

# H 型與箱型鋼梁螺栓續接彎矩接合之經濟設計方法探討

陳正平 結構、土木技師

## 【摘要】

在進行腹板接合螺栓應力之檢核工作時，接合螺栓組是否除須考慮傳遞剪力外，尚須考慮腹板接合板中心線二側之剪力螺栓組之間的偏心距所產生之偏心二次彎矩，以及鋼梁全斷面所承受之彎矩依其腹板斷面模數所分攤到之彎矩，同時作用下之螺栓最大合成應力？還是，僅須考慮剪力產生之應力即可？此問題困擾大多數結構工程師，多數的設計參考書籍或規範或學校鋼結構設計相關課程的教學上，均甚少或未對此類問題作規定或說明，致設計腹板螺栓時，僅考慮傳遞剪力者大有人在。本文針對此問題，除充分考量各種力量對接合螺栓的影響外，亦以簡單明確之受力模式探討如何設計才能符合安全需求，並達到符合經濟效益的目標。

## 一、前言

較長之鋼梁常因製作及公路運輸、或施工吊裝尺度及重量等受限、或為確保接合之施工品質而採工廠內銲接工地栓接、或吊裝程序、或因鍍鋅爐之長度受限（一般鍍鋅爐之尺度最大可達 17m 長×1.8m 寬×3.2m 高）等需求，而會有續接的需求。但 H 型與箱型鋼梁以螺栓作彎矩續接的情況，常會出現腹板接合所需螺栓數量太多的困擾。其主要原因係鋼梁腹板除須負責傳遞剪力，及剪力傳遞過程所衍生之「接頭中心線二側之剪力螺栓組重心間偏心距所產生之偏心二次彎矩」外，尚須傳遞鋼梁全斷面所承受之彎矩依其腹板斷面模數所分攤到之彎矩，此彎矩對於腹板接合螺栓而言，係由螺栓組之抗扭能力來抵抗。由於螺栓組以抗扭模式抵抗之能力較差，因此會需較多的腹板接合螺栓才能滿足需求，尤其是遇到梁深(h)較淺時，此種情形更為嚴重(見圖 1)。因此腹板接合螺栓之數量，出現比翼板接

合螺栓之數量還多的案例甚多（箱型鋼梁見圖 2；H 型鋼梁見圖 3）。此種現象除造成視覺上不成比例外，在螺栓的使用效率上亦產生不經濟，而致造價成本較高的現象。

在進行腹板接合螺栓應力之檢核工作時，接合螺栓組是否除須考慮傳遞剪力外，尚須考慮腹板接合板中心線二側之剪力螺栓組之間的偏心距(見圖 4)，所產生之偏心二次彎矩，以及鋼梁全斷面所承受之彎矩依其腹板斷面模數所分攤到之彎矩，同時作用下之螺栓最大合成應力？還是，僅須考慮剪力產生之應力即可？此問題確實困擾大多數結構工程師，尤其是多數的設計參考書籍或規範或學校鋼結構設計相關課程的教學上，均甚少或根本未對此類問題作明確的規定或說明，致設計腹板螺栓時，僅考慮傳遞剪力者大有人在。腹板接合螺栓僅考慮傳遞剪力，與同時考慮剪力與其衍生之偏心二次彎矩，甚至加上腹板依其斷面模數分擔到之彎矩等，來檢核最遠處螺栓之合成應力，此種狀況即使不檢核滑動力，二種作法所計算出之腹板螺栓數量，有相差近倍的現象。本文針對此種現象除探討如何設計才能符合安全需求外，亦探討如何以簡單明確之受力模式來設計所需螺栓之數量，才能達到符合經濟效益的目標。



