

耐火鋼螺栓接頭火害性能研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 95 年 12 月

(本部計畫編號)

095-301070000-G2028

耐火鋼螺栓接頭火害性能研究

執行單位：內政部建築研究所

研究主持人：李鎮宏

協同主持人：蔡銘儒

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 95 年 12 月

目次

表次	V
圖次	VII
摘要	XI
第一章 緒論	1
第一節 研究動機.....	1
第二節 研究目的.....	2
第三節 研究方法概述.....	3
第二章 文獻回顧	5
第一節 常溫下剪力接合研究.....	5
第二節 常溫與高溫下螺栓孔之承壓行為.....	6
第三節 有限元素數值分析.....	7
第三章 高溫下螺栓孔承壓能力分析.....	9
第一節 前言.....	9
第二節 高溫螺栓孔承壓行為.....	11
第三節 耐火鋼材高溫下的相關機械性質.....	12
第四節 螺栓孔於高溫之承壓強度分析.....	13
第四章 試驗規劃與步驟.....	25
第一節 試體鋼材種類.....	25
第二節 試體尺寸與規劃.....	26
第三節 試驗設備.....	26
第四節 試驗步驟.....	28
第五章 試驗結果與比較.....	49

第一節 鋼材高溫單軸拉伸試驗結果.....	49
第二節 SN490B鋼板螺栓孔高溫承壓試驗結果.....	49
第三節 SN490CFR耐火鋼螺栓孔高溫承壓試驗.....	50
第四節 試驗結果比較.....	51
第六章 高溫螺栓孔承壓行為之數值模擬.....	79
第一節 前言.....	79
第二節 數值模擬分析方法.....	79
第七章 結論與建議.....	105
第一節 結論.....	105
第二節 建議.....	106
附錄一.....	107
附錄二.....	108
附錄三.....	109
參考書目.....	113

表次

表 3-1 Eurocodes 3&4 (1992) 楊氏係數(E)折減.....	14
表 3-2 Eurocodes 3&4(1992)與BS 5950:Part 8(1987)降服強度(F_y)折減	14
表 3-3 中鋼SN490B普通鋼降服強度(F_y)折減	14
表 3-4 新日本製鐵(1995) SM50A普通鋼降服強度(F_y)折減	15
表 3-5 中鋼SN490B普通鋼抗拉強度(F_u)折減	16
表 3-6 新日本製鐵(1995) SM50A普通鋼抗拉強度(F_u)折減	16
表 3-7 中鋼SN490C-FR耐火鋼降服強度(F_y)折減	16
表 3-8 新日本製鐵(1995) SM50A-NFR耐火鋼降服強度(F_y)折減..	17
表 3-9 方朝俊(2000) SN490C-FR耐火鋼降服強度(F_y)折減	17
表 3-10 中鋼SN490C-FR耐火鋼抗拉強度(F_u)折減	17
表 3-11 新日本製鐵(1995) SM50A-NFR耐火鋼抗拉強度(F_u)折減.	18
表 3-12 方朝俊(2000) SN490-FR耐火鋼抗拉強度(F_u)折減	18
表 4-1 中鋼提供之鋼材材料性質	30
表 4-2 SN490BC之化學材料規格表	30
表 4-3 SN490B鋼板在各溫度的折減(原 8mm與 12mm鋼板材)	31
表 4-4 SN490C-FR之材料化學性質	31
表 4-5 SN490C-FR 鋼材在各溫度的折減係數 (原 12mm鋼板材)..	32
表 4-6 實驗試體尺寸	32
表 4-7 310S不鏽鋼高溫強度折減表 (Allegheny Ludlum (2002))	34
表 4-8 310S化學組成表 (Allegheny Ludlum (2002))	34
表 5-1 螺栓孔試體實驗資料	55
表 5-2 四種邊距由孔中心到邊緣的距離	56
表 6-1 SN490B 鋼材試體之實際尺寸	87
表 6- 1 SN490C-FR 鋼材試體之實際尺寸	87
表 6- 2 四種邊距由螺栓孔中心到邊緣之距離	88

圖 3-1 符號說明.....	19
圖 3-2 普通碳鋼的高溫機械性質 (林文謙(1998))	19
圖 3-3 熱滾壓(hot-rolled)碳鋼於高溫下的強度折減資料(Harmanthy, 1993).....	20
圖 3-4 冷作(cold-worked)碳鋼於高溫下的強度折減資料(Harmanthy, 1993).....	20
圖 3-5 Eurocodes 3&4(1992)、BS 5950:Part 8(1987)與中鋼提供普通鋼材楊氏係數折減.....	21
圖 3-6 普通鋼降服強度折減.....	21
圖 3-7 普通鋼抗拉強度折減	22
圖 3-8 耐火鋼楊氏係數折減.....	22
圖 3-9 耐火鋼降服強度折減.....	23
圖 4-1 SN490B試片在各溫度的折減(原 8mm鋼板)	35
圖 4-2 SN490B試片在各溫度的折減(原 12mm鋼板)	35
圖 4-3 SN490C-FR在各溫度的折減.....	36
圖 4-4 普通鋼與耐火鋼強度比較.....	36
圖 4-5 普通鋼與耐火鋼正規折減比較.....	37
圖 4-6 兩種不同邊距之鋼板設計圖.....	37
圖 4-7 實驗設備組合前視圖.....	38
圖 4-8 實驗設備組合側視圖.....	38
圖 4-9 上下部夾具固定試體.....	39
圖 4-10 焊接於試體上之測溫線.....	39
圖 4-11 CNS12514 標準升溫曲線	40
圖 4-12 小型多功能耐火爐.....	40
圖 4-13 小型多功能耐火爐.....	41
圖 4-14 油壓千斤頂.....	41
圖 4-15 油壓設備.....	42

圖 4-16 自平衡鋼架.....	42
圖 4-17 上部U型夾具與下部固定具.....	43
圖 4-18 Unibrain Fire-I 810b型CCD相機.....	43
圖 4-19 NI SC-2345 資料收集器.....	44
圖 4-20 整體系統.....	44
圖 4-21 測溫線分佈	45
圖 4-22 定溫加載實驗流程圖.....	46
圖 4-23 定載加溫實驗流程圖.....	47
圖 5-1 SN490B鋼材各溫度應力與應變圖(中鋼實驗室提供).....	56
圖 5-2 SN490C-FR耐火鋼各溫度應力與應變圖(中鋼實驗室提供)	57
圖 5-3 中鋼實驗室提供SN490B與SN490C-FR的抗拉強度比較....	57
圖 5-4 中鋼實驗室提供SN490B與SN490C-FR抗拉強度正規折減..	58
圖 5-5 室溫下邊距 0.5d之SN490B鋼板試體(實驗前)	58
圖 5-6 室溫下邊距 0.5d之SN490B鋼板試體(實驗後)	59
圖 5-7 設計溫度 528°C 邊距 1.0d之SN490B鋼板試體(實驗前)	59
圖 5-8 設計溫度 528°C , 邊距 1.0d之SN490B鋼板試體(實驗後)	60
圖 5-9 設計溫度下SN05 組試體(邊距 0.5d)螺栓孔承壓力與變形	60
圖 5-10 藍脆現象.....	61
圖 5-11 SN05 試體室溫下實驗後照片	61
圖 5-12 SN10 試體 328°C下實驗後照片	62
圖 5-13 設計溫度下SN10 組試體(邊距 1.5d)螺栓孔承壓力變形圖	63
圖 5-14 室溫下邊距 0.5d之SN490C-FR鋼板試體(實驗前)	63
圖 5-15 室溫下邊距 0.5d之SN490C-FR鋼板試體(實驗後)	64
圖 5-16 設計溫度 706°C 邊距 0.5dSN490C-FR鋼板試體(實驗前).	64
圖 5-17 設計溫度 706°C 邊距 0.5dSN490C-FR鋼板試體(實驗後).	65
圖 5-18 設計溫度FR05 組試體邊距 0.5d螺栓孔承壓力與變形圖.	65
圖 5-19 設計溫度FR10 組試體邊距 1.0d螺栓孔承壓力與變形圖.	66
圖 5-20 鋼板承壓面積.....	66

圖 5-21 四組試體螺栓孔極限承壓力比較.....	67
圖 5-22 四組試體螺栓孔極限變形量比較.....	67
圖 5-23 四組試體的溫度折減比較.....	68
圖 5-24 SN05 組試體折減關係與各規範折減公式比較	68
圖 5-25 SN10 組試體折減關係與各規範折減公式比較	69
圖 5-26 FR05 組試體折減關係與各規範折減公式比較	69
圖 5-27 FR10 組試體折減關係與各規範折減公式比較	70
圖 5-28 SN05 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較....	70
圖 5-29 SN10 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較....	71
圖 5-30 FR05 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較....	71
圖 5-31 FR10 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較....	72
圖 5-32 SN490B四種邊距的比較.....	72
圖 5-33 SN490C-FR四種邊距的比較.....	73
圖 5-34 7/8in高強度螺栓與 6 mm鋼板螺栓孔SN490B承壓力比較.	73
圖 5-35 7/8in高強度螺栓與 6mm鋼板螺栓孔SN490C-FR承壓力比較	74
圖 5-36 厚度 6mm鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=室溫)	74
圖 5-37 厚度 6mm鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=300 °C).....	75
圖 5-38 厚度 6mm鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=500 °C).....	75
圖 5-39 厚度 6mm鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=700 °C).....	76
圖 5-40 厚度 6mm SN05 鋼板定載 2103kgf加溫實驗	76
圖 5-41 厚度 6mm SN10 鋼板定載 4599kgf加溫實驗	77
圖 6- 1 塑性部分模擬曲線(SN490B, 常溫下)	88
圖 6- 2 Case 1 之網格劃分	89
圖 6- 3 Case 2 之網格劃分	89

圖 6- 4	Case 3 之網格劃分	90
圖 6- 5	收斂性分析之結果	90
圖 6- 6	SN05-t06-T020 試體模擬結果比較	91
圖 6- 7	SN05-t06-T300 試體模擬結果比較	91
圖 6- 8	SN05-t06-T500 試體模擬結果比較	92
圖 6- 9	SN05-t06-T700 試體模擬結果比較	92
圖 6- 10	SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖	93
圖 6- 11	SN10-t06-T020 試體模擬結果比較	93
圖 6- 12	SN10-t06-T300 試體模擬結果比較	94
圖 6- 13	SN10-t06-T500 試體模擬結果比較	94
圖 6- 14	SN10-t06-T700 試體模擬結果比較	95
圖 6- 15	SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖	95
圖 6- 16	FR10-t06-T020 試體模擬結果比較	96
圖 6- 17	FR05-t06-T300 試體模擬結果比較	96
圖 6- 18	FR05-t06-T500 試體模擬結果比較	97
圖 6- 19	FR05-t06-T700 試體模擬結果比較	97
圖 6- 20	SN490C-FR 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖	98
圖 6- 21	FR10-t06-T020 試體模擬結果比較	98
圖 6- 22	FR10-t06-T300 試體模擬結果比較	99
圖 6- 23	FR10-t06-T500 試體模擬結果比較	99
圖 6- 24	FR10-t06-T700 試體模擬結果比較	100
圖 6- 25	SN490C-FR 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖	100
圖 6- 26	6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(RT)	101
圖 6- 27	6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(300°C)	101
圖 6- 28	6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(500°C)	102
圖 6- 29	6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(700°C)	102
圖 6- 30	7/8 inch 高強度螺栓與 6 mm 厚鋼板螺栓孔(SN490B 鋼材)承壓力比較	103
圖 6- 31	7/8 inch 高強度螺栓與 6 mm 厚鋼板螺栓孔(SN490C-FR 鋼材)承壓力比較	103
圖 6- 32	SN05t06T700 包含潛變之效應	104

摘要

關鍵字：螺栓孔、承壓強度、高溫、耐火鋼

一、研究緣起

美國Federal Emergency Management Agency (FEMA) 對於發生在西元2001年的紐約世貿大樓(WTC)火災，做了詳盡的勘災報告(FEMA 430, 2002)，提供了研究超高層建築火害珍貴的資料紀錄；報告中詳述了這場世紀火災發生的起因、經過、建築的反應、構件或接頭破壞的形式、高樓崩塌的機制、災後勘災的結果…等紀錄；縱使整個世貿大樓受火害而崩塌的過程極為複雜，但是值得注意的是，經過FEMA的許多學者專家討論的結果，造成如此慘烈的大樓崩塌，是由鋼骨柱組成的內、外牆和輕桁架樑樓板接頭受火害後破壞而開始的，其中尤其以接頭處螺栓和鋼板接合產生承壓破壞和塊狀剪力最為常見。

二、研究方法及過程

本研究利用螺栓孔與固定插銷接合的單剪試驗來量測中鋼公司所提供之兩種鋼材(SN490B, SN490C-FR)螺栓孔試體於兩種邊距(0.5d、1.0d)與四種溫度(室溫、300°C、500°C、700°C)下之螺栓孔承壓力與變形的關係，並利用所量得之結果來檢驗各國規範中承壓力的公式與高溫下的折減公式，以選擇出最接近試驗結果之承壓力公式與高溫折減關係。此外，本研究也比較了普通鋼與耐火鋼螺栓孔試體之承壓力與其在高溫折減的差異。由實驗與分析之結果可知，美國AISC-LRFD第二版(1993)所提供的承壓力公式最接近試驗結果，而利用中鋼材料實驗室所提供的鋼材高溫折減關係所計算出之高溫螺栓孔承壓力折減最接近實驗所得之高溫承壓力折減。在耐火鋼與普通鋼螺栓孔試體的比較方面，實驗數據也印證了耐火鋼在高溫時的優良特性。

三、重要發現

接觸式量測裝置，如LVDTs、extensometers、potentiometers…等。經常被使用於結構試驗之位移量測。然而，對於高溫結構構件試驗，此接觸式位移量測裝置既非常昂貴且常受到儀器本身最高工作溫度與最大伸長量之限制。因此，本文建立一套非接觸式CCD位移量測系統，以改善傳統高溫結構試驗之接觸式量測方式。比較結果發現，高溫下螺栓孔承壓破壞之實驗結果與ABAQUS/Standard有限元素數值模擬結果相一致，驗證了CCD位移量測系統在高溫下位移量測之可行且有效。此

外，本文也以 ABAQUS/ Standard 程式做為數值模擬工具，建立一套有限元素分析模型來模擬螺栓孔於高溫下承壓之行為；在材料參數方面，以中鋼高溫材料試驗所得之結果，做為數值模擬分析之基礎。由試驗結果顯示出此有限元素數值模型可成功地模擬高溫下螺栓孔承壓之行為。

四、主要建議事項

根據研究發現，本研究針對耐火鋼螺栓接頭火害性能其在高溫下之承壓能力行為之探討及目前國內採用之設計規範 AISC-LRFD 第三版(2001) 相互驗證下，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議、及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所

目前國內對於鋼結構建築物之設計乃依據「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，其主要設計精神係沿用美國 AISC-LRFD 設計規範進行結構物常溫下設計，惟火災發生時，其火場溫度驟升尤達閃燃以後之火災全盛期，建築構造承受高達 600⁰C 以上之高溫，鋼構承載能力之設計是否仍得沿用並進行高溫下之分析，經由本研究初步針對鋼板螺栓接合承壓力之實驗與分析結果，該 AISC-LRFD(2001) 規範之設計仍得加以應用於火害下鋼板螺栓接合承壓力之分析設計。

長期性之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

因國內目前採用之「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」其接頭分析設計內容，依不同結構行為分門別類，本研究接頭行為僅為其中一項，為能整體通盤性考量火害下之接頭設計，建議針對不同接頭受力的行為延伸研究之觸角。

ABSTRACT

Keywords: bearing Strength, Fire Resistance Steel, Hole of Bolt

When a steel structure is exposed to a fire, the steel temperatures increase and the strength and stiffness of the steel are reduced, leading to possible deformation and failure, depending on the applied loads and the support conditions. The increase in steel temperatures depends on the severity of the fire, the area of steel exposed to the fire and the amount of applied fire, so that structural steel buildings with applied fire protection can be designed to have excellent fire resistance.

Unprotected steel structures tend to perform poorly in fires compared with reinforced concrete or heavy timber structures, because the steel members are usually much thinner. Steel also has a higher thermal conductivity than most other materials. Unprotected steel structures can survive some fires if the severity is low and the steel does not get too hot. Full-scale tests and some real fires in large steel buildings have shown that well-designed structures can resist severe fires without collapse, even if some of the main load-bearing members are unprotected. Thermal expansion of steel members can cause damage elsewhere in the building. A review of steel behaviour in many fire tests is given by Cooke(1996).

The main factors affecting the behaviour of steel structures in fire, as discussed further in this chapter, are as follows:

- the elevated temperatures in the steel members,
- the applied loads on the structure,
- the mechanical properties of the steel, and
- the geometry and design of the structure.

第一章緒論

第一節研究動機

鋼結構建築由於其擁有耐震韌性優良、延展性佳、強度高、品質均勻、施工迅速、材料可回收…等特性，在地震頻繁、砂石資源日漸枯竭及人工費用上漲的台灣地區，日益受到重視，尤其是在 921 地震(民國 88 年)過後，建築物、廠房和公共建設耐震要求普遍受到重視的同時，鋼構造結構更有被逐漸推廣的趨勢，因此，現於國內各大都會區、高科技廠房及重大工程建設，已多可見鋼構造的建築及橋樑。傳統鋼材的降伏強度、極限強度會隨著溫度的增加而降低，此外，鋼材的熱膨脹係數及熱傳導性也較其他普通的非金屬建材為高，綜合以上鋼材在高溫下性質，導致鋼結構耐火性能不佳，Buchanan (2001) 指出未受防火披覆保護的鋼結構在受火害時，其表現甚至較鋼筋混凝土結構或重型木構造結構為差。

民國 86 年發生的新竹瑞聯半導體廠房大火(損失約 120 億台幣)和民國 90 年發生的汐止東方科學園區高層大樓大火(損失約 100 億台幣)，雖然幸運地並無人員傷亡，但龐大的財物損失也燒出了國內鋼結構建築防火的許多問題；根據內政部消防署最近七年來(86-92)的統計，我國每年火災發生的次數平均約為 14000 件，每年因火災死傷人數平均約為 950 人；在可預見的未來，國內鋼結構建築將逐漸成長，而且在人口密集的都會區超高層鋼構建築也將日益風行，可預見未來國內鋼構建築受火害侵襲的機率將增加。

西元 2001 年美國的世貿大樓(WTC)嚴重火災造成的崩塌事件中，造成兩棟世貿大樓(WTC1 & WTC2)崩塌的主要原因，並非是客機直接的撞擊爆炸，而是來自客機撞擊爆炸後在樓層中遺留大量燃油所引燃的大火，造成支撐樓板重量的桁架樑與內、外牆鋼骨柱在接頭處因高溫而產生螺栓孔承壓破壞而開始的。藉由美國的世貿大樓(WTC)的崩塌的例子，可以了解到螺栓孔的承壓破壞問題在鋼結構受火害時的重要性。

此外，在實際的鋼結構“樑對柱”或是“樑對樑”接頭處，常以角鋼、剪力片(shear tab)、或 T 型鋼以螺栓連接樑的腹板至柱翼板或大樑腹板以傳遞剪力，此種接合方式在實際鋼構建築裡的應用極為普遍，基於此理由，以及其受火害後可能造成的嚴重性，加之美國紐約世貿大樓(WTC)因火害而崩塌所帶來的衝擊，本研究擬以在高溫下螺栓孔承壓實驗，來研究火害時螺栓孔的承壓行為和強度。

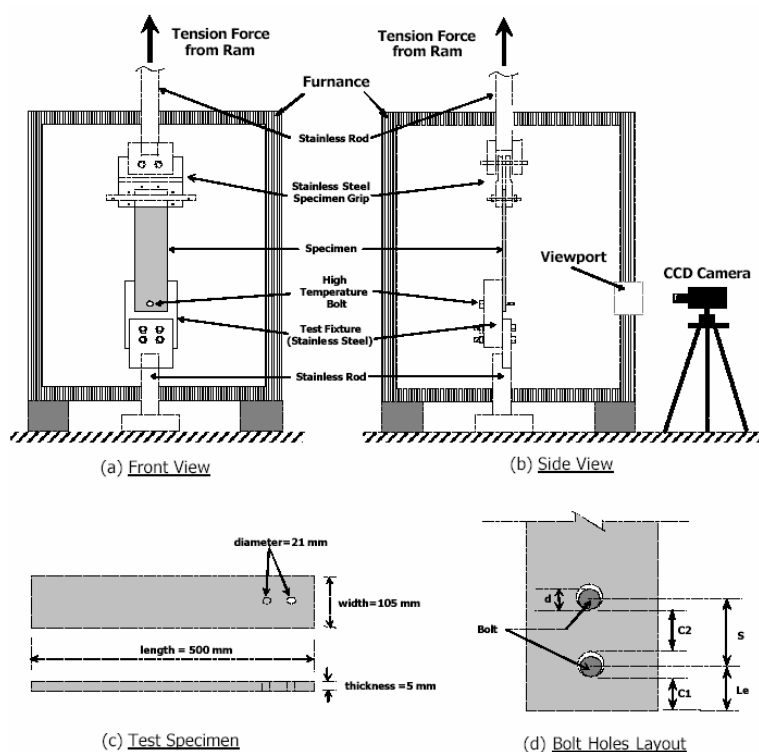
第二節 研究目的

本研究的目的是：藉由高溫下螺栓孔承壓實驗，來瞭解火害時螺栓孔的承壓 (bearing) 行為和強度。不同的溫度、不同鋼材、不同的螺栓孔邊距，對螺栓孔承壓行為和強度的影響將會被探討，此乃本研究的研究目的：

- 1 配合本研究所得之結果，檢驗美、歐…等各國鋼結構規範裡，有關螺栓孔承壓強度公式的適用性。
- 2 由於現今有關螺栓孔在高溫下承壓強度的估算，主要是套用適用於室溫下的螺栓孔承壓強度公式，再對公式中鋼材的極限強度或降伏強度因不同的溫度而做不同的折減所得。所以藉由實驗結果檢驗此種鋼材強度折減法在高溫螺栓孔承壓能力評估的適用性，並對各國規範所提供的折減公式做比較，以得出最接近之折減公式。
- 3 比較中鋼公司提供之普通鋼(SN490B)與耐火鋼(SN490C-FR)的高溫性質與螺栓孔承壓能力，以驗證耐火鋼之耐火能力。
- 4 探討鋼板端螺栓接合在不同溫度、不同鋼材、不同螺栓至板端 (end distance) 的距離之承壓行為與強度。並利用既有的 ABAQUS 有限元素分析軟體，配合實驗上所得之鋼板端螺栓接合在高溫下實驗結果，建立一套合理且強健的有限元素分析模型，來模擬在高溫下之螺栓孔承壓問題之行為與分析模式。
- 5 同時建立 CCD (charge coupled device) 位移量測系統，應用於本文螺栓孔高溫試驗承壓行為之量測，取代傳統高溫上接觸式位移量測系統。例如：LVDT、strain gage ……等等。以輔助整個高溫實驗過程鋼板受力後位移之量測。此種位移量測系統比起一般上接觸式量測裝置硬體費用低，且可以即時高速的量測物件，精確高，其最重要的優點是不只可以量測某一個局部點的位移，而是在整個擷取影像上可以作全面性的量測。

第三節研究方法概述

本計劃實驗所使用鋼板的尺寸為：長500 mm、寬105 mm、厚度5mm 或9.5 mm在鋼板端將鑽1 或2 個螺栓孔，螺栓孔徑為21mm，將使用直徑為19mm 的耐高溫螺栓(或耐高溫鋼棒)與螺栓孔接合；含螺栓孔的鋼板試體將在燃燒爐裡面加溫、加軸拉力以做高溫下的拉伸實驗，整個實驗的佈置如下圖所示，熱耦溫度計(thermo- couple)將佈設於鋼板試體的上、中、下段，特別是靠近螺栓孔段，以測量溫度；在燃燒爐內的夾具和固定設備一律採用耐火不銹鋼材製成，其中接頭部分將全部採用耐高溫螺栓(high- temperature bolt)接合(如有必要，夾具或固定設備將棄不必要的螺栓接合，儘量以一體成形設計為主)，以確保實驗在高溫條件下進行時，夾具和固定設備部分能完好無破壞且能重複使用；此外，在燃燒爐外上、下兩支傳力用不鏽鋼棒將纏繞中空銅管，並接上水管循環，以水冷方式降低傳遞到上部油壓千斤頂和下部地板的高熱，以確保實驗安全；所自行開發的CCD camera 位移自動量測系統將架設在觀景窗(viewport)外，對燃燒爐內的螺栓孔進行位移的量測。



亦將藉由一個螺栓接合和兩個螺栓接合的高溫拉伸實驗，來探討螺栓孔端距(C1)和孔距(C2)在高溫下對螺栓孔支承強度的影響(見圖(7d))，並以實驗數據和各國規範的公式

(以強度折減法)做比較；就一個螺栓接合的實驗，將改變鋼板試體中螺栓孔的端距(C1)，使其為0.5倍、1.0倍、1.5倍、2.0倍的螺栓直徑d(暫定)，以瞭解端距在高溫下對螺栓孔支承力的影響；就兩個螺栓接合的實驗，將固定端距(C1)為2d並改變鋼板試體中螺栓孔距(C2)，使其為1.0倍、2.0倍、3.0倍的螺栓直徑d(暫定)，以瞭解孔距在高溫下對螺栓孔支承力的影響；每個鋼板試體在不同溫度做拉伸實驗時，主要量測的螺栓孔變形產生的位移和所施加拉力的關係，特別要記錄螺栓孔位移達到6 mm時的拉力值(Pd)和螺栓孔的最大支承拉力(Pmax)，6 mm的孔位移是AISC-LRFD對螺栓孔支承強度所訂定的一個極限狀態。

藉由CCD camera位移自動量測系統進行高溫下螺栓孔承壓實驗，使用中鋼公司提供之兩種鋼材量測在兩種設計邊距與四種設計溫度下螺栓孔承壓力。實驗乃是利用耐火性質良好的310S耐火不銹鋼製成上部鉤具與下部固定具伸入火爐中來將試體固定，所要量測的目標乃試體下方螺栓孔的變形與承壓力，其中使用的插銷為直徑7/8 in. (22.2mm)。試體上焊接了數個測溫線將資料傳進收集器中，收集器同時也收集與上部鉤具連接之荷重計之資料，其拉力值即為鋼板螺栓孔承壓力之值。

實驗又分為定載加溫與定溫加載兩種，定溫加載是將火爐內的溫度控制在一固定的溫度，接著進行鋼板試體的拉伸試驗，主要是紀錄在設計溫度下螺栓孔承壓力與螺栓孔變形的關係，並求得螺栓孔的極限承壓力(P_{max})。而定載加溫則是模擬在火害中螺栓孔承壓而破壞的行為，實驗初期先在鋼板試體施加一固定拉力，然後在依照CNS12514標準升溫曲線所規定的溫度和時間的關係，提高燃燒爐內溫度，此時同步記錄螺栓孔變形產生的位移、時間和溫度的關係。

第二章文獻回顧

第一節常溫下剪力接合研究

在室溫下，鋼板中螺栓孔承受螺栓給予的壓力其破壞的模式大致可分為兩種：一種是與螺栓交界面材料降伏而造成螺栓孔過度變形擴大的承壓破壞模式 (bearing failure mode)，一種是由於螺栓孔的邊距或間距不夠而造成螺栓孔被螺栓撕裂的撕裂破壞模式 (tear-out failure mode)；相關的研究大致在 70 年代時由美國的 Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints (RCRBSJ) 贊助進行的大量實驗和後續研究所制定的準則 (Fisher and Struik, 1974) 而奠下了基礎，其後的一些研究如 Chong 和 Matlock (1976)，Gilchrist 和 Chong (1979) 的研究主要是著重在對輕型 (light gauge) 鋼板螺栓孔支承實驗結果的探討，Frank 和 Yura (1981) 所做的實驗指出，當螺栓孔的變形等於 6 mm (1/4 英寸) 時，螺栓孔所能承受的最大支承力約略等於 $2.4dtF_u$ (d : 螺栓直徑, t : 板厚, F_u : 鋼板極限強度)，當所受的支承力超過這個值時，孔的變形將開始迅速擴展，當支承力達到 $3.0dtF_u$ 時，孔的形狀將擴展成橢圓狀並影響到構件的強度和用途，美國 AISC-LRFD 第三版 (2001) 對螺栓孔承壓強度的規範採納了 6 mm 為螺栓孔的極限狀態而將規範訂定如下：

當螺栓孔的變形為設計的考量時(即孔變形限小於 6 mm)，螺栓孔標稱強度(R_n)為

$$R_n = 1.2 L_c t F_u \leq 2.4 dt F_u \quad (2.1)$$

當螺栓孔的變形不為設計考量時(即孔變形可大於 6 mm)，螺栓孔標稱強度(R_n)為

$$R_n = 1.5 L_c t F_u \leq 3.0 dt F_u \quad (2.2)$$

對於長槽孔且力作用垂直於孔槽時，螺栓孔標稱強度(R_n)為

$$R_n = 1.0 L_c t F_u \leq 2.0 dt F_u \quad (2.3)$$

上述公式中 L_c 指的是孔邊與孔邊或是孔邊與板端的淨距離。較為近期的實驗如 Kim 和 Yura (1999)、Lewis 和 Zwerneman (1996) 除了證實了以上極限狀態的標稱強度，而且證實了極限降伏強度比 (F_u/F_y ratio) 低的鋼材其對螺栓孔的標稱強度並無影響。

在鋼結構受火害的設計與分析，常使用“折減法”來計算 (Harmathy, 1993; Lawson and Newman, 1996; Buchanan, 2001)，意即使用鋼材在溫度上升後折減的極限強度或降伏強度來預估結構在高溫下的強度，在此我們須注意的是，整個 AISC-LRFD 對螺栓孔的承壓強度是建立在室溫下螺栓孔變形 (6 mm) 的極限狀態下，當溫度升高，鋼構件在受力又受熱的狀態下會有膨脹、潛變…種種和常溫狀態不同的力學行為產生，此時螺栓孔的承壓強度計算如再使用“折減法”並以 6 mm 的螺栓孔變形為其極限狀態，由於鋼材的材料性質 (極限強度、降伏強度、彈性模數、熱膨脹率…等性質) 在高溫下已改

變，原規範在此極限狀態下所訂定的承壓強度(即公式(2.1)至(2.3))是否合理適用將是一大疑問，對於此問題，目前國內外並無螺栓孔在高溫下的實驗和研究予以解答，近期方朝俊(2000)對耐火鋼構件受火害後其銲接及螺栓預力損失的行為有深入的研究，但並未對螺栓孔的支承問題有所著墨，本計劃將藉由實驗以了解在不同高溫下螺栓孔承壓的行為，實驗結果也將與各國規範(如我國、美、歐、日…等等)在使用折減法後所預估的強度比較、研究。

第二節 常溫與高溫下螺栓孔之承壓行為

鋼板螺栓孔之破壞形式可分為兩種：

- (1) 鋼板承壓破壞模式 (bearing failure mode)
- (2) 鋼板撕裂破壞模式 (tear-out failure mode)

國內規範對螺栓孔邊距最大、最小部份，均有其規定。目的為避免邊距過小時，其在打孔時會在鋼板之反側出現膨脹及龜裂現象發生，此時，鋼板容易造成撕裂破壞模式發生。另外，在最大邊距部分也做了一些規定，其目的在於避免螺栓孔邊距過大，在邊緣處將會發生捲曲現象發生。

Fisher 和 Struik (1974) 在美國 Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints (RCRBSJ) 進行研究螺栓孔破壞行為模式，並且為後來之規範制定了準則。其後，陸續有很多人對於這方面之研究做相當多投入。例如：Chong 和 Matlock (1976)、Haussler 和 Pabera (1976) 及 Gilchrist 和 Ching (1979) 都對鋼板在螺栓接合條件下，研究其接合行為，這類實驗是在沒有使用墊圈 (washer) 之條件下。

Frank和Yura (1981) 針對螺栓剪力接頭進行試驗，其試驗結果報告中指出當螺栓孔之變形量等於 6.35 mm (1/4 inch) 時，其螺栓孔所能承受最大壓力約為 $2.4 dtF_u$ (d 為螺栓直徑， t 為板厚， F_u 為鋼板極限承载力)，當螺栓孔承壓的壓力大於 $2.4 dtF_u$ 時，螺栓孔即開始迅速的變形，當其支承達到 $3.0 dtF_u$ 時，螺栓孔變形形狀將擴展成橢圓形並迅速影響整個結構行為。

Kim 和 Yura (1997) 共同實驗研究對兩種不同之鋼板：一種為高極限-降服應力比 (high ultimate-to-yield stress ratio) 之鋼板，另一種為低極限-降服應力比 (low ultimate-to-yield stress ratio) 之鋼板。針對這兩種不同鋼板，研究其對應於不同邊距之單螺栓孔和對應於不同邊距與淨間距之雙螺栓孔，對鋼板強度之影響。Kim 和 Yura 在其實驗結果中發現，在位移 6.35 mm (1/4 inch) 時，其極限-降服應力比大於 1.13 者，並不會影響其強度。也再次證實了承壓強度與材料之極限強度成比例關係。同時這份實驗結果與美國 AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction Load and Resistance Factor Design) 規範與歐洲規範 (Eurocode 3) 做比較，驗證了規範內的鋼板螺栓接合極限狀態的標稱強度 (nominal strength)。

以上鋼板螺栓接頭試驗，皆為常溫下所做之試驗，國內外尚未針對螺栓孔在高溫下承壓行為進行研究，因此在於鋼結構火害設計上，目前做法都是乘以一個“折減係數”做為計算設計，如 Harmathy (1993)、Lawson and Newman (1996)、Buchanan (2001)，

利用鋼材在高溫下折減後的強度來做設計。這種做法往往無法考慮鋼材在高溫下材料的性質(潛變、膨脹、降伏強度、極限強度、彈性係數…等)。因此，對於高溫下利用折減係數預估的鋼板承壓強度是否合理性，令人懷疑。

第三節有限元素數值分析

Pratt 和 Pardoen (2002) 利用 NIKE3D 非線性有限元素方法，模擬圓錐形螺栓接頭搭接縫載重拉伸行為，並將其載重拉伸行為與實驗結果作比較。同時，這個結果顯示出非線性有限元素分析可以準確的預測螺栓接頭行為。而後，Pratt 和 Pardoen (2002) 利用 NIKE3D 有限元素法模擬預測單孔與雙孔螺栓搭接接頭，受載重拉伸作用之力學行為。並將其所得結果與實驗結果進行比較。結果顯現出其數值模擬可以準確的預測其結果。Rex 和 Easterling (2003) 共同研究發展出一套特殊模擬方法，模擬一鋼板在常溫下受一高強度螺栓承载力之破壞。並且可以有效的預測其初始勁度、強度、載重、變形之行為，利用如此數值模擬結果將可以節省時間與金錢上之花費。但以上分析結果，只是在常溫下對螺栓接頭所做的數值模擬。

早期，Najjar 和 Burgess (1996) 利用有限元素法之觀念，針對大型鋼結構構件或整體，自己發展出一套 3DFIRE 非線性結構分析程式，來模擬其構件或結構整體受火害時的力學行為及反應。隨後 Huang、Burgess、Plank (2001) 利用 VULCAN 非線性結構分析程式，進行有關鋼結構受火害的行為模式。Gillie、Usmani、Rotter (2002) 則利用 ABABQUS 來進行有關鋼角處受火害之結構行為模式。

另外，針對不同的鋼結構構件也有很多人進行研究模擬。例如：Liu (1999) 對於無防火披覆的鋼梁，提出自己的分析模式進行數值模擬。Sanad、Rotter、Usmani 和 O' Connor (2000) 同樣提出自行分析模式，對於大型建築物之複合型鋼樑進行火害分析及結構行為探討。Cai、Burgess 和 Plank (2002) 利用 VULCAN，對於火害中非對稱斷面桿件進行模擬。Villa Real、Lopes、Silva、Piloto 和 Franssen (2004) 利用 SAFIR 數值模擬，分析梁柱構件在火害中之行為。但對於這些研究，大多利用折減方式模擬鋼材在高溫下材料之應力應變曲線。對於高溫潛變的效果，也大多不考慮或由折減的應力應變關係所吸收，對於這樣的作法，常溫下或溫度低時還算合理，但對於高溫潛變效應明顯時，這樣數值模擬結果，差異甚大。

Buchanan (2001) 在報告中指出結構鋼在溫度達到攝氏四、五百度時，其潛變效應顯著，其潛變效應的快慢，倚賴當時鋼材所受的應力大小。另外，對於潛變方面研究慢慢由 Hill (1958)、Naghdi (1960) 和 Green (1965) … 等人針對等溫的工作硬化彈塑性材料之變形開始研究。Wang 和 Prager (1954) 建立一套包含溫度跟潛變效應極限理論。Pian (1957) 將潛變包含至總應變量公式，其總應變量公式表示為如下：

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^c \quad (2.1)$$

其中， ε_{ij} 為總格林應變張量(total Green strain tensor)

ε_{ij}^e 為即時彈性應變(instantaneous elastic strain)

ε_{ij}^p 為即時塑性應變(instantaneous plastic strain)

ε_{ij}^T 為與時間相依性溫度應變 (time-dependent thermal strain)

ε_{ij}^c 為與時間相依性潛變應變 (time-dependent creep strain)

另外，Buchanan (2001) 針對鋼材在高溫下受力之應變增量表示成如下 (2.2) 式中：

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_i = \varepsilon_\sigma(\sigma, T) + \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{cr}(\sigma, T, t) \quad (2.2)$$

其中， ε 為總應變

ε_i 為初始應變

$\varepsilon_\sigma(\sigma, T)$ 為應力所造成應變

$\varepsilon_{th}(\sigma, T)$ 為溫度所造成應變

$\varepsilon_{cr}(\sigma, T, t)$ 為潛變所造成應變

在模擬時，應把隨應力、溫度、時間而改變之潛變參數考慮進來，使得分析結果更為準確。

第三章高溫下螺栓孔承壓能力分析

第一節前言

螺栓孔的承壓能力並不只由螺栓本身的強度所決定，而是由螺栓所連接物件的強度與螺栓設計上的配置所決定。舉例來說：一個由螺栓連接鋼板接頭，所承現出來的強度是由螺栓的間距、邊距、鋼板的極限抗拉強度 F_u 與鋼板的厚度所決定。在各國規範與過去的研究所提供的公式中可以看出，決定螺栓孔承壓能力的設計強度皆與上述的變數有關。在各規範中，高溫下的螺栓孔的承壓能力所使用的公式並沒有改變，其中隨著不同的溫度而有折減的是連接物件的抗拉強度 F_u ，故高溫下是藉由抗拉強度的折減來做設計。

常溫下的螺栓孔承壓能力在各規範設計上有不同的公式，但也對應了不同的安全係數。AISC-LRFD(1993, 2001)設計上所使用的安全係數為0.75，而歐洲規範Eurocode3(1992)在設計上所使用的安全係數換算之後為0.8。

AISC-LRFD 第二版 (1993)

在當下使用非常廣泛的AISC-LRFD中 (American Institute of Steel Construction, Load and resistance factor design specifications for structural steel buildings)，本文中簡稱為LRFD，有關鋼板與螺栓接合構件的規定 (見圖 3-1)，螺栓孔的承壓強度所使用的折減係數為0.75，乘以連接物件的標稱承壓強度 R_n 即為螺栓孔的承壓設計強度。在LRFD第二版 (1993) 中所列出的 R_n 的公式如下：

(a) 當 $L_e \geq 1.5d$ ， $s \geq 3d$ 且沿力做作用線上有兩個以上包括兩個螺栓時，(適用於標準孔、或垂直於作用力的槽孔、或摩阻型超大孔或平行於作用力方向的摩阻型槽孔)：

當設計中需考量螺栓孔周圍變形時，即孔邊變形不超過0.25 in. (6.35 mm)，螺栓孔強度為

$$R_n = 2.4dtF_u \quad (3.1)$$

當螺栓孔周圍的變形非為設計考量時，即孔邊變形大於0.25 in. (6.35 mm)也可接受時，靠近鋼板邊緣的螺栓孔強度

$$R_n = L_e t F_u \leq 3.0dtF_u \quad (3.2)$$

對其餘接合形式的螺栓孔強度

$$R_n = (s - d/2)tF_u \leq 3.0dtF_u \quad (3.3)$$

對垂直於力作用線的長槽孔強度

$$R_n = 2.0dtF_u \quad (3.4)$$

(b)當 $L_e < 1.5d$ 或 $s < 3d$ ，或在力作用線上只有一個螺栓時，(適用於標準孔、或垂直於作用力的槽孔、或摩阻型超大孔或平行於作用力方向的摩阻型槽孔)：

對單顆螺栓或是最靠近鋼板邊緣的螺栓孔強度

$$R_n = L_e t F_u \leq 2.4dtF_u \quad (3.5)$$

其他螺栓接合的螺栓孔強度

$$R_n = (s - d/2)tF_u \leq 2.4dtF_u \quad (3.6)$$

在(3.1)-(3.6)公式中， d 為螺栓的直徑， t 為與螺栓相接的鋼板的厚度， F_u 為連接鋼板的抗拉強度， L_e 為螺栓孔中心到鋼板的邊緣的長度， s 為沿力的作用線上螺栓孔中心的距離， R_n 為鋼板標稱承載強度。

AISC-LRFD 第三版 (2001)

在LRFD第三版(2001)中，螺栓孔承壓強度的公式針對了不同形式的螺栓孔以及部分的係數做了說明與調整如下：

(a)當扣件連接使用標準螺栓孔，超大孔、與作用力方向無關的短槽孔或平行於力作用線的長槽孔：

在服務載重下，螺栓孔周圍的變形為設計考量時

$$R_n = 1.2L_c t F_u \leq 2.4dtF_u \quad (3.7)$$

在服務載重下，螺栓孔周圍的變形非設計考量時

$$R_n = 1.5L_c t F_u \leq 3.0dtF_u \quad (3.8)$$

(b)當扣件連接使用垂直於力作用線的長槽孔：

$$R_n = 1.0L_c t F_u \leq 2.0dtF_u \quad (3.9)$$

公式中的 L_c 為在力作用線上螺栓孔的邊緣到鄰近孔的邊緣或鋼板的邊緣的淨邊距。

歐洲規範 Eurocode 3 (1992)

在歐洲規範中，對單顆螺栓連接的螺栓孔承壓能力為：

$$F_{b,Rd} = 2.5 f_u d t e_1 / (3d_0 Y_{Mb}) \quad (3.10)$$

$F_{b, Rd}$ 相當於已經包含安全係數的 R_n ， d 為螺栓的直徑， t 為與螺栓相接的鋼板的厚度， f_u 為連接鋼板的抗拉強度（等同於AISC-LRFD的 F_u ）， e 為在力作用線上螺栓孔的邊緣到鄰近孔的邊緣或鋼板的邊緣的淨邊距（等同於AISC-LRFD的 L_e ）， d_0 為螺栓孔的直徑， γ_{M2} 為安全係數。

Kulak G. L. (1987)

若將鋼材的剪力強度視為張力強度的 0.7 倍，且破壞的形式為剪切(tear-out)破壞，則螺栓孔的承壓強度可表示為下式：

$$\begin{aligned} R_n &= 2t(C1)(0.7F_u) \\ &= 1.4(C1)tF_u \end{aligned} \quad (3.11)$$

其中， $C1$ 為淨邊距等於 L_e ；此公式與AISC-LRFD第三版（2001）所使用的公式只有在係數上的不同，AISC-LRFD第三版（2001）使用的係數是 1.2 倍，Kulak（1987）所使用的公式則為 1.4 倍。

第二節 高溫螺栓孔承壓行為

普通碳鋼高溫下的相關機械性質

鋼結構設計中，鋼材的楊氏係數、降服強度與抗拉強度是相當重要的機械性質，而隨著環境溫度的上升，鋼鐵材料本身的溫度也隨著上升，這些重要的機械性質會隨著溫度有不同的變化。

圖 3-2、圖 3-3 與圖 3-4 收集了普通碳鋼在不同高溫下相關機械性質變化情形的試驗資料；由圖 3-2 與 3-3 可以看出，普通碳鋼在 150-400°C 附近的抗拉強度與降服強度較常溫時為高，而伸長率和斷面縮率卻有降低的趨勢，鋼材在此溫度下會呈現藍色，這種現象在冶金學中稱為藍脆(blue brittleness)現象，其原因與碳鋼中的自由氮原子在此溫度時定住(pinning)鋼材中的差排(dislocation)有關，在鋼材中添加鋁或鈦將能有效固定住自由氮原子，即可免除藍脆效應(林文謙, 1998)，此外，以冷軋或冷作的方式生產鋼材，亦可以消除此效應(Yush-kevich 等人, 1974)，此為圖 3-4 冷作鋼材無藍脆效應之原因。在溫度過了 400°C 後碳鋼的抗拉強度與降服強度急遽下降，而伸長率卻升高，一直到 600°C 時，強度下降至僅為常溫強度的三分之一。

