

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

FBG 應用於潛盾隧道環片變形監測之可行性研究

**A Feasibility Study on the Use of FBG
for Shield Tunnel Segment Deformation Monitoring**



研究生：黃价民

指導教授：黃安斌 博士

中華民國九十六年八月

FBG 應用於潛盾隧道環片變形監測之可行性研究

**A Feasibility Study on the Use of FBG
for Shield Tunnel Segment Deformation Monitoring**

研究生：黃价民

Student: Chieh-Min Huang

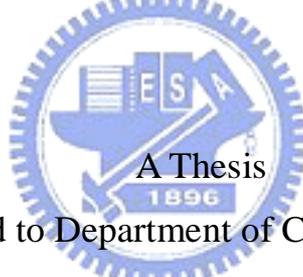
指導教授：黃安斌 博士

Advisor: Dr.An-Bin Huang

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

August 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年八月

FBG 應用於潛盾隧道環片變形監測之可行性研究

學生：黃价民

指導教授：黃安斌 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

潛盾隧道環片受力分析大多以經驗法則考慮現場環境下之土壓力行為。潛盾隧道環片從鑄造、搬運、安裝乃至於施工完成受周圍環境影響，環片受力的情況可能比設計所考慮之條件更複雜。過去曾嘗試使用應變片與光纖感測系統來監測潛盾隧道環片之受力情形，但大多受到監測技術限制，而導致所獲結果有限。本研究於隧道環片中安裝光纖光柵鋼筋感測器，從鋼筋籠之組立、混凝土澆置、各階段養護至環片抗彎試驗，進行完整記錄。對於日後隧道開挖、完工以及營運通車之環片受力狀況，提供一完整可靠的安全監測數據。藉由 FLAC 模擬單一環片抗彎試驗，與現場所量測之數據比較，相互確認量測與分析結果之可靠性。本論文敘述光纖光柵黏著技術之研發、現場監測與數值分析之結果。

關鍵字：光纖光柵、潛盾隧道襯砌環片、光纖監測、FLAC。

A Feasibility Study on the Use of FBG for Shield Tunnel Segment Deformation Monitoring

Student : Chieh-Min Huang

Advisor : Dr. An-Bin Huang

Department of Civil Engineering
National Chiao-Tung University

Abstract

The empirical procedures typically used in shield tunnel lining design consider the earth pressure distributions expected in the field. Due to drastic variations in the environment, the loading conditions experienced by the tunnel lining segments during fabrication, transportation and installation can be rather much more complicated than those considered in the design. Attempts have been made to measure the loading conditions within the tunnel lining segments using either strain gages or fiber optic sensors. Hampered by drawbacks in their monitoring techniques, these attempts had limited success. The technique of monitoring strain from within a reinforcement steel using fiber Bragg grating (FBG) has been developed in this research. With the FBG installed in the reinforcement, a complete record of strains experienced by the tunnel lining segment from fabrication, concrete pouring, curing through the loading tests was obtained. This technique enables the strains experienced by the shield tunnel lining system be monitored on a long term basis throughout the periods of tunneling drilling, lining installation as well as subway operation. The lining segment loading test was numerically simulated using FLAC. A comparison between the FLAC computations and FBG measurements was made to evaluate the reliability of the FBG readings. The thesis narrates the development of the FBG adhesion and monitoring techniques, as well as the results from numerical analysis.

Keywords : Fiber Bragg Grating, Shield tunnel lining segment,
Optical Fiber Monitoring, FLAC.

誌謝

歷練了兩年，終於要離開這浩瀚無窮的知識寶庫，感謝吾師 黃安斌老師兩年來的敦敦教誨，使學生蛻變成為思考縝密與具有研發能力之人。感謝台灣大學 陳正興博士、中興顧問社大地工程研究中心 冀樹勇博士、財團法人台灣營建研究院 李維峰博士與暨南國際大學 張文忠博士，因為有您們精闢的見解與教導，使得本論文更趨完美。

在學期間，感謝學長們的幫忙與指導，更感謝同門兄弟崑山與叮嚀的相互砥礪。還有感謝大地組的全體同學，陪我渡過這多采多姿的研究所生活，兩次的班遊使我畢生難忘。

最後感謝父母親的養育之恩、弟弟的義氣相挺以及女友菟杏的支持陪伴，沒有你們的鼓勵，就沒有今天嶄新的我。

黃价民

謹誌

中華民國九十六年八月

目錄

中文摘要	i
Abstract.....	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vii
表目錄	xii
第一章 前言	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究流程	1
1.3 論文架構.....	2
第二章 研究背景	4
2.1 光纖光柵.....	4
2.1.1 光纖光柵概述	4
2.1.2 光纖光柵的基本原理	5
2.1.3 光纖光柵的分類	6
2.1.4 光纖光柵應變量測原理	7
2.1.5 光纖光柵溫度量測原理	7
2.2 潛盾隧道.....	8

2.2.1 潛盾隧道概述	8
2.2.2 潛盾隧道環片類型	10
2.2.3 潛盾隧道載重形式	13
2.2.4 潛盾隧道分析模式	17
2.2.5 潛盾隧道設計荷重	21
第三章 光纖光柵黏著技術之研發	39
3.1 基本試驗設備簡介	39
3.2 光纖光柵/鋼筋接著劑握裹力測試	41
3.2.1 試驗方法	41
3.2.2 試驗結果	41
3.3 接著劑於模擬蒸氣養護條件下之測試	42
3.3.1 試驗方法	42
3.3.2 試驗結果	43
3.4 光纖光柵與應變片之感測比較	43
3.4.1 試驗方法	43
3.4.2 試驗結果	45
3.5 光纖光柵預埋於鋼筋內之耐久性測試	45
3.5.1 試驗方法	45
3.5.2 試驗結果	47

3.6 光纖光柵預埋於隧道環片鋼筋內之施作	47
第四章 光纖光柵於環片製作過程之監測	69
4.1 預鑄場內之鋼筋組裝、灌模及養護	69
4.2 預鑄環片過程之光纖光柵監測	70
4.3 環片抗彎試驗	72
4.3.1 外壓試驗機試驗結果	72
4.3.2 光纖光柵鋼筋應變計試驗結果	73
4.3.3 光纖光柵鋼筋應變計與混凝土應變計之比較	74
第五章 FLAC 數值模擬與分析	95
5.1 FLAC 模擬環片抗彎試驗	95
5.2 FLAC 模擬與現場量測結果之關係	97
5.3 FLAC 反算環片彎矩分佈與曲樑理論分析之比較	99
第六章 結論與建議	118
6.1 結論	118
6.2 建議	119
參考文獻	120

圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	3
圖 2.1 相位光罩法示意圖	24
圖 2.2 光纖光柵基本原理示意圖	24
圖 2.3 長週期式光纖光柵原理示意圖	25
圖 2.4 短週期式光纖光柵原理示意圖	26
圖 2.5 環片斷面類型示意圖(改繪自 JSCE, 1996).....	27
圖 2.6 隧道環片組合示意圖	28
圖 2.7 K 型環片類型示意圖(改繪自 JSCE, 1996).....	28
圖 2.8 K 型環片由徑向嵌入所產生之接縫角 α_R 示意圖(改繪自 JSCE, 1996)	29
圖 2.9 K 型環片由縱向嵌入所產生之嵌入角 α_L 示意圖(改繪自 JSCE, 1996)	29
圖 2.10 日本慣用計算法以及修正慣用計算法之載重分佈形式(改繪自 JSCE, 1996).....	30
圖 2.11 矩形均佈載重下之應力增量影響係數(Fadum, 1948)	31
圖 2.12 堆疊環片隧道示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局, 2006).....	32
圖 2.13 潛盾隧道環片組立平面示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局, 2006)	33
圖 2.14 隧道襯砌分析型式(改繪自臺北市政府捷運工程局, 2006)	34

圖 2.15 隧道襯砌結構分析模式(長期或短期地層荷重情況)	35
圖 2.16 片間接頭接觸深度與壓力分佈示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程 局，2006).....	36
圖 2.17 隧道周圍之土壤彈簧示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局，2006)	37
圖 3.1 微調儀.....	50
圖 3.2 長 90cm×寬 60cm 之光學板.....	50
圖 3.3 加熱盤.....	51
圖 3.4 光纖光柵解讀儀	51
圖 3.5 光纖光柵預拉設備	52
圖 3.6 可程式恆溫恆濕試驗機	52
圖 3.7 長度 10cm 之七號鋼筋沿軸向切半	53
圖 3.8 接著劑測試之儀器架設圖	53
圖 3.9 長度 10cm 之七號鋼筋預拉架設圖	54
圖 3.10 硬膠塗滿剝除披覆之光纖與光柵部份	54
圖 3.11 三種接著劑模擬蒸氣養護結果	55
圖 3.12 七號鋼筋(10cm)灌鑄成混凝土圓柱	56
圖 3.13 兩種熱固膠使用混凝土灌鑄模擬蒸氣養護結果.....	57
圖 3.14 七號鋼筋溝槽尺寸示意圖.....	58
圖 3.15 50cm 鋼筋預拉架設圖	59

圖 3.16 使用 AX-019 防水膠填滿鋼筋溝槽	59
圖 3.17 於鋼筋兩側黏上應變片	60
圖 3.18 使用 AX-019 防水膠保護應變片	60
圖 3.19 萬能材料試驗機(100 噸).....	61
圖 3.20 鋼筋拉伸試驗結果	61
圖 3.21 鋼筋拉伸試驗中光纖光柵與應變片之比較	62
圖 3.22 長度 10cm 之七號鋼筋沿軸向銑一溝槽	63
圖 3.23 光纖光柵溫度感測器	63
圖 3.24 以 POWER3077 固定光纖光柵溫度感測器	64
圖 3.25 使用 AX-019 防水膠填滿鋼筋溝槽	64
圖 3.26 光纖光柵鋼筋感測器耐久性試驗結果	65
圖 3.27 臺北捷運 CR580A 區段標工程用之七號鋼筋，中間銑一溝槽	66
圖 3.28 鋼筋尾端熔接光纖延長段.....	66
圖 3.29 將鋼筋置於加熱盤上加熱使接著劑固化	67
圖 4.1 鋼筋籠與光纖光柵鋼筋應變計.....	75
圖 4.2 鋼筋籠與接線盒	75
圖 4.3 光纖光柵鋼筋應變計與接線盒配置平面圖	76
圖 4.4 鋼筋籠放入環片鋼模	77
圖 4.5 混凝土由運輸管輸送至預鑄環片場	77

圖 4.6 混凝土澆置填滿環片鋼模	78
圖 4.7 鋼模蓋上頂蓋並以夾具固定四周	78
圖 4.8 以人工方式抹平環片外側表面	79
圖 4.9 環片養護流程圖	79
圖 4.10 蒸氣養護	80
圖 4.11 水中養護	80
圖 4.12 大氣養護	81
圖 4.13 環片熱偶計記錄	81
圖 4.14 水中養護連續監測數據圖	82
圖 4.15 大氣養護連續監測數據圖	83
圖 4.16 環片抗彎試驗架設圖	84
圖 4.17 環片抗彎試驗各式感測器分佈側視圖	85
圖 4.18 環片抗彎試驗時間對加載關係圖(外壓試驗機)	86
圖 4.19 環片抗彎試驗載重對冠部位移關係圖(外壓試驗機)	87
圖 4.20 環片加載過程記錄裂紋生成之載重	88
圖 4.21 環片抗彎試驗結果之記錄板	88
圖 4.22 環片抗彎試驗載重對應變關係圖(短鋼筋之光纖光柵)	89
圖 4.23 環片抗彎試驗載重對應變關係圖(長鋼筋之光纖光柵)	90
圖 4.24 光纖光柵應變計與混凝土應變計之載重對應變關係圖(短鋼筋)....	91

圖 4.25 光纖光柵應變計與混凝土應變計之載重對應變關係圖(長鋼筋)....	92
圖 5.1 FLAC 網格建立與環片初始模型.....	102
圖 5.2 FLAC 模擬環片抗彎試驗之邊界條件.....	103
圖 5.3 設置邊界條件與歷史點後採用左右對稱環片之左半部狀態來計算	104
圖 5.4 歷史點於實際環片尺寸上之位置.....	105
圖 5.5 FLAC 模擬環片中短鋼筋位置之垂直位移圖(載重為 10 噸).....	106
圖 5.6 FLAC 模擬環片中短鋼筋位置之軸向應變(載重為 10 噸).....	107
圖 5.7 FLAC 模擬與現場光纖光柵監測數據比較(短鋼筋).....	108
圖 5.8 FLAC 模擬與現場光纖光柵監測數據比較(長鋼筋).....	109
圖 5.9 內側保護層開挖至鋼筋表面以模擬環片抗彎過程之混凝土開裂 ..	110
圖 5.10 完整環片、內側保護層開裂環片以及現場監測數據比較(短鋼筋)	111
圖 5.11 完整環片、內側保護層開裂環片以及現場監測數據比較(長鋼筋)	112
圖 5.12 FLAC 模擬環片中間段位移與現場試驗所得位移之比較.....	113
圖 5.13 FLAC 模擬完整環片之彎矩圖(載重為 10 噸).....	114
圖 5.14 FLAC 模擬內側保護層開挖環片之彎矩圖(載重為 10 噸).....	115
圖 5.15 完整環片與內側保護層開裂環片之彎矩比較(載重為 10 噸)	116

表目錄

表 2.1 側向土壓力係數(k_L)與地盤反力係數(κ)之關係(JSCE, 1996).....	38
表 2.2 襯砌材料之單位重(JSCE, 1996).....	38
表 3.1 接著劑特性表.....	68
表 4.1 短鋼筋施工前各階段光纖量測數值.....	93
表 4.2 長鋼筋施工前各階段光纖量測數值.....	94
表 5.1 FLAC 參數設定值.....	117



第一章 前言

1.1 研究動機與目的

台北捷運信義線隧道施工採用潛盾工法，關於潛盾隧道結構之設計，各顧問公司並無統一，也無所謂“正確”的分析方法，只是一種長久以來“約定俗成”的分析流程及方式，由於缺乏可靠的量測資料來確認分析的結果及安全性，故計畫在信義線隧道環片裝設光纖量測。在隧道環片組裝及混凝土預鑄前於鋼筋上黏接光纖光柵，為隧道襯砌環片從製作到安裝完成進行長期監測，以進一步了瞭解施工中及日後營運通車時，隧道環片之受力情形。並可在監測值趨近主管機關研定之各項臨界管理值時，適時發出必要的警告資訊與救災準備，以確保隧道結構安全。本研究之內容包含光纖光柵黏貼於襯砌環片鋼筋技術之研發、黏貼光纖光柵單片隧道環片之組裝及混凝土預鑄程序之研發測試、隧道環片養護與搬運過程中光纖光柵數據之擷取、單片隧道環片壓力試驗過程中光纖光柵讀數之擷取、以及單片隧道環片壓力試驗數值分析與試驗結果之比較。

1.2 研究流程

針對隧道環片監測所進行的各項試驗流程如圖 1.1 所示，整個流程對於如何製作、測試感測器以及將感測器安裝於環片上有一個完整的說明。

1.3 論文架構

研究論文分為五大章節，分別敘述如下：

第一章 前言

說明研究動機與目的，並完整敘述整個研究流程。

第二章 研究背景

研究背景分為光纖光柵與潛盾隧道的原理說明，闡述如何應用光纖光柵來製作光纖光柵感測器，對於潛盾隧道的載重分布形式也有詳細的說明。

第三章 研究方法

從如何選用光纖光柵黏貼於鋼筋的膠、模擬蒸氣養護、鋼筋拉伸試驗到如何埋設光纖光柵於鋼筋內有一完整說明。

第四章 現場監測及 FLAC 模擬

在預鑄場內從鋼筋組裝、混凝土澆置、養護到環片抗彎試驗有完整的監測，再利用 FLAC 程式來模擬環片抗彎試驗，可與現場所量測之數據比較並找出其關係式。

第五章 結論與建議

根據現場鋼筋籠組裝、預鑄環片、光纖監測以及光纖管線配置，整合探討後提出一適當的結論與建議。

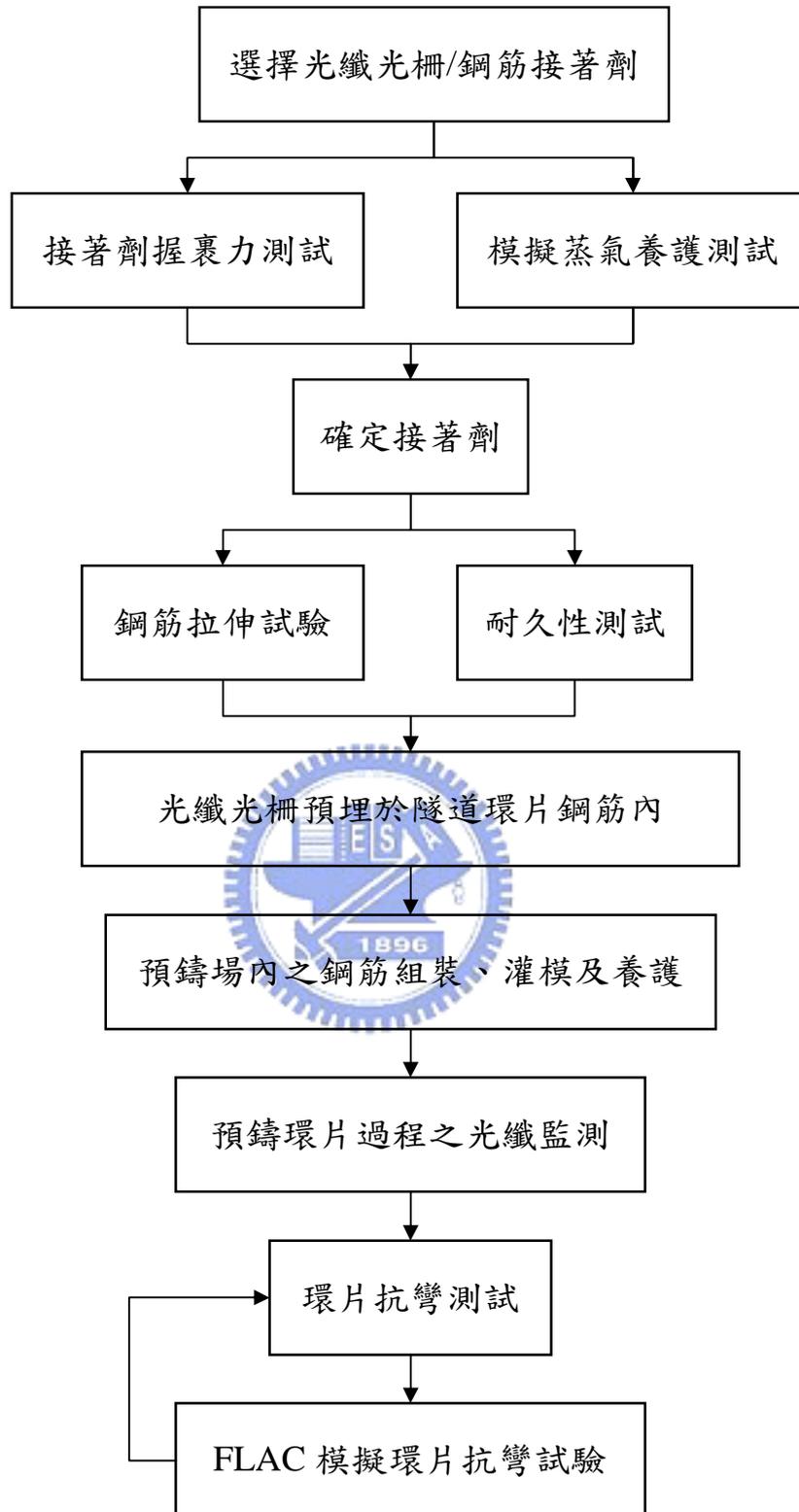


圖 1.1 研究流程圖

第二章 研究背景

2.1 光纖光柵

2.1.1 光纖光柵概述

布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Gratings, FBG)最早是發展於 1978 年，由 K. O. Hill 在加拿大通訊研究中心(Canadian Communications Research Center, Ottawa)發現，他利用波長為 488nm 之氬離子雷射光耦合入摻鍺光纖，產生的駐波使光纖核心發生折射率週期性的變化，因而形成光柵。此項發明也稱之為希爾光柵(Hill Grating)，但是希爾光柵長度約 1m，使得應用上非常不便。

到了 1989 年，G. Meltz 利用側向全像技術(Transverse Holographic Technique)，將兩束同調紫外光交錯產生干涉條紋，並利用紫外光可直接穿透光纖包覆層(Cladding)的特性，直接作用在光纖核心(Core)以產生光柵。後來利用浸氬或加入其他元素提高感光性，使得布拉格光纖光柵進入實用階段。

1993 年，K. O. Hill 改良先前光纖光柵的製作方法，發展出相位光罩(Phase Mask)法，如圖 2.1 所示，使得干涉條紋不再受限於兩束入射光的角度，只需要注意單一入射光是否垂直於相位光罩。只要達到垂直的條件，入射光會因相位光罩的作用而分成兩束同能量之紫外光，並在光纖核心上形成干涉條紋，產生折射率呈週期性變化的光柵，此為現今普遍使用的布

拉格光纖光柵。

2.1.2 光纖光柵的基本原理

由光學繞射(Diffraction)原理可知，光源端入射至一個具有狹縫的平面，會因為入射光的波長與狹縫的寬度，在另一端產生不同間距的亮暗相間繞射條紋，而整個亮暗條紋會以 Bessel function 的分佈來呈現。

若將繞射原理中的單狹縫改變成週期性狹縫，則可以得到加成的效果，此週期性狹縫即為光柵結構，如圖 2.2 所示，各繞射現象可由式 2-1 表示：

$$n_2 \sin q_2 = n_1 \sin q_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (2-1)$$

其中 n_1 、 n_2 分別為介質 1 和介質 2 的折射率， λ 為入射光的波長， Λ 為光柵的週期， m 為繞射的階數， θ_1 、 θ_2 分別為光的入射角和 -1 階($m=-1$)繞射角。

當發光二極體、半導體雷射等寬頻光源耦合(Coupling)進入布拉格光纖光柵時，除了滿足布拉格條件(Bragg Condition)之特定波長會被反射，其餘的波長會因為相位差而相消，布拉格條件之反射波長 λ_B 可由式 2-2 求得：

$$\lambda_B = 2\Lambda n \quad (2-2)$$

其中 n 為光纖核心的有效折射率， Λ 為光柵折射率週期性改變的間距。至於單模光纖中反射波長的反射率 R 可由式 2-3 表示：

$$R = \tanh^2 \left(\frac{pL\Delta n}{\lambda_B} \right) = \tanh^2 \left(\frac{pL\Delta n}{2\Lambda n} \right) \quad (2-3)$$

其中 L 為光纖光柵的長度， Δn 為折射率的改變量。由式 2-3 可知光纖

光柵的長度愈長，會有愈多的能量轉移成反射模態。

2.1.3 光纖光柵的分類

依照光纖光柵的週期大小，可將光纖光柵分成長週期式與短週期式兩大類，其說明如下。

1.長週期式光纖光柵(Long Period Fiber Grating)

長週期式光纖光柵亦稱為穿透式光纖光柵(Transmission Fiber Grating)，其週期約為 100~1000 μm 。長週期光纖光柵意指光纖傳輸波長滿足式 2-4 之條件：

$$b_2 - b_1 = \Delta b = \frac{2p}{\Lambda} \quad (2-4)$$

其中 Λ 為光柵週期， β_1 為基本之模態， β_2 為與 β_1 耦合之模態。當在光纖中傳輸的光和特定波長的光遇到長週期式光纖光柵時，會耦合入一相同方向前進、但卻不同模態的光，入射光中該波長的光不會反射，只會穿透長週期式光纖光柵，如圖 2.3 所示。

2.短週期式光纖光柵(Short Period Fiber Grating)

短週期式光纖光柵通常被稱為布拉格光纖光柵或反射式光纖光柵(Reflection Fiber Grating)，其週期約為 1 μm 。當光纖光柵的週期愈短時，模態耦合時的模態傳播常數偏移量($\frac{2p}{\Lambda}$)也會愈大，使得入射光耦合入一反向前進的光，於短週期式光纖光柵處產生反射的效果，如圖 2.4 所示。

2.1.4 光纖光柵應變量測原理

當光纖光柵受到一外力作用，會產生 $\Delta\varepsilon$ 的應變增量，連帶使得光柵週期的間距增加 $\Delta\Lambda$ ，代入式 2-2 可得：

$$\Delta I_B = 2n\Delta\Lambda \quad (2-5)$$

根據應變之定義：

$$e = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2-6)$$

將式 2-5 代入式 2-6 可得：

$$e = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\frac{\Delta I_B}{2n}}{\frac{I_B}{2n}} = \frac{\Delta I_B}{I_B} \quad (2-7)$$

由於光纖光柵受到應變時，不只光柵週期 Λ 和波長 λ_B 會改變，其有效折射率 n 也會發生變化，所以式 2-7 應該修正為：

$$\frac{\Delta I_B}{I_B} = K_e \frac{\Delta L}{L} = K_e e \quad (2-8)$$

其中 K_e 為應變敏感係數(約 0.74)，根據 Rao (1998) 文獻可知， 1μ 的應變會使光柵波長飄移約 1.2pm，無論是拉應變或壓應變皆有很好的線性關係。但是在極大的拉應變下，反射波長的強度會有下降的趨勢，使得反射波長對應變有些許非線性的情形發生。

2.1.5 光纖光柵溫度量測原理

當光纖光柵受到溫度變化影響，會產生膨脹或冷縮的熱應變現象，因為熱光效應的關係，使得有效折射率也會發生變化，其波長飄移量可由式 2-9

表示：

$$\frac{\Delta I_B}{I_B} = (K_z + K_a)\Delta T = K_t\Delta T \quad (2-9)$$

其中 K_ζ 為熱光效應造成的溫度敏感係數， K_α 為熱應變造成的溫度敏感係數， K_t 為溫度敏感係數。

布拉格光纖光柵的波長飄移對溫度變化並非完全線性，在高溫時的溫度變化會使波長飄移較為顯著， $K_\alpha \approx (0.55 \sim 1.1) \times 10^{-6}$ ，差別在於 K_ζ 於 150°C 時為 6.9×10^{-6} ，但是 K_ζ 在 450°C 時變化成 9.6×10^{-6} 。

在室溫情況下，根據 Rao (1998) 文獻可知， 1°C 的溫度變化會使得光纖光柵波長飄移約 13pm 。於高溫的情況下，光纖光柵波長的反射強度會降低，到 900°C 時會完全消失，即使回到室溫下，反射強度也會比初始加溫前還要低。



2.2 潛盾隧道

2.2.1 潛盾隧道概述

潛盾工法起源於十九世紀法國工程師 Marc Isambard Brunel 觀察蛀鑿船蟲 (Ship Worm) 使用牙齒鑿入木頭內，同時以身體支撐開挖之隧道周壁，並分泌出一種硬化劑固結開挖壁面，再藉由身體的蠕動前進挖掘，進而發明潛盾工法，於 1818 年取得專利。

1825 年，Marc Isambard Brunel 將潛盾工法運用於英國倫敦泰晤士河底的隧道工程，首開潛盾工法之先河 (Skempton, 1994)。但因當地地質狀況不

良且施工機具簡陋，於 1828 年發生嚴重坍塌導致機毀人亡之慘劇，被迫停工。停工七年之後再度復工，並在 1841 年 12 月順利到達對岸工作井，成為世界第一條河底隧道，總長 1196 英尺。

1869 年，英國人 Greathead 等採用自行研發之圓形潛盾機、鑄鐵弓形支撐和壓氣工法，成功完成英國倫敦泰晤士河第二條河底隧道鐵路工程，奠定了潛盾工法之基礎(Skempton, 1994)。

經過百餘年的演進，現今潛盾工法已經成為在軟弱土質中開挖隧道的常用工法之一。在可能崩塌流動之地盤內開挖隧道時，潛盾工法利用直徑較隧道外徑斷面稍大之潛盾機鑿入土內，支撐隧道洞口四周之地盤並設置永久襯砌，故在愈惡劣的地質環境中，採用潛盾工法愈安全可靠。

潛盾工法之優缺點如下：

1.優點

- (1)除了工作井周圍之施工用地外，其餘作業均可於地面下實施，故工程進行時對地面上各項設施、商業活動及交通影響可減至最低程度。
- (2)對地下各種埋設物之影響小，免除施工中拆除、移設原有地下設施之麻煩。
- (3)在適當的防護及配合措施下，即使於河川或其他大型結構物下方亦可施工。
- (4)在地面下施工，受天候影響小，可日夜全天候施工，故能縮短工期。

(5)施工按照一定週期之步驟反覆循環進行，有利於作業管理之簡化與自動化。

(6)隧道全斷面開挖，可一次完成，施工迅速。

2.缺點

(1)地下如有障礙物(如流木、鑽探管、既有之連續壁、堤防基樁)施工較難處理。

(2)必須採用輔助施工法時，工程費高，且須採適當之安全措施。

(3)工作井地面上之附屬設施操作時常有噪音及震動，影響附近環境。

(4)每一部潛盾機只有一個工作面，施工中途若遇意外(機具損壞、障礙物排除等)，只得停滯等候。

(5)潛盾機購置及環片成本高昂。

(6)棄土排泥及環片輸送等之周邊成本高昂。



2.2.2 潛盾隧道環片類型

根據日本土木學會(Japan Society of Civil Engineers, JSCE)所制定的日本潛盾隧道標準規範(Japanese Standard for Shield Tunneling)，將環片依照斷面來分類，可分為箱型環片(Box Type Segment)和平面型環片(Flat Type Segment)兩大類。其中箱型環片包含鋼環片(Steel Segment)、延性石墨鑄鐵環片(Ductile Cast Iron Segment)、波紋狀之延性石墨鑄鐵環片(Corrugated Type Ductile Cast Iron Segment)以及具有縱向肋鈹之鋼筋混凝土環片

(Ribbed Type RC Segment)，如圖 2.5 所示，平面型環片則包含 A、B 和 K 型環片。

若將環片依使用材料分類，可分為混凝土系環片、鋼環片、石墨鑄鐵環片等，說明如下：

1. 混凝土系環片

混凝土系環片又可分為鋼筋混凝土環片、合成式混凝土環片及預力混凝土環片等。

(1) 鋼筋混凝土環片

鋼筋混凝土環片可製作任意形狀尺寸、材質均勻，且透水性低，撓性佳且經濟。惟重量較鋼製、鑄鐵製之環片重，抗張力小而施工性亦欠佳。搬運組合時銜接端容易破損。



(2) 合成式混凝土環片

合成式混凝土環片係以鋼料與混凝土組合製作而成，兼有鋼料之強韌性及混凝土之經濟性等特徵，其單價介於鋼環片與鋼筋混凝土環片間。

(3) 預力混凝土環片

預力混凝土環片係以高壓力養護，成為具高彈性之環片，預力混凝土環片重量較鋼筋混凝土環片輕，其優、缺點同鋼筋混凝土環片。

2. 鋼環片

鋼環片採用 CNS2473【一般結構用軋鋼料】SS41 以上鋼料，或 CNS2947

焊接結構用軋鋼料 SS41 以上鋼料製作而成。鋼環片之鋼料材質均一、強度高、容易搬運、施工性佳、製作精度高等為其特點。惟較其他材質之環片勁度較小、易腐蝕，接頭止水性較差，對大斷面隧道之撓度大為其缺點，台灣地區因鋼料貴，其製造費較鋼筋混凝土環片約高一倍。惟因銲接補強及加工容易，一般常使用於人孔、連接管需開孔補強處或曲線段異形環片製作等。

3. 石墨鑄鐵環片

石墨鑄鐵又稱延性鑄鐵(Ductile)，重量較鋼製環片重，強度高，且耐久性、製品精度、防水性、勁度等都非常優良，但製作加工較費時，價格較昂貴。目前台灣仍未曾使用，石墨鑄鐵環片適用於中間人孔及流入管渠直接與潛盾管渠接合時，或隧道穿過建物、鐵道、河川等情況。

臺北捷運 CR580A 區段標使用三片 A 型環片、兩片 B 型環片以及一片 K 型環片來組成一環，如圖 2.6 所示。A 型環片為標準型環片，其兩端側面為垂直平坦面，B 型環片一側為垂直平坦面與 A 型環片連接，一側則為斜面與 K 型環片連接。

K 型環片依照嵌入方向可分為徑向嵌入與縱向嵌入，特徵為環片兩側面朝其嵌入方向呈錐型發展，如圖 2.7 所示。K 型環片以徑向嵌入會產生一接縫角(Joint Angle, α_R)，如圖 2.8 所示，接縫角可由式 2-10 表示：

$$a_R = \frac{q_K}{2} + w \quad (2-10)$$

其中 θ_K 為 K 型環片的中心角， ω 為 K 型環片能嵌入的必要餘裕角，一般而言 ω 為 $2\sim 5^\circ$ ，在不影響施工作業下愈小愈好。若 K 型環片以縱向嵌入則會產生一嵌入角(Insertion Angle, α_L)，如圖 2.9 所示，依照施工的狀況， α_L 為 $17\sim 24^\circ$ 。

2.2.3 潛盾隧道載重形式

潛盾隧道襯砌的設計，必須考量施工階段以及隧道完工之安全性，參考日本潛盾隧道標準規範(JSCE, 1996)，可將其設計載重分為主要載重、二次載重以及特別載重，載重分佈形式如圖 2.10 所示，說明如下：

1. 主要載重(Primary Loads)

主要載重為潛盾隧道襯砌設計時所考量之基本載重，包含下列五種載重形式：



(1) 垂直與水平土壓力(Vertical and Horizontal Earth Pressure)

依據土壤的狀況，可將地下水壓力分為兩種情形評估，在有效應力法中，將地下水壓力與土壓力分別考量，此法適用於凝聚性土壤(Cohesive Soil)；然而在總應力法中，地下水壓力則與土壓力合併考量，此法適用於砂質土壤(Sandy Soil)。

垂直土壓力應被設計成均佈載重作用於隧道冠部，若覆土深度大於隧道外徑，在設計垂直土壓力時可採用鬆動土壓力來設計，因為土壤在較厚的覆土下，拱效應較能發揮。在砂質土壤和堅硬黏土($N \geq 8$)中，若覆土深度大

於 1~2 倍的隧道外徑，鬆動土壓力常被設計成垂直土壓力。然而，在中等堅硬黏土($4 \leq N < 8$)或軟弱黏土($2 \leq N < 4$)中，則使用全部覆土重量來設計垂直土壓力。

水平土壓力設計成均佈載重作用於隧道兩側，其可由垂直土壓力乘以側向土壓力係數(the Coefficient of Lateral Earth Pressure, k_L)而得。當不考慮地盤反力時，可用靜止土壓力係數當成側向土壓力係數；若考慮地盤反力，則可用主動土壓力係數或減小靜止土壓力係數來替代側向土壓力係數。假如側向土壓力係數相當難決定，可採用表 2.1 之地盤反力係數(the Coefficient of Soil Reaction, κ)與側向土壓力係數關係來評估。

(2)水壓力(Water Pressure)

垂直水壓力為一均佈載重形式之靜水壓力，作用於隧道冠部最高點和隧道底部最低點。水平水壓力也為一均佈載重之靜水壓力，其範圍從隧道冠部至隧道底部。

(3)自重(Dead Weight)

隧道中沿著襯砌形心的單位長度自重(g_1)可由式 2-11 來計算：

$$g_1 = \frac{W_1}{2pR_c} \quad (2-11)$$

其中 W_1 為縱向單位長度之襯砌環片重量(t/m)， R_c 為主要襯砌之形心半徑(m)。若計算 W_1 時，缺乏實際襯砌單位重，可參考表 2.2，依照不同環片種類之單位重代入計算。

(4)地表載重影響(Effects of Surcharge)

地表載重的影響決定於土層中之應力傳遞，必須考慮基礎類型、基礎底部之覆土深度以及土壤狀況。計算土層中的應力傳遞，可藉由 Boussinesq's equation(式 2-12 和式 2-13)和 Westergard's equation(式 2-14)來獲得，或者利用數值分析例如有限元素分析法等也能獲得土層中之應力傳遞狀況。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta s = \frac{P}{Z^2} I_1 \\ I_1 = \frac{3}{2p \left[1 + \left(\frac{r_1}{Z} \right)^2 \right]^{5/2}} \text{ (點荷重形式)} \end{array} \right. \quad (2-12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta s = q I_2 \\ I_2 = 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r_2}{Z} \right)^2 \right]^{3/2}} \text{ (圓形均佈載重形式)} \end{array} \right. \quad (2-13)$$

其中 $\Delta\sigma$ 為地表載重影響之應力增量， P 為垂直集中載重， Z 為欲求點之深度， q 為圓形均佈載重， I_1 和 I_2 為影響係數， r_1 為地表集中載重至欲求點之水平距離， r_2 為圓形載重半徑。

$$\Delta s = qI \text{ (矩形均佈載重形式)} \quad (2-14)$$

其中 q 為矩形均佈載重， I 根據 $m(=\frac{L}{Z})$ 和 $n(=\frac{b}{Z})$ 參考圖 2.11 可獲得， L 為矩形基礎之長度， b 為矩形基礎之寬度。

(5)地盤反力(Soil Reaction)

垂直向的地盤反力與地盤變位無關，為垂直載重和襯砌環片自重所產生之地盤反力總和，如圖 2.10 所示之 $P_{g1}+p_{g1}$ 。水平向的地盤反力則和地盤變

位有關，其為襯砌環片中心水平上下各 45°之中心角範圍，以三角形均佈載重分佈，如圖 2.10 所示之 $q_r(=\kappa\delta)$ ，其中 δ 為襯砌之變形，可由式 2-15 求得：

$$d = \frac{[2(p_{e1} + p_{w1}) - (q_{e1} + q_{w1}) - (q_{e2} + q_{w2})]R_c^4}{24(hEI + 0.0454kR_c^4)} \quad (2-15)$$

