

含樓板鋼梁與混凝土柱接頭耐震行為研究

鄭錦銅¹、錢沛鴻²、陳誠直³、蔡克銓⁴

關鍵詞：複合構造、梁柱接頭、耐震試驗

摘要

本研究主要在探討中低樓層建築之樓板對鋼梁與混凝土柱(RCS)梁柱接頭之耐震行為影響，作為中、美合作計畫之先期研究。此中、美合作計畫將於2002年在國家地震工程研究中心進行實尺寸 RCS 三層樓三跨度平面構架耐震試驗。故從文獻中選擇梁穿透式 RCS 接頭型式引進國內，製作與構架相同尺寸之次結構試體3座(含樓板之十字型內柱)，以實驗驗證其耐震行為，並深入探討樓板、接頭細節對接頭耐震行為影響。

1、前言

由1980年代中期發展至今之研究結果【1】顯示，RCS複合結構系統確實比傳統RC與鋼結構系統更具經濟優勢，但接頭區鋼梁與混凝土柱之間的互制行為仍未有精確之理論與實驗研究結果可以印證，以致這些強度預測模型大多趨於保守，實為無法於強震區廣受採用之關鍵。另外，目前各國實際應用上對此類複合構材的設計準則及營建工法仍有頗大差異，如何使RCS複合構造系統產生較高的經濟效益，以滿足未來營建工業的需求，實有進一步研究的空間。

RCS複合構造之梁柱接合方式可概分為二大類【1】如圖1所示，一為梁穿透型(圖中接頭1-7)，鋼梁以整個斷面穿透入柱方式結合。另一為柱連續型(圖中接頭8-12)，鋼梁至柱面截斷，再以橫隔板或端板接合來傳遞梁端應力，減少接頭區之擁塞。梁穿透式具較佳韌性但相對的施工難度較高，尤其雙向鋼梁與柱正

¹ 國立高雄第一科技大學 營建工程學系 助理教授

² 國立高雄第一科技大學 營建工程學系 研究生

³ 國立交通大學 土木工程學系 副教授

⁴ 國立台灣大學 土木工程學系 教授

交接合時之細部設計更形複雜。柱連續型減低梁柱接頭區配筋擁擠問題，使混凝土施工較容易。但是鋼梁與柱面之接合需小心處理，需提供適當力量傳遞機制，使 RCS 複合構造接頭具足夠強度讓梁端產生塑性鉸，發揮其應有韌性。

1989 年起，RCS 複合構造有規模研究始於美國德州奧斯丁大學【2,3】，共進行 15 個梁穿透型 RCS 複合構造之梁柱接頭(無樓板)試驗，發現兩種主要破壞模式。一為交會區(panel zone)梁腹板降伏、混凝土剪力破壞，另一為位於梁柱交會區上下方之柱混凝土，反覆載重時受梁壓迫發生承壓破壞(Bearing failure)。1993 年 Kanno【4】繼續進行同類型梁柱接頭(無樓板)試驗研究，參數包含接頭箍筋細節、柱軸力、混凝土承壓強度等。試驗結果顯示其耐震性能並不比傳統 RC 與鋼結構系統差。從 1997 年開始，美國與日本合作進行一系列 RCS 複合構造系統研究，包括：

- (1) 日本 Building Research Institute and Building Contractor Society【5】：進行 10 個柱連續型 RCS 複合構造之內梁柱接頭(無樓板)試驗，研究蓋板(Cover Plate)、端板(Face Bearing Plate)、及另向梁之存在對接頭區剪力傳遞影響，另外 4 個雙向立體接頭試驗(3 個柱連續型與 1 個梁穿透型)結果顯示，立體接頭與上述單向接頭差異不大。
- (2) 日本 Chiba 大學【6】進行 16 個柱連續型與梁穿透型梁柱接頭(無樓板)試驗，研究剪力傳遞行為，另外也研發理論分析模式。
- (3) 日本 Osaka 科技學院【7】進行 6 個梁穿透型梁柱接頭(無樓板)試驗，應用 Strut and Tie Model 研究交會區梁外混凝土剪力傳遞機制。
- (4) 美國 University of Michigan【8】進行 10 個柱連續型外梁柱接頭(無樓板)試驗，研究剪力傳遞與承壓行為，以及交會區縱向與橫向主筋量需求。另外，2 個破壞試體以碳纖包裹近梁端之柱斷面，試驗結果顯示修復強度與勁度效果不錯。
- (5) 美國德州 A&M University【9】進行 6 個梁穿透型梁柱接頭(含樓板)試驗，探討複合樓板對勁度與強度影響，並以鋼板包覆方式改善接頭區接合細節，也一併探討梁穿透型接頭正交兩向於接頭區因一向梁穿透連續而另向不連續之耐震行為差異。

針對樓板對梁柱接頭耐震行為影響，Yu 等【10】試驗研究鋼構或 SRC 梁柱接頭(含樓板)試體，結果顯示樓板與鋼梁複合行為隨接頭之接合型式、剪力釘配置，樓板厚度及其鋼筋量之變化而改變，此複合行為影響隨梁深之加大而相對減小。一般而言，中低樓層建築會使用較小的梁深，樓板對梁深比例相對較大，故樓板對梁柱接頭耐震行為影響以中低樓層建築較顯著。從試驗中發現，當梁承受正向彎矩時，因樓板支撐可避免梁上翼板發生挫屈，且樓板混凝土受壓而增加梁彎曲勁度，複合行為明顯。反之，當梁承受負彎矩時，樓板混凝土受拉，僅由鋼筋提供少許彎曲勁度，複合行為較不明顯。另外，Liu and Astaneh-Asl【11】也進

行 16 個鋼構或 SRC 梁柱接頭(含樓板)試驗，研究參數包括接合細節(如剪力鉸柱接，梁以角鋼座接)、剪力釘、樓板鋼筋量等。試驗結果顯示樓板對反覆載重有相當貢獻，但加載到轉角 0.04radian 後其複合效果即顯著衰退。

2002 年中美合作計劃將於地震中心進行實尺寸 RCS 三層樓三跨度平面構架試驗，如圖 2 所示。在進行此項重大試驗之前，有必要對其子結構之耐震行為先行研究。因此，本研究共規劃 3 座含樓板梁柱接頭試體進行耐震試驗。研究參數包含接頭箍筋的型式、梁柱接頭區之加勁補強方式、樓板與鋼梁的複合行為及載重的方式等。以下為國外文獻關於 RCS 梁柱接頭設計之簡單介紹。

