

鋼構造廠房坍塌事故原因案例探討

李景亮

中國科技大學講師

李文修

中國科技大學建築研究所研究生

摘要

鋼結構具有高強度、高韌性及耐震性的優點，在考慮省能與減少產生營建廢棄物等因素下，一般廠房建築物結構多採用鋼構造興建施工。近年來由於營建業景氣的低迷與市場惡性之競爭，以及鋼構廠商削價競爭與工程成本面臨嚴重虧損等壓力下，於是鋼構施工品質難以有效管理及監督，特別是銲接施工品質的不良，往往容易造成工程災害進而危害建築物安全。

本文以案例探討方式，針對鋼構柱樑接頭銲接品質缺失因子關係，藉由設計及施工詳細檢討進行有效評估，進而作為後續工程人員對鋼構廠評估銲接施工品質及改善計畫的依據，以協助鋼構柱樑接頭銲接品管人員，執行鋼構工程品質管制時，能克服鋼構銲接施工品質所面臨的問題，希望藉此鋼構接施工管理模式，能大幅降低銲接施工缺陷現象的發生，以確保整體鋼構工程銲接施工品質。

關鍵詞：鋼構柱樑接頭、銲接缺陷、銲接施工管理

Case study on the reasons of the steel structure factory collapse

Abstract

Steel structure has high strength、high toughness and earthquake- resistance advantage and can be more energy-saving and reduce the waste in construction. Nowadays we adopt steel structure to build the plants. Recently du to the depression in the construction industry and “cost down” competition, the supplier of steel structure confront the “cost down” competition and deficit of construction cost. In this situation the construction quality is hardly be controlled under effect management especially so as to the unqualified of steel welded that conduct construction damage and the building safety threatened

In this paper, discuss with case example, the relation between the lack of steel columns and beams joint welding quality. Thru design and intensive construction make effective estimations. In accordance with these make improving plan for later member to assist the QC member then to execution steel construction quality control and the overcome the welding quality problem. Thru this steel welded construction management modal reduce the welding deficit to ensure overall steel welding construction quality

Keyword : steel columns and beams joint, welding deficit, welding construction management

一、前言

鋼構具有強度高、自重輕、材料均質等力學特性的優勢，二十世紀末期由於鋼材鍛造技術及銲接技術的成熟，加上鋼構使用在建築工程興建施工時，但能縮短施工工期，且能因應將來建築物越蓋越高的需求。再者，由於鋼材在生產及製作過程中所產生的污染少，又具有資源回收再生使用的好處，在強調永續經營的理念下，鋼構具有上述許多優勢，因而成為優良建築材料。

根據陳華焜(2004)之研究，在考慮省能與減少產生營建廢棄物等因素下，比較相同單位樓地板面積，建築結構採用鋼筋混凝土、鋼骨鋼筋混凝土(SRC)或鋼構來施工建造時，結果發現以採用鋼構來施工時，二氧化碳產生量為最低，造成環境的影響也最小，且研究報告顯示，以全新鐵砂來提煉每公斤鋼胚時，二氧化碳的排放量約為2.06公斤，以回收廢鐵來提煉每公斤鋼胚時，二氧化碳的排放量約為0.32公斤，又根據資料顯示混凝土(RC)與鋼骨鋼筋混凝土(SRC)建築物，二氧化碳產生的排放量，約為鋼構建築結構的1.5倍，由此驗證鋼構建築非常具有環保的作用，能減少建材所產生的二氧化碳。國內目前對於鋼構領域之研究，一般是以柱樑接頭研究為多；原因是鋼構具有特殊施工方式，鋼構施工過程尤其是現場的柱樑接頭組裝、銲接工作，將決定日後整棟建築物的安全堅固與使用壽命，所以鋼構柱樑接頭的銲接施工管理與銲接品質是息息相關，由許多鋼構工程案例，發現柱樑銲接施工的管理，將影響銲接施工後缺陷發生的頻率，如何來避免及克服銲接缺陷的發生，首先必須追蹤、分析銲接缺陷發生原因，是人為設計或是施工疏失，抑是自然環境無法克服而產生，經過追蹤探討發生的根源後，必須釐清是人為設計或是施工的疏失，抑是自然環境所造成，再將造成銲接缺陷的因素及缺陷的類別做詳細分類，進而來建構防範銲接缺陷發生的各項措施，期望能降低鋼構柱樑銲接缺陷發生的頻率，並能減少因銲接施工缺陷，造成工程品質瑕疵的風險，如此鋼構建築物於居住時才可得到具體的安全與保障。

