

鋼骨梁柱接頭橫隔板耐震性能研究

Seismic Researches of Diaphragms in Beam-to-Box Columns

主管單位：內政部建築研究所

鄭元良 蔡克銓 李台光 汪家銘
Cheng, Yuan-Liang Tsai, Keh-Chyuan Lee, Tia-Kuang Uang, Chia-Ming
林克強 莊勝智
Lin, Ker-Chun Jhuang, Sheng-Jhih

摘要

國內鋼結構建築之箱型柱與寬翼梁構成的抗彎接合中，箱型柱內與梁翼板同高處配置柱內橫隔板，且箱型柱與內橫隔板間至少一對接合銲道使用電熱熔渣銲之接合細節，已成為國內鋼構界之工業化製造標準。但在過去許多針對此接合細節之梁柱接頭試驗結果中可發現，當接頭尚未發展明顯非線性變形前，常在電熱熔渣銲道之熱影響區附近發生脆性破壞，其破壞機率約為 25%。由關於電熱熔渣銲之研究成果發現，箱型柱內橫隔板採電熱熔渣銲與柱板接合之梁柱接頭耐震性能可靠度不佳，此顯示國內採用電熱熔渣銲之箱型柱梁接頭，在未發展充分非線性變形能力前有較高之破壞機率，研究也顯示此電熱熔渣銲製作與檢測品質仍有改善空間，值得國內工程界及鋼構業重視。藉由有限元素分析結果、電熱熔渣銲元件試驗結果與實尺寸梁柱接頭試驗結果皆顯示，當柱內電熱熔渣銲位置偏差或柱外梁翼位置偏差等施工問題發生時，其累積塑性應變之指標明顯提升，且皆於試驗過程中發生突發性的脆性破壞。

關鍵詞：箱型柱，電熱熔渣銲，熱影響區，累積塑性應變

Abstract

Moment connections formed by box column and wide flange beams are extensively used in the steel buildings in Taiwan. The diaphragms inside a box column are installed at the same elevations where the beam flanges are connected to the column. For each diaphragm, there are four connections between the sides of the diaphragm and its adjacent column flanges. In the Taiwan structural steel fabrication practice, it is commonly seen that at least one pair of the diaphragm-to-column flange (D-to-CF) connections in a diaphragm are fabricated by using the Electroslag welding (ESW) details. However, many past experimental results show that, for a beam-to-column connection with the ESW joints, there is approximate a 25% chance of a brittle fracture occurring near the heat affected zone (HAZ) of the ESW.

Therefore, the objectives of this research include: (1) understanding the mechanical behaviors of the ESW D-to-CF connection in the box column and (2) suggesting refined fabrication details for the ESW in order to avoid the brittle damage and to enhance the seismic performance of the beam-to-box connection.

Keywords : Box Column, Electroslag welding, Hot Affect Zone, Equivalent Plastic Strain

一、研究緣起

在國內鋼結構建築中，由四片鋼板所組成之箱型斷面柱構件的應用極為普遍，為使箱型柱構件與 H 形梁構件之接合符合抗彎接合之力學特性，在箱型柱內與梁翼板同高程處配置柱內橫隔板，以順利傳遞梁端彎矩。國內鋼結構實務中，箱型柱在梁柱接頭處採直通連續，橫隔板配置於箱型柱內部，為順利且經濟地製作柱內橫隔板，國內鋼構廠乃於內橫隔板與柱板間，至少一組相對接合採用電熔渣銲 (Electro-Slag Welding, ESW) 之單道熔填銲道製作，此箱型柱內橫隔板製作細節為國內鋼結構實務普遍使用且特有之細節，依目前鋼結構製造技術，此細節已幾乎為工業化標準，並已大量使用於國內鋼結構建築之梁柱接頭中，而國外的應用較不普遍。理論上，柱內橫隔板採用電熔渣銲可提供足夠強度以傳遞梁柱接頭中梁翼板之拉力。

但相關研究成果[1,2,3]顯示，許多應用於實際工程之 H 形梁接箱型柱之梁柱接頭中，即使梁翼採切削細節來降低梁翼板拉力需求，與對應柱內橫隔板為電熔渣銲道之柱面接合試體的試驗結果發現，柱內橫隔板與柱板接合之電熔渣銲道，其接合之強度與韌性能力明顯較多道熔填之 FCAW 或 SMAW 全滲透銲道不可靠，常發生不被預期的脆性破壞機率極高，如照片一與照片二所示，經統計破壞機率約為 25~40% 之間。探討破壞原因發現，製作偏斜的電熔渣銲被研判為此梁柱接頭試體造成破壞的主要原因，同時電熔渣銲的高入熱量亦對柱板材質造成相當大的影響。另一方面，由銲道檢測程序也顯示，所有試體於箱型柱構件製作完成後，其電熔渣銲均經超音波檢測合格，再進行梁構件接合，但從電熔渣銲破壞之部分剖面巨觀試片發現，部分區域之電熔渣銲道仍有熔透瑕疵現象，因此超音波檢測合格標準或可靠度仍有調整空間。有關電熔渣銲幾何位置與形狀之相關解析研究[4]，利用尖端開口位移、應力三軸度與破裂指數等三指標評估其破壞潛勢，研究成果顯示，當電熔渣銲與內橫隔板偏移顯著時，尖端開口位移與應力三軸度指標明顯提升，有發生破壞之趨勢。另外針對文獻[1] 中 A572GR50 材質未接梁之柱板與內部電熔渣銲相鄰處熱影響區進行硬度與衝擊強度試驗[5]，結果顯示其熱影響區有硬度增大，衝擊強度值有顯著降低之現象，此顯示該熱影響區有脆化現象發生。

