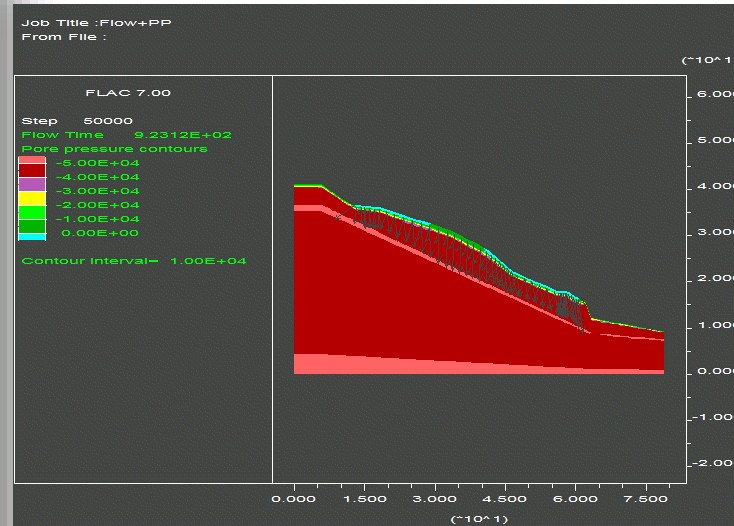


坡地淺層水力力學反應無線感測模組研發



水保局技研小組 2019/01/15

張文忠 成大土木系教授

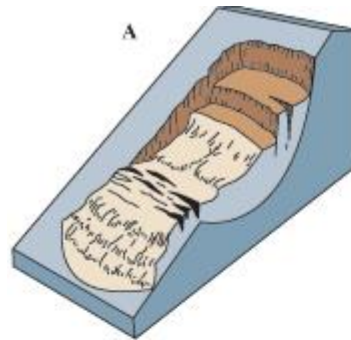
周仕勳 成大土木博士候選人

Outline

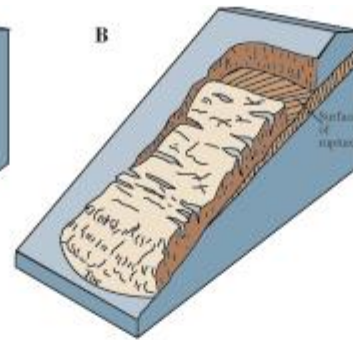
- 研究背景與目標
- 研究方法
 - 淺層滑動理論背景
 - 坡地淺層水力力學反應無線感測模組
- 無線模組現地測試監測成果
- 未來展望

Background

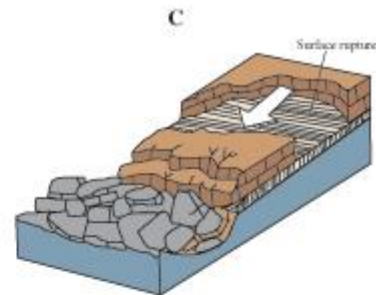
- 山區坡地崩塌多為降雨引致
- 約80%為淺層非飽和土壤邊坡破壞
- 因有一定之延時與前兆，故預警較為可行且易發揮成效



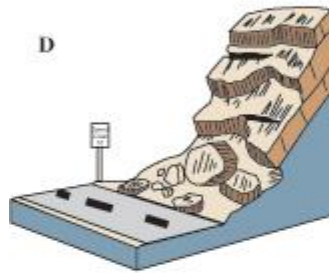
Rotational landslide



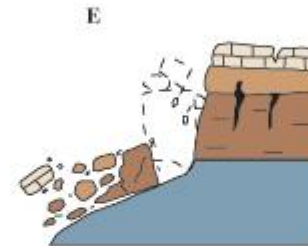
Translational landslide



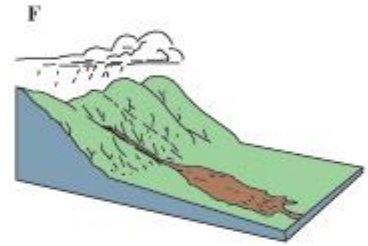
Block slide



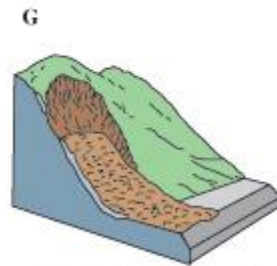
Rockfall



Topple



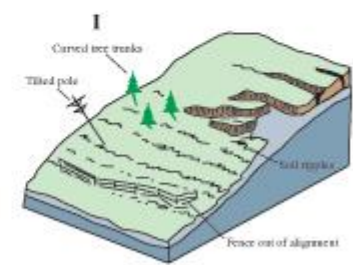
Debris flow



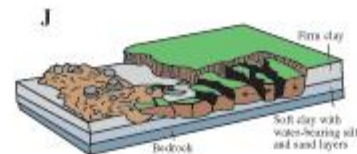
Debris avalanche



Earthflow



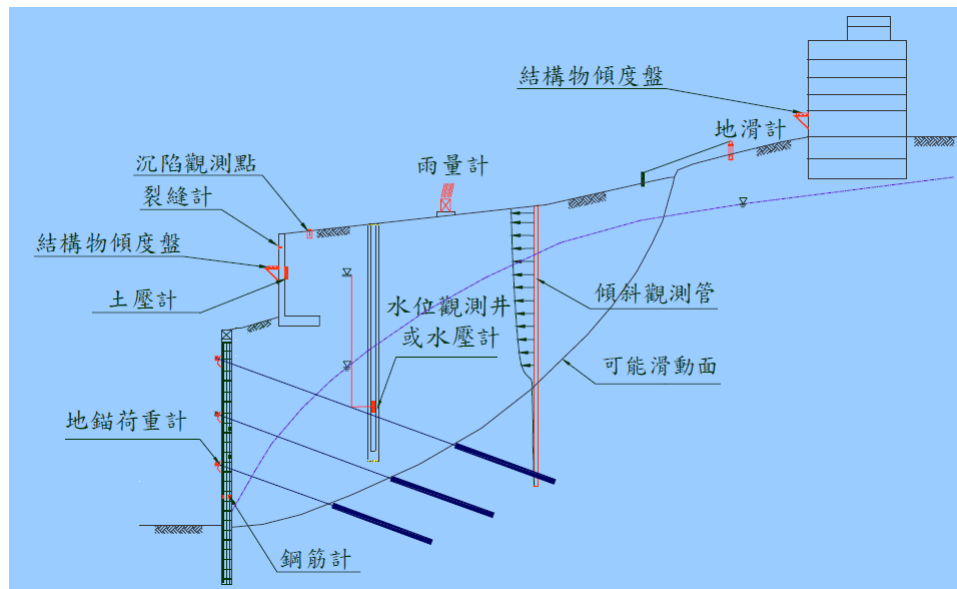
Creep



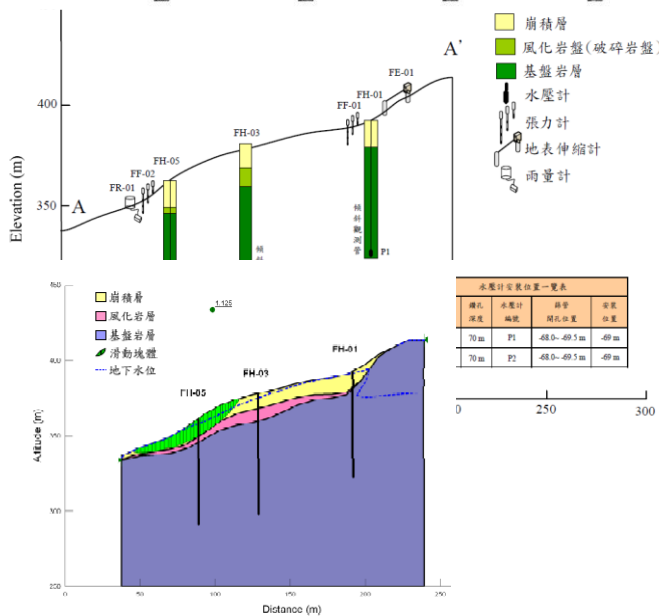
Lateral spread

計畫背景

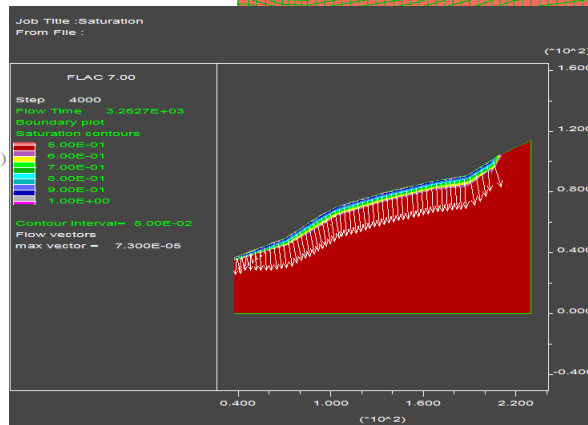
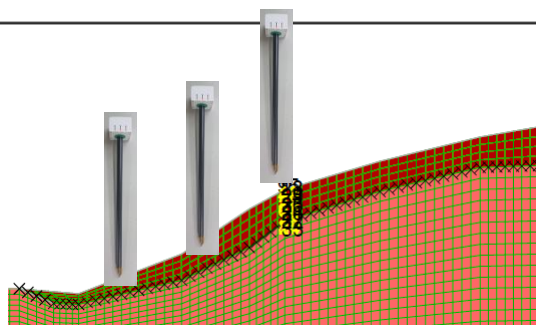
- 現有坡地監測系統架構
 - 配合經驗法預警
 - 需鑽孔與安裝、單價高、監測點位有限
 - 缺乏系統性資料整合與後續加值運用