鋼構具有高強度、高韌性、耐震性佳及施工迅速的特性，預製構件均以銲接方式來接合，所以設計者如果對於構件接合的施工過程或銲接特性掌握不足，將會造成施工接合不易或應力過度集中的現象，且容易造成鋼構銲接接合處非預期的破壞。本文旨在探討及調查分析破壞事故情之相關的原因，說明鋼構建築設計不良或銲接施工疏失，可能導致鋼構建築物破壞、倒塌的意外事件發生。

二、研究案例現場調查

鋼構施工方法有銲接、鉚釘、螺栓鎖固…等接合方式，鋼構採用銲接施工時，設計空間彈性可變大、構造可以簡單化，不需要在構件上開孔，節省開孔所需的工時，且不會削弱構件截面，施工方法簡便，所以工作效率可提昇；又構件可直接連接，可以連接任意形狀且複雜的結構等特點；因此近來鋼構銲接已慢慢取代早期的鉚釘、螺栓鎖固接合方法，成為目前鋼構建築主要施工方法。鋼構工程除材料的選用外，最主要是銲接施工，因為整個鋼構是由許多構件(Member)裝配組合而成，單一構件又是由許多材料零件(Piece)裁拼組成，這些組成、裝配、組合的接合，最常用的施工方法，是以銲接施工為主，銲接施工接合應用迄今近百年，

由於銲接應用技術不斷的精進，發展到今日已是鋼構施工最主要、最簡單的接合方法；所以鋼構工程施工經過良好的結構設計、銲接規範的訂定、慎選銲接材料，經精良的銲接技術進行施工，必定能得到可靠且經濟的施工品質，所以銲接施工是鋼構工程最重要的環節，也是工程施工成敗的關鍵所在。

本研究案例為一新建玉米倉庫鋼構廠房工程，新建完成後屯放玉米時結構體坍塌損壞，本研究案例調查坍塌現況時照片如下圖 1~圖 6 所示，破壞型態如下：

1. 鋼梁接頭處產生拉力破壞。
2. 外牆鍍鋅鋼承板受拉扯撕裂。
3. 柱與梁接頭處翼板受拉挫屈。
4. 構件本身並無彎曲破壞。



圖 1、研究案例鋼構廠房結構體坍塌損壞



圖 2、鋼梁接頭處產生拉力破壞



圖 3、外牆鍍鋅鋼承板受拉扯撕裂



圖 4、柱與梁接頭處翼板受拉挫屈



圖 5、柱與梁接頭處破壞現況



圖 6、梁構件破壞現況

三、國內鋼構施工常見缺失探討

鋼構工程柱樑銲接施工過程包括三階段，依鋼構施工歷程區分為：

- (1). 規劃設計階段。
- (2). 製造施工階段(廠內預製、施工現場吊掛、安裝與銲接施工)
- (3). 施工管理階段。

依行為發生者為規劃設計者、製造施工者、(裁切組立、吊掛、安裝與銲接)及施工管理者，因此鋼構工程柱樑銲接施工品質的維護，必須由設計、施工、監造三者共同配合施工現場，並落實PDCA 品質管理循環模式，執行鋼構柱樑接頭銲接缺陷防範措施，不要疏忽銲接施工過程任何小缺失，以避免鋼構柱樑接頭銲接缺陷發生，須增加施工成本與人力付出，再進行銲接缺陷剷修、修補工作，因而影響鋼構柱樑接頭銲接施工品質。