圖 1：腹板深度較淺之鋼梁所需腹板接合螺栓數量較多之案例。



圖 2：箱型鋼梁腹板接合螺栓數量較翼板接合螺栓數量多之案例。



圖 3：H 型鋼梁腹板接合螺栓數量較翼板接合螺栓數量多之案例。

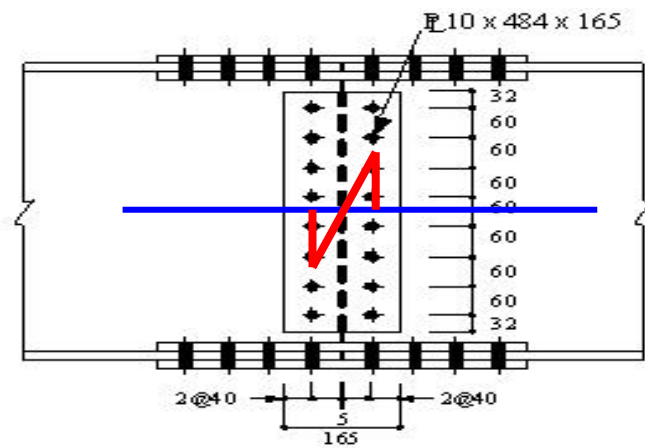


圖 4：H 型鋼梁腹板接合中心線二側之剪力螺栓組之間之偏心二次彎矩示意圖。

## 二、 栓接設計相關規範之規定

### 2.1、鋼結構設計規範

鋼結構設計規範對於H型與箱型鋼梁螺栓續接彎矩接合設計之局部結構系統的力學行為，僅於第10.1.2節（彎矩接合）規定：「受束制之梁、大梁和受束制桁架之端部接合，應依其接合處之勁度所計得彎矩與剪力之合成效應設計之」。除此原則性的宣示外，其餘部分均未作規定。

### 2.2、公路橋梁設計規範

經查交通部 98 年 12 月所頒「公路橋梁設計規範」中 9.1.16 節 2. 撓曲構材之(3)腹板續接之最末段所提到：

『在「容許應力設計法」中，腹板續接板及其接頭至少應足以承受由  $F_w D t_w$ 、 $M_w (= F_w D t_w e)$ 、 $M_w$  及  $H_w$  組合之控制力。... 受偏心載重接頭之最大合成力不得超過依據 9.2.2 節(3)取  $N_b=1.0$  計得之抗滑強度。』

式中：

$F_w$  = 續接處腹板之最大剪應力，依(9-4r)或(9-4s)定義。

$D$  = 腹板深度。

$t_w$  = 腹板厚度。

$e$  = 腹板續接板，自續接中心線至所考慮接頭一側螺栓中心點之距離。

$M_w$  = 假設由腹板分擔抵抗之彎矩， $M_w$  應作用於腹板深度中間。

$H_w$  = 對於中性軸不在腹板深度中間之斷面，應另加考慮一設計水平合力  $H_w$  作用於腹板深度中間。

### 三、 設計實務探討

3.1、 在實務設計上，設計者對鋼梁以螺栓續接之設計考量如下：

3.1.1、對彎矩設計常出現之考量方式大致有下列三種：

- (1)、僅將翼板鋼材之全張力強度轉算成等強度之螺栓數量作翼板續接設計。而遺漏鋼梁腹板依其斷面模數分擔到之彎矩，及腹板承受剪力之螺栓組重心間所產生之偏心彎矩。
- (2)、直接將整根鋼梁斷面所承受之彎矩，除以梁全深（螺栓受力為單剪）或除以上、下翼板斷面重心間距（螺栓受力為雙剪）。但未檢核翼板接合螺栓分佈之長度範圍內之翼板與腹板間之銲道及腹板強度，是否足夠承受「鋼梁腹板依其斷面模數分擔到之彎矩」藉由翼板與腹板間之強度傳入上、下翼板之接合螺栓內（應用例見圖5及6）。
- (3)、採用第(1)種方式，另於腹板接合螺栓組之設計，除考慮鋼梁剪力之影響外，另加入鋼梁腹板依其斷面模數分擔到之彎矩。

3.1.2、對剪力設計常出現之考量方式大致有下列二種：

- (1)、 僅考慮腹板承受剪力所需之螺栓數量。
- (2)、 除考慮腹板承受剪力外，並考慮因剪力螺栓組間偏心距所產生之偏心二次彎矩，二者同時作用下之最大合成力，並須檢核單一螺栓（離螺栓組中心最遠螺栓）之最大合應力。
- (3)、除採用(2)種方式外，另計入軸力及扭力（若有）等力。



