水土保持局技術研究發展小組
線上專題分享



基於振動之擋土構造物性能評估技術研究



報告人：柯永彥
成功大學土木工程系 副教授

2021/10/26

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA
國立成功大學 National Cheng Kung University 1931

報告大綱

- 緣起與研究目的
- 研究方法與原理
- 基於振動之性能指標

相關方法之介紹

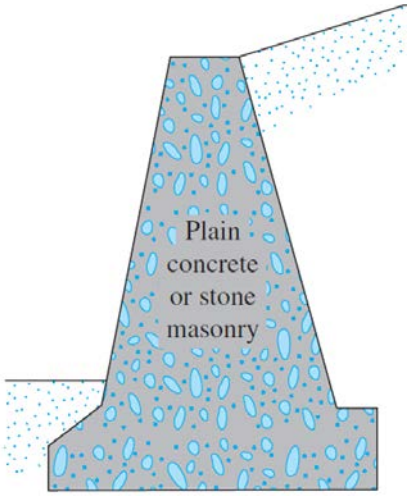
- 有限元素模擬
- 室內縮尺模型試驗
- 現地案例量測

相關方法之驗證

- 結論

緣起與研究目的

- 台灣常受各類邊坡災害，若能於邊坡破壞前預先掌握穩定性不足，及時進行管制或補強，將有助於防災減災。
- 人工邊坡多有保全對象，其破壞多與穩定設施失效相關，故可直接根據穩定設施健康狀態進行邊坡災害預警。
- 針對以自重提供穩定機制之重力式擋土牆，藉由牆身微振反應展現牆-土互制系統之動力特性，據以評估其穩定性能變化，並藉由損傷指標量化性能降低之程度。



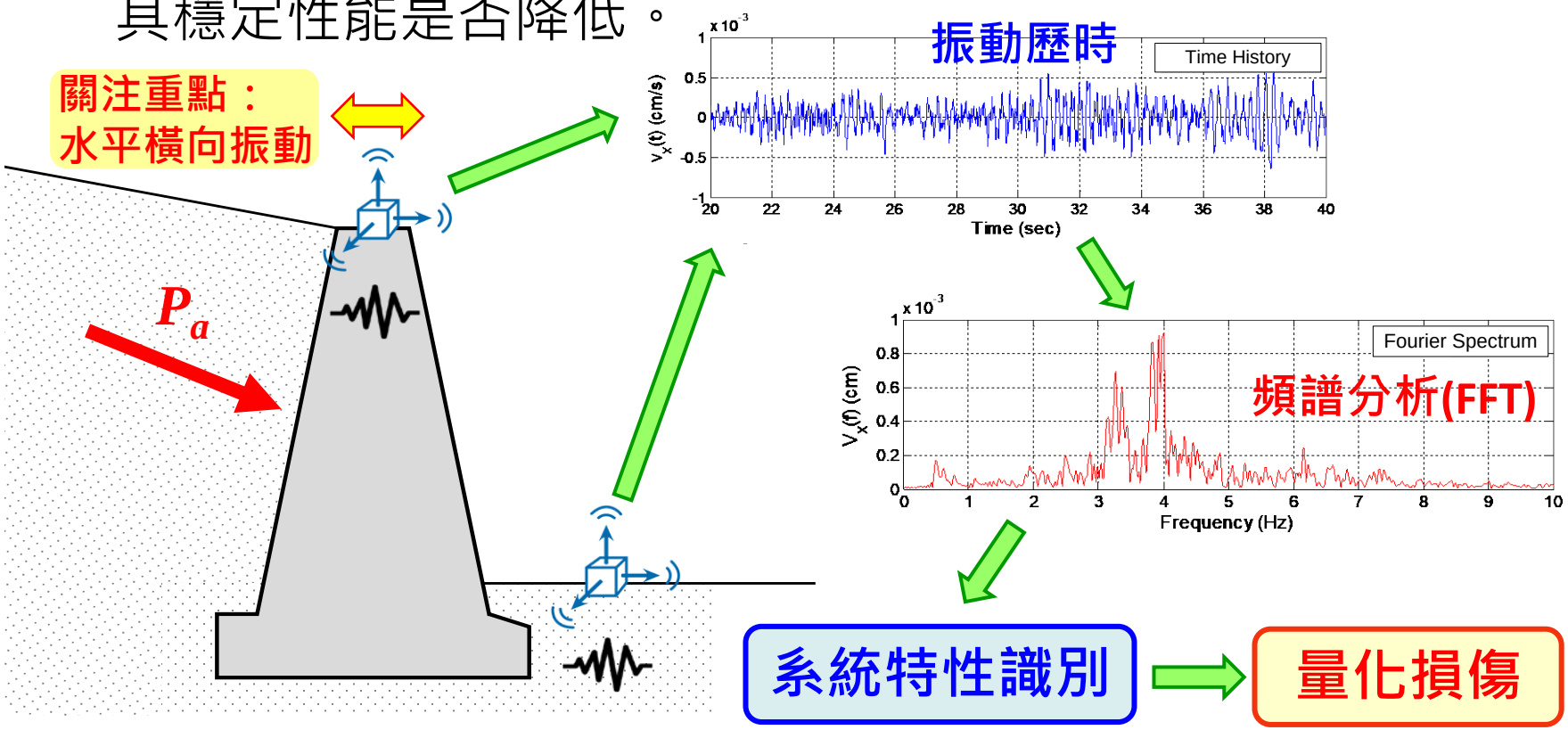
(Das, 2011)



(柯永彥攝)

研究方法與原理 -1

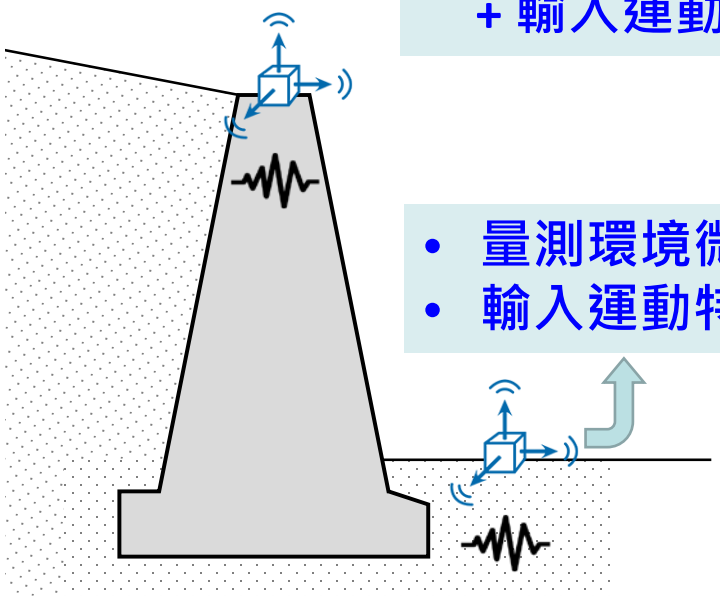
- 對於一土壤~結構互制系統而言，結構體之振動能反映系統本身特性與邊界條件之變化。
- 本研究利用土壤-擋土構造互制系統之振動特性變化，研判其穩定性能是否降低。

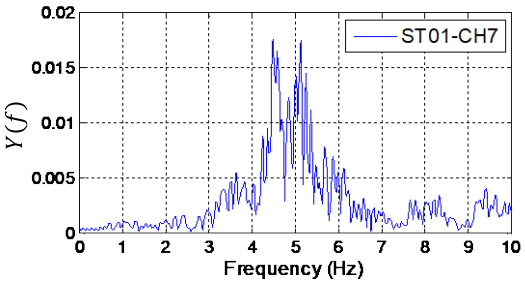


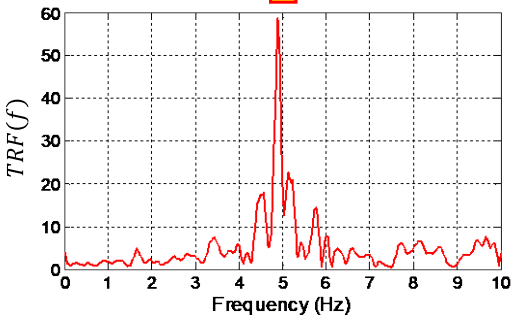
研究方法與原理 -2

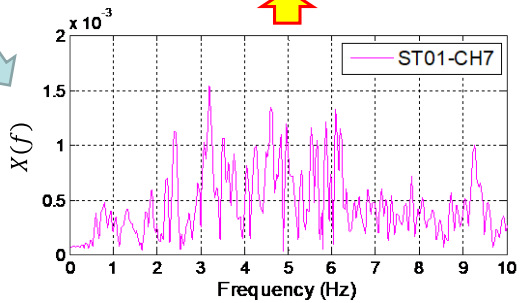
- 量測牆頂振動
- 牆~土系統特性 + 輸入運動特性

- 量測環境微振
- 輸入運動特性









Output $Y(f)$

$TRF(f)$

Input $X(f)$

量測設備：

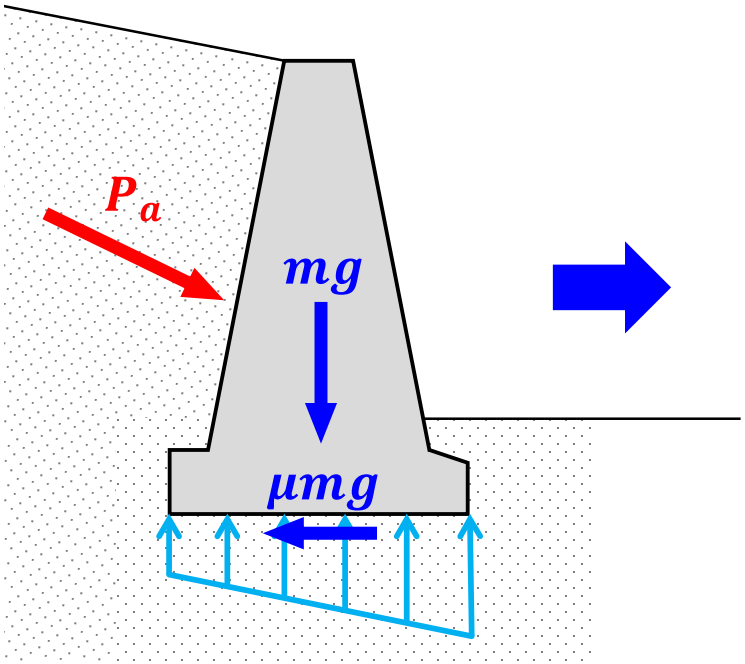
- 加速規
- 無線集錄系統



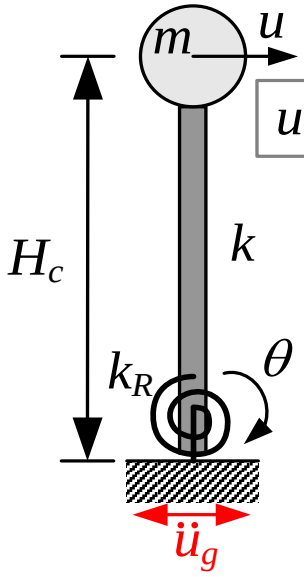
由輸入-輸出反應求系統轉換函數 (Transfer function) (TRF)

基於振動之性能指標 -1

重力式擋土牆穩定機制



牆-土系統簡化模型



$$u^t = u + H_c\theta + u_g$$

牆-土系統自然頻率...(1)

$$f_{n,R} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_R}{mH_c{}^2}} \quad \text{(rigid wall)}$$

