

建築師公會講習會2022/11/24

鋼筋混凝土之結構建材遭火害後之非破壞檢測實務

陳立憲 副教授/北科大 土木與防災所

人力資源 投產十年

感謝 研發與推廣團隊：博(10) + 碩(11)

博士：陳立憲(北科/土木) (報告)、
陳堯中(台科/營建)、
林俊宏(中山/海工)、
徐國偉(現 微軟; 原 政大/資料科學)、
陳章志(高雄大學/土木環境)、
劉崧璋(桃園土木/結構技師)

碩士：曹祖璟、王榆柔、柯志揚、黃崑瑋、楊佳嘉、林欣蓉、
黃仁佑、王力平、陳 煜、曾畊嘉、林心怡

建築研究所/安全防災組：蔡綽芳博士、雷明遠博士、王天志博士

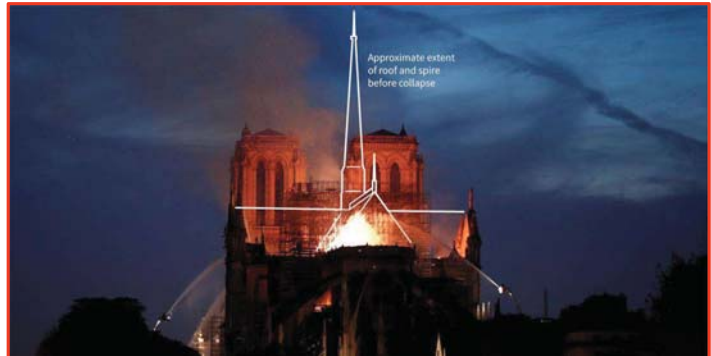
建築師公會/ 陳澤修理事長 與 各位建築師同仁!!!

古今世遺，東西皆燃；祝融之災，不可小覷！

巴黎地標**聖母院(Notre-Dame)**如何浴火重生？ 專家建議借鏡**聖約翰大教堂**
2019/4/15 惡火燒毀 850年歷史的聖母院屋頂及尖塔倒塌。

耗5年修復/**2001年紐約聖約翰大教堂(Cathedral of Saint John the Divine)**火災
專家：沒法5年內重建聖母院，檢測工程先輕敲石材，聆聽有無受損特有的細微聲音。。。

聖母院與聖約翰大教堂多為**石灰岩材**遇火速熱，又遇水速冷，會因岩裂削弱建築結構穩定性，表面也會化成粉末和碎片。為檢修補或更換石材，測試教堂結構工程團隊耗數月逐一檢視教堂磚塊發出的「聲響」。

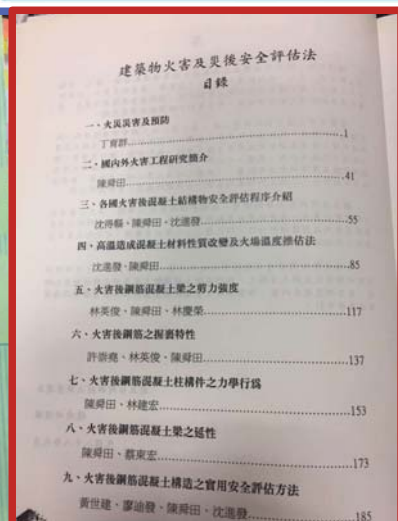


※ 本團隊研究成果**更新速實簡廉：剪-壓波速比**；及其**有溫度的關懷！**

學產之薪傳：火害鑑識與安全評估

溯學界研發：1990 - +

出版至業界應用：2000 - + ...



火災層出不窮：泛RC、老舊建物

地上 建築、房屋
交通、建設






地中 邊坡、地錨、
基礎擋土結構




地下 一次襯砌(噴凝土-鋼網)
二次襯砌(混凝土)





1. 北市公寓 (自由時報, 2018/09)
2. 桃園工廠 (團隊外業, 2019/04)
3. 電線走火 (TVBS新聞, 2011/12)
4. 電器自燃 (東森新聞, 2017/05)
5. 國道邊坡 (自由時報, 2018/02)
6. 八卦山隧道 (鏡周刊, 2018/06)
7. 雪山隧道 (蘋果日報, 2012/05)


5

鋼筋混凝土構材之物/化性受損研探：兼顧延脆、時效長短



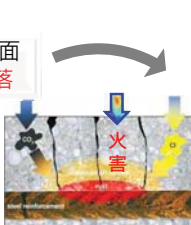
(混凝土強度)	直接	(脆)	(抗壓)	(短期)	(構材強度)
(鋼筋握裹力)	間接	延+脆	抗拉	長期	(建物壽命)



火災

混凝土剝落、鋼筋外露、握裹力傷損

混凝土表面
裂縫/剝落




鋼筋鏽蝕
體積膨脹

碳化(中性化)

表面裂縫、崩裂

震損

地震致梁柱破壞




(www.dba.taipei.gov.tw)


物性破壞

鹽害

氯離子(Cl⁻)鋼筋腐蝕



(engineers-australia.com)


6

災害統計－地風水火、天災人禍

火災



城中城火災(自由時報, 2021) 阿里山大火(公視, 2021)



災害-天災人禍

第一保全對象：人
第二保全對象：財產
第三保全對象：國土



震災



水/風災



918 地震(NOWnews, 2022)



88水災(自由時報, 2009)



人(傷、亡)



財產(質、量)
(不動產)
(隱性；持續性)

蝨食 >> 鯨吞
(顯性；一次性)

$R=H*V$
損害風險=危險×脆弱度
(量) (值)

101~110年 - 傷、亡統計表

人數	死亡	受傷
火災 ^[1]	1498	3551
震災 ^[2]	141	1096
水/風災	71	2428

100~108年 - 建築損失統計

火災(次數) ^[1]	33149
震/水/坡災 ^[2]	736/1136
全倒/半倒(戶數)	


火災!! 次數>戶數
對**生命安全與建築的嚴重性** >> 地震與颱風

[1]內政部消防署,2022;[2]中華民國統計資訊網


7

建物老/劣化案例多 - 引致火災機率增

海砂屋



危老建築



■ 全台住宅數量及平均屋齡分布

城市	住宅數量 (萬宅)	平均屋齡 (年)	屋齡達30年占比
台北市	90.1	36.2	71.2%
新北市	166.5	29.9	46.7%
桃園市	87.6	26.6	34.4%
台中市	107.3	28.7	39.8%
台南市	71.5	33.2	50.7%
高雄市	109.3	31.9	51.6%
全台總計	896.5	31.0	50.1%

資料來源：內政部不動產資訊平台-房屋稅籍住宅類數量、吉家網不動產

來源：鏡週刊

8

國際火災案例

天災-智利復活節島





人禍-巴黎聖母院





來源：復活節島大火yahoo(2022)、聖母院大火,Line Today(2019)

習見建物判識技術之盤點與痛點


火損調查

階段1：消防火調


1. 起火原因
2. 火流方向

階段2：結構鑑定

1. 單壓試驗求抗壓強度 (f'_c)
2. 燒失量推估最高溫度 (T_{max})
3. 中性化深度 (d_c)



單壓試驗




燒失量

燒失量 習見判識技術

申請單位：新北市政府某機關
 火災日期：105年
 調查場址：新北市貢寮區


C型鋼扭曲情形



推估溫度： $T_{max} = 175^\circ\text{C}$ · 與案場其他跡證 **不符**

火損調查檢討

1. 階段1-因：火調階段多為定性	3. 創新技術定量評估傷損指標
2. 階段2-果：雖為定量但火損低估	4. 後續補強之驗效



f'_c ：抗壓強度 (kgf/cm^2) T_{max} ：最高溫度 ($^\circ\text{C}$) d_c ：中性化深度 (cm)

10

應用 非破壞檢測之效益評估(昔、今對比)

昔

尋因(火調) 目視、化性

驗果(建管/使用) 破壞性試驗

1. 殘留跡證 2. 火流方向...

3. 鑽心取樣 **高估?%** 4. 中性化/碳化

5. 抗壓強度 6. 燒失量 **低估?%**

(均溫(穩態)
非均溫(暫態))

(巨觀
巨/微觀)

(破壞 重量敏感(800°C ↑) 線性)
(非破壞 體積敏感(200°C ↑) 非線性)

(定量 低估)
(合理)

(統計回歸
人工智能)

★ 符合調查需求、減少結構傷害、信/效度↑

主動式聲學

表面波
(表·GW)
PCR

超音波脈衝
(體·UP)
快篩

頻散曲線
反算剪力波速, V_s
估傷損深度, C_d

求 V_s/V_p
估 T_{max} & $\Delta f_c'$ (%)

➔

新 非破壞取代破壞

速 初勘可用、分析快(天→時)

實 重量→體積量測·量化8傷損指標

簡 操作簡易

廉 價格便宜

TAIPEI TECH National Taipei University of Technology

Secondary Wave Velocity 橫(剪力)波波速; Primary wave Velocity 縱(壓縮)波波速; V_s/V_p 剪-壓波速比
Maximum Temperature 最高溫度; Residual ratio of strength ($\Delta f_c'$) 強度折減率

11

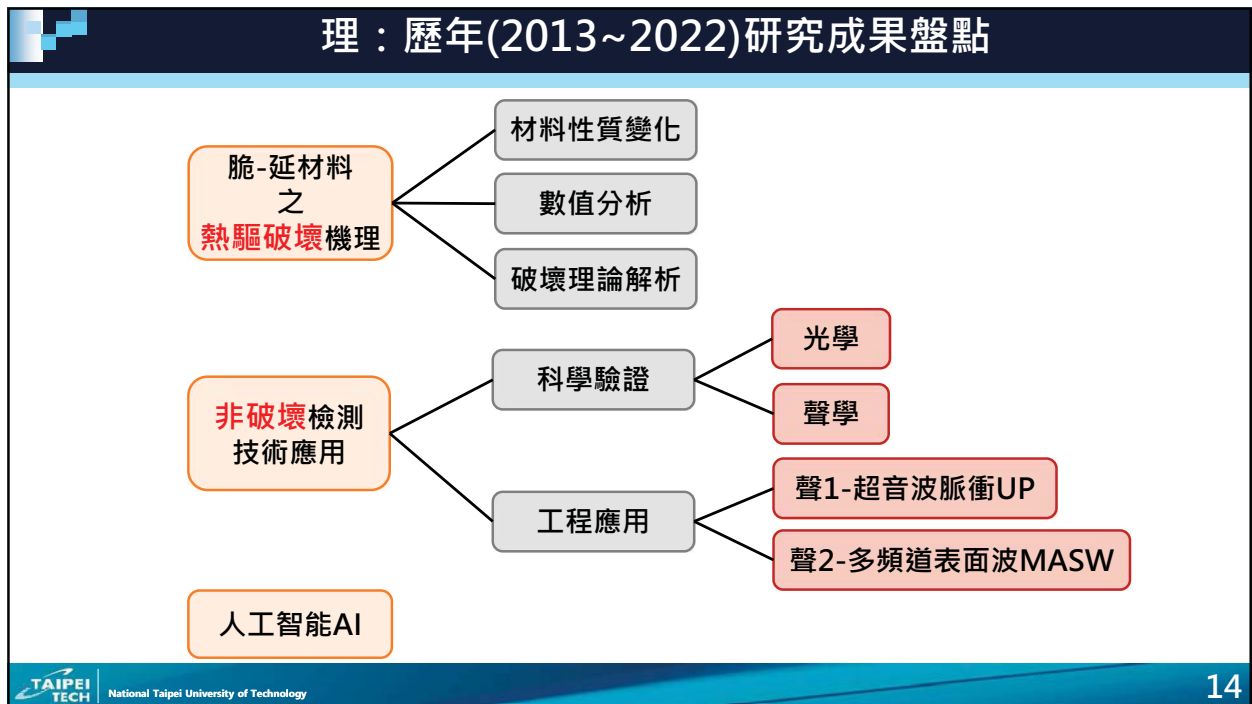
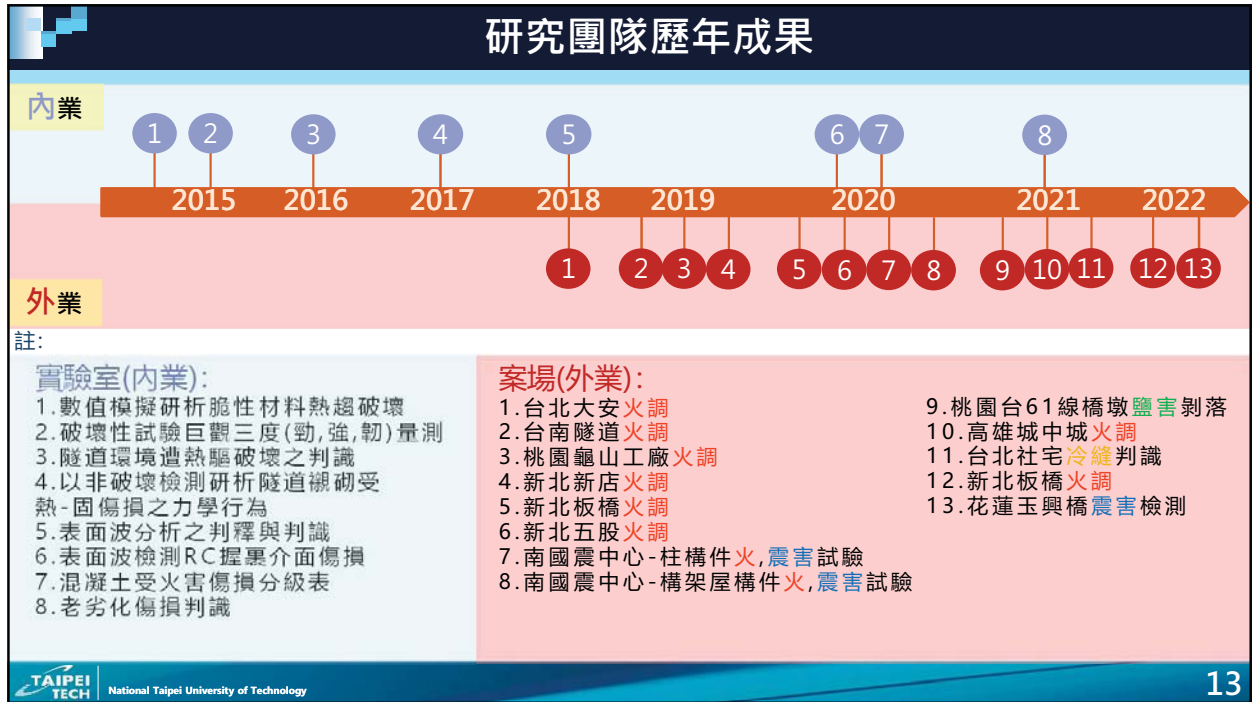
昔、今 火損鑑定技術之比較(量化指標)

項目	昔-破壞性試驗	今-非破壞檢測
量化輸入指標	<p>(主觀定性)目視, 化驗 火流</p> <p>跡證(非結構殘餘; 高溫後特徵少)</p> <p>1. 鑽心取樣, Coring 高估?%</p> <p>2. 燒失量, LOI 低估?% (重量損失(800°C ↑); 線性迴歸)</p> <p>3. 碳化試驗, C_d (破壞性試驗)</p>	<p>剪-壓波速比, $\frac{V_s}{V_p}$</p> <p>(Secondary/Primary Velocities ratio) (客觀定量)</p> <p>跡證(結構殘餘; 高溫惰性材料)</p> <p>學以致用、減少破壞、巨+微觀: 峰前+峰後</p> <p>(體積變化(200°C ↑); 非線性迴歸; AI分析)</p> <p>(非破壞檢測)</p>
量化輸出指標	<p>案場模擬-鑽心取樣 (火害後不同傷損程度)</p> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;"> </div> <p>學界: 穩態 (內外均溫) 業界: 暫態 (溫度遞減)</p>	<div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;"> </div> <p>單向度熱傳理論計算公式(黃崑瑋, 2017)</p>

使用 $f'_{c\ avg}$ 取代 $f'_{c\ min}$ 明顯高估

TAIPEI TECH National Taipei University of Technology

12



例：歷年(2013~2022)研究成果盤點



實驗室

內 8
外 13

案場





火16、震害3

物 19
化 2

冷縫、鹽害



冷縫
鹽害
(橋墩保護層脫落)

冷縫(kknews, 2018)

