

99-50-7466
MOTC-IOT-98-H1DB012

橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測 系統整合應用研究



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 4 月

GPN : 1009901430

定價 100 元

99-50-7466
MOTC-IOT-98-H1DB012

橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測 系統整合應用研究

著者：邱永芳、饒正、黃安斌、何彥德、李瑞庭

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究 /
邱永芳等著.-- 初版.-- 臺北市:交通部運研所,
民 99.04

面; 公分

參考書目:面

ISBN 978-986-02-3217-2(平裝)

1. 橋梁工程 2. 環境監測 3. 監視系統

441.816029

99007682

橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究

著 者:邱永芳、黃安斌、饒正、何彥德、李瑞庭

出版機關:交通部運輸研究所

地 址:10458 台北市敦化北路 240 號

網 址:www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話:(04) 26587176

出版年月:中華民國 99 年 4 月

印 刷 者:良機事務機器有限公司

版(刷)次冊數:出版一刷 110 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價:100 元

展 售 處:

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話:(02)23496880

國家書店松江門市:10485 台北市中山區松江路 209 號 F1•電話:(02)25180207

五南文化廣場:40042 台中市中山路 6 號•電話:(04)22260330

GPN:1009901430

ISBN:978-986-02-3217-2 (平裝)

著作財產權人:中華民國(代表機關:交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利,欲利用本著作全部或部分內容者,須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-02-3217-2 (平裝)	政府出版品統一編號 1009901430	運輸研究所出版品編號 99-50-7466	計畫編號 98-H1DB0012
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：邱永芳 研究人員：饒正 聯絡電話：04-26587192 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立交通大學防災工程研究中心 計畫主持人：黃安斌 研究人員：黃安斌、何彥德、李瑞庭 地址：新竹市大學路 1001 號 聯絡電話：03-5712121		研究期間 自 98 年 5 月 至 98 年 12 月
關鍵詞：橋墩、振動、基礎沖刷			
摘要： 部分橋梁等跨河構造物，不但部分結構例如橋墩基礎安置在河道內，橋梁兩端之橋臺也佔據原河道部分之排水斷面，這些因素使得河水流經跨河構造物時流速加快。水與橋墩基礎之互制與快速水流是造成橋墩基礎周圍河床沖刷最主要原因。受臺灣氣候、地形與地質特性之影響，暴雨期間河流水位高漲且流速極高，在上游區域則經常觸發土石流使得河川洪水具有高泥沙含量。此高泥沙含量洪水夾雜浮木與石塊，順溪流向下沖刷，造成衝擊與破壞。現有橋墩基礎周圍河床沖刷深度即時監測技術極為有限。本計畫嘗試使用溫度與水壓分佈即時量測的方法來推估洪水期間橋墩基礎周圍河床沖刷深度。於台一線大甲溪一橋墩基礎上下游側各安置一鑽孔。在鑽孔內不同深度安裝多個溫度與水壓計，橋墩結構上安置傾角/加速度儀。全部溫度與水壓計封裝於高強度鋼管。並於鄰近岸邊橋臺外監測機房內安裝資料解讀與訊號傳輸系統，綜合探討根據孔隙水壓與水溫分佈變化來推測橋墩鄰近基礎沖刷深度。 所安裝監測系統於莫拉克颱風期間量得水壓與溫度分佈隨時間之變化。根據讀數所推估之河床沖刷深度及發生時間符合事後觀察河床沖刷之跡象。本計畫驗證了該系統可以提供橋梁管理單位在洪水來臨時，以即時的資訊判斷橋墩基礎周圍河床沖刷深度以及封橋的必要性。根據此監測系統讀數來做決定，可在保護用路人安全的情況下，將封橋與否做彈性之管理。另外水壓計與傾角/加速度儀的安裝可以收集橋墩基礎附近水壓與結構行為等資料，這些資料加以整合與分析，將有助於日後新橋梁興建或既有橋梁補強的分析與設計。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
99 年 4 月	148	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價購買。
機密等級： ☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密 （解密條件：☐ 年 月 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密， ☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密） ☒普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Integration and Field Deployment of a Real-time Bridge Pier Vibration and Foundation Soil Pore Water Pressure Monitoring System			
ISBN (OR ISSN) ISBN 978-986-02-3217-2 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009901430	IOT SERIAL NUMBER 99-50-7466	PROJECT NUMBER 98-H1DB012
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yung-fang PROJECT STAFF: Jao Cheng PHONE: (04) 26587192 FAX: (04) 26564418			Project Period From May 2009 To December 2009
RESEARCH AGENCY: National Chiao Tung University, Natural Hazard Mitigation Engineering Research Center PRINCIPAL INVESTIGATOR: Huang An-bin PROJECT STAFF: Huang An-bin, Ho Yen-te, Lee Jui-ting ADDRESS: #1001, Ta Hsueh Rd., Hsin Chu, 300, Taiwan, R.O.C PHONE: (03) 5712121			
KEY WORDS: Bridge Pier, Vibration, Scouring			
ABSTRACT: Some river-crossing structures such as bridge piers are often placed within the river channel. These structural elements along with the approaching ramps reduce the original sectional area of the river and cause the flow rate to increase. The interaction between the water and bridge pier foundations and high flow rate are the main reasons for local scouring. Affected by the weather and land formation/geology, the water level and flow rate are usually very high during heavy rainfalls. These conditions tend to trigger mudflows in the upstream areas and result in high mud-content in the floodwater. The high mud-content flow mixed with boulders and tree trunks, and being under high speed are highly destructive. Techniques in real-time monitoring of the bridge foundation scouring are very limited. This project made an attempt to infer the bridge foundation scouring based on real-time temperature and pore water pressure distribution measurements around the bridge pier foundation. Boreholes were drilled respectively, at the front and back end of a bridge pier of the Taiwan Highway 1 bridge crossing Tajia River. A pair of inclination and accelerometer was installed in the bridge pier. All pore pressure and temperature sensors were sealed in a steel casing before being inserted into the borehole. The signals were transmitted to data logging and internet data transmission systems placed inside of an on-shore control room. The recorded data proved the basis for overall evaluation of the depth of scouring surrounding the bridge pier foundation. The installed monitoring system successfully recorded the variations of temperature and pore water pressure profiles during Typhoon Morakot. The depth of scouring estimated based on the recorded reading was consistent with the ground configuration observed after the typhoon. The project shows that this automated monitoring system is capable of offering the bridge manager real-time information to judge the severity of the scouring and decide if it is necessary to close the bridge. Using the real-time data as the basis, the control of the bridge is optimized while offering maximum protection to the bridge users. The instrumentation will enable information regarding the structural behavior of a bridge via the long-term collection of inclination/acceleration and pore-water pressure measurement data. The compilation and analysis of these data will help in the design of new bridges or rehabilitation of the old.			
DATE OF PUBLICATION April 2010	NUMBER OF PAGES 148	PRICE 100	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
圖目錄	V
表目錄	IX
第一章 緒 論	1-1
1.1 計畫背景	1-1
1.2 計畫工作項目說明	1-3
1.3 計畫完成工作項目說明	1-4
第二章 光纖光柵感測系統	2-1
2.1 光纖光柵原理簡述	2-1
2.2 光纖光柵傾斜/加速度感測	2-5
2.3 FBG-I/A 加速度感測原理	2-6
2.4 FBG-I/A 傾斜感測原理	2-9
2.5 FBG 水壓計	2-12
第三章 光纖水壓計現地安裝	3-1
3.1 初期預定施工方法	3-1
3.2 現地勘查與施工	3-8
第四章 量測數據結果	4-1
4.1 A 監測管量測數據	4-1

4.2 B 監測管量測數據.....	4-8
4.3 C 監測管量測數據.....	4-13
4.4 監測數據分析	4-17
4.5 安裝方法改良與建議	4-42
第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 結論	5-1
5.2 建議	5-2
參考文獻.....	參-1
附錄一 期中審查委員意見及辦理概況表.....	附錄 1-1
附錄二 期末審查委員意見及辦理概況表.....	附錄 2-1
附錄三 期末報告簡報資料.....	附錄 3-1

圖 目 錄

圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖	2-3
圖 2.2 光纖光柵感測機制示意圖	2-4
圖 2.3 FBG accelerometer 側面剖示圖	2-5
圖 2.4 FBG inclinometer 剖示圖	2-6
圖 2.5 FBG-I/A 加速度感測示意圖	2-8
圖 2.6 FBG-I/A 傾斜感測示意圖	2-10
圖 2.7 FBG-I/A 實體圖	2-11
圖 2.8 FBG-I/A 傾斜標定結果	2-12
圖 2.9 光纖光柵內連續遞增之漸變應變	2-12
圖 2.10 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變	2-13
圖 2.11 FBG 波長飄移分析示意圖	2-13
圖 2.12 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖	2-14
圖 2.13 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖	2-15
圖 2.14 等週期光纖光柵水壓計實體圖	2-16
圖 2.15 等週期光纖光柵水壓計率定與理論分析比較圖	2-17
圖 2.16 光纖光柵溫度棒	2-19
圖 2.17 光柵水壓計及溫度光柵率定圖	2-20
圖 2.18 水壓計鋼管封裝示意圖	2-20
圖 3.1 現地感測器系統佈置示意圖	3-3
圖 3.2 橋墩沖刷監測示意圖	3-4
圖 3.3 未受沖刷前橋墩外水壓分佈示意圖	3-5

圖 3.4 受沖刷後橋墩外水壓分佈示意圖	3-5
圖 3.5 溫度式沖刷感測原理	3-6
圖 3.6 溫度式沖刷量測結果	3-6
圖 3.7 不同地層材料平均粒徑與沖刷水流臨界速度	3-7
圖 3.8 現場勘查選定橋墩位置	3-9
圖 3.9 現地感測器安裝位置示意圖	3-10
圖 3.10 現地監測機房位置	3-11
圖 3.11 現地鑽孔圖	3-13
圖 3.12 現地水壓計鑽孔內安裝	3-13
圖 3.13 現地水壓計鑽孔內安裝完成	3-14
圖 3.14 地面光纖線路保護鋼管	3-14
圖 3.15 光纖線路保護鋼管固定於橋墩上	3-15
圖 3.16 單一組光纖水壓計保護鋼管安裝完成圖	3-15
圖 3.17 三組光纖水壓計保護鋼管安裝完成圖	3-16
圖 3.18 強力束帶保護圖	3-17
圖 3.19 強力束帶保護安裝完成圖	3-17
圖 3.20 標高完成圖	3-18
圖 3.21 光纜架設施工圖	3-18
圖 3.22 攝影機安裝完成圖	3-19
圖 3.23 測傾/加速度計安裝完成圖	3-19
圖 3.24 測傾/加速度數據擷取系統圖	3-20
圖 3.25 FBG 測傾儀內部實體圖	3-20
圖 3.26 FBG 測傾儀安裝完成圖	3-21

圖 3.27 現場傳輸系統施工圖	3-21
圖 3.28 現場擷取與傳輸系統完成圖	3-22
圖 3.29 現場水壓計安裝完成圖	3-23
圖 4.1 8 月 7 日中午莫拉克颱風現地照片	4-2
圖 4.2 8 月 10 日中午莫拉克颱風現地照片	4-3
圖 4.3 A 管 0~3 米水壓計歷時壓力變化圖	4-4
圖 4.4 A 管 3.5~9.5 米水壓計歷時壓力變化圖	4-5
圖 4.5 A 管 11~16.5 米水壓計歷時壓力變化圖	4-6
圖 4.6 A 管各深度總水頭歷時變化	4-6
圖 4.7 A 管各深度之溫度歷時變化	4-7
圖 4.8 B 管 0~4 米水壓計歷時壓力變化圖	4-9
圖 4.9 B 管 5.5~14.5 米水壓計歷時壓力變化圖	4-10
圖 4.10 B 管 16.5 米水壓計歷時壓力變化圖	4-11
圖 4.11 B 管各深度之總水頭歷時變化	4-11
圖 4.12 B 管各深度之溫度歷時變化	4-12
圖 4.13 C 管 0~4 米水壓計歷時壓力變化圖	4-14
圖 4.14 C 管 5.5~8 米水壓計歷時壓力變化圖	4-15
圖 4.15 C 管各深度之總水頭歷時變化	4-15
圖 4.16 C 管各深度之溫度歷時變化	4-16
圖 4.17 A 管 1 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-20
圖 4.18 A 管 1.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-21
圖 4.19 A 管 2 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-22
圖 4.20 A 管 2.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-23

圖 4.21 B 管 0.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-24
圖 4.22 B 管 1.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-25
圖 4.23 B 管 2 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-26
圖 4.24 B 管 6.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-27
圖 4.25 C 管 0.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-28
圖 4.26 C 管 1.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-29
圖 4.27 C 管 2 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-30
圖 4.28 C 管 6.5 米深度水壓與溫度量測比較圖	4-31
圖 4.29 A 管 1 米深度流速與溫度量測比較圖	4-32
圖 4.30 A 管 1.5 米深度流速與溫度量測比較圖	4-33
圖 4.31 A 管 2 米深度流速與溫度量測比較圖	4-34
圖 4.32 A 管 2.5 米深度流速與溫度量測比較圖	4-35
圖 4.33 B 管 0.5 米深度流速與溫度量測比較圖	4-36
圖 4.34 B 管 1.5 米深度流速與溫度量測比較圖	4-37
圖 4.35 B 管 2 米深度流速與溫度量測比較圖	4-38
圖 4.36 C 管 0.5 米深度流速與溫度量測比較圖	4-39
圖 4.37 C 管 1.5 米深度流速與溫度量測比較圖	4-40
圖 4.38 C 管 2 米深度流速與溫度量測比較圖	4-41
圖 4.39 現場損壞勘查	4-43
圖 4.40 沖刷深度 1 米	4-44
圖 4.41 新佈設光纖光柵水壓計安裝示意圖	4-45

表 目 錄

表 3.1	感測器波長與安裝深度配置.....	3-13
表 4.1	A 管消波塊內不同深度土層估計被沖刷時間.....	4-24
表 4.2	B 管消波塊內不同深度土層估計被沖刷時間.....	4-28
表 4.3	C 管消波塊內不同深度土層估計被沖刷時間表.....	4-32

第一章 緒 論

1.1 計畫背景

橋梁等跨河構造物，在建造時不但部分結構例如橋墩基礎經常安置在河道內，橋梁兩端之橋臺也會佔據原河道部分之排水斷面，這些因素使得河水流經跨河構造物時流速加快。水與橋墩基礎之互制與快速水流是造成橋墩基礎周圍河床沖刷最主要原因。受臺灣氣候、地形與地質特性之影響，暴雨期間河流水位高漲且流速極高，在上游區域則經常觸發土石流使得河川洪水具有高泥沙含量。此高泥沙含量洪水可將巨石浮起，順溪流向下沖刷，造成更大之衝擊與破壞力。橋墩基礎沖刷是一極端複雜的行為，橋墩附近之流場主要可分為四種流況：墩前壅水、向下射流、馬蹄形渦流與尾跡消散渦流。當水流遇到橋墩時在其前方產生一向下水流，此水流內之總水頭由上而下遞減。此向下水流會對河床土石材料產生沖刷，形成土壤孔隙水壓增加，有效應力減少，因而在橋墩兩旁則產生馬蹄形渦流沖刷橋墩周圍及後方河床並由尾跡消散渦流將被沖刷之浮動土石帶走。影響橋墩基礎沖刷之因素包括橋墩幾何形狀與尺寸、河道寬度、水深、流速、水流方向與特性（質量單位重、黏滯性等）、沈積土石顆粒尺寸、河床材料等。但至今無法有效將這些交互影響之複雜因素整合，分別探討其影響特性，本研究即綜合探討孔隙水壓力對總體破壞之機制以量測孔隙水壓力之變化來推測橋墩鄰近基礎之沖刷深度。

新建橋梁可以根據近來所累積經驗，以加深基礎的方法來增加橋梁結構體之安全度，但早期興建橋梁則不易做類似之改良而且數量龐大。國內的橋梁曾經有數次因為橋墩基礎沖刷而發生倒塌並造成人員傷亡，損失慘重。為避免類似慘劇再次發生，公路管理單位曾嘗試在颱風來臨前將某些具有崩塌可能之橋梁封閉，但此一措施對用路人造成許多不便。因此如何在確定橋梁安全的條件下將橋梁封閉時間降至最低，將對公路管理單位有極大之意義。基於以上原因，若能對橋梁基礎做即時監測，配合吾人對橋墩沖刷行為之經驗與知識，判斷橋梁

結構安全，應該可以在確保用路人安全與便利的條件下對橋梁封閉與否做出決策。

工程界對橋梁結構體監測之技術已有數十年的經驗，方法甚多。但在橋梁基礎沖刷監測之技術則比較有限。現有方法多以事後檢測基礎沖刷深度為目的，不易滿足自動化即時監測之要求。若使用電子式感測器做橋墩基礎周圍沖刷監測，在臺灣常有之颱風洪水情況下很容易受雷擊或水流衝擊破壞以致於無法發揮功能。因此感測器之耐用性、穩定度與如何在感測器現場安裝時做必要之保護是完成本計畫目標之重要考量。

光纖感測技術具有許多傳統電子感應技術沒有的優點，包括(1)體積小—光纖直徑一般為250 μm 左右體積甚小；(2)耐久性高—光纖之主要成份是矽(silica)為非金屬，可以長期埋在地下而不易腐蝕或改變其性質；(3)光纖訊號可長（數十公里）距離傳輸而不受電磁波干擾；(4)可以在同一光纖上做多點分佈式的監測。

國內目前已研發成功光纖光柵節理式偏斜儀（Fiber Bragg Grating Segmented Deflectometer, FBG-SD）、光纖光柵水壓計(FBG piezometer)、光纖光柵測傾儀(FBG inclinometer)、光纖光柵應變計(FBG strain gauge)等光纖感測器與光纖光柵解讀系統。FBG-SD設計是與傳統傾斜管匹配，將FBG-SD插入固定於地層內之傾斜管，以FBG-SD節理間偏斜角度之改變來估算傾斜管之變形分佈。FBG-SD已成功的應用於公路邊坡或地層開挖支撐變形之監測，一般FBG-SD感測範圍為正負2度角，光纖光柵拉伸應變量約為正負3,000至4,000 $\mu\epsilon$ (但可視感測器靈敏度做調整)，若每一感測器間距為1公尺長，則單一FBG-SD最大可感應位移量為正負3.14公分(總位移量為6.28公分)。國內外在FBG水壓感測技術方面也有初步之發展，國內目前所研發出的FBG水壓計的外部直徑大小約3公分，長度15公分，可安裝在現今一般的水位管內，FBG水壓計可量測精度為0.08kPa(約為0.8公分水位高度)，量測水位範圍可達600kPa(約為60公尺水位高度)，國內已經有安裝多點式FBG水壓計量測邊坡水壓變化的成功案例。FBG應變計經過適當封裝後，可量測沿著

光纖軸向方向的應變量，一般可量測範圍約為 $\pm 4,000\mu\epsilon$ ，可應用於地表拉伸計與裂縫計等感測器製作上。FBG測傾儀的為外部直徑大小約為4.5公分，長度25公分，其精度為0.002~0.003度，可量測範圍為 ± 10 度，可應用於橋墩傾斜與邊坡滑動監測上。除此之外使用光纖感應系統做監測需要實用而能夠維持長期穩定之訊號解讀裝置。市場上現有光纖訊號解讀系統並不一定能夠滿足現場監測在經濟與穩定性之需求，而必須在軟硬體方面做必要之檢測與改良。國內也已經有自行開發FBG解讀系統，所開發出的FBG解讀系統，精度可達 $1\mu\epsilon$ ，且可以針對各項工程進行符合現地安裝狀況與自動化監測的程式撰寫。

1.2 計畫工作項目說明

本研究在橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究計畫之主要工作內容與項目說明如下：

1. 相關感測器製作與封裝:將製作出適用於橋墩振動與基礎孔隙水壓監測的感測器，並將每一個感測器進行適合現地安裝的外部封裝。
2. 水壓計在鑽桿內之封裝作業:將製作完成後的光纖水壓計串聯在一起放入鑽桿內進行封裝。
3. 適用於現場橋墩基礎監測的感測器讀取系統組裝與測試。
4. 進行現地踏勘，選定一座橋梁做為現地橋墩基礎監測系統安裝場址。
5. 依據現地踏勘結果選定一橋墩，在其前後各進行一至少 15 公尺深鑽孔，並在兩個鑽孔內總共串接安裝至少 30 個水壓計。
6. 於水壓計上方橋墩安裝一組傾角/加速度感測器。
7. 於颱風期間做即時水壓、傾角/加速度監測，資料擷取與傳輸至試驗室，每 10 分鐘更新一次讀數。
8. 根據水壓分佈特性，橋墩傾角以及分析加速度數據 所得自然頻

率變化，為橋墩基礎周圍土壤沖刷深度，橋墩之穩定性與傾斜做整體即時評估。

9. 根據所得結果評估監測系統之功效。

1.3 計畫完成工作項目說明

本研究研究對於計畫完成工作內容如下：

1. 完成現地勘察與選定臺中縣大甲溪橋 27 號橋墩安裝感測器。
2. 完成現地鑽孔 A 監測管 18 米、B 監測管 18 米與 C 監測管 9 米。
3. 完成室內 40 組光纖光柵水壓計製作、測試與鑽桿內組裝。
4. 完成現地之光纜佈放至監測小屋，提供訊號傳輸使用。
5. A 監測管鑽孔內 15 組光纖光柵水壓計、B 監測管鑽孔內 15 組與 C 監測管 9m 鑽孔內 10 組光纖光柵水壓計現地安裝完成。
6. 現場光纖監測儀器之測試與擷取。
7. 現場 3.5G 遠端訊號傳輸架設完成。
8. 現場測傾/加速度計安裝完成。
9. 現場監視器與錄影機安裝完成。
10. 完成監測效果之評估。

第二章 光纖光柵感測系統

本研究在使用光纖感測技術已有多數之研發經驗。本章針對計畫中將使用之光纖感測技術原理與本研究所發展出之光纖感測器做一敘述與說明。

2.1 光纖光柵原理簡述

光纖光柵的製造係利用高能量同調雷射在光纖曝光造成折射率永久改變，成為一系列週期為 d 的明暗條紋，此稱之為光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG)。當一寬頻光耦合進入此一光纖時，除了滿足布拉格條件 (Bragg condition) 的特定波長，其餘波長都會因為相位差而相消 (Hill, 2005 ; Kersey, 1992 ; Meltz, 1989 ; Measures, 2001 ; Othons, 1999 ; Rao, 1998 ; 李瑞庭, 2005)。

其布拉格反射波長 λ_B 為

$$\lambda_B = 2nd \dots\dots\dots (2-1)$$

其中：

n = 光纖纖心的有效折射率

d = 折射率週期性改變的間距

圖 2.1 為光纖光柵反射原理示意圖，光柵中的週期明暗條紋類似在光纖中製造一系列透鏡組合，當寬頻光束通過這些透鏡組合時，造成某特定頻率光波被反射，而其他頻率光波則繼續向前傳導，而這些透鏡的間距不同，則被反射光波頻率亦不相同。

應變與波長飄移關係如圖 2.1 所展示，當光柵受到外力產生應變時，則造成光纖光柵原本間距 d 的改變增加量為 Δd ，帶入(2-1)式可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta d \dots\dots\dots (2-2)$$

根據應變的定義

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta d}{d} \dots\dots\dots (2-3)$$

得到

$$\Delta l = \left(\frac{\Delta d}{d} \right) l = \left(\frac{\frac{\Delta\lambda_B}{2n}}{\frac{\lambda_B}{2n}} \right) l \dots\dots\dots (2-4)$$

因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \dots\dots\dots (2-5)$$

當外力施加產生應變後，不只是反射回來的 λ_B 會改變，光纖的有效折射率 n 也會同時改變。因此上式應該被修正為

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{K\lambda_B} \dots\dots\dots (2-7)$$

當光纖光柵受到溫度變化時，波長飄移量可由下式表示

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\xi + \alpha)\Delta T = K_T \times \Delta T \dots\dots\dots (2-8)$$

其中：

ξ = 光纖的熱光係數 (Thermal Optical Coefficient)

α = 光纖的熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)

K_T = 溫度敏感係數

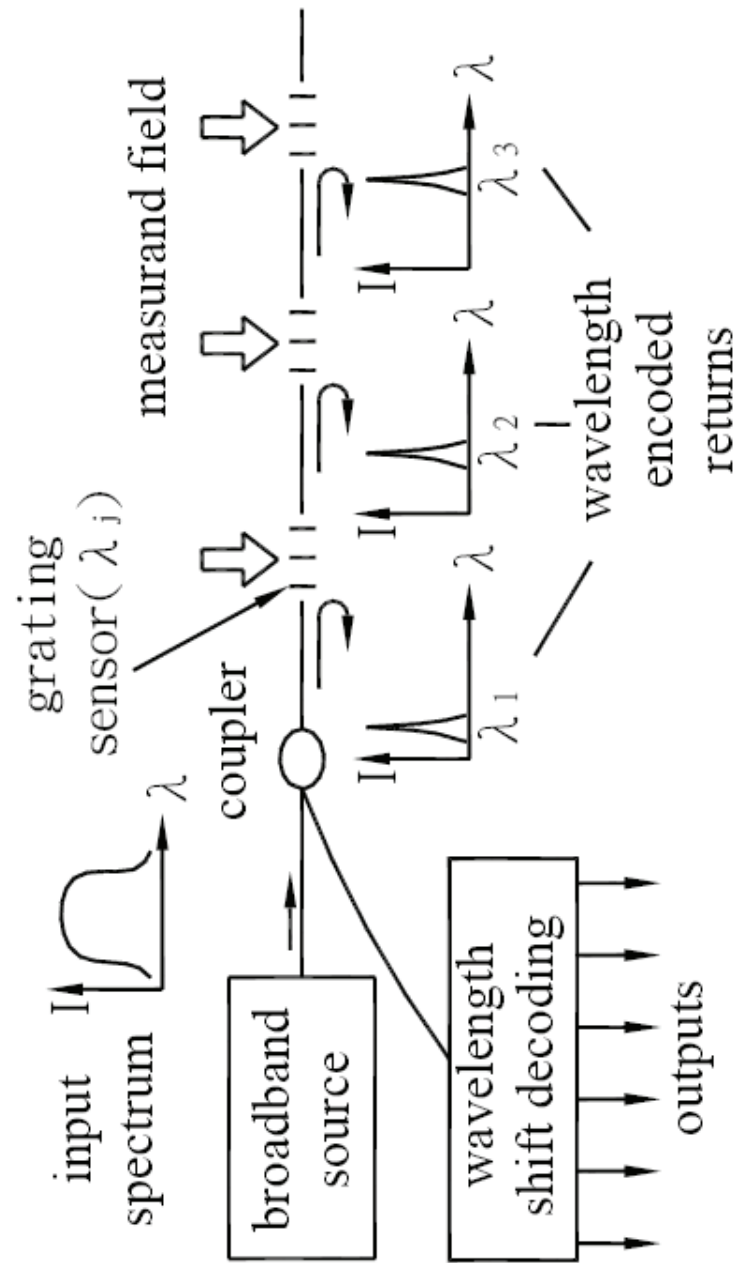


圖 2.1 光纖光柵反射原理示意圖

(Ho et al., 2005)

布拉格波長飄移並非完全線性，在高溫時溫度變化會使波長飄移較為顯著，因為在 ξ 在 150°C 約為 $6.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ， 450°C 時則變為約 $9.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而熱膨脹係數 $\alpha = 0.55 \sim 1.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。然而在室溫條件下， 1°C 的溫度變化約使得布拉格飄移約 $1.1 \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{nm}$ 。

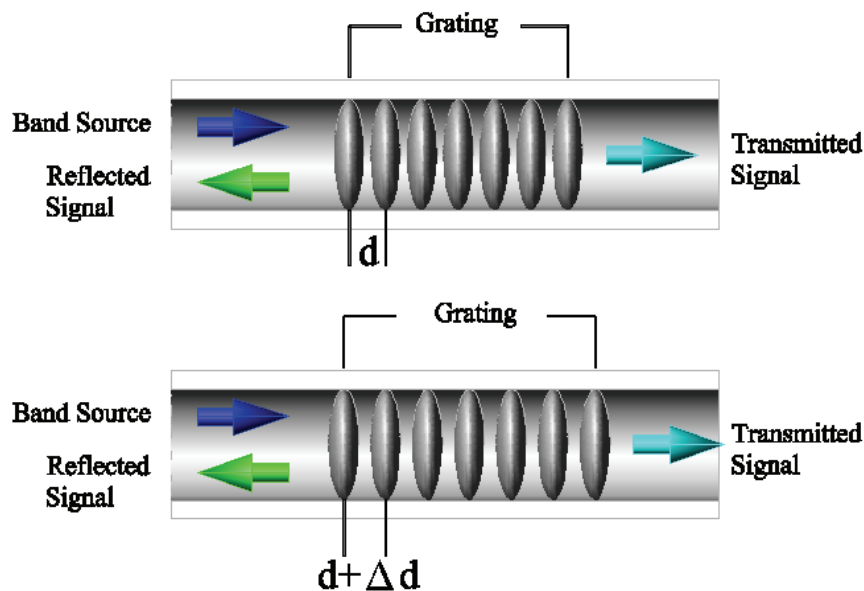


圖 2.1 光纖光柵感測機制示意圖

(簡旭君, 2003)

2.2 光纖光柵傾斜/加速度感測

本研究所研發雙質量光纖光柵加速度傾斜感測裝置 (FBG inclinometer/accelerometer, FBG-I/A) 之整體構件如圖 2.2 與圖 2.4 所示 (黃安斌、何彥德, 2008)。其加速度量測單元是由質量重塊與軸承桿件連接而形成。質量重塊將分別黏著於左右之兩個光纖光柵(FBG1 與 FBG2)拉緊，兩個 FBG 訊號透過光纖傳遞。感測元件固定於上蓋。透過軸承左右偏移。重塊與光纖光柵所形成之組合體以軸承為軸心旋轉並產生側向位移量。

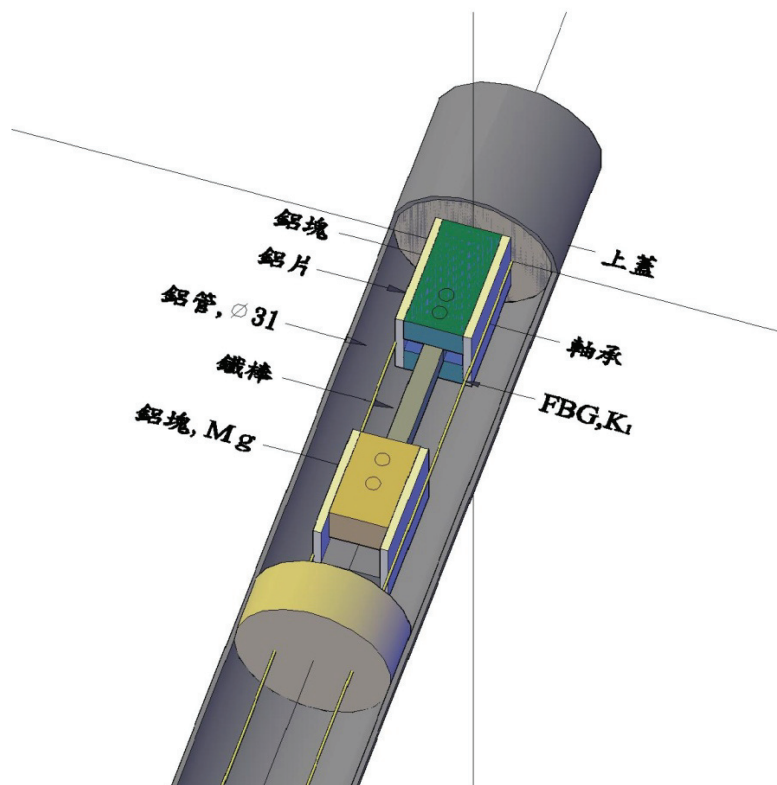


圖 2.2 FBG accelerometer 側面剖示圖

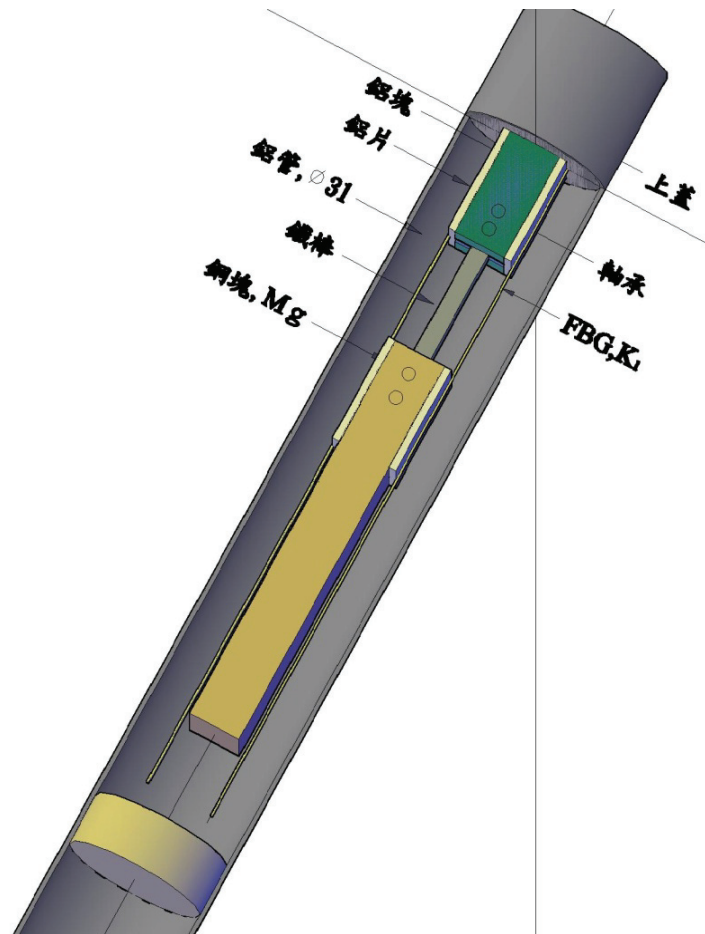


圖 2.3 FBG inclinometer 剖示圖

2.3 FBG-I/A 加速度感測原理

圖 2.4 為 FBG-I/A 加速度感測示意圖，當感測裝置相對於支架垂直方向(x 方向)產生加速度 a_x 時，感測器之系統運動公式如下：

$$M \ddot{x} + \left((a/b)^2 K_1 \right) x = -M a_x \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

其中：

M = 重塊質量

$\ddot{x}$ = x 方向加速度（位移對時間之二次微分）

K_1 = 光纖光柵張力方向之勁度

a = 光纖光柵對應軸心之力臂

b = 重力塊對應軸心之力臂

將公式兩邊除以 $2M$ ，得到：

$$\ddot{x} + \omega_o^2 x = -a_x \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

其中：

$$\omega_o = \sqrt{((a/b)^2 K_1)/M} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

代表此加速度儀之天然頻率。當加速度儀受一 x 向週期性振波，其迴旋角度頻率為 ω 時：

$$a_x = A_x e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

其中：

A_x = 振幅

重塊質量所對應之週期性振波為：

$$x = X e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

將公式(2-11)與(2-13)重塊振幅代入公式(2-9)即可得到重塊質量振幅 X :

$$X = \frac{-1}{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 \omega_o^2} A_x \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

光纖光柵所受應變 ε_{FBG} 與 X 關係為：

$$\varepsilon_{FBG} \approx -\kappa X \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

因此透過高頻 ε_{FBG} 之擷取，即可計算振幅 X 隨時間之變化，而得到量測之目的。

$$\kappa = \frac{a/b}{L} \frac{1}{\omega_0^2} (\mu\text{strain/G})$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

