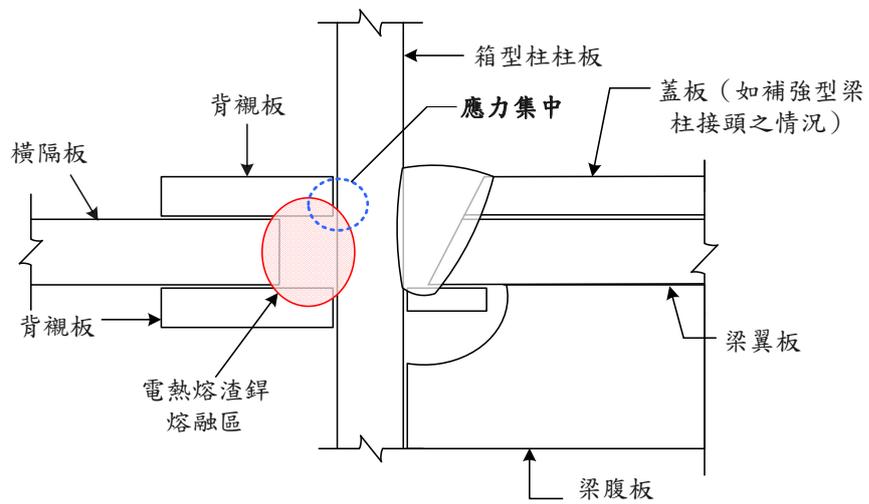


圖 9 盖板加上梁翼板之厚度大於橫隔板而產生應力集中

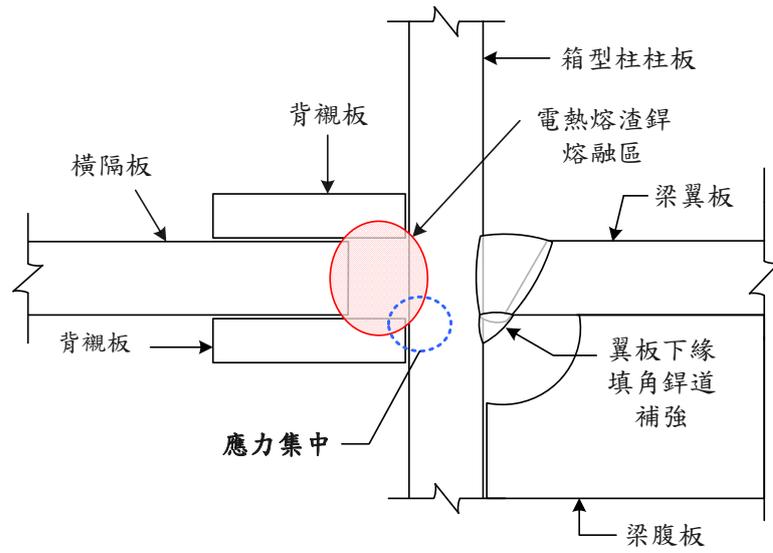


圖 10 含補強填角鋅道之梁翼板與橫隔板在厚度方向偏心而產生應力集中

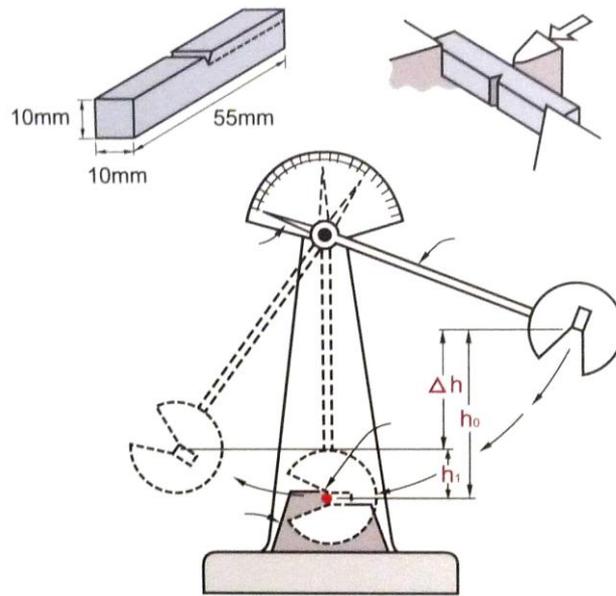


圖 11 韌性衝擊試驗模型示意圖

四、橫隔板與柱板連接處之銲道品質控制

為避免橫隔板與柱板連接處之銲道產生非預期的破壞，建議確實進行下列設計與施工之品管措施：

- 1、加強電熱熔渣銲接(ESW)之品質管制，ESW 銲接時應控制熔融區均勻對稱、均勻的熔透發展，避免因偏弧致銲道產生偏斜及熔透不足的現象。當直立式電熱熔渣銲接槽孔為長方形時，建議採用具擺幅功能之設備，確保無偏弧現象。
- 2、應確實進行銲道熔透程度檢驗，橫隔板厚度中心到銲道之上、下二端與柱板交接處之距離，如圖 12 中之 a_1 及 a_2 ，通常應不小於 $(t_d/2) + 2 \text{ mm}$ ，其中 t_d 為橫隔板厚度。
- 3、控制組立或吊裝之誤差，確保橫隔板厚度中心與接入梁之翼板厚度中心對齊，並加強檢驗。
- 4、使用與梁翼板接合細部總厚度（包括蓋板、額外填角銲道等）相匹配之橫隔板厚度。
- 5、使用與橫隔板厚度及接入梁之翼板厚度相匹配之柱板厚度，柱板厚度不宜小於 19 mm。
- 6、柱板應選用衝擊韌性值較佳之鋼材材質，可參考鋼結構協會「結構用鋼使用時機參考表」(見表 2)。尤其是板厚超過 40mm 時須符合 CNS 13812 SN400C 或 SN490C 之鋼材。
- 7、配合採用「梯形切削減弱式高韌性梁柱接頭」，其消能效果佳，可大幅減低梁-柱接頭銲道之強度需求及韌性需求。

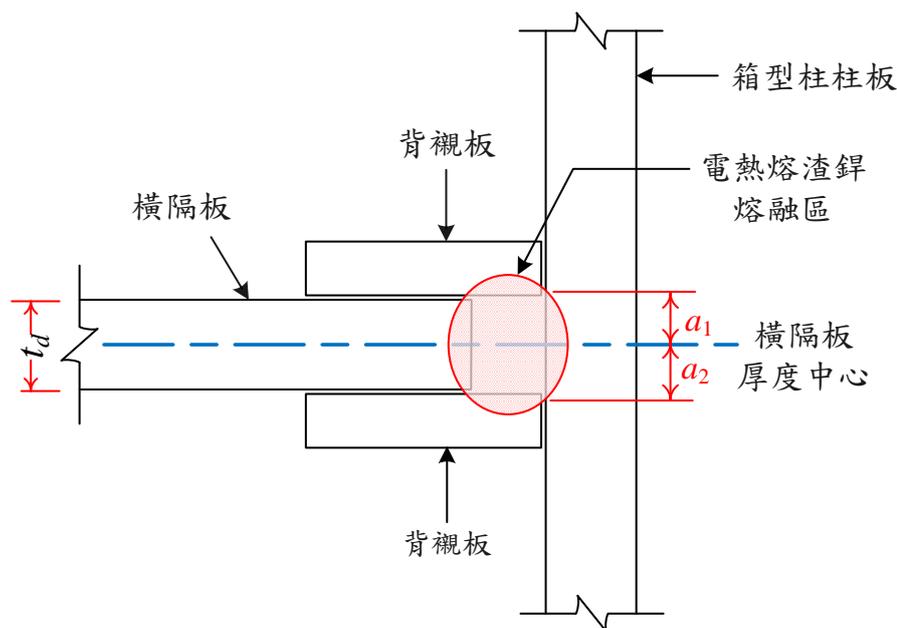


