

第四章 實驗結果與討論

4.1 試體破壞模式

試體 PN 之破壞模式為上翼板於柱面處沿寬度方向斷裂，其撕裂情況是由扇形開孔處向翼板兩側伸展，梁下翼板-柱面之全滲透鉚道處裂縫延伸約有三分之一的翼板寬度。試體 WF6-1 於層間變位角 4% 弧度時，扇形開孔處梁翼板-腹板之鉚道產生開裂，上下翼板及腹板於位移行程 5% 弧度時相繼發生局部挫屈，隨著挫屈情形趨於明顯裂縫也緩慢擴張；最終試體破壞模式呈現梁產生嚴重局部挫屈，扇形開孔處之翼板-腹板鉚道裂縫延伸約 10 mm。試體 WF6-2 最終因為設備限制而試驗終止，試體破壞模式為下翼板及其相鄰腹板位置發生局部挫屈，梁翼-柱面之全滲透鉚道兩端並無開裂產生。試體 WF6-3 之破壞模式為翼板-柱面鉚道處之開裂急劇延伸而導致翼板全撕裂，其扇形開孔處梁腹兩側與翼板之鉚道皆發現開裂產生，試驗結束後觀察其裂縫長度約達 30 mm。

試體 WF7-1 最終因油壓設備行程限制而停止，破壞模式為梁翼梁腹產生明顯局部挫屈，梁翼-柱面之全滲透鉚道兩端及扇形開孔處梁翼-梁腹鉚道皆有微小開裂產生。試體 WF7-2 之破壞模式為梁翼板-柱面全滲透鉚道兩端產生開裂，起始於翼板與導弧板接縫處之裂縫沿著鉚道往翼板中心延伸，最終撕裂進扇形開孔處並往另一側延伸，造成下翼板寬度方向全撕裂。

整體而言，試體 PN 為未擴翼補強之傳統型式梁柱接頭，其應力最大值發生於柱面，此處因鉚接熱及幾何形狀不連續等因素影響，最終造成翼板產生脆性破壞而無法發揮其應有的韌性行為。傳統梁柱接

合方式，於扇形開孔處之梁翼-梁腹銲道位置與梁翼-柱面全滲透銲道兩端會因應力集中而造成開裂。試體 WF6-2 塑鉸產生位置較試體 WF6-1 遠離柱面銲道處，實驗結果顯示將塑性變形區域遠離柱面確實能減少對梁翼全滲透銲道之影響，並抑制梁翼兩側銲道裂縫之形成。

實驗結果顯示，以應變硬化係數 C_{pr} 為 1.15 所設計之試體 WF6-1、WF6-2 與 WF7-1 均能完成最終行程，而於預定塑角產生處產生塑性變形，進而穩定消散能量；試體 WF6-3 與 WF7-2 採 C_{pr} 為 1.10 設計，在層間變位角 5% 弧度時都產生梁翼板於柱面銲道處之撕裂破壞而終止試驗。綜合上述觀察之破壞模式，以梁彎矩強度提高 1.15 倍以上所設計之擴翼寬度，梁柱接頭可發展較為穩定之韌性行為。

4.2 韌性能力



對於梁柱接頭之韌性能力要求，國內外規範各有不同的規定。國內規範（內政部營建署 1999）的標準是以塑性轉角的大小來判斷梁柱接頭之韌性能力，並規定韌性抗彎構架之梁柱接頭塑性轉角 θ_p 應以下述三規定之一決定之：

1. 3% 弧度；
2. 非線性動力分析所得之最大塑性轉角加上 0.005 弧度；
3. $\theta_p = 1.1(R - 1.0)\theta_E$

其中： R = 結構系統韌性容量

θ_E = 在設計地震力 E 作用下之最大層間變位角。

AISC (2003) 對特殊抗彎構架梁柱接頭之韌性要求為：測試試體需達層間變位角 4% 弧度，且於柱面之彎矩強度必須大於 80% 之標稱彎矩強度。

本研究六組試體之層間變位角與塑性轉角列於表 4.1。表中可看出在擴翼式梁柱接頭試體中，試體 WF7-2 雖然未達到國內規範所要求塑性轉角 3% 弧度，但仍符合 AISC 要求達層間變位角 4% 弧度的標準，其餘四組擴翼試體皆符合上述之相關規定，顯示擴翼補強式接頭之韌性行為優良。各試體之遲滯迴圈分別為圖 4.1 至圖 4.6 所示，其中圖 (a) 至圖 (d) 分別代表試體之載重-位移圖、彎矩-總塑性轉角圖、彎矩-接頭腹板區轉角圖及彎矩-柱轉角圖；其中彎矩值是由梁端載重中心位置計算至柱面之彎矩，並對應梁之標稱塑性彎矩強度予以正規化。以下分述各試體之韌性行為：

試體 PN 之遲滯迴圈圖如圖 4.1 所示。由圖 4.1 (a) 可看出，試體未完成 3% 弧度行程就產生翼板撕裂破壞，顯示傳統接頭其韌性能力不足。圖 4.1 (b) 顯示塑性轉角僅達 +1.8% 及 -1.6% 弧度，未符合規範之要求。圖 4.1 (c) 與圖 4.1 (d) 顯示接頭腹板區已有部分進入降伏狀態而柱尚在彈性階段。

試體 WF6-1 之遲滯迴圈圖如圖 4.2 所示。由圖 4.2 (a) 顯示試體在 5% 弧度後，因為發生挫屈導致強度有衰減現象，但仍較梁標稱塑性彎矩强度高；最後實驗終了時，正負方向層間變位角達 5.8% 弧度。圖 4.2 (b) 顯示最大塑性總轉角達 +4.8% 及 -4.6% 弧度，均符合規範之要求。圖 4.2 (c) 與圖 4.2 (d) 顯示接頭腹板區已有部分進入塑性狀態而柱尚在彈性階段，但試體之塑性轉角大部分仍是梁所貢獻。

試體 WF6-2 之遲滯迴圈圖如圖 4.3 所示。由圖 4.3 (a) 顯示試體

在 5% 弧度負方向時發生挫屈導致強度衰減，正方向無挫屈發生所以力量並無下降趨勢；最終試體完成 5.8% 弧度層間變位角之行程，下降後的強度仍較 M_p 高。圖 4.3 (b) 顯示最大塑性總轉角達 +4.2% 及 -4.6% 弧度，均符合規範之要求。圖 4.3 (c) 與圖 4.3 (d) 顯示接頭腹板區已有部分進入塑性狀態而柱尚在彈性階段，但試體之塑性轉角大部分仍是梁所貢獻。

試體 WF6-3 之遲滯迴圈圖如圖 5.4 所示。由圖 4.4 (a) 顯示試體在 5% 弧度第一迴圈負方向時，發生挫屈導致強度些微遞減；第二迴圈正方向時力量劇降，此時發生翼板斷裂。最終試體完成 5% 弧度層間變位角之第一回迴圈行程。圖 4.4 (b) 顯示最大塑性總轉角達 +3.6% 及 -3.5% 弧度，均符合規範之要求。圖 4.4 (c) 與圖 4.4 (d) 顯示接頭腹板區已有部分進入塑性狀態而柱尚在彈性階段，但試體之塑性轉角大部分仍是梁所貢獻。

試體 WF7-1 之遲滯迴圈圖如圖 5.5 所示。由圖 4.5 (a) 顯示試體最後行程走至 4.7% 弧度，在挫屈後強度雖然有衰減現象，但下降後強度仍較 M_p 高。圖 4.5 (b) 顯示最大塑性總轉角達 +3.3% 及 -3.5% 弧度，均符合規範之要求。圖 4.5 (c) 與圖 4.5 (d) 顯示接頭腹板區有些微的非線性行為而柱仍處在彈性階段，試體之塑性轉角大部分仍是梁所貢獻。

試體 WF7-2 之遲滯迴圈圖如圖 4.6 所示。由圖 4.6 (a) 顯示試體最後行程走完 4% 弧度；在正方向因為上翼板部分撕裂導致強度下降，負方向因下翼板局部挫屈而強度有衰減現象，但下降後強度仍較 M_p 高。圖 4.6 (b) 顯示最大塑性總轉角在正負方向均達 2.6% 弧度，未滿足國內規範要求，但有符合 AISC 規範之規定。圖 4.6 (c) 與圖

4.6 (d) 顯示接頭腹板區有些微的非線性行為而柱仍處在彈性階段，試體之塑性轉角大部分仍是梁所貢獻。

4.3 極限彎矩強度

表 4.2 為試體之彎矩強度表， M_{pn} 為梁之標稱彎矩強度， M_{wf} 與 M_{ph} 是依拉力試驗所求得梁於柱面與塑鉸處之塑性彎矩強度； $M_{wf, test}$ 與 $M_{ph, test}$ 分別代表實驗所得於柱面與塑鉸處之最大塑性彎矩強度。

M_{ph} / M_{pn} 為拉力試驗所得梁於塑鉸產生處之塑性彎矩強度與梁之標稱彎矩強度比值。所有試體皆為 A572 Gr. 50 鋼材，WF6 系列與 WF7 系列其比值分別為 1.23、1.18。顯示 A572 Gr. 50 鋼材實際材料強度較標稱強度約提高 1.18 至 1.23 倍；此與 AISC 建議 A572 Gr. 50 鋼材之材料變異係數 1.1 相類似。

$M_{wf, test} / M_{wf}$ 代表柱面於極限載重作用下之降伏狀態，比值若大於 1 代表柱面產生塑鉸後應變硬化之程度，值愈大則應變硬化程度愈高；若值小於 1，表示梁於柱面處尚未達全斷面降伏。試體 WF6 系列其值為 0.89~0.97 皆小於 1，顯示於柱面皆未達全斷面降伏；試體 WF7 系列其值為 0.99~1.06，顯示柱面處已進入全斷面降伏狀態。而試體 WF6-3 與試體 WF7-2 是以較低的應變硬化係數來設計，結果亦顯示在極限狀態下有較高的應力，最終均造成翼板的撕裂破壞。

$M_{ph, test} / M_{ph}$ 表示塑鉸產生處達到全斷面降伏後之應變硬化程度，五組試體之值為 1.02~1.16。由於此值皆大於 1，表示於預期塑鉸產生位置都達到全斷面降伏，顯示此處有較高的塑性變形能力與應變硬化行為發生。

總結而論，五組試體中 $M_{ph, test} / M_{ph}$ 之值皆較 $M_{f, test} / M_f$ 之值高，顯示試體在塑鉸區應變硬化程度較高，此與預期塑鉸機制於圓弧末端產生之設計理念相符。