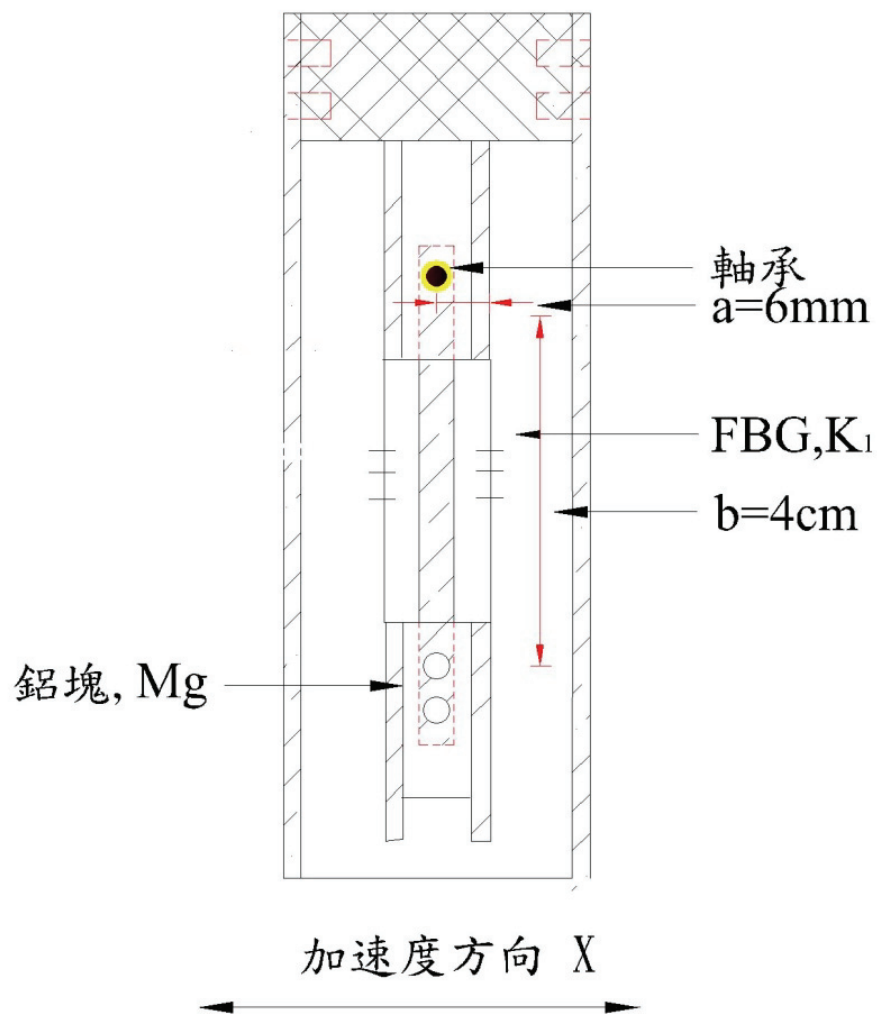


圖 2.4 FBG-I/A 加速度感測示意圖

2.4 FBG-I/A傾斜感測原理

在無傾斜時光纖光柵左右平衡，當傾斜時重塊重心軸向至軸承間之距離 d_{FBG} 。光纖光柵透過重力塊受制於光纖光柵產生反作用拉力與順時針方向之力矩 (M_{cw}) 為：

$$M_{cw} = (F_{FBG}) \times d_{FBG} \dots\dots\dots (2-16)$$

其中：

F_{FBG} = 光纖光柵所受拉力之改變

d_{FBG} = 光纖光柵相對於軸承之力臂

當傾斜時重塊受重力影響使得此組合體受逆時針方力矩 (moment)，此一逆時針方力矩 (M_{ccw}) 為：

$$M_{ccw} = (Mg) \times L_M \sin \theta \dots\dots\dots (2-17)$$

其中：

g = 重力加速度

L_M = 重塊相對於軸承之力臂

M_{ccw} 與 M_{cw} 大小相同方向相反，因此當感測裝置相對於重力方向產生傾斜角度 θ 時 (如圖 2.5 所示)，此時 θ 與 FBG 有以下之關係式：

$$F_{FBG} = \frac{MgL_M \sin \theta}{d_{FBG}} \dots\dots\dots (2-18)$$

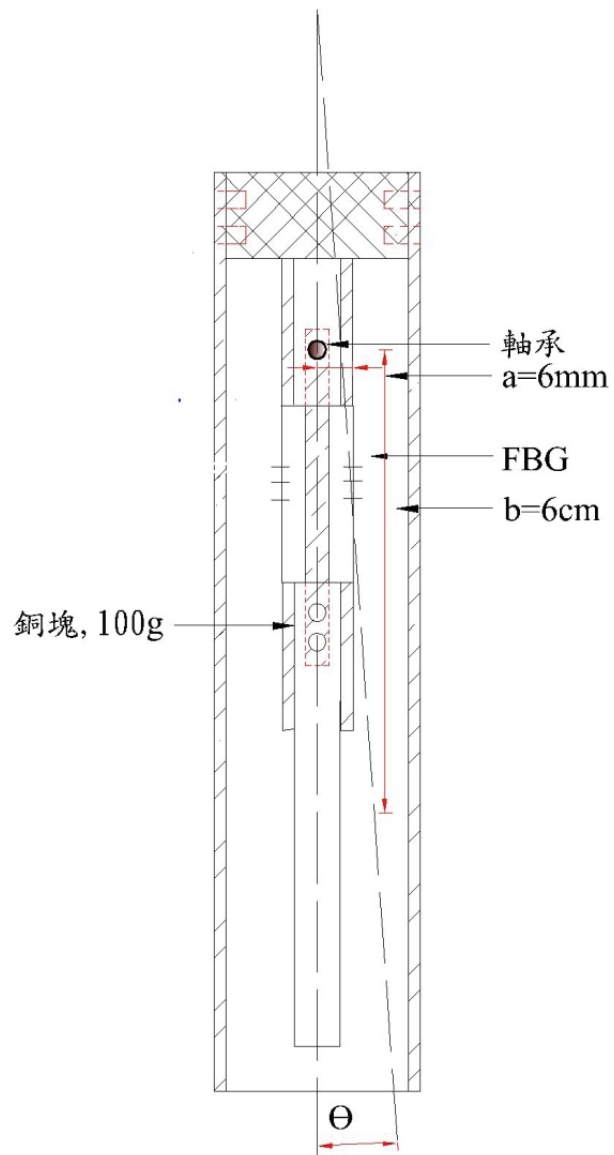


圖 2.5 FBG-I/A 傾斜感測示意圖

在重力塊上左右之光纖光柵所受拉力改變 FBG 大小相同正負相反。利用此一特性可以抵銷溫度效應，因為溫度對重力塊左右方之光纖光柵所產生拉力改變 FBG 大小與正負都相同。將重力塊左右方光纖光柵所量得拉力改變 FBG 數值相減即可將溫度效應消除。

如圖 2.6 所示每一 FBG-I/A 單元上下配有滾輪，可以配合放入傳統傾斜管中，當地層滑動時 FBG-I/A 可經由傾斜角度變化量來計算單組 FBG 測傾儀側向移動量，最後累積計算出變形監測管因地層移動而造成之側向位移。在實驗室中可標定出光柵波長改變量與角度變化量的關係(圖 2.7)，根據標定結果計算，FBG 波長改變 1pm (解析儀所能讀取之最小 FBG 波長改變量) 所對應之角度變化量，傾斜角度精度在 0.002 與 0.004 度之間。在監測地層滑動時我們可以將多個 FBG-I/A 串接在一起，並將量測到的角度換算成側向位移量，單組 FBG 測傾儀能夠容許的傾斜角度在-5 度至+5 度之間。



圖 2.6 FBG-I/A 實體圖

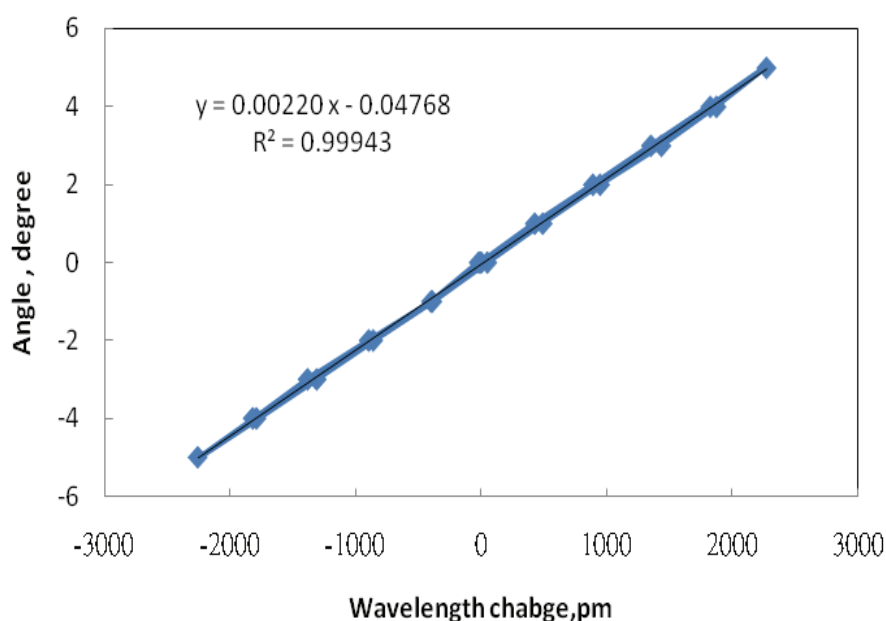


圖 2.7 FBG-I/A 傾斜標定結果

2.5 FBG水壓計

本研究已研發出使用光纖光柵（Fiber Bragg Grating, FBG）做水壓計，其使用 FBG 波峰漂移以及波峰寬度改變兩種方法來調解（modulate），這兩種方法分別敘述如下：

1. 漸變週期式 FBG 波峰寬度分析：漸變週期式 FBG 是指 FBG 內的光柵應變之分布是漸變的(如圖 2.8)，假設一原週期均勻分佈之 FBG 當受到外力而產生漸變式應變時其 FBG 波峰寬度會變寬，如圖 2.9 所示。

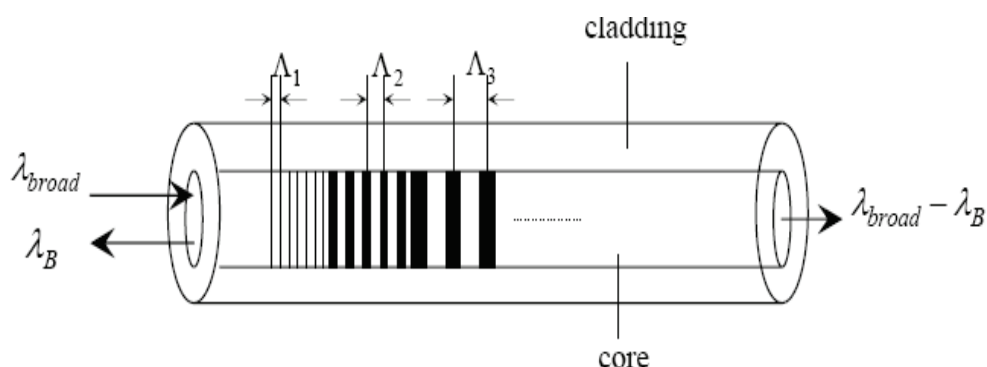


圖 2.8 光纖光柵內連續遞增之漸變應變

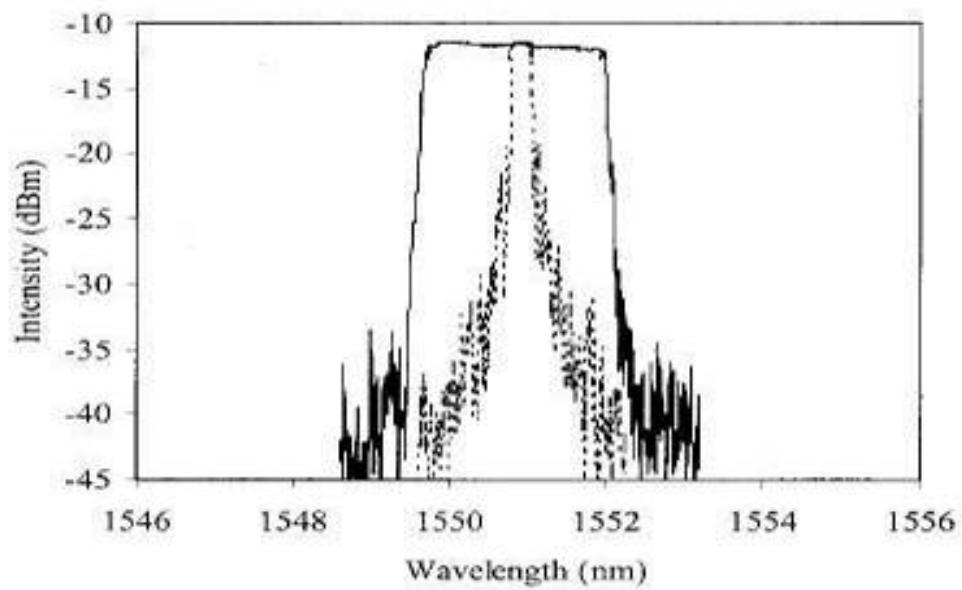


圖 2.9 連續遞增之漸變應變所產生 FBG 尖峰波長寬度之改變

2. 等週期式 FBG 波峰飄移分析：FBG 受應變或溫度影響，易產生波長飄移（圖 2.10），假設一個 FBG 初始波長為 λ_1 ，當 FBG 受到外力或溫度之影響時，會使得 FBG 波峰往長波長飄移為 λ_2 ，而此波峰變寬量會正比於 FBG 應變量。

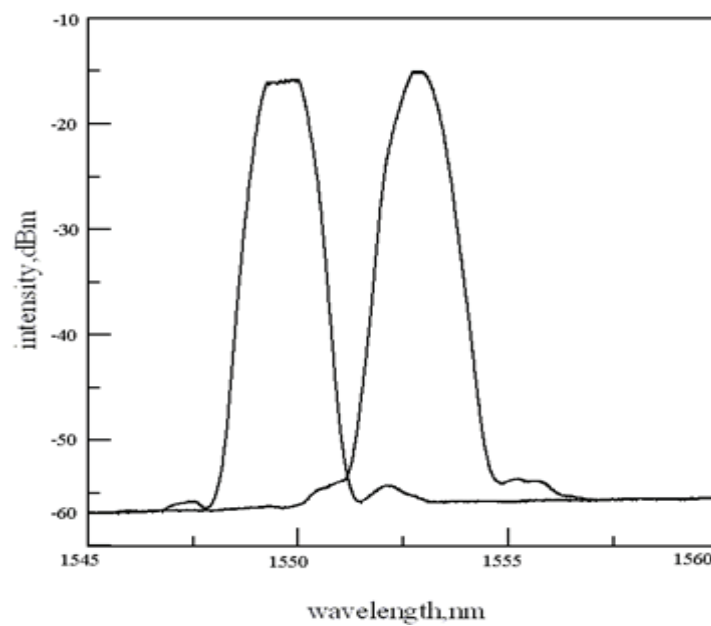


圖 2.10 FBG 波長飄移分析示意圖

採用漸變週期式 FBG 來製作水壓計如所示。將 FBG 貼於圓形薄片上，可隨著所需要量測的範圍調整薄片的厚度，根據彈性力學分析，當此圓形薄片受到垂直於平面的壓力時，從圓心到邊界的應變會呈現先受伸張再受壓縮分布，因此貼於圓板上的 FBG 會發生漸變的型式，光柵所反射的頻譜會以較寬的形勢顯示，其波形反應會產生如圖 2.9 之現象，而其波峰寬度與壓力成正比。此設計之優點是 FBG 反應不受溫度變化之影響而結構簡單。

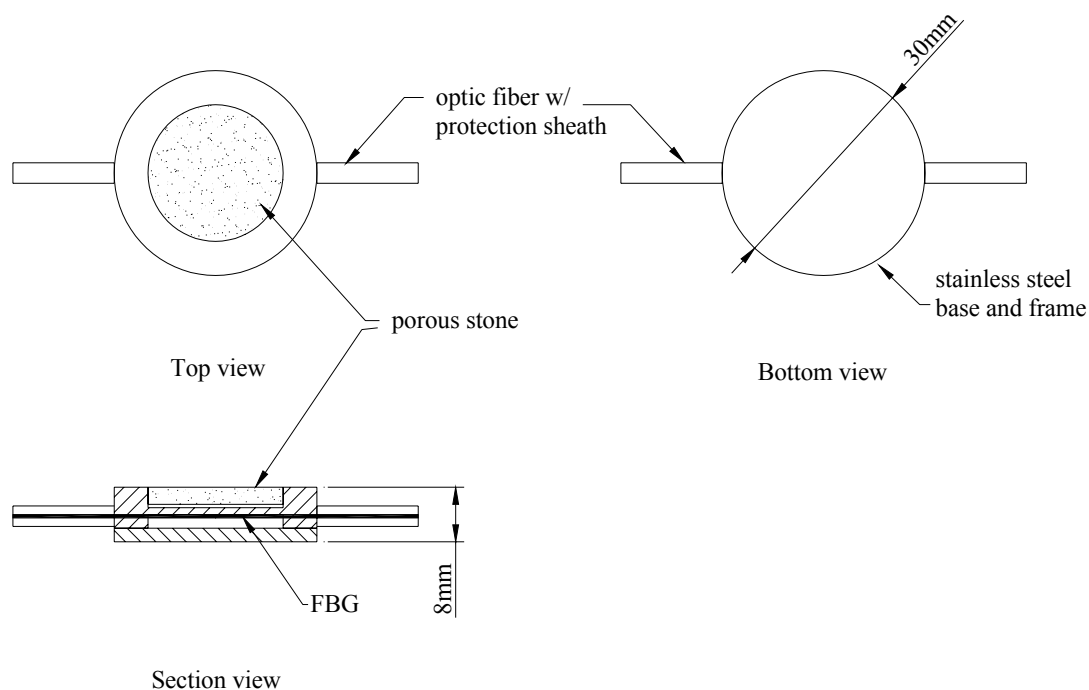


圖 2.11 漸變週期式 FBG 水壓計構造示意圖

圖 2.12 與圖 2.13 展示使用等週期式 FBG 波峰飄移與壓力間之關係來設計之光纖水壓計示意圖與實體圖。將 FBG 兩端黏著於一彈性金屬薄膜上，當水壓計內部受壓力作用改變時金屬膜隨之變形，因此 FBG 所感受之應變也隨之變化。當金屬膜仍在彈性限度內，FBG 即呈現等週期式之變化，FBG 波峰值與壓力有一線性關係。但此一設計無法隔離溫度改變對 FBG 波峰值之影響，因此必須加入另一呆 (dummy) FBG 做為感應溫度變化之用。

圖 2.14 為本研究所製作出的雙薄模式光纖柵水壓計之標定與理論分析比較圖，結果顯示，水壓計精度為 0.14kPa，相當於可量測 1.4cm 的水位變化，較使用薄膜理論分析的 2.02cm 為高，且在 0 至 300kPa 範圍內讀數與壓力間有高度之線性關係，其相關係數 (R^2) 在 0.999 以上，效果良好。等週期式 FBG 水壓計體積直徑小於 4cm，適合於安裝於現有之開孔式水位管內。

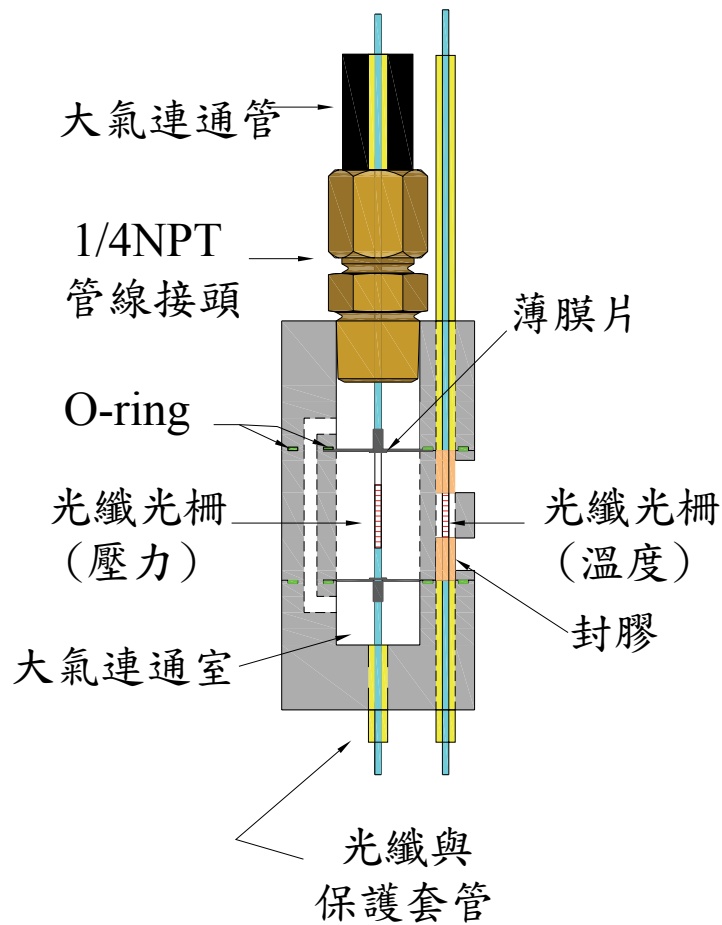


圖 2.12 等週期波長式 FBG 水壓計構造示意圖

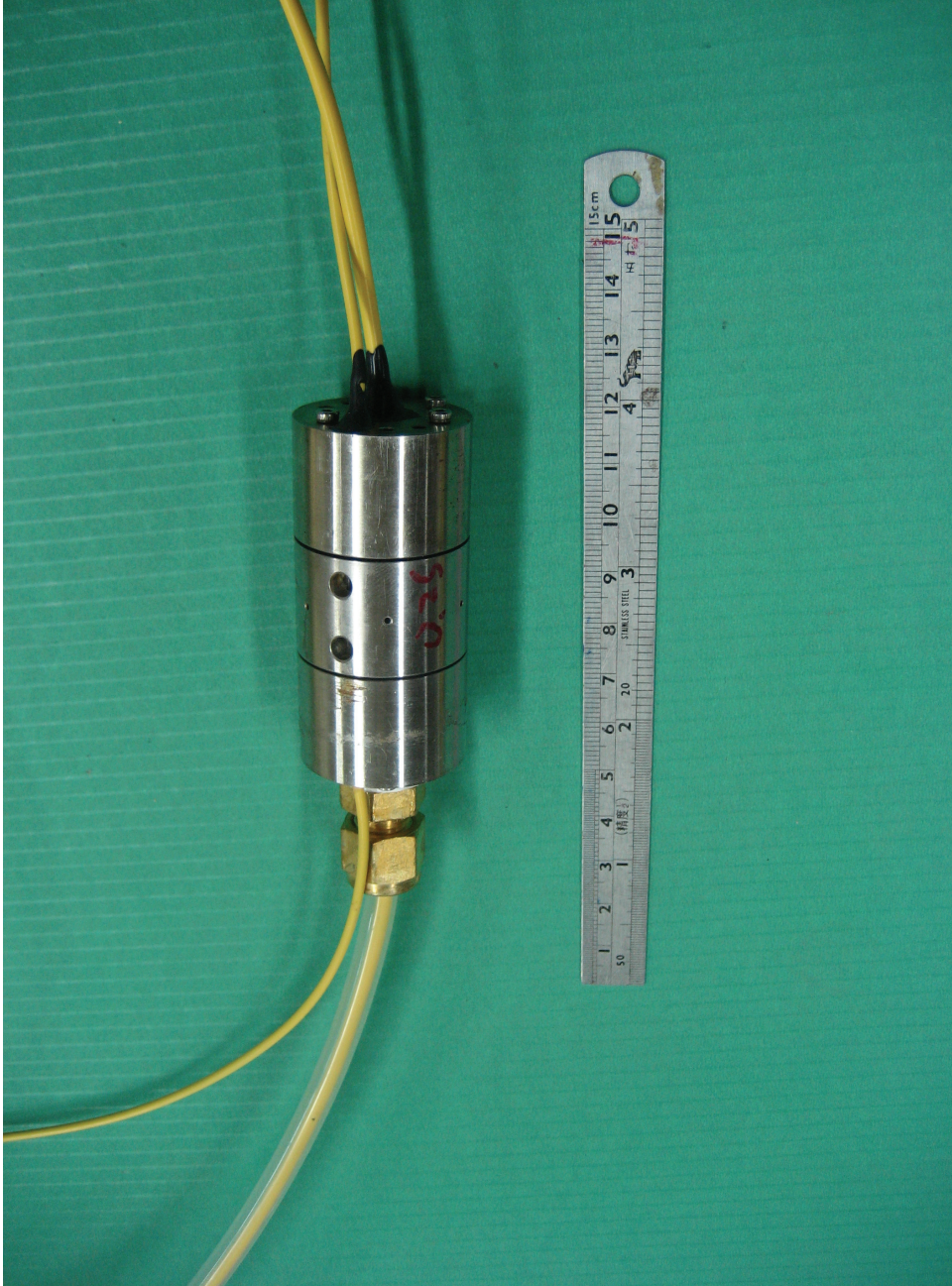


圖 2.13 等週期光纖光柵水壓計實體圖

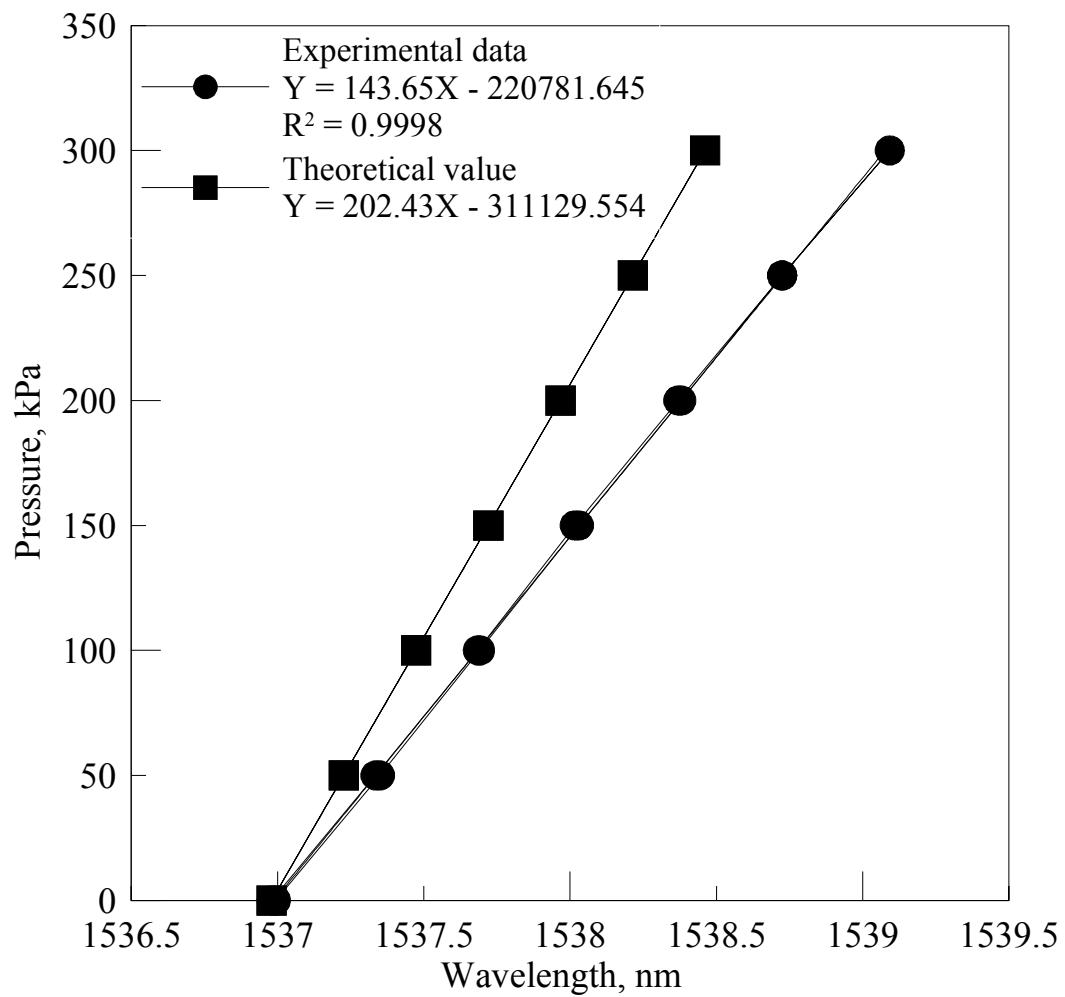


圖 2.14 等週期光纖光柵水壓計率定與理論分析比較圖

等週期式光纖光柵水壓計在使用時會配合一「光纖光柵溫度感測器」來感應溫度變化與修正溫度對水壓計所造成的誤差。本研究所製作出的光纖光柵溫度感測器是利用材質與光纖光柵水壓計相同之不銹鋼管製作而成，如圖 2.15 所示。其製作方式是將光纖光柵安裝於不銹鋼管內，兩端利用熱固膠固定於不銹鋼管上，當有溫度變化時不銹鋼管體積產生變化使得光纖光柵讀數發生改變，且因為其為兩端密閉之堅硬鋼棒，所以外部壓力對其所造成之影響非常微弱，將此光纖光柵溫度感測器與光纖光柵水壓計放在一起，則可間接用來進行溫度之修正。但是因為溫度感測器與水壓計並非在安裝在同一構件上，所以對於熱膨脹效應的反應會有些微之不同。本研究在不改變水壓計體積的前提下，改良將溫度感測器放置在水壓計的本體上，如此可直接的量測水壓計本身對於溫度變化的反應，設計示意圖及實體圖如圖 2.12 及圖 2.13 所示。一般地下水溫度大約在 5 度到 15 度之間，故標定的範圍設定為 0 到 40 度之間，圖 2.16 為光纖光柵水壓計及溫度光柵的標定曲線，由標定結果可得到每 1°C 的變化造成約 30pm 的波長漂移量。

本研究將製作完成後之 FBG 水壓計，放入 3 英吋之鋼管內，然後於鋼管 2 個相鄰 FBG 水壓計間設置阻隔層，如圖 2.18 所示。

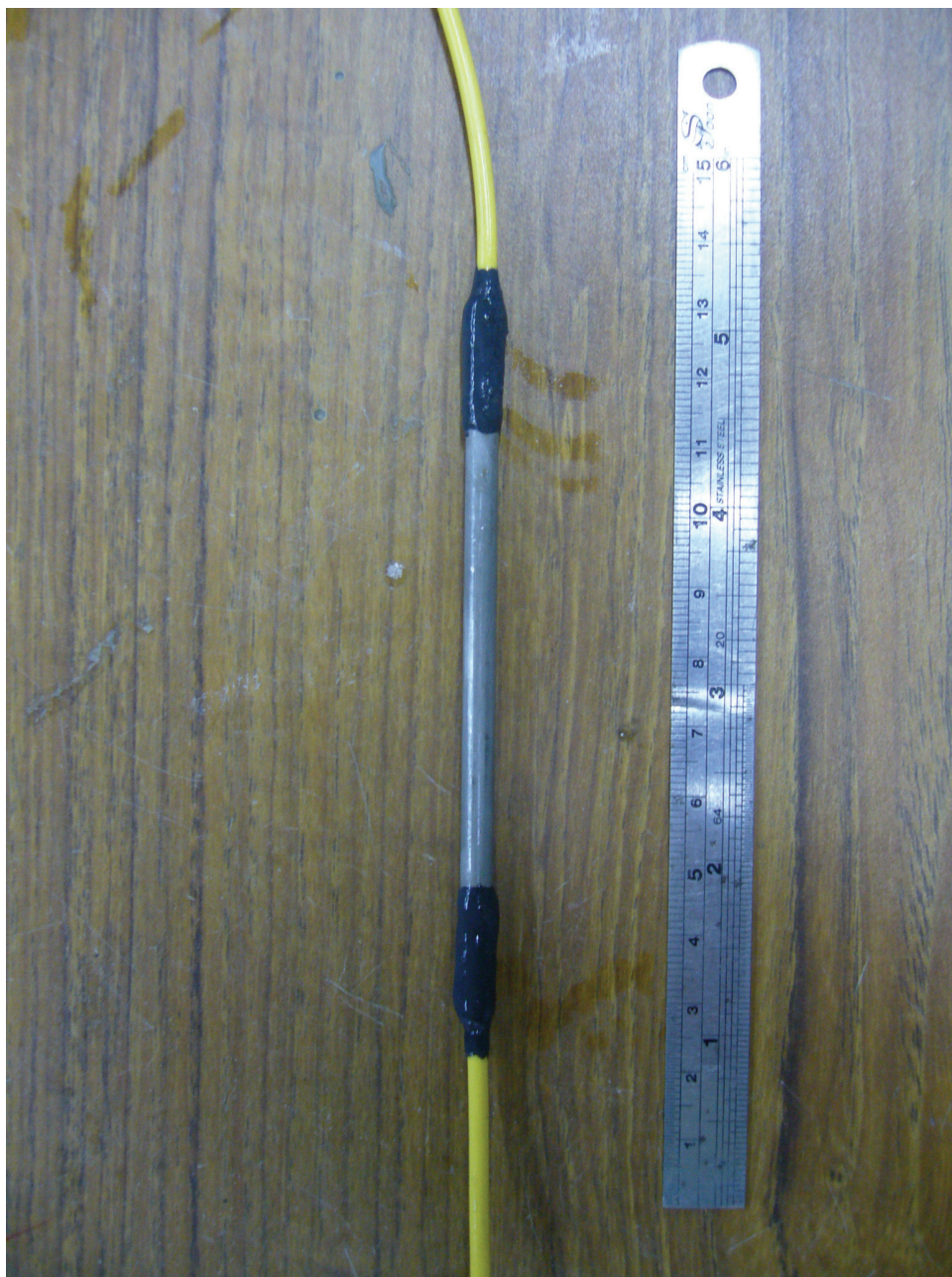


圖 2.15 光纖光柵溫度棒

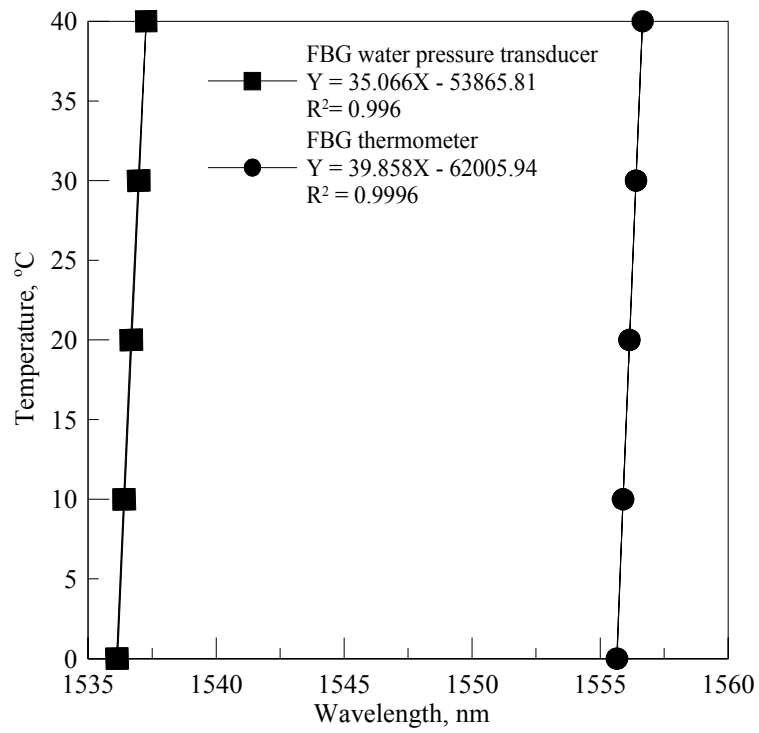


圖 2.16 光柵水壓計及溫度光柵率定圖

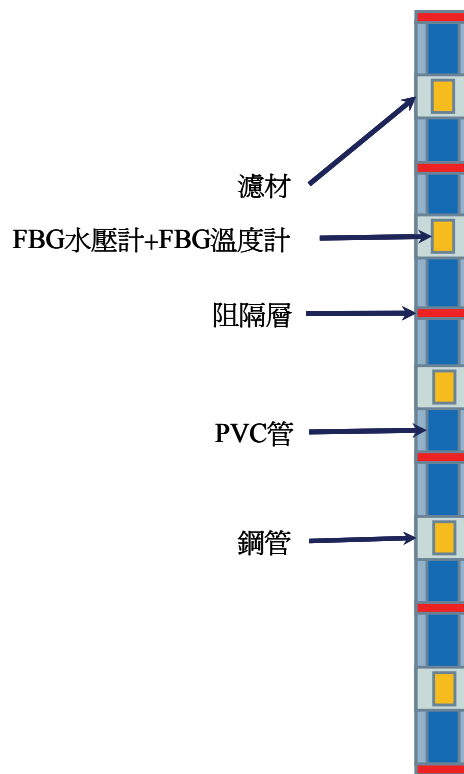


圖 2.17 水壓計鋼管封裝示意圖

第三章 光纖水壓計現地安裝

臺灣地區因為中央山脈南北縱列，河川多為東西流向，所以許多交通系統必須依靠橋梁來連接與建構。過去20年來臺灣的砂石主要供應有六成以開採河川砂石為主要來源，雖然政府於民國83年公告河川下游全面禁止開採砂石，並在民國88年成立河川局，藉由組織河川局來取締盜採砂石與保護河川。但是過去的開採行為，已造成臺灣西部各大主要河川中下游河道河床高程嚴重下降，當豪雨來臨時，水位迅速高漲且因為臺灣地區河川坡陡流急，所以水勢洶湧會劇烈沖刷橋臺與橋墩基礎附近之河床，使得橋梁傾斜或倒塌，造成人民生命與財產的損失。

根據交通部高速鐵路工程局民國97年統計的資料，全臺灣自民國87年至民國90年間32座橋梁傾斜或損壞的原因分析，其中有31座橋梁是因為梅雨季節或颱風豪雨造成破壞。本計畫的主要研究對象為橋墩震動與基礎孔隙水壓力的即時監測系統整合，本研究在單一橋墩的上下游側各安裝一組分佈式水壓計監測系統，並於橋墩結構上安裝傾角/加速度儀，所安裝之監測儀器在豪雨來臨時連續紀錄數據，累積長期之使用經驗。本研究將依據現地勘察結果選擇臺中縣大甲溪27號橋墩進行感測器安裝與監測。

3.1 初期預定施工方法

本計畫目的主要是測試使用分佈式水壓監測技術做橋墩基礎周圍河床沖刷即時監測之經濟性與可行性。在單一鑽孔內不同深度安裝多個封裝於高強度鋼管內之水壓計。本研究規劃於橋墩基礎上、下游各安裝一組FBG水壓計列陣，並在橋墩結構上安置傾角/加速度儀。於鄰近岸邊橋台外監測機房內安裝資料解讀與訊號傳輸系統，其示意如圖3.1所示。

本研究將依據現場踏勘後選擇一座橋梁進行現場感測器安裝與測試。水壓計安裝於外徑8公分，地層鑽採用之高強度鑽桿內。鑽桿壁在水壓計量測點鑽小孔以利水壓平衡，FBG水壓計兩端將灌膠密閉以固定水壓計位置並阻斷鑽桿內水壓計間之水流。水壓計在鑽桿內之安裝於試驗室完成。

