

鋼結構大樓韌性接頭之探討

陳純森 技師 2012-11-2

前言

鋼結構大樓之韌性問題，在 1994 年美國北嶺地震前後數年曾被廣泛研究與討論。遠在 1980 年代，國內陸續興建許多高層建築時，學術界已從事許多接頭之研究與試驗。如榮總大樓(23F, 1984)、宏總大樓(42F, 1989)年與新光人壽總公司大樓(50F, 1990)等。其中，榮總大樓採用八掛加勁之工法，宏總大樓為翼板擴張工法，而新光大樓則為蓋板加強工法。當時大部分之梁柱接頭均採用梁端加強方式設計，梁柱接頭轉角能力以 0.015 弧度為目標。此外，採用傳統梁柱結合方式之大樓亦不在少數，如台電大樓(26F)、國泰人壽大樓(26F)、高雄領航大樓(27F)、台北國貿大樓(34F)、台中傑聯資訊(30F)、台中世貿雙星(37F)、高雄寶成(37F)、東帝士金融(35F)、擎天雙星(33F)、霖園大樓(41F)、漢來大樓(42F)、長谷大樓(50F)與東帝士國際大樓(85F)等，均在集集地震(1999)之前所興建^[1]。在 1990 年代，國內也從事鋼梁端部減弱的研究，試驗的結果韌性良好，遂有部分大樓採用梁翼減弱之設計，如台北金融大樓(101F)等。

美國加州北嶺地震之影響

1994 年美國加州發生北嶺地震後，許多鋼結構之梁柱接頭發生非預期之脆性破壞，特別是梁柱接頭之介面，因為該處受力之彎矩應力最大，銲道與扇孔斷裂甚多，部分梁柱接頭之塑性變形角度不及 0.015 弧度。美國聯邦緊急管理委員會(FEMA)參考美國加州結構工程聯合團隊(SAC)之調查報告後，作出三項具體之結論與建議：

- (1) 梁柱接頭之電銲品質不佳必須設法提昇
- (2) 梁柱接頭可採用加強方式改善其韌性
- (3) 梁柱接頭可採用減弱方式改善其韌性

FEMA 於發表報告後並陸續調查研究，於 2000 年公開認證部分之韌性接頭方式(Prequalified Joint Connections)。五年之後，美國鋼結構協會(AISC)亦分別以 385-05 與 385-09s 公佈認證之韌性接頭方式。

規範之塑性轉角規定

目前國內鋼結構設計規範有關耐震設計規定，梁柱接頭所需之塑性轉角(θ_p)須以下述三種方法之一決定之：

- (1) 0.03 弧度
- (2) 非線性動力分析所得之最大塑性轉角加上 0.005 弧度
- (3) $\theta_p = 1.1 (R - 1.0) \theta_E$

其中： R =結構系統韌性容量

θ_E =在設計地震力 E 作用下之最大層間變位角

若第(3)式之 R 與 θ_E 如分別以4.8與0.005弧度計算，則塑性轉角成為0.0209弧度。

傳統接合工法與電銲品質探討

多層建築之梁柱接頭，多半採用腹板栓接而翼板銲接之傳統接合工法。腹板之上、下端均切割四分之一圓弧之扇形孔，其半徑為35mm。上端之扇孔可放置扁鋼防止銲漿滴漏，下端之扇孔作為銲道接續之穿梭。至於梁翼之電銲則為全滲透銲接(C.P.)。其示意圖與實例分別如圖1與圖2所示：

