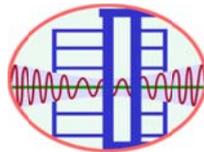


挫屈束制支撐與接合設計 雲端運算流程解說

(Server: S14073101/ Client: C14073101)

林保均
吳安傑

蔡克銓
莊明介

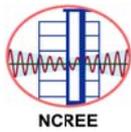


財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心



國立臺灣大學土木工程學系

中華民國 103 年 7 月



前 言

國家地震工程研究中心針對槽接式挫屈束制支撐構件及其與構架結構的接合細節，已完成試驗驗證並提出完整的設計流程與檢核方法[1-3]。以結構設計人員為服務對象，提供雲端運算設計軟體服務 Brace on Demand (BOD)，使用者可透過網址 <http://BOD.ncree.org.tw> 取得專屬 BOD 客戶端瀏覽器，執行雲端設計運算並快速取得設計結果。BOD 系統根據使用者所提供的構架幾何條件、BRB 構件降伏強度與等效勁度等設計需求，進行 BRB 構件及與隅板接合之完全自動化調整、設計與檢核等運算工作，並動態產生該專案之結構計算書與試算表。本文介紹 BOD 系統之運算流程，主要依據美國鋼結構設計[4]及鋼結構耐震設計規範極限設計法設計[5]，包含槽接式挫屈束制支撐、端部接合及隅板之詳細設計流程與檢核項目。

目 錄

一、槽接式挫屈束制支撐設計	2
(1) 構架基本幾何關係	2
(2) 核心元件鋼材	2
(3) BRB 軸力計算	3
(4) BRB 斷面與長度尺寸	3
(5) BRB 接合銲接尺寸	3
(6) 單邊預留壓縮空間與外鋼管端板至隅板集中間接合板淨間距	5
(7) BRB 消能長度因子、等效勁度、等效勁度因子	5
(8) 外鋼管斷面與長度計算	5
二、隅板設計	6
(1) 梁柱角隅隅板設計	6
(2) 梁跨中間接合設計	9
三、破壞檢核	11
(1) 外鋼管挫屈檢核	11
(2) 核心元件接合段受拉保持彈性檢核	11
(3) 核心元件接合段受壓強度檢核	11
(4) 隅板與中間接合板塊狀剪力破壞檢核	12
(5) 隅板與中間接合板拉力降伏檢核	12
(6) 隅板與中間接合板挫屈破壞檢核	12
(7) 隅板與梁柱接面強度檢核	13
(a) von Mises 降伏準則	13
(b) 拉力斷裂破壞	14
(c) 剪力斷裂破壞	14
參考文獻	14
設計檢核 DCR 對照表	16
尺寸符號對照表	18

一、槽接式挫屈束制支撐設計

(1) 構架基本幾何關係

圖 1a 與 1b 所示為配置單斜及雙斜 BRB 之單一樓層，樓層高度為 H_{col} ，梁跨度 L_{beam} ，左柱與右柱寬分別為 $d_{c,left}$ 與 $d_{c,right}$ ，上下梁深則分別為 $d_{b,upper}$ 與 $d_{b,lower}$ ，樓板厚度則為 t_s 。

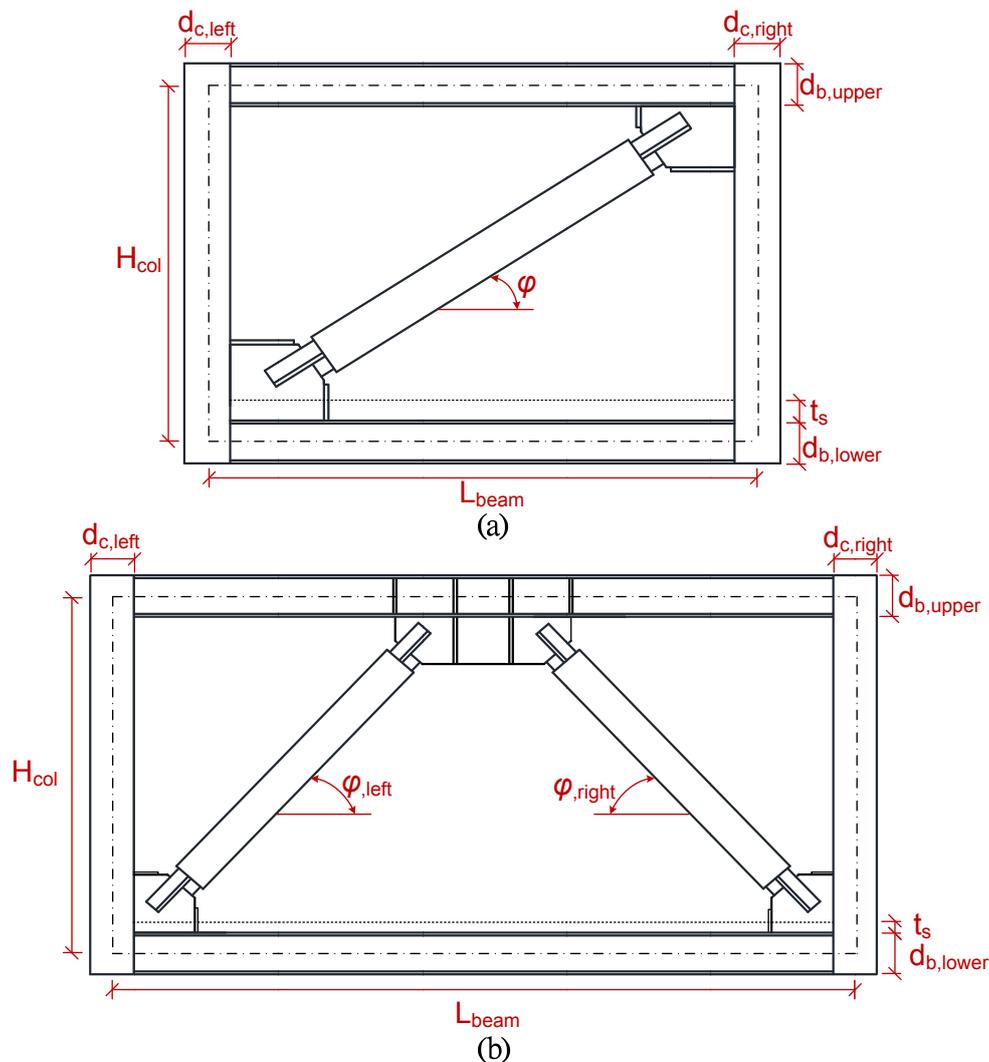


圖 1 (a)單斜與(b)雙斜配置槽接式挫屈束制支撐構架尺寸示意圖

(2) 核心元件鋼材

表 1 所列為本文所採用三種核心鋼材之力學參數， F_y 為所採用鋼材之最小規定降伏應力， R_y 為材料超強因子， Ω_h 為材料應變硬化因子， β 為 BRB 壓力強度調整因子，設計時採用 1.15。

表 1 鋼材參數表

鋼材	F_y (MPa)	R_y	Ω_h	β
ASTM A572 GR50	345	1.1	1.3	1.1~1.2
ASTM A36	248	1.3	1.5	1.1~1.2
CNS SN490B	324	1.2	1.3	1.1~1.2

(3) BRB 軸力計算

由所需之 BRB 軸向降伏強度(P_y)，計算核心元件消能段斷面積(A_c):

$$A_c = \frac{P_y}{F_y} \quad (1)$$

BRB 構件極限壓力強度:

$$P_{\max} = P_y \times R_y \times \Omega_h \times \beta \quad (2)$$

BRB 構件極限拉力強度可以表示為 P_{\max} / β 。

(4) BRB 斷面與長度尺寸

BRB 詳細尺寸細節請詳閱標準圖及圖 1a、1b 與圖 2。 t_c 為與隅板垂直的核心元件鋼材厚度， B_c 為核心元件消能段寬度， D_c 為核心元件消能段高度， t_j 為平行於隅板之核心元件鋼材厚度， B_j 為核心元件接合段寬度， D_j 為核心元件接合段高度， A_c 為核心元件消能段斷面積， A_j 為接合段斷面積， $A_t = 0.5(A_c + A_j)$ 為轉換段斷面積。