*冷縫亦屬耐震標章品控要求



橋2、隧1

行 3
住 18

= 總量21, 2013年~迄今




15

研究成果

編號	項目	年份	作者
1	有限元素法研析擬脆材料受熱驅破壞之熱-固耦合	2013	施佩文
2	連續熱損顆粒材之破裂韌度與拉力強度及齊聲、光破壞演化	2013	張育誠
3	擬脆性固材於熱驅破壞之準靜、動態力學行為	2015	劉岷璋*
4	應用「聲-光」非破壞檢測於無機聚合基質材料受液驅破壞之巨、微觀力學特徵	2015	王榆柔
5	土、建工程之脆延性固材於熱力-固力耦合下之巨-微觀破壞特徵及火害度判識	2015	曹祖璟
6	結合聲-光非破壞檢測於隧道環境遭熱驅破壞之傷損判識	2016	柯志揚
7	以聲-光非破壞檢測判識隧道襯砌受熱-固傷損之力學行為	2017	黃崑瑋
8	以導波技術檢測鋼筋混凝土握裹介面傷損之初探	2018	楊佳嘉
9	複合式超音波脈衝與多頻道導波法於鋼筋混凝土構材之火災鑑識及其延-脆介面之握裹傷損評估	2020	黃仁佑
10	以超音波脈衝與導波技術檢測鋼筋混凝土之火害受損程度與握裹介面傷損	2020	王力平
11	水泥基質材料的剪-壓波速特徵及其人工智能分析於火場熱源調查與構材傷損判識-地上建築與地下隧道為例	2020	陳煜
12	應用體-表耦合波傳技術於熱驅破壞與材料傷損之鑑識-老/劣化水泥基質材料和風化砂岩為例	2021	曾畊嘉

註：*為博士生



16

歷年研究之理論

類型		編號	項目	路徑連結
脆-延材料之 破壞機理	材料性質	1	水泥砂漿熱學性質	🔗
		2	「脆性」材料受熱後力學性質	🔗
		3	「脆-延」材料受高溫後之材料性質變化	🔗
	數值分析	4	ABAQUS熱傳導與應力分析之運算邏輯	🔗
	熱-固 破壞理論解析	5	彈/塑性理論解析	🔗
		6	熱傳導理論	🔗
		7	單向度熱傳導理論	🔗
		8	固材之破壞理論	🔗
		9	熱力驅動破壞之沿革	🔗
		10	「熱力-固材」驅動破壞理論	🔗
		11	鋼筋混凝土傷損機制	🔗









歷年研究之理論

類型		編號	項目	路徑連結
非破壞檢測 技術應用	科學 驗證	光學	12 電子斑紋干涉技術	🔗
		聲學	13 聲射技術之沿革與應用	🔗
		波傳 原理	14 基本波傳理論	🔗
			15 彈性應力波傳理論	🔗
	工程 應用	聲1	16 超音波脈衝量測技術	🔗
			17 超音波脈衝量測應用	🔗
		聲2	18 表面波震測法	🔗
			19 表面波及其頻散現象	🔗
			20 導波量測技術於鋼筋混凝土的應用	🔗
			21 導波應用於鋼筋握裹狀況評估	🔗
人工智能AI	22 線性回歸(Linear Regression)	🔗		
	23 支援向量機(SMOreg)			
	24 類神經網絡(Multilayer Perceptron)			
	25 決策樹(M5P)			

歷年研究實績

編號	項目	年份	結構體	老劣化傷損型態		檔案路徑
				老化(A)/劣化(D)	物/化性	
1	台北市大安區民宅火調	2018	建築	D	物	
2	台南市隧道火調	2019	隧道	D	物	
3	桃園龜山區工廠火調		建築	D	物	
4	新北市新店區民宅火調		建築	D	物	
5	新北市板橋區民宅火調	2020	建築	D	物	
6	新北市五股區民宅火調		建築	D	物	
7	台南國家地震中心-柱構件之火、震害試驗		建築	D	物	
8	台南國家地震中心-構架屋構件之火、震害試驗		建築	D	物	
9	桃園市台61線橋墩鹽害剝落	2021	橋梁	D	化	
10	高雄市城中城火調		建築	D	物	
11	台北市社宅冷縫判識		建築	D	化	
12	新北市板橋區民宅火調	2022	建築	D	物	
13	花蓮縣玉興橋震害檢測		橋梁	D	物	

操作手冊與數位典藏

編號	項目	年份	檔案路徑
1	聲射(AE)教學影片	2018	
2	超音波脈衝(UP)操作手冊	2019	
3	聲射(AE)操作手冊	2019	
4	電子斑紋干涉(ESPI)操作手冊	2019	
5	超音波脈衝(UP)教學影片	2019	
6	多頻道表面波(MASW)操作手冊	2020	
7	多頻道表面波(MASW)分析手冊	2020	
8	多頻道表面波(MASW)教學影片	2020	

成果展現

編號	項目		數量
1	論文發表	SCI期刊	6
2		研討會(獲獎篇數2篇)	12
3	專利申請	a.火害傷損判識系統 b.水泥基質結構物聲學的火害判別方法 c.水泥基質結構物聲學的火害判別裝置 d.火害傷損判識之方法	4
4	人資投產	碩士(曹祖璟、王榆柔、柯志揚、黃崑瑋、楊佳嘉、林欣蓉、黃仁佑、王力平、陳煜、曾畊嘉、林心怡)	11
5		博士(陳立憲、陳堯中、劉崧璋、陳偉志)	4
6	合作推廣	新北市消防局MOU簽訂 台北市、新北市消防局火調科技術推廣 建研所技轉推廣	4

Outline

- Part 1 .混凝土構材受火害之理論基礎
 - 熱驅破壞理論基礎
 - 非破壞檢測原理及應用
- Part 2 .混凝土火害傷損(含與鋼筋握裹)之檢測驗效與例證
 - 火害案例成果分享
- Part 3 .混凝土之老、劣、風化非破壞檢測擴大應用之可行性
 - 混凝土老、劣、風化案例成果分享
 - 檢測操作示範分享
 - 展望

講習摘要

審視火災於鋼筋混凝土結構傷損仍為消防署災損調查報告之首要，惟昔見之破壞性鑑定調查既因鑽芯取樣再傷火損結構；後續費時之傷損鑑定方法又多屬低估，邇來有一「**新速實簡廉**」的非破壞性聲學檢測判識方法，係以”快篩型”的**體波**(body wave, 剪力波與壓縮波)作表層混凝土(抗壓強度與鋼筋保護層)的火害最大可能之傷損分佈評估；及”詳查型”的**表面波**(surface wave)作其構材內部(含鋼筋握裹)劣化分析之診察。


藉由**熱驅式破壞力學**與**非破壞聲學**之學理研析；與內、外業之案例實證驗效，確保其科學鑑識之信度與效度。

該項技術已獲內政部建研所技轉推廣、四項專利與相關期刊論文發表、學研合作與獲獎(成大/北科大)、消防署與新北市消防局多年合作案場調研、晚近刊入土木技師公會鑑定手冊等諸項肯認。

Part 1 .混凝土構材受火害之理論基礎


介紹擬脆性材料(Quasi-brittle)如混凝土、砂漿之水泥基質材，受到熱力驅動破壞(Heat-driven Damage)的機理與特徵，先以實驗室微觀的聲學與光學同步耦合驗證其熱驅破壞演化；暨其非破壞檢測之波傳(體波與表波)原理與應用。

熱驅破壞理論基礎


25

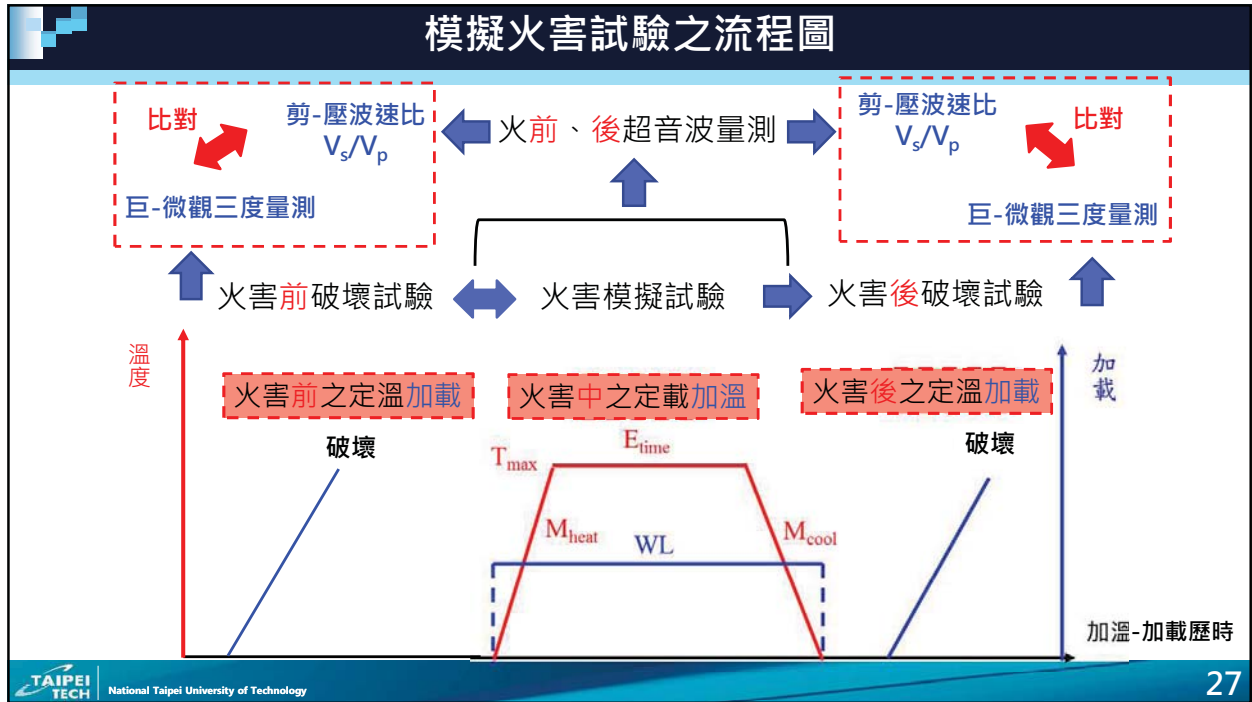
總架構 3³⁺⁵ 個試驗

Input (因)	Output (果)
<p>M1, 脆-延材料及其介面</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> 延¹ 延+脆³ </div> <p>脆² → 3變數</p> <p>M2a, 熱-固耦合之火害應力場</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> 最高溫度¹ 昇溫速率² </div> <p>持溫時間³ 降溫方式⁴ → 5變數</p> <p>工作載重比⁵</p> <p>M2b, 火害前後之比對</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 新型完整歷程單壓試驗 (COD控制) 碳化試驗 </div> <p>M3, 量測</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> 聲：AE 聲射(被動) 導波量測 </div> <p>UP 超音波(主動)</p> <p>光：ESPI電子斑紋干涉</p>	<p>D1, 資料擷取</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 巨觀：勁、強、韌度 微觀：叢聚、初裂、裂衍 握裏傷損判識 連續火場溫度分布 量測指標：剪-壓波速比 V_s/V_p </div> <p>D2 & D3 資料分析& 探勘</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> 資料分析 資料探勘 </div> <p>資料庫建置</p> <p>系統整合</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 探傷檢測系統韌體 </div> <p>應用推廣 Application</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: flex; justify-content: space-between;"> 專利申請 外業量測 </div> <p>學術投稿、發表 技術推廣/教育訓練</p>



既有(鑽芯)：破壞、費時、強度表裡不均 → 新增(超音波)：新、速、實、簡

26



擬脆性材料：單向度熱傳導理論解析-物理場描述(升溫段)

目的：求算試體受邊界溫度(升溫)之內部溫度分布

假設一無限平板(infinite plan) · 材料為均質等向之固體(混凝土)

控制方程式： $\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ B.C. $T(0,t)=T(L,t)=bt$
 I.C. $T(x,0)=T_0$

$$T(x,t) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_p \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \times \sin \frac{n\pi x}{L} \times \frac{2}{L} \int_0^L \left(\frac{b}{2\alpha_p} x^2 - \frac{bL}{2\alpha_p} x \right) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \right] + \frac{b}{2\alpha_p} x^2 - \frac{bL}{2\alpha_p} x + bt \quad n=1,2,3,\dots$$

初始溫度 ($T_0=0$) 升溫速率 (b) 升溫時間 (t) 試體厚度(L) 熱擴散係數 (α_p)

b ：升溫速率(°C/min)

TAIPEI TECH National Taipei University of Technology 28

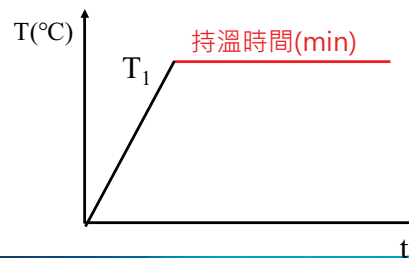
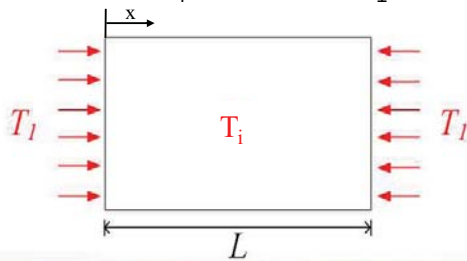
擬脆性材料：單向度熱傳導理論解析-物理場描述(持溫段)

目的：求算試體受邊界溫度(持溫)之內部溫度分布

控制方程式 $\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ B.C. $T(0,t)=T(L,t)=T_1$
 I.C. $T(x,0)=f(x)$

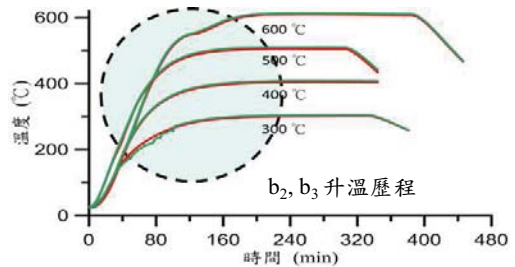
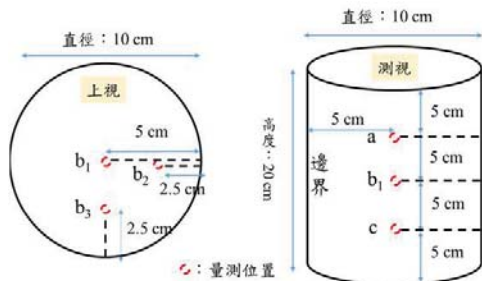
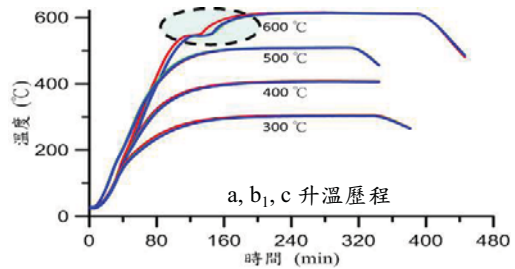
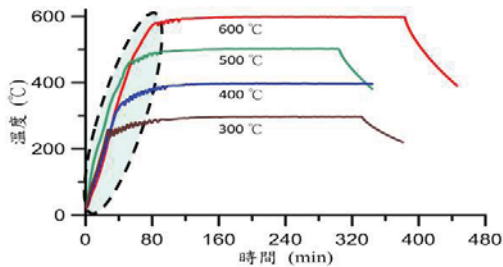
$$T(x,t) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_p \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 (t-t_1)} \times \sin \frac{n\pi x}{L} \times \frac{2}{L} \int_0^L (f(x) - T_{\max}) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \right] + T_{\max}, n=1,3,5$$

