

# 預先驗證合格之

# 鋼梁與箱型柱耐震抗彎接合

林克強／國家地震工程研究中心研究員

莊勝智、林志翰、李昭賢、林德宏／國家地震工程研究中心助理研究員

## 摘要

本文主要介紹鋼骨梁接箱型柱銲接型耐震抗彎接合，目的在建立國內預先驗證合格的鋼骨箱型柱梁接合資料庫，提供國內工程師進行實際梁柱接合設計時，有更多元的梁柱接合型式做為評估與選擇。此預先驗證合格之梁柱接合共包括九種耐震梁柱接合型式，區分為三類，包括接合細節改良型梁柱接合、強度減弱型梁柱接合與強度增強型梁柱接合，其變形容量均滿足台灣或美國規範對特殊抗彎構架系統之梁柱接合要求。為獲得應用於箱型柱之銲接型梁柱接合具有穩定耐震性能，其梁柱接合之銲接扇形開孔應避免採用 1/4 圓形式，選擇有助於降低應力集中效應之扇形開孔形式，並須以銑孔之機械加工方式製作，避免手工焰切施作之不平整與局部入熱，導致應力集中效應加劇；同時也應落實箱型柱內橫隔板電熱熔渣銲道製作與檢驗的品質管控。

## 抗彎構架梁柱接合之耐震情形

在建築結構系統中，抗彎構架系統（moment resisting frame system, MRF）因符合建築之大範圍空間應用與構造形狀特性，且受重力與側向力之能力較為穩定且可靠，為建築構造系統中應用最普遍的結構系統之一。同時抗彎構架系統在與所有建築耐震構架系統比較，許多建築物耐震設計規範均給予最高的耐震容量評價。規範中也規定，對於其他抵抗側向力效能較高之斜撐或剪力牆系統，可與特殊抗彎構架系統（special moment resisting frame, SMRF）複合使用，共同組成二元系統（dual system），此二元系統也可獲得規範認定

為最高的結構系統韌性容量，其中所謂二元抵抗側向力系統者，就現行規範規定（ASCE<sup>[1,2]</sup>；內政部營建署<sup>[3,4]</sup>）之規定，抗彎構架必須提供至少 25% 之結構物地震總橫力。但無論如何，就抗彎構架而言，系統之耐震性能取決於梁柱接合（beam-to-column connection）之韌性容量，因此在符合強柱弱梁（strong column-weak beam）之耐震設計原理下，系統消散地震輸入之能量由梁端彎矩塑鉸提供，而梁柱接合應能提供梁端順利發展彎矩降伏，且達預期變形能力下之應變硬化強度，故梁柱接合為抗彎構架系統中之主要關鍵元件。

台灣地處地震帶，在耐震需求、結構勁度與製作成本的考量下，部分或完全採用抗彎構架為抵抗側向力系統之高層或超高層鋼結構建築，其主要梁與柱構件之接合型式大多選用梁翼銲接之完全剛性接合為主。同時為使整體結構抵抗側向力之構架均佈化，以獲得較佳之位移控制，並增加靜不定贅餘度（redundancy），柱構件斷面儘可能提供兩向大且均勻之撓曲勁度與強度，因此具有雙向強軸之箱型柱（box column）構件廣泛受到採用。此與美、加等國之建築結構設計實務有明顯之差翼。以美國為主之建築結構系統，在剛性樓版的基本假設下，僅於部分構架設計為抵抗側向力構架，且大多安排此柱構件僅單向承受側向力，故在此部分構架之柱構件，可配置僅需單向提供主要強度與勁度之重型寬翼熱軋 H 型鋼（heavy wide-flange hot-rolled H shape steel）柱構件，此可適當地簡化柱構件的設計程序，並降低平面兩向抵抗水平力構件與柱構件接合的複雜性。由於在此結構設計實務上的差異，使得台灣鋼造之中高層建築結構柱構件，大多採用以四片鋼板組成之箱型柱構件，而美加地

區大多採用重型寬翼熱軋 H 型鋼柱構件，如圖 1 所示。

1994 年美國北嶺地震事件 (Northridge Earthquake Event) 對鋼造建築結構造成嚴重破壞，震害調查結果<sup>[5]</sup>及相關震害文獻<sup>[6,7]</sup>顯示，許多傳統梁腹栓接—梁翼鉚接 (bolted web-welded flange, BWWF) 之現場鉚接梁柱接合 (詳圖 2 所示) 發生破壞，且變形能力明顯不如預期，部分接合甚至在未發展塑鉸前即發生不如預期之脆性破壞。大多數之梁柱接合破壞發生於梁下翼板與柱翼板相接之節點上，其破壞模式分類詳「鋼構造梁柱抗彎接合設計手冊與參考圖」<sup>[8]</sup>一書，分析造成上述破壞之主要原因分別為：(1) 鉚材衝擊韌性不足；(2) 梁翼板鉚接背墊板與柱面間之天然裂縫，在梁端承受彎矩載重下引致顯著之應力集中效應 (特別在下翼板更為明顯)；(3) 梁翼板在腹板扇形開孔 (weld access hole) 尖端處，因斷面急遽變化所造成之應力集中效應；(4) 柱翼板厚度內之瑕疵所造成。除此之外，鋼材之拉力強度與

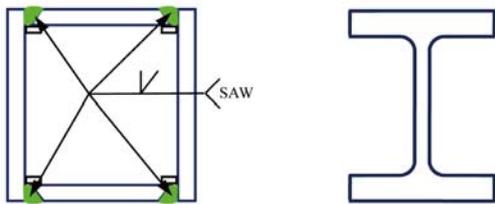
降伏強度比不足，導致梁塑鉸進入降伏後不久即達極限強度而斷裂，亦被認為是造成北嶺地震前梁柱接合 (pre-Northridge beam-to-column connection) 破壞的原因之一。

在 1994 年美國北嶺地震發生前，所有相關設計規範，包括美國鋼結構協會 (AISC) 當時最新於 1992 年出版之鋼結構設計規範耐震特別規定<sup>[9]</sup>，均未要求抗彎構架梁柱接合之變形容量需求。然而一般在進行建築結構設計時，抗彎構架梁柱接合之耐震變形容量，大多以 1.5% 弧度 (當時規定之最大彈性層間位移角 0.5% 弧度的 3 倍) 做為梁柱接合塑性變形能力的需求基準。自 1994 年北嶺地震發生後，AISC 分別於 1997、2002、2005 及 2010 年版之耐震特別規定<sup>[10-12,2]</sup>均規定，特殊抗彎構架之梁柱接合必須具有 4% 弧度之層間位移角變形容量。而台灣在 1999 及 2007 年版之鋼結構設計規範<sup>[13,14,3,4]</sup>中，對韌性抗彎構架梁柱接合也提出與美國規範相同等級之變形容量需求，在未進行更進一步結構分析下，梁柱接合應至少能提供 3% 弧度之塑性轉角變形容量。

