

國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文

乾縮潛變對新舊橋樑連接之影響

The Effect of Shrinkage and Creep in The  
Connection of New and Old Bridge



研究生：石靖嵐  
指導教授：鄭復平 博士

中華民國九十五年八月

乾縮潛變對新舊橋樑連接之影響  
The Effect of Shrinkage and Creep in The  
Connection of New and Old Bridge

研究生:石靖嵐

Student : Cing-Lan Shih

指導教授:鄭復平 博士

Adviser : Dr. Fu-Ping Cheng

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of Requirements

For the Degree of

Master of Science

In

Civil Engineering

August 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年八月

# 乾縮潛變對新舊橋樑連接之影響

學生：石靖嵐

指導教授：鄭復平 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘 要

本論文是在探討橋樑拓寬時，新舊兩橋樑以固接法相連接時，不同的乾縮潛變量對兩橋樑之連接板所產生的應力。藉由有限元素分析軟體 DAINA 建構有限元素模型加以分析，來了解新建的橋樑澆鑄完後在不同的環境條件下以不同的時間與舊有橋樑相接之應力影響。分析結果得知新舊兩橋樑連接線頭尾兩端的剪應力影響最大，並且新建橋樑澆鑄完後較晚與舊有橋樑相接可以得到改善，以及較低的氣溫和較高的相對溼度的環境條件下也可以得到改善。

關鍵詞：乾縮，潛變，橋樑拓寬，預力。

# **The Effect of Shrinkage and Creep in The Connection of New and Old Bridge**

Student: Cing-Lan Shih

Advisor: Dr. Fu-Ping Cheng

Department of Civil Engineering  
National Chiao-Tung University

## **ABSTRACT**

In this thesis , the stresses in connected slab , which is occurred by the differential shrinkage and creep, was investigated between new constructed and old bridge. A finite element model is established by Diana, a commercial finite element program, to explore the effect of stress in the connection slab for different environment and time after new bridge was built .The results of FE-analysis show that the shear stress is maximum at two end of the joint .Delaying the time to joint the new and old bridge and joint it at higher humidity and lower temperature will reduce the stress occur in the slab , too.

Keyword : shrinkage , creep ,the bridge widening , prestressed.

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	viii
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 研究動機與目的 .....	2
1.3 研究方法與內容 .....	3
第二章 文獻回顧 .....	4
2.1 前言 .....	4
2.2 橋樑拓寬施工方法 .....	4
2.3 混凝土之乾縮 .....	5
2.4 混凝土之潛變 .....	6
2.5 乾縮潛變的分析模式 .....	8
2.5.1 乾縮造成之應變計算 .....	8
2.5.2 潛變方程式的計算 .....	9

2.5.3 隨時間發展之強度與彈性係數計算 .....	11
2.6 潛變模式 .....	12
第三章 有限元素分析方法 .....	15
3.1 前言 .....	15
3.2 有限元素分析軟體簡介 .....	15
3.3 分析假設條件 .....	17
3.4 結構模型簡介 .....	20
3.4.1 模型幾何形狀與束制條件 .....	18
3.4.2 分析的元素 .....	18
3.4.3 分析的材料設定 .....	19
3.5 分析過程 .....	20
3.6 乾縮與潛變的驗證 .....	21
3.7 收斂性分析 .....	22
第四章 有限元素分析結果 .....	23
4.1 前言 .....	23
4.2 60%相對濕度下新橋澆鑄完 30 天後相接應力之分佈 .....	23
4.3 新橋樑澆鑄完等候不同時間相接的應力影響 .....	29
4.4 相對濕度對各應力的影響 .....	31
4.5 溫度對各應力之影響 .....	33

4.6 台灣地區一般相對濕度下冬天與夏天氣溫之應力影響 .....	35
4.7 增加鋼筋量之影響 .....	38
<b>第五章 結論與建議.....</b>	<b>41</b>
5.1 結論.....	41
5.2 建議.....	41
<b>參考文獻 .....</b>	<b>43</b>



## 表目錄

表 1 收斂分析結果表 .....	45
-------------------	----



## 圖目錄

圖 2.1 Kelvin Chain model .....	46
圖 3.4.1 結構模型之側視圖 .....	46
圖 3.4.2 結構模型之橋頭處橫斷面( $X=0$ ) .....	47
圖 3.4.3 元素分割圖 .....	47
圖 3.4.4 元素橫斷面分割圖 .....	48
圖 3.4.5 32 節點實體元素 .....	48
圖 3.4.6 鋼筋分佈側視圖 .....	49
圖 3.4.7 斷面鋼筋分佈圖 .....	49
圖 3.5.1 分析順序圖 .....	50
圖 3.5.2 舊樑 z 向撓度與時間關係圖 .....	50
圖 3.6 分析結果與試驗數據之比對 .....	51

### 60%相對濕度下新橋澆鑄完 30 天後相接應力之分佈

圖 4.2.1 x 向變位圖 .....	52
圖 4.2.2 y 向變位圖 .....	52
圖 4.2.3 z 向變位圖 .....	53
圖 4.2.4 z 向撓度與時間圖 .....	53
圖 4.2.5 xx 應力分佈—1 天 .....	54
圖 4.2.6 xx 應力分佈—30 天 .....	54

圖 4.2.7 xx 應力分佈—90 天 .....	55
圖 4.2.8 xx 應力分佈—180 天 .....	55
圖 4.2.9 xx 應力分佈—360 天 .....	56
圖 4.2.10 xx 應力分佈—720 天 .....	56
圖 4.2.11 連接板上 XX 應力最大處 .....	57
圖 4.2.12 xx 板上最大應力與時間關係圖 .....	57
圖 4.2.13 yy 應力分佈—1 天 .....	58
圖 4.2.14 yy 應力分佈—30 天 .....	58
圖 4.2.15 yy 應力分佈—90 天 .....	59
圖 4.2.16 yy 應力分佈—180 天 .....	59
圖 4.2.17 yy 應力分佈—360 天 .....	60
圖 4.2.18 yy 應力分佈—720 天 .....	60
圖 4.2.19 連接板上 yy 應力最大處 .....	61
圖 4.2.20 yy 向板上最大應力與時間關係圖 .....	61
圖 4.2.21 zz 應力分佈—1 天 .....	62
圖 4.2.22 zz 應力分佈—30 天 .....	62
圖 4.2.23 zz 應力分佈—90 天 .....	63
圖 4.2.24 zz 應力分佈—180 天 .....	63
圖 4.2.25 zz 應力分佈—360 天 .....	64

圖 4.2.26	zz 應力分佈—720 天.....	64
圖 4.2.27	連接版上 zz 向應力最大處.....	65
圖 4.2.28	zz 向板上最大應力與時間關係圖.....	65
圖 4.2.29	xy 向剪應力分佈圖—1 天.....	66
圖 4.2.30	xy 向剪應力分佈圖—30 天.....	66
圖 4.2.31	xy 向剪應力分佈圖—90 天.....	67
圖 4.2.32	xy 向剪應力分佈圖—180 天.....	67
圖 4.2.33	xy 向剪應力分佈圖—360 天.....	68
圖 4.2.34	xy 向剪應力分佈圖—720 天.....	68
圖 4.2.35	xy 板上最大正向與負向剪應力之處.....	69
圖 4.2.36	xy 正負向板上最大減應力與時間關係圖.....	70
圖 4.2.37	yz 向剪應力分佈圖—1 天.....	71
圖 4.2.38	yz 向剪應力分佈圖—30 天.....	71
圖 4.2.39	yz 向剪應力分佈圖—90 天.....	72
圖 4.2.40	yz 向剪應力分佈圖—180 天.....	72
圖 4.2.41	yz 向剪應力分佈圖—360 天.....	73
圖 4.2.42	yz 向剪應力分佈圖—720 天.....	73
圖 4.2.43	板上 yz 最大正向與負向剪應力之處.....	74
圖 4.2.44	yz 正負向板上最大剪應力與時間關係圖.....	75

圖 4.2.45 zx 向剪應力分佈圖—1 天 .....	76
圖 4.2.46 zx 向剪應力分佈圖—30 天 .....	76
圖 4.2.47 zx 向剪應力分佈圖—90 天 .....	77
圖 4.2.48 zx 向剪應力分佈圖—180 天 .....	77
圖 4.2.49 zx 向剪應力分佈圖—360 天 .....	78
圖 4.2.50 zx 向剪應力分佈圖—720 天 .....	78
圖 4.3.1 xx 向不同時間相接之應力 .....	79
圖 4.3.2 yy 向不同時間相接之應力 .....	79
圖 4.3.3 zz 向不同時間相接之應力 .....	80
圖 4.3.4 xy 向不同時間相接之正向剪應力 .....	80
圖 4.3.5 xy 向不同時間相接之負向剪應力 .....	81
圖 4.3.6 yz 向不同時間相接之正向剪應力 .....	81
圖 4.3.7 yz 向不同時間相接之負向剪應力 .....	82
圖 4.4.1 xx 向不同相對濕度應力 .....	83
圖 4.4.2 yy 向不同相對濕度應力 .....	83
圖 4.4.3 zz 向不同相對濕度應力 .....	83
圖 4.4.4 xy 向不同相對濕度正向剪應力 .....	84
圖 4.4.5 xy 向不同相對濕度負向剪應力 .....	84
圖 4.4.6 yz 向不同相對濕度正向剪應力 .....	84

圖 4.4.7 yz 向不同相對濕度負向剪應力 .....	85
圖 4.4.8 台灣各地區氣象站平均相對濕度統計表【8】 .....	86
圖 4.5.1 xx 向不同溫度之應力 .....	87
圖 4.5.2 yy 向不同溫度之應力 .....	87
圖 4.5.3 zz 向不同溫度之應力 .....	87
圖 4.5.4 xy 正向不同溫度之剪應力 .....	88
圖 4.5.5 xy 負向不同溫度之剪應力 .....	88
圖 4.5.6 yz 正向不同溫度之剪應力 .....	88
圖 4.5.7 yz 負向不同溫度之剪應力 .....	89
圖 4.5.8 台灣各地氣象站月平均最高氣溫統計表【8】 .....	90
圖 4.5.9 台灣各地氣象站月平均最低氣溫統計表【8】 .....	91
圖 4.6.1 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時各時間相接之 XX 應力圖 .....	92
圖 4.6.2 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時各時間相接之 YY 應力圖 .....	92
圖 4.6.3 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時各時間相接之 XY 正向剪應力圖 .....	93
圖 4.6.4 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時各時間相接之 XY 負向剪應力圖 .....	93
圖 4.6.5 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時各時間相接之 YZ 正向剪應力圖 .....	94
圖 4.6.6 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時各時間相接之 YZ 負向剪應力圖 .....	94

圖 4.6.7 相對溼度 80% 氣溫 15°C 時各時間相接之 XX 應力圖 .....	95
圖 4.6.8 相對溼度 80% 氣溫 15°C 時各時間相接之 YY 應力圖 .....	95
圖 4.6.9 相對溼度 80% 氣溫 15°C 時各時間相接之 XY 正向剪應力圖 .....	96
圖 4.6.10 相對溼度 80% 氣溫 15°C 時各時間相接之 XY 負向剪應力圖 .....	96
圖 4.6.11 相對溼度 80% 氣溫 15°C 時各時間相接之 YZ 正向剪應力圖 .....	97
圖 4.6.12 相對溼度 80% 氣溫 15°C 時各時間相接之 YZ 負向剪應力圖 .....	97
圖 4.6.13 相對溼度 80% 氣溫 35°C 時 30 天相接之 ZZ 向應力圖 .....	98
圖 4.6.14 夏天開始相接的 XX 向應力圖 .....	98
圖 4.6.15 夏天開始相接的 YZ 向剪應力圖 .....	99
圖 4.6.16 冬天開始相接的 XX 向剪應力圖 .....	99
圖 4.6.17 冬天開始相接的 YZ 向剪應力圖 .....	100

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

隨著都市的發展，交通量不斷的增加，舊有的道路與橋樑，已經逐漸的達到交通量的飽和，而必須要再做拓建的工程。目前國內現有的橋樑拓寬的方法有兩種，一種是固接法，就是將舊橋樑的橋面板懸臂部分預先打掉一部份，等新的橋樑澆製完成達到設計強度以後，再與舊橋樑相連接，比方說中山高的林口到楊梅段拓寬就是用這方法相連接。另一種方法則是用伸縮縫連接新舊兩橋。用伸縮縫連接的兩橋樑可以說猶如兩個獨立結構體，應力不會互相影響，比方說台北跟永和之間的福和橋拓寬就是用這方法相連接。用這種方法雖然對舊有的橋樑不會有應力的影響而且也可以適應較差的地質情況，但是必須持續的進行維修，妨礙交通並且要花上較多的成本，而且如果橋樑上車輛行駛的時速過快，也會影響到安全。因此固接法在國內還是使用的很普遍。

國內近年的橋樑拓寬工程很多舊有橋樑的的年齡都在 15 年以上，例如中山高的楊梅到汐止段，而經過 15 年的橋樑，其混凝土的乾縮(shrinkage)潛變(creep)和鋼腱的預力損耗幾乎已達結束，而新建完的橋樑其乾縮潛變剛開始，因此兩者間產生的額外應力是可預期的。本分析就是以經過 15 年的舊有橋樑，和新打設的橋樑相連接來

了解其行為。

## 1.2 研究動機與目的

材料力學上理想的線性材料必滿足虎克定律  $\sigma = E\varepsilon$ ，因為楊氏係數  $E$  為定值所以，施予固定的應力  $\sigma$  會產生相對應固定的應變  $\varepsilon$ ，但有潛變乾縮性質的材料卻不會遵守此理想的定律。潛變性質的材料受到固定的應力  $\sigma$  所產生的應變，不會是固定的，而會隨著時間持續的增加。乾縮性質的材料則是即使不受到應力還是會有隨時間持續增加的應變產生。但是潛變跟乾縮的應變量隨著時間的增長情況卻不會以線性成長，而是應變量只有開始發生的時候增加最多，之後隨著時間應變增加量越來越少，最後幾乎沒有增加。

因此在橋樑拓寬的情況下，舊有的橋樑因為已經經過很長的時間乾縮潛變造成的變形量已幾乎停止，因拓寬而新接上的橋樑，因為是新澆製完成的，乾縮潛變的變形量正是最大的時候，這使得的兩橋樑之間相連的版會受到兩橋樑變形不一致所造成的應力，而會產生開裂的情況。可預期的是新的橋樑澆製完成後與舊有橋樑的相接時新橋樑等待時間越長，連接板所受的應力會越小，或是相連接板的鋼筋量配置越多，混凝土負擔的應力會越小，但是越長得時間和越多的鋼筋量所造成的工程成本卻越高，因此本研究的目的就是經由研究相接時間與鋼筋量和其它的環境條件對連接板的應力影響，來找出一個可兼顧

成本與安全的適當時間或方法。

### 1.3 研究方法與內容

為了解新舊兩橋樑相接中間連接板之力學行為，乃以有限元素分析軟體 Diana 進行模擬分析。本研究內容大致可分為：第一章說明研究背景、動機、目的，並指出研究方法與內容；第二章文獻回顧介紹橋樑拓寬工法、乾縮潛變的物理性質及分析模式；第三章詳述有限元素分析模型建立之相關知識與細節；第四章探討新舊橋樑相接後連接板的應力分佈情況，以及探討不同的環境相對濕度、不同環境溫度和增加鋼筋對其應力的影響；第五章整合研究成果，並提出適當之建議。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 前言

混凝土體積變化的形式有彈性變形、凝結收縮、乾縮、潛變，這四種變形中以乾縮和潛變對固接式的橋樑拓寬影響最大。本章節先敘述橋樑拓寬的施工法，然後再針對乾縮潛變的物理性質與分析模式來詳細論述。

### 2.2 橋樑拓寬施工方法

一般國內橋樑拓寬的方式有「固接式」與「以縱向伸縮縫隔開式」兩種方式。

固接式的施工程序為：



先拆除舊有的橋樑之欄杆以及胸牆，並打除部份懸臂橋面板且留出預備搭接的橫向鋼筋。接著澆鑄新橋樑並在懸臂橋面留出預備搭接的橫向鋼筋。澆鑄完並且有足夠強度後對其施拉預力、錨碇使預力傳到橋身。然後架設新舊兩橋樑中間連結板之模板。配置鋼筋並且焊接新舊兩橋樑預留出的橫向鋼筋，最後灌注混凝土使兩橋樑結合一為體。

固接式的優點：

1. 費用較低。
2. 不需長期維護造成維護期間交通受影響。

3. 接合處不會有太大的變形影響交通安全。

縱向伸縮縫隔開式的施工程序為：

先拆除原橋樑之欄杆以及胸牆。澆鑄新橋樑，澆鑄完並且有足夠強度後對其施拉預力、錨碇使預力傳到橋身，最後設置縱向伸縮縫分離新舊橋面板。

縱向伸縮縫隔開式優點：

1. 兩橋樑可視為獨立橋樑，應力不會互相影響。
2. 可適應較差的地質情況。

### 2.3 混凝土之乾縮【6，9，12】

混凝土澆鑄完成後，因為內部的水分蒸發及水化，使混凝土再凝結的過程中逐漸收縮，稱為混凝土之乾縮(收縮)。混凝土乾縮引起之應變稱為乾縮應變。

混凝土由水泥漿與骨材組成。水泥漿含有固態水泥膠體 (cement gels) 及無數的孔隙 (capillary pores)。由於水泥膠體的孔隙小於毛細孔隙故它們不能含有游離水或水蒸氣，但是它們含有強力附在膠體薄片間的吸附水 (absorbed water) 或層間水 (interlayered water) 之可蒸發水 (evaporable water)。

混凝土收縮可概分為下列三種：

### 1.毛細孔收縮 (capillary shrinkage) :

此乃由孔隙水承受毛細水壓而增加周邊固體表面張力所產生。

### 2.化學作用收縮 (chemical shrinkage) :

包括水解收縮 (dehydration shrinkage)、碳化收縮 (carbonation shrinkage) 及轉化收縮 (conversion shrinkage) 等，這些體積變形均由化學反應所產生。

### 3.乾燥收縮 (drying shrinkage) :

混凝土乾縮體積並不等於所排出水量的體積，因為最初排出的游離水 (free water) 僅會造成非常小量的收縮。當乾燥作用持續時，在膠體間吸附水被排出，膠體體積變動才引起真正混凝土乾縮，一般而言，乾燥收縮被認為是主要混凝土尺寸水分喪失而改變的變形。

影響此乾縮的因素有環境的相對濕度、構材尺寸、材料之骨材、水灰比、搗實程度、養護方法以及構材內的鋼筋數量等。環境的相對濕度越大，構材尺寸越大，骨材越粗，使用之單位水泥量越少，搗實及養護良好，鋼筋多則收縮應變越小。收縮之完成受環境濕度之影響一般在 5 年內就終止收縮，但構材尺寸大時終止時間可達到 10 年甚至到 15 年以上。

## 2.4 混凝土之潛變【6，9，12】

當混凝土承受一持續荷重，首先在加載之時立即產生瞬間變形，此為彈性變形。而後隨時間持續的變形，就稱為潛變。因為乾縮潛變的物理情況極為相似因此通常可視為同一行為。但乾縮與應力無關，而潛變所引起之應變則與應力和時間有關。根據時間由潛變所引起之應變並非隨時間之增長而無限之增加，且潛變於混凝土承受載重後28天內差不多完成1/2，3~4個月內幾乎可完成3/4，在3-4年後差不多不會再有潛變的現象。

通常潛變發生的原因相當複雜，但一般而言，可以看成是以下幾種現象，交互作用而成，即：

- 
1. 因為層間水之潤滑，使得膠體分子之間產生滑動，而造成水泥砂漿之黏滯流（viscous）。
  2. 因為吸附水的滲流或層間水化水（interlayer hydrate water）的脫離，造成壓密變形。
  3. 由於骨材和膠體結晶而組成之架構，因為其間之水泥砂漿造成對彈性變形之束縛，形成延遲彈性（delayed elasticity）。
  4. 永久變形其原因是在結晶和新的鍵結產生而形成局部破

壞（微細裂縫及結晶破壞）造成永久變形。

影響潛變的因素與影響混凝土乾縮的因素大部份相同，其影響因素有：使用骨材的品質、水灰比大小、水泥品質、構材尺寸等。骨材越粗，使用之單位水泥量越少，水泥的品質越好，構材尺寸越大，則潛變應變越小。

## 2.5 乾縮潛變的分析模式【4】

分析乾縮與潛變模式的規範舉例有 CEB-FIP Code、ACI 209 Code、NEN6720 Code、JSCE Code、JCI Code。由於本分析是選擇以 CEB-FIP Model Code 1990 的公式來計算分析，因此接下來的部份將只對 CEB-FIP Model Code 1990 加以敘述。其中乾縮的應變可由 CEB-FIP Model Code 直接計算求得，但計算潛變造成的應變 CEB-FIP Model Code 只有說明潛變方程式的計算，而由潛變方程式更進一步的求得其應變，則必須藉由 Kelvin Chain 或 Double Power law 加以計算。

### 2.5.1 乾縮造成之應變計算

在  $t$  天全部的乾縮應變可由下式計算得

$$\varepsilon_s(t, t_s) = \varepsilon_{s0} \beta_s(t - t_s) \quad (2.5.1)$$

其中  $\varepsilon_{s0}$  為標註的潛變係數(notational shrinkage coefficient)。

$\beta(t - t_s)$  為潛變發展與時間的關係係數。

$t_s$  為潛變開始時的混凝土材齡。

$\varepsilon_{s0}$  與  $\beta(t-t_s)$  可由下列式子求得

$$\varepsilon_{s0} = \varepsilon_s(f_{cm28})\beta_{RH} \quad (2.5.2)$$

$$\text{式中： } \varepsilon_s(f_{cm28}) = \left( 160 + 10^\beta \left( 9 - \frac{f_{cm28}}{f_{cm0}} \right) \right) \times 10^{-6} \quad (2.5.3)$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \left( 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right) \quad \text{當 } 40\% \leq RH < 99\% \quad (2.5.4)$$

$$\beta_{RH} = 0.5 \quad \text{當 } RH \geq 99\% \quad (2.5.5)$$

其中  $\beta$  為水泥獨立的潛變係數，依水泥種類可分：

快速凝結高強度水泥  $\beta=8$ ，一般速度和快速凝結水泥

$\beta=5$ ，緩慢凝結水泥  $\beta=4$ 。

$$\beta_s(t-t_s) = \left( \frac{(t-t_s)}{350 \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 + (t-t_s)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5.6)$$

## 2.5.2 潛變方程式的計算

### 假設條件及基本方程式

混凝土應力在  $|\sigma_c| < 0.4f_{cm}(t_0)$  的範圍下時，可假設潛變與應力為線

性的關係。潛變方程式  $J(t, t_0)$  可表示如下：

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{c28}} \quad (2.5.7)$$

式中： $E_c(t_0)$  為  $t_0$  時的彈性係數

$\phi(t, t_0)$  為潛變係數，而對於混凝土凝結束度的種類，和養護時的溫度等影響則是由修改受載重時的材齡來計算，計算方法如下：

$$t_{0, \text{mod}} = \max \left( 0.5, t_{0, T} \left( \frac{9}{2 + t_{0, T}^{1.2}} + 1 \right)^\alpha \right) \quad (2.5.8)$$

其中  $\alpha$  為依水泥種類而不同的係數: (1)早強水泥  $\alpha=1$

(2)一般水泥  $\alpha=0$

(3)緩慢凝結水泥  $\alpha=-1$

式中  $t_{0, T}$  的計算方式如下:

$$t_{0, T} = \int_0^{t_0} c_A \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(\tau)} \right) d\tau \quad (2.5.9)$$



**潛變係數**

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t-t_0) \quad (2.5.10)$$

$\phi_0$  為標記的潛變係數(notational creep coefficient)， $\beta_c(t-t_0)$  為敘述潛變的發展與時間和載重關係的係數，兩係數可由下面式子求得

$$\text{式中： } \phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm28}) \beta(t_0) \quad (2.5.11)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0.46 \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.5.12)$$

$$\beta(f_{cm28}) = \frac{5.3}{\left( \frac{f_{cm28}}{f_{cm0}} \right)^2} \quad (2.5.13)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^3} \quad (2.5.14)$$

$$h = \frac{2A_c}{u} \quad (2.5.15)$$

式中：RH為周圍環境的相對濕度[%]，RH<sub>0</sub>為定值 100[%]，h<sub>0</sub>為定值 100mm

$$\beta_c(t-t_0) = \left( \frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)} \right)^{0.3} \quad (2.5.16)$$

$$\beta_H = \min \left( 1500, 150 \left( 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{1.8} \right) \frac{h}{h_0} + 250 \right) \quad (2.5.17)$$

### 2.5.3 隨時間發展之強度與彈性係數計算

由於乾縮潛變的材料其強度與彈性係數會隨時間而改變，因此上述的乾縮與潛變計算中有提到的t<sub>0</sub>時間的強度 f<sub>cm</sub>(t<sub>0</sub>)和彈性係數 E<sub>c</sub>(t<sub>0</sub>)，必須由以下的方式加以計算。

#### 隨時間發展之強度計算

時間 t 時的抗壓強度 f<sub>cm</sub> 受到溫度養護和水泥的種類所影響，其計算方式如下：

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm28} \quad (2.5.18)$$

其中 f<sub>cm28</sub> 為 28 天的抗壓強度 β<sub>cc</sub>(t) 為時間的函數表示如下：

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}}\right)\right) \quad (2.5.19)$$

其中係數  $s$  因水泥種類而不同:(1)早強水泥  $s=0.2$

(2)一般水泥  $s=0.25$

(3)緩慢凝結水泥  $s=0.38$

參數  $t_{eq}$  為混凝土的材齡方程式

$$t_{eq} = \int_0^t c_A \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(\tau)} \right) dt \quad (2.5.20)$$

其中  $T(\tau)$  為第  $\tau$  天的溫度  $T_{ref}$  為絕對溫度 293K  $c_A$  為定值  $4000K^{-1}$



隨時間發展之彈性係數之計算

混凝土  $t$  天的彈性係數  $E_c$  可以下式計算：

$$E_c(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{c28} \quad (2.5.21)$$

其中  $E_{c28}$  為 28 天的彈性係數

## 2.6 潛變模式【4】

上述 CEB-FIP 的潛變計算中我們了解到潛變方程式的計算方法，而要更進一步的計算其應變，則必須將混凝土視為黏彈性材料

(viscous-elastic)，並藉由 The Kelvin Chain model 或 Double Power law 來加以計算。由於本分析是用 The Kelvin Chain model 來進行計算的，因此以下僅對 The Kelvin Chain model 加以說明。

1. 潛變方程式的應力與應變可表示為

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t J(t, \tau) \bar{C} \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (2.6.1)$$

其中矩陣  $\bar{C}$  為波松比  $\nu$  的函數

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (2.6.2)$$

假設在  $t = -\infty$  到 0 之間沒有任何改變則  $t$  到  $t + \Delta t$  的應變增量可表示為

$$\Delta \varepsilon = \int_0^t (J(t + \Delta t, \tau) - J(t, \tau)) \bar{C} \dot{\sigma}(\tau) d\tau + \int_t^{t + \Delta t} J(t + \Delta t, \tau) \bar{C} \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (2.6.3)$$

為了以有限元素的方法求得位移 (2.6.3) 式可整理為應力的增量，

de Borst 和 van den Boogaard 假設應力的變化在時間的增加下為

線性，利用廣義的 mid-point 法則 ( $t \leq t^* \leq t + \Delta t$ ) 和使用矩陣  $\bar{D} = \bar{C}^{-1}$

則應力增量方程式為

$$\Delta \sigma = \hat{E}(t^*) \bar{D} \Delta \varepsilon + \tilde{\sigma}(t) \quad (2.6.4)$$

$$\frac{1}{\tilde{E}(t^*)} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t + \Delta t} J(t + \Delta t, \tau) d\tau \quad (2.6.5)$$

$$\tilde{\sigma} = -\tilde{E}(t^*) \int_0^t (J(t + \Delta t, \tau) - J(t, \tau)) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (2.6.6)$$

2. 上述之潛變方程式可寫為 Dirichlet 數列

$$J(t, \tau) = \sum_{\alpha=0}^n \frac{1}{E_{\alpha}(\tau)} \left(1 - e^{-\lambda_{\alpha}^t}\right) \quad (2.6.7)$$

此數列可由 Kelvin Chain 的 Model 來詮釋，如圖 2.1

$E_{\alpha}(\tau)$  為分析模型隨時間而改變的勁度，而數列中每個彈簧的勁度和阻尼的粘滯可求得延遲時間(retardation time)  $\lambda_{\alpha}$

$$\lambda_{\alpha} = \frac{\eta_{\alpha}}{E_{\alpha}} \quad (2.6.8)$$

將(2.6.7)式帶入(2.6.5)式和(2.6.6)式可得

$$\frac{1}{\tilde{E}(t^*)} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{\alpha=0}^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{1}{E_{\alpha}(\tau)} \left(1 - \exp(-\lambda_{\alpha}^{t+\Delta t-\tau})\right) d\tau \quad (2.6.9)$$

$$\tilde{\sigma}(t) = -\tilde{E}(t^*) \sum_{\alpha=0}^n \int_0^t \frac{1}{E_{\alpha}(\tau)} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{\lambda_{\alpha}}\right)\right) \exp(-\lambda_{\alpha}^{t-\tau}) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (2.6.10)$$

如果將  $t^*$  帶入  $E_{\alpha}(\tau)$  我們可以積分主要部分得：

$$\frac{1}{\tilde{E}(t^*)} = \sum_{\alpha=0}^n \frac{1}{E_{\alpha}(t^*)} \left(1 - \frac{\lambda_{\alpha}}{\Delta t} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{\lambda_{\alpha}}\right)\right)\right) \quad (2.6.11)$$

$$\tilde{\sigma}(t) = -\tilde{E}(t^*) \sum_{\alpha=0}^n \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{\lambda_{\alpha}}\right)\right) \tilde{\varepsilon}_{\alpha}(t) \quad (2.6.12)$$

因此可求得應變為

$$\tilde{\varepsilon}_{\alpha}(t) = \int_0^t \frac{1}{E_{\alpha}(\tau)} \exp(-\lambda_{\alpha}^{t-\tau}) \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (2.6.13)$$

## 第三張 有限元素分析方法

### 3.1 前言

本章節先介紹所使用的分析軟體，和說明本分析所做的假設條件，以及相關的參數設定，再來便是說明分析進行的詳細步驟，最後則是驗證與分析結果的收斂性探討。

### 3.2 有限元素分析軟體簡介【6】

工程上所用之有限元素分析之軟體有許多，如 ANSYS、MSC Nastran、MARC、ABAQUS、DIANA 等 其中本研究所採用由荷蘭 TNO Building and Construction Research 所發展出來之軟體 DIANA，TNO 為一大型之研究組織，以大地與混凝土非線性行為的研究方面為主。



DIANA 為一泛用型有限元素分析軟體，為了因應各種不同的需要，其分成了幾個模組 (modules)：

#### DIANA Primary Modules

A: Linear Static, Eigenvalue, FemGV (Pre/Post-processor)

B: Nonlinear, Dynamics, Shock & Response Analysis, User-Supplied Subroutines

C: Potential flow, Heat Transfer, Groundwater Flow

#### DIANA Supplementary Modules:

D: Euler Stability Analysis

F: Parameter Estimation

### DIANA Specials:

E: Pipeline Analysis

J: Liquefaction Features

K: Lattice Analysis

### Supplementary interfaces:

M: IGES-FEMGEN interface

N: DXF-FEMGEN interface



DIANA 可進行結構之靜態、動態、流動、熱傳、接觸、穩定性等分析，並可以模擬多種的材料行為與處理複雜的非線性現象。

DIANA 模型是由許多不同的模組所組成，共同來描述欲分析之物理問題和欲得到之結果。在準備執行 DIANA 時，需要先準備輸入檔 (input file) 與執行檔 (command file)。其中輸入檔定義了整個有限元素模型，包括了幾何模型、元素分割情況、元素斷面特性、材料性質、載重大小與分布、邊界條件、鋼筋分布等，至於執行檔則描述了如何分析所建立的模型和需要加以輸出的結果。

DIANA 有兩種方法提供使用者建構模型，一種是以 DIANA 所提供的指令來直接撰寫輸入檔建構模型，但直接輸入指令容易出錯，並且此方法在建立幾何模型和元素分割 必須完全靠標定座標的方法過程極為繁雜費事，且在過程中發生錯誤時不易發覺。

另外一個方法是用其所提供之 Femsys' 有限元素分析前後處理軟體 FemGV 6.1-02.，FemGV 包括了 FEMGEN 和 FEMVIEW 兩個部分，其使用了圖形介面，其中 FEMGEN 是以視窗的圖形介面幫助使用者建構模型，其中還有一些方便使用者建立幾何模型的指令以及自動分割元素的功能。FEMVIEW 則是以圖形介面表現分析結果，可顯示結果的變形曲線 或用顏色表現分析的應力結果。此種方法建構模型較為方便，可免去不少程式除錯的困擾，不過對於較複雜的材料行為還是要以 DIANA 所提供的指令來加以輔助修改，本研究就採用雙管齊下的方法處理模型。

### 3.3 分析假設條件

為了使 DIANA 能夠執行分析分析，適當的假設簡化條件是必須的。

本研究作了下列的假設：

1. 不計活載重的影響
2. 不考慮開裂

3. 以簡支樑的絞支承和滾支承代替實際的支承情況
4. 不考慮隔樑影響

### 3.4 結構模型簡介

#### 3.4.1 模型幾何形狀與束制條件

本研究之模型有可分為新舊兩座橋樑，型式皆為簡支鋼筋混凝土箱型樑。橋垮長度皆為 25M，橋面全寬皆為 5.5M 如圖 3.4.1 和 3.4.2。

3.4.2 中左端為舊橋樑，右端為新橋樑。



束制的部份 x 向、y 向、x 向束制如圖 3.4.1 與 3.4.2，x 向 z 向的束制情況是因為本橋樑為簡支承，因此 x 向只有在橋頭(x=0m)沿線有束制，z 向則是橋頭橋尾(x=0m 和 x=25m)的沿線皆有。而 y 向方面，由於實際的橋樑情況，y 方向並未有束制，只有在橋身橫向兩側一段距離處設有一水泥塊，防止橋身滑落，因此 y 向是可動的。但由於數值分析如果有一方向沒有任何束制則該方向會有不穩定的情況，雖然分析出的應力不受影響但沒受束制的方向便會有平移的現象，分析出的位移並非為實際的位移。因此這裡 y 向的束制設為舊橋橋頭(x=0m)下方邊角的一點，以達到不會影響其應力並且有束制的效果。

#### 3.4.2 分析的元素

分析的元素採用 32 個節點的實體素如圖 3.4.5，兩根樑元素分割方式皆相同總共分割 810 個元素 8702 個節點如圖 3.4.3 與 3.4.4。每個節點 3 個自由度 9 個高斯基分點，3255 根鋼筋，12 根預力鋼腱如圖 3.4.6 與 3.4.7。鋼筋與鋼腱是以嵌入實體元素的額外鋼筋的元素模擬，而每個鋼筋元素的自由度只有單一軸向的自由度。每根鋼筋用一個鋼筋元素模擬，而每根鋼腱則分割為 15 個鋼筋元素模擬。

### 3.4.3 分析的材料設定

本分析結構體材料是以混凝土為主。其壓強度  $f_c' = 350 \text{ kgf/cm}^2$  楊氏係數  $E_c = 280000 \text{ kgf/cm}^2$ 、波松比  $\nu = 0.2$ 、密度為  $0.0024 \text{ kgf/cm}^3$ 。

混凝土乾縮潛變的部份設定以 DIANA 內定的 CEB-FIP Code Model 1990 公式，輸入的參數有混凝土 28 天楊氏係數  $E_{t,28} = 280000 \text{ kgf/cm}^2$ ，混凝土 28 天抗壓強度  $F_{cm28} = 350 \text{ kgf/cm}^2$ ，環境溫度以  $0^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$  分別討論，相對濕度 RH 分別以 50%、60%、70%、80%、90%、100% 進行討論，材料年齡第 0 天開始。

鋼筋與預力鋼腱的材料部分，鋼筋降伏強度  $f_y = 2800 \text{ kgf/cm}^2$ ，預力鋼腱極限抗張強度  $f_s' = 16500 \text{ kgf/cm}^2$ ，鋼筋與鋼腱楊氏係數  $E_s$  皆為  $2000000 \text{ kgf/cm}^2$ ，波松比皆為 0.2。

