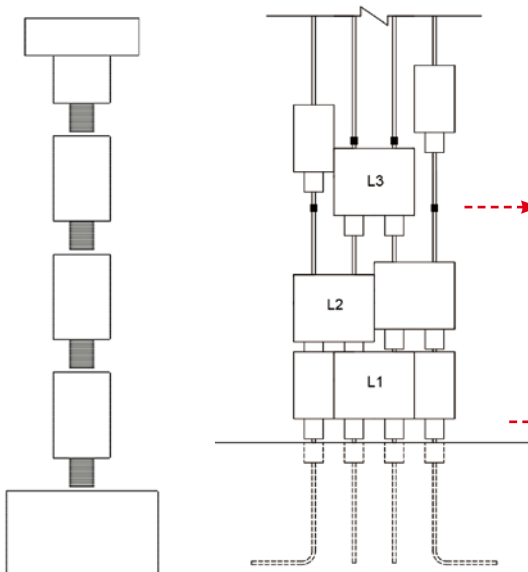
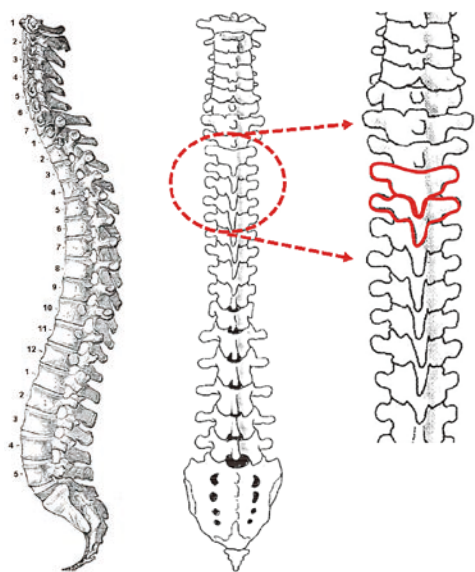


土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

April
2020



ISSN 0253- 3804



NT\$350



社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

Volume 47, No. 2

近年世界重大天然災害
的回顧與省思

災害面面觀

專 輯

新世代無機聚合材料於
土木與建築工程的應用

新型仿生模組化
預鑄橋墩系統之研發

得獎論文
特別報導

星礙居 109年擴大展覽

大甲溪畔的台灣公共建設紀錄園地

星礙居地址：424 台中市和平區東關路二段 73 號 歡迎參觀！



108年5月28日星礙居開幕

星礙居於108年5月28日在雨中開幕。經過一年多持續整修與擴建，配合中橫通車60周年，109年擴大舉辦展覽。有台灣公共建設檔案影片、含中英文介紹之精美大幅海報、圖片、照片、以及畫作，並備有少量明信片紀念品贈送有緣人。從109年6月28日開始，每星期二、四、六、日，由台中市中橫交通觀光促進會派員導覽，敬邀社會各界前往參觀。

109年5月9日中橫通車60週年時，在台灣公共建設紀錄園地戶外舉辦「中橫通車60年回顧展」，策展主題「義利清明、路程遠大」，重點在緬懷榮工之義、民眾享受其利，期待未來遠大發展，記錄中橫六十年來的建設、長期改善和今日中橫生態環境。回顧展由中國土木水利工程學會、日光文教基金會、蒼楓勵進會主辦。中國土木水利工程學會提供贈品及謝卡感謝義務支援回顧展人士。



室內展出：台灣公共建設紀錄



戶外展出：「義利清明、路程遠大」中橫通車60年回顧展



星礙居服務說明

- 室內展出台灣公共建設紀錄，室外展出中橫通車60周年回顧，歡迎參觀。
 - ★ 山區志工不足，室內展不定期開放。
- 遇雨時提供「星礙傘」自助借用。
- 紀念品匣每日提供少量星礙性質明信片及紀念品，供來賓轉贈星礙繫情已深親人，星礙明信片可即時寫寄，星礙未深則請日後續來追尋。
 - ★ 慶祝母親節，部分明信片已貼40年前發行孝親郵票，請自行補足郵資寄發。
 - ★ 如星礙已解，歡迎下次帶來自種小盆花，共同美化此園地。
- 如紀念品取完，確有星礙繫情需要，請洽服務志工或隔鄰球隊展區服務人員。
- 白冷冰店及天輪里活動中心停車場周邊有白冷圳林蔭步道、東卯溪親水步道、天輪巷生態步道，適合親子一日旅行。
- 本地山泉水質優良，可自備容器取用。



109年6月20日台中市和平國小師生參觀星礙居



上：由人體脊柱發想的模組化預鑄節塊
下左：無機聚合爐石混凝土之熱壓膨脹試驗
下右：伊達氣旋造成莫三比克大面積淹水災害

土木水利半月集

先進工程

- 混凝土工程
- 運輸工程
- 資訊工程
- 非破壞檢測
- 鋼結構
- 鋪面工程
- 工程管理
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 水資源工程
- 海洋工程
- 景觀工程
- 能源工程
- 工程美化
- 國土發展
- 大地工程
- 環境工程
- 綠營建工程
- 天然災害防治工程
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 土木史
- 大學教育
- 學生活動
- 終身學習
- 工程教育認證
- 技專院校

學會活動

- 學會選舉
- 土水法規
- 專業服務
- 學會財務
- 會務發展
- 公共關係 [工程倫理]
- 學術活動
- 介紹新會員
- 學會評獎
- 年會籌備
- 會士審查

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水部分會
- 土水東部分會

土木水利

社團法人中國土木水利工程學會會刊



發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木水利工程學會

主任委員：劉格非（國立臺灣大學土木學系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木水利工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：http://www.ciche.org.tw

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木水利工程學會第二十四屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：宋裕祺

常務理事：李順敏 高宗正 張荻薇 楊偉甫

理事：王宇睿 余信遠 林呈 林曜滄 邱琳濱 胡宜德 胡湘麟

高銘堂 張政源 許泰文 陳仲賢 陳彥伯 黃慧仁 壽克堅

廖學瑞 鄭燦鋒 賴建信 謝啟萬

常務監事：王昭烈

監事：呂良正 李建中 沈景鵬 林其璋 楊永斌 謝佳伯

中國土木水利工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木水利工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第518號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第0248號

特別報導

- 📖 新型仿生模組化預鑄橋墩系統之研發 宋裕祺／林冠禎／洪曉慧／江奇融／張國鎮 3

「新世代無機聚合材料於土木與建築工程的應用」專輯 (客座主編：李有豐教授、鄭大偉教授)

- 📖 專輯序言：新世代無機聚合材料於土木與建築工程的應用 李有豐／鄭大偉 9
- 📖 無機聚合材料 (Geopolymer) 與鹼激發材料 (AAM) 有何不同？ 鄭大偉 10
- 📖 無機聚合材料於鋼筋混凝土底版仰面修補之研究 李有豐／郝國偉／鄭大偉／陳彥鈞／黃志弘 13
- 📖 無機聚合物製成防火材料之應用 林凱隆／羅康維／鄭大偉／許皓翔 21
- 📖 無機聚合塗料之發展及應用 黃志弘／吳家和／鄭大偉 26
- 📖 無機聚合混凝土在國內應用的實例 鄭大偉／蔡志達／李韋暉／吳佳正 36
- 📖 無機聚合複合材料之抗衝擊力學性能試驗研究 蔡營寬／李宏輝／劉宇倫／鄭大偉／李有豐／吳嘉偉 41
- 📖 無機聚合材料配比設計方法推演與應用 蔡志達 50

災害面面觀

- 📖 近年世界重大天然災害的回顧與省思 陳禮仁 57

工程技術及發展

- 📖 多種地球物理探測法於基隆河河岸土層剪力波波速調查 林志峯／曾俊傑／蕭秋安／周坤賢／胡志昕／王鶴翔 71

廣告特搜

- 聖礙居 109 年擴大展覽 大甲溪畔的台灣公共建設紀錄園地 封面裡
- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 分毫不差才足以教人驚豔 封底裡
- 遠揚營造工程股份有限公司 豐富經驗 永續經營・創新工法 永保領先 封底



特別報導

2019 ASCE T.Y. Lin Award 論文分享

DOI: 10.6653/MoCICHE.202004_47(2).0001



賀

臺北科大工程學院宋裕祺院長率領研究團隊
榮獲美國土木工程學會
ASCE T.Y. Lin Award 2019 論文獎

新型仿生模組化 預鑄橋墩系統之研發

宋裕祺／國立臺北科技大學工程學院 院長、中國土木水利工程學會 理事長

林冠禎／國立臺北科技大學土木與防災研究所 博士、台灣世曦工程顧問股份有限公司 工程師

洪曉慧／國家實驗研究院國家地震工程研究中心 研究員

江奇融／國家實驗研究院國家地震工程研究中心 技術員

張國鎮／國立臺灣大學土木工程學系 教授、國家實驗研究院國家地震工程研究中心 前主任

由國立臺北科技大學工程學院院長宋裕祺率領的研究團隊，以「新型仿生積木式預鑄橋墩系統」為論文主題，日前榮獲「美國土木工程師學會林同棧獎」(ASCE T.Y. Lin Award)。此獎項以預力混凝土工程先驅林同棧命名，此為該獎項 1969 年設立半世紀以來，首次由華人研究團隊獲獎！

美國土木工程師學會 (ASCE) 的學術期刊為全球土木工程學術領域的領航指標，1969 年該學會將「預力混凝土獎」更名為「林同棧獎」，為美國科技史上首度以華人名字命名的科學獎項。受到新冠疫情影響，原定 4 月頒獎典禮取消，獎牌已越洋送至 2019 年度獲獎者宋裕祺、國家地震工程研究中心研究員洪曉慧、北科大博士林冠禎、國家地震工程研究中心技術員江奇融、國家地震工程研究中心前主任張國鎮等團隊成員手中。

此獎每年精選一篇對預力混凝土研究領域深具影響力的文章，得獎者皆為對於國家工程具卓越貢獻的工程師、頂尖大學學者，如 1969 年得主 Robert F. Mast 曾設計西雅圖地標太空針塔 (Space Needle)；1994 年得主 Ned H. Burns 因對預力混凝土和高性能預力混凝土橋梁研究的傑出貢獻當選美國國家工程院院士；2014 年得

主 M. Lee Marsh 為美國耐震設計規範主要編訂者之一。

研究團隊於 2013 年開始投入「新型仿生模組化預鑄橋墩系統」研究，藉由「人體脊椎」與「積木堆疊」概念，透過具脊椎關節的剪力樺接合、節塊開合，達到消散地震力量的效果。經過兩年的理論推導與規劃，2015 年起在國家地震工程研究中心進行一系列大尺寸橋墩試體的測試實驗，結果顯示，新型橋墩可抵抗之地表加速度為傳統橋墩者的 1.2 倍，所開發的模組化橋墩適合預鑄、產品品質容易掌控、製作精度高、能快速組立降低施工期間對環境衝擊，同時兼具快速生產與便於保存等優點，適用於新建及緊急救災工程，此新型橋墩工法已取得美國、日本和台灣的發明專利。整個研究從發想、構思、規劃、試驗、分析、討論、文章擬稿、投稿、回覆到刊登，歷時多年，此次獲獎是對研究團隊多年來努力的肯定。

得獎文章

Sung, Y.C., Hung, H.H., Lin, K.C., Jiang, C.R. and Chang, K.C., “**Experimental Testing and Numerical Simulation of Precast Segmental Bridge Piers Constructed with a Modular Methodology**”, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol.22, November, 2017.

本文將簡要概述得獎內容以分享產官學研各界參考。

前言

一般而言預鑄混凝土節塊在設計時通常會考量施加足夠的鋼腱預力，以提供各節塊之間的正向力與伴隨而來的摩擦力，來抵抗外力造成混凝土節塊界面間之剪力。各混凝土節塊正如同人體的脊椎，在承受高軸力時，將因全身繃緊容易造成不適，進而影響活動性能。若能在混凝土節塊界面間設置合宜的剪力連結裝置有效提供混凝土節塊界面間之剪力強度，將可大幅降低對於鋼腱預力施加之依賴，除可避免應力集中外，也可降低混凝土潛變與乾縮以及鋼腱預力損失之影響。

研究借鏡人體中脊椎與肌肉的組成方式，人體活動是藉由多塊骨骼相互支撐與各自變形所達成，如同預鑄節塊與鋼腱或鋼筋的搭配組合，在地震力作用之下節塊變形帶動鋼腱的受力以維持節塊的整體性，並提供回復能力使預鑄節塊能回復至初始狀態，讓殘餘變形降至最低，本研究以脊椎為發想加入剪力樺增加節塊間的抗剪強度，取代鋼腱施加大預力所提供的摩擦力如圖 1 所示，確保整體結構在地震作用下具備更優良的結構性能。

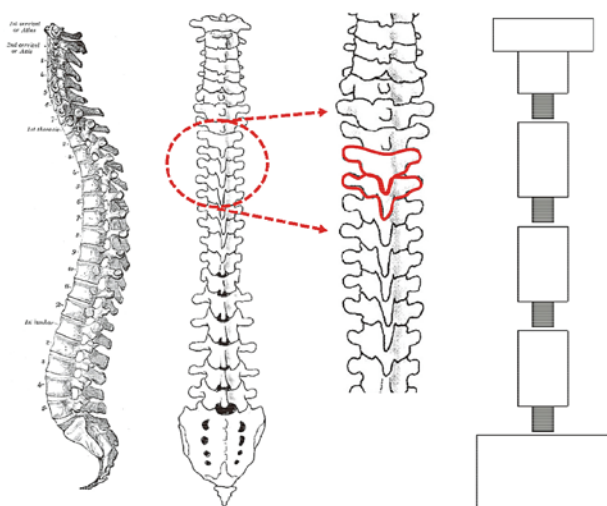


圖 1 人體的脊柱與預鑄節塊發想

模組化概念

以往預鑄橋墩多以單一節塊作為單一層構件，此種工法對於工程進度的提升會有所貢獻，但大斷面節塊須面臨節塊運送與節塊製作精度之要求，所以常需要於施工現場周邊建立臨時的戶外預鑄場，對於降低環境衝擊的優勢稍顯不足如圖 2。



a. 運送不易



b. 吊裝困難



c. 額外開設預鑄廠



d. 現地施作預鑄節塊

圖 2 傳統預鑄節塊施作方式

模組化概念為前述剪力樺預鑄節塊概念的延伸與改良，單一層預鑄節塊採用積木組合方式，將大節塊化整為零分割為數個模組化的小節塊，加入剪力樺型式後便成為如積木般的節塊如圖 3。小節塊的尺寸可有效地縮小且便於存放及運送，不必於施工現場額外開闢預鑄場。除此之外，其節塊型式如同積木可與上下層節塊進行結合，形成抗剪機制，且保有節塊之間的束制能力如圖 4，不僅如此，更可於緊急狀況迅速搬運至現場，並根據現場實際狀況，可組合成各種可能的結構型式如圖 5。

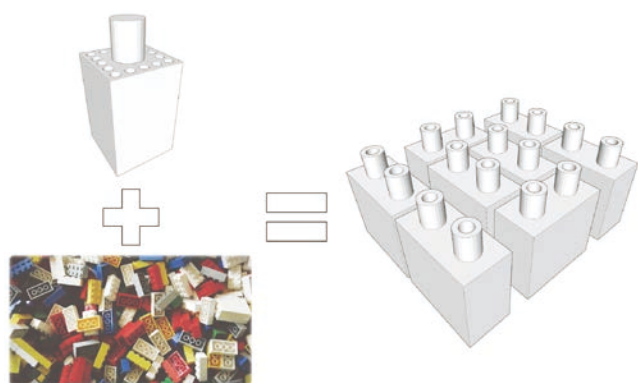


圖 3 模組化預鑄節塊橋墩之概念發想示意圖

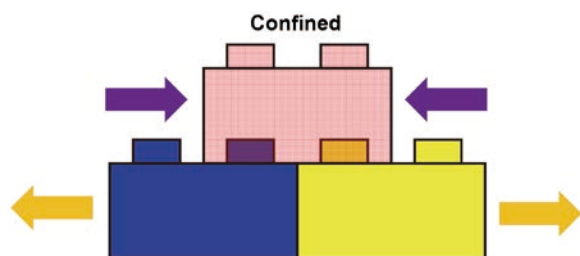


圖 4 模組化預鑄節塊抗剪機制及束制

模組化構想之實踐

利用針對本研究所提之模組化概念，設計兩種模組化型式之橋墩試體（如圖 6）：(1) 模組化 RC 剪力樺預鑄節塊橋墩試體 MRCSK，其剪力樺已於製作時與節塊結合，剪力樺採用的材料為 RC，並且在剪力樺中央放置旋楞套管使主筋與鋼腱直通，主筋則採用束筋的方式；(2) 模組化鋼棒剪力樺預鑄節塊試體 MSSK，其剪力樺則採用分離式的製作方式，剪力樺之材質為鋼材，並且組裝時再將剪力樺旋入節塊內部實踐全預鑄的概念，方便節塊的收納保存，與 MRCSK 不同之處在於採用多個旋楞套管保留主筋與鋼腱直通位置，並將主筋配置分布於斷面中。



a. 運送方便



b. 吊裝簡易



c. 精度可控



d. 全預鑄接合

圖 5 模組化預鑄節塊施作方式



(a) MRCSK

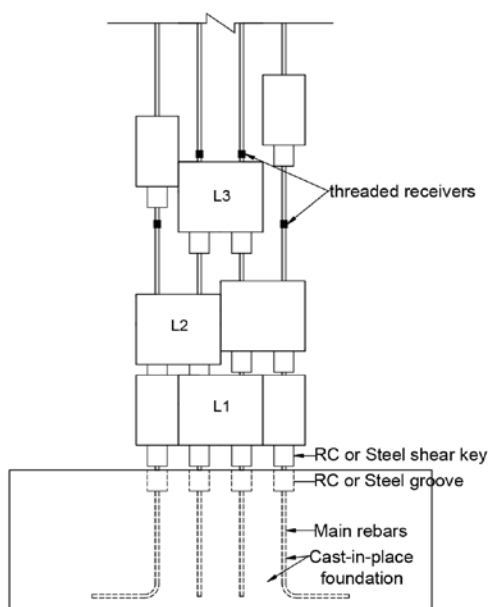


(b) MSSK

圖 6 MRCSK 單一節塊型式與 MSSK 分離式剪力樺

試體組立

MRCSK、MSSK 預鑄節塊橋墩組裝過程中，採用加壓灌漿，將所預留除了鋼腱以外的主筋孔位全部填滿，所以避免在加壓灌漿時壓力過大導致水泥漿體由節塊縫隙噴出，以及防止水泥漿流入鋼腱所預留的旋楞鋼管，組裝四個節塊時均於節塊間先於旋楞套管周圍利用矽利康（Silicone），可避免水泥漿體漫流。待 L1、L2 節塊組立完成便可將主筋續接，接著即可組立 L3、L4 至 L7 節塊如圖 7 所示，鋼腱的安裝 MRCSK 及 MSSK 在試體組立時一併完成如圖 8 所示。最後將預力鋼腱將錨定於橋墩柱頭表面上並施拉預力，接著再進行加壓灌漿，使所有小節塊可透過水泥漿體與主筋的握裹合為一體。



(a) 試體各組裝構件

實驗成果

傳統場鑄混凝土橋墩在受到大地震力作用下，多集中在橋底塑鉸區產生破壞（如圖 9 所示），亦即是以集中有限的塑鉸區域來吸收地震能量，然而試體 MRCSK 破壞情況則有明顯不同，橋墩裂縫是以分布式的方式分散產生於整個試體的各位置，每個小節塊均有些許裂縫與混凝土破損的情形產生，顯示此種型式的預鑄節塊橋墩可以藉由每個小節塊界面間的開合將地震能量以分布的方式吸收掉（如圖 10 所示）。試體 MSSK 破壞情況與 MRCSK 相似。

此外，實驗結果顯示此種新型橋墩可抵抗之地表加速度為傳統橋墩者的 1.2 倍。



(b) MRCSK 組裝



(c) MSSK 組裝

圖 7 模組化預鑄節塊之組裝



(a) MRCSK

(b) MSSK

圖 8 試體與儀器實際組裝

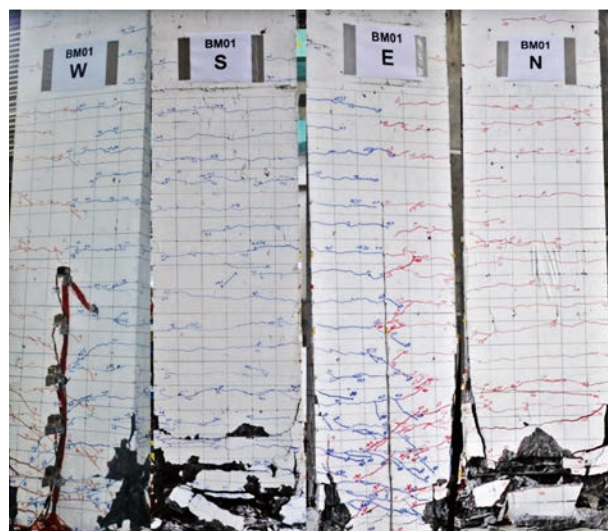
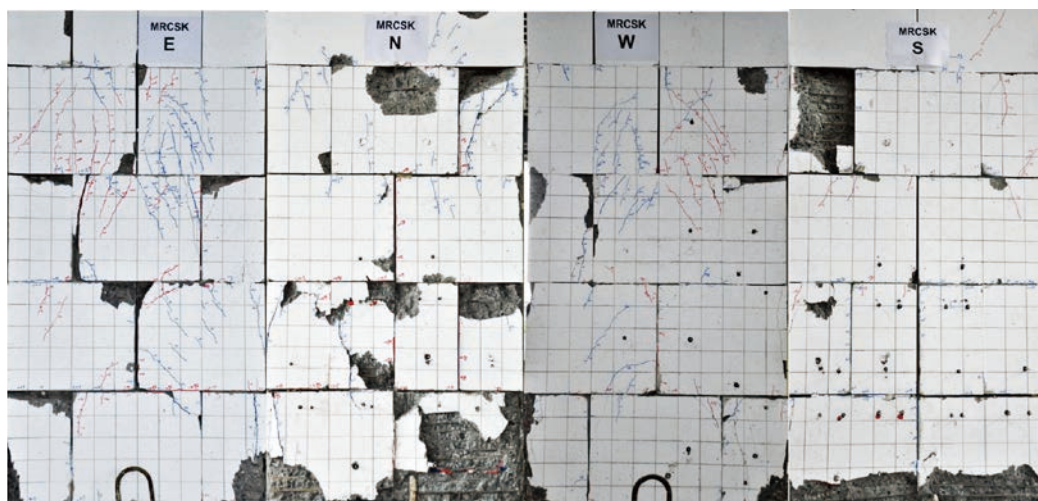
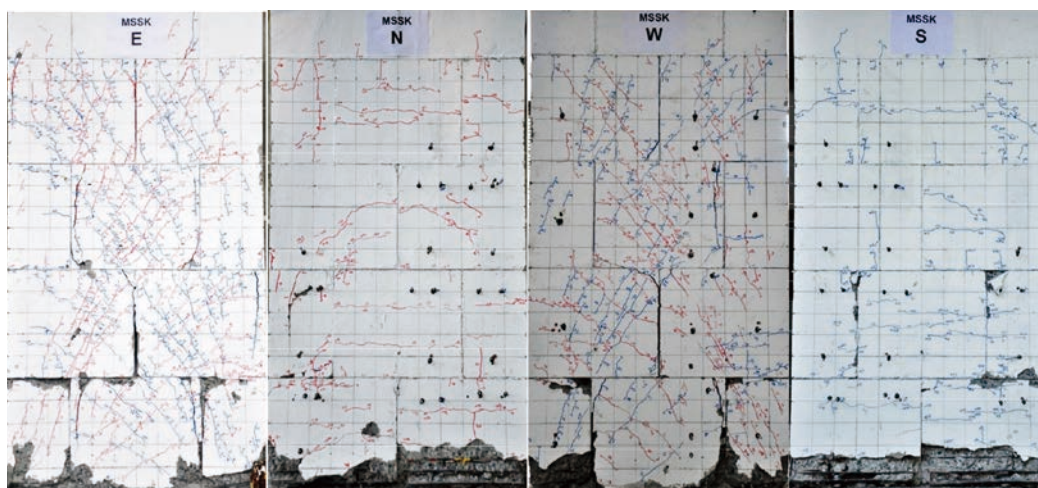


圖 9 傳統場鑄混凝土橋墩多集中在橋底塑鉸區產生破壞



(a) 試體 MRCSK 最終破壞情況



(b) 試體 MSSK 最終破壞情況

圖 10 模組化預鑄節塊試體藉由各小節塊界面間的開合吸收地震能量

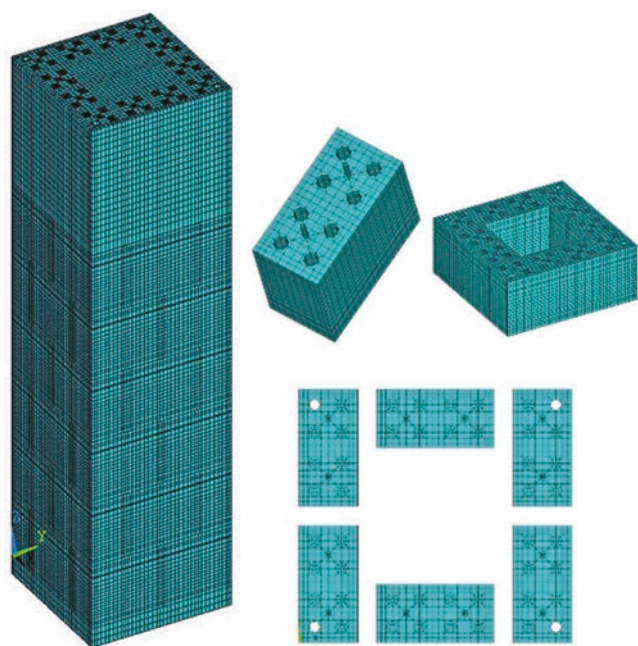


圖 11 結構分析模型示意

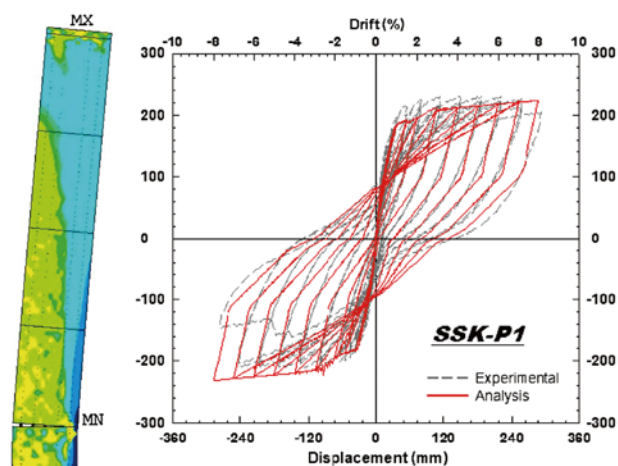


圖 12 模組化預鑄節塊數值分析方法可有效掌握其真實行為

本研究亦開發數值分析模型（如圖 11），針對分析結果與實驗結果進行比對，結果顯示所研擬的數值分析方法可有效掌握其真實行為（如圖 12）。

結論

本研究改良一般預鑄節塊橋墩在節塊間的組合型式，將節塊組合方式重新設計，並搭配鋼棒及 RC 兩種剪力樺形式，以人體脊椎的概念來接合上下各個小節塊，分別採用實心與空心斷面，以及相同的主筋配置及預力大小進行實驗比對，透過實驗結果比較得到兩者之間的差異與優點，針對本研究提模組化剪力樺預鑄節塊橋墩在前述各項實驗所獲致之結果簡述如後：

- (1) 預鑄節塊橋墩採用剪力樺的設計方式，在橋墩進行各層節塊組裝時其優點在於可透過公母頭來定位節塊位置，並可透過上下層剪力樺的互制效果，保持橋墩試體組裝過程中的自立性，此外，在斷面的設計上採用主筋、鋼腱配置對稱的形式，所以在組裝過程中僅需針對上下節塊的縱向角度進行微調，使節塊表面保持一致便可，在施工組立上可有效的簡化組裝流程並縮短工期，並減少施工人數。
- (2) 透過兩試體的比較，預鑄節塊橋墩因產生節塊間的開合可抵消掉部分的地震力，在此一系列的實驗結果中，其預鑄節塊 Drift 的發展均有 7% 以上，所以在韌性的發揮上較傳統橋墩為佳，此外，MSSK 預鑄節塊在未配置鋼腱的試體實驗結果，僅透過剪力樺與鋼筋本身的握裹能力，便足以提供節塊間的抗剪能力使節塊間不會產生橫向錯動，所以本研究改良的預鑄節塊橋墩結合了一般無剪力樺預鑄節塊的消能特性，也一併結合傳統橋墩對於主筋握裹能力

的重視，同時取其兩者間的優點並針對預鑄節塊的劣勢，加以改善設計出模組化剪力樺預鑄節塊橋墩。

- (3) 模組化剪力樺預鑄節塊實驗結果顯示，在單一層的小節塊變形中可觀察到側向的相對變形，顯示各個小節塊均能各自的轉動與變形來達到其消散能量的方式，因此透過每一小節塊的各自變形消能可有效避免橋墩的大多數破壞發生在塑鉸區內，小節塊的破壞情況大多為保護層剝落，並未產生箍筋剪斷的情況。並且搭配預力鋼腱可有效提供自復位功能，大幅地減少殘餘變形量。
- (4) 模組化預鑄節塊為本研究提的一項新概念工法，所探討之模組化試體均以此概念為發想，開發出模組化 RC 剪力樺預鑄節塊、模組化鋼棒剪力樺預鑄節塊此兩種不同剪力樺材質之模組化節塊，並就以排列方式組合出實心與中空兩種整體斷面型式，交叉排列後便有四種組合的方式，可以針對不同條件下的要求進行快速組裝。結合簡易的施工性與斷面的擴充性，以達到預鑄節塊快速施工的優勢，並可根據不一樣的工址、橋形組合成不一樣的斷面型式，即可大幅的節省施工時間並且顧及到環境、交通衝擊的影響。不僅用於新建橋梁，亦可供緊急救災之用，由於模組化節塊尺寸較小，便於平時的儲存，若遇緊急狀況可迅速搬運至現場，視現場狀況，將小節塊排列成符合現場之結構型式，有效將此概念運用於救災。



T.Y. LIN AWARD

The ASCE Prestressed Concrete Award was endowed in 1968 by T.Y. Lin, F. ASCE, to encourage the preparation of meaningful papers in the designated field of endeavor. The award was instituted by the Board of Direction in May 1968. By Board action in October 1969 the name of the award was changed to the "T.Y. Lin Award." The award is made in accordance with the policies of the Society and the following specific rules:

RULES

- I. All papers written or co-authored by members of ASCE that deal with prestressed concrete and which are in a print issue in the twelve-month period ending with June of the year preceding the year of award are eligible. Preference shall be given to papers written by younger authors.
- II. The American Concrete Institute and the Prestressed Concrete Institute will each be invited to nominate a single paper selected from their respective publications (which meet the foregoing criteria) for judging along with the single paper selected by the Structural Engineering Institute (SEI) from any ASCE publication.
- III. Annually the three papers thus selected will be reviewed by a committee composed of one member each from the American Concrete Institute and the Prestressed Concrete Institute, and one or more members from the SEI - one of which shall be the chair. This committee shall select a nominee for final recommendation to the SEI Board of Governors. Final approval shall be the responsibility of the ASCE Executive Committee.
- IV. The lead author shall receive a plaque and a cash prize determined annually by and subject to the approval of the Executive Committee of the ASCE Board of Direction based on the income from the award endowment. All other authors shall receive only a certificate.



T.Y. LIN
AWARD 介紹



歷屆
得獎人名錄



新世代 無機聚合材料 於 土木與建築工程 的應用

專輯序言

專輯客座主編 李有豐／國立臺北科技大學土木工程系 教授
鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

水泥是一種使用非常普遍且價格具經濟性的無機材料，其製程是將石灰石與黏土及其他添加物，經過燒製研磨而成。在燒製過程中，除能源的消耗量大外，因碳酸鈣受熱分解釋放出大量的二氧化碳，造成酸雨及溫室效應等。據估計，每產生一公噸的水泥，會產生 5% ~ 10% 飛灰及排放一公噸的二氧化碳，這都是製造水泥所要面臨的重要課題。為了解決此問題，無論在結構性或非結構性的工程應用上，「無機聚合材料」(Geopolymer) 為一個有潛力可能解決或替代水泥的新一代綠色環保材料。國外近年來對於無機聚合材料之研究開發，各國紛紛積極地展開投入相關的研究。近年 SCI 國際期刊所刊登相關 Geopolymer 的論文超過 800 篇以上，且在去年已經突破 1,000 篇。由國際期刊發表的數量證明「無機聚合材料」正逐漸的受到各界的重視。無機聚合材料在各領域之研究成果，令人甚為期待。由於無機聚合材料基本原料取得容易，

且製程及設備簡單，在常溫環境下即可製得，不像水泥需要高溫製程，其發展成為新一代環保材料實具有相當大的潛力。國外早已將此技術應用在實際上，特別是澳洲的實例相當多，其在 2013 年於昆士蘭大學採用預鑄無機聚合混凝土構件，修建了全世界第一棟建築物；又在 2014 年於澳洲布里斯班西方約 200 公里的 West Wellcamp 機場使用約 30,000 立方公尺的無機聚合混凝土，修築了一座停機坪；其他歐美地區實例也相當多。本期「新世代無機聚合材料於土木與建築工程的應用」專輯，介紹部分無機聚合材料在國內的應用發展情形。內容包括有無機聚合材料與鹼激發材料有何不同、無機聚合材料應用於防火建材、結構修補材料、補強材料、無機塗料、抗衝擊及抗炸性能、冷壓型地磚、無機聚合混凝土等，期待未來有更多的專家學者投入更多的研究，並應用於實務。🇹🇼



無機聚合材料 (Geopolymer) 與鹼激發材料 (AAM) 有何不同？

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

波特蘭水泥的大量生產所產生的二氧化碳數量加劇了全球暖化問題。因此，開發一種低碳排放的膠結材料已成為當務之急。無機聚合材料 (Geopolymer) 是一個未來可能取代波特蘭水泥的新興材料。其為利用化學法活化工業副產品或是含有鋁矽酸鹽的天然礦物來生產製造。國外已經有許多實例，使用無機聚合材料來替代波特蘭水泥。可惜的是，無機聚合材料目前並沒有標準或配比的規範，其原因是有多數的變數可能影響無機聚合材料的特性，例如原料的性質、鹼性活化劑的種類和配比用量、操作攪拌的順序等，因此限制了無機聚合材料的發展。但由於無機聚合材料的優異特性，包括：常溫製造、早強、力學强度高、耐酸鹼、防火絕熱、節能減碳等，其仍然是未來非常有潛力的工程材料。另由於無機聚合材料與鹼激發材料經常混淆不清，本文將由結構及成分上來區分解釋二者的異同。

無機聚合材料是利用含有矽鋁酸鹽的原料與鹼性活化劑反應製成的一種材料。通常會使用廢棄物作為其原料，例如來自煉鐵、煉鋼、發電廠所生產的爐渣或燃煤飛灰，因此對於環境的清潔具有特殊意義。無機聚合材料不需要高溫，在常溫之下即可製造，且二氧化碳排放量極低。國內對於無機聚合材料的研究較少，過去大部分的研究多集中在鹼激發材料 (Alkali-activated Material, AAM)。鹼激發材料 (AAM) 與無機聚合材料 (Geopolymer) 經常混淆不清，也常有不同的說法並造成爭議。到底這二者有何不同？根據 Van Deventer 等人^[1]的研究指出，AAM 是一個廣泛的分類，基本上涵蓋由鹼性鹽類（包括固體或溶解的）與固體矽酸鹽粉末所組成的材料。他們同時將無機聚合材料細分為二類：Inorganic Polymer 及 Geopolymer。其不同點為：Inorganic Polymer 是 AAM 的子集合 (subset)，其具有初階矽酸鹽網絡的膠結相。而 Geopolymer 則又是 Inorganic Polymer 的子集合，其含鈣量低，鹼含量及含鋁量較高，膠結相幾乎全部是矽鋁酸鹽相，且具有

很高的配位數，幾乎都是三維結構的 Q_4 。以上三者的關係如圖 1 所示。

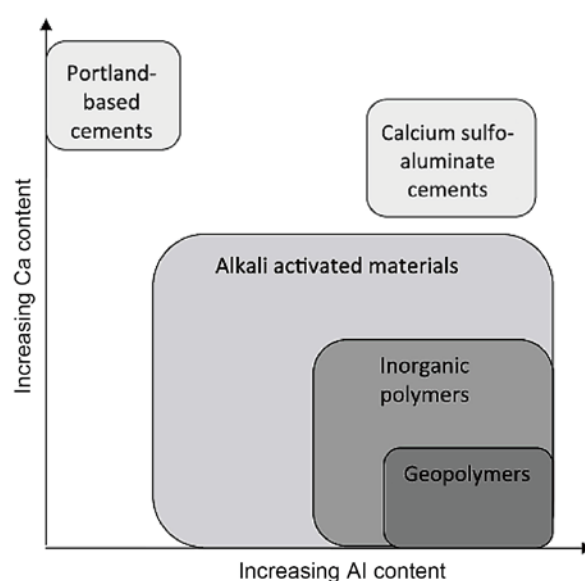


圖 1 AAM 不同子集合的分類以及比較 OPC 和硫鋁酸鈣水泥的化學性質。底色的深淺表示鹼含量的多少；較深的底色表示較高濃度的 Na 和 (或) K (Van Deventer *et al.* [1])

類似的說法也早在 2002 年由烏克蘭 Pavel Krivenko 教授所提出，如圖 2 所示。由圖中可知，Geopolymer 主要以 Al_2O_3 - SiO_2 為主成分，其含鈣量低，且鹼金屬氧化物 (R_2O ; K_2O , Na_2O , Li_2O) 含量高達 10 ~ 20%。Krivenko 教授同時認為鹼激發水泥之性能較傳統波特蘭水泥優越，而 Geopolymer 無論在耐久性、環境友善性、節能等特性又更勝於 AAM 及 OPC，如圖 3。

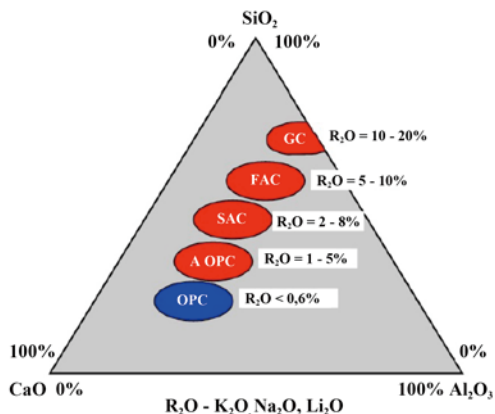


圖 2 各類水泥的 CaO - Al_2O_3 - SiO_2 三相圖 (Krivenko [2])

