

第五章 有限元素分析

5.1 前言

本章使用美國 Hibbit, Karlsson and Sorensen 公司所研發的 ABAQUS 有限元素分析程式 (2003) 進行結構試體非線性有限元素分析, 評估有限元素分析的可靠性, 並探討加勁板的厚度 t_s 、深度 d_s 及長度 L_s 對於梁翼板應變分佈、加勁板所傳遞之彎矩量與梁強度需求比及破裂參數 RI 的關係, 其中 5.2 節為試體有限元素模型建立, 5.3 節為分析結果, 5.4 節為 IFS 加勁板參數研究, 5.5 節為 FDWS 加勁板參數研究。

5.2 試體有限元素模型建立

為了與實驗結果比較, 分析模型採用與實驗試體相同之梁、柱及加勁板尺寸 (表 2.3) 來進行有限元素之模擬, 且為了使有限元素模型更接近真實試驗之試體, 本研究將梁與柱接合之焊道及加勁板與梁柱接合之焊道加入有限元素之模型中, 其相關之細節及假設說明如下:

1. 基本假設:

不考慮實際試體於製作及焊接時所造成之熱影響區及殘餘應力的影響, 並假設鋼材不產生局部挫屈及斷裂之行為。

2. 結構模型:

模型採用三維結構元素進行模擬, 其中鋼梁、鋼柱、加勁板及焊道皆採用 8 個節點的磚元素 (C3D8R), 而每個節點有 3 個位移自由度。

3. 剪力板、扇形開口及焊道之模擬假設:

假設梁腹板與剪力板完全貼合, 不考慮梁腹板與剪力板之接合螺栓及相對滑動效應, 並考慮梁腹板與剪力板之間的厚度差異, 且忽略梁腹板扇形開口之模擬, 而梁柱接頭區焊道模擬之尺寸則統一與 2.3.3 節中 IFS 加勁板接合細節所規劃的相同, 如圖 2.7 所示, 而圖 5.1 為梁柱接頭區焊道及忽

略梁腹板扇形開口之模擬情形。本研究亦將加勁板與梁接合及與柱接合之焊道加以模擬，而各加勁板之焊道模擬尺寸同樣與 2.3.3 節及 2.3.5 節中加勁板接合細節所規劃的相同，如圖 2.8 至圖 2.15 所示，但為了簡化部份焊道之結構模型網格，本研究將加勁板與柱接合之焊道簡化模擬成與真實削切之焊道相同面積的正方形焊道，而加勁板與梁接合之焊道則與真實削切之焊道相同，圖 5.2 為 IFS 加勁板與梁及柱接合之焊道模擬情形，圖 5.3 為 FDWS 加勁板與梁及柱接合之焊道模擬情形。

4. 材料性質：

鋼材之降伏強度採用鋼材拉力試驗之值，如表 2.1 及表 2.2 所示，鋼材之彈性模數採用 203,000 Mpa，波松比為 0.3，並使用吳家慶(2004)由 A572 Gr.50 及 A36 鋼材反覆載重試驗所得之應變硬化參數，其中包含等向硬化參數 (Isotropic Hardening) 及走動硬化參數 (Kinematic Hardening)，表 5.1 為 A572 Gr.50 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令，表 5.2 為 A36 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令。焊道之強度於試體焊接前就請鴻舜鋼鐵廠提供焊道強度報告 (附件 A)，因此焊道之降伏強度如報告所示採用 469 MPa (圖 5.4)，其反覆載重參數假設其與 A572 Gr.50 鋼材相同。

5. 邊界條件：

於柱頂之節點束制 2 個位移自由度，同樣地於柱底之節點束制 3 個位移自由度，以模擬試驗時柱頂與柱底之鉸接行為。

6. 施加载重：

於梁端施加與實驗一致之反覆載重位移，以求得力量—位移曲線。

5.3 分析結果

本研究有限元素分析主要模擬 8 組已進行反覆載重實驗之試體，其試體編號分別為 UR、IFS1 至 IFS5 及 FDWS2、FDWS3，將此 8 組試體由有

限元素分析所得之彎矩與位移關係、彈性勁度及局部行為與實驗進行比較，而圖 5.5 至圖 5.8 為試體 UR、IFS3、IFS5 及 FDWS2 之結構網格分佈圖，且由有限元素分析中所得之各項參數加以討論，其細節詳述如下：

5.3.1 試體 UR 及 IFS 試體分析結果

5.3.1.1 梁端彎矩與位移關係及彈性勁度比較

圖 5.9 為試體 UR 及 IFS 試體之梁端彎矩與位移關係比較圖，由圖中之各試體梁端彎矩與位移關係圖可整理出實驗與分析在每一個層間側位移角之彎矩及彈性勁度 K_E 之間的差值比例，如表 5.3 所示，由表中可更進一步看出 IFS 試體梁端彎矩之實驗值與分析值誤差範圍均在 10% 之內。

5.3.1.2 局部行為比較

(a) 應變比較：

圖 5.10 為試體 UR 及 IFS 試體之上翼板應變比較圖，其中試體 UR 及試體 IFS3、IFS4 及 IFS5 上翼板應變之分析與實驗值的誤差較小，而試體 IFS1 及試體 IFS2 誤差較大，判斷原因應為此兩組試體之焊道材料性質不知之故，因為此兩組試體之梁柱是於真實結構物中切割下來，因此焊道之材質未知，而本研究於模擬時將其未知的材質均假設與試體 IFS3 相同，可能是因假設的材質與其本身真實的材質不同，所以造成局部的行為誤差甚大，而本研究將模擬準確之試體 IFS3、IFS4 及 IFS5，進一步的將加勁板上之應變進行比較，如圖 5.11、圖 5.12 及圖 5.13 所示，由圖中可看出此三組加入加勁板之梁柱接頭行為，不管在梁端彎矩與位移關係之比較或彈性勁度 K_E ，均與實驗反應行為相當的接近。