上述相關之研究成果發現，箱型柱內橫隔板採電熔渣銲與柱板接合之梁柱接頭耐震性能可靠度不佳，此顯示國內採用電熱熔渣銲之箱型柱梁接頭，在未發展充分非線性變形能力前有較高之破壞機率，研究也顯示此電熱容渣銲製作與檢測品質仍有改善空間，值得國內工程界及鋼構業重視。

二、研究地方法

本研究規劃採用的研究方法為：(1)針對箱型柱採電熔渣銲接合之柱內橫隔板子結構，利用變化相關研究參數進行有限元素分析研究；(2)選擇特徵參數針對此子結構進行試驗研究，並比較解析與試驗研究結果，做為實尺寸梁柱接頭驗證試驗之依據；(3)選擇最佳接合細節，進行實尺寸梁柱接頭進行解析與試驗研究並比較試驗結

果；(4)綜合前述之研究成果，提出改善之設計建議。

三、ESW 元件試體有限元素模型分析

3.1 有限元素分析模型介紹

本研究使用之 ESW 元件分析模型如圖 1 所示，主要包含箱型柱、梁翼板、電熔渣銲道、橫隔板與橫隔板上下用以包圍電熔渣銲道之背襯板，其中梁翼板採用開槽全滲透銲接與箱型柱電熔渣銲對應之柱板相接，而於模擬梁翼板全滲透開槽全滲透銲接處忽略背襯板。因本分析模型為上下對稱之模型，故以箱型柱寬度方向之中心線取半分析，以節省分析計算之時間。本分析模型於箱型柱之柱板與內橫隔板處以鉸接束制，於上面梁翼板端部施加拉力，以研究柱板與電熔渣銲接合熱影響區與梁翼板之應力分布情況。而分析模型之梁柱尺寸主要以目前國內鋼構業較常使用之尺寸為主，箱型柱尺寸為 BOX 750x750x28，梁翼寬度為 300mm，梁翼板厚度為 25mm，內橫隔板厚度亦為 25mm。

本分析模型考慮梁翼傳入柱內之彎矩約佔總彎矩之比例(約 0.95)、梁翼塑性斷面模數與梁全斷面塑性斷面模數之比值(0.75)與應變硬化係數(1.25)，其施加最大拉力為 $1.58A_tF_y$ 。

鋼母材與銲道之材料模型目前均模擬為雙線性且為均質材料，於線性階段採用等向(Isotropic)材料模型，彈性模數設定為 200,000 MPa，波松比 (Poison Ratio) 為 0.3。塑性階段採用走動(Kinematic)材料模型，材料之降伏強度暫以標稱強度設定之。本分析模型不考慮實際試體製造銲接時所產生之熱影響與殘留應力，亦不考慮鋼材開裂破壞之行為。

3.2 有限元素分析模型參數研究

本研究使用有限元素分析軟體 ABAQUS 進行模擬與分析，共有三類參數進行研究分析，包含 ESW 熔透直徑大小、ESW 垂直偏心與梁翼板偏心等參數，探討該參數對柱板與電熔渣銲接合熱影響區與梁翼板之應力分布狀況之影響，目前規劃的詳細研究參數為(1)變化電熔渣銲道直徑大小，其電熔渣銲道直徑大小為 38mm(D38)、41mm(D41)與 D44mm(D44)三種大小，(2)變化電熔渣銲垂直偏心位置，其垂直偏心位置往上為正，往下為負，共分為+8mm(EV+8)、+5mm(EV+5)、+3mm(EV+3)、0mm(CC)、-3mm(EV-3)、-5mm(EV-5)與-8mm(EV-8)七種參數，(3)變化梁翼板之位置，讓梁翼板相對於箱型柱內橫隔板有一垂直往上偏心距離，分別為 0mm(BFCC)、+8mm(BFEC8)、+16mm(BFEC16)與+25mm(BFEC25)四種參數，而整體有限元素分析的組數如表一所示。

3.3 有限元素模型分析結果

本研究主要採用累積塑性應變(Equivalent Plastic Strain, 以下簡稱 PEEQ)與裂縫尖端開口位移(以下簡稱 Opening)為本研究電熔渣銲力學行為之指標，其中 PEEQ 為取熱影響區平行梁翼寬度方向之最大值，而裂縫尖端開口位移則是取側墊板及柱翼板間之間隙與電熔渣銲之兩交點相對位移，因於 ESW 上下皆有側墊板與柱翼板之間