2、梁柱接頭之主要破壞模式【1】

RCS 構架中梁柱接合處主要有兩種破壞模式：梁柱交會區剪力破壞以及梁翼與柱緣垂直承壓破壞。依破壞的模式的不同，如圖 3 所示，交會區可以分為內元素 (inner element) 以及外元素 (outer element) 兩區。

內元素破壞的模式主要為混凝土的承壓破壞 (bearing failure) 以及鋼梁腹的剪力降伏 (panel shear yielding) (詳圖 4)。外元素則包括握裹破壞 (bond failure) 以及混凝土剪力破壞 (shear cracks) (詳圖 5)。

從梁柱交會區的破壞模式研究結果中可知，交會區的剪力強度 V_b 可以如下式表示【1】：

$$V_b = V_{bi} + V_{bo} \quad (1)$$

$$V_{bi} = \min\{V_{be}, V_{swc}\} \quad (2)$$

$$V_{bo} = \min\{V_{bo}, V_{scf}\} \quad (3)$$

其中 V_{bi} , V_{bo} 各代表內元素與外元素的強度， V_{be} , V_{swc} 代表內元素的承壓強度以及剪力強度， V_{bo} , V_{scf} 則代表外元素的握裹強度及剪力強度。

3、試驗程序

如圖 2 所示，三層樓平面構架之尺寸為 X 向三跨，每跨 7 公尺，樓層高度為 4 公尺。依地震力靜力分析，實驗試體之梁斷面尺寸由頂層至一樓依序為 H396X199X7X11、H500X200X10X16 及 H596X199X10X15。柱尺寸皆為 65X65cm，柱主鋼筋採用 12-#11。因本試驗試體為一樓內柱接頭，梁尺寸為 H596X199X10X15。3 座含樓板梁柱接頭試體中，試體編號第一字母 I 代表內部接頭。第二字母代表有 (C) 無 (N) 橫梁交會於接頭區。第三字母代表接頭箍筋型式 L 或 U，如圖 6 所示。第四字母代表載重方式：C 為位移漸增反覆載重，P 為近斷層位移反覆載重。第五字母 S 代表含樓板之梁柱接頭。所有試體均使用相同之梁斷面及柱斷面如圖 7 所示，其中兩座模擬三維接頭 (含橫梁)，接頭箍筋採用 L 型。兩試體主要差別在於試驗時之載重，一座採用位移漸增反覆載重，另一座為模擬近斷層震波之位移反覆載重。最後一座模擬二維接頭 (未含橫梁)，接頭箍筋採用 U 型箍

筋如圖 6 所示。另外，為防止梁翼柱緣混凝土發生承壓破壞，於梁翼上下方之柱面四周配置加勁鐵筐 (BP)，如圖 8 所示。另外，圖 8 也顯示交會區柱面加勁鋼板 (FBP) 焊接位置與大小，以增加交會區剪力承載。樓板的鋼筋共可分為上下兩層，下層筋鋪設 3 號鋼筋間距為 300mm，鋼筋位於鋼承板底側上方 30mm；上層筋則是鋪設 7 x7 /100x100mm 的鋼絲網，鋼絲網位於樓板下 25mm，如圖 9 所示。圖 8 與 9 皆未顯示 INUCS 試體，其斷面尺寸皆與其他兩試體相同，差別只在於未配置橫梁。

實驗試體所使用之材料包括鋼筋及鋼板，於實驗前均先進行材料試驗，以了解材料之力學行為及強度。拉力試片包括了 #11、#4、#3 號鋼筋及所有不同厚度之鋼板，試驗結果列於表 1。各試體皆於實驗當天進行混凝土抗壓實驗，各試體之試驗結果如表 2 所示。

因梁柱為預鑄方式建造，為方便運送，將梁於距柱中心 1.5 米處切斷，到試驗現場時再以螺栓續接至 3 米長。為防止螺栓續接處於試驗時發生滑動，續接處之梁翼蓋板與梁腹接合板皆施加一公分厚填角焊。圖 10 顯示試驗構架配置，試驗時先以軸向千斤頂由柱頂透過橫梁施加一百公噸之固定軸向載重。再以東西兩側梁端之垂直向致動器由相對方向施加位移漸增之反覆載重，以模擬地震力作用下之層間柱位移量。柱頂水平致動器可將柱固定位置維持不動，但容許柱端旋轉。位移控制歷時採用兩種方式，試體 ICLCS、INUCS 以位移漸增載重施加，如圖 11 所示。另一試體 ICLPS 之位移控制歷時為近斷層載重，如圖 12 所示。

4、實驗結果

所有試體主要破壞位置均發生於梁塑鉸區，鋼梁翼板與腹板相繼有挫屈之現象，造成強度上之衰減如照片一所示。照片二顯示因扭轉挫屈而造成鋼梁與混凝土柱交接處下翼板斷裂。以下為各試體在各施力階段之詳細描述：

從試驗過程觀察，發現試體 INUCS 與 ICLCS 表現差異不大。當梁端位移量分別達到層間變位角 0.375%與 0.5%時，試體 ICLCS 與 INUCS 樓板開始出現撓曲裂縫。當位移量達到層間變位角 0.75%時，試體 ICLCS 樓板在剪力釘位置上開始出現裂縫，梁柱交會區及柱出現撓曲裂縫，試體 INUCS 鋼梁下翼板降伏。當位移量到層間變位角 1.0%時，試體 ICLCS 鋼梁下翼板降伏，兩試體交會區皆開始出現剪力裂縫，樓板裂縫變寬，而柱撓曲裂縫快速成長與擴大。當位移量達到層間變位角 2.0%時，兩試體鋼梁腹板皆發生降伏。當位移量達到層間變位角 3.0%時，兩試體皆發生剪力釘斷裂，交會區剪力裂縫大量出現。當位移量達到層間變位角 4.0%時，兩試體之剪力釘斷裂的聲音明顯減少，並且梁板出現分離的情形，並且樓板沒有再出現新的裂縫，鋼梁下翼板出現局部挫屈。當位移量到層間變位角 5.0%時，兩試體之梁上翼板發生挫屈，一直到位移量 180mm(層間變位角 6.0%)時，試體 ICLCS 西側鋼梁下翼板拉斷、加勁板被一同拉出，兩試體之東側鋼梁下翼板皆發生斷裂，因此停止實驗。兩試體梁柱接頭交會區及柱本身並沒有嚴重的