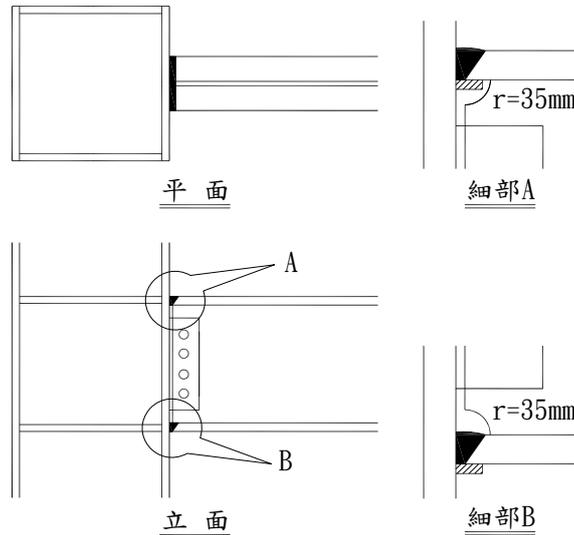


圖1 梁柱之傳統式接頭



圖2 傳統之梁柱接頭

早期美國之工地電銲習慣採用包藥電銲方法(FCAW)。由於該法之助熔劑用量甚少，對銲接品質確實有不良影響，無怪乎北嶺地震之震害嚴重。近期之FCAW已採用雙重助熔之方式，電銲品質提昇不少。

日本於1995年之阪神地震也曾發生部分鋼結構建築之接頭裂損，但日本工程界對梁柱接頭的改善研究，不如美國北嶺地震之熱衷，乃因日本早期的工地電銲以SMAW為主，並不流行FCAW，且日式的工地接頭並不在柱面，而是遠離柱面一段距離，以閃開應力最大之位置。況且日本的箱型柱內之釣魚銲以ESW為主，其電銲品質也比美式之EGW穩定，震害影響不如美

國嚴重。圖 3 為美式工地接頭與日式工地接頭位置之示意圖。

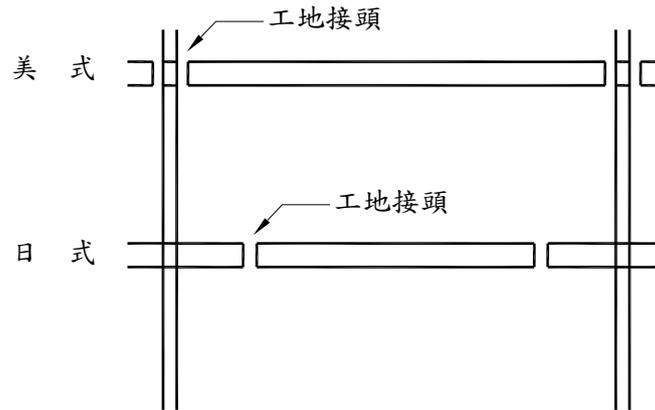


圖 3 美式與日式之工地接頭位置

傳統工法之改善

傳統式之腹板扇孔於受力時，容易產生局部應力集中之現象，導致扇孔處常常率先破壞。FEMA 350 曾建議將扇孔作適度之改善，如圖 4 所示。

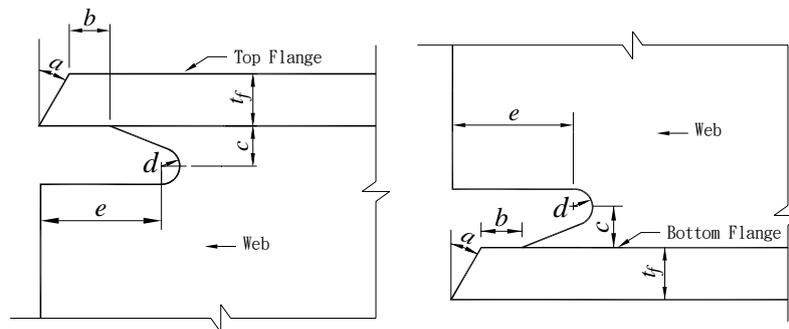


圖 4 FEMA 350 建議之扇孔改善

圖 4 之細部加工要領須，FEMA 353 建議各部尺寸如下：

- a：按照 AWS D1.1 之電銲程序開槽
- b：採用 t_f 或 0.5 英吋之較大值 ($+0.5t_f$; $-0.25t_f$)
- c：採用 $0.75t_f \sim 1.0t_f$ (± 0.25 英吋)，但不得小於 0.75 英吋
- d：半徑最小值為 $3/8$ 英吋 ($+無限$; -0)
- e：3 倍 t_f (± 0.5 英吋)