(b) 加勁板軸向應力分佈 I：

本研究利用與實驗反應行為相當接近之試體 IFS3、IFS4 及 IFS5，由

ABAQUS 所繪出應變圖，並將此應變對應於真實材料之應力應變曲線可得，此三組試體加勁板上之軸向應力圖，如圖 5.14、圖 5.15 及圖 5.16 所示，由圖中可看出各加勁板之降伏範圍及中性軸位置，且將降伏範圍代入 2.2.1.1 節加勁板之中性軸位置分佈中之(2.22)式，即可計算出部份塑性加勁板軸向應力分佈狀態 I 下不同之降伏範圍所對應之中性軸位置，如表 5.4 所示，而表中所示之距離均由梁翼板內側與加勁板交接面算起，且由表中可看出使用第二章所推導之公式所計算出之中性軸位置與 ABAQUS 分析所得出之中性軸位置誤差範圍均在 5% 之內。而利用圖 5.14、圖 5.15 及圖 5.16 所示之應力圖，並積分應力圖下所圍之面積，再乘上所對應面積至梁中性軸之距離，即可得此三組試體加勁板上所提供之彎矩 M_s ，如圖 5.17 所示，而將此三組加勁板所提供之彎矩貢獻除上加勁板所提供之塑性彎矩 M_{ps} 可得於分析中加勁板所能達到之塑性彎矩比例，如圖 5.18 所示，由圖中可得 IFS 試體之加勁板最高可提供 $0.88M_{ps}$ 。而將此三組加勁板所提供之彎矩貢獻除上梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} ，可得分析之加勁板彎矩佔整體彎矩的比例，如圖 5.19 所示。由圖中可看出試體 IFS3 於層間側位移角 $\theta=2.0\%$ 弧度時，加勁板提供之彎矩佔整體彎矩 24% 後加勁板提供之彎矩就未再增加，而此現象於 3.9.3 節加勁板應變分佈比較中所發現的現象相同，而由於試體 IFS3 之加勁板未能在層間側位移角 $\theta=2.0\%$ 弧度結束後，分擔梁翼板所承受之彎矩，因此導致真實試驗時層間側位移角 $\theta=3.0\%$ 弧度時試體之破壞。而試體 IFS4 及試體 IFS5 均能在每個層間側位移角分擔梁翼板之彎矩，且所提供之最大彎矩分別佔整體彎矩的 28% 及 29%，此二試體為真實試驗之成功例。而由此分析結果可看出，加勁板於軸向應力分佈 I 狀態下，所求得之加勁板彎矩佔整體彎矩的比例，於分析時必須要佔整體彎矩的 28% 以上，對應於真實試驗之試體才會成功，而此結果亦與 3.9.3 節加勁板應變分佈比較中所發現的現象相同。

(c) 加勁板軸向應力分佈 II：

由上述 (b) 加勁板軸向應力分佈 I 中之應力圖 (圖 5.14、圖 5.15 及圖 5.16)，其應力所求得之方法，是由 ABAQUS 於反覆載重作用下所得之應變，再將其應變對應於真實材料性質之應力應變曲線而得，但因本研究所有材料之材料性質，均由單向拉力試驗而得，因此由應變對應單向拉力試驗而得之應力應變曲線，其應力圖會顯示出材料性質中的降伏平台段，而將此有降伏平台之應力圖，與 2.2.1.1 節中之加勁板中性軸位置分佈，及 3.9.3 節中所求得之加勁板彎矩貢獻進行比較。但使用上述方法所求得之應力圖，會出現應力低估之現象，且造成加勁板之彎矩貢獻量也出現低估的情形，因為於真實反覆載重作用下之鋼材，其應力應變曲線並不會顯示出降伏平台段，因此本研究利用模擬準確之試體 IFS3、IFS4 及 IFS5，並直接將其 ABAQUS 於反覆載重模擬分析中所得之應力繪出，如圖 5.20、圖 5.21 及圖 5.22 所示，並積分應力圖下所圍之面積，再乘上所對應面積至梁中性軸之距離，即可得此三組由 ABAQUS 於反覆載重模擬分析中，所直接得到的加勁板彎矩 M_s ，如圖 5.23 所示。而將此三組加勁板提供之彎矩 M_s ，除上加勁板所提供之塑性彎矩 M_{ps} ，可得由此應力分佈狀態下之加勁板彎矩所能達到的塑性彎矩比例，如圖 5.24 所示，由圖中可得到於反覆載重作用下，層間側位移角 $\theta=4.0\%$ 弧度時，試體 IFS3、IFS4 及 IFS5 加勁板所能達到的塑性彎矩分別為 $1.33M_{ps}$ 、 $1.12M_{ps}$ 及 $0.81M_{ps}$ 。而將此三組加勁板所提供之彎矩 M_s ，除上梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} ，可得由此應力分佈狀態下之加勁板彎矩佔整體彎矩的比例，如圖 5.25 所示，由圖中可看出可得到於反覆載重作用下，層間側位移角 $\theta=4.0\%$ 弧度時，試體 IFS3、IFS4 及 IFS5 加勁板所能達到之彎矩佔整體彎矩的比例分別為 34%、36% 及 36%，其中試體 IFS4 及 IFS5 為真實試驗之成功例。而由此分析結果可看出，ABAQUS 於反覆載重作用下，試體 IFS3、IFS4 及 IFS5 其加勁板之彎矩佔整體彎矩的比例，並

非由上述 (b) 加勁板軸向應力分佈 I 中所描述的分別佔整體彎矩比例的 24%、28% 及 29%，其加勁板於反覆載重作用下，加勁板之彎矩佔整體彎矩的比例應提高為 34%、36% 及 36%。因此由加勁板軸向應力分佈 II 狀態下，所求得之加勁板彎矩需佔整體彎矩 36% 以上，試體才會成功。