楊氏係數(E)

表 3-1 列出了歐洲規範 Eurocode3 (1992)中楊氏係數隨溫度折減的係數，AS 4100(澳洲規範)和 NZS 3404(紐西蘭規範)提供的一個楊氏係數的關係公式如下：

$$\begin{aligned} k_{E,T} &= 1.0 + T/[2000\ln(T/1100)] & 0 < T \leq 600^\circ\text{C} \\ &= 690(1 - T/1000)/(T - 53.5) & 600 < T \leq 1000^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.12)$$

由圖 3-5 加入中鋼提供的普通鋼楊氏係數折減，可以看出楊氏係數會隨著溫度的上升而下降。

降服強度(F_y)

當結構物桿件的受力達到了降服強度以上，結構物桿件的變形速度開始爬升，變形愈來愈大。所以降服強度為判定結構物是否變形過大而無法使用的重要參數。表 3-2 為歐洲規範 Eurocode3 (1992)與 BS5950:Part8 (1990)降服強度的折減資料。表 3-3 為整理中鋼的普通鋼材高溫試驗所得到的降服強度的折減，中鋼所使用的鋼材為 SN490B。在新日本製鐵株式會社 (1995)所出版的「建築結構用耐火鋼材 (NSFR)」中也有提供普通鋼材在高溫的降服強度的折減，此書所使用的鋼材為 SM50A，見表 3-4。AS 4100(澳洲規範)和 NZS 3404(紐西蘭規範)提供了一個降服強度折減的關係公式，此公式為折減斜線部分：

$$K_{y,T} = (905 - T)/690 \quad (3.13)$$

由圖 3-6 可以看出普通鋼材降服強度的各種折減趨勢。

抗拉強度(F_u)

抗拉強度(F_u)為鋼結構設計上的重點，乃是決定結構物是否破壞的重要設計參數。表 3-5 與表 3-6 分別為中鋼所提供的抗拉強度的折減與新日本製鐵株式會社所提供的折減(見圖 3-7)。

第三節 耐火鋼材高溫下的相關機械性質

耐火鋼之耐火機制

結構用鋼鐵材料的諸多機械性質是隨著溫度的升高而降低，其中強度的折減尤其明顯，如圖 3-6 所示，普通結構用鋼材，大約在 400°C 時，降伏強度大約下降至常溫強度的 0.6 倍，由於現今的鋼結構容許應力設計法常以 1.67 作為許多構件設計的最小安全係數 (即 $R_{allowable} = R_n/1.67 = 0.6R_n$)，因此鋼結構構造一旦發生火災，鋼材所受溫度在超過 400°C 後，構件將隨時有坍塌破壞之虞，故開發出在高溫環境之下仍可保持鋼材基本強度的耐火級鋼材，便成為一種鋼結構在防火上的重要需求。我國中鋼公司因應上述可能的需求，自行開發了耐火級鋼材，並將耐火級鋼材的耐火溫度設定在 600°C，也就是說在 600°C 時鋼材的降服強度至少還能維持在室溫強度規格值的 0.6 倍。

耐火結構用鋼材在冶金原理上的耐火機制並不複雜，即在冶金的過程中添加固定比例的鉬(Mo)、鈮(Nb)、釩(V)等元素，而在高溫下這些元素與碳元素所形成的碳化物(carbide)，將能有效阻止或定住鋼材在高溫載重下所產生差排錯列，延遲鋼材降伏在固定高溫下的發生，也就因此提高了鋼材在固定高溫下的降伏強度；此外，這些鉬、鈮、釩和碳所形成的碳化物也有稍許阻止粒晶間的晶界(grain boundary)移動和旋轉的功能，故耐火級鋼材在高溫下的抗潛變性能也較普通鋼材為佳，基於以上耐火級鋼材的高溫特性，應用耐火級鋼材於鋼結構建築，構件在火害中強度的折減比普通鋼材緩慢，將可達到一定的結構耐火功能。

楊氏係數(E)

圖 3-8 為中鋼提供之 SN490C-FR 耐火鋼之楊氏係數折減。

降服強度(F_y)

歐洲規範 Eurocode3 (1992)、BS5950:Part8 (1987)與 AS 4100 和 NZS 3404 降服強度的折減資料並沒有針對耐火鋼與普通鋼有特別的區別。表 3-7 為中鋼公司為本研究所提供的耐火鋼降服強度資料，中鋼所使用的鋼材為 SN490C-FR。表 3-8 為新日本製鐵資料中耐火鋼的降服折減，新日本製鐵所使用的鋼材為 SM50A-NFR。表 3-9 為方朝俊(2000)試驗所使用中鋼 SN490C-FR 耐火級鋼材所得各溫度的降服強度，綜合整理之後所得之耐火鋼降服強度折減，請見圖 3-9。

抗拉強度(F_u)

表 3-10、表 3-11 與表 3-12 分別為中鋼、新日本製鐵(1995)與方朝俊(2000)對耐火鋼在不同溫度抗拉強度的折減，綜合資料請見圖 3-10 所示。

第四節螺栓孔於高溫之承壓強度分析

現今所有文獻資料關於螺栓孔在高溫中的承壓強度的計算方式，是用鋼材本身強度的折減做設計，以公式(7) $R_t=1.2L_c t F_u$ 為例。高溫下的設計在公式上並沒有改變，只有 F_u 在不同溫度下的折減為高溫設計的變數。

表 3-1 Eurocodes 3&4 (1992) 楊氏係數(E)折減

溫度(°C)	楊氏係數折減(%)
100.00	1.00
200.00	0.90
300.00	0.80
400.00	0.70
500.00	0.60
600.00	0.31
700.00	0.13
800.00	0.09
900.00	0.06

表 3-2 Eurocodes 3&4(1992)與BS 5950:Part 8(1987)降服強度(F_y)折減

溫度(°C)	Eurocodes 3&4(%)	BS 5950: Part(%)
100.00	1.00	1.00
200.00	1.00	1.00
300.00	1.00	1.00
400.00	1.00	0.97
500.00	0.78	0.78
600.00	0.47	0.47
700.00	0.23	0.23
800.00	0.11	0.11
900.00	0.06	0.06

表 3-3 中鋼SN490B普通鋼降服強度(F_y)折減

溫度(°C)	降伏強度折減(%)
20.00	1.00
100.00	1.00
200.00	0.92
300.00	0.78
400.00	0.72
500.00	0.63
600.00	0.42

650.00	0.30
700.00	0.18
750.00	0.13
800.00	0.10

表 3-4 新日本製鐵(1995) SM50A普通鋼降服強度(F_y)折減

溫度 °C	降服強度折減(%)
20.000	1
100.000	0.955
200.000	0.836
300.000	0.681
400.000	0.597
500.000	0.500
600.000	0.292
700.000	0.153
800.000	0.125

表 3-5 中鋼SN490B普通鋼抗拉強度(F_u)折減

溫度(°C)	抗拉強度折減(%)
20.00	1.00
100.00	0.95
200.00	1.01
300.00	1.04
400.00	0.94
500.00	0.67
600.00	0.38
650.00	0.27
700.00	0.18
750.00	0.13
800.00	0.12

表 3-6 新日本製鐵(1995) SM50A普通鋼抗拉強度(F_u)折減

溫度 °C	抗拉強度折減(%)
20.00	1.00
100.00	0.94
200.00	0.93
300.00	0.99
400.00	0.88
500.00	0.60
600.00	0.34
700.00	0.18
800.00	0.14

表 3-7 中鋼SN490C-FR耐火鋼降服強度(F_T)折減

溫度(°C)	降服強度折減(%)
20.00	1.00
100.00	0.95
200.00	0.95
300.00	0.87
400.00	0.83
500.00	0.74

550.00	0.67
600.00	0.57
650.00	0.43
700.00	0.28
750.00	0.16
800.00	0.07

表 3-8 新日本製鐵(1995) SM50A-NFR耐火鋼降服強度(F_y)折減

溫度 °C	降服強度折減(%)
20.000	1.000
100.000	0.972
200.000	0.944
300.000	0.917
400.000	0.889
500.000	0.847
600.000	0.694
700.000	0.333
800.000	0.181

表 3-9 方朝俊(2000) SN490C-FR耐火鋼降服強度(F_y)折減

溫度 °C	降服強度折減(%)
20.00	1.00
200.00	0.92
300.00	0.89
400.00	0.80
500.00	0.75
600.00	0.60

表 3-10 中鋼SN490C-FR耐火鋼抗拉強度(F_u)折減

溫度(°C)	抗拉強度折減(%)
20.00	1.00
100.00	0.95
200.00	1.00
300.00	1.03

400.00	0.92
500.00	0.75
550.00	0.66
600.00	0.56
650.00	0.41
700.00	0.28
750.00	0.16
800.00	0.09

表 3-11 新日本製鐵(1995) SM50A-NFR耐火鋼抗拉強度(F_u)折減

溫度 °C	抗拉強度折減(%)
20.00	1.00
100.00	0.96
200.00	0.99
300.00	1.03
400.00	0.95
500.00	0.82
600.00	0.58
700.00	0.28
800.00	0.16

表 3-12 方朝俊(2000) SN490-FR耐火鋼抗拉強度(F_u)折減

溫度 °C	抗拉強度折減(%)
20.00	1.00
200.00	0.96
300.00	1.03
400.00	1.01
500.00	0.85
600.00	0.57

圖 3-1 符號說明

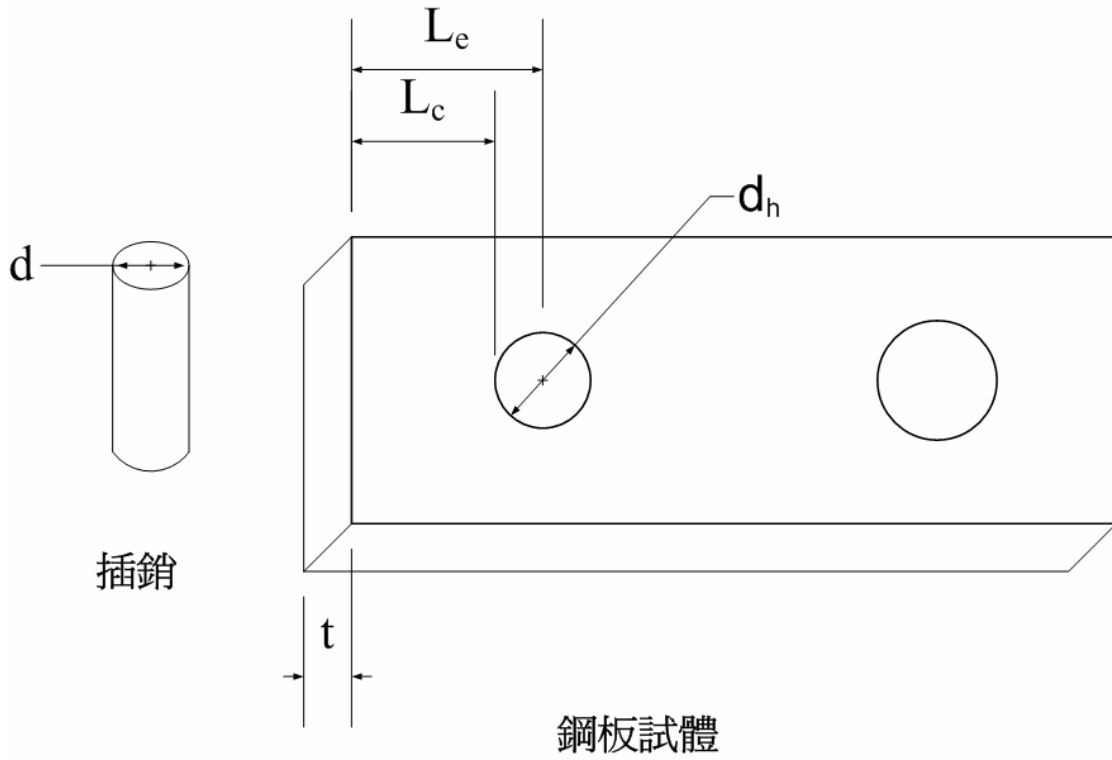


圖 3-2 普通碳鋼的高溫機械性質 (林文謙(1998))

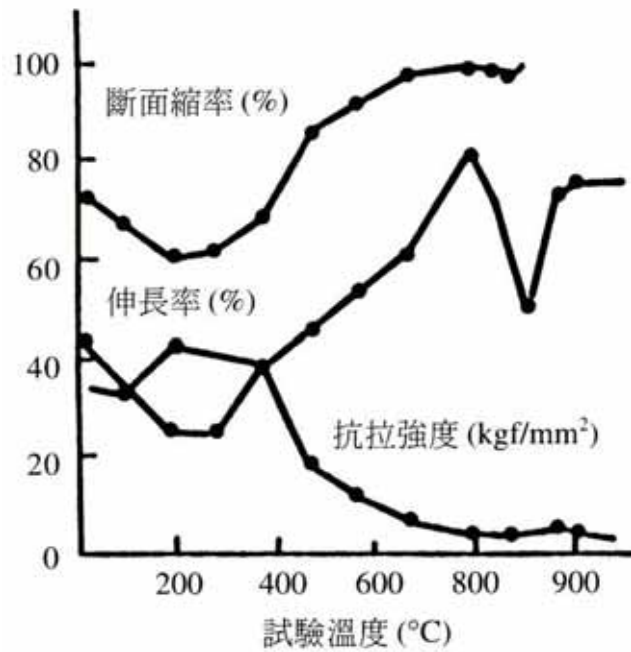


圖 3-3 熱滾壓(hot-rolled)碳鋼於高溫下的強度折減資料(Harmanthy, 1993)

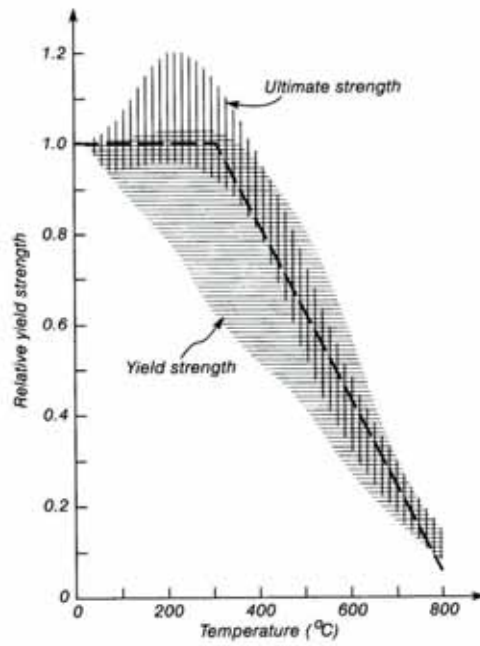


圖 3-4 冷作(cold-worked)碳鋼於高溫下的強度折減資料(Harmanthy, 1993)

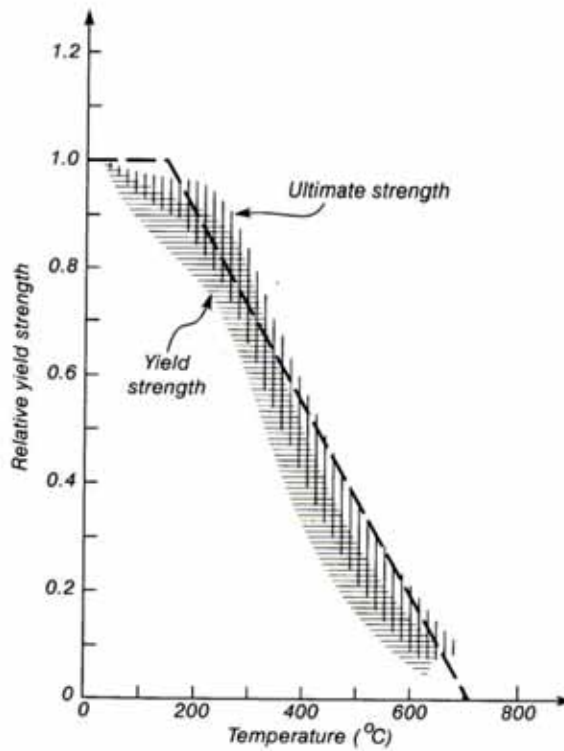


圖 3-5 Eurocodes 3&4(1992)、BS 5950:Part 8(1987)與中鋼提供普通鋼材楊氏係數折減

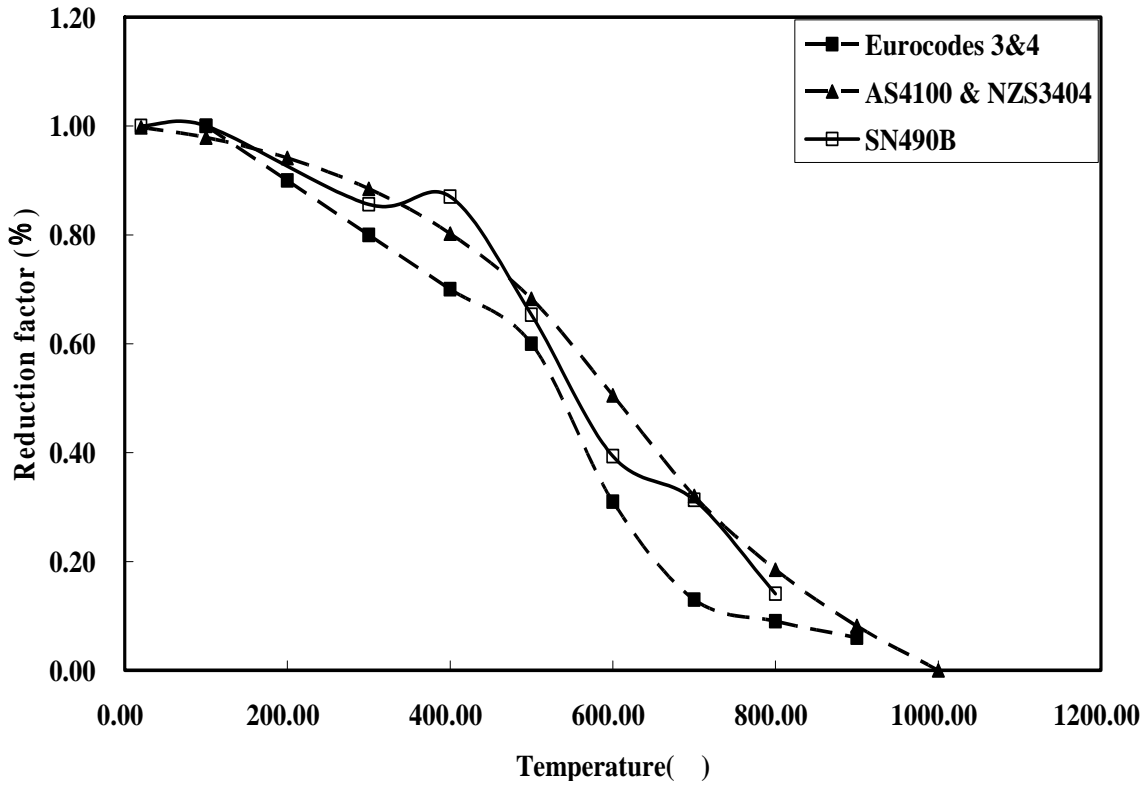


圖 3-6 普通鋼降服強度折減

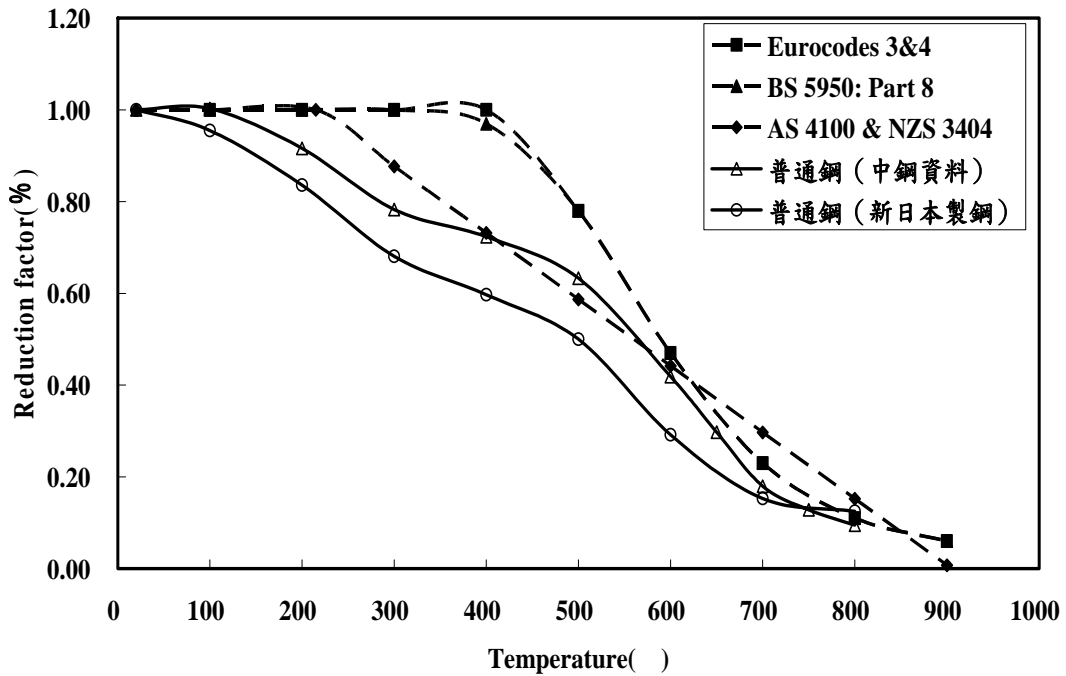


圖 3-7 普通鋼抗拉強度折減

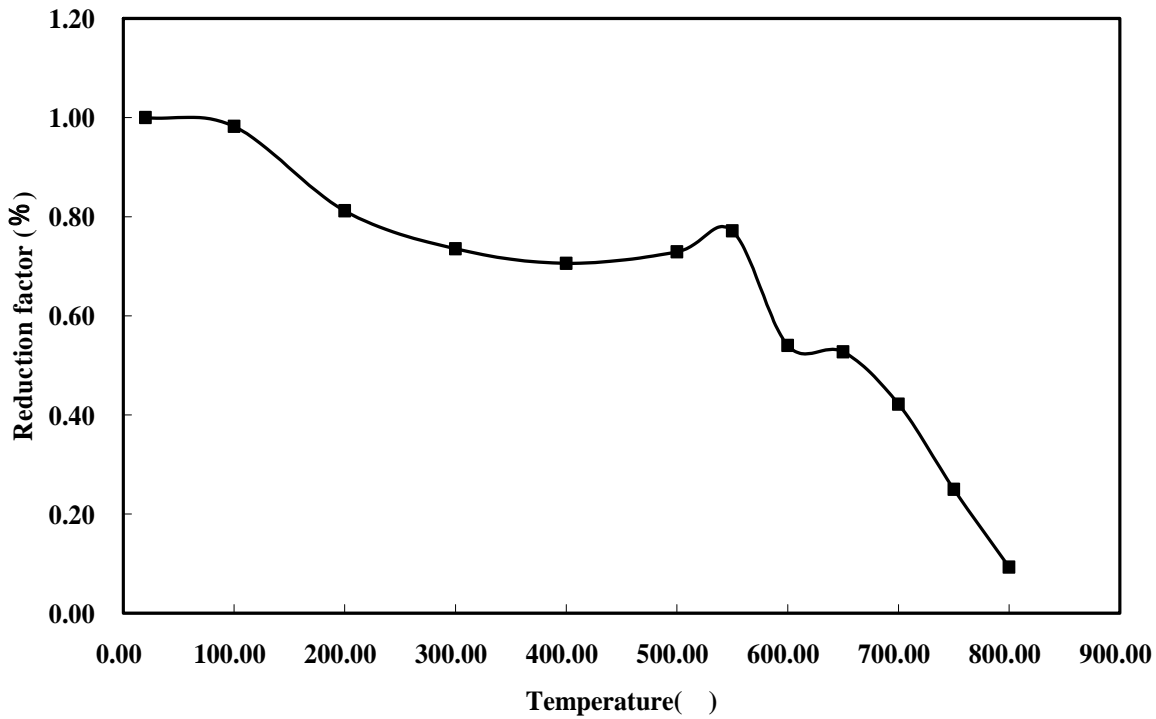


圖 3-8 耐火鋼楊氏係數折減

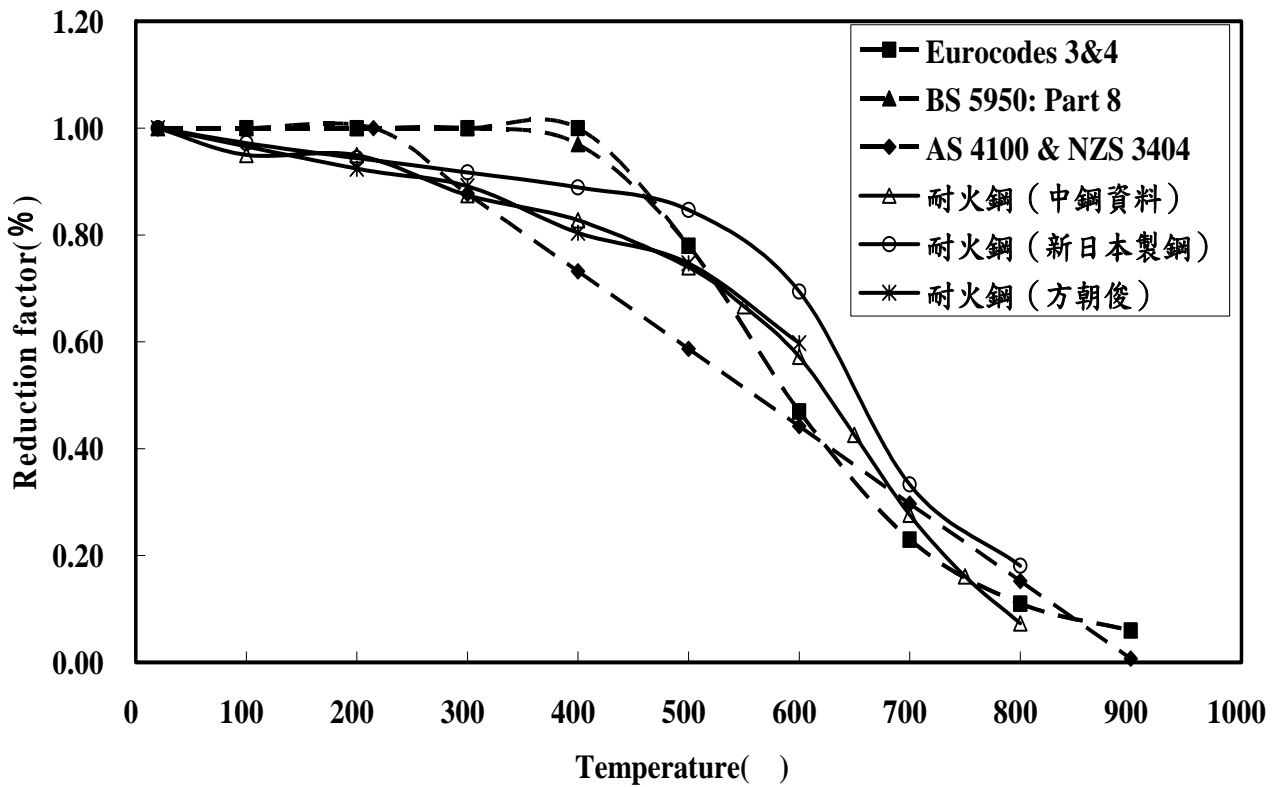
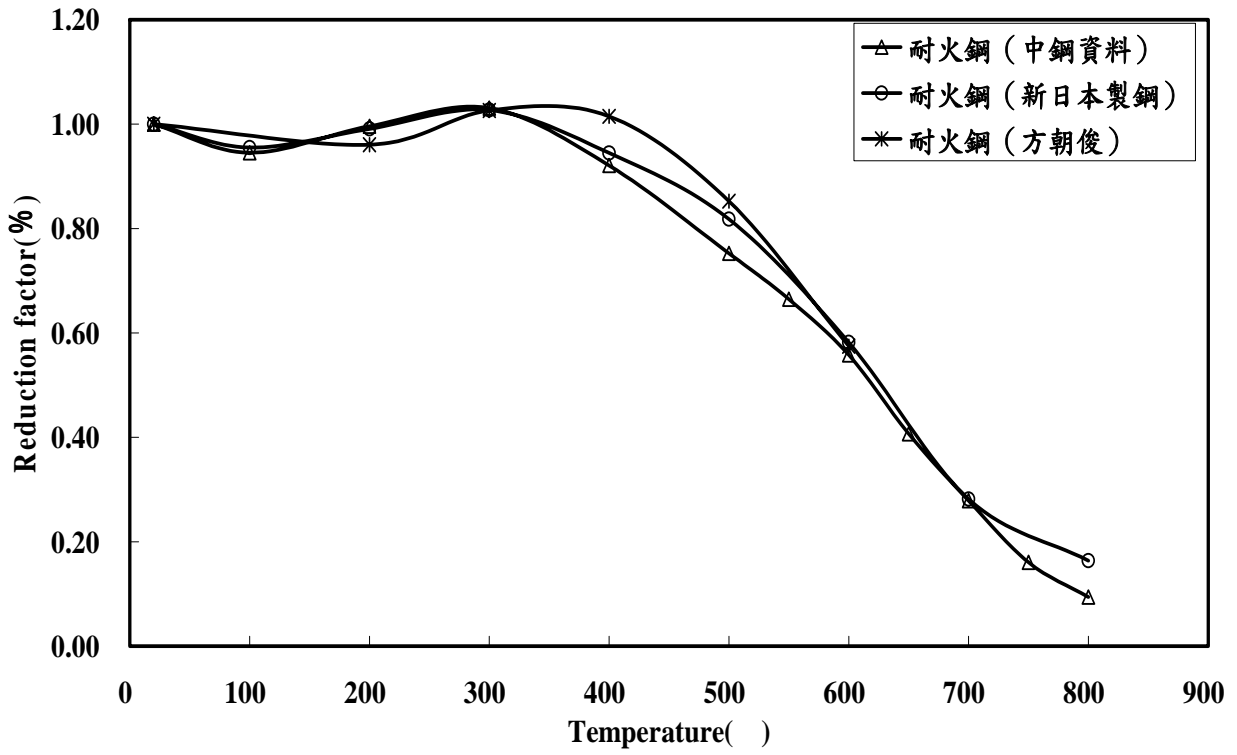


圖 3-9 耐火鋼降服強度折減



第四章試驗規劃與步驟

本章節所要介紹的是兩種鋼材試體的性質、試體的規劃與實驗中所使用的設備與其使用的步驟。並介紹兩種鋼材在兩種不同的邊距與各種溫度下，螺栓孔承壓破壞的行為。實驗中用來量測載重、位移與溫度的儀器在接下來的小節會被詳細的探討與介紹。實驗步驟與實驗應注意事項以及實驗中所遇到的問題也將在本章予以討論。

第一節試體鋼材種類

此研究所使用的鋼材為中國鋼鐵公司所提供的兩種鋼材，分別為 SN490B 鋼材與 SN490C-FR 耐火級鋼材。表 4-1 為中鋼所提供之兩種鋼材在室溫的材料性質，而這兩種鋼材在材料實驗所使用的試片，在中鋼所提供的材料性質中 SN490B 有兩種厚度，分別為軋鋼廠生產的 8 公釐厚與 12 公釐厚的鋼板，而 SN490C-FR 皆是軋鋼廠生產的 12 公釐厚的鋼板。在表 4-1 中，Width 寬度與 Thickness 厚度為經過裁切後的試片實際尺寸；Ultimate Stress 為試片破壞的極限應力值；Yield Stress 為試片之降伏應力；Off Yield Stress 為應變 0.2% 以楊式係數為斜率之直線與曲線相交的驗證強度；Modulus 為楊式係數。由表 4-1 可以看出各試體的降伏強度與極限強度。而本研究所使用的兩種鋼材皆是用由中鋼的軋鋼廠生產的 12 公釐厚的鋼材下去作裁切而成的試片。

SN490B 鋼材

我國 CNS 13812 G3262-03 建築結構用鋼標準中所規範的 SN 級鋼材主要是應用於建築結構耐震上，而 SN 級鋼材依照銲接性與耐震性能的好壞又有 A、B、C 的等級之分，以 C 等級為最佳；SN 級的鋼材較一般構造用 SS 級鋼材(CNS 2473 G3039-92)與銲接結構用 SM 級鋼材(CNS 2947 G3057-03)在化學成分與碳當量上的要求較嚴格，表 4-2 為 SN490BC 的化學材料規格表，以 490MPa 級的鋼材為例，SN490 鋼材的硫(S)含量規定至少在 0.015% 以下，而 SS490 和 SM490 鋼材的規定卻分別只有在 0.05% 和 0.035% 以下即可，又 SN490 鋼材的磷(P)含量規定至少在 0.03% 以下，而 SS490 和 SM490 鋼材的規定卻分別只有在 0.035% 和 0.05% 以下；此外，為了因應建築結構耐震上的需求，SN 級鋼特別在降伏強度上下限(控制強度的變異性)、降伏比(0.8 以下)、耐衝擊韌性值(27 Joule 以上)、厚度方向斷縮率(25% 以上)上有了新的要求以加強結構的韌性，「對於需要較佳之銲接性與耐震性能之建築結構應採用 SN 之 B 或 C 級鋼材」(陳生金, 2003)。

本研究所使用的 SN 級鋼材為中鋼公司製造的 SN490B 級鋼板材，所有關於鋼材方面的室溫或高溫材料試驗，皆在中鋼公司之材料實驗室內完成。室溫中，由中鋼軋鋼廠出廠 8 公釐厚的 SN490B 鋼板作裁切而成的材料試驗用試片，其降伏強度的平均值為 375.81 MPa，極限強度的平均值為 548.83 MPa，楊氏係數的平均值為 206759.15MPa。由製鋼廠出廠 12 公釐厚的 SN490B 鋼材下去作裁切的試片，其降伏強度的平均值為 340.825 MPa，極限強度的平均值為 531.505 MPa，楊氏係數的平均值為 245444.35MPa。由材料實驗結果可知，較厚鋼板(12 mm)所裁切而成的試片，其降伏強度與抗拉強度均比由較薄鋼板(8 mm)所裁切而成的試片略小。而 SN490B 鋼材在高溫下的性質是本研究所關心的，整理中鋼實驗室所提供之 SN490B 在各溫度之材料性質為表 4-3。由表 4-3

可以看出 SN490B 鋼材在各溫度的降伏強度與極限強度的折減係數。圖 4-1 與圖 4-2 可以看出 490B-8 與 490B-12 在各溫度的降伏強度與極限強度折減的趨勢。

SN490C-FR 耐火級鋼材

本研究所使用之耐火鋼是由中鋼公司自行研發而成的 SN490C-FR 耐火級鋼材，此鋼材除了保有 SN490C 鋼材在耐震上的特性，還具有鋼材溫度達到 600°C 時，仍保有室溫強度三分之二的耐火特性，在未來鋼結構耐火設計上有其應用之潛力；SN490C-FR 耐火級鋼材之耐火機制主要是在其化學組成中加入了耐高溫的鉬、鈮、釩、鈦等元素，表 4-4 為 SN490C-FR 之化學性質，在高溫下這些元素與碳所形成的碳化物，特別是鉬與鈮的碳化物，能鎖定住差排(dislocation)，並阻止鋼材內的差排在一定高溫下因受力而移動，進而延遲鋼材降伏時機的發生，而這些耐高溫合金的添加，也有助於增強鋼材在一定高溫下抗潛變的能力。

室溫中，中鋼公司軋鋼廠出廠 12 公釐厚的 SN490C-FR 鋼板裁切而成的試片，其降伏強度的平均值為 447.77 MPa，極限強度的平均值為 562.725 MPa，楊氏係數的平均值為 225918.95MPa。表 4-5 可以看出 SN490C-FR 鋼材在各溫度的降伏強度與極限強度的折減係數。圖 4-3 可看出 SN490C-FR 在各溫度的降伏強度與極限強度折減的趨勢。

圖 4-4 與圖 4-5 為普通鋼與耐火鋼的比較，圖 4-4 是應力值之比較，圖 4-5 為折減之比較。耐火鋼在高溫時的抗拉強度折減有很明顯的比普通鋼來的平緩，降服強度則沒有這麼明顯。

第二節 試體尺寸與規劃

實驗所使用的試體是利用中鋼公司所提供 12 公釐厚的 SN490B 與 SN490C-FR 兩種鋼板所製成。由於實驗方法有兩種，所以實驗的試體在編號上也有不同。定溫加載實驗中 SN05-t06-T300 的編號為例，SN 乃代表 SN490B 鋼材，若將 SN 改為 FR，則代表 SN490C-FR 耐火鋼；SN05 的 05 代表邊距為 1.0 倍螺栓直徑減掉 0.5 倍螺栓孔直徑(1.0d_b-0.5d_h)，若 05 改為 10，則為 1.5 倍螺栓直徑減掉 0.5 倍螺栓孔直徑(1.5d_b-0.5d_h)；t06 乃鋼材厚度為 6 公釐；T300 乃定溫至 300°C 後開始加載，若 T300 改為 RT，則為常溫(Room temperature)。定載加溫實驗中，以 SN05-t06-TR 為例，SN05-t06 與前者相同；TR 為定載升溫(elevating temperature)。表 4-6 為實驗試體的詳細尺寸。圖 4-6 為兩種不同邊距之鋼板詳細設計圖，試體下方之螺栓孔中所使用的插銷為 7/8 in. (22.2mm)。實驗乃是以下螺栓孔與插銷接合產生承壓力，再以 CCD 量測插銷中心與螺栓孔頂部的相對位移，見圖 4-10，以兩種邊距與不同溫度得到各力與位移圖形。

第三節 試驗設備

實驗所使用的設備部分為內政部建築研究所台南防火實驗室所提供。於平衡鋼架上方向下連接油壓千斤頂、荷重計與研究設計之上部鉤具，並延伸自火爐中，於垂直方向從平衡鋼架下方向上連接下部固定具，並延伸自火爐中。上部鉤具與下部固定具以插銷固定焊有測溫線之試體，試體下方的螺栓孔為量測的目標，其使用的插銷為 7/8 in.

(22.2mm)。測溫線延伸至火爐外之資料收集器，荷重計也連接至資料收集器。爐外架設 CCD 以測量位移變化，位移資料連同資料收集器之訊號一起傳入筆記型電腦中。見圖 4-7、4-8、4-9 與 4-10。

小型多功能耐火爐

對於本實驗所用之加熱爐為瓦斯燃燒式加熱爐(見圖 4-12、4-13)，其規格如下：

- (1) 瓦斯壓力約為 800~850mmAq。
- (2) 母火燃燒風壓約 800~850mmAq。
- (3) 大火燃燒風壓約 300~400mmAq。
- (4) 溫度設定依 CNS12514 標準升溫曲線設定(見圖 4-11)。

mmAq：Aq=Aqua(水柱)之簡稱，mmAq 又稱 mmH₂O，1mmAq=1Kg/m²。

1 mmAq (靜壓單位)= 9.80665 Pa (帕) = 0.0980665 hPa (百帕)
 1 atm = 760 mm-Hg \doteq 1013 hPa，所以 1 mmAq \doteq 0.0735793 mm-Hg(毫米汞柱高)。

加載設備

100 公噸油壓千斤頂

連接自平衡鋼架與荷重計，由油壓設備供應油的進出以控制千斤頂衝程的長短，拉力、壓力實驗皆可應用，其拉力或壓力加載能力各為 100 公噸(見圖 4-14)。

油壓設備

實驗所使用之油壓設備藉由控制壓端或拉端的調壓閥，來達到壓力試驗或拉伸試驗。此油壓設備全由手動控制，所以加載的速率須由操作者精密控制(見圖 4-15)。

自平衡鋼架

由 H 型鋼所組成的自平衡反力框架，在梁、柱部分有密集的加勁板，以防止腹板或翼板挫屈。此自平衡鋼架支上梁與油壓千斤頂相連接，油壓千斤頂再連接上部 U 型鉤具(clevis)，上部 U 型鉤具由加熱爐頂部伸入爐中，透過剪力插銷與試體上部圓孔連結，試體下部圓孔再與下部固定具(fixture)剪力插銷相連結，下部固定具穿出加熱爐的下方，並與自平衡鋼架下部的橫梁相連接(見圖 4-16)。

荷重計(load cell)

本實驗所使用的荷重計為內政部建研所歸仁防火實驗室所提供 TML 之 100 噸荷重計，用來量測力的大小(見圖 4-17)，荷重計在做實驗之前已經由 SGS 公司校正。

耐高溫 U 型鉤具與固定具

本實驗所使用上部耐高溫 U 型鉤具(clevis)與下部耐高溫固定具(fixture) (見圖 4-18)皆使用在高溫中強度折減較小，並能耐高溫至 1093°C 的 310S 不鏽鋼材料(見表 4-7)製成，其材料的化學組成請見表 4-8，耐高溫上部 U 型鉤具與下部固定具的設計溫度為 900°C，即在 900°C 仍能順利進行鋼板的高溫承壓實驗。下部固定具所用來固定試體的插銷之直徑為 7/8 in. (22.2mm)。

非接觸式位移量測系統

由於高溫結構實驗以接觸式的方法來量測位移上有其困難性，且耐高溫用的線性位移計(LVDT)過於昂貴，因此，本實驗室自行開發了非接觸式的位移量測系統，透過高溫爐的觀景窗，由爐外量測高溫螺栓孔承壓實驗中插銷中心與螺栓孔頂邊緣的相對位移，由於實驗時鋼板變形的影像皆由 CCD 攝影機以影像檔的方式即時且連續儲存於電腦中，在實驗後，吾人仍可對有興趣的點位分析其位移。此非接觸式位移量測系統主要是由 CCD 攝影機、筆記型電腦、資料收集器所組成(陳諺輝, 2006): Unibrain Fire-I 810b 型 CCD 攝影機，用來擷取影像(見圖 4-19); ASUS A3500G 筆記型電腦，用來儲存影像與辨識影像以及儲存實驗結果; NI SC-2345 資料收集器，安裝了四組模組收集溫度、一組模組收集施力值(見圖 4-18)，整個系統的架設完成圖請見圖 4-20。

熱電耦式溫度計

本實驗使用的熱電耦式(thermal couple)溫度計為 K-type 型，可耐高溫至 1260°C，由於 K-Type 型的熱電耦溫度計是唯一能使用於 900°C 至 1260°C 的標準基本金屬熱電耦計，因此在工業上常被廣泛的使用，其正電耦元素為 90% Ni-9% Cr，負電耦元素為 94% Ni 和矽、錳、鋁、鐵、鈷的合金。試體量測溫度分佈見圖 4-21。

第四節 試驗步驟

本實驗為鋼板試體下方螺栓孔與固定具上插銷接合以兩種邊距與不同溫度下之單剪拉力試驗，油壓設備控制上部鉤具上升拉動鋼板試體，使的鋼板試體下方螺栓孔中的插銷與螺栓孔接觸產生承壓力，造成鋼板產生承壓破壞。而位移為插銷中心與螺栓孔頂邊緣的相對位移，並利用 CCD 量測系統量測。施力方向見圖 4-9。

定溫加載試驗

定載加溫實驗共選擇了4種溫度，分別為20°C、300°C、500°C、700°C。實驗中先將試體溫度升至指定溫度在開始施力，當試體升至指定溫度時，火爐內的環境溫度大約大於試體溫度200°C，在關掉部分燃燒機使火爐內環境溫度降至指定溫度。定溫加載實驗流程圖見圖4-22。

定載加溫試驗

定載加溫實驗所施加的力量為使用公式(3.7) $R_t=1.2L_c t F_u$ ，輸入該試體的淨邊距與厚度代入公式所得到的值，再乘與0.5倍當作施力。等施力加至指定強度時，開啟火爐爐火加溫至試體毀壞，並紀錄讓試體破壞時的溫度。爐火升溫依照CNS12514標準升溫曲線，見圖4-11。定載加溫實驗流程見圖4-23。

表 4-1 中鋼提供之鋼材材料性質

試片編號： NO.	Width (mm)	Thickness (mm)	Ultimate Stress (MPa)	Yield Stress (MPa)	Off Yield Stress (MPa)	Modulus (MPa)
SN490C-FR	5.978	5.498	561.05	447.77	447.86	212816.5
SN490B(8mm)	5.973	4.525	549.65	377.18	375.03	206085.1
SN490B(12mm)	5.977	5.552	531.59	338.65	342.93	254915.9