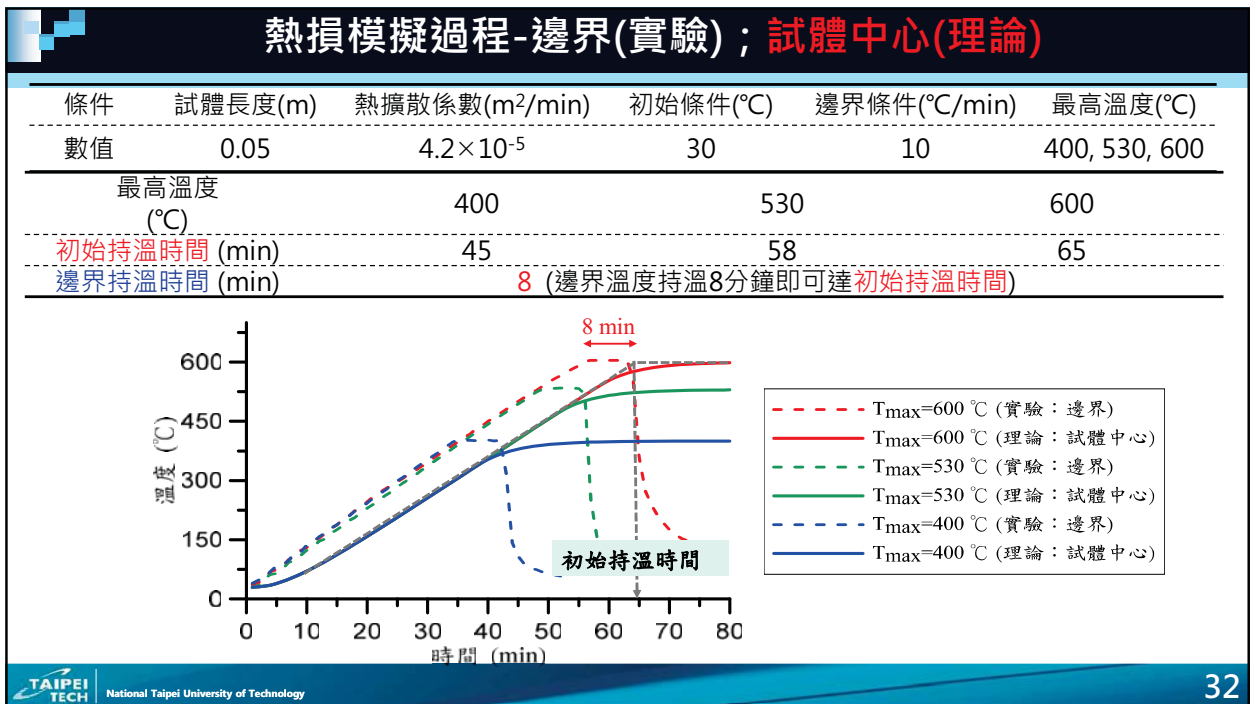
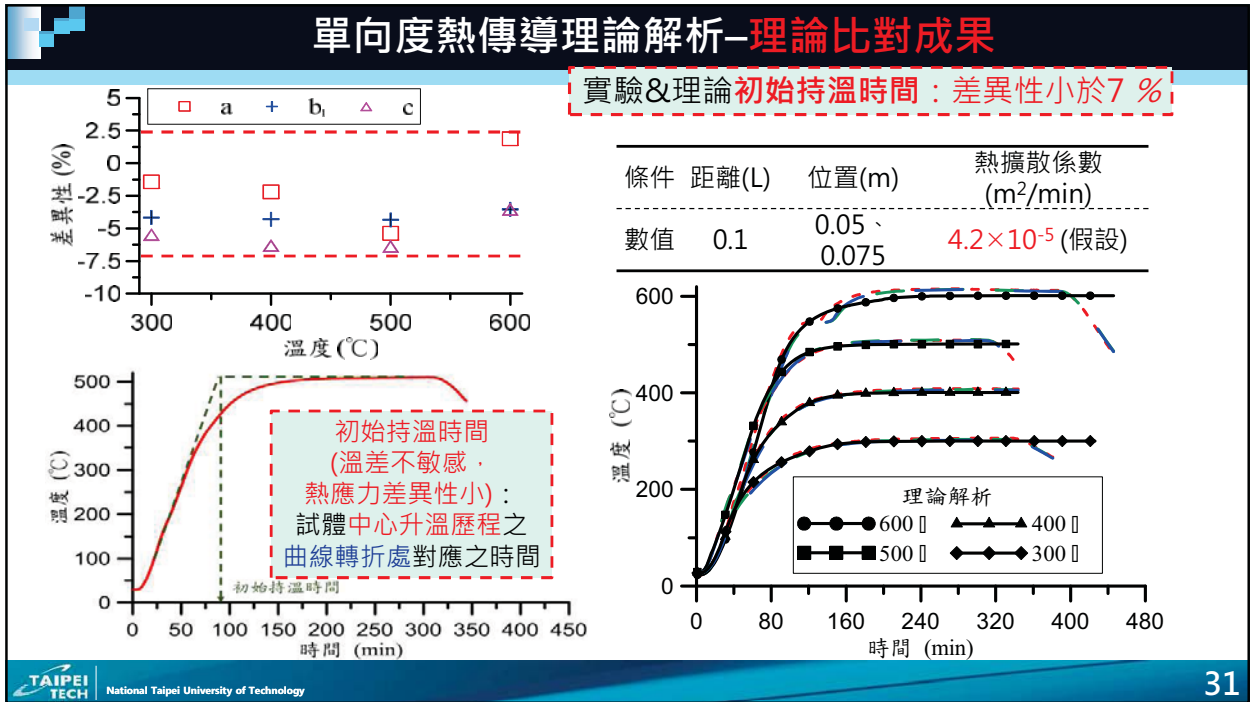
初始溫度 (T_i) 邊界溫度 (T_1) 持溫時間 (t) 試體厚度 (L) 熱擴散係數 (α_p)

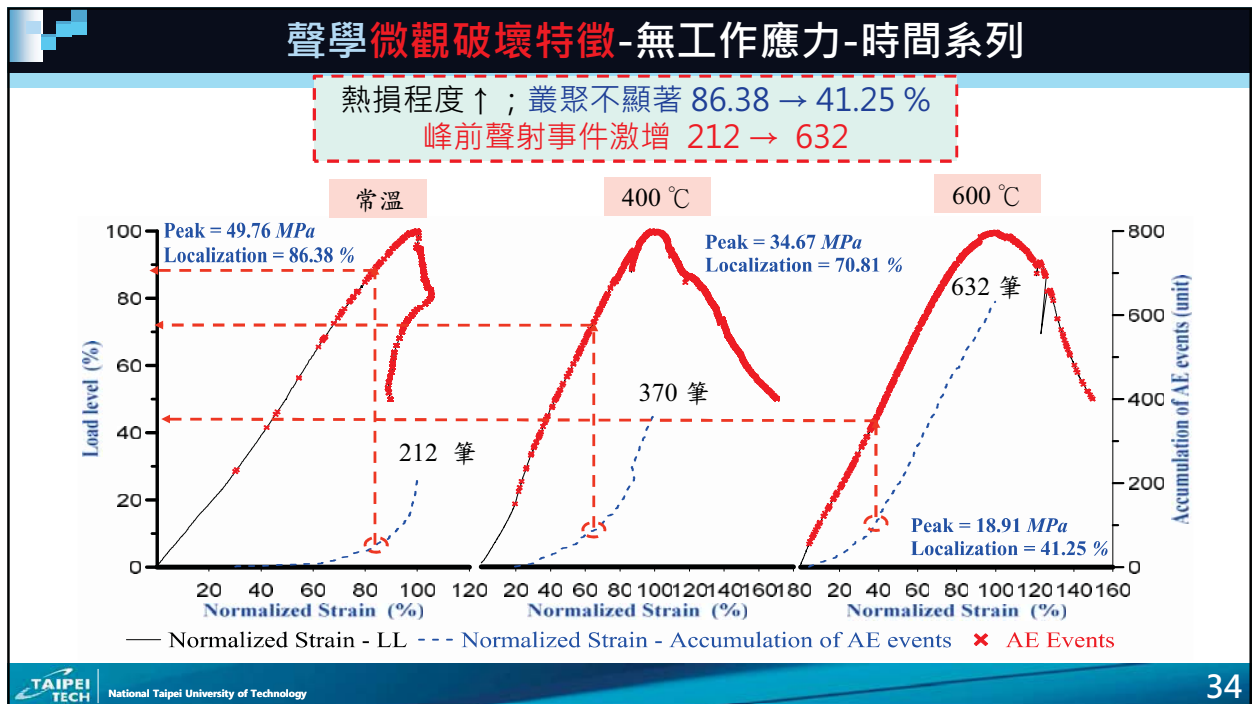
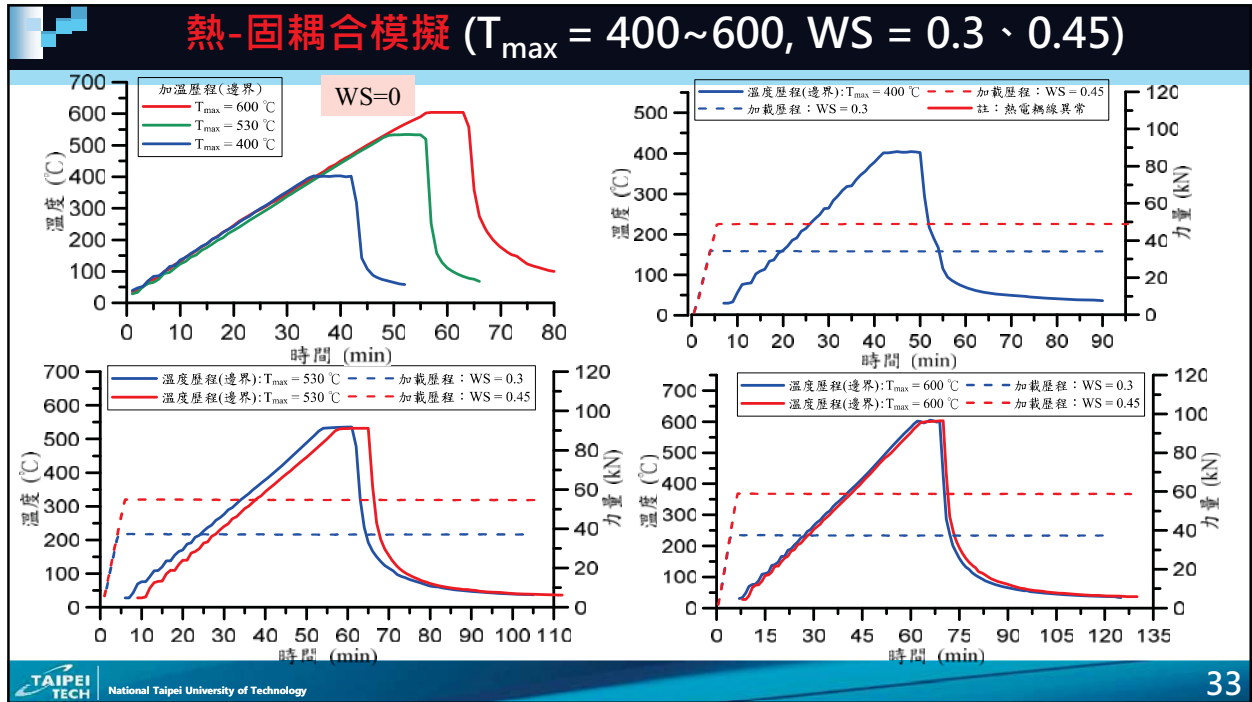


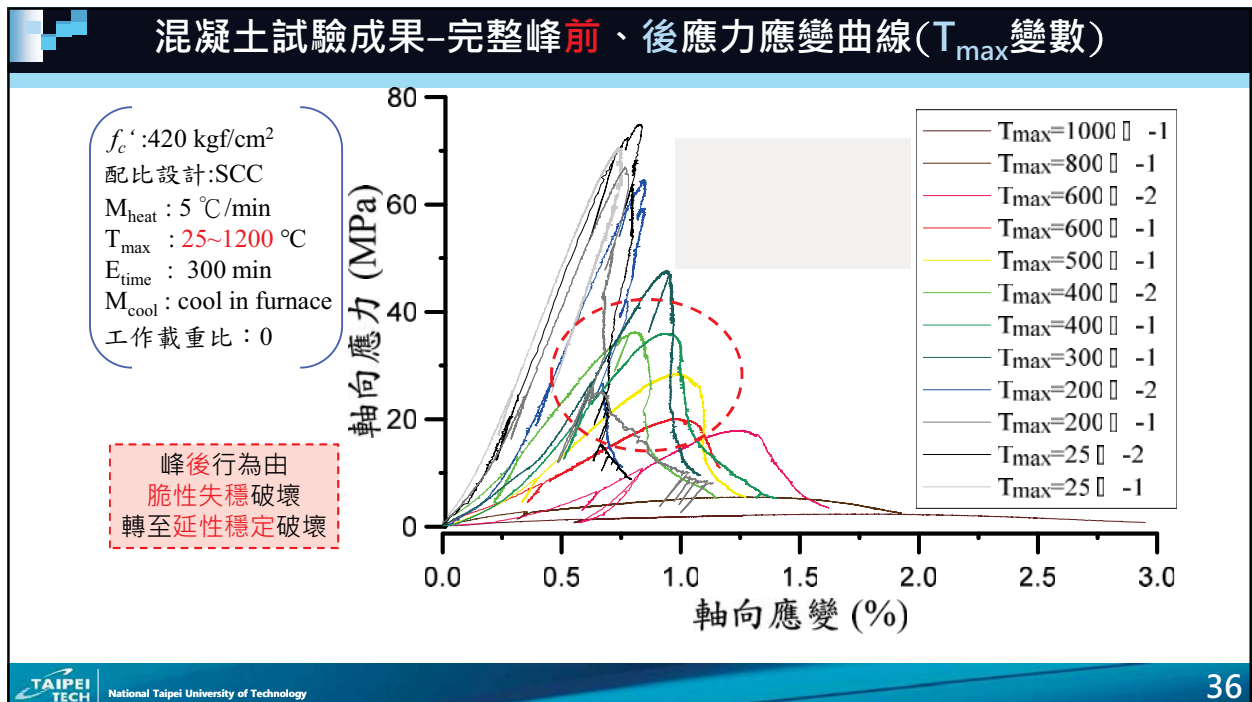
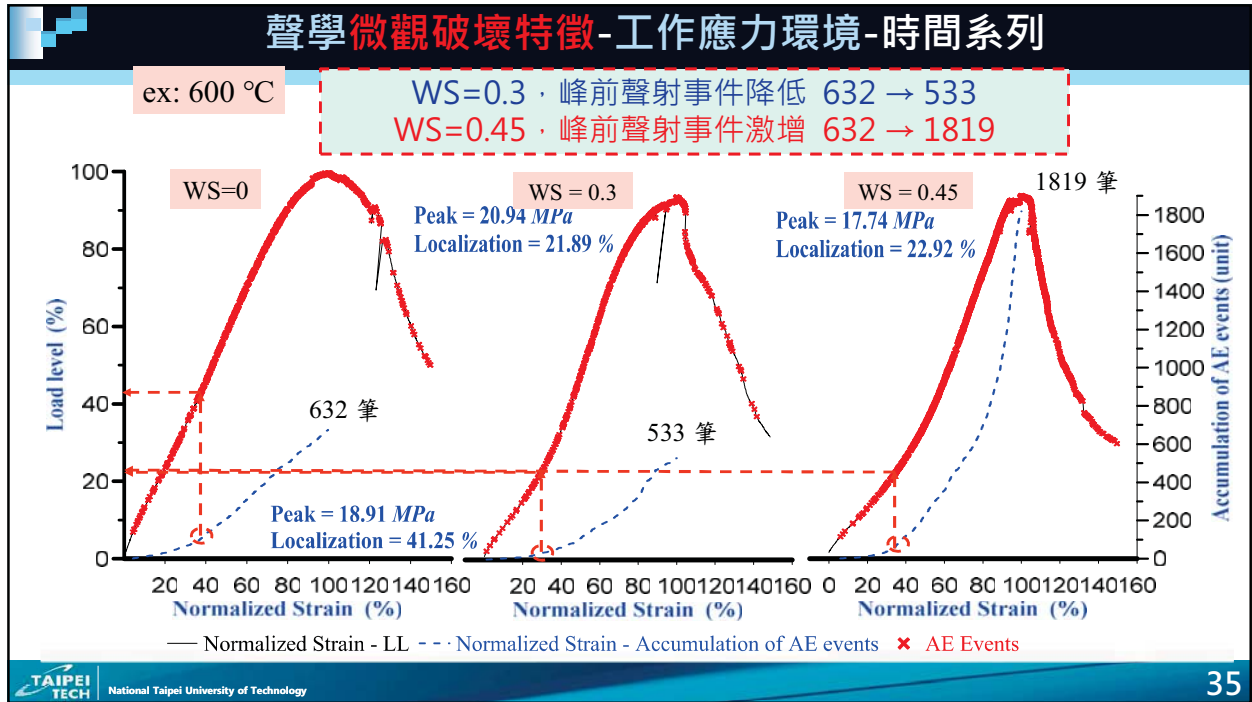
單向度熱傳導理論解析-溫度量測成果