而本研究將於 5.4 節進行 IFS 加勁板之參數研究，屆時加勁板之軸向應力分佈狀態共分為，軸向應力分佈 I 及軸向應力分佈 II 兩種，而此兩種不同之軸向應力分佈狀態，將界定出不同的試體破壞的指標，而由 (b) 加勁板軸向應力分佈 I 狀態下，所求得之加勁板彎矩需佔整體彎矩比例的 28% 以上，而由 (c) 加勁板軸向應力分佈 II 狀態下，所求得之加勁板彎矩則需佔整體彎矩比例的 36% 以上，而此兩種不同軸向應力分佈狀態之間的差異，是否僅存在一個比例關係，或其所界定出的參數研究建議 α 值是否相同，將於 5.4 節詳細說明。

(d) 加勁板剪應力與軸向應力分佈比較：

圖 5.26 為試體 UR 之梁腹板於正彎矩時之剪應力分佈圖 (4% Drift)，而將 ABAQUS 模型中，由柱面算起 200 mm 處之梁腹板元素應力值繪於圖 5.27 中。圖 5.28 及圖 5.29 為試體 IFS4 之加勁板及梁腹板於正彎矩時之剪應力分佈圖 (4% Drift)。而將 ABAQUS 模型中，由柱面算起 200 mm 處之加勁板及梁腹板元素應力值繪於圖 5.30 中，由圖中可看出梁端之剪力傳遞至梁柱接頭時，其應力會集中於靠近翼板之腹板兩側。而積分圖 5.27 及圖 5.30 曲線下所圍之面積，可得試體 UR 及試體 IFS4 之腹板所佔剪應力值分別為 -594.5 kN 及 -640.8 kN，而將計算出之腹板剪力值，除上於層間側位移角 4% 弧度時之梁端總剪力分別為 -677.5 kN 及 -835 kN，可得各試體之腹板所佔的剪力值，其中試體 UR 之腹板佔 88%，而翼板佔 12%。而試體 IFS4 之腹板佔 77%，而翼板及加勁板共佔 23%。

圖 5.31 及圖 5.32 為試體 IFS4 加勁板及梁腹板於正彎矩時之軸向應力

分佈圖 (4% Drift)。而將 ABAQUS 模型中，同樣由柱面算起 35 mm 處之加勁板及梁腹板元素應力值繪於圖 5.33 及圖 5.34 中，由圖中可看出梁承受一彎矩時，其中一部分之彎矩是藉由梁翼板傳遞至箱形柱內橫隔板中，而另一部份是藉由加勁板傳遞至箱形柱之兩側翼板。而計算圖 5.33 及圖 5.34 應力圖下所圍之面積，再乘上所對應之面積至梁中性軸的距離，即可得梁翼、梁腹及加勁板所提供之彎矩分別為 1870 kN-m、100 kN-m 及 1077 kN-m。而此時 ABAQUS 梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} 為 3004 kN-m，而由應力圖積分所得之梁翼、梁腹及加勁板彎矩相加，其與 ABAQUS 梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} 誤差僅 1%。而將應力圖積分所得之彎矩除上梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} ，可得梁翼板佔整體彎矩的 62%，梁腹佔 3%，加勁板佔 36%。

3. 參數比較：

為了更進一步了解加勁板對於梁柱接頭破壞形式之影響，因此本研究使用試體 UR 及試體 IFS3、IFS4 及 IFS5 此四組分析與實驗行為接近之有限元素模擬，來進行有限元素分析中所得之各項參數討論。本研究使用破裂參數 (Rupture Index, RI) 來評估加勁梁柱接頭破壞的潛在可能區域。破裂參數其定義為材料常數 a 與等價塑性應變 $PEEQ$ 的乘積在除以韌性破壞時之應變 ε_γ (Hancock & Mackenzie 1976)，其表示式如下：

$$RI = \frac{a \times PEEQ}{\varepsilon_\gamma} \quad (5.1)$$

$$PEEQ = \frac{1}{6} \left[(\varepsilon_{y1} - \varepsilon_{y2})^2 + (\varepsilon_{y2} - \varepsilon_{y3})^2 + (\varepsilon_{y3} - \varepsilon_{y1})^2 \right] \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_\gamma = a \times \exp\left(\frac{1.5\sigma_m}{\sigma}\right) \quad (5.3)$$

$$\sigma_m = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (5.4)$$

其中等價塑性應變 $PEEQ$ 為塑性應變張量的第二不變量，其值可在 ABAQUS

分析結果中直接選取變數 $PEEQ$ 得知，而 ε_{y1} 、 ε_{y2} 及 ε_{y3} 分別為三個方向的主軸塑性應變，其中等價塑性應變 $PEEQ$ 可用來偵測接頭局部區域之韌性破壞，其等價塑性應變 $PEEQ$ 值愈高表示愈容易產生韌性破壞。靜應變 σ_m 則為主軸應力的平均值取負號，其值亦可在 ABAQUS 分析結果中直接選取變數 Pressure 得知，而 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 分別為三個方向的主軸應力， $\bar{\sigma}$ 為米瑟司應力 (Mises Stress)，其值同樣可在 ABAQUS 分析結果中直接選取變數 Mises 得知。由上述所計算出之破裂參數 RI，主要為判斷加勁梁柱接頭臨界面發生破裂的可能性，破裂參數 RI 值愈高代表愈容易產生破裂。