如圖 2 所示， L_{wp} 為工作點至工作點長度， L_{BRB} 為 BRB 構件全長， L_{sc} 為外鋼管長度， L_c 與 L_t 分別為核心元件消能段與轉換段長度， L_x 為接合段於外鋼管內之長度， $L_{j,e}$ 為接合段計算至 BRB 構件端部之長度。接合段總長 $L_{j,wp}$ 可由 $L_{wp} - L_c - 2L_t$ 計算而得。

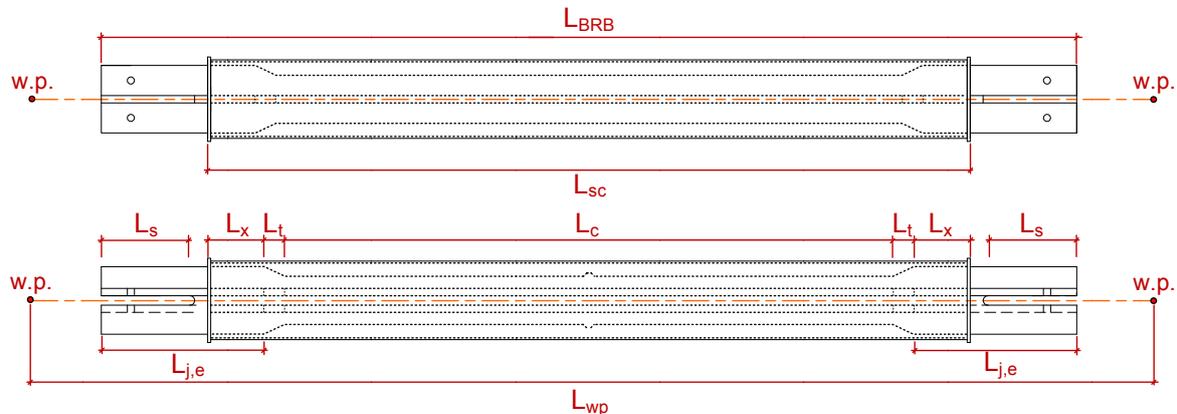


圖 2 WES-BRB 構件尺寸示意圖

(5) BRB 接合銲接尺寸

如圖 3a 與 3b 所示，BRB 與隅板銲接長度 L_w 計算方式如下[4]:

$$\begin{aligned} \phi \times 0.707 \times T_w \times (4L_w + D_j) \times (0.6F_{\text{exx}}) &\geq P_{\max} \\ \phi &= 0.75 \end{aligned} \quad (3)$$

接合之填角銲尺寸採 $T_w = 0.8t_c$ ，銲材的張力強度 F_{exx} 為 490 MPa (或 4.9 tonf/cm²)。為考量施工便利性，開槽長度(L_s)與寬度($t_{g,s}$)分別增加 25 mm 與 3 mm ($L_s = L_w + 25$, $t_{g,s} = t_g + 3$ mm)，如圖 2 所示。

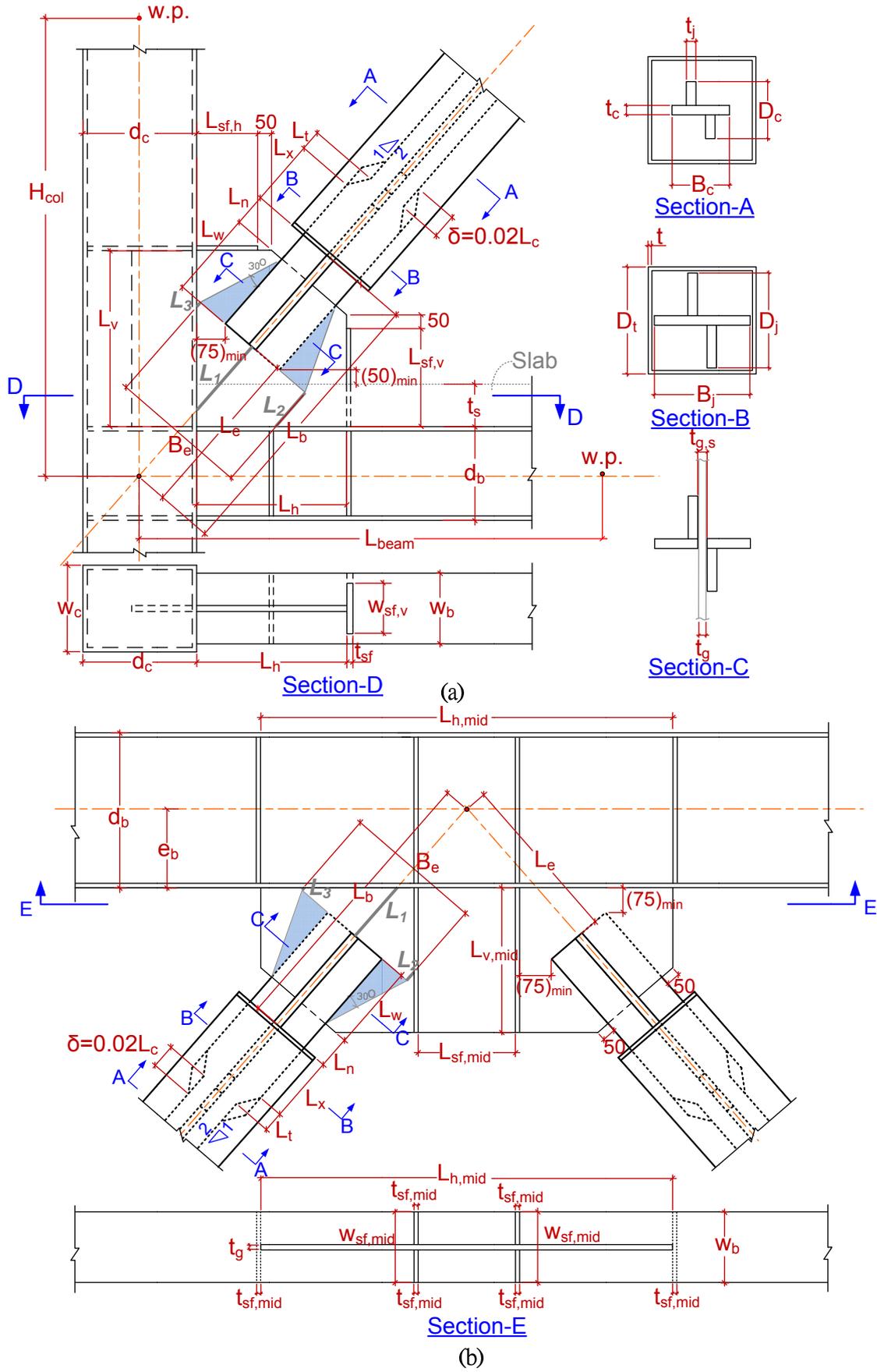
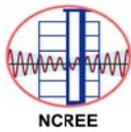


圖 3 WES-BRB 構件與(a)梁柱角隅及與(b)中間接合板接合細部設計



(6) 單邊預留壓縮空間與外鋼管端板至隅板集中間接合板淨間距

考量雙端滑動之 BRB 最大核心壓應變為 4%，因此單邊預留壓縮空間 δ 為 $0.02L_c$ ，並另外增加 25mm 做為外鋼管端板至隅板淨間距 L_n ($=\delta+25\text{mm}$)，且設計 L_x 至少為 $2L_n$ ， L_e 為 BRB 端部至工作點距離，如圖 3a 與 3b 所示。

(7) BRB 消能長度因子、等效勁度、等效勁度因子

BRB 在地震力作用而進入降伏消能的階段後，塑性變形會集中在核心元件消能段部份，消能長度因子 α 可表示為[6]:

$$\alpha = \frac{L_c}{L_{wp}} \tag{4}$$

BRB 的彈性等效勁度 K_{eff} 可由核心元件消能段、轉換段與接合段三段共同串聯後加成，而構架中之接合段範圍包含隅板及部分梁柱構件，因此實際斷面積較接合段斷面積(A_j)大，為反映實際構架中接合段斷面積，因此計算 BRB 等效勁度時，將接合段勁度放大 1.2 倍($1.2K_j$)[7]， E 為鋼材的楊氏模數，由上述三段勁度 K_c 、 K_t 與 $1.2K_j$ 表示為：

$$K_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_t} + \frac{1}{1.2K_j}} = \frac{EA_c A_t A_j}{L_c A_t A_j + 2L_t A_c A_j + \frac{L_{j,wp} A_c A_t}{1.2}} \tag{5}$$