圖 5：箱型鋼梁腹板接合螺栓數量較翼板接合螺栓數量多之案例。



圖 6：H 型鋼梁腹板接合螺栓數量較翼板接合螺栓數量多之案例。

### 3.2、鋼結構標準圖之適用性

若採用鋼結構標準圖或鋼結構設計手冊所提供之常用接合詳圖（一般稱標準圖），其接合螺栓通常僅以排滿全梁高，並儘量接近該梁腹板剪力之全強度為原則，來配置接合螺栓之數量，若略有不足，則不再為了少數螺栓再增加一排螺栓。因此標準圖中所提供的接合詳圖，不一定可適用該梁之任何受力情況。

若要將標準圖所提供的接合詳圖之安全性提升至可適用於任何受力情況，則必須將接合鋼板及接合螺栓之數量等之安全性提升至最高標準。惟實務上，接頭強度須達最高標準情況的機會不多，而對其他接頭強度需求較低之大部分情況，便會增加製造構件所需工時與成本，且會造成資源及財務上的浪費。

另一種情況是每一接頭之載重組成率不一，有的軸力較大，有的彎矩較大，亦有是剪力或扭力較大的情況。而剪力較大時，其接合螺栓的配置樣式又會影響偏心距離，進而影響偏心二次彎矩（或偏心扭力）。

因此單一接合詳圖很難適用於各種接頭之載重狀況，所以正確的使用標準圖的原則，應係將擬採用的接合型式詳圖，先依據該接頭的載重組成率作個別檢核，若檢核結果符合安全需求才可採用該型式之接合詳圖；若檢核結果不符合安全需求，則須選用接頭強度更高一級的接合型式詳圖作同樣的檢核，若選用最高級的接合型式詳圖仍無法通過結構安全檢核，則須單獨另行設計，並繪製專用之詳圖。此種繁複的檢核工作可以用後處理程式交由電腦自動處理以節省工時並提升正確性。

因此俗稱之「標準圖」，其性質實際上僅是「常用接合詳圖」而已，並非如一般工程師所誤認為是的「萬用標準圖」。因此一般常用接合詳圖，不一定能滿足各種載重組合之合力，必須採前述原則檢核所選用之詳圖是否適用後才可選用，否則須另繪專用詳圖。

#### 四、接合處局部結構系統力學行為探討

在力學行為方面，任何鋼結構H型鋼梁或箱型梁，其腹板除須負責傳遞剪力，及剪力傳遞過程所衍生之「接頭中心線二側之剪力螺栓組重心間偏心距所產生之偏心二次彎矩」外，尚須傳遞鋼梁全斷面所承受之彎矩依其腹板斷面模數所分攤到之彎矩，此彎矩對於腹板接合螺栓而言係由螺栓組之抗扭能力來抵抗。由於螺栓組以抗扭模式抵抗之能力較差，因此會需較多的腹板接合螺栓才能滿足需求。此種力學行為設計者須充分了解，才能完成妥善之接合設計。

在「鋼結構設計規範」中僅規定：「受束制之梁、大梁……之端部接合，應依其接合處之勁度所計得彎矩與剪力之合成效應設計之。」等原則性宣示，其餘設計細節部分由設計者自行依專業術養自行設計考量。在「公路橋梁設計規範」則特別規定 $M_w$ (假設由腹板分擔抵抗之彎矩， $M_w$ 應作用於腹板深度中間)須列入考慮，提醒設計者注意，以防設計者疏漏而造成公共安全疑慮。

設計實務上，為減少腹板接合螺栓用量，可利用於腹板接合板之上、下端配置較多螺栓(應用例見圖 7)，以利用力學行為上其有效深度較大的特性，更有效來承受鋼梁腹板依其斷面模數分擔到之彎矩。尤其是，若將圖 7 中之三塊腹板接合板連成為完整一塊之型式(應用例見圖 8)，則更可一併提高抵抗因「接合板中心線二側之剪力螺栓組間偏心距產生之偏心二次彎矩」之能力。

惟三塊腹板接合板連成為完整一塊之型式，其任一螺栓孔中心至最近之連接板邊緣之距離不得大於連接板厚度之 12 倍，亦不得大於 15cm 【見鋼結構設計規範容許應力設計法第 10.3.11 節(最大邊距及間距)】。腹板接合板若完整連續為一整塊，其扭轉常數“J”可以提高，因此抵抗彎矩(扭力)的效率亦隨之提高。腹板接合板在無配置螺栓之處可予切除，以減少鋼材用量及重量(見圖 8 中虛線裁切線所示)。