4.4 接頭區應變分佈

本研究於各組試體之適當位置黏貼應變計 (如圖 4.7 至圖 4.8)，藉由讀取各試體在層間變位角 0.5%、1%、2%、3% 與 4% 弧度時之應變資料，來探討試體局部位置之應變分佈及趨勢，由此可對擴翼式梁柱接頭之力學行為有更深入之瞭解。

此取法乃考慮 0.5% 弧度時試體尚在彈性階段，1% 弧度時試體進入非彈性階段，2% 弧度之後試體達塑性階段。而 4% 弧度以後，試體已發生明顯的局部挫屈，過大的變形降低應變計之可信度。應變計黏貼於梁上翼板及梁腹板處，當梁端位移為負方向，梁上翼板承受拉應力時視為正應變，反之則為負應變；當試體進入塑性變形階段，由於受到殘留應變的影響，負應變量會小於正應變量，故取梁端位移負方向之應變量來討論。

應變計 F-40 用以瞭解試體於梁翼鉸道處之應變分佈。於擴翼短梁翼板之圓弧段起位置貼有應變計 F-175、F-180 與 F-240，圓弧末端處貼有應變計 F-356、F-420 與 F-505，可瞭解最大擴翼處與圓弧末端塑鉸產生處之應變分佈與趨勢。為了瞭解擴翼短梁內的應變趨勢，於梁翼縱向位置貼有應變計 F；圓弧末端相對應之腹板位置亦貼有應變計 W-356、W-420 與 W-505，其目的為瞭解塑鉸產生處之腹板應變程度與趨勢。分別就梁翼與梁腹之應變分佈情形探討如下：

圖 4.9 為試體 PN 之梁翼應變比較圖，圖 4.10 至 4.14 分別為試體

WF6-1 至 WF6-3、WF7-1 與 WF7-2 之梁翼與梁腹應變比較圖。圖 4.9 之 (a) 圖為梁翼距柱面 40 mm 處之應變分佈，由圖可知應變呈現兩側大中央小的趨勢，且應變量在 2% 弧度內大幅增加。顯示傳統型式接頭於梁翼全滲透鐸道處有較高的應變需求，導致試體 PN 未達 3% 弧度行程時，梁翼於此處發生撕裂破壞。

圖 4.10 (a) 至 (c) 為試體 WF6-1 之梁翼應變分佈，應變計以對稱於梁翼中心方式黏貼。F-40 在 1% 弧度內大致平均分佈且應變量不大，2% 弧度後應變成長幅度增大，顯示試體進入塑性階段。4% 弧度時呈現兩端有高應變量，試驗結果也顯示此處有開裂產生。F-180 為最大擴翼寬度與圓弧切削之交接處，由圖可知兩端的應變非常微小，應變分佈主要集中於梁翼中央區域，呈現中央高兩側低的趨勢。F-356 為塑鉸處之應變分佈，在 2% 弧度後呈現高應變分佈，顯示塑鉸處有高應變需求。

圖 4.11 (a) 至 (c) 為試體 WF6-2 之梁翼應變分佈。F-40 之應變分佈與試體 WF6-1 相似，4% 弧度時之應變成呈平均分佈，實驗結束後梁翼兩端並無發現裂縫。F-240 與 F-550 各階段之應變值較試體 WF6-1 之應變小，顯示較大擴翼量可降低梁翼之應變需求。

圖 4.12 (a) 至 (c) 為試體 WF6-3 之梁翼應變分佈，其應變計位置與試體 WF6-1 相同。近柱面處之應變位置 F-40 與 F-180 皆比試體 WF6-1 之應變為高，實驗也顯示此位置之高應變量導致梁翼於梁柱接面處發生撕裂破壞。圖 4.13 與 4.14 之 (a) 至 (c) 為試體 WF7-1 與 WF7-2 之梁翼應變分佈，兩組試體之應變趨勢大致相似近。試體 WF7-2 之 F-40 兩側亦呈現高應變趨勢，此試體也於梁翼-柱面鐸道處發生翼板撕裂。

圖 4.10 至 4.14 之 (d) 圖為擴翼短梁段內之縱向應變分佈，試體之應變分佈趨勢大致相同。梁翼於柱面處有應力集中現象，所以呈現高應變狀態；而圓弧段末端為預期之塑角產生處，此處最先達到其設計彎矩容量，所以亦有較高之應變分佈，且降伏區域亦大範圍的往遠離柱面發展。

圖 4.10 至 4.14 之 (e) 圖為試體塑鉸處對應之梁腹位置應變分佈，其黏貼位置對稱於梁腹中心。應變計 W420 顯示梁腹於 1% 弧度內之應變趨勢近於線性，此時梁腹還保持在彈性階段；2% 弧度後梁腹兩側之應變值明顯增加，兩側之應變需求大於中央處，此與梁斷面由翼板逐漸擴展至腹板並往腹板中心延伸之降伏狀態相符合，最終梁腹兩側近翼板處呈高應變現象。

上述應變探討可知，足夠的擴翼補強量確實能降低梁翼全滲透鉚道兩端及扇形開孔位置之應變需求。擴翼圓弧末端遠離柱面與平滑的圓弧段，能提供最佳的塑性消能範圍，並減少降伏區域對梁柱接頭的影響，有助於改善末端處之應力集中現象。

4.5 結論

由水平擴座板補強接頭文獻與擴翼式接頭試驗比較可知，此兩種型式接頭皆是增加梁柱接合區之梁翼板寬度，達到提高接頭處彎矩容量並使塑鉸遠離梁柱交接面產生。然而擴座型式接頭因鉚接入熱量增加與梁翼-擴座板接合處之幾何不連續，導致擴座末端處有開裂發生而無法發揮應有之韌性行為；擴翼式接頭試驗顯示，藉由鋼板直接裁切之擴翼板並採圓弧漸進段設計，明顯改善上述擴座式接頭缺點，使梁柱接頭提供了良好之韌性消能能力。

試體 WF6-3 與 WF7-2 相較於未擴翼補強之傳統接頭 PN，已有較佳的極限強度與韌性能力，但最終仍於翼板發生脆性破壞，扇形開孔處亦有明顯裂縫發生。結果顯示，此兩試體之擴翼程度，未能有效抑制鉸道與扇形開孔處之應力集中現象；其餘三組試體則顯示了良好的韌性能力，於塑鉸處發展穩定的塑性消能機制。綜合以上結果可知，擴翼方式確實能改善傳統接頭之韌性，減少了應力集中所造成之開裂，並提供擴翼式接頭的設計依據。



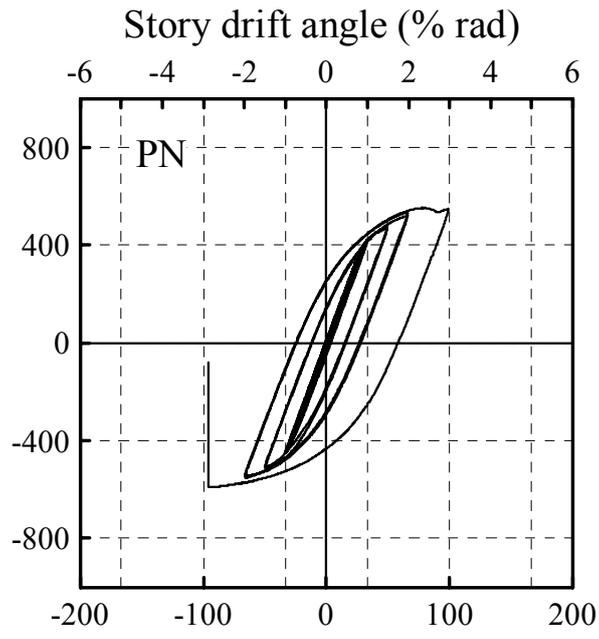
表 4.1 試體破壞模式與最大塑性總轉角、層間變位角

試體 編號	層間變位角		塑性總轉角		破壞模式
	θ_i (% rad)		θ_p (% rad)		
PN	+3.0	-3.0	+1.8	-1.6	梁上翼板沿寬度方向撕裂；梁下翼板開裂約三分之一倍梁寬
WF6-1	+5.8	-5.8	+4.6	-4.8	梁翼與梁腹產生局部挫屈；梁腹板與翼板銲道於扇形開孔處產生開裂
WF6-2	+5.8	-5.8	+4.2	-4.6	梁下翼與梁腹產生局部挫屈；梁腹板與翼板銲道於扇形開孔處產生開裂
WF6-3	+5.0	-5.8	+3.6	-3.5	梁下翼板產生局部挫屈並沿寬度方向撕裂
WF7-1	+4.7	-4.7	+3.3	-3.5	梁翼與梁腹產生局部挫屈；梁腹板與翼板銲道於扇形開孔處產生開裂
WF7-2	+4.0	-5.0	+2.6	-2.6	梁下翼板發生局部挫屈並沿寬度方向撕裂

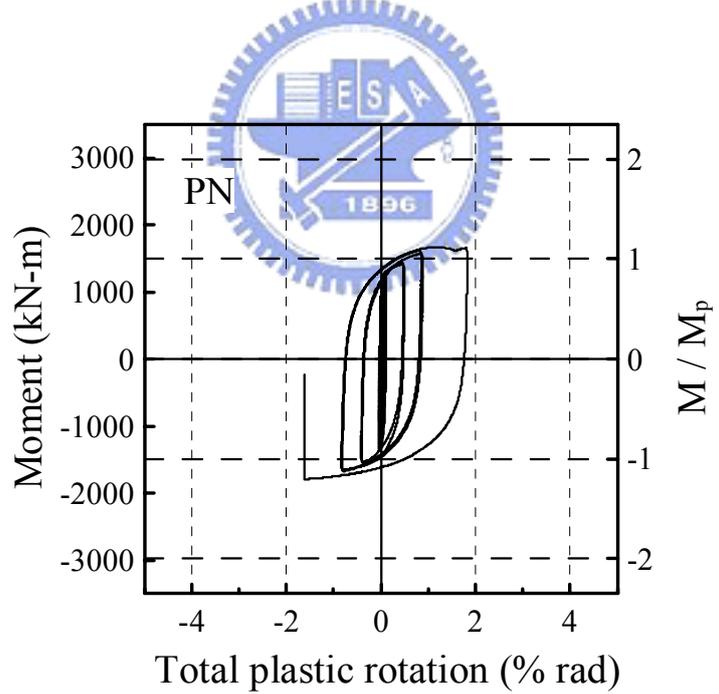
表 4.2 試體之彎矩強度

試體編號	M_{pn}	M_f	M_{ph}	M_{ph}/M_{pn}	$M_{f,test}$	$M_{ph,test}$	$M_{f,test}/M_f$	$M_{ph,test}/M_{ph}$
PN	1487	1833	1833	1.23	1676	1676	0.91	0.91
					-1791	-1791	0.98	0.98
WF6-1	1487	2395	1833	1.23	2303	2032	0.96	1.11
					-2124	-1874	0.89	1.02
WF6-2	1487	2541	1833	1.23	2439	2033	0.96	1.11
					-2279	-1899	0.90	1.04
WF6-3	1487	2297	1833	1.23	2227	1965	0.97	1.07
					-2188	-1931	0.95	1.05
WF7-1	2156	3288	2547	1.18	3341	2951	1.02	1.16
					-3240	-2862	0.99	1.12
WF7-2	2156	3159	2547	1.18	3348	2957	1.06	1.16
					-3229	-2852	1.02	1.12