基礎旋轉阻抗...(2)

$$k_R = mH_{GC}{}^2\left(2\pi f_{n,R}\right)^2$$

f_n ↘、k_R ↘

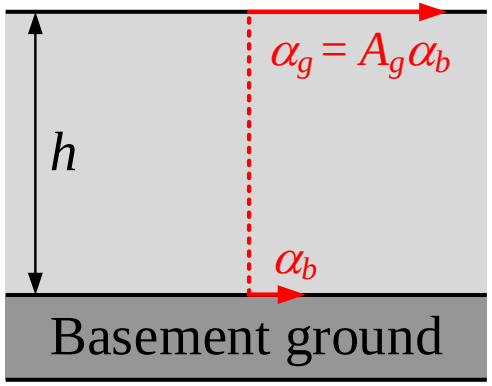
⇒ 系統勁度↘、穩定性能↘

基於振動之性能指標 -2

Nakamura根據系統自然頻率(f_n)與對應的放大係數(A)定義**損傷指數(vulnerability index)...(3)**

可應用於
加勁邊坡

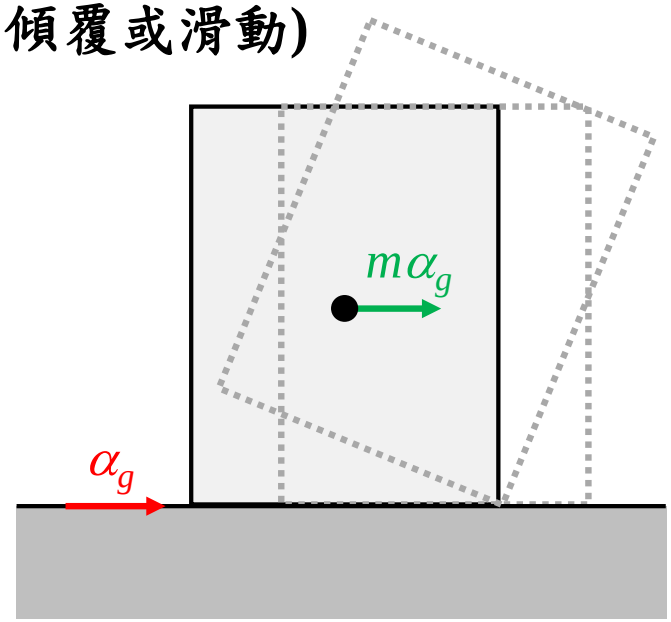
地盤與土堤



剪應變 ⇦ $K_g = \dfrac{(A_g)^2}{f_n}$

列車翻覆或出軌(剛性塊體傾覆或滑動)

可應用於
重力式
擋土牆



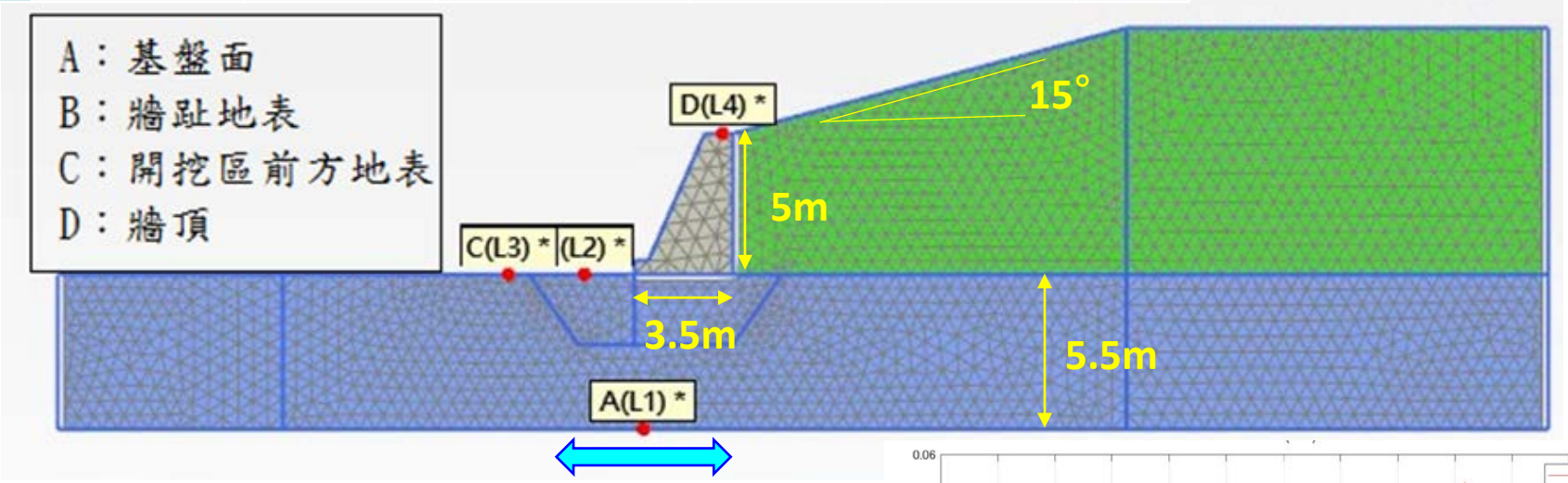
$K_b = \dfrac{(A_g)^2}{f_n}$ ⇨ 激振輸入功率

有限元素模擬 -PLAXIS 2D

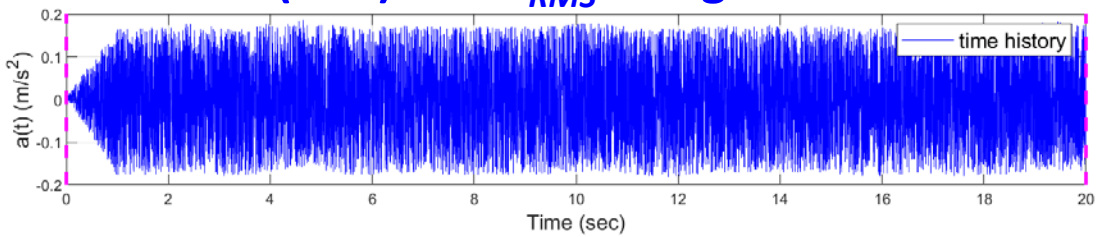
土層	γ (kN/m³)	SPT-N	ϕ (deg)	V_s (m/s)	E (kPa)	ν
底層	18	9	32.7	166.4	1.37×10^5	0.35
背填	15	8	32.7	160	1.03×10^5	0.35

抗滑動FS: 1.54 > 1.5

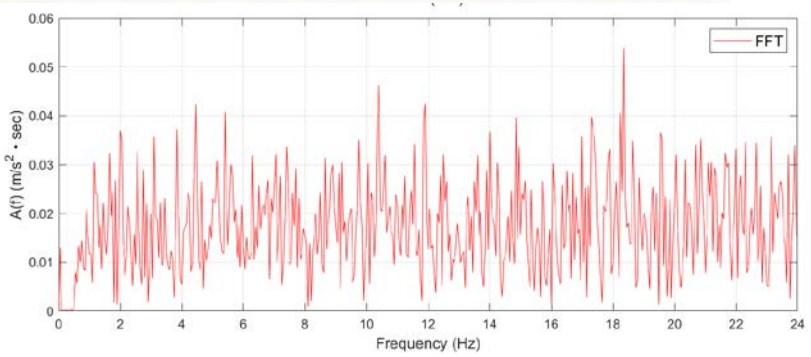
抗傾覆FS: 3.69 > 2.0



基盤面(A點)輸入a_{RMS} = 10gal之白噪激振



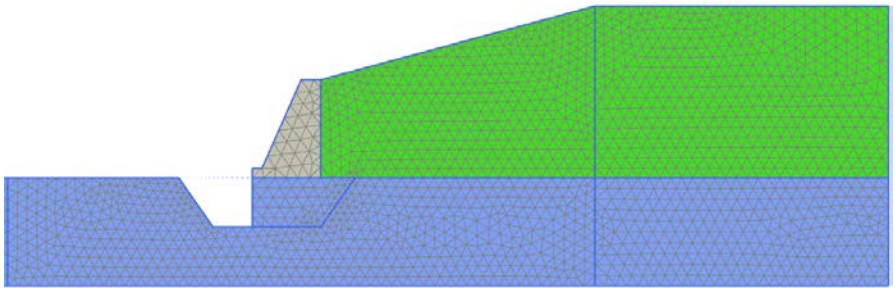
振動歷時



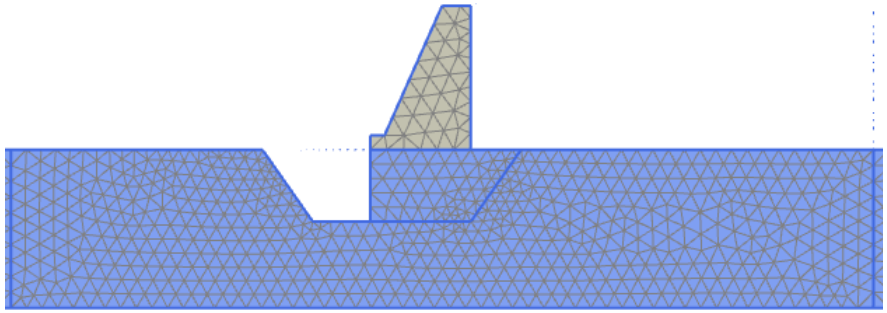
傅氏譜

模擬弱化情境

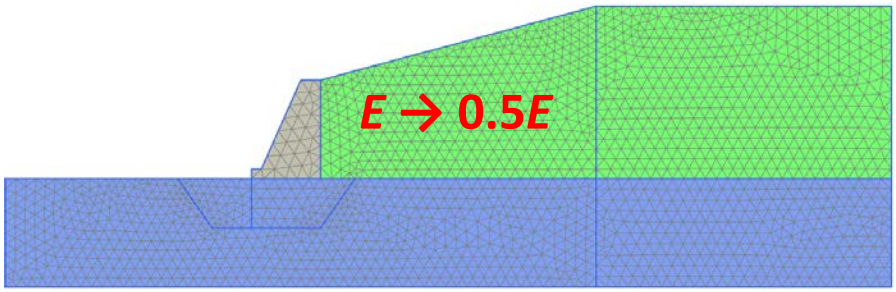
牆趾開挖



無背填土、牆趾開挖

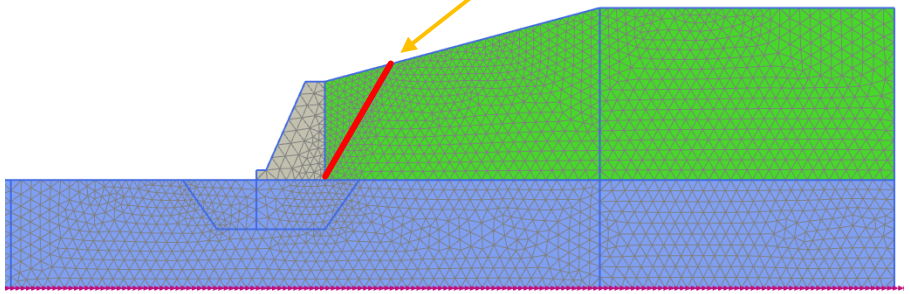


背填土弱化

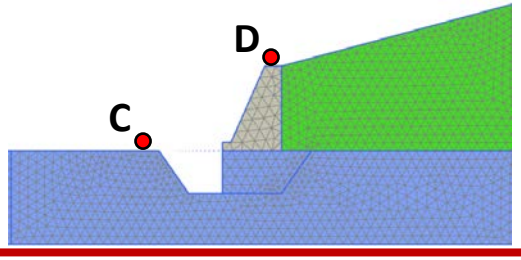


背填土主動破壞

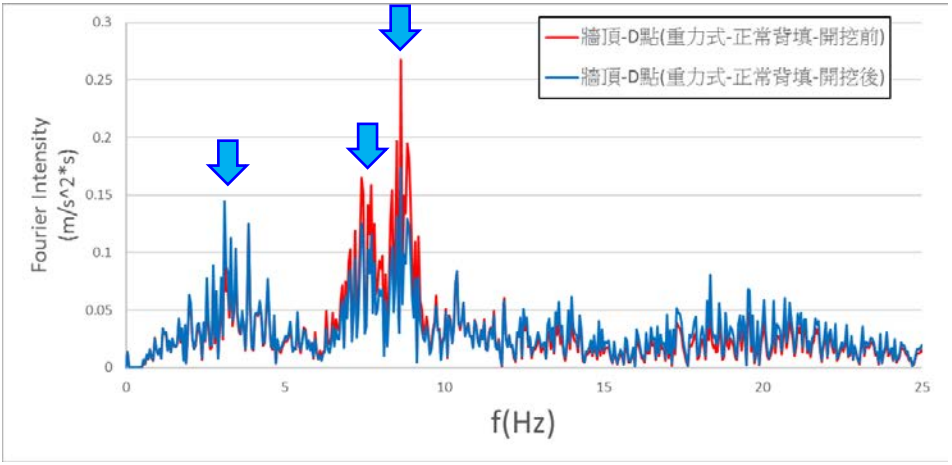
以界面元素模擬破壞面(採Mohr-Coulumb模式)，並給定強度折減因子 R_{inter}= 0.1 ，藉以模擬破壞面剪力強度下降。



