

多頻道振動訊號於 鋼筋混凝土構材之 受損調查應用

林俊宏

國立中山大學海洋環境及工程學系
海洋工程地物與監測研究室

chlin.geo@mail.nsysu.edu.tw



簡報內容

- 前言
- 彈性波波傳特性介紹
- 多頻道震測技術
- 火害後握裹力喪失定性調查技術
- 火害現場結構材料探傷檢測系統與雲端資料庫
- 結語



前言



火災層出不窮：泛RC結構

地上 建築、房屋、交通、建設

地中 邊坡、地錨、基礎擋土結構



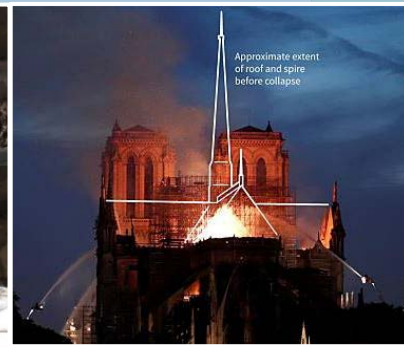
惡火無情



錢櫃惡火



桃園工廠



巴黎聖母院



國道邊坡

地下 一次襯砌(噴凝土-鋼網)、二次襯砌(混凝土)



隧道致災



白朗峰



雪山

台灣災害人禍 100~108年統計

人數	亡	傷
火災	958	2257
颱風	77	2790
地震	141	933

(wiki)

火災之災損 >> 颱風與地震！

非破壞檢測於火害結構鑑定輔助

階段應用

火場初勘(目視及剪壓波速比)有結構安全鑑定之必要

RC火害受損深度調查

受損深度超過保護層

鋼筋握裹力喪失段調查

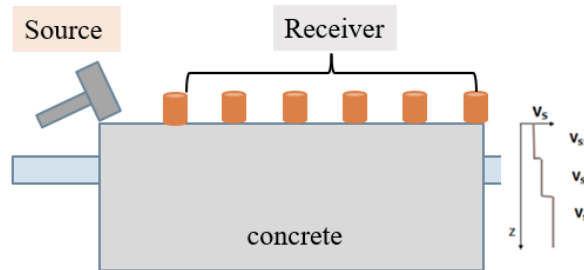
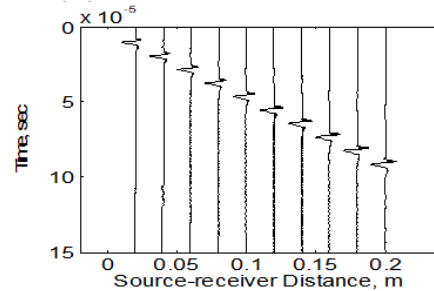
鋼筋混凝土火害受損厚度調查

應用在RC表面傳播之雷利波

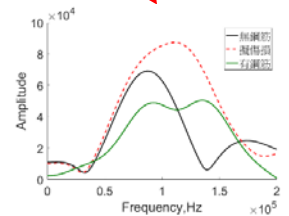
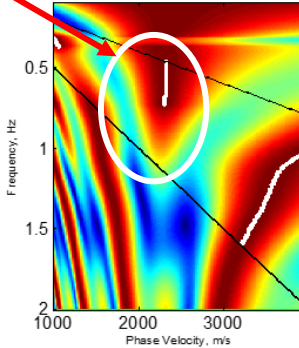
鋼筋握裹力喪失段調查

應用在鋼筋中傳播之導波

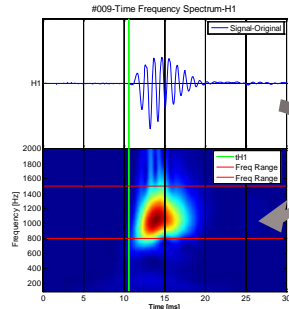
多頻道振動訊號收錄



多頻道頻散曲線分析 (波場轉換法)



