

# 高強度螺栓與銲道併用之接頭設計方法及特例探討

陳正平技師

## 一、前言

美國鋼結構協會出版之「鋼結構設計規範」，較早之版本均認為高強度螺栓鎖固達最小預拉力後再銲接之情況，高強度螺栓與銲道二者可以共同抵抗剪力。其主要的考量係摩阻型高強度螺栓與銲道二者承受剪力後產生之變形量均較小，因而視為可共同承受剪力。在鋼結構梁-柱接頭設計實務上，檢核梁端達塑性鉸所產生之剪力時，其接合螺栓之設計數量會較多，若再考慮螺栓組之重心與柱面銲道間之偏心接合效應，則所需之接合螺栓數量會更多，且螺栓數量越多，產生之偏心彎矩(或扭力)越大，因此常見許多設計者會於腹板接合板與梁腹板間以銲接補強，使摩阻型高強度螺栓與銲道共同承受剪力，以解決螺栓數量太多的問題。然而文獻[3]之研究顯示，高強度螺栓與縱向及橫向之填角銲接共同承受剪力時，兩種方向之填角銲接之變形量均小於高強度螺栓之變形量 (見圖1)。因此美國鋼結構協會出版之「鋼結構設計規範」[2] (亦隨之修改高強度螺栓與銲道共同承受剪力時，對高強度螺栓可分擔之剪力作了上限之限制。美國鋼結構協會出版之「建築物耐震設計規範」(Seismic Provisions For Structure Steel Buildings, AISC 341) [1] 亦於2005年版起規定摩阻型高強度螺栓與銲接兩者不得共同分擔剪力。

現行「鋼結構極限設計規範及解說」對使用於抵抗地震力構架之接合，並無相關規定；僅在第十章 (接合設計) 第10.1.8節 (螺栓與銲接之組合)中，對一般用途之接合有規定：「……以摩阻型接合設計之高強度螺栓則可與銲接共同分擔載重，惟須先鎖緊高強度螺栓後再銲接」。至於第十三章 (耐震設計) 則未提及高強度螺栓與銲道共用的問題。因此目前工程師均依規範認定只要先鎖緊高強度螺

栓後再銲接，即可應用於抵抗地震力韌性剛構架之梁-柱接頭。實務上，當梁腹板接合螺栓數量太多時，亦經常出現以銲接補強螺栓的用法(實際案例見圖2)。

現行「鋼結構設計規範及解說」已近六年未修訂，六年來美國鋼結構設計規範修改甚多，國內規範未隨美國鋼結構設計規範立即修改，其主要原因係考量工程師所使用之桿件或構材設計所用之後處理程式，每遇設計規範修訂亦須隨之修改，甚為麻煩，且新版規範亦需經一段時間使用後才能適應，所以修改版本次數避免太過頻繁。最近鋼結構極限設計規範修訂單位「中華民國鋼結構協會」正著手針對「鋼結構極限設計規範及解說」進行修訂工作已有數個月之久，修訂內容亦有包含高強度螺栓與銲道併用於同一接頭之相關規定，惟修訂完成後仍須經內政部「建築技術審議委員會」審議通過後才會正式頒行，可預期尚需一段時日才會施行。因為梁-柱接頭之接合型式，「螺栓與銲道之合併使用」的問題會影響結構安全至鉅，因此有必要儘早讓設計工程師知道，以免繼續設計出有安全疑慮之房屋結構。本文若有不當之處亦請不吝指正。