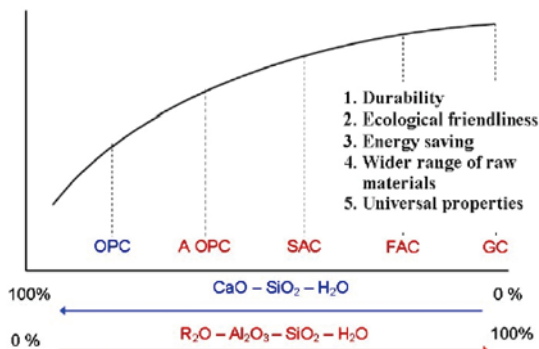


圖 3 各類水泥的性質比較概念圖 (Krivenko [2])

Thapa 與 Waldmann [3] 認為 AAM 與 Geopolymer 的反應機制不同，如圖 4。AAM 中有較高的含鈣原料，經適當或較高鹼度的鹼性溶液溶解後形成膠結漿體，最後形成矽酸鈣水合物相／鋁酸鈣水合物相及鋁矽酸鹽網狀結構。而 Geopolymer 則原料之含鈣量較低，經低鹼度的鹼性溶液溶解後形成聚合架構，最後形成鋁矽酸鹽網狀結構。

Davidovits [4] 認為高爐爐石由玻璃相的黃長石 (Melilite) 礦物組成，主要為鈣鋁黃長石 (Gehlenite) 及鈣鎂黃長石 (Akemanite) 的固溶體，如圖 5 所示。當高爐爐石粉經鹼激發反應後會造成鈣鋁黃長石及鈣鎂黃長石中的部分結構斷鏈，分別產生正矽酸鉀／鈣水合物與 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 以及二矽氧化鈣水合物與 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。由於正矽酸鉀／鈣水合物中的 K^+ 、 Na^+ 在非架橋連接氧的位置， Al-O-K^+ 裸露在外，也就是沒有被結構包覆在內。因此其穩定性不足，容易因風化造成結構的破壞。但是 Davidovits 的研究指出，如果在以上系統中添加 20% 的變高嶺土 (Metakaolin)，則在 ^{29}Si NMR 分析圖譜中，由主要的化學位移 -82ppm/-83ppm (表示 $\text{Q}_2(1\text{Al})$ 及 Q_2) 會轉移至 -88ppm 及 -90ppm，也就是 Q_3 並形成 Q_4 網狀結構。如果再增加變高嶺土的添加量至 30%，則化學位移會轉移到 -88ppm, -90ppm, -92ppm, 或更高。表示 $\text{Q}_4(3\text{Si}, 1\text{Al})$, $\text{Q}_4(2\text{Si}, 2\text{Al})$, $\text{Q}_4(1\text{Si}, 3\text{Al})$, 及 $\text{Q}_4(4\text{Al})$ 的三維架狀結構形成，如圖 6 所示。如此暗示了抗風化能力的增強。

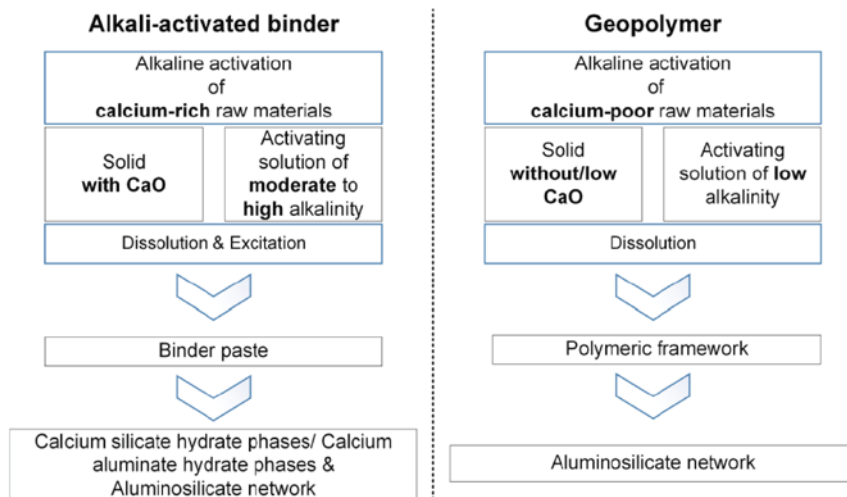


圖 4 AAM 與 Geopolymer 的反應機制 (Thapa and Waldmann [3])

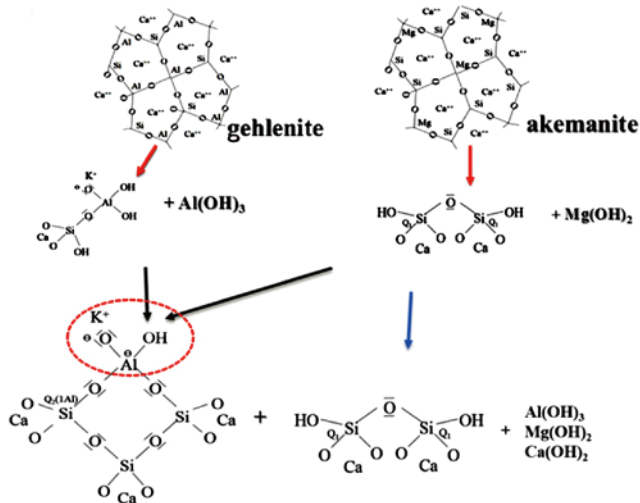


圖 5 爐石粉鹼激發後結構的變化 (Davidovits [4])

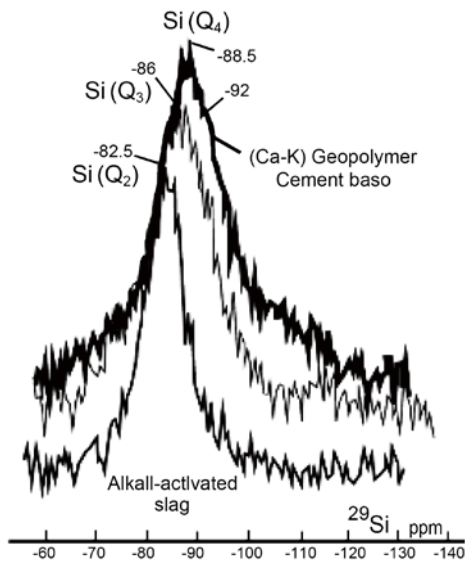


圖 6 爐石為基材的無機聚合水泥 (由 AAM 轉變為 Geopolymer Cement) 的 ^{29}Si NMR 分析圖譜。底部曲線表示未添加變高嶺土的鹼激發爐石；中間曲線為添加 20% 變高嶺土的圖譜；最上面的曲線為添加 30% 變高嶺土的圖譜 (Davidovits [4])

綜合以上的論述及本團隊過去的經驗，可了解鋁在無機聚合系統中的重要性。如圖 7 所示，未額外添加鋁的爐石－飛灰基的無機聚合混凝土試體，放置在未控制條件的室外環境，約半年的時間即可發現其表面有風化破壞的現象。因此，要形成無機聚合材料，必需採用低鈣含量非晶質的矽鋁酸鹽原料，如此更可以迅速溶解於鹼性溶液中。另外同時使用氫氧化鈉及矽酸鈉混合溶液比單獨使用氫氧化鈉溶液更有利。因為矽酸鈉若先通過氫氧化鈉的解聚，才會有更高的反應性。另外無機聚合材料其主要結構通常是 Q_4 ，鹼激



圖 7 未額外添加鋁的爐石／飛灰基無機聚合混凝土試體 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) 放置室外環境經長時間被風化的情形

發爐石粉或燃煤飛灰其主要結構通常是 Q_3 ，雖然其強度很高，但耐久性較差。根據本團隊的經驗，除了採用純變高嶺土為基材的無機聚合材料其 Q_4 的結構比較完整。但由於現今製造無機聚合材料經常使用爐石粉或燃煤飛灰，個別的或混合使用，其溶出的鋁膠體不足，因此需在配料時額外添加含鋁材料（如變高嶺土）或在鹼性溶液中額外添加含鋁藥劑（如鋁酸鈉）混合而成。在爐石粉與（或）燃煤飛灰為主要原料系統中，當鹼液未添加鋁酸鈉時，會以卜作嵐反應為主；若添加足量鋁酸鈉時，無機聚合反應和卜作嵐反應之比例是相當的，且試體之抗風化能力會上升（李韋皞 [5]）。其結構體也經常是三維體狀及鏈狀共存的複合系統。

參考文獻

1. Van Deventer, J.S., Provis, J.L., Duxson P., and Brice, D.G. (2010), Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), pp. 145-155.
2. Krivenko P. (2002), Alialine cement: From research to application, *Proceedings of the Int. Conf. Geopolymer*, 28th–29th October 2002.
3. Thapa V.B. and Waldmann D. (2018), A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders. <http://hdl.handle.net/10993/35284>
4. Davidovits J. (2008), *Geopolymer chemistry and applications*. Saint-Quentin, Fr.: Inst. Géopolymer 592 pp.
5. 李韋皞 (2018)，微結構發展對於無機聚合材料性質的影響研究，博士論文，資源工程研究所，國立臺北科技大學。





無機聚合材料於 鋼筋混凝土底版仰面修補之研究

李有豐／國立臺北科技大學土木工程系 教授

郝國偉／國立臺北科技大學土木工程系 研究生

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

陳彥鈞／國立臺北科技大學資源工程研究所 研究生

黃志弘／國立臺北科技大學建築系 教授

本文提出無機聚合材料 (geopolymer) 作為修復材料應用於鋼筋混凝土底版仰面修復補強。共製作二種不同型式之鋼筋混凝土版構材，分別為未有任何凹槽之標準版 (Benchmark RC deck) 與具有矩形凹槽版。採用無機聚合材料與環氧樹脂修補材料於鋼筋混凝土底版凹槽處進行修補。實驗參考 ASTM D6272 進行四點抗彎試驗；另外進行不同載重下之反覆加載四點抗彎試驗。從四點抗彎試驗結果可得知無機聚合材料修補之試體，較環氧樹脂修補之試體有較高抗彎強度。另外從四點抗彎反覆載重試驗可得知，使用無機聚合修補材之試體以 0.9 倍極限載重之反覆載重下能承受 51 次以上反覆載重；而環氧樹脂修補材僅能承受 2 次，可得知使用無機聚合修補材，除擁有較高之承載能力外，也具有良好承受反覆載重能力。

前言

鋼筋混凝土結構物常因地震造成混凝土開裂，或是因環境鹽分高，造成鋼筋鏽蝕混凝土剝落。一般鋼筋混凝土結構物受到外力因素產生裂縫時，會依照裂縫大小與位置進行修復或補強。以鋼筋混凝土梁為例，裂縫易產生於彎矩或是剪力最大處，於修復補強前會進行評估，判定是否需要進行結構補強或是採用斷面修復方式即可。從過去文獻顯示，使用不同類型之修補材料，例如環氧樹脂修補材與高早強水泥砂漿等，能有效提升鋼筋混凝土構件之斷面彎矩或剪力強度^[1-6]。

由於鋼筋混凝土構件開裂處斷面減少會承受較大之應力，因此採用修補材料的強度應該較既有混凝土高。目前大多採用水泥砂漿或環氧樹脂修補材，但是

水泥砂漿強度較低，已有許多研究尋找更合適的材料取代傳統水泥砂漿，並指出無機聚合物是具有潛力的材料^[7]。無機聚合物是 1979 年法國學者 Davidovits 首次提出，透過以鹼性溶液溶出矽、鋁膠體成為一種黏結劑^[8]。近年無機聚合材料的相關研究越來越多，其特點在於原料多元，經適當調配可具有良好的抗壓、抗彎和收縮等特性^[9]。無機聚合材料越來越受到重視，尤其在與卜特蘭水泥 (Portland cement) 相比，可減少 50%~80% 的二氧化碳排放，亦可用於受損混凝土結構的修補^[10]。

本文使用兩種修補材料，分別為市面上販售之環氧樹脂修補材及無機聚合修補材，將兩種修補材料進行抗壓強度試驗 (ASTM C109)^[11] 與收縮量量測

(ASTM C596-18)^[12]，再將兩種修補材料分別修補至具有矩形凹槽鋼筋混凝土單向版，模擬鋼筋混凝土仰面混凝土剝落破壞，進行四點抗彎試驗 (ASTM D 5628^[13]) 及反覆載重試驗。透過試驗結果，探討無機聚合材料與市面販售之環氧樹脂修補材之力學行為。

研究內容與實驗規劃

本節將說明無機聚合修補材及環氧樹脂修補材之抗壓試驗及收縮試驗規劃；鋼筋混凝土版試體設計與其修補方式，及其四點抗彎試驗。

材料介紹

本節說明使用修補材料特性，包含環氧樹脂修補材與無機聚合修補材。

環氧樹脂修補材

本文使用之環氧樹脂修補材是由國森企業股份有限公司提供，此環氧樹脂修補材具有質量輕及黏著性高之特性，常用於國內鋼筋混凝土版仰面修補，其材料性質如表 1 所示。

表 1 環氧樹脂修補材特性

項目	環氧樹脂修補材
比重	< 1
施作時間	40 分鐘
初期硬化時間	1 天
完全硬化時間	7 天

環氧樹脂修補材因為可以阻絕外面的水氣進入鋼筋混凝土內，以減緩混凝土內鋼筋之鏽蝕，並且容易於鋼筋混凝土仰面進行施作。本文使用之環氧樹脂修補材需依照比例進行拌合，由 A 劑與 B 劑以 2:1 混合後得一稠狀之環氧樹脂修補材，如圖 1 所示。



圖 1 環氧樹脂修補材

無機聚合修補材

無機聚合材料為非晶質 (Amorphous) 或半晶質 (semi-crystalline) 之物質，通常使用富含鋁矽酸鹽之原料，如變高嶺土、燃煤飛灰與爐石粉等。藉由鹼金屬矽酸鹽溶液或鹼金屬氫氧化物溶液將其顆粒表面之矽、鋁離子溶出；在系統中粒子因聚合作用而形成連續性網狀結構，最後經脫水乾燥硬化後形成三維架狀結構體，其反應示意圖如圖 2 所示。

無機聚合材料具有廢棄物資源化、廢棄物固化、水泥建材、磚材、陶瓷製品、防火材料和塗料等諸多領域之應用。無機聚合材料作為水泥建材具有製作簡單及施作方便之特性，在常溫之下即可施作，碳排放量低，且當此材料硬化後特性類似於卜特蘭水泥 (矽酸鹽水泥)，但抗壓強度更高，並可與混凝土相容並進一步產生反應，可牢固得附著於既有混凝土結構上。因此本文將使用此無機聚合材料作為混凝土底板仰面修補材。

試驗規劃

試驗規劃包括修補材料收縮試驗、修補材料抗壓試驗；鋼筋混凝土版修補後之四點抗彎試驗及反覆載重四

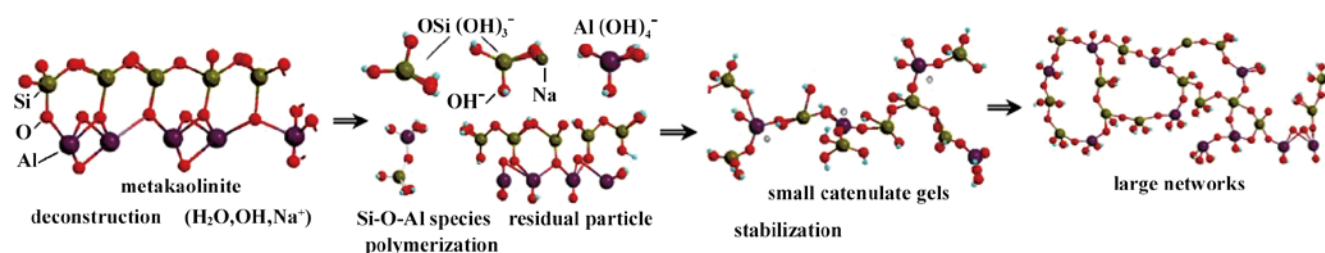


圖 2 無機聚合反應示意圖^[15]

點抗彎試驗。由無機聚合修補材料收縮試驗及抗壓試驗之結果，選定無機聚合修補材料配比，進行後續混凝土版修補後四點抗彎試驗及反覆載重試驗之試體。

以下為此材料性質試驗之試體命名方式：「E」是環氧樹脂修補材；「G」是無機聚合材料；「S」是無機聚合材料所摻之乾砂；無機聚合材料所摻之乾砂量將標於符號 S 的後方。例如：使用無機聚合材料並摻 150%（與無機聚合材料重量比）之乾砂；命名方式為「G-S150」。

修補材料收縮試驗

材料收縮率對於修補材料而言是很重要的考量因素。無機聚合修補材主要由三種材料依照特定之比例拌合而成，分別為：高爐石粉 S4000、細粒料及鹼性溶液。就無機聚合修補材料而言，當鹼性液體與爐石充分反應後，剩餘水分將會隨著接觸空氣面散失，進而產生收縮。當修補材料於仰面修補後，若產生收縮可能使修補材料與修補處之間產生裂縫，因而導致修補材料剝落。

故本試驗為理解無機聚合材料及環氧樹脂修補材之材料收縮特性，本研究依照 CNS 14603 將試體製成 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 28.5\text{ cm}$ 試體進行試驗，試體齡期為 7 天，接著以收縮試驗儀量測材料收縮量，表 2 為修補材料試體名稱與說明。

表 2 各修補材料試體名稱與說明

試體名稱	說明
G	無機聚合材料
G-S150	無機聚合材料摻 150% 乾砂
G-S200	無機聚合材料摻 200% 乾砂
E	環氧樹脂修補材

修補材料抗壓試驗

無機聚合材料性質類似於水泥，而修補混凝土仰面通常為結構之受拉側，就混凝土而言材料抗壓強度為抗拉強度十倍左右，故為了解無機聚合修補材與環氧樹脂修補材之抗壓強度，將依照 ASTM C109 之規範進行抗壓試驗，將兩種修補材料分別灌注於 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 之模具中，將所有配比材料拌合後放置 7 日，於 7 日後使用國立臺北科技大學土木系材料試驗室之 100 噸萬能試驗機，抗壓速率為 100 kN/min。為了解不同修補材料抗壓強度，將使用不同配比之修補材料進行抗壓試驗，修補材料試體名稱與說明亦如表 2 所示。

四點抗彎試驗與試體設計

鋼筋混凝土版試體是參照 ACI 318-05 之單向鋼筋混凝土版設計規範，以 #3 鋼筋網做為鋼筋混凝土版之配筋，配置於試體受拉側上方 3 cm 處，混凝土強度為 210 kgf/cm^2 。單向鋼筋混凝土版之尺寸為 $120\text{ cm} \times 34\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ ；試驗試體分別設計標準鋼筋混凝土版；與鋼筋混凝土版於受拉側中央設計 $30\text{ cm} \times 34\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 之矩形凹槽試體。凹槽試體分別使用無機聚合修補材與及環氧樹脂修補材進行修補，於修補完成後 7 日進行四點抗彎試驗。四點抗彎試驗使用國立臺北科技大學土木系材料試驗室之 100 噸萬能試驗機進行。鋼筋混凝土版試體尺寸與配筋圖如圖 3 所示。

鋼筋混凝土版試體編號說明如下：第一碼代表使用之試體型式，「B」表示標準鋼筋混凝土版，「R」表示將鋼筋混凝土版於受拉側中央設計 $30\text{ cm} \times 34\text{ cm}$ 之矩形凹槽試體；第二碼代表使用之修補材料，「E」表示使用環氧樹脂修補材進行修補，「G」表示使用無機聚合修補材進行修補。表 3 為四點抗彎試驗試體名稱表。

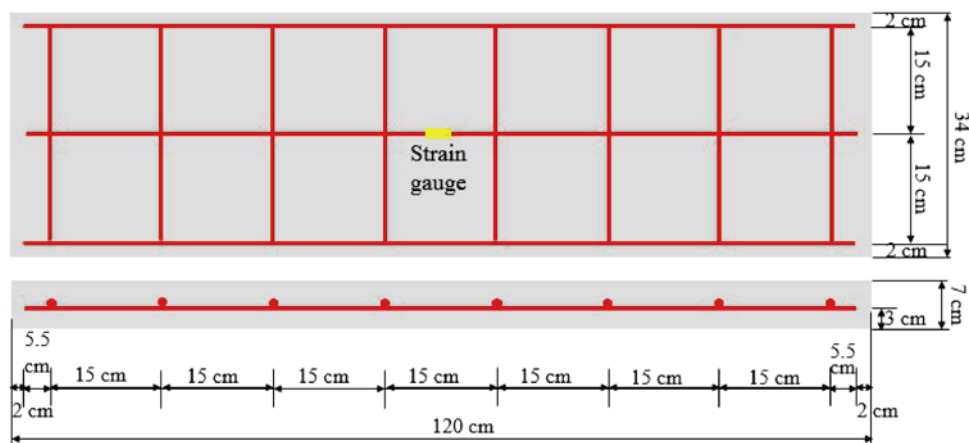


圖 3 混凝土試體配筋圖

表 3 四點抗彎試驗試體名稱表

試體編號	說明
B	標準試體
R	矩形凹槽之試體
R-E	矩形凹槽之試體，且使用環氧樹脂修補材進行修補
R-G	矩形凹槽之試體，且使用無機聚合修補材進行修補

為研究鋼筋混凝土版仰面修補，將單向鋼筋混凝土版進行四點抗彎試驗（ASTM D 5628），並於混凝土版下方受拉力側設計凹槽以模擬混凝土剝落，於凹槽處以修補材進行修補，並比較各試體於修補後之抗彎強度。圖 4 為四點抗彎試驗示意圖，試體長度為 120 公分；高度為 7 公分；上支承間距設計為 34 公分，下支承間距為 100 公分，規劃試體為撓曲破壞。

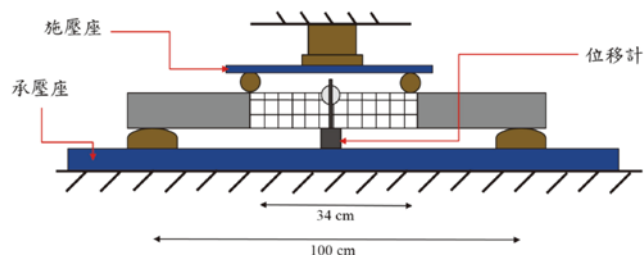


圖 4 四點抗彎試驗示意圖

反覆載重四點抗彎試驗

從上節之四點抗彎試驗，先將試體抗彎加載至試體產生極限強度並破壞。並將同種試體以測試極限強度之 0.7、0.8 及 0.9 倍載重進行反覆施力至試體完全破壞，並紀錄其反覆載重次數，以了解受到反覆載重之試體疲勞性質。本試驗使用國立臺北科技大學土木工程材料試驗室之 100 噸萬能試驗機進行反覆載重四點抗彎試驗。

每組測試之試體將區分為 0.7 倍、0.8 倍及 0.9 倍之極限破壞力，故一種試體有四片版試體，一片做為極限載重用途，三片做為反覆載重用途。表 4 為反覆載重抗彎試驗試體名稱與數量表。

表 4 反覆載重抗彎試驗試體名稱與數量表

試體名稱	試體數量			
	D	0.9P	0.8P	0.7P
B	1	1	1	1
R-E	1	1	1	1
R-G	1	1	1	1

試體製作與修補材施作

為完整說明四點抗彎試驗及反覆載重試驗試體製作之試體製作流程，將製作方式分為兩種，分別為試體製作方式及試體修補方式。

四點抗彎試體製作方式

為製作單向鋼筋混凝土版試體，先於現地以木製模具進行組模，再依序放置保麗龍板，保麗龍板之尺寸依照凹槽尺寸所設計，最終放置 #3 鋼筋網後進行混凝土澆置（圖 5）。每片鋼筋網均於試體受拉側所對應之拉力筋貼附應變貼，以量測試體受力時之極限應變。



圖 5 矩形凹口試體組模完成照片

將組合完成之模具放至於平坦地面上進行試體澆置，為使每一塊鋼筋混凝土版保持穩定強度，於澆置時配合品管人員進行現地混凝土品管相關試驗，包括混凝土氯離子檢測及混凝土坍落度試驗。為保持試體表面平坦，使用搗實器及抹刀，將混凝土版進行搗實及抹平。於混凝土澆置完成後進行養護。每組鋼筋混凝土版試體均於四點抗彎試驗當天進行混凝土圓柱試體抗壓，以確認每次試驗之混凝土品質。

四點抗彎試體修補與補強方式

每一組修補試體於使用修補材料修補前，均使用國森企業所提供之底漆作為做為膠結材。底漆之成分為樹脂 A 劑及樹脂 B 劑，將兩種樹脂依照固定配比 4:1 進行拌合，於拌合後使用刷子塗抹於需要修補之試體凹槽處，並靜置 15 分鐘後再使用修補材料進行修補；圖 6 為國森企業所提供之底漆拌合後的照片。

再依據 2.1 節之無機聚合修補材與環氧樹脂修補材之製作方式，填補於矩形凹槽試體內，圖 7 為標準試體、矩形凹槽試體與矩形凹槽試體修補後之照片。



圖 6 底漆樹脂拌合後呈現膠狀

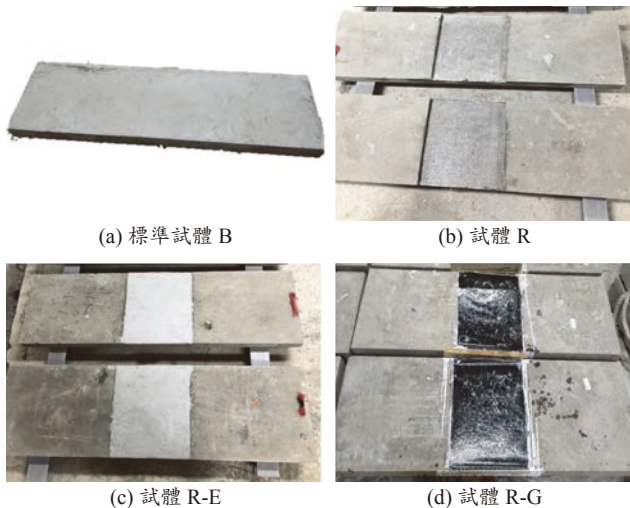


圖 7 各矩形混凝土試體之照片

材料性質試驗結果

本章分為修補材料收縮試驗與抗壓試驗，由修補材料試驗結果決定使用於四點抗彎試驗之無機聚合修補材料配比。

修補材料收縮試驗結果

按照 CNS14603 之試驗規範，所有試體均於凝固後拆模並量測凝固時之試體長度 28.5 cm，進行長度紀錄。每組試體三顆，每顆試體量測三次，並取其平均值。

表 5 為試體 G（無機聚合材料未摻砂）之 7 天齡期收縮試驗結果，此試驗結果可得知使用無機聚合材料未摻砂時，七日平均量測值為 28.128 cm，將七日量測值減去凝固時量測值，可得到收縮量，將收縮量除以凝固時量測值，可得平均收縮率為 1.305%。

表 5 試體 G，7 天齡期收縮量

編號	第一次量測 (mm)	第二次量測 (mm)	第三次量測 (mm)	三次量測平均 (mm)
1	3.722	3.721	3.722	3.721
2	3.701	3.701	3.702	3.701
3	3.737	3.735	3.734	3.735
平均收縮率：1.305%				

表 6 為試體 G-S150（無機聚合材料摻 150% 砂）之 7 天齡期收縮量試驗結果，此表可知將砂摻入無機聚合材料，七日量測值為 28.279 cm，可使其收縮量減少，此試體平均收縮率為 0.736%。

表 6 試體 G-S150，7 天齡期收縮量

編號	第一次量測 (mm)	第二次量測 (mm)	第三次量測 (mm)	三次量測平均 (mm)
1	2.237	2.250	2.239	2.242
2	2.115	2.122	2.119	2.118
3	2.244	2.251	2.247	2.247
平均收縮率：0.736%				

表 7 為試體 G-S200（無機聚合材料摻 200% 乾砂）之 7 天齡期收縮量試驗結果，當摻砂率提高可有效減少無機聚合物收縮量，七日量測值為 28.415 cm，此試驗之平均收縮率為 0.297%。

表 7 試體 G-S200，7 天齡期收縮量

編號	第一次量測 (mm)	第二次量測 (mm)	第三次量測 (mm)	三次量測平均 (mm)
1	0.867	0.867	0.868	0.867
2	0.839	0.833	0.834	0.835
3	0.835	0.830	0.832	0.832
平均收縮率：0.297%				

表 8 為試體 E（環氧樹脂修補材）之 7 天齡期收縮試驗結果，環氧樹脂修補材收縮率較無機聚合材料低，七日量測值為 28.496 cm，此試驗之平均收縮率為 0.015%。

表 8 試體 E，7 天齡期收縮量

編號	第一次量測 (mm)	第二次量測 (mm)	第三次量測 (mm)	三次量測平均 (mm)
1	0.039	0.039	0.038	0.038
2	0.043	0.040	0.046	0.043
3	0.037	0.033	0.037	0.036
平均收縮率：0.015%				

表 9 為所有修補材料收縮試驗之平均數值表，依照材料收縮試驗結果可得知，無機聚合材料在未摻砂前（試體 G）之平均收縮量為 1.305%，是所有材料收縮試驗中最高者；其次為無機聚合材料摻以重量比 150% 之砂（試體 G-S150），平均收縮量為 0.736%；第三為無機聚合材料摻以重量比 200% 之砂（試體 G-S200），平均收縮量為 0.297%，是無機聚合材料型式試體中最低者；最低收縮率之試體為環氧樹脂修補材（試體 E），收縮率為 0.015%。

從表 9 材料之收縮率可得知，無機聚合修補材試體收縮量均高於環氧樹脂修補材，但將無機聚合材料摻砂，可有效減少其收縮量，其中以摻 200% 之無機聚合材料重量比的砂，可減少 1.053% 之收縮率。環氧樹脂修補材於材料收縮試驗之收縮率為所有修補材料最低者，具有良好低收縮率。收縮率試驗由收縮量高至低分別為：G > G-S150 > G-S200 > E。

表 9 修補材料收縮試驗之平均數值表

試體名稱	平均收縮率
G	1.305%
G-S150	0.736%
G-S200	0.297%
E	0.015%

修補材料抗壓試驗

依照 ASTM C109 之規範進行抗壓試驗，每組試體 3 個。表 10 為環氧樹脂修補材 (E)、無機聚合材料未摻砂 (試體 G)、無機聚合材料摻 150% 砂 (G-S150)、與無機聚合材料摻 200% 砂 (G-S200) 之 7 天齡期材料抗壓強度值，其中以試體 G-S150 擁有最高之平均抗壓強度。試體 G 之 7 天平均抗壓強度為 62.23 MPa。

表 10 各修補材試體之 7 天抗壓強度

試體名稱	抗壓強度 (MPa)	平均抗壓強度 (MPa)
E	19.08	21.85
	23.52	
	22.97	
G	60.19	62.23
	64.70	
	61.80	
G-S150	70.92	73.78
	76.51	
	73.91	
G-S200	65.01	66.80
	69.19	
	66.20	

圖 8 為兩種不同種類之修補材料抗壓試驗前後對照圖，可觀察出無機聚合修補材於抗壓後產生脆性破壞，且變形量較環氧樹脂修補材低出許多；環氧樹脂修補材於抗壓後產生較大之變形量，類似於韌性材料。

從表 10 材料之抗壓試驗可得知，無機聚合材料型式之試體均高於環氧樹脂修補材，高出 284% ~ 387% 之抗壓強度，其中以摻 150% 之無機聚合材料重量比的砂擁有最高抗壓強度 73.78MPa，抗壓試驗由抗壓強度高至低分別為：G-S150 > G-S200 > G > E。

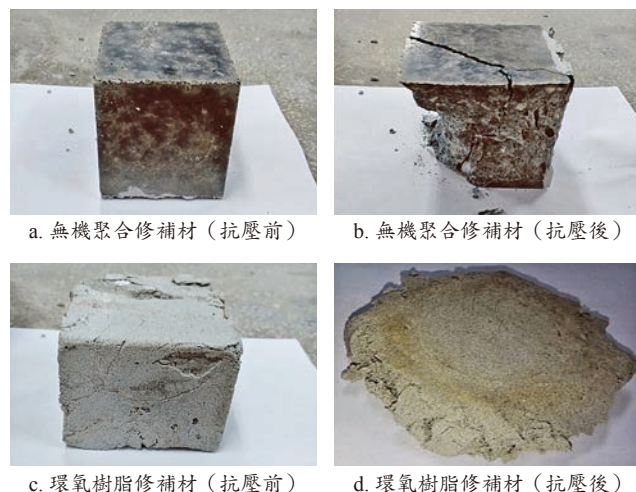


圖 8 各修補材抗壓試驗前後照片

從材料抗壓試驗前與材料抗壓試驗後之圖片 (圖 8)，可觀察出無機聚合材料行為類似水泥，於抗壓後為剪力破壞，相較於環氧樹脂修補材屬於韌性材料，於抗壓後未產生裂縫，而產生較大之變形量。混凝土為脆性材料，與無機聚合材料亦同，而兩種相同性質之材料亦能與修補完後有相似的材料特性，故本研究使用無機聚合材料做為修補材料並與環氧樹脂修補材進行比較。

為使用無機聚合材料修補於仰面，本研究之四點抗彎試驗將以 G-S150 作為修補材料，其原因為此種配比具有最高之抗壓強度及在收縮試驗於無機聚合材料型體中具有次低之收縮率。故本研究使用 G-S150 作為四點抗彎試驗及反覆載重試驗之修補材。

四點抗彎試驗結果

矩形凹槽組 (試體 R 系列) 每組試體兩個，進行四點抗彎試驗，紀錄試驗結果力與位移關係與破壞模式。表 11 為標準試體及矩形凹槽試體之抗彎極限強度、極限位移、平均極限強度及平均極限位移之數據。表 12 四點抗彎試驗後之矩形試體破壞照片表

表 11 標準試體及矩形凹槽試體之抗彎極限強度表

試體名稱	極限載重 (kN)	極限位移 (mm)	平均極限載重 (kN)	平均極限位移 (mm)
B-01	15.3	15.10	14.8	16.1
B-02	14.4	17.10		
R-01	9.4	23.80	9.6	25.2
R-02	9.8	26.69		
R-E-01	9.8	24.74	9.5	21.5
R-E-02	9.3	18.39		
R-G-01	10.2	21.07	10.2	21.1
R-G-02	10.3	21.27		

表 12 四點抗彎試驗矩形試體破壞照片與說明表

試體名稱	破壞照片	說明
標準試體 B		中間處產生撓曲裂縫後最終破壞
R		開槽處斷面慣性矩較小，故破壞時均於開槽處發生開裂
R-E		鋼筋混凝土開槽處與修補材料之間產生開裂，破壞時均於開槽處發生開裂
R-G		中央產生撓曲裂縫後於修補材料及試體之間之介面產生裂縫，最終破壞

從矩形凹槽試體之四點抗彎試驗結果可得知，試體採環氧樹脂修補材修補試體（R-E）未能使其抗彎強度提升，且未達到標準試體（B）之抗彎強度。試體採無機聚合材料修補試體（R-G）與未修補之矩形凹槽試體（R）比較，其抗彎強度可提升 6.86%，但是還無法達到標準試體（B）的強度。

反覆載重抗彎試驗

每組試體均會先進行抗彎試驗得到極限載重（P），並將其試驗數據紀錄後再進行不同極限載重倍率之反覆載重抗彎試驗。表 13 為矩形凹槽試體反覆載重試驗次數結果表，其中在表格破壞欄中，N 代表未破壞；Y 代表破壞。由表 20 可得知二種不同修補材料之試體，在受 0.9 倍極限載重之反覆載重試驗，使用無機聚合材料修補之試體（R-G），能承受 51 次反覆載重；而使用環氧樹脂修補材之試體（R-E）僅能承受 2 次。在受 0.8 倍極限載重之反覆載重試驗，使用無機聚合材料修補之試體（R-G），能承受 1000 次以上反覆載重，且未破壞；而使用環氧樹脂修補材之試體（R-E）僅能承受 167 次。在受 0.7 倍極限載重之反覆載重試驗，二者之反覆載重次數可達 1000 次以上，且未破壞。

表 13 矩形試體經修補後反覆載重試驗次數

試體名稱	極限載重 P (kN)	0.9 P		0.8 P		0.7 P	
		次數	破壞	次數	破壞	次數	破壞
R-E	9.5	2	Y	167	Y	≥ 1000	N
R-G	10.2	51	Y	≥ 1000	N	≥ 1000	N

N：未破壞；Y：破壞

結論

依據上述的試驗結果可以獲得下列幾點結論：

1. 在材料性質試驗之收縮試驗結果中可得知，環氧樹脂修補材具有最低之收縮率，而純無機聚合材料具有較高之收縮率。添加 150% 重量比細砂之無機聚合修補材，比無機聚合材料減少了 0.6% 之收縮率。
2. 在材料性質試驗之抗壓試驗結果可得知，試體 G-S150 具有最高之抗壓強度 73.78 MPa；次高為試體 G-S200 抗壓強度為 66.80 MPa；試體 G 抗壓強度為 62.23 MPa，試體 E 抗壓強度為 21.85 MPa。
3. 無機聚合修補材應用於鋼筋混凝土仰面之修補具可行性，依照四點抗彎試驗結果可得知，無機聚合材料修補試體（R-G）抗彎強度雖仍低於標準試體（B），但高於使用環氧樹脂修補材修補之試體。
4. 由四點抗彎試驗後之破壞模式可觀察出，使用無機聚合材料修補之試體（R-G），於抗彎試驗時能在修補材料上發現撓曲裂縫，代表此種修補材料於抗彎試驗中有明顯受力行為。而使用環氧樹脂修補材修補之試體（R-E），於抗彎試驗時修補材料未能產生裂縫，產生裂縫處多為相異材料交接處，且與未修補之試體破壞模式類似。
5. 由反覆載重試驗結果可觀察出，在受 0.8 與 0.9 倍極限載重之反覆載重試驗，使用無機聚合材料修補之試體（R-G）承受反覆載重次數均高於使用環氧樹脂修補材修補之試體（R-E）。

參考文獻

1. Al-Salloum, A. (2007), "Flexural performance of RC beams repaired with commercial repair materials," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 19, pp. 153-172.
2. Ahmad, S., Elahi, A., Barbhuiya, S.A., and Farid, Y. (2012), "Use of polymer modified mortar in controlling cracks in reinforced concrete beams," *Construction and Building Materials*, Vol. 27, pp. 91-96.
3. Wang, B., Xu, S., and Liu, F. (2016), "Evaluation of tensile bonding strength between UHTCC repair materials and concrete substrate," *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 595-606.
4. Hor, Y., Wee, T., and Kazutaka, S. (2017), "Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete" *Construction and Building Materials*, Vol. 155, pp. 463-474.
5. Geraldo, R., Teixeira, O., Matos, S., Silva, F., Gonçalves, J., and Camarini, G. (2018), "Study of alkali-activated mortar used as conventional repair in reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 165, pp. 914-919.
6. Al-Majidi, H., Lampropoulos, P., Cundy, B., Tsioulou, T., and Al-Rekabi, S. (2018), "A novel corrosion resistant repair technique for existing reinforced concrete (RC) elements using polyvinyl alcohol fibre reinforced geopolymer concrete (PVAFRGC)," *Construction and Building Materials*, Vol. 164, pp. 603-619.
7. Nguyen, K.T., Le, T.A., Lee, J., Lee, D., and Lee, K. (2017), "Investigation on properties of geopolymer mortar using preheated materials and thermogenic admixture," *Construct Build Mater*, Vol. 130, pp 146-155.
8. Jumrat, S., Chatveera B, and Rattanadecho P. (2011), "Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, Issue 2, pp. 242-248.
9. Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., and Zhang, J. (2018), "A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 152, pp. 79-95.
10. Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., and Husseina, A.A. (2017), "Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, pp. 54-74.
11. ASTM C109/C109M-02. Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens); ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2016.
12. ASTM C596-18. Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2018.
13. ASTM D 5628. Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2018.
14. 郝國偉、陳彥鈞、蕭勝偉、李有豐、鄭大偉、陳彥鈞，「無機聚合材料與碳纖維貼片於鋼筋混凝土版仰面修復與補強之可行性研究」，*混凝土科技*，第十三卷，第三期，第 61-73 頁，民國 108 年 7 月。
15. Hajimohammadi A., Provis J.L., and van Deventer J.S.J. (2008), "One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp. 9396-9405.



