

鋼構造建築物崩塌性能及震災韌性提升計畫

張廷皓¹ 張豐選¹ 吳東諭²

¹國立台灣大學土木系 碩士生;

²國立台灣大學土木系 助理教授; E-mail: tungyuwu@ntu.edu.tw

鋼構架因其優越之強度重量比及延性，一直被視為具有高抗震能力之結構系統且廣泛應用於強震區之中高樓層建築中。本研究團隊為進一步提升鋼構造建築物之耐震性能，採用高擬真及高精度之有限元素模型，探討鋼構造建築物於地震下之崩塌行為及進行災損評估，所探討之參數包括鋼柱之斷面性質、梁柱接頭之接合型式及側撐需求、耐震規範之演進、以及鋼構造之高擬真模擬方法。以下就本研究團隊近年之研究方向與成果，作一概略性之介紹。

1. 初始幾何缺陷對特殊抗彎矩構架崩塌性能之影響

在熱軋寬翼型鋼材料的製造、運輸、組建中都會有初始幾何缺陷(Initial geometric imperfection)(IGIs)的產生，而在一般的有限元素法分析中，通常假設 IGIs 為一由挫曲模態疊加之初始位移場，其大小依 AISC(2016a)[1] 及 ASTM(2019)[2] 中規定之寬翼型鋼製作公差所設定[3][4]。然而，此 IGI 建模之基礎理論薄弱，且是以一確定性方法模擬一隨機效應。

Padilla-Illano 等人[5]亦使用攝影量測、雷射掃描和千分錶法等三種不同方法量測冷軋 C 型鋼斷面之缺陷分布，其中前兩者為非接觸式量測方法，相較於手動量測(接觸式量測)可提供更詳盡之缺陷分布訊息(如 3D 點雲)。Selvaraj 等人[6]對冷軋 C 型鋼斷面進行雷射量測，定義不同的缺陷組合來計算量測缺陷大小，將斷面幾何性質(細長比、腹板翼板寬厚比)對缺陷大小進行迴歸分析。

上述 IGIs 之研究皆以冷軋型鋼(CFS)為探討對象，據本研究團隊所知，目前針對熱軋寬翼型鋼構件 IGIs 之相關研究不多且多為早期研究，而並未針對特殊抗彎矩構架之崩塌性能有所探討。因此本研究團隊使用高擬真之有限元素模型，量化不同假設之 IGIs 對特殊抗彎矩構架(SMFs)其崩塌性能之影響。

本研究透過一四層樓特殊抗彎矩構架(SMF)之崩塌性能探討 IGIs 對結構系統層級之影響。採用之構架原型由 NIST[7]設計，為一三跨、跨距為 6.1 m 之 SMF，並使用 W24 之深寬翼鋼柱及梁翼切削減弱式之梁柱韌性接頭(RBS)，構架平面如圖 1(a)所示。

有限元素模型利用 LS-DYNA[8]建立，如圖 1(b)所示，其中此模型由殼元素所組成，並使用應變硬化材料(MAT_153)[9]模擬結構鋼 A992 之材料性質。SMF 底端假設完全固定，並利用束制面外位移以模擬側向支撐，及藉由靠桿考慮構架之 P-Delta 效應。將結構之樓層載重分擔至 SMF 後，其一樓外柱之初始軸力為 $0.18P_y$ ，其中 P_y 為柱斷面之降伏力。構架之有限元模型一共由 96,000 個元素組成，其細節及構架原型可詳見 Wu 等人之研究[10]。

