

陣列式光柵光纖感測即時監控系統

Real-time optical FBG monitoring system

水土保持局
2018/05/15

郭志禹
中央研究院應用科學中心

前言 — 計畫緣起

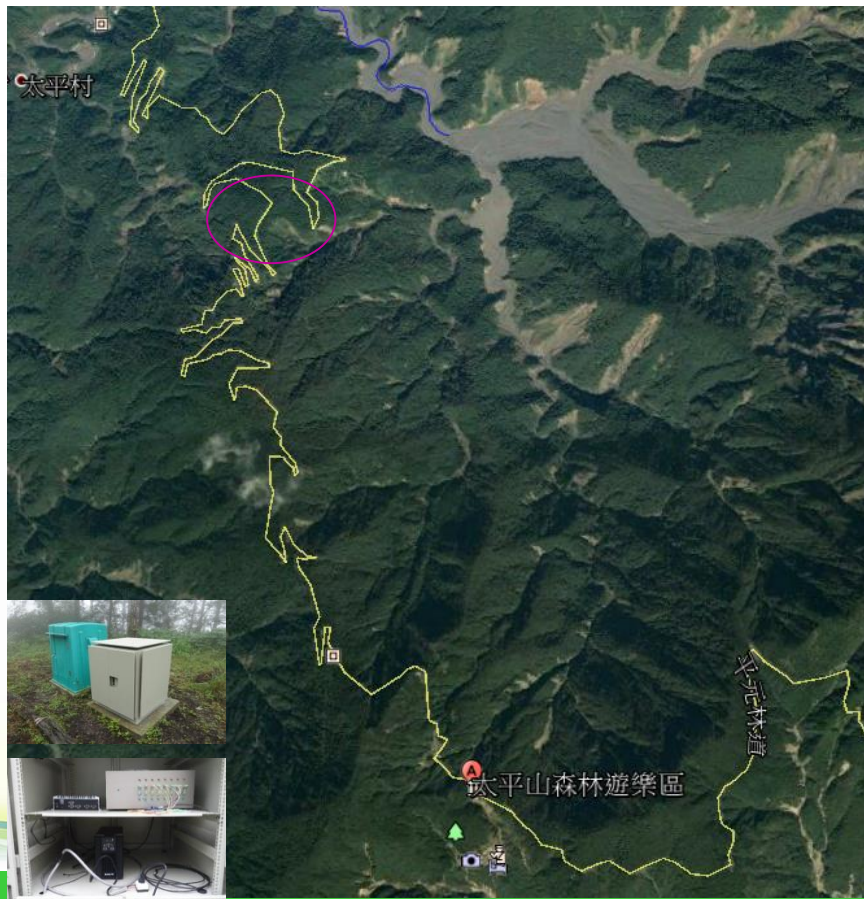


1. 台灣極端降雨事件頻繁，加速坡地災害發生機率、2009年莫拉克颱風造成高雄市甲仙鄉小林村山崩，即為極端降雨事件所引發之大規模崩塌災害。由於大規模崩塌產生之災害面積大，在其影響範圍，往往具有保全對象，諸如聚落與財產等。故針對有保全重點的大規模崩塌潛勢崩塌區域，連續、即時且穩定的現場深層監測是必須的。
2. 孔隙水壓為山崩重要觸發因子，深度分布式水壓監測為重點。

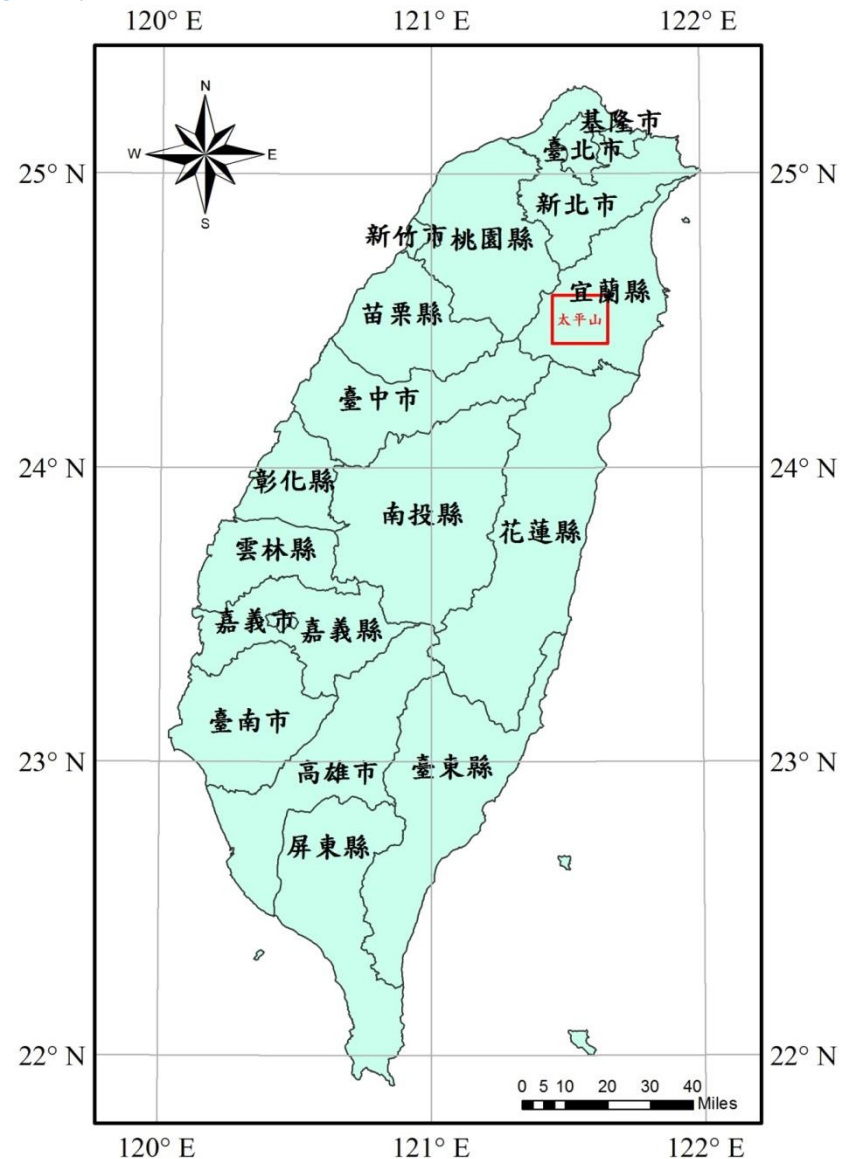
前言 — 實施地點，行政院防災應用科學計畫 2015~2017

✓ 本計畫範圍為

1. 宜蘭縣太平林道13 km



〈照片來源 Google Earth〉

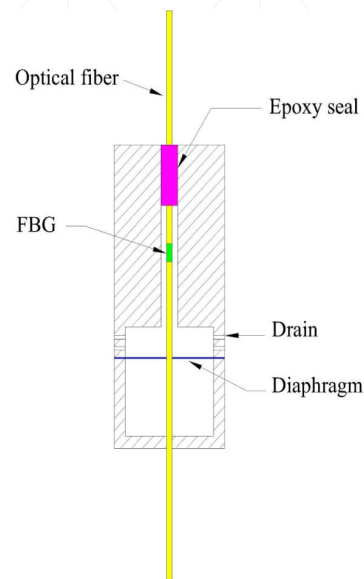


串列式光纖光柵水壓監測

優點：

- 可將光柵串連形成一陣列式結構達成分布式監測
- 感測器結構簡單，不畏地下水浸潤
- 光纖可抗雷擊，不受電磁干擾

1. 光纖布拉格光柵(FBG)原理
2. 光纖光柵水壓計設計
3. 孔隙水壓計之溫度相依性
4. 光纖光柵水壓計的完整率定
5. 光纖光柵的串接原理



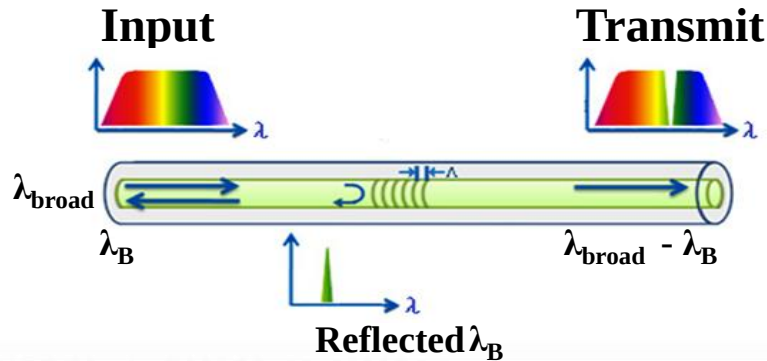
(Schematic view)



(Photograph)

光纖光柵水壓計
高勝傑(2006)，Huang, et al. (2012)

