

H 型鋼梁接頭腹板「扇形孔」之細部設計與施工

陳正平 中華民國鋼結構協會 技術委員會主任委員

【摘要】

H 型鋼梁在梁-柱接頭處與柱連接，或是梁本身之續接處，其上、下翼板常使用銲接方式接合，此時梁腹板與翼板相交處（見圖 1 及 2）通常需要設置扇形孔（weld access hole）以利銲接之進行。國內通常依梁構材之受力型態，將梁分成大梁與小梁(或懸臂梁)，大梁通常會承擔地震力引致之反復載重並提供所需之塑性轉角來消耗地震能量，而小梁或懸臂梁基本上僅承擔垂直載重而不承擔反復載重。大梁與柱之接合使用翼板全滲透銲道-腹板螺栓的接合型式時，腹板與翼板相交處即須設置扇形孔；小梁與小梁續接，或懸臂梁與柱連接時，翼板大都採用銲接方式接合，此時也須設置扇形孔。大梁及小梁(或懸臂梁)對扇形孔型式細部設計與施工之要求各不相同，惟扇形孔之細部型式雖不同，其製作扇形孔所需之工時成本卻相差不多，因此小梁或懸臂梁之扇形孔型式雖可較大梁之型式簡單，但建議採用與大梁之型式相同之扇形孔型式，以便採用單一模具，製作品質管理簡單化，且可降件發生錯誤的機率。

一、前言

中華民國鋼結構協會為服務鋼構業者，協助解決鋼結構設計及施工之技術問題，及推廣使用鋼結構綠建材，特於民國 100 年 11 月 30 日於國立台灣科技大學國際大樓 IB707 會議室，由國立台灣科技大學營建工程系 陳正誠教授召集，進行「鋼結構 H 梁扇形孔細部設計與施工」技術備忘錄之工程論壇會議。出席人員計有：大彥工程顧問股份有限公司 張宏成總經理、中國鋼鐵結構股份有限公司 蔡武松經理、台北市結構技師公會 陳正平技師、台聯工程顧問股份有限公司 柯鎮洋總經理、永峻工程顧問公司 鍾俊宏協理、永裕鋼鐵工程股份有限公司 朱應華廠長、宜鋼股份有限公司 徐火清協理、春源鋼鐵工業股份有限公司 郭金宇

課長、國立交通大學土木工程學系 陳誠直教授、理成工業股份有限公司 梁文德副總經理、以及國立台灣科技大學營建工程系 陳生金教授等。並已於民國 100 年 12 月 30 日完成「中華民國鋼結構協會」技術委員會技術備忘錄第 002 號“H 梁扇形孔細部設計與施工”，並已登載於協會網站供鋼構業者參考。本文特將技術備忘錄之工程論壇之討論重點及筆者之觀點提出說明，期盼工程先進不吝指正。

鋼結構之梁-柱接頭或是梁本身之續接，其翼板若採銲接方式接合時，為何須於梁腹板與翼板相交處開設扇形孔？此一問題困擾許多工程師。梁腹板開設扇形孔之目的係為進行梁翼全滲透開槽銲接時，為利銲接工作之進行，使銲道之連續性更佳所需之工作孔（weld access hole）。其位於上翼板下方之扇形孔之功能為使全滲透開槽銲所需之背墊板可連續通過；下翼板上之扇形孔之功能為使銲道可連續，以減少銲接缺陷產生(見圖 3 及 4)。若梁腹板與翼板相交處不設置扇形孔，翼板之銲道會受到腹板之阻隔而成不連續銲道或產生銲接缺陷，此種情形容易造成銲道應力集中現象，可能導致梁翼全滲透開槽銲接容易因疲勞效應而產生脆性破壞，因此在銲道與腹板交叉處設置扇形孔，以求銲道連續性更完整。

梁柱接頭處扇形孔目前鋼構業界以日本之弧形扇形孔並採用自動銑刀設備製作為最普遍，且施工快速品質管理簡易(見圖 1)。但當梁深較大、梁翼板太厚，自動銑刀設備無法製作扇形孔時，以弧形扇形孔細部或 AWS D1.8 之扇形孔細部，並採用火焰切割及切割面研磨的方式製作扇形孔最為恰當。

早期在造船工業之銲接技術即發現不連續之銲道容易造成銲接缺陷及應力集中現象，容易因疲勞效應而產生脆性破壞，因此在銲道交叉處設置扇形孔，以求銲道連續完整。使用扇形孔後，發生銲道脆性破壞之現象大幅減少，因而沿用至今。然而，1994 年美國北嶺地區及 1995 年日本阪神地區發生之強裂地震，造

成許多鋼骨抗彎矩構架之梁柱接頭嚴重受損。此些受損之梁柱抗彎矩構架，其梁-柱接頭採用梁腹板鎖螺栓-梁翼板全滲透開槽銲(Bolted Web Welded Flange，BWFF)之施作方式經由事後的調查研究顯示，傳統之 BWFF 梁柱接頭之破壞模式有梁翼二側全滲透開槽銲之銲道處開裂破壞，及扇形孔處之開裂等破壞模式。其中，扇形孔之開裂破壞模式和扇形孔開孔形狀有關，並發現扇形孔與梁翼板之交角越小，扇形孔處之開裂就越不容易發生。

為適應一般情況，扇形銲接孔自預訂銲道趾端至扇形銲接孔之孔邊之距離，應不小於腹板厚度之 1.5 倍，若以開槽機加工時其開槽形狀依其刀具形狀而定，開槽形狀及尺寸可參考圖 1 所示。鋼構造建築物鋼結構設計技術規範“鋼結構極限設計法規範及解說”第 10.7.3 節(梁翼板切除與扇形銲接孔)規定：『所有扇形銲接孔，自預訂銲道趾端至扇形銲接孔之孔邊之距離，應不小於腹板厚度之 1.5 倍(見圖 5)，扇形銲接孔之高度則應足夠容納與鄰接板間之銲道尺寸，及提供容納背墊板之空間，扇形銲接孔採熱切割時表面應加以磨平，以消除其刻痕或尖銳之凹角。對於巨型型鋼及厚度超過 50mm 之組合金鋼，熱切割表面並應使用磁粉探傷或滲透液探傷法檢驗之。若扇形銲接孔或梁翼板切除之彎曲轉變段以預先鑽孔或鋸孔，則不需再磨平。』