隙，故此兩種參考指標皆分為上部與下部兩種。有限元素分析結果之比較如圖 2 至圖 4 所示。分析結果顯示隨著梁翼往上偏心愈大，其上部 PEEQ 與 Opening 之反應愈大，下部 Opening 之反應則愈小，ESW 往下偏心量愈大時，上部 Opening 反應愈大、下部 Opening 反應愈小，當 ESW 往上偏心量愈大時，上下部 Opening 反應則反之，而對於 PEEQ 反應來說，隨著 ESW 往下偏心量愈大，上部 PEEQ 有愈大之趨勢，而 ESW 往上偏心量愈大，上部 PEEQ 則有愈小之趨勢，而下部 PEEQ 整體反應幾乎接近 0。尤其需特別注意當 ESW 垂直偏心位置與梁翼偏心位置為反方向時，其 PEEQ 與 Opening 之指標明顯提升。

四、橫隔板與箱型柱電熱熔渣銲接合試驗

綜合前述分析結果以及考慮試體製作可行性，本研究以 ESW 銲道垂直偏心量、梁翼板垂直偏心量兩者為控制參數，變化各種組合並配合有限元素分析設計出 8 組試體，各試體之設計參數詳見表 2，其中以+代表 ESW 有偏心，0 代表不偏心。試體採用之原始箱型柱斷面為 750x750x28mm，橫隔板厚度為 25mm，元件試體高度則取 300mm(橫隔板置於中心)，在此箱型柱兩側對應於橫隔板之位置均銲上 25mm 之板片(模擬梁翼板)，板片端部另加轉接板與加勁板，以利與試驗機台之接合，試體標準圖如圖 5 所示。

本試驗於國家地震工程研究中心 SHIMADZU 500 噸萬能試驗機進行，於試驗進行前將 ESW 元件試體上下兩端鎖固於可與 500 噸萬能試驗機相接之轉接夾具上，緊接著將試體上下兩端轉接夾具與 500 噸萬能試驗機相接，即可進行試驗，如圖 6 所示。其試驗採位移控制，其位移量從 0mm 持續定量增加位移，位移每當增加約 24mm 時，即進行力量的卸載與重新加載，直至試體無法提供正常強度為止。

圖 7 為各組試體之位移與力量關係圖，其中位移為上翼板、下翼板及箱型柱上之三支位移計之總和，力量由 500 噸萬能試驗機獲得，試體 CE+25、EE+25 與 EE-25 皆於試驗位移尚未到達 100mm(相對翼板拉伸率為 16.8%)時即發生破壞，如圖 8 所示，破壞發生極為突然，且強度瞬間喪失，屬於脆性破壞，破壞模式皆為箱型柱柱板受拉拱起而破壞。其餘試體之破壞皆於翼板切削段圓弧處發生斷裂，此時翼板拉伸率約為 19.3%~27.8%。

五、實尺寸鋼梁與箱型柱接頭試驗

本試驗共進行兩組實尺寸鋼結構梁柱接頭試體試驗，試體各部均採用 SN490B 材質之鋼材，試體鋼柱之斷面尺寸為 BOX 750x750x28 mm，試體鋼梁之斷面尺寸為 BH 800x300x14x25 mm，並於鋼梁上下翼板外側使用 t=8mm、L=365mm 之蓋板。柱內對應於梁翼板高程處皆配置柱內橫隔板(diaphragms)，厚度與梁翼板相同(兩組試體均為 25cm)。梁柱接頭之接合細節中，梁翼板採工地全滲透銲與柱板接合，並以鋼質背襯板做為全滲透銲道之背襯板，銲接完成後，兩側起、迄弧板均移除且整修與磨平，上下翼板之背襯版(backing)均不移除。試體之梁腹板以兩排 8 支共 16 支 M24-S10T 高張力螺栓，以提供梁柱接合處之剪力需求。

試驗裝置如圖 9，柱兩端支承中心之距離為 4000 mm。柱底藉由一支短柱固定

於反力地板上，以防止試體柱在梁受力作用時發生軸向滑動。試體梁水平放置，其自由端與一支固定於反力地板之油壓伺服閥千斤頂相接。整個試驗是由接於梁端下翼板外側之油壓伺服閥千斤頂施加力量，試驗採用位移控制施以反覆逐漸增加之位移載重，並由電腦程式自動控制油壓伺服閥千斤頂，依照預定之位移歷時執行，試驗之位移如圖 10 所示。

圖 11 與圖 12 分別為試體 BC1 與 BC2 之梁端施力與總變形轉角及梁塑性轉角關係圖，其中 θ 為梁柱接頭總變形轉角， θ_{bp} 為梁塑性變形轉角。此結果顯示，試體 BC1 之總變形轉角達 5% 弧度時，鋼梁上翼板發生斷裂，梁塑性轉角為 +3.89% 與 -4.34%，如圖 11 所示，分析各變形分量之結果顯示，柱與梁柱交會區大致仍維持彈性反應。試體 BC2 在總變形轉角達 3.0% 弧度迴圈時，柱板即發生破壞，梁塑性轉角僅達 +2.55% 與 -1.76% 弧度，如圖 12 所示。

探討兩組試體之破壞模式發現，試體 SW1 的破壞發生極為突然，且強度瞬間喪失，屬於脆性破壞。造成此試體破壞可能並非單一因素，研判可能發生的原因包括：1. 與翼板相同厚度的柱內橫隔板強度無法與梁翼板加上超厚蓋板厚度所施加之力匹配，2. 電熔渣焊所導入的高入熱量可能造成柱板母材的材質脆化，3. 電熔渣焊焊道製作偏差等。此破壞模式於過去相關試驗文獻 [Tsai and Lin, 1992；林克強等, 2006；林克強等, 2007] 中均有類似之破壞發生，應值得國內鋼結構業的重視。