施加的預力每股以扣除摩擦損耗的起始預力為  $11000\text{kgf/cm}^2$ ，每根樑 6 股，總初始預力為  $6 \times 11000 = 66000\text{kgf/cm}^2$

### 3.5 分析過程

為了要模擬橋樑拓寬的施工程序 因此分析作業分成 3 個階段

第一個階段是模擬舊有的橋樑單獨受到預力後經過 15 年的時間。

如圖 3.5.1 黃色部分

第二個階段是模擬新的橋樑受到預力後分別等待 30 天、60 天、90 天、120 天、180 天、210 天、240 天、270 天、300 天、330 天、360 天的時間，準備與舊樑相接。如圖 3.5.1 藍色部份



第三個階段是模擬新舊樑經由中間連接板的相接，經過 2 年的時間來討論其應力。如圖 3.5.1 黃藍紅全部

第一階段：

此階段是先單獨對舊橋施予預力，此預力是已扣除瞬間預力損耗的起始預力。因為此研究是長時間的預力損耗和潛變乾縮為主因此瞬間的預力損耗就不列入時間的分析中而在一開始就先扣除。施加預力後接著讓時間經過 15 年，材料的設定中有設定潛變跟乾縮的性質，因此模型會隨著 DIANA 的時間模擬產生乾縮潛變的影響，而使模型

產生應力和變形。如圖 3.5.2 顯示了舊樑經過 15 年新橋樑正中間節點的撓度隨著時間的變化曲線。由於乾縮潛變的預力損耗使得預力造成向上撓度持續的減少，因此撓度在起始受預力往上拱後隨著時間逐漸往下掉，並且變形量也隨時間逐漸減少。因為在真實橋樑相接的施工方法中，是先將準備與舊樑相接的翼版預先打掉一部份，但因為就單獨一根橋樑受預力與乾縮潛變的狀況下，即將被打掉的這懸臂部份對整體影響不大，因此第一階段及接下來的第二階段的新橋樑皆以翼板就已被打掉的情況來分析。

第二階段:



此階段如同第一階段，對新橋施予預力，然後經過 DIANA 所模擬的時間。材料設定完全相同，不同的是經過的時間。

第三階段:

此階段是將新舊橋中間的连接板接上，並且經過 DIANA 的時間模擬，來觀察左右兩個新舊橋樑隨著時間產生的不一致變形所造成的各項應力。

### 3.6 乾縮與潛變的驗證

本分析軟體預力部分的驗證已在交通大學 2002 年的碩士論文「支撐先進工法二次施工之研究」中得到驗證【6】，因此本論文只對乾縮潛變的部份加以驗證。為了驗證本軟體對乾縮潛變模擬的正確性，以 Kentucky Transportation Center 的試驗結果加以比較。試驗所用的 28 天抗壓強度、彈性模數分別根據 ASTM C39、ASTM C469 的規定，試驗所加的外力分 3 天加載，總共加載 2433psi。試體的大小為 6"x12" 的圓柱試體，環境條件為 50% 的相對溼度，溫度為 73°F 分析和試驗的比較如圖 3.6 的藍色曲線和紅色曲線，由圖中可知兩曲線幾乎是相符的，以 6 個月的應變量來看，誤差約 7% 左右。另外綠色曲線則是以相同試體增加 4% 的垂直鋼筋量所做的分析結果。分析結果可發現增加垂直鋼筋後，應變量大大減小，以 6 個月的應變量來看減少了 35.8%。

### 3.7 收斂性分析

由於本分析所分割的元素為 810 個共 8702 個節點，因此為了驗證結果的收斂情況另外以分割 432、540、648、864、918 個元素來討論其收斂性。由表 1 可知分割 648 個元素以前，有些數值還會有所跳動，但是分個 648 個元素以上時，數值就完全沒有變動，因此已達收斂。

## 第四章 有限元素分析結果

### 4.1 前言

本分析先以新樑澆鑄完後等候 30 天與舊樑相接，環境相對溼度 RH=60%，氣溫 25°C 的情況來分析，以分析的結果來詳細討論其應力大小和分佈的狀況。然後再與新橋不同的相接時間，和不同的周圍氣溫、相對濕度、不同的鋼筋量進行討論比較，並且最後以較為接近現實環境條件的狀況做分析，來了解實際狀況下應力會影響到多少，以及是否會有影響安全之虞。

### 4.2 60%相對濕度下新橋澆鑄完 30 天後相接應力之分佈

此部份的分析是以新橋澆鑄完後等候 30 天與舊橋相接，環境相對濕度為 60%，氣溫 25°C。分析的目的是希望了解新舊橋樑相連接後，其應力隨著時間的變化情況。應力討論的時間點皆是以相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天來討論。

## 分析的變位結果

新橋澆鑄完 30 天相接時的各方向變形如圖 4.2.1~4.2.3，圖中綠色部分為原結構，紅色部分為變形後的結構。由圖中可了解到 x 方向即樑身的縱向有向內縮的現象，這是因為乾縮潛變的影響。乾縮本身就會使混凝土的體積隨時間而縮小，潛變則是因為預力的壓力施加到混凝土上因此也會隨時間而向內縮。但由於新橋較為年輕，因此體積有較大的變化量。乾縮潛變已經停止的舊橋被新樑的變化拉動，而因為橋體是簡支樑在前端( $x=0\text{m}$ )處是鉸支承，x 方向無法動，導致 x 向變形只能集中在橋樑尾端處( $x=25\text{m}$ )的滾支承發生。

y 方向的變圖中可以發現，變形也是集中在兩橋樑的尾端並且朝新橋的方向變形。這原因也是如同 x 向的變形，因為新橋的乾縮潛變影響使得它體積不斷的縮短，但一端卻受到舊橋的限制，因此變形朝舊橋的反方向彎曲。且由於橋頭( $x=0\text{m}$ )的 x 向的束制導致變形集中發生於橋尾端( $x=25\text{m}$ )。

z 方向的變形圖中，因為本分析不考慮外加载重的影響，因此剛受預力的新橋樑繞度是向上的，且因為預力損耗的關係，繞度會隨著時間慢慢的下降如圖 4.2.4，(圖中的變形曲線是取自新橋樑中間部分

的節點)。而經過長時間預力損耗的舊橋樑其繞度已由原本的向上減少至向下，因此變形圖中舊橋的變形是向下，新橋的變形是向上。

### 分析的應力結果

相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天的 xx 向的應力分佈如圖 4.2.5 ~4.2.10，由圖中可發現 xx 向的張應力由連接板與舊樑的連接線開始發展，隨著時間逐漸增大並且向整個連接板拓展。由於潛變乾縮的影響新橋會隨時間不斷的收縮，而此收縮是屬於新橋混凝土本身體積的縮小，但是這個縮小的趨勢卻受到舊樑的束制，欲收縮卻被舊樑拉住，因此連接板上 x 向產生了很大的張應力。相對於連接板的張應力，與連接板相連的舊樑受到了連接板收縮的壓力，因此有壓應力的發展。不過圖上顯示的最大張應力與壓應力並非在板上而是在舊樑前端的支承處，且圖上可發現在舊樑支承處的兩端各有一張應力與一壓應力，這兩個應力的出現是因為舊樑為了抵抗新樑不一致的拉力造成的旋轉力矩而產生的應力。圖上的壓力處靠內側，拉力處靠外側，因此可推測旋轉應是以受壓力處為支點的逆時針旋轉。雖然分析結果顯示這兩個應力對樑身的影響甚大，但是因為本分析為了簡化而沒考慮實際橋樑支承的情況，在實際的支承情況下此

應力皆會由支承所承受，因此不會影響到橋身。圖 4.2.11 的紅點為連接版上 xx 向應力最大處，圖 4.2.12 為最大處的 xx 應力與時間的關係。

相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天的 yy 向的應力分佈如圖 4.2.13~4.2.18。圖中可發現 yy 向應力影響的範圍非常小，只有集中在連接板與舊橋的連接線的兩端。因為 y 向幾乎沒有束制因此可以自由的產生位移，所以應力的影響並不多，只有兩端有很大的集中應力。這兩集中拉力的產生原因有二，一為連接板乾縮的影響，雖然其乾縮變形以 x 向的較多，但由於舊橋乾縮量很小，因此連接板與舊橋連接處的兩端會有受到集中的拉扯，產生應力集中，而這應力集中包含著 y 向的拉力。另一原因則是由於廣義虎克定律的原理，新橋由 y 向拉舊橋，使得連接板有 y 方向的膨脹應變，因此 x 向與 z 向便有收縮的應變。但由於連接板與舊橋的體積差異甚大，因此連接板與舊橋連接處兩端 x 向的收縮應變會有遽減的情況，因而導致集中的拉扯，產生應力集中，此應力集中也包含了 y 向的拉力。因此由以上兩原因導致了兩端的 y 向集中拉力。圖 4.2.19 的紅點為連接版上 yy 應力最大處，圖 4.2.20 為最大處節點的 yy 應力與時間的關係。

相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天的 zz 向的應力分佈如圖 4.2.21~4.2.26。zz 向應力的發展如同 xx 向都是沿著

連接板與舊樑的連接線逐漸增強，但不同處再於  $zz$  向應力並不會發展到整個連接板，且  $zz$  向的應力相較於  $xx$  向與  $yy$  向小很多。而  $zz$  與  $xx$  應力另有一相同處再於連接線靠連接板那一側為集中的張應力，而連接線靠舊橋那一側則為相反的壓應力。這也表示著連接板在  $z$  方向體積也有縮小的趨勢，也就是說連接板的厚度在縮小但是被舊樑拉住，因此有張應力，而相反的舊樑則受到了連接板的壓力，因此連接線的另一側為壓應力。連接板體積會縮小的原因有二：一為乾縮導致，但是由於板的厚度與其他方向相比較小，因此乾縮的影響不大。令一個使其厚度變小的原因，就是因為新樑經由連接板對舊樑在  $y$  方向拉扯。由廣義虎克定律的知  $y$  方向有膨脹應變則  $x$  和  $z$  方向便會有收縮的應變，因此導致  $z$  方向的縮小。另外還有一個會影響到  $zz$  向應力的原因是由於新橋樑的預力損耗使其繞度向下掉，而向下掉的力量給予了舊橋樑向下壓的力量。以上三個原因產生了  $zz$  向的應力，但由圖也可發現其應力的數字大小相較於  $xx$  向  $yy$  向的應力小很多，因此  $zz$  向應力相較於其他方向的應力影響較小。圖 4.2.27 的紅點為連接版上  $zz$  向應力最大之處，圖 4.2.28 為最大處節點的  $zz$  應力與時間的關係。

相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天的  $xy$  向的剪應力分佈如圖 4.2.29 ~4.2.34。由圖中可以明顯的看到在連接板

與舊樑的連接線的前後兩端有很大的  $xy$  剪應力，並且以連接板下方形狀漸變處最大。造成這兩個集中剪應力的原因與  $y$  向兩端的集中應力的原因相同，皆為乾縮應變加上廣義虎克定律  $y$  向拉力的影響。圖 4.2.35 上的紅點為最大正向剪應力之點，藍點為最大負向剪應力之點，圖 4.2.36 為正負兩最大  $xy$  剪應力與時間的關係。

相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天的  $yz$  向的剪應力分佈如圖 4.2.37~4.2.42，由圖中發現  $yz$  剪應力的發展幾乎如同  $zz$  應力一樣，都是延著連接板與舊樑的相接線發展。其影響  $yz$  剪應力最大的原因也是如同  $zz$  應力一樣，由乾縮應變、廣義虎克定律  $y$  向拉力的影響，還有新橋向下壓的影響，由以上三個原因累加造成的。圖 4.2.43 的紅點為板上最大正向剪應力之點，藍點為板上最大負向剪應力之點，圖 4.2.44 為正負兩最大  $yz$  剪應力與時間的關係。

相接後經過 1 天、30 天、90 天、180 天、360 天、720 天的  $zx$  向的剪應力分佈如圖 4.2.45~4.2.50，圖中可明顯發現到  $zx$  剪應力對連接板的影響不大，只有在樑前端的支承處有較明顯的應力。影響不大的原因在於連接板的  $z$  向的板厚與  $x$  向的版長相差甚大，因此  $zx$  方

向的勁度極大，不易產生變形。所以也不易有剪應力產生，因此以下將不再多對  $zx$  剪應力進行討論。

## 小結

由以上分析可了解到，對連接板影響較大的應力為  $xx$  應力、 $yy$  應力、 $xy$  剪應力、 $yz$  剪應力。但  $yy$  向應力與  $xy$  向剪應力影響的範圍較小，只有在連接板與舊橋連接線的兩端，而  $xx$  向應力則分布在整個連接板， $yz$  向剪應力分布於連接板與舊橋的整個連接線，這兩應力分佈範圍較廣，會影響到整個連接板，因此 4 個應力當中  $xx$  應力與  $yz$  剪應力的影響較大。

### 4.3 新橋樑澆鑄完等候不同時間相接的應力影響

此部分的分析是以新橋澆鑄完成後等待不同的時間與舊橋相連接。等待的時間分別以 30 天、60 天、90 天、120 天、150 天、180 天、210 天、240 天、270 天、300 天、330 天、360 天來進行討論。環境條件為相對濕度 60%，氣溫 25℃。分析目的是希望了解新橋澆鑄完後等待不同的時間相對其應力的影響。

分析結果所顯示的各應力為連接版上的最大應力， $xx$  最大應力之點如圖 4.2.11， $yy$  最大應力之點如圖 4.2.19， $zz$  最大應力之點如圖

4.2.27, xy 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.35, yz 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.43。

### 分析結果

由圖 4.3.1 xx向的各時間相接圖可發現, 相接後 2 年時 60 天相接的應力較 30 天相接的應力減少了  $6.57\text{kgf/cm}^2$ , 90 天相接較 60 天相接的應力減少了  $4.65\text{kgf/cm}^2$ , 120 天相接較 90 天相接減少了  $3.64\text{kgf/cm}^2$ , 150 天又較 120 天減少了  $2.99\text{kgf/cm}^2$ , 之後每差 30 天的減少量都在  $2\sim 1\text{kgf/cm}^2$  左右, 和 30 天與 60 天之間的減少量  $6.57\text{kgf/cm}^2$  相比, 只有  $6.57\text{kgf/cm}^2$  的  $1/3$  倍。

由圖 4.3.2 yy向的各時間相接圖可發現, 相接後 2 年時 60 天相接的應力較 30 天相接減少了  $10.5\text{kgf/cm}^2$ , 90 天相接較 60 天相接應力差了  $6.4\text{kgf/cm}^2$ , 120 天相接又較 90 天相接差了  $4.5\text{kgf/cm}^2$ , 之後每差 30 天的應力減少量都在  $3\text{kgf/cm}^2$  以下, 也是只有 30 天與 60 天之間減少量的  $1/3$  倍。

由圖 4.3.3 zz向的各時間相接圖可發現, 相接後 2 年時 60 天相接的應力較 30 天相接減少了  $3.29\text{kgf/cm}^2$ , 90 天相接的應力較 60 天減少了  $2.31\text{kgf/cm}^2$ , 120 天相接的應力較 90 天減少了  $1.81\text{kgf/cm}^2$ , 之

後每增加 30 天應力的減少量也是都只有 30 天與 60 天之間減少量的 1/3 倍。

由圖 4.3.4~4.3.5 xy 向的各時間相接圖可發現，相接後 2 年時 60 天相接的應力較 30 天相接減少了  $4.02 \text{ kgf/cm}^2$ ，90 天相接的應力較 60 天減少了  $2.75 \text{ kgf/cm}^2$ ，120 天相接的應力較 90 天減少了  $2.12 \text{ kgf/cm}^2$ ，210 天相接的應力較 180 天減少了  $1.25 \text{ kgf/cm}^2$ ，之後也是增加 30 天應力的減少量約略為 30 天與 60 天之間減少量的 1/3。xy 負向的剪應力 60 天相接的應力較 30 天相接減少了  $4.85 \text{ kgf/cm}^2$ ，90 天相接的應力較 60 天減少了  $3.3 \text{ kgf/cm}^2$ ，210 天相接的應力較 180 天減少了  $1.46 \text{ kgf/cm}^2$ ，之後每增加 30 天應力的減少量也是都只有 30 天與 60 天之間減少量的 1/3 倍。

由圖 4.3.6~4.3.7 yz 向的各時間相接圖可發現，相接後 2 年時 60 天相接的應力較 30 天相接減少了  $2.01 \text{ kgf/cm}^2$ ，90 天相接的應力較 60 天減少了  $1.4 \text{ kgf/cm}^2$ ，120 天相接的應力較 90 天減少  $1.12 \text{ kgf/cm}^2$ ，210 天相接的應力較 180 天減少量為  $0.671 \text{ kgf/cm}^2$ ，之後每增加 30 天應力的減少量只有 30 天與 60 天之間減少量的 1/3。負向剪應力 60 天相接的應力較 30 天相差了  $2.1 \text{ kgf/cm}^2$ ，180 天相接的應力較 150 天

減少量  $0.68 \text{ kgf/cm}^2$ ，之後每增加 30 天應力的減少量只有 30 天與 60 天之間減少量的  $1/3$ 。

### 小結

由上可知，新橋澆鑄完越晚與舊橋相接對舊樑與連結板的各應力影響都會降低，但是應力的降低量以前面的 1~4 個月相接降的最多，5 個月後相接降低的的應力量幾乎都只有前 1~2 個月相接降低量的  $1/3$ 。雖然就安全而言，越晚相接產生的應力越小當然就越好，但是由於工程成本的關係，越晚接工程成本越高，而且會延長完工時間，因此還是需要有經濟的考量，而由以上結果看來是以第 3~4 個月相接最為經濟。



### 4.4 相對濕度對各應力的影響

此部分的分析是新橋澆鑄完成後等待 30 天與舊橋相接，環境氣溫為  $25^{\circ}\text{C}$  時，以 50%，60%，70%，80%，90%，100% 的環境相對濕度來進行討論，目的是希望了解新舊橋不同的相對溼度下相連接對其應力的影響。

分析結果所顯示的各應力只以相接後的第 720 天的應力來表示。且各應力為連接版上的最大應力，XX 最大應力之點如圖 4.2.11，

yy 最大應力之點如圖 4.2.19，zz 最大應力之點如圖 4.2.27，xy 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.35，yz 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.43。

## 分析結果

相對濕度對各應力的影響如圖 4.4.1~4.4.7，圖中可發現隨著相對濕度越高各應力減少的越多，到 100%的相對濕度時幾乎各應力都趨於 0。圖 4.5.8 為台灣各地區平均相對濕度的統計表，圖中可發現台灣各地的平均相對濕度都有在 75%以上，宜蘭的相對濕度還到達 84%，甚至還有些地方高達 90%，因此以台灣的現實情況上述 4.2 的分析結果之應力可再大幅的下降。如以一般台灣地區結構設計的 80%相對濕度跟本分析來比，由圖 4.4.1~4.4.7 中可知xx向的應力可在下降 19.37 kgf/cm<sup>2</sup>，yy向的應力可在下降 16.7 kgf/cm<sup>2</sup>以上，zz向的應力可在下降 9.8 kgf/cm<sup>2</sup>以上，xy正向的剪應力可在下降 10.3 kgf/cm<sup>2</sup>以上，xy負向的剪應力可在下降 11.9 kgf/cm<sup>2</sup>，yz正向的剪應力可在下降 6.2 kgf/cm<sup>2</sup>，yz負向的剪應力可在下降 4.4 kgf/cm<sup>2</sup>。

## 小結

相對濕度的因素是屬於外在環境的因素，前面相接時間的影響是人為可控制的，但是外在環境是無法控制的。當結構物位於較低的相度溼度的環境則無法避免的將會產生較高的應力。如圖 4.4.8 可知台

灣地區平均最高的相對濕度可達 90%，最低的相對濕度有 75%。圖 4.4.1~4.4.7 中相對濕度 90%與 75%的相差量：xx應力相差了 20 kgf/cm<sup>2</sup>，yy應力相差了 20 kgf/cm<sup>2</sup>，zz應力 10 kgf/cm<sup>2</sup>，xy正向剪應力差了 12 kgf/cm<sup>2</sup>，xy負向剪應力差了 13 kgf/cm<sup>2</sup>，yz正向剪應力差了 6 kgf/cm<sup>2</sup>，yz負向剪應力差了 4 kgf/cm<sup>2</sup>。因此可發現到，位於最低相對濕度環境的情況其張應力會比位於最高相對濕度的情況多了 20 kgf/cm<sup>2</sup>，剪應力多了 13 kgf/cm<sup>2</sup>，因此相對濕度對此影響甚大。

#### 4.5 溫度對各應力之影響

此部分的分析是以新橋澆鑄完成後等待 30 天與舊橋相接，環境相對濕度為 60%，以 0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃的環境氣溫來進行討論。目的是希望了解新舊橋不同的環境氣溫下相連接對其應力的影響。

分析結果所顯示的各應力只以相接後的第 720 天的應力來表示。且各應力為連接版上的最大應力，xx 最大應力之點如圖 4.2.11，yy 最大應力之點如圖 4.2.19，zz 最大應力之點如圖 4.2.27，xy 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.35，yz 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.43。

#### 分析結果

由圖 4.5.1~4.5.7 可知，隨著周圍環境溫度的升高，各應力皆伴隨著越大，而且可概略的看出在 10-30 之間影響最大。

由圖 4.5.8~4.5.9 可知台灣各地的平均溫度除了較為特殊的地方例如山上，其他各地之間的平均氣溫很少會有相差超過 5°C。因此以下以 4.2 節的 25°C 分析結果，將其環境溫度減少為 20°C 再來進行分析，以比較其應力的減少情況。

由圖 4.5.1~4.5.7 可知若以本分析所用的 25°C 跟 20°C 相比 xx 應力可減少 4.89 kgf/cm<sup>2</sup>，yy 應力可減少 3.6 kgf/cm<sup>2</sup>，zz 應力可減少 2.5 kgf/cm<sup>2</sup>，xy 正向剪應力可減少 2.6 kgf/cm<sup>2</sup>，xy 負向剪應力可減少 3 kgf/cm<sup>2</sup>，yz 正向剪應力可減少 2.1 kgf/cm<sup>2</sup>，yz 負向剪應力可減少 3 kgf/cm<sup>2</sup>。

#### 4.6 台灣地區一般相對濕度下冬天與夏天氣溫之應力影響

本節分析的目的是希望了解在台灣一般地區環境狀況下的實際應力情況，由於之前章節所用的 60% 相對溼度和台灣一般地區的相對溼度相去甚遠，因此本節以較為一般的 80% 相對濕度來進行，並且氣溫的設定分別以台灣最高的夏天平均氣溫(35°C)和最低的冬天平均氣溫(15°C)來分析。由於本分析軟體無法模擬四季的氣溫變化，因此只能以最高與最低的平均氣溫來分析，了解台灣平均氣溫在最高與最

低下應力可到達多少，並探討是否會超過混凝土強度，然後兩種溫度下的分析再分別以 30 天、60 天、90 天、120 天的新舊橋樑相接時間一併討論。最後在將冬天與夏天的兩筆數據以每半年的方式互相疊合，以此近似的方法來模擬四季的天氣變化。

由於 4.2 的結果可了解到，影響較大的應力有 xx 應力、yy 應力、xy 剪應力、yz 剪應力，且四個應力當中 yy 應力與 xy 剪應力只集中於連接板與舊橋之連接線的兩端，可於兩端點處增加剪力摩擦筋以減少此兩個應力的影響。而 xx 應力與 yz 應力的分佈範圍較廣，其影響包含到整個連接板，因此較須特別注意。

混凝土之抗張抗剪強度是依中國土木工程學會所編寫的「混凝土工程設計規範與解說」而定，混凝土抗張強度  $35\text{kgf/cm}^2$  是取自 1/10 的抗壓強度  $350\text{kgf/cm}^2$ ，混凝土之抗剪強度  $10\text{kgf/cm}^2$  是由公式  $0.53\sqrt{f_c'}$  所求得。

分析結果所顯示的各應力為連接版上的最大應力，xx 最大應力之點如圖 4.2.11，yy 最大應力之點如圖 4.2.19，zz 最大應力之點如圖 4.2.27，xy 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.35，yz 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.43。

## 分析結果

相對溼度 80% 之下夏天氣溫 35°C 相接的結果如圖 4.6.1~ 4.6.6。圖上的紅線代表混凝土抗張及抗剪強度。圖中可了解到 xx 向應力相接時間要在 90 天以後較為安全。yy 向應力與 xy 向剪應力則是幾乎都超過其抗張強度與抗剪強度，因此連接板與舊樑的連接線兩端如不多加剪力摩擦筋則會有開裂的情況發生。yz 向剪應力超過 120 天後相接較為安全，90 天相接雖然在 2 年時還未超過其強度但是由此趨勢來看，在經過幾年的時間也是會超過其抗剪強度。90 天以前相接則會在兩年以前就會超過其抗剪強度。

而以冬天 15°C 的氣溫下相接的結果如圖 4.6.7~ 4.6.12，圖中可發現到 xx 向的應力在冬天的氣溫下已大幅的下降，即使 30 天就相接其 720 天的應力也是只有在 27kgf/cm<sup>2</sup> 左右，對於 35kgf/cm<sup>2</sup> 的抗張強度來說並不會有開裂的問題。yy 向應力也是大幅的下降，90 天後相接已經幾乎不會超過其抗張強度，60 天相接雖然 720 天還位超過其強度，但是由趨勢來看 720 後不久便會超過其強度。xy 向的剪應力雖然也是有大幅的下降但是幾使 120 天相接經過 1 年也是會超過其抗剪強度。yz 向剪應力可發現 720 天時剪應力都在其抗剪強度之下，且 60 天後相接幾乎不會有開列之虞。

zz 向應力的部分因為由圖 4.6.13 可發現其應力幾使在夏天的 35 °C 之下並且 30 天相接仍然遠低於其抗張強度，因此相接的時間更晚或是冬天的溫度之下可預期的應力會降的更低，在此便不再更加討論此應力。

### 夏天冬天分析結果之疊加

為了模擬真實的季節變化，接下來將以上述的夏天分析結果與冬天分析結果互相疊加，來近似實際的季節交替。在此的作法為假設一年內的天氣為半年夏天半年冬天，如以夏天開始相接的情況，0~180 天以夏天來算，180~360 天以冬天來算，360~540 天以夏天來算，540~720 天再以冬天來算。算法如下：0~180 天的數值直接取自夏天 0~180 天的數值，180~360 天的數值以冬天 180~360 天扣除冬天第 180 天數值後與原第 180 天的數值相加。而 360~540 天的數值為夏天的 360~540 天扣除夏天第 360 天之值與原第 360 天的數值相加。同理第 540~720 天的數值以冬天 540~720 天扣除冬天第 540 天之數值與原 540 天的數值相加。由以上的方法可以近似的得到夏天開始相接的各新橋樑等候時間的應力情況如圖 4.6.14 與圖 4.6.15。同理也可得到以冬天開始相接的應力圖如圖 4.6.16 與圖 4.6.17。這裡的應力只取影響較大的 XX 向應力與 YZ 向剪應力來看，而 YZ 向剪應力也取較大的

正向剪應力來看。由圖中可發現，XX 向應力由夏天開始相接的情況下新橋澆鑄完要等候 90 天以上較為安全，而如果由冬天開始相接則新橋等候 30 天~60 天便可。從 YZ 向剪應力來看，由夏天開始相接的情況下新橋澆鑄完成要等候 120 天以上，但冬天開始相接則新橋只須等候 60 天以上。因此綜合兩 XX 與 YZ 兩應力來看，夏天開始相接新橋要等候 120 天，但冬天開始相接新橋只須等候 60 天。

#### 4.7 增加鋼筋量之影響

本章節以一個增加鋼筋量的分析結果與未增加鋼筋量的分析結果互相比較，了解其應力減少情況。增加鋼筋的分析中，增加的鋼筋處是於連接板與新橋的橋面板處之縱向鋼筋，增加量為原本的兩倍，也就是將原本的 $13\phi@20$ 的鋼筋量增為 $13\phi@10$ 。其餘的條件皆相同，新橋澆鑄完皆等候 90 天與舊橋相接，環境相對濕度皆為 80%，環境氣溫皆為 20℃。

分析結果所顯示的各應力只以相接後的第 720 天的應力來表示。各應力為連接版上的最大應力，xx 最大應力之點如圖 4.2.11，yy 最大應力之點如圖 4.2.19，zz 最大應力之點如圖 4.2.27，xy 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.35，yz 最大正負向剪應力之點如圖 4.2.43。

#### 分析結果

分析結果為，未增加鋼筋前連接板上的應力為 15.3~32.3kgf/cm<sup>2</sup>，增加鋼筋後連接板上的應力減少為 13.8~29.2 kgf/cm<sup>2</sup> 減少了 1.5~3.1 kgf/cm<sup>2</sup>。由於未增鋼筋量前x向的最大變型量為 1.11cm，增加鋼筋後最大變型量減少為 0.95cm，也就是說增加了縱向鋼筋減少了x向的變形量，因而使xx向的應力減少。另外增加鋼筋量後yy向最大的應力由 31.6 kgf/cm<sup>2</sup>減少為 28.8 kgf/cm<sup>2</sup>，yy向應力減少了 2.8 kgf/cm<sup>2</sup>，zz向最大的應力由 12.2 kgf/cm<sup>2</sup> 降為 12.1 kgf/cm<sup>2</sup>，xy正向剪應力由 14.8 kgf/cm<sup>2</sup>降為 13.8kgf/cm<sup>2</sup>，xy負向剪應力由-17.3 kgf/cm<sup>2</sup>降為-16.1 kgf/cm<sup>2</sup>，正負兩剪應力約略降低 1 kgf/cm<sup>2</sup>，yz正向剪應力由 7.89 kgf/cm<sup>2</sup>減少為 7.79 kgf/cm<sup>2</sup>，yz負向剪應力由-7.05 kgf/cm<sup>2</sup>減少為-7.00 kgf/cm<sup>2</sup>。由以上結果可發現增加此鋼筋量對zz向應力幾乎沒影響，但是由於鋼筋增加的是縱向鋼筋因此這是可預期的。而剪應力則是因為本分析程式無法模擬剪力摩擦筋的效應，因此增加鋼筋量無法對剪應力產生效用，僅能影響正向應力。

## 第五張 結論與建議

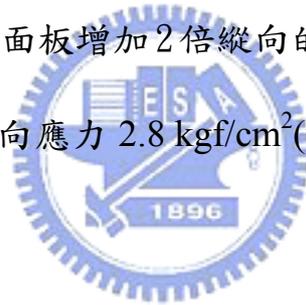
### 5.1 結論

由以上的分析結果整合出以下的結論：

1. 影響連接板所受的應力之因素有：新橋澆鑄完後等待與舊橋相接的時間、環境的相對溼度與環境的溫度。新橋等待與舊橋相接的時間越長、環境相對濕度越高、環境氣溫越低則連接板所受到的應力就越小。
2. 三度空間的六向應力有：xx 向應力、yy 向應力、zz 向應力、xy 向剪應力、yz 向剪應力、zx 向剪應力。本分析的連接板受此六向應力影響較大的有：xx 應力、yy 應力、xy 剪應力、yz 剪應力，共四個應力。
3. yy 向應力與 xy 向剪應力影響的範圍較小，只有在連接板與舊橋連接線的兩端，因此只要在兩端多增設橫向鋼筋便可減少這兩個應力的影響。
4. xx 向應力分布在整個連接板，yz 向剪應力分布於連接板與舊橋的整個連接線，因此這兩應力分佈範圍較廣，會影響到整個連

接板。其中 xx 向應力可於連接板與新橋橋面板多增設縱向鋼筋來減少其影響，但 yz 剪應力則較難以克服。

5. 新橋澆鑄完後等待與舊橋相接的時間越長，所產生的應力越小，而應力減少的量以前 4 個月最多，因此由經濟考量，新橋澆鑄完以第 3 和第 4 個月與舊橋相接最為經濟。
6. 新舊橋樑於夏天開始相連接時，新橋須等待 4 個月後再相接較為安全，而冬天相連接時新橋須等待 2 個月即可相接。
7. 於連接版與新橋橋面板增加 2 倍縱向的鋼筋可減少縱向應力(xx 向)  $3.1 \text{ kgf/cm}^2$  與橫向應力  $2.8 \text{ kgf/cm}^2$  (yy 向)。



## 5.2 建議

1. 建議連接版與舊橋連接線兩端可加強剪力摩擦筋以抵抗兩處之集中應力，由於本軟體無法模擬剪力摩擦筋，此部分有待更進一步的研究。
2. 建議可增加養護時間，以使連接板在初期應力增加最大的時刻處於 100% 相對濕度之下，可有效的減少其應力的增加。本分析未能考慮到養護時間對其應力的影響，此部分有待進一步的研究。

## 參考文獻

1. Arthur H. Nilson著，涂照朋、彭詩懿譯，預力混凝土設計，高立，民國 86 年。
2. Kentucky Transportation Center , Results of Creep Tests on Concrete Cylinder for the Cable-Stayed Bridge at Owensboro.
3. O.C.ZIENKIEWICZ,R.L.TAYLOR , “The FINITE ELEMENT METHOD Volume 1” ,Fifth edition, Butterworth Heinemann,2000.
4. TNO Building and Construction Research , “DIANA User’s Manual, Release 7.2”.
5. William N.Findley,James S.Lai,Kasif Onaran ,”Creep And Relaxation Of Nonlinear Viscoelastic Materials”,North-Holland Publishing Company,.1976.
6. 王昱凱，支撐先進工法二次施工之研究，國立交通大學土木工程學研究所碩士論文（2002）。
7. 王新榮，陳時錦，劉亞忠，有限元素法及其應用，中央圖書出版社，民國 86 年。
8. 中央氣象局全球知訊網
9. 林樹柱，預力混凝土設計及施工，大中國圖書公司。

10. 胡美璜，公路橋樑設計範例(三)，台灣省公路局，民國 68 年。
11. 陳泓文，乾縮與潛變對預力混凝土橋樑變形影響研究，中興工程顧問社，民國 87 年。
12. 黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，民國 86 年。
13. 混凝土設計規範及解說(土木 401-93)，中國土木水利工程學會，民國 93 年。



元素數量	x 變位極值(cm)		y 變位極值(cm)		z 變位極值(cm)	
	極大	極小	極大	極小	極大	極小
432	0.137	-1.58	2.06	-0.113	0.185	-0.117
540	0.137	-1.58	2.06	-0.113	0.185	-0.117
648	0.137	-1.58	2.06	-0.113	0.186	-0.117
810	0.137	-1.58	2.06	-0.113	0.186	-0.117
864	0.137	-1.58	2.06	-0.113	0.186	-0.117
918	0.137	-1.58	2.06	-0.113	0.186	-0.117

元素數量	XX應力極值(kg/cm <sup>2</sup> )		YY應力極值(kg/cm <sup>2</sup> )		ZZ應力極值(kg/cm <sup>2</sup> )	
	極大	極小	極大	極小	極大	極小
432	76.1	-97	61	-21.7	26.6	-38
540	76.1	-97.8	60.8	-22.8	26.6	-38
648	76.2	-97.8	60.8	-22.8	26.6	-38
810	76.2	-97.9	60.8	-22.8	26.7	-38
864	76.2	-97.9	60.8	-22.8	26.7	-38
918	76.2	-97.9	60.8	-22.8	26.7	-38

元素數量	XY剪應力極值(kg/cm <sup>2</sup> )		YZ剪應力極值(kg/cm <sup>2</sup> )	
	極大	極小	極大	極小
432	31.4	-36	17.1	-15.4
540	31.1	-36	16.8	-15.2
648	31.2	-36	16.8	-15.3
810	31.1	-36	16.7	-15.3
864	31.1	-36	16.7	-15.3
918	31.1	-36	16.7	-15.3