彎矩單位：kN-m

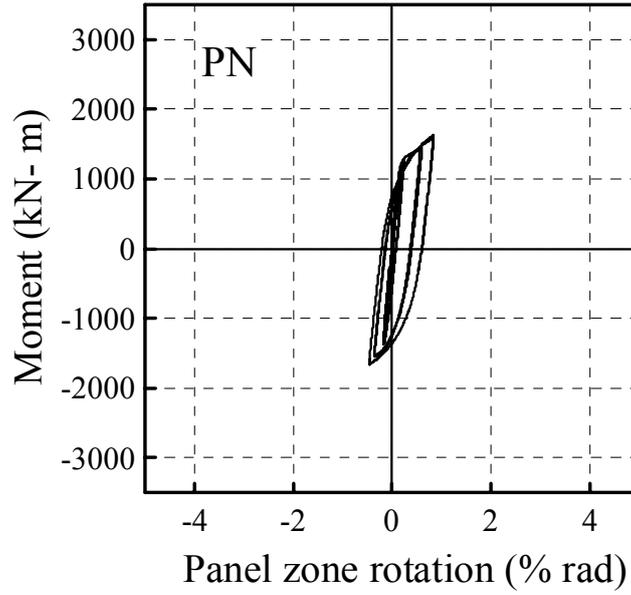


(a) 試體 PN 之載重與位移關係圖

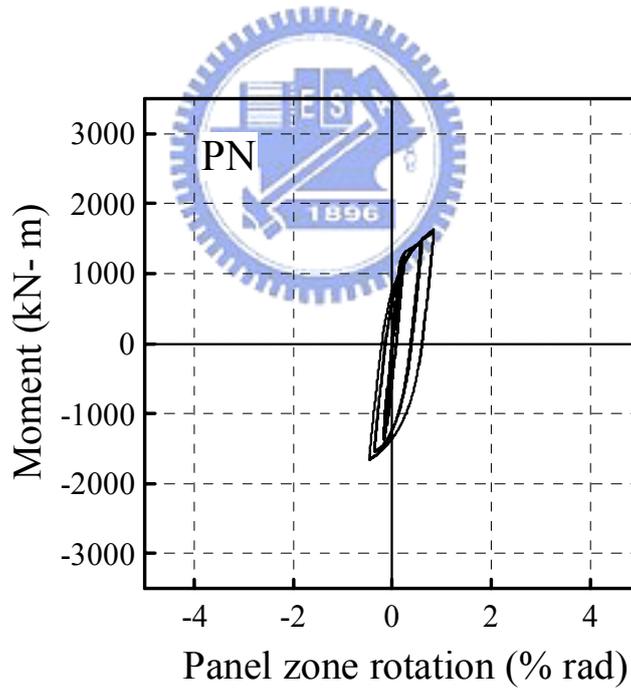


(b) 試體 PN 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.1 試體 PN 之遲滯迴圈圖

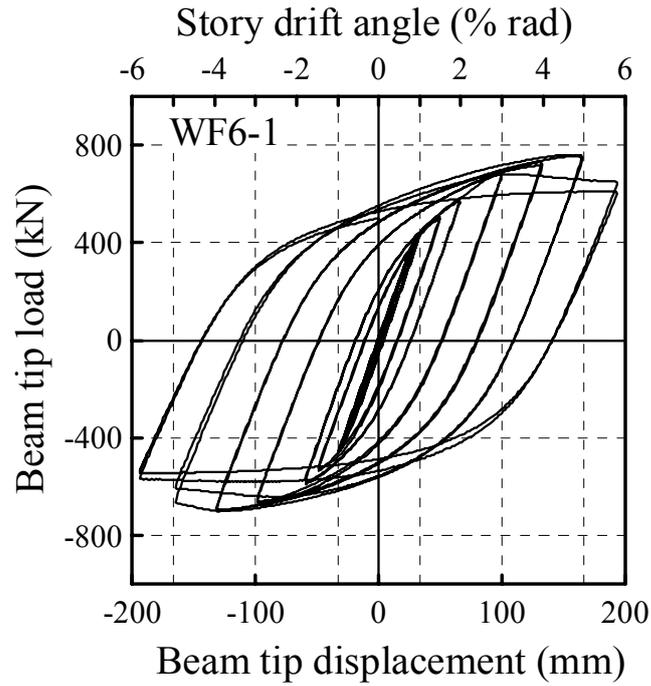


(c) 試體 PN 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

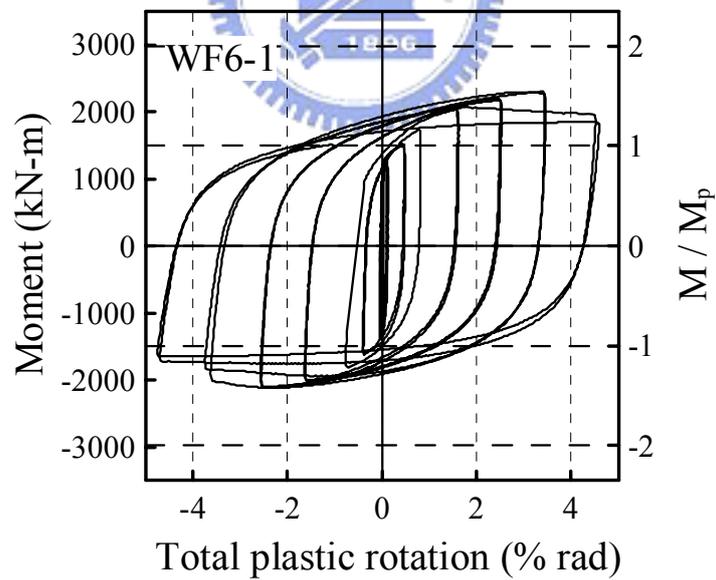


(d) 試體 PN 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.1 試體 PN 之遲滯迴圈圖 (續)

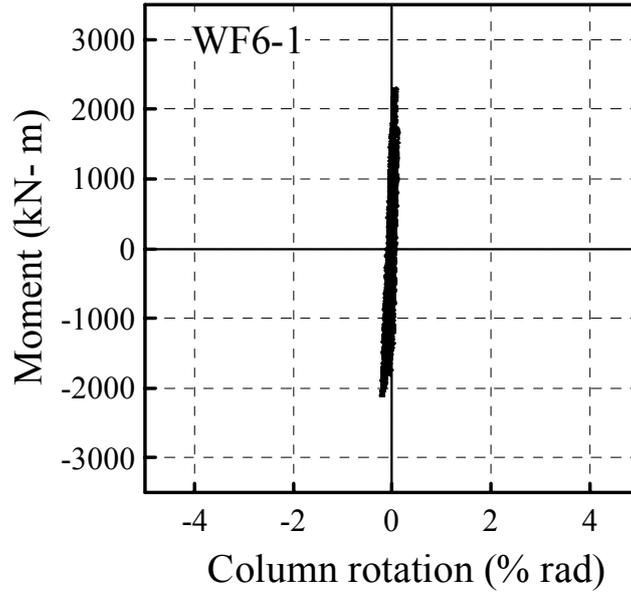


(a) 試體 WF6-1 之載重與位移關係圖

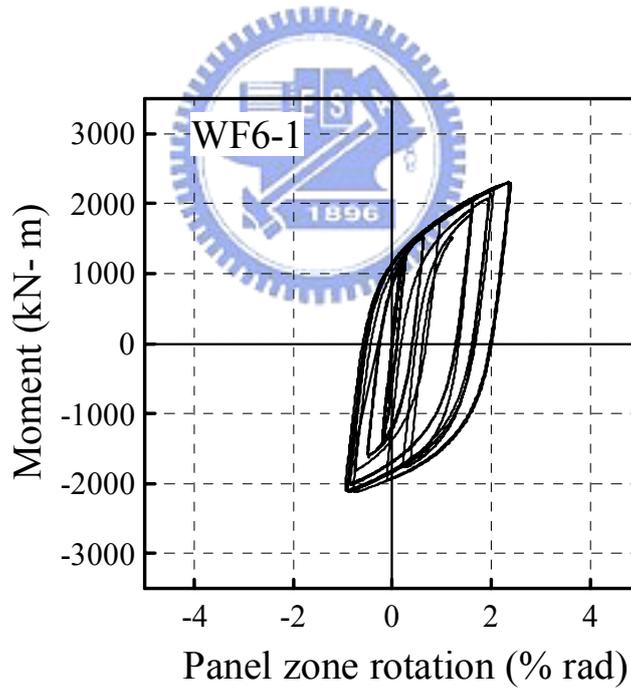


(b) 試體 WF6-1 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.2 試體 WF6-1 之遲滯迴圈圖

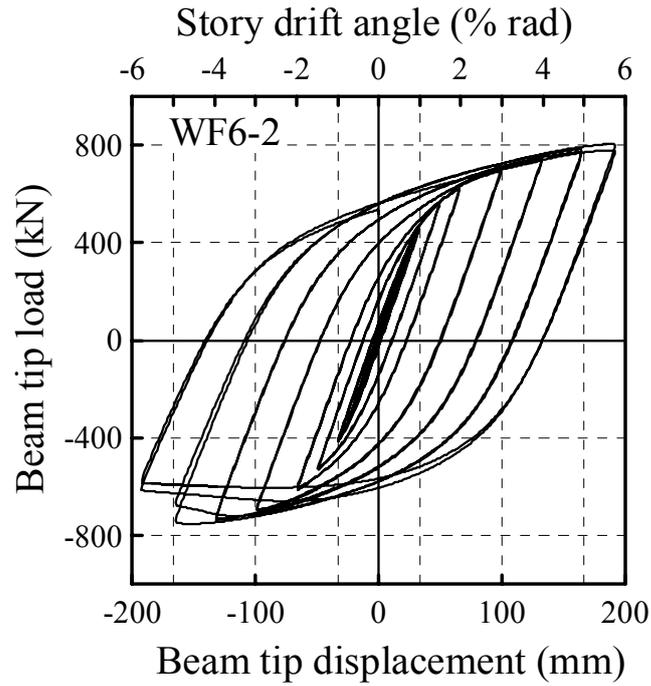


(c) 試體 WF6-1 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

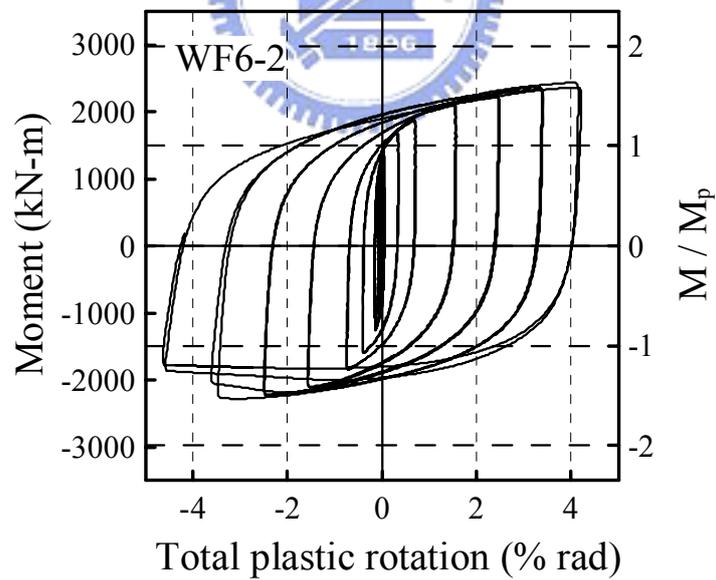


(d) 試體 WF6-1 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.2 試體 WF6-1 之遲滯迴圈圖 (續)