破壞，樓板自發生梁板分離後就沒有再產生新裂縫。

試體 ICLPS 之東側梁端位移首先達到 -60mm 時(同時西側梁端位移為 60mm)，西側梁下翼板已降伏，接著東側梁端位移進入 +180mm 時(等於東側梁從下方 -2% 位移處往上 8%)，東側梁腹板及梁上翼板先進入降伏再發生局部挫屈。不久鋼承板和樓板混凝土剝落，並且一直發出聲響。而西側鋼梁下翼板發生扭轉挫屈，交會區也出現多處剪力裂縫，西側柱也發現許多撓曲裂縫。而樓板在北側柱面處則發生一條 2mm 以上大裂縫，剪力釘位置也有不少裂縫。接著東側梁端位移回到 +30mm，然後梁端位移在 +150mm 與 +30mm 間來回時，試體也無太大變化，直到東側梁端位移再次進入 +180mm，接著往回到達 -60mm 後(等於東側梁從上方 +6% 位移處往下 8%)，此時東側鋼梁下翼板發生扭轉挫屈，柱東側出現不少撓曲裂縫，交會區也出現些許剪力縫，試體其他部位並沒有嚴重的破壞發生。接著東側梁端位移在 +90mm 與 -30mm 之間來回，一直到東側梁端位移量為 -60mm 實驗結束。再觀察發現原樓板與柱之間大裂縫寬度加大，但是沒有發生梁板分離的現象，而交會區與混凝土柱並沒有新的裂縫。

圖 13 顯示各試體梁端位移與荷重之遲滯迴圈關係。由圖可知：(1)試體在正彎矩作用下之起始勁度與強度均比在負彎矩作用下高。試體之正彎矩平均比負彎矩增加 27%，正彎矩勁度平均比負彎勁度增加 67%，如表 3 所示。(2)樓板可有效防止鋼梁上下翼板發生側向扭轉挫屈，但局部挫屈仍無法避免，因樓板支撐上翼板挫屈比下翼板輕微。(3)試體之遲滯迴圈形狀與鋼筋混凝土梁柱類似。(4)近斷層地震載重作用下，鋼梁翼板與腹板相繼有挫屈之現象，但是樓板意外地未與梁發生分離，且一直到實驗結束鋼梁翼板並未發生斷裂破壞，其迴圈所表現之強度衰退行為比其他試體遲緩。

梁端位移可依交會區所佈置之位移計與傾角量測計(Tilt Meter)分離成四大部分。由分離結果可知，所有試體絕大部分變形集中於梁上，如圖 14 所示 ICLCS 試體變形分離結果。而柱撓曲變形與交會區承壓變形皆很小且維持在彈性範圍內，交會區剪力所造成梁端之轉角稍大呈現些許非線性行為。

5、結論

根據試驗結果可以歸納出以下幾點結論：

- (1)所有試體表現皆為強柱弱梁，破壞集中於鋼梁，韌性消能能力優良。樓板對鋼梁提供橫向束制，穩定梁上翼板且延遲其挫屈發生時間，同時也有效預防梁上翼板發生扭轉挫屈。因此，在正彎矩作用下樓板(受壓力)可以增加試體勁度與極限強度。試驗結果顯示試體之正彎矩強度平均比承受負彎矩時高 27%，而正彎矩勁度平均比負向彎矩勁度高 67%。
- (2)樓板之複合作用於梁端位移角 3%後消失，其強度達到最大後衰退現象比承受負彎矩作用時趨緩。但是當梁下翼板被拉斷後，鋼梁正彎矩強度即急遽下降。

- (3)子結構於近斷層歷時載重作用下，鋼梁翼板與腹板相繼有挫屈之現象，但是樓板意外地未與鋼梁發生分離，且一直到實驗結束鋼梁翼板並未發生斷裂破壞，極限強度後衰退行為也比其他試體皆遲緩、表現良好。
- (4)由試體變形分離之結果發現絕大部分結構變形集中於梁上，柱撓曲變形與交會區承壓變形所造成梁端之轉角皆很小，且維持在彈性範圍內，交會區剪力所造成梁端之轉角則稍大，呈現些許非線性行為。
- (5)試驗結果顯示試體主要破壞在鋼梁，所以模擬三維接頭試體（含橫梁）與二維試體（未含橫梁）之試驗結果並無明顯差異，顯然橫梁對抗剪能力之提昇效果並未顯現。
- (6)對於交會區強度之估算，本研究發現 Kanno 理論過於保守而低估其強度。由於交會區變形大致維持彈性，故不同接頭箍筋形式對耐震行為影響無法顯現出來。

6、誌謝

本文承國家科學委員會研究計劃 NSC90-2625-Z-327-001 之經費補助，及國家地震工程研究中心(NCREE)實驗室周志雄先生在實驗上之協助，特此誌謝。

7、參考文獻

1. Kanno, R. and Deierlein, G.G., (2000), "Design model of Joints for RCS Frames." *Composite Construction in Steel and Concrete IV*, ASCE.
2. Deierlein, G.G., Sheikh, T.M., Yura, J.A., and Jirsa, J.O. (1989). "Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part2," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115(11), pp.2877-2896.
3. Sheikh, T.M., Deierlein, G.G., Yura, J.A., and Jirsa, J.O. (1989). "Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part1," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115(11), pp.2858-2876.
4. Kanno. R. (1993). "Strength Deformation, and Seismic Resistance if Joints between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns," PhD. Dissertation, Cornell University, Ithaca, N.Y.
5. Nishiyama, I., Itadani, H., and Sugihiro, K. (1997). "3D beam-Column Connection (Joint Panel) Tests on RCS," Presentation at 4th JTCC Meeting, Monterey.
6. CA. Kim, K. and Noguchi, H. (1997). "An Analytical Study on the Shear Strength of RCS Joints," Presentation at 4th JTCC Meeting, Monterey, CA.
7. Baba, N. and Nishimura, Y., "Stress Transfer on Through Beam Type Steel Beam-Reinforced Concrete Column Joints," Proc. of 6th ASCCS Conference,

- Los Angles, USA, pp.753-760.
8. Parra-Montesions, G. and Wight, J.K., (2000). "Seismic Response of Exterior RC Column- to-Steel Beam Connections," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126(10), pp.1113-1121.
 9. Bugeja, M.N., Bracci, J.M. and Moore, W.P., (2000). "Seismic Behavior of Composite RCS Frame Systems," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126(4), pp.429-436.
 10. Yu, Q.S., Noel, S. and Uang, C.M., (2000). "Composite Slab Effects on Strength and Stability of Moment Connections with RBS or Welded Haunch Modification," Proc. of 6th ASCCS Conference, Los Angles, USA, pp.705-712.
 11. Liu, J. and Astaneh-Asl, A., (2000). "Cyclic Behavior of Shear Connections with Floor Slab," Proc. of 6th ASCCS Conference, Los Angles, USA, pp.745-752.
 12. Krawinkler, H., Gupta, A., Medina, R. and N. Luco, (2000). "Development of Loading Histories for Testing of Steel Beam-Column Assemblies," Report for the SAC Steel Project by FEMA.