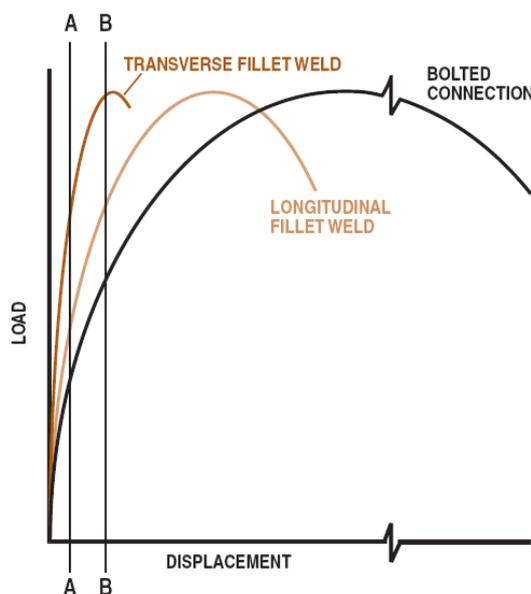


圖1：螺栓與銲接併用之載重與變位關係示意圖[3]。



圖2：梁腹板接合螺栓數量太多，以銲接補強案例。

## 二、「接合」與「接頭」之定義

在「中華民國鋼結構協會」針對「鋼結構極限設計規範及解說」修訂會議討論中，出現「接頭」及「接合」之名詞混淆的問題，一般人在書寫工程相關文章時，大都以隨興或讀起來是否順口來決定採用「接合」或「接頭」。經召集人陳正誠解釋：在AISC (2010) 鋼結構極限設計規範中，對桿件或構材結點之整體連結稱作「接頭」(connection)；對接頭中部材或肢材之連結稱作「接合」(joint)。為方便工程先進及讀者易於了解規範用語，特別加以說明，本文以下之相關名詞亦以此原則定義。

## 三、AISC (2010)鋼結構極限設計規範修訂要點

### 3.1、鋼結構設計規範

AISC (2010) 鋼結構極限設計規範，第J1.8 (螺栓與銲接組合)中規定：「A3.3節所定義之螺栓(亦即，ASTM A307、A325、A354、A449、A490、F1852、F2280等)，其螺栓孔若為標準孔或垂直於載重方向之短槽孔，則可與平行銲軸受力之

填角銲共同分擔剪力，惟螺栓之最大剪力強度不得大於該螺栓承壓型剪力強度之50%。(此處特別提醒：填角銲須為平行銲軸受力。)

既存結構如以銲接方式進行修改或補強時，既有之摩阻型高強度螺栓可用以承受修改或補強時存在之載重，銲接須提供承載後續載重所需之強度。」

〔解說〕：

螺栓分擔剪力的規定係參考Kulak and Grondin (2003)之研究報告，承受剪力之ASTM A307螺栓與高強度螺栓，其螺栓孔若為標準孔或垂直於載重方向之短槽孔，則可與平行銲軸受力之填角銲共同分擔剪力，惟螺栓之最大剪力強度不得大於該螺栓承壓型剪力強度之50%。又，由經驗顯示，螺栓附近之銲接熱量尚不致改變螺栓之機械性質。

既存結構修改或補強時，修改或補強銲接前，業已存在的靜載重可由既有已預拉力鎖緊之高強度螺栓承受，其餘載重應全部由新增加之銲道承受。

### 3.2、鋼結構耐震設計規範

AISC (2010)「鋼結構耐震設計規範」第D2.2節 (螺栓接合)規定：栓接接頭應符合下列規定：

- (1)、以標準孔接合之栓接接頭，其可用之剪力強度應依鋼結構設計規範第J3.6(螺栓及螺牙部之拉力與剪力強度)及J3.10(螺栓孔之承壓強度)計算其承壓型剪力接合強度，惟螺栓孔之標稱承壓強度不得大於 $2.4dtF_u$ 。
- (2)、螺栓與銲接不得設計為共同抵抗同一接合之力，或接頭中之同一分力。

〔解說〕：AISC (2010)耐震設計規範禁止螺栓與銲道共用。螺栓接合在大地震力反復作用及接合板產生之非彈性變形情況下，螺栓可能超過其抵抗滑動之極限。若高強度螺栓與銲道共同抵抗同一平面之剪力，螺栓在反復載重作用下可能

無法產生足夠的滑動量而進入承壓狀態，此時銲道將承受全部剪力，若銲道未設計為抵抗全部剪力將會先行破壞。因此AISC (2010)耐震設計規範禁止螺栓與銲道共同分攤同一接合面之力，或接頭中之同一分力。

在同一「接頭」中，螺栓所承受之力量與銲道所承受之力量成正交時，例如：梁-柱抗彎矩接頭中 (見圖3)，翼板銲道以水平力偶傳遞撓曲彎矩，腹板螺栓傳遞垂直剪力，此種情況可各自負擔不同方向之分力。但腹板螺栓不得與腹板連接板邊緣之銲道 (實線部分代表額外補銲之銲道)共用分擔同一方向之分力 (亦即，傳遞垂直向之剪力)。在此特別提醒讀者，腹板連接板上、下緣之銲道(虛線部分)，因銲接施作所需之空間不足 (所需銲接角度約30度，且為仰銲姿式，施作困難) 而無法施作。

