107-028-7A73
MOTC-IOT-106- H1DB002

道路災害防治技術強化研究

交 通 部 運 輸 研 究 所
中 華 民 國 107 年 3 月

107-028-7A73
MOTC-IOT-106-H1DB002

道路災害防治技術強化研究

著 者：陳志芳、胡啟文、陳鈞彥、
張文忠、黃安斌、李良輝、陳冠宇

交通部運輸研究所
中華民國 107 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

道路災害防治技術強化研究 / 陳志芳等著. --
初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民107.03
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-5311-6(平裝)

1.公路工程 2.防災工程

442.1 107001862

道路災害防治技術強化研究

著　　者：陳志芳、胡啟文、陳鈞彥、張文忠、黃安斌、李良輝、陳冠宇
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.ihmt.gov.tw (中文版＞中心出版品)
電　　話：(04)26587132
出版年月：中華民國 107 年 3 月
印 刷 者：采峰實業有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 50 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定　　價： 300 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 臺北市中山區松江路 209 號 F1・電話：(02) 25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010700179　　ISBN：978-986-05-5311-6 (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份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

106

道路災害防治技術強化研究

交通部運輸研究所

GPN: 1010700179
定價 300 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：道路災害防治技術強化研究</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN 978-986-05-5311-6 (平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1010700179</td><td>運輸研究所出版品編號
107-028-7A73</td><td>計畫編號
106-H1DB002</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港研中心
主管：邱永芳
計畫主持人：陳志芳
共同主持人：胡啟文、陳鈞彥
聯絡電話：04-26587181
傳真號碼：04-26564418</td><td colspan="2">合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會、國立高雄應用科技大學、國立中山大學
計畫主持人：張文忠
共同主持人：李良輝、陳冠宇
協同主持人：黃安斌
地址：臺南市大學路 1 號、高雄市蓮海路 70 號、高雄市三民區建工路 415 號
聯絡電話：06-2757575~63128、07-3814526~5222、07-5252000~5353</td><td>研究期間
自 106 年 01 月
至 106 年 12 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：深層崩塌破壞、攝影測量、瘋狗浪</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

本研究針對公路邊坡可能遭遇之破壞面位於飽和土層之深層滑動進行解析法分析，並研發與解析法搭配之無線感測土層反應模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性。

另外，應用多視立體視覺三維重建攝影測量技術與物聯網完成全自動三維監測架構，建立公路邊坡監測全自動攝影、監測數據計算及誤差分析的方法。

在海岸公路異常波浪防災技術部分，彙整海象模擬與國內海象觀測站之波浪資料來建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，評估其對海岸公路通行安全之可能影響，提供海岸公路通行安全預警資訊。

成果效益與應用情形：
1. 發展解析法客製化之公路土壤邊坡深層滑動監測與預警技術，提升預警準確度。
2. 完成自動攝影系統應用於三維監測並提供全自動計算分析及三維表面差異的展示。
3. 發展臺東海岸公路易致災區段之波浪溯上與溢淹數值模式，整合本所港研中心港灣環境資訊網預報資訊建置「臺東海岸公路浪襲預警系統」。
4. 研究成果提供交通部、公路總局與台鐵局之養護與工務單位，做為相關防災作為啟動之準據。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>107 年 3 月</td><td>349</td><td>300</td><td>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價購。</td></tr>
<tr><td colspan="4">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</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS

INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Advanced study on mitigation technology of road disasters.

ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN 978-986-05-5311-6 (pbk)	1010700179	107-028-7A73	106-H1DB002

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jyh-Fang Chen
COMMON INVESTIGATOR: Chi-Wen Hu, Chun-Yen Chen
PHONE: (04) 26587181
FAX: (04) 26564418

PROJECT PERIOD
FROM January 2017
TO December 2017

RESEARCH AGENCY: NCKU Research And Development Foundation, National Kaohsiung University of Applied Sciences, National Sun-Yat-Sen University.
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Jong Chang
Co-PRINCIPAL INVESTIGATOR: Liang-Hwei Lee, Guan-Yu Chen
PROJECT STAFF: An-Bin. Huang
ADDRESS: No.1, University Road, Tainan City, 701, Taiwan , R.O.C
No.415, Chien Kung Road, Kaohsiung 807, Taiwan, R.O.C
No.70, Lianhai Rd., Gushan District, Kaohsiung 804, Taiwan, R.O.C
PHONE: 06-2757575~63128、07-3814526~5222、07-5252000 ~5353

KEY WORDS: shallow slope failure, Photogrammetry, Freak Wave

ABSTRACT:

To improve the limitations of rainfall-based slope warning system, a new framework that integrated the hydro-mechanical slope analysis and wireless sensing module for field key properties is under development. The target failure mode in this study is deep slips that failure surfaces occur in the saturated zone and trigger by excess pore pressures. The long-term goal is to establish a customized, time-dependent warning system for deep slip failures triggered by rainfalls.

In addition, application SfM-MVS photogrammetric automatic three-dimensional monitoring architecture, the establishment of automatic photography, calculation and analysis methods.

In feature of freak wave of coastal highway and application of disaster prevention, The shoaling and inundation due to freak waves will be simulated to identify the vulnerable area under various wave conditions. The results can be used to determine if a specific section of a coastal highway should be closes. Thus, the transportation safety can be guaranteed.

BENEFITS AND APPLICATIONS:

1. Develop customized, time-dependent warning system and procedure to improve the limitations of current warning techniques.
2. The automatic camera system can be applied to 3D monitoring effectively and provide full automatic calculation, analysis, and display of 3D surface differences.
3. Develop the numerical inundation and wave run-up model of disaster-prone section of coastal highways in Taitung, and integration forecast information from "Harbor Environment Information Website," develop "Freak Wave Early Warning System of Coastal Highways in Taitung"
4. The system potentially can be used by ministry of transportation, directorate general of highways, and Taiwan railways administration for hazard management.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
March 2018	349	300	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

道路災害防治技術強化研究

目　錄

中文摘要.....I

英文摘要.....II

目錄.....III

圖目錄.....V

表目錄.....XVII

第一章 前言.....1-1

1.1 研究緣起.....1-1

1.2 研究目的.....1-2

1.3 研究內容.....1-2

第二章 水力力學耦合穩定分析與無線監測系統.....2-1

2.1 水力力學耦合邊坡穩定分析.....2-1

2.2 無線監測系統架構.....2-19

2.3 系統感測器.....2-19

2.4 系統組成.....2-25

2.5 無線淺層土壤監測模組.....2-34

2.6 深層水力力學反應無線感測模組.....2-43

第三章 淺層滑動場址監測成果與分析.....3-1

3.1 甲仙攔河堰聯外道路土層監測模組安裝測試.....3-1
3.2 甲仙場址監測資料.....3-7
3.3 西湖場址土層監測模組安裝測試.....3-21
3.4 西湖場址監測資料.....3-27
第四章 深層滑動場址監測與分析.....4-1
4.1 五彎仔深層監測.....4-1
4.2 五彎仔二維水力力學耦合穩定分析.....4-13
第五章 多視立體視覺攝影測量及監測相關理論.....5-1
5.1 視覺攝影測量理論基礎.....5-1
5.2 相機率定.....5-6
5.3 率定標樣式.....5-11
5.4 網密點重建.....5-13
5.5 點雲差異分析.....5-15
5.6 整體最小二乘法平差理論.....5-17
5.7 統計檢驗.....5-23
第六章 道路邊坡滑動預警模式.....6-1
6.1 大地監測系統規劃.....6-1
6.2 道路邊坡崩塌現象與監測徵兆物理量.....6-5
6.3 自動傳輸計算及預警.....6-15
第七章 IoT 視覺監測系統建置與實例探討.....7-1
7.1 IoT 視覺攝影監測系統設計.....7-2

7.2 視覺監測系統設計.....7-11
7.3 自動監測系統運算伺服器架構.....7-15
7.4 其他系統設置需求.....7-16
7.5 系統介面介紹.....7-28
7.6 實驗區設置.....7-37
7.7 誤差分析.....7-38
7.8 點雲差異分析.....7-41
第八章 異常波浪案例蒐集與分析.....8-1
8.1 異常波浪災害概述與預警之必要性.....8-1
8.2 異常波浪災害蒐集與分析.....8-5
8.3 利用文字探勘蒐集異常波浪引致臺東海岸海岸公路災害之案例.....8-9
8.4 異常波浪特性分析.....8-15
第九章 公路海岸地形變遷及海水溯上與溢淹特性分析.....9-1
9.1 臺東海岸公路.....9-1
9.2 臺東海岸地形變遷.....9-3
9.3 波浪溯上與溢淹特性分析.....9-15
第十章 異常波浪容易致災區段之波浪溯上與溢淹數值模式建立 ...10-1
10.1 COBRAS 模式介紹.....10-1
10.2 數值地形.....10-4
10.3 模式設定.....10-16
10.4 模擬流程.....10-19
10.5 模擬結果.....10-28
10.6 海岸公路海浪警戒預報.....10-61

第十一章 結論與建議.....11-1
11.1 結論.....11-1
11.2 建議.....11-4
11.3 研究成果效益.....11-5
11.4 提供應用情形.....11-5
參考文獻.....參-1

圖目錄

圖 2.1 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995) 2-2
圖 2.2 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995) 2-2
圖 2.3 典型土壤非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004) 2-3
圖 2.4 非飽和滲流分析結果比較.....2-3
圖 2.5 淺層無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖.....2-6
圖 2.6 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖.....2-9
圖 2.7 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995) 2-10
圖 2.8 數值分析模型.....2-14
圖 2.9 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量.....2-14
圖 2.10 ID05 位置預測孔隙水壓歷時 2-15
圖 2.11 ID05 位置預測地表運動歷時.....2-15
圖 2.12 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線.....2-16
圖 2.13 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念 2-16
圖 2.14 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念 2-17
圖 2.15 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念.....2-17
圖 2.16 系統架構示意圖.....2-20
圖 2.17 電容式土壤水份計.....2-21
圖 2.18 I^2C 連接方式.....2-21
圖 2.19 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖.....2-22
圖 2.20 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖 2-22
圖 2.21 SCA103T 傾斜儀.....2-23

圖 2.22 傾斜儀類比電壓比例輸出標定.....2-24
圖 2.23 沉水式液位計.....2-25
圖 2.24 客製化電路板.....2-26
圖 2.25 系統運作示意圖.....2-26
圖 2.26 Arduino Uno.....2-27
圖 2.27 拓樸示意圖.....2-29
圖 2.28 XCTU 參數設定.....2-30
圖 2.29 Xbee S1 pro.....2-30
圖 2.30 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組 SIM5320E.....2-31
圖 2.31 即時時鐘模組 DS3231.....2-32
圖 2.32 SD 卡數據紀錄模組.....2-32
圖 2.33 太陽能電源控制器.....2-33
圖 2.34 10W 太陽能板.....2-33
圖 2.35 18650 鋰電池.....2-34
圖 2.36 Arduino Uno 原型擴展板.....2-35
圖 2.37 擴展板與微控制器.....2-35
圖 2.38 土層監測模組客戶端.....2-36
圖 2.39 土層監測模組伺服器端.....2-37
圖 2.40 客戶端之程式流程圖.....2-38
圖 2.41 伺服器端程式流程圖.....2-40
圖 2.42 伺服器端之程式流程圖(續).....2-41
圖 2.43 土層監測模組外構.....2-44
圖 2.44 防水電子盒內部配置.....2-44

圖 2.45 土壤水份計桿件外構.....2-44
圖 2.46 太陽能板支架.....2-45
圖 2.47 Wemos lolin32 微處理器(摘自 www.wemos.cc).....2-46
圖 2.48 液位計實體與校正結果.....2-47
圖 2.49 深層邊坡無線感測模組內部組件圖.....2-47
圖 2.50 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖.....2-49
圖 3.1 監測設施平面配置圖(南水局 2011).....3-2
圖 3.2 監測剖面圖(南水局 2011).....3-3
圖 3.3 監測模組相對位置圖.....3-4
圖 3.4 電動鑽機鑽至預計深度.....3-4
圖 3.5 確保模組保持水平.....3-5
圖 3.6 皂土覆蓋桿身與地表.....3-5
圖 3.7 客戶端盒內配置.....3-6
圖 3.8 伺服器端盒內配置.....3-6
圖 3.9 監測站點周遭環境.....3-6
圖 3.10 Thingspeak 即時顯示情況.....3-8
圖 3.11 監測場址與甲仙雨量站相對位置.....3-9
圖 3.12 Node0 含水量監測結果.....3-9
圖 3.13 Node1 含水量監測結果.....3-10
圖 3.14 Node2 含水量監測結果.....3-10
圖 3.15 Node3 含水量監測結果.....3-11
圖 3.16 擋土牆透水孔.....3-12
圖 3.17 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage1.....3-15

圖 3.18 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage2.....3-15
圖 3.19 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage3.....3-16
圖 3.20 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage4.....3-16
圖 3.21 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage5.....3-17
圖 3.22 甲仙現地入滲速率-基質吸力 3-18
圖 3.23 典型細砂 SWCC (Gonzalez and Adams, 1980).....3-18
圖 3.24 Node0 土壤體積含水量依時性剖面 3-19
圖 3.25 Node1 土壤體積含水量依時性剖面 3-19
圖 3.26 Node2 土壤體積含水量依時性剖面 3-20
圖 3.27 測站傾斜角監測結果.....3-21
圖 3.28 傾斜角量測方向.....3-21
圖 3.29 西湖邊坡實照.....3-22
圖 3.30 西湖系統安裝位置示意圖 (Google Earth) 3-22
圖 3.31 西湖監測系統架構圖.....3-23
圖 3.32 西湖場址監測模組尺寸與實際安裝深度示意圖.....3-24
圖 3.33 各監測模組安裝相對位置與系統盒內模組.....3-25
圖 3.34 監測模組安裝流程圖.....3-26
圖 3.35 資料接收端位.....3-27
圖 3.36 Node 2 於 2017/3/31－2017/4/02 降雨與含水量變化 3-28
圖 3.37 Node 2 於 2017/4/11－2017/4/16 降雨與含水量變化.....3-29
圖 3.38 Node2 於 2016/12/23－2017/4/28 傾斜量變化 3-30
圖 3.39 Node5 於 2016/12/23－2017/4/28 傾斜量變化 3-30
圖 3.40 Node10 於 2016/12/23－2017/4/28 傾斜量變化 3-31

圖 3.41 更新後西湖 Node4 土層含水量紀錄.....3-32
圖 3.42 更新後西湖 Node5 土層含水量紀錄.....3-32
圖 3.43 更新後西湖 Node6 土層含水量紀錄.....3-33
圖 3.44 更新後西湖傾斜量紀錄.....3-33
圖 4.1 阿里山公路五彎仔路段航照圖(青山工程顧問公司,2006).....4-3
圖 4.2 阿里山公路五彎仔路段監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2006）.....4-4
圖 4.3 全光纖式監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2007）.....4-5
圖 4.4 台 18 線阿里山公路五彎仔崩塌區塊體滑動與深井配置圖(公路局五工處).....4-6
圖 4.5 五彎仔地區崩積材料剖面.....4-7
圖 4.6 五彎仔地區崩積材料剖面.....4-8
圖 4.7 五彎仔崩塌區監測儀器配置圖(公路局五工處提供).....4-9
圖 4.8 滑動塊體分布及可能滑動深度圖(公路局五工處提供).....4-9
圖 4.9 深層邊坡無線感測模組外構與現場安裝圖.....4-10
圖 4.10 深層邊坡無線感測模組電子配置圖.....4-11
圖 4.11 深層邊坡無線感測模組分層水分紀錄.....4-12
圖 4.12 深層邊坡無線感測模組傾角紀錄.....4-12
圖 4.13 深層邊坡無線感測模組孔隙水壓紀錄.....4-13
圖 4.14 五彎仔數值分析模型.....4-16
圖 4.15 入滲開始後 410000 秒後孔隙水壓分布與流動向量 4-16
圖 4.16 入滲後垂直有效應力分布與位移向量.....4-17
圖 4.17 入滲後水平位移分布.....4-17

圖 4.18 B-7 位置預測孔隙水壓歷時.....4-18
圖 5.1 核線幾何關係.....5-2
圖 5.2 SfM-MVS 標準流程.....5-6
圖 5.3 率定場及鏡頭畸變差.....5-7
圖 5.4 率定標樣式.....5-12
圖 5.5 Hattori 編碼方式.....5-13
圖 5.6 可能的座標系組合.....5-13
圖 5.7 直接最近距離示意圖.....5-16
圖 5.8 二次函數距離示意圖.....5-16
圖 5.9 M3C2 計算原理.....5-17
圖 5.10 正交距離與縱向距離的關係.....5-19
圖 6.1 自動道路邊坡近景攝影測量預警系統流程圖.....6-16
圖 7.1 IoT 近景攝影監測系統流程圖.....7-1
圖 7.2 Sony Multi Media USB 介面.....7-3
圖 7.3 SONY A5100 16-50mm 變焦鏡組.....7-3
圖 7.4 Micro USB 與 Sony Multi USB 腳位比較圖.....7-3
圖 7.5 Raspberry Pi 3 單板電腦.....7-4
圖 7.6 Raspberry Pi 3 單板電腦 I/O 接腳圖.....7-5
圖 7.7 類比控制設計電路圖.....7-5
圖 7.8 IoT 全自動攝影及上傳架構圖.....7-6
圖 7.9 控制電路.....7-7
圖 7.10 系統控制介面.....7-7
圖 7.11 現地監測與監控中心硬體架構.....7-8

圖 7.12 Wireless Mesh Network 多 AP 傳遞方式.....7-9
圖 7.13 點對點 Wireless Mesh Network.....7-10
圖 7.14 Quantenna QT3860 5GHz WiFi Mesh.....7-11
圖 7.15 視覺監測系統 SfM-MVS 計算流程.....7-12
圖 7.16 視覺監測系統 SfM-MVS 計算流程.....7-12
圖 7.17 自動視覺攝影測量資料夾結構.....7-13
圖 7.18 自動監測系統資料庫關聯圖.....7-15
圖 7.19 自動監測系統網路架構.....7-16
圖 7.20 iWitness Pro 自動率定標.....7-19
圖 7.21 本研究室多功能自動率定場.....7-19
圖 7.22 多功能率定場拍攝率定標.....7-19
圖 7.23 使用 iWitness Pro 進行相機參數求解.....7-20
圖 7.24 相機率定報告.....7-21
圖 7.25 PhotoScan 相機率定參數.....7-22
圖 7.26 PhotoScan 相機自率定成果.....7-24
圖 7.27 PhotoScan 相機率定參數.....7-24
圖 7.28 自動監測專案檔.....7-25
圖 7.29 系統設定檔.....7-26
圖 7.30 道路自動邊坡監測系統選單自動載入.....7-27
圖 7.31 道路邊坡自動監測系統歡迎訊息及相關測試連線資訊.....7-27
圖 7.32 道路邊坡自動監測系統介面.....7-29
圖 7.33 排程及差異分析計算介面.....7-29
圖 7.34 監測站資訊.....7-30

圖 7.35 監測站誤差向量.....7-30
圖 7.36 線上點雲瀏覽格式.....7-31
圖 7.37 點雲差異線上點雲格式.....7-31
圖 7.38 關於自動監測系統說明.....7-32
圖 7.39 道路邊坡自動監測系統網頁登入介面.....7-32
圖 7.40 道路邊坡自動監測系統網頁任務介面.....7-33
圖 7.41 叢集計算主機狀態.....7-33
圖 7.42 IoT 自動監測模組管理.....7-34
圖 7.43 IoT 自動監測模組進階設置.....7-34
圖 7.44 實驗區設置.....7-37
圖 7.45 監測點誤差分析圖.....7-39
圖 7.46 模擬監測點變動對 RMSE 影響圖.....7-40
圖 7.47 點雲差異分析以 M3C2 為例.....7-41
圖 7.48 M3C2 點雲差異及點雲展示.....7-42
圖 8.1 於 2013 年龍洞海濱異常波浪事件之發生區域.....8-2
圖 8.2a 2016 年澳洲雪梨皇家國家公園異常波浪事件.....8-3
圖 8.2b 2016 年澳洲雪梨皇家國家公園異常波浪事件岸邊的人被波浪衝擊而失去平衡.....8-3
圖 8.3 2008 年颶風艾克(Hurricane Ike)在加爾維斯頓(Galveston)海岸公路使行駛的腳踏車受波浪衝擊失去平衡.....8-4
圖 8.4 2000-2016 年臺灣地區各月份發生異常波浪次數(橘色發生於颱風警報期間案例).....8-5
圖 8.5 龍洞異常波浪事件之前後幾天的波浪資料，由上而下分別是波高、週期與波向(董東璟教授提供).....8-6

圖 8.6　COBRAS 數值模式的模擬區域，從事故地點的階梯向東延伸，如圖中之直線所示。上圖為 Google Earth 上的位置示意，下圖是數值地形上的截取位置。.....8-5

圖 8.7 數值模擬使用的一維數值地形：左側為外海，右側為礁臺，最右側則是事故地點的階梯。.....8-7

圖 8.8 週期 8 秒波高 2m 的規則入射波(模擬時間 80 s).....8-8

圖 8.9 週期 8 秒波高 2m 的較大波浪(模擬時間 158 s).....8-8

圖 8.10 礁臺邊緣與事故地點的階梯產生的向上衝擊(模擬時間 176 s).....8-8

圖 8.11 利用 google site 於特定新聞來源搜尋關鍵字結果.....8-9

圖 8.12 新聞蒐集及事件辨識流程.....8-10

圖 8.13a 利用 google site 於特定日期搜尋關鍵字結果.....8-11

圖 8.13b 網路爬蟲蒐集新聞結果.....8-11

圖 8.14a 相關浪襲公路新聞資料.....8-12

圖 8.14b 相關浪襲公路新聞資料.....8-13

圖 8.14c 相關浪襲公路新聞資料.....8-13

圖 8.14d 相關浪襲公路新聞資料.....8-14

圖 8.14e 相關浪襲公路新聞資料.....8-14

圖 8.15 2015 年 8 月 7 日中度颱風蘇迪勒期間，於台九線往南接近 441 公里處，長浪襲擊車輛(資料來源：蘋果日報).....8-15

圖 8.16 2014 年麥德姆颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-16

圖 8.17 2014 年黃蜂颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-16

圖 8.18 2015 年蘇迪勒颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-17

圖 8.19 2015 年天鵝颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-17

圖 8.20 2015 年杜鵑颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-18
圖 8.21 2015 年尼伯特颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-18
圖 8.22 2016 年莫蘭蒂颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-19
圖 8.23 2016 年馬勒卡颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-19
圖 8.24 2016 年梅姬颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局).....8-20
圖 9.1 東部公路(台 9 線)區段圖 9-1
圖 9.2 南迴公路(台 9 線)多良段工程區段圖(交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處提供) 9-2
圖 9.3 南迴公路(台 9 線)多良段 418K+920 橫斷面(交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處提供) 9-2
圖 9.4 Google earth 衛星影像 9-3
圖 9.5 Google earth 衛星影像轉換為灰階二值圖 9-4
圖 9.6 利用灰階二值圖進行邊緣偵測.....9-4
圖 9.7a 南興地磅站 2005 年衛星影像邊緣偵測.....9-5
圖 9.7b 南興地磅站 2010 年衛星影像邊緣偵測.....9-5
圖 9.7c 南興地磅站 2011 年衛星影像邊緣偵測 9-6
圖 9.7d 南興地磅站 2012 年衛星影像邊緣偵測.....9-6
圖 9.7e 南興地磅站 2012 年衛星影像邊緣偵測.....9-7
圖 9.7f 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測 9-7
圖 9.7g 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測.....9-8
圖 9.7h 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測.....9-8
圖 9.7i 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測 9-9
圖 9.7j 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測 9-9

圖 9.7k 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測.....910
圖 9.7l 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測 9-10
圖 9.8 南興地磅站各年之海岸線疊繪於 2005 衛星影像.....9-11
圖 9.9 南興地磅站各年之海岸線疊繪於 2005 衛星影像.....9-12
圖 9.9 南興地磅站斷面變化(台 9 線至海岸線距離).....9-12
圖 9.10 大武漁港(陳冠宇教授攝).....9-13
圖 9.11 大武漁港南側養灘現況(陳冠宇教授攝).....9-14
圖 9.12 南興地磅站北側(439K+700)向南拍攝(陳冠宇教授攝).....9-14
圖 9.13 南興地磅站北側養灘處(439K+700)向南拍攝(陳冠宇教授攝)
.....9-15
圖 9.14 波谷深與波峰高的比值(Ratio of Trough height to Crest height, RTC).....9-16
圖 9.15 異常波浪個別波之型態(董東璟教授提供).....9-17
圖 9.16 南興段(440K+800)處浪高尺(陳冠宇教授攝).....9-18
圖 9.17 南興段(440K+800)處浪高尺(陳鈞彥研究員攝).....9-19
圖 9.18 104 年杜鵑颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-20
圖 9.19 104 年巨爵颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-21
圖 9.20 105 年尼伯特颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高9-21
圖 9.21 105 年莫蘭蒂颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高9-22
圖 9.22 105 年馬勒卡颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高9-22
圖 9.23 105 年梅姬颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-23
圖 9.24 105 年艾利颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-23
圖 9.25 105 年杜鵑颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-24

圖 9.26 105 年海馬颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-24
圖 9.27 105 年尼莎颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-25
圖 9.28 106 年天鴿颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高 ...9-25
圖 9.29 南興段(440K+900)水泥護欄受波浪衝擊剝落情形.....9-26
圖 9.30 南興段(441K+000)浪襲公路情形.....9-26
圖 10.1 海洋學門資料庫解析度 0.12 分之水深資料.....10-5
圖 10.2 台九線多良段附近 5m 解析度的內政部 DEM 數值地形 ...10-6
圖 10.3 台 9 線多良段附近之海陸域整合數值地形.....10-7
圖 10.4 多良段在 417K+715 到 419K+862 區間，靠海側的道路平台邊緣高程.....10-8
圖 10.5 Google earth 的 12 站位置.....10-9
圖 10.6 12 個站的切線地形.....10-9
圖 10.7 418K+600 站的海域模式地形.....10-10
圖 10.8 418K+600 站橫斷面圖(紅色虛線模式內插使用的陸域地形)
.....10-10
圖 10.9 418K+600 站提供模式內插使用的地形 10-11
圖 10.10 Google earth 南興段 7 站位置(綠三角).....10-12
圖 10.11 水利署台東海岸（尚武段）監測調查計畫的等深圖.....10-13
圖 10.12 南興段 7 站所取的向岸方向近岸地形切線.....10-14
圖 10.13 南興段 7 站向岸方向的近岸地形.....10-14
圖 10.14 南興段 440K+000 站的海域地形 10-15
圖 10.15 南興段 440K+000 站橫斷面圖(取紅色虛線提供模式內插陸域地形).....10-15

圖 10.16 南興段 440K+000 站提供模式內插使用的地形 10-16

圖 10.17 2016 年尼伯特(左上)、莫蘭蒂(右上)、馬勒卡(左下)以及梅姬(右下)的移動路徑 10-17

圖 10.18 2016 年尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡和梅姬颱風警報期間水利署台東外海浮標每小時的示性波高(Hs)對尖峰週期(Tp).....10-18

圖 10.19 多良段模式所使用的情境模擬條件.....10-18

圖 10.20 南興段模式所使用的情境模擬條件.....10-19

圖 10.21 各站的模擬流程圖.....10-19

圖 10.22 419K+820 站模擬左邊界波高 12m、週期 16 秒的連續正弦波入射且初始水位為 2m 的 VOF 空間分布 10-21

圖 10.23 419K+820 站於模擬期間第 195 到 199 秒發生越波事件 10-22

圖 10.24 419K+820 站於模擬期間第 360 到 364 秒發生的越波事件 10-23

圖 10.25 419K+820 站的模擬期間 VOF 空間分布最大值 10-24

圖 10.26 419K+820 站橫斷面圖(取紅色虛線提供模式的地形內插)10-24

圖 10.27 440K+000 站模擬左邊界波高 9m、週期 16 秒的連續正弦波入射且初始水位為 2m 的 VOF 空間分布.....10-26

圖 10.28 440K+000 站於模擬期間第 339 到 343 秒發生的越波事件 10-27

圖 10.29 440K+000 站的模擬期間 VOF 空間分布最大值 10-28

圖 10.30 多良段 12 站的發生道路溢淹的情境數量(長條圖上方標示的數 字為各站的平台高程) 10-30

圖 10.31 南興段 7 站的發生道路溢淹的情境數量(長條圖上方標示為各站的平台高程).....10-43

圖 10.32 016 年尼伯特颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和

接近平台的情境溯上水位.....10-59
圖 10.33 2016 年馬勒卡颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近平台的情境溯上水位.....10-60
圖 10.34 2016 年梅姬颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近平台的情境溯上水位.....10-60
圖 10.35 2016 年海馬颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近平台的情境溯上水位.....10-61
圖 10.36 439K+700 站的模擬期間 VOF 空間分布最大值 10-62
圖 10.37 南興段海浪警戒預報檔.....10-63
圖 10.38 臺東海岸公路通行安全預警系統多良段.....10-65
圖 10.39 臺東海岸公路通行安全預警系統南興段.....10-65

表目錄

表 2-1 AT command 操作流程與參數意義 2-24
表 3-1 傾斜管孔位鑽孔資料(南水局 2011).....3-2
表 3-2 簡化地質材料參數(南水局 2011).....3-3
表 3-3 各階段淺層入滲速率 3-17
表 3-4 不同測站淺層入滲速率 3-20
表 4-1 分析所用土層參數 4-14
表 4-2 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數.....4-14
表 4-3 非飽和水文參數.....4-15
表 5-1 F 檢驗 5-24
表 6-1 邊坡破壞型態分類(譯自 Hungr 等(2013)).....6-5
表 6-2 山崩形態之移動速度表 6-8
表 6-3 邊坡崩滑速度分級表 6-9
表 6-4 邊坡維護階段管理基準 6-12
表 6-5 山坡地工程監測參考管理值(內政部營建署).....6-13
表 6-6 邊坡穩定判斷建議之管理值(廖瑞堂，2001).....6-13
表 6-7 位移速率與邊坡穩定性判斷建議表 6-13
表 6-8 現行位移監測相關監測精度 6-14
表 7-1 Sony Multi Media USB 腳位說明 7-4
表 7-2 5GHz WiFi Mesh backhaul.....7-10
表 7-3 PhotoScan 以 TLS 三維座標轉換比較表 7-40
表 8-1 新聞蒐集相關浪襲公路事件 8-12

表 9-1　異常波浪型態之分類(董東璟教授提供).....9-17

表 9-2　封路之判斷依據參考表 9-19

表 10-1 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-31

表 10.2 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-32

表 10.3 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-33

表 10.4 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-34

表 10.5 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-35

表 10.6 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-36

表 10.6(續) 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-37

表 10.7 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-38

表 10.8 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-39

表 10.9 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-40

表 10.9(續) 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-41

表 10.10 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-44

表 10.11 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-45

表 10.11(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-46

表 10.12 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-47

表 10.12(續) 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣).....10-48

表 10.13 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-49

表 10.14 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-50

表 10.14(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-51

表 10.15 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-52

表 10.15(續) 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣).....10-53

表 10.16 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-54

表 10.17 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-55

表 10.17(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-56

表 10.18 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 10-57

表 10.18(續) 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位 4-58
表 10.19 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的燈號.....4-66
表 10.20 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的燈號.....4-67
表 10.21 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的燈號.....4-68
表 10.21(續) 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的燈號.....4-69
表 10.22 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的燈號.....4-70
表 10.23 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的燈號.....4-71
表 10.23(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的燈號.....4-72
表 10.24 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的燈號.....4-73
表 10.24 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的燈號.....4-74

第一章　前言

1.1 研究緣起

臺灣受造山運動影響導致地質脆弱之坡地分佈廣泛，且颱風與地震發生頻繁，整體天然環境因素導致坡地崩塌無法避免，因此邊坡崩塌時常導致人員損傷、交通中斷及經濟損失等。山區道路邊坡崩塌主要為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且降雨引致邊坡破壞其具有一定延時與徵兆，使得此類災害之預警將較為可行且易發揮成效。本研究針對公路邊坡可能遭遇之滑動面位於飽和面以下之深層滑動，進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線土層反應感測模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性，利於相關單位對此類災害預警及管理之決策參考。

道路邊坡監測以擷取表面三維資料的方法，含 GPS 定位系統、地面雷射掃描技術及攝影測量三維重建等技術，但仍受限於自動攝影、資料回傳、自動化解算及資料分析等問題。也發展一個視覺攝影測量的自動監測系統，提供自動攝影、資料回傳、視覺定位計算、三維資料差異分析及預警機制。以物聯網結合攝影系統，建立全自動攝影及影像自動回傳功能，並以 SfM-MVS 攝影測量技術建立全自動計算分析功能，提供預警及分析使用。

另外，針對臺灣東部海岸地區與公路可能受到颱風波浪或異常浪等長波侵襲所造成重大災害，發展建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，發展溯上分析及預警系統，建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，有效減少災害造成之傷亡。本研究完成彙整海象模擬與國內海象觀測站之波浪資料來建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，評估其對海岸公路通行安全影響，可提供海岸公路通行安全預警資訊，以利公路管理單位作為災害預防及災後管理之決策參考。

1.2 研究目的

本研究目的如下：

1. 進行深層滑動土層地層材料力學試驗，發展水力力學耦合解析法技術與撰寫分析軟體，研發適用於土壤邊坡深層滑動之無線監測模組。
2. 利用全自動近景攝影測量監測及多時序三維重建資料差異分析，進行記錄道路整體邊坡變遷，做為崩塌潛勢判斷之依循。
3. 蒐集異常波浪引致臺東海岸公路災害案例與特性分析，並建立易致災區段之波浪溯上與溢淹數值模式。

1.3 研究內容

本研究主要整合「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」、「公路邊坡崩塌近景攝影測量自動判讀系統開發研究」及「海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究」3 個子計畫之主要研究成果(詳細內容請參閱各子計畫所出版之研究報告)，主要研究內容如下所示：

1. 邊坡水力力學耦合穩定分析與無線感測模組。
2. 淺層滑動場址監測成果分析。
3. 深層滑動場址監測與分析。
4. 多視立體視覺攝影測量及監測理論。
5. 近景攝影之道路邊坡現地監測。
6. IoT 視覺監測系統建置與與實例探討。
7. 異常波浪案例蒐集與分析
8. 公路海岸地形變遷及海水溯上與溢淹特性分析。
9. 異常波浪易致災區段波浪溯上與溢淹數值模式建立。
10. 結論與建議。

第二章 水力力學耦合穩定分析與無線感測模組

道路土壤邊坡依其機制可分為淺層與深層滑動，二種邊坡破壞其滑動機制與致災因子顯著不同，因此其解析程序及對應之崩塌預警模式亦應分開考慮，本文以降雨引致滑動面位於飽合土層之深層崩塌為研究對象，以解析法整合地形、地質材料及水文特性之場址破壞機制分析，搭配水力力學耦合試驗了解降雨對土壤應力狀態之影響程度，以探討邊坡滑動機制，並作為依時預警系統之理論架構。

2.1 水力力學耦合邊坡穩定分析

2.1.1 土壤含水量特徵曲線

土壤含水量特徵曲線(soil-water characteristic curve, SWCC)為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，含水量通常以體積含水量(θ)表示，亦可用重量含水量(ω)或飽和度(S_r)表示，典型的土壤含水量特徵曲線如圖 2.1，土水特徵曲線之斜率可視為土壤的儲水能力(storage capacity)。非飽和土壤因基質吸力(matric suction, u_a-u_w)改變，在吸水(wetting)及排水(drying)的過程中會產生遲滯效應，即在相同基質吸力下吸水曲線(wetting curve)上的含水量會低於排水曲線(drying curve)上的含水量，原因是排水後土壤顆粒排列變緊密。

土壤含水量特徵曲線去飽和的過程可分為三個階段，邊界效應階段(boundary effect stage)，此階段幾乎所有孔隙都被水填滿，當基質吸力大於進氣值(air-entry value)，空氣開始進入土壤孔隙；接著進入轉移階段(transition stage)，土壤開始去飽和，含水量隨基質吸力增加而明顯降低；最後進入殘餘階段(residual stage)，此階段含水量受基質吸力的影響快速降低達到殘餘含水量(residual water content)。另外，在非飽和土壤中，滲透係數亦會受到基質吸力的影響，如圖 2.2 所示。

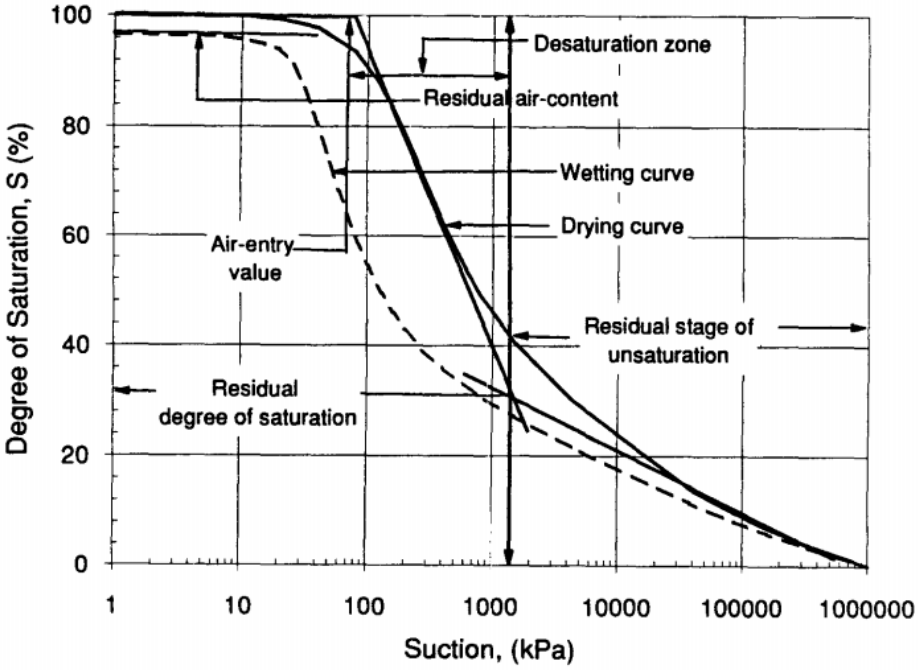


圖 2.1 典型的土壤含水量特徵曲線 (Fredlund, 1995)

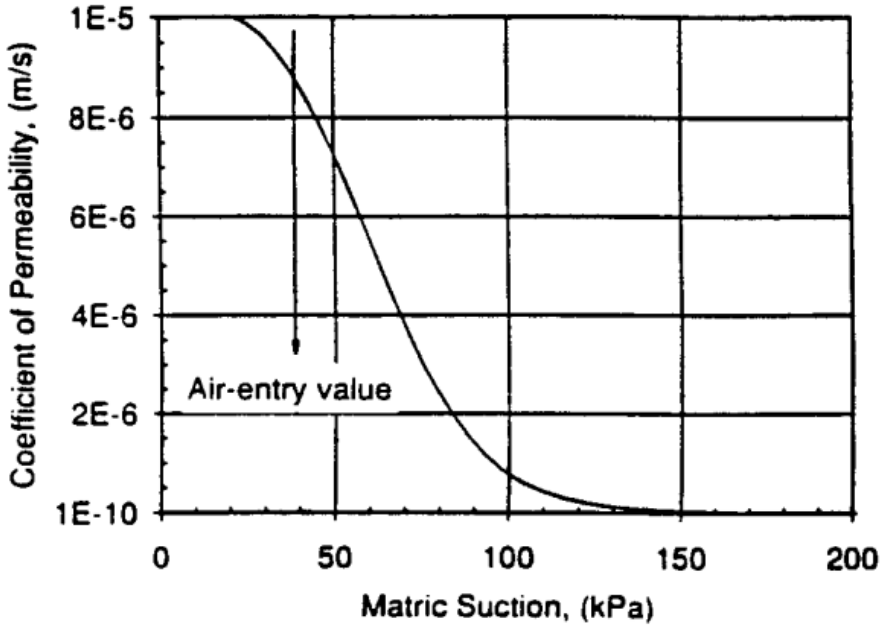


圖 2.2 土壤滲透係數與基質吸力之關係 (Fredlund, 1995)

2.1.2 非飽和滲流分析

實務上考慮滲透情形下的邊坡穩定分析，大多利用提高地下水位

以模擬降雨入滲透過程中孔隙水壓增加的現象，但孔隙水壓的變化受到土壤本身的滲透特性控制而有不同的反應。因非飽和土壤之基質吸力及飽和土層滲流力之變化和孔隙水壓在邊坡內的分布有密切關係，為得到孔隙水壓分布隨滲透的變化情形，需了解入滲之水力學機制。

假設水在非飽和土中的流動滿足達西定律，但和飽和土中滲流的不同為非飽和土之滲透係數為土壤含水量的函數，稱為基質吸力-滲透係數曲線，圖 2.3 為典型土壤之非飽和土壤特性曲線，非飽和滲流中滲透係數為孔隙水壓力的函數。土中水流動支控制方程式可依質量守衡的原理來推導建立，結合達西定律和流動控制方程式可推導出基本的地下水流控制方程式，Freeze and Cherry(1979) 假設孔隙氣壓等於大氣壓力，且可自由進出土壤，提出在均質、均向土壤內之三維流體流動之控制方程式可以 Richards equation 表示，以總水頭的形式表示為：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k(h_p)\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[k(h_p)\frac{\partial h}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[k(h_p)\frac{\partial h}{\partial z}\right]=\frac{\partial\theta(h_p)}{\partial x} \tag{2.1}$$

式中 h=總水頭；θ=體積含水量； h_p=壓力水頭；k=土壤滲透係數(為壓力水頭之函數)，給定初始及邊界條件，可計算土壤內總水頭(或壓力水頭)隨時間之變化，此控制方程式適用於飽和及非飽和土層。

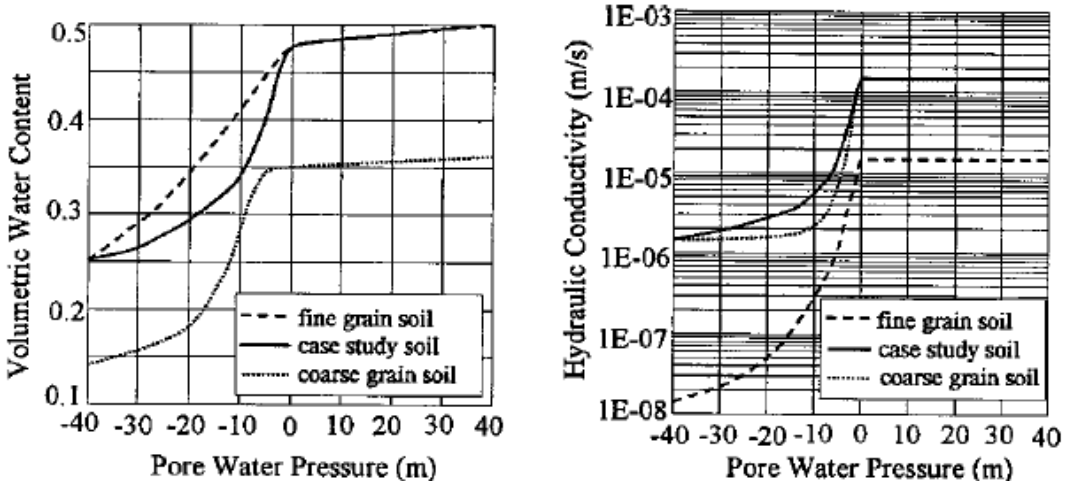


圖 2.3 典型土壤非飽和土壤特性曲線(Collins and Znidarcic, 2004)

自然邊坡中，若入滲率大於飽和滲透係數(k_{sat})，無法入滲之降雨

會沿著邊坡表面流動，使邊坡表面之壓力水頭為零，分析中地表邊界並非以入滲率控制，而是以壓力水頭控制。滲流使非飽和之土柱隨時間飽和，使細顆粒土壤的基質吸力減少，並使其剪力強度下降。

考慮一維入滲下均質土體，根據質量守恆且土壤和水均不可壓縮，為了簡化計算，假設土壤滲透係數 k 不隨深度改變(即 $\partial k(h_p)/\partial z = 0$)，可得鉛垂向之一維 Richard equation：

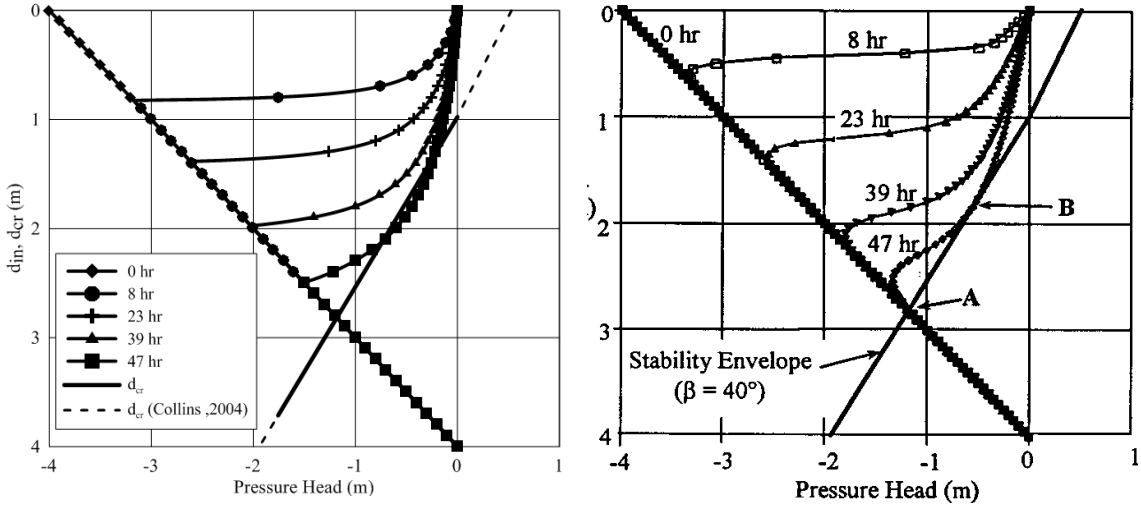
$$M(h_p)\frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(h_p)\frac{\partial h_p}{\partial z}\right] \tag{2.2}$$

其中 z 為深度(地表為零且向下為正)；h_p=壓力水頭；k=土壤滲透係數(為壓力水頭之函數)，可由土水特性曲線決定；M=孔隙水含容能力。

以 Crank-Nicolson 有限差分法，以求解深度之 1/400 為Δz，Δt 則以 Hillset al. 所建議的Δt 限制式，Δ≤Δz/|V| ，V=Q/(θ(0，t)-θ_i)，即數值計算之可蘭穩定條件(CFL condition)，使每一計算時距之水流不會超過一個網格距離，可將式 2.2 式改寫為差分形式：

$$M(h_p)\frac{h_{p,j}^{n+1}-h_{p,j}^{n}}{\Delta t} = \frac{k_{j+\frac{1}{2}}\left[\left(h_{p,j+1}^{n+1}-h_{p,j}^{n+1}\right)+\left(h_{p,j+1}^{n}-h_{p,j}^{n}\right)\right]}{2\Delta z^2} - \frac{k_{j-\frac{1}{2}}\left[\left(h_{p,j}^{n+1}-h_{p,j-1}^{n+1}\right)+\left(h_{p,j}^{n}-h_{p,j-1}^{n}\right)\right]}{2\Delta z^2} \tag{2.3}$$

為驗證一維分析模式之可靠度，以邊界條件和 Collins and Znidarcic (2004)相同，上邊界之使用壓力水頭為 0，下邊界條件為排水邊界，地下水位在 4m 處，基質吸力分佈為靜基質吸力分布，使用「典型」細顆粒土壤之水土特性曲線，解得之滲流分析結果和 Collins and Znidarcic (2004)以二維數值程式 SEEP/W 之結果比較如圖 2.4，可以發現趨勢大致上相同，但數值上有差異，可能是因為 SEEP/W 係利用有限元素法進行二維分析，而本研究為利用一維有限差分數值方法進行分析。



(a) 1D 有限差分　　(b) 2D 有限元素 (Collins and Znidarcic, 2004)

圖 2.4 非飽和滲流分析結果比較

2.1.3 淺層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

本研究參考 Collins and Znidarcic (2004)降雨下之無限邊坡穩定分析概念，推導淺層無限邊坡之水力力學耦合穩定分析，考慮一坡角為 β 之無限長邊坡，如圖 2.5，地下水位面位於 d_w 處，W 為自重，N 及 S 分別為作用在切片底部之正向應力及剪應力，d_{in} 為入滲深度，假設邊坡破壞會發生在臨界深度 d_{cr} 處。

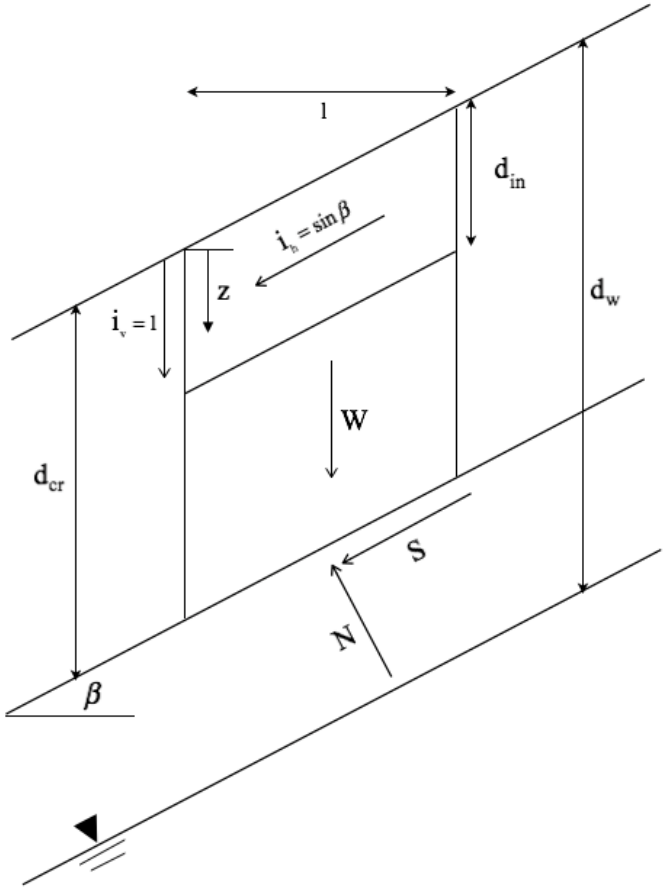


圖 2.5 淺層無限邊坡之水力力學耦合穩定分析示意圖

切片內飽和部分($z \le d_{in}$)以有效應力進行分析，土壤單位重為飽和單位重γ_s，在土壤飽和部分會產生滲流，平行向滲流平行坡面，水力梯度為$i_h = \sin\beta$，垂直向滲流由入滲造成，水力梯度$i_v = 1$；切片內非飽和部分($z > d_{in}$)以總應力分析，土壤單位重為總體單位重γ_t，其基質吸力之大小隨深度改變，即$h_c = d_w - z$。

自重 W 可分解為垂直坡面 W_N和平行坡面 W_S兩個分量：

$$W_N = \left[\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \cos\beta \qquad (2.4a)$$

$$W_S = \left[\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \sin\beta \qquad (2.4b)$$

其中$\gamma' = \gamma_s - \gamma_w$。垂直滲流力 S_v可分解為垂直坡面和平行坡面兩個分量，可以式(2.5a)、(2.5b)表示：

$$S_{vN} = i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \cos\beta \tag{2.5a}$$

$$S_{vS} = i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin\beta \tag{2.5b}$$

水平滲流力 S_h 可以式(2.6)表示：

$$S_h = i_h \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \tag{2.6}$$

故滑動面上之正向力 N 及剪力 S 可以式(2.7a) 、(2.7b)表示：

$$\begin{aligned} N &= \left[\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \cos\beta + i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \cos\beta \\ &= \left[\gamma_s \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \cos\beta \end{aligned} \tag{2.7a}$$

$$\begin{aligned} S &= \left[\gamma' \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \sin\beta + i_v \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin\beta + i_h \cdot \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \\ &= \left[\gamma_s \cdot l \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot l \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \sin\beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot l \cdot \sin\beta \end{aligned} \tag{2.7b}$$

除以 $l \cdot \sec\beta$ 可得到滑動面上之正向應力及剪應力，如式(2.8a) 、(2.8b)：

$$\sigma = \left[\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \cos^2\beta \tag{2.8a}$$

$$\tau = \left[\gamma_s \cdot d_{in} + \gamma_t \cdot (d_{cr} - d_{in})\right] \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + \gamma_w \cdot d_{in} \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \tag{2.8b}$$

代入衍伸莫爾-庫倫破壞準則：

$$\tau_f = \left[c' + (u_a - u_w)\tan\phi^b\right] + (\sigma - u_a)\tan\phi' \tag{2.9}$$

可推導臨界滑動深度 d_{cr} 為:

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma \cos^2\beta\left(\tan\beta - \tan\phi'\right)} - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1\right) \cdot d_{in} - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan\beta}{\tan\beta - \tan\phi'} \tag{2.10}$$

由 $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c \tan\phi^b$ 、 $h_c = d_w - d_{cr}$ ，可將式(2.10)改寫為：

$$\left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan\phi^b}{\gamma \cos^2\beta\left(\tan\beta - \tan\phi'\right)}\right] \cdot d_{cr}$$

$$\frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot tan\emptyset^b}{\gamma cos^2\beta\left(tan\beta - tan\emptyset'\right)} - \underbrace{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1\right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲流}} - \underbrace{\frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{tan\beta}{tan\beta - tan\emptyset'}}_{\text{水平滲流}}$$

(2.11)

考慮淺層滑動情形，不考慮水平滲流的影響並忽略入滲對土壤單位重的改變，可將式(2.8a) 、(2.8b)改寫為：

$$\sigma = \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta \tag{2.12a}$$

$$\tau = \gamma_t \cdot z \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \tag{2.12b}$$

所對應之安全係數(FS)為:

$$FS = \frac{c_t + \gamma_t \cdot z \cdot \cos^2 \beta}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot z \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} + \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \tag{2.13}$$

當 $z = d_{cr}$ 時 FS = 1.0，則式(2.13)可轉換為:

$$d_{cr} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} \cdot \frac{\tan\beta}{\tan\beta - \tan\varphi'} = \frac{c_t}{\gamma_t \cdot \cos^2\beta(\tan\beta - \tan\varphi')} \tag{2.14}$$

由 $c_t = c' + \gamma_w \cdot h_c(z)\tan\phi^b$ ，可將式(2.14)改寫為：

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z)\tan\varphi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2\beta(\tan\beta - \tan\varphi')} \tag{2.15}$$

式(2.15)中基質吸力隨深度的分布 $h_c(z)$ 可由 1-D 滲流分析解得，並代入式(2.15)進行迭代計算得到 d_{cr}，此架構為進行無限邊坡因降雨入滲引致淺層邊坡滑動之基礎，因入滲引起基質吸力改變為時間之函數，因此稱為具依時特性之滑動機制。

式(2.11)中若忽略基質吸力、基質吸力摩擦角與垂直滲流影響，將入滲轉換為孔隙水壓力，則其破壞模式即為深層滑動，相同架構可建立具依時特性之滑動機制，此部分將於研究初期推導完成，並以元素試驗加以驗證。

2.1.4 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論

傳統無限邊坡深層滑動分析，以圖 2.6 所示其安全係數計算為:

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin\beta\cos\beta} + (\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w r_u}{\gamma_{sat}}) \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \tag{2.16}$$

式中 $r_u = \frac{h_w}{d_{cr}}$ 為孔隙水壓比，h_w 為地下水位上升之總水頭高，包含靜水壓力與滲流引致之孔隙水壓。

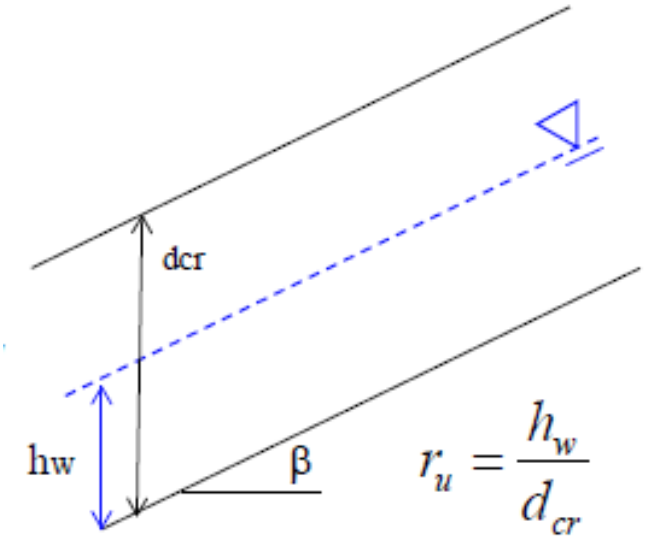


圖 2.6 深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析圖

不考慮平行滲流時($r_u = 1.0$)，則式(2.16)可簡化為:

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} d_{cr} \sin\beta\cos\beta} + \frac{\gamma' \tan\phi'}{\gamma \tan\beta} \tag{2.17}$$

式中 γ' 為滑動面土壤浸水單位重。考慮平行滲流時，則 r_u 大於 1，造成安全係數降低直至破壞，其應力變化如圖 2.7 所示(Anderson and Sitar, 1995)。

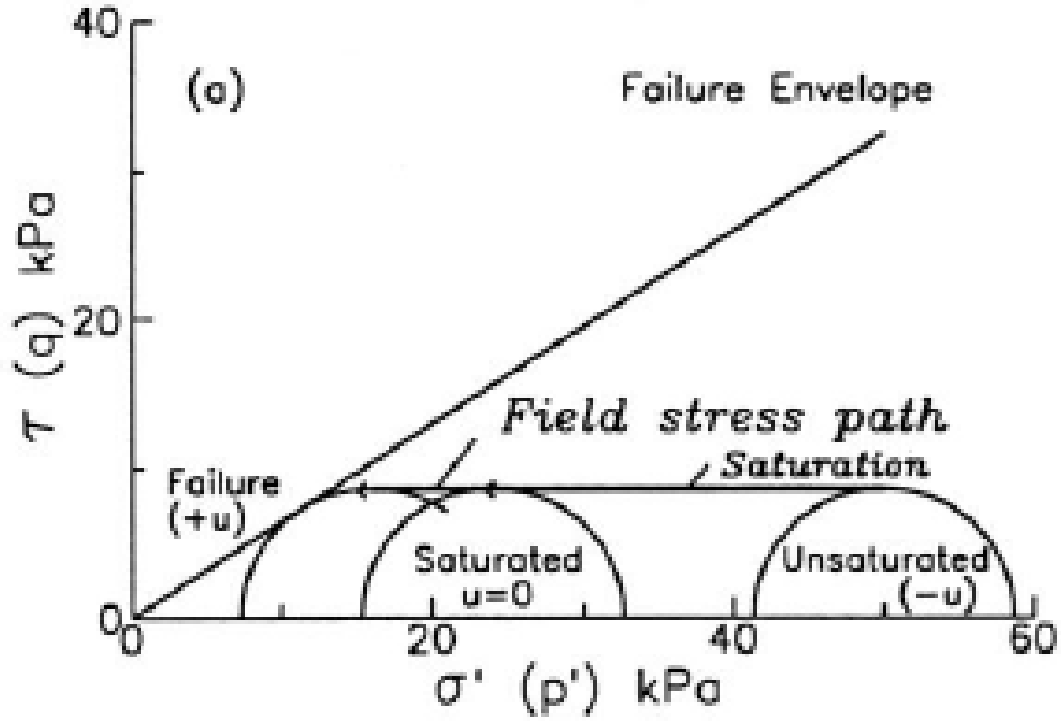


圖 2.7 深層無限邊坡滑動應力狀態(Anderson and Sitar, 1995)

整體而言，臨界滑動面土壤孔隙水壓力對深層土壤無限邊坡穩定具有重大之影響，因此掌握孔隙水壓變化可有效推估現地邊坡穩定性並作為依時預警之指標。因 r_u 為時間之函數，若可由量測資料進行統計分析，或以整體集水區水文解析，建立孔隙水壓比與降雨特徵之關聯，建立 r_u 預警值，結合現地水壓監測及深層無限邊坡水力力學耦合穩定分析理論，可作為依時預警之架構。

2.1.5 二維水力力學耦合數值分析

由於無限邊坡分析僅適用於一維案例，且無法得到位移分佈、大小與方向以及時間歷時，不利於監測點決定及位移量預測，因此本研究將進行結合土中入滲滲流分析及飽和土層非線性有效應力分析，利用相同的網格，於進行滲流分析時，將孔隙水壓傳遞給相同網格之土壤進行力學分析，滲流分析之結果將用於更新飽和土壤之彈性及強度，此程序可近似模擬水力力學耦合耦合分析。

為進行初始非飽和土層水力力學耦合分析，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)進行初始非飽和到飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且力學計算中考慮土壤孔隙水壓力改變對有效應力之影響，更新土壤彈性參數及強度，模擬初始非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程。

分析時以修正之 Mohr-Coulomb 彈塑性組構模式，考慮其剪力強度($\tau^{\max}$)為:

$$\tau^{\max} = (\sigma - u_a)\tan\phi + S_w(u_a - u_w)\tan\phi + c' \tag{2.18}$$

式中S_w 為水之飽和度，基質吸力($u_a - u_w$)以P_c 代表，其與水飽和度之關係以 van Genuchten (1980)建議之關係式表示如下:

$$P_c(\mathrm{S}_w) = P_0(S_e^{-1/a} - 1)^{(1-a)} \tag{2.19}$$

式中a 為土壤常數，S_e為有效飽和度，其定義為:

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \tag{2.20}$$

式中S_r 為土壤殘餘飽和度，低於此值土壤水力與力學特性不再變化；P_0 參考基質吸力，其值為:

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \tag{2.21}$$

式中ρ_w 為水之密度，α 為土壤常數。

非飽和滲透係數亦以常用之 van Genuchten (1980)準則表示，其與相對飽和度之關係為:

$$k_r = S_e\left[1 - (1 - S_e^{(1-a)})^a\right]^2 \tag{2.22}$$

式中k_r為相對滲透係數，不同飽和度滲透係數($k(S_e)$ 與飽和滲透係數

k_{sat} 關係為:

$$k(S_e) = k_r * k_{sat} \tag{2.23}$$

分析時選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，設定初始基質吸力，初始飽和度為滑動土層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

以甲仙監測場址二維維水力力學耦合分析為例，該場址分為崩積層(Colluvium)及基岩(Bedrock)，以圖 2.8 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測上下邊坡交界處不同深度之反應。

模擬初始階段孔隙水壓及水分子流動向量如圖 2.9 所示，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolatation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，其值與深度相近，來源為靜水壓，第二階段為當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流大幅增加，ID05 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 2.10 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動，此可由 ID05 地表位移與傾角歷時(如圖 2.11 所示)與不同深度達到飽和時產生對應之運動量得到驗證。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，上邊坡 ID05 預測於持續降雨入滲下於 $2.2*10^5$ 秒(約 2.54 日)產生滑動，且此時土層均達到飽和，且地表於 $1.5*10^5$ 秒(約 1.6 日)前開始有顯著傾角變化，且傾角為先正(順時針)後負，此因滑動面由淺層轉為深層，深層滑動量較大時淺層所測之角度轉為逆時針。

2.1.6 邊坡依時預警架構

依時性邊坡預警系統可分為無限邊坡及二維水力力學分析，無限邊坡之依時預警以下列分析結果為例，若不同時間之水頭分佈及破壞包絡線如圖 2.12 所示，破壞發生於地表飽和後 42 小時，滑動面深度為 1.5m，基質吸力與體積含水量之關係可由實驗結果或 VG model 推估，在 0.75m 深度，以式 2.16 推估之破壞過程體積含水量依時變化如圖 2.13 所示，由破壞時間(42 hr)往前推算可決定不同時間所對應之體積含水量，若以破壞前 24 小時為預警時間，則所對應之體積含水量為 0.22，可由現地於 0.75m 量測之含水量作為發布預警作為之依據，而不同階段預警值亦可由圖 2.13 推估。

而二維案例以甲仙場址上邊坡為例，由 vG model 可推估其體積含水量變化，深度 1.5m 處含水量歷時如圖 2.14 所示，推估破壞時間為 61 小時，因此往前推算 24 小時所對應之體積含水量為 0.52，因此時已接近飽和，因此其數值較不可靠，此乃因所選場址土層厚度僅約 2.5m，且地下水位位於土層底部，破壞型態較接近平行滲流引致之深層滑動，但由地表傾度觀測結果(如圖 2.15 所示)，滑動破壞前 24 小時其地表傾角開始顯著變化，因此此類邊坡較適宜以地表傾角作為訂定依時預警之物理量。

由無限邊坡與二維分析結果顯示非飽和水力分析中之滲透係數對破壞時間預測具有重要影響，但是此類參數求取不易，且會受降雨前地下水位或基質吸力大小之影響，因此相當複雜，而解決途徑之一為於降雨時進行現地監測水分變化，由其表層入滲流況推估，並可據以更新破壞時間推估曲線，此為無線監測模組中分層含水量監測所具有之功能。

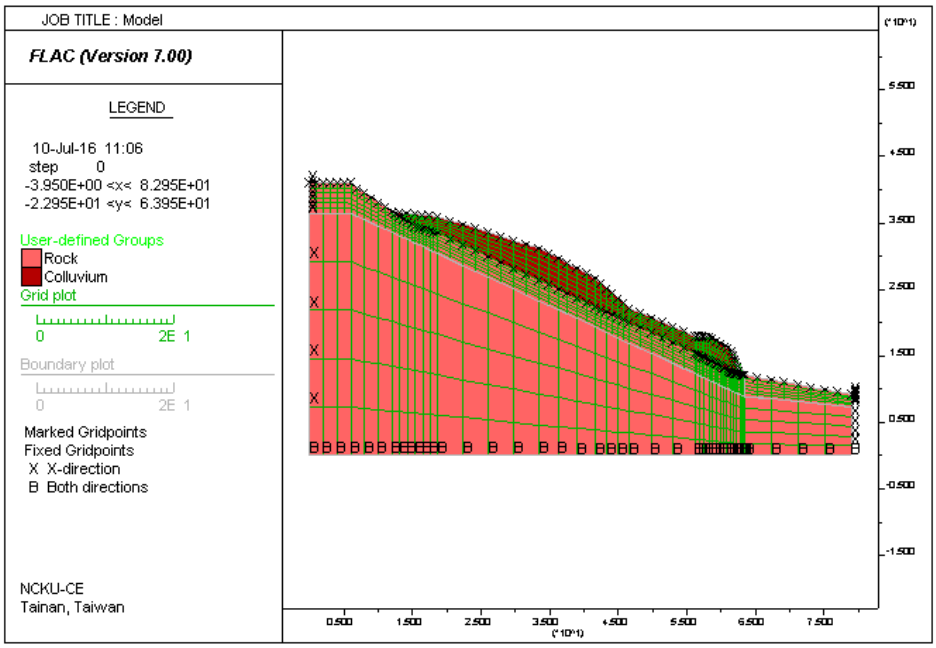


圖 2.8 數值分析模型

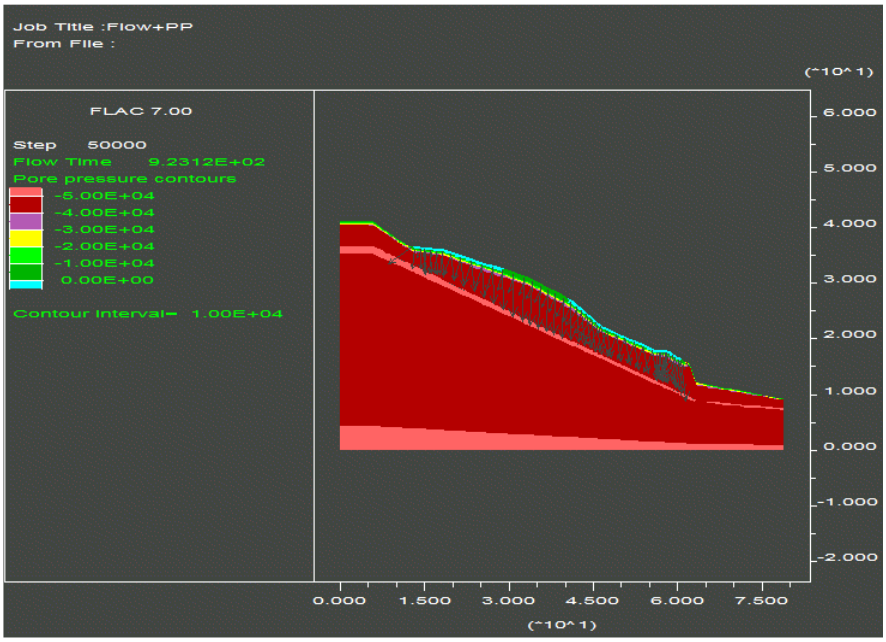


圖 2.9 入滲開始後 900 秒後孔隙水壓分布與流動向量

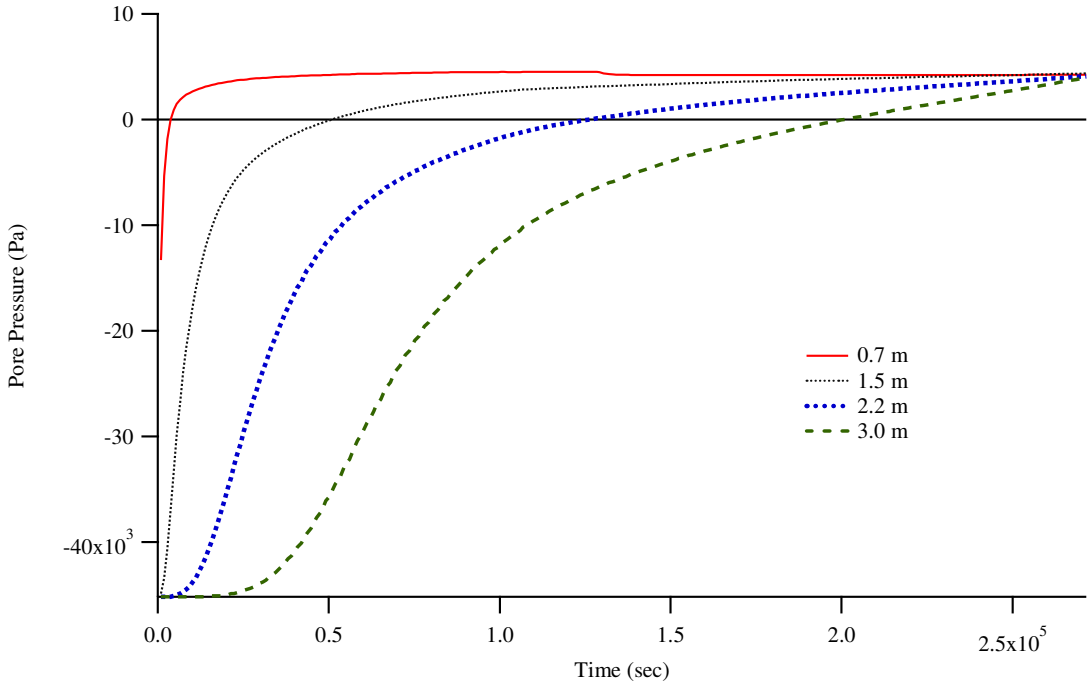


圖 2.10 ID05 位置預測孔隙水壓歷時

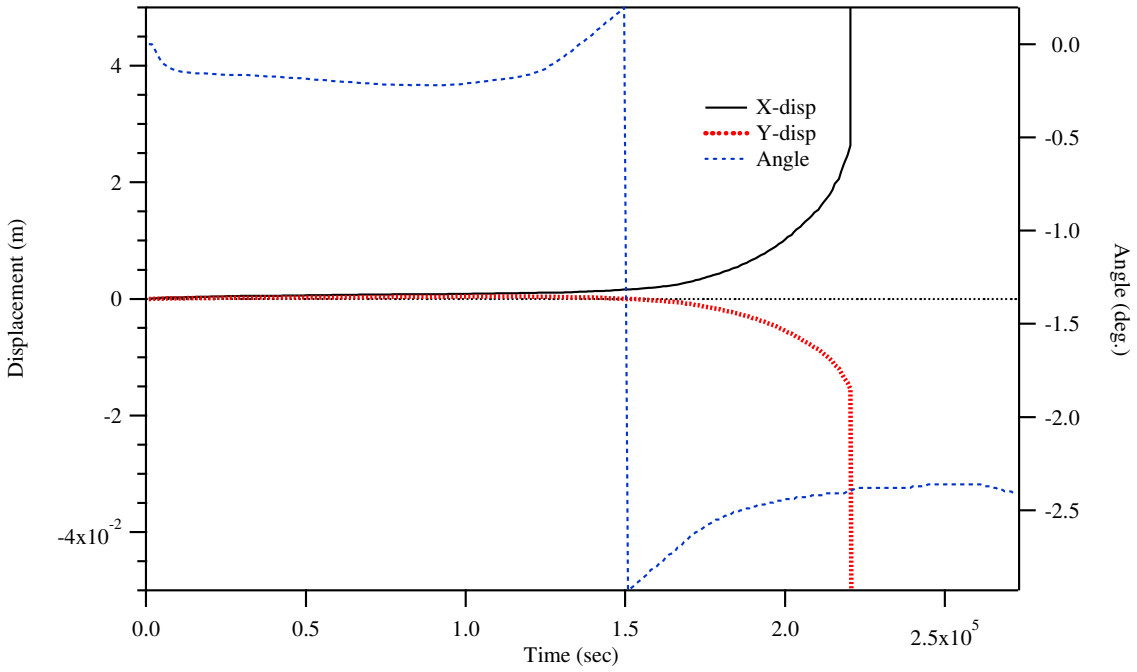


圖 2.11 ID05 位置預測地表運動歷時

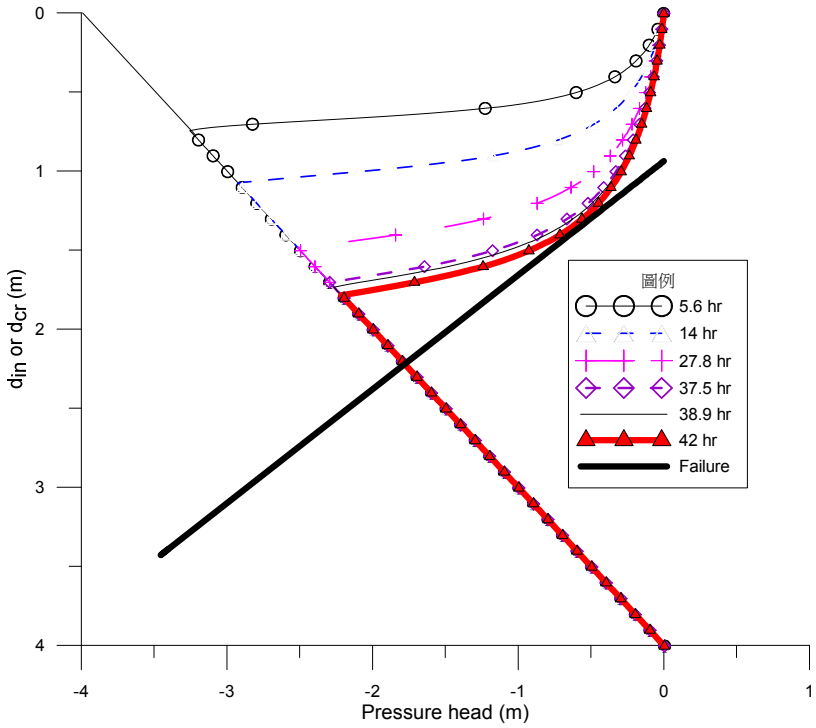


圖 2.12 室內模型試驗壓力水頭與破壞包絡線

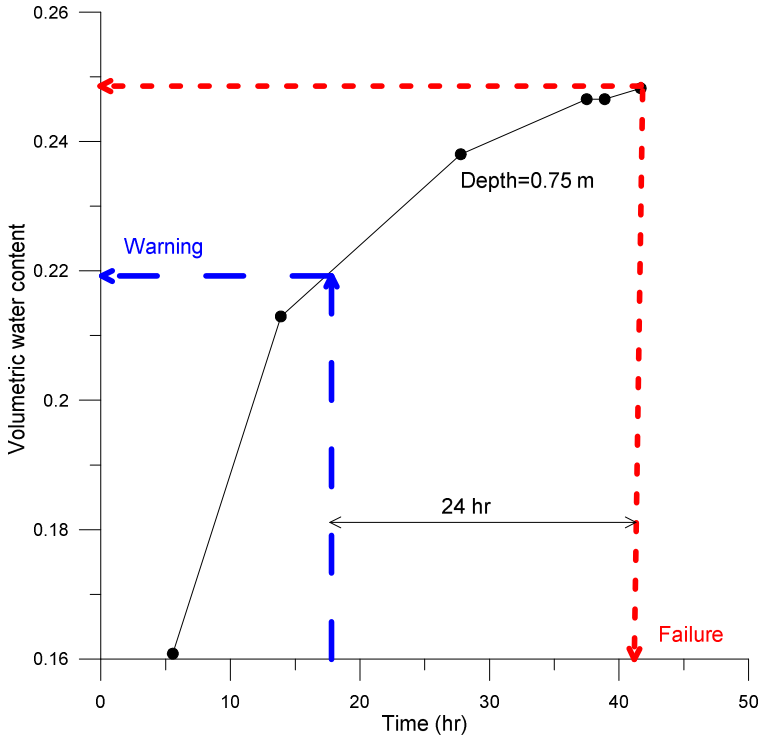


圖 2.13 深度 0.75 m 體積含水量變化及依時預警概念

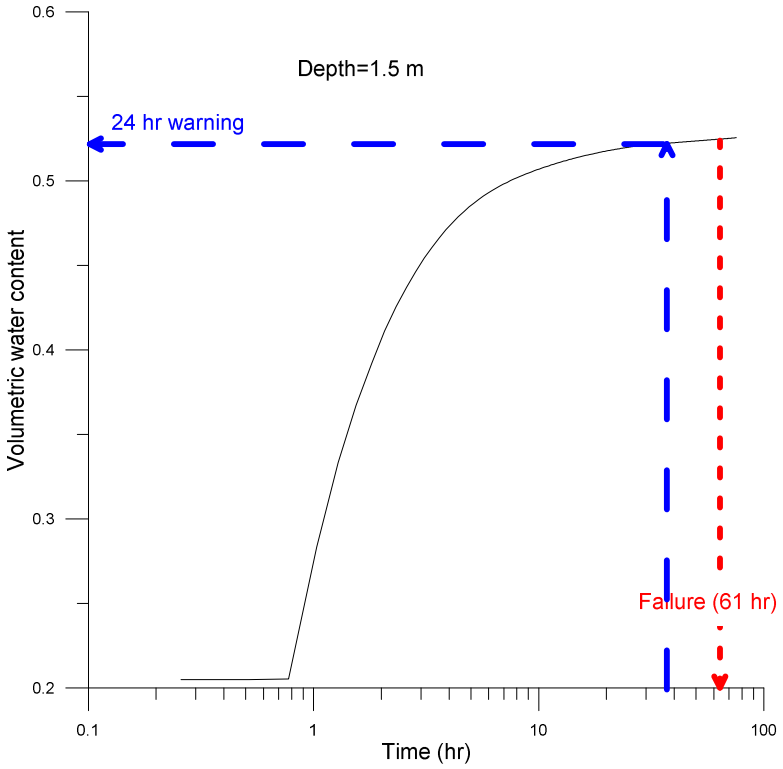


圖 2.14 甲仙上邊坡深度 1.5 m 體積含水量變化依時預警概念

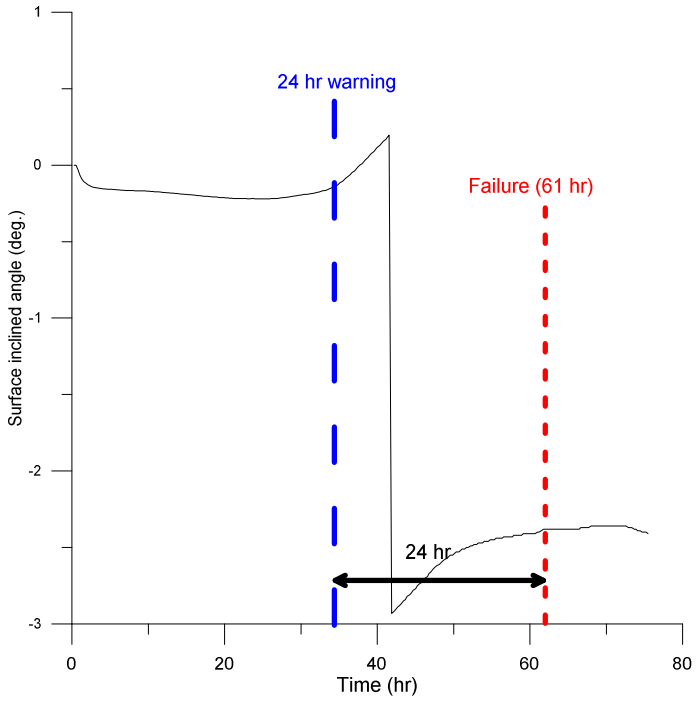


圖 2.15 甲仙上邊坡表面傾角變化依時預警概念

若現地符合無限邊坡條件，則可由現地土層參數及量測推估之滲透係數推估滑動深度及滑動之時間。若現地須進行二維分析，則由初期以合理假設之參數進行耦合分析，求得地表傾角與運動量分佈，作為無線監測模組安裝位置之依據，安裝時依滑動面選取包括最大運動及無顯著反應處，由初期無顯著破壞之監測值可先進行模式修正，雨季時由即時表層入滲及運動量據以修正依時預警歷時曲線及滑動面位置，相關不同階段之門檻值可由管理單位需求進行後續制定。由相關耦合分析結果顯示，以表層入滲行為與表層運動量監測推估破壞過程理論上可行，相關表層無線監測模組可依此成果進行硬體規劃。相關理論於模型與數值分析均已得到驗證，此架構應具一定之可信度。

應用於深層滑動依時預警時須進行適度修正，針對一維無限邊坡深層滑動，其滑動面仍以極限平衡分析，但滑動面深度與時間則與滑動面所在孔隙水壓變化及入滲後飽和土層滲流力大小有關，式(2.18)中之平行滲流力像須加以考慮，即飽和土層中除靜水壓力外尚須考慮原有飽和土層滲流引致之超額孔隙水壓力之影響，基質吸力效應則可忽略不計。而二維分析則需假設孔隙水壓上升條件或是包含上游邊坡入滲至飽和土層之影響，相關入滲分析與非飽和入滲相同。

因孔隙水壓力與深層邊坡穩定具學理之關聯，因此連結孔隙水壓變化與降雨特徵為改善現有純以降雨為指標之預警之關鍵，相關方法包括: (1)進行集水區降雨入滲分析及(2)以長期觀測迴歸孔隙水壓與降雨參數(如降雨強度、累積降雨量、降雨分布及延時等)關聯性，本年度將以降雨入滲分析為主，但所發展之監測模組可提供長期監測，作為統計回歸之依據。

2.2 無線監測系統架構

無線土層監測系統係由微控制器結合各感測器以及無線傳輸模組，裝置於待測地點並持續透過無線傳輸將各感測器之量測資料送出。無線無線土層監測系統主要組成包括感測元件(sensor)、微控制器(MCU)及通訊單元，此三部分須以韌體進行整合，另外還包括附屬之外構、電源及接收端。本計畫以 Arduino 為監測端之微控制器，選擇不同感測元件，發展不同監測目的之感測模組，規劃有觀測降雨入滲之分層土壤水分計、地表傾角之高精度傾度儀(inclinometer)、開口豎井水位之壓力式液位計(liquid level sensor)等，並以可形成區域通訊網路之 Xbee 建立感測模組間及與接收端通訊，經由接收端連結現有 3G 通訊網路，達到遠端監測之功能。

系統架構示意圖如圖 2.16 所示，土層監測模組包含兩種型態，分別為客戶端以及伺服器端，由客戶端將量測之現地資訊發送給伺服器端，伺服器端統一收集各節點資料後，透過 WCDMA(3G)/GSM(2G)無線通訊模組將資訊上傳至遠端伺服器，各監測模組同時備有記錄卡備份現地資料，達到對邊坡即時、無線、自動化監測目的。

2.3 系統感測器

本研究主軸為研發一同時適用於非飽和與飽和土壤，用以監測因降雨造成淺層邊坡滑移之土層監測模組。在消費性電子產品大量使用下，微機電系統(Micro-Electro Mechanical-Systems，MEMS)感測器近來迅速發展，其具有體積微小、低耗電、低成本以及通訊介面簡易等優點，系統感測器之種類與功能如下:

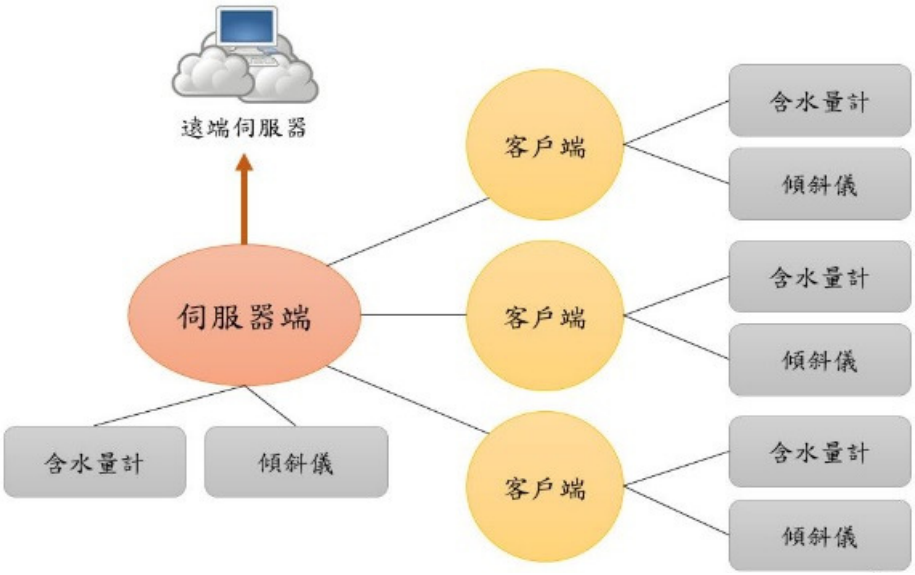


圖 2.16 系統架構示意圖

(1) 電容式土壤水分計(Capacitance moisture sensor)：以非接觸式量測周圍環境電容變化，透過感測器內嵌之 ADC (Analog to Digital Converter)進行數位輸出，間接測得非飽和土壤之含水量。

(2) 傾斜儀(Tiltmeter)：量測單軸向傾斜量變化，支援比例類比電壓與數位 SPI 輸出，提供軸向上高精度、靈敏度之傾斜角量測。

(3) 類比式壓力計(pressure sensor): 以電子薄膜式壓力計，量測開孔豎井液位，以高精度 AD 模組與現有模組連結。

2.3.1 電容式土壤水份計

目前市售之研究級現地土壤水分計成本較高，且尺寸不易整合於監測模組，因此本研究透過量測土壤介電係數，間接量測土壤含水量變化，以評估土壤內基質吸力。

本研究採用 Catnip Electronics 設計製作之電容式土壤水份計(圖 2.17)，其具有低成本、高解析度與高重複性等優勢，並採用 I^2C(Inter-Integrated Circuit)通訊界面與微控制器與周邊設備整合。I^2C 連接方式如圖 2.18，至少須有一主控端(Master, 通常由微處理器擔

任)，負責發送時脈與位址訊號，所有 I^2C 元件之資料線(SDA)、時脈線(SCL)連接，具有可多組元件串聯、連接線數量少等優勢。



圖 2.17 電容式土壤水份計

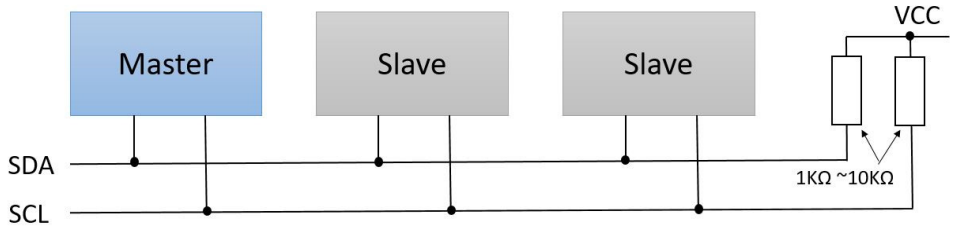


圖 2.18 I^2C 連接方式

土壤水份計可進行分佈式地層含水量量測，透過多組電容感測裝設於探棒表面(圖 2.19)，即可同時監測探棒長度內土層不同深度之含水量，亦可提供降雨時浸潤面隨時間/降雨量的變化。圖 2.20 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度之關係圖，土壤體積飽和度為在控制體積含水量下，固定土水比例求得，圖中可見 Catnip 具備足夠之重複性與一致性。

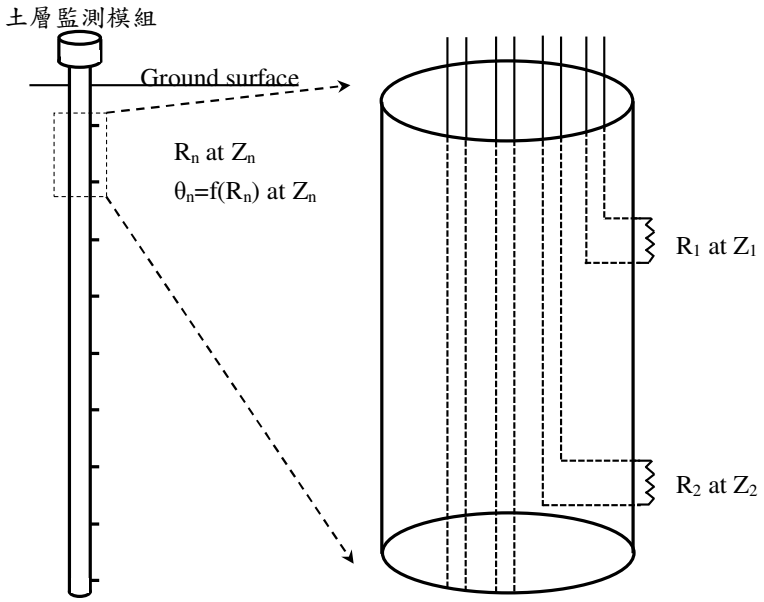


圖 2.19 土層監測模組與分佈式含水量監測示意圖

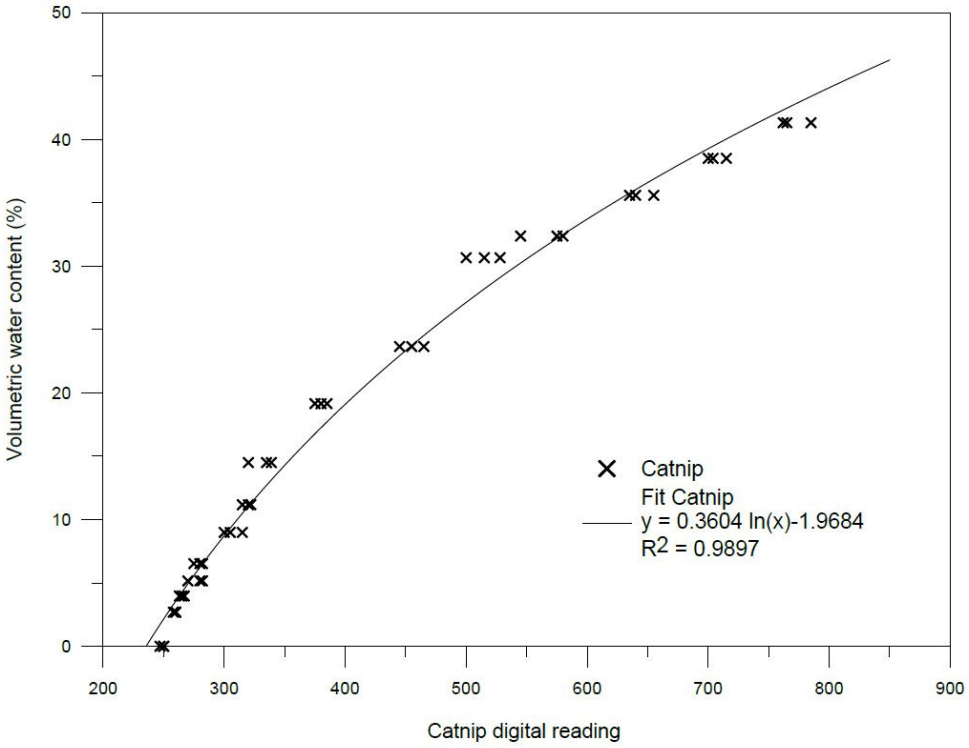


圖 2.20 Catnip 數位訊號輸出與土壤體積飽和度關係圖

2.3.2 傾斜儀

本研究使用之傾斜儀為 Murata Electronics 所生產之高精度傾斜儀 SCA103T(圖 2.21)，採用差動量測原理補償雜訊效應及誤差，具有極佳的耐震力，能在車輛、航空、建築機械以及手持裝置中提供穩定的量測功能。量測範圍±15 度，解析度可達 0.001 度(10Hz BW 類比輸出)，支援比例類比電壓與序列周邊介面 (Serial Peripheral Interface Bus, SPI) 數位輸出，SPI 係透過 4 條連接線與微控制器連接，分別為資料輸入線(MISO)、資料輸出線(MOSI)、序列時脈線(SCK)以及晶片選擇線(CS)，透過不同的晶片選擇線微控制器可同時運行多組 SPI 設備。

傾斜儀工作電壓 5V 與多數微控制器相同，可直接以 Arduino Uno 內嵌之穩壓晶片供給電源。將傾斜儀固定於土層監測模組上，長時間監測因土層滑移所造成之傾斜角改變量。SCA103T 透過 Arduino Uno 進行之類比電壓比例輸出標定(圖 2.22)，結果顯示 SCA103T 具有足夠之線性、重複性以及解析度。



圖 2.21 SCA103T 傾斜儀

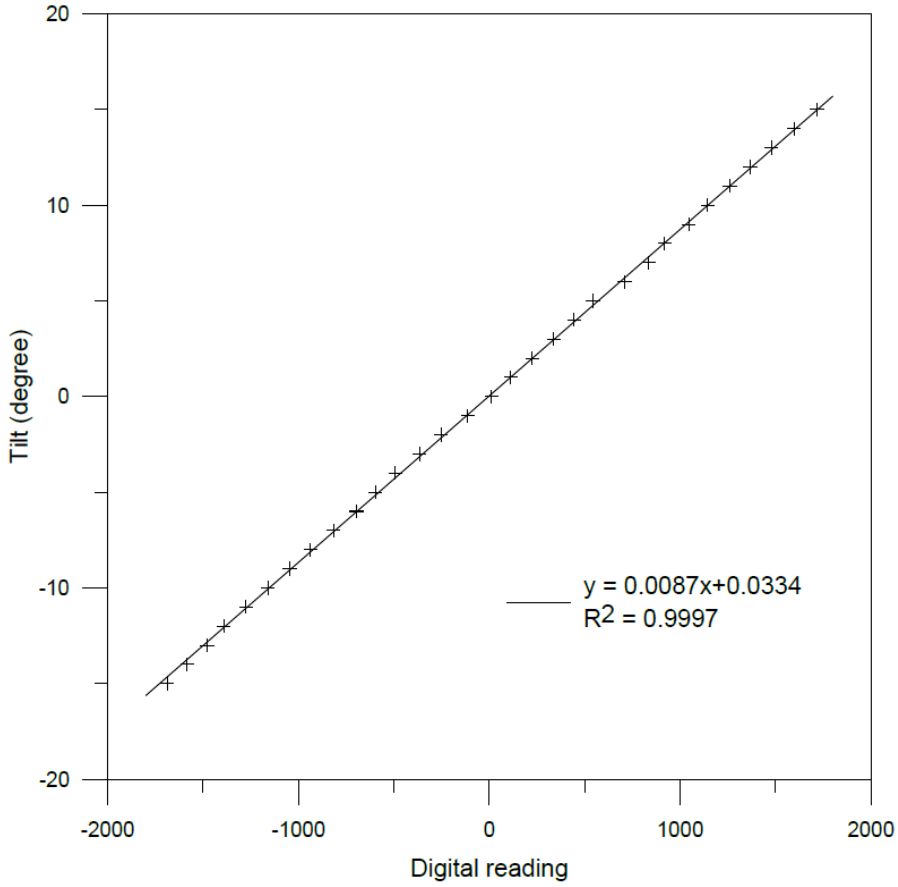


圖 2.22 傾斜儀類比電壓比例輸出標定

2.3.3 類比式壓力計

本計畫為量測特定土層深度之孔隙水壓力，以量測開口豎井水位換算孔隙水壓力，豎井液位計採用沉水式液位計(如圖 2.23 所示)，其具備有以下幾點特色，包含(1) 內置微型信號處理電路，可進行遠程傳輸；(2) 抗干擾強，長期穩定性好；(3) 防結露，防雷擊設計；(4) 316 不銹鋼隔離膜片；(5) 堅固密封、高可靠、高精度等，綜合上述各項特點，故選擇該儀器作為本次計劃量測邊坡水位之感測器。此感測計為類比輸出，因此所發展之感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)，此計畫以 16bit 之 A/D converter 模組，以確保解析度達 1 cm 以下。



圖 2.23 沉水式液位計

2.4 系統組成

本研究採用之無線傳輸模組、數據紀錄模組、即時時間模組以及微機電感測器，皆配置於客製化電路板如圖 2.24 所示，用以直接與微控制器連接，並連同電源供應模組固定於防水耐侯之電子盒中，其下方連結分佈式土壤水份計。透過客戶端與伺服器端建構之無線網路，以及感測器擷取之數據，可進行區域即時邊坡監控，其系統運作示意圖如圖 2.25 所示。其中無線土層監測模組之部分包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)數據紀錄、(4)即時時間、(5)感測器，除感測器外各部分說明如下。

2.4.1 微處理器

微處理器(Micro Control Unit, MCU)，是一單晶片的微控制器，基於開放原始碼的開發平台，允許使用者自行發展符合特別需求的模組，建構簡易輸入/輸出的控制板，可進行類比/數位的量測或控制，整合 SPI、UART、I2C 與 GPIO 等通訊界面，可與不同之感測器/控制板進行連結，常見具備開放原始碼特性之開發版如基於 ATMEGA328P 晶片的 Arduino UNO、Mega，基於 Linux 的 Raspberry Pi 與基於 ESP32 晶片之 lolin、ESPUINO-32。

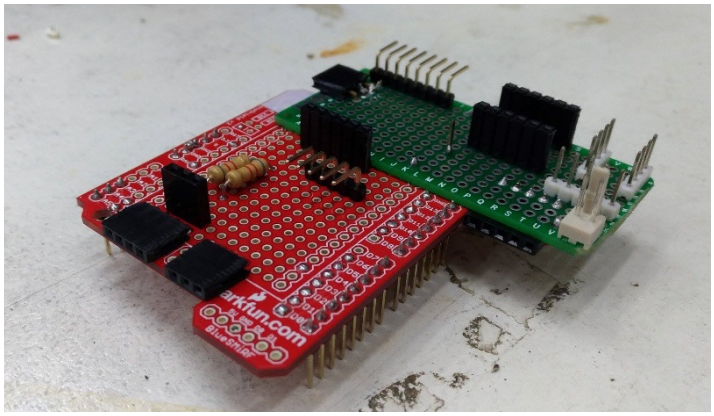


圖 2.24 客製化電路板

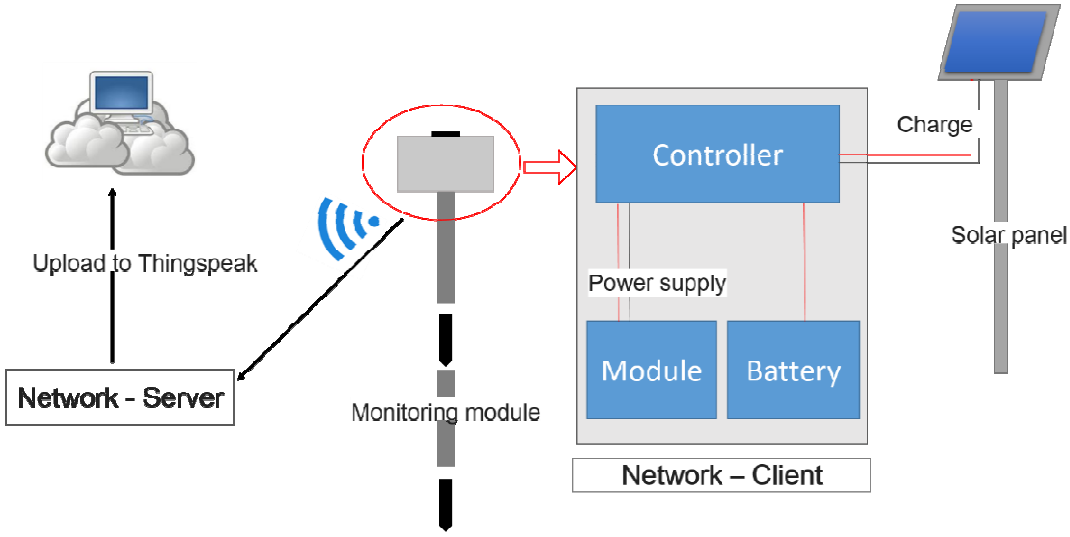


圖 2.25 系統運作示意圖

透過微控板可將程式邏輯帶入監測架構中，藉由簡易之迴圈、布林參數可將監測架構升級為智慧化感測，可由使用者自行設定擷取頻率或寫入特定觸發條件讓微控板進行特定動作，作為智慧型無線感測模組之基礎，MCU 之選擇可基於接腳數量、省電、系統穩定性與開發程式撰寫的難易程度進行抉擇，於智慧型無線模組中可比喻為大腦，進行所有電子元件之連接、監測數值之取得、傳送與邏輯判斷等工作；。

Arduino 為一系列基於開放原始碼發展出來的 I/O 介面控制板，並使用 C 語言的開發環境，可與電腦透過 USB 介面連結，撰寫及燒錄韌

體以更改執行程序，使其開發門檻相對於市面上其他微電腦及微處理器降低許多，同時增加監測模組功能客製化的彈性。

本研究採用 Arduino Uno(圖 2.26)為系統控制器，其搭載 Atmega328 微處理器，內含 32 KB Flash memory、2 KB SRAM、1KB EEPROM，其時脈達 16 MHz，且具 14 支數位 I/O 接腳，包含一組 SPI 介面以及一組 I^2C 介面，其中 I2C 支援單一匯流排最多可和 112 個節點通訊，足以滿足與模組間數位資料傳輸。另外備有 6 支類比訊號接腳，可透過微控制器內含之 ADC 將類比訊號轉換成數位訊號，亦可作為數位 I/O 接腳使用。Arduino UNO 長寬分別僅 69 mm 及 54 mm，符合土層監測模組於現地安裝的尺寸限制，且其工作電壓 5V 可直接與大多數電子元件連結，輸入電壓介於 7~12V 也適用多數市售充電式鋰電池。

