

鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範柱及接合設計之修正研擬

周中哲¹ 劉郁芳² 周德光² 黃司睿³ 陳蓮安³

¹國立臺灣大學土木工程學系 教授

²國家地震工程研究中心

³國立臺灣大學土木工程學系 學士生

摘要

本研究收集鋼骨鋼筋混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)柱及梁柱抗彎接頭最新國外設計規範及研究成果，再與臺灣鋼骨鋼筋混凝土規範及近年之研究進行分析比較，其中在 SRC 柱設計方面，對於混凝土強度、鋼骨強度、柱主筋間距、鋼柱寬厚比等在考慮研究及工程實務的可行性，提出設計條文建議修訂。另外鋼筋混凝土柱與鋼梁(Reinforced Concrete and Steel, RCS)之接頭已被美國及日本規範列為一種抗彎接頭，臺灣規範目前尚未有此種接頭設計方法，但學術界及實務界已有一些相關研究供參考，本研究針對 RCS 接頭整合美日規範的設計理論，再與國內外研究的成果彙整成 RCS 接頭剪力設計方法作為規範修訂參考。藉由此次國內外相關規範研究及實驗結果彙整工作，修訂 2011 年版的鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說以期更符合現今國內實務應用及國際技術發展。

關鍵詞：鋼骨鋼筋混凝土結構、柱設計、鋼柱寬厚比、梁柱接頭、接頭剪力強度

ABSTRACT

The design specifications and literatures related to SRC columns and beam-column connections in the United States, Japan, and Taiwan were collected for the revision of Taiwan Design Specifications and Commentary of Steel-Reinforced-Concrete Structures. The revision recommendation will be expected to be an essential reference for design and construction of SRC structures in Taiwan. Design of Reinforced-Concrete-Column and steel beam connection (called RCS connection) has been included in the design specifications of United States and Japan. However, this connection type has not been included in Taiwan specifications. This work was focused on revision of SRC code in Taiwan. In terms of SRC column design, concrete strength, steel strength, column reinforcement spacing, and column width-to-thickness ratio are revised based on AISC 341 (2016). Integrating the design theories of U.S. and Japan, as well as the research results in Taiwan, a new section of RCS design was recommended to the updated SRC code.

一、前言

自九二一大地震後，國內開始大量採用鋼骨鋼筋混凝土為建築物之構造型式，但在建築土木工程領域中，鋼骨鋼筋混凝土構造設計及施工複雜度高，工地常無法按設計圖施工，然而設計與施工關係建築結構物之安全甚鉅，故鋼骨鋼筋混凝土構造規範為建築工程中不可輕忽之課題。目前我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」係於民國100年公告，其後美國ACI及AISC規範也多次進行修訂，我國鋼骨鋼筋混凝土工程之研究結果、施工方法、施工技術與檢驗亦有相當程度的改變。因此本研究將以國內外規範及研究成果為基礎，以鋼骨鋼筋混凝土柱及梁柱接頭設計為修訂目標，深入檢討國內外規範相關研究及實驗成果，為未來臺灣鋼骨鋼筋混凝土規範柱及梁柱接頭設計條文修訂供內政部建築研究所參考(周中哲等人 2021)。

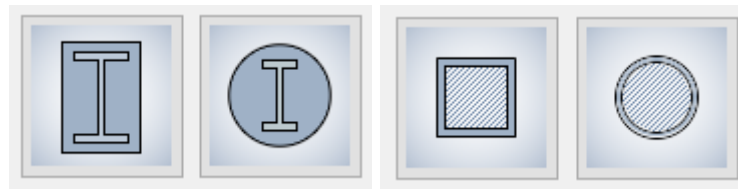
臺灣鋼骨鋼筋混凝土(SRC)構造規範(2011)對於SRC柱材料強度如混凝土強度、鋼骨強度皆較現行工程應用為低，配合實驗研究成果，混凝土強度由210 kgf/cm²調高至280 kgf/cm²，鋼骨強度由3520 kgf/cm²調高至4200 kgf/cm²(周中哲、吳松城 2017)。柱鋼筋主筋間距則考慮限制鋼筋最小間距及為避免壓力控制行為及高強度混凝土脆性破壞，建議鋼骨鋼筋混凝土柱中之主筋間距不得大於200 mm。現行臺灣SRC規範(2011)將鋼柱寬厚比分為 λ_{pd} 與 λ_p 二類，參考美國AISC 360-16 (2016)及 AISC 341-16 (2016)則有 λ_{md} (中等韌性構件的寬厚比)及 λ_{hd} (高韌性構件的寬厚比)與 λ_p (結實構件的寬厚比)三類。以A572 Gr.50鋼材($F_{ys}= 3.3$ tf/cm²)為例，根據臺灣SRC規範(2011)，耐震構材柱板b/t的限制為 $\sqrt{3E/F_{ys}}$ ，代表柱之鋼材寬厚比(b/t)不得大於43，對於AISC 341-16 (2016)對應的b/t若採用高韌性構件的寬厚比 λ_{hd} 值則不得大於35。若使用A36鋼材($F_{ys}=2.4$ tf/cm²)時，根據臺灣SRC規範(2011)柱之b/t不得大於50，但對於AISC341-16(2016)其對應的b/t若採用 λ_{hd} 值則不得大於38，所以目前鋼柱寬厚比所引用之臺灣SRC規範(2011)相較於AISC 341-16(2016)較為不保守。再由周中哲及吳松城(2017)的研究顯示，其試體使用國內高強度SM 570M鋼材($F_{ys}= 4.2$ tf/cm²)，若依據臺灣SRC規範(2011)柱之b/t不得大於38，但對於AISC 341-16(2016)其對應的b/t若採用 λ_{hd} 值則不得大於30，該研究結果顯示寬厚比增加會降低柱韌性。依據周中哲等人研究(2017、2020)的研究顯示，當b/t值過大時柱構件之抗彎撓曲延展性不佳，反之當b/t減少

時柱構件之抗彎撓曲延展性改善很多。此外臺灣處於地震帶，基本上都需要符合耐震設計的要求，低樓層特別是一樓柱的 b/t 宜控制在一定範圍以下，確保一樓柱在承擔高軸力及彎矩作用下能有好的強度及韌性的發揮。在高耐震區尤其對在大側向位移下承擔高軸壓力的低樓層SRC柱，顯示軸力愈大會使鋼管內灌混凝土柱之撓曲韌性愈差，因此有必要檢討臺灣規範對鋼骨鋼筋混凝土之鋼柱(圖一)寬厚比限制(周中哲等人2017、2020)。

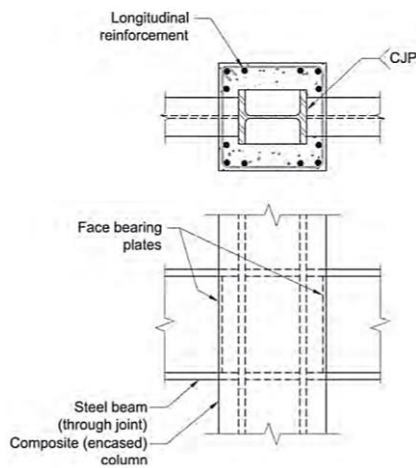
目前美國AISC-341(2016)的常見梁柱接頭型式有三種：(1)包覆型柱(Encased Column)與鋼梁之銲接接合(圖二(a))，(2)填充型柱(Filled Column)(圖二(b))，與直通型鋼梁接合及與鋼梁T型栓銲接合(圖二(c))，(3)鋼筋混凝土柱(Reinforced Concrete Column)與直通鋼梁之接合(圖二(d))。其中，鋼筋混凝土柱與鋼梁之接合為新增的複合斷面構造型式(Reinforced Concrete and Steel, RCS)，此種接合美國及日本都已納入規範，日本也有許多案例。日本的「柱RC梁S混和構造設計指針(案)」(2004)中，將此類型接頭分為柱直通及梁直通兩種。如圖三所示，日本規範內有多種接頭型式，圖三(a)為梁直通接合有配置剪力筋且無箱型加勁板範例。圖三(b)為梁直通接合且配置箱型加勁板，箱型加勁板作用為圍束接合處混凝土，且可作為抗剪構材。圖三(c)為柱直通接合且配置箱型加勁板。RCS構造結合了高韌性之鋼梁及混凝土柱高抗壓性的特性，且RCS構造可採預鑄方式，具有施工快速及經濟的優點，國內外學術界及實務界已有相關研究，但臺灣SRC規範目前尚未有此種接合型式，本次梁柱接頭的研究也針對RCS構造，整合美日的設計理論，再加上臺灣研究的成果，彙整美日台建議的接頭剪力計算方法於新規範中供工程師參考。