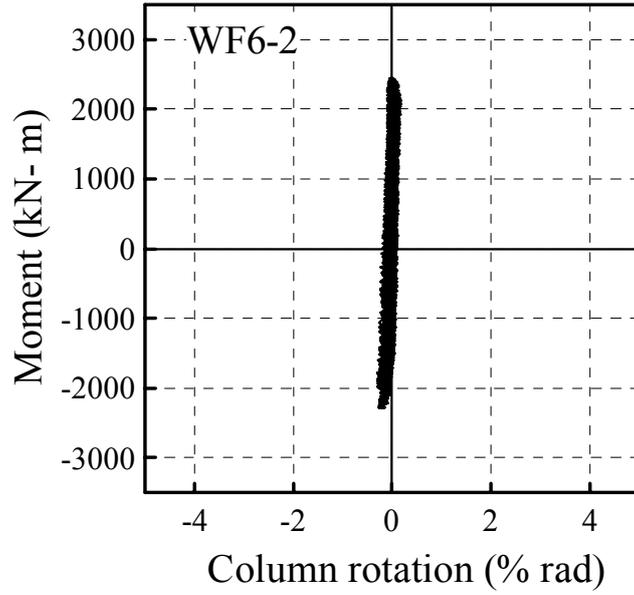


(a) 試體 WF6-2 之載重與位移關係圖

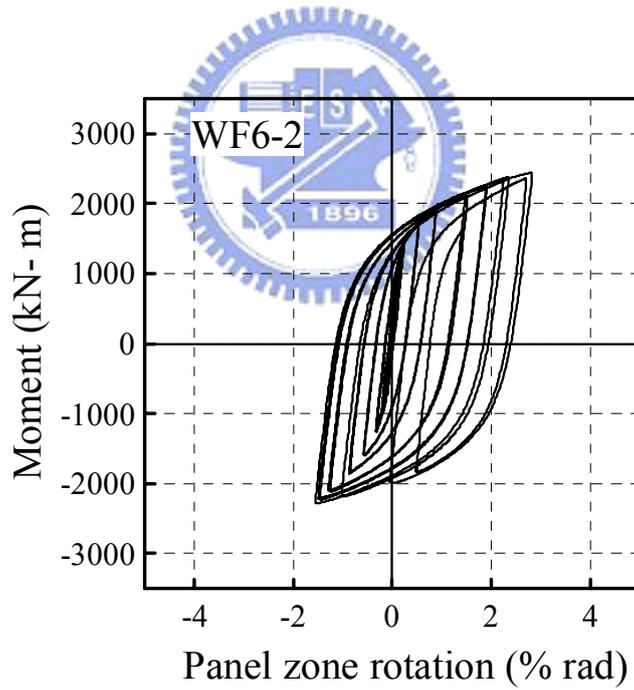


(b) 試體 WF6-2 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.3 試體 WF6-2 之遲滯迴圈圖

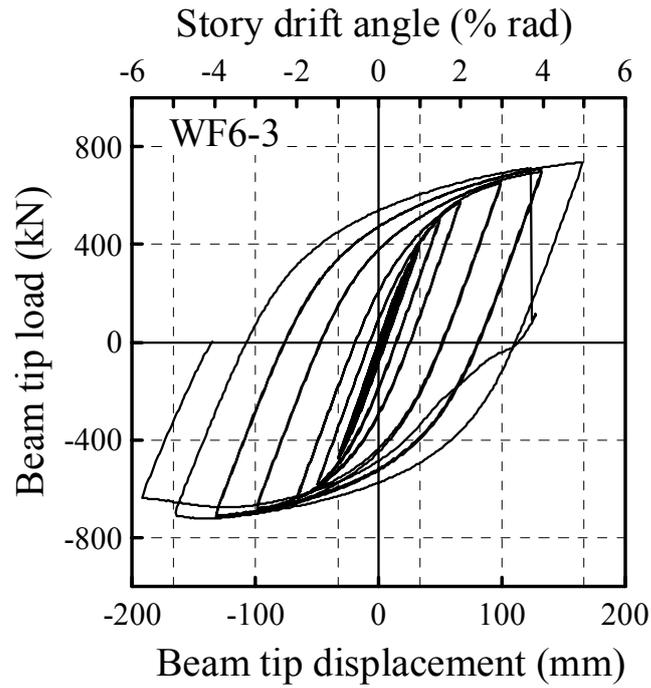


(c) 試體 WF6-2 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

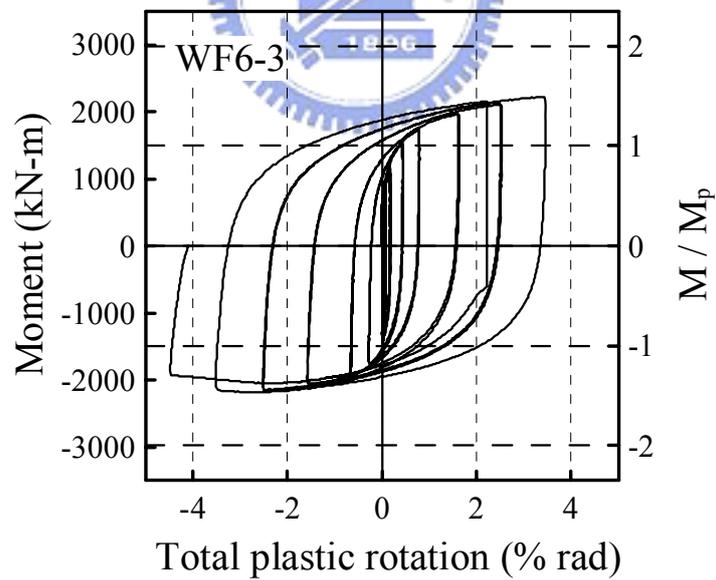


(d) 試體 WF6-2 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.3 試體 WF6-2 之遲滯迴圈圖 (續)

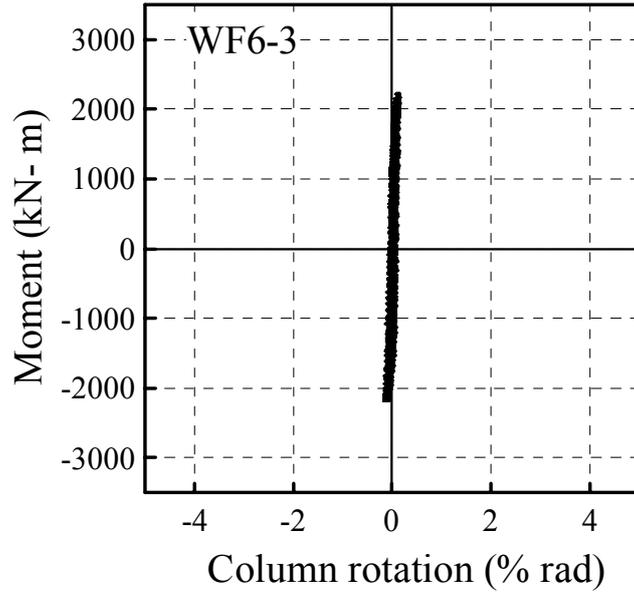


(a) 試體 WF6-3 之載重與位移關係圖

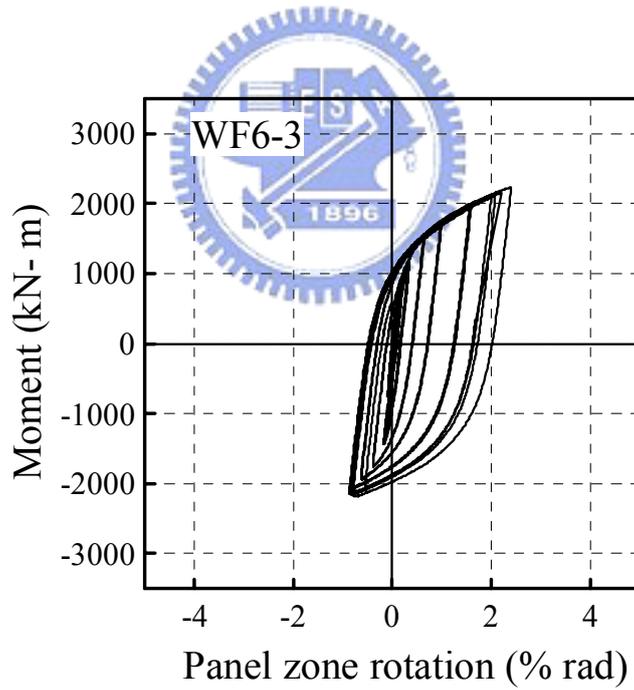


(b) 試體 WF6-3 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.4 試體 WF6-3 之遲滯迴圈圖