圖 12 ESW 熔透程度檢驗

結構構件適用之鋼材

構材型態			CNS 2473 SS 系列	ASTM A36	ASTM A572 Gr.50	CNS 2947 SM-A 系列	CNS 13812 SN-A 系列	ASTM A709 Gr.50	ASTM A992	CNS 2947 SM-B 系列	CNS 2947 SM-C 系列 SM570	CNS 13812 SN-B 系列	CNS 13812 SN-C 系列 SM570M-CHW ⁽⁴⁾
構材耐震需求	構材類別	鋼板厚度限制											
一般構材	不會使用到銲接之梁或柱	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
一般構材	會使用到銲接之梁或柱	無	X	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐震構材	熱軋 H 梁、銲接組合 H 梁、熱軋 H 柱	< 40mm	X	X	X	X	X	○	○	○	○	○	○
耐震構材	熱軋 H 梁、銲接組合 H 梁、熱軋 H 柱	≥ 40mm	X	X	X	X	X	△ ^(2,3)	△ ^(2,3)	○	○	○	○
耐震構材	箱型柱、銲接組合 H 柱	< 40mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	○	○
耐震構材	箱型柱、銲接組合 H 柱	≥ 40mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	○

附註：(1)「○」表示經設計者同意後使用者；「△」表示滿足附加條件下，經設計者同意後使用者；「X」表示不適合使用者。

(2) 熱軋型鋼之衝擊值須滿足 21°C、27J 的要求，且試片取樣位置須符合 ASTM A6 Supplementary Requirement S30 之規定。