剪力波速剖面分析

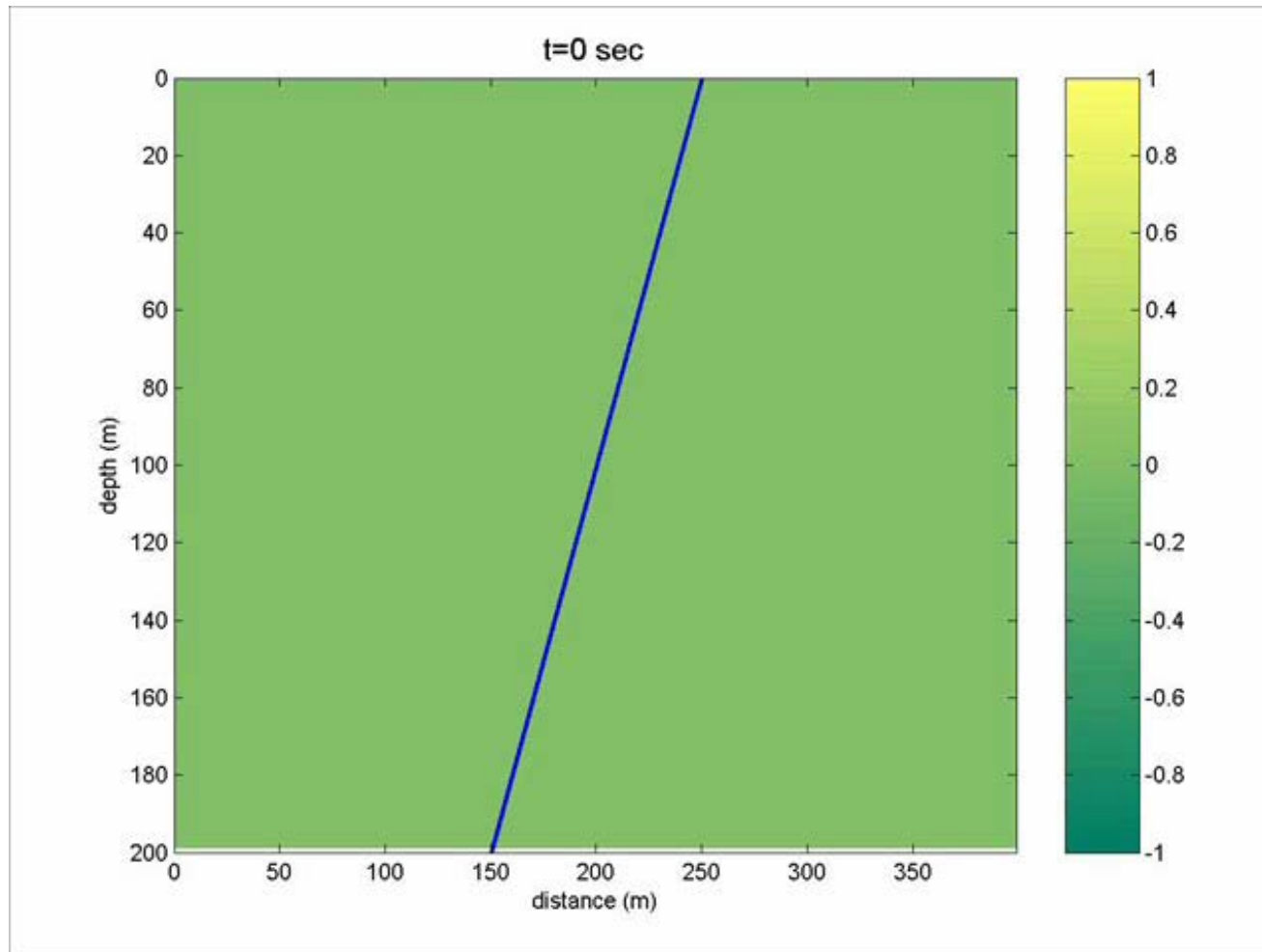




彈性波波傳特性介紹

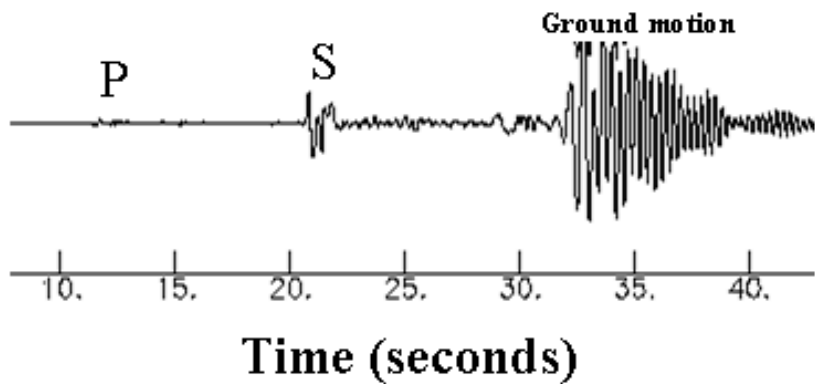


彈性波傳遞

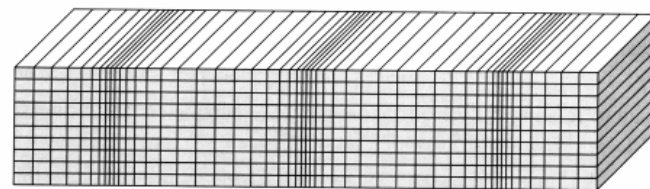


震波的分類

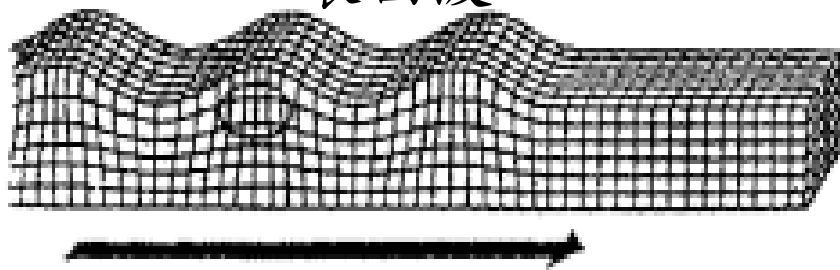
8



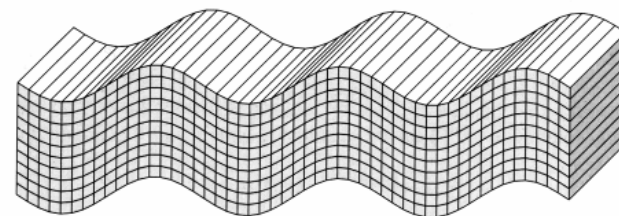
P波



表面波



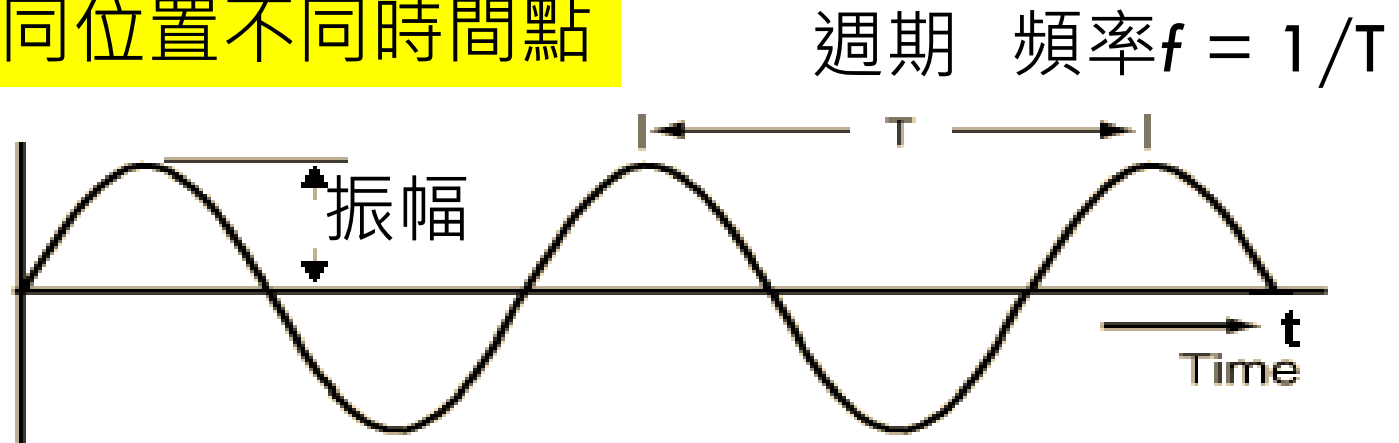
S波



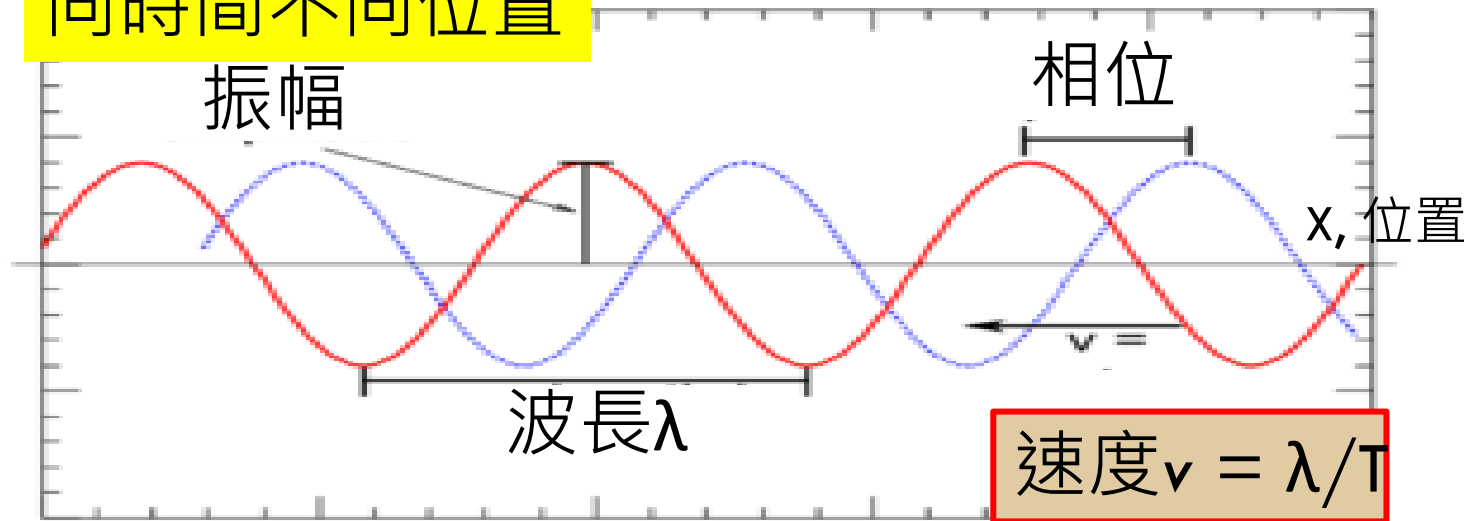
波的特徵

- 週期/頻率
- 振幅
- 波長
- 相位
- 速度

同位置不同時間點

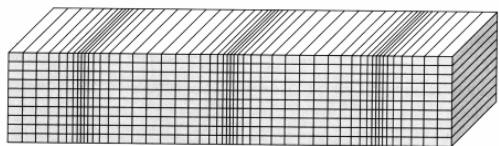


同時間不同位置

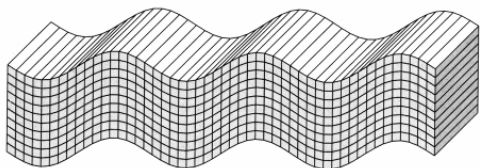


體波的傳遞

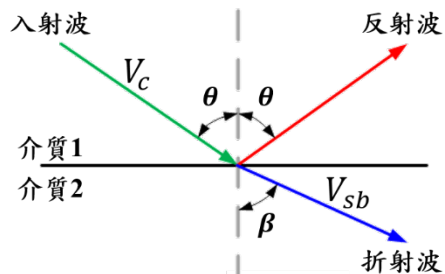
P波



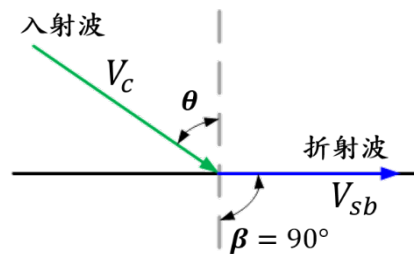
S波



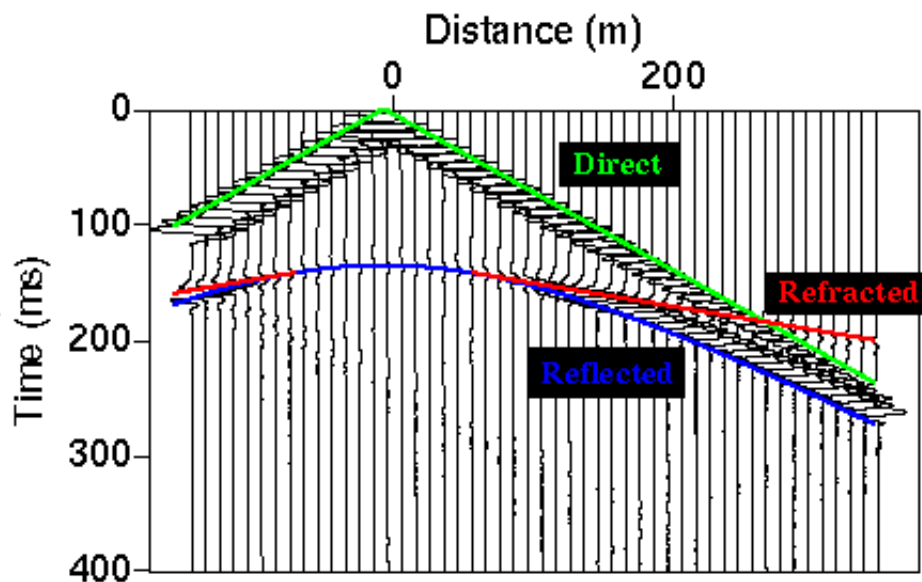
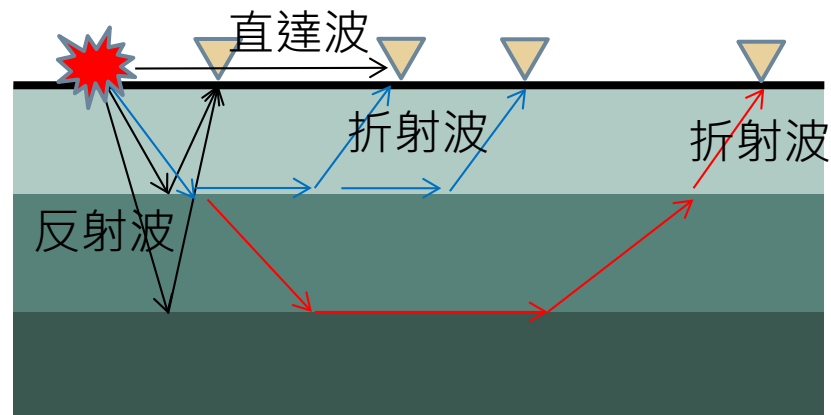
Snell's Law



波的折射/反射



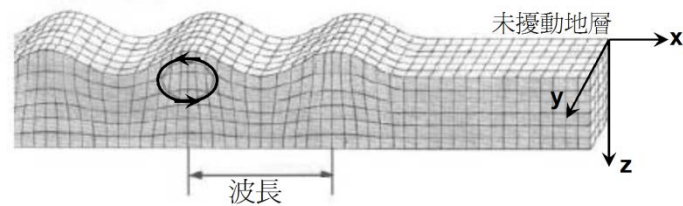
波的全反射



表面波的傳遞 - 半無限域空間

11

雷利波



勒爾波

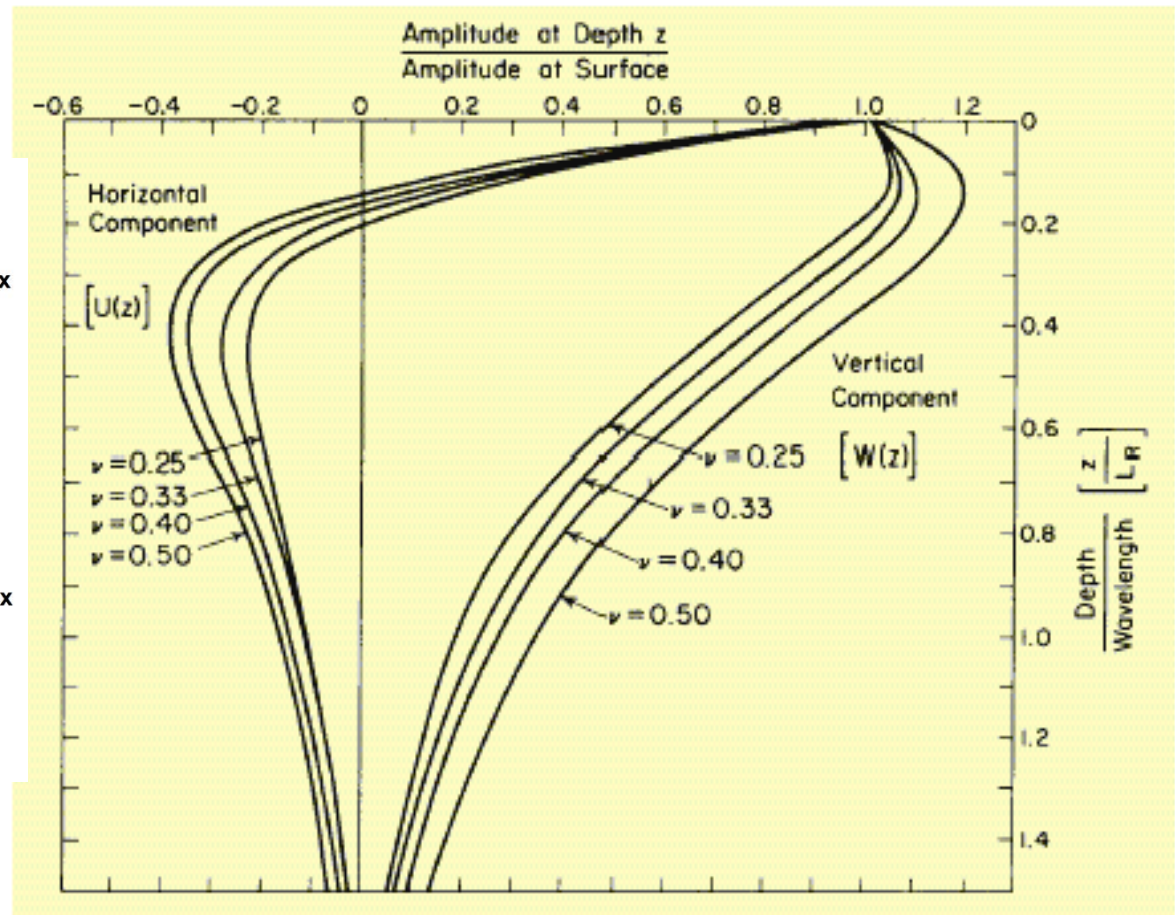
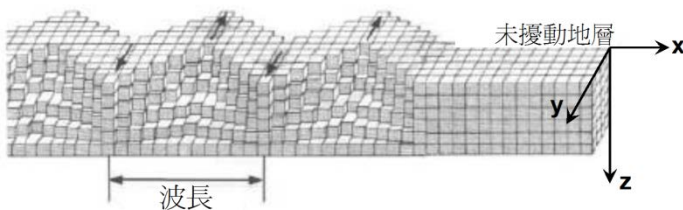
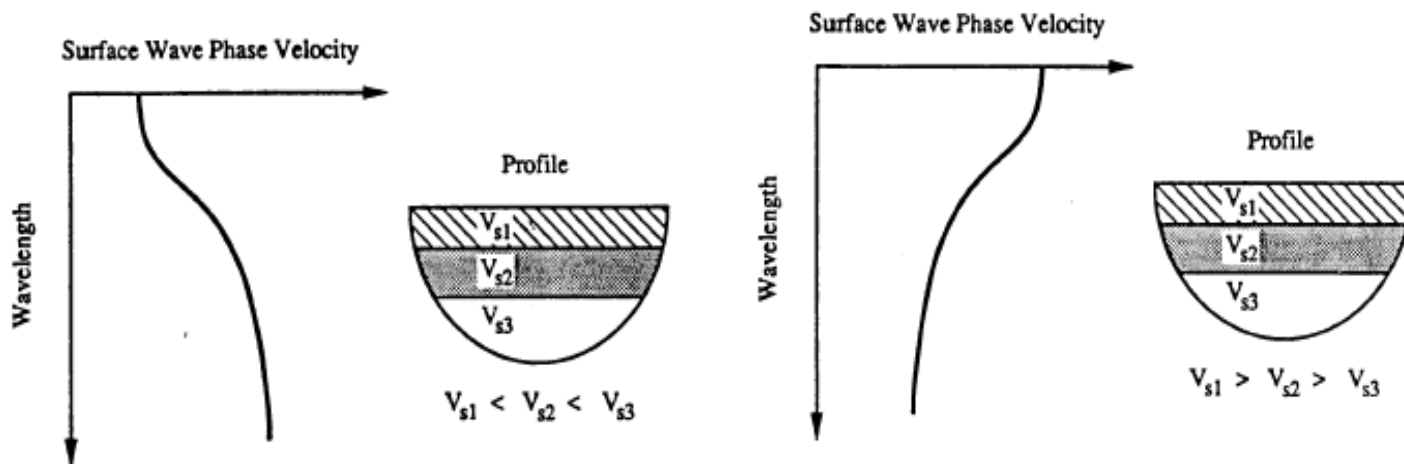
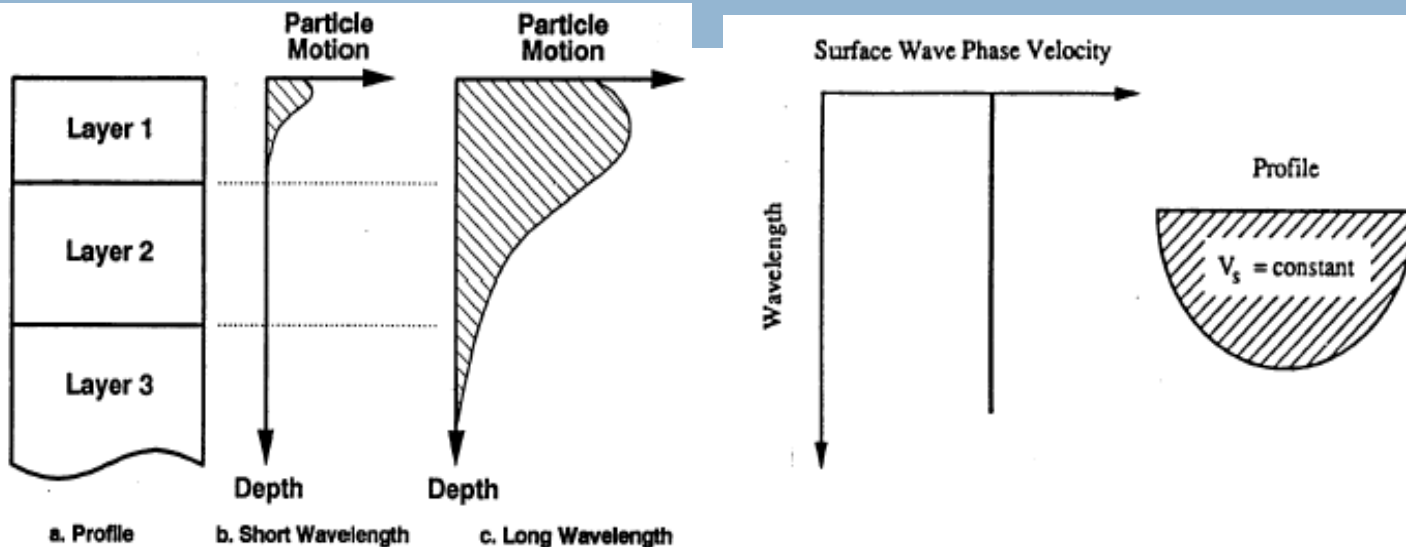


Figure Amplitude ratio vs. dimensionless depth for Rayleigh wave in a homogenous halfspace (from Richart et Al. 1970)

表面波的頻散特性

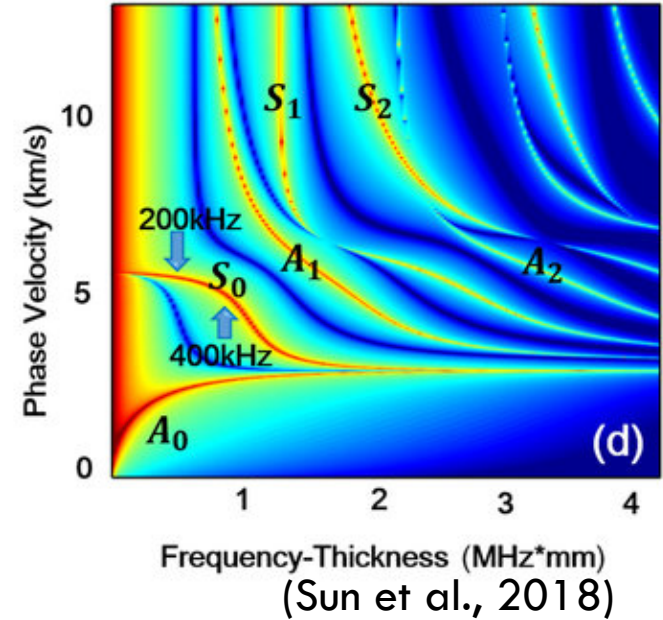
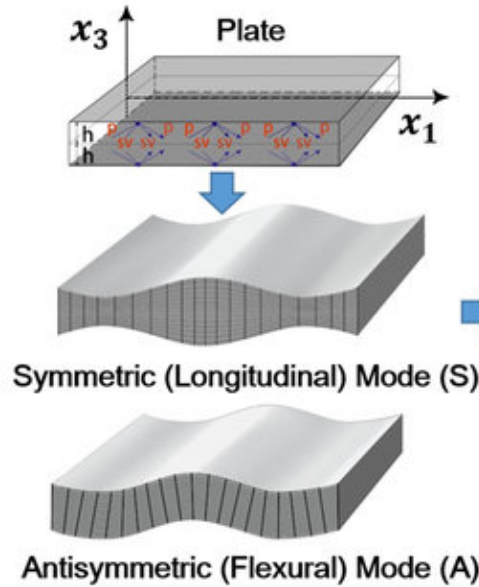
12



導波 - 有限空間

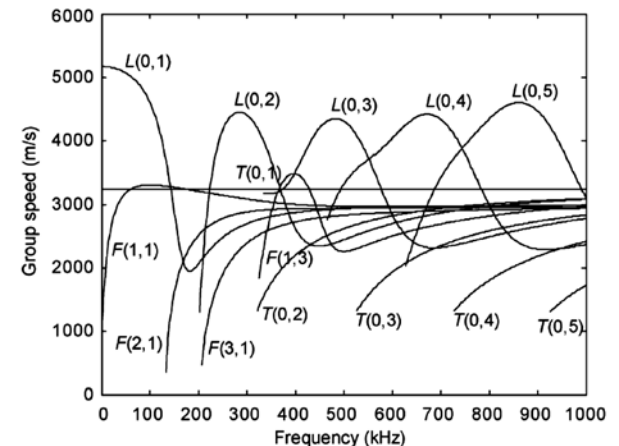
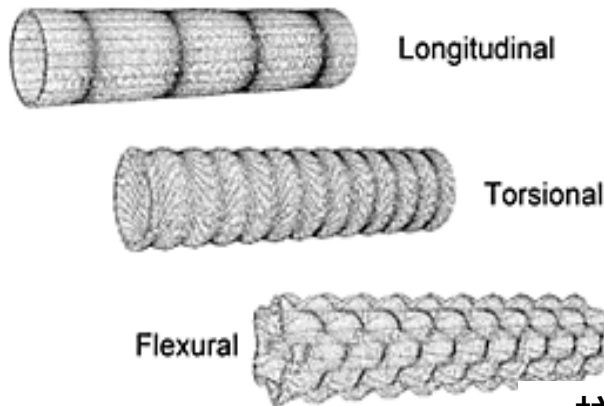
板波

樓地板
橋面板



柱波

鋼筋
柱
樑



柱波之多模態頻散曲線(Li et al., 2012)