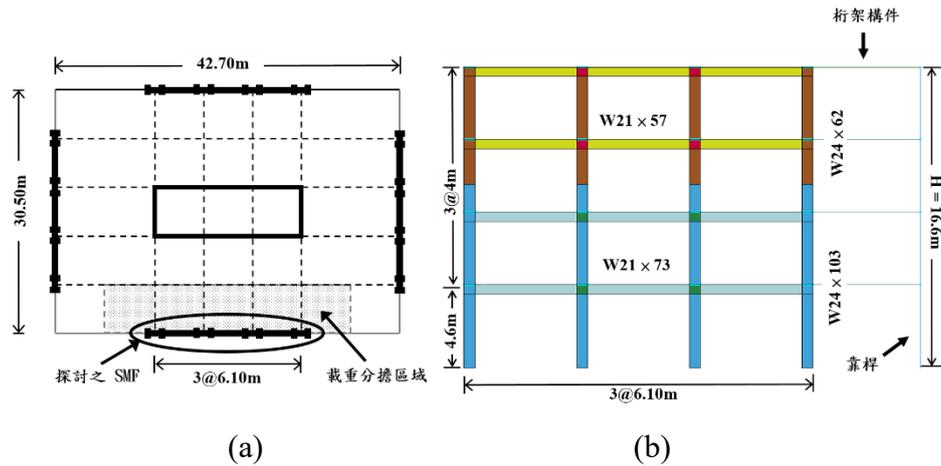


圖 1 四層樓特殊抗彎矩構架之(a)平面圖(b)有限元素模型

本研究考慮五種具不同型態初始缺陷之構架，分別為：

- (1) 構架 P(Perfect)：無 IGIs 之完美構架。
- (2) 構架 G(global)：施加一於柱中間高度處有最大振幅為 $(L/1500)$ 之半正弦波型之整體缺陷於所有鋼柱，如圖 2(a)所示。
- (3) 構架 GL1(global-local at first story)：在構架 G 上再施加局部缺陷於 1 樓柱底，依局部挫曲模態疊加，翼板及腹板缺陷之最大振幅分別為 $b_f/250$ 及 $h/250$ ，如圖 2(b)所示。
- (4) 構架 GLA(global-local at all stories)：與構架 GL1 相似，但局部缺陷施加於所有鋼柱。
- (5) 構架 S(spectral)：以 2D 隨機缺陷場施加初始缺陷於所有鋼柱，如圖 2(c)所示。

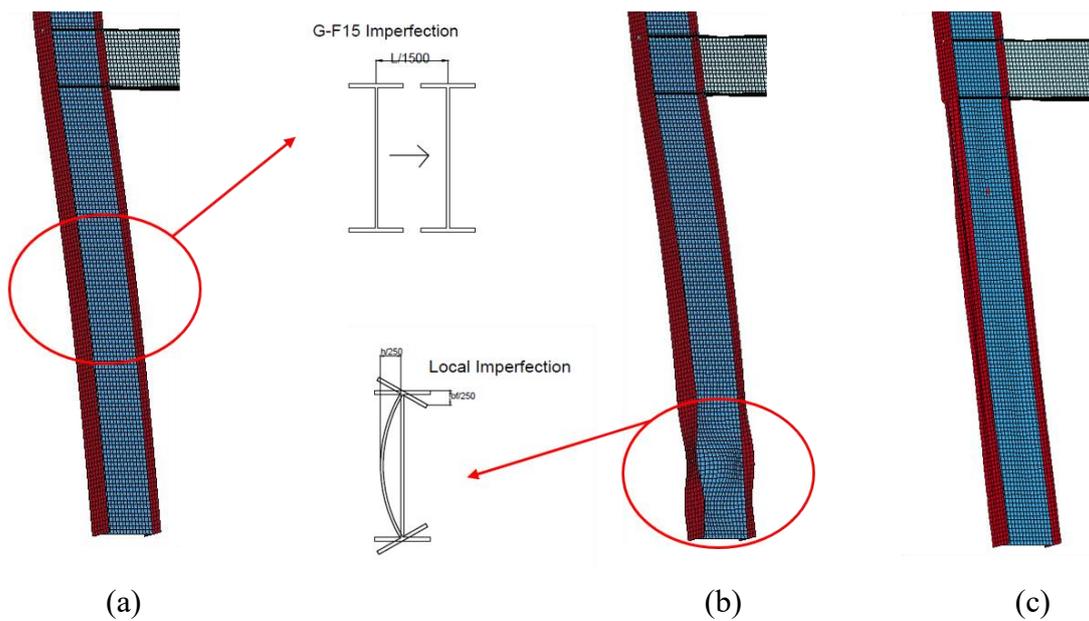


圖 2 施加不同型態之 IGIs 後之鋼柱初始幾何：(a)構架 G、(b)構架 GL1 及 (c) 構架 S

五種具不同 IGIs 之 SMF 之崩塌易損性分析結果之中位數($\tilde{S}_{a,c}$)及變異數(β_{sa})詳見表 1。從表 1 可見，不同缺陷型態之崩塌反應譜加速度($\tilde{S}_{a,c}(T_1, 5\%)$)幾乎相同，說明 IGIs 對 SMF 崩塌性能之影響幾可忽略。