(3) 使用銲接組合 H 型鋼（即 BH）斷面時，鋼板之衝擊值亦須滿足 21°C、27J 的要求，且試片取樣位置須符合 ASTM A673 之規定。

(4) SM570M-CHW 為中國鋼鐵公司 CSC SM570M-CHW 鋼種，適用於箱型柱與內隔板接合處，採用高入熱量之「電熱熔渣銲」銲接之情況，此規格鋼種尚未列入 CNS 國家標準，本表暫以 SM570M-CHW 稱呼之。

表 2 結構用鋼使用時機參考表

五、大尺寸電熱熔渣銲

當柱橫隔板較厚時，電熱熔渣銲之尺寸亦隨之加大，電熱熔渣銲可銲之最大尺寸為多大，才不會產生銲接熔透不足之現象？電熱熔渣銲之銲機，以往因不具橫向擺幅功能，因此較大之銲接尺寸可能會產生熔透不足之現象。近來較大型鋼構廠所使用之電熱熔渣銲機，大多具有橫向擺幅功能，已可克服柱內橫隔板過厚，致熔透不足的問題。惟考量銲接熱影響區之材質變化及柱板太薄時可能被熔透，建議設計時柱內隔板與柱板間，相對板厚之決定，在假設粗晶熱影響區不超過柱板中央之情況下，參見表 3 之建議 [1]。

假設粗晶熱影響區不超過柱板中央之情況下。	
梁翼板厚(mm)	最小柱板厚度(mm)
25(含)以下	25(建議使用 28)
50	32(建議使用 36)

表 3 柱板最小厚度之限制[1]

六、結語

箱型鋼柱與鋼梁之接頭，是結構構架中傳力路徑最為重要的位置，而箱型鋼柱之封閉特性，致其與鋼梁之接頭對應處之柱內橫隔板，採用電熱熔渣銲接（ESW）接合成為不可避免的事實。且近因人工手銲之成本較高，且若橫隔板四周均採用電熱熔渣銲接（ESW）方式接合，其銲接品質較易控制，銲接速度又較快。因此柱內橫隔板四周均採用電熱熔渣銲接之鋼構廠越來越多，部分設計監造單位擔心電熱熔渣銲接之品質控制不易，恐會影響結構安全，而常會發生爭議，致影響工期及施工成本。

為解決業主、監造與鋼構廠間之爭端，中華民國鋼結構協會研究發展委員會提出解決之建議方案供鋼構業界參考，筆者認為配合採用「梯形切削減弱式高韌性梁柱接頭」，其消能效果佳，可大幅減低梁-柱接頭銲道之強度需求及韌性需求。且「梯形切削減弱式高韌性梁柱接頭」製作簡易，造價低廉，韌性消能效果佳，尤其是不妨礙鋼結構立體韌性剛構架之原有空間寬之使用機能。故建議除謹慎控制施工品質外，「梯形切削減弱式高韌性梁柱接頭」實為解決剛構架電熱熔渣銲韌性問題之最佳方案。惟「梯形切削減弱式高韌性梁柱接頭」為行政院國家科學委員會之國際性專利，現委託台科大研發處技術移轉中心代管，使用前應與該中心接洽，以免觸法。

【參考資料】

- [1] 梁宇宸、陳正誠、蔡顯榮 (2008) “電熱熔渣銲(ESW)對箱型柱板材質之熱影響”，鋼結構設計與施工技術研討會，中華民國鋼結構協會。
- [2] 內政部營建署(1998) 結構建築物鋼結構技術設計規範，“容許應力設計法及鋼結構極限設計法設計規範”。
- [3] 內政部營建署(1998) “鋼結構建築物鋼結構技術施工規範”。
- [4] 中華民國鋼結構協會〔2009〕“橫隔板與箱型柱板間 ESW 或 EGW 相關之設計與施工”技術備忘錄 第 001 號。

- [5] 陳正平〔2008〕“談「房屋結構用鋼材選用 ASTM 規格」”技師報 605 期。
- [6] 陳生金，“鋼結構行為與設計”，科技圖書公司，2009 年。
- [7] 陳生金、陳舜田、葉禎輝、周作隆〔1996〕“強裂地震下鋼骨結構梁柱接頭之破壞及高韌性接頭之開發”，結構工程，第十一卷第四期，民國八十五年十二月。
- [8] “陳生金、涂進德〔1998〕“鋼骨抗彎構架梁柱接頭設計與施工探討”鋼結構會刊第七期，中華民國鋼結構協會，民國八十七年元月。
- [9] 陳正誠、陳正平〔2003〕鋼結構設計手冊極限設計法”，中華民國結構工程協會，民國 92 年 10 月。