3.1 鋼構柱樑接頭銲接缺陷原因

鋼構工程柱樑接頭銲接過程，構材銲道接合處與銲材經過銲接高溫熔融與凝固冷卻，構材銲道接合處材質因而產生變化，且銲接過程中容易受到各種人為或外在環境因素影響，如：銲接環境的濕度過高、銲接材料的受潮、銲道接合處開槽面的銹蝕、油污、銲接過程層間除渣處理的不完全，銲道接合處開槽形狀設計的不良，及銲接施工作業環境不安全等原因，均容易造成鋼構柱樑接頭銲接品質的變化，導致鋼構柱樑接頭銲接缺陷現象的發生，如果銲接過程中銲接人員的施工不當或技術不熟練，更容易造成各種銲接缺陷的發生，所以在鋼構工程柱樑接頭銲接施工案例，常發現龜裂、氣孔、夾渣、堆疊、銲道融合不足、融合不良、銲蝕、銲冠過高、不足、寬度太窄、銲道表面粗糙…等銲接瑕疵、缺陷現象，上述銲接缺陷有些是規範容許，有些是規範不容許，詳如圖7 所示說明，規範不容許之銲接缺陷則必須再進行鑿修程序，並再次經檢驗確認符合規範要求時才可認定合格，銲接缺陷合格標準，以訂定的施工合約為依據。

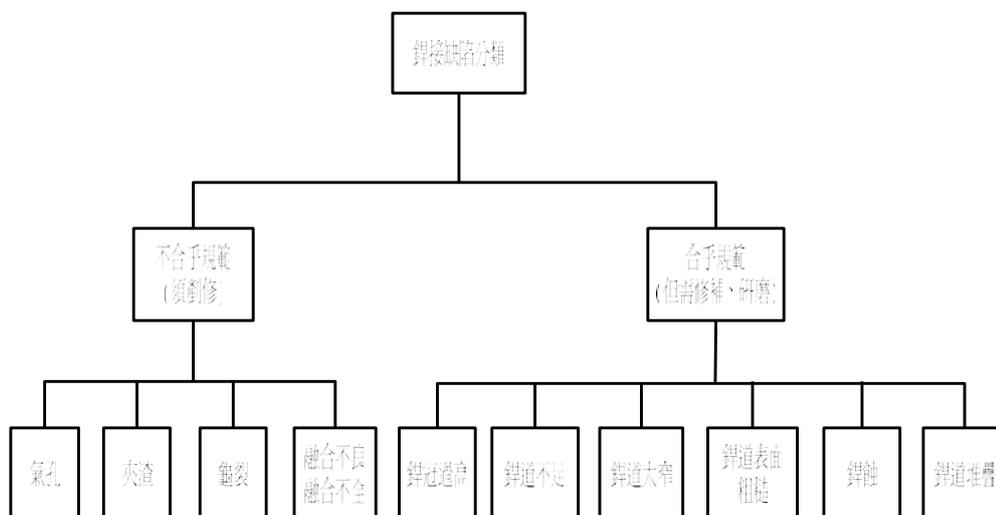


圖 7 鋼構柱樑接頭銲接缺陷分類圖[6]

3.2 鋼構工程施工缺失原因

影響鋼構工程施工缺失因素非常繁多，一般區分直接與間接因素，直接因素是指施工管理過程中，因施工現況因素直接產生的問題，例如(1). 銲接施工人員施作不當、技術的不熟練。(2). 鋼構柱樑選用的材料、銲材規格與規範不符。(3). 鋼構柱樑吊掛、安裝施工的誤差。(4). 銲接施工機具、設備的不良。(5). 銲接施工環境不良、不安全等；至於間接因素是施工缺失所潛在的因素，例如：(1). 鋼構柱樑設計規劃不當。(2). 銲接施工管理不當。(3). 溝通協調的不良等因素。

目前鋼構工程銲接施工現況缺失如下：

1. 鋼構柱樑接頭構件未考慮相關施工性

鋼構柱樑接頭銲道的開槽設計型式與銲道間隙的大小，及銲道開槽的不良或吊掛、安裝施工精度的不精確，將直接影響銲道銲接施工的品質，銲道開槽型式與銲道間隙的大小，銲接施工時銲熔無法使鋼構柱樑接頭銲道接合處融合，導致構材銲道接合處強度無法滿足設計要求；銲道開槽的不良或吊掛、安裝施工精度的不精確，鋼構柱樑接頭銲接施工品質不良，導致鋼構柱樑構件銲接施工後的變形，又不良的銲接條件將增加施工的困難度，將影響整體鋼構施工的進度。