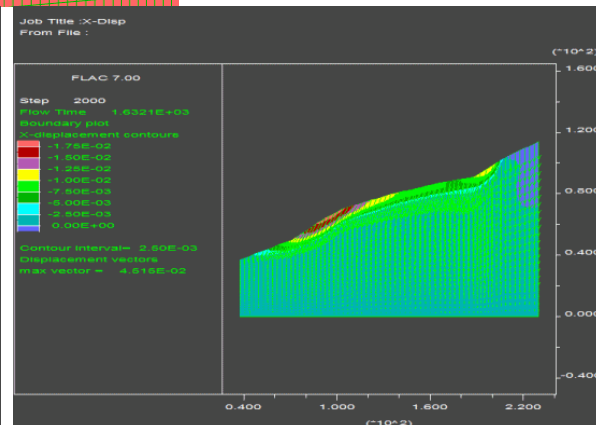
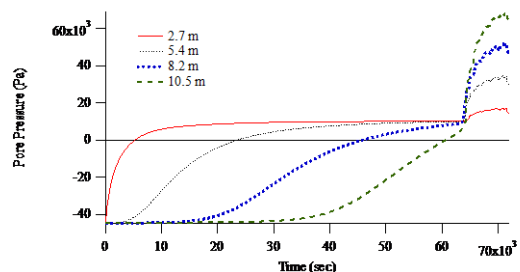
傳統監測 vs. 耦合解析+地表監測



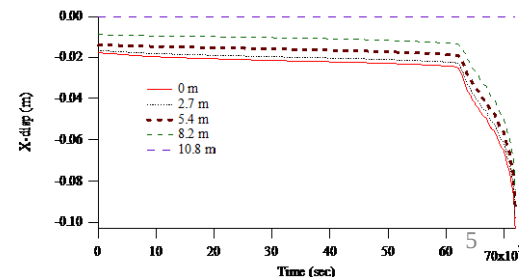
(b) 莫拉克颱風穩定性分析成果 (F.S.=1.125)



Wetting front (Saturation+Flow)



X-disp+Disp. vector



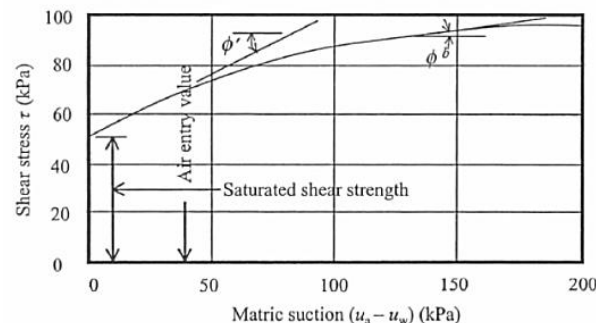
淺層 vs. 深層滑動

Shallow slide mechanism

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

Initial: $u_w < 0$, suction > 0

inc. $\omega \rightarrow$ reduce suction $\rightarrow$ reduce τ_f



Failure surface

Infiltration

Shallow

Deep seated

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$$

Initial: $u_w > 0$

$u_w \rightarrow$ parallel seepage + WT inc. $\rightarrow$ reduce τ_f

降雨引致淺層邊坡滑動特徵

- 陡坡細顆粒或凝聚性土壤
- 滑動面發生於非飽和區
- 常時基質吸力提供額外凝聚力
- 降雨因基質吸力降低抗剪強度且單位重增加
- 淺層飽和區伴隨平行坡面水平滲流增加下滑驅動力
- 力學反應與土層水力行為相關

無限邊坡水力學耦合LEM穩定分析

$$\left[1 + \frac{\gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \right] \cdot d_{cr} = \underbrace{\frac{c' + d_w \cdot \gamma_w \cdot \tan \phi^b}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_t} - 1 \right) \cdot d_{in}}_{\text{垂直滲漏}} - \underbrace{\frac{\gamma_w}{\gamma_t} \cdot d_{in} \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi'}}_{\text{平行滲流}}$$

淺層滑動：

- 細顆粒土壤可不考慮水平滲流的影響
- 忽略入滲對土壤單位重的改變

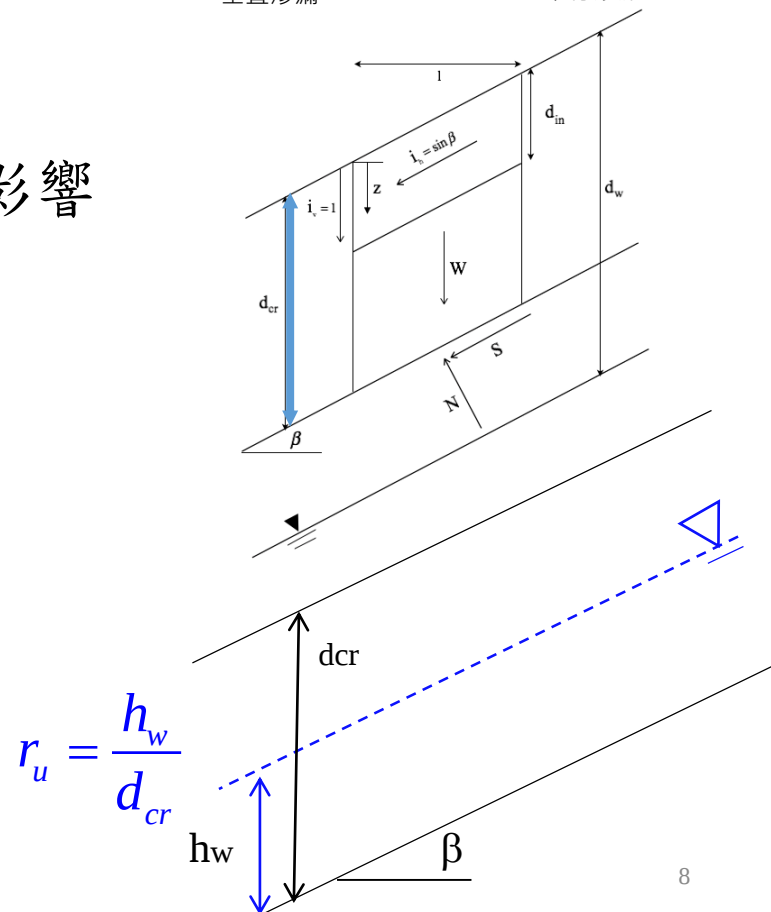
$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c(z) \tan \varphi^b}{\gamma_t \cdot \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \varphi')}$$

$h_c(z)$ 為不同時間邊坡內基質吸力分布

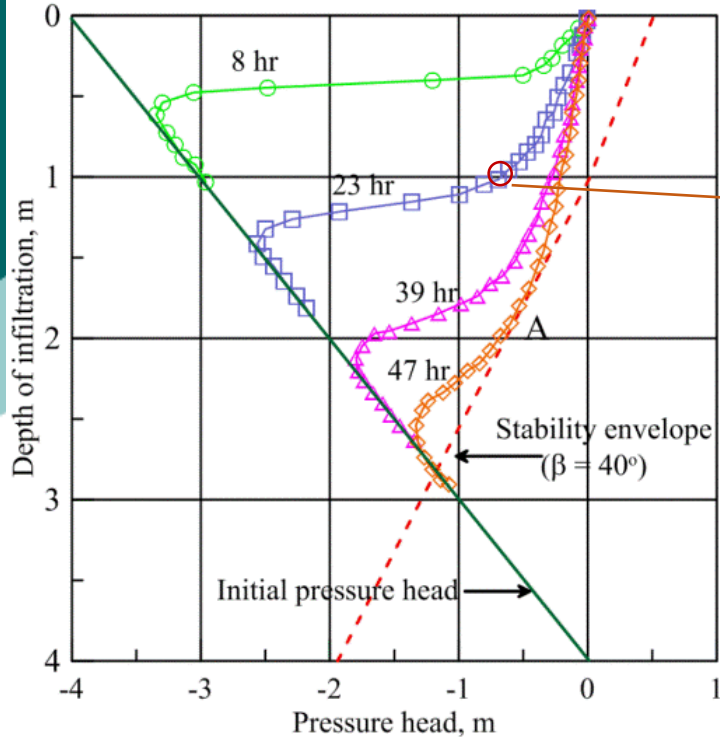
深層滑動:

- 與孔隙水壓相關

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

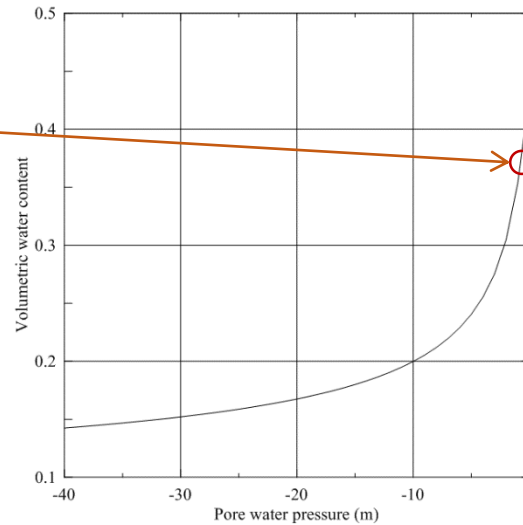


淺層水力學耦合+地表監測



(Collins and Znidarcic, 2004)

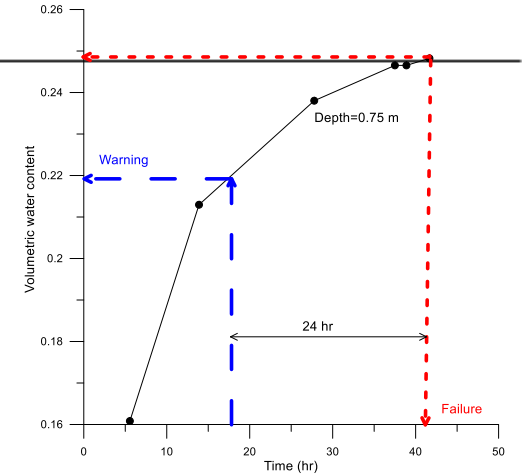
土壤強度參數



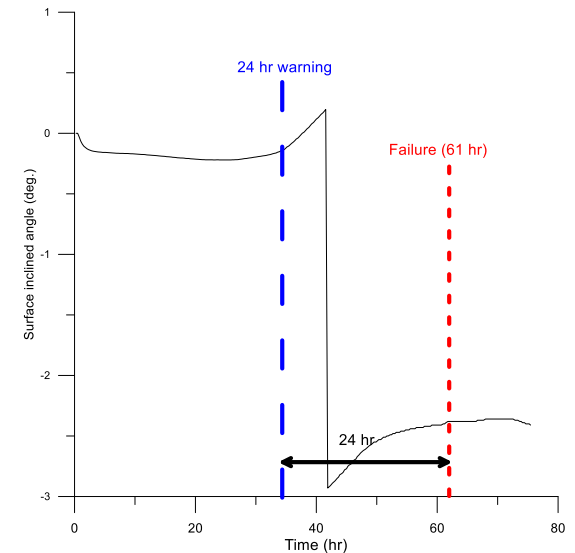
$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}$$

$$d_{cr} = \frac{c' + \gamma_w \cdot h_c \cdot \tan \phi' - \gamma_w \cdot h_p \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot \cos^2 \beta \cdot [\tan \beta - \tan \phi']}$$