其解說中亦有下列補充說明：

1. 採用較大且平滑的扇形銲接孔可減少銲接的收縮應變，避免垂直方向之銲接過於接近，並在孔位的銲接與檢測上提供良好工作性，且應避免製作扇形切角時可能產生之尖銳凹痕或裂痕，圖 5 所示為幾種可行方法。
2. 熱切割前必須預熱以減少硬表層的形成。
3. 切割面必須研磨或加工，以去除硬表層及保持平滑轉界面。並須以磁粉探傷或滲透液探傷檢測。

對於「熱軋 H 型鋼」為熱軋成型，翼板與腹板交界處完全連續，因此在該

處開設扇形孔不會在翼板與腹板交界面有出現間隙之問題存在，因此梁翼全滲透開槽銲之疲勞效應較不顯著；但對於「銲接組合型鋼梁」，若其腹板與翼板之組合方式為採「填角銲」或「部份滲透銲+填角銲」方式接合，則其梁端部腹板扇形孔開設後，翼板與腹板界面之間，會有間隙存在，扇形孔開設後該間隙會外露。此種界面間隙外露之現象形同存在一道初始裂縫，不利於抵抗疲勞效應。但若為此而於扇形孔處翼板與腹板的交接縫，以圍繞(包角)銲道填補並磨平之，則可能補銲動作反造成母材銲蝕或刻痕，反而更不利於抵抗疲勞效應。

另外，若於梁端之翼板與腹板接合處，局部採用全滲透開槽銲雖可解決前述扇形孔開設後，翼板與腹板交界處間隙外露的問題，但因梁於組銲後，其長度須經裁切，因而局部全滲透開槽銲之位置不易確定，製作較麻煩，實務上有其困難度。考量該翼板與腹板界面之間隙，係出現在二側銲道之間，通常腹板板厚大部份在 25mm 以下居多，且二側潛弧銲接（見圖 6）組合銲道每邊亦有約 3mm 之滲透效果，因此所剩之間隙寬度已不多，其疲勞效應較不嚴重。因此權衡利弊得失，建議扇形孔之製作技術著重在翼-腹板交接處之研磨，務必使扇形孔孔邊之平順度符合需求。

扇形孔之切割若採手工或半自動火焰切割方式開孔，則常因手顫動或火嘴未暢通而致切割面不平順，因此建議預留 1 至 2 mm，再予研磨成設計圖規定之平順曲線。若是以型鋼開槽機加工，則其開槽形狀依其刀具形狀為準，一次加工完成。

二、梁柱接頭扇形孔設計考量

大梁通常會承擔地震力引致之反復載重並提供所需之塑性轉角及消能容量，大梁與柱之接合使用翼板全滲透銲道-腹板螺栓的接合型式時，此時腹板即須設置扇形孔。扇形孔的形狀與施工方式對梁-柱接頭韌性的發展有顯著的影

響，在梁翼梯形切削減弱式梁柱接頭（註：梁翼圓形切削減弱式梁柱接頭有過度切削致強度不足之結構安全疑慮，建議不要使用）被發展出來之前，扇形孔除了需要考慮到裂縫的抑制外，還需要兼顧塑性轉角的提供。但是在梁翼梯形切削減弱式梁柱接頭被發展出來後，塑性轉角由梁的翼板切削區來提供。因此，扇形孔的細部設計與施工，以考量在反復應力作用下裂縫的抑制為主要目標。

要抑制裂縫發展，最重要的是要避免過度的應力集中，因此扇形孔沿著應力方向，其幾何形狀應保持平順，而切割面粗糙度也要受到控制。在扇形孔之開孔型式，目前設計圖大部份採 AWS 型式，少部份採 FEMA 型式，但皆須以人工切割和研磨，造成施工不便及品質管理問題。目前大型鋼構廠大部份以日本「建築鐵骨設計基準及解說」[1]中建議的扇形孔（如圖 1）施作居多。

三、梁柱接頭扇形孔施工考量

在施工方面，以自動銑刀設備製作的扇形孔，除了幾何形狀準確度高外，扇形孔切割面的粗糙度也很低，施工品質佳（如圖 7 及 8）。但是每套自動銑刀設備僅能針對某一特定的扇形孔細部進行施工，目前國內的自動銑刀設備，基本上僅能製作日本設計準則建議之扇形孔。另一方面，自動銑刀設備的加工能力有其限制，當梁翼板太寬、梁過深、梁翼板太厚或是梁不夠長時，即無法使用自動銑刀設備製作扇形孔，此時火焰切割加上切割面研磨為最可行的方法。使用火焰切割加上切割面研磨製作扇形孔時，扇形孔之尺寸應依製造圖尺寸加工，孔邊不得有鋸齒狀、銹蝕、刻痕等缺陷，其表面粗糙度須達 $13\mu\text{m}$ ，以避免產生疲勞效應。日本設計準則建議之扇形孔（見圖 9）及 AWS D1.8 建議之扇形孔（見圖 10）皆可使用。弧形耐震扇形孔自動銑刀所能加工的 H 型鋼斷面尺寸主要控制因素為梁深及翼板寬，通常翼板厚度不是主要控制因素，因銑刀可以依翼板厚度調整位置。大部份的機台能處理的 H 型鋼斷面為 H1000*500 以下，但也能找到處理最大為 H1200*600 及最大為 H1500*700 的機台，但此種機台較少。