其中 η 為彎曲勁度之有效率。

2. 二次載重(Secondary Loads)

二次載重為施工期間或隧道完工後作用之載重，包含下列三種載重形式：

(1) 內部載重(Internal Loads)

內部載重為隧道完成後，作用於襯砌內部之載重，在設計襯砌結構安全時，必須考量抵抗這些載重，例如作用於襯砌底部的鐵路運輸工具載重可直接由已硬化之背填灌漿支撐。



(2) 施工載重(Construction Loads)

施工載重需考量潛盾機盾殼之推力、背填灌漿壓力、施工者的活載重以及其他施工載重，例如傳動裝置的自重等等。

(3) 地震影響(Effects of Earthquake)

地下結構物之耐震設計為地盤受地震波作用時，地下結構物因地盤之變位所產生之應力及應變來加以設計。一般地下結構物之變位，很接近假設地下結構物不存在時地盤之變位，即所謂自由場之變位，以剪切變位傾角(racking angle)表示，結構物與地盤之作用力為使地下結構物產生變位之

力，即傳統地下結構物受地震作用影響之設計方式。地震所引起之土層剪切變位傾角可由式 2-16 表示：

$$g = I \frac{V_{\max}}{C_{se}} \quad (2-16)$$

其中 I 為重要係數， V_{\max} 為地表運動最大速度(m/s)， C_{se} 為隧道所在位置土壤之剪力波速(m/s)。 C_{se} 應依量測值而定，若無量測值，可由式 2-17 和式 2-18 之經驗公式來決定。

$$C_{se} = 100N^{1/3} \text{ (凝聚性土壤)} \quad (2-17)$$

$$C_{se} = 80N^{1/3} \text{ (無凝聚性土壤)} \quad (2-18)$$

3. 特別載重(Special Loads)

隧道襯砌環片之設計載重除了主要載重和二次載重外，還需考量同時有兩個以上之潛盾隧道施工的影響、鄰近地區施工的影響以及地表沉陷的影響等等，所有會影響襯砌環片的情形都必須詳細考量以確保施工期間和隧道完工後營運的安全性。

2.2.4 潛盾隧道分析模式

一般常用的潛盾隧道分析方法可分為一般環片式分析模式與上下堆疊隧道分析模式，說明如下：

1. 一般環片式隧道分析模式

(1) 雙環模式之隧道設計與分析

組立完成後的隧道含有間隔式的連結點如圖 2.12 所示，間隔式隧道襯

砌環片組立後之平面圖如圖 2.13。由於隧道縱向的尺寸遠大於其他兩個方向的尺寸，因而可將隧道之受力行為視為平面應變狀態，隧道結構可用兩組半環襯砌和一組環向結點的模式來分析，如圖 2.14 所示。

隧道襯砌的分析模式(雙環模式)為對稱於中心軸的立體構件，其混凝土襯砌本身及連接處分別有不同的彎曲勁度，由於採 K 片位置在冠頂左右交互排列的推進原理，本模式將由兩個在平行平面上的半環組成，並由垂直此平面的構件連接，以模擬環向結點的摩擦阻抗。本模式將由僅能承受壓力的彈簧支撐，以模擬周圍土層的被動反作用力，如圖 2.15，徑向連結點的彎曲勁度，將經由多次迭代計算的修正來模擬真實結點的性質。

(2) 彎曲勁度

襯砌環片彎曲勁度以環片厚度(h)為慣性矩計算之有效深度，其慣性矩為 $(bh^3/12)$ ，環片間之模擬接頭勁度則忽略環片間螺栓之作用，以兩環片間接觸深度(t)為慣性矩計算之有效深度，然而接觸深度並非常數，隨接觸點處之軸力與彎矩而異，如圖 2.16 所示，而彎矩又隨接觸點之彎曲勁度增加而變大。為求得片間接點處實際之接觸深度與彎矩，分析時將採迭代方式進行。分析開始時假設各片間接點為完全接觸，即接觸深度 $T(=250\text{mm})$ ，經代入分析得到每一接點之彎矩 M_i 及軸力 N_i ，再據以計算各接觸點軸力之偏心距 $e_i = \left| \frac{M_i}{N_i} \right|$ ，若 $e_i \leq \frac{T}{6}$ ，表示接點全面均承受壓應力，即為全部接觸，故其接觸深度為 T ，與原假設相符無須修正；假如 $e_i > \frac{T}{6}$ ，則此時接頭會因承受

張應力而有分離之情形，其應力將會重新分佈，假設壓應力在接觸深度內呈線性變化，即壓應力為三角形分佈在接觸深度 t_i 內，則依據力平衡條件可推得偏心距 e_i 及此時之接觸深度 t_i ，如式 2-19 所示：

$$e_i = \left| \frac{M_i}{N_i} \right| = \frac{T}{2} - \frac{t_i}{3} \quad (t_i < T) \quad (2-19)$$

由於接觸深度改變，故於後續迭代計算進行時接觸深度須加以修正，使分析輸入之接觸深度與已輸出之接頭軸力和彎矩計算之接觸深度 t_i 約相等為止。

(3) 土壤彈簧

隧道分析中之被動土壓力以僅能承受壓力的土壤彈簧來模擬，分佈在除冠頂 90° 區域外之隧道四周，若任一徑向彈簧計算結果為承受張力，則以一水平彈簧替代，以符合彈簧承受壓力之力學性質，如圖 2.17 所示。

(4) 環向結點間之剪力勁度與摩擦阻抗

環向結點間的剪力勁度可經由其作用力與變位曲線定義，由於襯砌環的彎曲勁度不對稱(K 片交互地左右排列)，因此兩環之間存在相對位移，此位移包括混凝土環片的剪力變形及相鄰兩環片間的相對滑動，而抑止滑動所需的摩擦力來自盾尾千斤頂的殘餘應力。

假如環片與環片之間仍存在壓應力，那麼其產生的摩擦阻力即為鄰近環間軸向壓應力與摩擦係數的乘積。在環間剪力超過摩擦力之前，兩環間相對的移動將被限制，而僅有環片混凝土本身的剪力變形，因此其作用力

對位移之關係曲線為一斜線。由於整個混凝土環片都會發生剪力變形，因此分析模式中垂直環片的摩擦阻抗構件皆模擬為具有混凝土剪力勁度之構件。

2. 上下堆疊隧道分析模式

使用考慮莫耳-庫倫降伏準則及土壤彈塑性行為之有限差分的數值方法進行分析(例如 FLAC)，模擬周圍土壤於開挖下行及上行隧道與完成襯砌環片過程，分析地表沉陷量及環片應力。

初始應力的決定將影響土層隨後有關荷重、開挖、襯砌組立等所產生之應力應變行為，這是由於土壤具有非線性、非彈性及應力應變關係為圍壓之函數等特性。使用 FLAC 模擬地層初始應力狀態不得使其產生塑性變形，所需之土壤參數除總密度 D ，凝聚力 C 及有效內摩擦角 ϕ 外，尚需剪力模數 (Shear Modulus, S) 及體積模數 (Bulk Modulus, B)，其中 D 、 C 及 ϕ 根據地質調查報告獲得，而 S 及 B 需由式 2-20 和式 2-21 求得：

$$S = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-20)$$

$$B = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2-21)$$

其中 ν 為柏松比 (Poisson's Ratio)， E 為土壤之彈性模數。依據 Ng and Lo (1985) 之研究，土壤在解壓狀態下之彈性模數 (Unloading modulus) 約為正常彈性模數 (Loading modulus) 之 2 至 3 倍，其範圍乃以隧道中心為原點，往兩側向下以 45° 線以下所包括之範圍。隧道襯砌環片架設時機為當隧道開挖

頂拱土壤之變形達隧道盾尾間隙約 7cm 時即架設環片。

2.2.5 潛盾隧道設計荷重

隧道襯砌的荷重包括堆置和運輸過程中環片的自重、環片組立時的荷重及短期與長期地層靜荷重如地表載重等正常荷重狀況，並考慮 200 年洪水位時之荷重及地震荷重，整個荷重分析過程簡述如下：

1. 從螺栓孔吊放環片

假設以繩索從螺栓孔將環片吊起計算環片自重造成的彎矩，此應力可以傳統的樑理論分析。

2. 現場堆置

整環的環片依序上、下堆置，可用傳統樑理論計算環片堆置自重造成之彎矩。



3. 從灌漿孔吊裝

從灌漿孔吊裝環片，用傳統樑理論計算環片自重造成的彎矩。

4. 自重

環片在地層中組立完成後在各種荷重狀況下皆考慮其自重。

5. 背填灌漿壓力

隧道襯砌組立完成時，由襯砌的灌漿孔對盾尾間隙作背填灌漿，形成一均佈壓力作用在襯砌外緣，分析時取單一環片，兩端點以鉸支點支撐，環片外緣承受均佈荷重。

6.長期地層荷重(附加地表載重)

“長期”表示目前的地層及現有低水位情況之荷重，地表荷重的考慮則根據臺北都會區大眾捷運系統之土木工程設計手冊(Civil Engineering Design Manual, CEDM)第 4.3.2、4.3.3 及 4.3.5 節，由於隧道路線從現有建築物及街道下通過，地表載重的考慮將包括結構物荷重，以及根據 C-AASHTO 中 HS20-44 之車輛活載重，鄰近建築物或未來可能的建築物作用在地表之最小設計荷重為 50KN/m^2 ，假如能確知未來建築物之樓層數，則包括呆載重及活載重的垂直荷重假設為每層樓 12KN/m^2 作用在預定的基礎位置。

7.短期地層荷重(附加地表載重)

其分析模式及地表載重與長期荷重狀況相同，考慮地下水位在地表面，地表下之水壓呈靜水壓分佈。



8. 200 年洪水水壓力

考慮 200 年洪水位時，結合短期及長期地層荷重之狀況。

9.預鑄混凝土襯砌於隧道直徑變化 0.33%時引致之彎曲應力

以隧道上方覆土荷重產生垂直分佈力及伴隨的環壓力作用在 2.2.4 節中之雙環模式可得到一組隧道直徑變形量，經程式多次測試，取其直徑變形量達到 CEDM 第 4.9.3 節規定值時襯砌所受的軸力、彎矩，在此計算過程連結點之柔度將被自動計算。

10.地震載重

地震作用在隧道橫斷面時，環片將隨地盤位移而產生相同之位移，因此在橫斷面上，襯砌環片及開孔週邊產生之 racking strain 即為環片之應變。由此應變變形量經分析求得相當之地震載重，並依 CEDM 載重組合表 2.5.1A 之規定，進行襯砌環片分析之。



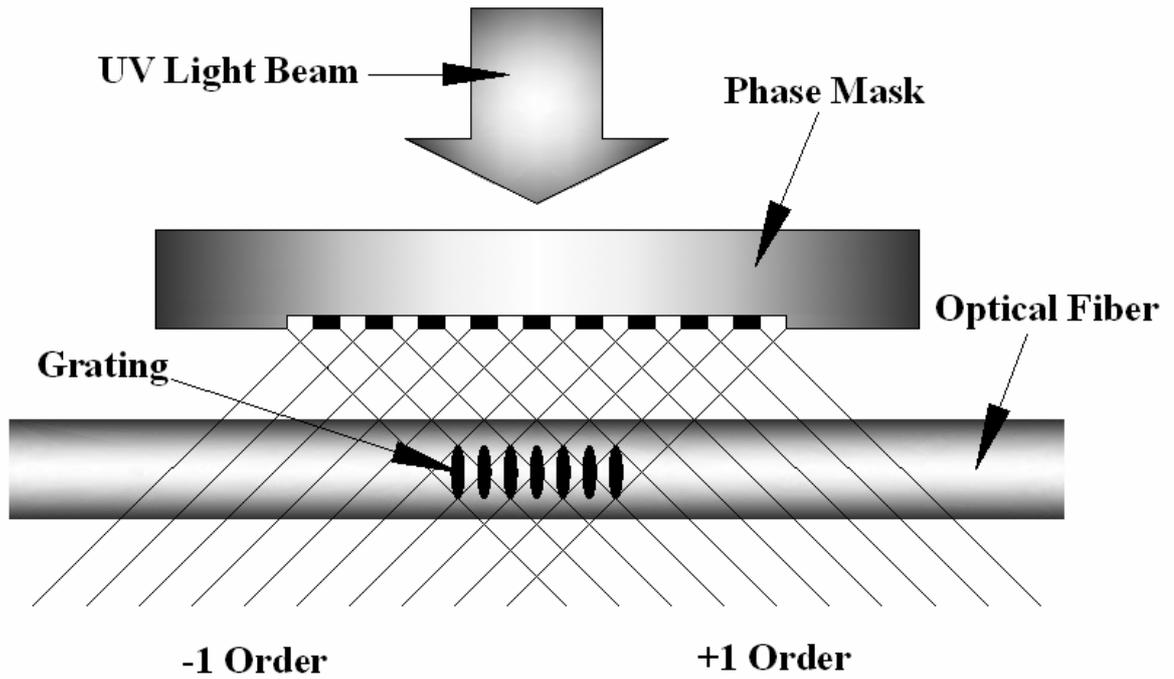


圖 2.1 相位光罩法示意圖

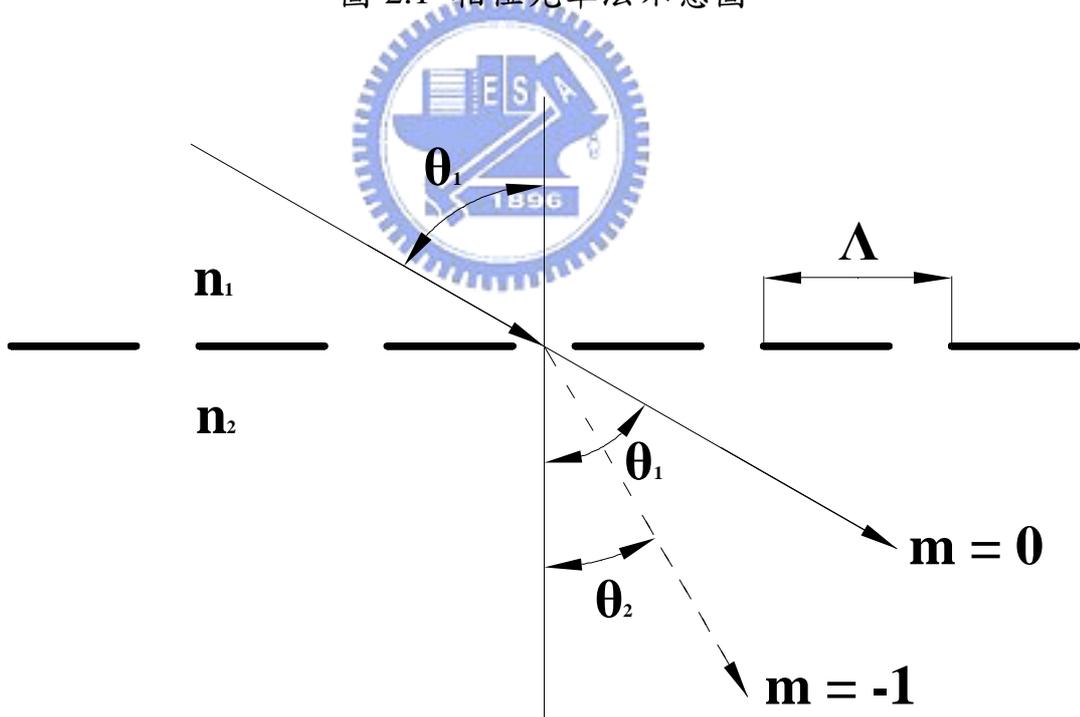
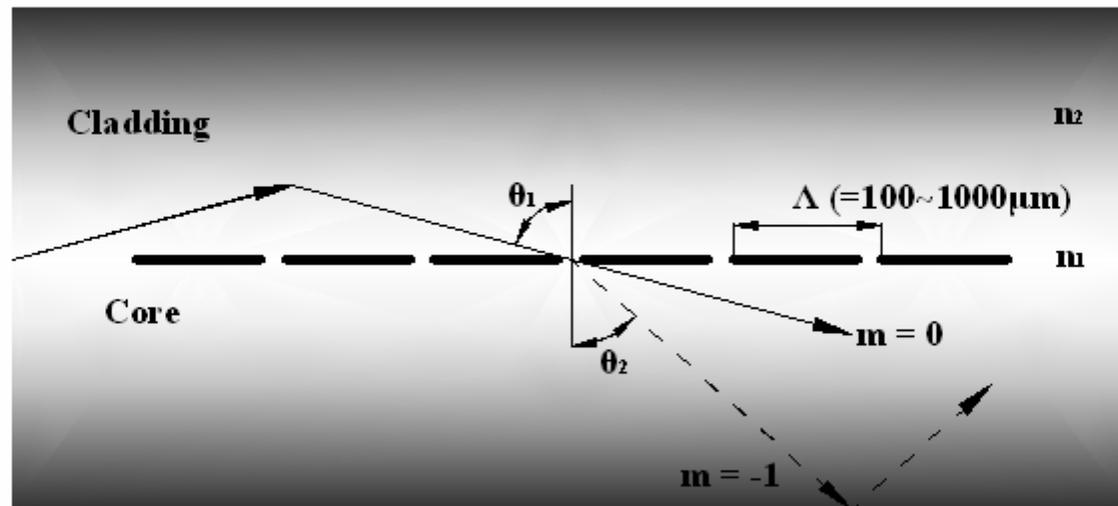


圖 2.2 光纖光柵基本原理示意圖

Input Spectrum

No Reflection



Transmitted Spectrum

圖 2.3 長週期式光纖光柵原理示意圖

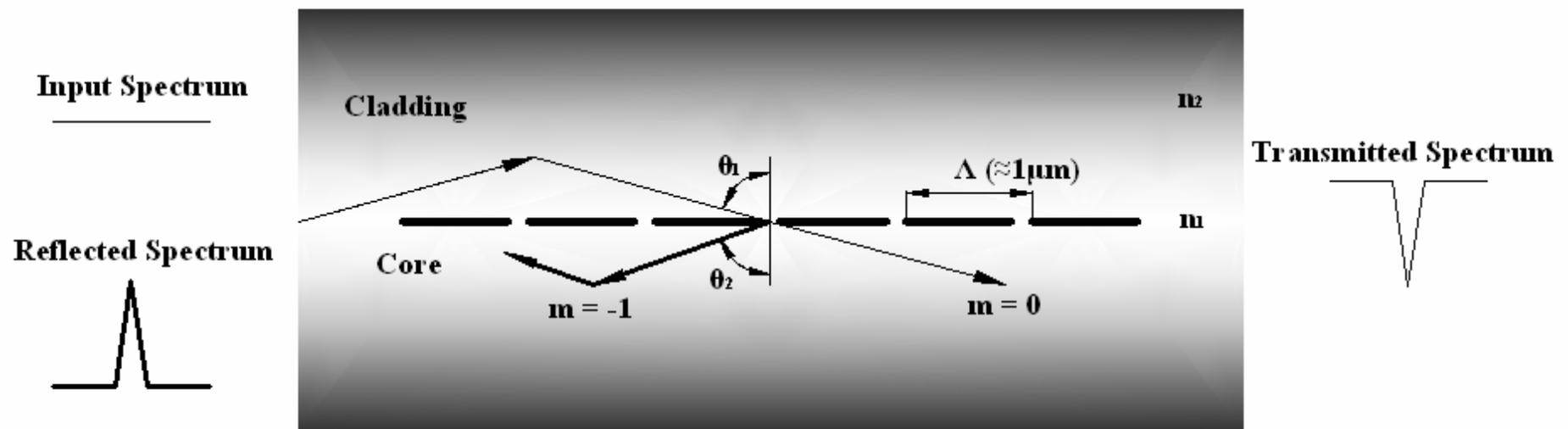


圖 2.4 短週期式光纖光柵原理示意圖

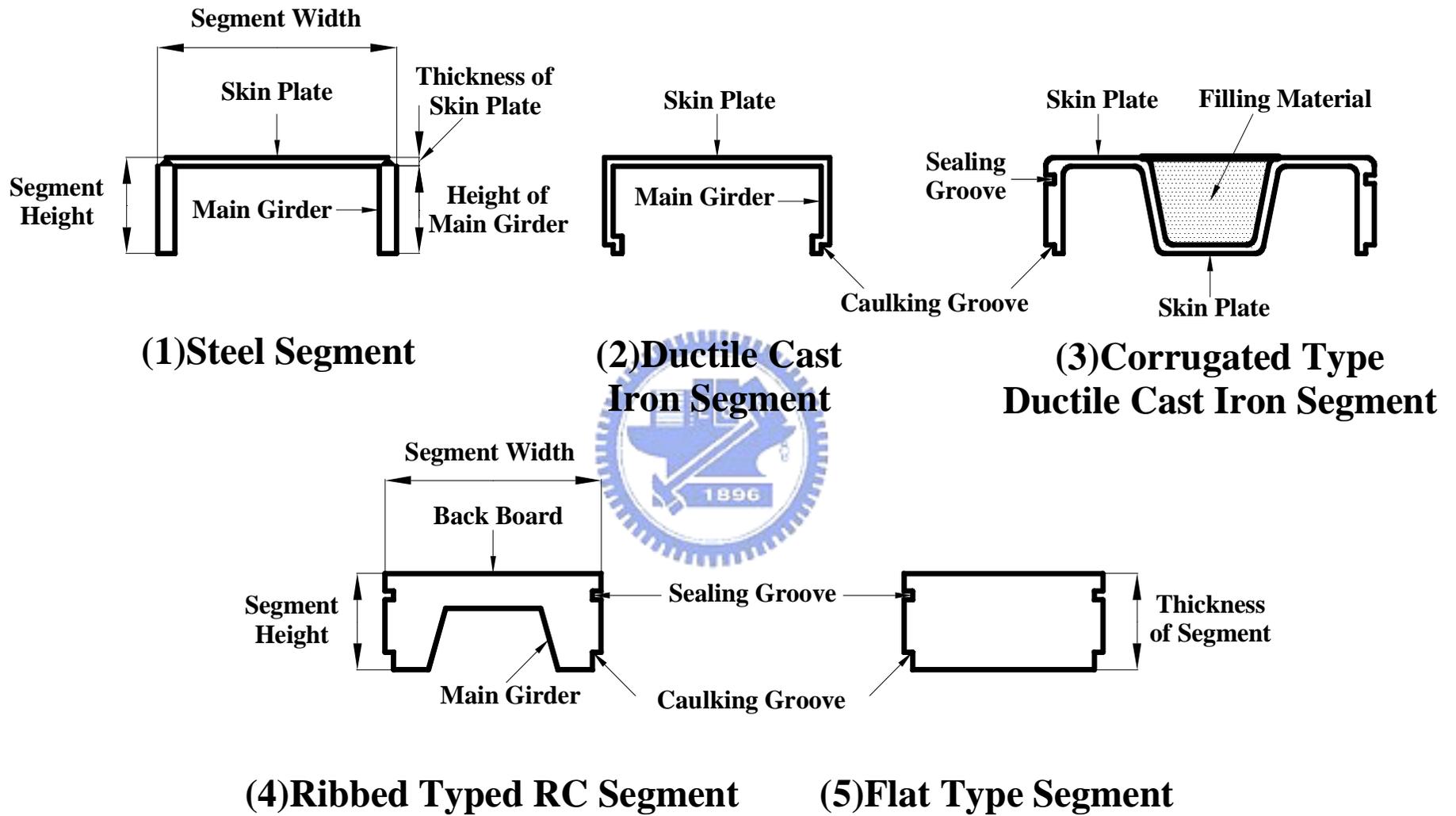


圖 2.5 環片斷面類型示意圖(改繪自 JSCE, 1996)

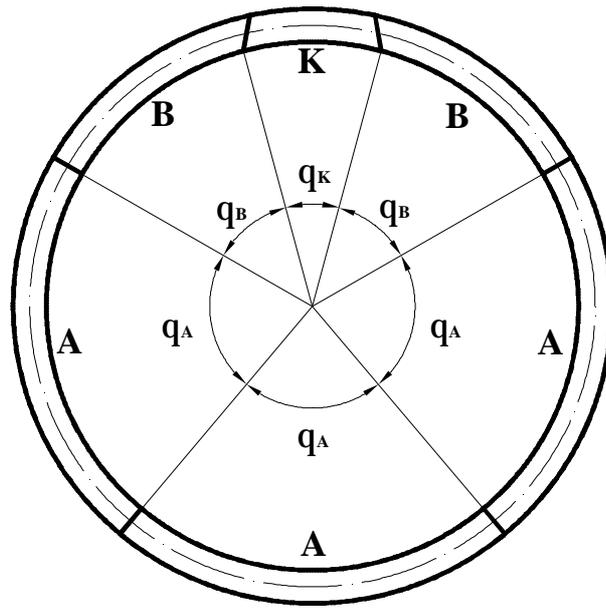


圖 2.6 隧道環片組合示意圖

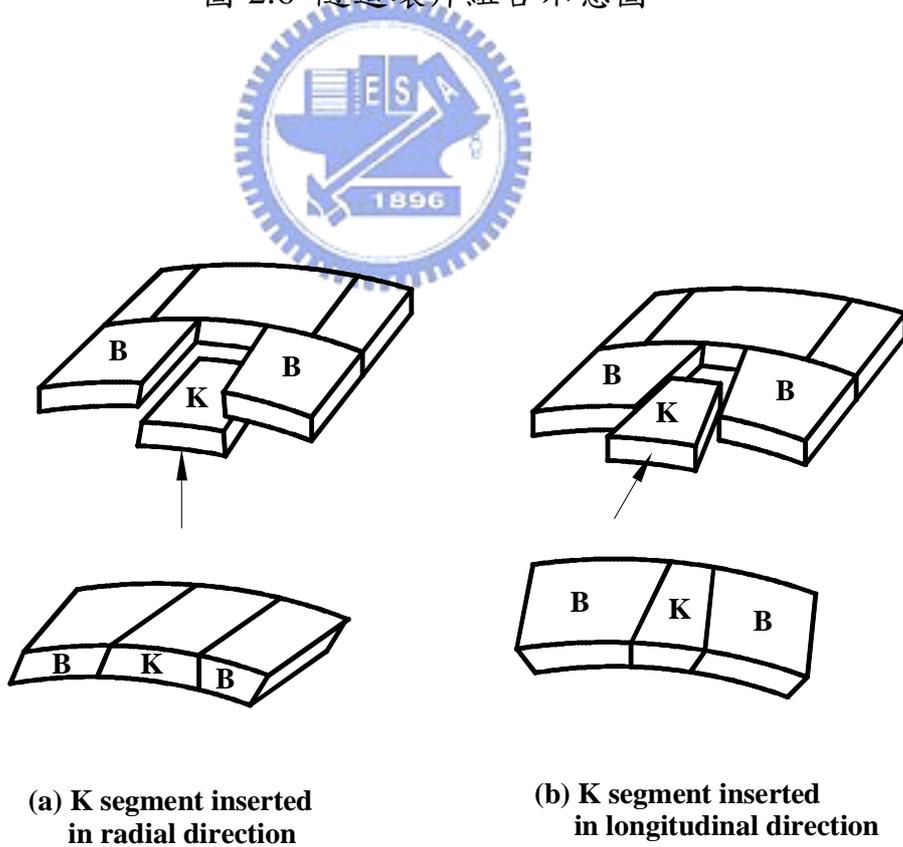


圖 2.7 K 型環片類型示意圖(改繪自 JSCE, 1996)

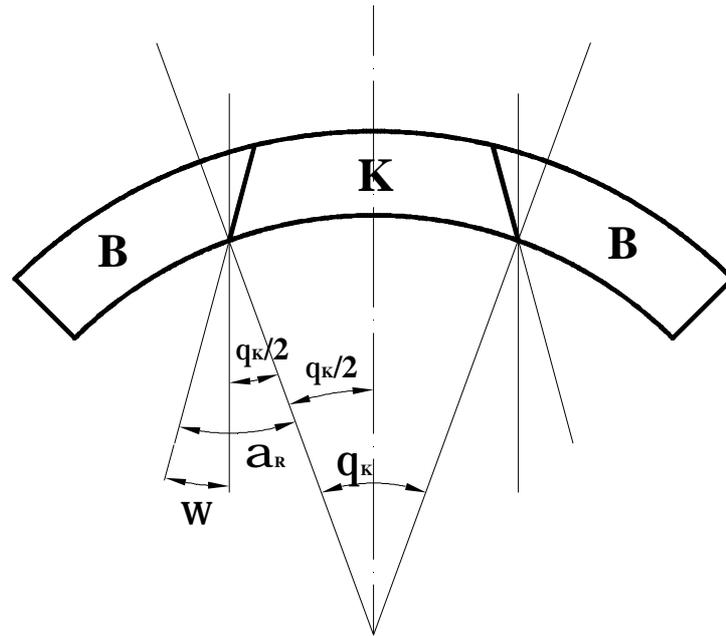


圖 2.8 K 型環片由徑向嵌入所產生之接縫角 α_R 示意圖(改繪自 JSCE, 1996)

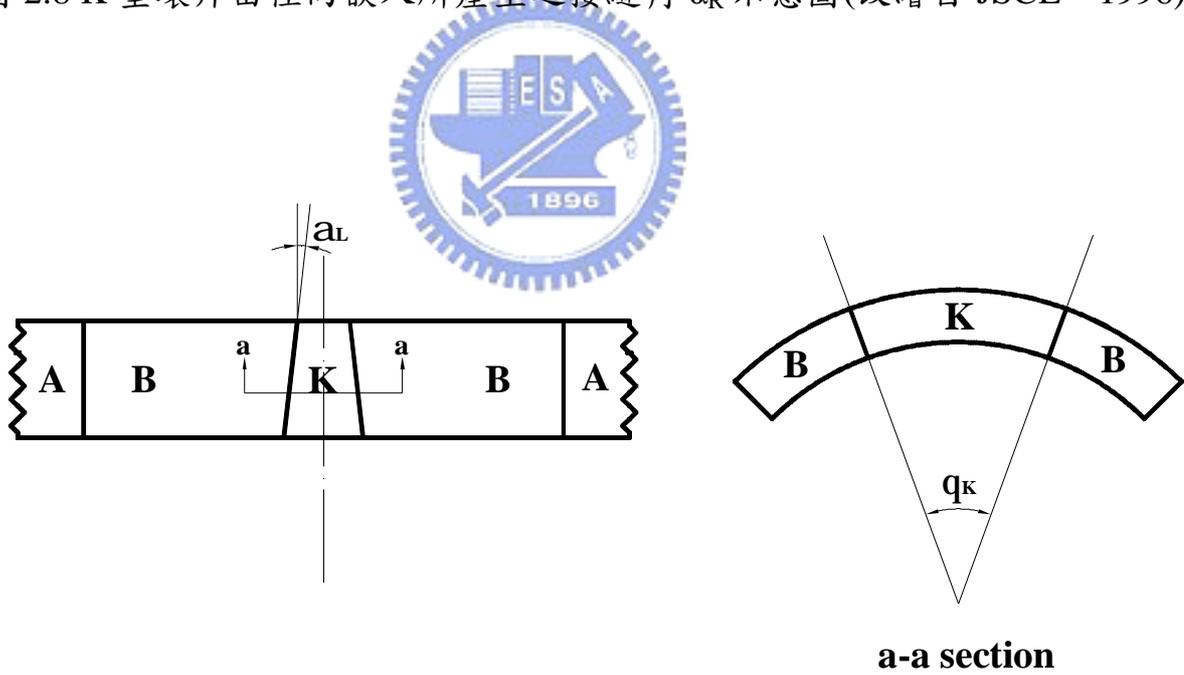


圖 2.9 K 型環片由縱向嵌入所產生之嵌入角 α_L 示意圖(改繪自 JSCE, 1996)

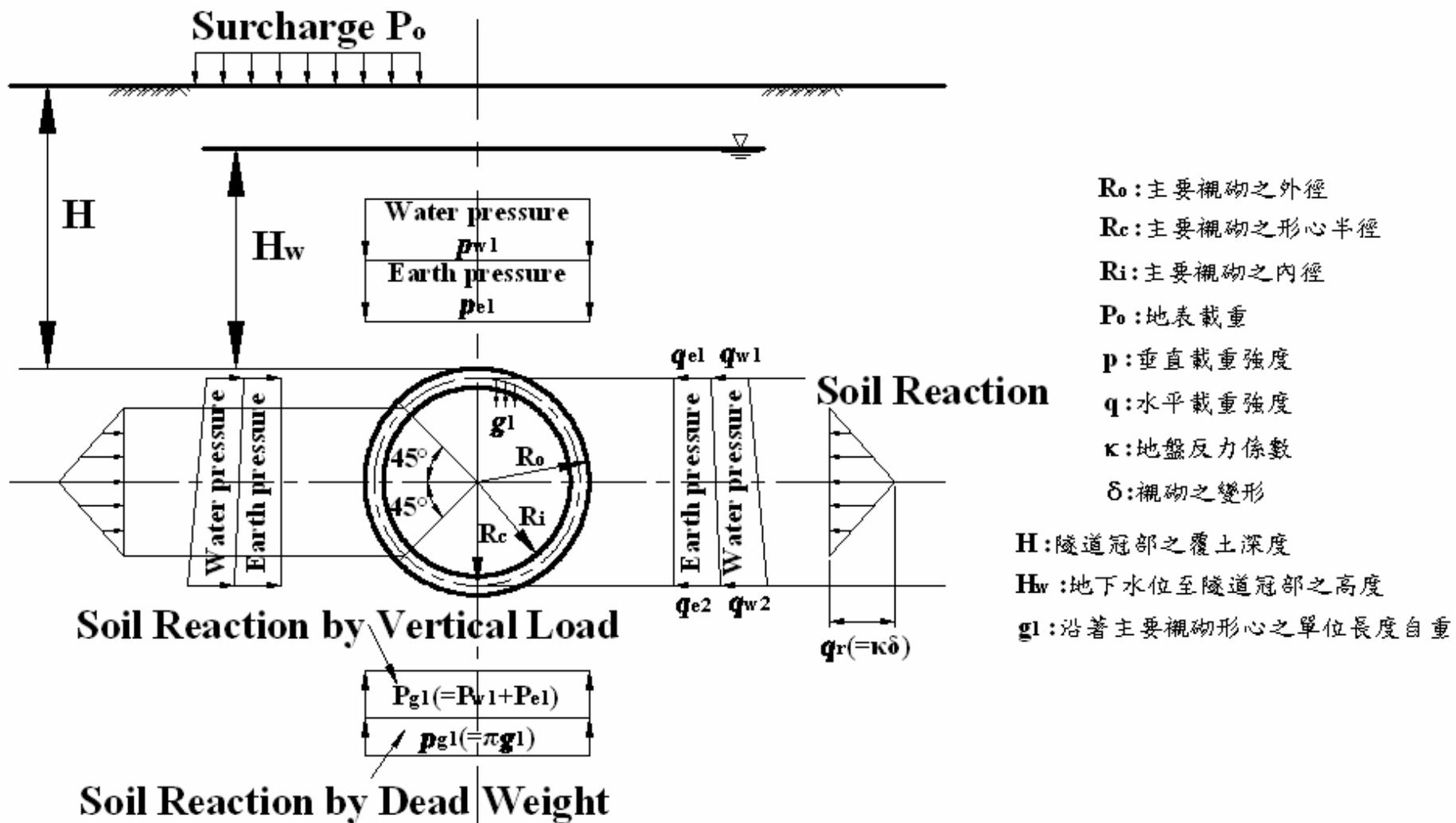


圖 2.10 日本慣用計算法以及修正慣用計算法之載重分佈形式(改繪自 JSCE, 1996)

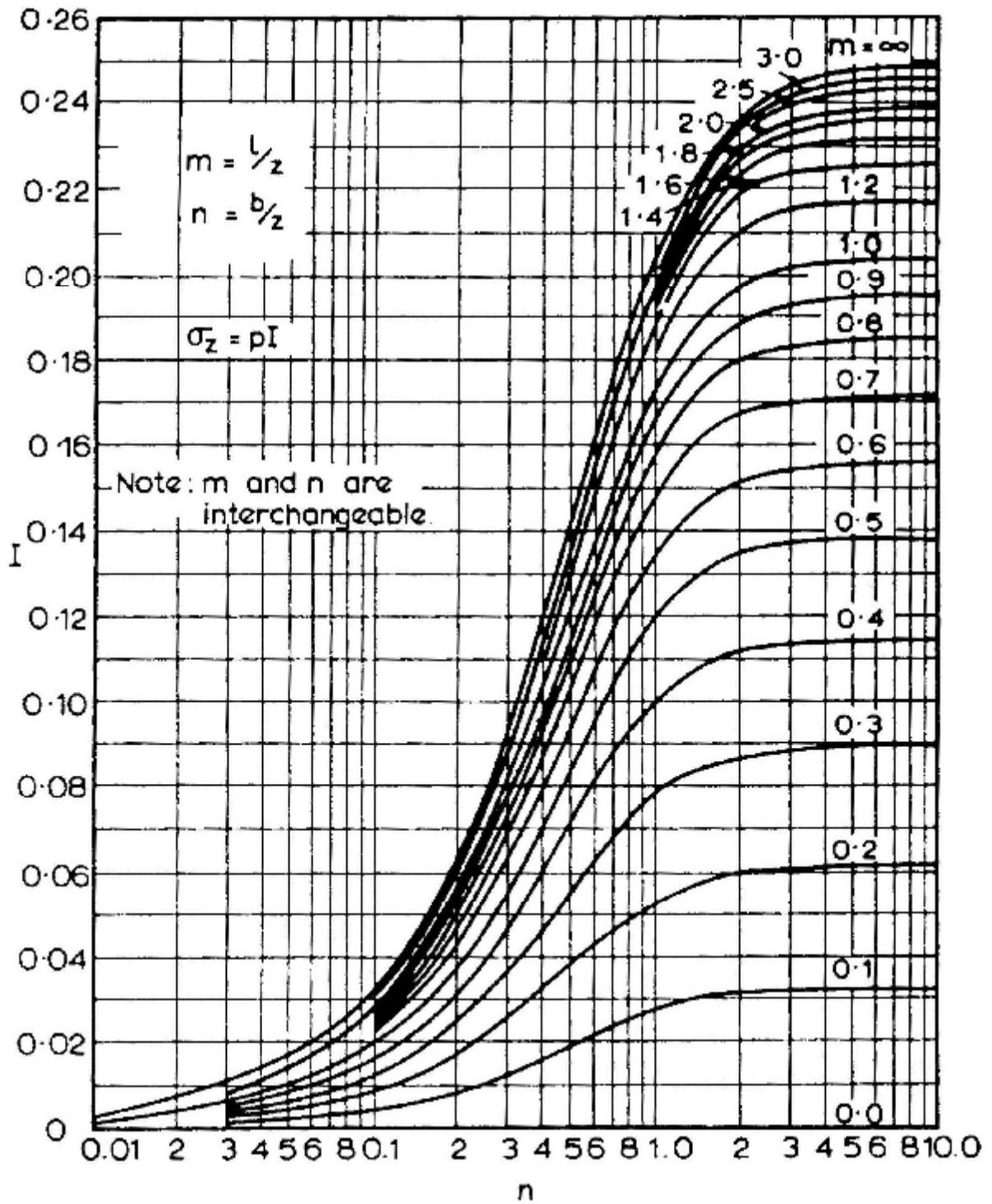


圖 2.11 矩形均佈載重下之應力增量影響係數(Fadum, 1948)