經過北嶺地震的慘痛教訓後，全球在此相關領域的研究人員競相投入梁柱抗彎梁接合之研發，提出更具耐震能力之接合型式，成果極為豐碩。其研發的梁柱接合型式眾多，且各種接合型式均有個別的設計方法或接合細節，部分型式也藉由實尺寸試驗驗證能發揮 4% 弧度的層間位移角變形容量。

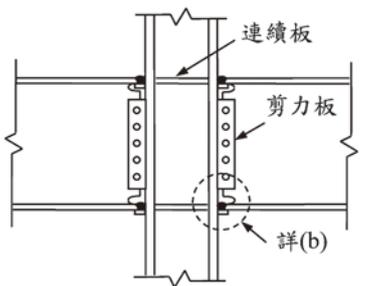
由過去震害調查結果<sup>[5-7]</sup>，與國內實尺寸梁柱接合試體試驗結果<sup>[15]</sup>顯示，梁翼鉚接型抗彎梁柱接合之破壞，大多發生在梁翼板靠近梁腹板因鉚接所需之扇形開孔 (weld access holes) 附近，對於採用傳統 1/4 圓形式之腹板扇形開孔，因在梁構件與柱面接合高應力區之斷面形狀急遽變化，而造成梁翼板在靠近扇形開孔尖端附近應力高度集中而發生斷裂 (如圖 3 所示)，此破壞大多在未達規範要求之變形容量前發生。因此為使鉚接型之梁柱接合能提供足夠的變形容量，不外乎使用下列兩種設計手段：(1) 在不變梁端彎矩強度下，降低因腹板扇形開孔所引致之翼板應力集中現象，(2) 調整梁端彎矩強度，將梁塑鉸遠離柱面，降低柱面強度需求。故梁柱接合可依梁端強度調整的不同區分為三類：(1) 接合細節改良型梁柱接合，(2) 強度減弱型梁柱接合，與 (3) 強度增強型梁柱接合。

本文所收集之梁柱接合中，是以梁翼鉚接型之抗彎梁柱接合為主，並應用於箱型柱構件者，而收集之原則如下：

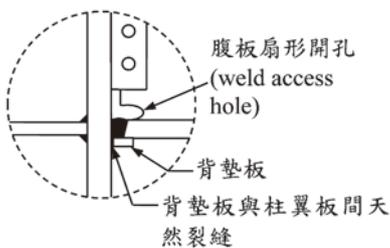


(a) 台灣廣泛採用以四塊鋼板鉚接組成之箱型柱構件 (box column) (b) 歐美廣泛採用之重型寬翼熱軋 H 型鋼柱構件

圖 1 鉚接組合箱型柱構件與寬翼熱軋 H 型柱構件斷面



(a) Pre-Northridge BWWF 接合細節



(b) 梁下翼板接合細節

圖 2 1994 年北嶺地震發生前傳統梁腹栓接—梁翼鉚接之梁柱接合



圖 3 梁翼板在腹板鉚接扇形開孔尖端附近發生斷裂破壞<sup>[8]</sup>

- 發表於公開場合，可獲得相關試驗條件與成果者；
- 實尺寸試驗研究成果者；
- 變形容量滿足美國或台灣規範要求者；
- 有明確設計邏輯與方法，足以提供做為設計依據者。

本文欲藉由收集各類型符合規範變形容量之梁柱接合，建立國內鋼結構韌性抗彎梁柱接合之預先驗證合格接合“prequalification connection”資料庫，提供國內工程師在選用梁柱接合型式時有更多元的選擇，並節省進行重覆梁柱接合試驗之工程成本。

## 現行規範之韌性梁柱接合彎矩強度與變形容量規定

台灣（2007 年版）<sup>[3,4]</sup> 與美國 AISC（2010 年版）<sup>[1,2]</sup> 現行鋼結構耐震設計規範，有關鋼骨韌性抗彎構架系統之梁柱接合彎矩強度與變形容量的相關規定分別敘述如下。

### 國內現行鋼結構設計規範

台灣鋼構造建築物鋼結構設計技術規範<sup>[3,4]</sup> 對韌性抗彎構架系統梁柱接頭之梁彎矩強度與與塑性變形容量有明確規定。在強度方面：採用反覆載重試驗評定梁柱接頭變形能力者，梁柱接頭之最大塑性轉角容量，以試驗最大彎矩強度之 90% 所對應的塑性轉角認定之；在變形方面：梁柱接頭所需塑性轉角（ $\theta_p$ ）以下列三式之一決定之：

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

其中 R：結構系統韌性容量

$\theta_E$ ：在設計地震力 E 作用下之最大層間變位角

## 美國 AISC 2010 耐震特別規定

AISC 於 2010 年出版之鋼結構耐震特別規定<sup>[2]</sup> 中，針對特殊抗彎構架（Special Moment Frames, SMF）系統之梁柱接頭變形與撓曲強度有下列二項規定：

- 梁柱接頭須能提供至少 0.04 弧度的層間位移角（inter-story drift angle）。
- 層間位移角達 0.04 弧度時，梁柱接合強度須達 80% 梁標稱塑性彎矩強度以上。

兩者規範最主要之差異，在於梁柱接合試驗之變形容量的認定有所不同，台灣規範規定，當梁柱接合試體之彎矩強度不低於試驗最大彎矩強度之 90% 時，其變形容量才被認定有效；而美國規範規定，梁柱接合試體之梁端強度應大於梁構件標稱彎矩強度之 80%，其變形容量即認定有效。很明顯地，在變形容量的認定上國內規範較美國規範嚴格許多。

## 設計原理

在本文所分類之三種鉚接型梁柱接合中，其基本設計原理分別敘述如下：

1. 接合細節改良型梁柱接合：此類接合不調整梁柱接合之梁構件強度，故梁塑鉸預期發生於梁柱交接處，此接合之變形能力乃利用更講究之接合細節提供，在所提出之改善接合細節中，大多集中在改善梁與柱構件接合處之應力集中效應，此應力集中效應主要來自梁腹板因電鉚梁翼板而需配置之扇形開孔所導致者。因此此類接合之設計原理主要著重於腹板扇形開孔施工細節的精進，以避免引致不利的應力集中效應。
2. 強度減弱型梁柱接合：此類接合是在梁端離柱面適當距離處選擇一段區域減弱梁斷面強度，強迫梁塑鉸發生於此強度減弱區域，提供梁柱接合塑性變形發展之主要來源。一般梁構件強度的減弱可藉由削減梁翼板或腹板面積等手段達成。雖然不同形式之強度減弱型梁柱接合有其個別之設計方法，但基本之力學設計原理可以圖 4 之梁彎矩需求與彎矩容量關係圖說明。典型抗彎構架在水平地震力作用下，梁與柱構件之反曲點約分別發生於構件中點，在強柱弱梁的耐震設計基本原則要求下，抗彎構架系統之塑鉸預期發生於梁端，當進行梁端與柱之彎矩接合時，其梁彎矩需求可假設梁中點彎矩為零，並往梁柱接頭方向依線性比例

