

計畫編號：107 保發-11.1-保 01-06-001(36)

**土砂崩落防護網感知系統及告警智能分析
之研究**

**Sensing System and Intelligent Analysis of
Earth Fence for Slope Land Disaster
(成果報告書)**

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：107 年 2 月 9 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人：葛宇甯 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 107 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

土砂崩落防護網感知系統及告警智能分析之研究

摘要

本計畫擬將物聯網之架構應用在土砂災害之防護與示警，並將不飽和土壤之保水曲線與邊坡崩塌，做一系統性地探討。本計畫分為現地與室內兩方面進行，於現地的部分，將引進新式的吸收型輕量土砂防護柵，或於水保局既有之防護柵上，佈設相關之感測器，同時亦佈設於坡地上，監測環境資料，透過雲端的處理，判釋坡地安全，提供必要之預警。當防護網受土砂攻擊時，佈設其上之感測器，亦可透過物聯網，發揮示警的功能。在室內試驗的部分，因土壤邊坡穩定性多受不飽和土壤所影響，非飽和土壤之水分特性曲線(SWCC)為一重要指標，故將透過新發展之定流量幫浦法，來量測所選場址土壤之 SWCC，並進一步與邊坡崩塌做關聯性地探討。

關鍵詞：物聯網、感測器、輕量土砂防護柵、非飽和土壤之水分特性曲線

Sensing System and Intelligent Analysis of Earth Fence for Slope Land Disaster

Abstract

Rock fall is a common geo-disaster that threatens people's properties and lives in Taiwan. A rock fall protection fence is named ultra-light fence will be built. Sensors with on-board gyroscope and accelerometer were installed and placed on the posts of the fence to record the tilt angle of the rock fall protection fence. The data were analyzed and uploaded to Internet in real time, and applied in websites and Apps. When the data reaches the threshold, alarm signals will be sent out in terms of light, sound, and text message, etc.

Keywords: Rock fall, Sensor, Alarm system

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VII
第一章 緒論	1-1
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 報告書大綱	2-1
第二節 ULF TYPE-E 吸收型輕量土砂防護網	2-2
第三節 感測器監測儀器校正與整合物聯網架構	2-6
第四節 現地監測資料與室內試驗之整合	2-8
第五節 蒙地卡羅應用於邊坡穩定分析	2-8
第三章 感測器與監測儀器校正與整合物聯網架構	3-1
第一節 物聯網	3-1
第二節 告警系統架構之傳輸方式	3-3
第三節 感測器 Arduino Genuino 101	3-5
第四節 資料中繼站 Raspberry Pi 3	3-6
第五節 太陽能電力系統	3-7
第六節 整合成果	3-10
第四章 現地監測資料與室內試驗之整合	4-1
第一節 前言	4-1
第二節 定流量幫浦系統	4-2
第五章 應用蒙地卡羅進行邊坡分析	5-1
第一節 蒙地卡羅模擬方法	5-1

第二節	隨機亂數生成方法	5-3
第三節	未來研究案例分析	5-5
第六章	工作進度	6-1
第一節	工作項目進度	6-1
第二節	新式防護工法之施工工期概估	6-2
第三節	新式工法建置成果	6-4
第四節	新式工法之後續維管	6-6
第七章	結論及建議	7-1
第一節	結論	7-1
參考文獻.....		參-1
附錄.....		附錄 1-1
附錄一、	崩壞土砂防護柵-設計計算書(參考).....	附錄 1-1
附錄二、	期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄 2-1
附錄三、	期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄 3-1
附錄四、	期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄 4-1

表次

表 2-1 感測器說明	2-7
表 3-1 藍芽、ZIGBEE、LoRA 比較表	3-5
表 3-2 卡爾曼演算法與 MADGWICK 演算法之比較.....	3-15
表 3-3 警示模組於各階段作用情形	3-25
表 6-1 進度表.....	6-2
表 6-2 施工工期初估表.....	6-3

(以下略)

圖次

圖 2-1 ULF 工法標準圖	2-3
圖 2-2 工法設計流程.....	2-5
圖 2-3 物聯網架構.....	2-6
圖 3-1 ARDUINO GENUINO 101	3-6
圖 3-2 RASPBERRY PI 3	3-7
圖 3-3 車用電池.....	3-8
圖 3-4 35 W 太陽能板.....	3-9
圖 3-5 電源控制.....	3-10
圖 3-6 Z 軸漂移現象.....	3-11
圖 3-7 取樣率與誤差.....	3-14
圖 3-8 X 軸量測數據	3-16
圖 3-9 Y 軸量測數據	3-16
圖 3-10 GAP 廣播流程.....	3-17
圖 3-11 GATT PROTOCOL	3-18
圖 3-12 GATT 廣播流程.....	3-19
圖 3-13 ARDUINO IDE 設定藍芽	3-20
圖 3-14 警示燈.....	3-21
圖 3-15 警示音.....	3-22
圖 3-16 警示模組（無事件狀態）	3-23
圖 3-17 警示模組（警戒值狀態）	3-24
圖 3-18 警示模組（行動值狀態）	3-24
圖 3-19 RASPBERRY PI 系統介面.....	3-26
圖 3-20 HUAWEI E180 與預付卡 SIM 卡.....	3-29
圖 3-21 外接裝置狀態	3-30

圖 3-22 撥號設定文件	3-31
圖 3-23 撥號成功時系統訊息	3-32
圖 3-24 設定 GAMMU 之介面	3-33
圖 3-25 GAMMU 設定檔.....	3-34
圖 3-26 中繼站簡訊發報	3-35
圖 3-27 上傳數據至 GOOGLE 雲端	3-36
圖 3-28 GOOGLE SHEET 資料庫(一)	3-36
圖 3-29 GOOGLE SHEET 資料庫(二)	3-38
圖 3-30 資料監測網頁（基本架構）	3-39
圖 3-31 試算表 ID	3-40
圖 3-32 取得試算表 X 角度之指令碼	3-41
圖 3-33 發布網路應用程式	3-41
圖 3-34 HTML 對網路應用程式發出要求.....	3-42
圖 3-35 官方網站提供之範例	3-43
圖 3-36 即時動態圖表範例（資料來源：BO ERICSSON，2015）..	3-43
圖 3-37 資料監測網頁（含動態圖表）	3-44
圖 3-38 上傳 HTML 至 GITHUB PAGE.....	3-45
圖 3-39 網頁發布之網址	3-45
圖 3-40 VISUAL STUDIO 2017.....	3-46
圖 3-41 APP 發布於手機內	3-46
圖 3-42 APP 內容.....	3-46
圖 3-43 足尺試驗.....	3-47
圖 3-44 實際安裝情形一.....	3-47
圖 3-45 實際安裝情形二	3-48
圖 3-46 足尺試驗結果	3-48

圖 3-47 試驗數據	3-49
圖 4-1 SWRC 試驗儀器示意圖 (LEE, 2011)	4-4
圖 4-2 定流量幫浦與氣密式針筒 (台大土壤力學實驗室).....	4-5
圖 4-3 多孔陶瓷板.....	4-6
圖 4-4 三軸室 (台大土壤力學實驗室).....	4-7
圖 4-5 滲透試驗步驟示意圖	4-8
圖 4-6 定流量幫浦試驗示意圖	4-10
圖 4-7 滲透試驗之標準石英砂結果	4-11
圖 4-8 標準石英砂之吸力和時間之關係圖	4-12
圖 4-9 標準石英砂之不飽和土壤水分特性曲線.....	4-13
圖 5-1 SLIDE 模型建置.....	5-6
圖 6-1 場址原貌	6-4
圖 6-2 現地放樣.....	6-4
圖 6-3 施工完成(一).....	6-5
圖 6-4 施工完成(二).....	6-5
圖 6-5 緩衝金具 ULF-US、UH 概要圖	6-7
圖 6-6 緩衝金具 ULF-OS、OC 概要圖	6-7

(以下略)

第一章 緒論

本計畫擬將物聯網之架構應用在土砂災害之防護與示警，並將不飽和土壤之保水曲線與邊坡崩塌，做一系統性地探討。本計畫分為現地與室內兩方面進行，於現地的部分，將引進新式的吸收型輕量土砂防護柵，或於水保局既有之防護柵上，佈設相關之感測器，同時亦佈設於坡地上，監測環境資料，透過雲端的處理，判釋坡地安全，提供必要之預警。當防護網受土砂攻擊時，佈設其上之感測器，亦可透過物聯網，發揮示警的功能。在室內試驗的部分，因土壤邊坡穩定性多受不飽和土壤所影響，非飽和土壤之水分特性曲線(SWCC)為一重要指標，故將透過新發展之定流量幫浦法，來量測所選場址土壤之SWCC，並進一步與邊坡崩塌做關聯性地探討。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 報告書大綱

本文內容概述如下：

第一章 緒論

本章介紹本研究之動機。

第二章 工作執行方法與步驟

本章簡述本計畫之執行方法與步驟。

第三章 感測器與監測儀器校正與整合物聯網架構

本章詳細說明感測器與監測儀器校正與物聯網的整合進行詳盡說明。

第四章 現地監測資料與室內試驗之整合

本章節說明如何將詳細說明不飽和水分特性曲線之試驗方法，本計畫下一階段將於場址處取得監測資料後進行現地及室內試驗之資料整合。

第五章 應用蒙地卡羅進行邊坡分析

本章節引入蒙地卡羅之概念，下一階段將以此進行隨機場之邊坡分析。

第六章 工作進度

第七章 結論與建議

第二節 ULF TYPE-E 吸收型輕量土砂防護網

此工法之概念源自日本開發商株式会社ライテク（此後以 Raiteku 稱之）所研發之邊坡土砂防護工法。ULF TYPE-E 吸收型輕量土砂防護柵乃為 Raiteku 所開發之各式邊坡土砂防護工法的其中一種，乃運用逐步消能的防災觀念，於土砂災害自邊坡崩落的過程中，透過各式工法分段消除因高度差而形成的能量。本合作計畫預計採用之能量吸收型土砂防護柵 (Ultra-Light Fence Earth type E, ULF TYPE -E)，乃為超輕量支柱和具專利之金屬緩衝器件之組合。經實驗證明，能消除 300 kJ 的土砂衝擊能量，或 114 kN/m^2 的土砂衝擊力。

一、計畫條件

本計畫決定於台北市蟾蜍山作為工法佈設位置，以 ULF TYPE-E 做為崩壞土砂防護柵使用時。

- (一) 係以崩壞土砂防護為目的之構造設置。
- (二) 係以長期防護對策為目的之永久結構型式。
- (三) 防護柵上方之邊坡角度為以下所述。
邊坡角度： 40° 。
- (四) 防護柵上方之邊坡高度為以下所述。

邊坡高：7.5 m

基礎地盤之地質條件如下所述。

地盤種類：1 層：表層；2 層：砂礫

平均 N 值：1 層：N=0；2 層：N=30

極限周圍摩擦抵抗：1 層： 0.00 N/mm^2 (忽略周圍摩擦抵抗)

2 層： 0.2 N/mm^3 (砂礫、N=30)

(五) 使用金屬網規格

金屬網規格：鍍鋁鋅鋼線（素線徑 4.0 mm、網目 40 mm）

(六) 使用支柱規格

支柱規格：圓形鋼管 $\phi 165.2 \times t 6.0$

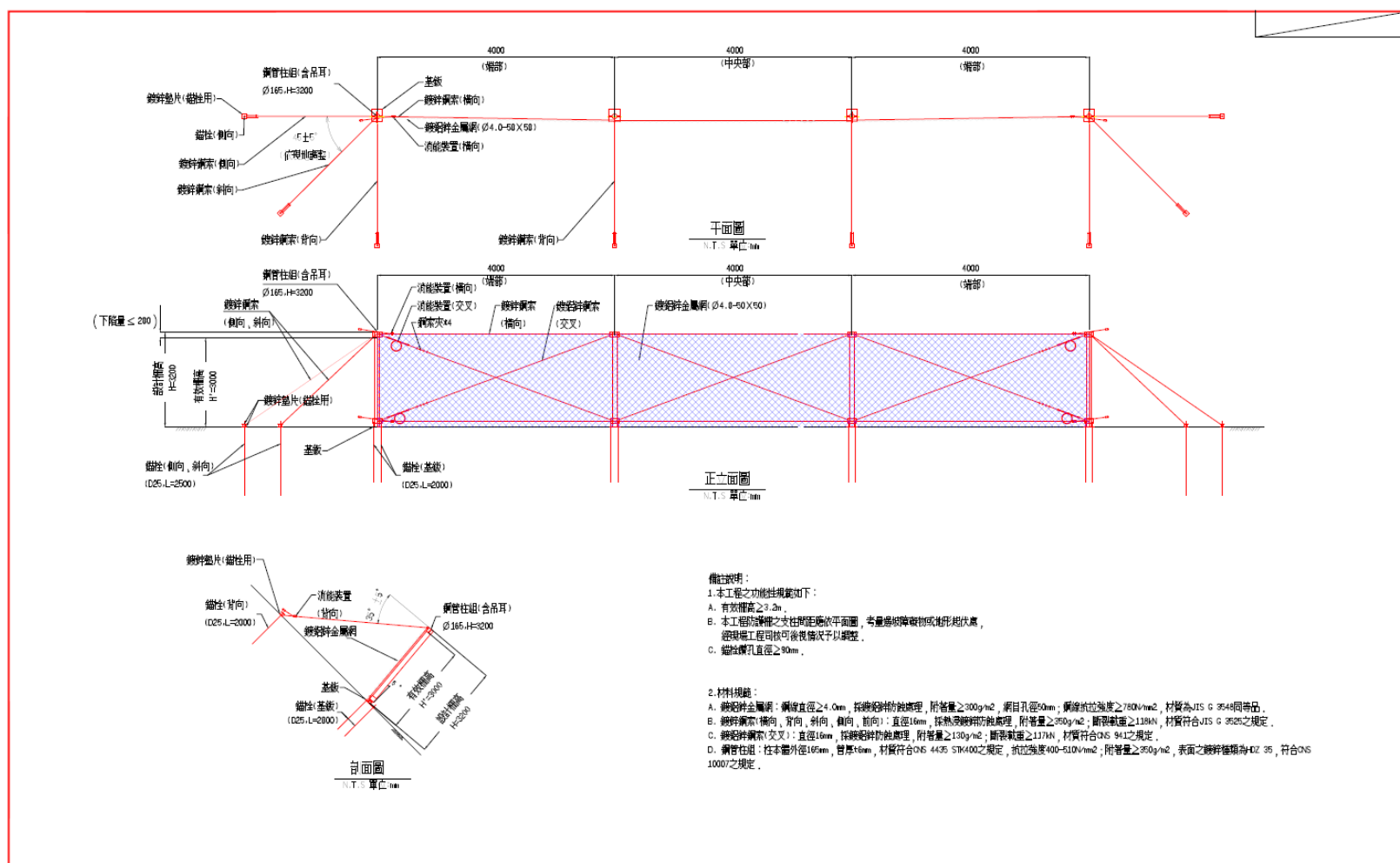


圖 2-1 ULF 工法標準圖

二、ULF Type-E工法設計流程

該工法之設計流程如

圖 2-2 所示，俟與水保局工作小組商討後，共同決定工法佈設之位置。計算流程詳附錄一。

三、參考準則

- (一) 道路土工 切土工・斜面安定工指針
[社]日本道路協會（平成 21 年 6 月）
- (二) 道路土工 擁壁工指針
[社]日本道路協會（平成 24 年 7 月）
- (三) 道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV鋼橋編
[社]日本道路協會（平成 24 年 3 月）
- (四) 崩壊土砂による衝撃力と崩壊土砂量を考慮した待受け擁壁の設計計算事例
平成 16 年 6 月 全国地すべりがけ崩れ 対策協議会
- (五) 落石対策便覧
[社]日本道路協會（平成 12 年 6 月）

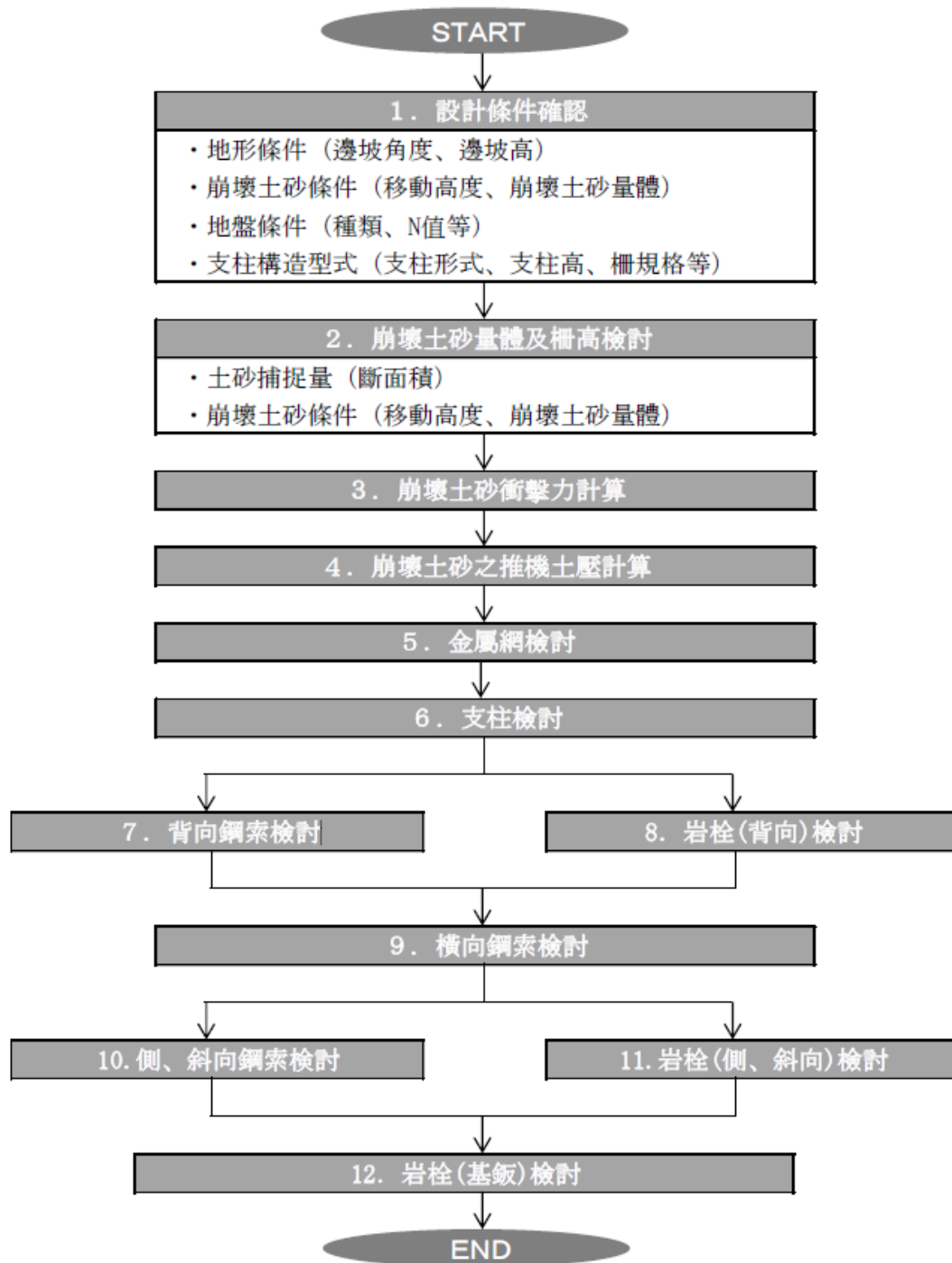


圖 2-2 工法設計流程

第三節 感測器監測儀器校正與整合物聯網架構

本計畫之物聯網系統主要是由三個節點所構成（如圖 2-3）。其一，由大量具藍芽 4.0 傳輸功能的感測器佈置於 ULF 防護網之支柱，並量測其傾角之即時變化，根據預先設定的警戒值及行動值控制不同警示系統作用。感測器本身不具儲存資料之功能，僅將量測之資料傳輸給上一層的資料中繼站。藍芽 4.0 傳輸功能感測器選用之原因將由第四章中有詳盡說明。其二，建構在數個感測器之上的資料中繼站，負責溝通及統整各感測器之間的資訊，並彙整成可視資料上傳至雲端，亦根據警戒值及行動值控制其他警示系統作用。其三，由雲端資料庫提供的網路空間，形成最終的資料庫，可透過手機 APP、個人電腦或網頁即時關注各感測器最新的狀態，亦可用於後續資料分析以回饋系統，達到更精準的判別。

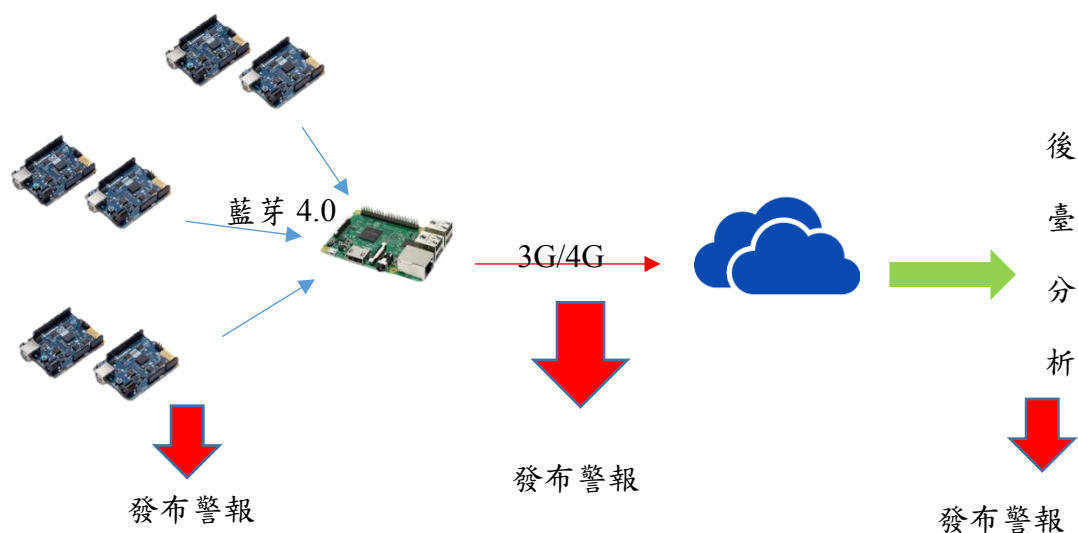
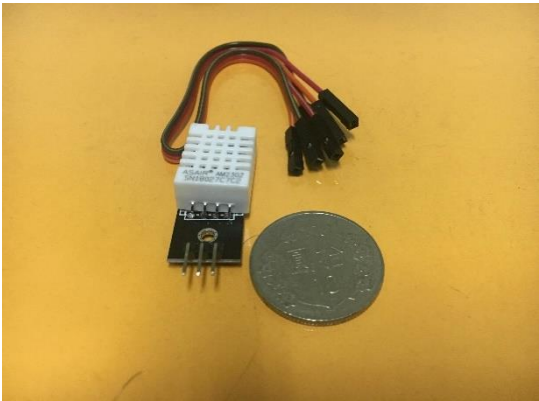
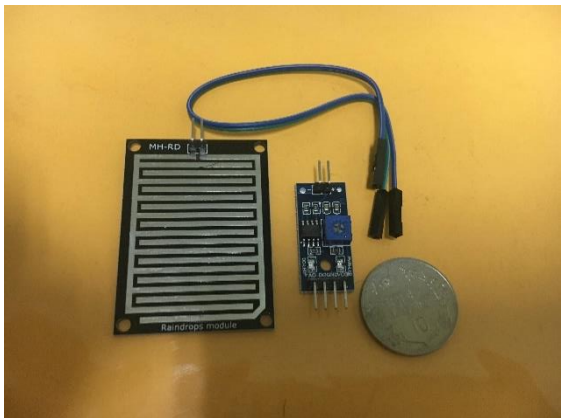


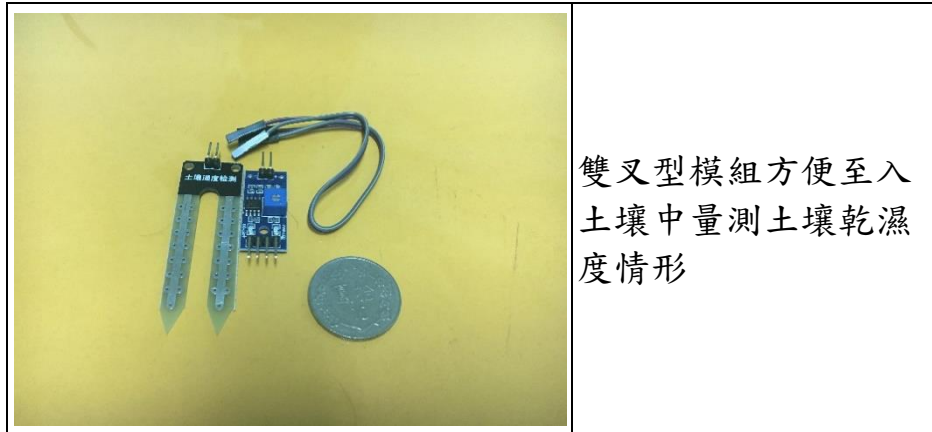
圖 2-3 物聯網架構

爾後，選定並校正感測器，包含濕度溫度感測器、氣壓計、降雨

感測器、土壤濕度感測器、陀螺儀、加速度規等。基本淺層邊坡安全監測系統則可透過設置多層土水導電阻感測器及雨量計，用以監測並提供現地雨水入滲與雨量及土壤間的關係，監測多層土壤水分，及時監控邊坡的穩定度。目前已購置下表所示之感測器，並進行校正中。

表 2-1 感測器說明

感測模組	說明
溫溼度感測器 DHT22	 溫度測量範圍: -40°C–80°C 濕度測量範圍: 0–100%RH 量測精度: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, $\pm 1\%$
降雨感測器	
	 降雨時透過降落在板上的雨滴大小和多寡，改變感測器的電壓輸出，間接知道有無降雨以及降雨大小
土壤濕度感測器	



第四節 現地監測資料與室內試驗之整合

現地監測之山坡環境因子，如雨量、表層土壤之含水量，地下水之位置、氣壓及溫度等，將與防護網所量測到支柱之運動選轉之角度，做大數據之連結。另外，SWCC 曲線將用在 Lu and Likos (2006) 之非飽和土有效應力架構，將現地邊坡表土之有效應力，與現地量測之體積含水量做進一步之相互驗證，期將力學機制與環境因子透過大數據分析建立關係。

第五節 蒙地卡羅應用於邊坡穩定分析

現地監測之山坡環境因子，如雨量、表層土壤之含水量，地下水之位置、氣壓及溫度等，將與防護網所量測到支柱之運動選轉之角度，做大數據之連結。另外，SWCC 曲線將用在 Lu and Likos (2006) 之非飽和土有效應力架構，將現地邊坡表土之有效應力，與現地量測之體積含水量做進一步之相互驗證，期將力學機制與環境因子透過大數據分析建立關係。

第三章 感測器與監測儀器校正與整合物聯網架構

本研究計畫將針對已選定之工址，設置具有陀螺儀、加速度計之感測器配合 ULF 工法之防護網，量測防護網支柱之傾斜角度上傳至雲端以利網頁或 APP 平台使用，以期達到即時監測邊坡資料。當達到設定警戒值及行動值，分別即時啟動各項警示模組，如警示燈、警示音、簡訊等等，便能加強緊急應變之能力。