圖 5.35 至圖 5.38 為試體 UR、IFS3、IFS4 及 IFS5 之等價塑性應變 $PEEQ$ 、米瑟司應力 (Mises Stress) 及軸向應力 S22 之分佈圖，而圖 5.39 及圖 5.40 (a) 為破裂參數 RI 於層間側位移角 $\theta=3.0\%$ 弧度及 $\theta=4.0\%$ 弧度時，沿上翼板橫向分佈 (Line A)、沿上翼板與柱接合之焊道橫向分佈 (Line B) 及沿梁上翼板與加勁板接合處之縱向分佈 (Line C) 之示意圖，其中 Line A 距柱面 60 mm，Line B 為最靠近柱面之梁柱接頭焊道，而 Line C 為距柱面 60 mm 至 500 mm 之梁翼分佈。

圖 5.39 及圖 5.40 (b) 為 Line A 處之破裂參數 RI，於層間側位移角 $\theta=3.0\%$ 弧度及 $\theta=4.0\%$ 弧度時的分佈圖，由圖中可看出未加勁梁柱接頭試體 UR 在此處之破裂參數 RI 為最大，此位置與第三章實驗觀察現象試體 UR 所發生破壞的位置相同 (照片 3.10)，而加入加勁板後在此位置的破裂參數 RI 均降低許多。

圖 5.39 及圖 5.40 (c) 為 Line B 處之破裂參數 RI，於層間側位移角 $\theta=3.0\%$ 弧度及 $\theta=4.0\%$ 弧度時之分佈圖，由圖中可看出此處試體 IFS3 之破裂參數 RI 為最大，且最大之範圍均集中在焊道兩側，而此位置同樣與第三章實驗觀察現象試體 IFS3 所發生破壞的位置相同 (照片 3.39)。

圖 5.39 及圖 5.40 (d) 為 Line C 處之破裂參數 RI，於層間側位移角 θ

=3.0%弧度及 $\theta=4.0\%$ 弧度時的分佈圖，由圖中可看出未加勁梁柱接頭試體 UR 最大之破裂參數 RI 仍靠近梁柱接頭區，而加入加勁板後之 IFS 試體之破裂參數 RI 已遠離梁柱接頭區，使破裂參數 RI 最大處集中在加勁板端部。

將圖 5.39 及圖 5.40 所分析出的破裂參數 RI 最大值彙整在一起，即可更明顯的看出各試體最可能發生破壞的區域是會發生在哪一個範圍，如圖 5.41 所示，由圖中可看到未加勁梁柱接頭試體 UR 位於 Line A 處，為破裂參數 RI 最大處，因此此處為未加勁之傳統梁柱接頭會產生破壞的位置，且由第三章試體 UR 之實驗觀察現象亦可證明破壞位置與破裂參數 RI 最大處之位置相同。而加入加勁板之試體 IFS3、IFS4 及 IFS5 位於 Line B 處，為破裂參數 RI 最大之位置，即代表 IFS 試體在此處為最可能發生破壞之位置，其中試體 IFS3 之破裂參數 RI 均較試體 IFS4 及 IFS5 為高，因此可判斷出試體 IFS3 在 Line B 處破壞之可能較試體 IFS4 及 IFS5 高，而此位置同樣與第三章試體 IFS3 之實驗觀察現象所發現之破壞位置相同。

5.3.2 FDWS 試體分析結果

5.3.2.1 梁端彎矩與位移關係及彈性勁度比較

圖 5.42 為 FDWS 試體之梁端彎矩與位移關係比較圖，由圖中之各試體梁端彎矩與位移關係圖可整理出實驗與分析在每一個層間側位移角之彎矩及彈性勁度 K_E 之間的差值比例，如表 5.3 所示，由表中可更進一步看出 FDWS 試體梁端彎矩之實驗值與分析值誤差範圍均在 5% 之內。

5.3.2.2 局部行為比較

(a) 應變比較：

圖 5.43 為 FDWS 試體上翼板有限元素分析與實驗應變比較圖，而圖 5.44 及圖 5.45 為 FDWS 試體之加勁板有限元素分析與實驗應變比較圖，

由圖中可得知此二組 FDWS 試體之梁柱接頭，其梁翼板及加勁板應變分佈均與實驗反應相當接近。

(b) 加勁板軸向應力比較：

本研究利用 ABAQUS 於反覆載重分析模型中，直接繪出此二組試體加勁板上之軸向應力圖，如圖 5.46 及圖 5.47 所示，由圖中可看出加勁板之中性軸位置與 2.2.2.1 節中所敘述的相同，其中性軸位置均維持在加勁板之形心位置，即 $1/2(d_b - 2 \cdot t_f)$ 處。而利用圖 5.46 及圖 5.47 所示之應力圖，並積分應力圖下之面積，再乘上所對應的面積至梁中性軸之位置，即可得此二組試體加勁板上提供之彎矩 M_s ，如圖 5.48 所示。而將此二組加勁板所提供之彎矩貢獻除上加勁板所提供之塑性彎矩 M_{ps} 可得於分析中加勁板所能達到之塑性彎矩比例，如圖 5.49 所示，由圖中可得 FDWS 試體之加勁板最高可提供 $0.72M_{ps}$ 。而將此二組加勁板所提供之彎矩除上梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} ，可得分析之加勁板彎矩佔整體彎矩的比例，如圖 5.50 所示，由圖中看出試體 FDWS2 及試體 FDWS3 均能在每個層間側位移角分擔梁翼板之彎矩，且所提供之最大彎矩分別佔整體彎矩的 39% 及 37%，此二試體為真實試驗之成功例。而由 5.3.1.2 節中之 (b) 軸向應力狀態 II 所界定之試體破壞指標，其中描述加勁板於分析時至少必須要佔整體彎矩的 36% 以上，對應於真實試驗之試體才會成功，而試體 FDWS2 及試體 FDWS3 加勁板提供之最大彎矩最少都佔整體彎矩的 36% 以上，因此於真實試驗時試體均能承受反覆載重而不至發生破壞，而本研究將於 5.5 節進行 FDWS 加勁板之參數研究，屆時所模擬之試體是否破壞的指標，與 5.3.1 節中之 (b) 應力狀態 II 所界定的相同，為加勁板所提供之彎矩於層間側位移角 $\theta = 4.0\%$ 弧度時需佔整體彎矩的 36% 以上。