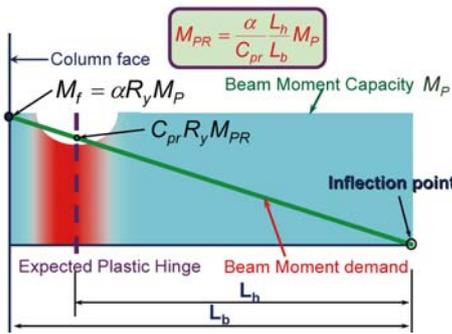


圖 4 強度減弱型梁柱接合之梁彎矩需求與彎矩容量關係圖

增加之彎矩梯度決定之，如圖 3 所示。在「梁塑鉸遠離柱面，降低柱面強度需求」之設計原則要求下，就強度減弱型梁柱接合而言，梁端在遠離柱面一特定距離處之區段，應利用適當方法減弱梁斷面之彎矩強度容量，提供梁塑鉸的發展。為確保所設計之梁柱接合能順利發展完整之塑鉸彎矩強度，其彎矩需求應考慮塑鉸處材料變異性與應變硬化之超強效應，其斷面減弱後之彎矩強度為  $C_{pr} R_y M_{PR}$ ，如圖 4 中所示，其中  $C_{pr}$  為鋼材之應變硬化因子，可根據 FEMA-350<sup>[16]</sup> 建議，其應變硬化應力取材料降伏應力與極限應力之平均值，所以  $C_{pr} = (F_y + F_u) / 2 F_y$ ； $R_y$  為材料超強因子，即材料實際與標稱降伏強度的比值。就梁彎矩容量而言，因強度減弱型梁柱接合之梁構件若為整段相同材質，梁構件在柱面之彎矩容量，可以實際塑性彎矩強度  $R_y M_P$  考慮之，其中  $M_P$  為梁構件在柱面處標稱彎矩強度。為降低柱面處應力，梁構件在塑鉸處考慮材料變異性與應變硬化效應所引致之柱面應力大小，可利用  $\alpha$  值調整之，此  $\alpha$  值表示在柱面處彎矩需求與實際彎矩容量之比值，設計時建議  $\alpha$  值不小於 0.85 且不大於 1.0。依圖 4 之需求彎矩梯度，強度減弱型梁柱接合之梁構件在斷面減弱區域中點的標稱彎矩強度需求  $M_{PR}$  可由下式求得。

$$M_{PR} = \frac{\alpha}{C_{pr}} \frac{L_h}{L_b} M_P \quad (1)$$

其中  $L_b$  與  $L_h$  分別為梁反曲點至柱面與塑鉸間距離。

3. 強度增強型梁柱接合：此類接合是在梁端從柱面起選擇一段區域增加梁斷面強度，迫使梁塑鉸位於補強段遠離柱面之端點，以提供做為梁柱接合之塑性變形發展來源。一般梁構件強度的增強可藉由增加梁構件深度或斷面積的方法達成。雖然不同形式之強度減弱型梁柱接合有其個別之設計方法，但基本

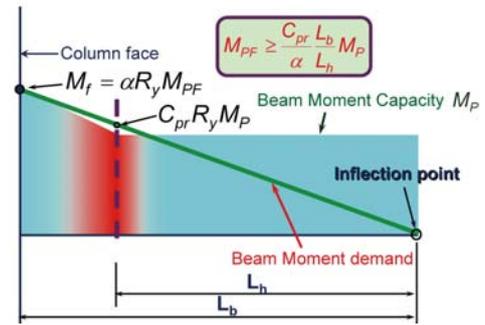


圖 5 強度增強型梁柱接合之梁彎矩需求與彎矩容量關係圖

之力學設計原理可以圖 5 之梁彎矩需求與彎矩容量關係圖說明。

強度增強型梁柱接合之設計原理與強度減弱型梁柱接合者相同，在梁與柱構件之反曲點約分別發生於構件中點的假設，及強柱弱梁的耐震設計基本原則要求下，抗彎構架系統之塑鉸預期發生於梁端，當進行梁端與柱之彎矩接合時，其梁彎矩需求可假設梁中點彎矩為零，並往梁柱接頭方向依線性比例增加之彎矩梯度決定之，如圖 5 所示。在「梁塑鉸遠離柱面，降低柱面強度需求」之設計原則要求下，就強度增強型梁柱接合而言，梁端從柱面起一特定距離內，利用適當方法增加梁斷面之彎矩強度容量，使塑鉸位於強度增強段遠離柱面之端點，以提供梁塑鉸變形。為確保所設計之梁柱接合能順利發展完整之塑鉸彎矩強度，其彎矩需求應考慮塑鉸處材料變異性與應變硬化之超強效應，其斷面減弱後之彎矩強度為  $C_{pr} R_y M_{PR}$ ，如圖 5 中所示，其中  $C_{pr}$  為鋼材之應變硬化因子，可根據 FEMA-350<sup>[16]</sup> 建議，其應變硬化應力取材料降伏應力與極限應力之平均值，所以  $C_{pr} = (F_y + F_u) / 2 F_y$ ； $R_y$  為材料超強因子，即材料實際與標稱降伏強度的比值。就梁彎矩容量而言，若增強型梁柱接合之梁構件在柱面與塑鉸間之補強材料採用與梁構件相同之材質，梁構件在柱面處補強後彎矩容量，可以考慮與塑鉸處相同材料變異性之實際塑性彎矩強度  $R_y M_{PF}$  設計之，其中  $M_{PF}$  為梁構件在柱面處補強後之標稱彎矩強度。為降低柱面處應力，梁在塑鉸處考慮材料變異性與應變硬化效應所引致之柱面應力大小，可利用  $\alpha$  值調整之，此  $\alpha$  值表示在柱面處彎矩需求與實際彎矩容量之比值，設計時建議  $\alpha$  值不大於 1.0。依圖 5 之需求彎矩梯度，強度增強型梁柱接合之梁構件在柱面處經補強後之斷面標稱彎矩強度需求  $M_{PR}$  可由下式求得。

$$M_{PF} = \frac{C_{pr} L_b}{\alpha L_h} M_P \quad (2)$$

其中  $L_b$  與  $L_h$  分別為梁反曲點至柱面與塑鉸間距離， $M_P$  為塑鉸發生處梁斷面之標稱彎矩強度。

在進行梁柱接合設計時，對於典型建築結構而言，一般由重力載重所造成之彎矩效應較地震力所造成者不顯著，故在結構設計實務上，可簡化依單純地震力所造成之線性彎矩梯度，做為梁構件之強度需求，進行增強或減弱型梁柱接合之塑鉸初步設計，以取代來自不同方向之地震力與不同重力載重類型等作用下複雜的組合載重彎矩需求。但應特別注意，若作用於梁構件上之重力載重效應相對顯著時，其考慮重力載重後之塑鉸位置，將明顯地在考慮地震力作用下之塑鉸位置隨著不同組合載重的影響前後移動，因此應考慮重力效應之影響。