第一節 物聯網

本計畫將透過物聯網之概念，將防護網支柱之傾角作為監測對象，即時且長時間監控防護網狀態，並希望僅在災害發生時，相關人員才需至現場進行維護及評估，節省人力及時間資源。

物聯網 (IoT) 最初的概念是以大量的裝置，如 RFID (無線射頻辨識) 標籤、感測器、執行器和智慧型手機等等，透過裝置本身唯一的位址彼此間互相溝通來達成共同目標，使用情境如農牧場管理、石油挖掘監測、智慧家庭等。以智慧家庭來說，透過手機或平板控制燈光強度、溫溼度感測器自動調整冷氣強度或風向等都是物聯網的實踐。有別於以往裝置與裝置之間單純傳輸資料，裝置本身是具有智能，可以依據蒐集的資料做出控制的反應，並且加強與人生活的關聯性，除此之外，它能依據需求發展出客製化的應用，並不侷限某種特定裝置

才可以建立物聯網。

簡而言之，物聯網是結合人、裝置、數據及運算力達到改善我們的生活或商業行為，而物聯網能興起主要有下列原因：

- (一) 低廉的感測器 – 感測器的平均價格在十年內由 1.3 美元降至 0.6 美元。
- (二) 低廉的頻寬 – 在過去十年頻寬的成本下降了近 40 倍。
- (三) 低廉的運算力 – 同樣地，運算成本在十年內下降了 60 倍，使得裝置不僅僅是互相連結，而是具有智能，可以對自己產生或接收到的新數據做處理。
- (四) 智慧型手機普及 – 智慧型手機變成一個個人通往 IoT 的媒介，可以處理遠端遙控連結到居家、車輛或是近期興盛的醫療健康穿戴裝置。
- (五) 無所不在的無線網路 – 隨著 Wi-Fi 的普及率，連結網路的成本非常低廉甚至免費。
- (六) 大數據 – 由於 IoT 勢必產生大量的數據，大數據分析的發展與 IoT 是互相助益的。
- (七) IPv6 – 大部分的網路裝置現今皆支援 IPv6，且最新的網際網路協定標準 (Internet Protocol standard) 將要取代過去的 IPv4。IPv4 僅支援 32 位元的 IP 位址，大約提供 43 億個不同的位址，然而這數量級遠遠不能滿足全球物件的數量。另一方面 IPv6 支援 128 位元的 IP 位址，數量大約是 3.4×10^{38} ，幾乎無限的 IP 位址將可輔助標記 IoT 大量的裝置。

本計畫引入物聯網的概念，將邊坡監測不僅僅是資料收集，也

能達到數據處理並針對不同情境採用不同的告警方式，不透過人員被動監測，而是裝置本身的判斷達到節省人力及縮短事件發生到做出緊急處理的時間。

第二節 告警系統架構之傳輸方式

本計畫之告警系統係針對邊坡防護，山區常面臨地勢險峻，人員不易到達之外，亦沒有無線網路（wifi）涵蓋，甚至 3G、4G 網路訊號不佳。為此，合適之感測器和資料中繼站之傳輸為本計畫之重點，以期在不利條件下能達到最佳的傳輸方式效果，以下將比較藍芽、Zigbee、LoRa 之優劣，簡易比較詳表 3-1。

Zigbee 為一低速短距離之無線傳輸技術，其主要優勢為低成本、低功耗、支援大量網路節點、支援多種網路拓撲、低複雜度考量等，是適合大量鋪設的一種傳輸協定。雖在傳輸距離、功耗及組織性占優，但 Zigbee 在傳輸時較易掉封包，且傳輸量稍低。

LoRa 則是一項最近新興的長距離傳輸方式，最大特點為公里級的傳輸距離及極低的功耗，是近期物聯網重要的核心架構。其低功耗之特點雖然延長了電池使用壽命及降低維護成本，犧牲的是其傳輸量及傳輸頻率，目前 LoRa 之應用多使用在適合數分鐘或數小時進行一次傳輸的情境，如農場管理或動物追蹤。

藍芽（Bluetooth）之傳輸特性類似 Zigbee，屬於短距離傳輸之技

術，然其無線電頻率採用 2.4GHz，屬於非常普遍使用且擁擠的頻段，除了 Bluetooth，諸如 wifi、Zigbee、微波爐等等皆有使用此頻段，意即藍芽傳輸容易受到鄰近裝置的影響，甚至是其他藍芽裝置。然而在新推出的藍芽 4.0 規範大幅改善此一干擾問題，採用了自適應跳頻將傳輸頻段再細分成數十個子頻段，並快速的切換子頻段，使得同頻段的干擾降到最低。除此之外加強低功耗技術，並改善其傳輸距離，抗干擾能力，惟其傳輸距離僅符合本研究的最低標準（10 m）。

除了傳輸技術本身性能，亦須考慮操作性、技術需求及成本，LoRa 雖傳輸距離及功耗十分優越，惟其傳輸量及傳輸頻率不符合本計畫所應用的情境，且架設成本亦是此三者之中最高，故不予採用。而 Zigbee 和藍芽兩者性質相似皆符合研究情境需求，總體來說 Zigbee 較具優勢，然而在選擇所需的感測器時，感測器本身即搭載了藍芽 4.0 之功能，滿足本計畫之需求，故此研究以藍芽 4.0 作為感測器與中繼站之傳輸。

而在中繼站與雲端部分，由於涉及雲端網路及較多的資料量，需採用 3G/4G 網路或 wifi 的傳輸方式，由於受限於現地可能沒有既有之無線網路可用，僅能選擇 3G/4G 網路，所以中繼站必須選擇可擴充 3G/4G 網卡之裝置以完成雲端傳輸的步驟。

表 3-1 藍芽、Zigbee、LoRa 比較表

模組	藍芽	Zigbee	LoRa
傳輸距離	10-100m	50-300m	>10km
傳輸量	24Mbps	250Kbps	<1Kbps
功耗	中	低	極低
安全性	高	中	中

第三節 感測器 Arduino Genuino 101

為符合量測傾斜角度及藍芽傳輸的需求，選用 Arduino Genuino 101（如圖 3-1）作為感測器，Arduino 為一家開發微控制器的廠商，其優點是，低程式語言需求、開源程式碼、擴充性高及價格平易，非常適合在開發階段產品，而 Genuino 101 則是近年所推出的一塊新控制板，其上搭載三軸陀螺儀、三軸加速度計、藍芽 4.0 模組及一些基本 I/O 介面，這些都非常符合研究的要求，而價格低廉也是使物聯網達到可行性的條件之一。

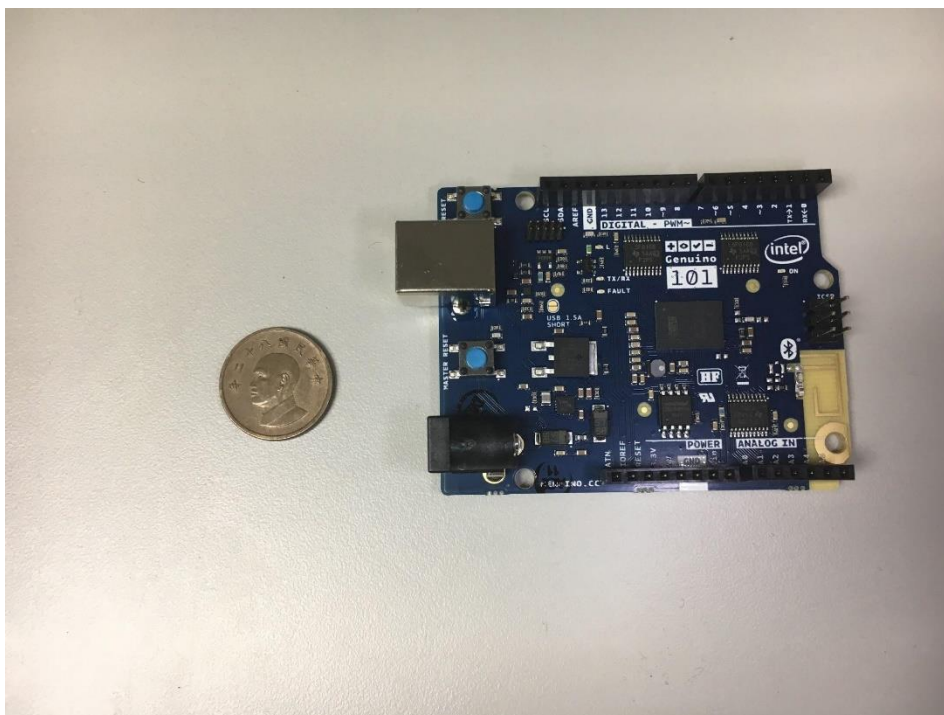


圖 3-1 Arduino Genuino 101

程式可採用 java、C#等語言編寫，工程師僅需學習一種語言即可，減少開發時造成工程師的困擾，另其相關擴充元件甚多，可依據後續需求將所需之模組直接擴增在原控制板上，例溫溼度感測、土壤濕度、雨量感測等等，其他如前面所提到的 Zigbee，亦有相關模組可擴充，對於開發者來說非常彈性。而電力需求亦容易達到，輸入電壓範圍 5V~13V，電流大約在 250mA，屬於低功耗的控制器，一般市售的 9V 電池即可啟動達一個多小時。

第四節 資料中繼站 Raspberry Pi 3

中繼站除了要以藍芽與感測器間溝通之外，尚需具備網路功能將收集之資料上傳，本身也需具備資料儲存之能力，以提供網路中斷時的資料備份。綜合以上需求，本研究挑選 Raspberry Pi 3 作為資料中繼站（如圖 3-2），Raspberry Pi 系列的單板電腦，除了售價便宜，其運算速度非常優異，適合處理數據的蒐集、加

工及網路傳遞，可以在有 wifi、乙太網路或是網卡支援情況下連結網路，甚至在使用網卡的情形下，變成一路由器（Router）提供網路給其他裝置連線，亦支援藍芽 4.0 可讀取感測器上的龐大數據。而中繼站的容量取決於擴增的 SD card 可以達到 128GB 以上的容量。

Raspberry Pi 基本上與一般電腦功能相同，可以文書處理、使用瀏覽器上網、觀看影片等等，不同的是僅有一個手掌大小，耗電量也比一般電腦低上許多。電壓需求為 5V，作用時的電流最高量測到 2.1A，是整套系統最耗電的項目。



圖 3-2 Raspberry Pi 3

第五節 太陽能電力系統

物聯網的兩個實體節點功耗不大，但由於具崩塌潛勢之邊坡多地處偏遠，人車不易到達，若要定期更換電池勢必會造成維護上的麻煩，故能源自立性是不可或缺的。其中太陽能電力系統最重要的兩個項目：電池與太陽能板的選擇，將影響整套系統的優劣，以下將詳述如何挑選電池與太陽能板及其考量。

一、電池

台灣雖地處亞熱帶地區，但仍屬島嶼型氣候，平均日照時數雖高，但冬夏兩季差異大，必須要能克服長時間電池無法充電的情況。所以在電池選擇上，必須先計算各個節點的耗電量做評估，最後挑選合適的電池。

首先訂定 14 天為電池再無任何太陽能發電補注情形下可持續運作的時間，以一個中繼站來說，電源規格為 5V 輸入，前一節所提到 2.1A 僅為起動時所需的電流，且量測期間尚有螢幕訊號輸出增加統計的量值，開機後只需較少的電流維持運作。在接收及上傳資料過程中平均量測到的電流是約為 350 mA，加上變壓器的消耗，每小時消耗能量為 2 Wh。本研究現階段以市面上常用的車用 12 V 電池（圖 3-3）容量為 60 Ah，也就是 720 Wh 作為使用。



圖 3-3 車用電池

二、太陽能板

依據每日功耗及監測地區有效日照時數計算太陽能板所需功率。

等效日照時數的定義為：

當地之日照量換算為 1000 W/m^2 之標準條件下之等效照射時間。

由於市售太陽能板所標示之功率為在此一標準下之功率亦即有效日照時數為能達到太陽能板全功率運轉的時數。資料中繼站每日功耗為 48 Wh ，可應用下列公式可得目標太陽能板功率：

$$\text{太陽能板功率} \times \text{轉換效率} \times \text{有效日照時數} = \text{每日功耗}$$

太陽能板(圖 3-4)與電池間亦須靠電源控制器(圖 3-5)使用。



圖 3-4 35 W 太陽能板



圖 3-5 電源控制

第六節 整合成果

一、Arduino

負責量測此次研究的傾角資料需要其板上搭載的陀螺儀及加速度計，其實兩者皆能獨立量測出傾角位態資料，但兩者量測的原理分別有以下缺點：

(一) 角度量測

1. 陀螺儀

微機電系統 (MEMS) 的陀螺儀，是利用內部的機械元件，結合科氏力原理，將量測的角速度轉換成徑向位移，再透過感測元件將位移量對應成角速度，最後透過對時間積分角速度及原初始位態得到旋轉後的角度。然而其中量測必然存在誤差，雖然極其微小，在對時間

積分後對角度的影響甚鉅，以至於用陀螺儀計算的角度出現大偏差或是靜止狀態時計算結果發生「漂移 (drifting)」的現象，如圖 3-6。

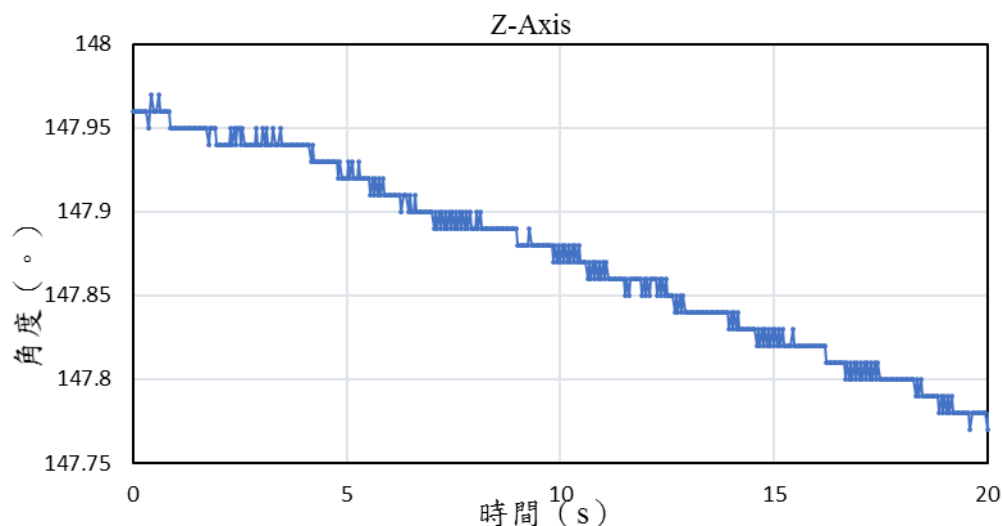


圖 3-6 Z 軸漂移現象

2. 加速度計

同樣是微機電系統 (MEMS) 的加速度計，利用物體運動時加速度改變桿件內可變動電極及固定電極的距離產生電容變化，此一變化的值再轉換成對應的加速度值。在靜止狀態下，三軸量測的加速度向量合成後即為重力方向，再將三軸加速度的分量對重力方向的夾角計算出物體的位態，但在物體運動狀態下，物體的除受重力以外，亦受外力影響，三軸加速度計量測的是外力和重力的合力方向，無法知道此時重力方向為何變無法

知道物體的位態。

兩者都有其缺點無法全方面的量測角度位態，卻能被彼此的優點彌補：陀螺儀量測的是角速度，並不受物體的運動狀態或重力影響，即使受到撞擊或其他外力可以量測動態的角度，彌補加速度計的不足；而加速度計在靜止狀態，提供陀螺儀正確的角度，即使發生漂移的現象，透過加速度計便可知該漂移現象是否物體真的在旋轉。兩者的相輔相成才能提供不論靜態或動態精準正確角度資訊。

本計畫量測角度是藉由陀螺儀及加速度計量測之三軸角速度及三軸加速度，配合 Madgwick 演算法擬和出角度，Madgwick（2010）提出了一種以四元數（quaternion）代表量測到之角速度及加速度（或磁力）的演算法，能夠應用在 IMU（Inertial Measurement Unit）或是 MARG（Magnetic, Angular Rate, and Gravity）。IMU 包含了陀螺儀及加速度計，即本計畫採用之 Arduino 101 所涵蓋的範圍；而 MARG 或稱 AHRS（Attitude and Heading Reference Systems），則是混和 IMU 及磁力計，利用磁力計量測之地球磁場對重力方

向進行修正。此演算法之特點有以下幾點：

(1) 計算需求低

由於感測器本身之計算能力遠不及單板電腦，無法進行計算需求大的演算法，以 IMU 的計算為例，更新一次四元數需要 109 個純量算術運算；而 MARG 則需要 277 個。較低的運算量也能配合硬體的高取樣率，而 Arduino Genuino101 最高取樣率達 400Hz。

(2) 適合低取樣率

因本研究需適應野外電力供應緊繃之情境，低取樣率可以有效降低功耗，然而取樣率低可能會造成角度計算誤差提高，Madgwick (2010) 在提出他的演算法時，強調其演算法在低取樣率之表現，如圖 3-7：

左圖為 IMU 在不同取樣率時動態或靜態之表現，在 10Hz 的取樣率下，靜態的方均根誤差已經來到 2 度左右，動態誤差則是 5 度，而 Arduino Genuino101 最低取樣率是 25Hz，對照圖 3-6 靜態誤差約在 1 度、動態則是 2.5 度左右。另外可以觀察到 MARG 在低取樣率時（10Hz 以下）有較小之誤差，若未來有需要更低取樣率之情境（例如追求更低功耗），可以考慮採用

MARG 作為感測元件。

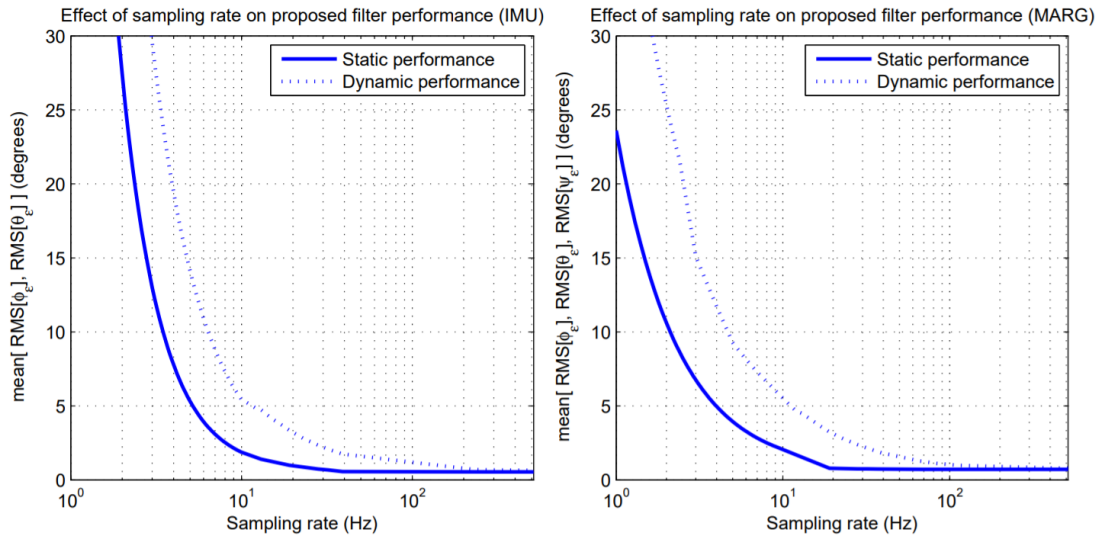


圖 3-7 取樣率與誤差

(3) 較傳統卡爾曼濾波準確如表 3-2。

φ 、 θ 、 ψ 分別代表 x, y, z 三軸之旋轉角度，無論是 IMU 或是 MARG 在雙軸上皆優於卡爾曼演算法，而 z 軸 Madgwick (2010) 提到 IMU 無法對其進行運算，然而本研究僅需知道雙軸傾斜的角度， z 軸（防護網支柱方向）之旋轉非本研究觀察之重點。

要設定初始化一臺 Arduino 元件必須先使用內建的自動校準函式調整加速度計及陀螺儀自身的偏差，須借用到水平且防震動的光學平台，在其上進行自動校準，並記錄加速度計及陀螺儀三軸的校準量，再以編譯的方式，設定每次啟動的校準量，上述動作可以保證在每次

啟動控制板時，x、y 方向都是以水平 0 度為基準，若初始設定為每次啟動自動校準，則啟動時會以當下的角度作為 0 度基準。若監測中重新啟動，則先前記錄到的傾斜角度便會成為新的基準，這使得某些事件，如土砂堆積為一個連續的過程，並非一瞬間達到最大的傾角，重新啟動造成累積的傾角歸零，感測器將無法正常發出警訊，所以必須有以上動作以水平為基準的設定。

表 3-2 卡爾曼演算法與 Madgwick 演算法之比較

Euler parameter	Kalman-based algorithm	Proposed filter (MARG)	Proposed filter (IMU)
RMS[ϕ_ϵ] static	0.789°	0.581°	0.594°
RMS[ϕ_ϵ] dynamic	0.769°	0.625°	0.623°
RMS[θ_ϵ] static	0.819°	0.502°	0.497°
RMS[θ_ϵ] dynamic	0.847°	0.668°	0.668°
RMS[ψ_ϵ] static	1.150°	1.073°	N/A
RMS[ψ_ϵ] dynamic	1.344°	1.110°	N/A

φ 、 θ 、 ψ 圖 3-8 及圖 3-9 為校正後置於桌面（非光學平台）量測之結果：

可以觀察感測器量測到此桌面的傾斜為 X 方向-0.8 度、Y 方向 1.2 度，而量測之誤差約為 ± 0.5 度，取樣率為 25 Hz，誤差符合 Madgwick (2010) 所提出的範圍。

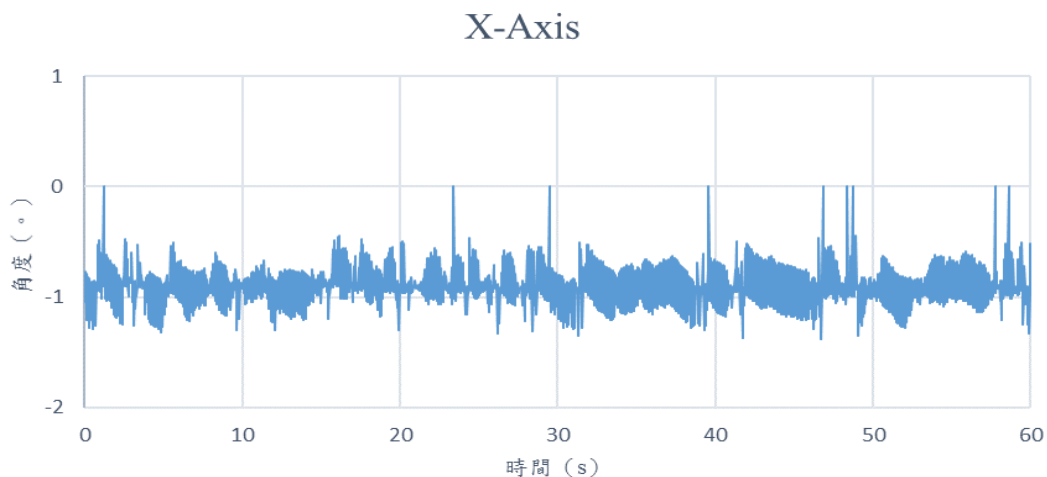


圖 3-8 X 軸量測數據

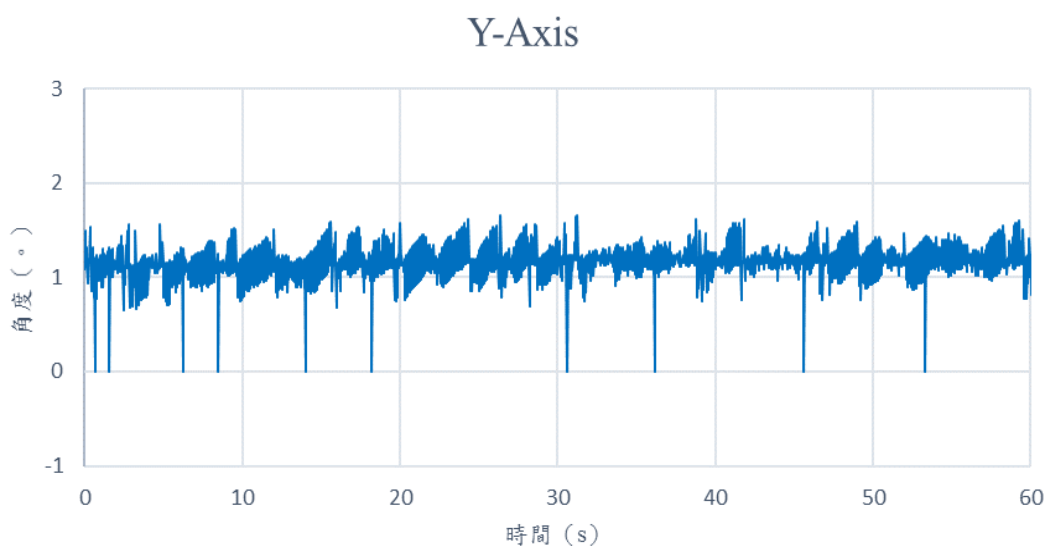


圖 3-9 Y 軸量測數據

二、藍芽傳輸

本次使用板載藍芽模組為藍芽 4.0，有別於以往藍芽模組，藍芽 4.0 提供了「低功耗模式 (BLE)」，在 BLE 的模式下，有效提升傳輸距離及降低功耗，然而藍芽 4.0 所採用的通訊協定 GATT Protocol，不再是透過主從雙方的 Tx/Rx 腳位進行資料傳輸。

在談及 GATT 架構之前，必須先了解 GAP（Generic Access Profile），它是用來控制裝置的廣播與連接。GAP 先定義了兩種裝置的分類：

- ◆Peripheral: 外圍裝置，通常為簡單或小、低功耗設備，用來提供數據。

在本研究裡就是感測器 Arduino。

- ◆Central: 中心裝置，負責收集外部裝置的數據，相對於外部裝置功能複雜，並可連結其他外圍裝置。在研究裡是資料中繼站 Raspberry Pi。

在 GAP 中外圍裝置透過兩種方式對外廣播數據，分別是 Advertising Data Payload（廣播數據）和 Scan Response Data Payload（掃描回覆），每種數據最長可以包含 31 byte。外圍必須不斷地向外廣播，讓中心裝置知道自己的存在。掃描回覆則是中心裝置向外部裝置請求回覆，內容可能是數據以外的資訊，如設備名字。