整體缺陷之方向若與構架 P 其一樓鋼柱之挫曲方向相同，則 IGIs 會加劇挫曲行為並使 $S_{a,c}(T_1, 5\%)$ 下降較顯著。相反地，若整體缺陷方向與構架 P 鋼柱挫曲方向相反，則可能改變柱挫曲模式並對構架之崩塌性能產生正面效果，如圖 3(a)和(b)所示。而與整體缺陷不同，局部缺陷之影響較具一致性且為負面，因其會加劇鋼柱於崩塌時之局部挫曲，如圖 3(c)所示。儘管如此，如表 1 所示，局部 IGI 對構架之 $\tilde{S}_{a,c}(T_1, 5\%)$ 之影響仍然幾可忽略不計。此外，使用二維功率譜法建立之 IGIs(即構架 S)，因其隨機性導致其對構架之 $S_{a,c}(T_1, 5\%)$ 影響最不一致，例如所考慮之十一筆地震歷時中，有六筆會使構架 S 之 $S_{a,c}(T_1, 5\%)$ 上升。

結果顯示，於大部分情況下，IGIs 對一樓外柱於重力下之軸力為 $0.18P_y$ 之特殊抗彎矩構架其崩塌性能之影響幾可忽略，平均差異在 3%以內。此結果表明，在一般地震工程且柱軸力不大之構架分析中，IGIs 之模擬並非必要。

表 1 不同缺陷條件下 SMF 崩塌易損性分析結果

構架	$\tilde{S}_{a,c}(T_1, 5\%)$ (g)	β_{sa}
P	0.636	0.45
G	0.634	0.44
GL1	0.630	0.44
GLA	0.624	0.44
S	0.639	0.43

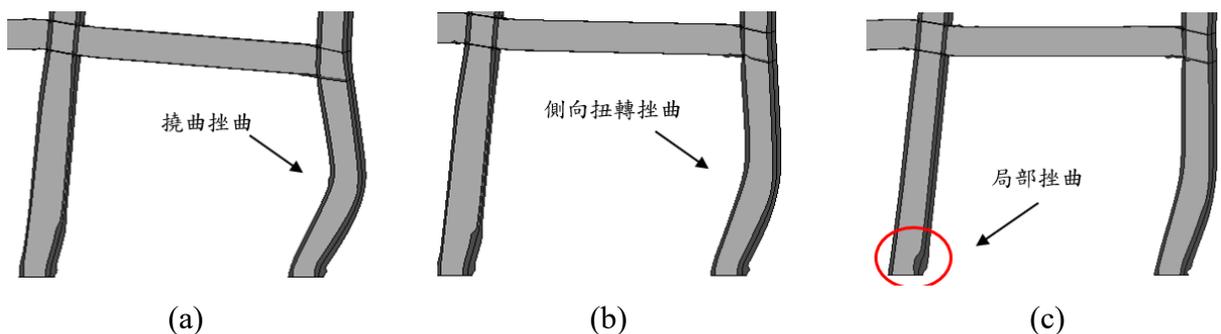


圖 3 (a)構架 P、(b)構架 G 及(c)構架 GLA 於地震歷時 Impvall/H-DLT262 下之一樓變形圖

2. 耐震規範之演進對鋼構造建築物震災韌性之影響

隨著規範之演變，自然預期新建之鋼構造建築物具有較佳之耐震性能。然而，此預期卻仍無法被完全證實及量化，在於過去對不同時期鋼構造建築物之易損性之研究，並未有系統性之探討，如建築物之原型並無相同之配置及用途。此外，過去研究所採用之結構分析並無直接模擬鋼構造中破壞及結構不穩定等行為，故無法完整反應各時期建築物之差異及破壞模式。有鑑於此，本研究團隊將採用 LS-DYNA 模型對一系列之鋼構造建築物依 FEMA P-58[19] 進行震災韌性(Seismic Resilience)評估，以探討設計規範之演變對鋼構造建築物震災韌性之影響，並了解鋼構造建築物對都市整體帶來之震災風險。而因台灣至今尚無評估建築物震災韌性所需之資料庫，本研究亦將利用數值模擬方法求取鋼構造建築物中常見結構及非結構構件之易損性曲線及後果函數。