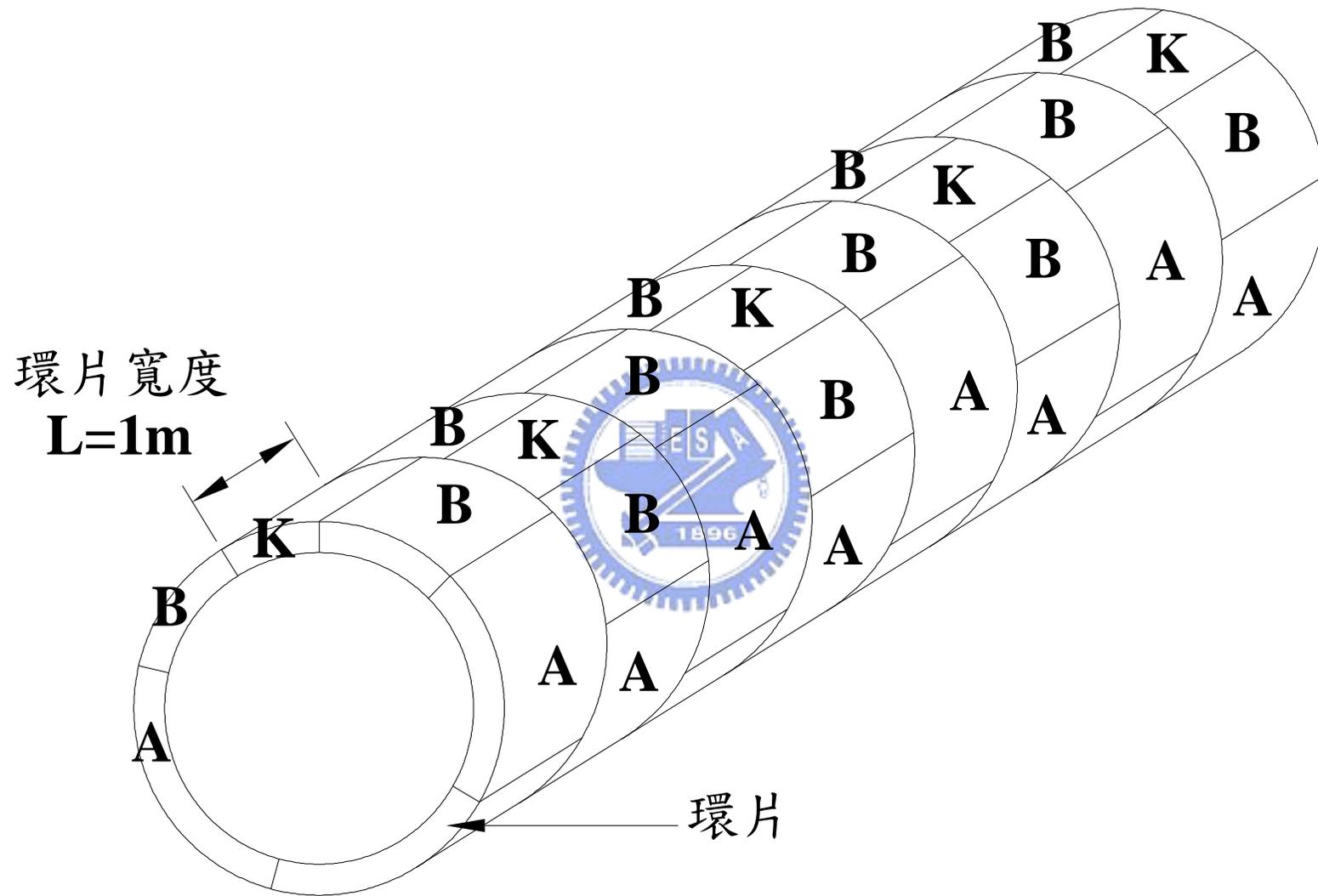


圖 2.12 堆疊環片隧道示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局，2006)

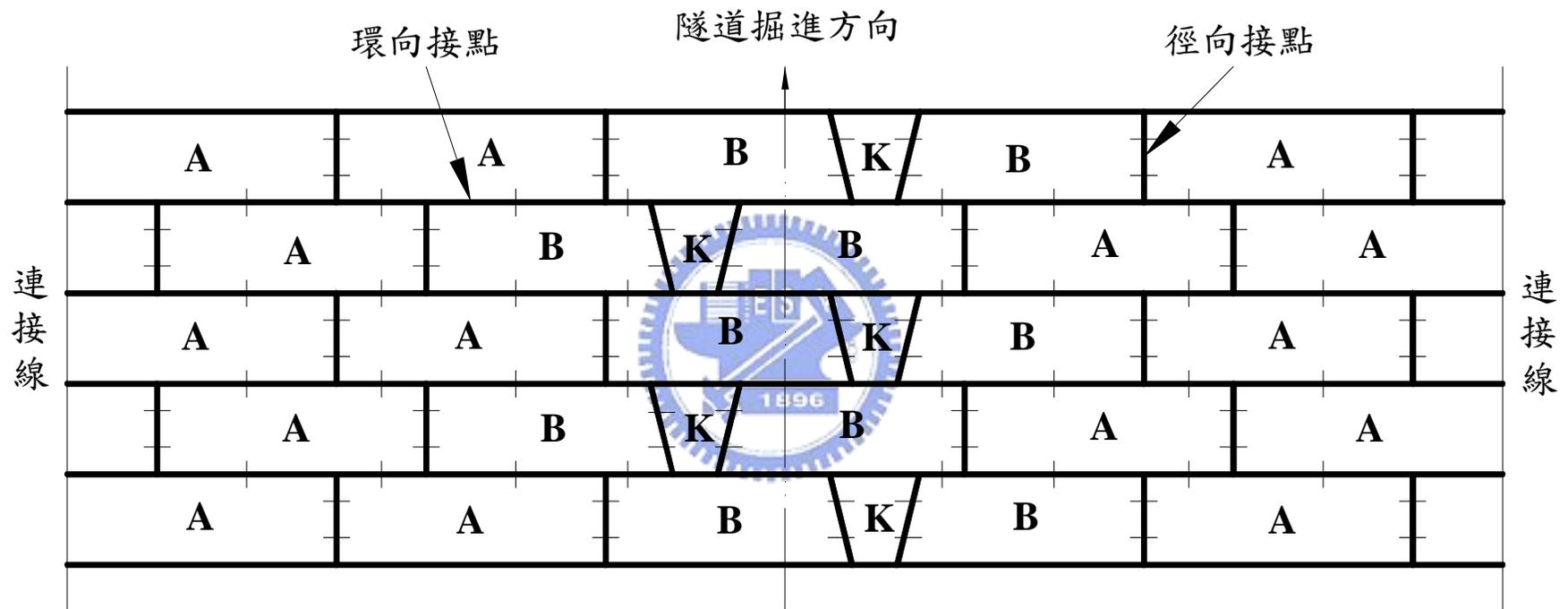


圖 2.13 潛盾隧道環片組立平面示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局，2006)

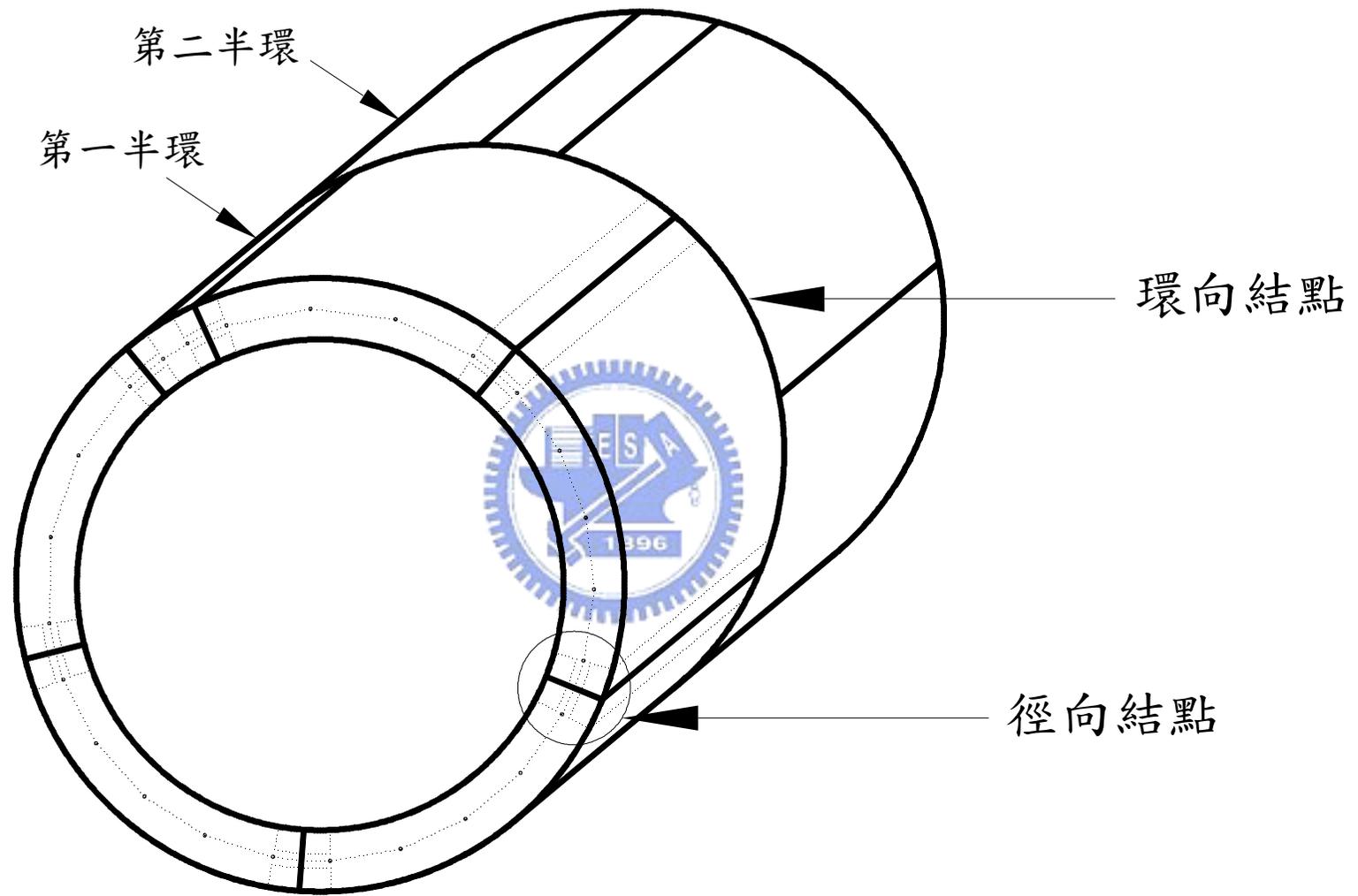


圖 2.14 隧道襯砌分析型式(改繪自臺北市政府捷運工程局，2006)

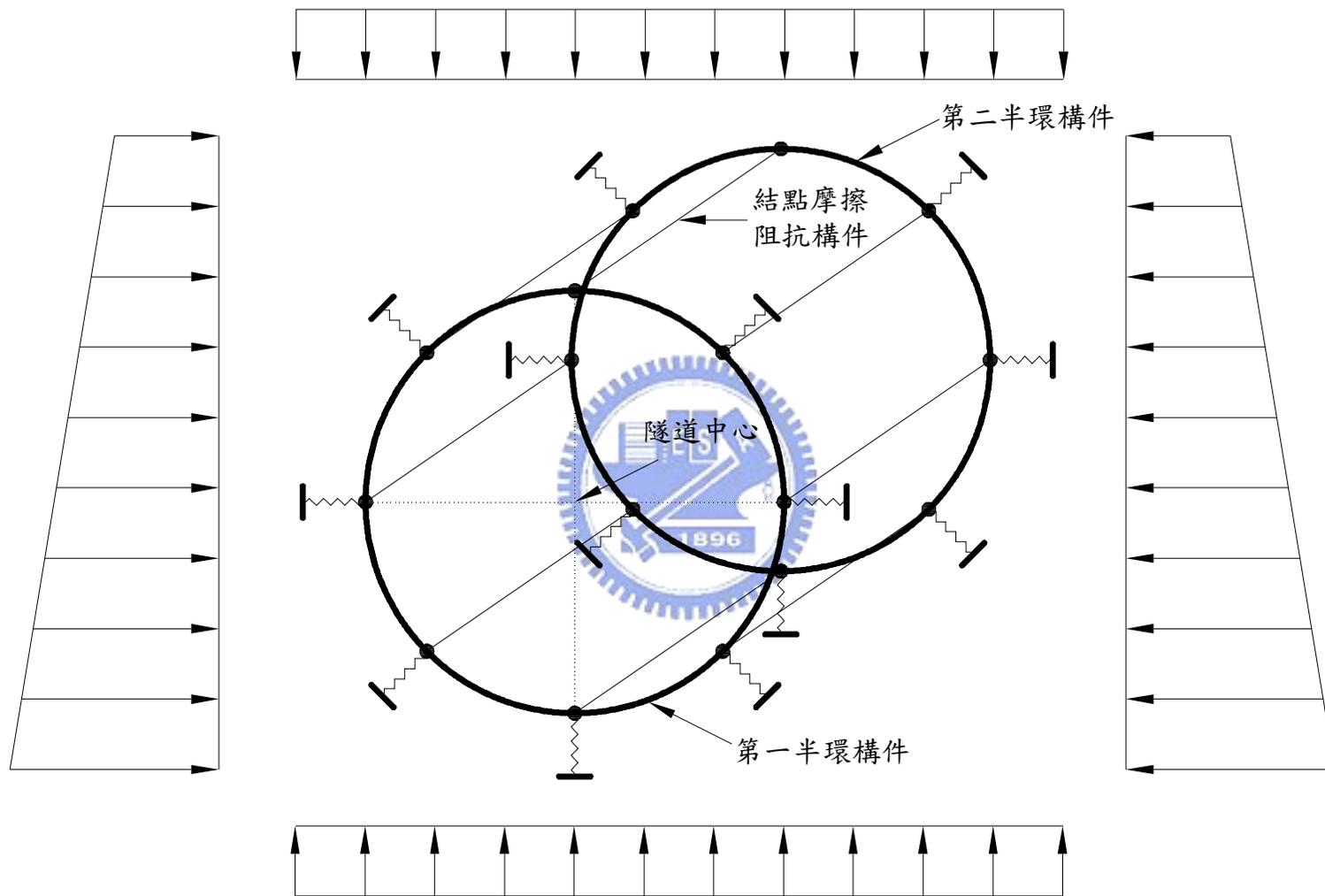


圖 2.15 隧道襯砌結構分析模式(長期或短期地層荷重情況)

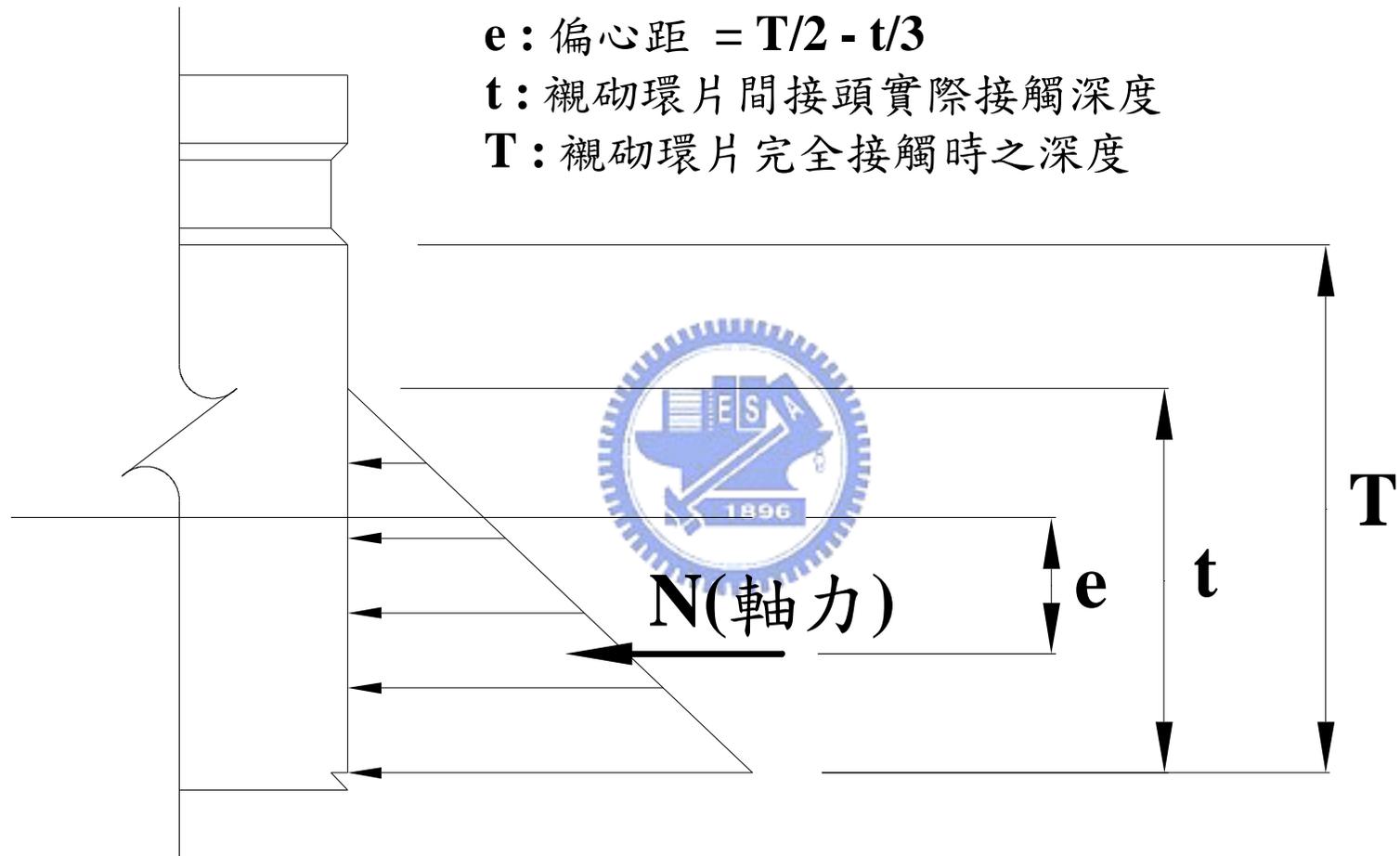


圖 2.16 片間接頭接觸深度與壓力分佈示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局，2006)

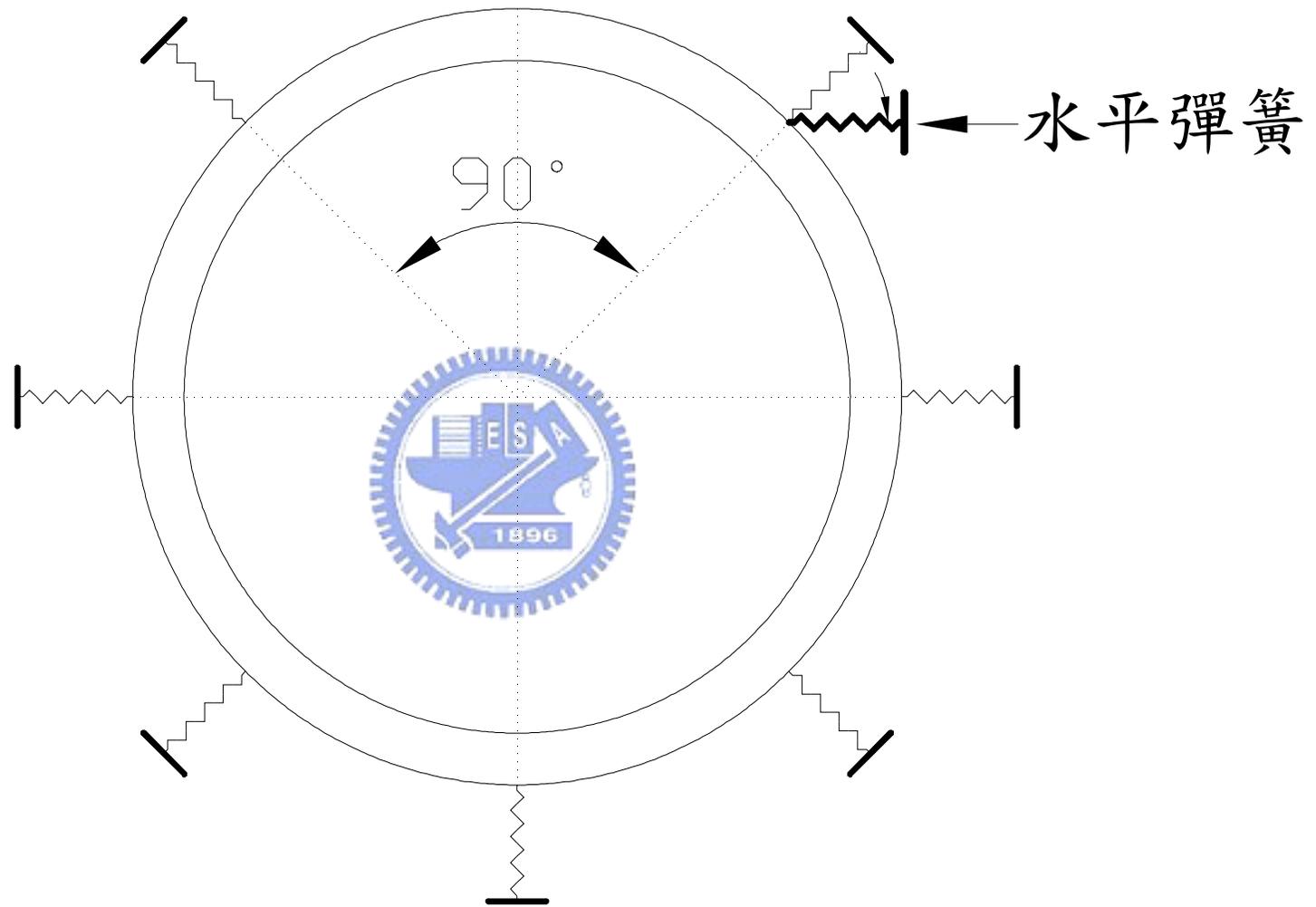


圖 2.17 隧道周圍之土壤彈簧示意圖(改繪自臺北市政府捷運工程局，2006)

表 2.1 側向土壓力係數(k_L)與地盤反力係數(κ)之關係(JSCE, 1996)

Design Method	Ground Condition	k_L	$\kappa(\text{kN/mm}^3)$	Approx. N-value
Effective Stress Method	Very Dense Sandy Soil	0.35~0.45	30~50	$30 \leq N$
	Medium Dense Sandy Soil	0.45~0.55	10~30	$15 \leq N < 30$
	Loose Sandy Soil	0.50~0.60	0~10	$N < 15$
	Hard Cohesive Soil	0.35~0.45	30~50	$25 \leq N$
	Stiff Cohesive Soil	0.45~0.55	10~30	$8 \leq N < 25$
	Medium Stiff Cohesive Soil	0.45~0.55	5~10	$4 \leq N < 8$
Total Stress Method	Medium Stiff Cohesive Soil	0.55~0.65	5~10	$4 \leq N < 8$
	Soft Cohesive Soil	0.65~0.75	0~5	$2 \leq N < 4$
	Very Soft Cohesive Soil	0.75~0.85	0	$N < 2$

表 2.2 襯砌材料之單位重(JSCE, 1996)

襯砌環片類型	Primary Lining			Secondary Lining	
	Concrete	Steel	Ductile Cast Iron	Plain Concrete	Reinforced Concrete
Unit Weight	26.0(kN/m ³)	78.5(kN/m ³)	72.5(kN/m ³)	23.5(kN/m ³)	25.0(kN/m ³)

第三章 光纖光柵黏著技術之研發

3.1 基本試驗設備簡介

從測試黏著劑的固結能力、光纖光柵感測器之預拉設備乃至光纖光柵感測器與接著劑之耐久性測試所需設備，簡單敘述如下：

1. POWER 3077 高性能瞬間接著劑

針對困難接著材質，對大部分塑膠、橡膠及金屬材料皆具有極強之接著強度，並具有耐衝擊及快速固定材質之特性，符合 Mil 美國軍用規 Type2 Class I 及 Class II，接著劑其餘特性如表 3.1 所示。

2. 353ND 熱固膠

353ND 光纖接著劑為美國 EPOXY Technology 公司所研發之產品，適用於光纖通訊元件的生產。353ND 分為 Part A 和 Part B 兩種熱固化環氧樹脂膠，使用時須以重量比 10:1(A:B)混合而成。對於多種溶劑和化學材料具有優良的抗性，適用於光纖、金屬、玻璃、陶瓷和塑膠。混合後的特性為耐用性佳、操作容易、皮膚過敏性低，固化時顏色從琥珀色變成深紅色。通過美國太空總署(NASA)的除氣(Outgassing)測試，獲准應用於太空飛行項目。

3. JA643 熱固膠

JA643 為高強度之高溫型環氧樹脂，有良好的加工性與穩定性，在 130°C 以上迅速反應成形，具有高衝擊強度與高接著強度。

4. E6000 防水膠

具有高抗電壓、防水、快乾和高強度特性。

5. AX-019 防水膠

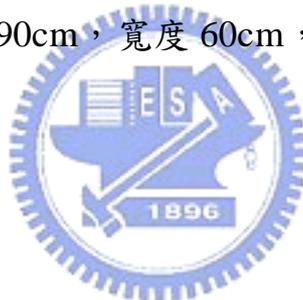
電子級高防水膠，對特殊 Hard coating 表面，強度極佳，耐溫 150°C。

6. 微調儀

微調儀如圖 3.1 所示，X 方向刻度為每格 0.5mm，微調刻度(環向刻度)為每格 0.01mm。

7. 金屬光學板

如圖 3.2 所示，長度 90cm，寬度 60cm，每一孔為 M6 螺絲孔，螺絲孔中心間距為 25mm。



8. 加熱盤

如圖 3.3 所示，金屬加熱板尺寸為 20cm×20cm，最高加熱溫度為 300°C。

9. 光纖光柵解讀儀

光纖光柵解讀儀為美國 MICRON OPTICS 公司所研發，機型為 sm125，如圖 3.4 所示，其最小量測精度為 1pm，適用光柵波長為 1520~1570nm。

10. 光纖光柵預拉設備

光纖光柵預拉設備包含鋁擠型滑軌和鋁製滑檯，如圖 3.5 所示。

11. 可程式恆溫恆濕試驗機

如圖 3.6 所示，其溫度範圍為-20~150°C，濕度範圍為 10~98%，溫度控

制精度為 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，濕度控制精度為 $\pm 3\%$ ，內箱尺寸為寬度 100cm×高度 100cm×深度 80cm。

3.2 光纖光柵/鋼筋接著劑握裹力測試

根據美國標準試驗法(ASTM)對接著劑(Adhesive)的定義為：一種能利用其對各種材料表面之附著力量，而使相同或不同的材料結合在一起之物質。為了測試何種接著劑能緊密結合光纖光柵與鋼筋，本試驗使用一種高性能瞬間接著劑(POWER3077 與催化劑 766)及兩種熱固膠(353ND 與 JA643)來測試。

3.2.1 試驗方法

先將長度 10cm 之七號鋼筋(直徑為 22mm)沿軸向切半，如圖 3.7 所示，再將微調儀和鋼筋固定於光學板上，如圖 3.8 所示。剪裁一條光纖，將光纖中間剝除被覆(coating)約 1cm 以模擬光柵，光纖兩端剝除被覆分別以接著劑固定於微調儀和鋼筋上，然後慢慢轉動微調儀直至光纖斷裂。

3.2.2 試驗結果

三種接著劑測試結果，光纖皆斷在中間剝除被覆之處，接著劑部份並無剝落之現象，證明三種接著劑能緊密結合光纖與鋼筋，其抗拉強度亦超過光纖之抗拉強度，故使用三種接著劑實際黏著光纖光柵與鋼筋，於混凝土蒸氣養護條件下，測試接著劑之耐久性與穩定性。

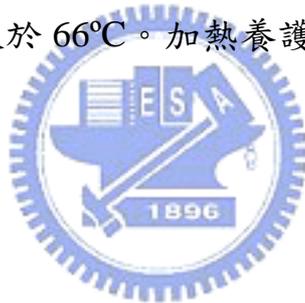
3.3 接著劑於模擬蒸氣養護條件下之測試

蒸氣養護原則依照行政院公共工程委員會制定之公共工程施工綱要規

範第 03390 章第 3.1.4 節加速養護(第四版，2006)規定如下：

1.由承包商提出經工程司核可後可使用高壓蒸氣、常壓蒸氣、加熱與溼治及其他加速達到至強度之養護方法。

2.若採用連續或分段加熱法進行養護，除工程司另行核可外，應依照下列方法為之。採用連續加熱法時，溫度升高速率不得超過 22°C/hr，採用分段加熱法時，連續兩段間之溫度差不得超過 20°C 且每段之加熱時間不得少於一小時，且最高溫度不得大於 66°C。加熱養護完成後混凝土之冷卻速率不得超過 11°C/hr。



3.3.1 試驗方法

先將一光纖光柵之光柵部分塗上 E6000 防水膠(軟膠)，此步驟是為了防止三種接著劑(硬膠)黏著到光柵，使光柵呈現多波峰反應。靜置 1 小時後，分別於距離光柵兩端 1cm 處剝除約 1cm 之被覆，並將光纖光柵與鋼筋固定於鋁擠型滑軌上施作預拉，如圖 3.9 所示，預拉量約為 3000pm。

俟光纖光柵反應之波長穩定後，將接著劑塗在光纖光柵剝除被覆處(第一階段上膠)。於接著劑完全固化後，再將接著劑塗滿整段鋼筋上的光纖光柵(第二階段上膠)，如圖 3.10 所示。

將完成之光纖光柵鋼筋感測器放入可程式恆溫恆濕試驗機，設定恆溫恆

濕試驗機之單一循環程式，以及光纖光柵解讀儀之自動記錄程式，記錄頻率為 1data/1min。

本試驗採用連續加熱之方法，試驗條件比施工網要規範嚴苛，藉由可程式恆溫恆濕試驗機來模擬現場蒸氣養護過程接著劑與光纖光柵之耐用強度。單一循環階段為 20 至 80°C，上升速率為 11°C/hr，到達 80°C 時維持 24 小時，之後同樣以速率為 11°C/hr 下降至 20°C，相對濕度為 98%。

3.3.2 試驗結果

自動記錄之波長值可畫成圖 3.11，由圖中可看到 POWER3077 於 80°C 時有略降的趨勢，所以選用 353ND 與 JA643 熱固膠實際灌鑄混凝土，如圖 3.12 所示，再一次模擬蒸氣養護流程。

第二次模擬為兩個循環，模擬結果如圖 3.13 所示，由圖中可看到 JA643 熱固膠於二個循環 80°C 時皆有略降的趨勢，故選用 353ND 熱固膠作為此次研究用接著劑。

3.4 光纖光柵與應變片之感測比較

藉由鋼筋拉伸試驗可瞭解光纖光柵之量測應變量上限，以及整個拉伸試驗過程中，鋼筋之受力趨勢。並且與應變片相互比較，測試光纖光柵所量測之反應是否穩定與靈敏。

3.4.1 試驗方法

利用光纖光柵黏貼於七號鋼筋溝槽，並將應變片固定於鋼筋中間段兩側

來比較光纖光柵與應變片之靈敏度及穩定性。試驗方法分為前置作業、預拉階段以及黏貼應變片，對整個鋼筋拉伸試驗做一個完整的說明。

1.前置作業

先將 50cm 長之七號鋼筋，鋼筋軸向中心銑一溝槽，如圖 3.14 所示。因為本試驗接著劑為需要加熱固化之 353ND，所以必須架設加熱盤，並升高預拉滑軌，如圖 3.15 所示。於加熱盤上放置一方形不鏽鋼板，使其延伸至滑軌上方，然後將 50cm 長之七號鋼筋放置於滑軌上方之不鏽鋼板。光纖光柵之光柵部分先塗上 E6000 防水膠之後，再於兩端套入直徑 3mm 之黃色保護線，並使光柵位於鋼筋中間段溝槽內，黃色保護線則分別置入鋼筋兩端 3mm 寬之溝槽內。



2.預拉階段

將光纖光柵兩端多餘段剝除被覆後，使用 POWER3077 固定於鋁製滑檯上。之後預拉約 3000pm 時，將 353ND 注入鋼筋溝槽，使其完全包覆鋼筋溝槽內之光纖光柵，並加熱至 150°C 使接著劑固結。俟接著劑完全固結後，關掉加熱盤，放置一段時間使其冷卻，並使用 AX-019 防水膠填滿鋼筋溝槽，如圖 3.16 所示。

3.黏貼應變片(Strain Gauge)

使用 POWER3077 將應變片黏貼於鋼筋兩側平面，如圖 3.17 所示，並塗上 AX-019 防水膠保護應變片，如圖 3.18 所示，50cm 長之光纖光柵鋼筋

應變計至此完成。

3.4.2 試驗結果

鋼筋拉伸試驗是參考 CNS560 和 CNS2111 來試驗，使用萬能材料試驗機(100 噸)上下夾住鋼筋兩端，如圖 3.19 所示，施以拉力直至鋼筋斷裂。鋼筋斷裂如圖 3.20 所示，可由其斷裂方式(脆斷)來判別試驗用之鋼筋應為高強度鋼筋。

藉由萬能材料試驗系統所記錄之拉拔力、時間與位移，和光纖光柵及應變片所量測之應變讀數，可畫出拉拔力與應變關係圖，如圖 3.21 所示，圖中可看出應變片於拉拔力約 0.2 噸時，應變即達 0.25% 並且損壞。光纖光柵的試驗反應比應變片穩定，對於整個拉伸試驗的記錄亦較完整，鋼筋破壞時的應變約為 0.35%。



3.5 光纖光柵預埋於鋼筋內之耐久性測試

光纖光柵與接著劑對於環境變化的耐久性一直是個重要的議題，本試驗將水加熱至 70°C 來模擬惡劣的環境，測試光纖光柵與接著劑是否能抵抗惡劣的環境。

3.5.1 試驗方法

本試驗特別於鋼筋溝槽內埋設一光纖光柵溫度感測器，藉以讓光纖光柵應變感測器扣除溫度之影響，使反應更趨近於實際變化。以下將試驗方法分為光纖光柵應變感測器、光纖光柵溫度感測器以及光纖光柵鋼筋感測器

來介紹。

1.光纖光柵應變感測器

先將 10cm 長之七號鋼筋中心銑一 3mm 溝槽，如圖 3.22 所示。再於光纖光柵之光柵部份塗上 E6000 防水膠靜置，然後將方形不鏽鋼板放置於加熱盤上，使其延伸至預拉滑軌上方。固定 10cm 之七號鋼筋於不鏽鋼板上，將光纖光柵兩端套入直徑 2mm 之黃色保護線，並使光柵位於鋼筋中間段溝槽內，黃色保護線則分別置入鋼筋兩端之溝槽內。

將光纖光柵兩端多餘段剝除被覆後，使用 POWER3077 固定於鋁製滑檯上，之後預拉約 3000pm 時，將 353ND 注入鋼筋溝槽，令其完全包覆鋼筋溝槽內之光纖光柵，並加熱至 150°C 使接著劑完全固化。



2.光纖光柵溫度感測器

先將直徑 1/8 inch 之尼龍管裁為長度 10cm，之後將光纖光柵穿入長度 25cm、直徑 2mm 之黃色保護線，直至光柵突出黃色保護線約 2cm。使用快乾膠固定光纖光柵與黃色保護線，然後將光纖光柵與黃色保護線一起穿入直徑 1/8 inch 之尼龍管，尼龍管一端使用 POWER3077 固定光纖光柵與黃色保護線，另一端以 AX-019 防水膠填滿尼龍管空隙，完成圖如圖 3.23 所示。

3.光纖光柵鋼筋感測器

將光纖光柵溫度感測器置入光纖光柵應變感測器之鋼筋溝槽中間段，使用 POWER3077 填入鋼筋溝槽至覆蓋光纖光柵溫度感測器為止，如圖 3.24

所示。最後使用 AX-019 防水膠填滿整段鋼筋溝槽即完成長度 10cm 之光纖光柵鋼筋感測器，如圖 3.25 所示。

3.5.2 試驗結果

將光纖光柵鋼筋感測器放入裝水八分滿之容器，置於加熱盤上以 70°C 連續加熱 14 天，每 10 分鐘自動記錄一個資料點，應變與時間之關係圖如圖 3.26 所示。由圖中可看出，經過 14 天後，光纖光柵鋼筋感測器應變量略下降約 40 $\mu\epsilon$ ，非常微小，可見光纖光柵與接著劑之耐久性良好。