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。



無機聚合物製成防火材料之應用

林凱隆／國立宜蘭大學環境工程系 特聘教授

羅康維／國立臺北科技大學資源工程研究所 博士候選人

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

許皓翔／國立宜蘭大學環境工程系 碩士

無機聚合物材料具有傳統卜特蘭水泥所不具備的優良性能，比如：早強、體積穩定性佳、耐化學腐蝕、界面結合能力強、抗滲性好、耐高溫性好、耐水熱作用及耐久性佳等特點。此外，從環境的角度來看，過去幾年來，廢棄物中無機聚合物材料的開發和生產越來越受到重視。許多研究顯示出在無機聚合物中使用礦渣和飛灰具有優異的機械和物理性能。無機聚合物不僅可減少卜特蘭水泥之碳足跡，且還可再利用大量的工業廢棄物，如礦渣，飛灰和矽粉。這些矽鋁酸鹽材料因富含鋁酸鹽（Al）和矽酸鹽（Si）可作為摻料。目前國內防火原料與防火建材多為進口之產品，鑒於提升國內防火材料之競爭性，使用無機聚合物可再利用大量的工業廢棄物且解決溫室氣體排放等問題，若將其發展成為新一代環保綠色材料實具有相當的潛力。本文就無機聚合物的基本理論與技術發展，針對其歷史背景、形成的條件、反應過程及防火材料相關的應用等做一整體性的回顧。

前言

無機聚合物（Geopolymer）是種新型的高性能膠凝材料。Davidovits 在 1978 年創建 geopolymer 此名詞來代表藉由地質化學或者地質合成而得到的礦物聚合物^[1]。無機聚合反應是一個涉及矽鋁酸鹽礦物質的化學合成反應。主要係以氧化鋁和二氧化矽為前導物，並溶解於鹼溶液中，由鹼溶液或矽酸鹽來激活以形成低聚體，之後進行縮聚反應形成矽鋁酸鹽的架狀物^[2]。無機聚合物的概念包括所有採用天然礦物或廢棄物製備之矽氧四面體和鋁氧四面體聚合而成的三維網狀凝膠體^[3]。無機聚合物這類膠凝材料具有傳統卜特蘭水泥所不具備的優良性能，比如：早強、體積穩定性佳、耐化學腐蝕、界面結合能力強、抗滲性好、耐高溫性好、耐水熱作用及耐久性佳等特點^[3,4]。其獨特的性能且其在建築材料、高強材料、固核固廢材料、密封材

料和耐高溫材料等方面具應用之潛力^[5]。

此外，在製備過程中與卜特蘭水泥相比，無機聚合物具有很大的優勢。一般而言，製備無機聚合物不需要高溫煅燒或燒結，無機聚合反應在常溫下即可完成，且在生產過程中幾乎沒有 NO_x、SO_x 和 CO 的產生，CO₂ 的排放量亦低^[6]。對於無機聚合物來說，特別是原材料和養護溫度是非常重要的因素，在無機聚合物合成時必須要加以考慮。此外，固液比和使用的金屬矽酸鹽的類型也會對得到的無機聚合物的最終性能有著很大的影響。而目前國內防火原料與防火建材多為進口之產品，鑒於提升國內防火材料之競爭性，無機聚合物具有減少二氧化碳排放、高抗壓強度，優異的易燃性和耐用性，將其發展為防火材料的替代品成為新一代綠色材料深具相當的潛力。本文就無機聚合物的基本理論與技術發展，探討防火材料應用無機聚合物之可行性。

無機聚合物

歷史背景

鹼活化水泥發展於 1965 年代，根據 Davidovits 設立兩種主要鹼活化膠結材系統，第一種為活化爐石（Si + Ca），其 CSH 為主要的反應產物，第二種為鹼活化（Si + Al），一般例子為鹼活化變高嶺土或 F 級飛灰^[7]。

第一種膠結材最早是始於 Glukhovsky 所開始發展，主要是以氫氧化鈉作為活化劑，活化爐石（Blast Furnace Slag）所產生一具有膠結性之材料，而後，在將此膠結材料用於古代建築上，並且命名為「Soil-Cement」，而又有其它學者稱為「Alkali-Slag Cement」或「Alkali-Activated Slag Cement」。而這種膠結材料可由天然的鋁矽酸鹽礦物與鹼性之工業廢棄物混合產生。這種膠結材料反應的主要產物為矽酸鈣水化物、鋁矽酸鈣水化物與鋁矽酸鈉水化物，其鹼活化物可分為六類（其中 M 為鹼金屬離子）：(1) 鹼性（MOH）；(2) 弱酸鹽（ M_2CO_3 、 M_2SO_3 、 M_3PO_4 、MF）；(3) 矽酸鹽（ $M_2O \cdot nSiO_3$ ）；(4) 鋁酸鹽（ $M_2O \cdot nAl_2O_3$ ）；(5) 鋁矽酸鹽（ $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$ ）；(6) 強酸鹽（ M_2SO_4 ）^[8]。

第二種膠結材由 Davidovits 所開始發展的，主要是由鹼活化變高嶺土所產生，並且命名這種材料為「Geopolymer」^[9]。這種膠結材料性質類似於古代羅馬建築與埃及金字塔，其主要是由 $CaCO_3$ 、不定形的鋁矽酸鹽和類似於沸石的材料所組成（ $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$ ），其經驗式為 $Mn\{-(SiO_2)_z-AlO_2\}_n \cdot wH_2O$ ，其中 n 為聚合程度；M 為鹼金屬離子；z 為 1、2、3，其各類型的聚合物如圖 1 所示^[10]。

無機聚合物特性

Geopolymer 主要是用於描述鋁矽酸鹽無機聚合物，而通常無機聚合物可以藉由卜作嵐材料或富含鋁矽酸鹽的材料與強鹼性溶液混合產生（如圖 2），而生成之無機聚合物以 SiO_4 、 AlO_4 之四面體組成架狀結構，其結構相似於沸石，沸石主要為結晶相，但無機聚合物主要是由不定形所組成。無機聚合物擁有極好的機械特性、低收縮、耐火和抵抗酸能力，這些特性使無機聚合物擁有與卜特蘭水泥建築材料競爭之能力，其耐久性也符合混凝土之耐久性。惟製造卜特蘭

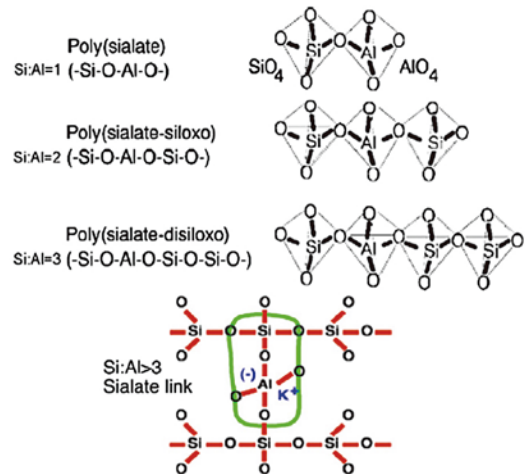


圖 1 不同類型之無機聚合物^[10]

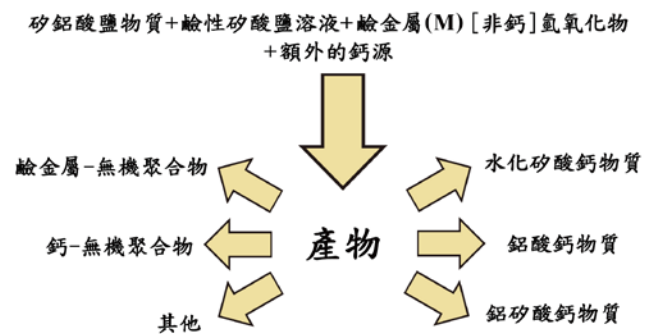


圖 2 鋁矽酸鹽鹼活化可能產物^[12]

水泥在燒製過程中至少需要 1,400°C 的高溫燒製而成，而無機聚合物的製備在低於 100°C 的環境中即可合成，不需花費太多的能量合成；傳統上製造 1 公斤卜特蘭水泥需要消耗 1.6 公斤的石灰石，即產生 0.53 公斤之 CO_2 ，而無機聚合物所排放 CO_2 約比傳統卜特蘭水泥少約 55%^[11]，故無機聚合物為對環境友善的建築材料，如表 1 所示。

表 1 無機聚合物和熟料生產過程中的總 CO_2 排放量^[11]

單位	無機聚合物	熟料
kJ/g	0.306	1.059
kWh/kg	0.085	0.294
kg CO_2 (Energy)	0.056	0.192
kg CO_2 (Decarbonation)	0.237	0.342
Total kg CO_2 emitted	0.293	0.534

無機聚合物反應過程

根據 Glukhovsky 所建立 Glukhovsky 模型（Glukhovsky Model），當材料主要是由矽酸鹽及鋁酸鹽所組成時，會發生破壞－凝結－濃縮－結晶化

(Destruction-Coagulation-Condensation-Crystallization) 所連結而成的反應；其第一步為共價鍵之 Si-O-Si 和 Al-O-Si 鍵結崩解，而此反應會發生在於鹼性溶液中之 pH 提高時，此官能基物轉變為膠體相 (Colloid phase)，之後當破壞的產物出現時會開始堆積 (Accumulation)，而其之間會相互作用而形成凝固結構 (Coagulated Structure)，導致第三階段的濃縮結構和結晶^[13]。

圖 3 為簡化後之無機聚合反應，其合成鋁矽酸鹽關鍵的步驟為固態的鋁矽酸鹽原料轉變^[14]。由圖中得知，當添加氫氧化鹼時，其 pH 值會上升，致使鋁矽酸鹽之原料於高鹼性環境下，其顆粒表面會開始溶解，而產生鋁矽酸鹽物種，而這些物種主要以類似單體之型式存在於溶液中，使溶液成為過飽和溶液。而後此溶液中這些物質會轉換成為膠體，當物質膠體化後，系統依然會持續的重新排列與組織，而這些膠體會藉由縮合作用 (Condensation) 產生一大的鏈狀結構，導致膠體中之架狀結構增加，因此形成三維架狀構的無機聚合物。而整個反應過程中會逐步將溶解程序中所消耗的水份逐漸排出，因此水在整個反應過程中是扮演反應介質的角色，但部分的水會殘留於膠體結構中。在整個反應機制中，結構的重組決定材料的微結構、孔徑分佈和物理特性等^[14-16]。

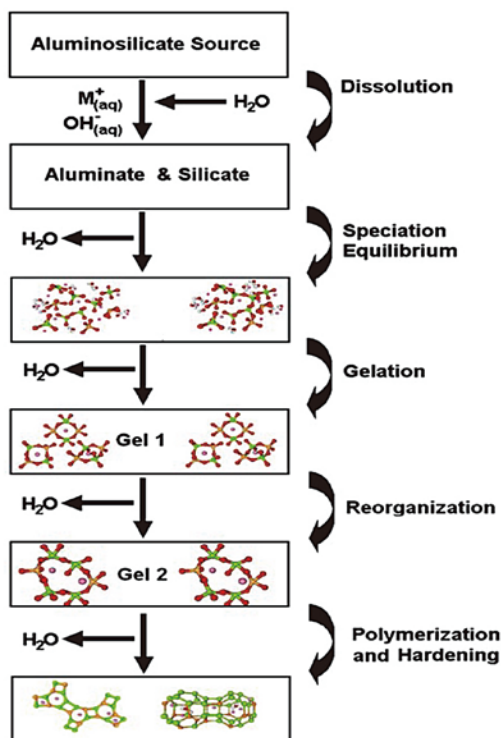


圖 3 無機聚合反應示意圖^[17]

防火隔熱建材隔熱原理

防火隔熱建材是指建材若遇到火源時不會燃燒，且有阻擋火勢蔓延、延遲火源熱能傳遞功效之建材。防火隔熱建材應具備在高溫下能負荷重量、遮擋火焰以及高熱之耐火性能，根據 CNS 國家標準分級，可分為耐燃一級（不燃材料）、耐燃二級（耐火板）與耐燃三級（耐燃材料）等材料。依材料燃燒性能的定義：耐燃一級在火災發生時，不會產生濃煙與氣體，且在高溫火害下不會發生變形、龜裂與熔化等現象，其單位面積發煙係數低於 30 材料稱之；耐燃二級是只在火災初期材料會發生極少燃燒現象，且發煙係數單位面積低於 60 之材料；耐燃三級是只在火災初級發生微燃燒現象，但其燃燒速度緩慢，其發煙係數單位面積低於 120 之材料。根據邱俊萍（2002）實驗結果顯示，無機聚合物於火害過程中皆無發煙之情形，故屬於不發煙材料^[18]。目前市售的常見防火建材，耐燃一級的有纖維石膏板、纖維矽酸鈣板、玻璃纖維強化水泥板等；屬耐燃二級的防火建材有石膏板類、水泥纖維板等；耐燃三級的建材有耐燃合板、木質水泥板等建材。而建築物中使用防火建材的目的主要是增加火災發生時逃生的機會。

防火隔熱建材

防火隔熱建材通常具有孔隙率高、體密度低與熱傳導率低等特性。一般防火隔熱材料為多孔結構且為不均勻體。基本上皆是於材料內部留置孔洞，以降低熱傳遞。隔熱材料一般應具備下列基本條件：(1) 低熱傳導率、(2) 較低之熱膨脹係數、(3) 具防水性或低吸濕性、(4) 大的熱容量材料（熱容量大的材料，溫度上升緩慢，其下降亦依時間而遲延，亦即溫度改變之幅度較小）、(5) 氣泡以密閉性最佳、(6) 質輕、(7) 易施工與 (8) 物美價廉等特性。

隔熱材料應用甚廣目前市售的常見防火建材有纖維石膏板、纖維矽酸鈣板、玻璃纖維強化水泥板、石膏板類、水泥纖維板、耐燃合板、木質水泥板等建材，其市售各防火建材性質比較表如表 2 所示。而一般絕熱材料之熱傳導係數約為 0.034 ~ 0.173 W/m · K。

表 2 市售各種防火板性質^[19]

	矽酸鈣板	石膏板	水泥板	合板
耐燃性	不燃	不燃	不燃	可燃
比重 (g/cm ³)	0.5 ~ 0.7	1.5 ~ 2.5	1.5 ~ 2.0	0.5 ~ 0.8
抗彎強度 (kgf/cm ²)	50 ~ 70	50	100	20
吸水率 (48 小時)	0.15	0.3	0.2	> 30%
隔音 (dB)	35	65	65	10
礦物分解最高溫度 (°C)	1120	1040	-	150
石棉含量 (%)	0 ~ 3	0 ~ 3	3 ~ 5	0

無機聚合物應用於防火材料

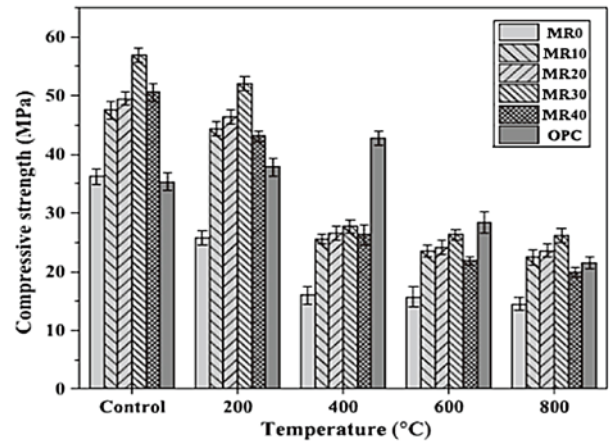
一般營建材料皆利用卜特蘭水泥製成，但因卜特蘭水泥於溫度為 300°C ~ 400°C 時，結構會開始瓦解，故火災發生後，利用卜特蘭水泥建造之建築物皆須拆除重建；而無機聚合物因所含有的孔隙為奈米孔洞，且其構造為構造鋁矽酸鹽三維網狀結構 (Tacto-Alumino-Silicate 3D Network)，可讓物理鍵結水與化學鍵結水以非破壞方式進出孔洞，使無機聚合物整體結構保持完整，並於高溫時仍保持一定強度，與卜特蘭水泥特徵明顯不同 (如圖 4)。

目前國內研發成果

邱俊萍^[18]利用爐石添加變高嶺土再利用鹼性溶液 (KOH、矽酸鈉) 合成無機聚合物，其實驗結果顯示抗壓強度約為 80 MPa、抗彎強度約為 15 MPa，且防火絕熱試驗顯示，於 1,100°C 火焰噴燒 30 分鐘後，薄板後方溫度最高僅為 350°C，代表以爐石製成之無機聚合物不僅擁有極佳之機械性質且具有隔熱效果，可應用結構與防火材料上。

林孟暉^[21]利用燃煤底灰添加變高嶺土與鹼性溶液 (NaOH、矽酸鈉) 製成無機聚合物。利用燃煤底灰製成之無機聚合物，於火害試驗中顯示以鹼性溶液 $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} = 1.0$ 所製成之無機聚合物，在火害溫度 300°C、500°C 及 700°C 中其抗壓強度皆維持在室溫下抗壓強度之 70% 以上；而當火害溫度為 1,100°C 時，為室溫下之二分之一，表示利用燃煤底灰之無機聚合物具有抵抗火害之能力。

吳冠龍^[22]利用變高嶺土、標準砂、玻璃粉與玻璃纖維為原料，再利用鹼性溶液 (NaOH、矽酸鈉) 溶液催化，以製成無機聚合樹脂 (Geopolymeric Resin) 修補混凝土裂縫。當無機聚合樹脂中添加玻璃粉與玻璃纖維時，修補劈裂強度可達 0.73 MPa，且當養護天數拉長時，強度也有上升的趨勢，表示無機聚合數只可做為水泥砂漿體之黏結材。

圖 4 無機聚合物火害後強度變化^[20]

枋吟霞^[23]利用水淬熔渣與鹼性溶液 (鋁酸鈉、矽酸鈉與氫氧化鈉溶液) 製成無機聚合物，於製備無機聚合物過程中額外添加發泡劑 (KMnO_4 與 H_2O_2) 以提升隔熱效果。研究結果發現當添加發泡劑量愈多時，其孔洞量變大、變多，致使無機聚合物之熱傳導係數愈低；當添加是為 1.6 wt.% 時，其熱傳導係數約為 0.23 W/m·K。

陳志賢^[24]分別利用含矽質廢棄物 (水庫淤泥、廢容器玻璃、TFT-LCD 玻璃) 以鹼激發的方式製備無機聚合物。若以 30% 爐石與 70% 水庫淤泥製成無機聚合物，在養護齡期 91 天時抗壓強度可達 132 MPa；另外，以鈉石灰玻璃為原料時，利用鹼當量為 3% 時所合成之無機聚合物，經長時間養護後其抗壓強度可達 115 MPa；而製作 TFT-LCD 無機聚合物時，以鹼當量為 15% 下催化，於 70°C 養護 24 小時後，抗壓強度即可達 64 MPa。

目前國外研發成果

Liang 等人^[20]利用稻殼灰取代變高嶺土製備無機聚合物探討其熱穩定性的影響，添加稻殼灰 30% 之無機聚合物相對強度，顯示出最高的相對強度，在 200°C、400°C、600°C 和 800°C 下，無機聚合物的相對強度

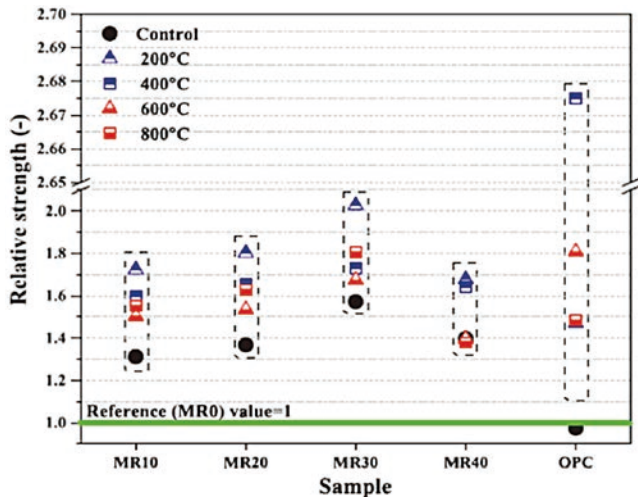


圖 5 無機聚合物火害後強度變化^[20]

分別為 2.03、1.73、1.68 和 1.81，比 OPC 相對增加 103%，73%，68% 和 81%，進一步顯示，稻殼灰在無機聚合物的熱穩定性中扮演重要作用（如圖 5）^[20]。

結語

本文根據無機聚合物其基本理論與技術發展，針對其歷史背景、形成的條件、反應過程及防火材料相關應用結果。無機聚合物這類膠凝材料具有卜特蘭水泥所不具備的優良性能，比如：早強、體積穩定性佳、耐化學腐蝕、界面結合能力強、抗滲性好、耐高溫性好、耐水熱作用及耐久性佳等各項優點，是一種環保型綠色材料。目前國內防火原料與防火建材多為進口之產品。而無機聚合材料的研究在國內尚屬起步階段，基礎研究較少。未來應針對國內材料及設備，對無機聚合物的配比、反應過程及相關應用開發等方面進行有系統的研究。這對於以無機聚合物提升國內防火材料之競爭性是未來可行發展的應用技術，技術最佳化應整合無機聚合物系統的反應機制，經濟效益應著重於工業廢棄物再利用，以促進技術產業化與落實循環經濟之發展方向。

參考文獻

- Davidovits, J. (1991), Geopolymers-inorganic polymerie new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656.
- Khale, D. and Chaudhary, R. (2007), Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- Zheng, G.J., Cui, X.M., Zhang, W.P., and Zhang, F.T. (2009), Preparation of geopolymer precursors by sol-gel method and their characterization. *Journal of Materials Science*, 44, 3991-33996.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., and Lorenzen, L. (1999), The potential use of geopolymer materials to immobilize toxic metals: part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, 10, 659-669.
- 孫道勝等人 (2005)，無機聚合物的研究與應用發展前景，材料導報，第 7 卷，第 61-65 頁。
- Provis, J.L., Duxson, P., Harrex, R.M., Yong, C.Z., and Van Deventer J.S.J. (2008), Valorisation of fly ashes by geopolymerisation. *Global Nest Journal*, 11, 147-154.
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G., and Cheng, Y.B. (1999), Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29, 113-120.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. (2008), Alkali-activated binders: a review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22, 1305-1314.
- Davidovits, J. (1979), Synthesis of New High-Temperature Geopolymers for Reinforced Plastics/Composites. SPE PACTFC 79, Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, USA, 151-154.
- Singh, N.B., Saxena, S.K., Kumar, M., and Rai, S. (2019), Geopolymer cement: Synthesis, Characterization, Properties and applications. *Materials Today: Proceedings*, 15, 364-370.
- Carreño-Gallardo, C., Tejeda-Ochoa, A., Perez-Ordóñez, O.I., Ledezma-Sillas, J.E., Lardizabal-Gutierrez, D., Prieto-Gomez, C., Valenzuela-Grado, J. A., Robles Hernandez, F.C., and Herrera-Ramirez, J.M. (2018), In the CO₂ emission remediation by means of alternative geopolymers as substitutes for cements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 4878-4884.
- Yip, C.K., Lukey, G.C., and Van Deventer, J.S.J. (2005), The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 35, 1688-1697.
- Li, C., Sun, H., and Li, L. (2010), A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40, 1341-1349.
- Park, S. and Pour-Ghaz, M. (2018), What is the role of water in the geopolymerization of metakaolin. *Construction and Building Materials*, 182, 360-370.
- Duxson, P., Lukey, G.C., Separovic, F., and Van Deventer, J.S.J. (2005), Effect of Alkali Cations on Aluminum Incorporation in Geopolymeric Gels. *Industrial&Engineering Chemistry Research*, 44, 832-839.
- Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M., and Van Deventer, J.S.J. (2007), The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292, 8-20.
- 邱俊萍 (2002)，利用高爐爐渣製成無機聚合材料之研究，國立臺北科技大學材料及資源工程系碩士論文
- 蔡文傑 (1996)，防火建材之現況與未來發展方向，工業簡訊
- Liang, G.W., Zhu, H.J., Zhang, Z.H., and Wu, Q.S. (2019), Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 222, 872-881.
- 林孟曄 (2006)，利用燃煤底灰製成無機聚合材料之研究，國立臺北科技大學材料及資源工程系碩士論文。
- 吳冠龍 (2008)，以變高嶺土製成無機聚合樹脂應用於混凝土裂縫修補之研究，國立臺北科技大學材料及資源工程系碩士論文。
- 枋吟霞 (2008)，利用焚化灰渣之水淬渣製成無機聚合材料之研究，國立臺北科技大學材料及資源工程系碩士論文。
- 陳志賢 (2009)，含矽質廢棄物之無機聚合物，國立成功大學土木工程學系博士論文。



無機聚合塗料之發展及應用

黃志弘／國立臺北科技大學建築系 教授

吳家和／國立臺北科技大學資源工程研究所 研究生

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

隨著環保意識逐漸抬頭，不同國家或地區相繼制定出塗料產品的認證標準，限制有機塗料之應用範圍與生產，進而促進無機塗料的發展。本文就無機聚合塗料的功能性，包含防火性、防水性、防腐蝕性、抗微生物腐蝕性、修補性、隔熱性、被動輻射散熱性、黏著力來源，顯示無機塗料材料巨大的性能潛力，並對其目前存在的問題做一整體性的回顧。並期望未來有更多相關研究可使無機聚合塗料邁向商品化。

前言

市售常見的塗料，在生產及使用上會添加大量的溶劑、顏料和助劑等有機化合物，短時間內可能造成人體危害^[1,2]，而有些經長期的排釋放，逐漸地污染環境^[3]；甚至造成揮發性有機物逸散，造成人體健康威脅。由於在生產合成過程中使用大量的資源，例如生產合成樹脂會消耗煤和石油，同時排放大量CO₂、SO₂等^[4]。隨著環保意識逐漸抬頭，「永續發展」、「健康環境」成為人類發展總目標的情況下，不同國家或地區也相繼制定出塗料產品的認證標準，限制有機塗料之應用範圍與生產，進而促進無機塗料的發展。

無機聚合材料係一種新興之環保材料，歸因於其良好的物理性質、原料取得容易、低碳排放、製程不需高溫燒結；物理性質如低密度^[5,6]、耐火及絕熱特性^[7]、抗腐蝕性^[8]、耐久性^[9]等；無機聚合材料原料多為工業副產品^[11-13]，且在常溫即可形成無機聚合結構^[10]，相較於其他須特定條件才可生成之材料如波特蘭水泥，無機聚合材料能耗低且環保^[14,23]。無機聚合材料的應用範圍廣泛，從磚^[15,16]、陶瓷^[17,18]、混凝土^[19]至複合材料^[20-23]皆有所發展，其中，也涉及到本文所提的塗料產業。本篇將介紹無機聚合塗料的發展、功能性、黏著力來源以及目前存在的問題。

無機聚合塗料的功能性

由於無機聚合材料本身的優越性能，已有諸多實例將無機聚合技術應用於塗料領域中。根據 Scopus 網站統計，從 2011 迄至 2020 年，共計 190 篇與無機聚合塗料相關之文獻，其中又以防火方面研究數量最多，黏著性次之。彙整前人文獻可知，無機聚合塗料多使用工業副產品（如燃煤飛灰及高爐爐石粉）^[24-26]以及變高嶺土^[27-30]，其原料容易取得、成本低廉且環保、製造工藝簡單，如 Lv 等人以固態矽酸鈉和變高嶺土進行調配得一乾燥塗料粉末，該粉末與水混拌即可製成塗料；其與波特蘭水泥^[25,26,30]、金屬^[32-36]、木質^[37]等基材間皆具有良好的黏著力，其中又以矽酸鹽類材料具有最佳的化學結合性能。無機聚合塗料除裝飾和基本的保護作用外，根據需求還可開發出不同的功能性，大致可分為防火性^[24,31,40]、防水性^[41,43]、防腐蝕性^[25,27]、抗微生物腐蝕性^[26,42]、修補性^[29,30,39]、隔熱性^[32,33,38]、被動輻射散熱性及其他功能等。

防火性

防火塗料為廣泛使用的性質之一，其作用是塗覆於可燃基材上，除了與普通塗料相同的裝飾和表面保護作用外，當遇到火焰或者熱輻射時，防火塗料能夠迅速發

生物理、化學變化而隔絕熱量，阻止火焰蔓延，達到一定程度的阻燃作用；另外當塗覆於鋼鐵等金屬構件或者混凝土等非金屬構件表面時，除具防銹、耐酸鹼、耐鹽霧和防腐蝕等作用外，當遇火時能夠隔絕熱量，降低構件表面溫度而使構件具有防火作用。

Wang 等人^[40]將粉末型 Na_2SiO_3 和 KOH 與聚二甲基矽氧烷 (PDMS) 混拌以製備無機聚合塗料；由於無機聚合結構具有良好的熱穩定性及耐燃性，改善 PDMS 易燃之特性；而 PDMS 具有良好的彈性、分散性及化學穩定性，改善無機聚合結構強度高而脆之特性，可吸收更多來自燃燒過程中的熱應力，且提升 $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ 之含量會使塗層緻密且光滑。

Wang 和 Zhao^[24]以鉀系鹼性溶液分別與漂珠和矽石粉進行混拌，並採用溶膠－凝膠法製備二種阻燃塗料。實驗結果顯示，在燃燒過程中，其阻燃效果主要源於 C-S-H 鍵結脫氫產生 H_2O ，且在塗層表面生成緻密且連續的焦炭，其具有隔絕熱量及抑制揮發物的形成和逸出。

Watolla 等人^[31]以變高嶺土、矽灰、氧化鋁及鈉系鹼性溶液製備發泡型的鋼板防火塗料。根據實驗結果顯示，塗料在固化過程中會部分發泡，其發泡性能來自於矽灰在鹼性環境中反應釋放之氫氣；在防火性測試中，厚度僅 6 mm 的塗層可將鋼板基材背部達 500°C

的時間延遲 30 分鐘以上，歸因於該塗層具有玻璃發泡陶瓷之特性。

Wang 和 Zhao^[45]以矽灰、鉀系鹼性溶液及膨脹型石墨製備防火塗料。根據實驗結果顯示，膨脹型石墨與無機聚合結構可共同達到阻燃的效果，歸因於燃燒時，膨脹型石墨可膨脹形成具有大量層狀結構的保護層；而無機聚合結構焦化形成的玻璃 / 陶瓷緻密結構，也具有一定的保護效果。

防水性

在長期處於水中或受到水作用的環境下，塗料的防水和耐水性能必然十分重要。無機防水塗料能有效抑制濕氣進入，主要透過塗層本身的疏水性來防止水分穿透。

郭文毅等人^[43]之專利——含疏水性粉體之營建工程材料之改質技術，透過改質營建剩餘土石方與水攪拌後經一陽離子界面活性劑及一表面改性劑改質後，經去除水分及研磨處理而製成含疏水性粉體。

Liu 等人^[41]以變高嶺土、鈉系鹼性溶液及石英砂製備無機聚合砂漿，塗裝於鐵片表面，再塗裝長鏈甲基－氫矽氧烷 (PMHS) 於表面並以 120°C 固化，最終形成有機矽奈米絲結構 (Silicone Nanofilaments) 之防水塗層。由於無機聚合砂漿本身的多孔結構，當中尚留有鹼性溶液。如圖 1 所示，每個孔隙的末端如同反應槽。當

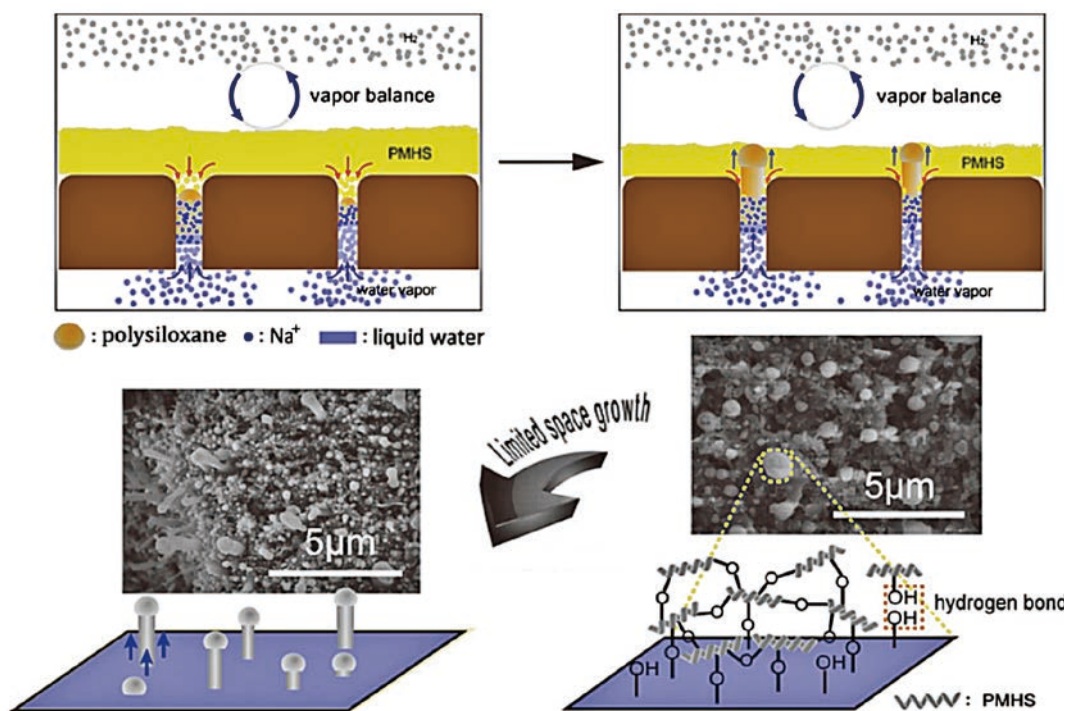


圖 1 無機聚合砂漿表面形成有機矽奈米絲結構之機制示意圖^[41]

PMHS 塗裝於無機聚合砂漿表面時，少量的 PMHS 可與孔隙中的鹼性溶液產生水解聚合反應。隨著水解產物（PMHSO）增加，PMHSO 重新聚合並沉澱，形成有機矽奈米絲的成核點。當塗層保持在 120°C 的密閉環境中，水分會快速從無機聚合砂漿內部釋放，使密閉環境達飽和狀態。此時，在氣液平衡下，表層擴散的水氣將凝結使孔隙中的水氣可繼續釋放，使 PMHS 進行更多的水解聚合反應。在蒸氣壓和毛細作用下，以成核點向外生長許多奈米結構的有機矽，最終形成具有防水性的有機矽奈米絲結構。根據實驗結果顯示，該塗層具有約 161° 的接觸角和 2° 的滾動角的超疏水性。

防金屬腐蝕性

在工業發達國家，腐蝕造成的直接經濟損失外，因腐蝕而造成的停車、效率降低、成本增高、生產過程中能源的惡性損耗、產品品質的降低以及人身安全事故、資源和能源的過度消耗等的間接損失則更為巨大。金屬的防腐蝕方法很多，如改變金屬本身、電鍍、暫時封存等。但從技術和便利等方面考慮仍以塗料塗裝最為經濟、可靠和易於翻新維修。塗料主要透過形成低孔隙率之緻密保護層及利用電化學法達到防止金屬腐蝕之效果。

UUGEI 什億科技有限公司^[46]研發出 U&U900 金屬防腐披覆，以爐石粉、燃煤飛灰及鉀系鹼性溶液製成塗料，適合沿海地區、溫泉區、工業區等受到鹽硫化物、酸、鹼性環境或工業環境。

Li 等人^[47]以變高嶺土、鈉系鹼性溶液及鋅粉製備水性無機富鋅塗料，作為鋼鐵基材的保護塗料。根據實驗結果顯示，含有 55 wt% 的球形鋅粉和 25 wt% 的層狀鋅粉之塗層具有良好的防金屬腐蝕性，其歸因於鋅及鐵之間的氧化電位差，形成陰極保護；層狀結構也提供一定的阻隔作用。

Aguirre-Guerrero 等人^[25]以鋼筋混凝土為基材，以變高嶺土及燃煤飛灰各別與波特蘭水泥粉製成防腐蝕砂漿塗料。根據實驗結果顯示，塗裝塗料之基材皆有較低的氯離子滲透性、較高的電阻率；在耐濕冷熱循環試驗中，變高嶺土基無機聚合塗料有較佳的耐候性，歸因於變高嶺土低孔隙率。

Zhang 等人^[27]利用變高嶺土、爐石粉、PP 纖維及 MgO 膨脹劑混合製成海洋環境混凝土防腐蝕塗料。根據實驗結果顯示，當爐石粉添加量大於 10% 時，可降低塗層的滲透性，同時也提高流動性，此歸因於爐