臺灣這方面的研究包含陳誠直等人(2002)以反覆載重測試RCS梁柱接頭三種不同箍筋型式之效果，實驗結果顯示試體皆有良好之圍束效果及剪力強度，接頭交會區也建議配合加勁與補強細節，常用之補強方式含：增加鋼帶板、承壓面板(FBP)、橫梁、剪力釘、小鋼柱、垂直鋼筋VJR(圖四(a))。另外，歐昱辰等人(2021)也以高強度混凝土製作RCS接頭(圖四(b))，試體皆有良好之韌性消能行為，且符合強度計算之結果。RCS接頭強度計算方式，國外目前則已有多人提出，AISC341-16(2016)條文中說明可以鋼梁及混凝土強度疊加計算，解說也建議參考ASCE(1994)及Parra(2001)以內外交會區的概念，考慮不同破壞模式的計算，Kathuria等人(2015)以ASCE(1994)的公式為基礎再加以細分相關參數。日本

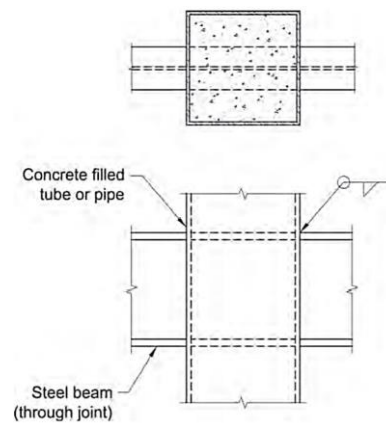
AIJ規範(2014)也提供接頭強度計算方式，為抵抗長期載重對混凝土所造成的開裂破壞，此時梁柱接頭區的剪力強度主要受混凝土的抗裂能力控制，短期載重的設計則主要是防止梁柱接頭區發生整體剪力破壞，此時在計算梁柱接頭區的設計剪力時需要將混凝土、箍筋和鋼骨腹板的剪力強度皆納入考量，並依據強度疊加原理予以疊加。



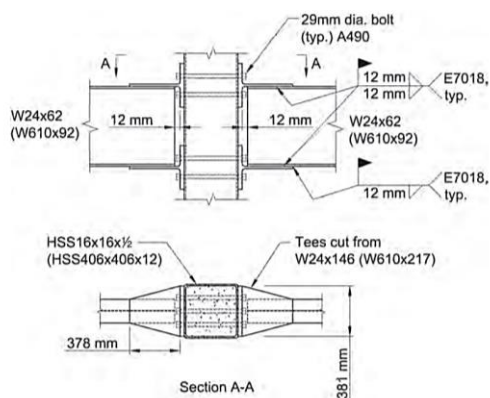
圖一 鋼骨鋼筋混凝土柱



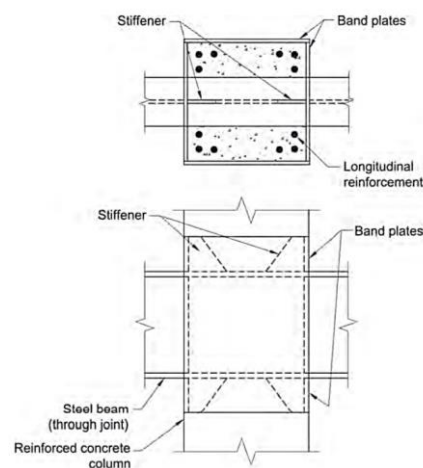
(a) 包覆型柱與鋼梁抗彎矩接合



(b) 填充型柱與直通鋼梁接合型式

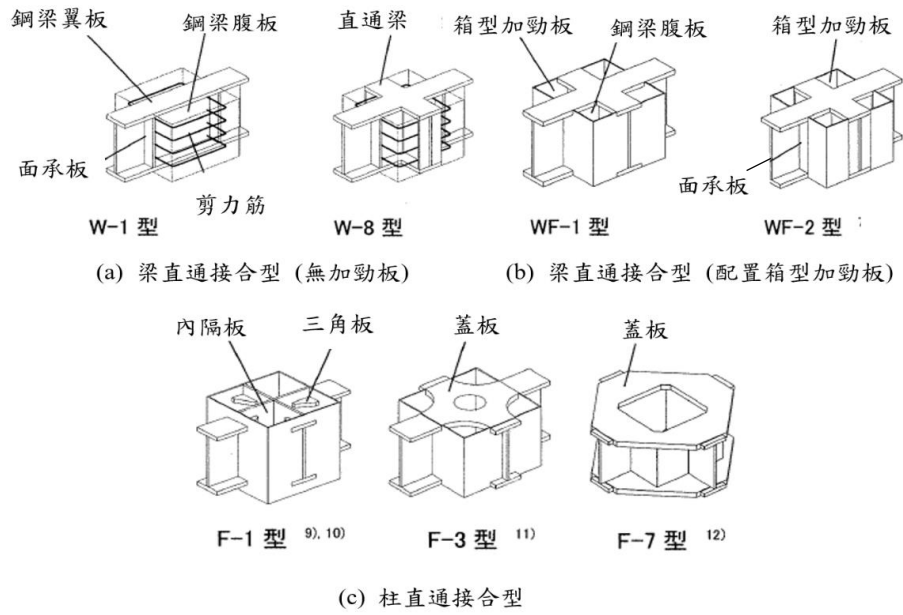


(c) 填充型柱與鋼梁 T 型銲接接合型式

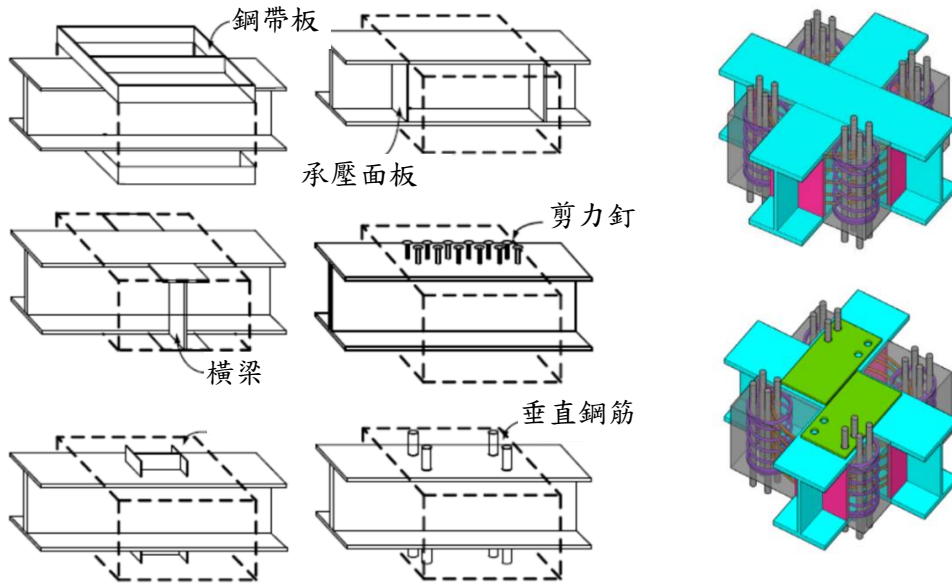


(d) 鋼筋混凝土柱與鋼梁接合

圖二 美國規範複合斷面接頭形式 (AISC 341-16(2016))