六、結論與建議

1. 由有限元素分析結果、ESW 元件試驗結果與實尺寸梁柱接頭試驗結果皆顯示，當柱內 ESW 位置偏差或柱外梁翼位置偏差等施工問題發生時，其 PEEQ 之指標明顯提升，而 Opening 之指標由有限元素分析結果亦發現有明顯提升之趨勢，故避免施工偏差以降低梁柱接頭發生電熔渣銲道破壞之機率。
2. 由 8 組柱內橫隔板 ESW 元件試體之試驗結果比較顯示，當柱內橫隔板之 ESW 銲道或柱外梁翼板銲接位置發生偏差時，其柱內橫隔板之應變有增加之趨勢，尤其當柱外梁翼板與柱內橫隔板偏差 25mm 時，柱板容易因受梁翼板之拉力而外拱破壞，且此破壞為承载力瞬間突然喪失之脆性破壞。
3. 由實尺寸梁柱接頭試驗結果顯示，當梁翼板與柱內橫隔板高程偏心 25mm 時，梁塑性轉角尚未達到 3% 弧度前，即發生柱板受梁翼板拉力產生外拱，且造成梁彎矩瞬間喪失之破壞模式，研判此破壞發生於柱板與柱內橫隔板間之電熱熔渣銲道，但實際詳細破壞情形需切開破壞位置加以證實。

參考文獻

1. 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」，第五屆海峽兩岸及香港鋼結構技術交流會。
2. Ker-Chun Lin and Sheng-Jih Jhang, “Seismic Behaviors and Design Method on Steel Beam-to-Box Column Connections with Cover Plate,” *Structural Engineering*, Vol 25, No.2, pp.75-92, 2010 (in Chinese)
3. Tsai K. C., and Lin, K. C., “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, February 1992, Project No.: NSC-81-0414-p-002-10-B

4. Cheng-Chih CHEN, Chien-Lin LAI, and Ker-Chun LIN (2009), “FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ELECTRO-SLAG WELDING FOR DIAPHRAGMS IN STEEL BOX COLUMN,” The Eleventh Taiwan-Korea-Japan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures SEEBUS 2009, Kyoto, Japan, December 3-5, 2009.
5. 張惠雲、劉琨泰、陳政宇、林克強 (2010) 「鋼電熱熔渣銲件微觀結構研究」，中華民國力學學會第三十四屆全國力學會議。
6. 梁宇宸、陳正誠、蔡顯榮，「受高入熱量 ESW 銲接下箱型鋼柱材質之影響」，中華民國第九屆結構工程研討會，國賓大飯店，高雄，2008 年 8 月 22~24 日。
7. Architectural Institute of Japan (AIJ). (2006). Recommendation for Design of Connections in Steel Structures, AIJ, Tokyo, Japan. pp. 79-86 (in Japanese)
8. 鋼構造建築物鋼結構設計技術規範(一)鋼結構容許應力設計法規範及解說(2007)，內政部營建署
9. 鋼構造建築物鋼結構設計技術規範(二)鋼結構極限設計法規範及解說(2007)，內政部營建署
10. 建築物耐震設計規範及解說(2002)，內政部營建署
11. AISC (2005), “*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*,” American Institute of Steel Construction.
12. AISC (2005), “*Specification for Structural Steel Buildings*,” American Institute of Steel Construction.
13. FEMA (2000), “*Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*,” FEMA 350, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
14. American Welding Society (1992), D1.1-1992, Structural Welding Code.

表 1 有限元素分析組數

ESW熔透直徑 (mm)	ESW 垂直偏移量 (mm)	梁翼往上偏移量 (mm)	分析組數
38	-5、-3、0、+3、+5	0、8、16、25	共20組
41	-5、-3、0、+3、+5	0、8、16、25	共20組
44	-8、-5、-3、0、+3、+5、+8	0、8、16、25	共28組

表 2 電熔渣鋁元件試體參數表

試體名稱	ESW 垂直偏心率	梁翼板垂直偏心率
CC	0	0 mm
EC	+	0 mm
CE+8	0	+8 mm
EE+8	+	+8 mm
CE+25	0	+25 mm
EE+25	+	+25 mm
EE-16	+	-16 mm
EE-25	+	-25mm