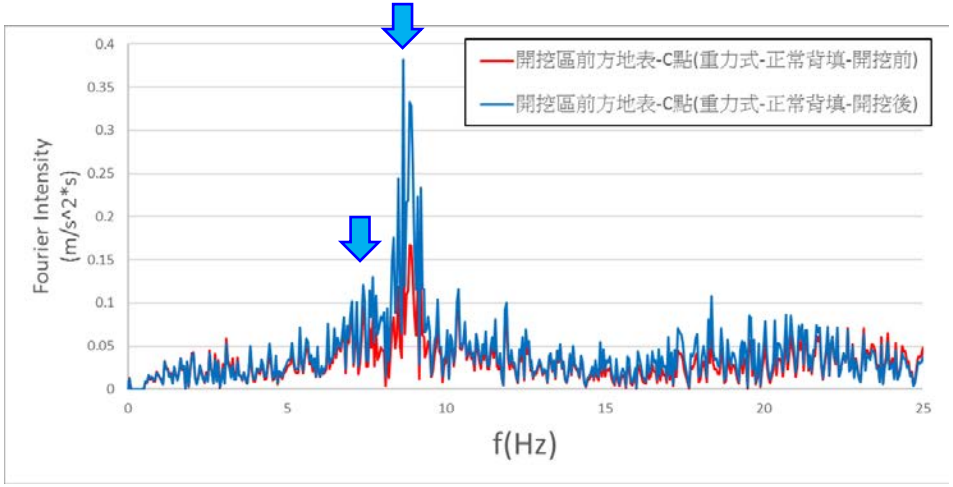
牆趾開挖 (有背填) -1



牆頂(D點)傅氏譜



開挖區前方地表(C點)傅氏譜

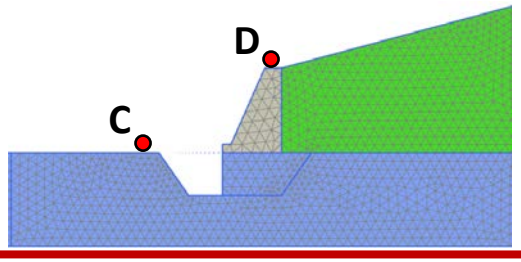


開挖前後在3.5 Hz、7.5 Hz與9 Hz 附近皆有顯著尖峰，開挖後3.5Hz處振幅略升，7.5 Hz與9Hz處振幅則略降。

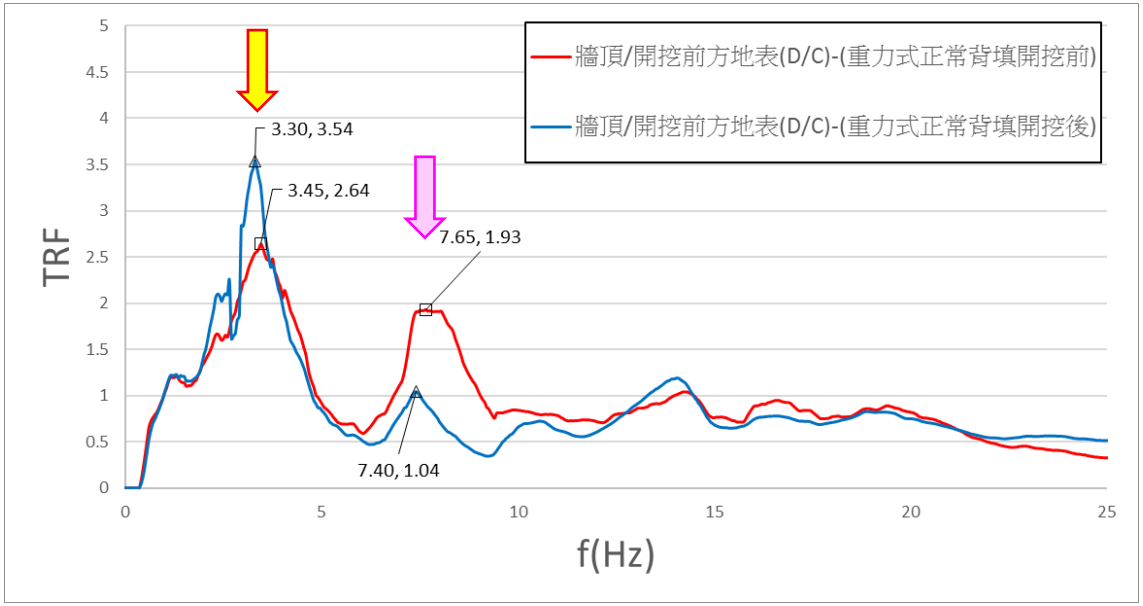
開挖前在7.5 Hz略有尖峰，9Hz附近則有明顯尖峰，開挖後後者之振幅大幅上升。

3.5 Hz尖峰與牆體特性較有關，7.5 Hz與9Hz尖峰則可能與地盤特性較有關

牆趾開挖 (有背填) -2



牆頂(D點)相對於開挖區前方地表(C點)轉換函數



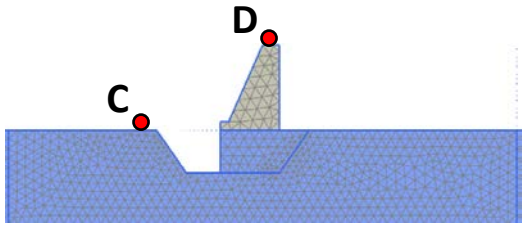
轉換函數中9 Hz尖峰不復見
→ 可能代表牆前地盤特性

開挖前位在7.65 Hz處之尖峰，於開挖後略降至7.40 Hz處，且放大係數大幅下降
→ 可能代表牆背地盤(背填土+底層土)之振動特性

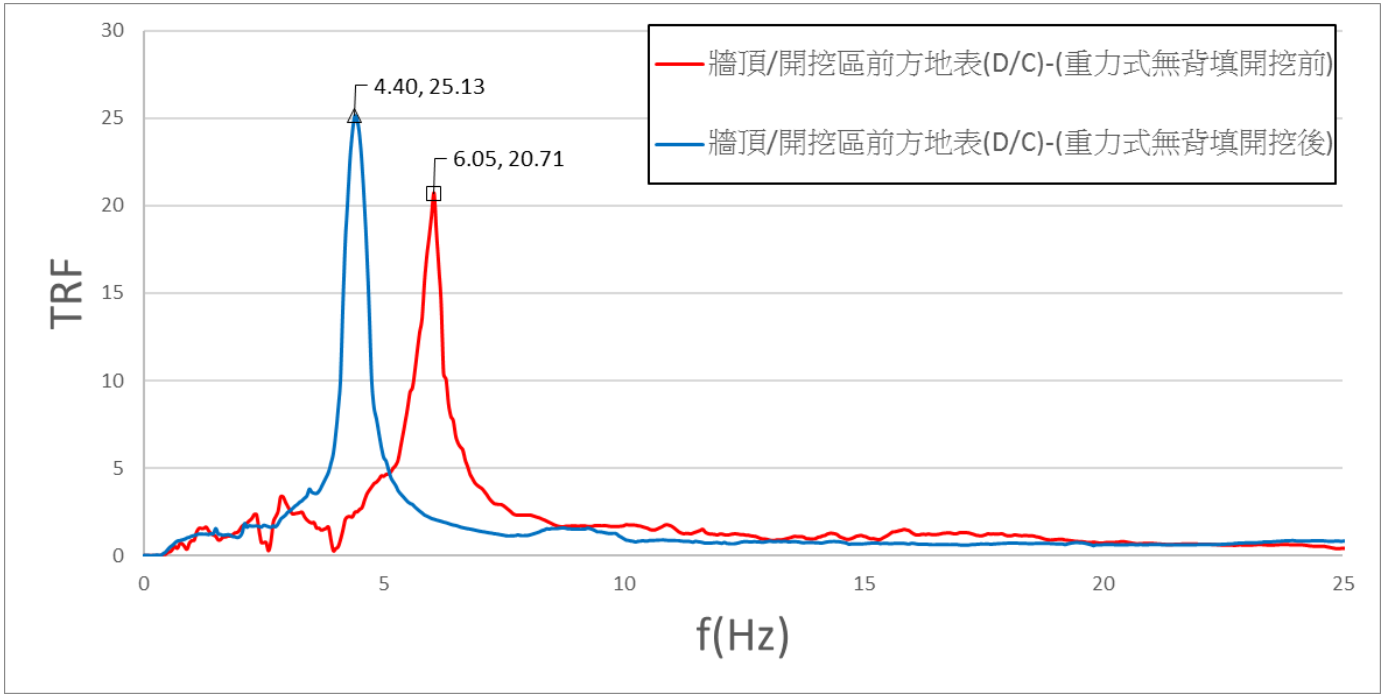
開挖前位在3.45 Hz處之尖峰，於開挖後略降至3.30 Hz處，放大係數則微幅上升
→ 可能代表牆體之振動特性

性能指標 \ 情境	開挖前	開挖後	相對差異
自然頻率 (Hz)	3.45	3.3	-4.3%
旋轉阻抗 (MN-m/rad)	47.7	43.6	-8.5%
Nakamura 損傷指數	2.02	3.8	+88.0%

牆趾開挖 (無背填)

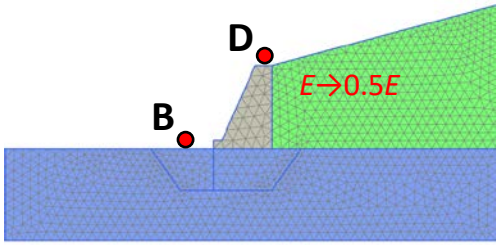


牆頂(D點)相對於開挖區前方地表(C點)轉換函數

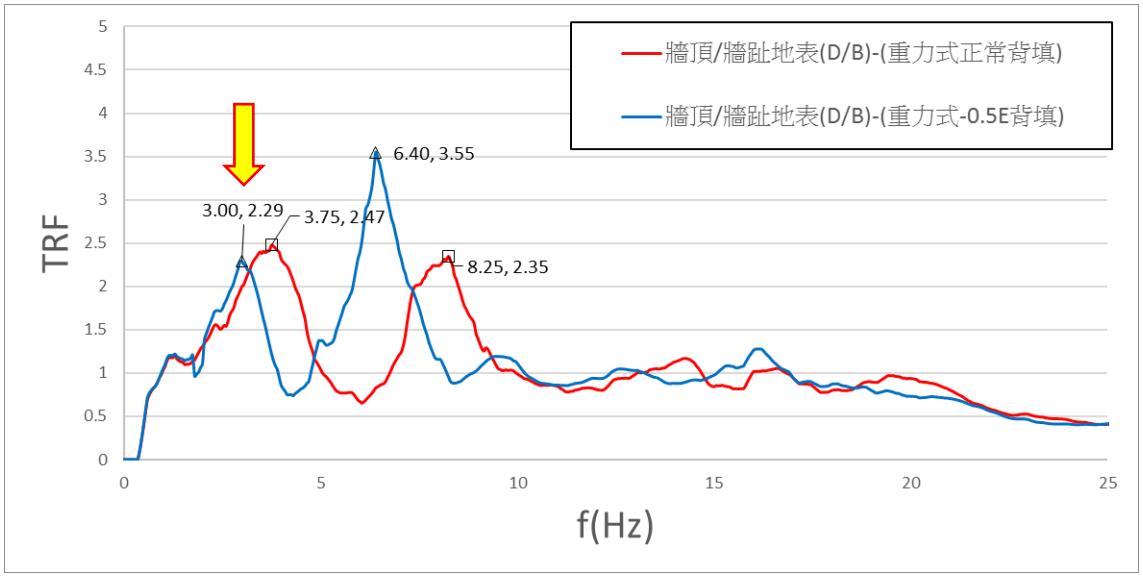


- 牆趾開挖對牆底基礎旋轉勁度有可觀影響
- 有背填之情況下，牆趾開挖僅造成牆體振動顯著頻率些微變化，顯示背填土對牆體振動特性之影響明顯較牆底基礎土壤為大。

背填土弱化 (*E*→0.5*E*)