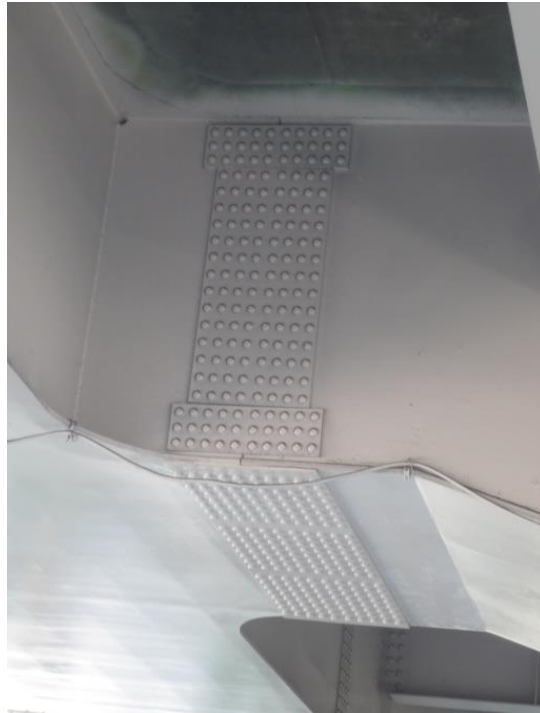


圖 7：螺栓於腹板接合板之上、下端配置較多之型式

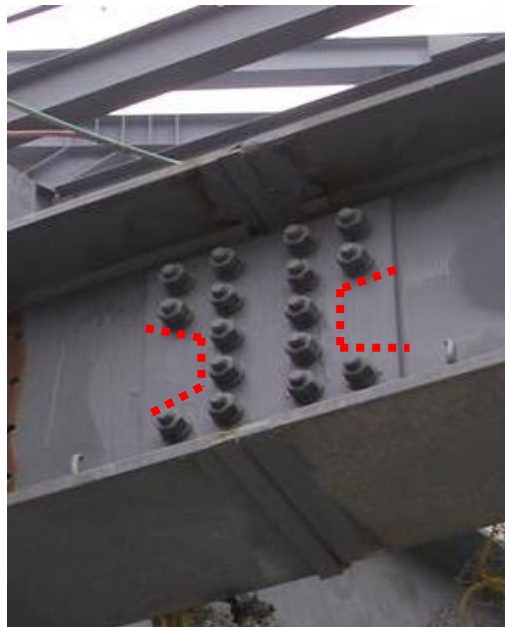


圖 8：螺栓於腹板接合板之上、下端配置較多之型式[5：陳純森，技師報 797 期]

## 五、 經濟設計方法探討

為降低整體接合螺栓之總數量，建議採下列原則設計：

- 1、對於翼板之斷面模數佔全斷面模數之比例較高（以大於 70%以上為宜）之熱軋型鋼梁，且若其翼板接合板有足夠的長度可供消散腹板傳到翼板的彎矩，消散之建議角度為 30 度（適合梁深較淺之梁：見圖 9），則建議可簡化為，將「腹板依其斷面模數與鋼梁全斷面模之比例所承受之彎矩依其所分攤到之彎矩」，全部改由上、下翼板承受。而腹板僅承受剪力及接合板中心線二側之剪力螺栓組間偏心距所產生之偏心二次彎矩。對於較梁深(h)較淺之梁，較適用此法，可減少之螺栓數量亦較多(見圖 10)。
- 2、若前述條件無法滿足，亦可採用檢核鋼梁翼板接合板上，螺栓配置長度範圍內之翼板與腹板間之接合銲道強度與腹板強度（通常為腹板厚度比翼板為薄，且有時腹板材質強度比翼板之材質強度為低，腹板之強度會控制設計）是否足夠承受由整根鋼梁構材組合銲道所需之剪力、腹板彎矩藉由接合銲道傳入上、下翼板所產生之剪力，以及承壓力等之合應力。而腹板僅承受剪力及腹板接合板中心線二側之剪力螺栓組間偏心距所產生之偏心二次彎矩。