由目前對規範之初步回顧，台灣規範之演變可概分為以下三個時期：一、民國 63 年至 88 年；二、民國 88 年至 100 年；以及三、民國 100 年至今。台灣之耐震設計規範最早於民國 63 年明定於建築技術規則[11]，而台灣之全鋼骨建築物亦於民國 66 年首建[15]，故第一時期以民國 63 年為開始，第一及第二時期之分界點為民國 88 年，除了因 921 地震重新修訂震區並大幅提升設計地震力外[14]，鋼構設計規範亦新增許多耐震條文，包括強柱弱梁、考慮放大地震力之柱軸壓強度、柱續接處及接合方式、減弱式梁柱接頭之使用、梁柱腹板交會區之設計、梁柱接頭及梁之側向支撐，以及斜撐構架中斜撐構材及連桿梁之設計等規定[16]。最後，由於民國 96 年新增耐震鋼材及更為嚴苛之強柱弱梁及梁柱腹板交會區剪力強度等要求[17]，以及民國 100 年對建築物耐震規範之大幅修訂[18]，故以民國 100 年後劃分為第三時期。

依規範演變所決定之代表時期，台灣鋼構建築物震災韌性之資料庫即需包含各時期實務設計上常見之鋼構材料及構件型式，而為決定常見結構構件之易損性曲線，則需該時期之鋼構構件之試驗數據建置及校正有限元素模型，以判定構件之損傷狀態及對應之需求參數，故需廣泛蒐集台灣各時期之鋼構試驗數據。本研究以蒐集與鋼結構實驗相關之台灣博碩士論文為主，並依年代作為主要之分類原則。此外，因梁柱接頭為鋼構架中之重要構件，本研究之實驗數據蒐集先以梁柱接頭為主要調查對象。

經整理蒐集到之台灣博碩士論文[22]-[38]，以及參考 FEMA P-58 之易損性資料庫中對梁柱接頭之分類，可確認台灣於過去五十年間常用之梁柱接頭型式，的確因規範之演變及接頭型式之研發，而演化出許多不同之型式。而台灣實務上常見之梁柱接頭型式，可依年代及行為表現分為以下三個類型，分別為：

- (1) 北嶺前傳統接頭(pre-Northridge connections)：此接頭指於 1994 北嶺地震發生前台灣實務界所常用之接頭型式，為 WFBW(welded-flange-bolted-web)之接合方式，其特點為因當時對鋼材強度及銲接細節等無相關可提升接頭延性之規定，而使其塑性轉角(plastic rotation)有嚴重不足之現象。
- (2) 北嶺後傳統接頭(post-Northridge connections)：此接頭為於北嶺地震發生

後所常用之傳統接頭，其改良北嶺前傳統梁柱接頭之銲接細節等，以期改善北嶺前接頭塑性轉角(plastic rotation)不足之現象。

- (3) 梁翼切削型接頭(Reduced-Beam-Section connections)：此接頭為於北嶺地震發生後所常用之改良式接頭，其耐震原理主要是藉由切削梁翼板，降低此區域之彎矩強度使其先行降伏，讓塑性鉸遠離梁柱交界面，避免梁柱接頭先產生破壞。

待決定鋼構規範演變之代表時期及蒐集各時期鋼構試驗之數據後，將建置用於分析鋼構構件易損性之有限元素模型，並利用所蒐集到之試驗數據校正材料模型，如 Wu 等人所建置之可模擬北嶺地震前梁柱接頭(pre-Northridge connections)脆性破壞之有限元素模型(如圖 4)。惟各時期之鋼構材料及構件之試驗有可能無法蒐集齊全，因此若遭遇此困難，將尋找及參考國外相似材料及構件之試驗進行有限元素模型之建置及校正。