表 1 收斂分析結果表

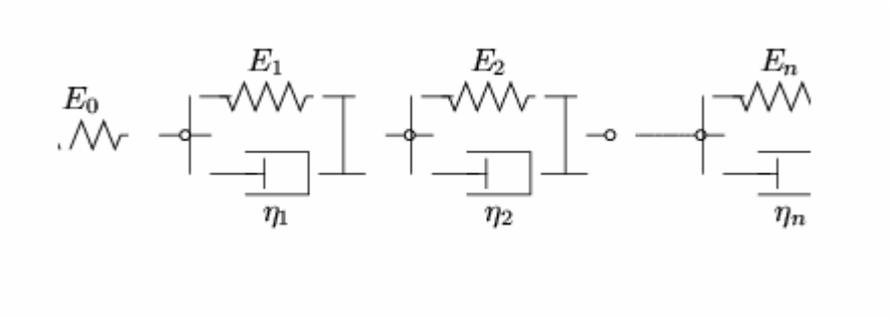


圖 2.1 Kelvin Chain model

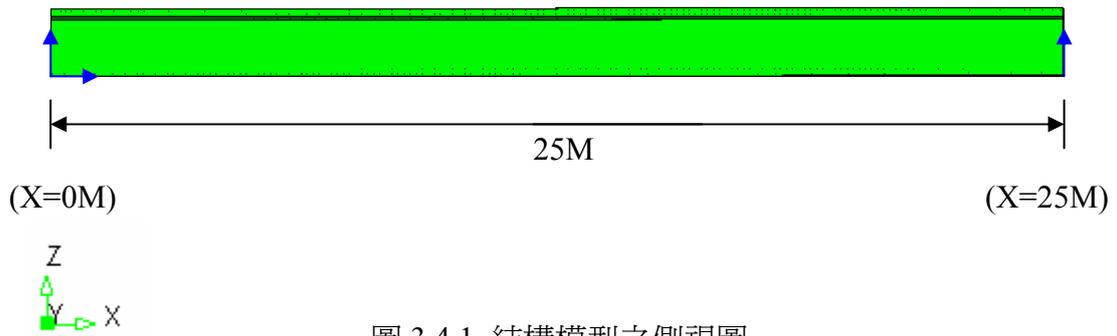


圖 3.4.1 結構模型之側視圖

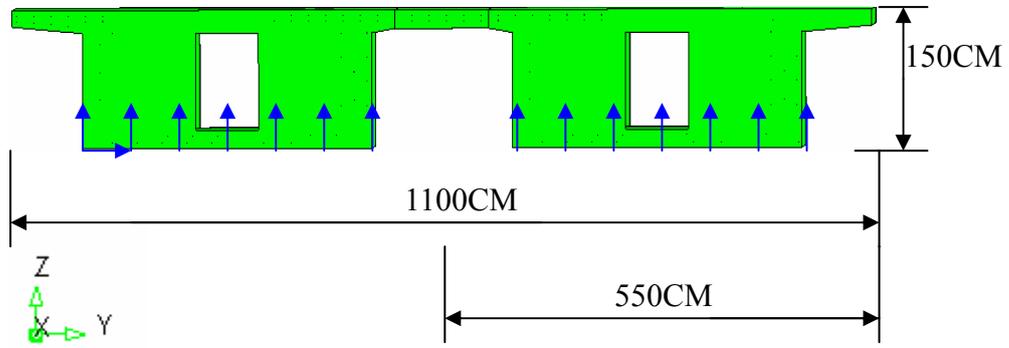


圖 3.4.2 結構模型之橋頭處橫斷面(X=0M)

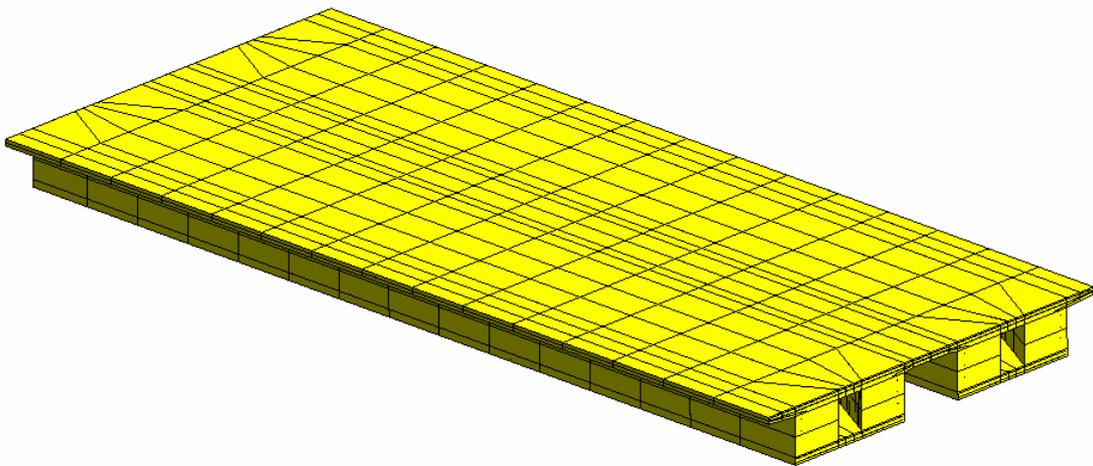


圖 3.4.3 元素分割圖

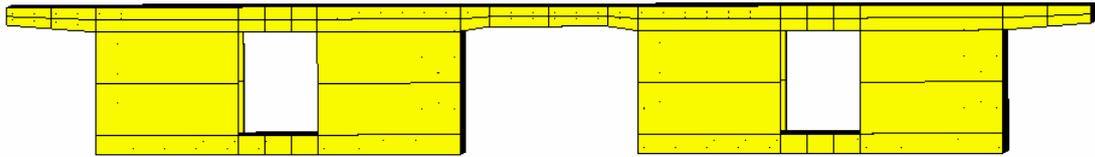


圖 3.4.4 元素橫斷面分割圖

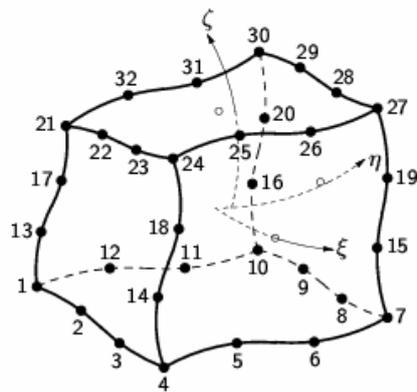


圖 3.4.5 32 節點實體元素



圖 3.4.6 鋼筋分佈側視圖



圖 3.4.7 斷面鋼筋分佈圖

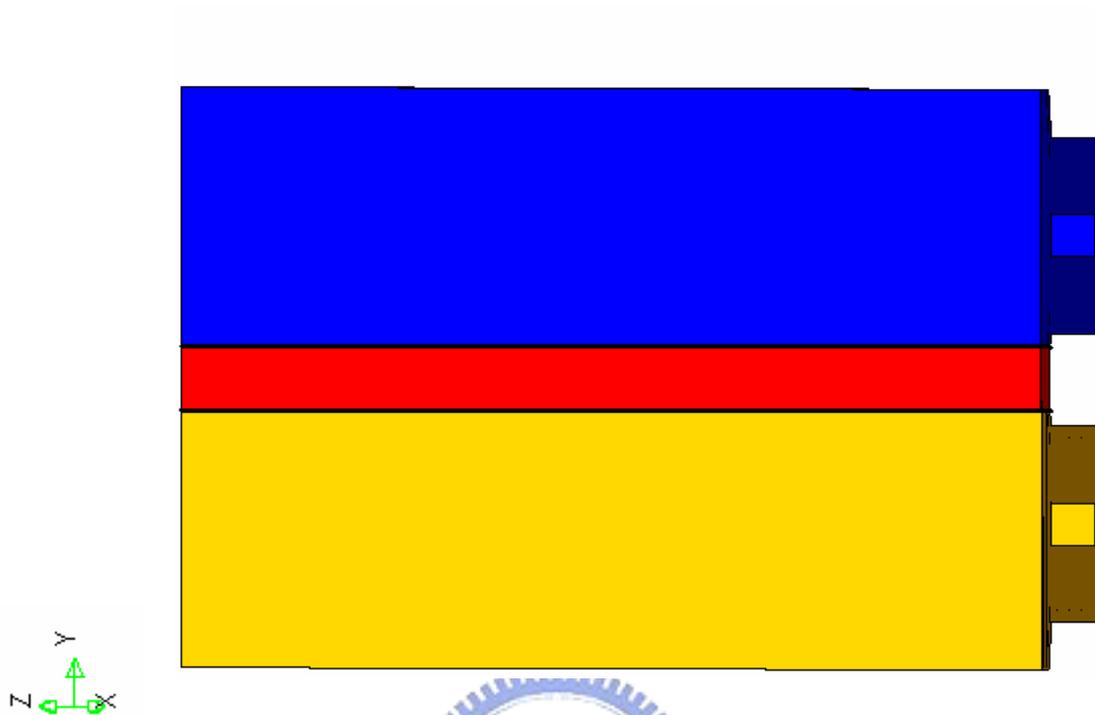


圖 3.5.1 分析順序圖  
 第一階段:黃色  
 第二階段:藍色  
 第三階段:黃藍紅三色

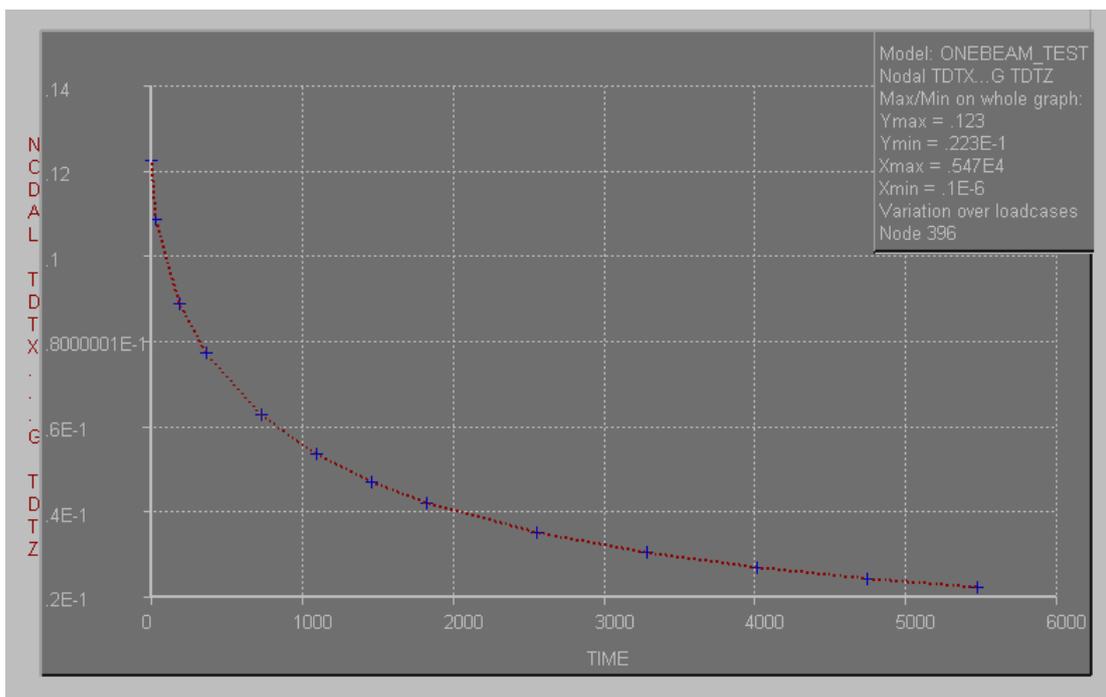


圖 3.5.2 舊樑 z 向撓度與時間關係圖

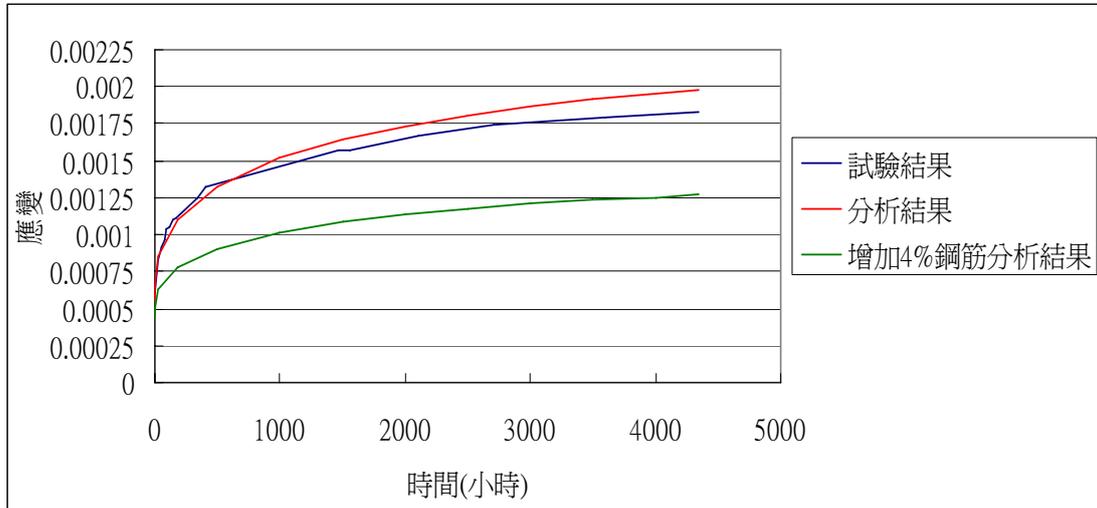


圖 3.6 分析結果與試驗數據之比對

藍色線：Kentucky Transportation Center 試驗結果

紅色線：Diana 分析結果

綠色線：增加 4% 垂直鋼筋量的 Diana 分析結果

Model: 2\_FEM  
PH2: Phase number 2  
Step: 8 TIME: 755  
Nodal TDTX...G TDTX  
Max = .137  
Min = -1.58  
Factor = 95.1

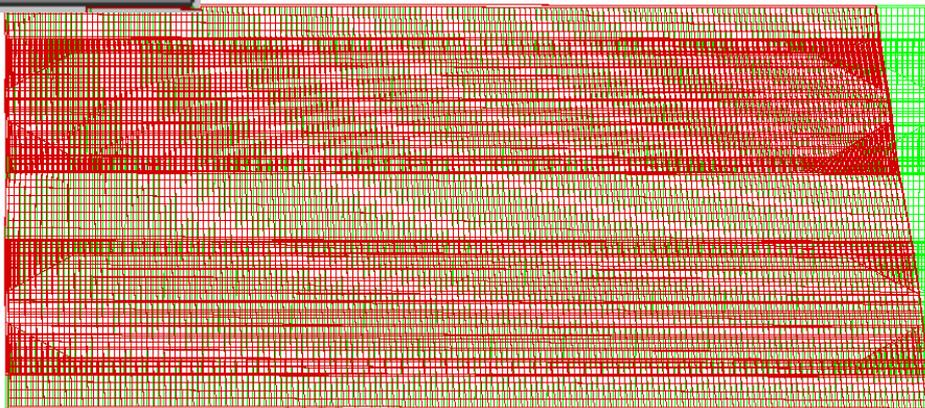


圖 4.2.1 x 向變位圖

Model: 2\_FEM  
PH2: Phase number 2  
Step: 8 TIME: 755  
Nodal TDTX...G TDTY  
Max = 2.06  
Min = -.113  
Factor = 72.8

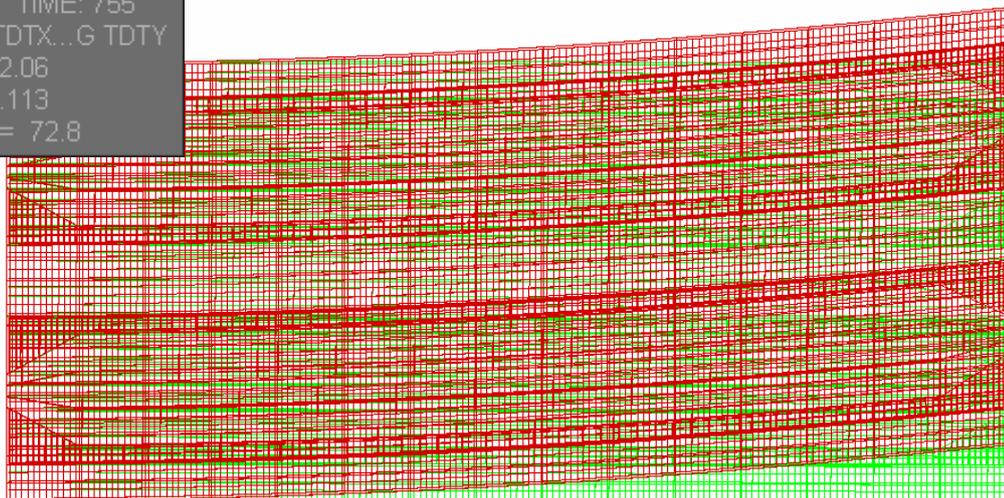


圖 4.2.2 y 向變位圖

Model: 2\_FEM  
 PH2: Phase number 2  
 Step: 8 TIME: 755  
 Nodal TDTX...G TDTZ  
 Max = .186  
 Min = -.117  
 Factor = .161E4

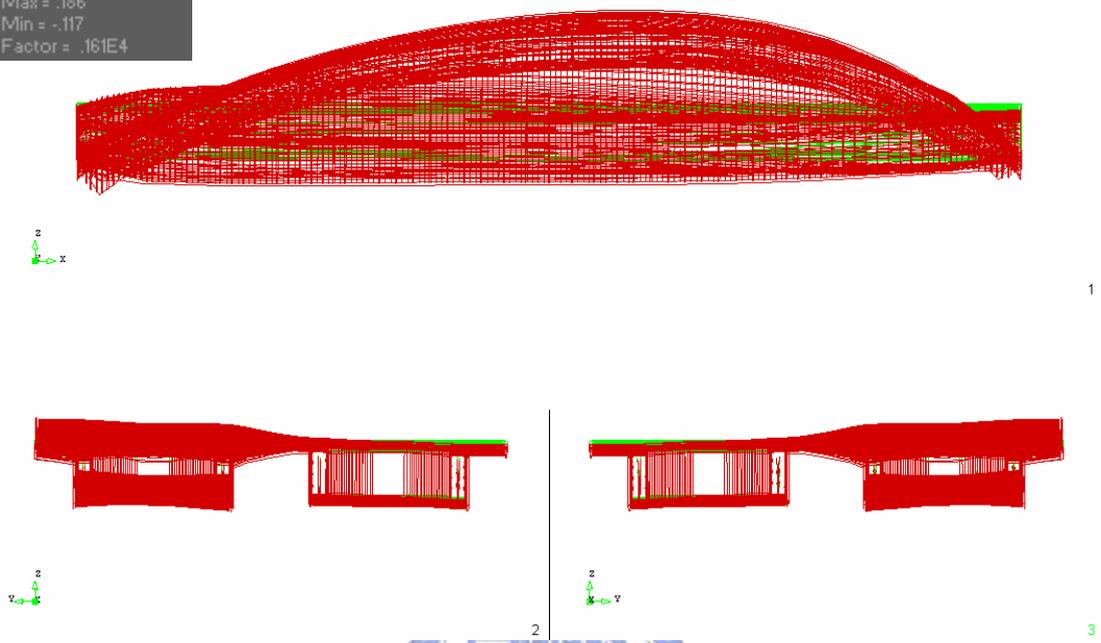


圖 4.2.3 z 向變位圖

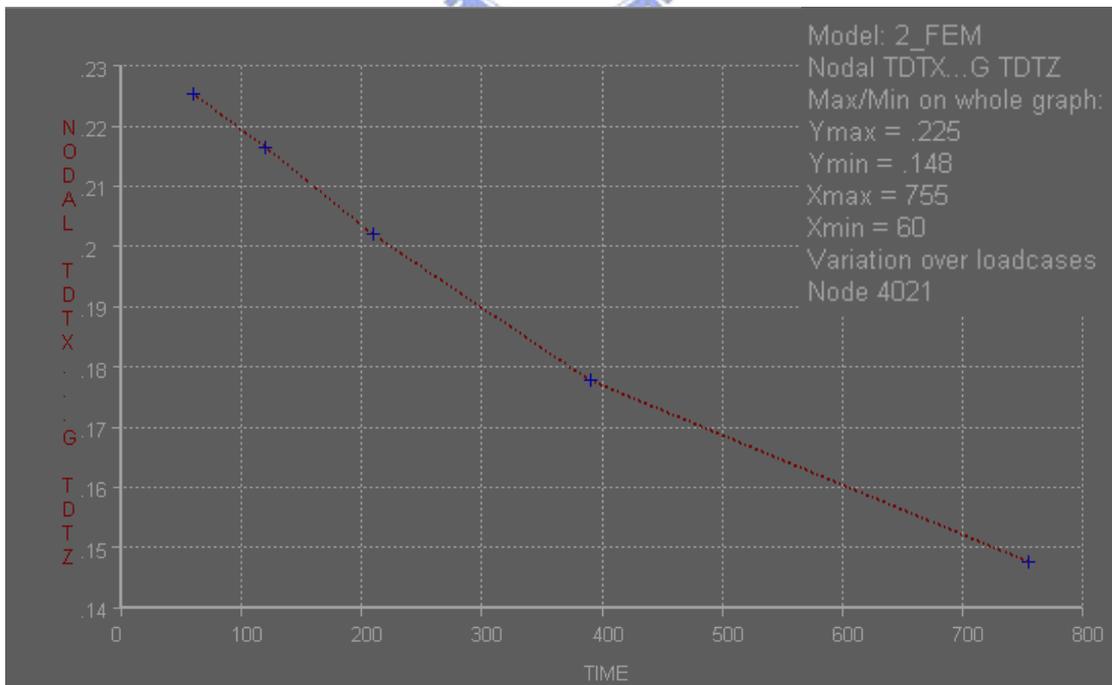


圖 4.2.4 z 向撓度與時間圖

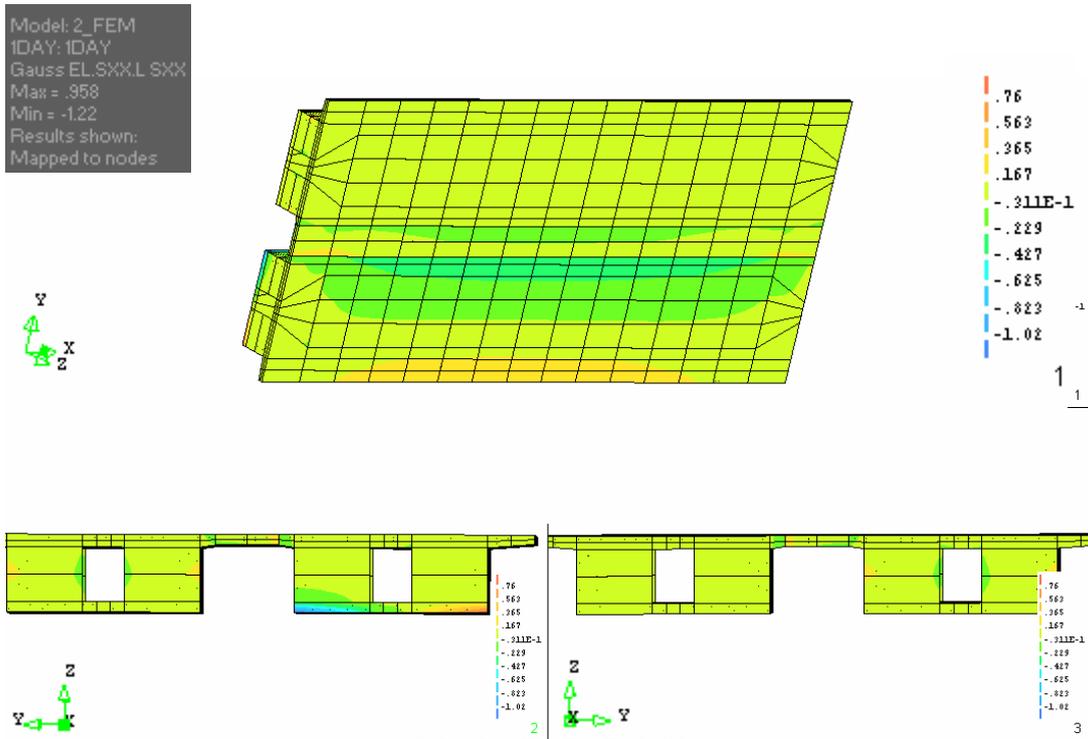


圖 4.2.5 xx 應力分佈—1 天

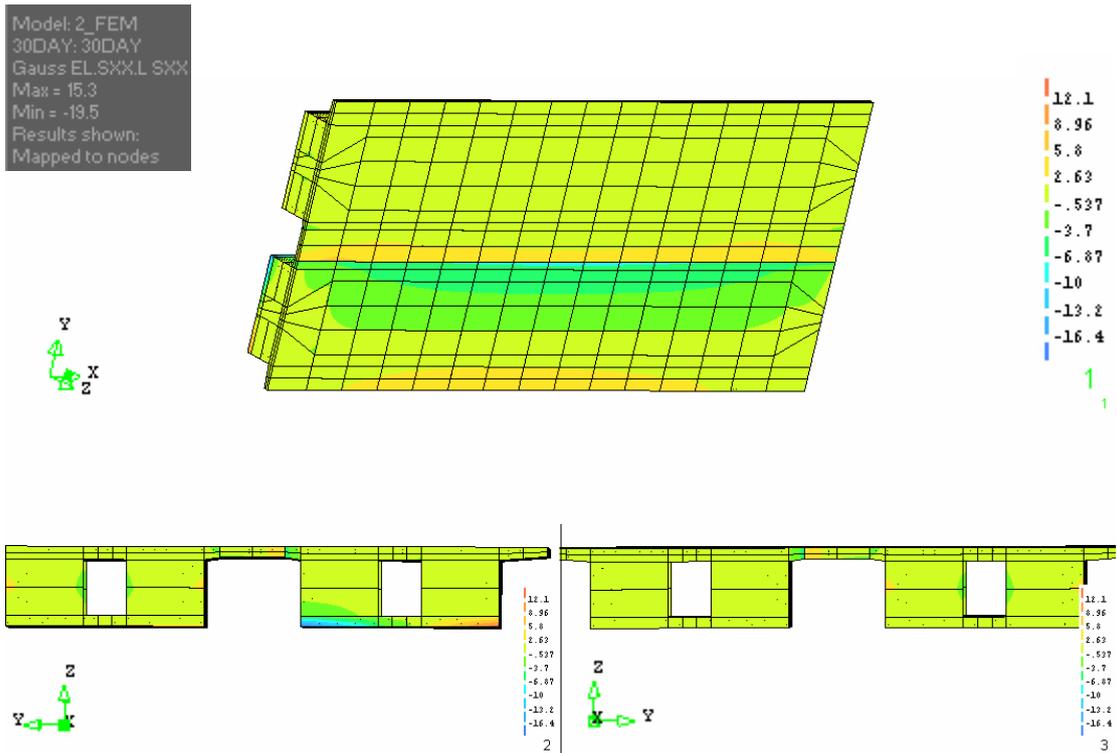


圖 4.2.6 xx 應力分佈—30 天

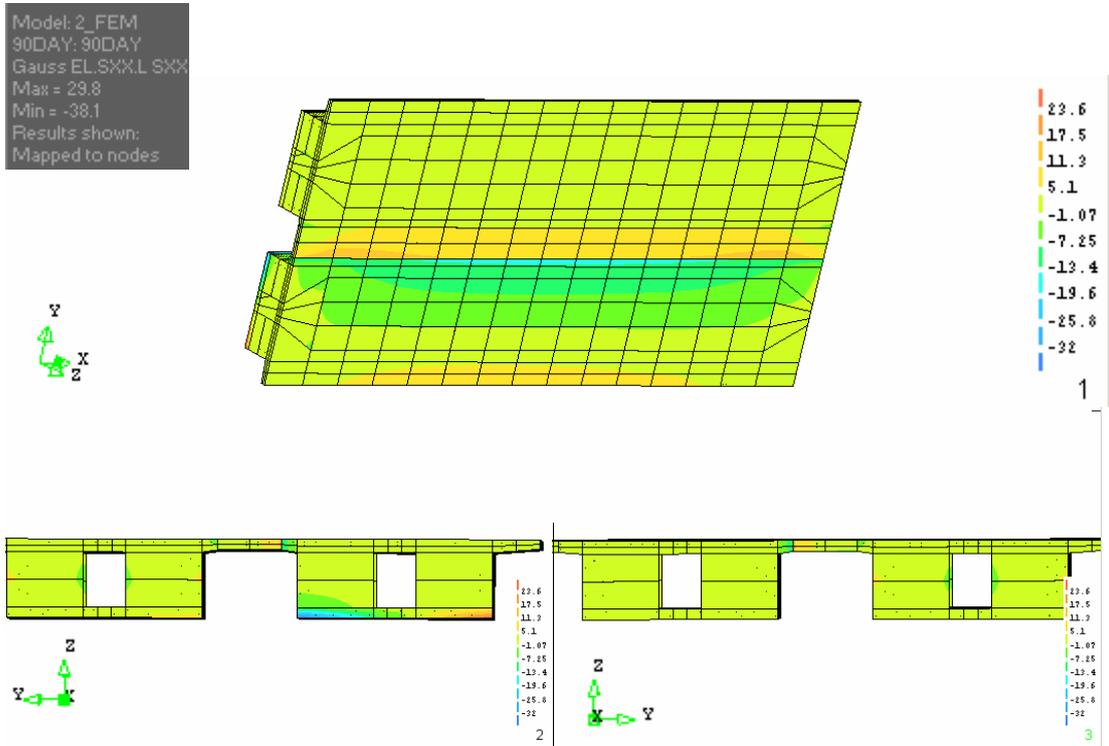


圖 4.2.7 xx 應力分佈—90 天

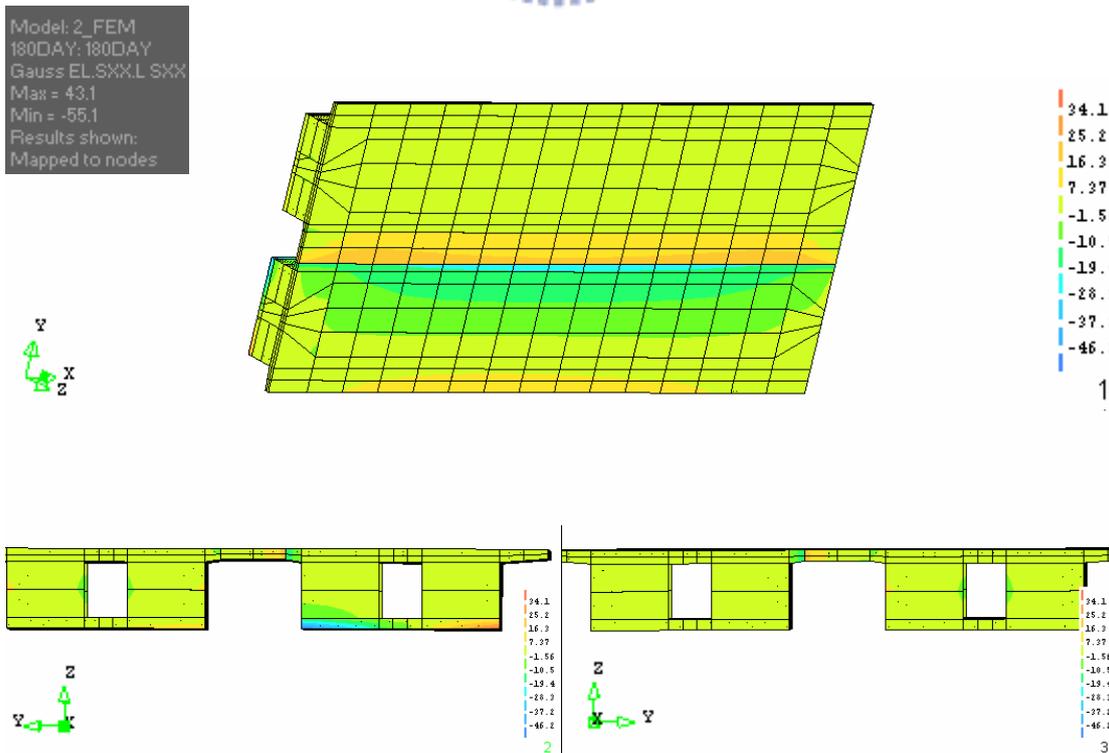


圖 4.2.8 xx 應力分佈—180 天

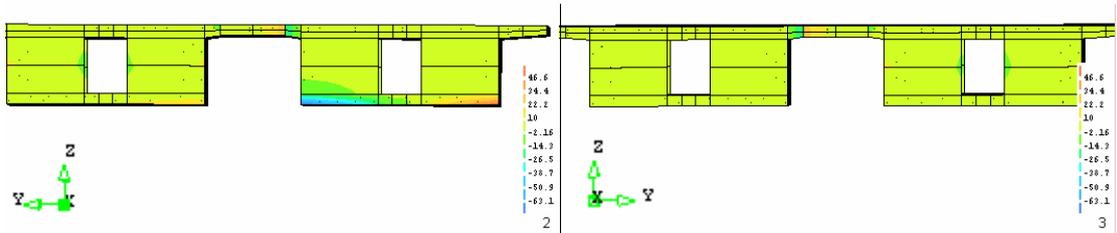
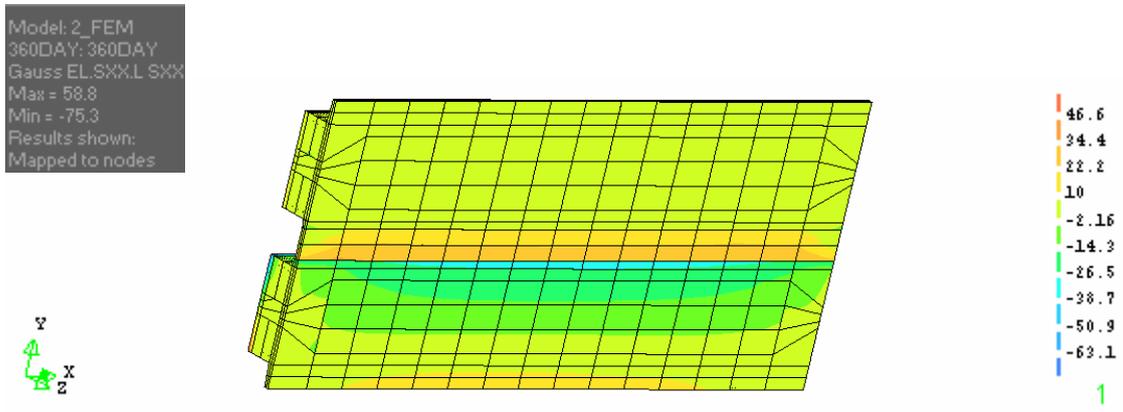


圖 4.2.9 xx 應力分佈—360 天

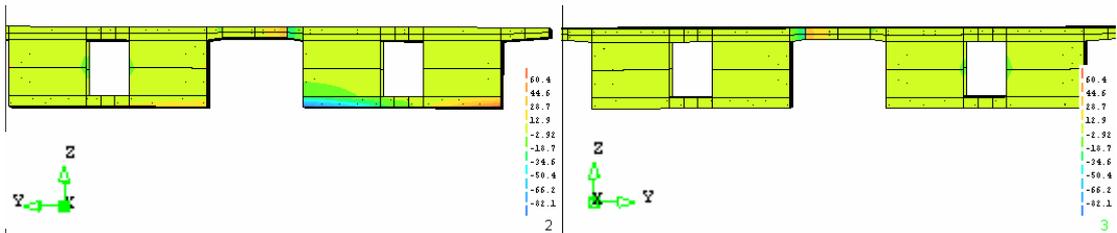
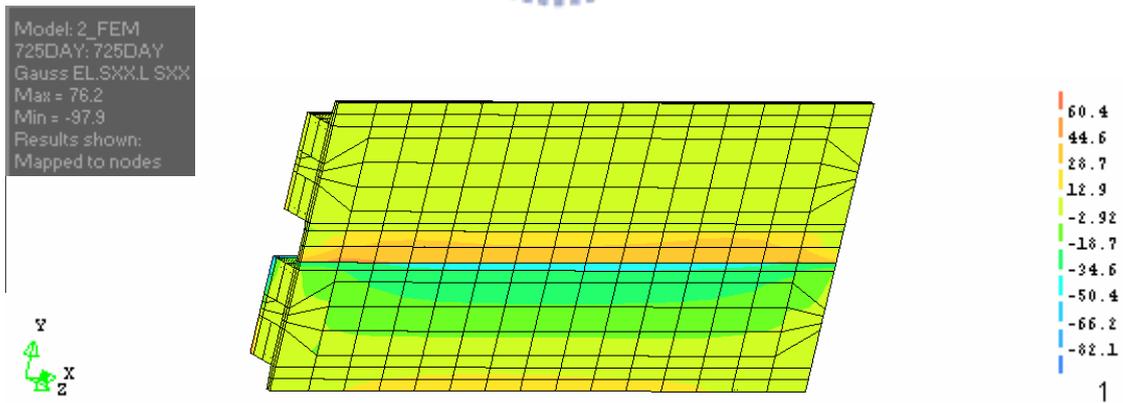