陣列式光纖光柵(FBG)感測技術

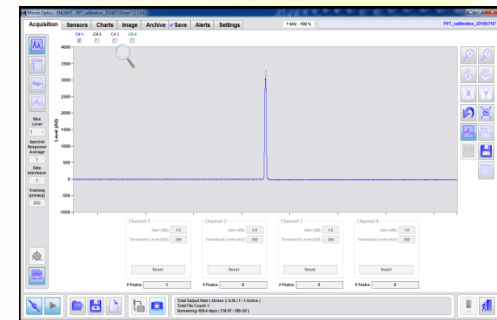
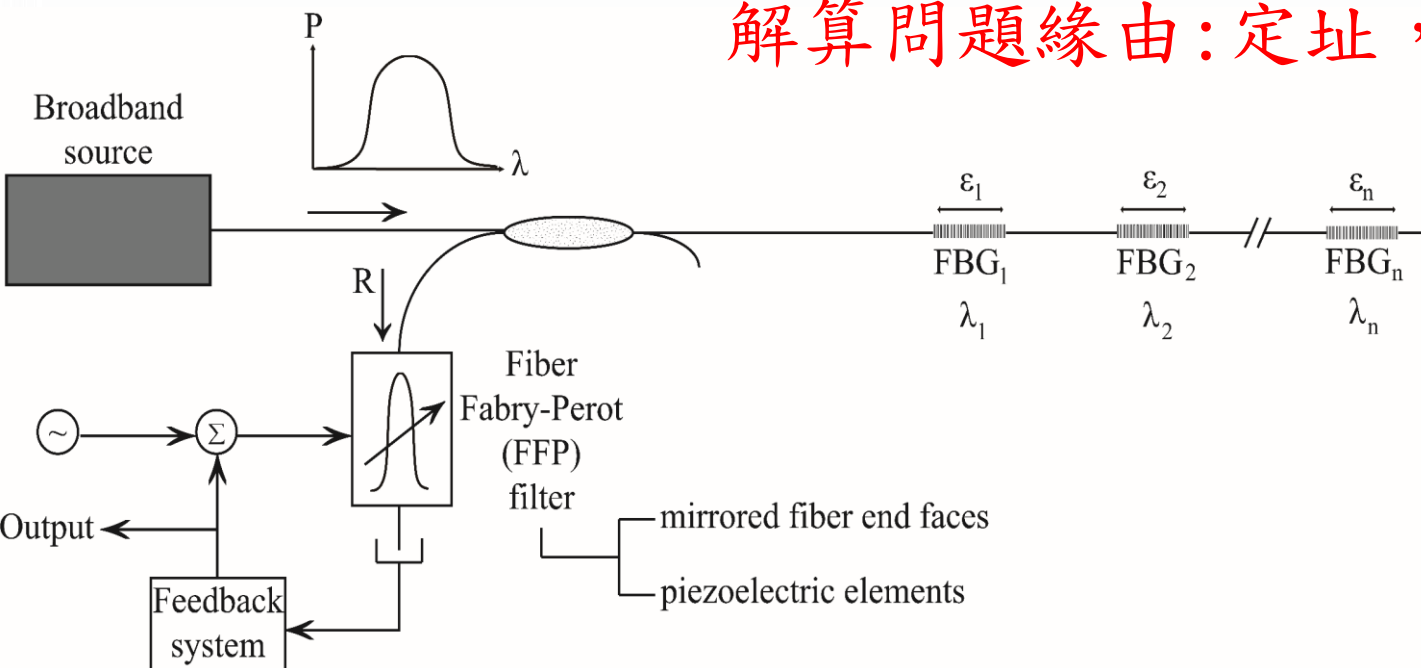


Bragg wavelength $\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$
 (n_{eff} : model index; Λ grating period)

Hill and Meltz (1997)

Kersey (1993)

解算問題緣由：定址，雙物理量率定



光纖光柵水壓計設計

- 水壓改變時，金屬膜受到兩側壓差驅動而產生應變並輕微地拉扯光纖，進而使光柵間隔產生變化。
- 因壓力計可能因溫度改變而導致讀數改變，部分壓力計有加入第二光柵作為溫度計，以為溫度補償。

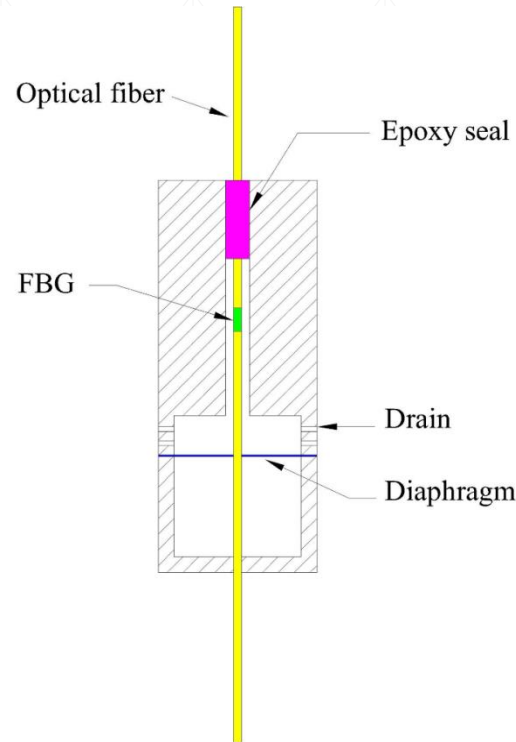
光柵水壓計率定

- 溫度率定

$$T = a_T w_T + b_T$$

- 壓力率定

$$P = a_P w_P + \bar{a}_T T + b_P$$

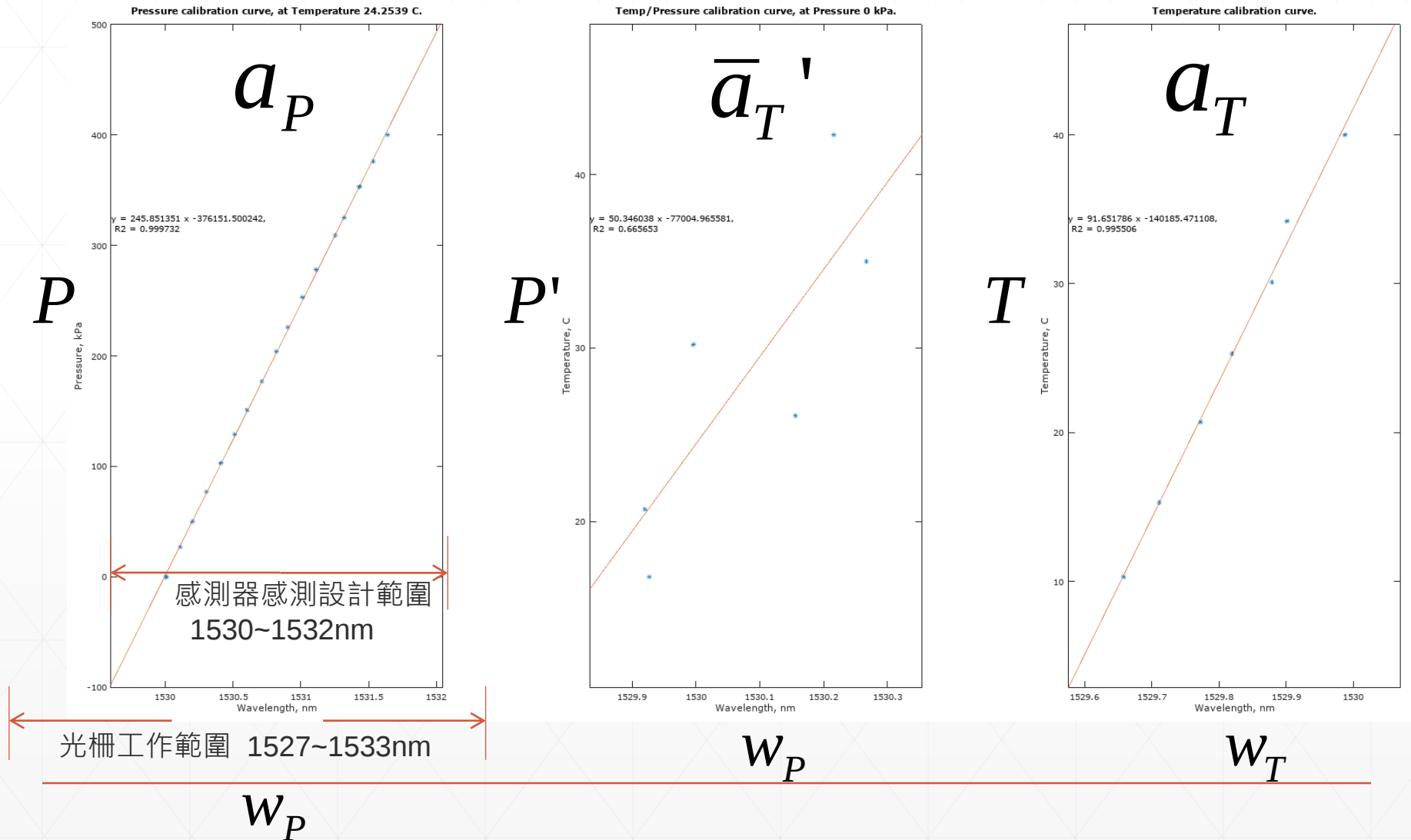


(Schematic view)



(Photograph)

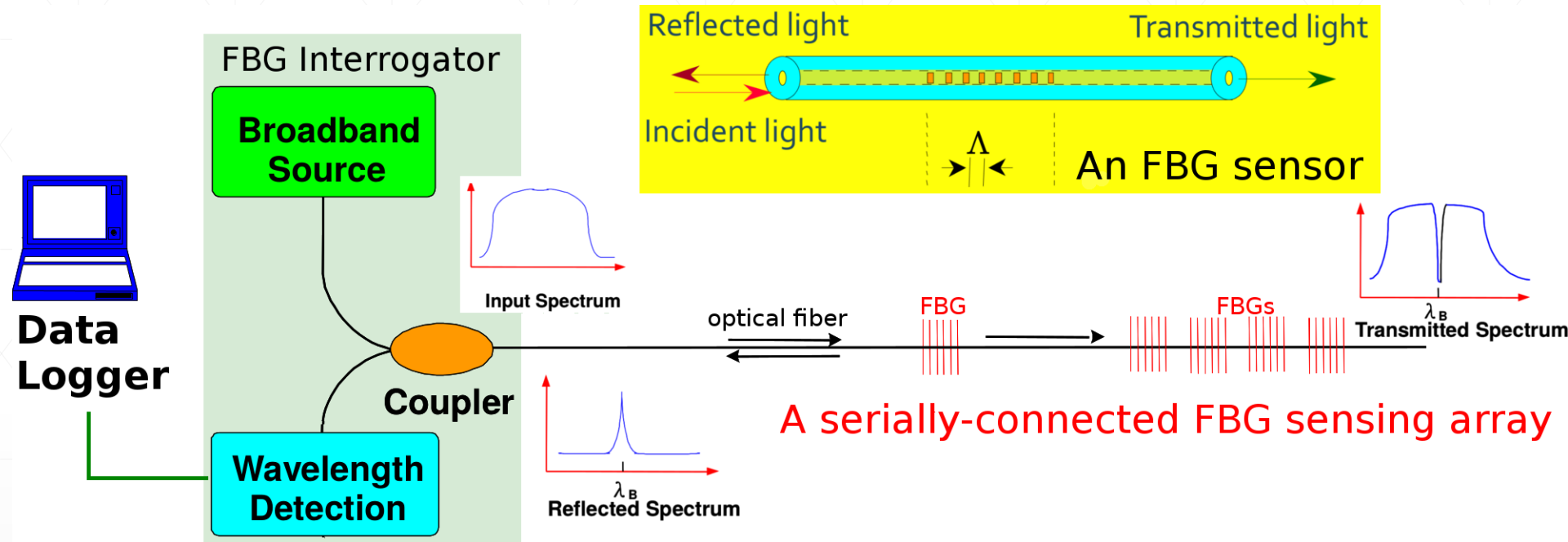
孔隙水壓計之壓力與溫度相依性 400kPa



光纖光柵串接原理

Kersey (1993)