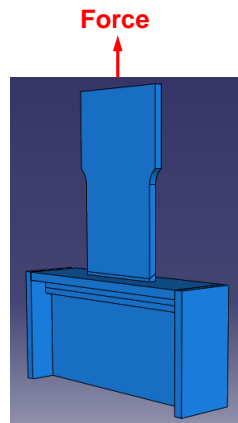


圖 1 有限元素分析模型

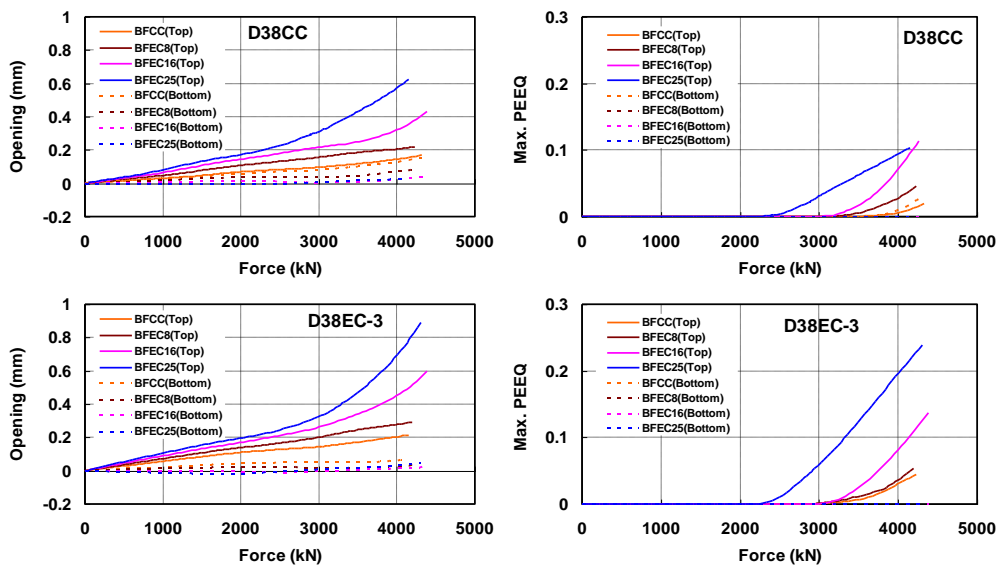


圖 2 ESW 熔透直徑為 38mm 之分析結果比較圖

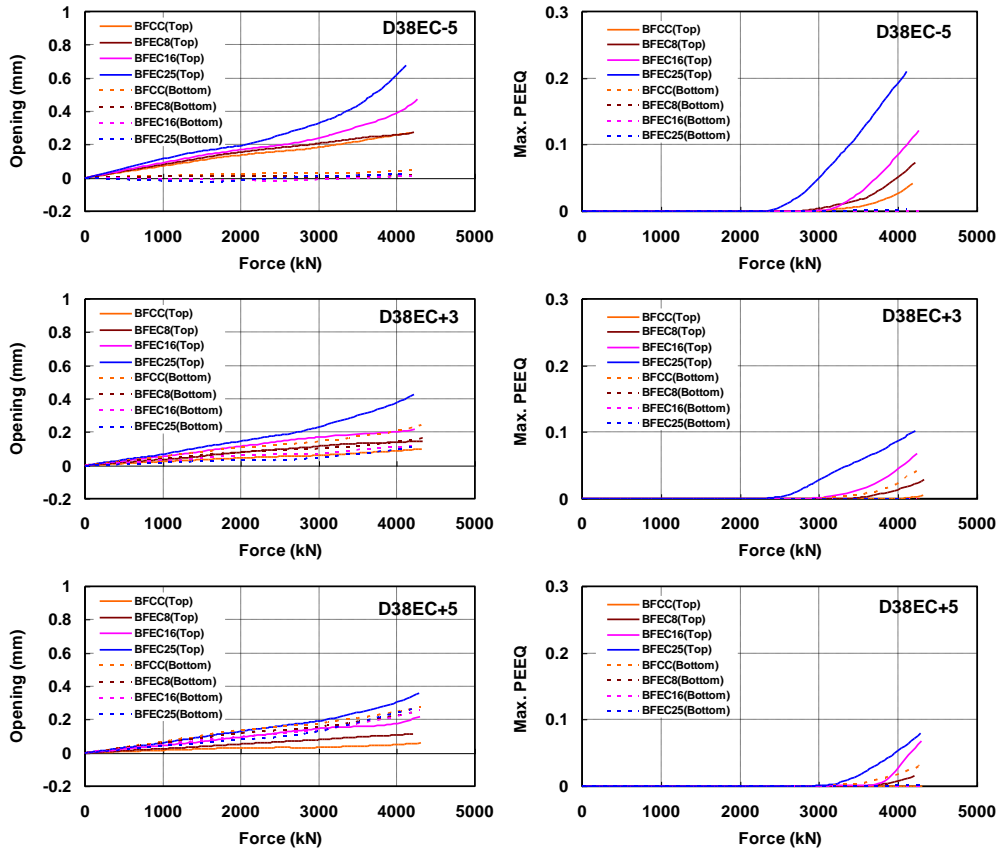


圖 2 ESW 熔透直徑為 38mm 之分析結果比較圖(續)