上述梁-柱抗彎矩接頭中，若上翼板為以銲接方式接合，而下翼板為以高強度螺栓接合，來承受撓曲彎矩所產生之水平力偶(見圖4)，則筆者認為亦應可接受。



圖3：翼板銲接腹板栓接之接頭，腹板螺栓不得與腹板銲接共用[1]。

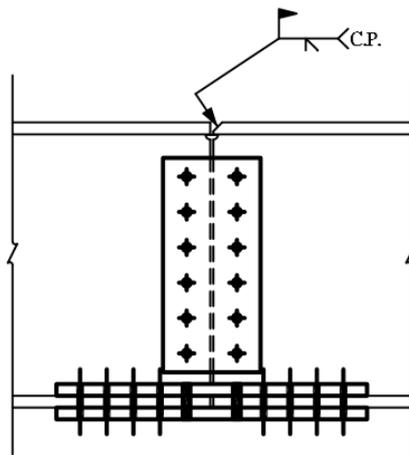


圖4：上翼板為以銲接方式接合，下翼板以高強度螺栓接合，  
來承受彎矩之水平力偶。

承受軸力之斜撐桿件，其端部接頭中必須全部由同一種接合型式承受。換言之，全部由螺栓承受或全部由銲接承受。圖5中，斜撐軸力可全部由端部之樞軸接合進入連接板。圖5及圖6中，斜撐端部連接板之水平分力可經由梁底銲道進入梁下翼板，再由梁下翼板與柱間之銲道接合進入柱；但斜撐之垂直分力與梁之剪力，則雖位於同一剪力面，但仍必須全由斜撐連接板之垂直銲道傳遞進入柱，或全由梁端腹板接合螺栓傳遞進入柱。二者只能擇一，不能共同承受。

而圖7之情況與圖5及圖6類似，其斜撐之接合型式會將部分斜撐之垂直分力經由梁腹板之加勁板(封板)進入梁腹板，再由梁腹板進入柱，但因梁腹板之剪力強度不足，因此須於梁側增銲封板補強，因此會造成梁腹板的接合螺栓便無法發揮剪力強度，而必須改為全部垂直剪力均由銲道承受。