## 試驗驗證合格之梁柱耐震接合

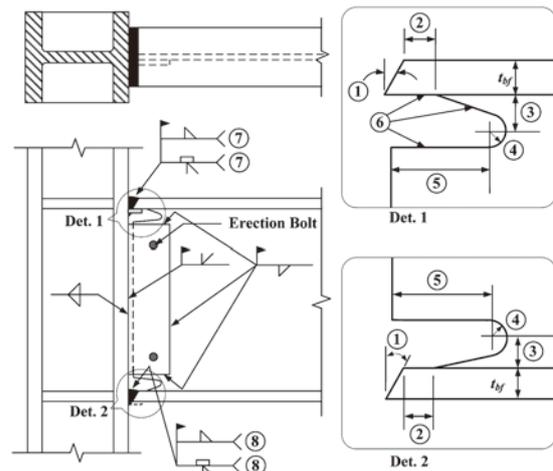
本文所收錄之三類梁柱接合型式，其主要目的是降低當梁柱接合在梁端發展最大預期之塑鉸彎矩強度後，於柱面所引致之應力。除細節改良型梁柱接合是希望藉由採用減少梁斷面劇烈變化之細節，以降低接合處應力集中效應外，強度減弱型與強度增強型梁柱接合，均採用強迫方式將梁塑鉸移出柱面，達到降低梁與柱構件接合應力之目的。當然將強度減弱型或強度增強型之梁柱接合，同時複合採用細節改良型接合之細節，其梁柱接合可獲得更良好的變形容量。

### 接合細節改良型梁柱接合

為避免梁腹板因鉚接所需扇形開孔之應力集中效應所造成之破壞，過去相關研究可分為兩方向，一者將扇形開孔在與梁翼相交側平滑處理，避免幾何形狀之突然變化，進而降低應力集中效應；另一者則取消扇形開孔的開設，以阻隔因扇形開孔所造成之應力集中效應。後者之接合不利於現場鉚接施工，故大多用於工廠鉚接之拱頭式梁柱接合。本節介紹兩種細節改良型梁柱接合，包括特殊鉚接扇形開孔型梁柱接合與無鉚接扇形開孔型梁柱接合。

#### ● 特殊鉚接扇形開孔型梁柱接合

此接合是由 Ricles 等人<sup>[17]</sup>在 SAC Steel Project 架構下，提出有效提升鉚接式抗彎接合變形能力之鉚接扇形開孔改善細節（如圖 6 所示，本文簡稱為美式扇形開



- ① 開槽角度依不同之全滲透鉚程序，須符合 AWS D1.1 節之規定。
- ② 此長度取梁翼厚度  $t_{bf}$  或 13 mm (1/2 in.) 之大值 (可加上 1/2 tbf 或減掉 1/4  $t_{bf}$ )。
- ③ 此高度取距梁翼內緣  $3t_{bf}/4$  至  $t_{bf}$ ，或 19 mm (3/4 in.)  $\pm$  6.5 mm (1/4 in.)，取大者。
- ④ 圓弧半徑應大於 9.6 mm (3/8 in.)。
- ⑤ 此長度為  $3t_{bf}$  ( $\pm$ 13 mm (1/2 in.))。
- ⑥ 此處之切割方法與表面平滑需求，請參照 FEMA-353 之規定。
- ⑦ 上翼板背墊板不須移除，在背墊板與柱翼板加鉚填角鉚。
- ⑧ 下翼板背墊板須移除、挖鑿、磨光，再以鉚道填滿，並加鉚填角鉚。

圖 6 特殊鉚接扇形開孔細節型接合

孔)，針對此鉚接扇形開孔改善接合，進行非線性有限元素分析與實尺寸梁柱接合試驗研究。試驗結果顯示，沒有任何一組試體之破壞是由扇形開孔處開始發展，且不論是單梁或雙梁試體均具有 0.03 弧度以上之塑性轉角變形能力。由於單純採用此講究之特殊扇形開孔細節，而不必增強或減弱梁端彎矩強度，即可大幅提升梁柱接合之變形能力，達到美國鋼結構設計規範耐震特別規定特殊抗彎構架梁柱接合 ANSI/AISC 341-10<sup>[2]</sup>之變形需求，故被 ANSI/AISC 358<sup>[1]</sup>收錄為符合特殊抗彎構架系統梁柱接合變形需求之預先驗證合格接合。雖然此接合型式僅在應用於 H 型柱時經驗證具有充分的變形能力，但一般認為此接合細節應用於箱型柱時，也能大幅降低因鉚接扇形開孔所造成之應力集中效應。

#### ● 無鉚接扇形開孔細節型接合

日本部分相關研究學者，致力於研發無腹板鉚接扇形開孔 (no scallop) 的接合細節，在日本鋼構造建築結構工程實務中，此接合細節大多應用於工廠製作之拱頭式梁柱接合。真喜志卓教授等人在 1993 年針對此無鉚接扇形開孔梁柱接合之研究成果<sup>[18]</sup>顯示，採用無鉚接扇形開孔之接合細節，且配合梁腹全滲透鉚接之 H 型梁接鋼管柱接合，具有 3.5% 弧度以上之接合變形能力。故此無鉚接扇形開孔之接合細節已被收錄於日本「鐵骨工事技術指針・工場製作編」<sup>[19]</sup>之施工技術標準中。

國內相關研究成果<sup>[20]</sup>也針對無鉚接扇形開孔之實

尺寸梁與箱型柱接合試體進行試驗研究，試體梁以拱頭型式預先於工廠以銲接與箱型柱接合。梁與柱構件之接合細節（如圖 7），此乃基於前述日本無銲接扇形開孔之接合細節為基礎，以避免因銲接扇形開孔的存在而引致應力集中效應。梁柱接合之主要特徵與細節詳「鋼構造梁柱抗彎接合設計手冊」<sup>[8]</sup>。試驗結果顯示，即使未對梁端強度做任何調整，此採用拱頭式且無銲接扇形開孔之全電銲型廠銲梁柱接合（詳圖 7 所示），可提供 4% 弧度以上之總變形轉角及 3% 弧度以上之塑性轉角能力。

### 強度減弱型梁柱接合

強度減弱型梁柱接合是在梁構件上距柱面適當距離處，以減少梁斷面積之方法降低梁彎矩強度，確保梁塑鉸能在斷面減弱區順利發展，進而降低柱面處的應力需求，使梁柱接合能發揮足夠的韌性。本文收集三種強度減弱型梁柱接合，如圖 8 所示，包括：

- (a) 梁翼圓弧切削減弱型接合；
- (b) 梁翼梯形切削減弱型接合；
- (c) 梁翼鑽孔減弱型接合。

對於此類梁柱接合之特徵分別概述如下，其餘有關材質、構件斷面型式及製作方法、試體規模及接合細節、與梁柱接合試驗性能，及相關接合與施工細節參考圖說，參閱文獻「鋼構造梁柱抗彎接合設計手冊與參考圖」<sup>[8]</sup>一書。