按照現場需求，每支鑽桿長3公尺，內部安裝一至五個水壓計。鑽桿有強度高，耐扭力與耐摩擦之特性，適合本計畫之需求。本研究將選擇1個橋墩基礎(樁帽)的上游側與下游側安裝一組水壓計列陣，安裝方法是使用衝擊鑽孔在緊鄰橋墩基礎上、下游河床面下各鑽1孔(圖3.2)，每一孔放入至少15個水壓計之列陣。衝擊鑽有外套管與鑽頭與內鑽桿。鑽孔時孔壁以外套管保護，鑽孔至所需深度後將鑽頭與內鑽桿拔出，然後置入內含水壓計之鋼管，外套管與水壓計鋼管間空間以細砂回填，最後拔出外套管。水壓計安裝之目的不在決定多層地下水是否存在，僅用於反應在周圍回填細砂內是否有靜態水壓狀況之分佈，因此無須以灌漿的方法回填鑽孔與水壓計鋼管間之空間。在水壓計鋼管暴露於水面上之部位以固定夾具將鋼管固定於橋墩，每一孔深度至少15公尺，其長度之決定將考慮監測橋梁附近之水文與地質條件，確保水壓監測深度大於可能之沖刷深度。除此之外，在此橋墩基礎水位面以上放置一個傾角/加速度儀，用以量測橋墩基礎的傾斜角度與動態特性。將上述所有感測器，用單一條光纜串連到監測機房內與讀取系統連接(圖3.1)，將讀取系統所擷取之資料以網路或無線傳輸方式傳回至遠端即時監測系統內，然後進行判斷與分析。

在沒有河床沖刷情況下，地層內水壓受土石阻擋影響趨近於靜態水壓分佈(圖3.3)，其總水頭不隨深度而改變，而且在橋墩上下游河床面下之水壓分佈為對稱。在有河床沖刷情況下，沖刷面下地層內水壓仍然趨近於靜態水壓分佈，但沖刷面上其總水頭之分佈如前述，是由上而下遞減（因此有由上向下之水流），同時受沖刷區域內渦旋與亂流之影響，水壓應該呈現不穩定的現象(圖3.4)。根據此一原理與水壓分佈之數據可以決定河床沖刷之發生及其深度。橋墩受基礎沖刷或其他

原因，是否發生傾斜或不穩定之現象，可以使用安裝於水面上，橋墩表面之傾角/加速度儀來感測其傾斜量與加速度特性。當傾斜量過大或根據加速度紀錄所算得自然頻率發生異常狀況都是橋梁受損現象之反應。預警或封橋之決定可以根據所量得河床沖刷深度、橋墩傾斜與自然頻率變化等因素綜合評估，來做決策之依據。

另外根據Camp et al.(1998)量測溫度的變化來量測沖刷深度，利用河水與砂土層溫度的不同來界定河床與水的介面以得知沖刷深度，並可利用河床深度之溫差效應得知河水水位(圖3.5、圖3.6)。Briaud(2008)提出會導致沖刷的臨界流速與地層材料平均粒徑的關係，如圖3.7所示。本研究於合約項目外新增做FBG溫度計量測，但是7月份的現地安裝只有量測土壤中溫度的變化，重新安裝時將安裝FBG溫度感測器量測大氣中溫度與土壤中溫度變化。

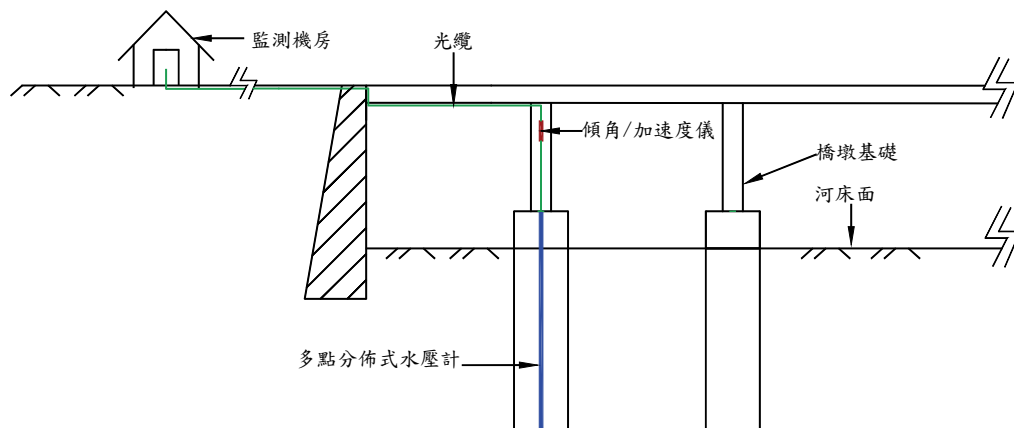


圖 3.1 現地感測器系統佈置示意圖

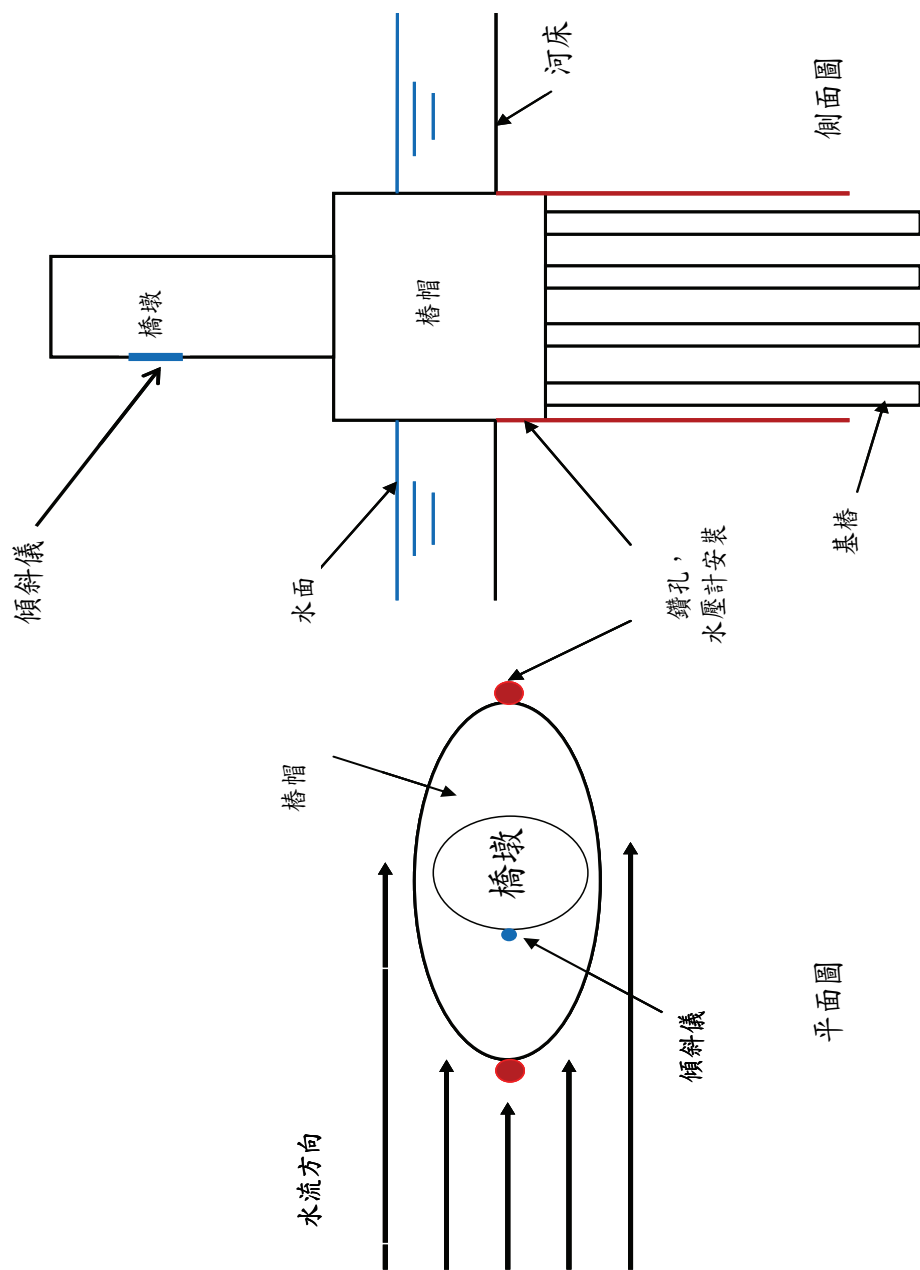


圖 3.2 橋墩沖刷監測示意圖

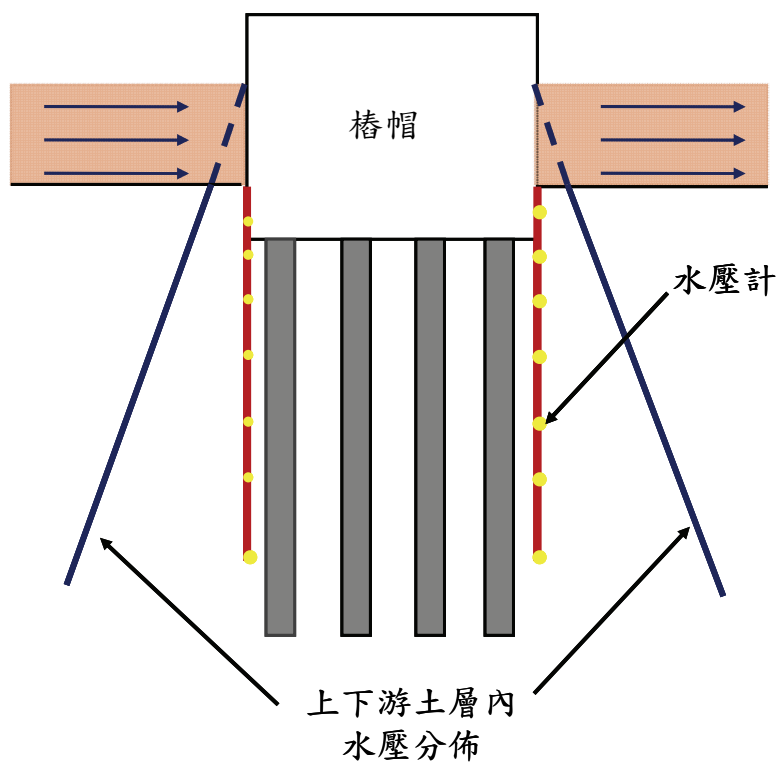


圖 3.3 未受沖刷前橋墩外水壓分佈示意圖

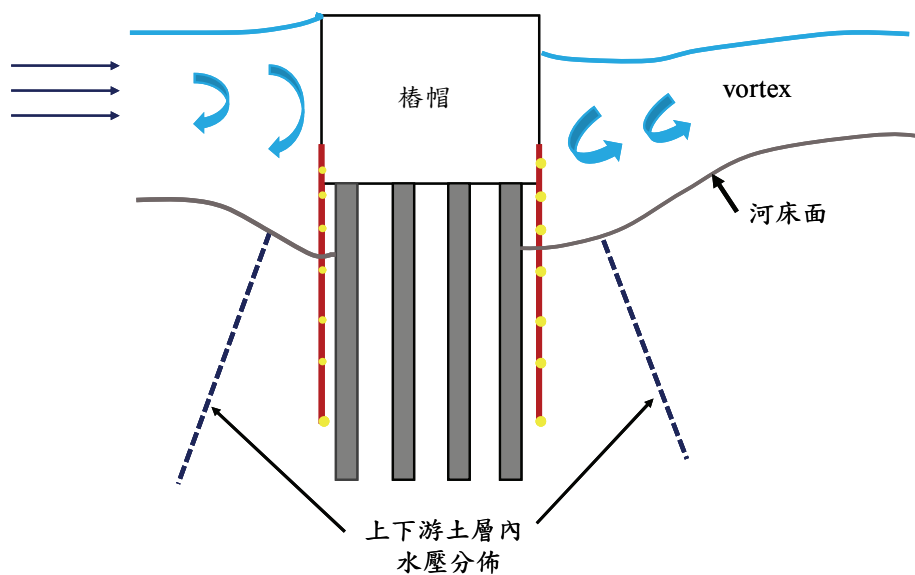


圖 3.4 受沖刷後橋墩外水壓分佈示意圖

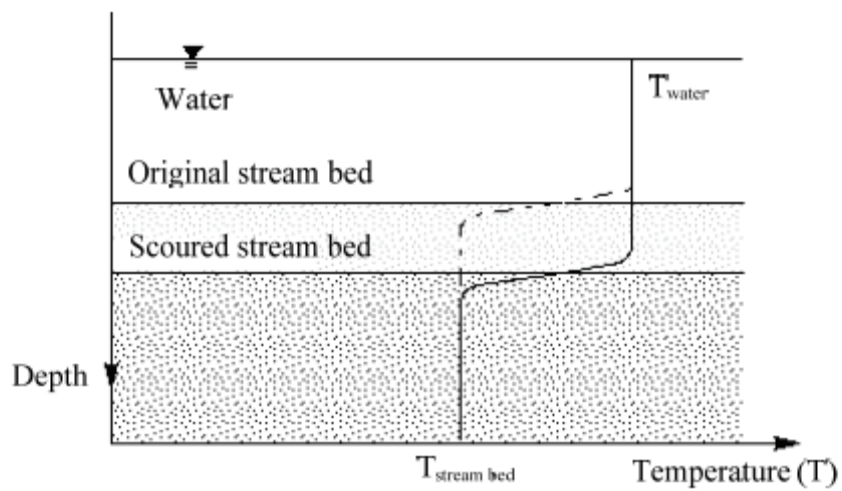


圖 3.5 溫度式沖刷感測原理

(Camp et al.,1998)

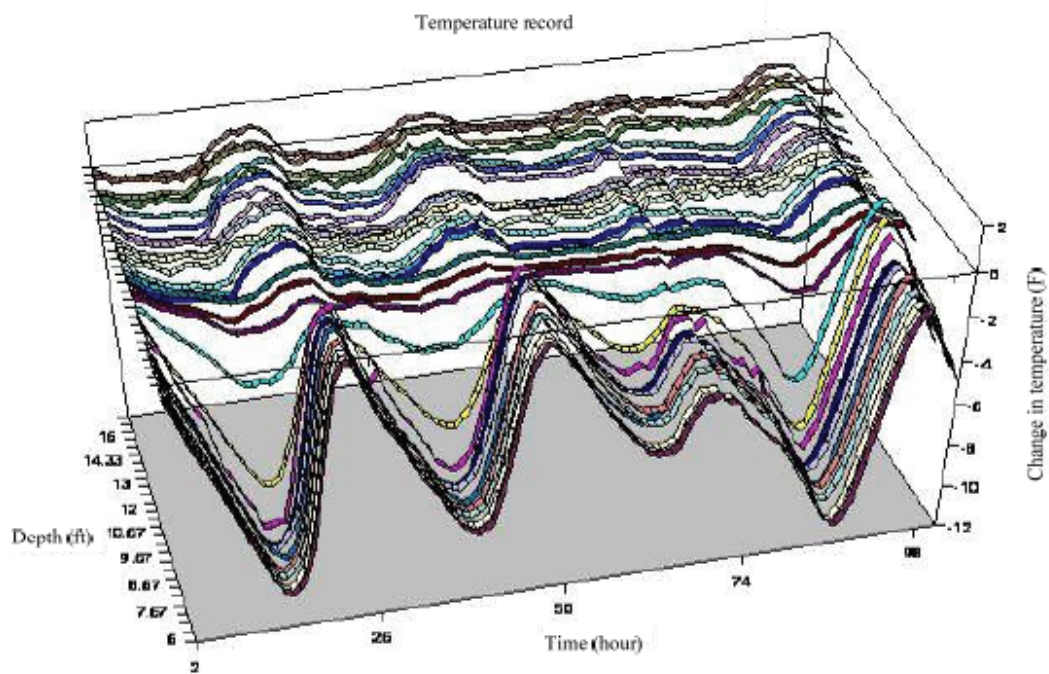


圖 3.6 溫度式沖刷量測結果

(Camp et al.,1998)

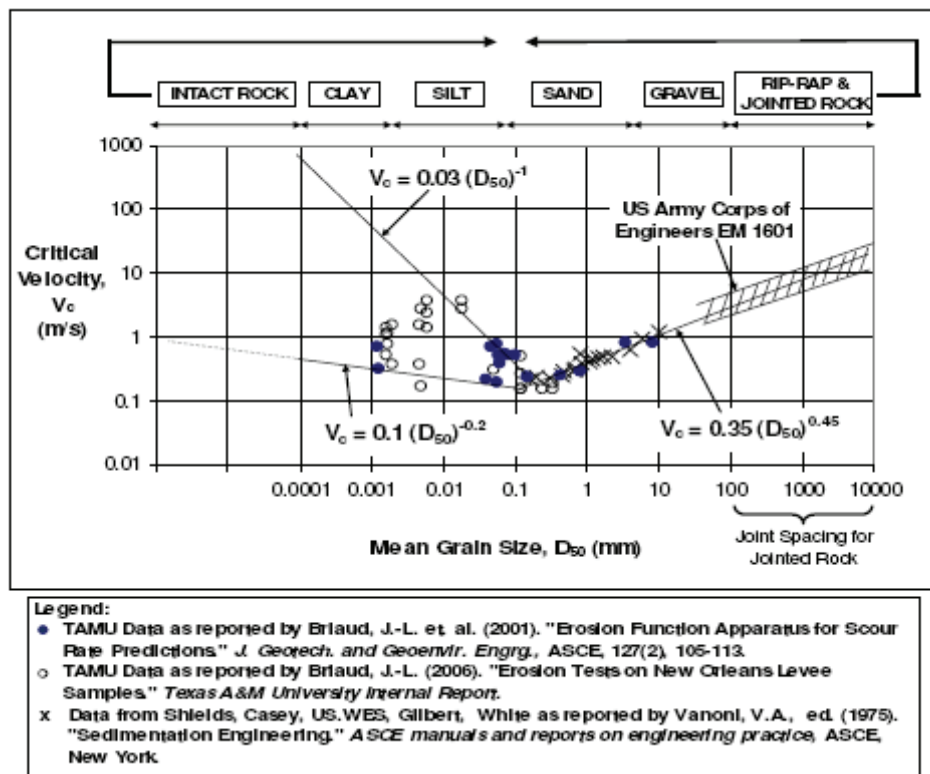


圖 3.7 不同地層材料平均粒徑與沖刷水流臨界速度
(Briaud, 2008)

3.2 現地勘查與施工

本研究於5月25日在臺中縣大甲溪橋進行現地勘查作業(圖3.8)，選擇27號橋墩附近作為感測器安裝地點，並決定感測器安裝位置(圖3.9)，且於當日現場與附近居民協調，選擇適當位置與空間作為自動化擷取系統安裝地點(圖3.10)。

本研究於7月6日完成實驗室內水壓計製作、測試與鋼管內封裝，其水壓計波長與安裝深度如表3.1所示。

本研究於7月11日進入大甲溪橋下進行施工與安裝，圖3.11為現場鑽孔施工圖。圖3.12為現地水壓計鑽孔內安裝施工圖，圖3.13為現地水壓計鑽孔內安裝完成圖。水壓計鋼管安裝完成後，本研究使用相同管徑大小之鑽管進行地面至橋台2上方米處光纖傳輸線路之保護(圖3.14~圖3.15)，並使用凹型鐵環將鋼管固定於橋墩上，水壓計保護鋼管完成如圖3.16與圖3.17所示。除此之外，為避免水流沖刷導致鋼管之損毀，本研究使用強力束帶(圖3.18)2條沿著橋墩包覆鋼管(圖3.19)，用以加強對鋼管的固定與保護。

本研究接著於橋墩上以地面為基準點繪製標高圖(圖3.20)，用以觀察水位高度的變化。圖3.21為本研究光纜架設施工圖，另外本研究於橋面板下額外加裝攝影機(圖3.22)。本研究於8月份進場安裝測傾/加速度感測器(圖3.23與圖3.24)，本研究於10月份加裝1組FBG測傾儀於橋墩上(圖3.25、圖3.26)，其精度可達 $0.0034^{\circ}/\text{pm}$ ，用以量測橋墩的傾斜角度。

本計畫所安裝儀器包括有光纖光柵水壓計、光纖光柵測傾儀、光纖光柵溫度計、紅外線攝影機與電子式加速度計，將所有設備並傳輸線路集成放置於橋面板下(圖3.27與圖3.28)，圖3.29為所有感測器與線路安裝完成圖。然後使用光纜將訊號傳輸至機房內，機房內安裝一19吋工業電腦與光纖切換器，自動化記錄訊號讀數。



圖 3.8 現場勘查選定橋墩位置

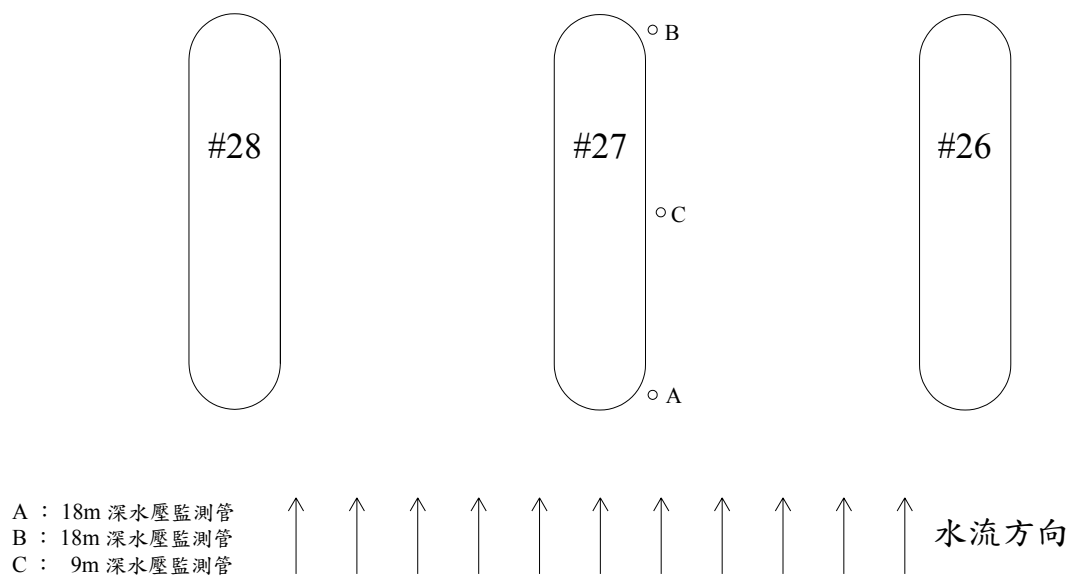


圖 3.9 現地感測器安裝位置示意圖



圖 3.10 現地監測機房位置

表 3.1 感測器波長與安裝深度配置

深度(m)	A管波長(nm)	B管波長(nm)	C管波長(nm)
0.5	1524	1524	1524
1.0	1530	1530	1530
1.5	1536	1536	1536
2	1542	1542	1542
2.5	1548	1548	1548
3.5	1548	1548	1548
4.5	1524	1524	1524
5.5	1530	1530	1530
6.5	1536	1536	1536
8	1542	1542	1542
9.5	1548	1548	
11.0	1542	1542	
12.5	1524	1524	
14.5	1530	1530	
16.5	1536	1536	



圖 3.11 現地鑽孔圖



圖 3.12 現地水壓計鑽孔內安裝

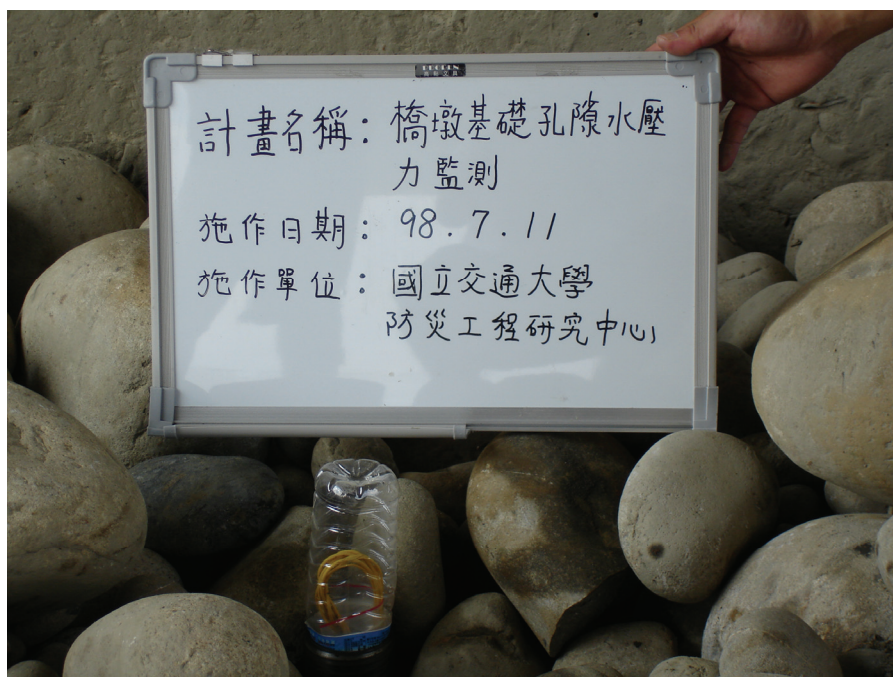


圖 3.13 現地水壓計鑽孔內安裝完成



圖 3.14 地面光纖線路保護鋼管



圖 3.15 光纖線路保護鋼管固定於橋墩上



圖 3.16 單一組光纖水壓計保護鋼管安裝完成圖



圖 3.17 三組光纖水壓計保護鋼管安裝完成圖



圖 3.18 強力束帶保護圖



圖 3.19 強力束帶保護安裝完成圖



圖 3.20 標高完成圖



圖 3.21 光纜架設施工圖



圖 3.22 攝影機安裝完成圖



圖 3.23 測傾/加速度計安裝完成圖

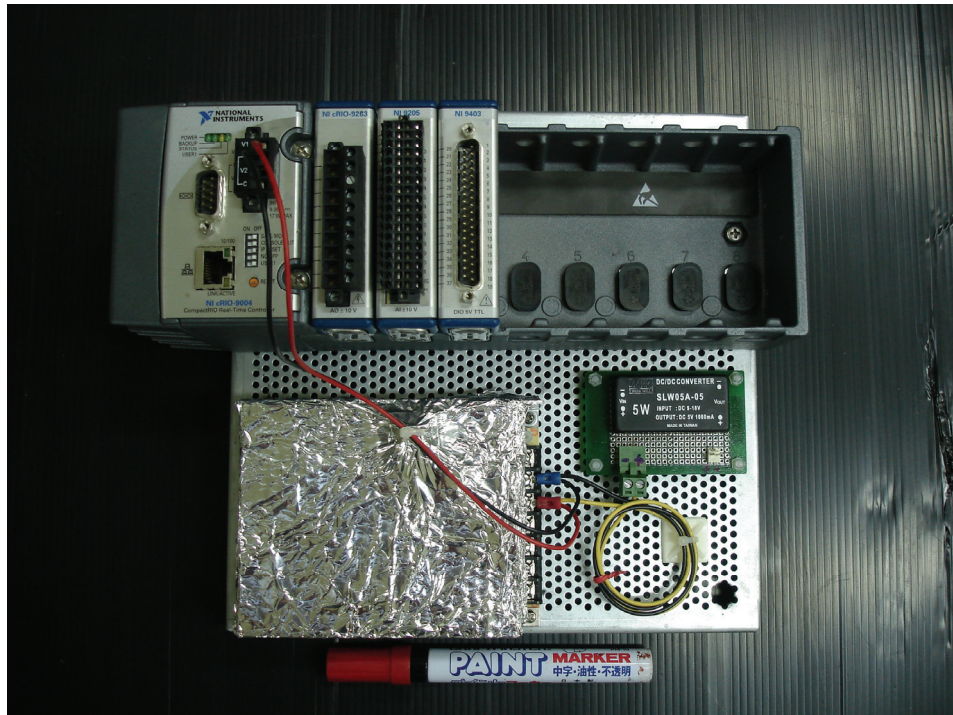


圖 3.24 測傾/加速度數據擷取系統圖



圖 3.25 FBG 測傾儀內部實體圖

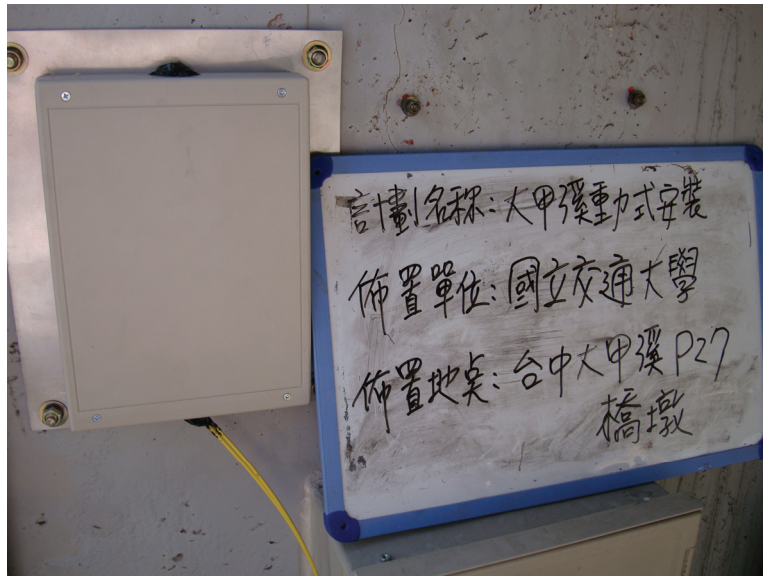


圖 3.26 FBG 測傾儀安裝完成圖



圖3.27 現場傳輸系統施工圖



圖 3.28 現場擷取與傳輸系統完成圖



圖 3.29 現場水壓計安裝完成圖

第四章 量測數據結果

本章主要說明於莫拉克颱風期間所量測到的數據與資料，本研究於8月7日與8月10至大甲溪橋現場，藉由攝影機與現地觀察，8月7日中午水位高度約在所畫尺標0.5米處(圖4.1)，而8月10日中午水位高度已暴漲至在所畫尺標約4米處(圖4.2)，以下將分節說明各監測管量測結果。

4.1 A監測管量測數據

圖4.3為A監測管0~3m之間，各點水壓計的歷時壓力變化圖(以8月7日14時為初始值相比較)，可看出在8月9日上午12點過後(圖中橫軸為12小時一單位)，各深度的水壓力有明顯上升，均可達到10 kPa以上。尤其在-2m及-2.5m位置上之水壓力可達到30kPa。圖4.4為A監測管3.5~9.5m之間，各點水壓計的歷時壓力變化圖，在-6.5m、-8m及-9.5m位置上之水壓力變化達到10kPa左右。圖4.5為A監測管11~16.5m之間各點水壓計的歷時壓力變化圖，可看出在此之間之水壓力變化並不大。圖4.6為展示A監測管以總水頭方式之表示法，來說明各深度光纖光柵水壓計之歷時變化，當現場水壓呈現淨水壓分佈時，則各點水壓計的連線為一垂直線(該分析假設地表位置水頭為0，向下為負位置水頭，總水頭=位置水頭+壓力水頭+速度水頭，當無速度水頭發生時，且水壓為淨水壓分佈時，各點的總水頭會相等為一直線)，若有沖刷行為時，上下水流有流速的變化，使得水壓力會有明顯的變化，由監測結果圖看出，在0~12m之間的水壓力計，有明顯變化，尤其在-2.5m位置，總水頭變化可達到4m以上。圖4.7為A監測管，各深度的溫度隨時間的歷時變化，可發現靠近地表處的溫度會最先開始下降，下降溫度最高約2.8度左右，隨後為-1.5m的水溫，才開始下降，與現有沖刷監測方法—水溫監測方法，有相同之變化之行為。