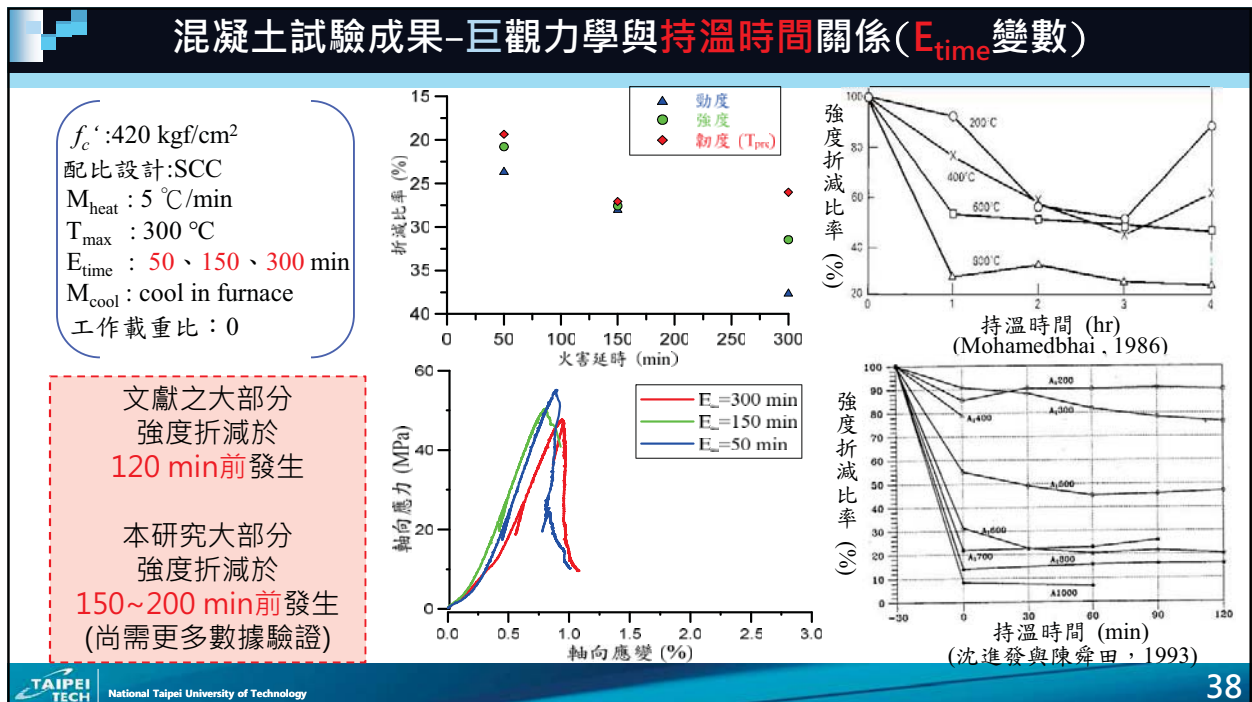
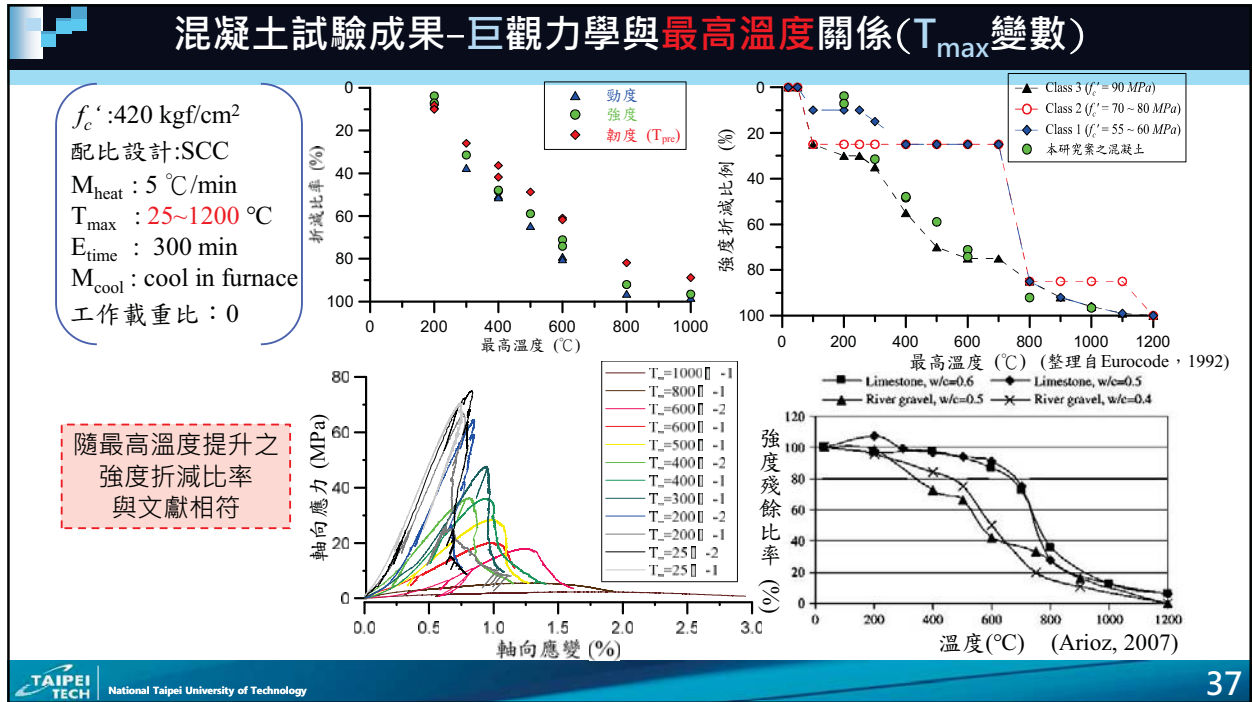
邊界：升溫段(非線性)以線性模擬

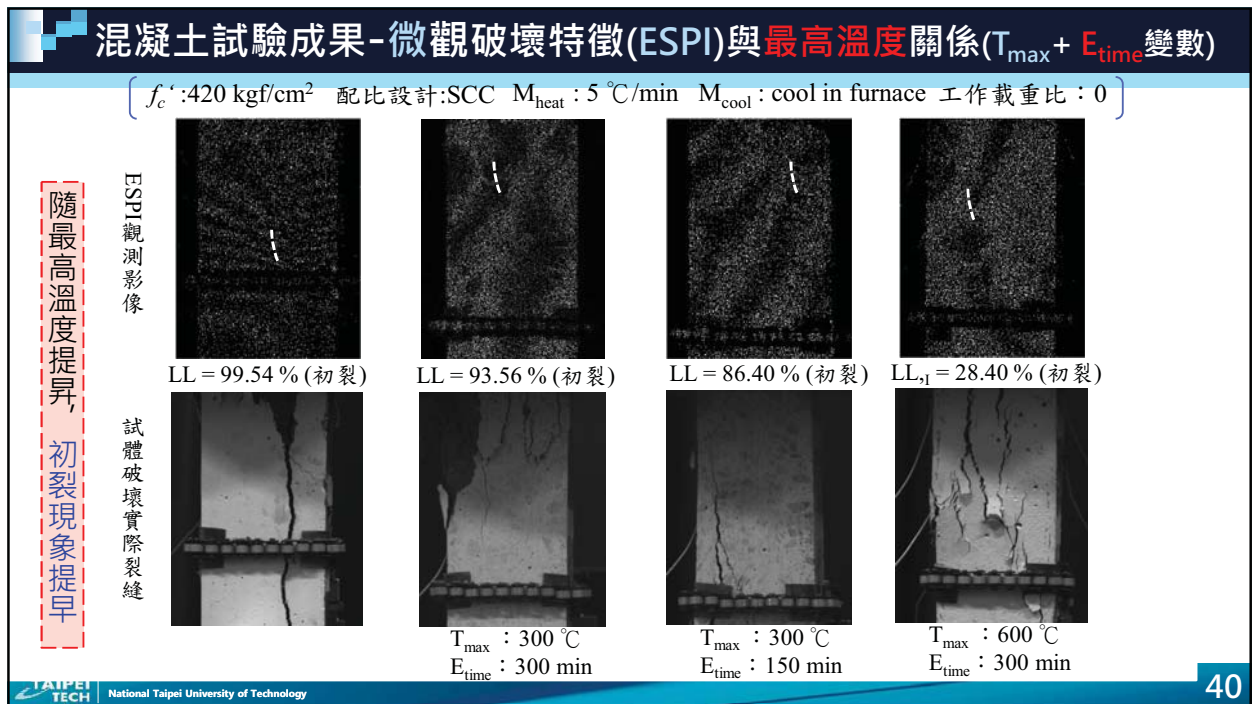
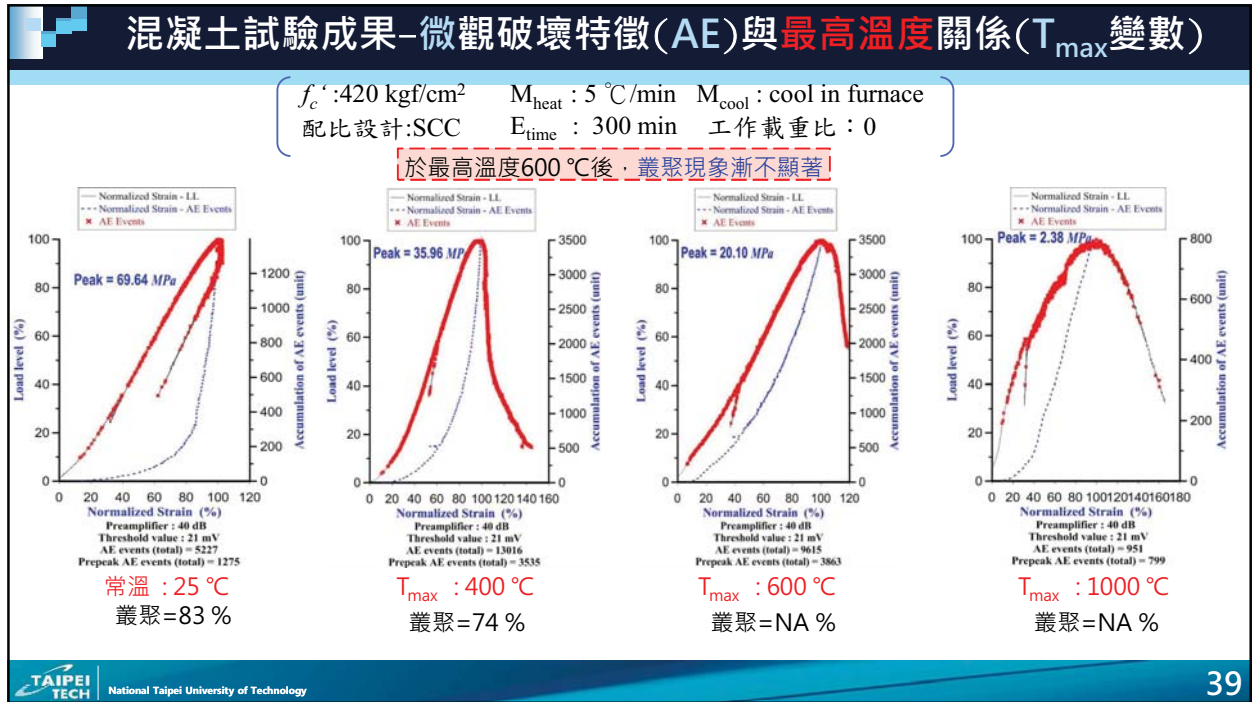


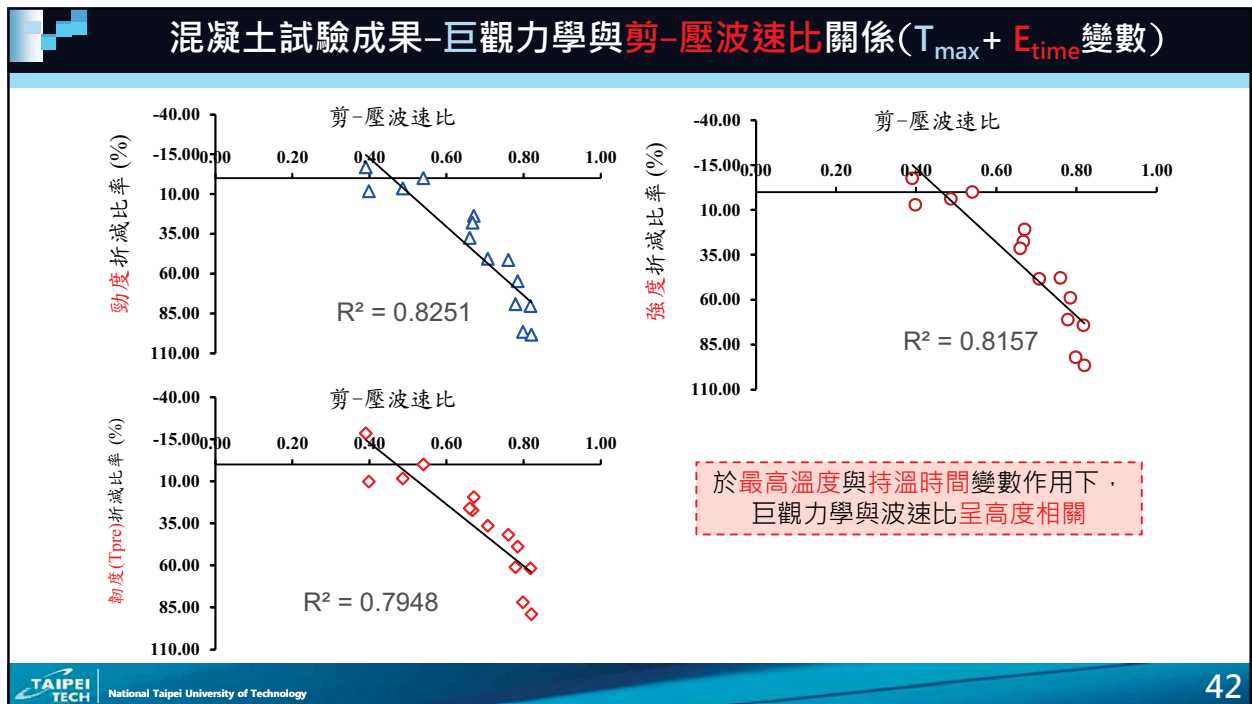
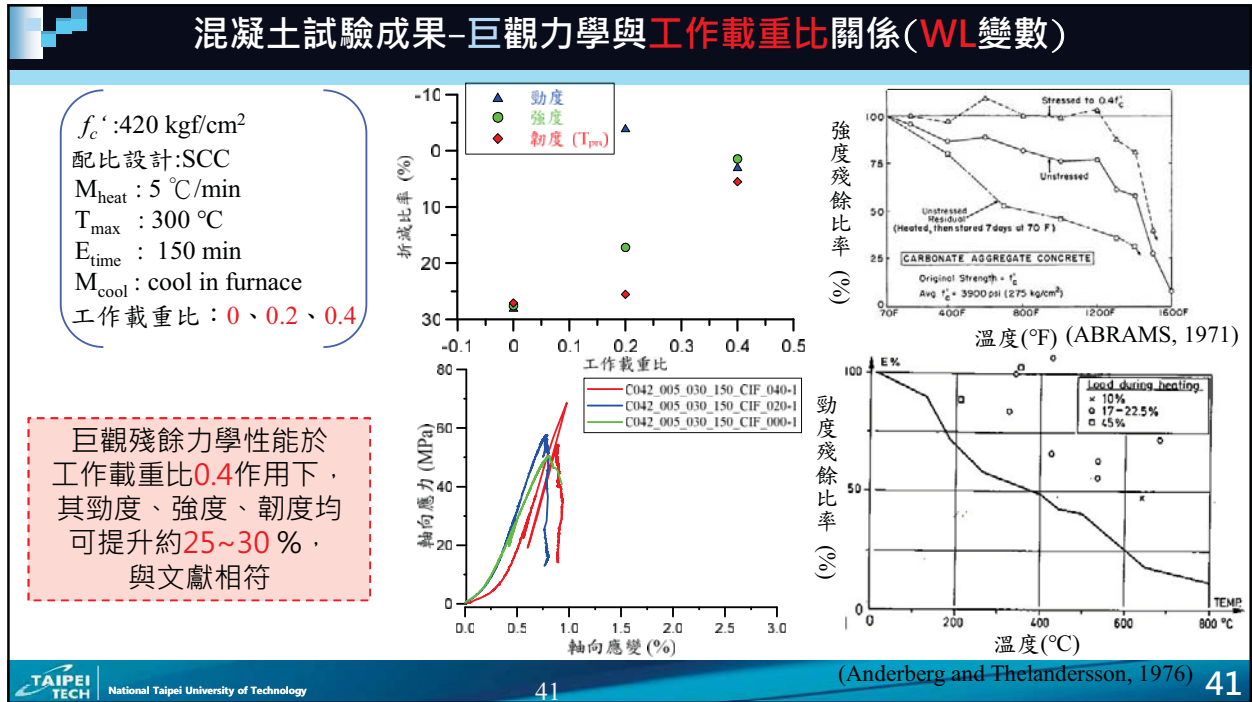