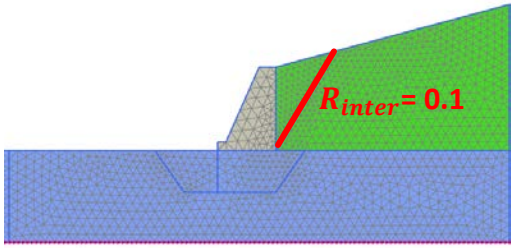


牆頂(D點)相對於牆趾地表(B點)轉換函數

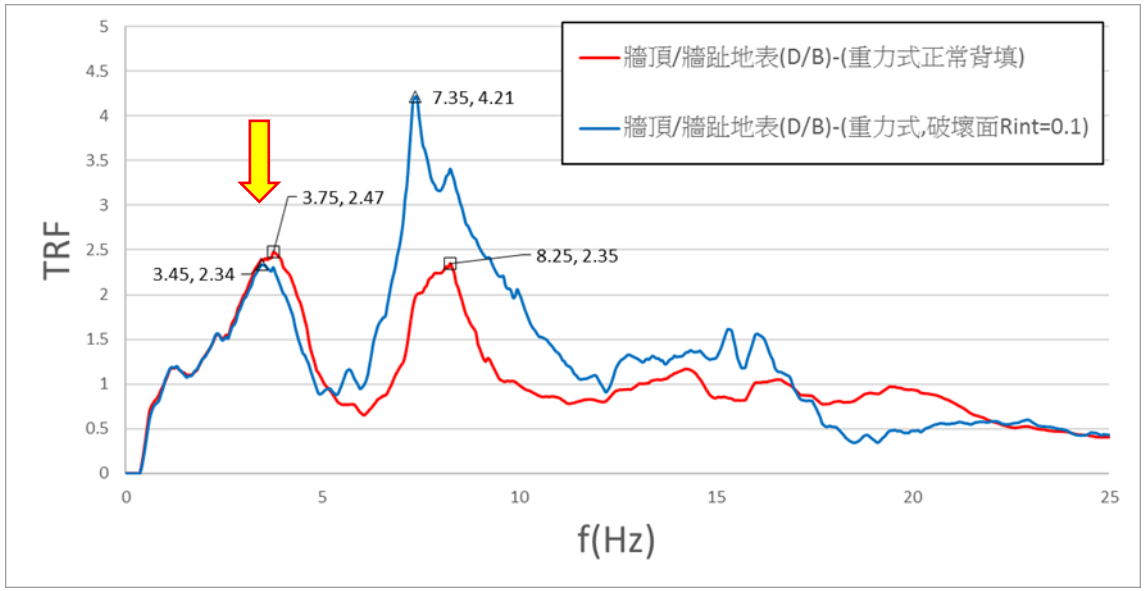


情境 / 性能指標	開挖前	開挖後	相對差異
自然頻率 (Hz)	3.75	3.0	-20.0%
旋轉阻抗 (MN-m/rad)	56.4	36.1	-36.0%
Nakamura 損傷指數	1.63	1.75	+7.4%

背填土主動破壞



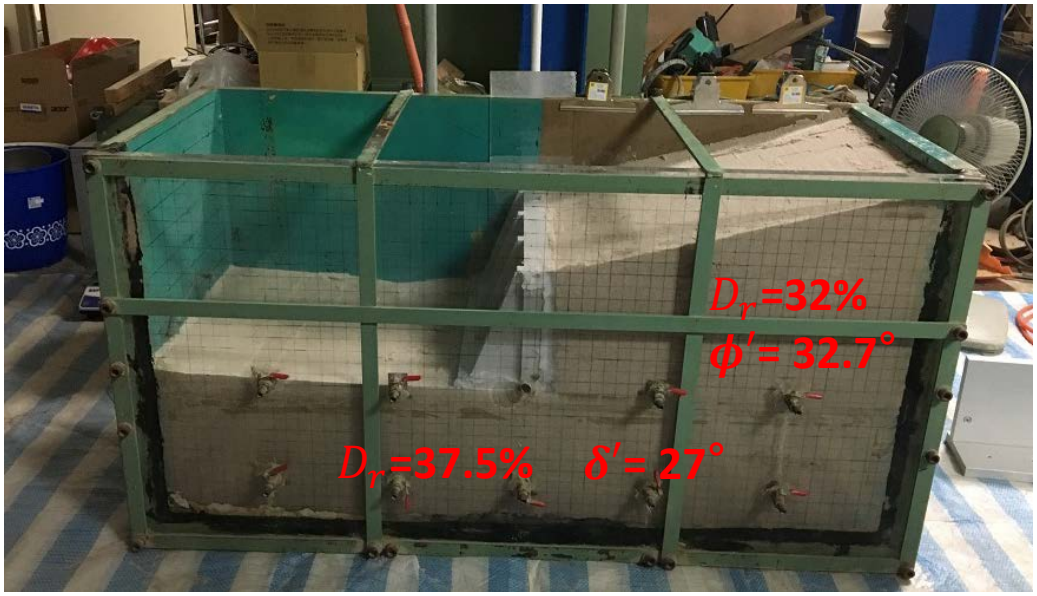
牆頂(D點)相對於牆趾地表(B點)轉換函數



性能指標 \ 情境	開挖前	開挖後	相對差異
自然頻率 (Hz)	3.8	3.45	-9.2%
旋轉阻抗 (MN-m/rad)	57.9	47.7	-17.6%
Nakamura 損傷指數	1.57	1.59	+1.3%

室內縮尺模型試驗

製作**重力式擋土牆**縮尺模型，並利用均勻細砂搭配砂箱製作邊坡試體，進行室內測試與驗證。





$FS_{overturning}$ = 5.89 > 2.0
$FS_{sliding}$ = 2.06 > 1.5

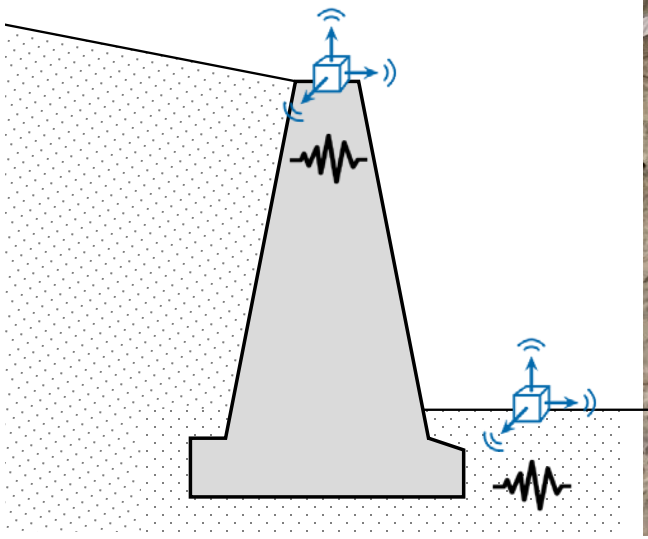
1/25 scale:
H 20 cm; B 14 cm
Prototype:
H 5 m; B 3.5 m

縮尺模型試驗量測配置

測點位置

- 牆頂：牆體特性
- 牆趾前砂面：地盤特性
- 砂箱外地板：振源特性

(各測點進行同步量測)





縮尺模型試驗試驗情境 -1

坡面降雨入滲

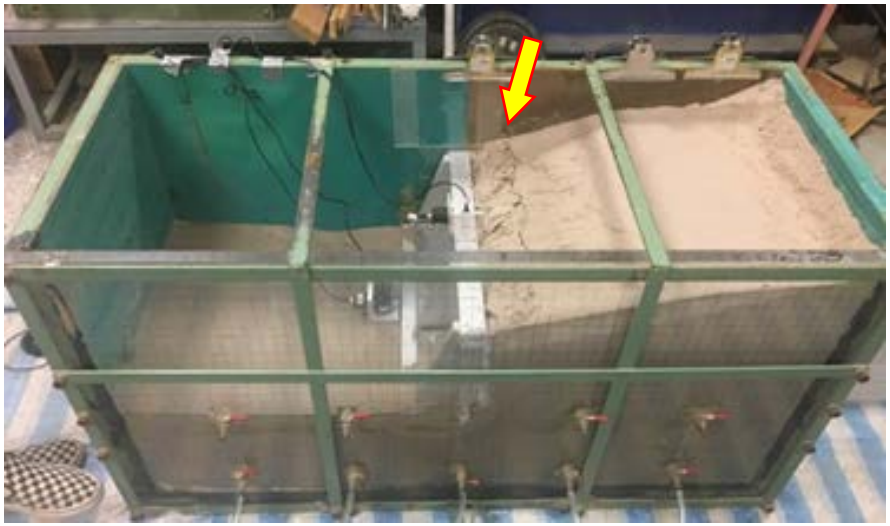
以澆花器模擬降雨，使基礎土壤近飽和，而背填土達濕潤



(因縮尺模型排水路徑短而排水快，試驗時並無法使坡面達到浸潤)