表 4-2 SN490BC 之化學材料規格表

種類符號	厚度範圍 mm	化學成分(%)						機械性質												
		碳 C	矽 Si	錳 Mn	磷 P	硫 S	碳當量 C _{eq}	拉伸試驗				彎曲試驗								
								降服強度 Mpa	抗拉強度 Mpa	降服比 %	伸長率		厚度方向		試驗溫度 °C	衝擊值 J	試片			
SN490B	6以上未滿12	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.03 以下	0.015 以下	0.44 以下	325.000	490~610	-	1A號	17以上	-	-	-	-		-	-	四號 軋延 方向
	12以上未滿16							325~445		80以下							4號			
	16.000							325~445		80以下	1A號 或4號	23以上								
	超過16,40以下							325~445		80以下							4號			
	超過40,50以下							0.46 以下		295~415	80以下	4號								
	超過50,100以下																0.20 以下			
SN490C	6以上未滿12	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.02 以下	0.008 以下	0.44 以下	-	490~610	-	1A號	17以上	25以上	15以上	0	27以上	-	四號 軋延 方向		
	12以上未滿16							-		-									4號	23以上
	16.000							325~445		80以下	1A號 或4號	23以上								
	超過16,40以下							325~445		80以下									4號	23以上
	超過40,50以下							0.46 以下		295~415	80以下	4號								
	超過50,100以下																		0.22 以下	

表 4-3 SN490B 鋼板在各溫度的折減(原 8mm 與 12mm 鋼板材)

溫度(°C)	SN490B (8mm)		SN490B (12mm)	
	極限強度折減 (%)	降伏強度折減 (%)	極限強度折減 (%)	降伏強度折減 (%)
25	1	1	1	1
400	0.922	0.673	0.954	0.679
450	0.810	0.643	0.830	0.676
500	0.654	0.609	0.679	0.619
550	0.493	0.496	0.507	0.534
575	0.415	0.433	0.427	0.453
600	0.354	0.378	0.362	0.401

表 4-4 SN490C-FR 之材料化學性質

	化學成分(%)						
	C	Si	Mn	Mo	Nb	V	Ti
SN490C-FR	0.080	0.230	0.900	0.330	0.024	0.036	0.015

表 4-5 SN490C-FR 鋼材在各溫度的折減係數 (原 12mm 鋼板材)

溫度(°C)	SN490C-FR	
	極限強度折減 (%)	降伏強度折減 (%)
20	1.000	1.000
100	0.945	0.950
200	0.996	0.949
300	1.031	0.874
400	0.921	0.828
500	0.752	0.740
550	0.665	0.666
600	0.558	0.572

表 4-6 實驗試體尺寸

試體編號	溫度 (°C)	厚度 (mm)	邊距(L_c) (mm)	螺栓孔直徑 (mm)	孔中心到邊緣 (L_e)
SN05-t06-T020	20.000	6.540	10.390	24.000	22.390
SN05-t06-T300	302.773	6.450	10.080	23.950	22.055
SN05-t06-T500	509.000	6.450	10.580	23.850	22.505
SN05-t06-T700	703.594	6.270	10.500	24.400	22.700
SN10-t06-T020	30.000	6.450	21.310	23.850	33.235
SN10-t06-T300	328.177	6.390	21.920	24.000	33.920
SN10-t06-T500	507.129	6.340	22.670	24.000	34.670
SN10-t06-T700	727.136	6.330	21.900	23.870	33.835
FR05-t06-T020	20.000	6.380	10.430	24.000	22.430

FR05-t06-T300	300.307	6.230	10.050	24.200	22.150
FR05-t06-T500	494.221	6.580	10.080	24.000	22.080
FR05-t06-T700	706.499	6.330	10.330	24.400	22.530
FR10-t06-T020	20.000	6.450	21.480	24.000	33.480
FR10-t06-T300	305.258	6.350	21.250	23.970	33.235
FR10-t06-T500	536.621	6.360	21.200	24.000	33.200
FR10-t06-T700	716.171	6.300	21.950	23.970	33.935

表 4-7 310S 不鏽鋼高溫強度折減表 (Allegheny Ludlum (2002))

Test Temperature		Yield Strength		Tensile Strength		Elongation
(°F)	(°C)	ksi	MPa	ksi	MPa	%
77	25	45.6	314	90.5	624	42.6
200	93	41.4	286	83.4	575	41.3
400	204	36.9	254	77.3	533	35.8
600	316	34.6	239	75.2	519	35.0
800	427	30.3	209	73.6	508	33.5
1000	538	29.4	203	70.2	484	37.0
1200	649	25.8	178	57.0	393	32.0
1400	760	21.4	147	37.7	260	54.0
1600	871	16.1	111	22.5	155	56.5
1800	982	8.2	56	11.8	81	93.3
2000	1093	4.0	27	6.5	44	121.0

表 4-8 310S 化學組成表 (Allegheny Ludlum (2002))

成份	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
%	0.08	2.0	0.045	0.03	1.5	24-26	19-22	Balance

圖 4-1 SN490B 試片在各溫度的折減(原 8mm 鋼板)

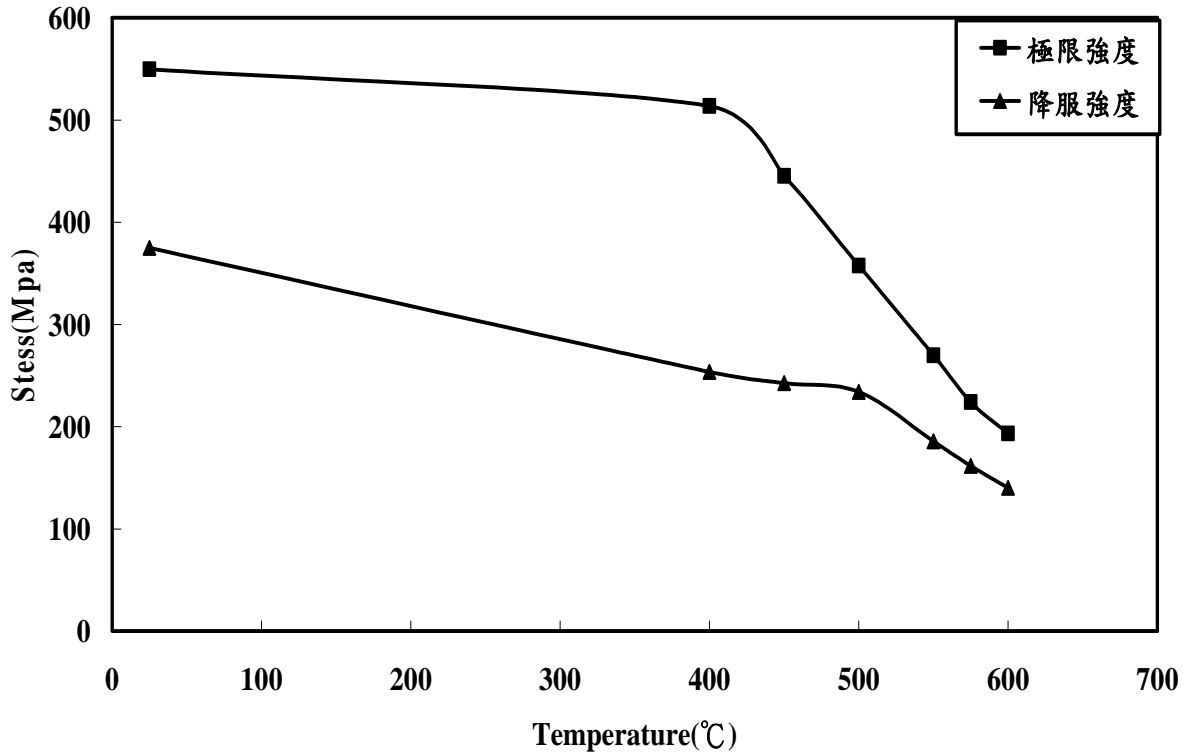


圖 4-2 SN490B 試片在各溫度的折減(原 12mm 鋼板)

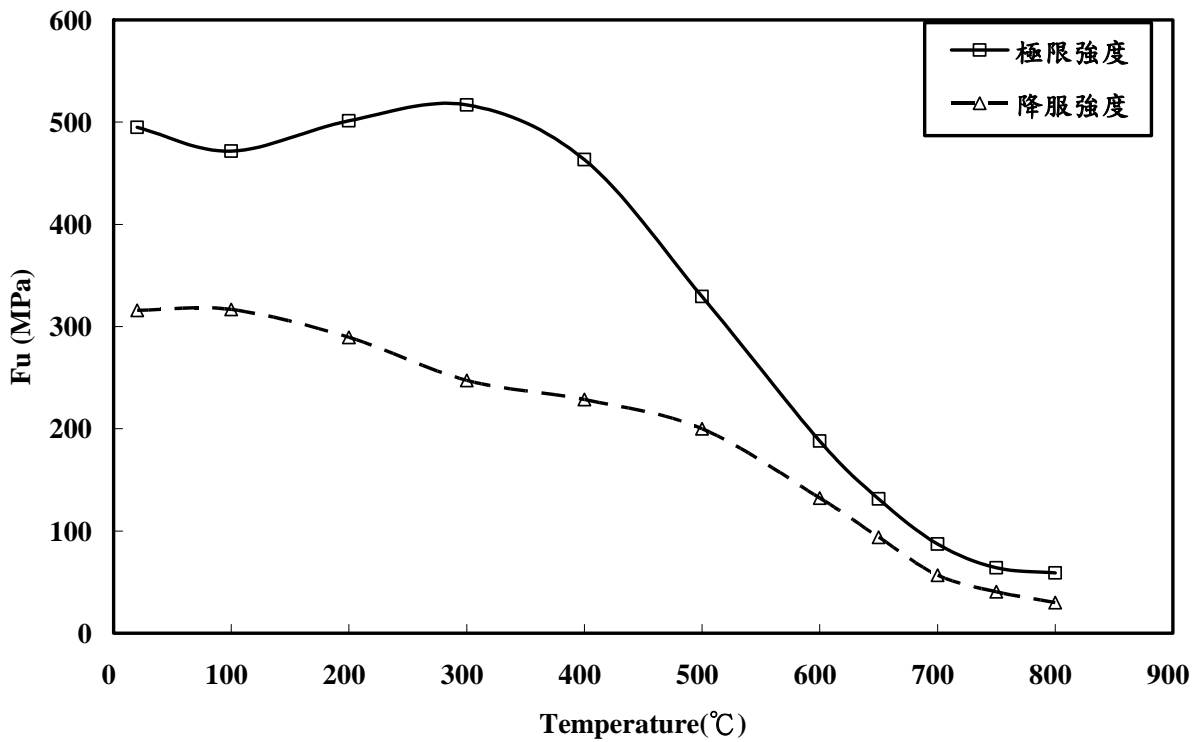


圖 4-3 SN490C-FR 在各溫度的折減

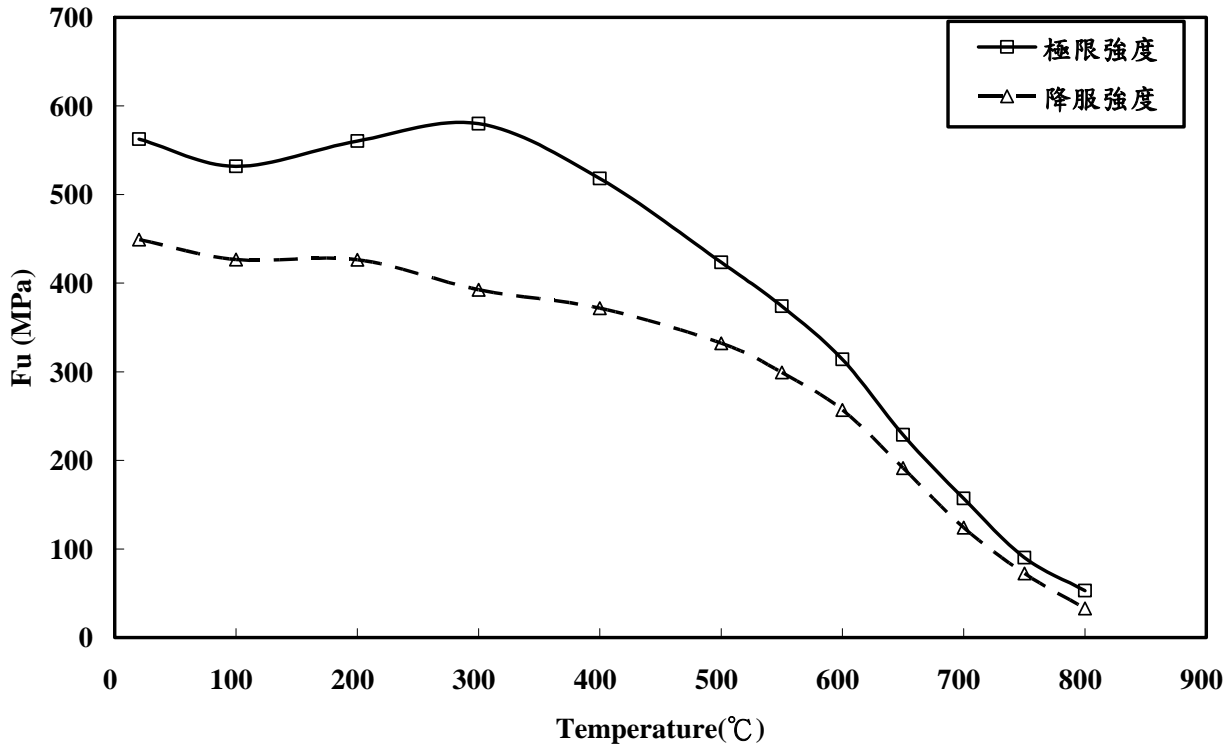


圖 4-4 普通鋼與耐火鋼強度比較

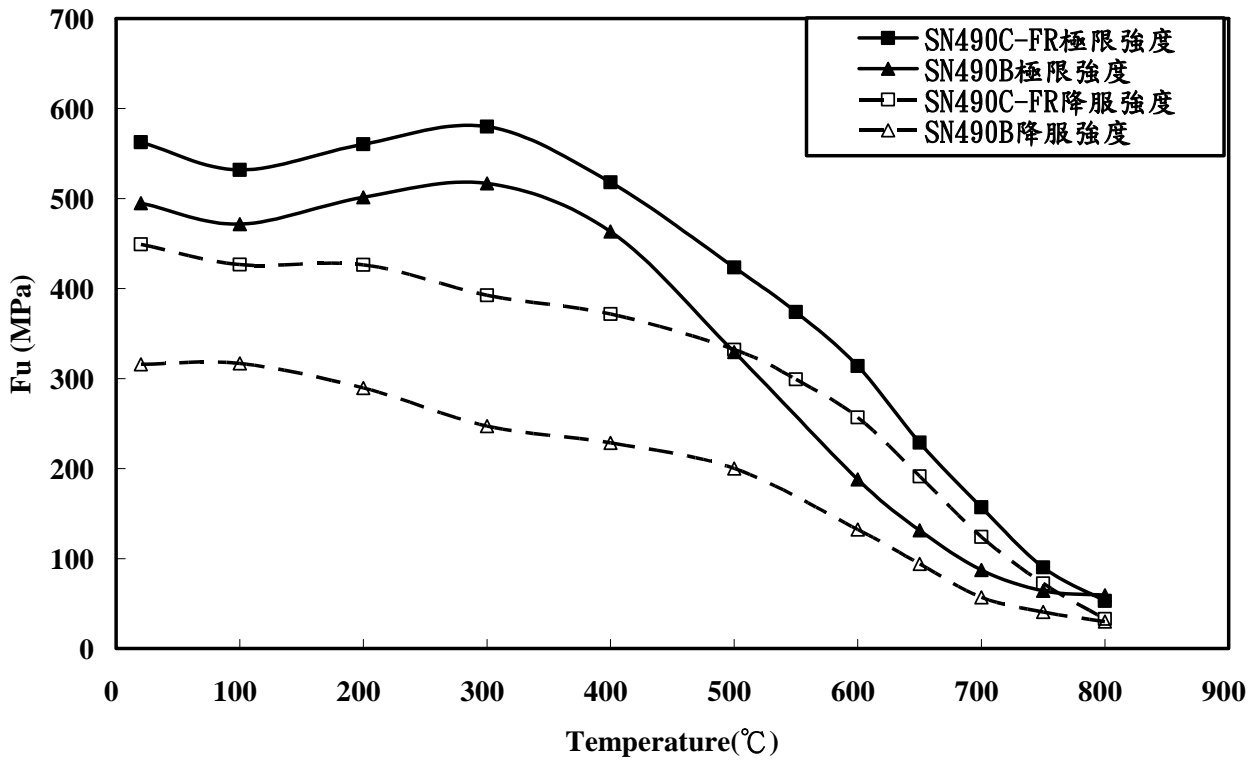


圖 4-5 普通鋼與耐火鋼正規折減比較

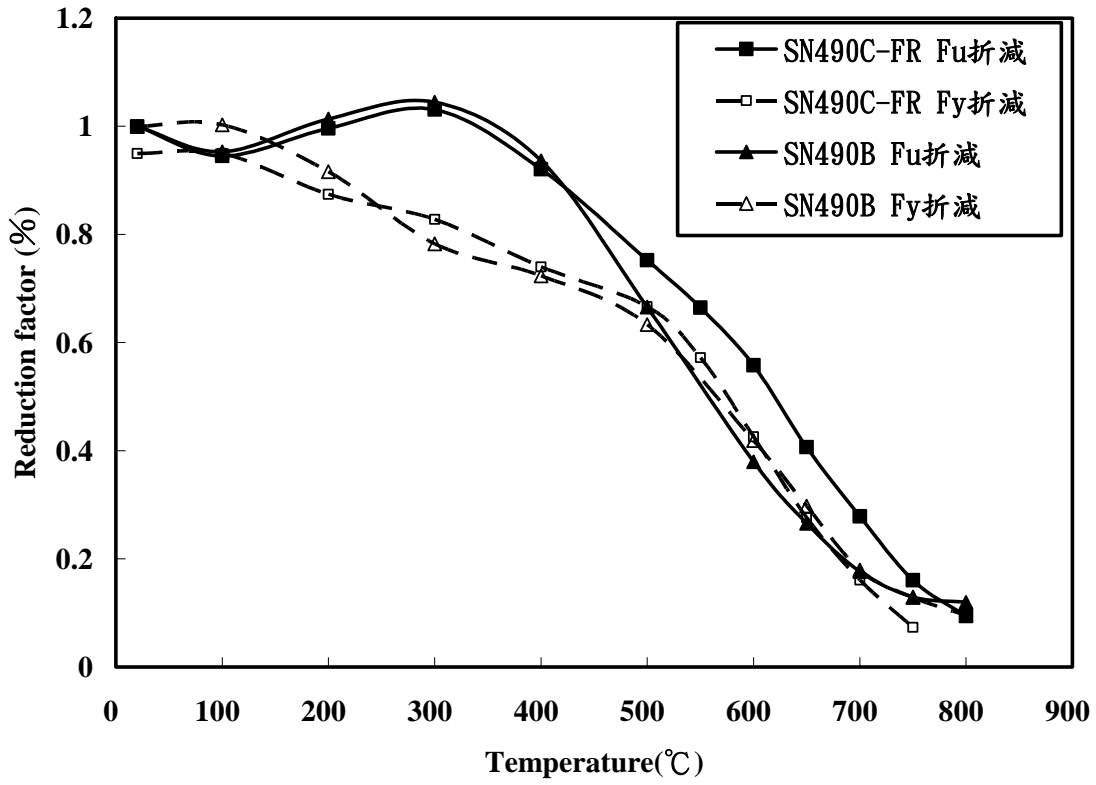


圖 4-6 兩種不同邊距之鋼板設計圖

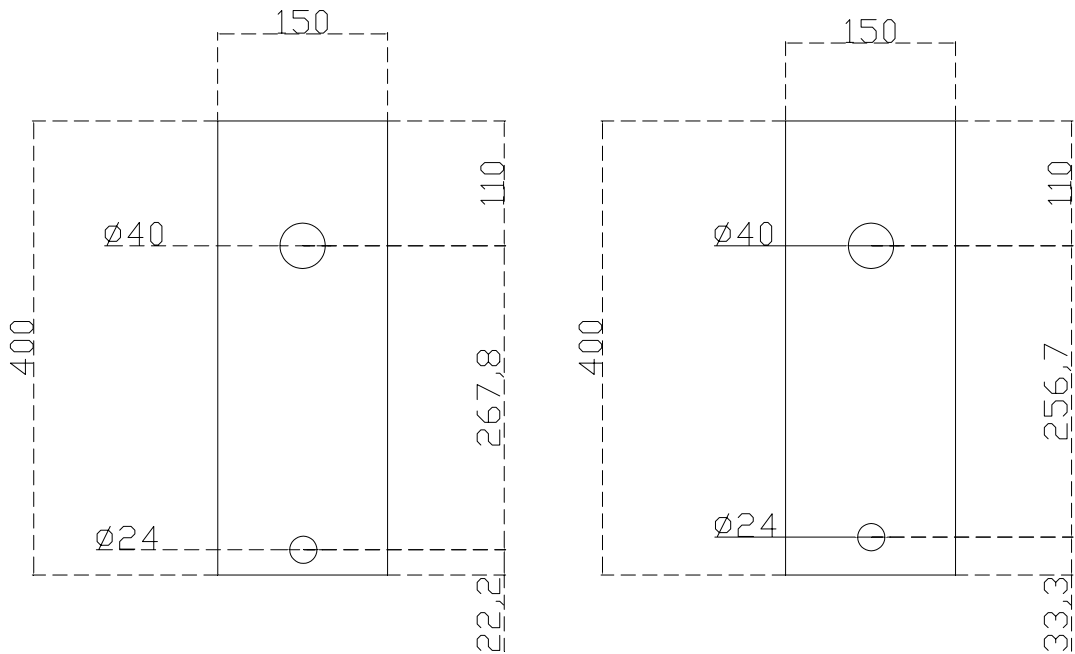


圖 4-7 實驗設備組合前視圖

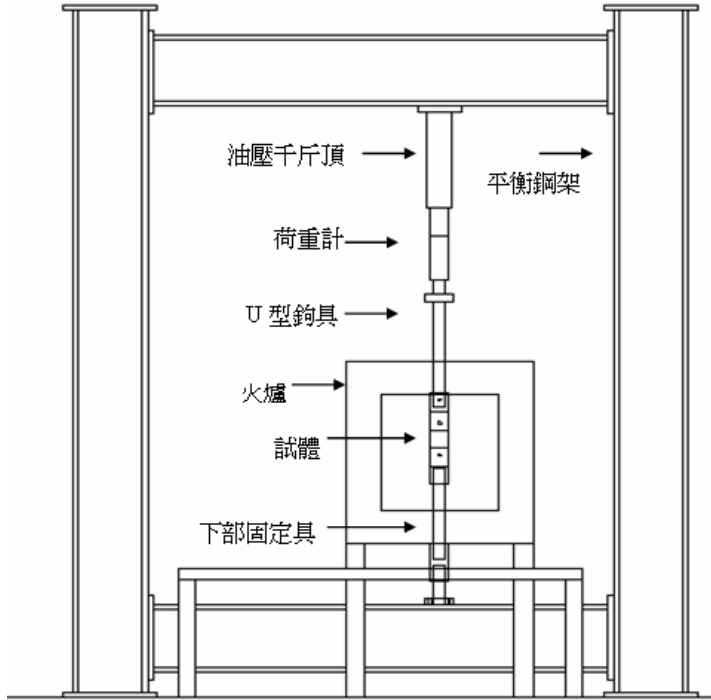


圖 4-8 實驗設備組合側視圖

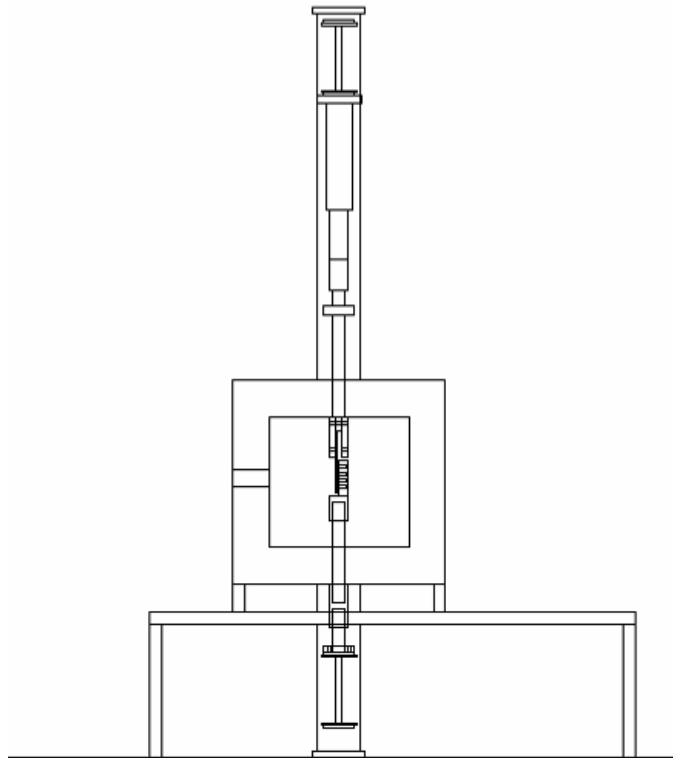


圖 4-9 上下部夾具固定試體



圖 4-10 焊接於試體上之測溫線

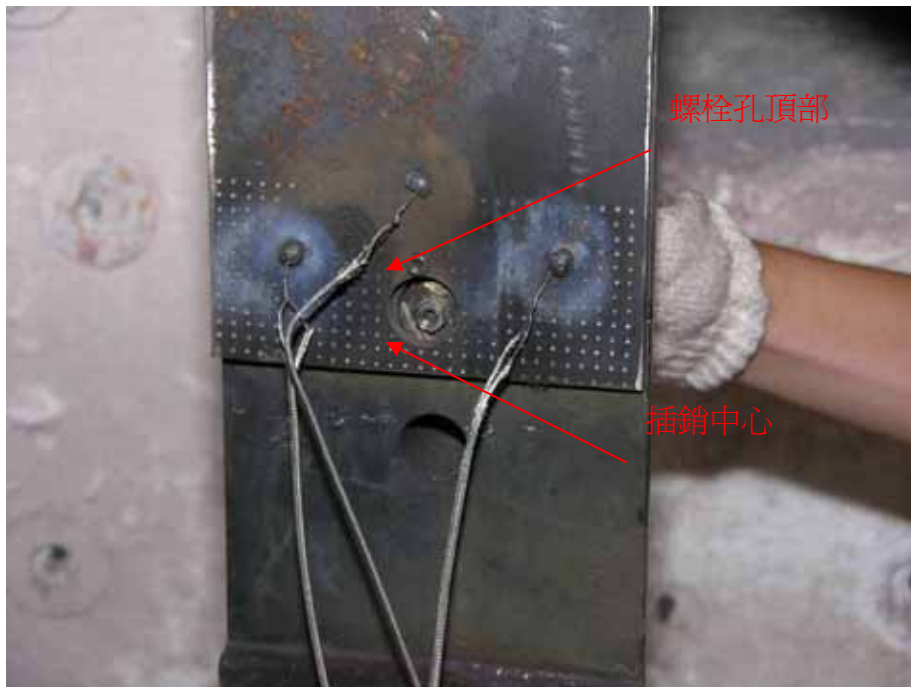


圖 4-11 CNS12514 標準升溫曲線

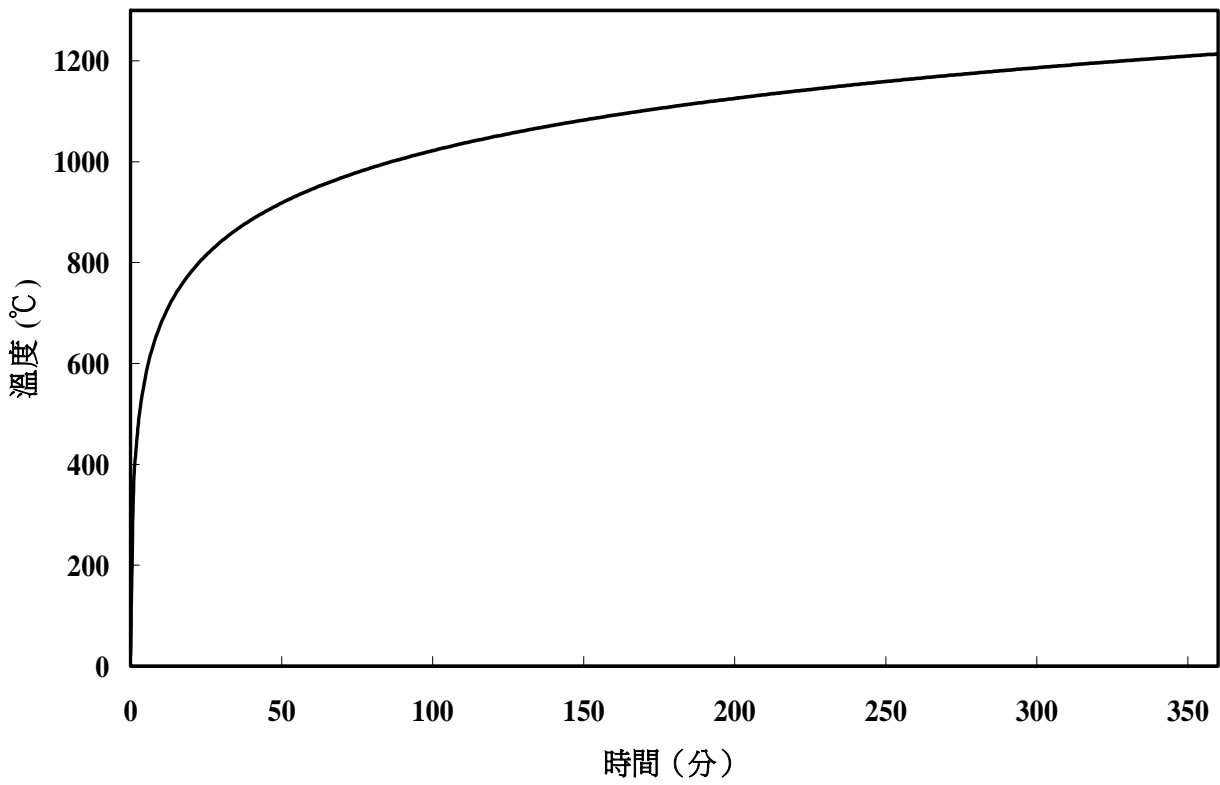


圖 4-12 小型多功能耐火爐

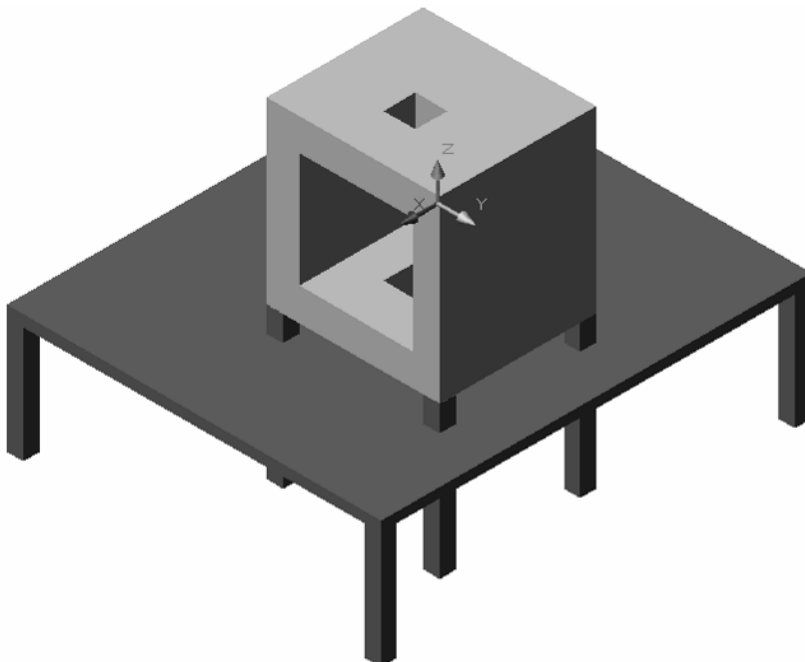


圖 4-13 小型多功能耐火爐



圖 4-14 油壓千斤頂

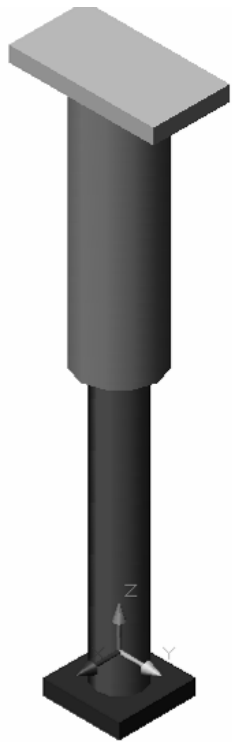


圖 4-15 油壓設備



圖 4-16 自平衡鋼架

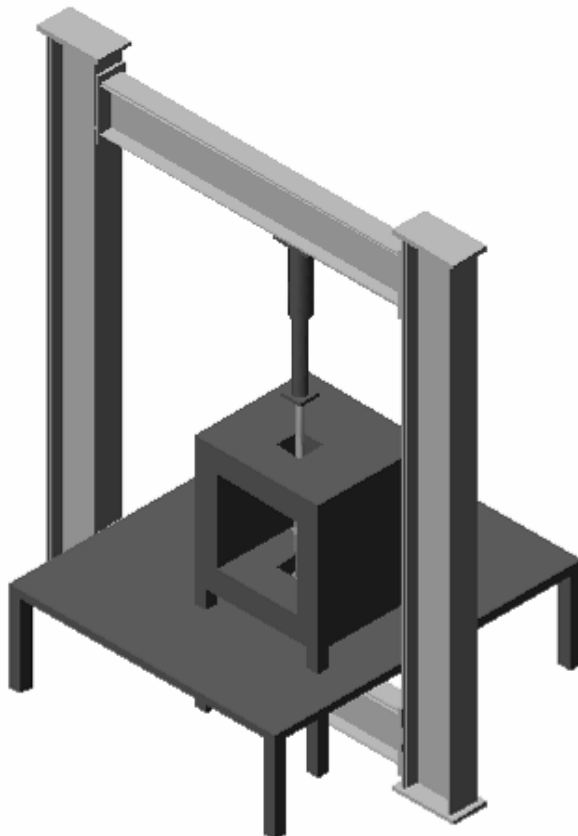


圖 4-17 上部 U 型夾具與下部固定具

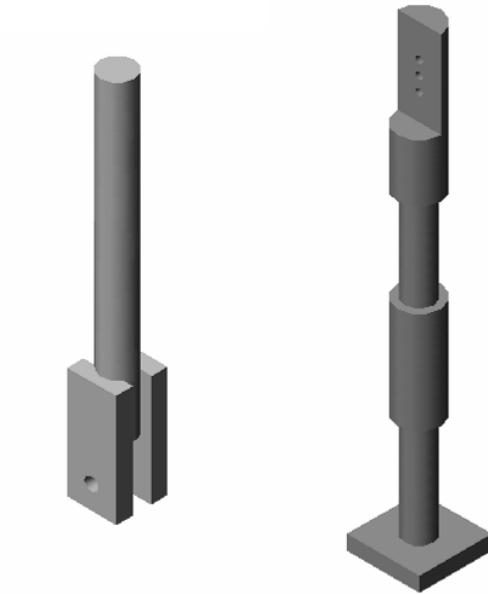


圖 4-18 Unibrain Fire-I 810b 型 CCD 相機



圖 4-19 NI SC-2345 資料收集器



圖 4-20 整體系統

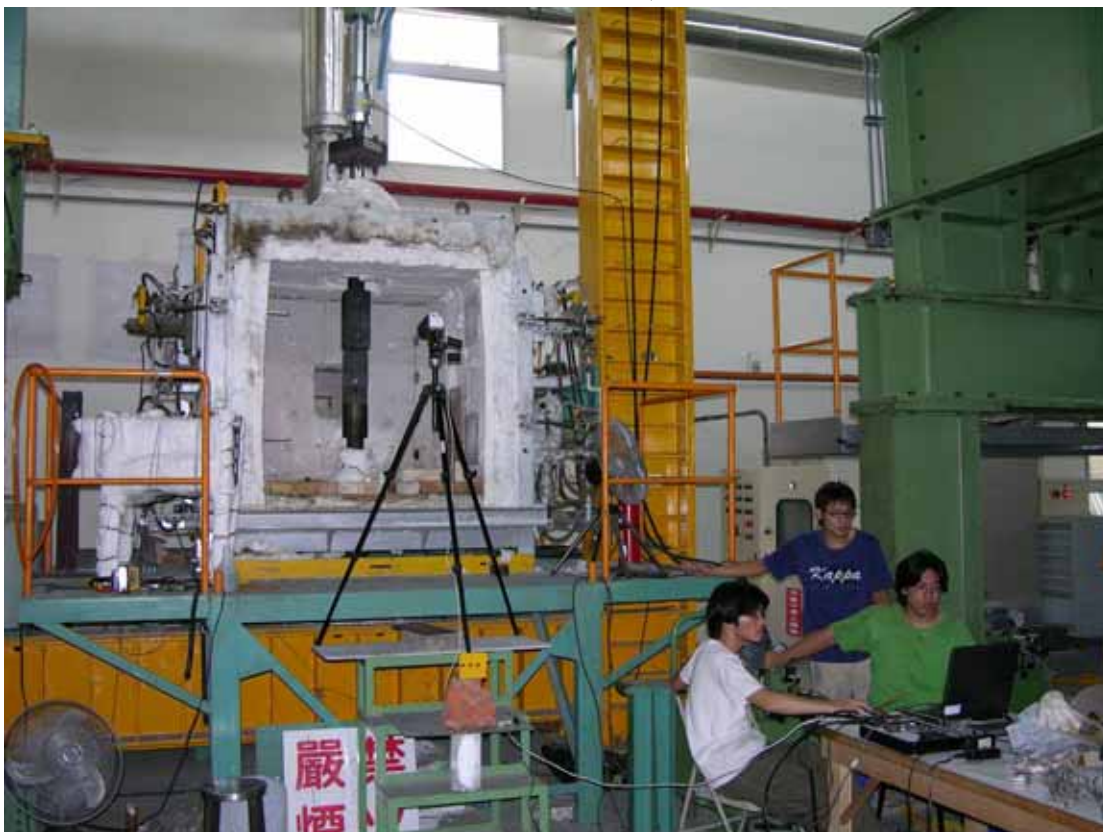


圖 4-21 測溫線分佈

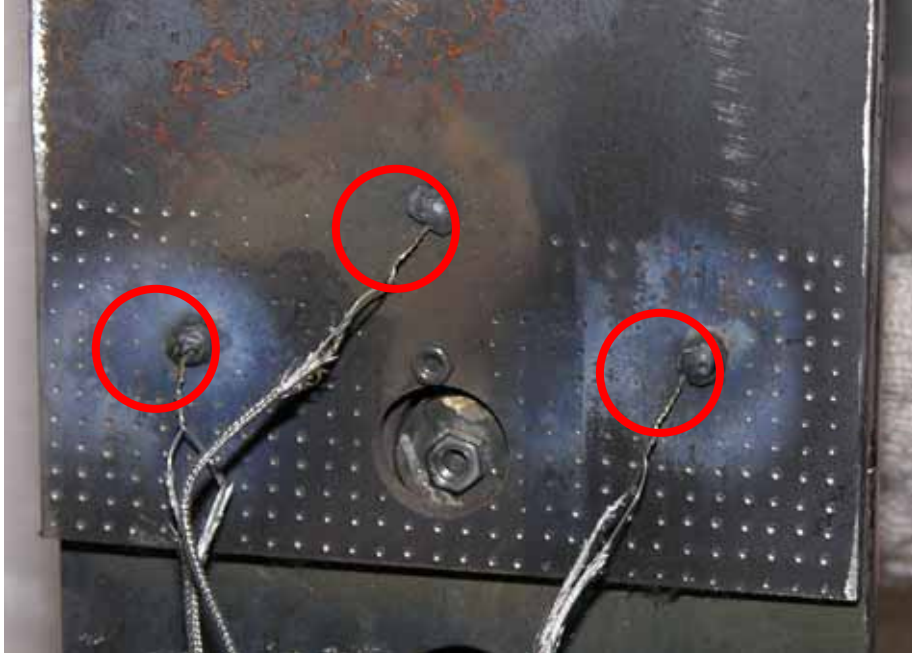
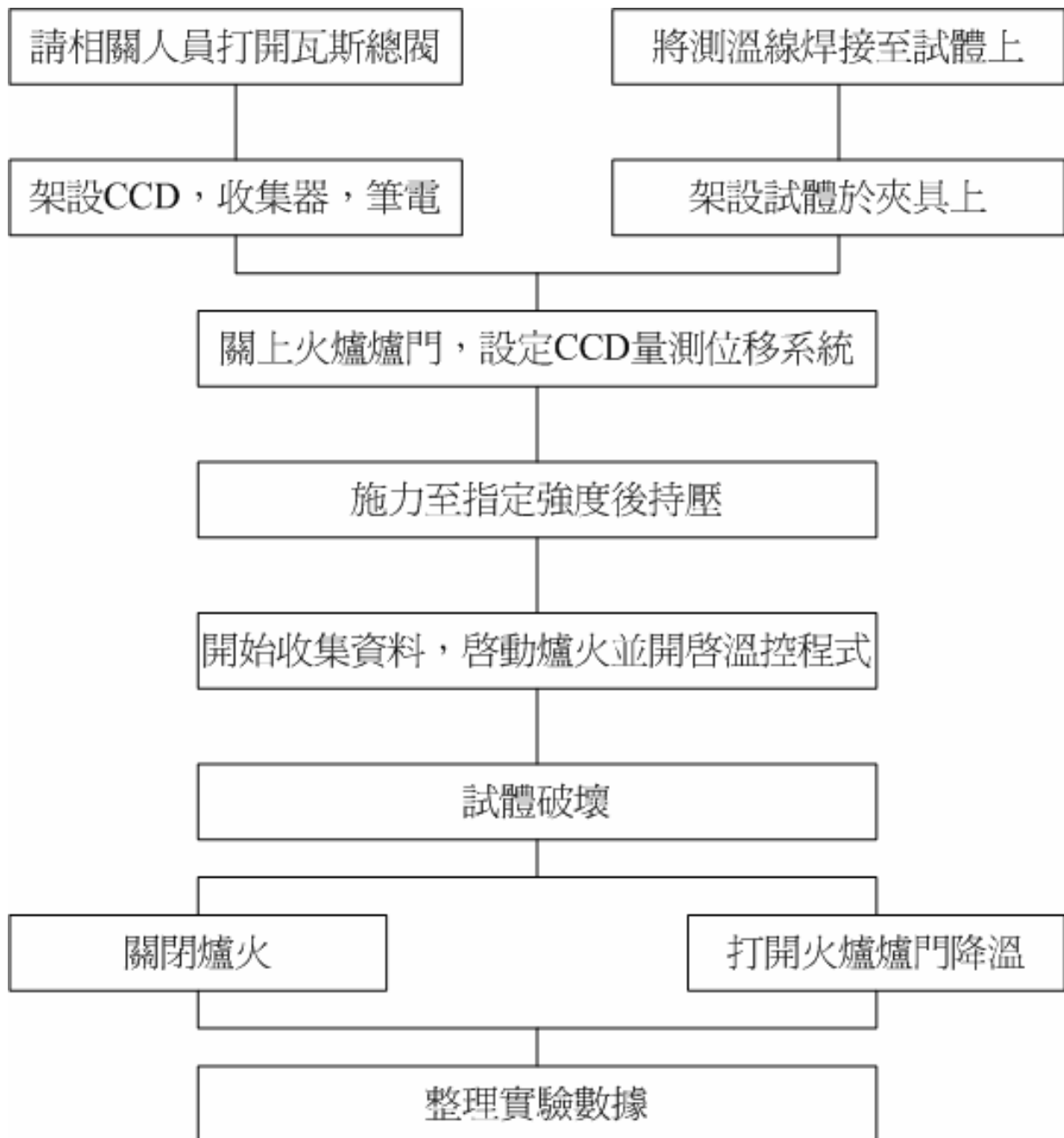


圖 4-22 定溫加載實驗流程圖



圖 4-23 定載加溫實驗流程圖



第五章試驗結果與比較

第一節鋼材高溫單軸拉伸試驗結果

本實驗鋼板試體所使用的材料為中鋼公司所提供之 SN490B 與 SN490C-FR 鋼材，同時，中鋼公司也為這批出廠的兩種鋼板提供了在各溫度下單軸拉伸試驗的應力與應變資料。經整理之後在以下小節討論。

SN490B 鋼材

中鋼公司所提供的 SN490B 鋼材在各溫度下單軸拉伸試驗的應力應變曲線圖請見圖 5-1。由圖中可以看出 SN490B 在超過 400°C 後強度的折減幅度變大。在 200°C 至 400°C 附近，因為藍脆現象，鋼材變得較脆，伸長率比室溫時為小，但降伏強度與抗拉強度並未因藍脆現象而有所升高，原因可能與所提供試體的製程有關，參照圖 3-2b 熱滾壓鋼材強度折減的統計數據，仍屬正常。在溫度超過 600°C，強度只剩下不到室溫強度的 1/3，愈高溫，降服強度與破壞強度的差距也愈來愈小，但伸長量愈來愈大，鋼材潛變(creep)的效應越來越明顯，在達到降服點之後馬上就到達破壞點。在結構設計上，這樣的現象是非常危險的。