圖 4.1 8 月 7 日中午莫拉克颱風現地照片



圖 4.2 8 月 10 日中午莫拉克颱風現地照片

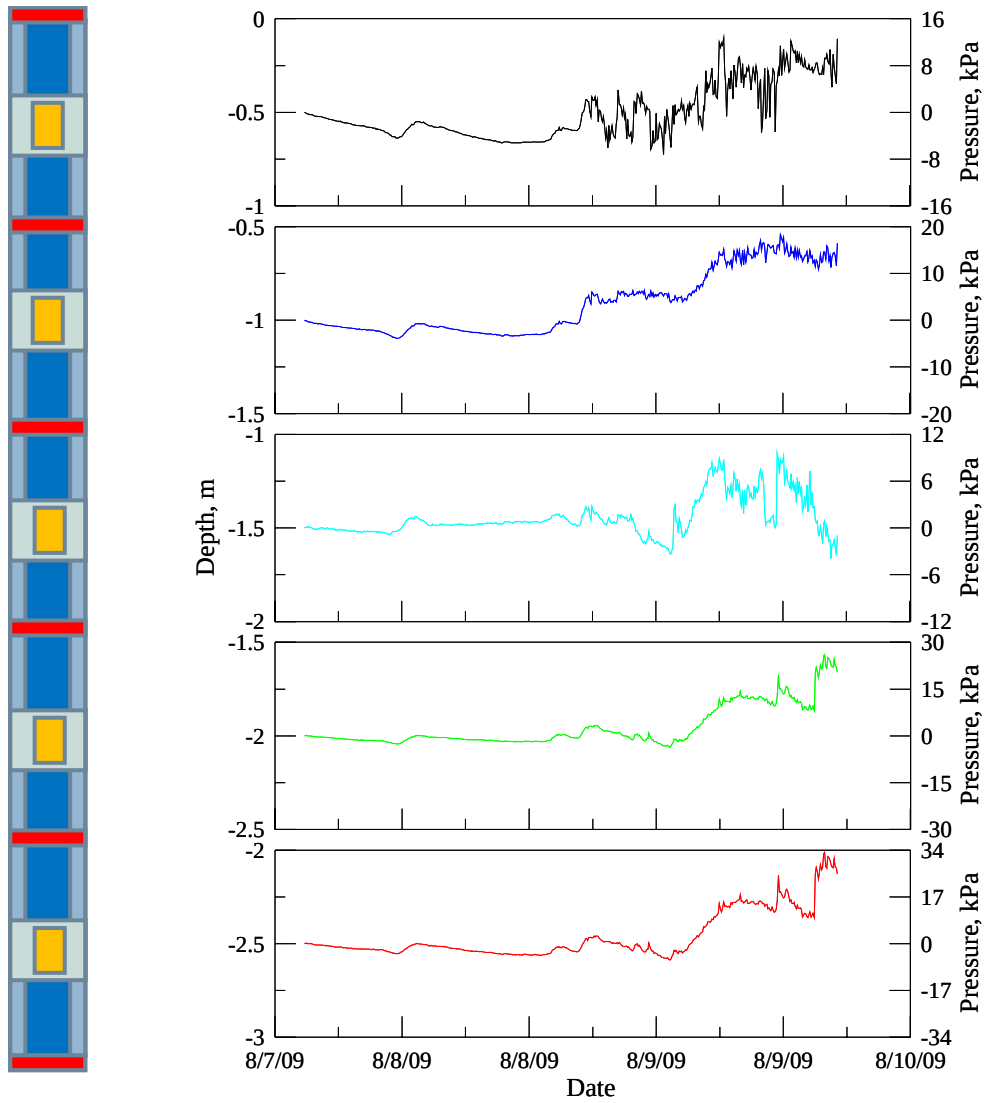


圖 4.3 A 管 0~3 米水壓計歷時壓力變化圖

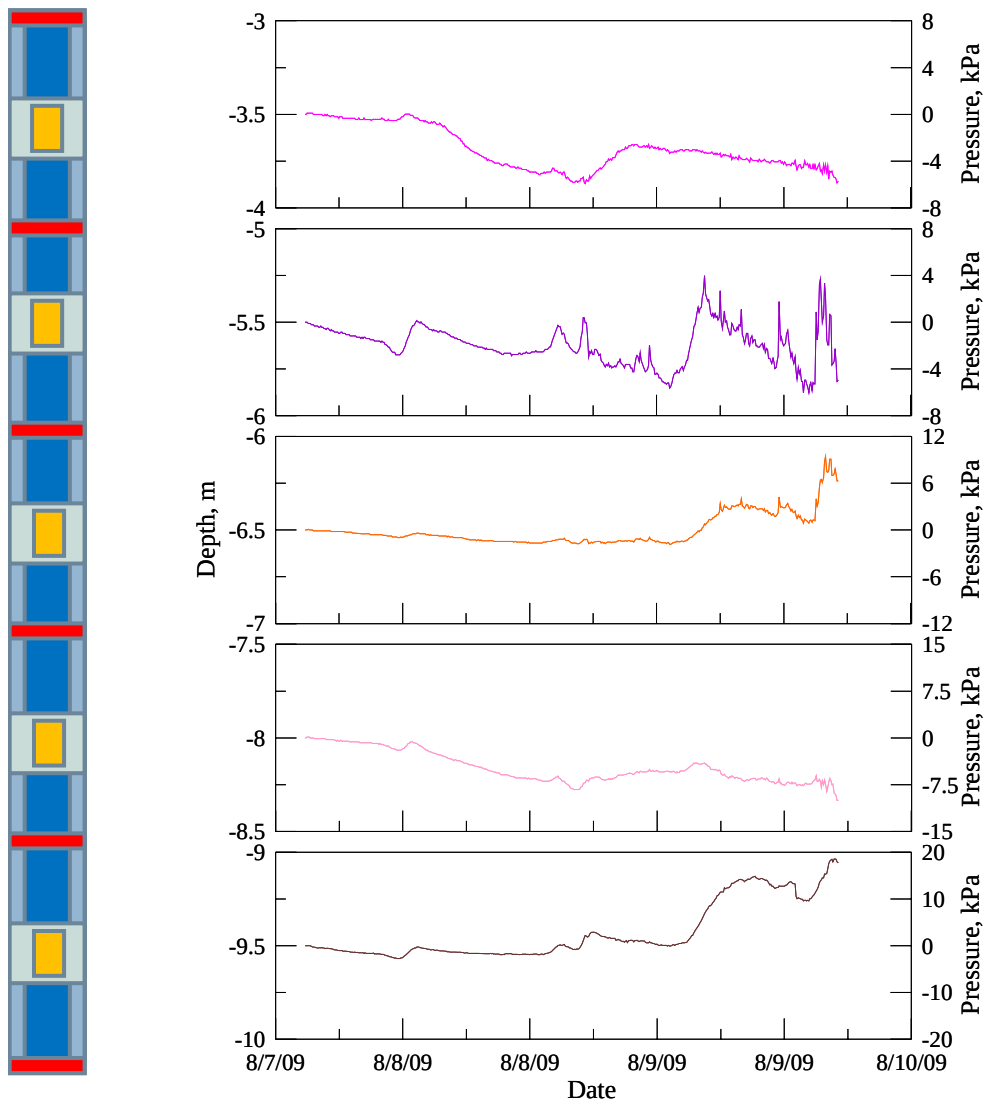


圖 4.4 A 管 3.5~9.5 米水壓計歷時壓力變化圖

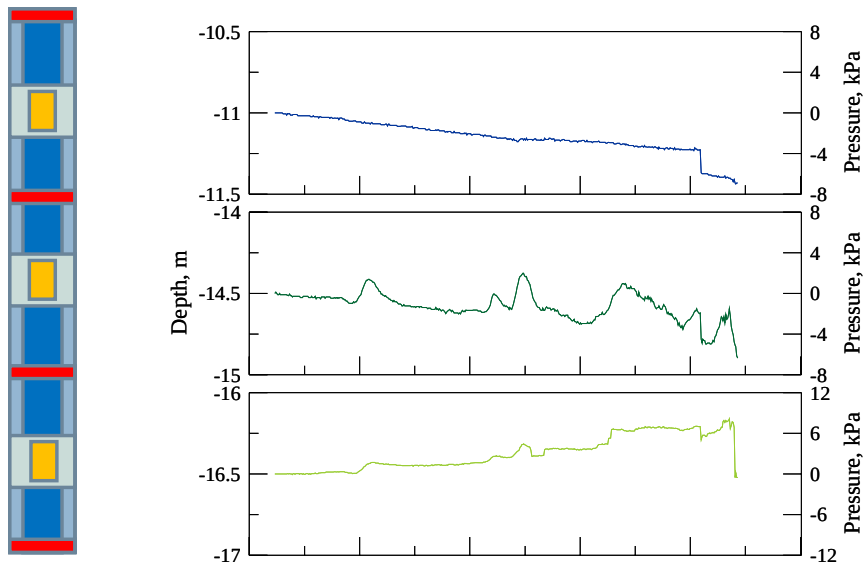


圖 4.5 A 管 11~16.5 米水壓計歷時壓力變化圖

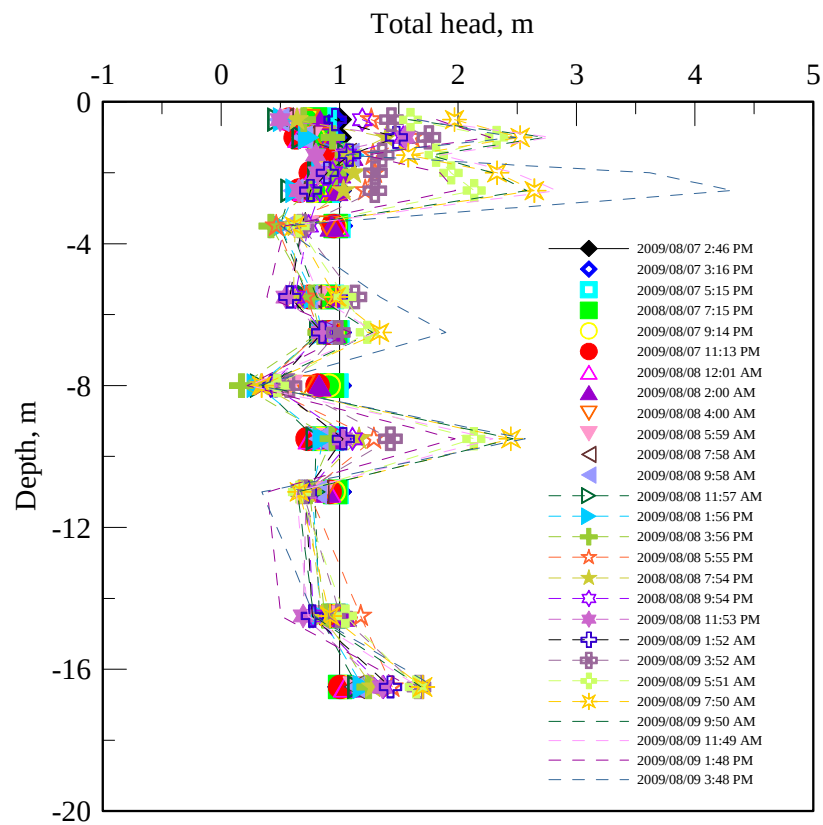


圖 4.6 A 管各深度總水頭歷時變化

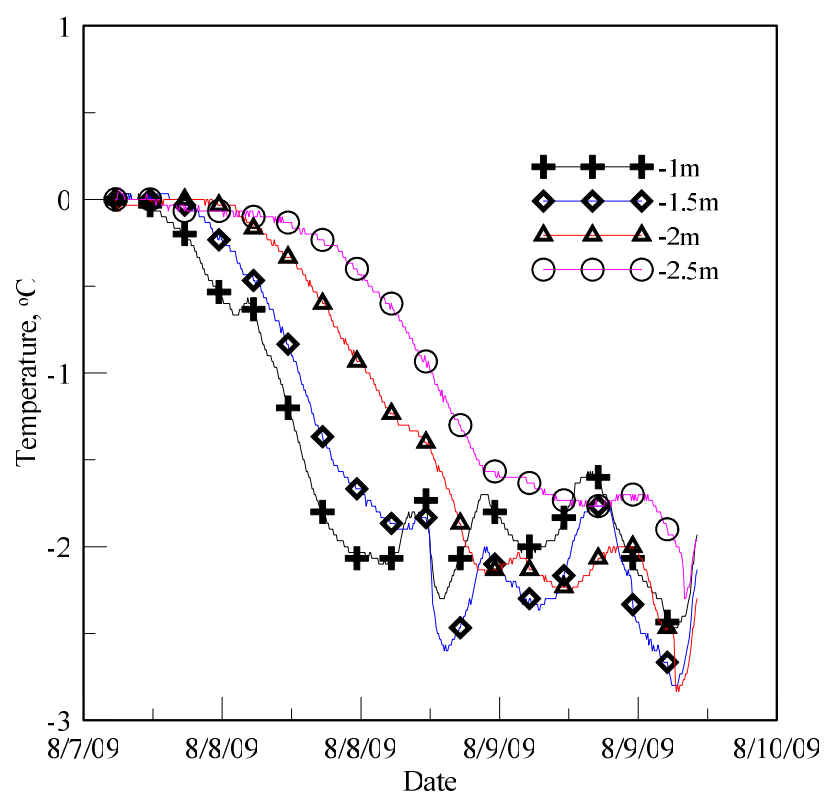


圖 4.7 A 管各深度之溫度歷時變化

4.2 B監測管量測數據

圖4.8為B監測管0~4m之間，各點水壓計的歷時壓力變化圖(以8月7日18時為初始值)，可看出在8月9日上午12點過後，各深度的水壓力有明顯上升，均可達到10 kPa以上。圖4.9為B監測管5.5~14.5m之間，各點水壓計的歷時壓力變化圖，可看出在此之間之水壓力變化約在10kPa之內。圖4.10為B監測管16.5m之歷時壓力變化圖，水壓力未有明顯變化。圖4.11為展示B監測管，以總水頭方式之表示法，來說明各深度光纖光柵水壓計之歷時變化，從此圖看出，在0~12m之間的水壓力計，有明顯變化，總水頭變化約可達到2m。圖4.12為B監測管-0.5m~-6.5m之間溫度隨時間的歷時變化，在靠近地表處的水溫會最先開始下降，之後隨時間增加各深度的水溫，也開始慢慢下降，其溫度變化最大約為2°C。

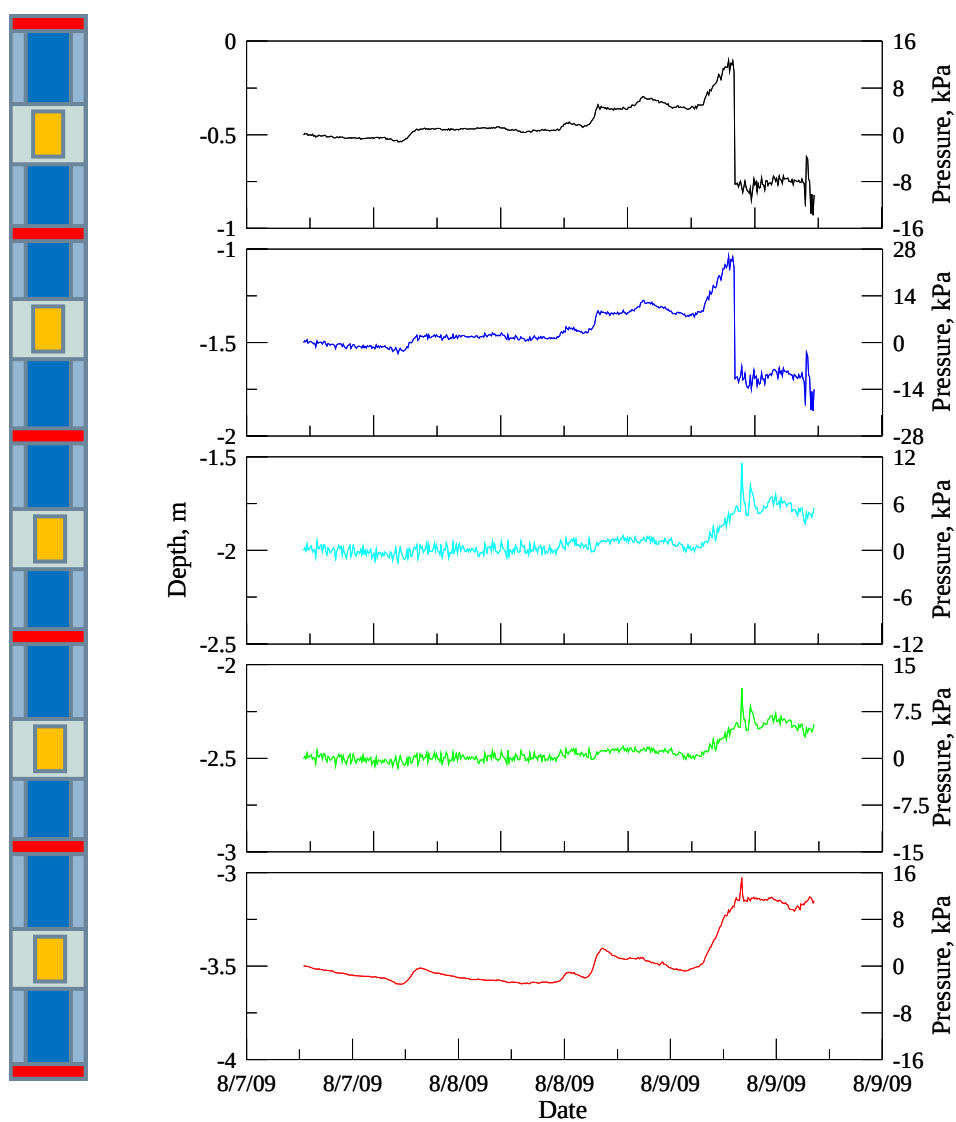


圖 4.8 B 管 0~4 米水壓計歷時壓力變化圖

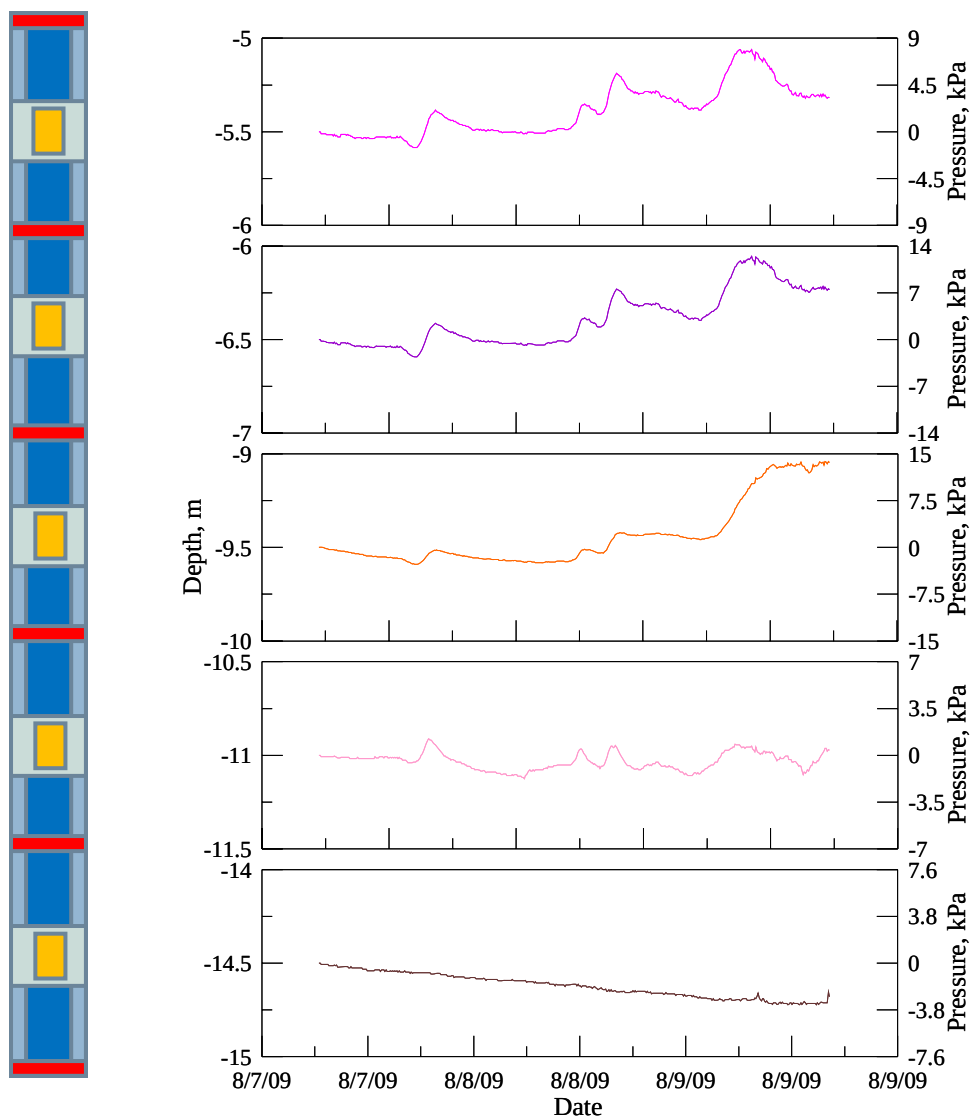


圖 4.9 B 管 5.5~14.5 米水壓計歷時壓力變化圖

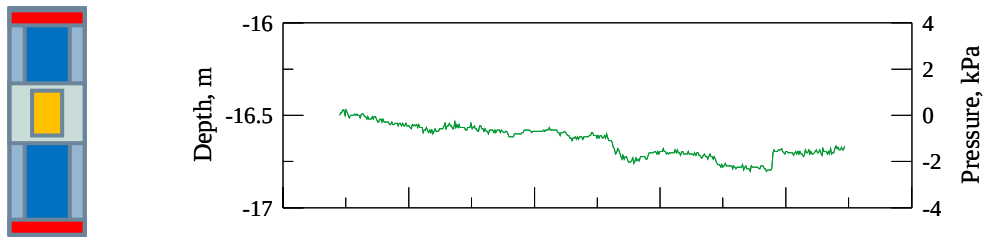


圖 4.10 B 管 16.5 米水壓計歷時壓力變化圖

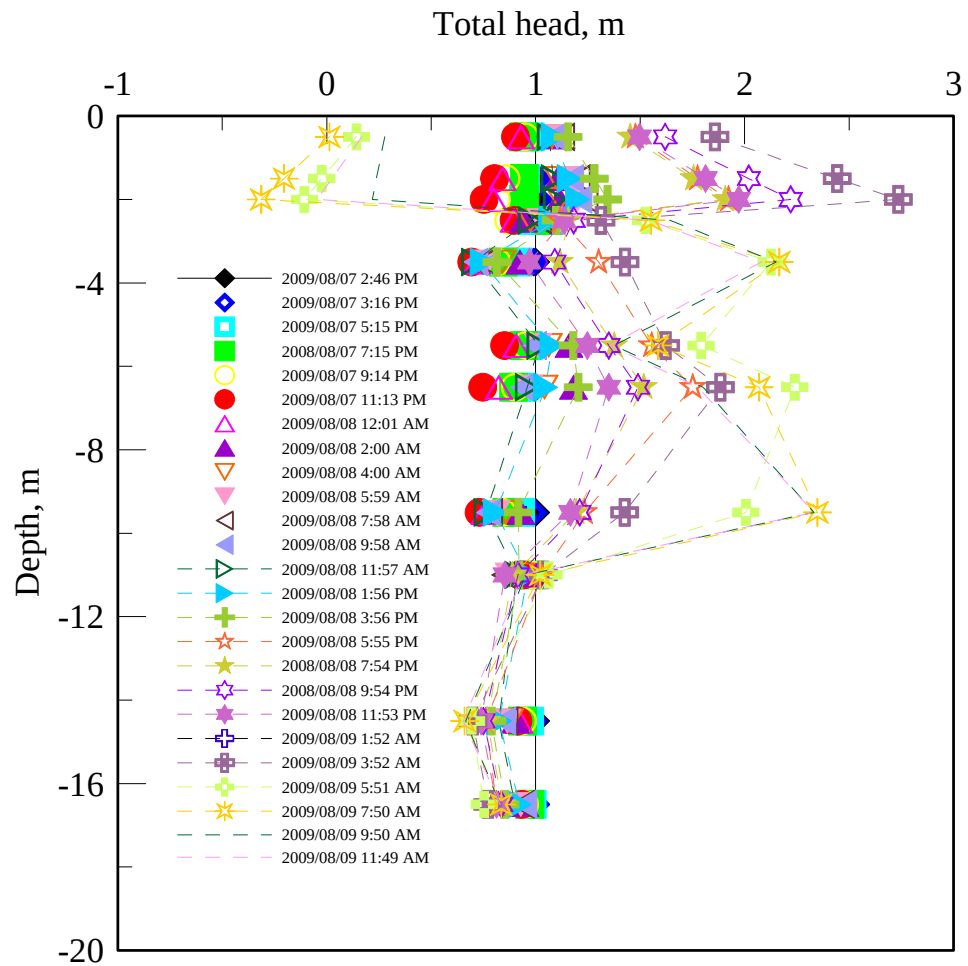


圖 4.11 B 管各深度之總水頭歷時變化

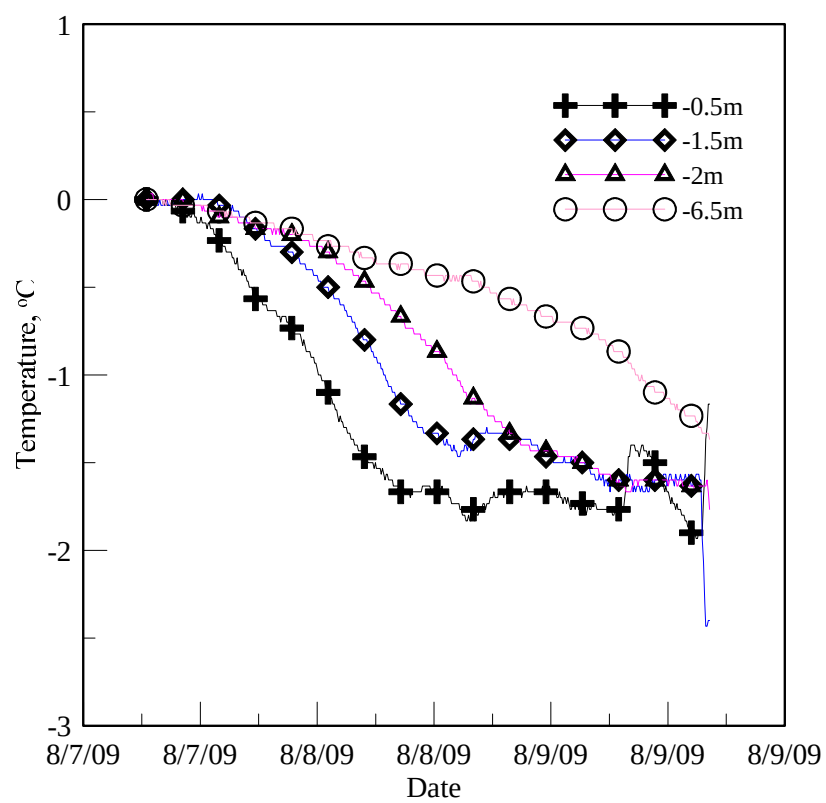


圖 4.12 B 管各深度之溫度歷時變化

4.3 C監測管量測數據

圖4.13為C監測管0~4m之間，各點水壓計的歷時壓力變化圖(以8月7日07時為初始值)，可看出在8月9日上午12點過後，深度在-3.5m處的水壓有明顯上升。圖4.14為C監測管5.5~8m之間，各點水壓計的歷時壓力變化圖，可看出在此之間之水壓力變化約在10kPa之內。圖4.15為C監測管，以總水頭方式之表示法，來說明各深度光纖光柵水壓計之歷時變化，從此圖看出，在2~8m之間的水壓力計，有明顯變化，總水頭變化約可達到2m。圖4.16為C監測管-0.5m~-6.5m之間溫度隨時間的歷時變化，在靠近地表處的水溫會最先開始下降，之後隨時間增加各深度的水溫，也開始慢慢下降，其最大溫度變化約為2.2°C。

後因巨石撞擊，C監測管於8月9日上午6點沖毀，B監測管於8月9日下午1點沖毀，A監測管於8月9日下午5點沖毀，本計畫於9月份進行第一次災後會勘，但是由於現場水流湍急，評估後預計於11月底進行修復，也發文給水利署第3河川局並核可。但是本研究於11月初天氣與水流允許狀況下進入橋墩下並進行第2次現勘，發現橋墩沖刷深度達1米以上，3組水壓計的第1節鋼管皆已消失，評估已經無法進行修復，故本研究將重新安裝A、B兩孔各15組FBG水壓計。

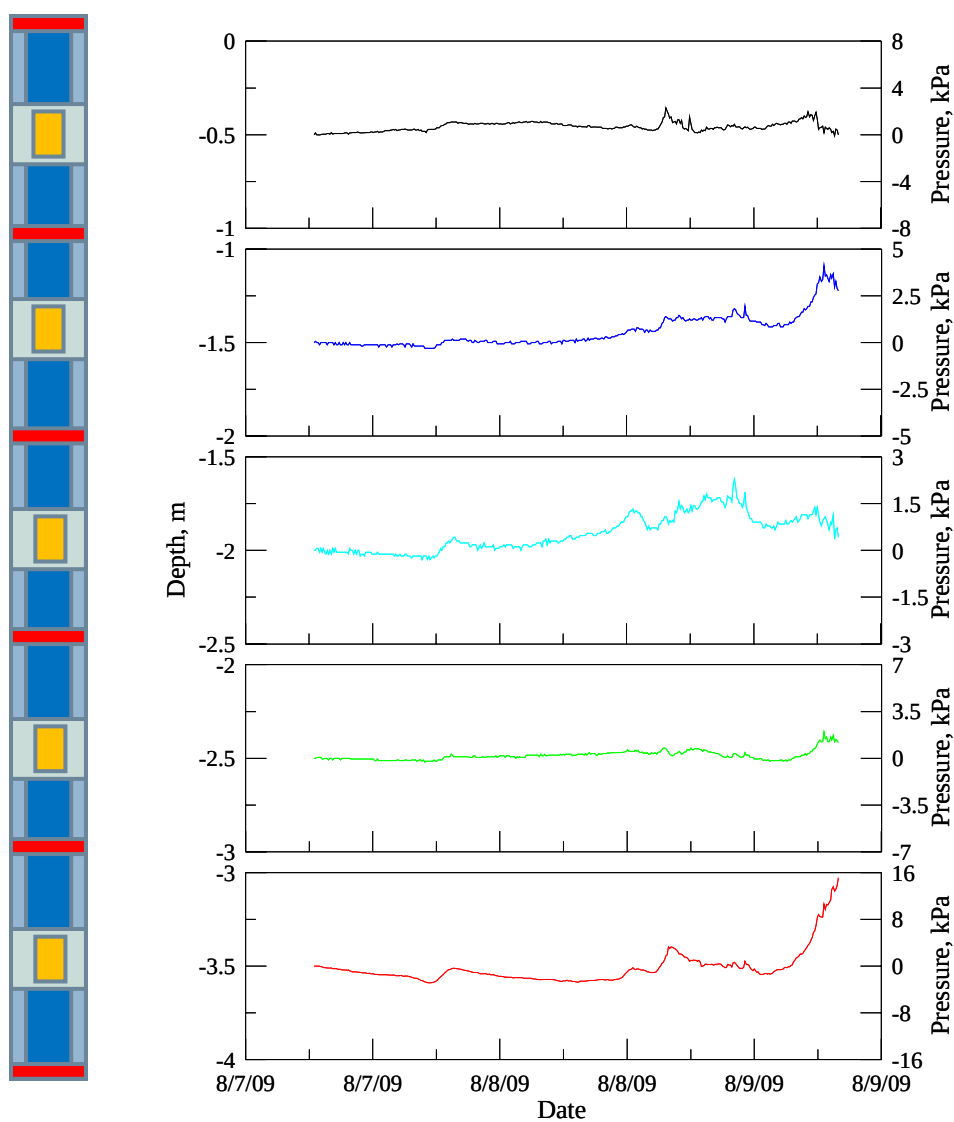


圖 4.13 C 管 0~4 米水壓計歷時壓力變化圖

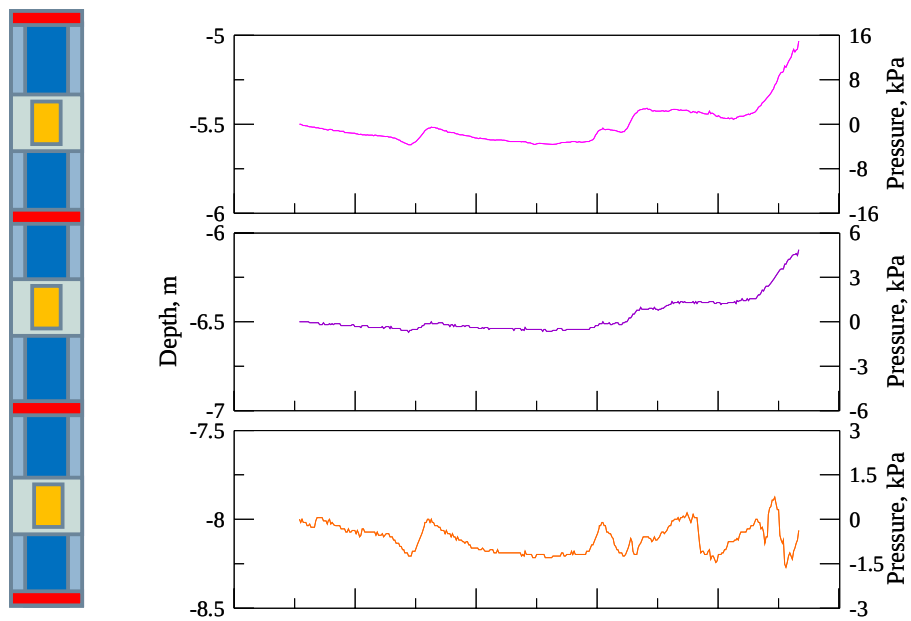


圖 4.14 C 管 5.5~8 米水壓計歷時壓力變化圖

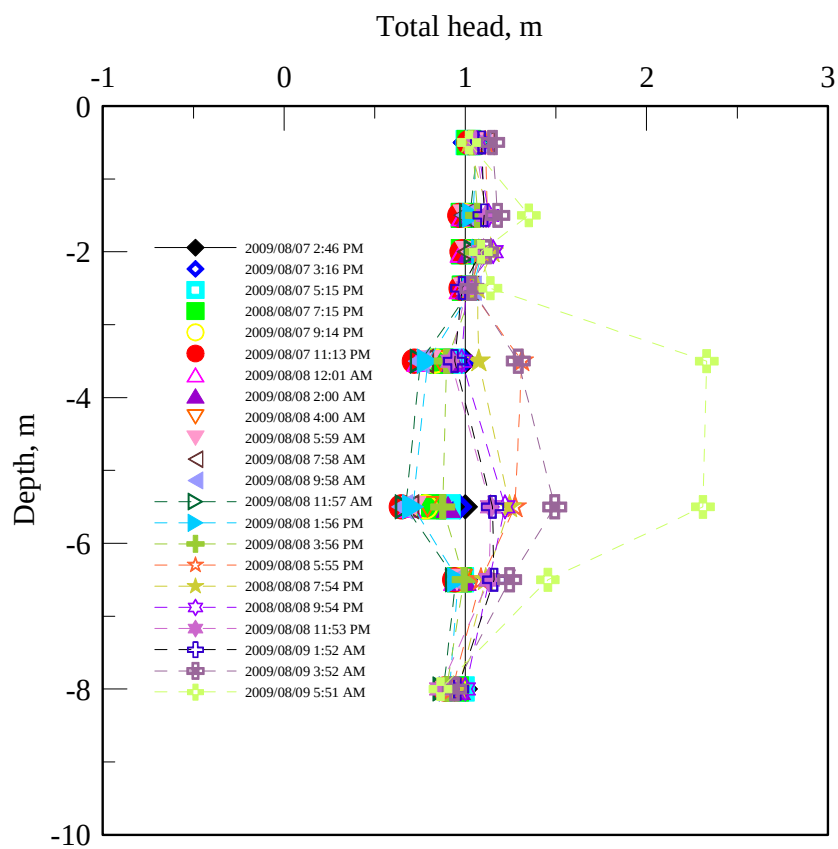


圖 4.15 C 管各深度之總水頭歷時變化

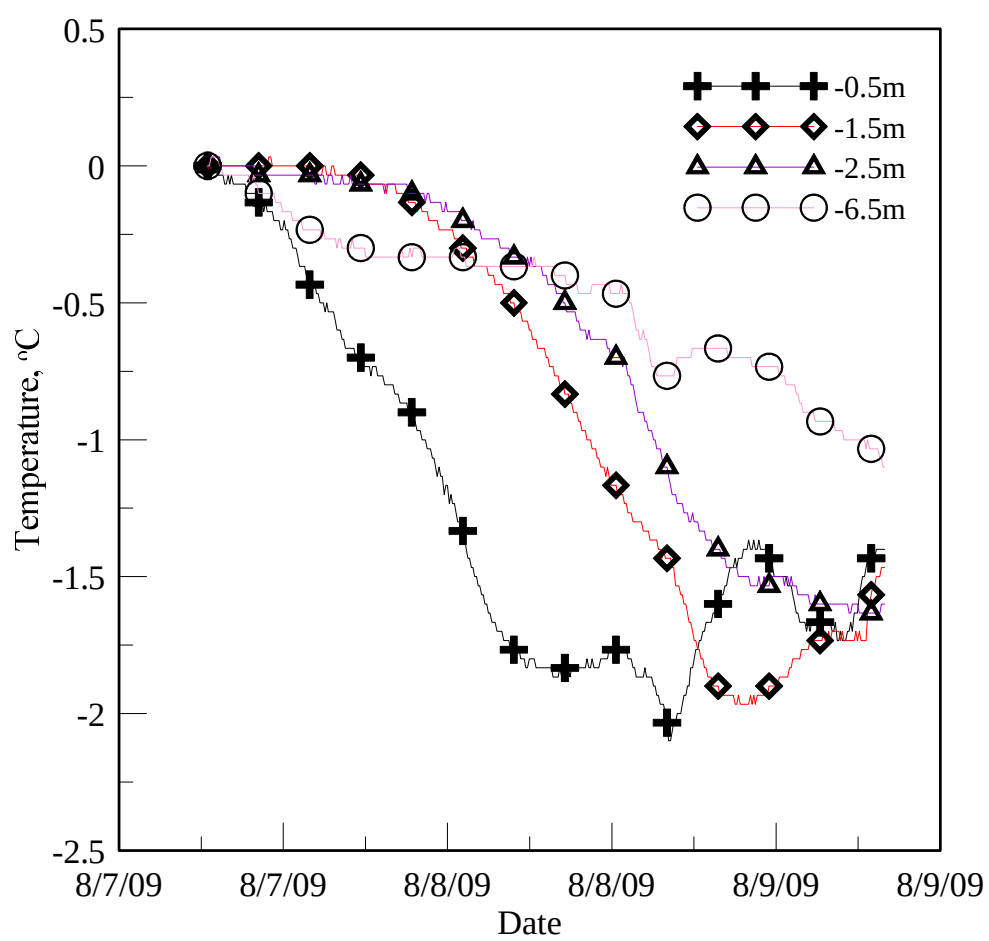


圖 4.16 C 管各深度之溫度歷時變化

4.4 監測數據分析

本計畫於大甲溪橋墩上安裝有光纖光柵溫度感測器與光纖光柵水壓感測器，本節主要敘述於大甲溪橋墩監測數據的分析，將其分別首先是針對溫度與水壓變化進行一分析。

1. 溫度與水壓分析

由於本計畫是將鋼管埋設位於消波塊中，所以其所量測橋墩基礎沖刷行為不同於一般橋墩地層中沖刷行為。圖4.17~圖4.20為不同深度溫度與水壓量測比較圖。依據溫度與壓力綜合研判，A管1米深溫度在與8月8號15時降低約 2°C 後達到平衡(以8月7號14時為初始值)，表示此時在消波塊內該深度的土層被水沖刷帶走，所以FBG溫度感測器所量測的溫度全部為水的溫度且變化不大，另外對照此時所量測的水壓力變化，也發現壓力有急遽變化的現象，但是此時鋼管並未沖垮，鋼管的沖垮推估是由於消波塊的移動所造成的，時間約為8月9日17時。使用相同的分析方法，A管1.5米處在約在8月8日21時溫度降低約 2.5°C ；A管2米約在8月9號0時溫度降 2°C ；A管2.5米處在約8月9號3時溫度降低 1.8°C ，上述階段皆有水壓急遽變化的現象。將A管消波塊內不同深度土層預估被沖刷置換時間整理如表4.1所示。由於本次安裝將水壓計使用鋼管封裝後鑽孔放置於地層內，可能由於水流或重物衝擊造成鋼管震動，使得鋼管與地層或消波塊間產生孔隙且水壓發生變化，本研究已經重新設計水壓計封層與施工方法，於12月份重新安裝時FBG水壓計內部核心元件將採用PVC管封裝，用以降低此種影響。

圖4.21~圖4.24為B管不同深度溫度與水壓量測比較圖。依據溫度與壓力綜合研判，B管0.5米深溫度在與8月8號14時降低約 1.8°C 後達到平衡(以8月7號18時為初始值)，表示此時在消波塊內該深度的土層被水沖刷帶走，所以FBG溫度感測器所量測的溫度全部為水的溫度，且變化不大，且對照此時所量測的水壓力變化，也發現壓力有急遽變化的現象，但是此時鋼管並未沖垮，鋼管的沖垮是由於消波

塊的移動所造成的，時間約為8月9日13時。相同的分析方法下，B管1米處在約在8月8日15時溫度降低約1.5°C；B管2米處約在8月9號6時溫度降1.6°C；上述皆有水壓急遽變化的現象。而B管6.5米處溫度並無平衡之現象發生，水溫下降約1 °C，研判該處土壤並未被沖刷帶走，將B管消波塊內不同深度土層預估被沖刷時間整理如表4.2所示。

圖4.25~圖4.28為C管不同深度溫度與水壓量測比較圖，依據溫度與壓力綜合研判，C管0.5米深溫度在與8月8號06時降低約2°C後達到平衡(以8月7號07時為初始值)，表示此時在消波塊內該深度的土層被水沖刷帶走，所以FBG溫度感測器所量測的溫度全部為水的溫度，且變化不大，且對照此時所量測的水壓力變化，也發現壓力有急遽變化的現象，但是此時鋼管並未沖垮，鋼管的沖垮是由於消波塊的移動所造成的，時間約為8月9日06時。相同的分析方法下，C管1.5米處在約在8月8日20時溫度降低約1.8°C；C管2米處約在8月8號22時溫度下降2°C；上述皆有水壓急遽變化的現象。而C管6.5米處溫度並無平衡之現象發生，水溫下降約1.1°C，研判該處土壤並未被沖刷帶走，將C管消波塊內不同深度土層預估被沖刷置換時間整理如表4.3所示。