2. 鋼構柱樑構材的影響

鋼構柱樑形狀改變處通常是應力集中地方，因此鋼構柱樑構材加工應避免形狀的變化(除非結構設計特殊的考慮)，銲接施工過程產生的高熱也容易造成柱樑材質的脆化，所以鋼構柱樑接頭銲接施工之銲接程序、銲接條件、銲材及柱樑構材的選用必須慎重選擇，且銲接施工前必須作銲接程序及銲工的檢定及試驗，檢定核可才可進行正式的鋼構柱樑接頭銲接施工。

3. 銲材的影響

選用適當銲材及銲材需作適當的保護措施，以避免銲材受潮造成銲藥的變質，導致銲接施工品質缺陷的發生，例如造成氣孔的原因是銲接施工過程，銲材高溫受熱所產生氣體於銲熔金屬內，被包圍無法溢出因而形成不連續的氣泡，原因是銲接施工技術不當及銲材潮溼所形成缺陷，所以必須依銲接條件選擇適當銲材，並作適當的保護措施，可以減少上述銲接施工缺陷現象的發生。

4. 銲接施工的影響

銲接的溢銲及銲接的高熱將影響鋼構柱樑構件材質及銲道銲接後的強度，過度的銲接高入熱量，導致鋼材熱影響區的脆化及產生應力集中現象，銲接施工運棒速度過快容易產生融合不足，運棒速度過慢將因銲接過熱，對材質熱影響區產生脆化作用，影響整體鋼構柱樑接頭銲接施工的品質。

5. 銲接施工使用機具的影響

銲接電壓、電流之穩定性，影響銲接施工品質，不穩定的銲接施工電壓、電流會對銲熔產生影響，並直接影響著鋼構柱樑接頭銲道接合的強度，起始電流與終端電流不穩定，也容易造成銲熔不足的銲接缺陷現象。

四、案例事故原因探討與分析

4.1 設計計算探討：

本研究案例設計載重、計算及相關圖說經檢視結論如下：

1. 荷重假設：(單位 t/m^2)

(1) 靜荷重：屋頂烤漆版 $0.04 t/m^2$

(2) 活荷重：屋頂烤漆版 $0.06 t/m^2$

小結『靜荷重、活荷重皆未考慮玉米屯放重量及其所產生之側壓力』

2. 水平地震力計算內計算為風力計算式非地震力計算

小結「遺漏水平地震力計算」

3. 建築結構應力分析及設計

小結「遺漏建築結構應力分析及設計計算資料」

4. 樓層最大變位檢核及層間相對變位檢核

小結「遺漏層間相對變位檢核計算資料」

5. 遺漏鋼結構之接頭設計計算

6. 遺漏外牆設計，檢視設計圖採用鍍鋅鋼承板 $T_w=1.5mm$ 如右圖非屬抵抗側向壓力之設計。

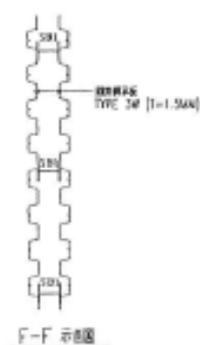
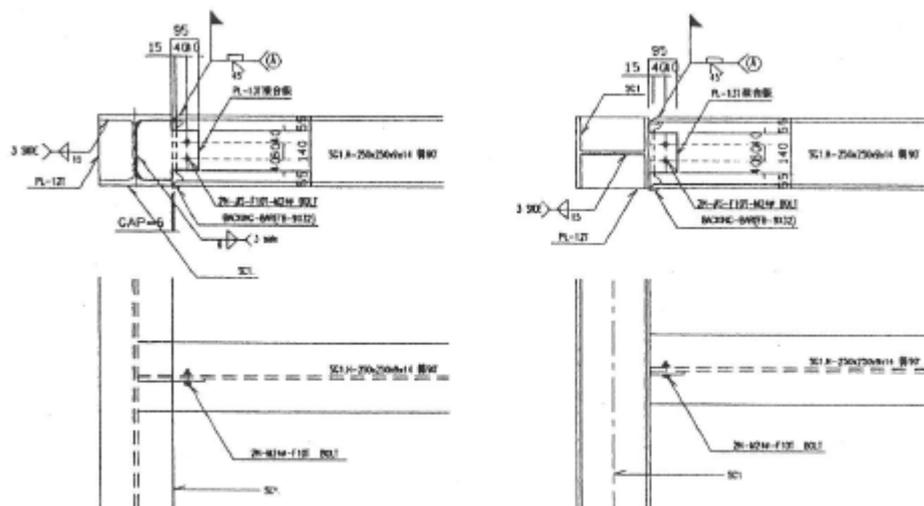