GAP 廣播流程如下圖：

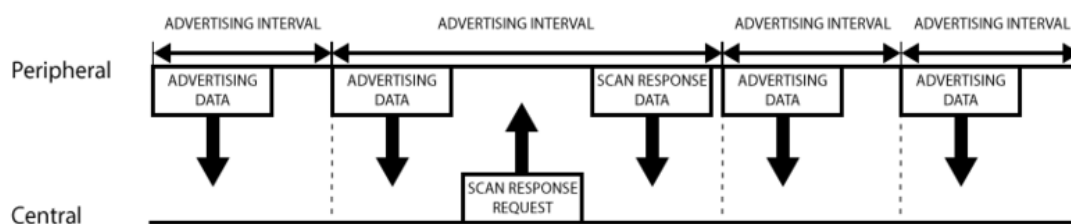


圖 3-10 GAP 廣播流程

外部裝置每隔一段時間會對外廣播數據，間隔越長就越省電，但被中心裝置發現的機率也越低，而在這廣播間隔（Advertising interval）中如果中心裝置要求掃描回覆，外部裝置便會回傳中心裝置

的要求，然後開始下一個廣播間隔。

而在 GATT 架構下定義了兩個名詞，服務（Service）與特徵（Characteristics），兩者關係如圖 3-11：

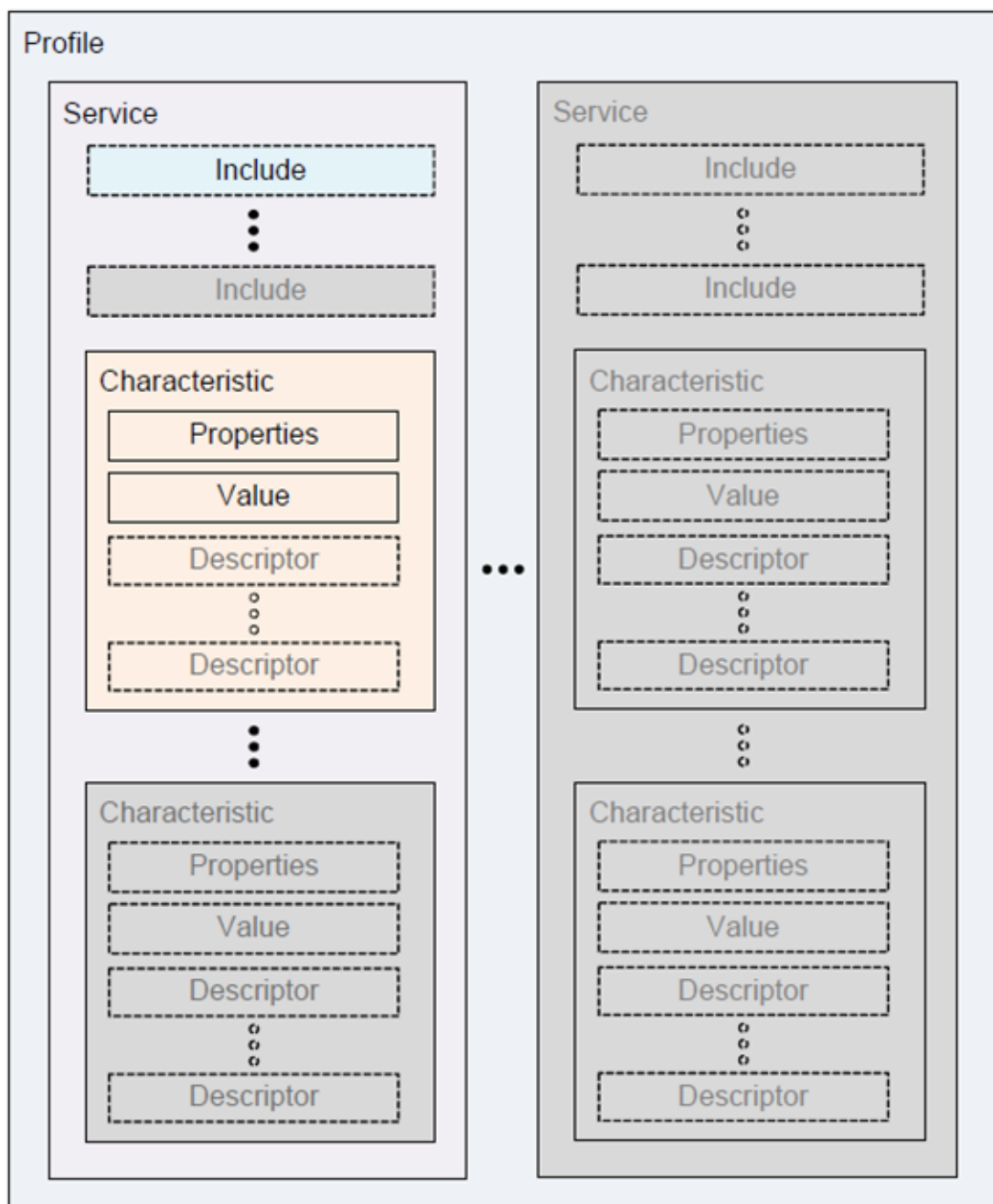


圖 3-11 GATT Protocol

每個服務當中會包含數個特徵，而在特徵當中包含一個 property/value 跟數個 descriptor，透過服務跟特徵來連結兩個 BLE 裝置的通信。要注意的是 GATT 連接也是通過上述的 GAP 協議，但不同的是 GATT 的連接是獨佔的，也就是一旦 BLE 裝置產生連接，外部裝置便會停止廣播，所以一個外部裝置只能對應一個中心裝置。雖然有了這個限制，但透過 GATT 協議連接的兩方可以互相通信。

而雙方通信的原則是遵守主從關係，外部裝置作為 Server(從)具有服務和特徵的定義，中心裝置作為 Client(主)向從端發出要求。與 GAP 不同的是，數據的交換都是由主端發出要求，從端回覆或接受。

連接一旦建立，外部裝置一樣會建議中心裝置一個連接間隔 (Connection Interval)，中心裝置就會依照此間隔去嘗試連接外部裝置，但中心裝置不一定會遵守此建議，中心裝置會依照自身的狀態如嘗試連接其他裝置或是處理別的運算安排兩者的連接。

GATT 主從端的連接如圖 3-12：

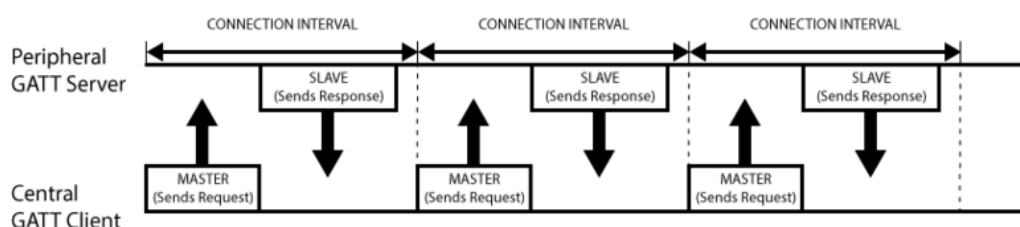


圖 3-12 GATT 廣播流程

圖 3-13 則是在設定 arduino 前述所說的廣播、服務及特徵。



```

檔案 編輯 草稿碼 工具 說明
_2C78
#include <CurieIMU.h>
#include <MadgwickAHRS.h>
#include <CurieBLE.h>

BLEPeripheral blePeripheral; // BLE Peripheral Device (the board you're programming)
BLEService gyroService("19B10000-E8F2-537E-4F6C-D104768A1214"); // BLE LED Service

BLEFloatCharacteristic PitchdataChar("19B10001-E8F2-537E-4F6C-D104768A1214", BLERead);
BLEFloatCharacteristic RolldataChar("19B10002-E8F2-537E-4F6C-D104768A1214", BLERead);
BLEFloatCharacteristic HeaddataChar("19B10003-E8F2-537E-4F6C-D104768A1214", BLERead);

```

圖 3-13 Arduino IDE 設定藍芽

(一) 訊號輸出

本研究針對已選定場址提出以下四個警示模組，使用者可依據實際需求，自行選配，增加成果之效益。

1. 警示燈

在 Arduino IDE 內設定警戒值與行動值，並將警示燈分為紅色警示燈與黃色警示燈，達到警戒值時，Arduino 負責警示燈模組的 digit I/O pin 便會以電壓做為控制發出訊號，使繼電器切換電路，將黃色警示燈的電路導通，並在超過行動值時再次切換電路使黃色警示燈熄滅。由於採用繼電器的方式，Arduino 與所有的警示模組電路分離，兩者互不相通，可以保護感測器在需要高功率、高電壓或高電流警示模組啟動時，不至於燒毀。無事件發生時所有模組電路皆是斷路，

不會造成電源損耗。

同理應用在行動值發生時，負責警示燈模組之 pin 會發出訊號切換繼電器將紅色警示燈電路導通。圖 3-14 之警示燈可依使用者需求選用 LED 型式、尺寸、排列形狀、顏色。



圖 3-14 警示燈

2. 警示音

方法同警示燈模組，在達到行動值時，負責警示音模組 pin 10 發出訊號導通警示音電路。圖 3-15 警示蜂鳴器可依使用者需求選用其他聲音種類、聲音音量之設備。



圖 3-15 警示音

3. 簡訊發報

簡訊發報最初的構想是透過 Arduino 的 I/O 訊號輸出並連接一臺簡訊發報機，當負責簡訊發報模組訊號輸出時簡訊發報機產生動作。但若將簡訊發報機設計在感測器端，發報機的數量及費用將非常龐大，是沒有效率的做法，故應當設置在資料中繼站端，一旦資料中繼站之下的感測器發出達警戒值或行動值的角度位態，資料中繼站便同樣發出訊號使簡訊發報機作動。而後又因資料中繼站本身為了有 3G/4G 上網功能，需設置網卡，簡化了預先的設置，直接透過資料中繼站的 3G/4G 功能發出簡訊。

4. 物聯網

物聯網為此系統整體，包含從感測器蒐集數據到雲端資料庫、網頁及 APP 開發。

補充說明：

上述警戒值行動值啟動之 pin 並不拘限該模組需連接相對應的 pin，我們在繼電器與電池之間的電路製作了一系列接口，使用者僅須依需求將模組正負極連接至警戒值或行動值區的接口即可。

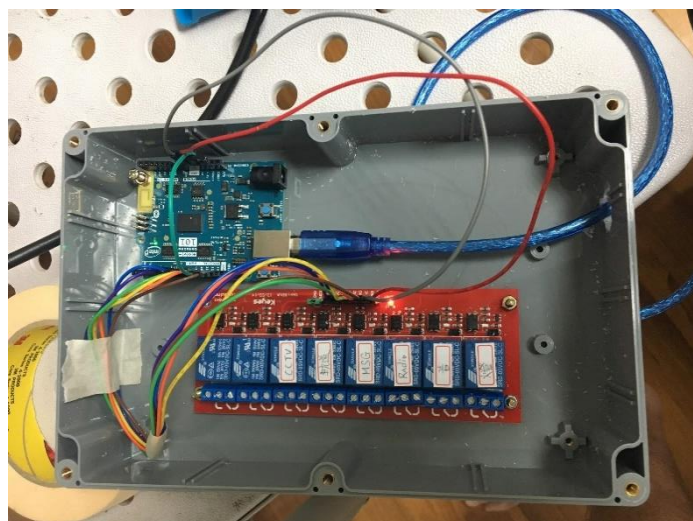


圖 3-16 警示模組（無事件狀態）

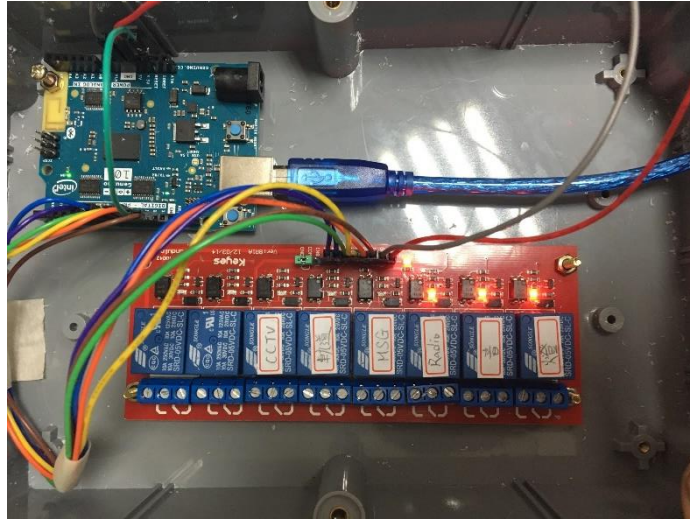


圖 3-17 警示模組（警戒值狀態）

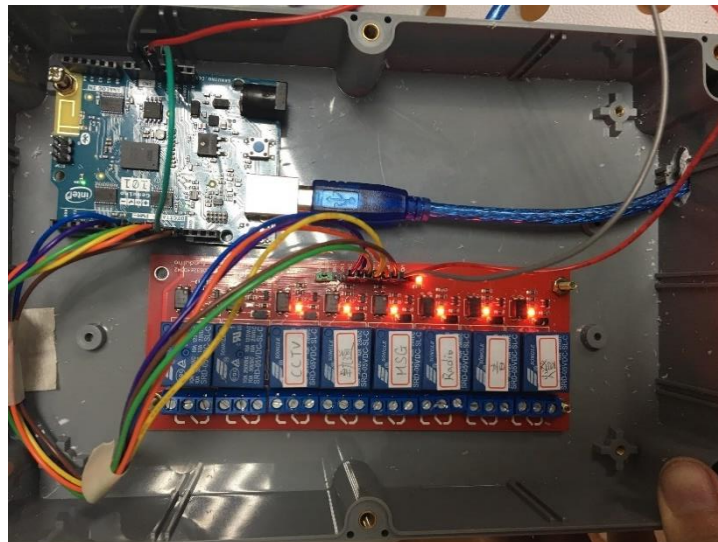


圖 3-18 警示模組（行動值狀態）

各模組依表 3-3 在警戒值或行動值作動：

表 3-3 警示模組於各階段作用情形

警示模組	警戒值	行動值
警示燈（黃）	O	X
警示燈（紅）	X	O
警示音	X	O
簡訊發報	O	O
物聯網	O	O

三、Raspberry Pi

如前述所說 Raspberry 是一塊單板電腦，如同一般電腦一樣，需要一套作業系統，剛購入的 Raspberry 並不提供作業系統，需自行上網下載安裝，下列主題為此研究對 Raspberry 所做的設定及建置。

(一) 初始設定及安裝

Raspberry Pi 3 作業系統安裝：

1. 從 <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/> 下載 rasbian jessie with pixel 之映像檔。
2. 由一般電腦對 SD 卡進行燒錄。

3. 將 SD 卡插入 Raspberry，接上電源、鍵盤、滑鼠、螢幕等周邊裝置。
4. 在終端機（terminal）執行 `sudo raspi-config expand filesystem`。
5. 調整時區跟網路頻段（預設為英國的時區以及該地的網路頻段）。
6. 作業系統介面應如圖 3-19：

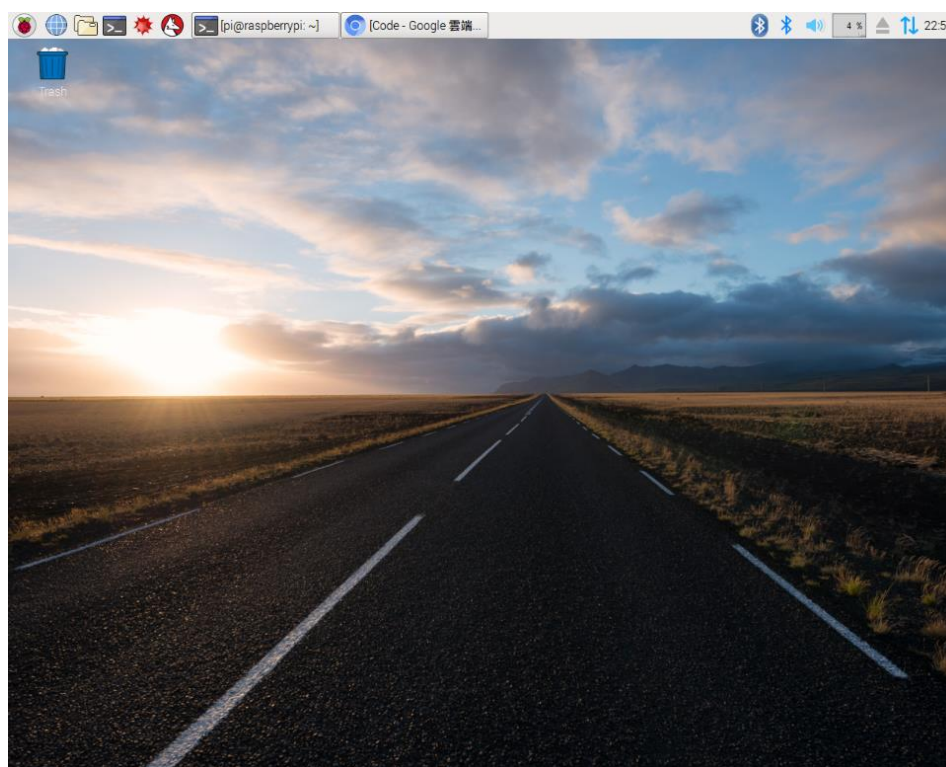


圖 3-19 Raspberry Pi 系統介面

Google sheet 金鑰：

1. 登入 google 帳戶
2. 進入 google api 管理頁面

憑證>>建立憑證>>服務帳戶金鑰>>新增服務帳戶，角色

選擇"編輯者">>JSON 格式>>建立，產生.json 檔

3. 在 google sheet 點選共用，邀請新帳戶

4. 產生之 json 檔即 Google sheet 金鑰，任何上傳或讀取動作

皆需要此金鑰。

安裝 python 套件：

1. 安裝 gspread （上傳資料至 google sheet 之套件）

在終端機執行：

```
$ sudo pip install gspread
```

2. 安裝 oauth2client

在終端機執行：

```
$ sudo pip install oauth2client
```

```
$ sudo pip install --update oauth2client
```

本研究之程式碼 scripts 執行都是在 python2.7 下，因為此

套件不支援 python 3。

3. 安裝 bluepy （python 的藍芽套件）

在終端機執行：

```
$ sudo apt-get install python-pip libgl2.0-dev
```

```
$ sudo pip install bluepy
```

A. 安裝 wvdial （負責網卡撥號的套件）

```
$ sudo apt-get install -y wvdial
```

```
$ sudo nano wvdial.conf
```

4. 安裝 gammu python-gammu (python 發送簡訊的套件)

```
$ apt-get install gammu
```

```
$ apt-get install python-gammu
```

(二) 藍芽傳輸

由於 Raspberry 負責資料中繼的部分，屬於感測器的主端，所以不需像 Arduino 有複雜的設定，僅需知道該感測器的 UUID (通訊唯一識別碼) 及資料儲存的位置 (handle) 便可取用。

資料傳輸時是以十六進位的編碼傳輸，所以在中繼站藉由藍芽讀取之後必須在程式中增設一個轉換函式，轉換成一般人可讀的格式。

(三) 3G/4G 上網

雖然 Raspberry 內建 Wifi 模組，僅需在介面操作即可使用 wifi 上傳資料，但本計畫場址屬於室外且地處偏遠，現地並不會提供 wifi，於是，必須建立 Raspberry 本身 3G/4G 上網的功能，步驟如下。

1. 插入已放入預付卡的網卡 (Huawei E180)



圖 3-20 Huawei E180 與預付卡 SIM 卡

2. 在終端機輸入 `$ls /dev/tty*`。

檢查 USB 是否有讀取到新裝置 `/dev/ttyUSBX`（如圖 3-20），通常會

是最後一個 `ttyUSB` 編號，圖 3-21

圖 3-21 中 `ttyUSB0` 及 `ttyUSB1` 為外接鍵盤及滑鼠之編號，如果沒有新的裝置出現可以重複執行上述指令刷新，或重新插入網卡。

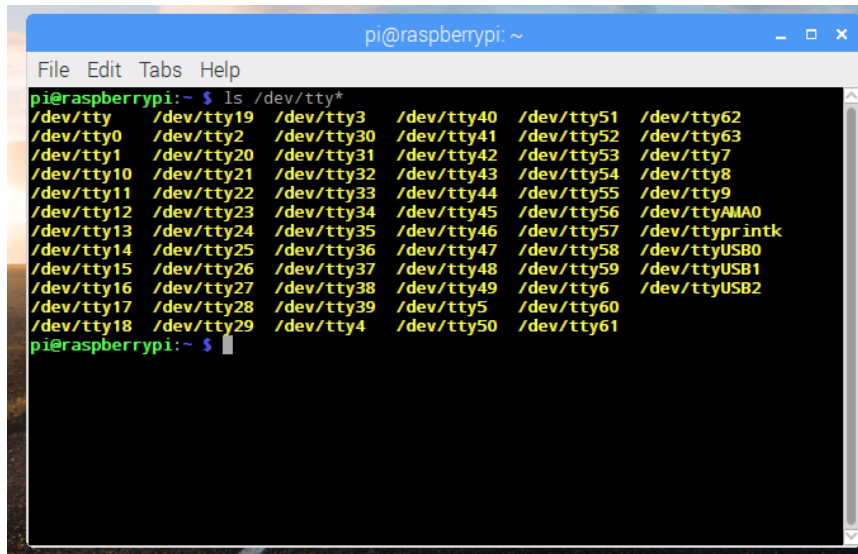


圖 3-21 外接裝置狀態

3. 如果使用其他系列的網卡，Raspberry 可能無法辨識其裝置，需要安裝與設定模式轉換工具（usb-modeswitch）。

```
$ sudo apt-get install -y usb-modeswitch
```

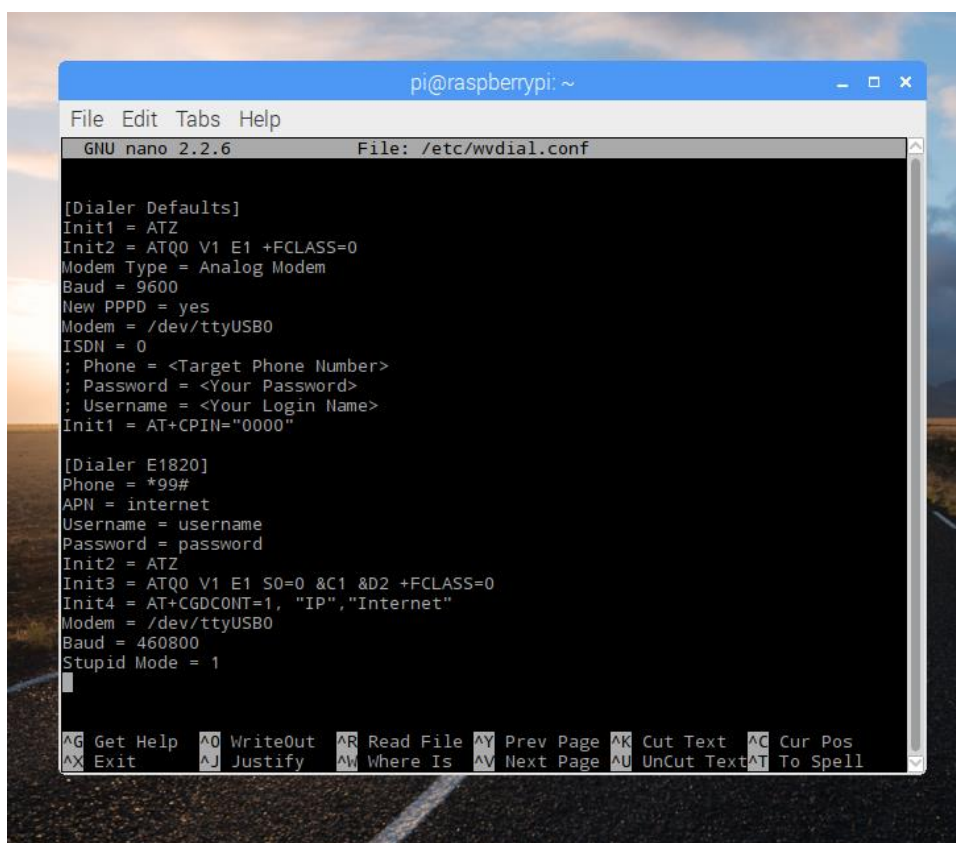
並新增網卡設備資訊規則到/lib/udev/rules.d/40-

usb_modeswitch.rules

4. 設定撥號文件

```
$ sudo vi /etc/wvdial.conf
```

（注意文件位置不一定是這個路徑）並改寫成下圖 3-22：



```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.2.6 File: /etc/wvdial.conf

[Dialer Defaults]
Init1 = ATZ
Init2 = ATQ0 V1 E1 +FCLASS=0
Modem Type = Analog Modem
Baud = 9600
New PPPD = yes
Modem = /dev/ttyUSB0
ISDN = 0
; Phone = <Target Phone Number>
; Password = <Your Password>
; Username = <Your Login Name>
Init1 = AT+CPIN="0000"

[Dialer E1820]
Phone = *99#
APN = internet
Username = username
Password = password
Init2 = ATZ
Init3 = ATQ0 V1 E1 S0=0 &C1 &D2 +FCLASS=0
Init4 = AT+CGDCONT=1, "IP", "Internet"
Modem = /dev/ttyUSB0
Baud = 460800
Stupid Mode = 1
^G Get Help ^O WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text ^C Cur Pos
^X Exit ^J Justify ^W Where Is ^V Next Page ^U UnCut Text ^T To Spell

```

圖 3-22 撥號設定文件

5. 各參數代表之涵義

PIN：預付卡預設的 PIN 碼，有些預付卡不需輸入 PIN 碼也能撥號。

[Dialer xxx]：profile 名稱，之後撥號就會以 xxx 為名，可設定多組 profile。

Modem：wvdial 所用的數據機設備位置，預設為 /dev/modem。

Baud：wvdial 和數據機所溝通的 baud rate。

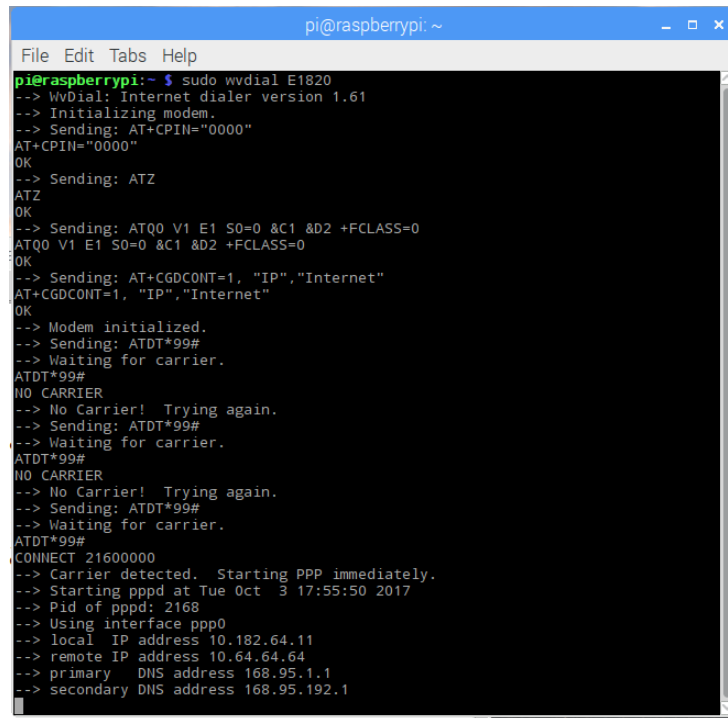
Stupid Mode：如果啟用 stupid mode，數據機在和終端伺服

器（terminal server）溝通時將不會出現提示，並且當數據

機連上後會立即啟動 pppd。

6. \$ sudo wvdial E1820

初次撥號可能會失敗，可重複嘗試，成功的訊息如圖 3-23。



```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi:~$ sudo wvdial E1820
--> WvDial: Internet dialer version 1.61
--> Initializing modem.
--> Sending: AT+CPIN="0000"
AT+CPIN="0000"
OK
--> Sending: ATZ
ATZ
OK
--> Sending: ATQ0 V1 E1 S0=0 &C1 &D2 +FCLASS=0
ATQ0 V1 E1 S0=0 &C1 &D2 +FCLASS=0
OK
--> Sending: AT+CGDCONT=1, "IP", "Internet"
AT+CGDCONT=1, "IP", "Internet"
OK
--> Modem initialized.
--> Sending: ATDT*99#
--> Waiting for carrier.
ATDT*99#
NO CARRIER
--> No Carrier! Trying again.
--> Sending: ATDT*99#
--> Waiting for carrier.
ATDT*99#
NO CARRIER
--> No Carrier! Trying again.
--> Sending: ATDT*99#
--> Waiting for carrier.
ATDT*99#
CONNECT 21600000
--> Carrier detected. Starting PPP immediately.
--> Starting pppd at Tue Oct 3 17:55:50 2017
--> Pid of pppd: 2168
--> Using interface ppp0
--> local IP address 10.182.64.11
--> remote IP address 10.64.64.64
--> primary DNS address 168.95.1.1
--> secondary DNS address 168.95.192.1