3.6 光纖光柵預埋於隧道環片鋼筋內之施作

如何將光纖光柵緊密的黏貼於鋼筋內部，以及光纖光柵與接著劑是否能順利通過環境與施工的惡劣條件，是本論文及臺北捷運計畫最重要的關鍵點。早期電子式感測器甚至 SOFO 光纖感測器皆為把感測器以軟鐵絲或束帶固定於主鋼筋表面，此作法容易造成混凝土澆置過程中，因震動棒攪拌碰觸而使感測器毀損，且其所量測之讀數並不能完全代表鋼筋本身所受之應力變化情形。所以本研究自行研發黏貼技術，將光纖光柵直接內埋於鋼筋中心位置。

經過 3.2 節與 3.3 節的試驗，最終以 353ND 作為光纖光柵內埋於鋼筋之實驗用接著劑。其最大的優點為溫度 150°C 時，僅需 1 分鐘即能使接著劑完全固化，並且緊密結合光纖光柵與鋼筋，此為日後需要大量監測時，加快感測器製作速度的最大優勢。

環片之主鋼筋有長短之分，敘述如下：

- (1)長鋼筋：鋼筋中性軸曲率半徑為 2980mm，光纖光柵黏貼位置為鋼筋中心點和分別距離鋼筋中心點 900mm 之兩點，共計 3 點。
- (2)短鋼筋：鋼筋中性軸曲率半徑為 2857mm，光纖光柵黏貼位置為鋼筋中心點和分別距離鋼筋中心點 800mm 之兩點，共計 3 點。

本試驗方法以短鋼筋為例，並且分為前置作業、預拉階段以及光纖光柵溫度感測器製作三部分說明。

1.前置作業

先將臺北捷運 CR580A 區段標工程用之七號鋼筋，鋼筋軸向由表面銑一 4mm 寬之溝槽至中心，如圖 3.27 所示。再取三根光纖光柵，在光柵部分塗上 E6000 防水膠靜置一小時。一小時後將三根光纖光柵熔接成串，並使用 POWER3077 固定透明熱縮套管兩端，光柵與光柵的距離約為 800mm，串接之光纖光柵兩端預留 550mm 與長度 3m、直徑 3mm 之黃色保護線熔接，如圖 3.28 所示。

2.預拉階段

將銑好溝槽之短鋼筋置於加熱盤上，如圖 3.29 所示，之後將串接好的光纖光柵放入鋼筋溝槽內。預拉時，先將左端光柵與中間段光柵之間的被覆剝除，使用 POWER3077 固定於鋼筋溝槽內，分別預拉左端光柵、中間段光柵與右端光柵，預拉量約為 2000~3000 μ m，預拉後以 353ND 固化光柵

與其周圍部份。

3.光纖光柵溫度感測器

先將直徑 1/8 inch 之尼龍管裁為長度 10cm，之後將光纖光柵穿入長度 25cm、直徑 2mm 之黃色保護線，直至光柵突出黃色保護線約 2cm。使用快乾膠固定光纖光柵與黃色保護線，然後將光纖光柵與黃色保護線一起穿入直徑 1/8 inch 之尼龍管，尼龍管一端使用 POWER3077 固定光纖光柵與黃色保護線，另一端以 AX-019 防水膠填滿尼龍管空隙。完成後，剪裁一段長度 3m、直徑 3mm 之黃色保護線當做延長段，並與光纖光柵溫度感測器熔接。

將光纖光柵溫度感測器置於中間段光柵與右端光柵之間，使用 POWER3077 覆蓋鋼筋溝槽內之光纖與光纖光柵溫度感測器，然後使用 AX-019 防水膠填滿鋼筋溝槽即完成光纖光柵鋼筋應變計之製作。

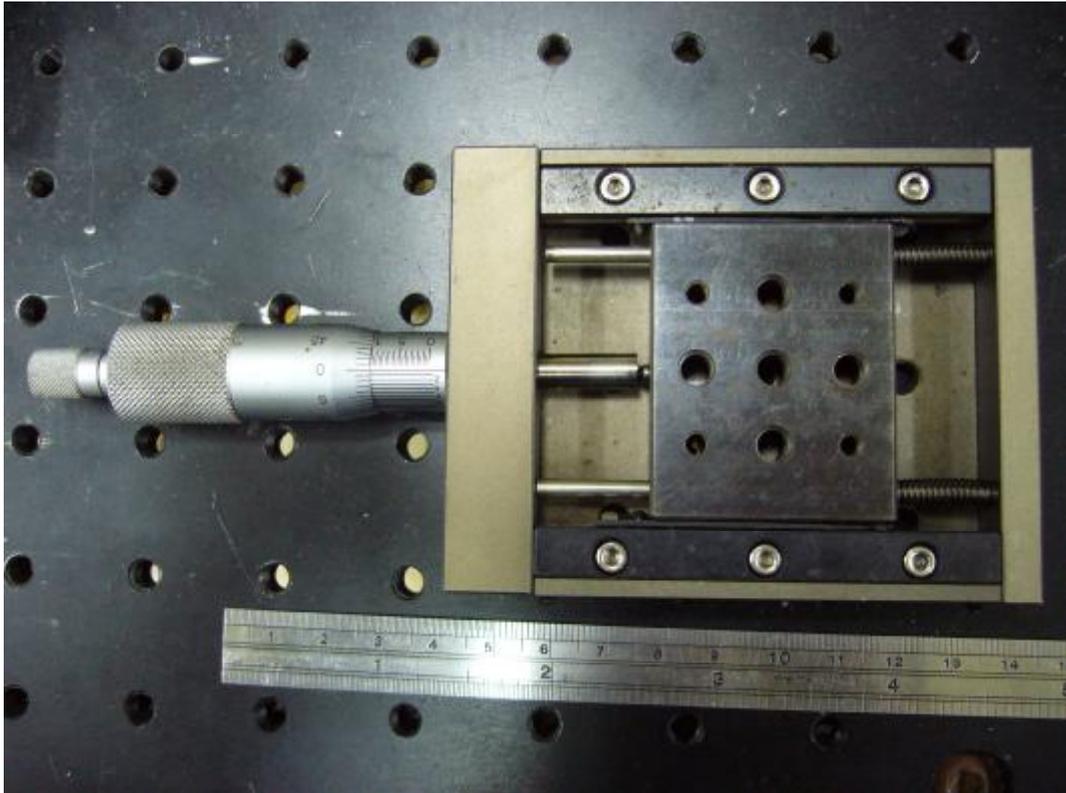


圖 3.1 微調儀



圖 3.2 長 90cm×寬 60cm 之光學板



圖 3.3 加熱盤



圖 3.4 光纖光柵解讀儀

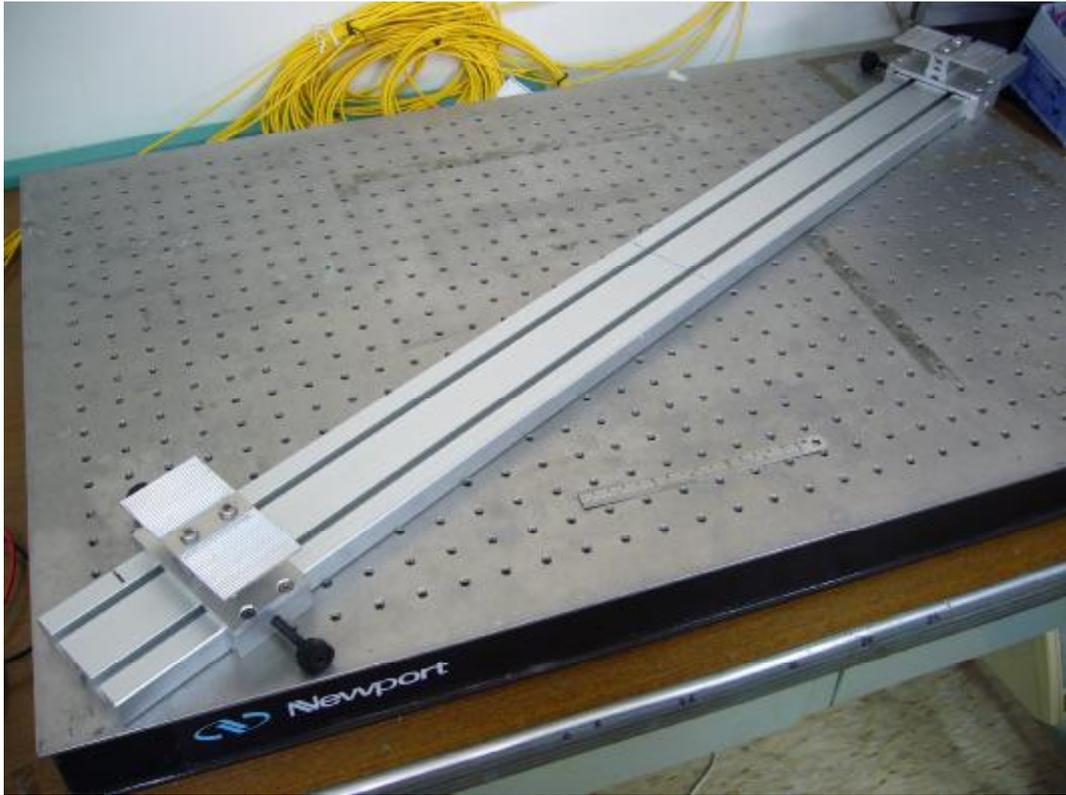


圖 3.5 光纖光柵預拉設備



圖 3.6 可程式恆溫恆濕試驗機



圖 3.7 長度 10cm 之七號鋼筋沿軸向切半



圖 3.8 接著劑測試之儀器架設圖

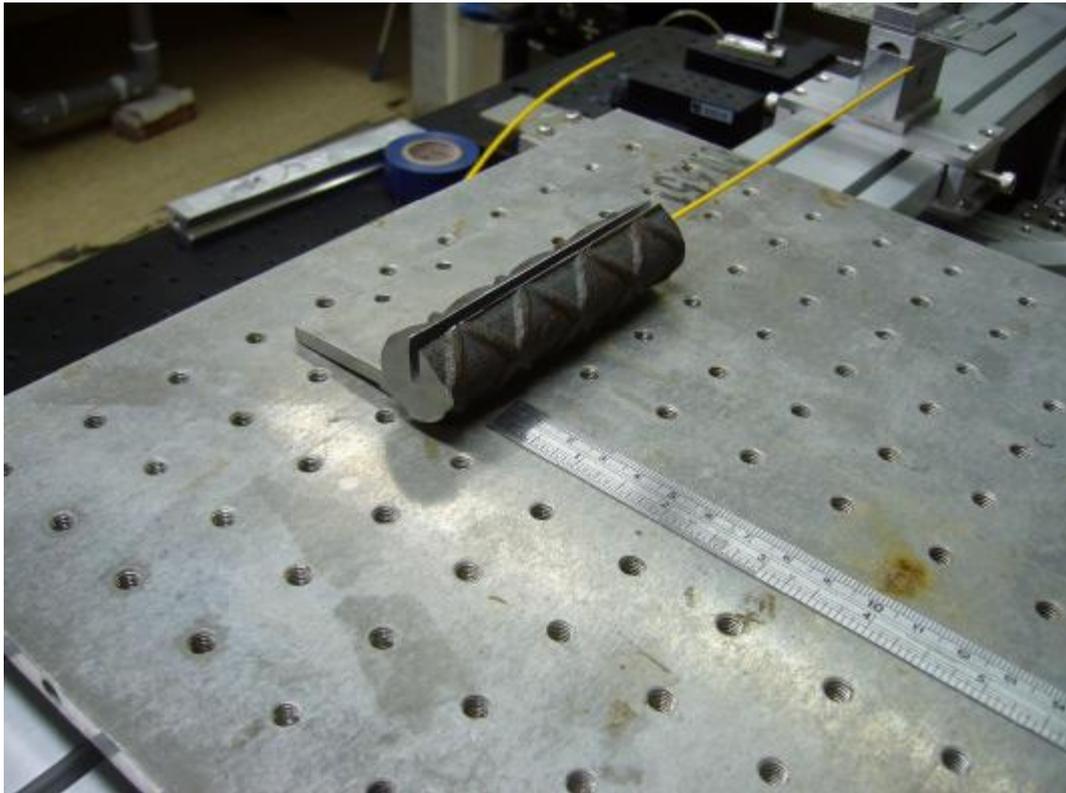


圖 3.9 長度 10cm 之七號鋼筋預拉架設圖

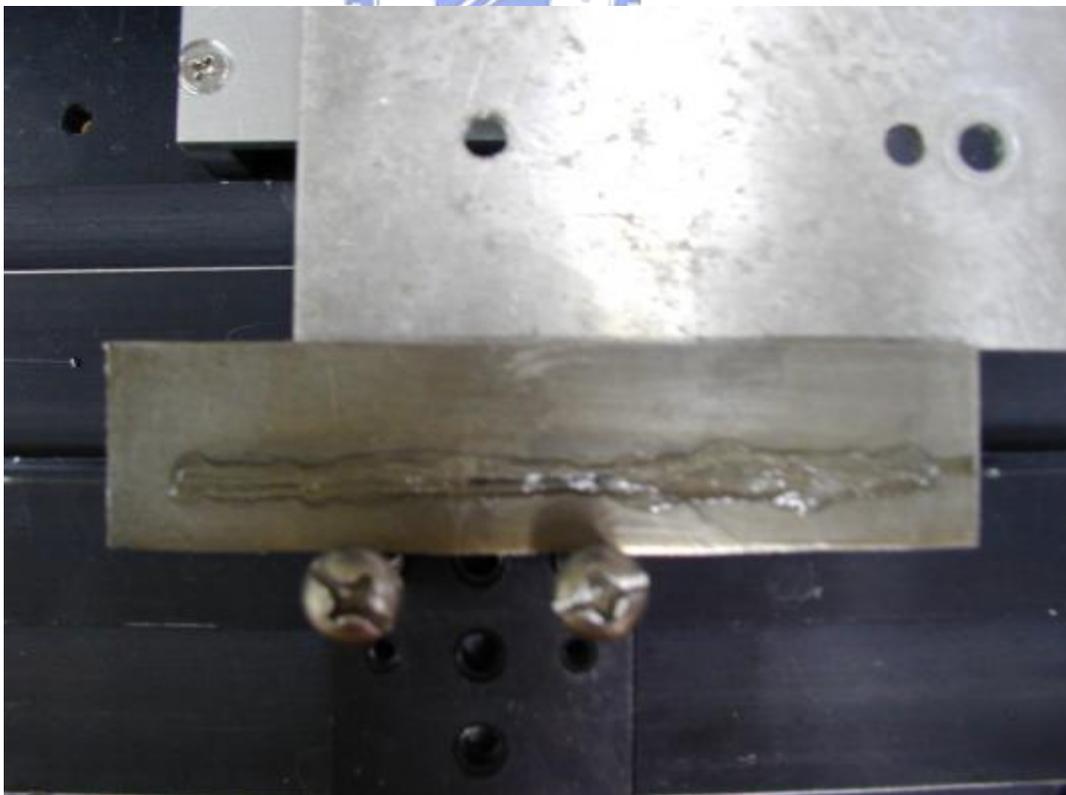


圖 3.10 硬膠塗滿剝除披覆之光纖與光柵部份

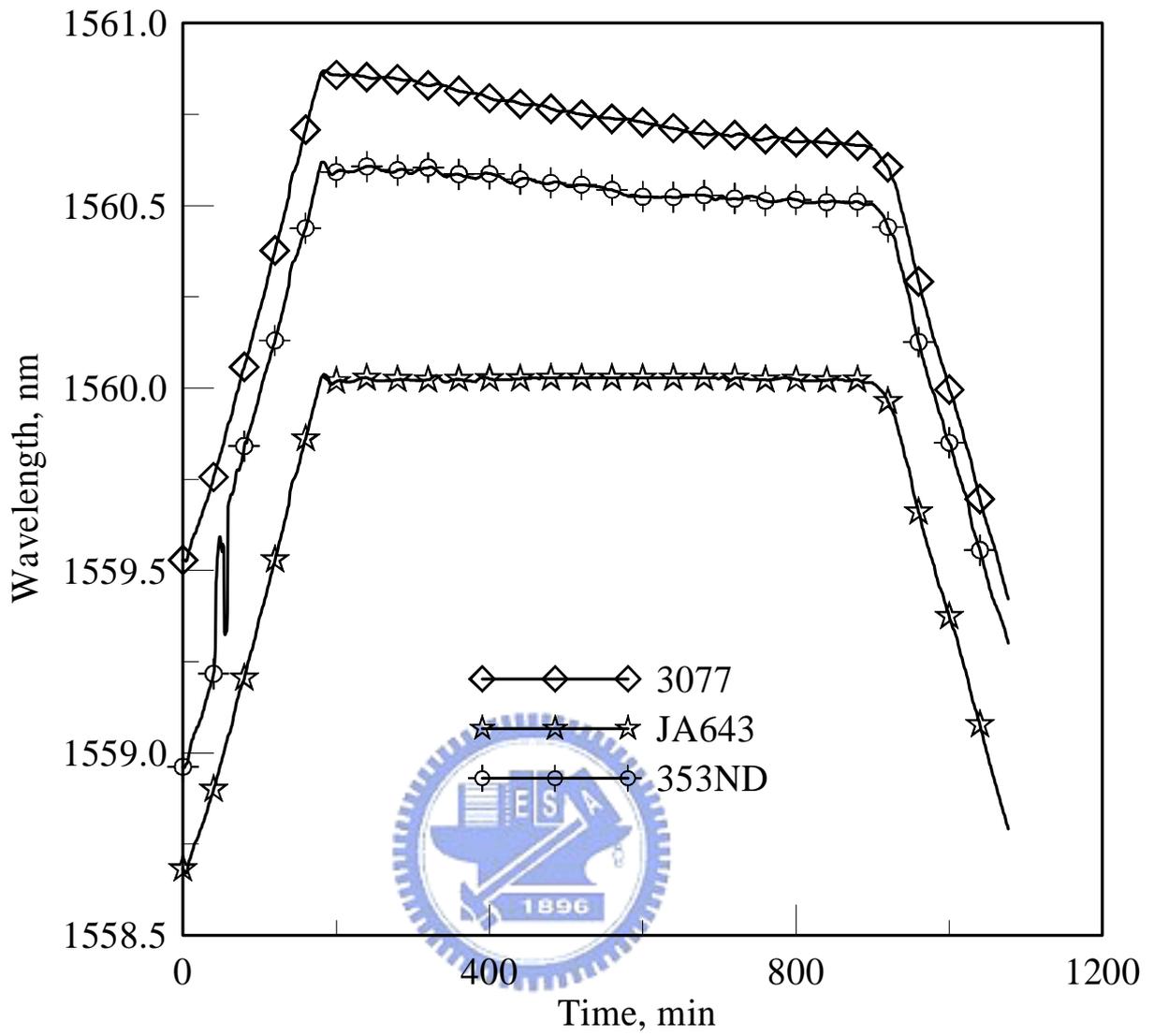
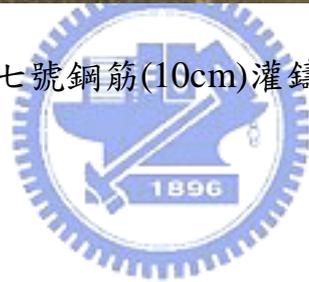


圖 3.11 三種接著劑模擬蒸氣養護結果



圖 3.12 七號鋼筋(10cm)灌鑄成混凝土圓柱



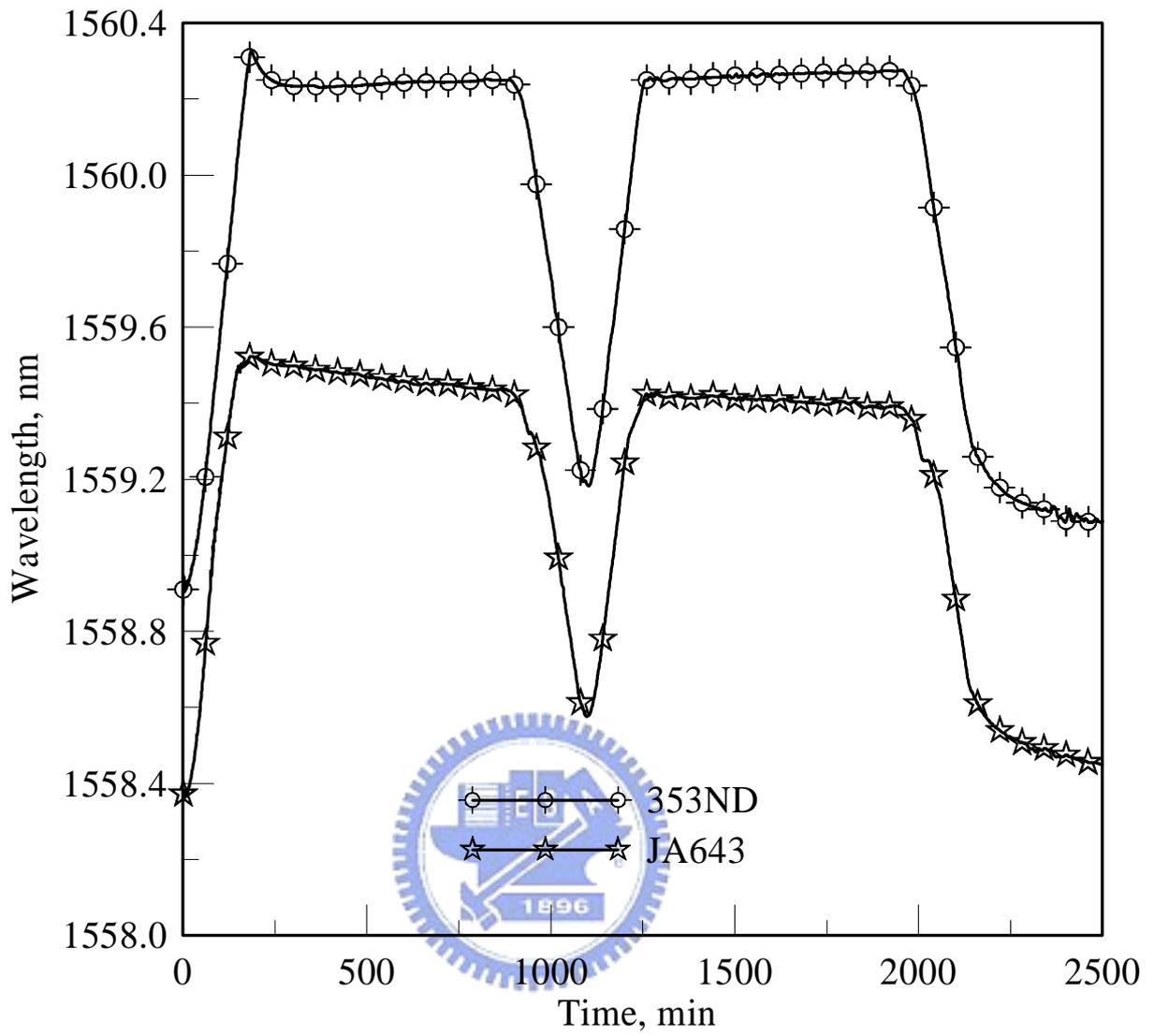


圖 3.13 兩種熱固膠使用混凝土灌鑄模擬蒸氣養護結果

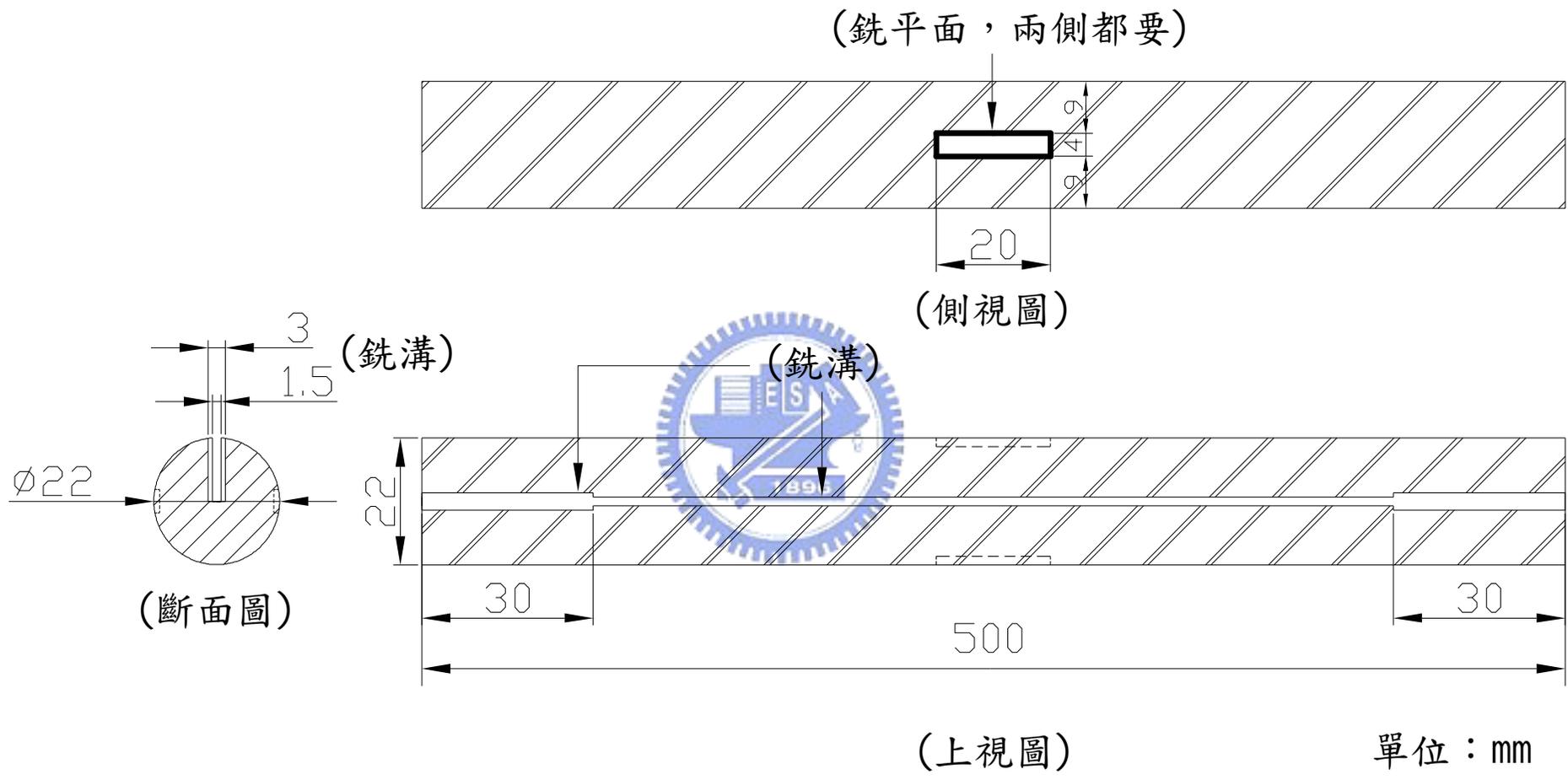


圖 3.14 七號鋼筋溝槽尺寸示意圖

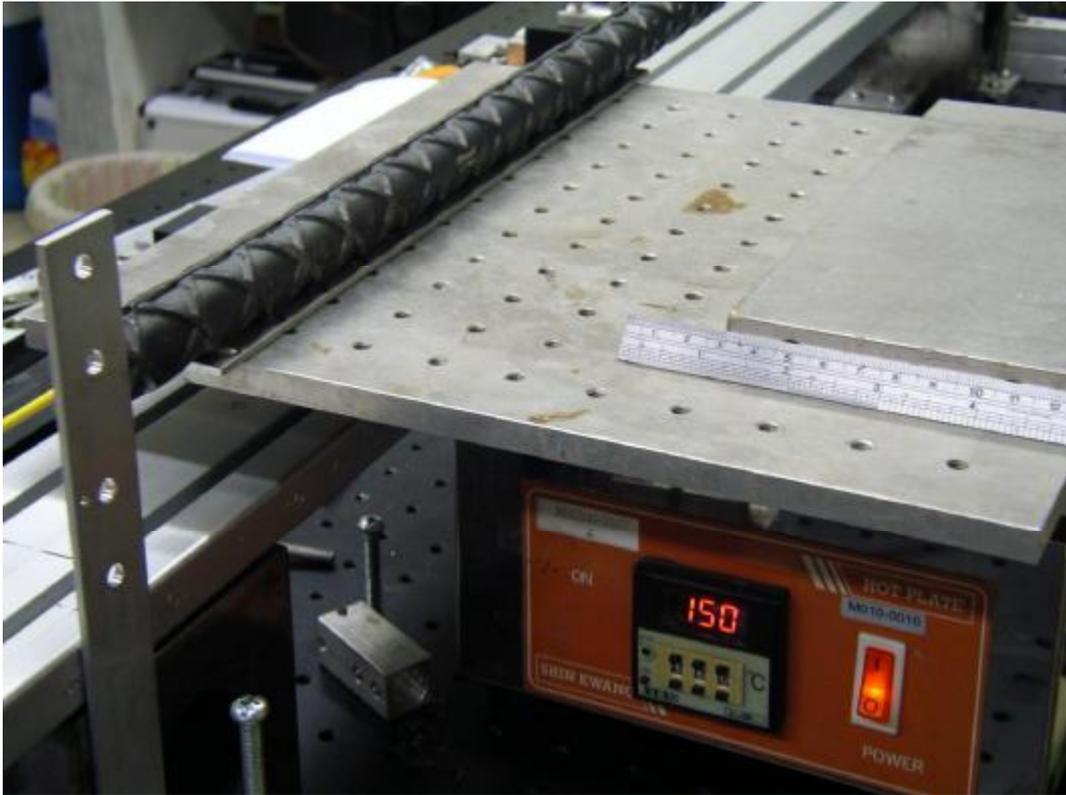


圖 3.15 50cm 鋼筋預拉架設圖

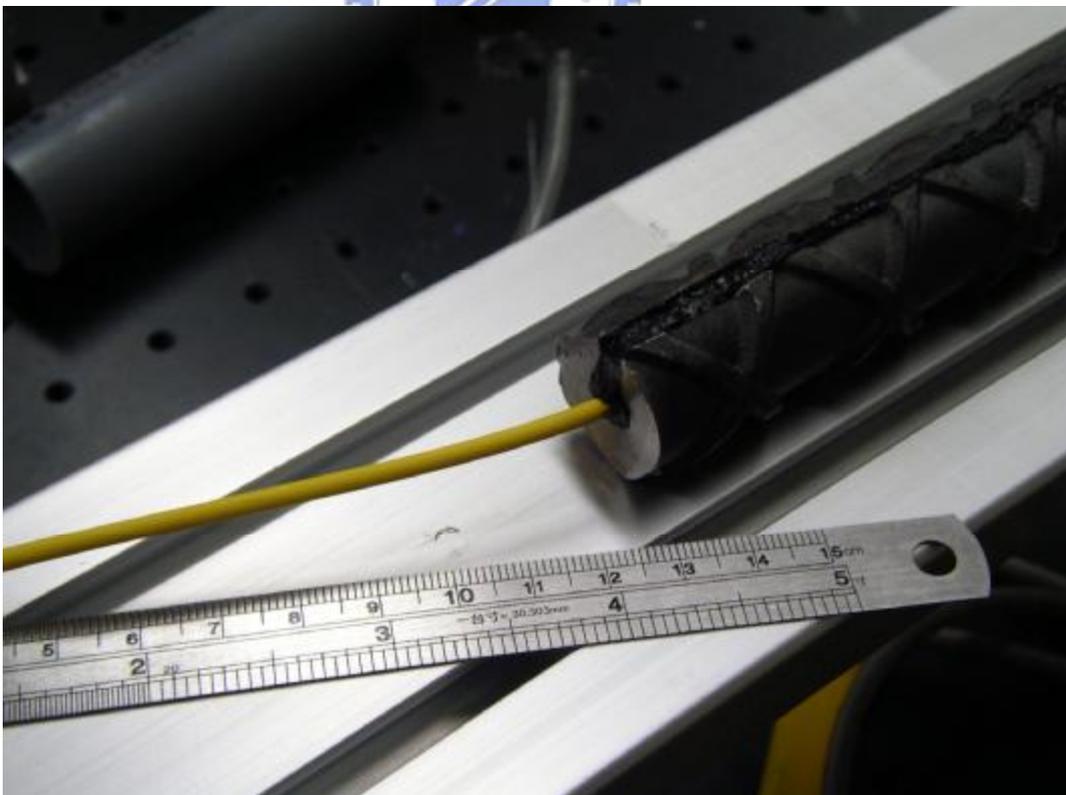


圖 3.16 使用 AX-019 防水膠填滿鋼筋溝槽



圖 3.17 於鋼筋兩側黏上應變片



圖 3.18 使用 AX-019 防水膠保護應變片

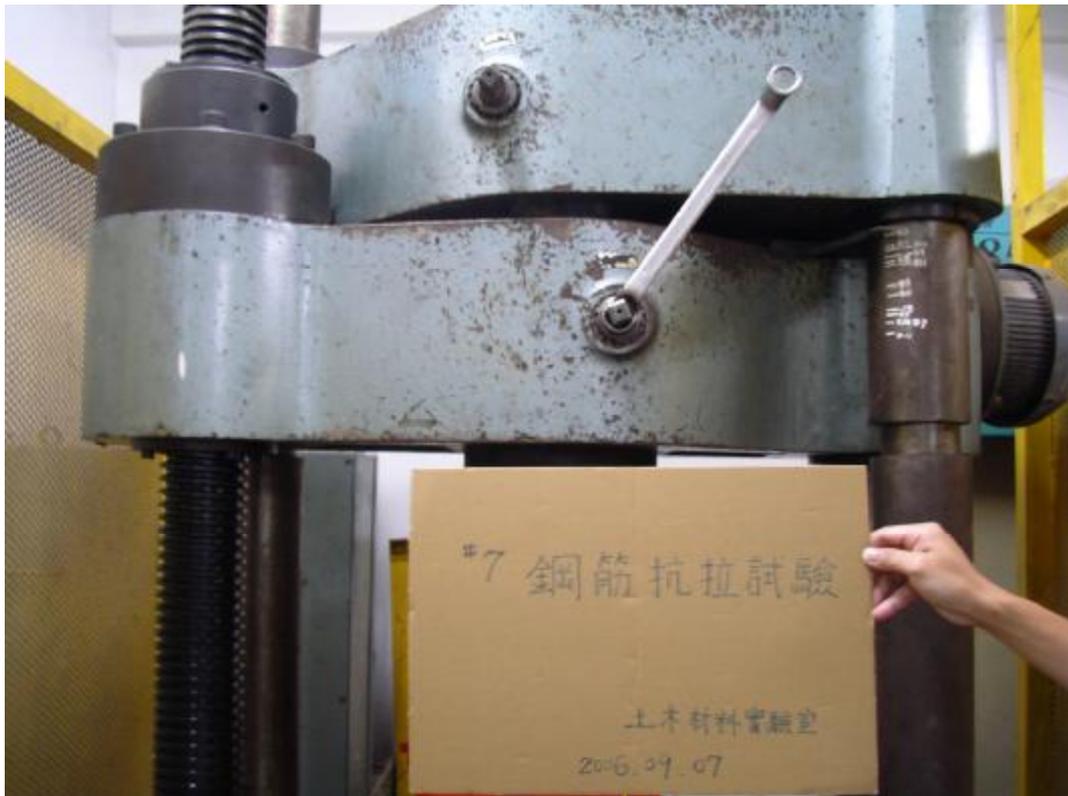


圖 3.19 萬能材料試驗機(100 噸)