圖三 日本 RCS 常見梁柱接頭示意圖 (日本建築學會, 2004)



(a) RCS 接頭型式(陳誠直等, 2002)

(b) RCS 接頭型式
(歐昱辰等, 2021)

圖四 臺灣學者 RCS 接頭研究示意圖

二、SRC 柱設計

本節以鋼骨鋼筋混凝土柱設計進行修訂檢討，項目包括混凝土強度、鋼柱強度、柱主筋間距、鋼柱寬厚比等。

2.1 混凝土強度

臺灣 SRC 規範(2011)相關規定，於 6.3 章節一般要求規定混凝土抗壓強度不宜小於 210 kgf/cm^2 ，於 9.2 章節材料規定，鋼骨鋼筋混凝土構造中，用以抵抗地震力之混凝土材料其抗壓強度不得小於 210 kgf/cm^2 。比照美國 AISC 341 (2016) 規範其中相較於混凝土部份參考 ACI 規範，也同樣比對參考目前研擬的混凝土結構設計規範(2021)，其中分為一般(常重與輕質)與特殊抗彎矩構架及特殊結構牆(常重與輕質)二類應用，對於前者混凝土最低為 210 kgf/cm^2 、而後者混凝土最低為 280 kgf/cm^2 ，因此建議混凝土規定抗壓強度 f'_c 不宜小於 280 kgf/cm^2 。

2.2 鋼骨強度

臺灣 SRC 規範(2011 於 6.3 章節一般要求規定，鋼骨降伏應力不宜大於 3520 kgf/cm^2 ，於 9.2 章節材料規定，鋼骨鋼筋混凝土構造中，用以抵抗地震力之鋼骨材料其應符合 CNS 2947、CNS4269、CNS 13812、CNS 4435 之規定，其範圍從 $1988\sim 4282 \text{ kgf/cm}^2$ 。美國 AISC 341-16 (2016) 規範 A3.1 節條列鋼骨降伏強度，依據不同構架型式柱之降伏強度 F_{ys} 範圍介於 $50\sim 70 \text{ ksi}$ ($3.5\sim 4.9 \text{ tf/cm}^2$) 之間，也同樣比對參考目前的鋼結構極限設計法規範及解說(2010)，目前工程界常使用 SM570 規格的型鋼其強度為 4200 kgf/cm^2 ，周中哲及吳松城(2017)的研究中使用 SM570 鋼材搭配高強度混凝土 80 MPa (815 kgf/cm^2)，發現此類柱的韌性受軸力及寬厚比影響很大，對強度較高的材料使用上宜採用較嚴格的寬厚比，因此建議鋼骨其規定降伏應力不宜大於 4200 kgf/cm^2 。

2.3 柱鋼筋主筋間距

臺灣 SRC 規範(2011) 4.3.3 節規定鋼骨鋼筋混凝土柱中之主筋間距不得大於 300 mm 。若主筋間距大於 300 mm 時，則須加配 D13 以上之軸向補助筋，補助筋可以不用錨定，且補助筋應不計其對柱強度之貢獻。參考混凝土結構設計規

範(2021)建議柱之主筋淨間距加入最低值限制，即主筋與主筋之淨間距不得低於 4 cm、主筋標稱直徑之 1.5 倍與粗骨材最大粒徑之(4/3)倍三值之最大者。其目的係限制鋼筋最小間距之目的在於澆置混凝土時，使之易於流入鋼筋間及模板與鋼筋間之空隙，不產生蜂窩現象，同時避免因鋼筋排列過密導致發生剪力或收縮裂縫之情形發生。

此外在考量承受較高軸力或較高混凝土抗壓強度之 SRC 柱，參考混凝土結構設計規範 18.4.5.2 節 (2021)，建議當鋼骨鋼筋混凝土柱中 RC 部份所分擔之軸力 P_{urc} ，在 $P_{urc} > 0.3A_c f_c'$ 或 $f_c' > 700 \text{ kgf/cm}^2$ 時，鋼骨鋼筋混凝土柱中之主筋間距不得大於 200 mm。其目的係對於承受較高軸力的 $P_{urc} / A_c f_c'$ 柱而言，壓力控制行為是可預期的，對較高混凝土抗壓強度而言，破壞行為傾向於脆性，柱主筋間距限制 200 mm，以確保 SRC 柱之強度與韌性。

2.4 鋼柱寬厚比

對於鋼柱寬厚比(b/t)根據不同斷面需求，則有不同的定義產生，當鋼柱斷面肢材之寬厚比小於 λ_p 時，斷面可稱之為結實斷面，結實斷面鋼柱之撓曲強度可達塑性彎矩斷面肢材之寬厚比小於 λ_r 時，此斷面可歸類於半結實斷面。在美國 AISC 341-16 (2016)版中對鋼骨鋼筋混凝土柱若受軸力及彎矩作用下產生塑鉸時，分為中度延展性構件其寬厚比不應超過 λ_{md} ，及高度延展性構件其寬厚比不應超過 λ_{hd} 。以下對臺灣 SRC 規範(2011)中表 3.4-2 鋼骨鋼筋混凝土柱之鋼柱斷面肢材與表 3.4-3 填充型鋼管混凝土柱之鋼柱斷面肢材，分別進行討論，其中對於表 3.4-3 填充型鋼管混凝土柱則參考 AISC 341-16 (2016)，而表 3.4-2 鋼骨鋼筋混凝土柱之鋼骨斷面肢材建議可依照表 3.4.3 矩形填充型鋼管混凝土柱為依據，依比例進行換算，故先對填充型鋼管混凝土柱寬厚比討論。

2.4.1 填充型鋼管混凝土柱之鋼骨斷面肢材寬厚比

臺灣 SRC 規範(2011)表 3.4.3 以 λ_{pd} 與 λ_p 分別表示耐震設計與結實斷面之鋼骨斷面肢材寬厚比之上限，而 AISC 341-16 (2016)則以 λ_{md} 及 λ_{hd} 分別表示中等韌性與高韌性構件之鋼柱斷面肢材寬厚比之上限，換言之 AISC 341-16 中對於複合柱在耐震建築物下至少滿足中等韌性構件寬厚比 λ_{md} 限制。比對現行臺灣

SRC 規範與 AISC 341-16 的規定要求如表一所示，現行臺灣 SRC 規範(2011)之 λ_{pd} 值較 AISC 341-16 之 λ_{hd} 值較為不保守。

此外根據 Chou 等人研究(2019、2020)，鋼管內灌混凝土(Concrete-Filled Tube，CFT) 柱即使採用 AISC 341-16 (2016)高韌性構件的寬厚比 λ_{hd} 要求，在高軸力作用下(40%軸力強度)，柱底彎矩無法在 0.04 弧度的層間側位移角下滿足 90%的最大彎矩強度，顯示現行臺灣 SRC 規範的寬厚比因為較寬鬆，更無法滿足柱在 0.04 弧度下的耐震行為(圖五)。在無更多的研究資料下，建議修改至少與 AISC 341-16 值(2016)一致。先前 SRC 規範將寬厚比分為 λ_{pd} 與 λ_p 二值，建議保留 λ_p 值，而將 λ_{pd} 值以 λ_{md} 及 λ_{hd} 值取代，由於 λ_{md} 與 λ_p 分別依據 AISC 341-16 (2016)與 AISC 360-16 (2016)，兩公式因為接近，故 λ_{md} 與 λ_p 值差異不大。