邊坡幾何條件



體積含水量變化及依時預警



表面傾角變化依時預警概念

長期目標

- 預測邊坡淺層滑動依時性反應，作為監測模組佈設及制定警戒值之依據。
- 研發同時監測邊坡水力與力學反應無線監測模組，解決山區邊坡監測不易與點位有限之侷限，並使模組雲端化達到即時監測之目的。
- 作為智慧雲端化水土保持管理系統之感測端先導研究。
- 開發可快速佈設且具依時特性之預警模組作為相關防災作為啟動之準據。

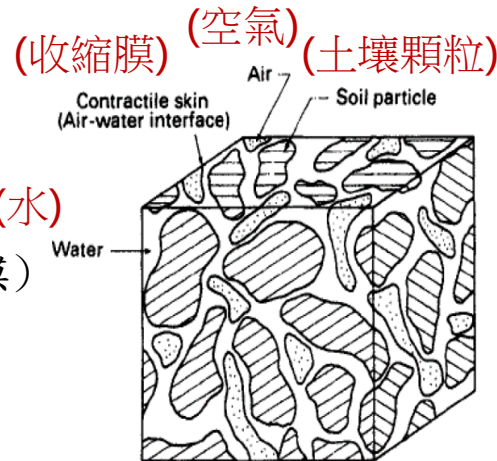
非飽和土壤力學性質

$$\tau_{ff} = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi'$$

$$= c_t + (\sigma - u_a) \tan \phi'$$

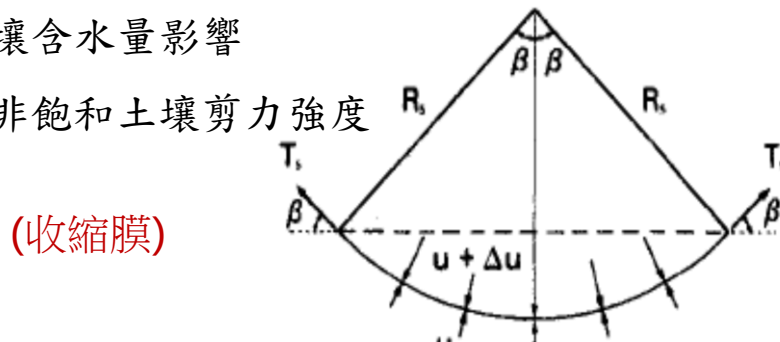
• 非飽和土壤組成

- 固相(土壤顆粒)
- 液相(水)
- 氣相(空氣)
- 液氣交界面(收縮膜)

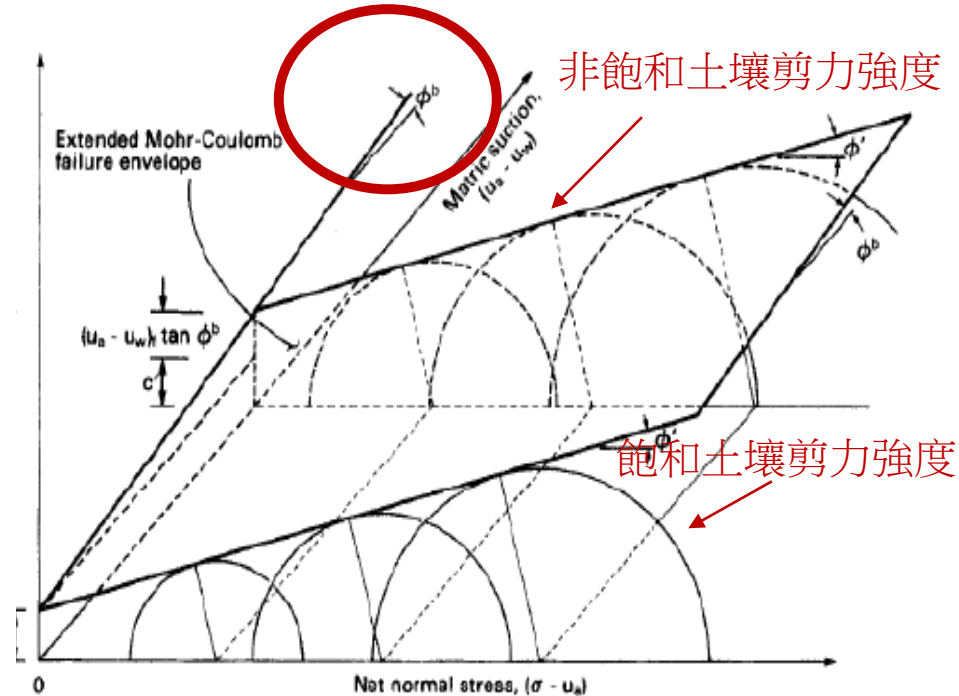


• 基質吸力

- 液氣交界面收縮膜之張力
- 受土壤含水量影響
- 提供非飽和土壤剪力強度



氣水交界面之表面張力現象(Fredlund and Rahardjo, 1993)



非飽和土壤衍伸莫爾-庫倫破壞準則(Fredlund and Rahardjo, 1993)

- 飽和與非飽和土壤剪力強度差異在於**基質吸力**提供額外剪力強度，以參數 ϕ^b 代表
- 當**降雨入滲**致使淺層邊坡非飽和部份**含水量改變**，基質吸力改變而**土壤剪力強度下降**

土水特徵曲線(SWCC)

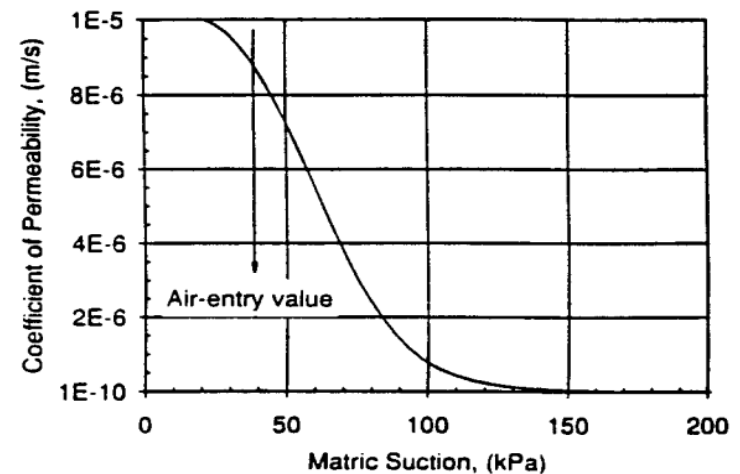
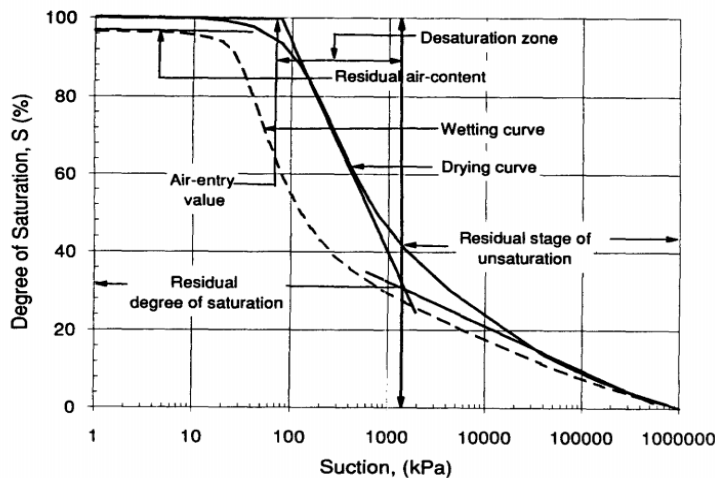
土水特徵曲線為描述土壤含水量與基質吸力間關係之函數，含水量通常以體積含水量(θ)表示，亦可用重量含水量(ω)或飽和度(S_r)表示。

➤ van Genuchten模式(van Genuchten, 1980)

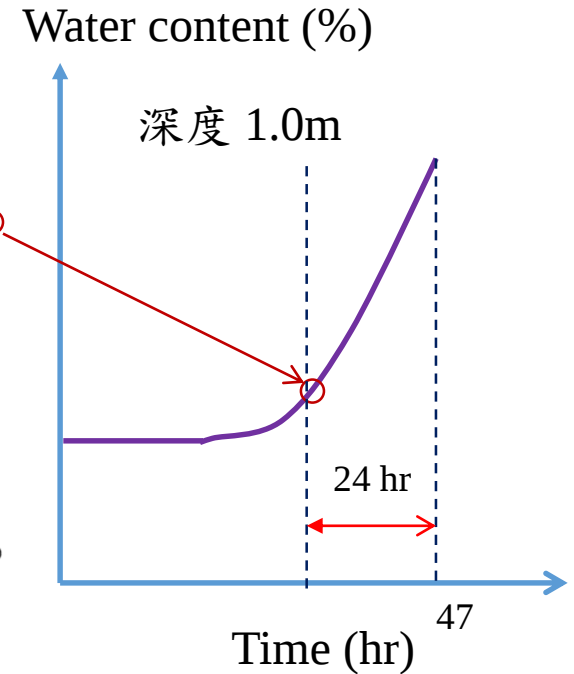
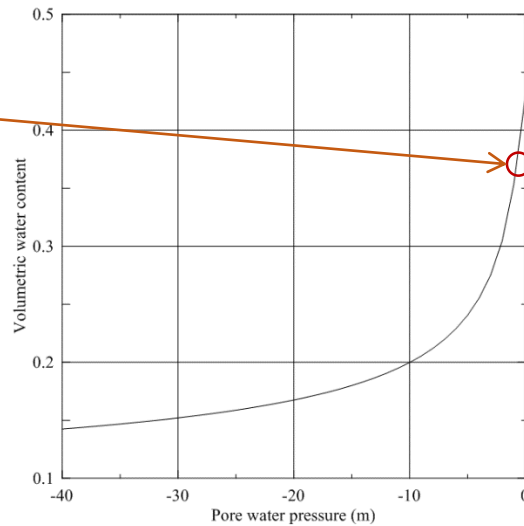
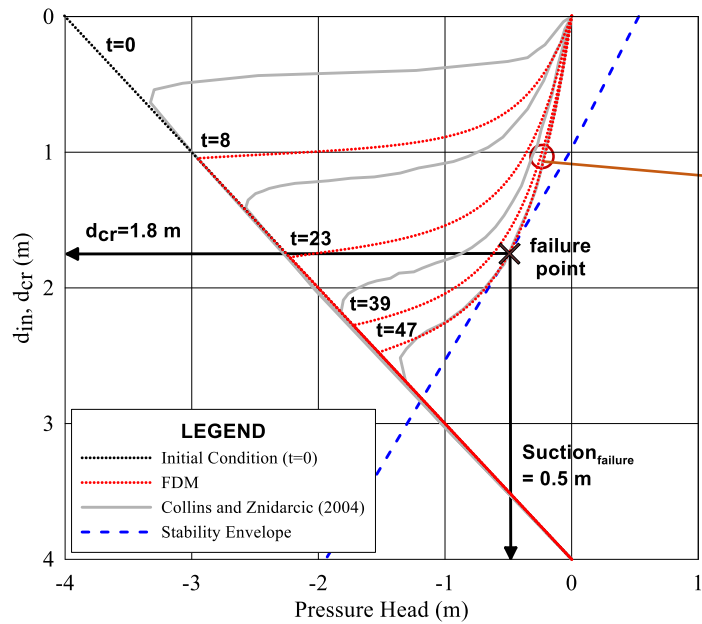
$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$k(h) = k_s S_e^{0.5} + \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2$$