石粉與變高嶺土相比，其較小的比表面積導致用於潤濕顆粒表面的鹼性溶液相對減少，換言之，更多的鹼性溶液可以改善塗料流動性，且更易與混凝土基材反應；當變高嶺土添加量大於 30% 時，收縮變大導致裂紋產生；然而 PP 纖維可大幅降低收縮率；MgO 膨脹劑可提高塗料的體積穩定性。該塗料降低了波特蘭水泥的孔隙率與平均孔徑大小，從原本的 29.5%、平均孔徑 50 nm 降至 22.3%、平均孔徑 10 nm，歸因於無機聚合塗料的緻密結構。

抗微生物腐蝕性

牆壁表面和內部的微生物（如細菌及黴菌等），其繁殖造成的環境污染不利於人們的身心健康早已引起重視，尤其在潮濕的建築物內、外牆面、溫暖且潮濕的車間、倉庫、貯藏室等處的牆面、地面、頂棚等。微生物會以驚人的速度生長繁殖，在很短的時間內就使塗層受到侵蝕而長黴，導致塗層褪色，沾汙以至脫落。在此種情況下就必須採取抗微生物腐蝕性之措施。其中，塗裝具有光觸媒材料之塗料可達到牆壁抑菌及自潔的功能。以二氧化鈦為例，經紫外光照射後，二氧化鈦可吸收光子的能量，使其電子從基態位置躍遷至高能階，過程中產生一對自由電子－電洞對。在氧氣或水氣存在的情況下，該電洞可產生氧分子或羥基（OH·），具強氧化能力；該電子可產生過氧化氫或超氧分子（O₂^{-·}），同樣具有很強的氧化能力。該氧化能力可分解微生物的蛋白質、脂質、碳水化合物及核酸等一些有機物質，以達到抑菌及自潔的功能。由上述可知，光觸媒材料並不適合添加於有機塗料，反而適合添加於無機聚合塗料。

Tuntachon 等人^[26]使用燃煤飛灰、奈米級二氧化鈦（銳鈦礦相：金紅石相 = 4：1）及鈉系鹼性溶液製成無機聚合漿體，該漿體對藻類和真菌具有抵抗力。根據實驗結果顯示，添加 5wt% 的奈米級二氧化鈦時，通過其光催化之特性，且在不影響無機聚合反應的情況下，在照光時產生強氧化自由基，抑制微生物的生長。

Roghianian 和 Banthia^[42]先對膨潤土進行預處理，在其中加入氧化鋅及抑菌顆粒，再將該膨潤土、燃煤飛灰及鈉系鹼性溶液混拌，製成下水管道之抗微生物腐蝕性塗料。由於下水道之混凝土表面長時間暴露在酸性及生物腐蝕的環境中，細菌可將硫化物氧化為硫酸，進而破壞混凝土結構，甚至鏽蝕內部鋼筋。根據生物腐蝕加速試驗結果顯示，無機聚合塗層的微結構

僅發生微小變化，且鋅並未明顯溶出，代表著抑菌顆粒有被無機聚合漿體包裹，使其保有良好的離子交換能力，進而延長混凝土的壽命。

修補性

由於無機聚合材料與波特蘭水泥材料具有良好的黏著力，同時又具有如前節所提之良好的防金屬腐蝕性。綜合二者性能，無機聚合塗料也適用於鋼筋混凝土之裂縫修補。

De Koster 等人^[29]以變高嶺土、鈉系鹼性溶液製成無機聚合塗料，並利用高壓噴霧造粒將該塗料包覆具有癒合效果的細菌顆粒，以製備混凝土修補劑，可避免水及有害物質進入裂縫對混凝土產生降解及鋼筋腐蝕。細菌在有水環境會開始活化，並產生碳酸鈣填補裂縫。然而，當細菌過早與水反應，則在未進入裂縫時就開始活化，降低修補效果。該無機聚合塗料可將細菌芽孢顆粒良好的黏著於裂縫內壁，同時保護細菌顆粒不會過早活化。

Montes 和 Allouche^[39]以燃煤飛灰、鈉系鹼性溶液及細粒料製成無機聚合砂漿，應用於混凝土管線修補。根據實驗結果顯示，與波特蘭水泥砂漿相比，無機聚合砂漿具有較佳的耐腐蝕性，且經酸性環境加速試驗後仍具較高之抗壓強度；材料中的 CaO 高含量可能為導致耐蝕性下降之關鍵原因，然而卻提供一定的抗壓強度。

Petr 等人^[30]利用變高嶺土、鉀系鹼性溶液及細粒料製備低黏度且高強度的黏結劑，且可用外徑為 1mm 的注射針注入裂縫。根據實驗結果顯示，當黏結劑中添加 30% 水，灰砂比為 1，且矽鋁比為 1.5 時，其黏度低於 1 Pa·s 且抗壓強度達 88.1 MPa；在黏結劑中添加細粒料可消除固化過程中收縮引起的裂紋；與未加細粒料的黏結劑相比，其具有相似的抗壓強度且更高的彈性係數（2 至 3 倍）。

隔熱性

建築能耗占總能源消耗的 30%~40%，其中絕大部分用於製冷設備如空調^[42]，故建築絕熱塗料因其經濟性，逐漸成為新的建築節能措施。隔熱塗料除上述建築物之隔熱（絕熱）功能外，尚可應用於工業基材之

隔熱。隔熱效果主要歸因於塗層本身的高孔隙率及特殊的光學性質（如在可見光波段的高反射能力）。

Zhang 等人^[32]利用變高嶺土、鈉系鹼性溶液、絹雲母、滑石粉、二氧化鈦及中空玻璃微球製備無機聚合隔熱塗料。根據實驗結果顯示，添加 12% 二氧化鈦及 6% 的中空玻璃微球，可使塗層在可見光波段具有超過 90% 的反射率；透過自製加熱裝置，該塗層相較於未塗裝之金屬基材，其表面溫差可達 24°C。

Temuujin 等人^[34]利用燃煤飛灰製作低碳鋼板的隔熱塗料。根據實驗結果顯示，當整體的矽鋁比為 3.5 時，該塗層與基材的黏著力達 3.5 MPa；根據 Australian standard 1530.4 測量塗層的隔熱特性，在 5°C/min 之加熱速率，且最高 900°C 條件下進行試驗，該塗層具有 9 分鐘的絕熱能力，歸因於燃燒過程中無機聚合材料之結構脫水及其多孔結構。若增加塗層厚度更可提升隔熱能力。

Sakkas 等人^[38]使用 Fe-Ni 爐渣及鉀系鹼性溶液製成無機聚合漿體，作為混凝土隧道內襯的隔熱層。根據實驗結果，在市售的耐火產品中，該無機聚合漿體具有良好的孔隙率（40%）和吸水率（18%）；在嚴苛的隧道火災規範之 RijksWaterStaat（RWS）試驗下，該隔熱層與混凝土之界面，其溫度保持在 280°C 以下，比 RWS 試驗要求低 100°C；經 RWS 試驗後，隔熱層其結構完整且無明顯破損。

逸散性

傳統有機塗料為追求塗層的保護及緻密性，常添加低沸點且易逸散的有機化合物^[48]。當應用於油漆、傢俱、裝潢材料等時，隨時間會釋放具毒性的揮發性有機化合物（VOC）。無機聚合塗料與傳統有機塗料極大的化學特性差異在於其逸散性能上。Alves 等人^[49]在大學餐廳的室內空氣品質上檢測，證實有機塗料在空氣品質的巨大污染影響。

若有機塗料中含有如甲醛等致癌有害物質，情況將更為嚴重。Kim 等人^[50]針對空調暖房中，甲醛逸散狀況做了檢測，不但證實有機塗料具有逸散有害物質的特性，其逸散量更隨溫度上升更形惡化。有機塗料使用對於使用者在室內空氣品質上，形成巨大健康威脅。

因此，各國紛紛訂定環境相關規範，如美國環

保署於1998年公布的《National Volatile Organic Compound Emission Standards for Consumer Products》、香港於2007年公布的《空氣污染管制（揮發性有機化合物）規例》、歐洲於2008年提出的《European Solvent Emission Directive》及新加坡於2008年提出的《Environmental protection and management act》等，明確限制揮發性有機化合物（VOC）和有害空氣污染物（HAP）之排放，進而使低VOC的塗料相關文獻及專利（51-53）相繼而生且倍受重視。

取代傳統的溶劑型丙烯酸塗料，水性丙烯酸塗料具有較低的VOC排放，然而，其低黏著強度、成本昂貴、固化時間較長等限制了實際應用^[54]。Watanabe等人^[55]利用溶膠-凝膠法合成水性丙烯酸/二氧化矽混合物作為黏著劑，其形成的蜂窩狀陣列結構具有良好的耐溶劑性。

傳統的防腐塗料常使用多層環氧/聚氨酯有機材料作為黏著劑，其在固化過程需添加具高VOC含量的異氰酸酯；Díaz等人^[56]以環氧-矽氧烷混合物作為黏著劑以避免異氰酸酯的使用，達到防腐蝕效果也降低VOC之排放。Xu等人^[57]將矽酸鋅粉末添加至矽酸鉀溶液以製備無機富鋅防鏽塗料，其具有良好的黏著強度、防腐蝕性且低VOC排放^[58]。UUGEI什億科技有限公司^[46]則以爐石粉、燃煤飛灰及鉀系鹼性溶液製成水性無機防腐塗料，其VOC含量僅為0.796 g/L。

除此之外，交泰興有限公司代理之德國KEIM無機礦物塗料^[59]，係以矽酸鉀溶液作為黏著劑，添加天

然礦物及無機色料，以開發多色的建築塗料，其VOC含量小於1 g/L。

對於未來健康室內空氣品質確保，Khanuja和Agarwal^[60]主張多樣科技必須被應用到塗料工業，包括抗菌技術、水性塗料、光觸媒技術。其中無機塗料基於其技術簡易及經濟性，也具有巨大潛力。

被動輻射散熱性

有別於隔熱性，被動輻射散熱性係透過塗料具有特定波長的遠紅外線（8~13 μm）特性，該波段又稱為「大氣窗口」（sky window），可將熱輻射至太空而不易被大氣層吸收，構成「輻射冷卻」效果，本團隊將之應用在建築外殼塗料、都市道路鋪面上，可降低室內溫度甚至減緩都市熱島效應。

本團隊研究以變高嶺土、鉀係鹼性溶液及具有被動輻射散熱能力之材料，製備二種顏色的建築物外殼散熱塗料。根據實驗結果顯示，如圖2(a)所示，白色塗料係使用天然之鎂鋁矽酸鹽礦物製成，其在大氣窗口之發射率達0.92；黑色塗料則使用工業副產品之煉鋼爐石，其發射率達0.95；將白色塗料作為面層，黑色塗料作為底層，其雙層結構之塗層在模擬日照之建築物實驗中，相較於無塗裝之混凝土基材，該塗層約可降低建築物屋頂6°C、牆內5°C及室內2°C。白色塗料的被動輻射散熱功率如圖2(b)所示，約為20 W/m²，並隨塗層表面溫度下降而逐漸降低。

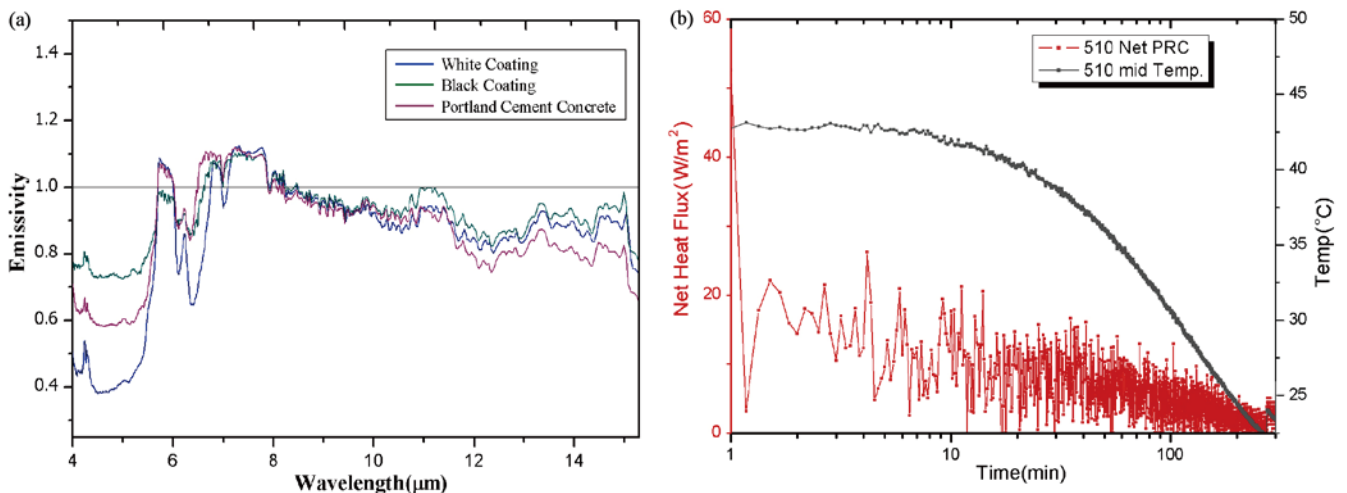


圖2 (a) 黑、白色塗料之發射率分析及 (b) 白色塗料之被動輻射散熱功率

耐候性

有機塗料其成分以碳氫化合物為主，長期暴露於戶外，會受紫外線、溫度、濕氣等影響而逐漸降解及風化，慢慢失去保護作用，最終轉變成 CO_2 和水^[61]。無機聚合塗料在固化過程中會形成連續性網狀結構，且成分以鍵能較強的矽鋁酸鹽為主^[62]，故有較佳的耐候性。

石玉英等人^[63]以二氧化鈦、高嶺土、絹雲母、矽灰石及矽氧烷/丙烯酸酯混合物製成具自潔性能的建築外牆塗料。根據實驗結果顯示，該塗料經 1,000 小時之人工耐老化性試驗後表面無發生掉粉現象，且耐洗刷性可超過 5,000 次。

交泰興有限公司代理之德國 KEIM 無機礦物塗料^[59]，實際應用於淡水紅毛城之外牆修復。由於淡水氣候多雨，紅毛城飽受牆面塗料剝離、掉色及漏水之苦，塗裝該塗料兩年後之牆面，與原先塗裝並貯存於室內之色版比較，無明顯色差或掉色，顯示無機聚合塗料的良好耐候性。

本團隊研究之建築物外殼散熱塗料，塗裝於黑鐵片及水泥砂漿板上，並根據 CNS15200-7-4 進行耐濕冷熱循環 10 天之試驗。根據實驗結果，如圖 3 所示，該塗料經試驗後並無起粉或剝落之現象。

其他功能性

無機聚合材料的輕質和化學穩定性，使其具有應用在需面對惡劣環境的航太業及汽車產業。然而，無機聚合材料過高的機械性能、低韌性、高孔隙率皆限制其發展。其中，孔洞在反應過程中會引起收縮且殘留應力，

為裂紋產生的主要原因。

Rahman 等人^[64]欲克服上述問題，在無機聚合材料中添加奈米級碳化矽鬚晶 (SCW) 及 Nextel 610 纖維 (99% Al_2O_3)，限制了裂縫的產生和擴展，改善無機聚合材料脆性和短梁層間剪切強度。根據實驗結果顯示，添加 4% (體積) 的 SCW，可有效改善短梁層間剪切強度，使無機聚合材料的 I 型斷裂韌性提高 113%；此外，SCW 有效地改善纖維及無機聚合材料的界面強度。

針對改善混凝土的耐久性，除改變原有混凝土的成分，將塗料應用於混凝土表面也是一種方法。無機聚合塗料除具備防金屬腐蝕性及抗微生物腐蝕性，通常也具有抗化學侵蝕性。

Tahri 等人^[65]以燃煤飛灰及鹼性溶液製成抗化學侵蝕性之砂漿塗料。根據實驗結果顯示，在強酸環境中的混凝土試體，塗有環氧樹脂塗料者其抗化學侵蝕性最佳；然而考慮成本及效益，無機聚合砂漿塗料其成本比環氧樹脂塗料低 70%。

Wiyono 等人^[66]利用燃煤飛灰、鈉系鹼性溶液或及火山泥製成無機聚合塗料。根據實驗結果顯示，塗有塗料之混凝土試體，其氯離子滲透係數較低且在在酸性環境中有更佳的耐久性。

Papakonstantinou 和 Balaguru^[67]研究指出，混凝土內部含有水分，經一段時間會形成蒸氣壓力，若該壓力無法釋放而囤積在混凝土內部，日久易造成結構損壞。使用一般常見之有機塗料，則該蒸氣壓力無法釋放並造成塗層分層。根據 200 次耐濕冷熱循環試驗結果顯示，塗有無機聚合塗層的混凝土試體，該試體的韌性及抗彎強度並無明顯變化；塗層也無發現裂痕或剝落。

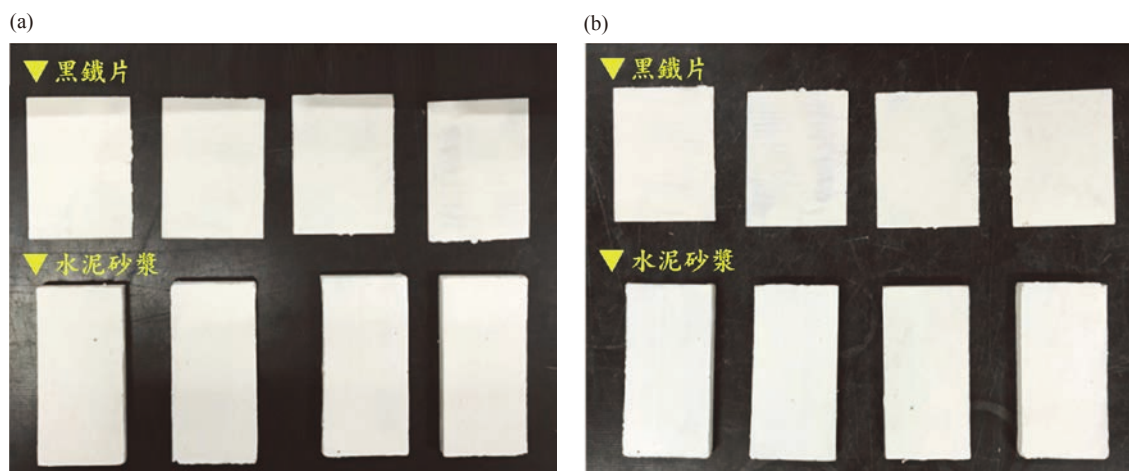


圖 3 白色塗料外觀：(a) 為耐濕冷熱循環試驗前；(b) 為耐濕冷熱循環試驗後

無機聚合塗料的黏著力來源

本團隊研究之建築物外殼散熱塗料，以不同比例之鉀系鹼性溶液與奈米級二氧化矽水溶液，探討其對二種基材黏著力之影響。根據實驗結果顯示，如圖 4 所示，經 CNS15200-7-4 長期性能－耐濕冷熱循環之試驗後，在波特蘭水泥砂漿與鐵片上之塗層其外觀並無起粉或剝落，而黏著力僅略微下降；其中又以鉀系鹼性溶液與奈米二氧化矽水溶液之比例為 5:5 可於混凝土及金屬基材提供一定強度的黏著力。

一般來說，無機聚合塗料與多孔無機基材具有良好的結合性能。例如，矽酸鹽類（波特蘭水泥）與矽酸膠類無機塗料具有良好的結合性能，因其可滲入多孔性的無機矽酸鹽基材中，且能夠和基材中的物質進一步發生化學反應，生成新的無機矽酸鹽而沉積於孔隙中，如化學式 (1) 所示。因此可知，無機塗料與基材的結合是牢固的化學結合。

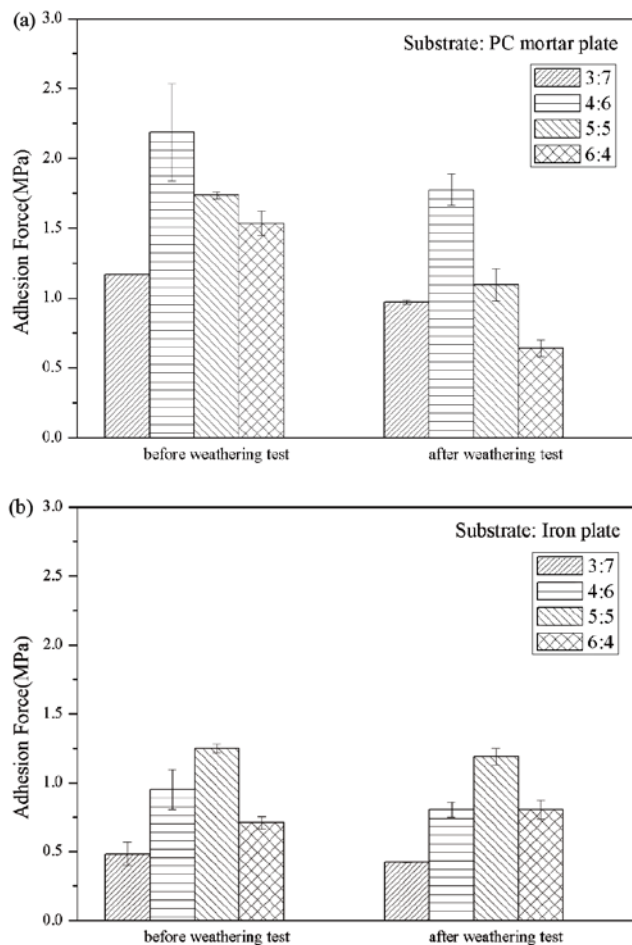
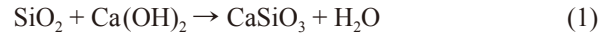


圖 4 塗層黏著力經耐候性試驗之前後對比：(a) 為波特蘭水泥砂漿；(b) 為鐵片



式中， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是水泥水化過程中 CaO 的產物，生成物 CaSiO_3 是矽酸鹽水泥的主要成分，也為一種凝膠材料。

Aguirre-Guerrero 等人^[25]以鋼筋混凝土為基材，以變高嶺土及燃煤飛灰各別與波特蘭水泥粉製成防鏽砂漿塗料。根據實驗結果，二種塗料皆對鋼筋混凝土良好的黏著力，歸因於無機聚合材料中的 C-A-S-H 凝膠，類似於水泥系統中的 C-S-H 凝膠，但該結構中還包含 Al 離子，使塗層與波特蘭水泥混凝土基材之界面更加緊密。

Mu 等人^[68]以變高嶺土及鈉系鹼性溶液製成無機聚合漿體，並與波特蘭水泥砂漿製成拉伸試體。根據實驗結果顯示，當液固比為 0.9 時，黏著力在 7 天達 0.82 MPa，至 28 天達 0.92 MPa；高液固比意味著低鹼度，不足的無機聚合反應及多孔結構使界面的黏著力變差。

除常見的矽酸鹽類基材，針對金屬材料，無機聚合塗料在金屬基材上的黏著力來源仍有爭議。Yong 等人^[35]利用變高嶺土及鈉系鹼性溶液製成塗料，塗裝於不鏽鋼及鐵之基材。二種基材本身表面具有氧化層。根據實驗結果顯示，與不鏽鋼基材相比，鐵基材與塗料的反應性更高，歸因於其表面的氧化層具有較多的羥基，而在不鏽鋼表面則具有較多的氧化鉻；根據 XPS 結果顯示，鐵基材的 Fe 3d 軌域增強歸因於基材氧化層中的氧化鐵部分溶解，其中塗料中的 Al^{3+} 可能取代氧化層的 Fe^{3+} ，甚至與 FeOOH 反應形成鋁酸鐵氧化物。由於 Fe^{3+} 性質類似於 Al^{3+} ，因此無法從 XPS 光譜中確實檢測 Al-O-Si 轉變成 Fe-O-Si 鍵結，然而該鍵結可能存在於界面上。因此該黏著力來源可能為化學鍵結。

然而，Latella 等人^[36]利用研磨後的變高嶺土及鈉系鹼性溶液製成塗料，將玻璃基材與不鏽鋼基材黏合。根據 SEM 的能量色散光譜顯示，位於二種基材中間的塗料並不會與玻璃或不鏽鋼基材發生化學反應，其應為物理性黏附。

Temuujin 等人^[33]將變高嶺土基無機聚合塗料塗裝於不鏽鋼和低碳鋼之基材上。根據研究結果顯示，當塗料整體的矽鋁比為 2.5 且鈉鋁比為 1 時，其與不鏽鋼和低碳鋼黏著力大於 3.5 MPa，其可能歸因於物理性黏附而非化學性；而當矽鋁比為 1 或 2 時，僅獲得低的

黏著力；在 800°C 煅燒，矽鋁比為 2.5 時，塗層與基材的熱膨脹相似，因而保持了塗層的完整性。

Mao 等人^[44]利用噴槍噴塗在鋁合金及低碳鋼基材上製備了厚度約為 60 μm 的鈉系變高嶺土基無機聚合塗層。根據實驗結果顯示，在 80°C 下固化的塗層具有良好的微觀結構，而在 150°C 下固化的塗層存在一些裂紋，歸因於收縮和殘餘應力；在浸水試驗中（蒸餾水），在 80°C 和 150°C 下固化的塗層其重量變化小於 2%，代表著該塗層在蒸餾水中具有良好的穩定性。

除探討混凝土與金屬基材，Shamala 等人^[37]以高嶺土及鈉系鹼性溶液製成無機聚合塗料，塗裝於木質基材。根據實驗結果顯示，NaOH 濃度為影響黏著力之關鍵；當 NaOH 濃度為 8M，黏著力在 90 天達 5.4 MPa；過低的 NaOH 濃度，無法充分反應形成無機聚合結構；過高的 NaOH 濃度，過量的 Na⁺ 和 OH⁻ 開始與原有的鋁矽酸鹽四面體產生新的鍵結，導致塗料的黏著力降低；然而，該文獻並未提出塗料與基材的鍵結原因。

綜合上述，無機聚合塗料在混凝土基材上的黏著力來源確定為化學鍵結；在金屬及木質基材上，仍未有文獻明確指出黏著力來源為物理性或化學性。然而，根據前人文獻之實驗結果可知，無機聚合塗料在混凝土、金屬及木質基材上皆有一定強度的黏著力，對於本材料在未來工業應用及營造施工具有極大優勢。

無機聚合塗料存在的問題

無機聚合塗料以無機聚合反應作為黏著基礎，藉由添加不同材料或形成特殊結構以達到不同功能及應用。然而，其塗料於基材間的黏著力，僅有與波特蘭水泥混凝土基材確認為化學鍵結，其餘基材種類如金屬及木質皆未明確指出鍵結性質。當塗層開始發生剝落時，則代表塗層的保護逐漸失效並在短時間基材會受到侵蝕及損害，同時又需要耗費人力及資金重新塗裝。為避免上述狀況，了解塗層鍵結性質以增加其壽命是相當重要的。

無機聚合塗料之研究多以 A、B 劑的形式製備，其中 A 劑為粉體、B 劑為液體。其工作性質如黏度、流平能力、垂流能力及密著性（塗料與塗料間的黏著力）皆對塗裝的難易程度有所影響。然而至今尚未被深入探討。

無機聚合塗料屬於無機塗料的一種。目前塗料市場大多為有機塗料，僅少數標榜無機塗料，然而其售價昂貴。縱使無機塗料其功效優異，在考量成本效益下，使用者不容易採用高售價之無機塗料，往往仍選擇傳統且塗裝方便的有機塗料。即使短期內無機塗料其功能性優於有機塗料，論長期的成本效益，採用有機塗料的機會仍較高。綜合上述，無機聚合塗料在市場上的實際發展及應用仍受限制，也是未來應改善的重點。

結語

無機聚合塗料其原料容易取得、成本低廉且環保，具有極佳永續性及健康性；其製造工藝簡單；其與波特蘭水泥基材間具有良好的黏著力；除裝飾和基本的保護作用外，還可根據需求開發不同的功能性之塗料。未來應針對其工作性質及鍵結性質等方面進行深入研究，同時在材料選擇上需考慮到成本以因應市場。這對無機聚合塗料邁向商品化將會更跨進一大步。

參考文獻

- Guo H., Lee S., Chan L., and Li W. (2004), "Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments." *Environmental Research*, Vol. 94, pp. 57-66.
- Wu X., Fan Z., Zhu X., Jung K.H., Ohman-Strickland P., Weisel C.P., and Liou P.J. (2012), "Exposures to volatile organic compounds (VOC) and associated health risks of socio-economically disadvantaged population in a "hot spot" in Camden, New Jersey." *Atmospheric Environment*, Vol. 57, pp. 72-79.
- Porwal T. (2015), "Paint Pollution Harmful Effects on Environment." *International Journal of Research*, Vol. 3, pp. 1-4.
- 徐峰、鄒侯招、儲健（2004），環保型無機塗料，化學工業出版社，第 4-18 頁。
- Kong D.L.Y., Sanjayan J. G., and Sagoe-Crentsil, K. (2007), "Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures." *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 1583-1589.
- Sakulich A.R. (2011), "Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. *Sustainable Cities and Society*." Vol. 1, pp. 195-210.
- Provis J.L. and van Deventer J.S.J. (2009), "Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications." Woodhead Publishing Limited.
- Abdullah Z.A., Ma C.K., and Wahid O. (2018), "Structural and material performance of geopolymer concrete: A review." *Construction and Building Materials*, Vol. 186, pp. 90-102.
- Albitar M., Mohamed Ali M.S., Visintin P., and Drechsler M. (2017), "Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes." *Construction and Building Materials*, Vol. 136, pp. 374-385.

10. Mohammadi H.A., Provis J.L., and van Deventer J.S.J. (2008), "One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp. 9396-9405.
11. Zhang Z., Provis J.L., Reid, A., and Wang H. (2014), "Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*." Vol. 56, pp. 113-127.
12. Toniolo N. and Boccaccini A.R. (2017), "Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review", *Ceramics International*, Vol. 43, pp. 14545-14551.
13. Giergiczny Z. (2019), "Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*." Vol. 124.
14. Petrillo A., Cioffi R., Ferone C., Colangelo F., and Borrelli C. (2016), "Eco-sustainable Geopolymer Concrete Blocks Production Process." *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Vol. 8, pp. 408-418.
15. El-Naggar K.A.M., Amin S.K., El-Sherbiny S.A., and Abadir M.F.b. (2019), "Preparation of geopolymer insulating bricks from waste raw materials." *Construction and Building Materials*, Vol. 222, pp. 699-705.
16. Ouda A.S. (2019), "Development the properties of brick geopolymer pastes using concrete waste incorporating dolomite aggregate" *Journal of Building Engineering*, 100919.
17. Suweni Muntini M. and Ahmadi H. (2018), "Performance of metakaolin geopolymer ceramic for fiber optic temperature sensor." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 15137-15142.
18. Kovářík T., Křenek T., Rieger D., Pola M., Říha J., Svoboda M., and Kadlec J. (2017), "Synthesis of open-cell ceramic foam derived from geopolymer precursor via replica technique." *Materials Letters*, Vol. 209, pp. 497-500.
19. Amran, Y.H.M., Alyousef R., Alabduljabbar H., and El-Zeadani M. (2019), "Clean production and properties of geopolymer concrete; A review." *Journal of Cleaner Production*, 119679.
20. Zhou B., Wang L., Ma G., Zhao X., and Zhao X. (2019), "Preparation and properties of bio-geopolymer composites with waste cotton stalk materials." *Journal of Cleaner Production*, 118842.
21. Thakur A.K., Pappu A., and Thakur V.K. (2019), "Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes", *Journal of Cleaner Production*.
22. Sá Ribeiro R.A., Sá Ribeiro M.G., Sankar K., and Kriven W.M. (2016), "Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material." *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 501-507.
23. Singh N.B. and Middendorf B. (2008), "Chemistry of blended cements part-I: Natural pozzolanas, fly ashes and granulated blast-furnace slags." *Cement International*, Vol. 6, pp. 76-91.
24. Wang Y. and Zhao J. (2019), Facile preparation of slag or fly ash geopolymer composite coatings with flame resistance. *Construction and Building Materials*, Vol. 203, pp. 655-661.
25. Aguirre-Guerrero A.M., Robayo-Salazar R.A., and de Gutiérrez R.M. (2017), "A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion." *Applied Clay Science*, Vol. 135, pp. 437-446.
26. Tuntachon S., Kamwilaisak K., Somdee T., Mongkoltanaruk W., Sata V., Boonserm K., and Chindaprasit P. (2019), "Resistance to algae and fungi formation of high calcium fly ash geopolymer paste containing TiO₂." *Journal of Building Engineering*, Vol. 25, 100817.
27. Zhang Z., Yao X., and Zhu H. (2010), "Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete." *Applied Clay Science*, Vol. 49, pp. 1-12.
28. Lv X., Wang K., He Y., and Cui X. (2019), "A green drying powder inorganic coating based on geopolymer technology." *Construction and Building Materials*, Vol. 214, pp. 441-448.
29. De Koster S.A.L., Mors R.M., Nugteren H.W., Jonkers H.M., Meesters G.M.H., and van Ommen J.R. (2015), "Geopolymer Coating of Bacteria-containing Granules for Use in Self-healing Concrete." *Procedia Engineering*, Vol. 102, pp. 475-484.
30. Petr K., Aleš S., Petr B., Jan Š., and Jan K. (2020), "Low viscosity metakaolinite based geopolymer binders." *Construction and Building Materials*, Vol. 230, 116978.
31. Watolla M.B., Gluth G.J.G., Sturm P., Rickard W., Krüger S., and Schartel B. (2007), "Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel." *Journal of Ceramic Science and Technology*, Vol. 3, pp. 351-364.
32. Zhang Z., Wang K., Mo B., Li X., and Cui X. (2015), "Preparation and characterization of a reflective and heat insulative coating based on geopolymers." *Energy and Buildings*, Vol. 87, pp. 220-225.
33. Temuujin J., Minjigmaa A., Rickard W., Lee M., Williams I., and van Riessen A. (2009), "Preparation of metakaolin based geopolymer coatings on metal substrates as thermal barriers." *Applied Clay Science*, Vol. 46, pp. 265-270.
34. Temuujin J., Minjigmaa A., Rickard W., Lee M., Williams I., and van Riessen A. (2010), "Fly ash based geopolymer thin coatings on metal substrates and its thermal evaluation." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 180, pp. 748-752.
35. Yong S.L., Feng D.W., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. (2007), "Chemical characterisation of the steel-geopolymeric gel interface." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 302, pp. 411-423.
36. Latella B.A., Perera D.S., Escott T.R., and Cassidy D.J. (2006), "Adhesion of Glass to Steel Using a Geopolymer." *J. Mater. Sci.*, Vol. 41, pp. 1261-1264.
37. Shamala R., Mohd M.A.B.A., Kamarudin H., Yue H., and Jin W. (2019), "Improvement of kaolin based geopolymer coated wood substrates for use in naoh molarity." *Materials Science Forum*, Vol. 967, pp. 241-249.
38. Sakkas K., Panias D., Nomikos P.P., and Sofianos A.I. (2014), "Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 43, pp. 148-156.
39. Montes C. and Allouche E.N. (2012), "Evaluation of the potential of geopolymer mortar in the rehabilitation of buried infrastructure." *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 8, pp. 89-98.
40. Wang Z., Wen G., Liu Q., Huang S., Tang P., and Yu, L. (2020), "Estimating the thermal conductivity of CaO-Al₂O₃-SiO₂ slags by equilibrium molecular dynamics simulations." *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 531, 119851.
41. Liu Z.H., Pang X.Q., Wang K.T., Lv X.S., and Cui X.M. (2019), "Superhydrophobic Coatings Prepared by the in Situ Growth of Silicone Nanofilaments on Alkali-Activated Geopolymers Surface." *ACS Applied Materials and Interfaces*.
42. Roghanian N. and Banthia N. (2019), "Development of a sustainable coating and repair material to prevent bio-corrosion in concrete sewer and waste-water pipes." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 100, pp. 99-107.
43. 郭文毅、黃忠信、莊漢松 (2013), 含疏水性粉體之營建工程材料, 專利。
44. Mao Y., Biasetto L., and Colombo, P. (2020), "Metakaolin-based geopolymer coatings on metals by airbrush spray deposition." *Journal of Coatings Technology and Research*.

45. Wang Y. and Zhao J. (2019), "Effect of graphite on the flame resistance of silica fume-based geopolymeric coatings." *Materials Chemistry and Physics*, 122088.
46. UUGEI 什德科技有限公司, <http://www.uugei.com/02-01-1.htm>
47. Li X., Cui X., Liu S., Mo B., and Cui L. (2013), "Preparation and characterization of inorganic zinc-rich coatings based on geopolymers." *Key Engineering Materials*, Vol. 537, pp. 261-264.
48. Lovell P.A. and El-Aasser M.S. (1997), "Emulsion Polymerization and Emulsion Polymers." Chapter 14, pp. 467-515, England.
49. Alves C.A., Vicente E.D., Evtugina M., Vicente A.M., Nunes T., Lucarelli F., and Fraile R. (2019), "Indoor and outdoor air quality: a university cafeteria as a case study." *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 11, pp. 531-544.
50. Kim S. and Kim H.J. (2005), "Comparison of formaldehyde emission from building finishing materials at various temperatures in under heating system." *Indoor Air*, Vol. 15, pp. 317-325.
51. Brandenburger L.B., Sickelsteel B., and Owens M.J. (2002), United States Patent No. 6762230B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
52. Porzio R.S., Zhao C.L., and Anchor M. (2006), United States Patent No. 7705082B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
53. Wallace A., Hook J., and Maroney M. (2005), United States Patent No. 20050249880A1. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
54. Weiss K.D. (1997), "Paint and coatings: A mature industry in transition", *Progress in Polymer Science*, Vol. 22, pp. 203-245.
55. Watanabe M. and Tamai T. (2006), "Acrylic polymer/silica organic-inorganic hybrid emulsions for coating materials: Role of the silane coupling agent." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 44, pp. 4736-4742.
56. Díaz I., Chico B., de la Fuente D., Simancas J., Vega J.M., and Morcillo M. (2010), Corrosion resistance of new epoxy-siloxane hybrid coatings. A laboratory study. *Progress in Organic Coatings*, vol. 69, pp. 278-286.
57. Xu R., He T., Yang R., Da Y., and Chen C. (2020), "Application zinc silicate-potassium silicate coating for anticorrosion of steel bar in autoclaved aerated concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 237, 117521.
58. Francis R. (2013), "Inorganic zinc silicate coatings: Fallacies and facts." *ACA Corrosion & Prevention*, Brisbane.
59. KEIM 德國凱恩礦物塗料, https://www.keim.com.tw/product_info.php?id=671
60. Khanuja G. and Agarwal A. (2016), "Advancements in coatings industry to improve interior air quality", *Paintindia*, vol. 66, pp. 51-60.
61. Schulz U. (2009), *Accelerated Testing: Nature and Artificial Weathering in the Coatings Industry*, pp. 101-103, Germany.
62. Cioffi R., Maffucci L., and Santoro L. (2003), "Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 40, pp. 27-38.
63. 石玉英、周子鵠、李賚周 (2004), 耐候自清潔外牆塗料的製備, 中國塗料, 第 24-26 頁。
64. Rahman A.S., Jackson P., and Radford D.W. (2020), "Improved Toughness and Delamination Resistance in Continuous Fiber Reinforced Geopolymer Composites via Incorporation of Nano-Fillers." *Cement and Concrete Composites*, 103496.
65. Tahri W., Abdollahnejad Z., Pacheco-Torgal, F., and Aguiar J. (2017), "Performance on an Alkali-Activated Cement-Based Binder (AACB) for Coating of an OPC Infrastructure Exposed to Chemical Attack: A Case Study." pp. 335-356.
66. Wiyono D., Antoni, and Hardjito D. (2015), "Improving the Durability of Pozzolan Concrete Using Alkaline Solution and Geopolymer Coating." *Procedia Engineering*, Vol. 125, pp. 747-753.
67. Papakonstantinou C.G. and Balaguru P.N. (2007), "Geopolymer protective coatings for concrete." *International SAMPE Symposium and Exhibition*, Vol. 52.
68. Mu S., Liu J., Lin W., Wang, Y., Liu J., Shi L., and Jiang Q. (2017), "Property and microstructure of aluminosilicate inorganic coating for concrete: Role of water to solid ratio." *Construction and Building Materials*, Vol. 148, pp. 846-856. 