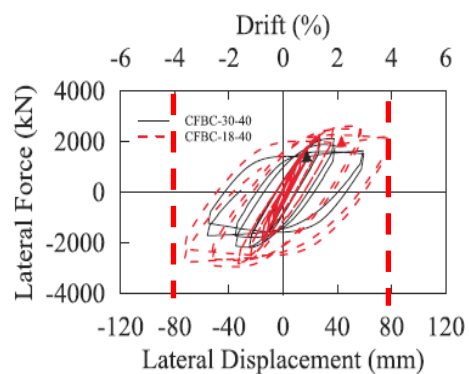
2.4.2 鋼骨鋼筋混凝土柱之鋼骨斷面肢材寬厚比

臺灣 SRC 規範(2011)表 3.4.2 λ_p 仍維持不變，對於 λ_{hd} 、 λ_{md} 則依照表一之矩形填充型鋼管混凝土柱為依據，依比例進行換算。以表一的 SM570 級為例， $\lambda_{hd}/\lambda_p=30/55=0.5454$ ， $\lambda_{md}/\lambda_{hd}=49/30=1.6333$ ，由於臺灣 SRC(2011)規範表 3.4-2 中並無 SM570 級鋼材，故 SM570 級鋼材由 490 級鋼材 F_{ys} 鋼骨強度依比例求得 SM570 級鋼材之 λ_p 值為 16，再使用表一矩形柱的相同比例換算得 $\lambda_{hd}=16 \times 0.5454=9$ ，而 $\lambda_{md}=9 \times 1.6333=14$ ，將表 3.4-2 修訂後與原臺灣 SRC 規範(2011)值比對可見表 2。

上述 2.4.1 與 2.4.2 係針對原臺灣 SRC 規範(2011)，將表 3.4-2 及表 3.4-3 中提出修訂建議，其中 SS490、SM490、SN490 級仍維持保留，而移除 SS400 級(A36)該部份規定。再者考量現行實務已大量使用 SM570 級鋼材，故加入 SM570 級(A572 Gr. 60)該部份規定。對於鋼骨斷面之寬厚比，考慮與 AISC 341-16 (2016)保持一致性，將表一及表二中寬厚比 λ_{pd} 、 λ_p 二值修改為 λ_{hd} 、 λ_{md} 、 λ_p 三值。表一及表二中建議修改寬厚比 λ_p 仍維持原臺灣 SRC 規範(2011)規定，臺灣 SRC 規範(2011)中原表 3.4-3 及表 3.4-2 之建議修改可分別參見表一及表二，表二依照表一為依據，以表一數值間的比例進行換算求得。

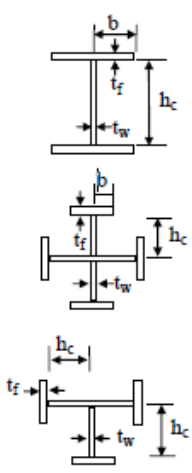
表一 SRC 規範表 3.4-3 建議修改與原 SRC 規範比對表

SRC 規範表 3.4-3 填充型鋼管混凝土柱之鋼骨斷面肢材寬厚比限制							
柱斷面肢材寬厚比		鋼材種類	建議修改(AISC 341-16)			SRC 規範(2011)	
			λ_{hd}	λ_{md}	λ_p	λ_{pd}	λ_p
	b/t	SM570 級 (A572 Gr.60)	30	49	55	38	-
		SS490、SM490 與 SN490 級 (A572 Gr.50)	35	56	61	43	61
		SM400 與 SN400 級 (A36)	38	61	72	50	72
	D/t	SM570 級 (A572 Gr.60)	36	72	86	62	-
		SS490、SM490 與 SN490 級 (A572 Gr.50)	48	96	109	70	109
		SM400 與 SN400 級 (A36)	56	111	150	82	150



圖五 高軸力荷載(40% P_n)及側向反覆載重下試體破壞及其遲滯迴圈(周中哲及吳松城，2017; Chou and Wu，2019)

表二 SRC 規範表 3.4-2 建議修改與原 SRC 規範比對表

SRC 規範表 3.4-2 鋼骨鋼筋混凝土柱之鋼骨斷面肢材寬厚比限制							
柱斷面肢材寬厚比		鋼材種類	建議修改(AISC341-16)			SRC 規範(2011)	
			λ_{hd}	λ_{md}	λ_p	λ_{pd}	λ_p
	b/t	SM570 級 (A572 Gr.60)	9	14	16	10	-
		SS490、SM490 與 SN490 級 (A572 Gr.50)	11	18	20	12	20
		SM400 與 SN400 級 (A36)	12	19	23	14	23
	D/t	SM570 級 (A572 Gr.60)	35	57	64	60	-
		SS490、SM490 與 SN490 級 (A572 Gr.50)	46	74	81	68	81
		SM400 與 SN400 級 (A36)	50	80	96	79	96

三、美國 AISC 341-16 (2016)複合梁柱接頭設計

美日規範與國內複合梁柱接頭設計的分析比較可參考劉郁芳等人之研究報告(2020)。本節以美國 AISC 341-16 (2016)中複合梁柱接頭設計的條文為主，並以參考文獻內容輔以說明，內容包含不同梁柱接頭型式及其強度計算方式。針對特殊抗彎矩構架中複合斷面，AISC 341-16 (2016)規定梁柱接頭須能承受至少 0.04 rad 層間變位角不破壞要求，同時柱面處撓曲強度須維持至少 $0.8M_p$ ，其中 M_p 為梁的塑性撓曲強度。AISC 341-16 (2016)提出三種梁柱接頭型式，第一種接頭型式為包覆型柱(Encased Column)與鋼梁之銲接接合，第二種接頭型式為填充型柱(Filled Column)，其中填充型柱又分為『與直通型鋼梁接合』及『與鋼梁 T 型栓銲接合』，第三種梁柱接頭型式為鋼筋混凝土柱(Reinforced Concrete Column)與直通鋼梁之接合(即 RCS 梁柱接頭)，此種接頭型式美國及日本都已納入規範，臺灣規範目前尚未說明此種接頭型式設計方法，本文著重在此種接頭的設計說明。

3.1 包覆型柱(Encased Column)

AISC 341-16 (2016)中包覆型柱與鋼梁接合型式(圖二(a)所示)，建議該接頭強度可保守以鋼柱及鋼梁接頭強度計算，AISC 341-16 (2016)說明鋼梁（或複合斷面梁）與包覆型柱（或鋼筋混凝土柱）接頭之接頭剪力強度可為鋼筋混凝土及鋼構件各別提供的剪力強度疊加[式(1)]，規範條文中提到鋼構材剪力強度可依據 AISC 360-16 (2016)進行計算[式(2)]。鋼筋混凝土的部分則可參考 ACI 318-14 (2014)計算細節，解說中建議接頭強度疊加細節計算也可參考 ASCE (1994)，Parra (2001)等人之接頭設計準則。因此梁柱接頭剪力強度(V_n)為：

$$V_n = V_{spn} + V_{nrc} \quad (1)$$

其中 V_{spn} 與 V_{nrc} 分別為鋼骨與鋼筋混凝土部分剪力強度，鋼構材剪力強度(V_{spn})計算為：

$$V_{spn} = 0.6F_{yw}t_{sp}h \quad (2)$$

其中 F_{yw} 為鋼板降伏強度， h 為柱深， t_{sp} 為鋼板厚度

ACI 318-19 (2019)的規範，剪力強度依據梁柱接頭邊界條件不同分為四種計算方式(表三)。

表三 梁柱接頭中鋼筋混凝土提供之剪力強度 (V_{nrc})公式(ACI 318-19)

柱	梁	剪力強度 V_{nrc} (N)	
		圍束	無圍束
連續	連續	$1.7\lambda\sqrt{f'_c}A_j$	$1.2\lambda\sqrt{f'_c}A_j$
	其他	$1.2\lambda\sqrt{f'_c}A_j$	$1.0\lambda\sqrt{f'_c}A_j$
其他	連續	$1.2\lambda\sqrt{f'_c}A_j$	$1.0\lambda\sqrt{f'_c}A_j$
	其他	$1.0\lambda\sqrt{f'_c}A_j$	$0.7\lambda\sqrt{f'_c}A_j$