背填土主動破壞

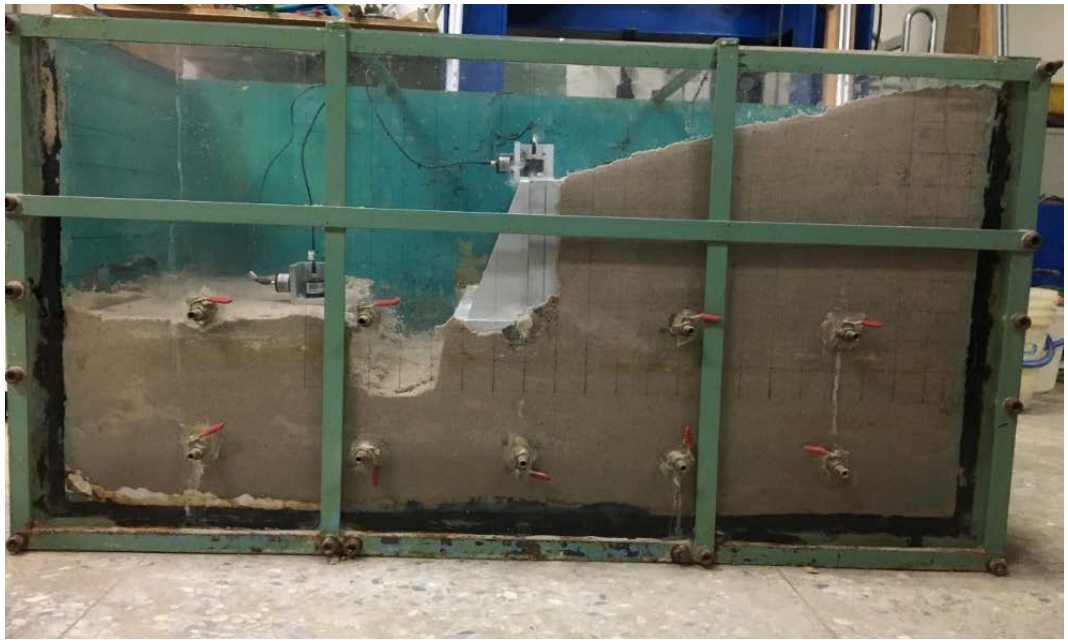
人為外推擋土牆，使背填土因主動破壞產生坡面開裂



縮尺模型試驗試驗情境 -2

牆趾開挖

牆趾前方土壤垂直下挖約10 cm



有背填土

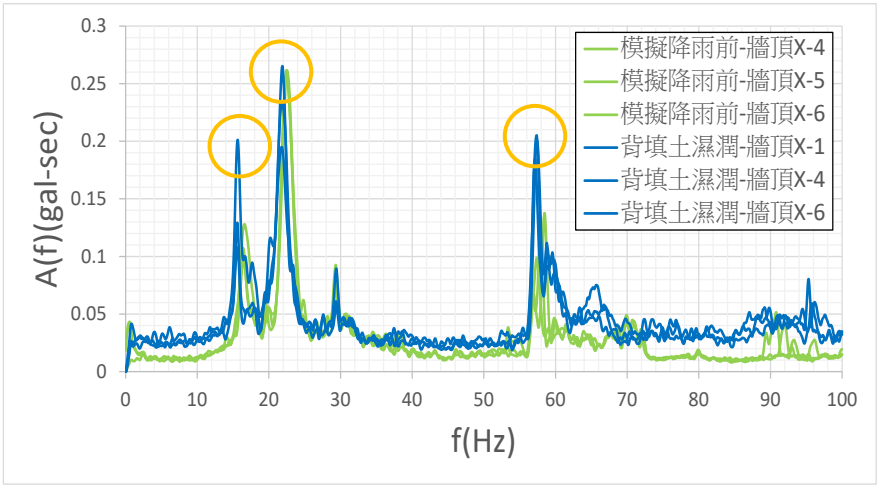


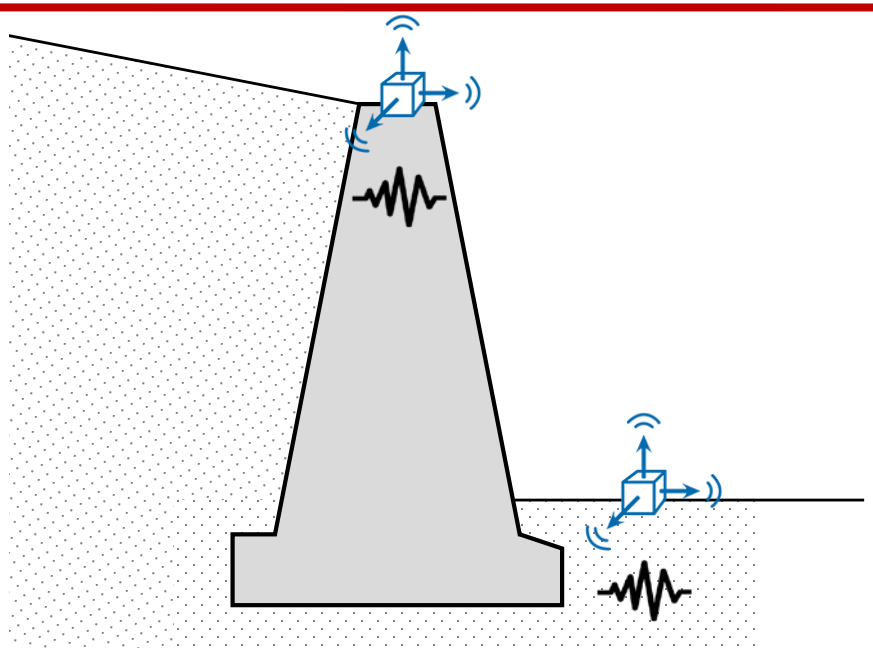
無背填土

→ 凸顯基礎土壤弱化之影響

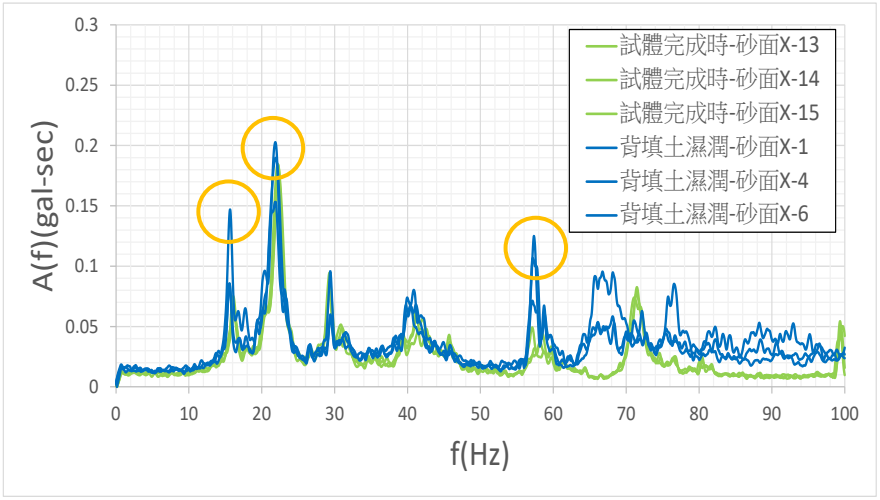
重力式擋土牆坡面降雨入滲情境試驗結果-1

牆頂傅氏譜

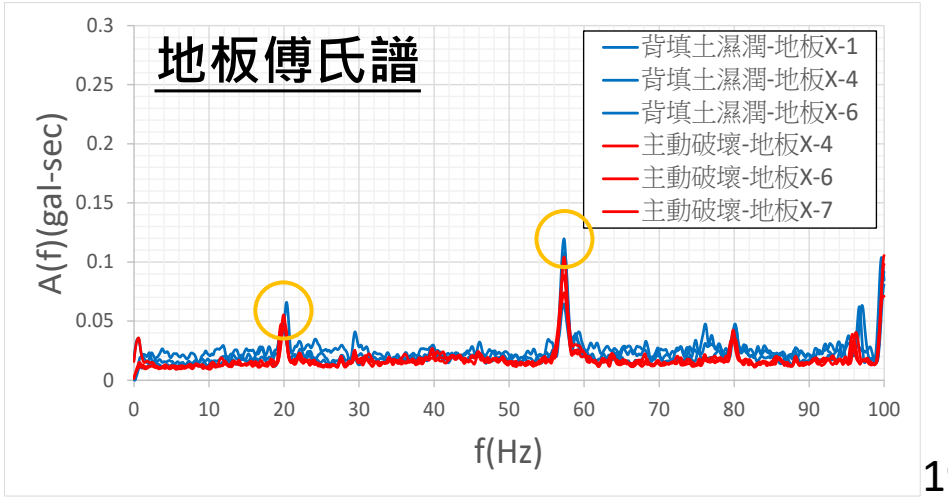




砂面傅氏譜

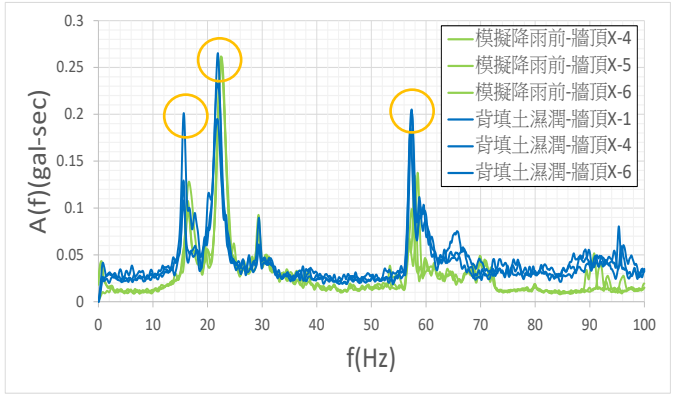


地板傅氏譜

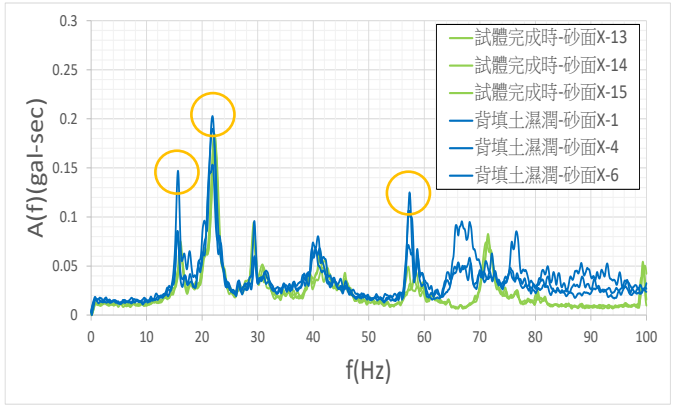


重力式擋土牆坡面降雨入滲情境試驗結果-2

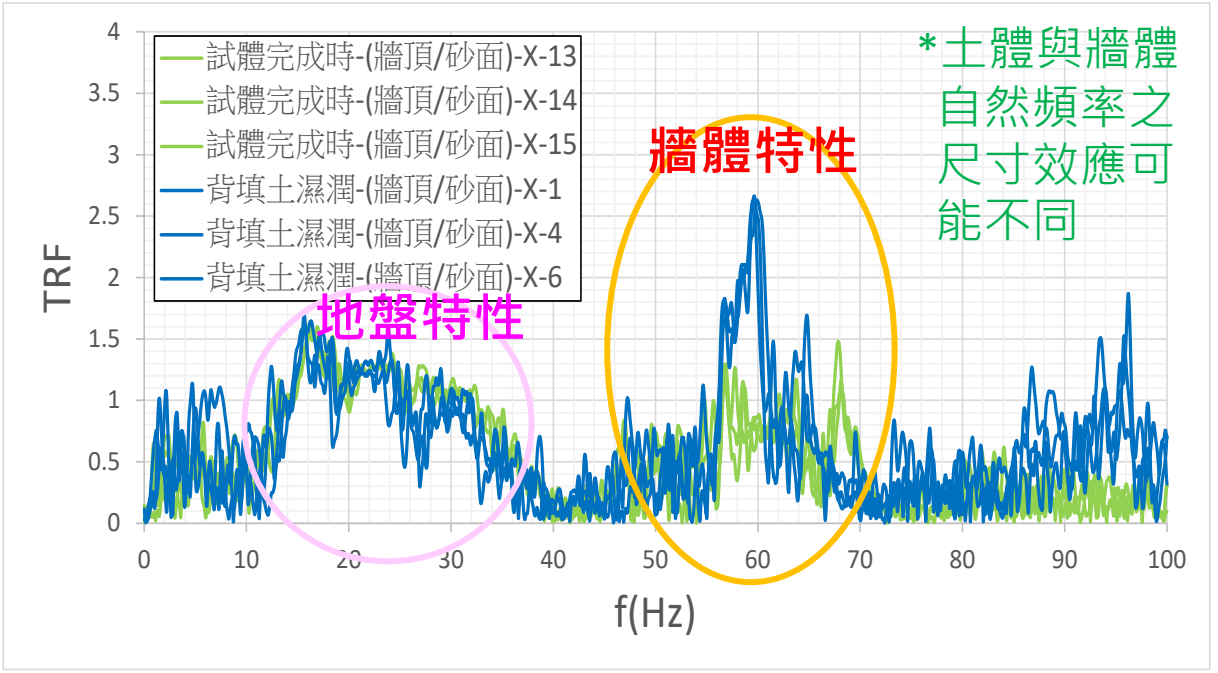
牆頂傅氏譜



砂面傅氏譜



(牆頂/砂面)TRF

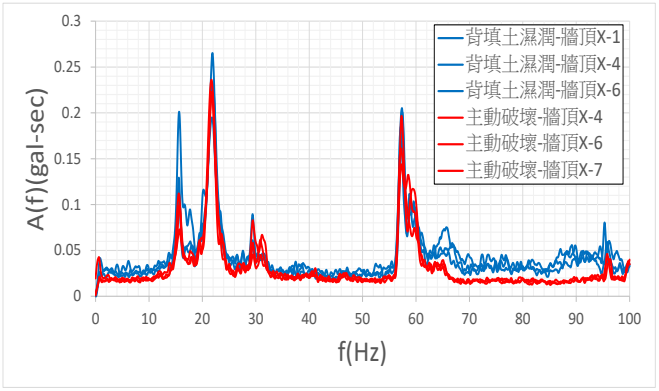


*坡面未達浸潤

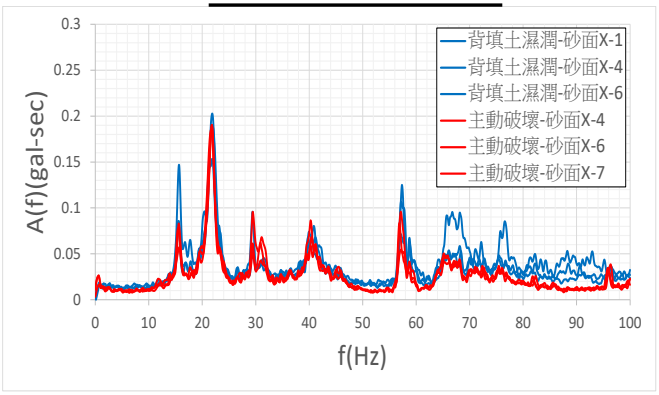
牆體自然頻率幾無變化，但對應之TRF值增加至約2倍 → Nakamura損傷指數(A^2/f_n)增至約4倍(0.029→0.12)，牆體穩定性已經降低