圖8及圖9右側之情況為梁之剪力及斜撐之垂直分力全由銲道承受。但圖9左側之情況則全由螺栓承受。



圖5：斜撐之垂直分力與梁之剪力須全螺栓或全由鉚道承受。

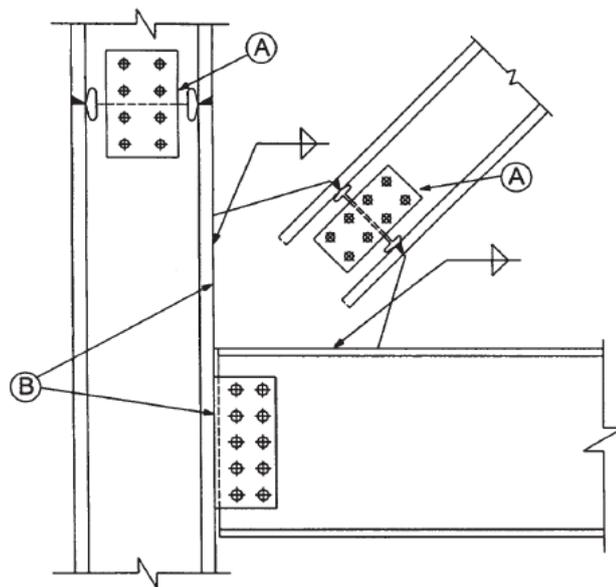


圖6：斜撐之垂直分力與梁之剪力須全螺栓或全由鉚道承受。



圖7：斜撐之垂直分力與梁之剪力，當梁有封板時須全鐸道承受。

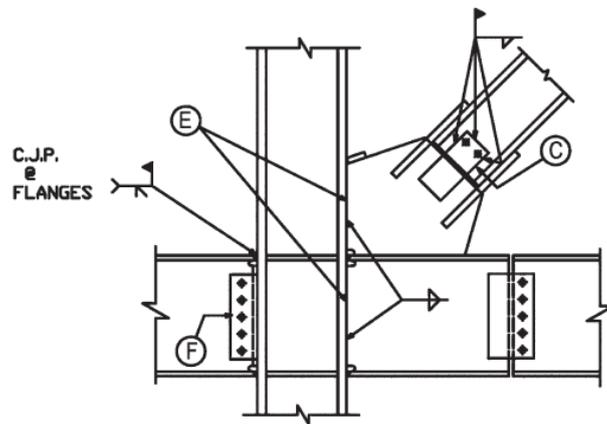


圖8：斜撐之垂直分力全由鐸道承受。

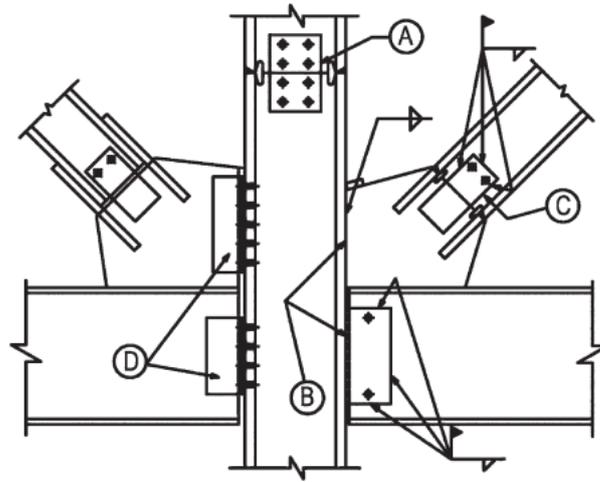


圖9：右側斜撐之垂直分力全由鐸道承受，左側斜撐之垂直分力全由螺栓承受。

#### 四、鋼結構設計規範修訂建議

4.1、現行鋼結構設計規範規定第十章(接合設計) 第10.1.8節 (螺栓與鐸接之組合)中，對一般用途之接頭建議修改為：「螺栓孔若為標準孔或垂直於載重方向之短槽孔，則可與平行鐸軸受力之填角鐸共同分擔剪力，惟螺栓之最大剪力強度不得大於該螺栓承壓型剪力強度之50%，且須先鎖緊高強度螺栓後再鐸接。」

摩阻型高強度螺栓與鐸道共同分擔載重時，必須在鐸接以前將高強度螺栓鎖緊，若先鐸接則鐸接熱量將使鋼板產生扭曲變形而影響摩阻面之密接作用，致影響摩阻強度。若摩阻型高強度螺栓在鐸接前先鎖緊，則摩阻型高強度螺栓與鐸接可假設在共同剪力面可分擔剪力。螺栓附近之鐸接熱量尚不致改變螺栓的機械性質。

但因現行鋼結構設計規範未特別強調僅能承受剪力，曾有工程師誤用於鋼梁端板與柱翼板間之受拉高強度螺栓與端板周邊之環繞銲接共同承受梁-柱接頭彎矩及剪力之情況，而產生銲道撕裂後再拉斷螺栓，造成倒塌事件(見圖10及圖11)。

AISC (2010) 鋼結構極限設計規範仍允許用於共同承受剪力之情況。因此建議規範修訂時應特別強調僅能用在「非耐震用途之剪力接合」。另外，AISC (2010) 考量銲接與螺栓共用於同一接頭時會有變形不一致的問題，因此限制螺栓孔須為標準孔或垂直於載重方向之短槽孔，才可與平行銲軸受力之填角銲共同分擔剪力，惟螺栓之最大剪力強度仍不得大於該螺栓承壓型剪力強度之50%。



圖10：誤用高強度螺栓與銲接共同承受梁-柱接頭彎矩而造成倒塌之案例



圖11：誤用高強度螺栓與銲接共同承受梁-柱接頭彎矩而造成倒塌之案例

4.2、AISC (2010) 鋼結構極限設計規範允許ASTM A307普通螺栓可與銲道可用於非耐震用途之剪力接合共同承受剪力。筆者認為考量國內已習慣使用摩阻型高強度螺栓，此規定實務上已用不上，況且普通螺栓無鎖至預拉力之規定，因此會有鬆脫之疑慮，且承壓型螺栓與銲接組合之接合方式在極限載重發生前，接合面可能已產生滑動而導致銲道負擔不確定之較大載重。因此建議維持：「設計時承壓型螺栓及A307螺栓不得視為與銲道共同分擔載重」之規定。

