

鋼梁腹板栓接接合設計要點

陳正平 技師

一、前言

接頭設計為鋼結構設計中最重要的一環，不論大梁或小梁端部之腹板，若採用栓接方式接合，則螺栓組之重心與接合板之支點鉸道間或多或少會產生偏心彎矩(見圖 1 及圖 2)。鋼結構樓版平面中，小梁端部通常係採簡支接合型式，不須設計成固接接合型式(見圖 3)。其主要原因為支承小梁之 H 型鋼大梁係屬開放型斷面(與矩型或圓形等管狀閉合(箱)型斷面不同)，H 型鋼開放型斷面之大梁其斷面扭轉常數(J)通常會比小梁之強軸斷面慣性矩還要小很多，尤其是支承該小梁之大梁端部若為簡支接合之情況時，此時大梁對小梁端部幾乎沒有束制能力，因此小梁接大梁之接頭縱使做成固接接頭，因大梁之整體扭轉勁度甚低，因此小梁之實際力學行為仍與簡支模式相近。一般除非在小梁接大梁接頭處之另側另外有接小梁或有懸臂梁等情況，有外部彎矩(例如，懸臂梁之梁端彎矩，或梁上柱之柱底彎矩，或另側亦有接入小梁)須由內側之小梁接頭平衡時；亦或小梁接大梁接頭處之另側有大軸力須通過該接頭(例如，桁架弦桿之軸力)，此時若僅賴小梁之腹板簡支接合螺栓承受而不足以傳遞軸力之情況，才會採用固接之接合型式，藉小梁之上、下翼板之接合來協助傳遞彎矩或軸力(見圖 3)。