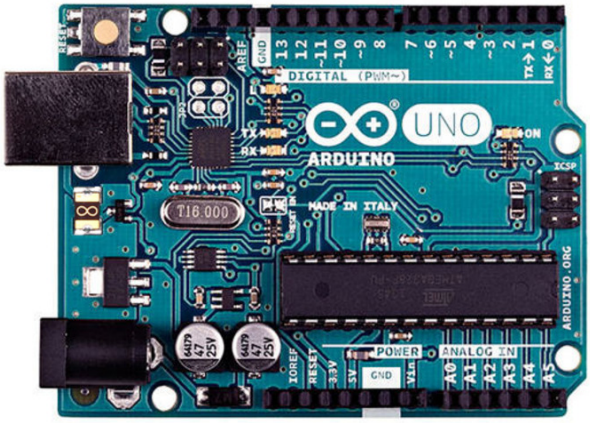


圖 2.26 Arduino Uno

2.4.2 無線傳輸模組

本以模組化之無線傳輸平台，於監測場址建立網路傳輸陣列收集各監測站量測數據，並透過 WCDMA(3G)、GSM(2G)等無線通訊技術將現地監測資料上傳至遠端伺服器。由於邊坡滑移多發生於長延時及高強度降雨時，而水對電磁波的傳遞具有相當程度的屏蔽干擾，因此無線傳輸平台的選擇須將穿透屏蔽能力納入考量，而傳輸距離以及傳輸網路陣列則可降低中繼站數量，降低能源與成本門檻。

Digi International 公司製造的 xbee 採用低速率無線個人區域網(WPAN, Wireless Personal Area Network)，具有多種頻段訊號發送能力，可因應環境條件選擇高頻或低頻發送訊號，低頻訊號傳輸較不受水的訊號屏蔽所影響。支援雙向傳輸，可藉此建立土層監測模組間的傳輸網路陣列，以下條列 Xbee 之特點。

(1) 傳輸距離長且穿透性佳: 節點間戶外傳輸距離達 750 m，且於坡地植披中穿透性佳，使監測站的佈設極為彈性，涵蓋監測區域所需之監測站數量也得以最小化，大幅降低材料成本及安裝便利性。

(2) 支援 ZigBee 通訊協定: ZigBee 是在 802.15.4 通訊協定的標準上，加入路由和聯網功能，其特點是連線簡易、低數據傳輸率(250Kbps)以及低功耗(傳輸時 63mW)，且可支援高達 65,000 個網路節點，適合家庭網路、工業自動化和醫療看護等應用，被視為物聯網最廣泛的協定之一。

(3) 具有多種網路拓樸: 拓樸(topology)即網路的構成方式(圖 2.27)，網路中各節點依據在網路中的定位分為協調器（Coordinator）、路由器（Router）、終端（Endpoint）三種，協調器於一個網路中僅有一個，用以管理網路的設置；路由器負責轉發節點訊號；終端則僅具有單向傳輸功能。依據不同的傳輸協議，xbee 支援如單點對多點（Point-to-multipoint）、簇樹狀(Cluster)、網狀(Mesh) 等多種拓樸。每個節點可以擷取資料，或傳遞來自其他節點的資料。

(4) DigiMesh 為 Digi International 開發之無線傳輸協議，其特色為全功能節點建構之網狀網路，網路中任一節點皆可擷取資料及傳遞資料，大幅增加建構無線網路的彈性，本計畫透過 xbee 建構之網路中，每一個土層監測模組都是一節點，當一個網路節點被移除或是斷訊，DigiMesh 傳輸協議另其周遭的節點可透過迂迴曲折的傳輸方式以接續到其目的地。以上可確保在少數監測站因任何因素斷訊下不致丟失監測數據，提升系統耐久性及可靠性。倘若監測範圍超過單點傳輸距離時，也可增加節點以中繼站之方案擴展監測區域。

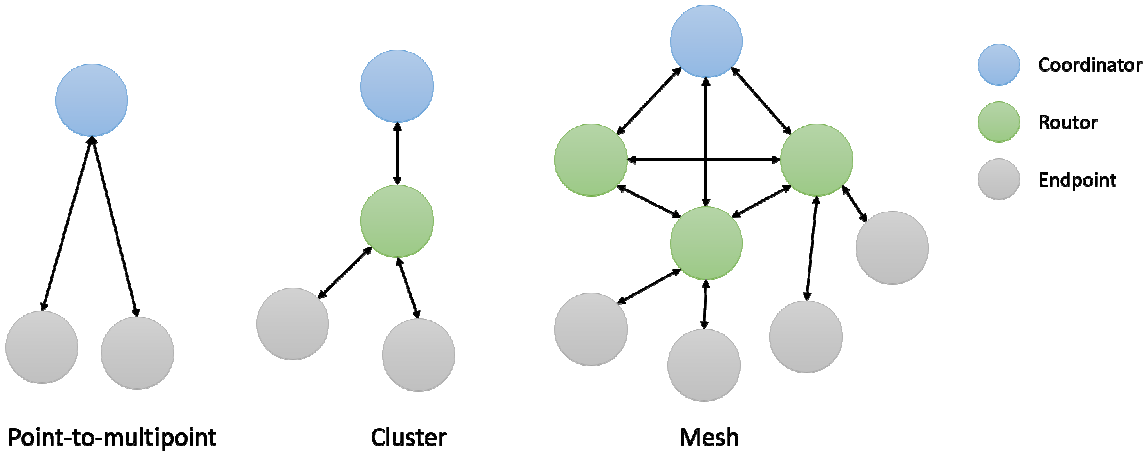


圖 2.27 拓樸示意圖

DigiMesh 同時具有節點深度睡眠模式供選擇，配合模組之觸發條件達到電源優化的目的。透過 Digi International 提供之模組溝通介面 XCTU (圖 2.28)，可對 Xbee 進行傳輸協議、節點功能、網路參數、睡眠模式等設定。於網狀網路中，每個 XBee 裝置需要使以下兩個網路參數一致以彼此溝通：(1)頻道(Channel): XBee 模組之間的無線通訊頻道 (2)個人區域網路(Personal Area Network, PAN):同一頻道內之個人網路。

Xbee 產品不同型號各自擁有不同的天線類型和功能，較常見的為 s1 和 s2 系列，而 s1 系列支援 Digi International 研發之 DigiMesh 傳輸協議。和 MCU 之間可直接經由序列埠進行資料傳遞，提升其數據傳輸穩定性。另外 Xbee 之工作電壓為 3.3V，可直接藉由 Arduino Uno 內嵌之穩壓晶片供電運作，優化模組的空間配置及電源轉換效率。綜合上述考量，本研究以 Xbee S1 pro(圖 2.29)做為無線傳輸平台，藉此建立土層監測模組間的傳輸網路陣列。

物聯網的興起使各領域累積數據量急劇攀升，開發商也因應推出各種 IoT 資訊平台以滿足資料儲存與顯示的需求。Thingspeak 為 2010 年 IoBridge 開發用以整合物聯網應用之開源平台，除了開放程式碼供使用者作專案應用外，也開放一定量之資料讀寫功能讓使用者免費使用，並透過 API(Application Programming Interface)作資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，因此本研究以 Thingspeak 作為系統伺服器。

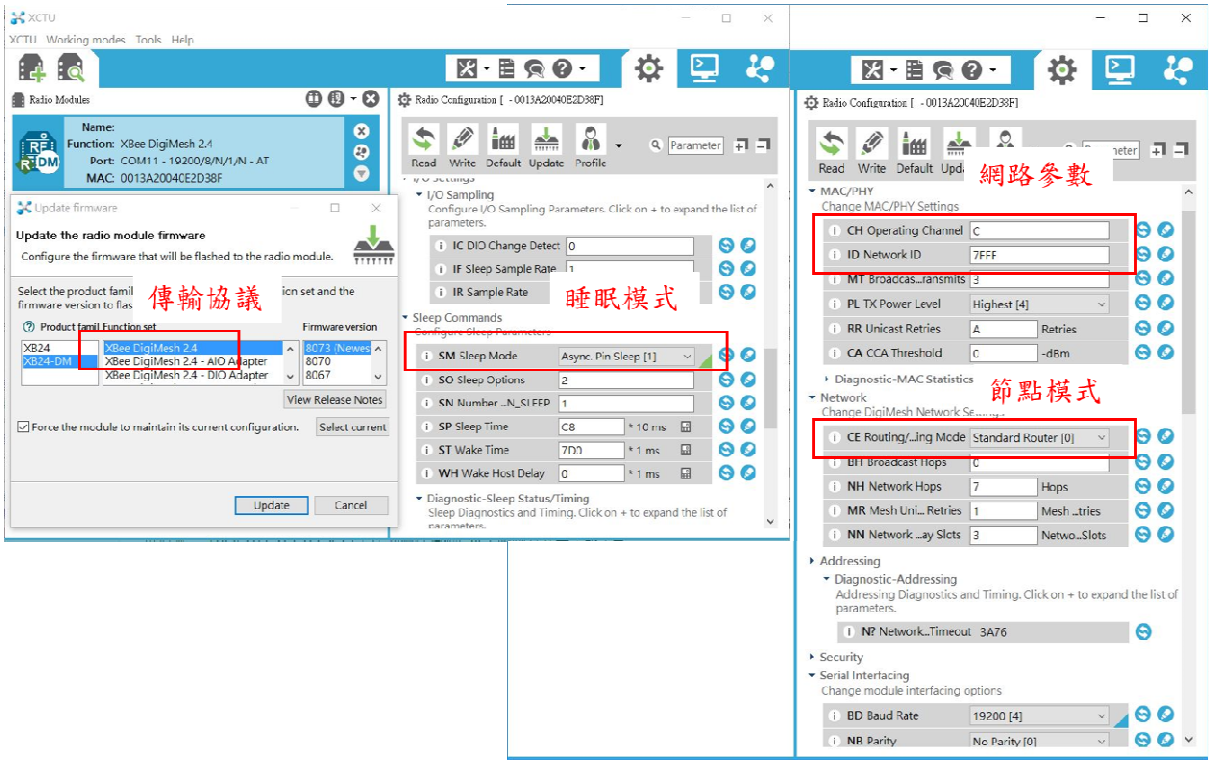


圖 2.28 XCTU 參數設定

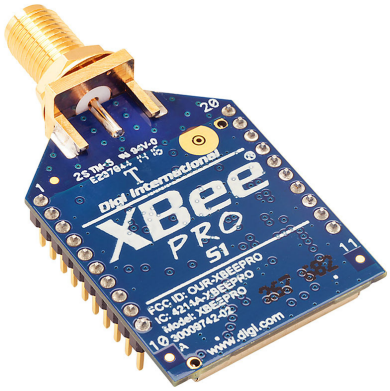


圖 2.29 Xbee S1 pro

為將感測網路蒐集到之現地數據上傳至 Thingspeak，伺服器端之土層監測模組搭載 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組—SIM5320E(圖 2.30)，以連結場址資訊與後台人員。SIM5320E 近似現今的手持裝置，具有簡訊、語音發送以及基本通話功能，且同樣以 SIM(Subscriber Identity Module)卡作為用戶身分識別。SIM5320E 由一組 TTL 邏輯電壓準位與

微控制器進行序列埠資料傳遞，相容於 3.3V 與 5V 之工作環境。其連網程序係由微控制器對其下達 AT command 操作。

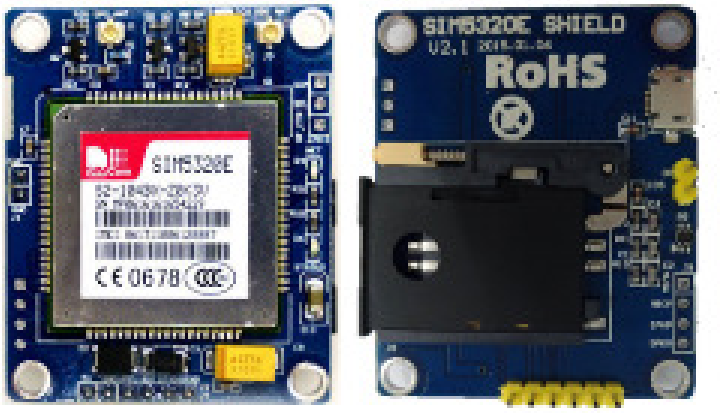


圖 2.30 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組 SIM5320E

2.4.3 即時時間模組

考量監測站間無線網路傳輸的發送及接收時間同步，土層監測模組之伺服器端與客戶端皆須運作於標準時間之下，以達成獨立計時及時間格式輸出的目的。

本研究採用之 DS3231(圖 2.31)為一低成本、高精度之即時時鐘模組(Real-time clock)，年誤差在一分鐘以內，符合土層監測模組時間精度的需求。其保存年、月、日、時、分、秒資訊，與微處理器透過 I2C 序列傳輸位址與時間資訊，並備有外接電池的獨立輸入端，即使系統斷電仍可確保時間正常計讀。DS3232 提供兩個可設置的日曆鬧鐘和支援程式設計的方波輸出，搭配 Arduino Uno 進入休眠模式後可因外部訊號觸發而喚醒的機制，達到省電功能增加系統續航力。

2.4.4 數據紀錄模組

為提供監測資料儲存安全以提供數據分析的完整性，本研究使用 Deek Robot 設計生產之 SD 卡數據紀錄模組(圖 2.32)備份土層監測資料，在遠端資料因故無法順利上傳至伺服器時，仍可藉由備份檔案得知現地量測資訊。輸出檔案以純文字檔作紀錄，包括監測站節點編號、

土層分層溫度及含水量、傾斜角度與即時時間，皆可依照所需格式進行編排後輸出，大幅簡化日後數據處理的流程。數據紀錄模組與 MCU 之間透過 SPI 進行資料傳遞。

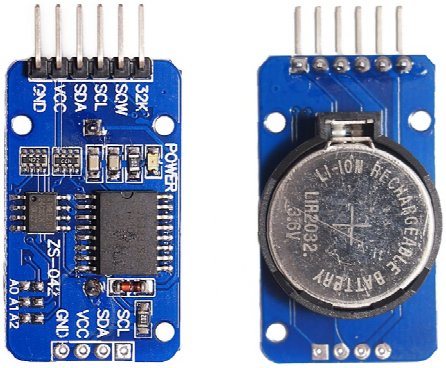


圖 2.31 即時時鐘模組 DS3231

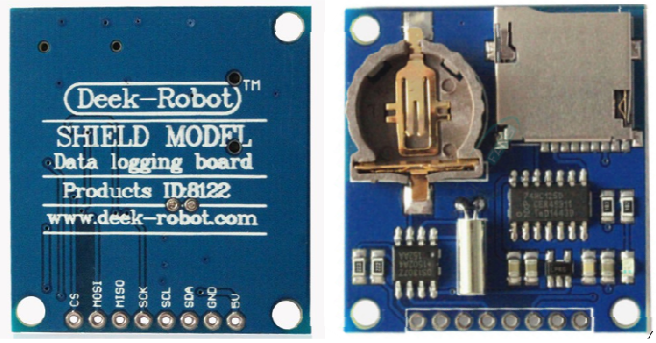


圖 2.32 SD 卡數據紀錄模組

2.4.5 電源系統

由於邊坡滑移多發生於長歷時、高強度之降雨期間，為使監測系統獨立運作達到現地長期監控的成果，本研究使用太陽能控制統搭配 18650 鋰電池組作為土層監測系統之電源系統。

系統太陽能電源控制器(圖 2.33)，搭配 10W 太陽能板(圖 2.34)，其上三組接口分別作為太陽能板電源輸入端、鋰電池電源輸入端、鋰電池電源輸出端。當日光充足使太陽能板輸入電壓高過鋰電池組輸入電壓時，將直接對鋰電池組進行充電，反之則停止充電。土層監測模組則連接鋰電池電源輸出端，直接由鋰電池組供電。

研究使用 18650 鋰電池(圖 2.35)，其直徑 18mm 高度 65mm，容量最高達 3400mAh，額定電壓 3.7V，為目前市面上能量密度最高之循環鋰電池，其高電壓輸出使其易於串接以提供微處理器之輸入電壓。土層監測模組依照現場系統空間配置可搭載 12 顆 18650 鋰電池，高電容量使土層監測模組於颱風、梅雨季時仍得以維持系統運作。



圖 2.33 太陽能電源控制器

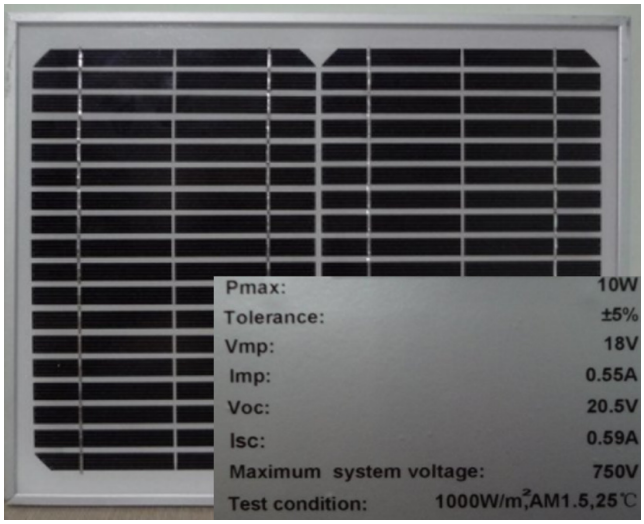


圖 2.34 10W 太陽能板



圖 2.35 18650 鋰電池

2.5 無線淺層土壤監測模組

2.5.1 淺層土壤監測模組

無線土層監測模組係由微控制器結合各感測器以及無線傳輸模組，裝置於待測地點並持續透過無線傳輸將各感測器之量測資料送出，於無線網路中扮演通訊節點的角色，可根據使用者所需或監測場址之地形限制，形成不同的拓樸(topology)以達成最佳的網路通訊效能。

Sparkfun 推出與 Arduino UNO 相容的原型擴展板如圖 2.36，可直接固定於微控制器之排針母座上如圖 2.37 所示，本研究採用該原型擴展板，並將土層監測模組上除土壤水份計外之感測器及模組固定於該原型電路板上，並設有多組含水量計排針接口，減少線材走線所佔用之體積以及接頭鬆脫之風險。所有土層監測模組皆可搭載 12 顆 18650 鋰電池作為戶外供電系統，並配合太陽能板與供電控制器提升土層監測模組續航能力，達到野外長期自動化量測之目的。土層監測模組依其具備之硬體與功能分成(1)客戶端、(2)伺服器端，關於兩者說明如下:

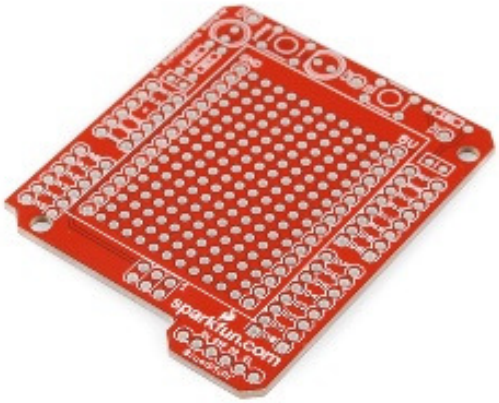


圖 2.36 Arduino Uno 原型擴展板

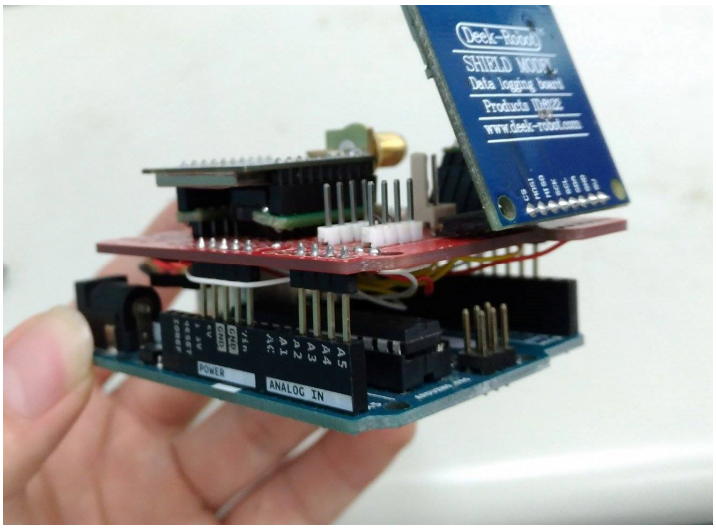


圖 2.37 擴展板與微控制器

(1) 客戶端

節點編號 node1 至 node3，於 xbee 建構之無線網路中負責對伺服器端發送量測資料，量測資料皆已透過微處理器進行校正係數之率定，其發送之量測資料包括土壤分層含水量、溫度以及土層監測模組之傾斜角，並附上節點編號供伺服器端辨識訊號來源。為避免因不可抗力之因素斷訊，致使與伺服器端之連線中斷，客戶端同時備有 SD 紀錄卡作監測數據紀錄，確保數據分析之完整性，土層監測模組客戶端之完成品及其系統組成如圖 2.38。

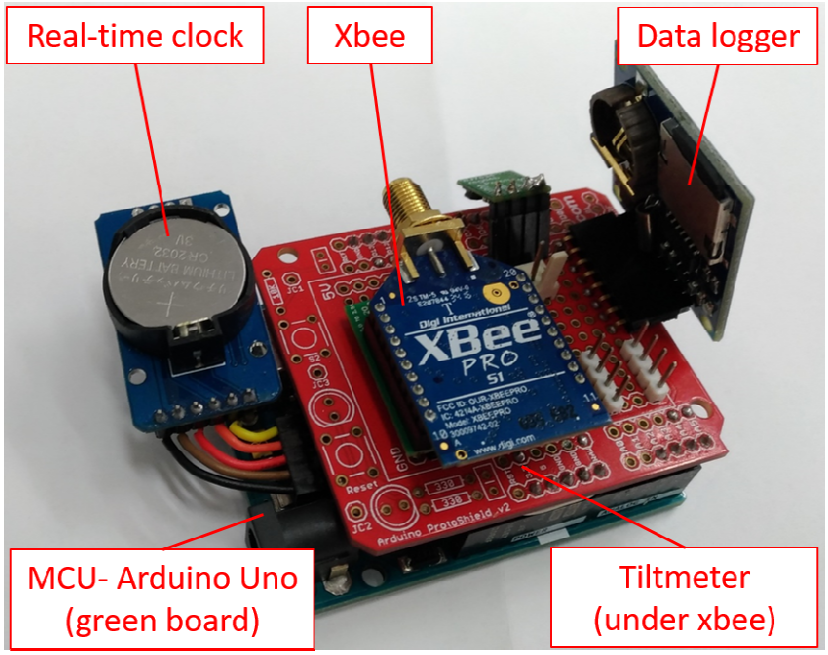


圖 2.38 土層監測模組客戶端

(2) 伺服器端

節點編號 node 0，於 Xbee 建構之無線網路中負責接收客戶端發送之監測資料，因配有 WCDMA(3G)/GSM(2G)無線通訊模組，具有和遠端伺服器連線之功能，其微處理器根據接收到之資料格式將其拆解並儲存於變數後，視使用者所需可儲存於紀錄卡，並將監測數據根據節點編號上傳至遠端伺服器，為遠端人員和現地監測情況之溝通橋樑。伺服器端具有傾斜儀以及土壤土壤水份計之排針接口，因此具備量測功能，可納入監測座標以擴展監測點位於現地之涵蓋範圍，降低系統佈設成本，土層監測模組伺服器端之完成品及其系統組成如(圖 2.39)。

2.5.2 微處理器程式流程

客戶端微處理器之程式流程依照時間軸大致可分成: (1)系統起始時間與週期設定、(2)感測器與 RTC 資料讀取、(3)SD 卡資料寫入以及(4)無線傳輸，以下就各部分詳細說明，圖 2.40 為客戶端之程式流程圖。

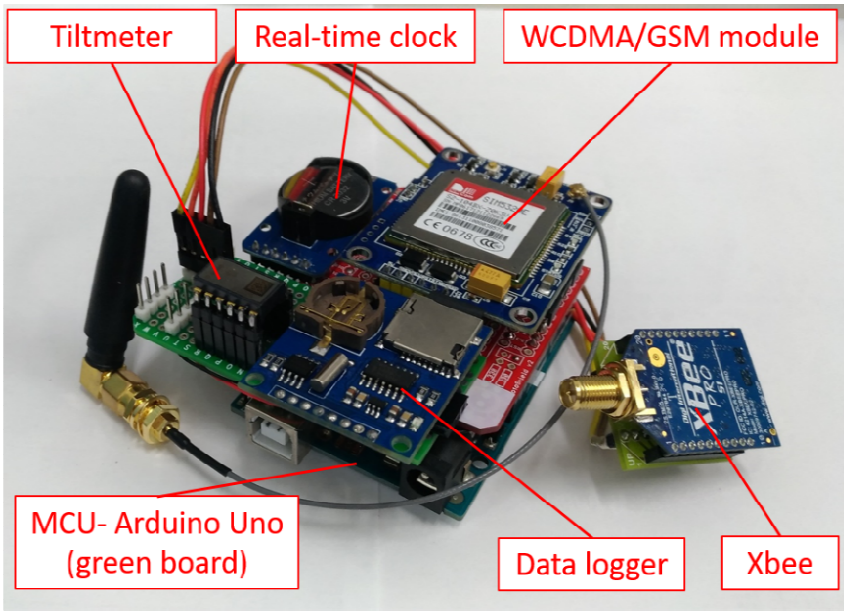


圖 2.39 土層監測模組伺服器端

(1) 系統起始時間與週期設定: 由於 DS3231 具備可程式化之方波輸出以及 2 個高精度鬧鐘設置，配合 Arduino Uno 可因外在條件觸發而從睡眠模式中被喚醒的功能，可使土層監測模組保持常態性睡眠狀態，僅於須發送資料時短時間運作。MCU 根據 RTC 讀取之目前時間，設定系統起始分鐘(0、15、30、45)，並根據 Node1~Node3 使三個客戶端分別以起始分鐘第 0、10、20 秒為起始時刻，再以等間距 15 分鐘設置鬧鐘輸出方波予 MCU 之外部觸發腳位(Pin2)，即可達成每小時中第 0、15、30、45 分鐘，三個客戶端將以等間距 10 秒鐘對伺服器端發送資料之目的。

(2) 感測器與 RTC 資料讀取: 土壤淺層與深層含水量之 I^2C 設備位址分別設置，透過暫存器，可讀取電容感測值以及溫度感測值，並透過律定係數轉換成體積含水量與真實溫度。傾斜儀與 MCU 以 SPI 傳輸介面，晶片選擇線(CS)接於 MCU，其低電位為有效，傾斜角度經類比電壓率定係數校正後輸出。DS3231 之讀取時間年、月、日、時、分、秒等時間資訊分別儲存於變數，為簡化日後數據處理之流程，透過語法，輸出需求字串格式。變數分別代表 NodeID、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層體積含水量、深層體積含水量、傾斜角。

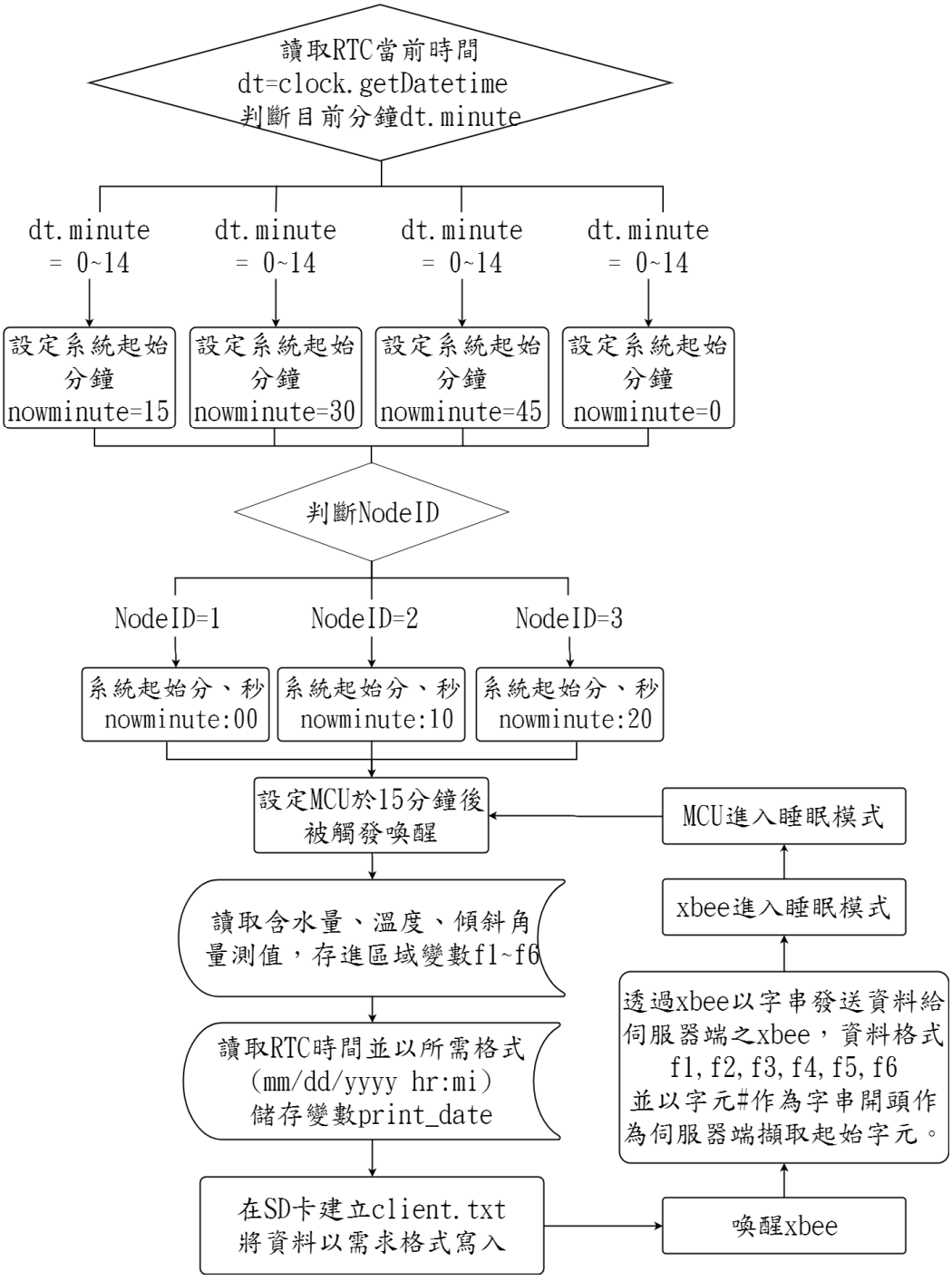


圖 2.40 客戶端之程式流程圖

(3)SD 卡資料寫入: 建立檔案，以所需資料格式以及換行符號儲存。

(4)無線傳輸: Xbee 於安裝前已經過 XCTU 設定為 Pin hibernate 模式，因此需對 xbee 輸出低電位以喚醒模組，MCU 將資料字串格式透過

一組序列線輸出給 Xbee，Xbee 間之資料無線傳輸將自動通透至伺服器端，其中字元#作為伺服器端擷取並拆解資料的起點，發送結束後對 Xbee 之 sleep pin 輸出高電位令其進入睡眠模式。

伺服器端微處理器之程式流程包括: (1)系統起始時間與週期設定、(2)Xbee 之資料接收、拆解以及儲存、(3)感測器與 RTC 資料讀取、(4)SD 卡資料寫入以及(5) WCDMA(3G)/GSM(2G)數據上傳，以下就各部分詳細說明，圖 2.41 以及圖 2.42 為伺服器端之程式流程圖。

(1) 系統起始時間與週期設定: MCU 根據 RTC 讀取之目前時間，設定系統起始分鐘(0、15、30、45)，並以等間距 15 分鐘設置 RTC 鬧鐘輸出方波予 MCU 之外部觸發腳位(Pin2)，即可達成每小時中第 0、15、30、45 分鐘喚醒 MCU 運作之目的。

(2) Xbee 之資料接收、拆解以及儲存: 以低電位脈衝喚醒 xbee 後即進入資料等待，當 xbee 資料緩衝區接收客戶端之無線傳輸資料，即以逗號為分隔字元拆解及儲存資料至全域變數，並根據 NodeID 儲存至相對應之變數。以上程序執行三次即代表成功接收三支客戶端之資料，當中若 Xbee 因故未接收到客戶端之封包，當次迴圈將於 30 秒後跳出而進入下一等待程序。

(3) 感測器與 RTC 資料讀取: 土壤淺層與深層含水量之 I^2C 設備位址分別設定，透過暫存器，可讀取電容感測值以及溫度感測值，並透過律定係數轉換成體積含水量與真實溫度。傾斜儀之傾斜角度經類比電壓率定係數校正後輸出。輸出需求字串格式。6 個變數分別代表 NodeID(Server=0)、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層體積含水量、深層體積含水量、傾斜角。

(4) SD 卡資料寫入: 建立 node0.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存；建立 node1.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存；建立 node2.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存；建立 node3.txt，以所需資料格式以及換行符號儲存。

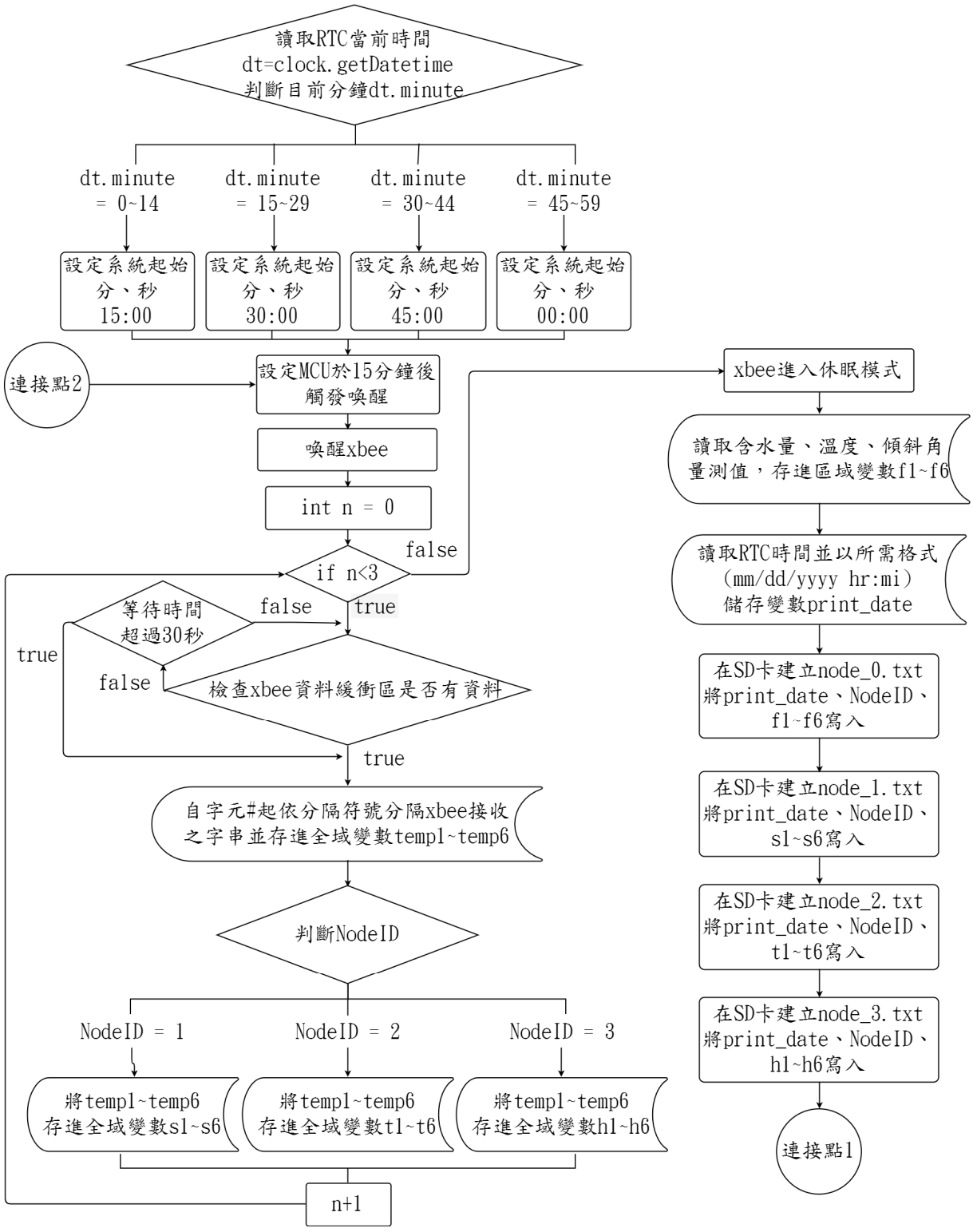


圖 2.41 伺服器端程式流程圖

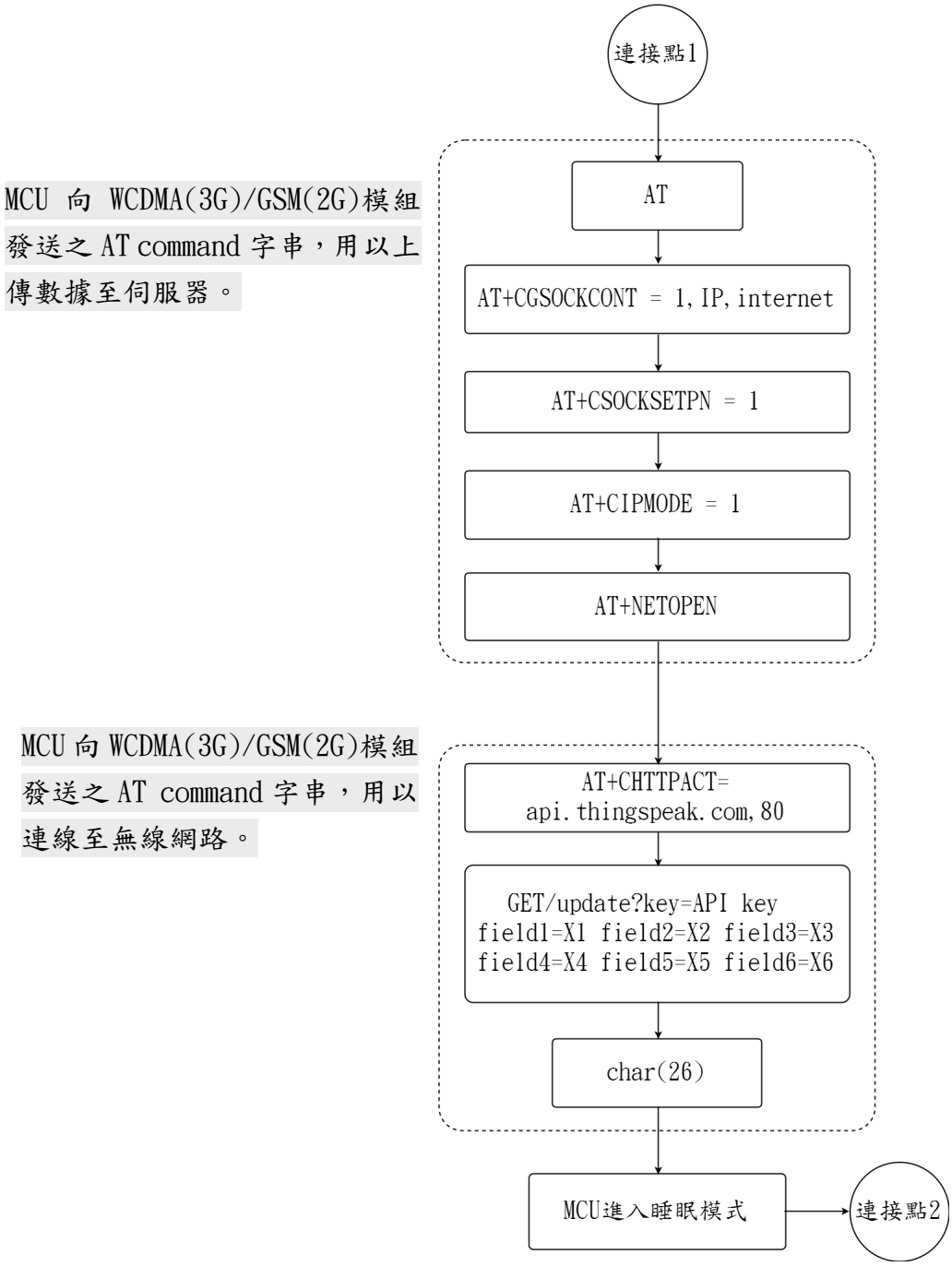


圖 2.42 伺服器端之程式流程圖(續)

(5) WCDMA(3G)/GSM(2G)數據上傳: Thingspeak 伺服器提供每個頻道(Channel)上 8 個免費數據上傳區域(Field)，本研究 Node1~Node4 將分開上傳至 4 個 channel(根據 NodeID 命名)以即時展示監測成果，各 channel 中之 field1~field6 分別代表 NodeID、淺層土壤溫度、深

層土壤溫度、淺層體積含水量、深層體積含水量以及傾斜角。透過 MCU 對 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組下達 AT command，可用以改變模組之通訊參數、無線網路連線以及數據上傳等功能。表 2-1 為研究使用 AT command 之操作流程以及其意義簡述。

表 2-1 AT command 操作流程與參數意義

AT	AT command 通訊開始
AT+CGSOCKCONT = 1, IP, internet	1: PDP Context Identifier: 可為 1~16 之任意值。 IP: 採用網路通訊協議 (Internet Protocol)，非點對點通訊。 Internet: SIM 卡 APN(中華電信、台灣大哥大皆為 internet)。
AT+CSOCKSETPN = 1	模組硬體參數(預設值)
AT+CIPMODE = 1	設定TCPIP應用模式為傳輸模式
AT+NETOPEN	連線開始
AT+CHTTPACT= api.thingspeak.com,80	執行http動作，指定thingspeak網域以及埠口(80)連接
GET/update?key=PR4PSUWMWK8PS1SE field1= f1 field2= f2 field3= f3 field4= f4 field5= f5 field6= f6 以上為字串	GET: 伺服器存取模式 API key: 每個 channel 有唯一的 API key，用以供伺服器核可存取。 field1- field6: 參數存取頻道 X1-X6: 自定義變數(於此為監測數據)
(char)26	傳送確認字元

2.5.3 系統硬體架構

土層監測模組外構設計(圖 2.43)可分為三部分，各部件詳述如下：

(1) 核心防水盒: 內含土層監測模組，18650 鋰電池組、供電控制器、外接天線及太陽能板之防水電子盒，其內部配置如圖 2.44。

(2) 土壤水份計外構: 可裝設一只土壤水份計之桿件外構如圖 2.45，並可透過 PVC 管依需求數量進行串聯，以延伸至預計裝設之土層深度。本研究以兩只土壤水份計作串聯，並延伸至地下深度分別為 25 公分以及 75 公分。

(3) 太陽能板支架(圖 2.46): 本研究採用 10W 太陽能板以提升土模組續航力，並可視土層監測模組之耗電情況作太陽能板輸出功率的增減。

核心防水盒係以市售電子防水盒加工而成，上下蓋具有 O 型環與溝槽，使其以螺絲旋緊後具有防水功能，防水盒下方開孔並透過 3D 列印之底座與 PVC 管黏合以連接下方土壤水份計外構。核心防水盒開孔以裝設 2.4GHz 頻段專用之耐候型天線，透過 SMA 接頭與無線傳輸模組連結，並以矽膠封填天線與盒間縫隙。土層監測模組、鋰電池組以及供電控制器則依空間配置固定於盒內。

土壤水份計外構將水分計之電容感測區塊暴露於外，以直接接觸待測土壤以量測土壤飽和度，土壤水份計之接線處與元件位置則置入後方空間，並以電子封裝膠封裝使其防水與絕緣，訊號線亦採用防水耐候型外披覆 4 芯電子訊號線，殼層以 3D 列印製作以大幅降低成本。

2.6 深層水力力學反應無線感測模組

針對深層滑動主要為現地孔隙水壓力控制，因此將孔隙水壓量測整合於現有入滲與地表運動監測模組為關鍵技術，為符合現地監測高精度、長期耐候與耐久之要求，本研究將現有淺層監測模組增加傳統電子式類比液位計，以高精度 AD 模組與現有模組連結。



圖 2.43 土層監測模組外構

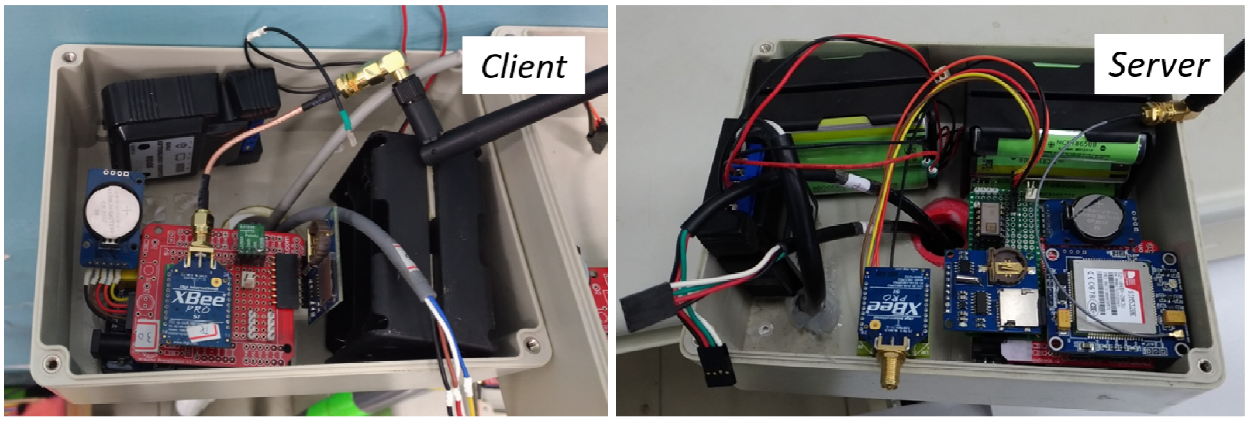


圖 2.44 防水電子盒內部配置



圖 2.45 土壤水份計桿件外構



圖 2.46 太陽能板支架

深層監測模組以物聯網(IoT)之架構進行研發，由微控板(MCU)搭配數位類比擷取卡(AD board)可連接傳統電子式感測器，配合 3G 模組(WCDMA)將監測資料送入雲端，突破常用有線監測之模式，並允許使用者透過雲端即時查看監測資料，此監測架構連結各式感測器形成局部(Local)或全域(Global)監測網路，可提供重大工程結構管理者或工程師由即時監測數據(real time monitoring)進行決策。

無線感測模組包括(1)微處理器、(2)無線傳輸模組、(3)時鐘與數據儲存模組及(4)感測器，各部分說明如下：

2.6.1 微處理器

因感測模組連接腳位較多，本研究採用 wemos lolin32(圖 2.47)，其為與 Arduino 相容開放原始碼之微處理器，搭載 ESP32 晶片，240MHz 雙核微控制器，運算數度高達 600 DMIPS，16MB 程式設計空間，且具 34 支 GPIO 接腳，其中包含一組 SPT(Serial Peripheral Interface Bus)介面、一組 (Inter-Integrated Circuit)介面，I^2C 支援單一匯流排，最多可

與 112 個結點通訊，足以應付多組模組間數位資料傳輸，以及 12 支接腳可做為類比訊號接腳，滿足土層監測模組的功能需求。



圖 2.47 Wemos lolin32 微處理器(摘自 www.wemos.cc)

2.6.2 電子式液位計

採用國產之沉水式液位計(liquid level transducer)，此感測計為類比輸出，因此感測模組需整合類比-數位轉換器(A/D converter)，此計畫以 16bit 之 A/D converter 模組，以確保解析度達 1 cm 以下，室內校正結果如圖 2.48 所示，現有模組中使用之液位計實驗室校正結果顯示其線性度佳。

2.6.3 感測模組

圖 2.49 為研發之深層無線感測模組內部元件圖，外構與淺層監測模組相同，電池模組可透過電池與太陽能充電模組為系統提供電力，以供野外進行模組布設並可維持太陽照度不足時之電源持續運轉系統，而無線監測模組，以 MCU 搭配傾斜晶片、分層含水量計、液位計與無線傳輸等模組，可定時將數據傳送至全球網路，即時感測(real time monitoring)推送監測數據至雲端。

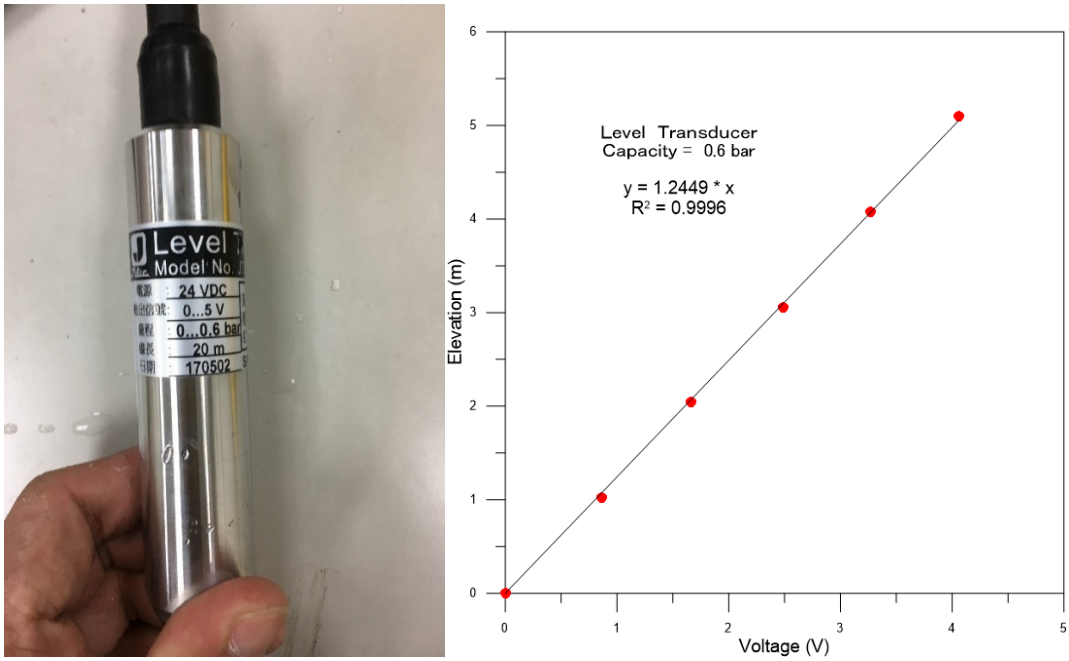
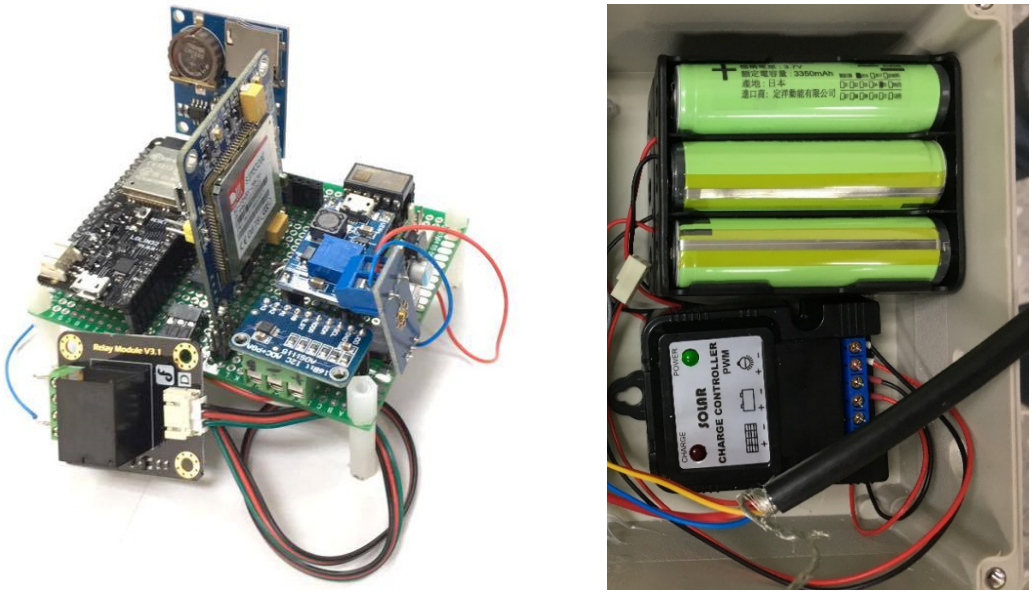


圖 2.48 液位計實體與校正結果



(a)無線感測模組　　(b) 電池模組

圖 2.49 深層邊坡無線感測模組內部組件圖

2.6.4 雲端伺服器

近年物聯網的興起使各領域累積數據量急劇攀升，開發商也因應推出各種 IoT 資訊平台以滿足資料儲存與顯示的需求。Thingspeak 為 2010 年 IoBridge 開發用以整合物聯網應用之開源平台，除了開放程式碼供使用者作專案應用外，也開放一定量之資料讀寫功能讓使用者免費使用，並透過 API(Application Programming Interface)作資料存取、匯出以及視覺化展示等功能，因此本研究以 Thingspeak 作為系統雲端伺服器，形成現地監測資料之雲端即時顯示平台。

圖 2.50 為 Thingspeak 雲端即時顯示頁面，Field1 至 Field7 依序顯示該測站之節點編號、傾斜角、淺層土壤體積含水量、淺層土壤溫度、深層土壤體積含水量、深層土壤溫度、水位以及模組電壓，游標移至資料點上即可獲知該監測值及其量測時間，用以展示及時監測成果，而平台也提供歷史資料輸出功能，其副檔名為 csv 格式，可用 Excel 直接開啟。



圖 2.50 ThingSpeak.com 即時資料顯示頁面示意圖

第三章 淺層滑動場址監測成果與分析

3.1 甲仙攔河堰聯外道路土層監測模組安裝測試

甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地曾於民國 94 年 9 月受泰利風災連續豪雨影響，聯外道路邊坡發生數次崩坍而阻斷交通，道路上、下邊坡擋土牆亦形成多處裂縫，而民國 98 年莫拉克颱風期間又導致邊坡再次坍塌。民國 99 年 3 月 4 日發生規模 6.4 甲仙地震，事後邊坡傾斜儀量測結果顯示邊坡有滑動現象，最大位移達 155mm，滑動崩塌潛勢甚高，根據「甲仙攔河堰第一次安全評估」於上邊坡埋設四處傾斜儀之量測資料顯示，上邊坡之潛在滑動面約位於地表下 1.5m 至 4.8m 之崩積層或岩土界面。

此場址已完成地形測量、地質鑽探、地質調查、邊坡監測、地球物理探測、地下水位量測、既有擋土設施調查等工作及邊坡穩定分析，南區水資源局皆有相關資料可供參考，包括現地監測設施平面圖(圖 3.1)、鑽孔資料(表 3-1)、邊坡剖面圖(圖 3.2)以及地質材料參數(表 3-2)。根據上述資料顯示，此場址符合以下本研究選址條件: (1)為陡坡地形且為軟弱土層，具有高破壞潛勢以及破壞歷史。(2)有相關地質、水文及幾何參數等現地監測資料可供參考。(3)區域為無線網路訊號涵蓋範圍。因此選定甲仙攔河堰聯外道路之西側坡地，作為即時淺層邊坡無線監測模組現地測試之區域。

本研究總計於甲仙攔河堰西側邊坡裝設四支土層監測模組，包括一支伺服器端(Node ID = 0)以及三支客戶端(Node ID = 1~3)，並以 3G 無線網路進行資料回傳。相對位置如圖 3.3 所示，土層監測模組於安裝過程中須保持約略水平，以維持足夠之量測範圍，另於近地表面與監測模組桿身之間回填皂土，避免降雨直接沿桿身入滲影響滲流監測成果。無線土層監測模組安裝流程如下:

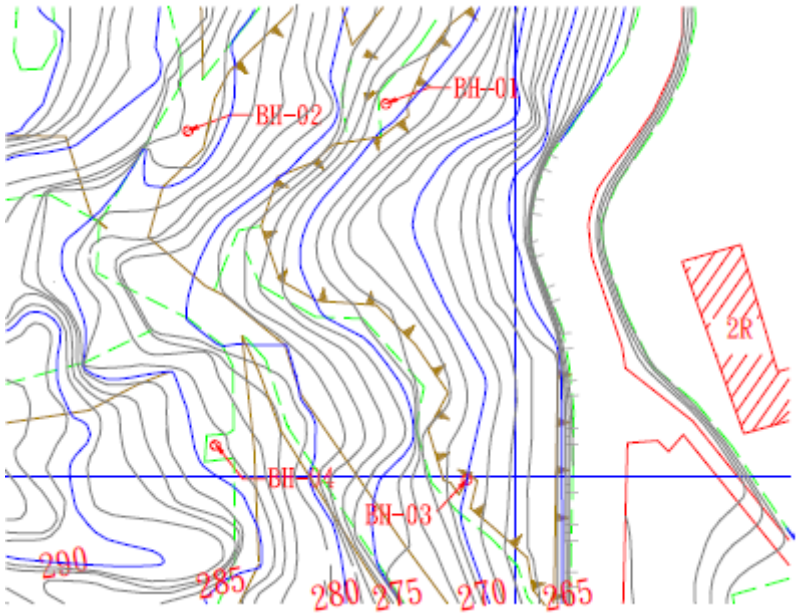


圖 3.1 監測設施平面配置圖(南水局 2011)

表 3-1 傾斜管孔位鑽孔資料(南水局 2011)

孔號	深度(m)	測傾管	鑽探成果
BH-01	15	有	0~0.8m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 0.8~1.5m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 1.5 ~4.2m，頁岩層：棕灰色破碎頁岩 4.2~15.0m，頁岩層：灰色頁岩。
BH-02	15	有	0~2.5m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 2.5~2.9m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 2.9~15.0m，頁岩層：灰色頁岩
BH-03	20	有	0~0.5m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 0.5~2.45m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 2.45~4.80m，頁岩層：棕灰色破碎頁岩 4.8m~20.0m，頁岩層：灰色頁岩局部破碎
BH-04	20	有	0~1.4m，覆土層：黃棕色砂黏土夾岩塊 1.4~2.2m，覆土層：棕灰色岩塊夾砂黏土 2.2~3.0m，頁岩層：棕灰色破碎頁岩 3.0~20.0m，頁岩層：灰色破碎頁岩

1. 以孔徑 62mm 之電動鑽機鑽孔至預定土層深度 0.8m(圖 3.4)。

2. 置入土層監測模組桿身，並確保監測模組維持水平(圖 3.5)。

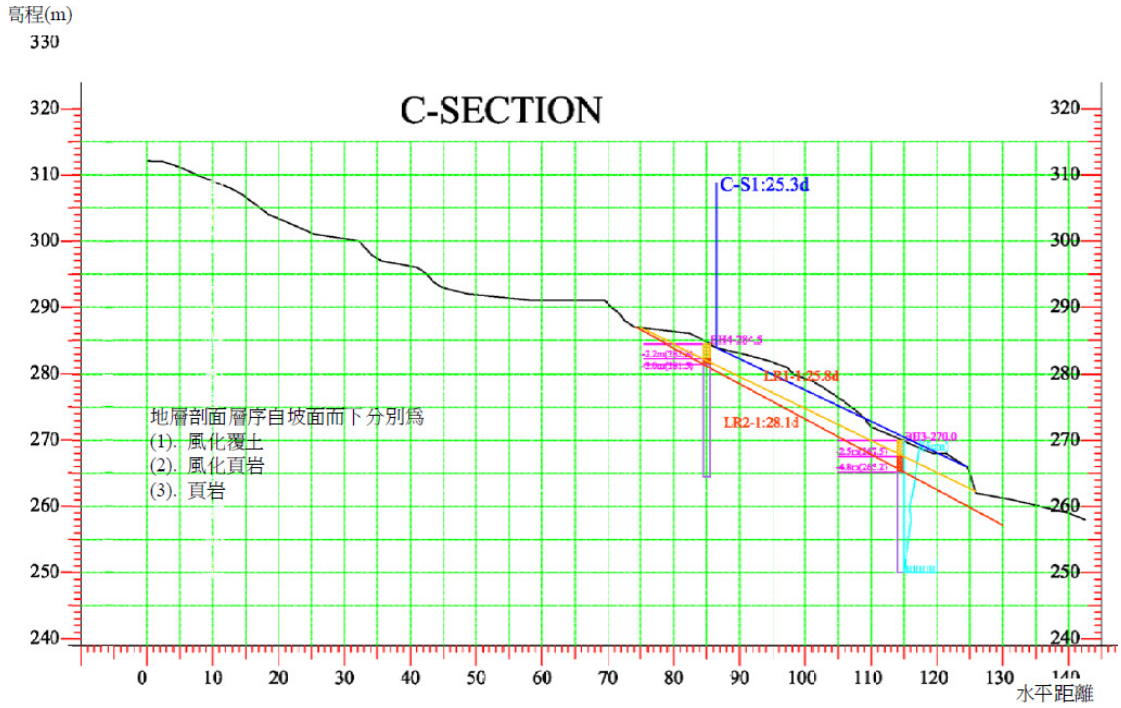


圖 3.2 監測剖面圖(南水局 2011)

表 3-2 簡化地質材料參數(南水局 2011)

參數類別	單位	風化土層	破碎頁岩	頁 岩
γ unsat	KN/m3	18.1	19.6	24.5
γ sat	KN/m3	20.6	21.6	--
Eref	KN/m2	7840	8820	29400
ν		0.3	0.3	0.2
Cref	KN/m2	24.5	29.4	98.0
Φ	Degree	31.0	32.0	30.0
ϕ	Degree	0	2	0
排水特性		Drained	Drained	Non-Porous

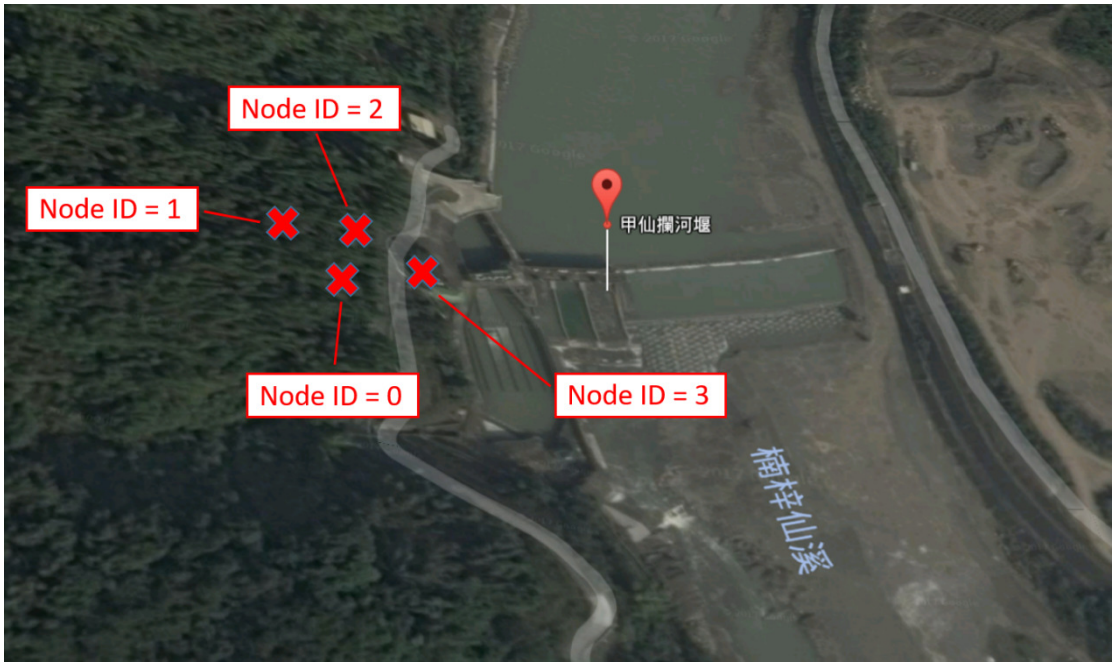


圖 3.3 監測模組相對位置圖

3. 回填皂土至含水量計上方。

4. 以少量皂土圍繞覆蓋於桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。

5. 重複上述步驟回填至地表(圖 3.6)。

6. 以少量皂土圍繞覆蓋於地表桿件周圍並淋濕皂土使其吸水膨脹。



圖 3.4 電動鑽機鑽至預計深度

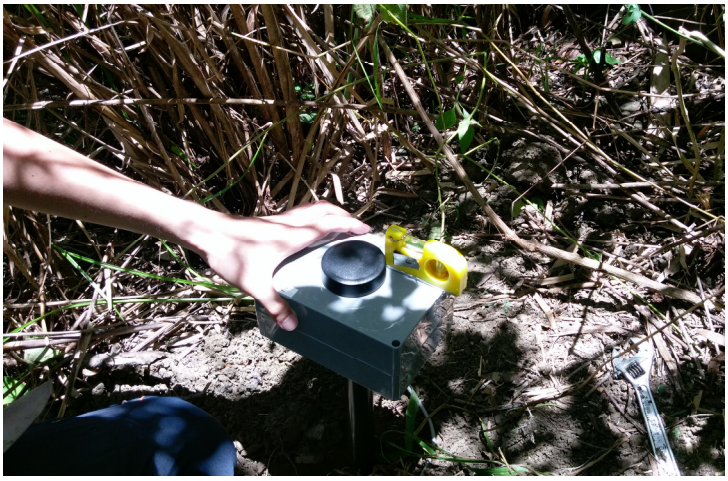


圖 3.5 確保模組保持水平



圖 3.6 皂土覆蓋桿身與地表

待土層監測模組外構安裝完畢後，於盒身側邊鑽孔以固定 2.4GHz 之耐候型天線，作為 Xbee 無線傳輸用途，其中伺服器端需多開一孔供 WCDMA(3G)/GSM(2G)模組天線使用，所有模組與天線皆為 SMA 接頭，將來若需更改硬體設置會有較佳之相容性，太陽能板之電源線則於盒底開孔進入盒內供電，最後以矽膠封填所有孔隙。依序將土層監測模組以及電源系統固定於電子防水盒中，土層監測模組須保持水平避免傾斜儀超出其量測範圍並確保傾斜儀之軸向面對邊坡走向。圖 3.7、圖 3.8 分別為客戶端以及伺服器端於現地裝設完成之盒內情況紀錄。圖 3.9 為各監測站點周遭環境以及邊坡上之相對位置。



圖 3.7 客戶端盒內配置



圖 3.8 伺服器端盒內配置

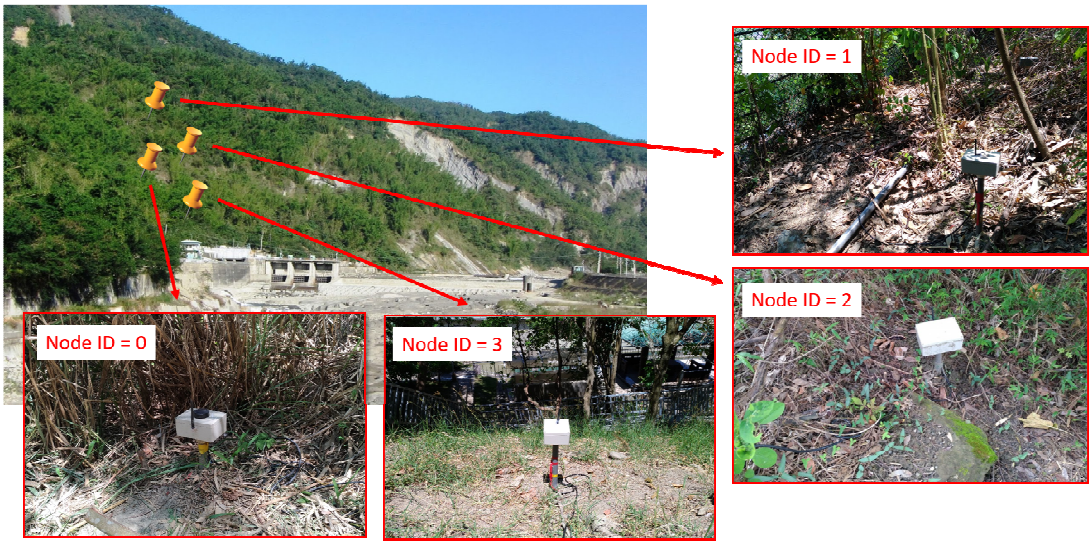


圖 3.9 監測站點周遭環境

3.2 甲仙場址監測資料

甲仙場址之土層監測模組系統於 106/5/22 安裝完畢，並於 106/6/21 換上韌體優化之模組，目前仍持續穩定上傳監測資料至 thingspeak 伺服器。106/5/22 至 106/9/17 期間歷經多次集中且長歷時之降雨事件，過程中顯示降雨事件並不影響本研究無線傳輸系統之穩定性，同時在雨季長時間日照不足的情況下，太陽能電源系統也足以支撐土層監測模組持續運行，證明系統之可行性與耐久性。圖 3.10 以 NodeID=3 之 thingspeak 頁面為例顯示場址即時資訊，Field1 至 Field6 依序顯示該測站之節點編號、淺層土壤溫度、深層土壤溫度、淺層土壤體積含水量、深層土壤體積含水量以及傾斜角，游標移至資料點上即可獲知該監測值以及發生時刻，可用以監測甲仙淺層邊坡水文及運動情況之依時性的反應。以下展示現地監測期間體積含水量計以及傾斜移之量測成果。

3.2.1 體積含水量監測結果

由於邊坡滑移多起因於高強度長延時之降雨，因此本研究之監測資料將以雨量監測作為土層體積含水量比較之標的。雨量資料來源為中央氣象局之雨量監測結果，與本研究監測場址最近之測站為甲仙測站，其位於高雄市甲仙國中操場後方山丘，兩者相對位置圖如圖 3.11。

圖 3.12、圖 3.13、圖 3.14 以及圖 3.15 分別為 Node0~Node3 於 106/5/22 至 106/9/17 期間之體積含水量監測資料，X 軸為標準時間，Y 軸為土壤體積含水量(%)，同時與甲仙雨量站之每小時累積雨量(mm)做對比。土壤分層水份監測結果可得下列成果:

(1). 土壤水份計感測值對於降雨事件之反應相當明顯，而深層水份計之感測值反應時間略晚於淺層含水量計，其間差異為土層入滲時間差導致。從降雨發生至含水量抵達峰值之歷時甚短，可及時反應降雨事件的影響。

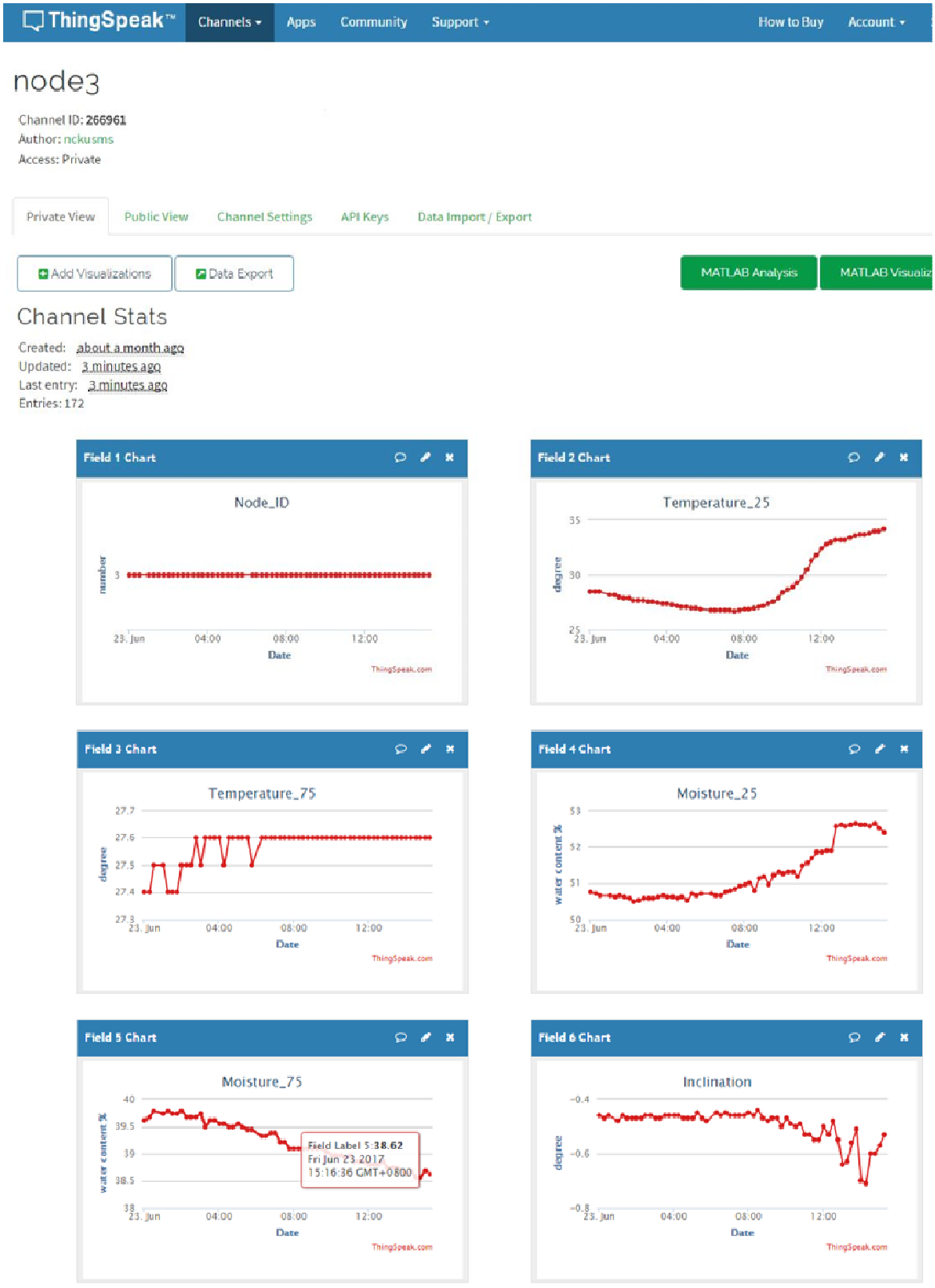


圖 3.10 Thingspeak 即時顯示情況

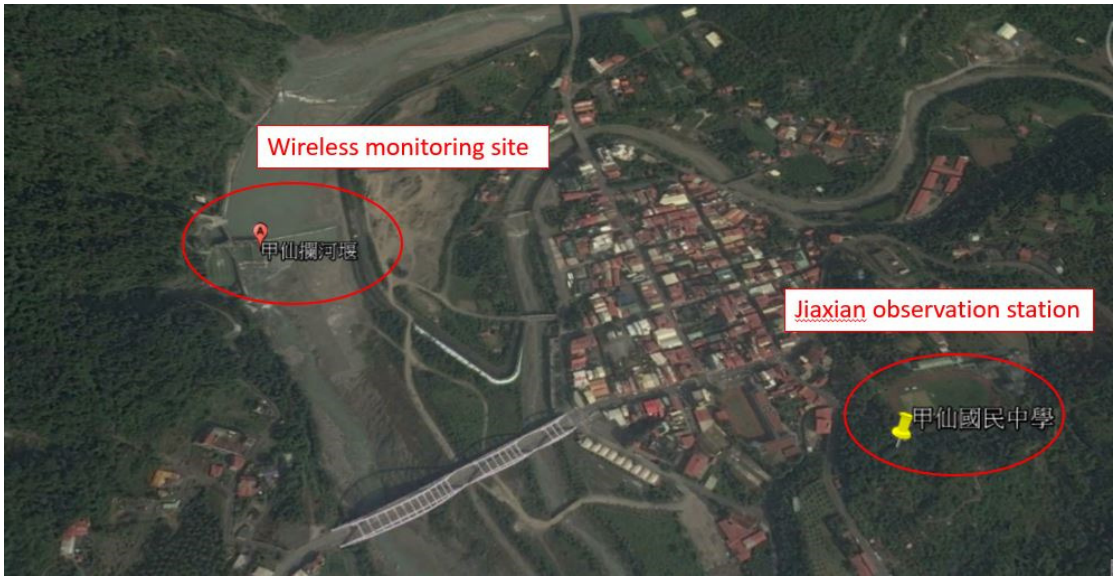


圖 3.11 監測場址與甲仙雨量站相對位置

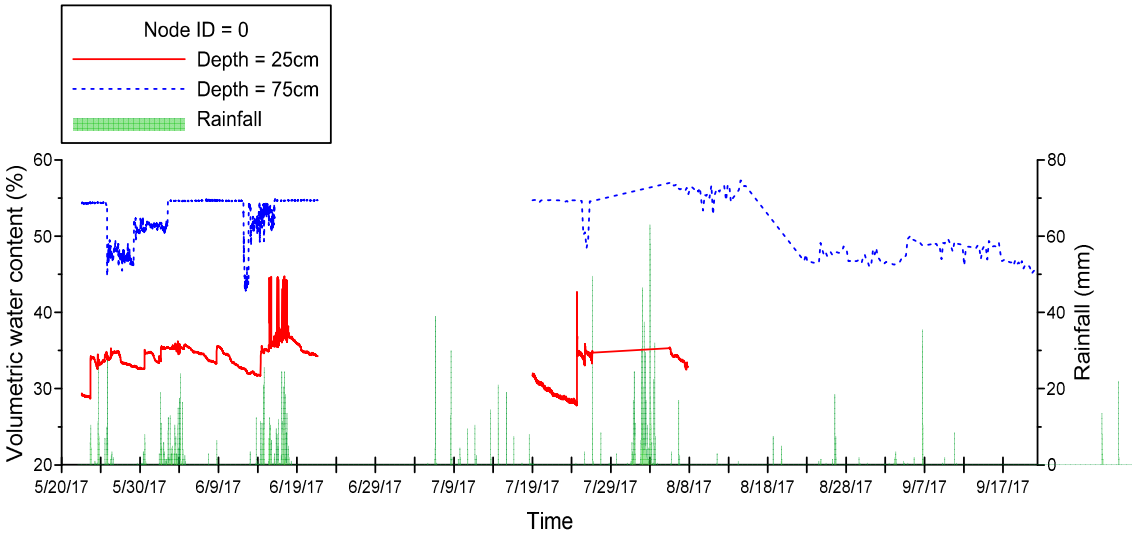


圖 3.12 Node0 含水量監測結果

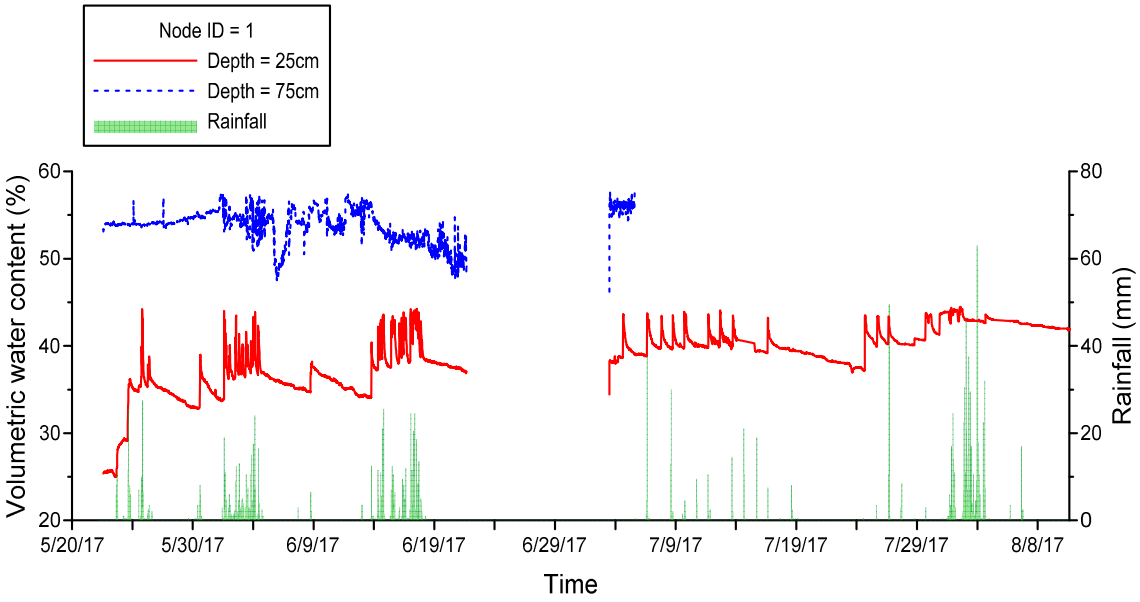


圖 3.13 Node1 含水量監測結果

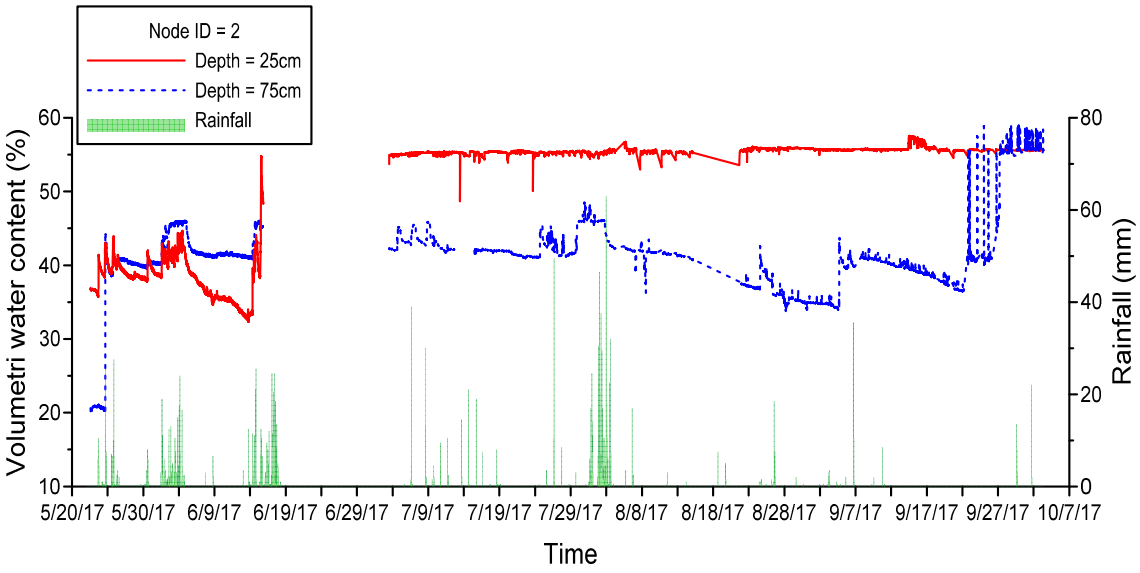


圖 3.14 Node2 含水量監測結果

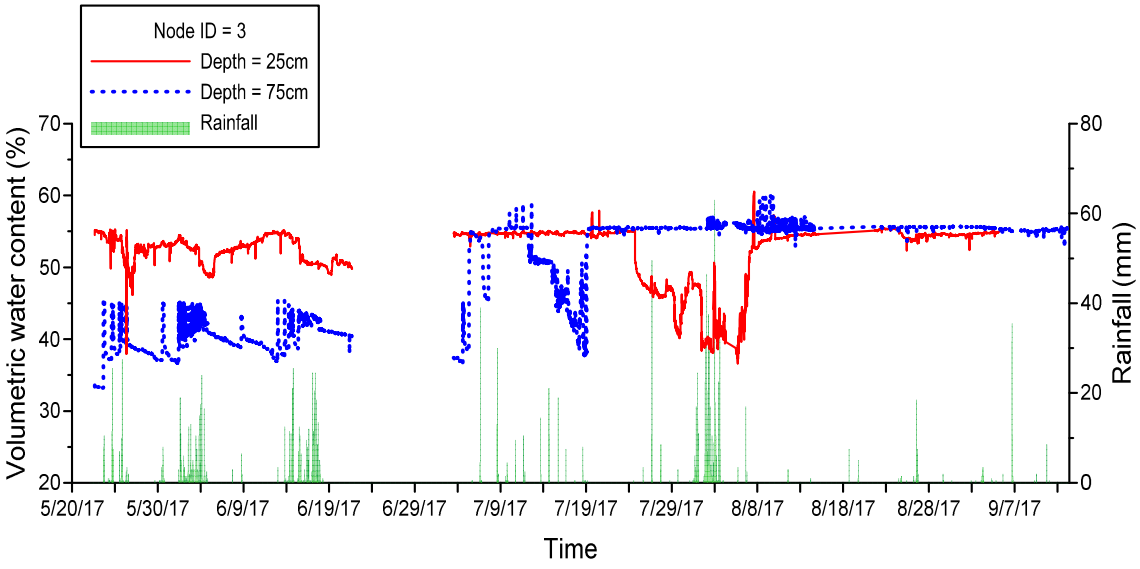


圖 3.15 Node3 含水量監測結果

(2). 在降雨事件發生後，含水量皆會在乾季時逐步降回降雨前之穩定值，顯示系統感測器具有重複性，可用做現地長期監測用途。

(3). 藉由已完成之基本物性試驗得知甲仙現地地表土壤之孔隙比為 0.6，可推算其飽和時之土壤體積含水量為 38%。圖中顯示 Node0、Node1 與 Node2 之深層含水量計始終處於飽和狀態，而淺層含水量計於降雨時迅速接近飽和狀態。

(4). Node3 之含水量計反應較為異常，其淺層含水量始終高於深層含水量，且深層含水量對於降雨事件之影響更大也更迅速，可能相較於其他監測點位皆位於甲仙聯外道路之上邊坡，Node3 則位於聯外道路之下邊坡，可能有路基、擋土牆等結構物影響地表下土層分布。另外由聯外道路旁之擋土牆透水孔(圖 3.16)流量甚大顯示，道路旁邊坡土層長期處於飽和狀態也有可能影響下邊坡之地下水分布。



圖 3.16 擋土牆透水孔

4.2.2 現地入滲速率推估

非飽和主壤滲流分析中最重要之參數即為滲透係數，但因需引入時間參數以及土壤基質吸力之量測範圍限制，滲透系數亦為較難量測之非飽和土壤參數。水在非飽和土中的流動滿足達西定律，但與飽和土壤滲流的不同為非飽和土壤之滲透係數為土壤含水量的函數，可用基質吸力-滲透係數曲線表示。

由於現地土壤具非均值性及異向性，且張力裂縫、裂隙等現地情況無法於室內小尺寸之試體中真實呈現，使滲透係數量測較難進行。Hillel et al. (1972)將瞬時剖面法之概念應用於現地土層，並將土層中之位置水頭引入公式推導，發展出非飽和土壤滲流係數之計算過程，期間假設水僅在垂直方向發生入滲，無地表水平滲流，且非飽和壤中之氣相壓力維持一大氣壓。

取現地土層深度位置 z_1 和 z_2 ，則在連續時刻 t_1 和 t_2 期間通過土層單位截面積之水總體積，根據質量守恆將等同於 z_1 到 z_2 間土壤體積含水量之變化總量如式 3.1，其中 θ_v 為體積含水量；A 為土層單位截面積。

$$V_w = \int_{z_1}^{z_2} \theta_v(Z) A dz \tag{3.1}$$

又通過截面z_1之流速可以式(3.2)表示，其中k_w為滲透係數；i_{ave}為土層深度z_1到z_2之水力梯度。

$$v_w = \frac{dV_w}{Adt} = k_w * i_{ave} \tag{3.2}$$

由於現地情形需考慮位置水頭之影響，因此總水頭$h_w = h_g + h_p$，h_g與h_p分別為位置水頭以及壓力水頭，壓力水頭於非飽和土壤中為負值；於飽和土壤中為正值。水力梯度$i_{ave} = \frac{dh_w}{dz} = \frac{\Delta z - \Delta \psi}{\Delta z} = 1 - \frac{\Delta \psi}{\Delta z}$，其中$\psi$為負壓力水頭，飽和土壤$i_{ave}$為 1；非飽和土壤$i_{ave}$最大為 2，視土層深度內之基質吸力分布而定。

結合式 3.1 與式 3.2，令單位截面積 A=1，將滲透係數k_w之關係式表示為式 3.3 如下:

$$k_w * \left(1 - \frac{\Delta \psi}{\Delta z}\right) = \frac{\int_{z_1}^{z_2} \theta_v(Z) A dz}{dt} \tag{3.3}$$

藉由重複量測不同初始含水量下之入滲速率，即可求得現地基質吸力或含水量與入滲速率之關係。

圖 3.17~圖 3.21 為 Node1 在不同初始體積含水量下各階段之體積含水量依時性剖面，發生時刻最早之曲線(棕色)為降雨事件前土壤體積含水量之初始值，圖中假設地表土壤於降雨期間處於飽和狀態，曲線移動涵蓋之面積可視為土層之儲水能力。

利用瞬時剖面法衍伸公式 3.3，以及各測站之體積含水量依時性剖面，可求取甲仙現地淺層土壤之入滲速率，其中參數的訂定以及選擇依據如下:

(1) 由於本研究僅於 0.25m、0.75m 兩土層深度進行體積含水量量測，而深度 0.75m 之體積含水量計因位於地下水位附近致使監測值變化甚小，因此以地表至上層含水量計之區段作為淺層土壤入滲速率之計算依據，即 $z_1 = 0$ ， $z_2 = 0.25\,\mathrm{m}$。

(2) dt 定義為自降雨事件發生時刻起，到上層土壤含水量計讀值開始變化之歷時。

(3) $\int_{z_1}^{z_2} \theta_v(Z) A dz$ 即為土壤體積含水量依時性剖面中從降雨時刻到土壤含水量改變時刻掃掠過之面積，但不包括深度超過 0.25m 的部分。

(4) 理論上應以甲仙現地土壤之土水特徵曲線，繪製基質吸力-土層深度剖面後求取水力梯度 $i_{ave} = (1 - \frac{\Delta\psi}{\Delta z})$，惟本研究體積含水量量測深度較少，因此假設地表至深度 0.25m 之基質吸力為線性分布，取 $i_{ave} = 2$ 。

表 3-3 為 Node1 各階段現地入滲速率計算結果，因此可以得到入滲速率-基質吸力關係如圖 3.22，並與典型之特徵曲線(Collins and Znidarcic, 2004)做比較，結果顯示甲仙現地淺層土壤之入滲行為較接近高滲透性之粗粒料，在基質吸力 0~3kPa 時則落於粗細粒料之間，其中甲仙現地之基質吸力係以典型細砂之 SWCC (Gonzalez and Adams, 1980)(圖 3.23)轉換而得。

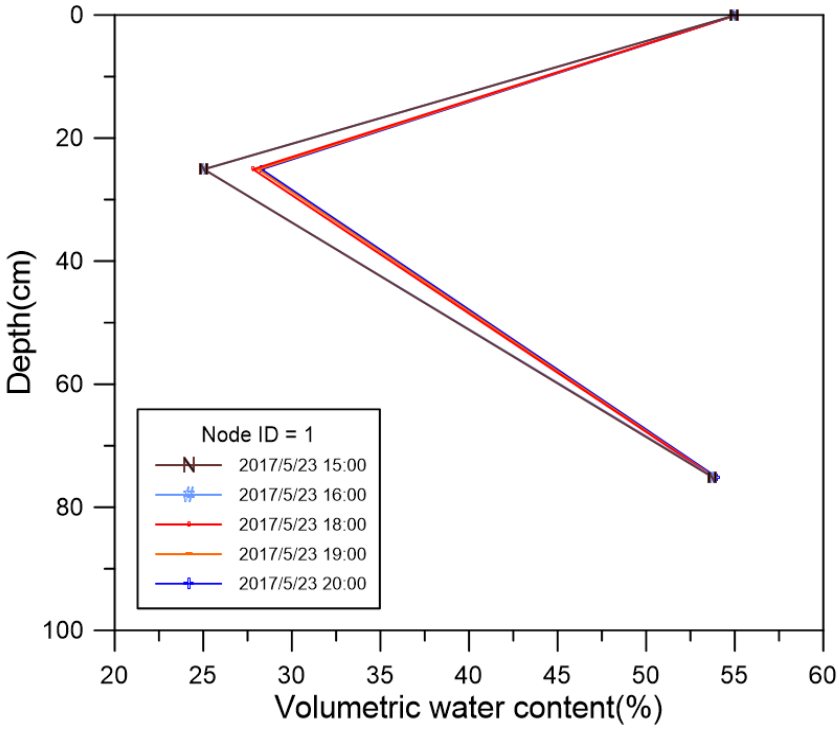


圖 3.17 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage1

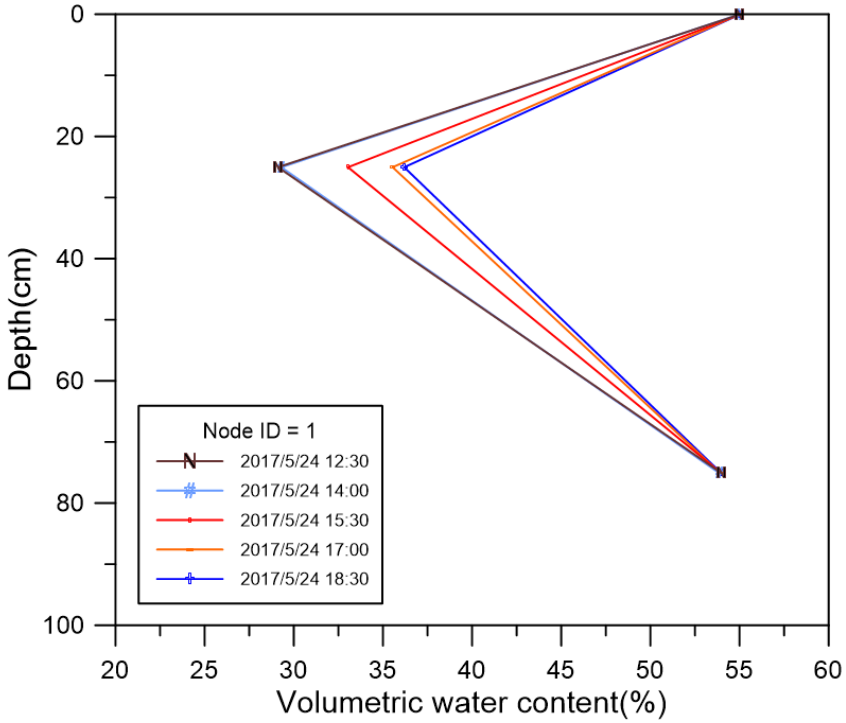


圖 3.18 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage2

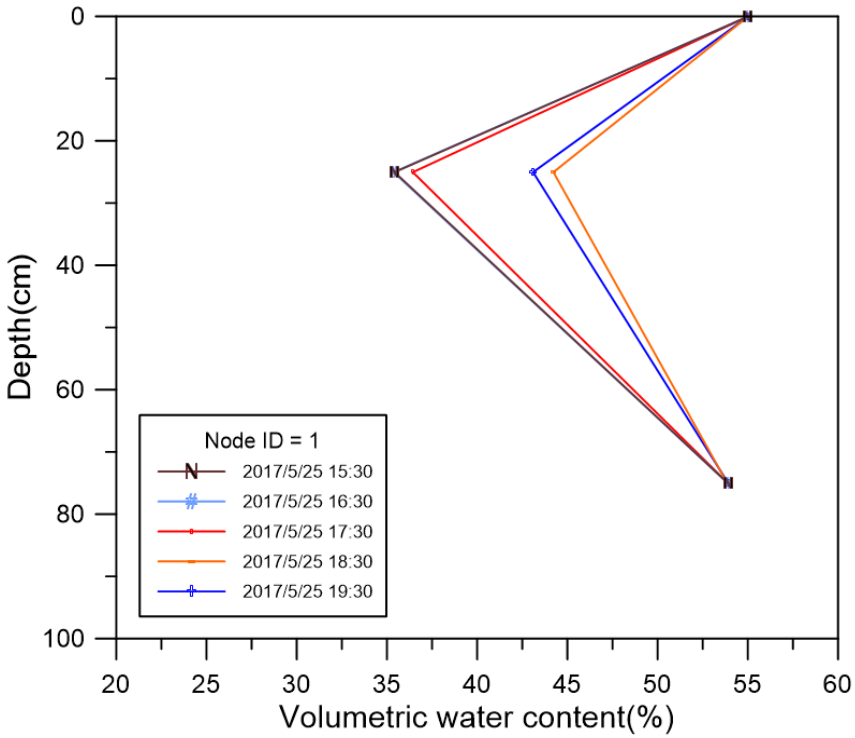


圖 3.19 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage3

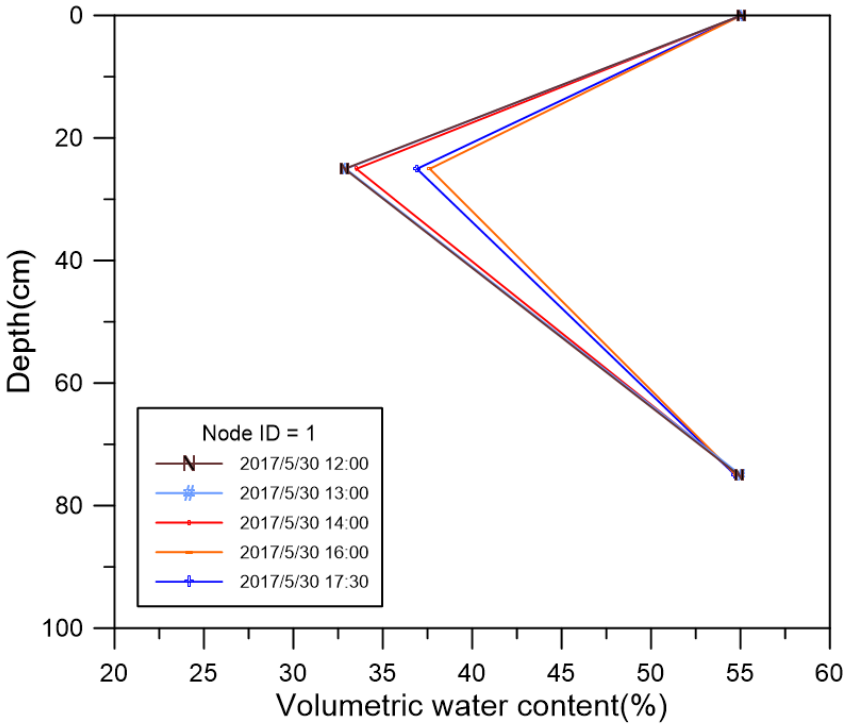


圖 3.20 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage4

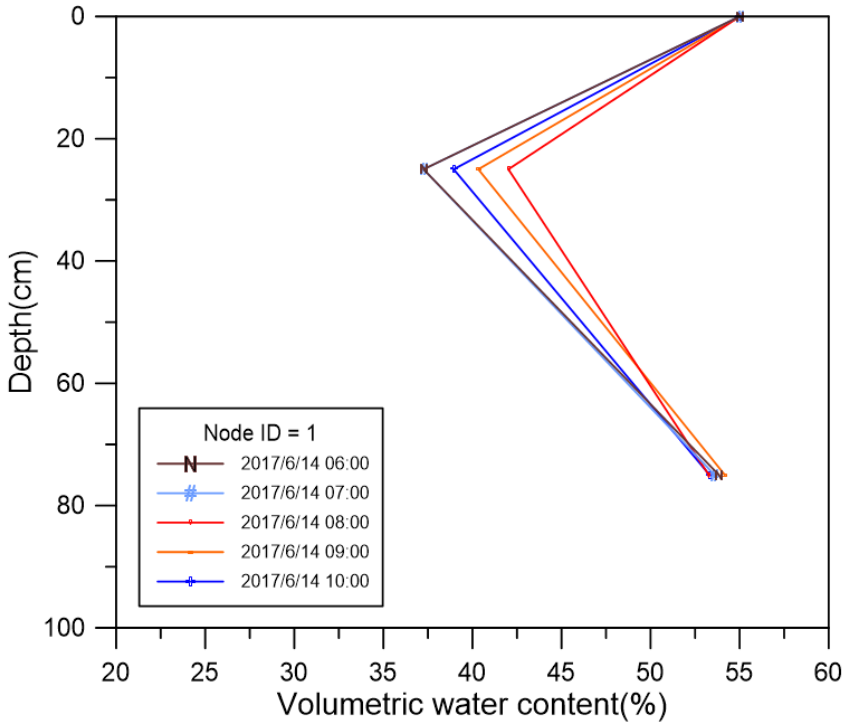


圖 3.21 Node1 體積含水量依時性剖面-Stage5

表 3-3 各階段淺層入滲速率

不同初始含水量階段	淺層入滲速率(m/sec)
1	$1.5*10^{-5}$
2	$2.3*10^{-5}$
3	$3.8*10^{-5}$
4	$4.1*10^{-5}$
5	$4.2*10^{-5}$

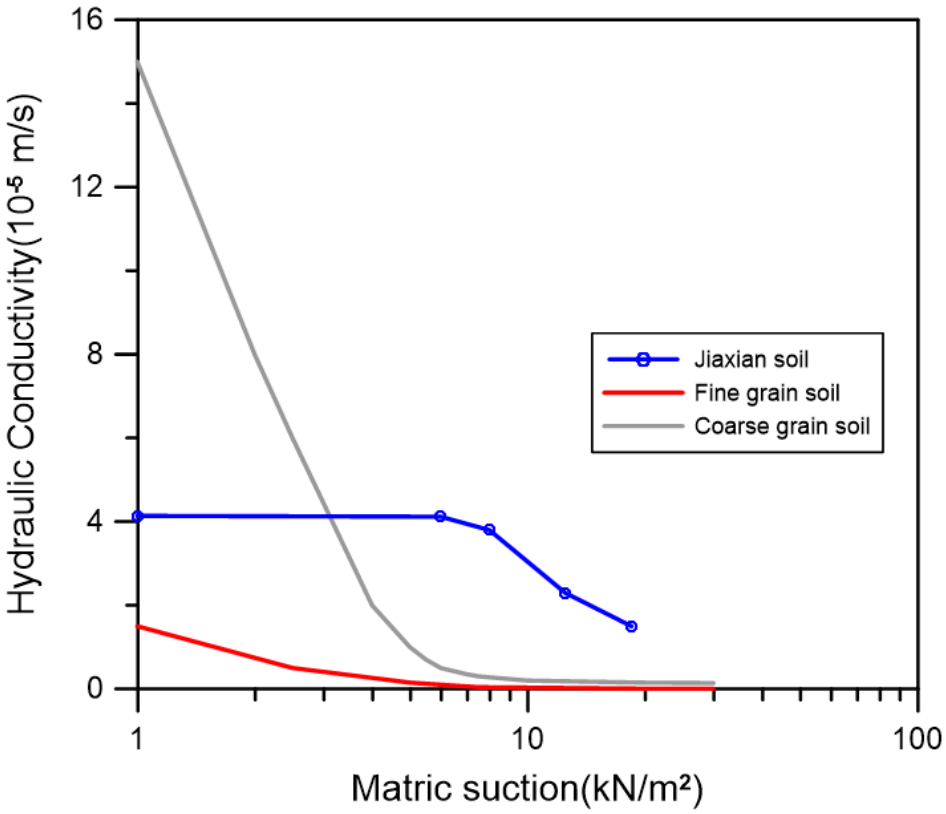


圖 3.22 甲仙現地入滲速率-基質吸力

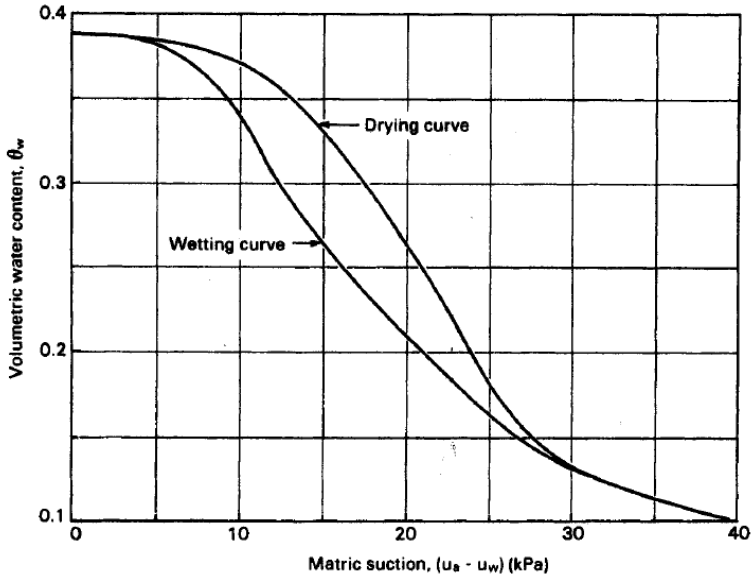


圖 3.23 典型細砂 SWCC (Gonzalez and Adams, 1980)