傳統式接頭之扇孔經改善後，學術研究之最大塑性轉角為 $0.0225 \sim 0.0316$ 弧度。採用傳統式接頭設計時，背墊板與起弧板等亦應妥善設置，以避免該處之局部應力集中現象。

美國 AISC 358-05 與 358-09s 之認證接頭，其第 8 章為鋼梁翼板與腹板均採用銲接方法之 Welded Unreinforced Flange-Welded web moment connection，簡稱 WUF-W，扇孔之加工則係參考前述 FEMA 350 之建議，其型式如圖 5 所示。WUF-W 工法適用於 SMF 與 IMF 系統，其使用條件之限制除了材質斷面與強度須符合 AISC 358 之規定外，其相關尺度為： $1/4'' \leq a \leq 1/2''$ ； $b \geq 1''$ ； $c = 30^\circ \pm 10^\circ$ ； $d \geq 2''$ ； $1/2'' \leq e \leq 1''$ 。

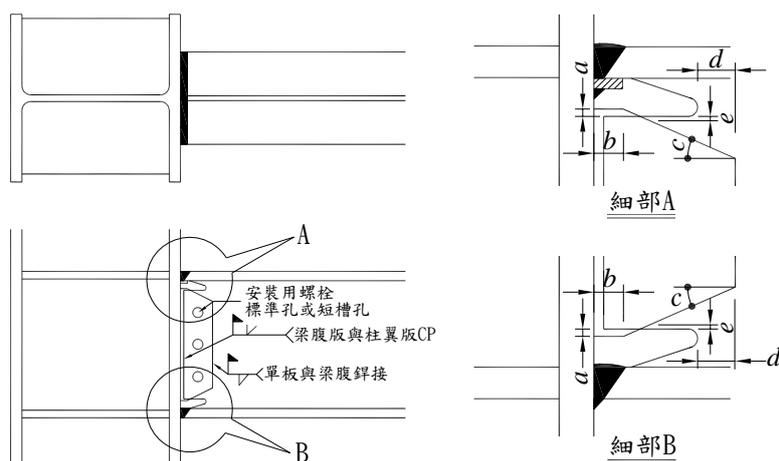


圖 5 AISC 認證之接頭改善工法(WUF-W)

加強工法

有關梁柱介面之加強工法，成果最具體者包括蓋板工法、擴翼工法、肋板工法、側板工法與加強端板等，分述如下：

一、蓋板工法：

梁端之蓋板補強工法有三角板、梯形板與矩形板加強等。其中梯形與矩形板之蓋板補強方法，FEMA 267 與 FEMA 350 均有類似建議。針對箱型柱之斷面，國內之試驗研究曾用 9 組試體，其中 2 組試驗時於橫隔板之電渣銲接破壞，其餘 7 組之塑性轉角介於 0.0249~0.0478 弧度，韌性效果良好。圖 6 為可供參考之梯形板加強方式，其中 $0.35d \leq a \leq 0.7d$ ， $b \leq 0.3b_f$ ，設計時除應符合規範外，亦應注意梁翼與柱面寬度不宜相差懸殊，特別是電渣銲的品質管控與驗證益形重要。圖 7 為梯形板補強實例。