```

圖 3-23 撥號成功時系統訊息

四、簡訊發報

首先先設定 gammu 套件讀取時的配置，在終端機輸入：

\$sudo gammu-config

會開啟 gammu 的設定界面（圖 3-24）

port：設定為網卡索在編號（如 /dev/ttyUSB2）

connection：設定為 19200

儲存後系統會告知設定檔位置，接者，在終端機測試：

\$sudo gammu--identify

如果成功便會看到網卡的資訊，表示 gammu 成功讀取到預付卡。

而在 python 中，要輸入設定檔所在之位置，以便程式在執行時 python-gammu 套件讀取配置，並將要傳送訊息以及號碼建立好。

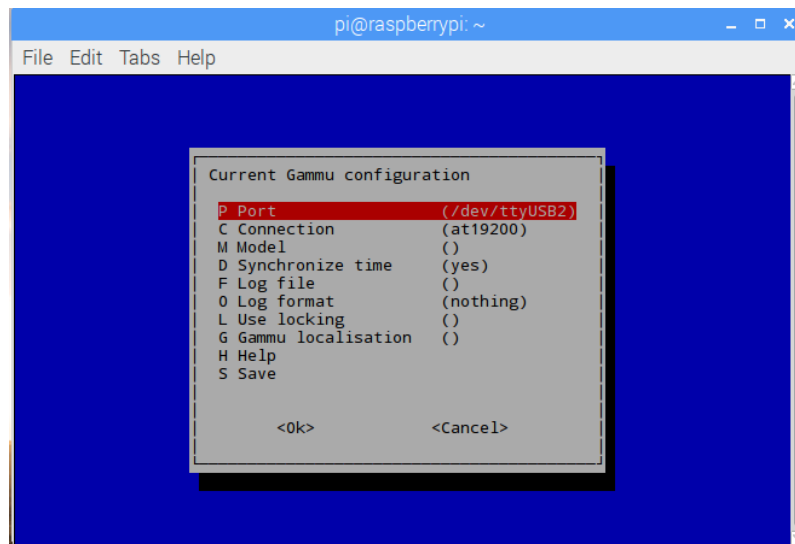
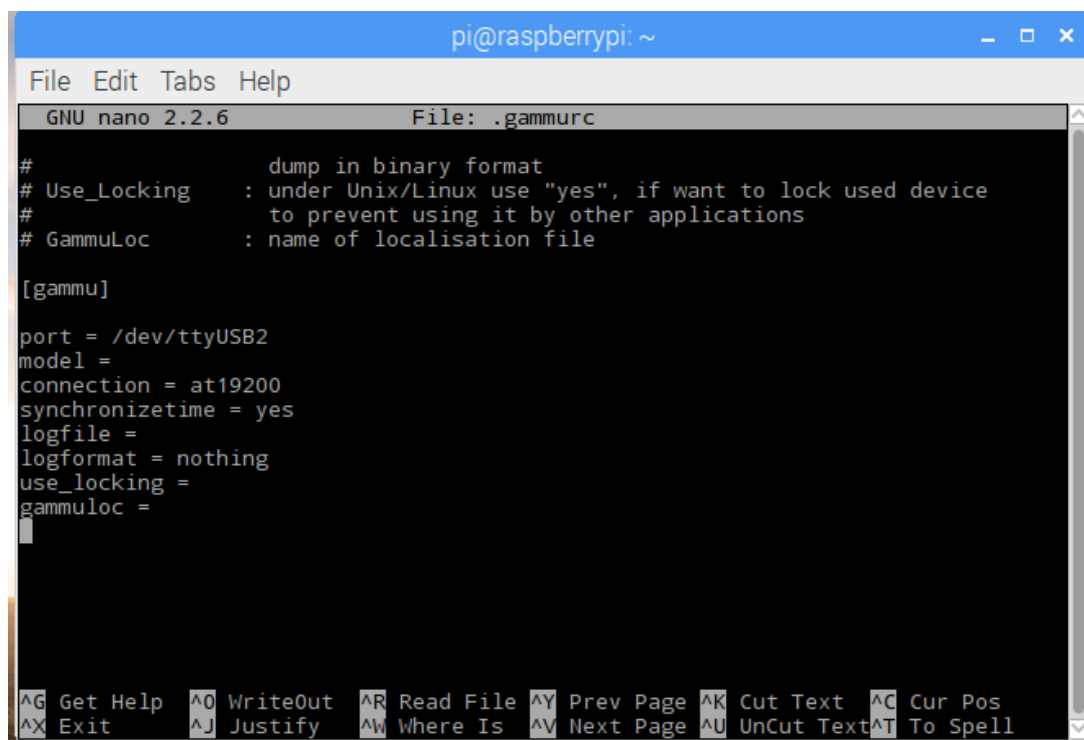


圖 3-24 設定 gammu 之介面



```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 2.2.6 File: .gammurc
# dump in binary format
# Use_Locking : under Unix/Linux use "yes", if want to lock used device
# to prevent using it by other applications
# GammuLoc : name of localisation file

[gammu]
port = /dev/ttyUSB2
model =
connection = at19200
synchronizetime = yes
logfile =
logformat = nothing
use_locking =
gammuloc =

^G Get Help ^O WriteOut ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text ^C Cur Pos
^X Exit ^J Justify ^W Where Is ^V Next Page ^U UnCut Text ^T To Spell

```

圖 3-25 gammu 設定檔

在初始化階段，會花費不少時間，所以在第一次執行時會有數分鐘程式不進行動作。

目前已成功測試同時傳送簡訊至三個號碼，理論上只要預付卡的金額足夠，可以傳送任意數量的簡訊。而執行的條件編寫在 python 的執行檔內，可依需求調整傳送簡訊的角度值。

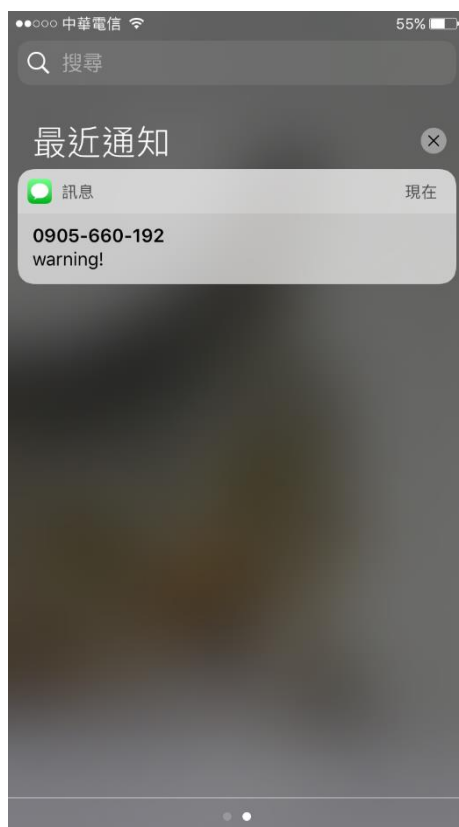


圖 3-26 中繼站簡訊發報

圖 3-26 為中繼站接收感測器之角度並超過預設行動值，立即發送簡訊至設定之手機號碼，傳送目標之號碼及簡訊內容皆可在事先於執行檔中編譯。

(一) 上傳數據

透過 oauth2client、gsread 套件及 google sheet 下載的憑證檔，便可將感測器的資料及時間戳記一併上傳至 google sheet。做為開發階段的資料庫，google sheet 提供一個免費且大容量的雲端空間，並且 google 也支援 API 的開發。

```

Python 2.7.9 (default, Sep 17 2016, 20:26:04)
[GCC 4.9.2] on linux2
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ----- RESTART -----
>>>
將資料記錄在試算表UploadByPython每60秒
按下 Ctrl-C中斷執行
無法新增一列資料Google試算表name 'data1' is not defined
8.26478290558 -1.41273975372
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.16772174835 -1.40380430222
新增一列資料到試算表UploadByPython
7.99346351624 -1.49261534214
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.1308927536 -1.23236322403
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.02395248413 -1.47999918461
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.17090034485 -1.27994084358
新增一列資料到試算表UploadByPython
7.80975866318 -1.58069741726
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.05968093872 -1.63915777206
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.01993083954 -1.16305541992
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.21831989288 -1.26069831848
新增一列資料到試算表UploadByPython
7.8900346756 -1.50260877609
新增一列資料到試算表UploadByPython
-8.09961414337 -5.27463054657
新增一列資料到試算表UploadByPython
sendtext
-25.5189323425 -33.6896286011
新增一列資料到試算表UploadByPython
8.93631267548 -2.15270757675
新增一列資料到試算表UploadByPython
9.16972064972 -2.18868613243
新增一列資料到試算表UploadByPython

```

圖 3-27 上傳數據至 google 雲端

	A	B	C	D	E	F
1	Time	Count	Angle X	Angle Y		
2		max_value	31.22		min_value	-33.69
3						
4						
301	2017-10-28 22:44:49	1	8.26	-1.41		
302	2017-10-28 22:44:56	2	8.17	-1.4		
303	2017-10-28 22:45:02	3	7.99	-1.49		
304	2017-10-28 22:45:08	4	8.13	-1.23		
305	2017-10-28 22:45:14	5	8.02	-1.48		
306	2017-10-28 22:45:21	6	8.17	-1.28		
307	2017-10-28 22:45:28	7	7.81	-1.58		
308	2017-10-28 22:45:35	8	8.06	-1.64		
309	2017-10-28 22:45:42	9	8.02	-1.16		
310	2017-10-28 22:45:50	10	8.22	-1.26		
311	2017-10-28 22:45:56	11	7.89	-1.5		
312	2017-10-28 22:46:03	12	-8.1	-5.27		
313	2017-10-28 22:46:10	13	-25.52	-33.69		
314	2017-10-28 22:46:17	14	8.94	-2.15		
315	2017-10-28 22:46:28	15	9.17	-2.19		
316	2017-10-28 22:46:40	16	9	-2.32		

圖 3-28 google sheet 資料庫(一)

圖 3-27 為上傳時程式執行畫面，可以注意到有一行 sendtext 訊息，表示感測器之角度資料超過簡訊發報之閾值（此次實驗閾值設定為 30 度），在下一行訊息可以看到 Y 方向之角度已超過 30 度之範圍，特別注意保留正負號的目的為了解每一軸旋轉的情形（順時針或逆時針）。

在資料上傳的同時，資料中繼站也會將上傳時間一併紀錄在資料庫中，如圖 3-28，由於資料庫是以試算表之形式記錄，亦可記錄最大值或最小值及其他試算表之運算。可以從時間戳記觀察到每一筆資料上傳的間隔約為 6 到 8 秒不等，原考量可能是網路速度的影響或是資料中繼站硬體的限制，之後發現程式碼編寫錯誤，誤將認證之函式置於上傳資料的迴圈內，造成每一次上傳資料前皆需上傳金鑰進行認證。更改編寫邏輯之後，傳送速度明顯得到提升，如圖 3-29。

630	2018-06-27 21:06:07	259	-2.44	-89.52	-1.19	-0.11
631	2018-06-27 21:06:10	260	-2.47	-89.16	-1.18	-0.13
632	2018-06-27 21:06:14	261	-2.62	-89.45	-1.23	-0.05
633	2018-06-27 21:06:17	262	-2.6	-89.5	-1.27	-0.03
634	2018-06-27 21:06:21	263	-2.24	-89.34	-1.26	-0.08
635	2018-06-27 21:06:25	264	-2.26	-89.45	-1.18	0.04
636	2018-06-27 21:06:28	265	-2.29	-89.27	-1.33	-0.11
637	2018-06-27 21:06:31	266	-2.31	-89.53	-1.09	-0.1
638	2018-06-27 21:06:35	267	-2.26	-89.53	-1.26	0.14
639	2018-06-27 21:06:38	268	-1.96	-89.64	-0.87	-0.19
640	2018-06-27 21:06:42	269	-2.1	-89.24	-1.34	-0.31
641	2018-06-27 21:06:47	270	-2.67	-89.48	-1.22	0.06
642	2018-06-27 21:06:51	271	-2	-89.54	-1.55	-0.03
643	2018-06-27 21:06:55	272	-2.25	-89.45	-1.63	-0.13
644	2018-06-27 21:06:58	273	-2.33	-89.63	-1.54	-0.05
645	2018-06-27 21:07:02	274	-2.39	-89.59	-1.39	-0.21
646	2018-06-27 21:07:06	275	-2.31	-89.43	-1.39	-0.22
647	2018-06-27 21:07:09	276	-2.12	-89.58	-0.96	-0.11
648	2018-06-27 21:07:13	277	-1.95	-89.65	-1.2	0.24
649	2018-06-27 21:07:17	278	-2.48	-89.67	-1.62	-0.05
650	2018-06-27 21:07:20	279	-1.91	-89.59	-1.6	-0.03
651	2018-06-27 21:07:24	280	-2.16	-89.33	-1.11	-0.3
652	2018-06-27 21:07:27	281	-2.07	-89.38	-1.28	-0.21
653	2018-06-27 21:07:31	282	-2.24	-89.8	-1.16	-0.23
654	2018-06-27 21:07:34	283	-2.31	-89.56	-1.2	-0.09
655	2018-06-27 21:07:38	284	-2.22	-89.64	-1.22	0.24
656	2018-06-27 21:07:41	285	-2.41	-89.46	-1.44	-0.25

圖 3-29 google sheet 資料庫(二)

更改上傳模式後 google sheet 資料庫上傳間隔僅剩 3 到 4 秒

五、網頁

本計畫物聯網的一環便是以網頁瀏覽數據資料，令使用者能方便監測邊坡狀態，本研究以 HTML 編寫網頁，使用 javascript 及 Google API 讀取 Google sheet 資料庫，並嘗試以動態圖表顯示歷時資料。本小節將詳細介紹架設網頁及網頁呈現之細節。

首先單一感測器資料進行呈現，也就是 X,Y 方向的角度以及量測期間之最大值與最小值共四筆資料。為節省排版及美編時間，本研究採用 w3school 提供之 CSS File。

CSS 為描述 HTML 元素如何在文章、螢幕或是媒體樣式之

呈現，使用 CSS 可以節省為每個元素調整樣式的時間，網路上有許多現成的 CSS File，只要在 HTML 中引入即可使用他人設計好的元素樣式，引入方式只需在 html 標籤之間加入 CSS File 來源字串：

```
<link rel="stylesheet"
```

```
href="https://www.w3schools.com/w3css/4/w3.css">
```

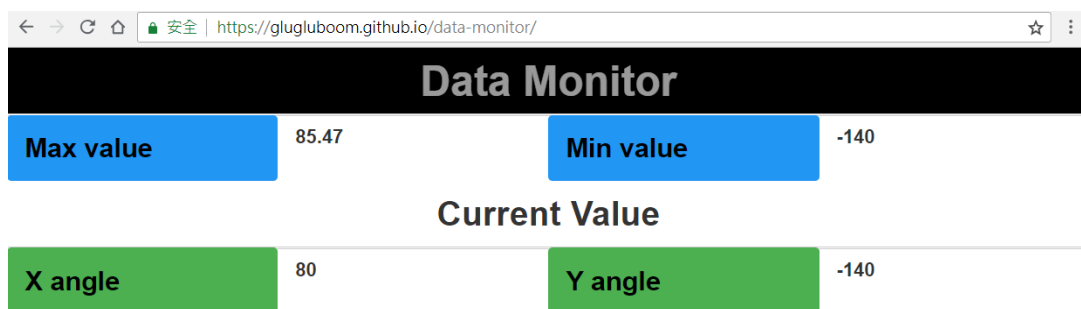


圖 3-30 資料監測網頁（基本架構）

建立基本網頁格式後（如圖 3-30），接著需要讓網頁能夠取用資料庫之數據，使用 JavaScript 可以將擷取資料庫中角度資料及最大最小值，然而在監測時資料庫會不斷地更新資料，使用 JavaScript 必須重新刷新網頁才能獲得更新後的數據，除了費時外，也會占用不必要的網路資源，重新刷新網頁並非解決的方法。為解決此問題，可使用 Google AJAX 及 jQuery 來避免上述問題的發生。Google AJAX Libraries API 可以透過 Google 本身的主機提供 JavaScript 的函式庫，當網站的使用者瀏覽到的不同網站是採用 Google 所提供的檔案，就不需要再重複下載。由於接下

來必須使用 jQuery 函式庫送出 GET Request，如果是一般的使用者必須先下載 jQuery 函式庫，增加網頁讀取時間。如果網站採用 Google 所提供的 jQuery，則使用者第一次瀏覽到網站時，會下載並且 cache 在電腦內，當使用者去到另一個網站也是使用到 Google 所提供的 jQuery，則不需要再重複下載，加快網頁呈現速度。如要使用 Google AJAX Libraries API 提供 jQuery 函式庫可以輸入下列字串：

```
<script
src='https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/1.11.3/jquery.min.js'></script>
```

由於本之資料庫是建立在 Google 試算表之中，要存取其中的數據可以透過 Google Apps Script (GAS) 指令碼進行讀取或寫入的工作，則建立可以讀取並回傳試算表數據之指令碼，並將指令碼發布成網路應用程式，再用網頁對此應用程式送出請求，即可在網頁上呈現試算表之數據，且不造成網路負擔。

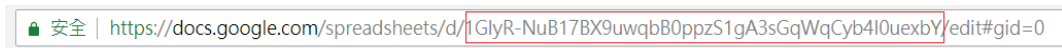


圖 3-31 試算表 ID

首先取得試算表之 ID(圖 3-31 紅色框線範圍)，並在 Google 雲端建立如圖 3-32 之指令碼 (GAS)：

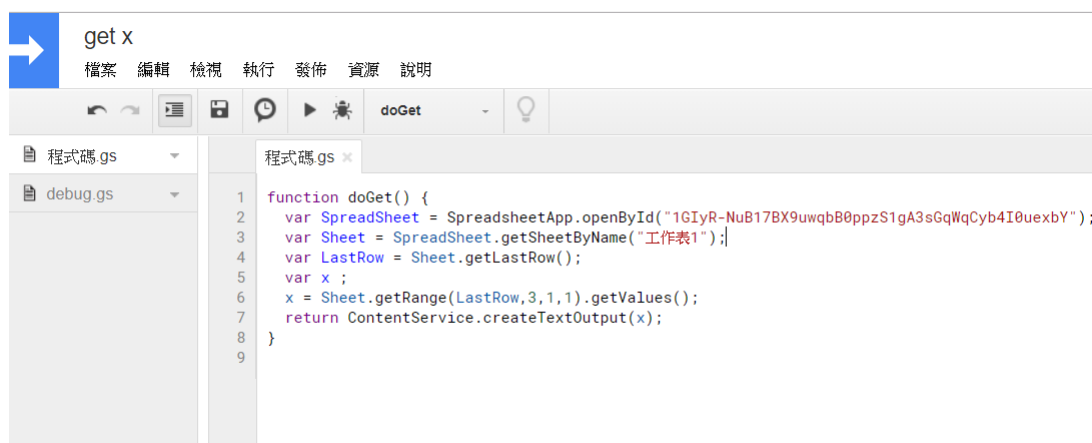


圖 3-32 取得試算表 X 角度之指令碼

程式碼內容為一函式對指定試算表進行讀寫，將取得之 ID 帶入第二行程式碼，選擇”工作表 1”。由於最新的數據會新增在試算表最後一列（如圖 3-28），則讀取之範圍為最後一列第三個元素，最後回傳該元素之值。

編寫完畢後，將此指令碼發布成網路應用程式，如圖 3-33：



圖 3-33 發布網路應用程式

取得網路應用程式之網址後即可在 HTML 使用 jQuery 對其發出要求，此應用程式便會回傳試算表最後一列之 X 角度如圖 3-39，並每隔兩秒重新送出要求便可讀取最新的數據，讀取後更改 HTML 內的元素來顯示數據，顯示結果就會如圖 3-34。

```

128     function getx(){
129         $.get("https://script.google.com/macros/s/AKfycbysWdVPfuQabi1l0J3_lQXtOd_dBSqsuft-nnpjXJMAaGoFwgA/exec",
130             function (x) {
131                 document.getElementById("xangle").innerHTML = x;
132                 xangle = x;
133             });
134     }
135     getx();
136     setInterval(function(){
137         getx()
138     },2000// this will run after every 2 seconds);

```

圖 3-34 HTML 對網路應用程式發出要求

雖然網頁已能即時動態更新數據，但無法檢視過去之資料，本研究欲撰寫一動態圖表於網頁中，可將歷時資料呈現並供使用者調閱，此部分需透過另一個函式庫 D3.js 來達成。

D3.js (Data-Driven Documents) 是一套 JavaScript 函式庫，專門處理網頁的資料視覺化，並支援 SVG (向量式圖形)，透過 D3.js 與 SVG 能夠更有效率的在網頁上存放圖形。D3 的官方網站提供了許多樣板，這些範例與樣板都是開源資源(Open Source)供世界各地的開發者分享或使用 (圖 3-35)。

Gallery

Mike Bostock edited this page on 2 May · 1279 revisions

Wiki » Gallery

Welcome to the **D3 gallery**! More examples are available for forking on [Observable](#); see [my profile](#) and the [visualization collection](#). Feel free to publish and share your own!

Visual Index

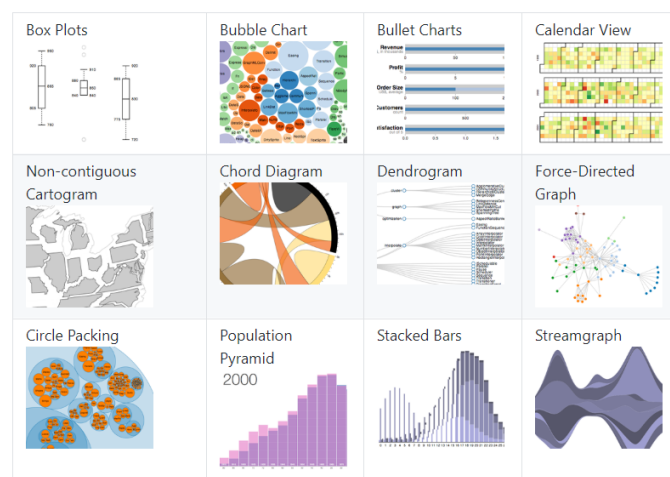


圖 3-35 官方網站提供之範例

本計畫參考了 Bo Ericsson 於 2015 年在 <https://bl.ocks.org/> 中分享的範例（圖 3-36）。並針對本研究需求，將數據來源改寫成前述由網路應用程式取得之試算表資料（圖 3-37）。

 Bo Ericsson's Block 3b57a788a4b96e1af211
Updated November 15, 2015

D3 Based Real Time Chart

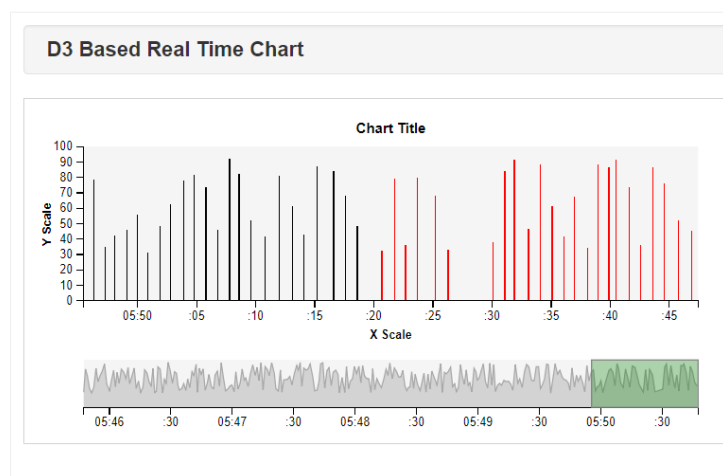


圖 3-36 即時動態圖表範例（資料來源：Bo Ericsson，2015）

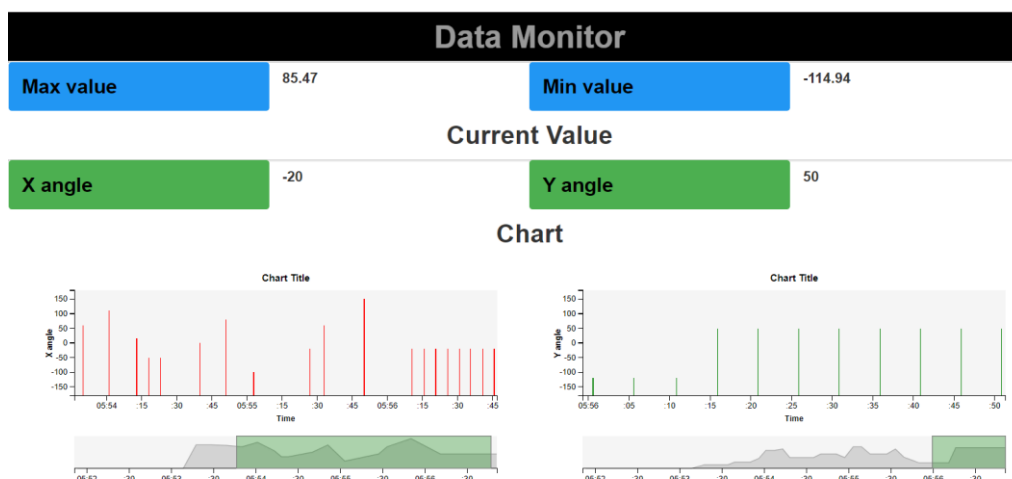


圖 3-37 資料監測網頁（含動態圖表）

可以觀察到動態圖表上方為接受到數據之長條圖，下方則是歷時數據曲線之縮圖，藉由拖曳或縮放調整動態圖表下方之綠色範圍可以瀏覽過去 3 分鐘之數據，左右兩個動態圖表分別代表 X,Y 方向之數據。

完成網頁 HTML 編寫後，仍只能夠過本機之瀏覽器瀏覽，為了讓使用者能隨時隨地經由網路監測，必須架設伺服器並購買 IP 位置發布志工開網域，再將撰寫好的 HTML 上傳至伺服器，使用者才能透過網址瀏覽。本研究範圍僅包含開發整套系統及探討其可行性，無長期維持營運網頁之考量，所以本研究採用替代方案以節省開發成本，即透過現成之架站平台，由該平台提供網頁空間，使用者僅需提供撰寫好之網頁並上傳，即可供其他人瀏覽，此方法稱為 hosting。

提供 hosting 服務的網站如 Google、Github 等等，本研究使

用 Github 提供的 Github Page 作為網頁架設之平台。

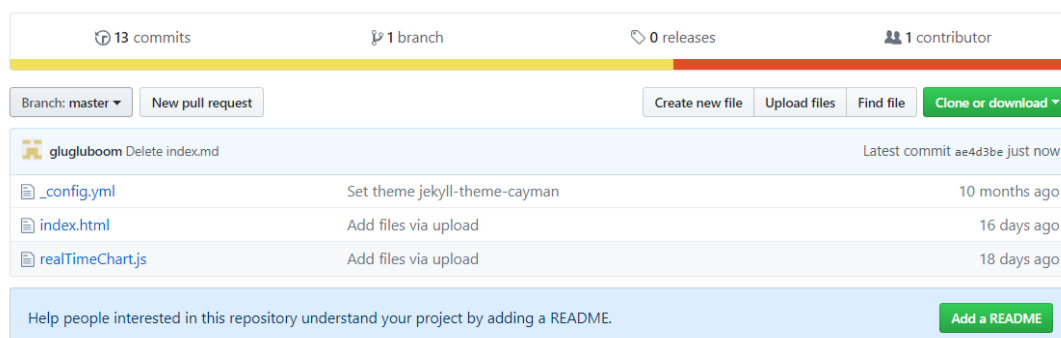


圖 3-38 上傳 html 至 Github Page

GitHub Pages

GitHub Pages is designed to host your personal, organization, or project pages from a GitHub repository.