- 串連光柵形成一陣列式結構



- 我們通常使用寬頻光源，如1528~1568nm之光源，故在此波長範圍(40 nm)內，約可容納至多8枚光柵($(1568-1528)_{\text{nm}}/6_{\text{nm}} \doteq 8$)。
- 根據解讀儀的設計，通常可支援多通道監測(八或十六)，即一解讀儀可串接至多約四十枚光柵。
- 依照讀取波長範圍，須加以定址，從而選定率定曲線解算，加諸容錯考量，**為相當冗長且錯誤率高之解算程序!**

Advantages and disadvantages of FBGs

優點	• 體積小 • 串接多工 • 電磁免疫性，抗雷擊，無短路 • 環境穩定性 • 低傳輸損耗，適宜長距離佈線 • 波長反映真實應變，線性度佳 • 低功耗
缺點	• 感測器製作關鍵技術專業門檻高(國內) • 目前解讀儀成本仍偏高 • 施工技術專業度高，如光纖熔接，剪切等

通用光纖光柵及時解算系統

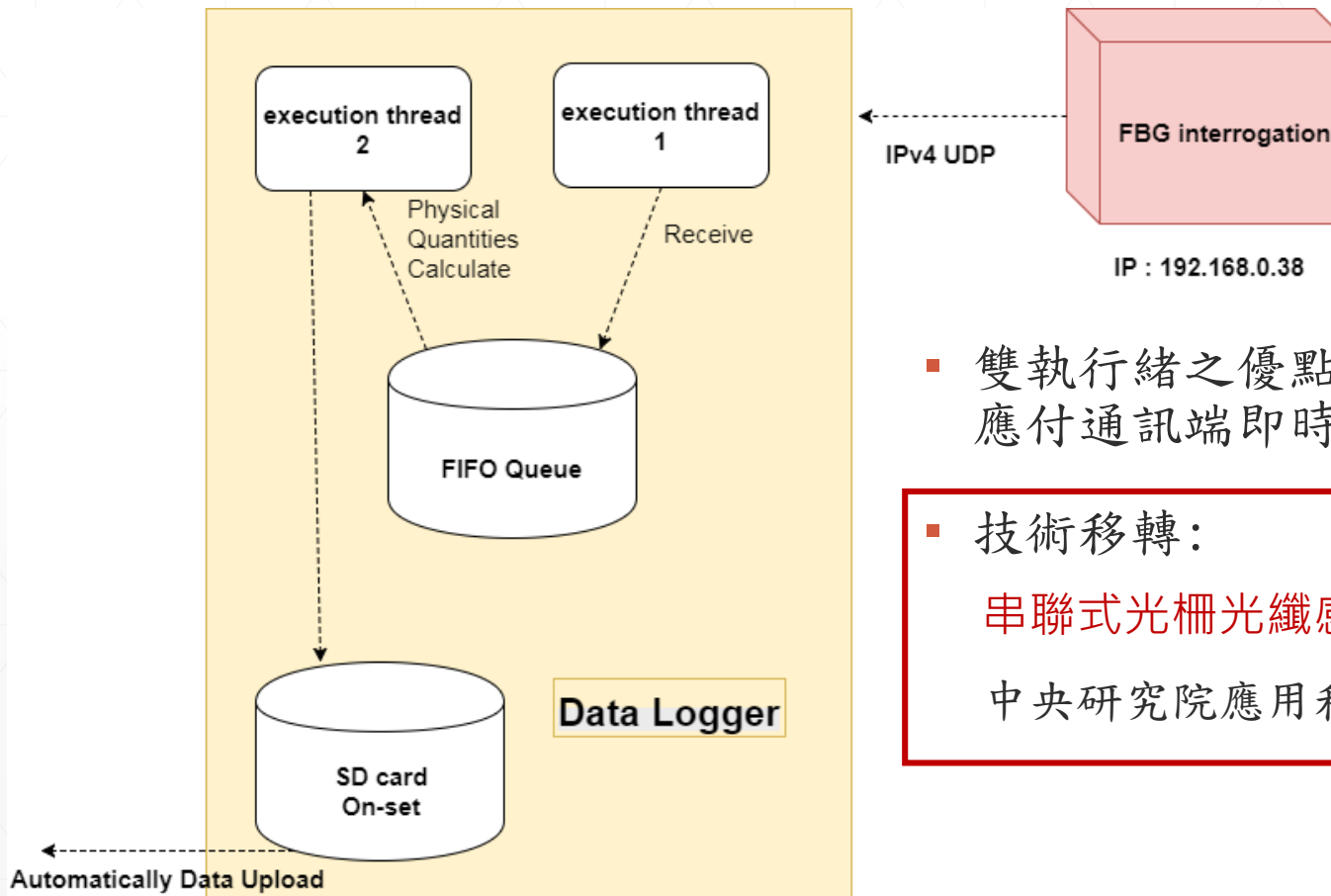
- 依照讀取波長範圍，須加以定址，從而選定率定曲線解算，加諸容錯考量，**為相當冗長且錯誤率高之解算程序！**
- 整合解讀儀通訊，感測器率定資料庫，感測器監測網路連接拓樸，即時物理量解算與輸出等功能。
- 以自由文字檔形式描述，低計算資源需求，穩定性、整合性與跨平台相容性高。

```
FBGoutput {  
    prefix = "PT";  
    format=[ps1.pressure, ps2.pressure, ps3.pressure, ps4.pressure, ps5.pressure,  
            ps1.temp, ps2.temp, ps3.temp, ps4.temp, ps5.temp ];  
}  
FBGinput {  
    channel = 2;  
    threshold = 4000;  
    //file = "Data/19121015_Wavelength_CH1_20160705113545_Raw.csv";  
    format = [ ps1.tempWavelength, ps2.tempWavelength,  
              ps3.tempWavelength, ps4.tempWavelength,  
              ps5.tempWavelength];  
}  
FBG_disconnect_action = "";  
// The logger_IP cannot be set. Probably the udp packets sent from FBG box is not  
// udp-spec conformed.  
logger_IP = "127.0.0.1"; //"192.168.0.14";
```

及時解算輸出描述區塊

通用光纖光柵及時解算系統

- 雙執行緒常駐型背景程式：
 - execution thread 1 負責與光纖解讀儀通訊，並蒐集回傳波長資料至記憶體中之FIFO資料儲列
 - Execution thread 2 負責檢核，光柵定址，物理量解算與輸出



- 雙執行緒之優點:獨立執行，特別是應付通訊端即時接收的需求

- 技術移轉:

串聯式光柵光纖感測網即時解算系統

中央研究院應用科學研究中心

通用光纖光柵及時解算系統

原始即時採樣解算範例，遠端監看

A screenshot of a terminal application window. The title bar at the top reads "Terminal - cykuo@ops:~". Below the title bar is a menu bar with options: File, Edit, View, Terminal, Tabs, Help. The main area of the terminal is dark blue/black. It contains 16 lines of text, each being a shell prompt: "cykuo@ops:~\$". A white cursor is positioned at the end of the 10th prompt line.

通用光纖光柵及時解算系統 (水保局106年創新計劃)

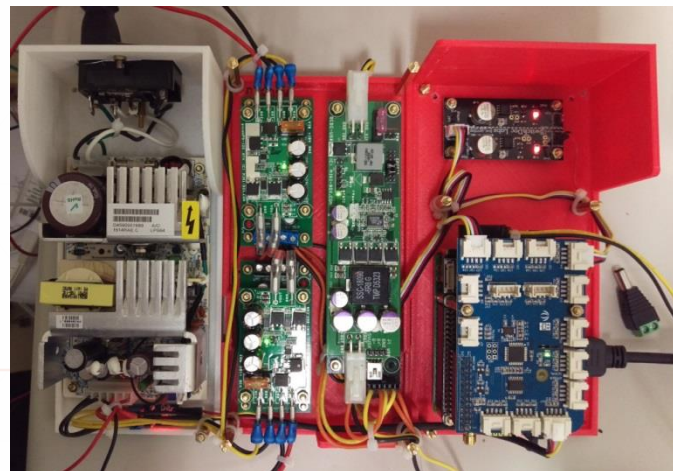
資料擷取系統微型與低功率化：

透過重新撰寫**即時解算驅動程式系統**，完成跨平台移植。目標平台為MOXA嵌入式電腦或樹莓派Raspberry Pi，兩者均為Linux為基底的完整作業系統，最大功耗為5W左右。該系統可整合新一代開放式物聯網(IoT)通訊系統，如 LoRAWan 長距離傳輸。

MOXA嵌入式海事級工業電腦



Raspberry Pi 開放微系統，整合
直流低壓 UPS，看門狗等模組



時序資料庫與網頁呈現

KairosDB

Time Range

Absolute		Relative		Time Zone
From	2017-05-01 12:00:00.000 am	or	Hours ▼ ago	Default ▼
To	2017-05-01 02:00:00.000 am	or	Years ▼ ago	

Metrics

Lantai

Name* Lantai

Limit

Group By

Aggregators

SUM Sampling 1 Milliseconds Align start time

Tags

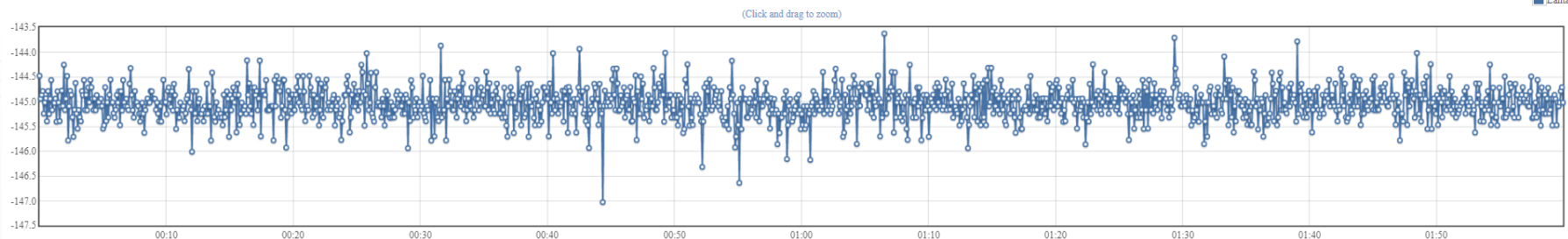
Name Pressure_1 Value Pressure_1

* Required Fields

Graph Show Query Save Delete Data

[Link to Graph](#)