淺層無限邊坡依時預警架構



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

二維水力力學耦合邊坡分析

水力力學耦合數值分析

FLAC程式

- 兩相流(two phase flow)模組:進行具兩相流體(包含不同液體及氣-液兩相)孔隙介質流動行為模擬，可進行非飽和土層中水的流動行為模擬
- 可整合於原有之連續體固體元素力學計算，以有限差分型式進行非線性大變形模擬，適切模擬非飽和土層邊坡因降雨引致之破壞過程模擬。

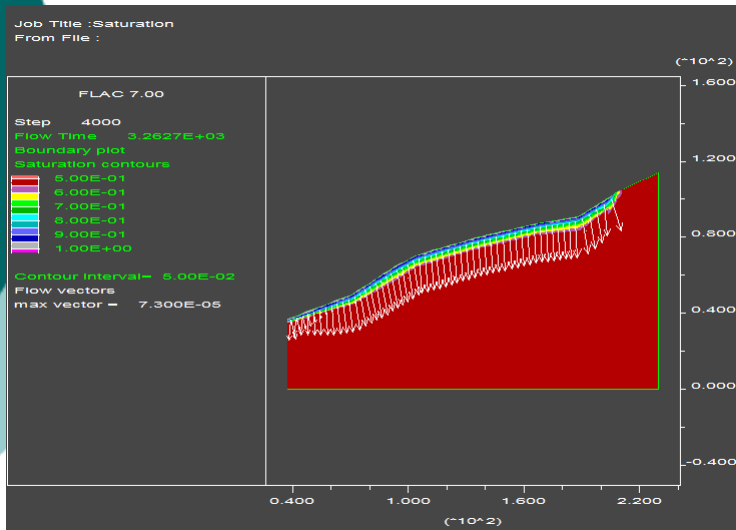
$$\tau^{max} = \sigma^b \tan \phi + C \quad \sigma^b = \sigma - (S_w P_w + S_a P_a)$$

$$\tau^{max} = (\sigma - P_a) \tan \phi + S_w (P_a - P_w) \tan \phi + C$$

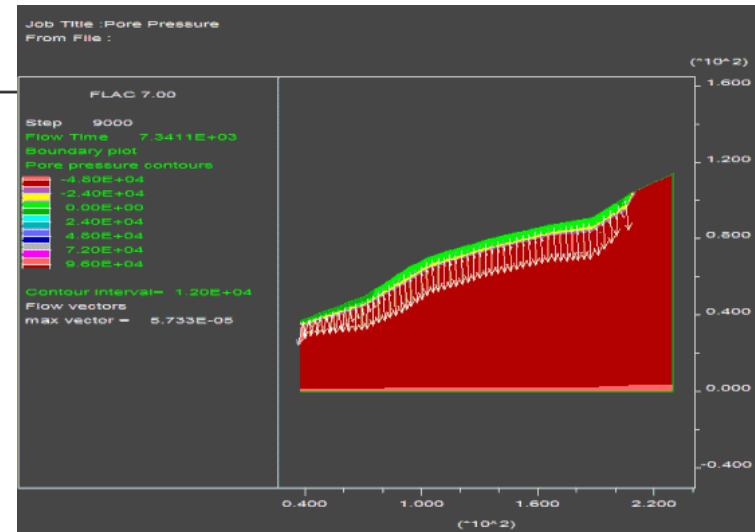
$$C_c = S_w P_c \tan \phi \quad P_c = P_0 [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a}$$

耦合分析結果

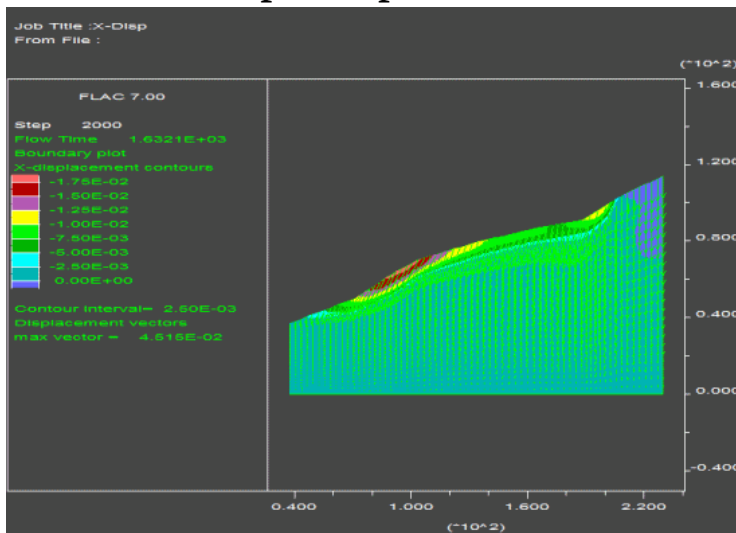
Wetting front (Saturation+Flow)



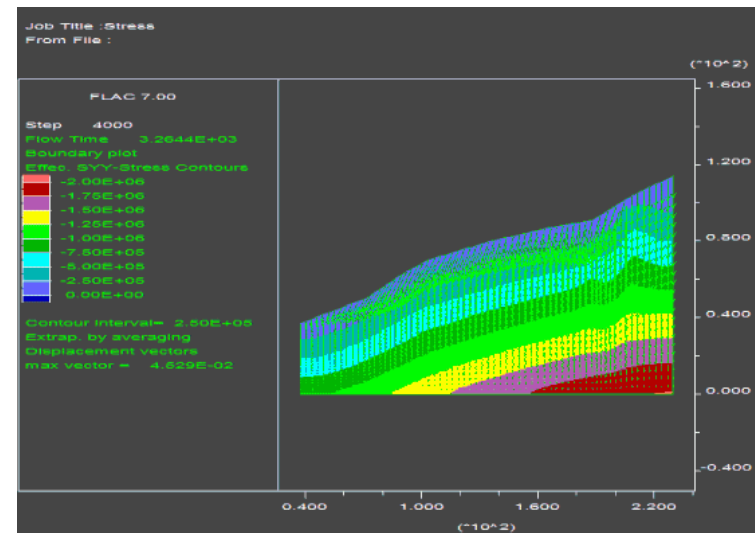
Pore pressure+Flow



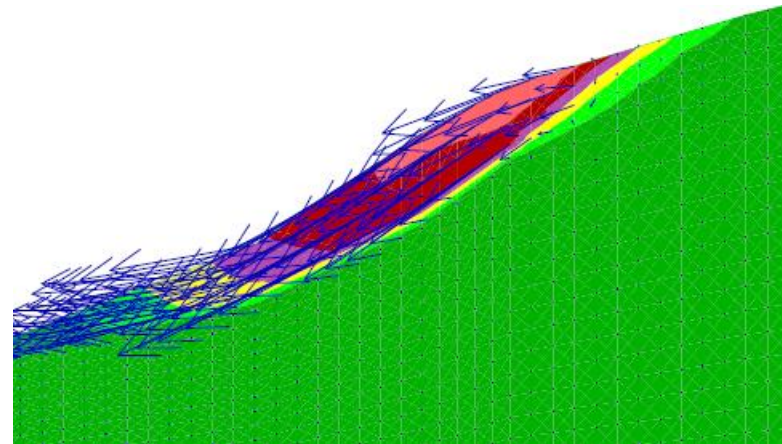
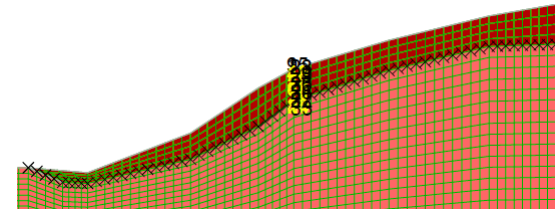
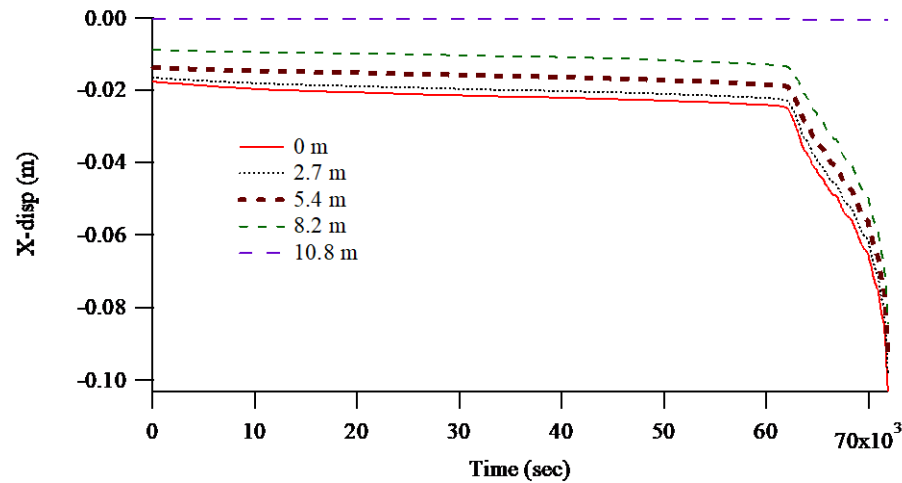
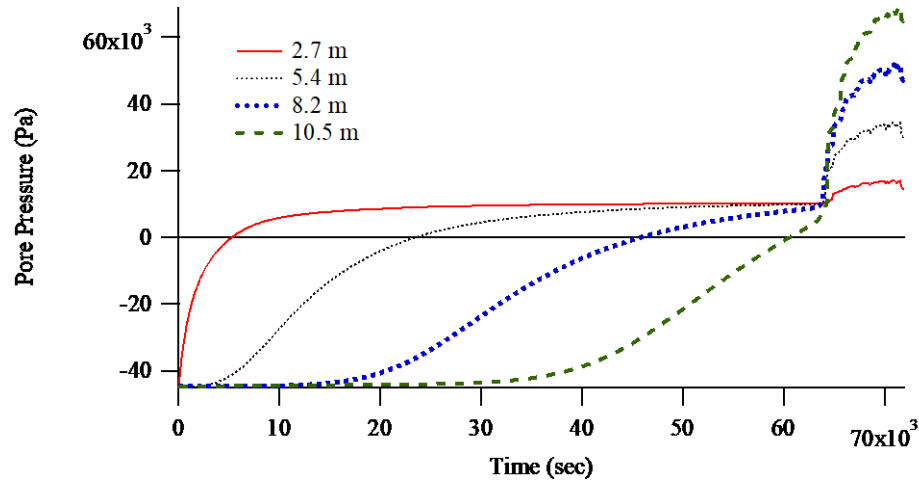
X-disp+Disp. vector