一個凝聚產官學土木專業知識的團體

一個土木人務必加入的專業學術團體

一個國際土木組織最認同的代表團體

一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING



<http://www.ciche.org.tw>
下載入會申請表

歡迎加入學會

電話: (02) 2392-6325
傳真: (02) 2396-4260
e-mail: service@ciche.org.tw



無機聚合混凝土在國內應用的實例

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

蔡志達／國立成功大學永續環境實驗所 副研究員

李韋皞／偕鼎科技股份有限公司 總經理

吳佳正／中聯資源股份有限公司 專業工程師

無機聚合混凝土（Geopolymer Concrete）是一種新興的材料，完全不使用波特蘭水泥，亦無需高溫製程，於常溫環境下即可硬化。其經常使用的原料為工業副產品的水淬高爐石粉、燃煤飛灰及配方的鹼性溶液混拌，並添加粗、細粒料即可製作無機聚合混凝土。除了不使用傳統波特蘭水泥為膠結材料外，其拌合的程序與設備均與傳統混凝土相似。縱使無機聚合混凝土擁有優異的特性，但現有無機聚合混凝土的標準及規範不足，也造成其發展緩慢的因素之一。目前所能蒐集到的規範或使用手冊僅有澳洲 Concrete Institute of Australia 所出版的「Geopolymer Recommended Practice Handbook（CIA Z16-2011）」^[1]；中國大陸軍方的「軍用機場無機聚合物混凝土道面施工及驗收規範（GJB 8231-2014）」、「工程搶建搶修無機聚合物膠凝材料技術要求（GJB 8236-2014）」^[2]；及本團隊協助經濟部礦務局所制定的「無機聚合綠色水泥及混凝土使用手冊」^[3]。再者，國內有關無機聚合混凝土的實際案例報導並不多，使得各界對此一新興材料之認知有限。援此，本文提出本團隊曾執行的大型實廠拌合試驗成果，與各界分享，期望能推廣此一綠色環保材料新知。

宜蘭冬山鄉共築幸福社區無機聚合混凝土實廠澆置試驗

本團隊於 106 年 10 月 6 日在宜蘭縣蘇澳鎮賓志預拌混凝土廠，進行爐石 / 飛灰基之無機聚合混凝土實廠生產。相關的配比如表 1 所示。在此次正式量產前，已於北科大實驗室與台北力泰建設企業股份有限公司（汐止廠）進行約 50 次試拌，並在賓志預拌混凝土廠進行六次廠拌試驗，每次拌含量 1.0 ~ 1.5 立方公尺的無機聚合混凝土，亦同時進行工作性（初始與 45 分鐘後的坍度與坍流度）與抗壓強度試驗，以期求得實際生產時必要之參數與產品特性。106 年 10 月 6 日共計量產 3 立方公尺的無機聚合混凝土。無機聚合混凝土拌合完成後以預拌混凝土車運送至 6 公里外新建中的「共築幸福社區」進行澆置。此社區係由九典聯合

建築師事務所宜蘭分所所長－陳尚鋒建築師所設計監造，同時陳建築師也是業主。現場實地澆置二座混凝土立柱及半面牆體，該牆體上半部則由傳統波特蘭水泥混凝土澆置而成，可同時測試無機聚合混凝土與其之相容性。試驗結果效果相當良好，各項工作性質與抗壓強度如表 2 所示。現場澆置的相片及近年相片如圖 1 至圖 6。

爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿實廠預鑄試驗

轉爐石具有硬度高、強度高及磨損率低等優秀之工程性質，作為天然骨材替代品相當具有潛力。轉爐石再利用上最大的問題在於含有轉爐煉鋼時添加之游離氧化鈣，遇水氣則會導致體積膨脹，造成應用上的

表 1 民國 106 年 10 月 6 日賓志預拌混凝土廠廠拌無機聚合混凝土配比表

體積 m ³	液灰比	爐石 / 飛灰基無機聚合混凝土組成材料用量 (kg)								總計 (kg)
		鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	粗粒料		細粒料 (河砂)	抗裂粉體	緩凝劑	
					6 分	3 分				
3.0	0.48	550	570	570	405	2,310	2,670	60	192	7,327

表 2 無機聚合混凝土的工作性與抗壓強度

45 分鐘後工作性		抗壓強度 (kgf/cm^2)		
坍度 (mm)	坍流度 (mm)	7 天	28 天	56 天
270	550 × 570	130	220	320



圖 1 無機聚合混凝土 45 分鐘後的工作性 (攝於 2017/10/6)



圖 2 無機聚合混凝土由預拌車卸至挖土機挖斗預備澆置 (攝於 2017/10/6)



圖 3 無機聚合混凝土澆置完成的牆體 (攝於 2017/10/6)



圖 4 無機聚合混凝土牆體拆模後情形 (攝於 2017/10/28)



圖 5 無機聚合混凝土牆體 (攝於 2019/5/7)



圖 6 無機聚合混凝土牆體 (攝於 2020/2/12)

限制。經本團隊實驗室等級測試發現，無機聚合材料可安定化轉爐石，探究其原因，為無機聚合材料富含游離矽膠，可與轉爐石中游離 CaO 或 MgO 反應，而形成穩定的矽酸鈣（鎂）化合物，因此可有效的抑制轉爐石的膨脹行為^[4]。為了驗證技術可跨出實驗室而實施於實際量產上，在科技部與中聯資源股份有限公司的支持下，於 2017 年至 2019 年間進行數次大型廠拌試驗。試驗主要以未安定化處理過的轉爐石細粒料（小於 4 號篩）、水淬高爐石粉、燃煤飛灰及鹼性溶液拌合成爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿，再進行預鑄製品生產，每次廠拌試驗拌合量約 1.0 ~ 1.5 立方公尺，而使用之預鑄模具為一立方公尺擋料塊及紐澤西護欄。每一次廠拌試驗除製作圓柱抗壓試體進行強度追蹤，並在特定齡期直接對所澆置的一立方公尺擋料塊及紐澤西護欄進行鑽心強度量測，以觀察其抗壓強度變化。此外最重要的，試體採用 CNS 1258（卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法）標準方法，在高壓釜中以 215°C、

2.0 MPa 壓力條件蒸煮 3 小時，並觀察試體的體積穩定性及是否有爆裂的現象。試驗結果顯示，蒸煮過的試體均完整無缺，體積變化率均在 0.5% 之內，而實驗室測試中，傳統卜特蘭水泥轉爐石砂漿試體經蒸煮後試體完全粉化崩解，此可證實無機聚合技術確實有安定化轉爐石的效果。

107 年 7 月 23 日實廠廠拌試驗的配比如表 3 所示。燃煤飛灰與爐石粉比例為 5 : 5，灰砂比為 1 : 2.936。實驗結果顯示，實廠拌製 1.5 立方公尺的爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿，其坍度達 260 mm，坍流度達 380 × 390 mm，顯示新拌性質工作性尚佳，如圖 7 所示。其 1 天的抗壓強度即可達 209 kgf/cm²，28 天的抗壓強度可達 416 kgf/cm²。經 CNS 1258 標準高壓蒸煮後，其抗壓強度可上升至 454 kgf/cm²，且試體外觀良好，試體的體收縮率 0.41%。實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果如表 4 所示。實廠廠拌並製成擋料塊及紐澤西護欄的結果如圖 8 所示。

表 3 民國 107 年 7 月 23 日實廠廠拌試驗配比（爐石粉：燃煤飛灰 = 5 : 5）

體積	L/S	灰砂比	無機聚合轉爐石砂漿組成材料用量 (kg)						總計 (kg)
			鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石細料	轉爐石含水率 %	水	
1.5 m ³	0.5	1 : 2.9	374	375	375	2,400	9	20	3,544

表 4 民國 107 年 7 月 30 日實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果

測試項目 / 日期	抗壓強度 (kgf/cm ²)					熱壓膨脹試驗	膨脹率 %
	1 天	3 天	7 天	28 天	28 天熱壓後	28 天	28 天
無機聚合轉爐石砂漿 / 107-7-30	209	334	375	416	454	良好	-0.41

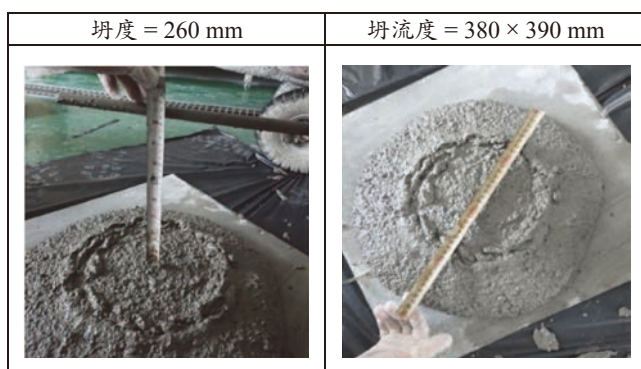


圖 7 燃煤飛灰與爐石粉比例為 5 : 5 廠拌試驗之新拌性質



圖 8 預拌廠實廠廠拌並製成擋料塊及紐澤西護欄的情形

107 年 9 月 27 日進行第二次實廠廠拌試驗的配比如表 5 所示。此次試驗改變爐石粉與燃煤飛灰比例為 4:6，同時降低鹼液使用量。實驗結果顯示，實廠拌製 1.5 立方公尺的爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿，其坍度達 235 mm，坍流度達 360 × 370 mm，顯示新拌性質工作性佳，如圖 9 所示。其 7 天的抗壓強度即可達 190 kgf/cm²，28 天的抗壓強度可達 306 kgf/cm²，56 天的抗壓強度可達 441 kgf/cm²。以齡期 28 天的試體經 CNS 1258 標準高壓蒸煮後，其抗壓強度可上升至 350 kgf/cm²，且試體外觀良好。此次實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果如表 6 所示。

無機聚合砂漿實廠廠拌及北科大設計館屋頂防水工程

108 年 10 月 5 日在力泰建設企業股份有限公司（汐止廠）協助下，進行爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿量產，

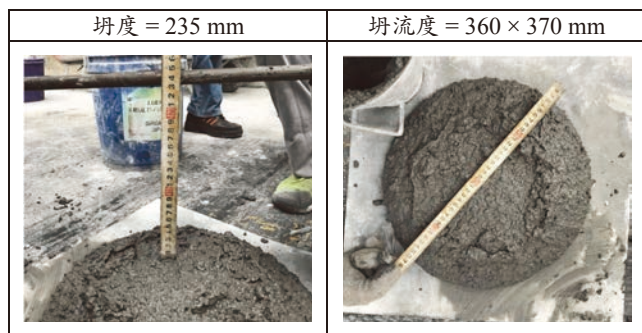


圖 9 爐石粉與燃煤飛灰比例為 4:6 廠拌試驗之新拌性質

共計生產 12 立方公尺。每立方公尺爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿的配比表如表 7 所示。拌合完成的無機聚合砂漿，分別由二台預拌混凝土車由汐止運送至約 18 公里外的臺北市大安區臺北科技大學，運輸時間約為 30 分鐘，再由泵送車泵送至設計館九樓屋頂進行防水層鋪設工程，如圖 10、圖 11 所示。無機聚合砂漿運送至臺北科技大學後所測試無機聚合砂漿之工作性質如圖 12 所示。其坍度達 260 mm，坍流度達 430 × 410 mm，顯示工作性質良好。其 3 天的抗壓強度 95 kgf/cm²，7 天的抗壓強度 356 kgf/cm²，28 天的抗壓強度達 399 kgf/cm²。不同齡期的抗壓強度如表 8 所示。北科大現地澆置工程完工相片如圖 13。



圖 10 無機聚合砂漿在力泰預拌廠拌合情形

表 5 民國 107 年 9 月 27 日實廠廠拌試驗配比
(爐石粉:燃煤飛灰=4:6) (鹼液使用量降低)

體積	L/S	灰砂比	無機聚合轉爐石砂漿組成材料用量 (kg)						總計 (kg)
			鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石細料	轉爐石含水率 %	水	
1.5 m ³	0.37	1:3.4	228	270	400	2,370	5	264	3,532

表 6 民國 107 年 9 月 27 日實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果

測試項目 / 日期	抗壓強度 (kgf/cm ²)				熱壓膨脹試驗	膨脹率 %
	7 天	28 天	28 天熱壓後	56 天	28 天	28 天
無機聚合轉爐石砂漿 /107-9-27	190	306	350	441	良好	未量測

表 7 民國 108 年 10 月 5 日力泰預拌混凝土廠廠拌爐石 / 飛灰基

無機聚合砂漿每立方公尺配比表

體積 m ³	L/S	灰砂比	爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿配比 (kg)							總計 (kg)
			鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	細粒料	細粒料含水率 %	抗裂粉體	水	
1.0	0.43	1:2.75	200	230	230	1,403	7	14	149	2,226



圖 11 無機聚合砂漿在北科大現場泵送情形



圖 13 無機聚合砂漿在北科大設計館屋頂防水工程施工及完工情形

結語

近年來隨著極端氣候的頻繁出現，節能減碳已成為全世界關注的重要議題，傳統水泥的製造不僅耗能，亦產生大量的二氧化碳。無機聚合混凝土組成材料使用多種工業廢棄物或副產品，包括燃煤飛灰、水淬高爐石粉等，不需經過高耗能之高溫生產程序，常溫環境下即可產製，可運用於結構性或非結構性之建築構件上，其生產建立在資源回收與循環再利用的基礎上，符合循環經濟的精神與效益。傳統水泥具有悠久的歷史，其研究基礎及產業鏈結穩固。惟目前礦山的開發受環境保護議題的影響漸趨困難，若傳統水泥原料開採受限而致減產，勢必影響各項產業供需。無機聚合混凝土不僅可將廢棄物有效資源化，亦可填補傳統水泥需求之缺口。期待未來國內能有更多的相關研究投入，盡速達到產業化的目標。

坍度：260 mm	坍流度：430 × 410 mm

圖 12 爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿之 45 分鐘後工作性質

表 8 爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿的新拌性質與抗壓強度

測試項目	抗壓強度 (kgf/cm ²)		
	3 天	7 天	28 天
爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿	95	356	399

致謝

本文的無機聚合混凝土各項實廠大型試驗，全因相關業界人力及設備的全力支持才得以完成。相關協助的工程前輩包括（以筆畫順序）：九典聯合建築師事務所宜蘭分所 陳尚鋒建築師、力泰建設企業股份有限公司、中聯資源股份有限公司、均利科技股份有限公司、欣得實業股份有限公司、賓志有限公司，在此特別致謝！

參考文獻

- Concrete Institute of Australia, 2011, Geopolymer Recommended Practice Handbook (CIA Z16-2011). <https://www.concreteinstitute.com.au/News/National/Release-of-Z16-Geopolymer-Recommended-Practice-H.aspx>
- 曹定國、李建舉、曹海林、蔡良才（2015），快凝早強無機聚合混凝土研究及應用，北京，科學出版社。
- 經濟部礦務局（2019），無機聚合綠色水泥及混凝土使用手冊。
- 鄭大偉、李韋峰、林冠宇、蔡志達、吳佳正、張祖恩、林凱隆、陳貞光，（2018），煉鋼轉爐石之無機聚合安定化技術開發，鑛冶，62 卷，第 4 期，第 55-69 頁。



無機聚合複合材料之 抗衝擊力學性能試驗研究

蔡營寬／國防大學理工學院環境資訊及工程學系 助理教授

李宏輝／國防大學理工學院環境資訊及工程學系 副教授

劉宇倫／國立臺北科技大學資源工程研究所 碩士生

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

李有豐／國立臺北科技大學土木工程系 教授

吳嘉偉／國防大學理工學院軍事工程研究所 碩士生

無機聚合材料因其製程簡單且具低二氧化碳排放之特性，近年來隨著節能減碳的環保意識攀升，已逐步穩定地發展。根據國內外針對無機聚合材料相關研究，顯見其在多項工程應用領域上極具發展潛力，為新一代之綠色環保再生材料。本文之目的，在於探討無機聚合材料之動態力學特性，以評估於軍事防護工程之可行性。其中，材料之製作以水淬高爐爐石粉（GGBS）作為無機聚合水泥之粉體原料，添加矽灰（Silica fume）、矽灰石（Wollastonite）、耐鹼玻璃纖維（Alkali-resistant glass fiber）、玻璃粉（Glass powder）及細粒料（Fine aggregate），與鹼性溶液（Alkaline solution）混合製成無機聚合砂漿試體，分別進行工作性與物性試驗（包括流度、硬化時間、線收縮率及孔隙率等）、基本力學性能試驗（抗壓試驗），及動態力學性能試驗（分離式霍普金森壓桿撞擊試驗），以探討無機聚合材料之衝擊力學特性。本研究中衝擊試驗所得之應變率範圍介於 200S-1 至 388S-1，試驗結果顯示，隨著應變率之提升，動態強度因子亦隨之增加，破壞產狀隨應力加載率之提升，破壞產狀從半破碎至半粉碎破壞，而當應變率較高時，試體吸收及消散能量之能力增加，抗衝擊性能亦進而提升。研究成果可供國軍建物防爆震設計之參考，並進一步評估以無機聚合材料取代傳統水泥應用於軍事設施工程及其潛在領域之可能，期能達到二氧化碳排放減量及資源再利用之目的。

前言

隨著環保意識抬頭，無機聚合材料因具低二氧化碳排放、可固化有害重金屬、耐久性佳及材料相容性佳等優點，已逐漸受到重視並穩定地發展^[1]。然而，目前仍著重於基礎理論與應用之探索階段，具有一定規模之工程實例相當有限。由於此類材料具早期强度高、常溫硬化、抗腐蝕及低熱傳導率等特性，應用於軍事設施工程如地下指揮所、坑道、機堡、水庫及機場跑道搶修

等有其發展潛力，惟軍事設施工程之防護能力要求較高，結構物受爆震波作用後常在表面形成坑洞及疤落（Spalling），在背後則產生痂落（Scabbing）及飛出物（Fragment），結構碎片飛出將嚴重威脅室內裝備及人員安全，因此，材料之動態力學特性（如：抗衝擊及抗炸性能等），為防護工程材料選用的考量重點之一。傳統上，常以改善混凝土材料特性，例如：高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）及超高性能混凝土

土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 等；或添加其他材料補強為主，例如：鋼纖維補強混凝土 (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC) 及碳纖維補強混凝土 (Carbon Fiber Reinforced Concrete, CFRC) 等，以降低爆炸衝擊背面所產生的破壞。此外，隨日益複雜的恐怖攻擊型態、意外爆炸及戰事威脅等，目前國內外有關無機聚合材料結構物於爆炸荷載下之力學行為及破壞模式之研究仍相當有限，因此，為利評估無機聚合材料應用於軍事防護工程之可行性，首應探討無機聚合材料之動態力學特性。

由於混凝土結構物承受高速撞擊及爆炸荷載之力學反應與作用過程非常複雜，爆炸與衝擊對結構物之力學行為常非受單一之作用影響，再加上混凝土為非均質且脆性之複合材料，較難進行精確的解析分析，多經由撞擊試驗及爆炸試驗所取得的數據與數值模擬分析，相互驗證比較其結果。過去研究成果顯示，無機聚合混凝土之基本物性與力學試驗，多以探討基本物性為主，如比重、乾縮率、水化熱、吸水率、坍度及初、終凝時間等，力學試驗則主要探討抗壓強度及抗彎強度。以 SHPB 進行動態試驗之結果顯示，無機聚合混凝土之抗壓強度、硬度等抗衝擊性能，將隨著應變率的增加而提升^[2,3]。

本文參考國內外相關研究方法，評估無機聚合混凝土應用於軍事防護工程之可行性，針對其抗衝擊與抗爆震之能力進行基本力學試驗及動態力學試驗等試驗研究。

材料製備及實驗方法

本文以無機聚合技術為基礎，製作基本力學特性試驗所需試體，進行抗壓試驗、霍普金森氏壓桿撞擊試驗等，探討無機聚合材料構件之力學行為及破壞模式，以評估應用於軍事防護工程之可行性。

無機聚合材料之製備

實驗材料

本研究使用之水淬高爐爐石粉係由中聯資源股份有限公司 (CHC Resources Corporation) 所提供，符合 ASTM C989 之規範。其中位徑 (D_{50}) 為 $12.0\ \mu\text{m}$ 。矽灰石由呈松企業股份有限公司 (Charles Star Enterprise Co., LTD) 所提供，外觀為白色纖維狀，中位徑 (D_{50}) 為 44

μm 。矽灰由埃肯有限公司 (National Blue Star (Group) Co., Ltd.) 所提供，其粒徑 80% 以上小於 $1\ \mu\text{m}$ 。水淬高爐爐石粉、矽灰石與矽灰之化學成分如表 1 所示。此外，本研究中使用之玻璃粉，其中位徑為 $100\ \mu\text{m}$ 。耐鹼玻璃纖維為華立企業股份有限公司 (Wah Lee Industrial Co., Ltd.) 所提供，其耐鹼玻璃纖維平均長度約 25mm 。細粒料為一般天然砂，係由力泰建設企業股份有限公司 (Lihtai Construction Enterprise Co., Ltd.) 所提供。經過計算後之細度模數 (Fineness modulus) 為 2.94，其中位徑 (d_{50}) 約為 1.0mm 。最後利用氫氧化鈉、矽酸鈉與鋁酸鈉混合配製成不同氫氧化鈉濃度、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 莫耳比與 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫耳比之鹼性溶液。

表 1 水淬高爐爐石粉、矽灰石與矽灰之化學成分表

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Others	L.O.I
爐石粉	57.4	27.4	10.8	0.3	0.6	1.2	1.3	1.1
矽灰石	37.5	58.1	2.3	-	0.8	-	1.3	-
矽灰	0.3	96.8	2.2	0.6	-	-	0.1	-

工作性及基本物性試驗試體製作及流程

砂漿 (Mortar) 試驗中，先將水淬高爐爐石粉、矽灰與耐鹼玻璃纖維進行預混拌 2 分鐘，再加入鹼性溶液混拌 3 分鐘，最後加入矽灰石與細粒料以製成無機聚合砂漿。同時在混拌完成之後，將無機聚合砂漿依照 ASTM C403 與 ASTM C23 之規範進行硬化時間試驗 (Setting time) 與流度試驗 (Slump flow)。並將漿體灌入 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的方形模具與 $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 285\text{mm}$ 的模具中，以進行抗壓強度、收縮試驗、超音波傳導速率 (Ultrasonic pulse velocity) 與物理性質試驗。在抗壓強度測試中，係將 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的方形試體在環境溫度下養護，在 4 小時、1 天、7 天與 28 天之養護齡期 (Curing time) 下依照 ASTM C109 規範進行抗壓試驗。收縮試驗中則是將 $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 285\text{mm}$ 之試體置於相對濕度 $> 60\%$ 之環境下，依照 ASTM C157 之規範測定其線收縮率。超音波傳導試驗係使用攜帶式超音波測定儀 (Portable ultrasonic non-destructive tester) (Pundit plus) 進行量測，透過測得無機聚合砂漿試體之超音波傳導速度，以了解試體之緻密程度。物理性質試驗則是參照 ASTM C20 之規範，測得試體之孔隙率及吸水率。無機聚合砂漿試驗流程如圖 1 所示。

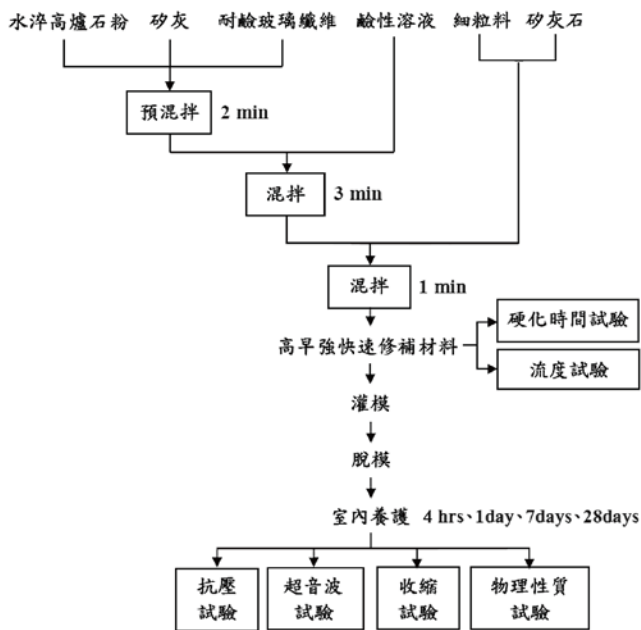


圖 1 無機聚合砂漿試驗流程圖

撞擊試驗試體製作

本研究使用分離式霍普金森壓桿撞擊試驗之試體設計尺寸為 $\phi 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ (D × H)，長徑比為 1:1，如圖 2 所示。抗衝擊試驗試體配方及鹼性溶液配比分別如表 2 及表 3 所示，其中，RGP-50 為本研究標準配方試體，作為配方及製程調整之對照組；試體 RGP-W5G5，以玻璃粉取代 RGP-50 中矽灰石重量比之 50% 製成；試體 RGP-50-BF，其試體配方及鹼性溶液配比與 RGP-50 相同，惟其耐鹼玻璃纖維係於粉體與鹼性溶

液預混拌後始添加（濕拌）。試體總數量計 15 顆（RGP-50：3 顆；RGP-W5G5：6 顆；RGP-50-BF：6 顆）。

基本力學性質與物性試驗

本實驗以半自動控制抗壓試驗機（50-A22A03）進行測定，如圖 3 所示。將無機聚合漿料灌入 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 之方形模具，每組參數製作 5 個試體後，於 4 小時、1 天、7 天及 28 天室溫養護後進行抗壓試驗。其抗壓強度測試依照 CNS 1232（混凝土圓柱試體抗壓強度試驗法）。



圖 3 半自動控制抗壓試驗機

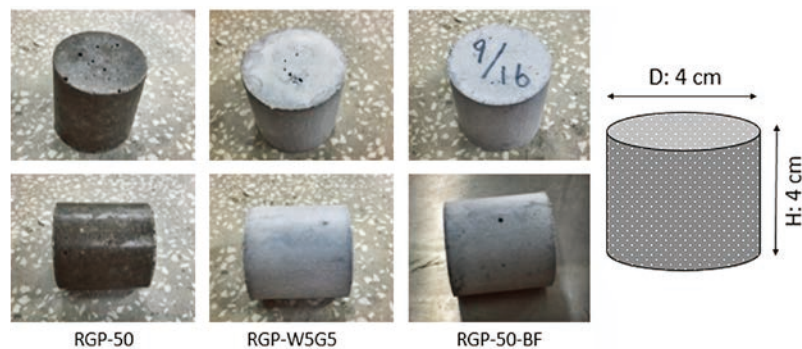


圖 2 分離式霍普金森壓桿撞擊試驗試體尺寸示意圖

表 2 抗衝擊試驗試體配比

試體	爐石粉 (wt%)	矽灰石 (wt%)	玻璃粉 (wt%)	抗鹼玻璃纖維 (wt%)	矽灰 (wt%)	L/B	B:S
RGP-50	100	10	0	2	1	0.55	1:1.2
RGP-W5G5	100	5	5	2	1	0.55	1:1.2
RGP-50-BF*	100	10	0	2	1	0.55	1:1.2

* 註：耐鹼玻璃纖維於粉體與鹼性溶液混拌後添加（濕拌）

表 3 抗衝擊試驗試體配鹼性溶液配比

NaOH 濃度 (M)	SiO ₂ /Na ₂ O 莫爾比	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ 莫爾比
10	1.28	50

分離式霍普金森桿衝擊試驗

分離式霍普金森壓桿試驗之目的，可用以探討應變率對於材料抗衝擊性能，文獻亦顯示無機聚合材料之抗壓強度、變形性（Deformation properties）及衝擊韌性（Impact toughness）等，均隨著應變率增加而提升^[4-6]，由於分離式霍普金森壓桿（Split Hopkinson Pressure Bar，簡稱 SHPB）已被廣泛應用於材料在高速撞擊速度下之行為。

SHPB 係利用高壓氣體將撞擊桿以一定速度射出，如圖 4 所示，使其與輸入桿撞擊而產生應力波，根據一維應力波傳播的條件，入射波以波速 $C_e = \sqrt{E/\rho}$ 向前傳播（ E 及 ρ 分別為介質的彈性模數與密度），經過 L/C_e 的時間（ L 為輸入桿的長度）傳至輸入桿與試體的界面，由於輸入桿與試體兩者波阻抗不同，故應力波傳遞至界面時將產生反射波及透射波，透射波即進入試體與輸出桿之界面，同時產生透反射。但由於試體較薄，其應力波在試體中來回一次的時間僅需 $2L_s/C_s$ （ L_s 及 C_s 分別為試體的長度及波傳速度），通常只需幾微秒之歷時，即完成數次的透反射，此時試體及桿兩端面的應力應變可達到一致，再利用訊號放大器及示波器將入射、反射及透射波記錄下來，即可得到試體的應力、應變及應變率的關係^[7]。

一維波傳理論

以 SHPB 進行材料動態力學試驗時，假設試體在撞擊過程中滿足一維波傳理論，透過黏貼於入射桿及透射桿上之應變計，紀錄應變歷時資料，進而推導試

體於衝擊荷載下之應－應變關係。基本假設條件如下：

- (1) 應力波在導桿的傳遞行為，應符合一維波傳理論。
- (2) 試體的應力場與應變場，是均勻且僅沿長軸向發生。
- (3) 忽略試體徑向的慣性效應（Inertia effect）。
- (4) 忽略試體和輸入及輸出桿間界面之摩擦效應（Effect of radial inertial）。

SHPB 試驗中，應力在桿件內部傳導時係以彈性波的方式進行，依作用方向區分為縱向波及橫向波，其中縱向波是平行質點運動方向進行，所產生的應變為拉伸或壓縮，而橫向波則是垂直質點運動方向，所產生的應變為剪切應變，在 SHPB 試驗中係根據彈性桿的質點縱向位移，依一維波傳理論逐一計算材料之應變、應變率與應力，對於側向應變的影響則予以忽略。

假設一材料截面積為 A ，縱向彈性係數為 E 之均勻細長桿，取其中心線為 x 軸，來探討彈性波在桿內傳導的情況。此時在圓桿中取任一微小單元，長度為 dx ，如圖 5 所示，在 S_1 處的應變為 $\partial u_1/\partial x$ ， S_2 處之應變為 $\partial u_2/\partial x$ ，假設材料受外力作用滿足虎克定律及牛頓運動定律，兩截面 S_1 及 S_2 相對於各應變所產生的合力對此微小單元造成的運動方程式則可以下式表示^[7]：

$$\varepsilon(t) = -\frac{C_e}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_e}{L_s} \varepsilon_r \quad (2)$$

$$\sigma_{avg}(t) = \frac{A_e E_e}{A_s} \varepsilon_r(t) \quad (3)$$

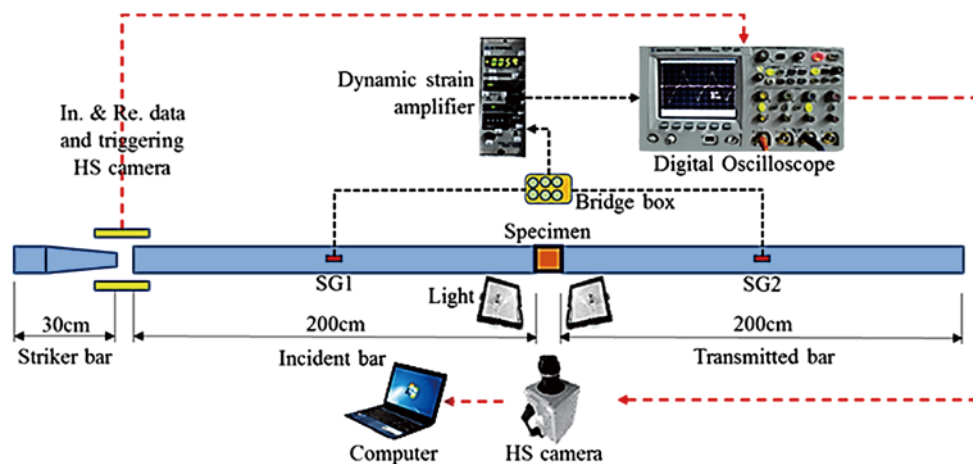


圖 4 SHPB 裝置及測試系統圖^[7]

若採用上述式 (1) ~ 式 (3) 分別計算試體之應變、應變率及平均應力時，因僅考慮單一應變歷時，故此分析方法稱為「單波法 (One-wave method)」，此法與三波法 (Three-wave method) 在計算上略有差異，如表 4 所示。

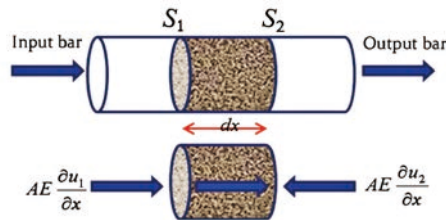


圖 5 一維縱向應力波之傳遞^[7]

表 4 單波法與三波法比較表^[7]

	單波法 (One-wave method)	三波法 (Three-wave method)
應力 (Stress)	$\sigma_{avg}(t) = \frac{A_s E_s}{A_s} \varepsilon_i(t)$	$\sigma_{avg}(t) = \frac{A_s E_s}{2A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t)$
應變 (Strain)	$\varepsilon(t) = -\frac{C_s}{L_s} \int_0^t \varepsilon_i dt$	$\varepsilon(t) = -\frac{C_s}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt$
應變率 (Strain rate)	$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_s}{L_s} \varepsilon_r$	$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{C_s}{L_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)$

試驗結果與討論

基本物性試驗結果

本研究之先導研究發現，以水淬高爐爐石粉作為無機聚合水泥之粉體原料，添加矽灰、矽灰石、耐鹼玻璃纖維及細粒料，與鹼性溶液混合製成無機聚合高強度複合材料，能夠有效增加其抗壓強度並改善其收縮性質。並透過調整灰砂比 (B/S) 與水灰比 (L/B)，使其養護齡期四小時之抗壓強度達到 36.7 MPa、養護齡期 28 天之線收縮率減少為 0.36%，同時具備適當之流動性質。透過調整鹼性溶液之 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫爾比為 50 時，能夠使無機聚合砂漿之初凝時間由 14 分鐘延長為 19 分鐘、流度由 200 mm 增加為 210 mm、養護齡期四小時之抗壓強度由 36.7 MPa 提升為 38.7 MPa 及 0.35% 之線收縮率。

由於矽灰石本身為纖維狀，與鹼性溶液拌合後會增加漿體黏度，故本研究以 5 wt.% 之玻璃粉 (中位徑：100 μm) 取代矽灰石，以提升漿體之流動性，經坍度試驗後，結果顯示流度由 210 mm 提升為 215 mm。然而玻璃粉之添加，會造成其部分與鹼性溶液反應，溶解

出更多的矽離子使硬化時間下降，而無法達到理想的抗收縮效果。因此，若以抗收縮性為考量時，建議仍以矽灰石作為添加劑較為合適。

此外，本研究期透過以耐鹼玻璃纖維與細粒料同時添加拌合之方式，使纖維均勻分散並增加流動性。然而，由於混拌時間不足，且漿體之黏度較高，使纖維無法有效的分散，並降低其流動性，同時抗收縮效果也降低。因此，以工作性之流度為考量時，纖維於加入鹼性溶液預混拌前添加，將具有更佳的分散效果。硬化時間及流度試驗結果如表 5 所示。

表 5 硬化時間及流度比較表

試體	T (°C)	初凝時間 (min)	終凝時間 (min)	流度 (mm)
RGP-50	28.3	19	24	210
RGP-W5G5	28.1	18	22	215
RGP-50-BF	27.5	20	25	195

其中，抗衝擊試驗試體 (RGP-50、RGP-W5G5 及 RGP-50-BF) 於不同齡期之線收縮率如圖 6 所示，試驗結果顯示，於養護齡期前期階段之線收縮率增加率較高，約於齡期第四天後增加率轉為趨緩，並以試體 RGP-50 之抗收縮性較佳。

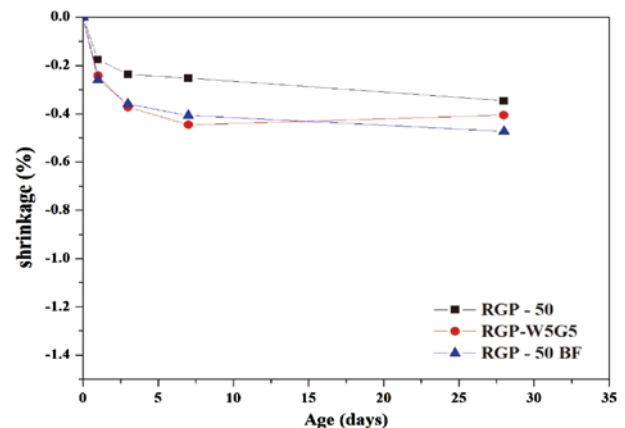


圖 6 不同齡期之線收縮率關係圖

靜態抗壓強度

本實驗分別以抗衝擊試驗試體 (RGP-50、RGP-W5G5 及 RGP-50-BF) 及抗炸試驗試體 (RGP) 之相同配比，製作抗壓試驗試體，進行不同齡期之抗壓試驗。試驗結果顯示，RGP-50 於 4 小時齡期之抗壓強度為 38 MPa，抗壓強度隨齡期增長而增加，於 28 天齡期強度可達到 121 MPa，與 RGP-W5G5 及 RGP-50-BF

相比，具有較高之抗壓強度，然而其抗壓強度之差異不大，約為 5%。各試體於不同齡期之抗壓強度如圖 7 所示。試體在養護齡期為 4 小時與 1 天之抗壓強度有明顯提升，但對於養護齡期為 7 天與 28 天強度發展並無太大影響。其原因為隨著混拌時間與混拌速度的增加，增加了溶出的矽、鋁膠體數量，同時提升漿體的均勻度，使得試體能夠在較早的養護齡期下便能夠有良好的強度發展。