進行 BRBF 分析時，常直接採用等效桁架桿件模擬 BRB 的受力變形行為，若受力面積採核心消能段斷面積 A_c ，並以 L_{wp} 為節點至節點長度，在分析模型中模擬 BRB 等效勁度時，無形中利用等效勁度因子 Q ，表示如下：

$$Q = \frac{K_{eff}}{EA_c / L_{wp}} \tag{6}$$

採最佳化設計之 BRB 的 Q 值一般在 1.2 至 1.5 之間， Q 值大小與 α 值有關，核心段相對較短時 α 值越小，則消能段所受的應變量就越有被放大的可能， Q 值也會相對較大；轉換段或接合段長度越長或斷面越大，整體斜撐等效勁度(或 Q 值)也隨之增加，因此，可依 BRB 非線性變形需求是否過大或彈性勁度需求，做各段長度與斷面積變化調整之依據。

(8) 外鋼管斷面與長度計算

為防止整體撓曲挫屈的發生，外鋼管須提供有效的慣性矩 I_{sc} ，接採用下式作為外鋼管的選取標準[8]：

$$I_{sc} \geq \frac{P_{\max} L_{sc}^2}{\pi^2 E} \tag{7}$$

外鋼管長度 $L_{sc} = L_{BRB} - 2L_w - 2L_n$ 。

二、隅板設計

(1) 梁柱角隅板設計

梁柱角隅板設計採用泛均力法(generalized uniform force method, GUFM)[9]計算斜撐軸力作用於隅板與梁柱接合界面上之分力，並考慮構架側位移時梁柱角隅開合效應對隅板產生額外之力量，來進行隅板與相關銲道尺寸之設計。

如圖 4 所示，泛均力法假設隅板與梁柱接合界面間之力量分別作用於隅板長度(L_h)與高度(L_v)的中點，且兩界面上合力延伸線與斜撐軸力相交於隅板控制點(gusset control point)。本文採隅板與梁接合面上之合力通過梁中心線與柱面交點來決定梁控制點(Beam control point)，如圖 4 所示，與斜撐軸線相交即可決定隅板控制點，並由隅板與柱接合面之中點連線來決定該界面上合力量之方向。利用上述之幾何關係與力平衡，可列出隅板與梁柱接面之四組分力關係如下：

$$H_{uc} = \frac{P_{\max} e_c \sin \varphi}{e_b + 0.5L_v} \quad (8)$$

$$V_{ub} = P_{\max} \left[\frac{e_b \left[(e_b + 0.5L_v) \cos \varphi - e_c \sin \varphi \right]}{0.5L_h (e_b + 0.5L_v)} \right] \quad (9)$$

$$H_{ub} = P_{\max} \cos \varphi - H_{uc} \quad (10)$$

$$V_{uc} = P_{\max} \sin \varphi - V_{ub} \quad (11)$$

V_{uc} 與 H_{uc} 分別為柱邊隅板垂直力與水平力， V_{ub} 與 H_{ub} 為梁邊隅板垂直力與水平力。圖 5 所示為隅板之等效支撐模型，用以模擬隅板於梁柱開合效應中之受力[10]，支撐之寬度與隅板厚度(t_g)相同，有效深度為 0.5 倍等效支撐長度($0.5L_g$)[11]，BRBF 變形時所產生之梁剪力會使等效支撐受力變形，支撐軸力之水平(H_{FA})與垂直(V_{FA})分力則用以表示隅板於梁柱開合效應下之設計力量需求。考慮構架於極限狀況下，梁構件在隅板前端處產生塑性彎矩以估計梁剪力，由於梁需傳遞因 BRB 軸向變形所引致之軸力，為有效且保守估計梁剪力(V_{beam})，應考量軸彎互制下折減之梁彎矩強度($M_{r,beam}$)且不考慮強度折減係數 [4]:

$$\text{若 } \frac{P_{r,beam}}{P_{n,beam}} \geq 0.2, \quad \frac{P_{r,beam}}{P_{n,beam}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{r,beam}}{M_{n,beam}} \right) = 1.0 \quad (12)$$

$$\text{若 } \frac{P_{r,beam}}{P_{n,beam}} < 0.2, \quad \frac{P_{r,beam}}{2P_{n,beam}} + \frac{M_{r,beam}}{M_{n,beam}} = 1.0$$

其中 $M_{n,beam}$ 為梁斷面塑性彎矩強度， $P_{n,beam}$ 為假設梁有充足側向支撐下之軸壓強度， $P_{r,beam}$ 為梁之軸壓力，可假設為 BRB 最大軸壓力之水平分量：

$$P_{r,beam} = P_{\max} \cos \varphi \quad (13)$$

考量材料超強效應($R_{y,beam}$)，所對應之梁剪力(V_{beam})可由下式計算，但不應大於梁可發展出之最大剪力強度($V_{p,beam}$)[5]:

$$V_{beam} = \frac{2(R_{y,beam} M_{r,beam})}{L_{clear}} \leq V_{p,beam} = 0.6R_{y,beam} F_{y,beam} t_w (d_b - 2t_f) \quad (14)$$

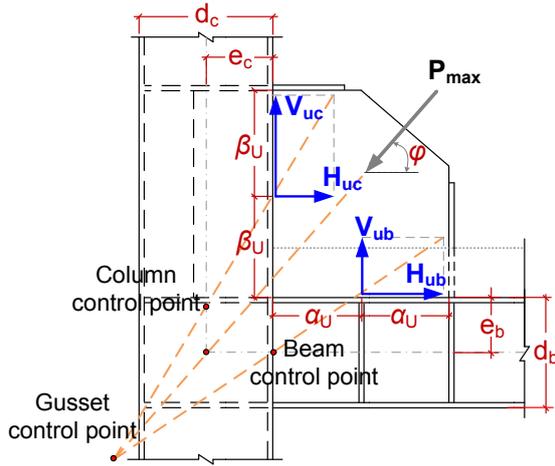


圖 4 泛均力法隔板之力量分布

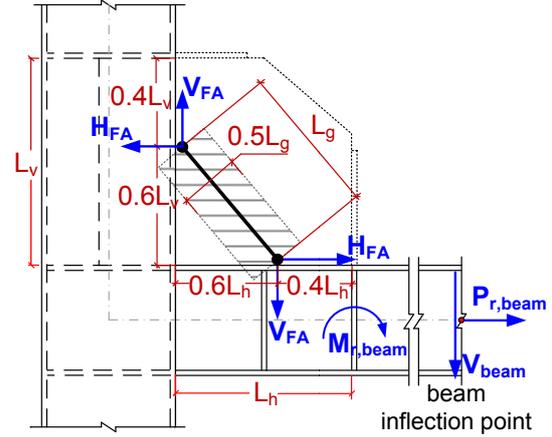


圖 5 隔板等效支撐模型

其中, L_{clear} 為梁之淨長度, 如圖 6 所示。如為單斜 BRB 配置構架, 假設所設計樓層之上層與下層之 BRB 及梁柱配置與設計樓層之配置相同, 則梁淨長度可計算為 $L_{beam} - 0.5d_{c,left} - 0.5d_{c,right} - L_{h,lower} - L_{h,upper}$ 。若為雙斜 BRB 配置構架, 則梁之淨長度為 $L_{beam} - 0.5d_{c,left} - 0.5d_{c,right} - L_{h,left} - L_{h,right}$, 其中 $L_{h,left}$ 與 $L_{h,right}$ 則分別為左側與右側梁柱角隅隔板長度, $F_{y,beam}$ 為梁構件材料降伏應力, t_w 與 t_f 分別為梁構件腹板與翼板厚。此梁剪力 V_{beam} 會使等效支撐受力變形, 假設支撐水平方向變形量為 $d_{strut,x}$, 而位在 $0.6L_h$ 處之梁上翼板表面則因梁彎矩而發生水平變形 ($d_{beam,x}$), 兩者相等的情況下 ($d_{strut,x} = d_{beam,x}$), I_b 為梁強軸慣性矩, 即可計算隔板於梁柱開合效應下所受到的水平分力 H_{FA} 與垂直分力 V_{FA} [10]:

$$H_{FA} = \frac{d_b L_h V_{beam} \left[0.3(L_{beam} - 0.5d_{c,left} - 0.5d_{c,right}) - 0.18L_h \right]}{4I_b / t_g + d_b L_h (0.3d_b + 0.18L_v)} \quad (15)$$

$$V_{FA} = \frac{d_b L_v V_{beam} \left[0.3(L_{beam} - 0.5d_{c,left} - 0.5d_{c,right}) - 0.18L_h \right]}{4I_b / t_g + d_b L_h (0.3d_b + 0.18L_v)} \quad (16)$$