Eff. Vert. stress+ Disp. vector



水力與力學耦合反應歷時

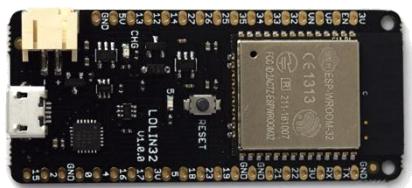




IoT 無線監測模組

MCU+Sensor

Wemos lolin32



Communication

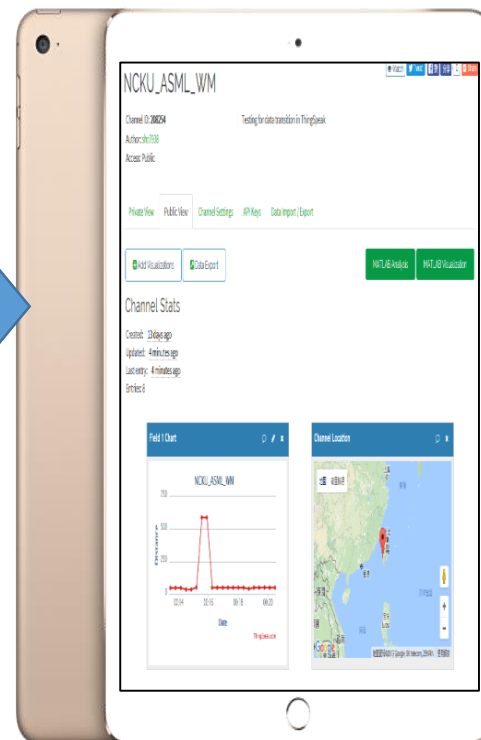
LoRa (Local)



3G/4G
/LoRa (Global)



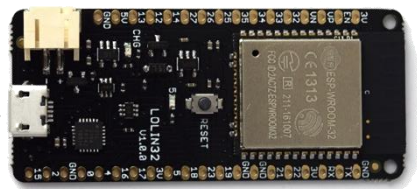
Cloud



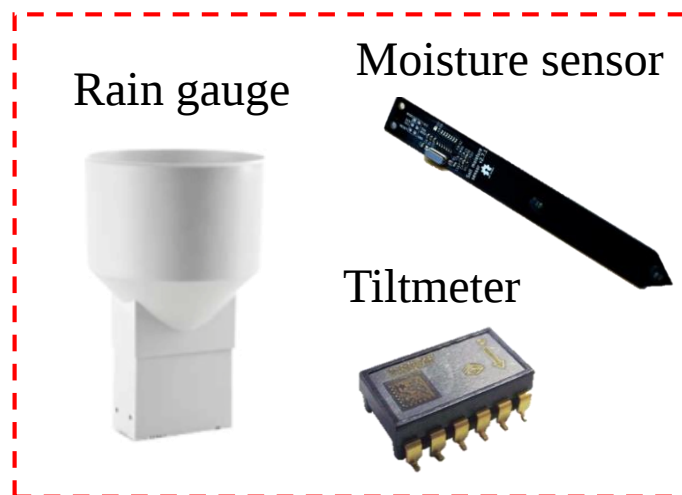
坡地淺層水力學反應無線感測模組

Wemos lolin32

- C語言開發環境
- 支援多種通訊介面



Sensor



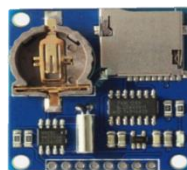
Real-time clock

- 使模組間時間同步
- 鬧鐘設置與觸發功能使微處理器週期運作



Data logger

- 備份現地監測資料



WCDMA(3G)模組

- 連接全域網路
- 以AT command操作



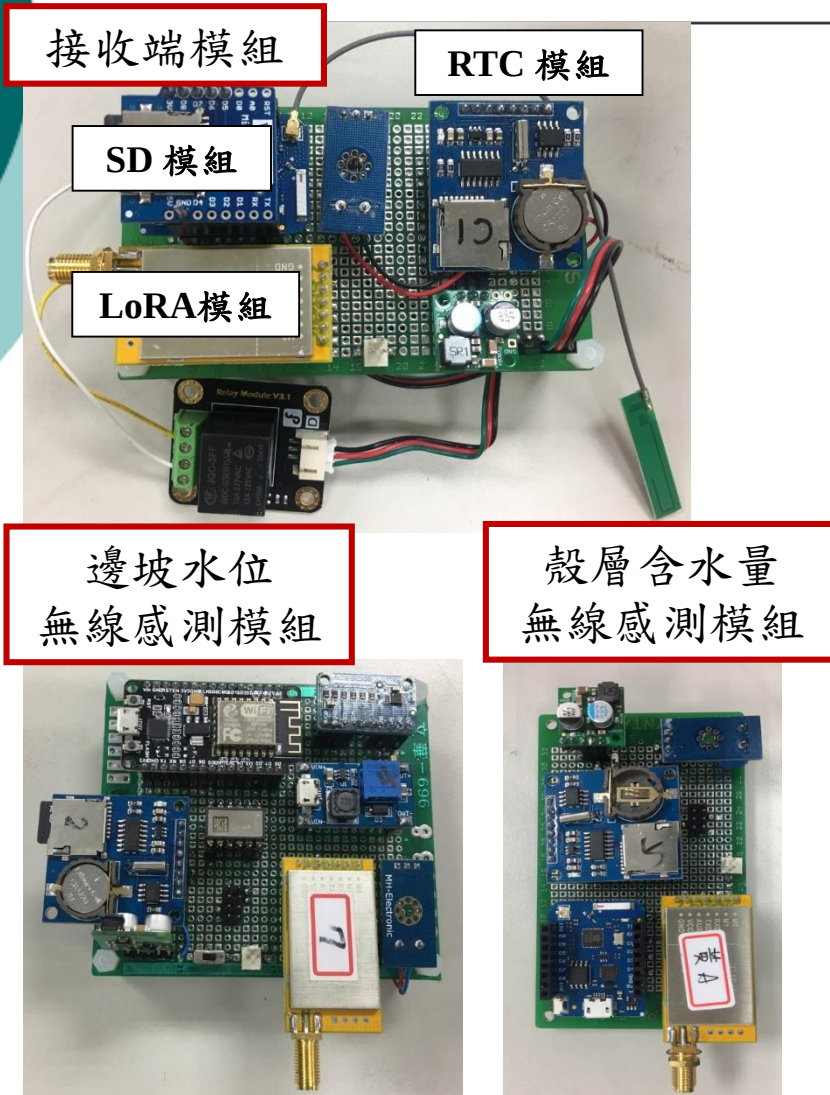
LoRa

- 建立監測模組區域網路
(傳遞距離可達3km)



IoT土層無線監測模組特色

模組硬體配置：



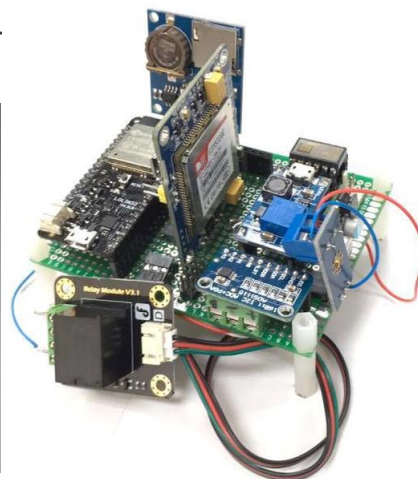
❖ 模組特色：

1. 可編程微型微控板(MCU)，達成智慧化量測控制。
2. 模組化特性可擴充感測器與無線模組進行串聯(LoRa、NB-IoT)。
3. 可與不同感測器進行串聯，達成萬物聯網概念。(研究以表層體積含水量、邊坡水位與傾角變位進行長期監測)
4. 獨立電源系統配合智慧電源管理，克服野外電源問題，模組不受制電源影響佈設。
5. 相較於傳統監測系統具輕量化，且性價比優異