Query Time: 19 ms
Sample Size: 1,438
Data Points: 1,438



■ 時序資料庫

- KairosDB: 快速, 分散式架構, 針對時間序列優化過的資料庫系統, 以Cassandra為基底
- Cassandra 為 Facebook使用的資料庫系統

時序資料庫與網頁呈現

- Grafana 前端資料分析系統

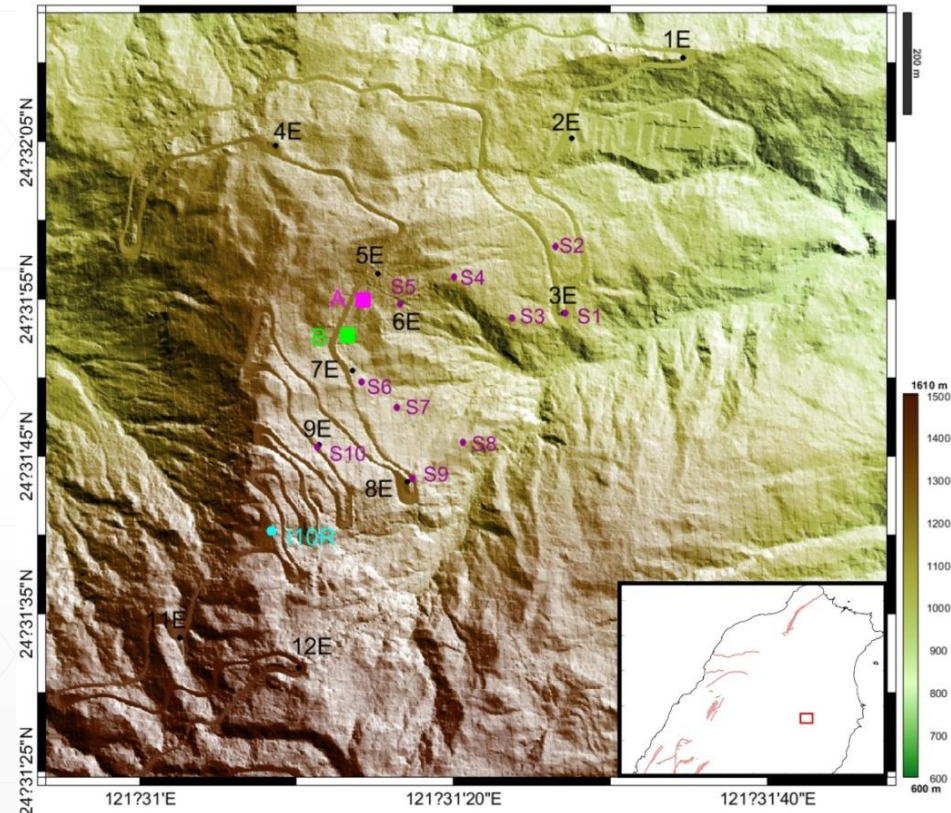
為kairosDB前端，專責於資料處理，網頁繪圖輸出與呈現的系統。提供資料平均、濾波、計數等等功能。同時可系統化地呈現多張圖表以供使用者檢視。

- KairosDB 與 Grafana 皆為開源系統。



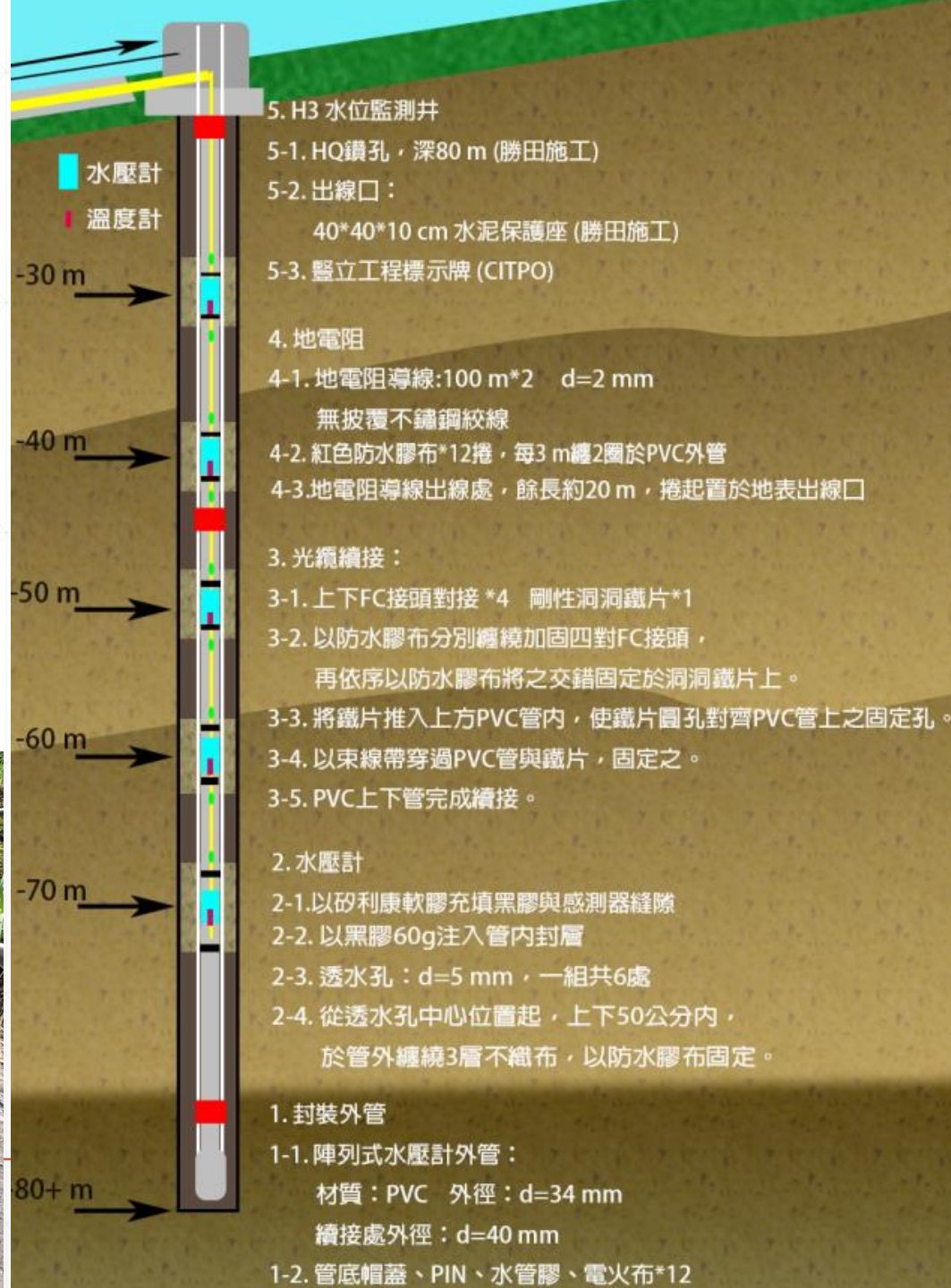
太平林道13km光纖光柵孔隙水壓監測應用案例

- 該監測坡面運動快速，B井位傾斜儀讀數大部分皆呈現飽和(2015年底)。
- A井孔隙水壓計的定常水壓讀數偏移。但非定常水壓仍提供其他監測技術珍貴資料！
- 利用2017年度防災應用科技計畫，在點位A與B之間於七月重新裝置一口光纖光柵水壓計的孔隙水壓監測井(LTW03)，在該新井中水壓計安裝於深度自30至70米，以每十米為間隔佈放。