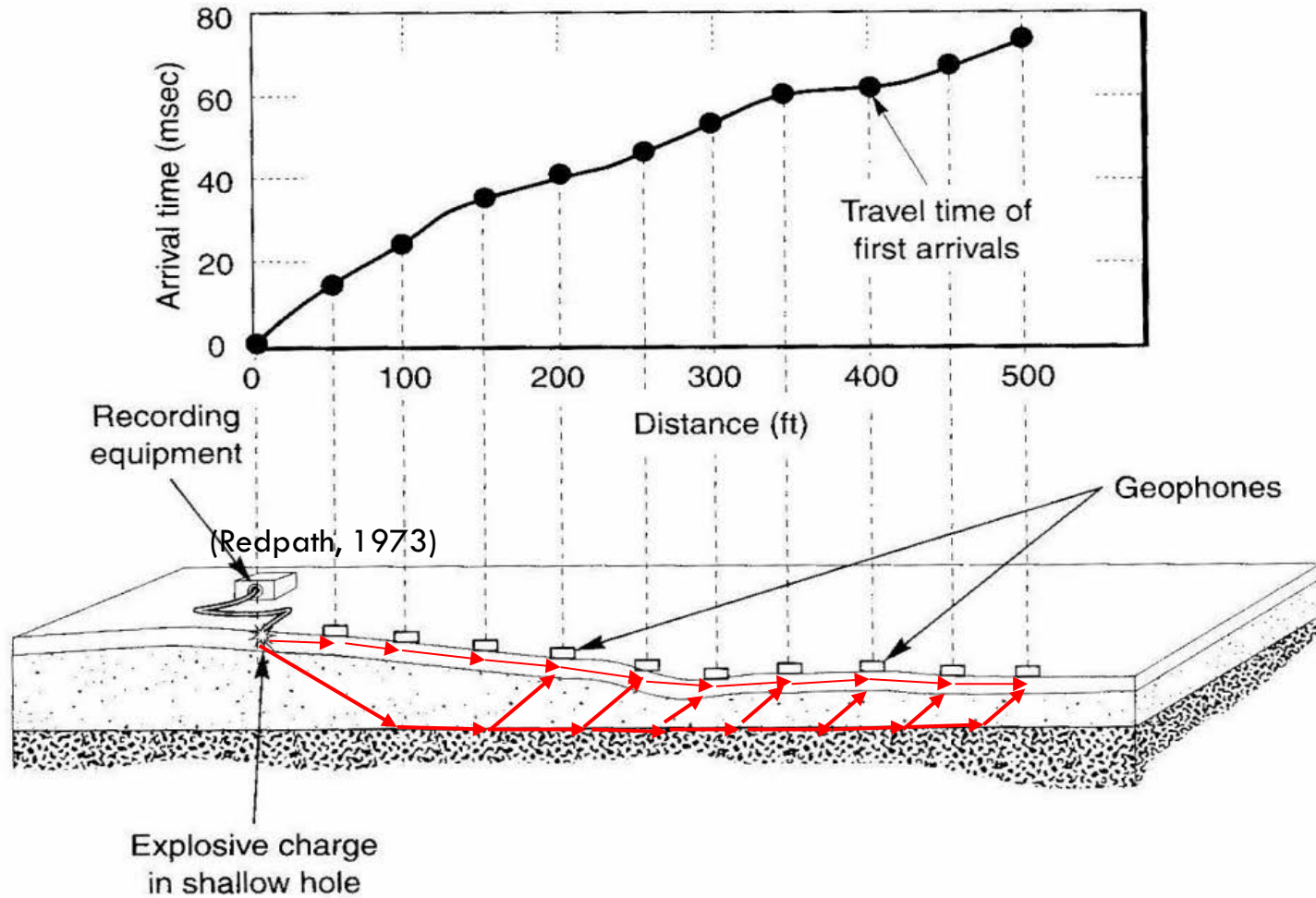
多頻道震測技術

層析成像造影技術
表面波震測造影技術



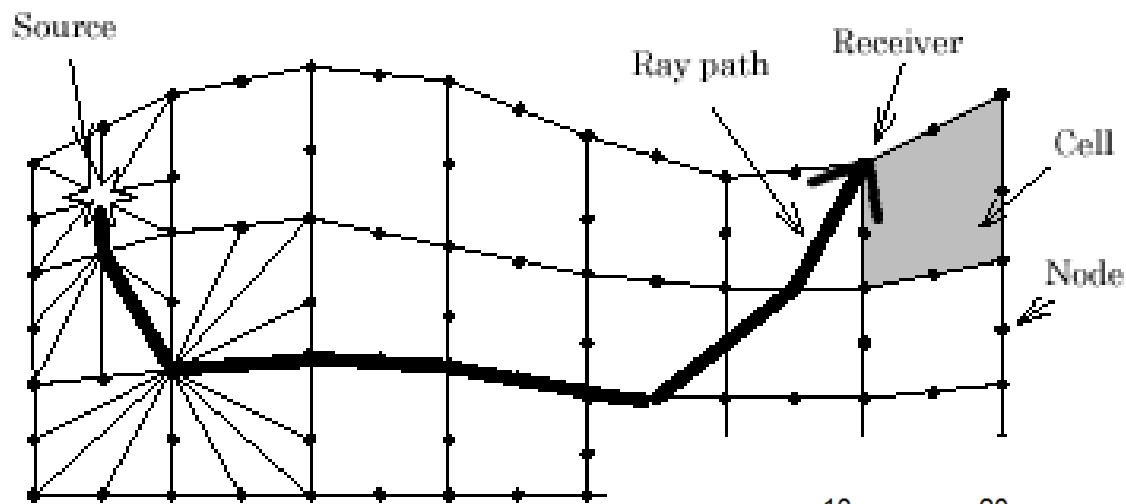
層析成像造影技術

15



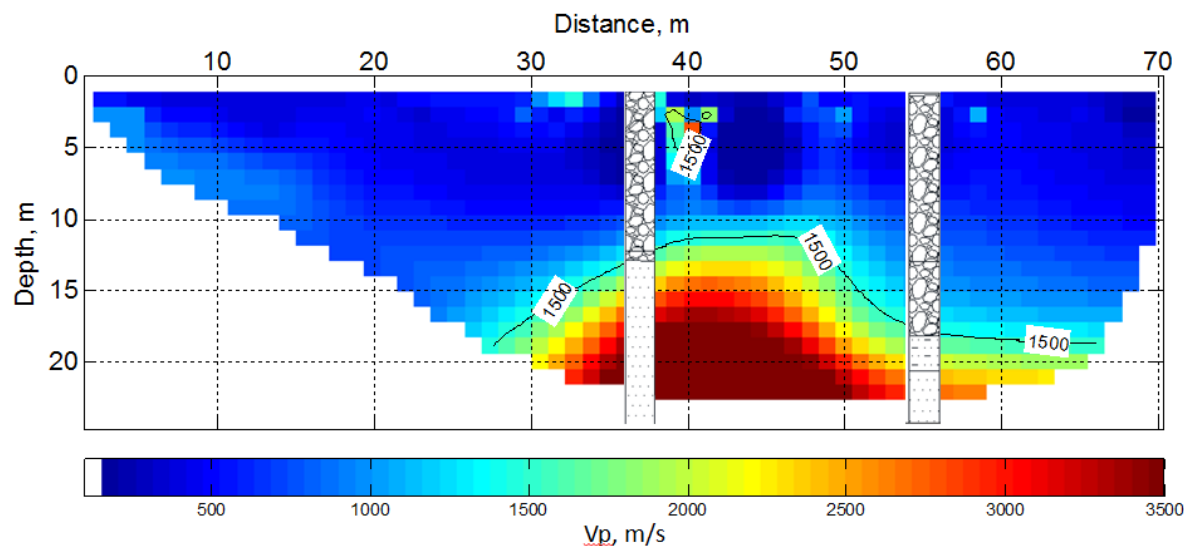
層析成像造影技術

16



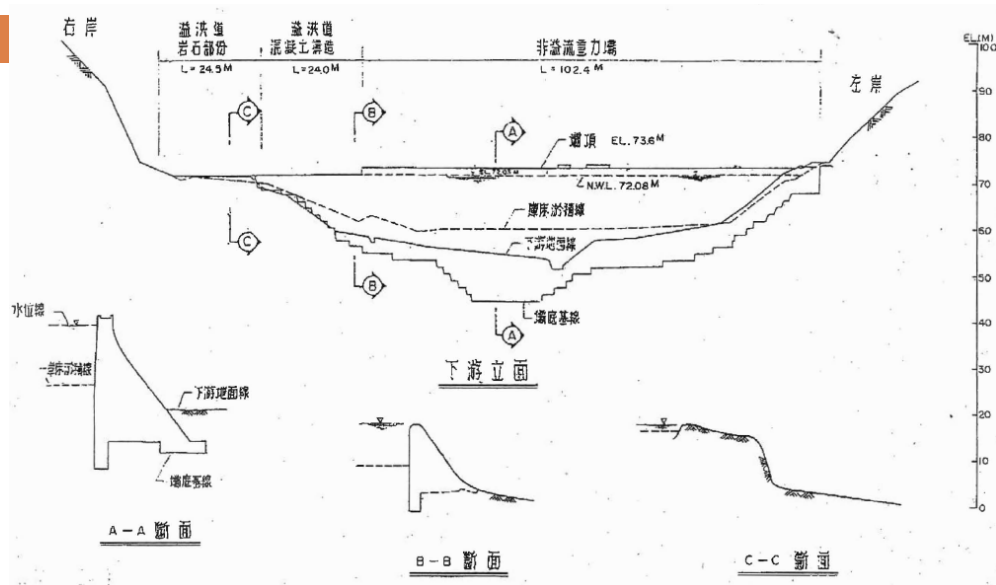
Tomographic Analysis 層析成像分析

壓縮波速



西勢水庫壩體強度調查

17

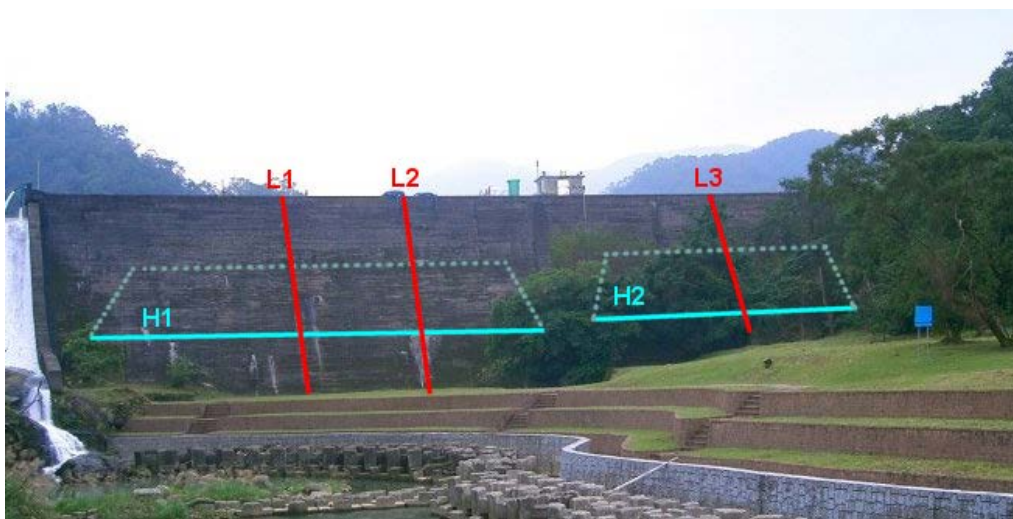


西勢水庫壩體

- 壩頂弧半徑：12.35公尺
- 壩高：26公尺
- 混凝土拱形重力壩
- 民國15年完工

壩體安全檢查問題

- 72年鑽心抗壓強度146-205 kg/cm²
- 97年，施密特錘檢測 僅38%達210 kg/cm²，其餘約僅達其0.85
- 前述僅表面狀況，內部強度不知



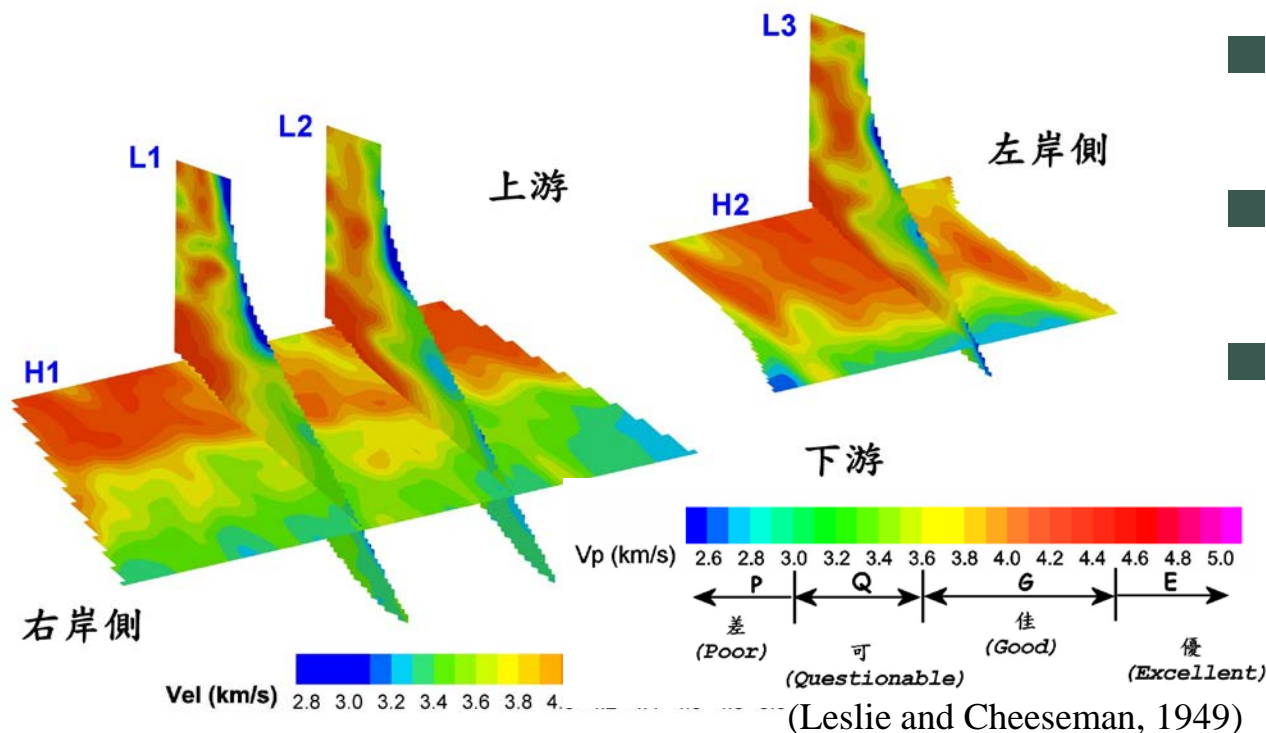
西勢水庫壩體強度調查

18



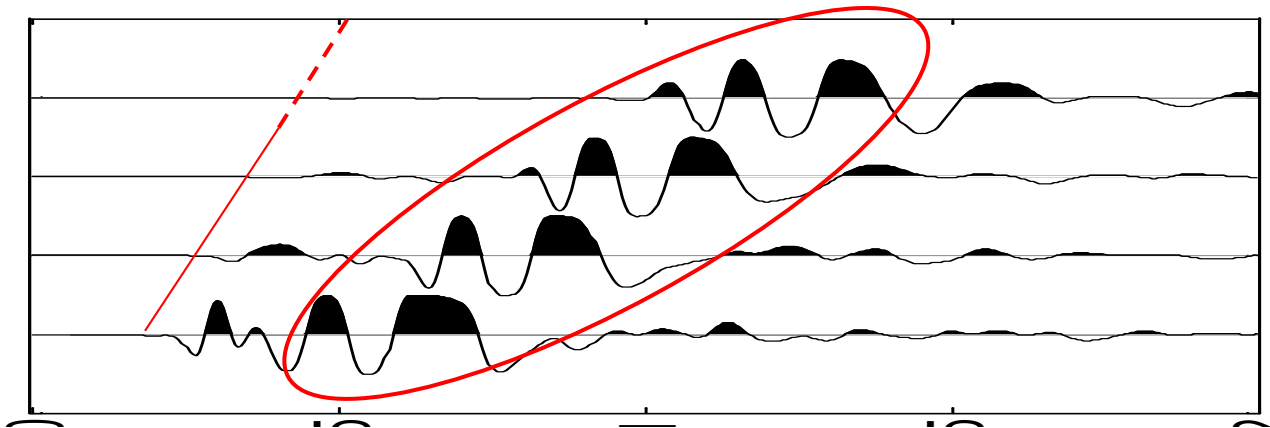
探測成果

- 下游壩面部分區域輕微風化，品質分類屬差，但僅限表面
- 內部波速尚可且連續性佳
- 整體混凝土品質尚可
- 但取水工附近壩體下游側有明顯低速帶在發展，應列為後續追蹤區域