圖 4.2.10 xx 應力分佈－720 天

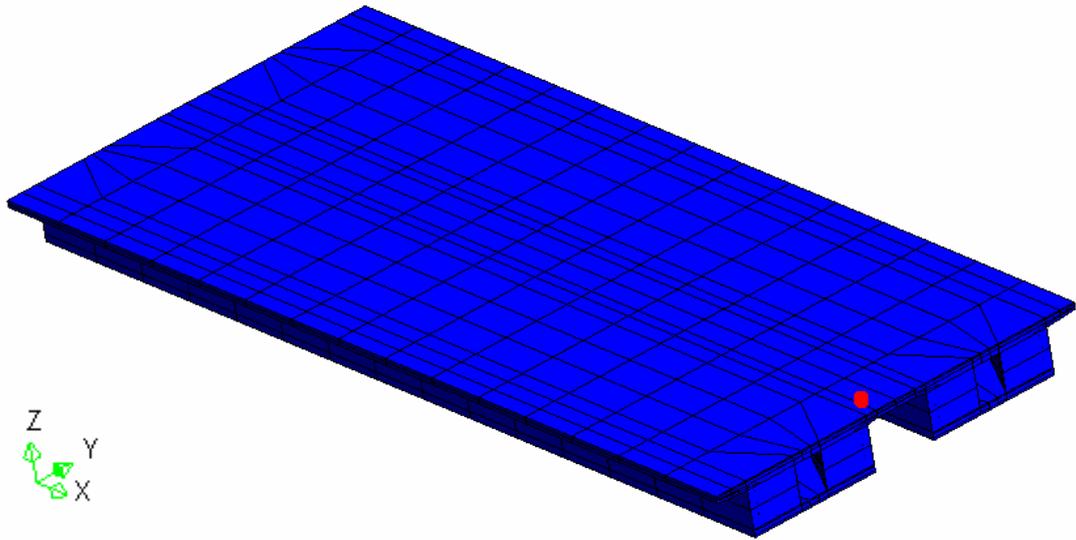


圖 4.2.11 連接板上 XX 應力最大處(圖上紅點處)

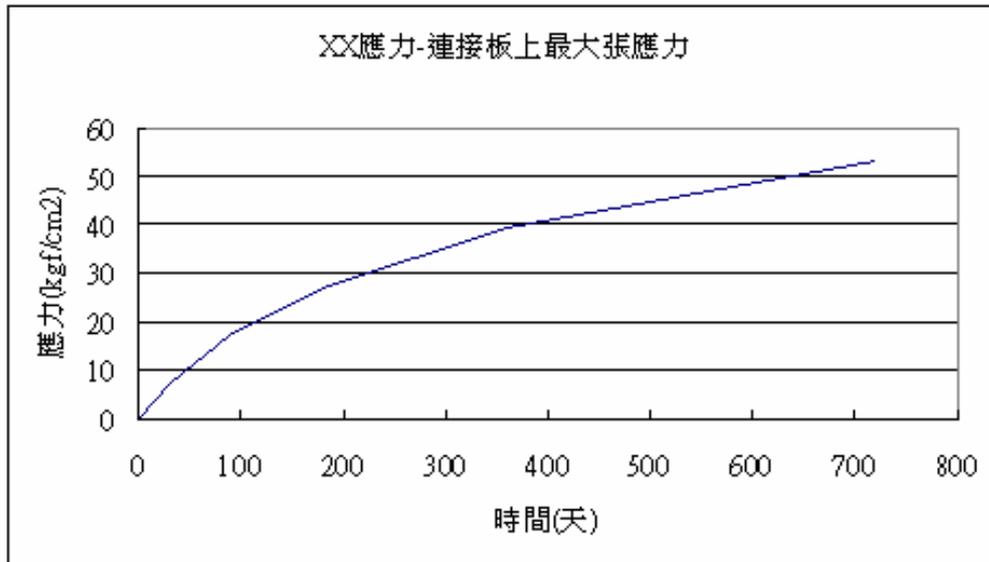


圖 4.2.12 xx 板上最大應力與時間關係圖

Model: 2\_FEM  
 1DAY: 1DAY  
 Gauss EL,SXX,L,SY  
 Max = .716  
 Min = -.205  
 Results shown:  
 Mapped to nodes

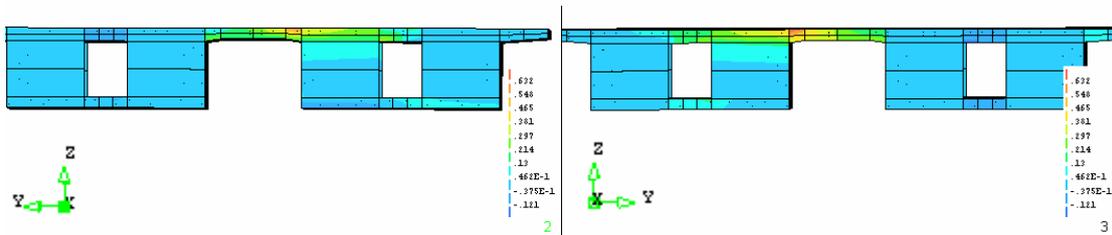
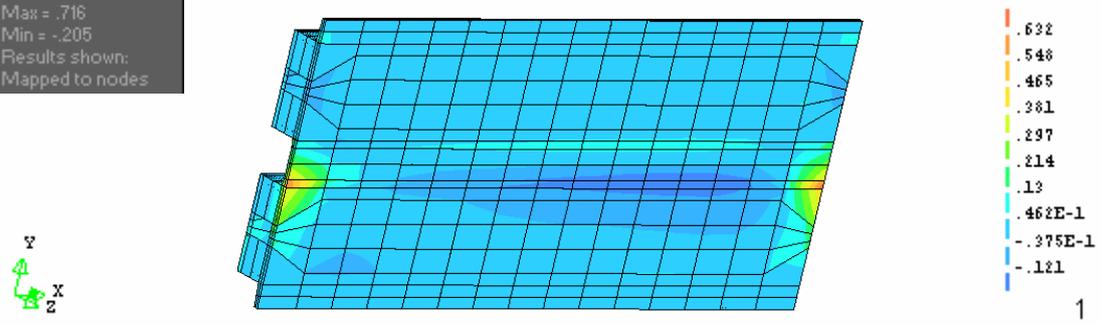


圖 4.2.13 yy 應力分佈-1 天

Model: 2\_FEM  
 30DAY: 30DAY  
 Gauss EL,SXX,L,SY  
 Max = 11.6  
 Min = -3.76  
 Results shown:  
 Mapped to nodes

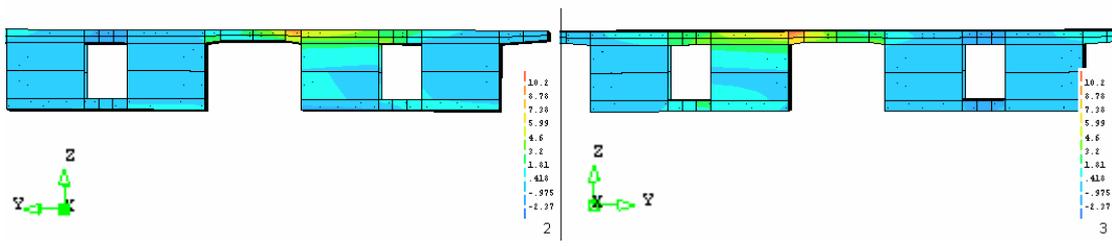
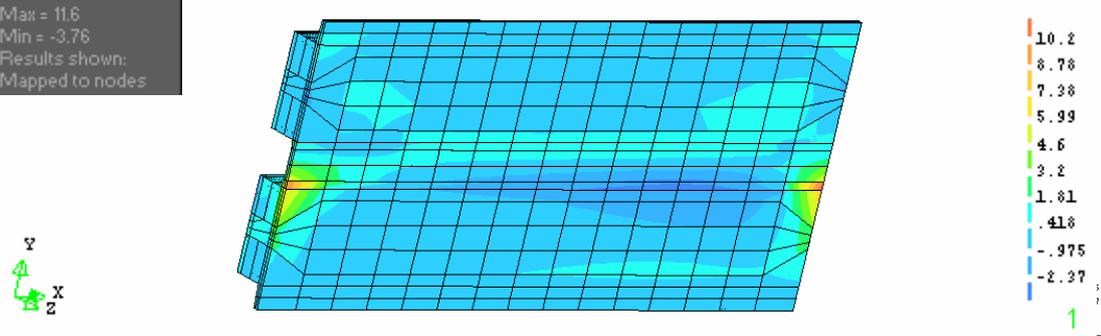


圖 4.2.14 yy 應力分佈—30 天

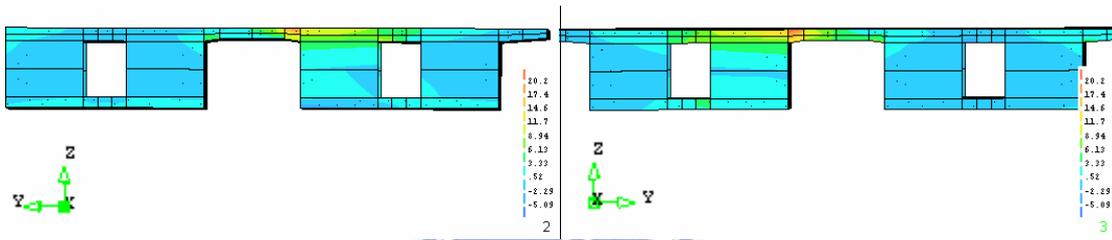
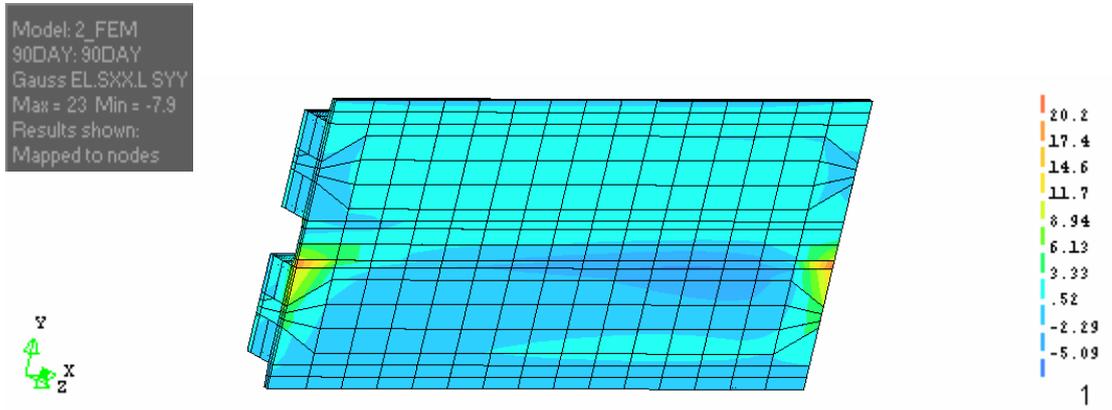


圖 4.2.15 yy 應力分佈—90 天

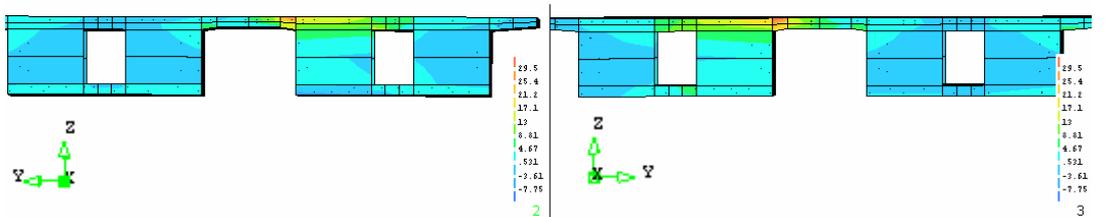
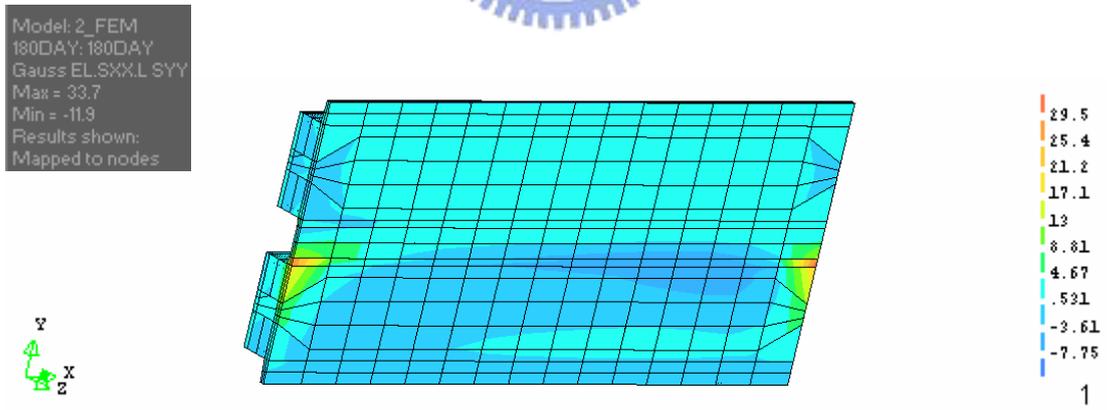


圖 4.2.16 yy 應力分佈—180 天

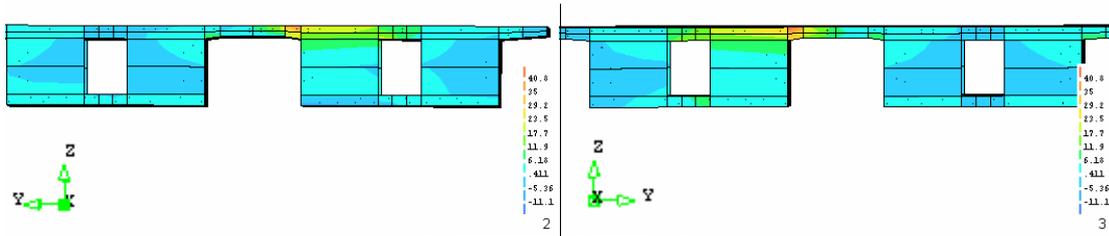
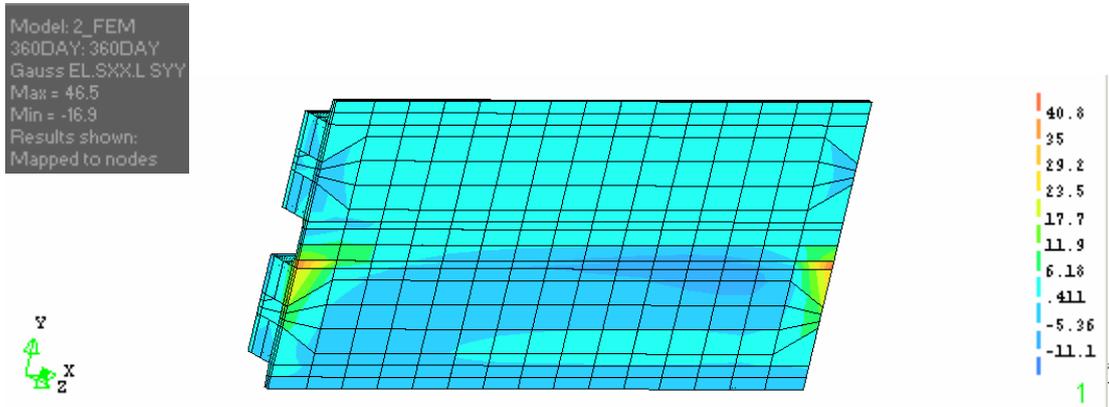


圖 4.2.17 yy 應力分佈—360 天

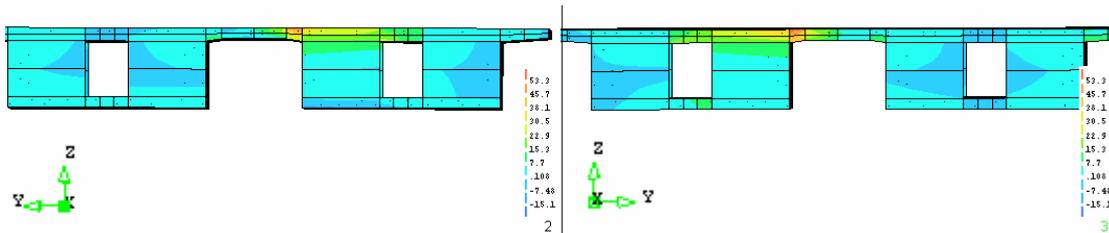
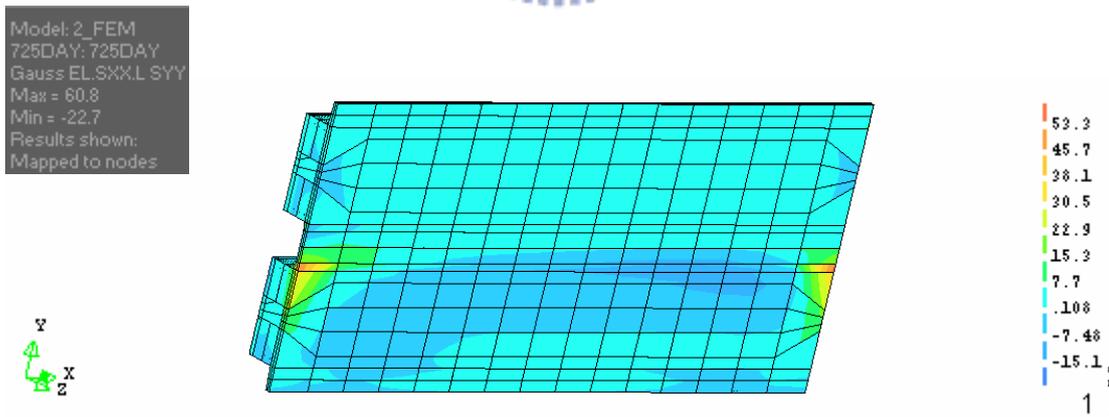


圖 4.2.18 yy 應力分佈－720 天

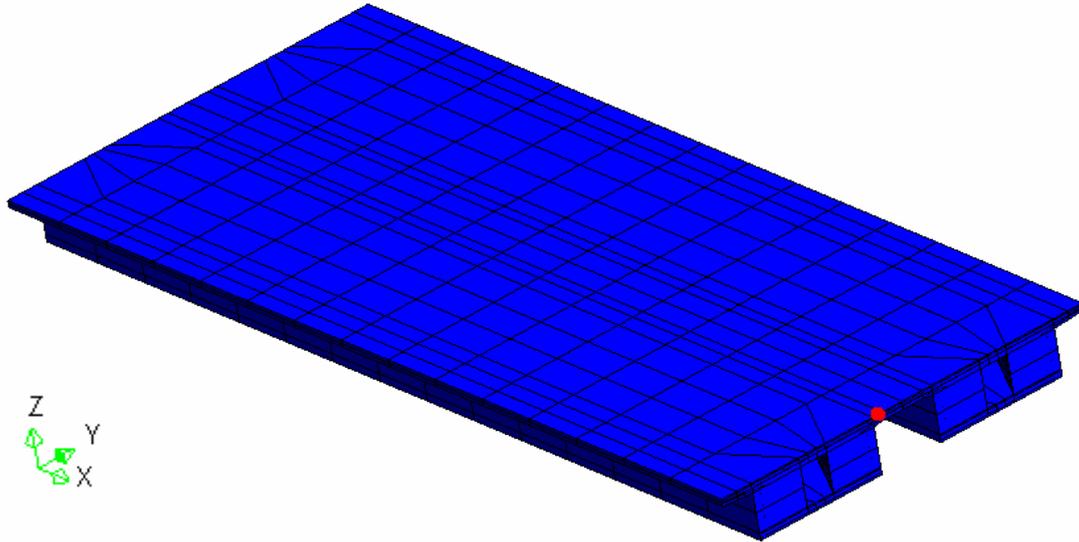


圖 4.2.19 連接板上 yy 應力最大處(圖上紅點處)

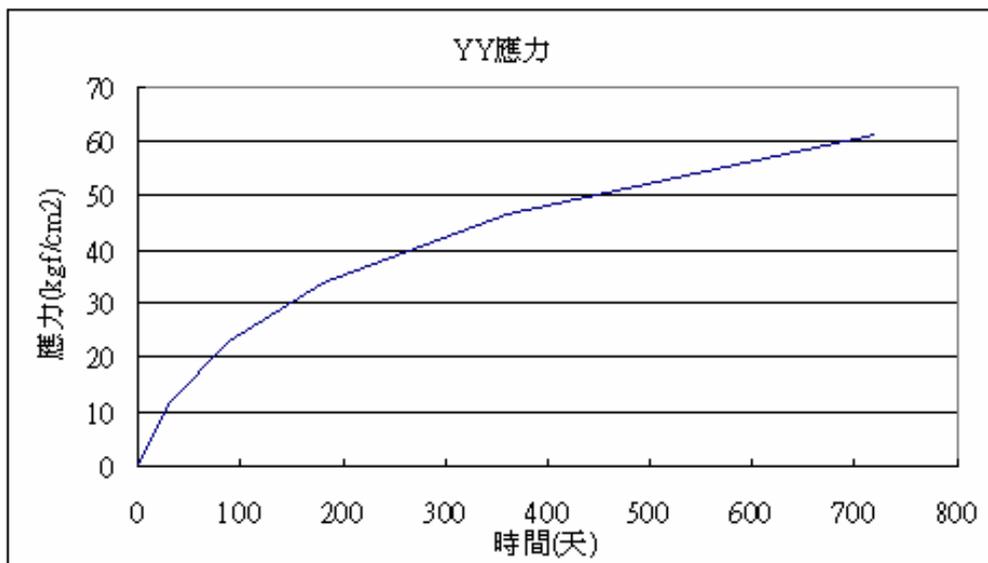


圖 4.2.20 yy 向板上最大應力與時間關係圖

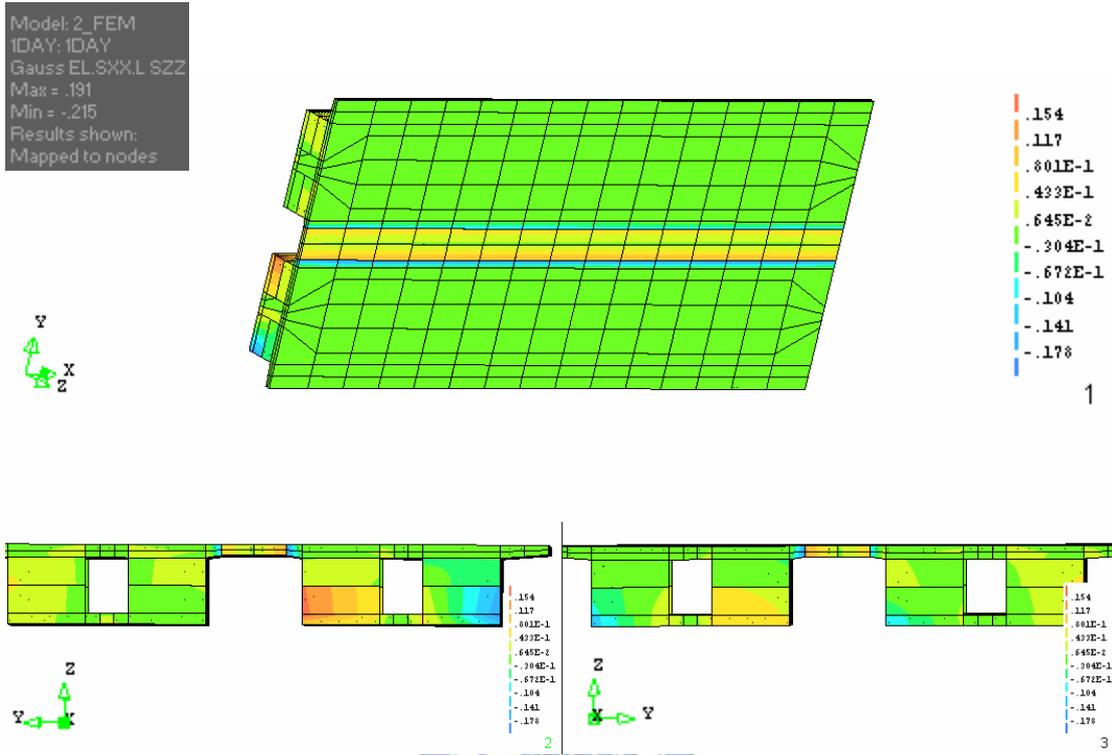


圖 4.2.21 zz 應力分佈—1 天

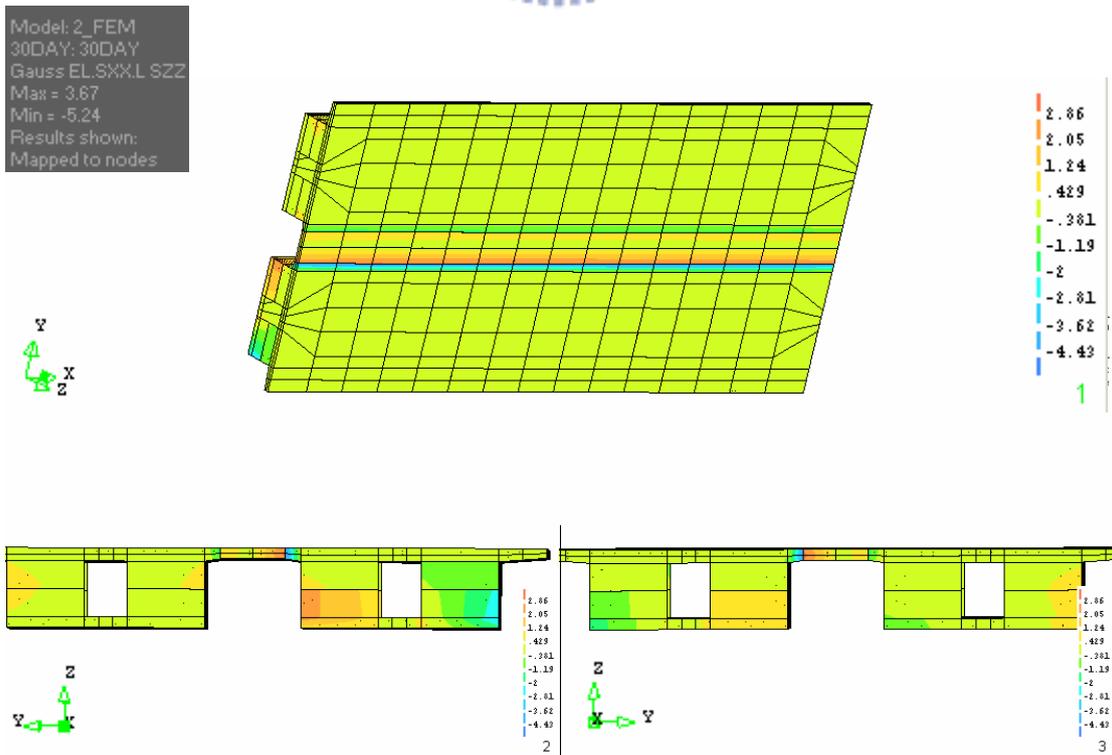


圖 4.2.22 zz 應力分佈—30 天

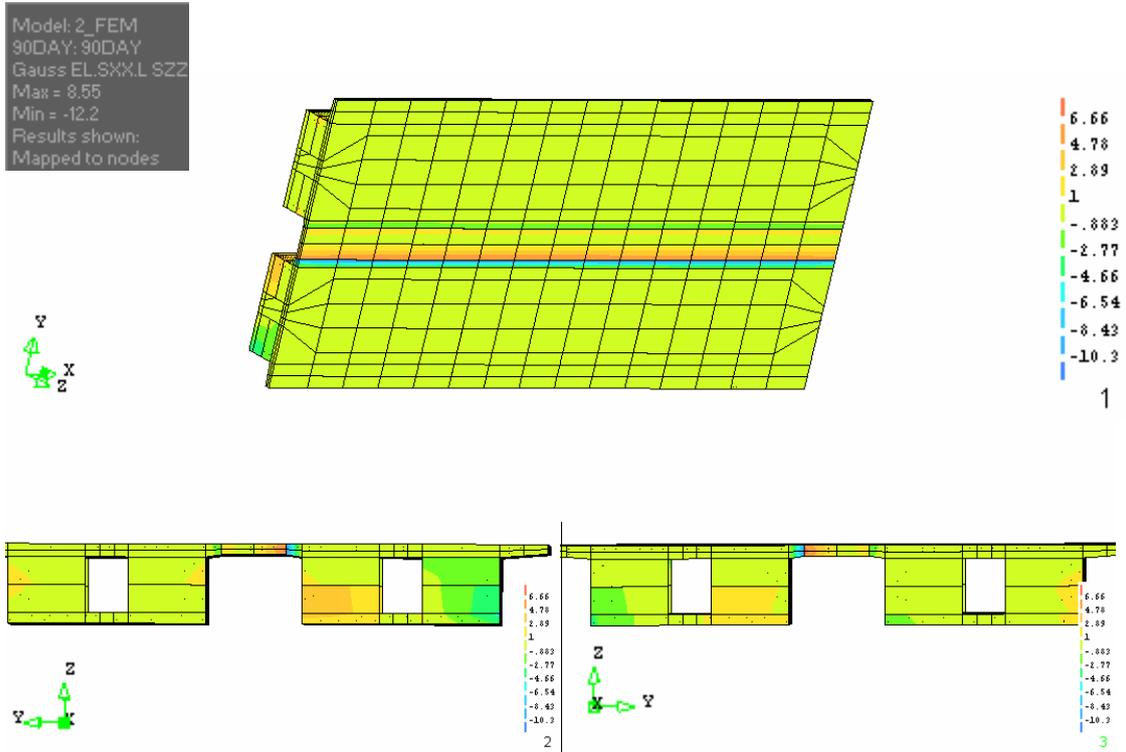


圖 4.2.23 zz 應力分佈—90 天

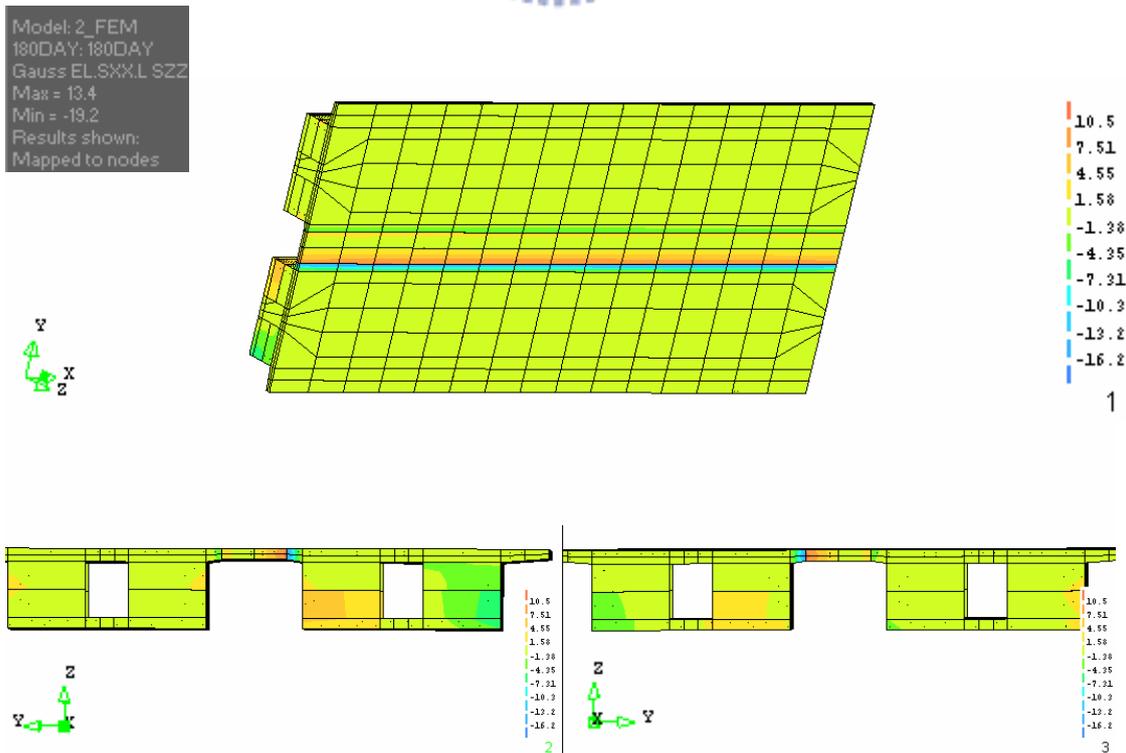


圖 4.2.24 zz 應力分佈—180 天

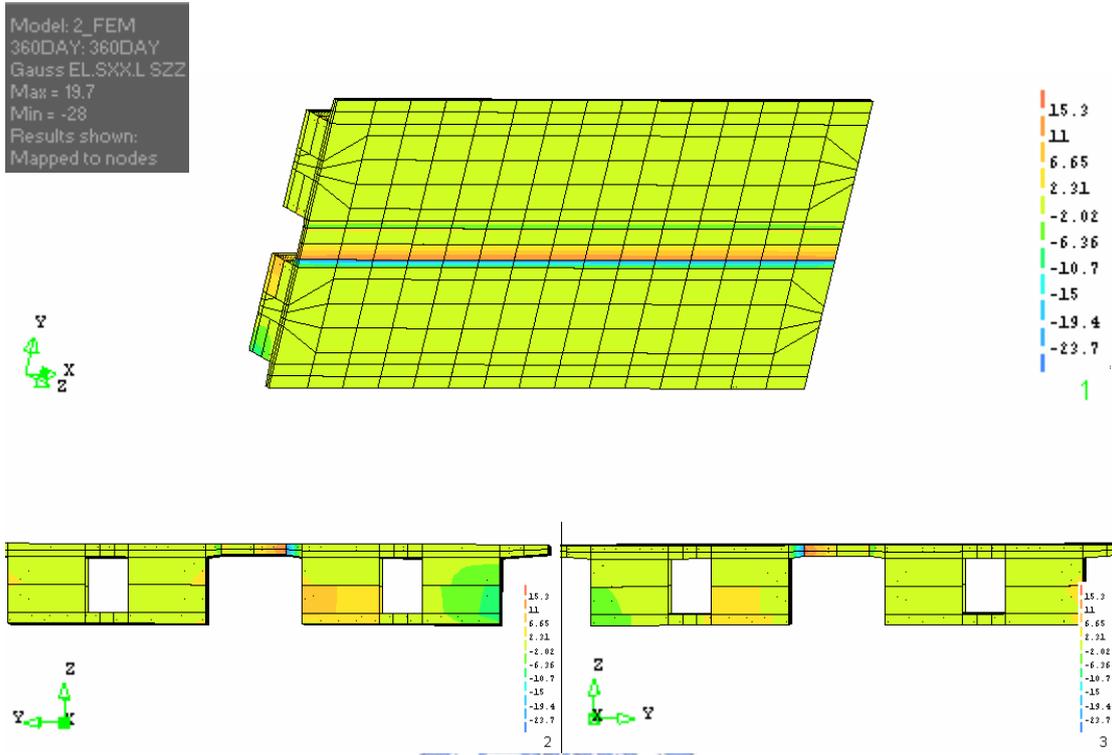


圖 4.2.25 zz 應力分佈—360 天

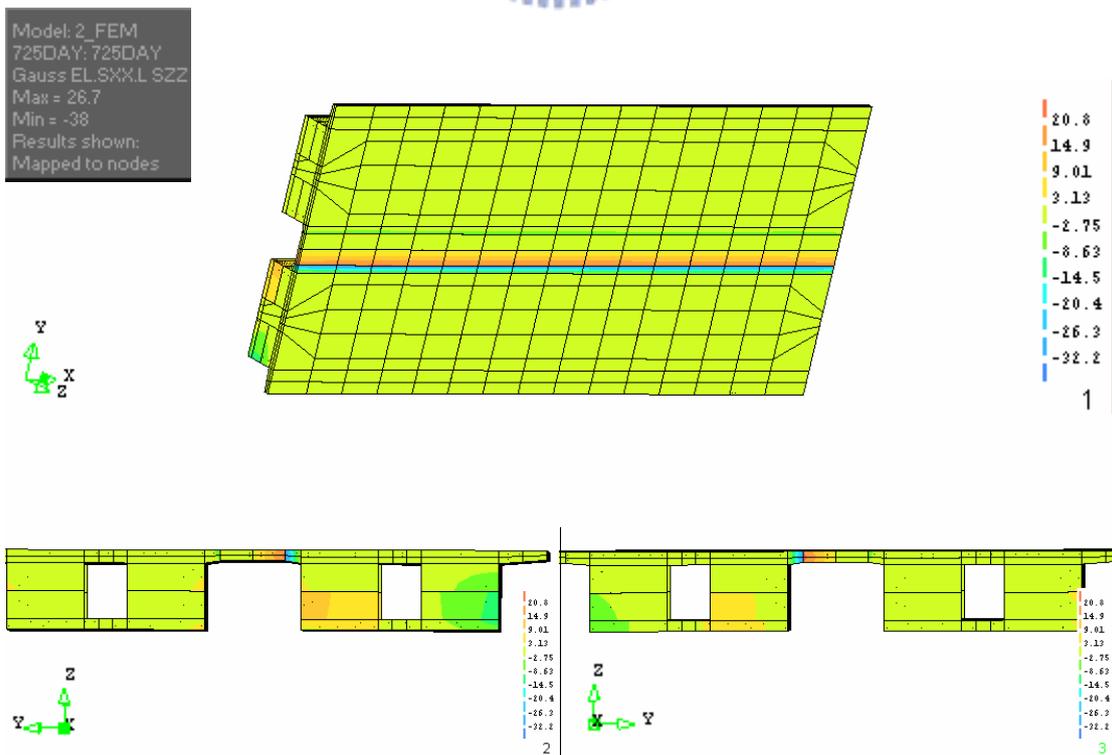


圖 4.2.26 zz 應力分佈-720 天

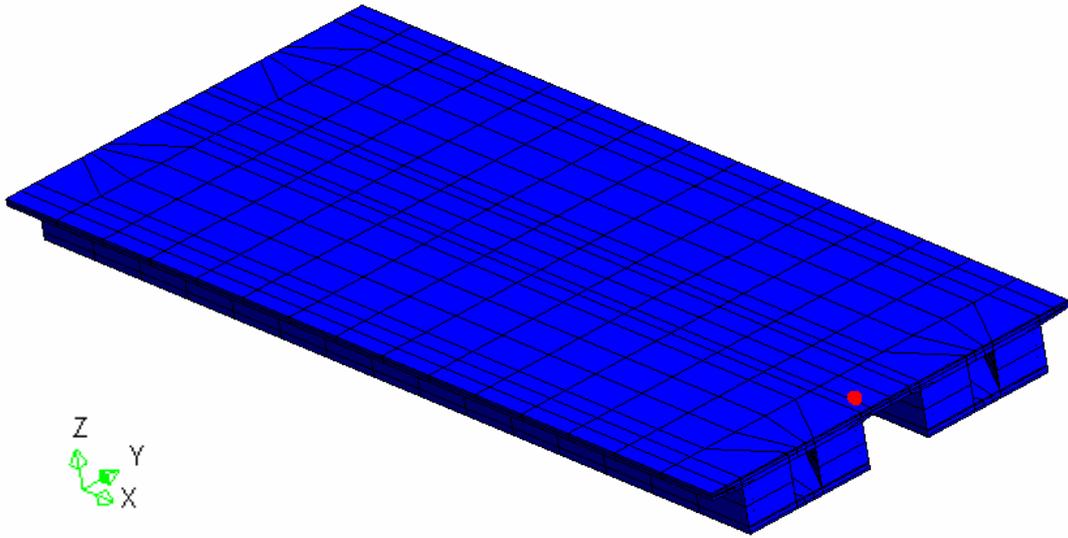


圖 4.2.27 連接版上 zz 向應力最大處(圖上紅點處)