重力式擋土牆背填土主動破壞情境試驗結果

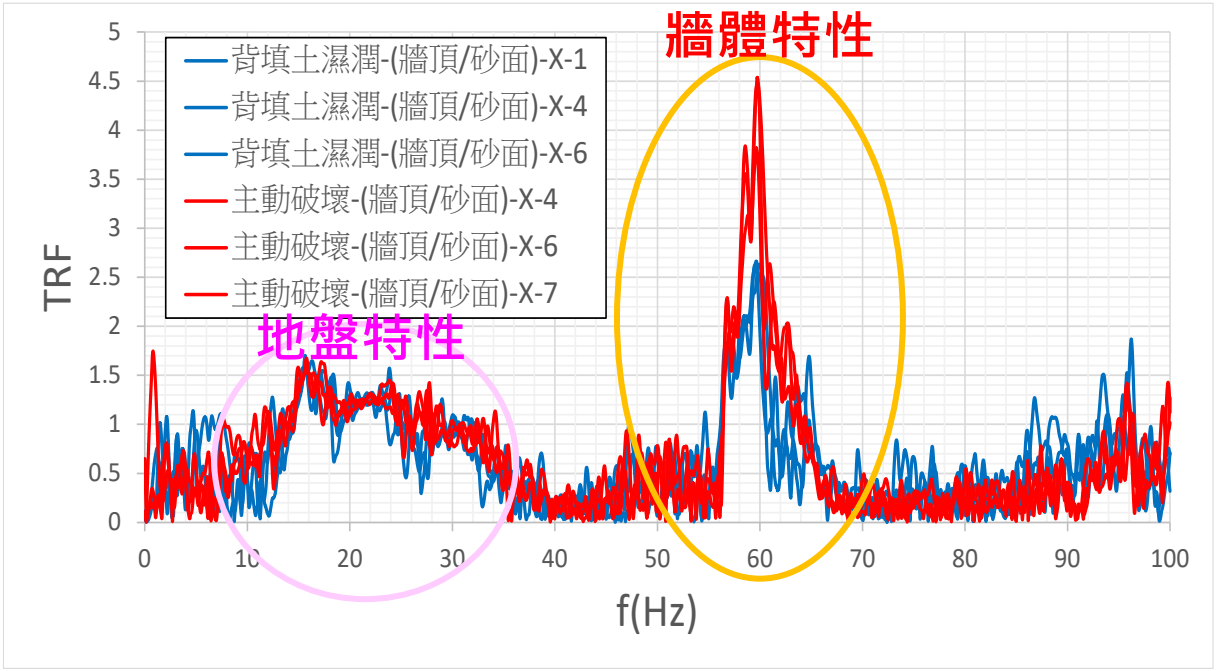
牆頂傅氏譜



砂面傅氏譜



(牆頂/砂面)TRF

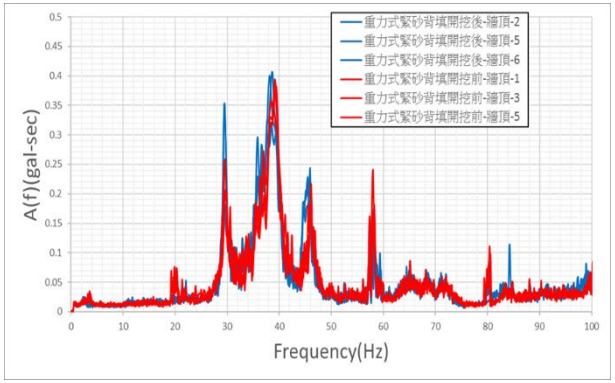


*試體完成時可能便已達主動破壞

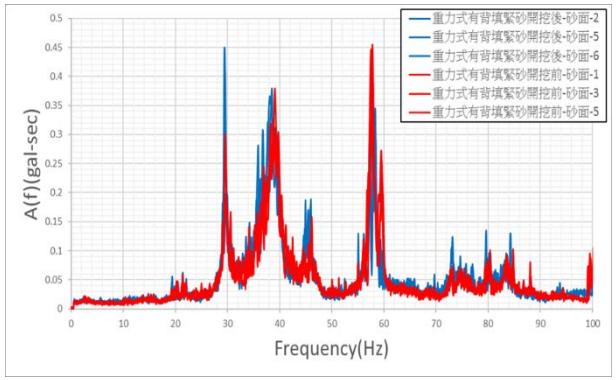
牆體自然頻率幾無變化，但對應之TRF值增加至約1.7倍 → Nakamura損傷指數(A^2/f_n)增至近3倍，牆體穩定性進一步降低

牆趾開挖影響(有背填)

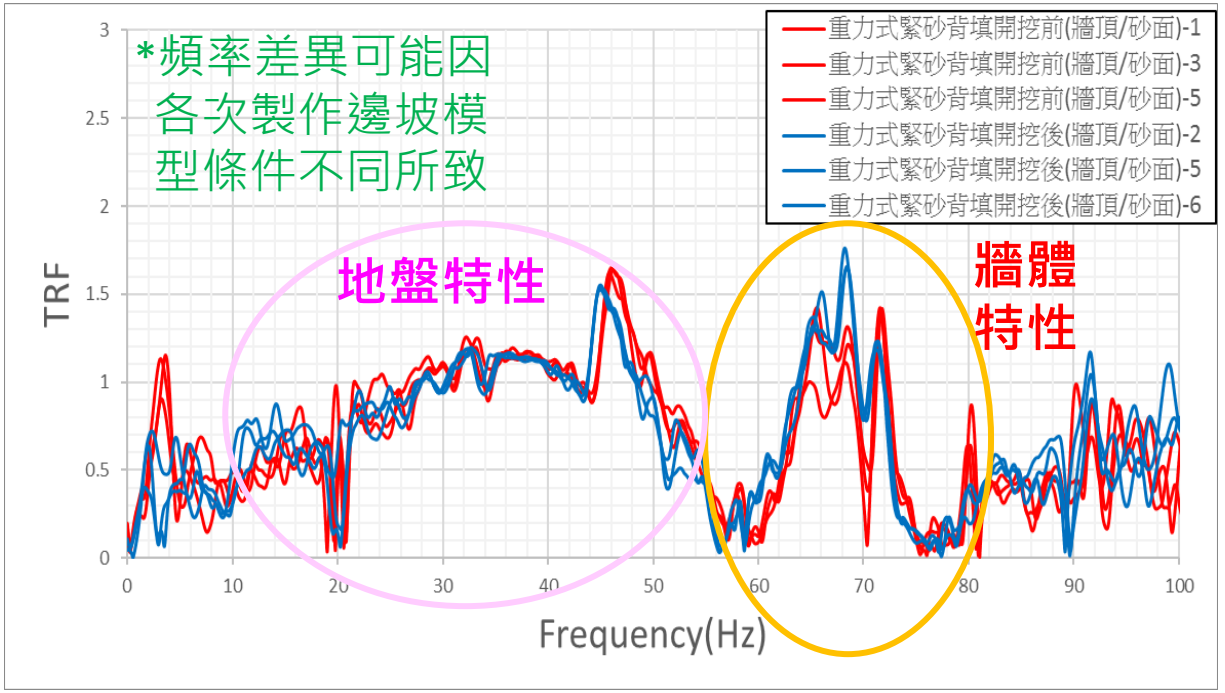
牆頂傅氏譜



砂面傅氏譜



(牆頂/砂面)TRF

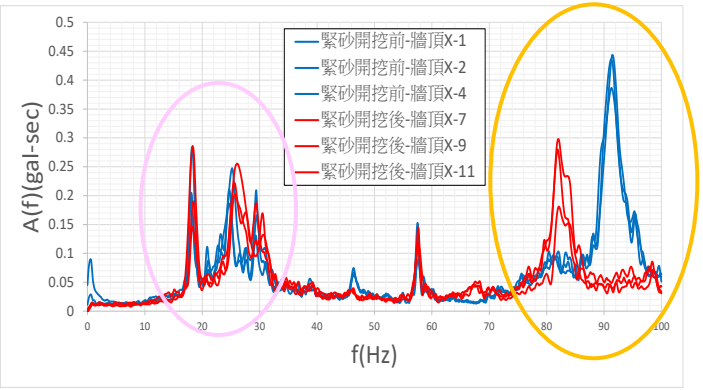


*背填土對牆體振動特性之影響較基礎土壤弱化明顯

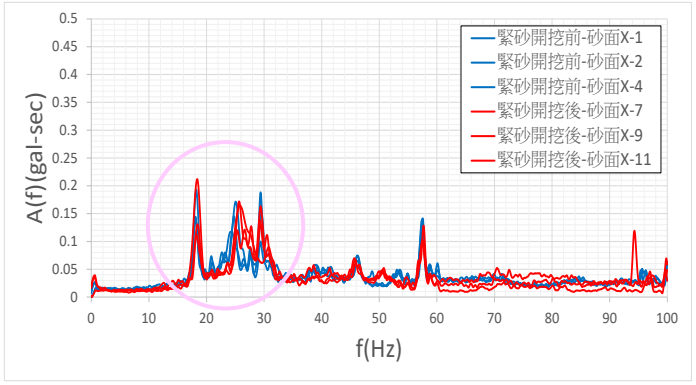
牆體自然頻率幾無變化，但對應之TRF值略增至1.3倍 → Nakamura損傷指數(A^2/f_n)增至1.7倍，牆體穩定性略為降低

重力式擋土牆牆趾開挖情境 (無背填) 試驗結果

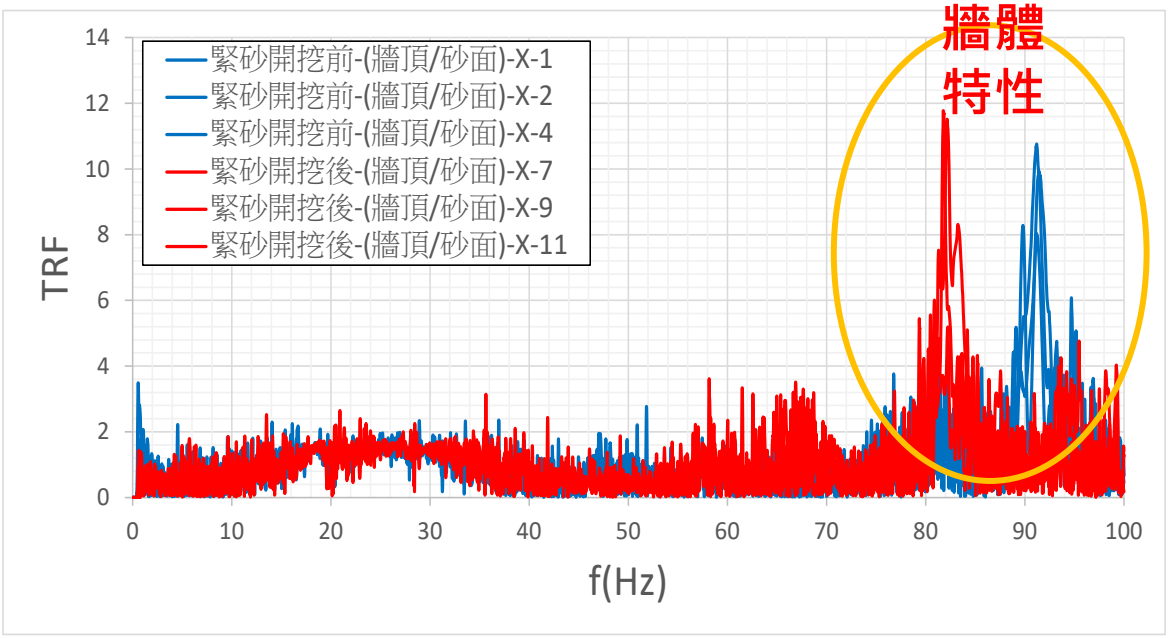
牆頂傅氏譜



砂面傅氏譜

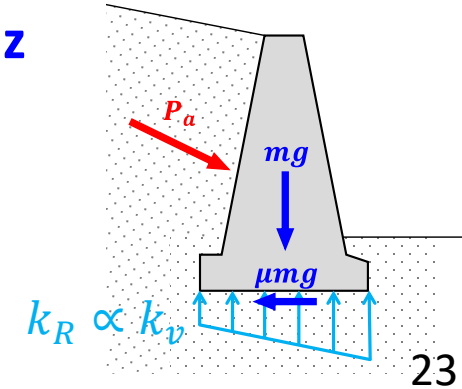


(牆頂/砂面)TRF



開挖前牆體自然頻率91 Hz
開挖後降至82 Hz

→基礎旋轉阻抗k_R
由25.4 kN-m/rad
降至20.6 kN-m/rad



現地試驗 - 台南市南化區 南179線4K路段

案例簡介

- 地層屬砂頁岩互層且為順向坡。
- 2017年6月因為梅雨導致路基流失。



分別對兩處牆體施測(牆頂&牆趾)