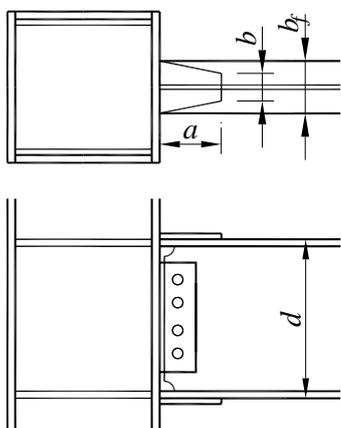


圖 6 梯形板補強方式



圖 7 梯形板補強實例

二、擴翼工法：

擴翼工法在國內研究之歷史最早，於 1990 年已有擴翼工法之學術研究報告，效果良好，惟當時之轉角需求目標為 0.015 弧度。因擴翼不但能舒緩梁翼與柱面之寬度差異，尚可提昇梁端之抗彎強度，力學行為一舉兩得。擴翼工法之方式有三角形擴翼、梯形擴翼與弧形擴翼等。國內之研究成果均證明擴翼工法有良好之韌性效果，其塑性轉角自 0.026 弧度至 0.048 弧度不等。弧形擴翼工法建議如圖 8 左圖所示，其中 $a=0.6b_f \sim 0.8b_f$ ， $b=0.3d \sim 0.45d$ ， b_f 為梁翼寬， d 為梁深， b 範圍為平滑曲線或大約 1:3 斜度之直線，擴翼寬度 c 之計算可依據梁柱介面處擴翼梁斷面之塑性彎矩能力與該處地震彎矩需求比值之 1.2 倍以上，惟設計時仍應符

合規範。圖 8 右圖為梯形擴翼工法曾經試驗之試體規格，正、負向之塑性轉角分別為 0.0281 與 0.0285 弧度。

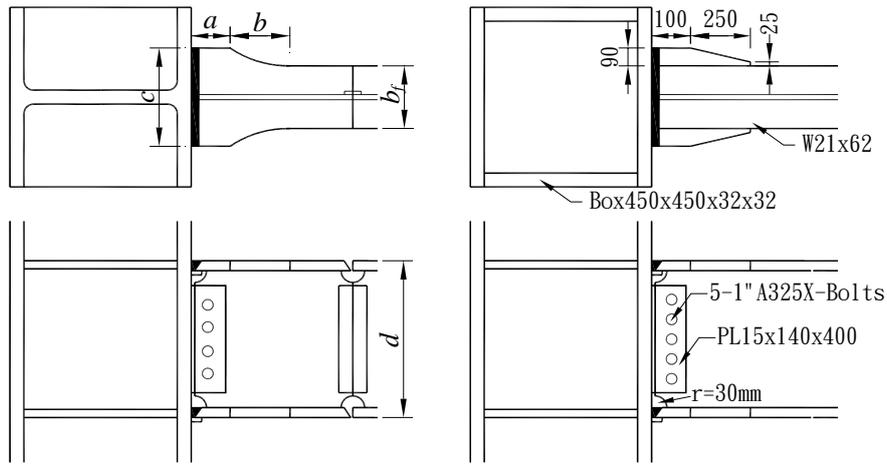


圖 8 漸變擴翼補強工法

三、肋板工法：

肋板加強工法為 FEMA 267 所提議項目之一。國內有關肋板加強之學術研究報告，共計試驗 11 個試體，除其中有 2 個試體之塑性轉角未達 0.0209 弧度外，其餘之塑性轉角介於 0.0319 弧度至 0.0453 弧度。肋板的上、下扇孔可閃開箱型柱內電渣鐸之熱影響區，亦可分散電渣鐸部位之應力。可供參考之肋板加強方式如圖 9 所示， a 取 80mm 與 $b/3$ 之大值， b 取 200mm 與 $d/3$ 之大值， d 為梁深， c 的計算依據肋板延長段末端處，梁斷面塑性彎矩能力與該處地震彎矩需求比值之 1.1 倍以上。於肋板延長斷面， e 的計算以梁斷面塑性彎矩能力增加 5% 計算之，可採用 $e=g$ 。 f 的計算依據梁柱介面處，含肋板梁斷面之塑性彎矩能力與該處地震彎矩需求比值之 1.1 倍以上，如考慮樓板之影響可採用 $f \leq 125\text{mm}$ ，其弧形漸變段之半徑，可取 $r=b$ 。