✓ Your site is published at <https://glugluboom.github.io/data-monitor/>

圖 3-39 網頁發布之網址

六、APP

由前一節所述，本計畫之資料庫建立在 google 試算表當中，並由 Google API 建立數個可以存取此試算表的函式，再透過 jQuery 從 API 取用些函式進而得到資料庫的數據，並將資料以網頁形式呈現，而現在由於智慧型手機及平板興盛，對於這些智慧型裝置的使用者來說，APP 應用程式比網頁使用更加頻繁且便利，若能開發一 APP 具有前一節網頁之功能，可以增加此系統之便利性及推廣性。

本研究之 APP 是透過 Visual Studio 2017 下的 Xamarin 平台開發（圖 3-40），APP 之開發概念相當簡易，即建立一簡易框架將

前一節之網頁於此應用內呈現，並進行發布。

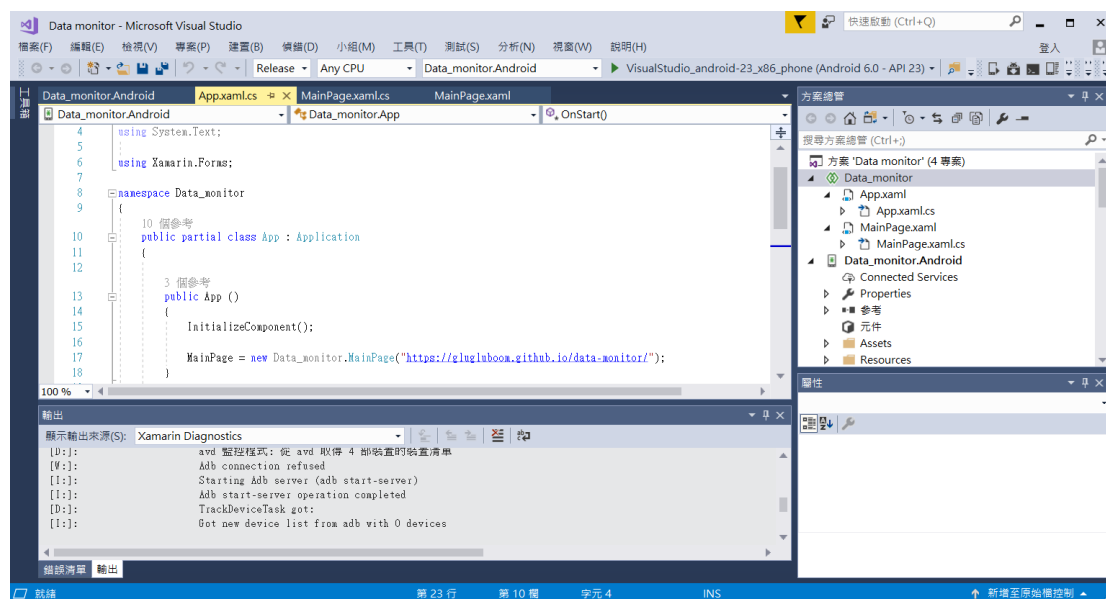


圖 3-40 Visual Studio 2017

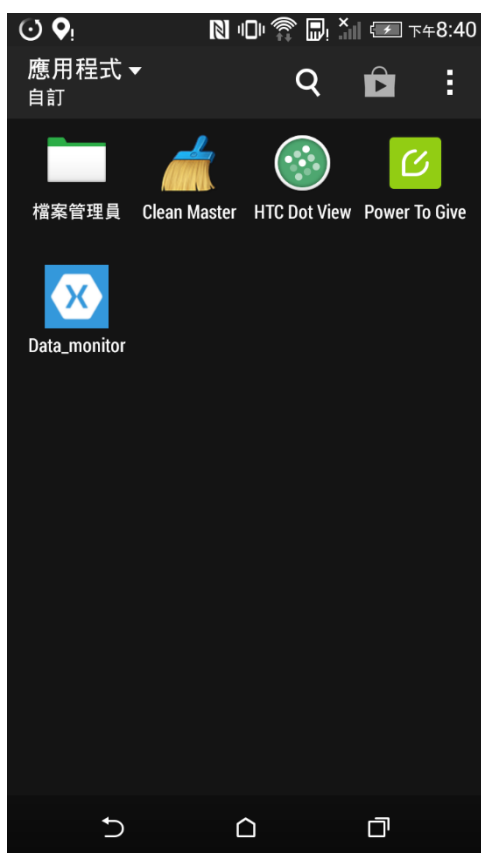


圖 3- 41 APP 發布於手機內

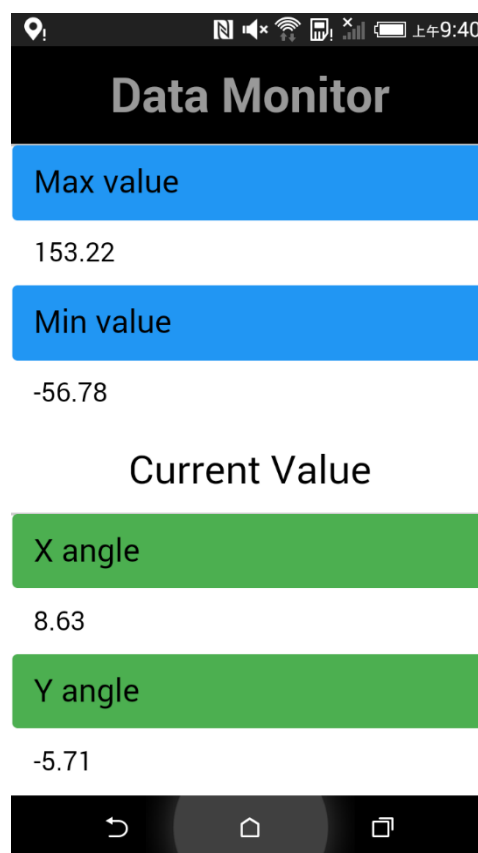


圖 3-42 APP 內容

七、足尺試驗測試

為評估感測模組於現地之表現，本研究利用日本 Raiteku 於福岡進行的足尺試驗進行測試。足尺試驗之項目為利用重錘自由落下的能量撞擊防護網，如圖 3- 43。

本研究於此防護網支柱以喉箍安裝感測器模組如圖 3- 44 及圖 3- 45。



圖 3- 43 足尺試驗



圖 3- 44 實際安裝情形一



圖 3- 45 實際安裝情形二

試驗後結果如圖 3- 46，試驗過程中落石撞擊造成中間鋼網變形並將力傳遞至四根支柱上，並利用兩側鋼網之緩衝金具進行耗能減少落石造成的能量。



圖 3- 46 足尺試驗結果

而量測的試驗資料如圖 3-47。

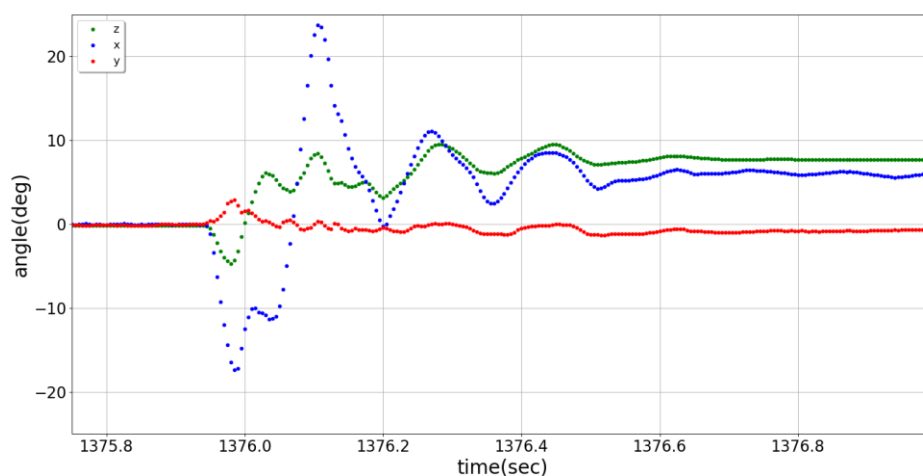


圖 3-47 試驗數據

試驗數據為擷取感測模組啟動 20 分鐘後遭受撞擊的兩秒內之數據，可以觀察到在遭受撞擊後除了 y 軸(支柱延伸方向)外，x 及 z 軸皆有明顯的變化，並且數據顯示感測器量測到支柱受撞擊後的震動情形，經此次足尺試驗測試證明感測模組能在巨大能量的撞擊下量測傾斜角度以及適應現地之環境。

第四章 現地監測資料與室內試驗之整合

本章節說明如何將詳細說明不飽和水分特性曲線之試驗方法，本計畫下一階段將於場址處取得監測資料後進行現地及室內試驗之資料整合，進一步了解土壤水分變化與崩塌之關聯性。

第一節 前言

因土壤邊坡穩定性多受不飽和土壤所影響，非飽和土壤之水分特性曲線(SWCC)為一重要指標，故將透過新發展之定流量幫浦法，來量測所選場址土壤之 SWCC，並進一步與邊坡崩塌做關聯性地探討大多數的大地工程師都使用傳統的土壤力學來解決大地工程的問題，由 Karl Terzaghi 提出的土壤力學中都是基於土壤是完全乾燥或是飽和的假設下。但是在很多現地狀況都是屬於不飽和土壤，若是使用傳統的土壤力學進行分析，便會造成不當的大地工程設計，因此了解不飽和土壤力學是必要的。不飽和土壤力學在基本分為三個部分，包含了不飽和土壤力學的理論部分、量測不飽和土壤基本性質的實驗方法和模擬不飽和土壤力學行為的方法（Chen, 2017）。其中土壤水分特性曲線（SWCC）在不飽和力學中扮演了一個重要的角色，SWCC 是由含水量和土壤吸力所組成的，每一種不同的土壤都有其獨特的 SWCC。在過去的幾十年中，有許多學者提出室內實驗和現地試驗來量測 SWCC，這些方法包含了濾紙法、離心機試驗、張力計試驗和壓力鍋

試驗。其中壓力鍋試驗已經被廣泛的使用，因為其步驟較為簡易且實驗結果有一定的可靠性，但是在壓力鍋試驗中判斷試體是否達到穩定的唯一方法是觀察其排水的狀況，為了確保試體達到飽和，所以實驗的過程就會拉長，為了改善這個問題，才提出了幾種新的量測 SWCC 的方法。

流量幫浦法 (Flow Pump) 是由 Olsen 在 1966 年提出來的，此方法首先應用於改善滲透係數的量測。在 1991 年 Zindarcic 等人提出了 Maintained Suction Measurement 和 Hwang 在 2002 年提出的 Suction Drop Measurement 兩種方法將流量幫浦運用到了量測 SWCC 的方法之中。在 2011 年 Lee 等人將兩個方法做出來的結果進行比較，優點就為能有效的縮短實驗時間並且得到較好的試驗結果，此方法為定流量幫浦法。

第二節 定流量幫浦系統

定流量幫浦系統將用於量測土壤水分特性曲線，瞭解土壤水分變化與崩塌關連性。此試驗結合了定流量幫浦系統 (flow pump system)、座標軸轉換技術與三軸儀器設備來進行，其中定流量幫浦 (flow pump) 會精密控制進入、流出試體之流量，且為維持未飽和之氣水壓狀態穩定，會在試體底部放上一多孔陶瓷板 (porous ceramic plate) 來隔離氣壓之流通，之後在試驗中給予試體頂部一氣壓，用差壓計 (differential

pressure transducer) 量測正氣壓與試體正水壓之差異來計算基質吸力 (matric suction)。

與傳統之 SWRC 或未飽和試驗藉改變氣壓大小來控制基質吸力之方式不同，在本試驗中氣壓會保持固定，先藉三軸反水壓系統使試體接近飽和狀態，再由連接試體底部之定流量幫浦所提供的定流量來控制基質吸力，得到隨時間變化之基質吸力反應曲線，同時從定流量幫浦所抽取出的水量來反算試體之飽和度或體積含水量，得到隨時間變化之曲線，結合這兩條曲線，由基質吸力平衡點及此時之含水量來獲得在 SWRC 中的代表點，最後畫出 drying curve，之後再藉注入水量之方式進行同樣流程，得到 wetting curve，在一次試驗中就能得到所需之兩條 curve。

此試驗目前有“Maintained Suction Measurement” (Znidarcic et al, 1991) 及“Suction Drop Measurement”(Hwang, 2002) 兩套成熟方法，其各自有特別的理論與方式使試體中的基質吸力穩定，這些試驗最快可在 3 天內就完成，且此系統也能使用於量測試體飽和 k 值、HCF (Hydraulic Conductivity Function)，還有最新發展之未飽和入滲試驗等

圖 4-1 為定流量幫浦系統結合三軸系統之 SWRC 試驗儀器示意圖 (Lee, 2011)。在三軸室中，試體底座分別連接著定流量幫浦(左)及反水壓系統、差壓計(右)；頂座則分別連接反水壓、氣壓系統(左)及差

壓計(右)，上方之 LVDT 量測軸向位移，右下方提供圍壓使試體與橡皮膜密合並限制側向變形，整個試驗中皆使用除氣水 (de-aired water)。

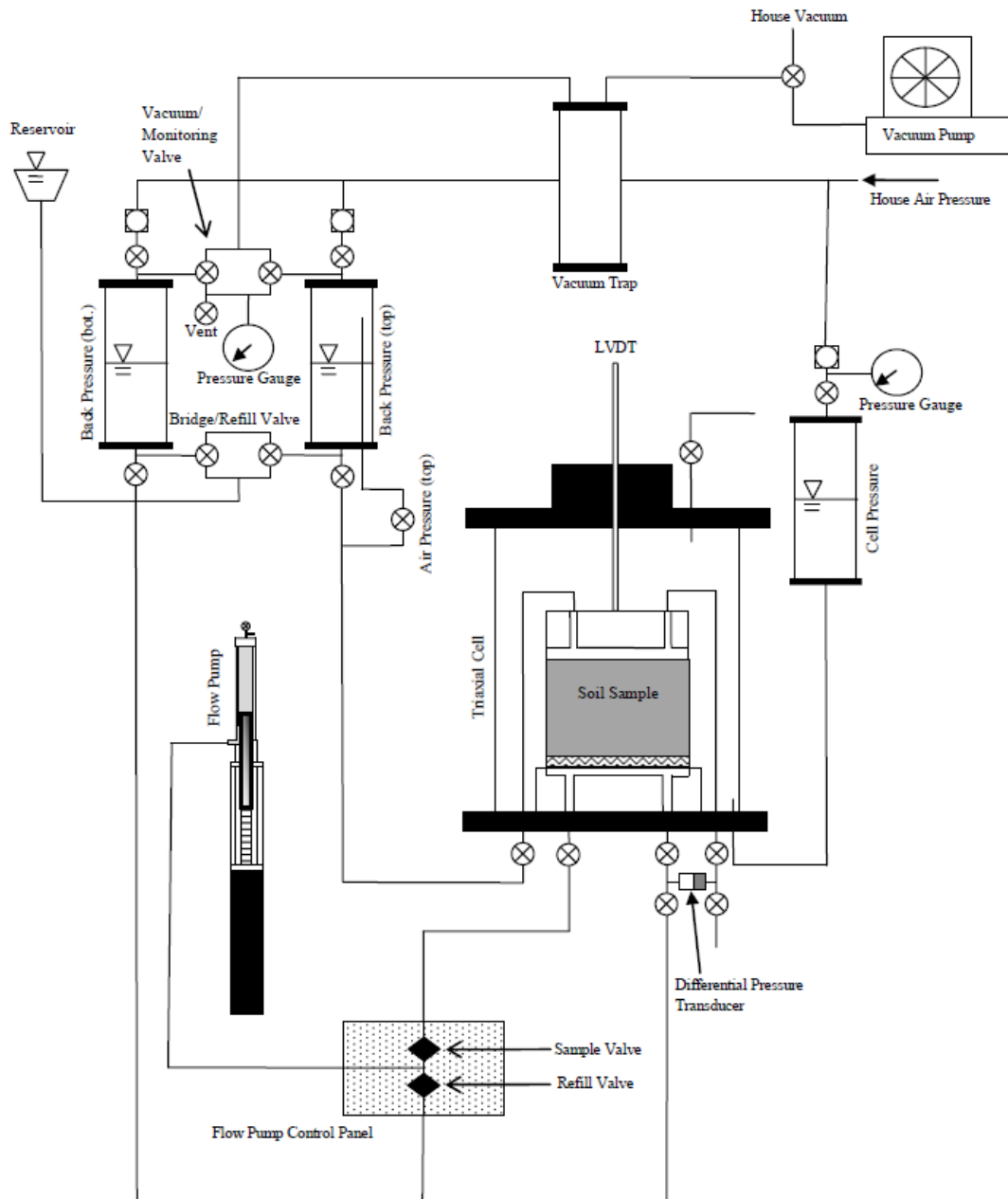


圖 4-1 SWRC 試驗儀器示意圖 (Lee, 2011)

一、設備配置

(一) 定流量幫浦

定流量幫浦主要由低轉速伺服馬達及流量筒(針筒)所組成，其運作原理為馬達施力推動針筒內的活塞 (piston) 並使其維持一等速狀態，以此控制流量。圖 4-2 為台大土木大地組所使用之定流量幫浦 (Model YSP-201, YMC Co.)，及搭配之氣密式針筒 (5 ml, Hamilton)，其流量範圍為 $3.504 \mu\text{l/hr} \sim 254.6 \text{ ml/hr}$ 。

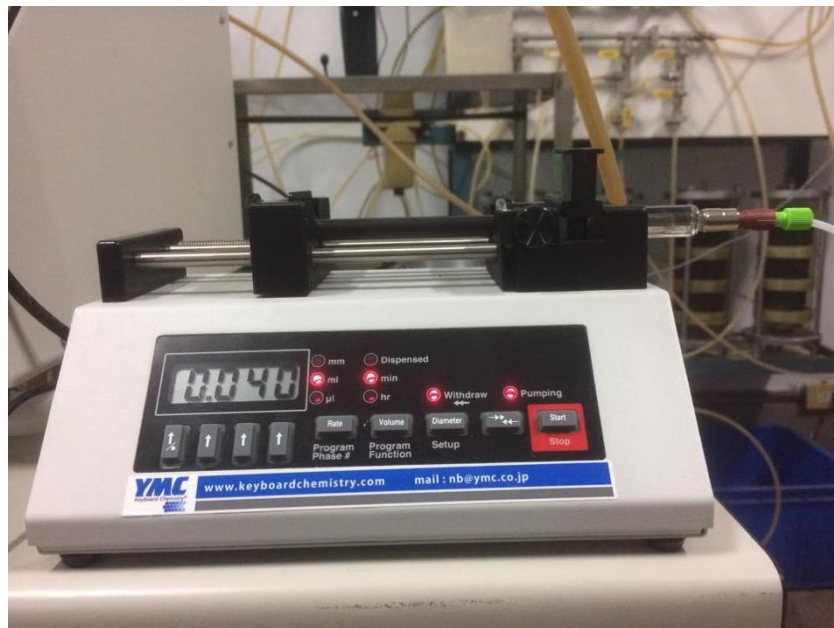


圖 4-2 定流量幫浦與氣密式針筒 (台大土壤力學實驗室)

(二) 多孔陶瓷板

多孔陶瓷板，試驗中被放置於試體與三軸底座之間 (圖 4-3)，藉其孔隙中的氣-水介面之表面張力提供一隔離氣壓與水壓之作用，且飽和之孔隙會使試體水壓與下方之流體產生水力連結，也就是在確保試體承受之氣壓(未與大氣壓接觸)的同時讓試體處於一能自由排水、進水的狀態，而有效孔隙的大小決定氣壓與試體內水壓之差壓 (Bar) 極限。

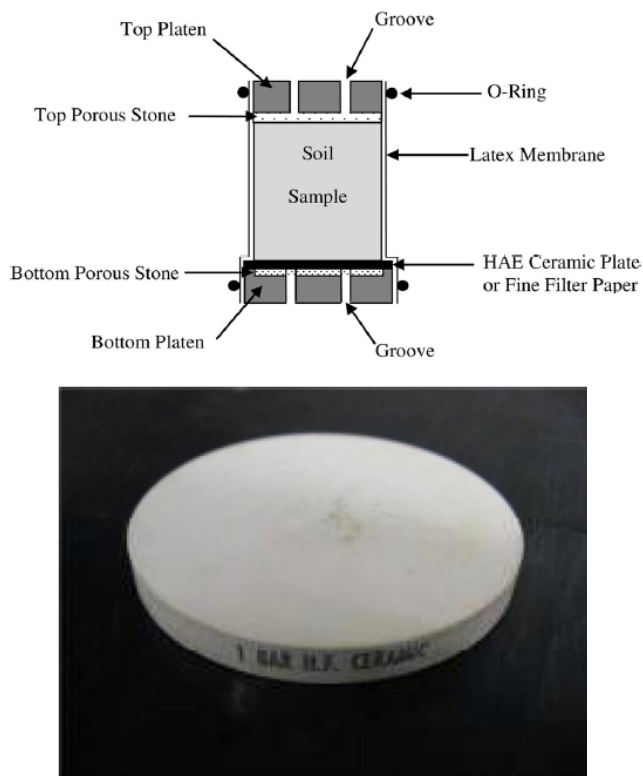


圖 4-3 多孔陶瓷板

(三) 差壓計

差壓計兩側分別連接著試體的頂蓋以及底座，在 SWRC 試驗中，其主要功用為量測頂部所給予之氣壓（正值）與底部定流量幫浦造成之水壓（正值）的差壓值，量測資料則會由資料獲取系統進行連續性記錄。

(四) 三軸系統

三軸室（圖 4-4）由壓克力所鑄成，可承受約 700 kPa，提供試體一穩定之試驗環境，其反水壓系統在 SWRC 試驗中使試體先處於飽和狀態，之後只提供底部反水壓，頂蓋改為提供氣壓，所有壓力之大小由後方之面板上的調節器來控制。



圖 4-4 三軸室 (台大土壤力學實驗室)

二、試驗步驟

為設定在量測 SWCC 的試驗中之初始流速，因此會先進行滲透試驗，獲得滲透係數後就可以計算出理想之初始流速，試驗開始之前，將配置好之試體打反水壓至飽和，爾後即可開始試驗。滲透試驗部分，亦使用流量幫浦，此部分不需隔絕空氣，故在試體內部並沒有陶瓷板的放置，所以在打飽和階段，可以使用通氣通水兩個步驟，讓試體更快達到飽和。接下來介紹一下滲透試驗的步驟，在試體飽和後，滲透試驗之整個過程如下圖 4-5 所示。第一步就是將閥門（G）關閉幾分鐘，以便在零流量的條件下，由兩個水壓計（C）量測到試體的水頭差，獲得此差值後我們就可以開始進行滲透試驗，即開啟流量幫浦開

始抽水，此時會有一個滲流經過試體（D）內部，在這情況下，流量是由流量幫浦所控制的，此步驟需要持續到水頭差維持在一個穩定值，這穩定的其間可能需要幾分鐘至幾個小時，這取決於不同的土壤種類，當量測到穩定的水頭差時，我們就可以關閉流量幫浦，讓使體又回到零流量的狀態，此時可以檢查這個值是否和一開始的零流量狀態的差值是差不多的，確認在試驗過程中，沒有對試體造成壓密或是擾動。

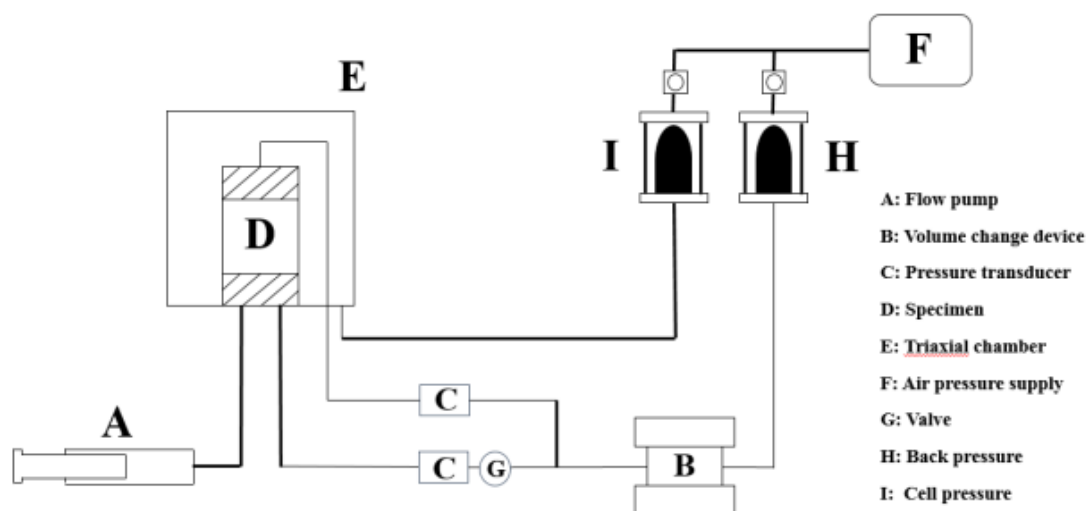


圖 4-5 滲透試驗步驟示意圖

再來為定流量幫浦法施作步驟，從試體打飽和開始，因為此試驗過程中有較多的限制，必須考量到流量幫浦最大承受力量，所以在反水壓的部分不可以超過 300 kPa，而且此試驗不可以使用通二氧化碳來增加飽和度的提升，所以此打飽和階段再細分成兩個部分。首先在試體配置好後，開始通水，在上閥的部分以 80 kPa 的力量去抽試體內部的氣體，這一過程可以將試體內部多數的氣體被抽出，當水開始從上閥流出時，將試體靜置 6 小時至半天的時間，再次開啟抽氣機對