2. 流速與溫度分析

將所光纖光柵水壓計量測到的水壓，在假設水位高程不變、8月7日14時並無沖刷下與水壓取絕對值分析的狀況，經由公式(4.1)，可以得到流速的變化。

$$v = \sqrt{2g \times P_v} \dots\dots\dots(4-1)$$

其中:g=9.81m/s²

Pv:為水壓力

另外根據圖3.7由Briaud(2008)所提出的沖刷流速與地層材料平均粒徑的關係圖中，若假設大甲溪現地的地層材料為5~20公分的礫石，可以依據公式(4.2)，可以得到臨界流速約為2~3.8(m/sec)。

$$V_c = 0.35(D_{50})^{0.45} \dots\dots\dots(4-2)$$

其中:Vc為沖刷臨界流速

D₅₀為現地地層材料之平均粒徑

經由上述，在A管1米處土層被水沖刷帶走後(溫度變化穩定時)流速約為4m/s(圖4.29)；在A管1.5米處沖刷完成後流速約為4.5m/s(圖4.30)；在A管2米處沖刷完成後流速約為5m/s(圖4.31)；在A管2.5米處沖刷完成後流速約為6m/s(圖4.32)。其沖刷速度皆略大於地層材料為平均粒徑20公分的臨界流速，符合地層內土壤或礫石產生沖刷時需要的臨界流速要求。

在B管0.5米處土層被水沖刷帶走後(溫度變化穩地時)流速約為5m/s(圖4.33)；在B管1.5米處沖刷完成後流速約為10m/s(圖4.34)；在B管2米處沖刷完成後流速約為8.5m/s(圖4.35)。其沖刷速度皆大於地層材料為平均粒徑20公分的臨界流速，符合地層內土壤或礫石產生沖刷時需要的臨界流速要求。

在C管0.5米土層被水沖刷帶走後(溫度變化穩地時)流速約為4m/s(圖4.36)；在C管1.5米處沖刷完成後流速約為5m/s(圖4.37)；在C管2米處沖刷完成後流速約為6m/s(圖4.38)。其沖刷速度皆略大於地層材料為平均粒徑20公分的臨界流速，符合地層內土壤或礫石產生沖刷時需要的臨界流速要求。

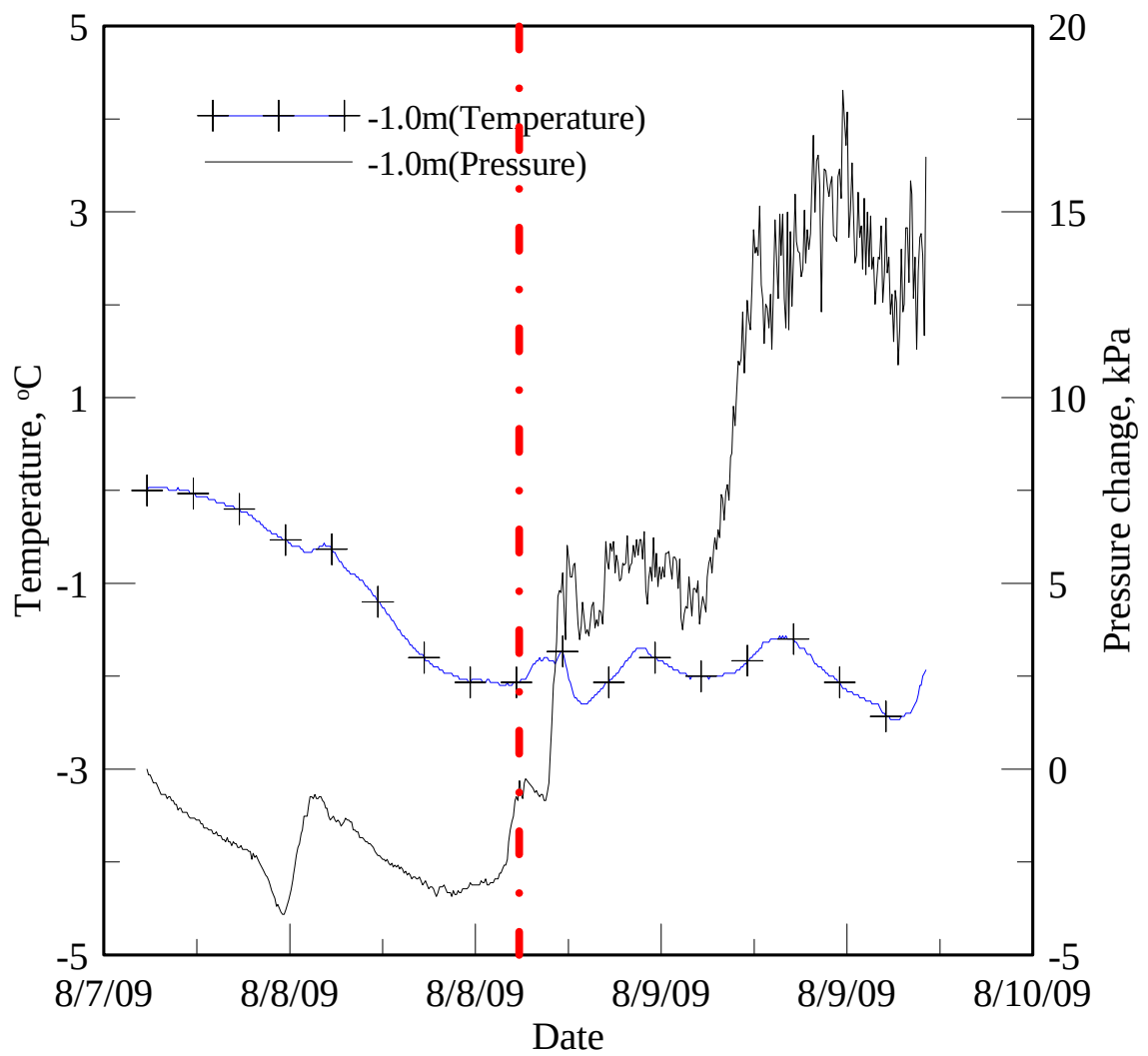


圖 4.17 A 管 1 米深度水壓與溫度量測比較圖

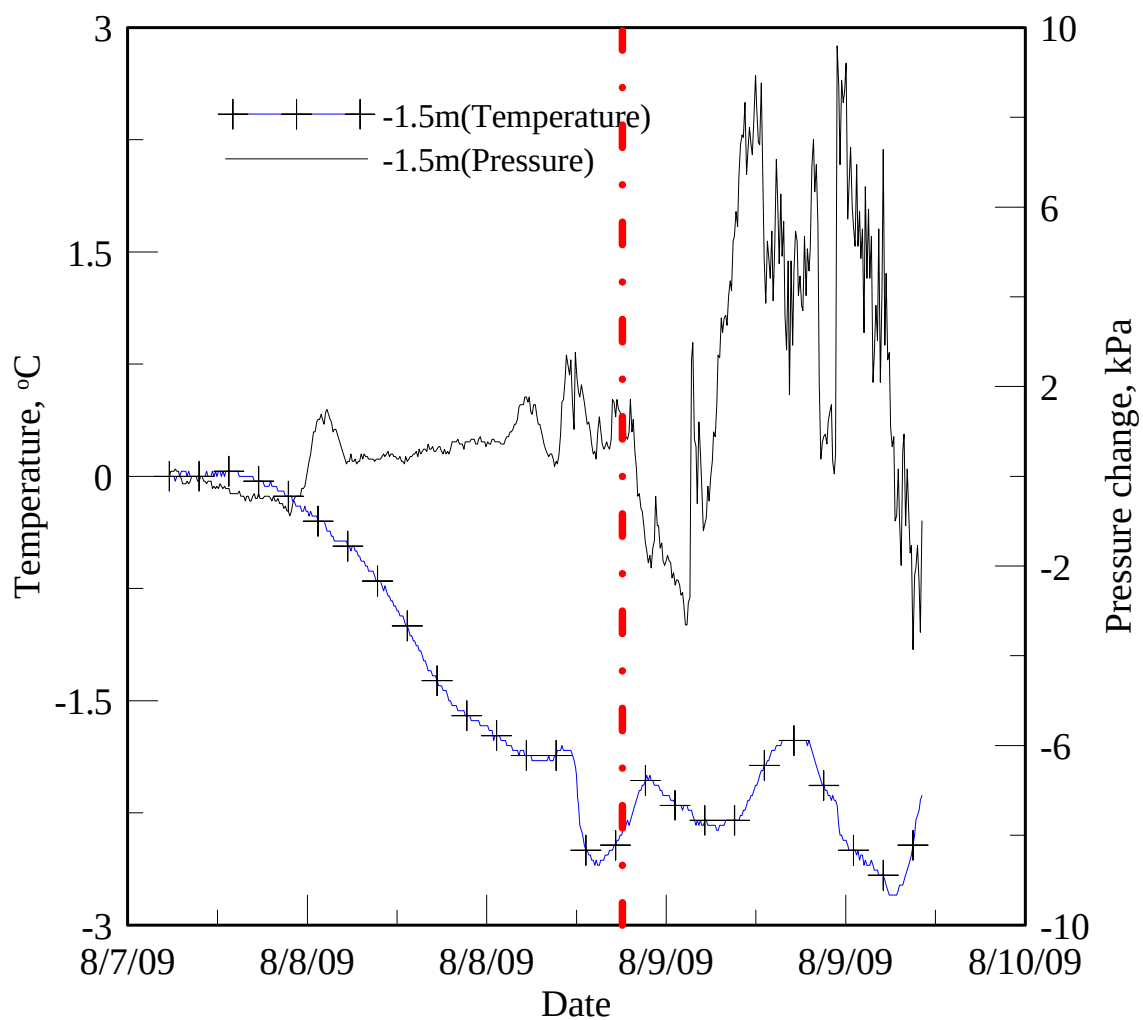


圖 4.18 A 管 1.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

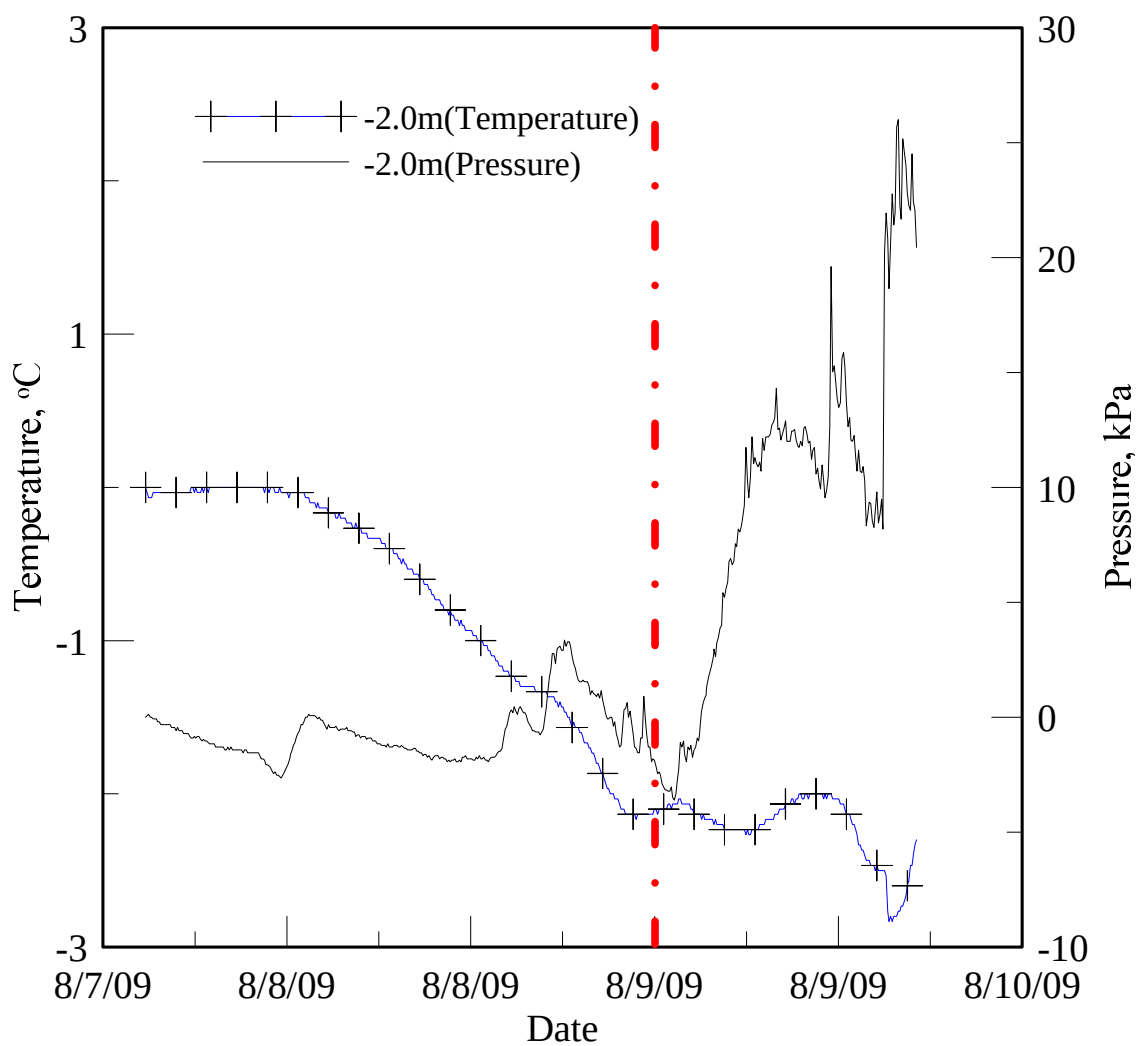


圖 4.19 A 管 2 米深度水壓與溫度量測比較圖

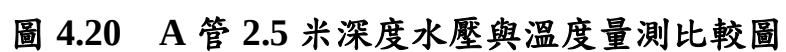


表 4.1 A 管消波塊內不同深度土層估計被沖刷時間

深度(m)	溫度變化(°C)	預估消波塊內土層被沖刷時間
1	2	8 月 8 號 15 時
1.5	2.5	8 月 8 號 21 時
2	2	8 月 9 號 0 時
2.5	1.8	8 月 9 號 3 時

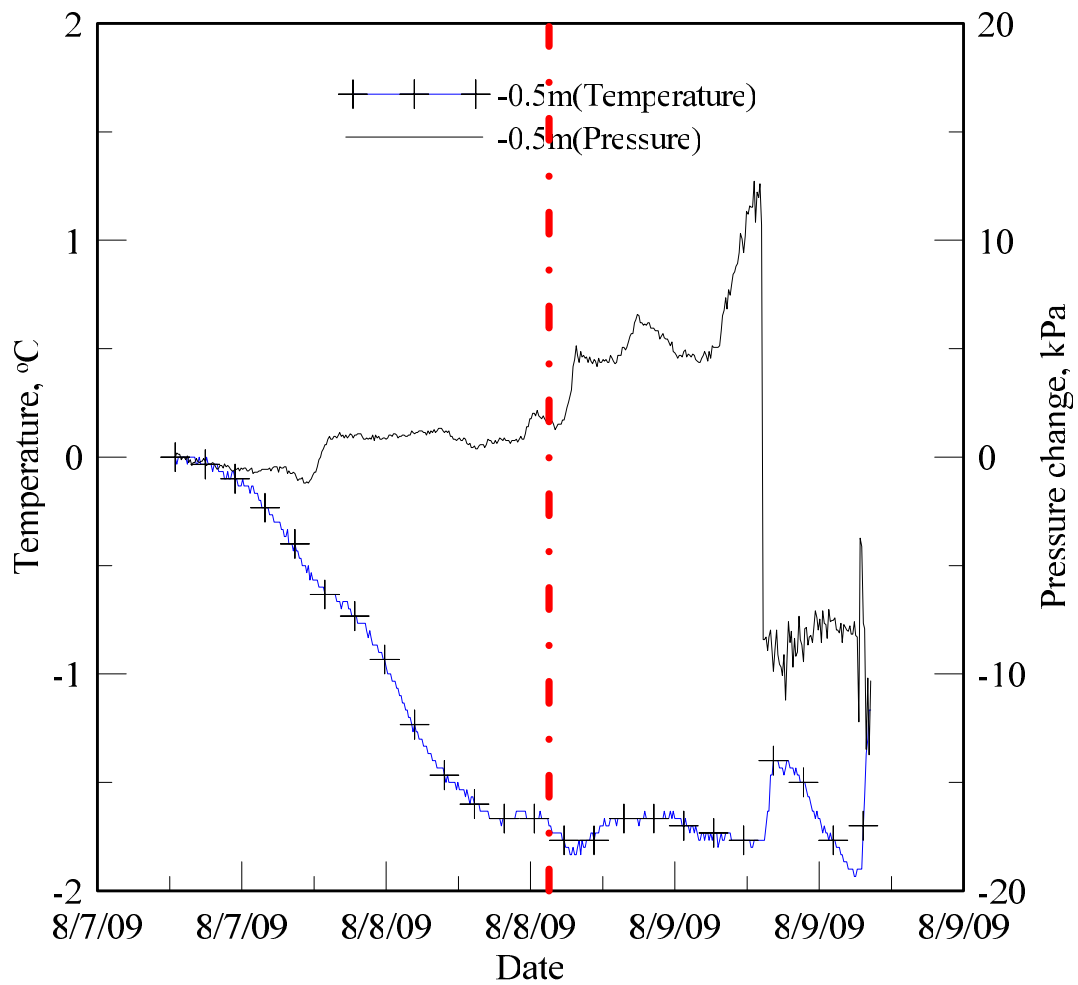


圖 4.21 B 管 0.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

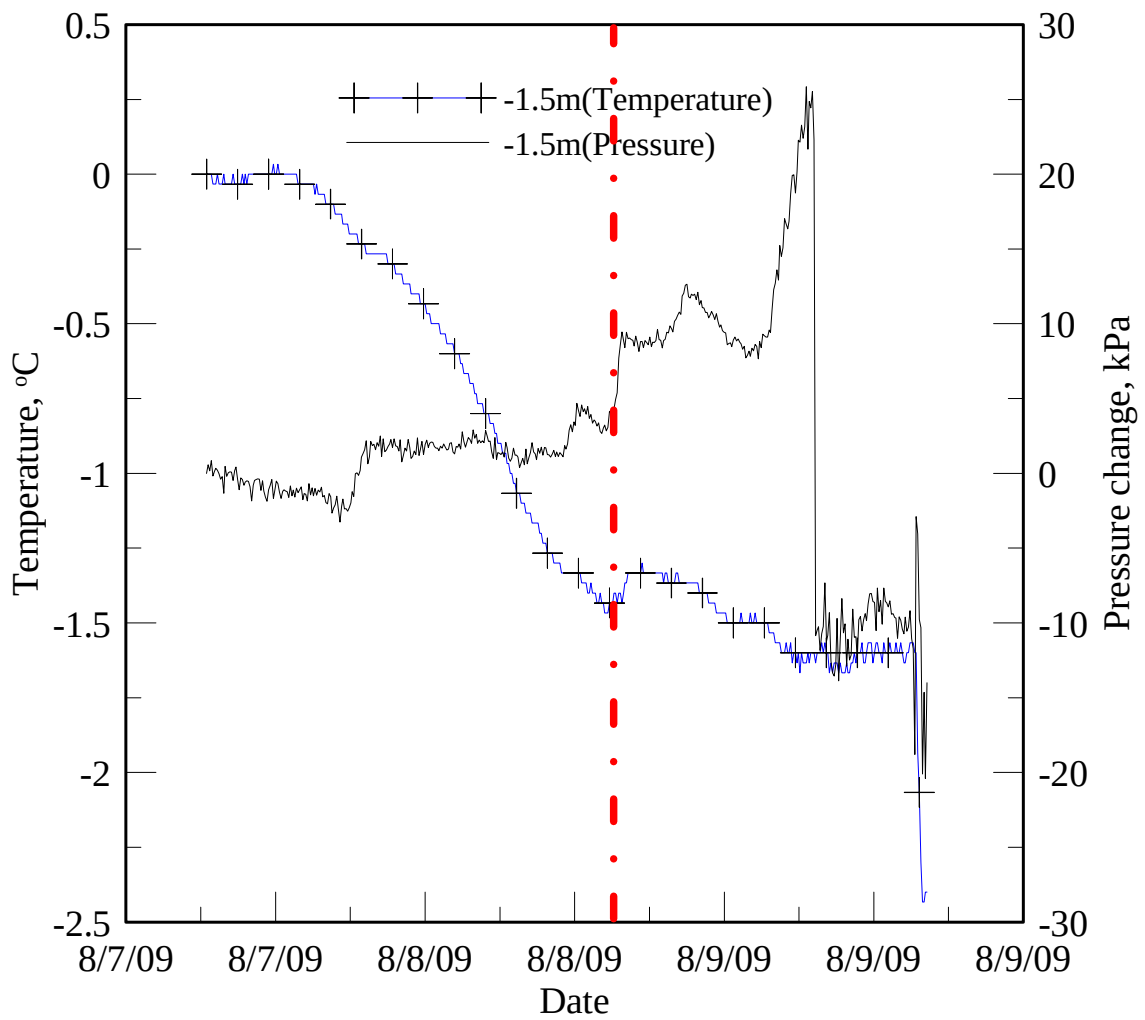


圖 4.22 B 管 1.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

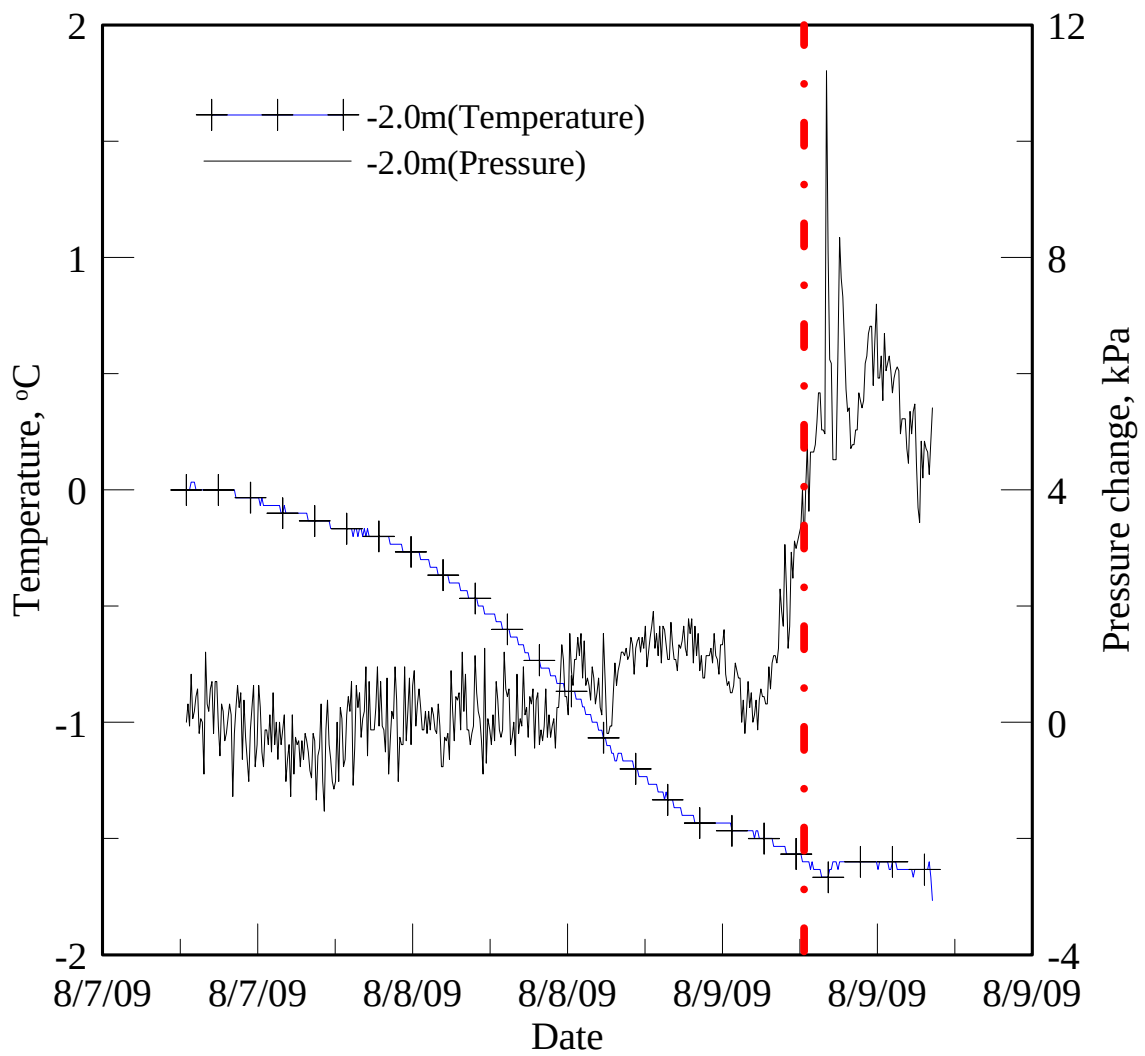


圖 4.23 B 管 2 米深度水壓與溫度量測比較圖

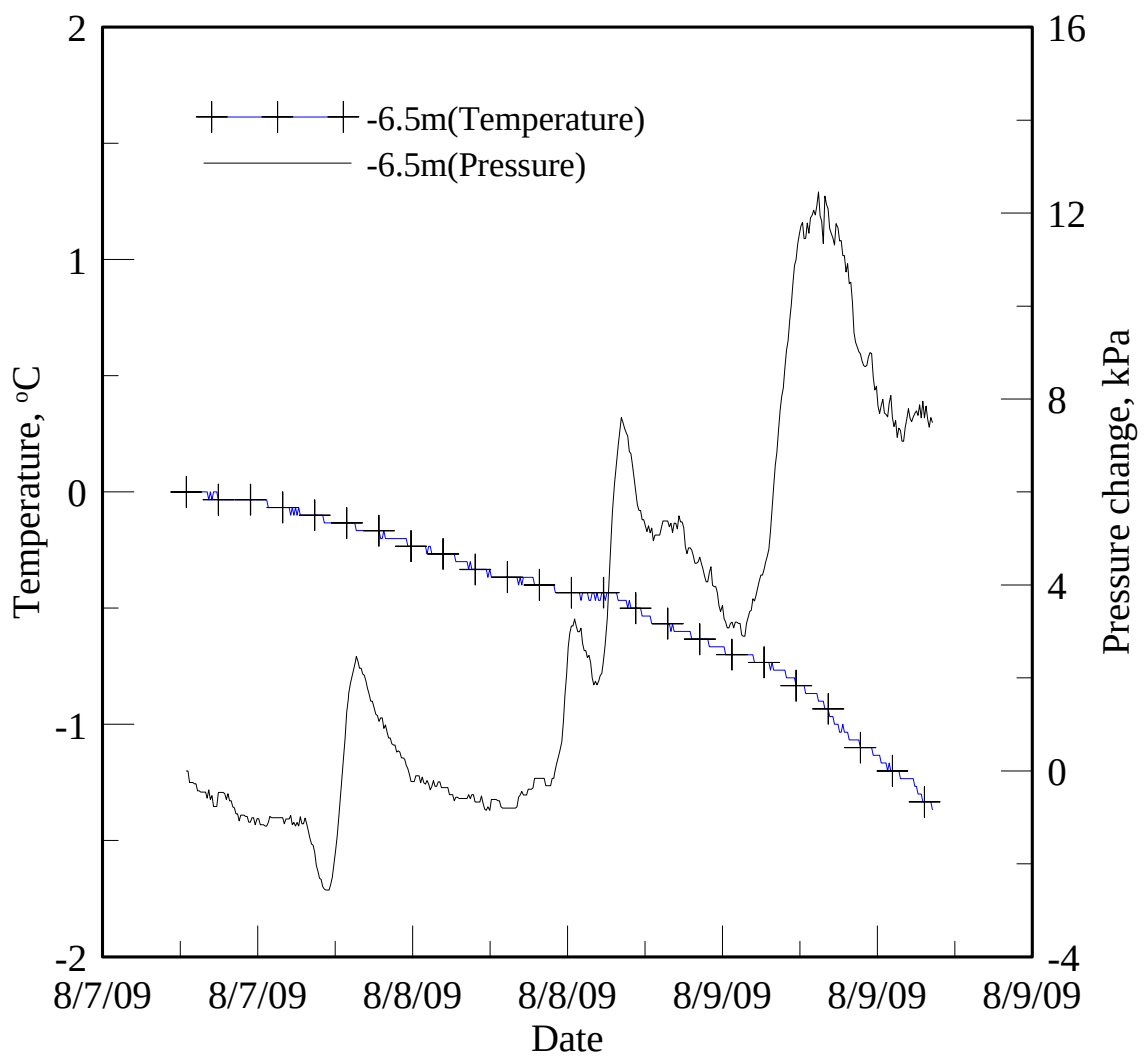


圖 4.24 B 管 6.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

表 4.2 B 管消波塊內不同深度土層估計被沖刷時間

深度(m)	溫度變化(°C)	預估消波塊內土層被沖刷時間
0.5	1.8	8 月 8 號 14 時
1	1.5	8 月 8 號 15 時
2	1.6	8 月 9 號 06 時