圖 3.24、圖 3.25 以及圖 3.26 為為測站 Node0~Node2 於 2017/5/23 同一降雨事件下土層各深度之體積含水量依時性剖面，以同一流程計算各測站之現地入滲速率如表 3-4 所示，其中 Node0 與 Node2 在地理位置上相鄰且屬於同一土層，結果顯示兩者淺層入滲速率相近，證明現地入滲速率計算流程具重複性。

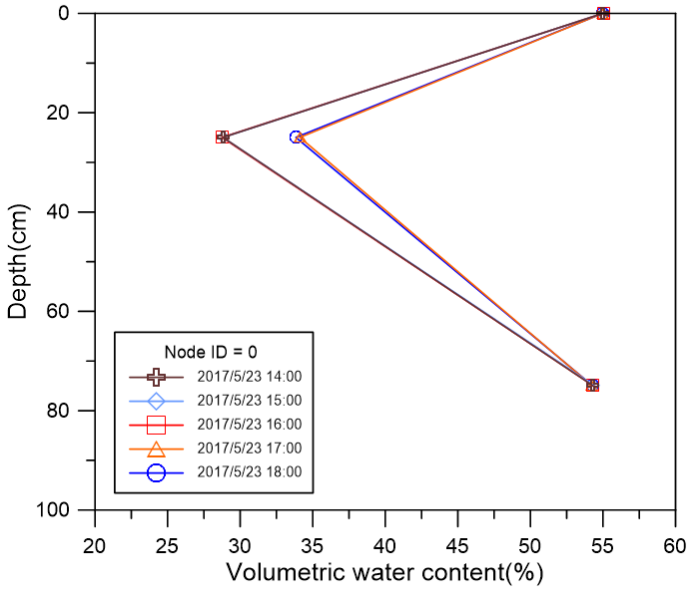


圖 3.24 Node0 土壤體積含水量依時性剖面

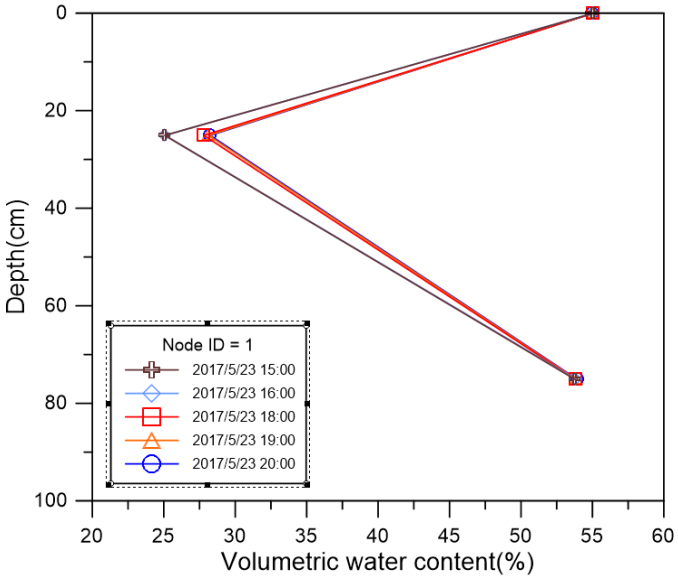


圖 3.25 Node1 土壤體積含水量依時性剖面

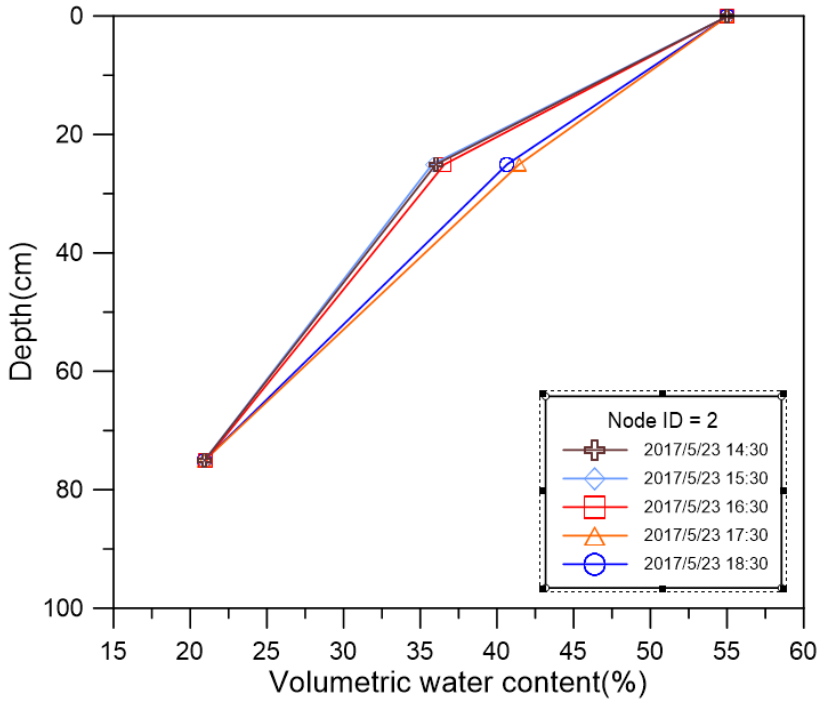


圖 3.26 Node2 土壤體積含水量依時性剖面

表 3-4 不同測站淺層入滲速率

Node ID	淺層入滲速率(m/sec)
0	$4.7*10^{-5}$
1	$1.5*10^{-5}$
2	$4.2*10^{-5}$

3.2.3 傾斜儀監測結果

圖 3.27 為各監測模組測得之傾斜角變化，傾斜角方向之數值意義如圖 3.28 所示，結果顯示甲仙邊坡之各測站位置，於觀測期間內有約 0.5 度微幅的滑移，其方向同邊坡走向，惟傾斜角變化幅度甚小，暫無淺層邊坡破壞跡象，仍待系統長時間觀察。

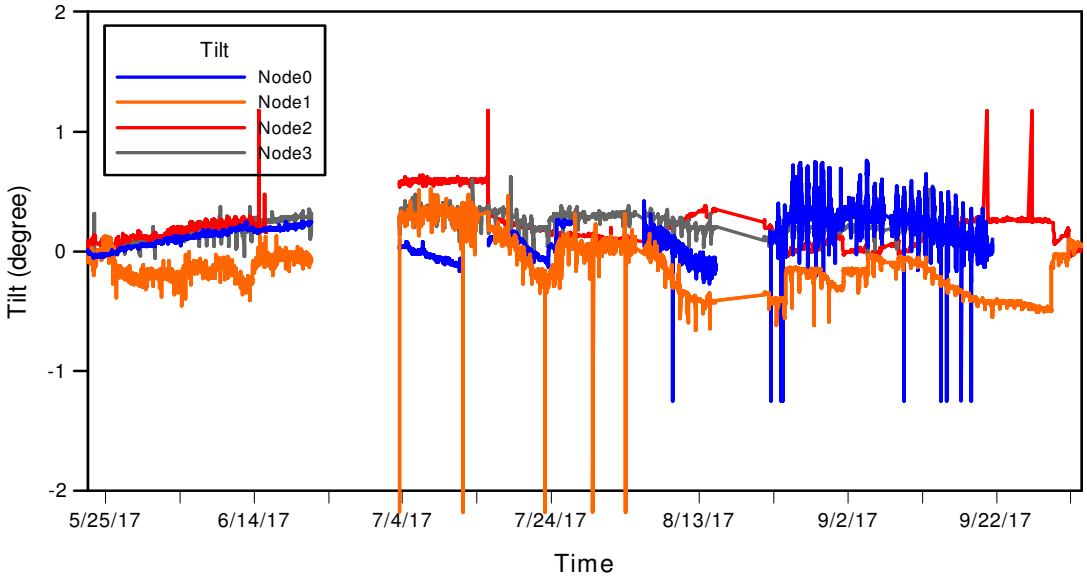


圖 3.27 測站傾斜角監測結果

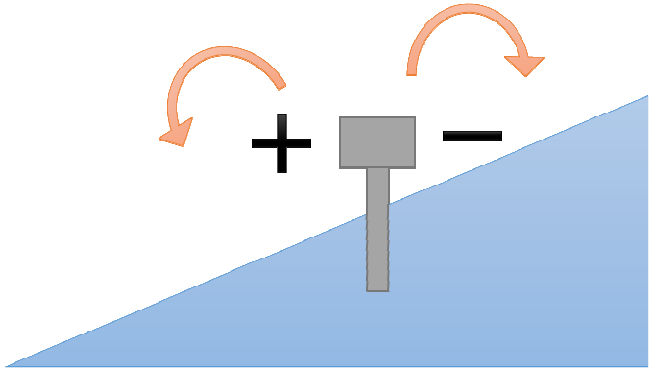


圖 3.28 傾斜角量測方向

3.3 西湖場址土層監測模組安裝測試

西湖場址位於國道三號西湖服務區北上段旁之邊坡(如圖 3.29 示)，邊坡定位約在北緯 24°33’48.21’、東經 120°45’37.37’(如圖 3.30)。於西湖場址取樣做室內基本物性試驗，包括篩分析試驗、比重計試驗、土壤比重試驗、阿太堡試驗、現地乾單位重試驗。由篩分析試驗結果結合比重計試驗結果可得土壤粒徑分布曲線，可大致分類為含細料細砂，大部分粒徑分佈於 100 號篩，細料含量超過 12%，由阿太堡試驗

結果液性限度 LL 為 42，塑性限度 PL 為 26，塑性指數 PI 為 18，統一土壤分類法分類結果為 SC(黏土質砂)。由現地取低擾動土樣試驗，三組結果平均得現地乾單位重 γ_d =1.47 (gw/cm^3)，換算可能土壤單位重約介於 14.5~18.75 (kN/m^2)，若取平均(飽和度 50%)則單位重約為 16.62 (kN/m^2)。



圖 3.29 西湖邊坡實照

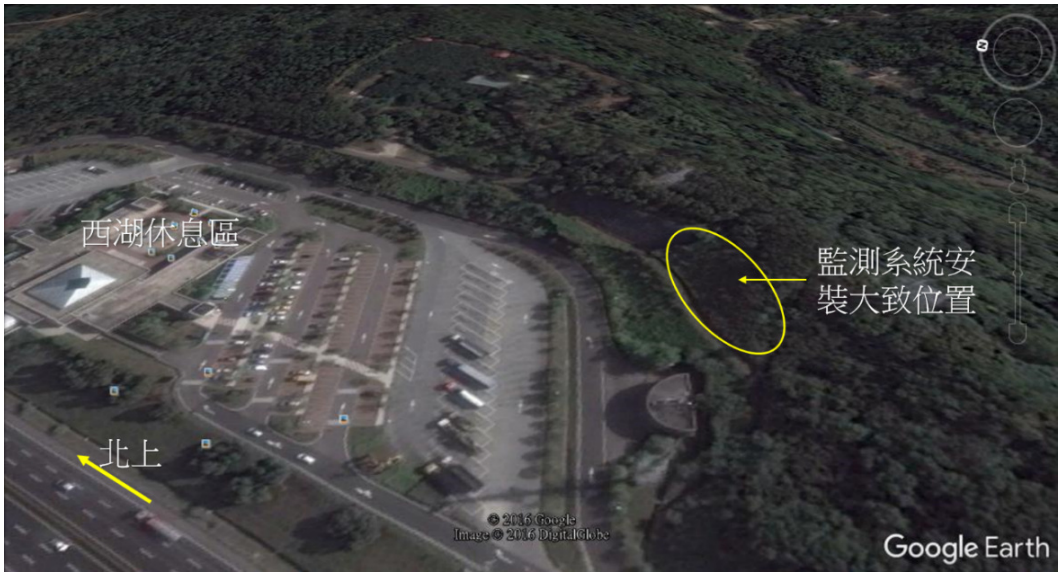


圖 3.30 西湖系統安裝位置示意圖 (Google Earth)

監測系統設計上由監測模組、太陽能系統及資料接收端三部分組成(如圖 3.31)，監測模組上配置多點電子式含水量計、高精密度電子式傾斜儀、無線傳輸模組及微控制器，為各種微機電感測元件之整合，量測各深度土壤含水量及地表傾斜量，並將資料以無線傳輸方式傳出。太陽能系統用於供給監測模組電力，使系統不斷電長期監測。資料接收端由電腦與 4G 連網組成，主要接收監測模組傳出之資料自動記錄，並連結網際網路可從遠端隨時監控。

西湖場址於 2016/12/09 共安裝 3 支監測模組，分別編號為 Node 2、Node 5 及 Node 10，並因前幾個月監測成果較不如預期，因此於 2017/03/23 將 Node 2 更換為 4 深度含水量量測，並於回填時確保土壤夯實緊密與含水量計緊密接觸，現場各監測模組尺寸及安裝深度如圖 3.32，實際安裝於邊坡之相對位置如圖 3.33，Node 2 為 4 深度含水量量測總長約 1 米，Node 5 為 2 深度含水量量測總長約 1.1 米，Node 10 為 3 深度含水量量測 1.3 米。

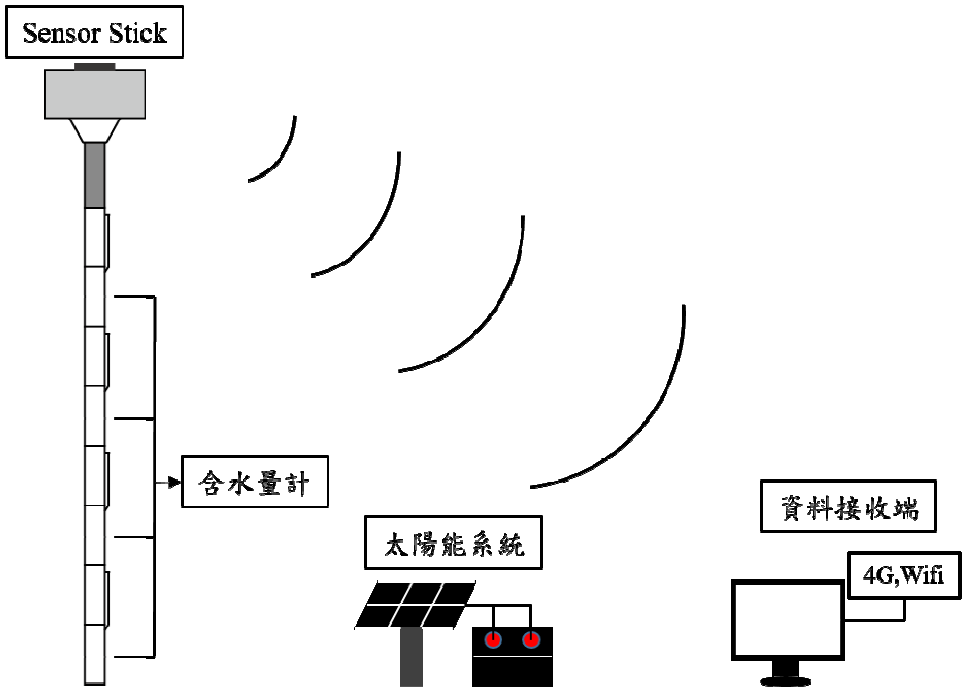


圖 3.31 西湖監測系統架構圖

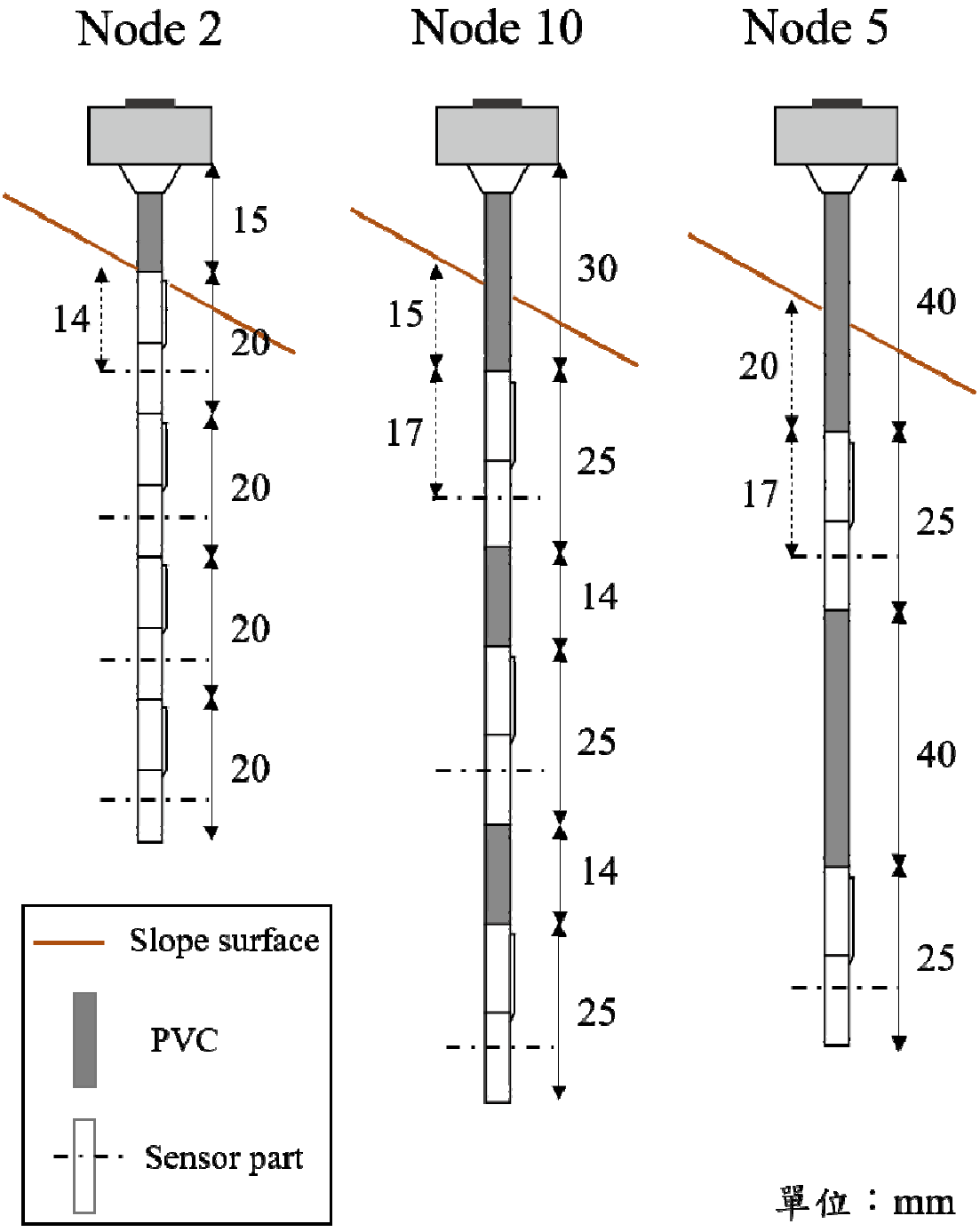


圖 3.32 西湖場址監測模組尺寸與實際安裝深度示意圖



圖 3.33 各監測模組安裝相對位置與系統盒內模組

監測模組安裝流程如圖 3.34，先利用手持式電動鑽機於安裝位置鑽孔至預定深度，鑽孔直徑需大於監測模組感測桿端直徑，而後將孔內土壤挖除以便放入監測模組，置入監測模組後將水準儀放上確保垂直度，再將挖除之土壤回填並夯實，必須讓土壤水份計與土壤緊密接觸，若未緊密接觸則可能造成量測上的錯誤，回填完成後於模組地表周圍鋪上薄層皂土(蒙脫土)並加水，防止降雨雨水直接沿著桿壁向下流。

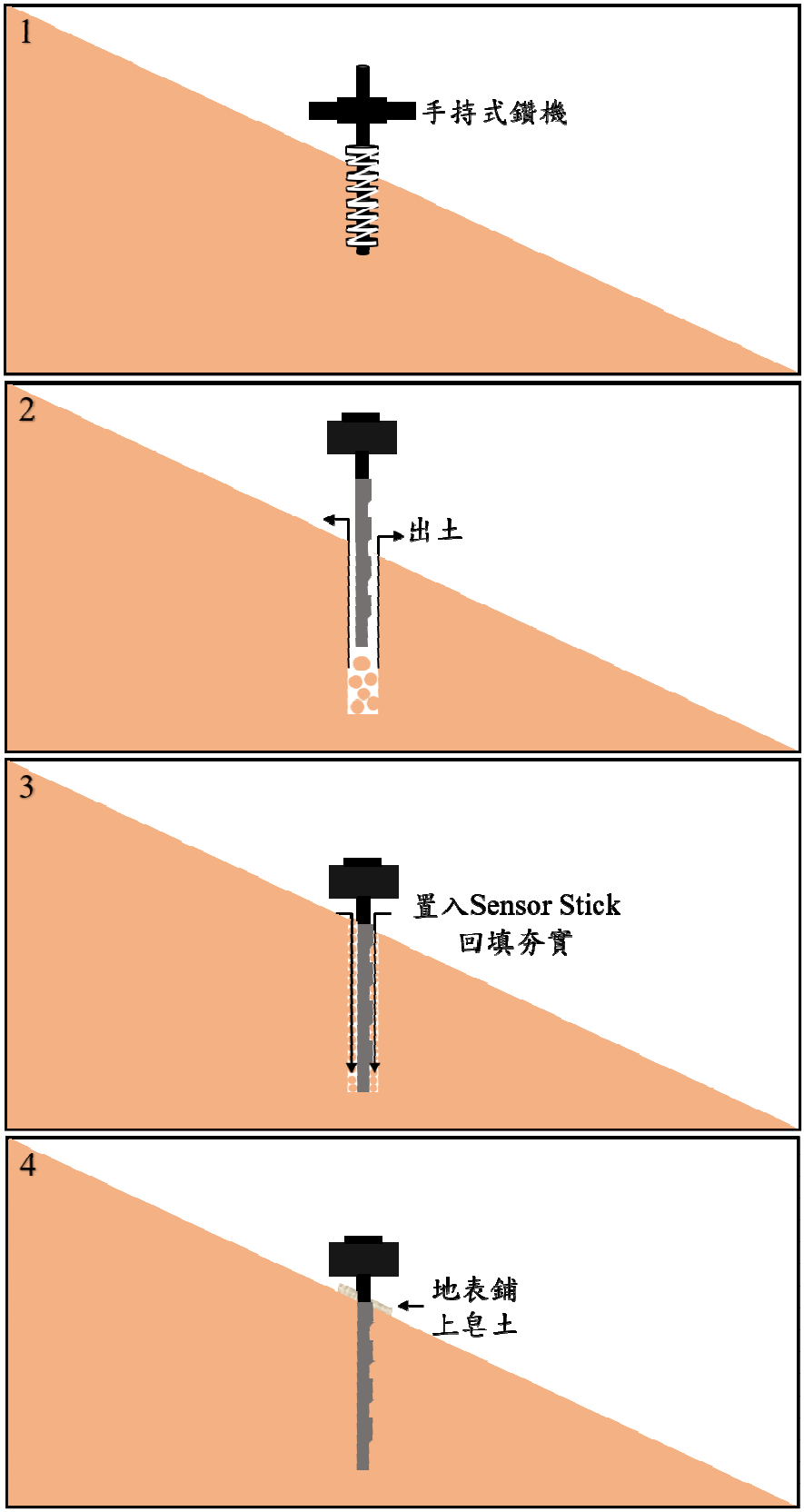


圖 3.34 監測模組安裝流程圖

資料接收端位於邊坡下方之機房內如圖 3.35，距離安裝監測模組之邊坡約 50 米，設備主要有 Arduino+ nRF24L01、Huawei 移動寬頻及電腦，將所有設備所需電源接上，移動寬頻僅須開啟 wifi 並設定好 4G 網際網路連線，電腦連線上移動寬頻 wifi，開啟永不休眠模式，並用 USB 連接 Arduino 開啟 Tera Term 程式自動記錄資料，同時開啟 Teamviewer 以便遠端監控。因機房為二層混凝土建築，為了使無線通訊上障礙減少，nRF24L01 需外接一條延長式天線並固定於窗戶上。



圖 3.35 資料接收端位

3.4 西湖場址監測資料

本計畫於西湖安裝監測模組後，各監測模組資料約每 10 分鐘穩定無線傳輸至資料接收端的電腦，計畫期間除因幾次電量不足及電腦故障因素導致了資料傳輸中斷，已記錄了從 2016.12.23 ~ 2017.04.28 約 5 個月之資料(包括含水量與傾斜量)。於去年 12 月至今年 3 月間，屬旱季降雨事件極少，因此土層含水量幾乎沒有特別變化，至 3 月底至 4 月中開始有降雨事件。以下為因降雨造成之含水量變化資料以及傾斜量變化資料。

3.4.1 西湖場址土層含水量監測資料

本章節擷取了 3 月底至 4 月中兩場降雨事件，選取 Node 2，4 深度(地表下 10、30、50、70 cm)含水量量測監測模組之資料，但因地表下 30cm 含水量計故障，因此僅有其餘 3 個深度之數據。而 Node 10 含水量計已有兩個深度損壞，Node 5 含水量量測異常(可能與安裝土壤回填未緊密有關)，因此本章僅擷取 Node 2 之資料。

圖 3.36 為 Node2 於 2017/3/31－2017/4/02 之含水量隨降雨之變化，可看出降雨發生後，地表下 10cm 之含水量計最先反應含水量增加，而後 50cm 之含水量計隨後慢慢增加，最深之含水量計原先幾乎沒有變化卻突然與 50cm 含水量增加至近乎飽和，以降雨入滲的觀點不太可能有這麼迅速的含水量變化，尤其雨量其實不大，因此合理推斷為最深處含水量計周圍土壤安裝時較難夯實緊密，可能因周圍回填土壤相較於現地未擾動土壤疏鬆且裂隙較大，當上層土壤水量足夠時直接流入最深的含水量計周圍導致量測之含水量極高，且降雨過後土層含水量消散也可看出最深處含水量計消散的最慢，因此推斷為類似碗公儲水的可能性極高。

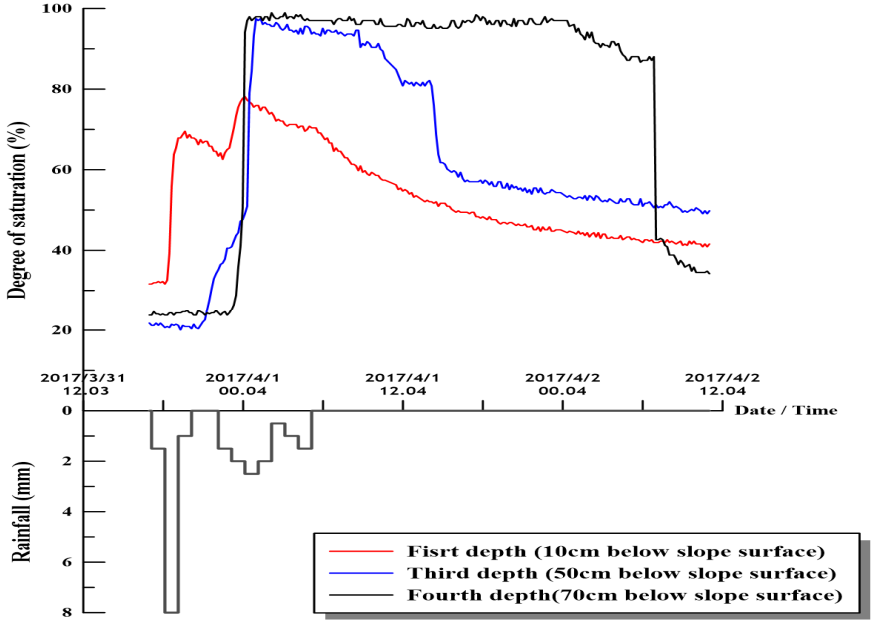


圖 3.36 Node 2 於 2017/3/31－2017/4/02 降雨與含水量變化

圖 3.37 為 Node 2 於 2017/4/11－2017/4/16 之含水量隨降雨之變化，其變化趨勢與圖 3.36 之降雨事件類似，10cm 含水量計隨降雨量之變化反應迅速，50cm 則較慢反應，70cm 最深之含水量則出現儲水的反應現象。由兩次降雨事件結果可得出: (1) 離地表越近之土壤含水量直接受降雨量之影響變化最顯著，而越深之含水量則反應越慢。(2) 現地安裝監測模組因挖填導致土壤孔隙變化，可能造成量測上的問題，且水可能直接進入挖填最深處造成儲水。因此安裝時盡量減少回填土壤與周圍土壤滲透上的差異性為入滲監測準確與否之關鍵。

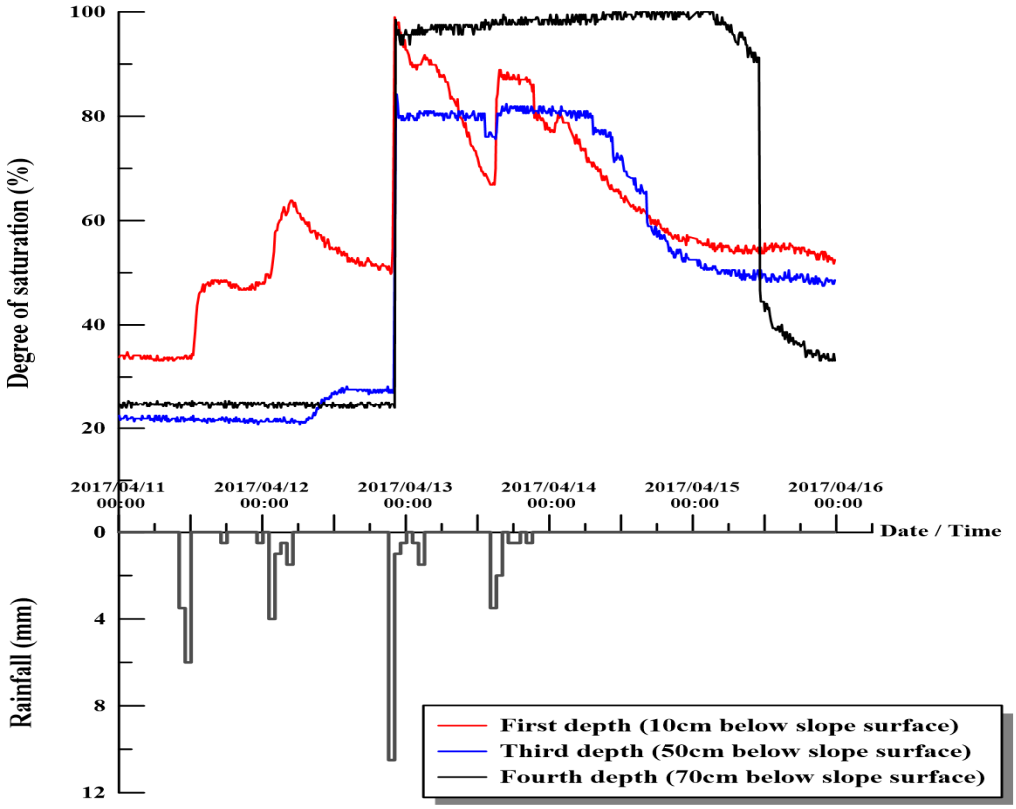


圖 3.37 Node 2 於 2017/4/11－2017/4/16 降雨與含水量變化

3.4.2 西湖場址傾斜監測資料

圖 3.38~圖 3.40 別為 Node 2、5、10 於 2016/12/23 至 2017/4/28 之監測傾斜量變化結果。各 Node 初始傾斜量即有約 1~2.5 度不等的傾斜量，原因為鑽孔非垂直與傾斜模組焊接於電路板時即有些許偏斜，初始偏斜量僅作為後續監測相對應之初始值。

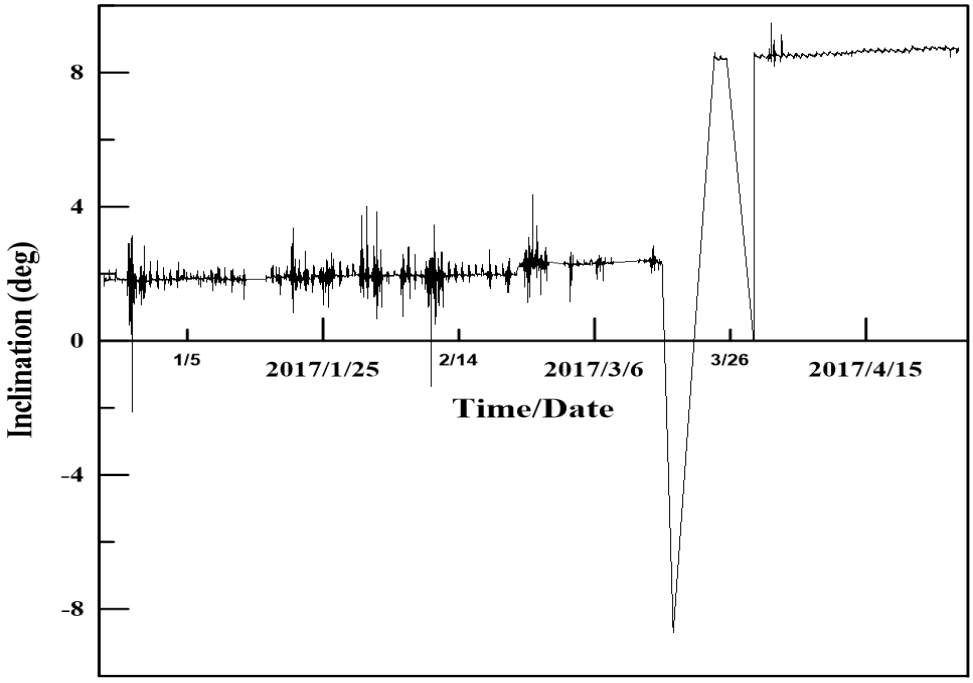


圖 3.38 Node2 於 2016/12/23－2017/4/28 傾斜量變化

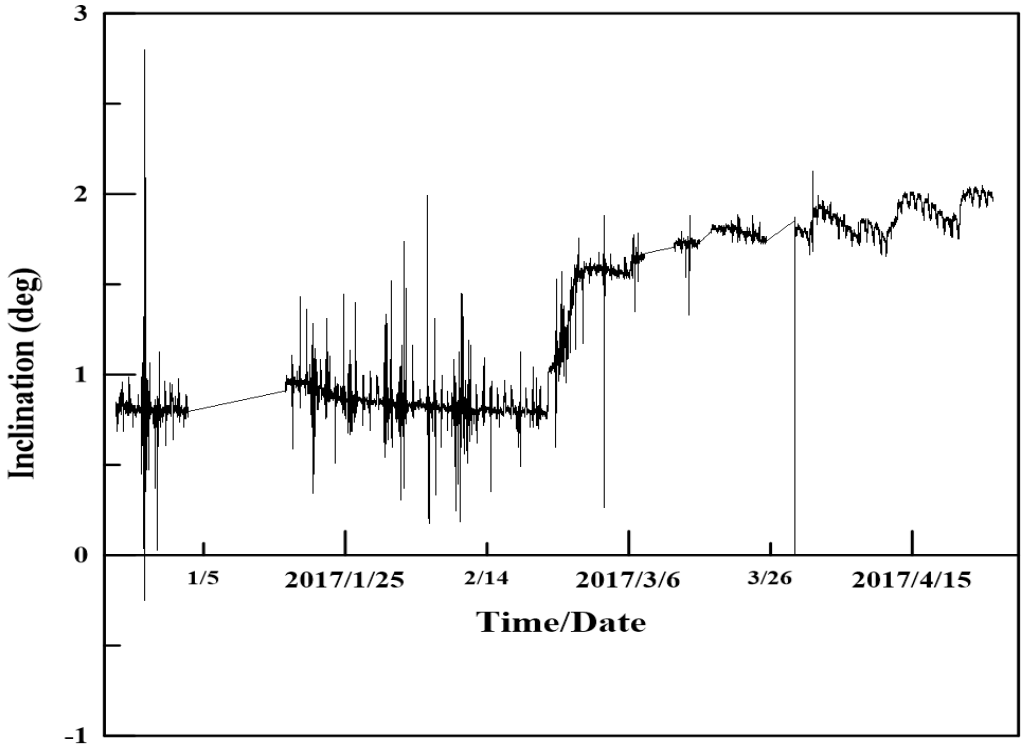


圖 3.39 Node5 於 2016/12/23－2017/4/28 傾斜量變化

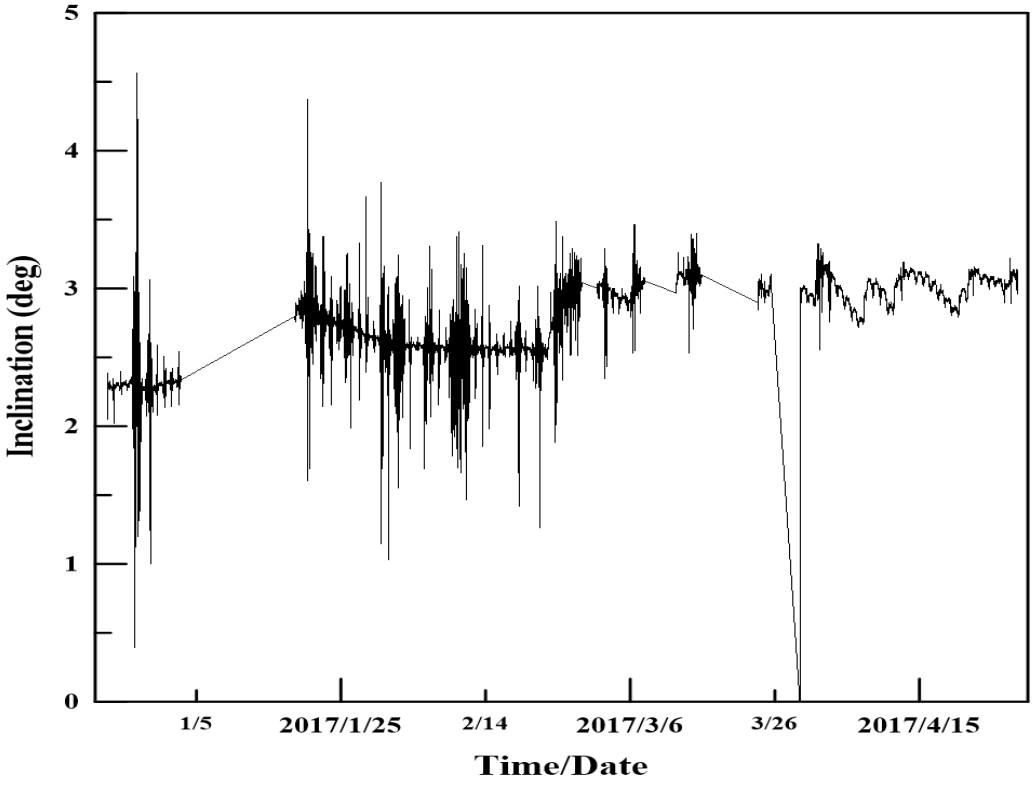


圖 3.40 Node10 於 2016/12/23－2017/4/28 傾斜量變化

由各 Node 長期監測結果可發現整體趨勢為傾斜量增加約 0.5~1 度左右，期間有許多時間跳躍的點位代表系統供電不足暫時無法收取資料，通常待太陽能自行充電足夠後電池即恢復放電，而傾斜量變化較大之狀況為因風力或者系統於斷電後復電第一次數據量測誤差造成。圖 3.38 之 Node2 數據於約 3/20 後傾斜量增加至 8 度原因為更換監測模組時因原鑽孔有些許坍孔，導致置入新的監測模組時僅能勉強嵌入鑽孔無法確保水平。現地淺層變位監測結果顯示場址於過去半年內傾斜量約增加 0.5~1 度，假設監測模組底端若為不動點則換算後之地表位移約 0.8~1.7cm 左右，代表此邊坡淺層可能有持續潛變的現象，但實際上是否如此仍需持續觀察。

3.4.3 更新後西湖場址監測資料

西湖監測站因原有系統於 7 月上旬大部損壞，因此於 7 月下旬進行系統重整更新，更新為與甲仙場址相同系統，並增設一組監測模組

(Node ID=6)，相關觀測成果如圖 3.41 至 3.44 所示，更新後系統穩定度顯著提升。

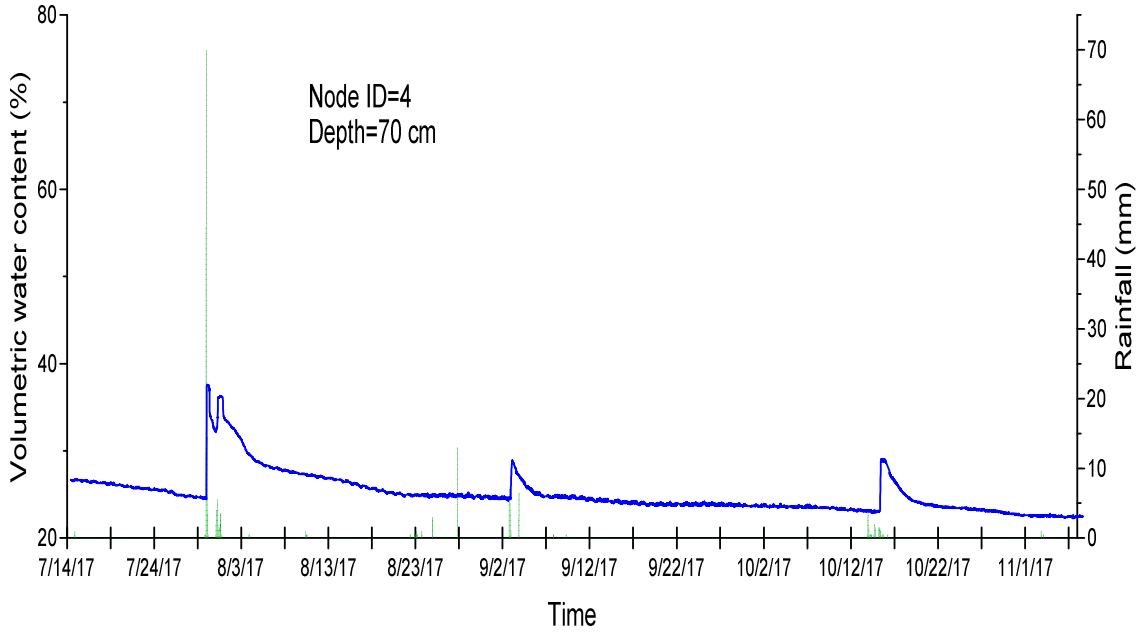


圖 3.41 更新後西湖 Node4 土層含水量紀錄

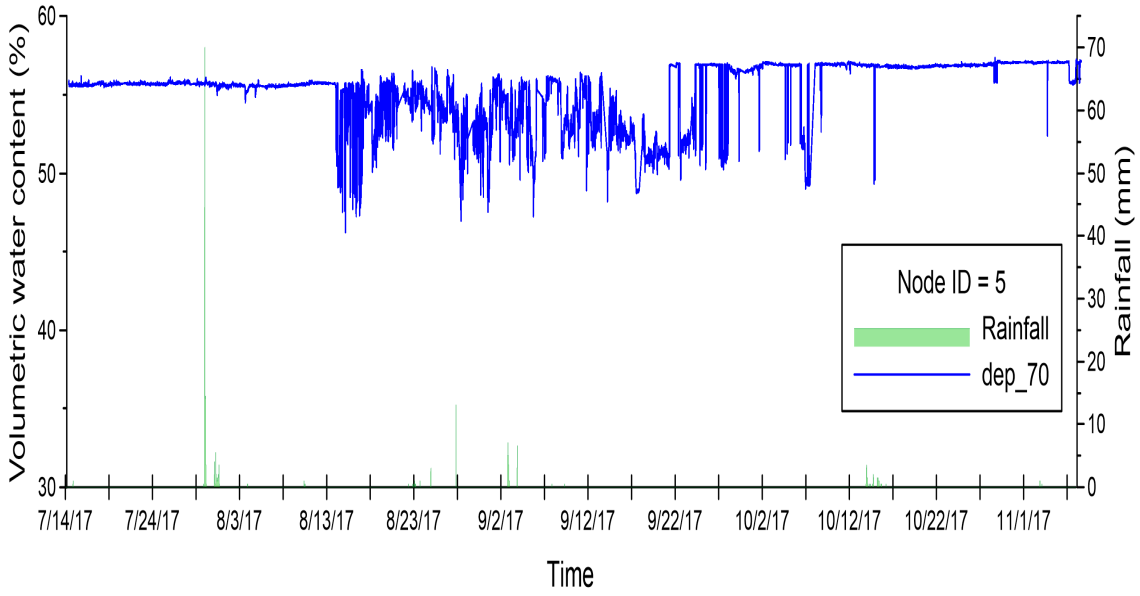


圖 3.42 更新後西湖 Node5 土層含水量紀錄

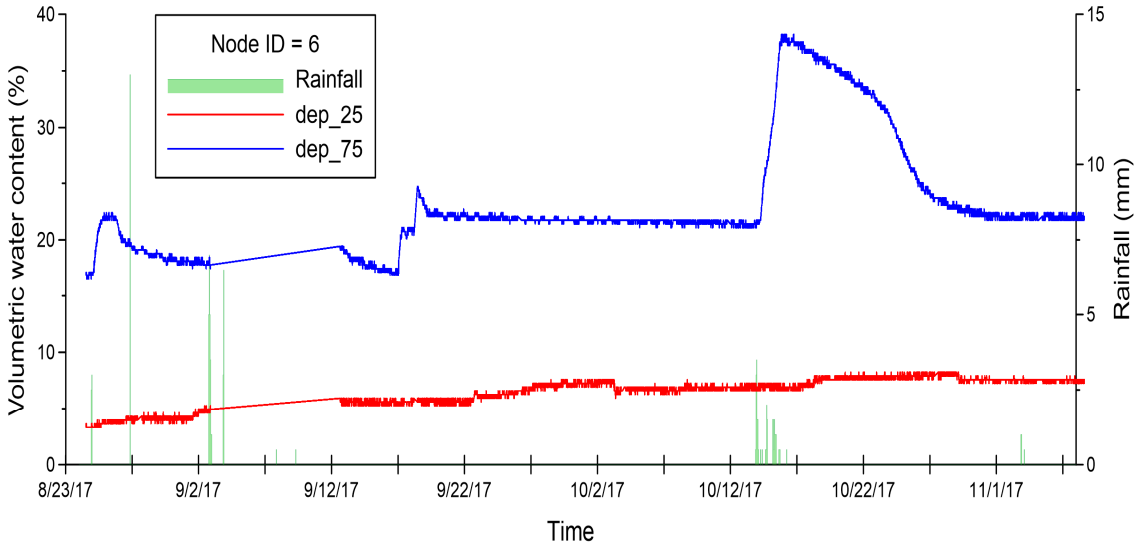


圖 3.43 更新後西湖 Node6 土層含水量紀錄

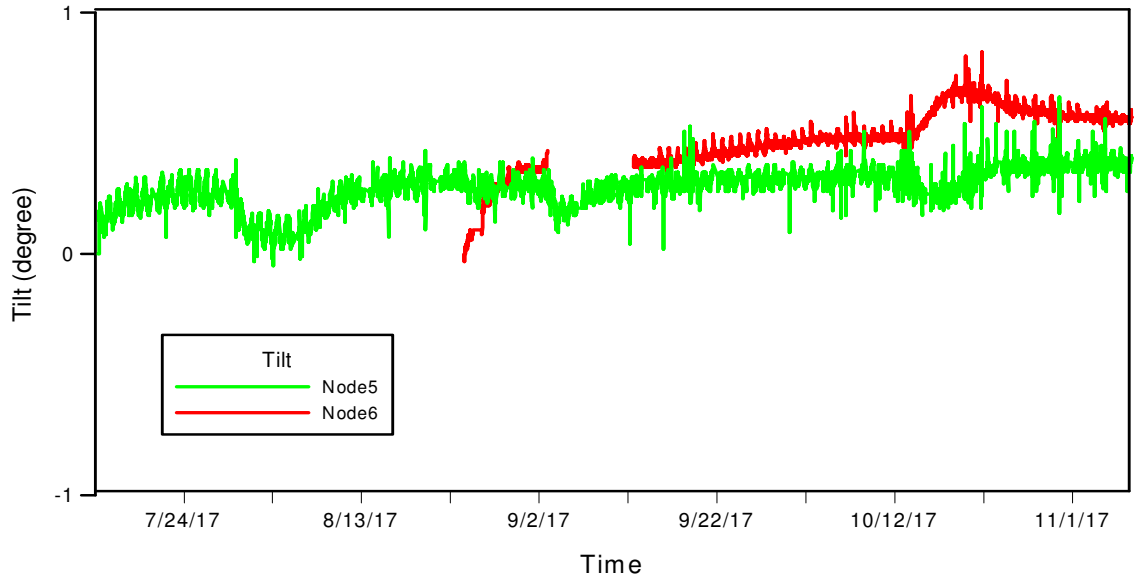


圖 3.44 更新後西湖傾斜量紀錄

第四章 深層滑動場址監測與分析

針對深層滑動機制分析，本年度之主要目標為完成水力力學耦合之邊坡極限平衡與數值模擬，初期關鍵為選定適合之研究場址，相關幾何模型與地質參數參考文獻，依選定場址之現地幾何與地質材料性質，進行二維水力力學耦合分析，此結果將可作為規劃深層滑動表層監測模組量測物理量之依據，所規劃之深層滑動無線感測模組原型亦可進行現地測試。

深層滑動候選場址須符合下列條件:

1. 現地需具有厚層軟弱土壤，坡角小於土壤有效摩擦角，地下水位高或入滲速率快，臨界破壞面為飽和土層之深層破壞。
2. 具有相關幾何、水文及地質參數，並儘可能有現地監測資料參考。
3. 須為鄰近道路之邊坡，且具高破壞潛勢或有破壞歷史。
4. 鄰近具有通訊訊號，以進行雲端資料傳輸。

由於本計畫研究對象為深層土壤邊坡破壞，此雖為台灣常見之災害類型，但進行解析法分析需有一定解析度之地形幾何與詳盡之地質材料參數資料，經與承辦單位進行商討，由相關設計或施工單位收集相關資料，本年度選定以阿里山五彎仔路段進行研究。

4.1 五彎仔深層監測

4.1.1 五彎仔路段資料彙整

根據交通部勘查全臺灣公路，阿里山公路列名最危險公路之一，其中以阿里山公路五彎仔路段最為嚴重，該公路之里程樁號為 42k+900~45k+500 之路段，行政區域屬嘉義縣番路鄉公田村。自民國 71 年拓寬通車後，該路段常常發生路面下陷龜裂及檔土結構物錯動破

壞，且每年投入許多經費養護、整治，但該路段至今仍繼續滑動中。而在民國 92 年 6 月發生大規模崩坍，其中崩坍範圍如圖 4.1 所示，阿里山公路 31.5k 裸坡崩坍後，不但造成沿線交通中斷 3 個月且該路段因此改線。

依民國 93 年青山工程顧問公司五彎仔地滑區調查與監測結果，圖 4.2 顯示五彎仔地滑區所埋設監測儀器配置圖，但所安裝之各式監測儀器，大多因坡面滑動而造成破壞，無法繼續發揮監測功能。據該研究結果，進行水平排水井整治前，該地區仍在繼續滑動中，其中以 N2、N3 及 N4 滑動塊體滑動量最大，在雨季期間，平均每月滑動可達 1.5 公分。另外現地地質調查與監測結果顯示，此區域岩層層面與坡面傾向並非一致，可排除地層滑動與順向坡之關連性，其可能滑動機制為崩積層與岩層介面之滑動或沿著深層破碎岩層弱面滑動，加上該區域涵蓋有剪裂帶且岩層也相當破碎。雨季期間，受地表水入滲的影響，局部區域地層之水位或水壓遽增，也可能是地層滑動主要之原因。

五彎仔地滑區面積約達 50 公頃，各滑動塊體滑動位移方向，大都朝向坡址之南獨座溪及北獨座溪向下滑移。根據青山工程顧問公司到查結果，將阿里山五彎仔地區分為 8 個滑動塊體，如圖 4.2。其中以 N2、N3 及 N4 滑動塊體滑動量最大，尤其在雨季期間，平均每月滑動可達 1.5 公分。可從水位觀測井 B2、05-02 及 05-01 的觀測數據得知，在暴雨其間該區域之水位變化均可達數十至二十公尺以上，顯示該區域地質是非常破碎且影響水位變化的可能原因並非全由地表水入滲，部分是由側向水流補注所造成，導致地下水位上升快速，土壤有效應力減小，降低土壤之抗剪強度，造成該區域滑動量為最大。



圖 4.1 阿里山公路五彎仔路段航照圖（青山工程顧問公司, 2006）

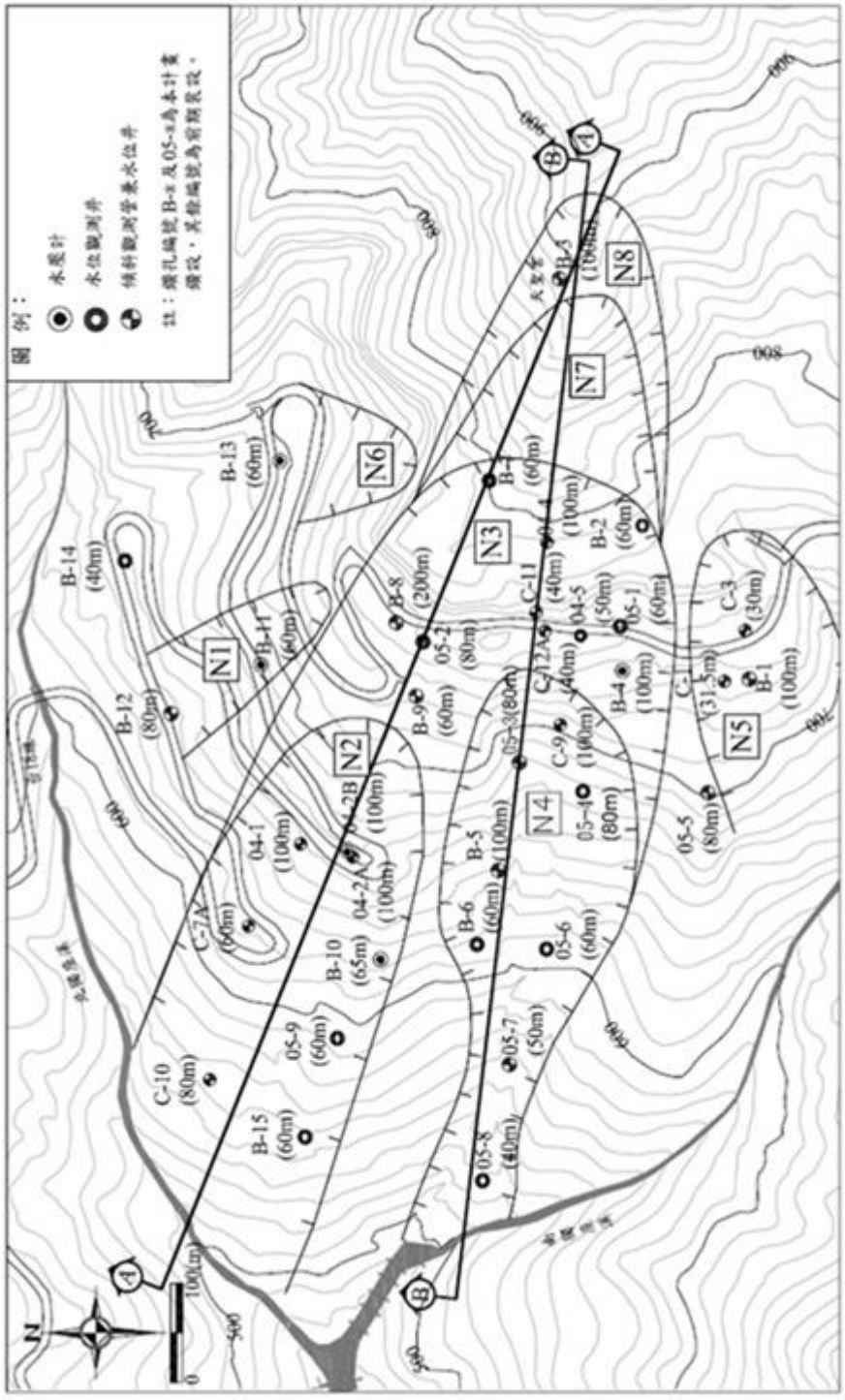


圖 4.2 阿里山公路五彎仔路段監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2006）

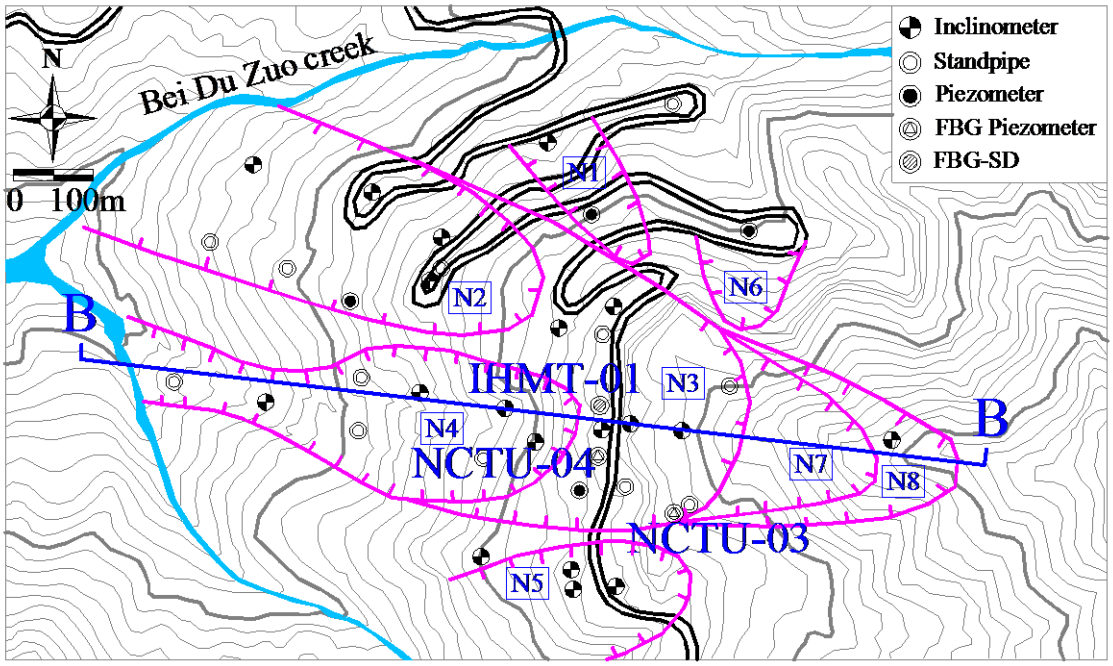


圖 4.3 全光纖式監測儀器配置圖（青山工程顧問公司, 2007）

邱永芳等(2011)於 2006~2010 年間以光纖感測監測此區域之地層傾斜與分層水位變化，其配置如圖 4.3 所示，由 NCTU-03 於辛樂克與莫拉克颱風監測結果，該區域的地層內之水壓力變化，淺層部分水壓力會開始先增加，之後深層部分，因受其側向水流入滲，則水壓力開始有變化趨勢，可觀察出，當地層內部受到水平向滲流影響時，則水壓並非呈靜態水力梯度增加。

本場址之優點包括具完整地質與監測資料、屬典型深層滑動、距離適宜且仍可能具滑動高潛勢，缺點為整治後力學與水力機制複雜、現有監測孔位非完全適宜及須取得相關許可。

4.1.2 五彎仔路段現狀與監測規劃

該路段於 2006 年 6 月 26 日區因山區連續豪大雨，造成 45k+500 處約有 150~170 公尺的路基嚴研重流失。決定由該崩塌坡頂較安全地方開闢道路來改線銜接前後公路路線，並且在災後該地滑區施作多處的擋土牆與全套管基樁及深長度地錨等抑制工法，如在 42k 的全套管基樁與地錨擋土工法並加貫入約 25m § 15cm 之 HDPE 排水管等措施，

來緩和該地區的滑動與崩塌行為。且於 2014 年 5 月~2016 年 7 月期間委託專業工程顧問辦理該五彎仔地滑區之調查、整治及提出防治工程。

其中規劃排水工法，在地滑區布設大口徑(§4.5 公尺)、深度 45~50 公尺之集水井（4 口，W-1、W-6、W-7、W-8），並於井底再往上各 5m 打設有 3 層不同深度(每層有 9 管以 22.5°間距向上游打設，其仰角約為 4~6°其長度在 70m 左右每井約有 27 支集水管)，往上游打設扇形橫向集水管（70 公尺），藉由井底排水管往下游較適當地點在導排之，希望可以把該地滑區因降雨期間所造成之崩塌區的地下水位迅速排出，以降低其地下水壓力，提升其土體內的有效應力，即以較為軟性的抑制方式提高地滑區之邊坡穩定性，該大口徑深井排水工法的示意圖如圖 4.4 所示。

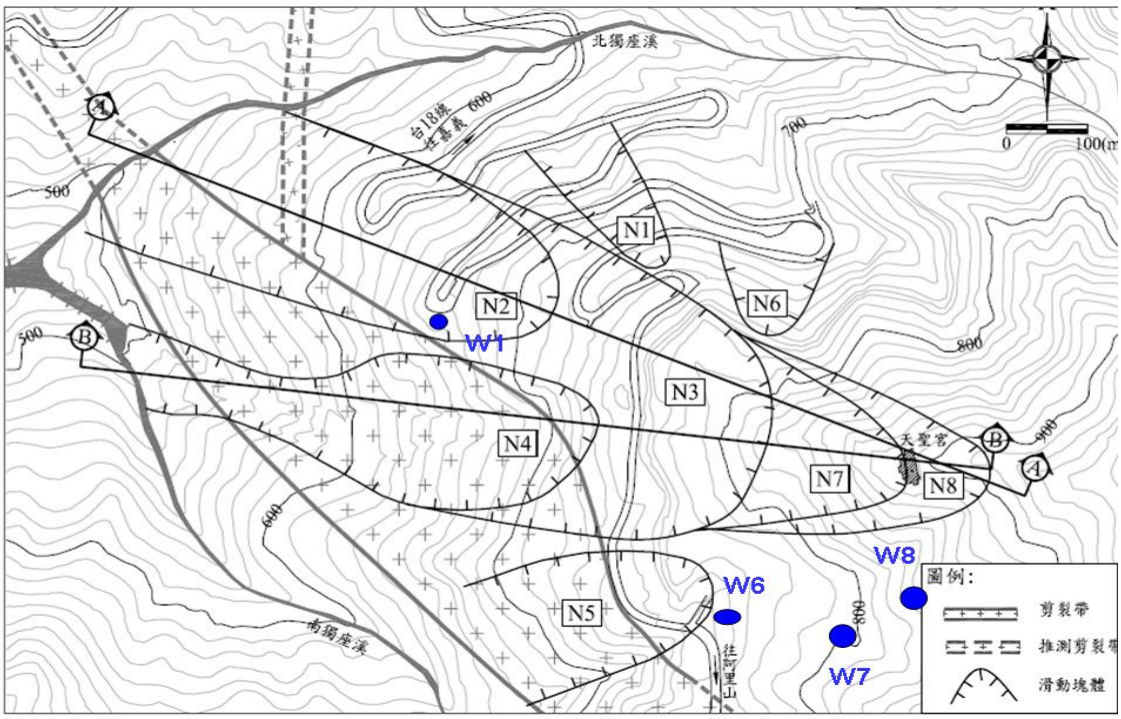


圖 4.4　台 18 線阿里山公路五彎仔崩塌區塊體滑動與深井配置圖(公路局五工處)

現地崩塌材料剖面如圖 4.5 所示，為含大顆粒礫石之典型崩積層，其堆積疏鬆且礫石多以懸浮狀態分佈於殘餘土壤，傳統上此類土壤強度參數決定須以大型試體進行剪力實驗，但受限此類設備並不常見且

價格昂貴，因此 Chang and Phantachang (2016)提出考慮礫石含量之土壤強度修正程序，其建議以重模土壤顆粒進行控制 skeleton void ratio 之實驗結果，進行礫石顆粒效應修正，本研究將以此程序推估現地崩積層土壤強度參數。



圖 4.5 五彎仔地區崩積材料剖面

圖 4.6 為利用成大自行研發之單剪儀以五彎仔崩塌區土壤，以重模土壤顆粒進行控制 skeleton void ratio 之實驗結果，圖中顯示不同垂直有效應力下不同礫石含量之最大剪應力，可做為剪力強度參數推估之依據。

4.1.3 五彎仔路段監測規劃

圖 4.7 為公路局五工處提供現有該路段監測儀器配置，現地踏勘後考量破壞機制、破壞潛勢、監測井完整性、人員通達便利性及通訊訊號強度，選定 B-7 孔位，圖 4.8 為圖 5.4 中 A-A 剖面之滑動塊體分布及可能滑動深度，B-7 位於 N3 滑動塊體，滑動塊體底部約在 80~120m，B-7 孔深為 60m，地下水位在雨季約為 10~20m，乾季則在 40m 以下。

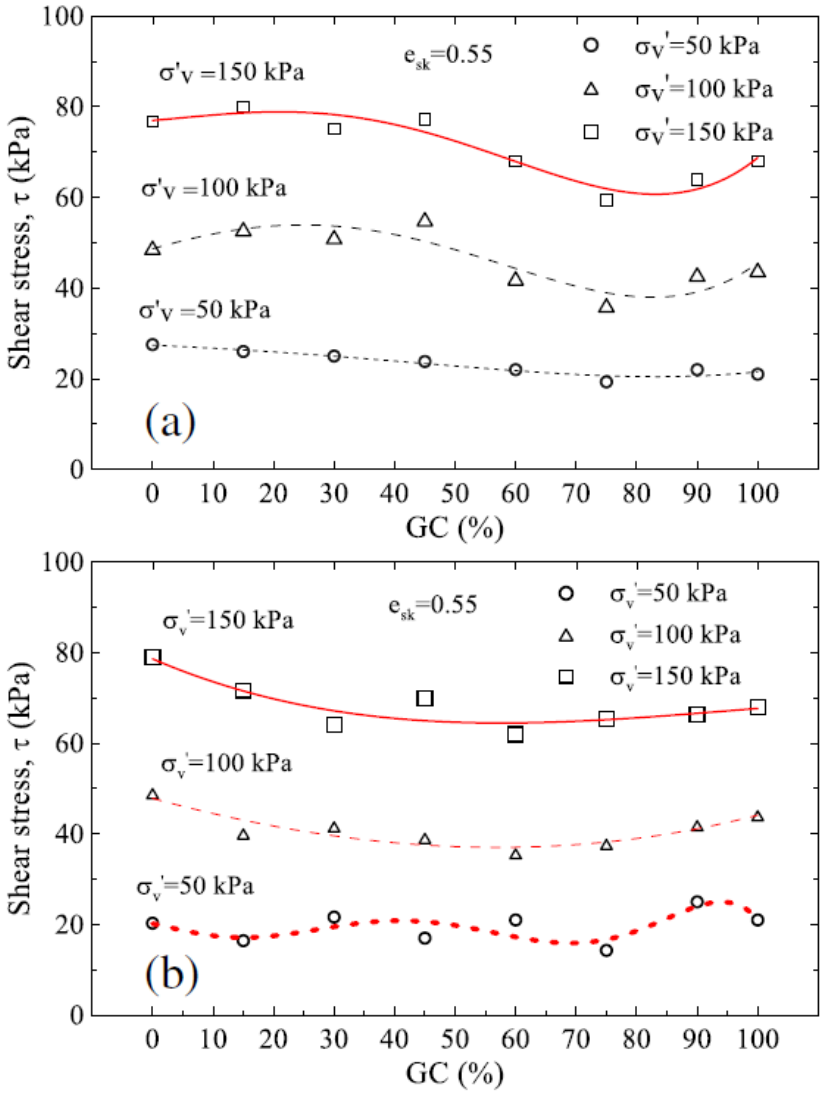
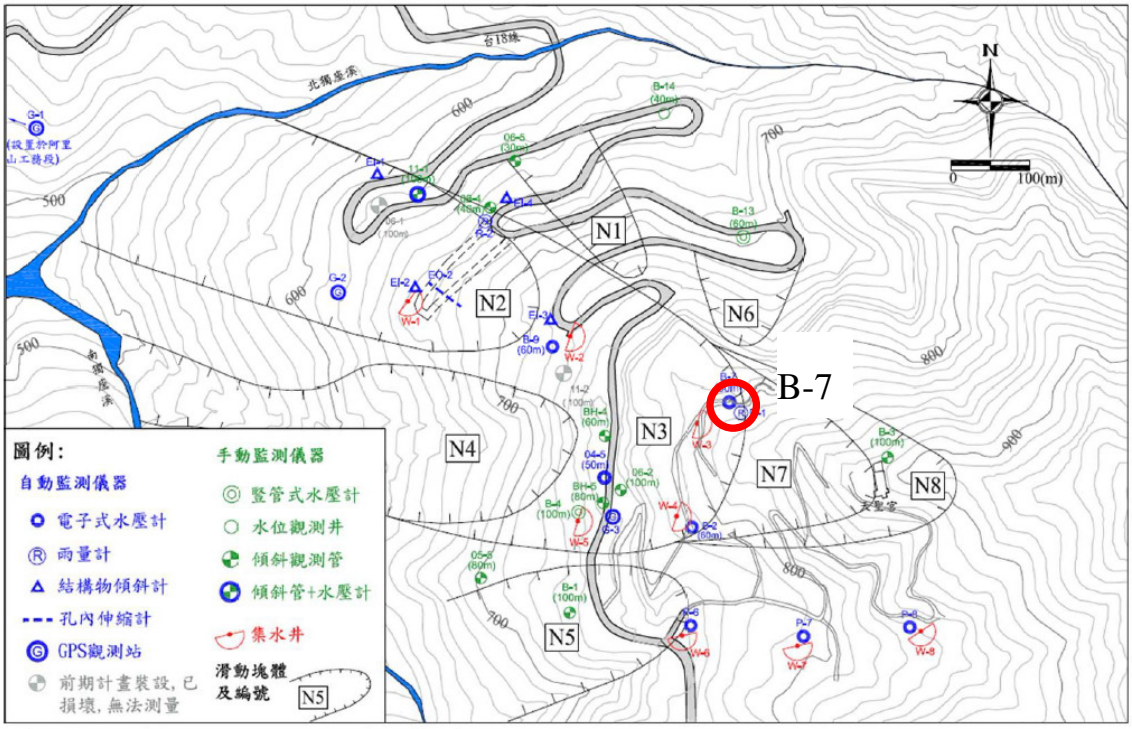


圖 4.6 五彎仔地區崩積材料剖面

經取得業管單位公路局五工處之許可後，深層滑動監測模組安裝於 B-7 井旁，感測模組外構與現場安裝如圖 4.9 所示，表層佈設入滲與傾角監測模組，增加液位計與通訊模組，圖 4.10 為內部電子配置圖，以太陽能板及鋰電池供給電源。



註：第 A 期整治工程包括 W-1、W-6、W-7、W-8 等 4 座集水井
第 B 期整治工程包括 W-2、W-3、W-4、W-5 等 4 座集水井，並改善 A 期整治工程中的 W-6、W-8 集水井

圖 2-1 監測儀器平面配置圖

圖 4.7 五彎仔崩塌區監測儀器配置圖(公路局五工處提供)

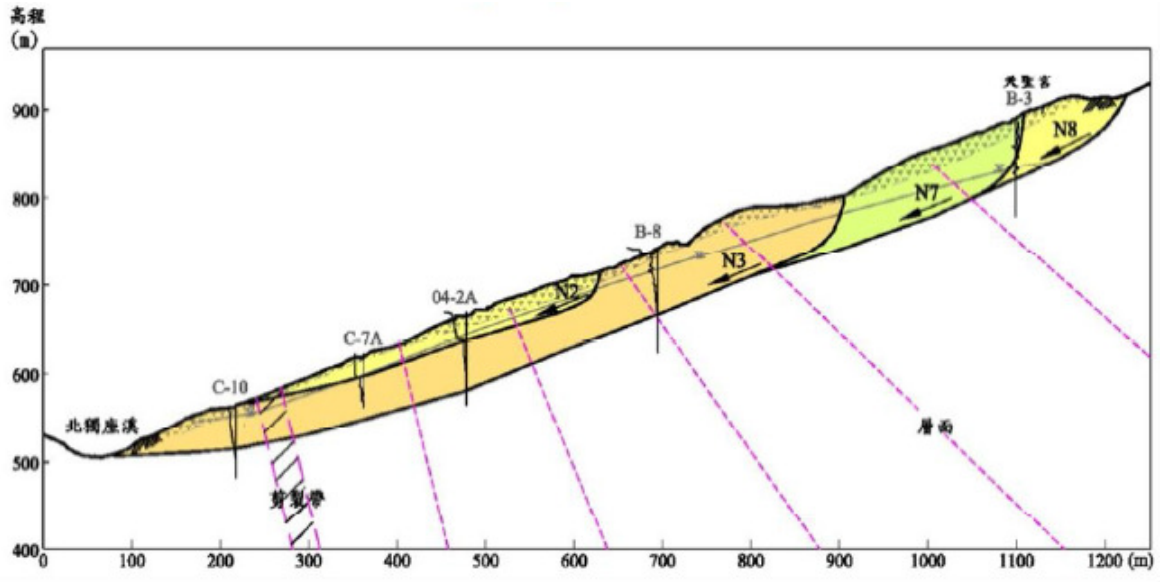
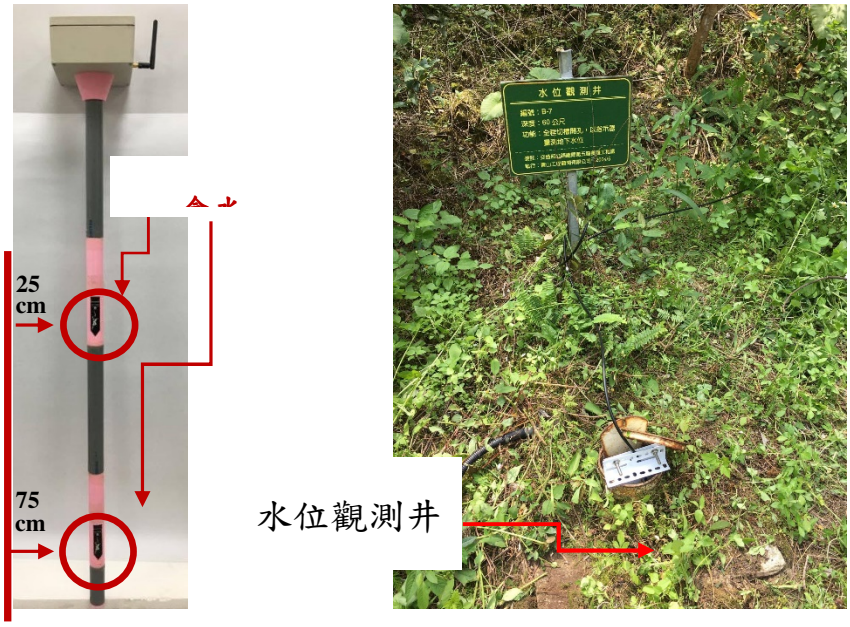


圖 4.8 滑動塊體分布及可能滑動深度圖(公路局五工處提供)



(a)模組外構　　(b) 水位觀測井



(c) 現場安裝示意圖

圖 4.9 深層邊坡無線感測模組外構與現場安裝圖

因目前僅有單一監測點，因此直接以 3G 模組上傳資料至雲端伺服器，但考量後續多點監測之需求，已預先整合 LoRa 通訊界面，另為連結類比式液位計，另加入類比-數位卡及直流電源供應，液位計底部位於地表下 30m，可量測水深為 20m，解析度可達 1 cm，每 10 分鐘讀取一次。

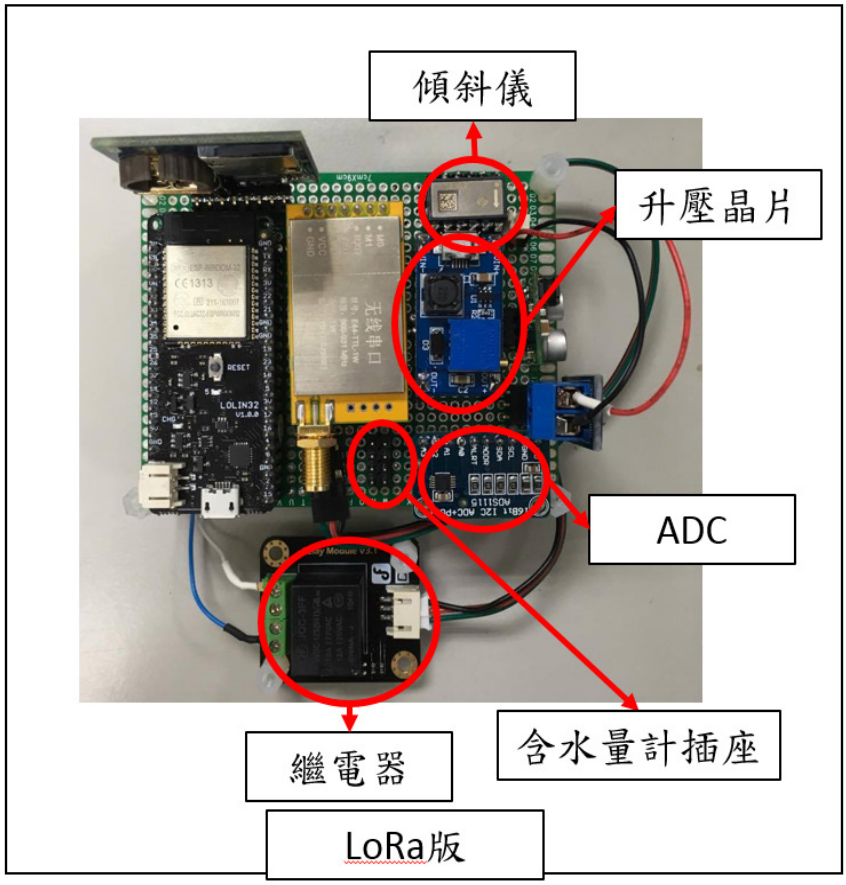


圖 4.10 深層邊坡無線感測模組電子配置圖

4.1.4 深層滑動模組監測成果

模組於 2017/09/05 裝設完畢上線後，因地下水位位於地表下 40m 以下，因此無水位紀錄，但地表分層水分及傾角仍持續有紀錄，結果如圖 4.11 及 4.12 所示，分層水位與降雨關聯符合入滲現象，而傾角則有持續變動。

為驗證地下水位監測之性能，研究團隊以相同之系統安裝於牡丹水庫右岸邊坡，進行性能測試，相近時間內監測成果如圖 4.13 所示，降雨與水位具正相關且水位上升具延遲現象，顯示深層監測模組架構已具一定完整性，以測試目的而言，符合原先規劃。

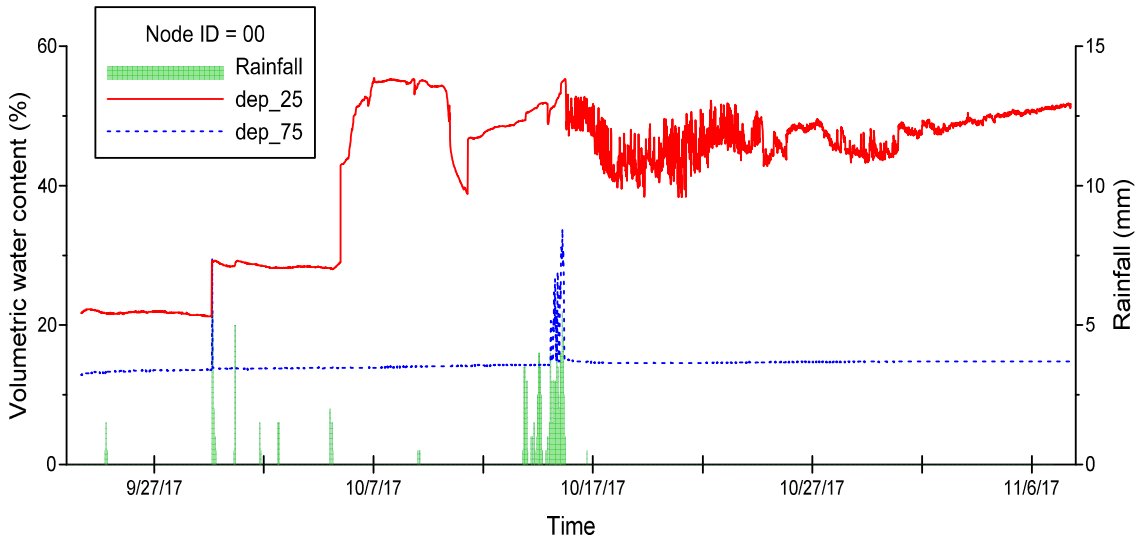


圖 4.11 深層邊坡無線感測模組分層水分紀錄

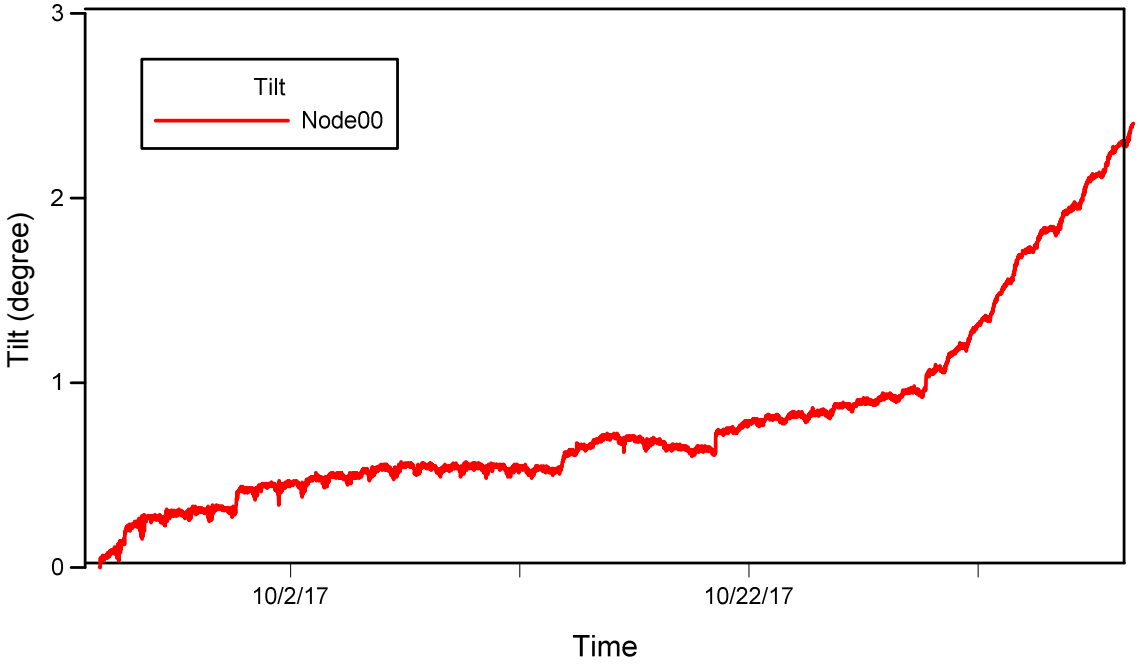


圖 4.12 深層邊坡無線感測模組傾角紀錄

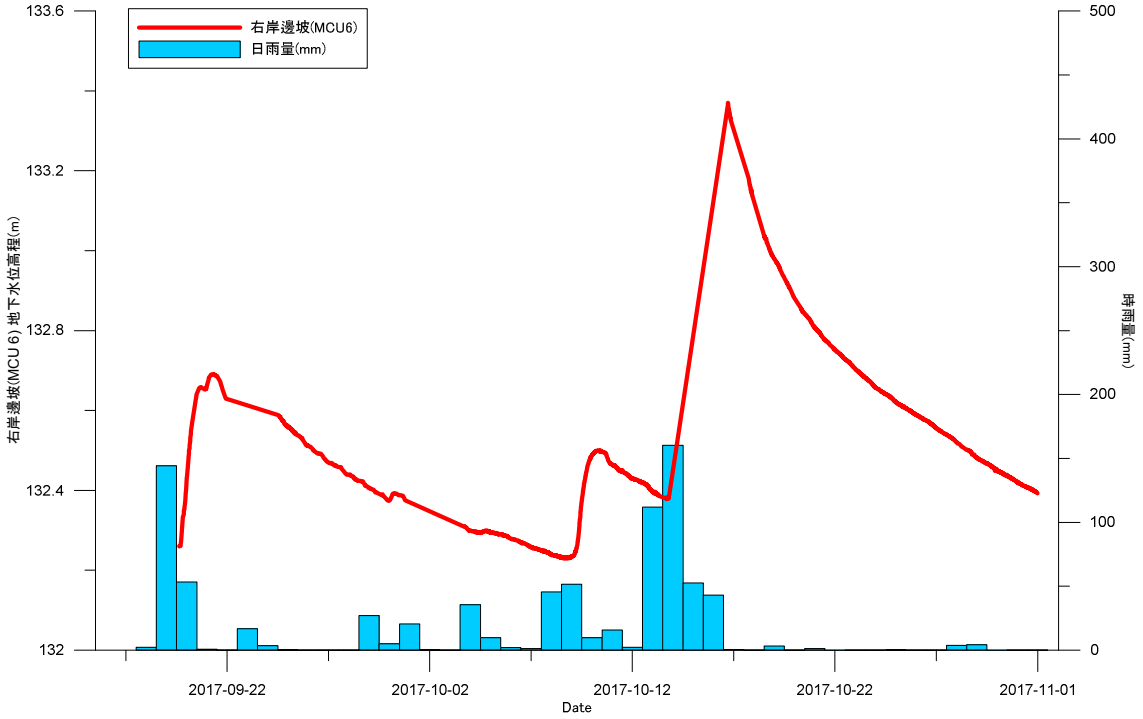


圖 4.13 深層邊坡無線感測模組孔隙水壓紀錄

4.2 五彎仔二維水力力學耦合穩定分析

為模擬降雨入滲引致之孔隙水壓變化，本研究以 FLAC 程式中之兩相流模組(Two-phase flow module)，進行五彎仔 A-A 剖面非飽和滲流分析，並開啟力學分析功能，於暫態滲流分析過程中同步進行力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，且考慮非飽和土壤基質吸力改變對有效應力之影響，更新土壤彈性參數及強度，模擬非飽和土層邊坡因降雨垂直入滲引致之破壞過程模擬。分析相關理論詳 2.1.5 節說明，模擬細節說明如下:

4.2.1 土層參數與幾何

依現有文獻顯示，五彎仔現地地層分為表土崩積層(Colluvium)、高度風化岩層(weathered rock, WR)、輕微風化(light weathered rock, LWR)及岩盤(Rock)，分析時採用之彈性與強度參數如表 4-1 所示，非飽和崩積層 van Genuchten (1980)模式擬合參數如表 4-2 所示，，非飽

和水文參數如表 4-3 所示，基質吸力引致土壤強度參數ϕ^b 為 5° 。

表 4-1 分析所用土層參數

參數	單位	Colluvium	WR	LWR	Rock
非飽和單位重	kN/m^3	18.5	19.6	21.0	22.0
飽和單位重	kN/m^3	21.0	21.6	22.0	22.0
楊氏模數	kPa	4000	1.0E4	2.0E4	1.0E5
柏松比		0.4	0.35	0.35	0.25
有效凝聚力	kPa	0	4.0	12.0	120
有效摩擦角	度	31	30	40	40
膨脹角	度	2	0	0	0
滲透係數	(m/s)	1.0E-4	1.0E-6	1.0E-8	1.0E-10

表 4-2 崩積層 Van Genuchten (1980) 模式擬合參數

θ_s (%)	θ_r (%)	α	m	n
43.5	6.1	0.1	0.99	1.11

以圖 4.14 所示之網格，選用之力學邊界為兩側垂直邊界於水平向固定，底部則為雙向固定。水力邊界則以底部為滲流邊界，坡頂表面設為保持飽和狀態並固定其孔隙水壓力為 0，初始基質吸力為表 4.3 之 Pc 值，初始飽和度為崩積層之平均值，以此初始與邊界條件進行水力力學耦合模擬，分析時監測 B-7 孔位處之反應。

表 4-3 非飽和水文參數

參數	Colluvium	WR	意義
Porosity	0.35	0.1	孔隙率
k_{sat} (m/s)	1.0E-4	1.0E-6	飽和滲透係數
fmodulus (Pa)	2.0E9	2.0E9	水體積模數
saturation	0.54	0.54	初始飽和度
Vga	0.1	0.1	VG parameter a
Vgpcw	0.5	0.5	VG water parameter b
Vgpncw	0.5	0.5	VG air parameter
vgp0 (Pa)	15000	15000	VG P0
Pc (Pa)	-45203	-45203	初始 From Pc(Sw)

圖 4.15~圖 4.16 為入滲達 4.1E5 秒後水壓分布與流動向量、垂直有效應力分布，反應與前期甲仙場址相近，圖 4.17 位移向量及水平位移分布圖顯示鄰近 B-7 邊坡為位移量最大之地區，顯示其具有相對高滑動潛勢。

模擬至 4.1E5 秒孔隙水壓及水分子流動向量如圖 4.15 所示，水由表層開始以垂直向下流動進行入滲(infiltration)及滲漏(percolatation)，不同深度土層基質吸力降低，當土層飽和後其基質吸力為 0 並產生正的孔隙水壓力，其值與深度相近，來源為靜水壓，第二階段為而當飽和土層達到一定厚度後開始產生約略平行坡面之滲流，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，B-7 位置不同深度孔隙水壓時間歷時如圖 4.18 所示，此時孔隙水壓因滲流而大幅增加，且此時因孔隙水壓增加導致土體產生顯著運動。分析結果顯示，使用現有使用參數及地質模型，B7 預測於持續降雨入滲下於 $4.1*10^5$ 秒(約 5 日)產生滑動。

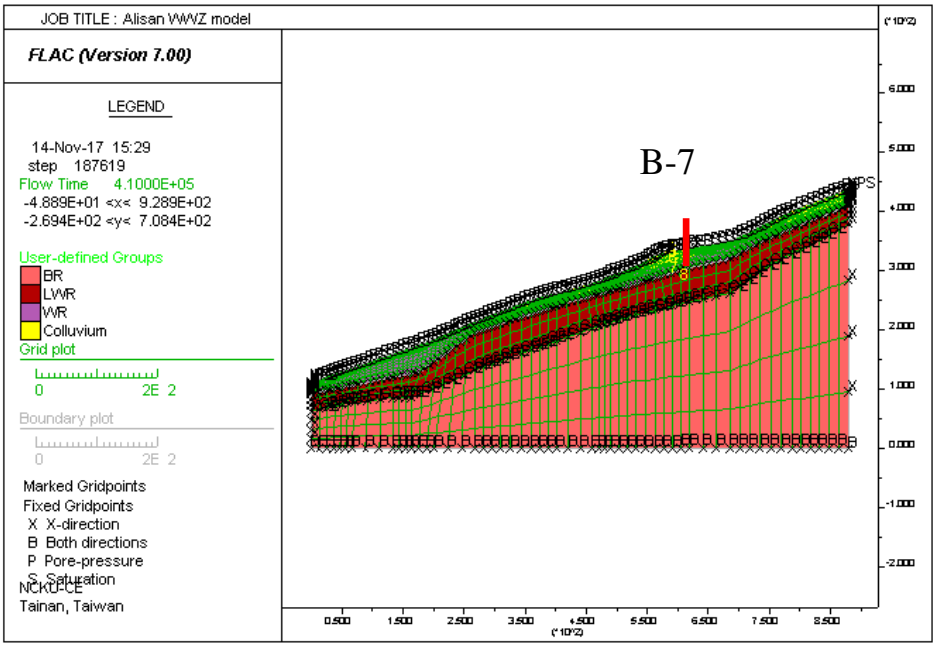


圖 4.14 五彎仔數值分析模型

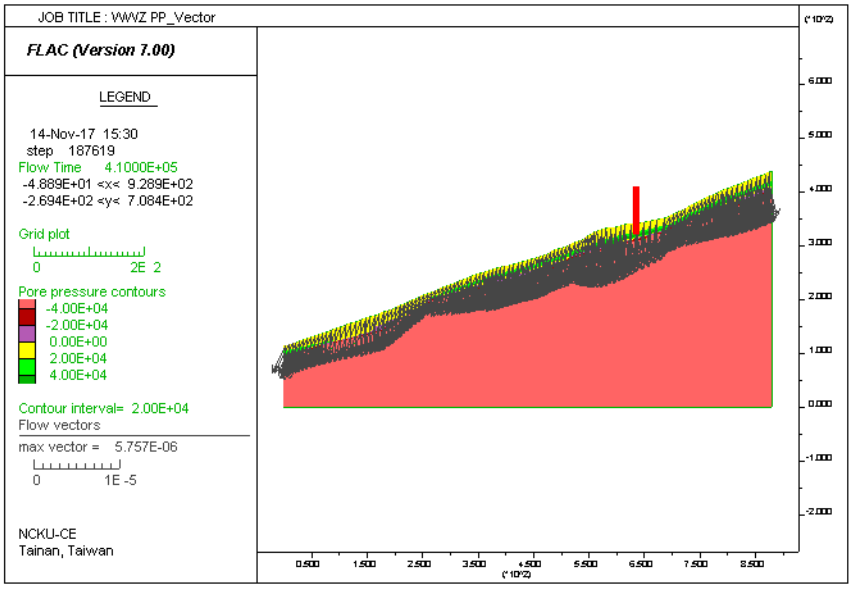


圖 4.15 入滲開始後 410000 秒後孔隙水壓分布與流動向量

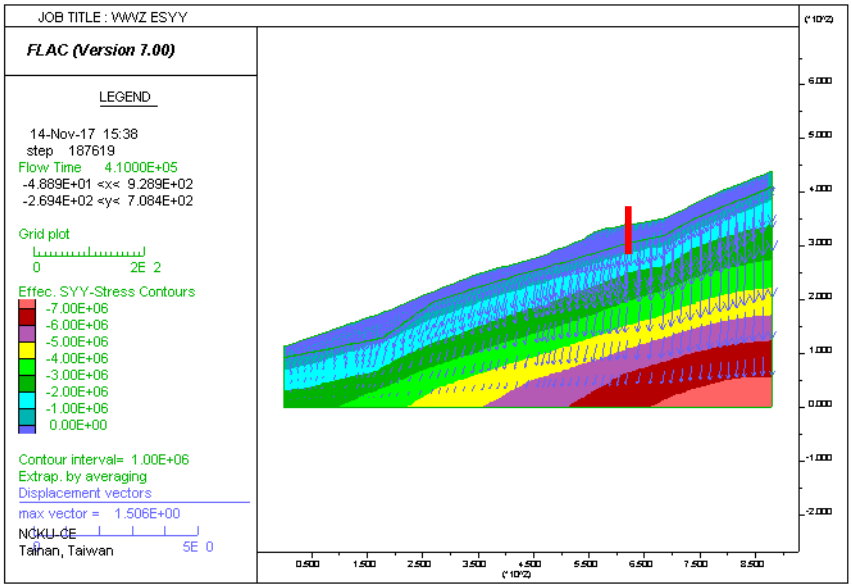


圖 4.16 入滲後垂直有效應力分布與位移向量

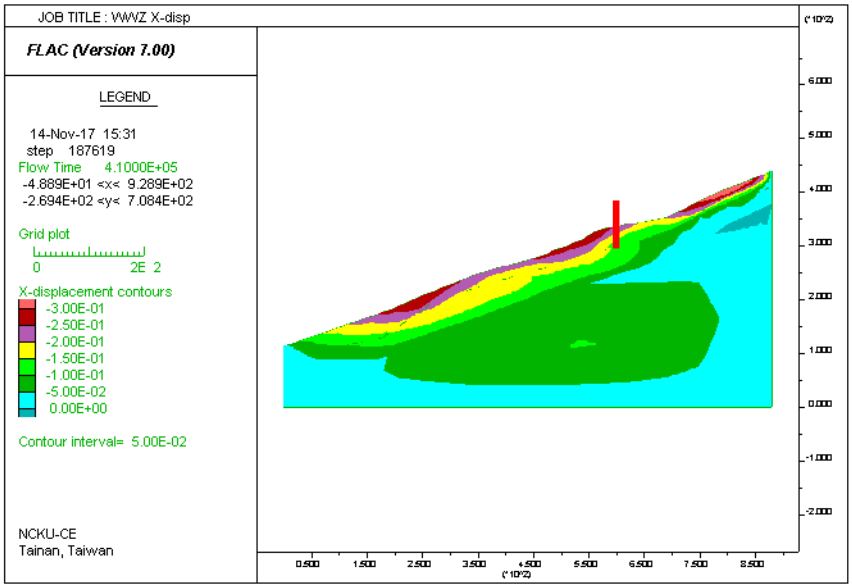


圖 4.17 入滲後水平位移分布

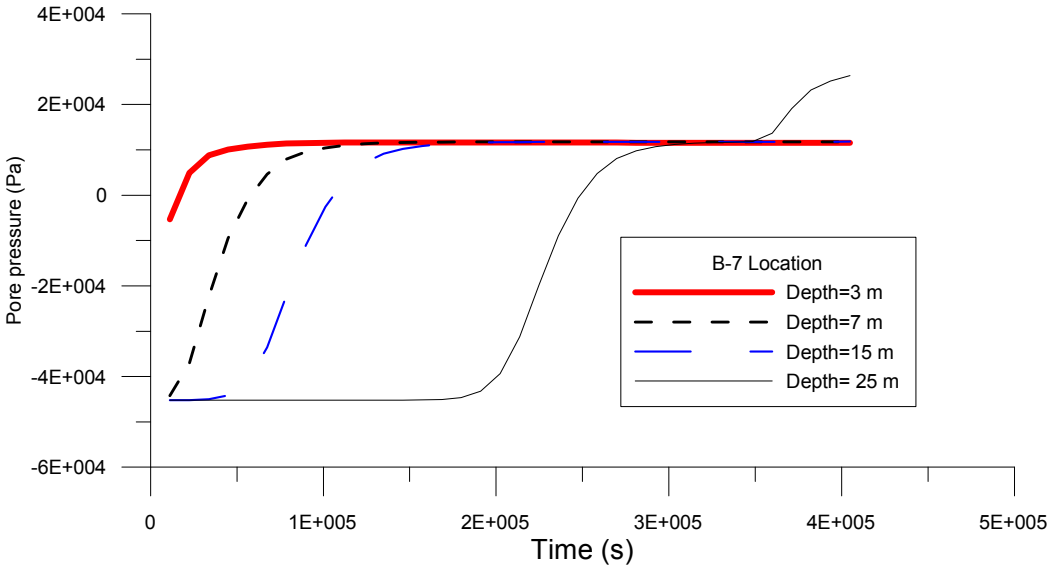


圖 4.18　B-7 位置預測孔隙水壓歷時

第五章 多視立體視覺攝影測量及監測相關理論

近年來，多視立體視覺中三維重建技術，以從運動恢復結構（Structure from Motion, SfM）演算法重建場景，起初 SfM 是以攝影測量衍生出來之方法，透過記錄相機行進路線，並求得相機姿態參數，接著運用三角測量進一步重建三維場景。隨著時代改變，其重點逐漸轉為從無序或有序之影像進行三維重建，主要是重建場景之深度及相機拍攝位置。

本研究延續近景攝影測量技術應用於道路邊坡監測使用，其關鍵核心技術包含多視立體視覺攝影測量理論技術及相機率定技術，以下先就視覺攝影測量理論技術進行闡述，後續包含像機率定、自動識別標誌及相關自動監測方法之相關技術進行說明。道路邊坡近景攝影自動監測方案採用監測點的自動監測，藉由自動識別標誌及自動量測，完成監測點變位判別依據，而道路邊坡整體滑動或破壞情事查詢可由稠密點雲資訊，經由多時期點雲差異判別該區域是否產生變位。

5.1 視覺攝影測量理論基礎

機器人視覺(Computer Vision)是以立體視覺(Stereo vision)理論描述射影幾何(Projective Geometry)為基礎，用來表示機器人與空間的相對幾何關係。由運動恢復結構(SfM)技術的發展，以多視立體(Multi-view Stereo, MVS)計算理論描述由序列影像中恢復物體位置的三維幾何關係，建立了計算機視覺領域中的三維重建技術理論。該技術於 1990 年後獲得了重大的發展，其中最具代表性之研究由學者 Hartley & Zisserman 提出。多視立體視覺由一般相機所獲取的影像序列來重構三維場景的三維空間結構及獲取相機外方位參數，其處理程序又稱為從運動恢復結構(SfM)[17-18]。其基本理論如下說明：最基本的公式用齊次座標的投影方程表達為：

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = P_1 P_2 X = PX \tag{5.1}$$

式中，R 為 3×3 階旋轉矩陣，t 為 3×1 階平移向量，P_n 為 3×4 階的投影矩陣，它將攝影機的內、外方位元素全部隱含在其中，它與攝影測量的直接線性轉換公式（Direct Linear Transformation, DLT）一致[19]。