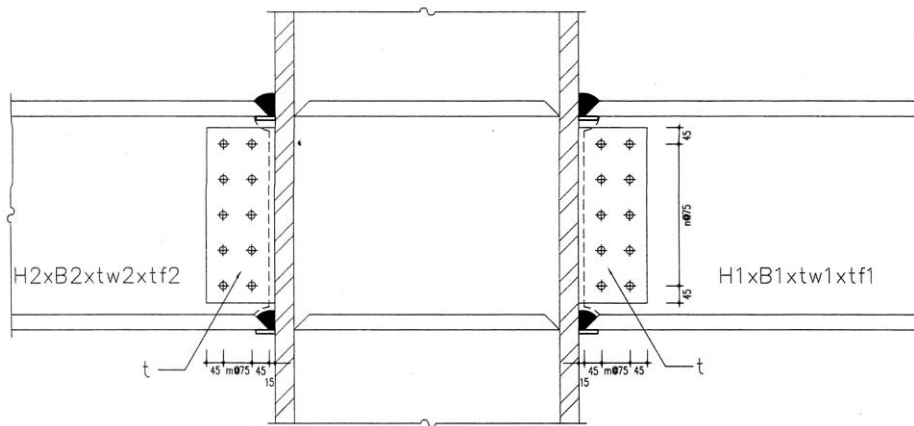


圖 1 梁柱剛性接頭腹板螺栓組偏心接合示意圖

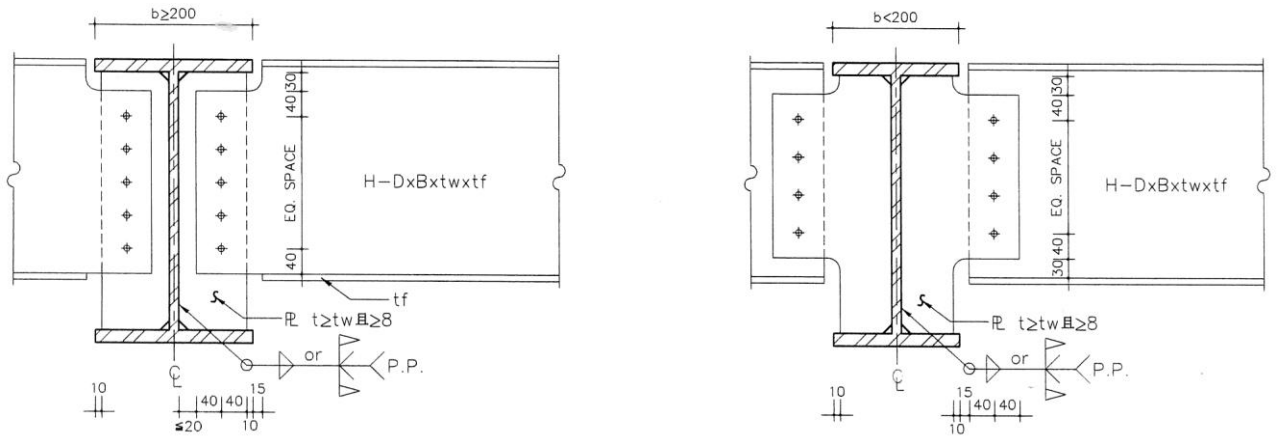


圖 2 小梁簡支接頭腹板螺栓組偏心接合示意圖

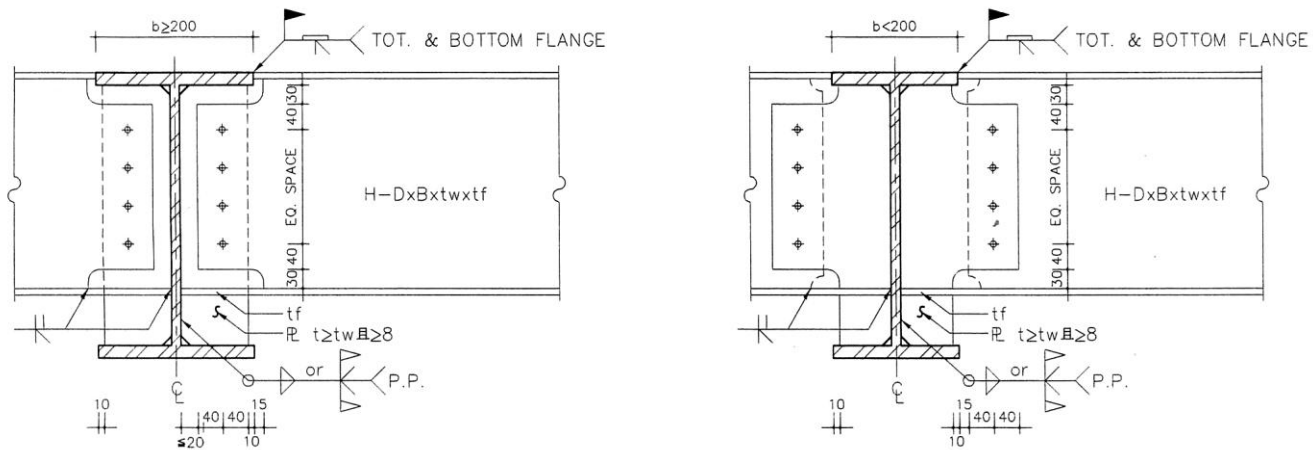


圖 3 小梁接大梁剛性接頭腹板螺栓組偏心接合示意圖

簡支接合若採單角鋼或雙角鋼連接方式(見圖 4)，則其剪力偏心距可減至最小，且當小梁端部產生撓角時，可藉由角鋼之非彈性變形行為，降低梁端之束制程度(見圖 5)；此種角鋼之非彈性變形行為亦可在小梁跨度中央之撓度變形量達到對應當時載重之撓度值時，即會自行停止。此種結構行為在設計分析時，模擬為簡支之模式甚為合乎實際力學行為。

但以單角鋼或雙角鋼之接合方式，在施工安裝時，角鋼翼緣端部須深入支承大梁之梁腹內部才能安裝。由於小梁端部之接合角鋼已銲接固定於小梁端，因小梁二端之接合角鋼的二對角方向之角鋼翼緣端部之距離會大於安裝跨距，因此會因施工空間不足而造成吊裝工作困難又耗時，除會造成所租用之吊裝設備可能消耗大部份時間在設法將小梁擠入大梁腹部就位而增加施工成本外，亦會增加安裝工時之成本(見圖 6)。