圖 3.20 鋼筋拉伸試驗結果

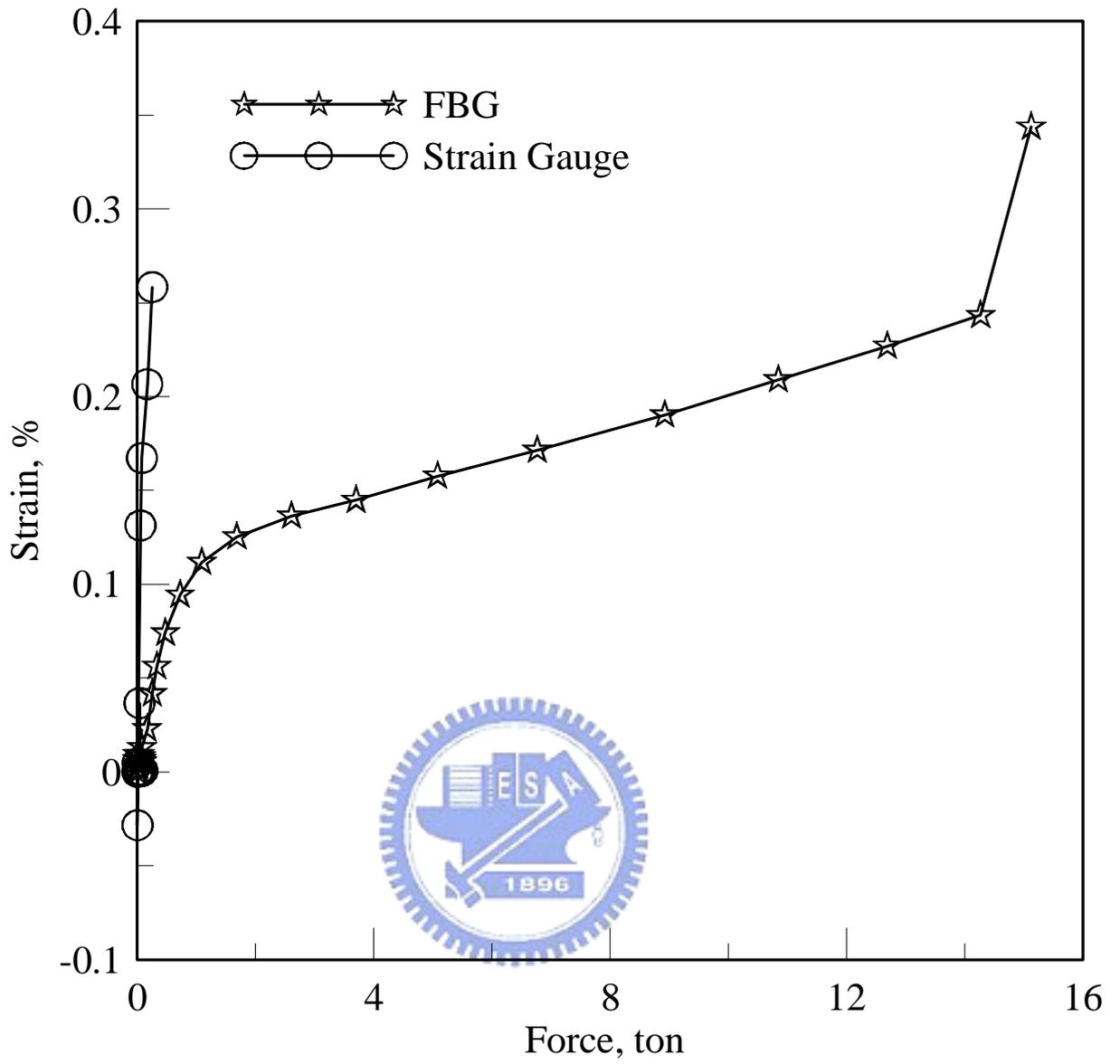


圖 3.21 鋼筋拉伸試驗中光纖光柵與應變片之比較



圖 3.22 長度 10cm 之七號鋼筋沿軸向銑一溝槽

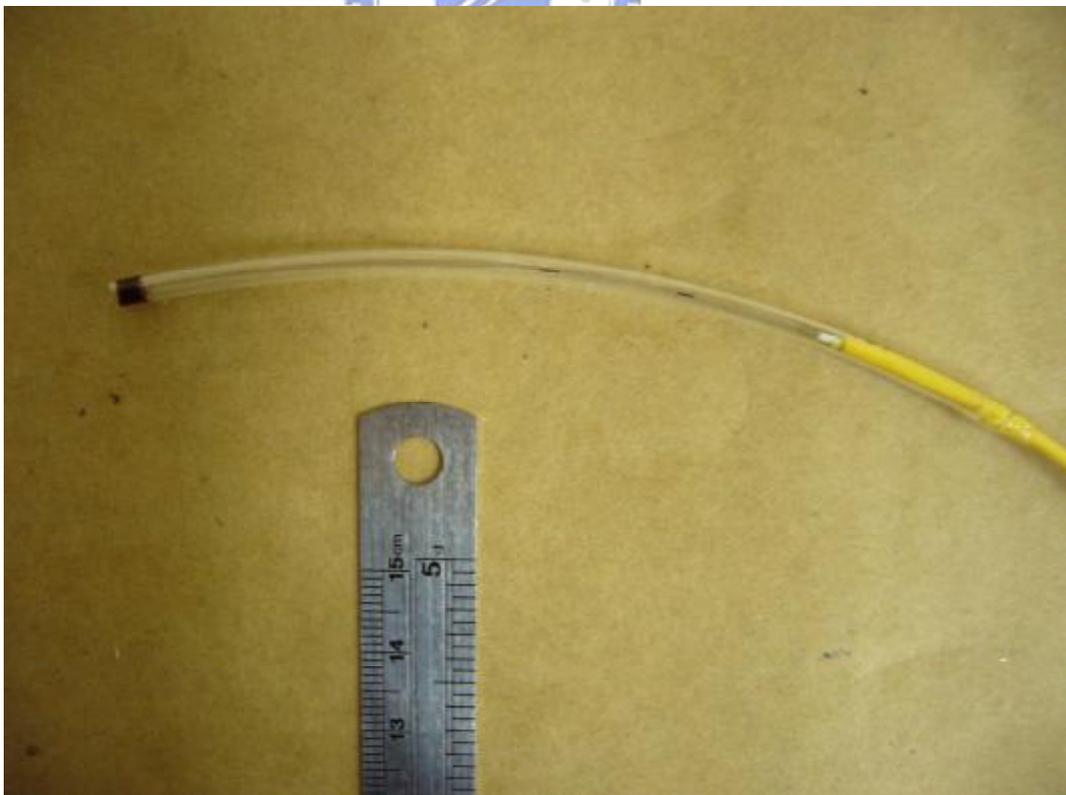


圖 3.23 光纖光柵溫度感測器



圖 3.24 以 POWER3077 固定光纖光柵溫度感測器



圖 3.25 使用 AX-019 防水膠填滿鋼筋溝槽

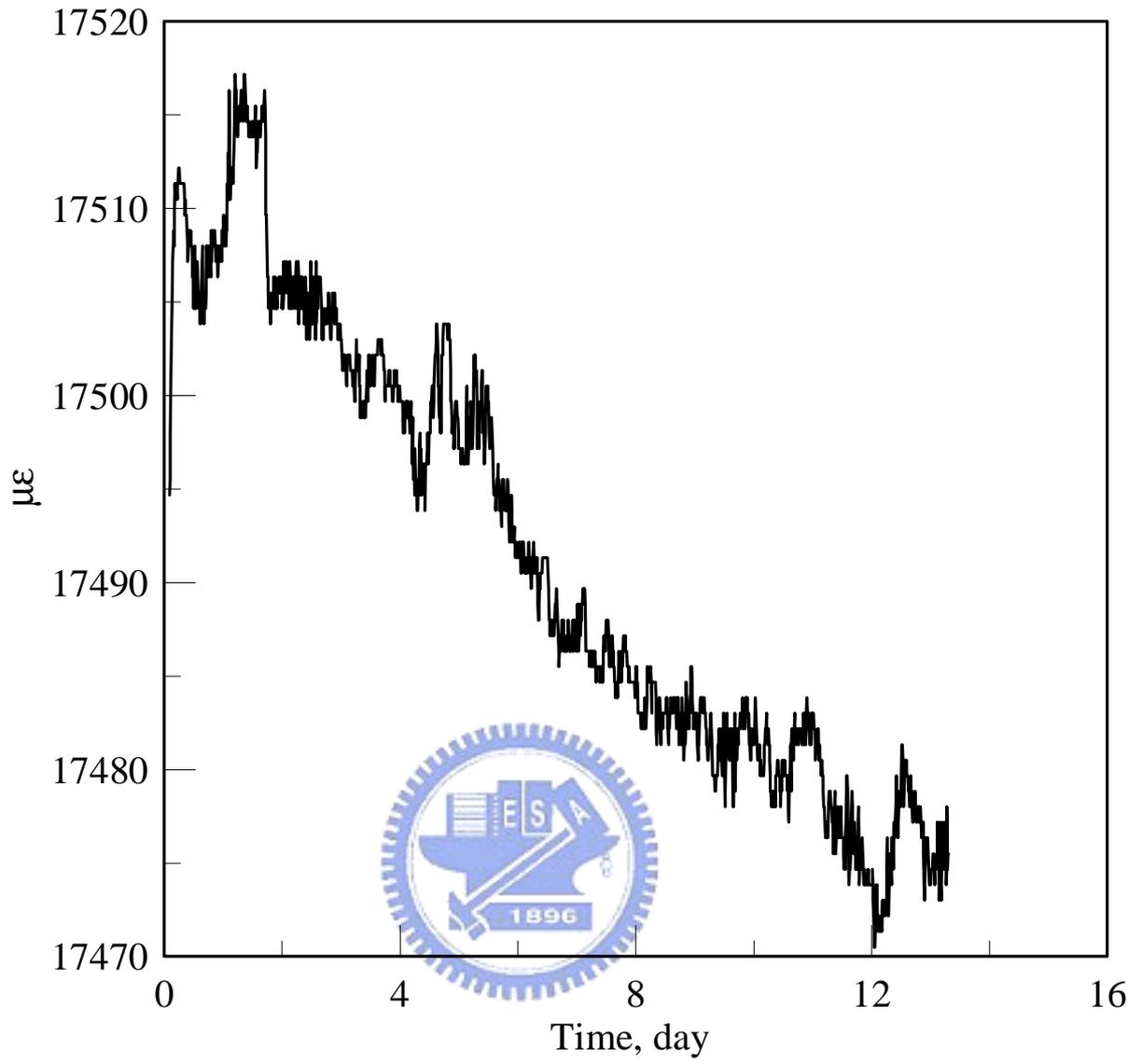


圖 3.26 光纖光柵鋼筋感測器耐久性試驗結果



圖 3.27 臺北捷運 CR580A 區段標工程用之七號鋼筋，中間銑一溝槽

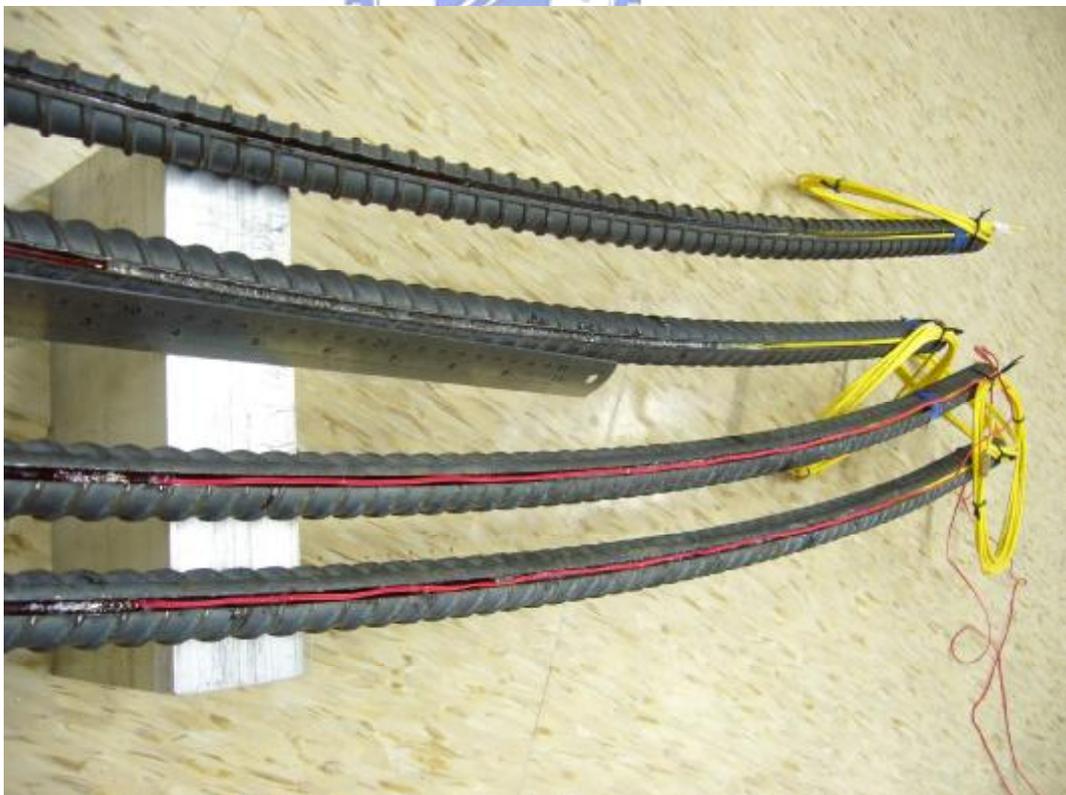


圖 3.28 鋼筋尾端熔接光纖延長段

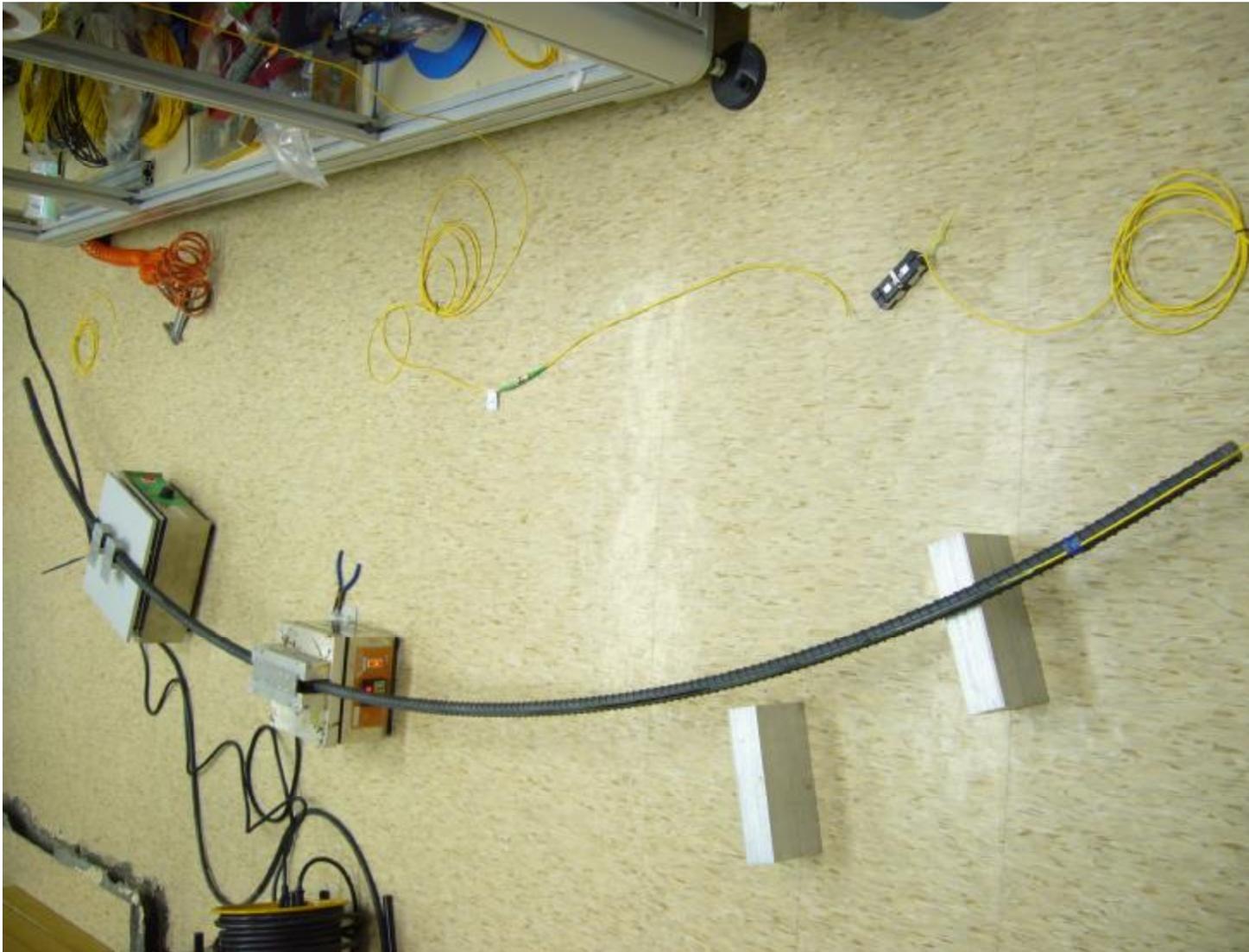


圖 3.29 將鋼筋置於加熱盤上加熱使接著劑固化

表 3.1 接著劑特性表

型號	外觀	黏度 (cp)	耐溫 (°C)	固化時間	完全固化	特性
POWER 3077	透明	1000	-54~95	15~30 秒	24 小時	1.不活化材質 2.高黏度 3.大間隙填補 4.高耐震
353ND	琥珀色	3000~5000	-55~250	80°C : 30 分鐘 100°C : 10 分鐘 120°C : 5 分鐘 150°C : 1 分鐘		1.高黏著性 2.高透光性 3.高穩定性
JA643	淡黃色	90000~110000	-40~135	135°C : 45 分鐘		1.高穩定性 2.耐衝擊 3.高黏著性

第四章 光纖光柵於環片製作過程之監測

4.1 預鑄場內之鋼筋組裝、灌模及養護

此次環片的預鑄是由亞利預鑄場配合施作，預鑄環片的生成大致可分為鋼筋籠之組立、混凝土澆置與振動搗實，以及環片養護階段，以下將個別說明。

1. 鋼筋籠之組立

台北捷運預鑄環片主要是由上下各八支主筋，總共十六支主筋組成，如圖 4.1 所示。本試驗則是取中間段之主筋來內埋光纖光柵製成光纖光柵鋼筋應變計，除了此鋼筋應變計為假固定外，其餘鋼筋皆以焊接來固定。

然而光纖光柵鋼筋應變計必須預留光纖線，以便將來於環片預鑄完成後，能夠讀取鋼筋應變量。所以本試驗利用接線盒的設置，將預留的光纖線集中於接線盒中，俟灌模及蒸氣養護完成後，能熔接光纖讀取接頭(俗稱 pig tail)，如圖 4.2 和圖 4.3 所示。

2. 混凝土澆置與振動搗實

鋼筋籠放入環片鋼模後，如圖 4.4 所示，將鋼模送至振動檯上，澆置之混凝土由旁邊預拌場經空中運輸管輸送至預鑄環片場，如圖 4.5 所示。先將鋼模內灌滿混凝土，如圖 4.6 所示，並以人工方式使用振動棒搗實，之後將鋼模頂蓋蓋上，四周以夾具固定，如圖 4.7 所示。

俟鋼模頂蓋固定完成，啟動振動檯，同時鋼模中間繼續灌注混凝土直至

混凝土完全緊實填滿鋼模，之後將鋼模頂蓋取下，以人工方式抹平環片外側表面，如圖 4.8 所示。

3.環片養護階段

環片的養護流程如圖 4.9 所示，混凝土的養護階段可分為蒸氣養護、水中養護以及大氣養護，蒸氣養護如圖 4.10 所示，先以帆布蓋住環片鋼模，之後蒸氣由噴嘴噴出，依照公共工程施工綱要規範，蒸氣養護最高溫度不得超過 66°C，溫度升高速率不得超過 22°C/hr，加熱養護完成後混凝土之冷卻速率不得超過 11°C/hr。

水中養護如圖 4.11 所示，俟蒸氣養護結束後，拆模靜置直到環片與養生池溫度差 10°C 內，方可將環片放入養生池，水中養護為期 2~3 天。水中養護結束後，將環片放置預鑄場空地開始大氣養護，為期至混凝土第二十八天強度達成，如圖 4.12 所示。

4.2 預鑄環片過程之光纖光柵監測

為了瞭解環片內鋼筋之應力變化情形，所以在鋼筋內埋設光纖光柵，依照行政院公共工程委員會所制定之公共工程施工技術規範第 02495 章【監測儀器】第 3.5.5 款增列，於環片混凝土澆置每個不同階段(混凝土澆置前、搗實靜置、蒸氣養生、脫模、水中養生、場內儲放，環片運送前後等)進行量測。

每個階段的量測資料如表 4.1 和表 4.2 所示，根據 Rao (1998)文獻中得

知，溫度變化 1°C 約對應光纖光柵波長值變化 13 pm，1μ 的拉應變大約使得光纖光柵波長值增加 1.2 pm，可將其整理為：

$$1(nm) = 10^3 (pm), \text{ 其中 } \begin{cases} n = 10^{-9} \\ p = 10^{-12} \\ m = \text{meter} \end{cases} \quad (4-1)$$

$$1(pm) \approx 0.0769(^{\circ}C) \quad (4-2)$$

$$1(pm) \approx 0.833(\mu\epsilon) \quad (4-3)$$

由表 4.1 和表 4.2 顯示，在蒸氣養護拆模後，光纖光柵鋼筋應變計和光纖光柵溫度感測器波長皆有變大。以短鋼筋為例，蒸氣養護拆模後光纖光柵溫度感測器波長值為 1528.058nm，扣除初始波長值 1527.760nm，代入式 4-1 和式 4-2 可計算得到當時環片溫度約為 46.9°C，與捷儀工程顧問公司所安裝之熱偶計記錄相符，如圖 4.13 所示，於 2006 年 12 月 6 日所量測之溫度約為 46~50°C。

在蒸氣養護前後之應變量變化，以短鋼筋光柵①為例，波長增加 626 pm，代入式 4-3 可知應變量增加 521.458 με，造成應變量增加的原因，一部份是由溫度增加所造成，另一部份是因為鋼筋受溫度增加而膨脹所造成。

環片在水中養護過程中，以 1data/sec 的速度連續擷取光纖光柵波長值，如圖 4.14 所示，可看出鋼筋內部不同分佈點之應變行為皆維持在 100 με 內，推測應是鋼筋內部之應力變化情形，結果顯示使用光纖光柵來量測是很穩定的。

環片在大氣養護過程中，以 1data/10min 的速度擷取光纖光柵波長值，期間因為發生工廠跳電等不可抗拒之因素，導致資料有中斷情形，如圖 4.15 所示。不過整體看來，應變也是維持在 $100 \mu\epsilon$ 內，推估是其鋼筋內部應力變化或人為因素等等所造成之影響。

4.3 環片抗彎試驗

環片抗彎試驗是由永明水泥公司提供外壓試驗機(150 噸)和試驗場地，試驗架設如圖 4.16 所示，環片上方之千斤頂跨距為 60cm，光纖光柵鋼筋應變計、光纖光柵溫度感測器、熱偶計以及混凝土應變計的詳細位置如圖 4.17 所示。

4.3.1 外壓試驗機試驗結果

由外壓試驗機自動擷取系統所量測之載重、位移和時間數據，可畫成時間對加載關係圖以及載重對冠部位移關係圖，如圖 4.18 和圖 4.19 所示。由圖 4.18 可看出環片抗彎試驗之加載步驟分成三個階段，加載約 5ton 時，停頓約 70 秒，繼續加載約 15ton 時，再停頓約 70 秒，之後加載至極限破壞。由圖 4.19 可得知，極限破壞時，環片冠部位移約為 80mm。試驗過程中，必須持續觀察環片出現的裂紋，並且記錄發生裂紋時的載重，如圖 4.20 所示。試驗結束後，將設計荷重、設計破壞荷重、實際荷重以及實際破壞荷重詳細記錄於試驗板上，如圖 4.21 所示，實際破壞荷重 46.9ton 遠大於設計破壞荷重 16.35ton，環片之設計是否過於保守，則必須進一步試驗探討。

4.3.2 光纖光柵鋼筋應變計試驗結果

光纖光柵解讀系統之雷射光源由短鋼筋光柵①與長鋼筋光柵③那側進入，自動擷取系統以 5data/sec 速度自動記錄光纖光柵波長值，試驗結果可畫成載重對應變的關係圖，如圖 4.22 和圖 4.23 所示。

因為鋼筋受拉反應比受壓大，所以在圖 4.22 和圖 4.23 可明顯看出，位於下層受拉側的短鋼筋光纖光柵反應比上層受壓側的長鋼筋光纖光柵大，且黏貼於鋼筋中間的光柵②都比兩側光柵反應大。兩側光柵則是因為黏貼的位置對稱，所以行為反應都很相近。

由圖 4.22 可知，短鋼筋光柵②和光柵③大約於 36ton 載重時無訊號反應，根據雷射光源輸出的方向，推測短鋼筋光纖光柵在光柵①與光柵②之間斷裂，所以才無光柵波長反射訊號。

由圖 4.23 可看出，大約在 36ton 載重時，上層長鋼筋受力行為轉為受拉狀態，推估應該是下層短鋼筋極限降伏後，轉為上層長鋼筋來承受，所以才會出現下降後上升的趨勢。

綜合圖 4.22 和圖 4.23，光纖光柵大約於 5ton 和 15ton 有反應平穩之趨勢，與外壓試驗機加載過程相符，且光纖光柵能監測約 36ton 的加載，遠遠超過設計破壞荷重 16.35ton，所以在環片鋼筋內裝設光纖光柵來達到監測的目的是可行的。

4.3.3 光纖光柵鋼筋應變計與混凝土應變計之比較

預鑄環片內埋設兩支混凝土應變計，一支裝設在短鋼筋光柵①的位置，一支裝設在長鋼筋光柵②的位置，如圖 4.17 所示。由捷儀工程顧問公司提供混凝土應變計監測數據，與光纖光柵鋼筋應變計監測數據可畫成載重對應變關係圖，如圖 4.24 和圖 4.25 所示。

圖 4.24 顯示短鋼筋光柵①與混凝土應變計的趨勢一致，圖 4.25 也顯示出長鋼筋光柵②與混凝土應變計的趨勢相符，此監測結果表示光纖光柵鋼筋應變計與混凝土應變計能相輔相成、互相率定。

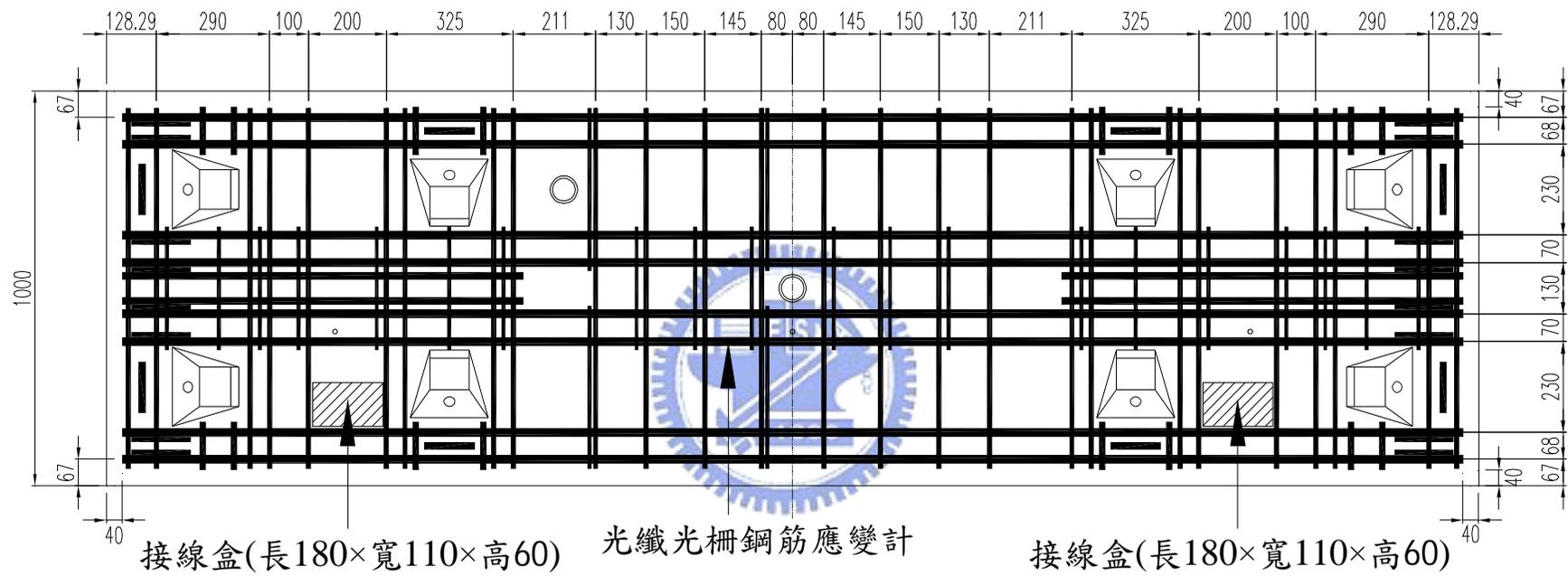
光纖光柵應變計與混凝土應變計的差別在圖 4.25 可明顯看出，當下層短鋼筋降服後，載重轉為上層長鋼筋承受，光纖光柵此時變化很明顯，混凝土應變計則是緩緩上升，由此可看出光纖光柵之高靈敏度特性。