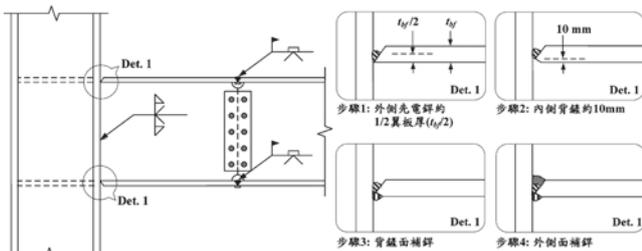
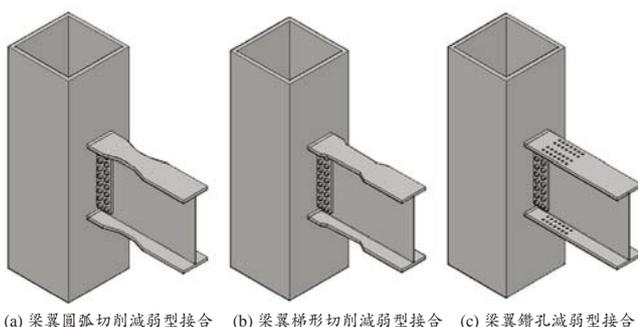


圖 7 無銲接扇形開孔細節型接合參考圖



(a) 梁翼圓弧切削減弱型接合 (b) 梁翼梯形切削減弱型接合 (c) 梁翼鑽孔減弱型接合  
圖 8 強度減弱型梁柱接合

#### ● 梁翼圓弧切削減弱型接合

梁翼圓弧切削減弱型梁柱接合，如圖 8(a) 所示，乃是在梁構件上離柱面一適當距離處，於梁上下翼板之適當區域內採圓弧形狀對稱切削，使得梁柱接合在地震力作用下所產生的塑性轉角主要集中在切削區，並預期在柱面接合區的需求彎矩不超過其塑性彎矩強度，避免銲接處因材料不連續所造成的脆性破壞。美國 Engelhardt 教授研究團隊之研究成果<sup>[21]</sup>證實，採用梁翼圓弧切削的梁柱接合，其強度與變形能力均能達到設計預期，且其非線性變形能力顯著優於北嶺地震前之傳統梁柱接合者。在 2000 年，美國 FEMA 350 文件<sup>[16]</sup>對新建鋼骨抗彎構架建築之耐震設計準則建議中，將梁翼圓弧切削減弱型梁柱接合列為預先驗證合格之耐震梁柱接合，此梁柱接合亦收錄於美國規範 ANSI/AISC 358-10<sup>[1]</sup>中，為符合特殊抗彎構架變形需求之法定預先驗證合格梁柱接合。在 FEMA 350 與 ANSI/AISC 358-10 中，梁翼圓弧切削細節被命名為 reduced beam section，簡稱 RBS。由於梁翼圓弧切削的設計與施工製作簡單，在工程界頗受歡迎，全球已有大量的應用案例。

#### ● 梁翼梯形切削減弱型接合

梁翼梯形切削減弱型梁柱接合，如圖 8(b) 所示，在梁構件上距柱面一適當距離的範圍，對梁上下翼板依線性漸變之形式進行對稱切削，此線性漸變之梯形切削區，是依據梁彎矩需求梯度變化而切割，確保梁柱接合在地震力作用下所產生的塑性轉角集中於整段切削區內，形成一擴大塑性區，以期控制柱面接合處之應力發展，進而有效降低脆性破壞的發生機率。此強度減弱型梁柱接合型式是由陳生金教授主持之研發團隊提出，並在相關研究成果<sup>[22]</sup>中建議，切削範圍內的梁翼切削量應依極限需求彎矩折減 5~10% 設計之，以確保梁構件在柱面處不會發生顯著的非線性行為。由於此接合的設計與施工製作簡單，目前在國內業界已有大量的使用案例。

#### ● 梁翼鑽孔減弱型接合

梁翼鑽孔減弱型梁柱接合，如圖 8(c) 所示，乃是在梁構件上離柱面一適當距離處，對特定範圍內之梁上下翼板，利用鑽孔降低此範圍之彎矩強度，以期梁柱接合在地震力作用下所產生的塑性變形集中在鑽孔區，降低梁構件傳遞至柱面接合處的彎矩需求，進而減少接合處發生脆性破壞的機率。梁翼鑽孔減弱型梁柱接合雖未被收錄在 FEMA 350 文件<sup>[16]</sup>中，但過去國內相關的實

尺寸梁柱接合試驗結果<sup>[23,24]</sup>顯示其仍具有不錯的韌性表現。就孔徑分布而言，沿梁軸向方向，孔徑可分為相同直徑、亦可採用非相同直徑以符合彎矩梯度分布。但使用非相同孔徑時，應考慮其施作的可行性。

## 強度增強型梁柱接合

強度增強型接合是在梁構件上從柱面至距柱面適當距離範圍內，以增加梁斷面積之方法，提高該範圍之梁彎矩強度，以符合梁塑鉸遠離柱面，降低柱面應力需求之設計原理，確保梁塑鉸在補強區遠離柱面端部或補強區內預期發生處發生，以發揮足夠的非線性變形，使梁柱接合能符合規範要求之變形需求。本文收集四種強度增強型梁柱接合，如圖 9 所示，包括：

- (a) 梁翼蓋板增強型接合；
- (b) 梁擴翼板增強型接合；
- (c) 加長單肋板增強型接合；
- (d) 梁翼內側板或加勁板增強型接合。

對於此類梁柱接合之特徵分別概述如下，其餘有關材質、構件斷面型式及製作方法、試體規模及接合細節、與梁柱接合試驗性能，及相關接合與施工細節參考圖說，參閱文獻「鋼構造梁柱抗彎接合設計手冊與參考圖」<sup>[8]</sup>一書。

### ● 梁翼蓋板增強型接合

在利用增加梁端彎矩強度提升變形能力之梁柱接合型式中，增加梁翼板斷面積為直接增加梁彎矩強度最有效率的方法之一，因此在梁上下翼板外緣直接貼鉚鋼

板，除可有效提升梁彎矩強度外，對於建築使用空間的影響較為有限，同時可調整此貼鉚鋼板形狀，以符合梁構件在與柱接合附近範圍內之彎矩梯度，達到降低梁柱接合界面之應力，有效將塑鉸移出柱面之目的，此接合稱為「梁翼蓋板增強型梁柱接合」，詳圖 9(a)。過去國內外相關研究<sup>[25-27]</sup>也證實，採用適當的設計方法與接合細節，蓋板增強型梁柱接合具有韌性能力佳的特性。