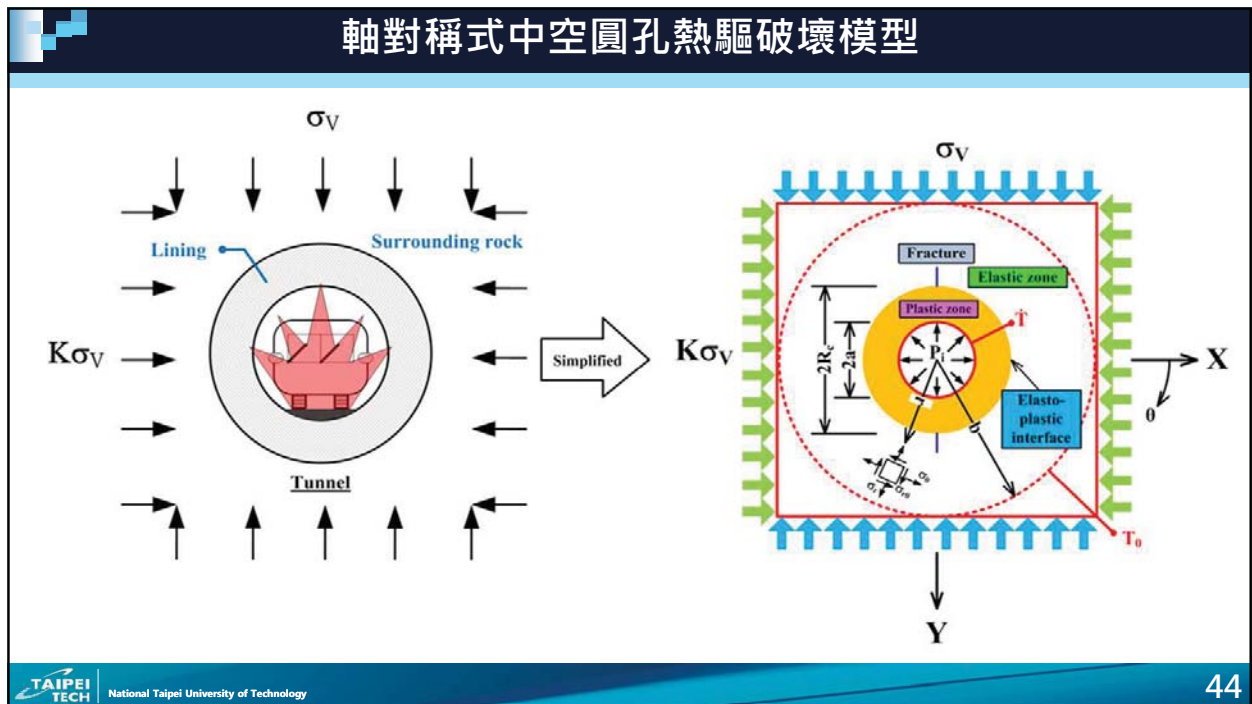
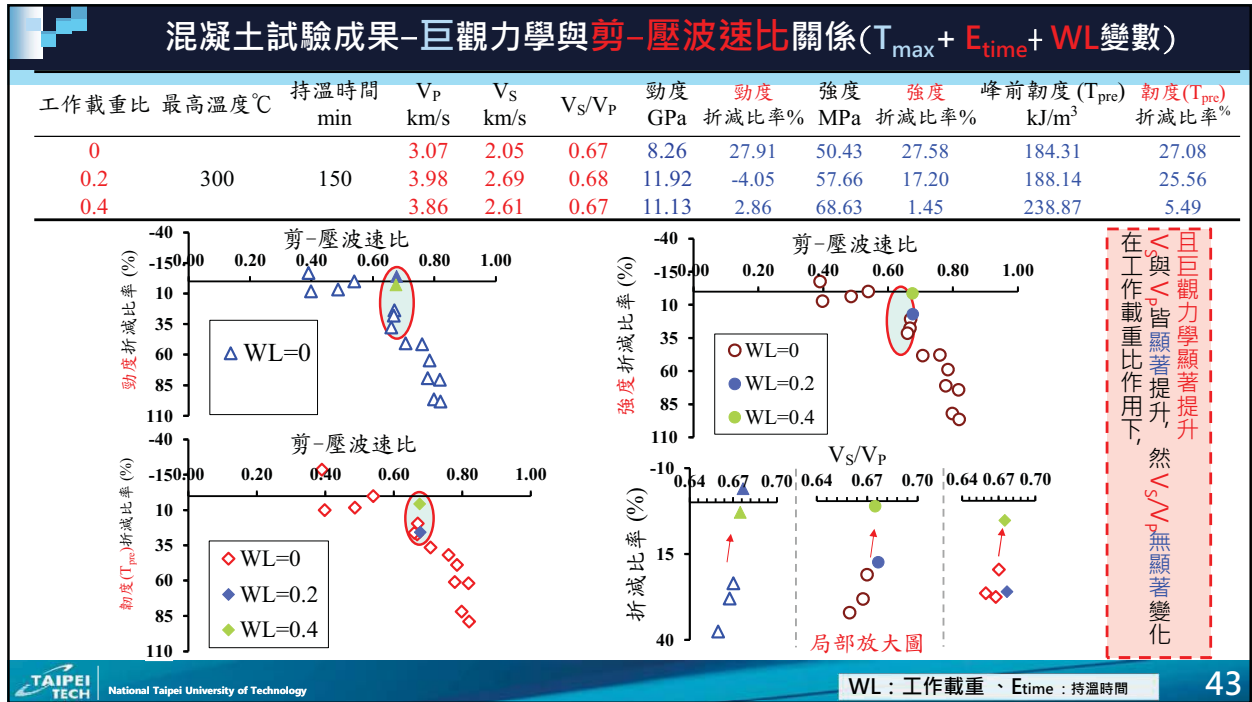




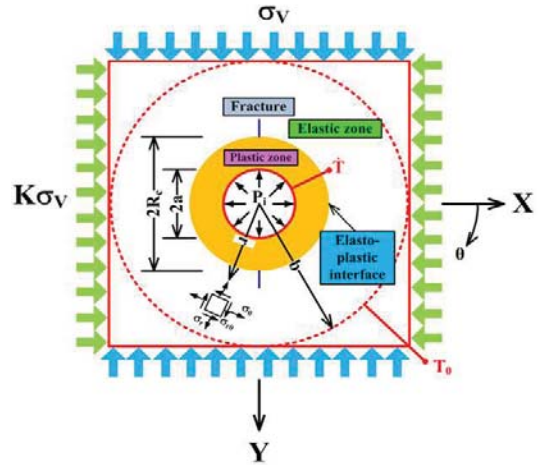
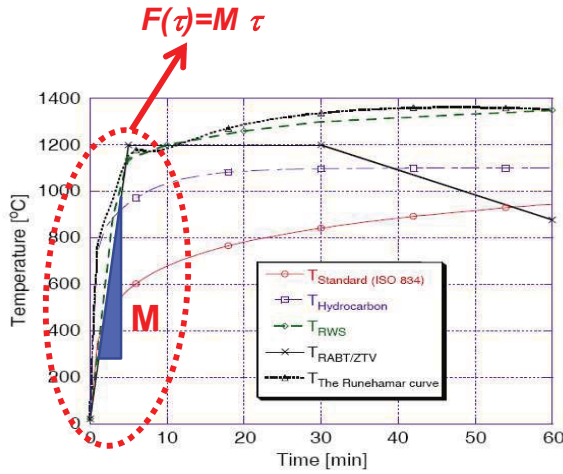






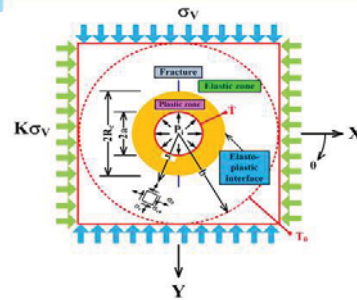
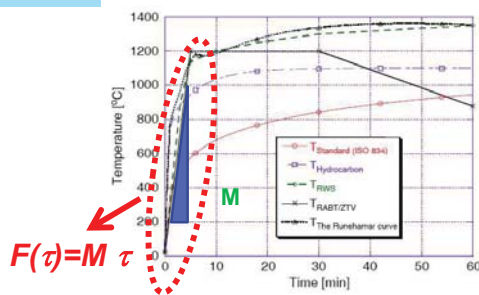


軸對稱式中空圓孔熱驅破壞-理論解析



模型內孔邊界有一線性熱驅溫度作用，如發生之初期

Dimensional Analysis



$$\sigma_{ij} = f(b, a, r, E, \nu, \alpha, \sigma_v, K\sigma_v, \sigma_c, T_0, Mt_f, t_i, t_f, \alpha_p, \theta, P_i, c, \phi)$$

FLTS單位系統 (力量F, 長度L, 溫度T, 與時間S)

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_c} = f\left(\frac{b}{a}, \frac{r}{a}, \frac{E}{\sigma_c}, \alpha T_0, \frac{\sigma_v}{\sigma_c}, \frac{K\sigma_v}{\sigma_c}, \frac{c}{\sigma_c}, \frac{Mt_f}{T_0}, \frac{t_i}{t_f}, \frac{t_i}{t_f}, \frac{\alpha_p}{a^2 t_f}, \frac{P_i}{\sigma_c}, \nu, \theta, \phi\right)$$

$$\sigma_{ij}^n = f(\Gamma^b, \Gamma, E^n, \alpha^n, \sigma_v^n, K\sigma_v^n, c^n, M^n t_f^n, t_i^n, t_f^n, \alpha_p^n, P_i^n, \nu, \theta, \phi)$$

Dimensional Analysis

分離變數法

$$U(\Gamma, t) = R_v(\Gamma) T_t(t^n)$$

Bessel function

$$R_v'' + \frac{1}{r} R_v' + \beta^2 R_v = 0$$

Duhamel's theorem

$$\theta(\Gamma, t^n - \tau^n) = \int_{\tau^n=0}^{\tau^n=t^n} \phi(\Gamma, t^n - \tau^n) \frac{dF(\tau)}{d\tau} d\tau$$

熱彈應力積分函數

$$\sigma_r^n = \alpha^n E^n \frac{1}{\Gamma^2} \left[\left(\frac{\Gamma^2 - 1}{\Gamma^{b^2} - 1} \right) \int_1^{\Gamma^b} \theta^n \Gamma d\Gamma - \int_1^{\Gamma} \theta^n \Gamma d\Gamma \right]$$

$$\sigma_\theta^n = \alpha^n E^n \frac{1}{\Gamma^2} \left[\left(\frac{\Gamma^2 + 1}{\Gamma^{b^2} - 1} \right) \int_1^{\Gamma^b} \theta^n \Gamma d\Gamma + \int_1^{\Gamma} \theta^n \Gamma d\Gamma - \theta^n \Gamma^2 \right]$$

$$\theta^n(\Gamma, t^n) = \frac{M^n}{\ln(\Gamma^b)} \left\{ \ln\left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma}\right) t^n - \frac{\pi^2}{2} \sum_{m=1}^{\infty} J_0^2(\beta_m) \begin{vmatrix} J_0(\beta_m \Gamma) & J_0(\beta_m \Gamma^b) \\ Y_0(\beta_m \Gamma) & Y_0(\beta_m \Gamma^b) \end{vmatrix} \right.$$

$$\left. \times \frac{1}{\alpha_p^n} \left[1 - e^{-\beta_m^2 \alpha_p^n t^n} \right] \times \sum_{\Gamma=1}^{\Gamma^b} \Gamma \begin{vmatrix} J_0(\beta_m \Gamma) & J_0(\beta_m \Gamma^b) \\ Y_0(\beta_m \Gamma) & Y_0(\beta_m \Gamma^b) \end{vmatrix} \ln\left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma}\right) \Delta\Gamma \right\}$$

線性熱驅熱傳解

熱力驅動彈力解 $\xrightarrow{\text{耦合}}$ 內、外徑固力作用

熱力驅動塑力解

47

線性熱驅彈性解析解-徑向應力

$$\sigma_r^{n, E} = \frac{\alpha^n E^n M^n}{2 \ln(\Gamma^b) \Gamma^2} \left\{ t^n \left[- \left(\frac{\Gamma^2 - \Gamma^{b^2}}{\Gamma^{b^2} - 1} \right) \ln(\Gamma^b) - \Gamma^2 \ln\left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma}\right) \right] \right.$$

$$\left. - \pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0^2(\beta_m)}{\begin{vmatrix} J_0(\beta_m) & J_0(\beta_m \Gamma^b) \\ J_0(\beta_m \Gamma^b) & J_0(\beta_m) \end{vmatrix}} \frac{1}{\alpha_p^n} \left[1 - e^{-\beta_m^2 \alpha_p^n t^n} \right] \times \left[\sum_{\Gamma=1}^{\Gamma^b} \Gamma \begin{vmatrix} J_0(\beta_m \Gamma) & J_0(\beta_m \Gamma^b) \\ Y_0(\beta_m \Gamma) & Y_0(\beta_m \Gamma^b) \end{vmatrix} \ln\left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma}\right) \Delta\Gamma \right] \times \right.$$

$$\left. \frac{1}{\beta_m} \left\{ \frac{\Gamma^2 - 1}{\Gamma^{b^2} - 1} \begin{vmatrix} Y_0(\beta_m \Gamma^b) & J_1(\beta_m \Gamma^b) & 1 \\ J_1(\beta_m) & \Gamma^b & \Gamma^b \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} -J_0(\beta_m \Gamma^b) & Y_1(\beta_m \Gamma^b) & 1 \\ Y_0(\beta_m \Gamma^b) & J_1(\beta_m) & \Gamma^b \end{vmatrix} \right\} \right\}$$

$$+ \left(\frac{1}{\Gamma^{b^2} - 1} \right) \left[1 - \left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma} \right)^2 \right] P_r^n + \frac{\sigma_v^n}{2} (1 + K) \left[\left(1 - \frac{1}{\Gamma^2} \right) - \left(1 - \frac{4}{\Gamma^2} + \frac{3}{\Gamma^4} \right) \left(\frac{1 - K}{1 + K} \right) \cos(2\theta) \right]$$

「熱力」驅動

「固力」耦合作用

48

線性熱驅彈性解析解-切向應力

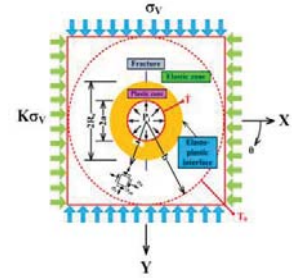
$$\sigma_{\theta}^{n,E} = \frac{\alpha^n E^n M^n}{2 \ln(\Gamma^b) \Gamma^2} \left\{ t^n \left[- \left(\frac{\Gamma^2 + \Gamma^{b^2}}{\Gamma^{b^2} - 1} \right) \ln(\Gamma^b) - \Gamma^2 \ln \left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma} \right) + \Gamma^2 \right] \right.$$

$$\left. - \pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0^2(\beta_m)}{J_0(\beta_m) J_0(\beta_m \Gamma^b)} \frac{1}{\alpha_p} [1 - e^{-\beta_m^2 \alpha_p^n t^n}] \right\} \times \left[\sum_{\Gamma=1}^{\Gamma^b} \begin{vmatrix} J_0(\beta_m \Gamma) & J_0(\beta_m \Gamma^b) \\ Y_0(\beta_m \Gamma) & Y_0(\beta_m \Gamma^b) \end{vmatrix} \ln \left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma} \right) \Delta \Gamma \right] \times$$

$$\frac{1}{\beta_m} \left\{ \frac{\Gamma^2 + 1}{\Gamma^{b^2} - 1} \begin{vmatrix} J_1(\beta_m \Gamma^b) & 1 \\ J_1(\beta_m) & \Gamma^b \end{vmatrix} - J_0(\beta_m \Gamma^b) \begin{vmatrix} Y_1(\beta_m \Gamma^b) & 1 \\ Y_1(\beta_m) & \Gamma^b \end{vmatrix} - \Gamma^2 \beta_m \begin{vmatrix} J_0(\beta_m \Gamma) & J_0(\beta_m \Gamma^b) \\ Y_0(\beta_m \Gamma) & Y_0(\beta_m \Gamma^b) \end{vmatrix} \right\}$$

$$+ \left[Y_0(\beta_m \Gamma^b) \begin{vmatrix} J_1(\beta_m \Gamma) & 1 \\ J_1(\beta_m) & \Gamma \end{vmatrix} - J_0(\beta_m \Gamma^b) \begin{vmatrix} Y_1(\beta_m \Gamma) & 1 \\ Y_1(\beta_m) & \Gamma \end{vmatrix} \right]$$

$$+ \left(\frac{1}{\Gamma^{b^2} - 1} \right) \left[1 + \left(\frac{\Gamma^b}{\Gamma} \right)^2 \right] P_i^n + \frac{\sigma_V^n}{2} (1 + K) \left[\left(1 + \frac{1}{\Gamma^2} \right) + \left(1 + \frac{3}{\Gamma^4} \right) \left(\frac{1 - K}{1 + K} \right) \cos(2\theta) \right]$$