BRB 受壓時, 梁柱接合處張開造成隔板受拉(圖 6a), 梁邊隔板垂直力與水平力分別為 $V_{b,c}$ 及 $H_{b,c}$, 柱邊隔板垂直力與水平力分別為 $V_{c,c}$ 及 $H_{c,c}$, 結果如下:

$$H_{c,c} = H_{FA} - H_{uc} \quad (17)$$

$$V_{c,c} = V_{FA} + V_{uc} \quad (18)$$

$$H_{b,c} = H_{FA} + H_{ub} \quad (19)$$

$$V_{b,c} = V_{FA} - V_{ub} \quad (20)$$

BRB 受拉時, 梁柱接合處閉合造成隔板受壓(圖 6b), 梁邊隔板垂直力與水平力分別為 $V_{b,t}$ 及 $H_{b,t}$, 柱邊隔板垂直力與水平力分別為 $V_{c,t}$ 及 $H_{c,t}$ 。結果如下:

$$H_{c,t} = H_{FA} - H_{uc} / \beta \quad (21)$$

$$V_{c,t} = V_{FA} + V_{uc} / \beta \quad (22)$$

$$H_{b,t} = H_{FA} + H_{ub} / \beta \quad (23)$$

$$V_{b,t} = V_{FA} - V_{ub} / \beta \quad (24)$$

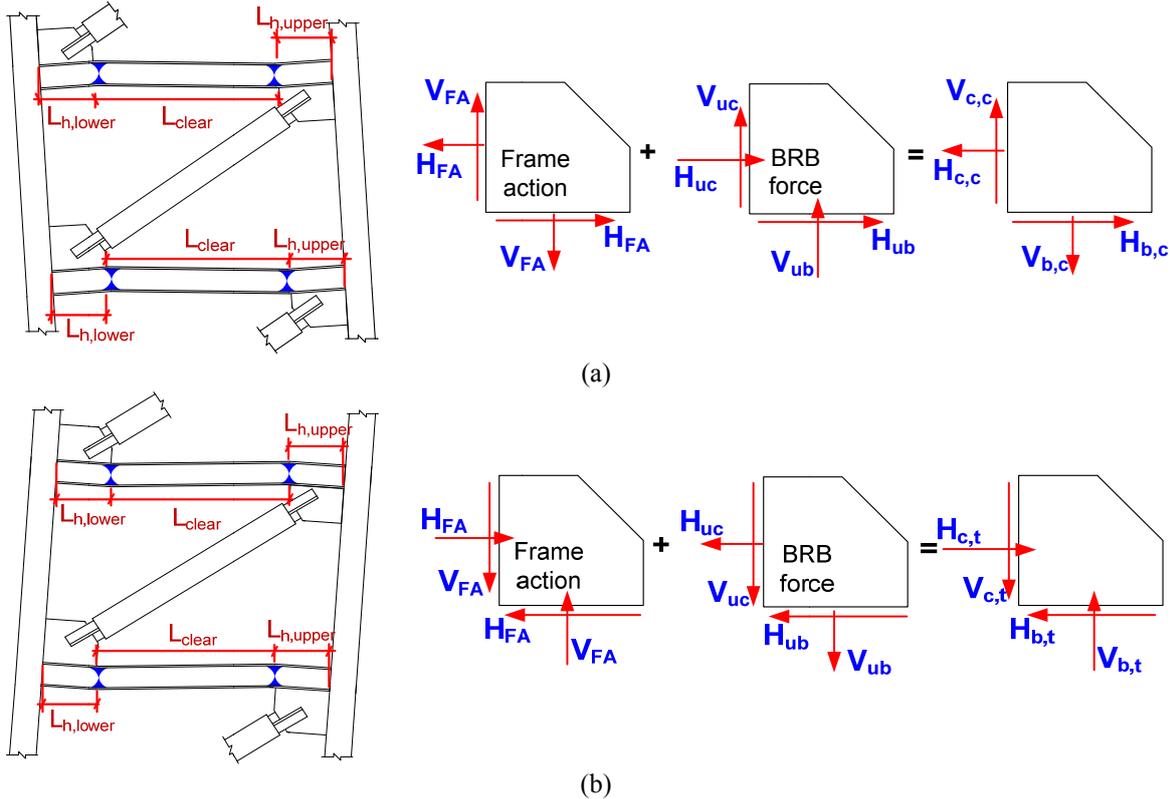


圖 6 梁柱角隅隔板受斜撐軸力與梁柱開合效應受力情形(a) 斜撐受壓梁柱接合處張開，與(b)斜撐受拉時梁柱接合處閉合

以下為隅板之詳細設計流程：

- 決定與梁翼與柱翼接合面之隅板長度(L_h)與高度(L_v)。
- 隅板建議使用國內習用之 ASTM A572 GR50 或 CNS SN490B 鋼材，為提高施工便利性，建議隅板外部邊線應垂直於柱面與梁面，以此決定隅板長度(L_h)與高度(L_v)，如圖 3a 所示。
- 利用泛均力法(式 8~11)計算斜撐軸力於隅板梁柱接合面上之分力(H_{uc} , V_{ub} , H_{ub} 與 V_{uc})。
- 利用等效支撐模型(式 15 與 16)計算梁柱開合效應於隅板梁柱接合面上之分力(H_{FA} 與 V_{FA})。
- 考量斜撐軸力與梁柱開合效應同時作用下，計算隅板接合面於斜撐受壓(式 17~20)與受拉時(式 21~24)之分力。
- 柱翼邊隅板填角鉚腳長 T_c 與梁翼邊隅板填角鉚腳長 T_b 可由下式求得，

$$\phi V_{an,c} \geq 1.25 \sqrt{V_{c,c}^2 + H_{c,c}^2} \quad (25)$$

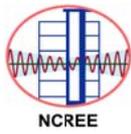
$$\phi V_{an,b} \geq 1.25 \sqrt{V_{b,c}^2 + H_{b,c}^2} \quad (26)$$

其中， $V_{an,c} = 2 \times 0.707 \times T_c L_v (0.6 F_{exx}) \left[1 + 0.5 \sin^{1.5} \left(\tan^{-1} \left| \frac{H_{c,c}}{V_{c,c}} \right| \right) \right]$

$$V_{an,b} = 2 \times 0.707 \times T_b L_h (0.6 F_{exx}) \left[1 + 0.5 \sin^{1.5} \left(\tan^{-1} \left| \frac{V_{b,c}}{H_{b,c}} \right| \right) \right]$$

$$\phi = 0.75$$

隅板厚度超過 20mm，則假設其與梁翼及柱翼接合採全滲透開槽鉚接。



(g) 如圖 3a 所示，若隅板厚度小於 20mm，則隅板端部加勁板厚度與隅板厚度相同($t_{sf} = t_g$)，若隅板厚度大於 20mm，則加勁板厚度為 20mm。垂直加勁板寬度($w_{sf,v}$)與梁翼寬度相同，當梁翼寬度大於 300mm 時，垂直加勁板寬度則維持 300mm。水平加勁板寬度($w_{sf,h}$)與垂直加勁板寬度($w_{sf,v}$)相同。垂直與水平加勁板長度分別為 $L_{sf,v}$ 與 $L_{sf,h}$ ，加勁板邊緣考慮與隅板斜面轉角處預留 50mm 之空間以利安裝 BRB。