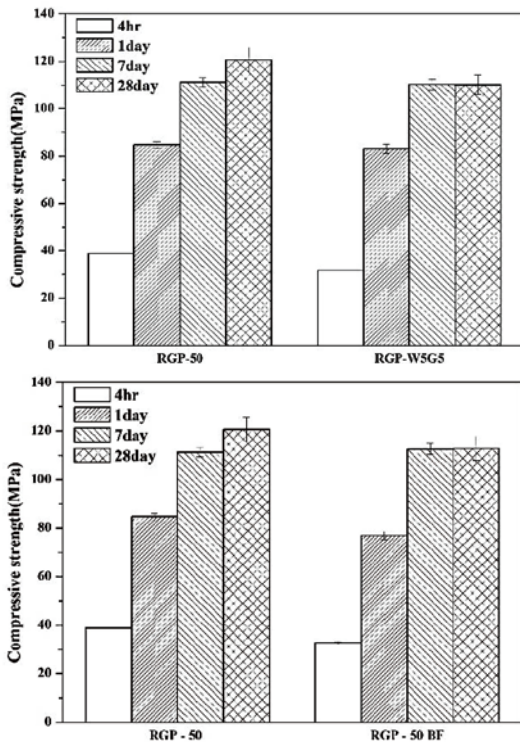


圖 7 各試體不同齡期之抗壓強度比較圖

動態力學特性

動態應力－應變曲線

一般而言，分離式霍普金森壓桿試驗之應變率介於 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ，透過撞擊腔壓之調整，可獲得材料在不同應變率條件下之動態抗壓強度。圖 8 為各試體動態抗壓強度與設定撞擊腔壓之關係圖，當撞擊腔壓由 0.9 kgf/cm^2 增加至 1.1 kgf/cm^2 時，結果顯示試體 RGP-50 及 RGP-W5G5，衝擊抗壓強度亦隨之增加，而 RGP-50-BF 之動態抗壓強度則未隨撞擊腔壓增加而顯現相同增加之趨勢。

隨撞擊腔壓之增加，觀察應力－應變曲線圖（如圖 9 所示），RGP-W5G5 之應變率由 200 s^{-1} 增加至 381 s^{-1} ，動態抗壓強度由 187 MPa 增加至 290 MPa ，增加率達 55%。此外，除應變率有明顯提升外，整體

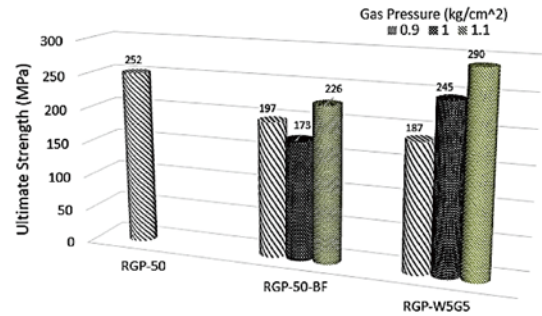


圖 8 衝擊抗壓強度與設定撞擊腔壓之關係圖

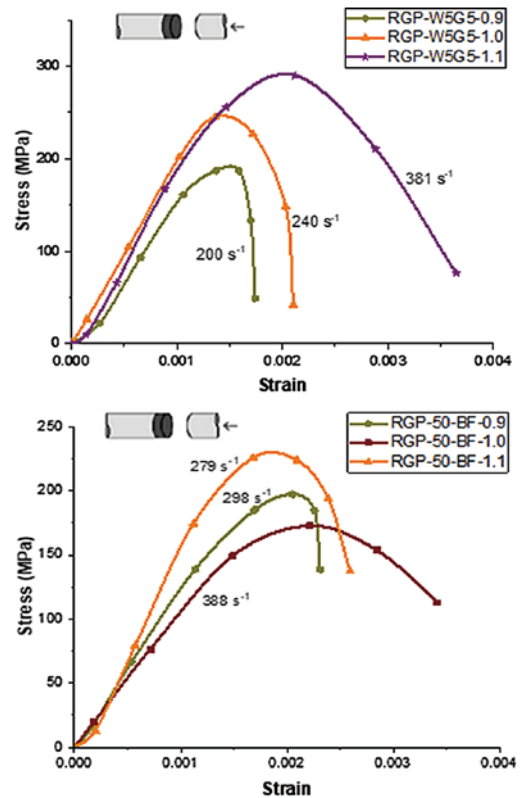


圖 9 不同應變率下之應力應變曲線圖

曲線有向上偏移之趨勢，動態抗壓強度增加且彈性係數亦隨之提高。隨著應變率持續增加，曲線向上偏移之趨勢愈加明顯，達到動態抗壓強度時之應變值亦隨之增加，在強度峰值後之曲線仍向後延伸，曲線下包圍的面積增加，顯示當應變率較高時，試體吸收及消散能量之能力亦進而提高。然而，由 RGP-50-BF 之應力－應變曲線圖，發現與前述試體（RGP-W5G5）試驗結果迥異之現象，其原因為，在此試體之製備過程中，其耐鹼玻璃纖維之添加時機，係於粉體與鹼性溶液預混拌後始加入，因漿體具有水分使得耐鹼玻璃纖維於第二次混拌中分布不均，造成各試體之變異性過大，後續將規劃增加第二次混拌時間，以提升耐鹼玻璃纖維之分布性，確保試體之品質一致性。

試體破壞與裂縫發展過程

觀察無機聚合材料試體破壞與裂縫發展過程，當試體 RGP-50 受到快速加載時，軸向裂縫從試體端面開始產生，並由中間延伸發展，約於 484 μs 時產生軸向裂縫，此時無明顯環向裂縫、膨脹或側向變形產生。於 1034 μs 時縱向裂縫數量明顯增加，同時亦有剪力裂縫產生，裂縫快速發展，環向應變隨之遽增，試體呈現環狀擴張破壞，此時試體完全破壞並呈半粉碎狀，如圖 10 所示，此時動態抗壓強度為 252 MPa。試體 RGP-50-BF 之破壞與裂縫發展過程與 RGP-50 相似，約在 533 μs 時產生軸向裂縫且無明顯環向裂縫，此時試體末端與透射桿端接觸面局部區域已呈現部分破碎，試體於 817 μs 時呈現環狀擴張破壞，此時試體完全破壞並呈半粉碎狀，如圖 11 所示，動態抗壓強度為 197 MPa。試體 RGP-W5G5 之裂縫發展過程，約 134 μs 時斜向裂縫（約 45°）剪力裂縫自試體之背撞面開始發展，並於約 617 μs 時呈現環狀擴張破壞，此時試體完全破壞並呈半粉碎狀，如圖 12 所示，然其破碎程度較前兩者為輕，動態抗壓強度為 187 MPa。破壞產狀隨著應力加載率提升，破壞產狀從半破碎至半粉碎破壞，各試體撞擊後破壞產狀如圖 13 至圖 15。

動態增強因子

分離式霍普金森桿撞擊試驗中，試體於高加載率之衝擊荷載下產生之壓應力峰值為動態抗壓強度，其與准靜態抗壓強度之比值，即為動態增強因子（Dynamic Increase Factor, DIF）。此參數在國外設計規範如 CEB^[8] 及 UFC^[9] 中已提出不同混凝土材料之建議參考值，據以量化材料於高加載率下之力學行為，可應用於結構於衝擊荷載下反應特性之設計、分析與評估。

本試驗中，當撞擊腔壓設定為 0.9 kgf/cm²，各試體准靜態強度及動態增強因子關係如圖 16 所示，結果顯示三種材料配比之准靜態抗壓強度介於 115 MPa 至 121 MPa，差異率僅約 5%；衝擊抗壓強度則介於 187 MPa 至 252 MPa，差異率約 35%；而動態強度因子分別為 1.7、1.84 及 2.08。顯示隨著應變率之提升，動態強度因子亦隨之增加，其中，以 RGP-50 之動態強度增益率最大。

由於 SHPB 試驗無法精準地控制加載率，本研究中衝擊試驗所得之應變率範圍介於 200 s⁻¹ 至 388 s⁻¹。文獻研究結果顯示，類混凝土脆性材料之 DIF 值介於 10 s⁻¹ 至 30 s⁻¹ 或 66 s⁻¹ 時，由於有效試驗數據之缺乏，在對數圖中可假設為線性比例關係^[10]，而動態抗

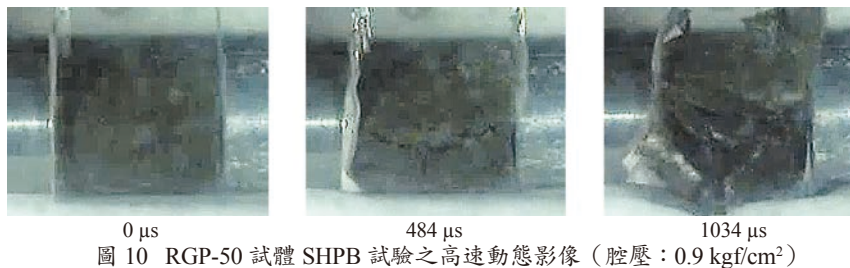


圖 10 RGP-50 試體 SHPB 試驗之高速動態影像（腔壓：0.9 kgf/cm²）

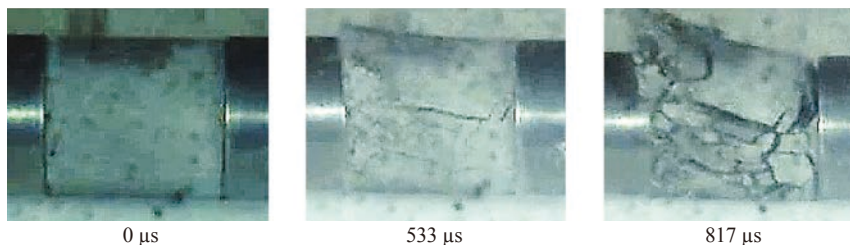


圖 11 RGP-50-BF 試體 SHPB 試驗之高速動態影像（腔壓：0.9 kgf/cm²）

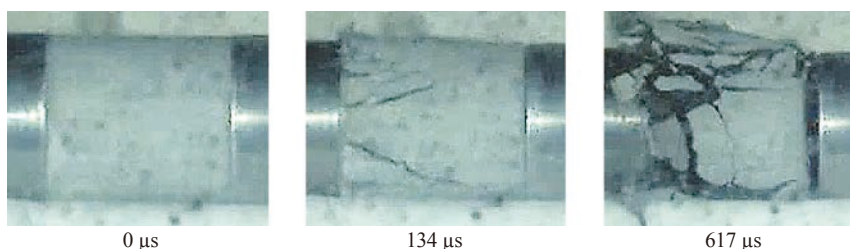


圖 12 RGP-W5G5 試體 SHPB 試驗之高速動態影像（腔壓：0.9 kgf/cm²）

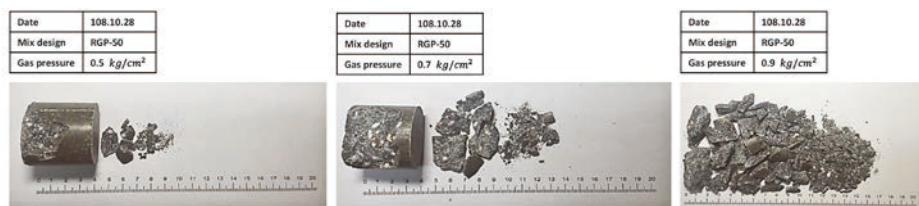


圖 13 RGP-50 試體撞擊後破壞產狀

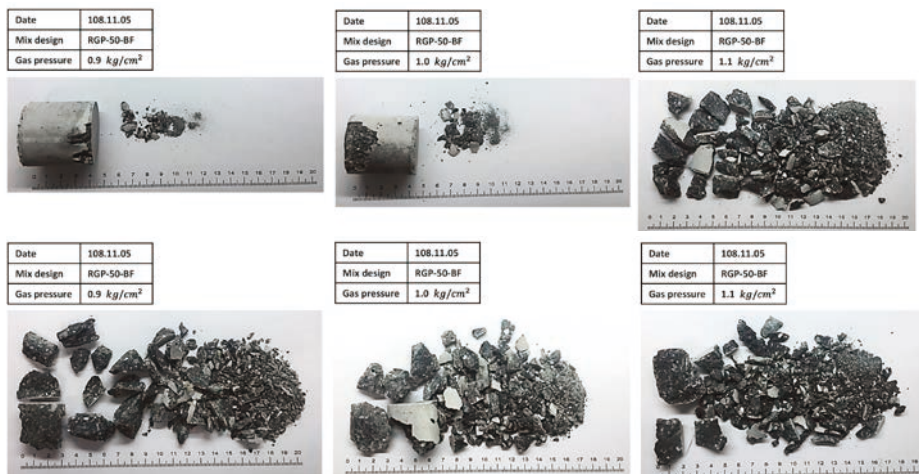


圖 14 RGP-50-BF 試體撞擊後破壞產狀



圖 15 RGP-W5G5 試體撞擊後破壞產狀

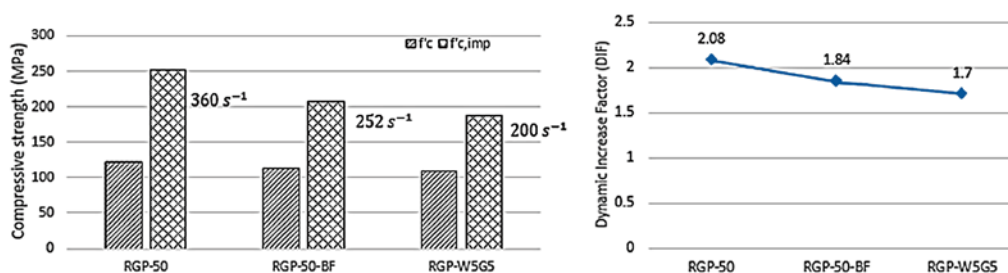


圖 16 各試體准靜態強度及動態增強因子關係圖

壓強度之應變率敏感度，則在當應變率大於 30 s^{-1} 或 66 s^{-1} 時開始突顯，曲線斜率轉為陡峭，動態強度因子增益率提升^[3]。因無機聚合材料具有類混凝土之材料脆

性，本研究使用卜特蘭混凝土（Ordinary Portland Cement concrete, OPC）之動態增強因子預測公式，以比較無機聚合材料動態增強因子之應變率敏感度，如下式表示^[8]：

$$DIF f'_c = f'_{\text{impact}} / f'_c = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{co})^{0.014} \quad \dot{\epsilon} \leq 30 s^{-1} \quad (4)$$

$$DIF f'_c = f'_{\text{impact}} / f'_c = 0.012 (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{co})^{1/3} \quad \dot{\epsilon} > 30 s^{-1} \quad (5)$$

其中， f'_{impact} 為動態抗壓強度； f'_c 為平均准靜態抗壓強度； $\dot{\epsilon}$ 為應變率，單位為 s^{-1} ； $\dot{\epsilon}_{co}$ 為應變率參考值 ($30 \times 10^{-6} s^{-1}$)。

影響混凝土動態增強因子應變率敏感度之因素包括准靜態抗壓強度、粗骨材之粒徑、水灰比、養護齡期、養護環境溫度、濕度、試體尺寸效應及儀器限制等。一般而言，准靜態抗壓強度較低之混凝土試體，將具有較高之動態增強因子應變率敏感度。本研究試驗數據與前述 OPC 強度增強因子預測公式之比較分析如圖 17 所示，結果顯示，RGP-50 及 RGP-W5G5 之有效資料點均落於曲線之下，而 RGP-50-BF 之有效資料點均落於曲線之上，顯示 RGP-50-BF 動態增強因子之應變率敏感度高於 OPC 材料。

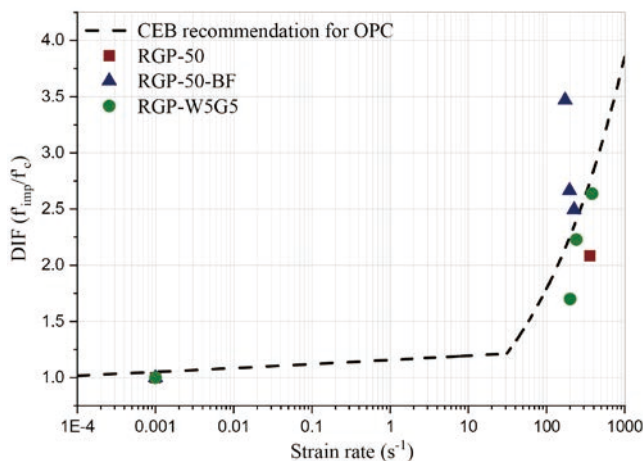


圖 17 各試體准靜態強度及動態增強因子關係圖

結論

本研究以水淬高爐爐石粉作為無機聚合材料之粉體原料，添加矽灰、矽灰石、耐鹼玻璃纖維、玻璃粉及細粒料，與鹼性溶液混合製成無機聚合砂漿試體，分別進行工作性與物性試驗（包括坍流度、硬度、線收縮率及孔隙率等）、基本力學性能試驗（抗壓試驗），及動態力學性能試驗，探討無機聚合複合材料之衝擊力學特性。根據試驗結果，主要發現如下：

1. 當灰砂比 (B/S) 為 1:1.2，水灰比 (L/B) 為 0.55 時，其養護齡期四小時之抗壓強度可達 36.7 MPa、養護齡期 28 天之線收縮率減少為 0.36%，同時具備適當之流動性質。

2. 當鹼性溶液之 SiO_2/Al_2O_3 莫爾比為 50 時，初凝時間由 14 分鐘延長為 19 分鐘、流度由 200 mm 增加為 210 mm、養護齡期四小時之抗壓強度由 36.7 MPa 提升為 38.7 MPa 及 0.35% 之線收縮率。
3. 玻璃粉之添加，將造成其部分與鹼性溶液反應，溶解出更多的矽離子使硬化時間下降，而無法達到理想的抗收縮效果。因此，以矽灰石作為抗收縮劑較為合適。
4. 隨著應變率持續增加，應力－應變曲線向上偏移之趨勢愈加明顯，且達到強度峰值後之曲線仍向後延伸，顯示試體吸收及消散能量之能力增加，抗衝擊性能亦進而提升。
5. 無機聚合材料試體於衝擊荷載下之破壞與裂縫發展過程，軸向裂縫從試體端面開始產生，並由中間延伸發展，破壞產狀隨著應力加載率提升，破壞產狀從半破碎至半粉碎破壞。

誌謝

本研究由科計部專題研究計畫 MOST 108-2221-E-606-001-MY2 補助支持，特此誌謝。

參考文獻

1. 戴于盛 (2013)，「無機聚合綠色水泥之應用開發研究」，碩士論文，國立臺北科技大學資源工程研究所，台北，臺灣。
2. 潘煌錚、戴毓修、彭仁柏、吳承修、蕭力銘 (2011)，「爐石活性粉混凝土的動態力學性質及耐久性」，台灣混凝土學會 2011 年混凝土工程研討會，台南，臺灣。
3. Khan, M.Z.N., Hao, H., Hao, Y., and Shaikh, F.U.A. (2018), "Experimental evaluation of quasi-static and dynamic compressive properties of ambient-cured high-strength plain and fiber reinforced geopolymer composites." *Construction and Building Materials*, Vol. 166, pp. 482-499.
4. 李夕兵、古德生 (1994)，「岩石衝擊動力學」，中南工業大學出版社，長沙，中國。
5. Parry, D.J., Dixon, P.R., Hodson, S., and Al-Maliky, N. (1994), "Stress equilibrium effects within Hopkinson bar specimens." *Journal de Physique III*, Vol. 4, pp. 107-112.
6. Subhash, G. and Ravichandran, G. (2000), "Split-Hopkinson pressure bar testing of ceramics." *Mechanical Testing and Evaluation*, Vol. 8, pp. 497-504.
7. 林維仁 (2014)，「分離式霍普金森壓桿試驗之應變量測及其應用於脆性材料適用性探討」，碩士論文，國防大學理工學院環境資訊及工程學系，桃園，臺灣。
8. CEB Comité Euro-International Du Béton, CEB-fib model code for concrete structures 2010. Telford, 2013.
9. UFC 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions, Department of defense, USA, 2008.
10. Ross, C.A., Jerome, D.M., Tedesco, J.W., and Hughes, M.L. (1996), "Moisture and strain rate effects on concrete strength." *ACI Mater J.*, Vol. 93, pp. 293-300.



無機聚合材料 配比設計方法 推演與應用

蔡志達／國立成功大學永續環境實驗所 副研究員

無機聚合材料（Geopolymer）不似水泥系複合材料擁有悠久的發展歷史與豐富的研究成果，故其配比設計方法大多採用比例法，或是取代法（於水泥系複合材料配比中，利用無機聚合漿體取代水泥漿體），因此本文期望以緻密配比邏輯（Densified mixture design algorithm, DMDA）為基礎，推演一符合無機聚合材料使用之配比設計方法，並介紹此配比設計方法在無機聚合砂漿與無機聚合混凝土，於實驗室與實場之應用。惟無機聚合材料組成原料相當多元，使用者可以根據所採用的組成材料，依據本文所提出之配比設計邏輯進行推演並計算，再經體積驗算與試拌確認後使用之。

緣起

無機聚合材料（Geopolymer）係由法國科學家 Davidovits 於 1979 年所提出，為一種三維架狀的鋁矽酸鹽物質，其結構為矽氧四面體與鋁氧四面體共用氧原子之鍵結型態^[1,2]。無機聚合材料主要為非晶質（Amorphous）或半晶質（Semi-crystalline）之物質，此材料在合成的過程中，通常使用鋁矽酸鹽原料（變高嶺土、燃煤飛灰或水淬高爐爐石粉）藉由鹼金屬氫氧化物水溶液或鹼金屬矽酸鹽水溶液使顆粒表面之矽、鋁離子溶出，形成鋁矽酸鹽聚合膠體，最後再與未反應之固體顆粒進行縮聚作用後，固化形成無機聚合材料。其與水泥系複合材料最大不同乃水泥硬固的機理為水化鍵結，而無機聚合材料則是化學鍵結（共價鍵）。由於無機聚合材料組成原料取得容易，製程與設備簡單，在常溫環境下即可製得^[3]，並具備優良的性能，故相當有潛力發展成為新一代綠色工程材料。近年來國內外均積極投入無機聚合材料之相關研究，惟無機聚合材料不似水泥系複合材料擁有悠久的發展歷史與豐富的研究成果，故其配比設計方法大多採用比例法，或是取代法（於水泥系複合材料配比中，利

用無機聚合漿體取代水泥漿體），這樣的方式在實驗室內少量操作尚屬可行，若應用到實廠廠拌或量產時，配比的表示方式建議應採用 kg/m^3 較為準確與適用。因此本文旨在以緻密配比邏輯（Densified mixture design algorithm, DMDA）為基礎，推演一符合無機聚合材料使用之配比設計方法，並介紹其相關應用。

無機聚合材料配比設計方法推演

緻密配比邏輯^[4]係一根據顆粒堆積與材料科學原理，並融入「耐久性、安全性、工作性、經濟性及生態性」考量的水泥系複合材料配比設計方法，於 1994 年推導與建立完成，並演繹出「漿量控制」、「用水量控制」，及「潤滑漿量厚度控制」等模式，與「代數解」、「矩陣解」，「幾何解（即體積變化係數解）」等計算方法^[5]。至今已成功應用於不同性能需求之指標工程上：高雄 85 T & C Tower、屏東海洋生物博物館、台北公車專用道、南投埔里中台禪寺、彰濱工業區車測中心、鶯歌陶瓷博物館－「禧門」、台中國家歌劇院等。由於緻密配比邏輯係以水泥系複合材料為基礎所發展。因此本文以爐石 / 飛灰基無機聚合材料組成原料

將緻密配比邏輯，再演繹以適合無機聚合材料配比設計使用，再演繹推導過程說明如下。爐石 / 飛灰基無機聚合材料組成原料：粗骨材、細骨材、F 類燃煤飛灰、水淬高爐石粉、鹼液、抗裂粉體，及緩凝劑；而一般常見之水泥系複合材料組成原料：粗骨材、細骨材、水泥、F 類燃煤飛灰、水淬高爐石粉、纖維、水及強塑劑 (Superplasticizer, SP)，就緻密配比邏輯而言，爐石 / 飛灰基無機聚合材料與水泥系複合材料組成原料之差異如表 1 所示。

表 1 緻密配比邏輯中爐石 / 飛灰基無機聚合材料與水泥系複合材料組成原料

	爐石 / 飛灰基無機聚合材料	水泥系複合材料
骨材系統	粗骨材、細骨材、 抗裂粉體	粗骨材、細骨材、 F 類燃煤飛灰、纖維
漿體系統	F 類燃煤飛灰、 水淬高爐石粉、鹼液、 緩凝劑、粗、細骨材含水量	水泥、F 類燃煤飛灰、 水淬高爐石粉、水與粗、 細骨材含水量、強塑劑

爐石 / 飛灰基無機聚合材料緻密配比邏輯之設計流程如下：

步驟一：選擇材料

蒐集組成原料之物化性資料，以作為配比計算之參據。並求出最小空隙率（最大單位重），依最小空隙的原理，即探討顆粒材料最大堆積密度即最佳級配條件下的空隙。

步驟二：決定強度與坍度

依據施工規範及施工條件之要求，選定爐石 / 飛灰基無機聚合材料強度與工作性。

步驟三：求骨材最大單位重

根據骨材最大單位重求出骨材系統之最小空隙 (V_v)。

1. 假設細骨材填塞粗骨材之最大單位重比例為 α 。

$$\alpha = \frac{W_{cs}}{W_{cs} + W_{ca}} \quad (1)$$

若僅使用細骨材，則 $W_{ca} = 0$ ； $\alpha = 1$ 。

2. 骨材系統之空隙體積 (V_v) 為：

$$V_v = 1 - \left(\frac{W_{cs}}{\gamma_{cs}} + \frac{W_{ca}}{\gamma_{ca}} + \eta \right) \quad (2)$$

式中 W_{ca} ， γ_{ca} ：分別表粗骨材重，及粗骨材密度；

W_{cs} ， γ_{cs} ：分別表細骨材重，及細骨材密度；

η 表抗裂粉體或纖維體積。

步驟四：計算用漿量及骨材系統體積

1. 計算骨材系統各材料之用量

無機聚合漿體 (V_p) 假設等於 (nV_v)，如圖 1 [5] 所示。

$$V_p = nV_v \quad (3)$$

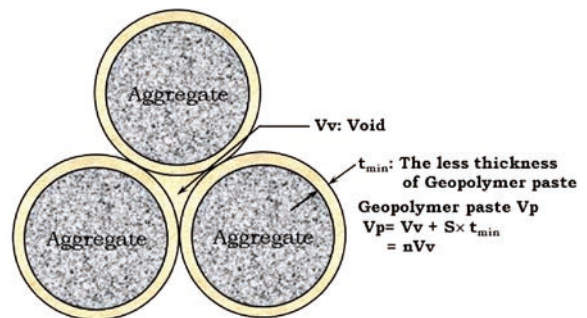


圖 1 無機聚合漿體於緻密配比邏輯中所扮演之角色示意圖 [5]

則骨材系統體積 (V_{agg}) 可以依下式求出，

$$V_{agg} = 1 - V_p = \left(\frac{W_{ca}}{\gamma_{ca}} + \frac{W_{cs}}{\gamma_{cs}} + \eta \right) \quad (4)$$

由於細骨材、粗骨材之混合比率為最緻密點，屬於固定重量比率，而抗裂粉體體積為已知，故將公式 (1) 及公式 (2) 重新代入公式 (4) 中，則可求出細骨材、粗骨材用量，再將 η 乘以抗裂粉體密度則可求出抗裂粉體用量。

2. 計算燃煤飛灰、水淬高爐石粉、鹼液、緩凝劑用量

$$V_p = \frac{W_{AL}}{\gamma_{AL}} + \frac{W_{fly}}{\gamma_{fly}} + \frac{W_{sl}}{\gamma_{sl}} + \frac{W_{Rd}}{\gamma_{Rd}} \quad (5)$$

λ 為液灰比，可以寫成下式：

$$\lambda = \frac{W_{AL}}{W_{fly} + W_{sl}} \quad (6)$$

ρ 為緩凝劑添加比例，可以寫成下式：

$$\rho = \frac{W_{Rd}}{W_{AL} + W_{fly} + W_{sl}} \quad (7)$$

θ 為 F 類燃煤飛灰與水淬高爐石粉之使用比例，可以寫成下式：

$$\theta = \frac{W_{fly}}{W_{fly} + W_{sl}} \quad (8)$$

將公式 (6)、(7)，及 (8) 重新代入公式 (5)，可得：

$$W_{sl} = \frac{V_p}{\left[\frac{\left(\frac{\lambda}{1-\theta} \right)}{\gamma_{AL}} + \frac{\left(\frac{\theta}{1-\theta} \right)}{\gamma_{fly}} + \frac{1}{\gamma_{sl}} + \frac{\left(\frac{\lambda\rho + \rho}{1-\theta} \right)}{\gamma_{Rd}} \right]} \quad (9)$$

由公式 (9) 求得之 W_{sl} ，再代入公式 (6)、(7)，及 (8)，即可計算出 W_{fly} 、 W_{AL} ，及 W_{Rd} 。

上式中

W_{AL} ：鹼液重； γ_{AL} ：鹼液之密度；

W_{sl} ：水淬高爐石粉重； γ_{sl} ：水淬高爐石粉之密度；

W_{fly} ：F 類燃煤飛灰重； γ_{fly} ：F 類燃煤飛灰之密度；

W_{Rd} ：緩凝劑重； γ_{Rd} ：緩凝劑之密度；若未使用緩凝劑，則 $\rho = 0$ ； $W_{Rd} = 0$ 。

步驟五：配比修正與試拌

1. 根據粗、細骨材含水率調整鹼液用量

一般而言，實廠使用之粗、細骨材均含有水分（含水率大於 0%），就水泥系複合材料配比而言，可直接採取「加石減水」與「加砂減水」的動作來進行配比修正，惟無機聚合材料配比中並無「拌合用水量」，故針對粗、細骨材的含水率，則需透過「加石減鹼液」與「加砂減鹼液」來進行配比修正，但由於鹼液與水的比重不同，建議應採體積法進行配比修正。

2. 試拌

任何一種配比設計方法，最後皆必須藉由試拌確認所設計配比的性質（工作性、強度等）是否滿足需求，無機聚合材料當然也無例外，當試拌結果無法滿足設計需求時，可經由漿量（n 值）、液灰比（ λ ），及 F 類燃煤飛灰與水淬高爐石粉之使用比例（ θ ）來進行配比調整，配比調整後再經由試拌確認相關性質。

爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿於高壓地磚之應用

體積穩定性一直是轉爐石資源化作為水泥系複合材料最大的問題，經相關研究發現無機聚合技術係一兼具安定化與資源化轉爐石的新技術^[6]。本應用期望透過冷壓技術^[7]資源化無機聚合轉爐石砂漿作為高壓地磚，其配比係採用上述推演後的緻密配比邏輯所設計，選用參數為：水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 5：5；鹼液濃度 4 M、6 M、8 M、12 M、（ $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.28$ ； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 50$ ）、液灰比（L/S）= 0.45、0.50、0.55、0.60、0.65，進行配比設計，如表 2 所示。其中轉爐石細粒料使用率可達 75% 以上；若依據綠建材評定基準中高壓混凝土地磚之規定，則冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚組成原料中：轉爐石細粒料、水淬高爐石粉、F 類燃煤飛灰等資源再生材料使用率達 99% 以上，不僅可有效資源化轉爐石細粒料，亦可增加資源再生材料之使用率，有效增加轉爐石細粒料資源化之多樣性，並提供戶外空間使用再生綠建材之選擇性，亦可提高轉爐石細粒料經濟價值，符合再生綠建材的精神。

表 2 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚配比

鹼液濃度	漿量 n	液灰比 L/S	灰砂比	配 比 (kg/m ³)			
				Slag	Fly ash	BOF 細粒料	抗裂粉體
12 M	1.00	0.45	1：4.215	238.41 (9.53)	238.41 (9.53)	2010.00 (80.37)	14.00 (0.56)
12 M	1.00	0.55	1：4.628	217.13 (8.83)	217.13 (8.83)	2010.00 (81.76)	14.00 (0.57)
12 M	1.00	0.65	1：5.042	199.34 (8.23)	199.34 (8.23)	2010.00 (82.97)	14.00 (0.58)
12 M	1.05	0.50	1：4.094	238.64 (9.76)	238.64 (9.76)	1954.14 (79.91)	14.00 (0.57)
12 M	1.05	0.60	1：4.477	218.25 (9.08)	218.25 (9.08)	1954.14 (81.27)	14.00 (0.58)
12 M	1.10	0.50	1：3.797	250.00 (10.36)	250.00 (10.36)	1898.28 (78.69)	14.00 (0.58)
12 M	1.10	0.60	1：4.151	228.65 (9.65)	228.65 (9.65)	1898.28 (80.11)	14.00 (0.59)
12 M	1.20	0.50	1：3.275	272.73 (11.63)	272.73 (11.63)	1786.56 (76.15)	14.00 (0.60)
12 M	1.20	0.60	1：3.581	249.43 (10.85)	249.43 (10.85)	1786.56 (77.70)	14.00 (0.61)
4 M	1.20	0.50	1：3.447	259.17 (11.18)	259.17 (11.18)	1786.56 (77.04)	14.00 (0.60)
6 M	1.20	0.50	1：3.394	263.20 (11.31)	263.20 (11.31)	1786.56 (76.78)	14.00 (0.60)
8 M	1.20	0.50	1：3.356	266.14 (11.41)	266.14 (11.41)	1786.56 (76.58)	14.00 (0.60)

由於無機聚合材料中，並未直接使用水，而是使用漿量（ n 值）與液灰比來控制工作性，因此先選用水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 5：5；鹼液濃度 12 M、液灰比（L/S）= 0.45、0.50、0.55、0.60、0.65 等 9 組配比（詳表 2 中鹼液濃度 12 M 之配比），進行冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓，另由於轉爐石細粒料中仍含有粒徑較大的顆粒（No.4、No.8、No.16 號篩），故採用 35 MPa 的成型應力。試驗結果顯示，9 組配比均可成功製作冷壓型高壓地磚，如圖 2 所示。

其中漿量 1.00 n ，液灰比 0.45 的配比太乾，組成材料間黏結力較不足，導致高壓地磚退模時容易缺角（見圖 3 (a)）；而漿量 1.20 n ，液灰比 0.60 的配比太濕，於加壓成型過程容易產生壓密排水現象，且高壓地磚表面的細顆粒材料，容易因壓密排水現象而沾黏在模具上，導致高壓地磚表面平整性不佳（見圖 3 (b)）。

根據冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓結果，並於齡期 6 天時，進行配比漿量 1.10 n ，液灰比 0.5 高壓磚抗壓強度試驗，試驗結果高達 88.1 MPa，遠大於 CNS 13295 — 「高壓混凝土地磚」中 A 級抗壓強度之要求（抗壓強度平均值應在 65 MPa 以上，且不得有任何一試樣測試值低於 59 MPa）。決定調降鹼液濃度，再考量轉爐石細粒料體積穩定性，故選定配比參數為：漿量 $n = 1.20$ ；水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 5：5；鹼液濃度 4 M、6 M、8 M；液灰比（L/S）= 0.50（詳表 2），進行冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚製作（見圖 4），並進行相關性能測試。

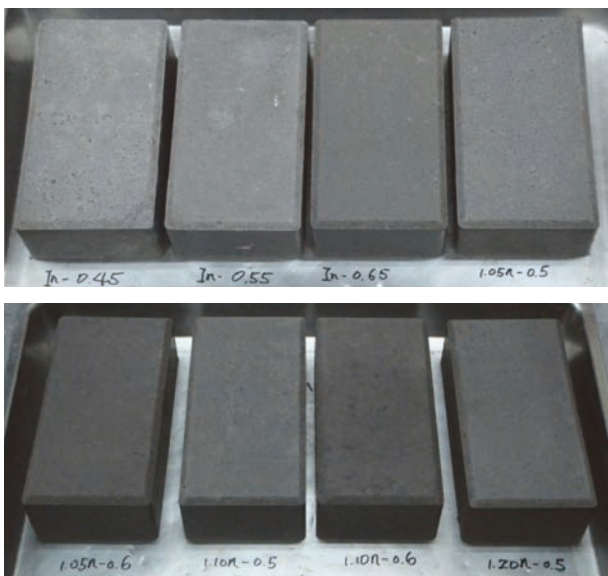
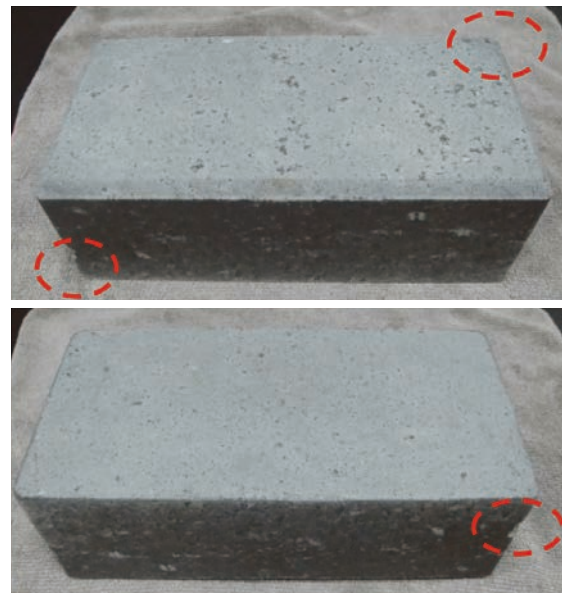
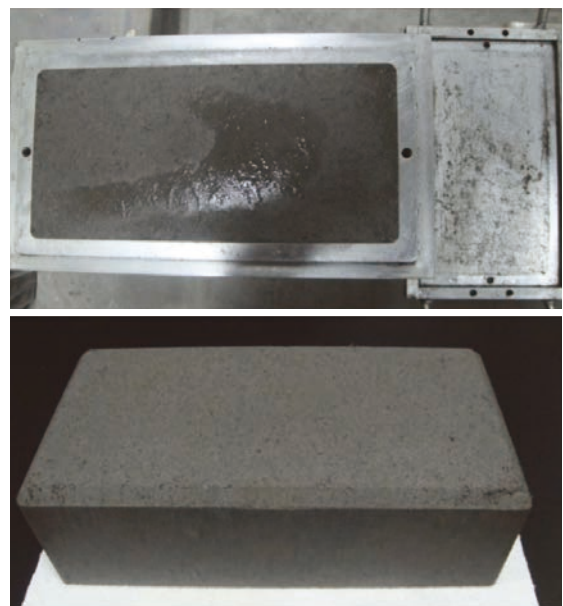