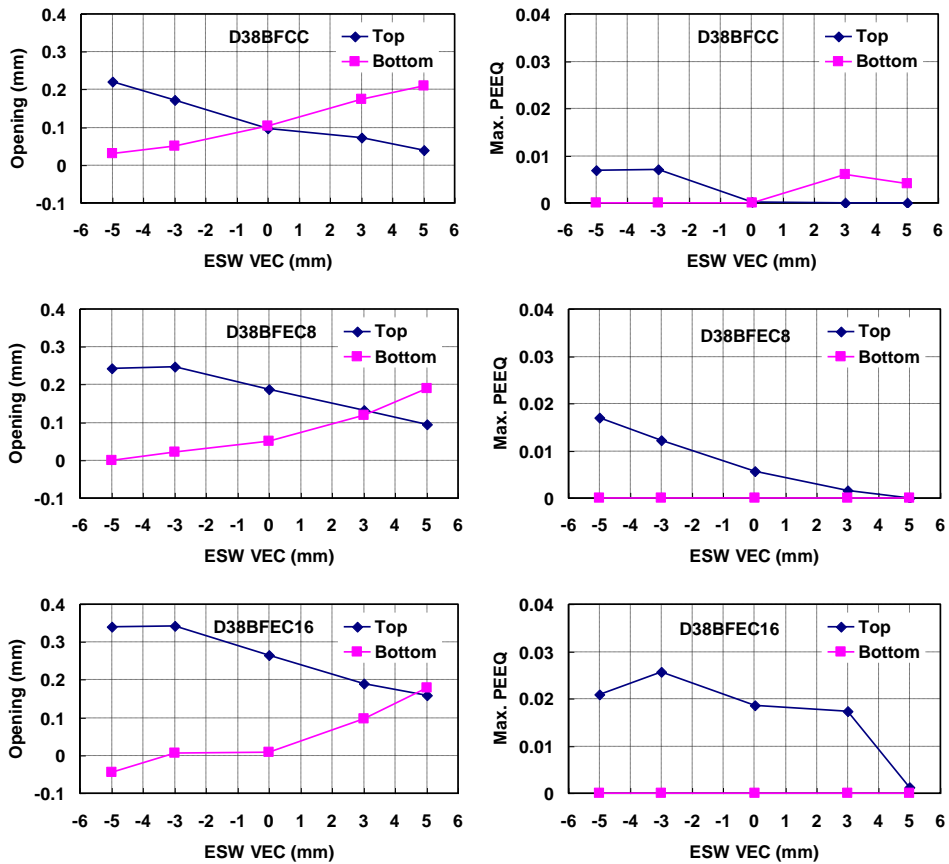


圖 3 ESW 熔透直徑為 38mm 時，採用不同垂直偏心率之分析結果比較圖

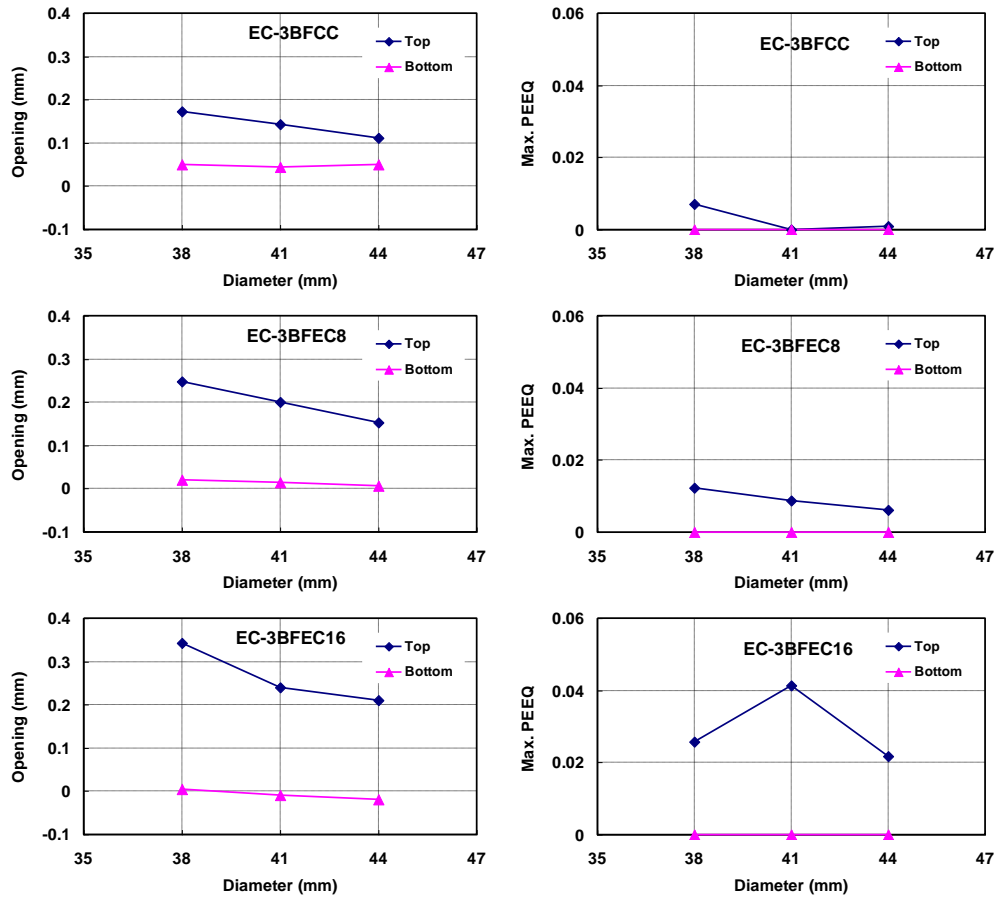


圖 4 ESW 垂直偏差為-3 時，採用不同 ESW 銲道直徑大小之分析結果比較圖

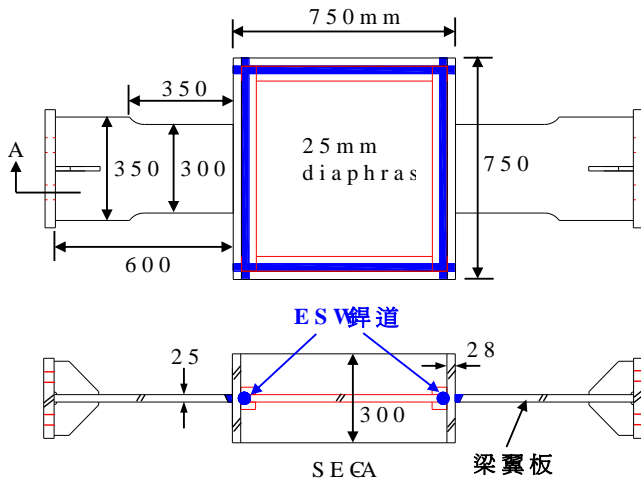


圖 5 電熔渣銲元件試體標準圖



圖 6 ESW 元件試體架設圖