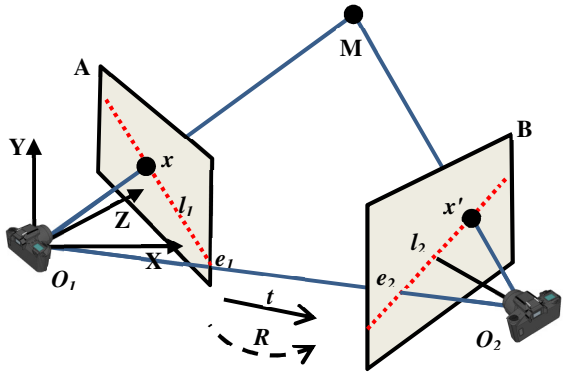


圖 5.1 核線幾何關係

多視立體視覺理論是基於核幾何（Epi-Polar Geometry）所衍伸的方法，如圖 5.1 所示，O_1 和 O_2 分別是兩個相機的投影中心，獲取的影像分別為 A、B 影像對，O_1 和 O_2 連線（基線）與 A、B 影像的交點 e_1, e_2 為核點。假設空間點 M 至相機投影中心由位置 O_1 到位置 O_2 的平移向量為 t，旋轉矩陣為 R，而在兩位置時對應的相機內方位參數分別為 K_1 及 K_2，空間點 M 在 A 及 B 影像上的投影分別為 $m_1(x_1, y_1)$（左影像）及 $m_2(x_2, y_2)$（右影像）。設影像點 M 到點 m_1 的轉換矩陣（即投影矩陣）為 P_1，到點 m_2 的投影矩陣為 P_2，則：

$$m_1 = P_1 M \ ; \ m_2 = P_2 M \tag{5.2}$$

設 O_1 為三維空間座標系的參考原點，且過 O_1 的相機主光軸為 Z 軸，則投影矩陣 P_1 和 P_2 可分別表達為：

$$\begin{aligned} P_1 &= K_1 [I \mid 0] \\ P_2 &= K_2 [R \mid t] \end{aligned} \tag{5.3}$$

由於一般情況下，R 及 t 是未知數，因此，多視立體視覺中投影矩陣 P_1, P_2 是所求的未知矩陣。利用射影幾何理論以及像對間的核線幾何關係，推導出對應像點 x 與 x' 之間滿足關係：

$$m_2^T F \ m_1 = 0 \tag{5.4}$$

其中 F 稱為基礎矩陣（Fundamental Matrix），它是一個 3×3 階的齊次矩陣，秩（Rank）為 2，因此僅有 7 個自由度，F 為投影矩陣(P_1,P_2)之基礎矩陣，則 F^T 亦為投影矩陣(P_1,P_2)之基礎矩陣，F 為奇異矩陣，即 $\det(F)=0$。F 表示了兩影像間的核幾何關係，即基礎矩陣 F 將影像 A 上的像點 m_1 轉換到影像 B 上通過其核點的直線上為 m_2。基礎矩陣最主要的用途：

1. 簡化影像匹配：因為需滿足 $m_2^T F\, m_1 = 0$，所以匹配時可以使用此約束條件，讓匹配視窗可以使用線性式的搜尋，亦即可將搜尋方式由二維方式降為一維搜尋方式，以節省運算的時間並提升匹配結果之可靠度。
2. 匹配點位除錯：將匹配後之點位代入公式，藉此運算判斷該點對是否為正確匹配之點位，並剔除錯誤之匹配點位。

令 e_1 , e_2 分別為左、右張影像上的核點，則：

$$Fe_1 = 0$$
$$F^T e_2 = 0 \tag{5.5}$$

當已知 A , B 二影像的投影矩陣為 P_1 和 P_2，則可得基礎矩陣：

$$P_1 = K_1[I\,|\,0]\ ,\quad P_2 = \left[[e_2]_m F e_2\right] \tag{5.6}$$

式中：

$$e_2 = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix},\ [e_2]_m = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$[e_2]_m$ 為第二張影像上核線之外積表示矩陣。

當投影矩陣未知時，可以透過共軛點推定得到基礎矩陣。欲推估兩張影像間的基礎矩陣可由(5-4)式求得，在兩張影像上任意的對應點 m_1 與 m_2 必然需要滿足 $m_2^T F\, m_1 = 0$。若兩張影像中的特徵點集合 $m_1(x_1, y_1)$ 與 $m_2(x_2, y_2)$，則每一組共軛點可以產生一個線性方程式，由於基礎矩陣扣除一個尺度常數之後，還有八個未知數，因此最少要有八組共軛點，才可以解算基礎矩陣。推求基礎矩陣的方法有很多種，最常被使用的有八

點法、七點法、RANSAC、LMeds 等方法。較為簡單且最廣為使用的為八點演算法[17]。

從 n 個匹配所得共軛點的集合可以得到方程式組：

$$AF = 0 \tag{5.7}$$

式中：

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} x_2x_1 & x_2y_1 & x_2 & y_2x_1 & y_2y_1 & y_2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ x_2^n x_1^n & x_2^n y_1^n & x_2^n & y_2^n x_1^n & y_2^n y_1^n & y_2^n & x_1^n & y_1^n & 1 \end{bmatrix}$$

對 $A = UDV^T$ 進行奇異值分解(SVD)所得 V 的最後一列向量，即為 F 的整體最小二乘(Total Least Square, TLS)解。制約條件為誤差平方和 ε 為最小，即：

$$\varepsilon = \frac{\min}{F} \sum_i^n (m_2^{i^T} F\, m_1^i)^2 \tag{5.8}$$

當相機內方參數已知時，可由基礎矩陣 F 求得本質矩陣 E（Essential Matrix），$E = K_2^T F\, K_1$。而本質矩陣 E 可分解為：$E = [t]_x R$。

對本質矩陣 E 進行分解即可得到投影矩陣 P_2，得到投影矩陣 P_1 和 P_2 後即可求得點 M 的三維空間位置（座標）。由分解本質矩陣得到的旋轉矩陣 R 和平移向量 t 為相機在獲取影像時的三維空間方向與位置。設對應左、右片第 i 個共軛點的影像座標為 $(x_1^i, y_1^i, 1)^T ; (x_2^i, y_2^i, 1)^T$，$X_i$ 為對應該共軛點的空間齊次座標，s 為一常數，則：

$$\begin{bmatrix} p_{13}u_i & -p_{11} \\ p_{13}v_i & -p_{12} \\ p_{23}u_i' & -p_{21} \\ p_{23}v_i' & -p_{22} \end{bmatrix} X_i = 0 \tag{5.9}$$

藉整體最小二乘法（TLS）之奇異值分解法，求解出 X_i 的值即完成三維重建的工作，稱之為稀疏點或準稠密點重建。

在相機內方位參數未知時，可由基本矩陣利用 Kruppa 方程式得到，也可以由基本矩陣計算投影矩陣，再由投影矩陣利用絕對對偶二次曲面進行自校正得到，該程序可稱為相機的自率定（Camera Self-Calibration）。

為了提升三维重建結果的精度，在多視立體視覺中引入 Bundler 平差方法，以增量方式加入逐張相片，增加多餘觀測並使用最小二乘法以序貫平差方式來作最佳解的推定。

對於稠密點雲的匹配重建，計算機視覺領域提出幾種解決的演算法，其中以Furukawa於2010年提出的面片基礎的多視立體視覺（Patch-Based Multiple View Stereo, PMVS）演算法效果最佳。

透過 Bundler 結合 PMVS 的特徵點匹配、面片擴展（Expansion）及濾波（Filtering）的程序全自動地獲取得相機的投影矩陣和稠密三維點雲。最後經由網格化及紋理貼圖該程序完成製圖應用的真正射影像製作。該程序已成為多視立體視覺三維重建的主流方法。

在實際計算中，四元數（Quaternion）法比奇異值分解（Singular-Value Decomposition, SVD）法運用更為普遍。它將旋轉矩陣用一個單位四元數 q 來表示，其中單位四元數 $q=(q_0,q_x,q_y,q_z)^T$ 滿足條件：$q_0>0, q_0^2+q_x^2+q_y^2+q_z^2=1$，其旋轉矩陣的運算式為：

$$R=\begin{bmatrix} q_0^2+q_x^2-q_y^2-q_z^2 & 2(q_xq_y-q_0q_x) & 2(q_xq_y+q_0q_y) \\ 2(q_xq_y+q_0q_y) & q_0^2-q_x^2-q_z^2 & 2(q_zq_y-q_0q_x) \\ 2(q_xq_z-q_0q_y) & 2(q_zq_y-q_0q_x) & q_0^2+q_x^2-q_y^2+q_z^2 \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

用以計算旋轉矩陣 R 及平移向量 t。

由前面基本的敘述可以看出，數值攝影測量與多視立體視覺的目的相似，但在理論本質上存在有很大的差異，數值攝影測量多在解決非線性描述與計算的問題，但多視立體視覺卻在追求線性的描述與計算問題。

近年來由 SfM 結合 MVS 的 SfM-MVS 三維重建技術得到了突破性的發展；稠密點雲(Dense point cloud)技術主要是以面片基礎的多視立體視覺(Patch-Based Multi- View Stereo, PMVS)演算法獲取三維表面資訊；表面重建技術是將點雲經波松表面重建(Poisson Surface

Reconstruction)及紋理貼圖方式完成三維模型表面重建。目前這整套技術被稱為 SfM-MVS 攝影測量或視覺攝影測量(Visual Photogrammetry)，廣泛應用於三維重建、無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)影像製圖及真正攝影像製作。代表性商業軟體如 Bentley® ContextCapture Center 的真實三維模型建模(Reality Modeling)及製圖，目前版本僅提供簡單量測工具。以量測為目的之軟體包含 AgiSoft® PhotoScan Professional、Pix4D®等軟體，並廣泛應用於 UAV 影像製圖、三維量測地質及考古等領域，其量測精度與拍攝地面解析度(Ground sample distance, GSD)有關，在拍攝品質與適當控制為前提，量測精度約莫可達 0.5 *pixel*[25-26]。SfM-MVS 計算標準流程如圖 5.2 所示。

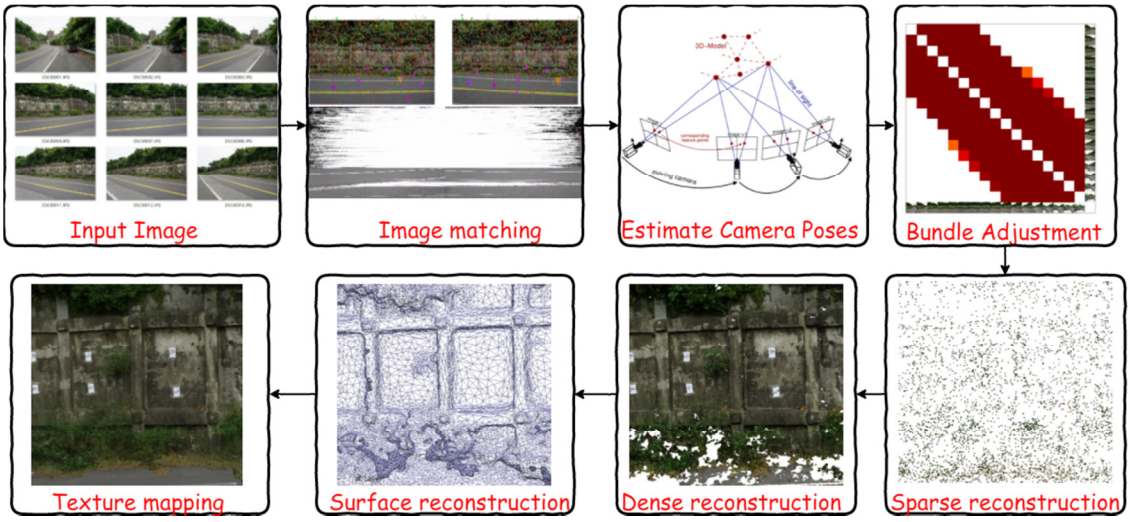
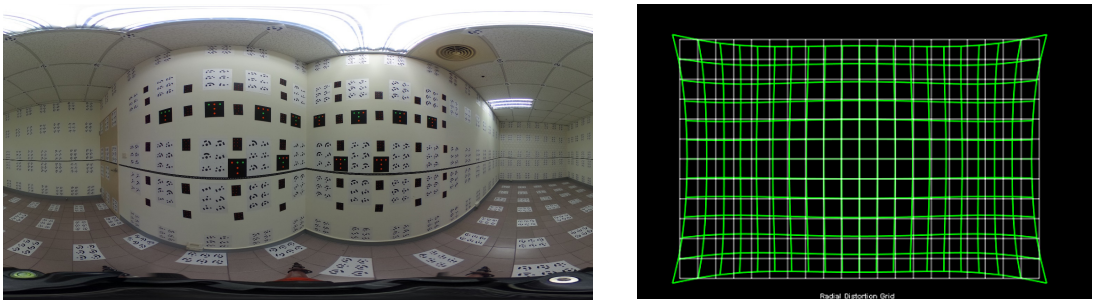


圖 5.2 SfM-MVS 標準流程

5.2 相機率定

相機率定在攝影測量中用以修正像點畸變扮演著關鍵的角色，尤其是對非量測性相機。多年來發展了眾多的相機率定方法，原則上可以分為使用率定標(Target)及攝影場景(Target Free)二種的率定方式。前者需於攝影測量程序前，配合率定進行拍攝以共線條件式解算，稱之為預率定方法[27-28]。後者直接使用攝像後的場景影像，在進行共軛點匹配量測後進行相機率定參數的求解，稱之為自率定方法[29]，並常於 SfM-MVS 中使用。如圖 5.3(a)為本研究室綜合相機率定場，可適用於 AGI PhotoScan Pro 及 iWitnessPro 進行相機率定。圖 5.3 (b)表示鏡頭畸變差，灰色為未修正前影像位置，綠色為修正鏡頭畸變差後所產生的位移量。



(a)多功能率定場　　(b)相機率定成果表示

圖 5.3 率定場及鏡頭畸變差

數值攝影測量長期來慣用附加參數自率光束法配合率定標來進行相機的率定工作，它是將相機內方位與透鏡頭畸變參數加入共線式光束法平差中視為未知數一併求解。特點是具有高精度的率定結果，但需精密率定標誌的配置，比較適合室內的實施，但室內可能受到相機焦距可變的影響，不易達到全焦段的率定，尤其是現代的消費型相機。

在計算機視覺領域中，發展了基於場景影像的相機自率定方法，特點是不需特定率定標的配合。1992 年由 Maybank 等提出了基於 Kruppa 方程式的自率定方法[29]。該法結合了絕對二次曲線和核線轉換的理論，在此基礎上推導出了 Kruppa 方程式。過程中，假設了照相機的模型是針孔模型，照相機的內方位參數不變，輸入的二維序列圖像，影像上之共軛點由影像匹配獲取，以直接求解相機的內方位參數。相機自率定可以歸納為是用各種優化演算法來求解一組非線性多項式方程組的問題。

5.2.1 直接線性變換方法

最早於 1971 年間由 Abdel-Aziz 和 Karara 提出建立攝相機成像幾何的線性模型，研究環境物體和影像之間的關係，提出了直接線性變換的率定方法，這種率定方法，參數的估計可以透過求解線性方程來完成。

直接線性變換法不考慮畸變因素時，影像點和實物點之間的成像關係如式(5.11)所示：

$$u=\frac{X_w l_{00}+Y_w l_{01}+Z_w l_{02}+l_{03}}{X_w l_{20}+Y_w l_{21}+Z_w l_{22}+l_{23}}$$
$$v=\frac{X_w l_{10}+Y_w l_{11}+Z_w l_{12}+l_{13}}{X_w l_{20}+Y_w l_{21}+Z_w l_{22}+l_{23}} \quad (5.11)$$

其中，(u,v) 是率定參照物上特徵點在影像座標系中的座標，(X_W,Y_W,Z_W)是參照物上特徵點的三維座標，l_{ij} 是 DLT 方法的待定參數。計算時，不失一般性，可以令$l_{23}=1$。如果已知率定參照物上 $n(n\geq 6)$ 個特徵點的座標(X_{Wi},Y_{Wi},Z_{Wi})及特徵點對應的影像點座標(u_i,v_i)，則待定參數就可以通過線性最小二乘法計算出來。

為了提高精度，應當加入非線性優化演算法。考慮非線性畸變時，直接線性變換法表示影像點與三維率定物上特徵點之間的關係如式(5.12)所示：

$$u_i+\delta_x(u_i,v_i)=u'_i=\frac{X_w l_{00}+Y_w l_{01}+Z_w l_{02}+l_{03}}{X_w l_{20}+Y_w l_{21}+Z_w l_{22}+l_{23}}$$
$$v_i+\delta_y(u_i,v_i)=v'_i=\frac{X_w l_{10}+Y_w l_{11}+Z_w l_{12}+l_{13}}{X_w l_{20}+Y_w l_{21}+Z_w l_{22}+l_{23}} \quad (5.12)$$

式(5.12)中，(u_i,v_i) 是率定參照物上第 i 個特徵點對應的實際影像座標。$\delta_x(x_d,y_d),\delta_y(x_d,y_d)$ 是影像點(u_i,v_i)處的鏡頭畸變校正。(u_i',v_i')是校正後的影像點座標。(X_{Wi},Y_{Wi},Z_{Wi}) 是參照物上第 i 個特徵點的座標。非線性畸變因素加入到 DLT 演算法中還是比較方便的。

5.2.2 自率光束法空中三角平差

以共線條件式來建立物空間與像平面空間之對應關係，稱之為光束法平差模式(Bundle Adjustment)。附加參數自率光束法平差模式是將相機內方位及鏡頭畸變差參數加入共線式一併解算，可解得內方位參數(f, x_0, y_0)、輻射畸變差參數 $k_1 \sim k_3$ 及切線畸變差參數 p_1~p_6。

附加參數修正值表示如式(5.13)所示。將附加參數與代入共線式得自率光束法公式，如式(5.14)所示。

$$\Delta x_i = x_0 - x_i\left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6\right) - \left(p_1 x_i + p_2 y_i + p_3 x_i y_i + p_4 y_i^2\right)$$
$$\Delta y_i = y_0 - y_i\left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6\right) - \left(p_5 x_i^2 + p_6 x_i y_i\right)$$
$$r^2 = x_i^2 + y_i^2 \tag{5.13}$$

$$x_i + \Delta x_i = -f\frac{m_{11}\left(X_i - X_0\right) + m_{12}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{13}\left(Z_i - Z_0\right)}{m_{31}\left(X_i - X_0\right) + m_{32}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{33}\left(Z_i - Z_0\right)}$$
$$y_i + \Delta y_i = -f\frac{m_{21}\left(X_i - X_0\right) + m_{22}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{23}\left(Z_i - Z_0\right)}{m_{31}\left(X_i - X_0\right) + m_{32}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{33}\left(Z_i - Z_0\right)} \tag{5.14}$$

式中：x_i, y_i：相片座標

f：攝影機焦距

X_0, Y_0, Z_0 ：攝影站之空間座標

X_i, Y_i, Z_i ：點位之地面座標

m_{11}~m_{33} ：旋轉矩陣係數

空中三角光束法平差可直接完成外方位參數求解(包括相對與絕對方位)，因此透過SfM求解之參數可用來當作自率光束法之初始值，再透過自率光束法將可取得序列影像內方位參數。

5.2.3 基於 Kruppa 方程式的照相機自率定方法

傳統的照相機率定方法需要率定參照物，並且率定參照物上點的三維座標和對應的影像座標都得已知。在一些場合中，照相機的焦距需要經常調節，位置也需要經常移動，如果採用傳統的率定方法就必須每次調整之後重新率定。這樣非常不方便。照相機自率定不需要率定參照物，該率定方法直接從照相機拍攝的多幅影像中確定照相機內方位參數。照相機自率定避免了使用率定參照物的問題。

常用的自率定方法有：基於 Kruppa 方程的自率定；基於絕對二次曲面的自率定；分層逐步重建等等。本文根據具體應用所需，採用了基於 Kruppa 方程的自率定方法。

照相機自率定的前提條件是影像點之間的對應關係已經確定下來，一般情況下，照相機拍攝影像時，可以認為其內參矩陣是不變化的所謂的自率定，就是計算照相機內參矩陣的各個變數，如式(5.15)

所示：

$$k=\begin{pmatrix}\alpha_u & s & u_0\\ 0 & \alpha_v & v_0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix} \tag{5.15}$$

Kruppa 方程式之相機自率定方法，其中有些方法需要對照相機內方位參數作一些假設。Kruppa 方程式是利用絕對二次曲線建立的關於相機內參矩陣 k 的約束方程自率定的基本構想是利用絕對二次曲線建立 Kruppa 方程式；求解 Kruppa 方程式確定矩陣 C；再通過 Cholesky 分解得到內參矩陣 k。

Kruppa 方程的自率定方法是由 Faugeras 等人提出的。該方法結合了絕對二次曲線和核線變換的理論，在此基礎上推導出了 Kruppa 方程式。在 Kruppa 方程式的推導過程中，假設：相機的模型是針孔模型，相機的內部參數始終保持恒定不變，輸入的二維序列影像是由單個相機拍攝而成的，序列影像上的對應匹配點已經被確定。基於 Kruppa 約束方程式的方法是在兩幅影像之間建立方程。點 x 在照相機投影矩陣 $P=K[R\ t]$ 的作用下成像為 $m=KRx$，則得到 $x=\mathrm{R}^T K^{-1}m$，代入絕對二次曲線的方程 $x^T x=0$，可得：

$$m^T K^{-T} R R^T K^{-1} m = m^T K^{-T} K^{-1} m = 0 \tag{5.16}$$

式(5.16)代表絕對二次曲線在二維平面上的像點與相機內方位參數的關係。通常用 ω 記為矩陣 $K^{-T}K^{-1}$ 所代表的絕對二次曲線的像。這就表明絕對二次曲線的像僅僅與相機的內參矩陣 K 有關，與相機的運動參數無關。式(5.16)還說明，在內參矩陣不變的前提下，絕對二次曲線可以看成一個虛擬的率定標誌，無論相機怎樣運動均能被偵測出來，且所成的像 ω 保持不變。絕對二次曲線的這種不變性幾乎是所有自率定方法的基礎。相機自率定的目的就是為了尋找出 ω 並計算出 $K^{-T}K^{-1}$；再對 $K^{-T}K^{-1}$ 取逆就可以得到 $K^T K$ 對 $K^T K$ 做 Cholesky 分解，即可求出內方位參數矩陣 K。

基於 Kruppa 方程式的自率定方法不需要對原始影像做攝影重建，而是通過對二維序列影像建立方程，求出相機的內方位參數。但是在

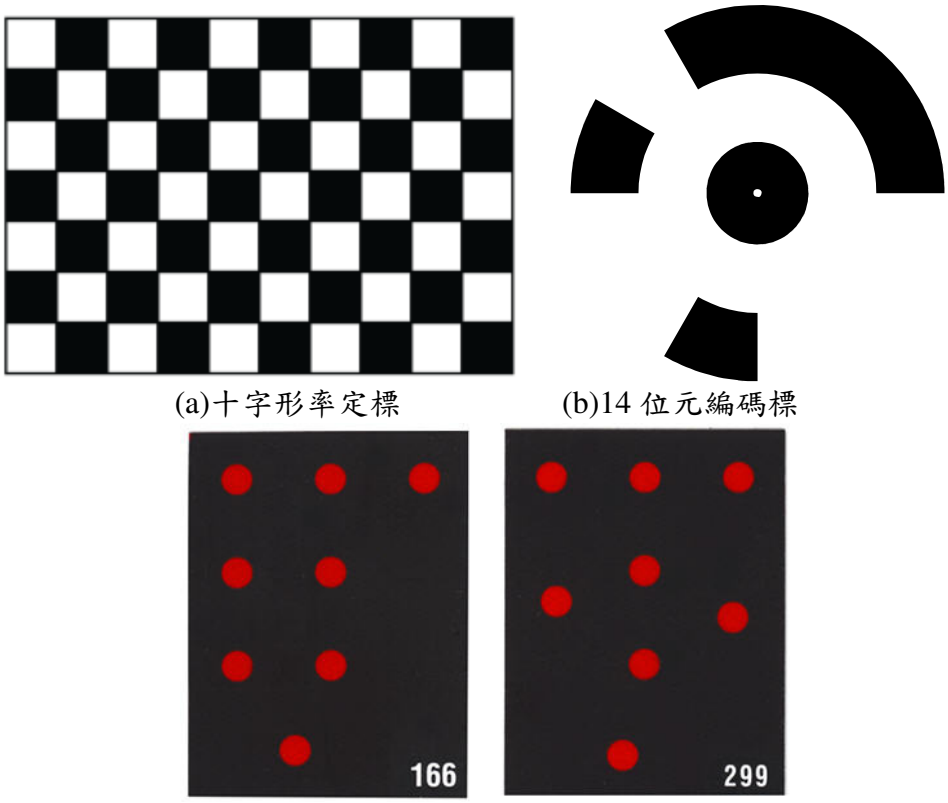
某些場合下很難將所有的二維序列影像統一到一個一致的攝影框架內，這意謂著無法確保無窮遠處的平面在所有二維影像確定的攝影空間裡一致。從而也說明了對於某些序列之二維影像，基於 Kruppa 方程的自率定方法存在不穩定的因素。

5.3 率定標樣式

率定標主要使用於預率定方法，需先於室內場景進行率定標拍攝取得參數後再進行後續處理，過去在做相機率定時處理程序較為複雜，且需使用立體標進行率定，隨著演算法的進步，標的樣式也從立體標轉變為平面標，而現在所使用率定標通常會選擇變形後還是能夠判別出標的形心位置的樣式，一般分為十字形角點或是含有圓心點標示的圓形標及 Hattori 所設計得編碼標，如圖 5.4(a)(b)(c)，前者的標定樣式是透過 Harris 的角點偵測取得特徵點；後者則是利用圓點中心檢測的算法獲取圓心點的位置。

傳統率定方法我們通常使用率定板（Calibration Target）作為參照物來進行標定。率定板就是帶有固定間距圖案陣列的平板，通常將其放在若干合適的角度和位置，從每一個角度、位置拍攝一張圖像。在此過程中要求相機不能移動位置，以確保其參數的不變性。圖 5.4(a)展示了一個西洋跳棋盤樣式的標定板，其作法為針對率定板連續拍攝十組以上在某種確定模式下的立體像對，隨後進行參數確定。

近年所使用的自動編碼標誌圖 5.4(b)(c)主要為攝影測量中自動識別的唯一率定物，因此編碼標誌設計的完善度決定自動識別及量測成果關鍵，相機的攝像原理為仿射投影成像幾何，且攝影測量是以多視立體視覺原理為基礎量測方式，為了滿足任何方向均可進行量測，因此編碼標必須能夠平移、縮放、旋轉、仿射等攝像幾何改變時，仍可以輕易辨識量測位置，本篇將針對 Hattori 編碼標進行說明。



(a)十字形率定標　(b)14 位元編碼標

(c) Hattori 編碼標

圖 5.4 率定標樣式

5.3.1 自動編碼標選擇

以現今編碼標大多採用圓形為主要特徵，這是由於圓形是一種簡單且完美的圖形，且具有下列特點：

1. 無方向性：其形狀中心不隨線性轉換、仿射轉換產生改變。
2. 特徵簡單：描述一個圓只需要圓心座標(x,y)和半徑 R 三個參數，這樣是其他圖型所無法取代的簡單。

這些特徵點使得圓型特徵的影像識別較為簡單，處理時可以獲得很高的處理效率。

5.3.2 編碼方式

Hattori 編碼方式以每個標誌都有 6 個點組成，如圖 5.5 所示，其中較大的三個點 A、B、O 用於標示座標系 XOY，其餘三個點用於編碼-稱作編碼點(Code Dot)。編碼點的位置從圖 5.5 中的 21 個圓形區域中選擇，而且互相之間至少需間隔一行一列。編碼為三個編碼點在其座標系 XOY 中的座標。

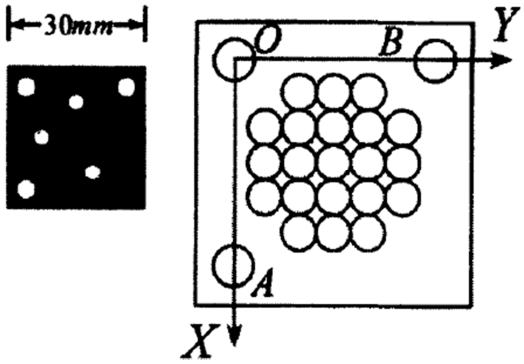


圖 5.5 Hattori 編碼方式

5.3.3 解碼算法

影像二值化後進行形態學處理膨脹(Dilation)，如果 6 個區域融合成一個區域則他們屬於一個標誌，稱為一個點組，如圖 5.6。

1. 搜尋 A、B、O 點：按照顯露模式(Emerging Pattern)對標誌影像排列，然後將所有可能的座標軸組合與模型比較通過計算點組的質心到所有點的距離最為計算依據。
2. 確定座標系:利用第 2 步找的三個點,確定座標系時有多種可能,。通過檢測剩餘的 3 個點是否能落入座標系形成的平行四邊形來決定到底為何種正確的組合。
3. 座標系確定後，計算出 3 個編碼點的座標，則編碼就可以進行提取。

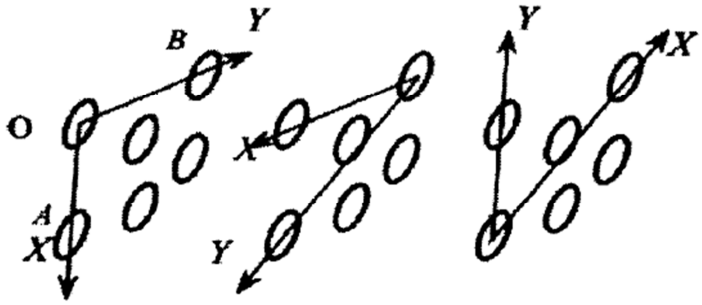


圖 5.6 可能的座標系組合

5.4 稠密點重建

經 SfM 計算建立稀疏點雲後，此時稀疏點雲無法有效描述場景的三維資訊,必須進一步計算出稠密點雲來描述空間點位的三維資訊，取得稠密點雲之方法分為兩種，一種是從物體的剪影(Silhouette)重建

物體的大致輪廓(Shape From Silhouette)。另一種是從目標所在區域的成像屬性出發，利用光度一致性約束(Photometric Consistency Constraint, PMCC)，是將稀疏特徵點周圍的一些區域恢復出三維資訊，實質上是運動資訊結構化的稠密方式。常用的方法有 PMVS 演算法，此方法具有較高的精度，因 MVS 為 PMVS 的核心理論，因此以下將針對 MVS 進行說明。

PMVS 演算法通常用來處理物體、場景、密度高之場景：

1. 物體：單一個或緊密的物體，在其周圍拍到的影像中能夠完全看到這個物體，且能夠直接的提取物體輪廓。
2. 場景：目標物體也許有部分遮擋，並且視角範圍被限制在較少的幾個視點，導致無法進行有效計算(尤其是建築物和牆面外觀)。
3. 密度高之場景：移動的障礙物在多張影像中出現在相對於靜止的目標物體之不同位置(如人從建築物的前面走過)。同時，當前的 MVS 演算法可以根據隱含的物件模型被劃分成 4 個類型：
   (1) 基於體素(Voxel-Based)的方法：需要一個包含場景的範圍框，它的精度被體素網格的解析度所限制。
   (2) 基於可變多邊形網格(Deformable Polygonal Meshes)的方法：需要一個 比較好的起始點，例如一個 Visual Hull 模型，來初始化相應的優化過程，限制了它的應用範圍。
   (3) 基於多深度圖像(Multiple Depth Maps)的方法：非常靈活，但需要將深度圖像融合到三維模型中。
   (4) 基於面片(Patch-Based)的方法：以小塊集合的形式來展現場景。這種方法簡單有效，並且能夠符合基於點的繪製技術的視覺要求，但是需要一個後續的處理步驟將塊的集合轉化成網格模型，從而能夠更加適應基於圖像的建模應用。

PMVS 使用面片方法進行運算，過程僅需要估計點之深度，再透過局部光學連續性估計點的法向量。此方法簡單、準確、效率高，可自動檢測和忽略外部點和障礙點，並且對紋理覆蓋不足、凹陷和高曲率的區域有較好的重建效果。

5.5 點雲差異分析

點雲距離計算為評判兩點雲間差異之依據，早期 DTM 資料要進行差異分析時，通常會將點雲進行網格化(Grid)處理，但在進行網格化過程中，必須由內插程序完成網格補點，而兩期差異將因內插程序導致誤差產生。目前既有的點雲差異分析方法包含 C2C (Cloud-to-Cloud)、C2M(Cloud-to-Mesh)及 M3C2(Multiscale-Model-to-Model-Cloud)等方法。C2C 是一個最簡單最快速的點雲距離計算方法，因為它不需要將點雲網格化，也不需要計算表面法線；C2C 可搭配的計算距離方法包含平均距離(Average distance)、最佳平面位置(Best fitting plane orientation)及郝斯多夫距離(Hausdorff distance)。C2M 是目前中最常見的方法之一，它是計算點雲和參考三維網格或理論模型之間的距離，這種方式較適合使用於平坦表面上，因為計算點與參考網格最符合。M3C2 方法主要結合下列三個關鍵特徵。

- 直接在點雲上操作，無需網格劃分或網格化。
- 計算沿著正常表面方向的兩個點雲之間的局部距離，以跟踪表面取向的 3D 變化。
- 根據點雲粗糙度和註冊誤差估計每個距離測量的置信區間。

C2C 方法可利用八叉樹結構特性，對兩時期點雲進行最鄰近搜索(Nearest Neighbor Search, NNS)，計算表面 S1 上點與表面 S2 間點之最近距離 LC2C，此計算方法類似郝斯多夫距離。NNS 計算效率高，但容易受到周圍點雲影響，以致匹配錯誤率較高，NNS 計算如圖 5.7 所示。

因此如何決定距離計算的平面非常重要，最常見的三種方法如最小二乘平面(Least squares plane)、2D 1/2 三角網格(2D1/2 triangulation)及局部二次函數方法(Quadric)。而這些方法都是尋求建立一個平面模式，用來描述點兩點雲間的關係，以下以局部二次函數為例。首先建立一個半徑距離 R 之球體，並擷取該半徑內之點集，或以 K 鄰近算法(K-th Nearest Neighbor, KNN)計算，取 K 個點進行二次函數(Quadratic Function)擬合，並透過擬合之平面計算其法線方向與其點之距離(L_{C2C_Q})，如圖 5.8 所示。因此利用此方法將可有效計算兩點雲間之差異量。

M3C2 的計算步驟主要為三個步驟：1.提取點雲間的核心點(Core Point)；2.計算點雲的表面法向量(Surface Normal)；及 3.計算兩點雲的距離。點雲間的核心點提取方法 M3C2 方法沿用 Brodu 與 Lague

於 2012 年提出的方法，該方法為將原始點雲進行疏化並提取關鍵的點作為特徵，其好處在於不用將整體點雲進行計算，可節省計算效率；表面法向量求取主要以點雲來計算擬合最佳平面，在推求此平面的法向量；點雲間的距離計算可由參考點雲中選取一點作為 i 點，在距離半徑 d 範圍以內找到所有鄰近點，並計算出投影平面，在由投影平面中心朝表面法向量方向以圓柱體延伸，直到接觸目標點群為止，最後找出在圓柱體內之所有點，計算出投影平面，並計算出投影平面中心，該距離及為點雲距離。相關演算步驟如圖 5.所示。

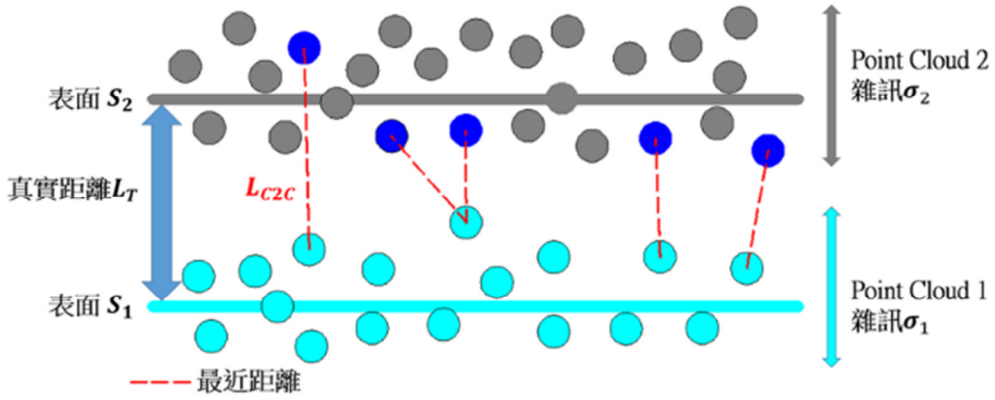


圖 5.7 直接最近距離示意圖

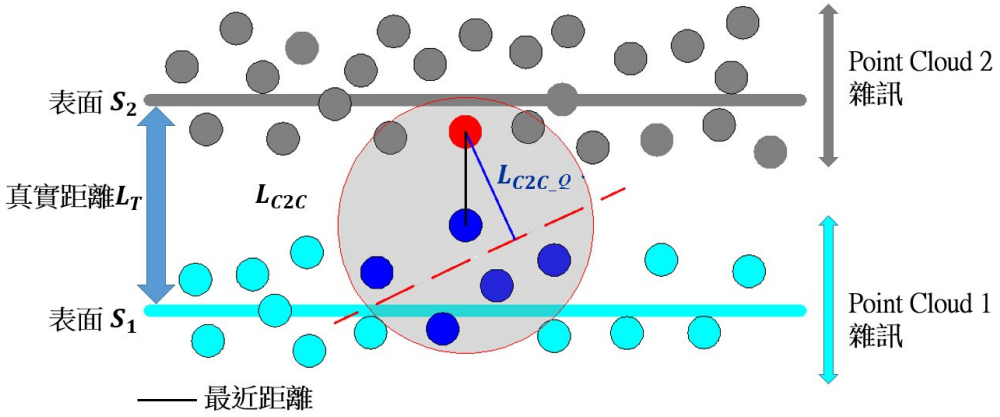


圖 5.8 二次函數距離示意圖

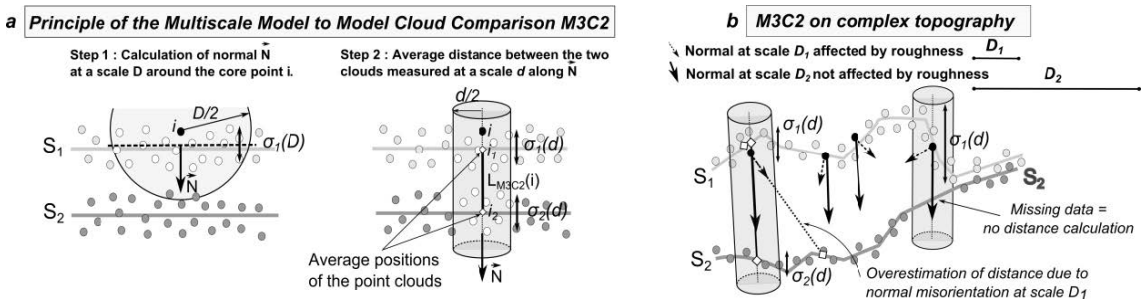


圖 5.9 M3C2 計算原理

5.6 整體最小二乘法平差理論

5.6.1 概述

最小二乘法(Least Squares, LS)是測量學門中，對資料處理的最基本，且應用最為廣泛的方法之一，對於經典的最小二乘法只考慮觀測向量的誤差，假設係數矩陣中沒有誤差或不考慮係數矩陣的誤差，然而係數矩陣包含誤差於測量實務中是存在的。整體最小二乘法(TLS)旨在解決顧及係數矩陣誤差的一種資料處理方法。整體最小二乘理論自從 Golub 在 1980 年正式命名以來，在數學界掀起研究熱潮，其應用的領域越來越廣泛，諸如自動控制、訊號處理、影像處理、醫學、統計學等。而本文中採用多視立體視覺三維重建技術中亦採用 TLS，解決相關數據平差及推估方法，首先對 LS 與 TLS 兩方法進行闡述，並由後續實驗中進行相關驗證，已證明 TLS 方法可用於道路邊坡監測之控制點及檢核點計算。

測量觀測資料的處理方法，通常是指最小二乘法進行測量平差，它是測量資料處理中的最基本、最廣泛的應用方法。1794 年，高斯(Gauss)首次提出了最小二乘法，解決了如何從多餘觀測中求出未知參數的最佳估計值。1912 年，馬爾柯夫(Markov)發表文章有系統地闡述了高斯最小二乘原理，得出了測量平差中著名的高斯-馬爾柯夫(G-M)模型。

函數模型(Functional Model)：

$$L = AX + \Delta \tag{5.17}$$

隨機模型(Stochastic Model)：

$$\begin{cases} E(\Delta) = 0 \\ \Sigma = \sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 P^{-1} \end{cases} \tag{5.18}$$

式中，L 為觀測向量，X 為未知參數向量，A 為 X 的係數矩陣，Σ為Δ或 L 的協方差矩陣，P 為觀測向量 L 的權陣，Q 為協因數矩陣，σ_0^2 為單位權方差。

高斯-馬爾柯夫模型在測量資料處理領域得到了廣泛應用，此模型在僅考慮偶然誤差、係數矩陣為列滿陣的情形下，得到的估值為最

優線性無偏估值。隨著測量技術的日益發展，特別是矩陣代數、泛函分析、最優化理論和概率統計等在測量平差中的應用，測量資料處理方法得到了極大的豐富，在不同層面上的對該模型擴充、發展形成了若干新理論及新方法。

對於經典的最小二乘法是只考慮觀測向量的誤差，假設係數陣沒有誤差或不考慮係數陣的誤差。對於現今平差理論與方法，係數矩陣一般也認為不包含有誤差的影響，然而係數矩陣含有誤差的情況在測量資料實務中是存在的。

在資料的獲取過程中，由於某種物理的、機械的、技術的、儀器的或作業人員等觀測條件的限制，測量誤差不可避免，觀測向量、係數矩陣都有可能存在誤差，所以建立的函數模型中係數矩陣與觀測向量同時存在誤差的情況並不少見。

例如測繪工作中最常用的線性回歸，通常情況下只考慮因變量的誤差，建立的模型其係數矩陣為常數矩陣，按照經典的最小二乘法進行，擬合的結果只能保證一個方向最佳；然而實際情況是，自變量並不是固定不變，有可能存在誤差，此時需要同時考慮因變量、自變量的誤差影響，這種情況下就是係數矩陣也存在誤差的情況；對於同一模型，當自變量選取不同時，擬合結果不同，差異較大，這和實際的工程要求也不相一致。在數位化曲線擬合中，其座標值(x,y)，都為觀測值，理應考慮兩者的誤差影響，建立的擬合模型其係數矩陣也存在誤差，但在以往的資料處理實踐中都忽略了係數矩陣的誤差影響；在重力異常擬合中，同樣也存在這種情形。

如何同時考慮自變量、因變量的誤差或如何處理係數陣和觀測向量同時存在的誤差，是測繪資料處理領域研究的新課題之一，處理這類問題就需採用整體最小二乘，也有學者把此翻譯為整體最小二乘，全最小二乘、全局最小二乘或整體最小二乘估計。下面透過一元線性回歸來說明整體最小二乘估計準則和經典的最小二乘準則的不同。

對於一組資料點，即$(x_i,y_i),i=1,2,\mathrm{L}\ ,n$，要確定其線性關係。若假定自變量$x_i$ 無誤差，因變量y_i是具有偶然誤差的觀測值，應用經典的最小二乘方法解算，其最小準則是：各點$(x_i,y_i),i=1,2,\mathrm{L}\ ,n$沿 Y

方向到直線的距離的平方和最小，即：

$$\sum \Delta y_i^2 = \sum (a - bx_i - y_i)^2 = \min \tag{5.19}$$

考慮因變量、自變量都為有偶然誤差的觀測值，要確定其線性關係，很顯然傳統的線性回歸最小準則不適用，要應用數理統計學上所述的正交距離最小或整體最小二乘準則，就是要求點(x_i, y_i)到回歸直線$y = a + bx$的垂直距離(正交距離)的平方和為最小整體最小二乘準則，為：

$$\sum_{i=1}^{n} r_i^2 = \min \tag{5.20}$$

式中，r_i就是點到回歸直線的的正交距離或垂直距離。

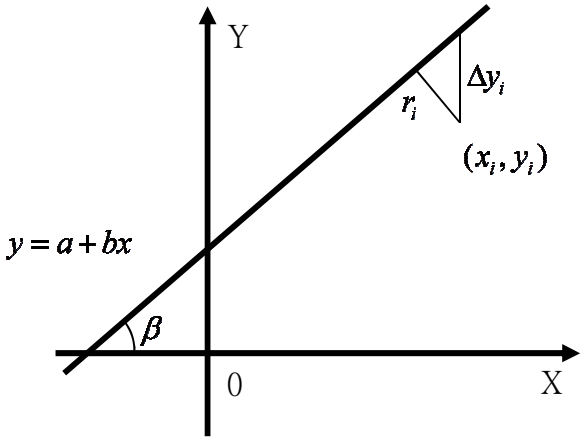


圖 5.10 正交距離與縱向距離的關係

從圖 5.10 可以看出Δy_i和r_i存在關係式：

$$r_i = \Delta y_i \cos\beta \tag{5.21}$$

顯然，整體最小二乘準則與經典最小二乘準則不一致，所以在這兩準則下進行解算，所得到的結果必然也不一致。雖然在以前的測量文獻中有討論這種雙變數的線性回歸，按照測繪資料處理原理，推導其解算方法，但不是真正的整體最小二乘準則，經過研究論證發現，不管那一種解算方法，其解算結果與單變數處理的結果一致，所以有必要在理論上論證整體最小二乘準則、解算方法及其在測繪學科中的理論體系。

在測繪學科，整體最小二乘方法的理論研究和應用研究主要在這

幾年。在整體最小二乘理論研究方面，美國 Ohio 大學的 Schaffrin 教授在 2005 年開始整體最小二乘問題相關演算法方面的研究，給出了誤差變數模型(Errors-In-Variable, IEV)中附加約束條件的解算公式，並在隨後幾年進行了深入研究，連續發表了幾篇有關整體最小二乘問題的解算演算法，包括約束整體最小二乘演算法、多元線性誤差變數模型的解算演算法、加權整體最小二乘解算演算法等，提出了相應的解算方法和步驟，並應用於解決三維座標轉換參數的求解和直線擬合，也對不同演算法所得的效果做出了比較與分析。在整體最小二乘應用於測繪領域方面，目前所採用的方法，基本上都是數學中所提出的解算方法，而且都是以觀測值向量和係數矩陣為獨立等精度情形下的應用。因此有必要根據測量觀測資料處理的特點，研究適合於該資料處理的整體最小二乘平差理論體系，將其納入現有的一套測量平差模型理論體系，為整體最小二乘理論應用於測量資料處理奠定基礎。

5.6.2 整體最小二乘平差方法

在經典最小二乘(LS)所使用的 G-M 模型中，觀測值表達為未知參數的線性函數關係，觀測值有含有偶然誤差，其數學模型誤差為零。在最小二乘原則下，參數解是最優線性無偏估計量，其前提條件是假設觀測值中不包含有系統誤差和粗差的影響，係數矩陣 A 是常數矩陣的情況。例如下面測量觀測資料處理中幾種常用的函數模型。

1. GPS 虛擬距離定位：

$$v_i^j = l_i^j \delta x_i + m_i^j \delta y_i + n_i^j \delta z_i - \delta t_i - l_i \tag{5.22}$$

2. 攝影測量中的共線條件方程式可表示為：

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - Xs) + b_1(Y - Ys) + c_1(Z - Zs)}{a_3(X - Xs) + b_3(Y - Ys) + c_3(Z - Zs)}$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - Xs) + b_2(Y - Ys) + c_2(Z - Zs)}{a_3(X - Xs) + b_3(Y - Ys) + c_3(Z - Zs)} \tag{5.23}$$

應用泰勒公式展開，可得到共線方程式之線性化為：

$$L = AX \tag{5.24}$$

式中，$L=\begin{bmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \end{bmatrix}$ ； $A=\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial Xs} & \frac{\partial x}{\partial Ys} & \frac{\partial x}{\partial Zs} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial \omega} & \frac{\partial x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial y}{\partial Xs} & \frac{\partial y}{\partial Ys} & \frac{\partial y}{\partial Zs} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial \omega} & \frac{\partial y}{\partial \kappa} \end{bmatrix}$

$$X=[dXs, dYs, dZs, d\varphi, d\omega, d\kappa]^T$$

3. 角邊測量中的三角網

$$v_{jk}=\frac{\Delta Y^0_{jk}\rho''}{(S^0_{jk})^2}\hat{x}_j-\frac{\Delta X^0_{jk}\rho''}{(S^0_{jk})^2}\hat{y}_j\frac{\Delta Y^0_{jk}\rho''}{(S^0_{jk})^2}\hat{x}_k+\frac{\Delta X^0_{jk}\rho''}{(S^0_{jk})^2}\hat{y}_k-l_{jk} \tag{5.25}$$

4. 角邊測量中的三邊網

$$v_i=\frac{\Delta X^0_{jk}\rho''}{S^0_{jk}}\hat{x}_j-\frac{\Delta Y^0_{jk}\rho''}{S^0_{jk}}\hat{y}_j\frac{\Delta X^0_{jk}\rho''}{S^0_{jk}}\hat{x}_k+\frac{\Delta Y^0_{jk}\rho''}{S^{0\,2}_{jk}}\hat{y}_k-l_i \tag{5.26}$$

5. 二維六參數座標轉換模型

$$\begin{aligned} u_i &= a_1x_i+b_1y_i+c_1 \\ v_i &= a_2x_i+b_2y_i+c_2 \end{aligned} \tag{5.27}$$

6. 三維 Bursa-Wo1f 座標轉換模型

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{new}=\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{old}+\begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 & -Z & Y & X \\ Z & 0 & -X & Y \\ -Y & X & 0 & Z \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ k \end{bmatrix} \tag{5.28}$$

以上模型表示為矩陣形式為：

$$\boldsymbol{L}+\boldsymbol{V}=\boldsymbol{AX} \tag{5.29}$$

對於未知參數求解一般使用最小二乘解算，即 $\hat{\boldsymbol{X}}=(\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{L}$ ，在觀測值滿足常態分佈情況下，應用最小二乘原理可以得到觀測量及未知參數的線性最優無偏估計。如果仔細分析上述模型，一種情況是函數模型為非線性形式，應用參數的近似值按泰勒級數展開，略去二次以上項得到的，誤差方程式係數矩陣 A 各元素不僅與控制點的數量、觀測值類型和網形有關，而且與待定點的近似值有關。在座標轉換模型中，一般認為舊座標沒有誤差，新座標存在誤差且為隨機變數，根據最小二乘可以得到轉換參數。同樣對於形變參數估計，通常考慮

座標矩陣沒有誤差。而實際情況是係數矩陣 A 本身會包含有誤差。

對於線性回歸模型，如果同時考慮回歸模型中自變量和因變量的誤差，數理統計中稱之為正交回歸(Orthogonal Regression)或變數誤差 EIV 迴歸，其本質就是要在解算中考慮係數矩陣的誤差，而常用的回歸模型中一般認為係數矩陣是沒有誤差的。然而忽略自變量的誤差，按照最小二乘原則，只能保證一個方向殘差平方和最小，造成同一模型，當自變量和因變量選取不同，待估參數結果差異。當係數矩陣 A 存在誤差時，從統計的觀點，最小二乘解一般是有偏的，不再與極大似然估計(Maxima Likelihood Estimation)等價。

5.6.3 最小二乘平差原理

在測量資料處理中，最常用的模型是高斯-馬爾柯夫模型，若僅考慮觀測向量誤差，其誤差方程式為：

$$V = A\hat{X} - L \;;\; P \tag{5.30}$$

式中，V 稱為殘差向量(或改正數向量)。其最小二乘準則：

$$V^T PV = \min \tag{5.31}$$

未知參數 X 的最小二乘估計為

$$\hat{X} = (A^T PA)^{-1} A^T PL = N^{-1} A^T PL \tag{5.32}$$

式中，$N = A^T PA$ 是法方程係數矩陣。估計量 X 是無偏估計量，即：

$$E(\hat{X}) = N^{-1} A^T P\, E(L) = N^{-1} A^T PAX = X \tag{2-33}$$

誤差向量 Δ 的最小二乘估計為：

$$\begin{aligned} V &= AX - L = (A(A^T PA)^{-1} A^T P - I)L \\ &= -(I - H)L = -(I - H)\Delta = -Q_{VV} PL \end{aligned} \tag{5.33}$$

式中，I 為單位矩陣，$H = A(A^T PA)^{-1} A^T P$ 稱為帽子矩陣，Q_{VV} 是殘差的協因數陣。且：

$$Q_{VV} = P^{-1} - AN^{-1} A^T = (I - H)P^{-1} \tag{5.34}$$

觀測量的平差值為：

$$\hat{L} = A(A^T PA)^{-1} A^T P\, L = HL \tag{5.35}$$

通常 $\hat{X}$ 稱為 G-M 模型的最小二乘估計(簡稱 LS)。

根據式(2-31)解算的參數估計量，滿足最優性質：

1. $\hat{X}$ 是 X 的無偏估計，對於任何常量 C，$C\hat{X}$ 是 CX 的線性無偏估計。
2. 中心極限定理，當 $n \to \infty$ 時，有 $(X - \hat{X})/\sigma_{\hat{X}} \hat{\to} N(0,1)$，記號 $\hat{\to}$ 表示依分佈收斂，$\sigma_{\hat{X}}$ 表示估計量 $\hat{X}$ 的方差均方根。最小二乘估計是漸近常態估計，具有漸近常態性，即 $\hat{X} - X \xrightarrow{L} N(0, \sigma_0^2 (A^T PA)^{-1})$。
3. 最小方差性，如果不考慮誤差分佈，最小二乘估計 $\hat{X}$ 是所有線性估計中具有最小方差的估計；如果誤差分佈是常態分佈，最小二乘估計就是常態分佈的最優估計，即對於任何常量 C，在 CX 的線性無偏估計中，$C\hat{X}$ 是唯一及方差一致最小的線性無偏估計。

5.7 統計檢驗

兩次座標的較差不一定反應監測物體真正位移，有可能是偶然誤差所引起，因此要對座標位移進行顯著性檢驗(t 檢驗)。不過，在進行 *t* 檢驗前要先確定兩期測量精度是否相同，即母體的變異數是一致的。所以在進行 t 檢驗前，要先做兩期母體變異數是否相同的檢驗(F 檢驗)。

5.7.1 兩個母體變異數比值之假設測試

令 S_1^2 與 S_2^2 分別是取自平均 μ_1 與 μ_2 且變異數 σ_1^2 與 σ_2^2 的常態分佈、樣本數 n_1 與 n_2 的獨立隨機樣本之樣本變異數。若 $\sigma_1^2=\sigma_2^2$，則統計量 S_1^2/S_2^2 服從有著自由度 n_1-1 與 n_2-1 的 F 分佈。

μ_1：第一期平均數　　μ_2：第二期平均數

σ_1：第一期標準差　　σ_2：第二期標準差

S_1：第一期變異數　　S_2：第二期變異數

n_1：第一期自由度　　n_2：第二期自由度

表5-1 F檢驗

單尾測試	雙尾測試
虛無假設 H0：S12/S22=1 對立假設 Ha：S12/S22＞1 顯著水準 α 檢定統計量 F= S12/S22 拒絕 H0：F ＞ Fα	虛無假設 H0：S12/S22=1 對立假設 Ha：S12/S22≠1 顯著水準 α 檢定統計量 F= S2(larger)/S2(smaller) 拒絕 H0：F ＞ Fα/2

5.7.2 單點位移顯著性檢驗(t 檢驗)

此項檢驗通常用於變形觀測網，對不同時間的重複測量數據，按自由網平差的成果進行變形分析。設監測網兩期平差得到的某個單獨座標值為 x_1 和 x_2 相應的變異數為 $\sigma_0^2 Q_1$ 和 $\sigma_0^2 Q_2$，單位權變異數估值為 $\hat{\sigma}_{01}^2$ 和 $\hat{\sigma}_{02}^2$。座標位移量為：

$$dx = x_2 - x_1 \tag{5.36}$$

因為 x_1 為 $N(\xi_1, \sigma_0^2 Q_1)$變量，x_2 為 $N(\xi_2, \sigma_0^2 Q_2)$變量，故 dx 也為 $N(\xi_1-\xi_2, \sigma_0^2(Q_1+Q_2))$變量。

作 dx 的標準化變量，它為標準化常態變量：

$$\frac{dx-(\xi_2-\xi_1)}{\sigma_0\sqrt{Q_1+Q_2}} \sim N(0,1) \tag{5.37}$$

根據兩期平差所得殘差平方和可做如下的 χ^2 變量：

$$\frac{(V^TPV)_1+(V^TPV)_2}{\sigma_0^2} = \frac{f_1\hat{\sigma}_{01}^2+f_2\hat{\sigma}_{02}^2}{\sigma_0^2} = \chi_{(f)}^2 \tag{5.38}$$

自由度 $f = f_1 + f_2 = (n-r)_1 + (n-r)_2$。

上述 $N(0,1)$ 變量與 $\chi_{(f)}^2$ 變量互相獨立，這是平差座標與殘差不相關，按 t (t 分配)變量定義為：

$$t=\frac{N(0,1)}{\sqrt{\frac{\chi_{(f)}}{f}}}=\frac{dx-(\xi_2-\xi_1)}{\sigma_0\sqrt{Q_1+Q_2}}\Big/\sqrt{\frac{f_1\hat{\sigma}_{01}^2+f_2\hat{\sigma}_{02}^2}{\sigma_0^2(f_1+f_2)}}=\frac{dx-(\xi_2-\xi_1)}{\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_1+Q_2}} \tag{5.39}$$

式中

$$\hat{\sigma}_0^2=\frac{f_1\hat{\sigma}_{01}^2+f_2\hat{\sigma}_{02}^2}{f_1+f_2} \tag{5.40}$$

t 變量的自由度為 $f=f_1+f_2$，它與 χ^2 變量的自由度 f 同。有了這個 t 變量就可對座標位移 dx 進行位移顯著性檢驗，其步驟如下：

1. H0：$\xi dx=\xi_2-\xi_1=0$，H1：$\xi dx\neq 0$
2. 其意思是，檢驗的原假設 H0 是 ξ2=ξ1，即該點座標理論值兩期相同，自然無位移存在，如果拒絕原假設 H0 則接受假設 H1，認為位移存在。
3. 作統計量 t，當原假設 H0 成立，式(2-39)應為：

$$t=\frac{dx}{\hat{\sigma}_0\sqrt{Q_1+Q_2}}=\frac{dx}{\hat{\sigma}_{dx}} \tag{5.41}$$

4. 選定顯著水平 α，查 t 分配表得 $t_{\alpha/2}$，如果 $|t|>t_{\sigma/2}$ 則拒絕 H0，位移顯著可信，否則接受 H0，認為有位移不可信。

第六章 道路邊坡滑動預警模式

本研究參考「道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究IOT103H1DB008」中整理之道路邊坡預警相關參考指標，特別針對近景攝影有關指標進行說明。近景攝影之道路邊坡滑動預警方法主要依據監測標誌自動識別及量測方式達到監測標三維資料獲取，再由監測點位三維資訊來判定監測點位是否產生滑動或位移，而近景攝影測量之觀測量來自於影像，因此拍攝平均地面解析度(GSD)將影響監測點精度，而經前期相關研究成果得知，近景攝影測量精度約為 0.5 像素之地面解析度，且近景攝影監測不適用於邊坡有植被生長環境使用，較適宜用於已經做了護坡區域使用，或是大範圍邊坡崩塌使用。

以下參考公路邊坡工程設計規範(104)大地監測系統規劃整理說明。

6.1 大地監測系統規劃

為確保公路邊坡施工中及長期之穩定，有必要在不同階段規劃完整的大地監測系統，適時建置並執行監測作業。

設計階段之監測系統利用安裝於現地之各類型感測器，採人工手動監測或自動監測記錄方式，取得與邊坡穩定安全相關之基本資料，如工址氣候條件、地下水狀況、可能滑動深度等，以利研判邊坡可能發生之災害型態、災害原因及機制，提供邊坡穩定分析及工程規劃設計之依據。工址調查階段設置之監測系統亦屬於設計階段之一部分。

大地監測系統之規劃設置，可依邊坡類別、現地條件，並考量設計、施工以及營運後管理維護階段之需求，規劃並選擇適當之監測設施。設計及施工階段設置之監測設施宜考量儘可能延續納入管理維護階段一併執行。

6.1.1 設計考量

為掌握公路邊坡之穩定性，研判可能的坡地災害型態、災害機制及致災因子，並取得設計時所需之各項地工分析參數，公路邊坡於調查或設計階段，可設置邊坡監測系統，取得各項邊坡現場資訊。

邊坡監測系統設置之規模(設置範圍、儀器種類、數量、量測方式、頻率等)，應依邊坡之既有條件加以調整。若有以下情形之一者，應視實際情形需要，擴大監測系統之設置規模。

1. 邊坡具有災害歷史，或現場具滑動徵兆者；
2. 邊坡有重要保全對象者；
3. 地質條件不佳或邊坡將採大規模挖填者。

6.1.2 監測計畫

各監測階段有其不同監測目的，因此監測系統之資料讀取方式、監測項目、儀器種類、監測頻率、監測時程等，均應有不同考量，需綜合研析並妥適規劃後，擬訂監測計畫循序實施。

監測計畫之內容至少應包括以下項目：

1. 權責單位、監測執行機構

敘明監測目的、權責單位及負責人員、監測執行機構及相關工作人員資料等。

2. 監測儀器佈置平面及剖面配置圖

應以圖形方式呈現，標示監測儀器之位置、深度與數量；若監測系統採自動量測方式者，需標示自動資料擷取系統之設備設置處。

3. 監測系統及安裝說明

應涵蓋整體系統說明、採用之儀器及設備之廠牌、型號、規格、操作原理、量測精度與誤差值範圍，安裝方法、監測方法、監測頻率，

並說明儀器檢核、校正、維護、故障檢測及排除方法。特殊之監測設施應載明詳細之使用指引、維修步驟、異常狀況可能原因及處理方式表，以及技術支援之聯絡資料等。

4. 監測資料之處理

監測系統設置完成後應予測試，並進行初始值設定與記錄。監測數據應以圖形呈現為主，配合表格方式呈現。

6.1.3 量測方式

彙整大地監測系統依其量測方式分為：

1. 人工手動方式：以人力攜帶量測儀器，赴現地儀器設置處進行量測及記錄，攜回成果進行資料整理。
2. 半自動方式：現場設置資料擷取器，以固定頻率或於特定條件發生時，自動讀取儀器監測值並記錄，配合人工赴現場下載監測資料。
3. 全自動化方式：現場設置感測器透過資料擷取器及傳輸設備，自儀器量測、記錄、傳輸、彙整、繪圖、管理值研判等一系列運作，均採自動化方式，遠距即可收集大量且即時的監測成果，瞭解現場資訊。自動化監測系統的主體架構可分為四個部分。

(1) 感測器：裝設於現場，量測監測區域的氣候、水文、應力及位移等物理量。

(2) 資料擷取設備:控制現場監測儀器之資料擷取程序、量測方式，並儲存監測資料之設備。資料擷取器裝設於現地邊坡，除需匹配監測儀器之類型外，亦需考慮現場環境狀況(如：溫度、電力供給能力等)，評估適合之資料擷取器型式。為避免監測資料因通訊中斷而無法傳輸或遺失，資料擷取設備以具資料儲存功能者為佳。

(3) 資料傳輸設備：將資料擷取器收集之監測資料，傳輸至後端伺服器之設備。傳輸設備之選擇與選用系統之傳輸方式有關，常用者可概分為有線傳輸及無線傳輸二大類。

(4) 監測成果整合軟硬體：感測器、資料擷取設備及傳輸設備等均為監測系統之硬體部分，但完整的自動化監測系統尚需配合後端整合軟體，彙整收集監測資料，並以適當、適時的方式呈現或通報。

調查、設計階段之監測方式，可採手動方式為主。監測物理量受特定事件影響，或在短時間內可能出現明顯變化的監測項目，如雨量、地下水位及水壓，宜採半自動或全自動監測方式，以利透過頻率較高的連續性資料，掌握物理量臨界值及發生的時間。而全自動監測可參考上述規範，並以近景攝影測量自動監測方式，來獲取監測道路邊坡表面位移監測，並藉由自動化計算及分析完成監測之目的。

6.1.4 監測頻率

調查、設計階段，採手動監測方式之監測頻率應以每一至三個月至少一次為原則，惟監測時間可根據天氣條件調整。例如，預期豪雨事件發生前，宜進行補充監測；豪雨事件結束後，在天候條件可行下，宜儘速再進行一次補充監測，以掌握在豪雨期間之邊坡狀況。其中，有關雨量、地下水位或水壓等監測，應儘量採用半自動監測或全自動監測方式，以記錄降雨期間之地下水位連續變化。

半自動及全自動監測系統之量測頻率，以 10 分鐘監測一筆為原則，惟在電力供應較為匱乏之環境下，監測頻率可適度減少，但不宜超過 30 分鐘一筆資料，以掌握豪雨期間監測成果之完整性。

考慮上述規範及近景攝影測量適用條件，近景攝影測量因採用攝影方式進行監測數據獲取，因此不適用於天候條件不佳時進行拍攝，而近景攝影計算效率可否於每十分鐘記錄一筆，本研究將一並探討。

6.2 道路邊坡崩塌現象與監測徵兆物理量

道路邊坡崩塌之監測，可視為道路邊坡管理非常重要之一環，一般而言，邊坡監測之應用時機可分為四大類：

1. 邊坡特性調查
2. 邊坡施工中安全監控
3. 邊坡長期維護與防災管理
4. 回饋設計及防災研究

四大類均為利用邊坡崩塌徵兆物理量之量測與分析，將所得成果做為不同目的使用時之參考。其中邊坡長期維護與防災管理對於道路管理單位而言顯得特別重要。為了瞭解道路邊坡崩塌徵兆物理量，首先必須進行道路邊坡崩塌之分類。

6.2.1 道路邊坡崩塌型態分類

影響道路邊坡崩塌的因素有很多，其中包含含水量、地球重力、岩石風化等因素，都間接或直接影響著道路邊坡的穩定，而表面特徵則是滑動破壞中最容易判識的一個主要依據，以表 6-1 為道路邊坡以及坡體運動分類表

表6-1 邊坡破壞型態分類(譯自Hungr等(2013))

運動型態	材料種類	
	岩石	土壤
墜落(fall)	岩石墜落(rock fall)	巨礫/岩屑/粉砂滾落 (boulder/debris/silt fall)
翻覆、傾覆 (topple)	岩石塊體傾覆(rock block topple) 岩石撓曲傾覆(rock flexural topple)	礫石/砂/粉砂傾覆 (gravel/sand/silt topple)
滑動(slide)	岩石弧形地滑(rock rotational slide) 岩石平面型滑動(rock planar slide) 岩楔滑動(rock wedge slide) 岩石複合滑動(rock compound	黏土/粉砂弧形地滑(clay/silt rotational slide) 黏土/粉砂平面型地滑 (clay/silt planar slide) 礫石/砂/岩屑滑動

	slide) 岩石不規則滑動(rock irregular slide)	(gravel/sand/debris slide) 黏土/粉砂複合滑動(clay/silt compound slide)
側潰(spread)	岩坡側潰(rock slope spread)	砂/粉砂液化側潰(sand/silt liquefation spread) 靈敏性黏土側潰(sensitive clay spread)
流動(flow)	岩石崩滑、岩石崩流(rock avalanche)	砂/粉砂/岩層不飽和流動(sand/silt/debris dry flow) 砂/粉砂/岩屑流動(sand/silt/debris flow slide) 靈敏性黏土流動(sensitive clay flowslide) 土石流、岩屑流(debris flow) 泥流(mudflow) 岩屑洪流(debris flood) 土石崩流(debris avalanche) 土流(earth flow) 泥碳流(peat flow)
坡體變形(slope deformation)	山坡變形(mountain slope deformation) 岩坡變形(rock slope deformation)	土坡變形(soil slope deformation) 土壤潛移(soil creep) 土石緩滑(solifluction)

運動體的組成物質可分為岩盤和工程土壤，其中工程土壤又可細分為顆粒較粗的土石和顆粒較細的土泥。斜坡運動形式可分為五大基本類型：墜落、傾覆、滑動、側落與流動。由兩種以上基本類型組合而成的運動則稱為複合運動（Complex Slope Movement）。以下概述塊體之運動型態（工研院能資所，1989）。

1. 墜落(Falls)

墜落是體積大小不一的岩塊或土石以自由落體的運動方式向下掉落，多發生於陡峭邊坡或懸崖，速度極快。發生於公路邊坡時可能傷及人車。砂頁岩互層構成的陡坡會因差異侵蝕的影響，導致上覆的砂

岩失去支撐而墜落。

2. 傾覆(Topples)

傾覆是岩塊向下坡方向傾斜而發生滾落的一種方式；岩層被兩組垂直節理切割成柱狀的岩塊最容易在自由面上發生傾覆或崩移。因山區闢建的公路，常有非常高聳的邊坡，甚至半隧道的型式，在這種邊坡傾翻破壞時有發生。傾翻發生的場合通常有一組高傾角不連續面(層面或節理面）向邊坡的內側傾斜。

3. 滑動(Slides)

滑動是最常見的斜坡運動。滑動可分兩種，一種為平面式滑動，另外一種為旋轉式滑動。平滑的滑動面形狀近乎平面，如層面、節理面、斷層面或崩積土與岩盤界面等；旋滑的滑動面形成則是開口向上的曲面。平滑常沿著岩盤、層面、節理面或斷層面滑動，常因地層排水不良而觸動，但是也常因坡腳被切除而引發，因此以發生在路邊、山溝或河流的坡面最多；旋滑常發生於邊坡、河岸、公路旁及填土的地方，尤其是土層很厚或岩層破碎的地方，在滑動體內及冠部附近經常可見到張力裂縫。事實上，自然界的滑動很少有單一型式者，很多滑動均是在頭部為旋滑，在趾部則轉變為平滑或流動。

4. 側落(Spreads)

側落幾乎是水平方向的滑動,滑動面底下通常是一種軟弱的岩層,因軟弱岩層發生塑性流動而影響上覆堅硬岩層。

5. 流動(Flows)

流動像塑性流體一樣的移動，其速度可以從每秒數 cm 至每秒數百公尺。流動不一定要含水，有的邊坡在重力的作用下也會慢慢地向下坡方向流動，稱為潛移（Creep），其移動速度很慢，每年可能只有數公釐至數 cm，但已足以威脅基礎的安全。潛移可分為淺、深兩類。前者只有表土部分發生滑動，後者會導致岩層彎曲。

6.2.2 道路邊坡崩塌徵兆物理量

根據上述道路邊坡崩塌分類結果，基於邊坡外在與內在因素或誘因觸發邊坡崩塌，可進一步將邊坡崩塌徵兆物理量可分為兩類，一為直接徵兆物理量，另一為間接徵兆物理量。

1. 直接徵兆物理量

邊坡崩塌即為斜坡塊體運動，因此位移即為此現象之直接徵兆物理量。邊坡移動可從地表面觀察（地表面物體傾斜、移動、地表開裂、隆起與下陷等）或地表面傾斜與位移量測得知，邊坡移動亦可由地下位移或變形量測得知。

表6-2 山崩形態之移動速度表

（日本高速道路調查會，1988）

移動速度	快		中		慢		
位移量	(3m/s)	(0.3m/min)	(1.5m/day)	(1.5m/mon)	(1.5m/year)	(0.3m/5year)	
岩石崩壞	■						
岩石片流動	■						
湍流土石流	■						
岩屑傾倒	■	■					
岩盤滑動	■	■	■	■	■	■	
土砂崩落		■					
側方擴散		■					
急速土砂流		■					
岩屑流		■					
砂質流動		■	■				
土方猛落		■	■	■	■	■	
慢速土砂流			■	■	■		
岩屑地滑			■	■	■	■	

層狀岩塊滑動				▬			
岩盤猛落				▬	▬	▬	▬
層狀土質滑動					▬		

此直接物理量隨著不同邊坡崩塌種類而有不同之現象徵兆，包括位移量、位移速度、位移範圍及位移深度等。邊坡崩塌過程除產生位移以外，可能伴隨產生之現象尚包括地聲、水質變化與受剪破壞激發之超額孔隙水壓變化，亦屬於直接徵兆物理量。邊坡崩塌直接徵兆物理量中以位移最為重要，而位移速度為此徵兆物理量重要之特徵。不同之斜坡塊體移動型態，將有不同之運動方式與速度，如潛移每年數cm；土崩每小時數百公里（潘國樑，1994）。根據日本高速道路調查會（1988）之研究，不同山崩型態之運動速度統計於表 6-2。邊坡崩塌移動速度對於災害規模影響甚鉅。崩塌速度為邊坡破壞現象的特質，因此需要獨立定義。Turner and Schuster (1996)整理邊坡崩塌位移速度並分為七級(表 6-3)。

表6-3 邊坡崩滑速度分級表

(Turner and Schuster, 1996)

速度 等級	描述	速度 (mm/sec)	代表性速度
7	非常快	5×10^{3}	5 m/sec
6	很快	5×10^{1}	3 m/min
5	快		
4	中等	5×10^{-1}	1.8 m/hr
3	慢	5×10^{-3}	13 m/month
2	很慢		
1	非常慢	5×10^{-5}	1.6 m/year
		5×10^{-7}	16 mm/year

崩滑速度很快與非常快之界限非常重要(等級 6 與等級 7 間)，此速度之界限約為人跑步的速度(5m/sec)。另一個速度界限介於慢與很慢等級之間(1.6m/year)，在此移動速度之下，建築物在崩滑過程中有可能不被損壞。。

2. 間接徵兆物理量

邊坡崩塌塊體移動之發生，與許多因素有關，其中較相關之環境因素包括：邊坡地形條件、邊坡地質材料與構造條件、邊坡之地表與地下水文條件及氣候條件等等。另一方面，邊坡塊體移動與人為因素亦息息相關。根據工研院能資所(1989)之研究，影響斜坡運動的因素可分為內在或外在兩種：內在因素主要包括：(A) 礦物組成的性質；(B) 地質構造；(C) 地下水的存在；(D) 地形；(E) 植生。外在因素主要包括：(A) 岩層的風化；(B) 孔隙水壓增加；(C) 加重負載；(D) 移去坡趾支撐；(E) 下伏地層垮塌；(F) 地震；(G) 其他因素，如地下採礦或石灰岩溶洞造成地盤下陷等。

一般而言，地震、豪雨及因豪雨或其他因素而造成之地下水位變化是邊坡塊體移動之重要誘因，由理論與過往經驗均得知邊坡崩塌常伴隨上述物理量之變化。故震動、水壓或水位及降雨特性等外在因素均屬邊坡崩塌之間接徵兆物理量。至於內在影響因素與邊坡崩塌極為相關，此部份因素主要為邊坡之先天不變因素(除地下水之存在)，做為道路邊坡危險程度評估之重要參考，較不適合為崩塌監測之徵兆物理量。基於上述之徵兆物理量，邊坡監測之目的通常包括：

(1) 在邊坡滑動已發生的情況下決定滑動體之深度與形狀，然後使用這些參數來計算滑動面上材料之剪力強度參數，做為改進邊坡穩定工法設計之依據。

(2) 決定滑動體之絕對垂直與橫向移動量及滑動之速度。

(3) 監測與邊坡滑動息息相關之地下水位或孔隙水壓，提供有效應力分析之用。

(4) 觀察介於安全邊緣之天然或開挖邊坡之穩定性，並確認施工或降雨對邊坡移動之影響。

(5) 監測及評估各種控制或穩定工法之有效性。

(6) 在偏遠地區將量測數據透過通訊系統傳出，為可能發生邊坡崩塌提出預警。

本研究僅針對表面破壞及滑動進行探討，並針對有邊坡滑動警示區域進行定期或固定長的監測研究。然而利用近景攝影測量之技術，主要為監測邊坡表面相關位移，對於邊坡內部應力及地下水變化則無法得知，攝影測量可提供監測區域高精度地表模型，利用兩期地表模型進行分析，將可有效計算出邊坡位移，並依據上表滑動速度做出相關邊坡滑動警示。

6.2.3 監測頻率

針對不同致災規模、保全對象以及天然事件提出各項監測項目之頻度，其說明如下：

第一類監測：

此類監測主要針對已經發生坡地災害的處所，為避免二次災害的發生，監測主要針對預報降雨前開始針對現地影像、降雨量、地下水位以及坡面上下滑動位移量為主要監測項目，且因為保全對象明確，且致災規模可能較大，此時應伴隨疏散避難為主。

第二類監測：

此類監測主要針對未發生坡地災害，但有明顯坡面滑動或是河道有明顯土砂堆積的處所，為避免災害的發生，監測主要透過巡察的回報以及即時的監測資料的回傳，設定警戒值作為通報。

第三類監測：

此類主要針對具有潛在坡地災害的區位進行監測，並同樣透過降

雨資料、地下水位監測、影像變遷變化等進行判識，並可針對變化較大之區域，提出工程治理的建議。

中華水土保持學會(1999)整理日本預警基準值相關資料與國內相關案例，建議各類監測儀器於地滑狀況之基準值可發現預警基準值之範圍相當廣泛，原因是此預警基準值是累積不論汛期或平時之實測資料所建立的(表 6-4)，故僅適用於與統計資料條件相同之邊坡。至於內政部營建署所建議之山坡地工程監測參考管理值(表 6-5)，與廖瑞堂(2001)有關山坡地工程穩定判斷之建議管理值，其制定方式同樣是以綜合相關案例資料及參考國外相關文獻所建立而成。另外可參考日本地滑對策技術協會建議，採用位移速率對於不穩定邊坡之活動性加以分級，如表 6-7 所示，該分級法係由測得之地層位移量除以觀測時間求得位移速率，再以位移速率之大小及位移趨勢是否顯著做為分級之依據，由表中可知不穩定邊坡之活動性大致分為四級，其中第一級係為緊急變動，第二級為確定變動，第三級為準確定變動之邊坡，該三類邊坡均屬確定有問題且在活動中之邊坡，需儘速提出有效因應對策加以處理。

表6-4 邊坡維護階段管理基準

(中華水土保持學會，1999)

監測方法	管理區分		
	注意	警戒	疏散
地表伸縮計 地表變位速度	0.5~25 *mm/day*	5~100 *mm/day*	50~500 *mm/day*
地盤傾斜計 地表面傾斜速度	5~10 *sec/day*	-	10~50 *sec/day*
管內傾斜計管 內變位速度	0.5~1 *mm/day*	2~5 *mm/day*	＞10 *mm/day*
地中伸縮計 地盤變位速度	1~10 *mm/day*	10~100 *mm/day*	＞100 *mm/day*
降雨量 (累積降雨量)		10~20 *mm/hr* 10~50 *mm*	20 *mm/hr* 100 *mm*

表6-5 山坡地工程監測參考管理值(內政部營建署)

觀測項目	需考量之因素	預警值	警戒值	行動值
地層移動	1.位移量 2.位移速度	2.0mm/月 (有一定位移傾向)	2.0~10.0mm/月 (有一定位移傾向)	＞10.0mm/月 (有一定位移傾向)
地下水位	設計地下水位	設計水位		
地下水壓	設計地下水壓	設計水壓		
建物傾斜量	容許傾斜量	1/500	1/360	1/250
裂縫增量	容許裂縫寬度	1mm		
地面沉陷	容許沉陷量	沉陷量不影響結構之使用性		
建物(鄰房)沉陷	1.容許沉陷量 2.差異沉陷量	沉陷量不影響結構之使用性 1/500	1/360	1/250
擋土牆及抗滑樁變位	位移量		力	
地錨荷重	1.設計拉力 2.鋼腱容許拉力	設計拉力×1	±設計拉力×1.2	鋼腱容許拉
擋土牆鋼筋應力	1.鋼筋降伏應力 2.鋼筋容許應力	設計應力	容許應力(考慮臨時結構短期應力可提昇 1.2 或 1.5 倍)	降伏應力

由於國內目前沒有相關的管理值訂定規範，所以先參考日本邊坡穩定性判斷的建議值與儀器可量測的精度及"全球衛星定位與自動化監測系統在坡地防災之應用(4/4)"，中所提之伸縮計行動值為警戒值的5~10倍，目前暫訂各項監測儀器行動值為警戒值的5倍，而近景攝影測量量測精度與拍攝地面解析度有決度對關係，並由"道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究"中說明近景攝影精度約為0.5pixel之地面解析度，因此參考彙整如表6-8最為近景監測精度參考指標。

表6-6 邊坡穩定判斷建議之管理值(廖瑞堂，2001)

觀測項目	考量之因素	預警值	警戒值	行動值
地層移動	1.位移傾向 2.位移速率	略有位移傾向 0.5mm/月	有一定位移傾向 2.0mm/月	有一定位移傾向＞10.0mm/月
地下水位及水壓	設計地下水位及水壓	設計水壓		
地面沉陷	容許沉陷量	不影響使用性		

表6-7 位移速率與邊坡穩定性判斷建議表

變動種類	日變動量（mm）	月變動量（mm）	一定方向的累積傾向	活動性判斷	摘要
緊急變動	20mm 以上	500mm 以上	非常的顯著	急速崩壞	崩壞型 泥流型
確定變動（行動值）	1 以上	10以上	顯著	活潑運動中	崩積土滑動 深層滑動
準確定變動（警戒值）	0.1 以上	2.0 以上	略顯著	緩慢運動中	黏土滑動 回填土滑動
潛在變動（預警值）	0.02 以上	0.5 以上	稍稍有	待繼續觀測	黏土滑動 崖錐滑動

表6-8 現行位移監測相關監測精度

各項監測儀器	伸縮計（磁感式）	伸縮計（拉線式）	傾度盤	GPS（水平）
行動值(紅燈)	>±50mm/day or ±5mm/min	>±250mm/day or ±25mm/min	±0.3°/min	±80mm/min
警戒值(黃燈)	>±10mm/day or ±1mm/min	>±50mm/day or ±5mm/min	±0.1°/min	±50mm/min
精度	0.1 mm	1mm	0.01°	30mm

6.2.4 災害預警

依據上表，攝影測量僅針對表面移動為主要考量因素，以表 6-8 預警值而言，本案採近景攝影測量之監測方式，必須盡可能降低拍攝地面解析度，以獲取更佳之量測精度。而近景攝影測量運用於邊坡監測上本計畫以自動監測標，讓近景攝影可以單獨對監測標進行精度解算，而更重要部分在於整體邊坡情事之判別，以邊坡局部破壞或整體滑動而言，近景攝影監測方式，可於固定時間將整區之邊坡進行三維

重建之工作，來獲取監測區稠密三維點雲資料，藉由連續稠密點雲差異計算，將可有效將差異進行偵測，並提供整區潛勢破壞監測。

6.3 自動傳輸計算及預警

於前期研究中主要探討近景攝影測量於邊坡監測之可行性，並提出以手持單相機及模擬多相機方式進行道路邊坡監測之用途，以替代人工定期巡檢之方式完成近景監測，惟此方法僅能透過人工拍攝及檔案上傳方式至近景攝影解算中心自行自動解算，本計畫採全自動拍攝及自動計算方式，達到預警之使用。(如圖 6.1)

其主要構想源至於模擬多相機旋轉攝影方式拍攝，利用多相機旋轉攝影方式及自動識別標誌偵測，讓現地近景解算可以更即時，而這些即時解算之數據可提供快速判別該區域是否已經開始產生位移，並可投過發布警示方式，將拍攝影像再度回傳為監控中心產製監測區域稠密點雲資訊，藉由不同時期點雲資訊來判識道路邊坡是否開始發生破壞等情事。

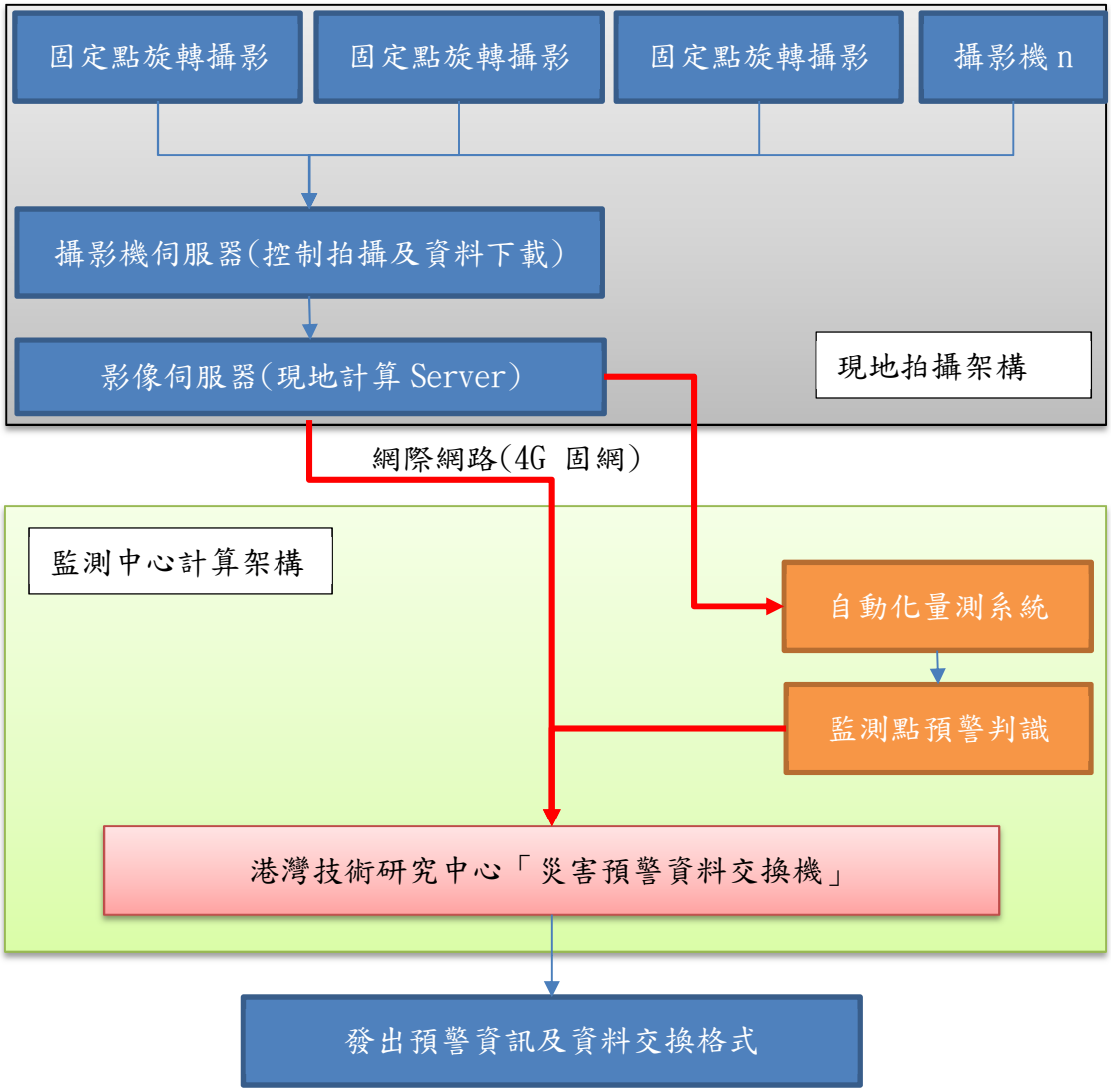


圖 6.1 自動道路邊坡近景攝影測量預警系統流程圖

第七章 IoT 視覺監測系統建置與實例探討

本研究中設計之道路邊坡全自動監測系統可相容於 1.全自動近景攝影系統 2.手動巡檢拍攝 3.UAV 定期巡檢系統。全自動近景監測系統必須能全自動進行專案建立，專案計算及相關精度分析，並設定其監測門檻值，依據此門檻值發布預警，與加入稠密點雲計算及點雲差異分析之排程，以達到自動預警及差異計算等功能設計。以下將對上述架構進行開發並選定一實驗區進行相關測試。

首先 IoT 自動攝影監測系統我們可以把它分為① 監測場地設置(Monitor site settings)、② IoT 視覺攝影監測模組(APS)、③ SfM-MVS 攝影測量模組(SfM-MVS_PM)、④ 誤差分析模組(Error Analysis)、⑤ 表面差異分析模組(SM)及⑥ 預警通報模組(Notify)。如圖 7.1 所示。

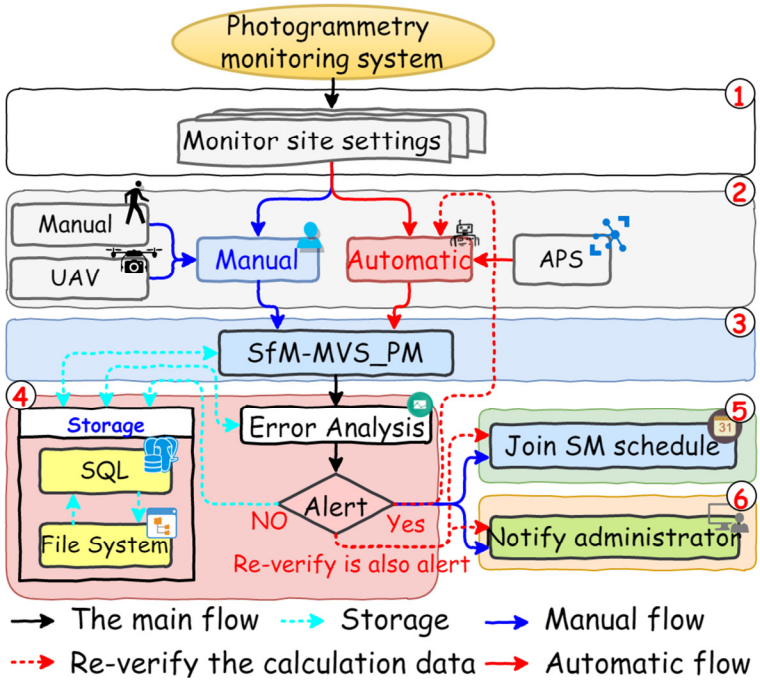


圖 7.1 IoT 近景攝影監測系統流程圖

監測場地設置可依據監測的需求選擇使用手動或全自動攝影兩種方式，手動攝影適合不固定時間，以人工巡檢方式進行拍攝；全自動攝影則透過現地架設 IoT 自動攝影裝置來獲取連續監測資料。IoT

自動攝影模組為本自動監測系統之核心,利用IoT技術結合攝影系統，使攝影測量監測方法達到全自動攝影、計算及預警功能。SfM-MVS攝影測量模組為本系統中計算核心，利用 SfM-MVS 將監測區影像進行三維重建，並依據所設置的監測點計算三維座標。誤差分析模組則依據 SfM-MVS 計算之監測點三維資料進行分析，來獲取相關可能的結構體變為情勢。表面差異分析模組則為判斷整體變位的方法之一，依據誤差分析模組顯示該區域可能發生位移情事，則可啟動監測區稠密三維重建步驟，再依據不同其稠密三維點雲資料以點雲差異分析方式，將不同期的差異以視覺化方式進行展示。預警通報模組則依據上述計算成果，若有立即危害或相關訊息需通報，則可依據此模組進行發布。上述程序中我們這把它分為兩部分。首先是硬體，包含 IoT 自動攝影模組及網路傳輸模組。其次逡為軟體計算架構,包含 SfM-MVS 計算、誤差分析及預警通報。以下將就這兩類分別進行說明。

7.1 IoT 視覺攝影監測系統設計

道路邊坡全自動近景攝影系統本研究設計 IoT 架構，利用微型電子電路及開發版，設計全自動旋轉拍攝及上傳架構，使得近景攝影監測系統得以全自動獲取監測現地資料。全自動攝影架構各主要部件功能及介紹如下依序闡述。

7.1.1 IoT 攝影系統

本研究選用 Sony A5100 相機，此款相機具有 2430 萬有效像素 Exmor APS HD CMOS 大感光元件，使用 BIONZ 影像處理晶片及 Sony 標準 E 接環，可依據監測解析度來調整選用鏡頭。相機控制方式可採用類比控制或使用 PTP 相機控制方法，而本文中選用 Sony A5100 相機同時可使用這兩種方式進行控制，以下依序進行介紹。

類比控制使用 Sony 相機系統中搭載的 Sony Multi Media USB 介

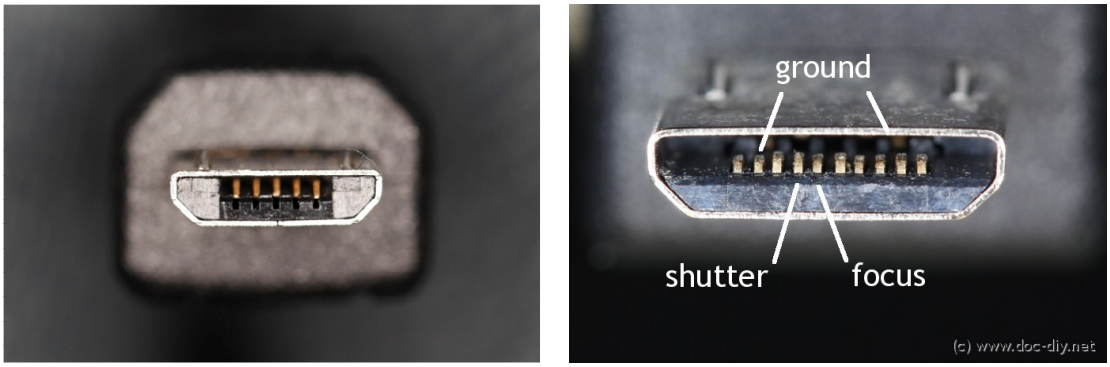
面來進行開發，該 USB 介面提供相機 1.開關控制、2.對焦控制、3.拍照控制、4.影像讀取。利用此特性，將可由此介面進行相關相機操作及檔案傳輸。Sony Multi Media USB 介面如圖 7.2 所示，Sony A5100 相機如圖 7.3 所示。Micro USB 與 Sony Multi USB 腳位比較圖如圖 7.4 所示。Sony Multi Media USB 腳位說明如表 7-1 所示。



圖 7.2 Sony Multi Media USB 介面



圖 7.3 SONY A5100 16-50mm 變焦鏡組



(a) Micro USB type b　　(b) Sony multi USB

圖 7.4 Micro USB 與 Sony Multi USB 腳位比較圖

表7-1 Sony Multi Media USB腳位說明

腳位編號	說明
U1	VBUS (+5V, max 2A)
U2	USB D-
U3	USB D+
U4	USB ID
U5	GND_USB
M10	+3.3V (MULTI_DC)
M09	reserved
M08	"UART_TX" / "LANC_SIG"
M07	“UART_RX” / “BOOT_IN”
M06	SELECT
M05	Audio R out / activate camera / focusing
M04	Audio L out / release shutter
M03	Maybe composite video out
M02	GND (identical to GND_USB)
M01	Power On /Off (short to GND)

7.1.2 IoT 嵌入式系統

本研究中自動攝影系統主要功能為自動定時拍照，並將拍攝影像上傳至近景計算伺服器。為達到自動定時控制之目的，須利用一嵌入式系統透過 I/O 介面輸出控制訊號，控制相機開關、對焦以及拍照，並可連接相機將相機內之影像檔案讀出及傳送。為達到上述功能，本案選用 Raspberry Pi 3 此款單板電腦，如圖 7.5 所示。控制腳位如圖 7.6 所示。

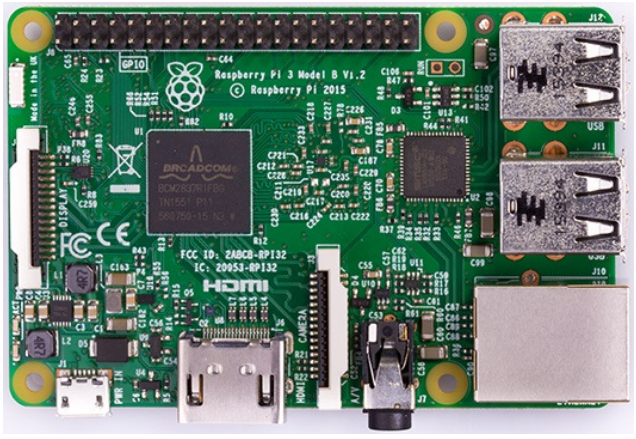


圖 7.5 Raspberry Pi 3 單板電腦

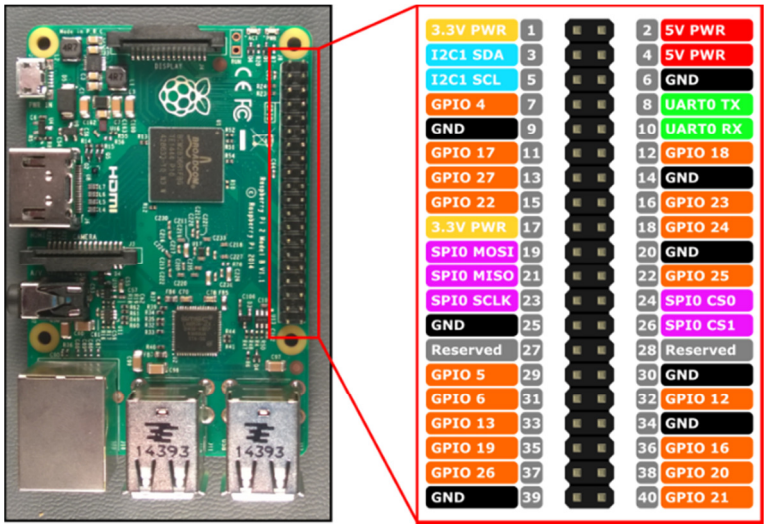


圖 7.6 Raspberry Pi 3 單板電腦 I/O 接腳圖

控制程式於 Raspberry Pi 3 上建置 Linux 系統，以 Python 語言搭配 WiringPI 函式庫[57]來控制 GPIO 介面來達到相機控制之目的，相關邏輯控制請參閱原著之上節圖 4.15(c)(d)。類比控制設計電路如圖 7.7 所示。PTP 數位控制則直接使用 PTP 通訊協定進行控制，USB 連線模式則透過 uhubctl 函式庫進行控制。

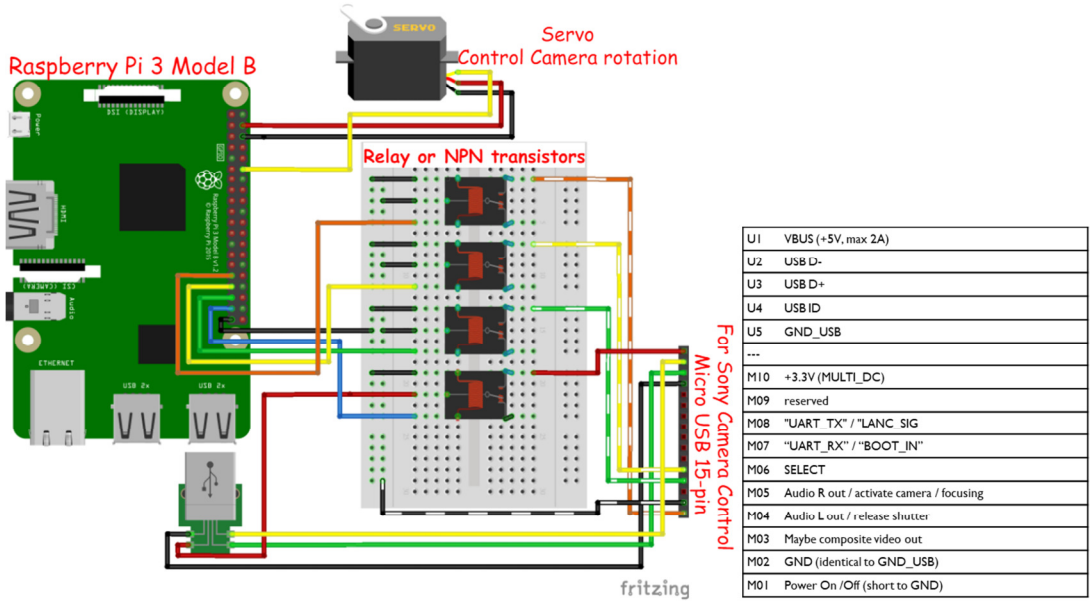


圖 7.7 類比控制設計電路圖

7.1.3 IoT 自動攝影控制邏輯

為達到群組相機同步拍照之目的，在群組中設一控制主站，作為發送訊號命令其餘控制子站控制相機同步拍照，並於所有控制站將照片傳輸至檔案伺服器後，將完成之專案資訊的 JSON 檔案傳輸至檔案伺服器，圖 7.8 為系統架構圖：

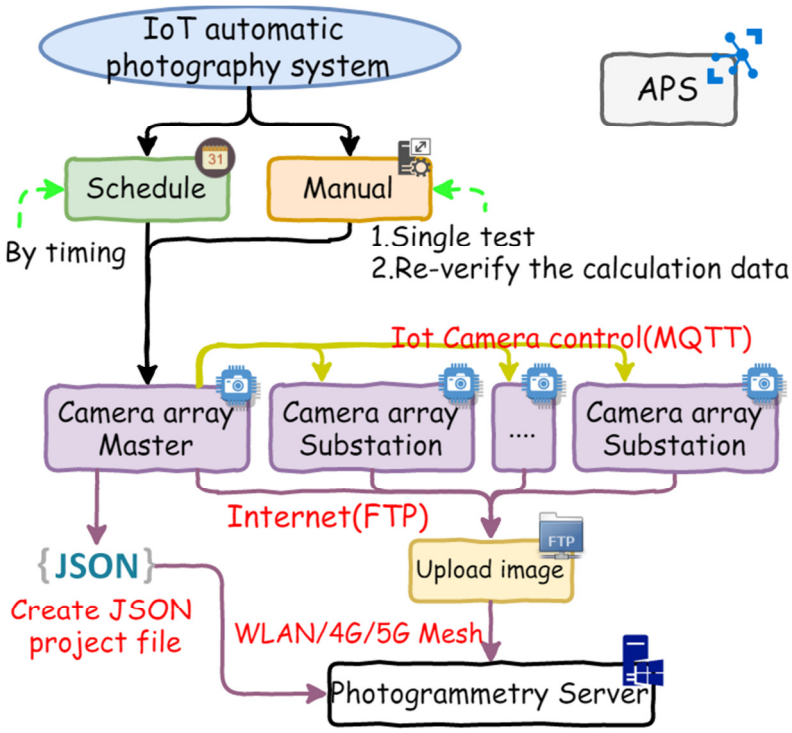


圖 7.8 IoT 全自動攝影及上傳架構圖

IoT 自動攝影系統可由手動(單次拍攝)或排程(定時拍攝)開始自動拍攝任務，IoT 通訊協定使用 MQTT 作為主要通訊協定。

7.1.4 控制電路與控制程式

整體自動拍攝架構如圖 7.9 所示，其中包含嵌入式系統及自動旋轉雲台及拍攝系統，本系統並提供手機 APP 介面及控制程式介面，供使者進行相關控制。如圖 7.10 所示。