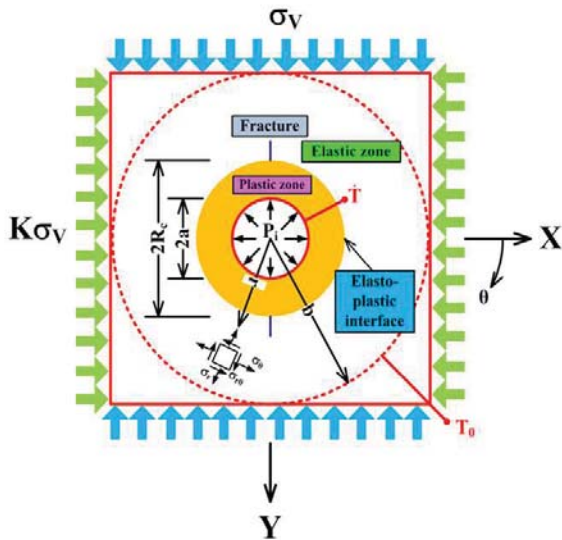


「熱力」驅動



「固力」耦合作用

線性熱驅條件因子



$$\zeta_M = \frac{\alpha^n E^n M^n + (2P_i^n + (1 + K) \sigma_V^n) \alpha_p^n \ln(\Gamma^b)}{2 \ln(\Gamma^b) \alpha_p^n}$$

$$= \frac{\alpha E M a^2 + (2P_i + (1 + K) \sigma_V) \alpha_p \ln(b/a)}{2 \ln(b/a) \sigma_c \alpha_p}$$

線性熱驅塑性解析解

莫爾-庫倫模式與軸對稱問題(K=0 或1)

$$\sigma_{\theta}^{n,p} \frac{1 + \sin \phi}{2c^n \cos \phi} - \sigma_r^{n,p} \frac{1 - \sin \phi}{2c^n \cos \phi} = 1$$

$$\sigma_r^{n,p} = \frac{1}{\Pi} \left[\Gamma^{\Pi} + \frac{\Pi \sigma_{rc}^{n,E} + \Omega}{\Gamma_c^{\Pi}} \right] - \frac{1}{\Pi} \Omega$$

$$\sigma_{\theta}^{n,p} = \frac{1}{m\Pi} \left[\Gamma^{\Pi} + \frac{\Pi \sigma_{rc}^{n,E} + \Omega}{\Gamma_c^{\Pi}} \right] - \frac{1}{\Pi} \Omega$$

臨界彈塑性半徑

$$\Gamma_{Cf}^{\Pi} = \left[\Gamma_{Cf}^{\Pi} \left(m\Pi \sigma_i^n + \frac{1}{\Pi} \Omega \right) - \Pi \sigma_{rc}^{n,E} - \Omega \right]^{0.5}$$

$$\frac{1}{\Pi} = \frac{m}{1-m}$$

$$m = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\Omega = \frac{2c^n \cos \phi}{m(1 - \sin \phi)}$$

51

軸對稱式中空圓孔熱驅破壞-成果(時間)

Experimental

Chen (2001)

- 巨觀裂縫 (初始裂縫)
- 微觀裂縫
- 大量聚集
- 稱為**叢聚**

內孔升溫曲線 →

微震裂源發生時機 (red arrow)

微震裂源累積曲線 (blue arrow)

內孔升溫曲線 (black arrow)

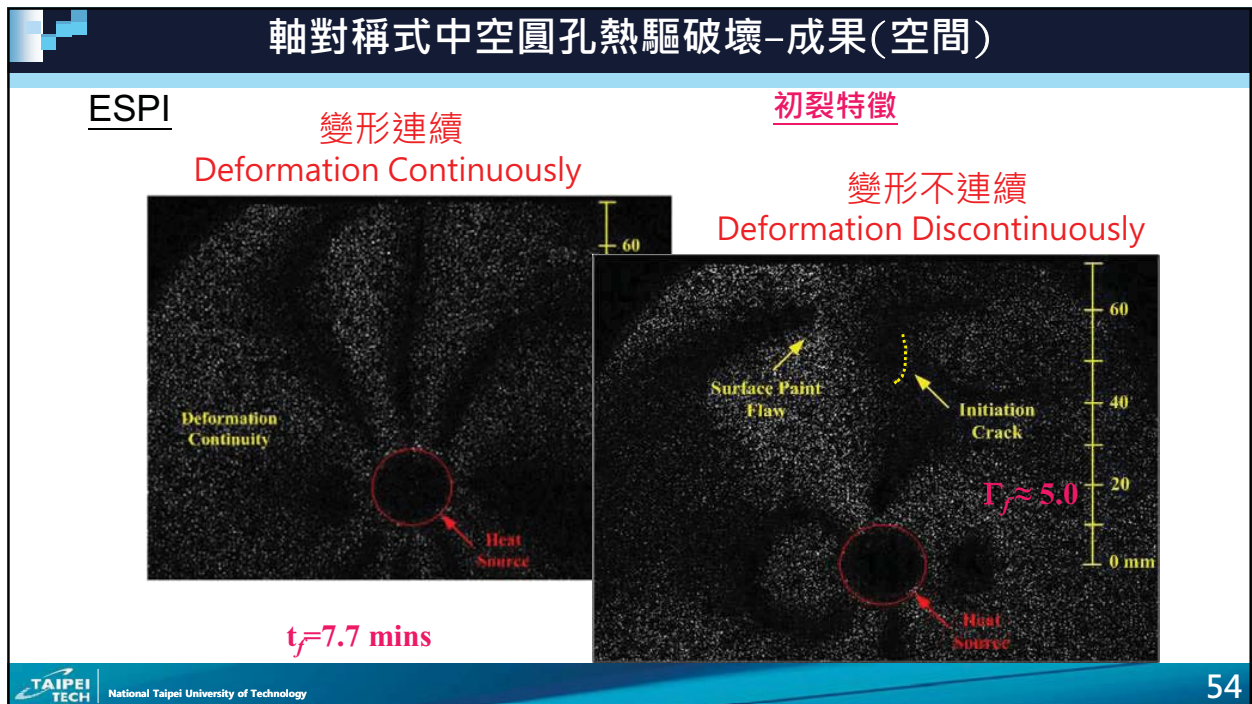
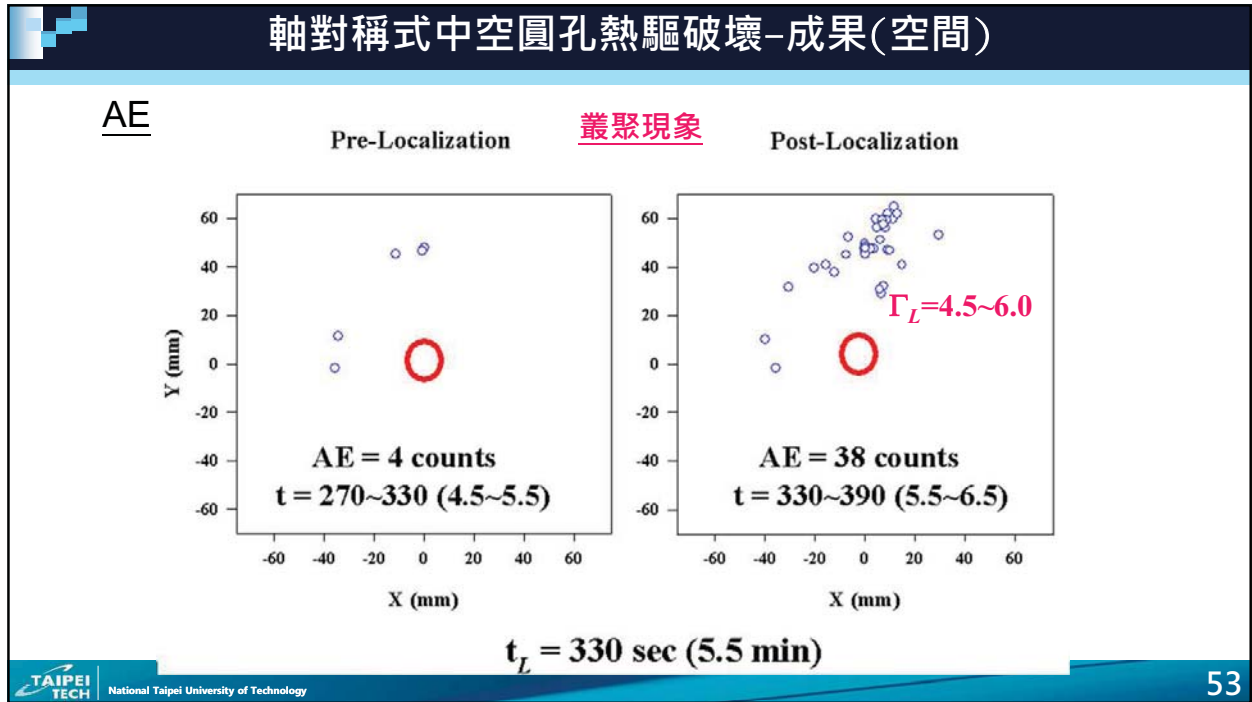
(T-T_i)_L = 79.2

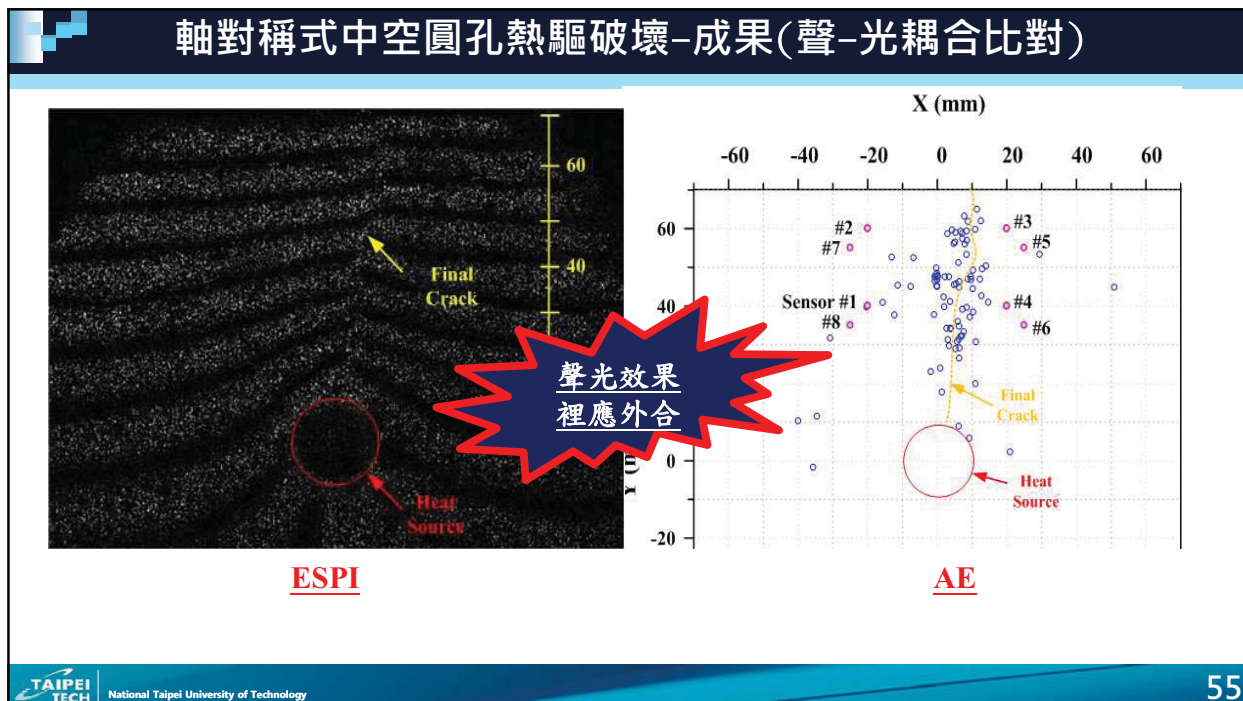
(T-T_i)_L = 63.7

t_L = 330 t_f = 466

Γ^b = 7.0

52





非破壞檢測原理及應用

TAIPEI TECH National Taipei University of Technology

體、表一體：波基法 (Wave-based Method)

體波：超音波脈衝 (Ultrasonic Pulse, UP) - 縱波、橫波 (V_s 、 V_p)
表面波：導波 (Guide Wave, GW) - 多頻道表面波分析 (Multi-channel Analysis of Surface Wave, MASW)
聲射法 (Acoustic Emission, AE) 電子斑紋干涉術 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)

- 耦合體波與表面波技術建置主、被動式聲波法 (UP與GW、AE) · 佐配電子斑點干涉術 (ESPI) 檢測材料內、外部之巨-微觀尺度及複合介面破壞特徵 · 作為火害傷損之科學辨識。

聯結巨-微觀破壞特徵之
正規化傷損判識指標

表、裏微震活動
- 量測微裂時、空演化

超音波
(主動1·體)
UP

聲射
(被動)
AE


導波
(主動2·表)
GW

光干涉
ESPI

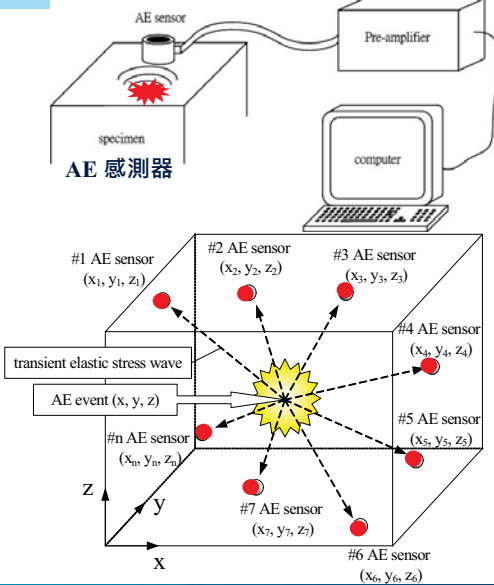
脆-延複合介面
- 握裹喪失段之檢測與定位

表面之微觀變形場
(變形連續DC 與變形不連續DD)

- 並以簡速之主動式聲波為應用量測 · 建立正規化指標 (剪-壓波速比 · V_s/V_p) 與導波特徵 · 定量判識構材之熱損程度。(註：體波: 橫波 V_s 、縱波 V_p)

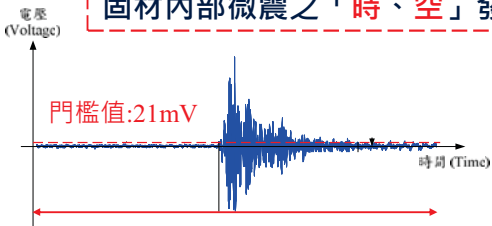

57

聲學-聲射法(AE)



固材內部微震之「時、空」發展

電壓 (Voltage)



擷取頻率：8 MHz


定位：到達時間差法

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$$

$$R_i - R_1 = V_p \times \Delta t_i + \epsilon_i$$

R_i 為 AE 事件至第 i 個感應器之距離
 ϵ_i 為統計之殘差值

4 個未知數


58

光學-電子斑紋干涉術(ESPI)

量測試體表面之面內位移
與變形連續至變形不連續時機

斑點形成原理

雷射光源 A 雷射光源 B

位移

Observer

$$d = \frac{(2n + 1)\lambda}{4 \sin \theta}$$

(產生亮紋)

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

(產生暗紋)

↑ PLAY 50 × 45 × 120 mm

$$\Delta d = \left(\frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \right)$$

λ : 雷射波長 (0.638 μm)
 n : 干涉條紋數
 θ : 雷射光入射角

National Taipei University of Technology

59

「巨」、「微」觀尺度之「時」、「空(表+裏)」破壞演化特徵

微震裂源 (Microseismic sources)

AE 1. Localization, 叢聚

ESPI 2. Crack initiation, 初裂

AE+ESPI 3. Crack propagation, 裂衍

微觀三演化：叢聚、初裂、裂衍

應力 σ

應變 ϵ

彈性 \longleftrightarrow 非彈性

因: 開口裂縫位移計 COD (環狀應變計控制)
(獨立於橫軸、縱軸之回饋訊號控制)

果: 可量化之: 巨觀三度: 勁度、強度、韌度

National Taipei University of Technology

60

火害溫度以剪-壓波速比推估：超音波脈衝(UP)量測

內業(實驗室)

1. 試驗前超音波波速比量測
破壞性試驗巨觀三度(勁、強、韌)量測

2. 連續式固力超音波量測
波速比量測探知連續內部傷損與微觀破壞特徵之關係

3. 連續式熱力超音波量測
連續熱驅破壞致內部傷損與波速比變化之關係

外業(現場)

內/外業
現場超音波波速比量測
推估構材巨觀
量化傷損指標

巨/微觀
UP 熱力傷損 UP
固力&熱力傷損均造成材料內部產生裂隙
現場超音波波速比量測
推估構材微觀破壞特徵

連續式/離散式

離散式超音波構件波速比量測：
1. 起火點位置(供消防單位參佐)
2. 結構系統之全域構材傷損分布

61

主動聲學-超音波脈衝(UP)剪-壓波速比 1/2

膠結材

400~600 °C, -0.5 % length change

Temp. °C (Mindess, 1981)