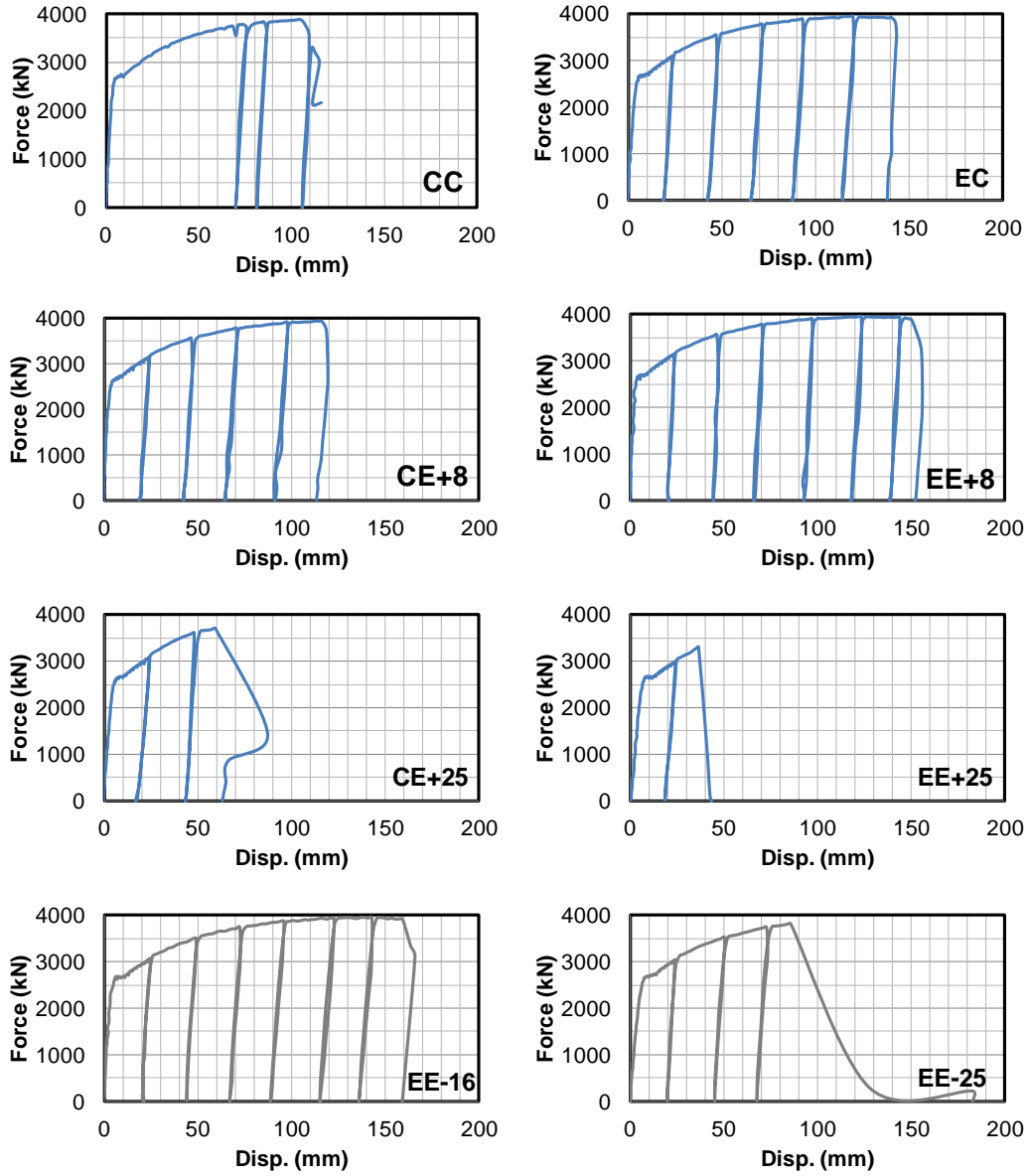


圖 7 ESW 元件試體之位移與力量關係圖



圖 8 ESW 試體柱板受拉拱起破壞

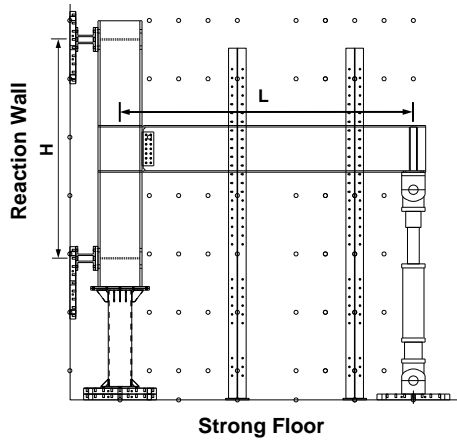


圖 9 試驗配置圖

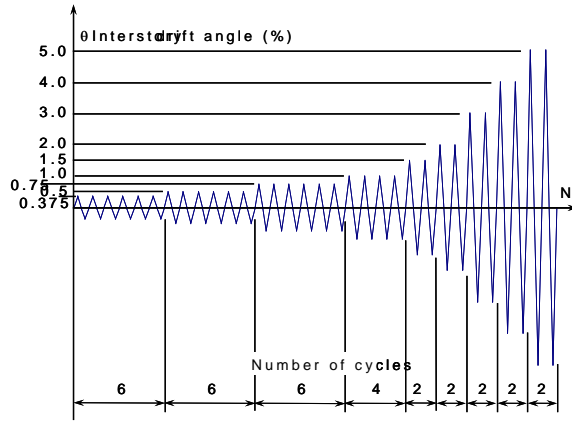


圖 10 實驗加載歷時圖

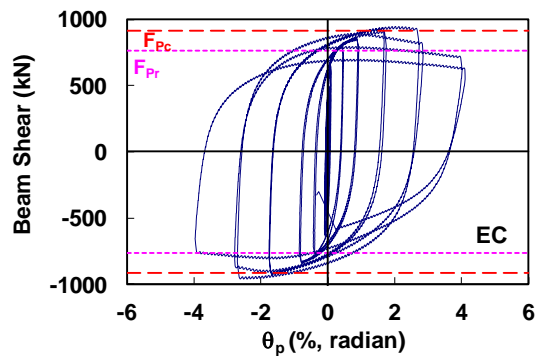
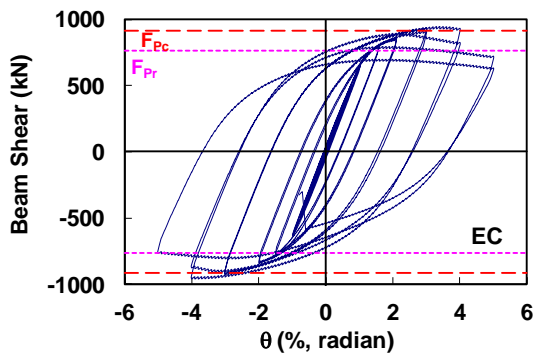