(c) 加勁板剪應力與軸向應力分佈比較：

圖 5.51 及圖 5.52 為試體 FDWS2 加勁板及梁腹板於正彎矩時之剪應力

分佈圖 (4% Drift)。而將 ABAQUS 模型中，由柱面算起 200 mm 處之加勁板及梁腹板元素應力值繪於圖 5.53 中，由圖中可看出梁端之剪力傳遞至梁柱接頭時，其應力會集中於靠近翼板之腹板兩側。而積分圖 5.53 曲線下所圍之面積，可得試體 FDWS2 之腹板所佔剪應力值為 -516.2 kN，而將計算出之腹板剪力值，除上於層間側位移角 4% 弧度時之梁端總剪力 -832 kN，可得試體腹板所佔的剪力值，其中腹板佔 62%，而翼板及腹板共佔 38%。

圖 5.54 及圖 5.55 為試體 FDWS2 加勁板及梁腹板於正彎矩時之軸向應力分佈圖 (4% Drift)。而將 ABAQUS 模型中，同樣由柱面算起 35 mm 處之加勁板及梁腹板元素應力值繪於圖 5.56 及圖 5.57 中，由圖中可看出梁承受一彎矩時，其中一部分之彎矩是藉由梁翼板傳遞至箱形柱內橫隔板中，而另一部份是藉由加勁板傳遞至箱形柱之兩側翼板。而計算圖 5.56 及圖 5.57 應力圖下所圍之面積，再乘上所對應之面積至梁中性軸的距離，即可得梁翼、梁腹及加勁板所提供之彎矩分別為 1860 kN-m、90 kN-m 及 1170 kN-m。而此時 ABAQUS 梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} 為 3024 kN-m，而由應力圖積分所得之梁翼、梁腹及加勁板彎矩相加，其與 ABAQUS 梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} 誤差僅 3%，而將應力圖積分所得之彎矩除上梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} ，可得梁翼板佔整體彎矩的 62%，梁腹佔 3%，加勁板佔 39%。

3. 參數比較：

為了更進一步了解加勁板對於梁柱接頭破壞形式之影響，本研究使用試體 UR 及試體 FDWS2 及 FDWS3，來進行有限元素分析中所得之各項參數討論，並使用破裂參數 (Rupture Index, RI) 來評估加勁梁柱接頭破壞的潛在可能區域，其破裂參數 RI 值愈高代表愈容易產生破裂。

圖 5.58 及圖 5.59 為試體 FDWS2 及 FDWS3 之等價塑性應變 PEEQ、米瑟司應力 (Mises Stress) 及軸向應力 S22 之分佈圖，而圖 5.60 及圖 5.61 (a) 為破裂參數 RI 於層間側位移角 $\theta=3.0\%$ 弧度及 $\theta=4.0\%$ 弧度時，沿

上翼板橫向分佈 (Line A)、沿上翼板與柱接合之焊道橫向分佈 (Line B) 及沿梁上翼板與加勁板接合處之縱向分佈 (Line C) 之示意圖。

圖 5.60 及圖 5.61 (b) 為 Line A 處之破裂參數 RI，於層間側位移角 $\theta = 3.0\%$ 弧度及 $\theta = 4.0\%$ 弧度時的分佈圖，由圖中可看出未加勁梁柱接頭試體 UR 在此處之破裂參數 RI 為最大，此位置與第三章實驗觀察現象試體 UR 所發生破壞的位置相同 (照片 3.10)，而加入加勁板後在此位置的破裂參數 RI 均降低許多。

圖 5.60 及圖 5.61 (c) 為 Line B 處之破裂參數 RI，於層間側位移角 $\theta = 3.0\%$ 弧度及 $\theta = 4.0\%$ 弧度時的分佈圖，由圖中可看出此處試體 FDWS3 之破裂參數 RI 大於試體 FDWS2，此代表試體 FDWS3 於 Line B 處發生破裂的機會較試體 FDWS2 大，且最大之範圍集中在焊道兩側，但 FDWS 試體進行真實反覆載重試驗時，此區域均未發生破壞。

圖 5.60 及圖 5.61 (d) 為 Line C 處之破裂參數 RI，於層間側位移角 $\theta = 3.0\%$ 弧度及 $\theta = 4.0\%$ 弧度時的分佈圖，由圖中可看出未加勁梁柱接頭試體 UR 最大之破裂參數 RI 仍靠近梁柱接頭區，而加入加勁板後之 FDWS 試體之破裂參數 RI 已遠離梁柱接頭區，破裂參數 RI 最大處集中在加勁板端部，而試體 FDWS2 之加勁板端部距柱面 300 mm 較試體 FDWS3 之 254 mm 長，因此呈現 Line C 處之破裂參數最高值分佈在不同位置之情形。

將圖 5.60 及圖 5.61 所分析出的破裂參數 RI 最大值彙整在一起，即可更明顯的看出各試體最可能發生破壞的區域是會發生在哪一個範圍，如圖 5.62 所示，由圖中可看到未加勁梁柱接頭試體 UR 位於 Line A 處，為破裂參數 RI 最大處，而此位置與第三章試體 UR 之實驗觀察現象所發生破壞的位置相同。而使用加勁板之試體最大破裂參數 RI 均發生在 Line B 處，即代表 FDWS 試體在梁柱接頭焊道端部為最可能發生破壞之位置。

5.4 IFS 加勁板參數研究

5.4.1 改變加勁板尺寸之參數研究

為了了解加勁板之厚度 t_s 、深度 d_s 及長度 L_s 對於梁柱接頭之影響，因此本研究針對此三項參數進行加勁板之參數研究，藉由改變此三項參數來進一步討論加勁板所能提供之彎矩貢獻量對於梁柱接頭焊道及加勁板端部之破裂參數 RI 的影響。