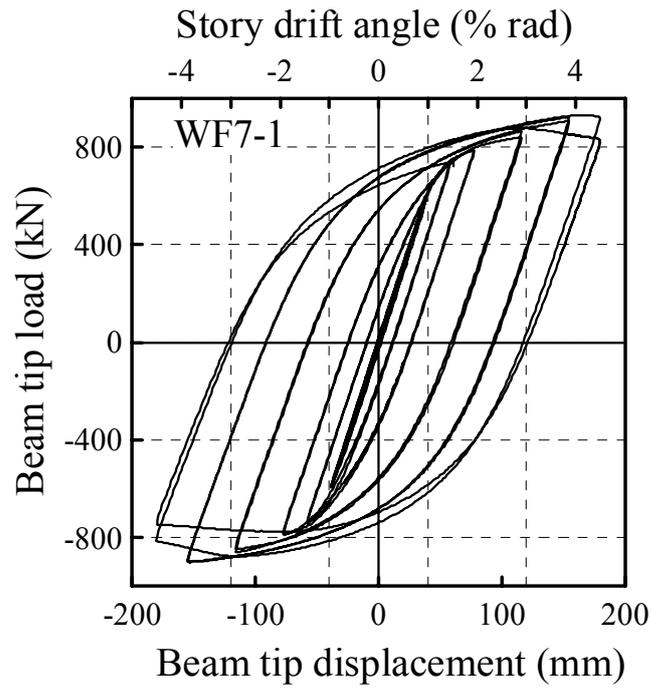


(c) 試體 WF6-3 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

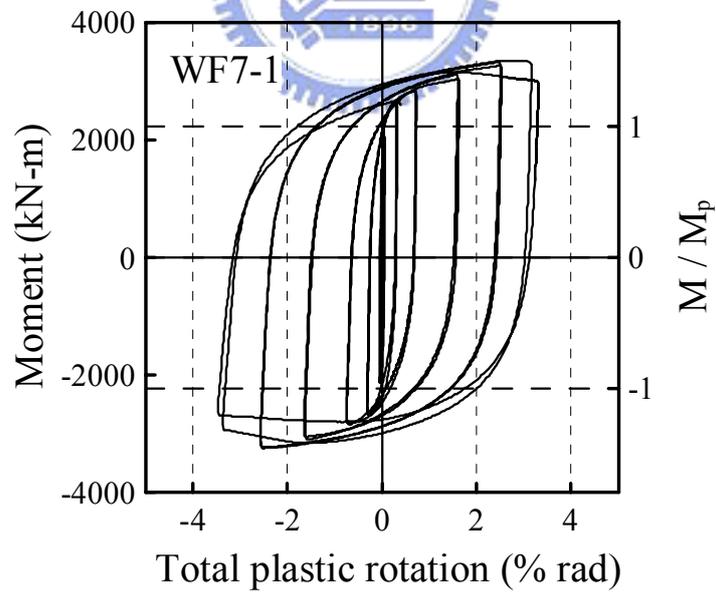


(d) 試體 WF6-3 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.4 試體 WF6-3 之遲滯迴圈圖 (續)

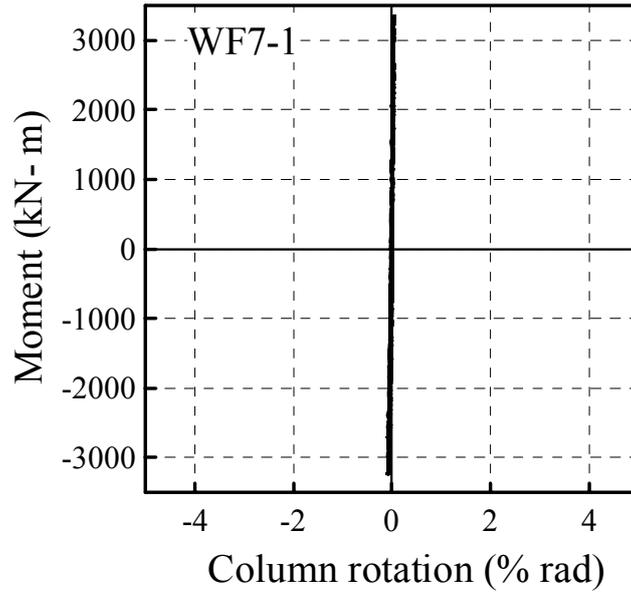


(a) 試體 WF7-1 之載重與位移關係圖

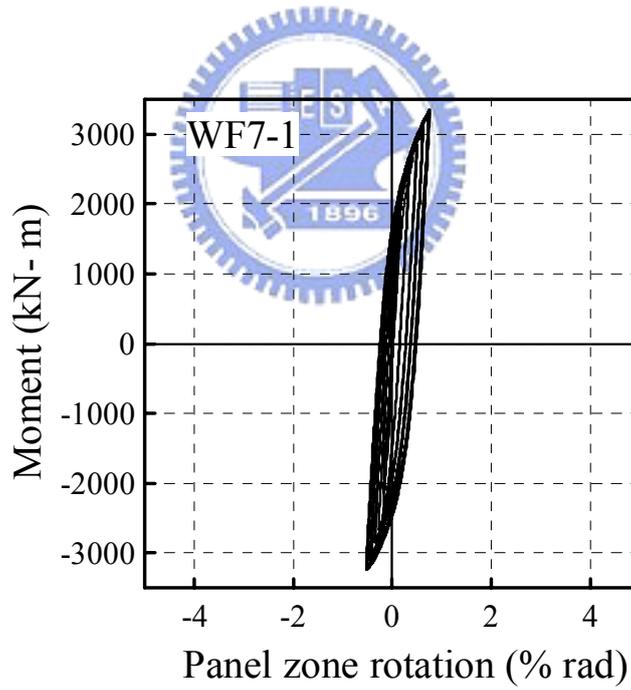


(b) 試體 WF7-1 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.5 試體 WF7-1 之遲滯迴圈圖

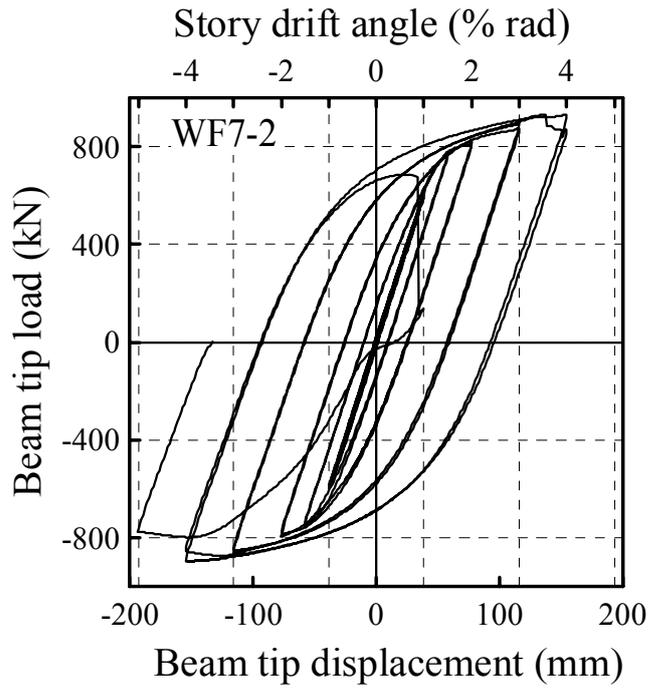


(c) 試體 WF7-1 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖

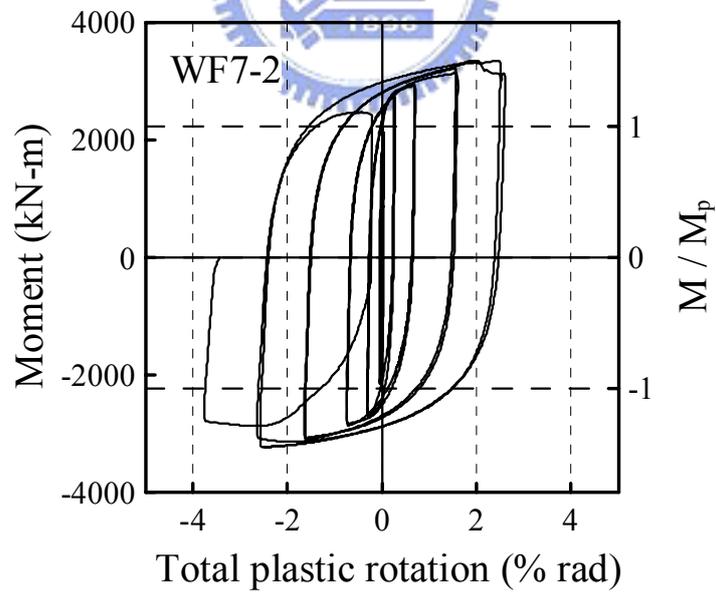


(d) 試體 WF7-1 之彎矩與柱轉角關係圖

圖 4.5 試體 WF7-1 之遲滯迴圈圖 (續)