SN490C-FR 耐火鋼材

中鋼公司所提供的 SN490C-FR 耐火級鋼材在各溫度下單軸拉伸試驗的應力應變曲線圖請見圖 5-2。吾人可以看出，鋼材強度在溫度 100°C 時較室溫強度略低，但在溫度 300°C 附近時，因為藍脆現象，鋼材強度較室溫強度略高，且伸長量變短，溫度再升高，過了 300°C 後，鋼材強度開始下降，伸長量變長，這種強度先略降(0-100°C)後略升(100-300°C)再下降的特性與圖 3-2a 展示的碳鋼高溫性質趨勢相同；SN490C-FR 耐火級鋼材在溫度高於 300°C 但未達 800°C 的高溫範圍，其強度折減的趨勢與量值，明顯與 SN490B 鋼材不同，由於耐火鋼內鉬、鈮、釩、鈦等耐高溫合金的作用，使得耐火鋼在高溫下強度折減的趨勢變緩且強度折減的量值也變少，當溫度升高至耐火鋼的設計溫度 600°C 時，鋼材高溫強度仍約能保有其室溫強度的 0.6 倍，就材料單軸拉伸試驗的結果來看，SN490C-FR 耐火鋼確實能達到材料強度耐火的特性。圖 5-3 為中鋼實驗室提供 SN490B 與 SN490C-FR 的抗拉強度比較，圖 5-4 為中鋼實驗室提供 SN490B 與 SN490C-FR 的抗拉強度正規折減比較。

第二節 SN490B 鋼板螺栓孔高溫承壓試驗結果

本實驗所使用的 SN490B 鋼板試體尺寸如圖 4-6 所示，所欲測試的是 SN490B 鋼板試體下方小螺栓孔(直徑 24 mm)在不同淨邊距(0.5d 與 1.0d)和不同溫度(室溫、300°C、500°C、700°C)下的支承強度。表 5-1 為實驗試體詳細的厚度、淨邊距、中心邊距、螺栓孔直徑、實驗溫度與螺栓孔能支承的極限承壓力，試體編號方式請參照 4.2 小節所述，透過 SN490B 鋼板試體的下方螺栓孔與固定具上插銷接合的單剪拉力實驗，吾人可用第 4 章所述之儀器量測並紀錄螺栓孔受力與變形的關係，圖 5-5 與圖 5-7 為 SN490B 鋼板試體實驗前的狀況，圖 5-6 與圖 5-8 為為 SN490B 鋼板試體單剪拉力實驗後的情形，以下小節將展示各種試驗的結果。

螺栓孔淨邊距 0.5d 之定溫加載試驗

本試驗所使用的鋼板試體其螺栓孔的淨邊距為 1 倍的螺栓直徑減掉 0.5 倍的螺栓孔直徑，簡稱為「淨邊距 0.5d」，所使用 SN490B 鋼板試體的編號開頭皆為「SN05」。由於此定溫加載試驗所預定達到的四個「定溫」溫度分別是室溫、300°C、500°C 與 700°C，但是，由於所使用瓦斯加熱爐溫控精度上的限制，以至於溫度並無法完全精準的控制，在預定溫度，各個實驗試體，實際所到達的溫度都在預定溫度附近(請見表 5-1 與圖 5-9)。由圖 5-9 展示的是在四個定溫下，螺栓孔受力與變形的關係圖(力：指的是由插銷傳來的單剪力，變形：指的是螺栓孔擴孔量)，螺栓孔各溫度的承壓強度指的是圖 5-9 中各力-位移曲線的力最大值；由圖可知，溫度 302°C 時，SN490B 鋼板試體因藍脆現象而變脆(見圖 5-10)，使得螺栓孔的承壓強度變得較室溫強度略高，螺栓孔變形能力與延展能力變得較室溫時為差，因而破壞時的擴孔量(10 mm)只有室溫時(15 mm)的 2/3，值得注意的是，在線彈性階段螺栓孔承壓的勁度在 302°C 時與室溫時相差無幾。溫度 509°C 時，SN490B 鋼板試體變軟，螺栓孔承壓能力變弱(強度為室溫的 0.73 倍)，延展性變佳(螺栓孔的變形量為室溫的 1.13 倍)，螺栓孔承壓的勁度較室溫時變小。溫度 703°C 時，螺栓孔承壓能力變得更低(強度僅為室溫的 0.2 倍)，勁度也變得更低，螺栓孔只需施拉不大的力量即被扯壞，但是由於鋼材變得更軟，且鋼材高溫的潛變效應更為明顯，螺栓孔的變形量可達到室溫的 1.7 倍之高。

圖 5-11 為 SN05 在不同溫度下破壞後的比較圖，其中左上為室溫、右上為 302.77°C、左下為 509°C、右下為 703.59°C。圖 5-12 為 SN10 在不同溫度下破壞後的比較圖，其中左上為室溫、右上為 328.18°C、左下為 507.13°C、右下為 727.14°C。照片中虛線框格部份為螺栓孔塑性變形的區域，其表面平滑、光亮，圖 5-9 中各曲線大部分的位移皆由此區域的變形所貢獻，而相片中緊接著虛線框格下方的部份破裂(fracture)區，其表面較為粗糙且破裂面不規則，此為圖 5-9 中各曲線線段的最後階段，由於破裂方式屬脆性破壞，故所佔曲線線段的比例極短。比較圖 5-11 和 5-12，可看出 SN05 和 SN10 試體在 300°C 左右的塑性區域最短，可見其藍脆現象使的鋼材變脆且延展性變差，而 700°C 左右的塑性區域相當的大，可見在高溫時 SN490B 鋼材已經變得相當軟且延展性很好。

螺栓孔淨邊距 1.0d 之定溫加載試驗

本試驗所使用的鋼板試體其螺栓孔的淨邊距為 1.5 倍的螺栓直徑減掉 0.5 倍的螺

栓孔直徑，簡稱為「淨邊距 $1.0d$ 」，所使用SN490B鋼板試體的編號開頭皆為「SN10」。SN10試體在各溫度(室溫、 328°C 、 507°C 、 727°C)的力-位移曲線圖(見圖 5-13)其強度折減趨勢、勁度變化、螺栓孔變形量均與SN05試體類似。室溫下SN10試體的抗拉強度為 11676.92 kgf ，SN05試體的抗拉強度為 7477.26 kgf ，SN10試體強度為SN05試體的 1.56 倍(見圖 5-10)，進一步觀察，SN05試體由螺栓孔中心至鋼板邊緣的距離(L_e)為 1.0 倍的螺栓直徑，而SN10試體由螺栓孔中心至鋼板邊緣的距離(L_e)為 1.5 倍的螺栓直徑，兩種試體 L_e 的比值為 1.5，與兩種試體強度的比值 1.56 相近，在其他溫度下，也有同樣的結果，可見螺栓孔邊距距離(L_e)與螺栓孔的承壓強度有正比的關係，增加螺栓孔邊距可提高螺栓孔的承壓強度。事實上，這個結果，正好驗證了AISC-LRFD第二版的螺栓孔承壓公式($R_n = L_e t F_u$)。

第三節SN490C-FR 耐火級鋼板螺栓孔高溫承壓試驗結果

圖 5-14 與圖 5-15 分別為FR05與FR10耐火級鋼板(SN490C-FR)試體實驗前的照片，圖 5-16 與圖 5-17 分別為FR05與FR10試體實驗後的照片。

螺栓孔淨邊距 $0.5d$ 之定溫加載試驗

由表 5-1 試驗的結果可以看出，所在四個設計溫度下，所有 SN490C-FR 耐火鋼 FR05 試體的螺栓孔極限承壓力，均比 SN490B 普通鋼 SN05 試體的螺栓孔極限承壓力為大，在設計溫度為室溫、 300°C 時，FR05 的螺栓孔極限承壓力約為 SN05 的 1.1 倍， 500°C 為 1.2 倍， 700°C 更升高為 1.6 倍，表示隨著溫度的升高，耐火鋼的折減趨勢較普通鋼為緩，因此能在一定高溫以下保有其應有的強度，故耐火鋼的使用可提高鋼板的支撐力，但比較圖 5-9 與 5-18 可知，FR05 耐火鋼試體在各溫度下的延展性均較 SN05 普通鋼試體略差。

螺栓孔淨邊距 $1.0d$ 之定溫加載試驗

SN490C-FR 邊距 $1.0d$ 的實驗結果見圖 5-19。FR10 大致的性質跟 FR05 沒有太大的差別，都有表現出耐火鋼的特性。邊距的加大也使的螺栓孔的極限承壓力變大。

第四節試驗結果比較

以下小節將：比較前面小節普通鋼與耐火鋼螺栓孔承壓實驗結果，比較實驗結果之高溫折減關係與各國規範的鋼材高溫折減公式，比較實驗值與各種螺栓孔承壓公式。

螺栓孔極限承壓力(P_{max})隨溫度變化之比較

圖 5-20 為四組試體在四種設計溫度下，螺栓孔極限承壓力的比較。此處所取的極限承壓力為插銷承壓鋼板試體之值，在力與位移的圖形中找出最大值整理而得。實線為耐火鋼(SN490C-FR)，由圖形中可以看出耐火鋼的螺栓孔極限承壓力皆大於普通鋼

(SN490B)，而在接近高溫時耐火鋼強度下降的程度也相對比較遲緩，這與中鋼所提供的材料性質相符。

螺栓孔極限變形量隨溫度的變化之實驗值比較

圖 5-21 為四組試體在四種設計溫度下，螺栓孔極限變形量的比較。此處所取之螺栓孔極限變形量為插銷與螺栓孔頂部之相對位移，在試體破壞點所取的位移值加以整理而得。四條曲線在 300°C 時皆有位移量變小的情形，如此印證了藍脆現象的特徵。溫度變高，鋼鐵材料變軟伸長量變大也符合中鋼所提供的材料特性。同樣的邊距之下，耐火鋼(SN490C-FR)的極限變形量皆比普通鋼(SN490B)來的小，可推斷耐火鋼較脆，而普通鋼的延展性較佳。

試驗結果與各規範之鋼材高溫折減比較

由於每一片試體的厚度與邊距不盡相同，為了讓實驗結果得以互相比較，將試體的厚度與淨邊距乘積的兩倍算出，即螺栓孔承壓時鋼板邊距所提供的總剪力面積 ($2tL_c$)，見圖 5-22。再將實驗所得的螺栓孔極限承壓力除此值 ($P_u/2tL_c$) 作為比較的依據，即螺栓孔邊距所受的極限剪應力。圖 5-23 為四組試體在四個不同的設計溫度下以室溫的極限剪應力做為基準值所得到的折減，由圖 5-23 可知，同材質的試體折減關係相近，邊距的影響相當有限，所以 SN05 組試體的折減關係與 SN10 組試體相近，FR05 組試體的折減關係則和 FR10 組試體相近。

圖 5-24、圖 5-25、圖 5-26 與圖 5-27 分別為 SN05、SN10、FR05 與 FR10 等各組試體高溫強度折減關係與各種規範提供的高溫強度折減公式作比較的結果。為了比較出哪一個規範所提供的折減最接近實驗所得到的折減，將每組個試體所得到的高溫強度實驗值折減與其相對應溫度的規範高溫強度折減公式做誤差的均方根處理，所得到的結果參考附錄一。其中誤差總均方根是 16 組實驗值折減與該規範折減所得到的值。各比較值中，中鋼實驗室的誤差總均方根為 0.046，Eurocodes 3&4 (1992) 的誤差總均方根為 0.054，BS 5950: Part 8 (1987) 的誤差總均方根為 0.056，新日本製鐵(1995)的誤差總均方根為 0.062，方朝俊(2000)的誤差總均方根為 0.164，AS 4100 & NZS 3404 的誤差總均方根為 0.185。比較實驗值折減與規範折減的誤差均方根可以發現，中鋼實驗室的誤差總均方根 0.046 最小，所以其所提供的高溫強度折減關係為最佳，此點並不令人意外，因為中鋼實驗室所提供的高溫強度折減關係為直接由鋼材的高溫拉伸實驗而得，由此之後的小節，在對規範中螺栓孔承壓公式的討論中所使用的折減將選擇中鋼實驗室所提供的高溫強度折減作為依據。

但是，藉由材料實驗室來獲得所使用鋼材的高溫強度折減關係是非常昂貴的，因此，利用規範的高溫強度折減公式仍是最簡便且最經濟的；以下將由圖 5-24、圖 5-25、圖 5-26 與圖 5-27 來檢視各規範的高溫強度折減公式對本螺栓孔承壓實驗結果的適用性。

由圖 5-24 可看出，對 SN05 組 (即 SN490B 鋼材、邊距 0.5d) 試體而言，歐洲規範 (Eurocode 3&4) 與英國規範 (BS 5950 Part 8) 的強度折減公式在室溫至 350°C 時，均保守低於實驗值曲線，在 350°C 至 500°C 時，折減公式微高於實驗值曲線，將略高估試體的強度值，在 500°C 至 700°C 時，折減公式與實驗值曲線幾乎重合。澳洲規範 (AS4100)

與紐西蘭規範(NZS3404)的強度折減公式在室溫至 650°C 時均低於實驗值曲線，但在 210°C 至 500°C 時，折減公式值遠低於實驗值曲線，過於保守，在 650°C 時與實驗值曲線相交，溫度高於 650°C 時，折減公式值將高於實驗值曲線，將高估試體的強度值；因此，綜合而言，歐洲規範與英國規範的折減公式較適合 SN05 組的試體，雖然在 350°C 至 500°C 時，折減公式將微略高估試體的強度值。

由圖 5-17 可看出，對 SN10 組(即 SN490B 鋼材、邊距 1.0d) 試體而言，歐洲規範(Eurocode 3&4)與英國規範(BS 5950 Part 8)的強度折減公式在室溫至 325°C 時，均保守低於實驗值曲線，在 325°C 至 600°C 時，折減公式高於實驗值曲線，將高估試體的強度值，在 600°C 至 700°C 時，折減公式與實驗值曲線幾乎重合。澳洲規範(AS4100)與紐西蘭規範(NZS3404)的強度折減公式在室溫至 600°C 時均低於實驗值曲線，但在 210°C 至 500°C 時，折減公式值遠低於實驗值曲線，過於保守，在 600°C 時與實驗值曲線相交，溫度高於 600°C 時，折減公式值將高於實驗值曲線，將高估試體的強度值；因此，綜合而言，歐洲規範與英國規範的折減公式較適合 SN10 組的試體與 SN05 組相同。

由圖 5-18 可看出，對 FR05 組(即 SN490C-FR 鋼材、邊距 0.5d) 試體而言，歐洲規範(Eurocode 3&4)與英國規範(BS 5950 Part 8)的強度折減公式在室溫至 350°C 時，均保守低於實驗值曲線，在 400°C 至 500°C 之間，折減公式與實驗值曲線幾乎重合。在 500°C 至 700°C 時，折減公式低於實驗值曲線，呈現保守的預測。澳洲規範(AS4100)與紐西蘭規範(NZS3404)的強度折減公式在室溫至 700°C 時均低於實驗值曲線，但在 200°C 至 600°C 時，折減公式值遠低於實驗值曲線，過於保守，在 700°C 時與實驗值曲線相交；因此，綜合而言，歐洲規範與英國規範的折減公式較適合 FR05 組的試體，雖然可能會過於保守。

由圖 5-19 可看出，對 FR10 組(即 SN490C-FR 鋼材、邊距 1.0d) 試體而言，歐洲規範(Eurocode 3&4)與英國規範(BS 5950 Part 8)的強度折減公式在室溫至 350°C 時，均保守低於實驗值曲線，在 350°C 至 450°C 時，折減公式微高於實驗值曲線，將略高估試體的強度值，在 400°C 至 700°C 時，折減公式高於實驗值曲線，將呈現保守的預測。澳洲規範(AS4100)與紐西蘭規範(NZS3404)的強度折減公式在室溫至 700°C 時均低於實驗值曲線，但在 210°C 至 600°C 時，折減公式值遠低於實驗值曲線，過於保守，在 700°C 時與實驗值曲線相交；因此，綜合而言，歐洲規範與英國規範的折減公式較適合 FR10 組的試體，雖然在 350°C 至 450°C 時，折減公式將微略高估試體的強度值。

試驗結果與各規範之公式比較

與實驗結果比較的規範一共有四個，分別為 AISC-LRFD 第三版(2001)、AISC-LRFD 第二版(1993)、Eurocode3 (1992)與 Kulak (1987)。以下分為四組實驗數據與將材料尺寸帶入規範公式所得到的值做比較。圖 5-28、圖 5-29、圖 5-30 與圖 5-31 分別為 SN05、SN10、FR05 與 FR10 的實驗抗拉強度與規範作比較，其中對應不同的溫度所使用的折減為中鋼公司所提供的折減。由圖中可以看出 AISC-LRFD 第二版(1993)所提供的公式($R_n = L_e t F_u$)最接近實驗值，其原因推測為受剪力的面積不同所導致。故之後與螺栓強度的比較將使用的公式選擇 AISC-LRFD 第二版(1993)所提供的公式。

邊距 1.5in. 與邊距 1.5d 之強度預測

用 5.4.1 與 5.4.2 此兩小節得到的折減與公式($R_n = L_e t F_u$)來預測 SN490B 與 SN490C-FR 兩種鋼板在厚度為 6 公釐，邊距分別為 0.5d、1.0d、1.5in. 與 1.5d，在溫度為室溫、300°C、500°C 與 700°C 時的結果，使用的材料規格與溫度皆為設計值。表 5-2 為四種邊距代表的距離，乃是由螺栓孔中心到鋼板邊緣的距離。圖 5-32 為 SN490B 四種邊距在不同溫度下的比較。圖 5-33 為 SN490C-FR 四種邊距的比較圖。由此方法可作為之後設計的依據。

A325 與 A490 螺栓與鋼板承壓強度比較

Yu (2006) 提供了 A325 與 A490 在各溫度的折減資料，Yu (2006) 使用直徑 7/8 in. 的兩種螺栓做單剪實驗。所得到的實驗數據與 5.4.5 小節中對各邊距與各溫度的螺栓孔承壓力的預測做比較。圖 5-34 為螺栓(A325, A490)跟普通鋼(SN490B)在各溫度的比較。由圖中可以看出 A325 螺栓的折減相當的快速，對普通鋼而言，超過 450°C 之後已經無法提供足夠的強度，在鋼板毀壞之前先被剪斷。當邊距為 1.5d(SN15)時無論是哪一種螺栓，都會在鋼板毀壞之前被剪斷。所以在設計上，鋼板之邊距設計超過 1.5d 時，則需要增加螺栓數以增加螺栓的強度。

圖 5-35 為螺栓(A325, A490)跟耐火鋼(SN490C-FR)在各溫度的比較。耐火鋼在高溫時的折減跟兩種螺栓(A325, A490)比較起來緩慢的許多，超過 500°C 之後邊距大於 1.0d 的耐火鋼板強度已經大於這兩種螺栓強度。而 A325 螺栓在超過 400°C 之後，強度已經低於任何一種邊距的耐火鋼板。

圖 5-36、圖 5-37、圖 5-38 與圖 5-39 分別為室溫、300°C、500°C 與 700°C 時普通鋼(SN490B)與耐火鋼(SN490C-FR)跟 A325 螺栓與 A490 螺栓的比較圖。其中*點值為實驗值將本身厚度正規化成 6mm 之後依據本身的邊距所呈現的資料，*點值旁邊為實驗時之真實溫度，此正規化實驗值跟公式值之比較在室溫、300°C 與 500°C 時大多在公式值之上方，呈現比較保守的情況，而在 700°C 時 SN10 與 FR10 的正規化實驗值在公式值之下方，可見公式值被高估了，有可能是因為正規化實驗值的溫度皆大於 700°C 的因素。

6mm 厚的 SN490C-FR 耐火級鋼板與 SN490B 鋼材跟 7/8in. (22.2mm) A325 螺栓單剪接合，依照 AISC-LRFD 規範的規定，1.5 英吋(38.1mm)的最小螺栓孔邊距(L_e)，均足以避免螺栓孔承壓破壞。6mm 厚的 SN490C-FR 耐火級鋼板與 7/8in. (22.2mm) A490 螺栓單剪接合，其避免螺栓孔承壓破壞的最小邊距將介於邊距 1.5 英吋($L_e=38.1mm$)與淨邊距 1.5d($L_e=44.4mm$)之間，詳細尺寸還需進一步分析，此最小邊距將小於 SN490B 鋼材的最小邊距(1.5d 淨邊距)，顯示出耐火鋼的高溫特性。隨著溫度的上升 A325 螺栓能適用的範圍愈來愈窄，到了 500°C 時 A325 螺栓的強度已經低於邊距為 0.5d 的兩種鋼板。A490 螺栓的適用範圍比 A325 螺栓的適用範圍大了很多。以規範中規定的最小邊距 1.5in 來看，7/8in. (22.2mm) A490 螺栓與鋼板做單剪接合中，在 500°C 之前的強度皆大於邊距 1.5in (22.2mm) 的兩種鋼板，但超過了 500°C 耐火鋼(SN490C-FR)的強度便大於了 A490 螺栓的強度。若對普通鋼(SN490B)而言，邊距 1.5in (22.2mm) 的鋼板螺栓孔承壓力在每一種溫度下都比 7/8in. (22.2mm) A490 螺栓的單剪強度來的低，設計上螺栓孔承壓力控制因素。

比較普通鋼(SN490B)與耐火鋼(SN490C-FR)的強度，圖形中耐火鋼曲線幾乎都在普

通鋼的上方，可見耐火鋼的強度比普通鋼來的強。可推斷耐火鋼在高溫的性質比普通鋼來的好，可作為設計上的考量。

SN490B 定載加溫比較

圖 5-40 為SN05 的定載 2103kgf加溫試驗，將試體實際的尺寸帶入LRFD第三版(2001) 螺栓孔承壓力的公式($R_n = 1.2L_c t F_u$)的結果 4206kgf，由於ASD規範所使用的安全係數為 0.5，故將計算結果乘以安全係數 0.5 得到 2103kgf，將此設定為SN05 定載加溫實驗的施力。將 2103kgf與實驗結果內插得到約 671°C 試體會毀壞。試驗的結果大約是在 690 °C 時開始破壞，與預測的 671°C 有點誤差，誤差的因素有可能是SN05 試體在 500°C 與 700 °C 的實驗結果只有一組，如果多幾組應該會更接近結果。

圖 5-41 為SN10 的定載 4599kgf加溫試驗，將試體實際的尺寸帶入LRFD第三版(2001) 螺栓孔承壓力的公式($R_n = 1.2L_c t F_u$)的結果 9198kgf，再乘以安全係數 0.5 得到 4599kgf，將此設定為SN05 定載加溫實驗的施力。將 4599kgf與實驗結果內插得到約 628°C 試體會毀壞。試驗的結果大約是在 670°C 時開始破壞，與預測的 628°C 有誤差，誤差的因素有可能跟SN05 試體的誤差類似。

表 5-1 螺栓孔試體實驗資料

試體編號	實驗溫度 (°C)	厚度(t) (mm)	淨邊距(L_c) (mm)	螺栓孔直徑 (mm)	中心邊距(L_e) (mm)	極限承壓力(P_u) (kgf)
SN05-t06-T020	20.00	6.54	10.39	24.00	22.39	7477.26
SN05-t06-T300	302.77	6.45	10.08	23.95	22.06	7717.05
SN05-t06-T500	509.00	6.45	10.58	23.85	22.51	5541.83
SN05-t06-T700	703.59	6.27	10.50	24.40	22.70	1423.06
SN10-t06-T020	30.00	6.45	21.31	23.85	33.24	11676.92
SN10-t06-T300	328.18	6.39	21.92	24.00	33.92	12266.78
SN10-t06-T500	507.13	6.34	22.67	24.00	34.67	8169.60
SN10-t06-T700	727.14	6.33	21.90	23.87	33.84	1694.91
FR05-t06-T020	20.00	6.38	10.43	24.00	22.43	8001.04
FR05-t06-T300	300.31	6.23	10.05	24.20	22.15	8162.62
FR05-t06-T500	494.22	6.58	10.08	24.00	22.08	6457.59
FR05-t06-T700	706.50	6.33	10.33	24.40	22.53	2284.56
FR10-t06-T020	20.00	6.45	21.48	24.00	33.48	12700.38
FR10-t06-T300	305.26	6.35	21.25	23.97	33.24	13053.24
FR10-t06-T500	536.62	6.36	21.20	24.00	33.20	9145.25
FR10-t06-T700	716.17	6.30	21.95	23.97	33.94	3136.51

表 5-2 四種邊距由孔中心到邊緣的距離

試體編號	孔中心距邊緣(L_e) (mm)
SN05, FR05	22.2
SN10, FR10	33.3
SN15in, SN15in	38.1
SN15, FR15	44.4

圖 5-1 SN490B 鋼材各溫度應力與應變圖(中鋼實驗室提供)

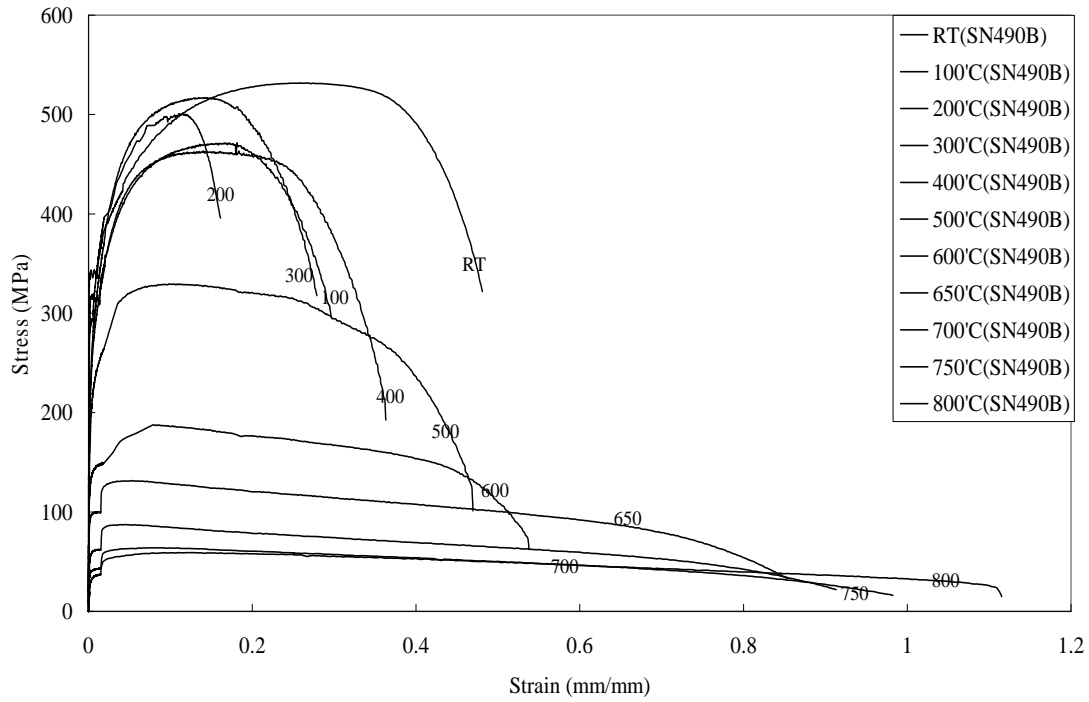


圖 5-2 SN490C-FR 耐火鋼各溫度應力與應變圖(中鋼實驗室提供)

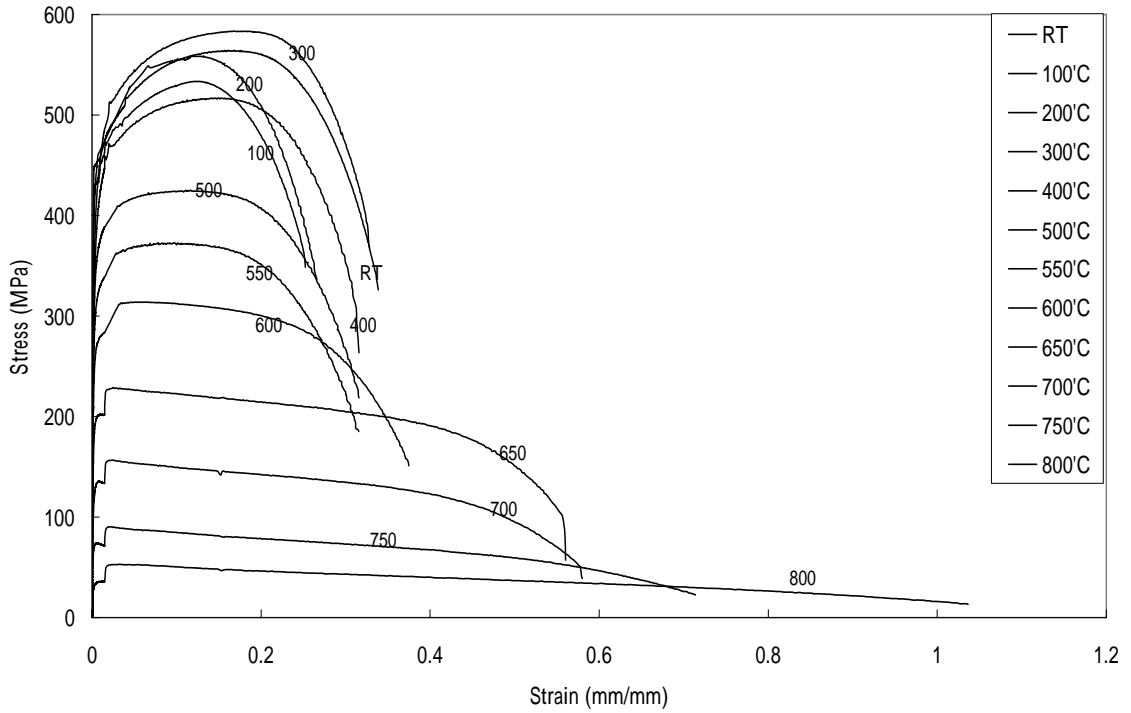


圖 5-3 中鋼實驗室提供 SN490B 與 SN490C-FR 的抗拉強度比較

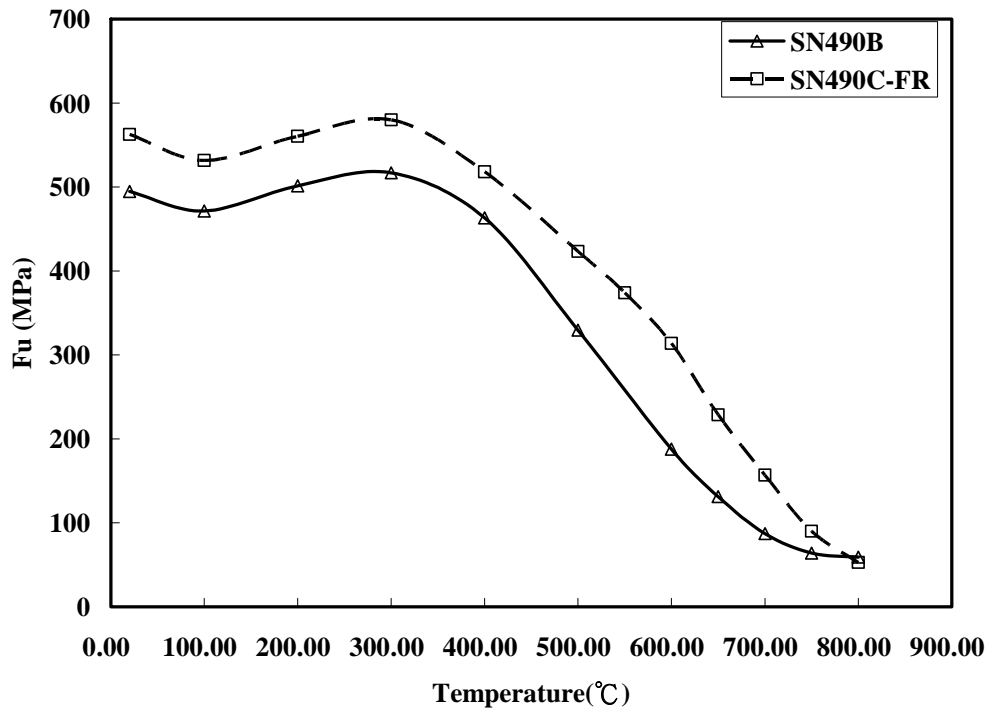


圖 5-4 中鋼實驗室提供 SN490B 與 SN490C-FR 的抗拉強度正規折減

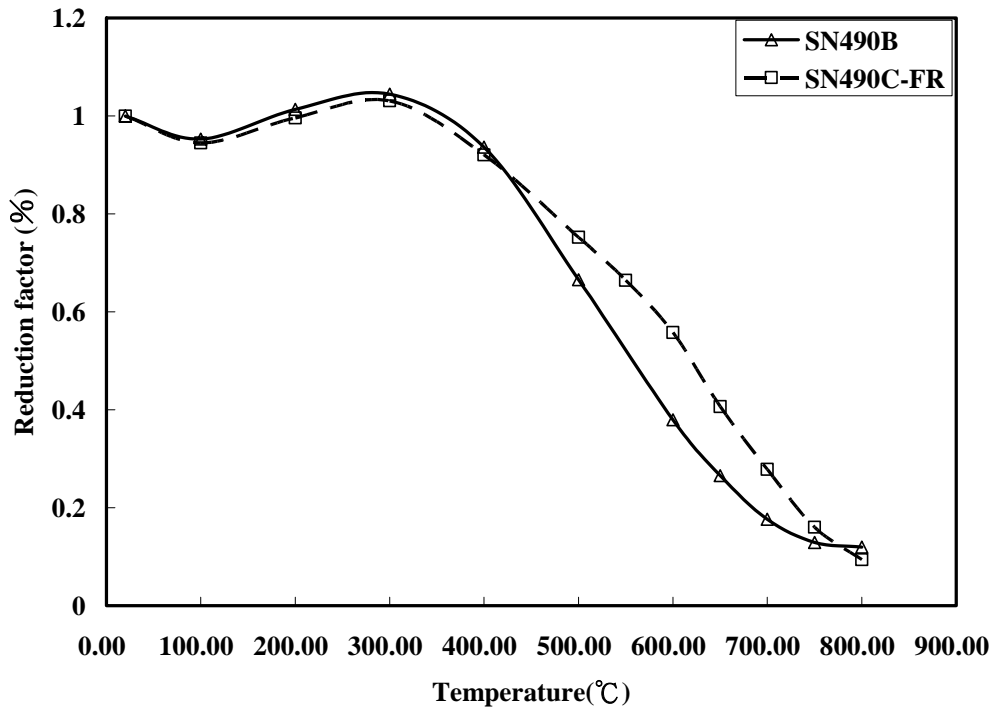


圖 5-5 室溫下邊距 0.5d 之 SN490B 鋼板試體(實驗前)

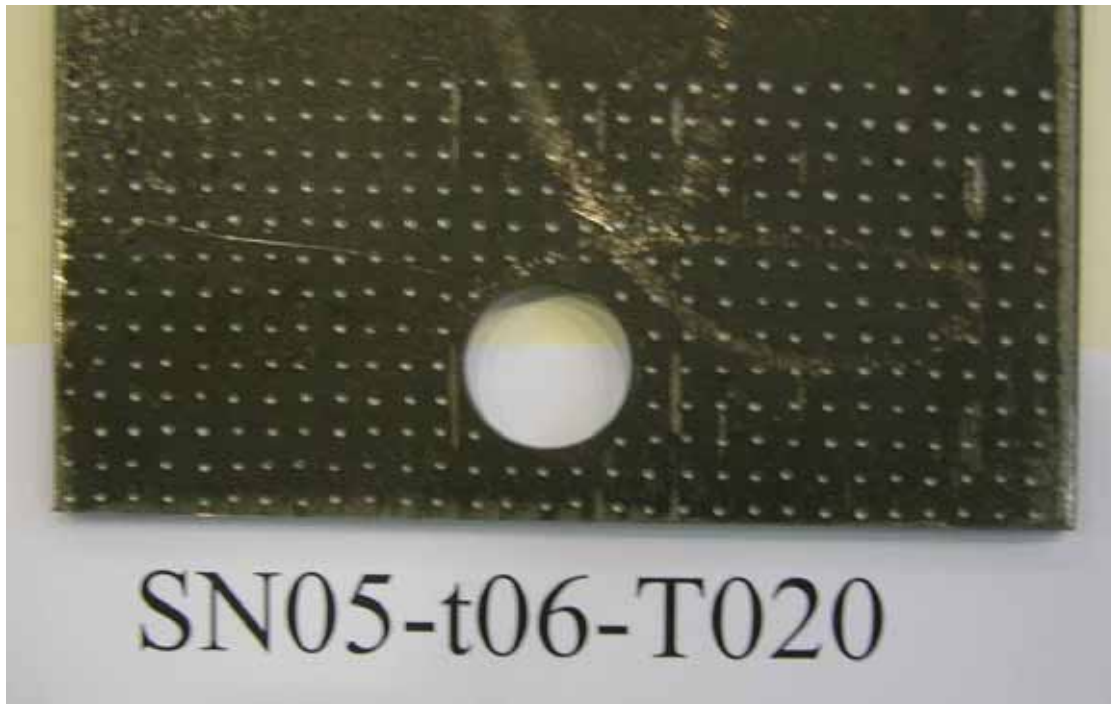


圖 5-6 室溫下邊距 0.5d 之 SN490B 鋼板試體(實驗後)



圖 5-7 設計溫度 528°C，邊距 1.0d 之 SN490B 鋼板試體(實驗前)

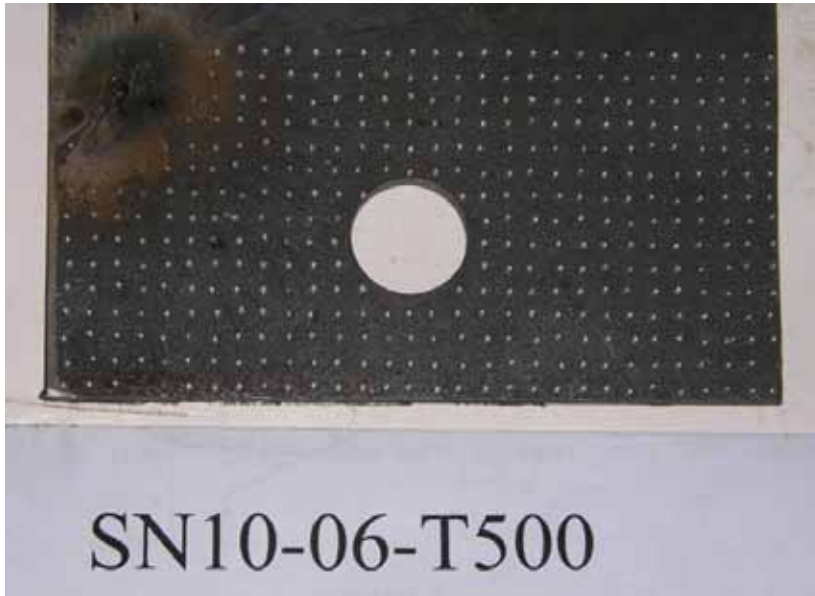


圖 5-8 設計溫度 528°C，邊距 1.0d 之 SN490B 鋼板試體(實驗後)



圖 5-9 設計溫度下 SN05 組試體(邊距 0.5d)螺栓孔承壓力與變形圖

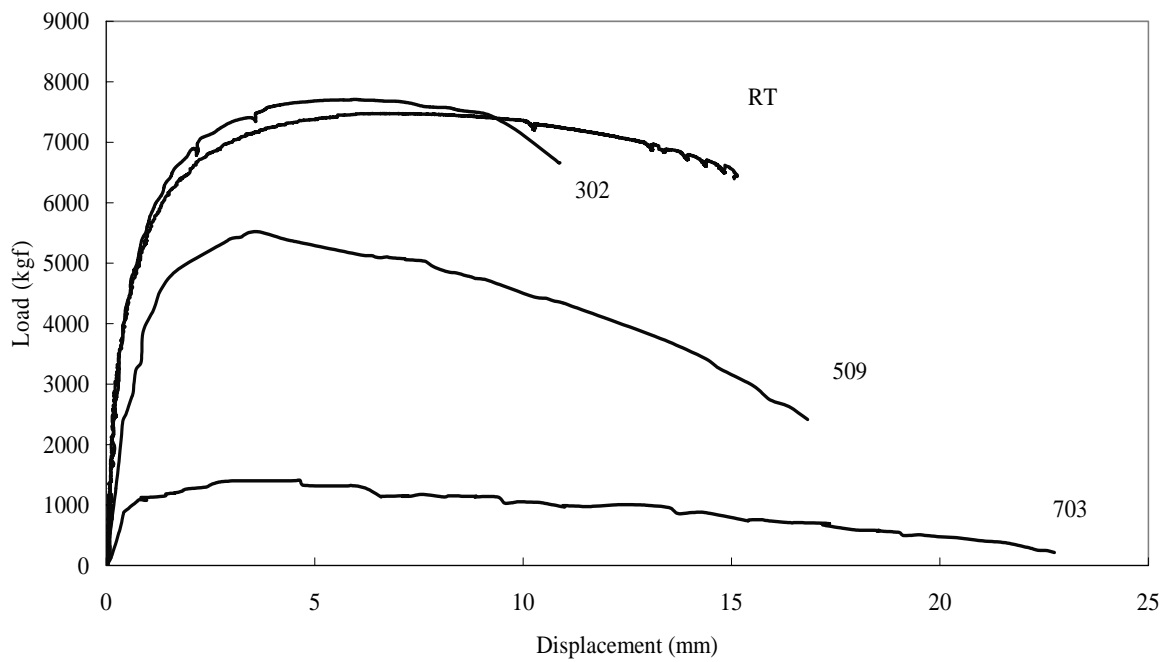


圖 5-10 藍脆現象



圖 5-11 SN05 試體室溫下實驗後照片



圖 5-12 SN10 試體 328°C 下實驗後照片

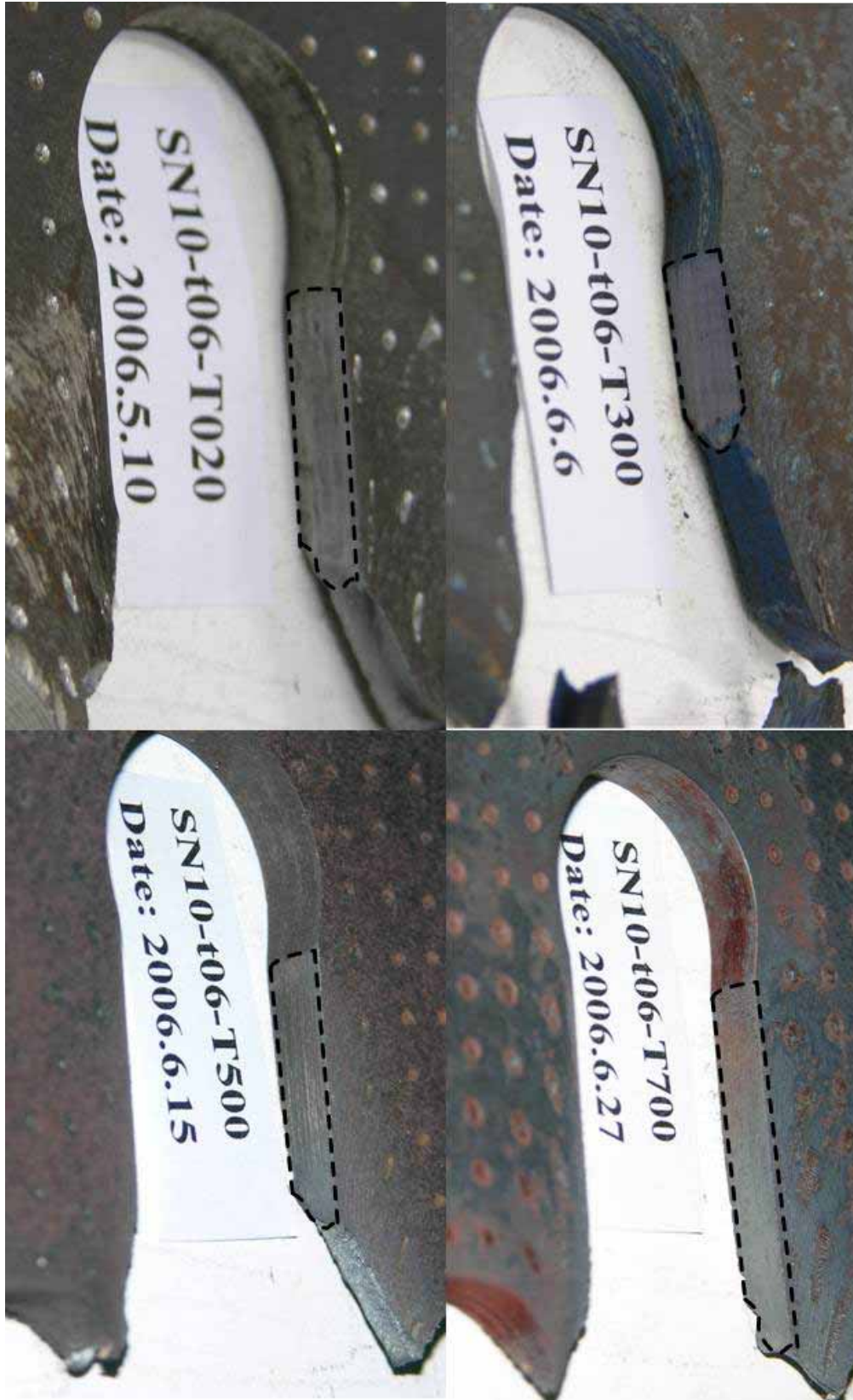


圖 5-13 設計溫度下 SN10 組試體(邊距 1.5d)螺栓孔承壓力與變形圖

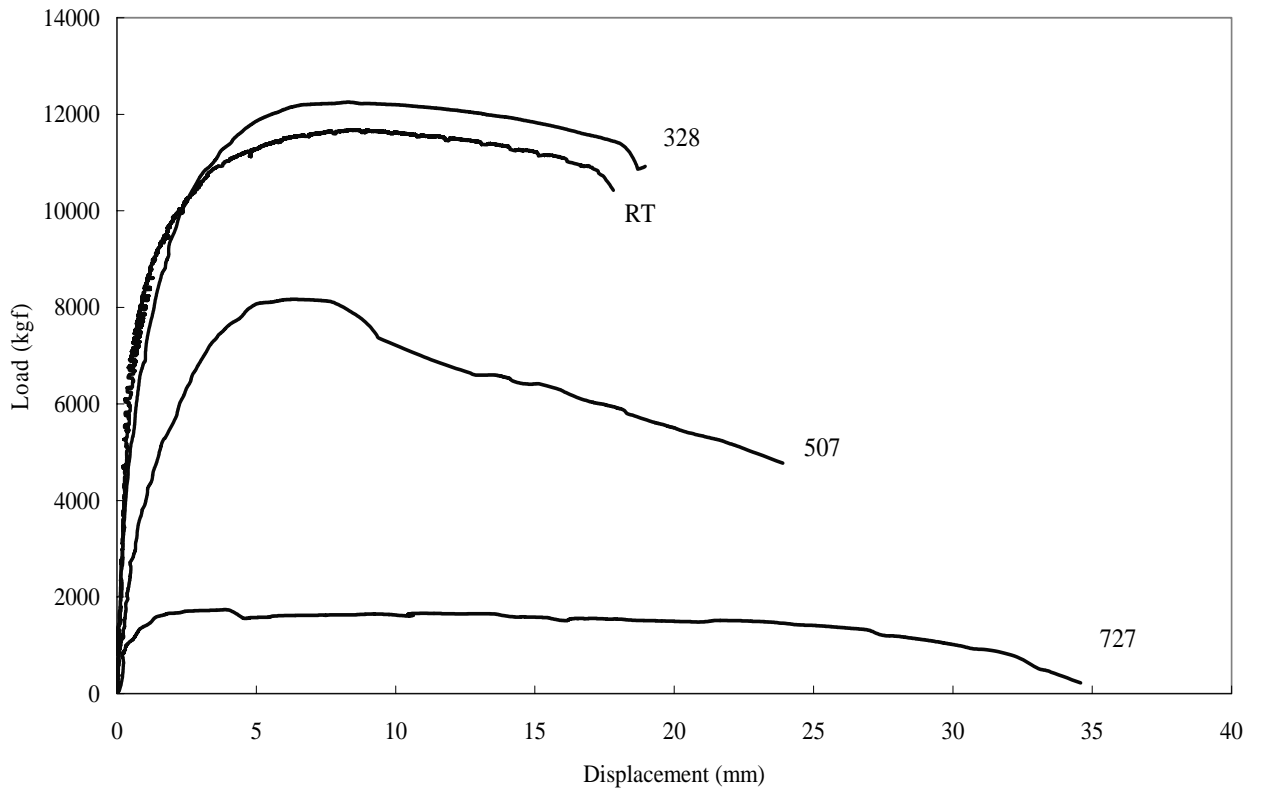


圖 5-14 室溫下邊距 0.5d 之 SN490C-FR 鋼板試體(實驗前)