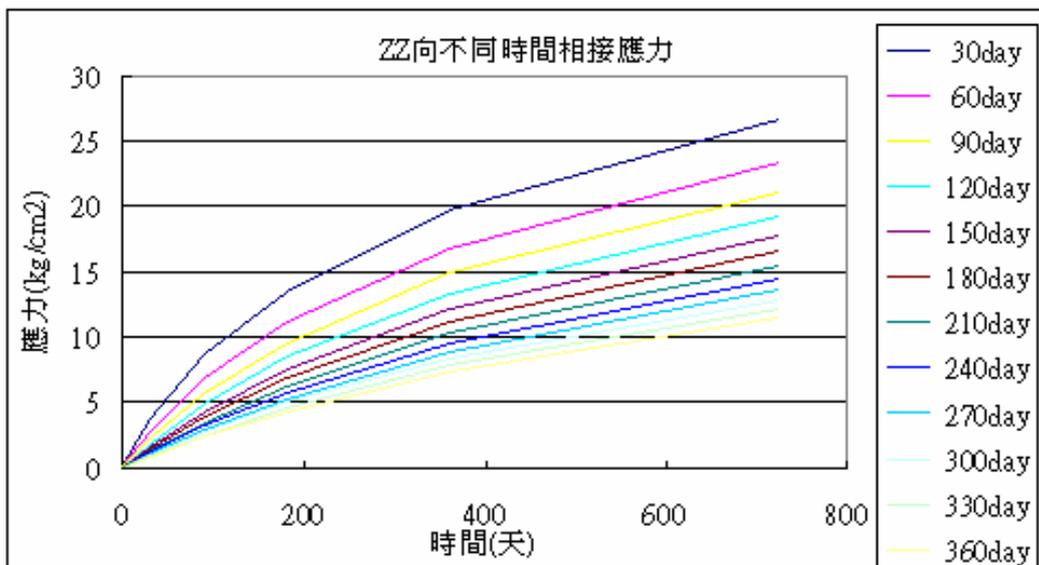


圖 4.2.28 新樑不同時間相接 zz 向應力圖

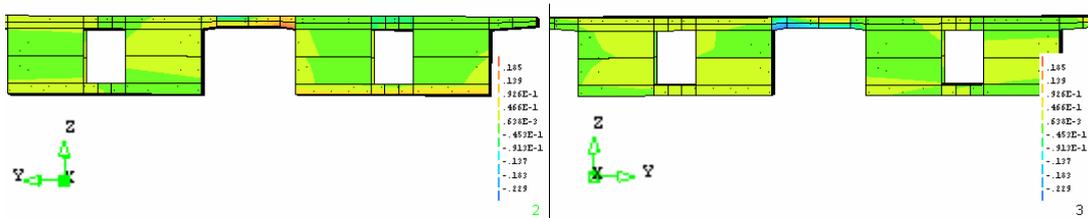
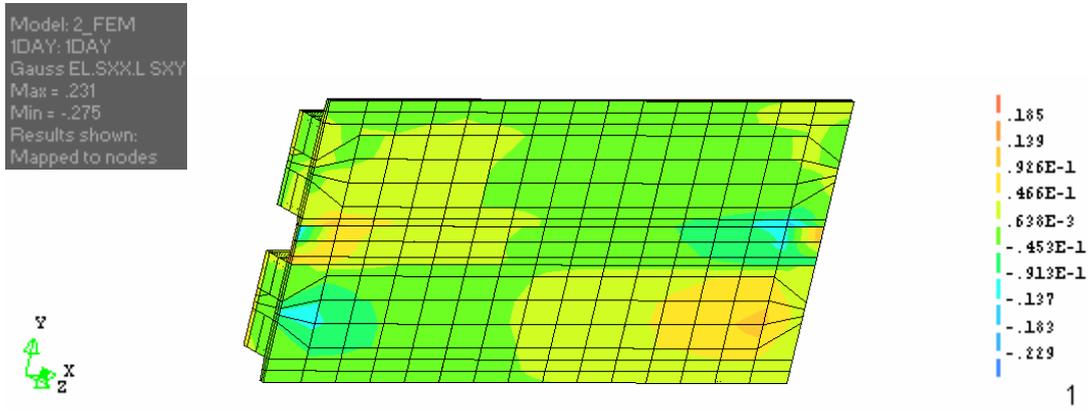


圖 4.2.29 xy 向剪應力分佈圖—1 天

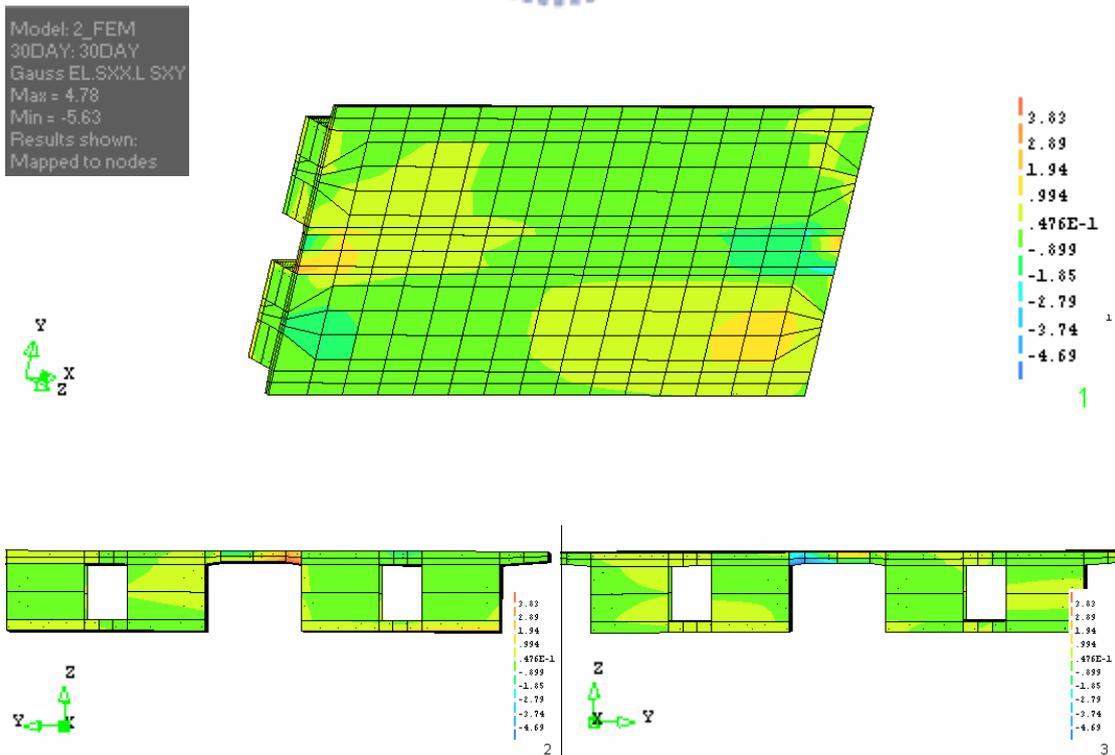


圖 4.2.30 xy 向剪應力分佈圖－30 天

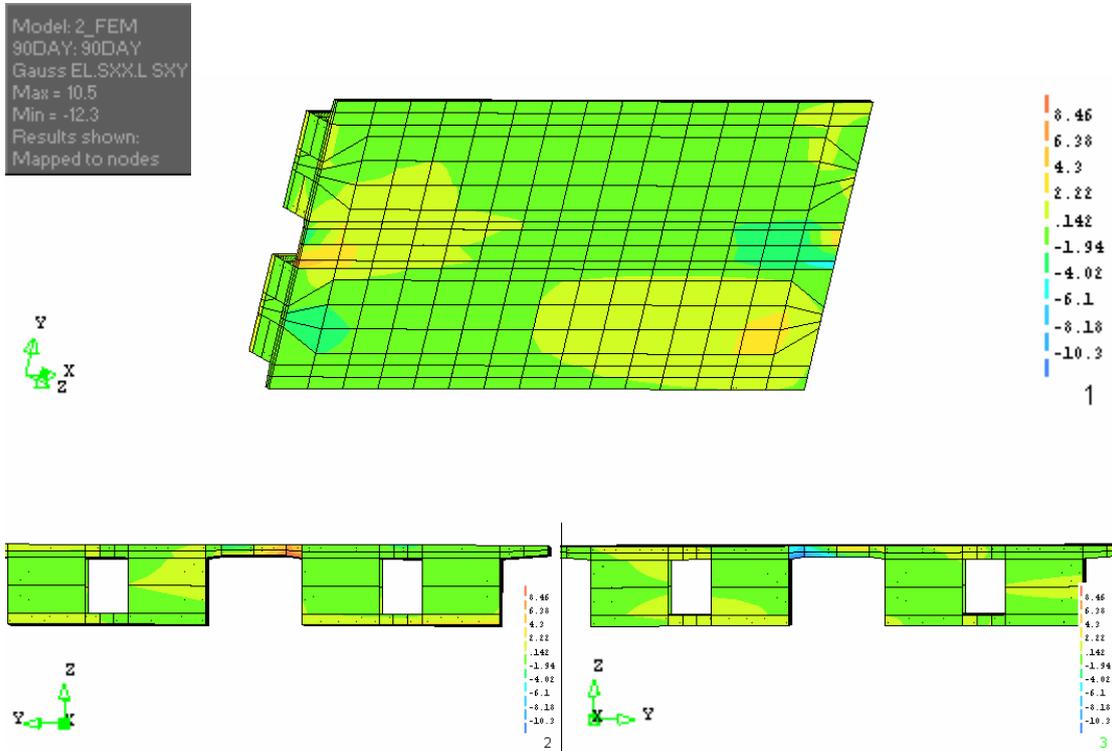


圖 4.2.31 xy 向剪應力分佈圖－90 天

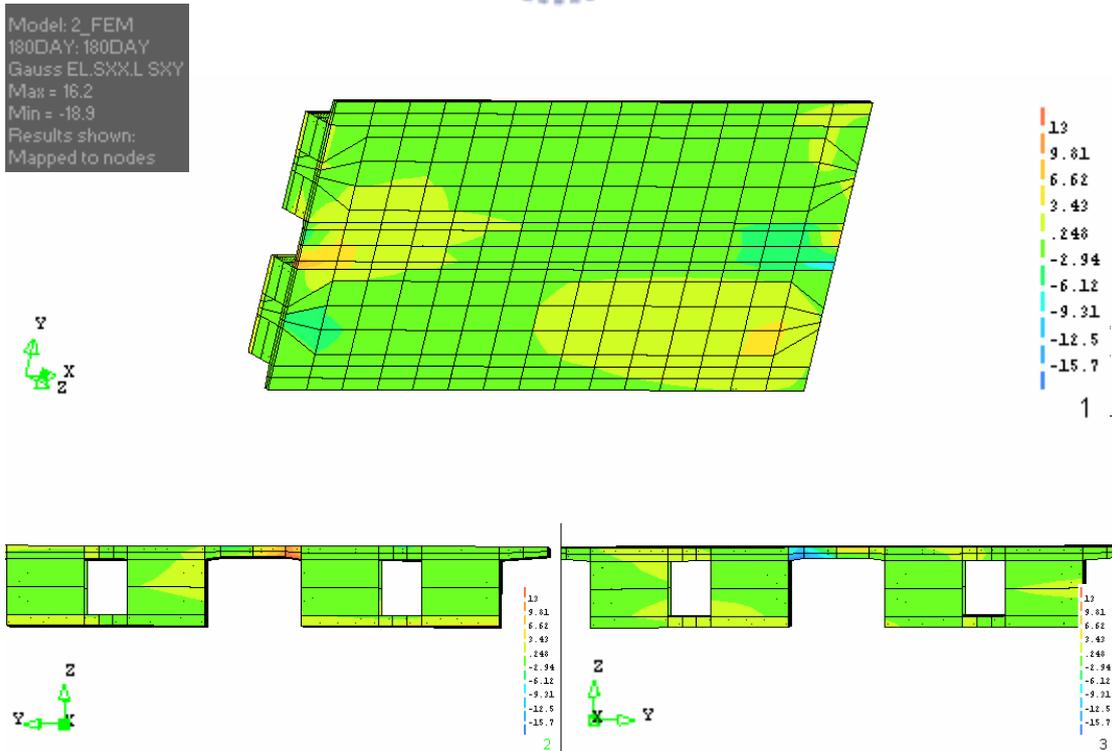


圖 4.2.32 xy 向剪應力分佈圖—180 天

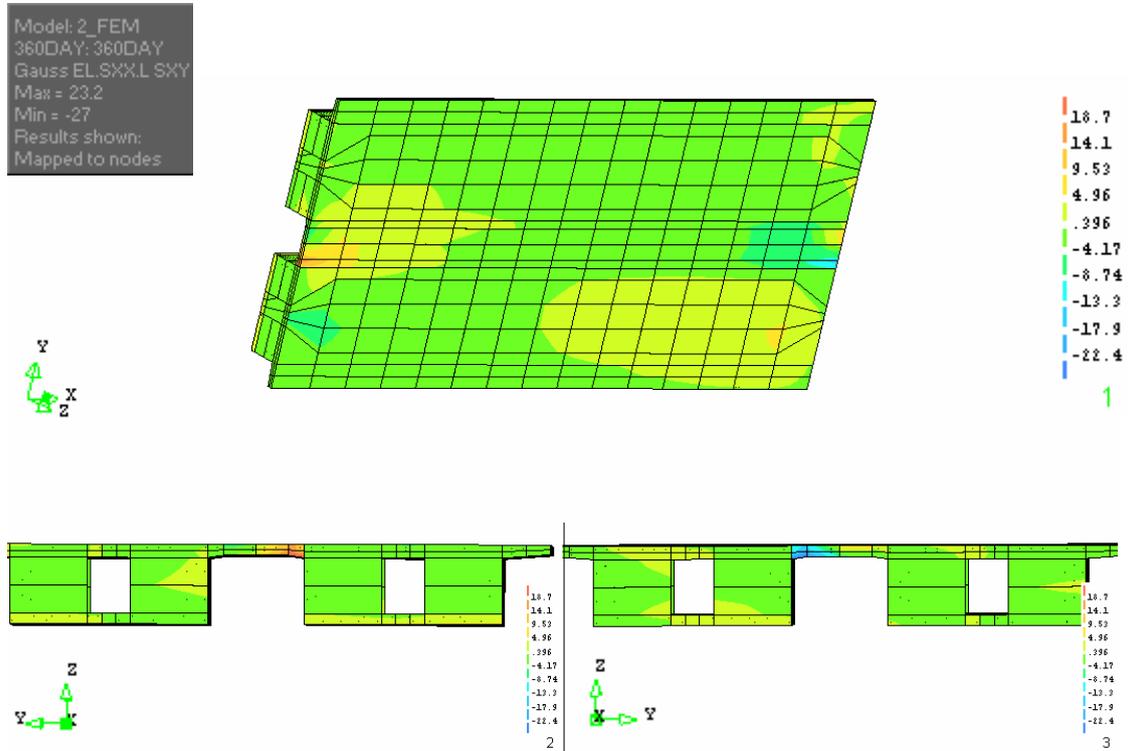


圖 4.2.33 xy 向剪應力分佈圖—360 天

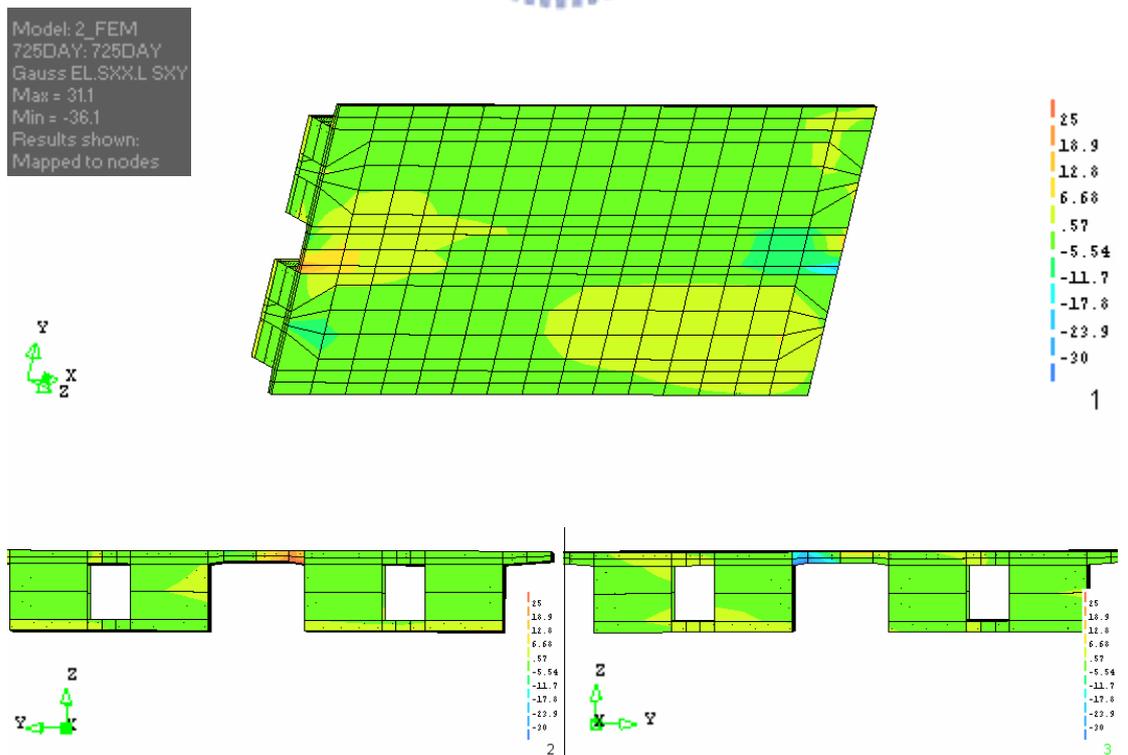


圖 4.2.34 xy 向剪應力分佈圖－720 天

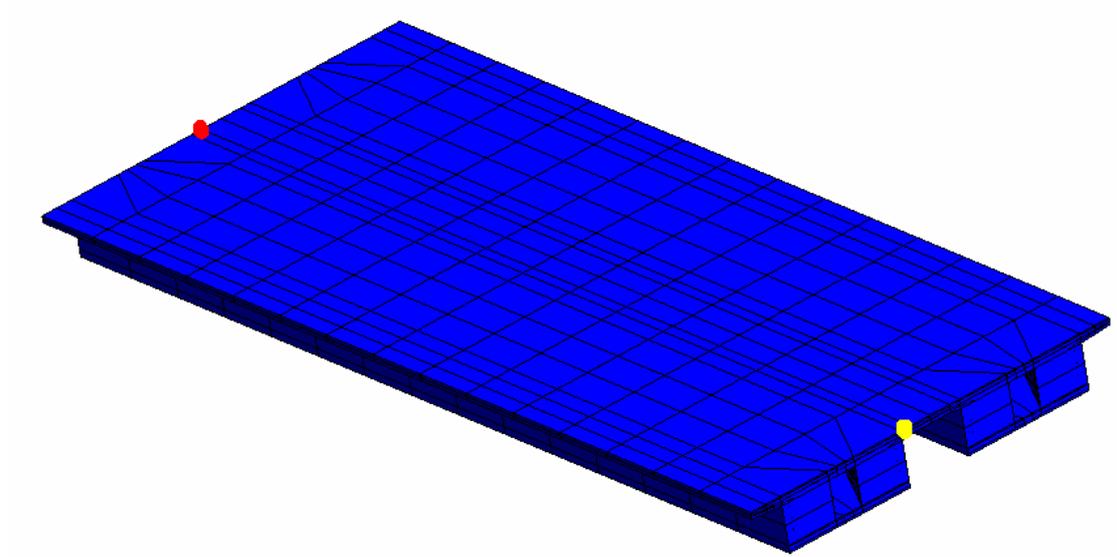


圖 4.2.35 xy 板上最大正向與負向剪應力之處  
最大正向剪應力為圖上紅點處  
最大負向剪應力為圖上黃點處

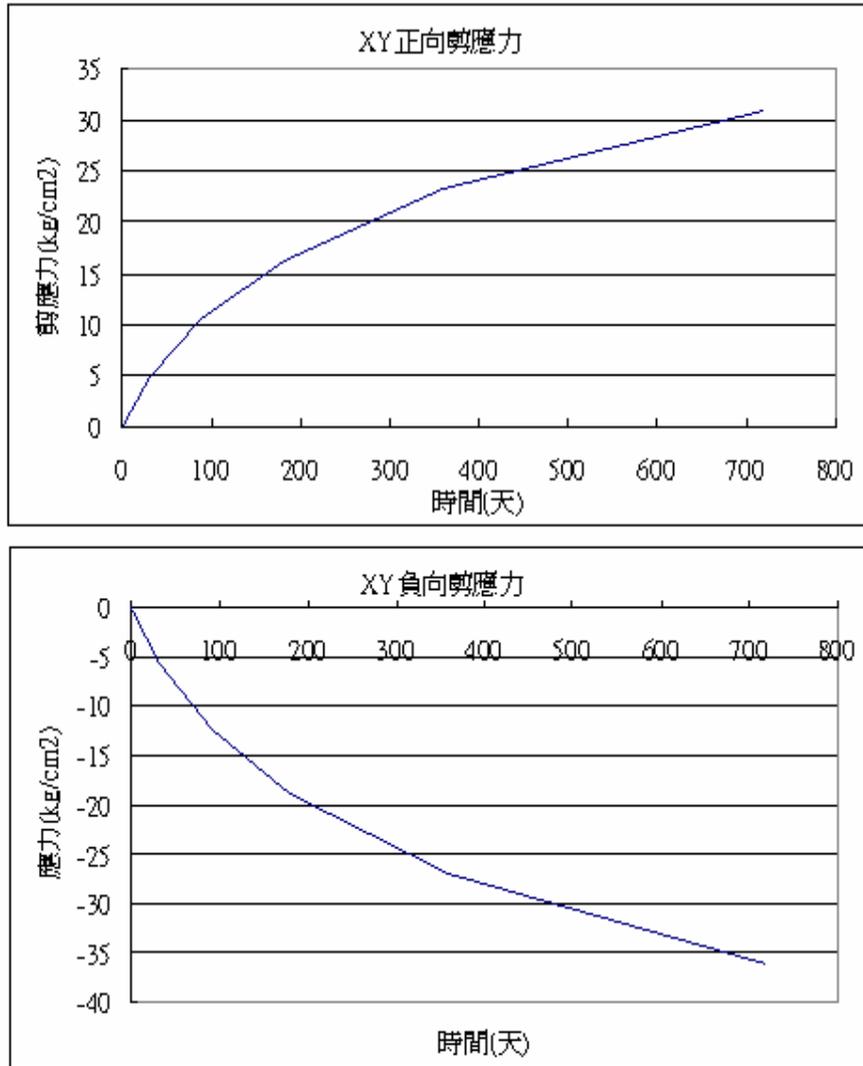


圖 4.2.36 xy 正負向板上最大剪應力與時間關係圖

Model: 2\_FEM  
 1DAY: 1DAY  
 Gauss EL,SXX,L SYZ  
 Max = .156  
 Min = -.113  
 Results shown:  
 Mapped to nodes

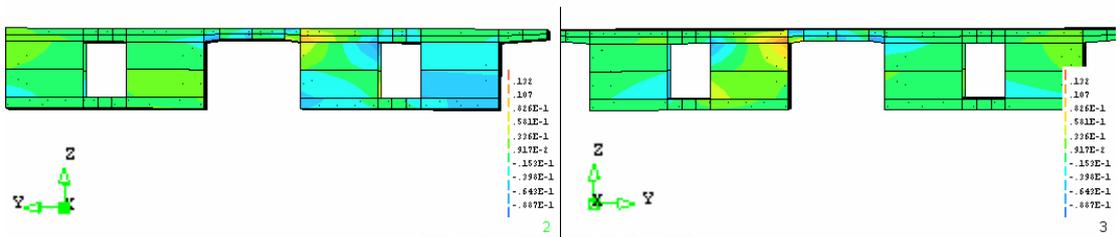
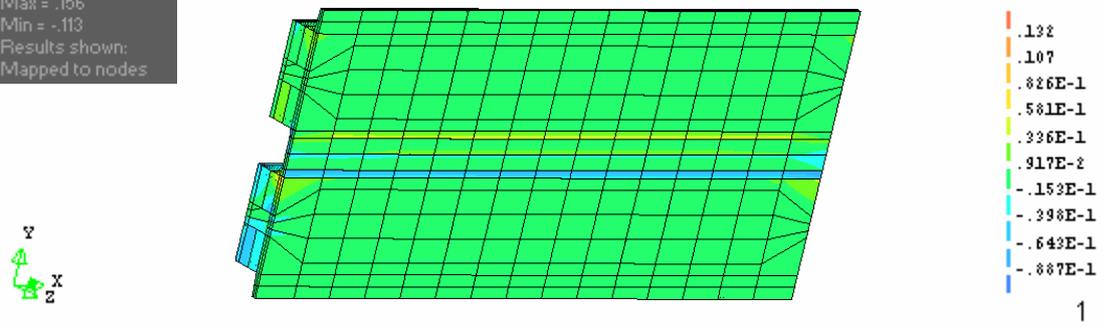


圖 4.2.37 yz 向剪應力分佈圖—1 天

Model: 2\_FEM  
 30DAY: 30DAY  
 Gauss EL,SXX,L SYZ  
 Max = 2.74  
 Min = -2.17  
 Results shown:  
 Mapped to nodes

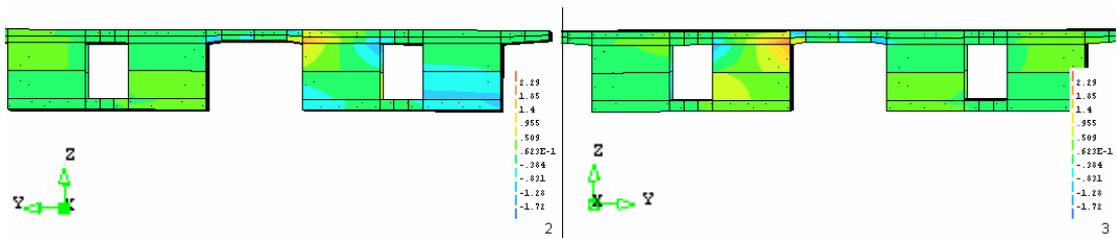
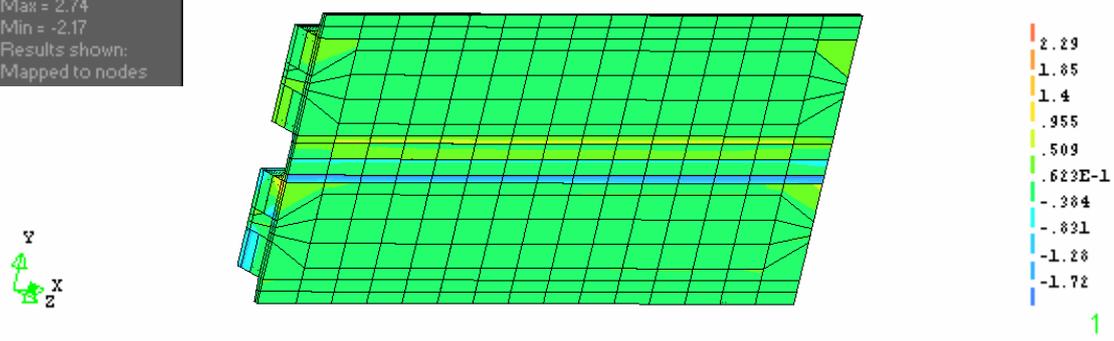


圖 4.2.38 yz 向剪應力分佈圖—30 天

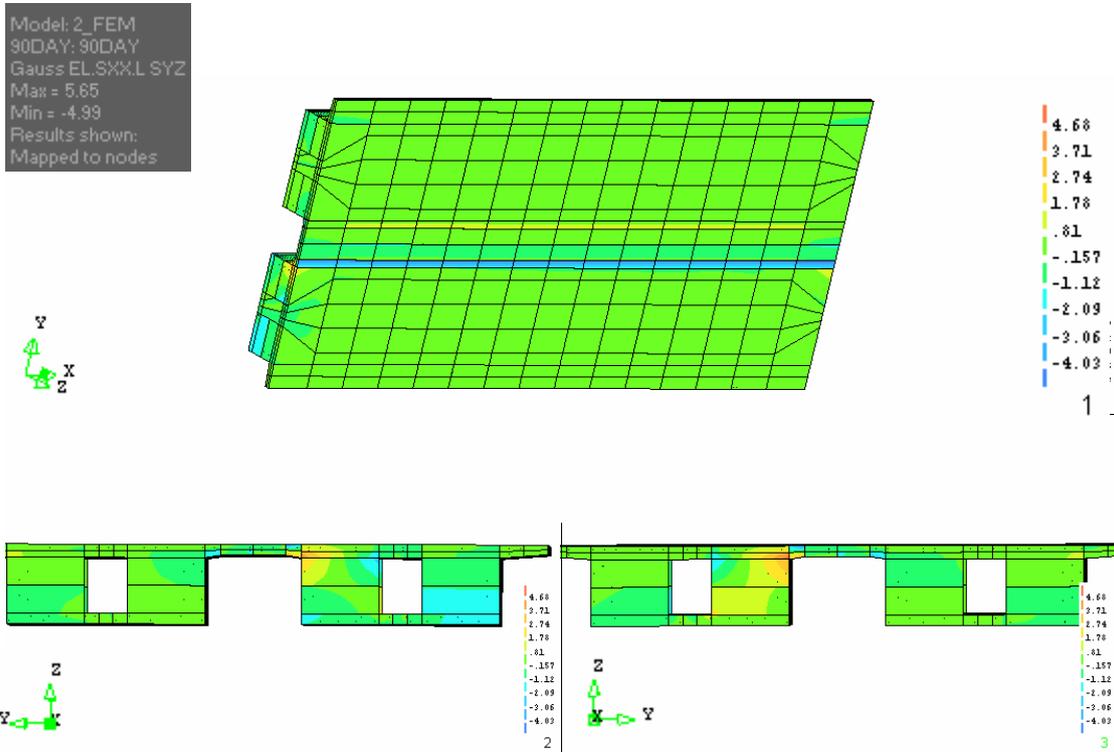


圖 4.2.39 yz 向剪應力分佈圖—90 天

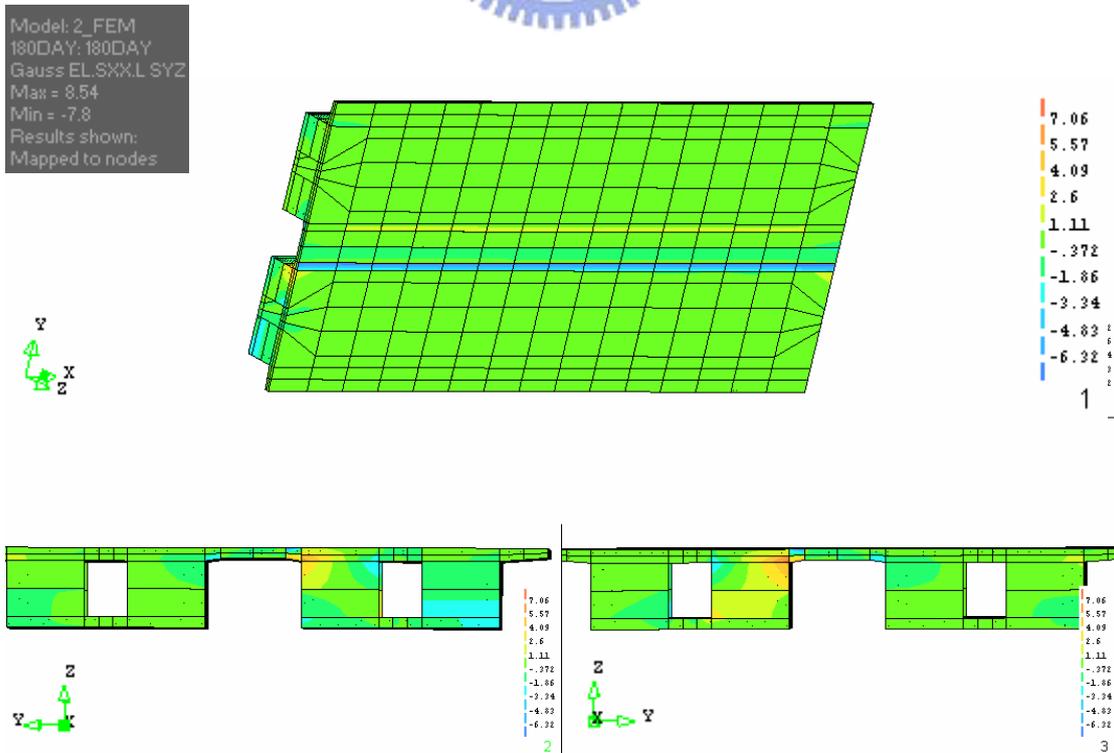


圖 4.2.40 yz 向剪應力分佈圖—180 天

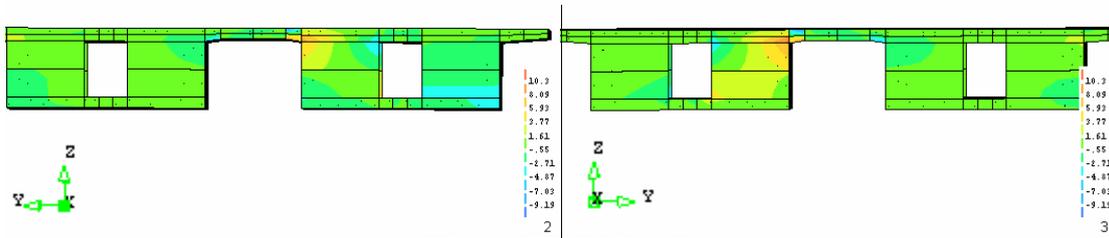
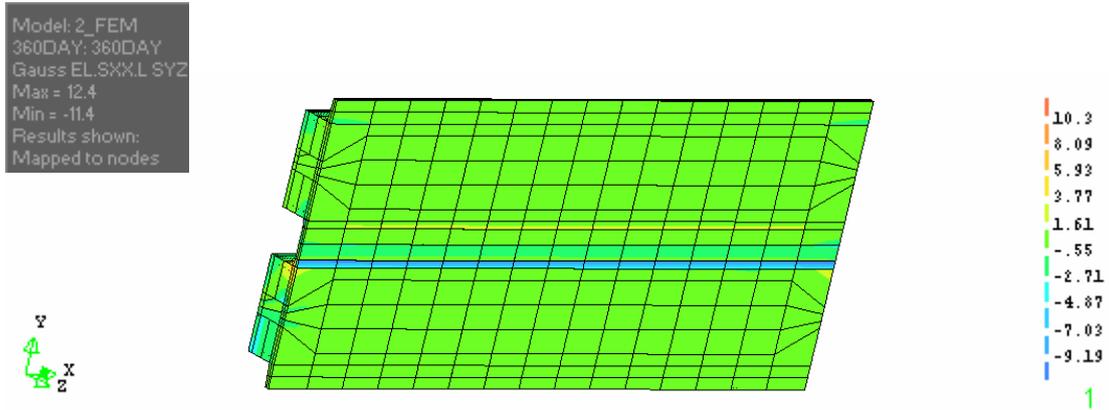