圖 4.1 鋼筋籠與光纖光柵鋼筋應變計



圖 4.2 鋼筋籠與接線盒



單位：mm

圖 4.3 光纖光柵鋼筋應變計與接線盒配置平面圖



圖 4.4 鋼筋籠放入環片鋼模



圖 4.5 混凝土由運輸管輸送至預鑄環片場



圖 4.6 混凝土澆置填滿環片鋼模



圖 4.7 鋼模蓋上頂蓋並以夾具固定四周



圖 4.8 以人工方式抹平環片外側表面

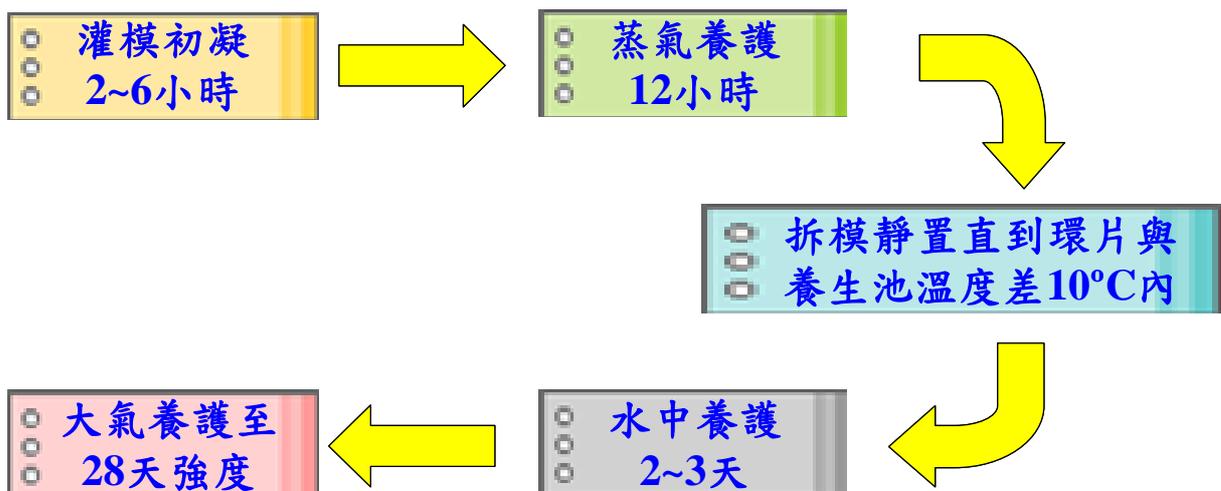


圖 4.9 環片養護流程圖



圖 4.10 蒸氣養護



圖 4.11 水中養護

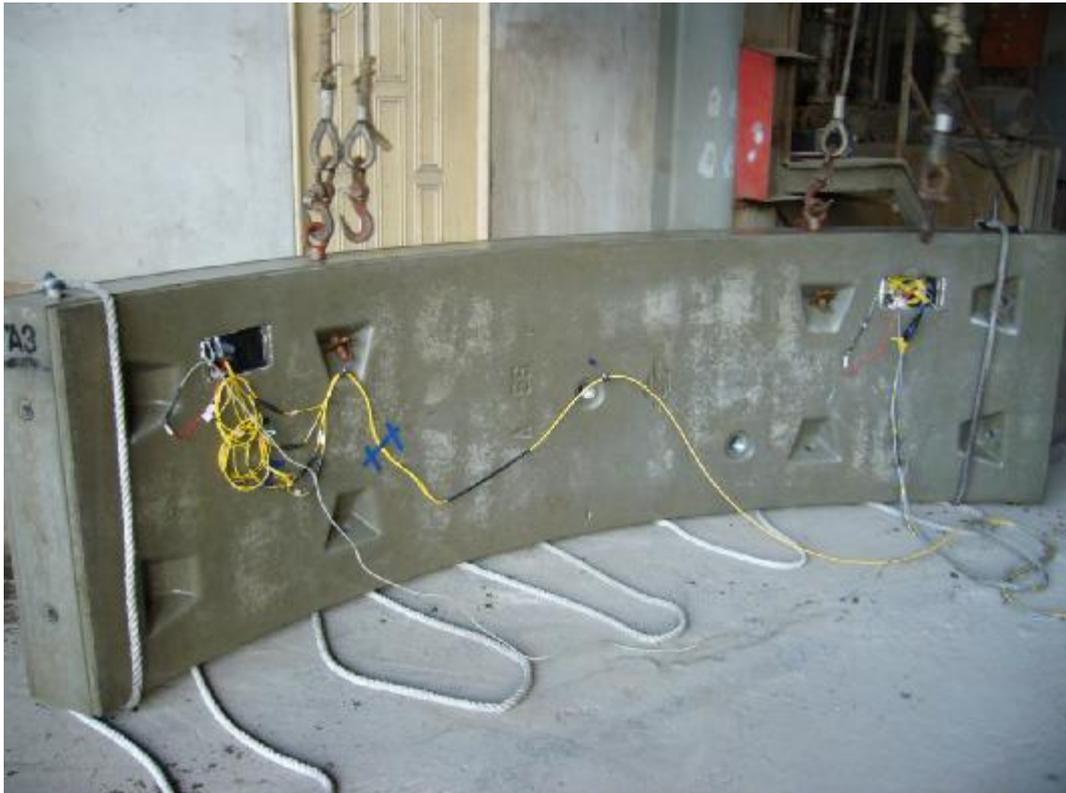


圖 4.12 大氣養護

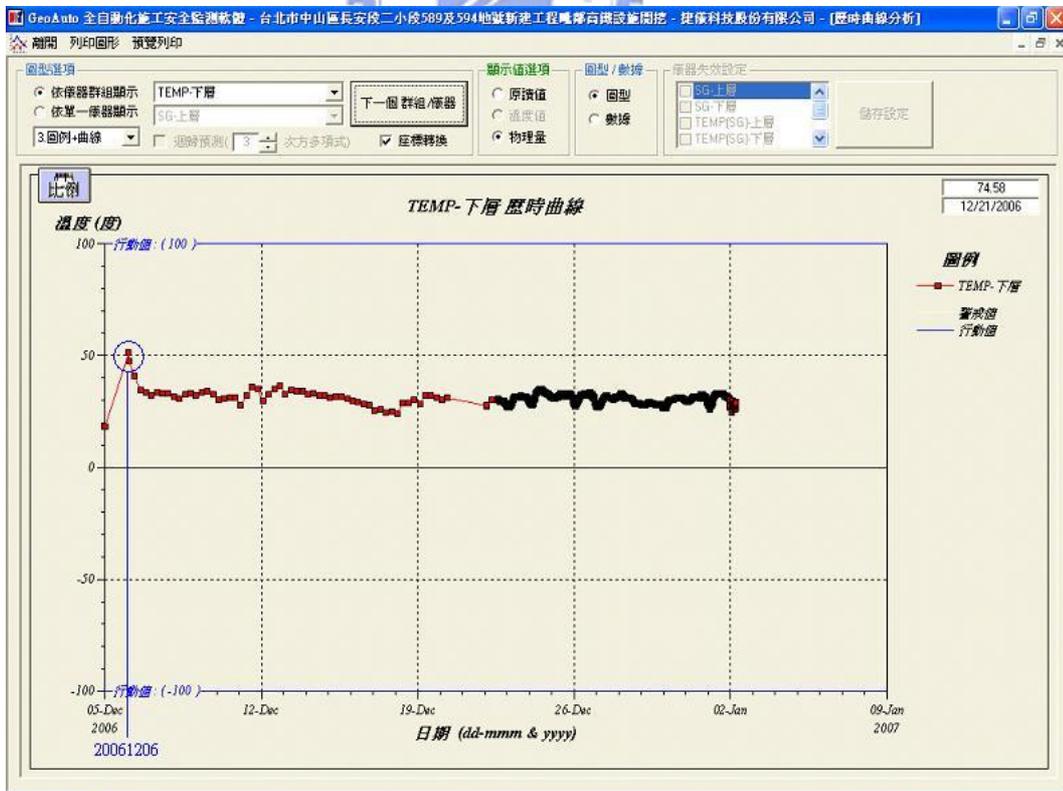


圖 4.13 環片熱偶計記錄

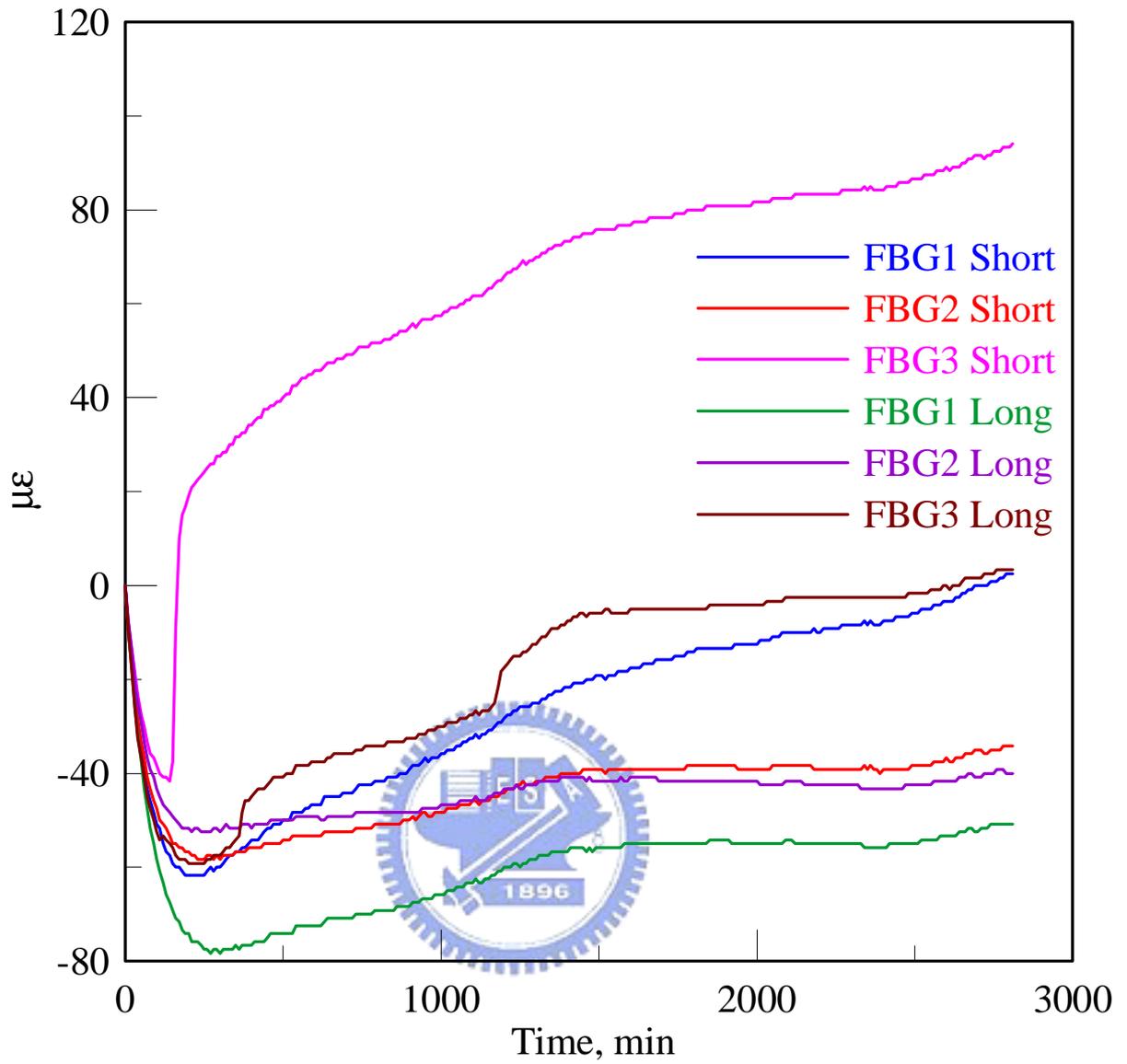


圖 4.14 水中養護連續監測數據圖

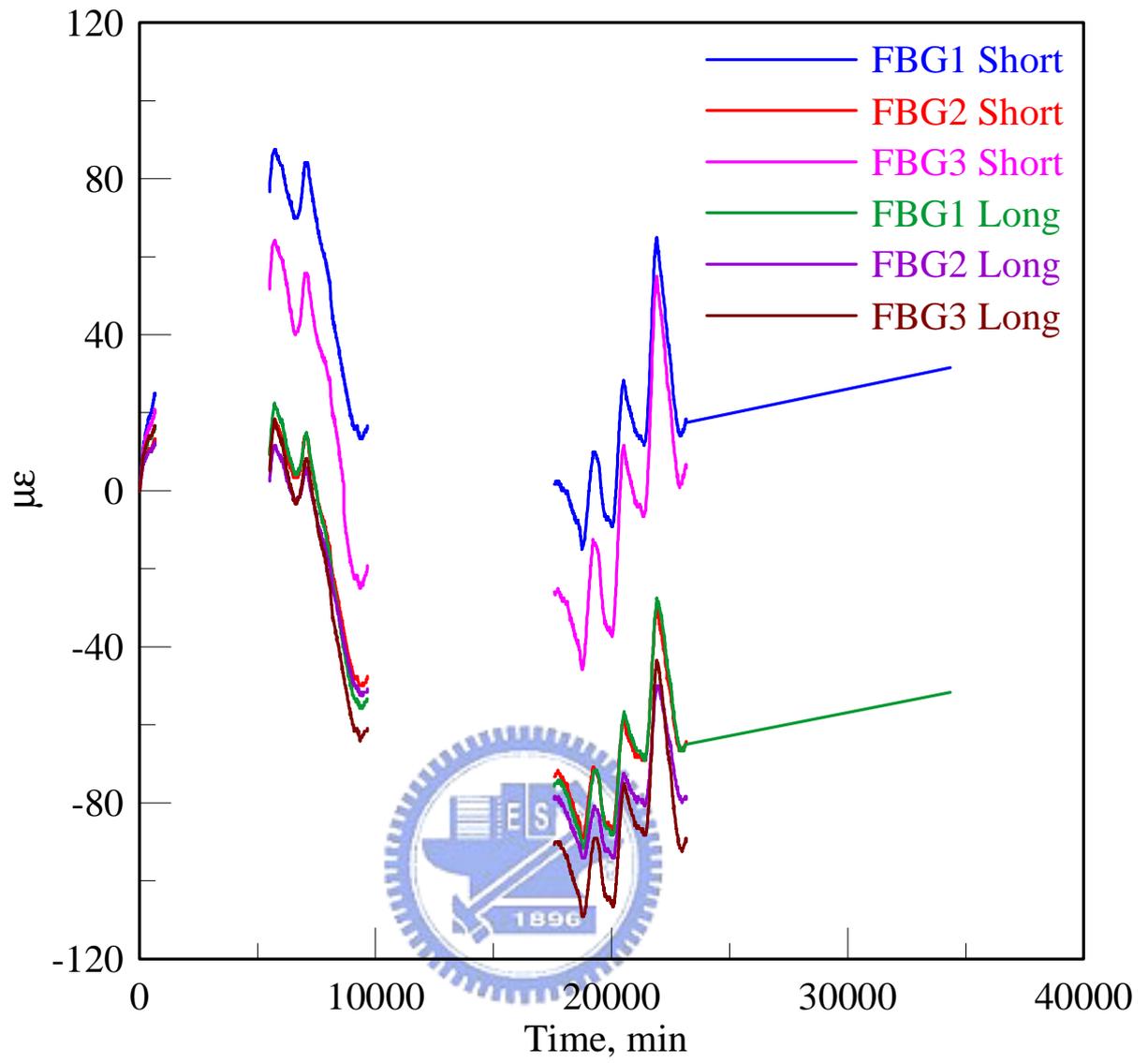


圖 4.15 大氣養護連續監測數據圖

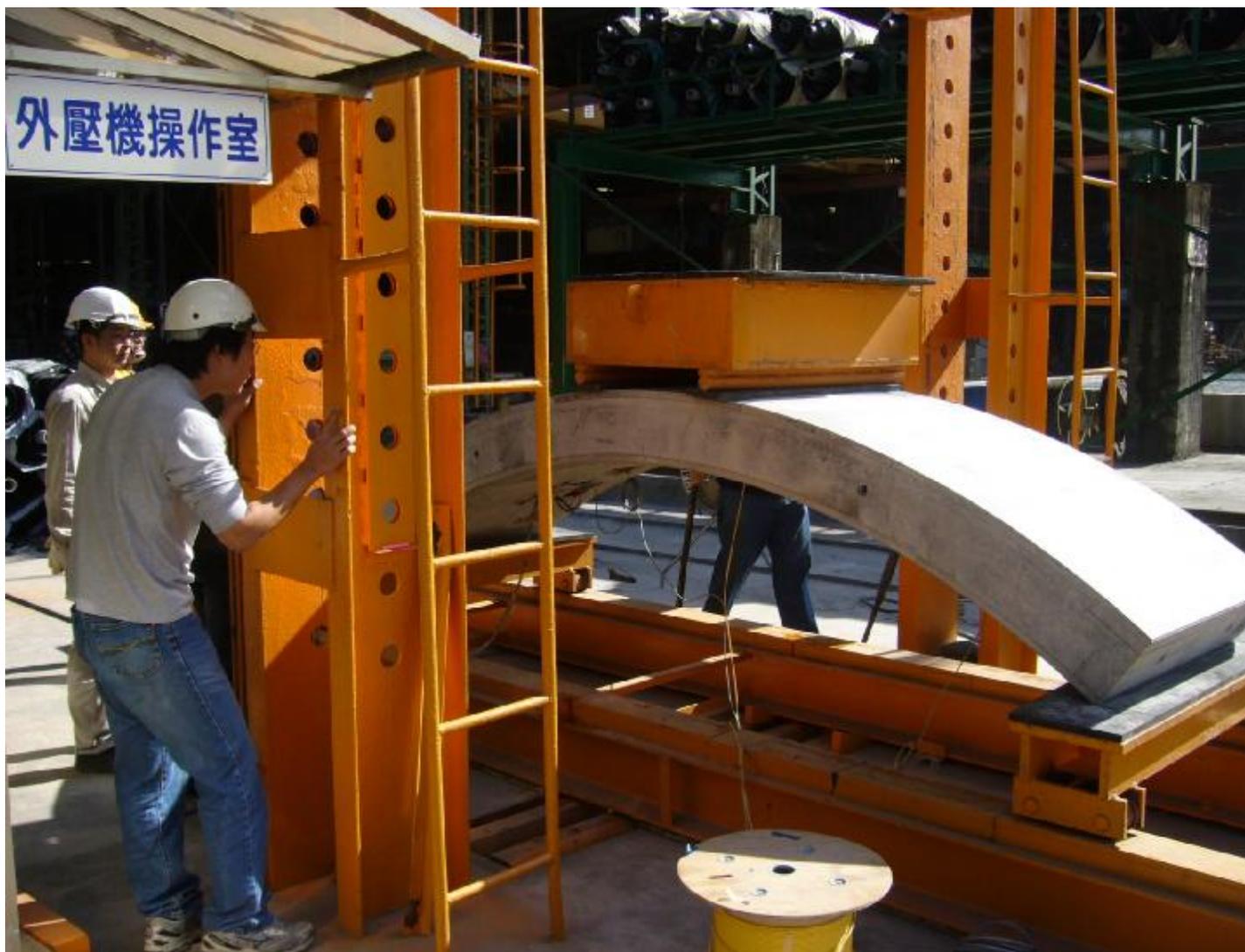


圖 4.16 環片抗彎試驗架設圖

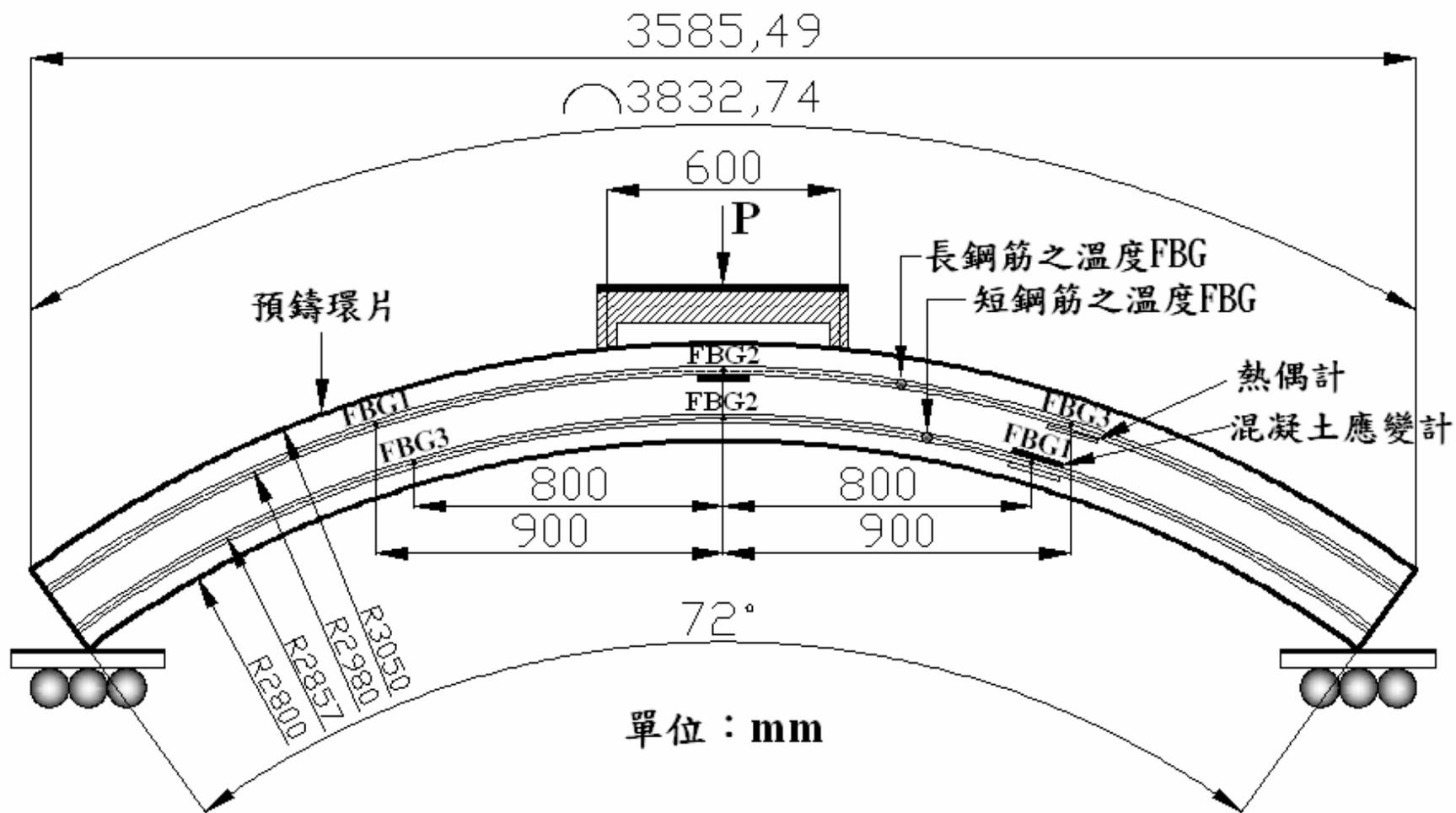


圖 4.17 環片抗彎試驗各式感測器分佈側視圖

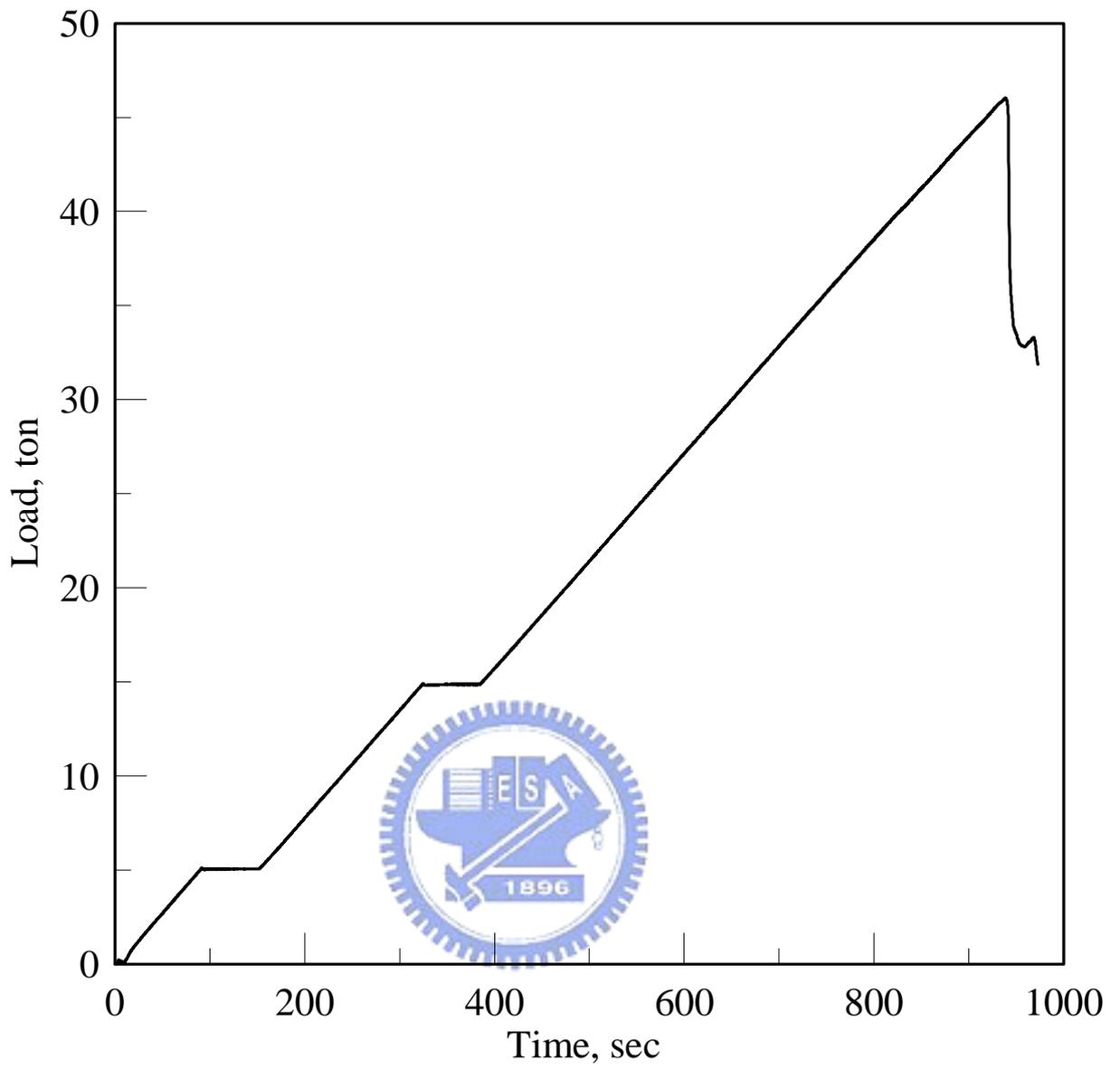


圖 4.18 環片抗彎試驗時間對加載關係圖(外壓試驗機)

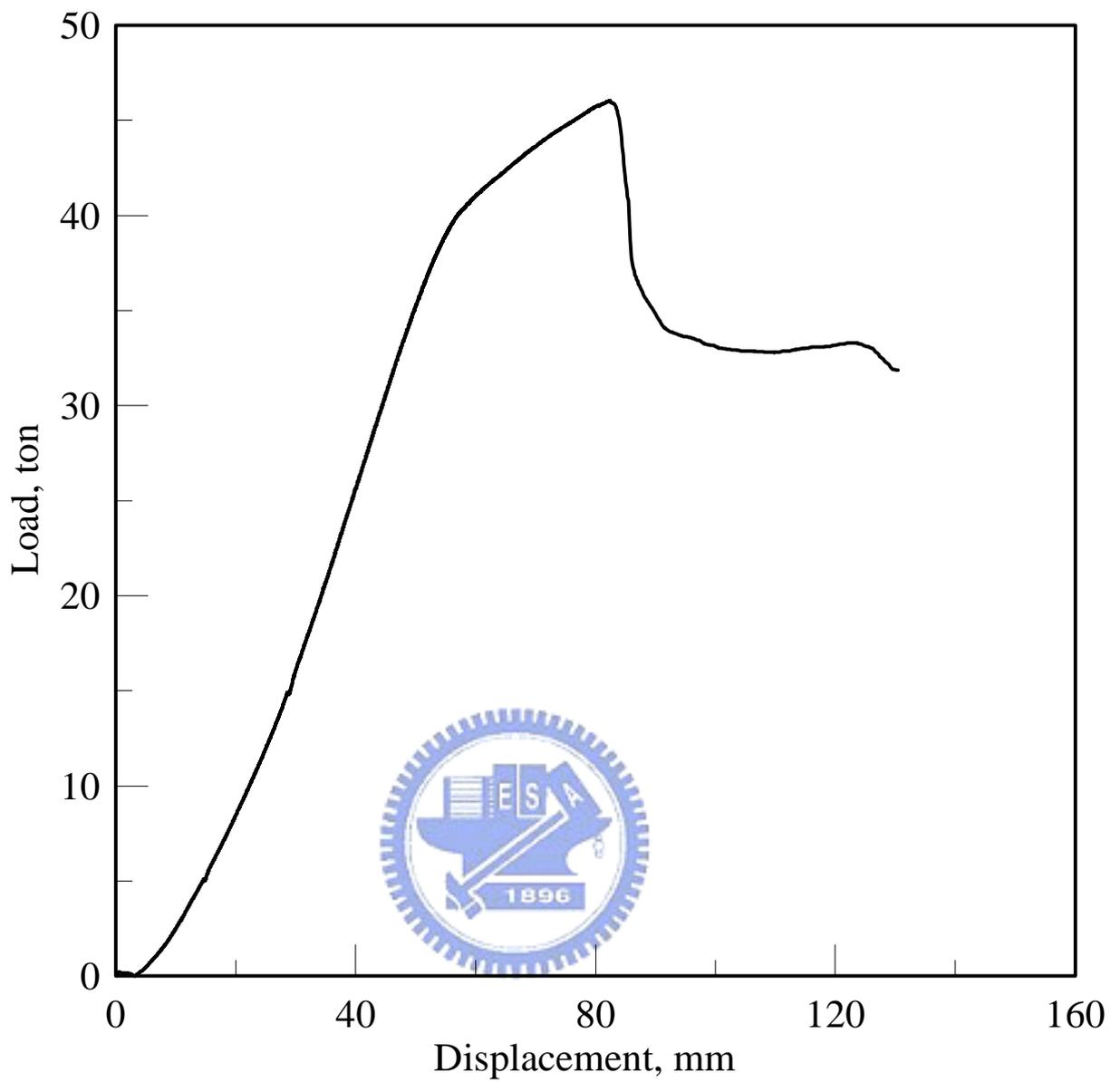


圖 4.19 環片抗彎試驗載重對冠部位移關係圖(外壓試驗機)



圖 4.20 環片加載過程記錄裂紋生成之載重

工程名稱	捷運信義線 CR580A 區段標		
試驗日期	96.1.2	規格	$\phi 5600\text{mm} \times 250\text{mm} \times 1000\text{mm}$
試驗項目	單體抗彎試驗: 設計荷重: 6.59 Ton 實際荷重 = 9 Ton 破壞荷重: 16.35 Ton 實際破壞荷重 = 46.9 Ton 變形 = 9.5 (20.503 (A))		
試驗結果	(註: 上述數值未加計重量)		
會驗單位	土三所 楊三所 八所 津之南	承造單位	承包商 CEC 蔡宗銀 製造商 亞利 李永興

圖 4.21 環片抗彎試驗結果之記錄板

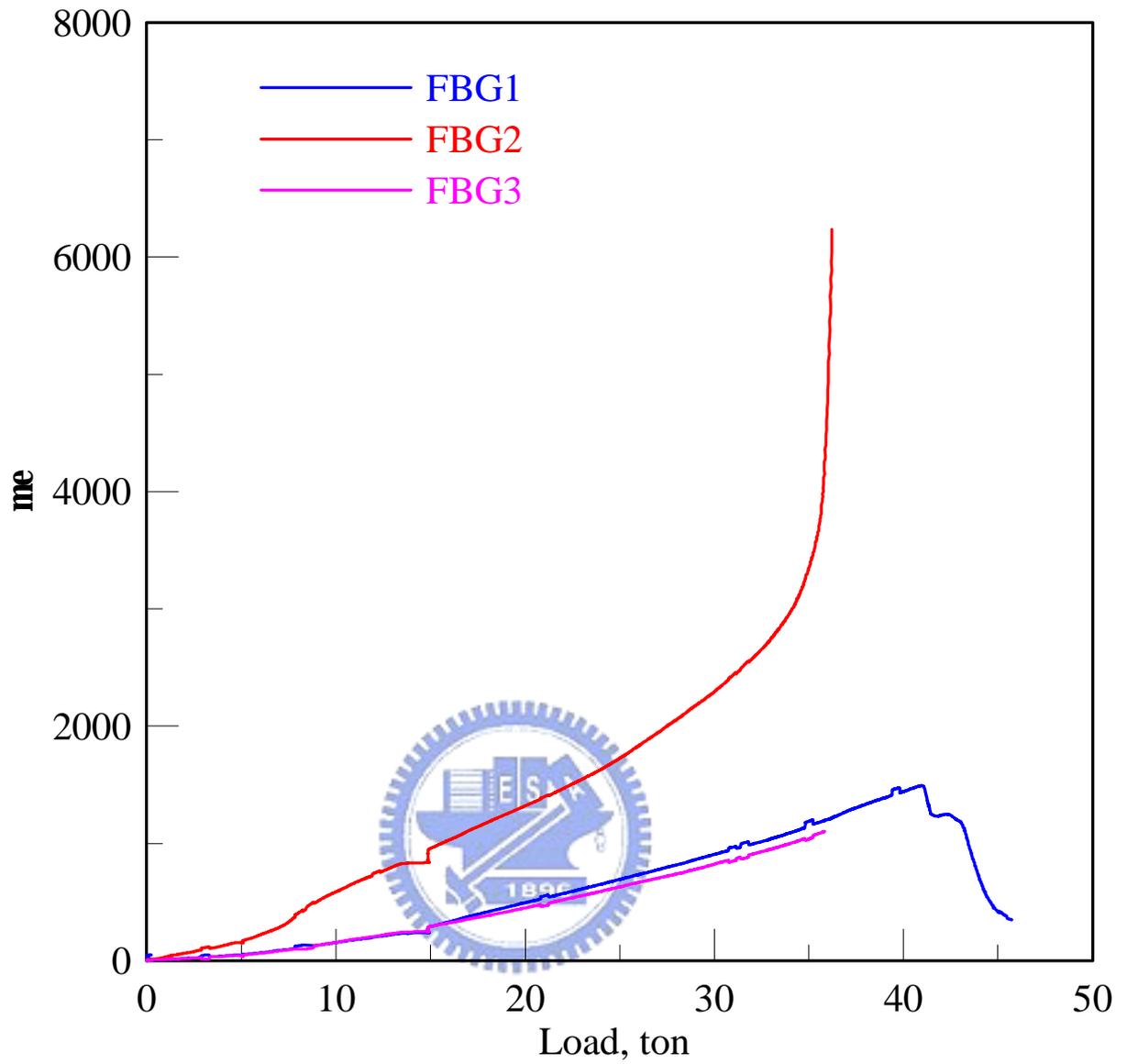


圖 4.22 環片抗彎試驗載重對應變關係圖(短鋼筋之光纖光柵)

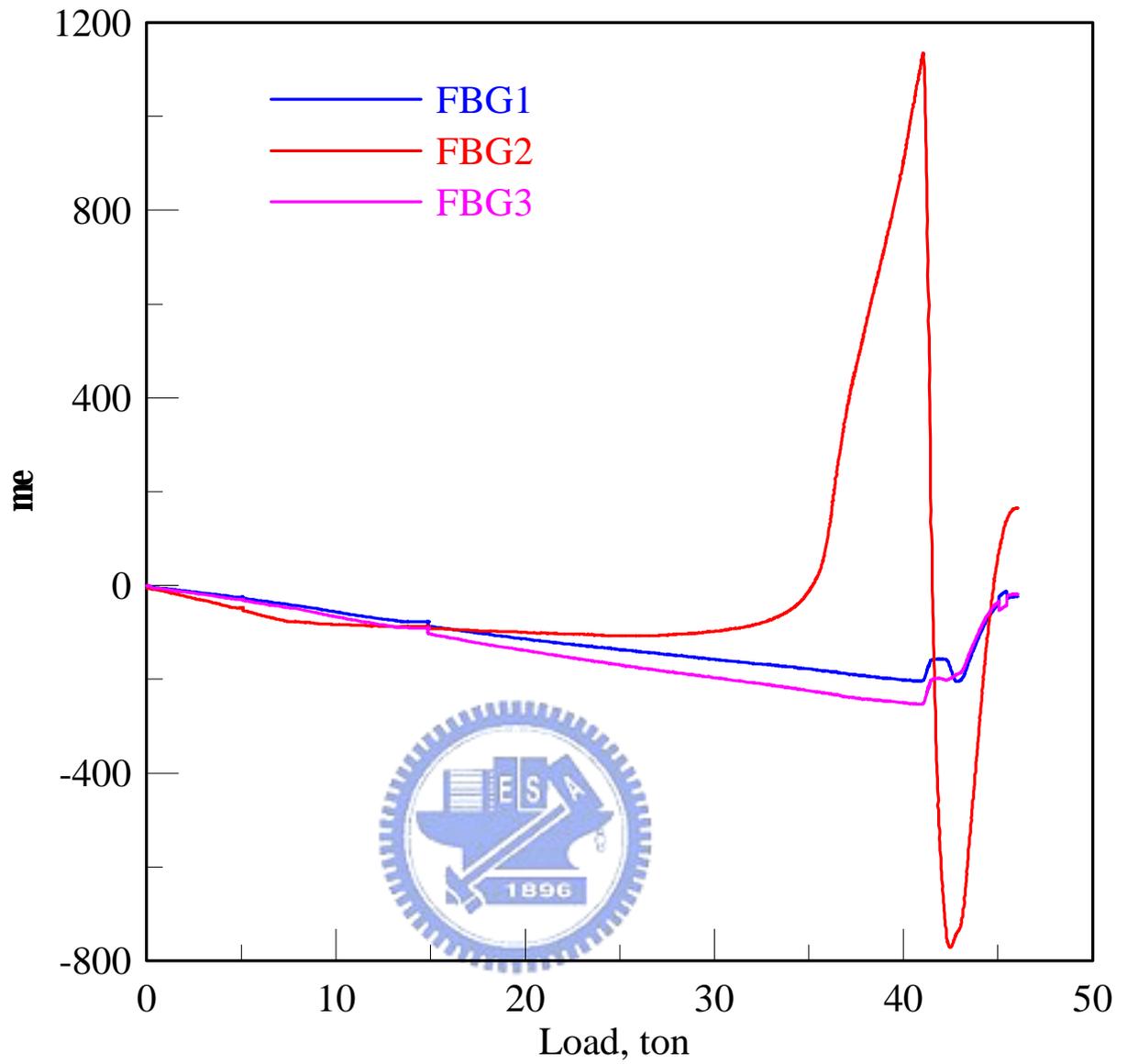


圖 4.23 環片抗彎試驗載重對應變關係圖(長鋼筋之光纖光柵)

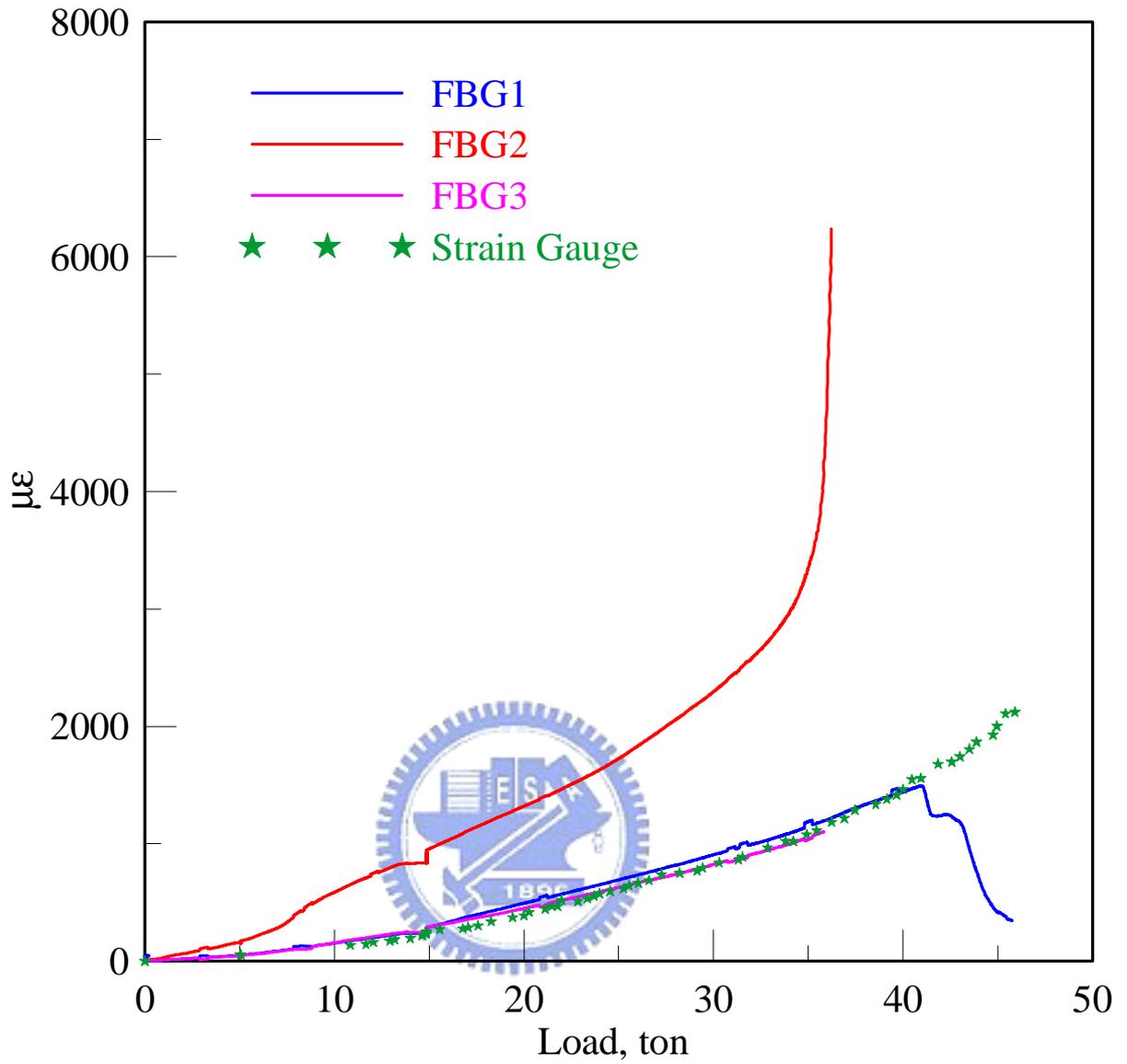


圖 4.24 光纖光柵應變計與混凝土應變計之載重對應變關係圖(短鋼筋)

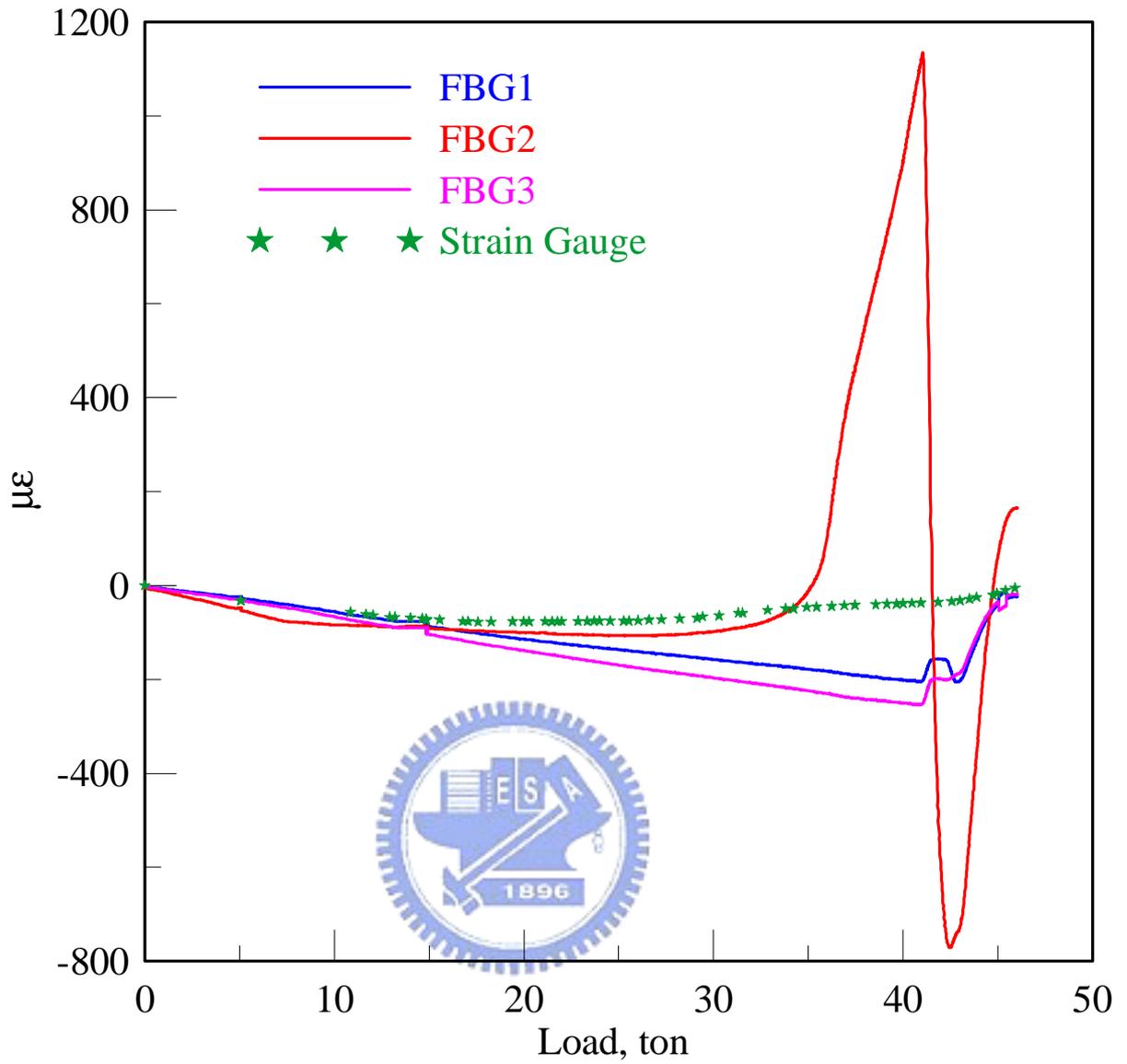


圖 4.25 光纖光柵應變計與混凝土應變計之載重對應變關係圖(長鋼筋)

表 4.1 短鋼筋施工前各階段光纖量測數值

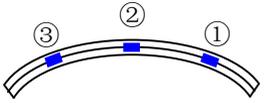
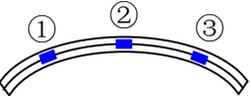
量測階段	光柵①(nm)	光柵②(nm)	光柵③(nm)	溫度光柵(nm)	
實驗室製作完成	1526.016	1538.570	1551.696	1527.760	
混凝土澆置前	1526.069	1538.475	1551.556	1527.734	
脫模 (蒸氣養護後)	1526.695	1539.159	1552.239	1528.058	
水中養護	1525.952	1538.449	1551.627	1527.719	
場內儲放 (大氣養護)	1525.954	1538.451	1551.628	1527.720	
環片運送前	1525.993	1538.377	1551.664	1527.719	
環片運送後	1526.065	1538.454	1551.742	1527.736	