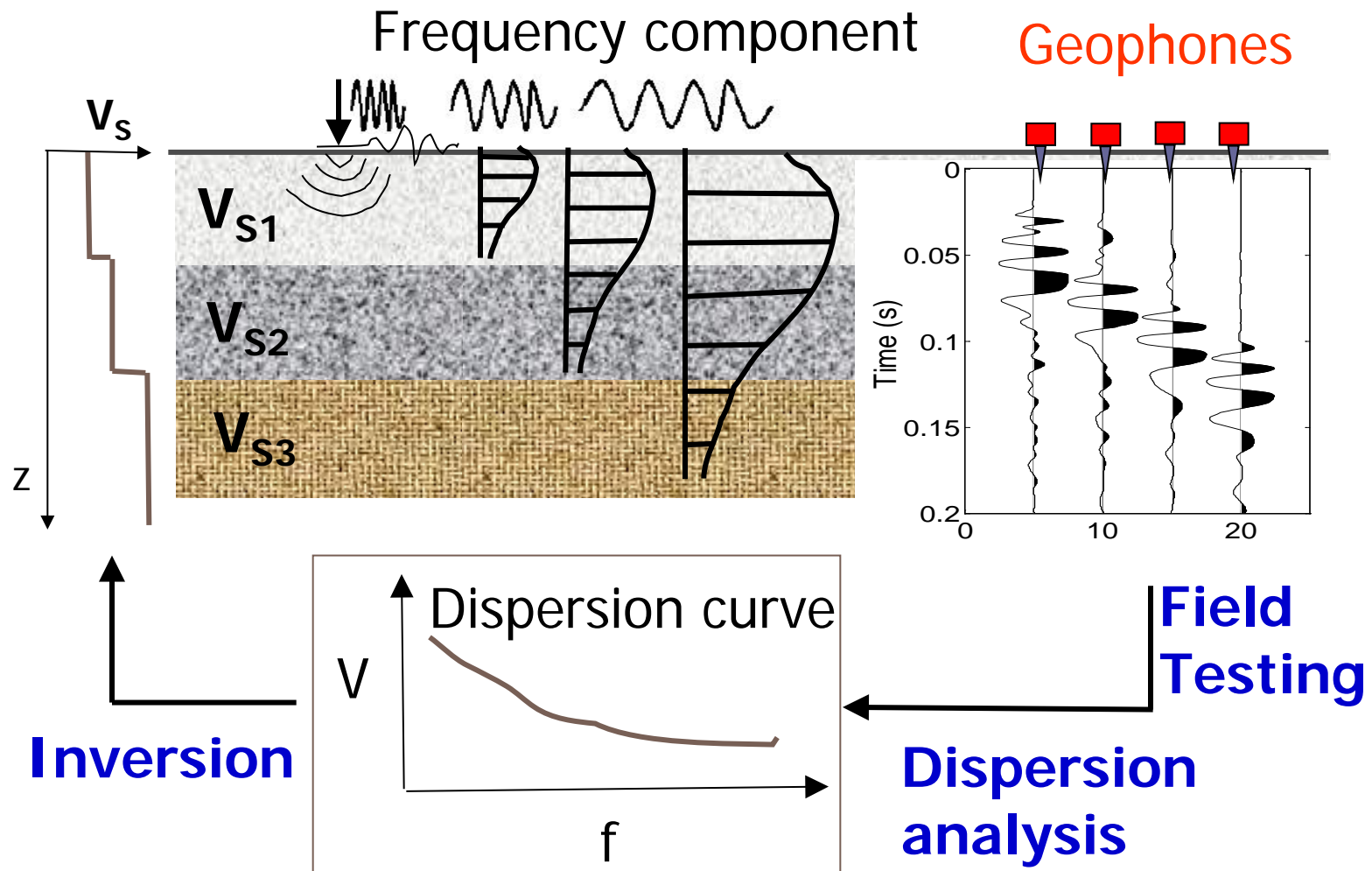
小結

- 層析成像造影技術可有效獲得混凝土構造P波波速影像剖面
- 應用層析成像可進行混凝土構造之強度檢測
- 但，
- 火害後之混凝土P波訊號衰減嚴重，應用不易



表面波震測造影技術

20



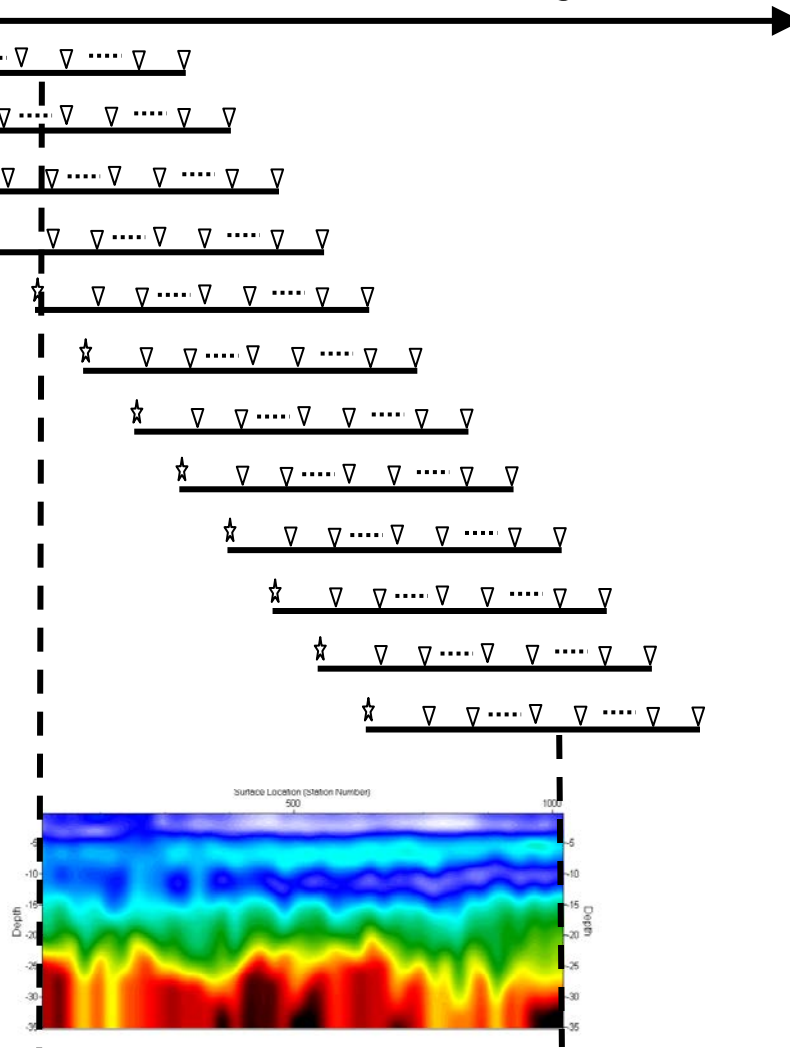
表面波震測造影技術- 1.5D影像

21

Survey Line

Data Acquisition

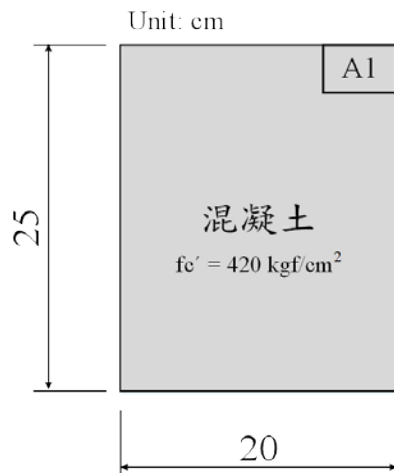
剪力波速



本研究試驗之各試體尺寸示意

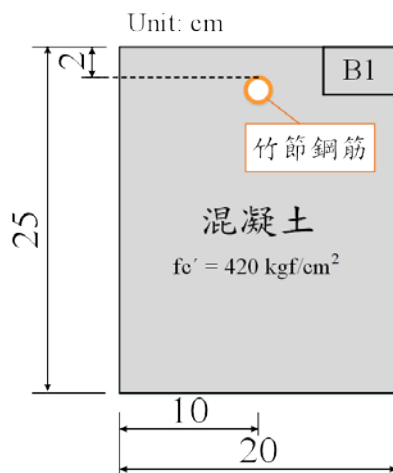
A

純混凝土



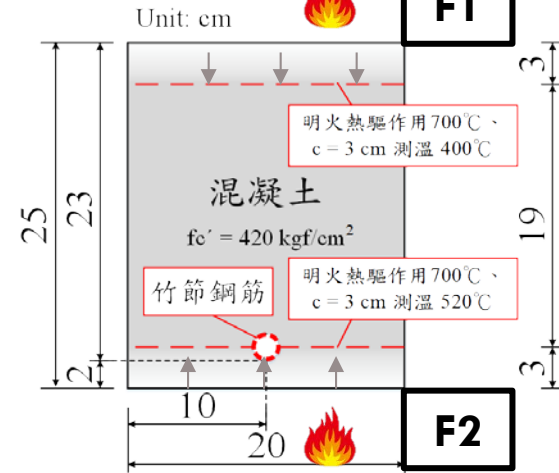
B

無損RC



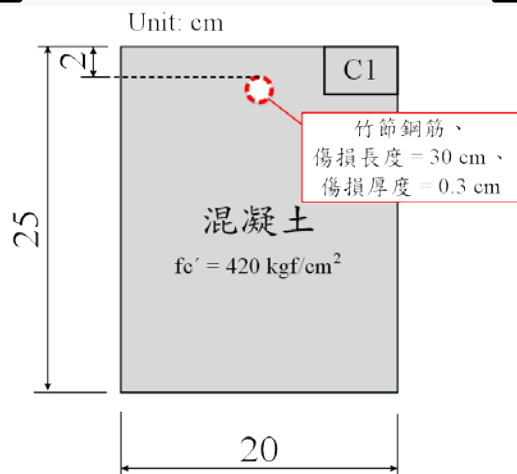
F

火損RC
(明火)



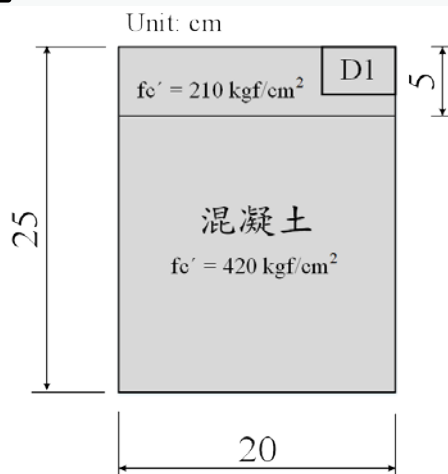
C

火損RC
(擬握裹傷損)

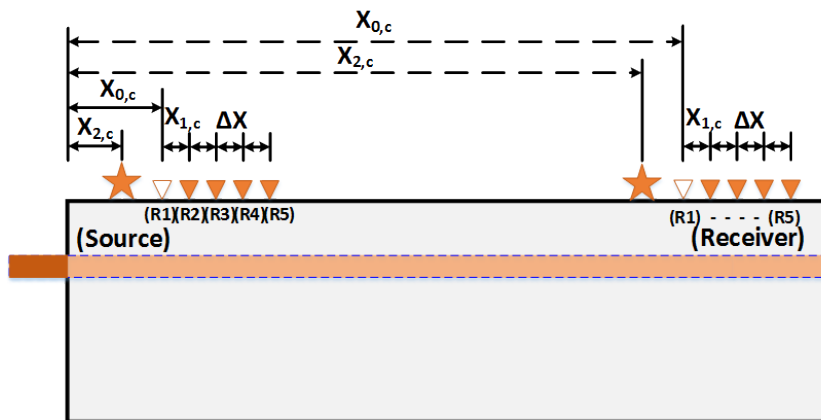


D

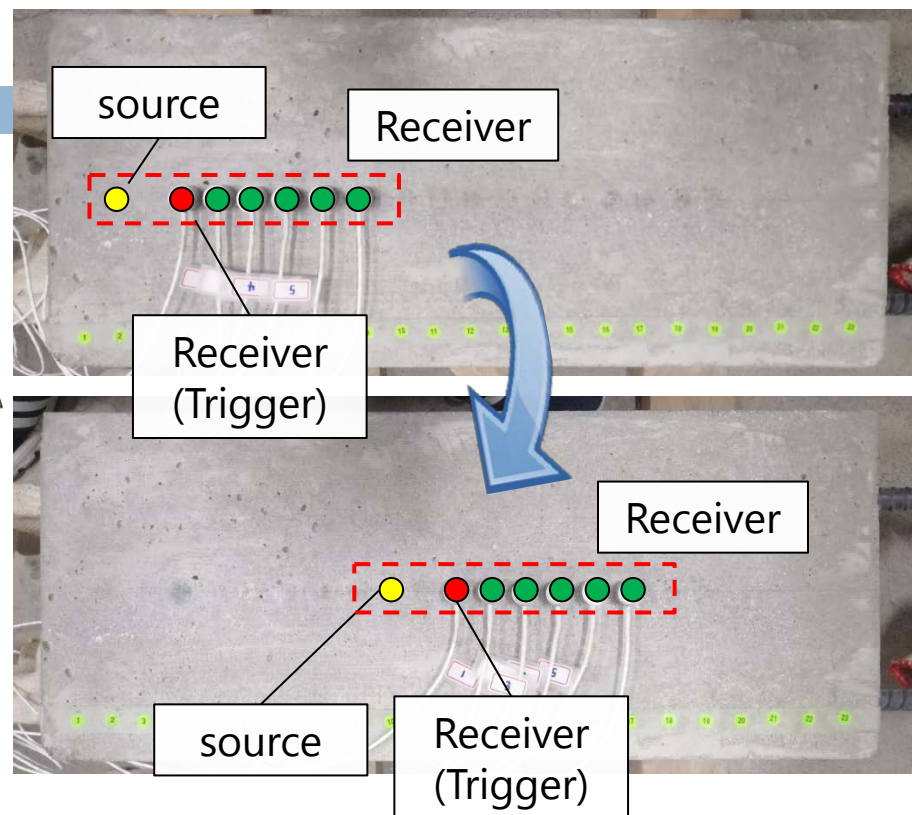
火損RC
(擬800°C強度分層)



施測配置 - 定距接收



導波量測配置示意圖

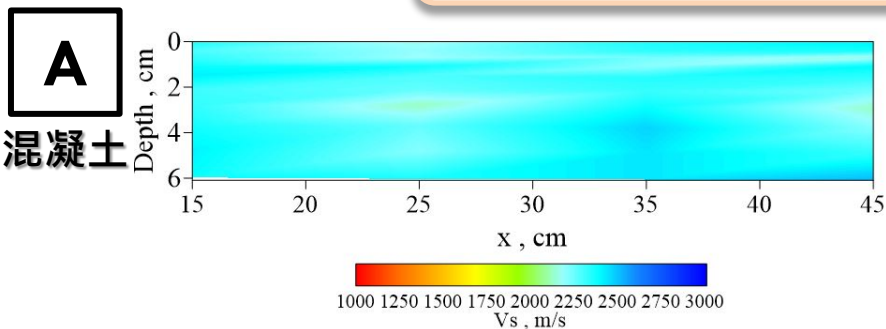


固定量測間距 → 遠場效應 ↓、探測精度 ↑、不受展距影響

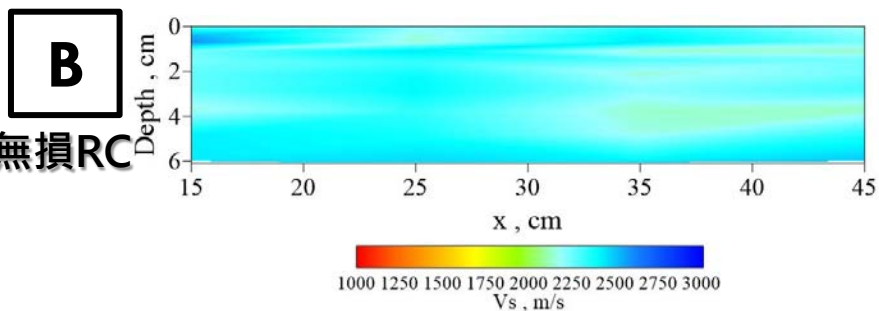
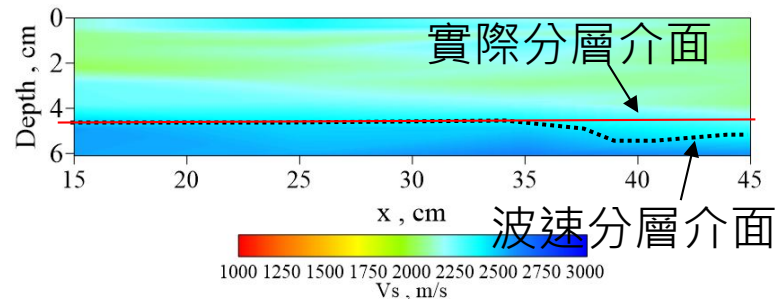
非破壞檢測為目標 → 以混凝土表面做擊發 / 接收