試體內部進行抽氣，又可以發現大量的氣體被抽出，這是因為在靜置的過程中水會將試體內部殘餘的氣體向上推擠，讓更多氣泡從上閥排出，當此步驟完成後，就可以進行下一個步驟，也就是打反水壓的階段，此階段主要是給試體內部一個壓力，讓剩餘在試體內部的氣泡被這壓力壓縮，使氣體溶進水中，進一步增加試體內部的飽和度。當試體確定飽和之後，即可開始定流量幫浦試驗，其示意圖如下圖 4-6。

一開始先將閥門(G)和閥門(H)關閉，並將氣壓管線接至閥門(G)，當水壓計(C)量測到的氣壓值和反水壓的大小相等時，就可以打開閥門(G)並等待幾分鐘，讓試體內部進行平衡達到穩定，然後就可以開啟流量幫浦(A)以除去三軸系統上部的水分，並得到第一個飽和度為 100%的平衡點，就可以開始量測 SWCC 的試驗，通過設定流量幫浦(A)將所要流出的體積，就可以開始流量幫浦，讓試體從飽和狀況變成不飽和的狀態，此時試體上下端的水壓計會分別量測到氣壓值和試體底部的孔隙水壓值，兩個數值的差值即為土壤吸力，當達到需求之飽和度時，流量幫浦就會停止抽水，此時試體的吸力值會逐漸開始下降，並在幾個小時內達到穩定的狀態，而這個穩定的時間就取決設定之流速，當吸力值達到平衡時，即獲得了一個平衡點，經過同樣的步驟下，就可以獲得在不同飽和度狀況下的吸力值，經過不同的循環即可得到乾側和濕側兩部分的平衡點，即完成試驗。後續將實

驗之數據點帶入 van Genuchten 模型當中，畫出本試驗之 SWCC。

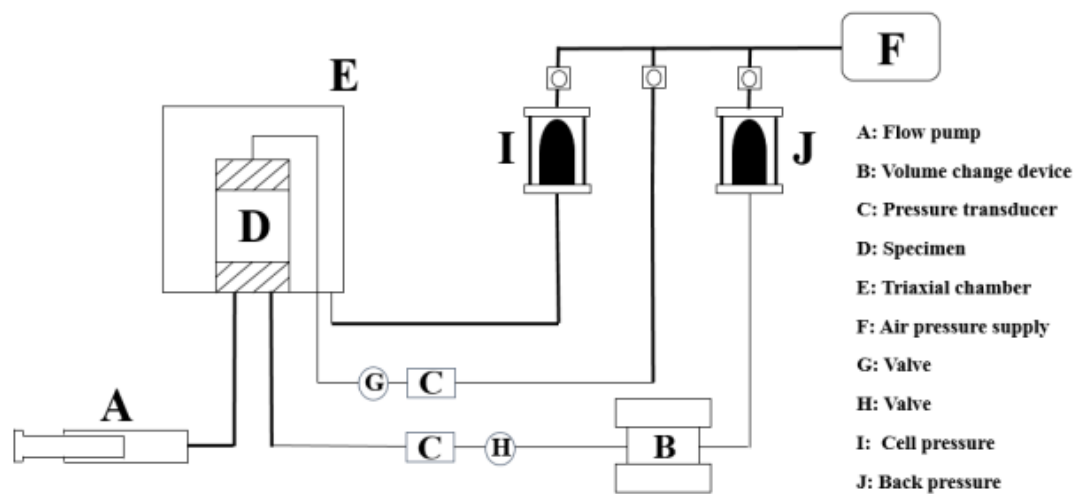


圖 4-6 定流量幫浦試驗示意圖

van Genuchten 模型為 1980 年 van Genuchten 提出了一個模擬方程式擬合 SWCC 曲線，該等式如下。

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (4.1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4.2)$$

θ 為含水量

θ_r 為殘餘含水量

θ_s 為飽和含水量

h 為土壤吸力

α 、 n 、 m 為模擬參數

利用定流量幫浦的實驗結果，便可求出完整的 SWCC 曲線。

三、實驗成果

我們以標準石英砂進行實驗，並將實驗的結果進行討論。首先是呈現出滲透試驗的部分，我們將以三種不同流速測量出它相對應的滲透係數，如圖 4-7。在試驗過程中，選定了三種不同的流速去進行實驗，主要原因是更多的資料就可以確定結果是否合理。結果顯示出標準石英砂的滲透係數分別為 $1.65\text{E-}03$ (cm/sec)，而這些數值也為後續定流量幫浦試驗提供了初始流速。

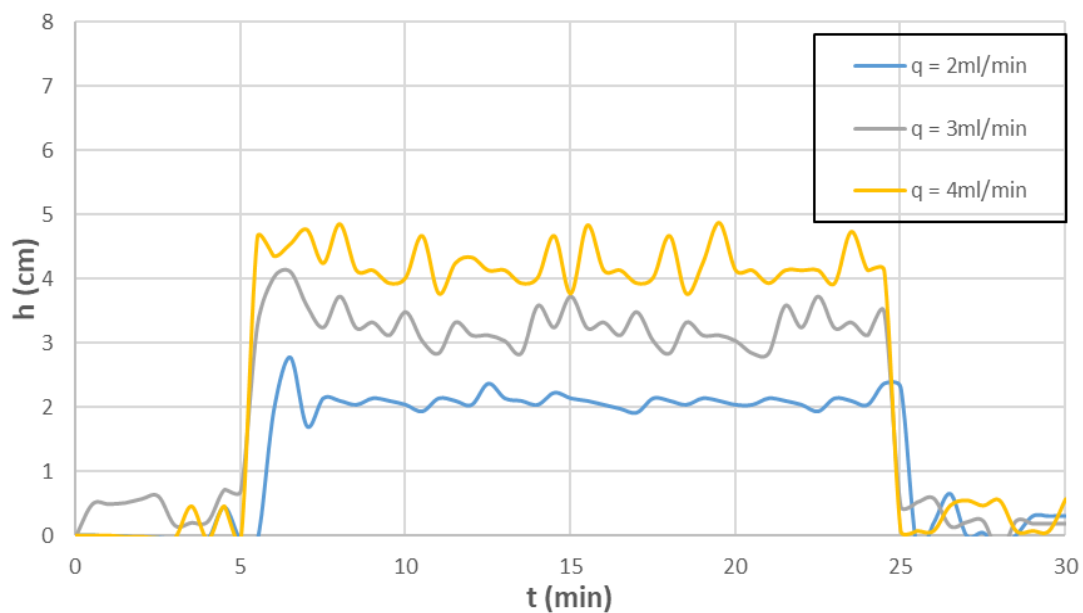


圖 4-7 滲透試驗之標準石英砂結果

接下來討論的是定流量幫浦的試驗結果，圖 4-8 展示出標準石英砂其吸力和時間的關係圖，我們可以在圖片中看到，每一階的平衡過程都是很好去判斷的，且在試體從飽和狀態降至不飽和狀態的過程中，每個飽和度都對應到一個不一樣的吸力值，當飽和度越低的時候，吸

力值也就越來越大。

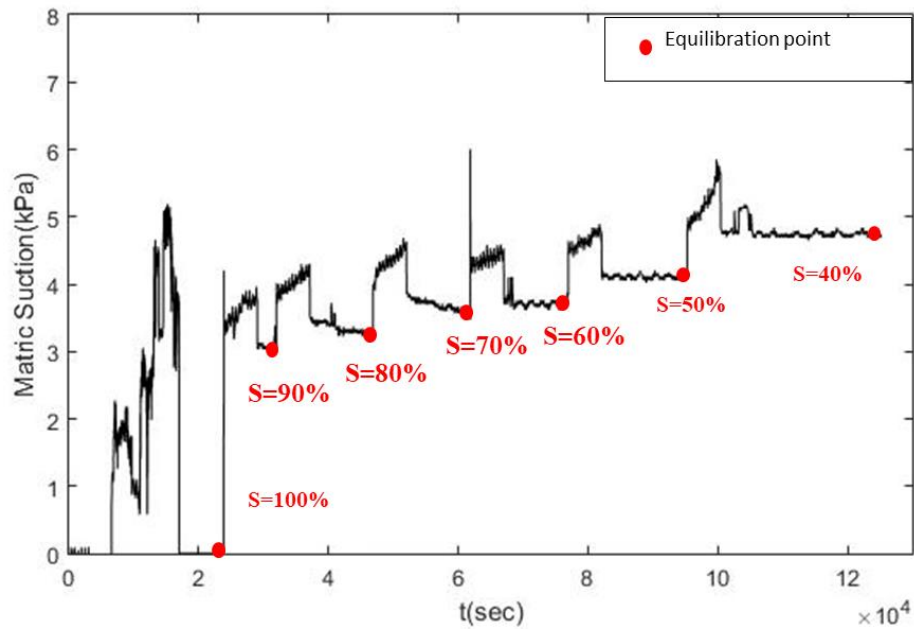


圖 4-8 標準石英砂之吸力和時間之關係圖

將這些平衡點帶入模擬方程式中，就可以畫出我們要的 SWCC，

由圖 4-9 展示出我們最終要求得之完整 SWCC。

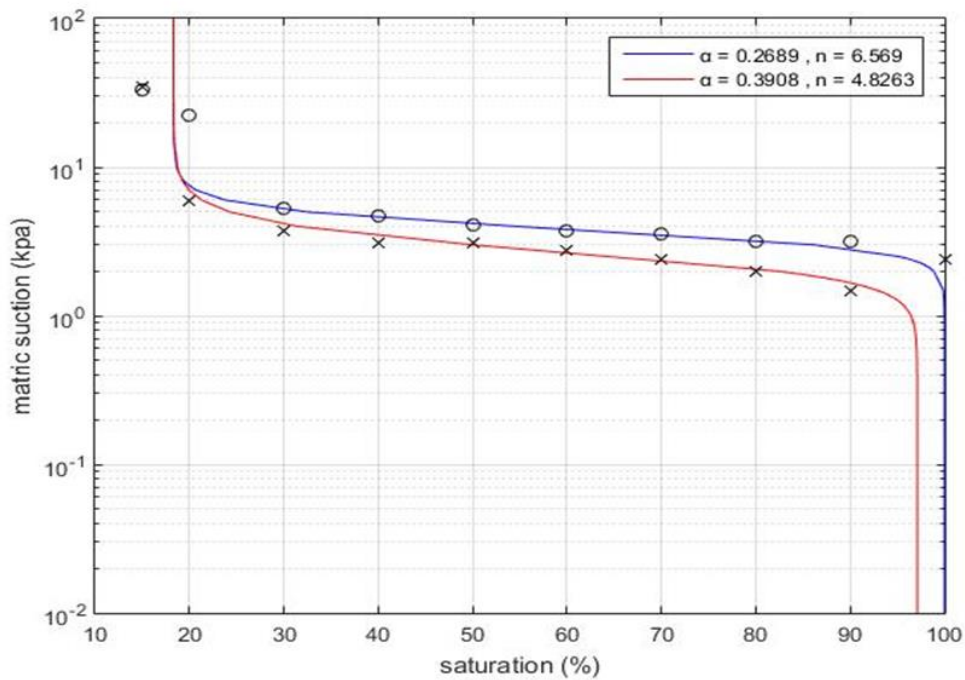


圖 4-9 標準石英砂之不飽和土壤水分特性曲線

四、整合

未來將現場使用之感測器，如濕度溫度感測器、氣壓計、降雨感測器、土壤濕度感測器等；基本淺層邊坡安全監測系統則可透過設置多層土水導電阻感測器及雨量計，用以監測並提供現地雨水入滲與雨量及土壤間的關係，監測多層土壤水分，及時監控邊坡的穩定度，此資料將與試驗室之 SWCC 進一步探討其與崩塌之關聯性。

第五章 應用蒙地卡羅進行邊坡分析

本計畫下一階段將以蒙地卡羅進行後續邊坡穩定分析，分析現場及室內試驗資料與崩塌之關聯性。

第一節 蒙地卡羅模擬方法

一、概述

邊坡工程中在設計變量參數時，常利用鑽探試驗資料或根據經驗的方法取得參數值，但是土壤是非均質且會因為外在因素導致參數與試驗資料產生差異，因此，如果對邊坡工程進行多次的分析，每一組變量參數利用隨機的方式產生，就可以更精準的判斷邊坡破壞的機率。

蒙地卡羅模擬方法又被稱為隨機模擬或隨機試驗方法，是邊坡可靠度研究的方法之一，且相對精準又普遍。以數理統計原理為基礎，借助計算機研究隨機變量的數值方法，利用蒙地卡羅法進行模擬分析，可以求得邊坡的安全係數機率分布、平均值和標準差，進一步得到其可靠度與利用破壞機率判斷該邊坡之穩定性。

二、基本原理

邊坡穩地性問題可以根據岩土體的土體結構與破壞機制等建立出如下的函數：

$$\begin{aligned}
FS_1 &= F_1(x_1, x_2 \dots x_m) \\
FS_2 &= F_2(x_1, x_2 \dots x_m), \dots, \\
FS_N &= F_N(x_1, x_2 \dots x_m)
\end{aligned}
\tag{5.1}$$

式中， FS 代表安全係數， $x_1, x_2 \dots x_m$ 代表該組參數的隨機變量，此隨機變量服從常態分布，總共有 N 組樣本。

在 N 次模擬中， $FS \leq 1$ 的次數為 M ，則該邊坡的破壞機率為：

$$P_f = \frac{M}{N} \tag{5.2}$$

N 足夠大時，可以更精準的擬合安全係數的分佈函數 $F(FS)$ ，並估計其分佈參數。

其平均值與標準差為

$$\text{平均值: } \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N FS_i \tag{5.3}$$

$$\text{標準差: } \sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (FS_i - \mu)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{5.4}$$

三、蒙地卡羅方法模擬步驟

(一) 確認該邊坡穩定性確定變量、隨機變量與其機率分佈。

(二) 建立邊坡穩定性分析數值模型，輸入確定變量與隨機變量並模擬 N 組數據。

(三) 對模擬結果進行分析，得出該邊坡的破壞規律與破壞模式以及 N 組安全係數

(四) 將 N 組安全係數擬合其分佈函數 $F(FS)$ ，並由 N 組安全係數計算其平均值(μ)與標準差(σ)

第二節 隨機亂數生成方法

一、概述

利用蒙地卡羅模擬方法來判斷邊坡的穩定性最重要的事情是隨機亂數如何生成，在知道隨機變量服從的常態分佈後，可利用多種方法產生相應的隨機數。其方法為在[0,1]之間產生服從均勻分布的隨機數，然後再將均勻分布進行轉換使其均勻分布的隨機數服從該隨機變量的常態分佈。目前產生均勻分布的隨機數的方法主要有混和同餘法、乘數同餘法以及質數乘餘法，本計畫採用質數乘餘法產生所需要的任意隨機亂數，質數乘餘法的特色是能夠在 $c=0$ 的情形下達到全週期性的效果，也是最常被使用的隨機亂數產生方法。

二、質數乘餘法原理(Prime Moduls Multiplicative Linear Congruential Method)

1951 年由 Lehmer 所提出。線性同餘法裡，選擇一個很大的整數 m ，然後依下面的遞回方程式，創造出在 0 至 $m-1$ 間之一連串整數群。

$$Y_{i+1} = (aY_i + c) \bmod m \quad (5.5)$$

Y_i : 種子數(seed)， a : 固定乘數(constant multiplier)， c : 增加量(increment)， m : 模數(modulus)，其中， Y_i 、 a 、 c 、 m 皆為整數。

LCG 要有全週期，須滿足三個情況:

1. m 、 c 互質

2. 設 x 為質數，假如 x 可以除盡 m ，則 x 可以除盡 $a-1$

3. 假如 4 可以除盡 m ，則 4 可以除盡 $a-1$

若(5.5)式中 $c=0$ ，且若 m 為質數，則可得到最大周期數為 $m-1$ ，但 a 必須有限制，找一整數 k 使 $(a^k)^{-1}$ 可以被 m 整除，符合上述條件的亂數產生方法稱為質數乘餘法。其遞回方程式如下：

$$Y_{i+1} = aY_i \bmod m \quad (5.6)$$

質數乘餘法的重要參數為 m 和 a ，在 m 的研究上若令 $m=2^{31}-1=2,147,483,647$ 本身剛好就是一個質數，因此，目前大多的研究都是放在 a 的找尋上。

目前有兩個 a 值為目前最廣泛被使用的，即 $a=16807$ 與 $a=630,360,016$ 。這兩個值都是 m 的質數，且已經被廣泛的測試，不論是在周期、統計特性上都有相當好的表現，且可以在任何電腦上順利的使用。而這也是目前最常被使用的亂數產生方法。

三、生成常態分布隨機亂數

將由(5.6)式中產生的 n 組服從均勻分布的隨機亂數兩兩分成一組，使用 Box-Muller 方法進行轉換，該方法是以兩組獨立的隨機數 u_1 和 u_2 ，這兩組數在 $[0,1]$ 上均勻分布，用 u_1 和 u_2 生成兩組獨立的常態分布隨機變數 x_1 和 x_2 ，其公式如下：

$$x_1 = \sqrt{-2\ln(u_1)} \cos(2\pi u_2) \quad (5.7)$$

$$x_2 = \sqrt{-2\ln(u_1)} \sin(2\pi u_2) \quad (5.8)$$

這兩個數為兩個互相獨立的常態分佈隨機數，當全部組數轉換完後就可以知道此常態分佈的平均值與標準差。

第三節 未來研究案例分析

一、模型建置

本計畫將利用 Rocscience 公司所開發之極限平衡分析法之邊坡穩定分析軟體-Slide 進行以蒙地卡羅法求其崩塌地之邊坡安全係數，未來模型可建置如圖 5-1。

新鮮岩盤的參數則利用 RocLab 換算，RocLab 程式是利用 Hoek-Brown 理論估算岩體強度的軟體，當中主要輸入之參數分別為單壓強度(σ_c)、岩性係數(mi)、地質強度指數(GSI)、擾動因子(D)等，由上述之參數就可以推估岩體之參數。風化岩層的參數(c & ψ)則可利用第二節隨機亂數產生的方法產生。

二、小結

下一階段將現地量測資料結果，搭配蒙地卡羅隨機場分析，可以模擬本計畫邊坡之邊坡穩定分析安全係數，亦可由此理論大量分析，並作進一步的機率統計，擬將統合成一完整的破壞機率分析。

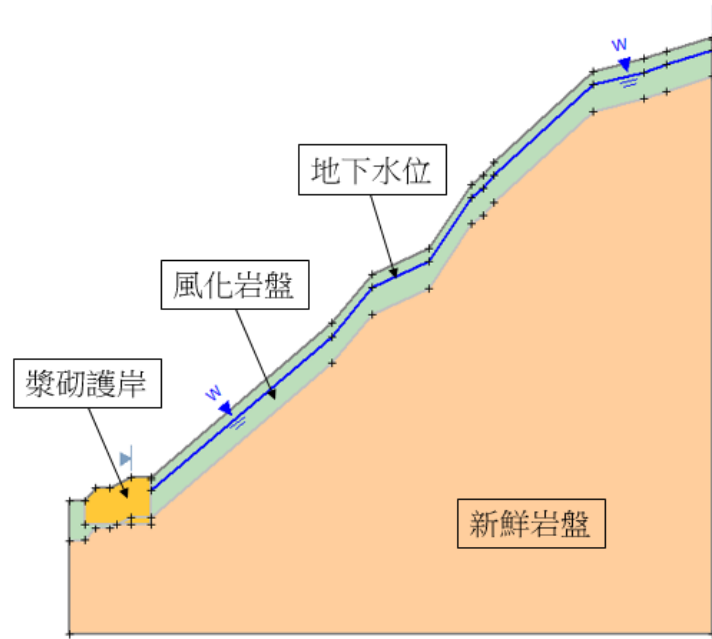


圖 5-1 Slide 模型建置

第六章 工作進度

第一節 工作項目進度

本計畫之工作項目可分為下列五個子項目：

- (一) 防護工法建置：場址已確定於臺北市蟾蜍山之邊坡，並將建立新式之工法—ULF 工法。
- (二) 感測器與監測儀器校正與整合：選定並校正感測器，包含濕度溫度感測器、氣壓計、降雨感測器、土壤濕度感測器、陀螺儀、加速度規等，並設置雨量計及多層土水導電阻感測器監測淺層邊坡，提供現地雨水入滲與雨量及土壤間的關係。進一步選定資料傳輸之中繼站設備，目前已整合完成。
- (三) 物聯網：完成物聯網初步架構之建置，包含手機/平板 APP。目前大致已整合完成。
- (四) 水分特性曲線：使用定流量幫浦系統，量測所選工址土壤之水分特性曲線(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)。防護網之建立後開始進行場址之相關監測，並取現場土樣回實驗室進行後續試驗。
- (五) 邊坡穩定性分析：引入蒙地卡羅之隨機場機率分佈概念進行邊坡穩定性分析，模型已建立完成。

表 6-1 進度表

	月份										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(一)											
(二)											
(三)											
(四)											
(五)											

第二節 新式防護工法之施工工期概估

引進新式防護工法，其施工工期初估如下表 6-2：

表 6-2 施工工期初估表

施工工期初估表

項次	工項																																
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	現地整理																																
2	現場放樣																																
3	施工架設置及拆卸																																
4	崩壞土砂防護柵 ULF-E	下部工	岩栓鑽孔																														
5			岩栓灌漿																														
6		上部工	支柱設置																														
7			鋼索設置																														
8			消能裝置安裝																														
9			金屬網設置																														
10		吊車進場																															
11	材料下料																																
12	材料進場																																

※ 項次4「岩栓鑽孔」及項次5「岩栓灌漿」所需工期須視現場邊坡、地質條件增減。

第三節 新式工法建置成果

現地勘查結果如圖 6-1、圖 6-2，



圖 6-1 場址原貌



圖 6-2 現地放樣

工法施工完成如圖 6-3、圖 6-4，



圖 6-3 施工完成(一)



圖 6-4 施工完成(二)

第四節 新式工法之後續維管

ULF 工法的主要構材之替換標準如以下規定。

一、鋼索

若發生落石直接衝擊而使鋼索遭到切斷或鋼絞線斷裂，經確認後進行替換。

二、金屬網

若因落石的衝擊等使金屬網有明顯變形及損壞的狀況，經確認後進行替換。

三、緩衝金具 ULF-US、UH (如圖 6-5)

(一) 當緩衝裝置遭受落石衝擊後，使得鋼索的預留長度有滑動情形時，原則上需要整組進行替換。但在滑動量些微的情形下，將基於設施管理人之要求應實施調查，報告狀況。

(二) 若緩衝裝置之 U 型螺栓如果有明顯變形或損壞的情況經確認後，進行整組替換。

(三) 若緩衝裝置之鋼索有更換，停止器也必須整組一併替換。

(四) 緩衝金具有整組更換，也必須一併替換鋼索。

四、緩衝金具 ULF-OS，OC (如圖 6-6)

當 ULF-OS，OC 等緩衝裝置遭受落石衝擊後，使得鋼索的預留長度有滑動情形時，原則上需要整組進行替換。但在滑動量些微的情形下，將基於設施管理人之要求應實施調查，報告狀

況。

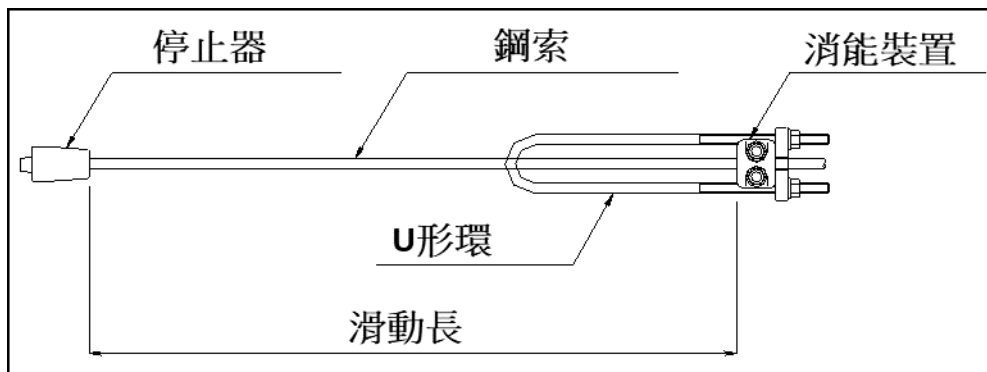


圖 6-5 緩衝金具 ULF-US、UH 概要圖

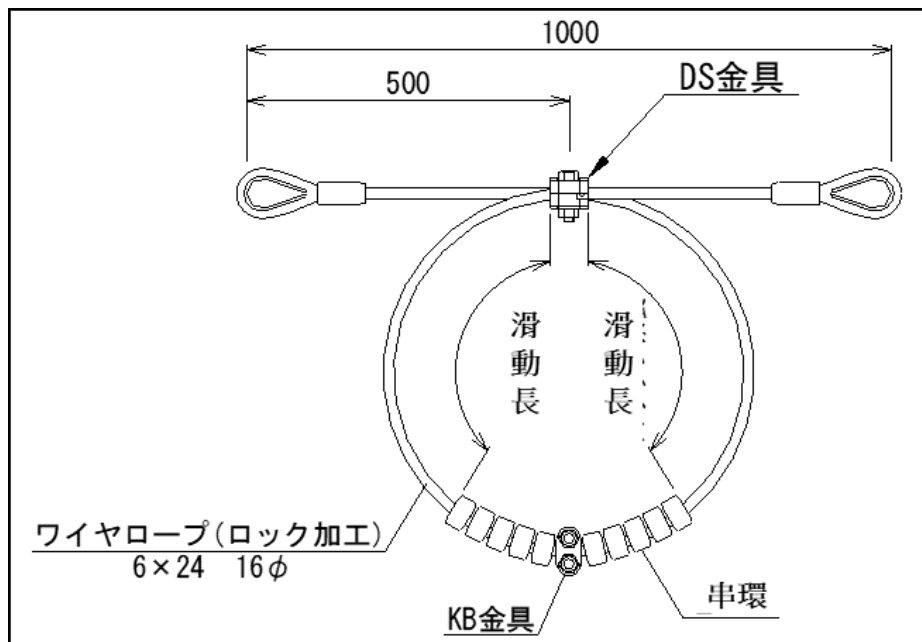


圖 6-6 緩衝金具 ULF-OS、OC 概要圖

五、支柱

若遭受落石直接碰撞使其明顯變形，經確認後進行替換。

除此之外亦可參照“公路邊坡大地工程設施維護與管理規範”針對防護柵所提出的巡察項目及維護策略及方法。

第七章 結論及建議

第一節 結論

本計畫嘗試引進新工法於邊坡土砂災害之防護，並更進一步地，將智能化的概念，應用在防災系統上。故將低成本、低功耗之感測器，透過無線通訊，及雲端大數據分析，使整個系統以物聯網的方式呈現，為最大之效益。此外，除獲得相關監測資訊外，亦可由監測雨量及土壤水分變化，探討其與崩塌關連性，並進一步與室內試驗所獲得之水分特性曲線做一關聯性的探討，以期能作為邊坡穩定分析之用。

除此之外，引進之新工法之目的在於將先進且優良工法，經過在地的改良、現場之實測表現，來決定其適用於臺灣的環境，而非獨厚特定之廠商，且本工法之材料規格，已在地化，符合國家政府的利益。

本計畫執行程度於感測器與監測儀器校正與整合、物聯網、水分特性曲線及邊坡穩定性分析的模組與模型已建立完成，防護網亦順利完工。

參考文獻

1. 交通部，“公路邊坡大地工程設施維護與管理規範”，交通部，44-51 頁，2015。
2. 財團法人成大研究發展基金會，“公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發(1/2)”，交通部運輸研究所成果報告，2015。
3. ハイパワーフェンス工法研究會 (2017, January 5). エネルギー吸収型軽量落石防護柵 ULF 工法. Retrieved from <http://www.hp-fence.com/ulf.html>
4. Banafa, A. (2016). “IoT Standardization and Implementation Challenges”. IEEE IoT Newsletter. Retrieved from <https://iot.ieee.org/home/sitemap/34-newsletter/july-2016/182-iot-standardization-and-implementation-challenges.html>
5. Hwang, C. (2002). “Determination of Material Functions for Unsaturated Flow.” Ph.D. thesis, University of Colorado, Boulder, CO.
6. Lee, J. (2011). “Limits to Continuity of Water Flow in Unsaturated, Compacted Soils.” Ph.D. thesis, University of Colorado, Boulder, CO.
7. Van Genuchten, M.Th. (1980). “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹” Soil Sci. Soc. Am. J.
8. Znisarcic, D., Illangasekare, T., and Manna, M. (1991). “Laboratory Testing and Parameter Estimation for Two-Phase Flow Problems.” In Mclean et al (ed.) Proc. Of the Geotechnical Engineering Congress.