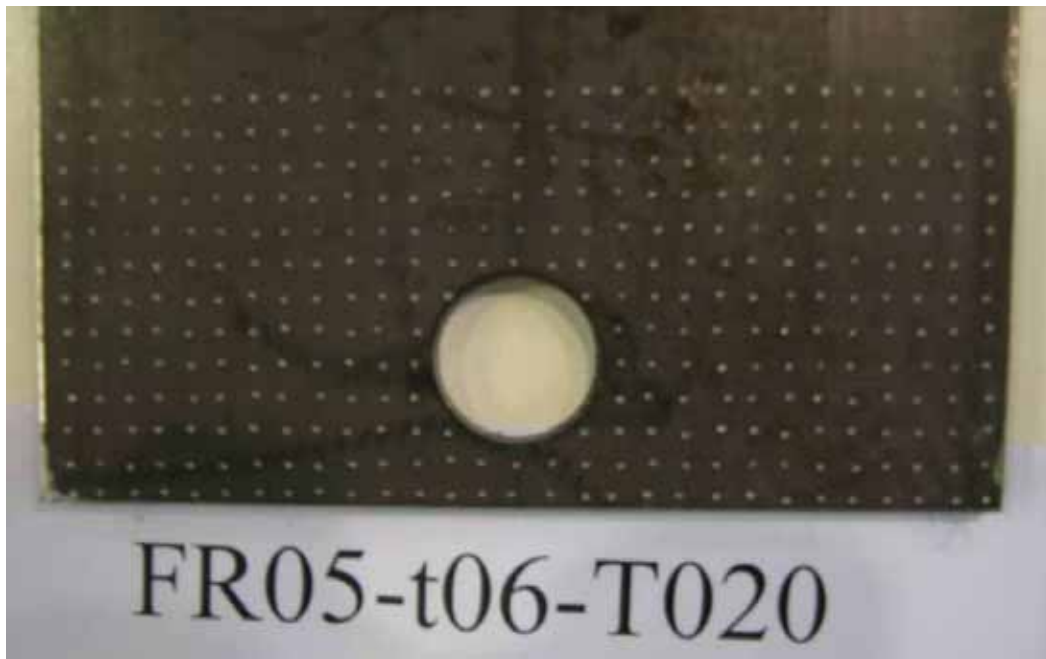


圖 5-15 室溫下邊距 0.5d 之 SN490C-FR 鋼板試體(實驗後)



圖 5-16 設計溫度 706°C，邊距 0.5d 之 SN490C-FR 鋼板試體(實驗前)



圖 5-17 設計溫度 706°C，邊距 0.5d 之 SN490C-FR 鋼板試體(實驗後)