4.3、現行鋼結構設計規範規定第十三章(耐震設計)中建議增列如下：

栓接接頭應符合下列規定：

- (1)、以標準孔接合之栓接接頭，其可用之剪力強度應依鋼結構設計規範第十章第10.3.1節(螺栓及螺牙部之拉力與剪力強度)及第10.3.9(螺栓孔之承壓強度)計算其承壓型剪力接合強度，惟螺栓孔之標稱承壓強度不得大於 $2.4dtF_v$ 。
- (2)、螺栓與銲接不得設計為共同抵抗同一接合之力，或接頭中之同一分力。

考量接頭在承受地震力全載反復作用狀況下，接合板有可能產生非彈性變形，此時螺栓之滑動量可能已超出臨界值，在同一剪力面上之銲道變形量不會大到容許螺栓可達承壓型之程度(見圖1)，特別是在承受反復載重之情況下。因此銲道須承受全部之力量。此時若銲道之設計強度不足，可能產生接頭整體破壞現象。此項「螺栓與銲道不得設計為共同抵抗同一接合之力，或接頭中之同一分力」之新規定亦適用於其他類似之情況。前述變革建議應納入鋼結構設計規範第十三章(耐震設計)中。

4.4、用於耐震設計之標準孔螺栓之剪力強度係以承壓型接合設計，其螺栓孔之標稱承壓強度不得超過 $2.4dtF_v$ 。所有高強度螺栓均須鎖緊至預拉力，且接合面之摩擦係數仍須符合摩阻型螺栓之規定。

## 五、結語

以往直覺上或設計觀念停留在小變位之彈性限度內，因此均認為：以摩阻型接合設計之高強度螺栓可與銲道共同承受同一接合面之剪力載重，係考量二者之相對變形量均甚小，因而視為高強度螺栓可與銲道共同分擔載重。此種理念在彈性階段尚可適用，但耐震設計之理念已採用考量韌性消能折減後之地震力來設計結構物，因此當承受反復載重，且進入非彈性階段，則先前之彈性限度觀念已不適用，但由實驗資料顯示，以標準孔接合之栓接接頭，其剪力強度得依承壓型剪力接合強度計算，惟螺栓孔之標稱承壓強度不得大於 $2.4dtF_v$ 。

況且採於腹板接合板與腹板間以銲接補強，使腹板之摩阻型高強度螺栓與銲道共同承受剪力，以解決螺栓數量太多的作法，會限制腹板螺栓滑動的機構而妨礙梁-柱接頭之梁翼板發展塑性轉角的能力，而增加腹板接合撕裂柱板的可能性。因此在腹板接合板與腹板間銲接補強的不適當作法亦有必要藉此次規範修訂之機會一併予以規定。惟同一方向之分力全部以以標準孔作螺栓接合時，其剪力強度得依承壓型剪力接合強度計算，但螺栓孔之標稱承壓強度不得大於 $2.4dtF_v$ 。此得依承壓型剪力接合強度計算之規定，亦提高了螺栓之剪力接合強度，使得以螺栓承受全部剪力之可行性大幅提高。

鑒於鋼結構設計規範修訂尚須一段時日，有必要讓技師同仁儘早了解嚴重性，供後續設計參考。遇到梁-柱接頭，考量塑鉸剪力，致腹板螺栓較多而產生較大之偏心時，不宜再以腹板連接板側緣之銲道來作剪力補強。甚至梁腹板為栓

接之接頭，若因斜撐接入梁端而致梁腹板剪力不足時，一旦梁端須加封板補強時，則梁端剪力及斜撐之垂直分力須全部由鉚道傳遞進入柱。

[參考文獻]

- [1]、AISC 341-10 Committee on Specifications (2010) “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”。
- [2]、AISC Committee on Specifications (2010) “Specification for Structural Steel Buildings”。
- [3]、Duane, K. M. & Sc,D. ( 2002 ). Mixing Welds and Bolts-Practical Ideas for the Design Professional. *Welding Innovation*, XIX(2).
- [4]、劉澤山 (2013) “腹板高拉力螺栓與電鉚是否可以共用抵抗地震力” 技師報 856期。