以 H800x400x20x55 為例，其尺寸已超出自動銑刀之加工範圍，故須採火焰切割後研磨之方式施作。若採 AWS 耐震扇形孔，因扇形孔腹板切割範圍(a1)較大，圖 11 所示之斷面甚至已十分接近鋼梁翼板切削之消能段，此情形恐會影響減弱式梁-柱接頭之韌性行為。因此當無法採自動銑刀設備加工時，扇形孔建議仍採弧形耐震扇形孔為宜。

綜合上述，將最適合國內目前使用的扇形孔細部設計配合施工方法敘述如後：

當 H 斷面之尺寸在自動銑刀設備加工能力範圍內時，建議採用日本設計準則建議之扇形孔（簡稱「弧形耐震扇形孔」）幾何形狀及自動銑刀設備進行施工。弧形耐震扇形孔細部如圖 9 所示，不論上、下翼板，扇形孔形狀如 ABDE 曲線，其細節敘述如下：

- (A1) AB 為一段以 E 點（上翼板）或 G 點（下翼板）為圓心、 r_1 為半徑之圓弧。當翼板厚度較小時 r_1 採用 35 mm，隨著翼板厚度增加下翼板之 DE 線段逐漸變小，當 DE 線段之長度小於 10 mm 時， r_1 應改採用較大的數值，通常採用 45 mm。
- (A2) BD 為一段以 C1 為圓心、 r_2 為半徑之四分之一圓弧。 r_2 固定為 10 mm。
- (A3) DE 為一直線段且為 BD 圓弧之切線。

當 H 梁之尺寸超出自動銑刀設備之加工能力範圍時，可以直接採用弧形耐震扇形孔（圖 9）或 AWS D1.8 建議之扇形孔（圖 10），配合火焰切割及切割面研磨施工方式製作扇形孔。使用弧形扇形孔時其細部尺寸與使用自動銑刀設備之細部尺寸及其細部描述（A1）、（A2）、（A3）等相同；使用 AWS D1.8 建議之扇形孔，其細部如圖 10 所示（簡稱 AWS 耐震扇形孔），不論上、下翼板，AWS 耐震扇形孔之形狀如 ABDEF 曲線所示，其細節敘述如下：

- (B1) AB 為一水平線段。A 點須自梁端基線退縮，退縮量視剪力連接板銲道尺寸而定。 a_1 應在 $3t_f \pm 12 \text{ mm}$ 之間（註：決定 a_1 時應注意 D 點不宜距離翼板韌性切削區過近），其中 t_f 為梁翼板之厚度。 $a_2 = a_3 + r$ 。
- (B2) BD 為一半徑為 r 之圓弧。 r 不得小於 10 mm ， a_3 不得小於（ $0.75t_f$ 與 20 mm ）之大者，但不需大於 $t_f + 6 \text{ mm}$ 。
- (B3) DE 為一段與梁翼板交角不大於 25° 之直線。DE 線段在 E 點虛線圓圈處應平順的延伸到 EF 段，一方面可降低應力集中，另一方面可方便研磨。
- (B4) EF 為一直線段。 $b + 0.5t_f \leq a_4 \leq b - 0.25t_f$ ，其中 b 為 t_f 與 12 mm 之大者。
- (B5) 所有的切割面均需以研磨的方式處理至平順，表面粗糙度不得大於 $13 \mu\text{m}$ 。
- (B6) E 點腹板與翼板交界處，不得為折角，須一小段弧形曲線連接。
- (B7) 切割面須施作 100% 磁粉探傷檢驗(MT)。

以火焰切割及切割面研磨施工方式製作扇形孔，宜先依其幾何形狀製作適當的模具，切割時火嘴靠著模具移動進行切割，切割曲線應自目標曲線（即 ABDEF 曲線）退後 1 至 2 mm，完成切割後再將切割曲線研磨至目標曲線。所有的切割面均需以研磨的方式處理至平順，切割凹痕或裂縫修補工作須符合 AWS D1.8M：2005 Sec. 6.9 之相關規定。其中，切割面表面粗糙度不得大於 $13 \mu\text{m}$ ，於實際執行上甚為困難，亦費工時，成本亦高，所幸須採手工切割狀況並不多。

四、小梁扇形孔

小梁不承受反復應力，因此扇形孔幾何形狀以容易施工為主要考量。以自動銑孔設備製作弧形耐震扇形孔（圖 9），施工容易且品質佳，也適合使用於小梁扇形孔。小梁扇形孔的製作亦可採用火焰切割加上切割面研磨的方式製作，但是

比較費工且品質控制較不容易，應盡量避免之。因各型梁扇形以手工製作時所費工時相差不多，此時仍建議採用符合耐震韌性相同之圖 9 及 10 所示之扇形孔形狀。

小梁扇形孔的製作若仍需以火焰切割加上切割面研磨的方式製作，此時可採用圖 12(或圖 13)所示之弧形小梁扇形孔。其中，圖 11 扇形孔形狀如 ABC 曲線所示，其細節敘述如下：

- (C1) AB 為一段以 C (上翼板) 或 D (下翼板) 為圓心、 r 為半徑之四分之一圓弧。 r 不得小於 (20 mm 與 t_w) 之大者，但可不必超過 50 mm。
- (C2) BC 為一直線段，B 點腹板與翼板間應容許以一小段弧形曲線連接。
- (C3) 切割面應以研磨的方式去除所有的刻痕 (notch)。