顆粒材

573 °C, 0.4 % linear expansion

熱漲冷縮(體積變化)

α-Quartz β-Quartz

Temperature (°C)

骨(重量損失)

500 °C · 燒失量: 52%~62%

沈進發·陳舜田與涂耀賢·1991

今(體積變化)

直接：量測困難

間接：波速量測

$$\frac{V_S}{V_P} \propto \nu(\text{Poisson's ratio})$$

62

主動聲學-超音波脈衝(UP)剪-壓波速比 2/2

實然

受熱損後剪-壓波速比上升

$T_{max}=25 \rightarrow 400 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 $V_S/V_P=0.54 \rightarrow 0.71$ (彈性範圍)

$T_{max}=400 \rightarrow 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 $V_S/V_P=0.71 \rightarrow 0.82$ (非彈性範圍)

本研究

應然

三維彈性應力波傳理論

縱波波速 $V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$

橫波波速 $V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

剪-壓波速比 $\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}}$

裂隙 ↑ 柏松比 ↓
 剪-壓波速比 ↑

固體壓縮 \rightarrow 火害 \rightarrow 裂隙壓縮

National Taipei University of Technology

63

直、間接量測方式說明

正規化複合式傷損指標
「 V_S/V_P 」

A1220M 乾點式超音波脈衝量測儀

壓力波探頭 100 kHz

剪力波探頭 50 kHz

內業(實驗室): 直接量測方式

Raw data 擷取示意

外業(火害現場): 間接量測方式

剪、壓探頭校驗: 自滿足 (self-contained)

探頭並排(量測S波):

50 kHz 乾點式橫波探頭

探頭相對(量測P波):

100 kHz 乾點式縱波探頭

註: T=剪力波 V_S ; L=壓力波 V_P

National Taipei University of Technology

64

內業(實驗室)直接量測方式之效度驗證(1/2)

根據理論值與文獻資料，試驗結果之界線值整理

彈性理論解	unit	彈性變形		非彈性變形
		下限值	上限值	臨界值
		lower value	upper value	critical value
ν (混凝土)	-	0.15	0.28	NA
V_s/V_p	-	0.55	0.7	> 0.7
T_{max}	°C	25	600	> 600
$\Delta f_c'$	%	0	40	> 40

ν : 柏松比 ; V_s/V_p : 剪-壓波速比指標 ;
 T_{max} : 火害最高溫度 · $\Delta f_c'$: 強度折減率 (柯志揚 · 2016)

- 400 °C · 膠結材脫水分解
- 500°C時氫氧化鈣開始產生分解
- 605°C時碳酸鈣開始分解
- **600 °C以上 · 大於臨界值 0.7**

65

內業(實驗室)直接量測方式之效度驗證(2/2)

柏松比(ν 值)與波速之關係 (黃兆龍 · 2007 · 混凝土性質與行為)

本試驗
 $f_c' = 420 \text{ kgf/cm}^2$
推估 : $\nu = 0.22$ $\frac{V_s}{V_p} = 0.6$

- 理論彈性範圍之柏松比 $\nu = 0.33$
- 塑性範圍之柏松比 $\nu = 0.5$
- ✓ 多孔隙一般混凝土 : 0.15-0.2
- ✓ 一般高強度混凝土 : 0.2-0.28
- 關係公式 :
$$\nu = 0.135(f_c')^{0.13}$$
- 式中, f_c' 之單位: MPa
- 三維之彈性波傳理論 :
- $\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$

理論解

66

外業(火害現場)間接量測方式之信度驗證

間接量測 VS. 直接量測

點位		B1	B2	B3	平均值
間接量測	Vp(m/s)	2102	2449	2432	2328
	Vs(m/s)	1795	2048	2083	1975
	Vs/Vp	0.85	0.84	0.86	0.85
直接量測	Vp(m/s)	3378	3438	2810	3408
	Vs(m/s)	2973	2910	2558	2942
	Vs/Vp	0.88	0.85	0.91	0.86
信度(%)		97.01	98.76	94.1	96.62

$$\text{信度} = \left(1 - \frac{(Vs/Vp)_A - (Vs/Vp)_{avg}}{(Vs/Vp)_A}\right) * 100\%$$



表-間接量測

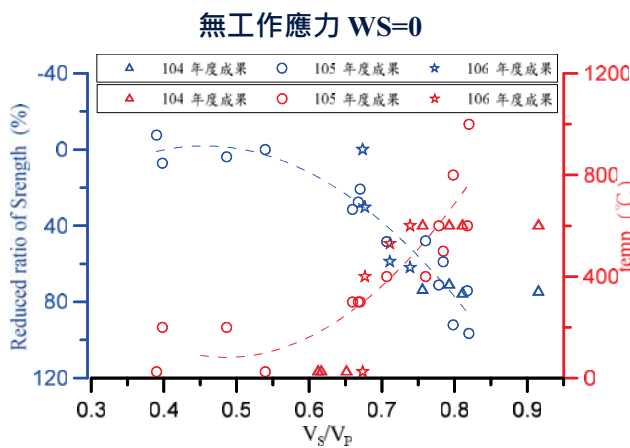


裡-直接量測

鑽芯試體



剪-壓波速比與前因(Tmax)、後果(Δfc')之關聯性



波速比=0.7

因→火害溫度=400 °C(消防)
 果→強度(勁、韌)折減=40 % (鑑定)
 與燒失量、碳化比對


- 火害首當其衝(表面)
- 力學折減明顯(短期)
- 結構物壽命減少(碳化、氯離子, 長期)
- 脆-延複合介面之握裹損失

混凝土受火害傷損分級

混凝土受傷損 - 分級對應波速比與強度折減

分級	顏色	剪-壓波速比	溫度分布 (°C)	強度折減率(%)	混凝土傷損机理
1	藍色	<0.61	常溫~200	20	無明顯損害 毛細水與膠孔水蒸發(物理變化)
2	淺藍色	0.61~0.67	200~300	34	輕微損害 C-S-H膠體、Al ₂ O ₃ 與Fe ₂ O ₃ 之水化物 喪失鍵結水
3	綠色	0.67~0.71	300~400	46	
4	黃綠色	0.71~0.75	400~500	60	中度損害(強度急遽下降) 石英發生物理性之相變轉換
5	黃色	0.75~0.78	500~600	71	
6	橘色	0.78~0.84	600~800	80+	重度損害(體積變化造成混凝土剝落、爆裂)
7	紅色	0.84~0.89	800~1000	80+	嚴重損害(燒失量敏感) 顏色呈現灰白色

體積敏感 200°C ↑ ; 重量敏感 800°C ↑



National Taipei University of Technology

← 69

多頻道表面波 (MASW) 量測技術

➢ 施測方式：

- 對待測物擊發一個衝擊(impact) · 使其產生表面波 · 再由接收器(receiver)收錄訊號。

➢ 分析方式：


- 表面波譜分析(SASW, Spectral Analysis of Surface Waves)
 - **多頻道表面波分析(MASW, Multi-channel Analysis of Surface Wave)**

依照不同訊號處理方式：

 - 多頻道表面波譜分析
 - 多頻道表面波場轉換分析

由水泥材料表面(脆)擊發-水泥材料表(脆)接收
探究水泥基質材導波示意圖

以非破壞檢測為目標
故以水泥基質材表面做擊發



National Taipei University of Technology

70

多頻道表面波分析 MASW (4+2圖) D2

多頻道
表面波分析

1

表面波擷取

時間域

2

頻率域

FFT

3-a

速度-頻率域

4-a

時間-頻率域

DSFT CWT (黃仁佑 · 2019)

本研究統整：
速度-頻率域 &
時間-頻率域

判識傷損有效

快速傅立葉轉換：FFT · Fast Fourier Transform
離散傅立葉轉換：DSFT · Discrete Space Fourier Transform
連續小波轉換：CWT · Continuous Wavelet Transform

71

成果研用1a - 剪力波速 判識 單一材料傷損深度

成果1a
火害傷損
深度調查

頻散曲線擷取相位波速 V_{ph}

速度-頻率域(無損) 速度-頻率域(受火損700°C)

指標1：剪力波速 V_s & c_d

SurfSeis程式反算 V_s

1. 全域剪力波速 V_s 變化

2. 轉換區域的臨界不連續面，
臨界傷損深度 $c_{d,critical} \equiv 0.8V_s$

If $c_{d,critical} > c$ · 則進行握裹傷損調查

Vs (m/s)

depth (cm)

$V_s \downarrow 48\%$
 $c_d > 6\text{ cm}$
(V_s 折減20%1)

$c = 2.0\text{ (cm)}$

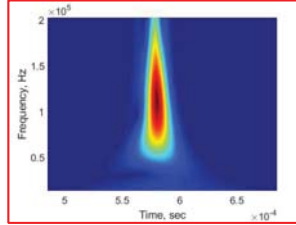
● 無損RC
× 明火RC

National Taichung University of Education
 $c_{d,critical}$ ：混凝土臨界傷損深度、 c ：保護層厚度 (cm)
72

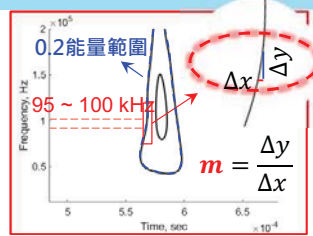
成果研用1b - 局域曲率 判識 複合材料介面傷損

成果1b
鋼筋握裹
喪失調查

指標2：局域曲率 m



時間-頻率域(受火損700 °C)

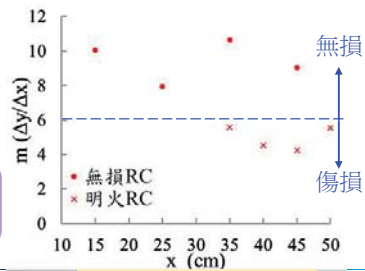


時間-頻率域等能量圖
(受火損700 °C)

握裹傷損：等能量圖之0.2能量範圍
100±5 kHz 局域曲率 m 由漸變→突變

m ：握裹無損 = 8 ± 2 ；傷損 = 5.2 ± 0.8

有無握裹傷損之臨界局域曲率 $m_{critical} = 6$ ，
小於6將有傷損可能。



Part 2 .混凝土火害傷損(含與鋼筋握裹)之檢測驗效與例證

將介紹近年案場實例，舉凡大者如協同公會調查高雄城中城火害之檢測結果，配合相關儀器設備展示與操作。

外業案場-檢測流程



外業案場-超音波脈衝檢測流程 (上半天)

- 1 現場環境評估 量測區域規劃、跡證蒐
- 2 粉刷層
敲除判斷 分水嶺
儀器延燒 30 min
- 3 可攜式儀設置
- 4 超音波脈衝量測 (UP)



前院狀況

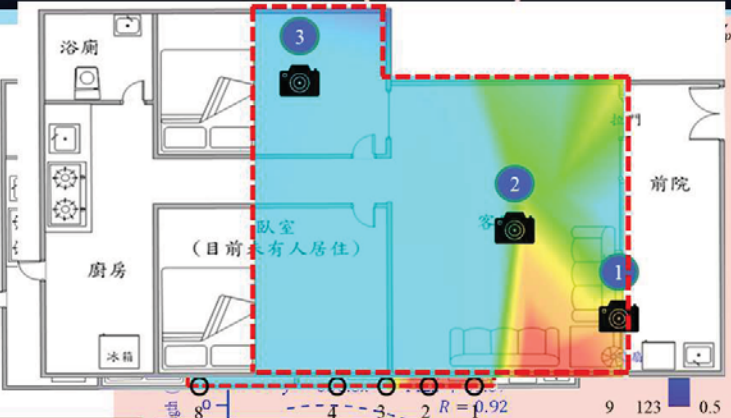


外業量測 (Vs) 面外剝 外業量測 (Vp) 磚尚在


TAIPEI TECH National Taipei University of Technology

外業案場-超音波脈衝分析流程 (下半天)

- 1 計算剪-壓波速比
- 2 代入回歸公式
- 3 繪製
最高溫度等值分佈平面圖
- 4 與現場跡證對比
- 5 提供報告



R = 0.92



窗框變形 漆面對比 牆面完整

TECH National Taipei University of Technology



歷年研究實績

編號	項目	年份	結構體	老劣化傷損型態		檔案路徑
				老化(A)/劣化(D)	物/化性	
1	台北市大安區民宅火調	2018	建築	D	物	
2	台南市隧道火調	2019	隧道	D	物	
3	桃園龜山區工廠火調		建築	D	物	
4	新北市新店區民宅火調		建築	D	物	
5	新北市板橋區民宅火調		建築	D	物	
6	新北市五股區民宅火調	2020	建築	D	物	
7	台南國家地震中心-柱構件之火、震害試驗		建築	D	物	
8	台南國家地震中心-構架屋構件之火、震害試驗		建築	D	物	
9	桃園市台61線橋墩鹽害剝落	2021	橋梁	D	化	
10	高雄市城中城火調		建築	D	物	
11	台北市社宅冷縫判識		建築	D	化	
12	新北市板橋區民宅火調	2022	建築	D	物	
13	花蓮縣玉興橋震害檢測		橋梁	D	物	


National Taipei University of Technology

6

台北市大安區民宅火調

1.地點：台北市大安區
 2.時間：2018
 3.案場狀況：建物為頂樓加蓋，僅有部
 分為RC結構

▲剪-壓波速比與火源距離呈負相關趨勢

▲現場火源位置圖

現場圖

National Taipei University of Technology
7

台南隧道火調- 隧道斷面 0k+184 - 延燒處

嚴重程度(點位)：
 $2 > 5 > 4 > 1 > 3 > 6$

分級溫度圖

無抗磨層、有研磨：1 ~ 6

距熱源：736 m

National Taipei University of Technology
8

桃園龜山區工廠火調

1.地點：桃園市龜山區
 2.時間：2019
 3.案場狀況：建物為RC結構，現場延燒情況嚴重，多處之保護層已完全破壞

現場圖

◀ 剪-壓波速比與、強度折減率與溫度分布圖

National Taipei University of Technology

9

新北市新店區民宅火調

④
④ 0.78 (587)