(2) 梁跨中間接合設計

採用雙斜 V 或倒 V 配置 BRB 之構架中間接合板，僅受 BRB 軸力影響而無梁柱開合效應，但由於 BRB 作用力中心與隅板銲道形心有一偏心矩，因此設計此銲道時須額外考量此彎矩作用。如圖 7 所示，中間接合板與梁接面之正向壓力($V_{b,mid}$)、剪力($H_{b,mid}$)、彎矩($M_{b,mid}$)可依下式計算：

$$V_{b,mid} = P_{\max} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \sin \varphi \quad (27)$$

$$H_{b,mid} = P_{\max} \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \cos \varphi \quad (28)$$

$$M_{b,mid} = H_{b,mid} e_b = P_{\max} e_b \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (29)$$

而中間接合板與梁接面之剪應力($F_{s,mid}$)、最大拉應力($F_{t,mid}$)與最大壓應力($F_{c,mid}$)可依下式計算：

$$F_{s,mid} = \frac{H_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g} \quad (30)$$

$$F_{t,mid} = \frac{M_{b,mid}}{L_{h,mid}^2 t_g / 4} - \frac{V_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g} \quad (31)$$

$$F_{c,mid} = \frac{M_{b,mid}}{L_{h,mid}^2 t_g / 4} + \frac{V_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g} \quad (32)$$

中間接合板與梁接面之銲道設計須考量彎矩之效應，隅板採用較經濟的強度分析法設計[4]，其原理為將銲道分割為數個節塊，而整體銲道之抵抗能力為每一節塊所能發展強度之總和，如圖 8 所示，單一銲道節塊強度(R_i)為[4]：

$$R_i = 2 \times 0.707 \times T_{b,mid} (0.6 F_{exx}) \left(1 + 0.5 \sin^{1.5} \theta \right) \left[\frac{\Delta_i}{\Delta_m} \left(1.9 - 0.9 \frac{\Delta_i}{\Delta_m} \right) \right]^{0.3} \times \left(\frac{L_{h,mid}}{10} \right) \quad (33)$$

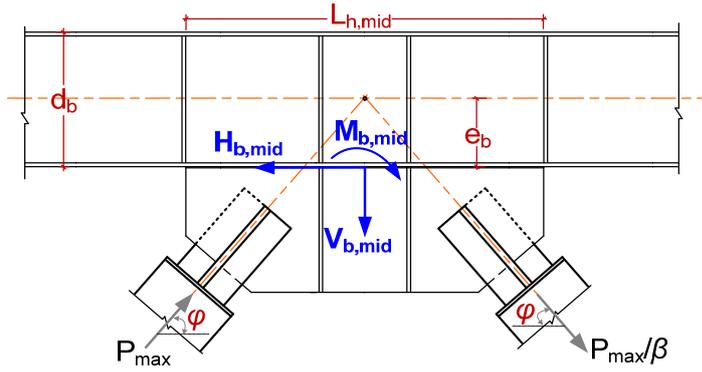


圖 7 中間接合板受力情形

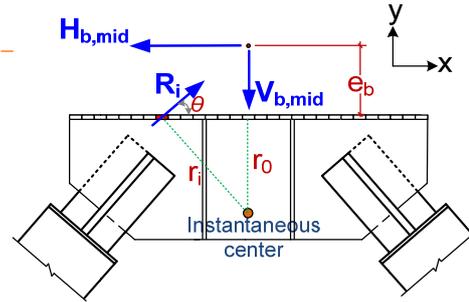


圖 8 中間接合板銲道設計

θ 為力量方向與銲道長向之夾角(度)

$\Delta_i = r_i \left(\frac{\Delta_u}{r_{crit}} \right)$ 為第 i 個銲道節塊之變形量(in), 其中 $\left(\frac{\Delta_u}{r_{crit}} \right)$ 為所有銲道節塊中之 $\frac{\Delta_u}{r}$ 最小者

$\Delta_m = 0.209(\theta + 2)^{-0.32} T_{b,mid}$ 為銲道節塊所發展最大強度所對應之變形量(in)

$\Delta_u = 1.087(\theta + 6)^{-0.65} T_{b,mid} \leq 0.17T_{b,mid}$ 為銲道破壞瞬間銲道節塊之變形量(in)

$T_{b,mid}$ 為中間接合板與梁接面之填角銲腳長(mm)

F_{exx} 為銲材張力強度

中間接合板與梁接面填腳銲道設計流程如下:

- 將中間接合板與梁接面銲道長度($L_{h,mid}$)平均等分, BOD 程式首次迭代均分 10 等分。
- 首先初步假設填角銲腳長 $T_{b,m}$, BOD 以 5mm 為計算起始值。
- 如圖 8 所示, 假設任一 r_0 及瞬時旋轉中心之位置(instantaneous center)。
- 如圖 8 所示, 假設所有銲道節塊之作用力(R_i)方向與銲道節塊形心至瞬時旋轉中心之方向垂直。
- 計算每一銲道節塊作用力(R_i)方向與銲道方向之夾角 θ (度)。
- 計算每一銲道節塊所對應之 Δ_m 與 Δ_u , 以及 Δ_i 。
- 計算每一銲道節塊之強度(R_i)。
- 銲道整體所提供之彎矩強度可以由每一銲道節塊強度乘上其形心至瞬時旋轉中心距離之總合 $\sum R_i r_i$, 亦可由整體銲道所提供之水平強度($P_{n,x} = \sum R_i \cos \theta_i$)乘上工作點至瞬時旋轉中心之距離而得 $P_{n,x} (e_b + r_0)$ 。若瞬時旋轉中心及 r_0 位置均正確時則兩者相等, 即 $\sum R_i r_i = P_{n,x} (e_b + r_0)$ 。若兩者不相等, 則重複步驟(c)改變 r_0 並重新計算。
- 決定適當之瞬時旋轉中心及 r_0 位置後, 選取適當之填角銲腳長 $T_{b,m}$, 使整體銲道所提供之水平($P_{n,x}$)與垂直($P_{n,y}$)強度足以承受中間接合板與梁接面之分力:

$$\phi P_{n,x} \geq H_{b,mid}$$

$$\phi P_{n,y} \geq V_{b,mid}$$

$$\phi = 0.75$$

隅板厚度超過 20mm, 則設計其與梁翼接合採全滲透開槽銲接。由於中間接合板

設計不需考量梁柱開合效應，因此端部不設置加勁板，僅於隅板中間設置。如圖 3b 所示，加勁板設計須符合下列規則：

- (a) 若隅板厚度小於 20mm，則加勁板厚度與隅板厚度將同，即 $t_{sf,mid} = t_g$ 。
若隅板厚度大於等於 20mm，則加勁板厚度為 20mm。
- (b) 加勁板寬度與梁翼寬度相同，即 $w_{sf,mid} = w_b$ 。
- (c) 如圖 3b 所示，BRB 構件端部須與梁及加勁板保持至少 75mm 之淨間距，且中間接合板之兩塊加勁板淨間距須大於等於中間接合板高度之半，即 $L_{sf,mid} \geq 0.5L_{v,mid}$ 。
- (d) 若 $L_{sf,mid} < 0.5L_{v,mid}$ ，則僅設計一組加勁板，並且設置於中間接合板水平向之中點處，如圖 9 所示。
- (e) 中間接合板端部與加勁板對應位置之梁腹需設置加勁板，梁腹加勁板總寬應與梁寬相近，且板厚與中間接合板加勁板厚($t_{sf,mid}$)相同。

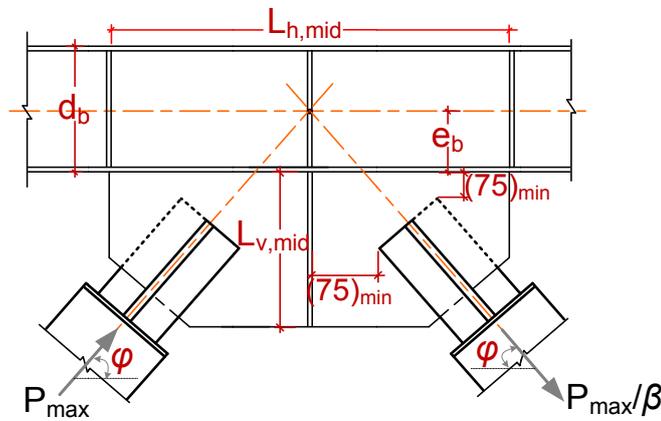


圖 9 中間接合板僅配置一組加勁板示意圖

三、破壞檢核

(1) 外鋼管挫屈檢核

Steel Casing Buckling (DCR-1)