五、結論與建議

- 1、對於小截面積之構材 (例如 H200x200x8x12 以下之斜撐構材或桁架之腹桿) 於現場作腹板鎖螺栓，翼板工地銲之對接方式續接時，因其腹板淨高僅 176mm，若扣除扇形孔之高度後僅剩 106mm；且對於對接之接頭界面處二側均設置扇形孔時，會產生接頭扇形孔處之翼板出現長約 100mm 之無側撐長度(見圖 14)，圖 14 中除有扇形孔製作及銲接品質欠佳的問題存在外，以上現象對桿件承受拉、軸壓力時，均甚為不利。因此建議此種情況應採單側開扇形孔(見圖 15)，或適度減小扇形孔之尺寸至可容納銲道尺寸及背墊板尺大為原則。
- 2、圖 12 及 13 原係比照 AWS D1.1[6]適用於先裁切鋼板再銲接組合成 H 型鋼之小梁(見圖 5 及 16)，其中扇形孔附近腹板與翼板間之銲道不予組合銲接。因國內之施工習慣係先組合 H 型鋼再依所需長度裁切，因此無法比照施作，而須改採用第四節之施工步聚施作。又圖 5 及 16 中其餘細部雖可適用於耐震扇形孔，但其扇形孔太靠近銲口，致背墊板無法平放貼合。
- 3、鋼結構極限設計法第 10.7.3 節(梁翼板切除與扇形銲接孔)中所規定：「所有扇

形銲接孔之長度須能使得銲接處離預定銲道趾部之距不大於開孔之 1.5 倍...」。應修訂為「銲接處離預訂銲道趾端之距離應大於腹板厚度之 1.5 倍」才能與圖 C10.7-3 相符(見圖 5)。

- 4、組合(BH)型鋼斷面梁若腹板厚度較大(約大於 22 mm)的時候，腹板與翼板間可能存在一縱向隙縫，此道隙縫會出現在扇形孔切割面，如圖 9 之 D 點處及圖 10 之 E 點處。由於縱向隙縫與應力方向平行，對裂縫的發展不敏感，而圍繞(包角)銲道在腹板端部與應力方向垂直，容易發展出裂縫，故不宜以圍繞(包角)銲道填補該隙縫。
- 5、對後施作之加勁板其位置若與梁翼銲道衝突，則只須截角避開，不需開設扇形孔(見圖 17)。
- 6、不論是以自動銑孔設備製作弧形耐震扇形孔，或以火焰切割手工製作耐震扇形孔，或是小梁與小梁續接，或懸臂梁與柱連接之扇形孔，其扇形孔形狀建議均採用與弧形耐震扇形孔相同之單一形狀，可方便管理，避免發生錯誤。

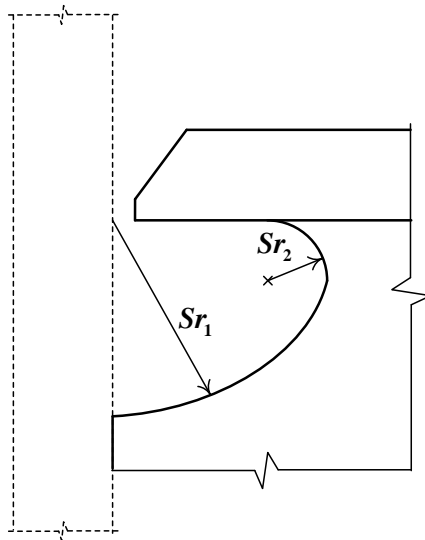
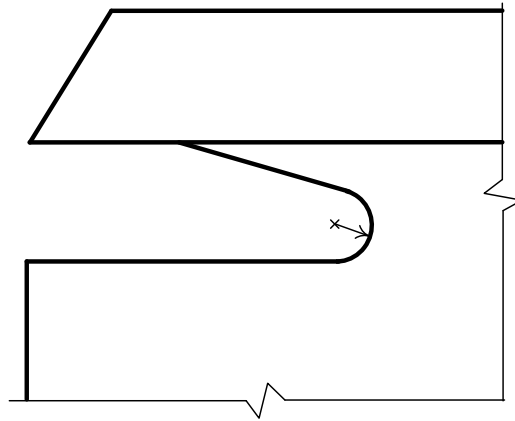
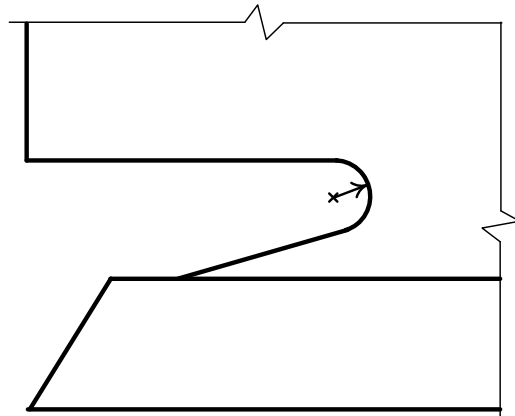


圖 1 日本設計準則建議之扇形孔幾何形狀[1]



(a) 上翼板下緣



(b) 下翼板上緣

圖 2 AWS D1.8 建議之扇形孔幾何形狀[2]