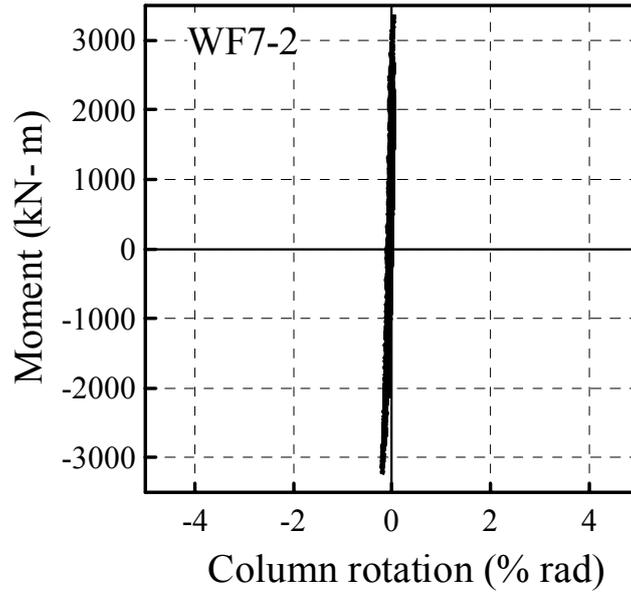


(a) 試體 WF7-2 之載重與位移關係圖

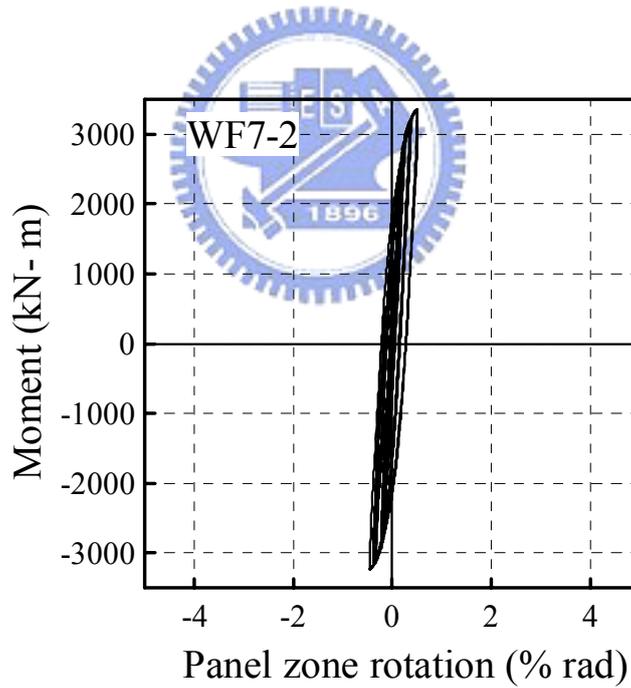


(b) 試體 WF7-2 之彎矩與總塑性轉角關係圖

圖 4.6 試體 WF7-2 之遲滯迴圈圖

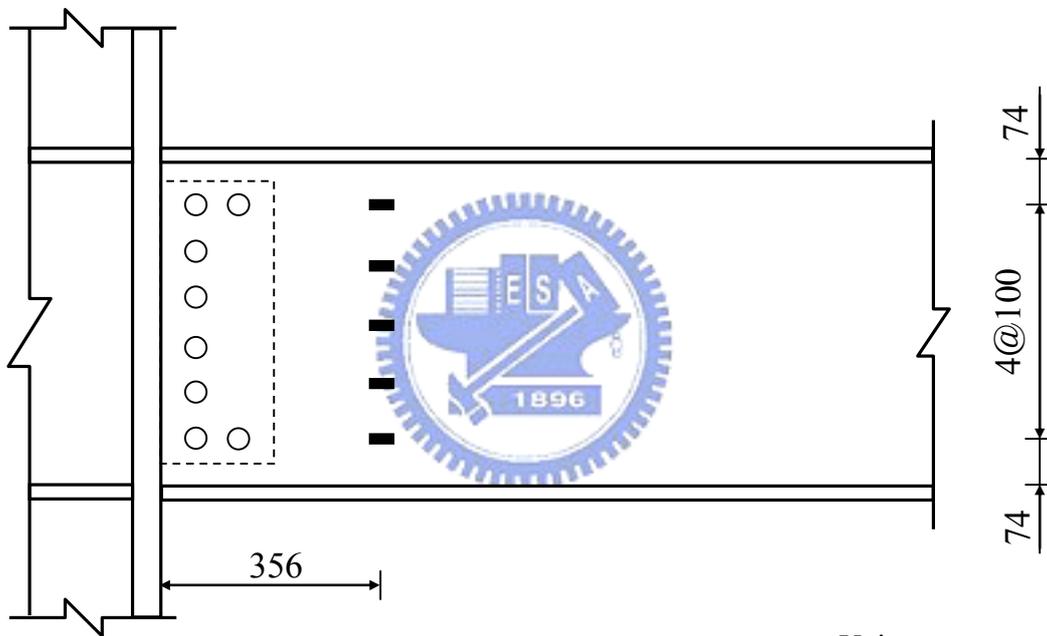
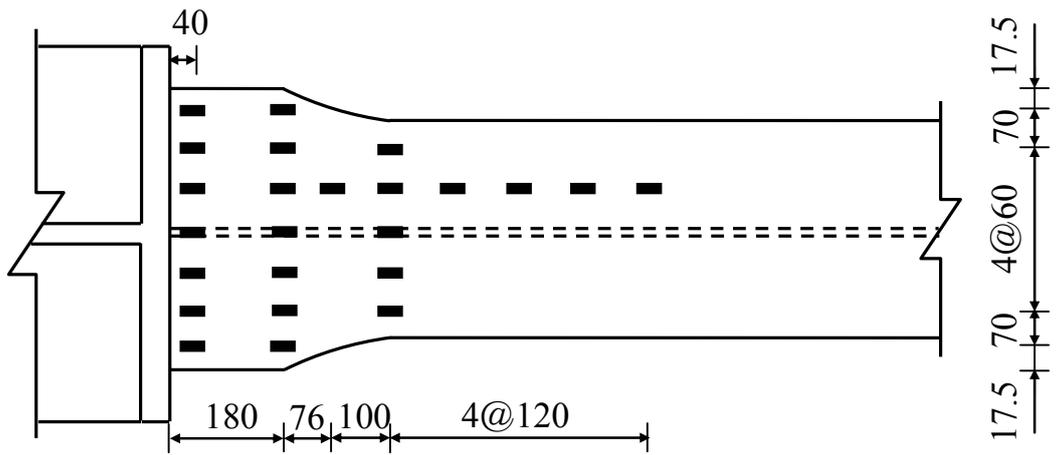


(c) 試體 WF7-2 之彎矩與接頭腹板區轉角關係圖



(d) 試體 WF7-2 之彎矩與柱轉角關係圖

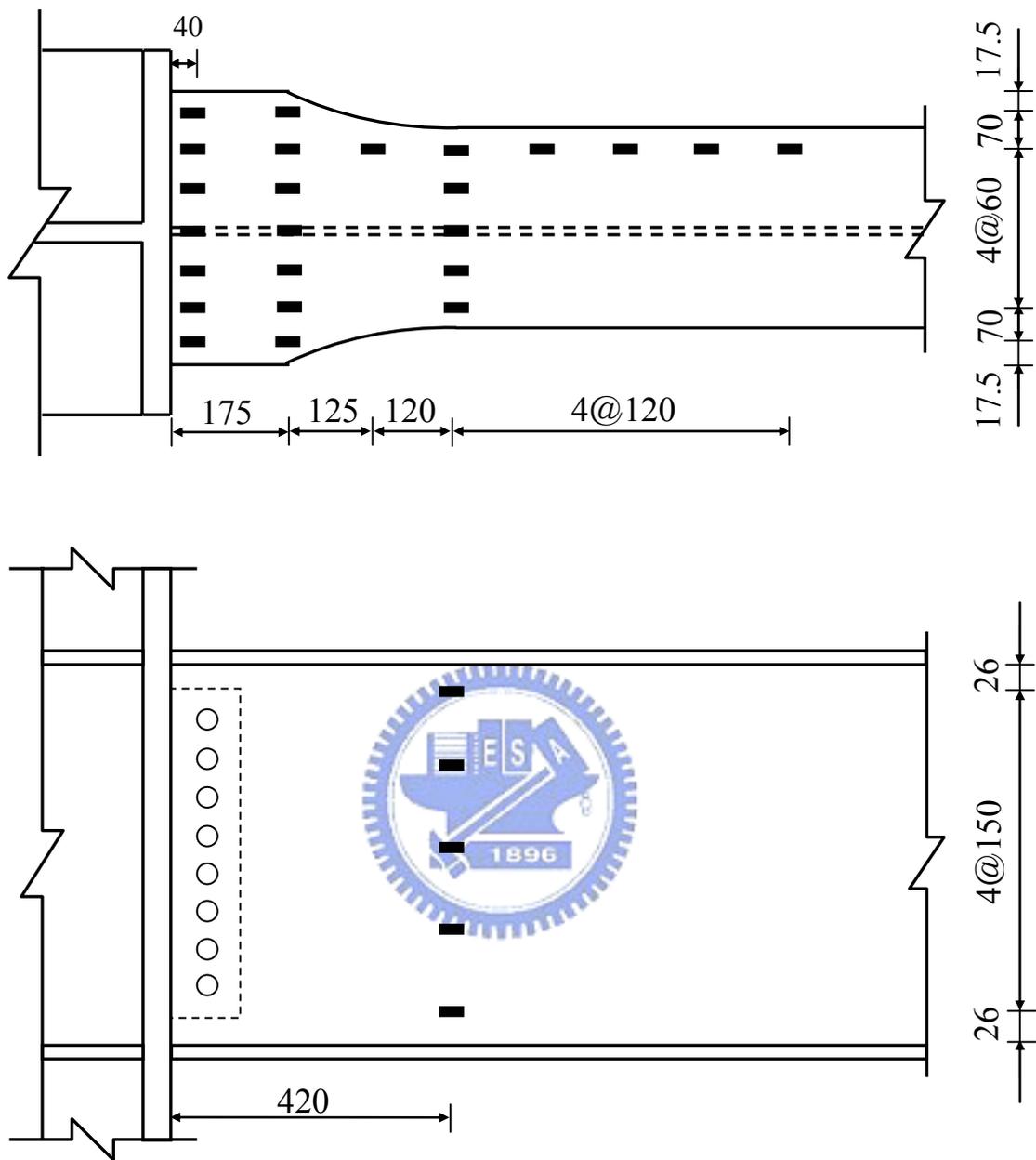
圖 4.6 試體 WF7-2 之遲滯迴圈圖 (續)



Unit : mm

註：試體 WF6-2 之 F240 與 F505 應變計位置即為 F180 與 F356 之位置
 試體 WF6-3 之應變計位置與 WF6-1 相同

圖 4.7 試體 WF6-1 應變計位置圖



Unit : mm

註：試體 WF7-2 之應變計位置與 WF7-1 相同

圖 4.8 試體 WF7-1 應變計位置圖

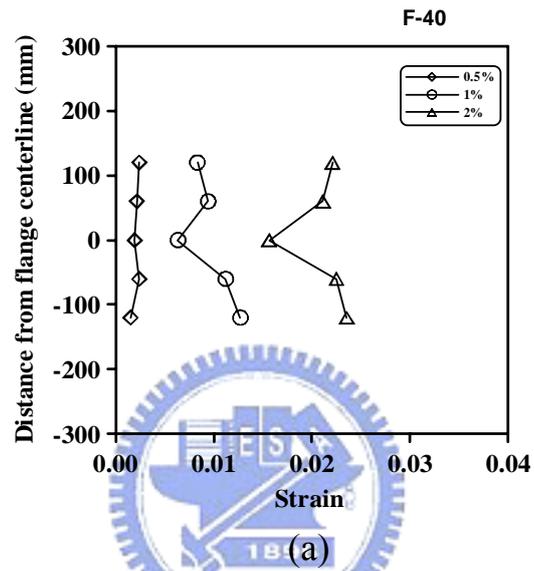
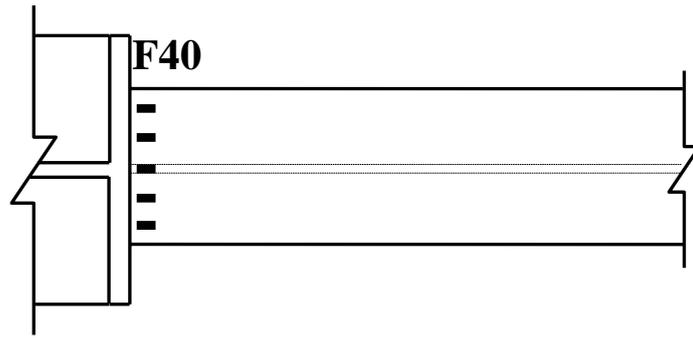