依式 7 檢核。

(2) 核心元件接合段受拉保持彈性檢核

Joint Region of Steel Core Yielding (DCR-2)

$$\phi A_j F_y R_y \geq P_{\max} / \beta$$

$$\phi = 0.90$$
(34)

(3) 核心元件接合段受壓強度檢核

Joint Region of Steel Core Buckling (DCR-3)

$$\phi P_{cr,upper} = \phi \times \min \left[\frac{\pi^2 EI_{yj}}{4(L_{b,upper} + \delta)^2}, A_j F_y R_y \right] \geq P_{\max}$$
(35)

$$\phi P_{cr,lower} = \phi \times \min \left[\frac{\pi^2 EI_{yj}}{4(L_{b,lower} + \delta)^2}, A_j F_y R_y \right] \geq P_{max} \quad (36)$$

$$\phi = 0.90$$

其中， I_{yj} 為核心元件接合段向隅板面外撓曲之斷面慣性矩， $L_{b,upper}$ 與 $L_{b,lower}$ 分別為外鋼管上下兩端部至梁柱交會之工作點的距離。

(4) 隅板與中間接合板塊狀剪力破壞檢核

Gusset Block Shear (DCR-4)

$$\phi P_n \geq P_{max} \quad (37)$$

其中 $P_n = 0.6F_{u,g} A_{nv} + F_{u,g} A_{nt} \leq 0.6F_{y,g} A_{gv} + F_{u,g} A_{nt}$ ， $\phi = 0.75$ 。

由圖 3a、3b 與圖 10，受拉斷面為 $A_{gt} = A_{nt} = D_j \times t_g$ ，受剪斷面為 $A_{gv} = A_{nv} = 2L_w \times t_g$ ， $F_{y,g}$ 及 $F_{u,g}$ 分別為隅板鋼材的標稱拉力降伏應力及拉力強度。

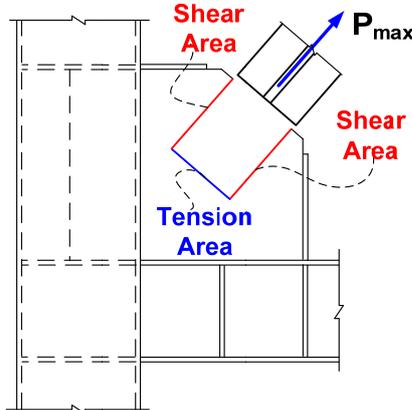


圖 10 隅板塊狀剪力破壞模式示意圖

(5) 隅板與中間接合板拉力降伏檢核

Gusset Plate Yielding (DCR-5)

Whitmore 建議[12]由斜撐與隅板接合銲道接合點開始，沿斜撐軸向呈 30 度角擴張，直至最後銲接點，拉力破壞斷面寬度 $W_{whitmore}$ 可表示為：

$$W_{whitmore} = 2L_w \times \tan 30^\circ + D_j \quad (38)$$

如圖 3a 與 3b 所示，若 $W_{whitmore}$ 斷面寬度超過隅板或中間接合板範圍，則取 $W_{whitmore}$ 與隅板或中間接合板之重疊寬度做為實際計算之寬度 B_e ，做為隅板抗拉強度檢核之斷面寬度 [4, 12]，則隅板可承受之拉力為：

$$\phi F_{y,g} B_e t_g \geq P_{max} / \beta \quad (39)$$

$$\phi = 0.90$$

(6) 隅板與中間接合板挫屈破壞檢核

Gusset Plate Buckling (DCR-6)



如圖 3a 與 3b 所示，採用斷面寬度 B_e 厚度 t_g 之等效區域作為承壓面積，並以 L_1 、 L_2 與 L_3 三條臨界長度之平均值作為有效長度 L_r ，若斷面寬度 B_e 超過隅板區域於梁柱範圍內，則臨界長度可取負值計算：

$$L_r = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (40)$$

依下列公式檢核隅板挫屈強度，

$$\phi \times P_{cr,g} = \phi \times (B_e \times t_g) \times F_{cr,g} \geq P_{\max} \quad (41)$$

$$\text{若 } \lambda_c \leq 1.5, F_{cr,g} = 0.658 \lambda_c^2 F_{y,g},$$

$$\text{若 } \lambda_c > 1.5, F_{cr,g} = \frac{0.877}{\lambda_c^2} F_{y,g},$$

$$\text{其中, } \lambda_c = \frac{KL_r}{\pi r} \sqrt{\frac{F_{y,g}}{E}}, K \text{ 值可取 } 0.65 \text{ 計算 [13,14]}$$

$$\phi = 0.90$$

(7) 隅板與梁柱接面強度檢核

(a) von Mises 降伏準則

Gusset Strength at the Connection to Beam or Column - von Mises Yield Criterion (DCR-7-1 / DCR-7-4)

在斜撐發展出最大軸力時，同時考量正向應力與剪應力作用下梁柱接面的隅板降伏情況，梁柱角隅隅板在梁柱接面應符合下列檢核：

$$\sqrt{\left(\frac{H_{c,c}}{L_v t_g + w_{sf,eff} t_{sf}}\right)^2 + 3 \left(\frac{V_{c,c}}{L_v t_g + w_{sf,eff} t_{sf}}\right)^2} \leq \phi F_{y,g} \quad (42)$$

$$\sqrt{\left(\frac{V_{b,c}}{L_h t_g + w_{sf,eff} t_{sf}}\right)^2 + 3 \left(\frac{H_{b,c}}{L_h t_g + w_{sf,eff} t_{sf}}\right)^2} \leq \phi F_{y,g} \quad (43)$$

$$\phi = 1.00$$

隅板接合面有效承載面積可將端部加勁板之有效斷面積 ($t_{sf} \times w_{sf,eff} = t_{sf} \times 2.5 t_g$) 納入計算。中間接合板與梁翼接面則須符合下列檢核：

$$\sqrt{\left(\frac{V_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g} + \frac{M_{b,mid}}{L_{h,mid}^2 t_g / 4}\right)^2 + 3 \left(\frac{H_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g}\right)^2} \leq \phi F_{y,g} \quad (44)$$

$$\phi = 1.00$$

(b) 拉力斷裂破壞

**Gusset Strength at the Connection to Beam or Column – Tensile Rupture
(DCR-7-2 / DCR-7-5)**

由圖 6 所示，當梁柱角隅隔板與柱接面水平力 $H_{c,c} < 0$ 或 $H_{c,t} > 0$ ，以及隔板與梁接面垂直力 $V_{b,c} < 0$ 或 $V_{b,t} > 0$ ，表示隔板接合面受壓力，拉力斷裂破壞僅須檢核接合面受拉力之情況：

$$H_{c,c} \geq 0, \quad \frac{H_{c,c}}{L_v t_g + w_{sf,eff} t_{sf}} \leq \phi F_{u,g} \quad (45)$$

$$H_{c,t} \leq 0, \quad \left| \frac{H_{c,t}}{L_v t_g + w_{sf,eff} t_{sf}} \right| \leq \phi F_{u,g} \quad (46)$$

$$V_{b,c} \geq 0, \quad \frac{V_{b,c}}{L_h t_g + w_{sf,eff} t_{sf}} \leq \phi F_{u,g} \quad (47)$$

$$V_{b,t} \leq 0, \quad \left| \frac{V_{b,t}}{L_h t_g + w_{sf,eff} t_{sf}} \right| \leq \phi F_{u,g} \quad (48)$$

其中， $w_{sf,eff} = 2.5t_g$ 。中間接合板與梁接面之拉力破壞檢核則須符合下列需求：

$$F_{t,mid} = \frac{M_{b,mid}}{L_{h,mid}^2 t_g / 4} - \frac{V_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g} \leq \phi F_{u,g} \quad (49)$$

$\phi = 0.75$

(c) 剪力斷裂破壞

**Gusset Strength at the Connection to Beam or Column – Shear Rupture
(DCR-7-3 / DCR-7-6)**

$$\frac{V_{c,c}}{L_v t_g + w_{sf,eff} t_{sf}} \leq \phi \tau_{u,g} = \phi (0.6 F_{u,g}) \quad (50)$$

$$\frac{H_{b,c}}{L_h t_g + w_{sf,eff} t_{sf}} \leq \phi \tau_{u,g} = \phi (0.6 F_{u,g}) \quad (51)$$