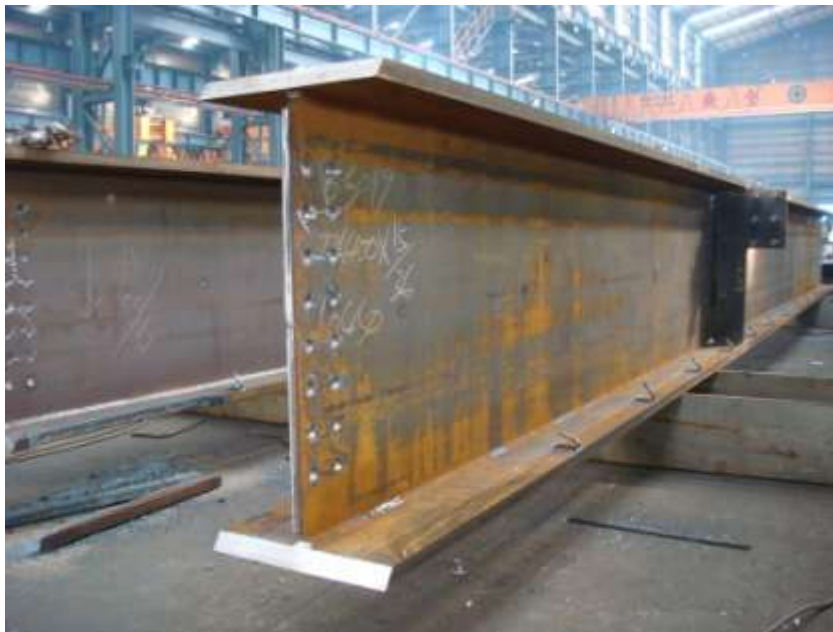


圖 3 梁端扇形孔



圖 4 梁端扇形孔

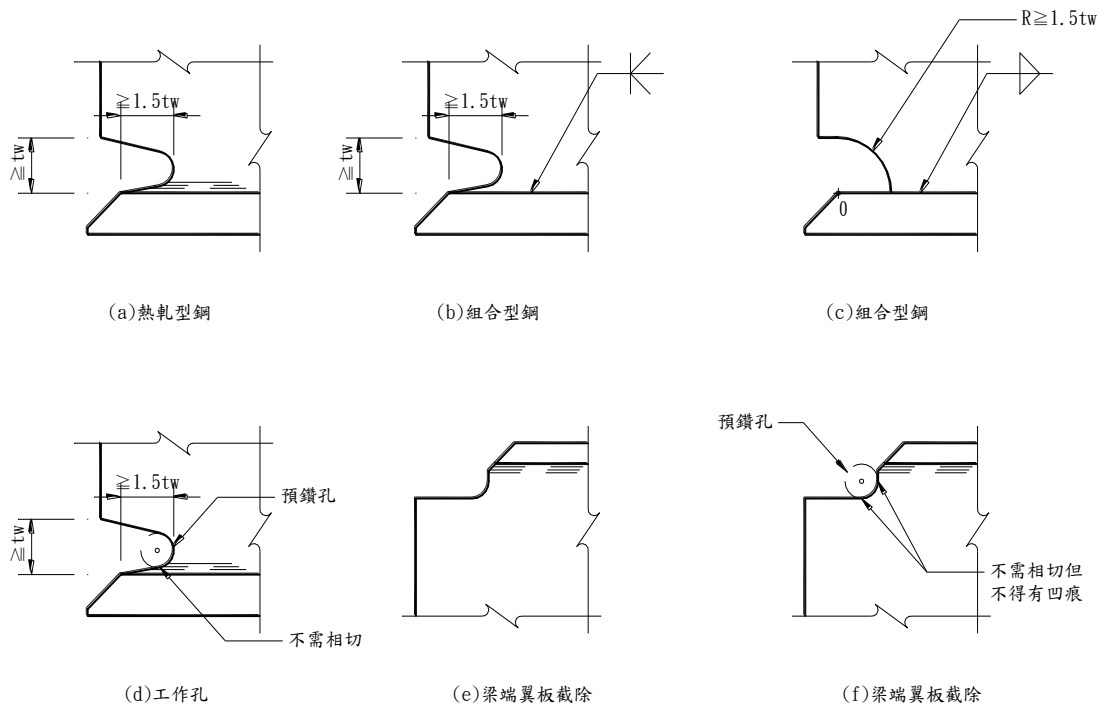


圖 5 扇形銲接孔之施工[4]