圖 2 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓結果-1

經相關性能測試結果顯示，採用鹼液濃度 6 M、8 M 的冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚，製作完成靜置 24 小時後的抗壓強度，即可符合 CNS 13295 — 「高壓混凝土地磚」中 B 級抗壓強度之要求，齡期 3 天時，即可達 A 級抗壓強度之要求；鹼液濃度 4 M 的冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚，齡期 1 天的抗壓強度，即可符合 C 級抗壓強度之要求，齡期 3 天時，可符合 B 級抗壓強度之要求，齡期 7 天時，亦可達 A 級抗壓強度之要求，如圖 5 所示。耐磨性亦均符合 CNS 13295 — 「高壓混凝土地磚」耐磨性之規定（見表 3），此結果亦印證無機聚合材料具備早強、高耐磨等特性。再



(a) 配比漿量 1.00 n ，液灰比 0.45



(b) 配比漿量 1.20 n ，液灰比 0.60

圖 3 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓結果-2



圖 4 不同鹼液濃度冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚成品

經超音波波速量測、熱壓膨脹試驗，及浸水體積穩定性觀測與長期觀測（截至目前已逾 2 年），均顯示冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚具有良好的體積穩定性；且冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚亦具備低熱傳導率與遠紅外線特性，未來可將其資源化成為更高值化的產品。

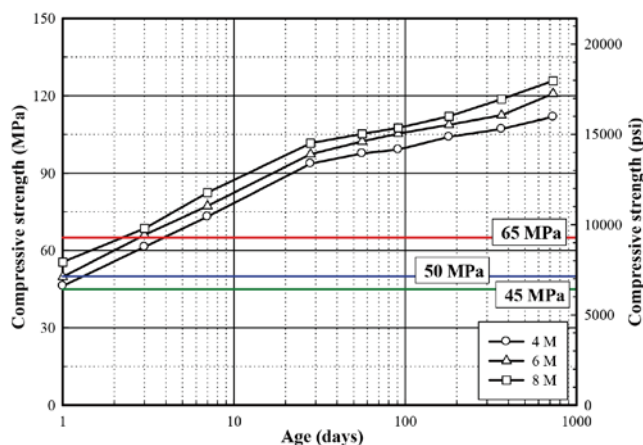


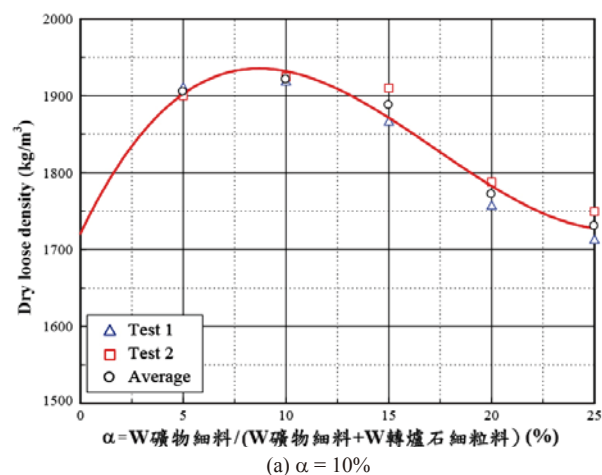
圖 5 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚抗壓強度成長關係

表 3 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚耐磨性試驗結果

	4 M	6 M	8 M	CNS 13295 規範值
厚度磨耗平均值 (mm)	2.13	2.44	1.88	≤ 3.00
磨耗體積損失 $Ac (cm^3/50 cm^2)$	10.67	12.22	9.40	≤ 15.00

爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土於人形砌塊之應用

爐石類副產物係指乾式製程的脫硫石礦物細料、轉爐石細粒料，及氣冷高爐石（粗粒料），首先根據爐石類副產物顆粒大小進行填塞堆積試驗，以求得骨材系統最大單位重，進而計算出骨材系統之最小空隙 (V_v)。其中先利用乾式製程的脫硫石礦物細料填塞轉爐石細粒料，求得最大單位重之填塞比例 (α) = 10%，脫硫石礦物細料與轉爐石細粒料再以此混合比例填塞氣冷高爐石，求得最大單位重之填塞比例 (β) = 60%，如圖 6 所示。採用上述推演後的緻密配比邏輯設計爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土配比，選用參數為：水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 4：6；鹼液濃度 10M ($SiO_2/Na_2O = 1.28$; $SiO_2/Al_2O_3 = 50$)、乾式製程的脫硫石礦物細料含水率 = 25.0 %、轉爐石細粒料含水率 = 7.50、8.75、10.00 %、未經含水率調整前液灰比 (L/S) = 0.575，爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土配比，如表 4 所示。



(a) $\alpha = 10\%$

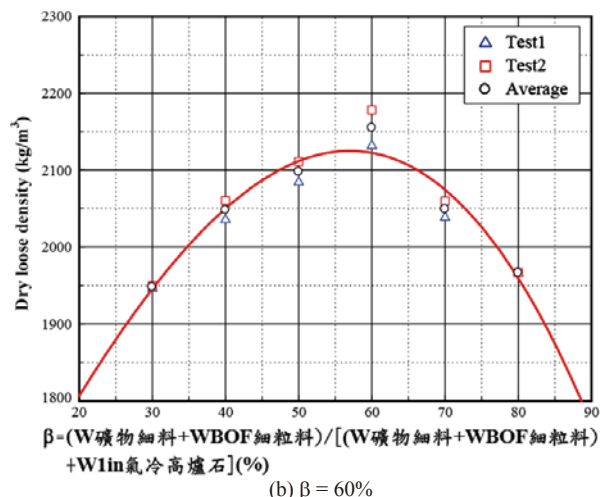


圖 6 爐石類副產物填塞堆積試驗結果

表 4 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土配比

配比 編號	配比 (kg/m ³)					
	液灰比 L/S	Slag + Fly ash	1in 氣冷高爐石 (OD)	礦物細料 (OD)	BOF 細粒料 (OD)	BOF 細粒料 含水率
ASB_7.50	0.556	374.68	784.40	65.01	1,058.93	7.50 %
ASB_8.75	0.544	374.68	784.40	65.01	1,058.93	8.75 %
ASB_10.00	0.527	374.68	784.40	65.01	1,058.93	10.00 %

本應用旨在透過自走式造塊機，將爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土資源化作為可滿足現地使用性能需求的人形砌塊，因此配比設計完成後，先於實驗室根據自走式造塊機製程，採用模擬造塊機的自製模具，配合震動台製程進行試拌與試壓，試驗結果如圖 7 所示。

配比經試拌與試壓確認後，製作所有相關性質試驗所需試體，並進行相關性能測試。結果顯示，爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土抗壓強度均隨齡期持

續成長，且可滿足設計需求，如圖 8 所示。再經超音波波速量測、乾縮性質量測、熱壓膨脹試驗（見圖 9），及浸水體積穩定性觀測，均顯示爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土具有良好的體積穩定性。

爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土於實驗室進行試拌與試壓，及相關性能測試完成後，於 109 年 2 月 13 日經相關性能評估與成本考量，選用表 4 中 ASB_8.75 配比，進行實廠廠拌與採用自走式造塊機壓製爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土人形砌塊試驗，試驗結果如圖 10 所示。圖中顯示採用上述推演後的緻密配比邏輯所設計之爐石 / 飛灰基無機聚合

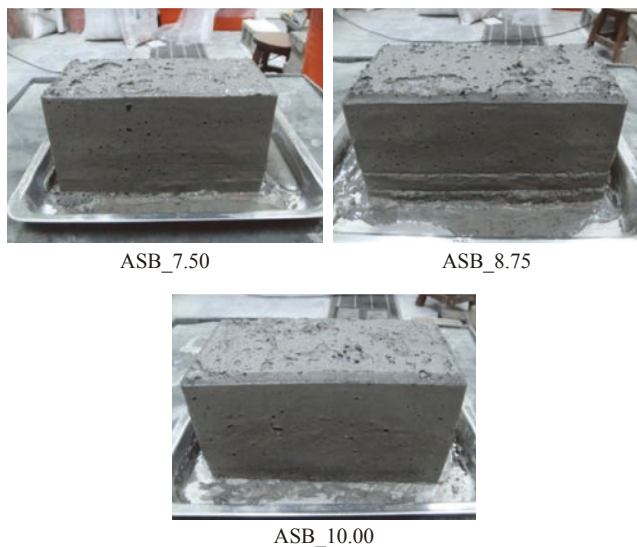


圖 7 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土實驗室試壓結果

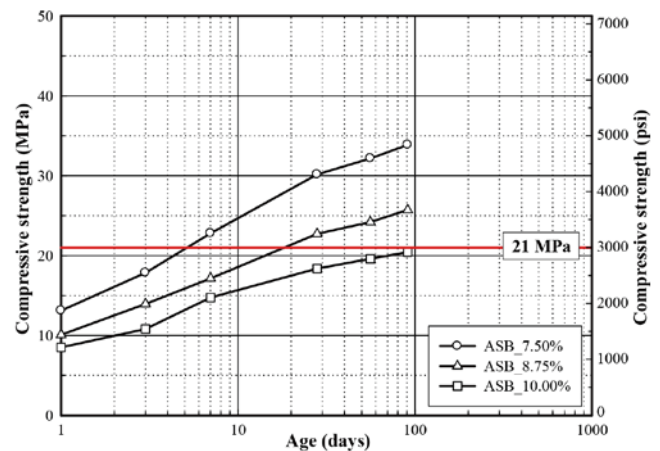


圖 8 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土抗壓強度成長關係

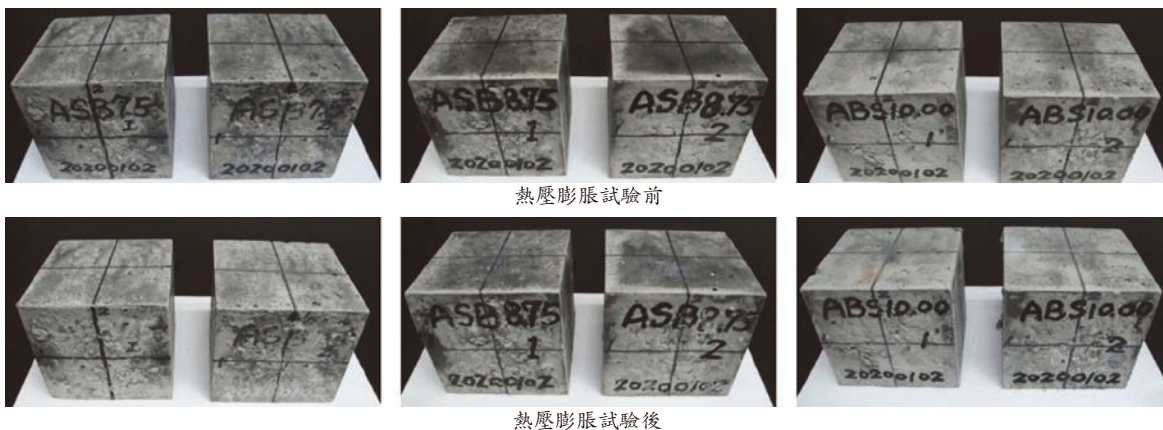


圖 9 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土熱壓膨脹試驗結果



圖 10 實廠壓製之爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土人形砌塊

爐石類副產物混凝土，可透過自走式造塊機成功壓製人形砌塊。並製作試體，於齡期 28 天時進行熱壓膨脹試驗，試驗結果顯示爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土具備良好的體積穩定性（見圖 11）。



圖 11 實廠壓製之爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土熱壓膨脹試驗結果

結語

緻密配比邏輯係根據水泥系複合材料所發展，根據組成材料再演繹後的緻密配比邏輯，亦可適用於無機聚合材料的配比設計，雖然本文所舉二個應用實例，均屬零坍度的無機聚合材料（砂漿或混凝土），使用者可經由漿量（ n 值）、液灰比（ λ ），及 F 類燃煤飛灰與水淬高爐石粉之使用比例（ θ ）來進行配比調整，調整後之無機聚合砂漿或混凝土的工作性亦可達到高坍度（ 200 ± 25 mm），甚至自充填砂漿（SCM）或自充填混凝土（SCC）的標準^[8]。經實驗室試拌與實廠廠拌驗證後發現，採用再演繹後的緻密配比邏輯所設計之無機聚合材料配比，經實驗室試拌確認後，若實廠廠拌或量產時，組成原料有變化，可根據體積法進行配比修正調整之。本文根據緻密配比邏輯，推演一適合

無機聚合材料配比設計方法，惟無機聚合材料組成原料相當多元，使用者可以根據所採用的組成材料，依據本文所提出之配比設計邏輯進行推演並計算，再經體積驗算與試拌確認後使用之。

致謝

本文有幸獲得科技部 - 「轉爐石安定化新技術及其高值化循環製程開發 (1/2)」MOST 106-3114-E-027-001，「轉爐石安定化新技術及其高值化循環製程開發 (2/2)」MOST 107-2218-E-027-006，及中聯資源股份有限公司經費支持，方使本研究得以順利完成，謹此致謝。

參考文獻

1. Xu, H., Van Deventer, J.S.J. (2000), "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals." International Journal Minerals Process, Vol. 59, pp. 247-266.
2. Schmücker, M. and Mackenzie, K.J.D. (2005), "Microstructure of sodium polysialatesiloxo geopolymer." Ceramics International, Vol. 31, pp. 433-437.
3. Hajimohammadi, A., Provis, J.L., and Van Deventer, J.S.J. (2008), "One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate." Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 47, pp. 9396-9405.
4. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，台北，2002。
5. 蔡志達（黃兆龍指導），「水泥系複合材料緻密配比邏輯再演繹及其應用之研究」，博士論文，國立台灣科技大學營建工程系，台北，2005。
6. 鄭大偉、李韋峰、林冠宇、蔡志達、吳佳正、張祖恩、林凱隆、陳貞光（2018），「煉鋼轉爐石之無機聚合安定化技術開發」，鑛冶，第 62 卷，第 4 期，第 52-69 頁。
7. Tsai, C.T. (2012), "Sintering of Ceramics - New Emerging Techniques: Chapter 5 Cold-Bonding Technique - A New Approach to Recycle Innocuous Construction Residual Soil, Sludge, and Sediment as Coarse Aggregates." Editor: Arunachalam Lakshmanan by InTech, ISBN 978-953-51-0017-1, Rijeka, Croatia.
8. 鄭大偉（2017），「低碳排放之無機聚合綠色水泥及混凝土製備研究 (2/4)」期末報告，經濟部礦務局 106 年度委辦計畫，台北。



近年世界重大天然災害的回顧與省思

陳禮仁／國立成功大學防災研究中心 技術顧問、中華防災學刊 執行編輯

全球暖化、氣候變遷呈現多樣化，天氣型態在頻率與程度上也出現區域性變化，極端天氣事件會嚴重破壞建築物和公共設施，同時也會嚴重破壞農作物收成。全球天然災害造成的總體經濟損失也逐步增加。每次災害皆帶來巨大傷亡與損失，對於經濟復甦與糧食短缺問題都造成重大衝擊，人類的無奈與失落彷彿世界末日的降臨，驚慌恐懼與束手無策呈現在每一場天災災民的臉上。

根據近 20 年之統計，全球共有約 123 萬人死於天然災害，每年平均有 6 萬人。總死亡人數中地震有 720,221 人、占 63%，極端氣候 363,682 人（占 24%）、洪水 104,707 人（占 11%）、崩塌 17,947 人（占 2%）（圖 1）^[1]。地震可以奪走很多人的生命，地球上每日都有可能發生地震，美國地質調查所（USGS）有全球即時的地震追蹤與報導。從歷史角度看，洪水、乾旱及流行病是死亡最多的原因。但，時至今日，地震及

其引起之海嘯卻是每年死亡最高之災害事件。

回顧十年來，超級風暴、山火、疾病暴發和巨型地震給整個星球造成了難以想像的損失，問題的範圍很容易使您不知所措。但是，每一次學習每次災難的教訓都很重要。每次事件，世界都可以從過去的經驗中汲取教訓，避免過去的錯誤，從而做出更有效的反應。隨著極端天氣的惡化，人們對災難範圍和後果的理解也會不斷精進。

2000~2019 天然災害分項死亡人數統計圖

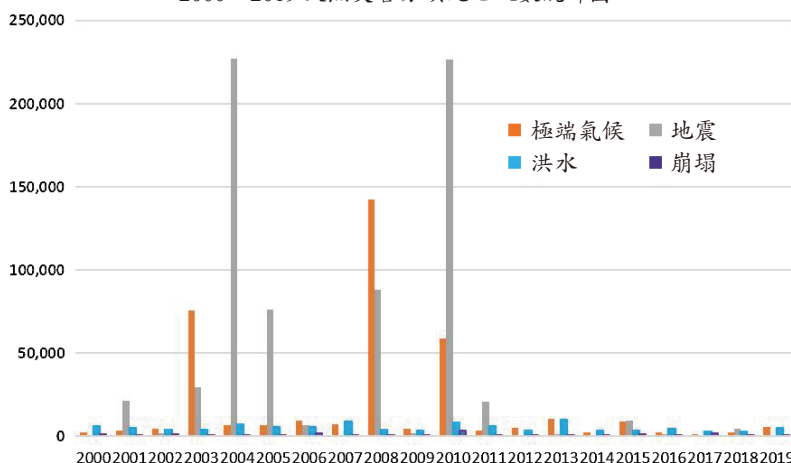
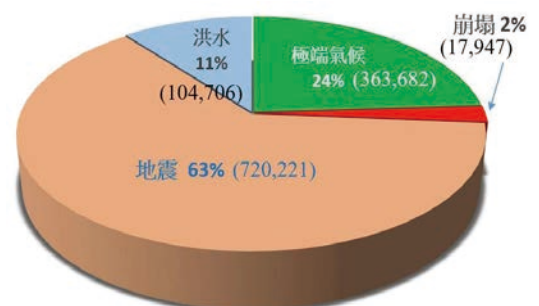


圖 1 2000~2019 年天然災害分項死亡人數統計圖及占比圖



根據一個非營利組織 Direct Relief 所編制之一份清單，列出了過去十年中改變世界的十種災難^[2]。這不是一個全面的清單，這些危機不一定具有最快的風速或最高的死亡人數。相反的，這些事件對世界其他地區產生了深遠的影響，挑戰了人們對災難的認知、災難可能造成的破壞以及如何以更好的視野，認識和尊重來應對事件的發生。

德國看守協會（Germanwatch）發表的 2019「全球氣候風險指數」（Global Climate Risk index, CRI）報告中^[3]，台灣 2017 年排名第 90 名，1998 至 2017 年間的全球平均排名則為第 42 名。但，要記得 2005 年世界銀行（World Bank）的全球天然災害熱點報告中，台灣同時暴露於三項以上天然災害（颱風、洪水、地震）之土地面積與面臨災害威脅之人口均為 73%，高居世界第一，兩種災害則為 99%^[4]。天然災害對於台灣的威脅仍不可輕忽，在此僅就 Direct Relief 所提列之重大災難摘出，也做一些檢討，希望能從慘痛的經驗中萃取防治之良方。

2010 年海地地震

事件概述

受到反聖嬰現象（La Niña）及氣候變化產生之負北極振盪（Arctic Oscillation, AO）影響，2010 年全球天然災害層出不窮，共發生 950 件天然災害，造成約 295,000 人死亡、經濟損失達 1,300 億美金，其中人員死亡比過去 40 年間遭受恐怖分子殺戮的總數還多。天然災害中，以地震為數十年來傷亡最慘重的一年，全年有 20 次規模大於或等於芮氏規模 7 之地震，是 1970 年以來大地震最多的一年。海地太子港地震就是受害最大之地震。

1 月 12 日星期二，當地時間下午 4 時 53 分 9 秒，海地發生 200 年以來最強烈的地震，規模 7.0 M，深度 10 km，震央在離海地首都太子港（Port-au-Prince）西南方 15 km 處，死亡人數約 23 ~ 31 萬人，受影響人數 300 萬人，災損達 80 億美元^[5]（圖 2）。根據美國地質調查所（USGS）發表說明，海地地震係受加勒比海板塊（Caribbean plate）與北美洲板塊（North America plate）擠壓而成。聯合國世界糧食計劃署（World Food

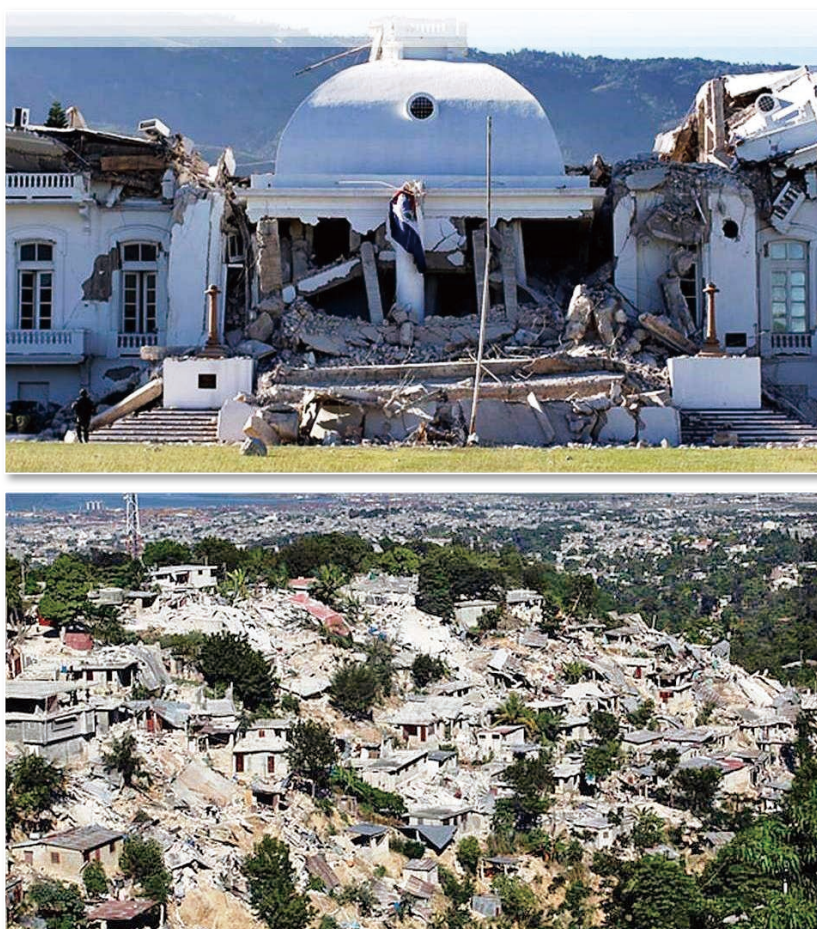


圖 2 海地地震震垮總統府（上）及震後殘破家園（Source：世界展望會）

Programme, WFP) 發言人拜爾斯 (Byers) 說：「這是一場歷史性的大災難，聯合國 1945 年創立以來，我們還從未遇到過破壞力如此強大的自然災害」。

省思

在規模 7.0 地震之前，政治衝突和動蕩的經濟已經使 70% 以上的海地人陷入貧困，這種不穩定的局面一直持續到今天。基礎設施薄弱，許多人住在棚戶區。但是地震的影響很難理解。超過 23 萬人被殺害 – 占人口的百分之二或更多，150 萬人流離失所。儘管最初的動盪是巨大的，但地震也揭示了國際援助努力中的斷層線。從海地消滅霍亂已有幾十年了，支援地震的聯合國維和人員卻帶來了一種新的疾病。

最近的一項研究發現，維和人員還生下了數百名兒童，有時還遭受性虐待。治療地震受害者的外國醫生被指控進行不必要的截肢和其他有問題的治療。在某種程度上，為應對災害，世衛組織 (WHO) 製定了新程序，以對要提供人道主義援助的醫療隊進行預先審查和批准。這是貧窮國家百姓的悲歌。

2011 年日本東北地方太平洋沖地震、福島第一核電廠災害

事件概述

2011 年全球共發生 820 件天然災害，超過 30,000 人死於天然災害，經濟損失有 3,500 億美元。「東日本大震災」是當年之最重大災害。

3 月 11 日 14 時 46 分 18 秒 (當地時間) 日本發生規模 9.0 大型逆衝區地震，震央在日本牡鹿半島東南東 130 公里太平洋近海三陸沖海域，距東京約 373 公里。地震深度 24.4 公里，震央區域長達 500 公里、寬約 200 公里，伴隨地震而來之海嘯、火災及不斷餘震造成重大傷亡，加上核電廠輻射外洩，導致全國地方性的地方機能癱瘓和經濟活動停止，損失慘重。共造成 19,729 人死亡、2,559 人失蹤、6,233 人受傷 (日本內閣府 2020/3 資料)。死亡原因大部分為海嘯溺水 (圖 3) 而死占 92.5%，其他為地震造成壓死、火災燒死 (圖 4)。總計經濟損失達 2,000 ~ 3,000 億美元 (16 ~ 24 兆日圓)；保險理賠約 500 億美元^[6]。儘管估計的死亡人數不盡相同，但在一個有財富和基礎設施發達的國家，多達近 20,000 人喪生的數字讓人覺得不可思議。

日本氣象廳於 14 時 49 分，針對岩手、宮城、福島等縣沿海地區發布「大海嘯警報」，對其它太平洋側之沿岸分別發布「海嘯警報」及「海嘯注意報」。海嘯造成青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉等 6 縣 62 市町村廣達 561 平方公里面積淹水 (圖 5)，也造成東北地方太平洋側之海岸線部分地盤下陷。根據氣象廳觀測結果，其中福島縣相馬市海嘯浪高達 9.3 公尺以上，而事件過後之現地調查則發現有海嘯痕跡達 16.7 公尺者。另調查發現海嘯浪波進入陸地後會向上攀升，岩手縣宮古市重茂姉吉地區竟攀升達 40.5 公尺^[6]。

日本東北大學今村文彥教授依據 NHK 拍攝宮城縣仙台市之海嘯影像分析結果，海岸沿岸至內陸 1 公里



圖 3 宮古市海嘯侵襲剎那景象 3/11/15:21 (Jiji Press)



圖 4 岩手縣山田町因地震引發火災 (AP)



圖 5 宮城縣南三陸町受災景象（每日新聞）

處之海嘯速度為每秒 6 公尺、時速約 20 公里，進入陸地受到堤防或逆流影響，速度會加倍。以岩手縣之北上川為例，海嘯可從海口往上朔流至 50 公里遠處，威力相當驚人。

14:46 地震發生後，日本東部沿海 10 部核電機組立即自動停機：包括福島一廠 3 部、福島二廠 4 部、女川廠 3 部（圖 6）。16:00 核能及公安署啟動緊急應變總部；17:00 日首相宣告核安緊急狀態；21:23 發出福島一廠 3 公里內的疏散命令，10 公里內在家等候通知。

事件後第 8 天（3/18），因福島一廠 3 號機使用含高毒性鈾的 MOX 燃料，故考慮混凝土灌漿封掉 3 號機（墓封），其他機組則以降溫為考量（圖 7）。此日美國援助抽水馬達送到日本；下午自衛隊與消防隊輪番上陣對 1、3 號機空中灑水；傍晚 18:40 國際原子能總署調升至國

際 INES-5 級核安事件，已趕上了美國三哩島事件（Three Mile Island accident），車諾比（Chernobyl disaster）則為最高的 7 級（本節摘自日本原子力災害對策本部公布資料）。

省思

「全世界見證了日本東北大地震帶來的驚懼與破壞。而日本人民遭遇災難時展現的堅毅、氣度與同情心，也教世人動容。」讀者文摘 2011 年七月號「走過浩劫的日本」乙文中是這樣描述的。大震災後日本人呈現的堅強與韌性、冷靜與沉著、忍讓與愛心，有太多言語無法形容的感人故事，處處散發著人性的光輝。同樣身處天然災害頻傳的台灣同胞，該有學習借鏡的地方，「東日本大震災報導^[6]」文中曾藉機會整理一些看法，在此謹摘錄下列數則以為參考省思。



圖 6 福島核電廠與震央相對位置圖（USGS 資料製作）

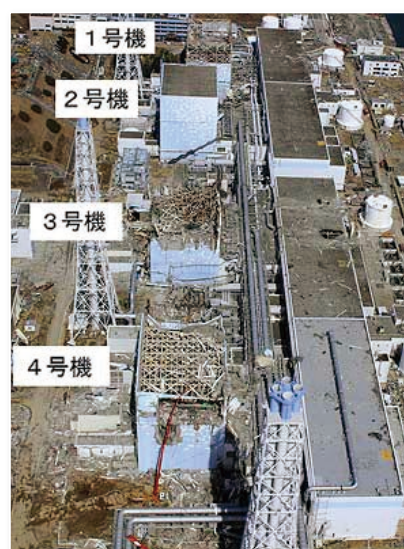


圖 7 福島核 1 廠受損情形（東京電力）

公部門作為

- 日本政府於3月13日公布「嚴重災害對應之特別財政援助相關法令」，分別針對公共土木設施災害復舊、農地復舊、水產動植物之養殖設施復舊等事業之特別財政援助以及私立學校設施災害復舊事業補助、受災者公營住宅建設事業等計18項措施。
- 災後中央政府隨即成立「中央防災會議及專門調查會」，由內閣總理大臣任召集人，委員包括防災擔當大臣在內之17位內閣官員、指定公共機關首長4位－日本銀行總裁、紅十字會會長、NHK會長、NTT社長、學識經驗者4位－東京大學教授、新潟大學教授、全國縣長聯合會災害對策委員長及日本消防協會。
- 提供災民生活重建補助津貼，每戶130萬日圓，最高300萬。本生活津貼補助朝手續簡化、金額增加、擴大補助對象等原則實施（註：日本無天然災害賠償項目）。
- 政黨間摒除私利，共同研擬救災對策，此刻反對黨（在野黨）皆靜默無聲，絕不乘火打劫、謾罵批評。
- 災區縣市銀行開設臨時專櫃，災民憑身分確認即可領取10萬日圓應急。

人民的行為

- 百姓守法重紀，即使重災區也鮮少有搶、偷不法情事。
- 市區大塞車，沒有駕駛按喇叭；電力中斷，電車停在兩站間，乘客下車默默沿著鐵軌走路回家，沒有半句怨言。
- 災民排隊領食物，不爭吵、不插隊，井然有序，即使只有飯糰和水，仍懷著感恩的心。
- 排隊加油，小客車每輛一次限制加油10公升，民眾也都嚴守規定，淡然接受。

媒體的作法

- 面對如此大的災難，新聞裡面所以沒有災民呼天喊地的畫面，沒有讓觀眾陷入焦慮，更不會加深所謂的「創傷症候群」。
- 專業素質、敬業精神，不煽動、不驕情、不造謠、不謾罵、不加油添醋，也不扭曲事實。
- 加重播報災區氣象及預報次日氣溫、降雨資訊，提供救災作業及災民生活參考。

- 持續關注災區重建工作，專題報導各行業從廢墟中站起來之感人故事，有激化民心、鼓勵災民士氣之正面作用。
- 與各縣市災害應變中心連線，24小時報導災區現況，每小時統計傷亡人數，公布傷亡名單。
- 提供飲用水供應之地點（大部分在各區小學校），讓災民方便就近取用。

未來課題

人類無法避免天然災害之蹂躪，惟有作好防救災準備，方能減少災害之損失與傷亡。所謂「勿恃災之不來、正恃吾有以待之」，事前預防總比事後救災有用。大規模複合型災害將持續不斷侵襲地球，謹就日本311大地震及海嘯所遭遇的問題提出幾點看法，是吾人必須面對、也急需正視的課題。

- 如何提升防災基礎教育，包括學校紮根、社會共識及居民認知。
- 大量災民（超過10萬）時疏散避難路線之規劃、交通運輸、場所安全與布置、物資備存、長期收容、保暖毛毯、衛生設備、學生上課、就業輔導、生活起居等等，政府與民間有否能力應變。
- 災區維生系統之運作，包括電力、電訊、公共用水、飲用水、交通體系、汙水廢棄物處理、廁所興建等事務；此外死亡喪葬、屍袋備用、傷患醫療、失親照料、失蹤搜尋、傷亡補助、生活津貼、弱勢照顧、親友聯繫、心理諮商等亦是關鍵課題。
- 國際救援之取捨、人員及救難犬之通關安排、救災地點之協調導航、陪同翻譯與事務人員之培訓遴選、車輛運輸之協助、黃金救難時間之掌控、統一指揮調度機構、需要支援之物資、機具數量等等皆是大型災害會遇到之問題，平時要有充分準備，災時才能應付自如。
- 臨時組合屋與永久住屋之地點規劃、興建模式、建坪大小、住戶條件、公共設施配套、就業輔導、傳統文化考量、孩童教育、弱勢家族輔導等等之思維。
- 縣市、鄉鎮區公所防救災人員組織編制、訓練，務必檢驗落實。地方與中央聯繫、協調是否順暢，地方權限與職掌是否清楚明確，充分的執行力、明快的判斷與效率的指揮等皆是檢核地方政府能力的參考依據。

- 各縣市、鄉鎮區的防災地圖是否完成，防災資訊是否完整傳達給居民，防災疏散避難演練是否落實，警戒避難基準值是否有效更新，雨量預報準確度與警報預警機制是否提升，防救災體系與指揮調度是否靈活實用等等仍須再度一一檢驗落實。

2012 年美國桑迪颶風

事件概述

2012 年全球共發生 920 件天然災害，超過 20,000 人死於天然災害，經濟損失有 1,730 億美元。較重大災損事件有 28 件，其中美國桑迪（Sandy）颶風災害最大，從加勒比海（Caribbean Sea）地區到美國東海岸各州，造成巨大災損。

10月22日加勒比海西方有一股熱帶氣流，強度快速成長6小時後形成熱帶風暴桑迪（Sandy），隨後向北緩慢行進直撲安的列斯群島（the Greater Antilles）且威力逐漸增強。24日終於轉為颶風，並在牙買加

(Jamaica) 的金斯頓 (Kingston) 登陸, 25 日襲擊古巴 (Cuba), 隨後減弱成 1 級颶風 (風速 74 ~ 95 mph), 29 日一早突轉北北西方向行進, 襲擊美東海岸城市紐約、華盛頓, 登陸後轉成熱帶氣旋前進 (圖 8)。「桑迪」最大風速為 175 km/h, 近中心最低氣壓 940 毫巴 (hPa); 共造成 253 人死亡 (其中美國有 131 人)、15 人失蹤, 災損高達 656 億美元, 另古巴有 132,733 棟房子受損, 其中 15,322 棟全毀; 美國紐約超過 200 萬人沒有電力可用, 而影響人數可能達 848 萬人; 海地有 20 萬人無家可歸^[7] (圖 8、圖 9)。

省思

本次桑迪颶風侵襲美東，紐約地區 3 日累積降雨在 50 毫米以下，降雨並非災害主因，主要危害來自颶風（暴風半徑達 790 Km）引起的暴潮與長浪侵襲海岸地區，暴潮迫使海水水位抬升，再加上長浪影響，使得海水溢淹沿海重要城市^[8]。



圖 8 桑迪颶風行進路線示意圖 (Adapted from: NASA 及 RIA-Novosti); 新澤西州水災 (右/AP)

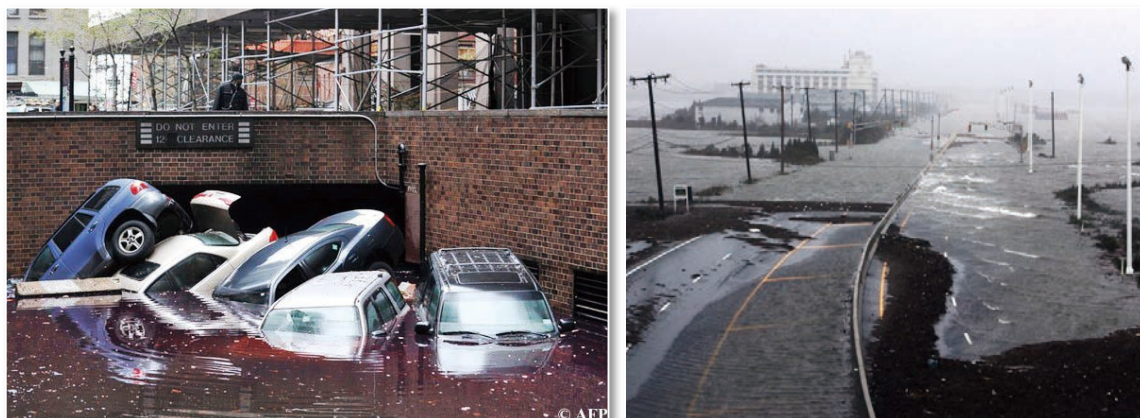


圖 9 桑迪颶風造成紐約災情(左/AFP)及亞特蘭大水患(右/Reuters)

預期為 1 級暴風雨會迅速演變為有記錄以來的最大颶風，在撞向美國東部沿海地區之前，在加勒比海造成了廣泛破壞，使新澤西州和紐約等大片地區（包括紐約市）停止運作。人們連續數天斷電，許多人被困在高層建築中，無法撤離或採購物資。僅在美國，就有 100 多人死亡，其中許多是由於暴露在外或相關狀況造成的。該事件挑戰了許多美國人的安全感，看似無敵亦是世界媒體中心的紐約市受到狂熱媒體前所未有的關注。

半年後（2013 年 6 月）當時的紐約市 Michael Bloomberg 市長，宣布推出將耗資 200 億美元之全市性重建與氣候回復力策略計畫，以確保紐約市五個行政區未來不再遭受氣候相關衝擊^[9]。這項計畫主要涵蓋修改建築規範、補強海灘、設計與研究建造海堤與濕地，以防止未來海平面上升與更強大沿海風暴的損害。

根據商業內幕（Business Insider）報導^[10]，紐約市住宅與都市發展局（Housing and Urban Development, HUD）於 2013 年推出一個讓紐約更能抵禦洪水與未來風暴的方案，名叫「設計重建（Rebuild By Design）」標案，其中獲獎之一的 BIG U 計畫，由比亞克·因格爾斯集團（Bjarke Ingels Group, BIG）設計，目標在沿著曼哈頓（Manhattan）南端蓋一座巨大屏障，包括一系列堤防、防洪牆及多用途公園。BIG U 包含二部分，其一是東區沿海防災計畫（East Side Coastal Resiliency Project, ESCR），其二是曼哈頓下城彈性計畫（Lower Manhattan Resiliency Project, LMR）。2018 年 3 月，ESCR 計畫遭到曼哈頓社區委員會（Manhattan's Community Board）3 次投票反對，理由是 ESCR 計畫不只是一要防止曼哈頓低窪地區，而且還要充實東河沿岸現有的公園空間設施，如自行車道及慢跑小徑。