### ● 梁擴翼板增強型接合

梁擴翼板增強型接合即利用增加梁翼板寬度以增加梁構件斷面彎矩容量。採用此方法之梁柱接合，是在梁構件從柱面起選擇一補強段，在此補強段額外增加梁翼板寬度，梁翼板所增加之寬度尺寸可依地震力之彎矩需求設計，以達到降低柱面應力需求，迫使梁塑鉸遠離柱面之強度設計原則。本文介紹兩類分別為切割擴翼板增強型梁柱接合與鉚接擴翼板增強型梁柱接合，如圖 9(a)、9(b) 所示，主要差異是在梁擴翼板之製作方式與形狀不同，前者擴翼板以較大面積之鋼板切割而得，後者擴翼板則在原梁構件翼板寬度方向兩側各額外增鉚鋼板。在採用切割型擴翼板之梁柱接合中，文獻<sup>[28,29]</sup>稱擴翼板增強部份為 widened flange，在擴翼部份由一平行段與圓弧曲線斷組成。在採用鉚接型擴翼板之梁柱接合中，相關文獻<sup>[25,20]</sup>稱此擴翼增強鉚接鋼板為 wing plate，該文獻中擴翼增強部份採用直線轉換。從施工性的角度而言，切割型擴翼板較適用於組合型 (built-up) 鋼梁，為考慮節省鋼材使用量，較適合工廠鉚接組合之拱頭式接合。鉚接式擴翼板可容易以鋼板鉚接製作而成，因此適用組合型式熱軋型 (hot-rolled) 鋼梁斷面，同時也適用現場鉚接接合或工廠鉚接之拱頭式接合。但無論如何，擴翼板的幾何特性對建築設備常配置於柱邊所需之管道空間的影響較大。

### ● 加長單肋板增強型接合

傳統梁腹栓接、梁翼鉚接 (BWFF) 之梁柱接合，在過去震害調查與試驗研究經常發現，梁翼板在梁腹鉚接扇形開孔附近發生破壞，其原因為梁翼板在梁柱接合處附近，因梁腹傳統 1/4 圓鉚接扇形開孔造成較高之應力集中效應所致。因此陳誠直教授為改善梁腹鉚接扇形開孔附近梁翼板之應力集中效應，且改進 Anderson and Duan<sup>[30]</sup>採用三角形單肋板之補強型式，提出加長單肋板增強型梁柱接合<sup>[31]</sup>，如圖 9(d) 所示。單肋板可配置與梁腹板及柱腹板於同一平面，因此可有效降低梁翼在鉚接扇形開孔附近之應力集中效應。但在三角形肋板末端之

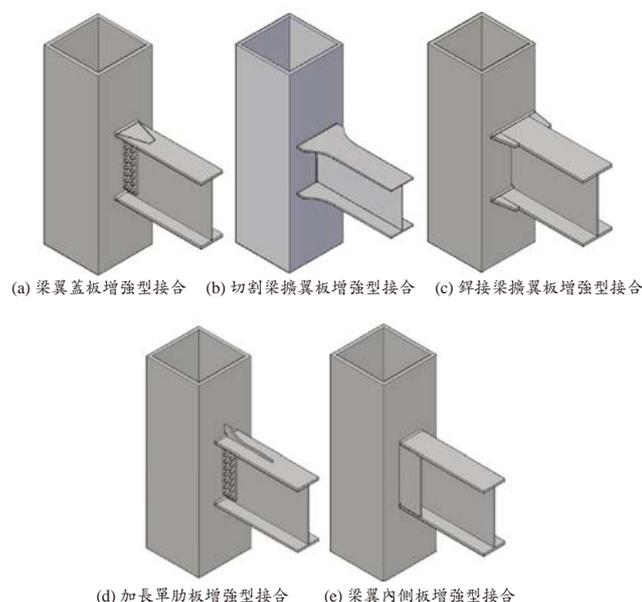


圖 9 強度增強型梁柱接合

梁翼板處也將產生可觀的集中應力，因此採用加長單肋板將三角形垂直單肋板之末端延長，將梁彎矩需求一容量比降低至一定比例，避免發生不符預期之翼板破壞。

● 梁翼內側板增強型接合

美國北嶺地震發生後，世界各地研究學者研發許多強度增強型之梁柱接合，許多強度增強型之梁柱接合，普遍於梁之上下翼板外側加裝各種不同型式的鋼板，但若欲對既有鋼構造建築物進行耐震補強，或其梁柱接合於施工完成後需進行強度提升時，因有 RC 樓板的存在，採用前述減弱型或增強型之梁柱接合，其施工難度相對較高。有鑑於此，為克服上述補強施工的困難，周中哲教授針對箱型柱梁柱接合提出在梁翼板內側配置鋼板<sup>[32]</sup>之梁柱補強接合型式，稱之為梁翼內側板增強型接合，如圖 9(e) 所示，提升補強施工之便利性。雖然此接合因補強工程而研發，但其耐震能力仍適用於新建工程。

銲接扇形開孔 (weld access hole) 細節

根據北嶺地震後針對抗彎構架鋼結構建築結構之震害調查報告發現，部分採用傳統 1/4 圓銲接扇形開孔 (weld access hole) 之梁柱接合 (如圖 10(a))，在梁翼板靠近梁腹板因銲接所需之扇形開孔附近發生斷裂。因此，美國現行鋼結構建築設計規範，為確保特殊耐震抗彎構架中所採用之梁柱接合能發揮足夠之耐震性能，對此梁柱接合之要求極為謹慎，無論梁柱接合採用增強型或減弱型，工地現場銲接之梁柱接合必須同時配合改良細節，其細節包括：(a) 腹板扇形開孔在與梁翼板之接合角度須採用平緩之開孔細節，(b) 梁下翼板與柱翼板銲接之背墊板 (backup bar) 必須背剷移除且挖鑿，並銲接填滿與增加填角銲，(c) 梁上翼板之銲接背墊板與柱翼板間增銲填角銲。此細節除避免力學行為不良的銲接扇形開孔形式外，也消除梁翼銲接背墊板與柱板間之天然裂縫，現在已成為美國鋼造特殊抗彎構架梁柱接合之標準細節，是從北嶺地震事件慘痛的教訓中學習而得。

而在台灣鋼結構建築工程實務中，因鋼構廠製造技術與施工成本無法取得平衡，因此過去常使用 1/4 圓之梁腹板扇形開孔，近年來，隨著機械自動開孔技術的進步，雙圓弧扇形開孔 (如圖 10(b) 所示) 之自動開孔設備的研發成功與應用普及，此扇形開孔之製作成本較美式扇形開孔者 (如圖 10(c) 所示) 大幅降低，且有助於梁柱接合在梁塑鉸彎矩作用下，舒緩扇形開孔附近之梁翼因幾何形狀