以上二種作法會使翼板接合螺栓之數量略為增加，但腹板接合螺栓之數量可大幅減少。此法不但可節省設計時間，且可得較經濟的接合螺栓數量。若不採用前述考量，常會出現腹板之接合螺栓數量多於翼板接合螺栓數量甚多的現象（箱型鋼梁見圖 2；H 型鋼梁見圖 3），且其接合螺栓之總數量會高於依以上二種作法計算所得之螺栓數量。此外，將續接之設置於遠離受力最大之位置，亦是節省接頭鋼料用量及提高安全性的有效方法之一。另外，腹板接合螺栓組承受偏心扭力或彎矩，可採螺栓組臨界滑動接合法(瞬時轉動中心法 Instantaneous center of rotation method)(見圖 11)，此法雖可得較經濟的螺栓配置，但計算程序甚為

複雜，實務上甚少採用，一般仍採用簡化彈性計算法。又，以螺栓承受雙剪之設計亦可減少所需螺栓之總數量。

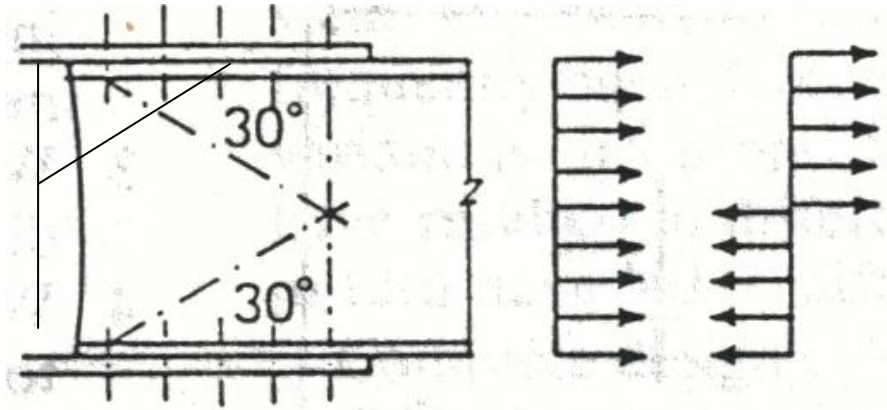
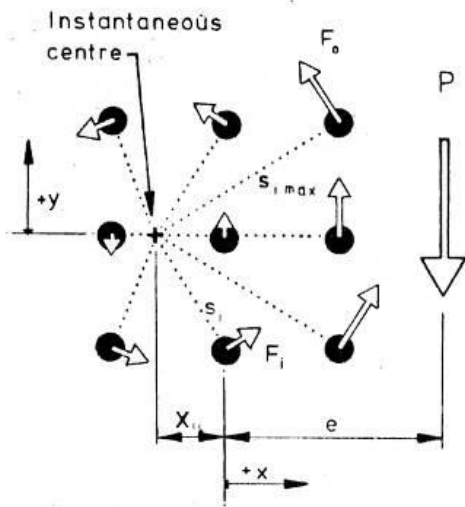


圖 9：消散腹板傳到翼板的彎矩之建議角度 30 度



圖 10：消散腹板傳到翼板的彎矩之建議角度 30 度



$$P/nF_0 = \frac{\sum s_i^2 / ns_{i,max}}{e - X_{ic}}$$

where

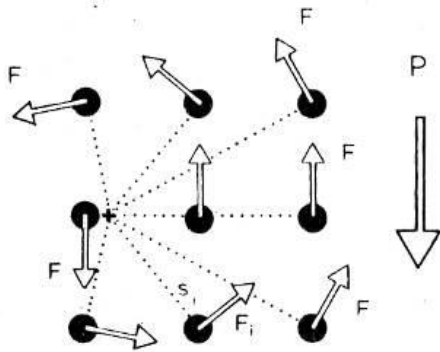
$$s_i^2 = (x_i - X_{ic})^2 + y_i^2$$

$$X_{ic} = \frac{\sum x_i^2 + y_i^2}{ne}$$

$F_0$  = maximum fastener shear

also  $F_i = \frac{s_i}{s_{i,max}} F_0$

(a) Elastic



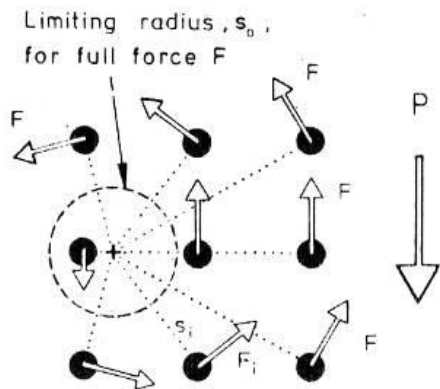
$$P/nF = \frac{\sum s_i / n}{e - X_{ic}} \quad \text{all } F_i = F$$

where  $X_{ic}$  satisfies

$$e - X_{ic} = \frac{\sum s_i}{\sum (x_i - X_{ic}) / s_i}$$

There is no general explicit solution for  $X_{ic}$ .