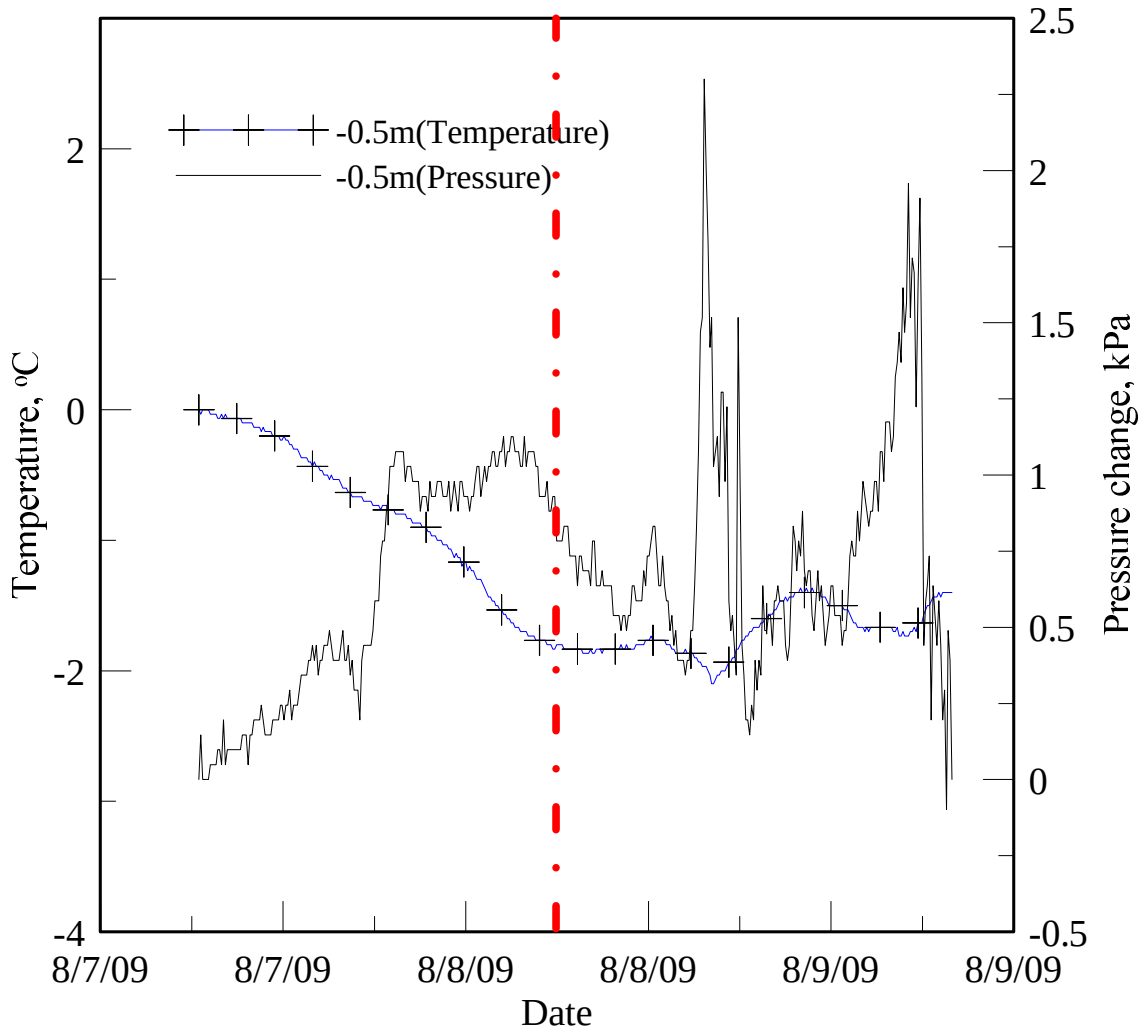


圖 4.25 C 管 0.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

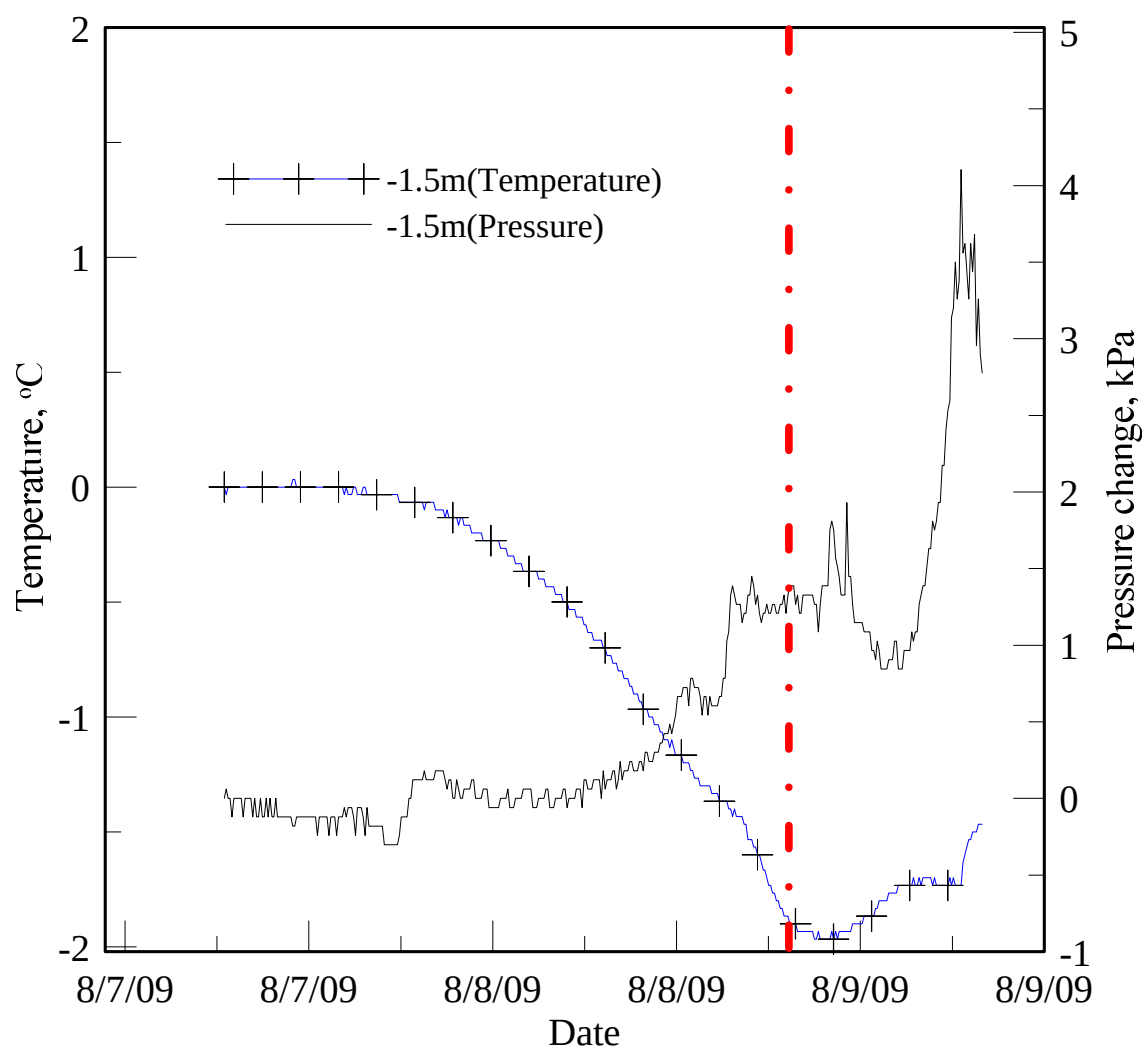


圖 4.26 C 管 1.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

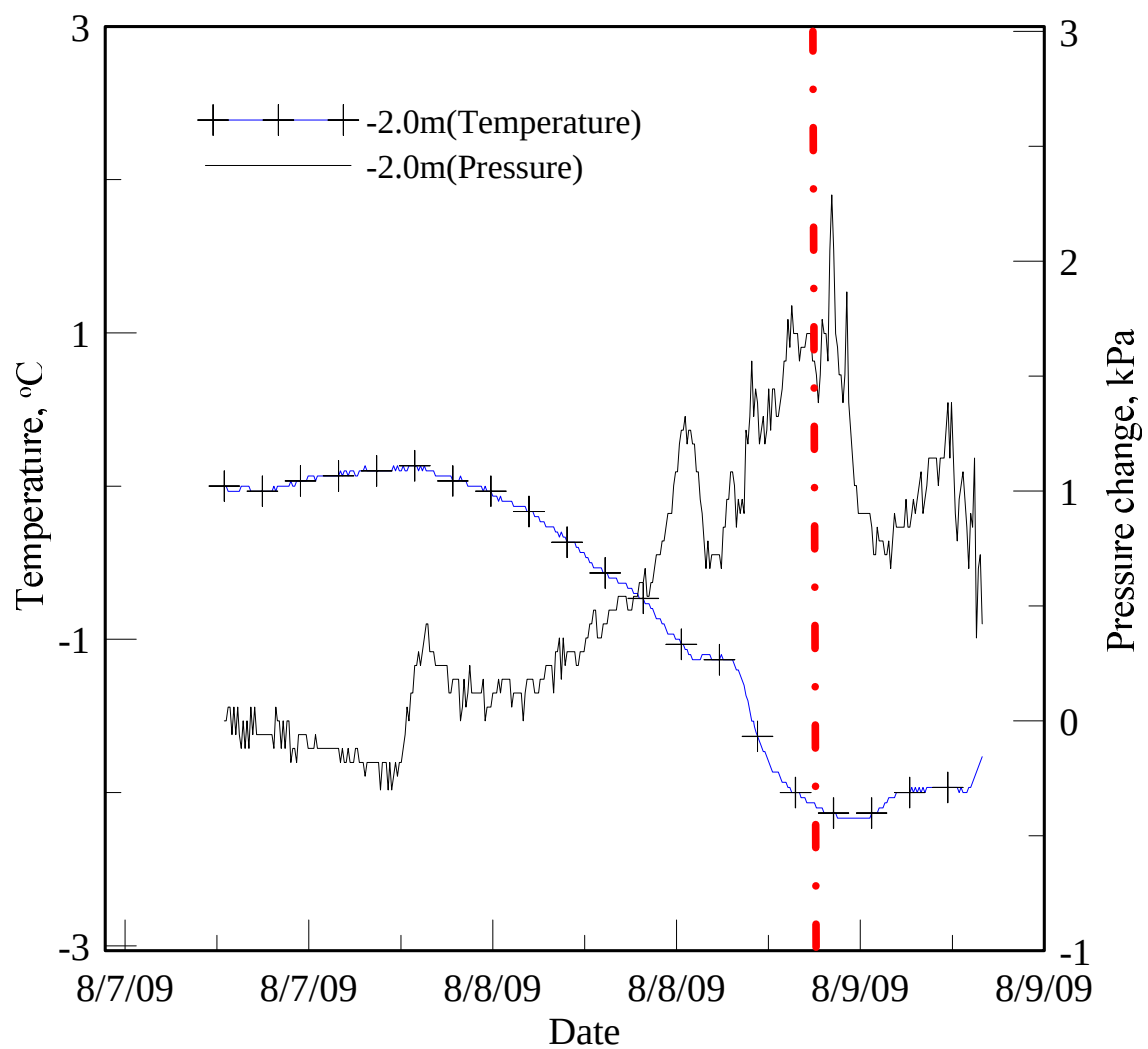


圖 4.27 C 管 2 米深度水壓與溫度量測比較圖

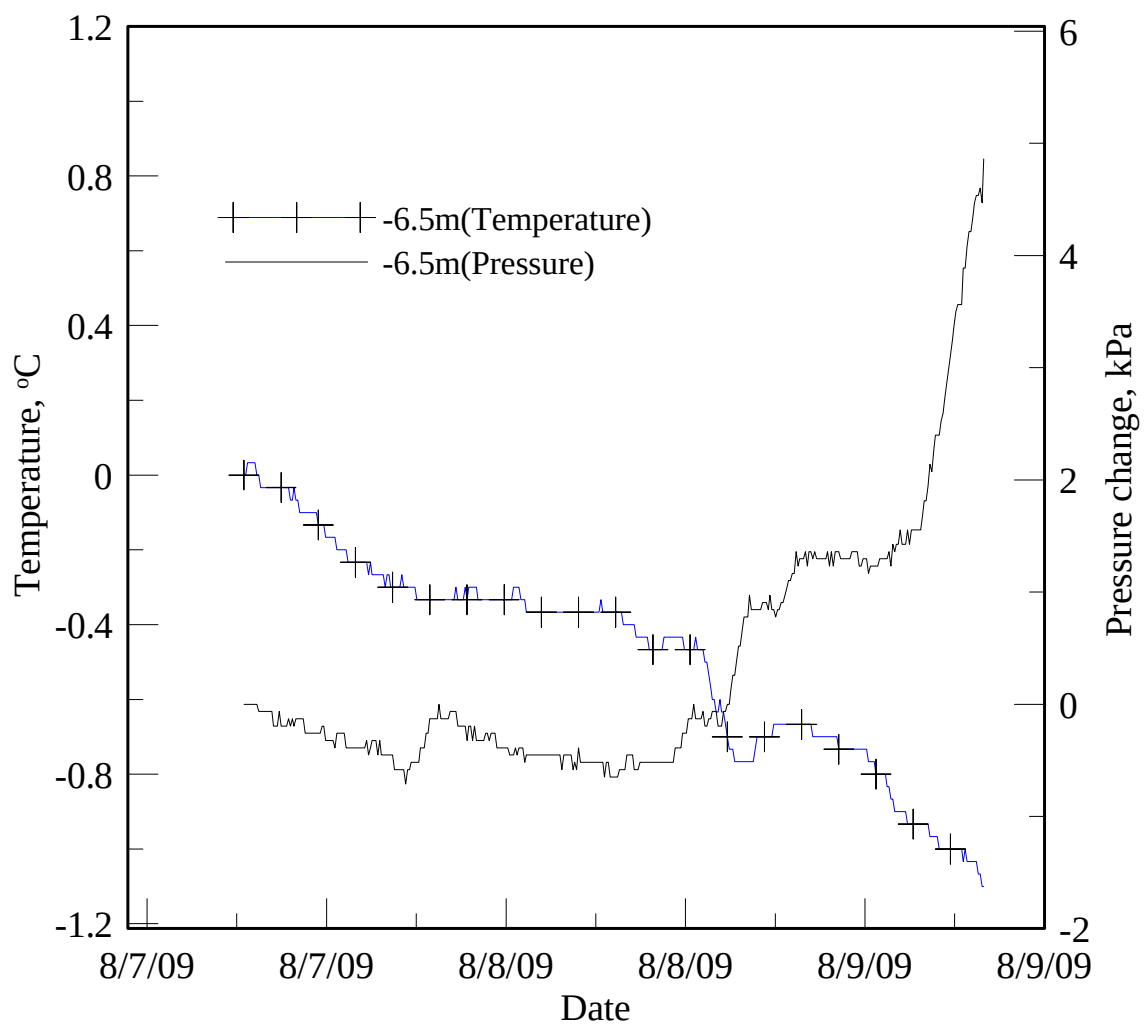


圖 4.28 C 管 6.5 米深度水壓與溫度量測比較圖

表 4.3 C 管消波塊內不同深度土層估計被沖刷時間表

深度(m)	溫度變化(°C)	預估消波塊內土層被沖刷時間
0.5	2	8 月 8 號 06 時
1.5	1.8	8 月 8 號 20 時
2	2	8 月 8 號 22 時