Boulder CO. 1991. ASCE, New York.

附錄

附錄一、崩壞土砂防護柵-設計計算書(參考)

崩壞土砂防護柵

設計計算書

中華民國107年8月

— 目 錄 —

頁

1. ULF TYPE-E計畫	
1- 1. 計畫條件	
1- 2. 設計流程	
1- 3. 參考準則	
2. 設計計算	
2- 1. 設計條件	
2- 2. 設計柵高檢討	
2- 3. 崩壞土砂衝擊力計算	
2- 4. 崩壞土砂之堆積土壓計算	
2- 5. 金屬網檢討	
2- 6. 支柱檢討	
2- 7. 背向鋼索檢討	
2- 8. 岩栓（背向）檢討	
2- 9. 橫向鋼索檢討	
2-10. 側、斜向鋼索檢討	
2-11 岩栓（側、斜向）檢討	
2-12. 岩栓(基鈹)檢討	

1. ULF TYPE-E計畫

1-1. 計畫條件

計畫ULF TYPE-E做為崩壞土砂防護柵使用時，係以以下條件為基礎。

- ① 本計畫之ULF TYPE-E係以崩壞土砂防護為目的之構造設置。
- ② 本計畫之ULF TYPE-E係以長期防護對策為目的之永久結構型式。
- ③ 防護柵上方之邊坡角度為以下所述。
邊坡角度：40°（假設）
- ④ 防護柵上方之邊坡高度為以下所述。
邊坡高：7.5 m（假設）
- ⑤ 基礎地盤之地質條件如下所述。

地盤種類：	①層：表層	②層：砂礫
平均 N 值：	①層：N= 0	②層：N= 30（假設）
極限周圍摩擦抵抗：	①層：0.00 N/mm ² （忽略周圍摩擦抵抗）	
	②層：0.20 N/mm ³ （砂礫、N=30）	

⑥ 使用金屬網規格

金屬網規格：鍍鋅鋼線（素線徑4.0mm 網目40mm）

⑦ 使用支柱規格

支柱規格：圓形鋼管 $\phi 165.2 \times t6.0$

1-2. 設計流程

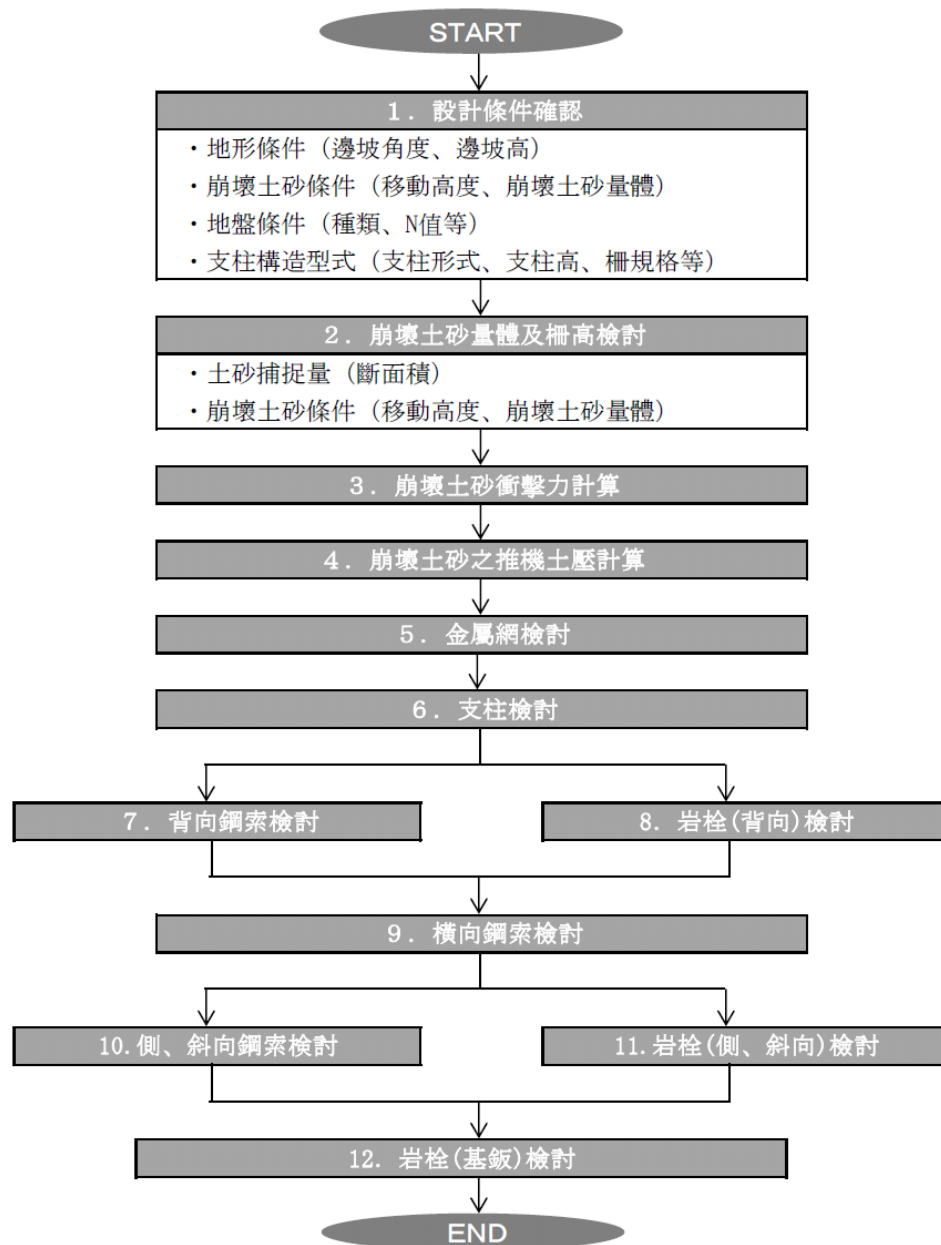


圖1. 設計流程

1-3. 参考準則

- | | |
|---|------------------------------|
| ① 道路土工 切土工・斜面安定工指針 | [社] 日本道路協会（平成21年 6月） |
| ② 道路土工 擁壁工指針 | [社] 日本道路協会（平成24年 7月） |
| ③ 道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV鋼橋編 | [社] 日本道路協会（平成24年 3月） |
| ④ 崩壊土砂による衝撃力と崩壊土砂量を考慮した
待受け擁壁の設計計算事例 | 平成16年 6月 全国地すべりがけ崩れ
対策協議会 |
| ⑤ 落石対策便覧 | [社] 日本道路協会（平成12年 6月） |

2. 設計計算

2-1. 設計條件

(1). 地形條件(假設)

- ① 邊坡角度 : $\theta = 40^\circ$
 ② 邊坡高 : $H_s = 7.5 \text{ m}$

(2). 崩壞土砂條件(假設)

- ① 崩壞土砂移動高度 : $h_{sm} = 1.00 \text{ m}$ (預定崩壞深度的1/2)
 ② 崩壞土砂量 : $V = 2.9 \text{ m}^3/\text{m}$

(3). 地盤條件(假設)

- ① 地盤種類 ①層 : 表層 ②層 : 砂礫
 ② N值 ①層 : 0 ②層 : 30

2-2 設計柵高檢討

$$\begin{aligned} \text{ULF 設計高 (H)} &= \text{必要柵高 (H')} + \text{下陷量 (0.2m)} \\ &= 3.000 + 0.2 \\ &= 3.200 \text{ m} \end{aligned}$$

表3.2.2 ULF必要柵高與設計高

必要柵高 (H')	ULF 設計高 (H)
2.000m	2.200m
2.500m	2.700m
3.000m	3.200m
3.500m	3.700m

2-3 崩壞土砂衝擊力計算

崩壞土砂的衝擊力是根據「崩壞土砂による衝擊力と崩壞土砂量を考慮した待受け擁壁の設計計算事例」p.7計算，如下所示。

$$F = \alpha \cdot F_{sm}$$

在此、 F : 作用於擋土牆之衝擊力 (kN/m²)
 F_{sm} : 移動力 (kN/m²)
 (根據國土交通省告示大332号(平成13年3月28日)所計算之移動力)
 α : 擋土牆對於衝擊力之緩和係數 (= 1.0)

移動力 F_{sm} 是根據「土砂災害防止に関する基礎調査の手引き」(「崩壞土砂による衝擊力と崩壞土砂量を考慮した待受け擁壁の設計計算事例」參照卷末資料的計算例)、以次式算出。

$$F_{sm} = \rho_m \cdot g \cdot h_{sm} \left[\left\{ \frac{bu}{a} \left[1 - \exp \left(\frac{-2 \cdot a \cdot H}{h_{sm} \cdot \sin \theta u} \right) \right] \cos^2(\theta u - \theta d) \right\} \exp \left(\frac{-2 \cdot a \cdot x}{h_{sm}} \right) + \frac{bd}{a} \left[1 - \exp \left(\frac{-2 \cdot a \cdot x}{h_{sm}} \right) \right] \right]$$

$$a = \frac{2}{(\sigma - 1)C + 1} fb$$

$$bu = \cos \theta u \left\{ \tan \theta u - \frac{(\sigma - 1)C}{(\sigma - 1)C + 1} \tan \phi \right\}$$

$$bd = \cos \theta d \left\{ \tan \theta d - \frac{(\sigma - 1)C}{(\sigma - 1)C + 1} \tan \phi \right\}$$

在此、 ρ_m : 土石等的密度 (= 1.8 t/m³)
 g : 重力加速度 (= 9.8 m/s²)
 σ : 土石等的比重 (= 2.6 t/m³)
 C : 土石等的容積濃度 (= 0.5)
 ϕ : 內部摩擦角 (= 30 °)
 fb : 流體抵抗係數 (= 0.025)
 H : 邊坡高 (= 8 m)
 h_{sm} : 移動高度 (= 1.00 m)
 θu : 急傾斜地的邊坡角度 (= 40 °) ※平均角度
 ※採用有崩壞虞慮之邊坡的平均角度。
 θd : 急傾斜地下端至平坦部的邊坡角度 (= 0 °)
 x : 背面水平區間距離 (= 0.00 m) ※從支柱背面起算之距離

$$a = \frac{2}{(2.6 - 1) \times 0.5 + 1} \times 0.025 = 0.028$$

$$b_u = \cos 40^\circ \times \left\{ \tan 40^\circ - \frac{(2.6 - 1) \times 0.5}{(2.6 - 1) \times 0.5 + 1} \times \tan 30^\circ \right\} = 0.446$$

$$b_d = \cos 0^\circ \times \left\{ \tan 0^\circ - \frac{(2.6 - 1) \times 0.5}{(2.6 - 1) \times 0.5 + 1} \times \tan 30^\circ \right\} = -0.257$$

$$\begin{aligned} F_{sm} &= 1.80 \times 9.8 \times 1.00 \times \left[\left\{ \frac{0.446}{0.028} \times \left[1 - \exp \left(\frac{-2 \times 0.028 \times 8}{1.00 \times \sin 40^\circ} \right) \right] \right\} \right. \\ &\quad \times \cos^2 \left[40^\circ - 0^\circ \right] \left. \times \exp \left(\frac{-2 \times 0.028 \times 0.00}{1.00} \right) \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{-0.257}{0.028} \times \left[1 - \exp \left(\frac{-2 \times 0.028 \times 0.00}{1.00} \right) \right] \right] \right] \\ &= 79.10 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= \alpha \cdot F_{sm} \\ &= 1.0 \times 79.10 \\ &= 79.10 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

2-4 崩壞土砂之堆積土壓計算

堆積土壓是根據「道路土工 擁壁工指針」p.101計算，如下所示。

(1). 主動土壓係數 K_A

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2}$$

在此、
 α : 防護工背面與鉛直面所呈角度 (= 25°)
 β : 防護工背填土坡面與水平面之角度 (= 0°)
 ϕ : 回填土的剪斷抵抗角 (= 30°)
 δ : 防護工壁面摩擦角 (= $2/3 \phi = 20.0^\circ$)

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{\cos^2(30 - 25)}{\cos^2 25^\circ \times \cos(25^\circ + 20.0^\circ) \times \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(30 + 20.0^\circ) \times \sin(30 - 0^\circ)}{\cos(25 + 20.0^\circ) \times \cos(25 - 0^\circ)}} \right]^2} \\ &= 0.543 \end{aligned}$$

(2). 主動土壓合力係數 P_A

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma \cdot h_d^2$$

在此、
 γ : 回填土的單位體積重量 (= 18 kN/m^3)
 h_d : 崩壞土砂的堆積高 (= 1.722 m)

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{1}{2} \times 0.543 \times 18 \times 1.722^2 \\ &= 14.49 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

(3). 與柵面垂直之分力 P_H

$$\begin{aligned} P_H &= P_A \cdot \cos \delta \\ &= 14.49 \times \cos 20.0 \\ &= 13.62 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

將 P_H 置換為三角形分布後、其最大分布荷重 p

$$\begin{aligned} p &= P_H / H \times 2 \\ &= 13.62 / 1.90 \times 2 \\ &= 14.34 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

(4). 與柵面平行之分力 P_V

$$\begin{aligned} P_V &= P_A \cdot \sin \delta \\ &= 14.49 \times \sin 20.0 \\ &= 4.96 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

分布荷重 q

$$\begin{aligned} q &= P_V / H \\ &= 4.96 / 1.90 \\ &= 2.61 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

2-5 金屬網檢討

(1). 金屬網各項元素

- ① 金屬網規格 : 鍍鋅鋼線網
- ② 金屬網素線徑 D : 4.0 mm
- ③ 金屬網網目 S : 50 mm
- ④ 素線拉張強度 σ : 780 N/mm² (※參照JIS規範中鍍鋅鋼線網之規格值)
- ⑤ 線交叉角 θ : 85°
- ⑥ 容許拉張應力安全係數(衝擊時): 1.0
容許拉張應力安全係數(堆積時): 2.0
- ⑦ 線交叉強度安全係數(衝擊時) : 1.5
線交叉強度安全係數(堆積時) : 1.5

(2). 金屬網張力

① 容許拉張應力 σ_a

$$\begin{aligned}
 \text{衝擊時 } \sigma_a &= \sigma / F_s \\
 &= 780 / 1 \\
 &= 780 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{堆積時 } \sigma_a &= \sigma / F_s \\
 &= 780 / 2 \\
 &= 390 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

② 金屬網素線的容許拉張強度 P_0

$$\begin{aligned}
 \text{衝擊時 } P_0 &= \pi \times D^2 \times \sigma_a / 4 \\
 &= \pi \times 4.0^2 \times 780 / 4 \\
 &= 9802 \text{ N} \\
 \text{堆積時 } P_0 &= \pi \times D^2 \times \sigma_a / 4 \\
 &= \pi \times 4.0^2 \times 390 / 4 \\
 &= 4901 \text{ N}
 \end{aligned}$$

③ 線交叉點強度 P_a

$$\begin{aligned}
 \text{衝擊時 } P_a &= 2 \cdot P_0 \cdot \cos(\theta / 2) \times 1 / 1.5 \\
 &= 2 \times 9802 \times \cos(85 / 2) \times 1 / 1.5 \\
 &= 9635 \text{ N} \\
 \text{堆積時 } P_a &= 2 \cdot P_0 \cdot \cos(\theta / 2) \times 1 / 1.5 \\
 &= 2 \times 4901 \times \cos(85 / 2) \times 1 / 1.5 \\
 &= 4818 \text{ N}
 \end{aligned}$$

④ 1m單位時的線交叉點數 n

$$\begin{aligned}
 n &= 1 / [2 \cdot S \cdot \sin(\theta / 2)] \times 1000 \\
 &= 1 / [2 \times 50 \times \sin(85 / 2)] \times 1000 \\
 &= 14.8 \text{ 處}
 \end{aligned}$$

⑤ 1m²單位時的金屬網張力

$$\begin{aligned}\text{衝擊時 } R &= P_a \cdot n / 1000 \\ &= 9635 \times 14.8 / 1000 \\ &= 142.6 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{堆積時 } R &= P_a \cdot n / 1000 \\ &= 4818 \times 14.8 / 1000 \\ &= 71.3 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

(2). 金屬網的容許荷重

① 初期網長 L

$$L = 4.000 \text{ m}$$

② 設計耐力時的突出量 D

$$d = 0.800 \text{ m} \quad \text{※ 根據實規模足尺實驗，採用支柱間隔的20\%}$$

③ 金屬網容許荷重 W

$$\begin{aligned}\text{衝擊時 } W &= 8 \cdot d \cdot R / L^2 \\ &= 8 \times 0.800 \times 142.6 / 4.000^2 \\ &= 57.04 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{堆積時 } W &= 8 \cdot d \cdot R / L^2 \\ &= 8 \times 0.800 \times 71.3 / 4.000^2 \\ &= 28.52 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

(3). 容許耐力之驗證

① 崩壞土砂衝擊時

單位面積的作用荷重

$$\begin{aligned}\alpha_{ULF} \cdot F &= 0.7 \times 79.10 \text{ kN/m}^2 \\ &= 55.37 \text{ kN/m}^2 > 57.04 \text{ kN/m}^2 \dots\dots\dots \text{OK}\end{aligned}$$

在此、 F : 崩壞土砂的衝擊力 (kN/m²)

α_{ULF} : 實規模實驗中透過結構體緩衝效果取得之衝擊力低減係數

② 崩壞土砂堆積時

單位面積的作用荷重

$$p = 14.34 \text{ kN/m}^2 < 28.52 \text{ kN/m}^2 \dots\dots\dots \text{OK}$$

2-6 支柱檢討

2-6-1 崩壞土砂衝擊時

彎矩作用於支柱，以基礎部和背向鋼索安裝部做為支點之懸臂樑進行支柱檢討。

(1). 柵張力T的水平分力H (kN)

$$\begin{aligned} H &= \frac{w \cdot L^2}{8 \cdot d} \\ &= \frac{55.37 \times 4.00^2}{8 \times 0.800} \\ &= 138.43 \text{ kN} \end{aligned}$$

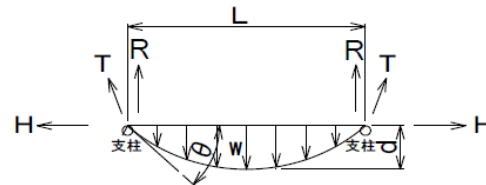


圖3.6.1 柵張力模型圖
(崩壞土砂衝擊時)

在此、 w : 作用於柵面之衝擊力 ($= 55.37 \text{ kN/m}^2 = \alpha_{ULF} \cdot F$)
 L : 支柱間隔 ($= 4.00 \text{ m}$)
 d : ULF (柵面) 的突出量 ($= 0.800 \text{ m}$)
 ※ 根據實規模足尺實驗，採用支柱間隔的20%

在此，乘以實規模實驗所得之ULF TYPE-E的張力低減係數、計算設計張力H'

$$\begin{aligned} H' &= \beta_{ULF} \cdot H \\ &= 0.2 \times 138.43 \\ &= 27.69 \text{ kN} \end{aligned}$$

在此、 β_{ULF} : 實規模實驗中透過結構體緩衝效果取得之衝擊力低減係數
 ($= 0.2$)

(2). 柵張力T (kN)

$$\begin{aligned} T &= H' / \cos \theta \\ &= 27.69 / \cos 43.60^\circ \\ &= 38.24 \text{ kN} \end{aligned}$$

在此、 θ : ULF的突出角 ($= 43.60^\circ$)

(3). 支柱作用力 R (kN)

$$\begin{aligned} 2R &= 2 \times T \times \sin \theta \\ &= 2 \times 38.24 \times \sin 43.60^\circ \\ &= 2 \times 26.37 \\ &= 52.74 \text{ kN} \end{aligned}$$

(4). 反力 R_A , R_B (kN)

基礎部為 A 點、背向鋼索安裝部為 B 點。

$$R_A = 44.499 \text{ kN (根據平面骨組解析之計算值)}$$

$$\begin{aligned} R_B &= 8.241 \text{ kN (根據平面骨組解析之計算值)} \\ &0.00 \end{aligned}$$

(5). 彎矩 $M_{\max}$ (kN·m)

$$M_{\max} = 18.773 \text{ kN} \cdot \text{m (根據平面骨組解析之計算值)}$$

(6). 應力度驗證

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M_{\max}}{Z_x} \\ &= \frac{18.77 \times 10^6}{115400} \\ &= 162.7 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a = 245 \text{ N/mm}^2 \cdots \text{OK (降伏強度)} \end{aligned}$$

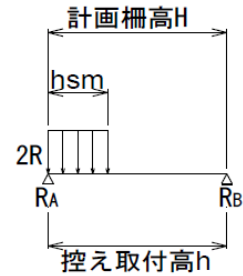


圖3.6.2 支柱作用力模型圖
(崩壞土砂衝擊時)

2-6-2 崩壞土砂堆積時

彎矩及軸力作用於支柱，以基礎部和背向鋼索安裝部做為支點之懸臂樑進行支柱檢討。

(1). 柵張力T的水平分力H (kN)

$$\begin{aligned} H &= \frac{w \cdot L^2}{8 \cdot d} \\ &= \frac{14.34 \times 4.0^2}{8 \times 0.800} \\ &= 35.84 \text{ kN} \end{aligned}$$

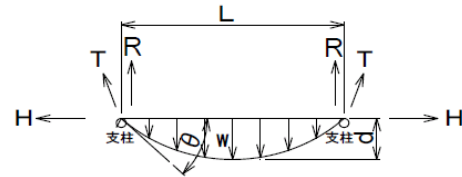


圖3.6.3 柵張力模型圖
(崩壞土砂堆積時)

在此、 w : 作用於柵面之分布荷重 (= 14.34 kN/m²)
 L : 支柱間隔 (= 4.00 m)
 d : U L F 的突出量 (= 0.800 m)

※ 根據實規模足尺實驗，採用支柱間隔的20%

(2). 柵張力T (kN)

$$\begin{aligned} T &= H / \cos \theta \\ &= 35.84 / \cos 43.60^\circ \\ &= 49.49 \text{ kN} \end{aligned}$$

在此、 θ : U L F 的下垂角度 (= 43.60°)

(3). 支柱作用力R (kN)

$$\begin{aligned} 2R &= 2 \times T \times \sin \theta \\ &= 2 \times 49.49 \times \sin 43.60^\circ \\ &= 2 \times 34.13 \\ &= 68.26 \text{ kN} \\ &19.113 \end{aligned}$$

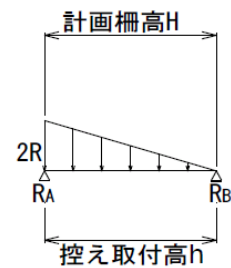


圖3.6.4 支柱作用力模型圖
(崩壞土砂堆積時)

(4). 反力 R_A , R_B (kN)

基礎部為A點、背向鋼索安裝部為B點。

$$\begin{aligned} R_A &= 52.013 \text{ kN (根據平面骨組解析之計算值)} \\ R_B &= 12.834 \text{ kN (根據平面骨組解析之計算值)} \\ &0.00 \end{aligned}$$

(5). 彎矩 $M_{\max}$ (kN·m)

$$M_{\max} = 23.917 \text{ kN} \cdot \text{m (根據平面骨組解析之計算值)}$$

(6). 軸力 N (kN·m)

1). 與支撐面平行之堆積土壓所產生的軸力

$$\begin{aligned} N_{\textcircled{1}} &= P_v \cdot L \\ &= 2.61 \times 4.00 \\ &= 10.44 \text{ kN} \end{aligned}$$

在此、 q : 與支撐面平行之堆積土壓 (= 2.61 kN/m²)
 L : 支柱間隔 (= 4.00 m)

2). 與支撐面垂直之堆積土壓所產生的軸力

$$\begin{aligned} N_{\textcircled{2}} &= R_B \cdot \tan \theta_A \\ &= 12.83 \times \tan 35^\circ \\ &= 8.99 \text{ kN} \end{aligned}$$

在此、 θ_A : 支柱直角方向與背向鋼索所呈角度 (= 35°) ※剖面方向

3). 作用於支柱之軸力

$$\begin{aligned} \Sigma N_{\textcircled{1}+\textcircled{2}} &= 10.44 + 8.99 \\ &= 19.43 \text{ kN} \end{aligned}$$

(7). 應力度驗證

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{N}{A} + \frac{M_{\max}}{Z_x} \\ &= \frac{19.43 \times 10^3}{3001} + \frac{23.92 \times 10^6}{115400} \\ &= 6.5 + 207.3 \\ &= 213.8 \text{ N/mm}^2 < \sigma_a = 266.7 \text{ N/mm}^2 \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

※) 容許應力度 σ_a = 拉張強度 (400N/mm²) / 1.5

2-7 背向鋼索檢討

(1). 與柵支撐面直角之設計張力 T_H

衝擊時支點反力 R_B : 8.24 kN

堆積時支點反力 R_B : 12.83 kN

$$T_H = 12.83 \text{ kN}$$

※ T_H 採用上記中的最大值。

(2). 考慮背向鋼索安裝角度之設計張力 T_A

$$\begin{aligned} T_A &= \frac{T_H}{\cos(\theta_A + \theta'_A)} \div n \\ &= \frac{12.83}{\cos(35^\circ + 5.0^\circ)} \div 1 \\ &= 16.75 \text{ kN} \end{aligned}$$