圖 4.2.41 yz 向剪應力分佈圖—360 天

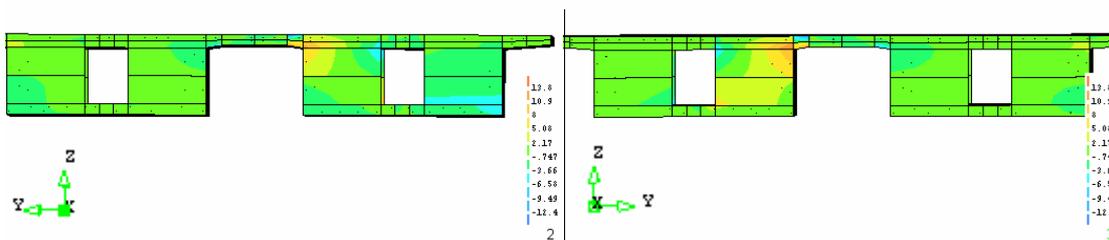
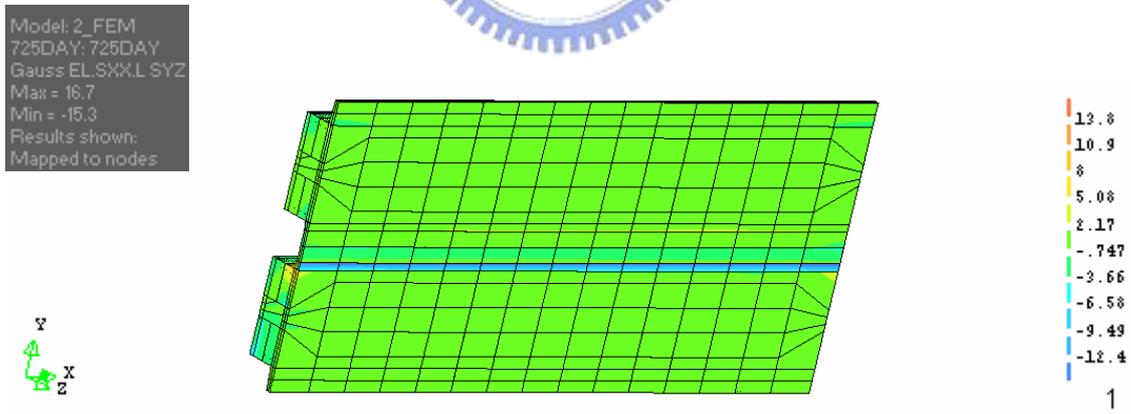


圖 4.2.42 yz 向剪應力分佈圖－720 天

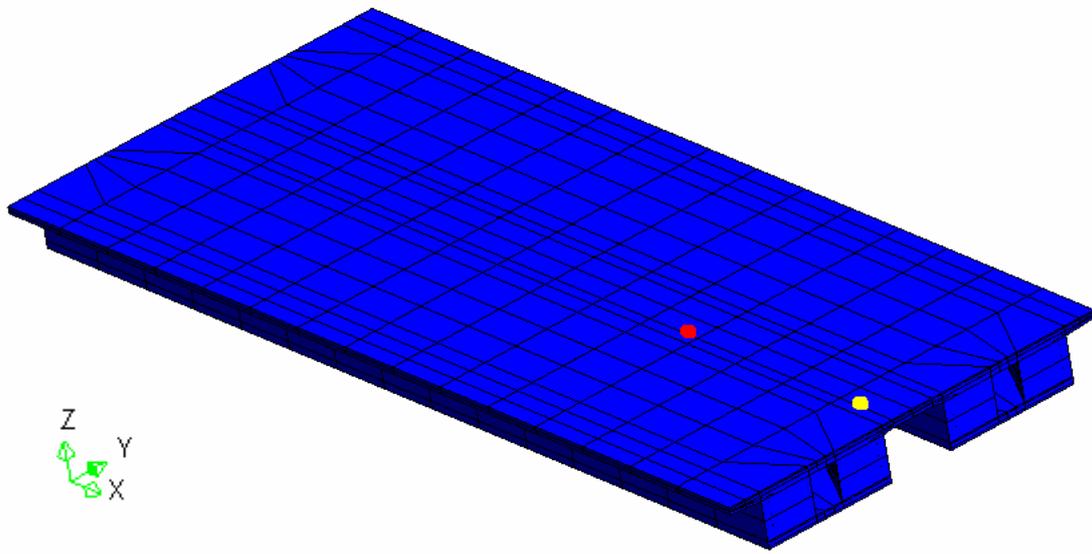


圖 4.2.43 板上 yz 最大正向與負向剪應力之處  
最大正向剪應力為圖上紅點處  
最大負向剪應力為圖上黃點處

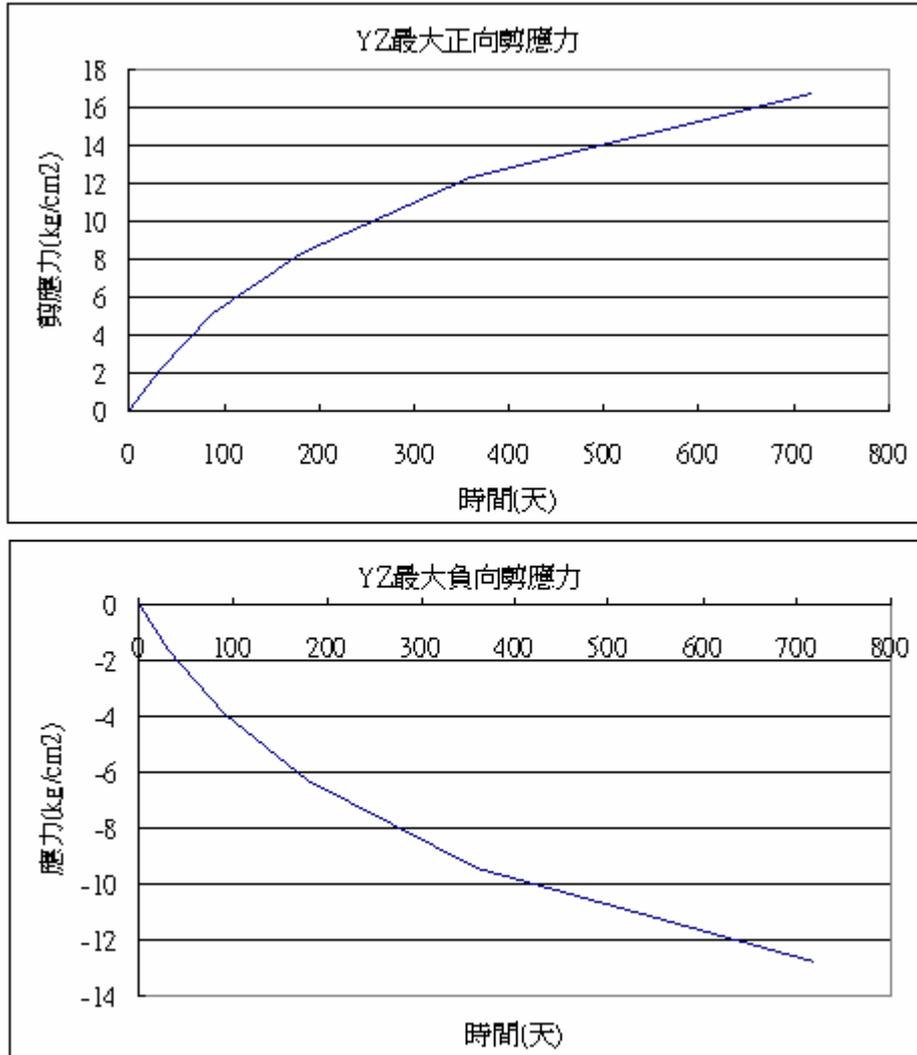
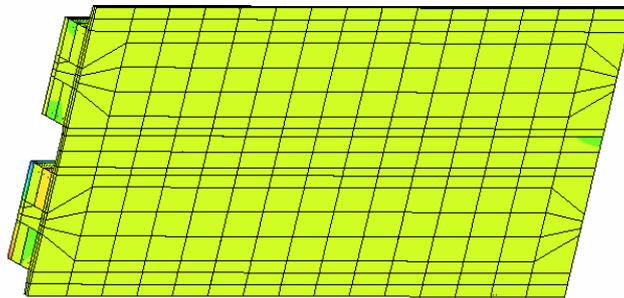
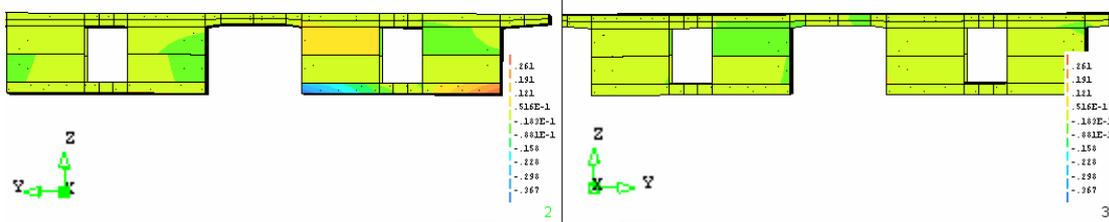


圖 4.2.44 yz 正負向板上最大剪應力與時間關係圖

Model: 2\_FEM  
 1DAY: 1DAY  
 Gauss EL,SXX,L SZX  
 Max = .331  
 Min = -.437  
 Results shown:  
 Mapped to nodes



1



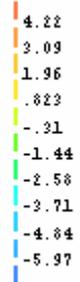
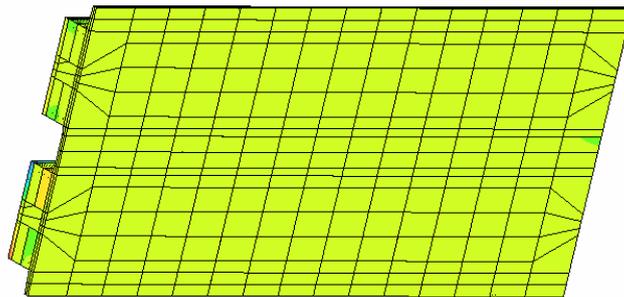
2

3

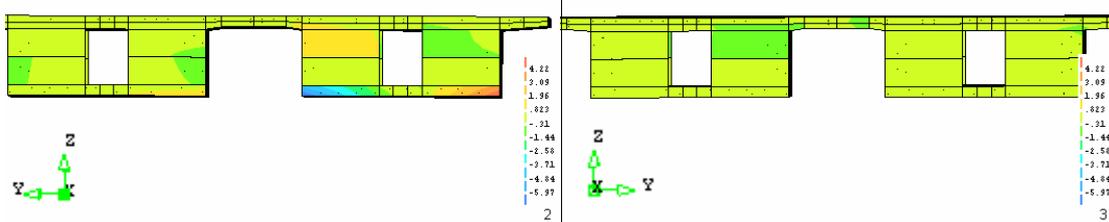
圖 4.2.45 zx 向剪應力分佈圖—1 天



Model: 2\_FEM  
 30DAY: 30DAY  
 Gauss EL,SXX,L SZX  
 Max = 5.35  
 Min = -7.11  
 Results shown:  
 Mapped to nodes