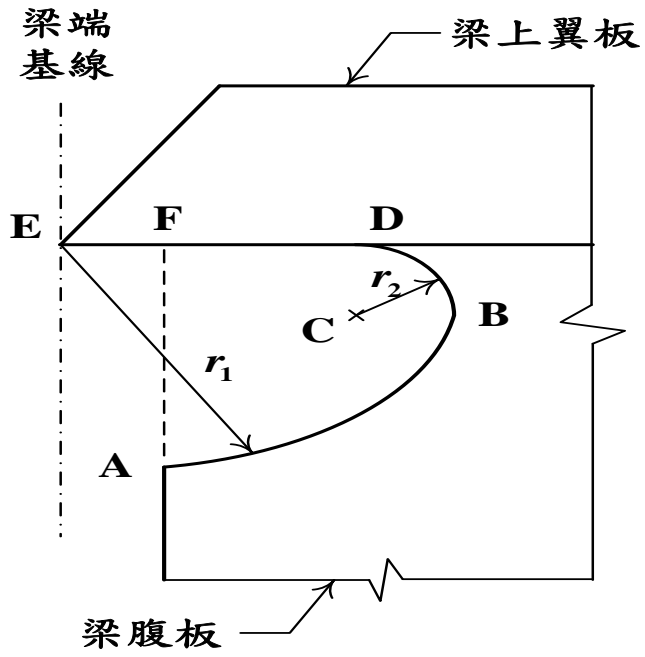
圖 6 潛弧銲接



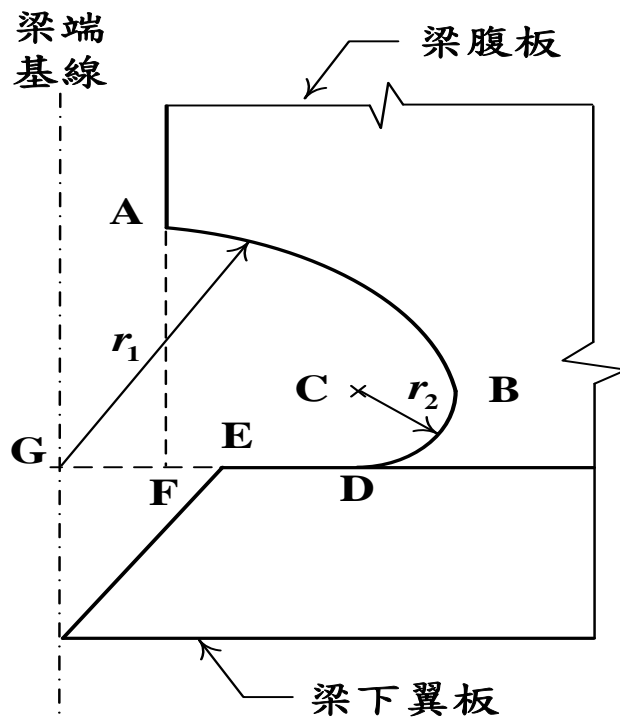
圖 7 自動銑刀設備製作的扇形孔



圖 8 自動銑刀設備製作扇形孔

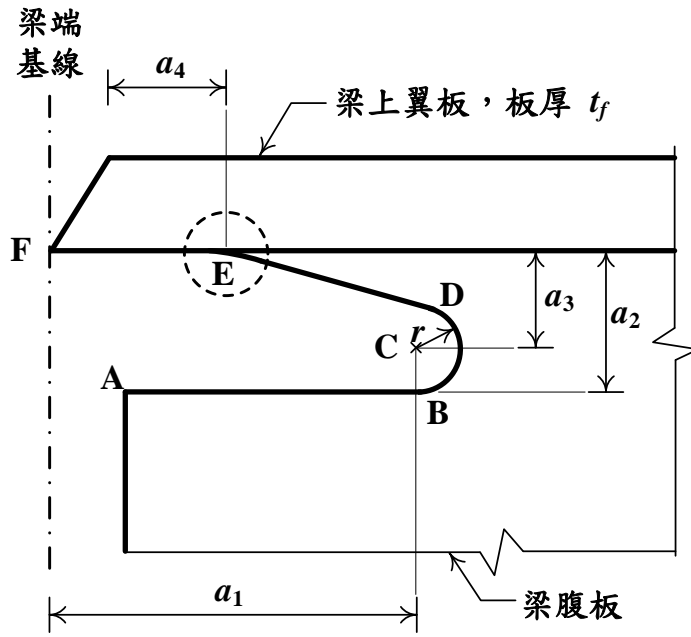


(a) 上翼板下緣

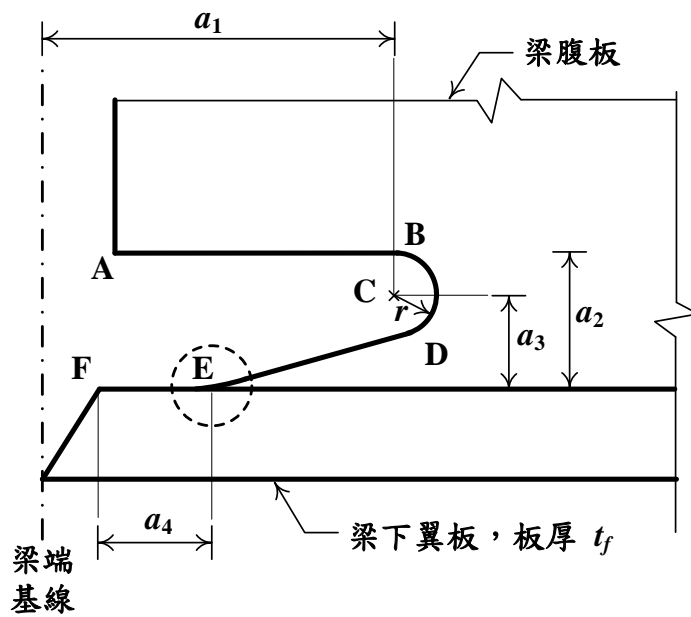


(b) 下翼板上緣

圖 9 使用自動銑刀設備時之扇形孔細部（弧形耐震扇形孔）



(a) 上翼板下緣



(b) 下翼板上緣

圖 10 使用手工製作時之扇形孔細部

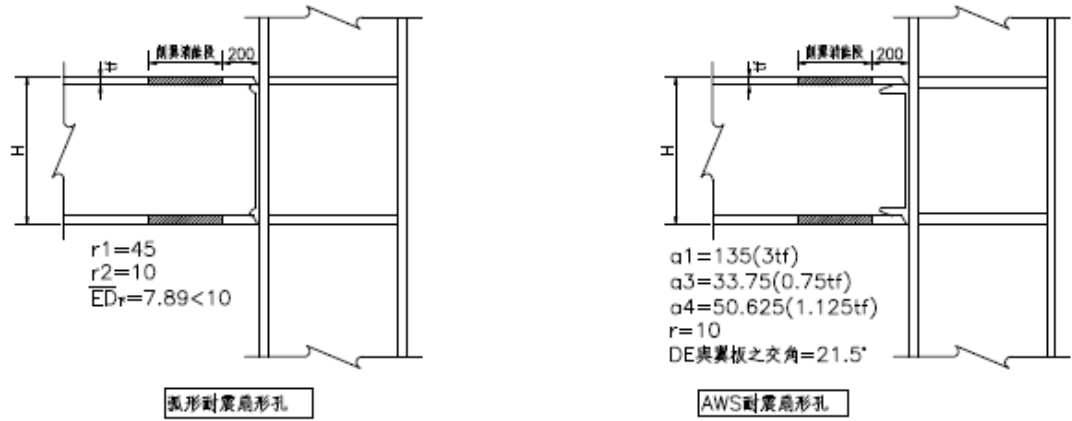


圖2(H=800x400x16x45)