因此為節省安裝工時，一般均採用預先銲好腹板接合板，將接合點移至大梁側，以方便快速安裝，節省工時；但因此所產生之偏心彎矩亦會增加鋼材用量而略增加材料成本。

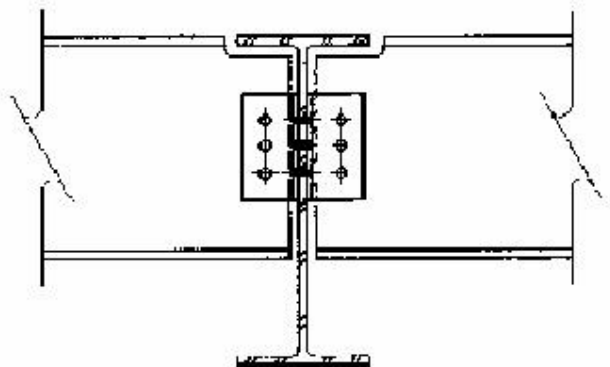


圖 4 雙角鋼工地栓接之接合法示意圖

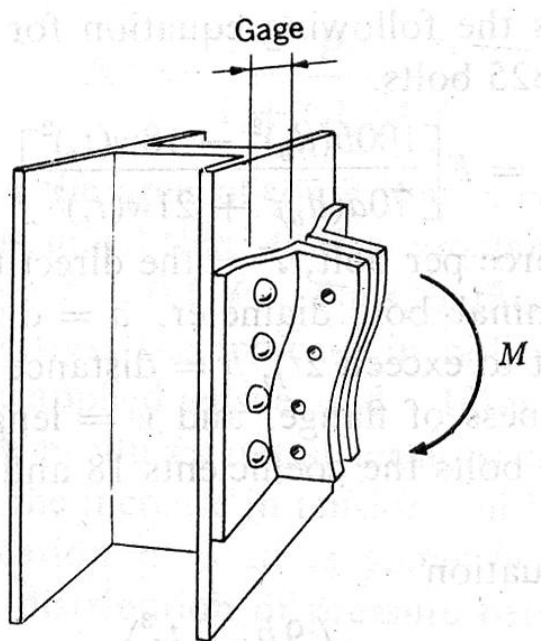


圖 5 雙角鋼接合撓角變形示意圖

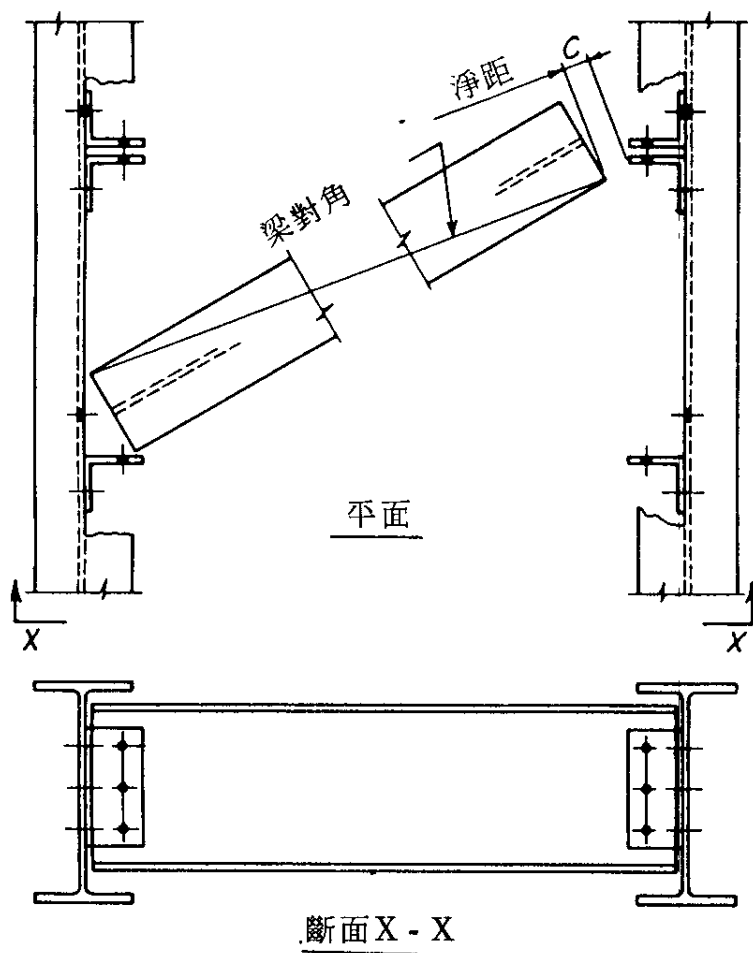


圖 6 以雙角鋼接合之小梁安裝程序示意圖

二、鋼梁端部簡支偏心接合設計法探討

小梁接大梁之接頭為了施工時安裝方便，一旦接合點偏離支承大梁之中心，而致與分析時之結點位置不一致時，即會產生偏心彎矩。其偏心彎矩之大小隨接合點外移之程度而有不同。若將小梁之上翼板截除（見圖 4）使小梁深入大梁腹部接合，則接合螺栓組之重心與大梁腹板中心間之偏心彎矩較小（見圖 2 左），但安裝之方便性已較雙角鋼之接合方式方便很多；若將大梁腹板接合板伸出大梁翼板外緣，再與小梁接合，則小梁之上翼板不須截除，但螺栓組之重心與大梁腹板支承中心間之偏心距離較大，偏心彎矩亦較大（見圖 2 右），但工地可安裝迅速，節省大量工時及吊裝機械租用之成本。

另外，因一般情況大梁之扭轉常數(J)常會低於小梁之斷面強軸慣性矩(I)，因此大梁對小梁端之束制能力甚低（一般情況，支承構材之扭轉勁度若小於小梁之撓曲勁度有達 10 倍以上，即可假設為簡支），小梁端假設為簡支之分析模式即屬合理。因此任何偏離支承中心之接合點均須計入偏心彎矩之影響，偏心彎矩之正確計算法是取該接合點位由分析所得之實際彎矩、剪力及軸力（若有）值來設計接頭。但一個結構系統中桿件非常