3.2 填充型柱(Filled Column)

對於填充型柱之梁柱接頭，AISC 341-16 (2016)分別提出適用於直通鋼梁及非直通鋼梁兩種情況下之接頭剪力強度計算方式，並以 Koester (2000), Elremaily and Azizinamini (2000), Ricles (2004)等人的學術研究為理論基礎。非直通鋼梁接

頭處之設計則以 Koester (2000)提出的 T 型板栓鉸型式作為實務設計參考依據，研究結果顯示複合斷面接合處以 T 型連接板栓鉸接合有助於力量傳遞。

3.3 鋼筋混凝土柱與鋼梁之接頭(RCS Connection)設計

對於鋼筋混凝土柱與鋼梁接合之複合構架系統(圖二(d)所示)，AISC 341-16 (2016)建議其梁柱接頭剪力強度採用與包覆型梁柱接頭剪力強度相同之計算方式，即強度疊加法或可參考 ASCE (1994)及 Parra (2001)等研究推導之公式進行梁柱接頭設計。以下分別列舉 AISC341-16 (2016)、ASCE (1994)及 Kathuria 等人 (2015)的理論。

3.3.1 AISC 341-16 (2016)

AISC 341-16 (2016)建議鋼筋混凝土柱與直通鋼梁之梁柱接頭剪力強度計算方式採強度疊加法，與包覆型柱接頭剪力強度計算方式相同[式(1)]，鋼骨部分剪力強度折減係數 $\phi_{spn} = 0.9$ ，鋼筋混凝土部分剪力強度折減係數 $\phi_{nrc} = 0.75$ ，混凝土接頭強度(V_{nrc})參考 ACI 318-19(表三)之計算方式，其中式(3)之計算結果與 ASCE (1994)較接近，因此使用係數為 1.0 之公式。另外 AISC 341-16 (2016)認為接頭剪力強度大都以單向載重試驗作為公式推導背景，反覆載重的試驗不多，且複合斷面的接頭行為需保守估計，建議將鋼筋混凝土的接頭剪力強度再折減 25%:

$$V_{nrc} = 1.0\lambda\sqrt{f_c'}A_j \times 0.75 \quad (3)$$

其中 λ 於輕質混凝土為 0.75，於常重混凝土為 1.0， f_c' 為混凝土抗壓強度(MPa)， A_j 為混凝土受剪有效面積(mm²)，計算方式如式(4)：

$$A_j = [\min(b + 2x, b + h)]h \quad (4)$$

其中 b 為梁寬，x 為最小梁邊至柱邊垂直距離，h 為柱深。

鋼梁和鋼筋混凝土柱之間的複合斷面接頭如圖二(d)所示，梁柱接頭之剪力強度以鋼筋混凝土和鋼梁個別提供之強度疊加計算。此種計算方式 (Deierlein 等 1989；ASCE 1994；Parra-Montesinos 及 Wight 2001) 已被用來驗證有實驗數據的複合斷面接頭 (Sheikh 等 1989；Kanno 和 Deierlein 1997；Nishiyama 等

1990；Parra-Montesinos 及 Wight 2001)。在美國和日本已經有許多學者針對此類接頭進行單向載重和反覆載重下的測試驗證接頭耐震行為（Sheikh 等 1989；Kanno 及 Deierlein 1997；Nishiyama 等 1990；Parra-Montesinos 及 Wight 2000；Chou 及 Uang 2002），這些結果顯示設計細節良好的鋼筋混凝土柱與鋼梁之複合斷面接頭可以與鋼骨或鋼筋混凝土接頭有相似的耐震效果。

3.3.2 ASCE (1994)

ASCE (1994) 建議梁柱接頭剪力強度計算方式採強度疊加法[式(1)]，剪力強度折減係數與 AISC 341-16 (2016)相同，其中鋼筋混凝土部分提供剪力強度(V_{nc})為混凝土拉壓桿強度(V_{csn})及混凝土壓力場強度(V_{cfn})之和。梁柱接頭中各強度貢獻機制如圖六所示，鋼板標稱剪力強度為

$$V_{spn} = 0.6F_{yw}t_{sp}jh \quad (5)$$

其中 jh 為有效柱深(圖六(a))。混凝土拉壓桿強度為

$$V_{csn} = 1.7\sqrt{f'_c}b_p h \leq 0.5f'_c b_p d_w \quad (6)$$

其中 f'_c 為混凝土強度(MPa)， b_p 為承壓面板有效寬度， d_w 為鋼梁腹板深度。混凝土壓力場強度分別由混凝土及箍筋提供：

$$V_{cfn} = 0.4\sqrt{f'_c}b_o h + A_{sh}F_{yw}0.9h/s_h \leq 1.7\sqrt{f'_c}b_o h \quad (7)$$

其中 b_o 為外部壓力場有效寬度(圖六(c))， A_{sh} 為箍筋截面積且不得大於 $0.004s_h$ ， s_h 為箍筋間距。

3.3.3 Kathuria 等人(2015)

Kathuria 等人(2015)的研究中也有說明計算鋼筋混凝土柱與鋼梁之接頭剪力強度的計算，接頭剪力強度為內交會區及外交會區接頭強度之和：

$$\phi V_n = \phi_s (V_{spn} + V_{csn}) + \phi_c V_{on} \quad (8)$$

其中 $\phi_c = 0.85$ 。內交會區接頭剪力強度為鋼板標稱剪力強度(V_{spn})及混凝土標稱剪力強度(V_{csn})之和，計算方法與 ASCE(1994)相近[式(5)、式(6)]，且需符合式(9)之上限值限制：

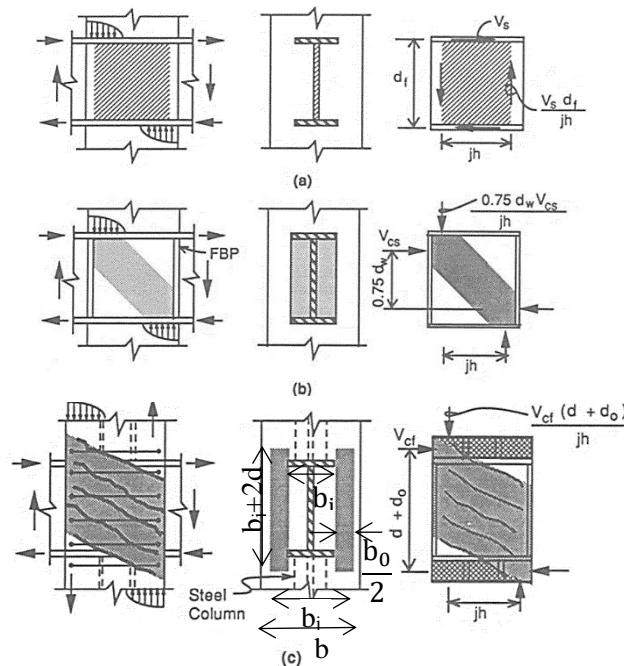
$$\phi_s (V_{spn} + V_{csn}) \leq \frac{\phi_b (M_{vb} - V_b h)}{d_j} \quad (9)$$

其中 $\phi_s = 0.85$ ， $\phi_b = 0.75$ ， d_j 為鋼梁上下翼板之中心距， V_b 為接頭區左右兩側與鋼梁交界面之平均剪力， M_{vb} 為接頭區承壓彎矩強度。且 Kathuria 等人(2015)的研究中混凝土標稱剪力強度(V_{csn})以 d_j 取代 d_w ，以翼板寬度 b_f 取代 b_p ，並且鋼板標稱剪力強度(V_{spn})另考慮強度調整因子 α_{sp} ，外接頭取 0.6，內接頭取 1.0。內交會區設計強度之上限值為避免接頭區混凝土之承壓破壞，接頭區可藉由焊接於鋼梁翼板上之垂直鋼筋分擔接頭區之剪力，進而提升此上限值。