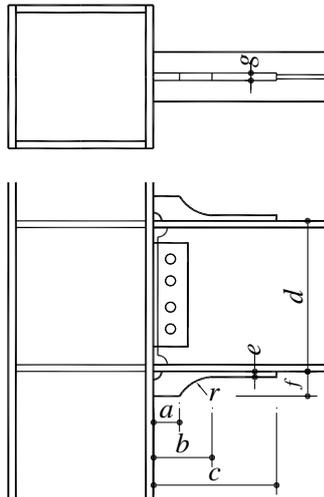


圖 9 肋板加強方式

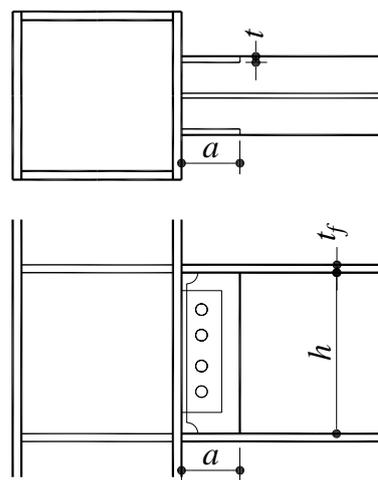


圖 10 側板加強工法

四、側板工法：

1995 年 FEMA 267 曾經提議在鋼梁端部，採用側面之垂直加勁板，以改善北嶺地震損害之建築物。側板補強之方法使梁端之斷面行同箱型鋼梁，可造就鋼梁端部的剛性與穩定，讓鋼梁端部之結實程度更佳。國內的研究報告曾經參考 FEMA 構想，將已安裝完工 8 年有餘之高雄某 34 樓超高層鋼構建築，取樣作側板加強試驗，得到優良之韌性效果。側板加強之方式建

議如圖 10 所示，圖中 $a \geq 0.46h$ ， $t \geq 0.65t_f$ 。 a 為加勁板寬度， h 為鋼梁淨深， t 為加勁板厚度， t_f 為鋼梁翼板厚度。採用側板加強工法時須考慮其防火被覆之施工要領。

五、端板加強工法：

美國 AISC 358-05 認證之耐震工法，其中第 6 章為鋼梁端板之加強工法，適用於特殊抗彎構架 (SMF) 與中等抗彎構架 (IMF)。但不包括直接與混凝土樓板接觸之 SMF 系統認證。該認證共包括三種端板之加強方式，即四顆螺栓未加勁端板 (Four-bolt Un-stiffened, 4E)，四顆螺栓具備加勁端板 (Four-bolt Stiffened, 4ES) 與八顆螺栓具備加勁端板 (Eight-bolt Stiffened, 8ES)。如以第二種之 4ES 為例如圖 11 所示。除了材質、斷面與強度須符合 AISC 358 之規定外，其加勁板與橫隔板缺口之尺度 AISC 規定如下：