表 1 鋼筋與鋼梁拉力試驗結果一覽表

Item	Rebar(#4)	Rebar(#11)	Plate(10mm)	Plate(15mm)
Fy (MPa)	430.7	443.3	478.5	444.2
Fu (MPa)	680.6	674.6	598.7	568.0

表 2 各試體混凝土抗壓強度一覽表

Specimen	Column(f_c')kg/cm ²	Slab (f_c')kg/cm ²
ICLCS	497	228
INUCS	554	247
ICLPS	507	213

表 3 各試體最大梁端載重一覽表

試體	實驗值						交會區 剪力 (kN)	理論值 Kanno 交會區 (kN)
	東側梁彎矩 (kN-m)		西側梁彎矩 (kN-m)		子結構 勁度 K(kN/m)			
	正	負	正	負	正	負		
ICLCS	1539	1282.5	1609.2	1235.7	3440	10643	3883.5	3440
INUCS	1701	1342.4	1652.4	1336.5	3572	12257	4134.2	3572
ICLPS	1668.6	1217.7	1660.5	1306.8	3458	7769.6	4011.7	3458

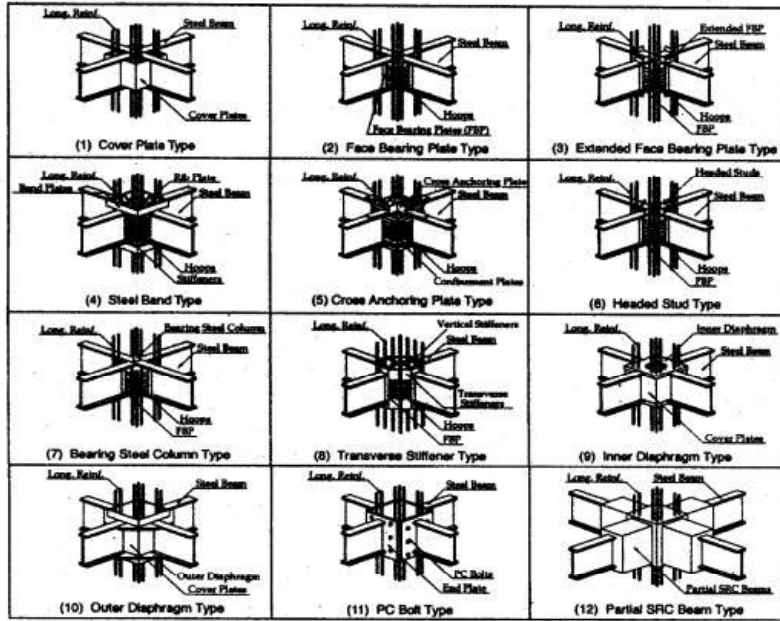


圖 1 RCS 梁柱接頭型式