表 4.2 長鋼筋施工前各階段光纖量測數值

量測階段	光柵①(nm)	光柵②(nm)	光柵③(nm)	溫度光柵(nm)	
實驗室製作完成	1533.166	1545.439	1558.157	1556.529	
混凝土澆置前	1533.115	1545.404	1558.173	1556.498	
脫模 (蒸氣養護後)	1533.746	1546.047	1558.862	1556.828	
水中養護	1533.003	1545.356	1558.164	1556.484	
場內儲放 (大氣養護)	1533.002	1545.356	1558.165	1556.485	
環片運送前	1532.942	1545.262	1558.078	1556.485	
環片運送後	1533.017	1545.294	1558.193	1556.516	

第五章 FLAC 數值模擬與分析

5.1 FLAC 模擬環片抗彎試驗

以往潛盾隧道都會利用 FLAC 來模擬整個隧道情況，甚至模擬多條隧道相互間影響，但是鮮少有針對單一環片進行模擬，故本節將利用 FLAC 來模擬二維單一環片抗彎試驗的狀況。並藉由數值模擬與現場監測數據比較，找出符合現場量測數據之方法，可反推得到整片環片的應力分佈情形與各種力學特性狀況。

環片抗彎試驗之光纖光柵監測於民國九十六年一月二日完成，藉由 FLAC 的模擬，以期得到單一環片於抗彎過程中的應力應變分佈情形，可作為日後設計隧道環片及相關試驗的參考。

FLAC 的網格設定為 200(X 軸)×175(Y 軸)格，並將其 X 軸的長度固定為 4m，Y 軸長度固定為 3.5m，亦即每一格網格皆為 20mm×20mm 之正方形網格。

以 X-Y 座標(2,0)為環片圓弧之圓心，將圖 4.17 之環片抗彎實際尺寸畫於網格中，如圖 5.1 所示，並輸入環片之材料參數例如彈性模數(Elastic Modulus, E)和柏松比(Poisson's Ratio, ν)等等，完成後將環片形狀以外的網格全部變成零模型(Null Model)，之後對環片設置重力加速度 $g(=9.81\text{m/s}^2)$ 以及採用大應變(Large Strain)來模擬實際變形，參數表如表 5.1 所示。

邊界條件以實際環片抗彎試驗之條件來設置，環片以兩個二分之一載重

作用於距離環片冠部中心頂點各 300mm 處，即兩載重間距為 600mm。其目的為使這 600mm 範圍之彎矩等於常數，亦即此範圍內剪力為零，稱為 Pure Bending。環片兩側置於滑臺之邊界條件則以滾支承(Roller)模擬，如圖 5.2 所示。

為了得知環片內光纖光柵鋼筋應變計所在位置的應力應變狀態，可以藉由設置各種狀態的歷史點(History)在鋼筋所在之座標上，方便將來的資料輸出。若欲求點數不多，則可直接輸出對應網格點(i,j)的各種狀態，而省略設置歷史點的步驟。因為環片為對稱之模擬，所以可就環片左半部或右半部去分析，之後再以對稱形式去計算和畫圖即可，如圖 5.3 所示。FLAC 模擬之歷史點於實際環片尺寸之位置如圖 5.4 所示，可看出歷史點位置皆在鋼筋內部。



當所有條件都設置完畢之後，執行 SOLVE 指令讓 FLAC 去自動計算，此時螢幕會出現時步(Step)、最大不平衡力(Unbalanced Force)以及平衡比率(Equil Ratio)，FLAC 內部限定時步超過十萬步或平衡比率為 10^{-3} 以下時，會控制停止自動計算。平衡比率為所有網格點中最大不平衡力和平均加載力之間比率的最大值，當平衡比率小於 10^{-3} 時，可認定設置的模型達到了平衡狀態。

輸出歷史點的 Y 方向位移資料，可得到環片整體的位移趨勢，如圖 5.5 所示(總加載為 10 噸)。若輸出 X-X 方向和 Y-Y 方向的應力，可代入廣義之

Hooke 定律(式 5-1)求得 X-X 方向和 Y-Y 方向的應變。

$$\begin{cases} e_{xx} = \frac{1}{E} [s_{xx} - n(s_{yy} + s_{zz})] \\ e_{yy} = \frac{1}{E} [s_{yy} - n(s_{xx} + s_{zz})] \\ e_{zz} = \frac{1}{E} [s_{zz} - n(s_{xx} + s_{yy})] \end{cases} \quad (5-1)$$

因為潛盾隧道是假設平面應變分析，所以式 5-1 中的 ε_{zz} 等於零，又 FLAC 採用二維模式來分析，所以式 5-1 中的 σ_{zz} 亦為零。求出 ε_{xx} 和 ε_{yy} 後，可座標轉換成環片軸向方向之應變，如圖 5.6 所示(以短鋼筋位置之歷史點為例)。

5.2 FLAC 模擬與現場量測結果之關係

以 FLAC 模擬環片中短鋼筋位置之軸向應變與現場光纖光柵監測之數據來比較，編號 13 號之歷史點約與短鋼筋之光柵③同位置；編號 23 號之歷史點約與短鋼筋之光柵②同位置。編號 34 號之歷史點約與長鋼筋之光柵①同位置；編號 45 號之歷史點約與長鋼筋之光柵②同位置。

因為現場之環片抗彎試驗是以持續加載的方式進行，所以針對編號 13、23、34 和 45 號的歷史點作連續加載的模擬，每次加載的總增量為 2 噸，加載至總載重 20 噸為止。將加載迴圈寫成 FISH 檔，即可於主程式最後匯出自動加載並完成計算及輸出。

將 FLAC 模擬之載重與應變關係和現場監測數據比較，如圖 5.7 和圖 5.8 所示。很明顯的看出環片中間現場監測值與 FLAC 模擬值的差異比環片兩側來的大，推估其主要差異為下列兩點：

1. FLAC 模擬環片之材料性質全為鋼筋混凝土，並無鋼筋與混凝土之分別，此為本身模擬狀況的差別。
2. 現場環片抗彎試驗時，內側保護層的混凝土會因為承受拉力而開裂，且主要拉力為鋼筋承受，但是 FLAC 模擬之環片為完整彈性模型，並不會破壞。

根據上述第二點之推測，將 FLAC 重新模擬，並將環片中間內側保護層設定為零模型，範圍約至實際環片內側受拉層之短鋼筋表面，用以模擬混凝土開裂，如圖 5.9 所示。

內側保護層開裂之載重與應變圖和未開裂環片以及現場光纖光柵監測數據比較如圖 5.10 和圖 5.11 所示。由圖 5.10 中可得知，模擬環片內側保護層開裂後，於載重 10 噸之前的反應幾乎與現場光纖光柵監測數據一致。相信只要嘗試調整開裂寬度，就能更符合現場所量測之環片受力行為。

圖 5.11 中，因為內側保護層開裂，導致環片中間段受壓應變影響更大，與現場監測行為差異愈大，推估其原因為現場實際環片會破壞，而 FLAC 模擬為彈性模型不會產生破壞。另一原因為外側受壓層大部分由混凝土來承受壓力，現場所裝設之光纖光柵內埋於鋼筋內部，故與 FLAC 模擬之鋼筋混凝土行為差異頗大，若於模擬時適當加入一鋼筋特性之介面參數，應能改善此問題。

位移之比較如圖 5.12 所示，可看出載重為 20 噸時，內側保護層開裂之

模擬較接近現場監測結果，不論長鋼筋或者是短鋼筋皆為此現象。因為現場位移資料為外壓試驗機系統所獲得，與 FLAC 模擬真正環片內部位移比較，可能為造成兩種曲線趨勢不一致之原因。

5.3 FLAC 反算環片彎矩分佈與曲樑理論分析之比較

縱使各家顧問公司分析隧道環片的方法不同，但是其最終目的皆為得知環片內部之受力情形與彎矩分佈，若環片彎矩已知，則可設計其斷面形狀與配筋量。藉由現場試驗數據，反覆修正 FLAC 模擬參數與介面狀況，可使 FLAC 模擬更接近實際情況。

由材料力學可知，直樑(Straight Beam)與曲樑(Curved Beam)的分別是以其中性面有無曲率變化來判斷，本研究監測分析之環片屬於等斷面曲樑。

以 FLAC 模擬外加载重 10 噸為例，輸出應力值並轉換成沿著環片縱向之應變值，可代入樑之撓曲公式(式 5-2)，求出欲求位置之彎矩：

$$M = \frac{eEI}{Y} \quad (5-2)$$

其中 M 為所求彎矩(kN-m)，I 為環片斷面之慣性矩(m⁴)，Y 為環片斷面中性軸至欲求點之垂直距離(m)。藉由上述計算，可得到完整環片與內側保護層開挖環片之彎矩圖，如圖 5.13 和圖 5.14 所示，與直樑之彎矩圖不同。

若考慮材料力學中之曲樑分析，基本假設如下：

1. 假設橫斷面面積為一常數且具有一個與作用力矩方向垂直之對稱軸。
2. 假設材料為均質及等向性，且當載重作用時其性質呈線-彈性。

3. 假設在彎矩作用之後，曲樑橫斷面仍維持平面。

藉由上述假設，於材料力學中可得到中性軸位置公式與曲樑公式，如式

5-3 和式 5-4 所示：

$$R = \frac{A}{\int_A \frac{dA}{r}} \quad (5-3)$$

其中 R 為中性軸位置，係由曲樑曲率中心定出， A 為曲樑斷面面積， r 為斷面上面積元素 dA 之任意位置，一樣由曲樑曲率中心定出。

$$s = eE = \frac{M(R-r)}{Ar(\bar{r}-R)} \quad (5-4)$$

其中 σ 為曲樑中之正向應力， M 為內彎矩，係由斷面法及平衡方程式對斷面之中性軸求得， \bar{r} 為從曲率中心至斷面面積形心之距離。

以 FLAC 環片上 X-Y 座標(0.959m, 2.85m)為例並配合環片之實際尺寸(參閱圖 4.17)，欲求點為從曲率中心通過環片縱向中心 $X=1.0\text{m}$ 、靠近環片外側邊緣之處，其與曲率中心之距離為 3.034m ($r = 3.034\text{m}$)。因為環片為長方形斷面，故形心位置為斷面中心位置，即與曲率中心之距離為 2.925m (環片中心)。

先由式 5-3 求得中性軸位置為 2.9233m，再由 FLAC 輸出欲求點之應力狀態並轉換成縱向應變，將所有資料代入式 5-4 可得彎矩為 31.2058 kN-m，與圖 5.13 中 X 軸為 1.0m 之彎矩 30.612 kN-m 相比較，誤差約為 1.9%，相差很小。同理，環片對稱中心靠近外側邊緣點(2m, 3.03m)理論計算得到彎矩為 78.3836 kN-m，與圖 5.13 中 X 軸為 2.0m 之彎矩 68.717 kN-m 相比，

誤差約為 12.3%。

至於內側保護層開裂之環片，其屬於不規則之變斷面曲樑，在理論分析上著實困難。若以上述等斷面曲樑之方法來分析，其結果與 FLAC 模擬之結果相差甚遠。但是由圖 5.15 可明顯看出，完整環片與內側保護層開挖之環片，其彎矩差別只在於環片內側中間有無開裂，兩側之彎矩圖形幾乎重疊。



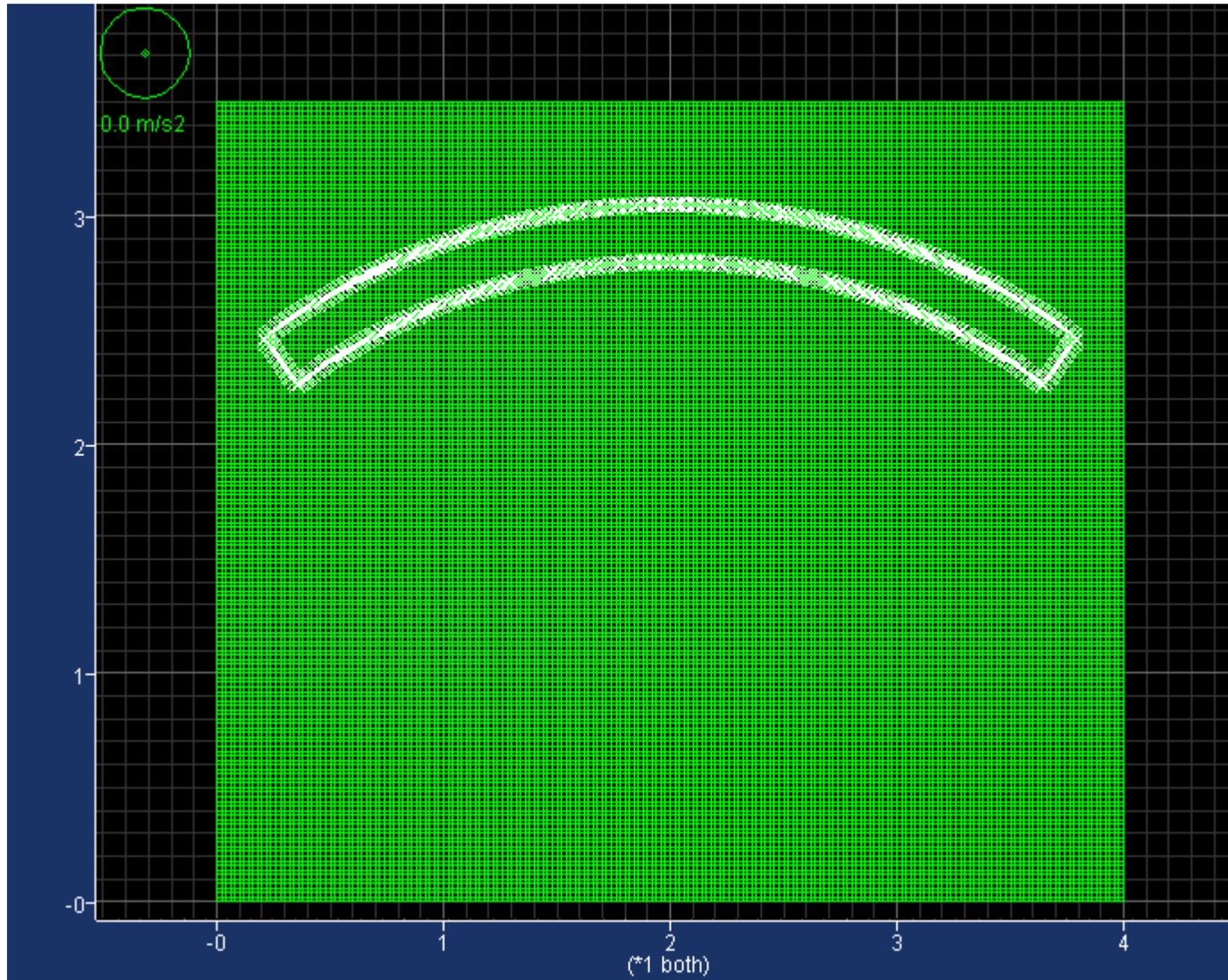


圖 5.1 FLAC 網格建立與環片初始模型

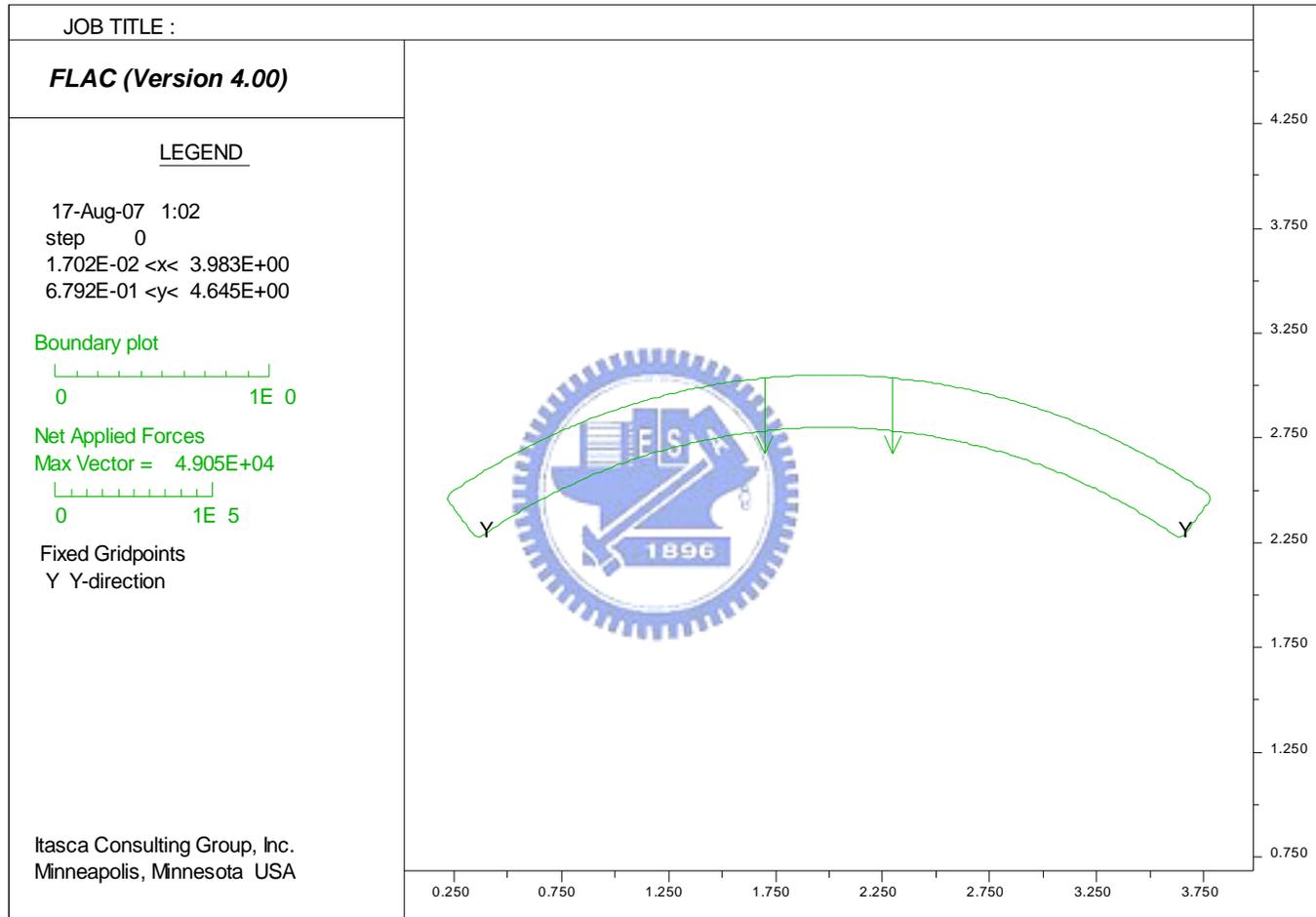


圖 5.2 FLAC 模擬環片抗彎試驗之邊界條件

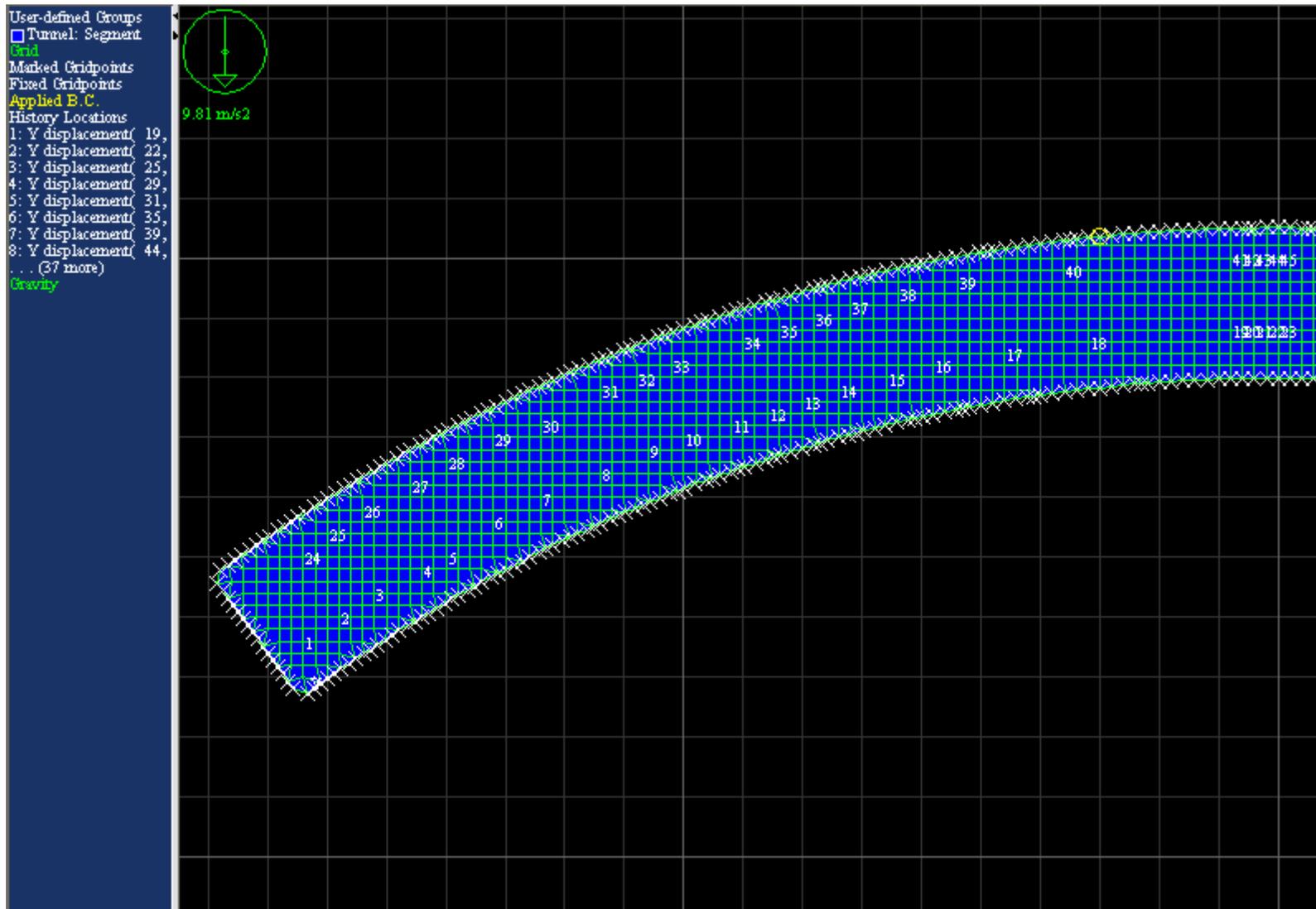


圖 5.3 設置邊界條件與歷史點後採用左右對稱環片之左半部狀態來計算

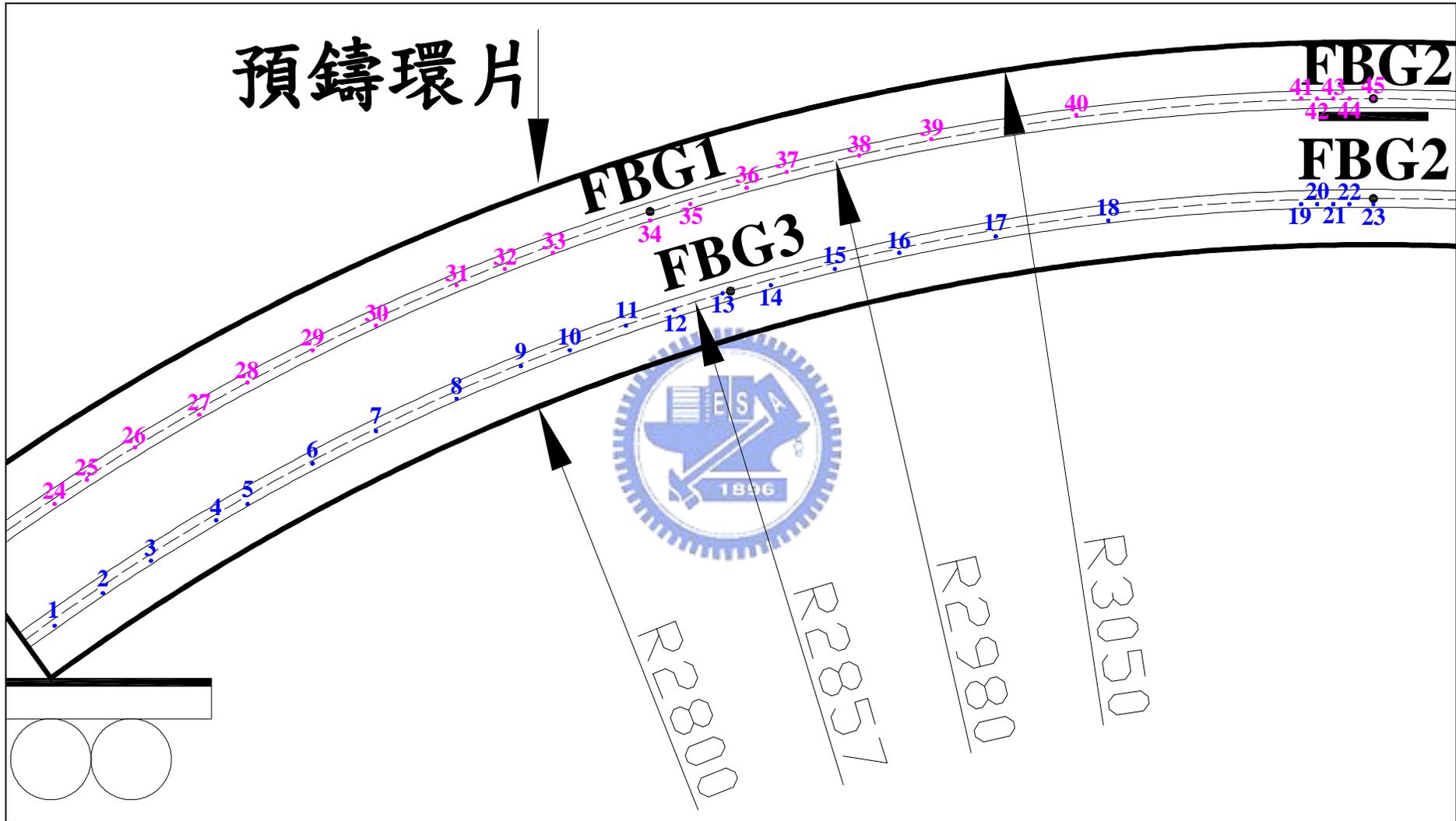


圖 5.4 歷史點於實際環片尺寸上之位置

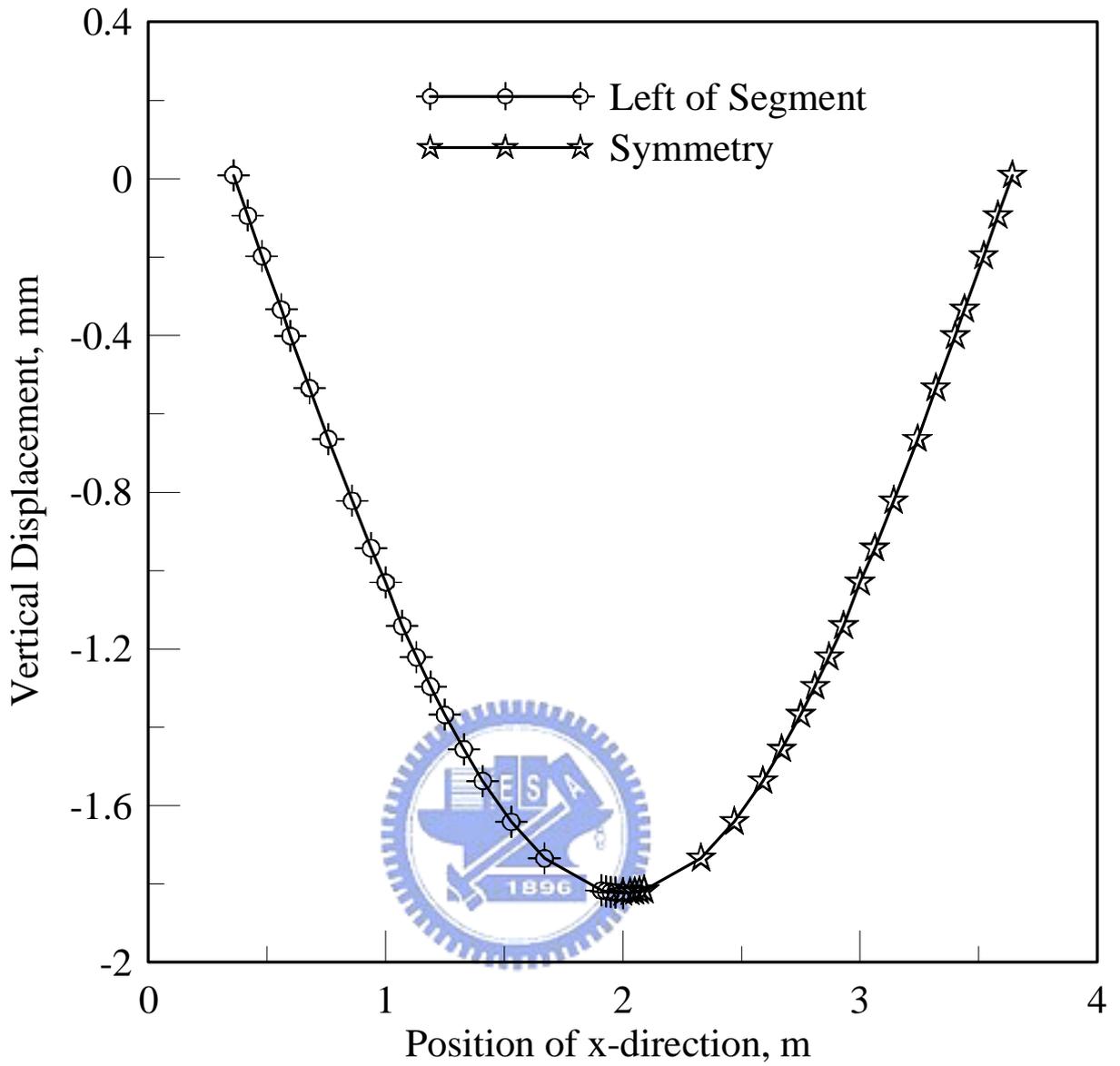


圖 5.5 FLAC 模擬環片中短鋼筋位置之垂直位移圖(載重為 10 噸)

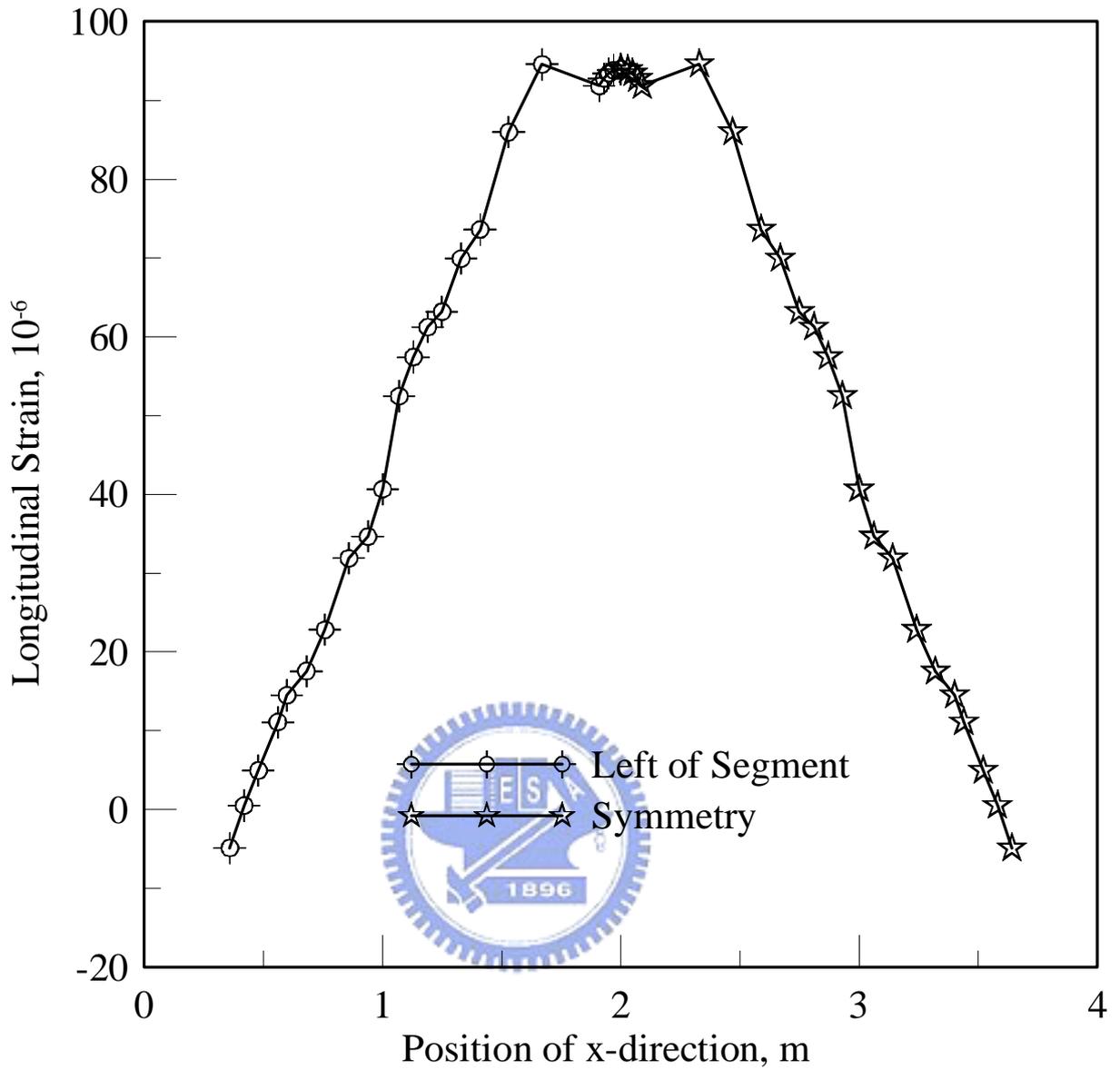


圖 5.6 FLAC 模擬環片中短鋼筋位置之軸向應變(載重為 10 噸)

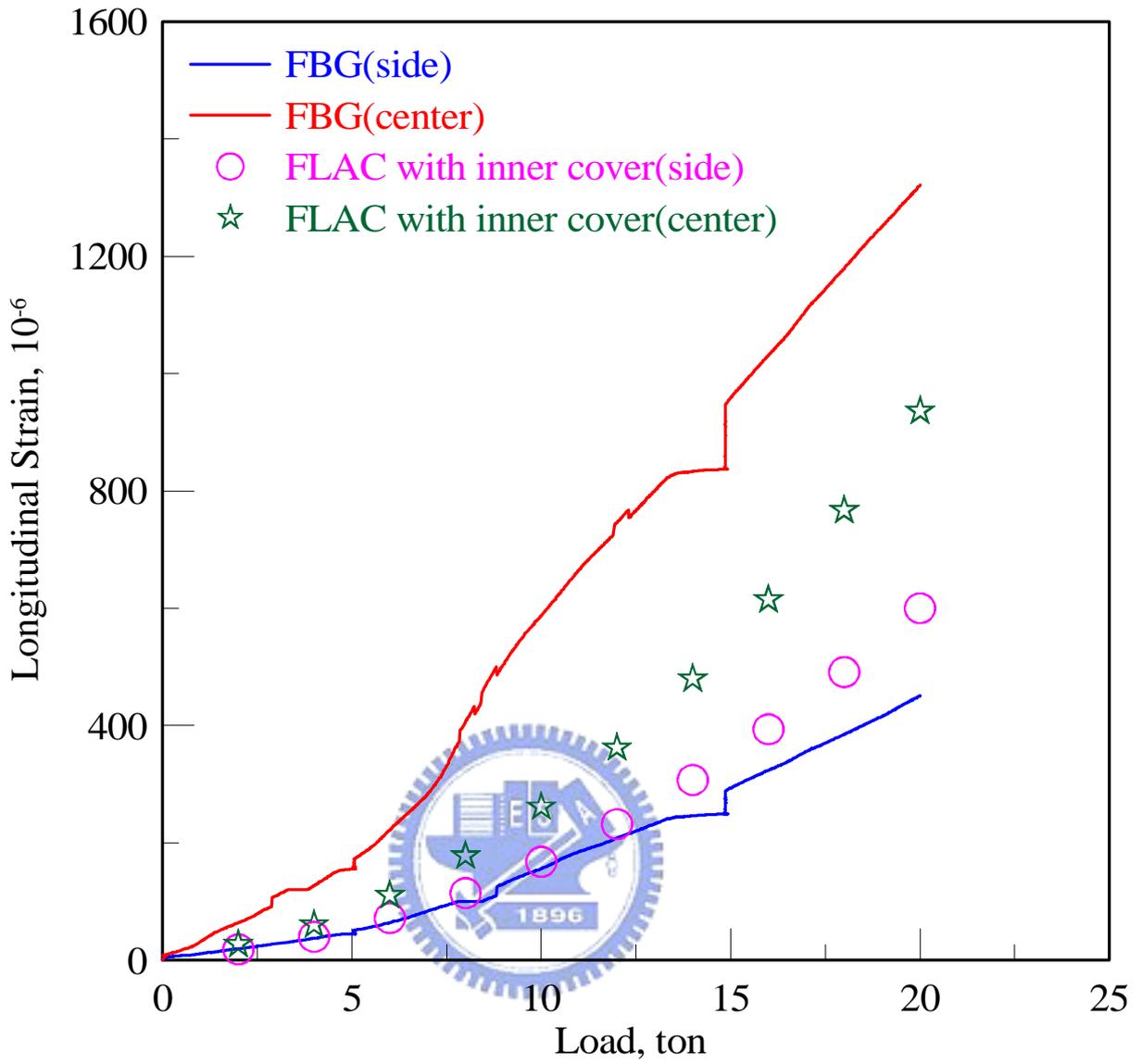


圖 5.7 FLAC 模擬與現場光纖光柵監測數據比較(短鋼筋)