(b) Plastic



As (b) above except that

$$F_i = \frac{s_i}{s_0} F \quad \text{for } s_i < s_0$$

(c) Elastic-plastic

圖 11 螺栓組臨界滑動接合法(瞬時轉動中心法)。

## 六、經濟設計方法計算例(設計法：ASD)

梁與梁對接：2 根 H 600x200x11x17 對接

鋼材:ASTM A36 ( $F_y=2.52 \text{ tf/cm}^2$ )

螺栓:JIS S10T/F10T M20 高強度螺栓

螺栓接合型式:承壓型接合(剪力面通過螺牙)

螺栓孔:標準孔

載重: 彎矩 = 30  $\text{tf-m}$ ; 剪力 = 30  $\text{tf}$

### 1、查出斷面基本資料

#### 1.1、H600x200x11x17

$$A_g=132 \text{ cm}^2 ; S_x=2520 \text{ cm}^3 ; I_x=75600 \text{ cm}^4 ; R=13 \text{ mm}$$

#### 1.2、柱翼內側續接板之最大寬度限制

$$W_1 = \frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} - R = 81.5 \text{ mm}$$

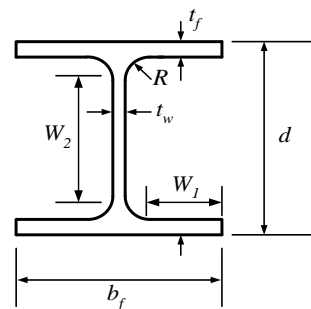
#### 1.3、柱腹續接板之最大寬度限制

$$W_2 = d - 2(t_f + R) = 540 \text{ mm}$$

#### 1.4、 $Z_i / Z < 0.7$

### 2、續接處之載重

強軸方向之彎矩為 30  $\text{tf-m}$  ; 剪力為 30  $\text{tf}$



### 3、翼板接合設計

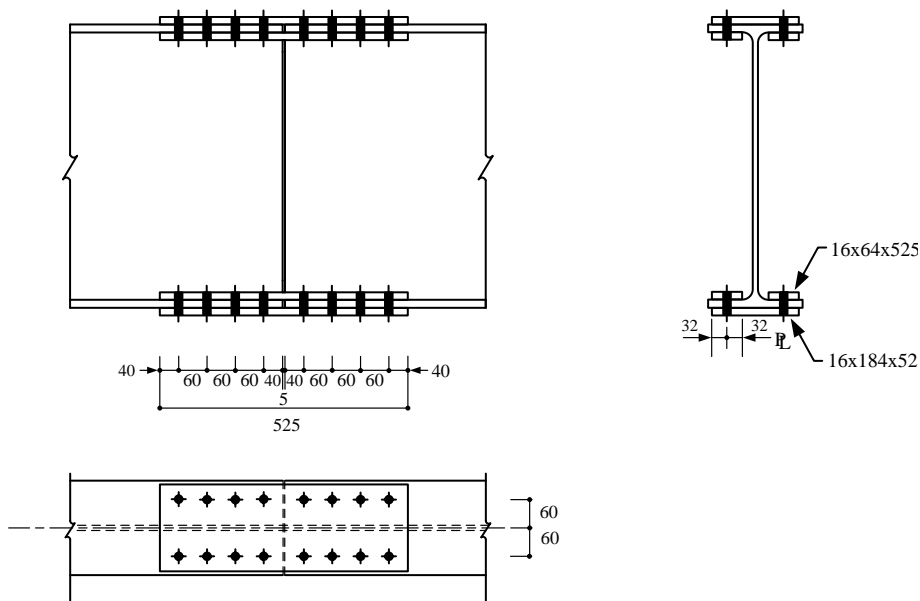
#### 3.1、螺栓所需個數

$$\text{雙剪強度} = 2 \times A_b = 2 \times \left( 1.41 \times \frac{\pi}{4} \times 2^2 \right) = 8.86 \text{ tf / 每個螺栓}$$