1



2

3

圖 4.2.46 zx 向剪應力分佈圖—30 天

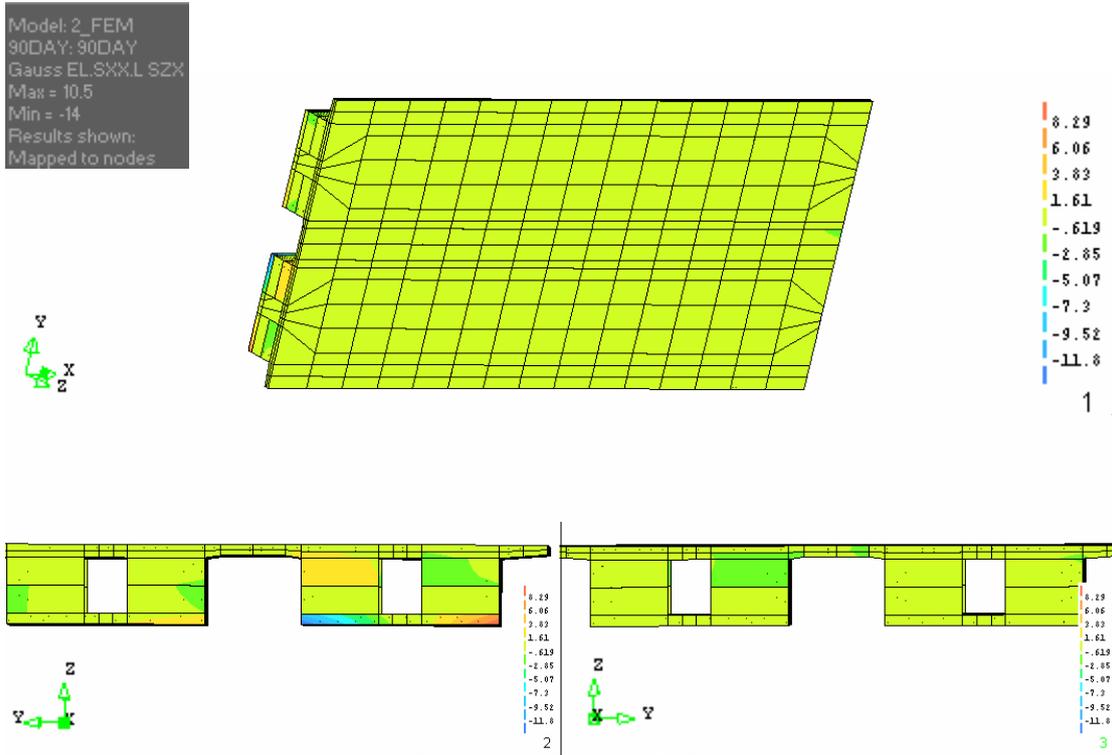


圖 4.2.47 zx 向剪應力分佈圖—90 天

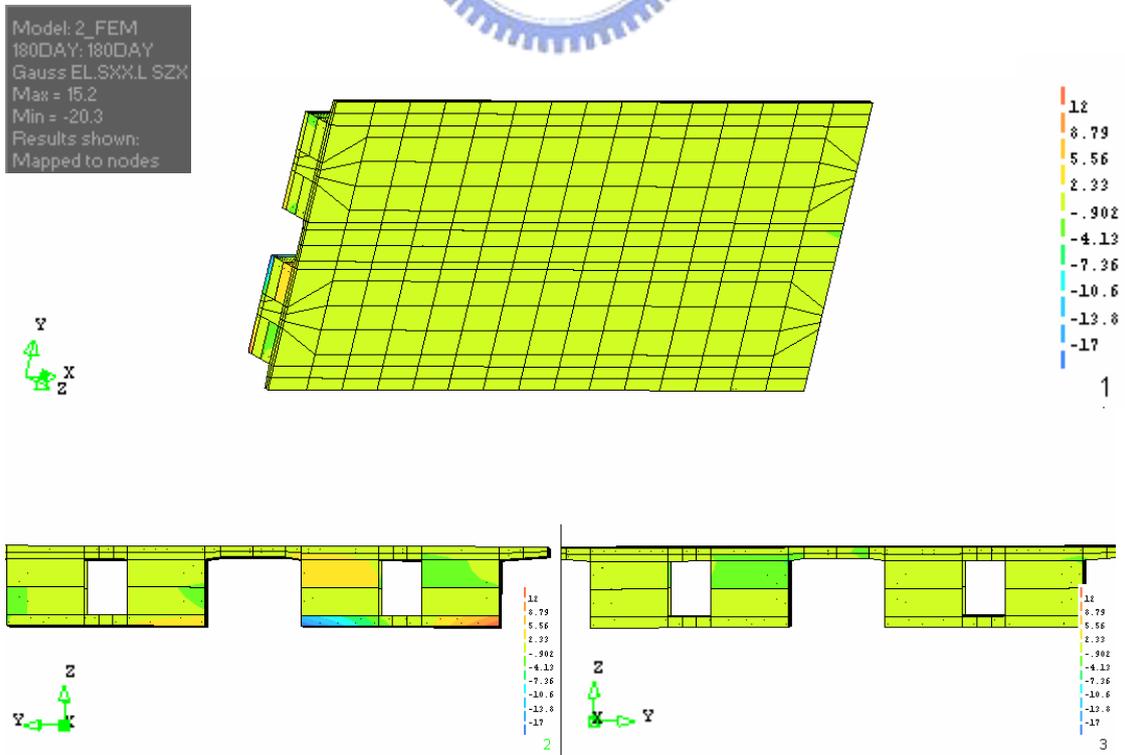


圖 4.2.48 zx 向剪應力分佈圖—180 天

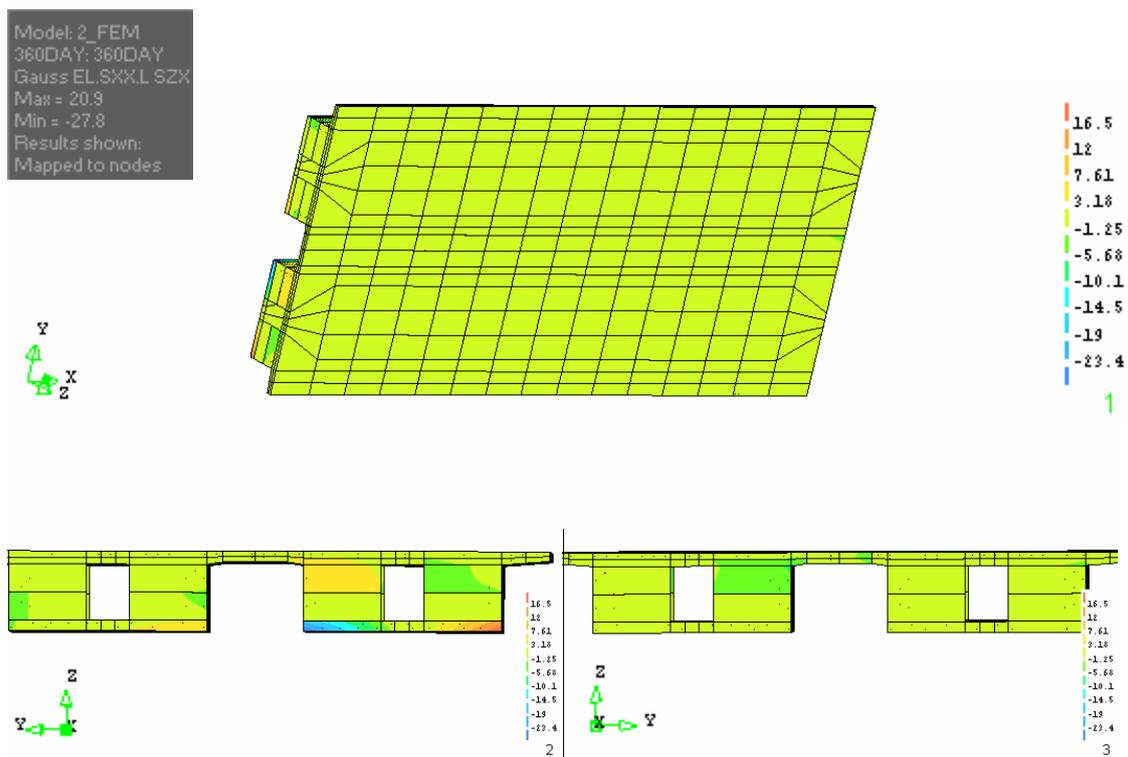


圖 4.2.49 zx 向剪應力分佈圖—360 天

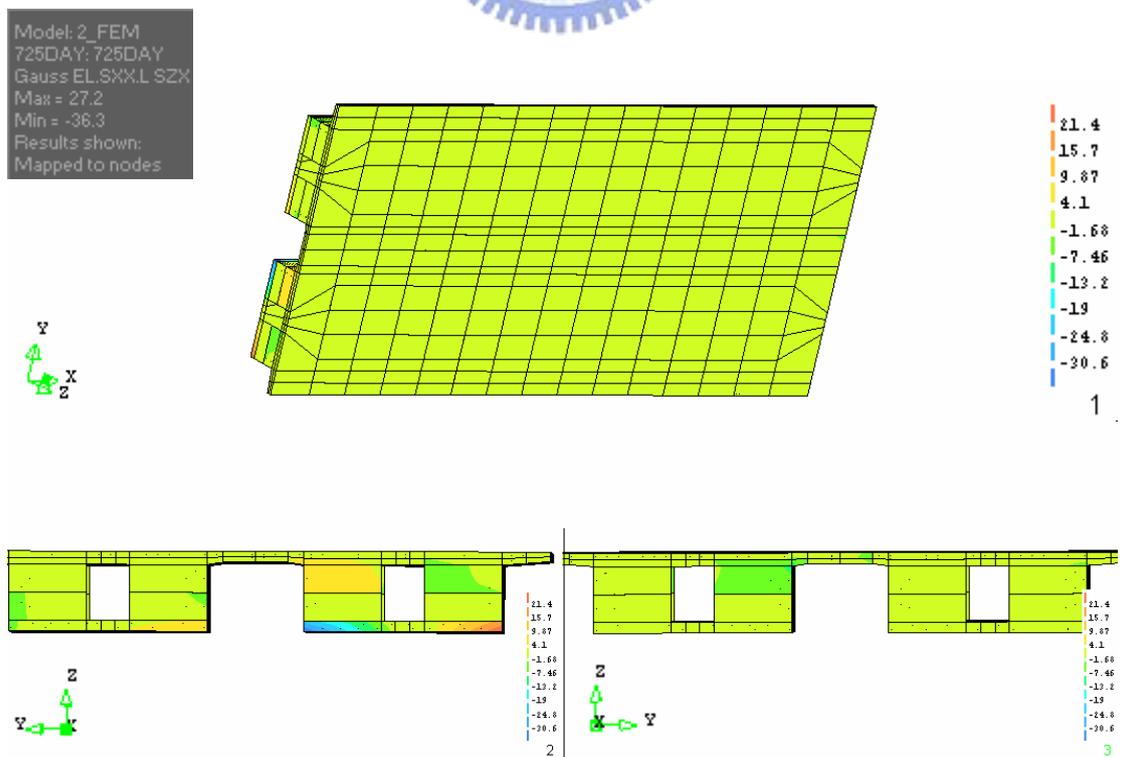


圖 4.2.50 zx 向剪應力分佈圖－720 天

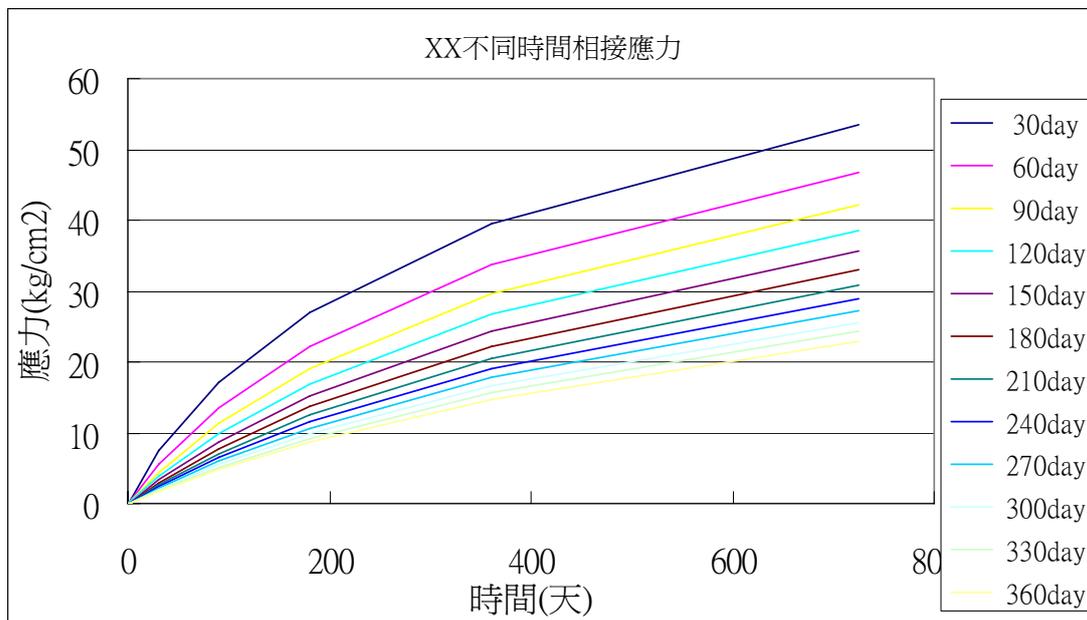


圖 4.3.1 xx 向不同時間相接之應力

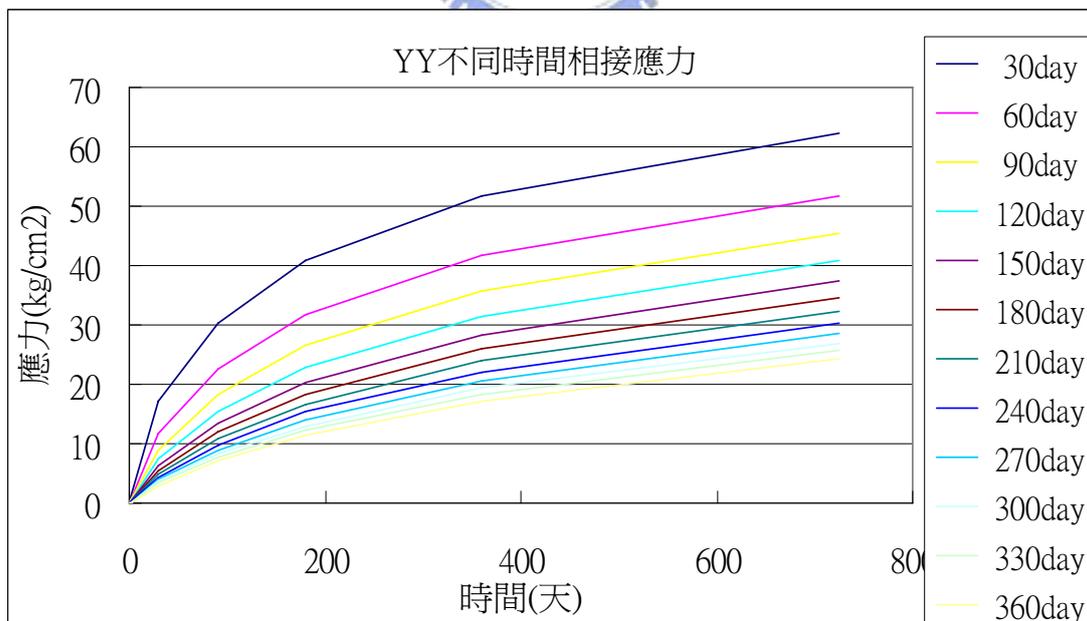


圖 4.3.2 yy 向不同時間相接之應力

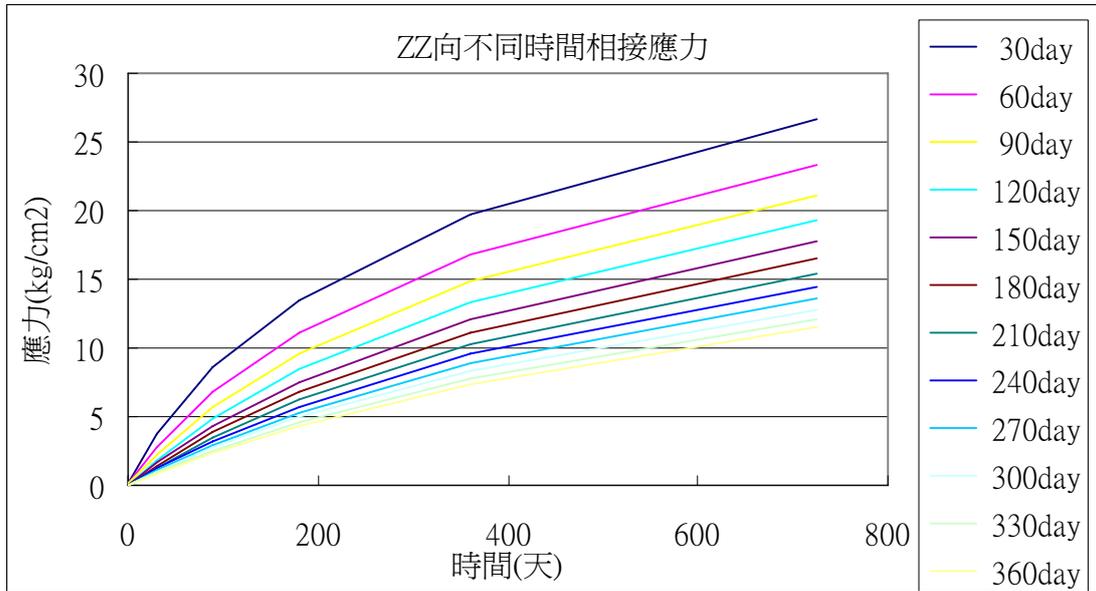


圖 4.3.3 zz 向不同時間相接之應力

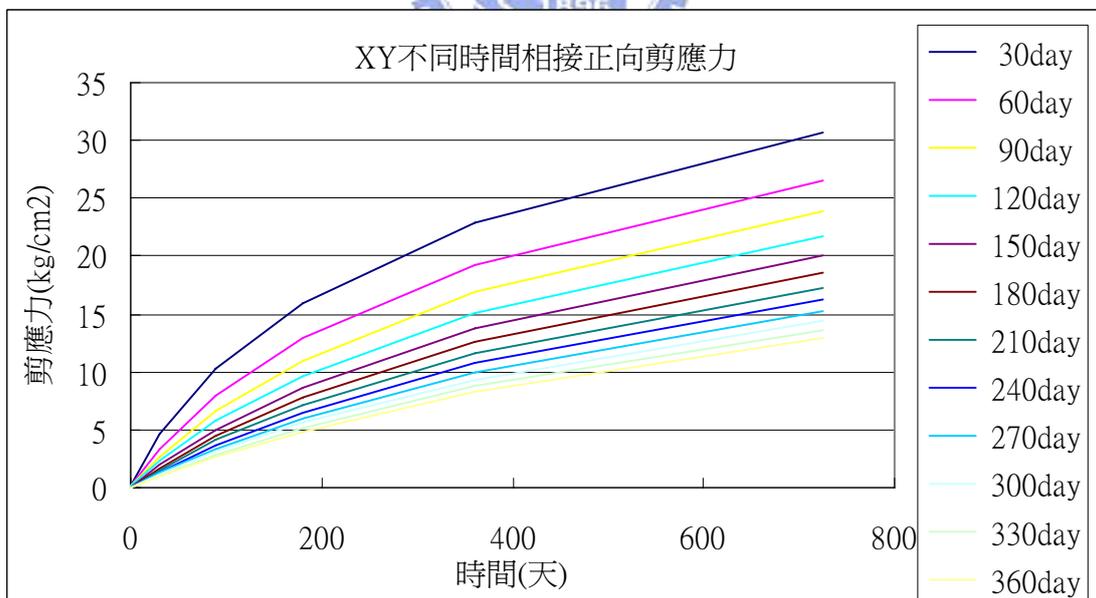


圖 4.3.4 xy 向不同時間相接之正向剪應力

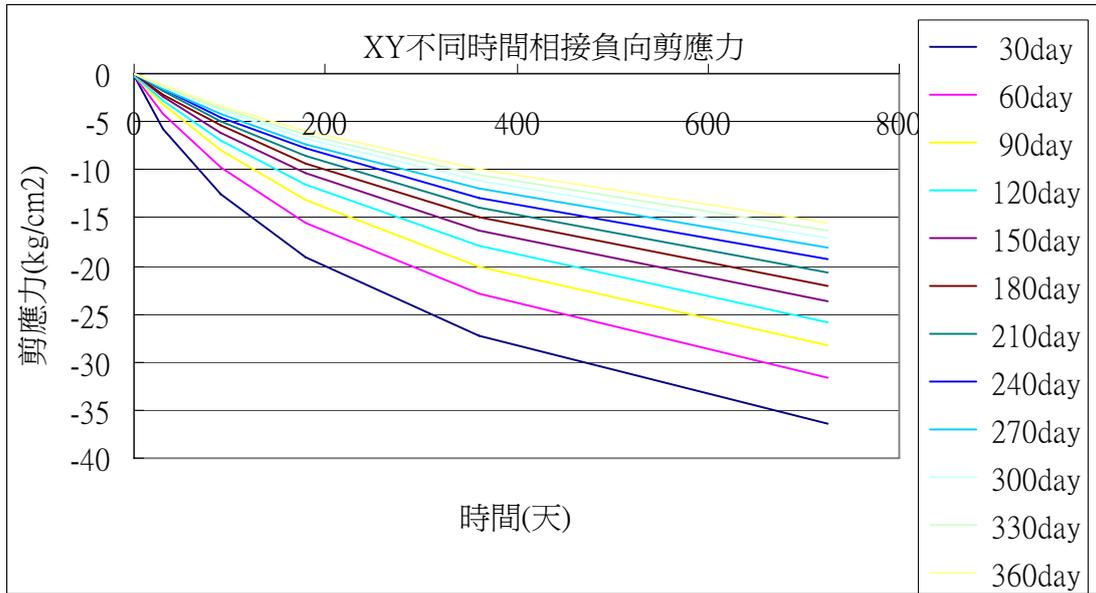


圖 4.3.5 xy 向不同時間相接之負向剪應力

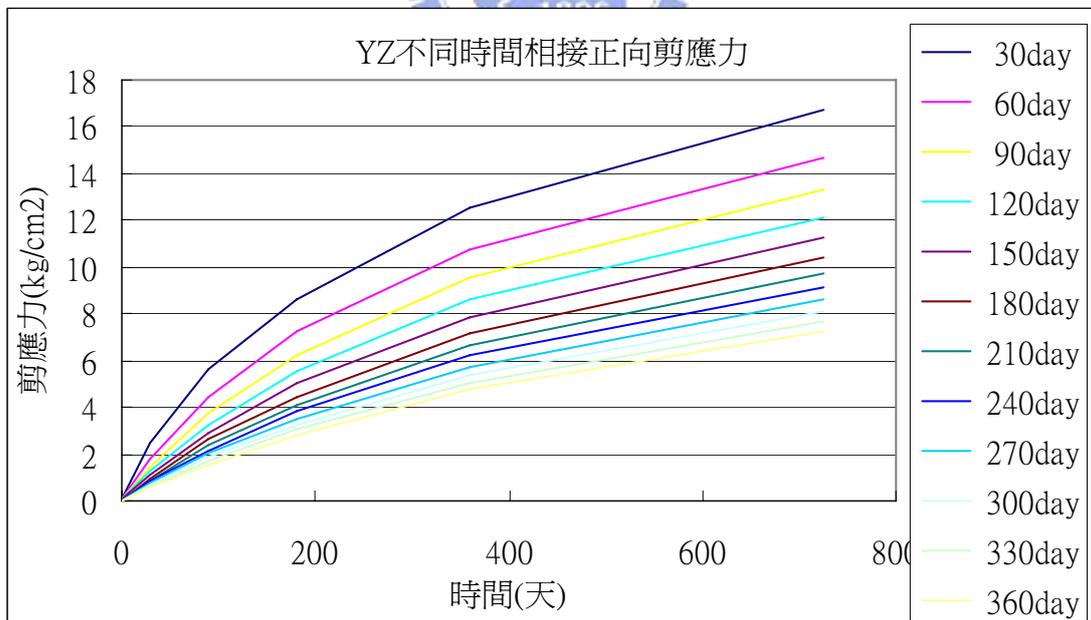


圖 4.3.6 yz 向不同時間相接之正向剪應力

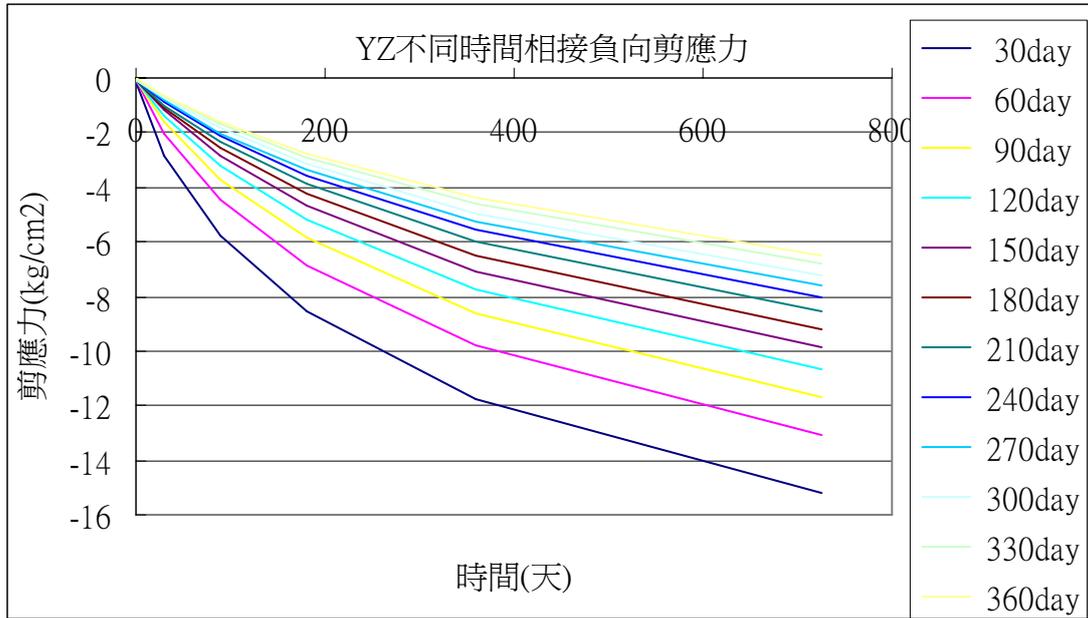


圖 4.3.7 yz 向不同時間相接之負向剪應力



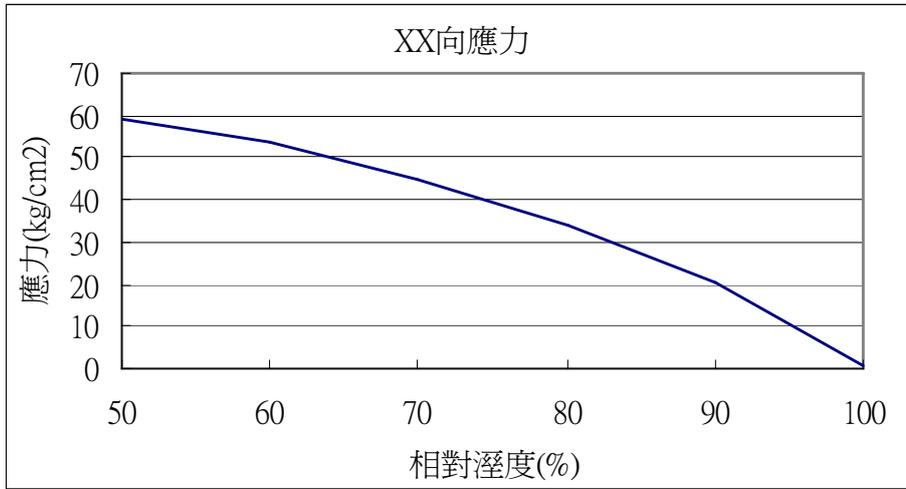


圖 4.4.1 xx 向不同相對濕度應力

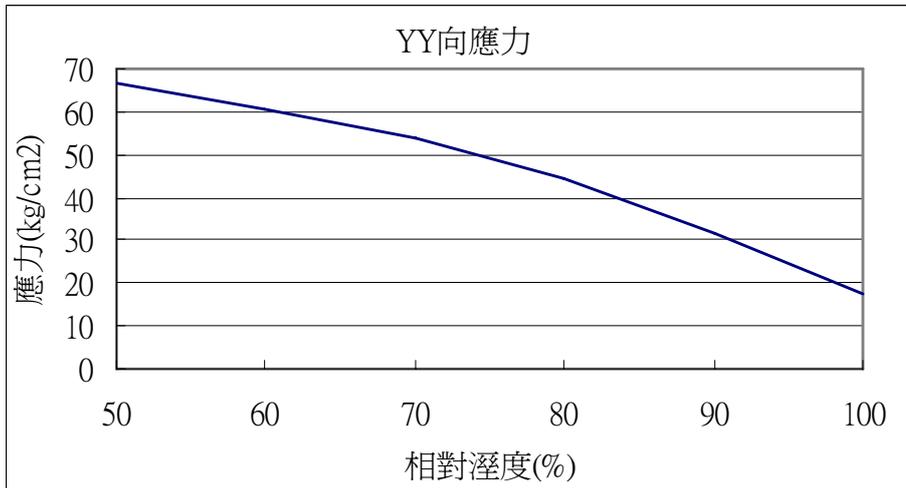


圖 4.4.2 yy 向不同相對濕度應力

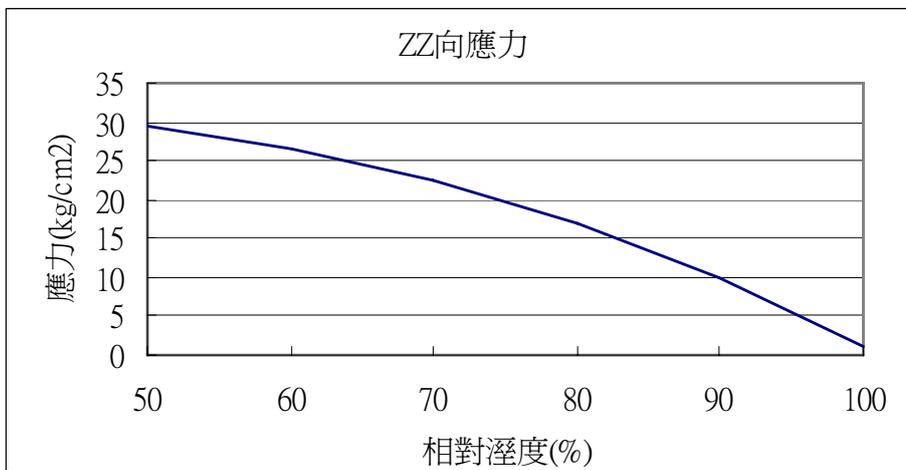


圖 4.4.3 zz 向不同相對濕度應力

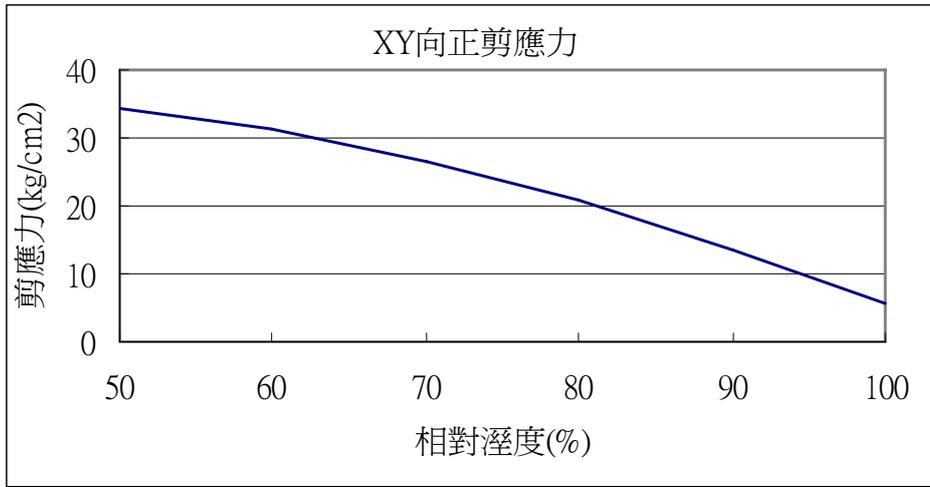


圖 4.4.4 xy 向不同相對濕度正向剪應力

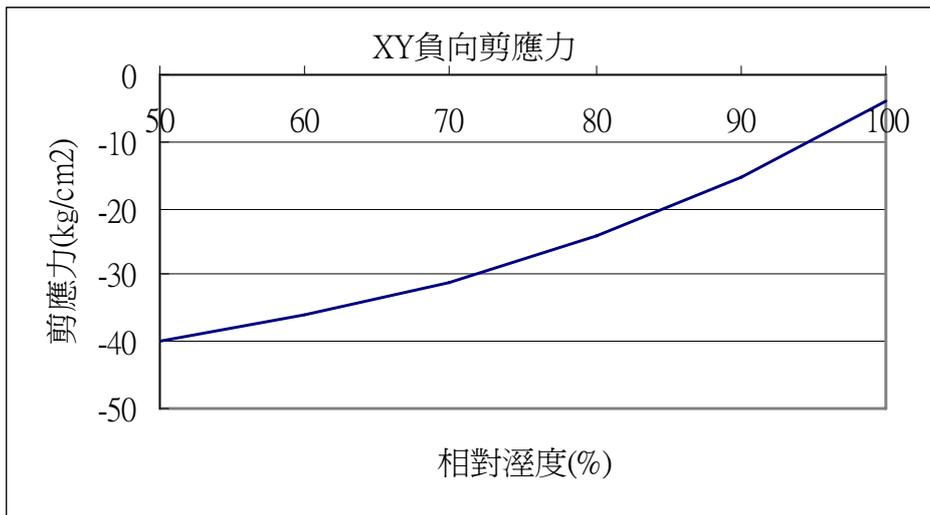


圖 4.4.5 xy 向不同相對濕度負向剪應力

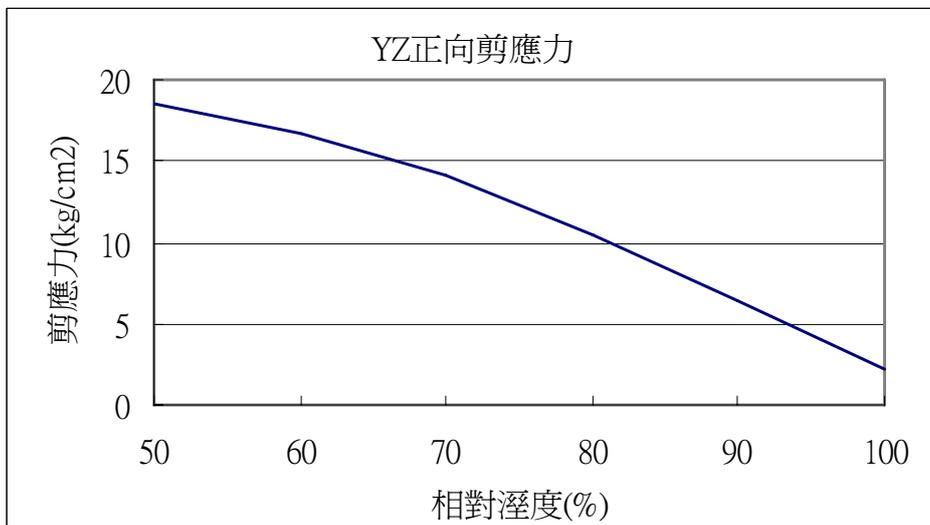


圖 4.4.6 yz 向不同相對濕度正向剪應力

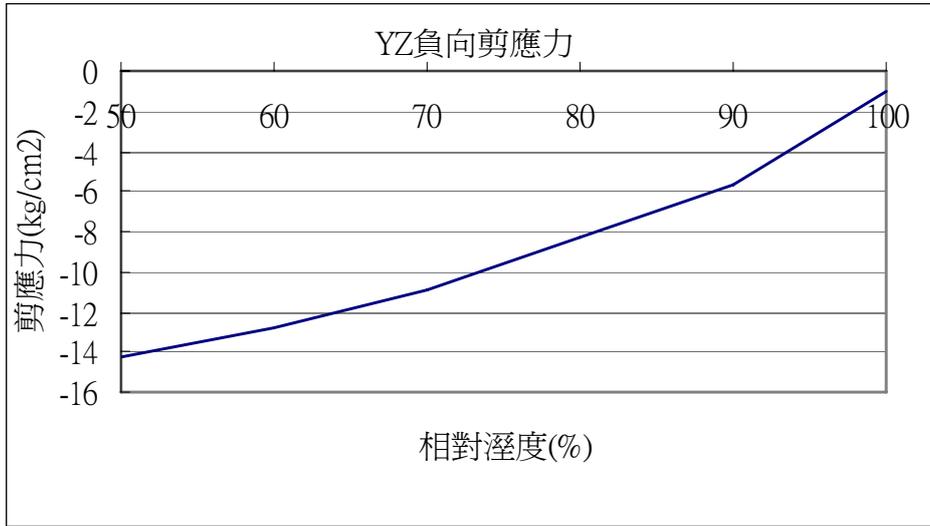


圖 4.4.7 yz 向不同相對濕度負向剪應力



## 台灣地區各氣象站月平均相對濕度統計表

單位:百分比

地名	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均	統計期間
淡水	83	84	85	83	83	82	78	78	78	78	79	80	80	1971-2000
鞍部	93	93	92	89	90	88	86	88	90	92	93	92	90	1971-2000
台北	79	82	81	79	80	79	74	76	77	77	77	77	78	1971-2000
竹子湖	88	89	88	87	87	87	84	84	85	87	88	88	86	1971-2000
基隆	81	83	84	82	82	80	75	77	79	79	79	79	80	1971-2000
彭佳嶼	80	82	85	86	88	89	87	87	84	81	79	78	83	1971-2000
花蓮	77	79	80	80	82	82	79	79	79	78	76	75	78	1971-2000
蘇澳	81	82	83	82	83	82	78	79	80	82	82	80	81	1971-2000
宜蘭	84	85	85	85	86	85	81	82	84	86	86	84	84	1971-2000
東吉島	82	84	84	84	87	88	87	88	85	81	81	80	84	1971-2000
澎湖	81	82	83	83	85	87	85	86	81	78	78	79	82	1971-2000
台南	78	79	77	77	78	80	79	82	79	77	77	77	78	1971-1998
高雄	75	75	75	77	79	81	80	82	80	78	75	75	77	1971-2000
嘉義	82	83	84	84	85	82	80	84	85	84	81	80	82	1971-2000
台中	76	78	78	78	80	80	77	79	77	75	74	74	77	1971-2000
阿里山	81	85	82	85	90	90	90	93	91	88	84	80	86	1971-2000
大武	72	74	75	76	79	79	78	80	79	74	72	71	75	1971-2000
玉山	69	78	80	82	85	83	79	84	80	74	68	66	77	1971-2000
新竹	79	80	83	81	80	78	76	78	76	77	76	77	78	1991-2000
恆春	73	74	74	75	79	84	83	84	80	74	71	71	76	1971-2000
成功	77	79	81	83	84	85	82	82	81	78	77	75	80	1971-2000
蘭嶼	87	89	90	91	92	93	92	92	91	89	88	86	90	1971-2000
日月潭	77	81	82	84	86	86	85	87	85	83	80	77	82	1971-2000
台東	73	75	75	77	79	79	77	78	77	74	72	71	75	1971-2000
梧棲	78	80	80	79	80	80	77	79	77	75	75	76	78	1971-2000

以上參考資料取自於中央氣象局

圖 4.4.8 台灣各地區氣象站平均相對濕度統計表【8】

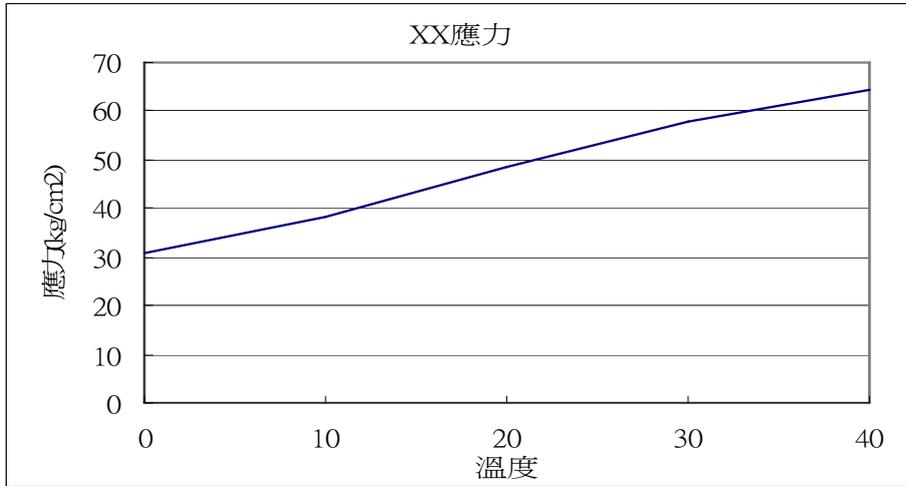


圖 4.5.1 xx 向不同溫度之應力

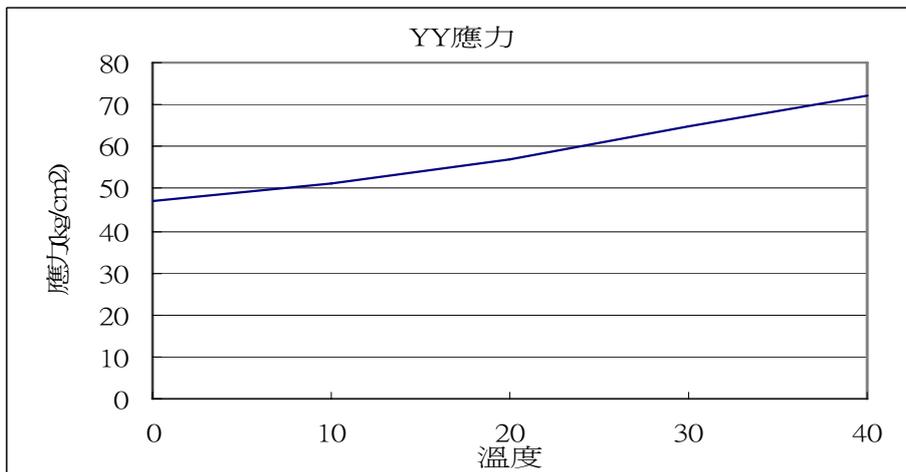


圖 4.5.2 yy 向不同溫度之應力

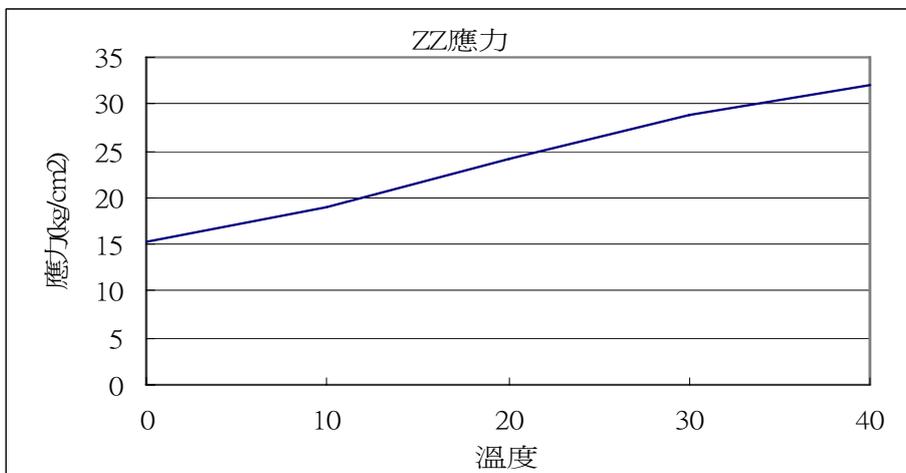


圖 4.5.3 zz 向不同溫度之應力

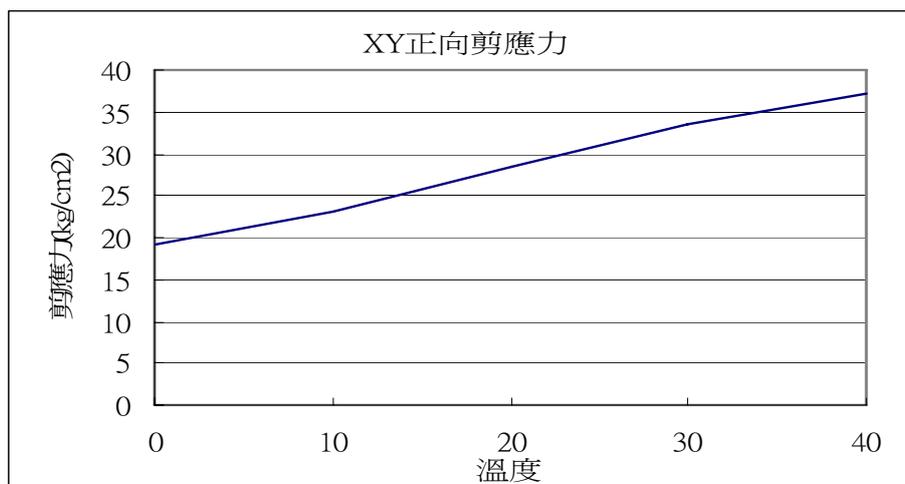


圖 4.5.4 xy 正向不同溫度之剪應力

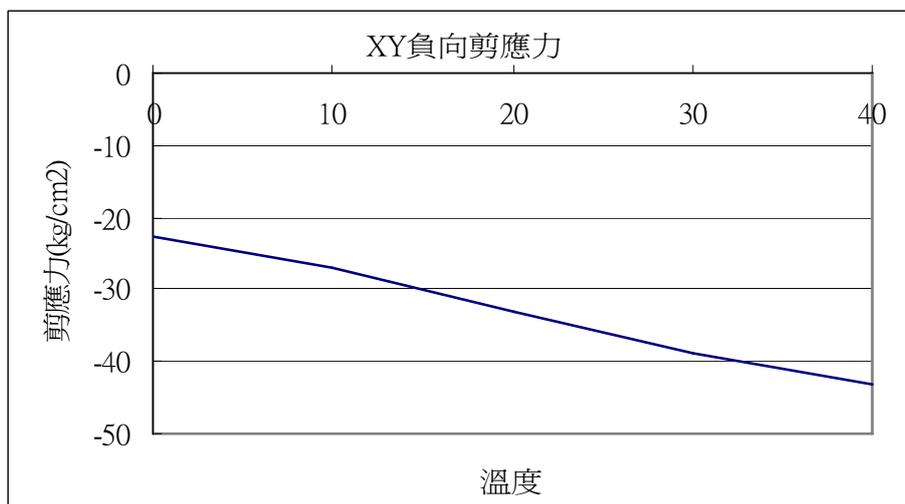


圖 4.5.5 xy 負向不同溫度之剪應力

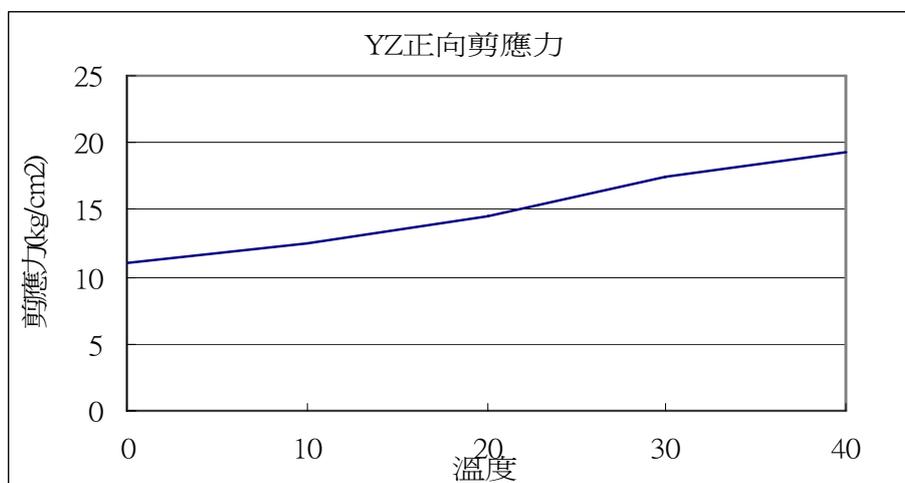


圖 4.5.6 yz 正向不同溫度之剪應力

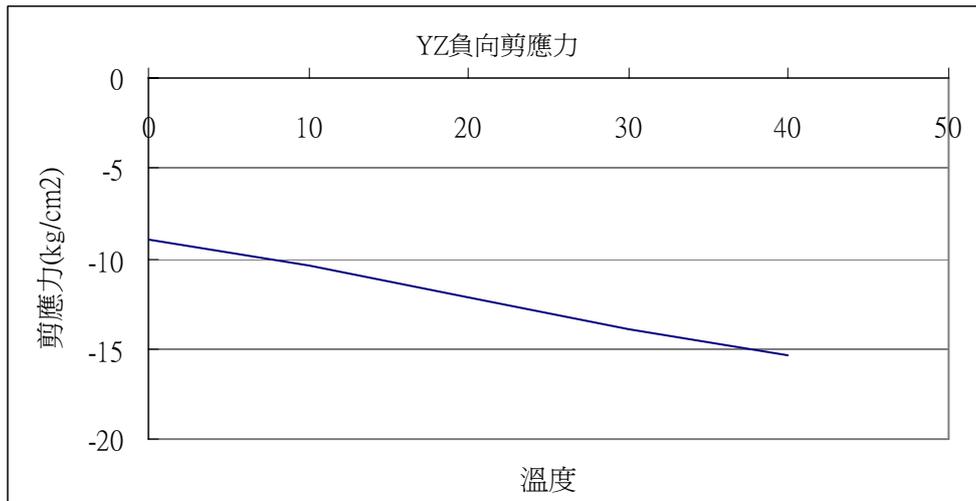


圖 4.5.7 yz 負向不同溫度之剪應力



## 台灣各氣象站月平均最高氣溫統計表

單位:攝氏度

地名	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均	統計期間
淡水	18.6	18.8	21.1	25.2	28.2	31.0	33.3	33.0	31.0	27.5	23.7	20.5	26.0	1971-2000
鞍部	12.7	13.4	16.5	20.2	22.5	25.2	27.0	26.2	24.0	20.5	17.0	14.1	19.9	1971-2000
台北	18.9	19.3	21.9	25.9	28.8	31.9	34.1	33.5	31.2	27.8	23.9	20.7	26.5	1971-2000
竹子湖	15.3	15.8	18.8	22.4	24.9	27.5	29.4	29.0	26.9	23.4	19.7	16.8	22.5	1971-2000
基隆	18.0	18.2	20.3	24.1	27.1	30.4	32.6	31.9	29.5	26.1	22.7	19.7	25.1	1971-2000
彭佳嶼	17.8	17.7	19.9	23.1	26.0	29.0	31.3	30.8	28.9	25.9	22.5	19.4	24.4	1971-2000
花蓮	21.0	21.1	23.3	26.0	28.2	30.3	31.8	31.6	30.3	28.0	25.1	22.4	26.6	1971-2000
蘇澳	18.9	19.1	21.5	24.4	27.1	29.9	31.3	31.0	29.1	26.2	23.4	20.2	25.2	1971-2000
宜蘭	19.4	19.6	22.2	25.4	27.9	30.7	32.6	32.0	30.2	26.8	23.4	20.5	25.9	1971-2000
東吉島	19.3	19.6	22.3	25.4	27.6	29.2	30.2	29.9	29.3	27.1	24.1	21.0	25.4	1971-2000
澎湖	19.1	19.3	22.3	26.1	28.6	30.5	32.0	31.6	30.9	28.1	24.5	21.0	26.2	1971-2000
台南	23.0	23.8	26.5	29.4	31.3	32.2	32.9	32.3	32.2	30.7	27.7	24.3	28.9	1971-1998
高雄	23.4	24.1	26.5	28.8	30.4	31.5	32.1	31.5	31.2	29.7	27.2	24.6	28.4	1971-2000
嘉義	21.8	22.0	24.7	27.9	30.3	32.2	32.9	32.2	31.6	29.8	26.9	23.7	28.0	1971-2000
台中	22.0	22.0	24.6	27.8	30.0	31.8	33.0	32.4	31.9	30.1	26.9	23.6	28.0	1971-2000
阿里山	10.9	11.3	13.7	15.6	16.6	18.0	18.8	18.3	18.0	17.4	15.3	12.5	15.5	1971-2000
大武	23.7	24.3	26.5	28.8	30.6	32.3	32.9	32.2	31.2	29.5	27.1	24.6	28.6	1971-2000
玉山	2.9	2.7	5.0	7.6	9.8	11.6	13.2	12.7	12.6	12.5	9.8	5.8	8.9	1971-2000
新竹	18.8	18.7	21.0	25.0	28.0	30.8	32.7	32.3	30.5	27.4	24.9	21.3	26.0	1991-2000
恆春	24.3	25.1	27.2	29.5	30.9	31.3	31.7	31.4	31.1	29.7	27.3	25.0	28.7	1971-2000
成功	21.9	22.2	24.1	26.5	28.6	30.4	31.7	31.4	30.3	28.3	25.5	23.0	27.0	1971-2000
蘭嶼	20.5	21.0	22.8	24.8	26.5	27.7	28.4	28.2	27.5	25.7	23.4	21.2	24.8	1971-2000
日月潭	19.5	19.8	22.1	24.2	25.6	26.9	28.0	27.3	26.9	25.7	23.3	20.6	24.2	1971-2000
台東	22.9	23.2	25.2	27.6	29.5	31.1	32.1	31.9	30.9	29.2	26.5	23.9	27.8	1971-2000
梧棲	19.5	19.3	22.1	25.9	28.6	31.1	32.4	31.9	30.8	28.2	24.9	21.3	26.3	1971-2000

圖 4.5.8 台灣各地氣象站月平均最高氣溫統計表【8】

## 台灣各氣象站月平均最低氣溫統計表

單位:攝氏度

地名	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均	統計期間
淡水	12.3	12.6	14.4	18.0	21.2	23.9	25.4	25.2	23.6	20.8	17.6	14.0	19.1	1971-2000
鞍部	7.5	8.0	10.1	13.6	16.8	19.6	20.6	20.4	18.8	16.0	12.6	9.2	14.4	1971-2000
台北	13.3	13.6	15.3	18.7	21.9	24.3	25.8	25.6	24.3	22.0	18.6	15.1	19.9	1971-2000
竹子湖	9.2	9.6	11.7	15.1	18.2	20.9	21.9	21.8	20.3	17.7	14.2	10.9	16.0	1971-2000
基隆	13.7	13.7	15.3	18.7	21.7	24.5	26.0	25.9	24.4	22.1	18.9	15.6	20.0	1971-2000
彭佳嶼	13.6	13.5	15.1	18.1	21.1	24.0	25.8	25.6	24.4	22.0	18.7	15.5	19.8	1971-2000
花蓮	15.1	15.5	17.4	19.8	22.2	24.2	25.2	24.9	23.8	21.8	19.2	16.5	20.5	1971-2000
蘇澳	14.0	14.2	16.1	18.8	21.6	24.2	25.7	25.3	23.9	21.5	18.6	15.5	20.0	1971-2000
宜蘭	13.4	13.8	15.7	18.6	21.3	23.7	25.0	24.9	23.3	20.9	17.8	14.8	19.4	1971-2000
東吉島	16.0	16.1	18.2	21.4	23.7	25.5	26.3	26.0	25.4	23.8	20.9	17.9	21.8	1971-2000
澎湖	15.2	15.1	17.3	20.9	23.6	25.6	26.5	26.3	25.8	23.8	20.7	17.3	21.5	1971-2000
台南	13.6	14.5	17.1	20.8	23.8	25.5	26.1	25.7	24.9	22.4	18.8	15.1	20.7	1971-1998
高雄	15.1	16.1	18.7	22.0	24.4	25.7	26.1	25.7	25.1	23.5	20.2	16.6	21.6	1971-2000
嘉義	12.1	13.3	15.5	18.9	21.8	24.0	24.9	24.6	23.2	20.6	16.8	13.0	19.1	1971-2000
台中	12.4	13.3	15.6	19.4	22.3	24.2	24.9	24.7	23.7	21.4	17.6	13.8	19.4	1971-2000
阿里山	1.8	3.0	5.2	7.5	9.4	10.9	10.7	10.8	9.8	8.2	5.8	3.0	7.2	1971-2000
大武	17.3	17.8	19.4	21.4	23.2	24.6	25.1	24.7	24.0	23.0	20.9	18.5	21.7	1971-2000
玉山	-5.0	-4.1	-2.1	0.3	2.5	3.9	4.2	4.1	3.5	2.4	0.2	-2.8	0.6	1971-2000
新竹	12.7	12.7	14.9	18.5	21.2	24.3	25.4	25.2	23.5	21.1	18.1	15.2	19.4	1991-2000
恆春	17.8	18.3	20.0	22.2	23.9	25.1	25.4	25.1	24.5	23.7	21.7	19.2	22.2	1971-2000
成功	16.3	16.7	18.4	20.5	22.5	24.3	25.1	24.8	23.9	22.4	20.0	17.6	21.0	1971-2000
蘭嶼	16.8	17.0	18.6	20.7	22.5	24.0	24.5	24.1	23.4	22.2	20.0	17.8	21.0	1971-2000
日月潭	10.9	11.6	13.7	16.3	18.3	19.6	20.0	19.8	19.3	17.9	15.2	12.2	16.2	1971-2000
台東	16.5	16.9	18.8	21.1	23.2	24.9	25.7	25.5	24.5	22.9	20.4	17.7	21.5	1971-2000
梧棲	13.2	13.2	15.5	19.3	22.5	25.0	26.1	26.0	24.4	21.6	18.2	14.7	20.0	1971-2000