→探討牆體完整性之影響

試驗情境

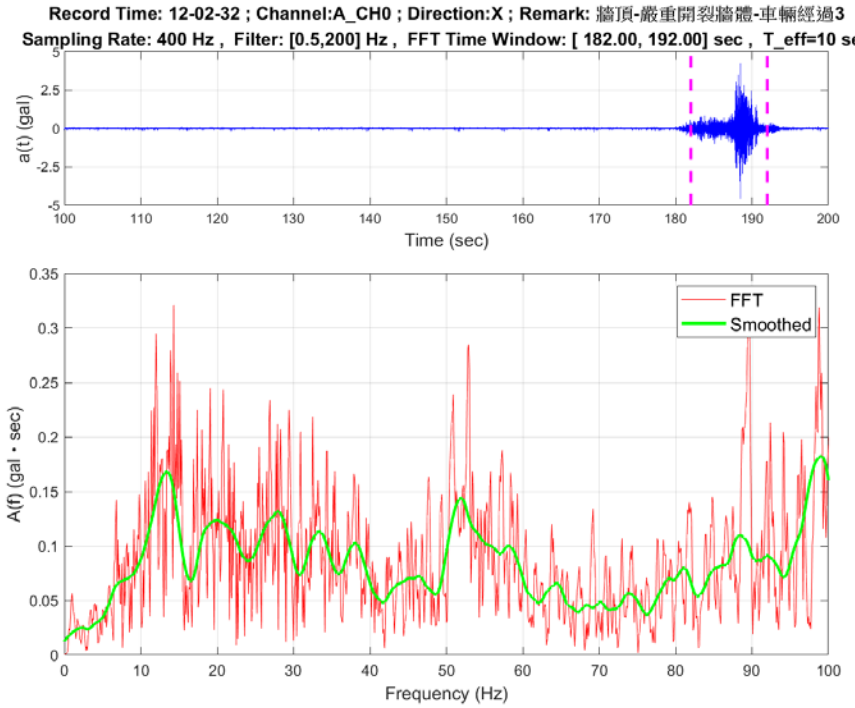




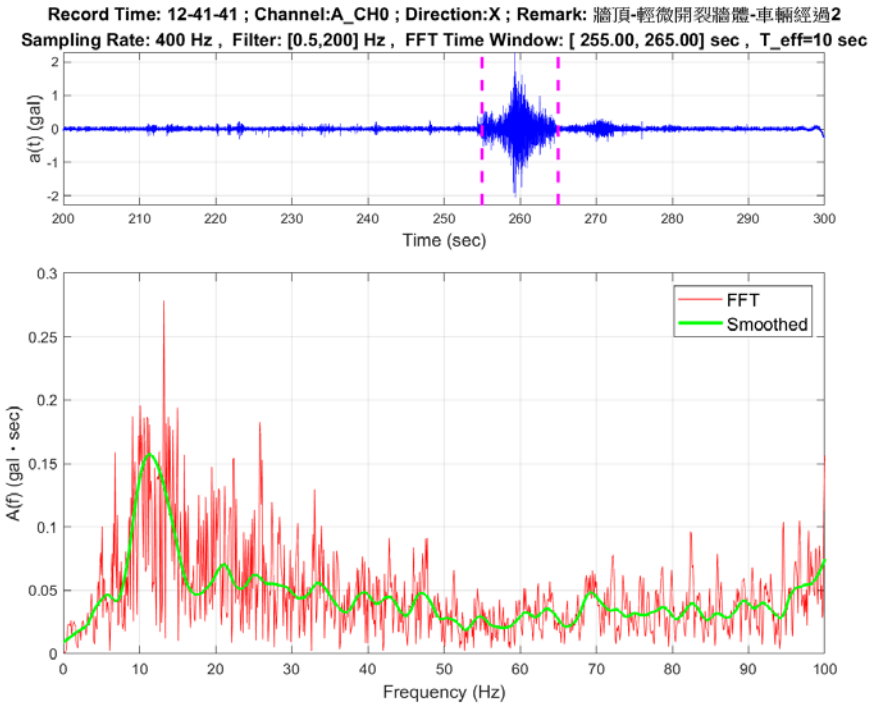
南化南179線4K路段試驗結果 -1

牆頂水平橫向振動傅氏譜

牆體嚴重開裂處



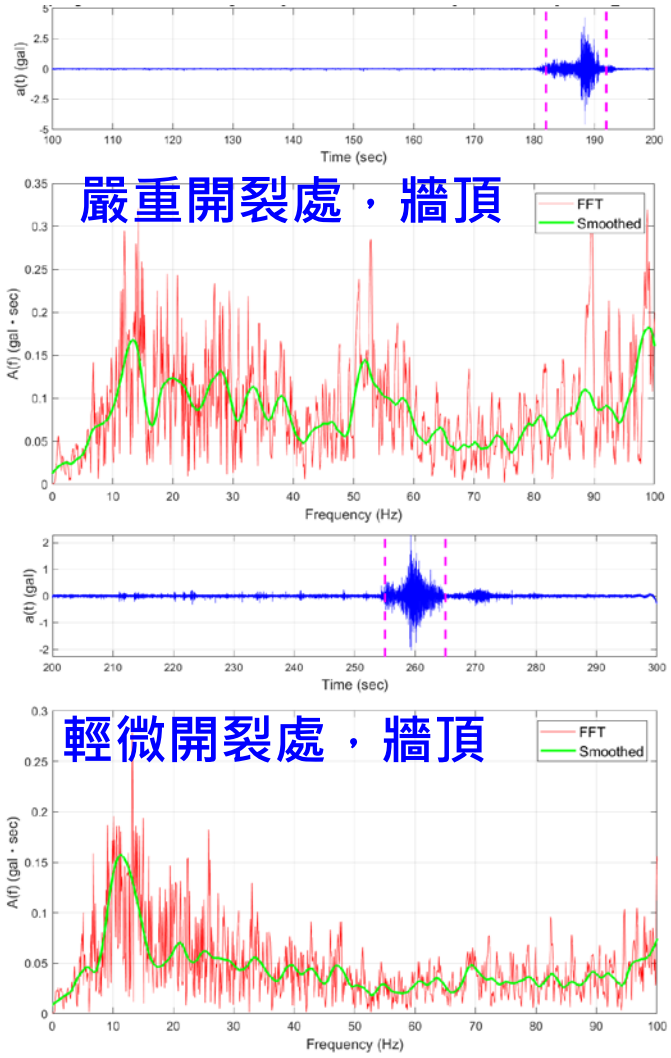
牆體輕微開裂處



現地環境微振能量太小而無法有效激發牆體反應，
故針對重車通過所引致振動進行分析

南化南179線4K路段試驗結果 -2

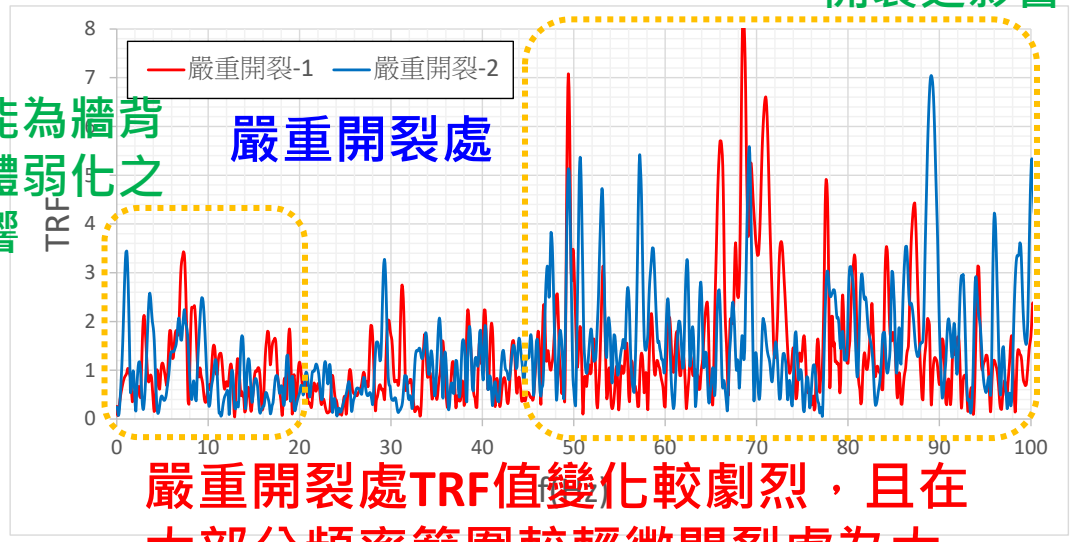
傅氏譜



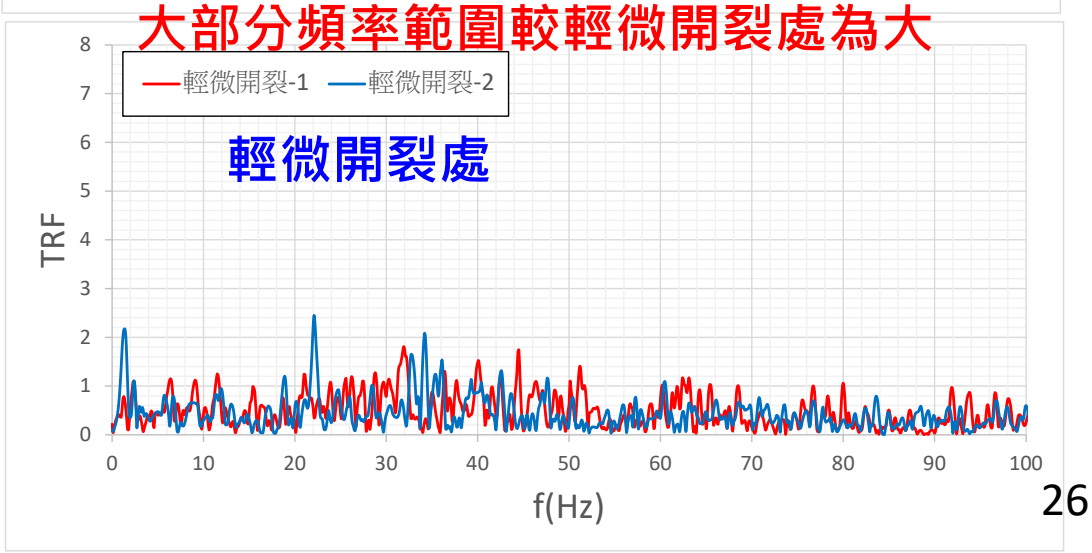
(牆頂/牆趾)TRF

可能為牆體開裂之影響

可能為牆背坡體弱化之影響



嚴重開裂處TRF值變化較劇烈，且在大部分頻率範圍較輕微開裂處為大



現地試驗－台南市龍崎區 市道182線25.9K路段

案例簡介

- 主要屬泥岩地層。
- 2018年8月因豪雨使擋土牆崩塌。



對兩段牆體同步施測(第1次: 牆頂；第2次: 牆頂&牆趾)