受火損較嚴重區域：

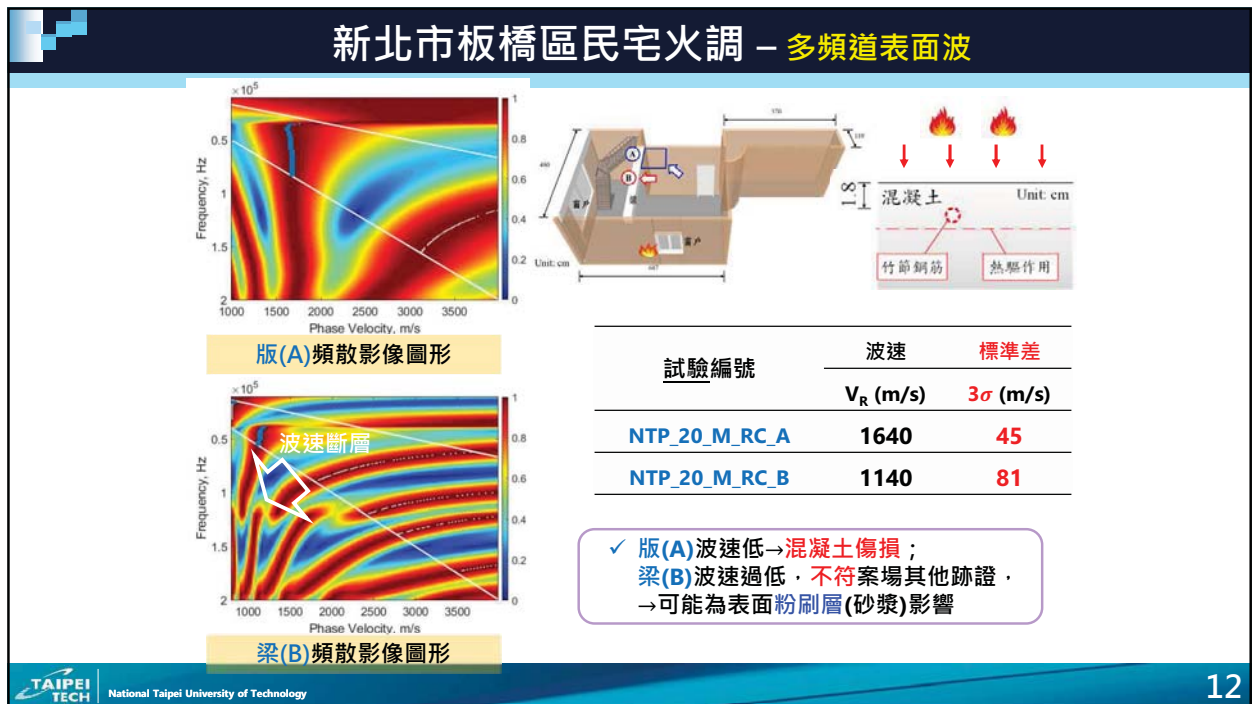
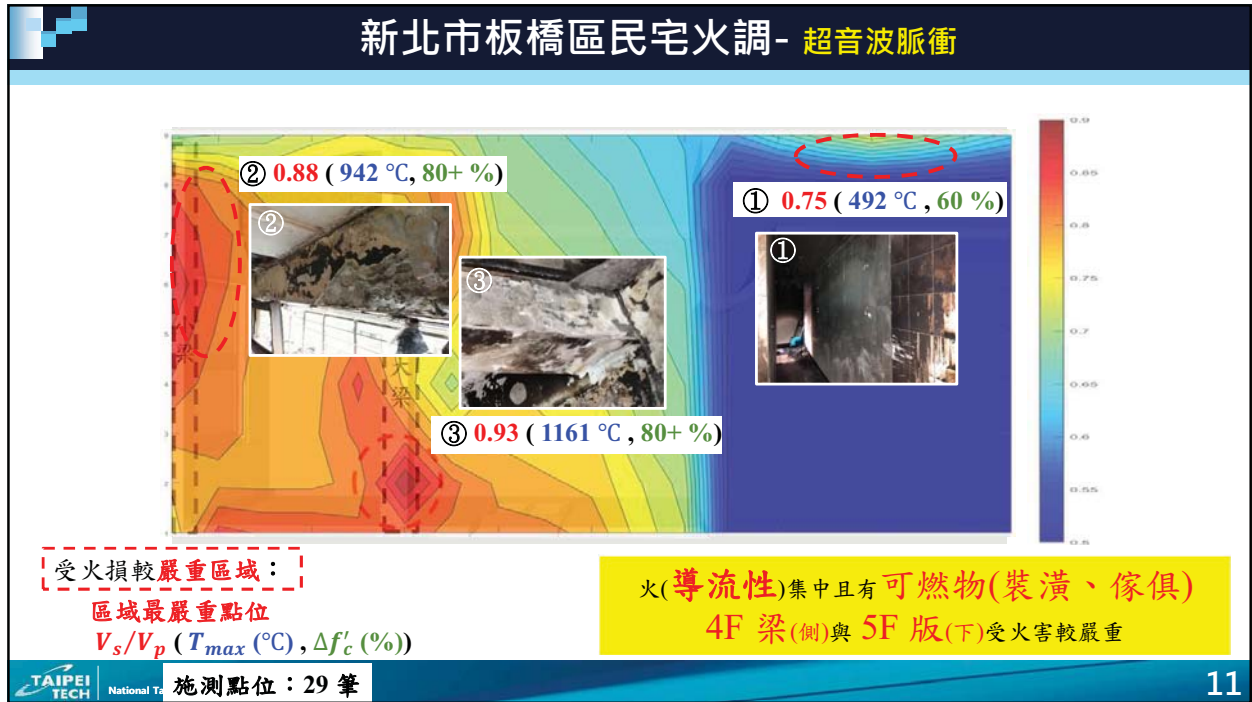
區域最嚴重點位

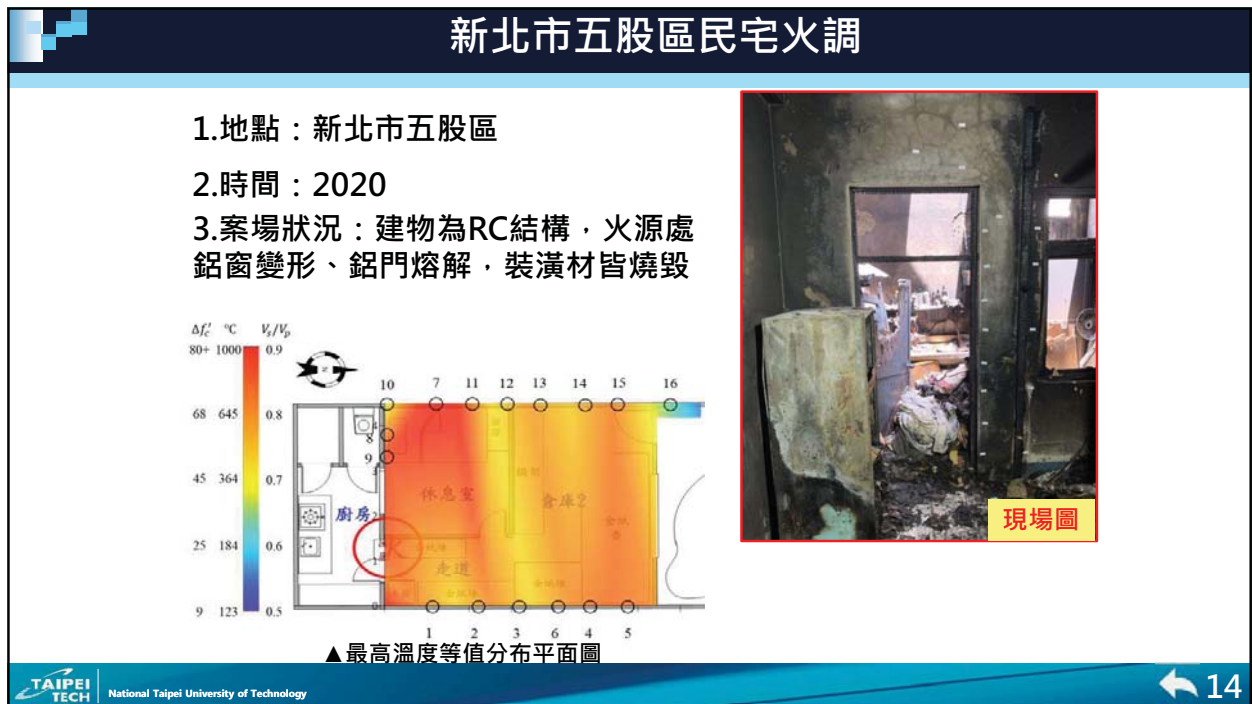
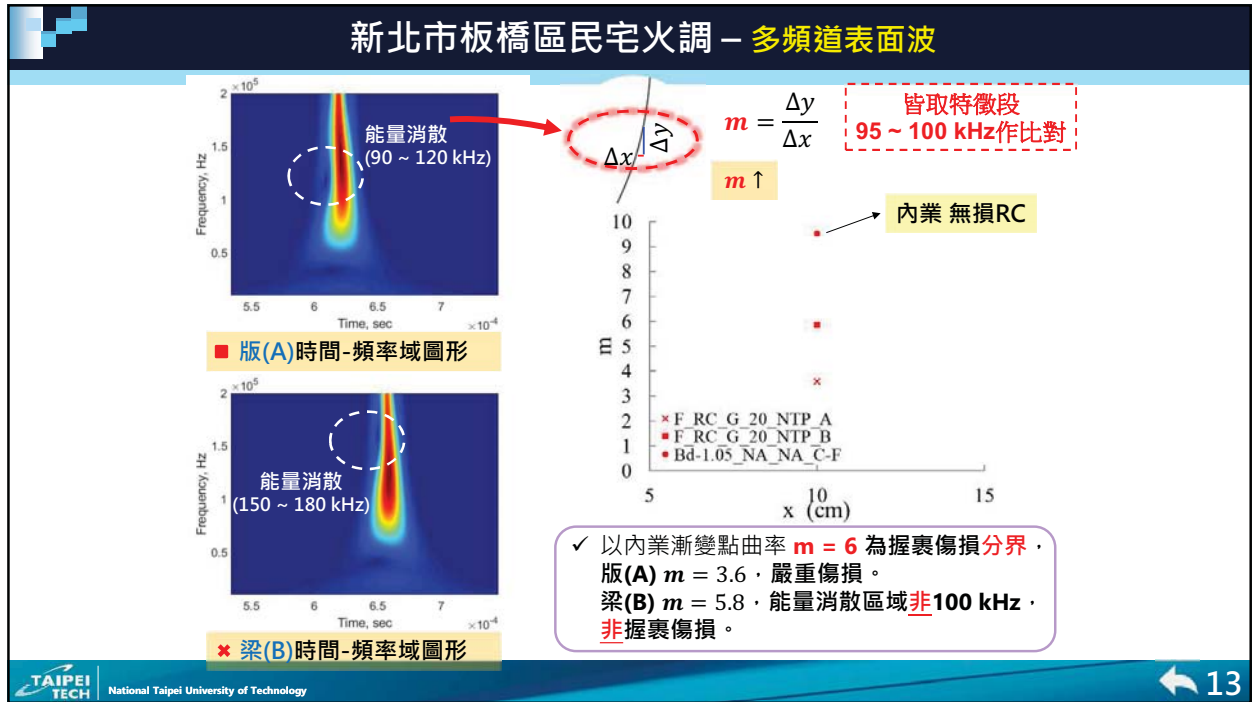
$V_s/V_p (T_{max} (°C), \Delta f'_c (%))$

區域一 受燃料控制(雜物間)
 區域二、三 受通風控制(窗戶、開口)

National Taipei University of Technology

10

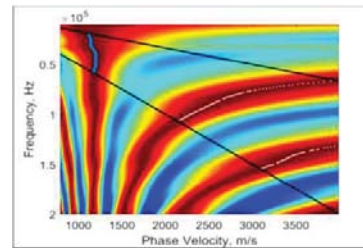
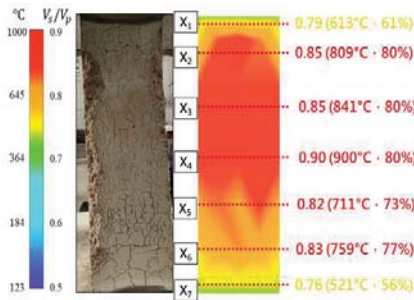
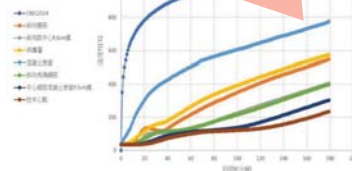




台南國家地震中心-柱構件之火、震害試驗

- 1.地點：台南國家地震中心
- 2.時間：2020
- 3.案場狀況：為模擬構件受火害之情形，推估之最高溫度為711°C~900°C與熱電偶線表面擷取資訊800°C相符。

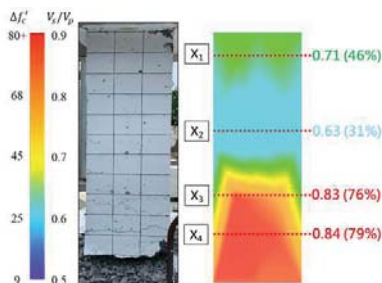
為混凝土表面溫度曲線



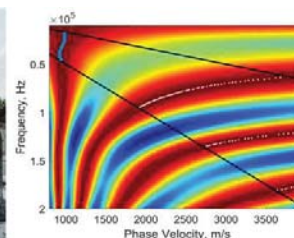
▲火害柱構件 速度-頻率域影像圖

台南國家地震中心-柱構件之火、震害試驗

- 1.地點：台南國家地震中心
- 2.時間：2020
- 3.案場狀況：構件受震害後破壞集中於底部(塑鉸區)，中間較輕微。底部推估之強度折減率76%~79%，中間推估強度折減率為31%~46%與外觀判識相符。




▲震害柱構件強度折減立面圖

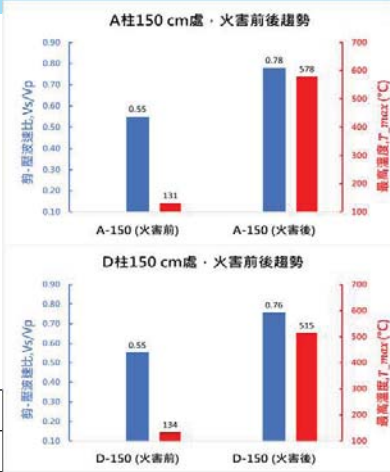


▲震害柱構件量測點位圖及速度-頻率域影像圖

台南國家地震中心-構架屋構件之火、震害試驗



量測位置	推估溫度 (°C)	熱偶計溫度 (°C)
A柱 150cm	578	423.4
D柱 150cm	521	501.1




A柱150 cm處 · 火害前後趨勢

位置	火害前	火害後
荷-壓比 V_s/V_p	0.55	0.78
最高溫度 T_{max} (°C)	131	578

D柱150 cm處 · 火害前後趨勢

位置	火害前	火害後
荷-壓比 V_s/V_p	0.55	0.76
最高溫度 T_{max} (°C)	134	515

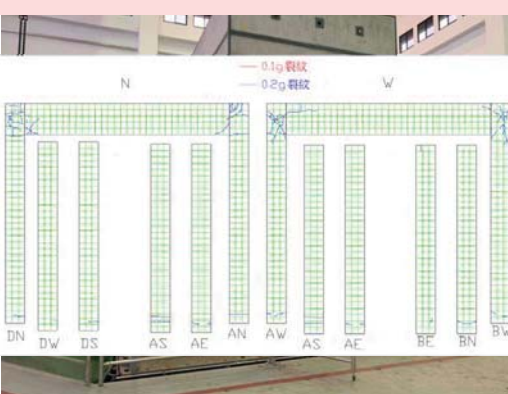
推估值與實際值相近



National Taipei University of Technology

17

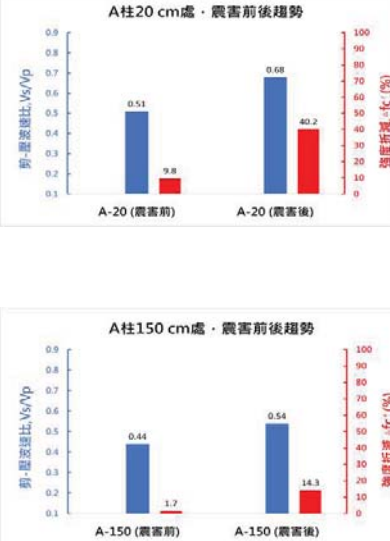
台南國家地震中心-構架屋構件之火、震害試驗



— 0.1g 裂紋
— 0.2g 裂紋

構架屋北面-裂縫紀錄

非破壞檢測
可有效量化目視結果




A柱20 cm處 · 震害前後趨勢

位置	震害前	震害後
荷-壓比 V_s/V_p	0.51	0.68
強度折減率 (%)	9.8	40.2

A柱150 cm處 · 震害前後趨勢

位置	震害前	震害後
荷-壓比 V_s/V_p	0.44	0.54
強度折減率 (%)	1.7	14.3




National Taipei University of Technology


18

高雄市城中城火調 – 超音波脈衝

1.地點：高雄市鹽埕區
 2.時間：2021
 3.案場情況：建物為RC結構，現場車子只剩下骨架，且上部樓板出現鋼筋裸露




現場圖



梁柱接頭



$\Delta f_c, \%$ $T_{max}, ^\circ C$ V_s/V_p
 80 1000 0.9
 68.6 645 0.8
 45 364 0.7
 25.1 184 0.6
 9 123 0.5

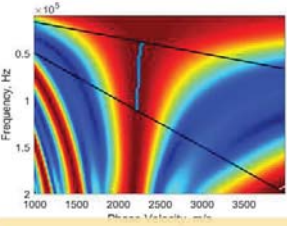


National Taipei University of Technology

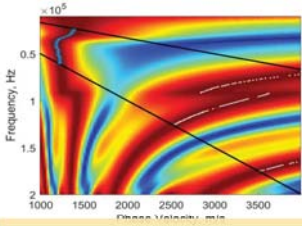
19

高雄市城中城火調 - 表面波


1.地點：高雄市鹽埕區
 2.時間：2021
 3.案場情況：建物為RC結構，現場車子只剩下骨架，且上部樓板出現鋼筋裸露



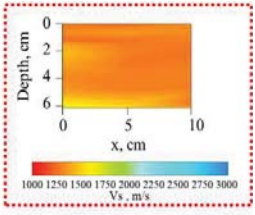
點位5_速度-頻率域圖



點位1_速度-頻率域圖



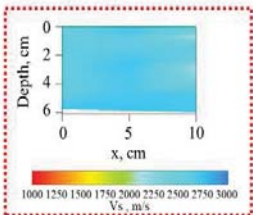
梁柱接頭



Depth, cm

x, cm


1000 1250 1500 1750 2000 2250 2500 2750 3000
Vs, m/s



Depth, cm

x, cm

1000 1250 1500 1750 2000 2250 2500 2750 3000
Vs, m/s



National Taipei University of Technology

20

新北市板橋區民宅火調

- 1.地點：新北市板橋區
- 2.時間：2022
- 3.案場狀況：因和室為木板材且靠近火源處，因此此區傷損較嚴重

F3-傷損情形