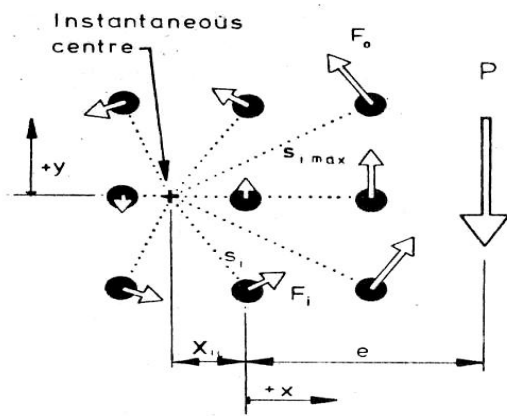
多無法設定太多結點來分析求得接合點位之力量來設計接頭，因此偏心彎矩之計算可保守簡化為支點反力(剪力)與偏心距之乘積，亦即 $M = V \times e$ ；或由電腦程式分析結果之個別桿件自由體之彎矩圖量取接合位置之剪力值(V)及彎矩值(M)等實際力量來設計接頭。

在工程實務上，因一個結構系統中桿件太多，同一種斷面之桿件其跨度及載重亦不相同，因而其接合點之剪力值及彎矩值均不同，因此無法以人工一一計算各接合點所需之接合板厚度及螺栓根數。故一般鋼結構設計圖中之標準圖均以梁深尺寸來配置單排最多螺栓數(單剪或雙剪)，該螺栓數原則上儘可能接近小梁腹板之剪力強度值，惟因尚須計入偏心彎矩之影響，因此標準圖所提供之接合詳細圖及螺栓數並不能滿足各種載重狀況，尤其是不能滿足特殊載重之情況。

然而一般工程師均誤以為標準圖所提供的接頭詳圖及螺栓配置即為可達傳遞桿件最大剪力之接頭，而未先依各別載重情況來檢核標準圖所提供之接合型式及螺栓配置是否可以滿足設計力量。若檢核結果可滿足該接合點之設計力量，則可利用標準圖所提供的接頭詳圖；若檢核結果不能符合需求，則須另外設計接頭詳圖。在設計實務上，比較有效率的作法係以「後處理程式」來讀取電腦應力分析結果之結點力量，再依接頭周邊之束制狀況，找出接合點之設計力量，再以標準圖所提供的接頭詳圖來檢核是否可以符合需求。若可滿足該接合點之設計力量，則可直接利用標準圖所提供的接頭詳圖；若不能符合需求則須另外設計並繪製接頭詳圖。

另外，接頭對側是否亦有小梁接入或大梁之尺寸較大，且大梁端部為固接，亦或大梁上有混凝土樓版提供部份扭轉勁度等情況均會影響計算結果，因此本文所探討的方向係以略偏保守之簡化方法為原則，以符合設計實務之需求。