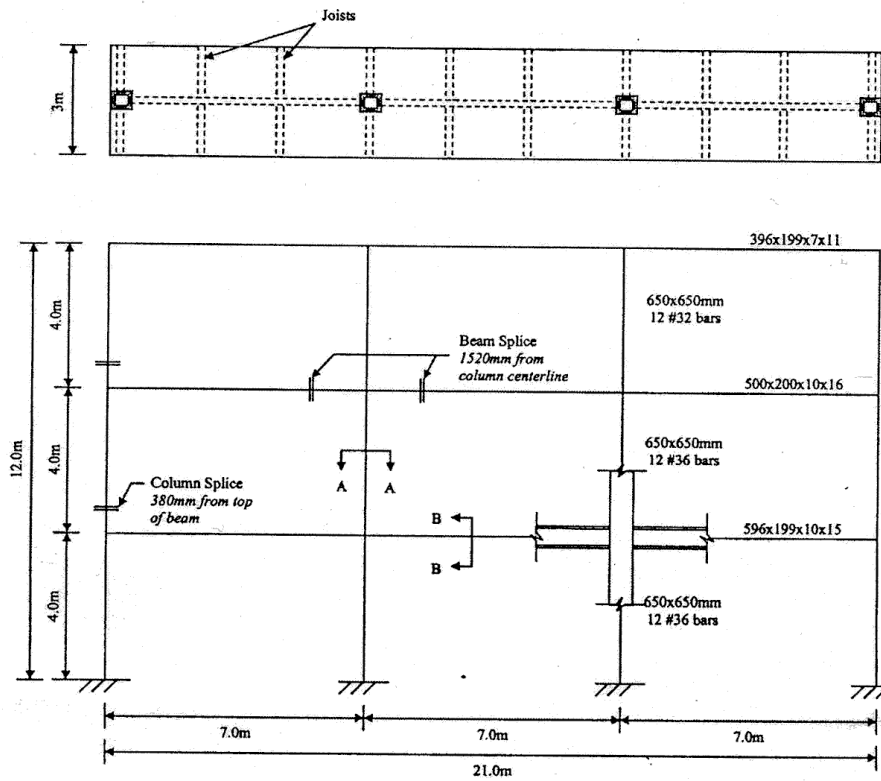


圖 2 三層樓實尺寸 RCS 構架平面圖及立面圖

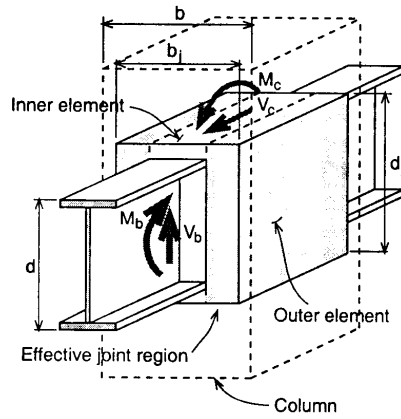


圖 3 內外元素示意圖【1】

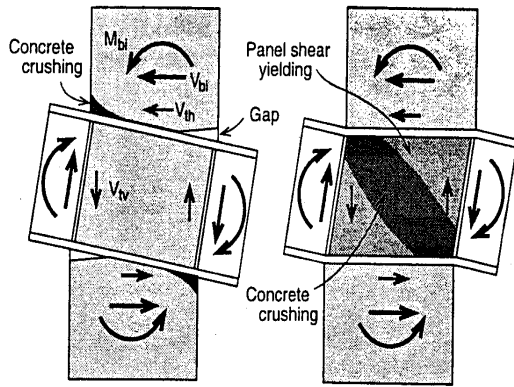


圖 4 內元素破壞機制【1】

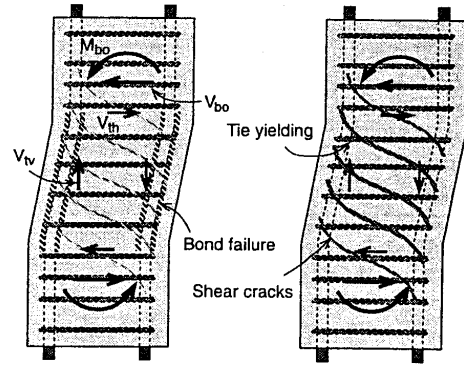
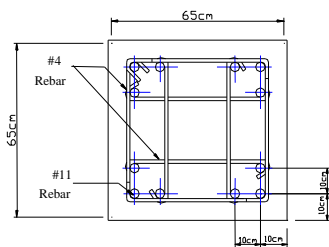
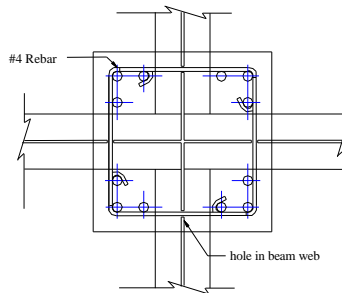


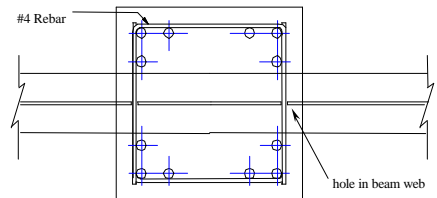
圖 5 外元素破壞機制【1】



Stirrup outside panel zone

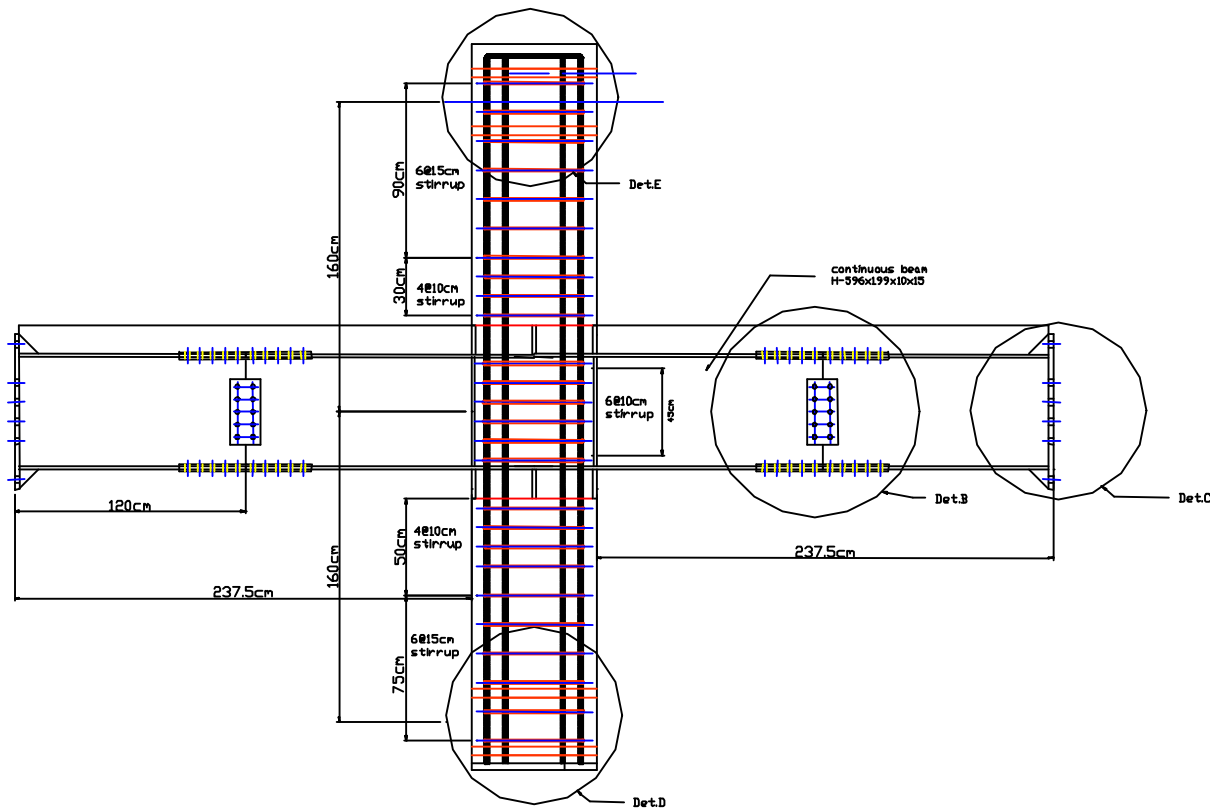


Stirrup in panel zone (4 L Shape)



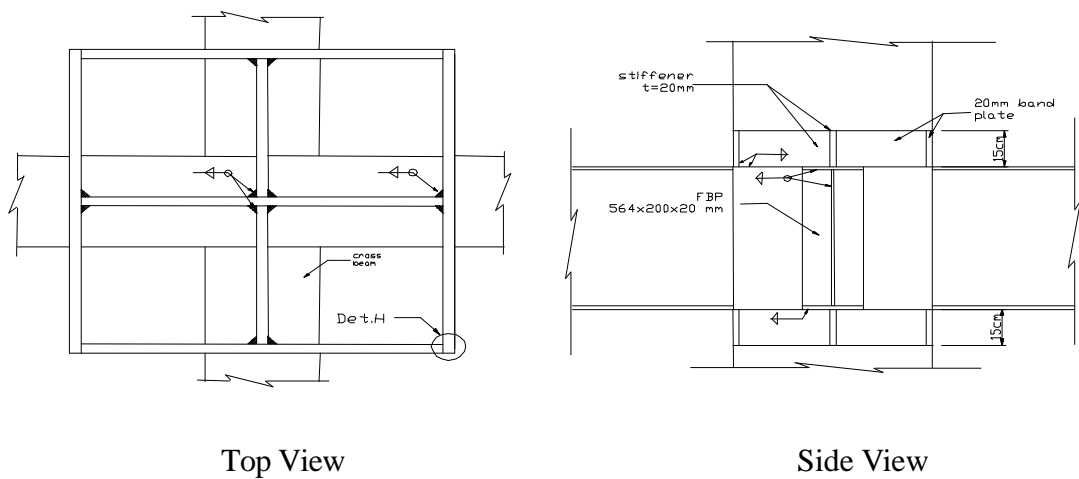
U shape

圖 6 試體柱與接頭區箍筋型式



A-A Section

圖 7 梁柱立面圖



Top View

Side View

圖 8 試體接頭區之加勁鐵筐(BP)與加勁鋼板(FBP)