$$\text{受拉翼板之總拉力} = \frac{M}{(d - t_f)} = \frac{3000}{(60 - 1.7)} = 51.5 \text{ tf}$$

$$\text{螺栓所需個數} = \frac{51.5}{8.86} = 5.81 \text{ 個}$$

採用 8 個雙剪螺栓，四處翼板接合共需 32 個 F10T M20 高強度螺栓。



翼板 4 顆接合螺栓長度 =  $6 \text{ cm} \times 3 = 18 \text{ cm}$ ，

檢核腹板淨高是否超過以消散角度 30 度計得之高度 =

$$2(18 \times \tan 30^\circ) = 20.8 \text{ cm} < (d - 2t_f = 56.6 \text{ cm}) \text{ N. G.}$$

腹板依其斷面模數所分攤到之彎矩 $=0.233 \times 30 \text{ tf-m} = 6.99 \text{ tf-m} = 699 \text{ tf-cm}$   
對翼板與腹板間之界面產生之剪應力 $(\tau_1) = 699 \text{ tf-cm} / (56.6 \text{ cm} \times 1.1 \text{ cm}) =$   
 $0.624 \text{ t/cm}^2$

由鋼梁剪力對翼板與腹板間之界面產生之剪應力 $(\tau_2) =$   
 $VQ/I t_w = 30 \text{ tf} \times 991.1 / (75600 \times 1.1) = 0.358 \text{ t/cm}^2$

總剪力 $(\tau) = 0.624 \text{ t/cm}^2 + 0.358 \text{ t/cm}^2 = 0.982 \text{ t/cm}^2$

$< 0.4 \times 2.52 = 1.01 \text{ t/cm}^2 \quad \text{O.K.}$

### 【建議】：

以上檢核結果若無法滿足翼板接合板上，螺栓配置長度範圍內，之翼板與腹板間之接合銲道強度與腹板強度需求，則腹板依其斷面模數所分攤到之彎矩，亦得採部分彎矩由腹板接合螺栓承受，部分彎矩轉由上、下翼板承受之方式處理。

### 七、結語

- 1、若鋼梁翼板之塑性斷面模數佔全斷面模數 70%以上之熱軋型鋼梁，且若翼板接合板有足夠的長度可供消散腹板傳到翼板的彎矩(消散之建議角度為 30 度)。則可簡化為將全部腹板承受之彎矩，改由上、下翼板承受，而腹板僅承受剪力及腹板接合板中心線二側之剪力螺栓組間偏心距產生之偏心二次彎矩。
- 2、若前述條件無法滿足，亦可採用檢核鋼梁翼板接合板上螺栓配置長度範圍內之翼板與腹板間之接合銲道強度與腹板強度，是否足夠承受由整根梁構材組合銲道所需之剪力、腹板彎矩藉由接合銲道傳入上、下翼板所產生之剪力及承壓力等之合應力。

- 3、以上二種作法會使翼板接合螺栓之數量略為增加，但腹板接合螺栓之數量可大幅減少，並可節省設計時間，可得較經濟的螺栓接合設計。
- 4、建議以上檢核結果若無法滿足翼板接合板上，螺栓配置長度範圍內，之翼板與腹板間之接合銲道強度與腹板強度需求，則腹板依其斷面模數所分攤到之彎矩，亦得採部分彎矩由腹板接合螺栓承受，部分彎矩轉由上、下翼板承受之方式處理。
- 5、腹板接合螺栓承受扭力可採用螺栓組臨界滑動接合法(瞬時轉動中心法 Instantaneous center of rotation method)(見圖 10)，此法雖可得較經濟的螺栓配置，但計算程序較複雜，實務上，一般仍保守採用簡化彈性計算法。

#### 【參考資料】

- [1] 內政部，〔2007〕，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範(二)鋼結構極限設計法規範及解說」，中華民國鋼結構協會印行。
- [2] AASHTO，〔2007〕「Standard specifications for highway bridges」。
- [3] 交通部，〔2009〕，「公路橋梁設計規範」，98年12月頒布。
- [4] Graham W Owens & Brian D. Cheal，〔1989〕「Structural steelwork Connections」。
- [5] 陳純森，〔2009〕「鋼結構大樓梁柱結合型式之探討」，技師報 797 期。