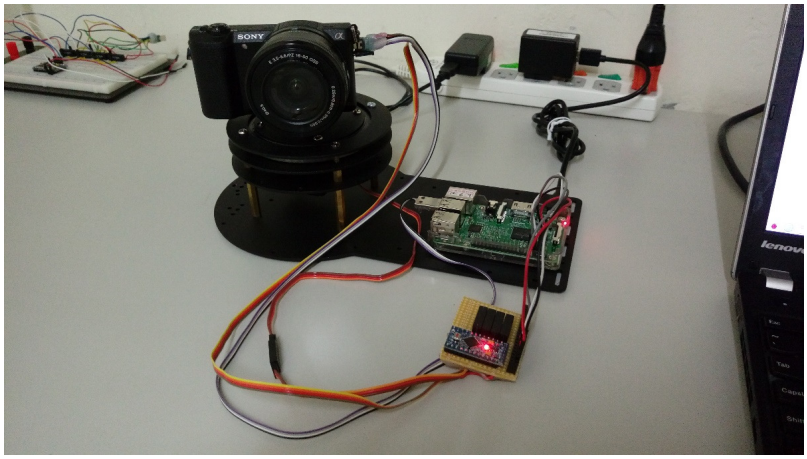


圖 7.9 控制電路



(a)手機 APP　　(b)控制程式

圖 7.10 系統控制介面

7.1.5 現地自動監測架構

現地自動監測架構包含上述嵌入式系統及自動攝影系統，相關系統控制採用 Wifi 做為資料控制及資料傳遞之媒介，本計畫規劃可由現

地主機進行初步計算，亦可回傳回監控中心進行後續相關計算。內部網路與網際網路可投過實體網路、4G Lte 或本研究計畫中採用 Wireless Mesh Network 網路進行傳遞，現地監測與監控中心硬體架構如圖 7.11 所示。

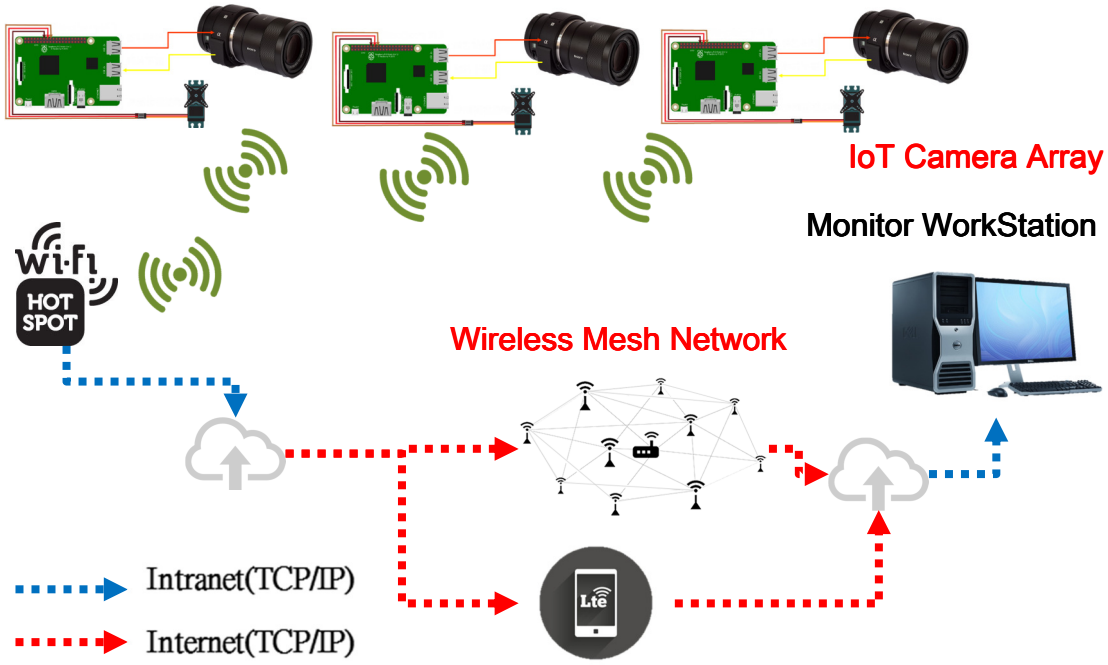


圖 7.11 現地監測與監控中心硬體架構

Wireless Mesh Network 技術由 Mesh Network 衍伸，Mesh Network 其實不算是新技術。此技術源自於美國軍方無線網路架構的解決方案，具有嚴格加解密的通訊調變能力，以及後端資料的安全管理。Mesh Network 具有與傳統有線網路截然不同的特性，包括隨時可能改變的網路型態、沒有方向或範圍限制的移動等，因此，它需要一種新的路由協定（Routing Protocol）來替這些 Node（節點）找出彼此聯繫的路徑，這是一種完全無線、可任意移動的網路架構，不需基地台，所有 Node 可以任意地進行連結，且每個 Node 同時具有 Router（路由器）的功能。傳統網路傳遞方式必須透過 HUB 進行資料交換，所有資料交換必須將資料重新傳遞回 HUB 進行交換再傳至目標電腦進行解讀。但 Mesh Network 則是採用獨立各台間進行獨立傳輸的方式，達到資料

傳輸訊息的目的。

而 Wireless Mesh Network 就是 Mesh Network 實作在無線網路上的技術，每一個在 Wireless Mesh Network 上的 Node 都可以連結到數個不同的 Node。Node 又分成兩種，一種是 Mesh Router（網狀路由器），一種是 Mesh Client（網狀客戶端）。其中 Mesh Client 可以是筆記型電腦、桌上型電腦機、PDA、IP 電話機和 RFID 閱讀器等，只要在一般的裝置上面安裝一塊無線網卡，具備必要的 Mesh Network 功能，就能變成 Mesh Client 了。

Wireless Mesh Network 運作方式可透過中間多 AP 方式進行訊號延伸，而目前最主要考慮的就是該架構上如何進行多點傳遞，將訊號延伸至有實體網路位置，再將網界接至網際網路上進行傳遞。多 AP 傳抵如圖 7.12 所示。

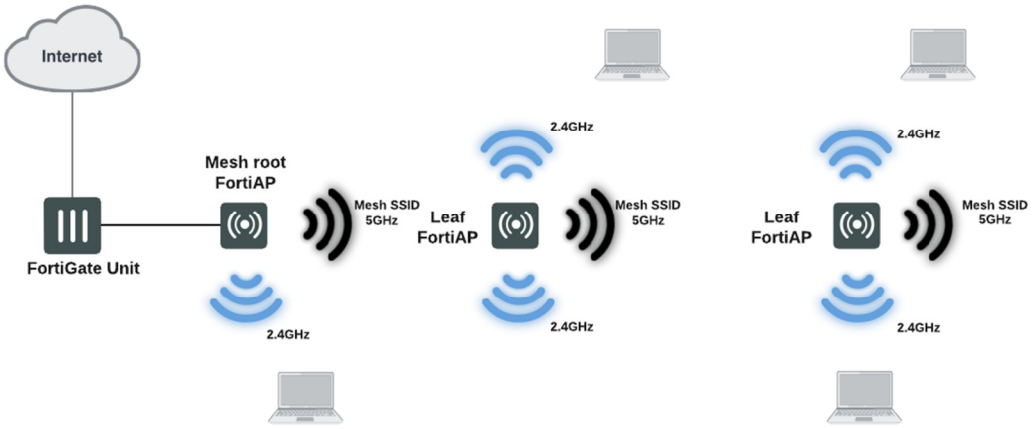


圖 7.12 Wireless Mesh Network 多 AP 傳遞方式

本研究計畫中採用網際網路跟 Wireless Mesh Network 傳遞，並於近端提供 5GWifi 進行資料傳遞相關點對點傳遞方式如圖 7.13 所示。

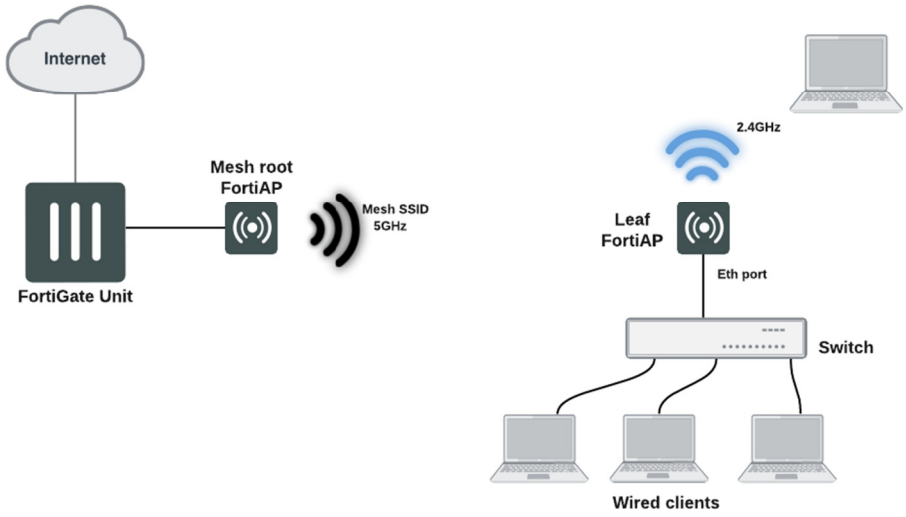


圖 7.13 點對點 Wireless Mesh Network

本研究計畫中將測試 Wireless Mesh Network 解決邊坡監測場址無 4G 網路或固網覆蓋時，利用此系統進行網路界接，並採購 Quantenna QT3860BC 系統，該系統理論傳遞距離可達 3 公里，並提供 1700MB 5G Wifi 頻寬，相關 5GHz WiFi Mesh 相關技術規格如表 7-2 所示，設備如圖 7.14 所示。

表 7-2 5GHz WiFi Mesh backhaul

5GHz WiFi Mesh backhaul
Quantenna QT3860
11ac 4x4 MIMO, 1700Mbps(Max)
11an 4x4 MIMO, 600Mbps compatible
Profile negotiation: mesh profile, negotiation elements
Key management: PMK, MTK, GTK
WPA/WPA2 Personal security
Operation Mode: AP/STA/WDS/Mesh
Proprietary hidden SSID
Self-forming (GIT algorism)
Self-recovery (GIT algorism)
Best path selection (bridge layer OLSR-like protocol)
Maximum hopping (4 recommend)



圖 7.14 Quantenna QT3860 5GHz WiFi Mesh

7.2 視覺監測系統設計

近景攝影自動監測系統結合上述自動攝影系統，主要流程由獲取的監測影像(手動巡檢或 IoT 自動攝影方式)進行編碼標的自動偵測及量測，再將監測場地測得控制點資料載入，接續判斷系統中相機是否已經執行相機率定程序，若有則直接載入，若無則進入自率定程序。完成上述基本動程序後則使用 SfM-MVS 方式計算監測點三維座標，並將監測點座標及計算專案進行存檔。相關流程如圖 7.15 所示。完成單次監測數據計算後將直接由誤差分析模組進行比對，並依據各監測區需求自動預報門檻值，當系統判定超過此門檻值則自動啟動表面差異分析功能，該功能提供不同時期表面差異顯示。主要計算步驟包含自動開啟專案並產製該專案稠密點雲資訊，再由點雲差異(M3C2)獲取點雲差異，差異顯示部分則透過渲染差異區點雲顏色，並由 Potree 格式進行 WebGL 點雲展示。相關流程如圖 7.16 所示。

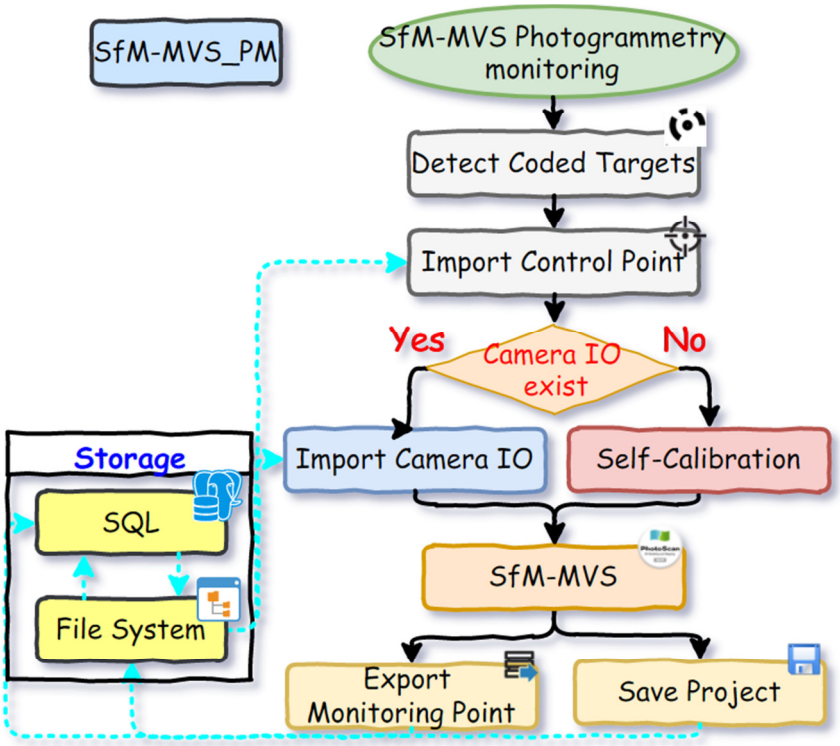


圖 7.15 視覺監測系統 SfM-MVS 計算流程

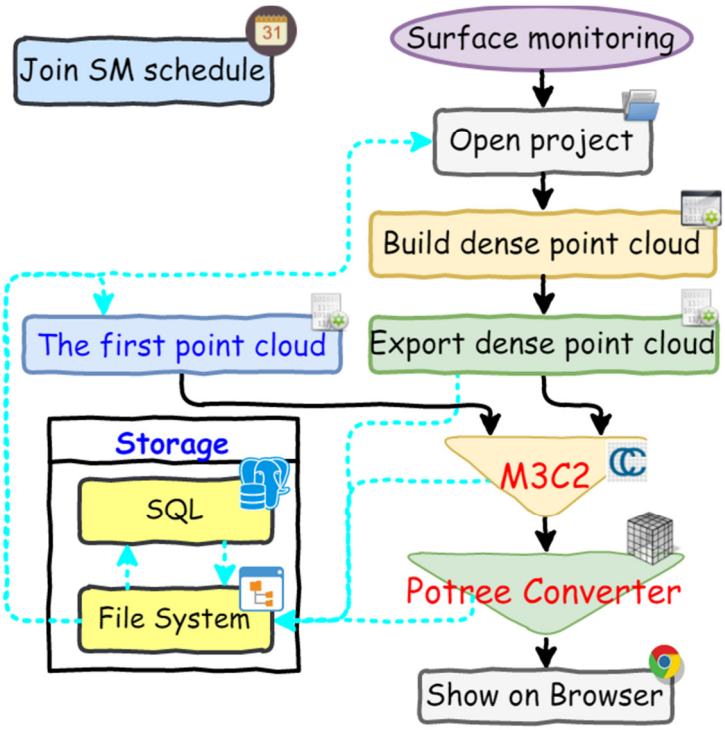


圖 7.16 視覺監測系統 SfM-MVS 計算流程

本系統可提供全自動攝影測量架構，免去以人工繁複操作達到全自動計算之目的。本系統於 Agisoft PhotoScan Pro (1.3.4 64bit Windows OS) 內建的 Python 環境中開發。PhotoScan 主要提供 SfM-MVS 相關成果計算，並引用 CloudCompare 計算 M3C2 成果，其餘相關計算功能均以 Python 進行開發。設計本系統支援多監測站同時計算，因此系統將依據 IoT 自動攝影模組所建立的專案檔及本系統存取資料夾結構開始自動計算程序。系統存取資料夾可分為三部分。(1)IoT 自動攝影模組影像上傳及專案檔建立、(2)攝影測量自動監測系統計算及分析及(3)排程及點雲差異分析展示系統。專案檔為 PhotoScan Server 自動啟動計算之關鍵，它以 JSON 格式(圖 7.17(b))描述攝影站代號('site_id')、拍攝編號('project_id')、建立時間('c_time')及目前加入的所有攝影站編號('camera_folders')。PhotoScan Server 將持續監視專案資料夾來開啟自動計算，並由專案參數向資料庫及檔案系統獲取計算參數供自動計算使用。

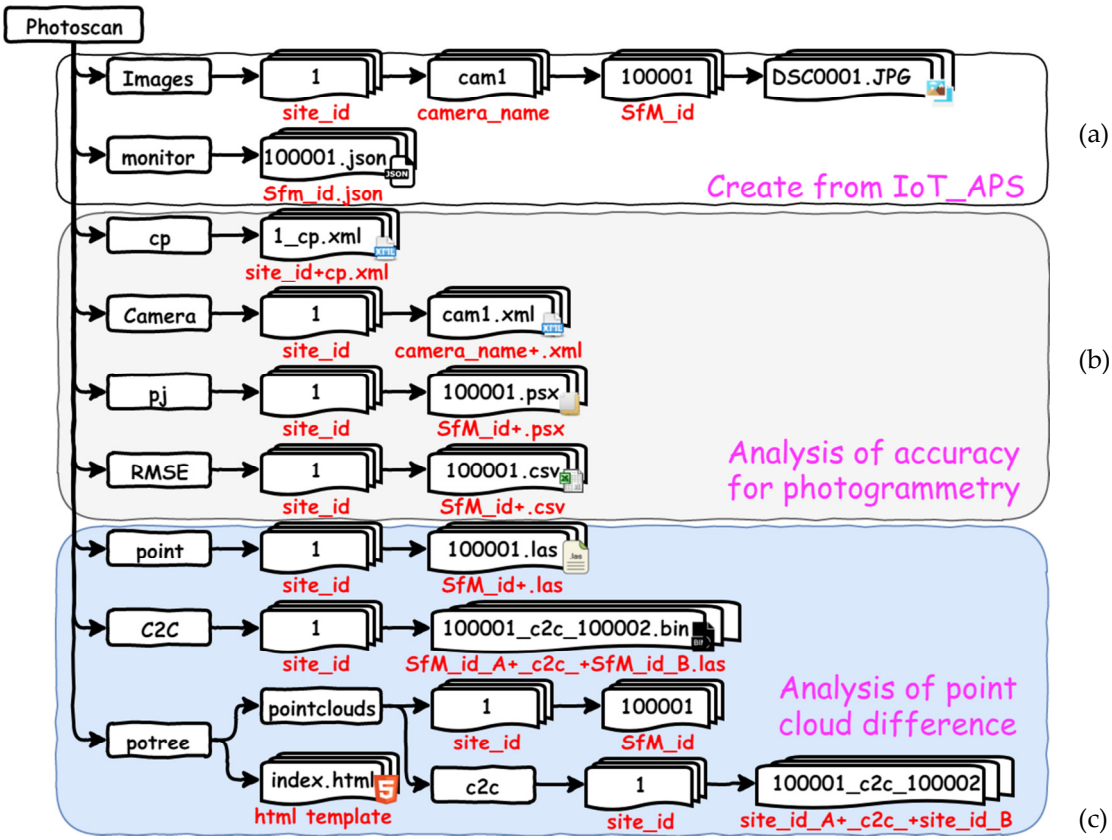


圖 7.17 自動視覺攝影測量資料夾結構

計算資料夾架構如圖 7.17 所示。圖中紅色文字描述專案檔變數、'Photoscan'資料夾為本系統根目錄、'Images'放置 IoT 自動攝影模組影像放置位置、'cp'放置監測點控制點資料、'Camera'放置相機率定參數資料夾、'pj'放置 photoscan 計算專案檔、RMSE 放置計算及分析成果、'point'放置產製稠密點雲、'C2C'放置計算兩期點雲差異檔案及'potree'放置點雲 WebGL based 展示格式。其中'cp'控制點資料以 xml 檔案格式放置監測點三維資料，並由監測場實地測量監測點獲得，檔案命名規則為'site_id+cp.xml'供後續自動讀取使用；'Camera'以'site_id'資料夾區分監測區域，檔案命名為'camera_name.xml'來放置相機率定參數。

資料庫於本系統中用來記錄及控制所有自動化的流程。資料庫以資料表'site'為核心來計算管理多個監測站，並放置包含監測站資訊、說明資訊及經緯度座標等。資料表'account'用來放置各監測站管理員資訊及聯絡方式，供後續自通報使用。資料表'site'的關聯資料表包含'iot'及'sfm'，用來記錄該監測場地是否包含 IoT_APS 及每次計算的專案。資料表'sfm'用來記錄近景攝影監測系統之專案創立、相關計算步驟回報資訊及監測點的誤差分析等資訊，並由關聯資料表'gcp'紀錄監測點詳細三維座標及計算資訊。資料表'sfm'的關聯資料表還包含'tasks'及'c2c'，用來紀錄資料表'sfm'之排程任務及點雲差異計算列表。資料表'c2c'的關聯資料'c2cpotree'，用來記錄點雲差異分析後產製 potree 格式列表。資料庫關聯圖如圖 7.18 所示。

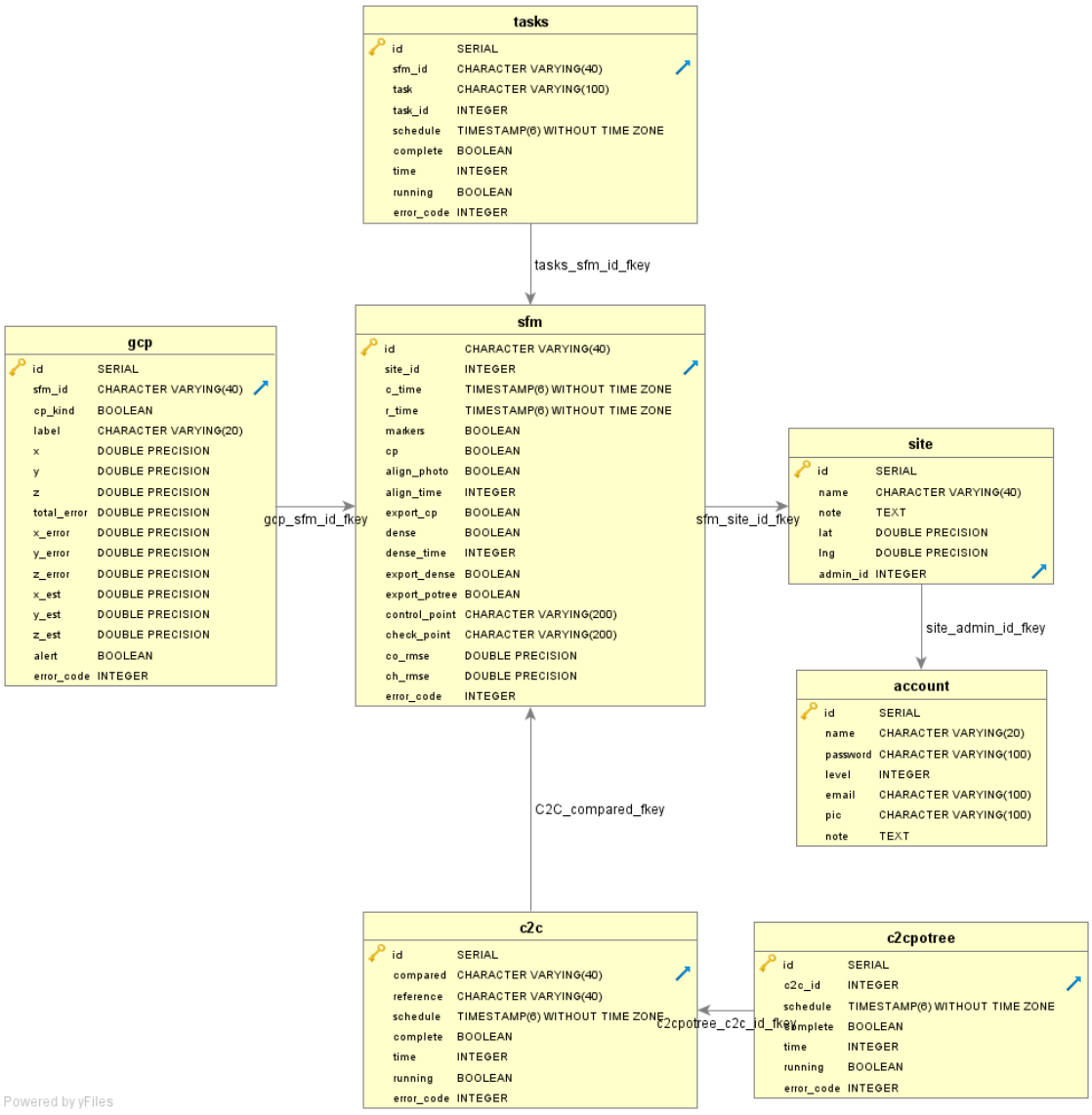


圖 7.18 自動監測系統資料庫關聯圖

7.3 自動監測系統運算伺服器架構

計算硬體規劃以叢集(Clustering)計算搭配高速網路架構建構高速運算架構。叢集計算架構使用區域網路串聯 PhotoScan Server、Cluster node 及資料儲存 NAS 系統，並支援多 Server 對此 Cluster node 任務計算，讓此架構可應用於其他攝影測量計算分析使用。其它相關 Server 包含儲存系統(FTP Server, SQL Server)及 IoT 資料交換協定(MQTT)。架構如圖 7.19 所示。實現此計算架構共計使用 4 台工作站

及 1 部 NAS 系統，其中 1 部工作站運作 PhotoScan Server 及 PostgreSQL，NAS 運作 Mosquitto（MQTT broker）、FTP Server 與（Network FileSystem, NFS），其餘工作站作為 PhotoScan clustering node 運算使用。為使系統快速運算，於 Intelnet 時使用雙向 100Mbps/s，Intranet 則使用雙向 1GbE/s。

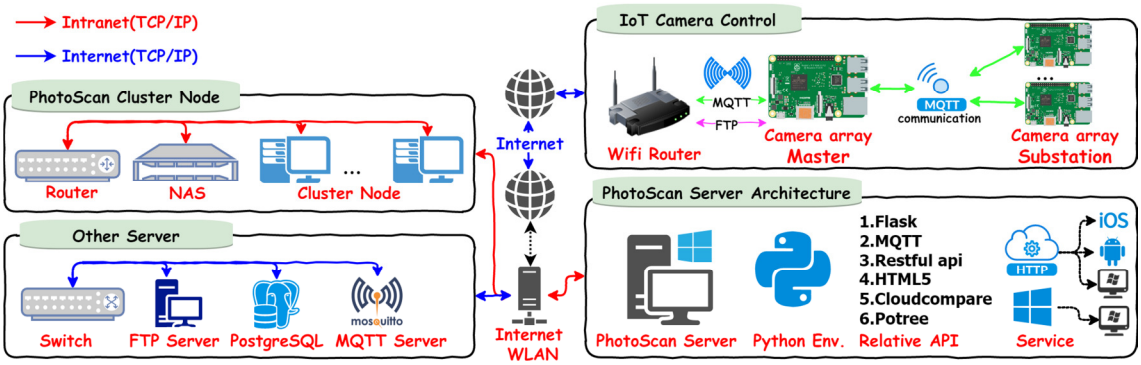


圖 7.19 自動監測系統網路架構

7.4 其他系統設置需求

上述系統架構中包含系統設定檔、相機率定參數、現場控制點資料及自動攝影回傳專案檔必須依據下列方式進行新增，此時系統才得以正常執行。以下依序進行說明。

7.4.1 相機率定參數

相機率定相關理論基礎請參閱 5.2 節。相機率定可採用自率定或預率定獲取相機參數，但特別注意不管使用何種軟體或工具進行相機率定，請先確保能夠將率定後的參數轉至 PhotoScan 軟體中進行應用，PhotoScan 中所使用的相機參數描述方式，以計算機視覺描述的相機模式類似，使用單位為 *pixel* 單位，而經典共線式才採用長度單位(μm)，雖然描述的參數代號都相同，但使用的公式及描述的內容不完全相同。如 PhotoScan 用以框幅式(針孔模式)對於相機參數的描述如下：

$$
\begin{aligned}
x &= X \ / \ Z \\
y &= Y \ / \ Z \\
r &= sqrt\left(x^2 + y^2\right) \\
x' &= x\left(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8\right) + \left(P_1\left(r^2 + 2x^2\right) + 2P_2 xy\right)\left(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4\right) \\
y' &= y\left(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8\right) + \left(P_2\left(r^2 + 2y^2\right) + 2P_1 xy\right)\left(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4\right) \\
u &= w * 0.5 + c_x + x' f + x' B_1 + y' B_2 \\
v &= h * 0.5 + c_y + y' f
\end{aligned}
\tag{7.1}
$$

式中

(X, Y, Z) - 點位座標*(local camera coordinate system)*

(u, v) - 相片座標 *(in pixels)*

f - 相機焦距 *(in pixels)*

c_x, c_y - 像中心偏移量 *(in pixels)*

K_1, K_2, K_3, K_4 - 輻射畸變差

P_1, P_2, P_3, P_4 -離心畸變差

B_1, B_2 - 仿射畸變差

w, h - 影像長寬*(in pixels)*

經典附加參數自率光束平差描述如下：

$$
\begin{aligned}
x_i - \Delta x_i &= -f \frac{m_{11}\left(X_i - X_0\right) + m_{12}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{13}\left(Z_i - Z_0\right)}{m_{31}\left(X_i - X_0\right) + m_{32}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{33}\left(Z_i - Z_0\right)} \\
y_i - \Delta y_i &= -f \frac{m_{21}\left(X_i - X_0\right) + m_{22}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{23}\left(Z_i - Z_0\right)}{m_{31}\left(X_i - X_0\right) + m_{32}\left(Y_i - Y_0\right) + m_{33}\left(Z_i - Z_0\right)}
\end{aligned}
\tag{7.2}
$$

$$
\begin{aligned}
\Delta x_i &= x_0 - x_i(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) - [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy] \\
\Delta y_i &= y_0 - y_i(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 - [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2y^2)] \\
r^2 &= x_i^2 + y_i^2
\end{aligned}
$$

式中

f - 相機焦距(μm)

x_i, y_i, X_i, Y_i, Z_i - 點位像片(*pixel*)及地面座標(m)

X_0, Y_0, X_0 - 攝影中心的地面座標(m)

m_{11}~m_{33} - 旋轉矩陣係數

k_1, k_2, k_3 - 輻射畸變差

p_1, p_2 - 離心畸變差

如式(7.1)及式(7.2)所式，請先確保相關率定參數間之轉換方式，得以進行後續參數引用。

(1) 預率定

預率定程序採用近景攝影測量商用軟體 iWitness PRO(Australis)進行相機率定。預率定程序中首先於室內場景布設自動編碼標，將拍攝完之影像採用 iWitness PRO 進行率定，相關率定參數可由 PhotoScan 相機率定選項中，利用載入方式將 iWitness PRO(Australis)格式進行匯入，並於 PhotoScan 軟體將會以上述參數進行相關轉換。

首先使用 iWitness PRO 自動率定標於特定率定場進行佈設，率定標如圖 7.20 所示，本研究是多功能率定場如圖 7.21 所示，並依據率定規則，以多交會方式進行率定標拍攝，拍攝成果如圖 7.22 所示，再依據所拍攝影像，使用 iWitness PRO 軟體進行全自動相機率定計算(圖 7.23)，並將相關率定參數及率定報表輸出如圖 7.24 所示。

計算相關率定參數後，可直接由將此參數由 PhotoScan 軟體直接進行轉換，請勿直接將此參數輸入 PhotoScan 使用，務必透過轉換參數功能將相關參數進行轉換，轉換後將相機率定參數進行存檔如圖 7.25 所示。而該 xml 則可依據本自動計算架構自動讀取並使用。

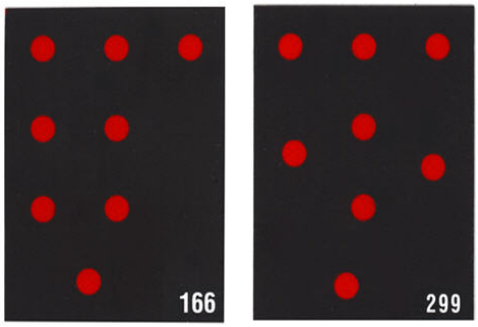


圖 7.20 iWitness Pro 自動率定標

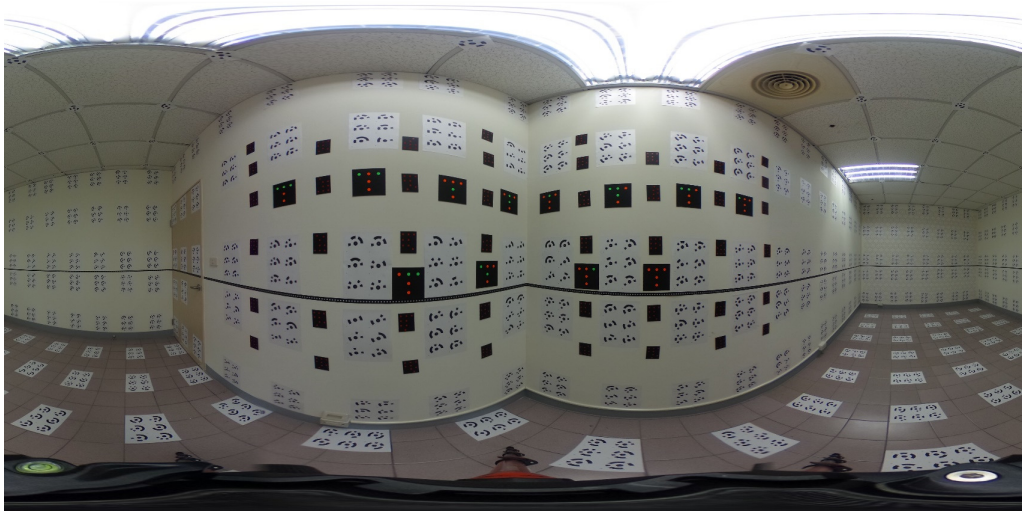


圖 7.21 本研究室多功能自動率定場



圖 7.22 多功能率定場拍攝率定標

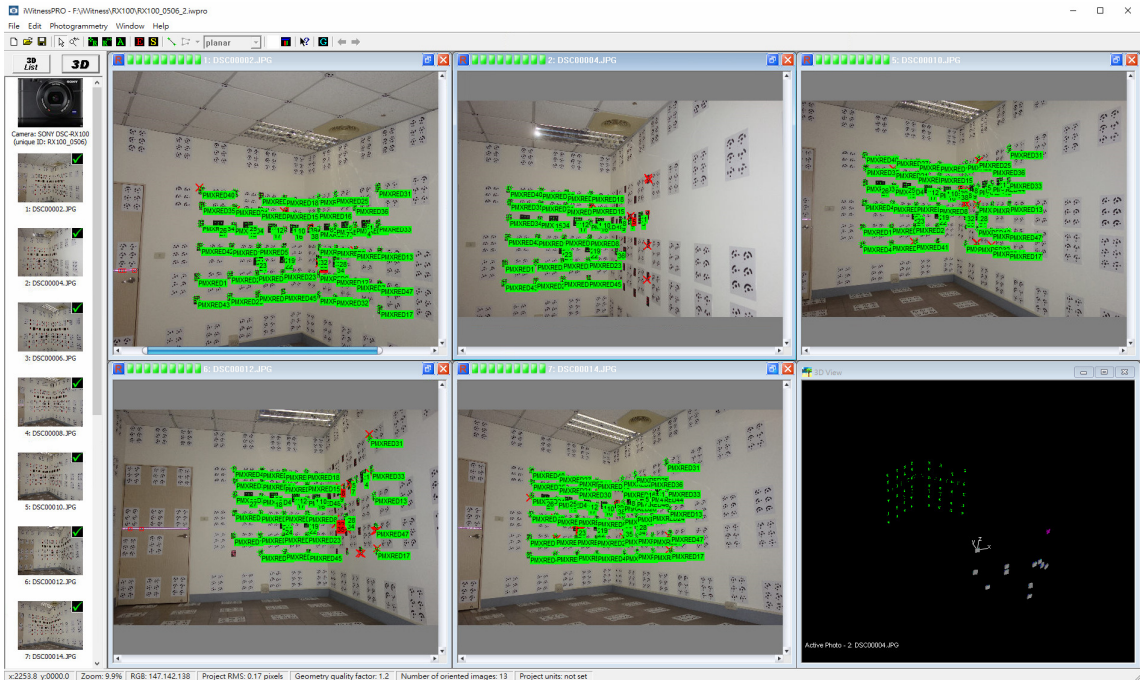


圖 7.23 使用 iWitness Pro 進行相機參數求解

CAMERA CALIBRATION REPORT

PROJECT DETAILS

Camera: SONY ILCE-QX1
Filename: F:\iWitness\QX1_0504\01\QX1_01_0504.iwpro
Calibration Date: 06/05/2016 10:21am

METRIC CALIBRATION PARAMETERS

Resolution = 5456 x 3632 pixels
Pixel width = 0.0050mm, Pixel height = 0.0050mm

		VALUE	STANDARD ERROR
Principal distance	c =	18.5762mm	0.003mm
Principal point offset in x-image coordinate	xp =	-0.0152mm	0.000mm
Principal point offset in y-image coordinate	yp =	0.1648mm	0.000mm
3rd-order term of radial distortion correction	K1 =	2.05497e-004	-1.#INDe+000
5th-order term of radial distortion correction	K2 =	-6.47337e-007	-1.#INDe+000
7th-order term of radial distortion correction	K3 =	-1.13485e-009	1.0128e-008
Coefficient of decentering distortion	P1 =	-4.9218e-006	7.457e-010
Coefficient of decentering distortion	P2 =	-7.1427e-005	7.457e-010
Differential scaling between x & y	B1 =	4.7217e-005	1.013e-008
Non-orthogonality between x & y axes	B2 =	-3.4695e-005	-1.#IOe+000

STANDARD CORRECTION EQUATION

The corrected image coordinates x(corr) & y(corr) can be calculated from the measured coordinates x(meas) & y(meas) by using the formulas:

x = x(meas) - xp
y = y(meas) - yp

x and y are now with respect to the principal point,

r^2 = x^2 + y^2
dr = K1•r^3 + K2•r^5 + K3•r^7
x(corr) = x(meas) - xp + x•dr/r + P1•(r^2 + 2x^2) + 2•P2•x•y
y(corr) = y(meas) - yp + y•dr/r + P2•(r^2 + 2y^2) + 2•P1•x•y

Produced by Australis from Photometrix - http://www.photometrix.com.au PAGE 1 of 5

CAMERA CALIBRATION REPORT

GAUSSIAN RADIAL DISTORTION CORRECTION PROFILE (dr)

For principal distance c, Gaussian radial distortion correction dr (microns) is given for any radial distance r (mm) as:

dr = K1•r^3 + K2•r^5 + K3•r^7

correction dx = x•dr/r

correction dy = y•dr/r

	VALUE	STANDARD ERROR
c =	18.576mm	0.0029mm
K1 =	2.05497e-004	-1.#INDe+000
K2 =	-6.47337e-007	-1.#INDe+000
K3 =	-1.13485e-009	1.0128e-008

r(mm)	dr(microns)
0.00	0.0
1.00	0.2
2.00	1.6
3.00	5.4
4.00	12.5
5.00	23.6
6.00	39.0
7.00	58.7
8.00	81.6
9.00	106.2
10.00	129.4
11.00	147.1
12.00	153.4
13.00	139.9
14.00	96.1
15.00	8.1
16.00	-141.7

CAMERA CALIBRATION REPORT

BALANCED RADIAL DISTORTION CORRECTION PROFILE(dr)

For 'balanced' principal distance cb, radial distortion correction dr (microns) is given for any radial distance r (mm) as:

dr = K0•r + K1•r^3 + K2•r^5 + K3•r^7

cb = 18.3337mm

K0 = -1.30573e-002

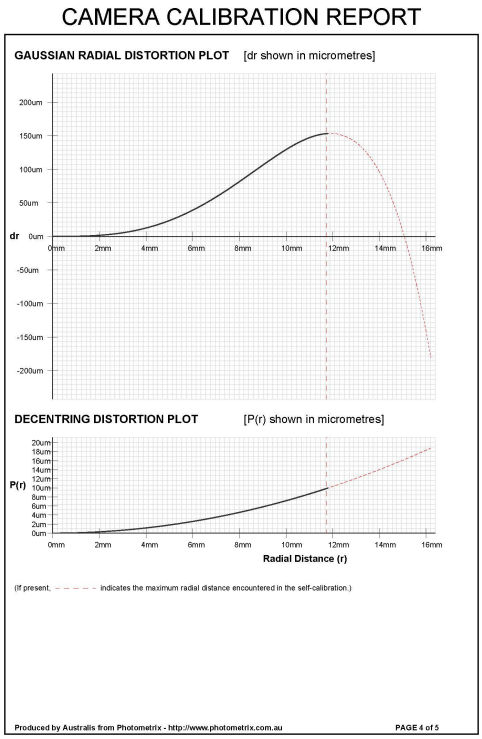
K1 = 2.02814e-004

K2 = -6.38885e-007

K3 = -1.12004e-009

r(mm)	dr(microns)
0.00	0.0
1.00	-12.9
2.00	-24.5
3.00	-33.9
4.00	-39.9
5.00	-42.0
6.00	-39.8
7.00	-33.5
8.00	-23.9
9.00	-12.7
10.00	-2.8
11.00	1.6
12.00	-5.3
13.00	-31.7
14.00	-88.0
15.00	-187.9
16.00	-348.8

Distortion profile is 'balanced' (dr = 0.0) about a radial distance of r = 11.5mm


CAMERA CALIBRATION REPORT
GAUSSIAN RADIAL DISTORTION PLOT [dr shown in micrometres]
200um
150um
100um
50um
dr 0um
-50um
-100um
-150um
-200um
0mm 2mm 4mm 6mm 8mm 10mm 12mm 14mm 16mm
DECENTRING DISTORTION PLOT [P(r) shown in micrometres]
20um
18um
16um
14um
12um
P(r) 10um
8um
6um
4um
2um
0um
0mm 2mm 4mm 6mm 8mm 10mm 12mm 14mm 16mm
Radial Distance (r)
(If present, indicates the maximum radial distance encountered in the self-calibration.)
Produced by Australis from Photometrix - http://www.photometrix.com.au
PAGE 4 of 5

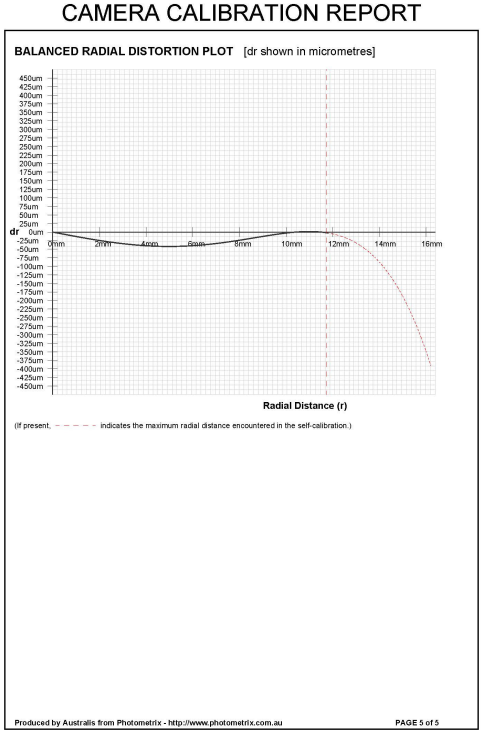

CAMERA CALIBRATION REPORT
BALANCED RADIAL DISTORTION PLOT [dr shown in micrometres]
450um
425um
400um
375um
350um
325um
300um
275um
250um
225um
200um
175um
150um
125um
100um
75um
50um
25um
dr 0um
-25um
-50um
-75um
-100um
-125um
-150um
-175um
-200um
-225um
-250um
-275um
-300um
-325um
-350um
-375um
-400um
-425um
-450um
0mm 2mm 4mm 6mm 8mm 10mm 12mm 14mm 16mm
Radial Distance (r)
(If present, indicates the maximum radial distance encountered in the self-calibration.)
Produced by Australis from Photometrix - http://www.photometrix.com.au
PAGE 5 of 5

圖 7.24 相機率定報告

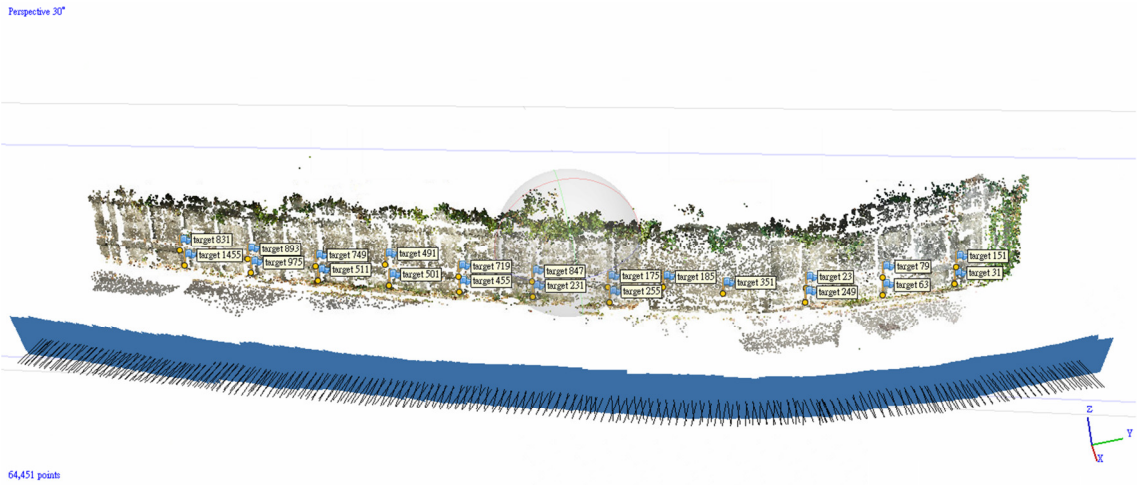
QX1_01_0506.xml

```xml
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<calibration>
  <projection>frame</projection>
  <width>5456</width>
  <height>3632</height>
  <fx>3.7187092755847721e+003</fx>
  <fy>3.7188739466851675e+003</fy>
  <cx>2.7256076154741604e+003</cx>
  <cy>1.7839369009583424e+003</cy>
  <skew>-3.1913909443259730e-001</skew>
  <k1>-7.4994952692392966e-002</k1>
  <k2>1.2622369526604196e-001</k2>
  <k3>-5.8766884118036856e-002</k3>
  <k4>3.1604277940883760e-002</k4>
  <p1>-1.2972796238301268e-003</p1>
  <p2>2.0108221281510267e-004</p2>
  <date>2016-05-06T06:46:15Z</date>
</calibration>
```

圖 7.25 PhotoScan 相機率定參數

(2) 自率定

自率定功能可直接採用 PhotoScan Pro 軟體進行相機率定功能，預率定功能可直接採用自然場景進行拍攝，並搭配適當現地控制點，其自率定成果將接近預率定成果(邱健瑋，2016)。現地拍攝、控制點設置及相關成果解算如圖 7.26 所示。



Agisoft PhotoScan

Processing Report By KUAS
23 June 2017



Survey Data

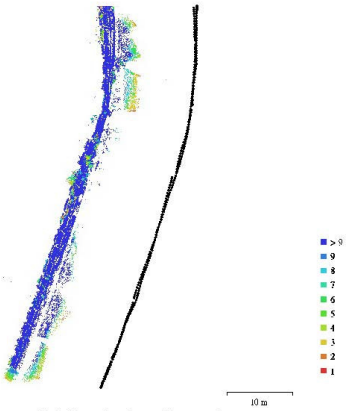


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	317	Camera stations:	317
Flying altitude:	13.8 m	Tie points:	64,451
Ground resolution:	1.86 mm/pix	Projections:	1,330,541
Coverage area:	138 m^2	Reprojection error:	0.65 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
SLT-A55V (35 mm)	4912 x 2760	35 mm	5.17 x 5.17 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

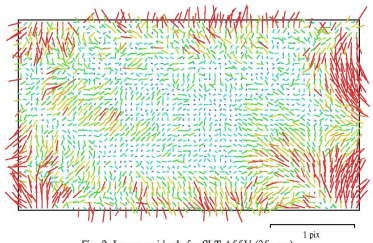


Fig. 2. Image residuals for SLT-A55V (35 mm).

SLT-A55V (35 mm)
317 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	**4912 x 2760**	**35 mm**	**5.17 x 5.17 μm**

F:	7425.93		
Cx:	-22.1497	B1:	-2.55748
Cy:	31.9891	B2:	-11.3863
K1:	-0.0155218	P1:	0.00110062
K2:	0.216452	P2:	0.000334175
K3:	0.271194	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Ground Control Points

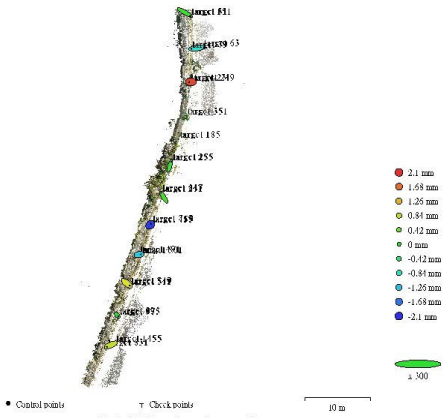


Fig. 3. GCP locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
10	3.32695	2.47106	1.10603	4.14424	4.28929

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
target 31	5.86321	-3.53727	0.0450283	6.84773	0.274 (19)
target 63	-5.63162	-0.764279	-0.940699	5.76057	0.410 (20)
target 231	-2.74708	4.23463	0.137705	5.04951	0.293 (21)
target 249	-1.83478	-0.0135358	1.9301	2.66305	0.296 (28)
target 255	1.41313	4.33238	0.0727599	4.55761	0.308 (23)
target 455	0.892428	0.771268	-2.05774	2.37183	0.393 (24)
target 501	2.00126	0.349046	-1.19401	2.35638	0.330 (33)
target 511	3.02081	-2.37314	1.04965	3.98231	0.323 (32)
target 975	1.08843	-1.03856	0.0441153	1.50507	0.354 (38)
target 1455	-4.07091	-1.95865	0.912597	4.60884	0.328 (20)
Total	**3.32695**	**2.47106**	**1.10603**	**4.28929**	**0.334**

Table 3. Control points.

圖 7.26 PhotoScan 相機自率定成果

率定後相關參數可直接進行引用，並將此相機率定成果轉存為 xml 格式，即可讓本系統使用(圖 7.27)。

XML.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<calibration>
  <projection>frame</projection>
  <width>4912</width>
  <height>2760</height>
  <f>7425.9294531279838</f>
  <cx>-22.149745848034854</cx>
  <cy>31.989105786198479</cy>
  <b1>-2.5574825403118666</b1>
  <b2>-11.386315354827726</b2>
  <k1>-0.015521839894247 97</k1>
  <k2>0.21645201425839591</k2>
  <k3>0.27119377458990213</k3>
  <p1>0.0011006197969181863</p1>
  <p2>0.00033417489451646043</p2>
  <date>2017-06-23T03:35:24Z</date>
</calibration>
```

圖 7.27 PhotoScan 相機率定參數

7.4.2 拍攝回傳專案檔

拍攝回傳專案檔是自動監測啟動的關鍵，該專案檔為JSON格式，裡面定義了相關專案檔所需的資料，如 site_id 欄位將對資料庫中監測站的位置，並由上述建置地面控制點資料，相機率定參數進行相關資料獲取，已建立自動監測專案，project_id 為專案的唯一 ID，用來建立存檔使用，c_time 為建立時間，camera_floders 為相機陣列，如圖 7.28 中 camera_floders 中 cam1、cam2、cam3 及 cam4 分別為該測站中以率定的相機編號，利用該編號進行影像匯入及相機參數匯入工作。相關檔案放置請參閱圖 7.17。檔案放置規則。本系統將另外提供手動巡檢及 UAV 巡檢之上傳工具，以方便自動監測專案建立及資料歸檔。

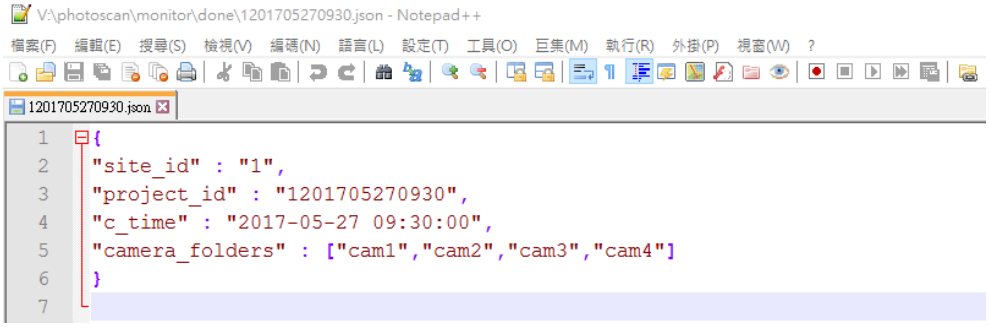


圖 7.28 自動監測專案檔

7.4.3 系統設定檔

系統設定檔中為自動監測系統中，相關設定參數設定檔案，其中包含專案資料夾、監測資料、PhotoScan Pro Server IP、PostgreSQL IP、資料表、使用者、密碼、網頁服務的 port 等資料，該檔案放置於主程式中，系統將自動讀取此設定檔。系統設定檔如圖 7.29 所示。

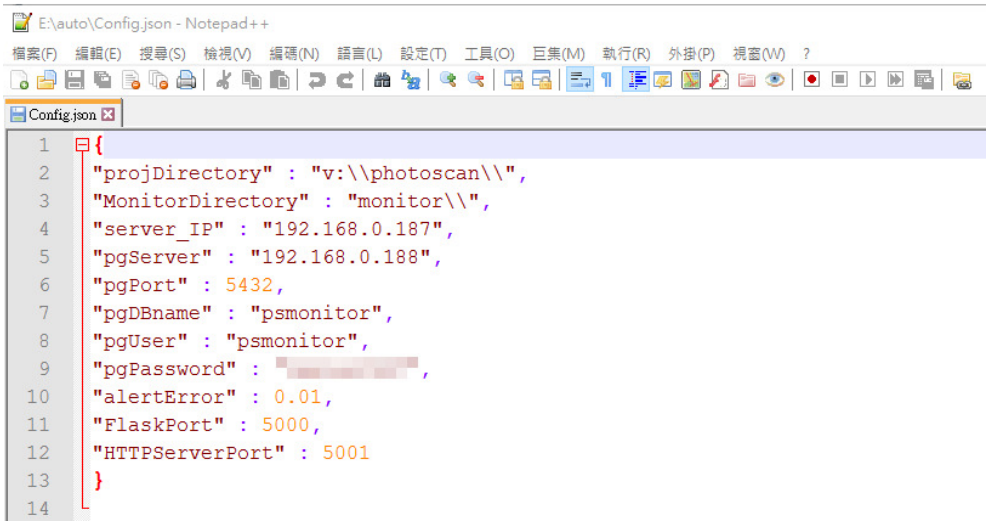


圖 7.29 系統設定檔

7.5 系統介面介紹

本系統直接結合上述監測功能，以 Python 語言封裝包含上述的城市功能，系統啟動可直接由 PhotoScan 開啟後使用”Run Script”方式啟動本系統。系統載入時會先確認所有伺服器架構是否正常運作，若相關測試均通過，將會於選單中新增”道路邊坡自動監測”選單，選單功能中有”道路邊坡自動監測系統”及”排程及差異分析計算”兩大功能，選單載入如圖 7.30 所示。系統載入後於 Console 中會進行相關環境連線測試及相關版權宣告等歡迎畫面，其中包含目前 PhotoScan Pro 軟體版本、PostgreSQL 版本、PhotoScan Server 連線測試、SQL 連線測試、Flask Server 啟動測試及 Http Server 啟動測試等功能，若相關測試都通過，系統將正常運作，相關歡迎測試訊息如圖 7.31 所示。

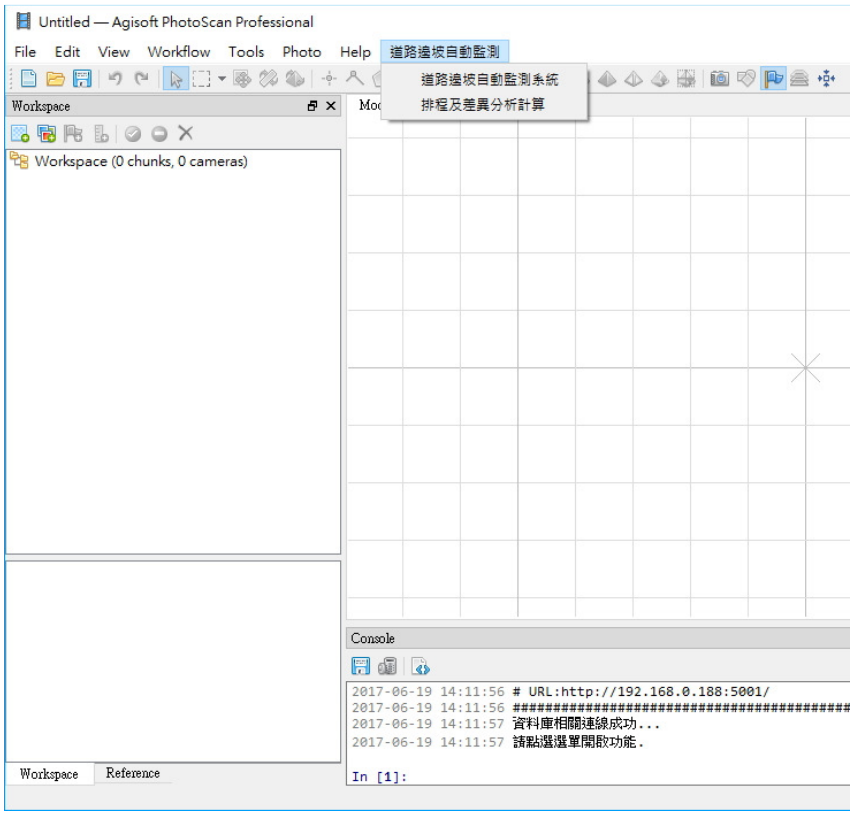


圖 7.30 道路自動邊坡監測系統選單自動載入