螺栓組承受扭力及剪力可採螺栓組臨界滑動接合(瞬時轉動中心法 Instantaneous center of rotation method)(見圖 7)，此法雖可得較經濟的螺栓配置，但計算程序較複雜，實務上，一般仍採用簡化彈性計算法。



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

where

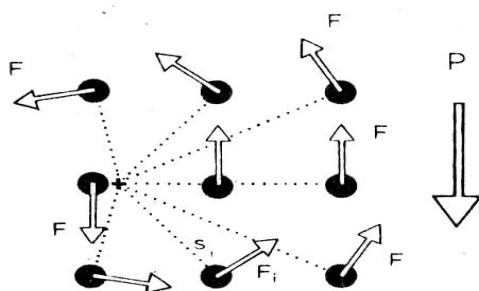
$$s_i^2 = (x_i - X_{ic})^2 + y_i^2$$

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

F_o = maximum fastener shear

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

(a) Elastic



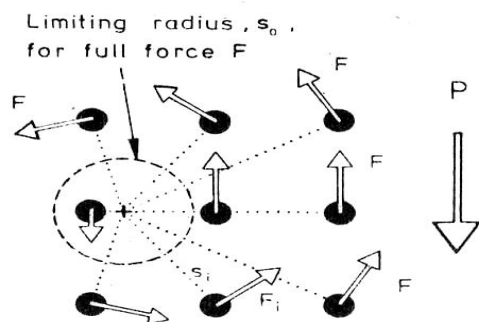
$$P/nF = \frac{\sum s_i / n}{e - X_{ic}} \quad \text{all } F_i = F$$

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 7 螺栓組臨界滑動接合(瞬時轉動中心法)

三、鋼梁端部簡支偏心接合簡化彈性計算例

本計算例是取大梁僅單側有小梁，且假設大梁之扭力勁度可以忽略之情況。螺栓抵抗剪力之模式為承壓型雙剪螺栓：

大梁尺寸：H 700x300x13x14；小梁尺寸：H 600x200x11x17

鋼材：A36 ($F_v=4.1 \text{ tf/cm}^2$)

螺栓：JIS S10T/F10T M20 高強度螺栓。

螺栓接合型式：承壓型接合，且剪力面通過螺紋。

螺栓孔：標準孔

載重：剪力 = 25 tf

取下圖接合配置型式作應力檢核詳下圖所示：

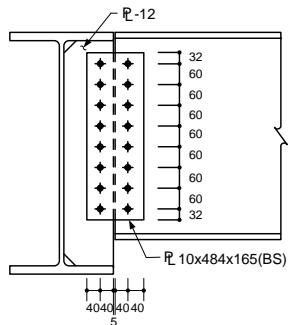


圖 8 一般採用之接合配置示意圖

設計步驟：

1. 查出斷面基本資料

由 RH 型鋼斷面性質表，查出小梁 H600x200x11x17 之斷面性質資料：

$$A = 132 \text{ cm}^2; S_x = 2520 \text{ cm}^3; R = 13 \text{ mm}$$

1.1、小梁腹板接合板之最大高度限制(小梁之斷面尺寸示意詳下圖所示)