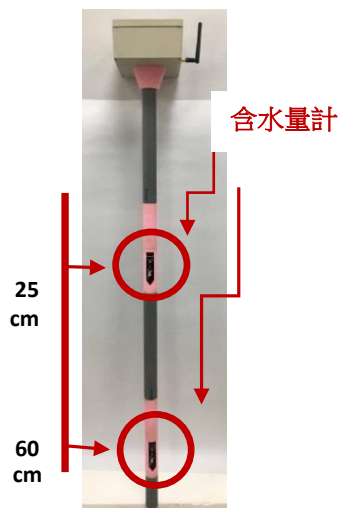
邊坡無線雲端監測模組組成

- 表層變位監測
 - 傾斜角度量測
- 地表水入滲監測
 - 分層土層含水量量測
- 無線通訊模組
- 資料處理流程

無線感測模組



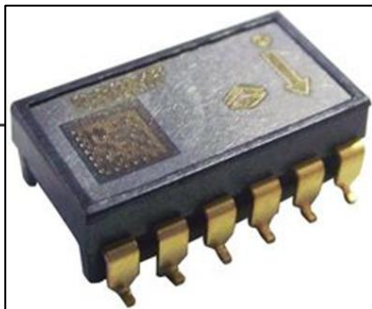
電池模組



土層監測模組內部架構示意圖

感測器

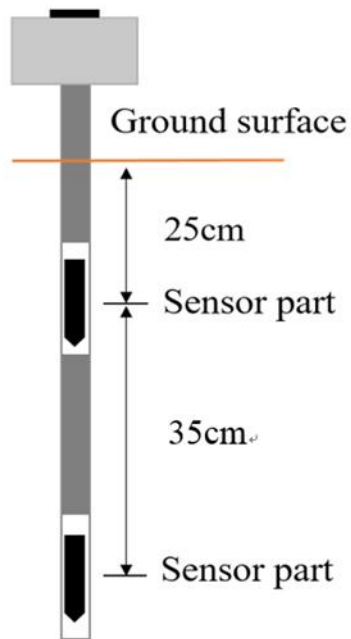
雨量計



傾斜儀



液位計

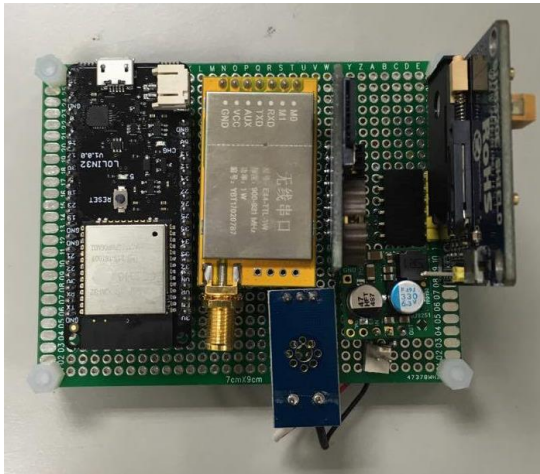


含水量計探棒

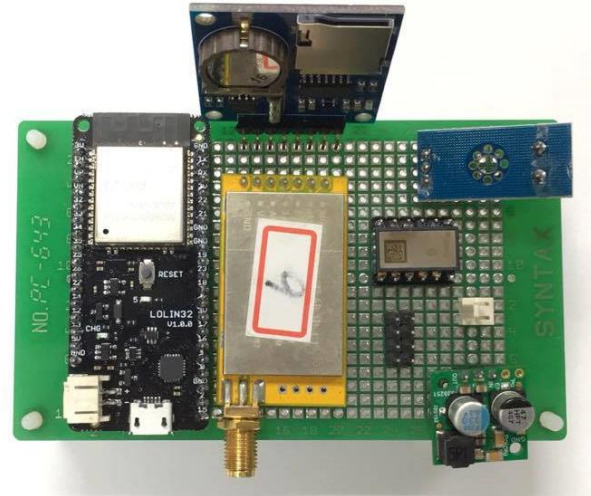


淺層無線監測模組

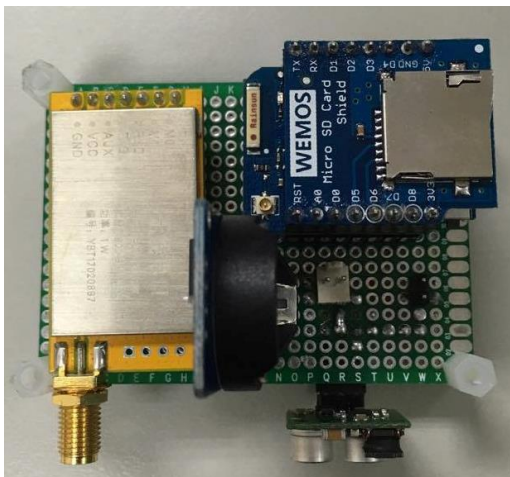
(a) 伺服器



(b) 客戶端-含水量計、傾斜儀