剪力波速剖面

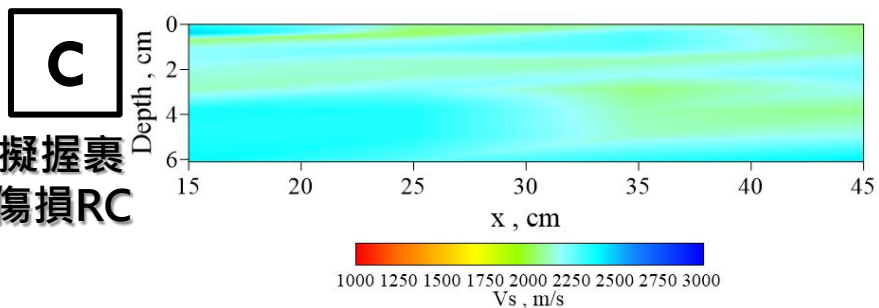
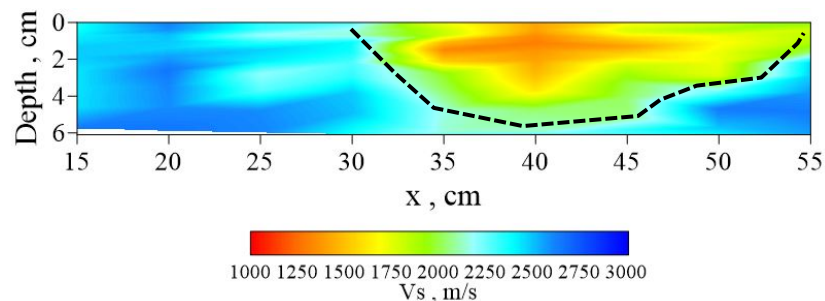
- 無火損波速皆相似；火損波速折減顯著



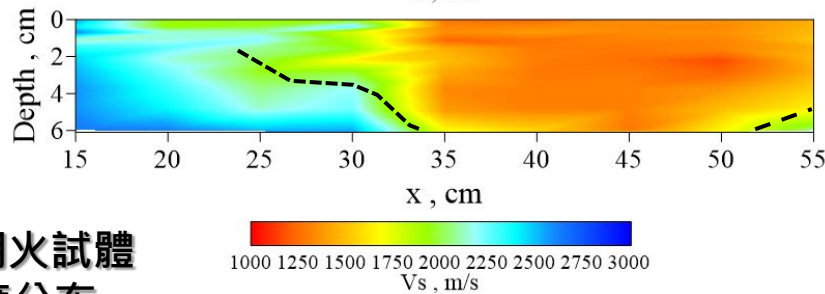
D
強度
分層RC



F1
明火
混凝土



F2
明火RC

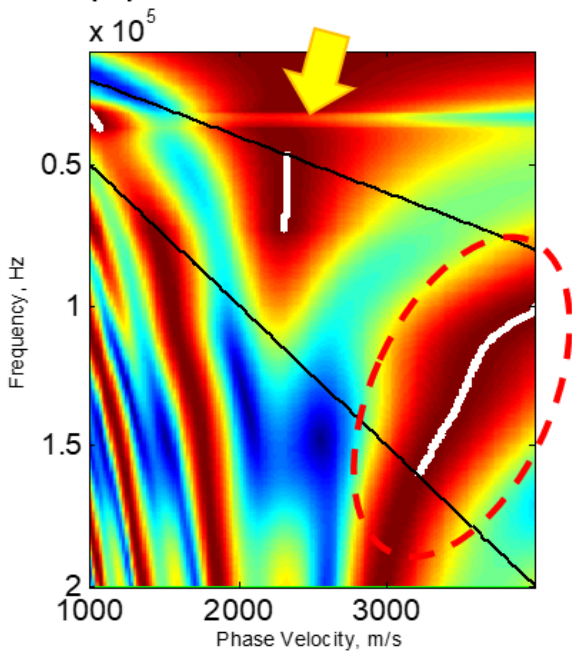


UP-明火試體
溫度分布

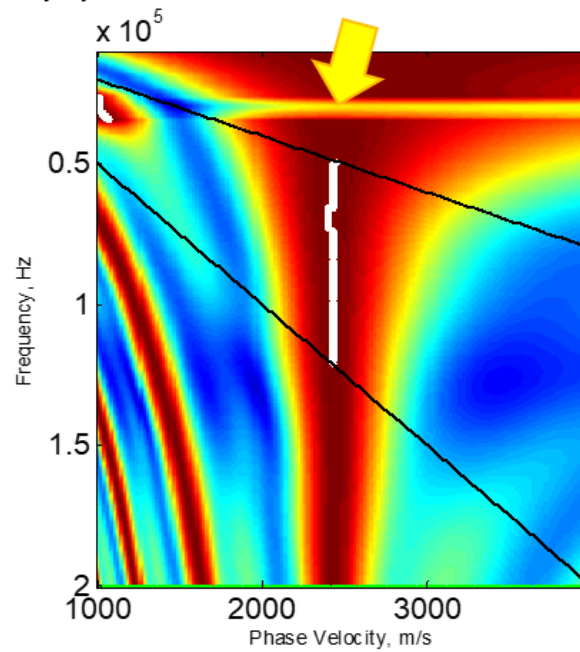
平均2400m/s; std:190m/s

鋼筋之影響

鋼筋影響頻散圖情況



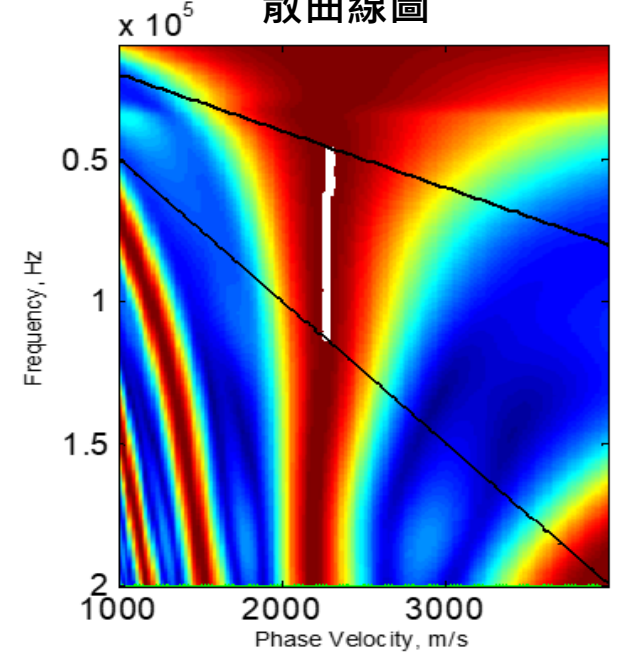
影響類型1：特定頻率有能量消失的情形並且同時在高速側有明顯的另一頻散曲線存在



影響類型2：僅有在特定頻率有能量消失的情形

解決方式

偏移鋼筋正上方3公分之頻散曲線圖



透過偏移鋼筋正上方做法，降低類型1和2的影響

小結

- 多頻道表面波震測可有效獲得混凝土構造物之s波波速影像剖面
- 應用s波波速影像剖面可協助獲得火害深度並評估隨深度之混凝土強度衰減量
- 但，
- 多頻道震動訊息獲得之訊號眾多，還可有進一步應用



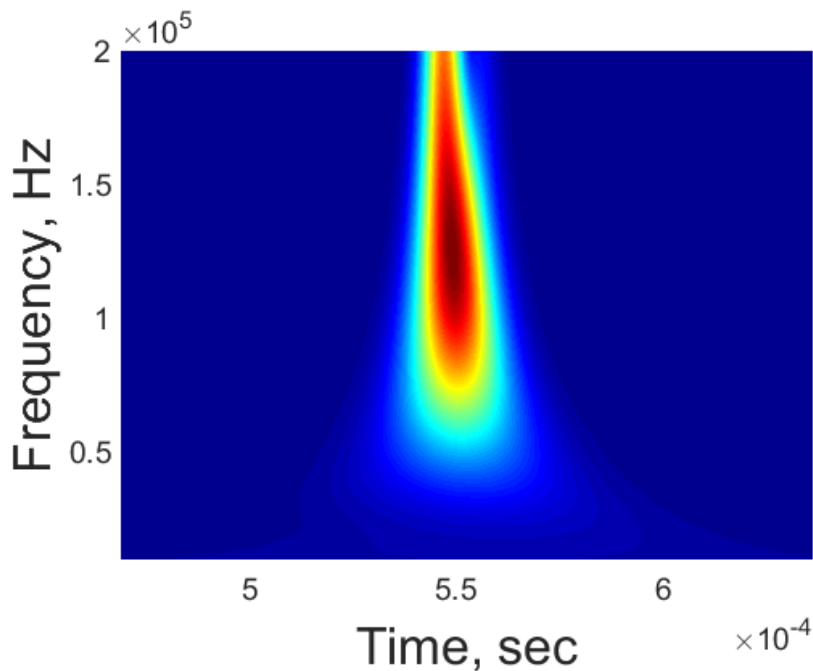
火害後握裏力定性調 査技術



握裹力受損之時頻特性

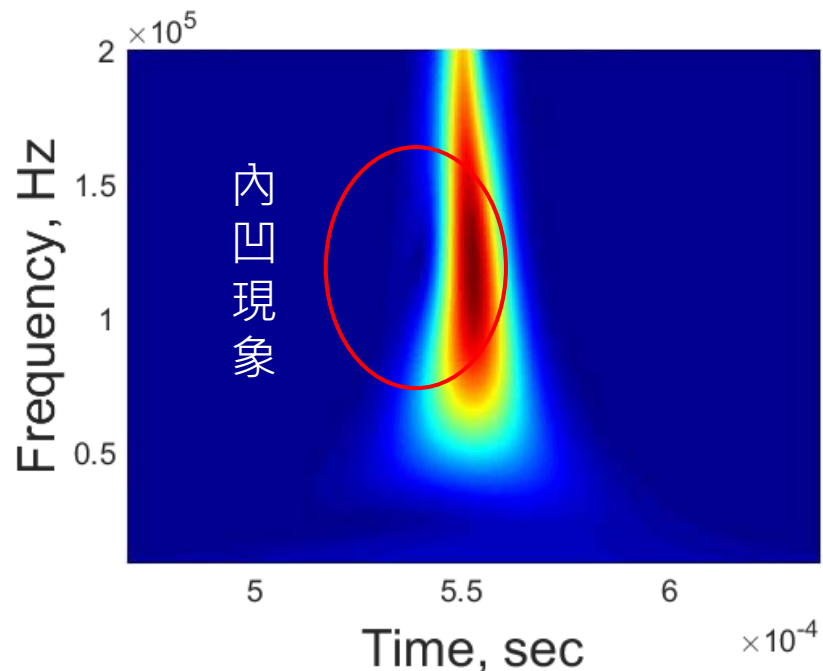
握裹力無損

類水滴狀



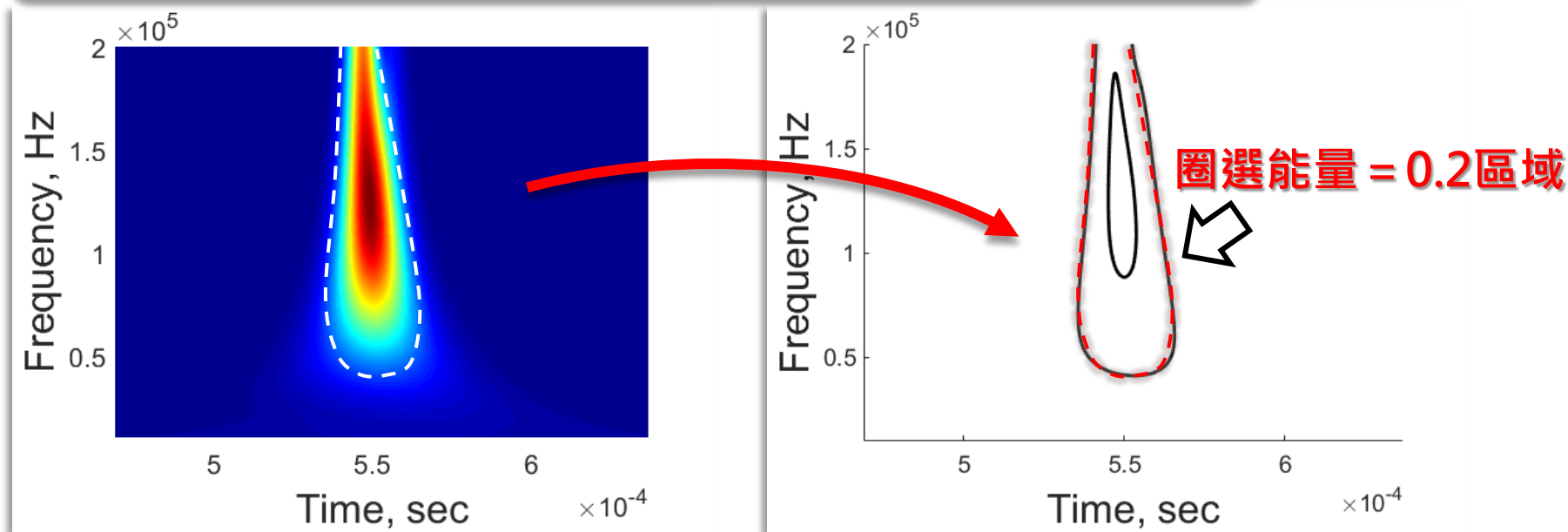
握裹力喪失受損

類馬靴狀



時間-頻率域圖形之判識(1/2)

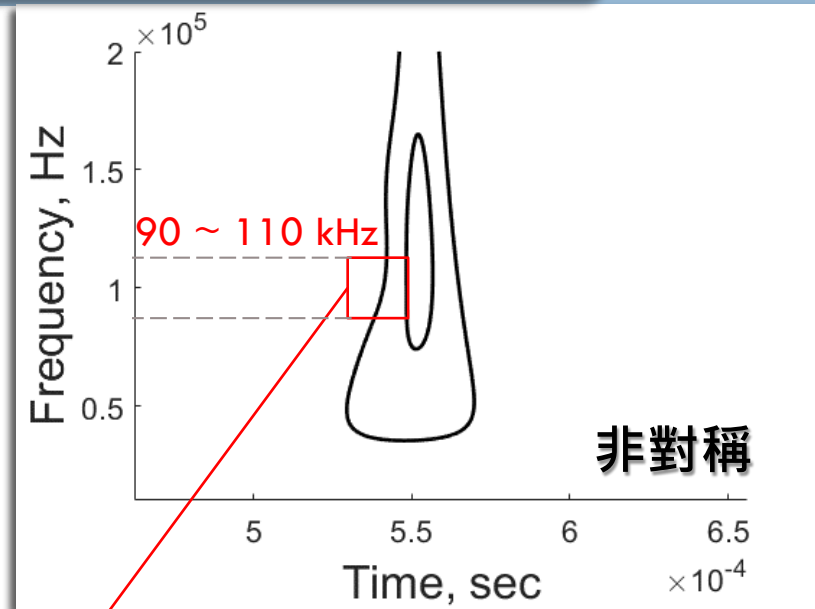
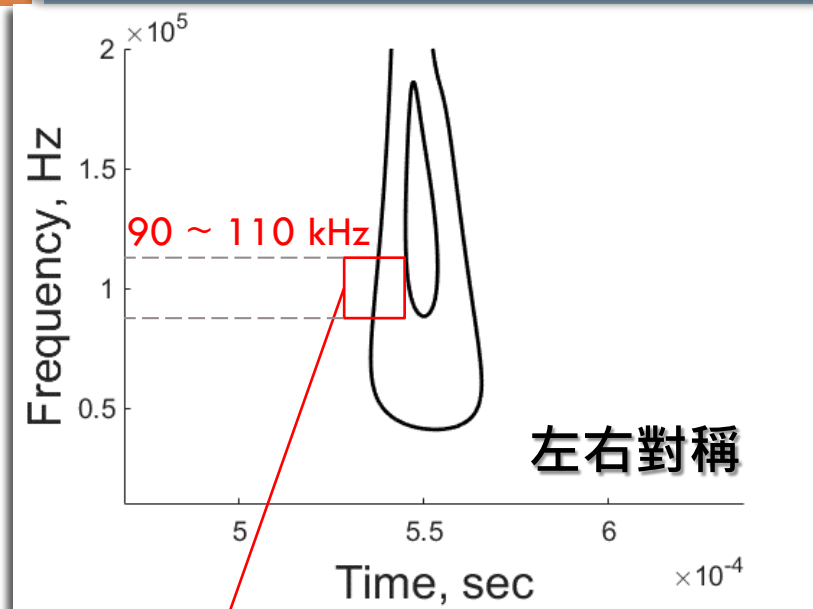
- 由連續小波轉換 → 等能量之時間-頻率域。