※ 支柱1根為單位的背向鋼索及錨定數量 n 為 1 支。

消能裝置設計張力

$$= 28.00 \text{ kN} \quad (\text{ULF-OS的動態張力為28kN})$$

設計 T_A 採用上記中的最大值。

$$T_A = 28.00 \text{ kN} < T_a = 59.0 \text{ kN} \cdots \text{OK}$$

在此、 θ_A : 支柱直角方向與制動鋼索所呈角度 (= 35°) ※剖面方向

θ'_A : 背向鋼索設置角度的施工誤差 (= $\pm 5.0^\circ$)

※背向鋼索設置角度的施工誤差，以安全性為原則 $+5^\circ$ 進行檢討

T_a : 鋼索的容許張力

$$= (T_b / F_s = 118.0 / 2^{※1}) = 59.0 \text{ (kN)}$$

※1以「防雪対策便覧」p.271吊柵的鋼索安全係數為準

T_b : 鋼索的斷裂強度 (= 118.0 kN)

※鋼索使用 $3 \times 7 \text{ G}/0 \text{ 16 } \phi$

(3). 背向鋼索及錨定 1 支的情況下，每 1 支單位的設計錨定力 T'_A

$$\begin{aligned} T'_A &= T_A \\ &= 28.00 \\ &= 28.00 \text{ kN} < T_a = 59.0 \text{ kN} \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

2-8 岩栓（背向）檢討

2-8-1 岩栓的作用力

岩栓基本上為在坡面上以直角方向打設，但施工時可能因坡面不平、地形和現場狀況等造成於坡面直角方向打設困難之情況；因此，作用於岩栓之剪力、拉力，在不考慮岩栓打設角度下，採用作用於背向鋼索之設計反力。

$$T_A' = 28.00 \text{ kN} = 28000 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{剪力 } S &= T_A' \\ S &= 28000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{拉力 } V &= T_A' \\ V &= 28000 \text{ N} \end{aligned}$$

2-8-2 岩栓種類

根據以上，岩栓採用竹節鋼筋種類，規格如下所述。

(1). 根據剪力決定之岩栓直徑 D_1

$$D_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi \cdot \sigma_{sa}}} \cdots \text{參考「落石對策便覽」P344(3)中算式}$$

在此, D_1 : 岩栓直徑 (mm)

S : 作用於岩栓之剪力 (= 28000 N)

π : 圓周率

σ_{sa} : 岩栓鋼材的容許剪應力 (= 142 N/mm²)

※ 鋼筋的容許剪應力 $\tau_a = \sigma_y / \sqrt{3} / 1.7$

(「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」p.136～鋼材的容許剪應力為準)

在此、 σ_y : 鋼筋的降伏應力 (= 420 N/mm²)

$$\tau_a = 420 / \sqrt{3} / 1.7 = 142.6 \text{ N/mm}^2 \approx 142 \text{ N/mm}^2$$

$$D_2 = 2 \times \sqrt{\frac{28000}{\pi \times 142}} = 15.84 \text{ mm}$$

(2). 根據拉力決定之岩栓直徑D₂

$$D_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot \tau_{sa}}} \quad \dots \text{參考「落石對策便覽」 P344(3) 中算式}$$

在此, D_2 : 岩栓直徑 (mm)

V : 作用於岩栓之拉力 (= 28000 N)

π : 圓周率

τ_{sa} : 岩栓鋼材的容許張應力 (= 156 N/mm²)

$$D_2 = 2 \times \sqrt{\frac{28000}{\pi \times 156}} = 15.12 \text{ mm}$$

(3). 決定岩栓直徑

岩栓直徑為D₁與D₂其中較大一方。

$$D_1 = 15.84 \text{ mm} > D_2 = 15.12 \text{ mm} \rightarrow 25.54 \text{ mm (SD420、D25)}$$

∴根據以上, 岩栓採用竹節鋼筋SD420、D25

2-8-3 岩栓長度 l (mm)

(1). 根據灌漿材與竹節鋼筋的握裹強度決定植入深度 l_1

$$l_1 = \frac{V}{D \cdot \pi \cdot \tau_1}$$

在此, V : 作用於錨定之拉力 (= 28000 N)

τ_1 : 灌漿材與竹節鋼筋的容許握裹應力 (根據表. 1 = 1.6 N/mm²)

※灌漿材的設計基準強度為24N/mm²

D : 岩栓的外徑 (= 25.54 mm)

$$l_1 = \frac{28000}{25.54 \times \pi \times 1.6} = 218 \text{ mm}$$

(2). 根據灌漿材與邊坡的握裹強度決定之植入深度 l_2

①層 層厚: $l_{①} = 0.0 \text{ m}$

極限周面摩擦抵抗: $\tau_1 = 0.00 \text{ N/mm}^2$ (無視周面摩擦抵抗)

②層

極限周面摩擦抵抗: $\tau_2 = 0.20 \text{ N/mm}^2$ (參照表. 2, 砂礫 $N=30$)

$$l_2 = l_{①} + \frac{V \cdot F_s}{\phi \cdot \pi \cdot \tau_2}$$

在此, F_s : 岩栓拉拔之安全係數 (= 2.0) ※永久結構時之安全係數

ϕ : 鑽孔直徑 (= 90 mm以上)

τ_2 : 對應地盤種類之極限周面摩擦抵抗的推定值

$$l_2 = 0 + \frac{28000 \times 2.0}{90 \times \pi \times 0.20} = 990 \text{ mm}$$

(3). 決定岩栓長度

岩栓植入深度為 l_1 與 l_2 其中較大一方。

$$l_1 = 218 \text{ mm} < l_2 = 990 \text{ mm}$$

∴岩栓植入深度為 l_2 , 將其尾數化為整數→ 1000 mm

岩栓所需長度 l 依下述決定。

$$l = \text{植入深度} + \text{突出長} (0.2 \text{ m})$$

$$l = 1.0 + 0.2 = 1.2 \text{ m} \rightarrow 1.5 \text{ m} \text{ (至少1.0m以上、以0.5m為單位進位)}$$

∴根據以上, 岩栓採用竹節鋼筋: SD420、D25-L1500

2-9 橫向鋼索檢討

(1). 1條鋼索時之荷重 (kN/m)

衝擊時水平分力H : 27.69 kN

堆積時水平分力H : 35.84 kN

$$H = T_1 = 35.84 \text{ kN/m}$$

※ T_1 採用上記之中的最大值

(2). 橫向鋼索的驗證

若橫向鋼索的初期張力 $T_0 = 5.0$ kN/條, 橫向鋼索的張力 T 則如下述。

$$\begin{aligned} T &= T_0 + T_1 \\ &= 5.0 + 35.84 \\ &= 40.8 \text{ kN/條} < T_a = 59.0 \text{ kN} \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

在此, T_a : 鋼索的容許張力

$$= (T_b / F_s = 118.0 / 2^{※1} = 59.0 \text{ kN})$$

※1以「防雪対策便覧」p.271吊柵的鋼索安全係數為準

$$T_b : \text{鋼索的斷裂強度} (= 118.0 \text{ kN})$$

※鋼索使用3×7 G/0 16φ

2-10 側、斜向鋼索檢討

(1). 1條鋼索時的荷重 (kN/m)

衝擊時水平分力H : 27.69 kN

堆積時水平分力H : 35.84 kN

$$H = T_H = 35.84 \text{ kN/m}$$

※ T_H 採用上記之中的最大值(2)考慮側、斜向鋼索安裝角度之設計張力 T_A

$$\begin{aligned} T_A &= \frac{T_H}{\cos(\theta_A + \theta_A')} \div n \\ &= \frac{35.84}{\cos(35^\circ + 5.0^\circ)} \div 2 \\ &= 23.39 \text{ kN} \end{aligned}$$

消能裝置設計張力

$$= 40.00 \text{ kN} \quad (\text{ULF-US (2個) 的動態張力 } 40\text{kN})$$

設計 T_A 採用上記之中的最大值。

$$T_A = 40.00 \text{ kN}$$

在此, θ_A : 支柱直角方向與側、斜向鋼索所呈角度 (= 35°) ※剖面方向 θ_A' : 岩栓打設角度的施工誤差 (= $\pm 5.0^\circ$)※岩栓打設角度的施工誤差, 以安全性為原則 $+5^\circ$ 進行檢討 n : 支柱 1 根時, 側、斜向鋼索及岩栓數量 (= 2 條/支)(3). 側、斜向鋼索及岩栓 1 條/支時的設計錨定力 T_A'

$$\begin{aligned} T_A' &= T_A \\ &= 40.00 \text{ kN} < T_a = 59.0 \text{ kN} \cdots \text{OK} \end{aligned}$$

在此, T_a : 鋼索的容許張力

$$= (T_b / F_s = 118.0 / 2^{※1}) = 59.0 \text{ kN}$$

※1以「防雪対策便覧」p. 271吊棚的鋼索安全係數為準

 T_b : 鋼索的斷裂強度 (= 118.0 kN)※鋼索使用 $3 \times 7 \text{ G}/0.16 \phi$

2-11 岩栓（側、斜向）檢討

2-11-1 岩栓的作用力

岩栓基本上為在坡面上以直角方向打設，但施工時可能因坡面不平、地形和現場狀況等造成於坡面直角方向打設困難之情況；因此，作用於岩栓之剪力、拉力，在不考慮岩栓打設角度下，採用作用於側、斜向鋼索之設計反力。

考慮側、斜向鋼索安裝角度之設計張力 T_A'

$$T_A' = 40.00 \text{ kN} = 40000 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} \text{剪力 } S &= T_A' \\ S &= 40000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{拉力 } V &= T_A' \\ V &= 40000 \text{ N} \end{aligned}$$

2-11-2 岩栓種類

根據以上，岩栓採用竹節鋼筋種類，規格如下所述。

(1). 根據剪力決定之岩栓直徑 D_1

$$D_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi \cdot \sigma_{sa}}} \quad \cdots \text{ 參考「落石對策便覽」P344(3)中算式}$$

在此，
 D_1 : 岩栓直徑 (mm)
 S : 作用於岩栓之剪力 (= 40000 N)
 π : 圓周率
 σ_{sa} : 岩栓鋼材的容許剪應力度 (= 142 N/mm²)
 ※ 鋼筋的容許剪應力 $\tau_a = \sigma_y / \sqrt{3} / 1.7$
 (「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」p.136～鋼材的容許剪應力為準)

在此， σ_y : 鋼筋的降伏應力度 (= 420 N/mm²)

$$\tau_a = 420 / \sqrt{3} / 1.7 = 142.6 \text{ N/mm}^2 \approx 142 \text{ N/mm}^2$$

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{40000}{\pi \times 142}} = 18.94 \text{ mm}$$

(2). 根據拉力決定的岩栓直徑D2

$$D2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot \tau_{sa}}} \quad \dots \text{ 參考「落石對策便覽」 P344(3) 中算式}$$

在此, D2 : 岩栓直徑 (mm)

V : 作用於岩栓之剪力 (= 40000 N)

π : 圓周率

τ_{sa} : 岩栓鋼材的容許張應力 (= 156 N/mm²)

$$D2 = 2 \times \sqrt{\frac{40000}{\pi \times 156}} = 18.07 \text{ mm}$$

(3). 決定岩栓直徑

岩栓直徑為D1與D2其中較大一方。

$$D1 = 18.94 \text{ mm} > D2 = 18.07 \text{ mm} \rightarrow 25.4 \text{ mm (SD420、D25)}$$

∴根據以上, 岩栓採用竹節鋼筋SD420、D25

2-11-3 岩栓長度 (mm)

(1). 根據灌漿材與竹節鋼筋的握裹強度決定之植入深度 l_1

$$l_1 = \frac{V}{D \cdot \pi \cdot \tau_1}$$

在此, V : 作用於岩栓之拉力 (= 40000 N)

τ_1 : 灌漿材與竹節鋼筋的容許握裹應力 (根據表.1 = 1.6 N/mm²)

※灌漿材的設計基準強度為24N/mm²

$$l_1 = \frac{40000}{25.4 \times \pi \times 1.6} = 313 \text{ mm}$$

(2). 根據灌漿材與邊坡的握裹強度決定之植入深度 l_2

①層 層厚: $l_{①} = 0.0 \text{ m}$

極限周面摩擦抵抗: $\tau_1 = 0.00 \text{ N/mm}^2$ (無視周面摩擦抵抗)

②層

極限周面摩擦抵抗: $\tau_2 = 0.20 \text{ N/mm}^2$ (參照表.2, 砂礫N=30)

$$l_2 = l_{①} + \frac{V \cdot F_s}{\phi \cdot \pi \cdot \tau_2}$$

在此, F_s : 岩栓拉拔之安全係數 (= 2.0) ※永久結構時之安全係數

ϕ : 鑽孔直徑 (= 90 mm以上)

τ_2 : 對應地盤種類之極限周面摩擦抵抗的推定值

$$l_2 = 0 + \frac{40000 \times 2.0}{90 \times \pi \times 0.20} = 1415 \text{ mm}$$

(3). 決定岩栓長

岩栓固定長為 l_1 與 l_2 其中較大一方。

$$l_1 = 313 \text{ mm} < l_2 = 1415 \text{ mm}$$

∴岩栓固定長為 l_2 , 將其尾數化為整數→ 1500 mm

岩栓長 l 依下述決定。

$$l = \text{固定長} + \text{突出長} (0.2 \text{ m})$$

$$l = 1.5 + 0.2 = 1.7 \text{ m} \rightarrow 2.0 \text{ m (至少1.0m以上、以0.5m為單位進位)}$$

∴根據以上, 岩栓採用竹節鋼筋: SD420、D25-L2000

2-12 岩栓(基鈹)檢討

2-12-1 岩栓的作用力

岩栓基本上為在坡面上以直角方向打設，但施工時可能因坡面不平、地形和現場狀況等造成於坡面直角方向打設困難之情況；因此，作用於岩栓之剪力、拉力，在不考慮岩栓打設角度下，採用作用於支柱之設計反力。

衝擊時支點反力 R_A : 44.50 kN

堆積時支點反力 R_A : 52.01 kN

$$R_A = 52.01 \text{ kN} = 52013 \text{ N}$$

※ R_A 採用上記其中最大值。

剪力 $S = R_A$

$$S = 52013 \text{ N}$$

拉力 $V = R_A$

$$V = 52013 \text{ N}$$

2-12-2 岩栓種類

根據以上，岩栓採用竹節鋼筋種類，規格如下所述。

(1). 根據剪力決定之岩栓直徑 D_1

$$D_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{S/n}{\pi \cdot \sigma_{sa}}} \cdots \text{參考「落石對策便覽」P344(3)中算式}$$

在此, D_1 : 岩栓直徑 (mm)

S : 作用於岩栓之剪力 (= 52013 N)

n : 基鈹錨定錨定數量 (= 2 本)

π : 圓周率

σ_{sa} : 錨定鋼材的容許剪應力度 (= 142 N/mm²)

※ 鋼筋的容許剪應力 $\tau_a = \sigma_y / \sqrt{3} / 1.7$

(「道路橋示方書Ⅱ鋼橋編」p.136～鋼材的容許剪應力為準)

在此, σ_y : 鋼筋的降伏應力度 (= 420N/mm²)

$$\tau_a = 420 / \sqrt{3} / 1.7 = 142.6 \text{ N/mm}^2 \approx 142 \text{ N/mm}^2$$

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{52013 / 2}{\pi \times 142}} = 15.27 \text{ mm}$$

(2). 根據拉力決定的岩栓直徑D2

$$D2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{V/n}{\pi \cdot \tau_{sa}}} \quad \dots \text{ 參考「落石對策便覽」 P344(3) 中算式}$$

在此, $D2$: 岩栓直徑 (mm)

V : 作用於岩栓之拉力 (= 52013 N)

π : 圓周率

τ_{sa} : 錨定鋼材的容許剪應力度 (= 156 N/mm²)

$$D2 = 2 \times \sqrt{\frac{52013 / 2}{\pi \times 156}} = 14.57 \text{ mm}$$

(3). 決定岩栓直徑

岩栓直徑為D1與D2其中較大一方。

$$D1 = 15.27 \text{ mm} > D2 = 14.57 \text{ mm} \rightarrow 25.4 \text{ mm (SD420、D25)}$$

∴根據以上、岩栓採用竹節鋼筋竹節鋼筋SD420、D25

2-12-3 岩栓長度 l (mm)

(1). 根據灌漿材與竹節鋼筋的握裹強度所決定之植入深度 l_1

$$l_1 = \frac{V / n}{D \cdot \pi \cdot \tau_1}$$

在此、 V : 作用於錨定的拉力 (= 52013 N)

τ_1 : 灌漿材與竹節鋼筋的容許握裹應力 (根據表. 1 = 1.6 N/mm²)

※灌漿材的設計基準強度為24N/mm²

$$l_1 = \frac{52013 / 2}{25.4 \times \pi \times 1.6} = 204 \text{ mm}$$

(2). 根據灌漿材與邊坡的握裹強度決定之植入深度 l_2

①層 層厚: $l_{①} = 0.0 \text{ m}$

極限周面摩擦抵抗: $\tau = 0.00 \text{ N/mm}^2$ (無視周面摩擦抵抗)

②層

極限周面摩擦抵抗: $\tau = 0.20 \text{ N/mm}^2$ (參照表. 2, 砂礫 $N=30$)

$$l_2 = l_{①} + \frac{V / n \cdot F_s}{\phi \cdot \pi \cdot \tau_2}$$

在此、 F_s : 岩栓拉拔之安全係數 (= 2.0) ※永久結構時之安全係數

ϕ : 鑽孔直徑 (= 90 mm以上)

τ_2 : 對應地盤種類之極限周面磨擦抵抗之推定值

$$l_2 = 0 + \frac{52013 / 2 \times 2.0}{90 \times \pi \times 0.20} = 920 \text{ mm}$$

(3). 決定岩栓長度

岩栓固定長為 l_1 與 l_2 其中較大一方。

$$l_1 = 204 \text{ mm} < l_2 = 920 \text{ mm}$$

∴岩栓固定長為 l_2 , 將其尾數化為整數→ 1000 mm

岩栓長 l 依下述決定。

$$l = \text{固定長} + \text{突出長} (0.15 \text{ m})$$

$$l = 1.0 + 0.15 = 1.2 \text{ m} \rightarrow 1.5 \text{ m} \text{ (至少1.0m以上、以0.5m為單位進位)}$$

∴根據以上, 岩栓採用竹節鋼筋: SD420、D25-L1500

表. 1 灌漿材與竹節鋼筋的容許握裹應力 (N/mm² (kgf/cm²))

灌漿材的設計 基準強度	18 (180)	24 (240)	30 (300)	40以上 (400以上)
鋼筋的種類				
竹節鋼筋	1.4	1.6	1.8	2.0

出自「道路土工 切土工・斜面安定工指針」H21.6 [社]日本道路協會 P300

表-2. 極限周面摩擦抵抗之推定值

地盤種類			極限周面摩擦抵抗 (N/mm ² (kgf/cm ²))
岩 盤	硬 岩		1.20
	軟 岩		0.80
	風化岩		0.48
	泥 岩		0.48
砂 礫	N 值	10	0.08
		20	0.14
		30	0.20
		40	0.28
		50	0.36
砂	N 值	10	0.08
		20	0.14
		30	0.18
		40	0.23
		50	0.24
黏性土			0.8×C (C為凝聚力)

出自「道路土工 切土工・斜面安定工指針」H21.6 [社]日本道路協會 P299

附錄二、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	請補充說明輕型防護網的選址條件及搭配之各種感測元件及監測系統的適切性。	謝謝委員的寶貴意見，本計畫防護網之選址條件將依水保局建議，與新店規劃科聯繫並進行後續作業。其感測元件及監測系統為本團隊自行研發整合，並考慮其低功耗、低成本之需求，以利未來大量之佈設（如有大量防護網之建置需求）。
2.	防護網設置是否干擾到監測器的有效性及敏感度，請評估。	謝謝委員的寶貴意見，放置在邊坡上的感測器及防護網支柱上之陀螺儀，其有效性及敏感度將在防護網建置晚成後進行評估。在目前的評估裡，其有效性及敏感度應

項次	審查意見	回覆辦理情形
		可滿足本計畫之需求。
3.	實際案例位置與室內試驗配置應補充說明。	謝謝委員的寶貴意見，實際案例俟與新店規劃科商討後決定之。室內 SWCC 試驗，已在期中報告書補充說明。
4.	本計畫引進日本新工法（ULF-E）進行研究，建議詳細說明此工法的優點，並補充說明引進臺灣使用之理由。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告中說明，引進臺灣使用之主要理由，為其緩衝裝置為可更換之耗材，並搭配本期開發之感知功能與智能分析。
5.	計畫書2-1頁說明本計畫將使用ULF-E進行試驗，建議說明施工地點及相關尺寸。	謝謝委員的寶貴意見，施工地點仍待討論，但目前已根據適當之假設，將相關尺寸在期中報告書說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
6.	本計畫研究要安裝的設備及量測資料和此新工法之連結性，宜再補充說明，並說明本計畫內容之創新性。	謝謝委員的寶貴意見，相關說明已在期中報告內。本計畫之創新性為透過現地土壤之力學行為與防護網感知系統建立可能的連結。
7.	建議明確且詳細列出本計畫之工作項目，以利追蹤考核是否完成。	謝謝委員的寶貴意見，相關之工作項目，已列在期中報告書中。
8.	土砂防護網感知系統感測哪些參數，其告警依據為何？警戒值與行動值如何決定？	謝謝委員的寶貴意見，其主要之感測資料為防護網支柱受土砂崩落攻擊時之傾斜角度，搭配相關之環境監測，以判斷各告警之量值。目前尚無明確之警戒值與行動值。

項次	審查意見	回覆辦理情形
9.	邊坡穩定係由多層土水導電阻感測器進行實測，其原理為何？	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告書說明。 其主要之原理，為利用土水特徵曲線，反應在土壤非飽和下之有效應力，進而得以評估計算邊坡之穩定性。
10.	期初內容宜加強撰寫，應將研究重點、文獻、基本原理、感測器等詳細說明。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告說明。
11.	研究議題新穎且具意義，值得探討，但工作細項及預期成果應釐清。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告說明。
12.	對捕捉土砂量之檢討：崩壞土砂之衝擊力計算、堆積土壓力之計算、針對支柱之彎矩耐力進行檢驗及鋼索之查驗工作細項應說明。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告說明。支柱之彎矩耐力進行檢驗及鋼索之。

項次	審查意見	回覆辦理情形
13.	感知系統及告警智能分析於土砂崩落防護網之間的關係探討，應詳細起具體說明。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告說明。
14.	感測器中，降雨感測器與精準雨量計之誤差為何？又土壤濕度感測器入土深度較少，是否足以代表崩塌時之土體含水量？	謝謝委員的寶貴意見，降雨感測器與精準雨量計之誤差近日將進行誤差之檢測。土壤濕度感測器之量測，搭配相關的降雨入滲分析，應可有機會瞭解土壤含水量分布，並透過土水特徵曲線，決定土壤當下之有效應力。
15.	目前感知器的量測範圍是否適合戶外量測環境，應加入測試說明。室內試驗的成果如何反應在戶外試驗場地，應加以說明。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期中報告說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
16.	土壤水分感知器如何與土砂防護網結合？兩者間的功能性如何連結？	謝謝委員的寶貴意見，土壤濕度感測器之量測，搭配相關的降雨入滲分析，應可有機會瞭解土壤含水量分布，並透過土水特徵曲線，決定土壤當下之有效應力。
17.	防護網的後續維護方式並未說明，應列入相關使用案例說明之。	謝謝委員的寶貴意見，防護網相關之維管查驗工作細項將於期末報告補充說明。

附錄三、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	請匯出完整的物聯網傳輸架構。圖 2-2 中各感知器通過藍芽4.0(現地傳輸有效距離約30m)，應銜接Raspberry Pi 之3G或 4G將現地資料回傳至後台進行分析及警報發布，因此圖 2-2 必須修正外，因 Raspberry Pi 多用於實驗室，是否適用於現地的惡劣環境，應有詳細評估。	謝謝委員的寶貴意見，警報發布可透過感測器(警示燈、音)、Raspberry Pi(簡訊)及後台(網頁)發布，已針對圖示部分做修正。另外 Raspberry Pi 已進行現地測試，可參考第三章-第六節 足尺試驗測試。
2.	宜加強防護網規格說明及其安裝架設條件，以及適用性評估。此外宜補充說明一些實務運用成功的案例。	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期末報告說明。
3.	場址迄今未決定，是否影響進度？	謝謝委員的寶貴意見，已確定場址於臺北市蟾蜍山，並將於 12 月進行防護網之建

項次	審查意見	回覆辦理情形
		置。
4.	雖然場址未定，為配合後續實測資料分析，因進行水分特性曲線及蒙地卡羅演算法之案例分析，不要僅提出其基本理論。	謝謝委員的寶貴意見，分析資料已在期末報告說明。
5.	現地量測之相關儀器設備必須有防蟲、防濕、防破壞等設計，否則無法長期使用，建議本報告宜就此部分加強說明	謝謝委員的寶貴意見，儀器之外盒是採用 IP65 之規格，即防塵等級最高、防水沖擊，另外於足尺試驗證明可於落石撞擊下正常使用。
6.	建議應針對各工作項目間的關係及執行流程詳加說明，請以流程圖表示	謝謝委員的寶貴意見，相關資料已在期末報告說明。

附錄四、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1.	警戒行動值的訂定建議搭配相關環境監測,並考慮安全餘裕時間。	謝謝委員的寶貴意見，警戒行動值的訂定的確非常複雜，告警系統的配置會根據邊坡所在的公路或鐵路之車速配置在來向能即時煞車之安全距離，使駕駛人能有足夠時間反應。
2.	防護網感知系統電量規劃否能在汛期或颱風期(3-4 月)持續作用?建議能有妥善配套規劃及詳細說明。	謝謝委員的寶貴意見，若無市電配置的規劃，感知系統單純靠鉛蓄電池可持續運作約 20 天，並搭配當地的日照時數配置足夠功率之太陽能板，在颱風前能使電池電量維持飽滿。

項次	審查意見	回覆辦理情形
3.	防護網的土砂沖擊力為 114 KN/m ² ,其可適用之集水區或土砂崩塌潛勢區大小為何?	謝謝委員的寶貴意見，在規劃建置防護網前，會事先調查災害潛勢區的發生源及影響範圍，若災害程度大建議以多階段整治的方式從發生源減少災害的程度。
4.	防護網之彈性係數會影響量測到的撞擊力值,能否反算出最大粒徑和掉落距離(高度)?	謝謝委員的寶貴意見，若防護網上裝土壓計等量測儀器，可測得衝擊時之土砂單位面積土壓力，以目前規劃的監測儀器是無法回推土砂量體，並且衝擊力也受衝擊角度邊坡情況等因素影響。
5.	土砂崩落不確定性甚高,如何確定保水曲線與崩落具一定關聯性,對於其他可能的崩落情況,建議整體考量。	謝謝委員的寶貴意見，考量邊坡土壤的不確定性，可應用蒙地卡羅法來進行邊坡分析，並配合 SWCC 曲線得到的飽和度與基質吸力關係納

項次	審查意見	回覆辦理情形
		入考量的因素。
6.	建議比較公路單位及地方主管機關對於土砂崩落防護網適用的範圍及技術。	謝謝委員的寶貴意見，會將此建議納入後續考量項目之一。