(c) 客戶端-雨量計

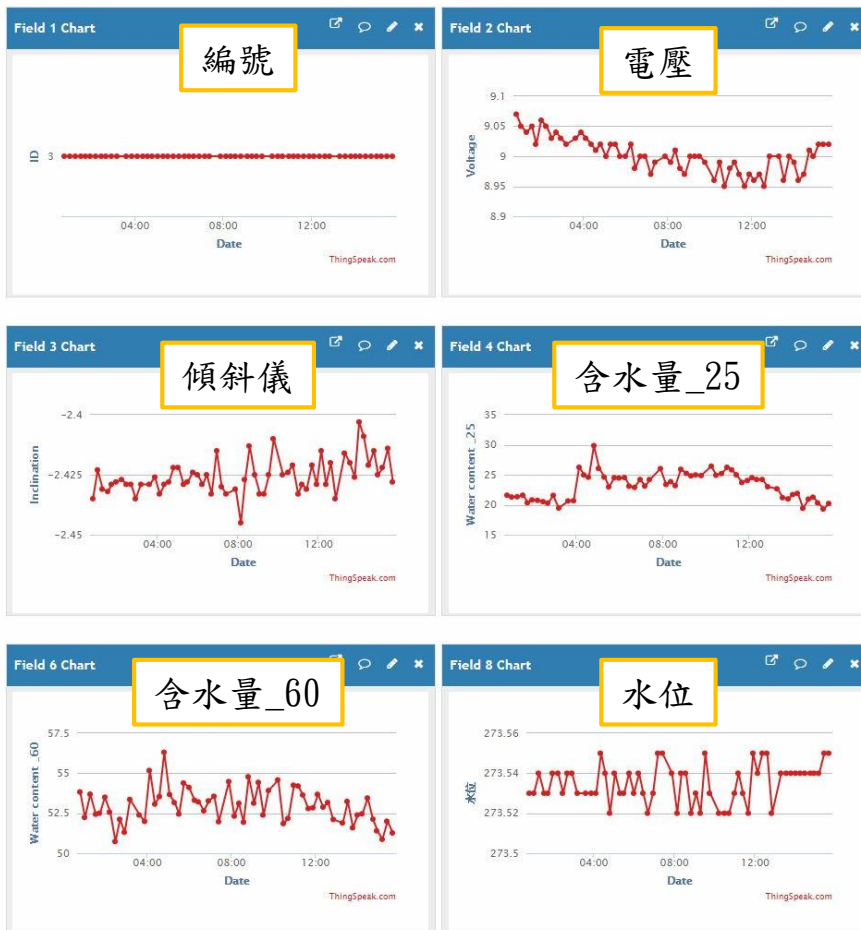


(d) 電池模組

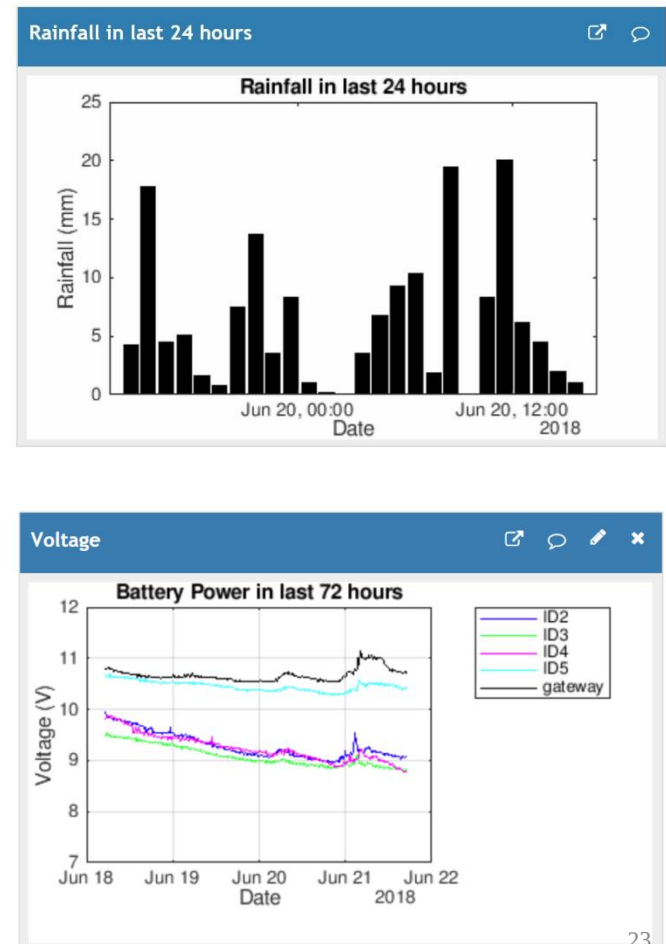


雲端即時顯示平台-Thingspeak

Raw data



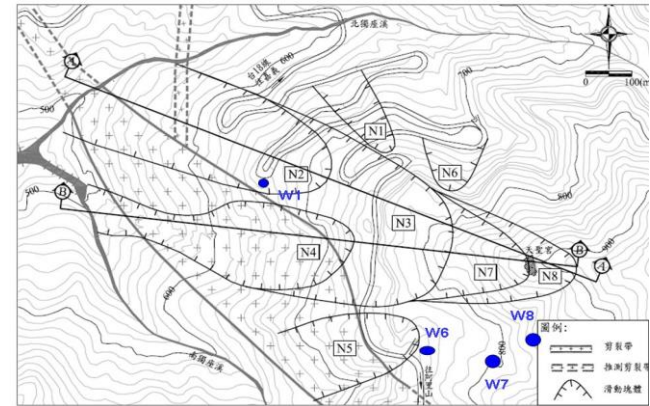
Process data



無線監測模組現地配置說明

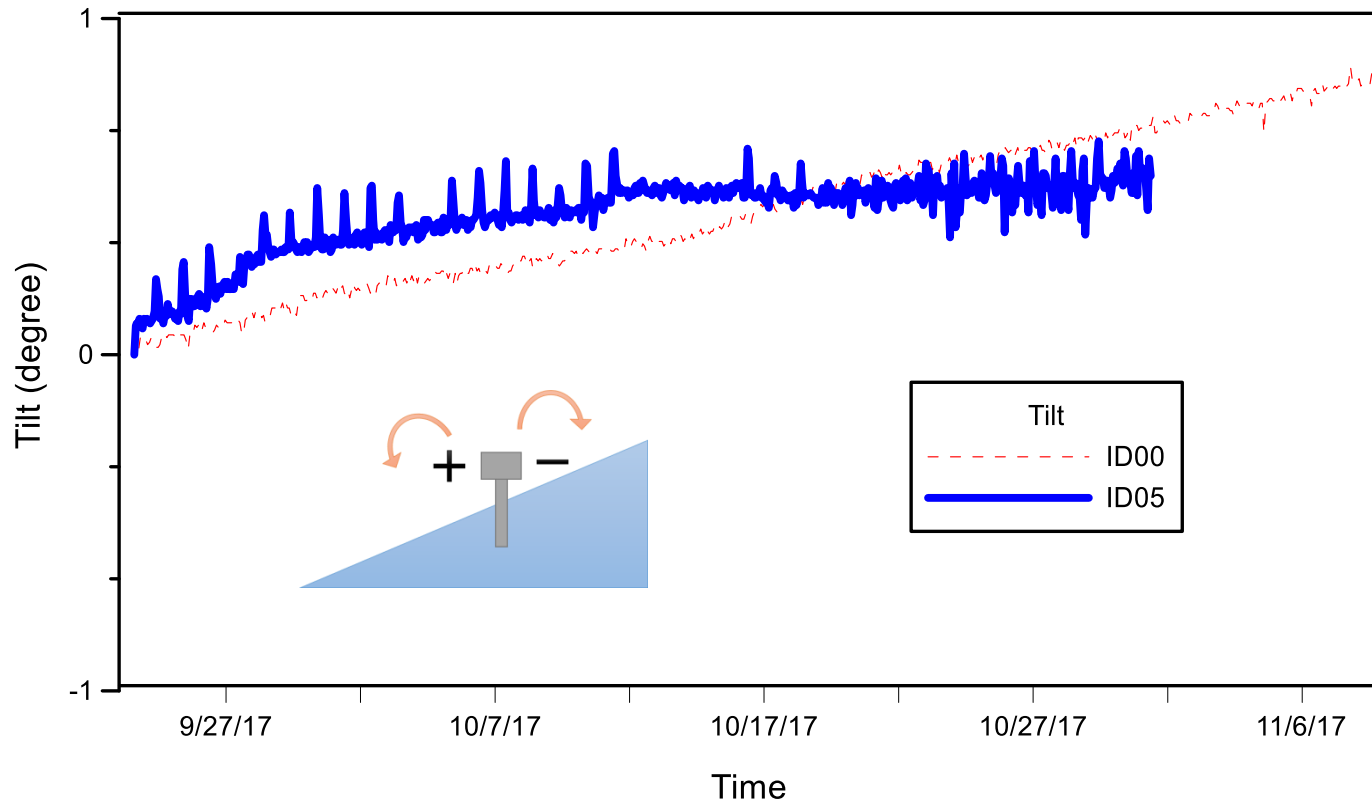
監測設施平面配置圖(公路局五工處提供)

嘉義阿里山五彎仔場址

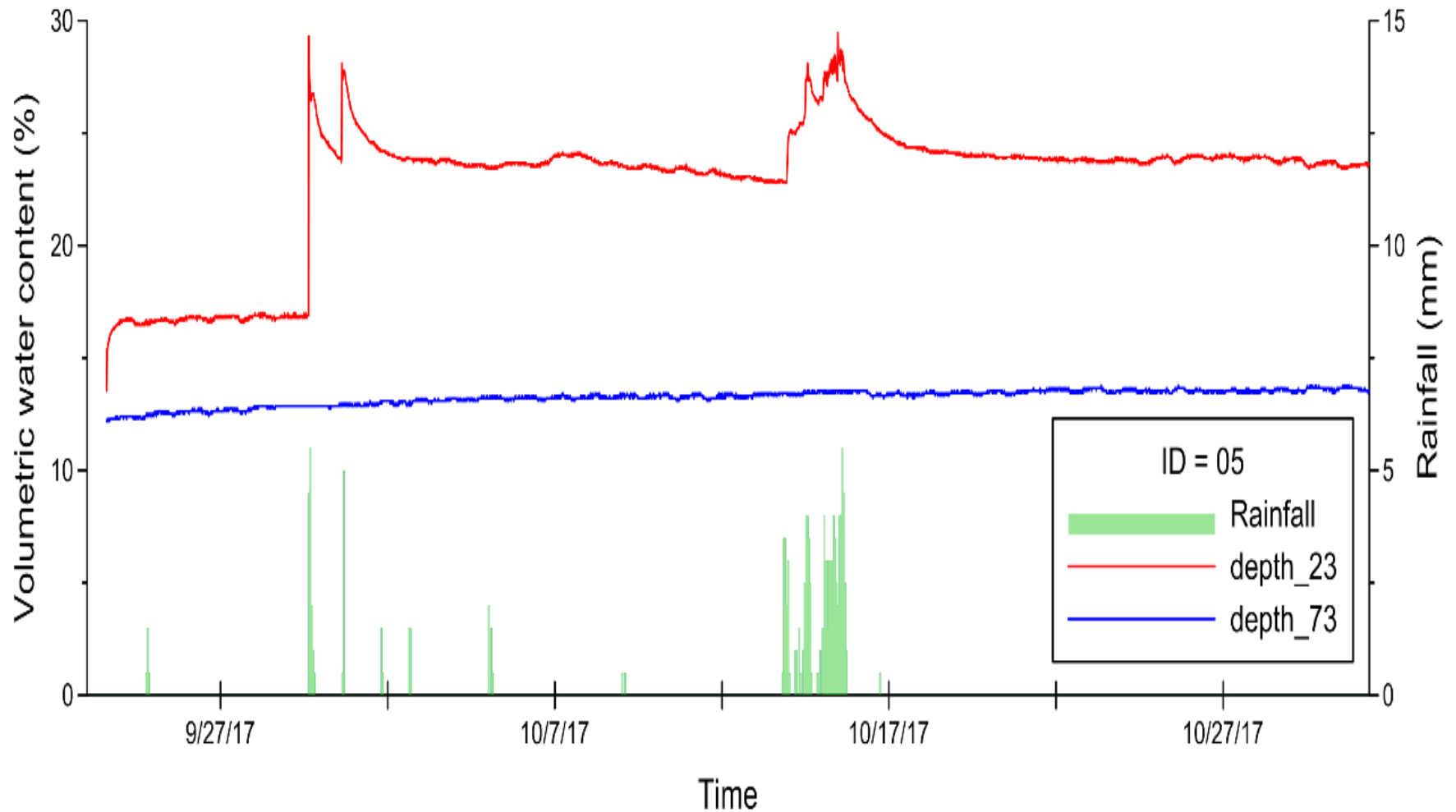


地表傾角監測數據

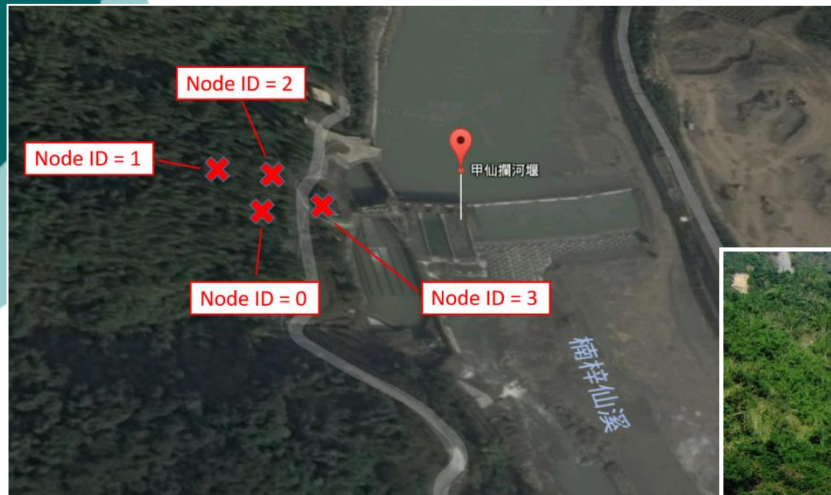
- 監測數值定義：邊坡傾向為正，反之為負
- 一個月內有小於0.3度微幅的傾斜，方向同邊坡傾向，現地無破壞徵兆。