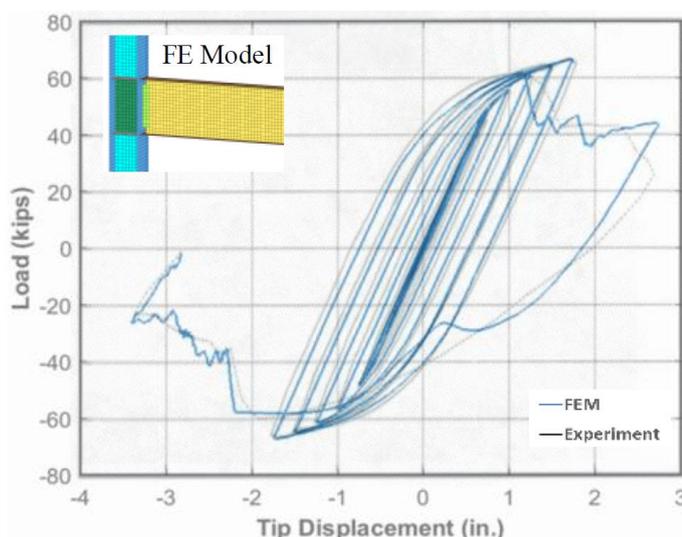


圖 4 Wu 等人以 Engelhardt 與 Husain [20]之試驗數據所校正之可模擬北嶺地震前梁柱接頭脆性破壞之有限元素模型[21]

各時期所採用之耐震設計原則可由相關耐震規範所獲得，但是實務上之設計會有個人之設計偏好，故為了得到台北盆地鋼結構建築的真實狀況，本研究團隊前往台北市建築管理工程處，蒐集台北盆地鋼結構建築在三個時期的設計參數，包括結構系統、結構材料、鋼梁斷面、鋼柱斷面、梁柱接頭形式等等。而在不同的樓層數下，設計的偏好也會稍有不同，所以將樓層變數分為四種樓高，因此本研究團隊依照不同時期在不同樓高下的情況，將蒐集而來的資料歸納成表 2。

統整完建管處的資料之後，本研究團隊以此設計偏好設計一系列之鋼構造建築物，作為後續用以探討震災韌性之原型。目前已完成之低樓層三個時期的設計，樓高為兩層樓，梁柱斷面上下兩層為相同之設計。而本研究團隊目前正著手將此設計斷面以有限元素分析軟體 LS-DYNA 進行平面構架之數值模擬，並依該時期蒐集而得之鋼構試驗數據建置及校正有限元素模型。

表 2 台北市建管處蒐集所得之各年代設計偏好

年代	樓高	鋼柱斷面	鋼樑斷面	鋼柱材料	鋼梁材料	接頭型式
第一時期 (民國 63~88 年)	L	H 型	H 型	A36	A36	傳統
	M	箱型	H 型	A572	A36	傳統
	H	箱型	H 型	A572	A36	傳統
	SH	箱型	H 型	A572	A36	傳統
第二時期 (民國 88~100 年)	L	H 型	H 型	A36	A36	傳統
	M	箱型	H 型	A572	A36	傳統
	H	箱型	H 型	A572	A36	改良
	SH	箱型	H 型	A572	A36	改良
第三時期 (民國 100 年~現今)	L	H 型	H 型	SN490	SN400	傳統
	M	箱型	H 型	SN490	SN490	傳統
	H	箱型	H 型	SN490	SN490	改良
	SH	箱型	H 型	SN490	SN490	改良

參考文獻:

- [1] AISC. Code of Standard Practice of Steel Buildings and Bridges, ANSI/AISC 303-16, American Institute for Steel Construction, Chicago, IL 2016.
- [2] ASTM. Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling, ASTM A6 / A6M-19, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [3] Elkady, A., and Lignos, D. G. Improved Seismic Design and Nonlinear Modeling Recommendations for Wide-Flange Steel Columns, J. Struct. Eng., 2018,144(9), 1–13. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002166.
- [4] Boissonnade and Somja, Influence of Imperfections in FEM Modeling of Lateral Torsional Buckling, SSRC, Grapevine, Texas, April 18-21, 2012
- [5] Padilla-llano, D. A., Zhao, X., Moen, C. D., and Schafer, B. , Initial geometric imperfection measurement and characterization of cold- formed steel C-section structural members with 3D non-contact measurement techniques. Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Toronto, Canada, March,2014, 25-28
- [6] Selvaraj, S., and Madhavan, M. , Geometric Imperfection Measurements and Validations on Cold-Formed Steel Channels Using 3D Noncontact Laser Scanner. J. Struct. Eng.,2018,144(3), 1–14. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001993
- [7] NIST. 2010. Evaluation of the FEMA P695 methodology for quantification of building seismic performance factors. NIST GCR 10-917-8. Gaithersburg,MD: National Institute of Standards and Technology
- [8] Hallquist J. LS-DYNA. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corp; 2013.