- 能量正規化為1，圈選能量 = 0.2區域
- 由偽彩圖 → 單色圖 (特徵顯著化)

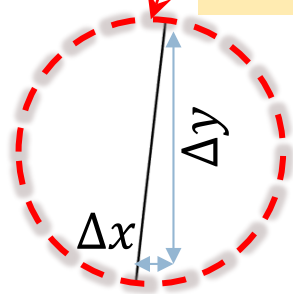
時間-頻率域圖形之判識(2/2)

- 由**全域**之**對稱性** → **局域**之90 ~ 110 kHz處**梯度變化**



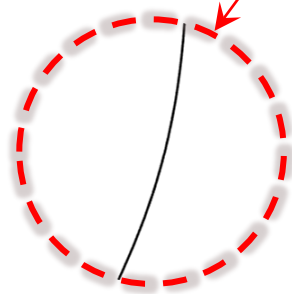
純混凝土 (無損)

氣泡墊模擬握裹傷損



$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

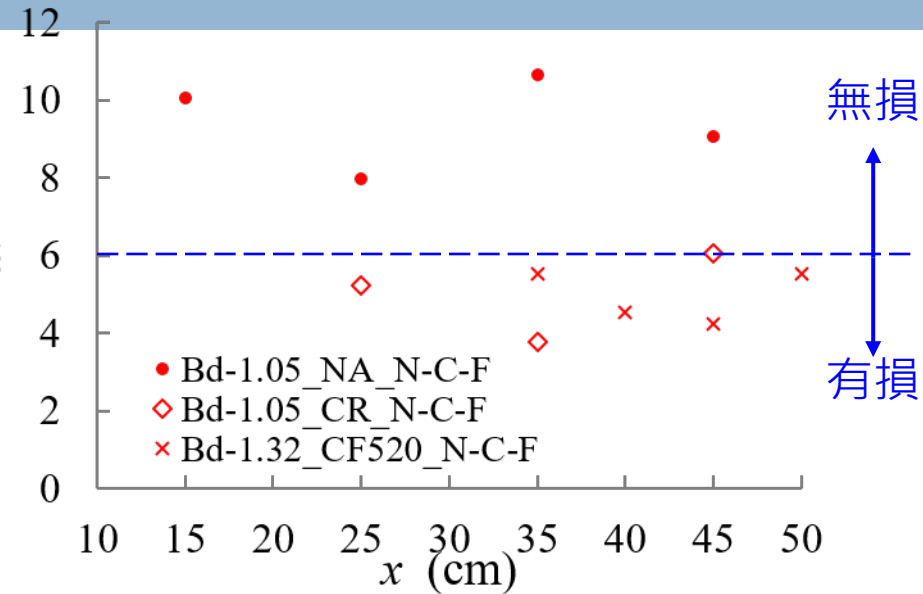
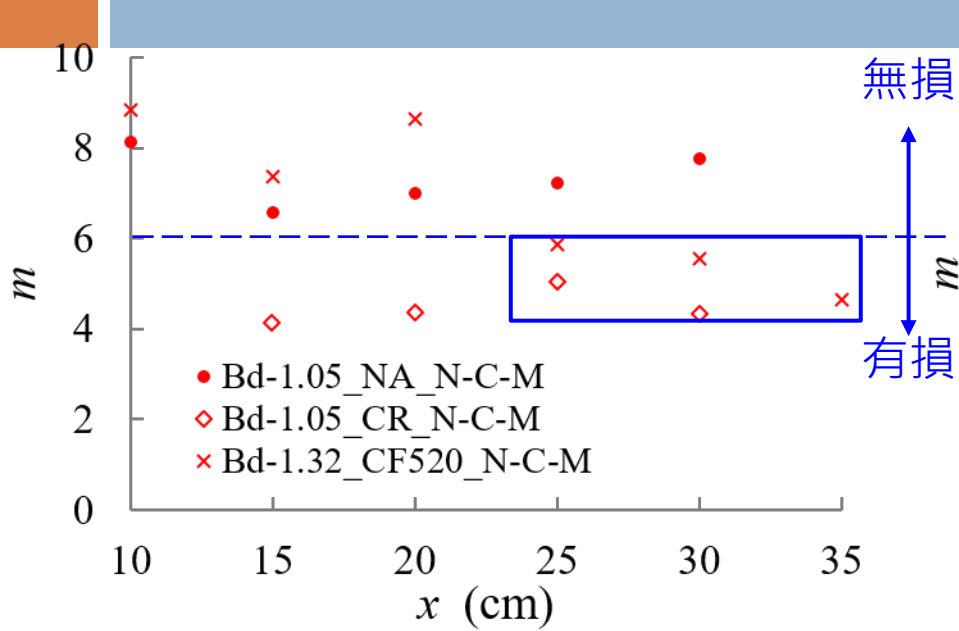
$m \uparrow$



$m \downarrow$

- 判釋頻率及集中段之**缺陷**及**斜率**，確認受損狀況

握裹力受損時頻特徵值



C - M

試體	試驗編號	$m \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)$	標準差 3σ
無損RC	NA-1.05_NA_N-C-F	7.34	1.85
擬傷損RC	Bd-1.05_NA_N-C-F	4.46	1.03
明火RC	NA-NA_CF520_N-C-F	5.3	1.24

C - F

m	3σ
9.43	3.06
4.86	1.45
5.15	1.78

✓ 以 $m = 6$ 為分界，
B1 為無損RC、
C1 為擬握裹傷損，
F2 為明火RC，
 $m_{B1} = 7 \sim 10$ ；
 $m_{C1} = 4 \sim 6$ ；
 $m_{F2} = 4.5 \sim 6$

水庫防淤隧道火害後導波量測



目的：導波量測構材受損深度、握裹傷損之有無

時間：報案 - 2019 3:12 am

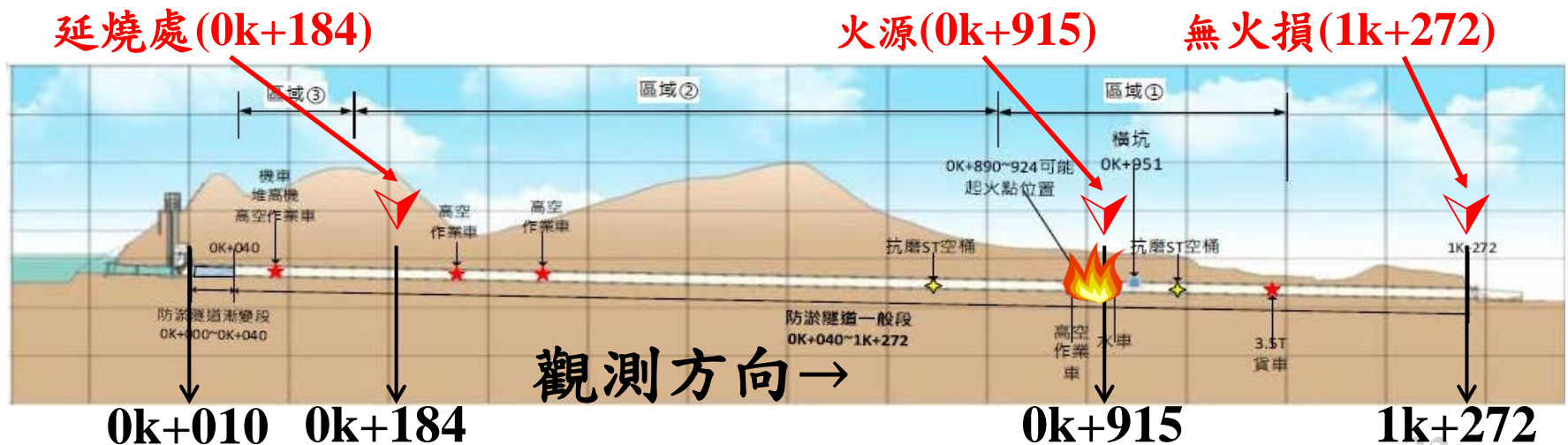
撲滅 - 2019 10:00 am ；延時估計 7hr.

延燒：隧道面漆 → 線型

結構：鋼筋混凝土 $f'_c = 350 \text{ kgf/cm}^2$ ；

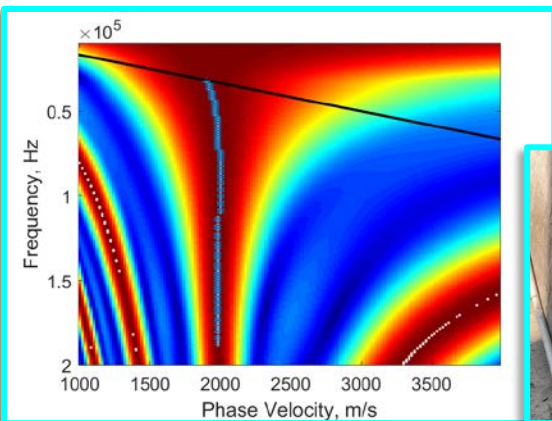
一次襯砌厚度10公分，二次襯砌厚度70公分，保護層厚度2.5公分

(自由時報, 2019)

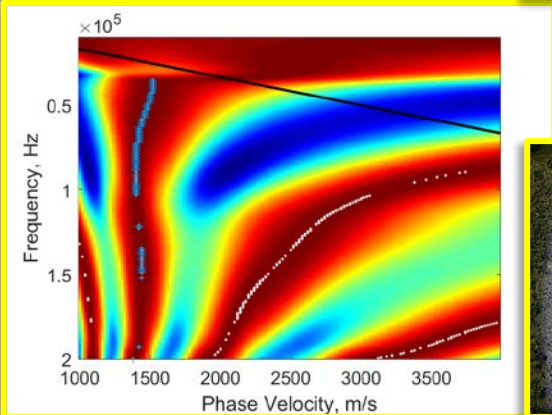


隧道縱斷面(同空間) - 頻散影像判識 (RC) (1/2)

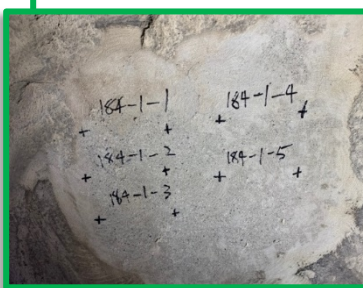
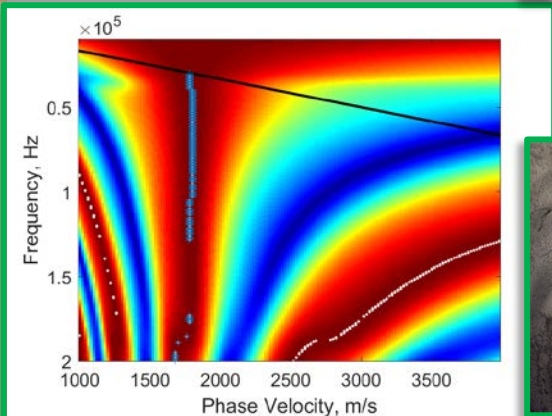
1K+272



0K+915

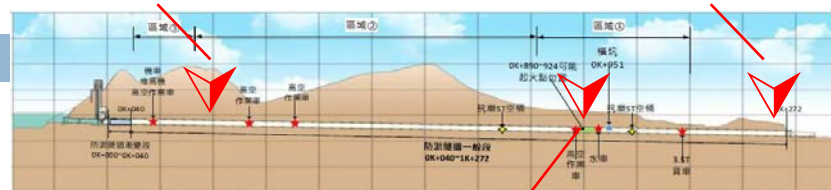


0K+184



延燒處(0k+184)

無火損(1k+272)



火源(0k+915)

隧道縱斷面(同空間)示意圖

V_{ph} :

1K+272(無損) :

- 2000 ~ 2100 (m/s)。

0K+915(火源) :

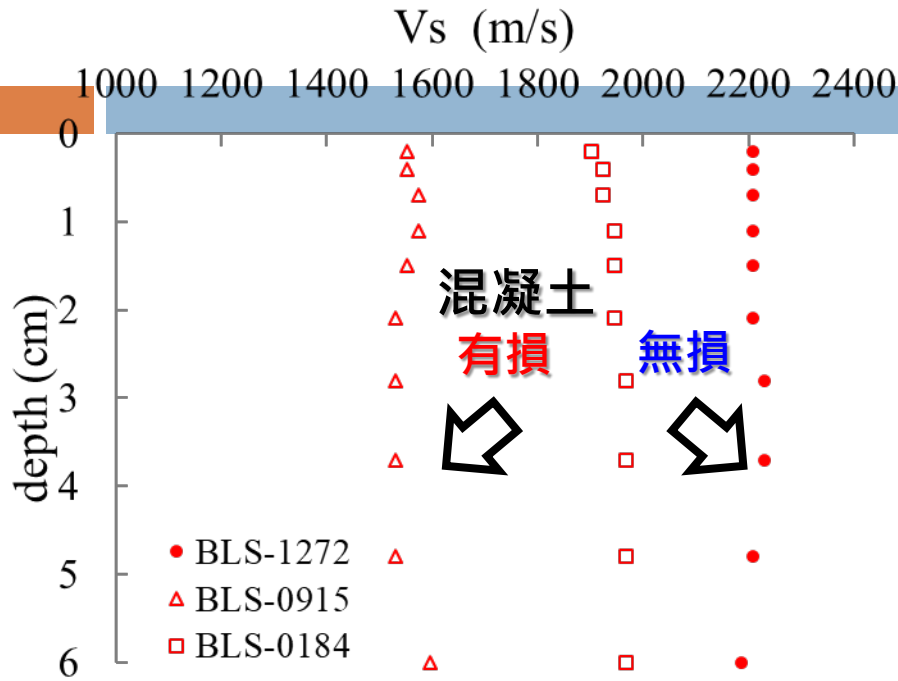
- 顯著下降且一致，受損深度 > 6 cm，推測火災延時 $\geq 3hr$ 。

0K+184(延燒) :

- 下降幅度小，推測為非火源區域。

$V_{ph} \rightarrow V_s$ ，判識混凝土傷損情形

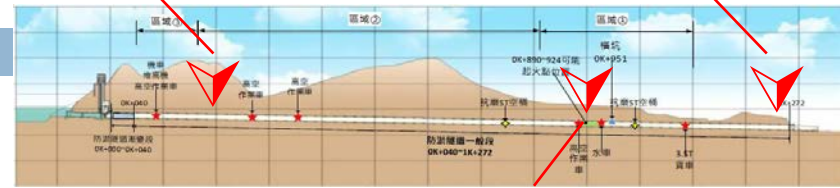
隧道縱斷面(同空間) - 頻散影像判識 (RC) (2/2)



隧道縱斷面(同空間)剪力波速-深度圖形

延燒處(0k+184)

無火損(1k+272)

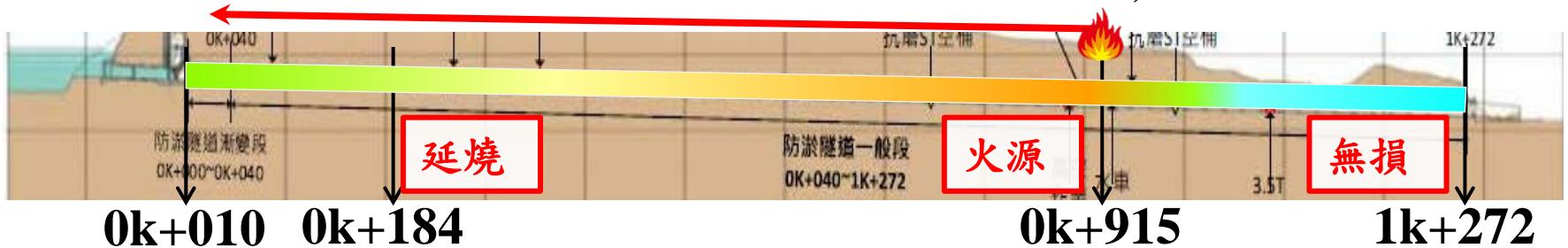
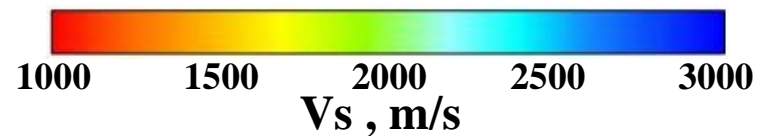