(1) 加勁板：

$$a = b / \tan 30^\circ$$

$$t_s > t_{bw} (F_{yb} / F_{ys})$$

t_s ：加勁板厚度； t_{bw} ：鋼梁腹板厚度

F_{yb} ：鋼梁降伏應力； F_{ys} ：加勁板降伏應力

(2) 橫隔板缺口：

$$C_w \geq k_w + 1.5"$$

$$k_f \leq C_f \leq k_f + 1.5"$$

k_w ：翼板外緣至腹板趾部尺度； k_f ：腹板中心線至翼板趾部尺度

如果缺口採用弧形，則半徑須 $\geq 0.5"$

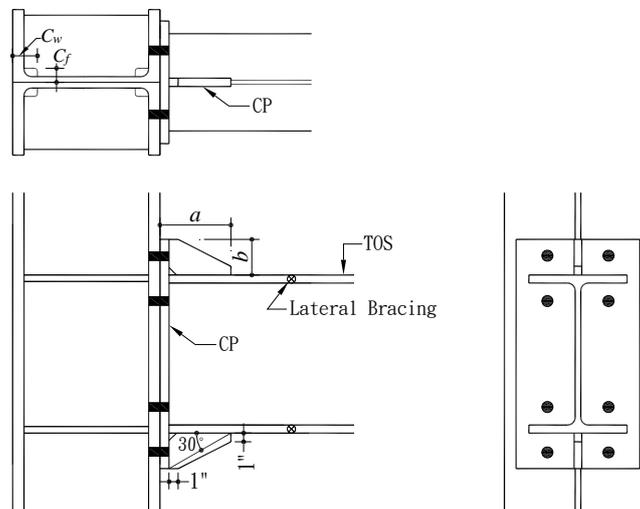


圖 11 端板加強 4ES 工法

減弱工法

所謂減弱工法，係設法在臨近柱面之附近設置較脆弱之梁斷面，誘導地震發生時由脆弱斷面先降伏，利用降伏塑鉸產生應力重新分配與消能機制，進而發揮韌性效果。減弱工法包括翼板圓弧切削、翼板梯形切削、翼板漸變切削與翼板鑽孔工法等，其示意圖如圖 12 所示。

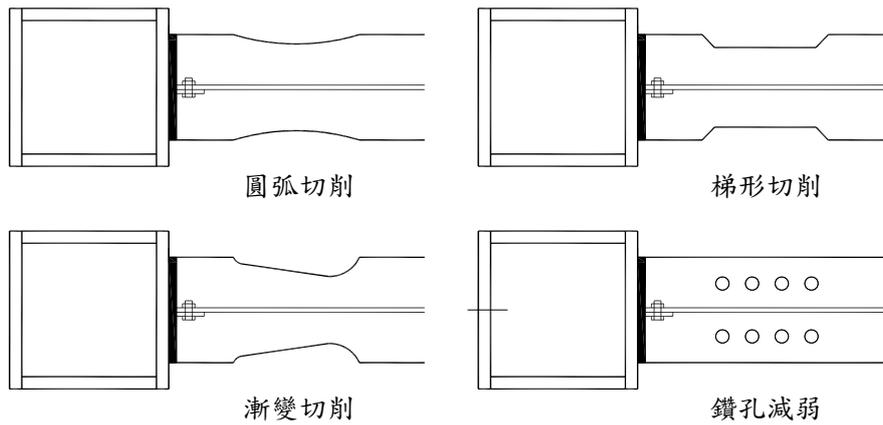


圖 12 翼板減弱工法

一、圓弧切削法：

1996 年國內已有翼板圓弧切削之學術研究報告，其試驗於 1999 年更為成熟，塑性轉角介於 0.0273~0.0310 弧度。圓弧切削與梯形切削意義較為接近，FEMA 350 之認證接頭曾包括梁翼梯形切削之減弱工法。AISC 358-05 並曾公佈梁翼圓弧切削的減弱工法認證，其示意如圖 13 所示。有關圓弧之切削，AISC 358 另規定： $0.5b_f \leq a \leq 0.75b_f$ ； $0.65d_b \leq b \leq 0.85d_b$ ； $0.1b_f \leq c \leq 0.25b_f$ ， $R=(4c^2+b^2)/8c$ ， b_f 為梁翼寬度； d_b 為鋼梁深度， R 為弧形半徑。有關橫隔板之缺口尺度則與端板加強工法相同，其他細部參考 AISC 358-05 及 AISC 358-09s 之規定。