圖 5-18 設計溫度下 FR05 組試體(邊距 0.5d)螺栓孔承壓力與變形圖

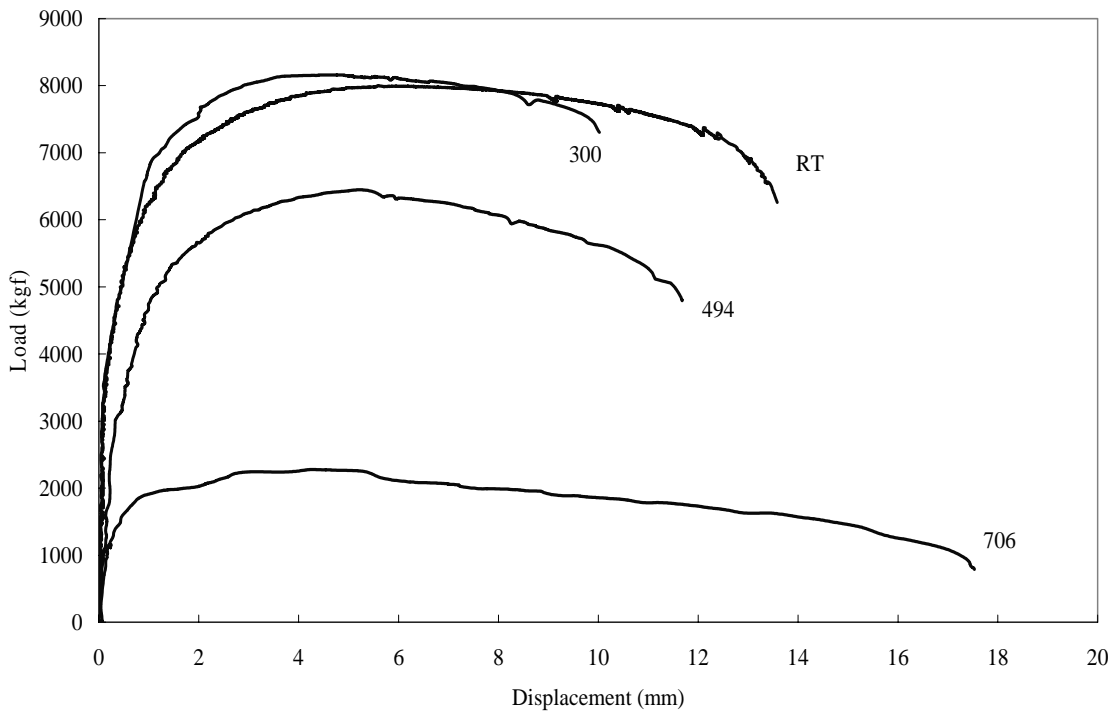


圖 5-19 設計溫度下 FR10 組試體(邊距 1.0d)螺栓孔承壓力與變形圖

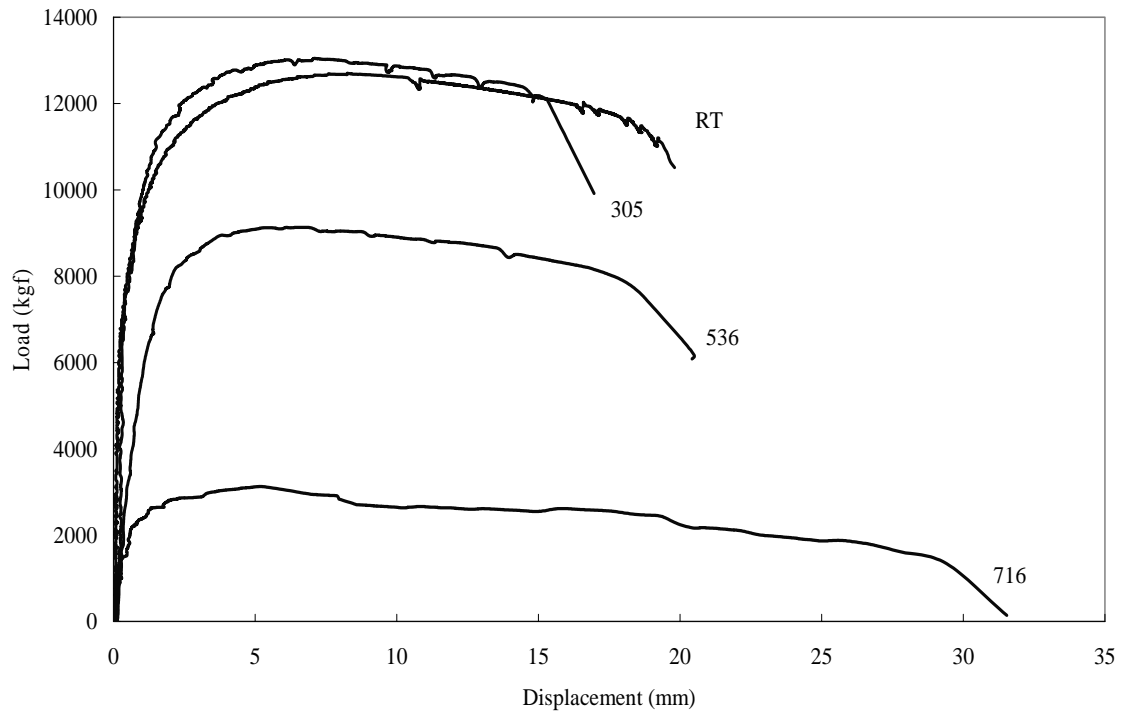


圖 五-20 鋼板承壓面積

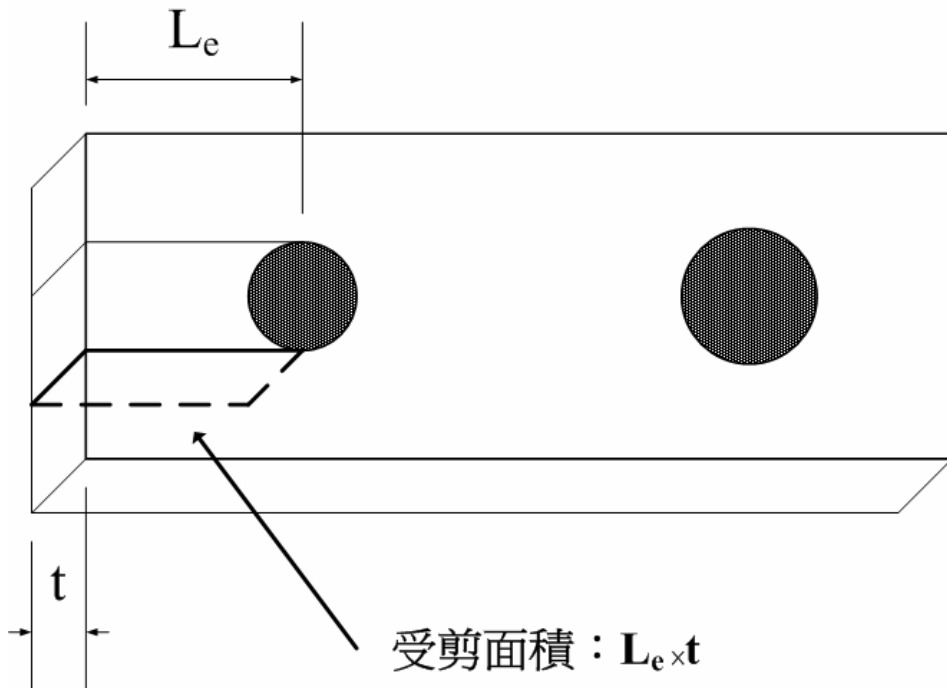


圖 5-21 四組試體螺栓孔極限承壓力比較

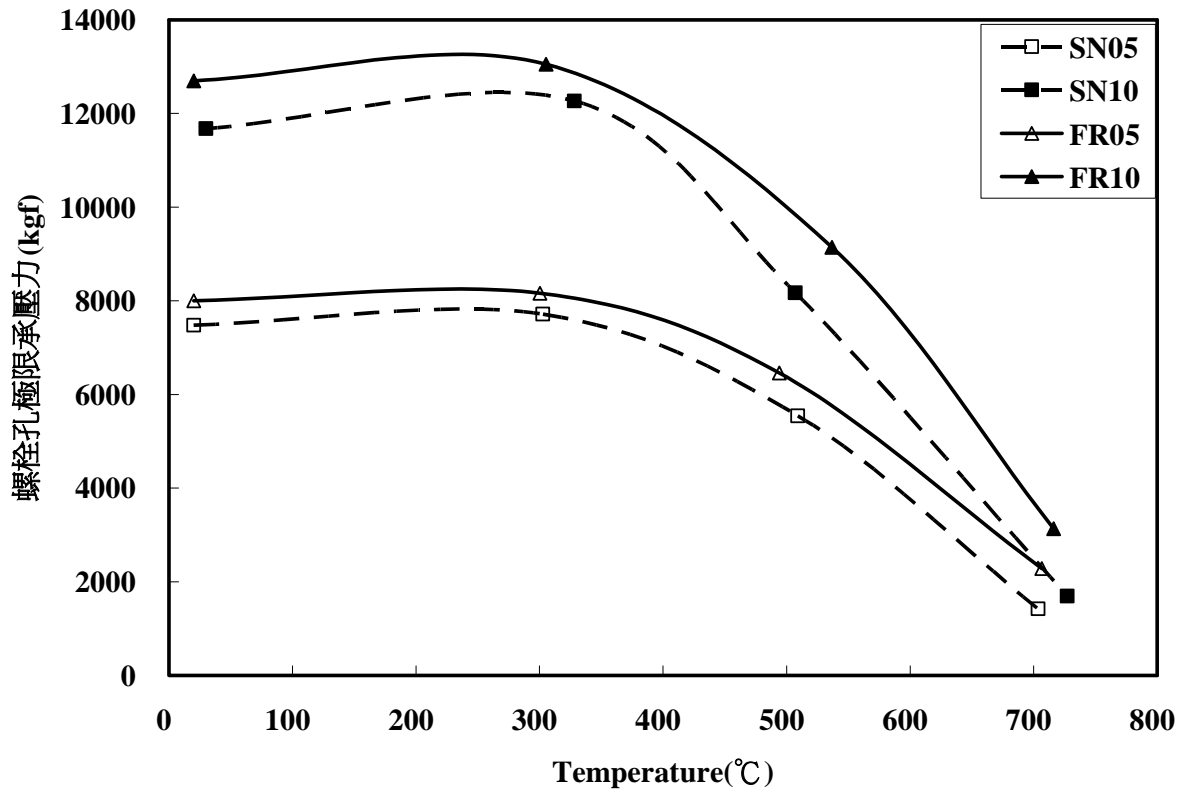


圖 5-22 四組試體螺栓孔極限變形量比較

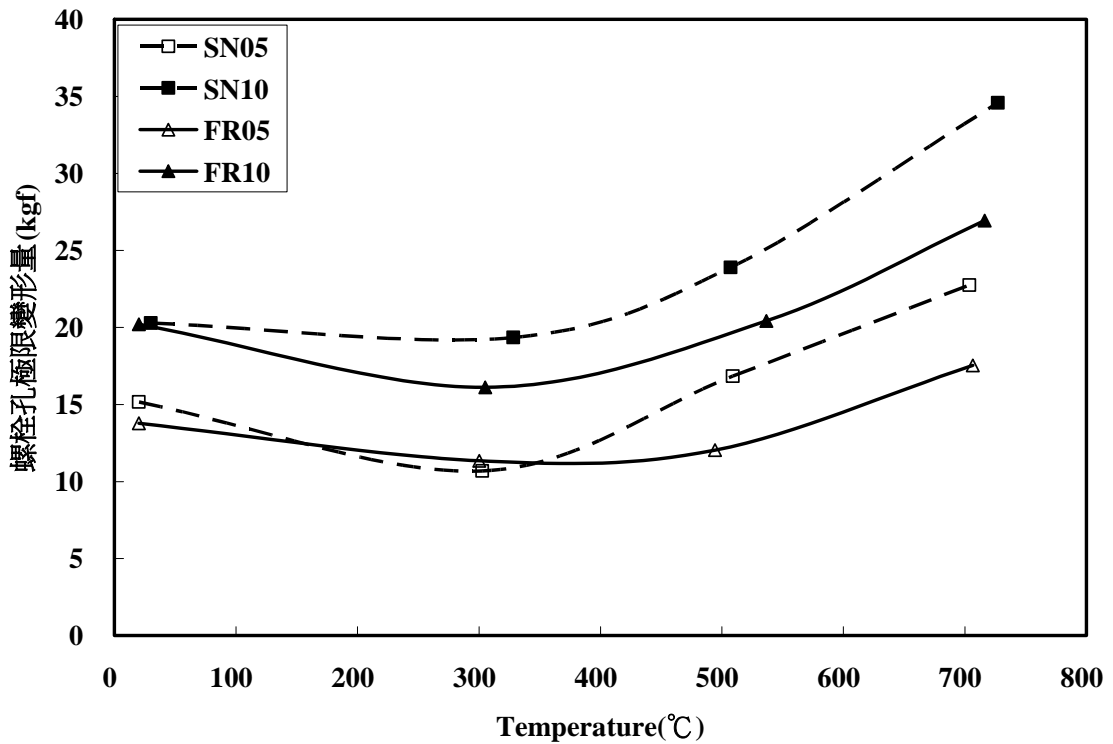


圖 5-23 四組試體的溫度折減比較

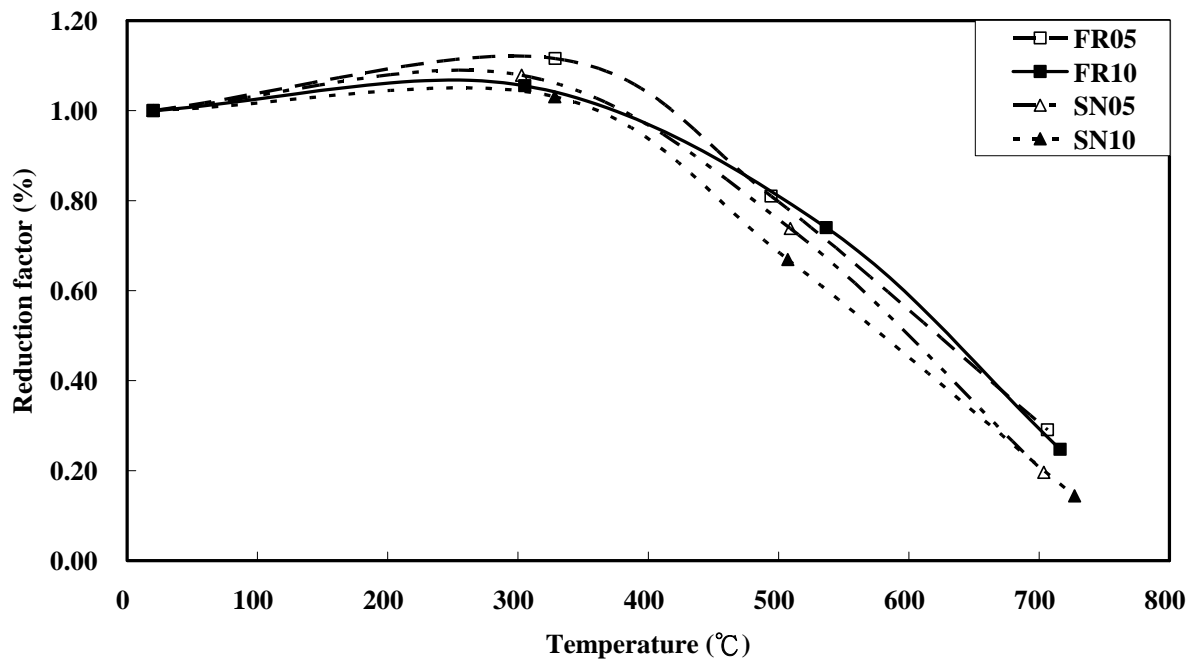


圖 5-24 SN05 組試體折減關係與各規範折減公式比較

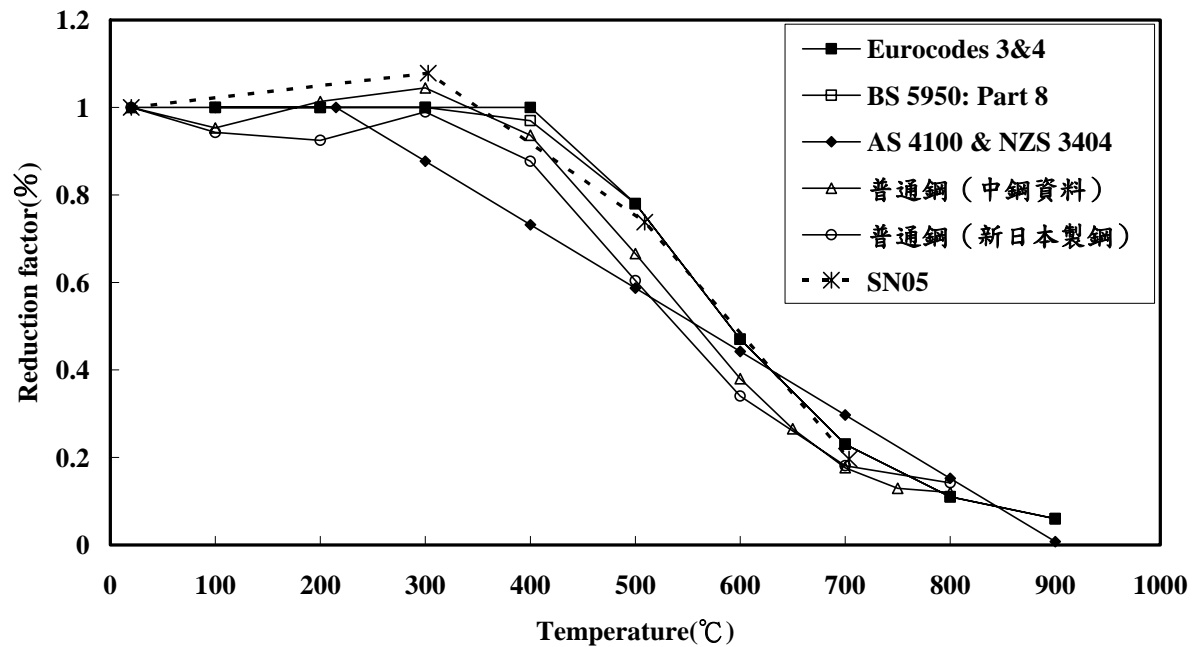


圖 5-25 SN10 組試體折減關係與各規範折減公式比較

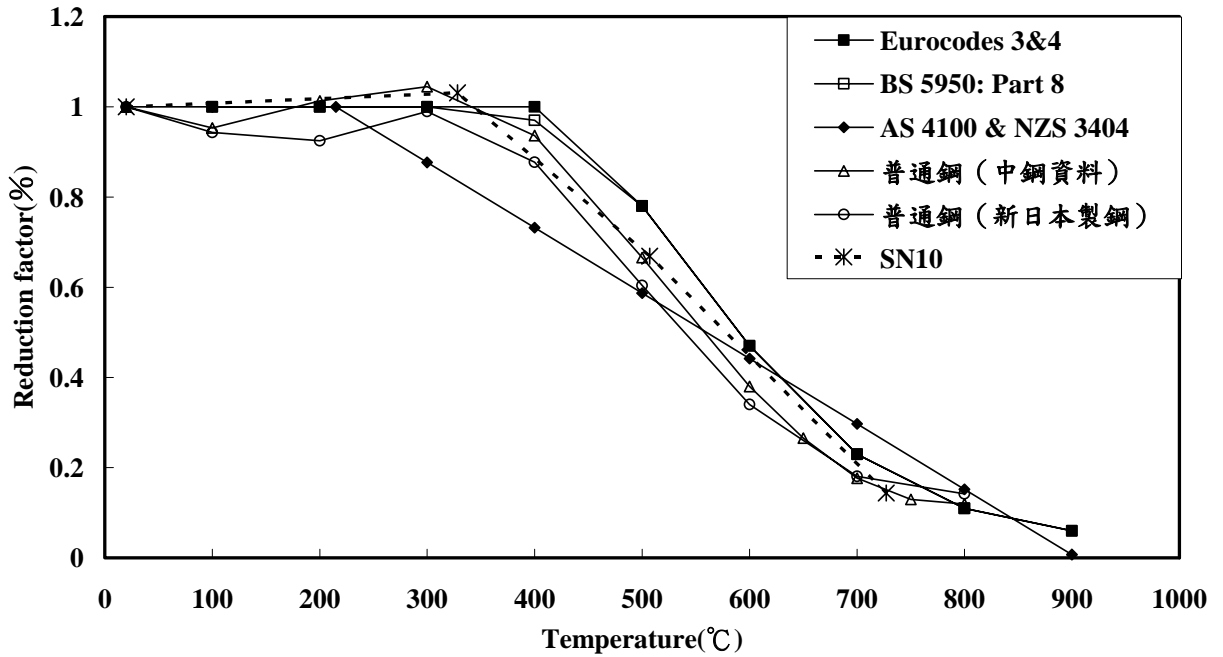


圖 5-26 FR05 組試體折減關係與各規範折減公式比較

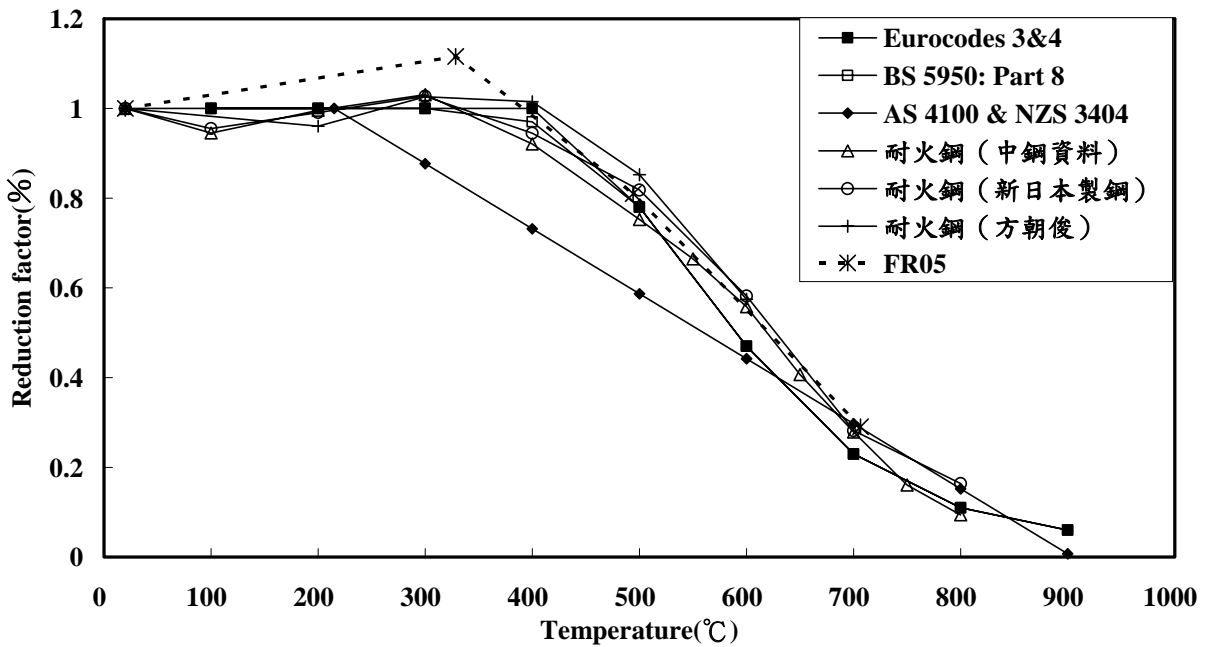


圖 5-27 FR10 組試體折減關係與各規範折減公式比較

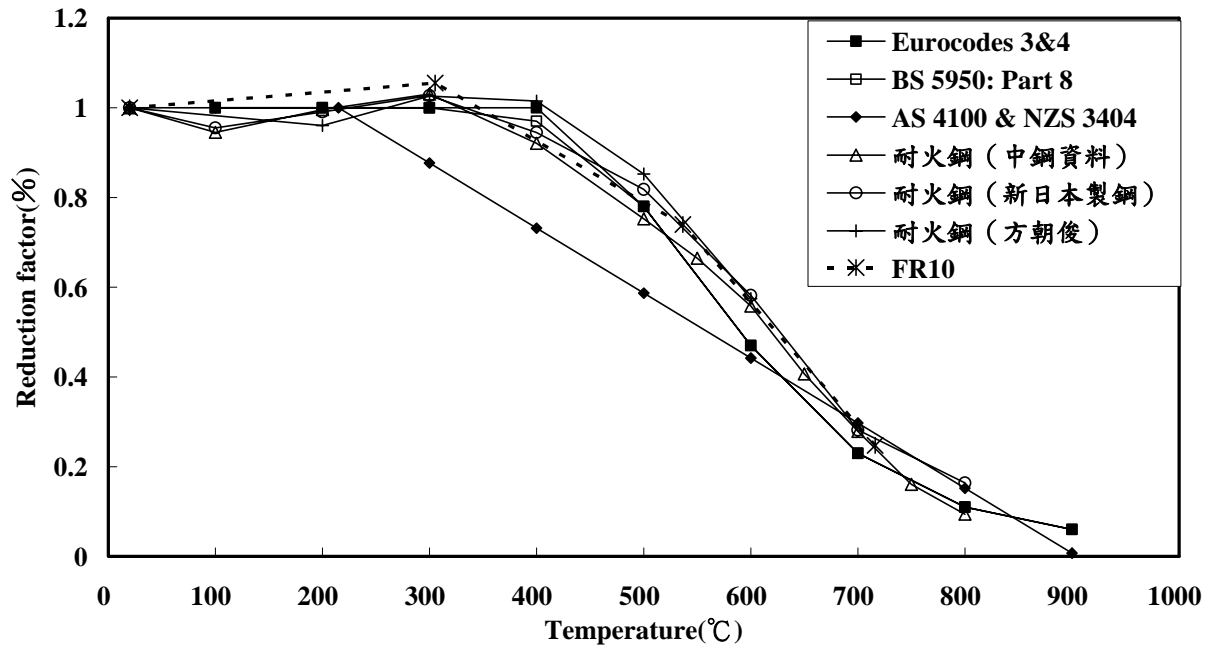


圖 5-28 SN05 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較

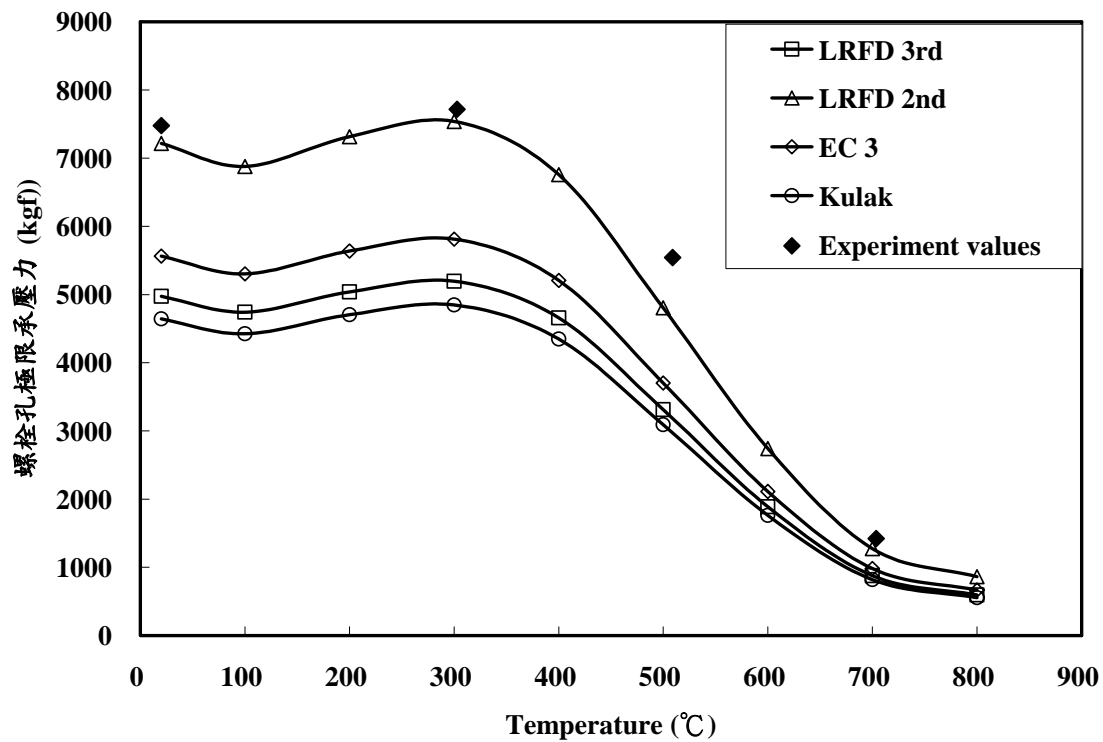


圖 5-29 SN10 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較

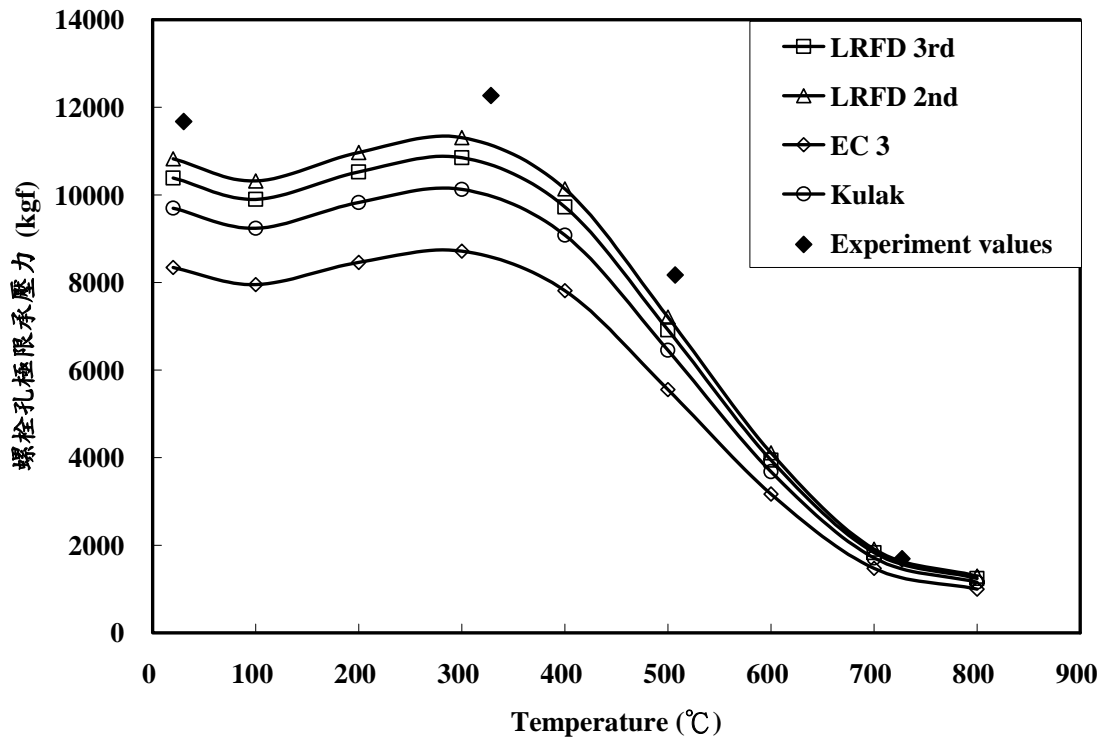


圖 5-30 FR05 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較

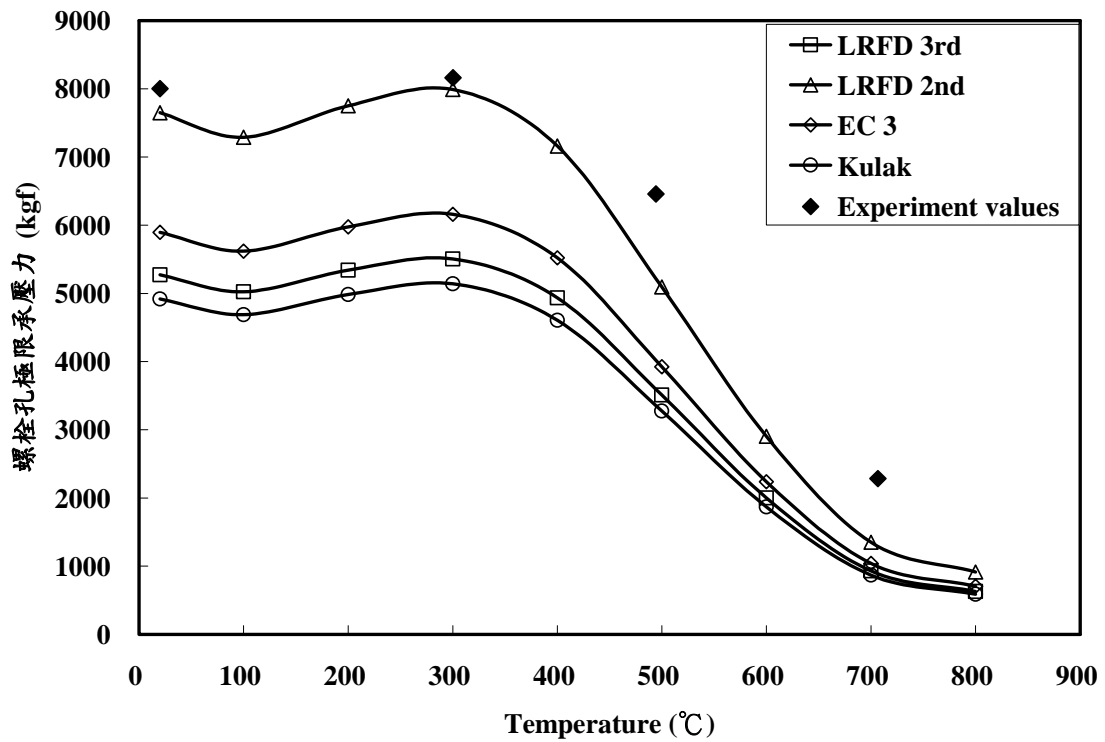


圖 5-31 FR10 組試體螺栓孔極限承壓力與規範承壓公式比較

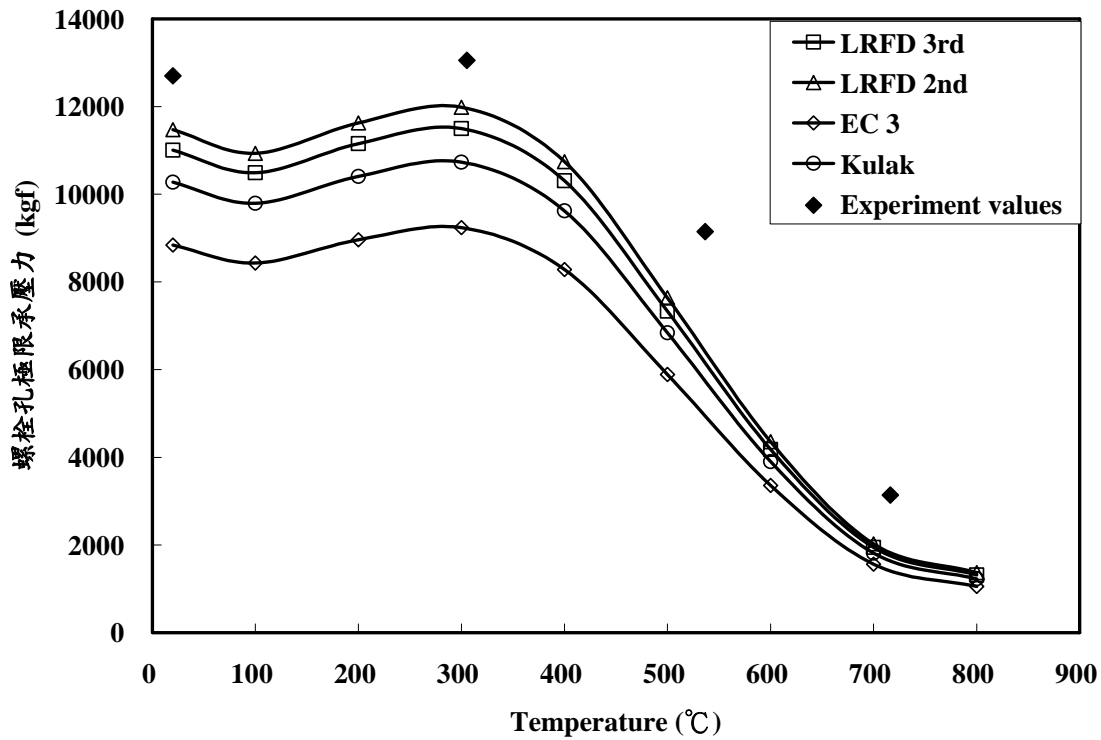


圖 5-32 SN490B 四種邊距的比較

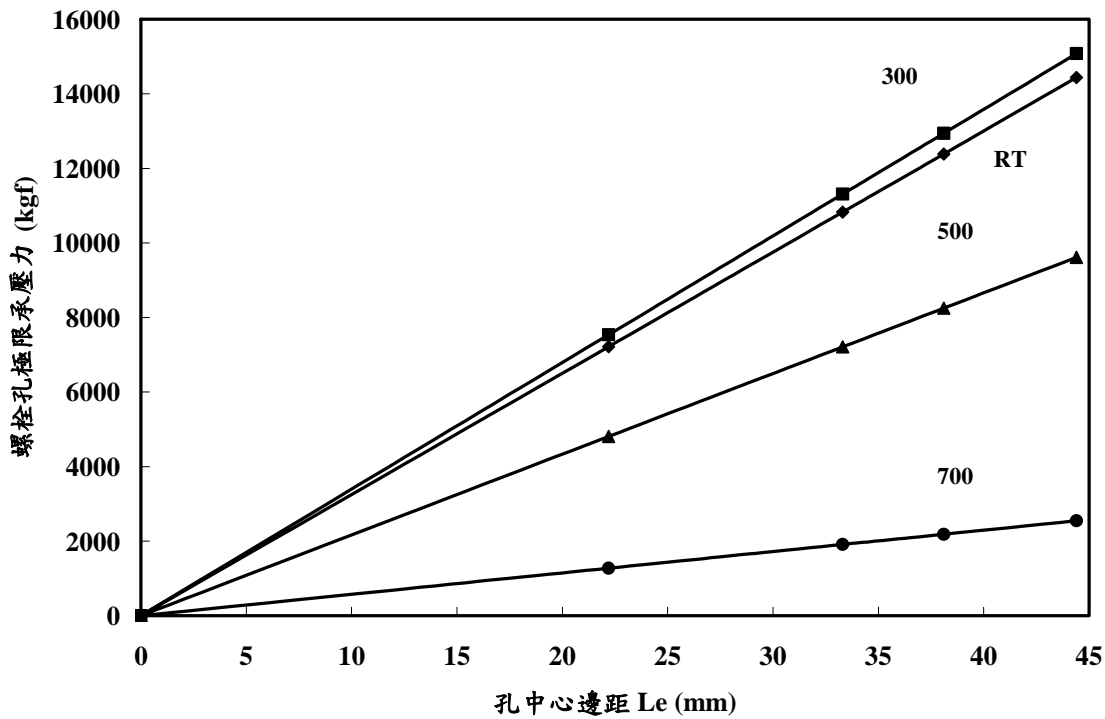


圖 5-33 SN490C-FR 四種邊距的比較

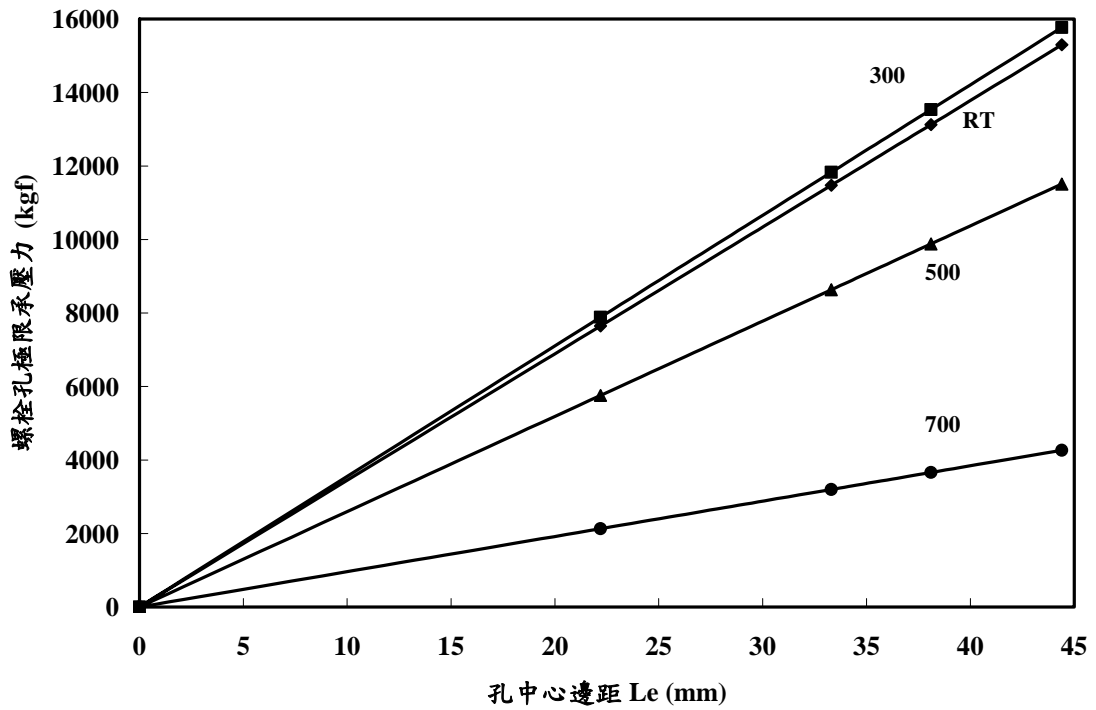


圖 5-34 7/8in. 高強度螺栓與 6 mm 厚鋼板螺栓孔(SN490B)承壓力比較

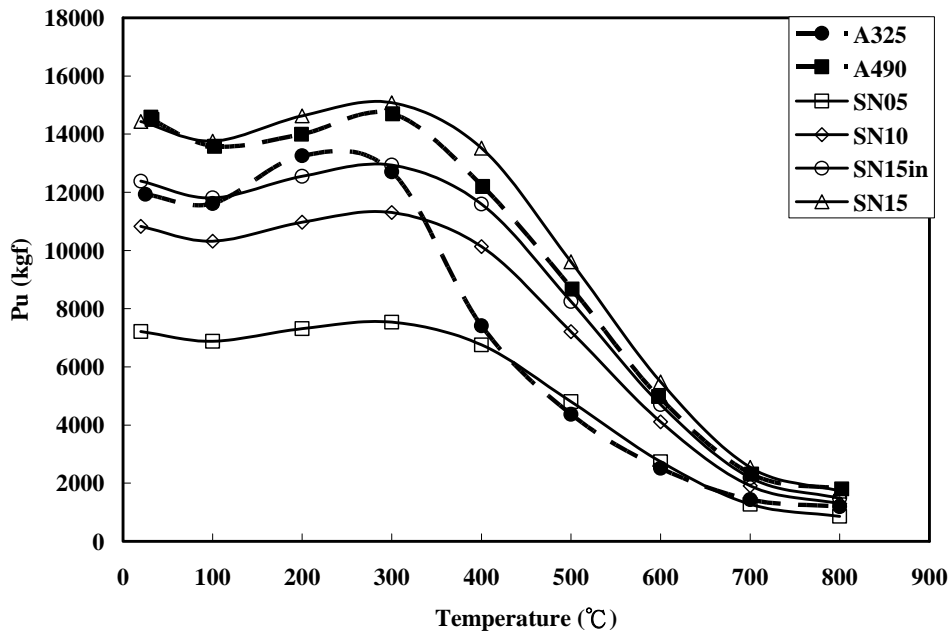


圖 5-35 7/8in. 高強度螺栓與 6mm 厚鋼板螺栓孔(SN490C-FR)承壓力比較

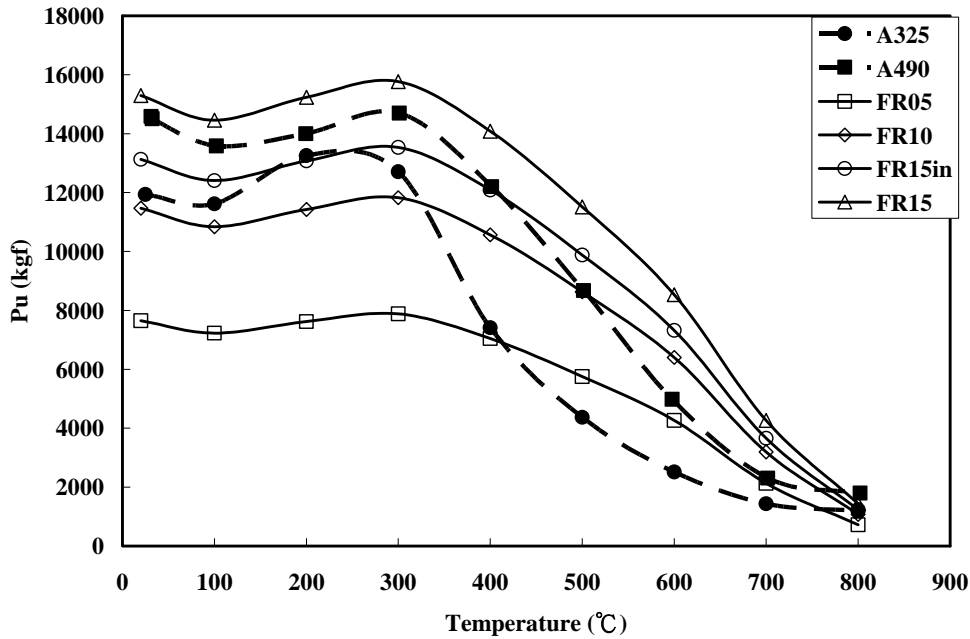


圖 5-36 厚度 6mm 鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=室溫)

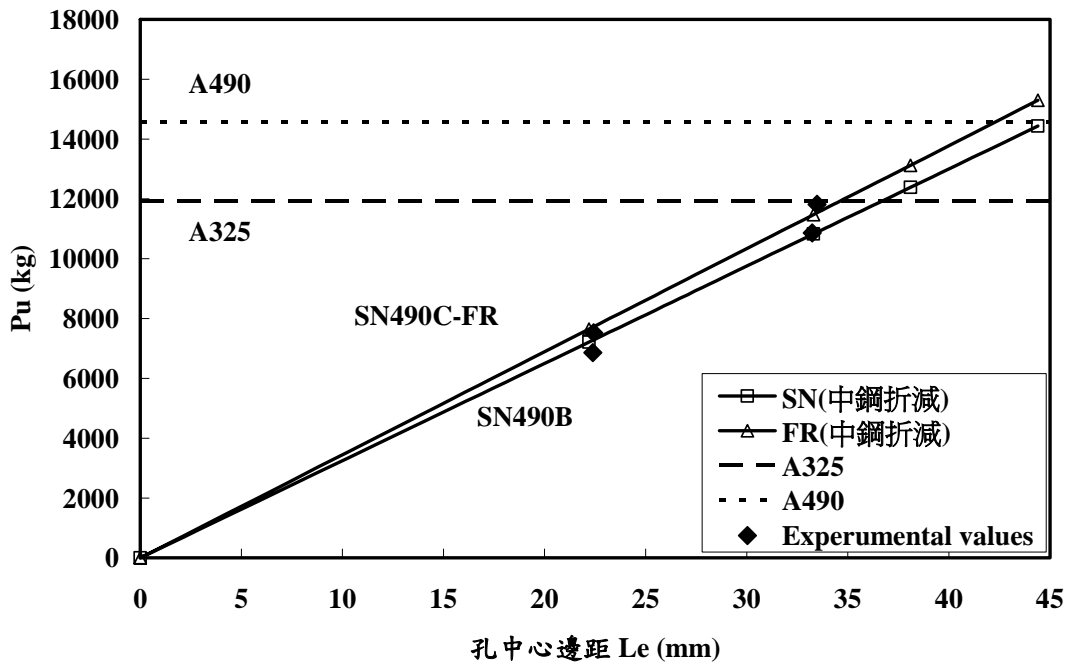


圖 5-37 厚度 6mm 鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=300 °C)

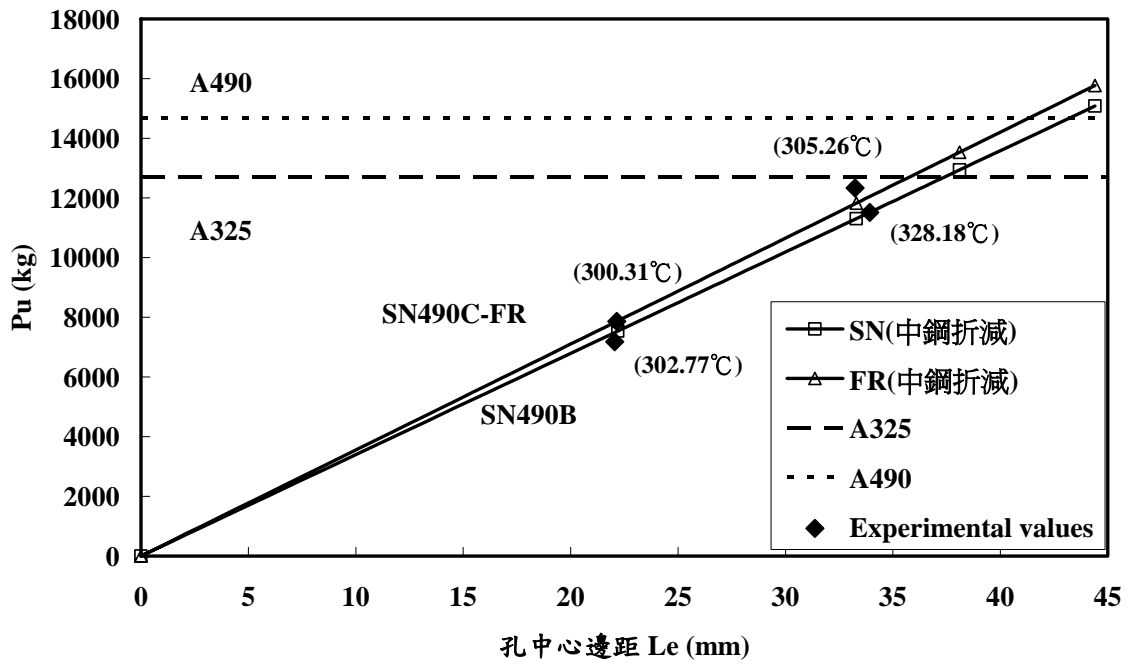


圖 5-38 厚度 6mm 鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=500 °C)

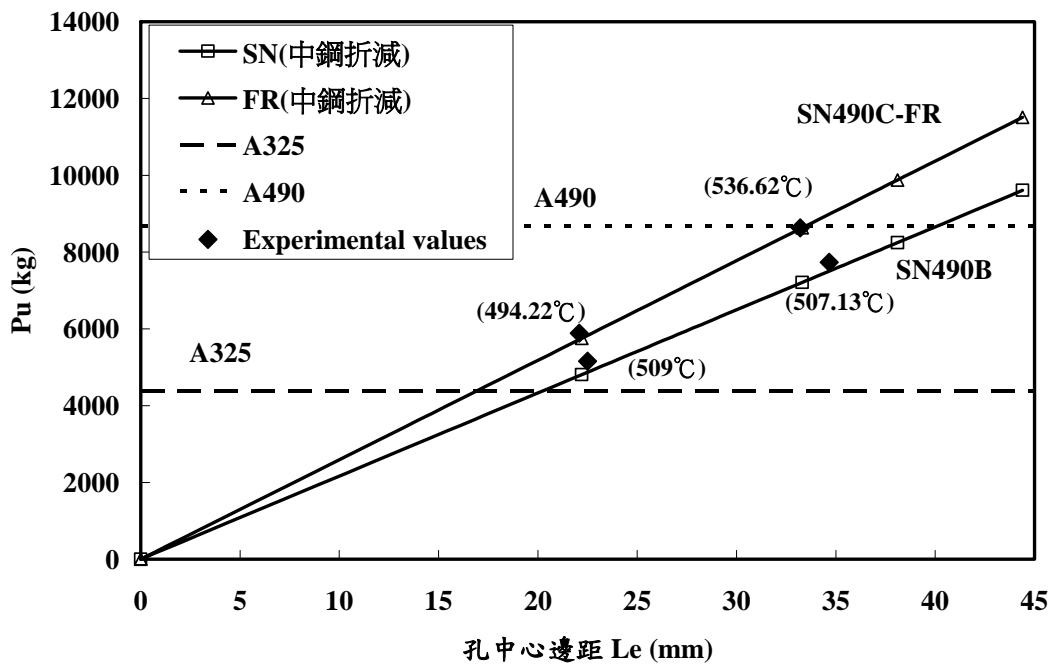


圖 5-39 厚度 6mm 鋼板螺栓孔與 7/8in. 高強度螺栓承壓力比較(溫度=700 °C)

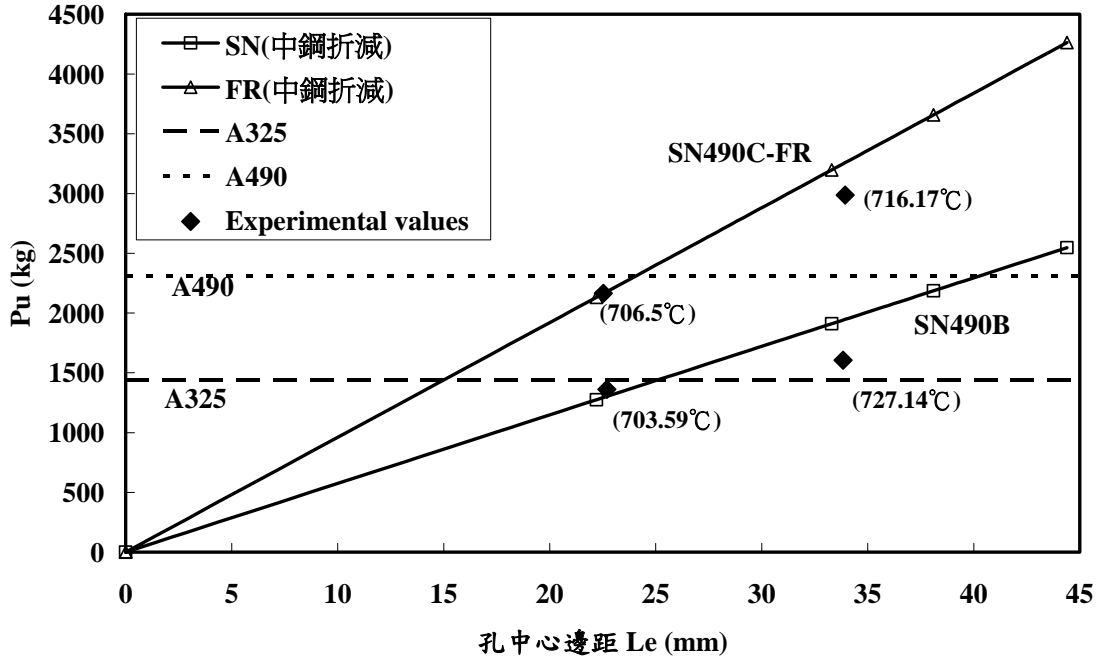


圖 5-40 厚度 6mm SN05 鋼板定載 2103kgf 加溫實驗

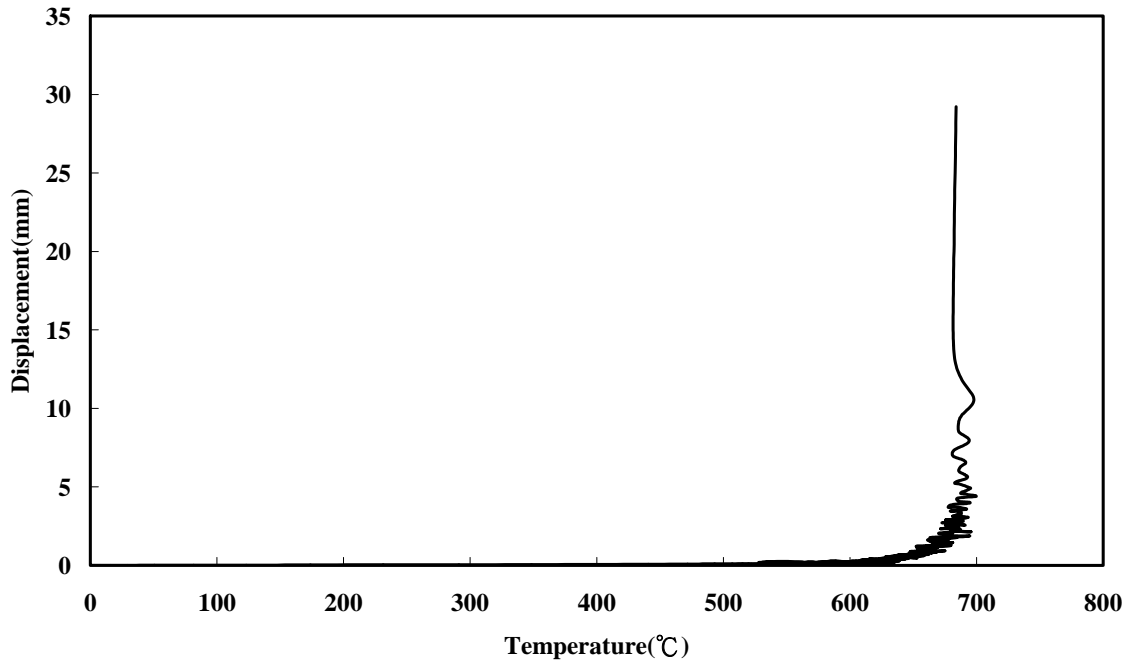
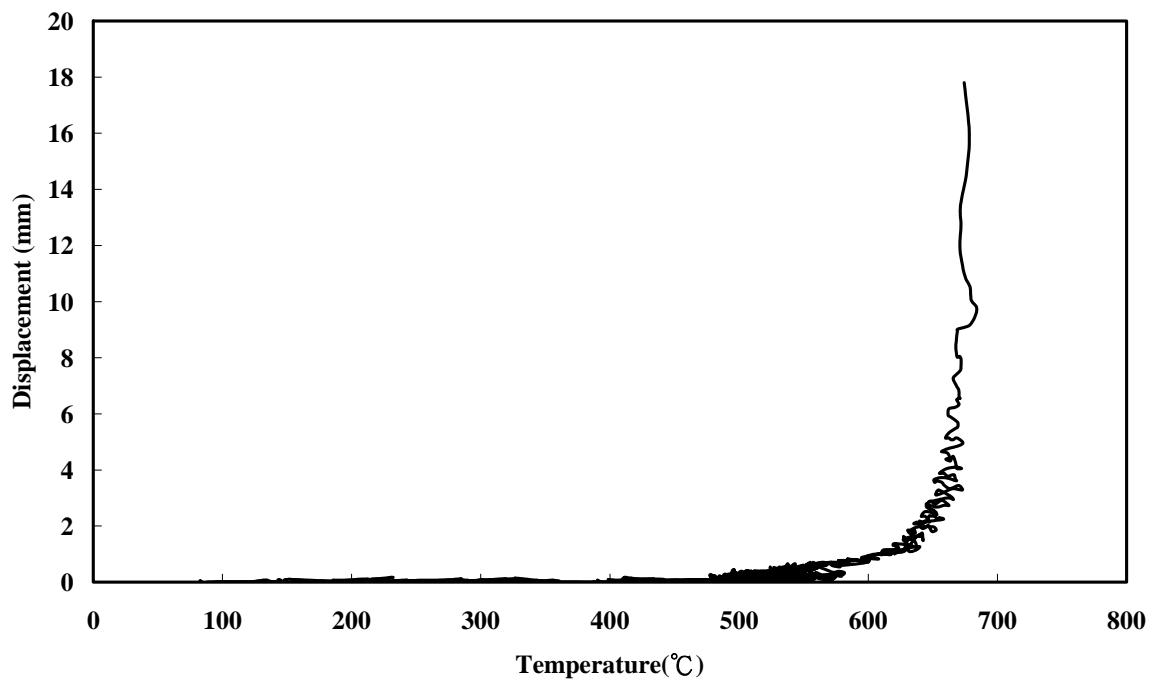


圖 5-41 厚度 6mm SN10 鋼板定載 4599kgf 加溫實驗



第六章高溫螺栓孔承壓行為之數值模擬

第一節前言

本實驗之鋼板為 SN490B 與 SN490C-FR 兩種鋼板，標稱厚度為 6 mm，所提供螺栓孔單剪力的插銷直徑為 7/8 英吋(22.2 mm)，試體分別以螺栓孔淨邊距為 0.5d(即螺栓孔淨邊距為 1.0 倍螺栓直徑減掉 0.5 倍螺栓孔直徑)及 1.0d(即螺栓孔淨邊距為 1.5 倍螺栓直徑減掉 0.5 倍螺栓孔直徑)，在四個不同設計溫度下進行試驗，所得實驗之結果已在前一章討論過。本章主要利用 ABAQUS 有限元素分析軟體，對本試驗之鋼板進行數值模擬，並與實驗值比較分析。再以此分析方法分別預測淨邊距 1.5d(螺栓孔淨邊距為 2.0 倍螺栓直徑減掉 0.5 倍螺栓孔直徑)試體及 AISC-LRFD 規範規定 7/8 英吋螺栓之最小螺栓孔邊距 1.5 英吋試體(螺栓孔中心到邊距之距離)的螺栓孔極限承壓力。

此外，利用 ABAQUS 分析預測之結果，比較 6mm 厚的 SN490B 與 SN490C-FR 之螺栓孔試體與 A325、A490 高強度螺栓，在四種不同邊距下，各邊距在溫度多高時，螺栓強度將低於鋼板螺栓孔之極限承壓力(即各邊距螺栓孔在何溫度時，不再被螺栓剪壞?)。

本章在最後也將在四種不同溫度下(室溫、300°C、500°C、700°C)，將 ABAQUS 模擬的螺栓孔極限承壓力與 AISC-LRFD 第二版螺栓孔極限承壓力公式值、實驗值做比較。

第二節數值模擬分析方法

基本假設

為了簡化數值模擬之複雜性，吾人作了以下基本假設：

- (1) 當試體加載至破壞過程中，假設其試體各部分位置之溫度穩定且相同。
- (2) 假設燃燒爐為均溫系統，不考慮熱力學之效應，如傳導、對流、輻射……等等。
- (3) 假設螺栓(插銷)為一剛體 (rigid body)。
- (4) 假設本試驗為靜態載重試驗。

(5) 假設試驗之材料為等向性材料。

模型建立方法

其鋼板與螺栓接觸之力學行為極為複雜，用二維有限元素 (two dimensional finite element) 來分析模擬並不恰當，為了使模擬更接近於螺栓與螺栓孔接觸的實際狀況，故以三維有限元素分析模擬之。

本文利用 ABAQUS CAE 介面分別建立十六種因不同淨邊距(0.5d 與 1.0d)、不同材料 (SN490B 與 SN490C-FR) 不同溫度下(室溫、300°C、500°C、700°C)之鋼材試體模型，其各模型之邊界尺寸如表 6-1、表 6-2 所示。在螺栓(插銷)模型部分則假設為一固定直徑為 7/8 英吋之剛體，以解析剛體 (analytical rigid) 模擬之。本文將模擬之模型，分成兩個分析步進行數值模擬分析，其主要敘述如下：

分析步驟：

Initial：本文將鋼材未受熱前之初始溫度設為室溫(20°C)，上、下螺栓之位置，分別位於鋼板螺栓孔中心位置。

Step 1：將試體升溫至指定溫度。並讓上、下螺栓恰接觸鋼板，並施加一非常微小壓力避免接觸時發生表面震顫。

Step 2：下方螺栓固定不動，上方螺栓向上位移直到位移結束。

接觸條件：

(1) 螺栓部分：在螺栓側面(與鋼板接觸部分)定義為 Master surface。

(2) 鋼板部分：在鋼板圓孔內側(與螺栓接觸部分)定義為 Slave surface。

兩者接觸部分需給定一適當磨擦係數 $f=0.33$ 。

邊界條件 (boundary condition)：

(1) 螺栓部分：下方螺栓固定不動，上方螺栓孔向上位移。

(2) 鋼板部分：由於接觸關係是由疊代過程中慢慢建立，並非一開始就有摩擦力，為避免一開始鋼板發生剛體位移，故在鋼板上之 X、Y 方向和地面間定義一很軟的彈簧(其 stiffness 數量級遠小於

最大承載力，本文設為 1N/mm)。鋼板沿 Z 方向 (厚度方向)，在其中性面上束制住，避免剛體在 Z 方向上發生剛體位移。

分析結果

SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 定溫加載試驗

圖 6-6 為常溫下(20°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 7477.3 kgf，其數值模擬結果為 7878.3 kgf，相對誤差為+5.4%。

圖 6-7 為溫度(302.77°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到極限強度為 7717.0 kgf，其數值模擬結果為 7296.8 kgf，相對誤差為-5.4%。

圖 6-8 為溫度(509°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 5540.8 kgf，其數值模擬結果為 5514.3 kgf，相對誤差為-0.5%。

圖 6-9 為溫度(703.59°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 1423.1 kgf，其數值模擬結果為 1411.8 kgf，相對誤差為-0.8%。

圖 6-10 為不同溫度下，SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖。

SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0 之定溫加載試驗

圖 6-11 為常溫下(20°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 11677.0 kgf，其數值模擬結果為 12552.9 kgf，相對誤差為+7.7%。

圖 6-12 為溫度(328.18°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 12267 kgf，其數值模擬結果為 11279.3 kgf，相對誤差為-8.0%。

圖 6-13 為溫度(507.13°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 8169.6 kgf，其數值模擬結果為 7738.7 kgf，相對誤差為-5.3%。

圖 6-14 為溫度(727.14°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 1694.9 kgf，其數值模擬結果為 2124.4 kgf，相對誤差為+25.3%。

圖 6-15 為不同溫度下，SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖。

SN490C-FR 鋼板螺栓孔淨邊距 0.5 之定溫加載試驗

圖 6-16 為常溫下(20°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 8001.0 kgf，其數值模擬結果為 8241.8 kgf，相對誤差為+3.0%。

圖 6-17 為溫度(302.7°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 8162.6 kgf，其數值模擬結果為 8013.9 kgf，相對誤差為-1.8%。

圖 6-18 為溫度(509°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 6457.6 kgf，其數值模擬結果為 6404.24kgf，相對誤差為-0.8%。

圖 6-19 為溫度(703.5°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 2284.6 kgf，其數值模擬結果為 2721.84kgf，相對誤差為+19.1%。

圖 6-20 為不同溫度下，SN490C-FR 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖。

SN490C-FR 鋼板螺栓孔淨邊距 1.0d 定溫加載試驗

圖 6-21 為常溫下(20°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 12700kgf，其數值模擬結果為 12613kgf，相對誤差為-0.7%。

圖 6-22 為溫度(302.7°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 13053 kgf，其數值模擬結果為 12676.5kgf，相對誤差為-2.9%。

圖 6-23 為溫度(509°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 9145.2kgf，其數值模擬結果為 8353.41kgf，相對誤差為-8.7%。

圖 6-24 為溫度(703.5°C)實驗值與理論值之比較圖。由實驗得到螺栓孔極限承壓力為 3136.5 kgf，其數值模擬結果為 3496.69kgf，相對誤差為+11.5%。

圖 6-25 為不同溫度下，SN490C-FR 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖。

比較與討論

將數值模擬分析與其試驗結果做比較，在彈性區域內大部分分析出來之結果與實驗之結果相符合。並且由其實驗所得螺栓孔承壓力與數值模擬分析所得之值比較，其平均誤差為 379.95 kgf (平均相對誤差=6.67%)，這顯示本分析方法對試體後段塑性區域雖有一段差距。但其對於鋼板之螺栓孔承壓力，仍有不

錯之預測結果。此外，除了 SN05 組試體的模擬值以外，其他組試體的模擬都有愈高溫誤差愈大的趨勢，這可能與愈高溫鋼材潛變效應愈強，而 7.3.1-7.3.4 的數值模擬模型在此並未考慮潛變效應有關。

螺栓孔邊距 1.5in 與淨邊距 1.5d 之強度預測

利用本章之數值模擬方法，預測 SN490B 與 SN490C-FR 鋼板在厚度為 6mm，其邊距為 1.5 英吋與 1.5d 之螺栓孔極限承壓力，對於其鋼板材料之尺寸規格與溫度，皆為設計值。表 7-3 為四種邊距由螺栓孔中心至邊緣距離設計。

圖 6-26、圖 6-27、圖 6-28 與圖 6-29 分別為室溫、300°C、500°C 與 700°C 時，數值模擬 6mm 厚的 SN490B 與 SN490C-FR 耐火鋼在不同邊距的螺栓孔極限承壓力與 AISC-LRFD 第二版螺栓孔承壓公式在不同邊距的比較。就 SN490C-FR 耐火鋼來看，大部份的螺栓孔承壓力公式計算值均較數值模擬的結果為保守，除了在 500°C 時的少數邊距範圍內的極限承壓力模擬(見圖 6-28)。就 SN490B 鋼來看，大部份的螺栓孔承壓力公式計算值的計算值也都較數值模擬的結果為保守，除了在 300°C 時的極限承壓力模擬以外(見圖 6-27)，

跟 A325 螺栓與 A490 螺栓的比較圖。在常溫下，SN490C-FR 與 SN490B 約在 L_e 為 30mm 時，高過 A325 螺栓。

到了 300°C，其 SN490C-FR 與 SN490B 在 L_e 為 34mm 時，才高過 A325 螺栓。但到 500°C， L_e 快速降至約 15mm 時 A325 螺栓先破壞，到 700°C，更為嚴重 A325 螺栓可適用的範圍只到 L_e 約為 11mm 而已，但其 A490 螺栓還可以到 L_e 為 18mm。

對於 A490 螺栓而言，在常溫下，SN490C-FR 與 SN490B 約在 L_e 為 39mm 時，高過 A490 螺栓。

到了 300°C，其 SN490C-FR 與 SN490B 在 L_e 為 42mm 時，才高過 A490 螺栓。但到 500°C， L_e 降至約 33mm 時 A490 螺栓先破壞，到 700°C，更為嚴重 A490 螺栓可適用的範圍只到 L_e 約為 18mm 而已。

圖形中耐火鋼的曲線幾乎都在普通鋼的上方，可見耐火鋼的強度比普通鋼要來的強。可推斷耐火鋼在高溫的性質比普通鋼來的好，可作為設計上的考量。

A325 與 A490 螺栓與各螺栓孔承壓強度比較

由 Yu (2006) 提供 7/8 英吋(22.2 mm) A325 與 A490 螺栓在各溫度下折減資料，並將其與數值模擬之值作比較。圖 6-30 為 A325 與 A490 跟 6mm 厚的 SN490B 鋼板試體在各溫度下的比較，圖 7-25 為 A325 與 A490 跟 6mm 厚的 SN490C-FR 鋼

板試體在各溫度下的比較。

由圖 6-30 可得知，在 SN490B 鋼板厚 6mm 的情況下，7/8 英吋(22.2mm) A325 螺栓與各邊距螺栓孔的單剪接合的破壞模式預測如下：

- [a] 與 0.5d 螺栓孔的接合，溫度在約 420°C 以前，如果接合發生破壞，是螺栓孔被扯壞，而溫度在 420°C 以後，則是螺栓被鋼板剪斷。
- [b] 與 1.0d 螺栓孔的接合，可能溫度在 150°C 至 350°C 之間，如果接合發生破壞，是螺栓孔被扯壞，而在 700°C 以前的其他溫度，則是螺栓被鋼板剪斷。
- [c] 與邊距(L_e)為 1.5 inch 的螺栓孔的接合(此為 AISC-LRFD 2nd Ed. 規範規定 7/8 英吋螺栓接合的最小邊距)，如果接合發生破壞，皆是 A325 螺栓被鋼板剪斷。
- [d] 與 1.5d 螺栓孔的接合，與 [c] 之結論同，如果接合發生破壞，皆是 A325 螺栓被鋼板剪斷。

由圖 6-30 可得知，在 SN490B 鋼板厚 6mm 的情況下，7/8 英吋(22.2mm) A490 螺栓與各邊距螺栓孔的單剪接合的破壞模式預測如下：

- [e] 與 0.5d 螺栓孔的接合，如果接合發生破壞，皆是螺栓孔被扯壞。
- [f] 與 1.0d 螺栓孔的接合，如果接合發生破壞，皆是螺栓孔被扯壞。
- [g] 與邊距(L_e)為 1.5 inch 的螺栓孔的接合(此為 AISC-LRFD 2nd Ed. 規範規定 7/8 英吋螺栓接合的最小邊距)，可能溫度在 180°C 至 400°C 之間如果接合發生破壞，可能是螺栓孔被扯壞，其他溫度時，螺栓與螺栓孔破壞時機將很相近。
- [h] 與 1.5d 螺栓孔的接合，如果接合發生破壞，可能皆是 A490 螺栓被鋼板剪斷，表示鋼板 6mm 厚、淨邊距 1.5d 的螺栓孔對任何高強度螺栓的單剪接合，已足夠阻止高溫時螺栓孔發生剪力破壞。

由圖 6-31 可得知，在 SN490C-FR 鋼板厚 6mm 的情況下，7/8 英吋(22.2mm) A325 螺栓與各邊距螺栓孔的單剪接合的破壞模式預測如下：

- [i] 與 0.5d 螺栓孔的接合，溫度在約 400°C 以前，如果接合發生破壞，是螺栓孔被扯壞，而溫度在 400°C 以後，則是螺栓被鋼板剪斷。
- [j] 與 1.0d 螺栓孔的接合，如果接合發生破壞，除了 200°C 至 300°C 的溫度區間內，皆是螺栓被鋼板剪斷。
- [k] 與邊距(L_e)為 1.5 inch 的螺栓孔的接合(此為 AISC-LRFD 2nd Ed. 規範規定 7/8 英吋螺栓接合的最小邊距)，如果接合發生破壞，皆是螺栓被鋼板剪斷，表示利用耐火鋼板時，規範規定的 1.5 inch 的最小邊距，仍然有效。
- [l] 與 1.5d 螺栓孔的接合，如果接合發生破壞，皆是 A325 螺栓被鋼板剪斷。

由圖 6-31 可得知，在 SN490C-FR 鋼板厚 6mm 的情況下，7/8 英吋(22.2mm) A490 螺栓與各邊距螺栓孔的單剪接合的破壞模式預測如下：

- [m] 與 0.5d 螺栓孔的接合，如果接合發生破壞，皆是螺栓孔被扯壞。
- [n] 與 1.0d 螺栓孔的接合，溫度在約 500°C 以前，如果接合發生破壞，是螺栓孔被扯壞，而溫度在 500°C 以後，則是螺栓被鋼板剪斷。
- [o] 與邊距(L_e)為 1.5 inch 的螺栓孔的接合(此為 AISC-LRFD 2nd Ed. 規範規定 7/8 英吋螺栓接合的最小邊距)，大致而言，如果接合發生破壞，皆是螺栓被鋼板剪斷，表示利用耐火鋼板時，規範規定的 1.5 inch 的最小邊距，除了 300°C 附近，皆有效。
- [p] 與 1.5d 螺栓孔的接合，可能皆是 A490 螺栓被鋼板剪斷，表示鋼板 6mm 厚、淨邊距 1.5d 的螺栓孔對任何高強度螺栓的單剪接合，已足夠阻止高溫時螺栓孔發生剪力破壞，且 FR15 試體的承壓力較 SN15 高出許多，因此螺栓孔的最小邊距值將介於邊距 1.5 英吋($L_e=38.1\text{mm}$)與淨邊距 1.5d($L_e=44.4\text{mm}$)之間。

綜合以上的觀察，可得以下重要結論：

- (1) 6mm 厚的 SN490B 鋼板與 7/8 英吋(22.2mm) A325 螺栓單剪接合，在高溫下，依照 AISC-LRFD 規範的規定，1.5 英吋(38.1mm) 的最小螺栓孔邊距(L_e)，應可避免螺栓孔承壓破壞。
- (2) 6mm 厚的 SN490B 鋼板與 7/8 英吋(22.2mm) A490 螺栓單剪接合，在高溫下，由於 A490 螺栓強度較 A325 螺栓高，需要淨邊距 1.5d 的螺栓孔才能避免螺栓孔承壓破壞，換句話說，6mm 厚的 SN490B 鋼板、淨邊距 1.5d 的螺栓孔對任何高強度螺栓的單剪接合，可阻止高溫時螺栓孔發生承壓破壞。
- (3) 6mm 厚的 SN490C-FR 耐火級鋼板與 7/8 英吋(22.2mm) A325 螺栓單剪接合，與 SN490B 鋼材同，依照 AISC-LRFD 規範的規定，1.5 英吋(38.1mm) 的最小螺栓孔邊距(L_e)，可避免螺栓孔承壓破壞。
- (4) 6mm 厚的 SN490C-FR 耐火級鋼板與 7/8 英吋(22.2mm) A490 螺栓單剪接合，其避免螺栓孔承壓破壞的最小邊距將介於邊距 1.5 英吋($L_e=38.1\text{mm}$)與淨邊距 1.5d($L_e=44.4\text{mm}$)之間，詳細尺寸還需進一步分析，此最小邊距將小於 SN490B 鋼材的最小邊距(1.5d 淨邊距)，顯示出耐火鋼的高溫特性。

包含潛變效應 SN490C-FR 螺栓孔邊距=1.0d

由於國內外並無對此鋼材潛變參數之資料，故本文自行假設潛變參數，以不斷嘗試錯誤法，找到一組潛變參數近似符合實驗曲線，其所示結果為圖 6-32。

表 6- 1 SN490B 鋼材試體之實際尺寸

試體編號	厚度 (mm)	邊距 (mm)	螺栓孔直徑 (mm)	孔中心到邊緣 (mm)	寬度 (mm)	長度 (mm)
SN05-t06-T020	6.54	10.39	24.00	22.39	150	400
SN05-t06-T300	6.45	10.08	23.95	22.06	150	400
SN05-t06-T500	6.45	10.58	23.85	22.51	150	400
SN05-t06-T700	6.27	10.50	23.75	22.38	150	400
SN10-t06-T020	6.45	21.31	23.85	33.24	150	400
SN10-t06-T300	6.39	21.92	24.00	33.92	150	400
SN10-t06-T500	6.34	22.67	24.00	34.67	150	400
SN10-t06-T700	6.33	21.90	23.87	33.84	150	400

表 6- 2 SN490C-FR 鋼材試體之實際尺寸

試體編號	厚度 (mm)	邊距 (mm)	螺栓孔直徑 (mm)	孔中心到邊緣 (mm)	寬度 (mm)	長度 (mm)
FR05-t06-T020	6.38	10.43	24.00	22.43	150	400
FR05-t06-T300	6.23	10.05	24.20	22.15	150	400
FR05-t06-T500	6.58	10.08	24.00	22.08	150	400
FR05-t06-T700	6.33	10.33	24.40	22.53	150	400
FR10-t06-T020	6.45	21.48	24.00	33.48	150	400
FR10-t06-T300	6.30	21.25	23.97	33.24	150	400
FR10-t06-T500	6.36	21.20	24.00	33.20	150	400
FR10-t06-T700	6.30	21.95	23.97	33.94	150	400

表 6- 3 四種邊距由螺栓孔中心到邊緣之距離

標稱	孔中心至邊緣距離(Le) (mm)
5	22.2
10	33.3
15 in	38.1
15	44.4

圖 6- 1 塑性部分模擬曲線(SN490B,常溫下)