→探討新舊牆體穩定性差異

→探討今年南台灣淺層地震影響

試驗情境



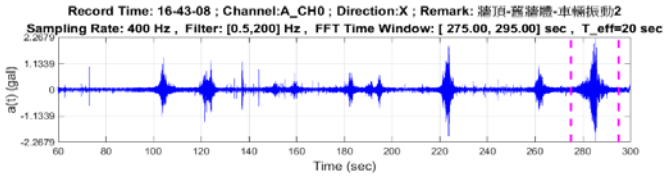


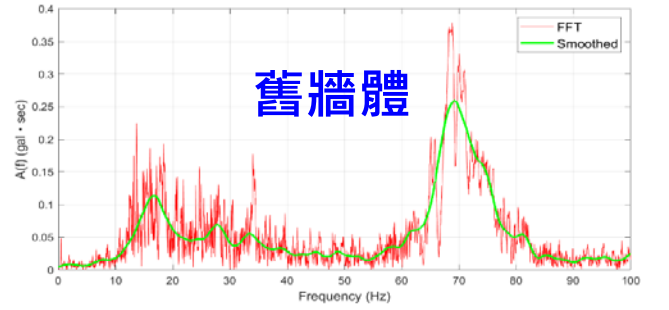
高約5 m, 推測屬於懸臂式擋土牆

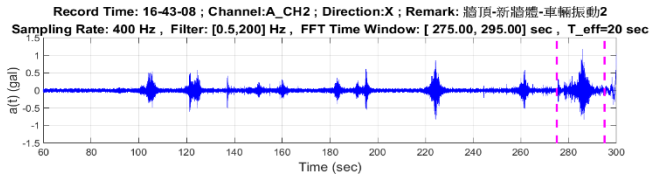
龍崎市道182線25.9K路段試驗結果-1

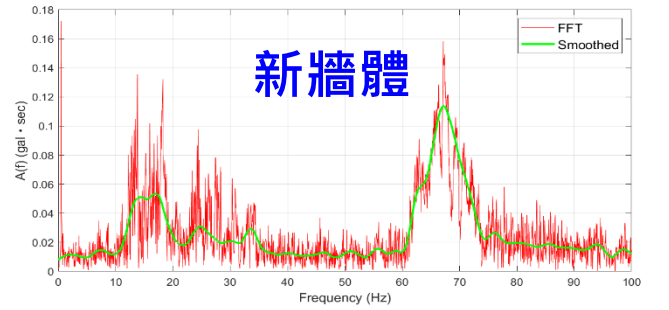
牆頂水平橫向振動傅氏譜

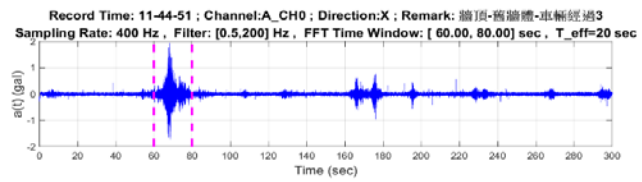
4/14
(汛期前)

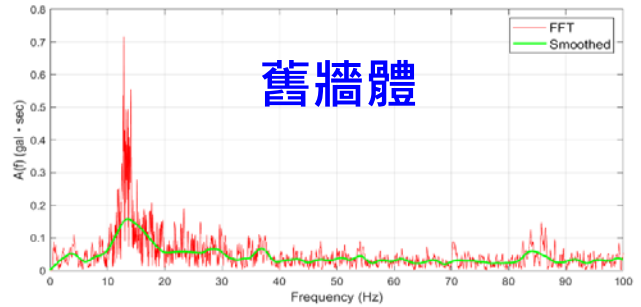


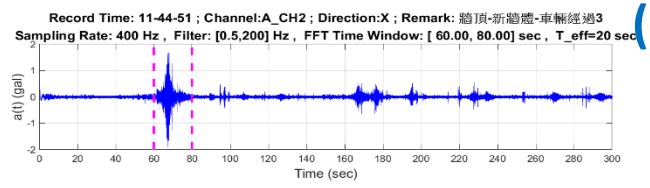


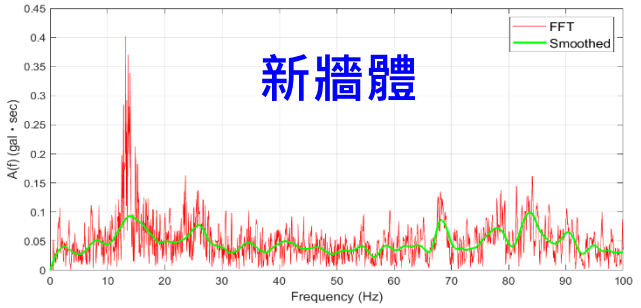












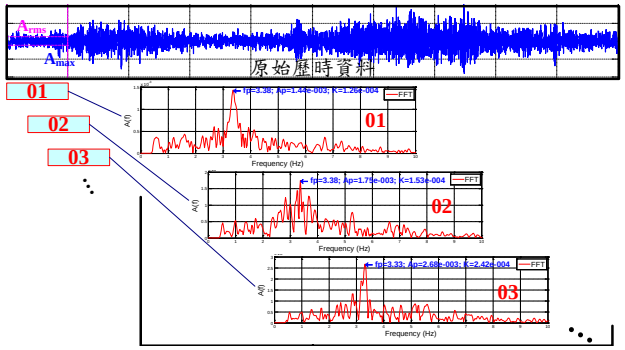
10/22
(10/17 M_L 5.2
地震後)

因不同車輛特性各有不同，依時變異性大

龍崎市道182線25.9K路段試驗結果-2

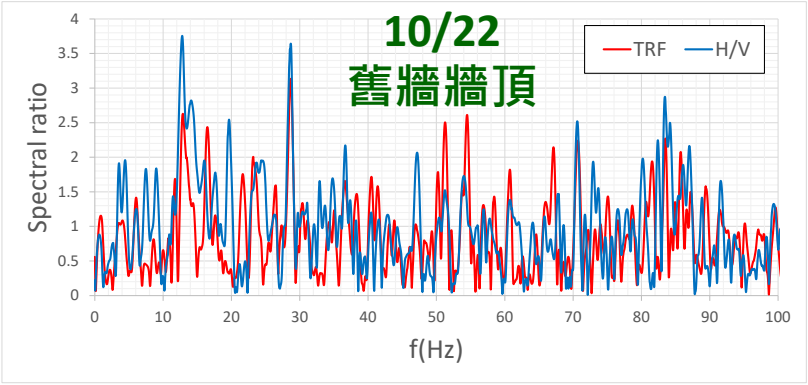
(牆頂/牆趾)平均TRF

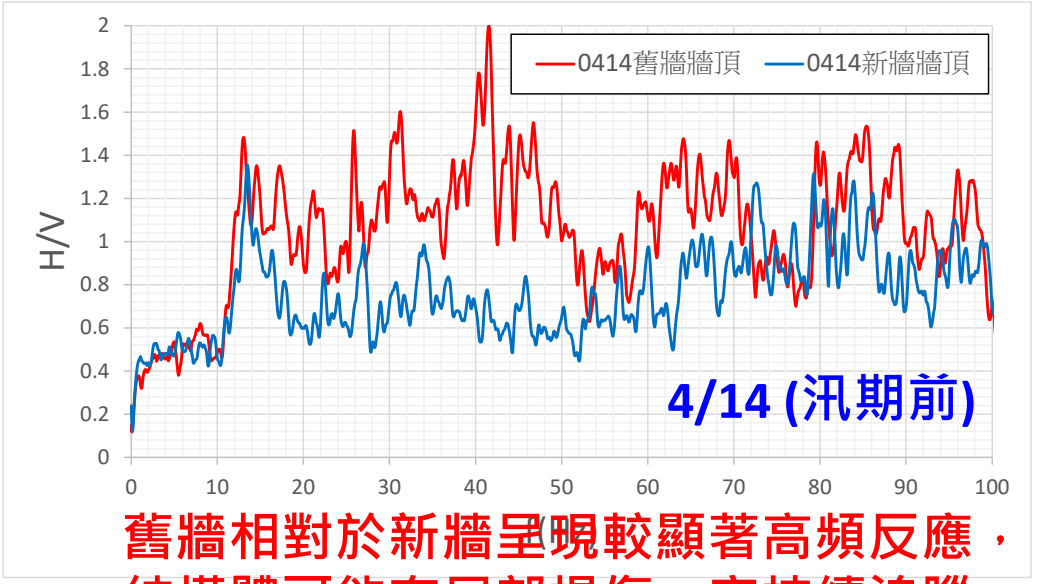
為消除頻譜分析依時變異性，將振動歷時分成許多長度固定且前後部分重疊之時段，分別求取其對應之頻譜後再平均



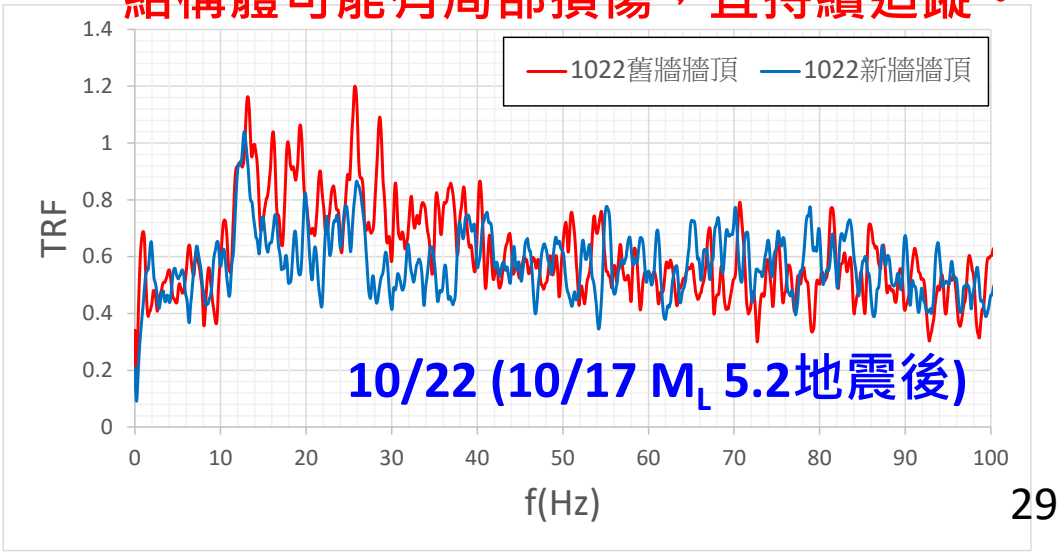
牆頂H/V頻譜比 →替代TRF

4/14因設備限制，未於牆趾設置測點





舊牆相對於新牆呈現較顯著高頻反應，結構體可能有局部損傷，宜持續追蹤。



結論

- 縮尺模型試驗中，坡面降雨入滲、背填土主動破壞與牆趾開挖僅造成牆體顯著頻率微幅變化或幾無變化，原因可能是縮尺模型僅達到背填土濕潤而無法近飽和、主動破壞可能早已發生以及背填土對振動特性影響遠大於基礎弱化。
- 針對前述情況，若綜合自然頻率與放大係數之變化，計算Nakamura損傷指數K值，則可展現出擋土牆穩定性降低。
- 現地案例中，因地層變化、結構型式較複雜，頻譜分析不易清楚判別牆體自然頻率，但由TRF之上升仍有助於展現擋土牆開裂或可能之性能弱化。

未來方向

- 縮尺模型試驗模擬降雨時，因背填土排水快而無法使坡面達浸潤，未來可採適當之替代流體以減緩排水速度，藉以對背填土雨水入滲行為做更合理之模擬。
- 擋土牆背填土主動極限狀態在牆體位移很小時便會發生，，未來可模擬因弱面或其他因素產生較主動破壞土楔更大之潛在滑動體，以探討牆背坡體弱化之影響。
- 現地案例自然頻率較難清楚判釋，使性能指標不易應用，雖本研究利用平均頻譜分析降低振源特性或環境影響，但若為能更有效釐清牆~土系統特性，可考慮引入其他進階系統識別方法。

感謝聆聽，敬請指教