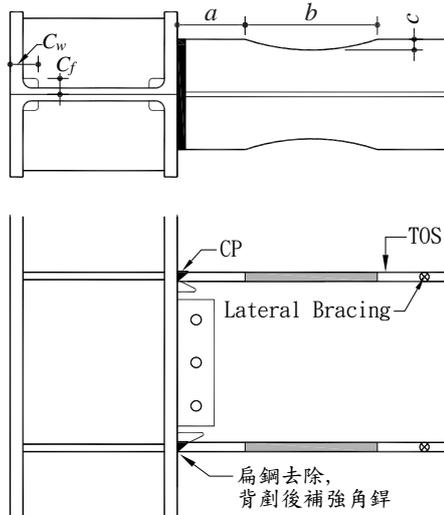


圖 13 圓弧切削減弱工法

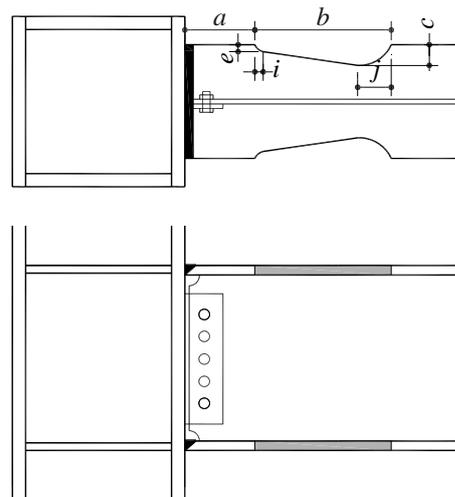


圖 14 漸變切削工法

二、漸變切削法：

此種工法係考量地震作用所衍生之鋼梁彎矩圖形，將切削曲線比擬彎矩曲線，以符合彎矩愈大斷面愈強之原則，國內於 1993 年已有漸變切削法之研究報告。其各試體之可靠塑性轉角為 0.0235~0.0479 弧度，接頭之處理如圖 14 所示，圖 15 為實際完成之漸變切削減弱工法實例。



圖 15 漸變切削減弱工法

翼板切削減弱工法於 1994 年美國北嶺地震後，SAC 曾經發表有關鋼結構耐震接頭之改善提議，其中 SAC-95 第七章 7.9.6 節介紹鋼梁斷面之減弱工法，曾將翼板切削之工法比喻為「狗骨頭」(dog-bone) 工法，稱讚此種工法屬於經濟型之作法，並引述台灣 1995 年 (Chen and Yeh-1995) 之漸變切削研究。SAC 團隊對於梁翼減弱工法未考慮混凝土樓板及其載重對受壓翼板的影響，作某種程度的意見保留。之後，國內於 1997 亦曾經研究樓板效應之影響，至 2000 年之 FEMA 350 第三章 3.5.5 節所認證的梁翼減弱工法，曾包含梯形切削減弱工法搭配扇孔改良。惟至 2005 年 AISC 認證之 358-05 第五章梁翼減弱工法，乃至於 AISC 358-09s 的增補版，則僅包括梁翼之圓弧切削工法與搭配扇孔改良。顯見 SAC、FEMA 與 AISC 等團體對於梁翼減弱工法之樓板細節仍然十分謹慎。

結語

有關大樓鋼結構之韌性接頭方法頗多，相關試驗研究報告與論述亦相當充分，本文不及備載，設計人如須採用時可洽相關之研究團隊，或參考文獻【2】的彙總。惟建築物之整體韌性並非單一接頭之試驗得以概括，且整棟建築之各層樓板對於建築結構韌性影響之研究調查亦尚待加強。有關電鍍品質的管控與入熱量之影響，結構工程領域之研究調查仍然十分匱乏。設計人除了應注意接頭之方法外，亦應對鋼料材質、結構系統與電鍍工法作完善充分之考量。

【參考文獻】

1. 鋼結構工程實務(第四版)，陳純森，2012 年，科技圖書公司。
2. 高層建築鋼結構韌性構架梁柱接頭之調查與研究，謝依平，2012 年，國立成功大學建築研究所碩士論文，陳純森指導。