火源(0k+915)

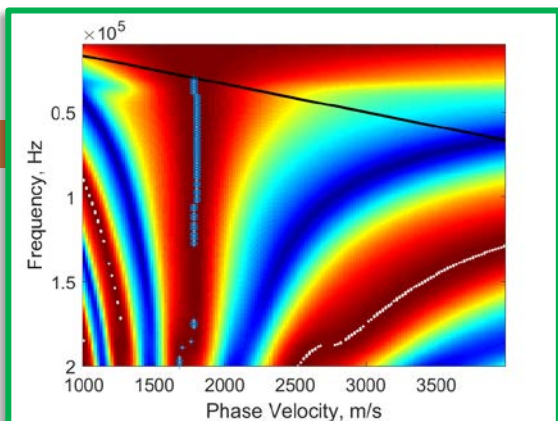
隧道縱斷面(同空間)示意圖

Vs :

- ✓ 0k+915 顯著下降，0k+184 次之。
- ✓ 嚴重程度：**0k+915** > 0k+184 > 1k+272
- ✓ ∴波速一致，
∴火害延時 ≥ 3 hr，受損深度 > 6 cm

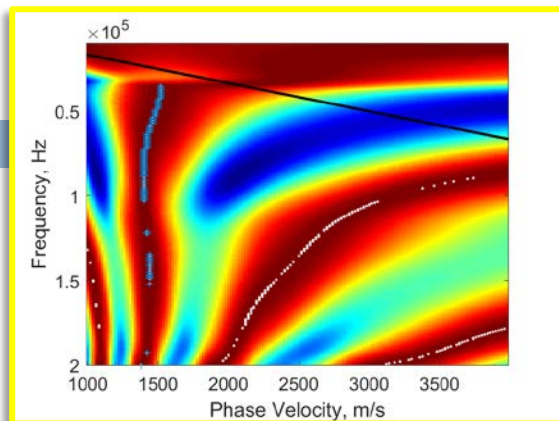


隧道縱斷面(同空間) - 超音波脈衝之溫度判識(下側壁)



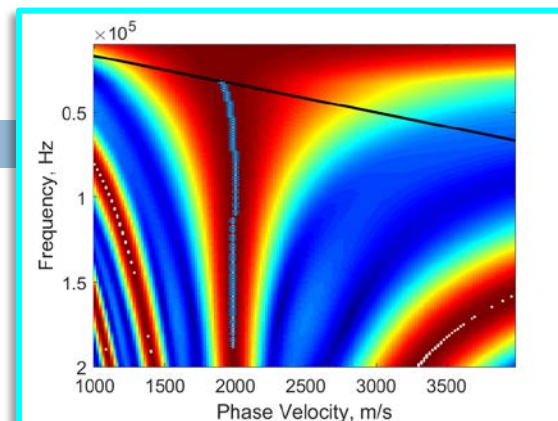
0K+184

(1954, 0.68, 300 ~ 400)



0K+915

(1550, 0.75, 500 ~ 600)



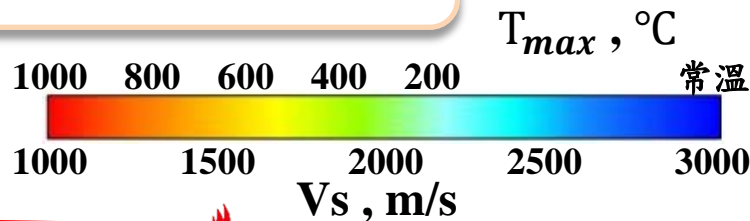
1K+272

(2200, 0.55, 常溫)

$V_{ph}, V_{s,G} \downarrow ; V_{s,U}/V_p \uparrow \& T_{max} \uparrow$

剪力波速、剪-壓波速比可互比、並有效判識混凝土傷損情形

點位 ($V_{s,G}, \frac{V_{s,U}}{V_p}, T_{max}$)



0k+010 0k+184

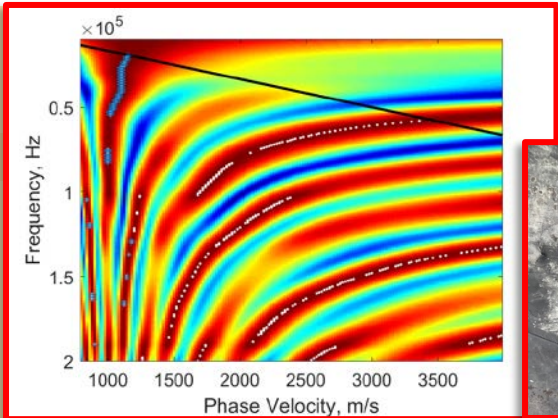
$V_s/V_p \rightarrow T_{max}$

0k+915

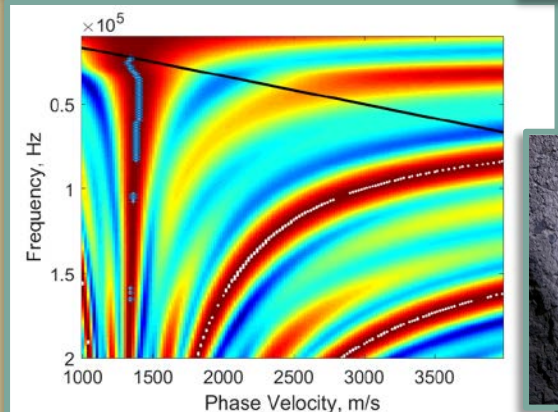
1k+272

隧道橫斷面0K+915(同時間) - 頻散影像判識 (RC) (1/2)

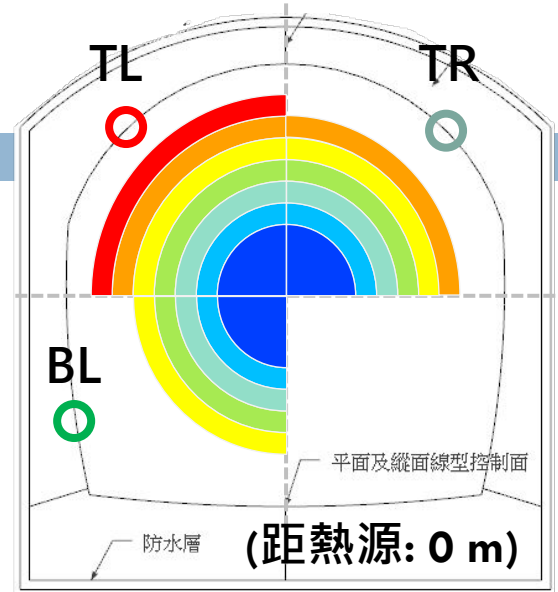
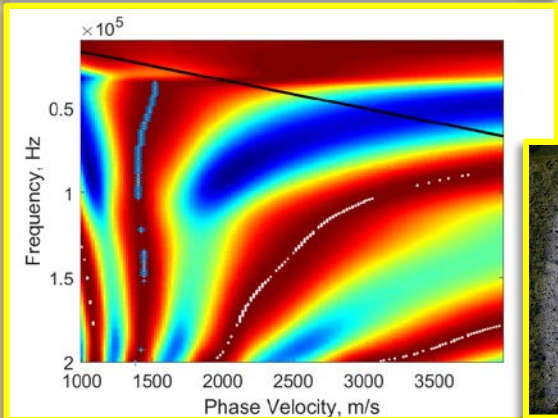
TL



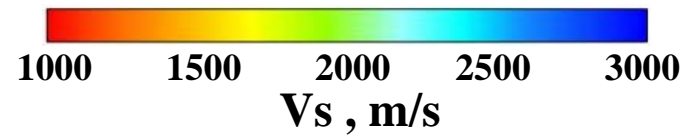
TR



BL



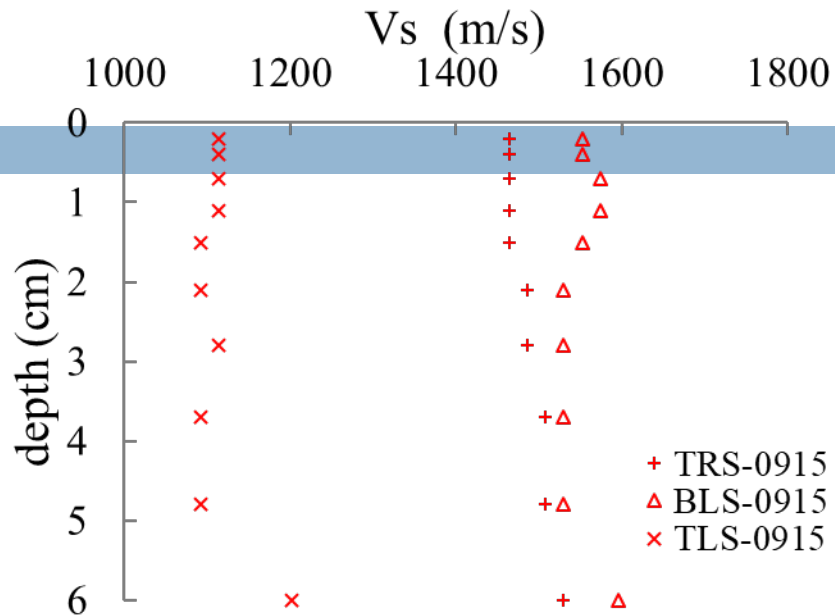
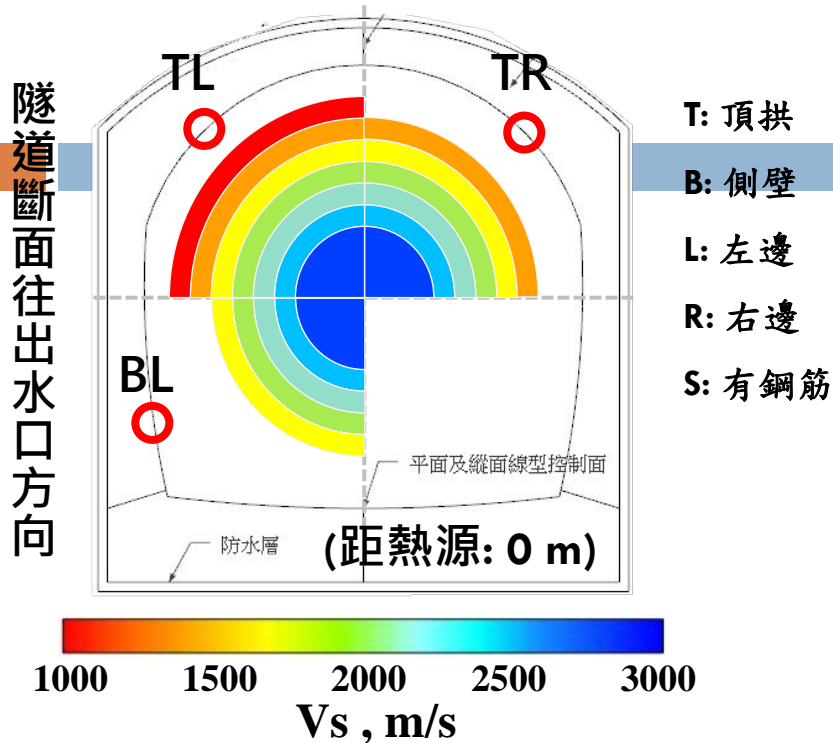
隧道斷面往出水口方向



里程	試驗編號	波速 (m/s)		標準差
		V_R	V_S	3σ
0K+915	TLS-0915	1060	1158	51
	TRS-0915	1350	1475	21
	BLS-0915	1450	1585	27

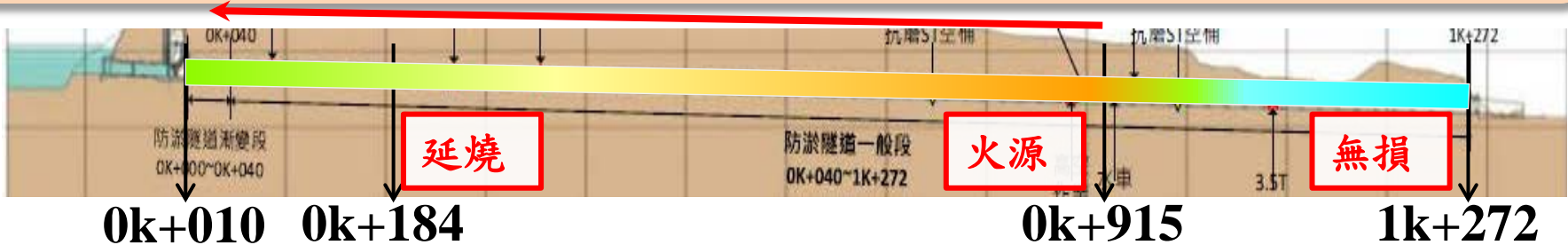
T: 頂拱, B: 側壁, L: 左邊, R: 右邊, S: 有鋼筋

隧道橫斷面0K+915(同時間) - 頻散影像判識 (RC) (2/2)



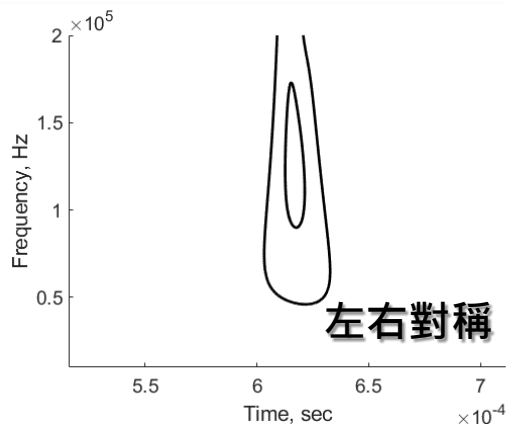
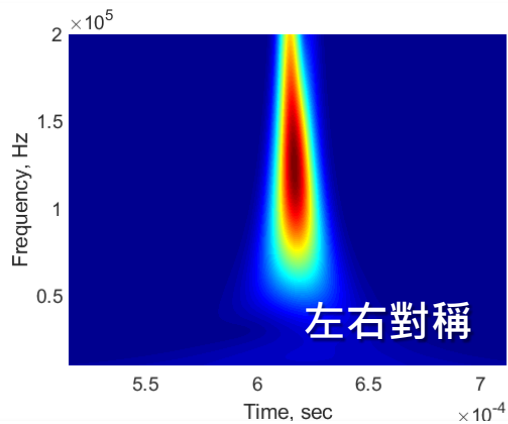
隧道橫斷面(同空間)剪力波速-深度圖形

- 0K+915 Vs : TL > TR > BL ; 頂拱較嚴重，推測火流延頂部傳遞。
- →0K+000~0K+915之受損深度皆>6 cm，頂拱為重點維修區域。



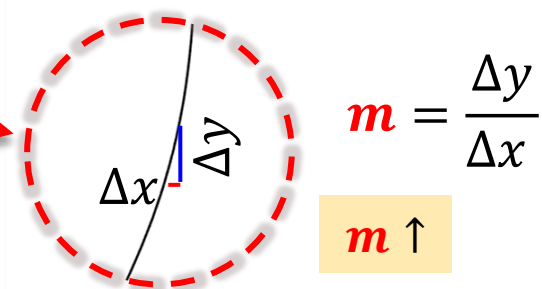
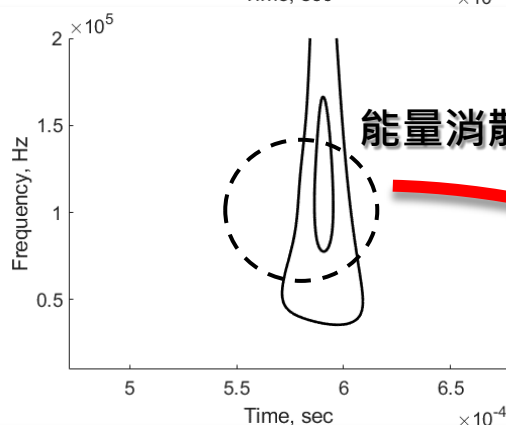
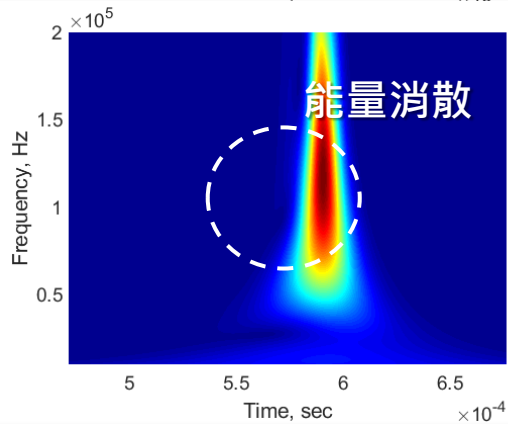
隧道縱斷面 - 時間-頻率域判識 - 有無握裹受損 (1/2)