本研究將所要進行的加勁板參數列於表 5.5 中，其中模擬試體之梁柱尺寸及材料性質，則統一使用與真實試體 IFS3 相同之尺寸（表 2.3）與材料（表 2.1），而梁彎矩強度需求比 α 值之計算方法同 2.2.1 節中 IFS 補強接頭試體設計，其中計算 α 值所使用之超強因子 β 值，則不使用 FEMA 350 所建議之(2.3)式，因設計時由(2.3)式所計算出之 β 設計值（表 2.4），與真實試驗成功之試體 IFS4 及 IFS5 於層間側位移角 4% 弧度時所推得之真實 β 值（表 3.3）比較，其 FEMA 350 所建議之(2.3)式與真實試體比較最大低估了 9%，因此本研究則統一使用由試驗所推得之 β 值，並將其取平均，經計算超強因子 β 統一為 1.36。

圖 5.63 為層間側位移角 $\theta=4.0\%$ 弧度時，加勁板各項參數對於加勁板整體彎矩貢獻量之關係圖，其中加勁板之彎矩貢獻，是由 5.3.1.2 節中之 (b) 加勁板軸向應力分佈 I 狀態下所求得，由圖中可看出於此軸向應力分佈狀態下，加勁板各項參數對於彎矩貢獻量之影響，其中加勁板之厚度 t_s 對於彎矩貢獻的影響最大，加勁板之深度 d_s 次之，而加勁板之長度 L_s 影響為最小。圖 5.64 為 IFS 加勁板 α 值與加勁板彎矩貢獻之關係圖，其中加勁板彎矩貢獻是由 (b) 加勁板軸向應力分佈 I 狀態下所求得，圖中將彎矩貢獻影響最大之參數 t_s 以不同符號表示，而由 5.3.1.2 節局部行為比較中之 (b) 加勁板軸向應力分佈 I，所定義的試體破壞指標表示，加勁板之彎矩貢獻量需佔整體彎矩的 28% 以上，對應於真實試體才會成功，而由圖中顯示加勁板之彎

矩貢獻量大於 28% 之試體，其 α 值均為 1.03 以上。

圖 5.65 為層間側位移角 $\theta=4.0\%$ 弧度時，加勁板各項參數對於加勁板整體彎矩貢獻量之關係圖，其中加勁板之彎矩貢獻，是由 5.3.1.2 節中之 (c) 加勁板軸向應力分佈 II 狀態下所求得，由圖中可看出於此軸向應力分佈狀態下，加勁板各項參數對於彎矩貢獻量之影響，其中加勁板之厚度 t_s 對於彎矩貢獻的影響最大，加勁板之長度 L_s 次之，而加勁板之深度 d_s 影響為最小。圖 5.66 為 IFS 加勁板 α 值與加勁板彎矩貢獻之關係圖，其中加勁板彎矩貢獻是由 (c) 加勁板軸向應力分佈 II 狀態下所求得，圖中將彎矩貢獻影響最大之參數 t_s 以不同符號表示，而由 5.3.1.2 節局部行為比較中之 (c) 加勁板軸向應力分佈 II，所定義的試體破壞指標表示，加勁板之彎矩貢獻量需佔整體彎矩的 36% 以上，對應於真實試體才會成功，而由圖中顯示加勁板之彎矩貢獻量大於 36% 之試體，其 α 值均為 1.03 以上，此 α 值與圖 5.64 中由加勁板軸向應力分佈 I 狀態下所得之結果相同。

而比較由加勁板軸向應力分佈 I 及加勁板軸向應力分佈 II 不同狀態下，所求得之加勁板各項參數對於加勁板整體彎矩貢獻量之關係圖，如圖 5.63 及圖 5.65 所示，發現加勁板之厚度 t_s 對於彎矩貢獻量之影響均為最大。而比較加勁板軸向應力分佈 I 及加勁板軸向應力分佈 II 不同狀態下，IFS 加勁板之 α 值與加勁板彎矩貢獻之關係，如圖 5.64 及圖 5.66 所示，發現其雖定義不同之試體破壞指標，但其所對應之 α 值卻相同，均為 1.03 以上，因此本研究 2.2.1 節 IFS 補強接頭試體設計第 4 步驟中所假設之 α 值應改正為 1.03。而由以上之敘述得到，加勁板軸向應力分佈 I 及加勁板軸向應力分佈 II 狀態下，所求得之不同加勁板彎矩貢獻，其對於其現象之描述並無太大之差異。

而本研究由圖 5.41 中得知，加入加勁板之梁柱接頭位於 Line B 處為破裂參數 RI 之最大位置，而位於 Line C 處為破裂參數 RI 第二大之位置，因

此本研究對於破裂參數 RI 之參數研究即針對此二個位置進行討論，圖 5.67 為 IFS 加勁板參數對於 Line B 處之最大破裂參數 RI 關係圖，由圖中可看出加勁板之各項參數對於破裂參數 RI 之影響，其中加勁板之厚度 t_s 對於破裂參數 RI 的影響最大，加勁板之深度 d_s 次之，而加勁板之長度 L_s 影響為最小，此影響的參數與加勁板整體彎矩貢獻量有關係，其加勁板所傳遞之彎矩愈大，而 Line B 處之破裂參數 RI 則會愈小。

圖 5.68 為 IFS 加勁板參數對於 Line C 處之最大破裂參數 RI 關係圖，由圖中可看出加勁板之各項參數對於此處破裂參數 RI 之影響，其中加勁板之長度 L_s 對於破裂參數 RI 的影響為最大，加勁板之厚度 t_s 次之，而加勁板之深度 d_s 影響為最小，此代表加勁板之長度 L_s 愈短愈會使加勁板端部之破裂參數 RI 值上升。