外交會區混凝土之標稱剪力強度(V_{on})可依以下規定計算，惟當鋼筋混凝土柱受軸拉力大於 $0.1A_g f'_c$ 時忽略不計：

$$V_{on} = 1.25 \alpha_c \sqrt{f'_c} b_o h \quad (10)$$

其中 b_o 為外交會區寬度，因接頭補強方式不同而有不同計算方式，其他相關細部設計如鋼梁上下柱端箍筋斷面積、鋼梁翼板厚度、承壓面板厚度、接頭區內箍筋圍束設計及鋼梁腹板箍筋穿孔面積上限、接頭區內鋼梁翼板主筋穿孔之蓋板補強及延伸蓋板承壓補強等，可參考 Kathuria 等人 (2015) 之研究報告。



圖六 梁柱接頭剪力強度圖示 (ASCE 1994)

四、日本鋼骨鋼筋混凝土接頭設計

本節以日本建築學會「鐵骨鋼筋混凝土構造計算規準同解說」(2014)中的條文為主，並以解說中的內容為輔助說明。日本規範在鋼骨鋼筋混凝土結構中柱是以鋼管鋼筋混凝土柱或I型鋼骨鋼筋混凝土柱這兩種型式為主，梁柱接頭處以梁直通或柱直通的型式接合。日本建築學會對於鋼骨鋼筋混凝土結構的接頭強度設計主要基於容許應力及強度疊加的原理，其所使用的強度疊加方式為一般疊加法 (Generalize Superposed Method, GSM)。由於鋼骨鋼筋混凝土結構接頭區主要是由混凝土及鋼骨所組成，該方法是將鋼骨與鋼筋混凝土的極限強度分別計算後再予以疊加：

$$Q_U = {}_c Q_U + {}_s Q_U + Q_w \quad (11)$$

其中 ${}_c Q_U$ 為混凝土極限剪力強度， ${}_s Q_U$ 為鋼骨的極限剪力強度， Q_w 為箍筋的極限剪力強度。

日本建築學會在制定鋼骨鋼筋混凝土接頭區設計剪力計算公式時，依長期載重及短期載重分成兩個部份，主要因為構架在這兩種載重下的設計考量不同。長期載重考量混凝土所造成的開裂破壞，此時梁柱接頭區的剪力強度主要受混凝土的抗裂能力控制[式(12)]，短期載重則主要防止梁柱接頭區發生整體剪力破壞，此時在計算梁柱接頭區的設計剪力時需要將混凝土、箍筋和鋼骨腹板的剪力強度皆納入考量，並依據強度疊加原理予以疊加[式(13)]。

(1)長期載重

$$Q_{panel,L} = {}_c A \cdot 3f_s \cdot (1 + \beta) \quad (12)$$

(2)短期載重

$$Q_{panel,S} = {}_c A_e (2f_s \cdot \delta + {}_w p \cdot {}_w f_t) + {}_s A \cdot {}_s f_s \quad (13)$$

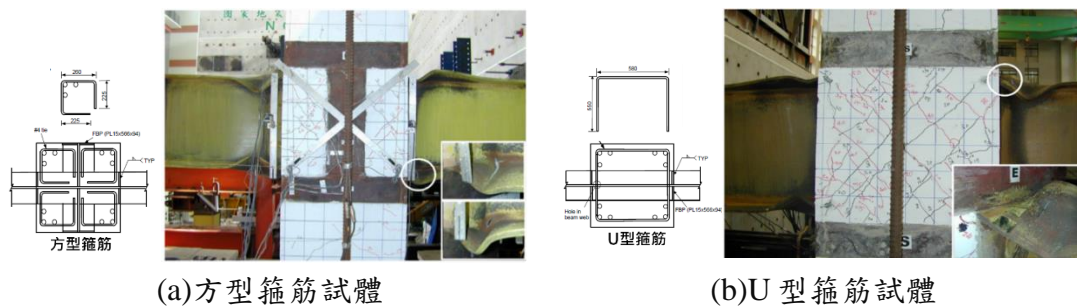
其中 ${}_c A$ 為混凝土的面積， ${}_c A_e$ 為混凝土的有效面積， ${}_s A$ 為鋼骨的面積， f_s 為混凝土之容許剪應力， ${}_w p$ 為箍筋比， ${}_w f_t$ 為箍筋之容許拉應力， ${}_s f_s$ 為鋼骨之容許剪應力， δ 為梁柱接頭型式之相關係數， β 為鋼材材料類型和尺寸係數。

五、臺灣鋼筋混凝土柱與鋼梁接頭之梁柱接頭研究

陳誠直等人(2002)將 RCS 梁柱交會區設置不同型式之箍筋與接頭有無橫向梁二變數，製作三組試體：U型箍筋搭配無橫向梁、L型箍筋搭配有橫向梁與方型箍筋搭配有橫向梁，鋼筋混凝土柱設計細節則依據 ACI 318-99，進行反覆載重實驗。實驗結果可觀察到，在接頭設置 L 型、U 型及方型箍筋，皆提供接頭區良好圍束，使試驗結果大部分之結構變形皆集中於鋼梁，柱則保持線性，如圖七，配置橫梁僅對交會區剪力裂縫有影響，對鋼梁之整體行為無影響，其中因方型箍筋施工較複雜，故建議梁柱交會區配置 L 型及 U 型箍筋。

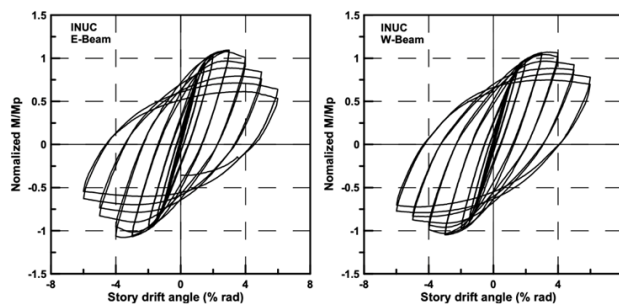
歐昱辰等人(2021)為了增加鋼筋混凝土在高樓層建築的適用性，使用了高強度鋼筋混凝土(New RC)取代傳統的 RC，設計四種 RCS 接頭模型，目的為研究此種試體接頭剪力行為。實驗模擬韌性抗彎矩構架做反覆加載試驗，試驗過程與結果顯示設計為梁彎矩破壞之試體，皆滿足 AISC 341 (2016)耐震規範之耐震行為需求，即飽滿之遲滯迴圈、良好之韌性消能行為，且全部試體皆採接頭箍筋減量設計，且接頭剪力強度皆能充分發揮，圖八為試驗中「梁塑鉸破壞同側偏心內部接頭」試體的破壞照片及其遲滯迴圈。

另外以 Kathuria 等人(2015)的研究為基礎，將包含外交會區寬度 b_o 、 ϕ_c 及式(9)修正。其中 b_o 考慮國內多以承壓面板作為補強，故以原文建議值推得公式 $b_o = \frac{7}{15}h - b_f \leq b - b_f$ ，將式(9)的鋼骨及混凝土的剪力強度之安全係數分別以 0.9 及 0.75 取代 0.85，同時 ϕ_b 改為 0.65。



(a)方型箍筋試體

(b)U型箍筋試體



(c)U型箍筋試體東向及西向遲滯迴圈

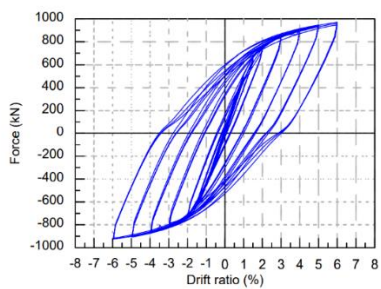
圖七 試體最終破壞情形(陳誠直等人 2002)