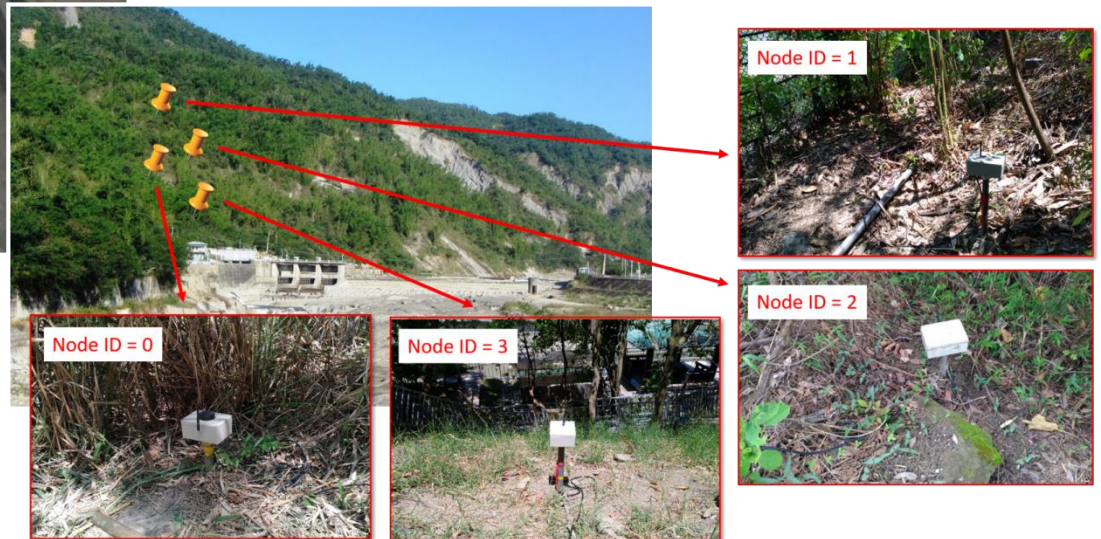
ID05 體積含水量監測資料



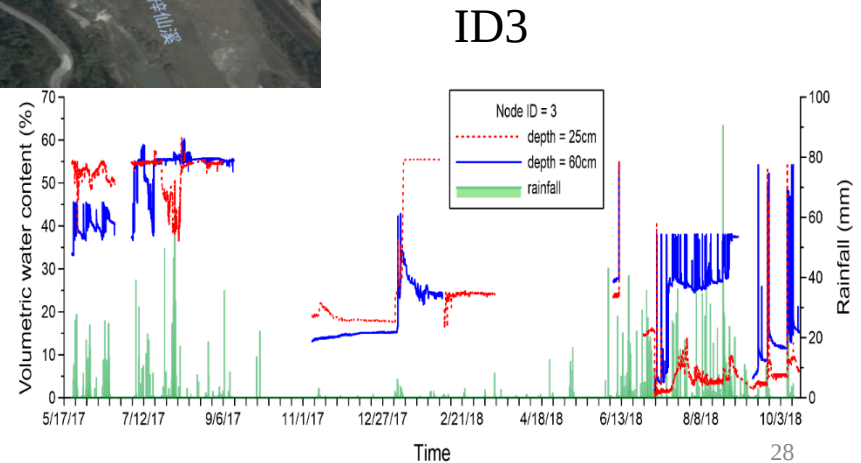
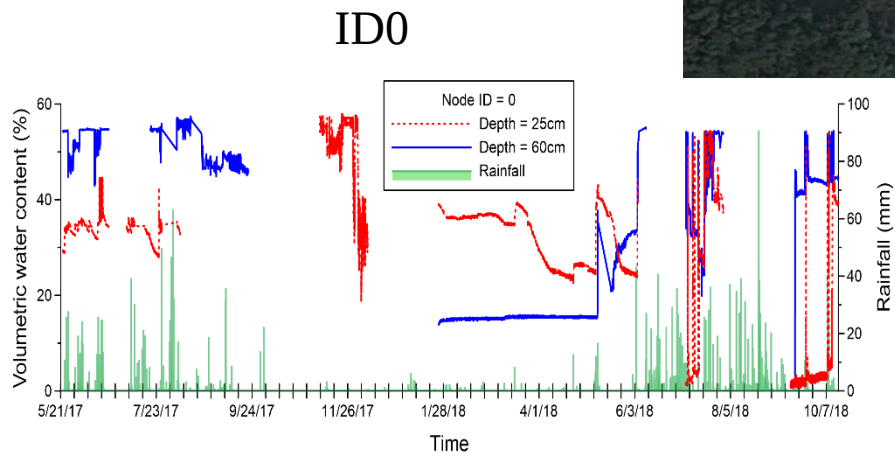
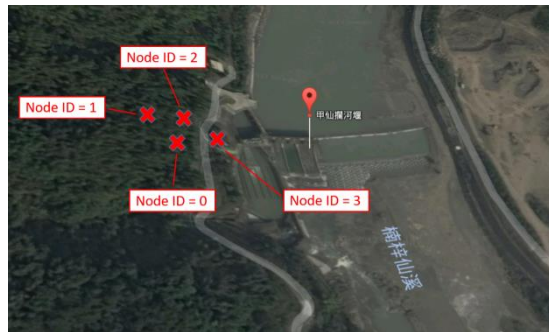
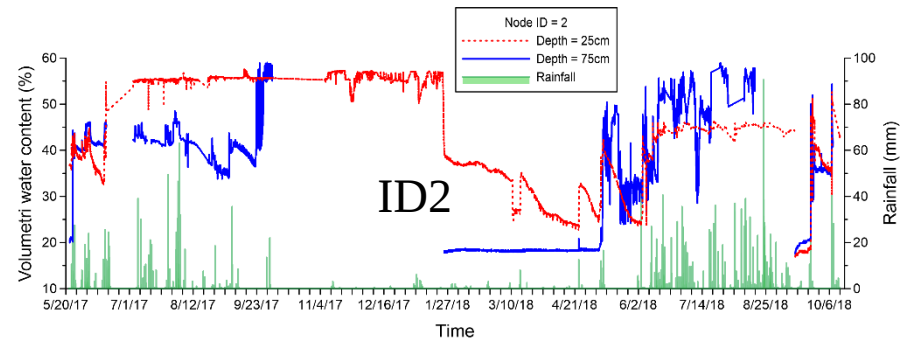
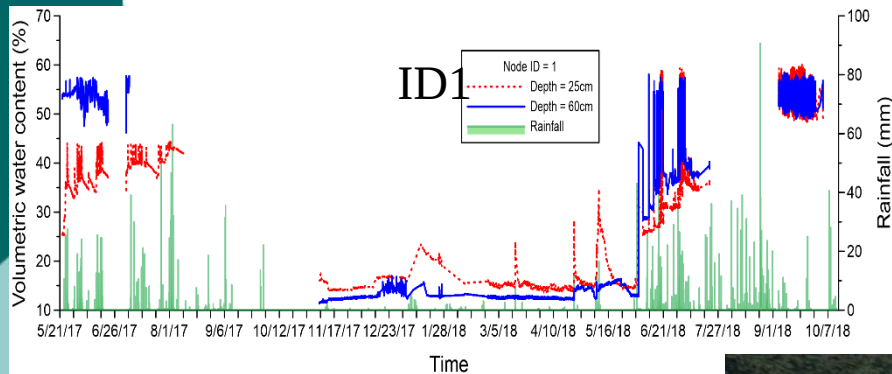
甲仙攔河堰通達道路邊坡



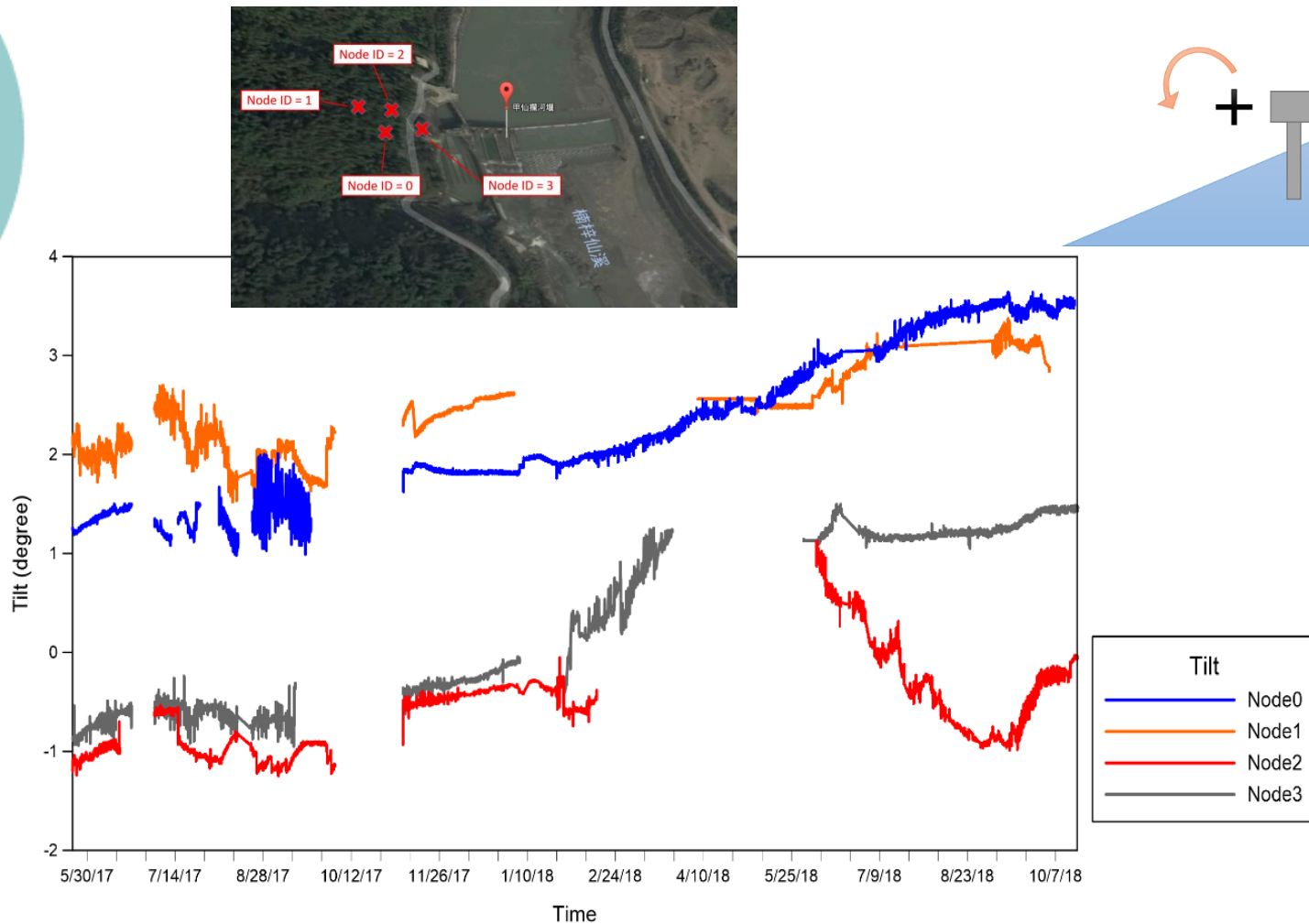
監測配置圖



甲仙監測數據—含水量計



甲仙監測數據－傾斜儀



未來展望

- 監測場址增加並精進系統耐用性
 - 增加潛在淺層滑動監測場址，取得實證資料
 - 改善感測模組耐用性並降低成本
- 深層滑動水力力學反應監測模組及分析架構
 - 破壞面位於崩積層底部並受地下水壓影響
 - 以地下水壓為監測及滑動預測指標
- 建立雲端演算及資料管理雲端平台
 - 進行監測資料回饋即時演算
 - 建構資料管理平台及後續加值應用
- 擴增應用領域
 - 擋土與山區水利設施即時監測
 - 坡地沖蝕量與降雨觀測
 - More

End

- Thanks.