```
2017-06-19 14:11:37 Agisoft PhotoScan Professional Version: 1.3.2 build 4205 (64 bit)
2017-06-19 14:11:37 Platform: Windows
2017-06-19 14:11:38 OpenGL Vendor: NVIDIA Corporation
2017-06-19 14:11:38 OpenGL Renderer: GeForce GTX 460/PCIe/SSE2
2017-06-19 14:11:38 OpenGL Version: 4.5.0 NVIDIA 382.53
2017-06-19 14:11:38 Maximum Texture Size: 16384
2017-06-19 14:11:38 Quad Buffered Stereo: not enabled
2017-06-19 14:11:38 ARB_vertex_buffer_object: supported
2017-06-19 14:11:38 ARB_texture_non_power_of_two: supported
2017-06-19 14:11:55 ################################################################################
2017-06-19 14:11:55 #
2017-06-19 14:11:55 #     ##     ##  ###     ###      ##         ######
2017-06-19 14:11:55 #     ##   ####  ###     ###     ####       ########
2017-06-19 14:11:55 #     ##  ####   ###     ###     ####      ####   ###
2017-06-19 14:11:55 #     ## ####    ###     ###    #####      ###     ##
2017-06-19 14:11:55 #     ######     ###     ###    ######     ####
2017-06-19 14:11:55 #     ####       ###     ###  ###  ###     ########
2017-06-19 14:11:55 #     #####      ###     ###  ###  ###      ########
2017-06-19 14:11:55 #     ######     ###     ##    ###  ###          ####
2017-06-19 14:11:55 #     ## ####    ###     ##   ##########           ###
2017-06-19 14:11:55 #     ##  ####   ###     ###  ##########   ###     ###
2017-06-19 14:11:55 #     ##   ####  ########  ###      ###  #########
2017-06-19 14:11:55 #     ##    ###   #######  ###      ###   ########
2017-06-19 14:11:55 #     National Kaohsiung University of Applied Sciences
2017-06-19 14:11:55 #       Road slope automatic monitoring system processing script.
2017-06-19 14:11:55 #           0.0.1 Bata 0501 - 2017.06.16
2017-06-19 14:11:55 #           Powered by Agisoft PhotoScan Pro http://www.agisoft.com/
2017-06-19 14:11:55 #                      PySide2 http://wiki.qt.io/PySide/
2017-06-19 14:11:55 #                      PostgreSQL https://www.postgresql.org/
2017-06-19 14:11:55 #           Server by Python Flask http://flask.pocoo.org/
2017-06-19 14:11:55 #           Copyright © 2017 KUAS By Ting-Rong. All Rights Reserved.
2017-06-19 14:11:55 #           Written/Assembled by trong42@gmail.com
2017-06-19 14:11:55 #
2017-06-19 14:11:55 ################################################################################
2017-06-19 14:11:55 #
2017-06-19 14:11:55 # Load Auto Run Config JSON file: E:\python_program\AutoMonitor\Config.json
2017-06-19 14:11:55 # Try to connect PostgreSQL Server.
2017-06-19 14:11:55 # IP:192.168.0.188 Port:5432 DBName:psmonitor User:psmonitor
2017-06-19 14:11:55 # Success connect to PostgreSQL Server. Version: 9.6.2
2017-06-19 14:11:56 # Load version 1.3.2 of PhotoScan library was  successful
2017-06-19 14:11:56 #
2017-06-19 14:11:56 # AgiSft PhotoScan Pro Server connect test.
2017-06-19 14:11:56 # Server IP:192.168.0.187
2017-06-19 14:11:56 connected to 192.168.0.187:5840
2017-06-19 14:11:56 #
2017-06-19 14:11:56 # Starting Flask Server.
2017-06-19 14:11:56 # URL:http://192.168.0.188:5000/
2017-06-19 14:11:56 #
2017-06-19 14:11:56 # Starting Http Server.
2017-06-19 14:11:56 # Service director : v:\photoscan\potree
2017-06-19 14:11:56 # URL:http://192.168.0.188:5001/
2017-06-19 14:11:56 ################################################################################
2017-06-19 14:11:57 資料庫相關連線成功...
2017-06-19 14:11:57 請點選選單開啟功能.
```

圖 7.31 道路邊坡自動監測系統歡迎訊息及相關測試連線資訊

開啟道路邊坡自動監測系統使用者介面如圖 7.32 所示，該介面將顯示系統載入時測試之相關連線資訊，其中包含 Photoscan 軟體版本，SQL 版本及 CPU、GPU 計算單元數量，該介面將自動監測資料結構中 monitor 資料夾，若該資料夾出現新專案檔(JSON)，系統將會自動開始計算及專案建立等步驟，該系統與前齊開發系統差別在於全自動，不須介入相關人工設定，相關計算結果將自動回存於資料庫中，並進行控制點及檢核點計算，並將此數據進行分析，若該數據超出預警值，系統將自動將此專案加入排程，並於排程時間進行稠密點雲及相關差異分析，排程及差異分析計算亦可由手動方式進行新增，若使用者發現某先區域已將開始產生誤差量，但該誤差量並未達警戒值，可由排程及差一點雲計算介面手動加入排程，排程專案選取可先由監測站位置進行選取，再依據日期選擇要排定排程之專案，最後選定監測專案後系統將列出該專案計算控制點精度及檢核點精度，並顯示該專案是否已經發布預警，使用者可由下列執行動作中進行稠密點雲產製、匯出稠密點雲、製作線上點雲格式、點雲差異分析及點雲差異分析網頁格式，排程方式可直接立即開始，或是選擇時間使用夜間離峰時間進行計算，加入排程後系統將於排程時間內進行相關排程計算，相關介面如圖 7.33 所示。

介面中另外可直接由計算成果來判別本次計算是否超過預警值，並可使用精度分析及 GCP 精度來查看整體計算成果。監測站精度分析如圖 7.34 所示。誤差向量顯示如圖 7.35 所示。誤差向量以二維及三維方式進行展示，可協助使用者解讀該邊坡的變位方向。數據的量化可提供使用者判釋該邊坡是否有潛在的變位風險。

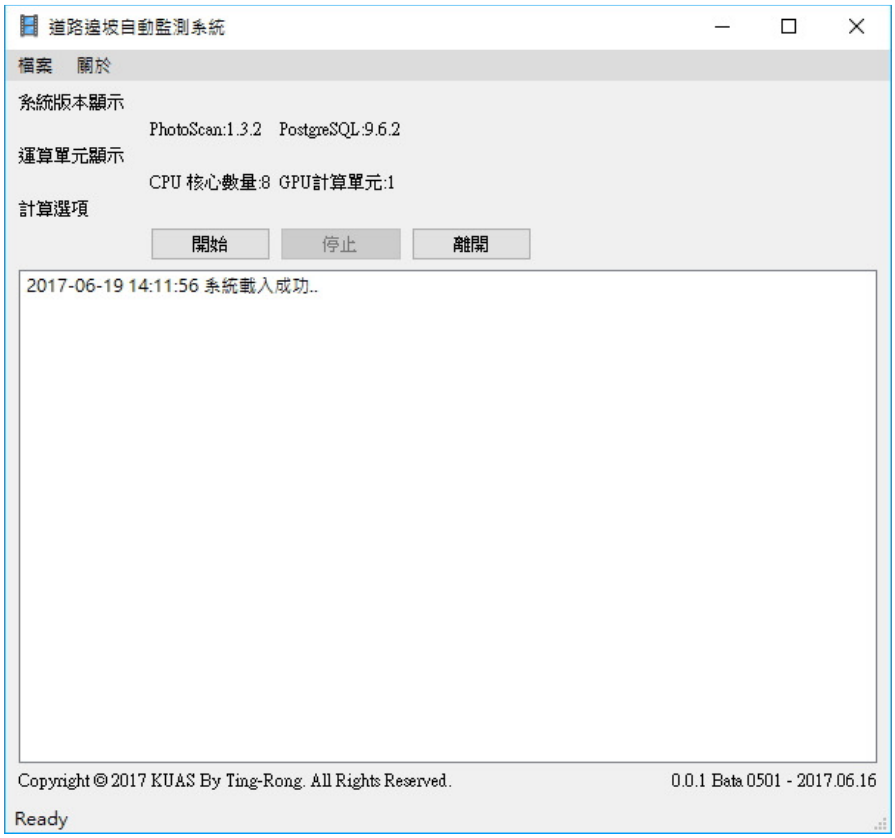


圖 7.32 道路邊坡自動監測系統介面

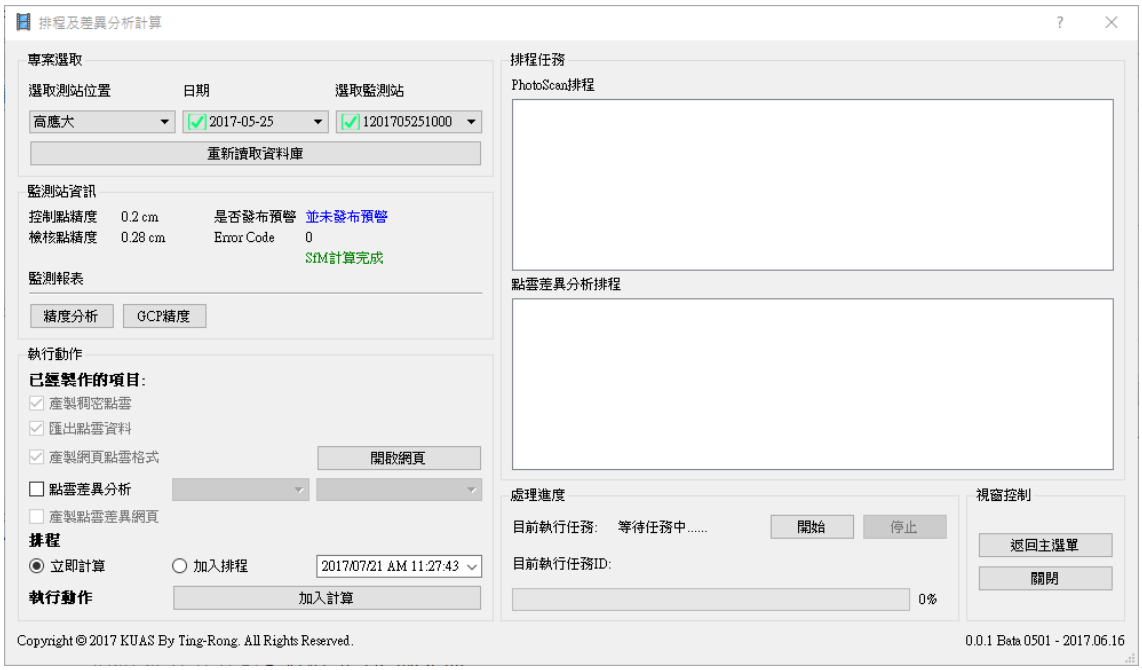


圖 7.33 排程及差異分析計算介面



圖 7.34 監測站資訊

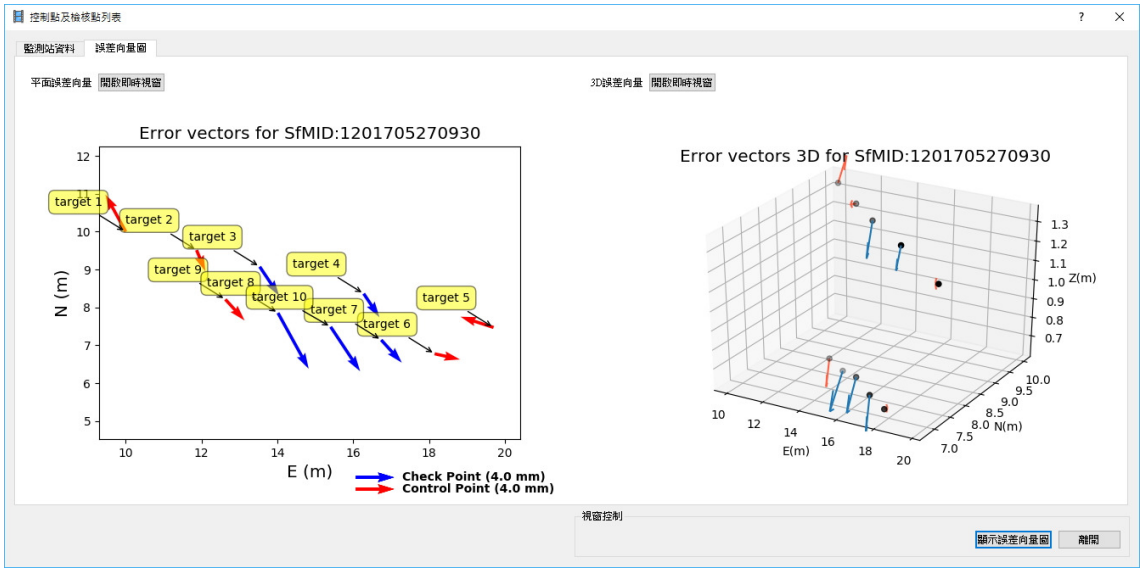


圖 7.35 監測站誤差向量

當完成稠密點雲輸出步驟後，於本系統中並可製作線上點雲格式，線上點雲採用 Potree 為核心，將點雲格式依此格式進行後續轉換，此步驟仍然全自動，完全不需人工介入，線上點雲瀏覽格式如圖 7.36 所示。

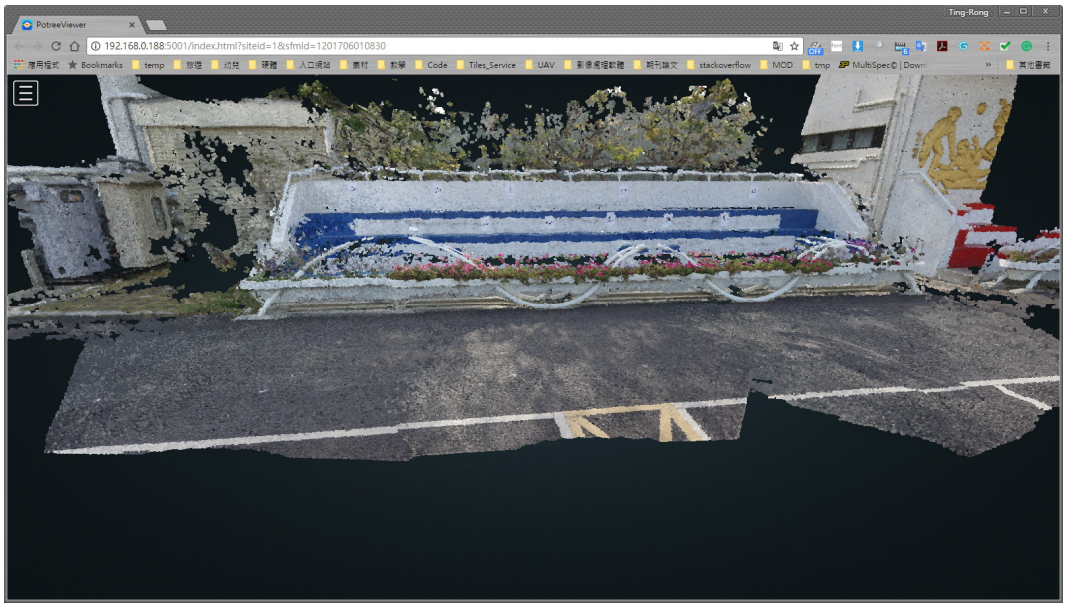


圖 7.36 線上點雲瀏覽格式

排程中可計算兩期點雲差異，計算核心採用 CloudCompare C2C，計算後點雲差異將直接彙整存檔於資料庫當中，若使用者需要觀看可直接產製點雲差異線上格式，並將點雲差異轉成線上點雲格式，讓使用者更方便進行專案管理，點雲差異線上點雲格式如圖 7.37 所示。該功能仍持續修改中，其中包含顏色、圖表及相關數據顯示方式。

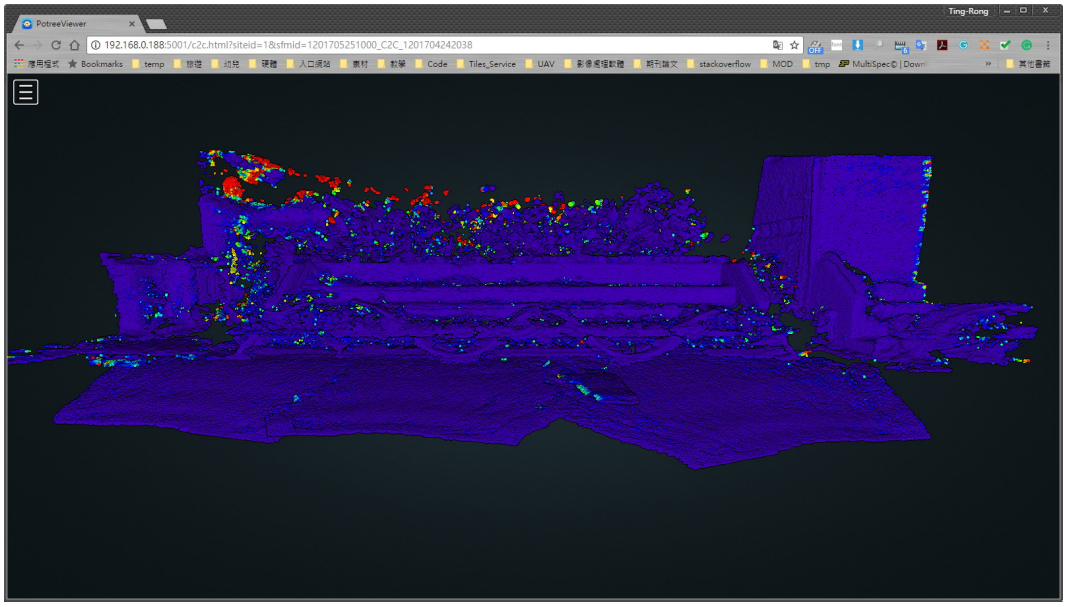


圖 7.37 點雲差異線上點雲格式

關於本軟體說明中以詳列本系統採用相關引用技術，及該計畫由交通部運輸研究所 港灣技術研究中心共同開發，如圖 7.38 所示。



圖 7.38 關於自動監測系統說明

本系統另一項功能再於 Web 介面，Web 介面提供管理員利用網頁進行相關監測資料管理及分析，本介面全部採用 Html5 + CSS3 + Ajax + bootstrap 開發，因此相容於目前所有瀏覽器，並可直接有移動平台(Android、iso)登入控制，以下為初步開發介面，系統登入可依據資料庫管理員資料欄位進行登入，登入畫面如圖 7.39 所示。

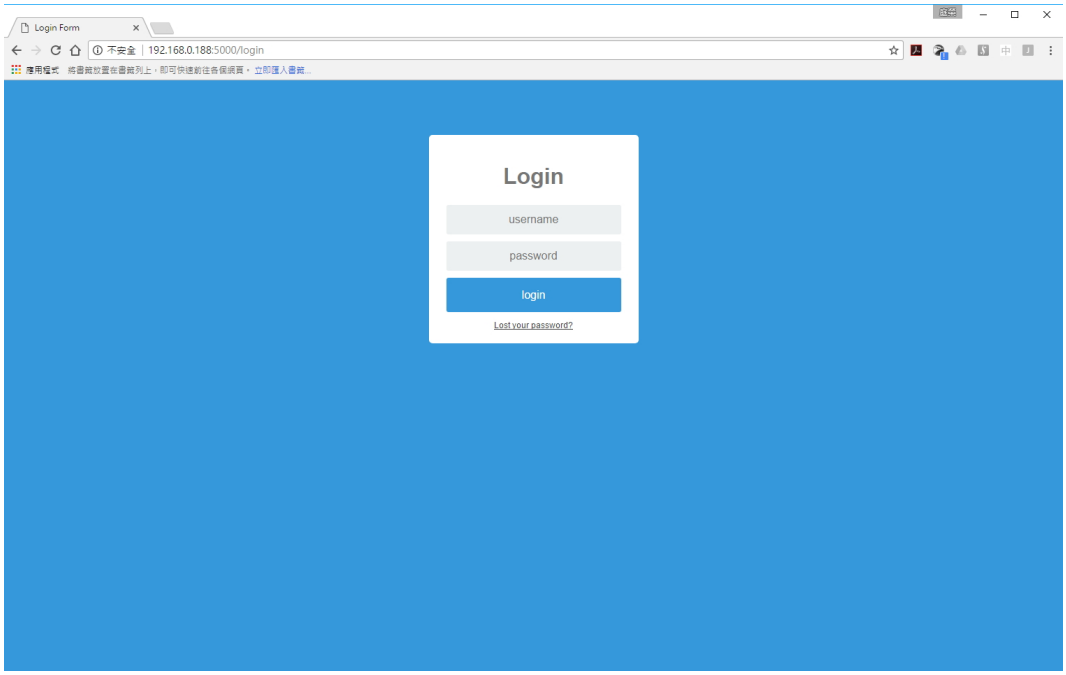


圖 7.39 道路邊坡自動監測系統網頁登入介面

登入後將自動轉換至控制介面，次介面為參考設計界面，後續可依據使用這工能進行新增修改。介面中提供相關道路邊坡自動監測功能啟動與停止，該功能與 Windows UI 功能連動，若於網頁介面進行停止，Windows UI 介面也會跟著停止，啟動亦相同。於網頁 UI 上提供目前計算相關訊息，其中包含監測任務及叢集計算主機狀態，Web UI 如圖 7.40 所示，叢集計算主機狀態如圖 7.41 所示。網頁控制介面中也可以直接對遠端 IoT 進行控制，控制介面如圖 7.42。介面中可以用來管理已建置 IoT 相機拍攝位置，並由資料庫抓取相關設定參數。詳細 IoT 設置如圖 7.43 所示。完成相關設置後可由此進行 IoT 任務下達，並由上述程序完成自動計算。

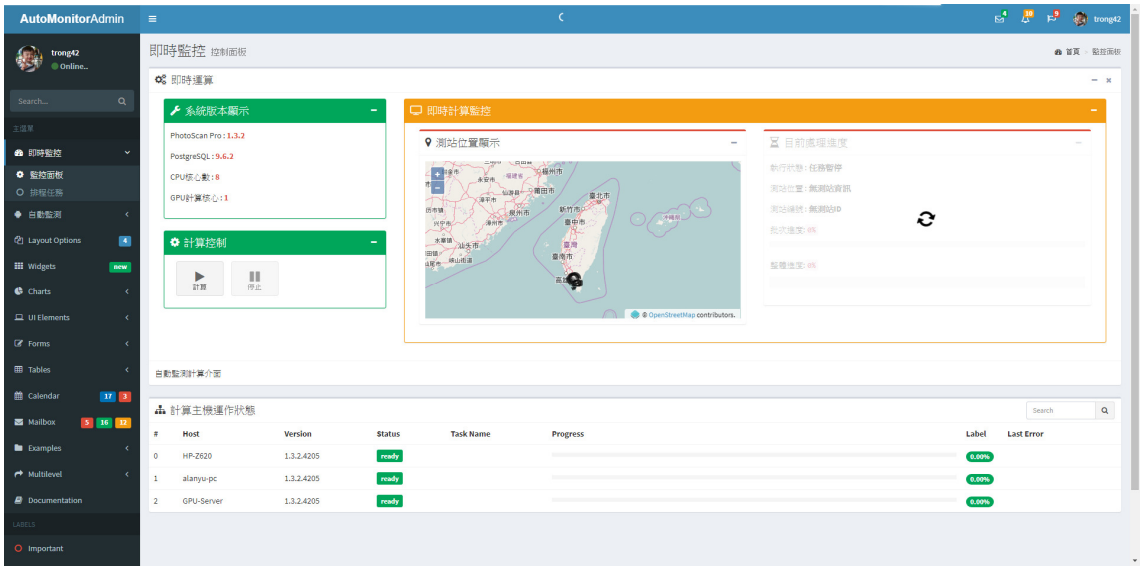


圖 7.40 道路邊坡自動監測系統網頁任務介面



圖 7.41 叢集計算主機狀態

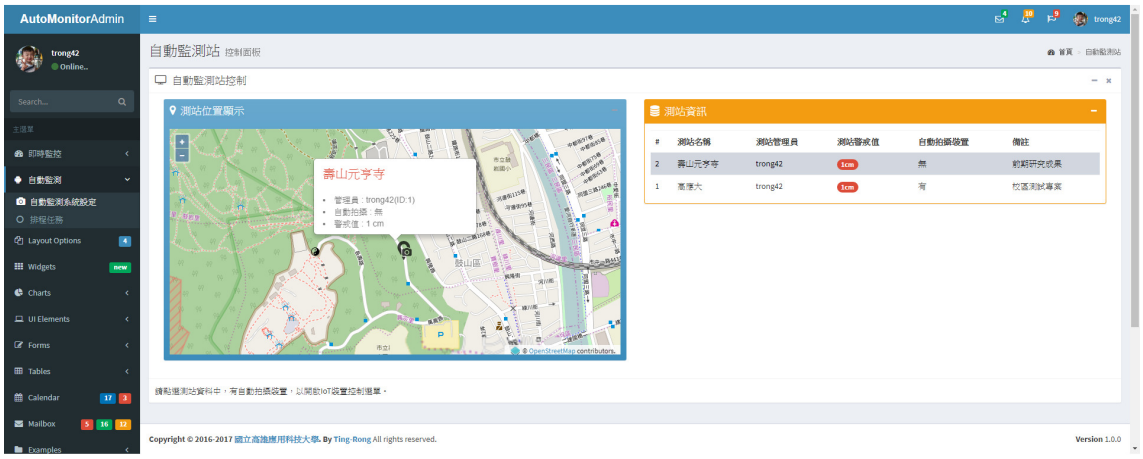


圖 7.42 IoT 自動監測模組管理



圖 7.43 IoT 自動監測模組進階設置

7.6 實驗區設置

實驗場地以台灣高雄市鼓山區鼓山二路往壽山動物園道路邊坡取其中 50m 為例(圖 7.44(a))。IoT 自動攝影系統以間隔 8*m* 設置一部，共計使用 4 部(圖 7.44 (b))。實驗設計使用相機解析度為 6000×4000 *pixel*、焦距為 16*mm* 及攝影距離約 11.5*m*，換算地面解析度約 3*mm/pix*。監測點使用中心半徑為 25*mm* 的 12*bit* 編碼標，共計設置 16 個(圖 7.44(c, d))。編碼標整體直徑為 175*mm* 約為 58*pixel*，遠大於可辨識 9-10*pixel*，並使用本地座標系統以 TST 測得各監測點座標。假設此實驗為臨時性實驗，因此 IoT 自動攝影設備使用測量用三角架架設，每台 IoT 自動攝影設備由獨立行動電源供應電源，單次拍攝範圍由 0°至 180°以每 10°拍攝一張照片，四部相機共計拍攝 76 張，網際網路連線使用 4G Let 傳輸。若未來要進行現地連續性觀測，可將此系統架設於路燈，並以市電及固網進行架接，以解決電力及網路問題。



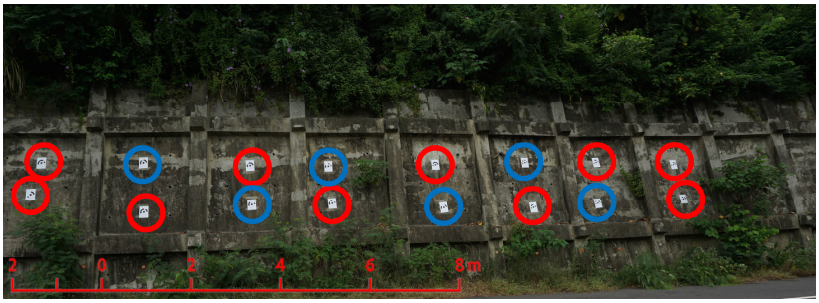
(a)實驗區域



(b)IoT 自動攝影系統



(c)使用編碼標

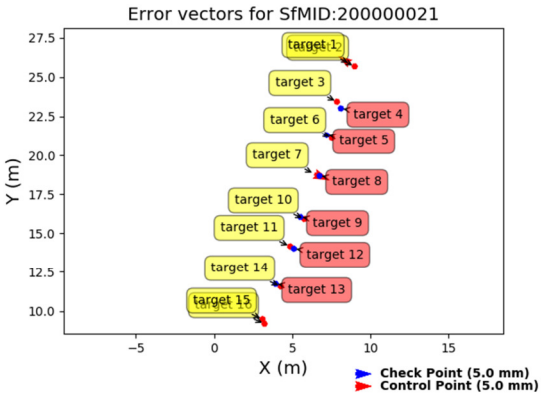


(d)控制點及檢核點設置位置

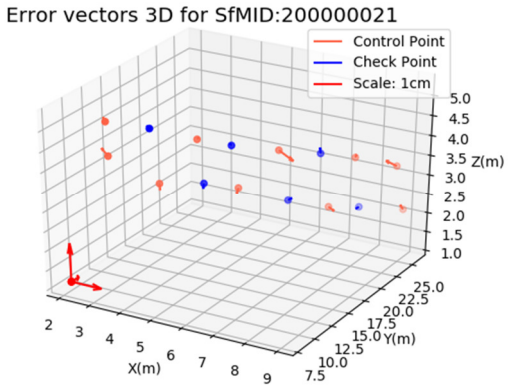
圖 7.44 實驗區設置

7.7 誤差分析

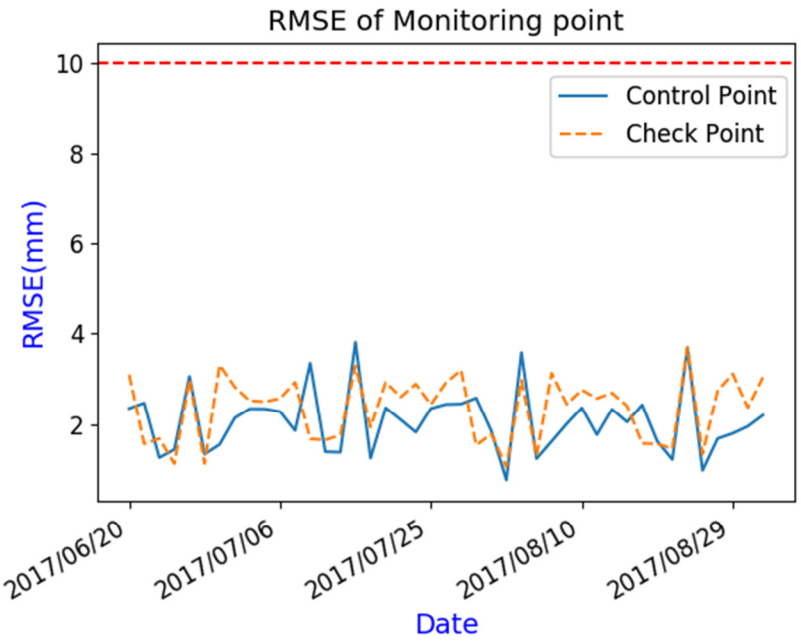
為了驗證 SfM-MVS 方法精度及可靠度可適用於監測使用，於 2014 年 6 月至 2014 年 12 月開始以定期手動巡檢對本實驗場地，以不同相機、焦距、攝影方式及自動編碼標抓取等條件進行測試。監測點均 TST 觀測成果進行比較，成果顯示精度均小於 0.5*pixel*。本研究延續此實驗場地，控制點以均勻分布於監測區上，誤差分析計算以本文提出兩方法進行比較。以本系統自動計算成果 SfMID:2000000021 為例。監測點(控制點與檢核點)最大誤差為 5.087*mm*，最小為 0.011*mm*，Total RMSE 為 1.39*mm*，控制點 RMSE 為 2.934*mm*，檢核點 RMSE 為 1.651*mm*。以本實驗拍攝 GSD 為 3*mm/pix*，以 *Pixel* 表示 Total RMSE 為 0.463*pixel*。各點位以誤差向量表示如圖 7.45(a,b)，本實驗統計 40 次計算數據的 RMSE 來驗證其方法之穩定度，控制點最大 RMSE 為 3.81*mm*，最小為 0.776*mm*，檢核點最大 RMSE 為 3.695*mm*，最小為 1.065*mm*，如圖 7.45(c)。上述成果說明利用此方式具有高精度及穩定度，可適用於結構體監測使用。



(a) 2D 誤差向量



(b) 3D 誤差向量



(c) 監測點 RMSE

圖 7.45 監測點誤差分析圖

此方法用於道路邊坡監測需長時間才能發現其變化，為了驗證此方式可適用於道路邊坡監測使用，以下模擬監測點位置發生變動。首先將各控制點依序於影像量測位置位移 25*mm*，如圖 7.46 所示。圖中'Raw'顯示各監測點原始誤差，'1 point'至'10 points'顯示各控制點依序移動後所顯示的誤差值。'Total RMSE'顯示各控制點位移後所計算的 Total RMSE。數據顯示當移動一個控制點時誤差值由 4.28*mm* 上升至 18.405*mm*，Total RMSE 也由 2.574*mm* 上升至 7.159*mm*；依序移動各控制點可發現被移動的控制點誤差值會提升，Total RMSE 也開始由 2.574*mm* 逐漸增加至 20.172*mm*。

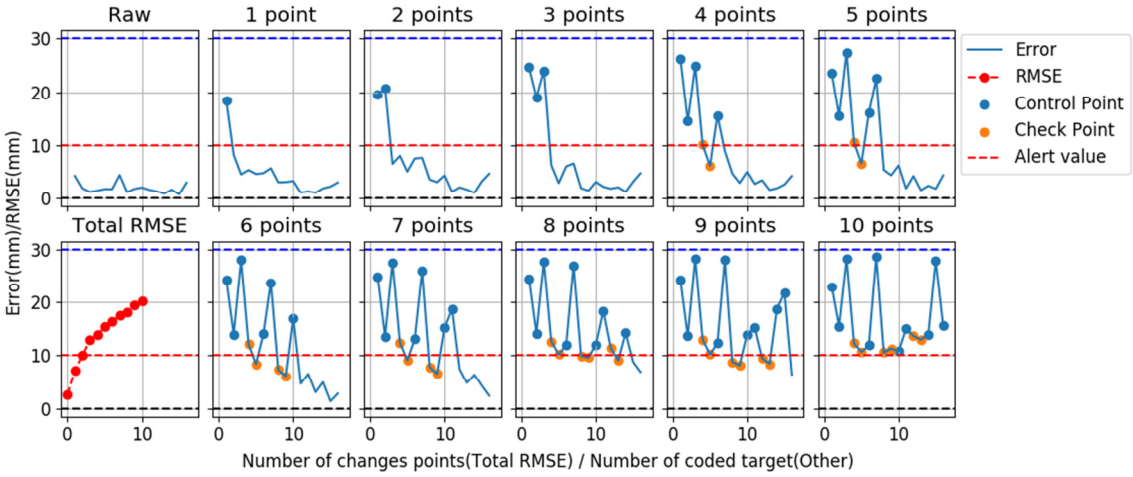


圖 7.46 模擬監測點變動對 RMSE 影響圖

上述方法於 SfM-MVS(PhotoScan)計算程序將位移(帶有誤差)的控制點加入約制，成果顯示並非絕對位移量，而是整體最小值。為了驗證帶有誤差的控制點不會干擾 SfM-MVS 求解成果，首先假設將各控制點位移約 55*mm*，於 SfM-MVS(PhotoScan)計算過程相機參數已知且不使用任何控制點進行約制，再將計算所得控制點經 TLS 與實測控制點計算 3D Affine 參數，並轉換其餘檢核點如表 7-3 所示。表 7-3(a)顯示 Affine 3D 轉換後座標差；(b)將位移控制點帶入 PhotoScan 約制的座標差；(c)座標差的三維距離。成果顯示(1)TLS 與 PhotoScan 所計算出來的座標差距非常接近(表 7-3(c))，TLS 所計算的轉換參數須符合各點誤差為最小並與 PhotoScan 計算結果相符；(2)檢核點於實驗例中並未變動，因此誤差並未在這些點上產生，而是直接將這些誤差顯示於帶有誤差的控制點上；(3)控制點於 SfM-MVS 計算程序中扮演座標轉換及尺度約制功能，經驗證帶有誤差的控制點並不會對計算過程產生更大的誤差。

表 7-3 PhotoScan 以 TLS 三維座標轉換比較表

Label	Diff. Of TLS (a)			Diff. Of PhotoScan (b)			Distance (c)		
	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz	*Simulated moving*	*TLS*	*PhotoScan*
target 1*	-16.59	-62.83	4.76	-16.67	-62.94	4.76	59.18	65.16	65.18
target 2*	14.98	50.2	0.62	14.89	50.12	0.65	58.22	52.39	52.37
target 3*	15.21	52.23	-1.29	15.23	52.21	-1.31	55.55	54.41	54.42
target 4	1.06	-0.57	5.23	1.05	-0.55	5.24			

target 5	0.14	3.15	0.56	0.2	3.19	0.53			
target 6*	-17.6	-51.22	6.46	-17.55	-51.14	6.46	57.02	54.54	54.53
target 7*	14.85	63.55	0.37	14.94	63.65	0.35	57.5	65.26	65.28
target 8	2.16	6.24	3.45	2.24	6.36	3.43			
target 9	2.57	13.41	0.96	2.65	13.52	0.95			
target 10*	-14.77	-41.46	5.93	-14.68	-41.32	5.9	56.82	44.41	44.38
target 11*	-15.8	-40.85	0.54	-15.74	-40.7	0.54	60.17	43.80	43.78
target 12	4.23	15.48	4.7	4.29	15.59	4.67			
target 13	7.19	20.12	0.15	7.19	20.12	0.17			
target 14*	8.84	-16.52	-40.58	8.84	-16.48	-40.61	57.17	44.70	44.70
target 15*	19.89	77.35	20.89	19.82	77.24	20.93	57.96	82.55	82.54
target 16*	-8.99	-30.45	2.28	-9.06	-30.55	2.29	57.58	31.83	31.85
RMSE			**25.791**			**25.785**	**57.73**	**55.59**	**55.59**

** Control point; Unit: mm*

7.8 點雲差異分析

稠密點雲匹配誤差可因選擇匹配密度、拍攝 GSD 及覆蓋率等因素影響將介於 GSD 的 2-3 倍。假設以 M3C2 對兩期無實質變動的點雲計算雲差異如圖 7.47(a)，取其中較不受植物干擾的紅色區域計算平均值為 0.07*mm* 及標準差為 9.2*mm*。依序刪除距離介於 1 至 3 倍標準差的點雲(±9.2*mm*~±27.6*mm*)如圖 7.47(b)~(d)。

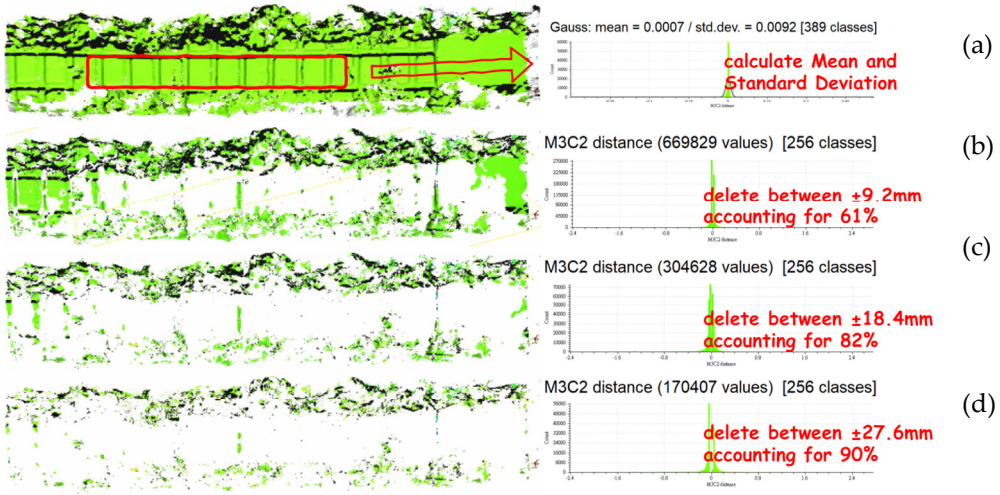


圖 7.47 點雲差異分析以 M3C2 為例

由實驗成果顯示 1 倍標準差佔整體 61%、2 倍佔整體 82%及 3 倍佔整體 90%，如圖 7.47(d)顯示保留下來的點雲數據均位於植物干擾區域。因此以本實驗例 GSD 為 3*mm* 為例，點雲匹配標準差約為 GSD 的 3 倍，大於 3 倍標準差可視為兩期差異區域。

點雲差異分析是以視覺化展示表面差異的一種方法。本文稠密點雲由 PhotoScan 產製，點雲差異計算(C2C 或 M3C2)由 CloudCompare 提供。本文視覺化點雲差異展示以彩色點雲套疊 M3C2 色階，以基於 WebGL 的多尺度 octree 展示點雲資訊。實驗例以 M3C2 計算 2014/10/01 與 2017/08/31 點雲差異(圖 7.48(a))，接續刪除 3 倍標準差內的點雲，並以 RGB 紀錄色階渲染顏色(圖 7.48(b))，最後以 Potree 分別將上述點雲經轉換並以 WebGL 展示(圖 7.48(c))。整體流程如圖 7.48 所示。

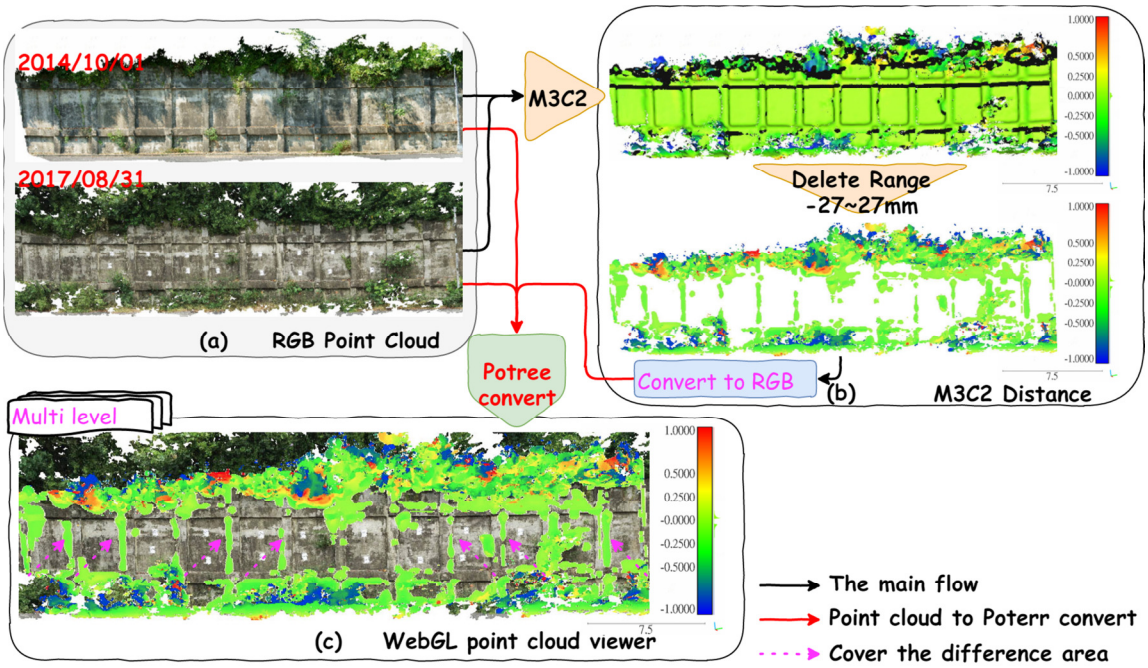


圖 7.48 M3C2 點雲差異及點雲展示

本實驗例經 TST 現地驗證及上述成果顯示地錨護坡區主體結構無實質變動，僅多處植物生長所產生的差異。但由於拍攝方式為旋轉攝影，多處因攝影遮蔽所產生差異(圖 7.48(c)洋紅色箭頭)，若使用固定攝影機旋轉拍攝將可避免此雜訊發生。

第八章　異常波浪案例蒐集與分析

8.1 異常波浪災害概述與預警之必要性

於海岸地區可能會受到異常波浪之侵襲，因而造成重大的災害。漁民、釣客、戲水的民眾或海巡人員，常被「突發性的異常波浪」所襲擊，這種突發性的異常波浪是沒有任何的前兆，如「瘋狗」般的隨便亂咬人，漁民及釣客就稱這「突發性的異常波浪」為「瘋狗浪」，也屢經大眾傳播媒體的大幅報導後，社會大眾對這種波高顯著大於背景波高之異常特大波浪已有認識，並普遍稱之為「瘋狗浪」。

蔡等(蔡等人，2015)針對異常波浪(Oceanic freak wave)、瘋狗浪(Dangerous Coastal Waves)及急速成長波浪(Rapid growth wave)有不同的定義，國外文獻中，特大的波浪稱為 freak wave(譯作突浪)或 rogue wave;亦稱為極限暴風波浪(extreme storm wave, ESW)或極陡波浪事件(steep wave event, SWE)。在本文統一稱為「異常波浪」，目前對於異常波浪的研究，能實際應用於災害的成果仍很有限。主管機關應採取何種程度之措施以減輕異常波浪災害？道路、風景區或其他可能受災的 設施應該何時封閉或管制？哪些區域應管制一般民眾進入以免危險? 民眾管制區域該以何處為界？凡此種種，主管機關都沒有簡單可行的準則可以依循。

如 2013 年海燕颱風威力強大，雖然遠在菲律賓外海，但卻也在龍洞海濱產生異常波浪，造成八死八傷的慘劇。根據現場勘查與相關地形資料，2013 年異常波浪事件發生的地點與海面有相當距離(約有 50 公尺以上) ，中間有礁臺相隔(圖 8.1)。由於事發地點並非緊鄰海岸，一般民眾可能覺得此距離應足以保障人身安全，但其實不然。此案例

也說明了對海岸遊憩區等權責單位而言，如何進行管制並不容易決定，實務上也缺少明確的規範。



圖 8.1 於 2013 年龍洞海濱異常波浪事件之發生區域。發生地點在紅色箭頭指示的人造階梯，階梯與海面有相當距離(約有 50 公尺以上)，中間有礁臺相隔(董東璟教授提供)。

異常波浪災害的發生，主要是岸邊的人被波浪衝擊失去平衡，從而被捲入海中(如圖 8.2a, 8.2b)；2008 年颶風艾克(Hurricane Ike)在加爾維斯頓(Galveston)海岸公路使行駛的腳踏車受波浪衝擊失去平衡(圖 8.3)；波浪的衝擊力與波高有關，因此以波高做為判斷基準是最直接有效的方法。先前執行的交通部運輸研究所合作研究計畫(如陳等，2013、陳等，2014、陳等，2015) ，不論是異常氣候下跨河橋梁何時封橋，抑或海嘯發生時民眾應往何處疏散避難，都依據數值模擬所得之各地淹水的深度來決定。因此在思考異常波浪防災問題時，自然也想參考過去的經驗，甚至延續過去的方法加以探討。



圖 8.2a 2016 年澳洲雪梨皇家國家公園異常波浪事件(來源 Mail Online)



圖 8.2b 2016 年澳洲雪梨皇家國家公園異常波浪事件岸邊的人被波浪衝擊而失去平衡 (來源 Mail Online)



圖 8.3　2008 年颶風艾克(Hurricane Ike)在加爾維斯頓(Galveston)海岸公路使行駛的腳踏車受波浪衝擊失去平衡

(來源 Jim Edds, http://www.extremestorms.com)

極淺海環境中的波浪傳播，由於受到海床地形與水體之環境影響，是一個極為複雜的問題。學者也指出，礁岩與防波堤的阻擋造成波浪反射與向上沖擊的現象，可使波浪遠高於原有波高，極可能是發生異常波浪意外的重要輔助條件(Su et al., 2002)。因此，單純以外海或近岸的波高判斷異常波浪的危險程度與有安全威脅的區域都很容易誤判。以跨河橋梁或海嘯的例子而言，都需另外對照海岸線附近的數值模擬結果，才能據此決定各地淹水的深度，再決定管制方式或管制區域。

除數值模擬之外，陳等人先前執行的研究計畫中，將各港遭受不同高度海嘯時的溢淹區域模擬結果，與 Google Earth 地理資訊系統之圖資相整合(Chen et al., 2015)。其目的是利用圖層方式在溢淹潛勢圖顯示港區不同之溢淹高程，港務單位可據以製作規劃逃生路徑或進行災害演習等。如果能建立類似的異常波浪危險區域資訊，以類似海嘯溢淹區域結合地理資訊系統之方式展現，則可作為相關單位管制的參考。

8.2 異常波浪災害蒐集與分析

根據中央氣象局氣象資料開放平臺資料庫及蔡等(蔡等人，2016)調查統計，結果顯示從2000年至2016年6月間臺灣地區的海岸異常波浪事件共有301件(圖8.4)，合計475人落海，臺灣四周海岸均有發生過異常波浪事件，以東北部及東部發生居多。

近幾年的新聞報導，如2000年12月14日基隆八斗子漁港西防波堤內側平台遭翻越的大浪襲擊落2名釣客入港內，造成2死的悲劇；2013年11月9日於新北市貢寮區的鼻頭龍洞地質公園，樹林社區大學共16學員突遭一陣大浪襲擊，造成8死8傷的重大慘劇；2014年7月8日於新北市野柳風景區內，有5人在地質公園遭到3波6公尺大浪襲擊受傷。

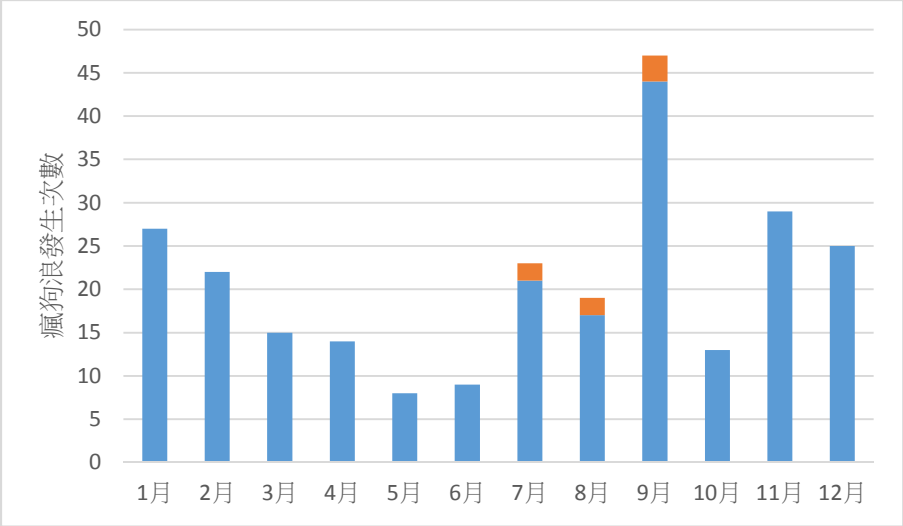


圖8.4　2000-2017年臺灣地區各月份發生異常波浪次數(橘色發生於颱風警報期間案例)

以 2013 年龍洞異常波浪事件為例(圖 8.1)，利用數值模擬的方式探討異常波浪的溯上過程，因此數值模擬的條件也參考當時海燕颱風的波浪條件與龍洞海濱之地形。根據自由時報報導，事故發生時樹林社大一行人正由龍洞灣岬步道尾端行走到鼻頭角海濱步道起點。事故地點附近的龍洞測站資料(圖 8.5)顯示，事故發生之前後幾天波浪方向都是 90 度左右，因此取事故地點的人造階梯向東(即 90 度方向)延伸的直線為準進行模擬，如圖 8.6 中之直線所示。



圖 8.5 龍洞異常波浪事件之前後幾天的波浪資料，由上而下分別是波高、週期與波向(董東璟教授提供)。

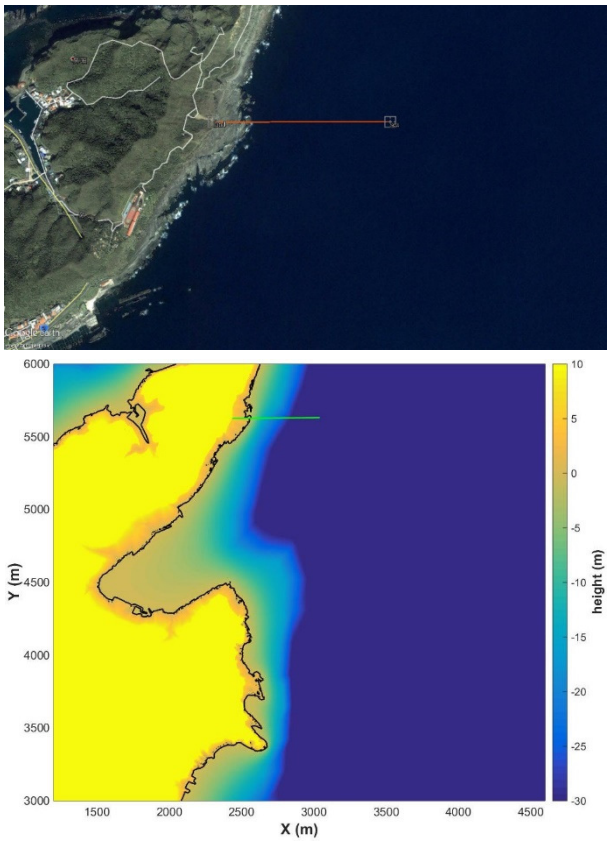


圖 8.6 COBRAS 數值模式的模擬區域，從事故地點的階梯向東延伸，如圖中之直線所示。上圖為 Google Earth 上的位置示意，下圖是數值

地形上的截取位置。

圖 8.6 中，上圖為鼻頭角地區的 Google Earth 衛星圖，下圖是根據內政部海岸地區 DSM 數值地形與海科中心的海底地形資料庫構成之鼻頭角地區完整的數值地形。由圖 8.6 中的直線位置截取出來的一維數值地形則由北往南看(可視為 180 度旋轉)顯示於圖 8.7。

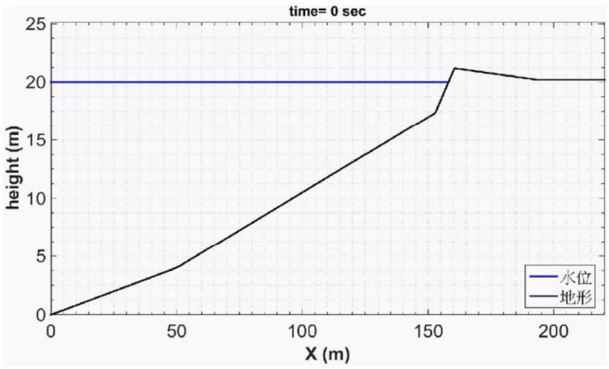


圖 8.7 數值模擬使用的一維數值地形：左側為外海，右側為礁臺，最右側則是事故地點的階梯。

由距離2013年異常波浪事件最近的氣象局龍洞測站的資料(圖 8.5)可大致決定實測示性波高約 2 m 與週期約 7 至 8 s，波向則接近由東向西。

本研究先取入射波是一系列週期 8 s、波高 2m 的規則波浪，如圖 8.8 最上圖 (模擬時間 80 s)。為能詳細解析波浪與地形的交互作用，水平解析度網格取 0.4m，垂直網格解析度取 0.2m。由於波高不高，波浪很難越過礁臺，故礁臺上無太多水，如圖 8.9 (模擬時間 80 s)所示。

波高 2m 的規則波浪之後，在外海再製造三個同樣週期為 8 s 的較大波浪，最大波高約有 4m，如圖 8.9 (模擬時間 158 s)所示。此時波高較高，部份波浪可以越過礁臺，故礁臺上有積水。

較大波浪之後，外海又回復一系列週期 8 s、波高 2m 的規則波浪，如圖 8.10 (模擬時間 176 s)所示。前端波高 4m 的大波在礁臺邊緣破碎而向上衝擊。正如先前學者所指出的，礁岩與防波堤的阻擋造成波浪反射與向上沖擊，向上衝擊的高度超過 1m。

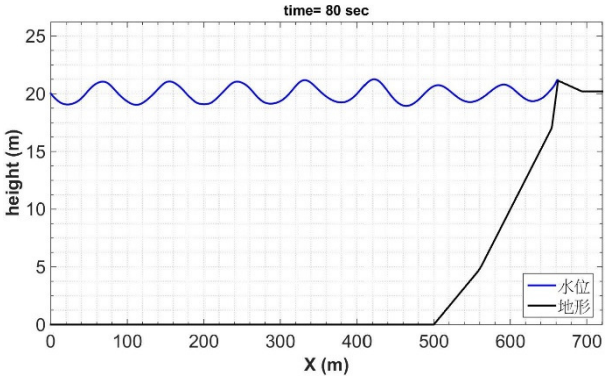


圖 8.8 週期 8 秒波高 2m 的規則入射波(模擬時間 80 s)

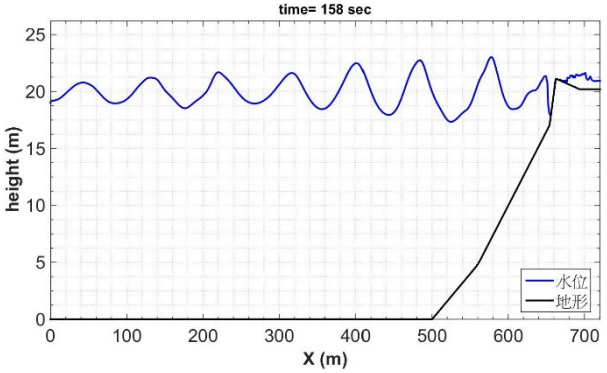


圖 8.9 週期 8 秒波高 2m 的較大波浪(模擬時間 158 s)

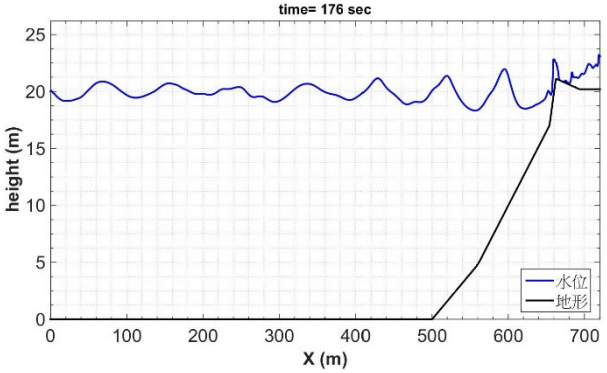


圖 8.10 礁臺邊緣與事故地點的階梯產生的向上衝擊(模擬時間 176 s)

8.3 利用文字探勘蒐集異常波浪引致臺東海岸海岸公路災害之案例

文字探勘是近年來隨著人工智慧和自然語言處理技術發展的一門新興技術文字探勘(Text Mining)主要是針對半結構化(Semi-structured)或非結構化（Unstructured）儲存格式的文件資料進行探勘，從非結構化的文字中，萃取出有用的資訊或知識(Fayyad et al. 1996)。

網路爬蟲是一種「自動化瀏覽網路」的程式，網路爬蟲被廣泛用於網際網路搜尋引擎或資料蒐集網站，用以取得或更新網站的內容。網路爬蟲可以自動收集所有頁面內容，供文字探勘演算法做探勘（分析處理下載的頁面），然後進一步得到隱含在網頁內容中之資訊(圖 8.11)。



圖 8.11 利用 google site 於特定新聞來源搜尋關鍵字結果

本研究利用文字探勘的技術來自動蒐集異常波浪及海岸公路的新聞資料，在分析文字資料時，我們經常會遇到字詞出現在許多個文件之中，一般而言，這些頻繁出現的字詞，並沒有包含著有用的資訊或是可供分辨上下文語意的資訊，一個有用的技術 *tf-idf* 可以解決這項問題，*tf-idf* 是一種在文字探勘、資訊檢索中常用的加權技術(S&B, 1998)，

也是一種統計方法，主要是評估一個字詞(term)對一個文件集或一份文件的重要程度，字詞的重要性隨著它在文件中出現的次數成正比增加，但同時會隨著它在語料庫中出現的頻率成反比下降，在一份給定的文件裡，詞頻(term frequency, *tf*)指的是某一個給定的詞語在該文件中出現的頻率，對於在某一特定文件裡的字詞t_i來說，它的重要性可表示為：

$$tf_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum_k n_{k,j}} \qquad (8.1)$$

以上式子中$n_{i,j}$是該詞在文件d_j中的出現次數，而分母則是在文件d_j中所有字詞的出現次數之和。

逆向文件頻率(inverse document frequency, *idf*)是一個詞語普遍重要性的度量，逆向文件頻率則可以用以下公式計算出來:

$$idf(t,d) = \log \frac{n_d}{1+df(d,t)} \qquad (8.2)$$

n_d為文件的總數，而$df(d,t)$表示包含字詞 t 的文件檔 d 的數量，而對數函數(log)的使用則是確保低頻的文件，不會被賦予一個太大的加權，*tf-idf* 可將特徵向量中常見的字詞的加權給降低，保留重要的字詞，因此，*tf-idf* 可以定義為詞頻與逆向文件頻率的乘積。並透過語意辨識及文章相似度來辨識相同的事件，並將相關的新聞事件標記時間、地點，如圖 8.12。

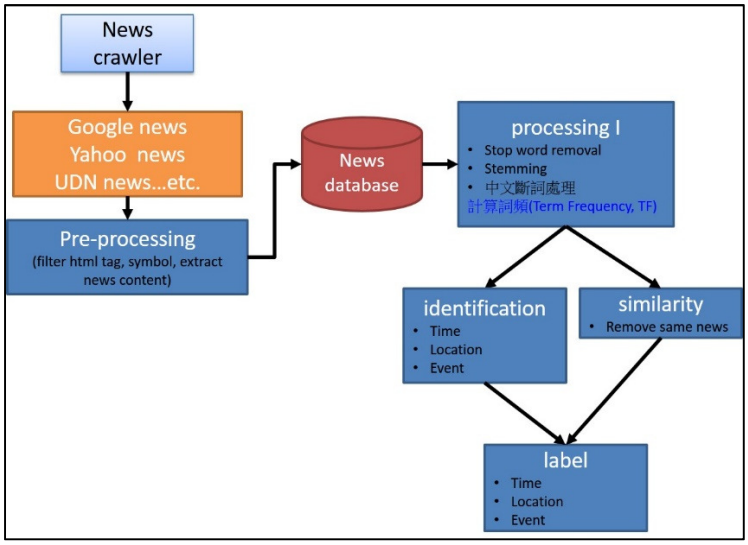


圖 8.12 新聞蒐集及事件辨識流程

因新聞來源眾多，各新聞網頁均有廣告頁面，利用網路爬蟲爬回

相關的新聞(圖 8.13a 及圖 8.13b)來自各出版社，而其各出版社的網頁之廣告位置均不同及授權問題，已向聯合線上股份有限公司申請聯合新聞網授權所屬聯合報系之內容資訊，以統一新聞來源及格式。



圖 8.13a 利用 google site 於特定日期搜尋關鍵字結果

1	http://news.ltn.com.tw/news/society/breakingne...	輕颱艾利影響中央應變中心：嚴防離岸流、瘋...	自由時報電子報 - 2016年10月5日
2	http://www.appledaily.com.tw/appledaily/article...	瘋狗浪奪8命	蘋果日報 - 2013年11月9日
3	http://news.ltn.com.tw/news/life/paper/922600&...	遊客落海身亡阿朗壹古道急封閉	自由時報電子報 - 2015年10月10日
4	http://news.ltn.com.tw/news/society/paper/1061...	船翻39小時他困船艙奇蹟生還	自由時報電子報 - 2016年12月11日
5	http://www.chinatimes.com/newspapers/201504...	花東海岸瘋狗浪奪2命	中時電子報 - 2015年4月3日
6	http://www.nownews.com/n/2016/12/04/232729...	小琉球漁民無膠筏出港捕魚疑遭「瘋狗浪」打...	NOWnews - 2016年12月3日
7	http://news.ltn.com.tw/news/society/paper/9580...	5公尺高瘋狗浪捲釣客1死1傷	自由時報電子報 - 2016年2月14日
8	http://news.ltn.com.tw/news/society/paper/9629...	烏石港衝浪區瘋狗浪捲走中國男大生	自由時報電子報 - 2016年2月28日
9	http://www.setn.com/News.aspx%3FNewsID%3D...	獨／美麗殺機！七星潭恐怖奪命當地人都不敢...	三立新聞網 (新聞發布) - 2016年4月7日
10	http://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/1...	天鵝長浪直撲東海岸成大：時速近百公里	自由時報電子報 - 2015年8月20日
11	http://news.ltn.com.tw/news/society/paper/1066...	釣客沒穿救生衣最重可罰90萬	自由時報電子報 - 2016年12月28日
12	http://www.ettoday.net/news/20160910/773085....	池上車禍砍傷1男1女逃逸「瘋狗獵」落魄彎山...	ETtoday - 2016年9月10日
13	http://news.ltn.com.tw/news/society/breakingne...	釣客要抓牛港落海出動直升機吊掛救援	自由時報電子報 - 2016年3月24日
14	https://www.walkerland.com.tw/article/view/1242...	【綠島景點】置身秘境的藍洞洞內尋美人蝦，...	WalkerLand窩客島 (新聞發布) (註冊) (網誌) - ...
15	http://news.ebc.net.tw/news.php%3Fnid%3D391...	海馬颱風最快周三發海警5問答告訴你影響程度	東森新聞 (新聞發布) - 2016年10月17日
16	http://www.ettoday.net/news/20140506/354141....	鼻頭角瘋狗浪8死基檢認定「突發天災」無人為...	ETtoday - 2014年5月6日
17	http://www.ettoday.net/news/20160909/772440....	殺人棄屍判無期...惡男假寫酒駕砍人穿短褲躲...	ETtoday - 2016年9月9日
18	http://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/1...	艾利海警解除花東、南部山區仍須嚴防豪雨	自由時報電子報 - 2016年10月5日
19	http://appweb.cna.com.tw/webm/menu/akey/20...	川普提名新國防部長馬提斯綽號瘋狗	中央通訊社 - 2016年12月1日
20	http://www.appledaily.com.tw/appledaily/article...	宜蘭台東也湧浪釣客1死3失蹤	蘋果日報 - 2013年11月9日
21	http://news.ltn.com.tw/news/society/breakingne...	雲林草嶺秘境再傳苗栗夫妻落水溺斃	自由時報電子報 - 2016年12月5日
22	http://www.appledaily.com.tw/realtimenews/artic...	【實用影片】瘋狗攻擊怎麼辦專家教你這兩招	蘋果日報 - 2016年8月12日
23	https://news.housefun.com.tw/news/article/1722...	成大預測：東部外海將掀浪10樓高	好房News - 2016年7月7日
24	http://www.cna.com.tw/news/firstnews/20161222...	川普提名任貿易顧問納瓦洛主張對陸強硬[影]	中央通訊社 - 2016年12月21日
25	http://news.ltn.com.tw/news/society/breakingne...	自排照開手排車冤死海巡署辯：因個資法未驗照	自由時報電子報 - 2016年3月1日

圖 8.13b 網路爬蟲蒐集新聞結果

因本計畫以臺灣東部海岸地區與海岸公路可能受到颱風波浪或異常浪等長波侵襲為軸，目前以關鍵字「瘋狗浪+公路」、「瘋狗浪

+台東」、「瘋狗浪+台９線」、「浪襲+台東」、「浪襲+台９線」、「颱風+富岡+多良+大武」作為檢索，其中符號「+」為布林檢索，所蒐集到之新聞如表 8-1 及圖 8.14a-8.14e，並以現有蒐集之新聞資料作分析。

表 8-1 新聞蒐集相關浪襲公路事件

日期	地點	事件	新聞來源	颱風
2012/08/23	台東森林公園海濱則有長浪襲岸	勸離好奇的觀浪民眾	公民新聞	天秤颱風
2014/07/23	湧起七、八公尺高長浪，沖擊省道台九公路上，造成南興段、多良段交通暫時中斷	中斷封閉	聯合新聞	麥德姆颱風
2014/10/13	長浪襲堤 富岡自行車道毀30米	封閉	自由時報	黃蜂颱風外圍環流
2015/08/06	台九線往南接近441公里處	浪襲擋風玻璃	蘋果新聞	蘇迪勒颱風
2015/08/21	台9線南迴公路、台11線長濱和富岡	預警性封閉	蘋果新聞	天鵝颱風
2015/09/27	台9線南迴公路易受浪襲攻擊路段	公路總局將派員駐點守視	蘋果新聞	杜鵑颱風
2016/07/08	台9線南迴公路多良至南興	間歇性管制通行	聯合新聞	尼伯特颱風
2016/09/13	台9線南迴公路金崙至香蘭路段、台11線東濱公路，屬易受浪襲攻擊路段	公路總局將派員駐點守視<浪高10m,富岡燈塔攔腰斷>	蘋果新聞	莫蘭蒂颱風
2016/09/17	台9線蘇花公路蘇澳-崇德路段	預警性封閉	蘋果新聞	馬勒卡颱風
2016/9/25	台東南迴海域推起陣陣長浪，台9線南興段掀起超標4公尺浪濤	封閉台9線439.8公里至441公里南興浪襲路段	自由時報	梅姬颱風
2016/09/27	台9線南迴公路多良至南興	預警性封閉或浪襲路段管制通行	聯合新聞	梅姬颱風



圖 8.14a 相關浪襲公路新聞資料

台九線大武鄉南興路段28日下午北上外車道封閉

日期：104-09-28　資料來源：公共事務科

臺九線439.5K~441.3K(大武鄉南興路段)因海浪侵襲，浪高已達警戒值5公尺，恐隨時浪花挾帶漂砂及石塊波及路面，大武工務段於本(28)日進行北上外車道封閉管制，倘浪勢持續擴大，不排除於下午18時0分進行臺九線419K~422K(太麻里鄉多良段)
及439K~441K(大武鄉南興段)全線封閉管制。

圖 8.14b 相關浪襲公路新聞資料

南興段浪擊 北上車道封閉

分享　分享　留言　列印　存新聞　A-　A+

2016-09-13 17:15聯合報 記者尤聰光／即時報導　讚　分享 0　傳送　G+1 0

台東縣南迴公路439K+800至441K南興段，因監看浪高值已達預警值3點5公尺，浪花波及北上外側車道，公路總局今天下午4點後外側車道封閉管制，請行經用路人注意並小心駕駛。



圖 8.14c 相關浪襲公路新聞資料


南迴公路台9香蘭-大鳥段 9日0時起預警性封閉

Tweet 分享 352

南迴公路柔腸寸斷。（記者黃明堂翻攝）

2016-10-08 22:07

〔記者黃明堂／台東報導〕台東縣警局晚間近10點通報，受豪雨影響，南迴公路台9線408K（香蘭段）-432.5K（大鳥段）於9日0時起實施預警性封閉，請大家告訴大家提前出發避開時段。

圖 8.14d 相關浪襲公路新聞資料


快訊／大雨釀災！台9線大武段預警性封閉　延後開放

2016/10/09 12:27

圖 / TVBS

最新消息！受到大雨影響，台9線408公里到432公里，從凌晨零時起預警性封路，原本預計10點開放通車，但因持續大雨造成多處災情擴大，將延到下午3點後，才開放通行。

圖 8.14e 相關浪襲公路新聞資料

以蒐集新聞分析，南迴公路(台 9 線)為多良段(419 公里至 422 公里)至南興段(台 9 線 439.8 公里至 441 公里) ，因離海岸近，較常受颱風海浪影響，常為公路總局公告之浪襲路段，如 2015 年 8 月 7 日

中度颱風蘇迪勒期間，一輛轎車行駛台九線往南接近 441 公里處時，突然一個長浪打上岸朝車輛直撲，車輛擋風玻璃應聲碎裂(圖 8.15)，據此向交通部公路總局申請相關道路設計資料。



圖 8.15　2015 年 8 月 7 日中度颱風蘇迪勒期間，於台九線往南接近 441 公里處，長浪襲擊車輛(資料來源：蘋果日報)

8.4 異常波浪特性分析

通常學者對異常波浪的定義是波高大於二倍示性波高，或靜水面至波峰高度大於 1.1 倍示性波高的波浪。若將目標設定為三姊妹波這樣的一系列波群，連續幾個波每個波都超大的機會不大，故數值模擬入射波波高也許可設為等於甚或稍低於二倍示性波高。

至於入射波週期，根據最近的研究，遠域颱風造成的湧浪可能是許多異常波浪事件的可能成因；例如 2013 年龍洞海濱異常波浪事件就很可能與威力強大的海燕颱風息息相關，以本研究所蒐集資料中據表 8.1 對應其颱風路徑圖(圖 8.16-圖 8.24)發現，所發生事件與颱風相關。其原因則可能因為湧浪加入當地的波場後，雖然波浪能量大幅增加，但對示性波高的影響不大；因此波高達到異常波浪標準(如超過二倍示性波高)的可能性大幅提高(Chen, 2016)。既然異常波浪與遠域颱風造成的湧浪有關，因此其模擬使用的週期應該長一些，超過示性週期、甚至接近湧浪週期亦屬適當。

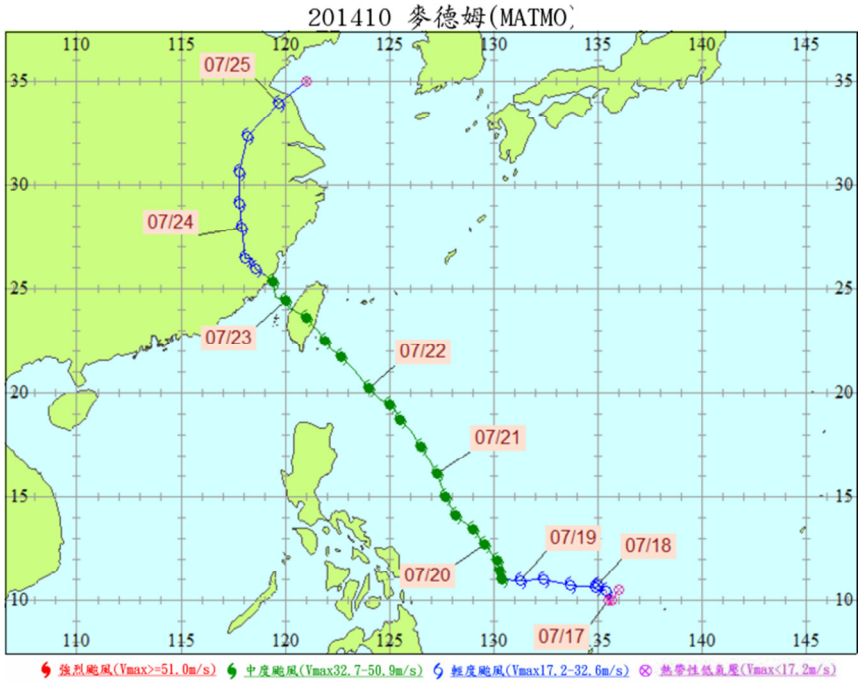


圖 8.16　2014 年麥德姆颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

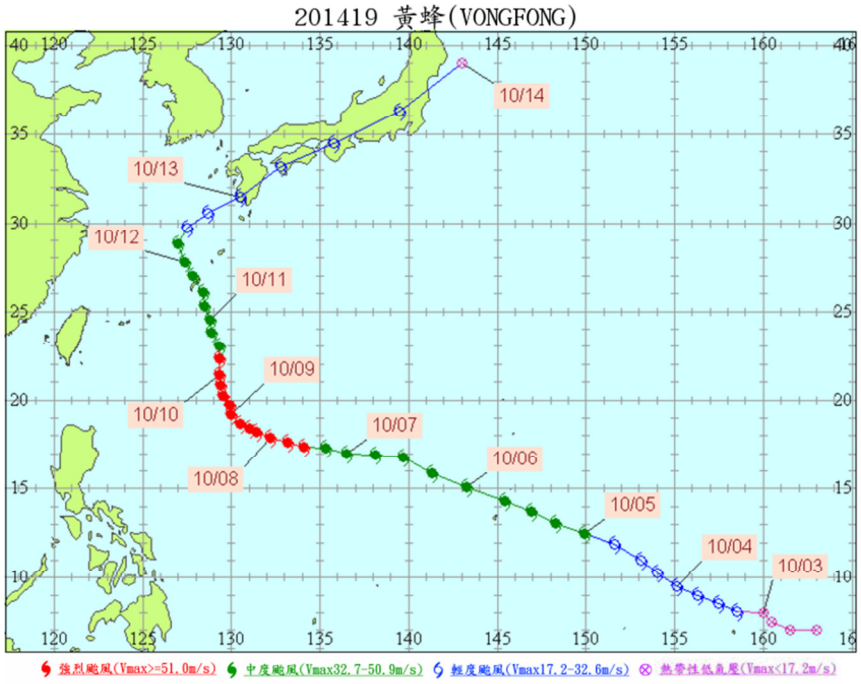


圖 8.17　2014 年黃蜂颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

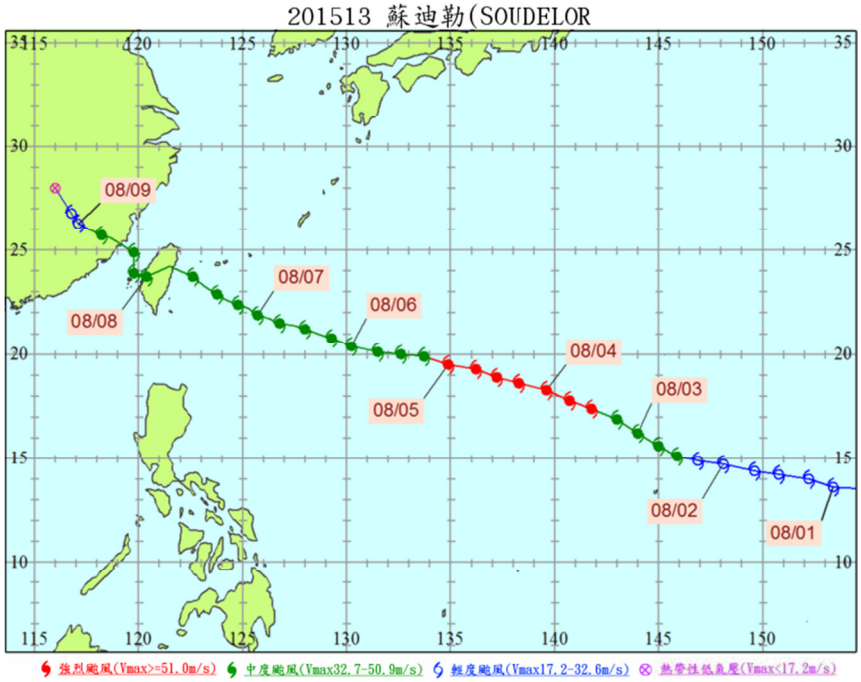


圖 8.18　2015 年蘇迪勒颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

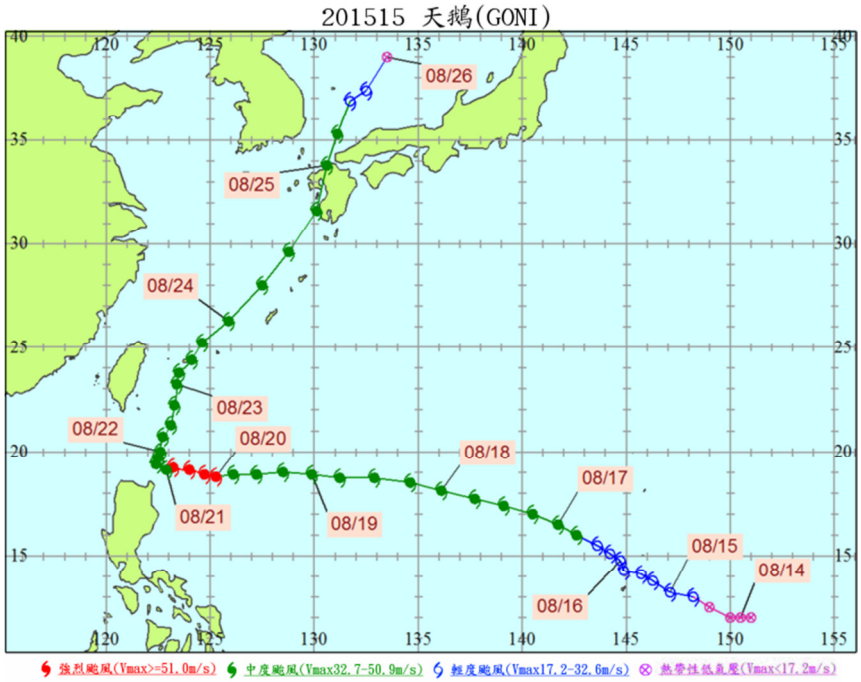


圖 8.19　2015 年天鵝颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

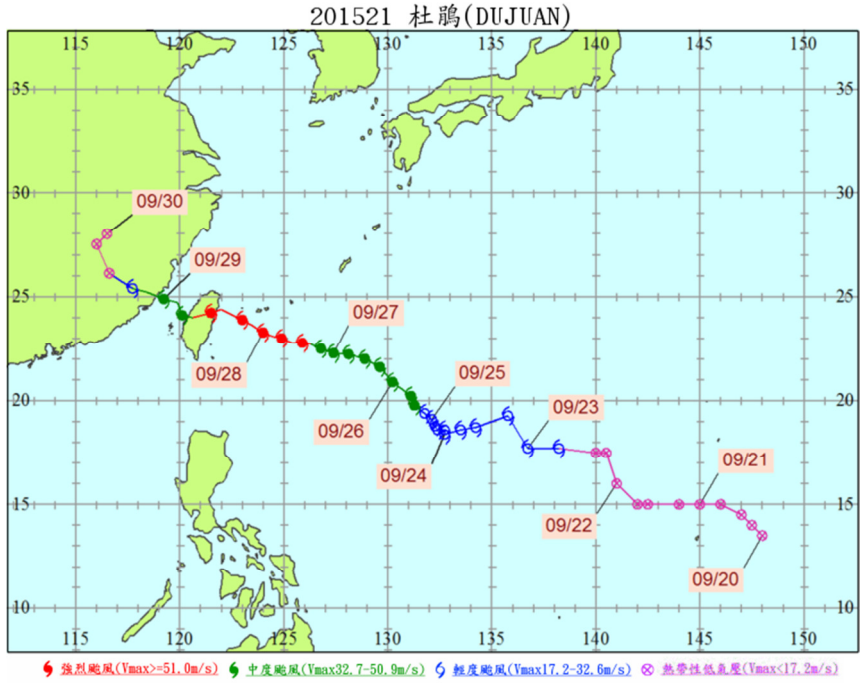


圖 8.20　2015 年杜鵑颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

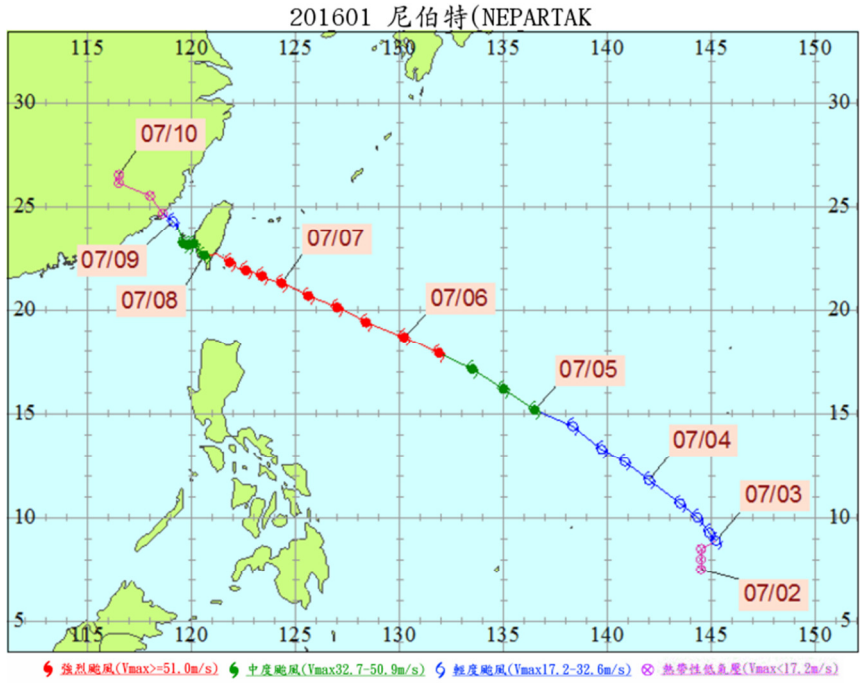


圖 8.21　2016 年尼伯特颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

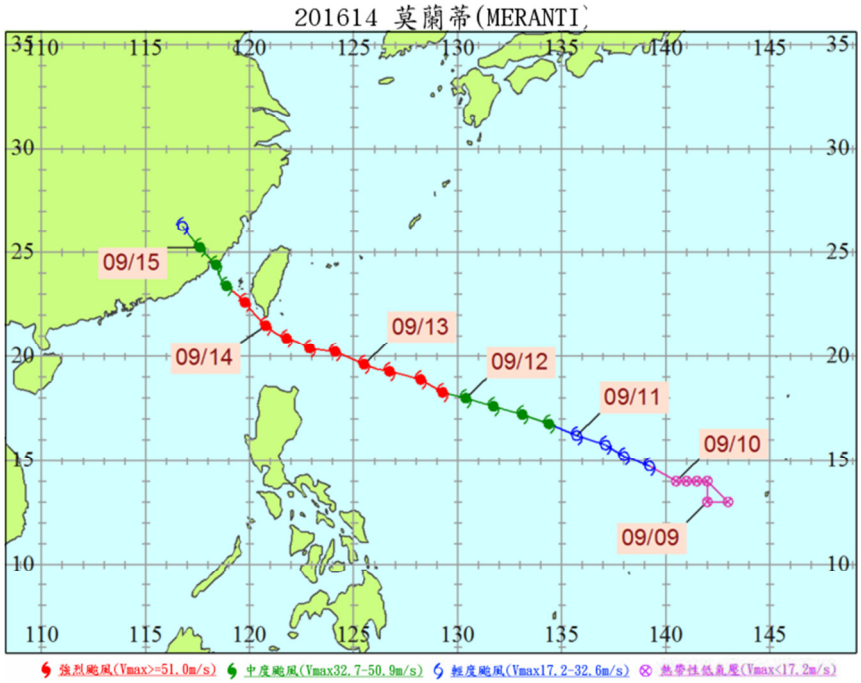


圖 8.22　2016 年莫蘭蒂颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

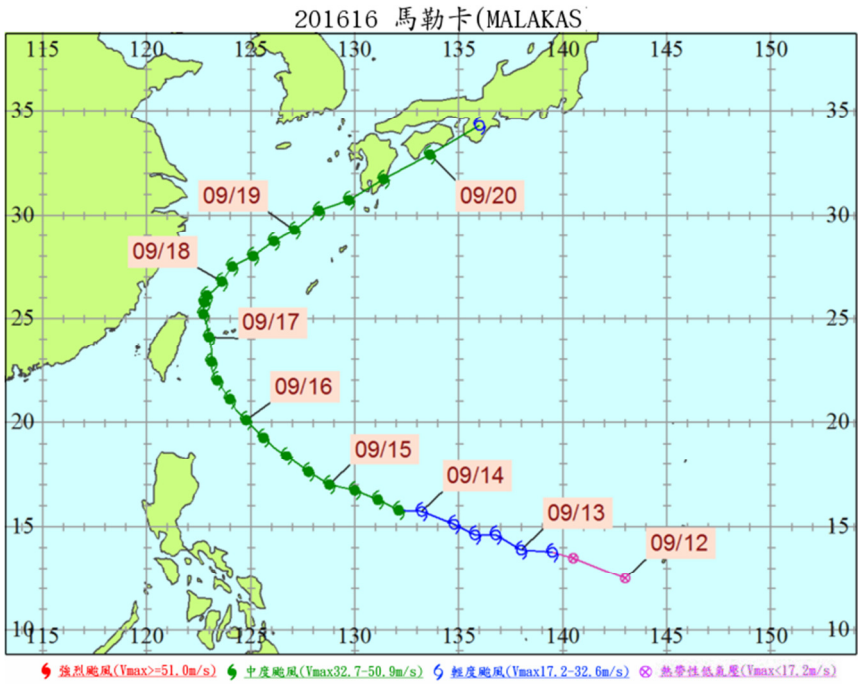


圖 8.23　2016 年馬勒卡颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

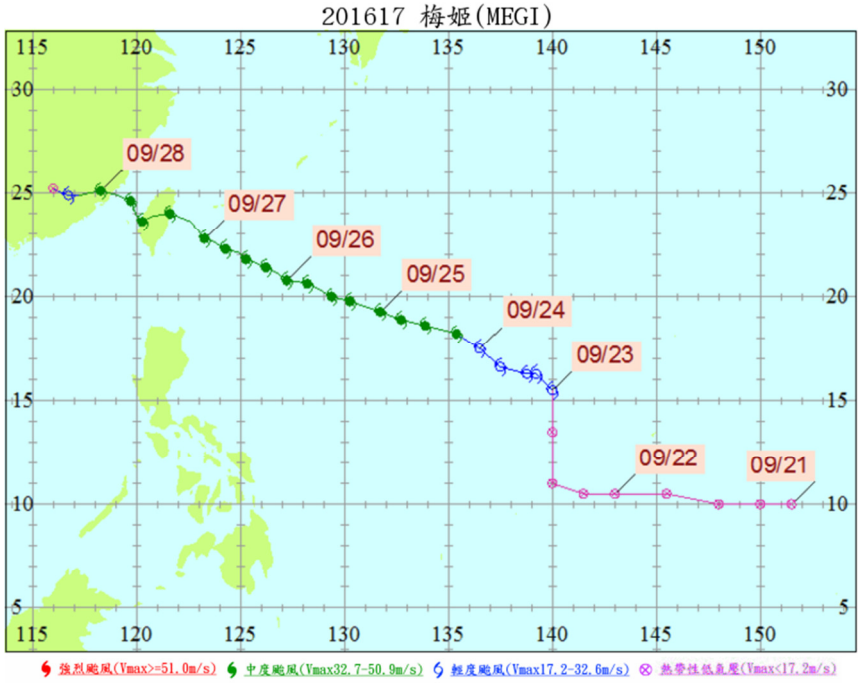


圖 8.24　2016 年梅姬颱風路徑圖(資料來源:中央氣象局)

本研究分析有無湧浪所產生的機制，在沒有湧浪的況下，其波高分佈為窄頻波譜而會遵守雷利分布(Rayleigh probability law)(式 8.3)

$$p(H)=\frac{H}{\sigma^2}\exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma^2}\right] \tag{8.3}$$

其中 p 是波高 H 機率密度函數，σ 是靜水面的標準差，根據雷利分布 H_s=2，σ =1.6 H_{ave}，波高最高的機率為兩倍的適性波高 $2H_s$ 或 1/81=0.01234。

但遠方天氣系統致使湧浪效應而構成異常波浪，所以考慮湧浪其波場則會為一個正弦波+窄頻波場(a sine wave +a narrow-banded wave field)，波高分佈會遵守(式 8.4)：

$$p(H)=\frac{H}{\sigma^2}\,\mathrm{I}_0\left(\frac{SH}{\sigma^2}\right)\exp\left[-\frac{H^2+S^2}{2\sigma^2}\right] \tag{8.4}$$

p 是波高 H 機率密度函數，σ 是原本風浪水面的標準差，S 是代表湧浪的正弦波的振幅，I_0:為第一類修正貝索函數，若 S=0 波高的機率密度函數就會恢復成雷利分佈，因為 $\mathrm{I}_0(0)$=1。(Wilbur et. al., 1987)

計算示性波高 H_s 的分佈

$$p(H)=\frac{H}{\sigma^2}\ \mathrm{I}_0\left(\frac{SH}{\sigma^2}\right)\exp\left[-\frac{H^2+S^2}{2\sigma^2}\right] \tag{8.5}$$

第一步先計算 H_0

$$\int_{H_0}^{\infty}p(H)dH=\int_{H_0}^{\infty}\frac{H}{\sigma^2}\ \mathrm{I}_0\left(\frac{SH}{\sigma^2}\right)\exp\left[-\frac{H^2+S^2}{2\sigma^2}\right]dH=\frac{1}{3} \tag{8.6}$$

假設 $\mathrm{S}=\mathrm{a}\sigma\ =1.6\sigma$

$$\begin{aligned}&\int_{H_0}^{\infty}p(H)dH\\&=\int_{H_0}^{\infty}\frac{H}{\sigma^2}\ \mathrm{I}_0\left(\frac{aH}{\sigma}\right)\exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma^2}-\frac{a^2}{2}\right]dH\\&=\int_{\frac{H_0}{\sigma}}^{\infty}\frac{H}{\sigma}\ \mathrm{I}_0\left(\frac{aH}{\sigma}\right)\exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma^2}-\frac{a^2}{2}\right]d\left(\frac{H}{\sigma}\right)\end{aligned} \tag{8.7}$$

以上積分等於 1/3, H0/σ=2.3032 並更新 Hs(有湧浪)為 2.92σ

$$\sigma\int_{\frac{H_1}{\sigma}}^{\infty}\frac{H}{\sigma}\ \mathrm{I}_0\left(\frac{aH}{\sigma}\right)\exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma^2}-\frac{a^2}{2}\right]d\left(\frac{H}{\sigma}\right)=\frac{1}{\mathbf{81}}=0.01234$$

$$H_1=4.04\sigma$$

$$H_{MAX}=\int_{4.04}^{\infty}\left(\frac{H}{\sigma}\right)^2\ \mathrm{I}_0\left(\frac{aH}{\sigma}\right)\exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma^2}-\frac{a^2}{2}\right]d\left(\frac{H}{\sigma}\right)=4.38\sigma \tag{8.8}$$

因此不同湧浪波高可以獲得最大波高，若無颱風的情況下，H_{MAX}=2H_s，而在遠處有颱風存在 H_{MAX} 將改變。

第九章 公路海岸地形變遷及波浪溯上與溢淹特性分析

9.1 臺東海岸公路

本研究目的為瞭解臺東海岸公路受颱風波浪及異常波浪影響的區段範圍、發展溯上分析及預警系統，建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，以前述分析結果之易受浪襲之路段，南迴公路(台9線)為多良段(419公里至422公里)至南興段(台9線439.8公里至441公里)，因離海岸近，較常受颱風海浪影響，常為公路總局公告之浪襲路段，由交通部運輸研究所協助逕向交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處及交通部公路總局西部濱海公路南區臨時工程處提供公路工程設計資料，圖9.1為東部公路(台9線)之區段圖，圖9.2~9.3為南迴公路多良段區段圖與橫斷面圖。

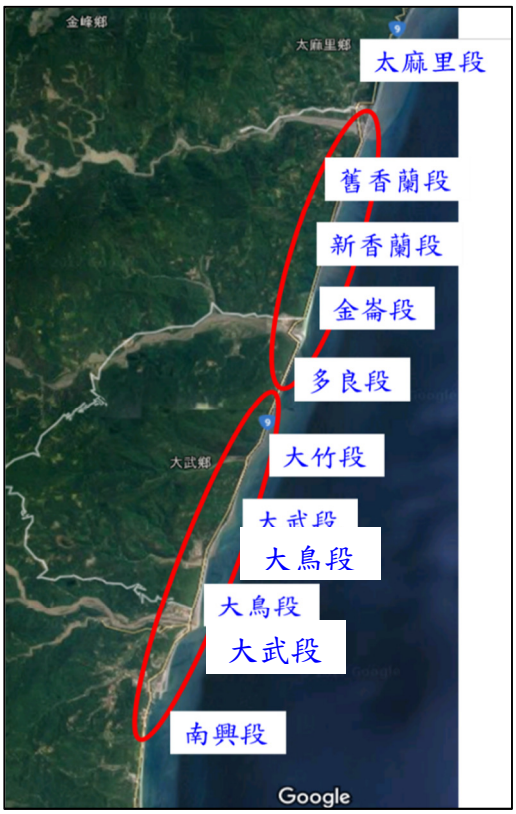


圖 9.1 東部公路(台9線)區段圖

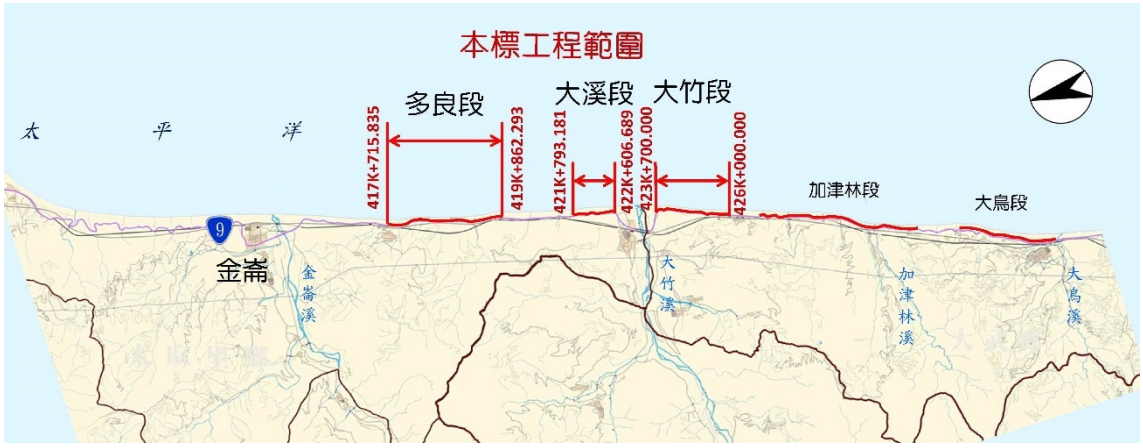


圖 9.2 南迴公路(台 9 線)多良段工程區段圖(交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處提供)

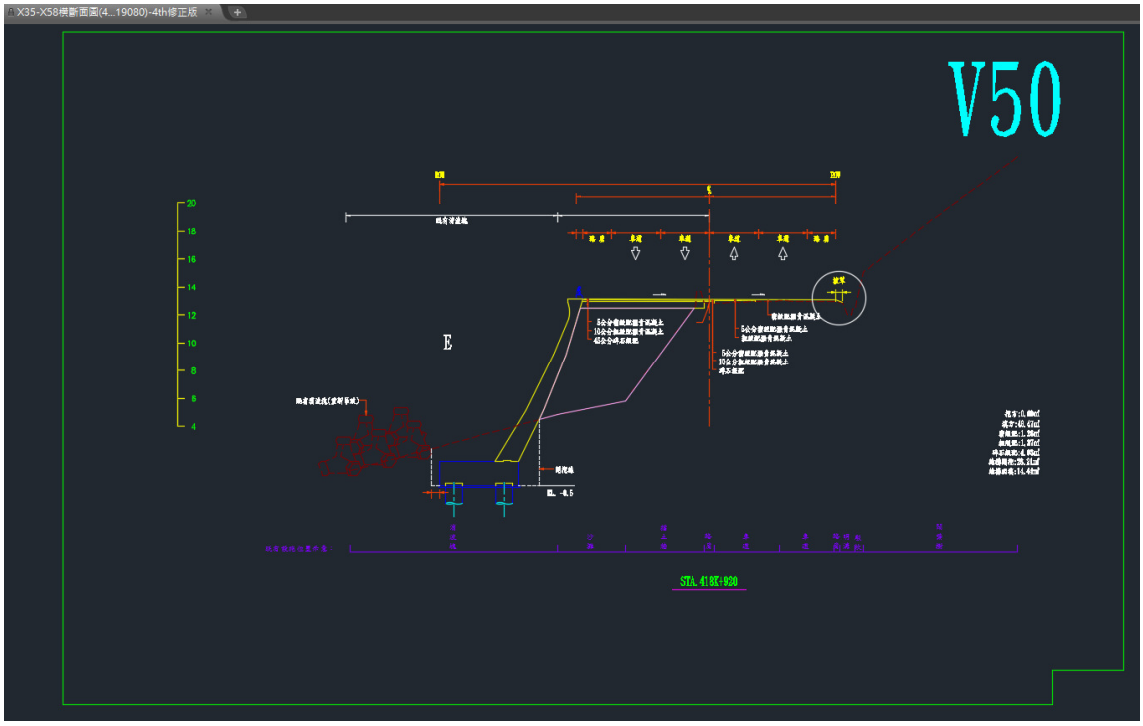


圖 9.3 南迴公路(台 9 線)多良段 418K+920 橫斷面(交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處提供)

本研究於 106 年 2 月 16 日臺東海岸公路受海浪威脅大武段現場會勘時水利署第八河川局提出「目前土砂來源匱乏，而河川輸砂量多，建議再與臺東縣政府協調將其運至岸邊作為海岸保護」。交通部公路總局第三區養護工程處亦提出「海岸侵蝕現象持續至今，相較以往，

海灘消失明顯，目前針對局部需要保護之地方作消波塊的佈設以削減波能，而越浪現象仍需深入研究」；並於會勘時由南興村村長口述「於南興村出口及地磅 440K 附近有浪襲」，本研究亦蒐集相關海岸線地形變遷之報告及利用 Google Earth 之衛星影像來進行海岸線地形變遷之分析。

9.2 臺東海岸地形變遷

陳等(陳與郭，2005)以民前 7 年至民國 89 年的臺灣堡圖、海岸基本圖及遙測影像等海岸地形資料分析計算台東海岸線歷年侵淤情形，藉以了解台東海岸近百年來之演變情形。其結果顯示臺東海岸民國 15 年至 99 年間全段之海岸變化雖然侵淤互現，但海岸線平均退量則約在 59.4 公尺至 71.4 公尺左右。

本研究亦利用 Google earth 之衛星影像來進行海岸線地形變遷之分析，本研究假設無潮汐影響下，以歷年的衛星影像來判斷海岸線(圖 9.4)；當波浪到達海邊時，因海水深度減少，故波浪的底部會被海底的摩擦力影響而波速減緩，但是波浪的上部較不受影響，所以高處的波浪速度較快，使的波浪越來越陡，終致破碎，就為碎浪，也可以說碎波，據此來判斷碎浪的地方作為海岸線。



圖 9.4 Google earth 衛星影像

將原始影像由 Google earth 按照衛星拍攝日期依序輸出，利用 Matlab 進行影像分析，將原始影像轉換灰階二值圖(如圖 9.5)並利用邊緣檢測演算法(如圖 9.6)，最後就可以利用邊緣偵測以找出碎波處。圖 9.7a-9.7l 為南興地磅之衛星 2005 年至 2014 之碎波處(紅線)。



圖 9.5 Google earth 衛星影像轉換為灰階二值圖

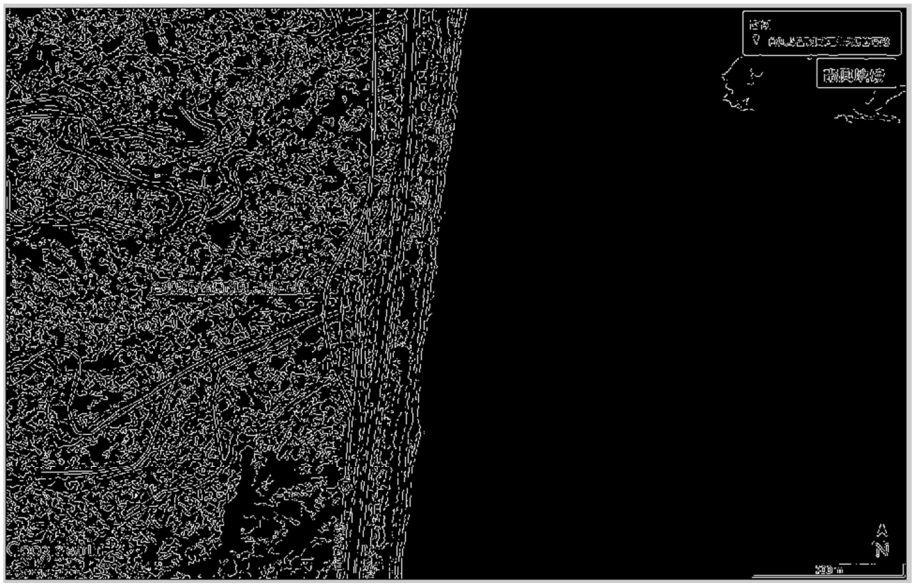


圖 9.6 利用灰階二值圖進行邊緣偵測



圖 9.7a 南興地磅站 2005 年衛星影像邊緣偵測



圖 9.7b 南興地磅站 2010 年衛星影像邊緣偵測

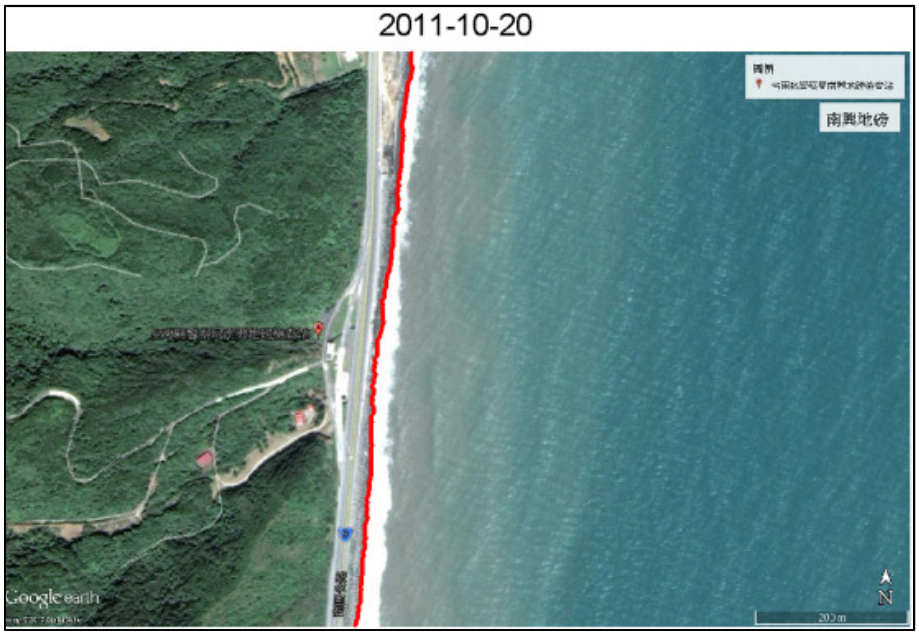


圖 9.7c 南興地磅站 2011 年衛星影像邊緣偵測



圖 9.7d 南興地磅站 2012 年衛星影像邊緣偵測

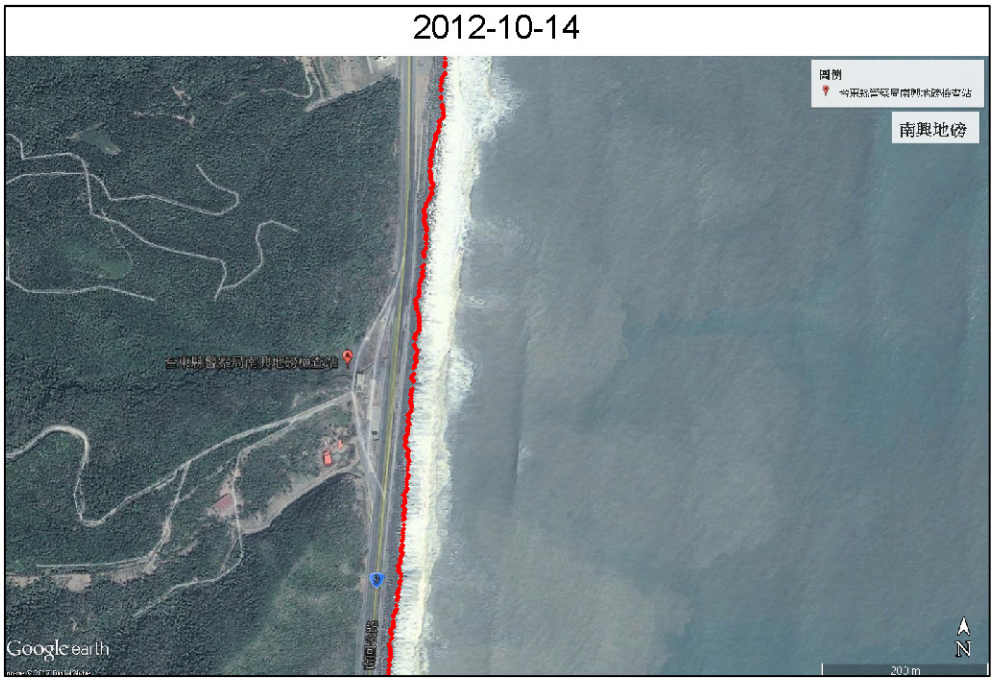


圖 9.7e 南興地磅站 2012 年衛星影像邊緣偵測

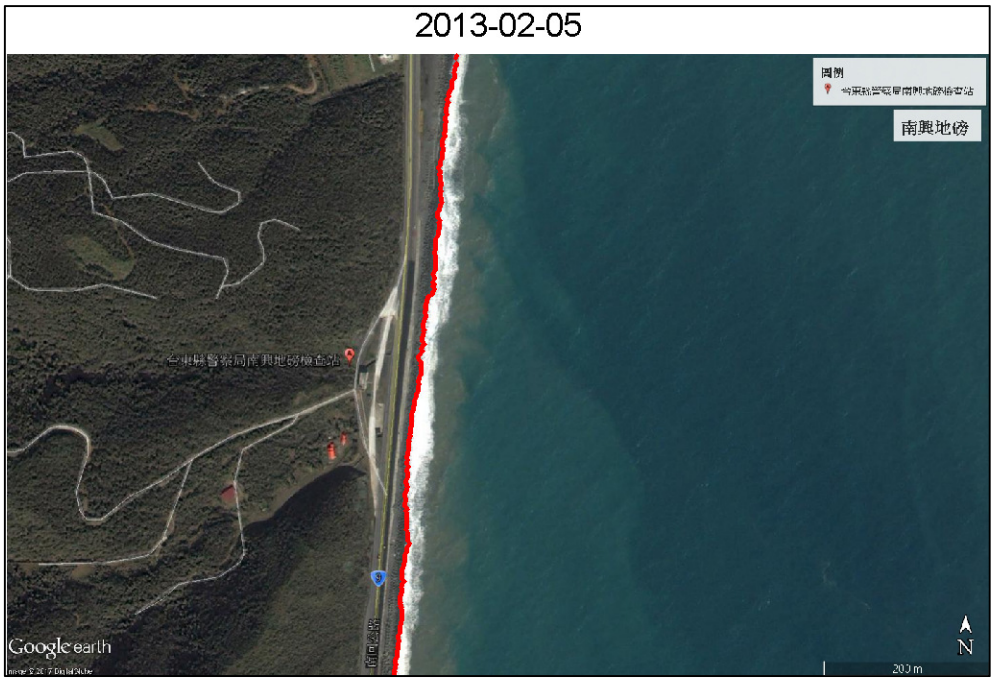


圖 9.7f 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測



圖 9.7g 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測

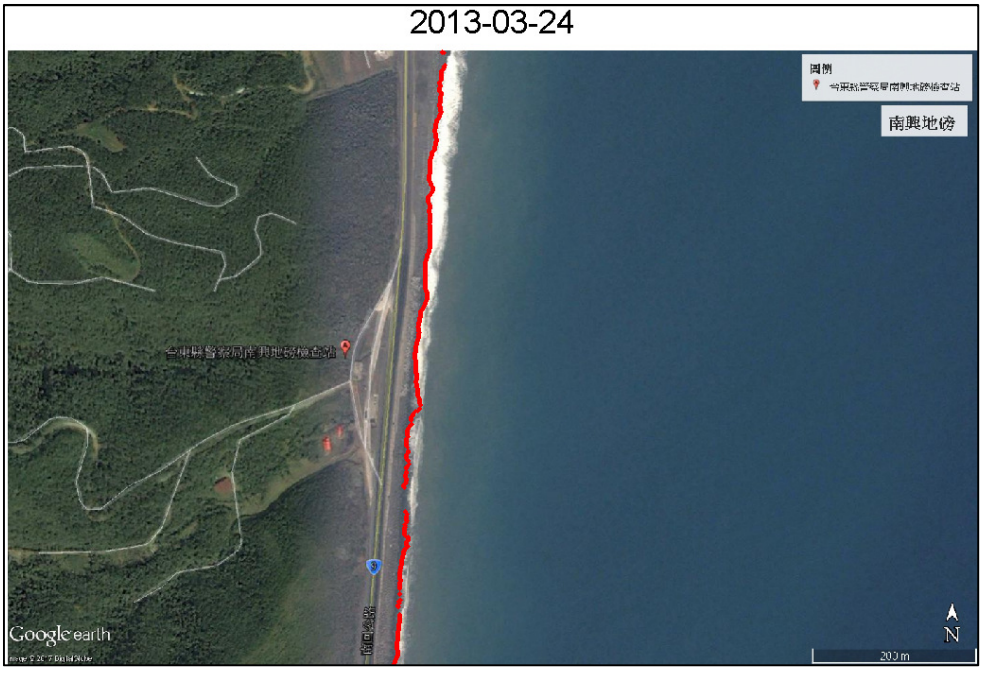


圖 9.7h 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測

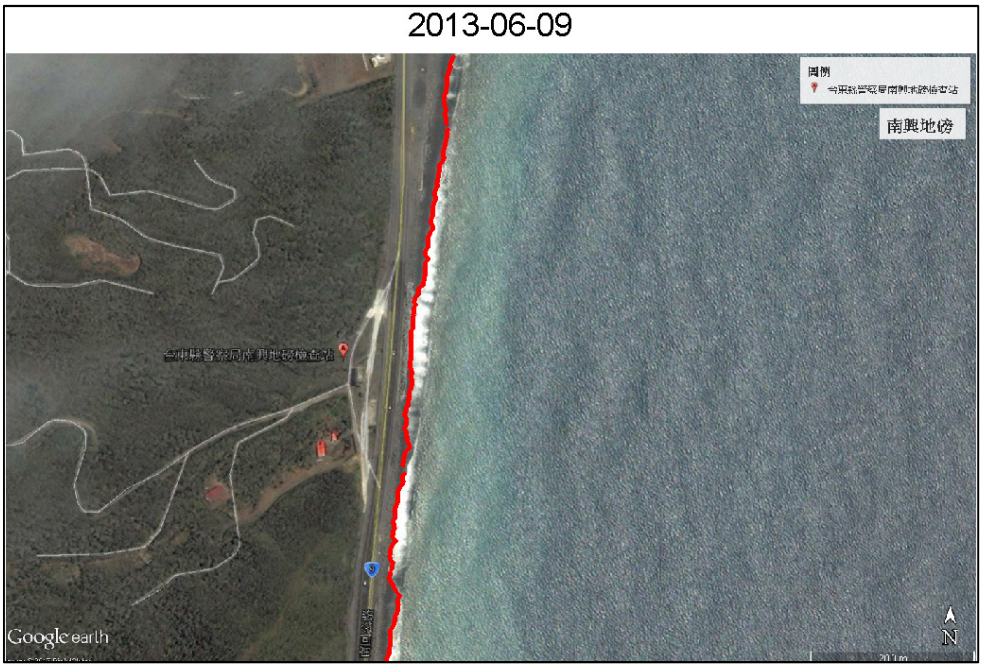


圖 9.7i 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測

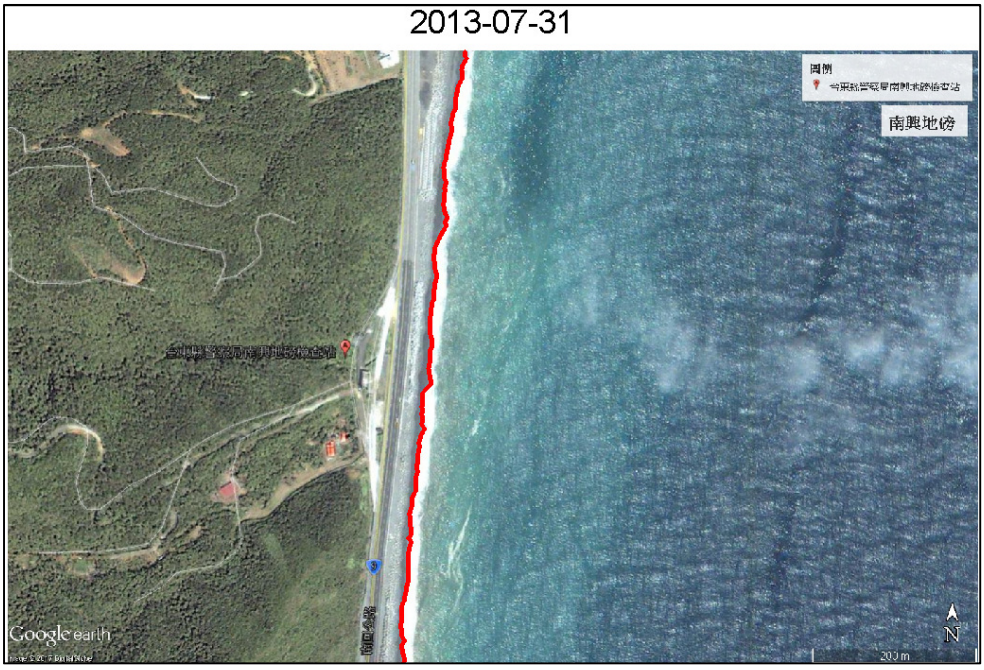


圖 9.7j 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測

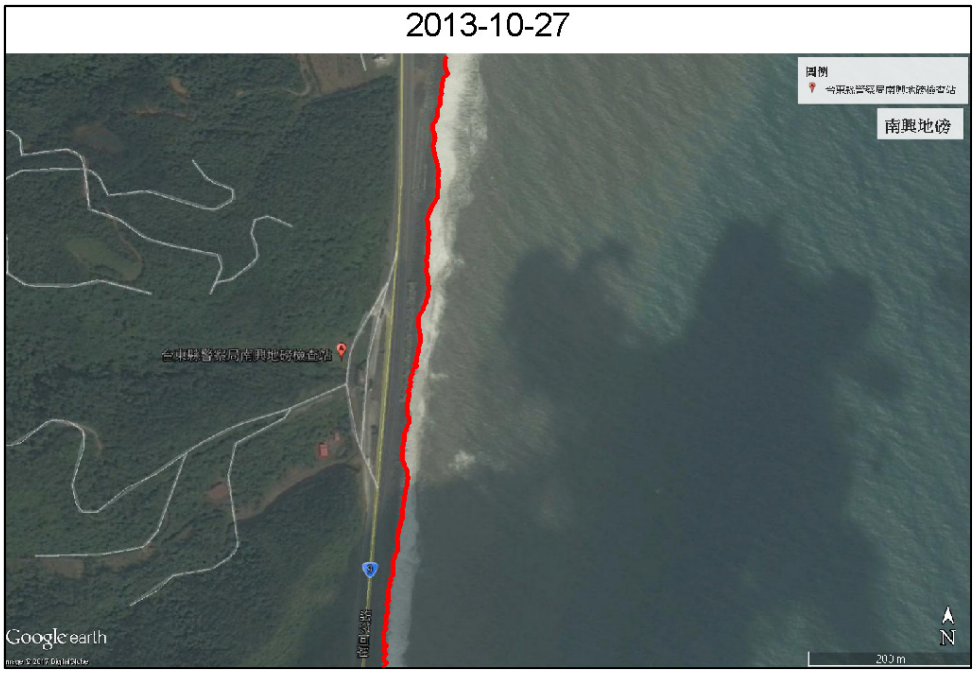


圖 9.7k 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測



圖 9.7l 南興地磅站 2013 年衛星影像邊緣偵測

圖 9.8 為將各日期之海岸線疊繪於 2005 年之衛星影像圖，並分析其海岸線之變化，利用像素值與比例尺之比例換算回實際距離，以南興地磅選取 4 測線，分別為 L1, L2, L3 及 L4 觀察其地形之變化(如圖 9.9a~9.9b)，以 L1~L4 測線計算海岸線與台 9 線之公路距離(圖 9.10)，從 2005 年至 2014 年 L1 斷面其海岸線退縮了約 70 公尺，L4 斷面退縮了近 87 公尺；其中 Google earth 衛星影像於 2013 年拍攝了 6 張衛星影像分別為 2、3、6、7、10 月，L3 斷面從 2013 年 2 月至 3 月海岸線向外推了 20 公尺，L3 與 L4 斷面又從 2013 年 3 月至 6 月海岸線向內退縮了 20 公尺，L1~L4 斷面於 2013 年 6 月至 7 月間海岸線向外推了近 30 公尺，隨後至 10 月又向內退縮了約 20~28 公尺。

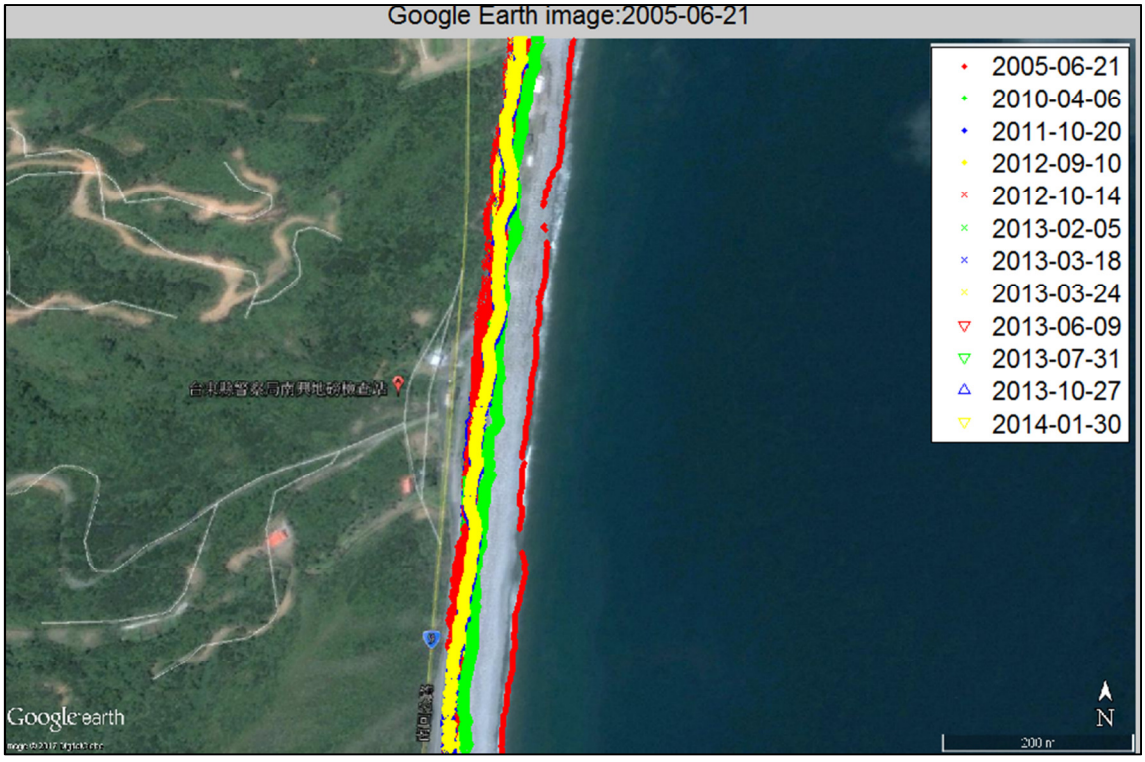


圖 9.8 南興地磅站各年之海岸線疊繪於 2005 衛星影像

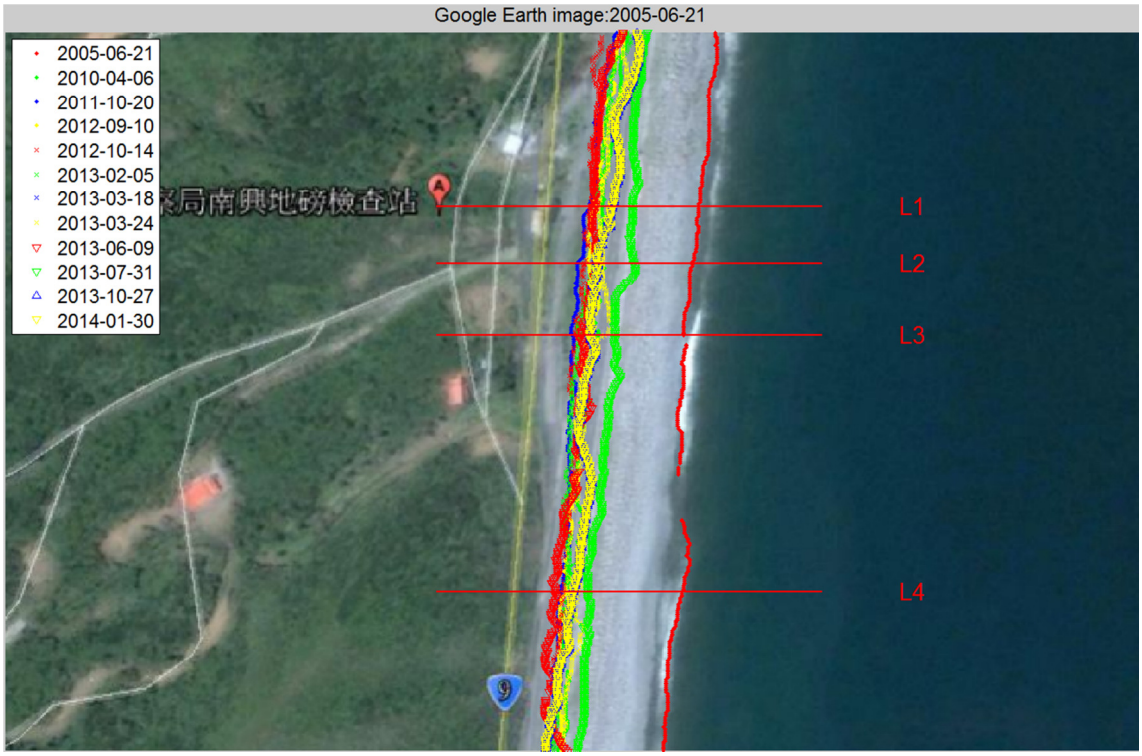


圖 9.9a 南興地磅站各年之海岸線疊繪於 2005 衛星影像

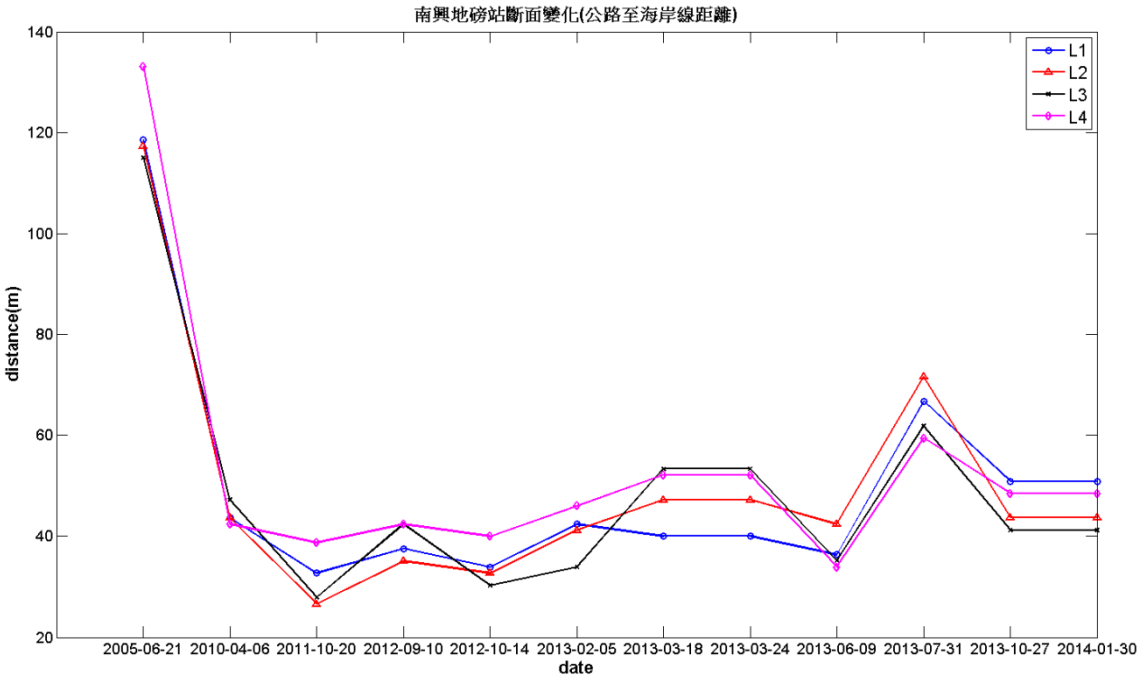


圖 9.9b 南興地磅站斷面變化(台 9 線至海岸線距離)

公路總局第三區養護工程處「台 9 線南迴公路拓寬改善後續計畫」將計畫路線安朔－草埔隧道段挖出之土石方用於台東海岸人工養灘，以保護受侵蝕之海岸公路，本研究於 106 年 8 月 9 日至臺東海岸公路受海浪威脅大武段及多良段再次進行現場會勘，並與交通部公路局第三區養護工程處大武工務段取得現場觀測資料，其養灘場址為大武漁港南側(圖 9.10、圖 9.11)其養灘向南延續至南興地磅站，圖 9.12、圖 9.13 為南興地磅站北側(439K+700)養灘現況，除了原本新設之消波塊保護工程並將安朔－草埔隧道段挖出之土石方向海側推進約有 50 公尺。



圖 9.10 大武漁港(陳冠宇教授攝)



圖 9.11 大武漁港南側養灘現況(陳冠宇教授攝)



圖 9.12 南興地磅站北側(439K+700)向南拍攝(陳冠宇教授攝)



圖 9.13 南興地磅站北側養灘處(439K+700)向南拍攝(陳冠宇教授攝)

9.3 波浪溯上與溢淹特性分析

根據 2013 年龍洞異常波浪事件相關報導，異常波浪穿過 50 公尺以上的礁臺後襲擊階梯附近的人群，此情境與前人研究中波峰向兩側延伸甚寬、看似一面水牆(蔡等, 2001)等描述有相通之處，都是接近單一方向的波浪。根據陳(2002)的推論，這種近似於單一方向的波浪，波向線不散開。而某些異常波浪的可能成因，如海流使波浪產生折射造成波能集中、或是不同方向波浪之線性或非線性疊加，都會在波能集中後分散。因此應該可以排除龍洞異常波浪事件是由於這兩種成因所造成。至於深海異常波浪較常見的阻塞作用，由於礁臺的阻擋，海流不可能正對著由外海入射的波浪，因此也無從發生；而阻塞作用產生的瞬間大浪與一般的入射波行為不相同，也無法穿過 50 公尺以上的礁臺後再襲擊人群。根據以上的推論，陳(2002)列出之異常波浪的可能成因中，與一般單一方向的波浪機制不同的幾個成因都可以排除。因此

我們假設入射波是一系列、單一方向的一般波浪。

根據氣象局委託董東璟教授等人的研究中，以波谷深與波峰高的比值(Ratio of Trough height to Crest height, RTC)(圖 9.14)為判斷波峰型異常波浪或波谷型異常波浪的依據，並以 Didenkulova and Anderson(2010)之建議波峰型異常波浪為波峰高度大於波谷高度的 1.5 倍(RTC<0.67) (如圖 9.15a)，波谷型異常波浪為波谷高度大於波峰高度 1.5 倍以上(RTC>1.5) (如圖 9.15b)，對稱型異常波浪則是介於兩者之間，即波谷高度與波峰高度比值介於 0.67 至 1.5 之間(0.67<RTC<1.5)(如圖 9.15c)，異常波浪絕大多數都是對稱(非成群)表 9.1，單一波浪與地形的交互作用，有太多不確定性與偶然性，故採用規則波進行模擬。

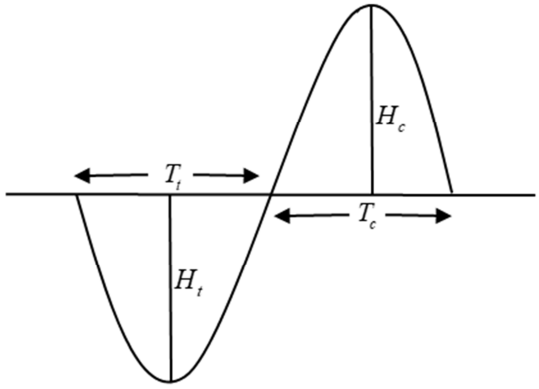
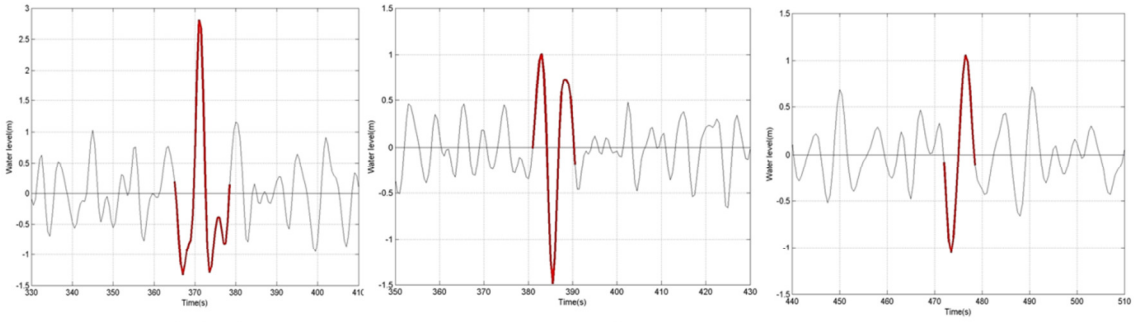


圖 9.14 波谷深與波峰高的比值(Ratio of Trough height to Crest height, RTC)



(a)波峰型
RTC < 0.67

(b)波谷型
RTC > 1.5

(c)對稱型
1.5 > RTC > 0.67

圖 9.15 異常波浪個別波之型態(董東璟教授提供)

表 9-1 異常波浪型態之分類(董東璟教授提供)

	總數目	成群 波峰型	成群 波谷型	成群 對稱型	非成群 波峰型	非成群 波谷型	非成群 對稱型
新竹浮標	377	2 (0.5%)	2 (0.5%)	25 (6.6%)	23 (6.1%)	21 (5.5%)	304 (80.6%)
龍洞浮標	580	2 (0.3%)	5 (0.8%)	43 (7.4%)	24 (4.1%)	21 (3.6%)	485 (83.6%)
花蓮浮標	602	1 (0.1%)	0 (0.0%)	17 (2.9%)	26 (4.3%)	49 (8.1%)	510 (84.3%)
鵝鑾鼻浮標	381	1 (0.2%)	0 (0.0%)	27 (7.0%)	8 (2.0%)	14 (3.6%)	331 (86.8%)
台東外洋浮標	204	0 (0.0%)	0 (0.0%)	12 (5.8%)	14 (6.8%)	9 (4.4%)	169 (82.8%)
東沙浮標	137	0 (0.0%)	0 (0.0%)	8 (5.8%)	8 (5.8%)	2 (1.4%)	119 (86.8%)
七股測站	360	0 (0.0%)	1 (0.2%)	24 (6.6%)	17 (4.7%)	27 (7.5%)	285 (79.1%)

交通部公路局第三區養護工程處大武工務段所取得現場觀測資料「歷年颱風浪襲路段浪高觀測紀錄表」(子計畫報告附錄一)，皆有紀錄歷年颱風浪襲多良段及南興段，當中央氣象局發布颱風警報時，養護單位會進駐守視該路段，並每小時回報浪高級路況，作為封路之判斷依據，在海側道路外側平台設置一浪高尺，圖 9.16 紅圈處為南興段(440K+800)所設置之浪高尺，圖 9.17 可見浪高尺有綠色、黃色、橙色及紅色每一個色號為間距一公尺，其紅色最頂處為與公路齊，表 9-2

為依據養護單位依歷史災情與災害紀錄所訂定預警值、警戒值、封路值作為封路之判斷依據。



圖 9.16 南興段(440K+800)處浪高尺(陳冠宇教授攝)



圖 9.17 南興段(440K+800)處浪高尺(陳鈞彥研究員攝)

表 9-2 封路之判斷依據參考表

設定浪高值		災害情形	處置作為	中央氣象局臺東浮標測站之觀測浪高值	現場觀測浪高值
預警值	3 公尺	浪花波及路面	進駐守視並每小時回報浪高及路況	3.7 公尺	3-4 公尺
警戒值	5 公尺	浪花挾帶漂砂波及小石塊(φ5cm以下)波及路面	進行外側車道通行管制	5.6 公尺	4-5 公尺
封路值	7 公尺	浪花挾帶漂砂、大石塊(φ15cm以上)及漂流物波及路面	進行全線車道通行管制	9 公尺	5-6 公尺

本研究依「歷年颱風浪襲路段浪高觀測紀錄表」繪製出歷年颱風、104 年杜鵑颱風、104 年巨爵颱風、105 年尼伯特颱風、105 年莫蘭蒂颱風、105 年馬勒卡颱風、105 年梅姬颱風、105 年艾利颱風、105 年海馬颱風、106 年尼莎颱風、106 年海棠颱風及 106 年天鴿颱風之浪襲路段浪高及臺東浮標示性波高(如圖 9.18-圖 9.28)，觀測波高為駐守人員依海平面高度所觀測到之波高高度並依照封路之判斷依據參考表進行封路的設定，而對應前述表 8-1 由新聞所蒐集到相關浪襲公路事件中是相符的。

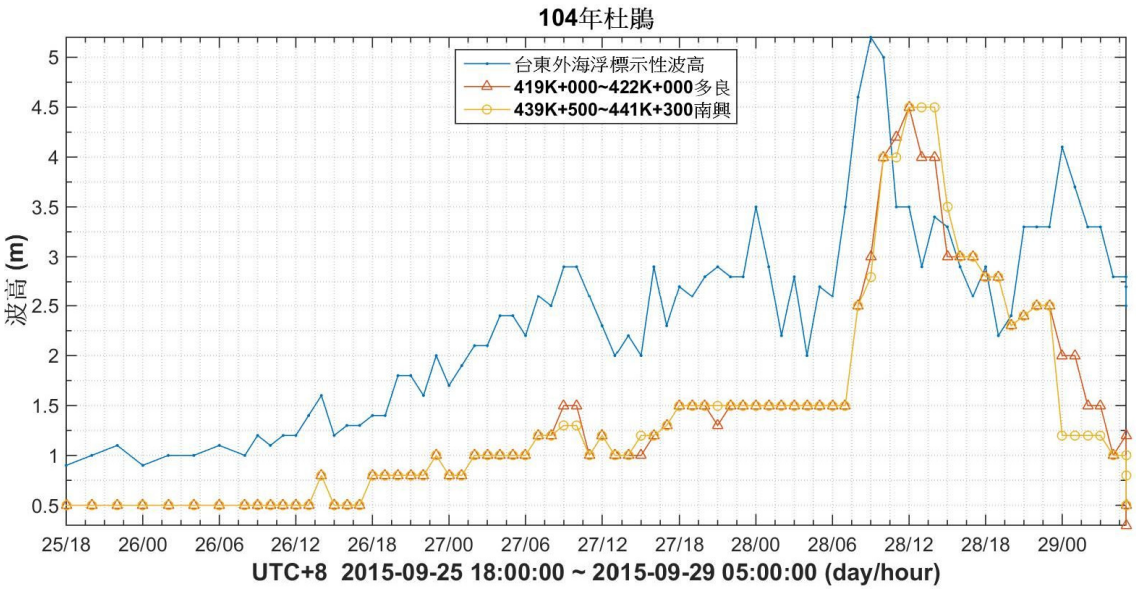


圖 9.18 104 年杜鵑颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

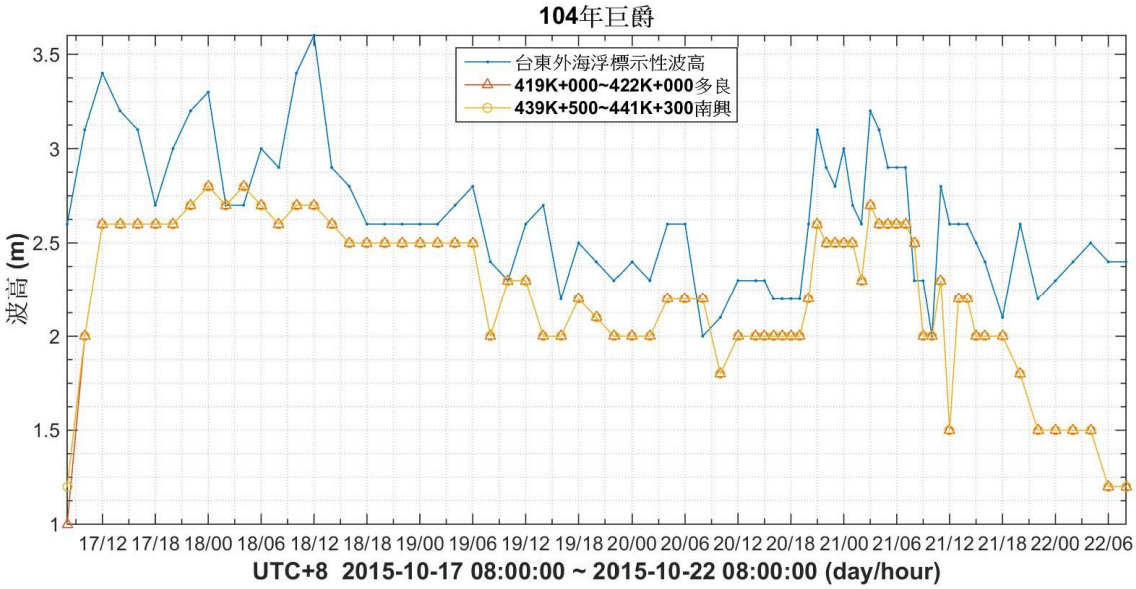


圖 9.19　104 年巨爵颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

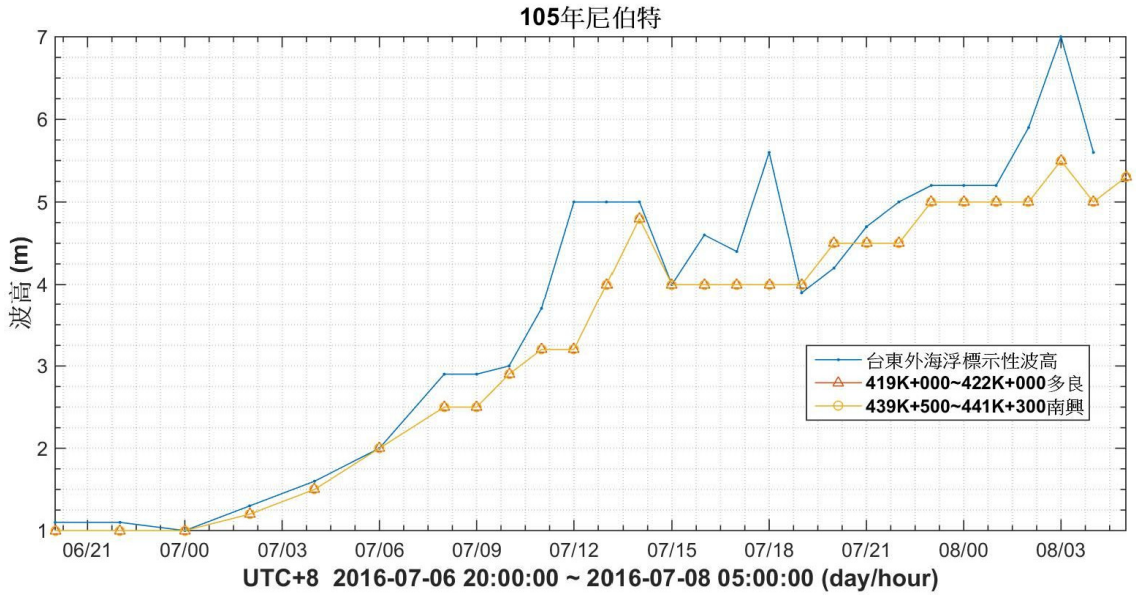


圖 9.20　105 年尼伯特颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

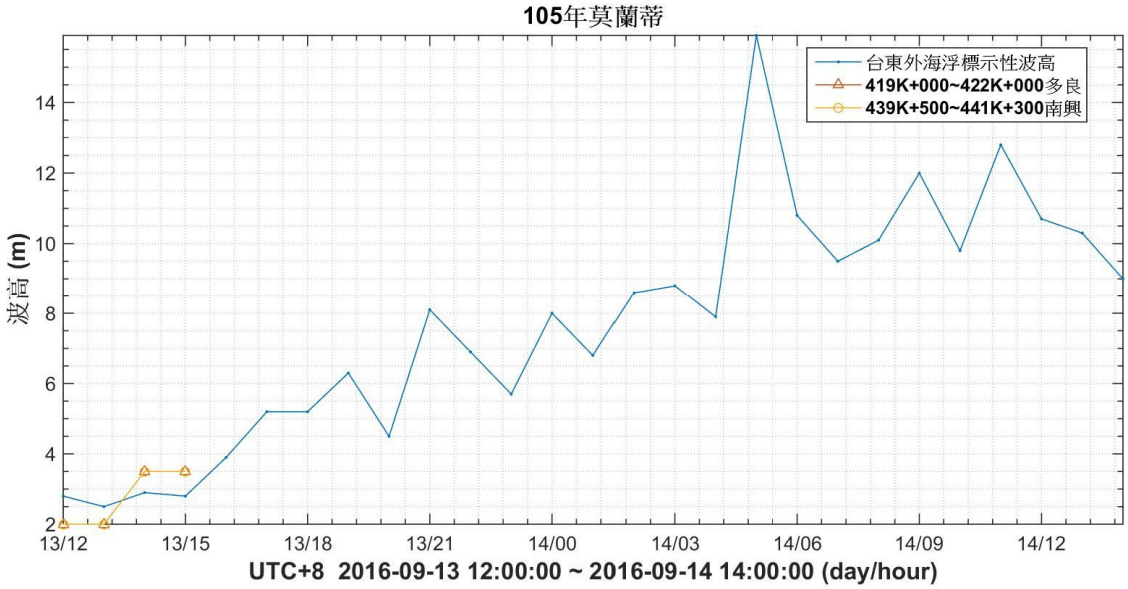


圖 9.21　105 年莫蘭蒂颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

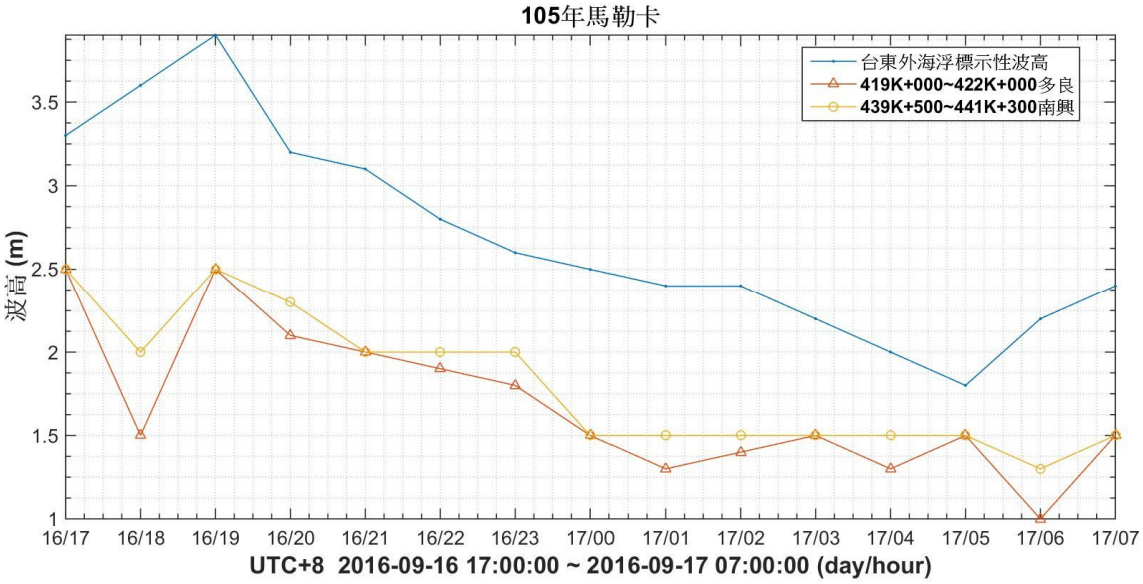


圖 9.22　105 年馬勒卡颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

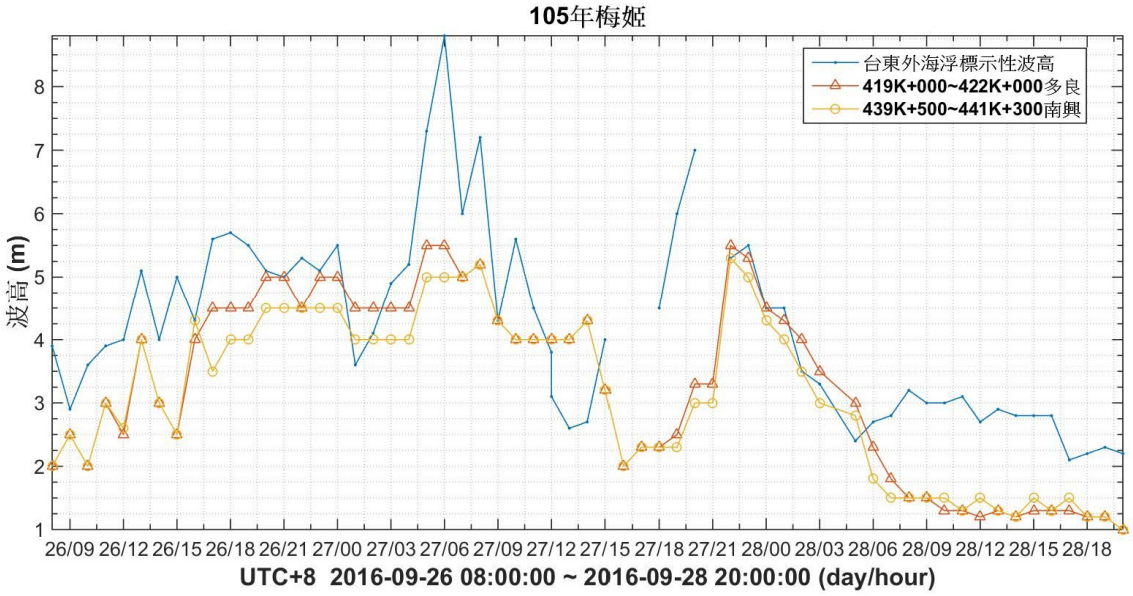


圖 9.23　105 年梅姬颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

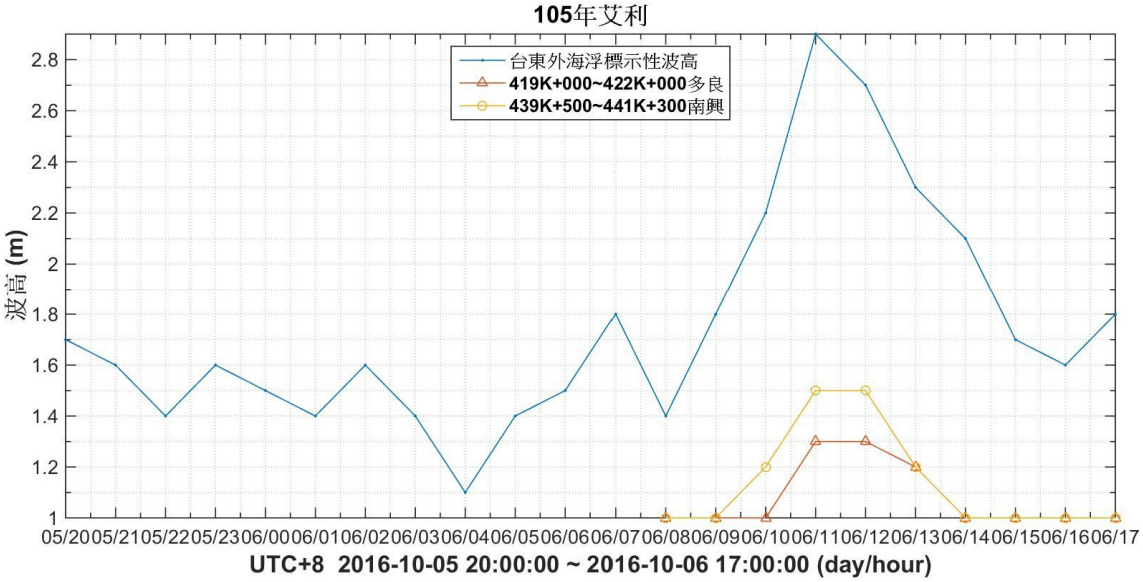


圖 9.24　105 年艾利颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

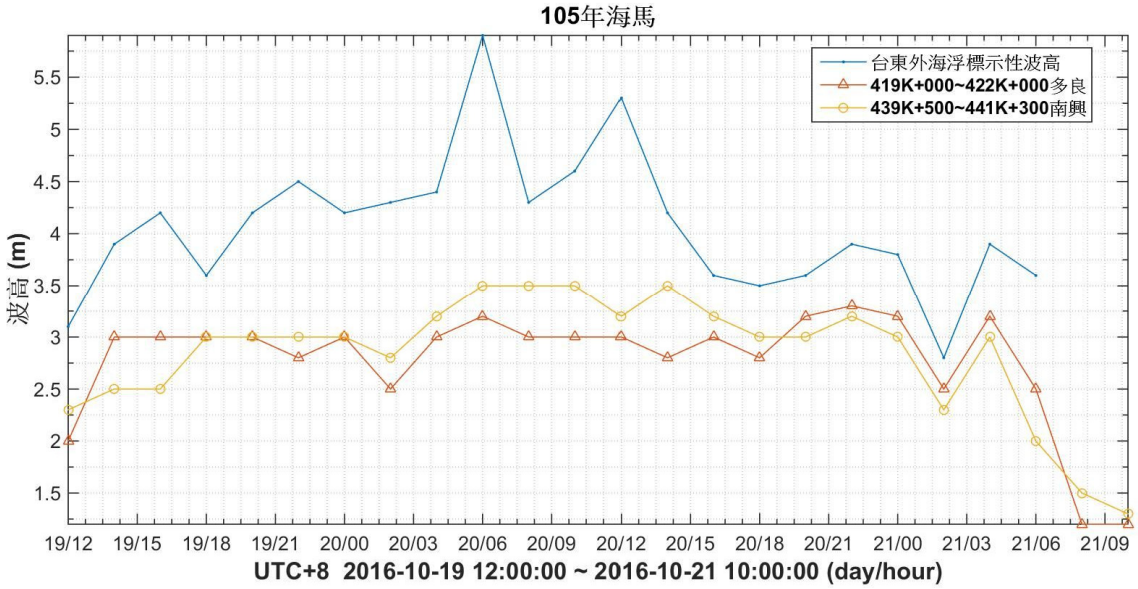


圖 9.25　105 年海馬颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

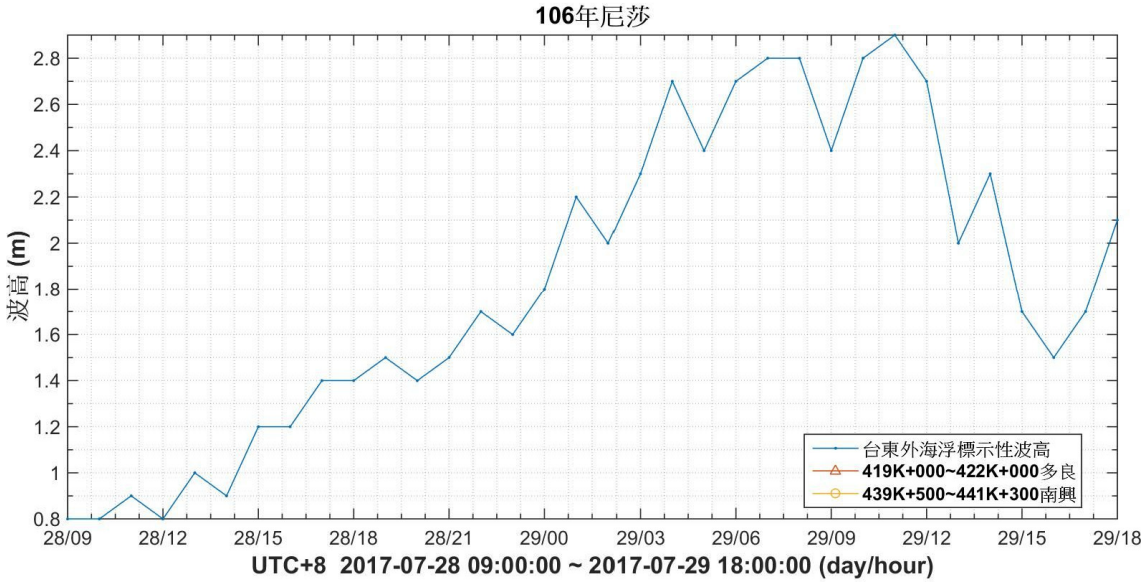


圖 9.26　106 年尼莎颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

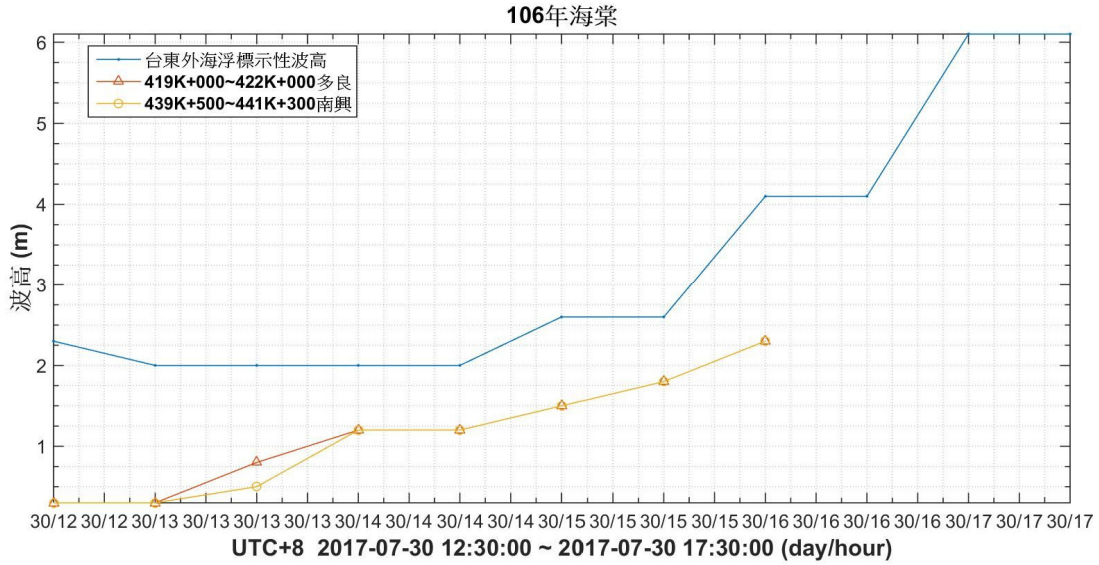


圖 9.27　106 年海棠颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

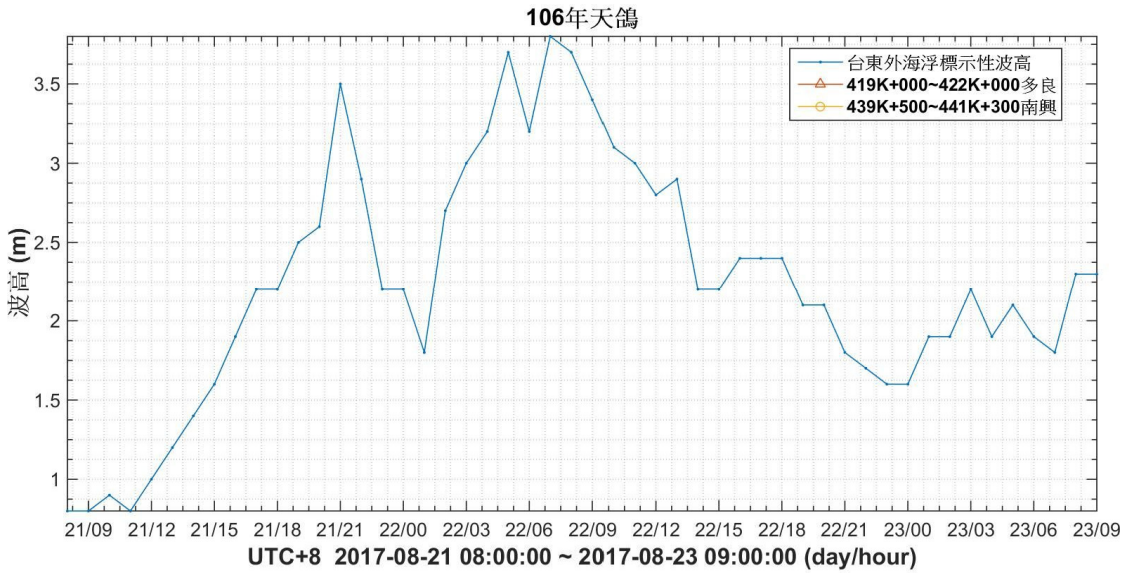


圖 9.28 106 年天鴿颱風浪襲路段觀測波高及臺東浮標示性波高

我們也在現場會勘時於南興段(441K+000)處，於道路靠近海側之擋土牆及護欄有發現有受波浪衝擊致使水泥塊剝落之情形(圖 9.29)，與交通部公路局第三區養護工程處大武工務段所提供之浪襲照片(圖 9.30)相符，可見衝擊力道，除了原本波浪的衝擊力外還有挾帶的漂砂及石塊，對公路安全造成影響，原本所設置之消波塊也因長期沖刷漸沒落海中，因此研究中模式模擬不考慮消波塊以作為最差狀況之考量。



圖 9.29 南興段(440K+900)水泥護欄受波浪衝擊剝落情形，左圖為向北拍攝，右圖為向南拍攝



圖 9.30 南興段(441K+000)浪襲公路情形

一般而言，異常波浪即令一開始未碎，最終溯上造成死傷的過程也可能碎波。在強烈的混合攪動下，流體不可避免會呈紊流狀態。因此欲以數值模擬異常波浪，必須考慮相關的紊流特徵。

眾所周知，紊流問題是著名科學家海森堡(W. Heisenberg)打算見到上帝時要問祂的兩大疑問之一，其困難可以想見。就理論來說，至今還沒有一個較為成熟的紊流理論，許多基本問題還不能用紊流理論來圓滿地解釋，只能運用半經驗公式來解決。這些半經驗公式就包括著名的普朗特(L. Prantle)混合長度理論與馮卡門(T. von. Karman)常數 $k \approx 0.4$ 對紊流問題求解的計算強度很高，按其網格大小可分為雷諾平均納維爾－史托克斯(Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS)方程式、大渦模擬(Large Eddy Simulation, LES)和直接數值模擬(Direct Numerical Simulation, DNS)三大類。

直接數值模擬（DNS）掌握了所有尺度的紊流運動，所以不需要對最小的尺度建立另外的模式。此法非常耗費計算資源，即使用最現代的電腦都可能無法完全處理所有尺度的紊流；故即令電腦性能在接下來的數十年間持續發展，一般研究者可能仍難以完全實行模擬。因此，對於最小尺度紊流運動以次網格模式來代替還是有必要的；此乃大渦流模擬（LES）所以應運而生的理由。

LES 數值模擬中，小的渦流被濾掉並用次網格尺度模式來代表，而大的、具有更多能量的渦流則可加以模擬。該方法比 DNS 解所需要的網格粗得多，但是通常比 RANS 模式需要更細化的網格。由於紊流運動結構的複雜性以及電腦運算速度的限制，大渦模擬(LES)和直接數值模擬(DNS)還很少用於一般工程上紊流流場的計算。再者，大部分我

們有興趣的平均流動都屬於雷諾平均納維爾－史托克斯方程式(RANS)能夠模擬的尺度範圍。因此，一般工程問題中紊流流場的計算多通過求解 RANS 方程式來進行數值模擬。