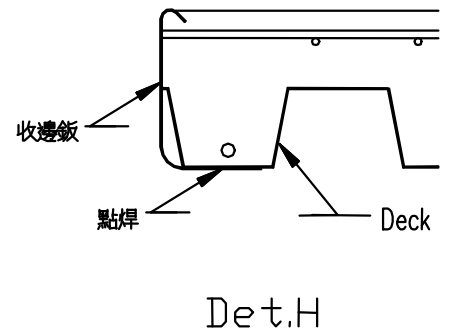
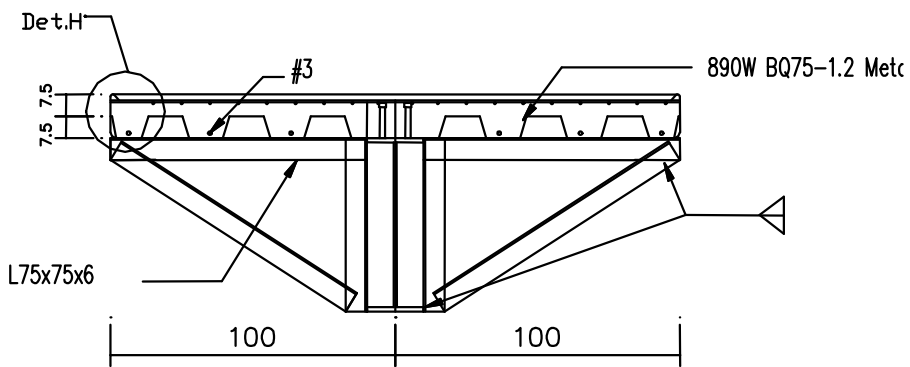
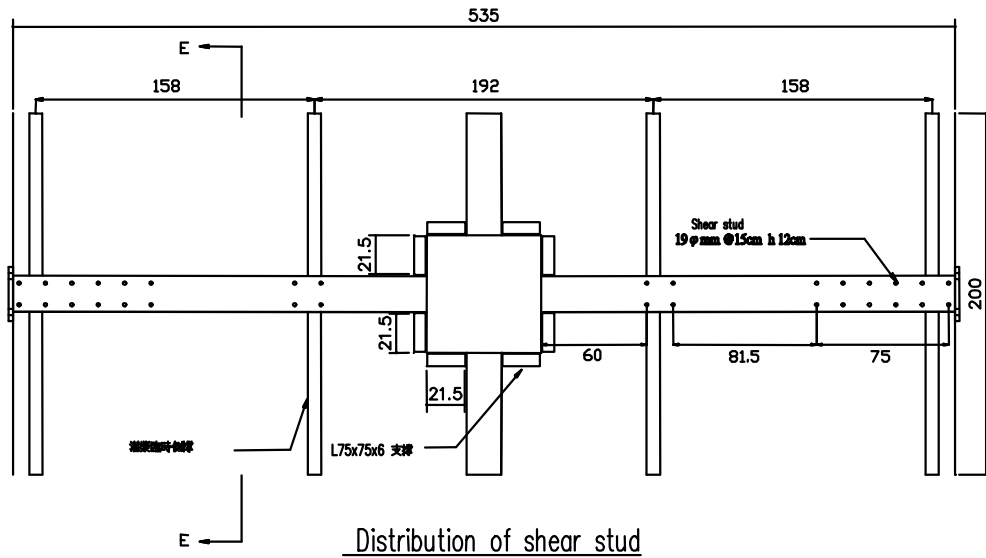


圖 9 試體 ICLCS 及 ICLPS 複合樓板製造尺寸圖

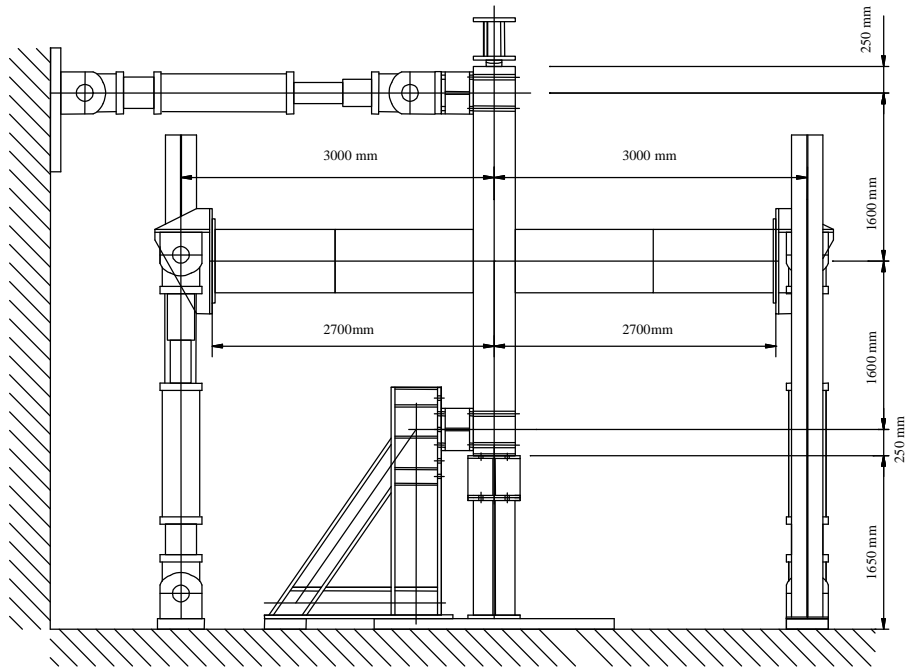


圖 10 實驗構架配置圖

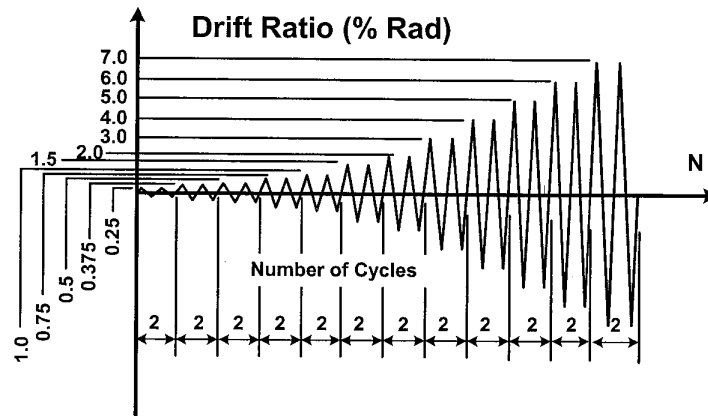


圖 11 試驗位移歷時圖(ICLCS、INUCS)