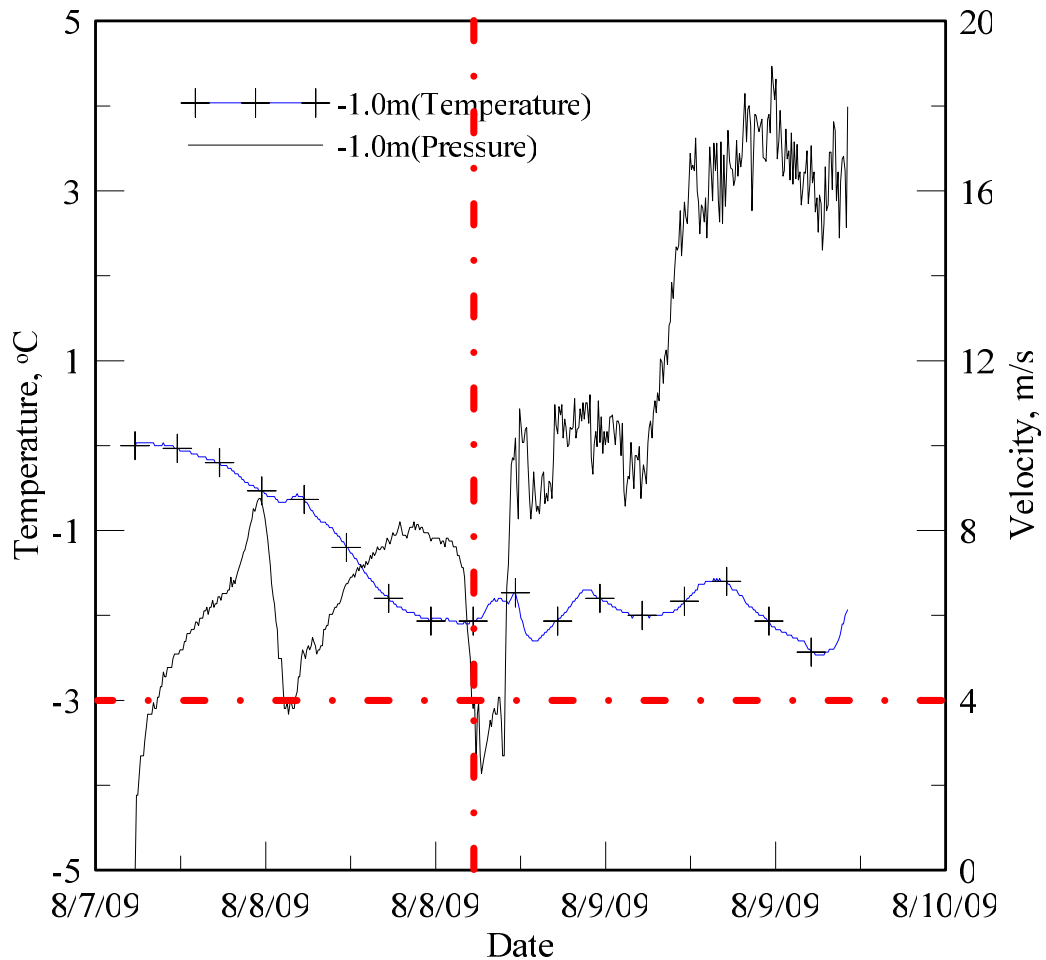


圖 4.29 A 管 1 米深度流速與溫度量測比較圖

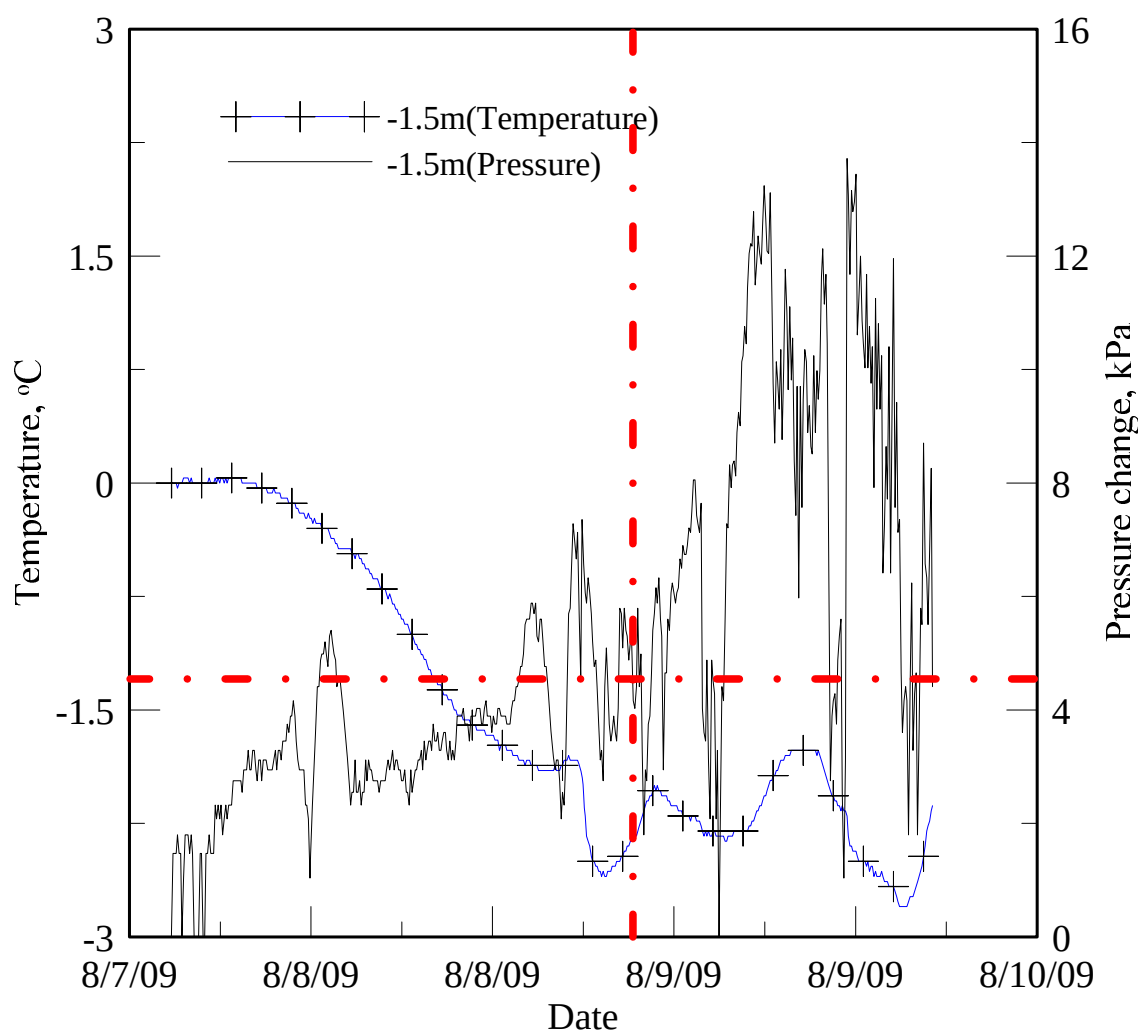


圖 4.30 A 管 1.5 米深度流速與溫度量測比較圖

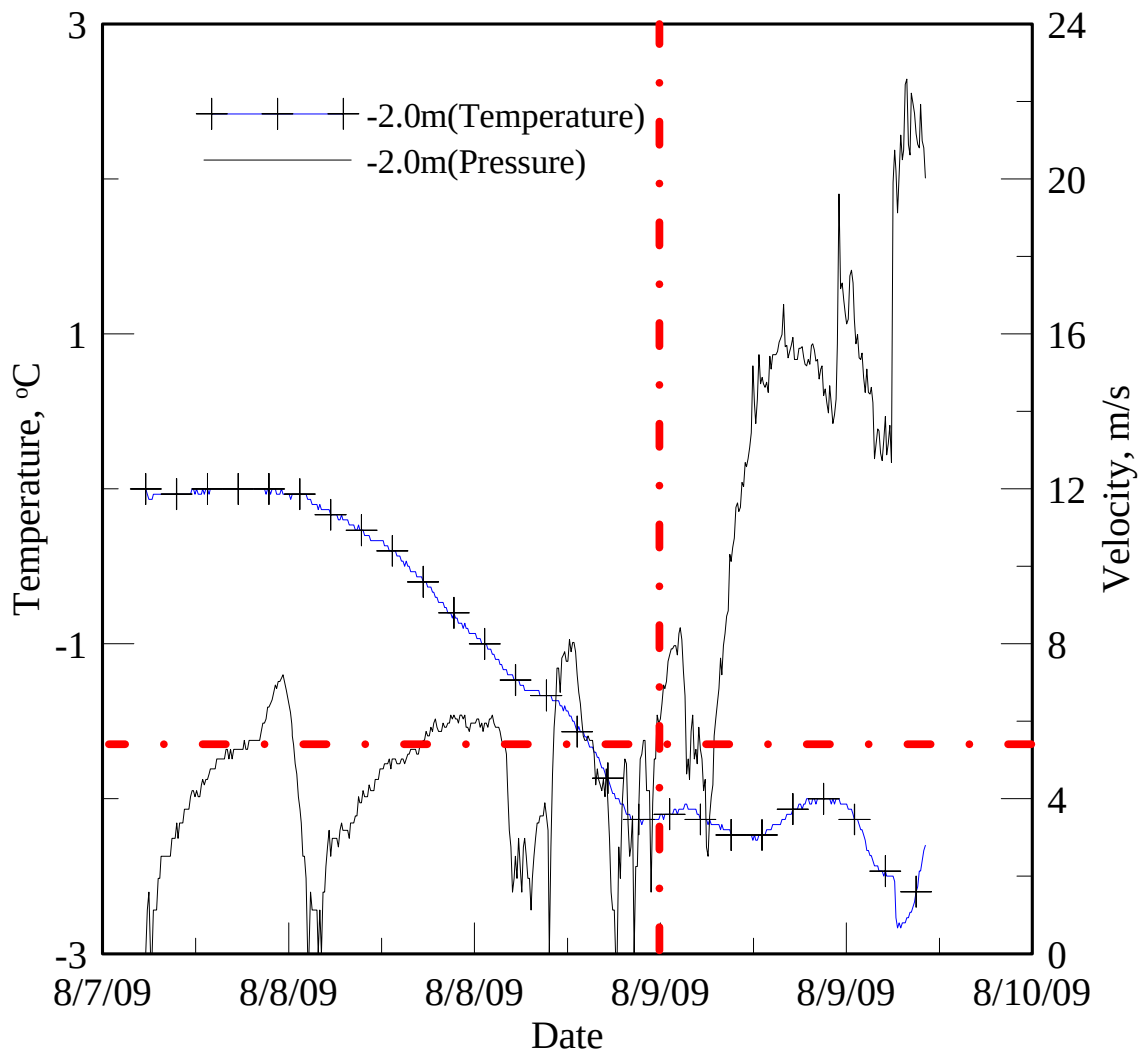


圖 4.31 A 管 2 米深度流速與溫度量測比較圖

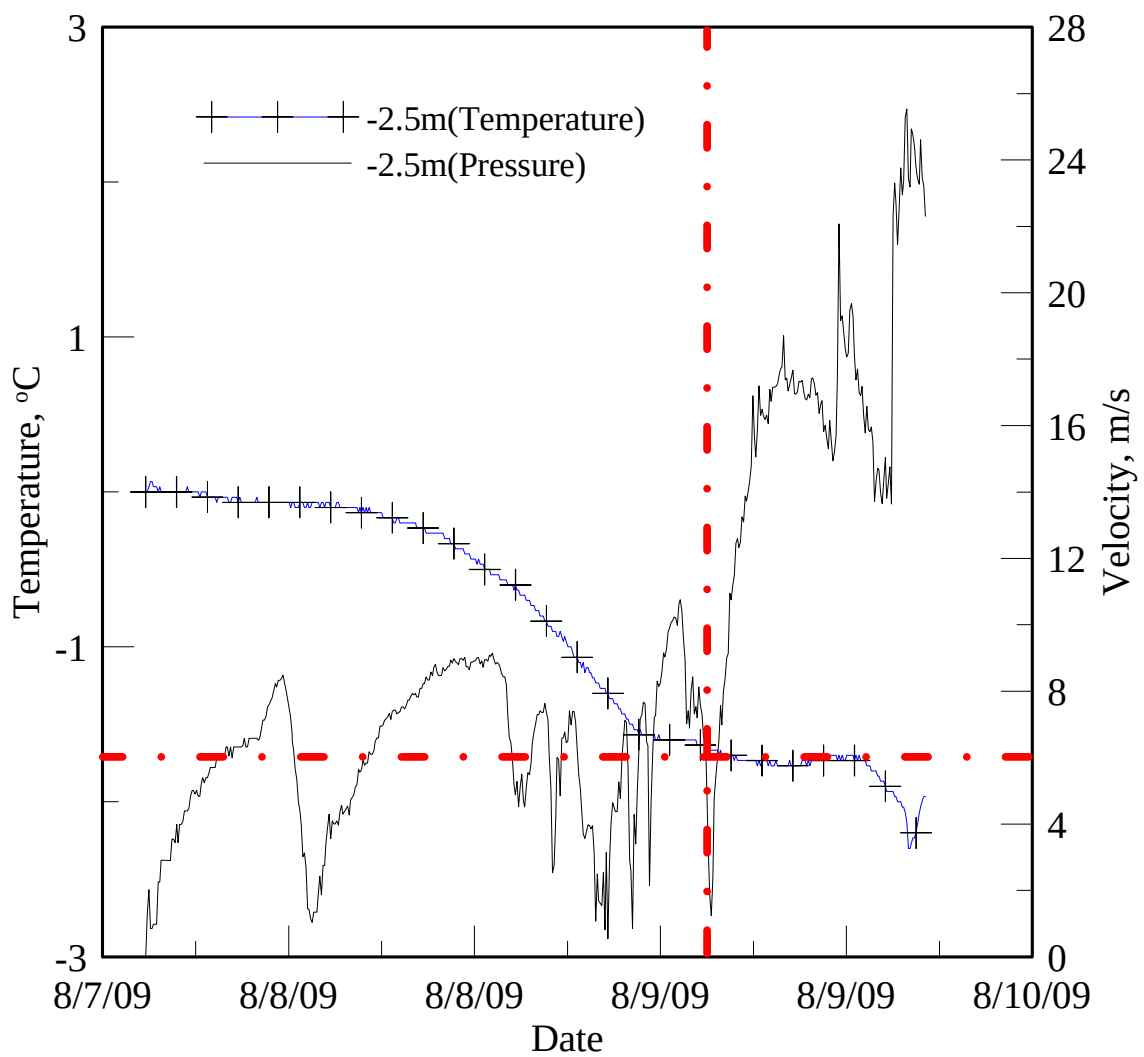


圖 4.32 A 管 2.5 米深度流速與溫度量測比較圖

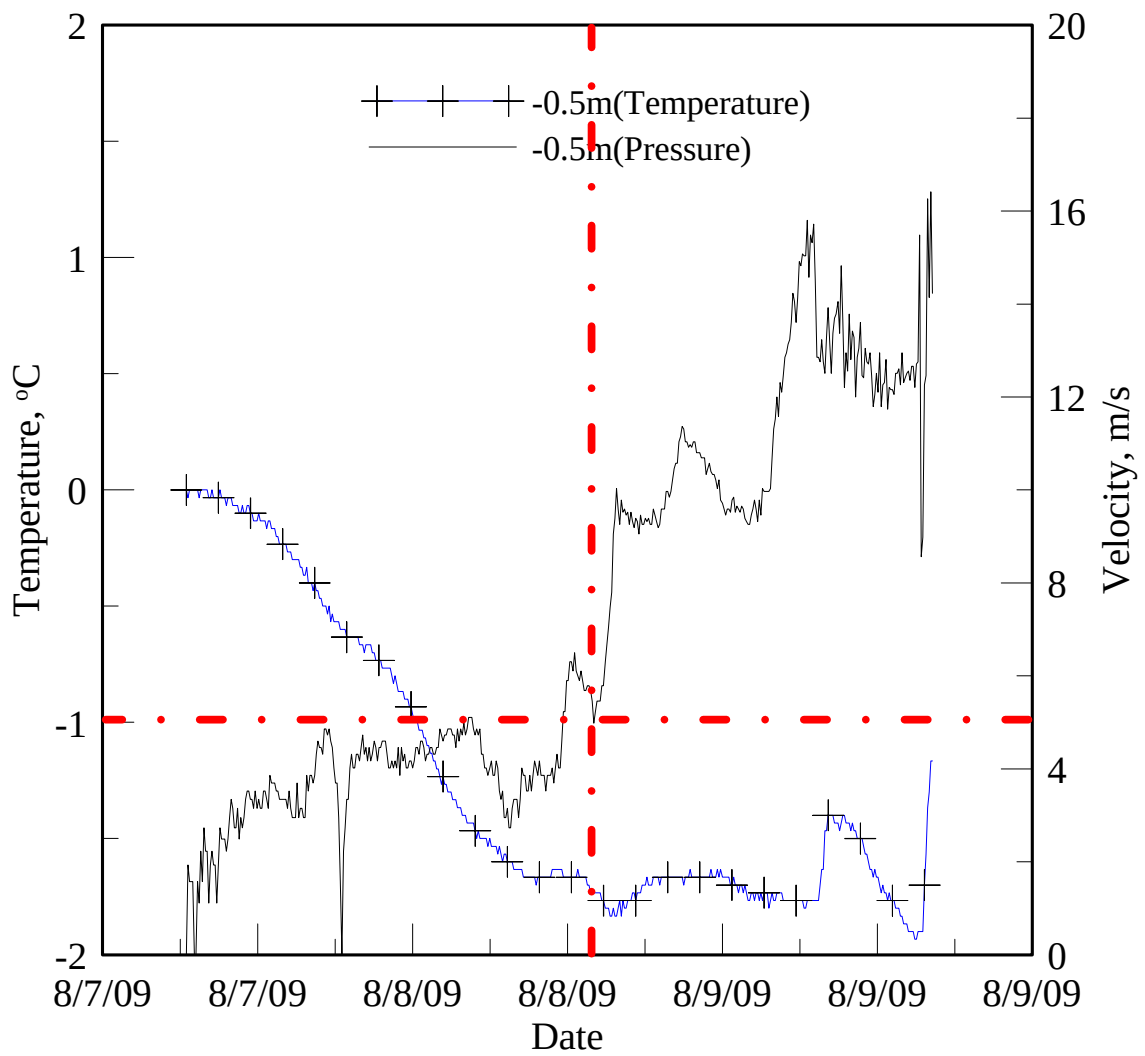


圖 4.33 B 管 0.5 米深度流速與溫度量測比較圖

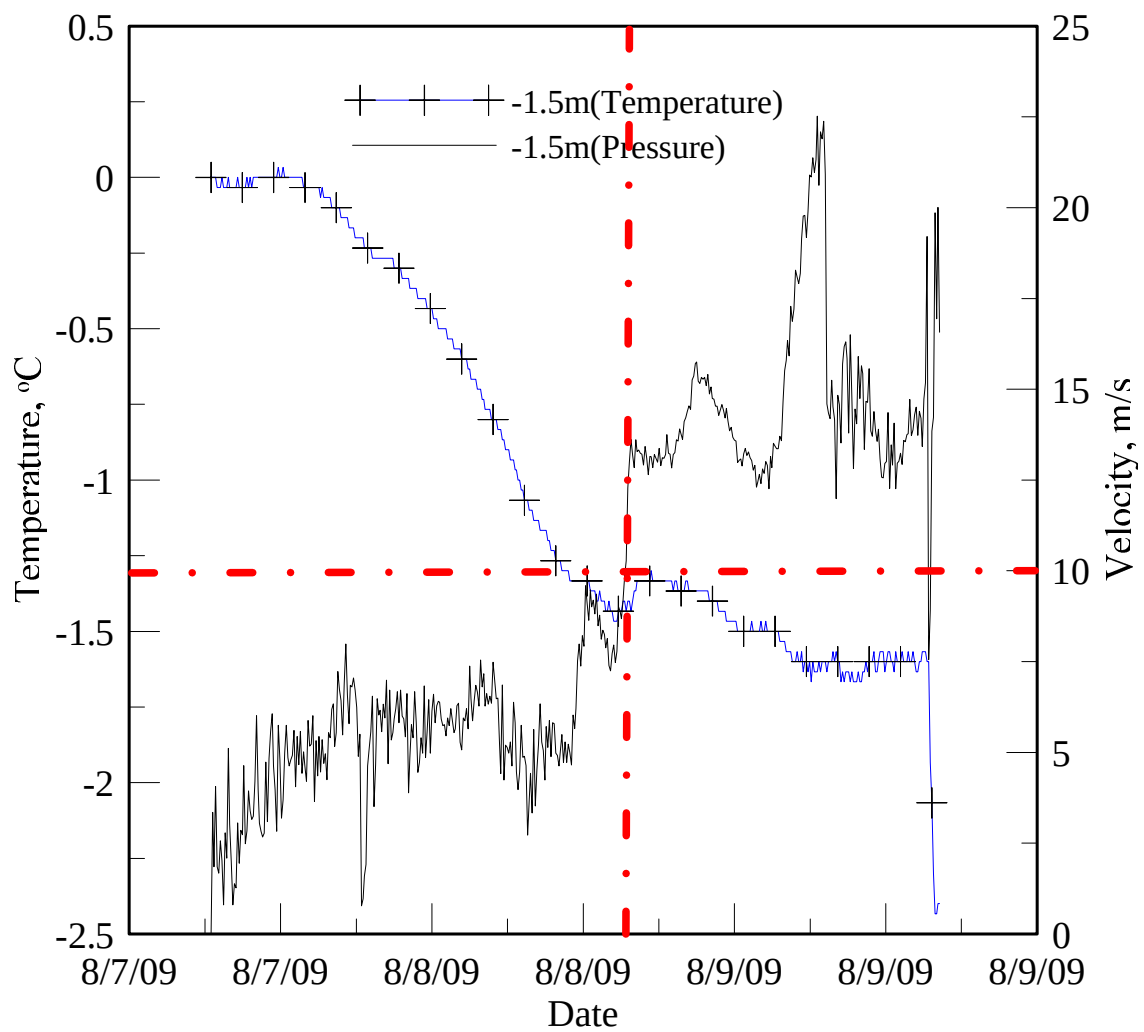


圖 4.34 B 管 1.5 米深度流速與溫度量測比較圖

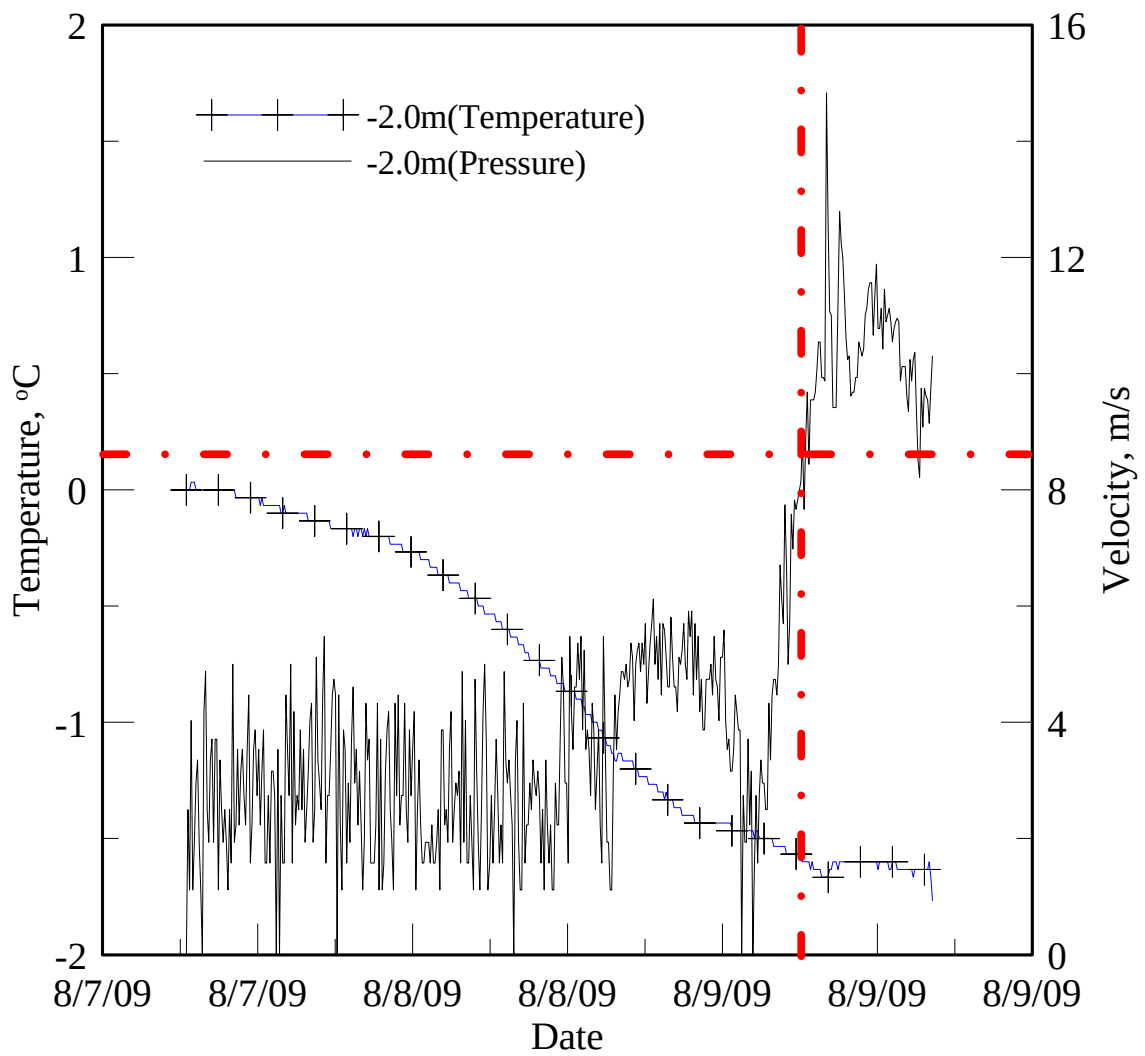


圖 4.35 B 管 2 米深度流速與溫度量測比較圖

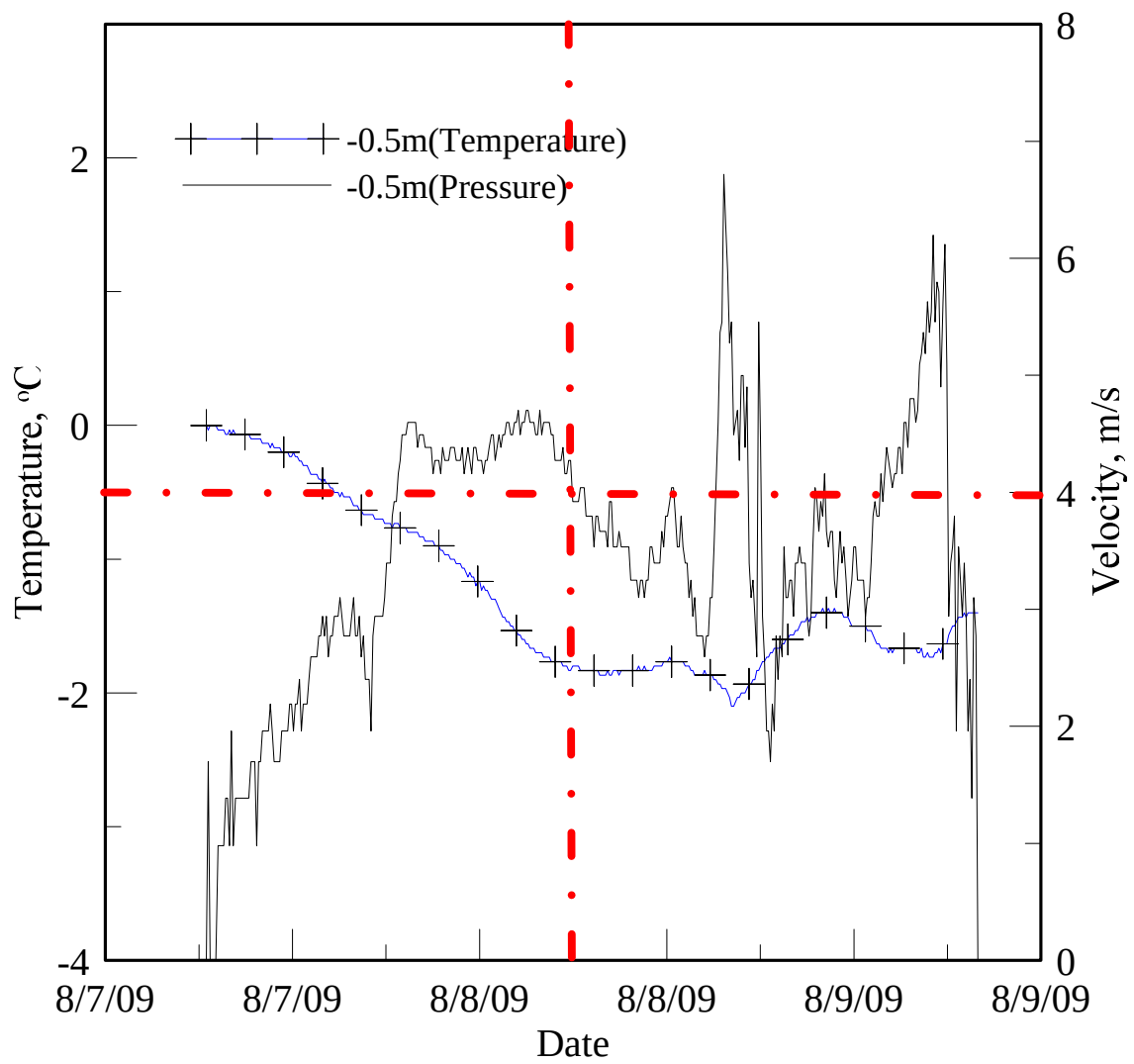


圖 4.36 C 管 0.5 米深度流速與溫度量測比較圖

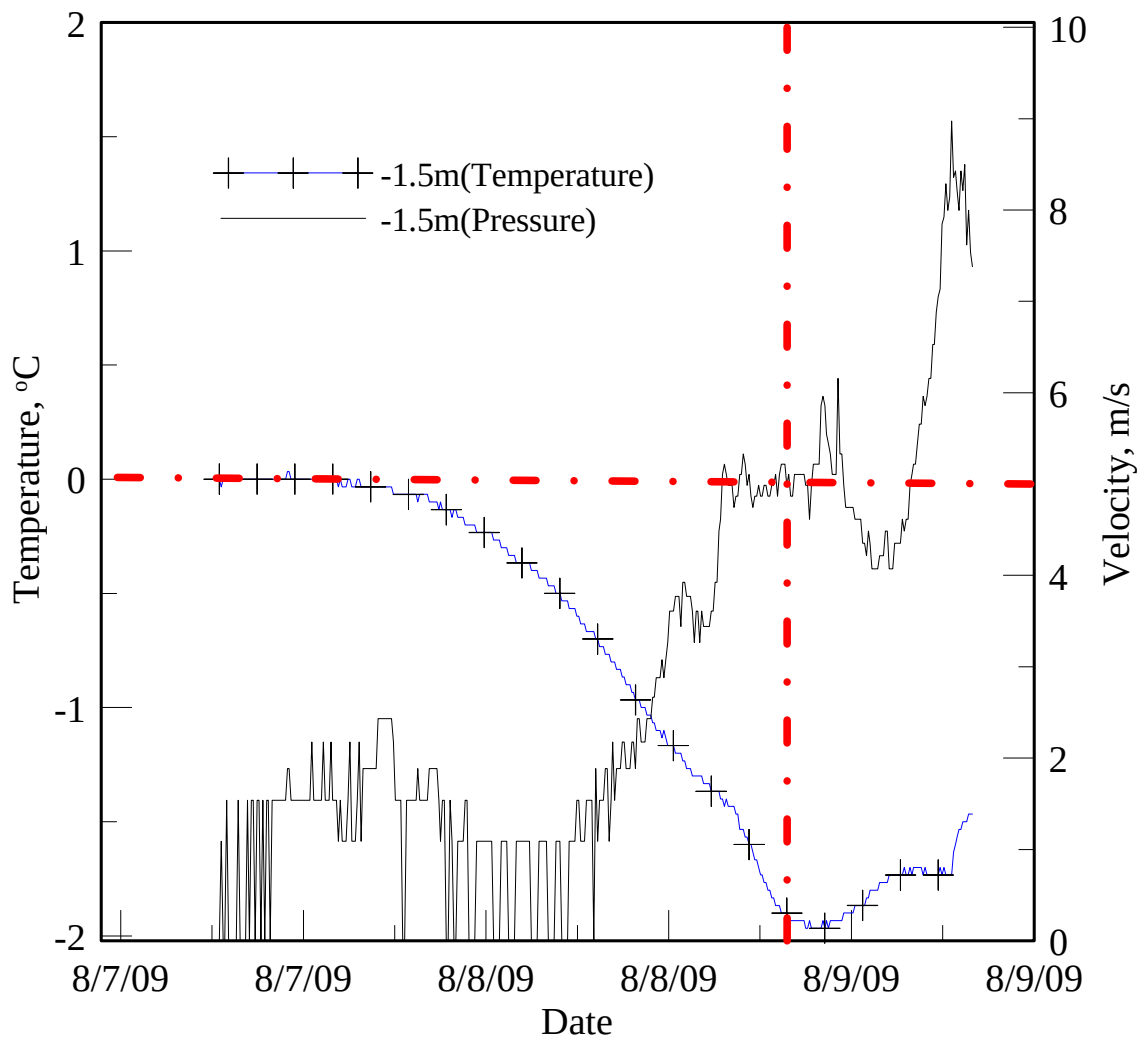


圖 4.37 C 管 1.5 米深度流速與溫度量測比較圖

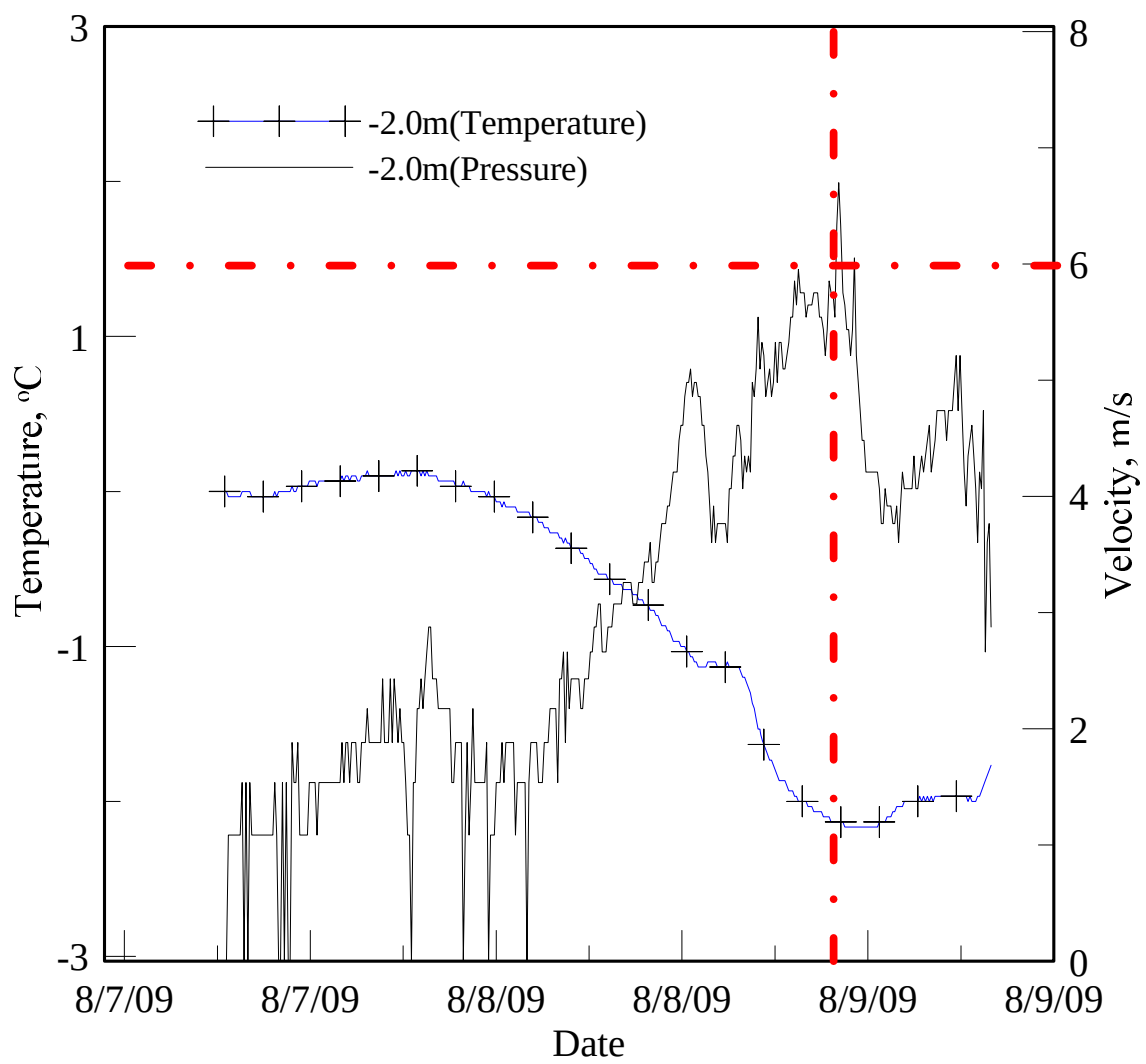


圖 4.38 C 管 2 米深度流速與溫度量測比較圖

4.5 安裝方法改良與建議

8月8日莫拉克颱風來襲，水壓監測管受巨石撞擊，C監測管於8月9日上午6點沖毀，B監測管於8月9日下午1點沖毀，A監測管於8月9日下午5點沖毀(圖4.39)，本研究於9月份進行第一次災後會勘，但是由於現場水流湍急，評估後預計於11月底進行修復，也發文給水利署第3河川局並核可。但是本研究於11月初天氣與水流允許狀況下進入橋墩下並進行第2次現勘，發現橋墩沖刷深度達1米以上(圖4.40)，3組水壓計的第1節鋼管皆已消失，評估已經無法進行修復，故本研究將重新安裝A、B兩孔各15組FBG水壓計。

重新安裝的光纖光柵水壓計，目前規劃與製作如下(圖4.41)：

1. 韌性監測儀器包裝:將光纖光柵水壓計採用韌性包裝，避免鋼性包裝容易產生的振動與斷裂問題。
2. 光纖光柵溫度感測器的安裝:將於橋墩上佈設光纖光柵溫度感測器，用來提供大氣的溫度。
3. 維護原有的紅外線攝影系統。
4. 維護原有的電子式加速度計與光纖光柵測傾儀。
5. 光纖光柵水壓計盡量安裝靠近橋墩，避開安裝於消波塊內，地表下0~6米使用小尺寸直徑約5公分的鋼管進行封裝，外部進行灌漿，預計灌漿深度2米，使其與橋墩連成一體，並使用一約5mm的剛性軟管連通水壓計與外部河流。6~18米則採用PVC管封裝，光纖光柵水壓計安裝深度與位置與前次A、B水壓監測管一致。
6. 水壓監測管內將佈設光纖光柵溫度感測器。



圖 4.39 現場損壞勘查



圖 4.40 冲刷深度 1 米

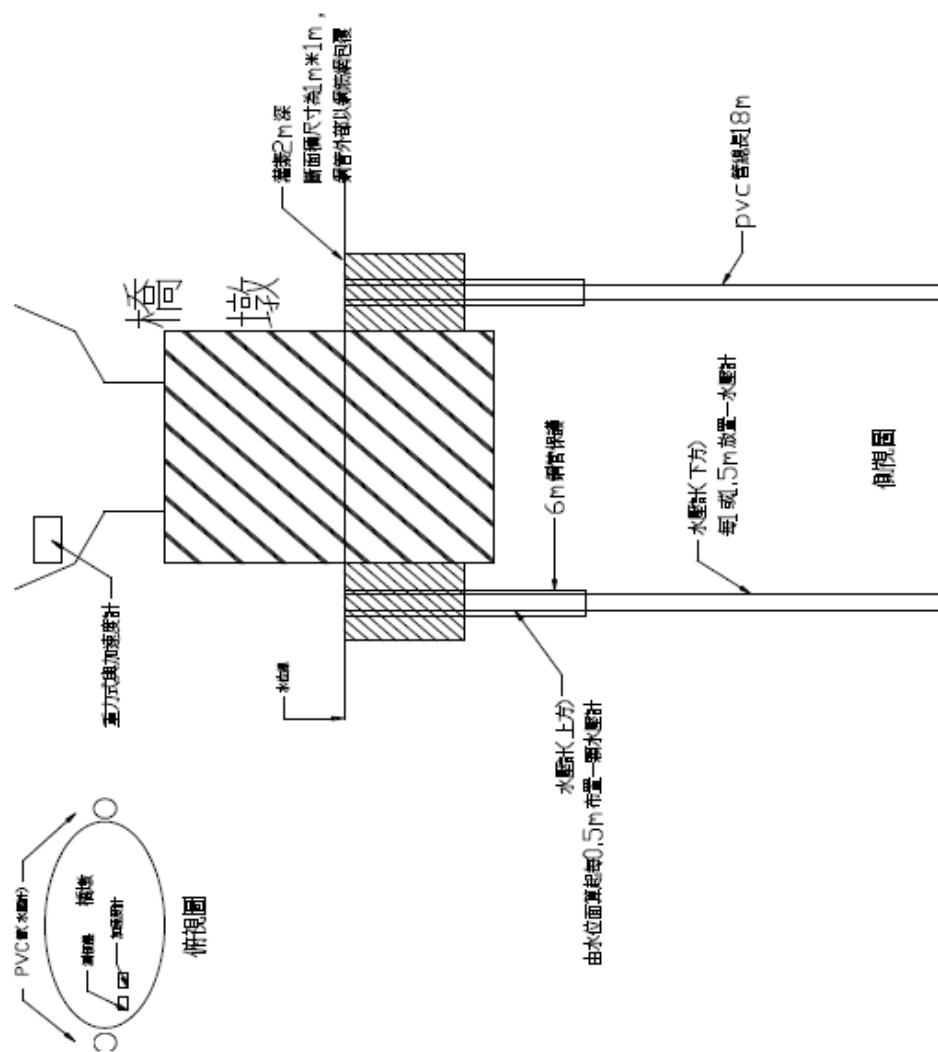


圖4.41 新佈設光纖光柵水壓計安裝示意圖

第五章 結論與建議

橋梁等跨河構造物，在建造時不但部分結構例如橋墩基礎經常安置在河道內，橋梁兩端之橋臺也會佔據原河道部分之排水斷面，這些因素使得河水流經跨河構造物時流速加快。水與橋墩基礎之互制與快速水流是造成橋墩基礎周圍河床沖刷最主要原因。受臺灣氣候、地形與地質特性之影響，暴雨期間河流水位高漲且流速極高，在上游區域則經常觸發土石流使得河川洪水具有高泥沙含量。此高泥沙含量洪水可將巨石浮起，順溪流向下沖刷，造成更大之衝擊與破壞力。橋墩基礎沖刷是一極端複雜的行為，影響橋墩基礎沖刷之因素包括橋墩幾何形狀與尺寸、河道寬度、水深、流速、水流方向與特性（質量單位重、黏滯性等）、沈積土石顆粒尺寸、河床材料等。但至今無法有效將這些交互影響之複雜因素整合，分別探討其影響特性，本研究即綜合探討孔隙水壓力對總體破壞之機制以量測孔隙水壓力之變化來推測橋墩鄰近基礎之沖刷深度。

5.1 結論

將本計畫所得結論分點說明如下：

1. 本研究已經完成室內40組水壓計的測試與製作，並將其封裝於鋼管內，其數量符合計畫所要求的30組水壓計以上。且已經將40組水壓計安裝於大甲溪橋墩旁，總鑽孔深度為45米，其鑽孔深度符合計畫所要求的30米以上。
2. 本研究已經完成測傾/加速度儀與現地傳輸光纜的架設，並將資料擷取系統架設於機房內，進行自動化量測。
3. 本研究已經成功量測到莫拉克颱風時A、B與C三監測管的水壓與溫度變化，但是非橋墩局部土壤局部沖刷，是消波塊局部沖刷行為。

4. 斷訊前每孔在不同深度都有孔隙水壓急升的現象，顯示橋墩周圍土壤有擾動行為，推估此液化導致消波塊移動沖走，進而絞斷水壓計鋼管及其內之光纜。
5. 可以提供未來於類似橋墩消波塊內安裝感測器之考量與分析。
6. 水溫降低隨時間向下延伸，本橋墩河水與地層沖刷溫度變化可達 $1.5^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。
7. 水壓分佈與溫度量測結果相當一致，都指出A、B、C各點沖刷深度超過2米(也與颱風後現場觀察結果匹配，第1層消波塊與第1節鋼管消失)。
8. 水壓與水溫分佈監測都是可行，結合兩者有助於數據的分析與研判，並提供即時沖刷深度之監測方法。
9. 水溫分佈監測是一實用之監測方法。

5.2 建議

本研究已經於98年7月與8月份完成所有感測器的安裝與架設，但是因莫拉克颱風造成損毀，本研究於9月份進行第一次災後會勘，但是由於現場水流湍急，評估後預計於11月底進行修復，也發文給水利局第3河川局並核可。但是本研究於11月初天氣與水流允許狀況下涉水進入橋墩下並進行第2次現勘，發現橋墩沖刷深度達1米以上，3組水壓計的第1節鋼管皆已消失，評估已經無法進行修復，故本研究將重新安裝A、B2組水壓計。將此次計畫建議說明如下：

1. 依據本次莫拉克颱風現場的量測結果，已經驗證了結合溫度與水壓量測對於消波塊內預估沖刷深度的效果，建議可以於同一大甲溪橋相鄰27號橋墩附近另外選擇5~10座橋墩安裝相似系統，提高橋墩安全監測效率。
2. 根據此次量測結果，現地沖刷溫度的變化預估只有 $1.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，所以實

際量測時需要高精度與穩定度的溫度感測器，所以建議日後若有相同的量測其溫度感測器的精度與穩定度為 0.1°C (含)以上。

3. 所量測的並非傳統的橋墩-地層介面，建議可選擇一無消波塊保護之傳統橋梁5~10座橋墩來加以量測溫度與水壓的變化。
4. 本結果已經驗證了水壓與溫度量測對沖刷深度量測的結果，建議日後可以合併使用，用以降低誤判的機率。
5. 建議未來可以嘗試與改良以量測水壓力差壓變化或流速變化來做為量測沖刷深度的依據。
6. 由於為第一次使用溫度與水壓作為沖刷深度的判讀，且只有一座橋墩作為監測目標，所以目前只能針對此座橋墩作沖刷深度的研判，對於此座27號橋墩於莫拉克颱風的監測結果可以定義地層與水溫變化達 1.5°C 以上與變化平緩時，消波塊內的土壤已經被河水沖刷帶走，但是此種效應與單一橋墩對橋梁結構的影響則需要進一步研究與分析，目前並無法明確提出警戒值或行動值，建議日後可以進行長時間與多橋墩量測後提出一建議警戒值。

本計畫之成果與效益包括下列幾點：

1. 本計畫已經成功安裝FBG水壓計與FBG溫度計於大甲溪橋墩旁，並架設自動化量測設備於莫拉克颱風來臨時進行自動化量測，可以提供未來於類似橋墩消波塊內安裝感測器之考量與分析。
2. 本研究藉由已經可藉由量測水壓與溫度的變化得到橋墩沖刷深度與時間的關係。
3. 藉由水壓的量測可以間接得到現場流速的變化，流速與沖刷深度等資料，可以作為未來新建橋梁設計或既有橋梁補強時的分析參數。
4. 水壓與水溫分佈監測都是可行，結合兩者有助於數據的分析與研判，並提供即時沖刷深度之監測方法。

參考文獻

1. Briaud, J. L., 2008, "Case Histories in Soil and Rock Erosion : Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees", The 9th Ralph B. Peck Lecture, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134 No. 10, ASCE, Reston, Virginia, USA.
2. Camp, Charles V., Pezeshk Shahram, M. ASCE, and Leatherwood, Terry D., 1998, "Detecting Bridge Scour by Measuring the Thermal Variation Across the Stream Bed", Water Resources Engineering Conference, U.S.A, pp. 246-251.
3. Hill, K.O., Fujii, F., Johnson, D.C., and Kawasaki, B.S., 1978, "Photosensitivity on Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication," Applied Physics Letter, No.32, pp.647-649.
4. Kersey, A.D., 1992, "Multiplexed Fiber Optic Sensors," Proceedings, Fiber Optic Sensors, Boston, Massachusetts, Eric Udd, editor, sponsored by SPIE-The International Society for Optical Engineering, pp.200-227.
5. Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T., 2006, "Development of a fiber Bragg grating sensed ground movement monitoring system," Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.
6. Meltz, G., Morey, W. W., and Glam, W. H., 1989, "Formation of Bragg Grating in Optical Fibers by Transverse Holographic Method", Opt. Lett. Vol.14, pp.823-825.
7. Measures, R. M., 2001, "Structural Monitoring with Fiber Optic Technology", Academic, California.
8. Othonos, A., and Kalli, K., 1999, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing," Artech House,

Boston, 422p.

9. Rao, Y.-J, 1998, "Fiber Bragg Grating Sensors: Principles and Applications," Optic Fiber Sensor Technology, Edited by K.T.V. Gattan and B.T. Meggitt, Published by Chapman and Hall, London, Vol.2, pp.355-379.
- 10.簡旭君，2003，「光纖光柵應變管之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹。
- 11.李瑞庭，2005，「光纖光柵讀取系統軟體之研發」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹。
- 12.交通部高速鐵路工程局，2008，「鐵路橋樑過河沖刷段橋墩與基礎結構系統檢測技術之研究」。
- 13.黃安斌、何彥德，2008，"雙質量式光纖光柵加速度傾斜感測裝置"，中華民國專利，申請中。