- [9] Huang, Y., and Mahin, S. A. ,Simulating the inelastic seismic behavior of steel braced frames including the effects of low-cycle fatigue., Rep. No. PEER 2010/104, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, CA
- [10] Wu, T.-Y., El-Tawil, S., and McCormick, J. ,Seismic collapse response of steel moment frames with deep columns, J. Struct. Eng., 2018, 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002150, 04018145.
- [11] 內政部營建司，「建築技術規則」，民國六十三年二月。
- [12] 內政部營建署，「建築技術規則」，民國七十八年五月。
- [13] 簡文郁，「國內設計地震力之演進與現況」，2002 集集地震液化工程問題研討會。
- [14] 內政部營建署，「建築物耐震設計規範及解說」，民國八十八年七月。
- [15] 財團法人成大建築文教基金會，「鋼構建築概論」，財團法人中華建築中心，民國九十年。
- [16] 內政部營建署，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，民國八十八年一月。
- [17] 內政部營建署，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，民國九十六年六月。
- [18] 內政部營建署，「建築物耐震設計規範及解說」，民國一百年七月。
- [19] FEMA. (2012). “Seismic Performance Assessment of Buildings.” *Report No. FEMA-P-58*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [20] Engelhardt, M. D., and Husain, A. S. (1992). “Cyclic tests on large scale steel moment connections.” *Rep. No. PMFSEL 92-2*, Phil M. Ferguson Strnct. Engrg. Lab., University of Texas, Austin, TX.
- [21] Wu, T.-Y., El-Tawil, S., and McCormick, J. (2019). “Influence of seismic design code evolution on the seismic losses and resilience of steel buildings.” *In International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake*. Taipei, Taiwan: National Center for Research of Earthquake Engineering.
- [22] 陳文生，「鋼骨樑柱接頭行為研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，民國七十九年。
- [23] 楊榮坤，「箱型柱與梁接頭之耐震行為」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國七十九年。
- [24] 陳光凱，「鋼樑與箱型柱接頭區行為研究」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國八十年。
- [25] 陳嘉有，「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，民國八十四年。

[26] 鐘明達，「鋼骨梁柱接頭耐震行為研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，民國八十八年。

[27] 林柏志，「擴大塑性區對梁柱接頭耐震行為之影響」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國九十年。

[28] 饒智凱，「鋼骨梁柱梁翼內側加勁補強接頭之耐震行為研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，民國九十六年。

[29] 蔡岳勳，「實尺寸鋼結構梁柱彎矩接頭試驗與分析」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，民國九十九年。

[30] 葉禎輝，「高性能鋼骨抗彎構架系統之開發-梁柱接頭研究」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國八十二年。

[31] 張文宏，「高性能鋼骨抗彎構架之耐震行為」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國八十三年。

[32] 周作隆，「高韌性鋼骨梁柱接頭之設計」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國八十四年。

[33] 林昆德，「抗彎鋼骨梁柱接頭之行為」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，民國八十五年。

[34] 陳威志，「梁翼切削與弱梁柱交會區共存型梁柱接頭韌性行為研究」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，民國八十八年。

[35] 陳宣維，「鋼骨圓弧切削梁柱接頭之耐震行為研究」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，民國八十八年。

[36] 林佳煜，「銲接孔對梁柱接頭耐震行為之影響」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國九十年。

[37] 魏振軒，「扇形孔與銲接細部對梁柱接頭耐震行為之影響」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國一〇一年。

[38] 顏志航，「建築鋼結構銲道穿透式梁柱接合工法研發」，國立台灣科技大學營建工程研究所碩士論文，民國一〇一年。