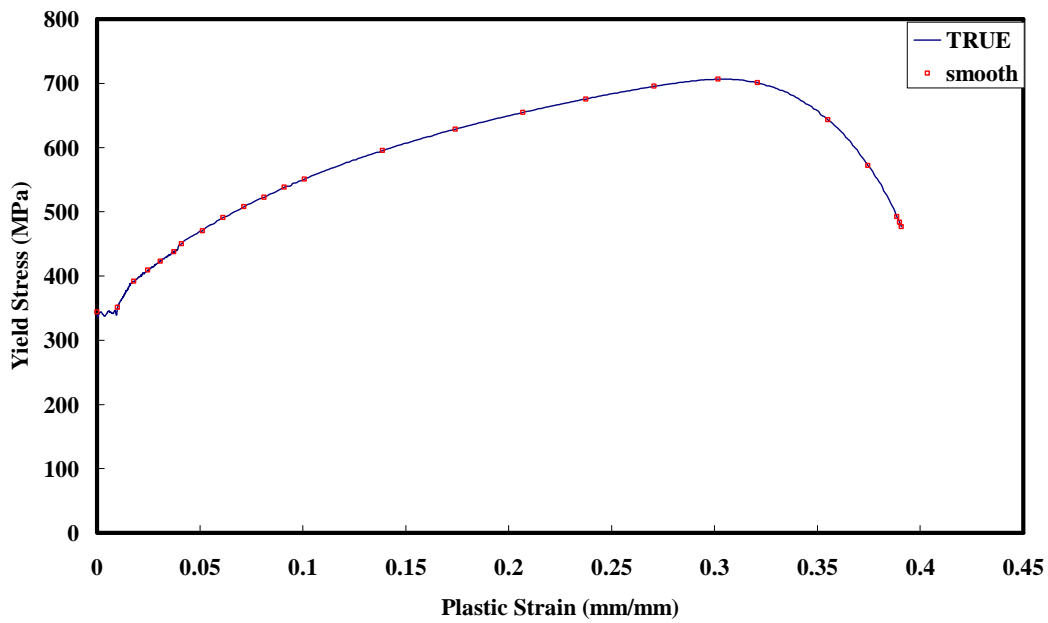


圖 6- 2 Case 1 之網格劃分

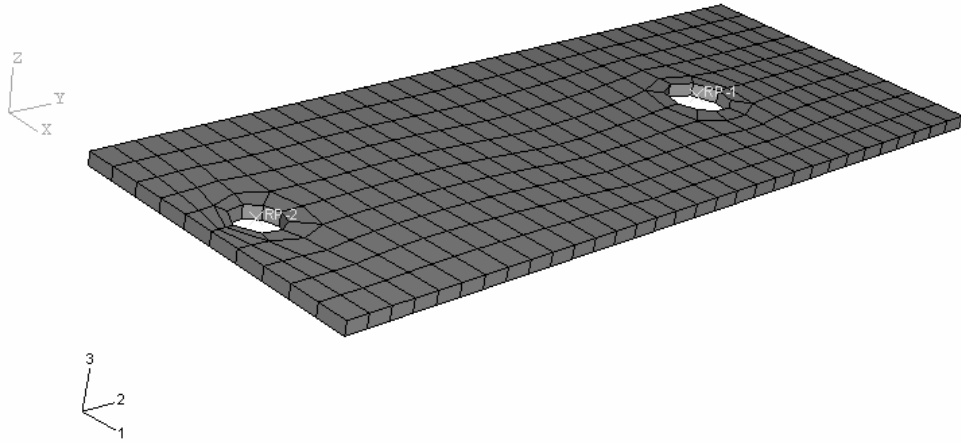


圖 6- 3 Case 2 之網格劃分

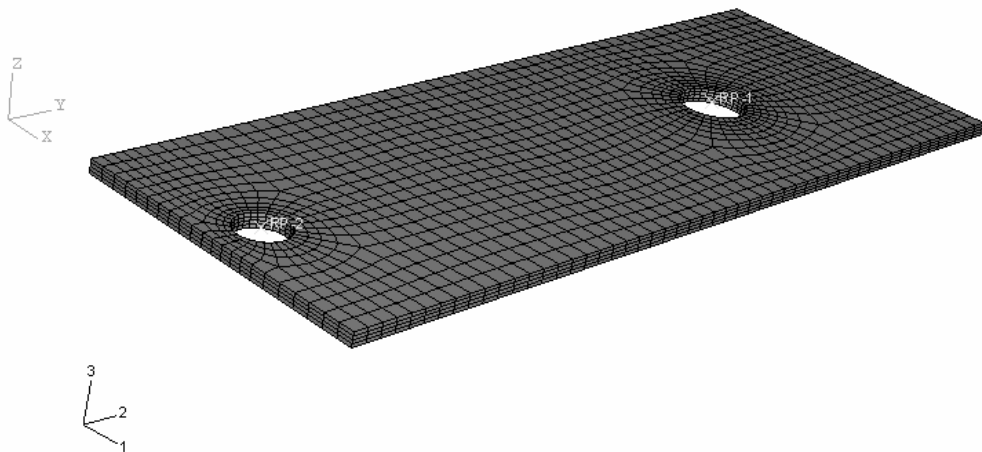


圖 6- 4 Case 3 之網格劃分

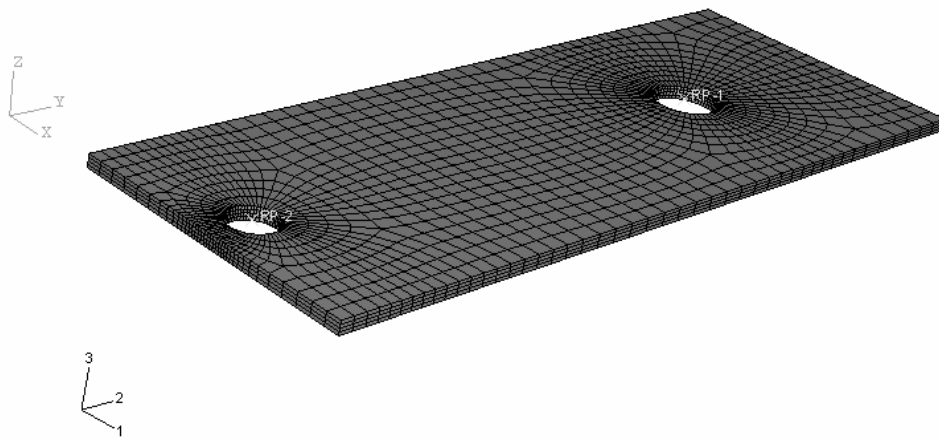


圖 6- 5 收斂性分析之結果

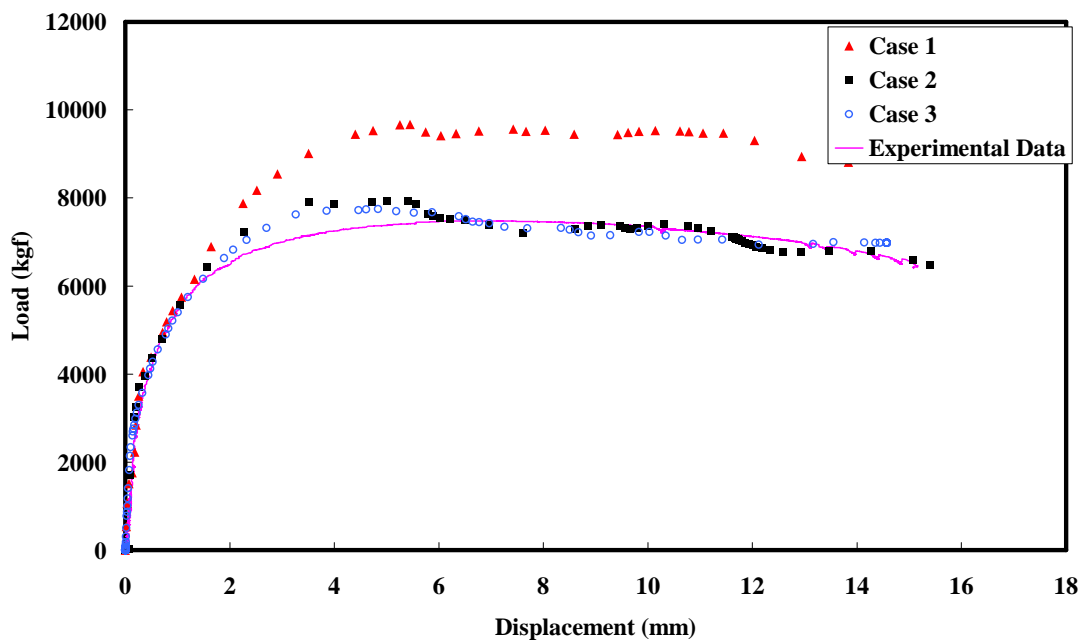


圖 6- 6 SN05-t06-T020 試體模擬結果比較

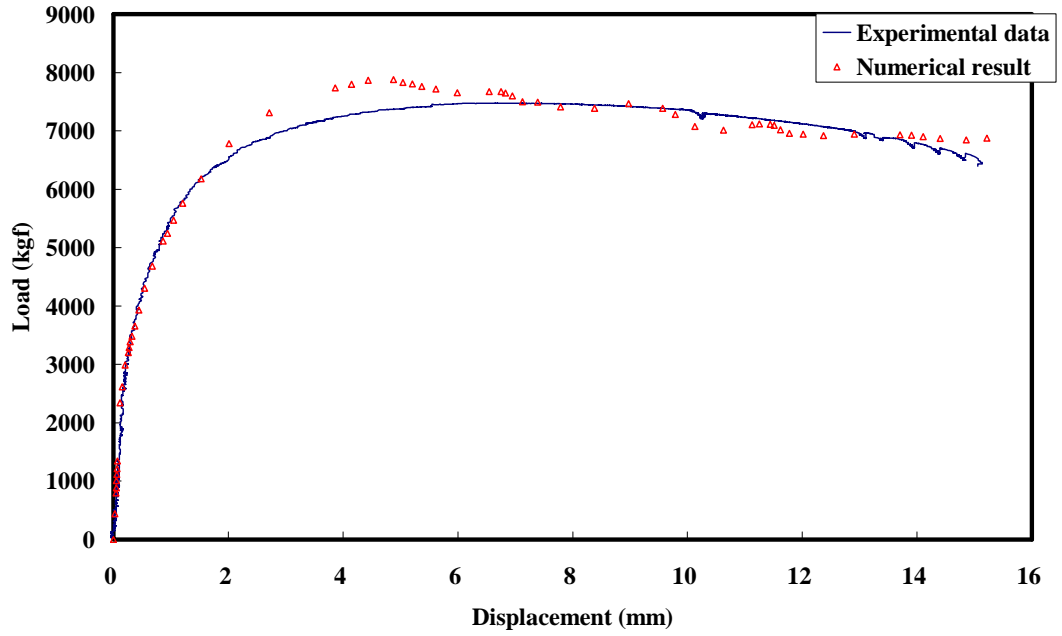


圖 6- 7 SN05-t06-T300 試體模擬結果比較

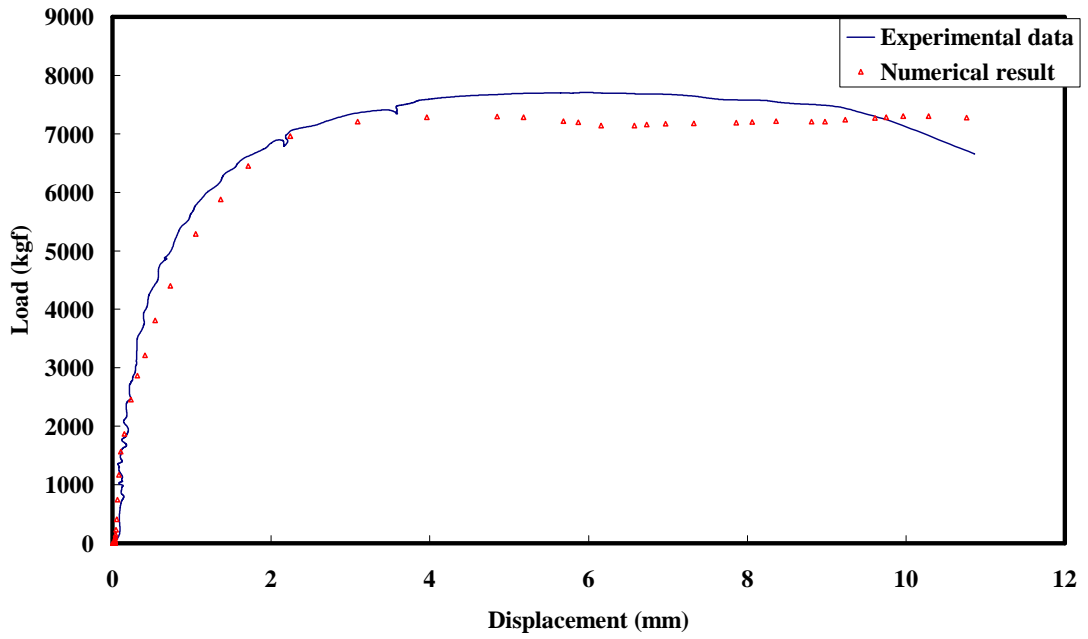


圖 6- 8 SN05-t06-T500 試體模擬結果比較

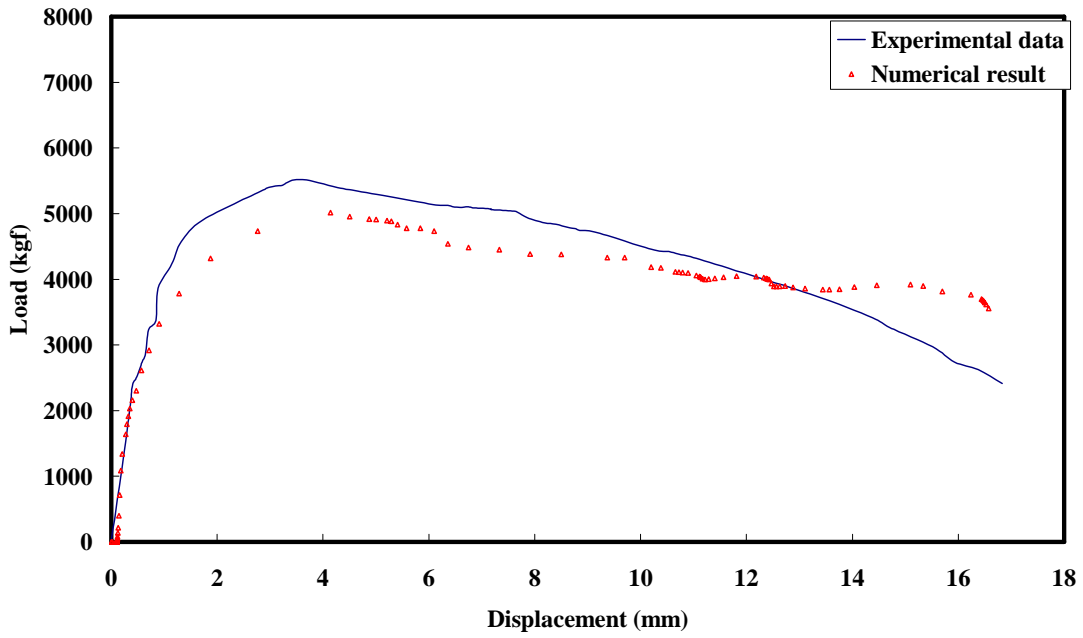


圖 6- 9 SN05-t06-T700 試體模擬結果比較

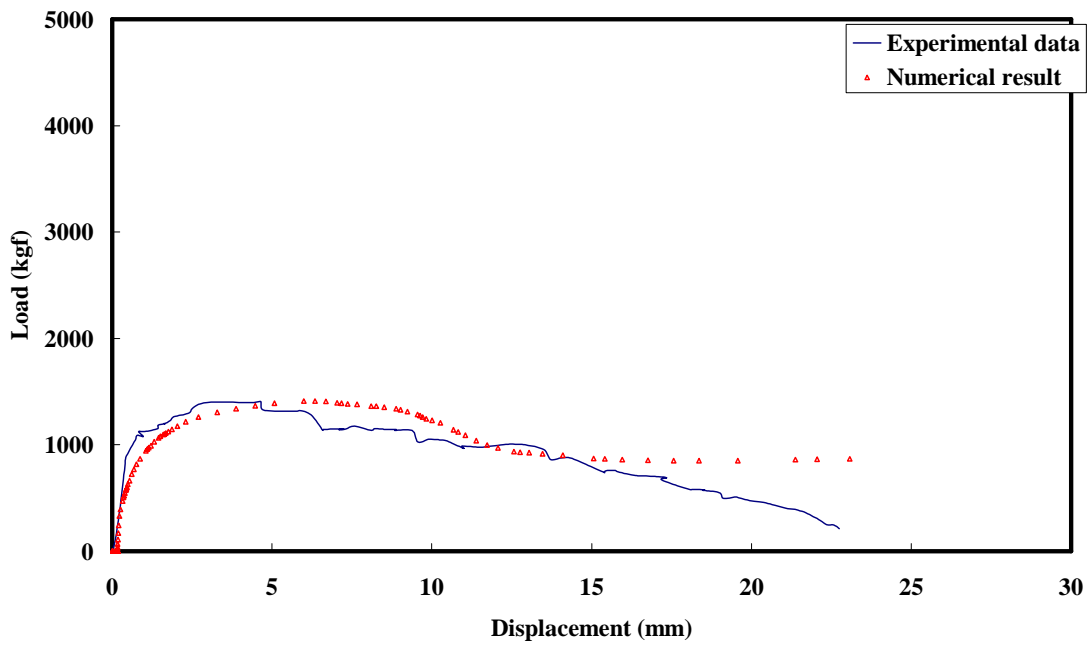


圖 6- 10 SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖

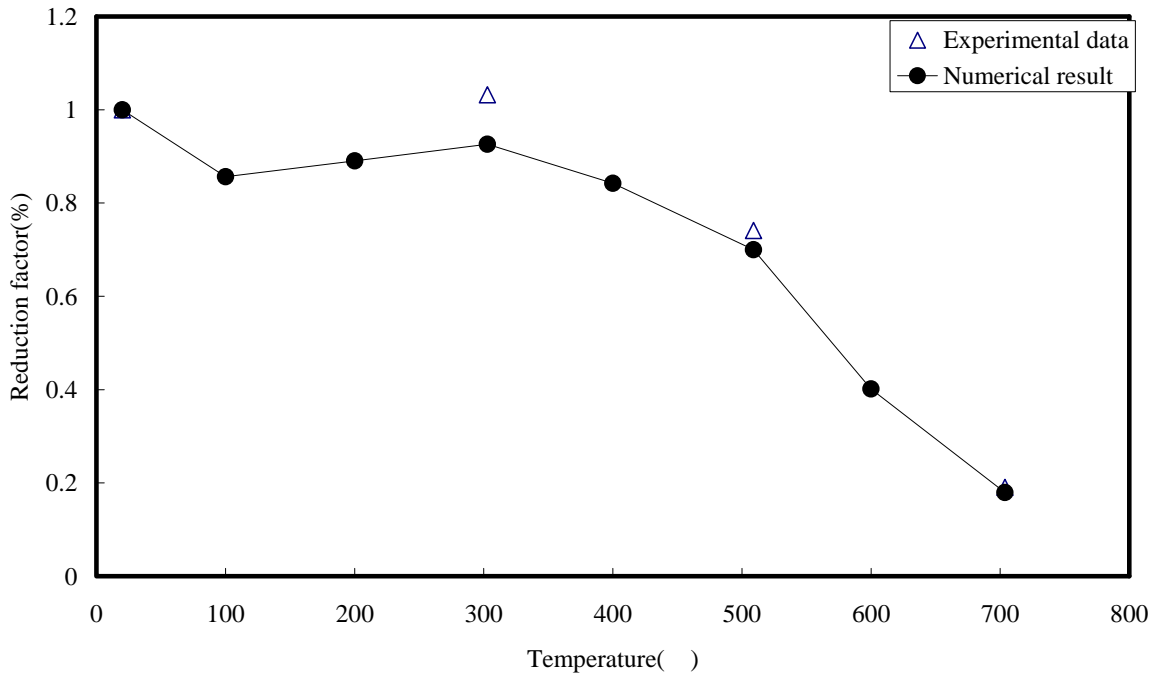


圖 6- 11 SN10-t06-T020 試體模擬結果比較

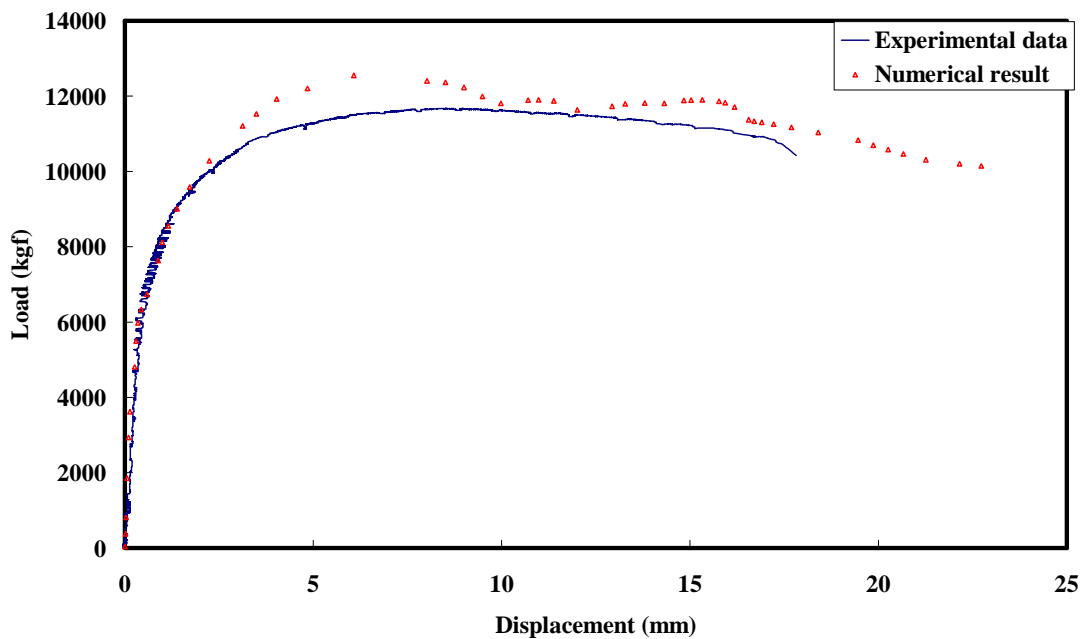


圖 6- 12 SN10-t06-T300 試體模擬結果比較

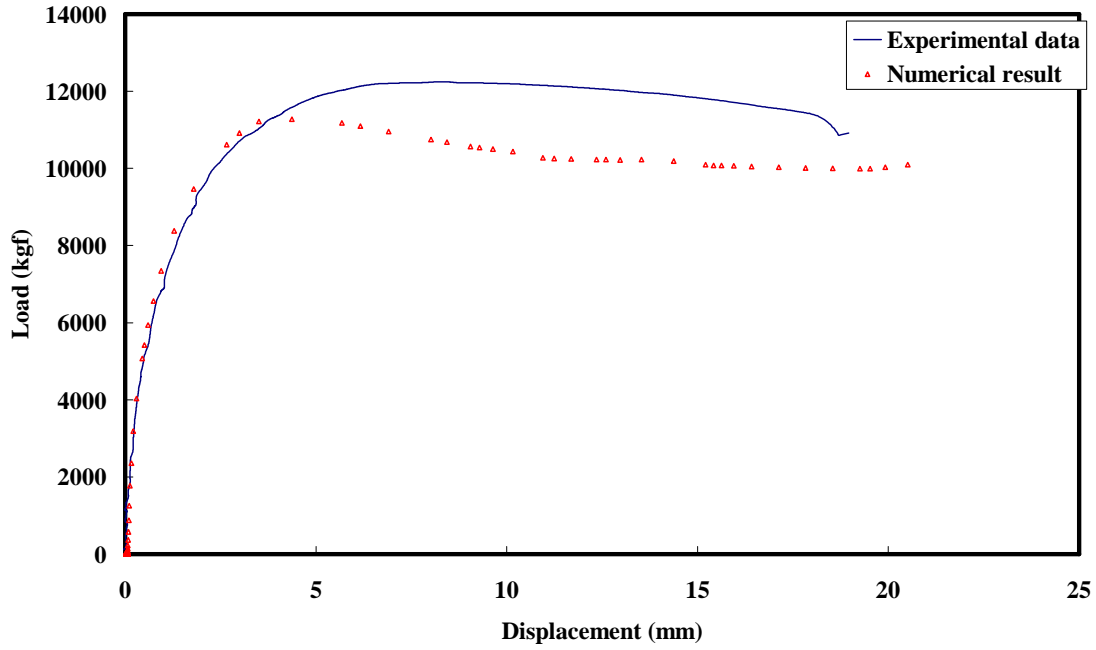


圖 6- 13 SN10-t06-T500 試體模擬結果比較

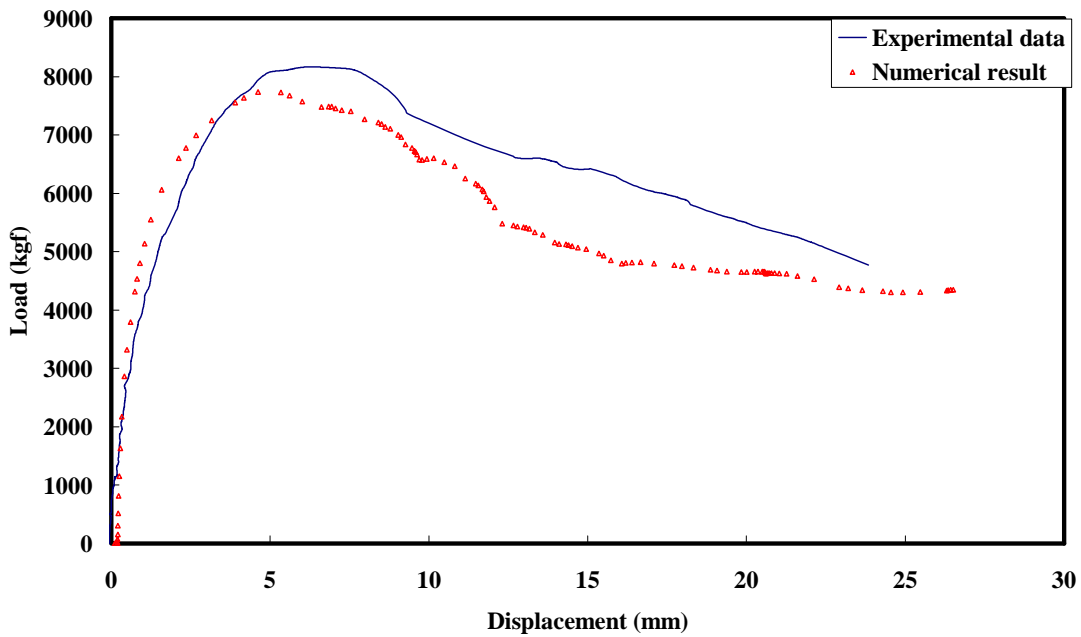


圖 6-14 SN10-t06-T700 試體模擬結果比較

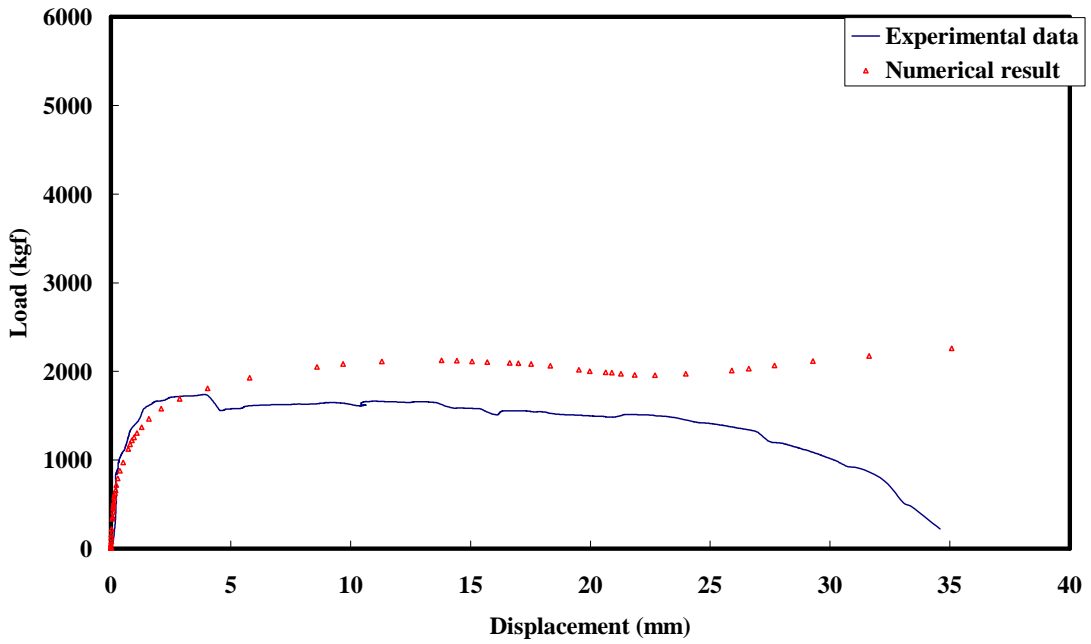


圖 6-15 SN490B 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖

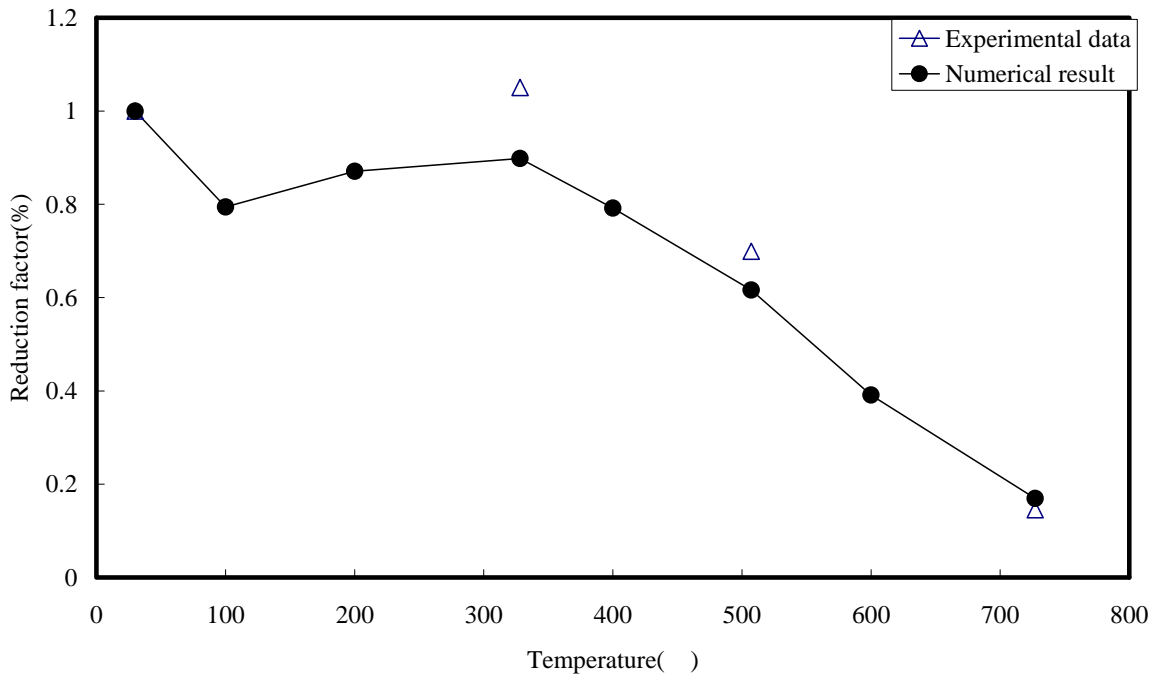


圖 6-16 FR10-t06-T020 試體模擬結果比較

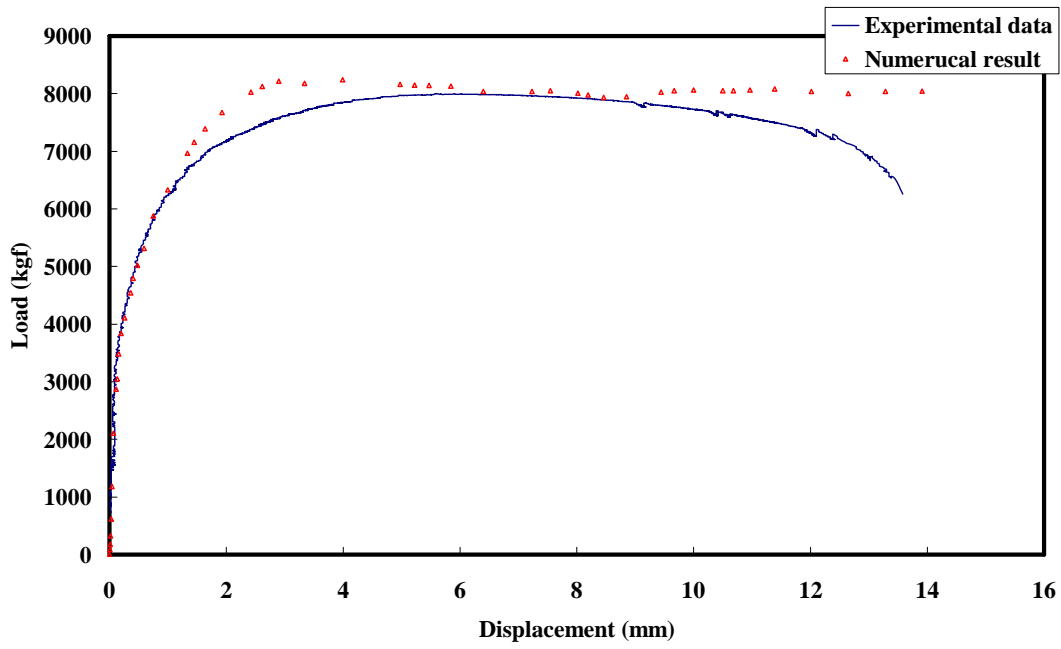


圖 6-17 FR05-t06-T300 試體模擬結果比較

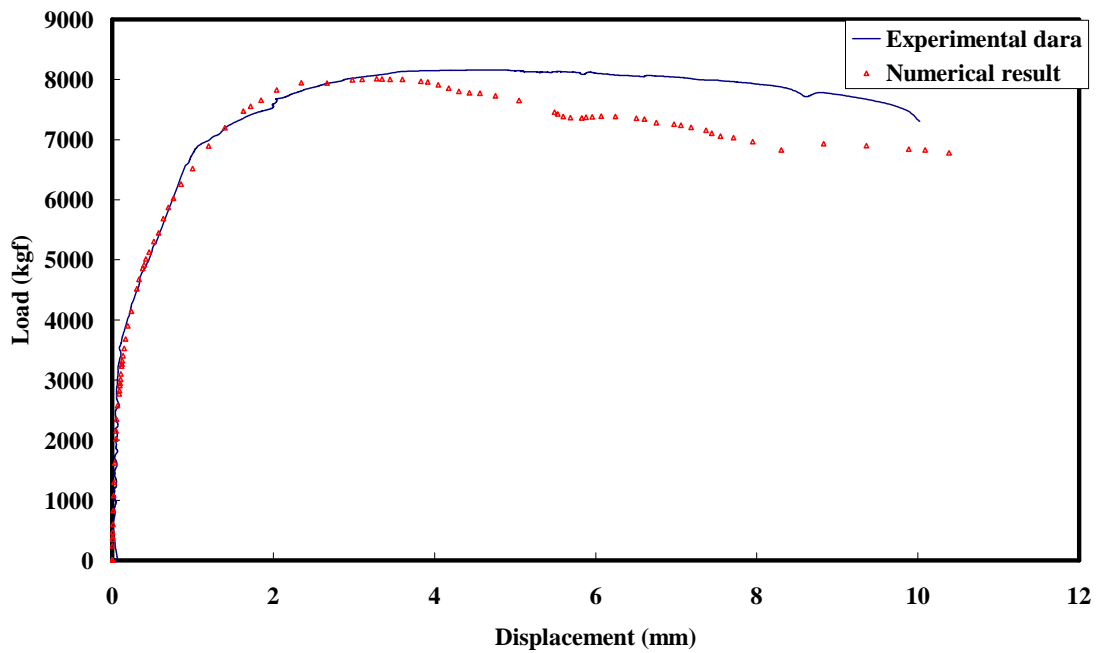


圖 6- 18 FR05-t06-T500 試體模擬結果比較

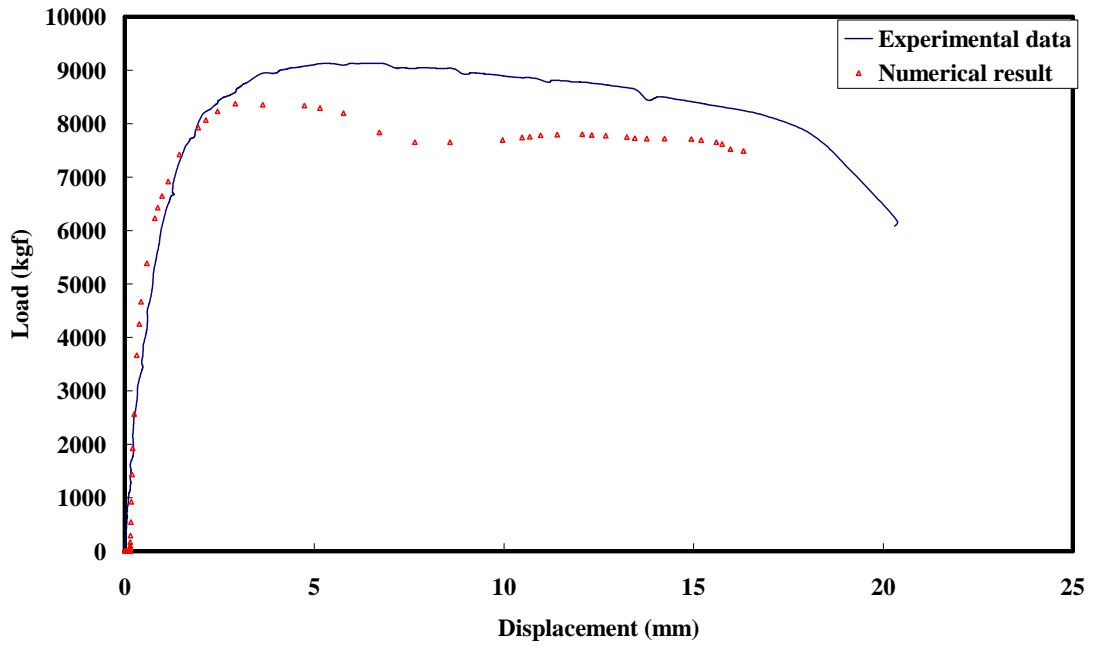


圖 6- 19 FR05-t06-T700 試體模擬結果比較

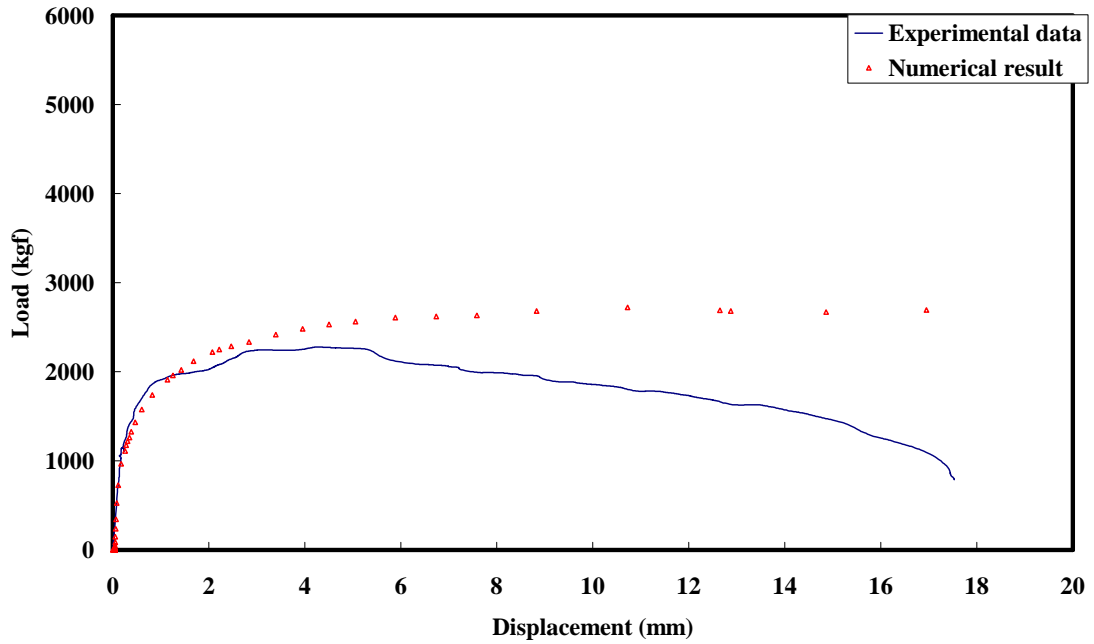


圖 6-20 SN490C-FR 鋼板且螺栓孔淨邊距 0.5d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖

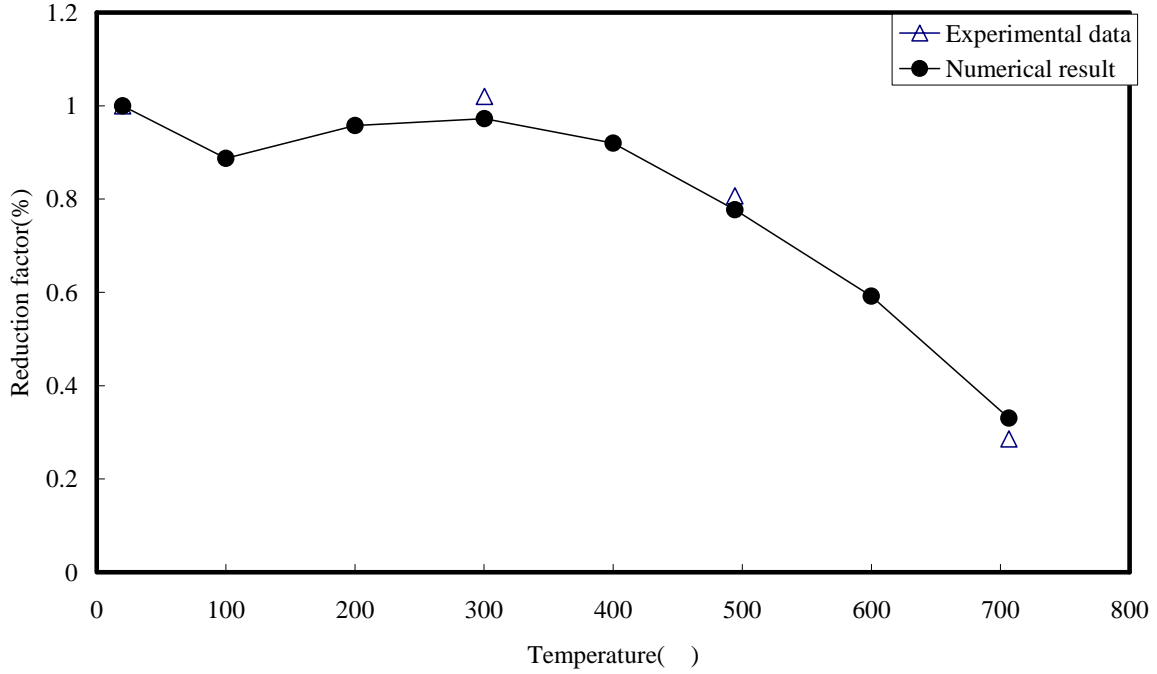


圖 6-21 FR10-t06-T020 試體模擬結果比較

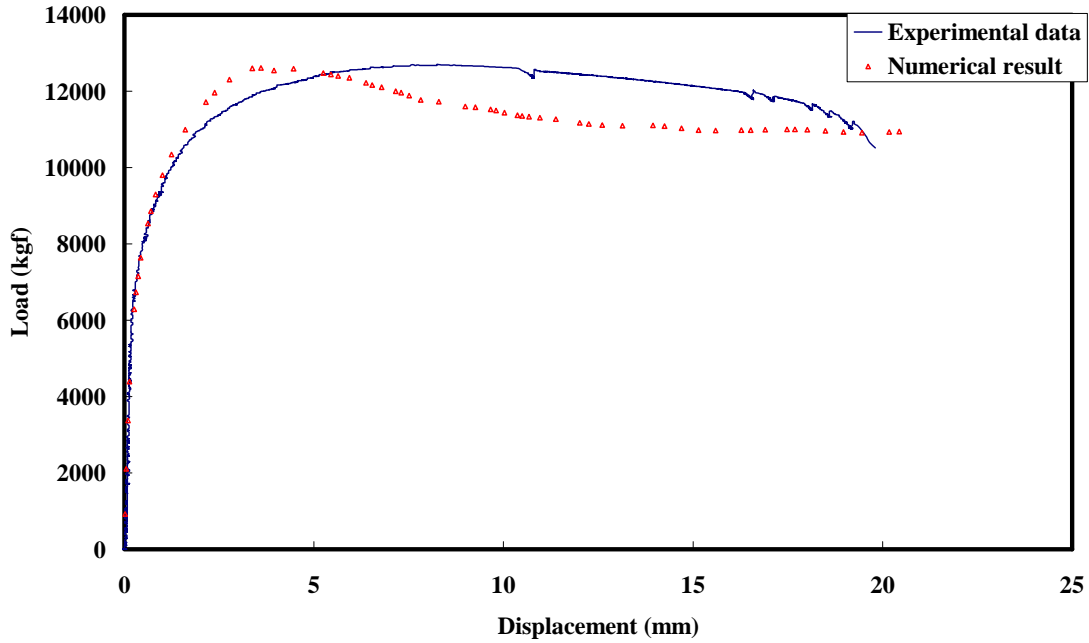


圖 6-22 FR10-t06-T300 試體模擬結果比較

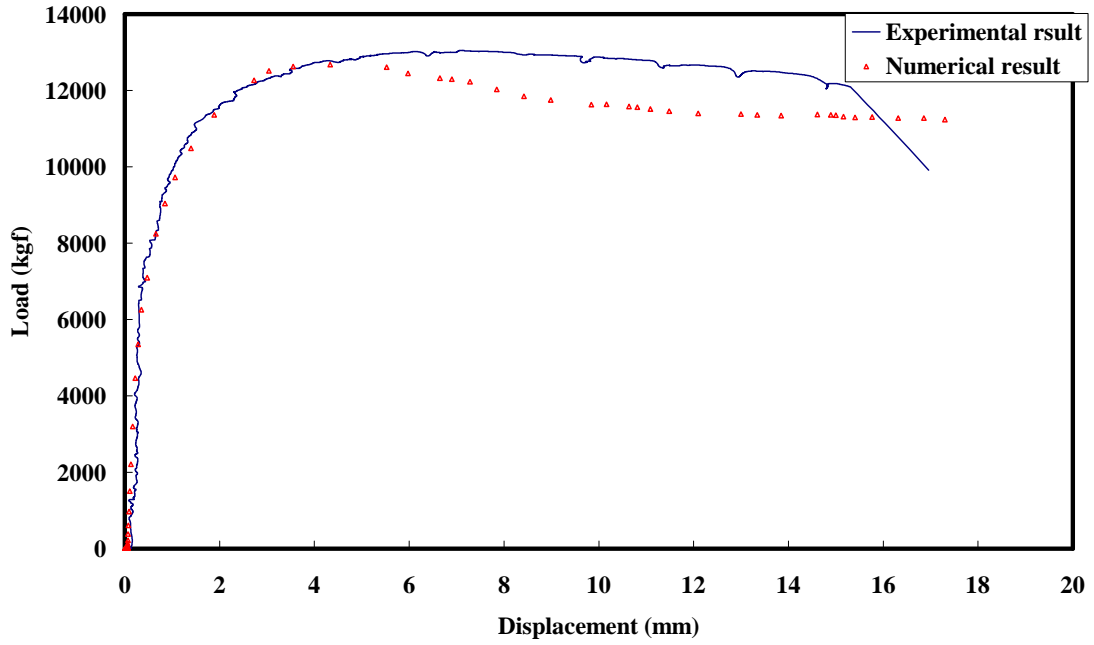


圖 6-23 FR10-t06-T500 試體模擬結果比較

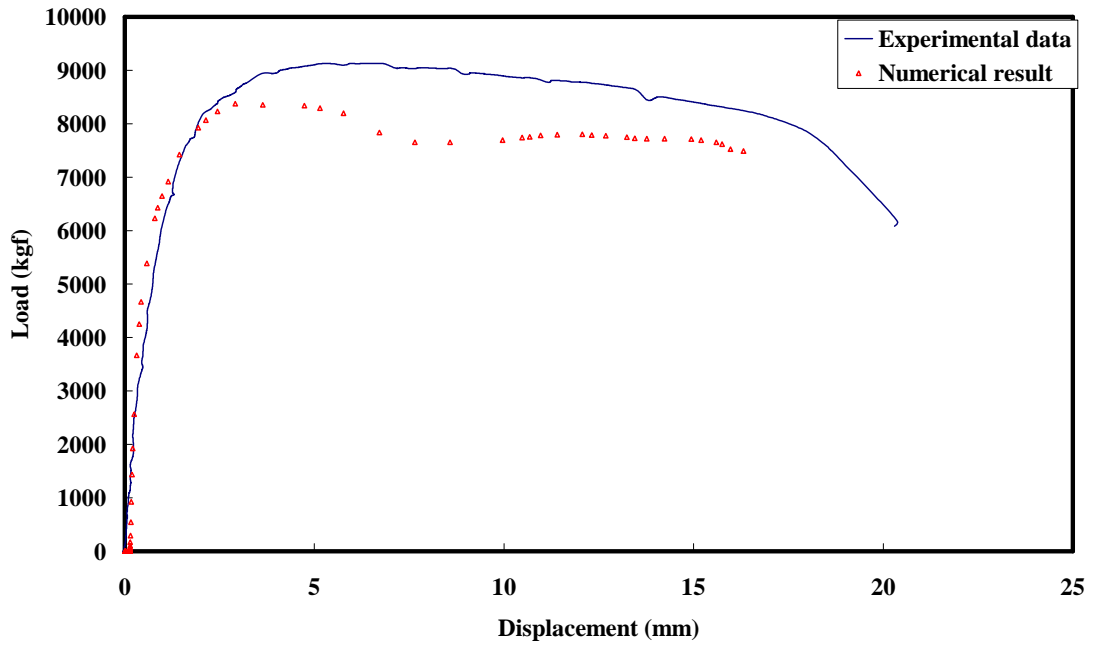


圖 6-24 FR10-t06-T700 試體模擬結果比較

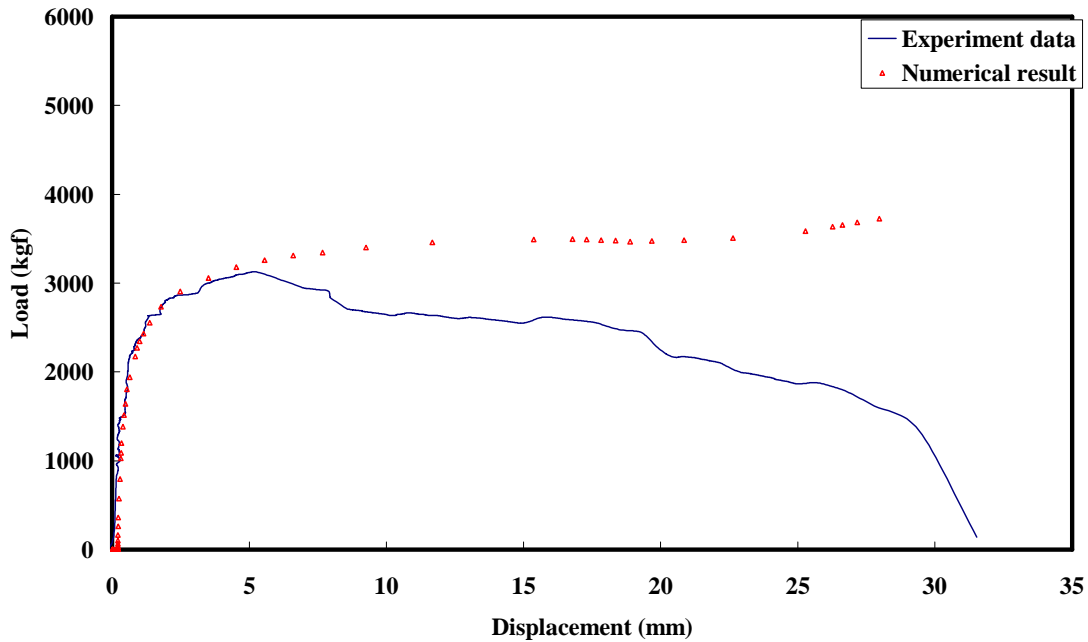


圖 6-25 SN490C-FR 鋼板且螺栓孔淨邊距 1.0d 時，螺栓孔極限承壓力折減關係圖

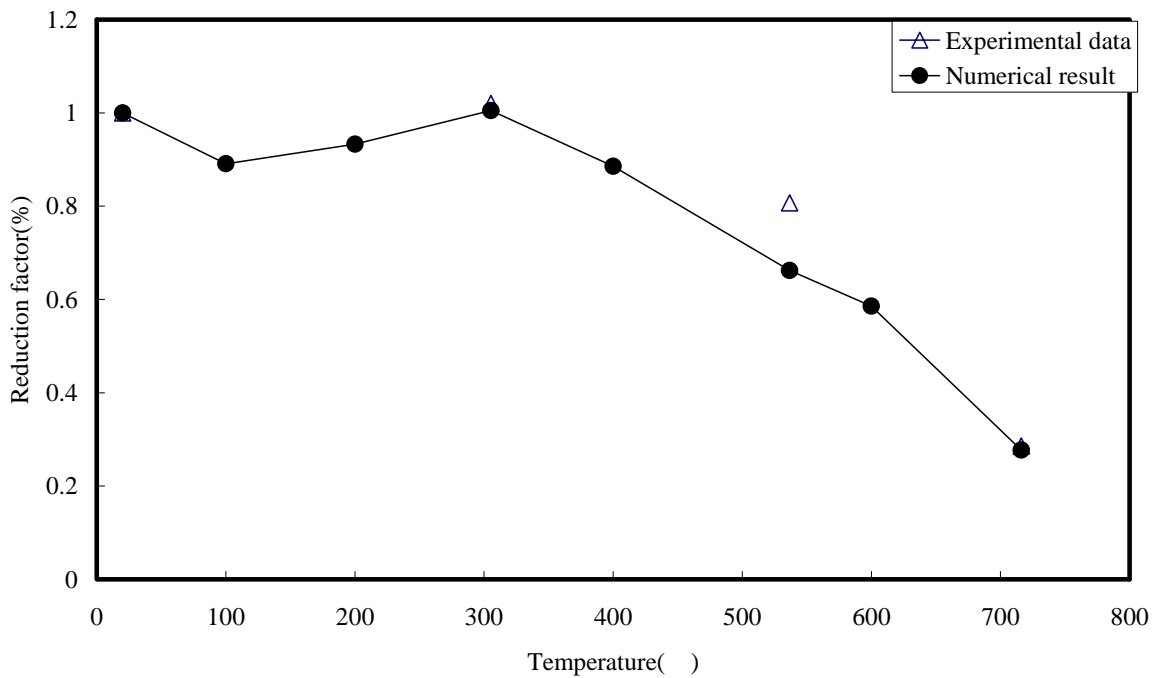


圖 6- 26 6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(RT)

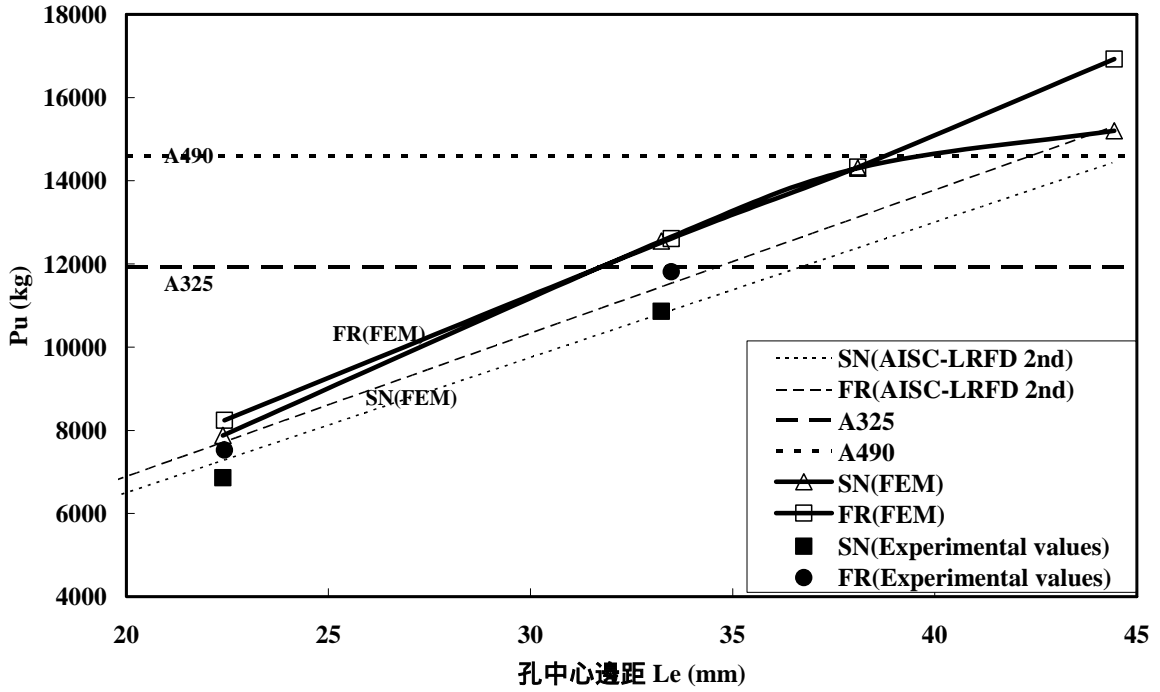


圖 6- 27 6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(300°C)

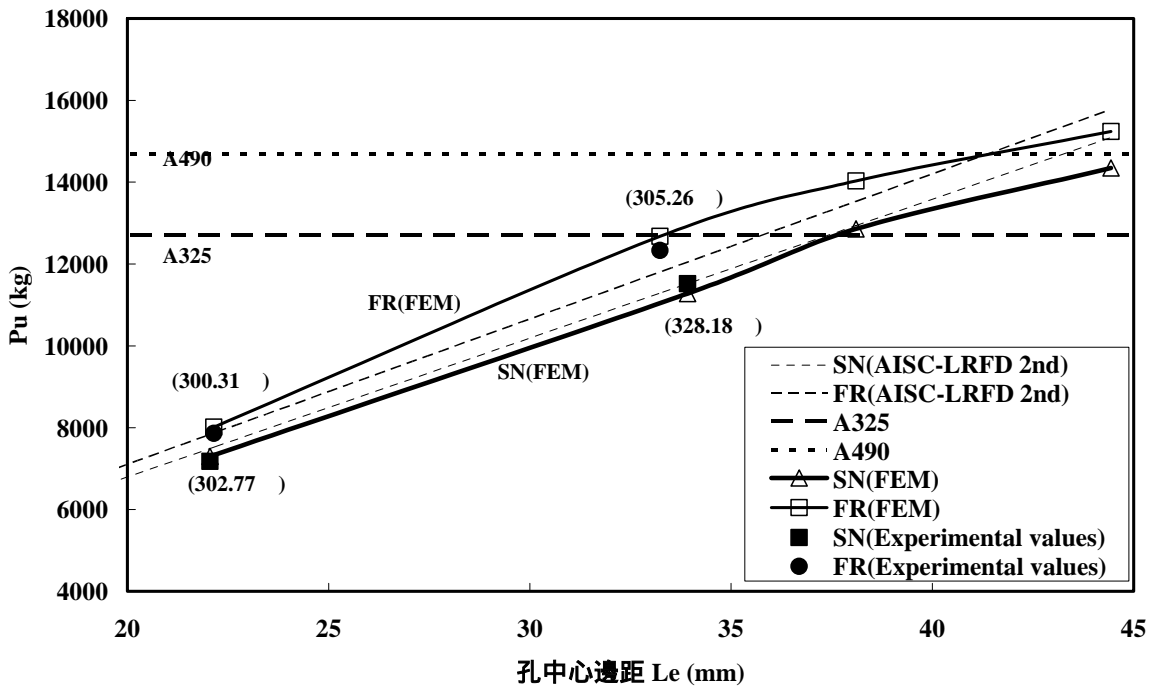


圖 6- 28 6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(500°C)

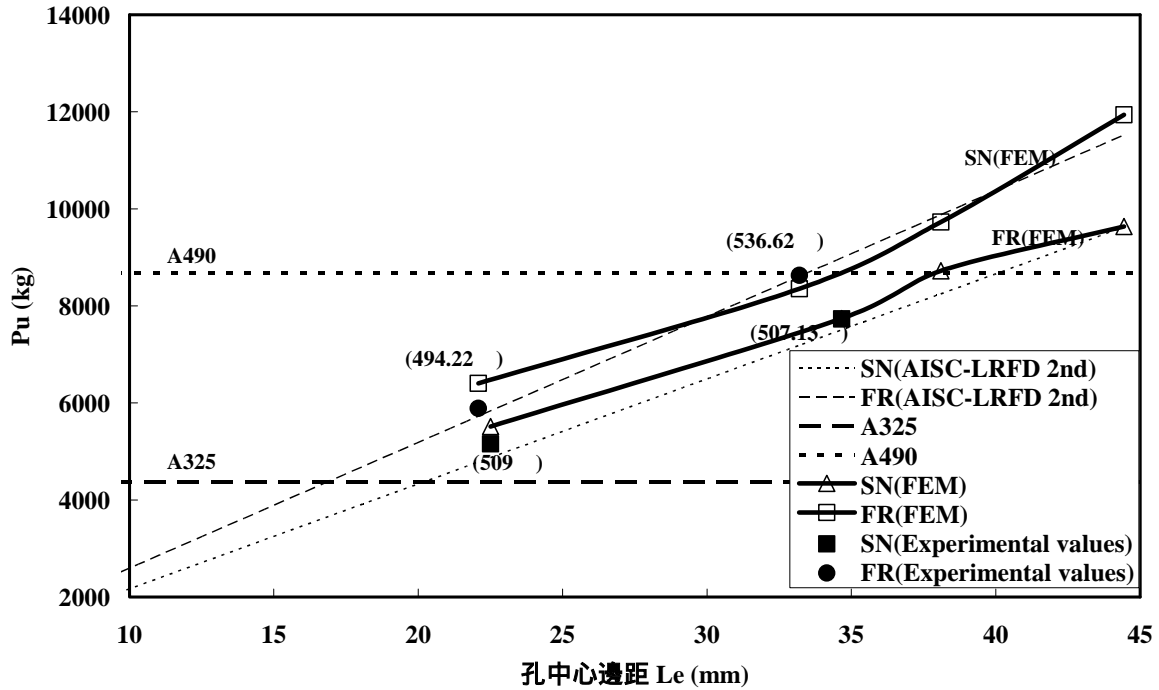


圖 6- 29 6mm 厚鋼板與 7/8 inch 高強度螺栓承壓力比較(700°C)

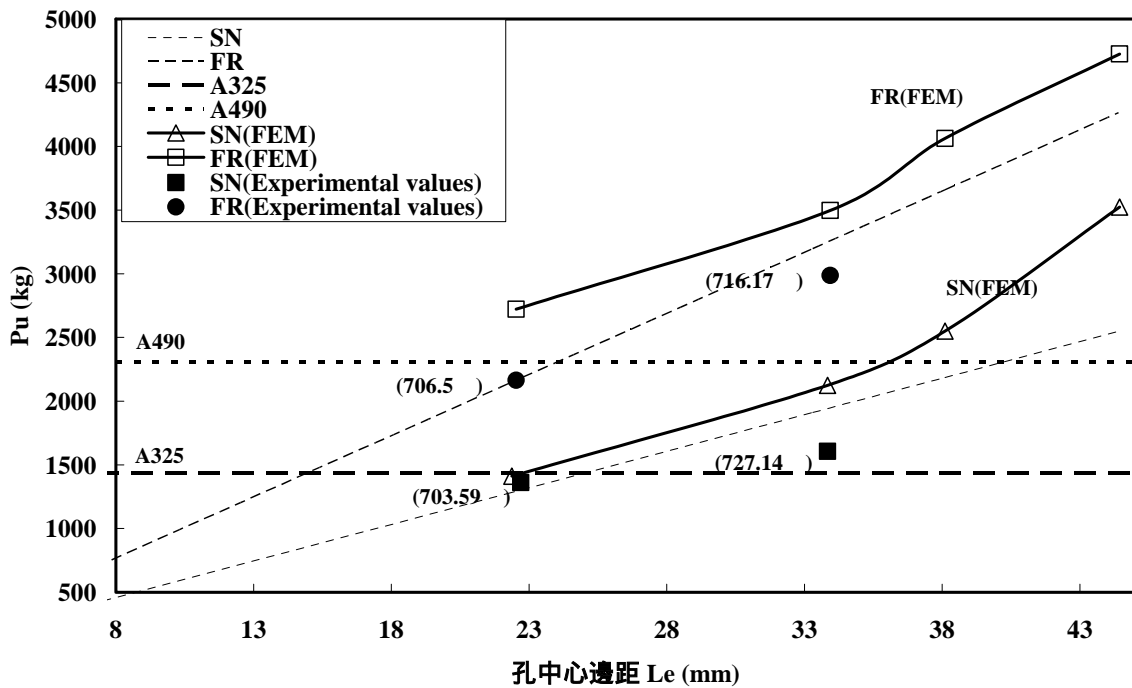


圖 6-30 7/8 inch 高強度螺栓與 6 mm 厚鋼板螺栓孔(SN490B 鋼材)承
壓力比較

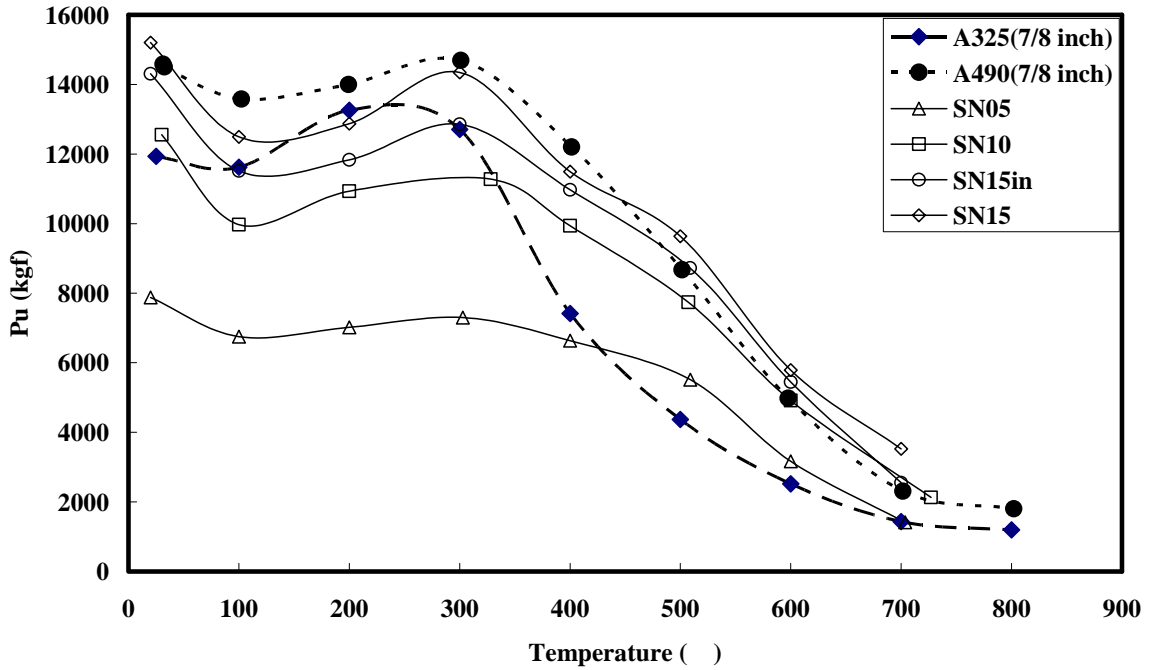


圖 6-31 7/8 inch 高強度螺栓與 6 mm 厚鋼板螺栓孔(SN490C-FR 鋼材)
承壓力比較

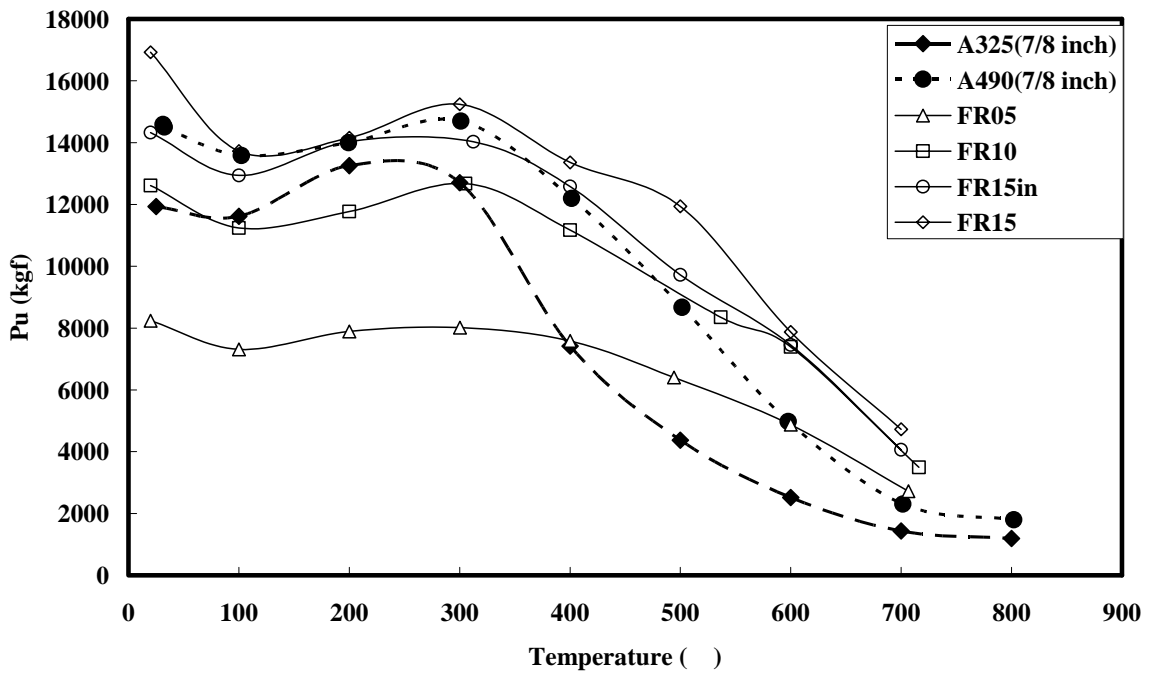
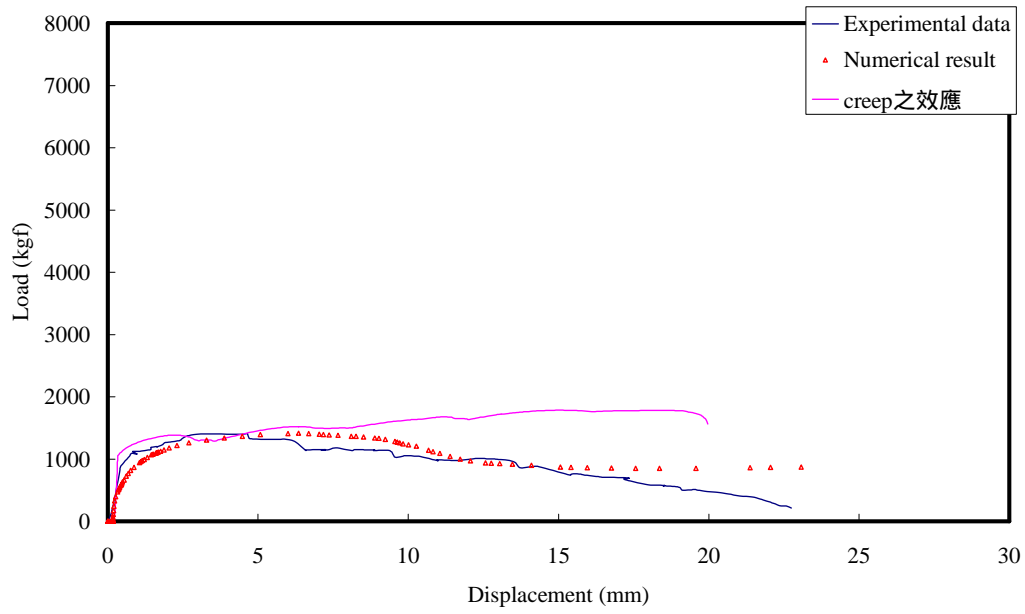


圖 6-32 SN05t06T700 包含潛變之效應



第七章 結論與建議

第一節 結論

1. 由 ABAQUS 線彈性部分模擬之結果可證實，利用 CCD 位移量測系統所量測出來之位移與模擬所得之結果幾乎相符合，故以 CCD 來量測位移之非接性方法，可成功應用在高溫實驗中。
2. 由螺栓孔於高溫下承载力試驗結果與 ABAQUS 分析模擬結果相比較，ABAQUS 可成功模擬螺栓孔最大承载力。
3. 由普通鋼(SN490B)與耐火鋼(SN490C-FR)的實驗結果以及附錄二樑柱接頭設計的結果，耐火鋼在單位重量下能提供較高的承壓力，並且在溫度超過 600°C 時，承壓力折減不至於過大，可作為設計上的考量。
4. 在與各規範提供之承壓力公式的比較中可知，較新的 LRFD 第三版(2001)所提供的公式較保守，而 LRFD 第二版(1993)所提供的公式最為接近實驗所得到的結果。
5. 鋼材在溫度與延展性的關係也在實驗中得到驗證，300°C 左右因為藍脆現象使的鋼材性質變脆，超過 300°C 之後，鋼材逐漸變軟，其延展性隨著溫度的上升不斷的升高。
6. 由實驗結果得知，厚度 6mm 的 SN490C-FR 耐火級鋼板與 SN490B 鋼材跟 7/8in. (22.2mm) A325 螺栓單剪接合，依照 AISC-LRFD 規範的規定，1.5 英吋(38.1mm)的最小螺栓孔邊距(L_e)，應可以避免螺栓孔承壓破壞。
7. 6mm 厚之 SN490C-FR 耐火級鋼板與 7/8 inch (22.2mm) A490 螺栓單剪接合，其避免螺栓孔承壓破壞之最小邊距介於邊距 1.5inch ($L_e=38.1\text{mm}$) 與淨邊距 1.5d ($L_e=44.4\text{mm}$) 之間，此最小邊距小於 SN490B 鋼材發生承壓破壞之最小邊距(1.5d 淨邊距)，可見耐火鋼高溫承壓強度優於普通鋼之特性。

第二節建議

立即可行之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所

目前國內對於鋼結構建築物之設計乃依據「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，其主要設計精神係沿用美國AISC-LRFD設計規範進行結構物常溫下設計，惟火災發生時，其火場溫度驟升尤達閃燃以後之火災全盛期，建築構造承受高達 600°C 以上之高溫，鋼構承載能力之設計是否仍得沿用並進行高溫下之分析，經由本研究初步針對鋼板螺栓接合承壓力之實驗與分析結果，該AISC-LRFD(2001)規範之設計仍得加以應用於火害下鋼板螺栓接合承壓力之分析設計。

長期性之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

因國內目前採用之「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」其接頭分析設計內容，依不同結構行為分門別類，本研究接頭行為僅為其中一項，為能整體通盤性考量火害下之接頭設計，建議針對不同接頭受力行為延伸研究之觸角。

附錄一期末審查意見

謝國防訓儲研究員仁杰：

1. 在接頭區內耐火鋼與一般鋼因膨脹係數不同，是否須另外考量。

王國防訓儲研究員暉堯：

1. 依簡報之第三個圖，有關其檢力破壞模式是否與孔距有關？

張助理研究員尚文：

1. 有關該量測變形之設備為何？是否具足夠精度？

蔡研究員銘儒：

1. 有關本案研究成果，因有中鋼與成大一併合作，其成果歸屬因加以釐清。
2. 一般剪力接頭於國內較少應用，恐研究成果受限，不符現狀。
3. 所內研究方向以研修法規條文為走向，請說明本案研究重點為何？

陳組長建忠：

1. 剪力接頭與抗彎接頭於結構行為上顯有差異之處，如何加以區別。
2. 在接頭處採用耐火鋼，是否仍須加以被覆？
3. 有關研究題目與方向應可加以延伸，以符合國內之現狀
4. 有關接頭耐火性能主控參數為何？目前是否有相關研究心得。

附錄二

	實際溫度 正規應力 實驗值折減			相對誤差值平方					
	°C	$f/(2*t*Lc)$	%	中鋼資料	Eurocodes 3&4BS	5950: Part 8	新日本製鐵	方朝俊	4100 & NZS 3
SN05-t06-T020	20.00	55.020	1.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		0.00000
SN05-t06-T300	302.77	59.347	1.079	0.00137	0.00619	0.00632	0.00842		0.04387
SN05-t06-T500	509.00	40.605	0.738	0.00957	0.00020	0.00020	0.02489		0.04167
SN05-t06-T700	703.59	10.808	0.196	0.00041	0.00086	0.00086	0.00028		0.00833
			均方根值	0.05328	0.04255	0.04293	0.09165		0.15319
SN10-t06-T020	30.00	42.477	1.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000		0.00000
SN10-t06-T300	328.18	43.788	1.031	0.00110	0.00095	0.00155	0.00535		0.03819
SN10-t06-T500	507.13	28.420	0.669	0.00007	0.00789	0.00789	0.00704		0.00898
SN10-t06-T700	727.14	6.113	0.144	0.00094	0.00286	0.00286	0.00070		0.00007
			均方根值	0.06399	0.05410	0.05545	0.05720		0.10868
FR05-t06-T020	20.00	60.119	1.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
FR05-t06-T300	300.31	67.083	1.116	0.01355	0.01342	0.01547	0.01260	0.02403	0.09722
FR05-t06-T500	494.22	48.680	0.810	0.00226	0.00029	0.00035	0.00024	0.04682	0.04963
FR05-t06-T700	706.50	17.469	0.291	0.00057	0.00467	0.00467	0.00026		0.00029
			均方根值	0.02294	0.06779	0.07159	0.05724	0.15368	0.19179
FR10-t06-T020	20.00	76.391	1.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
FR10-t06-T300	305.26	80.613	1.055	0.00091	0.00305	0.00323	0.00106	0.00892	0.03858
FR10-t06-T500	536.62	56.522	0.740	0.00268	0.00539	0.00539	0.00007	0.08191	0.08873
FR10-t06-T700	716.17	18.901	0.247	0.00000	0.00136	0.00136	0.00024		0.00011
			均方根值	0.03462	0.04951	0.04995	0.01851	0.17401	0.17848
			總均方根值	0.04571	0.05428	0.05599	0.06183	0.16416	0.18525

附錄二

SN490B 梁柱剪力接頭範例：

樑：W14×30, $t_w=0.27$, $T = 12$ in.

樑使用材料：SN490B

支撐位置：柱的翼板（假設為剛體）

反力：25 kips

使用螺栓：直徑 7/8 in. A490 螺栓

焊接：E70XX 填角焊

環境溫度：600°C

設計一個單板構架連接，計算所需要的板和焊接的尺寸。

1. 計算所需的螺栓數量：

A490 螺栓 600°C 折減 $F_u = 150 \times 0.3414 = 51.2169$

$\phi r_v = 0.75 \times 51 \times 0.4 \times 0.6013 = 9.2393$ k

$n = R / \phi r_v = 2.7058$

嘗試用 3 根螺栓。

檢查螺栓的偏心載重：

剛體支撐/標準孔

$e_b = |(n - 1) - a| = |(3 - 1) - 3| = 1.0$

查 AISC-LRFD(2001) 中表 7-17

$s = 3$ in. $e_x = 1.0$ in. $n = 3$

得到 $C = 2.71$

$\phi V_n = C \times \phi r_v = 2.71 \times 9.2393 = 25.0385$ kips > 25 kips OK

2. 設計板幾何形狀：

幾何限制：

$t_p \leq d_b/2 + 1/16$ in.

$L_h \geq 1 \frac{1}{2}$ in.

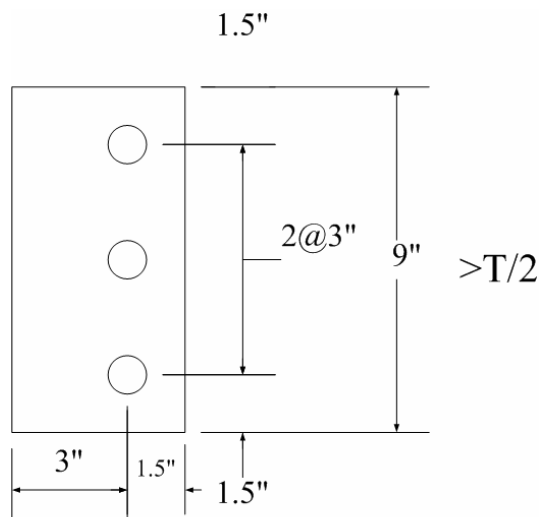
$L_v \geq 1 \frac{1}{2}$ in.

$2 \frac{1}{2}$ in. $\leq a \leq 3 \frac{1}{2}$ in.

$2 \leq n = \text{NO. of Bolts} \leq 9$

$L \geq T/2$

嘗試：



3. 計算板強度：

$$t_p \leq d_b/2 + 1/16 \text{ in.} = 0.5 \text{ in}$$

嘗試 1/4 in. = 0.25 in. 厚鋼板。

$$\text{SN490B在 } 600^\circ\text{C } F_y \text{ 折減} = 49.8929 \times 0.47 = 23.4497 \text{ ksi}$$

$$\text{SN490B在 } 600^\circ\text{C } F_u \text{ 折減} = 77.0150 \times 0.47 = 36.1970 \text{ ksi}$$

Shear Yielding:

$$\begin{aligned} \phi V_n &= 0.9(0.6F_y)A_g = 0.9 (0.6 \times 23.4497) (0.25 \times 9) \\ &= 28.1913 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \end{aligned} \quad \text{OK}$$

Shear Fracture:

$$\begin{aligned} \phi V_n &= 0.75(0.6F_u)A_n = 0.75 (0.6 \times 36.1970) (9 - 3) \times 0.25 \\ &= 24.4330 \text{ kips} \end{aligned} \quad \text{N.G.}$$

嘗試將厚度增大，試 $t = 3/8 \text{ in.} = 0.375 \text{ in.}$ 厚鋼板

Shear Yielding:

$$\begin{aligned} \phi V_n &= 0.9(0.6F_y)A_g = 0.9 (0.6 \times 23.4497) (0.375 \times 9) \\ &= 42.7371 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \end{aligned} \quad \text{OK}$$

Shear Fracture:

$$\begin{aligned} \phi V_n &= 0.75(0.6F_u)A_n = 0.75 (0.6 \times 36.1970) (9 - 6) \times 0.25 \\ &= 36.6495 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \end{aligned} \quad \text{OK}$$

Block shear:

$$\text{Tension yield} = A_{gt} \times F_y = 0.5625 \times 23.4497 = 13.1905$$

$$\text{Tension fracture} = A_{nt} \times F_u = 0.375 \times 36.197 = 13.5739$$

$$\text{Shear yield} = A_{gv} \times 0.6F_y = 2.8125 \times 0.6 \times 23.4497 = 39.5714$$

$$\text{Shear fracture} = A_{nv} \times 0.6F_u = 1.875 \times 0.6 \times 36.197 = 40.7216$$

$$\phi R_n = 0.75 (40.7216 + 13.1905) = 40.4341 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \quad \text{OK}$$

Bearing:

$$\begin{aligned} \phi R_n &= 0.75 (2.4 \times 0.875 \times 0.375 \times 36.197 + 2.4 \times 0.875 \times 0.375 \times 36.197 + 1.2 \\ &\times 1 \times 0.375 \times 36.197) = 54.9743 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \end{aligned}$$

OK

Plate Buckling:

$$L / 64 = 9 / 64 = 0.14 < 1 / 4$$

OK

4. 計算所需焊接尺寸：

由 AISC-LRFD(2001) Table J2.4

t_{weld} minimum size = 3/16 in.

使用 PL 3/8 × 4 1/2 × 0" -9" SN490B, with (3) 7/8 in. A490-N Bolts.

SN490C-FR 梁柱剪力接頭範例：

為了比較普通鋼與耐火鋼在鋼結構設計上應用的特性，初始設定並不改變，希望在一樣的情形之下，耐火鋼有更好的應用。

樑：W14×30, $t_w=0.27$, $T = 12$ in.

樑使用材料：SN490C-FR

支撐位置：柱的翼板（假設為剛體）

反力：25 kips

使用螺栓：直徑 7/8 in. A490 螺栓

焊接：E70XX 填角焊

環境溫度：600°C

設計一個單板構架連接，計算所需要的板和焊接的尺寸。

1. 計算所需的螺栓數量：

A490 螺栓 600°C 折減 $F_u = 150 \times 0.3414 = 51.2169$

$\phi r_v = 0.75 \times 51 \times 0.4 \times 0.6013 = 9.2393$ k

$n = R / \phi r_v = 2.7058$

嘗試用 3 根螺栓。

檢查螺栓的偏心載重：

剛體支撐/標準孔

$e_b = |(n - 1) - a| = |(3 - 1) - 3| = 1.0$

查 AISC-LRFD(2001) Table 7-17

$s = 3$ in. $e_x = 1.0$ in. $n = 3$

得到 $C = 2.71$

$\phi V_n = C \times \phi r_v = 2.71 \times 9.2393 = 25.0385$ kips > 25 kips OK

2. 設計板幾何形狀：

幾何限制：

$t_p \leq d_b/2 + 1/16$ in.

$L_h \geq 1 \ 1/2$ in.

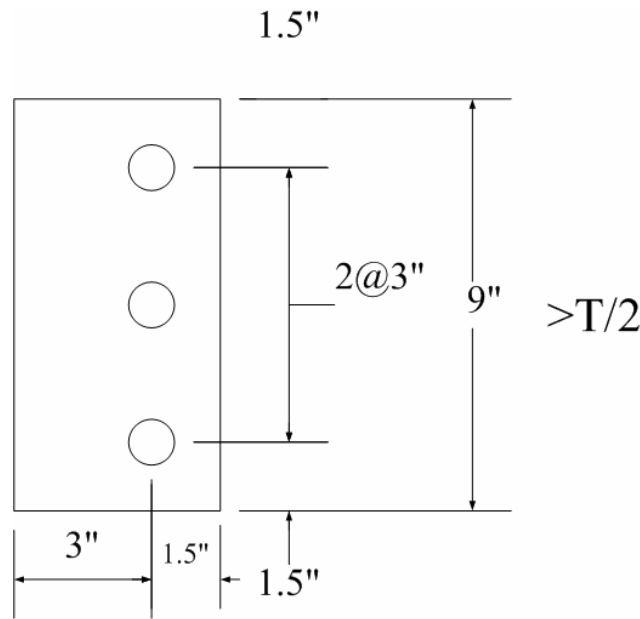
$L_v \geq 1 \ 1/2$ in.

$2 \ 1/2$ in. $\leq a \leq 3 \ 1/2$ in.

$2 \leq n = \text{NO. of Bolts} \leq 9$

$L \geq T/2$

嘗試：



3. 計算板強度：

$$t_p \leq d_b/2 + 1/16 \text{ in.} = 0.5 \text{ in}$$

嘗試 1/4 in. = 0.25 in. 厚鋼板。

$$\text{SN490C-FR在 } 600^\circ\text{C } F_y \text{ 折減} = 65.1219 \times 0.56 = 36.4683 \text{ ksi}$$

$$\text{SN490C-FR在 } 600^\circ\text{C } F_u \text{ 折減} = 81.6127 \times 0.56 = 45.7031 \text{ ksi}$$

Shear Yielding:

$$\phi V_n = 0.9(0.6F_y)A_g = 0.9 (0.6 \times 36.4683) (0.25 \times 9)$$

$$= 44.3090 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \quad \underline{\text{OK}}$$

Shear Fracture:

$$\phi V_n = 0.75(0.6F_u)A_n = 0.75 (0.6 \times 45.7031) (9 - 3) \times 0.25$$

$$= 30.8496 \text{ kips} \quad \underline{\text{OK}}$$

Block shear:

$$\text{Tension yield} = A_{gt} \times F_y = 0.375 \times 36.4683 = 13.6756$$

$$\text{Tension fracture} = A_{nt} \times F_u = 0.25 \times 45.7031 = 11.4258$$

$$\text{Shear yield} = A_{gv} \times 0.6F_y = 1.875 \times 0.6 \times 36.4683 = 41.0268$$

$$\text{Shear fracture} = A_{nv} \times 0.6F_u = 1.25 \times 0.6 \times 45.7031 = 34.2773$$

$$\phi R_n = 0.75 (34.2773 + 11.4258) = 34.2773 \text{ kips} > 25 \text{ kips} \quad \underline{\text{OK}}$$

Bearing:

$$\phi R_n = 0.75 (2.4 \times 0.875 \times 0.25 \times 45.7031 + 2.4 \times 0.875 \times 0.25 \times 45.7031 + 1.2$$

$$\times 1 \times 0.25 \times 45.7031) = 46.2744 \text{ kips} > 25 \text{ kips}$$

OK

Plate Buckling:

$$L / 64 = 9 / 64 = 0.14 < 1 / 4 \quad \underline{\text{OK}}$$

4. 計算所需焊接尺寸：

由 AISC-LRFD(2001) Table J2.4

t_{weld} minimum size = 3/16 in.

使用 PL 1/4 × 4 1/2 × 0" -9" SN490C-FR, with (3) 7/8 in. A490-N Bolts.

參考書目

- American Institute of Steel Construction. (1993). *Load and resistance factor design specifications for structural steel buildings*, second edition.
- American Institute of Steel Construction. (2001). *Load and resistance factor design specifications for structural steel buildings*, third edition.
- Allegheny Ludlum (2002), “Stainless Steel”, Technical Data Blue Sheet, Allegheny Ludlum.
- British Standards Institution.(1987). *BS 5950: Structural use of steelwork in building. Part 8: Code of practice for fire resistant design*. BSI.
- Buchanan, A. H. (2001), *Structural Design for Fire Safety*, John Wiley & Son Inc, New York, USA.
- Chong, C. P. and Matlock, R. B. (1976), “Light Gage Steel Bolted Connections without Washers,” *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 101, ST7, pp.1381-1391.
- European committee for Standardisation.(1992). *Eurocode3: design of steel structures*, part1: general rules for buildings.
- Fisher, J. W. and Struik, J. H. A. (1974), *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, John Wiley & Son Inc, New York, USA.
- Frank, K. H. and Yura, J. A. (1981), “An Experimental Study of Bolted Shear Connections,” *Report No. FHWA/RD-81/148*, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington D.C.
- Gilchrist, R. T. and Chong, K. P. (1979), “The Light Gage Bolted Connections without Washers,” *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 105, ST1, pp.175-183.
- Harmathy, T. Z. (1993), *Fire Safety Design & Concrete*, Concrete Design and Construction Series, Longman Science & Technical, England, UK.
- Kulak GL, Fisher JW, Struik JHA. Guide to design criteria for bolted and riveted joints, 2nd ed. New York: Wiley-Interscience Publication, 1987:112-6,141-4.
- Kim, H. J. and Yura, J. A. (1999), “The Effect of Ultimate-to-Yield Ratio on the Bearing Strength of Bolted Connections,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 49, No. 3, pp.255-269.
- Kim, H. J. (1996), “The effect of end distance of the bearing strength of bolted connection,”

Master Thesis, The University of Texas at Austin, USA.

Lawson, R. M. and Newman, G. M. (1996), *Structural Fire Design to EC3 & EC4, and Comparison with BS 5950*, Technical Report SCI Publication 159, The Steel Construction Institute, Berkshire, UK.

Lewis, B. E. and Zwerneman, F. J. (1996), *Edge Distance, Spacing, and Bearing in Bolted Connections*, Oklahoma State University, July.

British Standards Institution. (1990). *BS 5950: Structural use of steelwork in building*. Part 8: Code of practice for fire resistant design. BSI.

Yushkevich, P.M., Manankova, L.V. and Stepanovich V. E., (1974) “Blue brittleness of steel”, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 16, No. 4, pp. 344-345

方朝俊. (2000), “火害對耐火鋼構件銲接及栓接行為之影響”, 國立台灣科技大學, 營建工程系.

新日本製鐵株式會社(1995) “建築構造用耐火鋼材 (NSFR)” No. AC104.

林文謙 (1998), “碳鋼與高強度低合金鋼”, 鋼鐵材料手冊第二章, 中國材料科學學會, pp. 142.