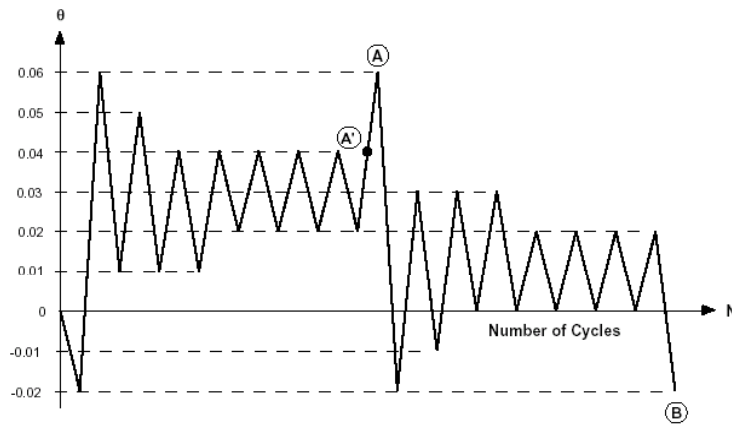


圖 12 試驗位移歷時圖(ICLPS)

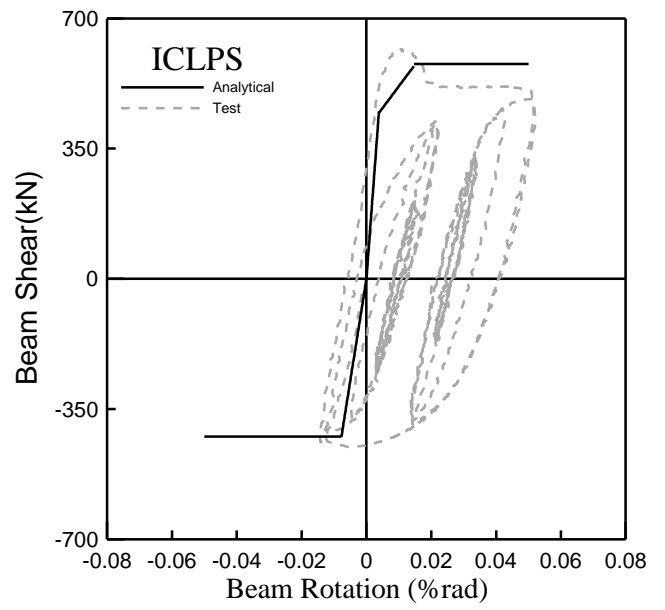
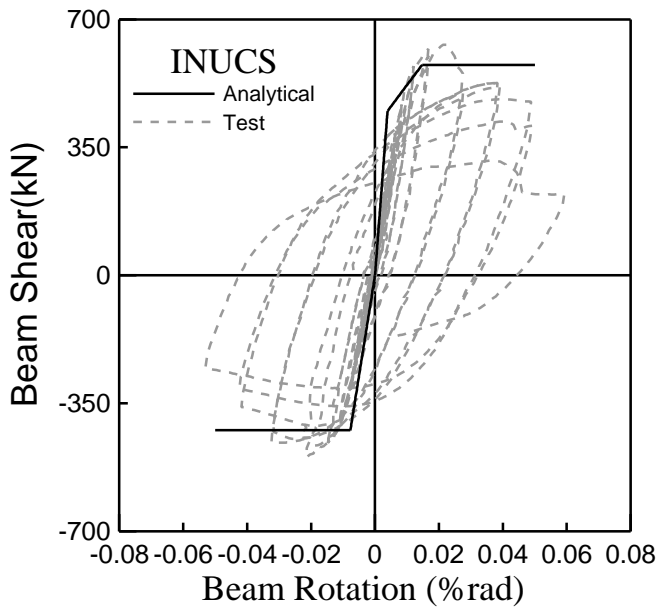
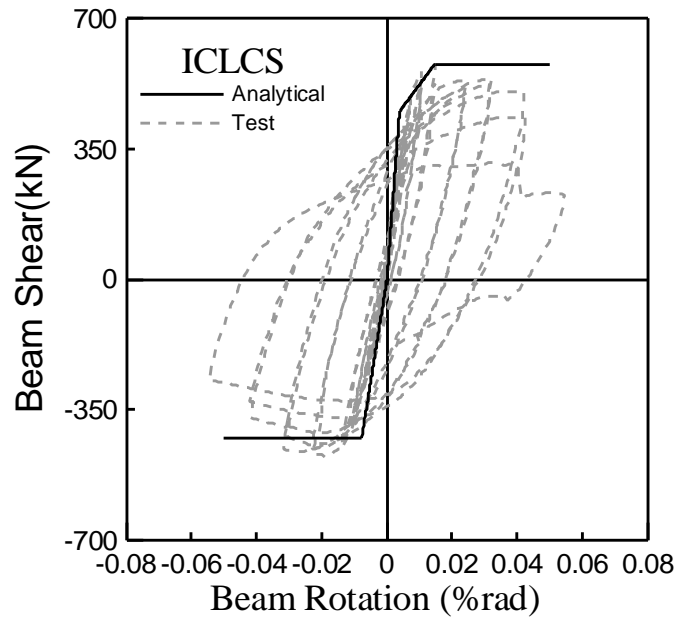