光纖光柵孔隙水壓監測井



蘭台新井水壓圖 30, 40, 50, 60 m



Unsaturated
~ - 87 kPa

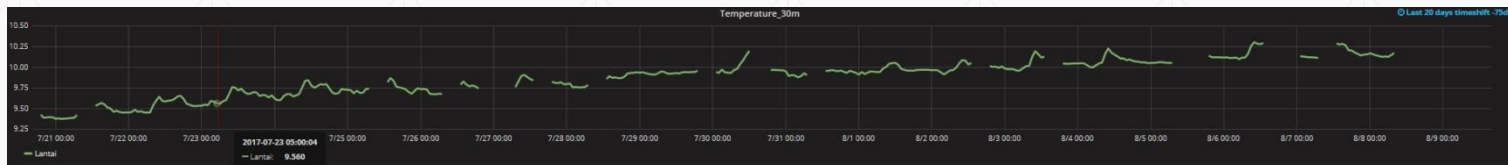
~ 67.5 kPa

~ 165 kPa

~ 331 kPa

NA

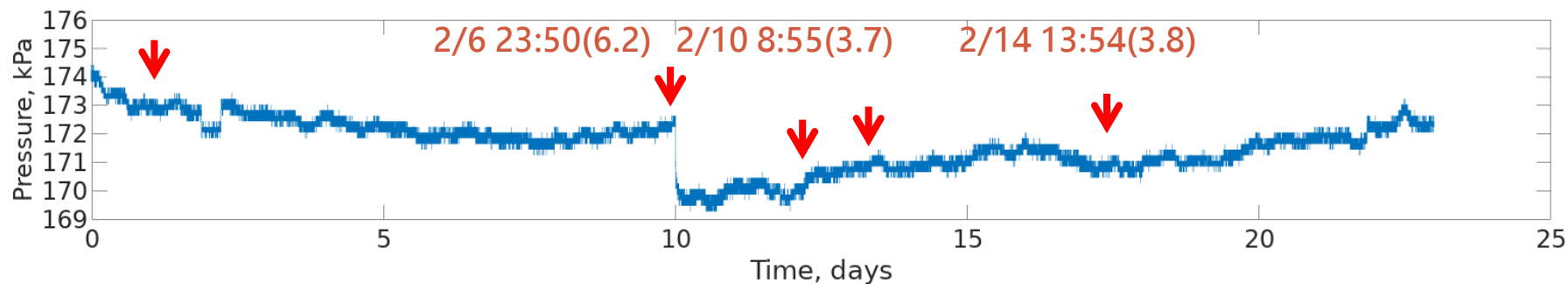
蘭台新井溫度圖 30 m, ~9.8°C



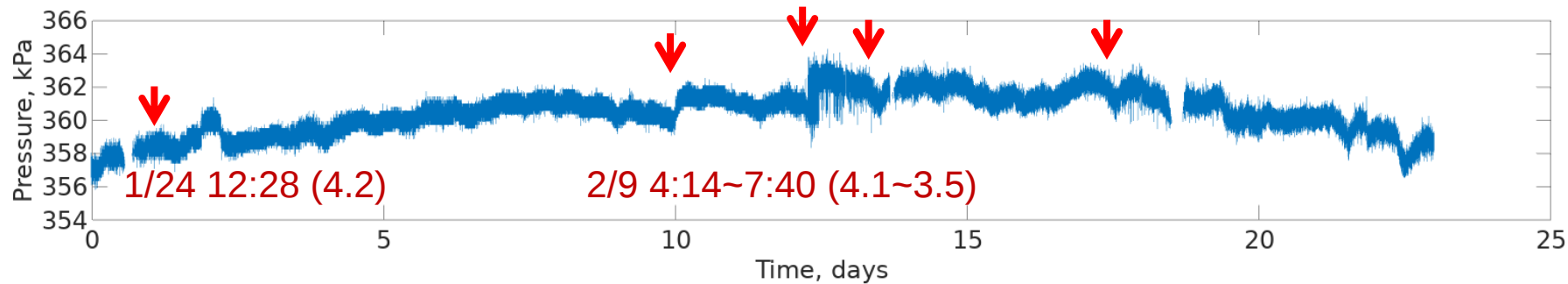
9.8 °C

2018 2/6 花蓮地震 23:50:42

50m Pore Pressure from Sun Jan 28 00:00:04 2018

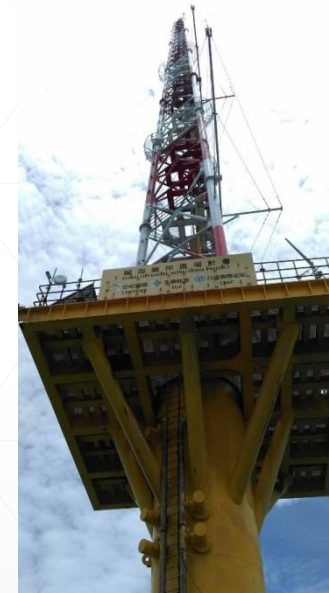
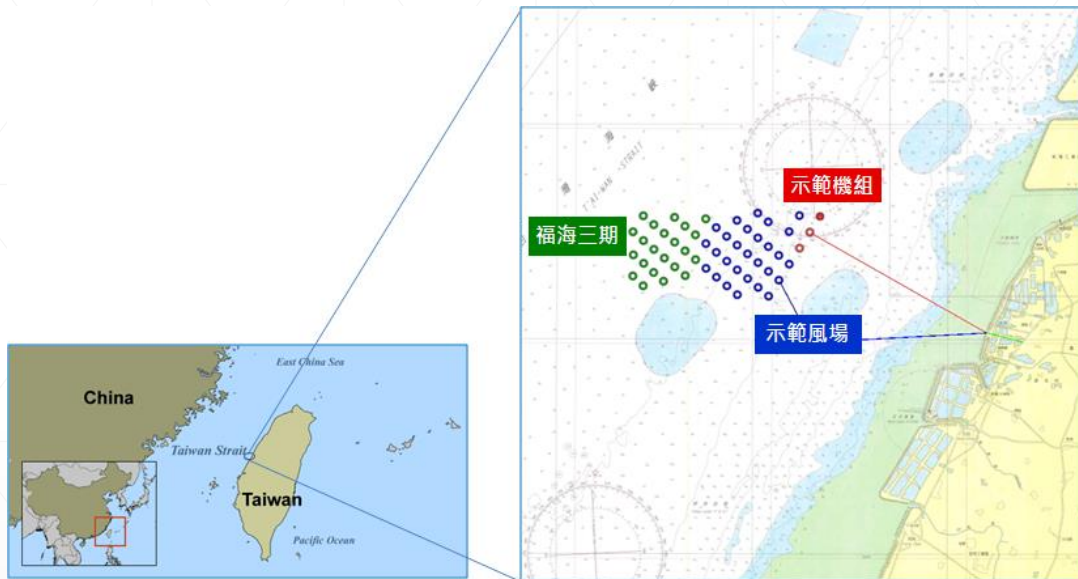


60m Pore Pressure from Sun Jan 28 00:00:09 2018



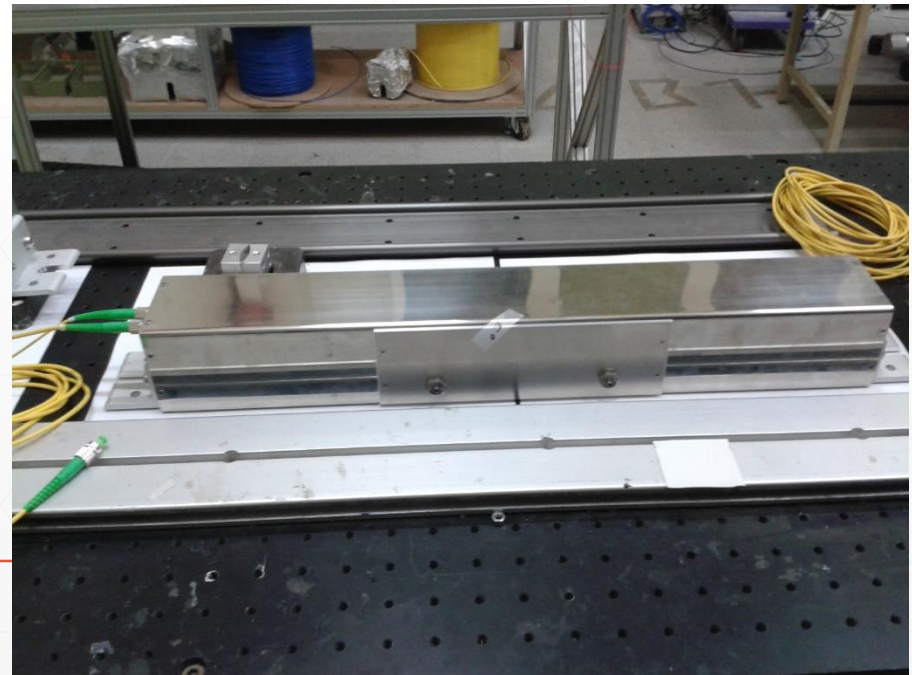
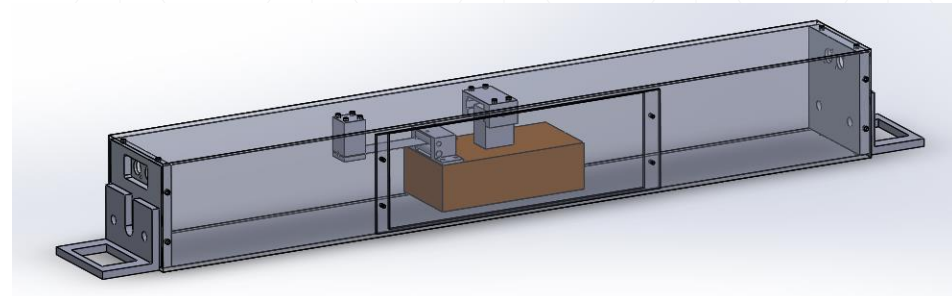
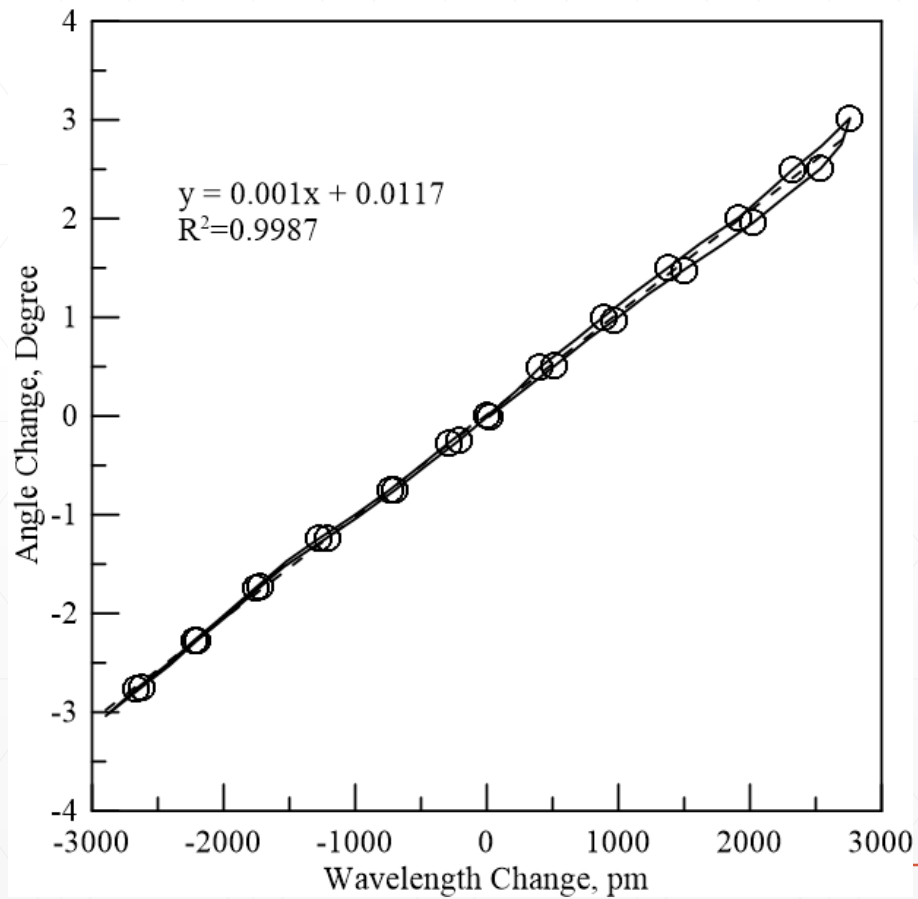
彰濱離岸測風塔動態傾斜監測