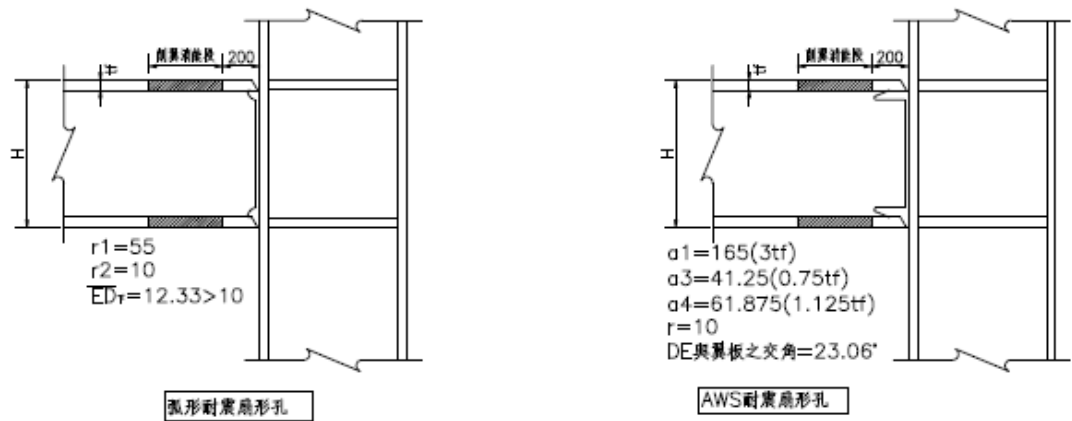
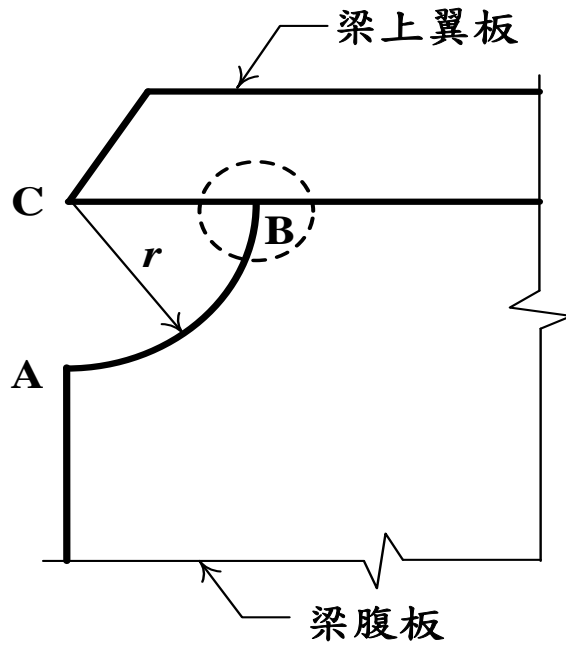
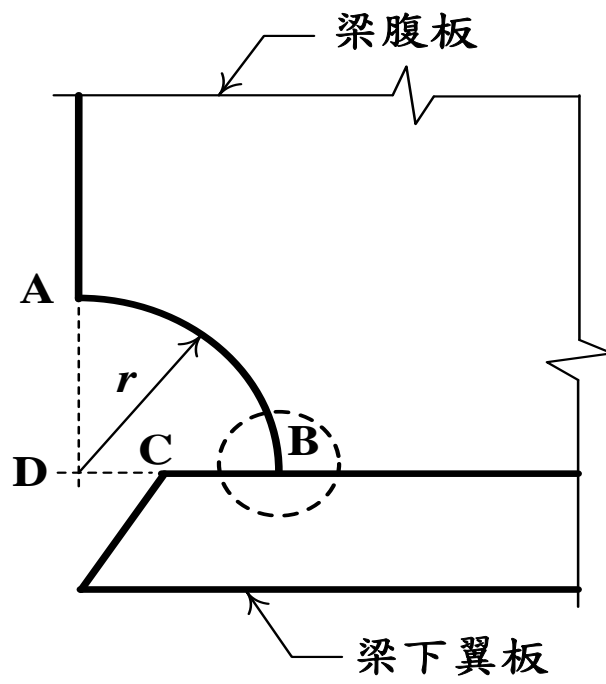


圖3(H=800x400x20x55)

圖 11 採 AWS 耐震扇形孔，因扇形孔腹板切割範圍(a1)較大

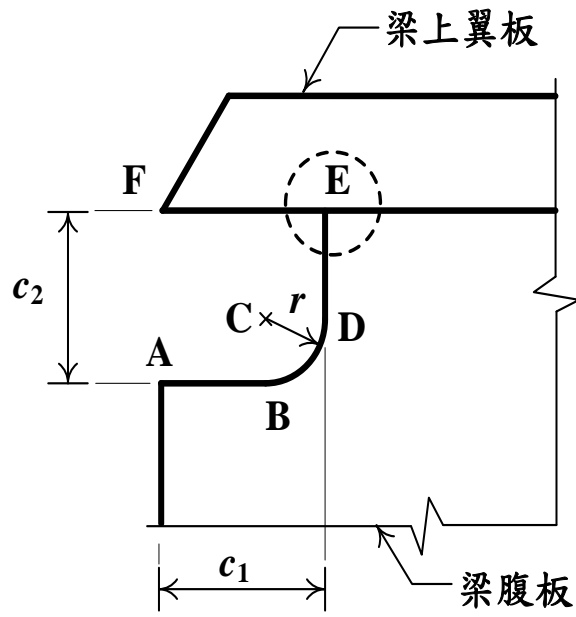


(a) 上翼板下緣

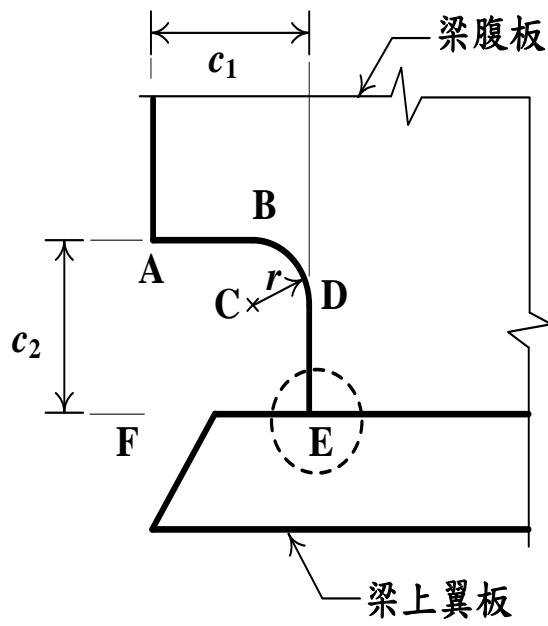


(b) 下翼板上緣

圖 12 弧形小梁扇形孔細部 (方案一)