圖 11 試體 EC 梁端受力與梁總變形轉角及梁塑性轉角關係圖

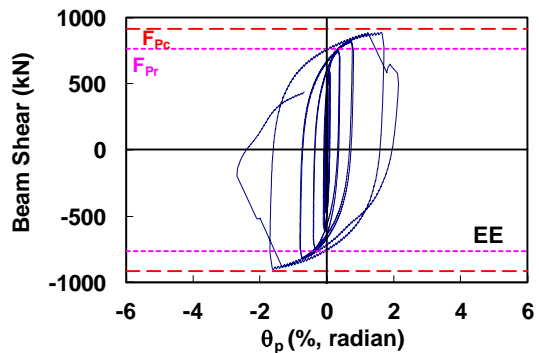
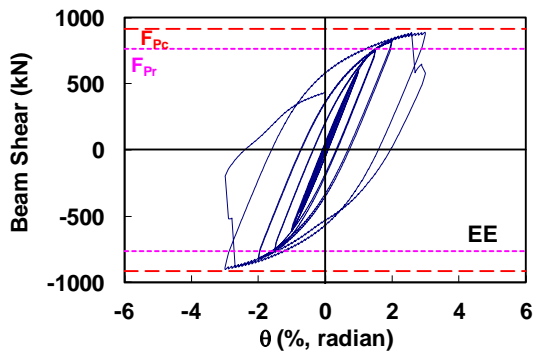


圖 12 試體 EE 梁端受力與梁總變形轉角及梁塑性轉角關係圖

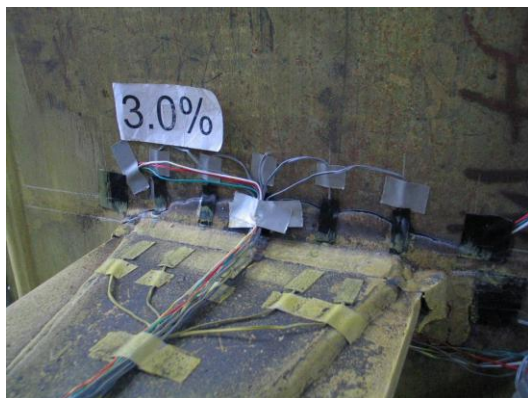


圖 13 試體 EE 於尖峰位移角 0.03 弧度時，對應上下翼板之柱板受拉拱起情況