- 測試光纖光柵感測技術應用於外海嚴苛環境的可行性。
- 探索彰濱外海脆弱海床的基礎在極端風波流事件中的反應。

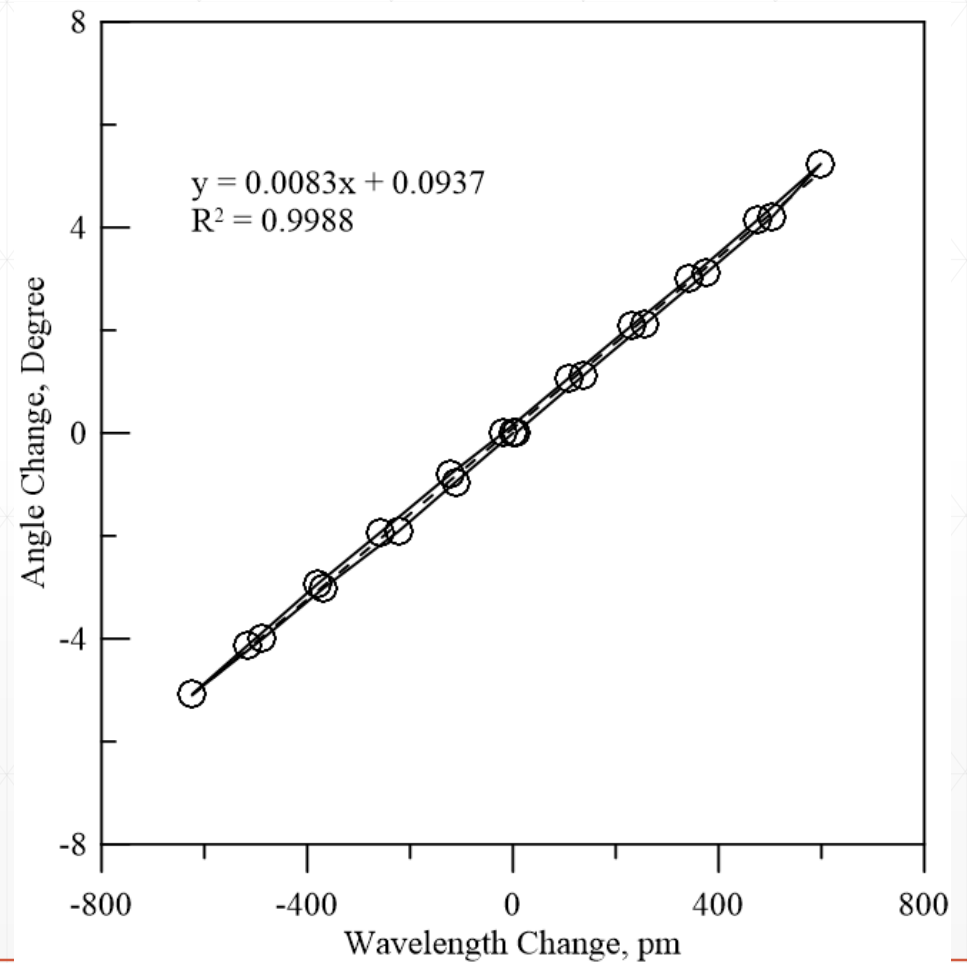


- 採樣頻率3Hz，自7月8日起至10月23日之紀錄，每兩小時平均
- 監測中發現，該測風塔約呈現一度左右的擺盪，而長時間下，則有氣候事件的影響。

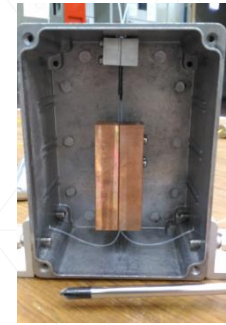
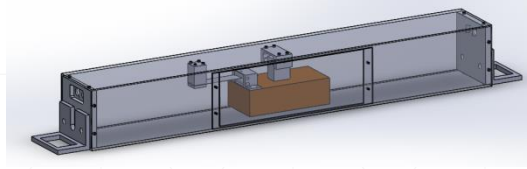
Optical level beam (OL beam)



FBG-based mass tiltmeter



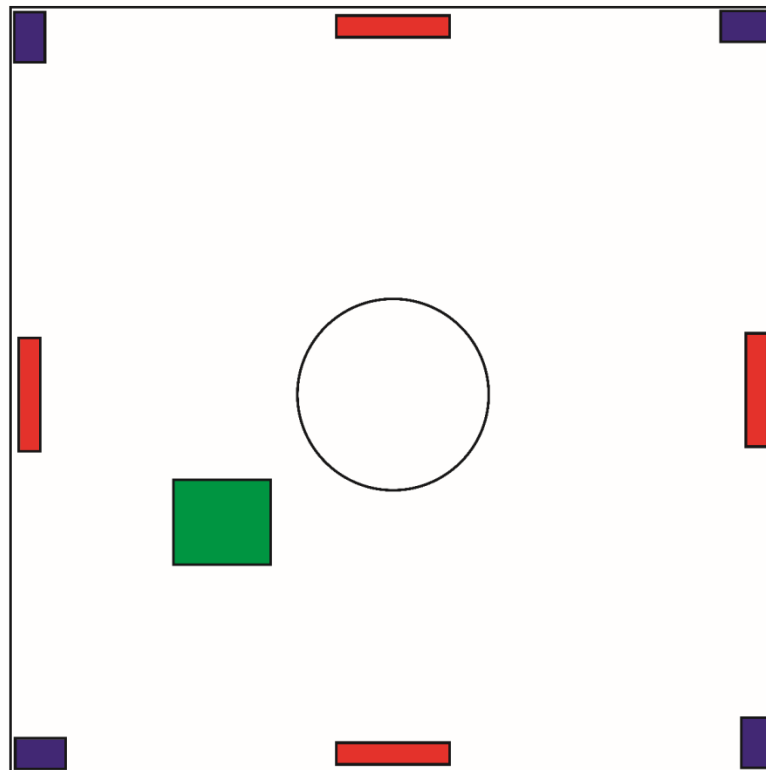
OL beam versus FBG-based mass tiltmeter



	OL beam	FBG-based mass tiltmeter
Weight (kg)	4.0	1.0
Resolution (Deg/pm)	0.0055	0.0083
R^2	0.998	0.999
Measurement range (Deg)	-3~+3	-5~+5

FBG inclinometer sensing system

To be installed on the platform of Fuhai meteorological mast



OL beam



FBG-based mass tiltmeter



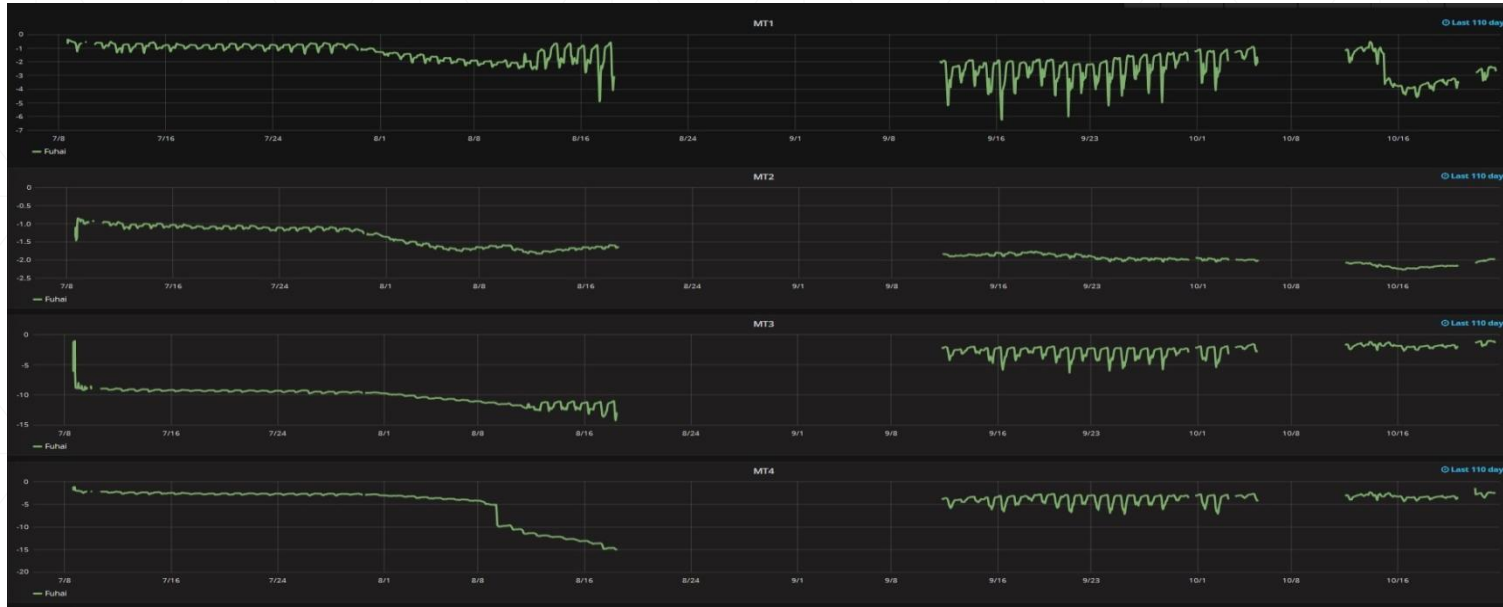
FBG interrogator

Principles of fiber Bragg grating (FBG)