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

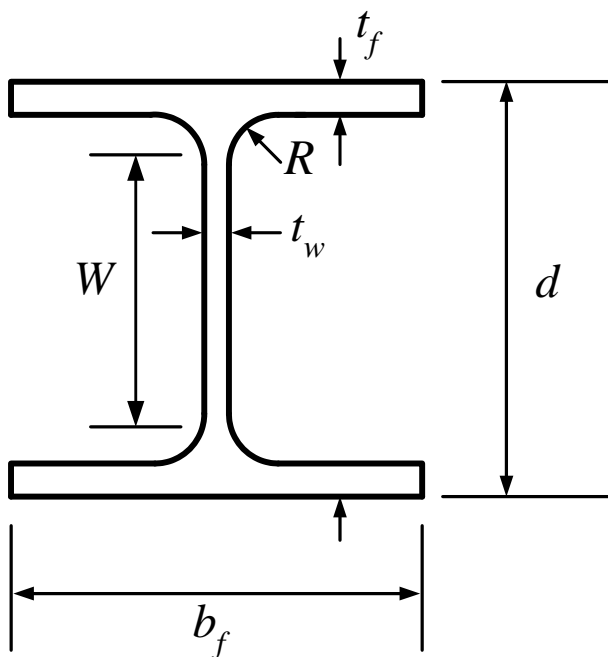


圖 9 小梁之斷面尺寸示意圖

2、續接處之載重

剪力為 25 tf

3、腹板接合設計

3.1、螺栓所需個數

H 600×200×11×17 小梁採用 8 個雙剪螺栓，一組腹板接合共需 16 顆 M20 F10T 高強度螺栓。

3.2、續接板設計

H 600×200×11×17 小梁之腹板接合螺栓間距 取 3 倍螺栓直徑=60 mm；螺栓邊距 32 mm，使用 2 片 plate 10×484×165 接合板。

【附註】如需自行設計螺栓間距、螺栓邊距則需考慮螺栓最大、最小間距及邊距、施工所需空間等。

(1) 螺栓之最小間距, S

$$\text{至少 } S \geq \frac{8}{3}d \text{ 且 } S \geq \frac{2P}{F_u t} + \frac{d}{2} \quad (\text{ASD 規範第 10.3.9 節})$$

(2) 螺栓之最小邊距, L_e

$$L_e = 1.75 \times d = 35 \text{ mm (保守取剪斷邊)} \text{ 且 } L_e \geq \frac{2P}{F_u t} \quad (\text{ASD 規範, 10.3.10})$$

節及

表 10.3.7)

本設計例取 $L_e < 40 \text{ mm}$ 符合 ASD 設計規範第 10.3.10 節規定。

(3) 螺栓之最大邊距, L_n , 及螺栓之最大間距

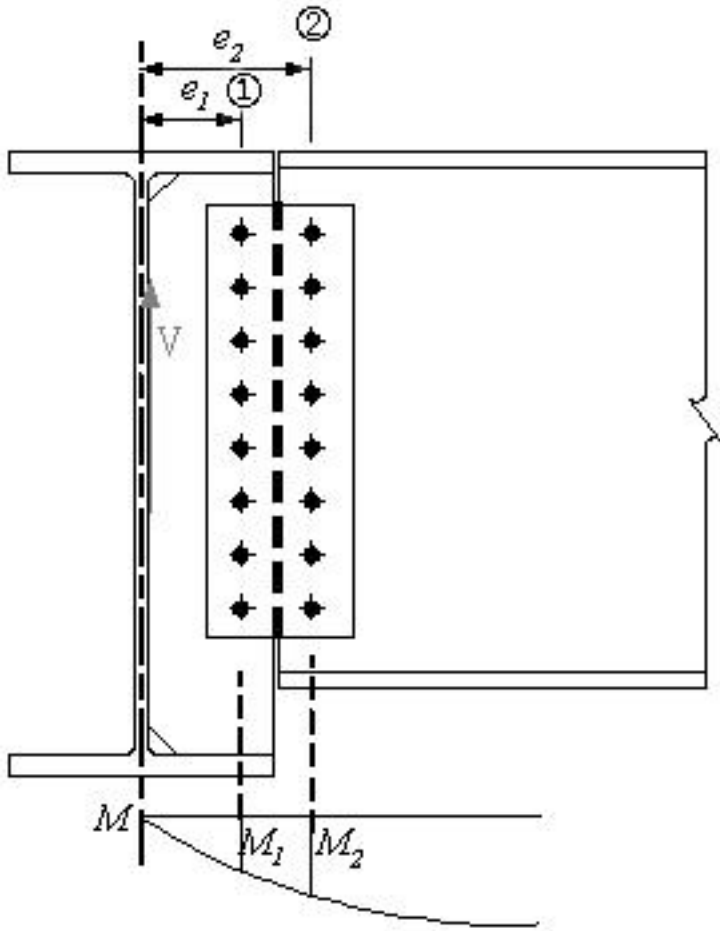
最大邊距 $L_n \leq 15 \text{ cm}$ 或 $L_n \leq 12 \times t$

最大間距依不同使用條件下，而有不同的需求。(ASD 規範第 10.3.11 節)。

3.3、螺栓之強度檢核：

$$\text{螺栓垂直剪力 } V_v = \frac{25}{8} = 3.13 \text{ tf}$$

- 註：
1. 因大梁端部可能為鉸接，故假設大梁沒有扭轉束制。
 2. 大梁為 H 型之開放斷面，扭轉勁度甚低。
 3. 小梁建議以簡支設計，以防端部接合之束制條件改變而影響接合安全。
 4. 假設螺栓組所承受之偏心扭力為 M 控制，簡化取 $M = V \cdot e$ ，基於以上假設，模擬大梁腹板中心為鉸接之支點。