RANS 方程式是雷諾(O. Reynolds)於 1894 年推導求得，也是模擬紊流最古老的方法。此法將流體運動的各物理量表達為一個平均值和一個擾動值的和，代入原始的納維爾－史托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程式後再取平均，從而得到關於平均物理量的控制方程式，即所謂雷諾平均納維爾－史托克斯(Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS)方程式。此平均值為統計意義上的平均，或稱總體(ensemble)平均。RANS 方程式在動量方程式中會出現新的與擾動速度的二階相關之應力項，稱為雷諾應力。這個二階張量是新的未知量，其控制方程式於第四章 COBRAS 模式介紹將詳細介紹。

因為雷諾應力的存在，RANS 方程式不封閉，即方程式中的雷諾應力還有耗散速率無法單純由 RANS 方程式進行求解；必須引入其他的方程式，使整個方程組中方程式個數與未知量個數相等才能求解，此過程一般即是以一紊流模式來封閉方程組。

最常見的紊流模式是 $k-\varepsilon$ 模式，此為最簡單的完整紊流模式，包含兩個方程式，並要另外解兩個變數 k 與 ε：其中 k 是紊流動能，ε 是動能耗散率。由於 $k-\varepsilon$ 模式具有很好的收斂速率和相對較低的記憶體要求，因此在許多工程應用中都頗受歡迎。自從 Launder 和 Spalding 於 1974 年提出此法之後，$k-\varepsilon$ 模式就變成紊流流場計算的主要工具；其適用範圍廣、耗費計算資源相對經濟，且有合理的精度，因此在實際問題的模擬有十分廣泛的應用。$k-\varepsilon$ 模式也屬於從實驗現象中歸納

出來的半經驗公式。

本文須求解 RANS 方程式，並須結合一紊流模式(如 $k-\varepsilon$ 模式)來封閉方程組，故經仔細評估後，決定使用 COBRAS (COrnell BReaking wave And Structure)流體模式。

第十章 異常波浪容易致災區段之波浪溯上與溢淹數值模式建立

臺灣東部海岸地區與海岸公路可能受到颱風波浪或異常浪等長波侵襲，而造成重大災害。在 2015 年蘇迪勒颱風於台 9 線長浪襲擊致使駕駛車輛擋風玻璃破裂。2016 年莫蘭蒂颱風於台 9 線的南興和多良段部分同樣發生長浪的浪花沖擊到馬路的狀況。本文挑選台 9 線多良段 417K+715 到 419K+862 之間地勢較低的區段為目標，建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，透過模擬可了解在何種波浪條件之下可能遭受的威脅，可提供公路單位作為道路通行安全的評估和道路暫時封閉的參考。

10.1 COBRAS 模式介紹

本文使用的 COBRAS (COrnell BReaking wave And Structure)流體模式以美國 Los Alamos 國家實驗室發展的二維不可壓縮流體的數值模式「RIPPLE」(Kothe 等人，1991)為基礎，經過 Lin 和 Liu 修改後的版本。模式為 2 維垂直方向(2DV)的水動力模式，可用來計算波浪與結構物的交互作用 (Lin and Liu，1998)，以及波浪與孔隙介質的交互作用(Liu 等人，1999)。模式的程式碼以 FORTRAN 撰寫而成。

本模式主要求解 Raynolds Averaged Navier Stokes (RANS)方程式，並結合非線性 k-ε 紊流模式來求得紊流動能 k 及紊流消散率 ε。模式特徵包括以流體體積法(Volume of Fluid，VOF)來描述流體在自由表面的變化。另外可按研究的需求在不同區域設定可變的網格解析。根據模式的輸出結果可得知模擬過程中的壓力、渦度、紊流黏滯力、動能、

紊流消散、流速、自由表面的構成、質量守恆或和水漫(overtopping)的體積。

以二維不可壓縮且黏性流動之牛頓流體假設條件下，其 RANS 控制方程式如前章所述：

連續方程式：

$$\frac{\partial<u_i>}{\partial x_i} = 0 \tag{10.1}$$

動量方程式：

$$\frac{\partial<u_i>}{\partial t} + < u_j > \frac{\partial<u_i>}{\partial x_j} = -\frac{1}{\boldsymbol{\rho}}\frac{\partial<p>}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\boldsymbol{\rho}}\frac{\partial<\boldsymbol{\tau}_{ij}>}{\partial x_j} \tag{10.2}$$

其中 i 和 j =1 或 2 ，分別代表水平方向和垂直方向。u_i 代表第 i 個方向分量的流速。$\boldsymbol{\rho}$ 和 p 各為密度和壓力。g_i表示第 i 個方向分量的重力加速度。$\boldsymbol{\tau}_{ij}$為黏滯應力。<> 符號代表時間平均。另外：

$$< \boldsymbol{\tau}_{ij} >= 2\boldsymbol{\mu}S_{ij} + \boldsymbol{\rho} < u_i'u_j' > \tag{10.3}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial<u_i>}{\partial x_j} + \frac{\partial<u_j>}{\partial x_i}\right) \tag{10.4}$$

其中$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\nu\rho}$為動力黏滯係數，而$\boldsymbol{\nu}$為動能黏滯係數，$S_{ij}$為剪應變率張量，$u_i'$ 和 u_j' 各代表流速在 i 和 j方向分量的瞬時擾動量，$< u_i'u_j' >$為雷諾應力(Reynolds stress)。

另外 k-ε 紊流閉合模式的控制方程如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + < u_j > \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\boldsymbol{\nu_t}}{\boldsymbol{\sigma_k}} + \boldsymbol{\nu}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] - < u_i'u_j' > \frac{\partial<u_i'>}{\partial x_j} - \boldsymbol{\varepsilon} \tag{10.5}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} + < u_j > \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\boldsymbol{\nu_t}}{\boldsymbol{\sigma_\varepsilon}} + \boldsymbol{\nu}\right)\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial x_j}\right] + 2C_{1\boldsymbol{\varepsilon}}\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{k}\boldsymbol{\nu_t}S_{ij}\frac{\partial<u_i>}{\partial x_j} - C_{2\boldsymbol{\varepsilon}}\frac{\boldsymbol{\varepsilon}^2}{k} \tag{10.6}$$

其中

$k=\frac{1}{2}<u_i'u_j'>$ 為紊流動能 (turbulence kinetic energy)

$\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{\nu}<\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)^2>$ 為紊流消散率 (turbulence dissipation rate)

$\boldsymbol{\nu}_t=C_d\frac{k^2}{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 為渦流黏度 (eddy viscosity)

$$C_d=\frac{2}{3}\left(\frac{1}{7.4+\mathrm{S_{max}}}\right) \tag{10.7}$$

$$\mathrm{S_{max}}=\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{k}max\left(\left|\frac{\partial<u_i>}{\partial x_i}\right|\right) \tag{10.8}$$

另外根據 Rodi (1980)的建議值，在此將$\boldsymbol{\sigma}_k$、$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$、$C_{1\boldsymbol{\varepsilon}}$、$C_{2\boldsymbol{\varepsilon}}$四個經驗參數設定為 1.0、1.3、1.44 以及 1.92。

紊流模式根據渦流黏度的特性提供以下兩種型式來表示雷諾應力。

1.當渦流黏度為線性且具等向性：

$$<u_i'u_j'>=-2\boldsymbol{\nu}_tS_{ij}+\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{10.9}$$

2.當渦流黏度為非等向性：

$$<u_i'u_j'>=\frac{2}{3}k\boldsymbol{\delta}_{ij}-C_d\frac{k^2}{\boldsymbol{\varepsilon}}\left(\frac{\partial<u_i>}{\partial x_j}+\frac{\partial<u_j>}{\partial x_i}\right)-\frac{k^3}{\boldsymbol{\varepsilon}^2}\left[C_1\left(\frac{\partial<u_i>}{\partial x_l}\frac{\partial<u_l>}{\partial x_j}+\frac{\partial<u_j>}{\partial x_l}\frac{\partial<u_l>}{\partial x_i}-\frac{\partial<u_l>}{\partial x_k}\frac{\partial<u_k>}{\partial x_l}\boldsymbol{\delta}_{ij}\right)+C_2\left(\frac{\partial<u_i>}{\partial x_k}\frac{\partial<u_j>}{\partial x_k}-\frac{1}{3}\frac{\partial<u_l>}{\partial x_k}\frac{\partial<u_l>}{\partial x_k}\boldsymbol{\delta}_{ij}\right)+C_3\left(\frac{\partial<u_k>}{\partial x_i}\frac{\partial<u_k>}{\partial x_j}-\frac{1}{3}\frac{\partial<u_l>}{\partial x_k}\frac{\partial<u_l>}{\partial x_k}\boldsymbol{\delta}_{ij}\right)\right] \tag{10.10}$$

其中

$\boldsymbol{\delta}_{ij}$ 為 Kronecker delta 函數

$$C_1 = \frac{1}{185.2 + \mathrm{D}_{\max}^2}$$

$$C_2 = \frac{1}{58.5 + \mathrm{D}_{\max}^2}$$

$$C_3 = \frac{1}{370.4 + \mathrm{D}_{\max}^2}$$

$$\mathrm{D}_{max} = \frac{k}{\boldsymbol{\varepsilon}} \max\left(\left|\frac{\partial < u_i >}{\partial x_j}\right|\right)$$

當 $C_1 = C_2 = C_3 = 0.0$ 時，可由非等向性簡化成等向性的形式。由於渦流黏滯性在線性及等向性的條件下，當流場出現較複雜的紊流時，可能無法正確表現非等向性渦流的物理特性，所以本研究使用非等向性的渦流黏度。

10.2 數值地形

模式在多良段所使用的海域地形為海洋學門資料庫網格解析度 0.12 分之水深資料，如圖 10.1。陸域地形資料是由內政部地政司所提供之 5m 解析度 DEM(Digital Elevation Model)數值地形資料，其中平面座標採用內政部 1997 台灣大地基準(TWD97)，而高程座標則採用內政部 2001 台灣高程基準(TWVD2001)，其台九線多良段附近的地形如圖 10.2 所示。由於海、陸域的解析度不同，在此將海域地形資料的由經緯度座標轉 TWD97 座標後，再以內插方式生成與陸域地形相同解析度之數值地形。最後得到多良段附近的解析度 5m 海陸域整合地形如圖 10.3。

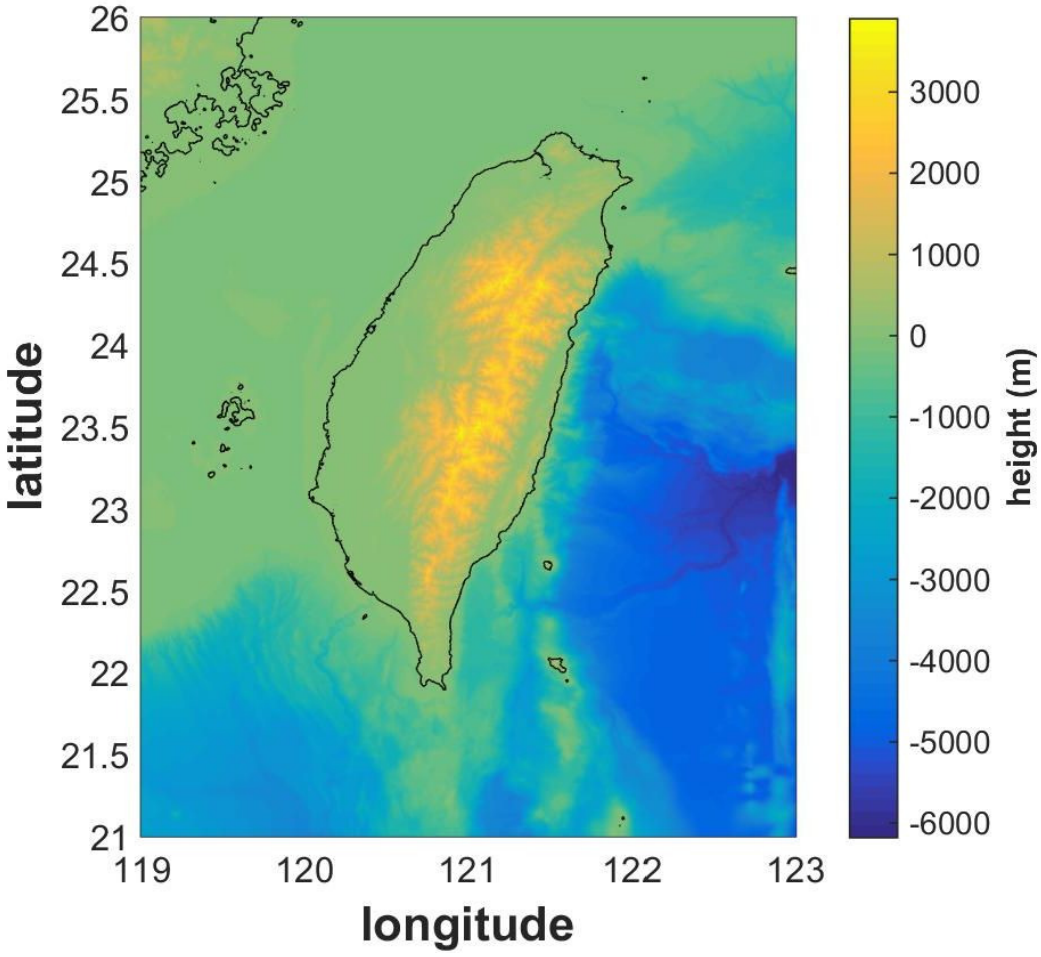


圖 10.1 海洋學門資料庫解析度 0.12 分之水深資料

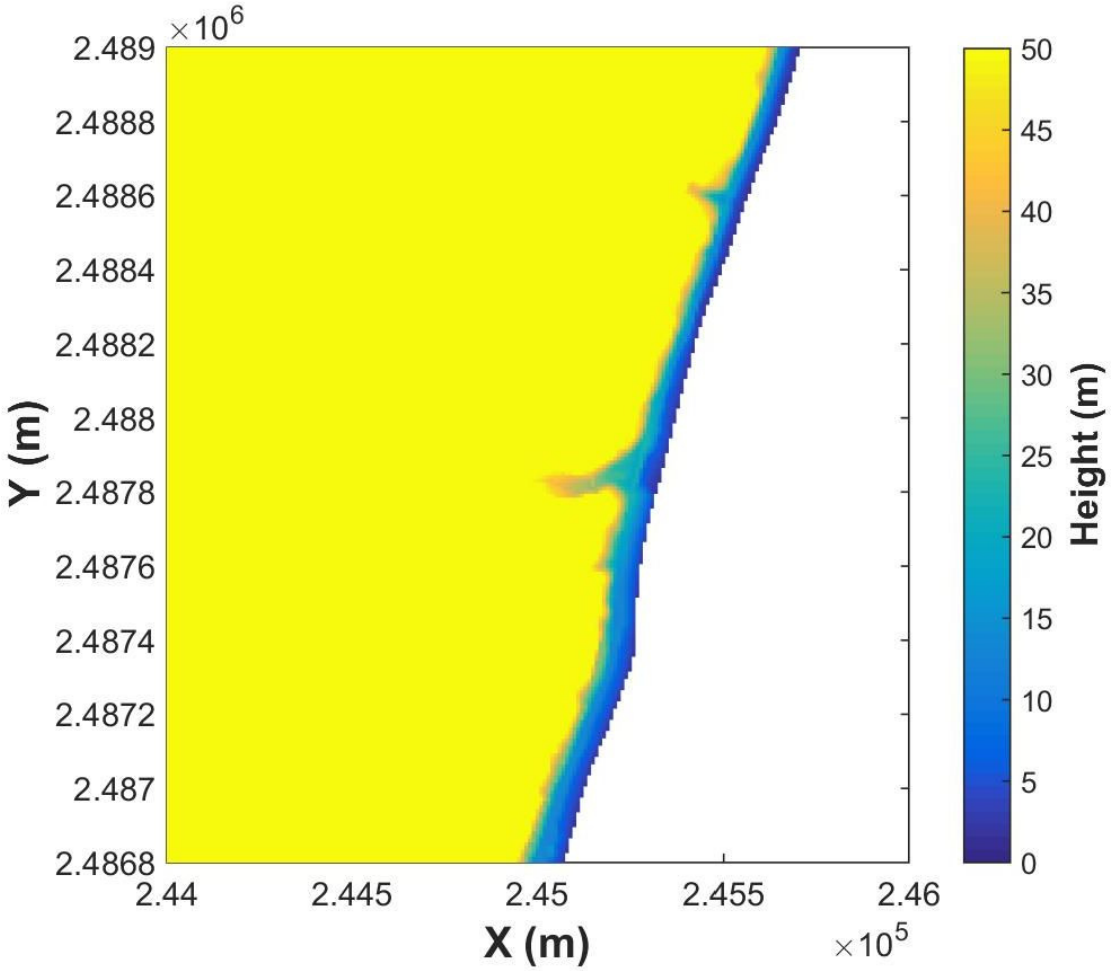


圖 10.2 台九線多良段附近 5m 解析度的內政部 DEM 數值地形

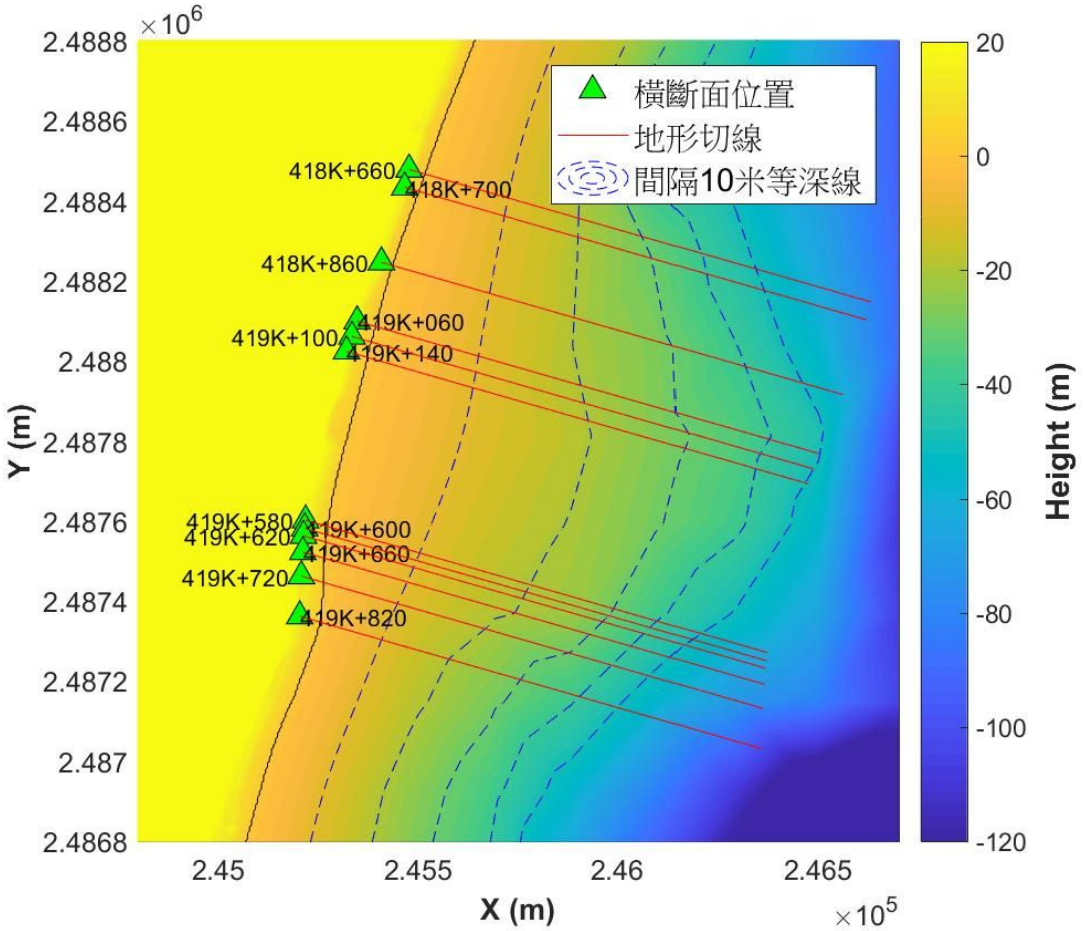


圖 10.3 台 9 線多良段附近之海陸域整合數值地形

本文根據公路局所提供的多良段(417K+715 至 419K+862)道路橫斷面圖資來繪製每個位置的道路平台近海側的大致高程，如圖 10.4。並從中選取的 418K+660 到 419K+140 以及 419K+580 到 419K+820 兩個高程較低的區間作為模擬目標。再從兩區間各挑選 6 個站進行波浪侵襲道路平台的模擬。選取的 12 站如圖 10.3 所標示的橫斷面位置(TWD97 座標)，以及圖 10.5 的 Google earth 標示(經緯度座標)。12 個站各取一離岸方向的切線，如圖 10.3 所示的紅色線。各站紅色切線的地形剖面參照圖 10.6。

在此僅取水深介於 0 到 32 公尺的區域作為模式使用的海域地形，並從深度 32 公尺的位置往離岸方向延伸 8 個波浪週期所能傳播的水平

距離作為入射波區。以 418K+660 站及波浪週期 10 秒為例，由於模式的波浪由左邊界入射，故先將地形左右翻轉後取深度 0 到 32 公尺的部分(x 座標約-600 到 0 m 區間)，再延伸一段入射波區(x 座標約-2000 到 -600 m 區間)，如圖 10.7。而陸域的道路平台地形則擷取自圖 10.8 的紅色虛線。多良段的道路寬度包含雙向的路肩和雙車道總共 18m，靠陸側的道路邊緣即為模式的右邊界。為了考慮比較嚴重的浪襲情況，所有模擬的地形從水深 5m 開始往陸地方向直到道路平台旁的擋土牆為止，將該區域地形皆調整為水深 5m 的平底海域。經過調整的 418K+660 站地形如圖 10.9 所示。

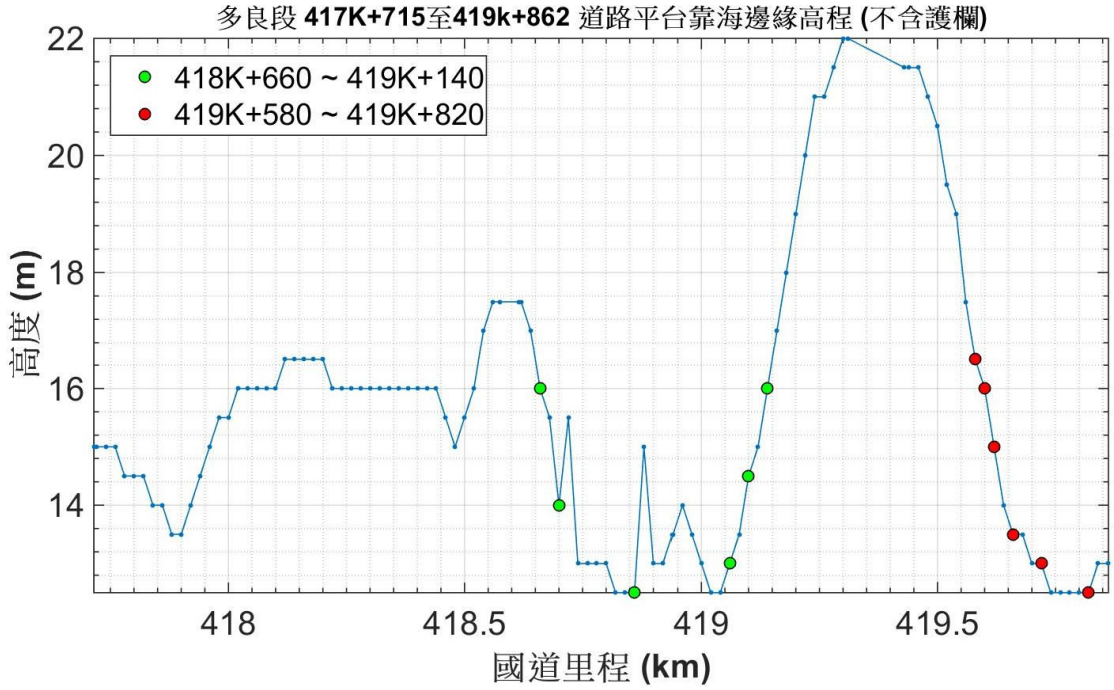


圖 10.4 多良段在 417K+715 到 419K+862 區間，靠海側的道路平台邊緣高程。

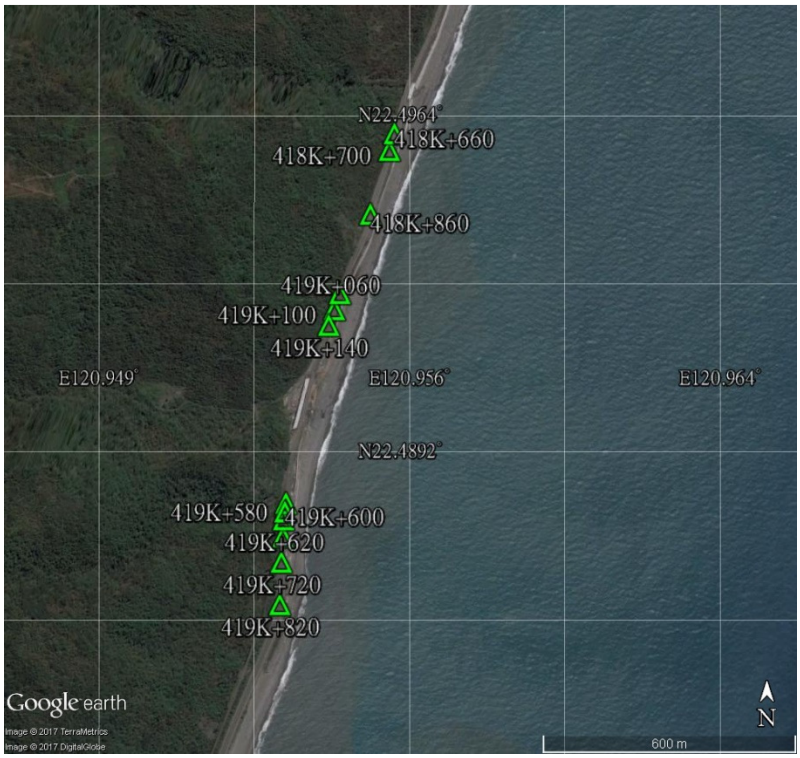


圖 10.5　Google earth 的 12 站位置。

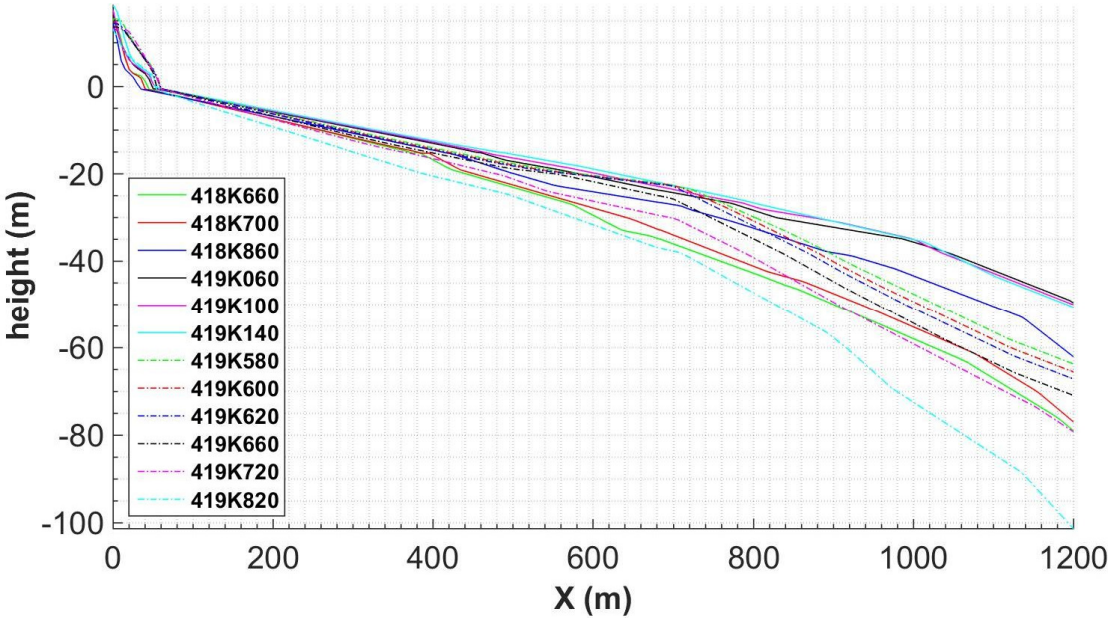


圖 10.6　12 個站的切線地形。

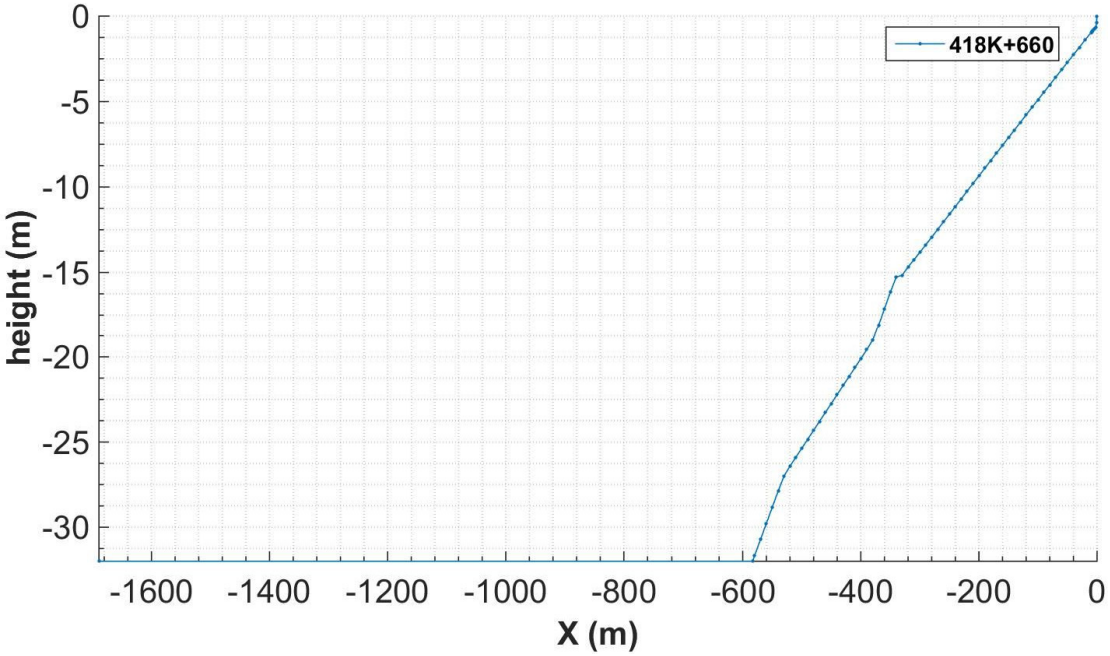


圖 10.7 418K+600 站的海域模式地形

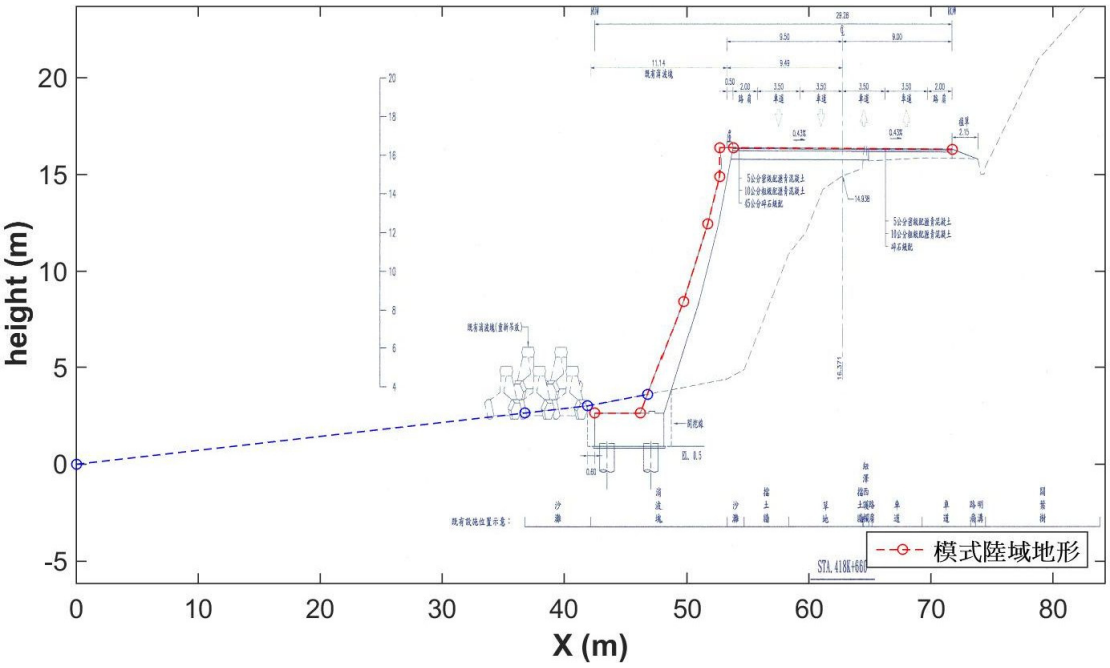


圖 10.8 418K+600 站橫斷面圖(紅色虛線模式內插使用的陸域地形)

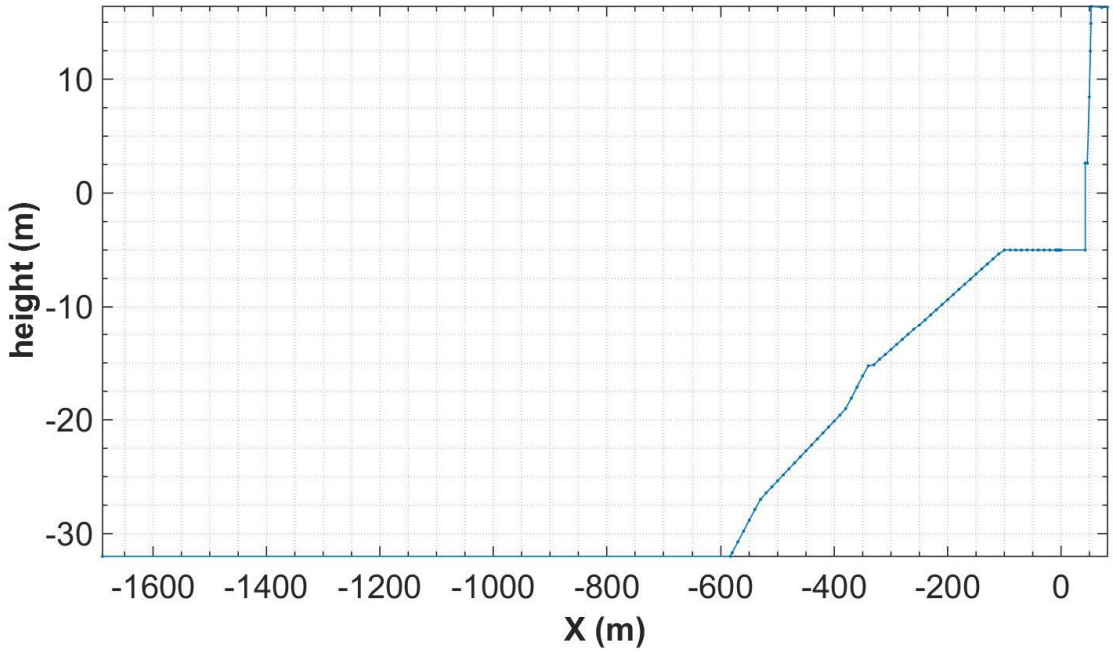


圖 10.9 418K+600 站提供模式內插使用的地形。

南興段的模式地形部分同樣參考公路局所提供的南興段道路橫斷面圖資。從中取出 439K+700、440K、440K+260、440K+500、440K+740、441K、441K+240 等 7 站來建立道路橫斷面的陸域地形，其位置如圖 10.10 的 Google earth 三角標示。南興段的海域地形則參照水利署台東海岸（尚武段）監測調查計畫（1/2）於 2008 年台東海岸南興段附近海域量測資料所繪製的等深圖(圖 10.11)。從等深圖中標示了 7 站的向岸方向地形切線，如圖 10.12。

各站的切線地形剖面如圖 10.13 所示。同樣取水深介於 0 到 32 公尺的區域作為模式使用的海域地形，並從深度 32 公尺的位置往離岸方向延伸 6 個波浪週期所能傳播的水平距離作為模式入射波區。以 440K+000 站且波浪週期 10 秒為例，由於模式的波浪由左邊界入射，故先將地形左右翻轉後取出深度 0 到 32 公尺的部分(x 座標約-2600 到 0 m 區間)，再延伸一段入射波區(x 座標約-3600 到-2600 m 區間)，如圖 10.14。而陸域的道路平台地形則擷取自圖 10.15 的橫斷面圖(參照紅色

虛線)。南興段的道路寬度包含雙向的路肩和雙車道總共 16m，靠陸側的道路邊緣即為模式的右邊界。考慮到較嚴重的浪襲情況，所有模擬的地形從水深 5m 開始往陸地方向直到道路平台旁的擋土牆為止，將該區域的地形調整為水深 5m 的平底海域。440K+000 站的地形經調整後如圖 10.16 所示。

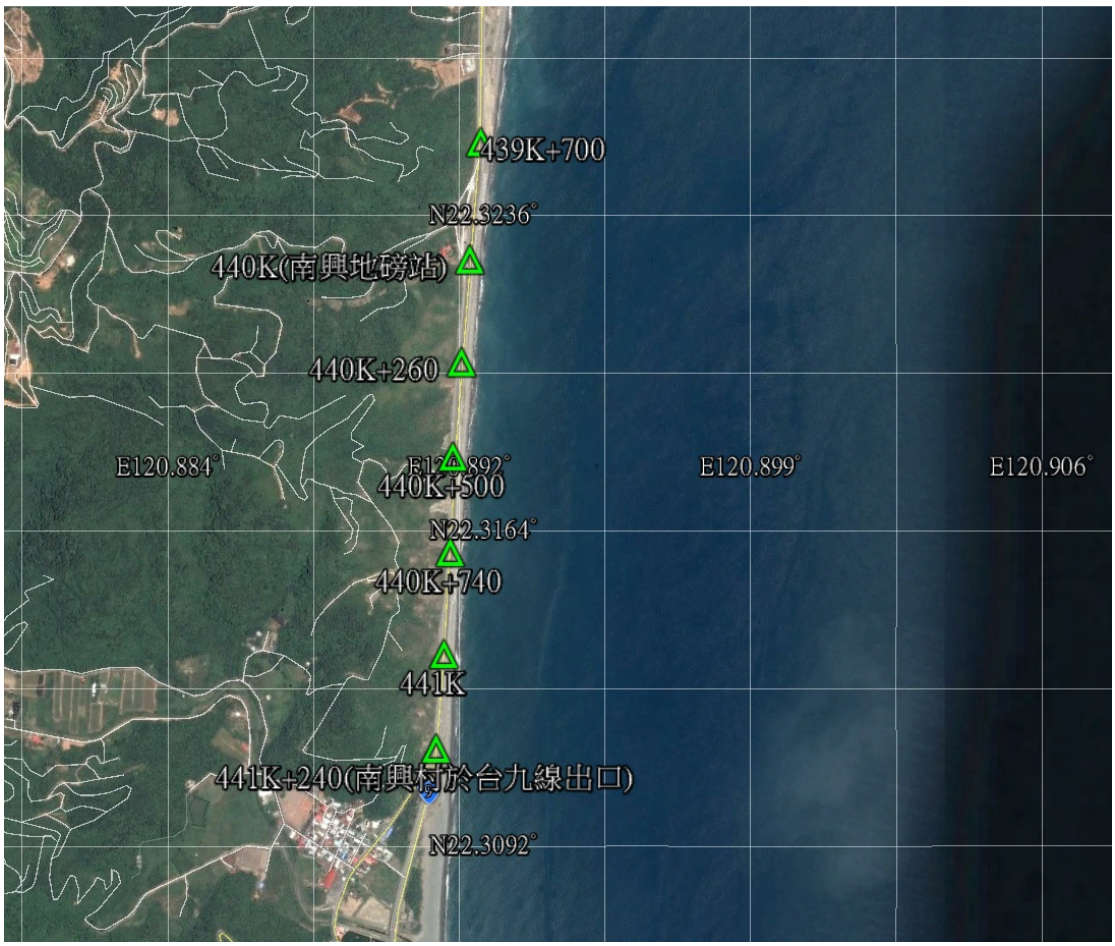


圖 10.10　Google earth 南興段 7 站位置(綠三角)。

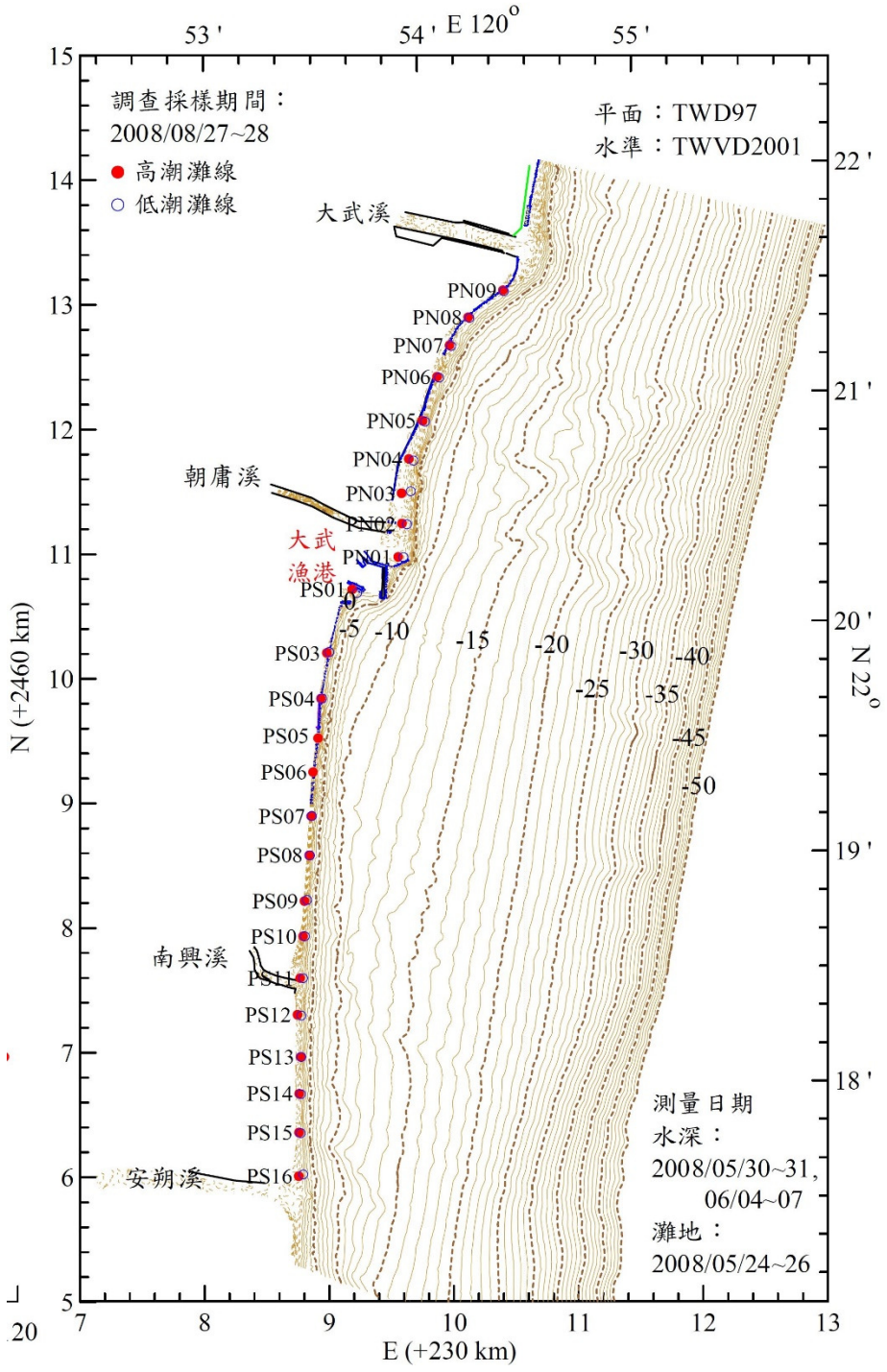


圖 10.11 水利署台東海岸（尚武段）監測調查計畫的等深圖。

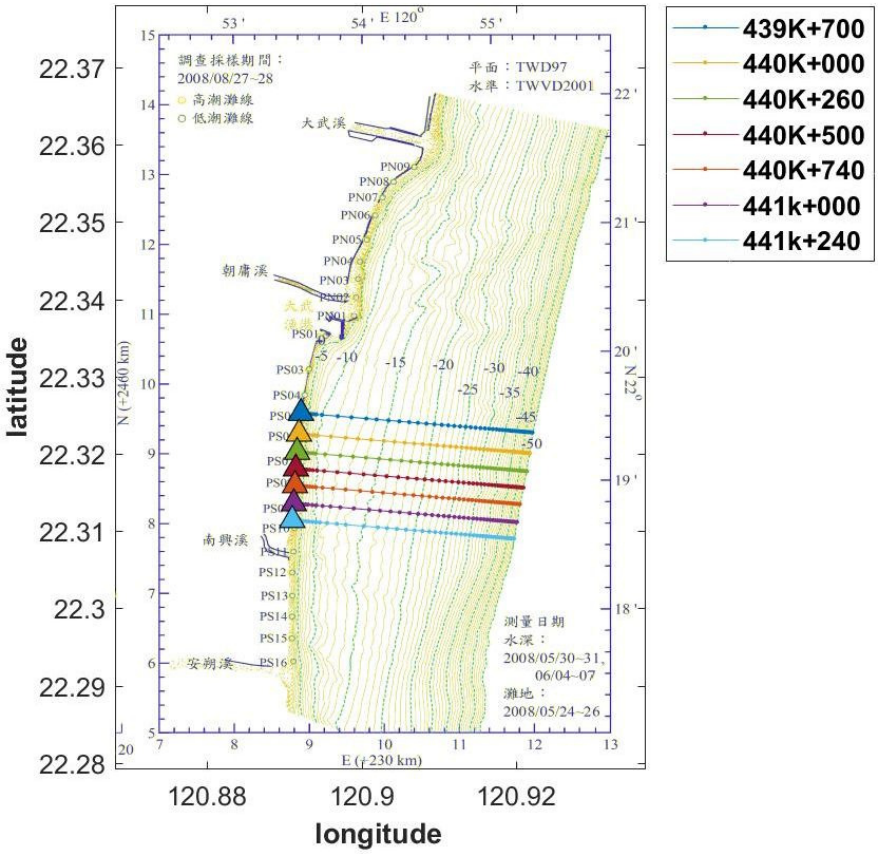


圖 10.12 南興段 7 站所取的向岸方向近岸地形切線

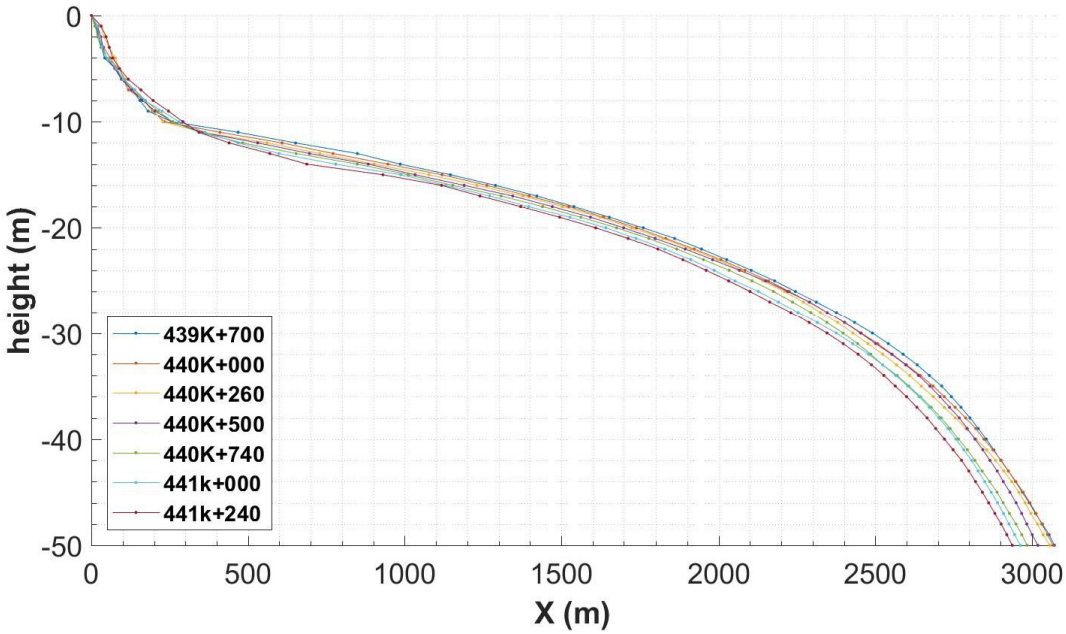


圖 10.13 南興段 7 站向岸方向的近岸地形

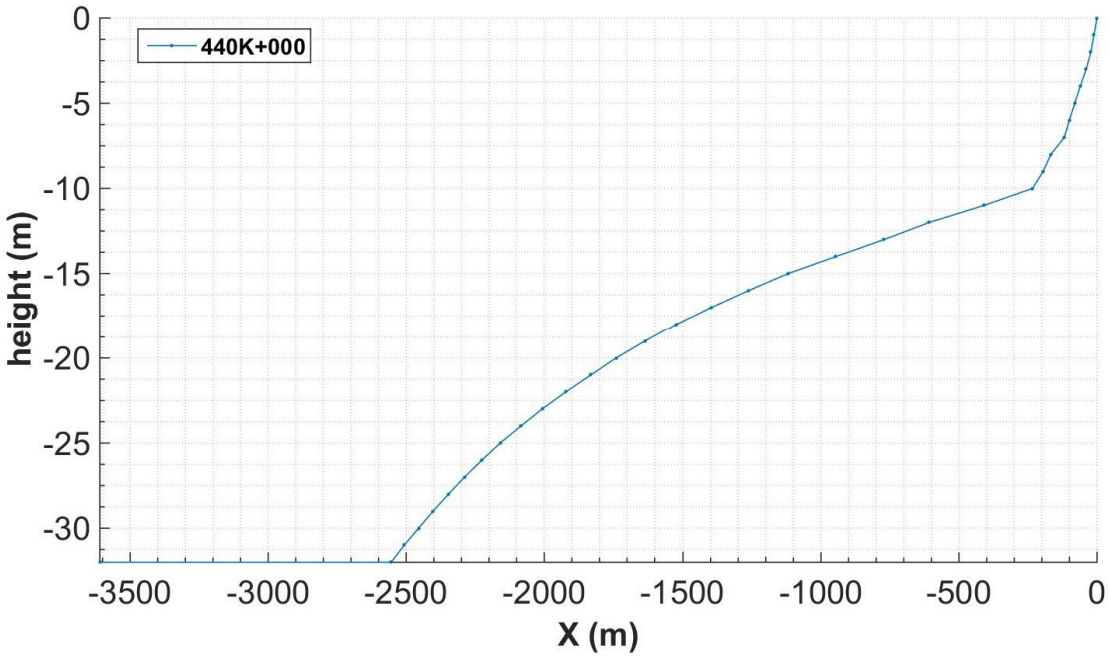


圖 10.14 南興段 440K+000 站的海域地形

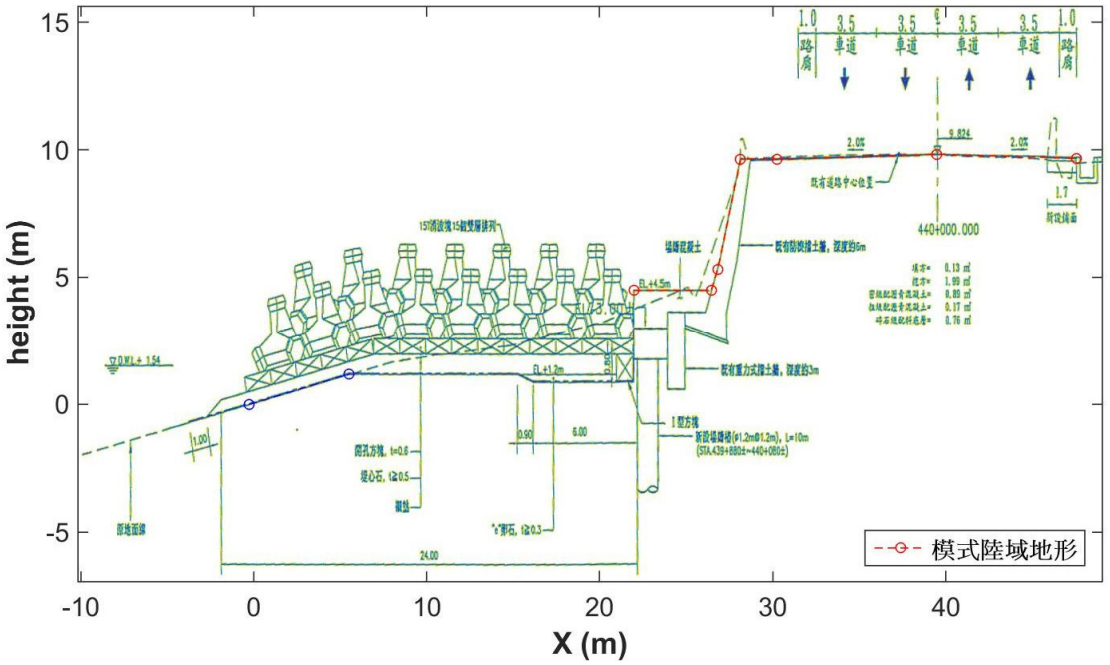


圖 10.15 南興段 440K+000 站橫斷面圖(取紅色虛線提供模式內插陸域地形)

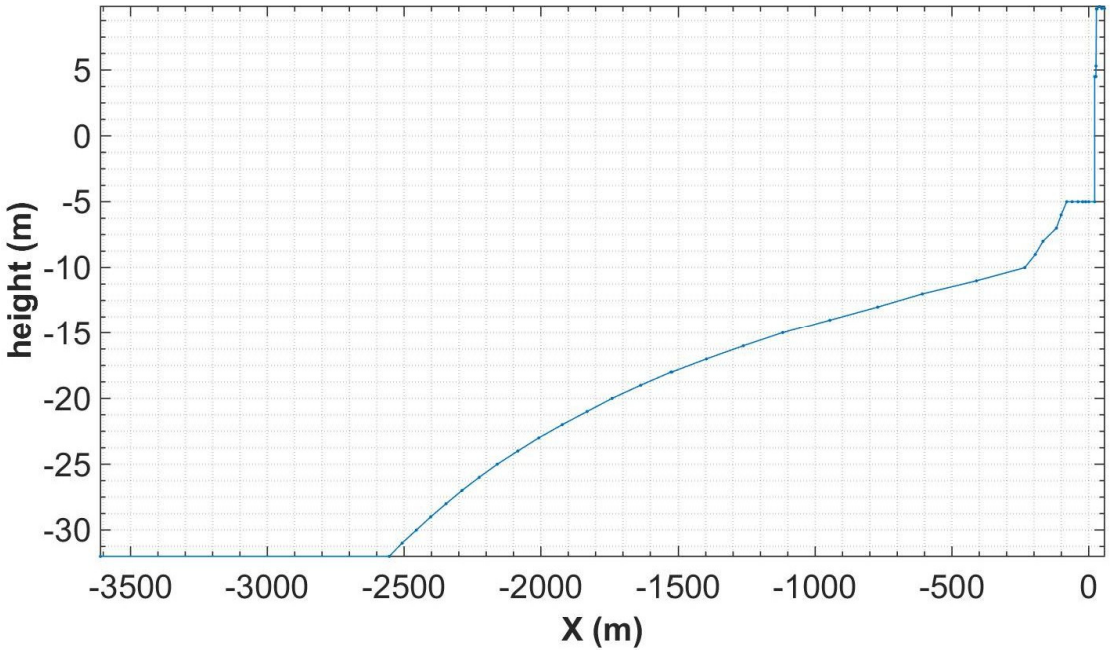


圖 10.16 南興段 440K+000 站提供模式內插使用的地形。

10.3 模式設定

模式區域水平 X 向和垂直 Y 向的範圍因每個站的地形差異而有所不同。網格解析度在 X 方向為 1m，而 Y 方向解析度除了入射波高為 5m 和 6m 時，解析度各為 0.3m、0.4m 之外，其他情況皆為 0.5m。模式的時間解析為調整式的時間步長，隨流速變化而不同。邊界條件的設定在頂部、海底以及右邊界(陸側)為牆，而左邊界(海側)使用連續的正弦波入射。模擬時間從第 1 個入射波進入模式區域開始，直到有 16 個入射波抵達道路平台旁的擋土牆之後結束。

圖 10.17 為氣象局發布的 2016 年尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡以及梅姬颱風歷史路徑，並從水利署位於臺東外海浮標(東經 121.14 度、北緯 22.722 度) 的逐時觀測資料中取出這 4 個颱風警報期間的示性波高和尖峰週期值如圖 10.18，台東浮標離南興和多良段的位置最近，所以沒有選擇較遠的花蓮港波浪統計資料作為上下限值的制定參考，由於接近百分之九十的示性波高都小於 6 公尺，再考慮異常波浪的定義一般

為兩倍示性波高以上。故在此將多良段模擬的入射波高上限訂在 12 公尺。而當入射波高達 9 公尺時，足以讓地勢較低的南興段在大部分的海況下發生平台溢淹，故以 9 公尺為上限。入射波高的下限值則是考慮當大部分的情況下不會發生平台溢淹為主。所以本文選擇 8、9、10、11 和 12m 等 5 種波高作為多良段的入射波高，而南興段則使用選擇 5、6、7、8 和 9m 等 5 種入射波高。波浪的入射週期皆使用 10 到 16 秒等 7 種週期，再搭配在-1.5 到 2m 範圍且間隔 0.5m 的初始水位作為潮位，對多良段 12 個站和南興段 7 個站進行浪襲道路的模擬，使用的情境條件如圖 10.19 和圖 10.20。所有模擬的初始條件為流速 0 且無擾動單一水位的水平面。

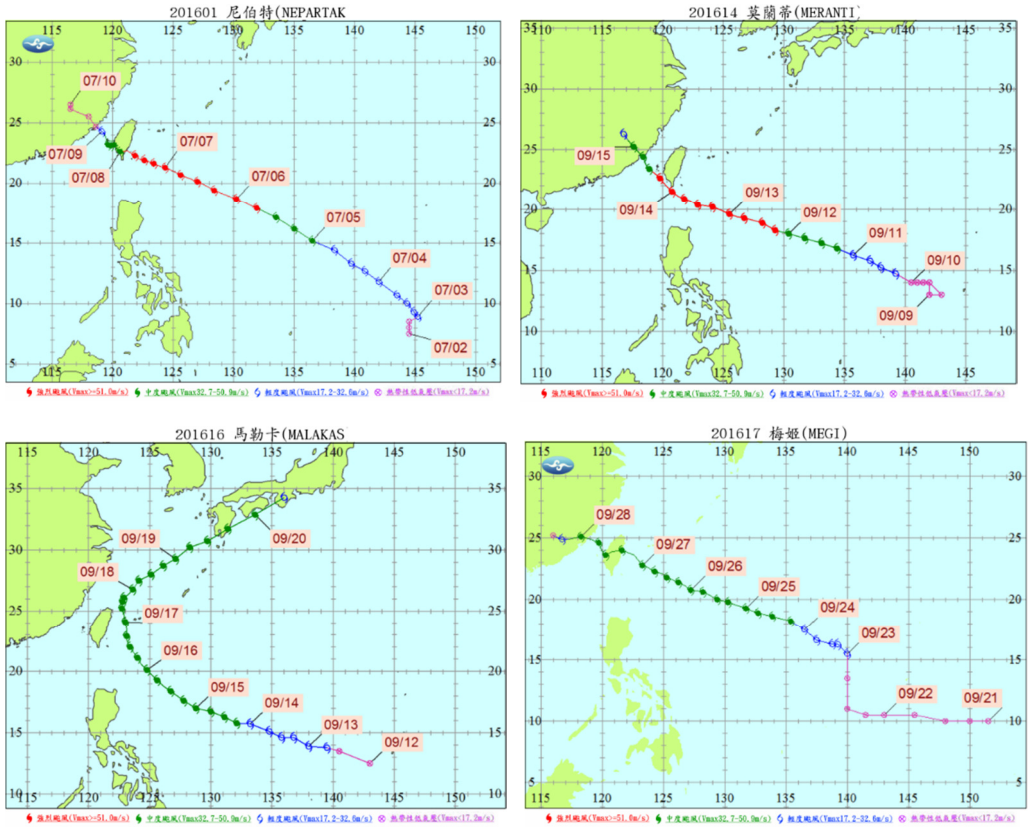


圖 10.17 2016 年尼伯特(左上)、莫蘭蒂(右上)、馬勒卡(左下)以及梅姬(右下)的移動路徑(中央氣象局颱風資料庫：http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning?list=2016)

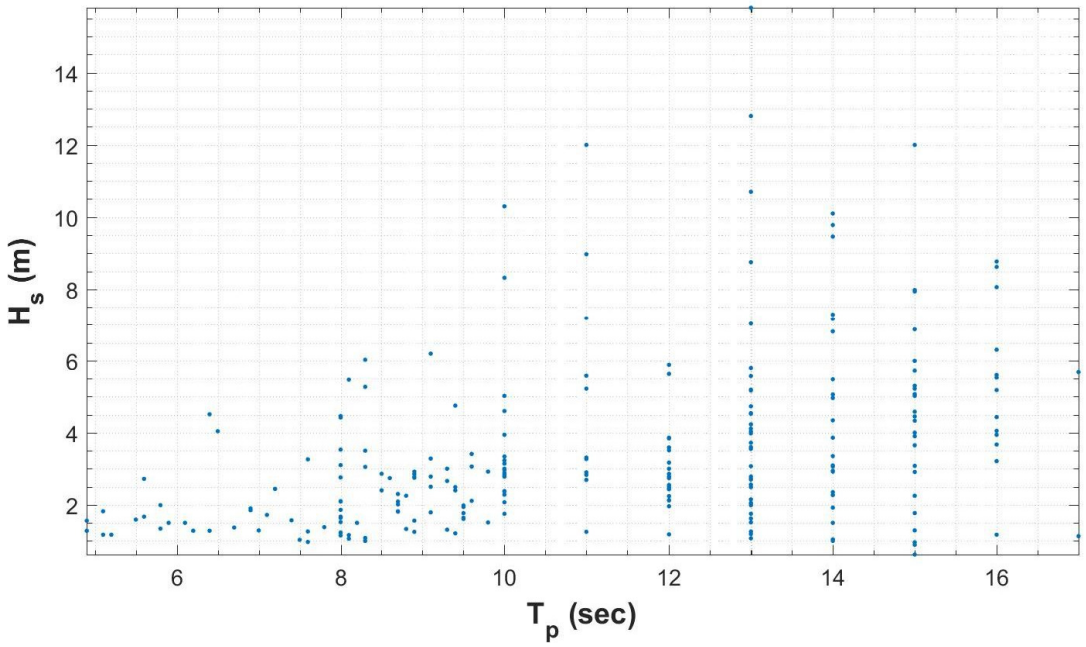


圖 10.18　2016 年尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡和梅姬颱風警報期間水利署台東外海浮標每小時的示性波高(H_s)對尖峰週期(T_p)

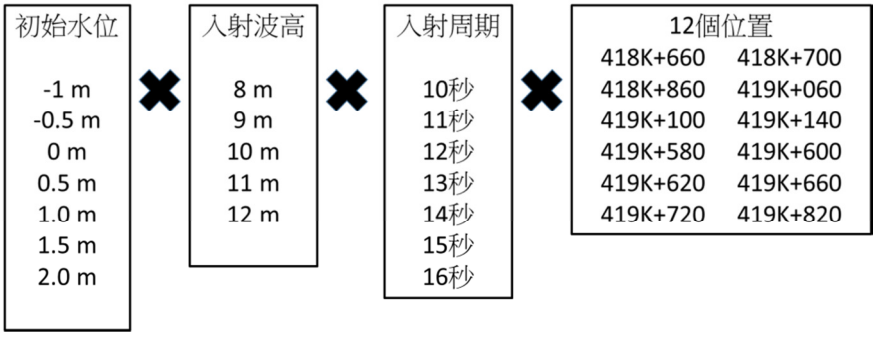


圖 10.19　多良段模式所使用的情境模擬條件

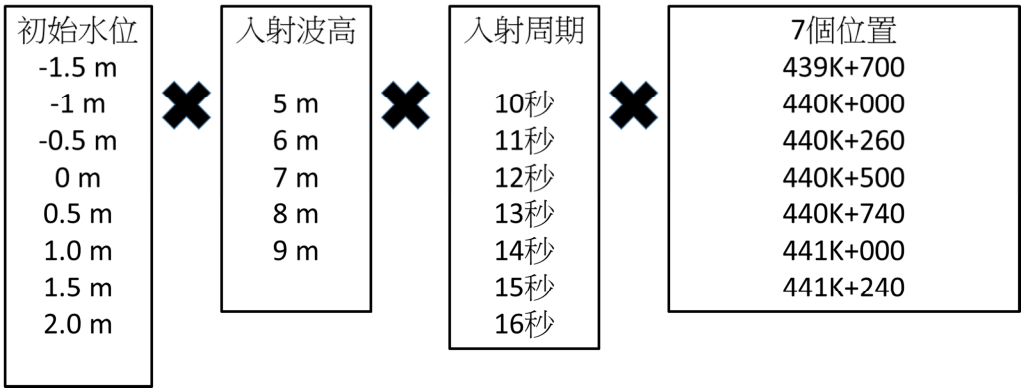


圖 10.20 南興段模式所使用的情境模擬條件

10.4 模擬流程

每個站的模擬流程先考慮情境條件最嚴重的情況。即先以最大的入射波高、週期和初始水位進行模擬。如果在此條件下發生道路平台溢淹，則以調降左邊界的入射波高、週期或初始水位後重啟新的模擬。重複同樣的方式降低情境條件直到平台不發生溢淹或達到情境條件的下限值為止，參照圖 10.21 的流程。最後分析所有模擬情境的模擬期間 VOF 空間分布最大值來探討發生道路溢淹的海況條件。

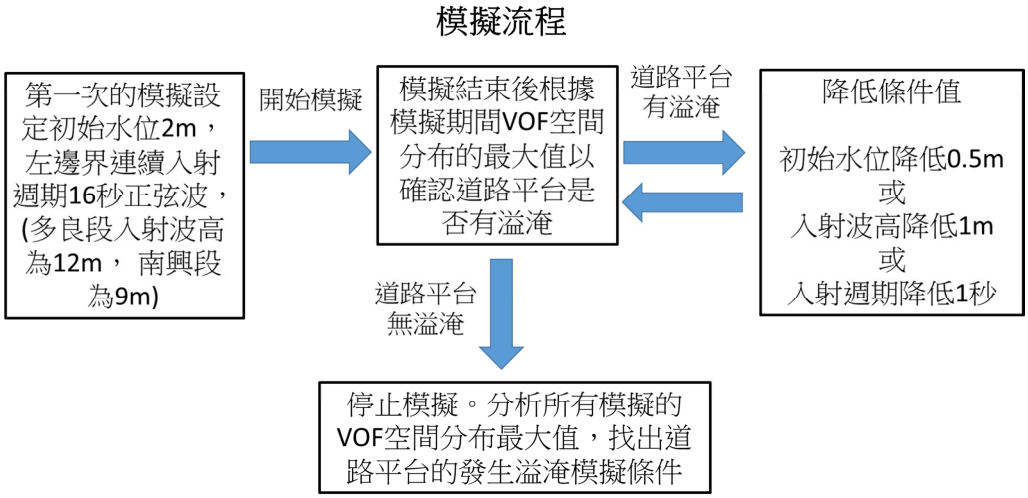


圖 10.21 各站的模擬流程圖

多良段以 419K+820 站為例，首先模擬左邊界入射波高 12m，週期 16 秒且初始水位 2m 的情境。其模擬時間第 50、100、200、300 和 400 秒的 VOF 空間分布如圖 10.22。模擬期間曾出現數次海浪造成平台的溢淹，如圖 10.23 在第 195 到 199 秒發生的越波事件。由於本次事件越波的浪花體積較小，所以模式將過小的 VOF 視為 0，使浪花在到達平台的地面前消失，故溢淹現象並不明顯。而在第 360 秒到 364 秒期間的越波事件如圖 10.24 可知平台的 x=40 到 45m 處出現溢淹(第 364 秒)。當模擬結束之後，輸出模擬期間 VOF 空間分布最大值來判斷溢淹與否，如圖 10.25。由該圖可知平台區域 X 座標 37 到 63 m 皆有溢淹的狀況，從橫斷面圖(圖 10.26)可知 37 到 45m 之間為非道路區域，45 到 63m 為寬 18m 的道路區域。

只要平台區域發生溢淹，不管是否為道路，皆將低海況條件進行新的模擬。因此後續進行的三個模擬分別降低週期 1 秒、波高 1m 以及初始水位 0.5m，其新的模擬條件如下：

1. 波高 12m，週期 15 秒，初始水位 2m
2. 波高 11m，週期 16 秒，初始水位 2m
3. 波高 12m，週期 16 秒，初始水位 1.5m

以此類推，持續模擬直到平台不發生溢淹或已達情境條件(圖 4.19)的下限值為止。

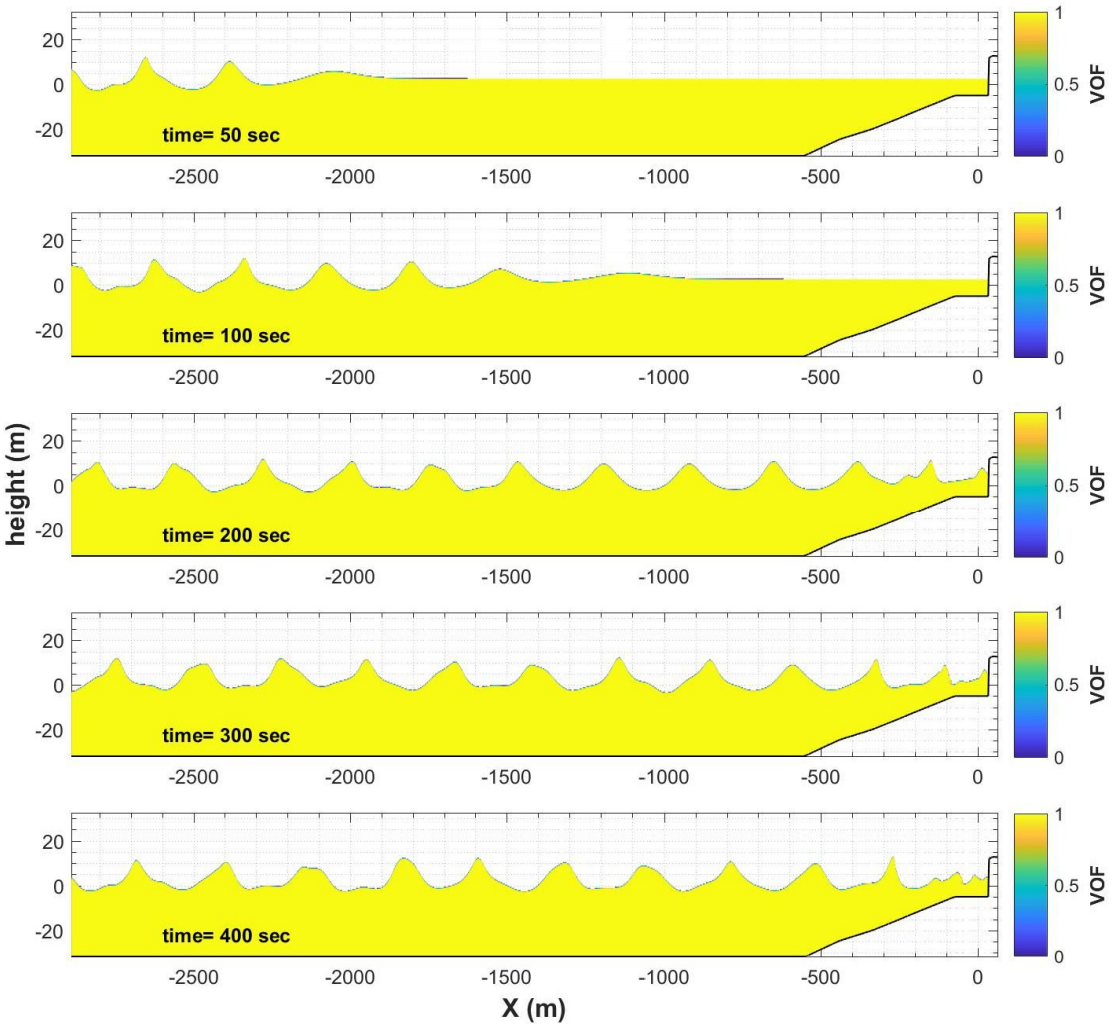


圖 10.22 419K+820 站模擬左邊界波高 12m、週期 16 秒的連續正弦波入射且初始水位為 2m 的 VOF 空間分布。

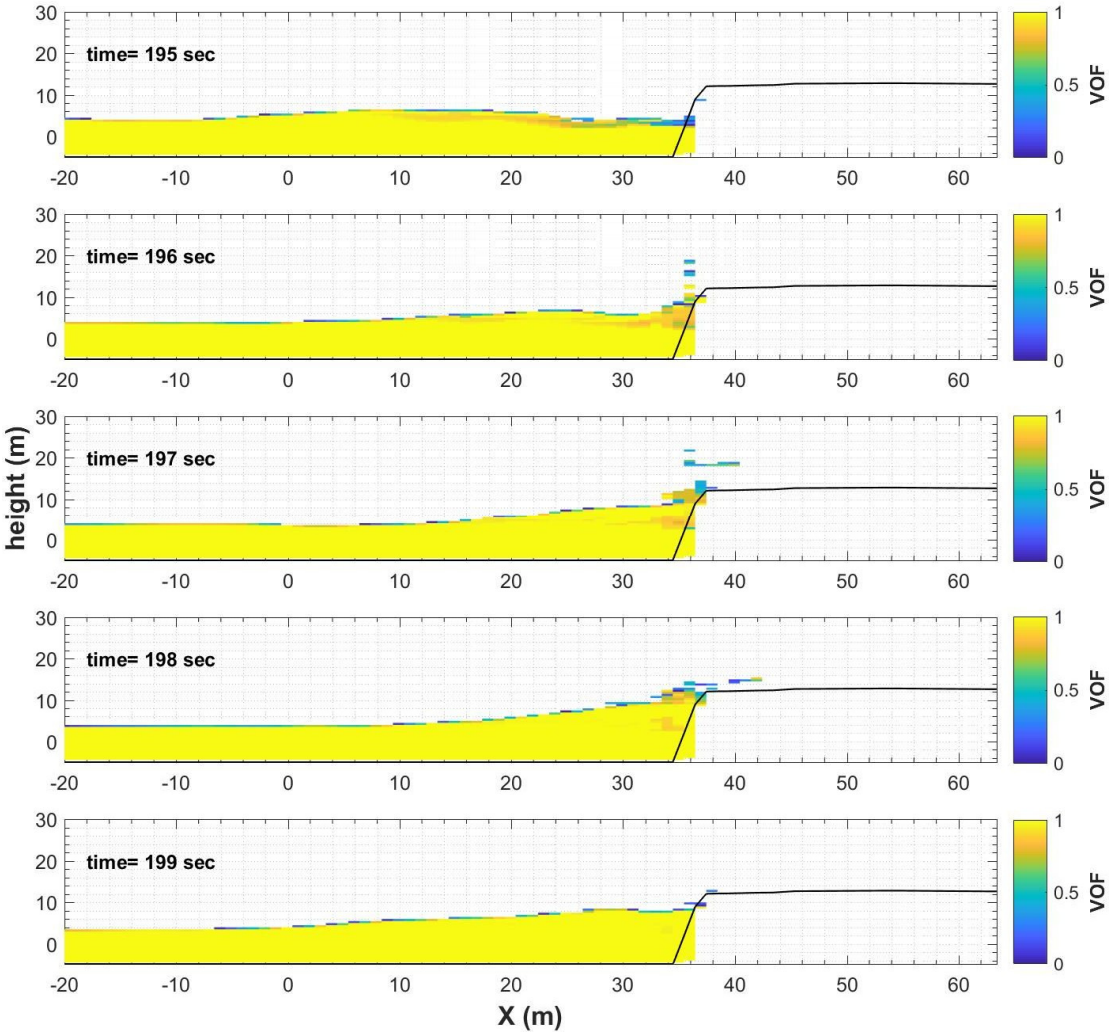


圖 10.23 419K+820 站於模擬期間第 195 到 199 秒發生越波事件。

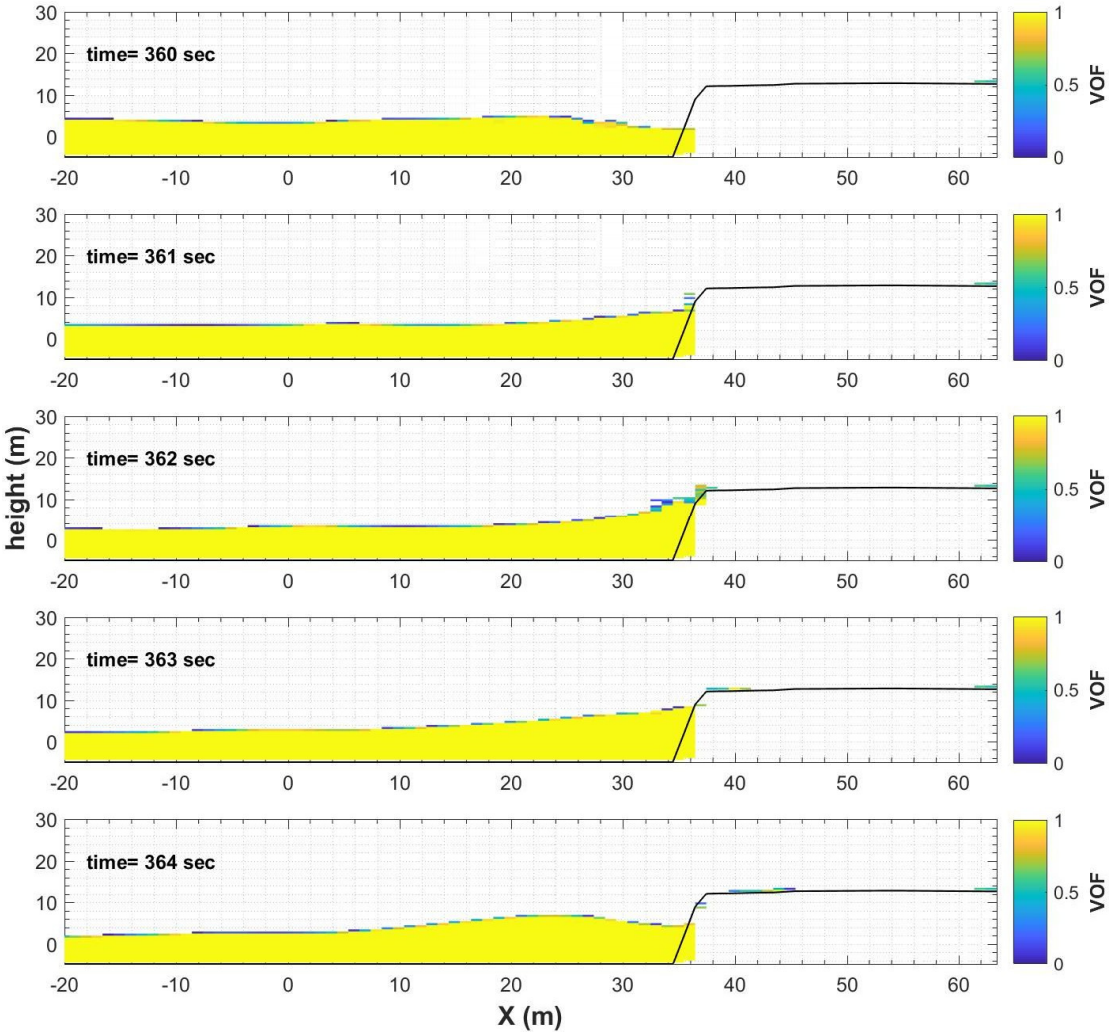


圖 10.24 419K+820 站於模擬期間第 360 到 364 秒發生的越波事件。

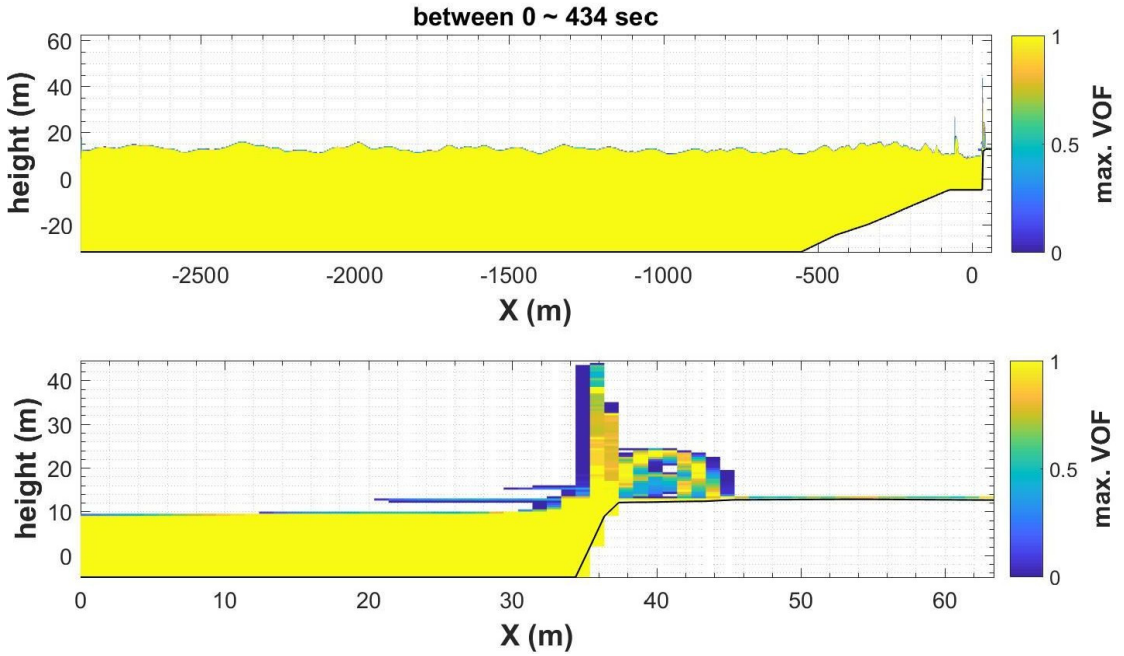


圖 10.25　419K+820 站的模擬期間 VOF 空間分布最大值。(情境條件為波高 12m、週期 16 秒連續入射正弦波且初始水位為 2m)

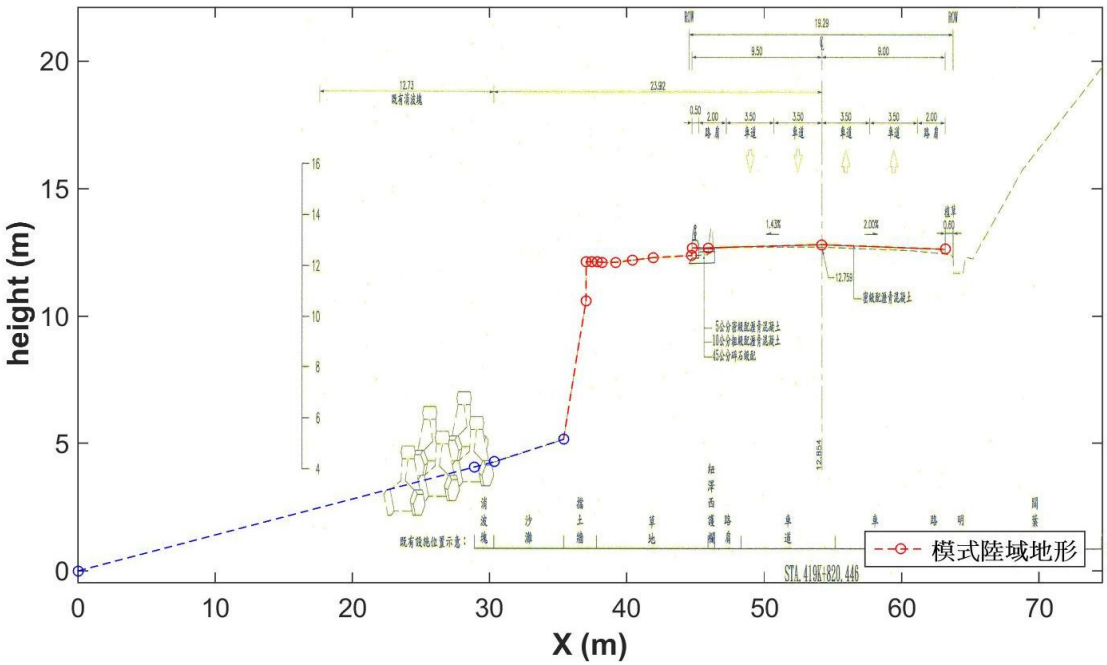


圖10.26 419K+820站橫斷面圖(取紅色虛線提供模式的地形內插)

南興段同樣先模擬最嚴重的條件，即初始水位 2m 的情況下，左邊界使用波高 9m、週期 16 秒的連續正弦波入射。以 440K+000 站為例，其模擬時間第 100、200、300、400 和 500 秒的 VOF 空間分布如圖 10.27。模擬期間發生數次海浪造成平台溢淹的情況，如圖 10.28 在第 339 到 343 秒發生的越波事件，讓原本已經溢淹的平台區域(X=28 到 46)情況加劇。最後由模擬結束所輸出模擬期間 VOF 空間分布來判斷溢淹情形，由圖 10.29 可知整個平台區域皆有溢淹的狀況(X 座標 28 到 47 m)。

同樣因平台區域發生溢淹，所以降低海況條件進行新的模擬。後續所進行的三個模擬分別降低週期 1 秒、波高 1m 以及初始水位 0.5m，其新的模擬條件如下：

1. 波高 9m，週期 15 秒，初始水位 2m
2. 波高 8m，週期 16 秒，初始水位 2m
3. 波高 9m，週期 16 秒，初始水位 1.5m

以此類推，持續模擬直到平台不發生溢淹或已達情境條件(圖 4.20)的下限值為止。

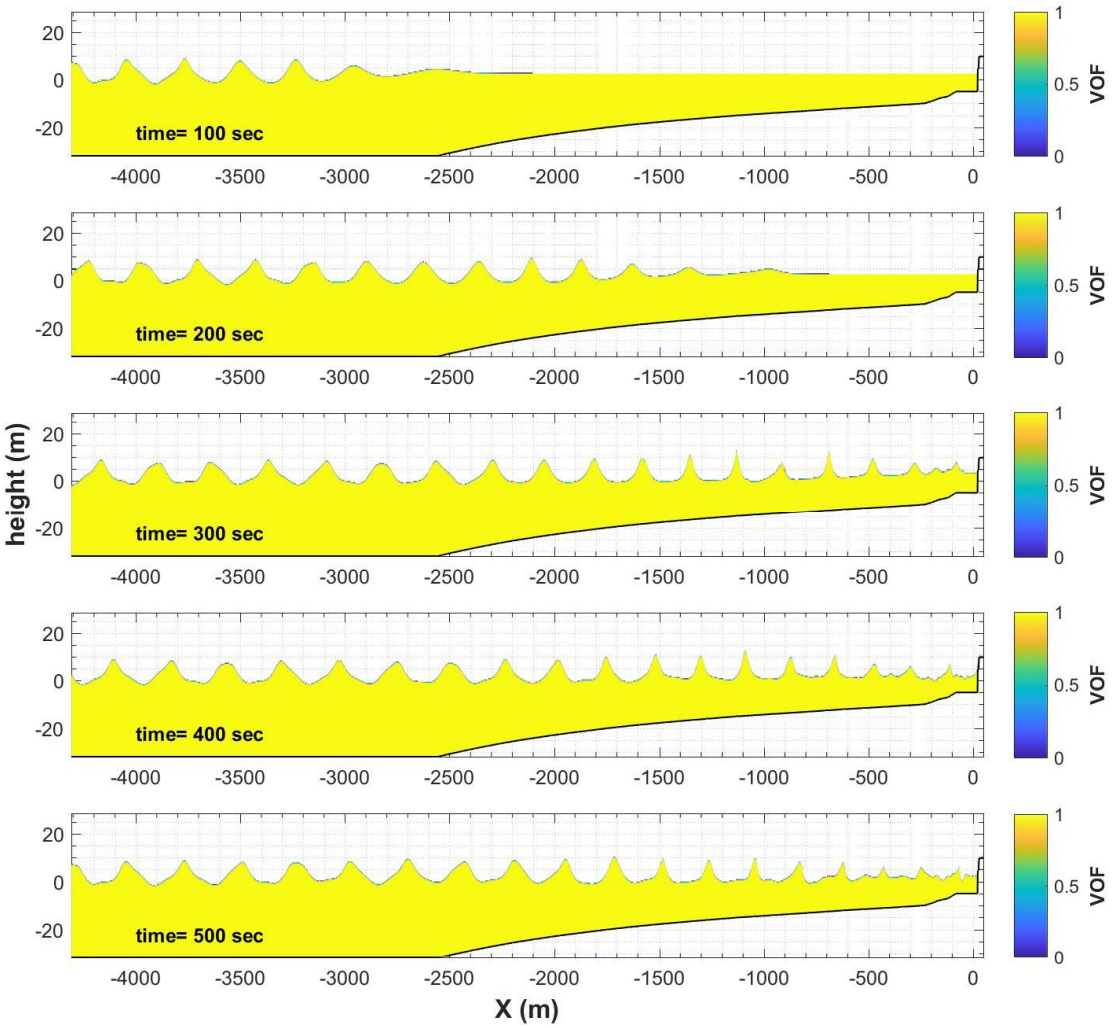


圖 10.27 440K+000 站模擬左邊界波高 9m、週期 16 秒的連續正弦波入射且初始水位為 2m 的 VOF 空間分布。

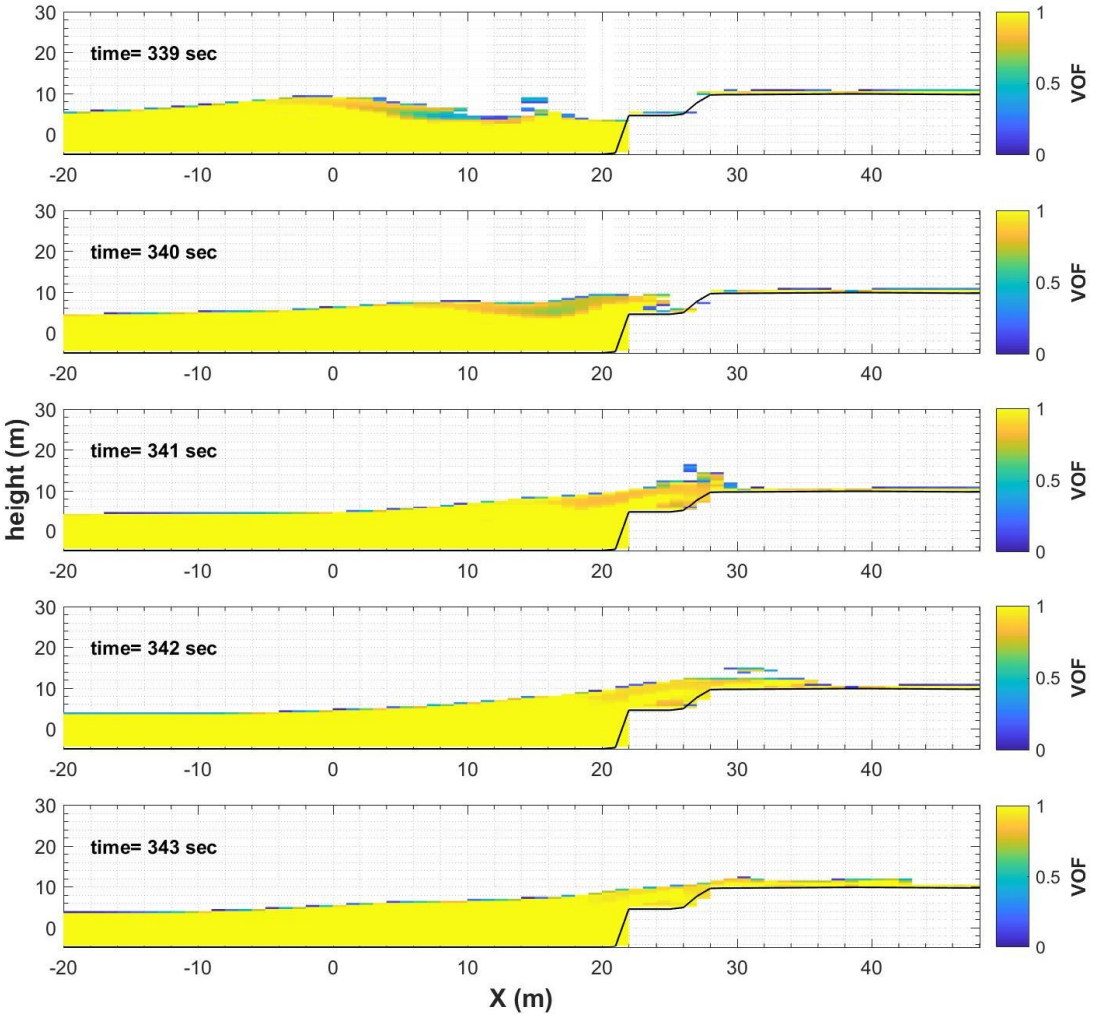


圖 10.28 440K+000 站於模擬期間第 339 到 343 秒發生的越波事件。

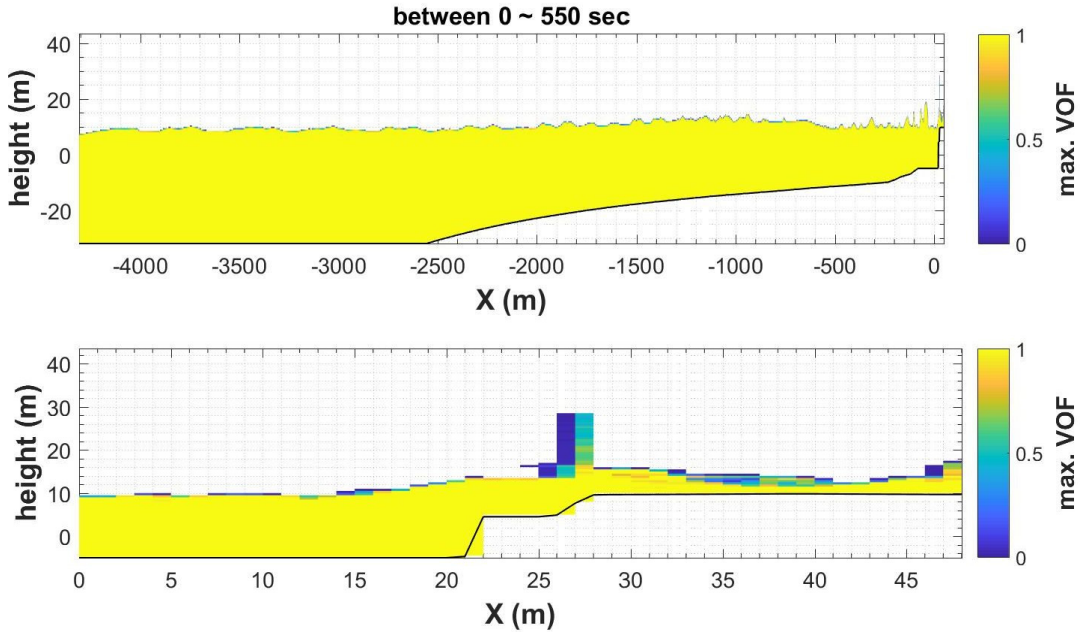


圖 10.29　440K+000 站的模擬期間 VOF 空間分布最大值。(情境條件為波高 9m、週期 16 秒連續入射正弦波且初始水位為 2m)

10.5 模擬結果

多良段因為有 12 個站不同的邊界入射波高、波浪週期以及初始水位條件，所以共進行 640 個浪襲道路平台的情境模擬。本文在後續的應用上，皆將情境的初始水位條件直接視為情境潮位條件。所有情境的平台溢淹距離如表 10-1 到 10-3，且溢淹距離的起點定義為靠海側的平台邊緣。結果顯示大部分的情境條件中，當入射波高越高，入射週期越大且初始水位值越高則越容易產生溢淹。就地形條件而言，大致上平台的高程越低越容易產生溢淹，但也有例外。例如 419K+620 站與 419K+660 站的平台高程各為 14.85m、13.41m，當潮位 2m、入射波高 10m 且週期為 15 秒的條件下，高程較高的 419K+620 站反而溢淹距離較長，其原因可能在原本的地形上，419K+620 站道路平台的離岸距離

比 419K+660 短約 20m 的關係。

為瞭解 418K+660 到 419K+140 以及 419K+580 到 419K+820 兩個區間的道路溢淹情形，在此僅取模式的道路位置，即 X 座標在離右邊界的路寬 18m 範圍內的平台溢淹情形如表 10-4 到 10-6，其溢淹距離的起點為靠海側的道路邊緣。640 個情境中有 141 個情境發生道路溢淹，其中溢淹範圍達整個路寬的情境約佔 76%(107 個)，主要是海浪溯上後的水體持續往道路內側流動所致。另外由波浪在接近平台區域所造成的最大溯上水位如表 10-7 到 10-9，由表可知在整體上最大溯上水位與入射波高、週期和潮位沒有明確的相關性，同波高不同週期的最大溯上水位不一定因為週期長就會有較大的最大溯上水位。

圖 10.30 為 141 個道路溢淹的情境在 12 個站的分布。由分布可知道路溢淹的情境在 2 個以下的站包括 418K+660、419K+100、419K+140、419K+580、419K+600 等 5 個站，亦即相對於其他 7 個站，這 5 個站較不易受浪襲影響，而這些站的平台高程也是相對高於其他 7 個站。溢淹情境最多的站在 419K+820，共有 59 個情境。其次為 418K+860，共有 24 個情境。溢淹情境較多的原因可能為 419K+820 與 418K+860 兩站的平台高程居 12 個站之中最低(約 12.3m 與 12.6m)。

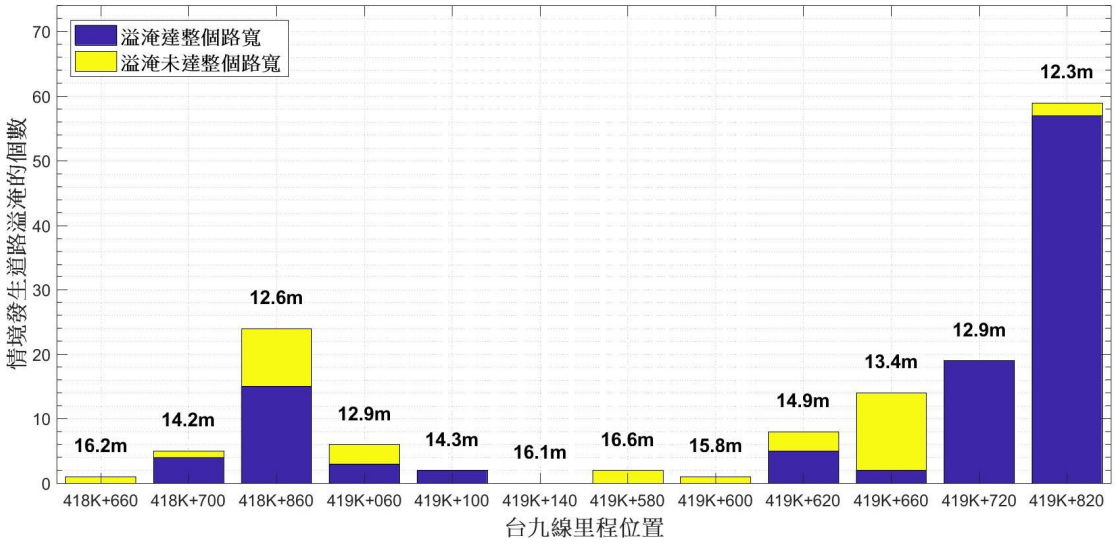


圖 10.30 多良段 12 站的發生道路溢淹的情境數量(長條圖上方標示的數字為各站的平台高程)。

表 10-1 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的道路平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 26m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 8m							波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
418K+700	1.5m						0	0						0	0
	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
418K+860	1.5m			0	0	0	1	0			0	0	0	0	0
	2m	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	4	4	19	19
419K+060	2m	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	0
419K+100	2m	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
419K+140	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+580	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+600	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+620	1.5m							1							1
	2m	0	0	0	0	3	3	9	0	0	1	3	1	10	4
419K+660	1.5m				0	0	1	0				0	0	1	0
	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
419K+720	1.5m		0	0	0	0	1	0		0	0	0	1	1	2
	2m	0	0	0	0	0	20	20	0	0	1	1	1	20	20
419K+820	0.5m					0	0	0					1	0	0
	1m				0	2	1	1				0	1	1	8
	1.5m		0	2	26	26	26	26		0	0	26	26	26	26
	2m	0	0	8	26	26	26	26	0	1	9	26	26	26	26

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-2 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 26m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 10m							波高 11m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	1.5m												0		
	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
418K+700	1.5m					1	0	0				0	0	0	0
	2m	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	19	0	0
418K+860	0.5m														1
	1m														4
	1.5m			0	0	1	0	0			0	1	0	0	19
	2m	0	0	0	4	19	19	19	0	0	0	4	19	0	19
419K+060	1.5m					0	0	0					0	0	1
	2m	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
419K+100	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
419K+140	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+580	2m	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+600	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+620	1.5m						8	2	0	0	1	3	3	2	3
	2m	0	0	0	3	8	26	8	0	0	1	1	26	26	2
419K+660	1.5m				0	1	0	0			0	0	0	0	0
	2m	0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	18	0	0
419K+720	1m					0	0	0					0	0	0
	1.5m		0	0	0	20	1	1		0	1	1	20	0	20
	2m	0	0	0	0	20	20	20	0	0	0	1	20	20	20
419K+820	0.5m				0	1	0	2				0	1	0	1
	1m			0	8	26	26	26			0	8	26	26	26
	1.5m		0	1	26	26	26	26		0	26	26	26	26	26
	2m	0	0	26	26	26	26	26	1	0	26	26	26	26	26

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-3 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 26m) *附註：斜線表示無模擬該情境。

省道里程平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	2m	0	0	0	1	0	0	0
418K+700	1.5m					0	0	1
	2m	0	0	0	1	19	19	19
418K+860	0m							0
	0.5m						1	19
	1m						2	19
	1.5m			0	0	0	3	19
	2m	0	0	19	19	19	4	19
419K+060	0.5m						1	0
	1m						2	19
	1.5m					0	1	19
	2m	0	0	1	1	3	1	19
419K+100	0.5m							0
	1m							1
	1.5m							19
	2m	0	0	0	1	0	0	19
419K+140	2m	0	0	0	0	0	0	0
419K+580	2m	0	0	0	0	1	0	0
419K+600	1.5m					0		
	2m	0	0	0	0	2	0	0
419K+620	1.5m	0	0	2	8	3	1	8
	2m	3	0	1	23	26	26	8
419K+660	1m				0			
	1.5m			0	2	0	0	0
	2m	0	0	0	16	18	0	1
419K+720	1m				0	0	1	1
	1.5m		0	1	2	20	20	20
	2m	0	0	0	1	20	20	20
419K+820	-1m							0
	-0.5m							9
	0m						1	26
	0.5m				0	0	8	26
	1m			1	26	26	26	26
	1.5m		0	26	26	26	26	26
	2m	0	1	26	26	26	26	26

表 10-4 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 26m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 8m							波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
418K+700	1.5m						0	0						0	0
	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
418K+860	1.5m			0	0	0	0	0			0	0	0	0	0
	2m	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	18	18
419K+060	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
419K+100	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+140	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+580	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+600	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+620	1.5m							0							0
	2m	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0
419K+660	1.5m				0	0	1	0				0	0	1	0
	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
419K+720	1.5m		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
	2m	0	0	0	0	0	18	18	0	0	0	0	0	18	18
419K+820	0.5m					0	0	0					0	0	0
	1m				0	0	0	0				0	0	0	0
	1.5m		0	0	18	18	18	18		0	0	18	18	18	18
	2m	0	0	0	18	18	18	18	0	0	1	18	18	18	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-5 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 26m)

省道里程 平台高程 平台高程	潮位	波高 10m							波高 11m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	1.5m												0		
16.2m	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
418K+700	1.5m					0	0	0				0	0	0	0
14.2m	2m	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	18	0	0
418K+860	0.5m														0
	1m														3
12.6m	1.5m			0	0	0	0	0			0	0	0	0	18
	2m	0	0	0	3	18	18	18	0	0	0	3	18	0	18
419K+060	1.5m					0	0	0					0	0	0
12.9m	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+100 14.3m	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+140 16.1m	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+580	2m	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+600	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
419K+620	1.5m						0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.9m	2m	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	18	18	0
419K+660	1.5m				0	1	0	0			0	0	0	0	0
13.4m	2m	0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	18	0	0
419K+720	1m					0	0	0					0	0	0
12.9m	1.5m		0	0	0	18	0	0		0	0	0	18	0	18
	2m	0	0	0	0	18	18	18	0	0	0	0	18	18	18
419K+820	0.5m				0	0	0	0				0	0	0	0
	1m			0	0	18	18	18			0	0	18	18	18
12.3m	1.5m		0	0	18	18	18	18		0	18	18	18	18	18
	2m	0	0	18	18	18	18	18	0	0	18	18	18	18	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-6 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 26m)

省道里程 平台高程 平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660 16.2m	2m	0	0	0	0	0	0	0
418K+700 14.2m	1.5m					0	0	0
	2m	0	0	0	0	18	18	18
418K+860 12.6m	0m							0
	0.5m						0	18
	1m						1	18
	1.5m			0	0	0	2	18
	2m	0	0	18	18	18	3	18
419K+060 12.9m	0.5m						0	0
	1m						1	18
	1.5m					0	0	18
	2m	0	0	0	0	2	0	18
419K+100 14.3m	0.5m							0
	1m							0
	1.5m							18
	2m	0	0	0	0	0	0	18
	1.5m		0	18	18	18	18	18
	2m	0	0	18	18	18	18	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-6(續) 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 26m)

省道里程 平台高程 平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
	2m	0	0	0	0	0	0	18
419K+140 16.1m	2m	0	0	0	0	0	0	0
419K+580 16.6m	2m	0	0	0	0	1	0	0
419K+600 15.8m	1.5m					0		
	2m	0	0	0	0	2	0	0
419K+620 14.9m	1.5m	0	0	0	0	0	0	0
	2m	0	0	0	15	18	18	0
419K+660 13.4m	1m				0			
	1.5m			0	2	0	0	0
	2m	0	0	0	16	18	0	1
419K+720 12.9m	1m				0	0	0	0
	1.5m		0	0	0	18	18	18
	2m	0	0	0	0	18	18	18
419K+820 12.3m	-1m							0
	-0.5m							1
	0m						0	18
	0.5m				0	0	0	18
	1m			0	18	18	18	18
	1.5m		0	18	18	18	18	18
	2m	0	0	18	18	18	18	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-7 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程 平台高程	潮位	波高 8m							波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660 16.2m	2m	8.2	8.7	10.1	11.0	12.2	13.5	15.1	8.6	8.9	9.1	10.9	12.3	15.3	11.1
418K+700 14.2m	1.5m						14.3	11.3						10.4	12.7
	2m	8.8	9.9	11.9	12.6	12.7	13.3	14.3	9.2	9.5	10.5	11.9	13.3	14.3	14.0
418K+860 12.6m	1.5m			11.0	10.0	10.4	12.3	10.0			10.4	11.3	12.0	11.8	11.3
	2m	8.0	9.3	10.3	11.3	11.0	12.3	12.4	9.0	9.5	10.9	12.5	12.5	13.1	12.9
419K+060 12.9m	2m	8.7	8.7	9.9	10.1	10.8	11.6	13.1	8.4	11.0	10.6	10.2	13.2	13.0	10.7
419K+100 14.3m	2m	9.3	8.9	9.8	11.2	11.1	12.0	14.2	9.1	10.2	12.8	11.8	12.4	14.2	12.0
419K+140 16.1m	2m	9.0	8.6	9.6	9.9	9.7	11.6	13.5	8.5	9.1	11.1	11.6	12.8	14.6	10.6
419K+580 16.6m	2m	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	12.8	16.7	0.0	0.0	0.0	11.8	12.2	14.6	13.9
419K+600 15.8m	2m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.4	15.1	0.0	0.0	11.4	12.3	11.5	15.1	12.8
419K+620 14.9m	1.5m							11.8							11.8
	2m	9.3	10.2	11.1	11.6	11.8	11.8	12.4	9.8	11.1	12.0	11.8	11.8	12.6	11.8
419K+660 13.4m	1.5m				8.7	10.0	13.3	9.4				9.3	12.7	13.3	9.5
	2m	8.5	9.0	11.3	11.1	12.4	12.7	12.7	9.1	10.0	10.7	10.4	13.1	13.3	13.3
419K+720 12.9m	1.5m		9.4	11.1	12.4	12.3	13.1	12.5		9.4	10.3	11.2	13.3	12.9	12.9
	2m	8.8	10.3	11.4	11.9	11.9	13.5	13.5	9.3	11.0	12.8	12.9	13.2	13.8	13.4
419K+820 12.3m	0.5m					10.4	10.3	10.9					12.1	10.4	10.0
	1m				11.8	12.1	12.4	12.1				11.9	12.1	12.1	12.4
	1.5m		11.4	12.1	12.9	12.4	13.1	12.7		11.4	10.9	12.4	12.6	12.6	12.6
	2m	10.4	11.7	12.4	12.6	12.6	12.8	14.0	9.9	12.1	12.6	13.0	12.8	14.4	12.8

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-8 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程 平台高程	潮位	波高 10m							波高 11m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660 16.2m	1.5m												9.1		
	2m	8.0	9.4	10.8	13.8	15.2	11.6	10.9	8.4	10.6	12.1	14.4	16.4	10.8	11.6
418K+700 14.2m	1.5m					14.3	9.9	11.4				11.7	11.3	10.9	12.4
	2m	10.1	10.8	11.0	12.7	14.4	14.4	11.4	9.0	11.4	12.2	14.4	14.8	12.3	12.7
418K+860 12.6m	0.5m														12.3
	1m														12.6
	1.5m			10.1	12.2	12.3	11.5	11.0			10.8	12.3	9.4	11.8	12.8
	2m	8.5	11.4	10.0	12.4	13.0	12.8	12.8	9.5	10.1	11.3	12.4	13.1	11.2	12.8
419K+060 12.9m	1.5m					10.3	10.1	11.3					10.7	11.4	12.7
	2m	9.0	9.2	10.4	12.7	12.7	11.3	10.9	9.4	10.5	11.4	13.2	12.8	11.8	11.4
419K+100 14.3m	2m	10.2	10.7	10.2	13.7	12.9	12.1	12.4	9.8	9.7	11.1	12.6	14.2	13.1	13.8
419K+140 16.1m	2m	8.8	8.3	10.1	12.4	14.2	11.1	10.6	9.2	9.0	11.0	14.6	14.7	10.7	12.7
419K+580 16.6m	2m	0.0	0.0	0.0	13.4	14.2	16.7	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	15.2	14.2	11.7
419K+600 15.8m	2m	0.0	0.0	0.0	12.3	13.5	15.7	15.2	0.0	0.0	0.0	11.7	15.2	13.1	12.0
419K+620 14.9m	1.5m						12.5	12.0	8.5	9.6	11.8	11.8	11.8	12.0	11.8
	2m	9.8	9.7	10.9	11.8	12.6	12.4	12.5	11.3	10.3	11.9	12.3	12.8	12.5	12.0
419K+660 13.4m	1.5m				12.0	13.3	9.7	12.7			10.7	12.7	10.5	11.2	12.7
	2m	9.9	9.2	10.8	13.2	13.3	13.3	13.3	9.3	13.3	12.3	12.8	14.0	11.1	12.2
419K+720 12.9m	1m					12.4	11.4	11.7					10.4	12.4	12.2
	1.5m		9.7	11.1	11.3	13.5	13.3	12.9		10.5	12.7	12.9	13.4	12.0	13.3
	2m	9.4	9.7	10.8	12.2	13.3	13.6	13.5	9.4	10.2	11.0	13.0	13.5	13.4	13.3
419K+820 12.3m	0.5m				10.4	12.1	10.9	12.1				9.8	12.1	10.4	12.1
	1m			11.2	12.4	12.6	12.8	12.6			11.4	12.3	12.6	12.6	12.7
	1.5m		10.9	12.1	12.8	12.6	12.5	12.6		11.4	12.6	12.6	12.5	12.6	12.6
	2m	10.3	11.5	12.5	12.6	12.6	12.8	12.6	12.1	11.4	12.6	12.6	15.6	12.6	12.6

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-9 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660 16.2m	2m	8.5	11.2	13.1	16.4	11.3	11.7	13.1
418K+700 14.2m	1.5m					11.2	12.6	14.4
	2m	10.6	11.9	12.9	14.3	14.8	14.8	14.8
418K+860 12.6m	0m							11.3
	0.5m						12.3	13.1
	1m						12.4	13.3
	1.5m			11.9	11.0	11.9	12.4	13.1
	2m	9.5	10.5	12.7	12.8	13.0	12.5	12.8
419K+060 12.9m	0.5m						13.0	11.8
	1m						13.0	13.3
	1.5m					12.1	12.9	13.5
	2m	11.7	10.6	12.8	13.2	13.0	13.0	13.5
419K+100 14.3m	0.5m							12.5
	1m							14.4
	1.5m							14.9
	2m	10.2	10.1	12.6	14.2	11.7	14.0	14.6

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-9(續) 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
419K+140 16.1m	2m	9.5	10.5	13.1	14.6	11.3	13.1	14.8
419K+580 16.6m	2m	0.0	0.0	11.7	13.9	16.7	12.6	13.9
419K+600 15.8m	1.5m					12.1		
	2m	0.0	0.0	11.2	13.7	15.8	15.7	14.0
419K+620 14.9m	1.5m	9.7	11.6	12.0	12.6	11.8	12.1	12.8
	2m	11.8	10.8	12.4	12.6	12.7	12.0	12.6
419K+660 13.4m	1m				9.7			
	1.5m			11.7	13.4	11.2	13.1	12.9
	2m	10.9	10.1	10.8	13.8	14.3	12.3	13.3
419K+720 12.9m	1m				12.5	10.4	12.8	13.3
	1.5m		10.8	13.2	13.0	13.5	13.5	13.4
	2m	9.4	11.5	11.9	13.3	15.2	13.5	13.5
419K+820 12.3m	-1m							10.9
	-0.5m							12.6
	0m						12.1	13.0
	0.5m				11.4	10.3	12.3	12.6
	1m			12.1	12.5	12.6	12.5	12.7
	1.5m		10.4	12.5	14.1	12.4	12.5	12.6
	2m	10.4	12.1	13.4	12.9	12.8	12.6	12.6

附註：斜線表示無模擬該情境。

南興段有因應 7 個站的不同入射波高、波浪週期以及初始水位條件，所以共進行 781 個浪襲道路平台的情境模擬。在此同樣將初始水位條件視為潮位條件。全部情境的平台溢淹距離如表 10-10 到 10-12。大致趨勢與多良段相同，當入射波高越高，入射週期越大且初始水位值越高則越容易產生溢淹。

為瞭解 439K+700 到 441K+240 區間的道路溢淹情形，在此僅取模式的道路位置，即 X 座標在離右邊界的路寬 16m 範圍內的平台溢淹情形如表 10-13 到 10-15，其溢淹距離的起點為靠海側的道路邊緣。781 個情境中有 534 個情境發生道路溢淹，其中溢淹範圍達整個路寬的情境約佔 85%(453 個)。另外由波浪在接近平台區域所造成的最大溯上水位如表 10-16 到 10-18。與多良段相同，整體上最大溯上水位與入射波高、週期和潮位皆無明確的相關性。

圖 10.31 為 534 個道路溢淹的情境在 7 個站的分布圖。大致上件數由 439K+700 站往 441K+240 站方向減少，可能與各站的平台高程有直接關係。441K+240 站除了平台高程最高之外，其原本地形的平台離岸距離為四十幾公尺，而其他 6 站為二十幾公尺。高程高與離岸距離遠使 441K+240 站有僅 20 個情境發生溢淹。

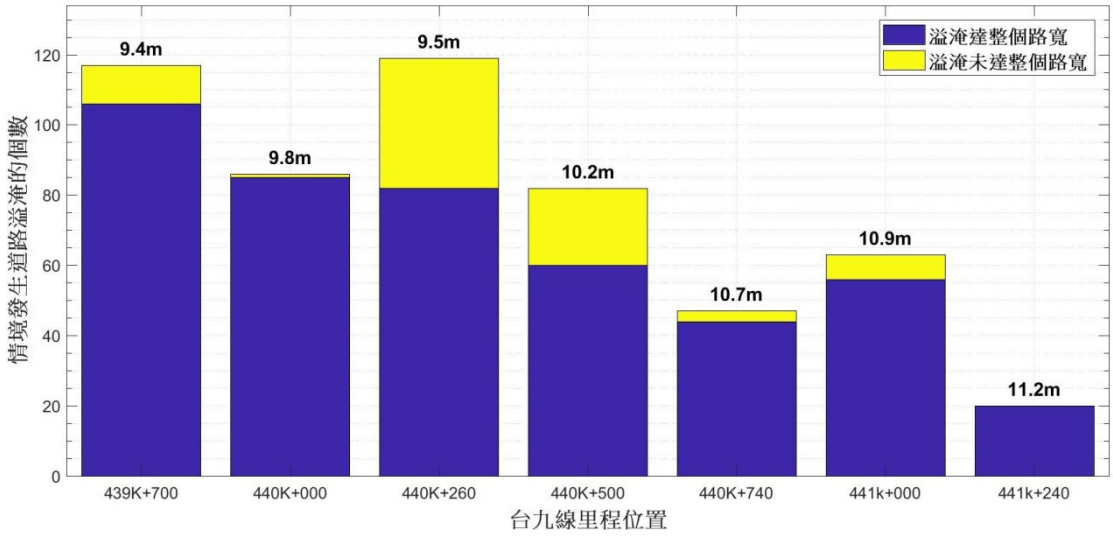


圖 10.31 南興段 7 站的發生道路溢淹的情境數量(長條圖上方標示為各站的平台高程)。

表 10-10 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 5m							波高 6m						
		週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒	週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒
439K+700 9.4m	0m							0						0	1
	0.5m							3				0	1	2	3
	1m			0	1	1	1	14			1	17	17	17	17
	1.5m			13	12	12	14	14	0	1	17	17	17	17	17
	2m	0	1	11	12	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
440K+000 9.8m	0.5m												0	1	0
	1m						0	2			0	1	20	20	20
	1.5m				1	1	11	20		0	20	20	20	20	20
	2m	0	0	2	20	20	20	20	0	20	20	20	20	20	20
440K+260 9.5m	0m												1	0	1
	0.5m							0					2	17	1
	1m				1	1	0	3			1	0	17	17	17
	1.5m			1	2	17	17	17	0	1	2	17	17	17	17
	2m	0	1	17	17	17	17	17	3	17	17	17	17	17	17
440K+500 10.2m	0m												0	0	
	0.5m							0					3	4	0
	1m						0	18			1	0	18	5	18
	1.5m						18	18		1	4	6	18	18	18
	2m	0	0	1	1	1	18	18	0	6	18	18	18	18	18
440K+740 10.7m	1m							1							1
	1.5m						0	4			0	1	1	1	18
	2m	0	1	1	1	0	17	17	0	0	18	18	18	18	18
441K+000 10.9m	0.5m							0							
	1m							7						1	0
	1.5m					0	1	8						3	17
	2m	0	0	0	0	12	14	17	0	0	1	1	1	17	17
441K+240 10.9m	1.5m														0
	2m	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-11 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒	週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒
439K+700 9.4m	-1m														1
	-0.5m						0	1						1	17
	0m				0	1	17	17		0	1	1	0	17	17
	0.5m			1	17	17	17	17	0	1	17	17	17	17	17
	1m	0	1	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	1.5m	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	2m	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
440K+000 9.8m	0m						0	0			0	0	1	0	1
	0.5m			0	0	1	20	20			20	20	20	20	20
	1m		0	20	20	20	20	20			20	20	20	20	20
	1.5m		2	20	20	20	20	20	1	1	20	20	20	20	20
	2m	1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-11(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+260 9.5m	-1m							0						0	0
	-0.5m							2					0	1	14
	0m			0	0	1	1	7		0	0	1	4	12	17
	0.5m			6	6	6	17	12	0	5	6	12	17	17	17
	1m	0	0	8	7	15	17	12	6	6	6	17	17	17	17
	1.5m	6	6	17	17	17	17	17	6	12	17	17	17	17	17
	2m	7	17	17	17	17	17	17	15	17	17	17	17	17	17
440K+500 10.2m	-0.5m														1
	0m												0	1	13
	0.5m					0	1	1					6	8	18
	1m		0	1	1	18	18	18		2	1	1	18	18	18
	1.5m		7	12	18	18	18	18	1	12	18	18	18	18	18
	2m	1	6	18	18	18	18	18	12	18	18	18	18	18	18
440K+740 10.7m	0.5m														1
	1m				2	0	1	0			1	0	1	1	18
	1.5m				18	18	18	18		0	18	18	18	18	18
	2m	0	1	1	18	18	18	18	0	18	18	18	18	18	18
441K+000 10.9m	-0.5m														0
	0m														17
	0.5m					2	0	0				1	1	0	17
	1m			2	0	17	17	17		0	1	17	17	17	17
	1.5m			17	17	17	17	17		17	17	17	17	17	17
	2m	0	0	17	17	17	17	17	0	17	17	17	17	17	17
441K+240 11.2m	1m						0	1					1	1	1
	1.5m						18	2				1	2	18	18
	2m	1	1	1	1	1	18	18	0	1	1	18	18	18	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-12 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700 9.4m	-1.5m							1
	-1m						1	17
	-0.5m				1	1	17	17
	0m			1	17	17	17	17
	0.5m	0	0	17	17	17	17	17
	1m	17	17	17	17	17	17	17
	1.5m	17	17	17	17	17	17	17
	2m	17	17	17	17	17	17	17
440K+000 9.8m	-1m							1
	-0.5m							20
	0m			0	1	1	1	20
	0.5m			20	20	20	20	20
	1m	0	2	20	20	20	20	20
	1.5m	20	20	20	20	20	20	20
	2m	20	20	20	20	20	20	20
440K+260 9.5m	-1m					0	1	1
	-0.5m				1	8	6	17
	0m		2	1	12	17	17	17
	0.5m	0	6	2	16	17	17	17
	1m	17	17	17	17	17	17	17
	1.5m	17	17	17	17	17	17	17
	2m	17	17	17	17	17	17	17

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-12(續) 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的平台溢淹距離(起點為海側的平台邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+500 10.2m	-0.5m							1
	0m			1	1	2	2	18
	0.5m		1	7	7	18	18	18
	1m	1	7	7	18	18	18	18
	1.5m	3	15	18	18	18	18	18
	2m	7	9	18	18	18	18	18
440K+740 10.7m	-0.5m							1
	0m							18
	0.5m			1	1	1	2	18
	1m			18	18	18	18	18
	1.5m		0	18	18	18	18	18
	2m	1	18	18	18	18	18	18
441K+000 10.9m	-0.5m						1	1
	0m					0	17	17
	0.5m				0	17	17	17
	1m			1	17	17	17	17
	1.5m	0	0	17	17	17	17	17
	2m	17	17	17	17	17	17	17
441K+240 11.2m	0m							1
	0.5m					0	1	18
	1m					18	18	18
	1.5m					18	18	18
	2m	1	1	1	1	18	18	18

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-13 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 5m							波高 6m						
		週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒	週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒
439K+700 9.4m	0m							0						0	0
	0.5m							2				0	0	1	2
	1m			0	0	0	0	13			0	16	16	16	16
	1.5m			12	11	11	13	13	0	0	16	16	16	16	16
	2m	0	0	10	11	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
440K+000 9.8m	0.5m												0	0	0
	1m						0	0			0	0	16	16	16
	1.5m				0	0	7	16		0	16	16	16	16	16
	2m	0	0	0	16	16	16	16	0	16	16	16	16	16	16
440K+260 9.5m	0m												0	0	0
	0.5m							0					1	16	0
	1m				0	0	0	2			0	0	16	16	16
	1.5m			0	1	16	16	16	0	0	1	16	16	16	16
	2m	0	0	16	16	16	16	16	2	16	16	16	16	16	16
440K+500 10.2m	0m												0	0	
	0.5m							0					1	2	0
	1m						0	16			0	0	16	3	16
	1.5m						16	16		0	2	4	16	16	16
	2m	0	0	0	0	0	16	16	0	4	16	16	16	16	16
440K+740 10.7m	1m							0							0
	1.5m						0	2			0	0	0	0	16
	2m	0	0	0	0	0	15	15	0	0	16	16	16	16	16
441K+000 10.9m	0.5m							0							
	1m							6						0	0
	1.5m					0	0	7						2	16
	2m	0	0	0	0	11	13	16	0	0	0	0	0	16	16
441K+240 11.2m	1.5m														0