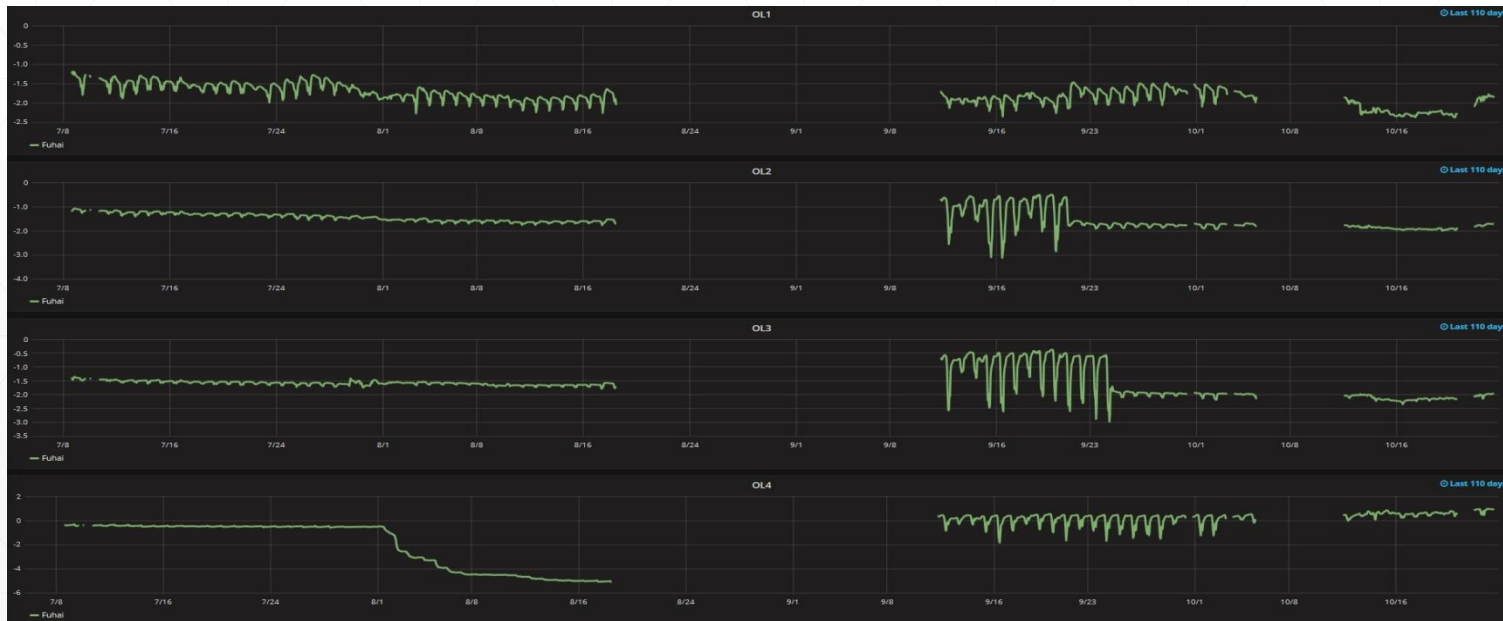
- FBG interrogator and MOXA



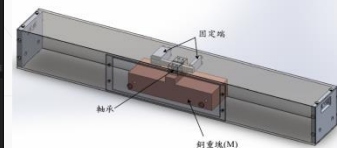
福海測風塔傾斜角度歷線，共八枚傾斜儀



Mass
Tiltmeter

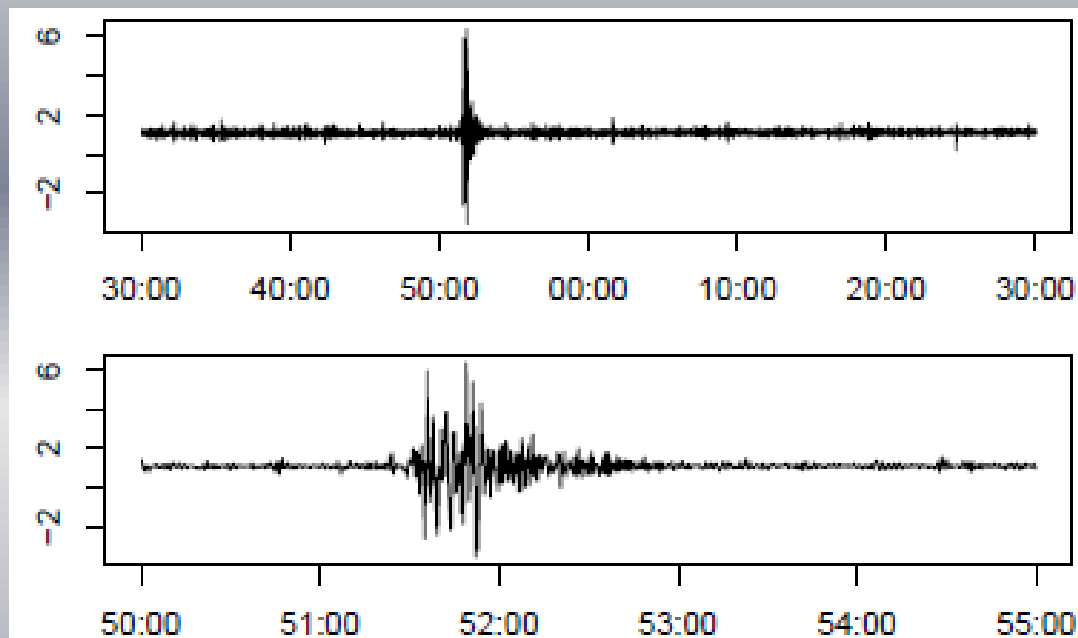


Optical
Level beam

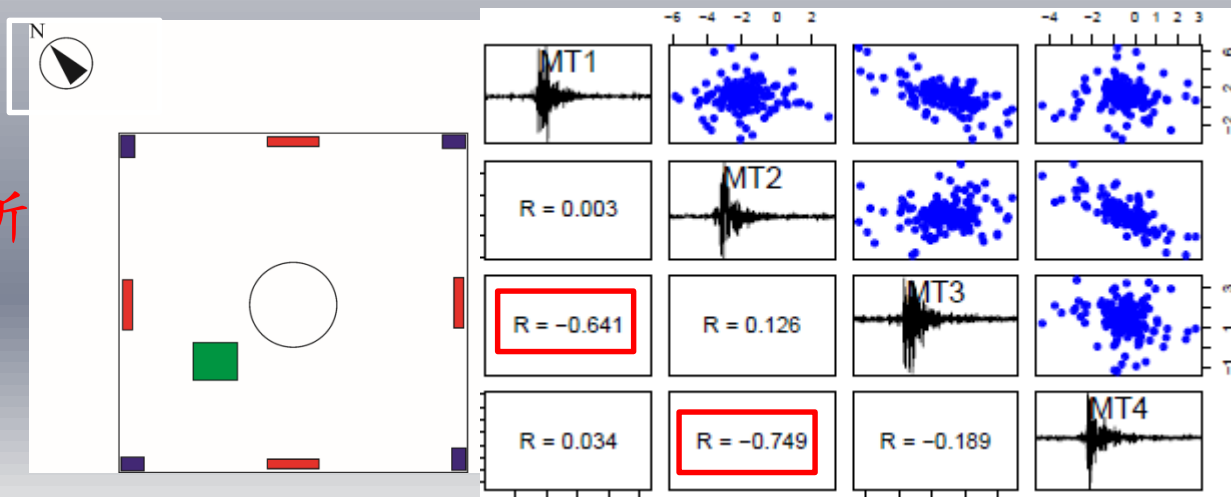


2018 2/6 花蓮地震 23:50:42

- 典型紡錘式訊號
- 動態傾斜儀系統紀錄到高達 6 度當量的角度位移！
- 對角位安裝的傾斜儀呈現高相關性

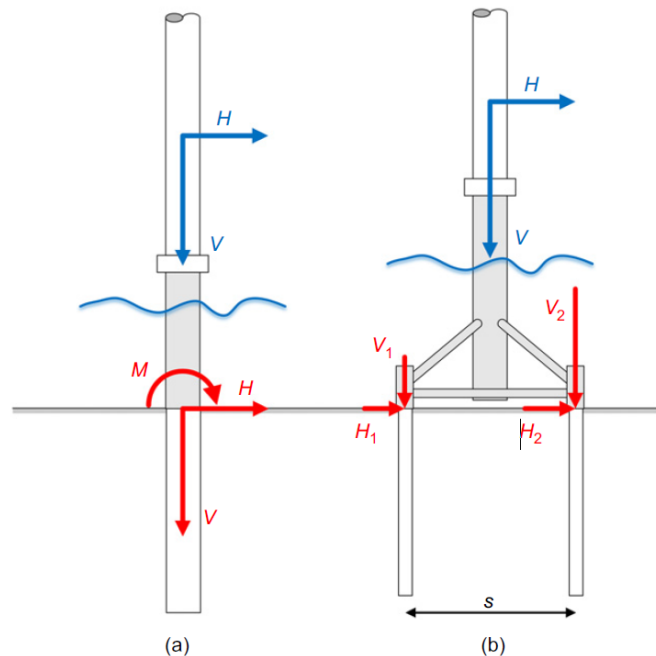


結構與基礎動態分析



Steering into future: FBG-based pile strain gauge

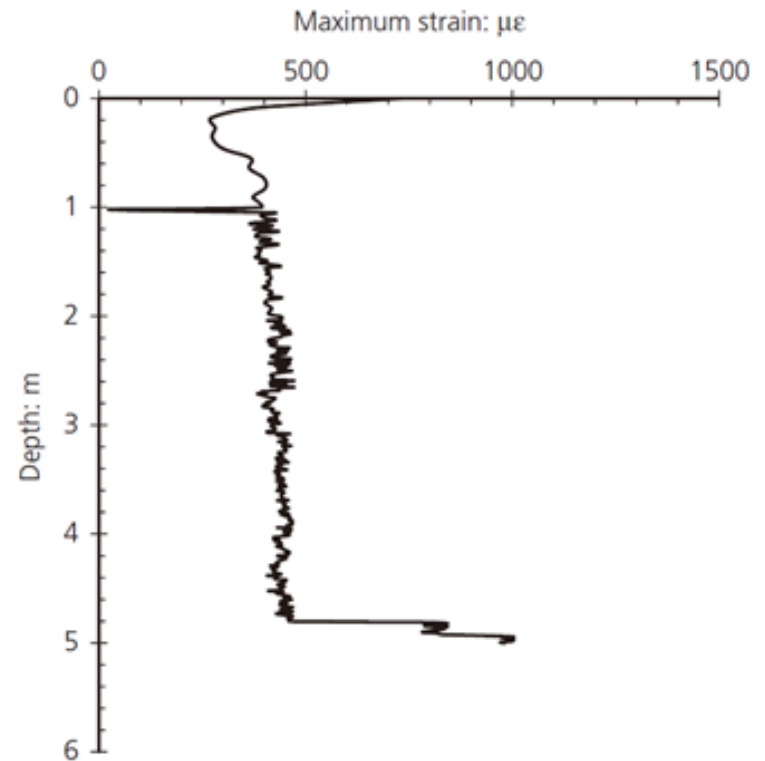
- Short-term stability
(e.g. pile dynamic analysis, PDA)
- long-term stability
(e.g. structural health monitoring, SHM)