圖 8 外牆鍍鋅鋼承板 $T_w=1.5mm$

4.2 檢核設計圖接頭銲接所提供之容許抗拉力：



[3] SG1 & SC1 接合詳圖

圖 9 SG1 & SC1 接合詳圖

SG1&SC1 接合容許抗拉力計算：

梁、柱接頭 H250x250x9x14 兩側全滲透鐸提供之容許抗拉力依據鋼結構設計手冊(容許應力法 ASD))：

「垂直於有效面積之拉力，全滲透鐸容許抗拉力 同母材」，鋼骨 $f_y=2500\text{kg}/\text{m}^2$ 。

因此：單側全滲透鐸容許抗拉力 $F_t=0.6 \times 2.5T/\text{c m}^2 \times (25 \times 1.4)=52.5 \text{ T}$

兩側全滲透鐸容許抗拉力 $F_t=52.5 \times 2 = 105 \text{ T}$

中間填角鐸提供之容許抗拉力(依據鋼結構設計手冊(容許應力法 ASD))：

鐸材 E70 抗拉強度= $F_u=4.92\text{T}/\text{c m}^2$ $F_v=0.3F_u=1.476 \text{ T}/\text{c m}^2$

容許鐸接強度= $0.707SF_v=1.57 \text{ T}/\text{cm}$ S：鐸接尺寸 S=5mm

鐸接長度 $L=14\text{cm}$

中間填角鐸接提供之容許抗拉力= $0.707 \times 0.5 \times 1.476 \times 14= 7.3\text{T}$

SG1&SC1 接合處之容許總抗拉力=(兩側全滲透鐸+中間填角鐸)提供之容許抗拉力= $105+7.3=112.3\text{T}$

兩側全滲透鐸之容許抗拉力佔總抗拉力約 93.5%

中間填角鐸之容許抗拉力佔總抗拉力約 6.5%

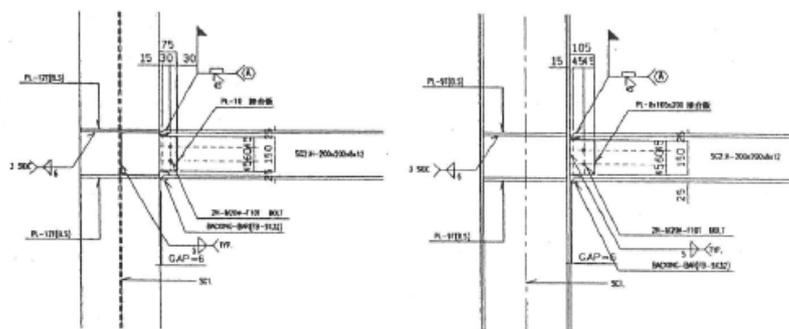


圖 10、SG2 & SC1 接合詳圖

SG2&SC1 接合容許抗拉力計算

H200x200x8x12

兩側全滲透鐸提供之容許抗拉力(依據鋼結構設計手冊(容許應力法 ASD))：

「垂直於有效面積之拉力，全滲透鐸容許抗拉力 同母材」，鋼骨 $f_y=2500 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。因此：單側全滲透鐸容許抗拉力 $F_t=0.6 \times 2.5 \text{ T}/\text{c m}^2 \times (20 \times 1.2)=36\text{T}$

兩側全滲透鐸容許抗拉力 $F_t=36 \times 2 = 72 \text{ T}$

中間填角鐸提供之容許抗拉力(依據鋼結構設計手冊(容許應力法 ASD))：

鐸材 E70 抗拉強度= $F_u=4.92\text{T}/\text{c m}^2$ $F_v=0.3F_u=1.476 \text{ T}/\text{c m}^2$