圖 4.9 試體 PN 之梁翼應變比較圖

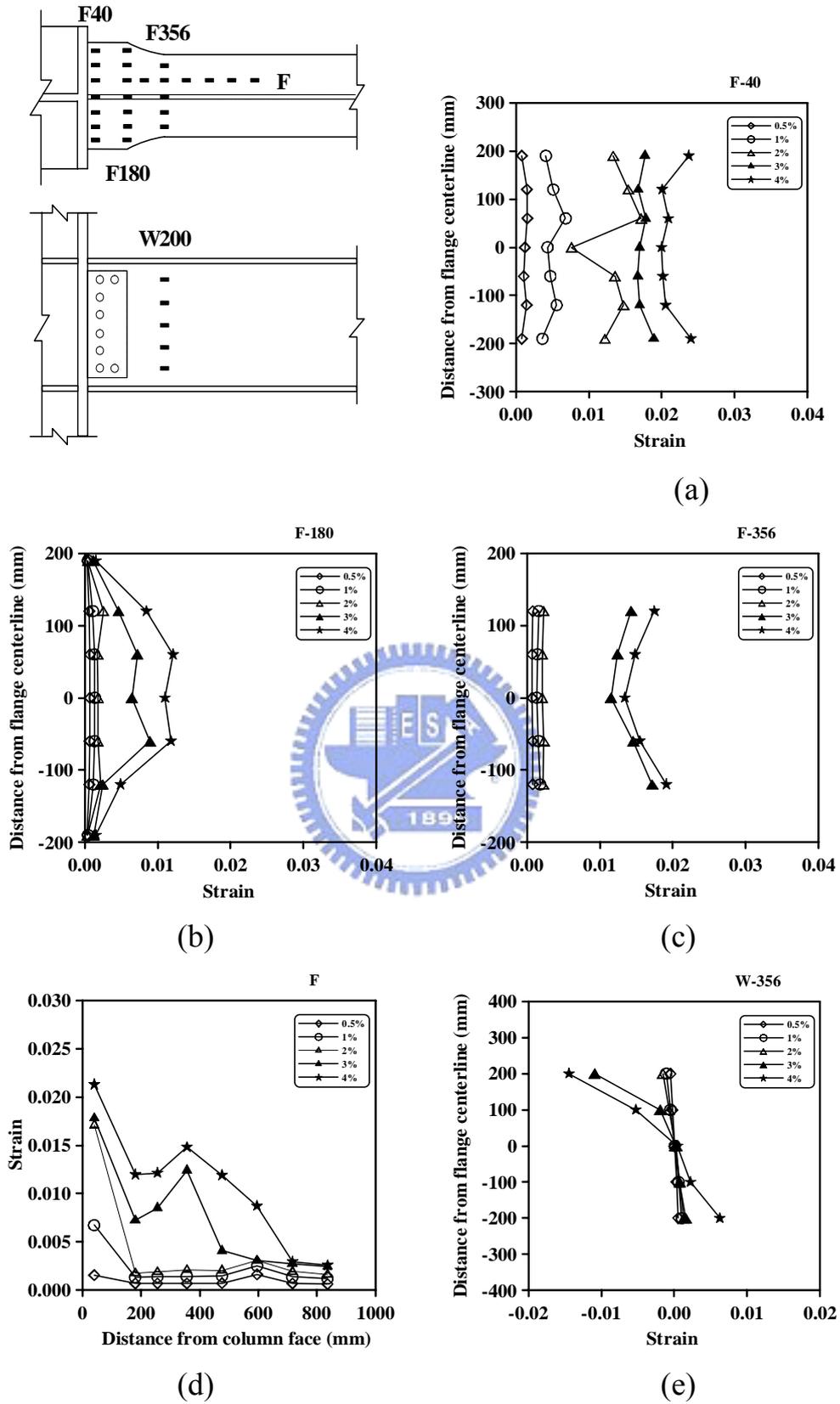
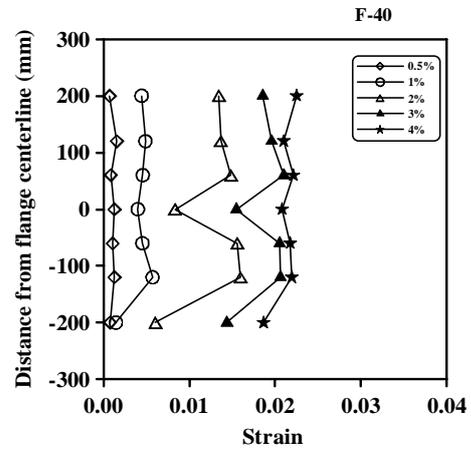
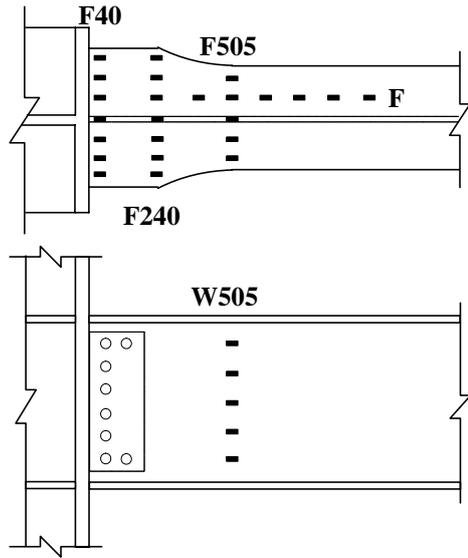
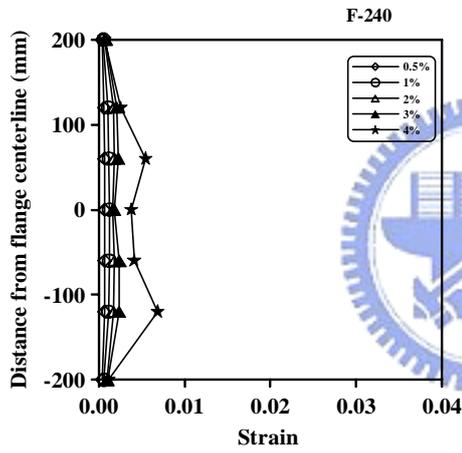


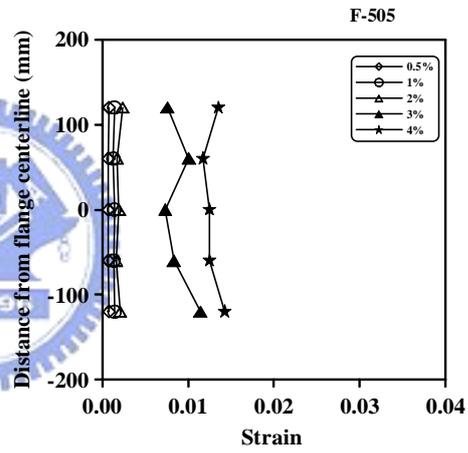
圖 4.10 試體 WF6-1 之梁翼與梁腹應變比較圖



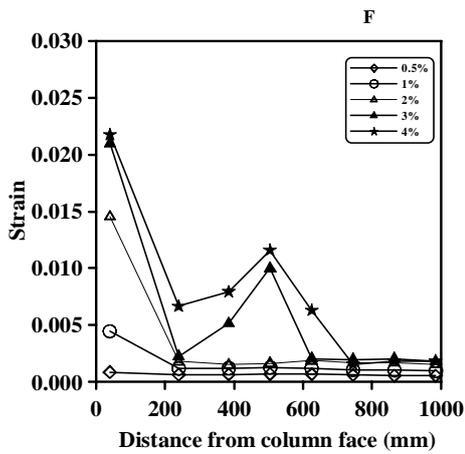
(a)



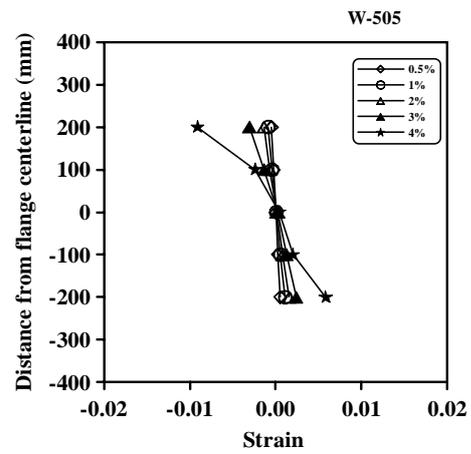
(b)



(c)

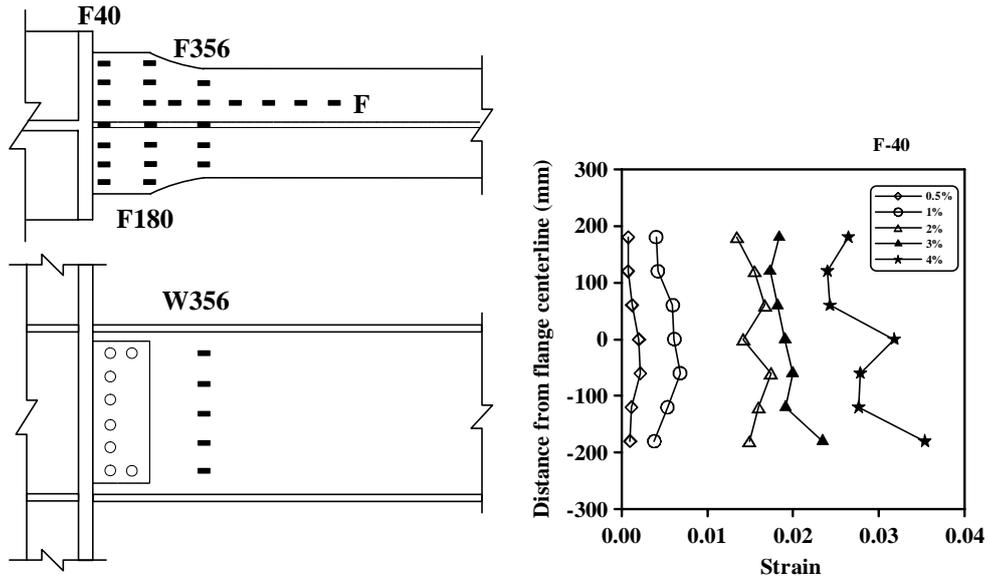


(d)

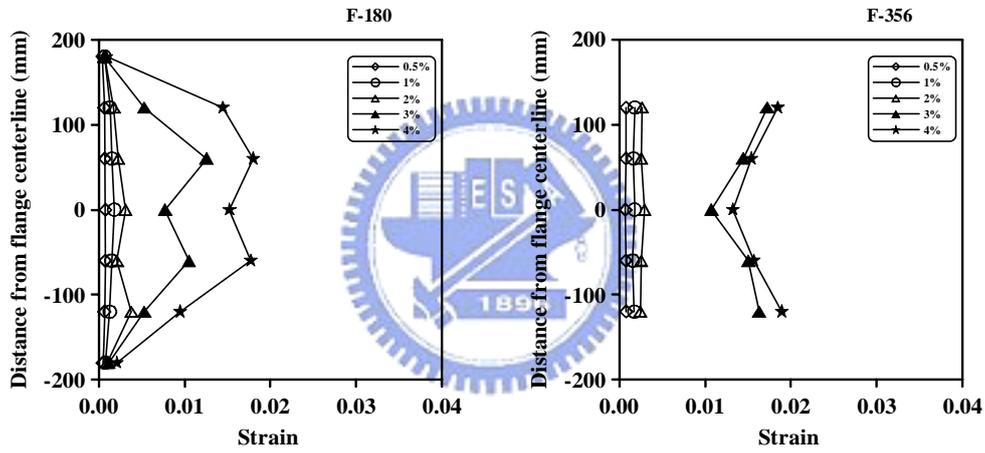


(e)