1K+272

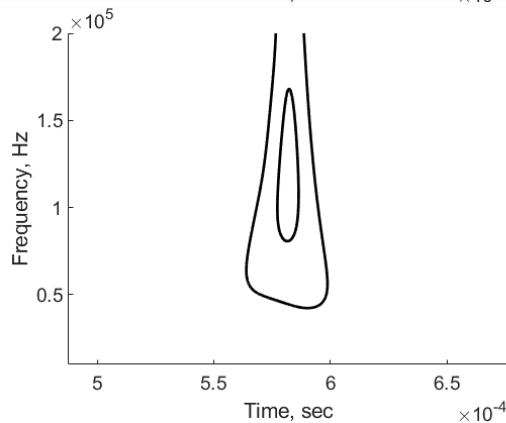
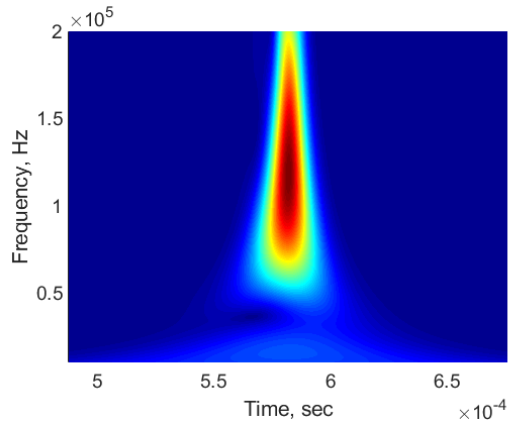


透過斯乃耳定律、波傳路徑與保護層厚度=2.5 cm，於Ch4將出現鋼筋特徵，
→ 以Ch4之時-頻圖形比對

0K+915



0K+184

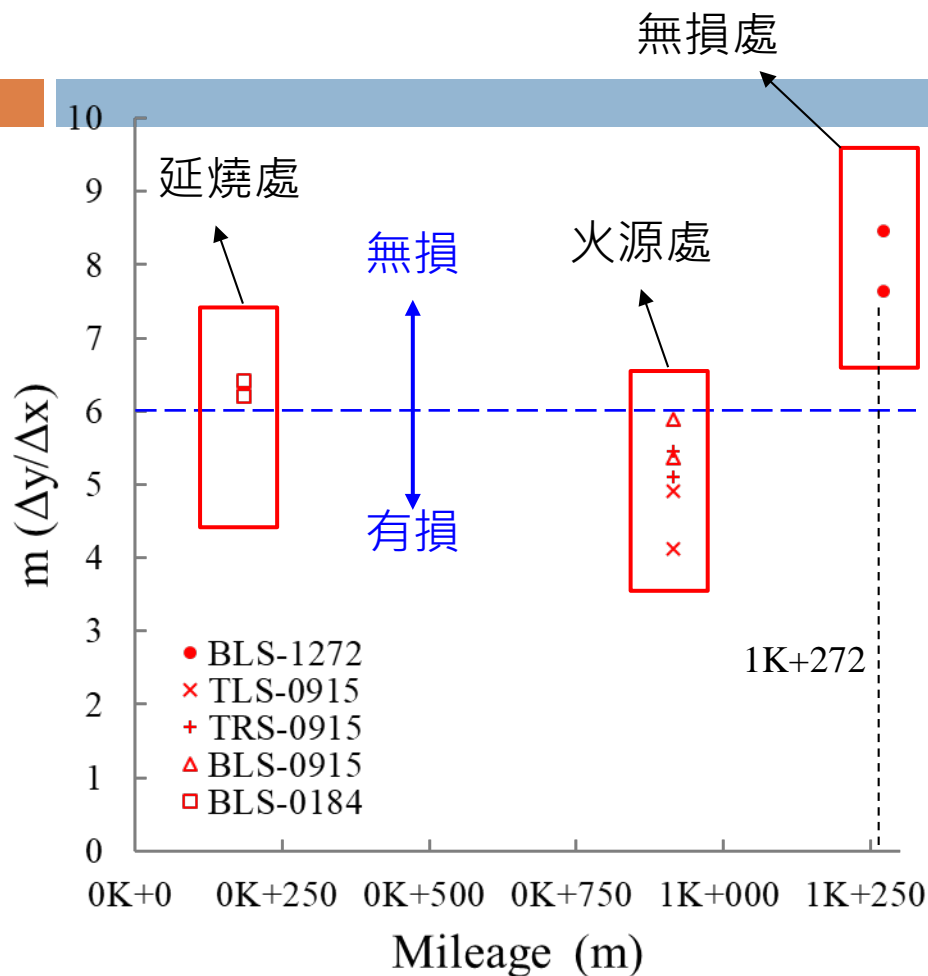


皆取特徵段
95 ~ 100 kHz作比對

梯度變化判識
應力波傳遞路徑

隧道縱斷面 - 時間-頻率域判識 - 有無握裹受損 (2/2)

只取特徵段(Ch4)作比對



里程	試驗編號	$m \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)$	標準差 3σ
1K+272	BLS-1272	8.05	1.23
	TLS-0915	4.52	1.17
0K+915	TRS-0915	5.28	0.51
	BLS-0915	5.62	0.79
0K+184	BLS-0184	6.31	0.30

(隧道) 脆發-定收法 空間-斜率圖形

- ✓ 以內業經驗之 **m = 6** 為分界，
1K+272(無損) $m = 7 \sim 9$ ，良好
- ✓ **0K+915(火源)** $m = 4 \sim 6$ ，
 又 $m_{BL} > m_{RS} > m_{LS}$ ，推估**有握裹受損**情形，需作**重點維修**
- ✓ **0K+184(延燒)** $m = 6 \sim 6.5$ ，
 推估**火害未達鋼筋深度**，**握裹無受損**

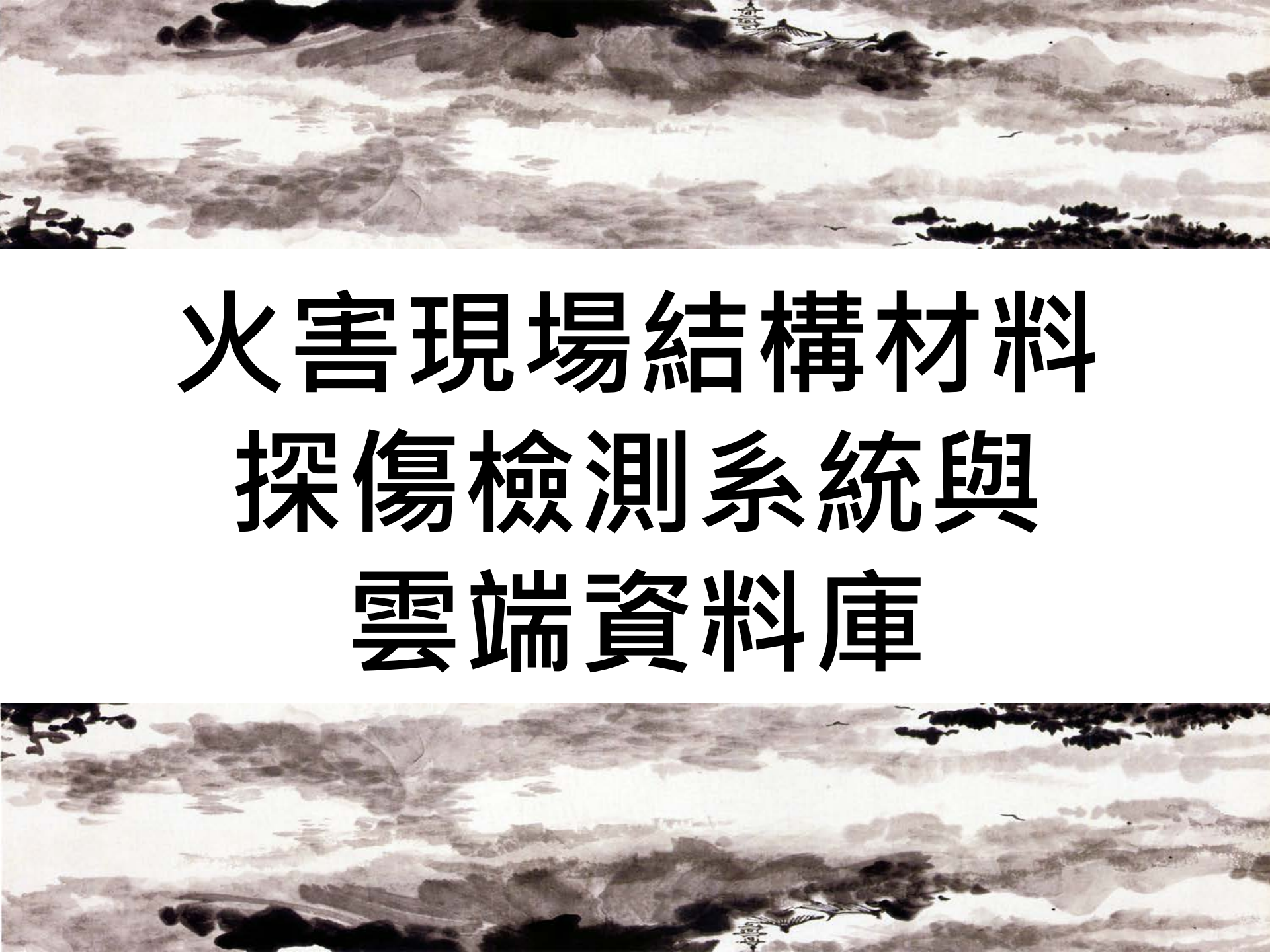
小結

1. 傷損深度判識：

- 1) 0K+915(火源)之Vs顯著下降且波速一致，推測火害延時 $\geq 3\text{hr}$ ；
同里程以頂拱受損最嚴重，推測火流延頂部傳遞引致。
- 2) 0K+184(延燒)之Vs降幅小，推測為非主要燃燒區域。
- 3) 頻散影像判識混凝土受損適確可行。

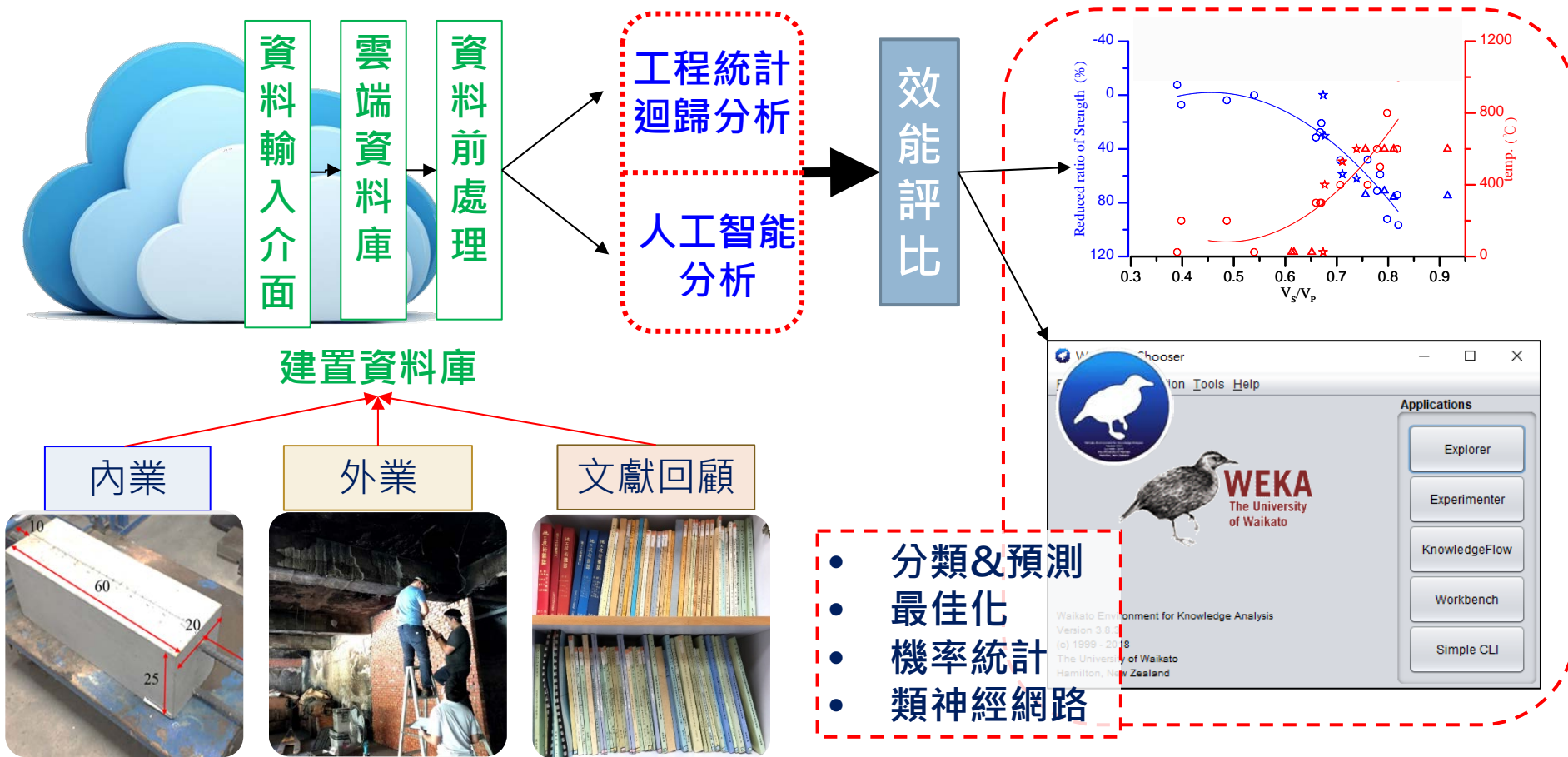
2. 握裹傷損判識：

- 1) 時頻圖95 ~ 100 kHz處斜率判識握裹傷損之方法可行，握裹傷損程度 \uparrow ； $m \downarrow$ 。
以 $m = 6$ 為有無握裹傷損之分界，握裹傷損程度 \uparrow ； $m \downarrow$ 。
1K + 272 = 7 ~ 9；0K + 915 = 4 ~ 6，推估有握裹受損情形，需作重點維修；
0K + 184 = 6 ~ 6.5，推估火害未達鋼筋深度，握裹無受損。

A traditional Chinese ink wash landscape painting (山水畫) serves as the background. It depicts a vast, misty landscape with a winding river or path leading towards a small pavilion or temple structure on a distant hill. The brushwork is expressive, with varying shades of ink creating depth and texture in the clouds and water. The overall mood is serene and contemplative.

火害現場結構材料 探傷檢測系統與 雲端資料庫

火害現場結構材料探傷檢測系統資料庫



火害現場結構材料探傷檢測系統資料庫

43

建研所與開發單位具所有功能之管理者權限



合作單位僅可新增及編輯該單位所登錄之資料



火害現場結構材料探傷檢測系統資料庫

使用者登入

帳號

密碼

查詢條件

試體名稱

試體清單

#	操作	試體名稱	新增人員	新增時間	更新時間
資料試算					

資料試算

壓縮波速 V_p : m/s

剪力波速 V_s : m/s

推估最高溫度 : 219.24531249999995 °C

強度折減比例 : 23.323125000000033 %

雲端資料庫網址：

<http://140.117.98.96:8080/fddocm/login.jsp>

火害現場結構材料探傷檢測系統

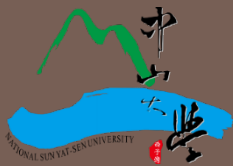
火害現場結構材料探傷檢測系統 第一代: 超音波檢測



- 後續研發
- 資料主動雲端推播功能
- 資料庫演算直接呈現
- 多頻道振動量測能力

結語

- 非破壞性檢測可有效協助火害現場調查工作
 - 快速初勘
 - 結構安全性評估
- 多頻道振動訊號可提供混凝土構造深度受損之訊息
 - 混凝土火害受損深度
 - 握裹力受損評估
- 雲端資料庫可協助現場應用之精效度



謝謝

林俊宏

國立中山大學海洋環境及工程學系
海洋工程地物與監測研究室

chlin.geo@mail.nsysu.edu.tw



研究團隊

台北科技大學 土木工程系 陳立憲 副教授