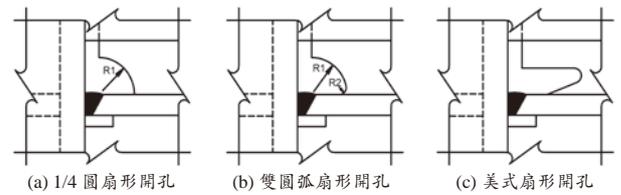


圖 10 梁腹板扇形開孔

大幅變化所造成之應力集中效應。過去針對台灣鋼結構工程實務所製作之 22 組實尺寸鋼梁接箱型柱梁柱接合試體的試驗結果<sup>[15]</sup>顯示，採用 1/4 圓之腹板扇形開孔，即使用於強度減弱型之梁柱接合，仍然使得梁翼板在扇形開孔尖端附近，在未達規範要求之變形容量前即發生斷裂，此破壞為所有破壞模式中發生比例最高，分別占有所有試體組數與發生破壞試體組數的 23% 與 38%。因此建議國內結構工程師，不論在採用上述減弱型或增強型梁柱接合時，其腹板因銲接所需之銲接扇形開孔應避免使用 1/4 圓之形式。同時在無法採用比雙圓弧更講究之扇形開孔時，雙圓弧扇形開孔為適當的扇形開孔選項，惟在製作此雙圓弧扇形開孔時，建議以機械銑具自動化一次同時開孔，避免採用人工焰切施作或兩圓弧分別加工。

箱型柱內橫隔板電熱熔渣銲製作

在台灣鋼構造建築結構常用之箱型柱構件一般採用由四塊鋼板組合而成，此箱型柱為順利傳遞梁端彎矩，一般在梁柱接合區之箱型柱內部於梁翼板所對應之高程處配置橫隔板 (diaphragms)，橫隔板與箱型柱四片鋼板之接合，習慣上一組相互面對之兩接合面採用全滲透銲 (fully penetration weld, FP)，另一組採用電熱熔渣銲 (electroslag welding, ESW) 或電熱氣體電弧銲接 (electro gas welding, EGW)，如圖 11 所示。

過去相關研究<sup>[15,25,27]</sup>顯示，箱型柱內橫隔板之 ESW 銲道可能發生銲道偏斜，而導致與此銲道接合之梁柱接合造成明顯韌性不足的脆性破壞，詳圖 12。基於現行 NDT 技術與經濟因素之考慮，UT 垂直檢測法為檢測鋼骨箱型柱內橫隔板 ESW 銲道最常見的檢測方法。但研究成果<sup>[33]</sup>顯示，採用台灣國家標準 CNS 12618 附件 A

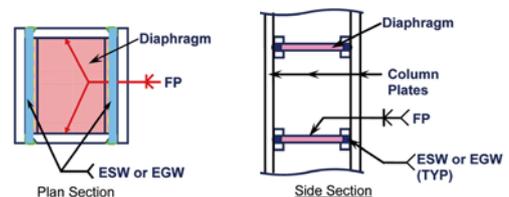
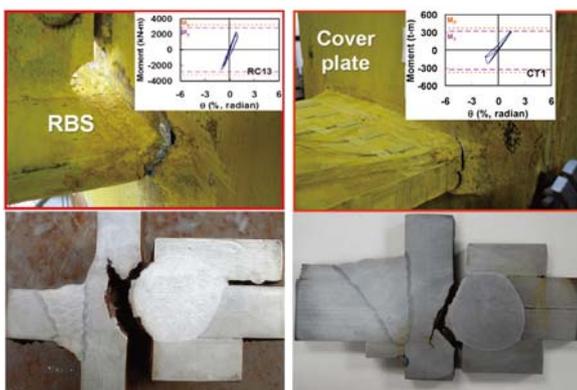


圖 11 箱型柱與柱內橫隔板製造示意圖

「鋼結構箱形斷面超音波直束檢測法」<sup>[34]</sup> 規定之探頭，無法獲得準確之 ESW 銲道熔幅檢測結果，且現行 ESW 銲接程序不易得到穩定的銲道品質，同時高入熱量之單道 ESW 銲接嚴重導致熱影響區的脆化現象。因此為確保箱型柱內橫隔板之 ESW 銲道有足夠之熔幅，文獻 [33] 針對箱型柱內橫隔板之 ESW 銲道的銲接細節、UT 垂直檢測程序與檢驗合格標準提出以下建議：

1. 採用如圖 13 之 ESW 側視板細節或其他可行之製作細節，增加 ESW 銲道與柱板熔接寬度，建議大於橫隔板梁側各至少 5 mm。
2. UT 檢測 ESW 銲道熔幅時，務必確實依據 CNS 12618 附件 A 之「鋼結構箱形斷面超音波直束檢測法」，將柱內橫隔板邊緣位置引至柱板外側，如圖 14 所示，做為檢測 ESW 銲道熔幅是否符合規定之依據。
3. 建議採用與日本建築學會<sup>[35]</sup> 規定相同之直徑 10 mm/ 頻率 5 MHz 探頭，做為 UT 檢測箱型柱內橫隔板 ESW 銲道熔幅之探頭。
4. 建議箱型柱內橫隔板 ESW 銲道熔幅邊界應超出內橫隔板厚度外 3 mm，做為 UT 熔幅檢測之合格標準。

關於箱型柱內橫隔板電熱熔渣銲道對梁柱接合之影響，詳見文獻 [33]。



(a) 梁翼切削減弱型梁柱接合 (b) 梁翼加蓋板增強型梁柱接合

圖 12 箱型柱內橫隔板電熱熔渣銲道破壞情形<sup>[27]</sup>

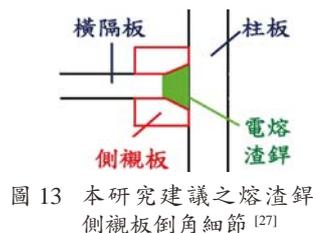


圖 13 本研究建議之熔渣銲側視板倒角細節<sup>[27]</sup>



圖 14 箱型柱電熱熔渣銲道之熔填池邊緣引至柱板外側並打點標定<sup>[23]</sup>

## 結論與建議

本文主要介紹鋼骨梁接箱型柱之預先驗證合格的抗彎耐震接合資料庫，所有梁柱接合均須符合下列原則：

- (1) 發表於公開場合，可獲得相關試驗條件與成果者、
- (2) 實尺寸試驗研究成果者、
- (3) 強度及變形容量符合美國或台灣規範要求者、
- (4) 有明確設計邏輯與方法，足以提供做為設計依據者，使所收集之梁柱接合能更客觀且具公信力。以下提出幾點結論與建議。

1. 現行台灣與美國鋼結構建築設計規範，對韌性抗彎構架系統之梁柱接合變形需求規定略有不同。台灣規範採用性能設計之概念，可考慮彈性靜力或非線性動力分析結果，可以獲得不大於最大 3% 弧度之塑性轉角 (plastic rotation angle) 決定之變形需求；就美國規範而言，則要求每個梁柱接合均須至少具有 4% 弧度之層間位移角 (story drift angle) 容量。雖然變形轉角定義不同，但對於建築結構常用之構件尺寸規模，彈性變形約為 1% 弧度，因此，就塑性轉角 3% 弧度與層間位移角 4% 弧度而言，兩者之變形需求等級大致相同。
2. 對於上述變形需求之梁柱接合試驗強度認定，台灣規範要求其試驗強度衰減至最大試驗強度 90% 以上之變形認定有效，而美國規範則規定其試驗強度衰減至標稱強度 80% 以上之變形認定有效。就此認定有效變形之強度而言，台灣規範的認定標準較美國規範者嚴格。
3. 本文共收集九種耐震梁柱接合型式，其變形容量均滿足台灣或美國規範對 SMF 系統之要求，接合型式區分為三類，分別為：
  - (a) 接合細節改良型梁柱接合：包括特殊銲接扇形開孔型梁柱接合與無銲接扇形開孔型梁柱接合；
  - (b) 強度減弱型梁柱接合：包括梁翼圓弧切削減弱型接合、梁翼梯型切削減弱型接合、與梁翼鑽孔減弱型接合；
  - (c) 強度增強型梁柱接合：梁翼蓋板增強型接合、梁擴翼增強型梁柱接合、加長單肋板增強型接合、與梁翼內側板增強型接合。