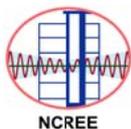
其中， $w_{sf,eff} = 2.5t_g$ 。中間接合板與梁接面之剪力破壞檢核則須符合下列需求：

$$F_{s,mid} = \frac{H_{b,mid}}{L_{h,mid} t_g} \leq \phi \tau_{u,g} = 0.6 \phi F_{u,g} \quad (52)$$

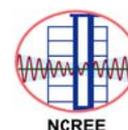
$\phi = 0.75$

參考文獻

1. 蔡克銓、吳安傑、林保均、魏志毓與莊明介，2012，「槽接式挫屈束制支撐與脫層材料性能研究」，結構工程，第二十七卷，第三期，第 29-59 頁。
2. Tsai KC, Wu AC, Wei CY, Lin PC, Chuang MC and Yu YJ, 2014, “Welded

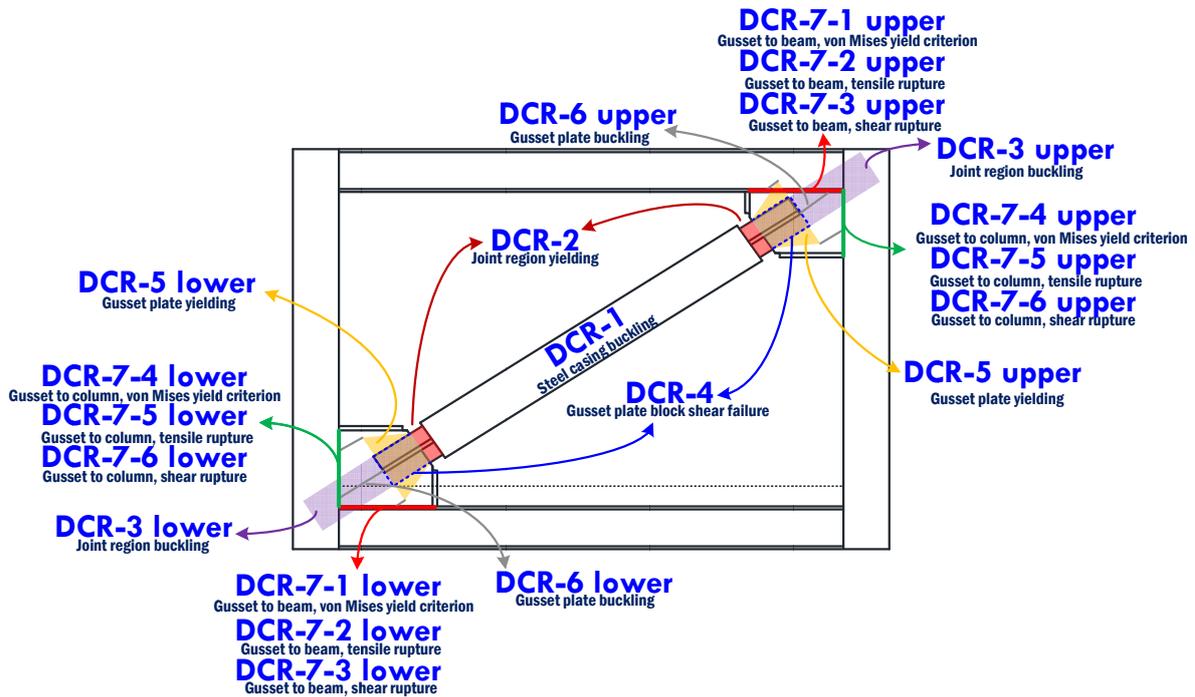


- end-slot connection and debonding layers for buckling-restrained braces,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, DOI: 10.1002/eqe.2423.
3. Lin PC, Tsai KC, Wu AC and Chuang MC, 2013, “Seismic design and test of gusset connections for buckling-restrained brace frames,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 43, Issue 4, pp. 565-587.
 4. American Institute of Steel Construction (AISC), 2010, “Specification for Structural Steel Buildings”, Chicago, Illinois.
 5. American Institute of Steel Construction (AISC), 2010, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”, Chicago, Illinois.
 6. 魏志毓與蔡克銓，2008，「挫屈束制支撐構架之設計」，*結構工程*，第二十三卷，第四期，第 85-100 頁。
 7. Yu YJ, Tsai KC, Li CH, Weng YT and Tsai CY, 2013, “Earthquake responses analyses of a full-scale five-story steel frame equipped with two types of dampers,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 42, Issue 8, pp. 1301-1320.
 8. Watanabe A, Hitomi Y, Saeki E, Wada A and Fujimoto M, 1988, “Properties of braces encased in buckling-restraining concrete and steel tube,” *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. IV, pp. 719-724, Tokyo-Kyoto, Japan.
 9. Muir S, 2008, “Design compact gussets with the uniform force method.” *Engineering Journal*, 1st quarter, pp. 13-19.
 10. Lee CH, 2002, “Seismic design of rib-reinforced steel moment connections based on equivalent strut model.” *Journal of Structural Engineering*, September 2002, pp. 1121-1129.
 11. Kaneko K, Kasai K, Motoyui S, Sueoka T, Azuma Y, Ooki Y, 2008, “Analysis of beam-column-gusset components in 5-story value-added frame.” the 14th world conference on Earthquake Engineering.
 12. Whitmore RE. Experimental investigation of stresses in gusset plate. University of Tennessee Engineering Experiment Station Bulletin No. 16, May 1952.
 13. Tsai KC, Hsiao PC, Wang KJ, Weng YT, Lin ML, Lin KC, Chen CH, Lai JW and Lin SL, 2008, “Pseudo-dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame—Part I: Specimen design, experiment and analysis,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 7, pp. 1081-1098.
 14. Tsai KC and Hsiao PC, 2008, “Pseudo-dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame—Part II: Seismic performance of buckling-restrained braces and connections,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 7, pp. 1099-1115.