附錄一

期中審查委員意見及辦理概況表

交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）

☒期中 ☐期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究

執行單位：交通大學防災與水環境研究中心

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
(一)林呈教授 (中興大學): 1. 為何會選擇橋址處高強度鼎塊護甲層佈設之大甲溪橋作為試驗橋梁?	謝謝委員建議，選定該橋墩是因為該橋墩過去具有一定沖刷深度，目前正進行橋墩基礎保護工程，且會同業主現地勘查與核可後選定該橋墩。	同意
2. 未來至 12 月底甚至明年洪汛期前河道因值枯水期而幾乎不會有沖刷現象(現場為大卵礫石質河床)，未來有何維修養護計畫?	感謝委員建議，本計畫已經於 2009 年 7 月份完成現地鑽孔 3 孔，總深度為 45 米(計畫合約 30 米)，安裝 40 組光纖光柵水壓計(計畫合約 30 組)，且進行自動化數據收集與擷取。但是系統於 8 月 8 日莫拉克颱風沖毀。本團隊於 9 月份進行災後第 1 次會勘，但是由於現場水流湍急，評估後預計於 11 月底進行修復，也發文給水利署第 3 河川局核可。但是本團隊於 11 月初天氣與水流允許狀況下涉水進入橋墩下進行第 2 次現勘，發現橋墩沖刷深度達 1 米以上，3 組水壓計	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	的第 1 節鋼管皆已消失，評估已經無法進行修復，故本團隊預計 12 月底進行重新安裝 2 組水壓計。	
3. 請補述 FBG 水壓計量測沖刷深度之原理及機制。	感謝委員的建議，相關原理與方法請參照 2.5 節與 3.1 節。	同意
4. 為何加速度計輸出值大於 0，且大小高達 600~700gal，此與物理意義不合，請再小心求證。	感謝委員的建議，本工作團隊所使用之加速度計為新購入之新品，期中報告後取回標定測試，發現訊號有不穩定之現象，初步評估是安裝時不慎敲擊所造成，本團隊已經重新購置一新品安裝。	同意
5. 水壓計及溫度計之輸出變化係隨時間而呈紊亂擾動情形，請檢核原始數據之變化並配合觀察錄影機所錄之墩前壅水變化，請小心比對進行說明。	感謝委員的建議，水壓計及溫度輸出變化請參考 4.1 節~4.3 節。錄影機為本計畫工作合約外所安裝，其解析度並無法清楚拍攝到微小的水位變化，故本團隊於橋墩上進行高程標示，進行水位高程標示，所以對於墩前壅水變化並無法明顯看出。	同意
6. 溫度變化之時序列為何在溫降過程中呈現較平滑曲線，而非呈擾動狀之時變	感謝委員的建議，FBG 溫度的量測與分析為本計畫工作合約外所安裝，FBG 溫度感測器並不受	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
變化?另結論中提出溫降或溫度坡降之特點可作為沖刷深度之研判,其依據為何? 7. 計畫中提出係因液化而引起消波塊移動之結論,惟現場係一堅實之卵礫石床,事實上甚難發生如震害中所言之“液化”。	外力影響,本團隊應是設定每 5 分鐘紀錄一次讀數,目前量測結果顯示溫度的改變約為 1.5~2°C,此種量測結果也與過去國外量測的趨勢一致(請參見 3.1 節)。 感謝委員的建議,液化是指地層材料中水壓上升使得有效應力為零的現象。而河流沖刷也符合此一現象的描述。	同意
(二) 宋文沛教授 (勤益科技大學): 1. 各監測儀器是否有律定、分析及校正 2. 一些資料 Noise 是否有濾過?因為雜訊資料會導致分析錯誤。 3. 紅外線攝影機相關功能應查證以免所	感謝委員的建議,本工作團隊所使用自製之 FBG 水壓計,安裝前皆有經過標定,而加速度計也有經過標定後使用。 謝謝委員的建議,FBG 水壓計本身為光訊號,不易受水與電磁波影響,而儀器本身的雜訊已經經過處理,所以 FBG 的精度約為 1 $\mu\epsilon$,並無其它雜訊處理問題。 謝謝委員建議,錄影機為本計畫工作合約外所安	同意 同意 同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
得資料有誤。	裝，已經查證攝影機相關功能。	
4. 加速度裝置之位置應慎選，目前部份所得之加速度歷時曲線應予解讀以免誤判。	感謝委員的建議，本工作團隊所使用之加速度計為新購入之新品，期中報告後取回標定測試，發現訊號有不穩定之現象，初步評估是安裝時不慎敲擊所造成，本團隊已經重新購置一新品安裝。	同意
5. 建議可以試驗光纖材料斷裂前後之溫度變化，以提供各管監測資料判讀。	感謝委員的建議，FBG 對於溫度外力與溫度的變化非常靈敏，其精度可達 0.1 度 C，根據多次實驗，並無發現斷裂前 FBG 讀數有大幅上升的現象。	同意
6. 報告書中可增列大氣溫度與各管溫度之變化關係。	感謝委員的建議，FBG 溫度的量測與分析為本計畫工作合約外所安裝與分析，本次實驗並無量測大氣溫度，將於下次安裝時安裝 FBG 溫度計量測大氣溫度。	同意
7. 建議加速度資料可以換算為位移資料。	感謝委員的建議，所使用加速度計具有可轉換為傾斜角度的公式 $\text{Angle} = \arcsin((\text{Volt} - \text{Bias}) / (\text{lgxScale_factor}))$ 位移 = 長度 * sin 角度，一般狀況下因為感測器安	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
	裝位置的不同，建議以傾斜角度做為判斷依據。	
(三) 朱金元科長 1. 各種監測儀器之原理及比較請補充，如何判讀沖刷深度請詳細書明。 2. 圖 2.1 與圖 2.2 文字敘述內容，與圖似乎不符，是否應對調？圖 2.1 與圖 2.2 間距符號不一致，請統一。 3. 圖 3.2 橋墩沖刷監測平面示意圖，請刪除「平面」兩字。 4. p3-6 與 p3-7 圖 3.3 及圖 3.4，請文字配合詳細說明(報告內說明太簡略)在水土界面水壓、總水頭特性，以作為為來判斷沖刷深度、開始沖刷時間、結束沖刷、回淤深度判斷之參考。 5. p3-8 第 7 行關於表 3.1 之說明（水壓計安裝與編號）與表標題(感測器波長與安	感謝委員的建議，已經補充說明於 2.5 節與 4.1~4.3 節。 感謝委員的建議，已修正。 感謝委員的建議，已修正「平面」兩字。 感謝委員的建議，3.1 節為一初步概念說明，並新增溫度沖刷量測，實際量測與分析結果請參考 4.1-4.4 節。 感謝委員的建議，已修正表 3.1 的說明。	同意 同意 同意 同意 同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
裝深度配置)不符。 6. 表 3.1 請說明深度與波長之關係，0.5-2.5m 波長 1,524-1,548 nm，2.5-3.5m 波長都是 1,548 nm。3.5-4.5m 波長 1,548-1,524nm；9.5-11nm 波長 1,548-1,542 nm。深度與波長似乎沒有絕對關係？這個數據是否在試驗室測量？	感謝委員的建議，FBG 水壓計波長與安裝深度無關，FBG 水壓計的波長可以依照現場之需要設計後安裝。	同意
7. p4-1 關於監測管數據說明，「圖 4.5 A 測管 11-16.5 m 之間...各點水壓力變化不大，所以這範圍之內並未有沖刷之行為」，那麼沖刷深度在哪裡？同頁 4.1 第 11 行：「由監測結果圖看出，在 0-12m 之間之水壓力計有明顯變化」，11-12m 間之敘述不一致。	感謝委員的建議，該敘述已經更正，請參考 4.1 節。	同意
8. 圖 4-6 總水頭如何得出未見說明。該圖為總水頭歷線，但看不出有 p4-1 所說當現場水壓呈現<u>淨水</u>	感謝委員的建議，該分析假設地表位置水頭為 0，向下為負位置水頭，總水頭=位置水頭+壓力水頭+速度水頭，當無速度水頭	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
壓分佈時，則各點水壓計的連線為一垂直線之現象。	發生時，且水壓為淨水壓分佈時，各點的總水頭會相等為一直線。	
9. 除了圖 4.3-圖 4.6 外，應該有與圖 3.3 及圖 3.4 類似之圖來說明沖刷之現象。	感謝委員的建議，請參考 4.1 節說明。	同意
10. 以圖 4.3 為例，看不出來沖刷深度到底在何處？為何各不同深度水壓計之歷時變化圖其 Pattern 都不一致？	感謝委員的建議，格式大小之不同是為清楚顯示壓力之變化，沖刷深度的判斷，請參見 4.1~4.4 節。	同意
11. 8 月 7 日中午水深即有 0.5 米深，怎麼各深度之水壓計其水壓都是 0 ？	感謝委員的建議，其分析所表示的是相對水壓變化，所以以 A 管為例，分析上是以 8 月 7 號 14 點為初始值開始計算水壓力變化，所以其初始水壓力變化為 0。	同意
12. p4-7 圖 4.6 與 p4-8 圖 4.7 之表示法，實在很難看出來所要表示的東西，其餘各監測管之分析也都有類似之問題。	感謝委員的建議，已經重新敘述與分析，請參考 4.1~4.4 節。	同意
13. 水壓監測結果請與溫度結果比對說明。	感謝委員的建議，FBG 溫度的量測與分析為本計畫工作合約外所安裝與	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
~~~~以下空白~~~~	分析，其結果說明請參見 4.1~4.4 節。   ~~~~以下空白~~~~	

## 附錄二

### 期末審查委員意見及辦理概況表

**交通部運輸研究所合作研究計畫（具委託性質）**  
**□期中☑期末報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究

執行單位：交通大學防災與水環境研究中心

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
(一)朱金元科長 (港灣研究中心)：   1. 期中報告意見都已修改。   2. 研究題目為「橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用研究」，報告內容對於橋墩振動相關量測儀器及及本研究量測結果著墨甚少，請補充。	感謝委員的建議。   感謝委員的建議，本計畫為對橋墩沖刷現象進行完整研究，於7月份鑽孔45米(計畫合約30米)並安裝40組光纖光柵水壓計(計畫合約30組)，且增設水溫度感測光纖與紅外線攝影機等，於8月7號量測到莫拉克颱風對橋墩的影響，但是水壓計系統於8月9號遭到沖毀。而8月分所裝設之電子式加速度計可能因為安裝時撞擊造成損毀，本計畫重新訂購且於10月分重新進行安裝，目前運作量好，另外本團隊11月份也新安裝一組光纖光柵測傾儀，目前也運作良好，其原理與安裝過程分別說明於2.4節與3.2節，但是由於今年度颱風較少，所以目前並無現場	同意   同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
3. 系統如何整合請加強說明。   4. A、B、C 管量測結果彼此之間關連性請加強分析。   5. 表 4.1~4.3 表頭之「預估」修改成「估計」，文字內容亦請配合修改。	量測數據。   感謝委員的建議，請參見 3.2 節。   感謝委員的建議，由於現地消波塊的影響，並非傳統橋梁沖刷的模式，所以並無法明確定義出 A、B、C 管間量測的關連性，分析的結果說明於 4.4 節。   感謝委員的建議，已修正。	同意   同意   同意
(二) 吳傳威教授(臺北科技大學)：   1. 本研究採用之監測儀器甚為專業可靠，構想亦頗正確，惟安裝經驗較不多，以致一次大水即沖毀，無法滿足監測工作的期限要求，因此對於安裝固定之方式，及耐久性宜有說明。   2. 本研究目前所列數據多為監測紀錄，若	感謝委員的建議，重新安裝的改進方式說明如 4.5 節。   謝謝委員的建議，由於計畫為第一次使用溫度與	同意   同意



參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
以實用觀點宜適當轉換為較直接的數值，若有可能，是否可提出相關警戒值或行動值，或至少提示可能性。   3. 橋墩振動部分較少提及，其與孔隙水壓或沖刷狀況之關係亦未提。	水壓作為沖刷深度的判讀，又只選擇大甲溪一座橋墩作為監測目標，所以目前只能針對此座橋墩作沖刷深度的研判。針對此座 27 號橋墩於莫拉克颱風的監測結果可以定義地層與水溫變化達 1.5°C 與變化平緩時，消波塊內的土壤已經被河水沖刷帶走，但是此種效應對橋樑結構的影響則需要進一步研究與分析。所以目前並無法明確提出警戒值或行動值。   感謝委員的建議，本計畫為對橋墩沖刷現象進行完整研究，於 7 月份鑽孔 45 米(計畫合約 30 米)並安裝 40 組光纖光柵水壓計(計畫合約 30 組)，且增設水溫度感測光纖與紅外線攝影機等，於 8 月 7 號量測到莫拉克颱風對橋墩的影響，但是水壓計系統於 8 月 9 號遭到沖毀。而 8 月分所裝設之加速度計可能因為安裝時撞擊造成損毀，本計畫重新訂購且於 10 月分重新進行安裝，目前運作量好，故兩者目前並無法有直接比較的結果。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
4. 本年度八八水災後 颱風甚少，以至於監 測數據可用者不 多，此非戰之罪，可 適當說明。	感謝委員的建議，請參見 4.5 節說明。	同意
5. 期末簡報中部分結 論及建議請補入期 末報告。	感謝委員的建議，請參見 5.1 節與 5.2 節。	同意
6. 監測儀器的安裝實為 成敗之關鍵，除鋼套 管以韌性取代剛性之 外，對於新建橋梁， 可考慮於橋墩預留安 裝管道。若屬可行請 提供預留管孔之需 求。	感謝委員的建議。	同意
(三) 林雅雯副研究員 (港灣研究中心)		
1. 紅外線攝影機現裝 置情況如何，請說 明。	感謝委員的建議，紅外線 攝影機目前安裝於橋面 板下方，從 7 月份安裝後 至今未曾取下，仍安裝於 橋面板下方。	同意
2. 水壓升高如何說明 與沖刷深度的關聯 性，請說明。	感謝委員的建議，請參見 4.4 節說明。	同意
(四) 邱永芳主任 (港灣 研究中心)：		
1. 報告內容只見量測 數據資料，卻沒有說	謝謝委員建議，請參見 4.4 節說明。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
明其物理意義為何，請於報告中補充其關聯性。   2. 報告內容中，缺乏對於監測系統的總檢討，並請提出施工及儀器設置經驗等經驗說明，可提供未來研究的方向及構想。   3. 本監測系統對於即時預警的檢討與建議為何？也請補充。	感謝委員的建議，重新設置儀器與檢討請參見4.5節說明。而未來的研究方向請參見5.1節與5.2節。   謝謝委員的建議，由於計畫為第一次使用溫度與水壓作為沖刷深度的判讀，又只選擇大甲溪一座橋墩作為監測目標，所以目前只能針對此座橋墩作沖刷深度的研判。針對此座27號橋墩於莫拉克颱風的監測結果可以定義地層與水溫變化達$1.5^{\circ}\text{C}$以上與變化平緩時，消波塊內的土壤已經被河水沖刷帶走，但是此種效應對橋樑結構的影響則需要進一步研究與分析。所以目前並無法明確提出警戒值或行動值。對於未來的預警研究與建議請參見5.1節與5.2節。	同意   同意
(五)中興大學土木系 林呈教授   1. 期末報告中看不出「橋	感謝委員建議與指正，關於”橋墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
墩振動與基礎孔隙水壓力即時監測系統整合應用」是如何整合的？	用”之整合部分說明，已說明於報告內文第3.2節。	
2. 仍欠缺利用光纖光柵水壓計是如何將水壓變化轉換為沖刷深度之具體說明。(文中圖2.15 乃為壓力~波長之比較圖，圖 2.17 為溫度~波長圖)	感謝委員建議，報告內容中圖 2.15 與圖 2.17，為光纖光柵水壓計對於壓力與溫度之率定圖，另外，如何由水壓力之變化轉化沖刷深度關係，可見報告內文第4.4節說明。	同意
3. 本橋所在河段洪水流速相當湍急，高速水流撞(沖)擊墩基後所產生之水位壅升與驟降的連續變動過程，快速升降之水位差可高達1.5~2.5m，且為一十分紊亂不穩定之水位擾動(即一般所謂之highly turbulent flow)。利用光纖光柵水壓計埋入河床中後面對此一快速擾動升降水位變化的現象，應如何在所量測之歷時資料中詮釋其特性，及其對沖刷深度的影響。(如 P.1-2 所述水壓計十分精密，可反應 0.8cm 之水位變化！)	感謝委員的建議，本計畫所使用之光纖光柵水壓計具有高靈敏度之特性，可觀測 0.8cm 的水位變化，而莫拉克颱風期間，並未量測到水位壅升與驟降之現象，但從水壓與溫度變化過程中，可間接得知沖刷深度與水壓力及溫度變化關係，詳細說明可參至第4.4節。	同意

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
4. 本橋為沉箱式基礎，文中 P.3-4~3-5 有展示樁基式墩基之監測系統示意圖，此二圖易導引讀者誤以為本橋基礎為樁基式者。   5. 本報告雖已有初步量測成果(含水壓轉換為沖深、溫度變化轉換為沖深)，但工作團隊對於所量測分析結果之物理意義及現場變化說明相當欠缺。   ~~以下空白~~	感謝委員建議，報告內文中所展示的監測系統示意圖為安裝規劃示意圖，並未針對何種橋梁墩基之型式，但此安裝方法並不會受任何墩基型式影響。   感謝委員建議，關於所測得水壓力與沖刷深度關係，已說明於報告內文第 4.4 節說明。   ~~以下空白~~	同意   同意

## 附錄三

### 期末報告簡報資料

# 橋墩振動與基礎孔隙水壓力 即時監測系統整合應用研究 期末簡報

黃安斌、何彥德、李瑞庭

## 計畫背景－監測目的與應用

- 為橋樑安全做預警－為封橋與否提供決策之重要依據
- 標定/修正現有橋墩沖刷數值模型與經驗法則，提供未來橋梁基礎設計與補強規範之依據。
- 紀錄沖刷歷程，提供維修時程安排之依據
- 了解監測橋樑基礎沖刷之機制

2009/12/30

## 工作項目說明

3

- 鑽孔3孔，2孔深度18米，1孔深度9米，總深度45米>計畫合30米
- 共安裝40個光纖光柵水壓計>計畫合約30個
- FBG溫度量測(計畫合約外)
- 加速度/傾斜感測器安裝
- 現場安裝全天候紅外線攝影機(計畫合約外)
- 完成現場光纜與自動化監測系統測試與安裝

2009/12/30

## 現有量測方法

4

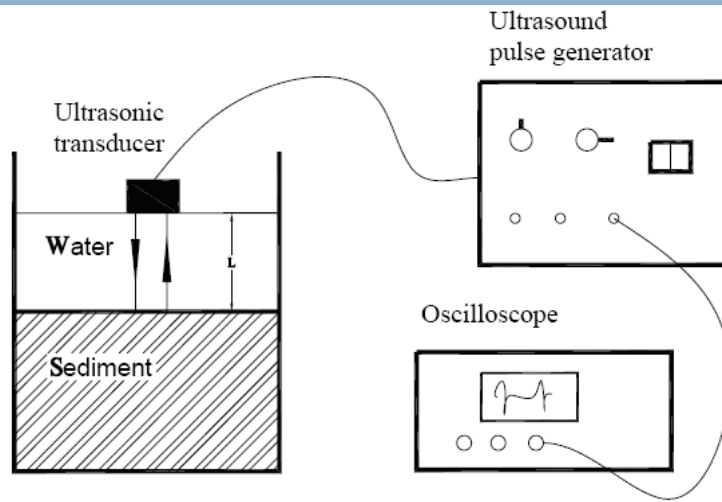
- 手動探桿
- 聲波、電磁波（無線）
- 導線電磁波（TDR）
- 滑動軸環 (sliding collar)
- 溫度分佈變化
- 鎖鍊＋鐵塊
- 其他.....

2009/12/30



# Ultrasonic method

5

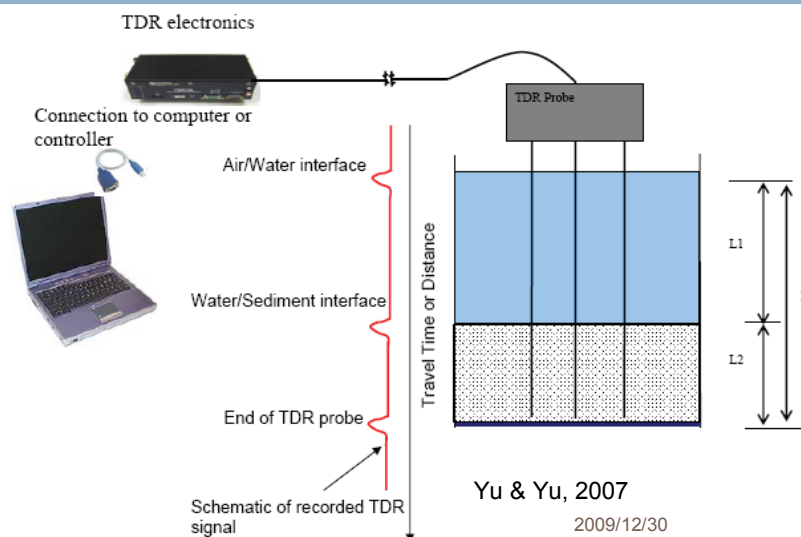


Yu & Yu, 2007

2009/12/30

# 時域反射TDR

6

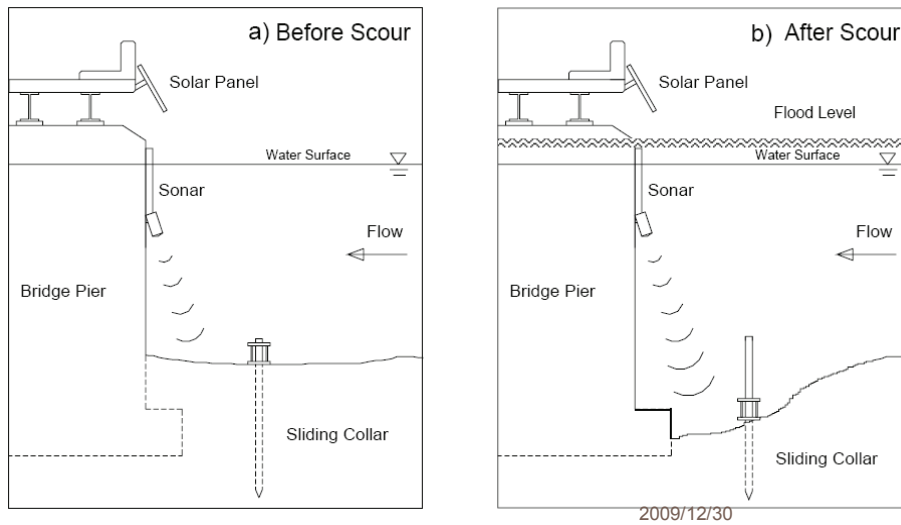


Yu & Yu, 2007

2009/12/30

## 聲納+軸環

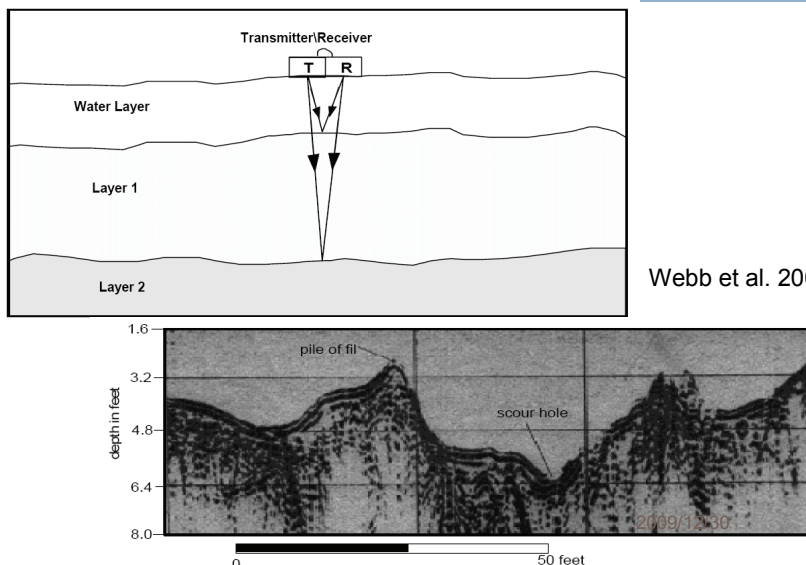
7



Nassif et al., 2002

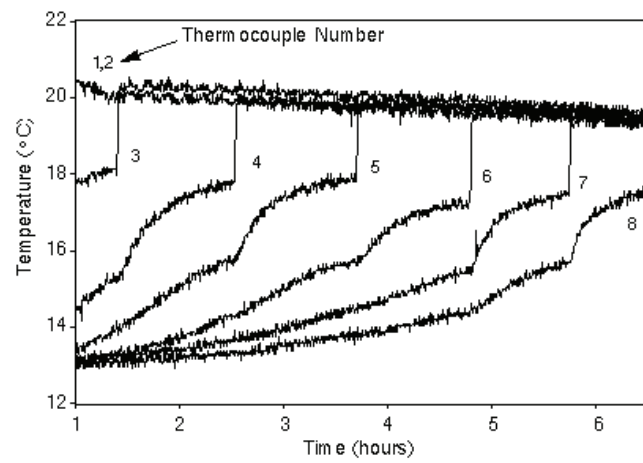
## 透地雷達(GPR)

8



## 溫度分佈量測(室內測試)

9

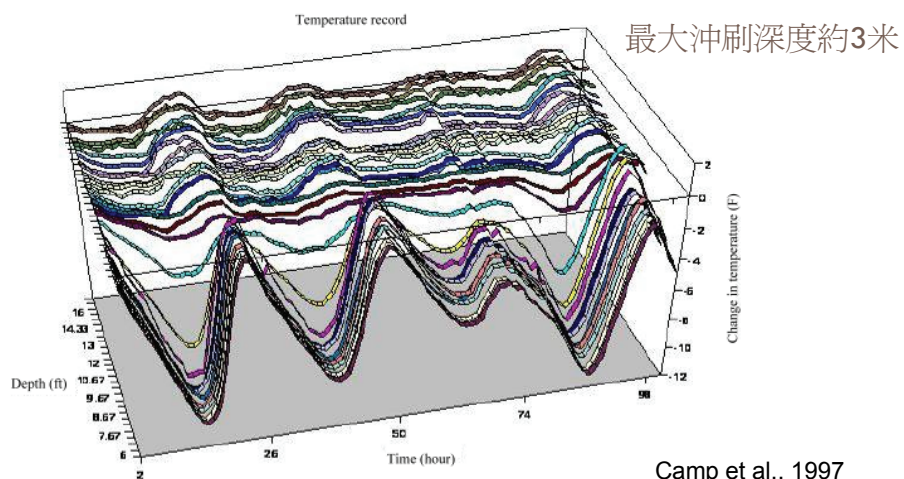


Camp et al., 1997

2009/12/30

## 現地溫度量測結果

10



Camp et al., 1997

2009/12/30

## 現有方法在洪水期間應用之缺點

11

- 即時監測 - 手動探桿、鎖鍊＋鐵塊
- 重複使用 - 滑動軸環
- 高泥沙含量，水深，河床土壤/材料特性 - 聲波、電磁波（無線）、導線電磁波（TDR）

2009/12/30

## 洪水期間橋墩沖刷監測之要求

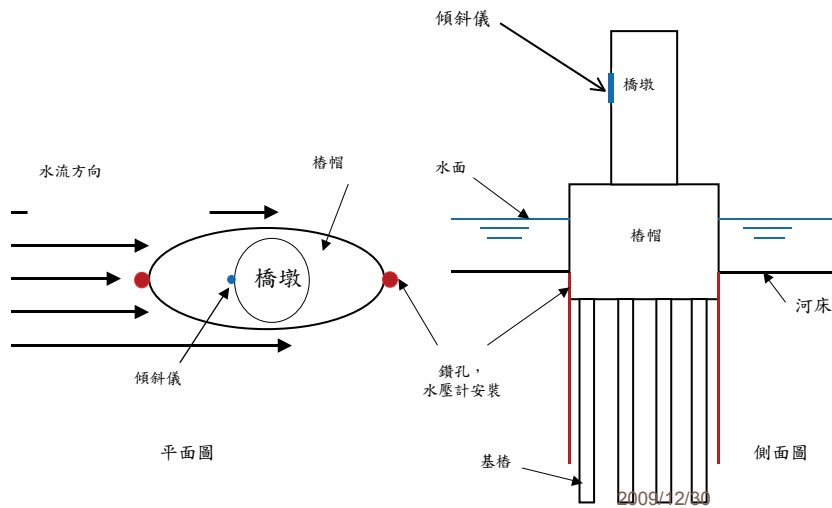
12

- 即時監測
- 可重複使用/重複安裝（耐用性高/便於保護）
- 不受高泥沙含量、水深、河床土壤/材料特性影響
- 溫度分佈監測（感測儀器校正）??

2009/12/30

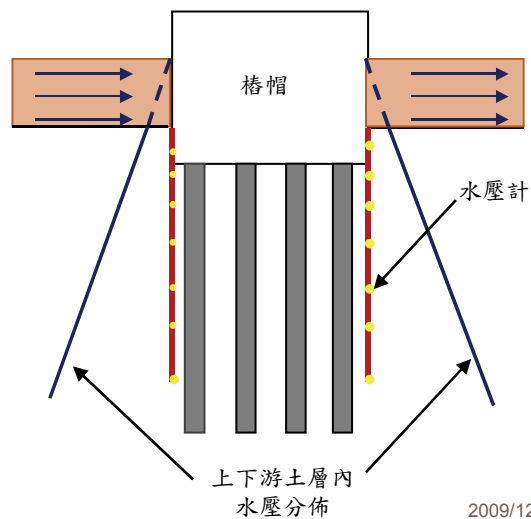
## 水壓＋溫度分佈監測法

13



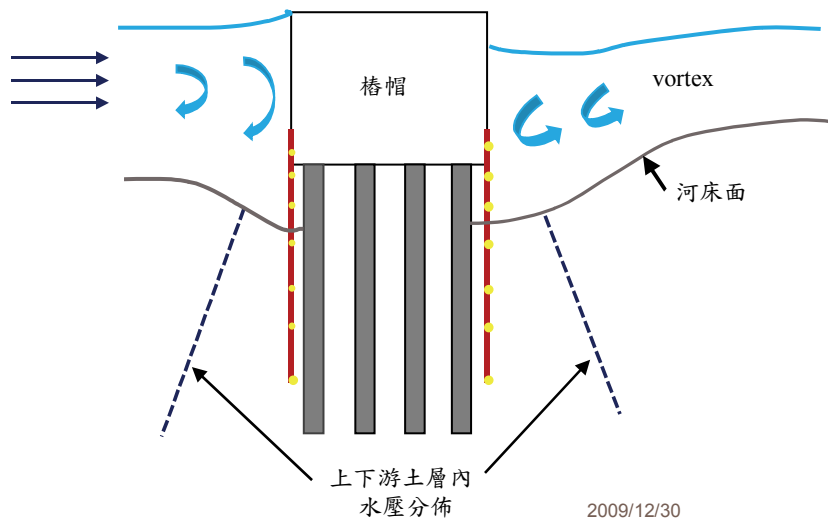
## 無基礎沖刷狀態

14



## 有基礎沖刷狀態

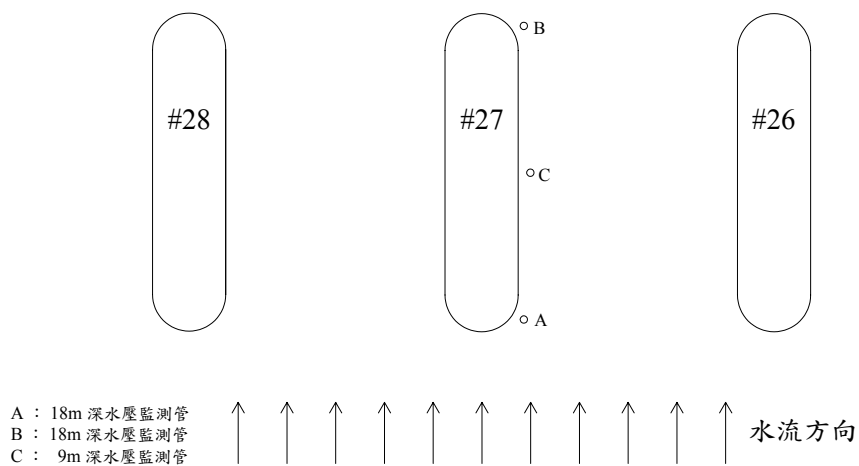
15



2009/12/30

## 大甲溪橋橋墩基礎水壓監測說明

16



2009/12/30

## 光纖水壓監測管狀況表

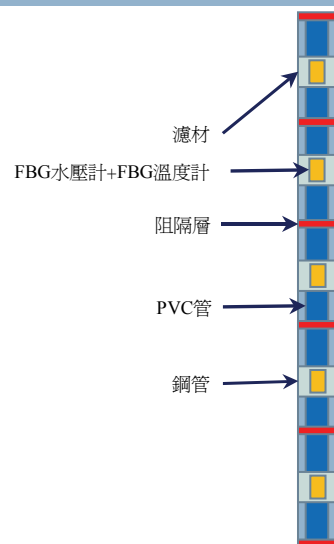
17

監測孔號	監測孔深度, m	光纖光柵水壓計安裝數量
A	18	15 個
B	18	15 個
C	9	10 個

2009/12/30

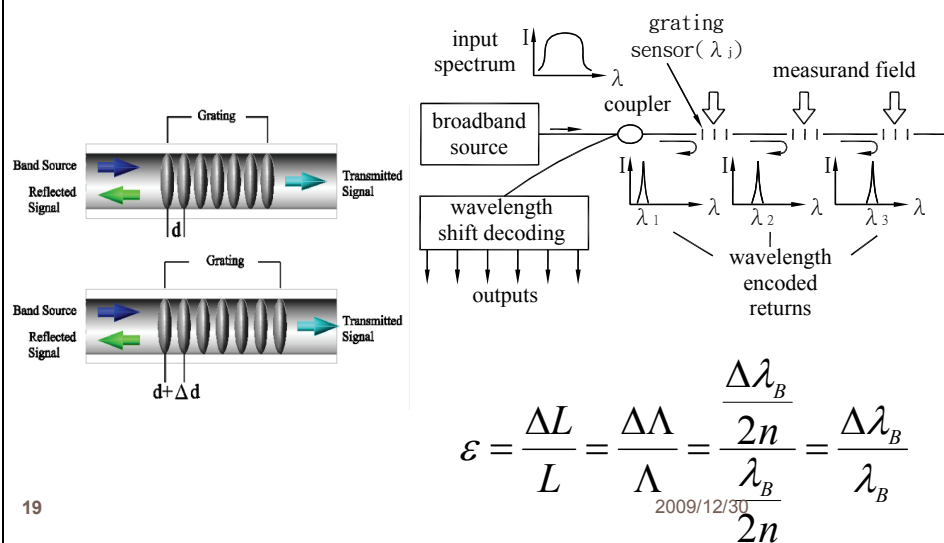
## FBG水壓計監測技術

18



2009/12/30

## 光纖光柵感測原理



19

## 分層水壓計設計

20





## FBG水壓計封裝與現場安裝

21



## #27橋墩光纖水壓計架設

22



## 攝影機與標高尺

23

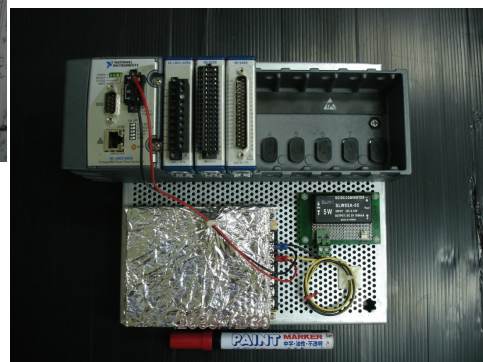


## 電子式加速度計安裝與擷取系統

24

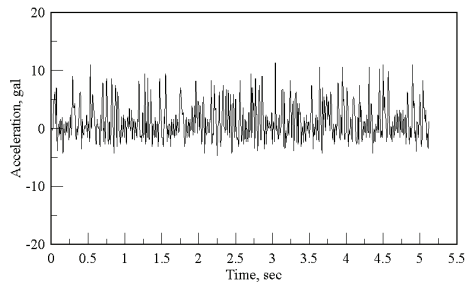


1. 穩定度高
2. 低耗電

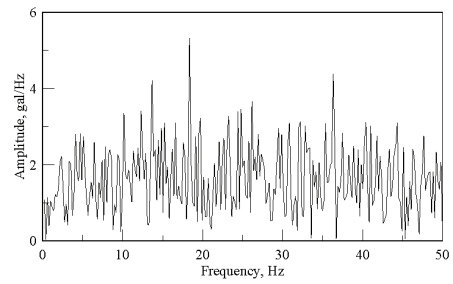


## 加速度計量測

25



(a)時域

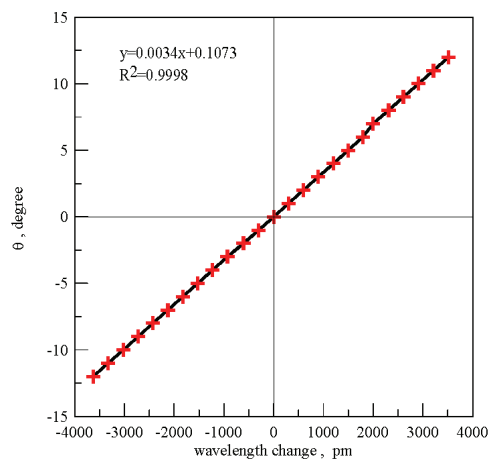


(b)頻率域

2009/12/30

## 光纖式測傾儀

26



2009/12/30

## 現場安裝完成與機房

27

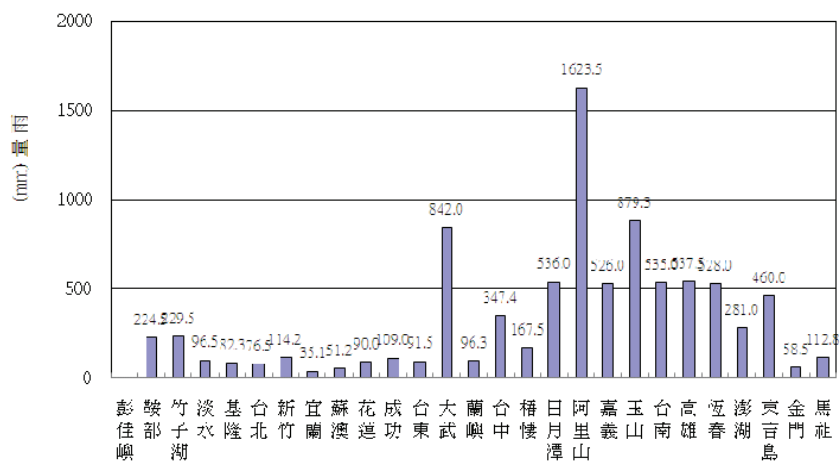


不斷電系統-2天  
3.5G無線傳輸系統



## 莫拉克雨量分佈

28



(中央氣象局網站，2009/12/30)



## 莫拉克颱風初#27橋墩景象

29



八月七日中午

2009/12/30

## 莫拉克颱風末#27橋墩景象

30

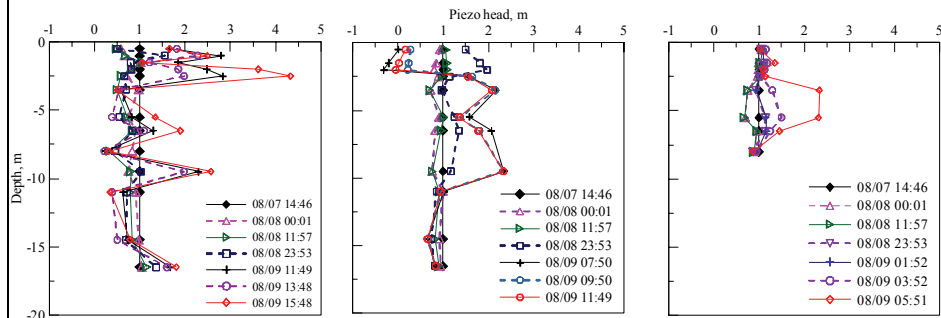


八月十日中午

2009/12/30

## A、B、C管歷時總水頭變化

31



A管

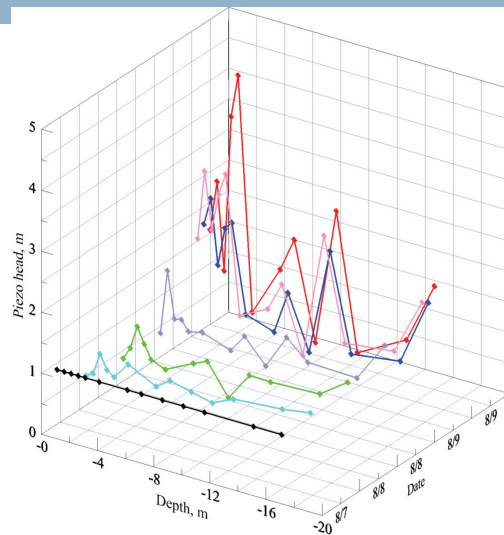
B管

C管

2009/12/30

## A管各深度之總水頭歷時變化

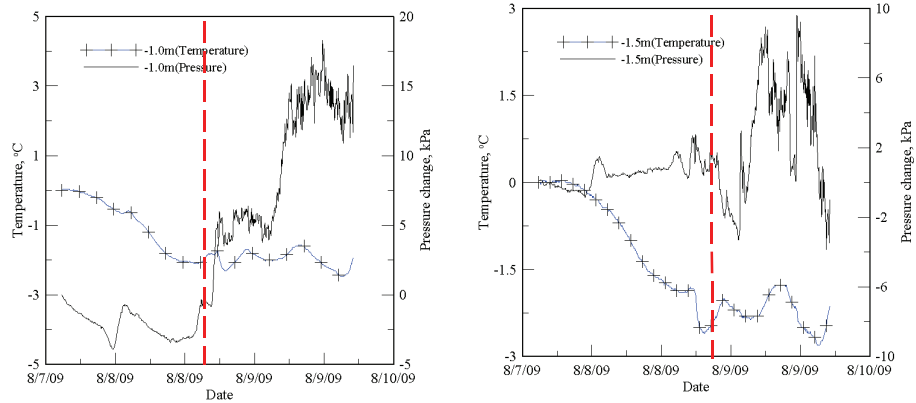
32



2009/12/30

## A管溫度與水壓變化之比較

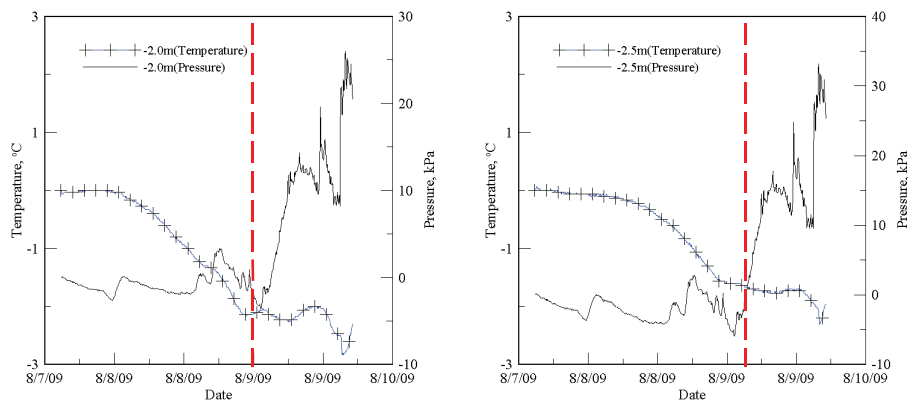
33



2009/12/30

## A管溫度與水壓變化之比較

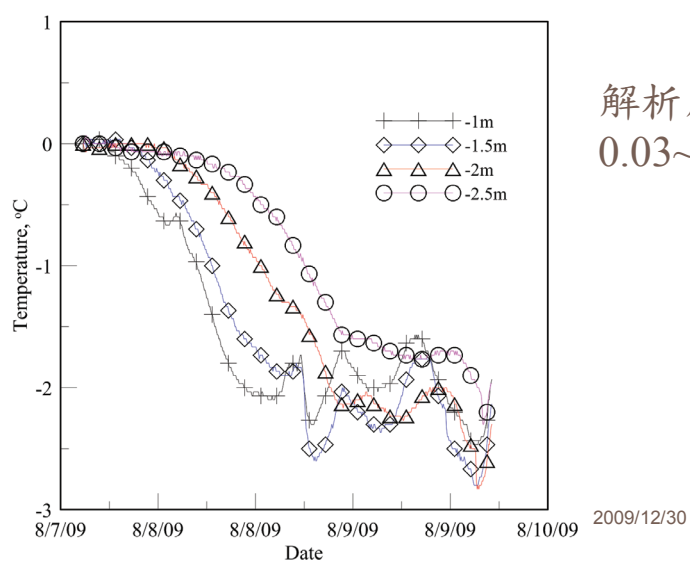
34



2009/12/30

## A管各深度之溫度歷時變化

35



解析度:  
0.03~0.04度C

## A管內各深度土層估計被沖刷時間

36

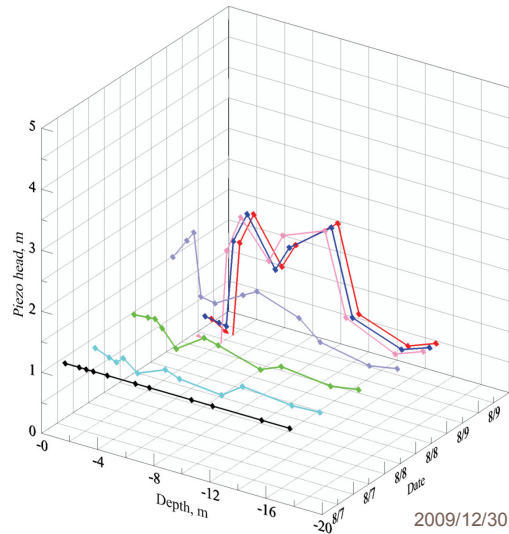
深度(m)	溫度變化(°C)	預估消波塊內土層被沖刷時間
1	2	8月8號15時
1.5	2.5	8月8號21時
2	2	8月9號0時
2.5	1.8	8月9號3時

2009/12/30



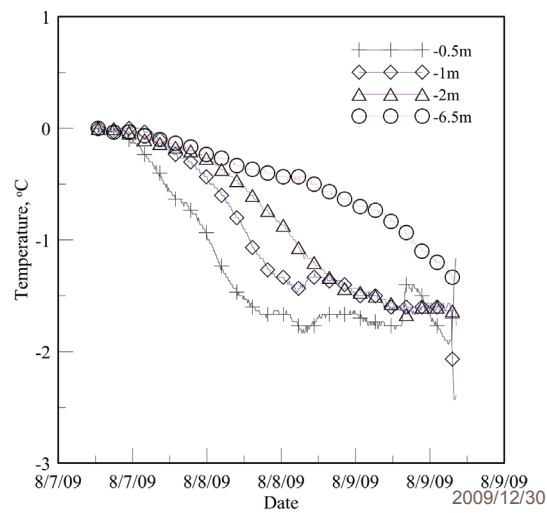
## B管各深度之總水頭歷時變化

37



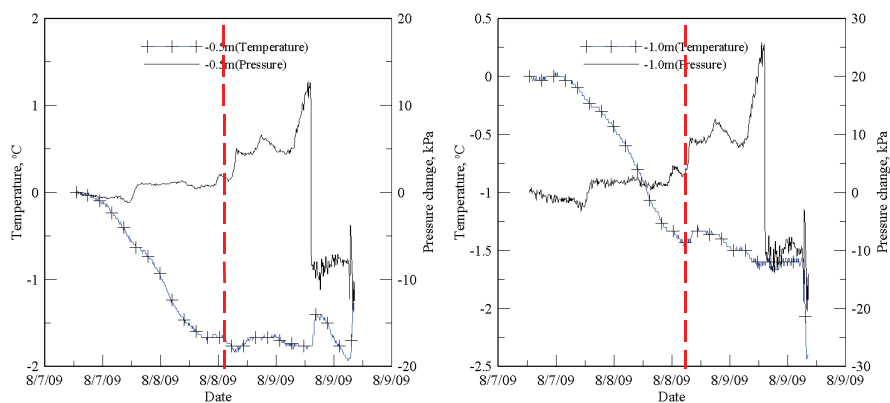
## B管各深度之溫度歷時變化

38



## B管溫度與水壓變化比較圖

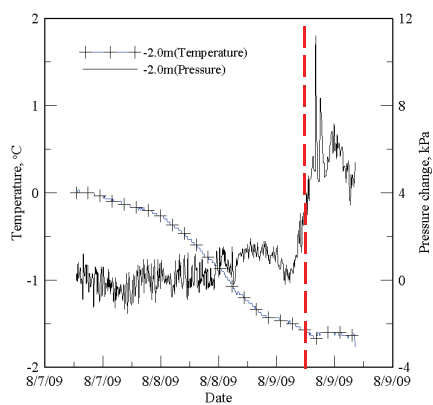
39



2009/12/30

## B管溫度與水壓變化比較圖

40



2009/12/30

## B管內各深度土層估計被沖刷時間

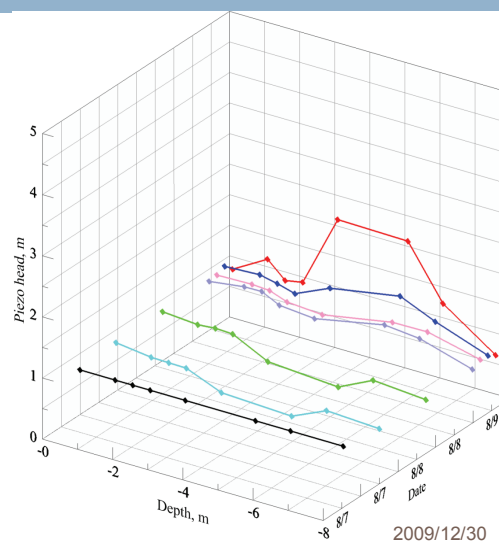
41

深度(m)	溫度變化(°C)	預估消波塊內土層被沖刷時間
0.5	1.8	8月8號14時
1	1.5	8月8號15時
2	1.6	8月9號06時

2009/12/30

## C管各深度之總水頭歷時變化

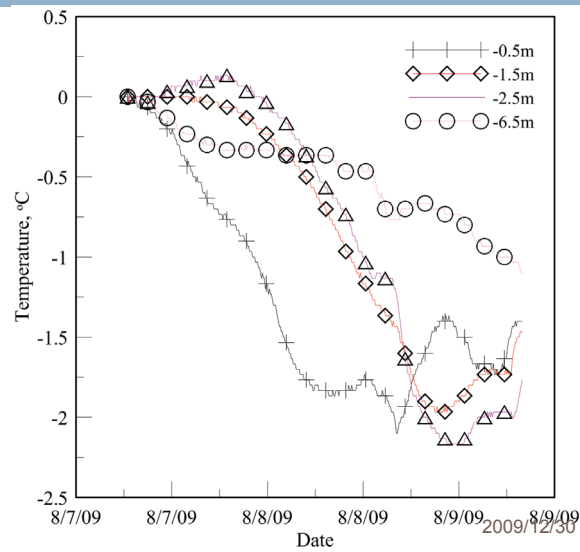
42



2009/12/30

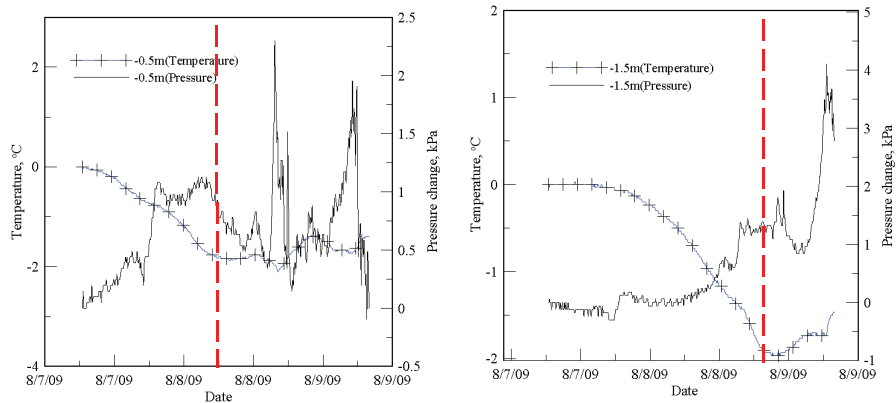
## C管各深度之溫度歷時變化

43



## C管溫度與水壓變化比較圖

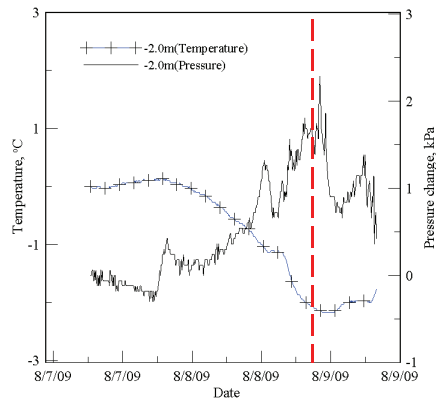
44



2009/12/30

## C管溫度與水壓變化比較圖

45



## C管溫度與水壓變化比較圖

46

深度(m)	溫度變化(°C)	預估消波塊內土層被沖刷時間
0.5	2	8月8號06時
1.5	1.8	8月8號20時
2	2	8月8號22時

2009/12/30

## 災後現勘與檢測

47

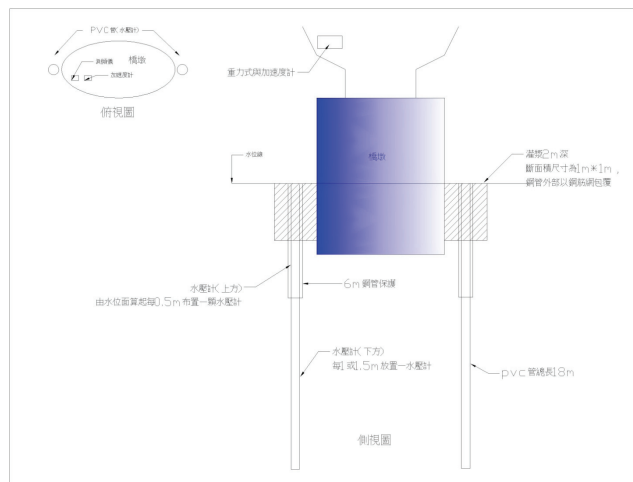


1. 第1節鋼管消失
2. 第1層消波塊消失
3. A孔量測水位深度約1米

2009/12/30

## 新的安裝設計

48



2009/12/30

## 結論

49

- 非橋墩土壤局部沖刷—消波塊局部沖刷
- 消波塊中安裝感測器之考量
- 斷訊前每孔在不同深度都有孔隙水壓急升的現象，顯示橋墩周圍土壤有擾動行為，推估此液化導致消波塊移動沖走，進而絞斷水壓計鋼管及其內之光纜
- 水溫降低隨時間向下延伸，本橋墩河水與地層沖刷溫度變化可達 $1.5^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

2009/12/30

## 結論(續)

50

- 水壓分佈與溫度量測結果相當一致，都指出A、B、C各點沖刷深度超過2米(也與颱風後現場觀察結果匹配，第1層消波塊與第1節鋼管消失)
- 水壓與水溫分佈監測都是可行，結合兩者有助於數據的分析與研判，並提供即時沖刷深度之監測方法
- 水溫分佈監測是一實用之監測方法

2009/12/30

## 建議

51

- 使用韌性監測儀器包裝
- 高解析度(0.1°C)溫度感測
- 監測儀器緊靠橋墩埋入
- 水面上參考溫度與壓力量測
- 低頻(10Hz以下)震動或高頻傾斜監測
- 其他橋墩之監測
- 不同基礎材料內橋墩之沖刷監測

2009/12/30

簡報結束，敬請指教



52

2009/12/30