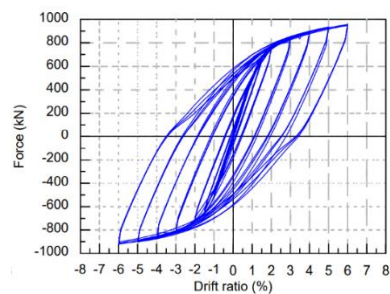
(a) 東向試體



(b) 西向試體



(c) 南向遲滯迴圈



(d) 北向遲滯迴圈

圖八 實驗試體(梁塑鉸破壞同側偏心內部接頭)破壞照片(歐昱辰等人 2021)

六、規範算例比較

本節以 ASCE(1994)中的算例，分別使用前述提及的計算公式，計算 RCS 接頭強度，並討論不同計算方式結果之差異。其中 ASCE (1994)的計算方法，Deierlein 等人(1989) 比較實際試驗與剪力強度公式計算結果，誤差約為 8%，與實驗相近且略為保守，證實 ASCE (1994) 剪力接頭強度之算式之可靠性。若將 ASCE (1994)與 AISC 341-16 (2016)條文中建議算法進行比較，ASCE (1994)計算出接頭總剪力強度為 3281 kN，而 AISC 341-16 (2016)計算出接頭總剪力強度為 3372 kN，相差 2.7%。將 ASCE(1994)與 Kathuria 等人(2015)之計算方式進行比較，兩者主要之不同為後者計算時考慮內部與外部連接之修正係數 α_{sp} 與 α_c ，以及其將箍筋提供的強度直接併入外部壓力場有效寬度 b_0 中計算，兩者計算之接頭總剪力強度結果相差 17%。

相較於 ASCE (1994) 接頭剪力強度為鋼構材剪力強度、混凝土拉壓桿強度及混凝土壓力場強度之疊加，AIJ 在制定鋼骨鋼筋混凝土接頭區設計剪力計算公式時，依長期載重及短期載重分成兩個部份，主要因為構架在這兩種載重下的設計考量不同。為抵抗長期載重對混凝土所造成的開裂破壞，此時梁柱接頭區的剪力強度主要受混凝土的抗裂能力控制式，短期載重的設計則主要是防止梁柱接頭區發生整體剪力破壞，此時在計算梁柱接頭區的設計剪力時需要將混凝土、箍筋和鋼骨腹板的剪力強度皆納入考量，並依據強度疊加原理予以疊加。AIJ 所提供的公式適用於所有的接頭形式，惟公式內部分參數之計算方式有所不同，如混凝土體積、鋼骨體積、梁柱接頭型式等，ASCE (1994)計算出接頭總剪力強度為 3281kN，而 AIJ 公式計算出總剪力強度則為 3096 kN，兩者差距約為 6%。

以 AISC 341-16 (2016)及 ASCE (1994)之計算方法單純比較混凝土強度部分，因 AISC 341-16 (2016)建議複合斷面混凝土剪力強度部分以 ACI 計算之剪力強度乘以 75% [式(3)]，因此將 ACI 318-19 (2019)規範中各種接合條件下的接頭強度(表三)與 ASCE (1994)計算結果比較，發現柱不連續時且無圍束情況計算混凝土強度結果較接近，因此建議使用式(3)計算。

表四 鋼筋混凝土接頭區之剪力強度計算比較

$A_{sh} = 450\text{mm}^2; A_{ie} = 1810\text{mm}^2; b = 750\text{mm}; b_f = 266\text{mm};$ $b_p = 266\text{mm}; b_p' = 202\text{mm}; d = 758\text{mm}; d_f = 739\text{mm};$ $d_w = 719\text{mm}; F_{up} = 400\text{MPa}; F_y = 250\text{MPa}; f_c' = 40\text{MPa};$ $F_{ysh} = 410\text{MPa}; F_{ysp} = 250\text{MPa}; h = 750\text{mm}; sh = 150\text{mm};$ $t_{sp} = 13.8\text{mm}; T_{vrm} = C_{vrm} = 0$			
公式	鋼骨剪力強度 (kN)	混凝土剪力強度 (kN)	鋼骨鋼筋混凝土接頭之剪力強度 (kN)
ASCE (1994)	$V_{spn} = 0.6F_{yw}t_{sp}jh$ $= 1172$	$V_{csn} = 1.7\sqrt{f_c'}b_p h \leq 0.5f_c'b_p d_w$ $= 2145$ $V_{cfn} = 0.4\sqrt{f_c'}b_o h + A_{sh}F_{yw}0.9h/s_h$ $\leq 1.7\sqrt{f_c'}b_o h = 823$	$\phi_s V_{spn} + \phi_c (V_{csn} + V_{cfn}) = 3281$ $\phi_s = 0.9, \phi_c = 0.75$
AISC 341-16 及 ACI 318	$V_{spn} = 0.6F_{yw}t_{sp}h$ $= 1523$	$V_{nrc} = 1.0\lambda\sqrt{f_c'}A_j \times 0.75$ $= 2669$	$\phi_s V_{spn} + \phi_c V_{nrc} = 3372$ $\phi_s = 0.9, \phi_c = 0.75$
Kathuria 等人 (2015)	$\phi_s (V_{spn} + V_{csn}) \leq \frac{\phi_b (M_{vb} - V_b h)}{d_j} = 2508$ $V_{spn} = 0.6\alpha_{sp} F_{yw} t_{sp} h = 1397$ $V_{csn} = 1.7\alpha_c \sqrt{f_c'} b_i h \leq 0.5f_c' b_f d_j = 2257$ $\frac{(M_{vb} - V_b h)}{d_j} = 3344$ $V_{on} = 1.25\alpha_c \sqrt{f_c'} b_o h = 1571$		$\phi_s (V_{spn} + V_{icn}) + \phi_c V_{on} = 3842$ $\phi_s = 0.85, \phi_c = 0.85$ $\phi_b = 0.75$
日本 AIJ (2014)		$Q_{panel,S} = c A_e (2f_s \cdot \delta + w P_w f_t) + s A_s f_s = 3096$	$Q_{panel,S} = 3096$

七、結論

本文將美國 AISC 341-16 (2016) 及日本建築學會「鐵骨鋼筋混凝土構造計算規準同解說」(2014) 與臺灣「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」(2011) 相互比較，擬定臺灣「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」(2011) 未來修訂方向，綜合歸納成「柱設計」、「梁柱接頭」及「SRC 規範待研究課題」三部份。

針對鋼骨鋼筋混凝土柱設計之混凝土強度、鋼骨強度、柱鋼筋主筋間距、柱寬厚比等項目，將混凝土規定抗壓強度 f_c' 由 210 提高至 280 kgf/cm²。鋼骨強度中鋼骨規定降伏強度由 3520 提高至 4200 kgf/cm²。至於柱中之主筋間距維持原上限間距 300 mm，但加入主筋與主筋之淨間距不得低於 4 cm、主筋標稱直徑之 1.5 倍與粗骨材最大粒徑之(4/3)倍三值之最大者；此外為避免柱壓力控制行為及高強度混凝土脆性行為，亦新增鋼骨鋼筋混凝土柱中 RC 部份所分擔之需要軸力 P_{urc} ，在 $P_{urc} > 0.3A_c f_c'$ 或 $f_c' > 700 \text{kgf/cm}^2$ 時，鋼骨鋼筋混凝土柱中之主筋間距不得大於 200 mm。原臺灣 SRC 規範(2011)中的表 3.4.2 及表 3.4.3 鋼骨鋼筋混凝土柱之鋼骨斷面肢材寬厚比，修正與 AISC 341-16 (2016)一致，將表中寬厚比 λ_{pd} 、 λ_p 二值建議修改為高韌性構件寬厚比(λ_{hd})、中等韌性構件寬厚比(λ_{md})、結實構件寬厚比(λ_p)三值。