5.4.2 改變柱尺寸之參數研究

為了了解改變柱尺寸之厚度及寬度對於加勁梁柱接頭之效應，本研究將試體 IFS4 之梁尺寸及加勁板尺寸固定，僅改變柱尺寸之參數如表 5.6 所示，表中主要將相同寬度 550 mm 之柱改變其厚度分別為 20 mm、28 mm 及 35 mm，而模擬試體之編號為 C1、C2 及 C3，並藉由此得到改變厚度大小對於加勁梁柱接頭的影響。而對於改變寬度大小之參數，本研究是將柱之厚度固定為 35 mm 僅將寬度改變為 550 mm 及 700 mm，而模擬試體之編號為 C3 及 C4，並藉由此得到改變寬度之大小對於加勁梁柱接頭的影響，其中模擬試體之材料性質則統一使用與真實試體 IFS4 相同之材料（表 2.1），而將真實之材料性質代入 2.3.1 節強柱弱梁比之計算公式中，並計算出所模擬之試體的強柱弱梁比，如表 5.6 所示。

圖 5.69 為 IFS 加勁板柱參數對於 Line A 處之應變關係圖（4% Drift），由圖中比較柱尺寸之厚度效應 C1、C2 及 C3 試體可看出，其應變之大小與

柱之厚度成反比，柱之厚度愈小其應變愈大。而由 C3 及 C4 試體可看出柱尺寸之寬度效應，由圖中可看出柱之厚度相同時，柱寬度愈大其應變會隨之增加。

圖 5.70 為 IFS 加勁板之柱參數對於加勁板的應力關係圖 (4% Drift)，而利用圖中所示之應力圖，並積分應力圖下所圍之面積，再乘上所對應之力臂，即可得各試體加勁板上所提供之彎矩貢獻，如圖 5.71 所示，由圖中比較柱尺寸之厚度效應 C1、C2 及 C3 試體，可看出試體之柱板愈厚愈能提高加勁板之彎矩貢獻，而比較柱尺寸之寬度效應 C3 及 C4 試體可看出，其影響並不明顯。而將圖 5.71 中所示之各試體彎矩貢獻除上加勁板所提供之塑性彎矩 M_{ps} ，可得分析之加勁板所能達到的塑性彎矩比例，如圖 5.72 所示，由圖中可看出柱板厚 20 mm 之 C1 試體最高僅能達到 $0.91M_{ps}$ 依照厚度之增加，其塑性彎矩比例亦增加，而柱板厚 35 mm 之 C3 試體其塑性彎矩比例可達 $1.12M_{ps}$ ，而柱板厚度相同但柱寬度增加為 700 mm 之 C4 試體其塑性彎矩比例略增為 $1.13M_{ps}$ 。而將圖 5.71 中所示之各試體彎矩貢獻除上梁端至柱面之彎矩，可得分析之加勁板彎矩佔整體彎矩的比例，如圖 5.73 所示，而圖中比例大小之分佈與加勁板所能達到塑性彎矩之比例相同。

圖 5.74 為 IFS 加勁板柱參數對於 Line B 處之破裂參數 RI 關係圖 (4% Drift)，由圖中比較厚度效應之 C1、C2 及 C3 試體，由圖中可看出 Line B 處之破裂參數 RI 對於厚度的效應與前述的現象相同，同樣為柱板愈厚愈能使加勁板之貢獻增大，而使得 Line B 處的破裂參數 RI 下降。而比較柱尺寸之寬度效應 C3 及 C4 試體，由圖中可看出 Line B 處之破裂參數 RI 對於寬度的效應，發現箱形柱兩側翼板之距離愈靠近加勁板愈能提高加勁板之貢獻能力，而使得 Line B 處的破裂參數 RI 下降。

5.5 FDWS 加勁板參數研究

5.5.1 改變加勁板尺寸之參數研究

為了了解加勁板之厚度 t_s 長度 L_s 對於梁柱接頭之影響，本研究針對此二項參數進行有限元素之參數研究，藉由改變此二項參數來進一步討論加勁板所能提供之彎矩貢獻量對於梁柱接頭焊道及加勁板端部之破裂參數 RI 的影響。

本研究將所要進行的加勁板參數列於表 5.7 中，其中模擬試體之梁柱尺寸及材料性質，則統一使用與真實試體 FDWS2 相同之尺寸（表 2.3）與材料（表 2.2），而梁彎矩強度需求比 α 值之計算方法同 2.2.2 節中 FDWS 補強接頭試體設計，其中計算 α 值所使用之超強因子 β 值，則不使用 FEMA 350 所建議之(2.3)式，因設計時由(2.3)式所計算之 β 設計值（表 2.5），與試驗成功之試體 FDWS2 及 FDWS3 於層間側位移角 4% 弧度時所推得之真實 β 值（表 4.2），其 FEMA 350 所建議之(2.3)式與真實試體比較最大低估了 13%，因此本研究則統一使用由真實試驗所推得之 β 值，並將其取平均經計算超強因子 β 統一為 1.51。

圖 5.75 為層間側位移角 $\theta=4.0\%$ 弧度時，加勁板各項參數對於加勁板整體彎矩貢獻量之關係圖，其中加勁板之整體彎矩貢獻量的計算，本研究利用 ABAQUS 於反覆載重分析模型中，直接繪出試體加勁板上之軸向應力圖，並積分應力圖下之面積，再乘上所對應面積至梁中性軸之距離，所得之加勁板彎矩 M_s 再除上梁端至柱面之彎矩 M_{ACT} 而得，由圖中可看出加勁板各項參數對於彎矩貢獻量之影響，其中加勁板之厚度 t_s 對於彎矩貢獻的影響最大，而加勁板之長度 L_s 影響較小。圖 5.76 為 FDWS 加勁板 α 值與加勁板彎矩貢獻之關係圖，圖中將彎矩貢獻影響最大之參數 t_s 以不同符號表示，圖中顯示加勁板厚度 t_s 等於 22 mm 試體之彎矩貢獻量均能大於整體彎矩 36% 以上，而由 5.3.1.2 節局部行為比較中之，(c) 加勁板軸向應力分佈 II 所界定的試體破壞指標表示，加勁板所提供之彎矩貢獻需佔整體彎矩