提供工程師進行實際梁柱接合設計時，有更多元的梁柱接合型式做為評估與選擇。

1. 建議梁柱接合之銲接扇形開孔應避免採用 1/4 圓形式，應選擇有助於降低應力集中效應之扇形開孔形式，並須以銑孔之機械加工方式製作，勿以手工焰切方式施作，避免手工切割之不平整與局部入熱，

導致應力集中效應加劇。

- 應落實箱型柱內橫隔板電熱熔渣鐸道製作與檢驗的品質控制與管制，以確保本文所介紹之預先驗證合格之梁柱接合能完全有效地應用於箱型柱構件。

## 參考文獻

- AISC (2010a), Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- AISC (2010b), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- 內政部營建署 (2007a), 「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範—鋼結構容許應力設計法規範及解說」, 內政部營建署, 台北。
- 內政部營建署 (2007b), 「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」, 內政部營建署, 台北。
- Youssef, N.F.G., Bonowitz, D., and Gross, J.L. (1995), "A survey of steel moment-resisting frame, buildings affected by the 1994 Northridge Earthquake," Report No. NISTIR 5625, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Tremblay, R., Timler, P., Bruneau, M. and Filiatrault, A. (1995), "Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake," Canadian Journal of Civil Engineering, 22(2), pp. 338-360.
- Krawinkler, H. (1996), "Earthquake design and performance of steel structures," Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 29(4), pp. 229-241.
- 中華民國結構學會 (2013), 「鋼構造梁柱抗彎接合設計手冊與參考圖」, 科技圖書公司, 台北。
- AISC (1992), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- AISC (1997), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-97, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- AISC (2002), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-02, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- AISC (2005), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-05, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- 內政部營建署 (1999a), 「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範—鋼結構容許應力設計法規範及解說」, 內政部營建署, 台北。
- 內政部營建署 (1999b), 「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」, 內政部營建署, 台北。
- 林克強、莊勝智、張福全、張柏彥 (2008), 「台灣典型鋼梁與箱型柱採梁翼切削或梁翼加蓋板抗彎接頭之破壞模式」, 鋼結構耐震設計與分析研討會 (台南場次) 論文集, 國家地震工程研究中心, 研究報告 NCREE-08-037。
- FEMA (2000), "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings," FEMA Report No. 350, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Ricles, J.M., Mao, C., Lu, L.W. and Fisher J.W. (2000), "Development and evaluation of improved ductile welded unreinforced flange connections," Report No. SAC/BD-00/24, SAC Joint Venture, Sacramento, California.
- 真喜志卓、筒井茂行、上森博、森田耕次、山本昇、藤沢一善、石井匠 (1993), 「ノンスカラップ梁端溶接接合部の変形能力に

関する実験: その 1. 実験計画」, Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Structures II, 1257-1258, 1993-07-25. (in Japanese)

- 日本建築學會 (2007), 「鉄骨工事技術指針・工場製作編」, 日本建築學會, 東京。(in Japanese)
- 林克強、莊勝智、林志翰 (2013), 「拱頭式鋼骨抗彎梁柱接合耐震性能研究」, 國家地震工程研究中心, 研究報告 NCREE-13-018。
- Engelhardt, M.D., Winneberger, T, Zekany, A.J., and Potyraj, T.J. (1998) "Experimental investigation of dogbone moment connections," Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Vol. 35, No. 4, pp. 128-139, Fourth Quarter.
- 陳生金、陳舜田、葉禎輝、周作隆 (1996), 「強裂地震下鋼骨結構梁柱接頭之破壞及高韌性接頭之開發」, 結構工程, 第十一卷, 第四期, 第 19-37 頁。
- 陳嘉有 (1995), 「韌性鋼骨梁柱接頭行為研究」, 國立台灣大學土木工程學系碩士論文, 蔡克銓教授指導。
- 林克強、莊勝智、林志翰 (2013), 「梁翼鑽孔式與無加勁式鋼骨梁柱接合耐震性能研究」, 國家地震工程研究中心, 研究報告 NCREE-13-019。
- Tsai K.C. and Lin, K.C. (1992), "Effect of flange stiffeners on seismic beam-to-box column connections," Report No. NTU/CEER R81-01, Center for Earthquake Engineering Research, National Taiwan University. Project No.: NSC-81-0414-p-002 -10-B.
- Engelhardt, M.D. and Sabol, T.A. (1998), "Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations," Engineering Structures, 20(4-6), pp. 510-520.
- 林克強、莊勝智 (2010), 「箱型柱與梁翼加蓋板補強抗彎接頭之韌性行為與設計方法」, 結構工程, 第二十五卷, 第二期, 第 75-92 頁。
- Chen, C.C., Lin, C.C. and Lin, C.H. (2006), "Ductile moment connections used in steel column-tree moment-resisting frames," Journal of Constructional Steel Research, 62(8), pp. 793-801.
- Chen, C.C. and Lin, C.C. (2013), "Seismic performance of steel beam-to-column moment connections with tapered beam flanges," Engineering Structures, 48, pp. 588-601.
- Anderson, J.C., and Duan, X. (1998), "Repair/Upgrade Procedures for Welded Beam to Column Connection," Report No. PEER98-03, University of Southern California.
- 陳誠直、呂正安、王亭復 (2003), 「以加長型單肋板提昇鋼構造梁柱接頭之耐震性能」, 結構工程, 第十八卷, 第三期, 第 19-34 頁。
- 周中哲、蔡克銓、汪永宇、饒智凱 (2010), 「鋼造梁柱側板補強接頭耐震設計及行為」, 中國土木水利工程學刊, 第二十二卷, 第一期, 第 85-97 頁。
- 林克強、莊勝智、李昭賢、林志翰 (2014), 「鋼骨箱型柱內橫隔板電熱熔渣鐸道檢測方法與製作細節建議」, 第八屆海峽兩岸及香港結構技術交流會, 台北, 台灣, 6-7 November, 2014。
- CNS (2000), CNS 12618, 「鋼結構鐸道超音波檢測法」, 附件 A 鋼結構箱形斷面超音波直束檢測法, 中國國家標準, 台灣, 民國 89 年 7 月 29 日。
- AIJ (2008), 鋼構造建築熔接部の超音波探傷檢查規準・同解説, 日本建築學會。