臺灣「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」接頭種類中並無鋼筋混凝土柱與鋼梁接合型式之 RCS 接頭，但此型的接頭已列入 AISC 341-16 (2016)規範之解說部份及日本 AIJ-SRC (2014)中，建議臺灣 SRC 規範未來能參照 AISC 341-16 (2016)，擬定相關規定及接頭強度計算。本文分別使用 AISC 341-16 (2016)、AIJ (2014)、Kathuria 等人(2015)建議之 RCS 接頭剪力強度計算方式，與 ASCE (1994)算例的結果比較。根據計算結果，建議使用式(3)計算 RCS 梁柱接頭中鋼筋混凝土提供之剪力強度，較接近 ASCE (1994)計算結果，且較為保守。

目前由於國內外資料不足或缺乏 SRC 梁柱接頭相關實驗數據，針對 SRC 中之梁主筋以續接器與鋼柱連接的議題，工程界普遍將梁主筋以續接器連接至柱鋼骨，而此種接頭形式不符合現行臺灣「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」(2011)中第 8 章規定，因此建議日後待研究結果明確後進一步修訂，俾使我國 SRC 規範更臻完善。

致謝

感謝 2021 年內政部建築研究所提供「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範柱及接合設計之修正研擬」計劃，能針對此規範的修正研擬提出修正方向，其中獲得建研所陳建忠組長、陶其駿主任及李台光博士協助。此外學者專家於中華民國結構工程學會的鋼骨鋼筋混凝土構造委員會提供寶貴意見也一併致謝，參與的委員有：王炤烈理事長、江世雄理事長、李中生教授、林克強博士、許協隆教授、陳誠直教授、陳正誠教授、歐昱辰教授、陳正平技師、陳煥煒副總經理、陳俊翰博士、郭可侯協理、蔡克銓教授、廖文正教授、劉俊秀教授及柯鎮洋董事長等，使本文得以順利完成。

參考文獻

1. 日本建築學會 (2004) , 「鐵骨鋼筋混凝土構造配筋指針 (案) 同解說」 , Architecture Institute of Japan (AIJ) , 東京。 (日文)
2. 日本建築學會 (2014) , 「鐵骨鋼筋混凝土構造配筋指針 (案) 同解說」 , Architecture Institute of Japan (AIJ) , 東京。 (日文)
3. 內政部營建署 (2010) , 「鋼結構極限設計法規範及解說」 , 民國九十九年 , 台北。
4. 內政部營建署 (2021) , 「混凝土結構設計規範」 , 民國一百一十年 , 台北。
5. 內政部營建署 (2011) , 「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」。
6. 周中哲、吳松城(2017) , 「高強度混凝土充填箱型鋼柱於高軸力下之耐震試驗」 , 結構工程 , 第 32 卷 , 第 1 期 , 25-48 頁
7. 周中哲、陳冠維、林德宏(2020) , 「箱型鋼柱於不同寬厚比軸力及近斷層地震下的耐震行為與背骨曲線發展」 , 結構工程 , 第 35 卷 , 第 4 期 , 57-75 頁
8. 周中哲、劉郁芳、周德光、黃司睿、陳蓮安 (2021) , 「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範柱及接合設計之修正研擬」 , 內政部建築研究所期末報告。
9. 陳誠直、林南交、鄭錦銅、蔡克銓 (2002) , 「鋼筋混凝土柱與鋼梁接頭行為」 , 中國土木水利工程學刊 , 第 29 卷 , 第 3 期 , 4-18 頁。
10. 歐昱辰、周中哲、王威儒、賴柏丞(2021) , 「新型鋼骨預鑄混凝土複合式構架接頭試驗報告」 , 國家地震工程研究中心 , NCREE-21-003。
11. 劉郁芳、周中哲、曾郡于、孫琛琛 (2020) , 「國內外規範之鋼骨鋼筋混凝土構造梁柱接合設計」 , 國家地震工程研究中心 , NCREE-20-017。
12. American Concrete Institute Committee (ACI 318R-99). (1999). "Building code requirements for structural concrete and commentary." ACI 318R-99, USA.
13. American Concrete Institute (ACI 318R-14). (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete" ACI 318-14 Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI Committee 318.
14. American Concrete Institute (ACI 318R-19). (2019). "Building Code Requirements for Structural Concrete" ACI 318-19 Commentary on Building

- Code Requirements for Structural Concrete. ACI Committee 318.
15. American Institute of Steel Construction (AISC 341-16). (2016). “Seismic provisions for structural steel buildings.”, AISC 341-16, Chicago, USA.
 16. American Institute of Steel Construction (AISC 360-16). (2016). “Specification for Structural Steel Buildings.”, AISC 360-16, Chicago, USA.
 17. ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete. (1994). “Guidelines for design of joints between steel beams and reinforced concrete columns”, *Journal of structural engineering*, Vol. 120, Issue 8, 2330-2357. Reston, VA, USA.
 18. Azizinamini, A., & Schneider, S. P. (2004). “Moment connections to circular concrete-filled steel tube columns”, *Journal of structural Engineering*, Vol. 130, pp. 213-222, USA.
 19. Chou, C. C., & Uang, C. M. (2002). “Cyclic performance of a type of steel beam to steel-encased reinforced concrete column moment connection”, *Journal of constructional steel research*, Vol 58, pp. 637-663, USA.
 20. Chou, C. C., & Wu, S. C. (2019). “Cyclic lateral load test and finite element analysis of high-strength concrete-filled steel box columns under high axial compression”, *Engineering Structures*, 189(2019), 89-99.
 21. Chou, C. C., & Chen, G. W. (2020). “Lateral cyclic testing and backbone curve development of high-strength steel built-up box columns under axial compression”, *Engineering Structures*, 223(2020), 11147.
 22. Deierlein, G.G., Sheikh, T.M. and Yura, J.A. (1989). “Beam Column Moment Connections for Composite Frames : Part 2”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.115, No.11, pp. 2877-2896.
 23. Elremaily A. (2000). “Connections between steel beams and concrete-filled steel tube columns.” University of Nebraska-Lincoln, NE, USA.
 24. Kathuria, D., Yoshikawa, H., Nishimoto, S., Kawamoto, S., Deierlein, G., (2015) “Design of Composite RCS Special Moment Frames,” John A. Blume Earthquake Engineering Center Technical Report Series, Stanford University, Report No.189,

pp. 5-8, Sept.

25. Koester, B. D. (2000). "Panel zone behavior of moment connections between rectangular concrete-filled steel tubes and wide flange beams" (Doctoral dissertation), University of Texas at Austin, USA.
26. Kanno, R, and Deierlein, G.G. (1997), "Seismic Behavior of Composite(RCS) Beam-Column Joint Subassemblies," Composite Construction III, ASCE, Reston, VA.
27. Nishiyama, I., Hasegawa, T. and Yomanouchi, H. (1990), "Strength and Deformation Capacity of Reinforced Concrete Column to Steel Beam Joint Panels," Building Research Institute Report 71, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan.
28. Parra-Montesinos, G. and Wight, J.K. (2000), "Seismic Response of Exterior RC Column-to-Steel Beam Connections," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 10, pp. 1,113–1,121.
29. Parra-Montesinos, G., & Wight, J. K. (2001). "Modeling shear behavior of hybrid RCS beam-column connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 127, Issue 1, pp. 3-11, USA.
30. Ricles, J. M., Peng, S. W., & Lu, L. W. (2004). "Seismic behavior of composite concrete filled steel tube column-wide flange beam moment connections," Journal of Structural Engineering, Vol. 130, pp. 223-232, USA.
31. Sheikh, T.M., Deierlein, G.G., Yura, J.A. and Jirsa, J.O. (1989). "Beam Column Moment Connections for Composite Frames : Part 1", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.11, pp. 2858-2876.