(a) 上翼板下緣



(b) 下翼板上緣

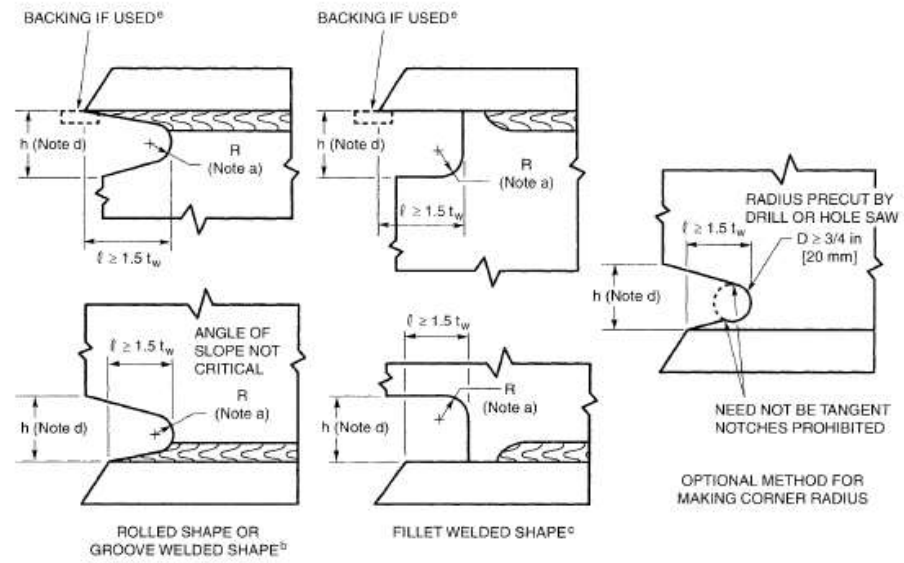
圖 13 弧形小梁扇形孔細部 (方案二)



圖 14 小斷面桿件建議採單側開扇形孔或減小扇形孔尺寸



圖 15 小斷面桿件建議採單側開扇形孔



^a Radius shall provide smooth notch-free transition; $R \geq 3/8$ in [10 mm] (Typical $1/2$ in [12 mm]).
^b Access hole made after welding web to flange.
^c Access hole made before welding web to flange. The web to flange weld shall not be returned through hole.
^d $h_{min} = 3/4$ in [20 mm] or t_w (web thickness), whichever is greater, h_{min} need not exceed 2 in [50 mm].
^e These are typical details for joints welded from one side against steel backing. Alternative joint designs should be considered.
 Note: For rolled shapes with flange thickness greater than 2 in [50 mm] and built-up shapes with web material thickness greater than 1-1/2 in [40 mm], preheat to 150°F [65°C] prior to thermal cutting, grind and inspect thermally cut edges of access hole using MT or PT methods prior to making web and flange splice groove welds.

Figure 5.2—Weld Access Hole Geometry (see 5.17.1)

圖 16 AWS D1.1 [2004] Fig. 5.2 扇形孔幾何尺寸[6]

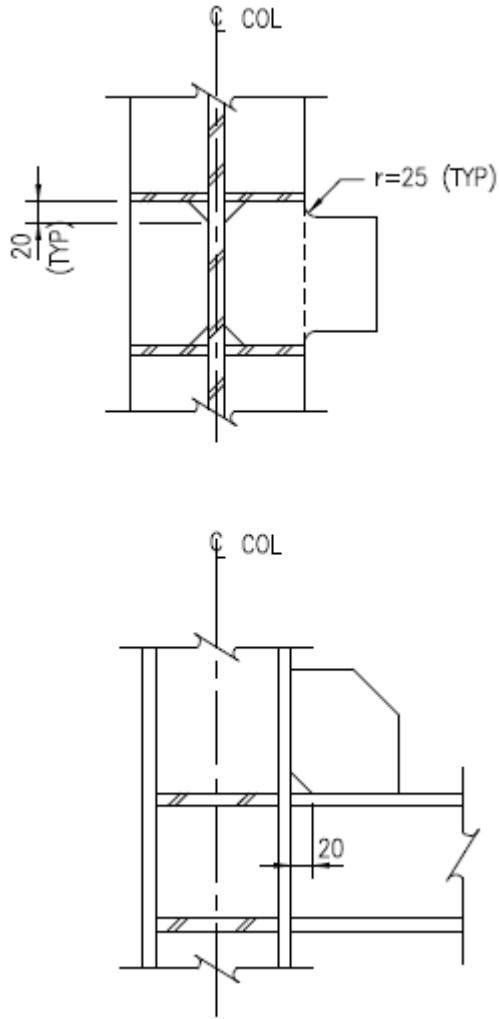


圖 17 加勁板截角避開梁翼銲道

【參考文獻】

- [1] 日本財團法人公共建築協會，「建築鐵骨設計基準及解說」，平成 10 年。
- [2] AWS (2009), Structural Welding Code-Seismic Supplement, ANSI/AWS D1.8/D1.8M:2009, American Welding Society.
- [3] 中華民國鋼結構協會，技術備忘錄 第 002 號「H 梁扇形孔細部設計與施工」，民國 100 年 12 月。
- [4] 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”。

- [5] 內政部營建署(1998) “鋼結構建築物鋼結構技術施工規範” 。
- [6] AWS (2004), Structural Welding Code-Steel AWS D1.1/D1.1M:2004,
American Welding Society.