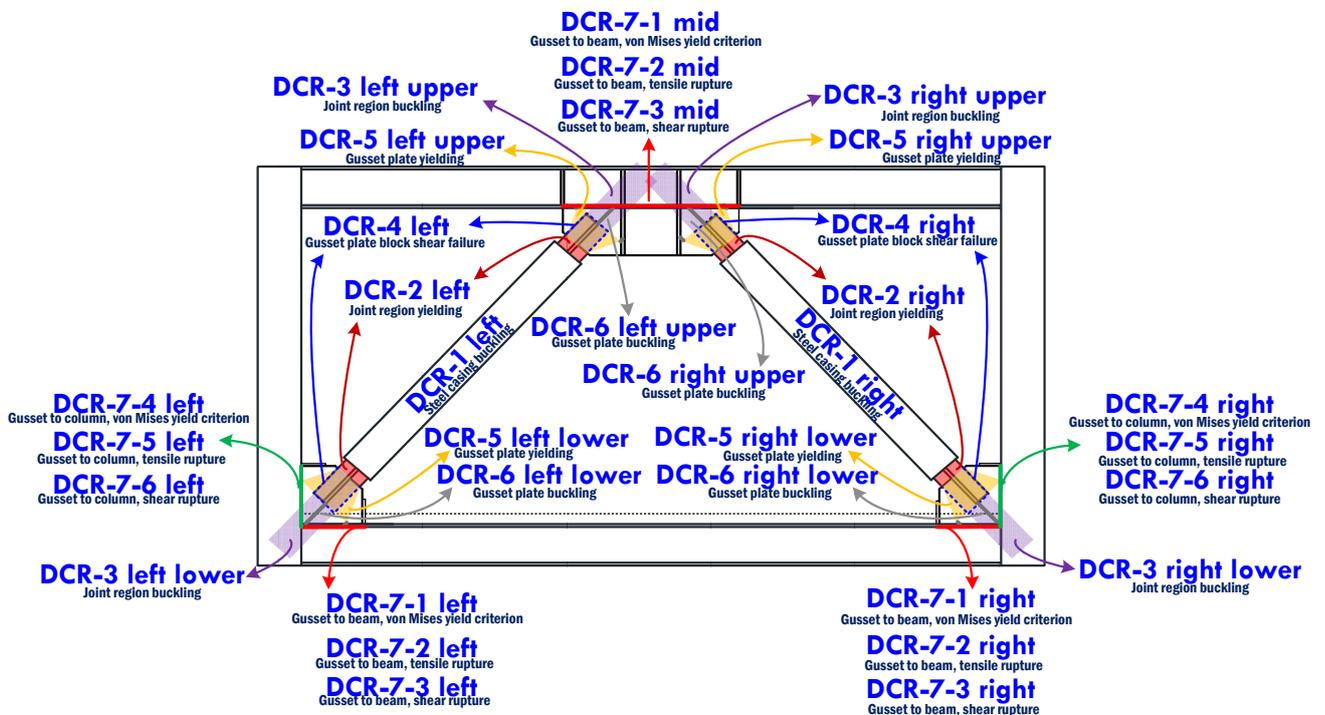


設計檢核 DCR 對照表

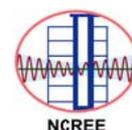
DCRs		相對位置						
		單斜配置		雙斜配置				
		上	下	左		中	右	
				上	下		上	下
DCR-1	外鋼管挫屈檢核	DCR-1		DCR-1 left		-	DCR-1 right	
DCR-2	核心元件接合段受拉保持彈性檢核	DCR-2		DCR-2 left		-	DCR-2 right	
DCR-3	核心元件接合段受壓強度檢核	DCR-3 upper	DCR-3 lower	DCR-3 left upper	DCR-3 left lower	-	DCR-3 right upper	DCR-3 right lower
DCR-4	隅板塊狀剪力破壞檢核	DCR-4		DCR-4 left		-	DCR-4 right	
DCR-5	隅板拉力降伏檢核	DCR-5 upper	DCR-5 lower	DCR-5 left upper	DCR-5 left lower	-	DCR-5 right upper	DCR-5 right lower
DCR-6	隅板挫屈檢核	DCR-6 upper	DCR-6 lower	DCR-6 left upper	DCR-6 left lower	-	DCR-6 right upper	DCR-6 right lower
DCR-7-1	隅板或中間接合板與梁面強度檢核-von Mises 降伏準則	DCR-7-1 upper	DCR-7-1 lower	DCR-7-1 left		DCR-7-1 mid	DCR-7-1 right	
DCR-7-2	隅板或中間接合板與梁面強度檢核-拉力斷裂破壞	DCR-7-2 upper	DCR-7-2 lower	DCR-7-2 left		DCR-7-2 mid	DCR-7-2 right	
DCR-7-3	隅板或中間接合板與梁面強度檢核-剪力斷裂破壞	DCR-7-3 upper	DCR-7-3 lower	DCR-7-3 left		DCR-7-3 mid	DCR-7-3 right	
DCR-7-4	隅板與柱面強度檢核-von Mises 降伏準則	DCR-7-4 upper	DCR-7-4 lower	DCR-7-4 left		-	DCR-7-4 right	
DCR-7-5	隅板與柱面強度檢核-拉力斷裂破壞	DCR-7-5 upper	DCR-7-5 lower	DCR-7-5 left		-	DCR-7-5 right	
DCR-7-6	隅板與柱面強度檢核-剪力斷裂破壞	DCR-7-6 upper	DCR-7-6 lower	DCR-7-6 left		-	DCR-7-6 right	



單斜配置 / Diagonal Configuration



雙斜配置 / Diagonal Configuration



尺寸符號對照表

構架尺寸相關符號		相對位置衍生符號					
		上	下	左	右		
d_b	梁深	$d_{b,upper}$	$d_{b,lower}$	-	-		
d_c	柱寬	-	-	$d_{c,left}$	$d_{c,right}$		
e_b	梁深的一半	$e_{b,upper}$	$e_{b,lower}$	-	-		
e_c	柱寬的一半	-	-	$e_{c,left}$	$e_{c,right}$		
H_{col}	樓高	H_{col}					
L_{beam}	梁跨距	L_{beam}					
t_s	樓板厚度	t_s					
w_b	梁寬	$w_{b,upper}$	$w_{b,lower}$	-	-		
w_c	柱深	-	-	$w_{c,left}$	$w_{c,right}$		
BRB 尺寸相關符號		單斜配置		雙斜配置			
		上	下	左		右	
				上	下	上	下
B_c	核心元件消能段寬度	B_c					
B_j	核心元件接合段寬度	B_j	$B_{j,left}$	$B_{j,right}$			
D_c	核心元件消能段高度	D_c					
D_j	核心元件接合段高度	D_j	$D_{j,left}$	$D_{j,right}$			
L_b	外鋼管端部至梁柱工作點距離	$L_{b,upper}$	$L_{b,lower}$	$L_{b,leftupper}$	$L_{b,leftlower}$	$L_{b,rightupper}$	$L_{b,righlower}$
L_{BRB}	BRB 構件全長	L_{BRB}		$L_{BRB,left}$		$L_{BRB,right}$	
L_e	BRB 構件端部至工作點距離	$L_{e,upper}$	$L_{e,lower}$	$L_{e,leftupper}$	$L_{e,leftlower}$	$L_{e,rightupper}$	$L_{e,righlower}$
$L_{j,e}$	接合段計算至構件端部長度	$L_{j,e}$		$L_{j,e,left}$		$L_{j,e,right}$	
$L_{j,wp}$	核心元件接合段全長	$L_{j,wp}$		$L_{j,wp,left}$		$L_{j,wp,right}$	
L_n	鋼管端板至隔板淨間距	L_n		$L_{n,left}$		$L_{n,right}$	
L_s	核心接合段開槽長度	L_s		$L_{s,left}$		$L_{s,right}$	
L_{sc}	外鋼管須提供有效的慣性矩	L_{sc}		$L_{sc,left}$		$L_{sc,right}$	
L_w	與隔板銲接長度	L_w		$L_{w,left}$		$L_{w,right}$	
L_{wp}	梁柱工作點至工作點長度	L_{wp}					
t_c	與隔板垂直核心元件鋼材厚度	t_c					
t_j	平行隔板之核心元件鋼材厚度	t_j					
T_w	接合之填角銲腳長	T_w	$T_{w,left}$	$T_{w,right}$			
δ	單邊預留壓縮空間	δ	δ_{left}	δ_{right}			
φ	斜撐與水平之夾角	φ					
隔板尺寸相關符號		單斜配置		雙斜配置			
		上	下	左	中	右	
L_h	隔板長度	$L_{h,upper}$	$L_{h,lower}$	$L_{h,left}$	$L_{h,mid}$	$L_{h,right}$	
$L_{sf,mid}$	中間接合板加勁板間淨間距	-	-	-	$L_{sf,mid}$	-	
$L_{sf,h}$	水平隔板端部加勁板長度	$L_{sf,h,upper}$	$L_{sf,h,lower}$	$L_{sf,h,left}$	-	$L_{sf,h,right}$	
$L_{sf,v}$	垂直隔板端部加勁板長度	$L_{sf,v,upper}$	$L_{sf,v,lower}$	$L_{sf,v,left}$	-	$L_{sf,v,right}$	
L_v	隔板高度	$L_{v,upper}$	$L_{v,lower}$	$L_{v,left}$	$L_{v,mid}$	$L_{v,right}$	
T_b	梁翼邊隔板填角銲腳長	$T_{b,upper}$	$T_{b,lower}$	$T_{b,left}$	$T_{b,mid}$	$T_{b,right}$	
T_c	柱翼邊隔板填角銲腳長	$T_{c,upper}$	$T_{c,lower}$	$T_{c,left}$	-	$T_{c,right}$	
t_g	隔板厚度	t_g					
t_{sf}	隔板加勁板厚度	t_{sf}	t_{sf}	t_{sf}	$t_{sf,mid}$	t_{sf}	
$w_{sf,eff}$	梁柱角隅隅板加勁板有效寬度	$w_{sf,eff}$					
$w_{sf,h}$	梁柱角隅隅板水平加勁板寬度	$w_{sf,h,upper}$	$w_{sf,h,lower}$	$w_{sf,h,left}$	-	$w_{sf,h,right}$	
$w_{sf,mid}$	中間接合板加勁板寬度	-	-	-	$w_{sf,mid}$	-	
$w_{sf,v}$	梁柱角隅隅板垂直加勁板寬度	$w_{sf,v,upper}$	$w_{sf,v,lower}$	$w_{sf,v,left}$	-	$w_{sf,v,right}$	