圖 13 各試體力位移遲滯迴圈圖與其包絡線預測曲線

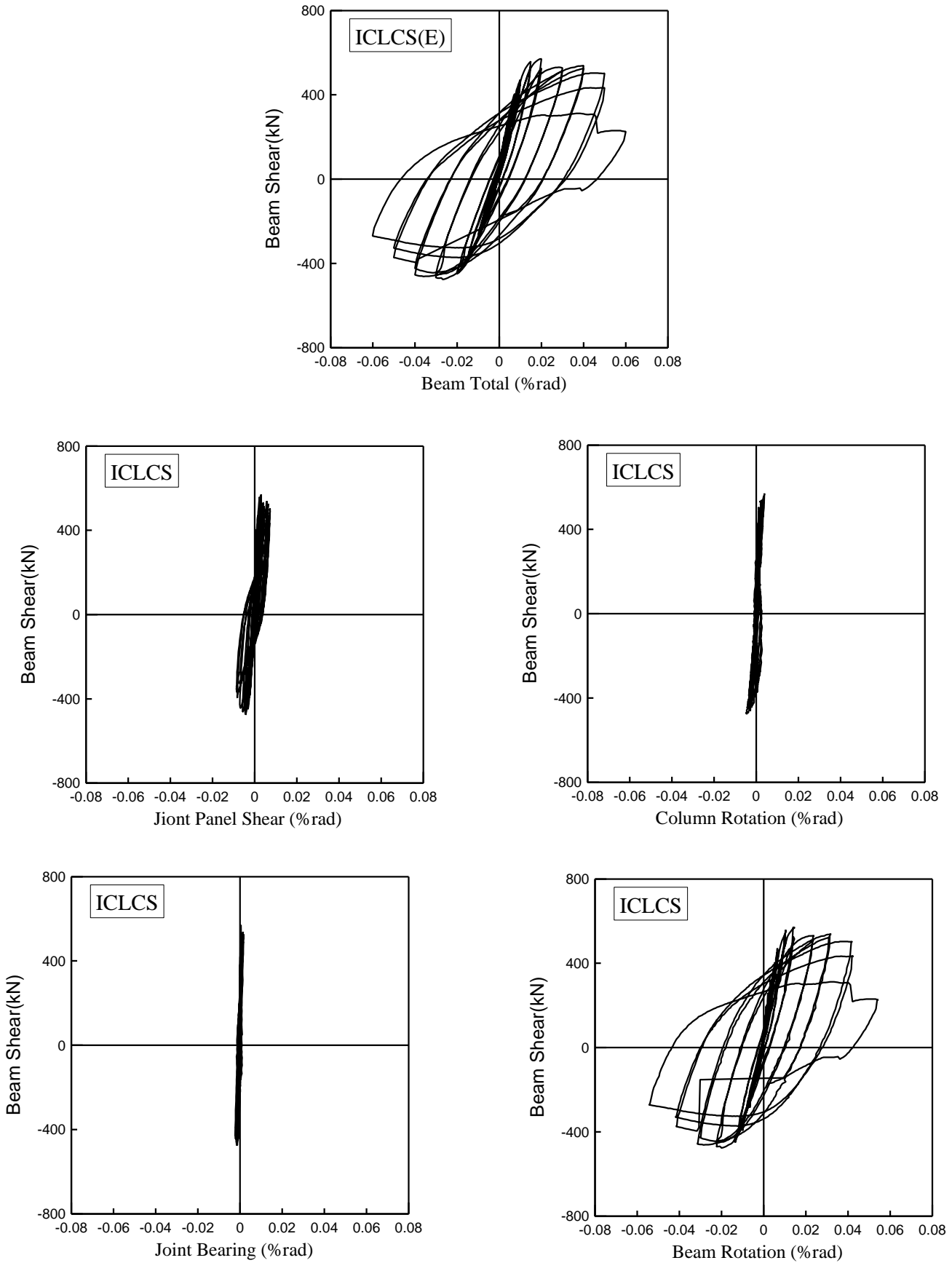
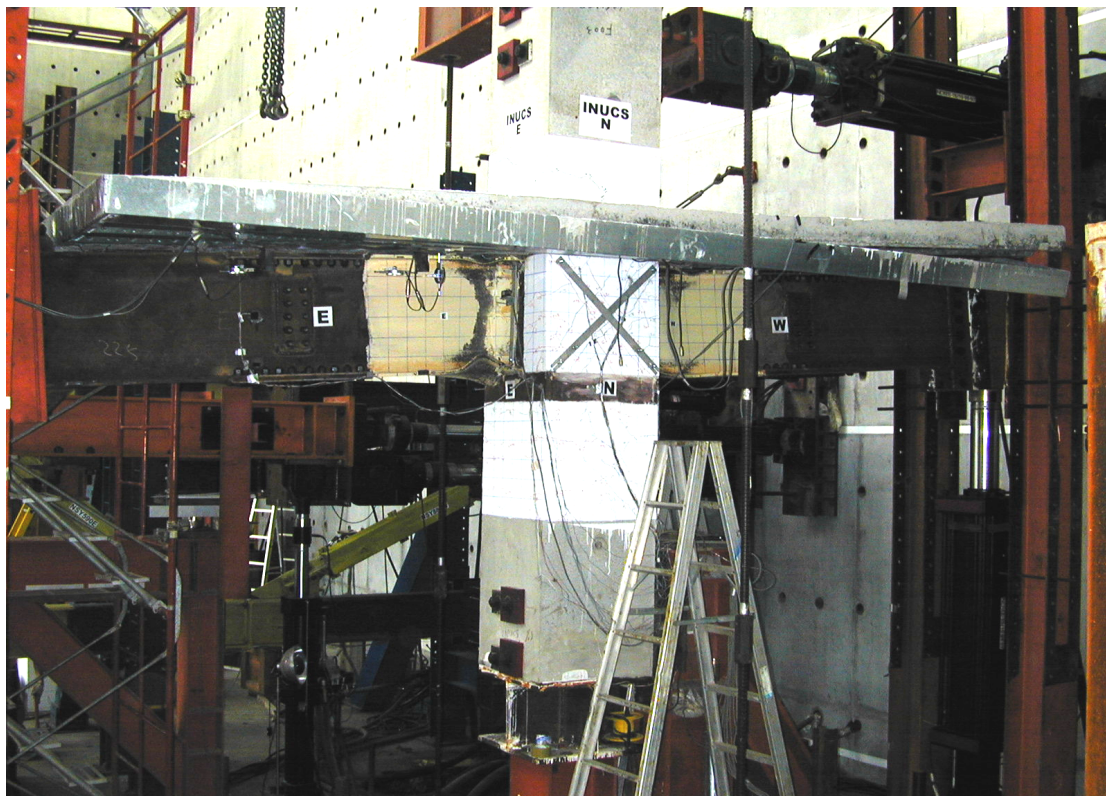


圖 14 試體 ICLCS 變形分離圖



照片一 試體全景



照片二 顯示因扭轉挫屈而造成鋼梁下翼板斷裂