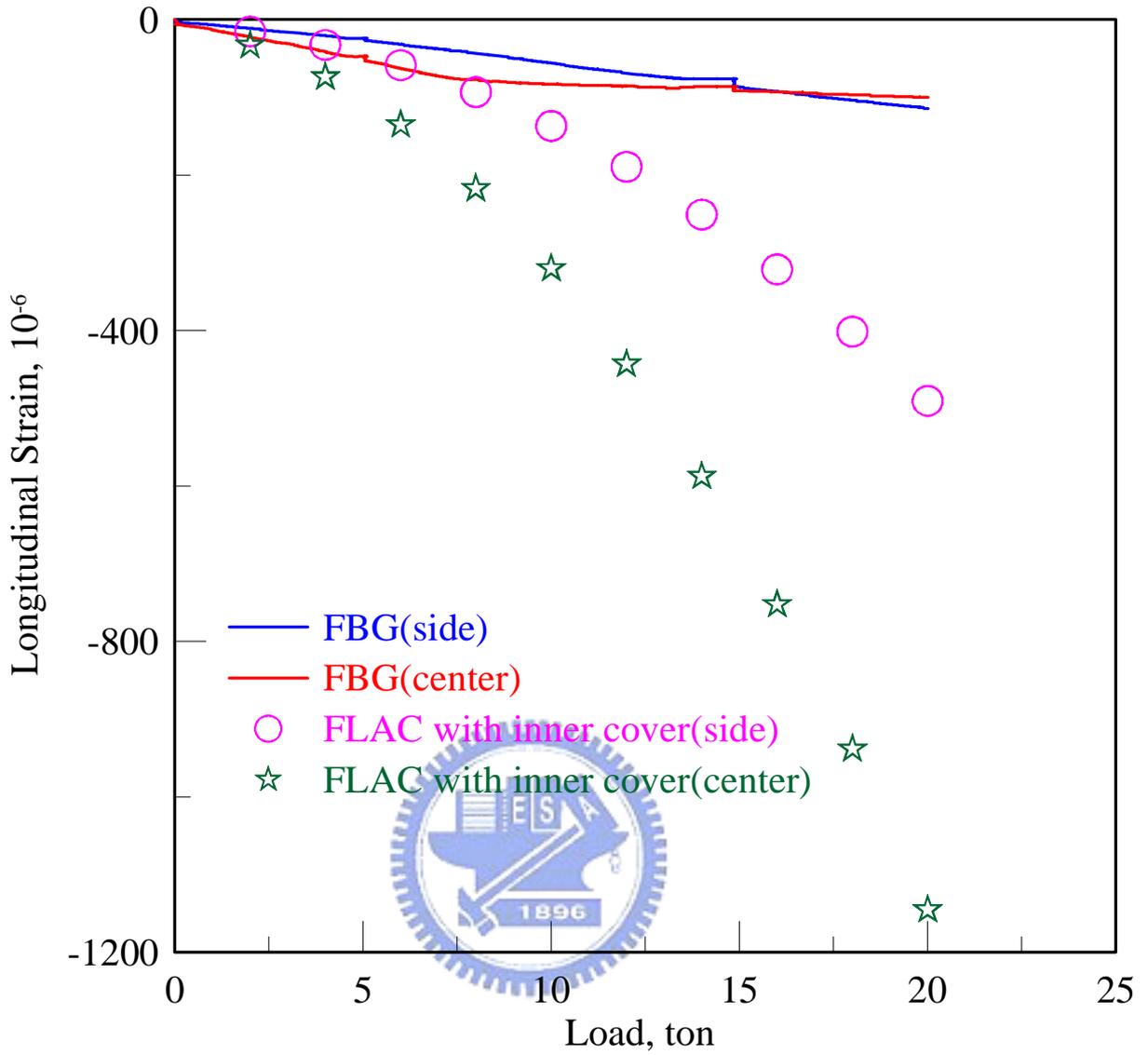


圖 5.8 FLAC 模擬與現場光纖光柵監測數據比較(長鋼筋)

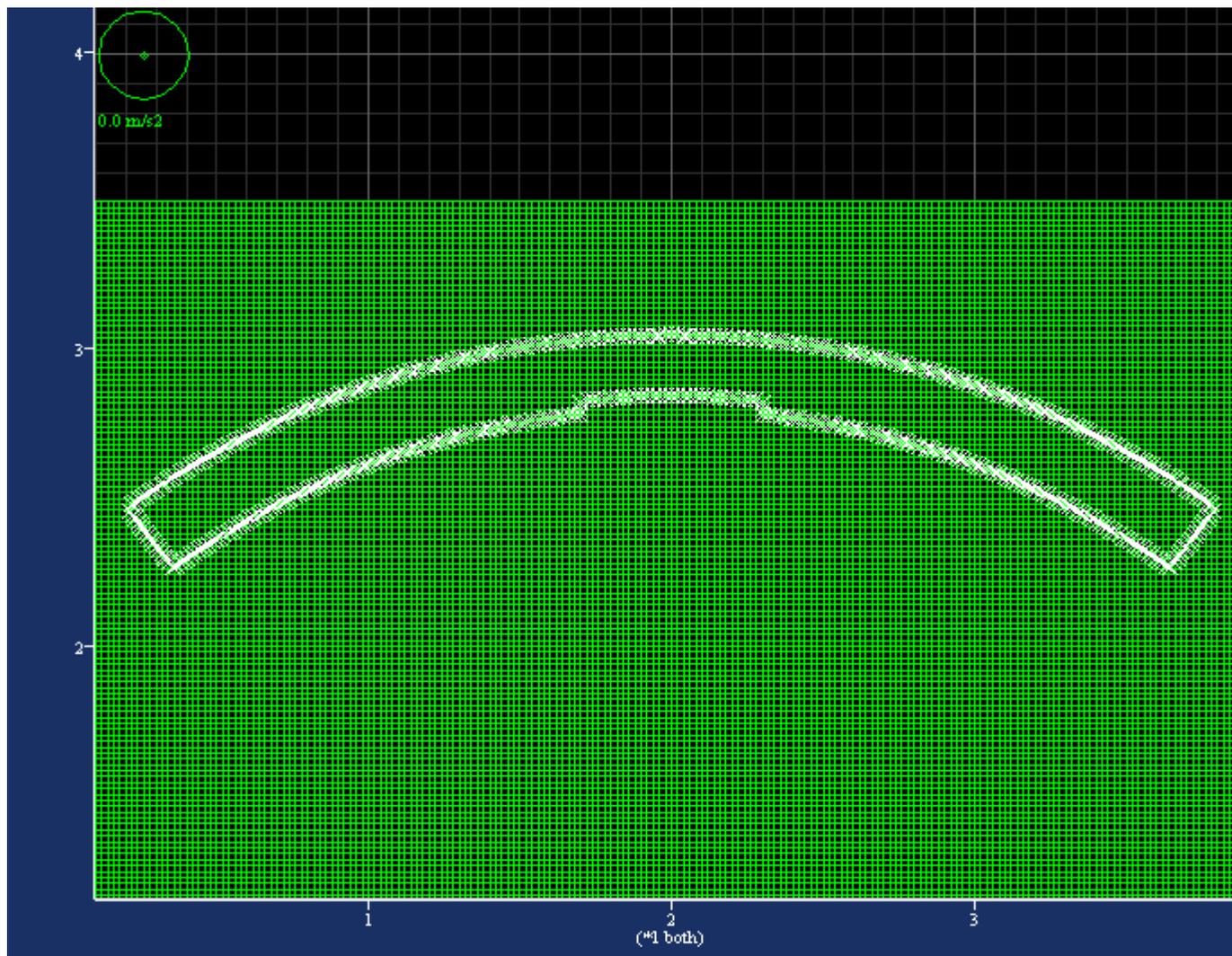


圖 5.9 內側保護層開挖至鋼筋表面以模擬環片抗彎過程之混凝土開裂

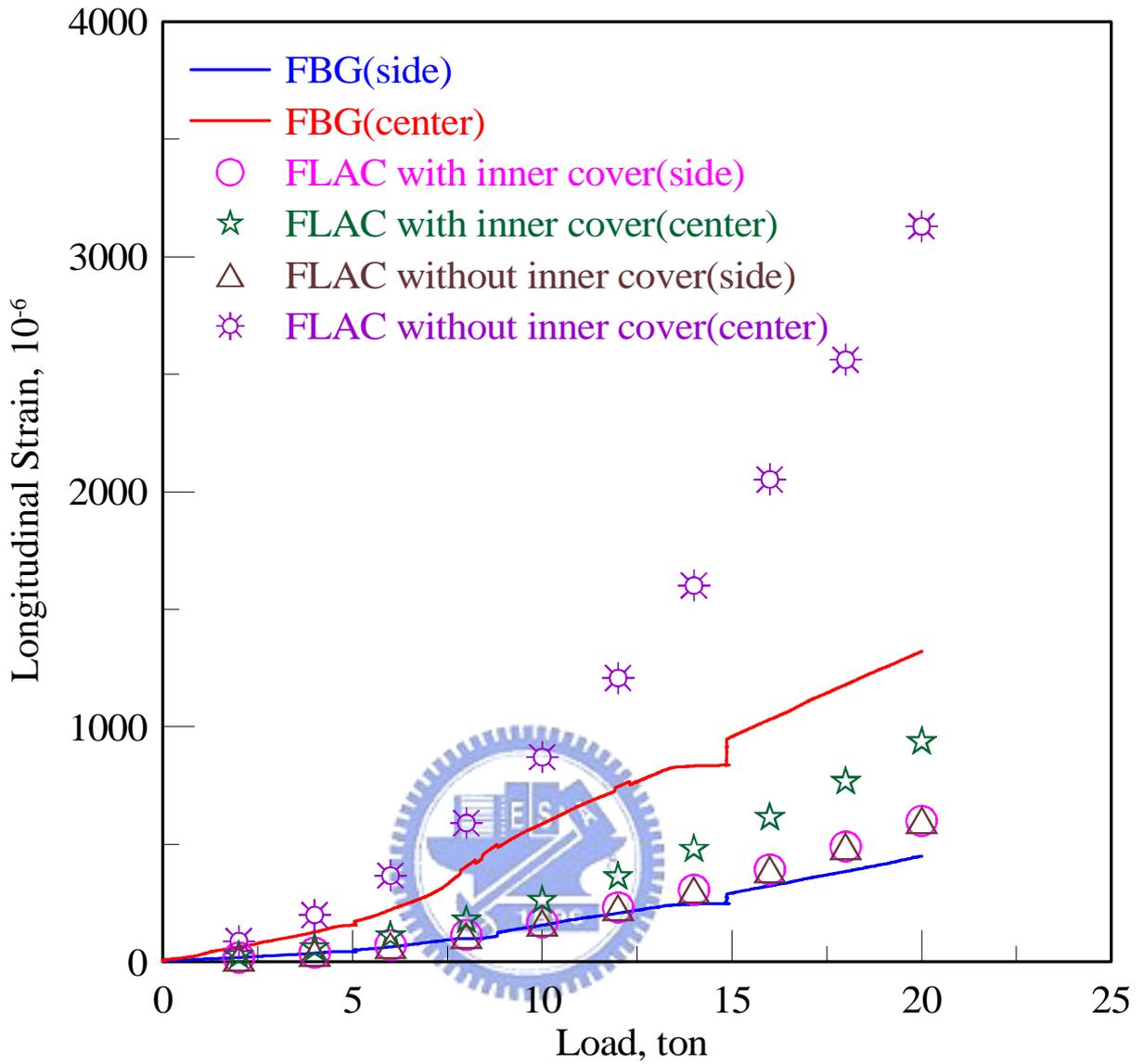


圖 5.10 完整環片、內側保護層開裂環片以及現場監測數據比較(短鋼筋)

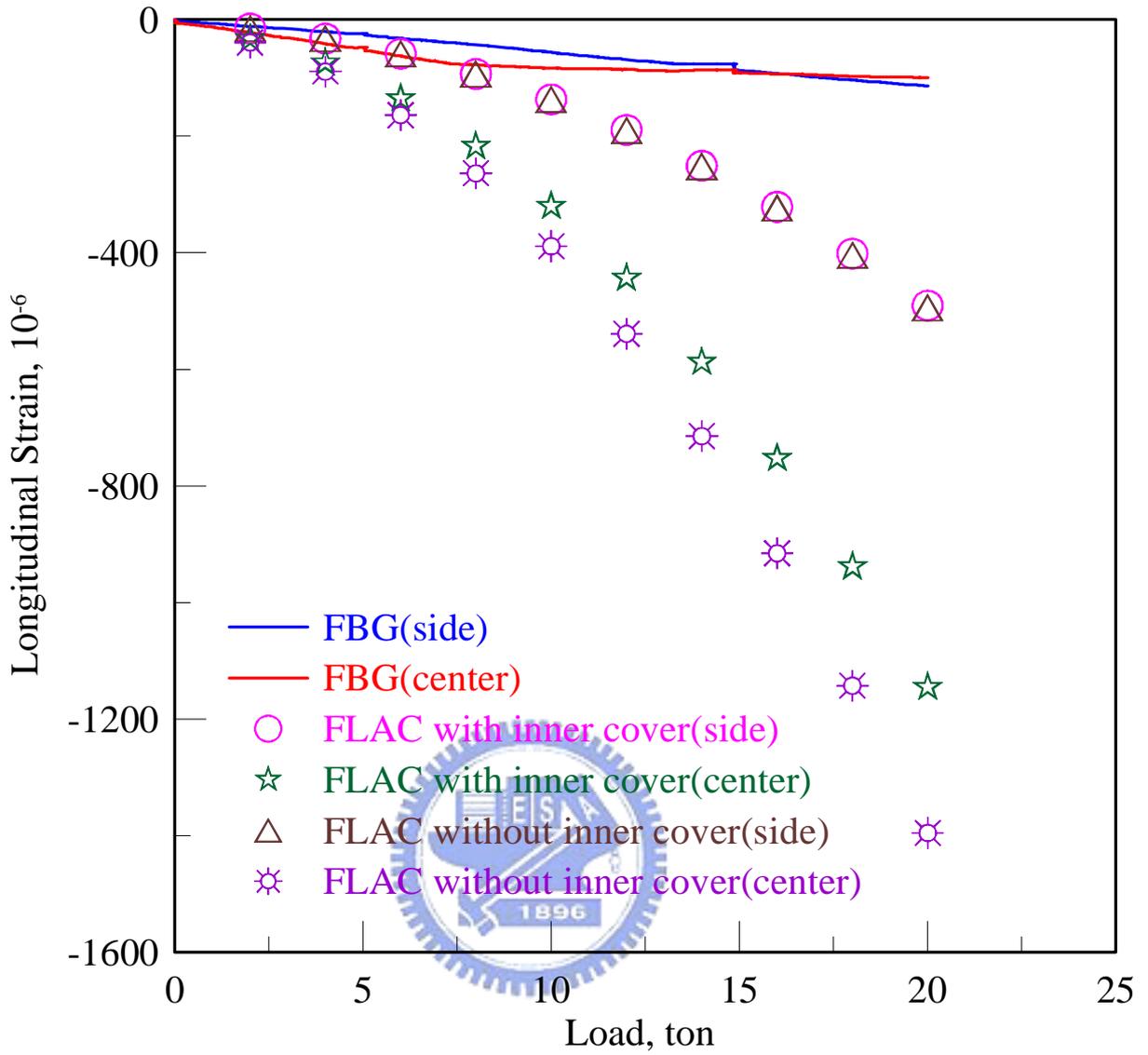


圖 5.11 完整環片、內側保護層開裂環片以及現場監測數據比較(長鋼筋)

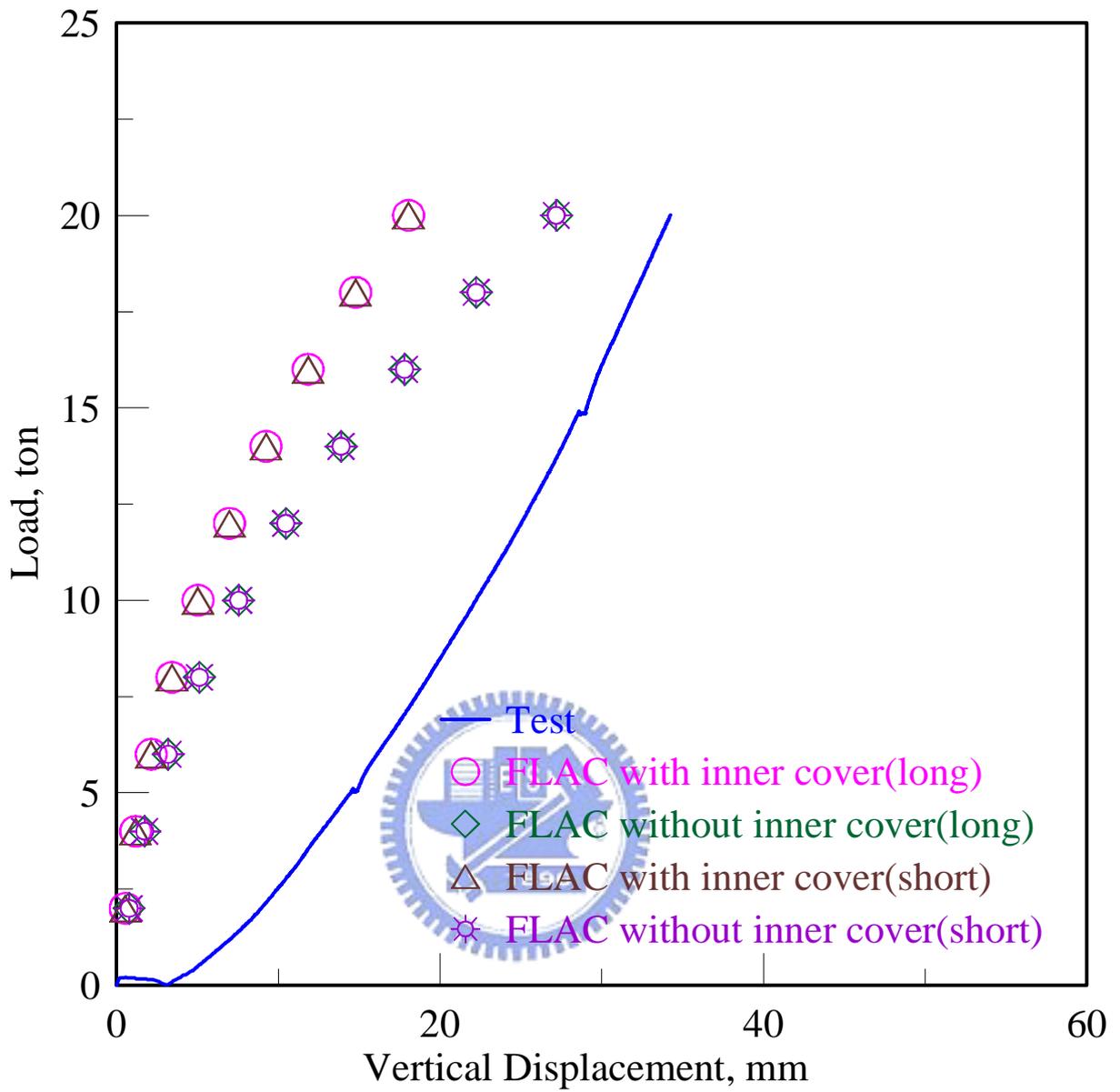


圖 5.12 FLAC 模擬環片中間段位移與現場試驗所得位移之比較

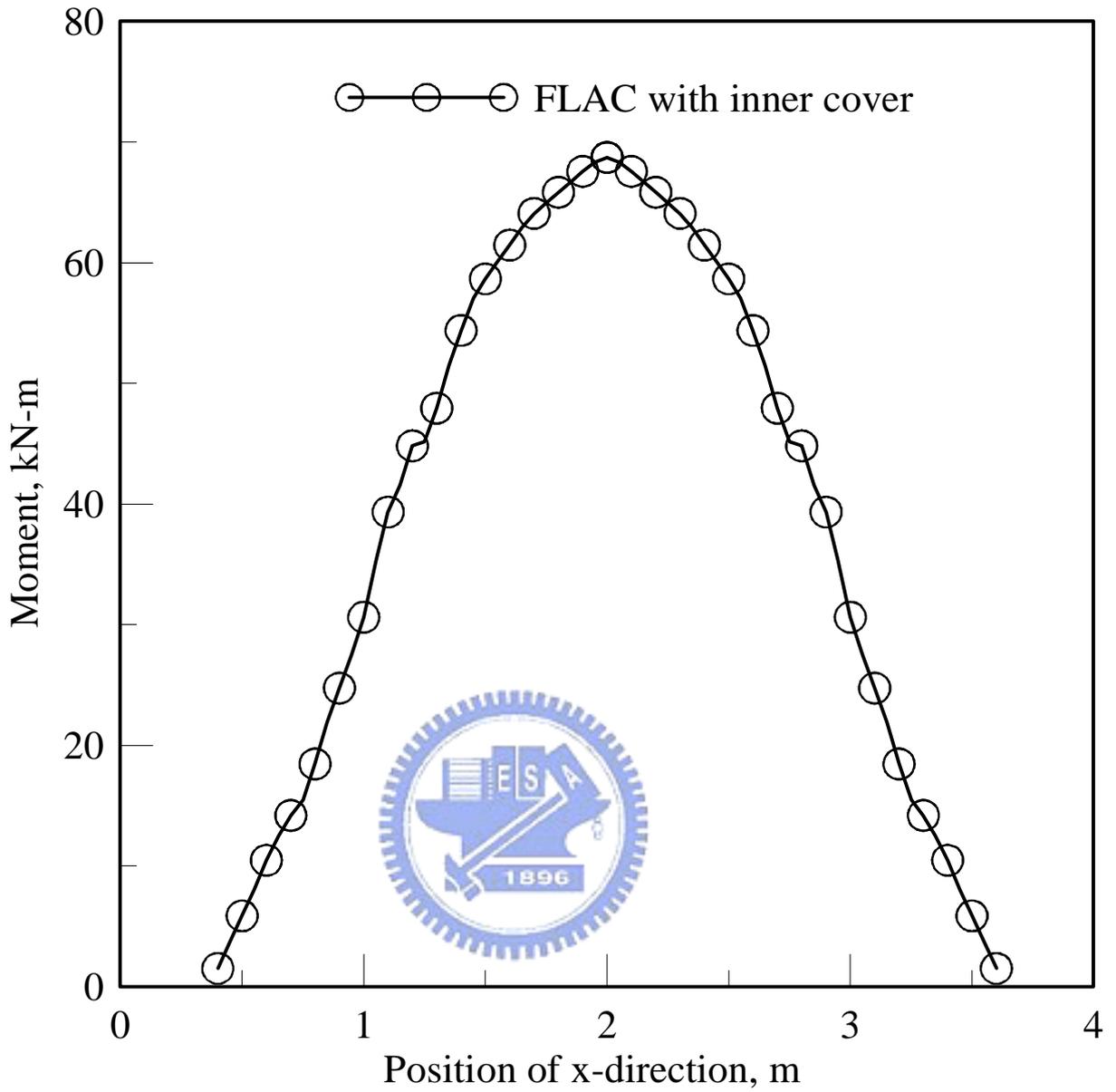


圖 5.13 FLAC 模擬完整環片之彎矩圖(載重為 10 噸)

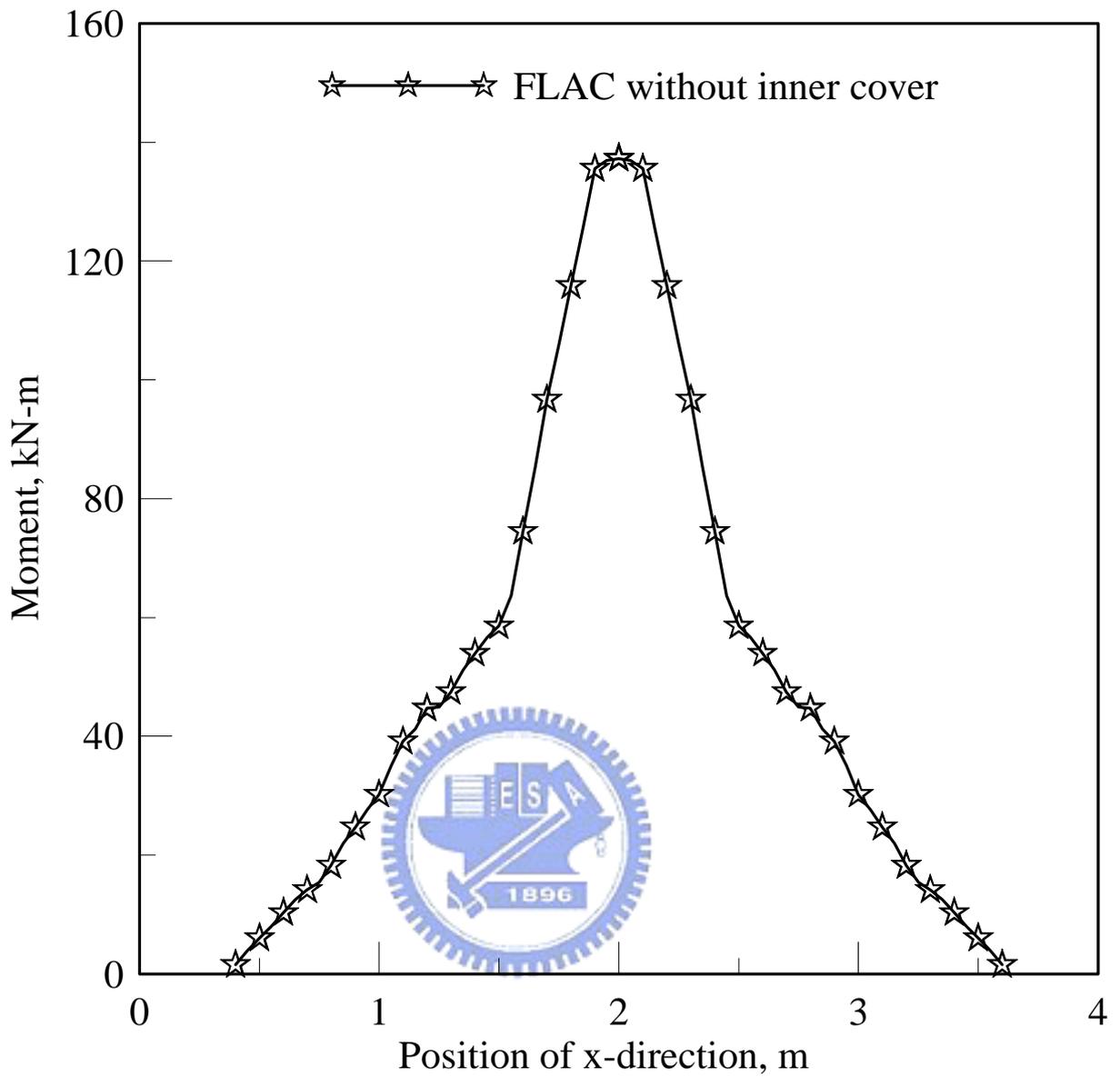


圖 5.14 FLAC 模擬內側保護層開挖環片之彎矩圖(載重為 10 噸)

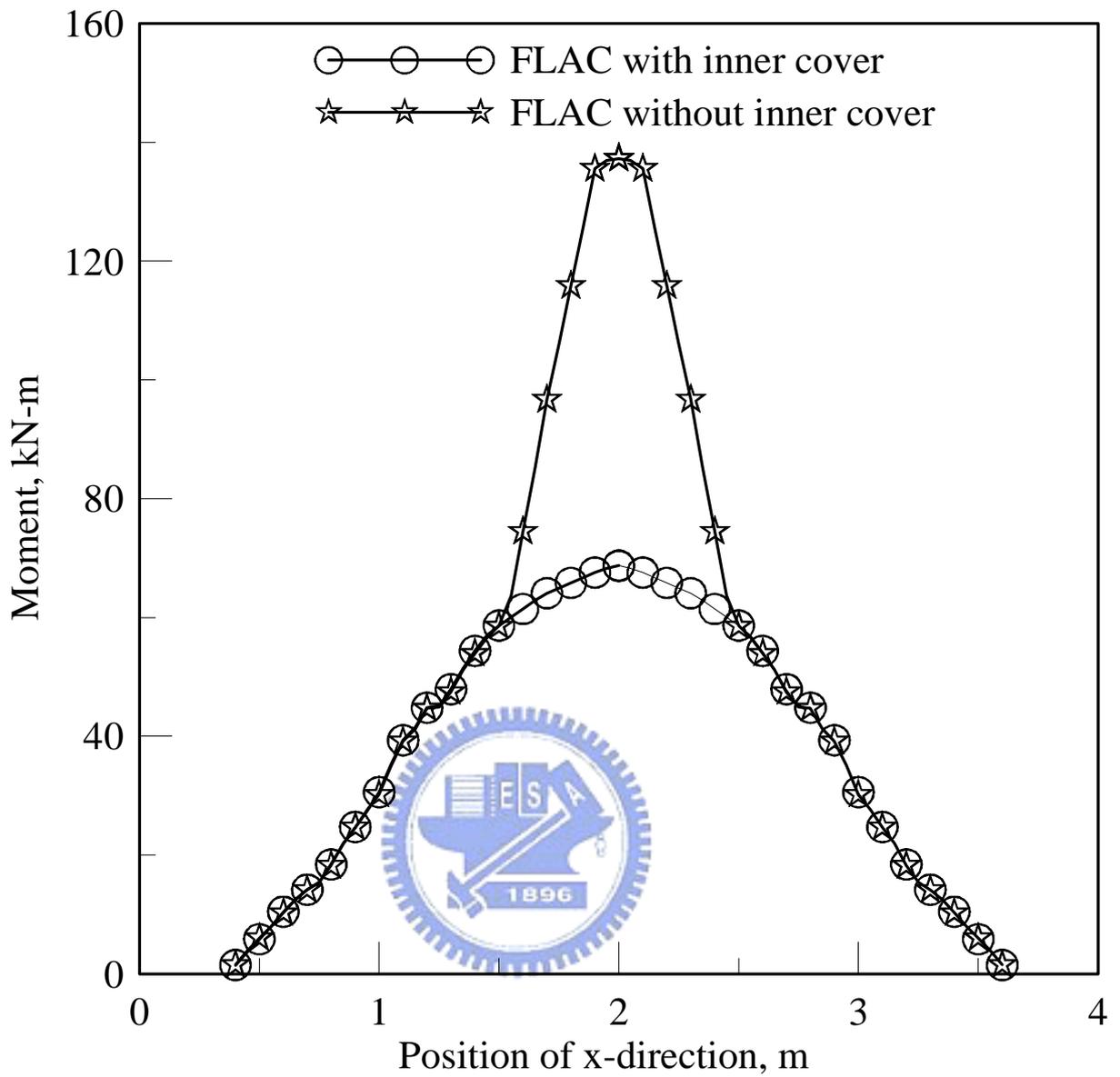


圖 5.15 完整環片與內側保護層開裂環片之彎矩比較(載重為 10 噸)

表 5.1 FLAC 參數設定值

參數名稱		數值
預鑄混凝土襯砌環片抗壓強度		$F_c' = 45 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
襯砌之柏松比		$\nu = 0.2$
襯砌之彈性模數		$E = 31527.6 \text{ (MPa)}$
鋼筋混凝土單位重		$D = 2446.483 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
剪力模數		$S = 13136.5 \text{ MPa}$
體積模數		$B = 17515.3 \text{ MPa}$
邊界條件	載重	0~36 ton，每次增量 2 ton (向下↓)
	固定邊界	Fix Y (Roller)
其他設定		重力加速度 $g \text{ (9.81m/s}^2\text{)}$
		大應變 (Large Strain)

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究從光纖光柵黏著技術之研發為起始點，歷經預鑄場內環片製作過程之監測與環片抗彎試驗之監測，到最後藉由 FLAC 數值模擬來說明整片環片之受力行為，得到以下結論：

1. 研究所選用之 353ND 熱固膠，為專門用於光纖通訊元件上之接著劑，因為其主要為環氧樹脂，所以對多種溶劑和化學材料具有優良的抗性。尤其是加熱至 150°C，僅需 1 分鐘即可達到完全固化強度，施工之便利性為其一大優勢。
2. 鋼筋中間銑一溝槽，溝槽體積與整段鋼筋體積相較之下，顯的微小，且溝槽有填滿接著劑與防水膠，對於整段鋼筋之強度，影響甚小。
3. 對於從鋼筋籠組立、混凝土澆置、各階段養護至環片製作完成，有一完整的記錄，可作為未來設計時的參考。
4. 環片抗彎試驗過程中，光纖光柵所量測之環片反應與混凝土應變計反應相符，且光纖光柵鋼筋應變計能承受之載重亦超過設計之載重，對於將來整個隧道完工後開始營運通車，光纖光柵的多工性、靈敏性與耐久性定能對整個隧道運轉歷史作一個完整的紀錄。
5. 光纖光柵監測的最大優勢在於其多工性，同一環片監測，使用傳統電子式監測儀器必須考慮龐大的電線配置，增加施工之不便。光纖光柵則為

多點分佈式監測，只要光柵波長配合得宜，則可將光柵熔接成串，輸出之光纖傳輸線僅需一條即可。

6. 光纖光柵內埋於環片鋼筋，可避免於混凝土澆置過程中，因為人工震動搗實所造成之感測器損壞情形。
7. 對於光纖光柵感測器無法監測獲得之其他位置力學狀態，可藉由 FLAC 的模擬得到，補其不足之處。且本研究使用之 FLAC 分析雖為二維模擬，但其單位厚度 1m 與實際環片厚度剛好相符。
8. 藉由 FLAC 反算得到彎矩分佈情形，可提供設計環片時，斷面形狀與配筋量之參考。

6.2 建議



對於本研究及未來建議如下：

1. 此次只針對一片 A 型環片試驗，建議可於 B 型環片與 K 型環片裝設光纖光柵監測系統。
2. 可嘗試減少環片主鋼筋量，找出設計與成本之最佳平衡點。
3. 光纖光柵鋼筋應變計可嘗試使用焊接固定，如此更接近實際狀況。
4. 若試驗費用充足，建議增加光纖光柵量測點之數量，更能提供設計分析上之參考。
5. 嘗試於 FLAC 模擬環片中，加入鋼筋特性之不同介面參數，可能更趨於實際狀況。

參考文獻

ACI-318-95, 1995, American Concrete Institute, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, Metric Edition.

American Institute of Steel Construction, 1994, Load and Resistance Factor Design Manual.

Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineers, 1984, Reinforced Concrete Design Handbook for Building Structures.

Chiang, S. D.H. and Tsai, T. B., 1984, Structural Design Handbook.

Fadum, R. E., 1948, *Influence Values for Estimating Stresses in Elastic Foundation*, Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mechs. Fndn. Eng., Vol. 3, pp. 77-84.

Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., and Kawasaki, B. S., 1978, *Applied Physics Letters*, Volume 32, pp. 647-649.

Hill, K. O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D. C., and Albert, J., 1993, *Applied Physics Letters*, Volume 62, pp. 1035-1037.

Hill, K. O. and Meltz, G., 1997, *Journal of Lightwave Technology*, Volume 15, pp. 1263-1276.

Hibbeler, R. C., 2005, *Mechanics of materials*, 6th ed. Upper Saddle River, N.J.

Japan Society of Civil Engineers, 1996, *Japanese Standard for Shield Tunneling*, the third edition.

Journal of Petroleum Technology., 1977, *The SI Metric System of Units and SPE's Tentative Metric Standard*, pp. 1575-1616.

Kashyap, R., 1999, *Fiber Bragg Gratings*, San Diego, CA.

Meltz, G., Morey, W. W. and Glenn, W. H., 1989, *Opt. Lett.*, Vol. 14, pp. 823-825.

Newmark, N. M., and Rosenblueth E., 1971, *Fundamentals of Earthquake Engineering*, Prentice-Hall.

Park, R., and Paulay, T., 1975, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons.

Rao, Y. J., 1998, Fiber Bragg grating sensors: Principles and applications, in *Optical Fiber Sensor Technology*, Vol. 2, K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, eds., pp. 355-389, Chapman & Hall, London.

Skempton, A. W., and Chrimes, M. M., 1994, Thames Tunnel: geology, site investigation and geotechnical problem, *Geotechnique* 44, No. 2, pp. 191-216.

Schmidt, B., *Prediction of Settlements due to Tunneling in Soil. Three Case Histories.*

Zienkiewicz, O. C., 1977, *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill.

臺北市政府捷運工程局，2002，臺北都會區大眾捷運系統土木工程設計手冊第十一版。

臺北市政府捷運工程局，2006，捷運隧道工程實務，捷運叢書 6。

行政院公共工程委員會，公共工程施工綱要規範第 02495 章【監測儀器】
第 1.5.4 節【儀器說明】。

行政院公共工程委員會，公共工程施工綱要規範第 03390 章【混凝土養護】
第 3.1.4 節【加速養護】。

何泰源、陳卓然和曾逸舟，2004，潛盾隧道環片襯砌之設計方法與設計實
例，中華技術季刊第 63 期。

劉波和韓彥輝，2005，FLAC 原理、實例與應用指南，人民交通出版社。

美國 EPOXY Technology 公司 <http://www.epotek.com/>。

尚貫科技 <http://www.topgun1.com.tw/index.htm>。

永寬化學股份有限公司 <http://everwide.com.tw/zh-tw/index.php>。

巨孚儀器工業股份有限公司 <http://www.giant-force.com.tw/>。