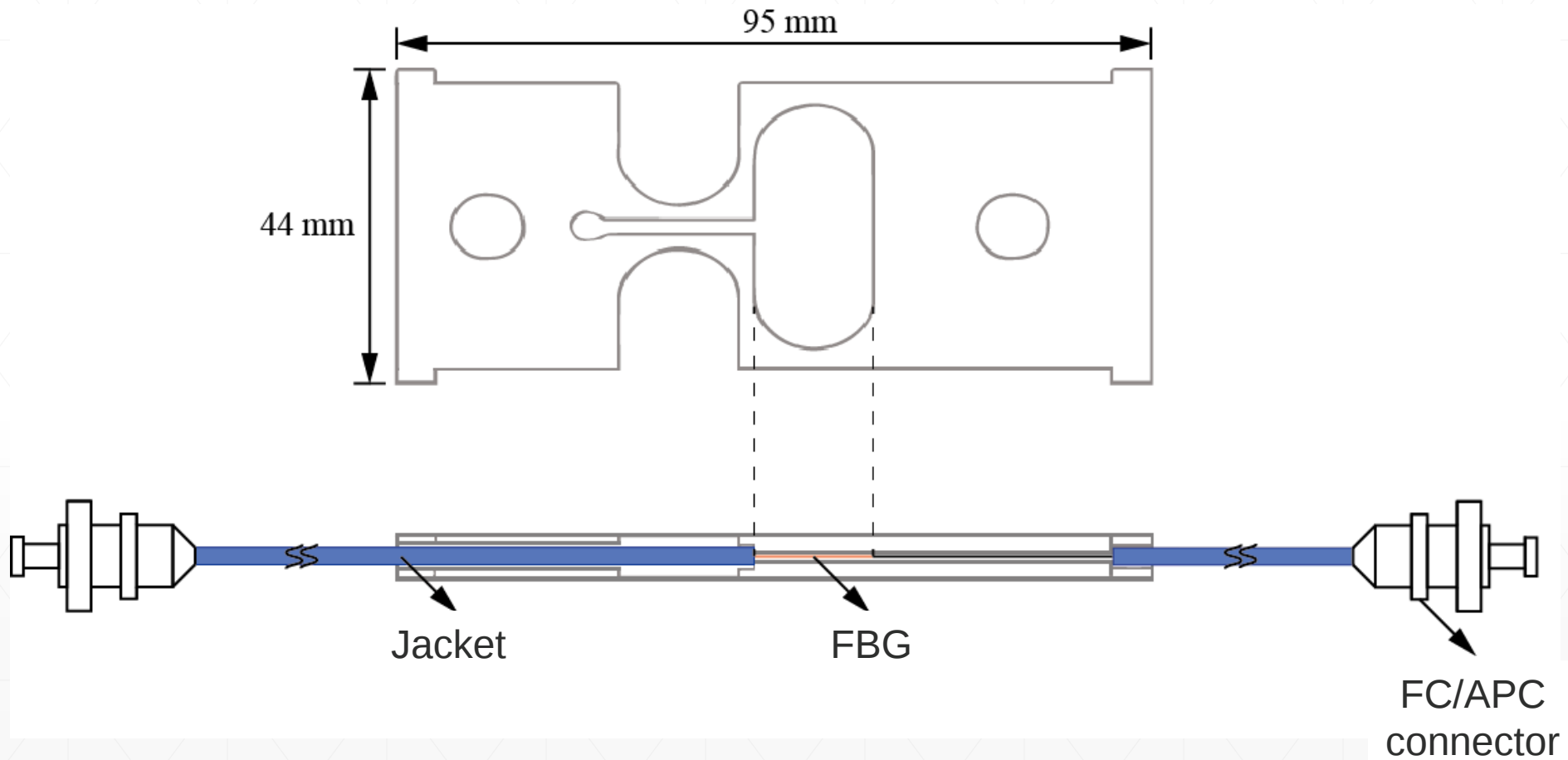
Load transfer mechanisms
(Houlsby, 2016)

FBG-based pile strain gauge

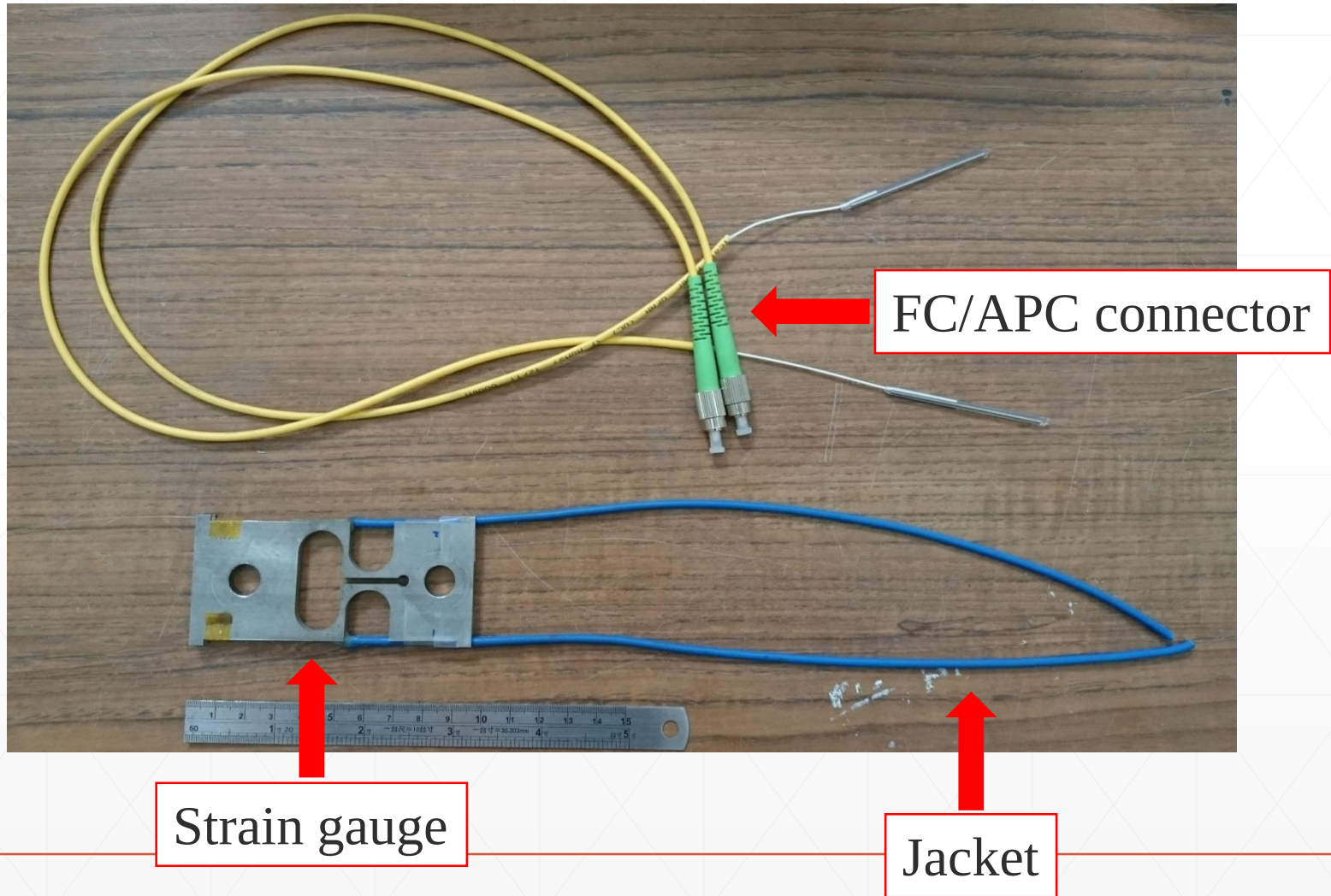
- Doherty et al. (2015) used FBG sensors to measure strain on driven steel piles



FBG-based pile strain gauge

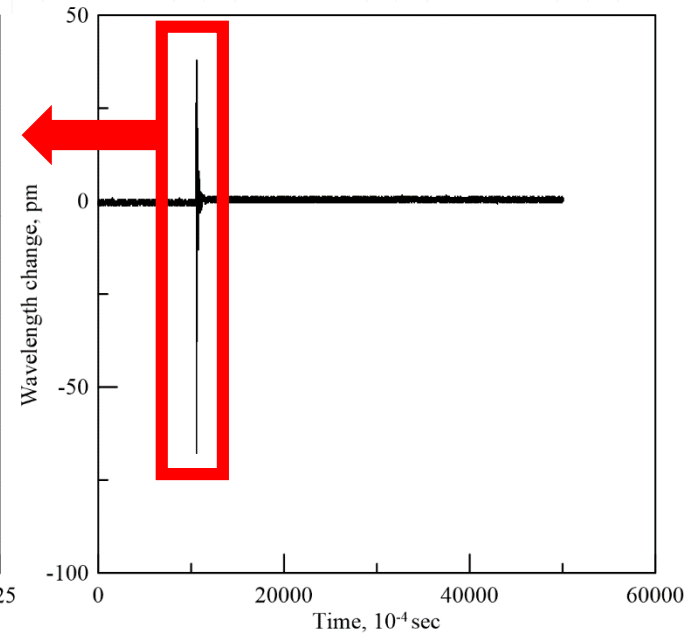
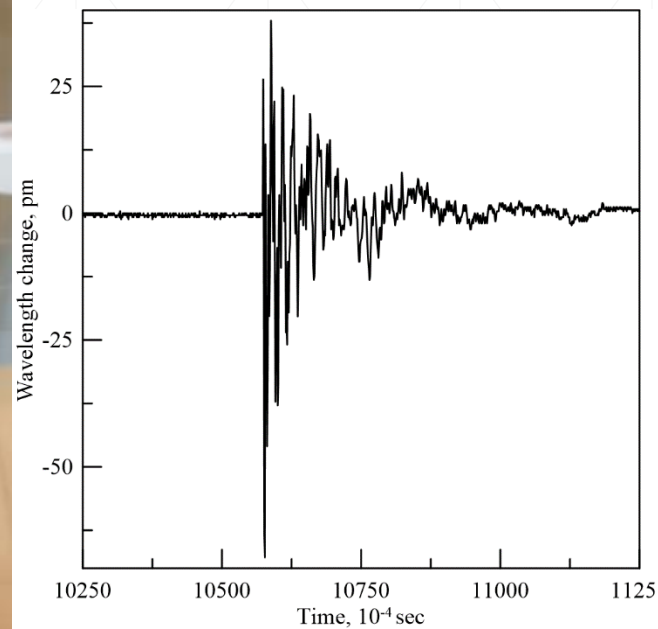


FBG-based pile strain gauge



FBG-based pile strain gauge

- Indoor testing (acquisition frequency: 10 kHz)



結論

- 光纖光柵感測器產品逐漸完整
- 即時物理量解算
- 長期高頻率穩定監測
- 適用於電磁落雷，油氣或特殊環境

謝謝指教