的 36% 以上，試體才足以承受真實反覆載重試驗，而不至發生破壞。而由圖中顯示加勁板之彎矩貢獻量大於 36% 之試體，其 α 值均為 1.07 以上。因此本研究 2.2.2 節 FDWS 補強接頭試體設計第 4 步驟中所假設之 α 值應改正為 1.07。

而本研究由圖 5.62 中得知，加入加勁板之梁柱接頭位於 Line B 處為破裂參數 RI 之最大位置，而位於 Line C 處為破裂參數 RI 第二大之位置，因此本研究對於破裂參數 RI 之參數研究即針對此二個位置進行討論，圖 5.77 為 FDWS 加勁板參數對於 Line B 處之最大破裂參數 RI 關係圖，由圖中可看出加勁板之各項參數對於破裂參數 RI 之影響，其中加勁板之厚度 t_s 對於破裂參數 RI 的影響最大，而加勁板之長度 L_s 影響較小，此影響的參數與圖 5.75 中加勁板整體彎矩貢獻量之關係圖相同，即代表加勁板所提供之彎矩貢獻量愈大，而 Line B 處之破裂參數 RI 則會愈小。

圖 5.78 為 FDWS 加勁板參數對於 Line C 處之最大破裂參數 RI 關係圖，由圖中可看出加勁板之各項參數對於此處破裂參數 RI 之影響，其中加勁板之長度 L_s 對於破裂參數 RI 的影響為最大，加勁板之厚度 t_s 次之，此代表加勁板之長度 L_s 愈短愈會使加勁板端部之破裂參數 RI 值上升。

5.5.2 改變柱尺寸之參數研究

為了了解改變柱尺寸之厚度及寬度對於加勁梁柱接頭之效應，本研究將試體 FDWS2 之梁尺寸及加勁板尺寸固定，僅改變柱尺寸之參數如表 5.8 所示，表中主要將相同寬度 550 mm 之柱改變其厚度分別為 20 mm、28 mm 及 35 mm，而模擬試體之編號為 C1、C2 及 C3，並藉由此得到改變厚度大小對於加勁梁柱接頭的影響。而對於改變寬度大小之參數，本研究是將柱之厚度固定為 35 mm 僅將寬度改變為 550 mm 及 700 mm，而模擬試體之編號為 C3 及 C4，並藉由此得到改變寬度之大小對於加勁梁柱接頭的影響，

其中模擬試體之材料性質則統一使用與真實試體 FDWS2 相同之材料 (表 2.2)，而將真實之材料性質代入 2.3.1 節強柱弱梁比之計算公式中，並計算出所模擬之試體的強柱弱梁比，如表 5.8 所示。

圖 5.79 為 FDWS 加勁板柱參數對於 Line A 處之應變關係圖 (4% Drift)，由圖中比較柱尺寸之厚度效應 C1、C2 及 C3 試體可看出，其應變之大小與柱之厚度成反比，柱之厚度愈小其應變愈大。而由 C3 及 C4 試體可看出柱尺寸之寬度效應，由圖中可看出柱之厚度相同時，柱寬度愈大其應變會稍微增加。

圖 5.80 為 FDWS 加勁板之柱參數對於加勁板之應力關係圖 (4% Drift)，而利用圖中所示之應力圖，並積分應力圖下所圍之面積，再乘上所對應之力臂，即可得各試體加勁板上所提供之彎矩貢獻，如圖 5.81 所示，由圖中比較柱尺寸之厚度效應 C1、C2 及 C3 試體，可看出試體之柱板愈厚愈能提高加勁板之彎矩貢獻，而比較柱尺寸之寬度效應 C3 及 C4 試體可看出，其箱形柱兩側翼板之距離愈靠近加勁板愈能提高加勁板之貢獻。而將圖 5.81 中所示之各試體彎矩貢獻除上加勁板所提供之塑性彎矩 M_{ps} ，可得分析之加勁板所能達到的塑性彎矩比例，如圖 5.82 所示，由圖中可看出柱板厚 20 mm 之 C1 試體最高僅能達到 $0.46M_{ps}$ 依照厚度之增加，其塑性彎矩比例亦增加，而柱板厚 35 mm 之 C3 試體其塑性彎矩比例可達 $0.69M_{ps}$ ，而柱板厚度相同但柱寬度增加為 700 mm 之 C4 試體其塑性彎矩比例略降為 $0.65M_{ps}$ 。而將圖 5.81 中所示之各試體彎矩貢獻除上梁端至柱面之彎矩，可得分析之加勁板彎矩佔整體彎矩的比例，如圖 5.83 所示，而圖中比例大小之分佈與加勁板所能達到塑性彎矩之比例相同。

圖 5.84 為 FDWS 加勁板柱參數對於 Line B 處之破裂參數 RI 關係圖 (4% Drift)，由圖中比較厚度效應之 C1、C2 及 C3 試體，由圖中可看出 Line B 處之破裂參數 RI 對於厚度的效應與前述的現象相同，同樣為柱板愈厚愈能

使加勁板之貢獻增大，而使得 Line B 處的破裂參數 RI 下降。而比較柱尺寸之寬度效應 C3 及 C4 試體，由圖中可看出 Line B 處之破裂參數 RI 對於寬度的效應，發現箱形柱兩側翼板之距離愈靠近加勁板愈能提高加勁板之貢獻，而使得 Line B 處的破裂參數 RI 下降。