圖 4.5.9 台灣各地氣象站月平均最低氣溫統計表【8】

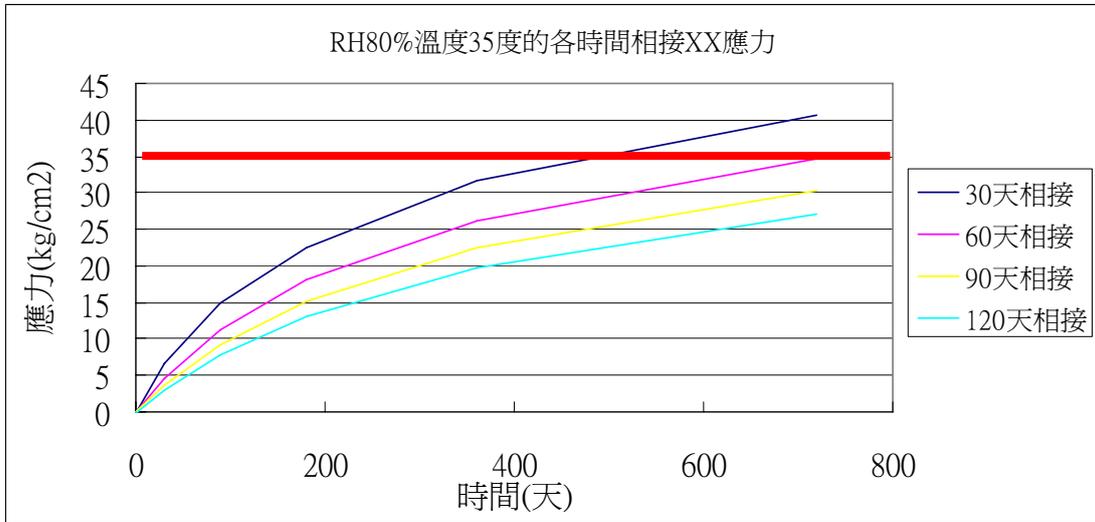


圖 4.6.1 相對溼度 80%氣溫 35°C時各時間相接之 XX 應力圖

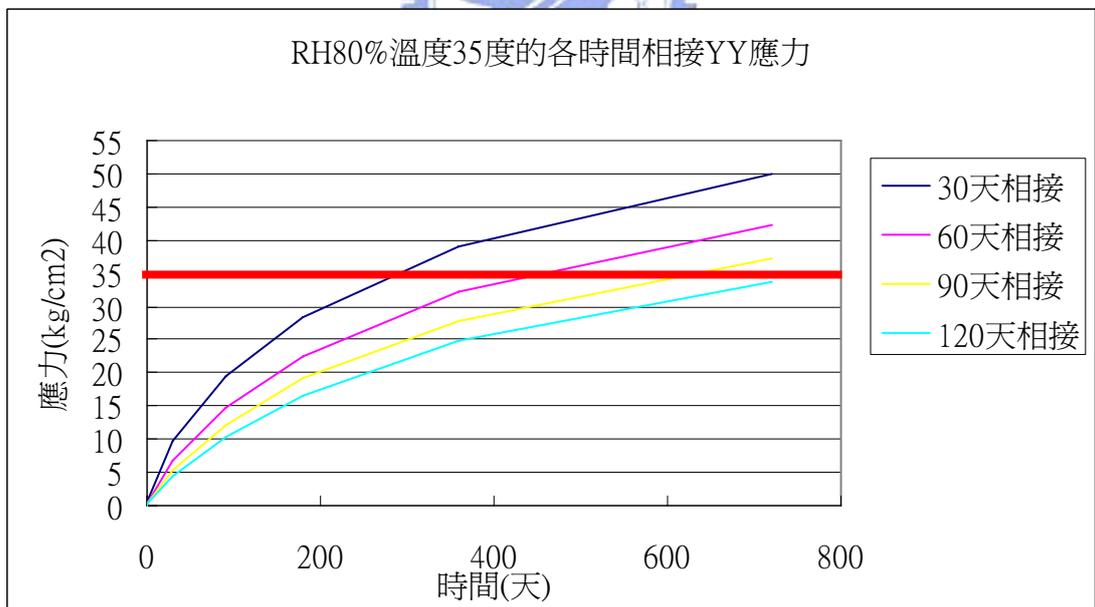


圖 4.6.2 相對溼度 80%氣溫 35°C時各時間相接之 YY 應力圖

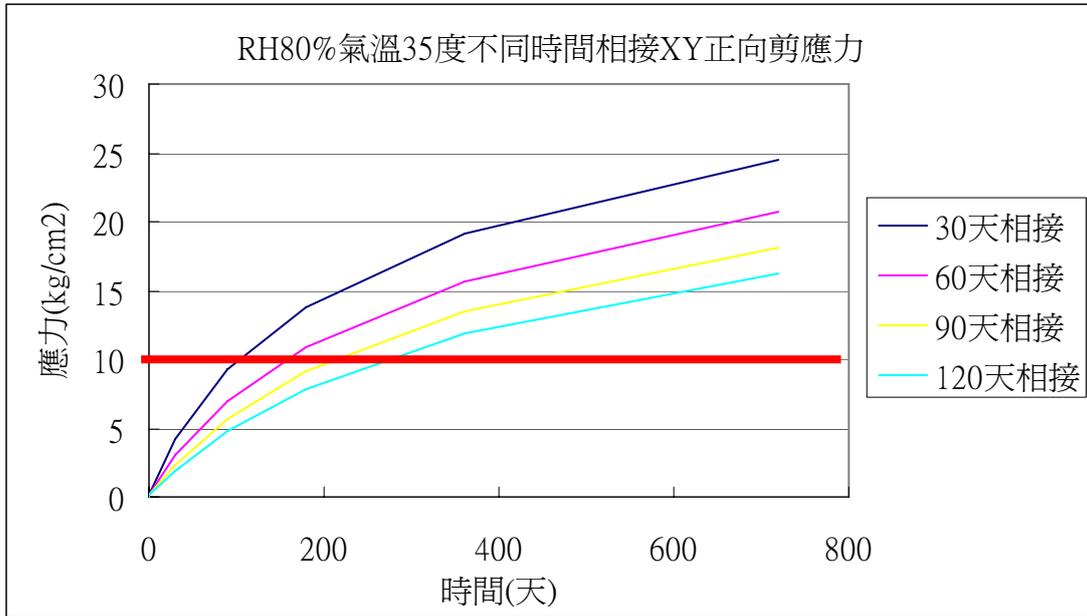


圖 4.6.3 相對溼度 80%氣溫 35°C時各時間相接之 XY 正向剪應力圖

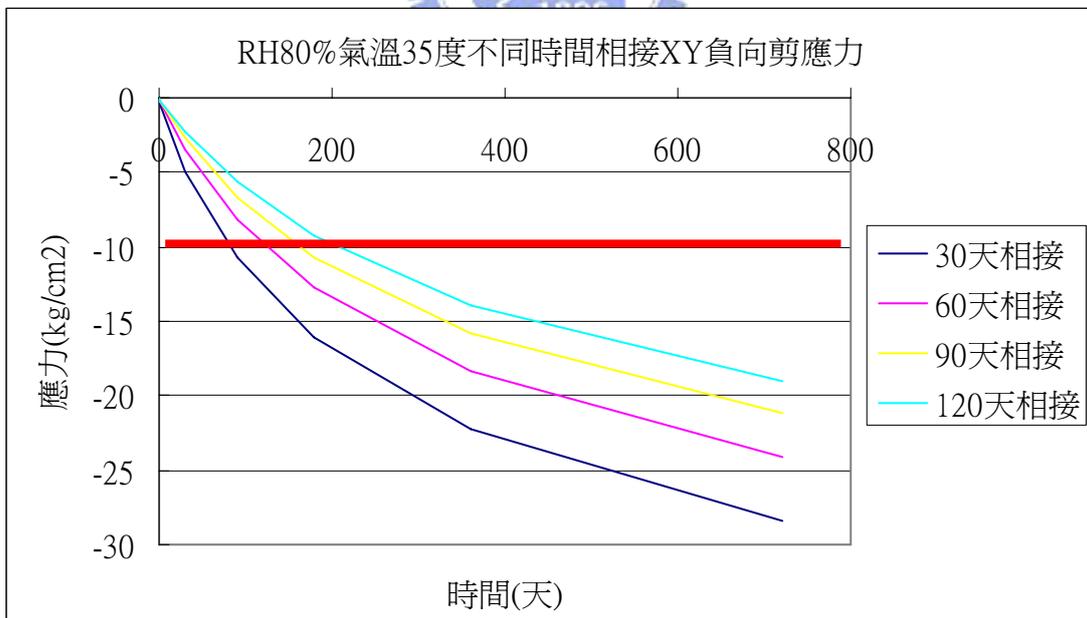


圖 4.6.4 相對溼度 80%氣溫 35°C時各時間相接之 XY 負向剪應力圖

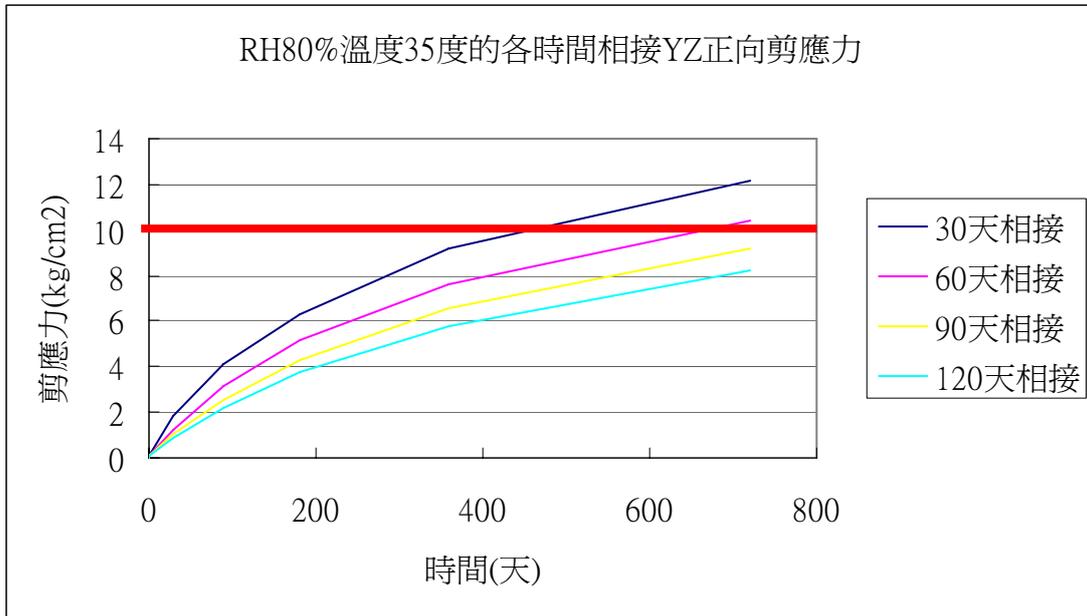


圖 4.6.5 相對溼度 80%氣溫 35°C時各時間相接之 YZ 正向剪應力圖

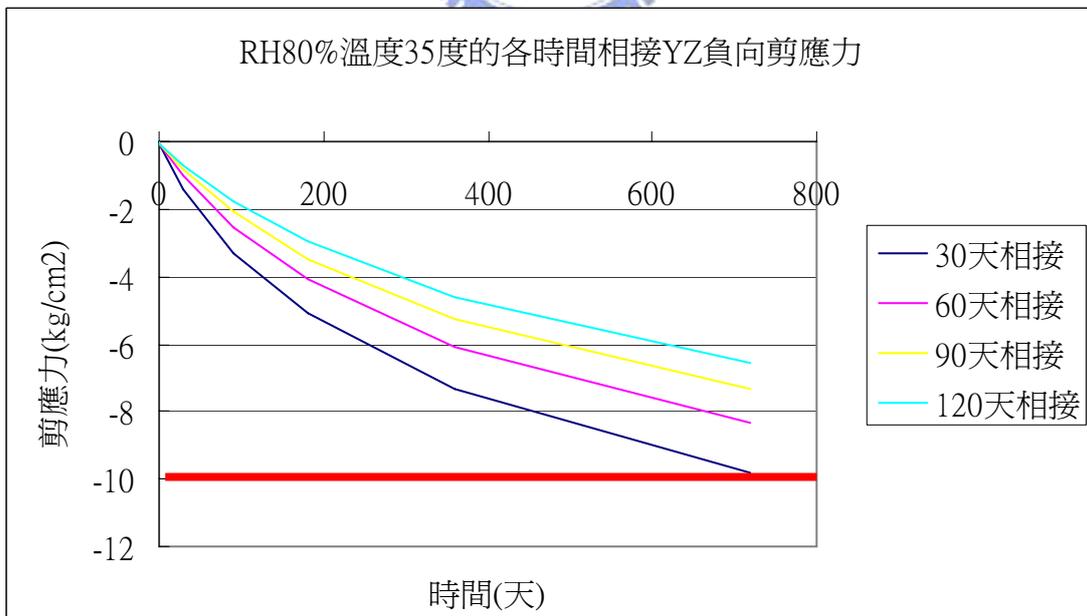
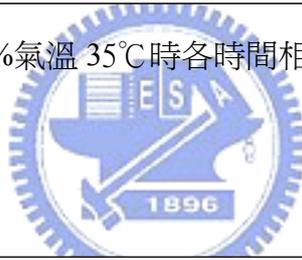


圖 4.6.6 相對溼度 80%氣溫 35°C時各時間相接之 YZ 負向剪應力圖

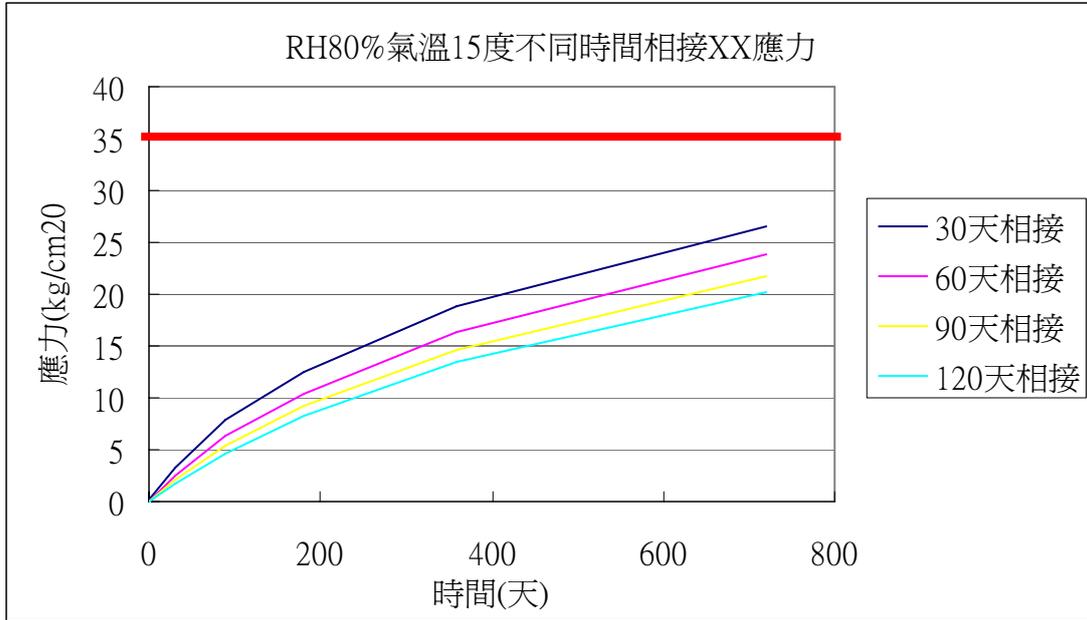


圖 4.6.7 相對溼度 80%氣溫 15°C時各時間相接之 XX 應力圖

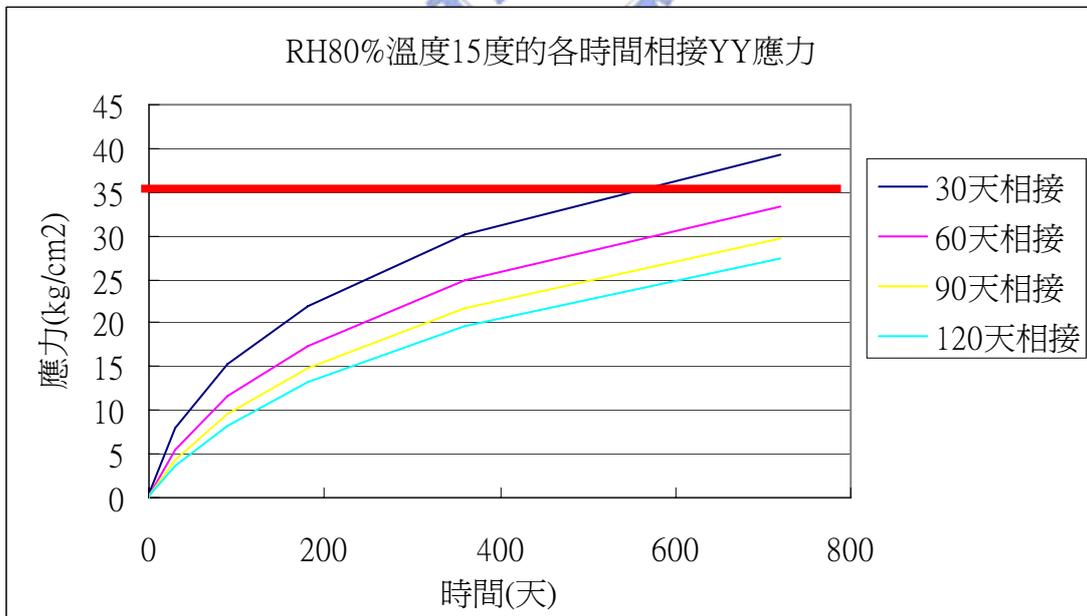


圖 4.6.8 相對溼度 80%氣溫 15°C時各時間相接之 YY 應力圖

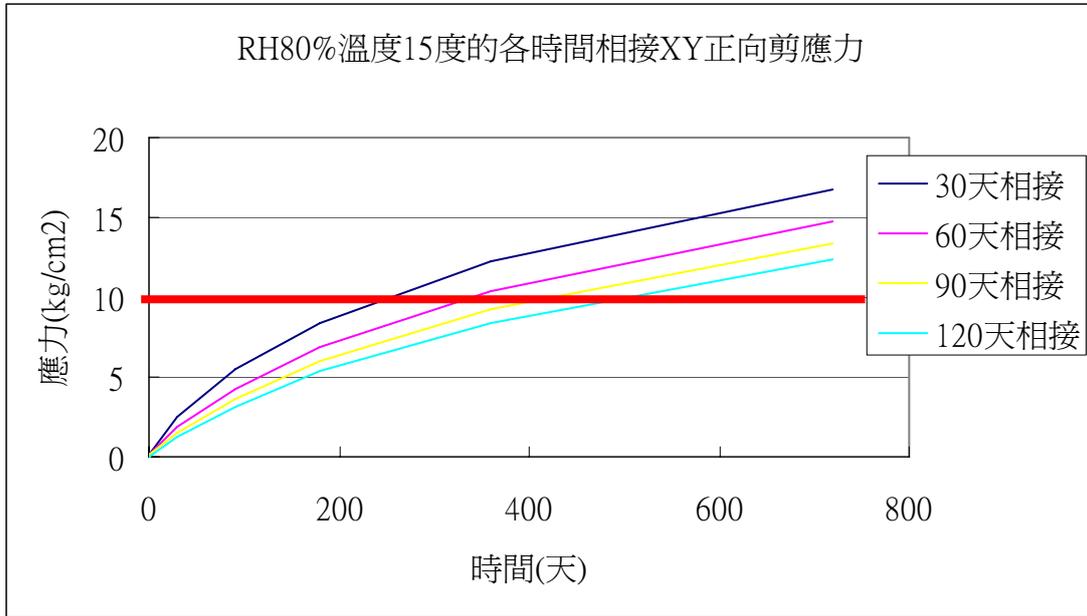


圖 4.6.9 相對溼度 80%氣溫 15°C時各時間相接之 XY 正向剪應力圖

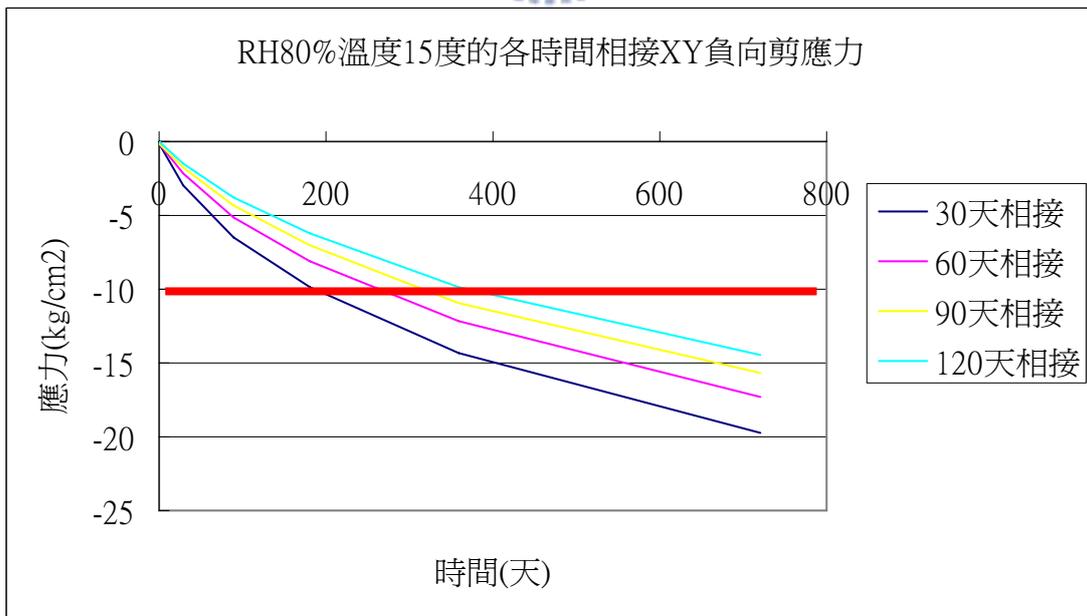


圖 4.6.10 相對溼度 80%氣溫 15°C時各時間相接之 XY 負向剪應力圖

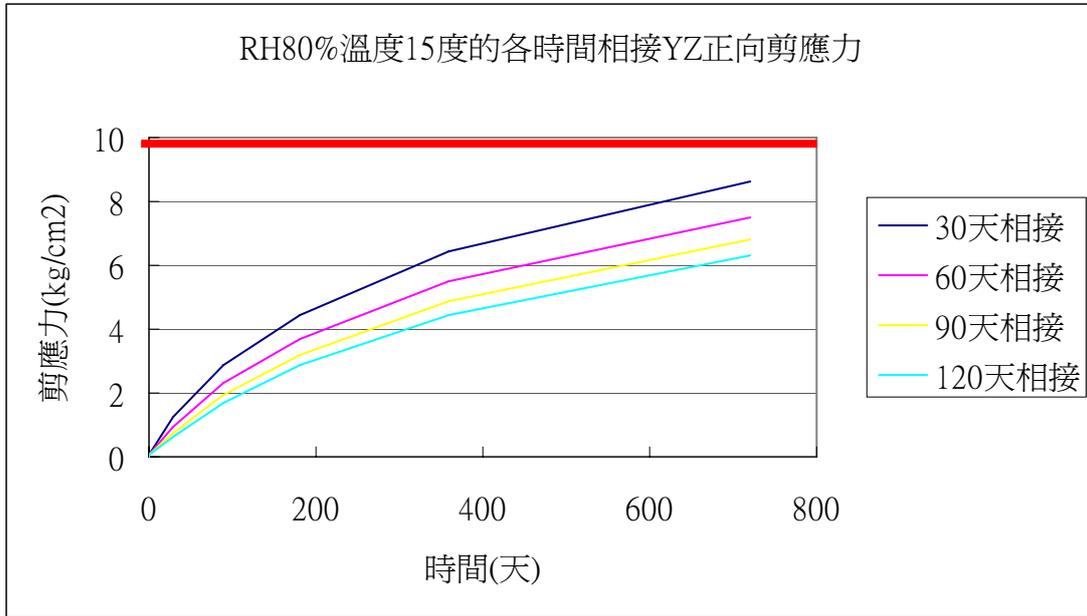


圖 4.6.11 相對溼度 80%氣溫 15°C 時各時間相接之 YZ 正向剪應力圖

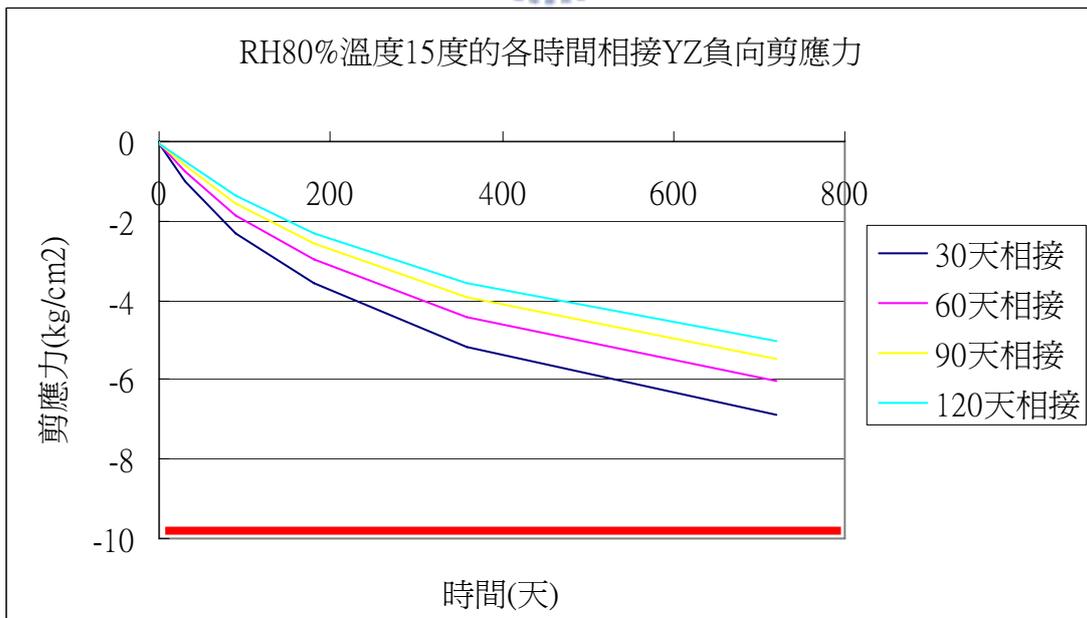


圖 4.6.12 相對溼度 80%氣溫 15°C 時各時間相接之 YZ 負向剪應力圖

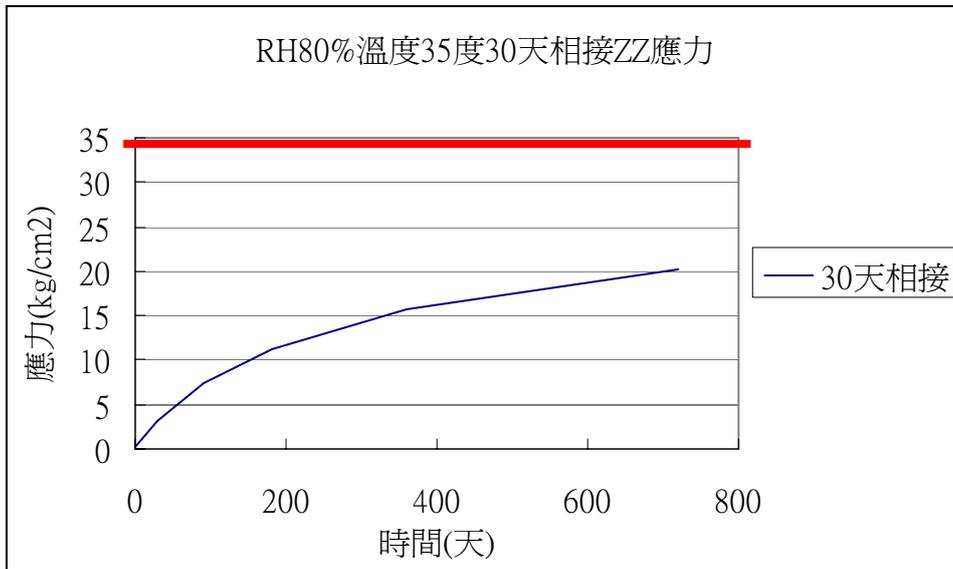


圖 4.6.13 相對溼度 80%氣溫 35°C時 30 天相接之 ZZ 向應力圖

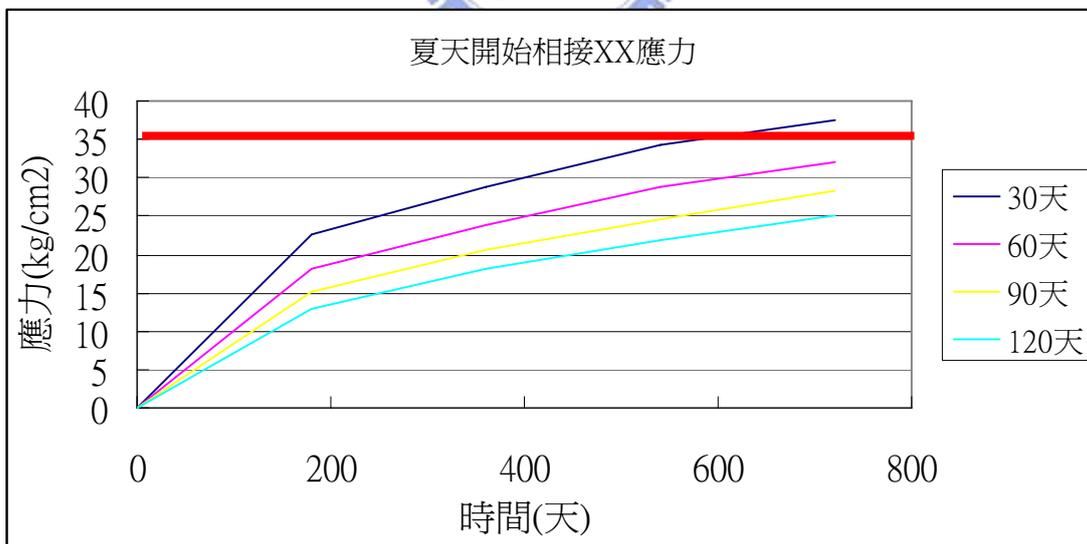


圖 4.6.14 夏天開始相接的 XX 向應力圖

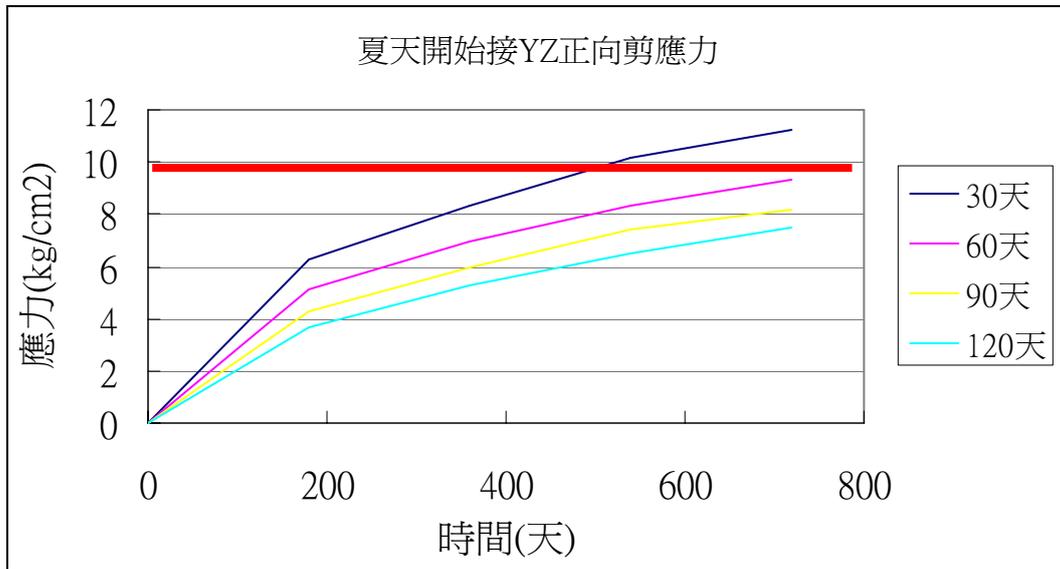


圖 4.6.15 夏天開始相接的 YZ 向剪應力圖

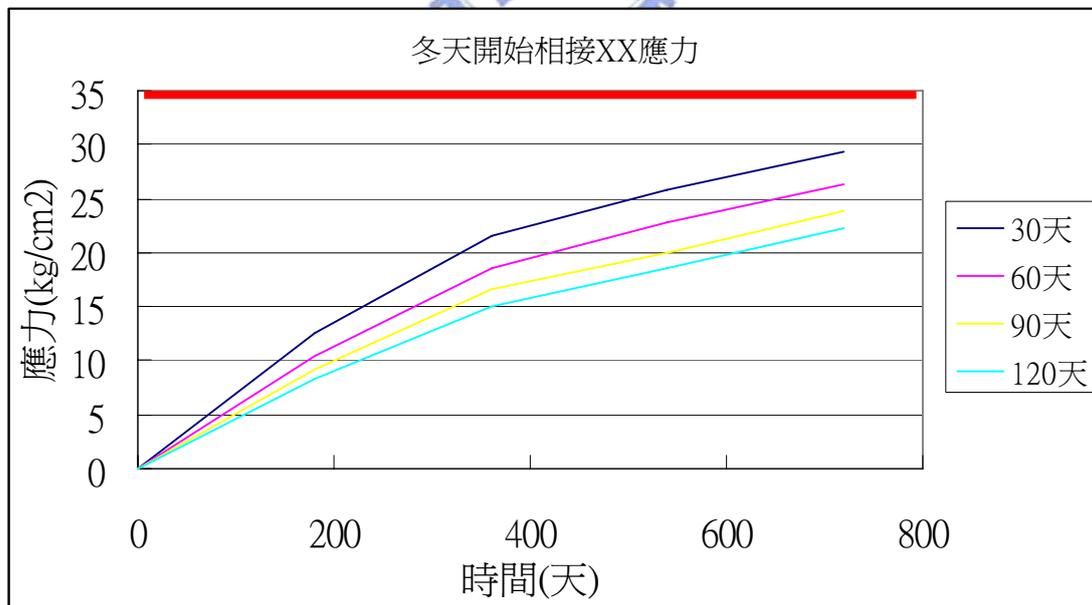


圖 4.6.16 冬天開始相接的 XX 向剪應力圖

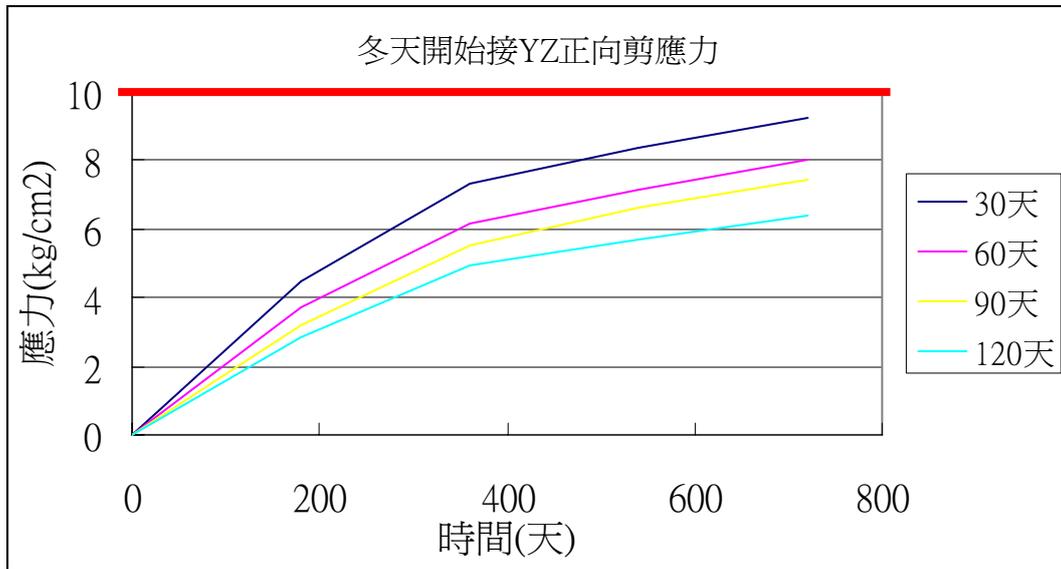


圖 4.6.17 冬天開始相接的 YZ 向剪應力圖