圖 4.11 試體 WF6-2 之梁翼與梁腹應變比較圖

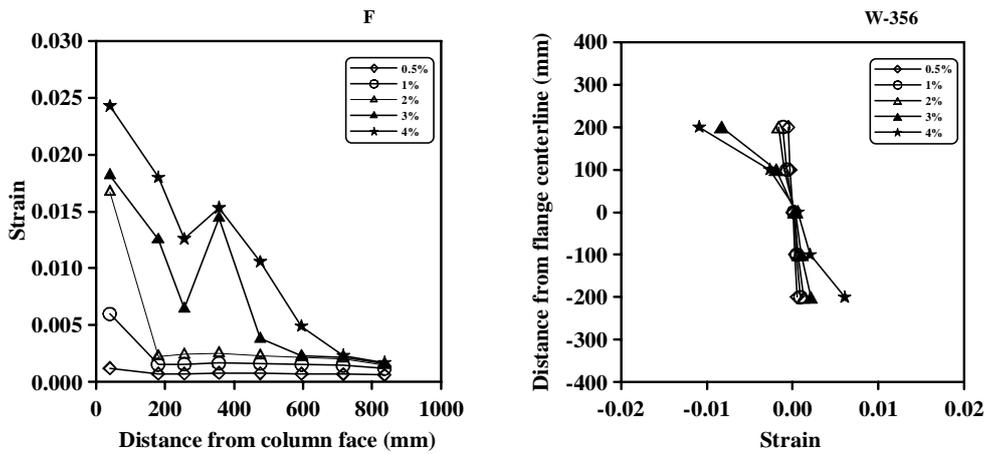


(a)



(b)

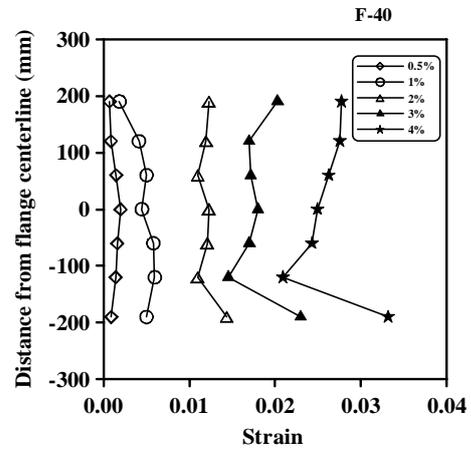
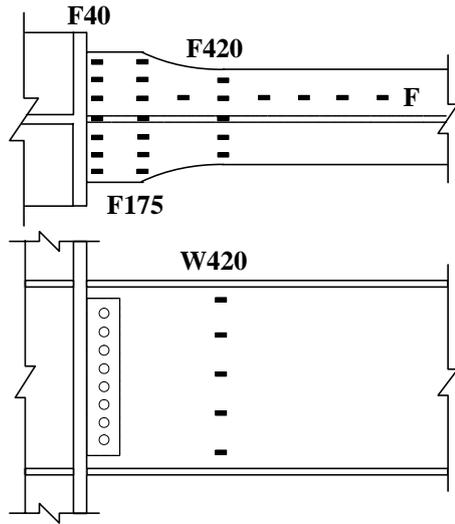
(c)



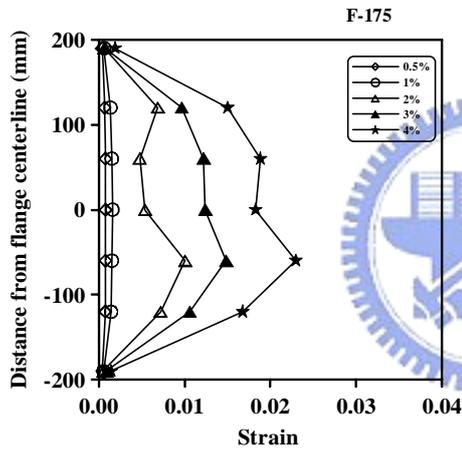
(d)

(e)

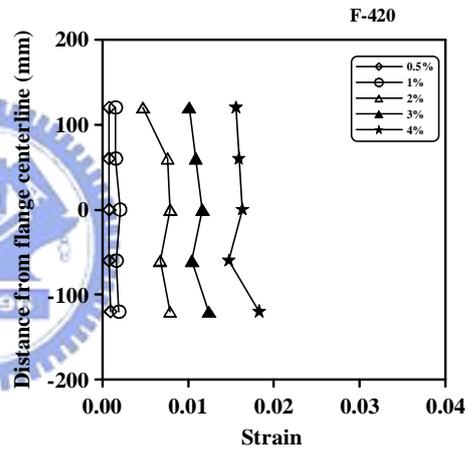
圖 4.12 試體 WF6-3 之梁腹與梁翼應變比較圖



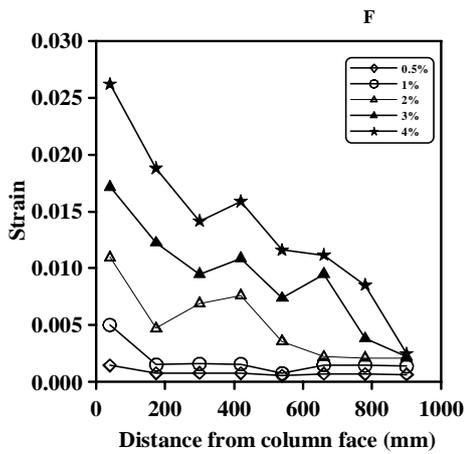
(a)



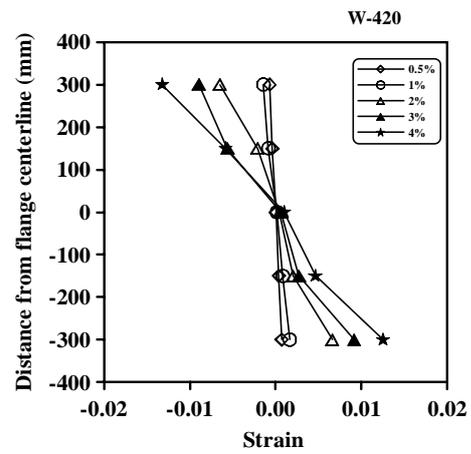
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 4.13 試體 WF7-1 之梁腹與梁翼應變比較圖

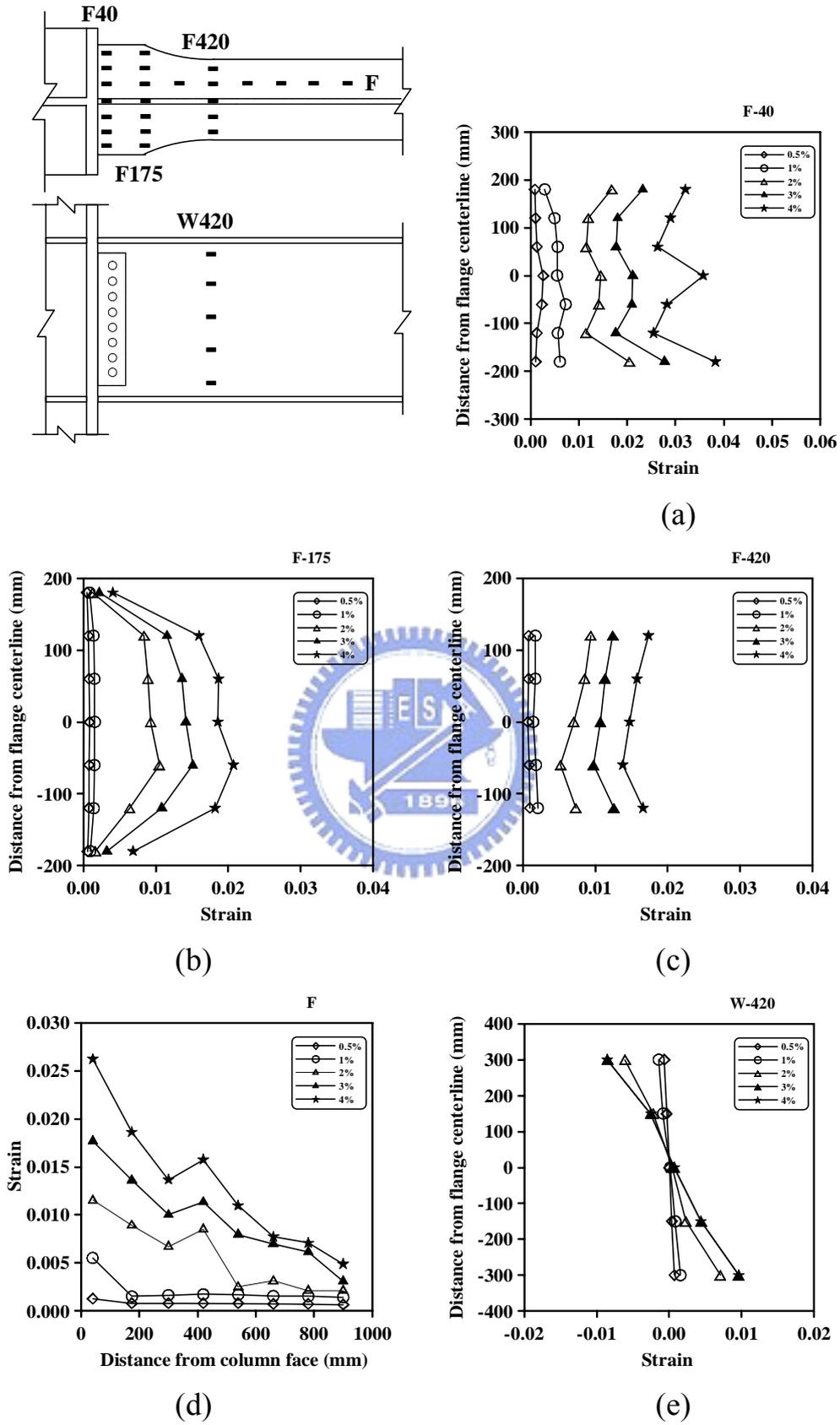


圖 4.14 試體 WF7-2 之梁腹與梁翼應變比較圖