斷面①：剪力 $V=25tf$

$$\text{彎矩 } M = V \times e_1 = 25 \times 11 = 275 \text{ tf-cm}$$

斷面②：剪力 $V=25tf$

$$\text{彎矩 } M_2 = V \times e = 25 \times 19.5 = 487.5 \text{ tf-cm}$$

故，②斷面彎矩較大，控制設計！！

$$\text{螺栓水平剪力 } V_h = \frac{M \cdot y}{\sum x^2 + \sum y^2} = \frac{487.5 \times 21}{2(3^2 + 9^2 + 15^2 + 21^2)} = 6.77tf$$

$$\text{螺栓承受總剪力 } V_t = \sqrt{3.13^2 + 6.77^2} = 7.46tf$$

$$(1) \text{ 雙剪強度} = 2 \times \left(1.87 \times \frac{\pi}{4} \times 2^2 \right) = 11.7 \text{ tf / 每支螺栓}$$

(2) 螺栓孔承壓強度(小梁腹板控制)

$$F_p = (d \times t) \times (1.2 \times F_u) = 2.0 \times 1.1 \times (1.2 \times 4.1) = 10.8 \text{ tf / 孔} \quad (\text{設計規範第}$$

10.3.6 節及表

C-10.3.2)

上二式取小較小值 $10.8 \text{ tf} > \text{實際螺栓剪力 } 7.46 \text{ tf} \quad \text{O.K.}$

3.4、續接板之強度檢核

(1) 撓曲強度之檢核

$$f_b = \frac{M}{S} = \frac{25 \times 19.5}{2 \times 1 \times \frac{48.4^2}{6}} = 0.62 \text{ tf/cm}^2 < F_b = 0.6F_y = 1.5 \text{ tf/cm}^2 \dots\dots(o.k)$$

(2) 剪力強度之檢核

$$f_v = \frac{25}{2 \times 1 \times 48.4} = 0.26 \text{ tf/cm}^2 < F_v = 0.4F_y = 1 \text{ tf/cm}^2 \dots\dots(o.k)$$

(3) 塊狀剪力撕裂之檢核(ASD 設計規範第 10.4 節)

續接板淨斷面積

$$A_e = 2 \times 1 \times (48.4 - 8(2 + 0.15)) = 62.4 \text{ cm}^2$$

續接板撕裂剪應力

$$f_v = \frac{25}{62.4} = 0.40 \text{ tf/cm}^2 < F_v = 0.3F_u = 1.23 \text{ tf/cm}^2 \dots\dots(o.k)$$

故腹板續接板使用 2 片 plate 10×484×165

四、結論

小梁接大梁之接頭邊界狀況非常多，難以採一種簡化之分析模式即可含蓋全部之情況。因此應用標準圖之前，最好依實際狀況以電腦程式先檢核個別情況是否可以適用，若不適用則須另外設計接頭詳圖。另外，接頭對側是否亦有小梁接入或大梁之尺寸較大，且大梁端部為固接、亦或大梁上有混凝土樓版提供部份扭轉勁度、小梁接頭有兼作大梁側撐用途等情況，均應依個別情況檢核標準圖之適用性。另外，採用摩阻型高強度螺栓時可考慮螺栓組之瞬時轉動中心效應，可略為降低螺栓使用量。惟瞬時轉動中心計算過程非常煩複，人工無法進行，而所計算結果又影響有限，因此瞬時轉動中心之計算法不為實務設計者所接受。

再者，接合點偏離結構分析模式之結點所產生之偏心現象，於接頭設計時是否須納入考量，常有爭議。筆者認為偏心均應納入設計考量，只是偏心量小或載重較小時可以忽略不計或酌加接頭之接合螺栓用量來含蓋，否則偏心量大到一個程度一定會產生破壞現象。施工中之懸臂小梁常因未設置臨時支撐，而又僅於梁腹鎖螺栓暫時固定等待接合上、下翼板時發生掉落現象即為一明顯的偏心量過大之失敗例。

註：本文刊登於第 39 期鋼結構會刊