容許鐸接強度= $0.707SF_v=1.57 \text{ T}/\text{cm}$ S：鐸接尺寸 S=5mm

鐸接長度 $L=15\text{cm}$

中間填角鐸接提供之容許抗拉力= $0.707 \times 0.5 \times 1.476 \times 15= 7.83\text{T}$

SG1&SC1 接合處之容許總抗拉力=(兩側全滲透鐸+中間填角鐸)提供之容許抗拉力= $72+7.83=79.83\text{T}$

兩側全滲透鐸之容許抗拉力佔總抗拉力 90.2%

中間填角鐸之容許抗拉力佔總抗拉力 9.8%

小結：「設計計算資料雖有遺漏或不足，惟設計圖說提供梁柱接頭之銲接容許抗拉強度(112.3T 及 79.83T)足以抵抗玉米屯放時所產生之側壓力(9.072 T~15.12 T)。」

4.3 施工檢討

1. 本案施工材料未試驗及焊道未檢驗，故無法提供相關試驗報告。
2. 玉米單位重為 54lb/英斗，約為 $700.12 \text{ kg/m}^3 = 0.70012 \text{ T/m}^3$ ，事故發生時玉米屯放深度約 22 公尺。距地面 6 公尺為鋼筋混凝土牆，故距地面 6 公尺處玉米單位面積重為 11.2 T/m^2 。梁(深度約 22 公尺處)受拉面積約 $0.75 \times 3.6 = 2.7 \text{ m}^2$ ，玉米屯放時，深度約 22 公尺產生之側向壓力作用於 SG1 及 SG2 梁與 SC1 柱之最大拉力，介於 9.072 T~15.12 T(假設側向壓力係數為 0.3~0.5)。
3. 現場調查時確認本案例施工僅施工中間填角銲，兩側全滲透開槽銲並未銲接如下圖照片所示：



圖 11、兩側全滲透開槽銲並未銲接



圖 12、兩側全滲透開槽銲並未銲接



圖 13、SG1H250X250X 9X14 端部未開槽及未銲接正面現況



圖 14、SG1H250X250X 9X14 端部未開槽及未銲接側面現況

五、結論與建議

5.1 結論

1. 本案研究案例鋼構廠房結構體坍塌事故主要原因係：
施工單位於梁柱接頭僅施作中間填角銲(中間填角銲提供之容許抗拉力為7.83T及7.3T)，兩側全滲透開槽銲並未開槽及銲接，顯然梁柱接頭銲道施工未按圖施作，致接頭抗拉能力不足以承受玉米屯放時所產生之側壓力(9.072 T~15.12 T)導致結構體坍塌。
2. 本案例可供鋼構廠評估銲接施工品質及改善之參考案例，以協助鋼構柱樑接頭銲接品管人員，執行鋼構工程品質管制時，能克服目前鋼構銲接施工品質所面臨的問題。

5.2 建議

1. 建議藉由鋼構柱樑接頭銲接缺陷案例建構相關施工管理模式，能大幅降低銲接施工缺陷現象的發生，以確保整體鋼構工程銲接施工品質。
2. 建議根據資料顯示鋼構工程品質產生問題，多由於銲接部位設計不當及施工品質的不良所造成，一般民眾常認為鋼骨的韌性和強度比起鋼筋混凝土好，所以鋼結構比鋼筋混凝土結構有韌性，耐震力也必然增強。然而，「以具有高強度與高韌性的鋼骨材料所建造之鋼結構，一定就會成為安全性能良好嗎？」。
3. 如何落實鋼構柱樑接頭銲接施工品質管理應屬當務之急，對於如何提昇鋼構柱樑接頭安裝、銲接施工品質擬作下列建議：
 - (1.) 落實鋼構廠商分級制度及評鑑標準，並建立廠商管理制度，對於整體鋼構工程品質提升將所有助益。
 - (2.) 確實執行現行鋼構建築施工作業程序及銲接施工品質的管理，對於施工缺失之檢核，應確實執行與改善，以提昇整體鋼構工程銲接的施工品質。

六、參考文獻

1. 台北市政府工務局 95 年 7 月審定之「臺北市建築物工程施工損害鄰房鑑定手冊」
2. 混凝土工程施工規範與解說(土木 402-88)
3. 內政部建築技術規則
4. 鋼結構設計手冊(容許應力法 ASD)中華民國結構工程學會
5. 王湘順，「鋼構工程柱樑接頭銲接缺陷預防之研究」，碩士論文，國立雲林科技大學營建工程系碩士班，2006。
6. 陳正平「鋼結構高強度螺栓與銲接設計探討」技師報 中華民國 102 年 7 月 6 日