	2m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-14 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒	週期10秒	週期11秒	週期12秒	週期13秒	週期14秒	週期15秒	週期16秒
439K+700 9.4m	-1m														0
	-0.5m						0	0						0	16
	0m				0	0	16	16		0	0	0	0	16	16
	0.5m			0	16	16	16	16	0	0	16	16	16	16	16
	1m	0	0	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	1.5m	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	2m	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
440K+000 9.8m	0m						0	0			0	0	0	0	0
	0.5m			0	0	0	16	16			16	16	16	16	16
	1m		0	16	16	16	16	16			16	16	16	16	16
	1.5m		0	16	16	16	16	16	0	0	16	16	16	16	16
	2m	0	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
440K+260 9.5m	-1m							0						0	0
	-0.5m							1					0	0	13
	0m			0	0	0	0	6		0	0	0	3	11	16
	0.5m			5	5	5	16	11	0	4	5	11	16	16	16
	1m	0	0	7	6	14	16	11	5	5	5	16	16	16	16
	1.5m	5	5	16	16	16	16	16	5	11	16	16	16	16	16
	2m	6	16	16	16	16	16	16	14	16	16	16	16	16	16
440K+500 10.2m	-0.5m														0
	0m												0	0	11
	0.5m					0	0	0					4	6	16
	1m		0	0	0	16	16	16		0	0	0	16	16	16
	1.5m		5	10	16	16	16	16	0	10	16	16	16	16	16
	2m	0	4	16	16	16	16	16	10	16	16	16	16	16	16

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-14(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+740 10.7m	0.5m														0
	1m				0	0	0	0			0	0	0	0	16
	1.5m				16	16	16	16		0	16	16	16	16	16
	2m	0	0	0	16	16	16	16	0	16	16	16	16	16	16
441K+000 10.9m	-0.5m														0
	0m														16
	0.5m					1	0	0				0	0	0	16
	1m			1	0	16	16	16		0	0	16	16	16	16
	1.5m			16	16	16	16	16		16	16	16	16	16	16
	2m	0	0	16	16	16	16	16	0	16	16	16	16	16	16
441K+240 11.2m	1m						0	0					0	0	0
	1.5m						16	0				0	0	16	16
	2m	0	0	0	0	0	16	16	0	0	0	16	16	16	16

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-15 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700 9.4m	-1.5m							0
	-1m						0	16
	-0.5m				0	0	16	16
	0m			0	16	16	16	16
	0.5m	0	0	16	16	16	16	16
	1m	16	16	16	16	16	16	16
	1.5m	16	16	16	16	16	16	16
	2m	16	16	16	16	16	16	16
440K+000 9.8m	-1m							0
	-0.5m							16
	0m			0	0	0	0	16
	0.5m			16	16	16	16	16
	1m	0	0	16	16	16	16	16
	1.5m	16	16	16	16	16	16	16
	2m	16	16	16	16	16	16	16
440K+260 9.5m	-1m					0	0	0
	-0.5m				0	7	5	16
	0m		1	0	11	16	16	16
	0.5m	0	5	1	15	16	16	16
	1m	16	16	16	16	16	16	16
	1.5m	16	16	16	16	16	16	16
	2m	16	16	16	16	16	16	16

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-15(續) 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的道路溢淹距離(起點為海側的道路邊緣，道路平台寬 20m)

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+500 10.2m	-0.5m							0
	0m			0	0	0	0	16
	0.5m		0	5	5	16	16	16
	1m	0	5	5	16	16	16	16
	1.5m	1	13	16	16	16	16	16
	2m	5	7	16	16	16	16	16
440K+740 10.7m	-0.5m							0
	0m							16
	0.5m			0	0	0	0	16
	1m			16	16	16	16	16
	1.5m		0	16	16	16	16	16
	2m	0	16	16	16	16	16	16
441K+000 10.9m	-0.5m						0	0
	0m					0	16	16
	0.5m				0	16	16	16
	1m			0	16	16	16	16
	1.5m	0	0	16	16	16	16	16
	2m	16	16	16	16	16	16	16
441K+240 11.2m	0m							0
	0.5m					0	0	16
	1m					16	16	16
	1.5m					16	16	16
	2m	0	0	0	0	16	16	16

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-16 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 5m							波高 6m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700 9.4m	0m							6.9						7.5	8.9
	0.5m							9.2				7.9	9.0	9.2	9.2
	1m			7.9	9.3	9.2	9.1	9.6			9.3	9.4	9.6	9.6	9.6
	1.5m			9.4	9.5	9.5	9.5	9.6	8.1	9.1	9.3	9.7	9.6	9.5	9.8
	2m	7.6	9.2	9.4	9.6	9.4	9.7	10.5	9.6	9.6	9.6	9.6	9.7	9.6	9.9
440K+000 9.8m	0.5m												8.6	9.6	8.9
	1m						8.2	9.6			9.4	9.6	9.8	9.8	10.0
	1.5m				9.5	9.5	10.0	10.0		8.1	9.9	10.0	9.9	9.8	10.1
	2m	7.7	9.2	9.6	10.0	9.9	10.0	10.1	8.4	9.9	10.1	9.9	10.0	10.3	10.3
440K+260 9.5m	0m												9.3	8.4	9.3
	0.5m							8.2					9.3	9.4	9.3
	1m				9.3	9.3	9.0	9.4			9.3	9.3	9.8	9.6	9.7
	1.5m			9.3	9.3	9.6	9.5	9.7	8.0	9.3	9.3	9.7	9.9	9.7	10.5
	2m	8.2	9.3	9.6	9.7	9.7	9.9	9.9	9.3	9.4	10.1	9.9	10.1	10.1	10.9
440K+500 10.2m	0m												9.6	8.5	
	0.5m							9.8					10.2	10.3	9.0
	1m						8.9	10.6			10.1	9.8	10.9	10.5	10.9
	1.5m						10.7	10.6		10.1	10.6	10.7	10.9	10.7	12.0
	2m	8.2	9.3	10.5	10.5	10.5	10.9	10.8	8.6	10.7	10.8	10.6	10.8	12.3	11.0
440K+740 10.7m	1m							10.4							11.0
	1.5m						9.2	10.5			9.5	10.7	10.4	10.5	10.8
	2m	8.9	10.4	10.4	10.4	10.2	10.8	10.6	9.2	9.6	10.8	11.2	10.9	11.0	11.2
441K+000 10.9m	0.5m							7.6							
	1m							10.8						10.9	10.3
	1.5m					9.6	10.7	10.9						10.8	11.3
	2m	9.0	8.4	9.4	10.3	11.0	11.1	11.4	9.2	10.4	11.0	10.9	11.0	11.6	11.3
441K+240 11.2m	1.5m														9.3
	2m	8.1	8.4	9.2	9.1	9.2	10.9	10.9	8.2	9.2	9.4	10.9	10.9	10.9	11.3

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-17 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700 9.4m	-1m														9.1
	-0.5m						9.0	9.1						9.1	9.4
	0m				8.2	9.1	9.6	9.3		7.3	9.1	9.1	7.9	9.6	10.0
	0.5m			9.1	9.5	9.2	9.7	9.7	7.6	9.1	9.3	9.7	9.7	9.6	9.9
	1m	7.3	9.1	9.8	9.7	9.2	10.0	10.1	9.3	9.4	9.6	9.7	10.2	10.0	11.7
	1.5m	9.6	9.7	10.0	9.9	10.0	10.2	10.6	10.0	11.1	10.0	10.0	10.2	10.5	10.2
	2m	9.7	10.0	10.2	10.0	13.6	12.1	10.0	9.7	9.7	9.7	10.0	10.7	11.0	11.1
440K+000 9.8m	0m						8.1	8.9			7.6	8.6	9.6	9.5	9.6
	0.5m			8.3	8.9	9.6	9.7	9.7			10.1	10.0	10.0	10.1	10.3
	1m		7.4	10.1	10.0	9.8	10.1	10.1			10.5	10.0	10.2	10.6	10.5
	1.5m		9.6	10.1	10.1	10.1	10.3	10.6	9.6	9.6	10.1	10.3	10.4	10.2	10.6
	2m	9.6	9.9	10.4	10.1	10.3	10.5	10.5	9.8	10.2	10.4	10.4	10.5	11.0	12.0
440K+260 9.5m	-1m							8.4						8.0	8.1
	-0.5m							9.3					8.9	9.3	10.3
	0m			8.9	8.9	9.3	9.3	9.7		7.9	8.4	9.3	9.3	9.8	10.0
	0.5m			9.5	9.6	9.4	9.9	9.8	7.4	9.3	9.3	10.2	10.2	9.9	9.9
	1m	8.1	9.0	9.7	9.6	9.8	10.3	9.8	9.5	9.5	9.6	9.8	10.2	11.2	10.4
	1.5m	9.4	9.5	9.8	10.3	10.3	10.2	12.7	9.6	9.8	10.7	10.0	10.3	10.3	11.3
	2m	9.8	9.9	10.1	10.3	11.7	10.8	12.1	9.8	10.3	10.8	11.9	10.8	11.8	12.3
440K+500 10.2m	-0.5m														10.1
	0m												9.7	10.1	10.8
	0.5m					9.8	10.2	10.2					10.2	10.6	10.6
	1m		9.5	10.1	10.1	11.7	11.0	11.0		10.3	10.2	10.2	10.8	11.8	11.3
	1.5m		10.4	10.5	11.1	11.1	10.9	11.3	10.1	10.5	10.6	11.1	11.1	11.8	11.6
	2m	10.2	10.3	11.1	11.3	11.1	11.3	11.6	10.5	10.6	11.1	12.0	12.3	12.8	13.0

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-17(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+740 10.7m	0.5m														10.8
	1m				10.5	9.8	10.9	10.2			10.3	9.4	10.7	10.8	10.8
	1.5m				10.7	10.9	11.2	11.5		9.0	11.0	11.0	11.0	11.3	11.3
	2m	9.7	10.3	10.5	10.8	11.0	10.6	11.4	7.6	10.8	11.0	11.4	11.0	11.8	12.9
441K+000 10.9m	-0.5m														9.1
	0m														11.3
	0.5m					10.7	10.0	10.3				10.6	10.6	9.9	11.1
	1m			10.7	10.6	10.9	11.5	11.4		10.4	10.6	11.1	10.9	11.3	11.6
	1.5m			10.8	11.4	12.1	11.1	12.1		11.0	11.5	10.7	12.5	11.8	11.8
	2m	9.7	9.7	11.6	11.5	11.5	12.2	12.1	9.5	10.8	11.3	11.8	12.7	12.6	12.3
441K+240 11.2m	1m						10.4	10.8					10.7	11.0	11.3
	1.5m						11.4	11.0				10.8	11.0	11.5	11.5
	2m	10.8	10.8	11.2	11.4	11.3	11.7	12.1	9.6	11.1	11.6	11.5	11.5	11.5	11.5

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-18 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700 9.4m	-1.5m							9.1
	-1m						9.1	9.5
	-0.5m				9.1	9.1	9.4	9.3
	0m			9.1	9.5	9.3	9.3	10.1
	0.5m	8.3	8.7	9.6	9.6	9.6	9.9	10.2
	1m	9.4	9.9	9.9	9.7	10.0	10.9	10.1
	1.5m	10.1	9.7	10.1	9.8	10.5	10.7	13.0
	2m	9.8	10.1	10.5	10.0	10.7	11.6	13.2
440K+000 9.8m	-1m							9.6
	-0.5m							9.8
	0m			8.0	9.6	9.6	9.6	10.1
	0.5m			9.9	10.1	10.2	10.2	10.3
	1m	9.4	9.6	10.1	10.0	10.1	10.4	10.5
	1.5m	10.0	10.1	10.2	10.5	10.2	11.6	11.1
	2m	10.1	10.2	10.5	10.4	11.8	11.6	11.1
440K+260 9.5m	-1m					9.0	9.3	9.3
	-0.5m				9.3	9.7	9.4	10.2
	0m		9.4	9.3	9.8	10.0	10.3	10.2
	0.5m	8.2	9.5	9.3	9.8	10.2	10.3	11.3
	1m	9.8	9.8	9.9	10.8	10.6	10.0	11.3
	1.5m	9.8	9.8	10.2	10.8	10.7	11.7	12.3
	2m	9.8	10.3	11.5	12.5	11.5	12.8	11.3

附註：斜線表示無模擬該情境。

表 10-18(續) 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的接近平台的最大溯上水位

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+500 10.2m	-0.5m							10.1
	0m			10.1	10.1	10.1	10.3	11.0
	0.5m		10.2	10.3	10.3	10.8	10.5	11.8
	1m	10.1	10.5	10.4	11.1	11.1	11.6	12.8
	1.5m	10.2	10.7	10.8	11.2	11.4	12.4	13.3
	2m	10.5	10.6	11.3	11.3	12.6	11.8	13.6
440K+740 10.7m	-0.5m							10.7
	0m							11.0
	0.5m			10.4	10.6	10.4	10.5	11.0
	1m			11.0	11.0	10.8	11.0	11.5
	1.5m		10.1	11.0	11.0	11.0	11.5	12.2
	2m	10.3	11.3	11.0	11.8	12.0	13.0	12.5
441K+000 10.9m	-0.5m						10.6	10.6
	0m					9.8	10.8	11.2
	0.5m				10.5	11.8	10.8	11.8
	1m			10.6	11.2	11.3	11.3	11.6
	1.5m	10.1	10.3	12.3	11.3	11.6	12.6	12.6
	2m	11.1	11.3	12.2	13.6	13.4	13.6	13.1
441K+240 11.2m	0m							11.0
	0.5m					8.9	11.2	11.5
	1m					11.7	11.4	11.5
	1.5m					11.5	11.5	11.5
	2m	10.7	11.3	11.0	10.8	11.6	11.5	11.5

附註：斜線表示無模擬該情境。

圖 10.32 到圖 10.35 各為 2016 年尼伯特、馬勒卡、梅姬和海馬颱風期間公路局所提供南興段 440K+000 附近的岸邊觀測浪高，並與情境條件近似的接近平台的溯上水位作比較。情境對應的方式根據水利署臺東外海浮標資料的 2 倍示性波高、尖峰週期以及大武漁港的觀測潮位，由表 10-16 到 10-18 分別對應到情境條件類似的入射波高、入射週期和潮位，取得接近平台的溯上水位。圖 10.32 到 10.35 的溯上水位值僅限定在可對應的情境條件範圍內且有模擬該情境的情況下。由圖可知絕大部分的情境溯上水位都超過觀測浪高，最大超過約 3.5m。由於模擬地形將原本水深 5m 處開始往陸地方向直到道路平台旁的擋土牆為止的區域範圍皆調整為水深 5m，亦即移除溯上又加深近岸地形可能為情境溯上水位皆大於觀測浪高的主因。

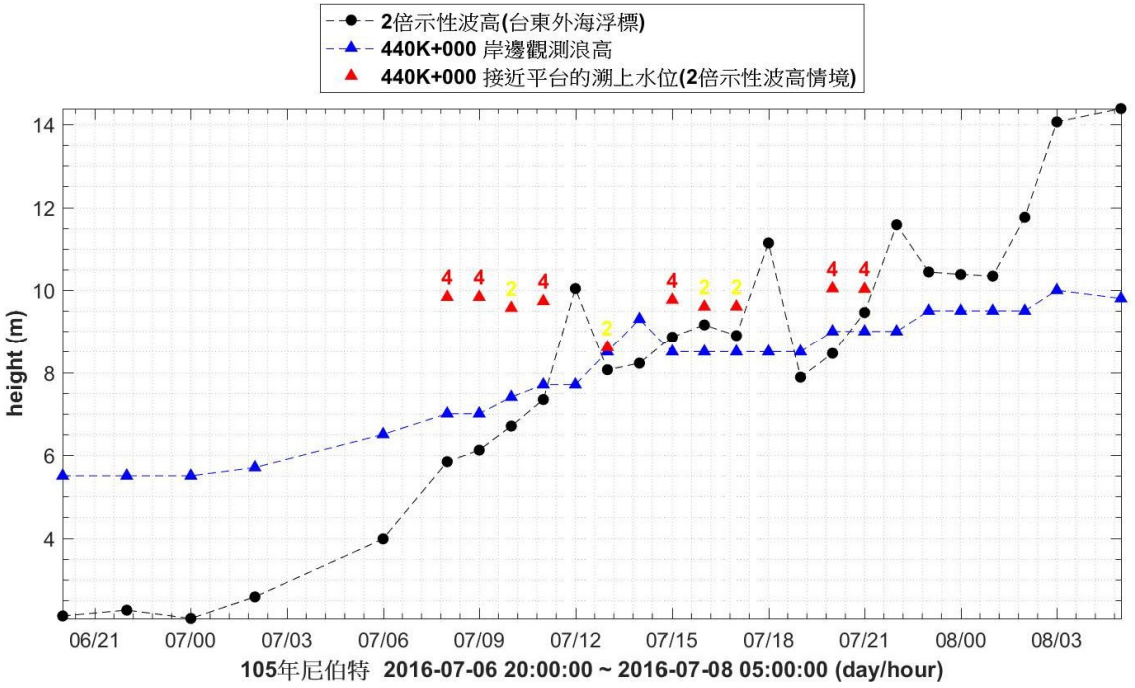


圖 10.32 2016 年尼伯特颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近平台的情境溯上水位。

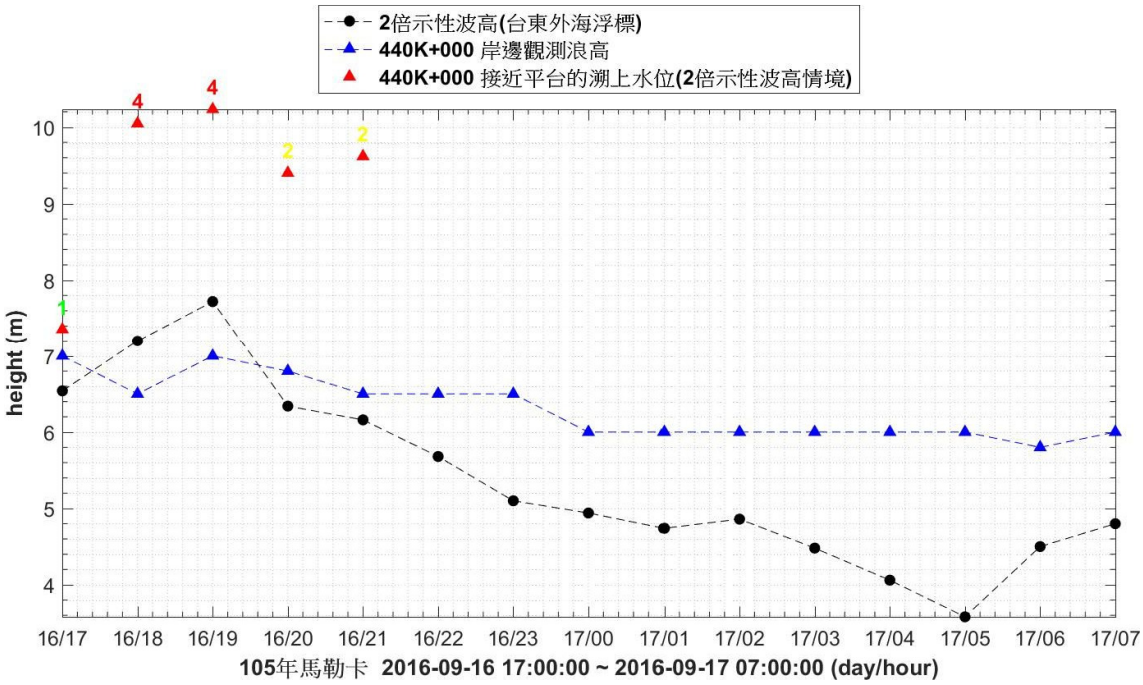


圖 10.33　2016 年馬勒卡颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近平台的情境溯上水位。

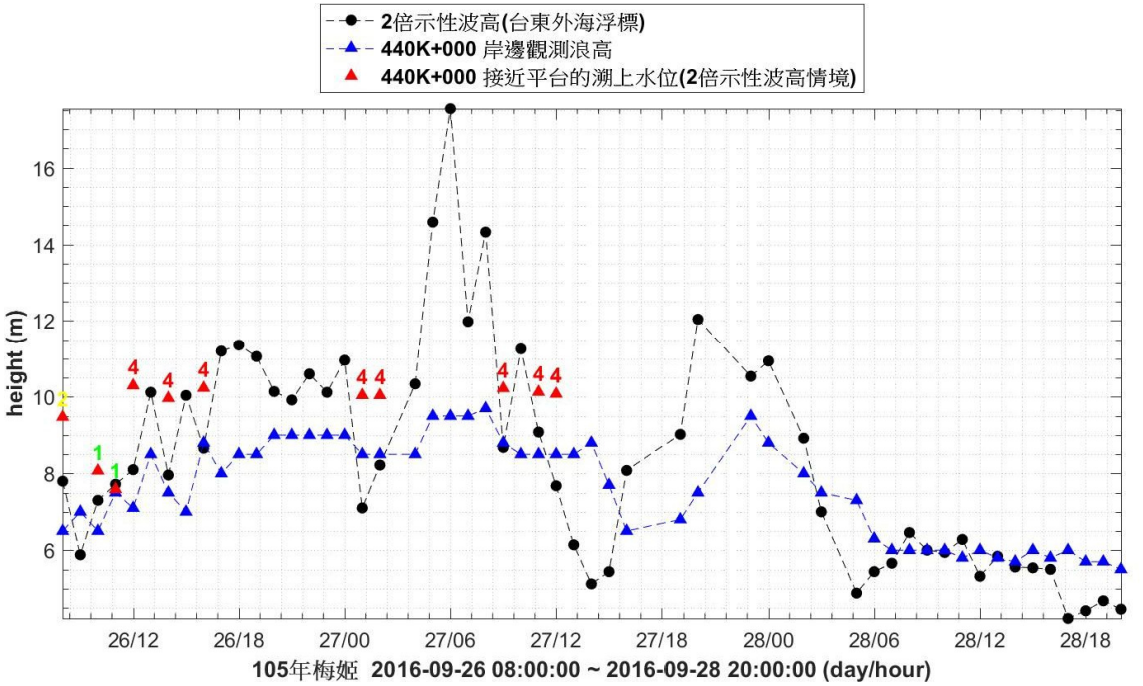


圖 10.34　2016 年梅姬颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近道路平台的情境溯上水位。

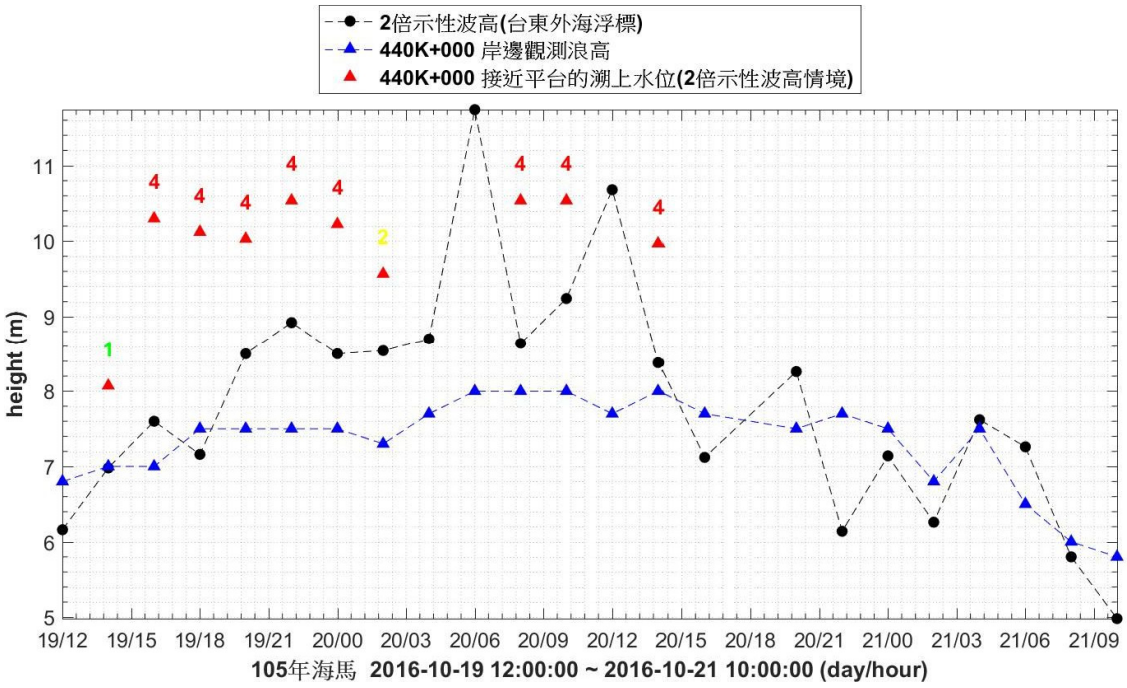


圖 10.35　2016 年海馬颱風期間在南興段 440K+000 的岸邊觀測浪高和接近道路平台的情境溯上水位。

10.6 海岸公路海浪警戒預報

根據多良段與南興段的情境模擬結果，本文制定浪襲海岸公路警戒等級的燈號顏色所表示的意義，除了提供相關防災單位作為警戒發布的參考，也便於防災人員的使用與民眾的宣導認知。燈號顏色的定義如下：

灰色：缺少示性波高、尖峰週期或潮位等外海觀測值

綠色：接近平台的溯上水位低於平台高程-1m

黃色：接近平台的溯上水位高於平台高程-1m

橙色：部分路面出現溢淹

紅色：整個路面出現溢淹

以圖 10.36 為例，紅色虛線以右為道路區域，從上到下所對應的燈號依

序為綠色、黃色、橙色和紅色。在此將灰、綠、黃、橙以及紅色各以數字 0、1、2、3 和 4 來表示，而多良段和南興段的所有情境對應的燈號皆列於表 10-19 到表 10-24。

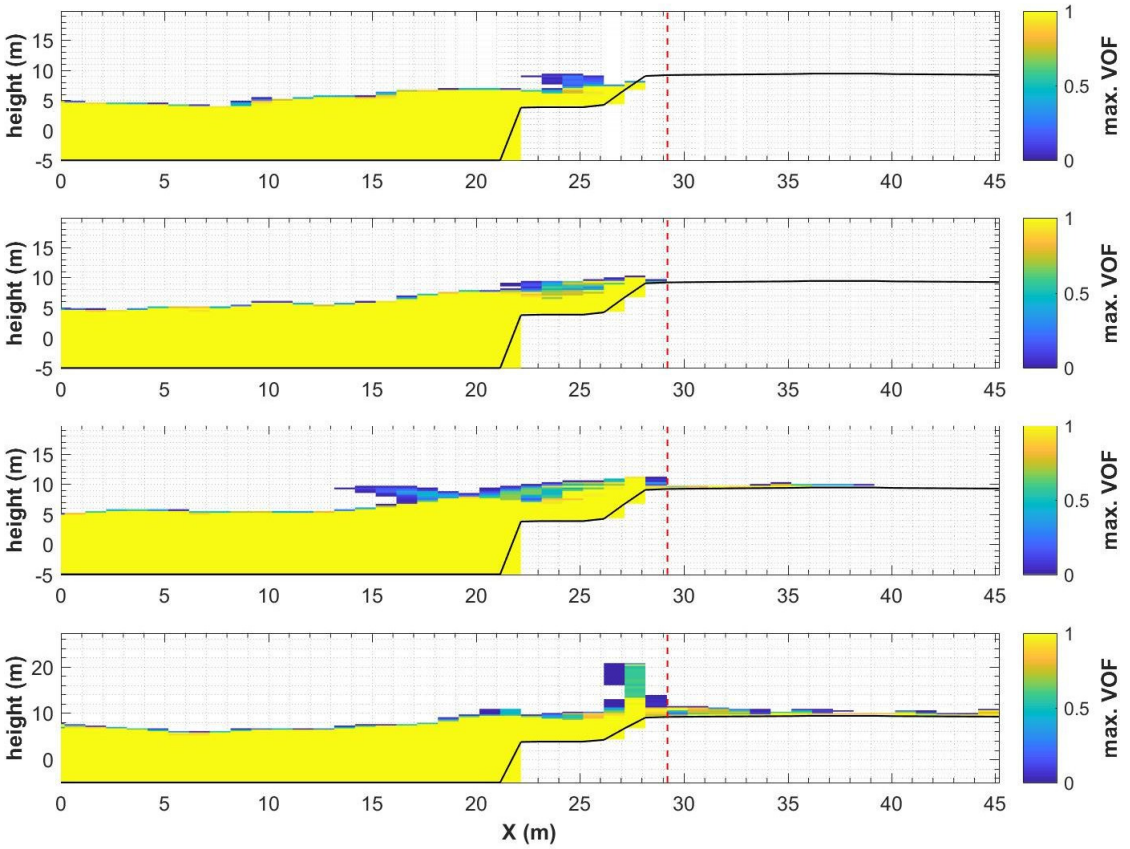


圖 10.36 439K+700 站的模擬期間 VOF 空間分布最大值。潮位條件皆為 2m、入射波高皆為 5m，由上至下的情境週期各為 10 秒、11 秒、12 秒和 14 秒。(紅色虛線右側為道路區域)

目前港研中心已提供 SWAN(Simulating WAves Nearshore)模式和 COHERENS(COupled Hydrodynamical Ecological model for REgioNal Shelf seas)模式在多良段和南興段外海約 30m 水深處的示性波高、尖峰週期和潮位預報值。預報值可對應情境的結果產生多良段 12 站與南興段 7 站的海岸公路海浪警戒預報檔。圖 10.37 為南興段的預報檔內容。



圖 10.37 南興段海浪警戒預報檔。

圖 10.37 各欄位的意義如下：

第 1 到 4 欄：年、月、日、時

第 5 到 7 欄：依序為預報的示性波高(m)、尖峰週期(sec)和潮位(m)

第 8 欄：由第 5 欄示性波高所對應的情境波高(m)

第 9 欄：由第 6 欄尖峰週期所對應的情境週期(sec)

第 10 欄：由第 7 欄潮位所對應的情境潮位(m)

第 11 到 31 欄：第 11 到 13 欄各為里程編號 439K+700 的燈號、接近平台的溯上水位(m)以及道路靠海側起算的溢淹距離(m)。與第 11 到 13 欄意義相同，剩下的欄位依序分別屬於里程編號 440K+000、440K+260、440K+500、440K+740、441K+000、441K+240。

32 欄：7 個里程編號中出現的最大燈號值

其中第 8 到 10 欄對應情境條件的方式，首先將異常波浪的波高視為示性波高的 2 倍，並對應到最接近的情境入射波高。而尖峰週期(的)和潮位亦對應到最接近的情境週期和潮位。因為情境模擬的波高、週期和潮位的條件範圍有限(圖 10.19 及圖 10.20)，所以當 2 倍示性波高或尖峰週期超出情境入射波高或週期的上限時，則對應到情境入射波高或週期上限值。同理如果低於情境下限時，則對應到下限值。

以圖 10.37 的第 1 行為例。當示性波高為 2.778 公尺、 尖峰週期為 7.221 秒、潮位 0.337 公尺時，異常波浪的波高視為示性波高的 2 倍，而 5.556 公尺所對應最接近的情境入射波高為 6 公尺(圖 10.37 第 8 欄)。因為尖峰週期 7.221 秒低於情境週期的 10 秒下限，則對應的情境週期為 10 秒(圖 10.37 第 9 欄)。0.337 公尺的潮位則對應最接近的情境潮位 0.5m(圖 10.37 第 10 欄)。由表 10-22 可知波高 6 公尺、週期 10 秒且潮位 0.5 公尺雖然在情境條件範圍內，但該情境未被模擬，亦即代表海況條件較不嚴重，其造成溢淹可能性極低。故各站的燈號值皆為 1(綠色)，而接近平台溯上高度和溢淹距離給予 0 值。

臺東海岸公路通行安全預警之視窗以網頁形式作為顯示，如圖 10.38 及圖 10.39 所示，分別為多良及南興，由下至上分別為潮位、波高及各路段的顏色燈號，其中潮位有觀測值及模擬值，波高有臺東浮標的觀測值與模擬值，顏色燈號可以選擇各里程編號作為預報輸出。其原養護單位係已派人駐守現場觀測波浪及路況作為封路之標準判斷，因此臺東海岸公路通行安全預警可以作為封路決策之依據。

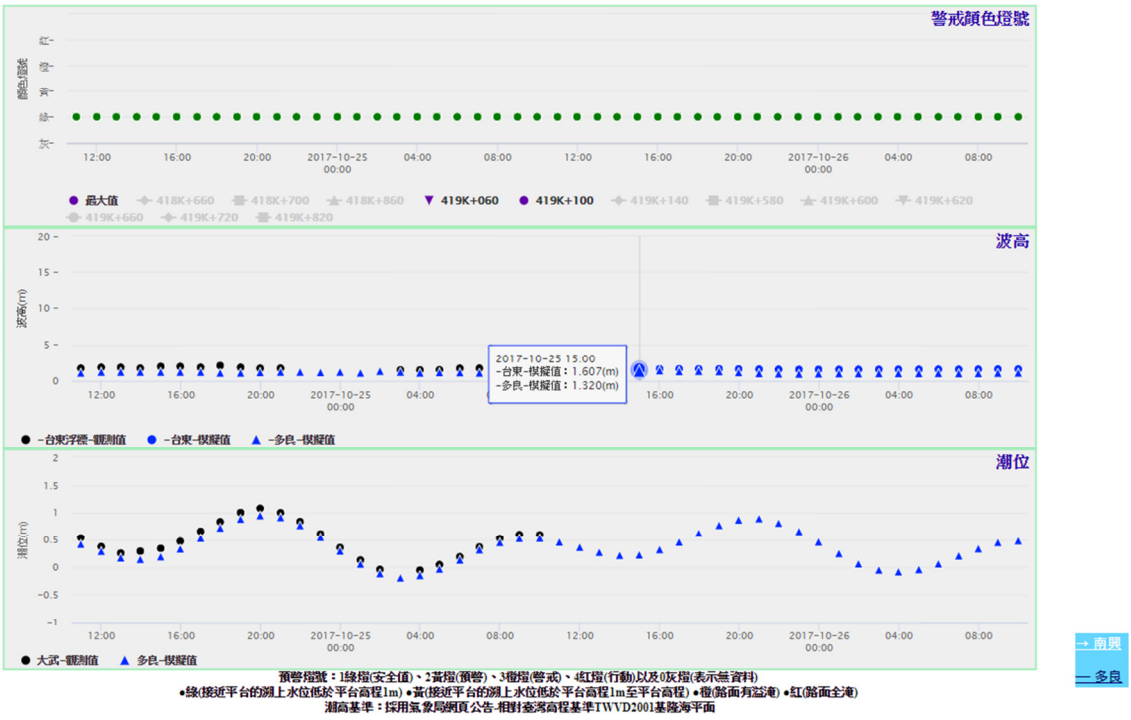


圖 10.38 臺東海岸公路通行安全預警系統多良段

(http://isohe.ihmt.gov.tw/station/display/Taitung-1.aspx)

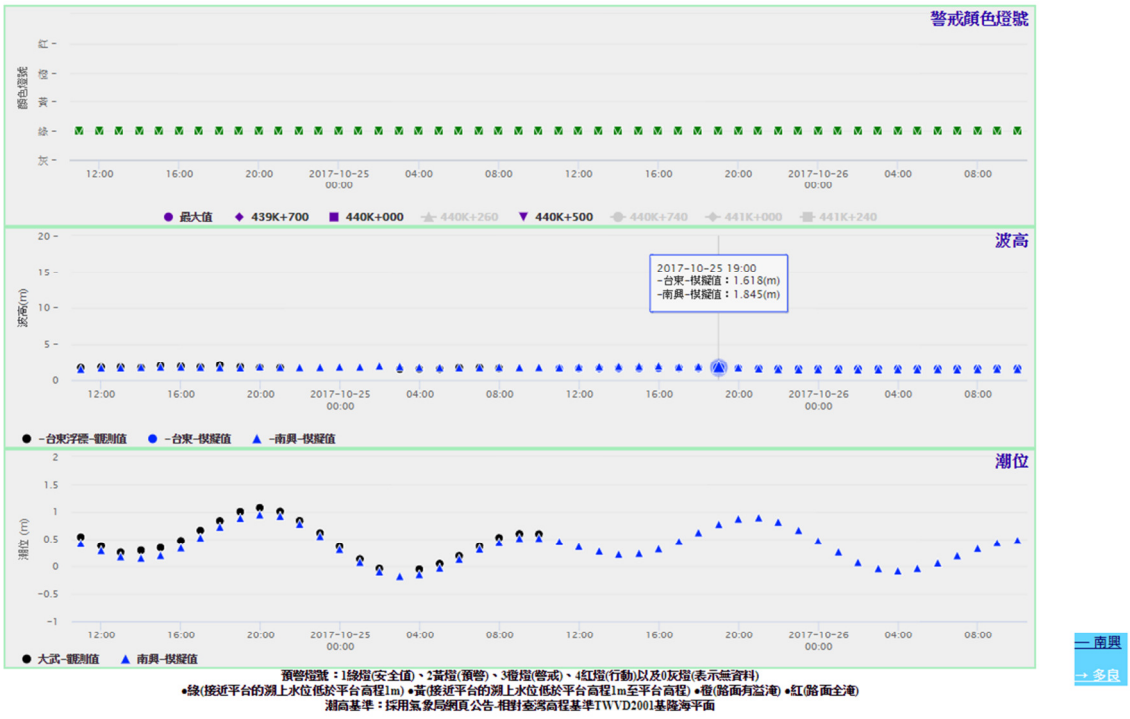


圖 10.39 臺東海岸公路通行安全預警系統南興段

(http://isohe.ihmt.gov.tw/station/display/Taitung-2.aspx)

表 10-19 多良段入射波高 8、9 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 8m							波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	2m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
418K+700	1.5m						2	1						1	1
	2m	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2
418K+860	1.5m			1	1	1	2	1			1	2	2	2	1
	2m	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	3	4	4
419K+060	2m	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1
419K+100	2m	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1
419K+140	2m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
419K+580	2m	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
419K+600	2m	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1
419K+620	1.5m							2							2
	2m	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
419K+660	1.5m				1	1	2	1				1	2	2	1
	2m	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2
419K+720	1.5m		1	1	2	2	2	2		1	1	1	2	2	2
	2m	1	1	1	2	2	4	4	1	1	2	2	2	4	4
419K+820	0.5m					1	1	1					2	1	1
	1m				2	2	2	2				2	2	2	2
	1.5m		2	2	4	4	4	4		2	1	4	4	4	4
	2m	1	2	2	4	4	4	4	1	2	2	4	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-20 多良段入射波高 10、11 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 10m							波高 11m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	1.5m												1		
	2m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
418K+700	1.5m					2	1	1				1	1	1	1
	2m	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	4	1	1
418K+860	0.5m														2
	1m														3
	1.5m			1	2	2	2	1			1	2	1	2	4
	2m	1	2	1	3	4	4	4	1	1	2	3	4	1	4
419K+060	1.5m					1	1	1					1	1	2
	2m	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1
419K+100	2m	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
419K+140	2m	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
419K+580	2m	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
419K+600	2m	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1
419K+620	1.5m						2	2	1	1	2	2	2	2	2
	2m	1	1	2	2	2	4	2	2	1	2	2	4	4	2
419K+660	1.5m				1	2	1	2			1	2	1	1	2
	2m	1	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	4	1	1
419K+720	1m					2	1	1					1	2	2
	1.5m		1	1	1	4	2	2		1	2	2	4	2	4
	2m	1	1	1	2	4	4	4	1	1	1	2	4	4	4
419K+820	0.5m				1	2	1	2				1	2	1	2
	1m			2	2	4	4	4			2	2	4	4	4
	1.5m		1	2	4	4	4	4		2	4	4	4	4	4
	2m	1	2	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-21 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
418K+660	2m	1	1	1	2	1	1	1
418K+700	1.5m					1	1	2
	2m	1	1	1	2	4	4	4
418K+860	0m							2
	0.5m						2	4
	1m						2	4
	1.5m			2	1	2	2	4
	2m	1	1	4	4	4	3	4
419K+060	0.5m						2	2
	1m						2	4
	1.5m					2	2	4
	2m	1	1	2	2	2	2	4
419K+100	0.5m							1
	1m							2
	1.5m							4
	2m	1	1	1	2	1	2	4
419K+140	2m	1	1	1	1	1	1	1
419K+580	2m	1	1	1	1	2	1	1
419K+600	1.5m					1		
	2m	1	1	1	1	2	2	1
419K+620	1.5m	1	2	2	2	2	2	2
	2m	2	2	2	3	4	4	2

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-21(續) 多良段入射波高 12 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 12m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
419K+660	1m				1			
	1.5m			1	2	1	2	2
	2m	1	1	1	3	4	1	2
419K+720	1m				2	1	2	2
	1.5m		1	2	2	4	4	4
	2m	1	1	2	2	4	4	4
419K+820	-1m							1
	-0.5m							2
	0m						2	4
	0.5m				2	1	2	4
	1m			2	4	4	4	4
	1.5m		1	4	4	4	4	4
	2m	1	2	4	4	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-22 南興段入射波高 5、6 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 5m							波高 6m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700	0m							1						1	2
	0.5m							2				1	2	2	2
	1m			1	2	2	2	3			2	4	4	4	4
	1.5m			3	3	3	3	3	2	2	4	4	4	4	4
	2m	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
440K+000	0.5m												1	2	2
	1m						1	2			2	2	4	4	4
	1.5m				2	2	3	4		1	4	4	4	4	4
	2m	1	2	2	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4
440K+260	0m												2	2	2
	0.5m							1					2	4	2
	1m				2	2	2	2			2	2	4	4	4
	1.5m			2	2	4	4	4	1	2	2	4	4	4	4
	2m	1	2	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4
440K+500	0m												2	1	
	0.5m							2					2	2	1
	1m						1	4			2	2	4	3	4
	1.5m						4	4		2	2	3	4	4	4
	2m	1	2	2	2	2	4	4	1	3	4	4	4	4	4
440K+740	1m							2							2
	1.5m						1	2			2	2	2	2	4
	2m	1	2	2	2	2	3	3	1	2	4	4	4	4	4
441K+000	0.5m							1							
	1m							3						2	2
	1.5m					1	2	3						2	4
	2m	1	1	1	2	3	3	4	1	2	2	2	2	4	4
441K+240	1.5m														1
	2m	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-23 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700	-1m														2
	-0.5m						2	2						2	4
	0m				2	2	4	4		1	2	2	1	4	4
	0.5m			2	4	4	4	4	1	2	4	4	4	4	4
	1m	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	1.5m	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	2m	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
440K+000	0m						1	2			1	2	2	2	2
	0.5m			1	2	2	4	4			4	4	4	4	4
	1m		1	4	4	4	4	4			4	4	4	4	4
	1.5m		2	4	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4	4
	2m	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
440K+260	-1m							2						1	1
	-0.5m							2					2	2	3
	0m			2	2	2	2	3		1	2	2	3	3	4
	0.5m			3	3	3	4	3	1	3	3	3	4	4	4
	1m	1	2	3	3	3	4	3	3	3	3	4	4	4	4
	1.5m	3	3	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4
	2m	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-23(續) 南興段入射波高 7、8 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 7m							波高 8m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒	週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+500	-0.5m														2
	0m												2	2	3
	0.5m					2	2	2					3	3	4
	1m		2	2	2	4	4	4		2	2	2	4	4	4
	1.5m		3	3	4	4	4	4	2	3	4	4	4	4	4
	2m	2	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
440K+740	0.5m														2
	1m				2	2	2	2			2	2	2	2	4
	1.5m				4	4	4	4		1	4	4	4	4	4
	2m	2	2	2	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4
441K+000	-0.5m														1
	0m														4
	0.5m					2	2	2				2	2	2	4
	1m			2	2	4	4	4		2	2	4	4	4	4
	1.5m			4	4	4	4	4		4	4	4	4	4	4
	2m	2	2	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4
441K+240	1m						2	2					2	2	2
	1.5m						4	2				2	2	4	4
	2m	2	2	2	2	2	4	4	1	2	2	4	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-24 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
439K+700	-1.5m							2
	-1m						2	4
	-0.5m				2	2	4	4
	0m			2	4	4	4	4
	0.5m	2	2	4	4	4	4	4
	1m	4	4	4	4	4	4	4
	1.5m	4	4	4	4	4	4	4
	2m	4	4	4	4	4	4	4
440K+000	-1m							2
	-0.5m							4
	0m			1	2	2	2	4
	0.5m			4	4	4	4	4
	1m	2	2	4	4	4	4	4
	1.5m	4	4	4	4	4	4	4
	2m	4	4	4	4	4	4	4
440K+260	-1m					2	2	2
	-0.5m				2	3	3	4
	0m		2	2	3	4	4	4
	0.5m	1	3	2	3	4	4	4
	1m	4	4	4	4	4	4	4
	1.5m	4	4	4	4	4	4	4
	2m	4	4	4	4	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

表 10-24 南興段入射波高 9 公尺情境模擬的燈號

省道里程 平台高程	潮位	波高 9m						
		週期 10 秒	週期 11 秒	週期 12 秒	週期 13 秒	週期 14 秒	週期 15 秒	週期 16 秒
440K+500	-0.5m							2
	0m			2	2	2	2	4
	0.5m		2	3	3	4	4	4
	1m	2	3	3	4	4	4	4
	1.5m	2	3	4	4	4	4	4
	2m	3	3	4	4	4	4	4
440K+740	-0.5m							2
	0m							4
	0.5m			2	2	2	2	4
	1m			4	4	4	4	4
	1.5m		2	4	4	4	4	4
	2m	2	4	4	4	4	4	4
441K+000	-0.5m						2	2
	0m					2	4	4
	0.5m				2	4	4	4
	1m			2	4	4	4	4
	1.5m	2	2	4	4	4	4	4
	2m	4	4	4	4	4	4	4
441K+240	0m							2
	0.5m					1	2	4
	1m					4	4	4
	1.5m					4	4	4
	2m	2	2	2	2	4	4	4

斜線：無情境模擬　1：綠色　2：黃色　3：橙色　4：紅色

第十一章 結論與建議

山區道路邊坡崩塌主因為地震與降雨引致，其中降雨引致之邊坡破壞其發生頻率與範圍遠較地震引致崩塌為高，且降雨引致之邊坡破壞具有一定之延時與前期徵兆，使得此類災害之預警較為可行且易發揮成效。本研究針對公路邊坡可能遭遇之位於飽和面以下之深層滑動面，進行解析法分析並研發與解析法搭配之無線土層反應感測模組，發展不同於現有以雨量監測為指標之經驗法預警模式，以提高預警之準確與時效性，利於相關單位對此類災害預警及管理之決策參考。

針對全自動道路邊坡近景監測方法,包含硬體及全自動計算架構，本研究提出 SfM-MVS 攝影測量的全自動道路邊坡監測架構,提供全自動攝影、回傳、監測點量測、監測點計算、誤差分析及表面差異分析為目的監測方法。SfM-MVS 攝影測量監測設備相較於現行 GPS 或地面雷射掃描來得廉價，且可提供監測點及三維表面監測。

另外，本研究以數值模擬技術為主軸，針對台 9 線選取多良段 418K~419K 及南興段 439K~441K 之間等 7 站作為模擬目標，蒐集了易致災之區段，並分析了異常波浪的特性，建立異常波浪容易致災之區段的長浪溯上數值模式，透過模擬可了解在何種波浪條件之下可能遭受的威脅，以網頁形式作為顯示臺東海岸公路通行安全預警之視窗，可提供公路單位作為道路通行安全的評估和道路暫時封閉的參考。

11.1 結論

1. 本研究持續維護甲仙、西湖等兩處公路土壤邊坡淺層崩塌無線感測網路監測場址與現地測試外，並精進更新相關硬體，增加雲端監看功能，大幅精進現有模組穩定與應用性。

2. 完成選定場址阿里山五彎仔 A-A 剖面之降雨垂直入滲下，水力力學耦合分析，同時推導孔隙水壓與安全係數關聯。結合孔隙水壓比

依時關係及深層無限邊坡滑動理論，可推估符合無限邊坡破壞之依時反應，應用二維耦合分析之孔隙水壓歷時，可建立監測點孔隙水壓與滑動之關聯性，可做為後續依時預警之學理依據。

3. 完成研發適用於土壤邊坡深層滑動之低成本易安裝之無線監測模組，以原有淺層滑動監測模組為基礎，增加孔隙水壓量測功能，並於選定阿里山場址及測試邊坡進行監測模組原型測試，成果符合原先規劃且完整度高。

4. 完成以 SfM-MVS 攝影測量技術用於邊坡表面位移監測上，期成果證明該方法可有效獲取監測點絕對或相對的位移量。

5. 完成以 IoT 自動攝影架構結合全自動近景計算程序可免去人工的介入，讓攝影測量技術應用於邊坡監測可以更融入實際應用。

6. 以 TLS 三維座標轉換方式來驗證帶有誤差的控制點對解算精度的影響，實驗成果證明，SfM-MVS 方法解算成果與 TLS 三維座標轉換的成果接近，且受變動的控制點也直接反應於該點計算誤差上。此外，該方法解算出來的誤差量為相對位移量，雖然不能直接表示該點的絕對位移量，但可知道該點位已經開始產生位移，可提供後續追蹤使用。

7. 針對異常波浪易致災路段之長浪溯上的數值模擬結果顯示，數值模式 COBRAS 可以相當程度描述 2013 年海燕颱風鼻頭角異常波浪事件，而數值地形最右(西)側的階梯造成波浪向上衝擊應該是異常波浪模擬最重要的要件；也分析有無湧浪所產生的機制，不同湧浪波高可以獲得最大波高，若無颱風的情況下，HMAX=2Hs，而在遠處有颱風存在 HMAX 將改變。

8. 本研究結合文字探勘的技術蒐集異常波浪及海岸公路的新聞資料，以關鍵字「異常波浪+公路」、「異常波浪+台東」、「異常波浪+台 9 線」、「浪襲+台東」、「浪襲+台 9 線」、「颱風+富岡+多良+大武」作為檢索，分析找出易致災之路段，其結果為南迴公路(台

9 線)為多良段(419 公里至 422 公里)至南興段(台 9 線 439.8 公里至 441 公里)，因離海岸近，較常受颱風海浪影響，常為公路總局公告之浪襲路段。

9. 完成多良段 640 個及南興段 781 個之浪襲道路平台的情境模擬，結果顯示入射波高越高，入射週期越大，初始水位值越高的情境下越容易產生溢淹。亦大致顯示平台高程越低越容易產生溢淹。多良段 640 個情境中有 141 個情境發生道路溢淹，其中溢淹範圍達整個路寬的情境約佔 76%(107 個)，南興段 781 個情境中有 534 個情境發生道路溢淹，其中溢淹範圍達整個路寬的情境約佔 85%(453 個)，主要是海浪溯上後的水體持續往道路內側流動所致。整體上最大溯上水位與入射波高、週期和潮位皆無明確的相關性。依臺東海岸公路通行安全預警視窗，可提供交通部公路總局及相關單位作為道路通行安全的評估和道路暫時封閉的參考。

11.2 建議

1. 本研究選定阿里山五彎仔場址作為測試地點，但該場址目前為穩定狀態，由於場址選定不易，且須滿足研究之要求與其他單位之配合，系統實際應用仍需更多案例進行測試，相關數值驗證與監測比較仍待後續補強。建議如有後續研究，除考慮更換研究地點外，也考慮增列鑽孔費用及設置水位監測系統。

2. 由於地下水位非僅由現地垂直入滲而改變，因此水力力學耦合分析有其侷限，建議以長期觀測之地下水位與降雨特徵進行統計分析，帶入極限平衡分析架構，應可增加其應用案例。

3. IoT 自動監測設備可設置於現地，但現地需考慮防水、防盜、電力及網路傳輸等問題，若能夠有效解決上述問題，將可開始實際上線測試。

4. 攝影測量技術受限於可見光的影響，比如天候條件不佳、濃霧、霾害、光照條件不佳或是夜間等情況之下將無法順利取得監測區影像，後續研究中可納入不可見光的攝影方式，如熱紅外線等。將有效解決部分天候條件所產生的問題。

5. 建立異常波浪容易致災之公路的波浪溯上與溢淹數值模式。以公路局道路橫斷面的高程為基礎，再與海科中心的海底地形資料庫內插後，可構建適當的數值地形。為保險起見，可選取平均最高高潮位作為水位基準。

6. 臺東海岸公路通行安全預警之視窗，可提供交通部公路總局及相關單位作為道路通行安全的評估和道路暫時封閉的參考，建議交通部公路總局第三區養護工程處可以使用本系統及配合實際觀測數值作比對並回饋，以利後續精進系統。

11.3 研究成果效益

1. 完成山區公路土壤邊坡深層滑動分析架構,研發低成本易安裝之表層無線監測網路，提升公路總局山區公路邊坡預警準確度。
2. 建立近景攝影測量技術,並制定此方案使用範圍及標準建置程序，應用於分析道路邊坡變遷及崩塌潛勢分析使用。
3. 建立臺東海岸公路易致災區段因異常浪之通行安全評估的技術及資料庫。

11.4 提供應用情形

1. 本研究提供公路總局針對山區公路邊坡預警監測使用，提升預警準確度。
2. 近景攝影監測架構可使用於自動攝影、手動、車載及 UAV 定期巡檢功能，協助國道高速公路局、公路總局、臺鐵局等，做為邊坡自動監測管理巡檢用。
3. 提供未來長浪發生時，臺東海岸公路易致災區段可能遭受的威脅，供公路單位參考。

參考文獻

1. 交通部(2012)，「交通技術標準規範公路類公路工程部公路養護規範」，交通部。
2. 自由時報網站，瘋狗浪奪命 東北角 8 死 8 傷。http://news.ltn.com.tw/news/focus/paper/729213
3. 李如儀(2004)，「景觀道路相關設施設計及施工參考手冊研訂」，交通部台灣區國道高速公路局。
4. 李良輝、張庭榮(2014)，「道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究」，交通部運輸研究所。
5. 林哲毅，1999，「土壤電阻率與含水特性關係之探討」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
6. 吳孟姍、陳國威(2013)，「地面式三維雷射掃瞄於野溪地形監測之應用--以屏東縣來社溪上游段為例」，社團法人中華水土保持學會 102 年度學會。
7. 社團法人永續發展工程學會 (2015)，宜蘭縣大忠村一號崩塌地特定水土保持區調查及監測計畫成果報告書，宜蘭縣政府。
8. 青山顧問有限公司（2006），台 18 線 28.9K~31.5K（五彎仔）地滑區調查、整治規劃及安全評估地滑地區補充監測執行總報告，交通部公路總局第五區養護工程處。
9. 邱永芳、黃安斌、饒 正、李瑞庭、陳志芳、何彥德 (2011)，全光纖式邊坡穩定監測系統整合與現地應用測試 (4/4)，交通部運輸研究所。
10. 洪本善(1998)，「全球衛星定位與自動化監測系統在坡地防災之應用(1/4)」，交通部運輸研究所。
11. 洪本善(2011)，「蘇花公路 115.9K 邊坡崩塌監測預警模式之建立研究」，交通部運輸研究所。

12. 黃安斌、林志平、廖志中、潘以文、湯士弘、簡旭君、吳政達、葉致翔、盧吉勇、楊培熙，2002，「先進邊坡監測系統之研發」，中國土木水利學會會刊，第二十九卷第二期，第 65-78 頁。

13. 張達德、蔡育秀、李宏徹、楊凱鈞，2013，無線感測網路應用於邊坡穩定即時監測系統的研究，第十五屆大地工程學術研討會。

14. 楚萬秀(2008)，「近景攝影測量標誌點設計及資訊處理研究」，東華大學碩士論文。

15. 陳文俊、郭金棟（2005）台東海岸線變遷，第 27 屆海洋工程研討會集文集，第 903-909 頁。

16. 陳冠宇（2002）瘋狗浪的可能機制，海洋工程學刊，第 2 卷，第 1 期，第 93-106 頁。

17. 陳冠宇、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎(2015)，應用地理資訊系統建置臺灣主要商港溢淹災害潛勢圖之研究（1/2），交通部運輸研究所合作研究計畫成果報告。

18. 陳冠宇、劉俊志、張義偉、李俊穎(2016)，瘋狗浪溯上的數值模擬與海岸公路或遊憩區之應用，海洋及水下技術季刊，第 26 卷第 4 期，第 38-47 頁。

19. 陳志芳、謝明志(2016)，「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)」，交通部運輸研究所。

20. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯 (2017)，公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(2/2)，交通部運輸研究所。

21. 蘋果日報網站，瘋狗浪 奪 8 命。http://www.appledaily.com.tw/appledaily/article/headline/20131110/35426913/

22. 董東璟、蔡政翰、蔡仁智、陳盈智、陳琬婷 (2015)災害性瞬變海象之研究(4/4) 交通部中央氣象局海象測報中心期末報告。

23. 廖文選，2010，「以 DSP 實現 GPS 與 IMU 感測器整合系統」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文。

24. 劉俊志(2006) 近岸突浪的分析探討，海洋物理研究所，國立中山大學，碩士論文。

25. 蔡政翰、林盈成、曾相茂（2001) 群波與瘋狗浪，海洋工程學刊，第 1 卷，第 1 期，第 71～82 頁。

26. 蔡政翰、蔡仁智、董東璟（2016) 危險的海岸波浪—瘋狗浪，科學月刊，第 564 期。

27. 戴于恒、張中白(2016)，「應用合成孔徑雷達差分干涉技術監測山崩之潛移現象—以九份及烏來地區為例」，國立中央大學地球科學學系碩士論文。

28. Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). "Analysis of rainfall-induced debris flows." Journal of Geotechnical Engineering, 121(7), pp. 544-552.

29. Bigioi, P., Susanu, G., Corcoran, P., and Mocanu, I. (2002) Digital camera connectivity solutions using the picture transfer protocol (PTP), *IEEE Transactions on Consumer Electronics 48*, 417-427.

30. Cascini, L., Cuomo, S., Pastor M, and Giuseppe Sorbino, G. (2010). "Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(1), pp. 85-98.

31. Chang, M., Chiu, Y., Lin, S., and Ke, T.C. (2005) "Preliminary study on the 2003 slope failure in Woo-wan-chai Area, Mt. Ali Road, Taiwan," Engineering geology, 80, 93-114

32. Chen, Guan-Yu, Liu, Chin-Chu, and Yao, Cheng-Chung (2015) A Forecast System for Offshore Water Surface Elevation With Inundation Map Integrated for Tsunami Early Warning, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 40(1), 37-47, doi: 10.1109/JOE. 2013.2295948.

33. Chen, Guan-Yu (2016), Remote Weather Systems and Associated Swell Effect on the Formation of Freak Waves, in preparation.

34. Chen, Guan-Yu (2016), Remote Weather Systems and Associated Swell Effect on the Formation of Freak Waves, in preparation.

35. COBRAS user's manual version 1.01(2002).

36. Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004). “Stability analyses of rainfall induced landslides.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 130, pp. 362–372.

37. Fraser, C. S. (1997) Digital camera self-calibration, *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 52*, 149-159.

38. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). “ Soil mechanics for unsaturated soils. ” New York, Wiley.

39. Hartley, R., and Zisserman, A. (2003) *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge university press.

40. Ho, Y. T., Huang, A. B., and Lee, J. T. (2006) “Development of a Fiber Bragg Grating Sensored Ground Movement Monitoring System,” Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.

41. Ho, Y. T., Huang, A. B., & Lee, J. T. (2008) “Development of a Chirped/differential Optical Fiber Bragg Gating Pressure Sensor,” Journal of Measurement Science and Technology(19):6pp, doi:10.1088/0957-0233/19/4/045304.

42. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., and Tsai, T.L. (2009) “Field monitoring of pore-water pressure profile in a slope subjected to heavy rainfalls,” Proceedings, XVII International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, pp.1931-1934.

43. Javernick, L., Brasington, J., and Caruso, B. (2014) Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry, *Geomorphology 213*, 166-182.

44. Kharif, C., Pelinovsky, E., and Slunyaev A. (2009) Rogue Waves in the Ocean, Springer.

45. Kothe D. B., Mjolsness, R. C. and Torrey, M. D. (1991), RIPPLE: A Computer Program for Incompressible Flows with Free Surfaces, DOI: 10.13140/RG. 2.1.1397.5200, Report number: LA-12007-MS, Los Alamos National Laboratory.

46. Kuo, C. Y., Tai, Y. C., Bouchut, F., Mangeney, A., Pelanti, M., Chen, R. F., Chang, K. J., (2009) Simulation of Tsaoling landslide, Taiwan, based on Saint Venant equations over general topography,” Eng. Geo., 104, 181-189.

47. Lague, D., Brodu, N., and Leroux, J. (2013) Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82*, 10-26.

48. Lane, S., James, T., and Crowell, M. (2000) Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research, *The Photogrammetric Record 16*, 793-821. Mallet, C., and Bretar, F. (2009) Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art, *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing 64*, 1-16.

49. Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flows". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3 (2): 269–289. doi:10.1016/0045 -7825(74)90029-2.

50. Liang, N. K. (2007) The freak wave mystery - a new hypothesis for its occurrence, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 241-246

51. Liang, N. K. (2012) The Freak Wave Potential of Typhoon Swell, Journal of Marine Science and Technology ； 20 (4) ， P467 - 471 DOI：10.6119/JMST-012-0328-1

52. Lin P. and P.L.-F. Liu (1998). A numerical study of breaking waves in the surf zone. Journal of Fluid Mechanics 359, 239-264.

53. Liu, P.L.-F., P. Lin, K.A. Chang and T. Sakakiyama (1999). Numerical modeling of wave interaction with porous structures. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE 125 (6), 322-330.

54. Orense RP, Towhata I, Farooq K (2003) Investigation of failure of sandy slopes caused by heavy rainfall. In: Proc. Int. Conf. on Fast Slope Movement—Prediction and Prevention for Risk Mitigation (FSM2003), Sorrento.

55. Orense RP, Farooq K, Towhata I (2004) Deformation behavior of sandy slopes duringrainwater infiltration. Soil Found 44(2):15–30.

56. Richards, B. G. (1965) "Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors.", in Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, A Symp. in Print. Australia: Butterworths, pp. 39-46.

57. Sassa K, Nagai O, Solidum R, Yamazaki Y, Ohta H (2010) An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake

and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide, Landslides, 7:219-236

58. Sand, S.E., Hansen, N.E.O., Klinting, P., Gudmestad, O.T., and Sterndor, M.J. (1990) Freak Wave Kinematics in: Water Wave Kinematics, NATO ASI Series E, 178, Kluwer Academic, pp. 535−550. 1990.

59. Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., and Szeliski, R. (2006) A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms, In *Computer vision and pattern recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, pp 519-528, IEEE.

60. Skarlatos, D., and Kiparissi, S. (2012) Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces, *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences 3*, 299-304.

61. Snavely, N., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2008) Modeling the world from internet photo collections, *International Journal of Computer Vision 80*, 189-210.

62. Stumpf, A., Malet, J.-P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., and Skupinski, G. (2015) Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion, *Geomorphology 231*, 130-145.

63. Su, M.Y., Tsai, C.H., Lin, Y.C. and Tseng, H.M. (2002) Nonlinear dynamical mechanisms connecting ocean giant waves and wave groups, 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME.

64. Tsai, C.H., Su, M.Y. and Huang, S.J. (2004) Observation and conditions for occurrence of dangerous coastal waves, Ocean Engineering, 31, 745-760.

65. Tsai, T.L and Yang, J. C. (2006) “Modeling of rainfall-triggered shallow landslide”, *Environmental Geology*, 50(4), 525-534.

66. Uchimura T, Towhata I, Wang L, Seko I (2008) Simple and low-cost wireless monitoring units for slope failure. In: Proc. of the First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, pp 611–614

67. Uchimura, T., Towhata, I., Trinh, T. L. A., Fukuda, J., Bautista, C. J. B., Wang, L., Seko, I., Uchida, T., Matsuoka, A., Ito, Y., Onda, Y., Iwagami, S., Kim, M. S., and Sakai, N. (2010): "Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface", Landslides, 7:351–357

68. Van Genuchten M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Journal of Soil Science Society od America, 44, pp. 892–898.

69. Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes.", In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.), Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C.,pp. 11-33.