有些城市說 BIG U 不足以長期抗拒洪水，該計畫只是設計保護 100 年一遇的洪水（即任何一年發生機率為 1%），也有聲音說 BIG U 的昂貴成本及複雜程度會阻礙建設。ESCR 計畫紐約市已列 4 億美金專款，中央政府也已核撥 5.11 億美金。該計畫預定將從 2019 年春天開始進行，於 2024 年底結束。但，LMR 計畫仍在設計階段。

BIG U 首席設計師 Jeremy Siegel 暗示有一道障礙，那就是川普（Trump）總統不願支助此讓紐約市更韌性、更適應氣候變遷的計畫。事隔 8 年後之今日可以回頭去檢視計畫之正確性與執行率，也可考驗紐約

市政府官員對氣候風險之認知與重視，畢竟「桑迪」的颶風強度歸類為 3 級，但是如果現今發生 4 級或 5 級的超級颶風來襲，紐約市的因應能力是否已經完成因應準備工作，答案有待考驗。

2013 年海燕颱風

事件概述

2013 年全球共發生 880 件天然災害，超過 30,000 人死於天然災害，經濟損失有 1,250 億美元。其中海燕颱風為 2013 年最嚴重之天然災害。

海燕颱風（Typhoon Haiyan，編號 1330），其中心最低氣壓為 895 毫巴（hPa），最大風速達 315 km/h（1 分鐘平均風力），11 月之海燕颱風，狂風暴雨襲擊菲律賓造成 5,533 人死亡、1,757 人失蹤，有 26,136 人受傷，災損 5 億 6,100 餘萬美元（圖 11 和圖 12）。

2013 年 11 月 2 日，一個熱帶擾動在馬紹爾群島西南部海面上生成。6 日上午 2 時 45 分升格為颱風，下午 11 時，聯合颱風警報中心（JTWC）將其升格為五級颱風。8 日在菲律賓雷伊泰省（Leyte）杜拉格沿海登陸，襲擊菲國東部及中部地區，颱風帶來之強風豪雨引發嚴重災害。11 日上午 2 時 50 分，轉為強烈熱帶風暴，並於越南（Vietnam）廣寧省下龍市一帶沿海登陸，最後往中國廣西省轉為熱帶性低氣壓（圖 10）。

菲國官方估計海燕颱風影響人數達 1,300 萬人，有 400 萬人必須撤離家園，其中 392,470 人住進 1,587 處避難所。社福及開發局（Department of Social Welfare and Development, DSWD）統計有 518,138 棟房屋全毀，552,731 棟受損，另有 628 所學校受損，893 所學



圖 10 海燕颱風路徑示意圖



圖 11 菲律賓莎瑪省 (Samar) 受災景象 (Reuters)



圖 12 菲律賓迪灣 (Guiuan) 市受災景象 (Reuters)

校作為避難所。官方指出有 320 萬婦女及 460 萬兒童需要照顧與保護，以防暴力、販賣與剝削^[11]。

根據中國大陸官方 12 日發布消息表示，海燕颱風造成海南、廣西、廣東 3 省區 313.3 萬人受災，7 人死亡，4 人失蹤，18.2 萬人緊急轉移安置。另有 900 餘間房屋倒塌，8,500 餘間不同程度損壞；農作物受災面積 29 萬 5 千餘公頃；直接經濟損失 44.7 億元人民幣。

省思

聯合颱風警報中心評定其接近中心最高持續風速為 315 公里/時 (1-minute sustained)，繼全球有記錄以來風速最高的 1961 年 9 月南施 (Nancy) 颱風 (345 公里/時) 及 1979 年 10 月狄普 (Tip) 颱風 (305 公里/時) 後，34 年以來第一個 1 分鐘平均風速超過每小時 300 公里的熱帶氣旋。強颱風肆虐菲律賓群島多數地區，大多死於海嘯般的暴潮和建築物倒塌。根據觀測資料，在 Surigao 市 12 小時雨量為破紀錄的 281.9 毫米；雷伊泰和莎瑪 (Samar) 省測得 5 ~ 6 公尺高的浪潮，雷伊泰省首府塔克洛班市 (Tacloban) 之機場轉運站也被 5.2 公尺高之浪潮摧毀，市區也被暴潮席捲而一蹶不振。

強颱風海燕過後，造成重大災情，除颱風規模強烈是原因外，《華爾街日報》(Wall Street Journal, WSJ) 點出另一個原因：老百姓不理解氣象預報員所播報的「暴潮」(storm surge)。即使氣象預報反覆發出警告說，這是有史以來最嚴重的風暴之一，但多數人不確定「暴潮」是啥？也不了解其中潛藏的災害風險有多大？政府官員坦言未曾聽過氣象用語「暴潮」這個詞，導致政府部門沒有選擇強制居民撤離的措施，民眾也

無警覺性，因此來不及疏散避難，因而遭致災難，是天災？還是人禍？

菲律賓大氣地球物理和天文管理局 (Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Services Administration, PAGASA) 因應風暴造成災難性傷亡及毀滅性破壞，故提出「海燕 (Haiyan)」除名，於 2014 年 1 月 29 日至 2 月 1 日舉行的第 46 屆颱風委員會年度會議上通過除名，其取代名稱於 2015 年舉行的第 47 屆颱風委員會年度會議上確定為「白鹿 (Bailu)」，並於 2019 年 8 月首次使用。同時海燕之菲律賓當地名稱「Yolanda (尤蘭查)」也被除名。

2015 年尼泊爾地震

事件概述

2015 年全球共發生 1,060 件天然災害，超過 23,000 人死於天然災害，經濟損失有 900 億美元。其中 4 月的尼泊爾 (Nepal) 地震傷害最為慘重。

2015 年 4 月 25 日當地時間上午 11 時 56 分，尼泊爾發生規模 7.8 地震，震央位於加德滿都 (Kathmandu) 東方、珠穆朗瑪峰 (Mt. Everest) 山腳下的拉多夫地區 (圖 13)，深度 15 公里，加德滿都谷地近 90% 建築物被毀，共造成尼泊爾 8,786 人死亡、22,304 人受傷 (圖 14、圖 15)，周邊印度有 130 人死亡、560 人受傷，中國 (西藏地區) 則有 27 人死亡、383 人受傷，孟加拉 (Bangladesh) 有 4 人死亡、200 人受傷^[12]。

主震發生後，美國地質調查所 (USGS) 監測記錄顯示共有 329 次大於或等於規模 4 之餘震，其中 47 次規模

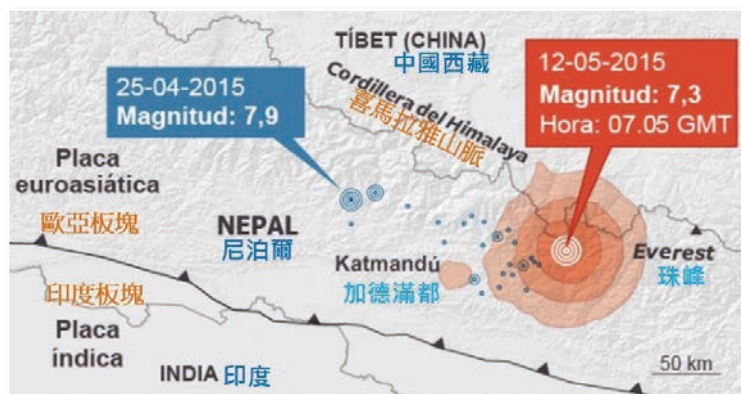


圖 13 尼泊爾主震與最大餘震震央位置示意圖 (EL PAIS)



圖 14 首府加德滿都房屋受害 (新華社)



圖 15 加德滿都王宮廣場納拉揚神廟災前與災後狀況 (EPA)

5 以上。最大的餘震發生在 5 月 12 日當地時間 12:51 規模 7.3，震央在柯達里 (Kodari) 東南方 18 公里處，深度約 10 公里，即靠近中國邊境介於加德滿都與珠穆朗瑪峰之間，此餘震也造成 117 人喪命、2,500 人受傷。

省思

尼泊爾本次地震主要原因係印度板塊與歐亞板塊相互碰撞，造成隱沒帶（即主要逆斷層前緣帶）附近的逆斷層活動造成。印度板塊以每年約 2 公分的速率往北—東北方向朝歐亞板塊聚合，板塊應力也導致喜馬拉雅山 (Himalayan mountain range) 每年以約 1.8 公分的速度增高，而尼泊爾即位於此兩板塊交界處附近，因此在歷史上有多次規模 6.5 以上的強震發生^[13]。其中 1934 年 1 月 15 日，尼泊爾東部發生芮氏規模 8.0 大地震，造成 10 萬 600 人死亡，是史上最嚴重的一次地震。

本次地震另一項災損是文化資產災害，根據聯合國教科組 (UNESCO) 調查評估，列為世界文化遺產之一的加德滿都谷地在此次地震中受到嚴重損

壞，包括帕坦王宮廣場 (Durbar Squares of Patan)、哈努曼多卡 (Hanuman Dhoka) 寺廟和巴克塔普爾 (Bhaktapur) 廣場等幾乎完全被摧毀。另 1832 年修建之一座高約 60 公尺的九層高塔加德滿都地標建築比姆森塔 (Bhimsen Tower) 也因地震而坍塌。雖認為這些受災的資產可以被修復及重建，但重建計畫將需要持續數十年時間，並需要耗費大量資金與人力。

尼泊爾於 1995 年開始實施建築規範 (Nepal National Building Code)，方有建築防震、耐震要求，但不涉及既有建築，致使加德滿都有近 7 成之建物仍為「磚造」或「加強磚造」結構。此外，當地人為了增加居住空間或作為觀光旅客住宿之用，往往在磚造房屋上增建樓層，用混凝土加蓋「加強磚造」之新房，此類「房舍疊加 (老揸少)」建築型態更大幅削弱耐震能力。7.8 級強烈地震摧毀了尼泊爾大部分地區的房屋，此為主要災因。另外，尼泊爾多山的地形使其難以進入偏遠地區，這導致許多傷患陷入困境，而救援人員卻難以到達，此恐為傷亡慘重之因。

2015 年 9 月尼泊爾頒布新憲法後，因不滿憲法部分條文恐加速少數族群遭政治邊緣化，引發南部馬德西（Madhesi）族發起強烈抗議活動。印度以邊境安全為由下達禁運令，長達半年對兩國邊境切斷進入尼泊爾之藥品、建築材料、油品等重要供給。此行動也讓尼泊爾全境陷入嚴重的能源危機。能源危機帶來的衝擊不僅是民生物資飆漲，大眾運輸停擺、商家餐廳關閉、學校停課學生無法上學、缺乏瓦斯燃料而大量砍伐樹木、進而牽引出更多的環境汙染議題。今日觀之，尼泊爾法治環境薄弱、族裔緊張局勢、高度貧困、2015 年災難性地震後續影響等，仍為目前商業環境、政府治理挑戰之核心弱點。

2017 年哈維颶風及瑪莉亞颶風

2017 年全球有 710 個天然災害事件，整體災損達 3,300 億美元，死亡達 10,000 人。其中 8 月下旬之強烈颶風哈維（Harvey）侵襲美國德州，是 2017 年損失最大的事件。最強風暴為編號第 15 之 5 級颶風瑪莉亞（Maria）。

哈維颶風

事件概述

於美國當地時間 2017 年 8 月 16 日 17 時形成熱帶氣旋，並命名為哈維，編號 NINE（#9）。25 日 23 時以 4 級颶風登陸美國德克薩斯州（Texas）。時速達 215 公里，哈維的風暴強度超過了 1961 年以來襲擊德州的所有其他熱帶氣旋。強降雨造成休斯頓（Huston）被洪水包圍數日，地面及空中陷於癱瘓，全城基本斷電，學

校停課，許多煉油廠關閉。哈維颶風造成 103 人罹難（65 人屬直接受害）、災損超過 1,250 億美元^[14]。另超過 300,000 棟建築物及 500,000 輛以上汽車遭水淹，有 336,000 戶停電，有 40,000 人避難。

自 1880 年以來，哈維颶風在美國無論範圍或強度是熱帶氣旋最重大降雨事件，最大降雨在德州內德蘭（Nederland）附近有 60.58 英吋（1,538.7 毫米），格羅夫斯（Groves）也有 60.54 英吋（1,537.7 毫米），雙雙打破 1950 年 8 月發生在夏威夷的希基颶風（Hurricane Hiki）所降下 52 英吋（1,320.8 毫米）的美國紀錄^[15]（圖 16 至圖 18）。

省思

風速每小時 130 英哩（209 km）的四級超強颶風「哈維」橫掃德州東南部，加上海水倒灌，給休士頓帶來有如歷史浩劫、前所未見的超大洪患。不斷高漲的滾滾洪水，迫使數以千計民眾爬上屋頂和高地求援，蜂擁而來的求救電話，讓救難人員根本無法招架。美國總統川普（Donald Trump）因而簽發命令，宣佈德州進入災難狀態。

在防災記者會上，不少媒體質問休士頓市府，為何不提前對市民下達撤離命令？對此，特納（Sylvester Turner）市長僅強調：「都是專業考量，市區淹水與道路交通癱瘓的同時，最好的防災就是讓居民們待在家中、就地避難！」

哈維颶風侵襲期間，對於電力、通訊網路、交通、醫療及石油與天然氣等基礎設施造成巨大衝擊，亦間接及直接造成民生需求及政府運作中斷。墨西哥

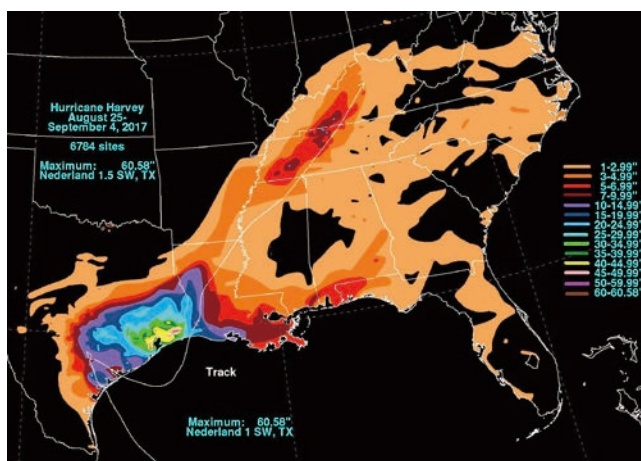


圖 16 哈維颶風觀測雨量圖（Courtesy of NOAA/WPC）

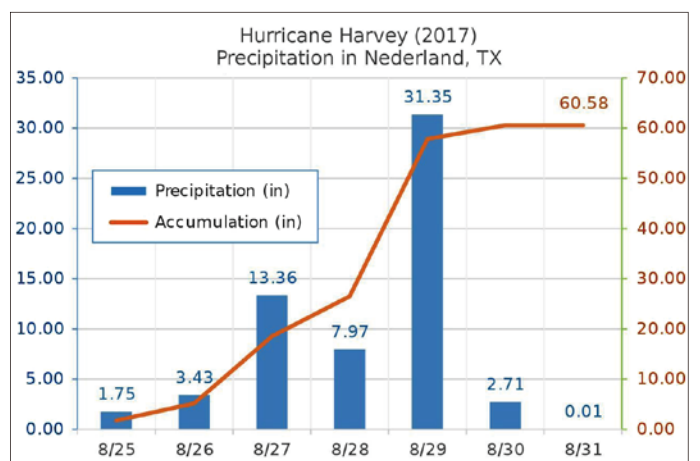


圖 17 德州內德蘭市降雨組體圖（From Wikipedia）



圖 18 遭水淹的休士頓地區正在進行水中救援 (AP)

灣占全美石油產量約 50%，因風災而關閉，休士頓煉油區亦全面癱瘓，牽動全球石化產業價格波動，衝擊影響全美國與全世界，亦登上 2017 年天然災害經濟損失最嚴重的事件。

但是風暴帶來了一個重要的事實：引進水，不是風，那是颶風最危險的部分，哈維颶風的降雨打破美國本土的歷史紀錄，其雨量相當於 1,270 億噸，可裝滿 26,000 個紐奧良超級巨蛋^[16]，如此大量雨水導致德州低窪地區洪水氾濫，科學家們估計是 50 萬年一次的洪水。從德州休士頓市看風災，近年來降雨量有愈來愈大趨勢，既有的水工構造物無法承受更大的雨量。面對每年都發生淹水的狀況，如何調適、改善是困難的課題。

瑪莉亞颶風

事件概述

2017 年 9 月 16 日發展於小安地列斯群島 (Lesser Antilles) 附近，當晚九時直接升格為熱帶風暴，並取名為瑪莉亞，編號 Fifteenth (#15)。9 月 18 日形成 5 級颶風，18 日晚間登陸島國多明尼加 (Dominica)，造成崩塌及洪水災害。20 日氣壓更低至 908 毫巴 (hPa)，最大風速達每小時 280 公里，當日下午 6 時 15 分登陸美國屬地波多黎各 (Puerto Rico) 亞武科阿 (Yabucoa)，造成島上多處土石流與停電災情。瑪莉亞已造成 3,067 人罹難，其中多明尼加有 65 人、波多黎各 2,975 人，經濟損失超過 916 億美元^[14] (圖 19)。



圖 19 多明尼加 (左圖) 與波多黎各 (右圖) 遭受瑪莉亞颶風災害 (AFP)

波多黎各全境遭逢大雨侵襲，最大降雨發生在卡瓜斯（Caguas）的 37.9 英吋（962.7 毫米），災損達 80 億美元，其中農業災損有 7.8 億美元，尤其咖啡損失最重，有 1,800 萬株咖啡樹遭毀，該島 15% 之咖啡產量至少要 5 ~ 10 年才能恢復。多明尼加觀測到最大降雨為 22.8 英吋（579.1 毫米），也造成洪水與泥流災害^[17]。

省思

瑪莉亞颶風災後，波多黎各的醫療狀況經調查發現：颶風打亂了醫療院所的運作；民眾至少有 1 天無法取得藥物；因為電力中斷，患者難以使用呼吸器；遇到醫療院所災後關閉、甚至民眾找不到醫師的問題；研究也指出，災後醫療照護中斷、延遲的問題，占了死亡人數死因的三分之一。

波多黎各總督羅塞略（Ricardo Roselló）曾指出瑪莉亞颶風是「波多黎各現代史上最大的災難」，但官方的死亡人數僅有 64 人，因為政府的死亡統計，需要經由法醫學機構（Institute of Forensic Sciences）證實民眾死亡原因與風災直接相關，認定很嚴格。由於數字離現實預期低的太多，而引發媒體與學界對政府部門的質疑。

美國喬治華盛頓大學（George Washington University）米爾肯公共衛生研究學院（Milken Institute School of Public Health）接受波多黎各政府委任，調查造成嚴重傷亡的「瑪莉亞」風災。調查結果在 2018 年 8 月 28 日公布，學院報告指出，2017 年 9 月至 2018 年 2 月與「瑪莉亞」有關的死亡數字為 2,975 人。報告分析稱，當地醫生和法醫有權發出死亡證明，但大部分醫生沒有受過正式訓練，不懂得分辨死者去世原因是否與「瑪莉亞」有關。

波多黎各曾為西班牙的殖民地，主要語言是西班牙語，但 1898 年由美國接管，目前地位是「未合併領地」（unincorporated territories）。波多黎各人雖然擁有美國國籍，但是無權投票選舉總統，只能在各政黨初選中投票，在眾議院裡也有一位投票權代表。

國際特赦組織（Amnesty International, AI）秘書長 Kumi Naidoo 先生於 2018 年 10 月 14 日在 TIME 雜誌上發表評論之標題：「瑪莉亞颶風一周年，我明白有件事比氣候變遷本身更可怕」^[18]。秘書長指出：瑪莉亞颶風對波多黎各人帶來的災難無可否認。多數人熬過颶風中的浩劫，但隨後卻又被迫進入另一個煉獄。整個

島上充斥著食物與水資源之短缺問題，電力完全失效（停電數個月），醫院因為大規模的破壞而關閉，所有基礎設施與服務也幾乎崩潰。

「這場颶風讓數十年以來的根本人權問題浮上檯面。儘管作為世界上最富有國家之一部分，但相較美國全國貧窮人口僅有 12.7%，波多黎各卻有近一半的人民生活於貧窮之中。由於身負超過 700 億美元的外債，美國面臨了嚴重的財務危機。用以調配此危機的廣大樽節措施已投入如健康照護等重要公共服務，使得原本就已非常脆弱的群體更加手無寸鐵。」Naidoo 秘書長進一步指出波多黎各面臨的困境。

對於美國聯邦緊急事務管理署（Federal Emergency Management Agency, FEMA）之作為有所評論，稱「FEMA 在規劃緊急應變計畫時，並未將島上 50 年的老舊基礎設施列入考量。當瑪莉亞颶風切斷了當地的輸電網、通訊及交通設施時，這嚴重地影響了 FEMA 的應變，並置許多人於無法取得健康照護與其他基礎服務的風險之中。」同時，點出「需要為波多黎各福祉負上最終責任的川普總統卻試圖把責罵聲錯誤地轉移至波多黎各當局身上，但他們自己也有很多問題需要面對。」

Naidoo 秘書長最後總結：「在風災一年後的今日，川普總統對波多黎各人民生活福祉上的輕蔑，以及聯盟和波多黎各當局不當的回應，為我們上了在這場颶風中最怵目驚心的一課。現在我們終於明白對人類而言，有一件事是比氣候變遷更加危險的一那就是一個不認為有必要保護人們免於氣候變遷侵襲的總統。」

2019 熱帶氣旋伊達

事件概述

2019 年全球有 820 個天然災害事件，整體災損達 1,500 億美元，死亡有 9,000 人。熱帶氣旋伊達（Cyclone Idai）於 3 月中襲擊非洲莫三比克（Mozambique）、馬拉威（Malawi）、辛巴威（Zimbabwe），造成 1,303 人罹難，受災人數達 185 萬人，而莫三比克災損約為該國 GDP 的 10%。伊達是 1980 年以來最嚴重熱帶氣旋災害，也是 2019 死亡最多之天災。

熱帶氣旋「伊達」3 月 4 日於莫三比克海峽形成熱帶低氣壓，在莫三比克及馬拉威上空降下暴雨，隨後轉為氣旋，風力達每小時 195 公里，14 日登陸莫國大城港都貝拉（Beira），再轉向辛巴威。



圖 20 伊達氣旋造成莫三比克大面積淹水災害 (L: NIDM/ R: The News Lens)

根據聯合國人道主義協調事務所 (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, OCHA) 24 日資料,「伊達」導致極為嚴重的洪災和土石流,已造成莫三比克 602 人死亡、2,000 人失蹤、1,641 人傷;辛巴威 634 人死亡、257 人失蹤、232 人傷;馬拉威 60 人死亡,577 人受傷^[19-21]。

根據美國國家航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 分析指出,伊達在 23,000 平方公里的土地傾盆大雨,在莫三比克有 360,000 公頃被水淹,至少 17,000 棟房屋被毀。NASA 也指出,從 3 月 3 ~ 19 日,部分地區雨量超過 20 英吋 (508 毫米)^[22]。

省思

洪水摧毀了當地的一切,房屋、農田、財產。災後重建工作將是一項艱巨而漫長的任務。根據莫三比克國家災害管理研究所 (INGC) 的數據,該國內有近 35.8 萬公頃農田被毀,39 間醫院受到不同程度的損害。

聯合國人道主義協調事務所 (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, OCHA) 進一步指出,莫三比克有 65,000 人住在帳篷,超過 17,400 棟房屋被毀,400,000 人口的港都貝拉市 (Beira) 完全沒有電力。超過 150 平方公里的地區被水淹,有些地區水深達 6 公尺,至少有 150 萬人受影響。

辛巴威與馬拉威同樣受到伊達颶風之傷害,其中辛巴威東部受到颶風襲擊的一個 20 萬人的城鎮奇瑪尼曼 (Chimanimani) 在未來幾個月需要緊急食物的支援;而馬拉威南部 4 個區有 81,613 戶家庭受到影響。持續不斷的暴雨和遍地災殃,都讓資源有限的急救隊無法有效深入災區,讓許多災民苦苦等候不到救援。

總結

綜上所述,在近 10 年 (2010 ~ 2019) 中,本文共摘錄了 8 個重大天然災害事件做回顧與檢討,包括 3 個地震事件、1 個颱風事件、3 個颶風事件及 1 個熱帶氣旋,範圍橫跨亞洲、北美洲及非洲。其實只涵蓋地質事件與氣象、水文事件,有關極端氣候、乾旱、森林野火等氣候事件也造成相當大災損與影響,礙於篇幅本次不予撰述。

2010 年 1 月海地發生規模 7.0 地震,卻造成超過 23 萬人死亡,有 300 萬人受影響,災損達 80 億美元。2015 年 4 月尼泊爾發生規模 7.8 地震,也造成尼泊爾、印度、中國西藏地區等近 9,000 人死亡,其中文化資產 (多處世界文化遺產) 遭受重大損失。海地與尼泊爾皆屬貧窮國家,基礎設施薄弱、房屋結構脆弱很多是磚造或帳棚、醫療設備不足、交通不便救援困難、斷電斷水易染疫病。兩處震後都急需國際社會支援救助,如何在財政困難情況下走出災害陰霾,有待

政府自身的謀略與努力。另一個地震事件，2011 年日本東北地方太平洋沖發生規模 9.0 地震，造成 2 萬 2 千多人死亡失蹤，本地震主要禍首是地震引發之海嘯，92.5% 之死亡是海嘯溺水，災損也高達 2,000 ~ 3,000 億美元，足見海嘯帶來的巨大威脅與破壞。但，讓人費解的是一個財富與基礎建設如此發達的國家，會有如此眾多的人命犧牲。

亞洲的菲律賓每年會有 20 個熱帶氣旋登陸境內，時代 (TIME) 雜誌於 2013 年曾評論菲律賓是全球最容易遭受熱帶風暴襲擊的國家。不幸，2013 年 11 月超級強颱風「海燕」侵襲菲律賓，狂風暴雨造成 5,500 多人死亡、1,700 多人失蹤，災損有 5.6 億美元。由於造成災難性傷亡及毀滅性破壞，「海燕 (Haiyan)」從此被除名。

非洲南部加勒比海周邊國家常受風暴困擾，2019 年 3 月熱帶氣旋「伊達」侵襲莫三比克、馬拉威、辛巴威及南非地區，造成嚴重災損，超過 1,300 多人罹難，185 萬人受災，房屋、農田被毀，食物匱乏、疾病蔓延的困擾，這些貧困國家地區的人民，要重新站起會是多麼艱辛漫長的一段路。

大西洋熱帶風暴級颶風以 8 ~ 10 月為好發期，每季平均發生 10.1 個有命名的風暴，其中有 5.9 個會成為颶風，而 2.5 個颶風威力會達到 3 級以上。2012 年 10 月，原本預期為 1 級颶風「桑迪」，在撞向美國東海岸城市時轉為 3 級颶風，強風引發暴潮加上長浪，造成 131 人死亡、紐約 200 萬人缺電，影響人數達 800 萬人以上。另 2017 年 8 月之哈維颶風及 9 月之瑪莉亞颶風，此兩颶風威力皆達 4 至 5 級，「哈維」橫掃德州東南部，豪大雨加上海水倒灌，給休士頓帶來超大洪患，有 103 人罹難，災損超過 1,250 億美元；而「瑪莉亞」狂風暴雨襲擊多明尼加與美國屬地波多黎各，造成 3,000 多人死亡，災損超過 900 億美元。

地球上天然災害像不定時炸彈隨時隨地會引爆，人類也無法避免天然災害之蹂躪，作好防救災準備是唯一之途。美國文學家馬克吐溫 (Mark Twain) 說過：「通常不會是那種你完全不熟悉的事情害慘你，而是那種你誤以為自己很熟悉的事情害慘你」，此話亦同樣適用於防救災事務。凡事不可固執己見、自以為是，要能虛心求教、不恥下問之學習精神，方能貫通事理，迎刃而解。希望本文之重大天然災害論述能帶給大家從不同角度去

思考防救災該有之脈絡，進而整理出綜合有效的防救災治理計畫，方是國家之幸、百姓之福！

參考文獻

1. University of Oxford, Our World in Data-Global natural disaster death rates: <https://ourworldindata.org/grapher/natural-disaster-death-rates>
2. Direct Relief (2019), "10 Disasters That Changed the World": <https://www.directrelief.org/2019/12/10-disasters-that-changed-the-world/>
3. Germanwatch, Global Climate Risk Index 2019.
4. The World Bank (2005), Natural Disaster Hotspots – A Global Risk Analysis: <http://documents.worldbank.org/curated/en/621711468175150317/pdf/344230PAPER0Na101official0use0only1.pdf>
5. 編輯部 (2010), 「2010 海地地震災害報導」, 中華防災學刊, 第二卷第 1 期, 第 90-91 頁, 中華防災學會印行。
6. 編輯部 (2011), 「東日本大震災報導」, 中華防災學刊, 第三卷第 2 期, 第 178-221 頁, 中華防災學會印行。
7. 編輯部 (2011), 「2012 年 10 月桑迪颶風災害」, 中華防災學刊, 第五卷第 1 期, 第 106-111 頁, 中華防災學會印行。
8. 國家災害防救科技中心 (2012), 「颶風 SANDY 對美東衝擊影響初步綜合分析」, 災害防救電子報, 第 088 期。
9. 能源知識庫 (2016), 「桑迪颶風侵襲紐約市三周年檢討與回顧」, 蘇衍綾提供資料。
10. Business Insider (2018), "Manhattan plans to build a massive \$1 billion wall and park to guard against the next inevitable superstorm".
11. 編輯部 (2014), 「2013 年 11 月菲律賓海燕颱風報導」, 中華防災學刊, 第六卷第 1 期, 第 139-143 頁, 中華防災學會印行。
12. 編輯部 (2015), 「2015 年 4 月尼泊爾地震災害」, 中華防災學刊, 第七卷第 2 期, 第 280-281 頁, 中華防災學會印行。
13. 國家災害防救科技中心 (2015), 「2015 年 4 月 25 日尼泊爾地震災害分析」, 災害防救電子報。
14. 陳禮仁 (2018), 「2017 年大西洋颶風報導」, 中華防災學刊, 第十卷第 1 期, 第 100-103 頁, 中華防災學會印行。
15. NOAA (2018), NATIONAL HURRICANE CENTER TROPICAL CYCLONE REPORT - HURRICANE HARVEY: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL092017_Harvey.pdf
16. 國家災害防救科技中心 (2018), 「颶風哈維 (Harvey) 對德州衝擊影響」, 災害防救電子報第 152 期。
17. NOAA (2019), NATIONAL HURRICANE CENTER TROPICAL CYCLONE REPORT - HURRICANE Maria (AL152017): https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL152017_Maria.pdf
18. K. Naidoo (2018), 「瑪莉亞颶風一周年，我明白有件事比氣候變遷本身更可怕」, TIME 評論報導，許睿洋中文翻譯。
19. 陳禮仁 (2019), 「2019 年上半年世界天然災害大事紀」, 中華防災學刊, 第十一卷第 2 期, 第 203-210 頁, 中華防災學會印行。
20. 陳禮仁 (2020), 「2020 年世界天然災害大事紀」, 中華防災學刊, 第十二卷第 1 期, 第 79-90 頁, 中華防災學會印行。
21. Wikipedia (2020), "Cyclone Idai": https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclone_Idai
22. NASA (2019), "Idai (Southern Indian Ocean)" /Tag: Idai 2019: <https://blogs.nasa.gov/hurricanes/tag/idai-2019/> 



多種地球物理探測法於 基隆河河岸土層 剪力波波速 調查

林志峯／臺北市政府工務局 局長

曾俊傑／臺北市政府工務局土木建築科 科長

蕭秋安／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 經理

周坤賢／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 副理

胡志昕／新中光物理探測股份有限公司 總經理

王鶴翔／新中光物理探測股份有限公司 顧問

臺北市特殊的盆地地形與軟弱土壤性質，導致地震發生時恐易產生土壤液化現象。又場址放大效應造成近地表鬆軟土層內之地震加速度會較原先放大，除了影響土壤液化評估結果外，亦直接影響地表建物安全，為利於後續都市防災工作推動，建置地表下 30 公尺內之土層剪力波波速 V_{s30} 資料有其必要性。本文針對基隆河河岸某一場址，以懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測法等進行探測，土層剪力波波速隨深度增加而增加，大致由每秒 140 公尺增至每秒 240 公尺，此四種探測技術測得之土層剪力波波速分布均相仿，且前三種探測技術結果極為相近，可提供後續臺北市範圍內建築物規劃設計與安全評估參考應用。

關鍵字：剪力波波速、懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法、地球物理探測。

前言

臺灣位處歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交會處，地震發生頻繁；又臺北盆地主要係由淡水河及三大主要支流（大漢溪、新店溪、基隆河）沖積而成，部分地區土壤較為鬆軟，特殊的盆地地形與軟弱土壤性質，使得臺北市在地震發生時恐易產生土壤液化現象，造成結構物傾斜甚或倒塌，相關維生管線、排水系統及道路也因沉陷而變位，影響其正常功能，造成停電、停水等災害^[1]。鑒於 2016 年 2 月 6 日美濃地震在臺南地區造成嚴重液化災情^[2]，行政院於 2016 年核定實施「安家固園」計畫，逐年撥付經費協助各縣市政府進

行老舊建築物耐震評估補強，以及土壤液化潛勢區改善防治等工作，進一步瞭解國人居住環境之土壤液化潛勢情形，預防地震造成重大的人命與財產損失。

臺北盆地受場址放大效應影響，地震波由岩盤進入近地表鬆軟土層時，基盤地震加速度會較原先放大，此現象除了影響土壤液化評估結果外，亦直接影響地表建物安全。為利於後續都市防災工作推動，臺北市政府於「安家固園」計畫支持下，通過地球物理探測方法探查、建置臺北市地表下 30 公尺內之土層剪力波波速 V_{s30} 資料，並探討較合適之地層波速量測方法與施作流程，達到精進臺北市土壤液化潛勢圖資之目標。

地球物理探測廣泛應用於地層調查、斷層定位、礦坑探測、地下水位調查、地下污染分布劃定等地質工作^[3-5]，計有電磁波、磁法、電阻法、震波法等技術，亦可配合孔內檢測進行混搭調查使用，其中地電阻影像法與地面波頻譜法曾應用於土壤液化災後調查之用^[6]，可有效分辨受液化擾動之土層，作為快速災損調查或較大區域液化潛勢評估狀況使用。本文係於基隆河河岸某一場址，採用四種常見土層剪力波波速量測技術進行探查，包括懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法等，提供後續臺北市範圍內建築物規劃設計與安全評估參考應用。

探測技術概述

懸盪式波速井測

懸盪式速度井測探測系統包含：一組自發性人工震源，以及二組固定距離（通常距離為 1 公尺）之垂直與水平方向受波器結合成的探測棒、捲揚機及資料擷取器，記錄由震源經孔壁—地層傳遞至近端及遠端受波器之人工震波，讀取近端與遠端受波器的震波波列時間差，可分別計算二受波器距離範圍內地層的壓力波（簡稱 P 波）與剪力波（簡稱 S 波）波速，現場配置及施測示意如圖 1。

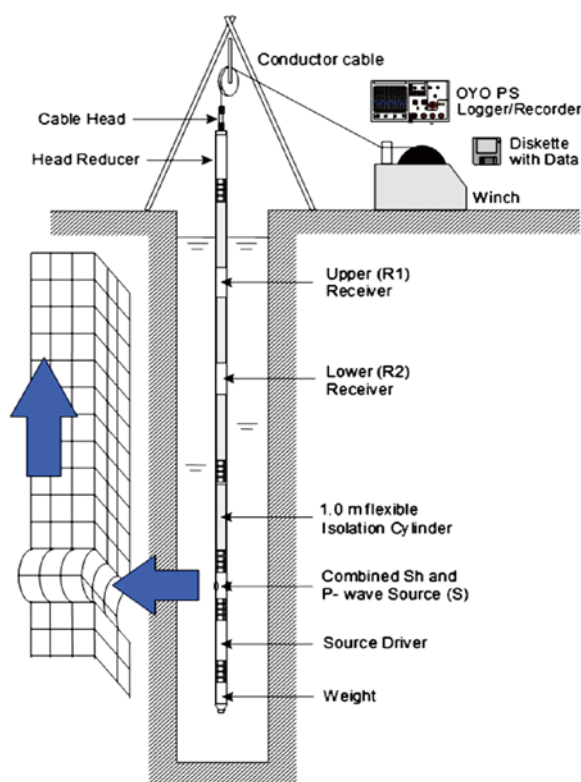


圖 1 懸盪式速度井測圖

懸盪式速度井測之波速計算流程說明如下：(1) 資料輸入—將現地施測資料傳入讀取初達波軟體；(2) 讀取初達波時間—分別由近端及遠端受波器之波形記錄，讀取 P 波與 S 波初達波時間，並顯示於各深度系列記錄上；(3) 初達波讀取時間輸出—參考近端與遠端受波器之初達波讀取時間並比較走時模式後，將初達波讀取時間輸出；(4) 波速計算—由初達波讀取時間，走時—距離關係計算各深度地層波速；(5) 重複步驟 (2)~(3) 完成整個探測深度；(6) 繪製土層波速成果剖面。

下孔式速度井測

下孔式速度井測法係將震源設置在地表上，受波器設置於孔內，記錄在特定深度震波所傳達之時間，由時間與深度關係計算震波速度。為防止鑽孔崩塌掩埋受波器，鑽孔需以內徑 56 至 86 毫米塑膠套管保護受波器，鑽孔井壁與塑膠套管間需以細砂填實。施測時在距離孔口一公尺處（或適當距離）分別設置一厚枕木及金屬塊，枕木以長釘固定於地表，同時在上方以重物壓重，此舉乃為防止震源滑動及為加強震源與地表密合性。再以水平方向側擊枕木塊，產生水平方向震波；水平方向側擊分別正向及反向，獲取 180 度位相位差之震波，以利波形辨認。

使用的受波器係為具三方向之孔內受波器組合，配備緊靠井壁裝置，具防水抗壓功能。第一組為垂直向受波器接收垂直向震波，第二組為水平向受波器接收水平向震波，第三組亦為水平向受波器，仍接收水平向震波但與第二組受波器方向垂直。測點間距之選擇，主要視地層變化程度而定，本案間距設定為 1 公尺。記錄方式一般採用重合記錄，首先判讀垂直向震波及水平向震波之到達時間，進行垂直向震波修正，然後繪製震波走時曲線，由走時曲線計算震波速度，現場配置及施測示意如圖 2。

跨孔式速度井測

土層跨孔式速度井測的測量，係將震源與受波器分別設置於相同深度之的二孔內（震源孔及接收孔），記錄在特定深度時，震波由震源孔至接收孔所傳達之時間，由時間與二孔間水平距離關係可計算震波速度。

實際施作係將三維（3-D）孔內受波器置於接收孔內，下降至孔底使彈簧彈出以貼緊孔壁，受波器以電纜連接至震測儀，三個分量可同時記錄一組垂直震波與兩組水平震波。將震源置於震源孔內，下降至受波

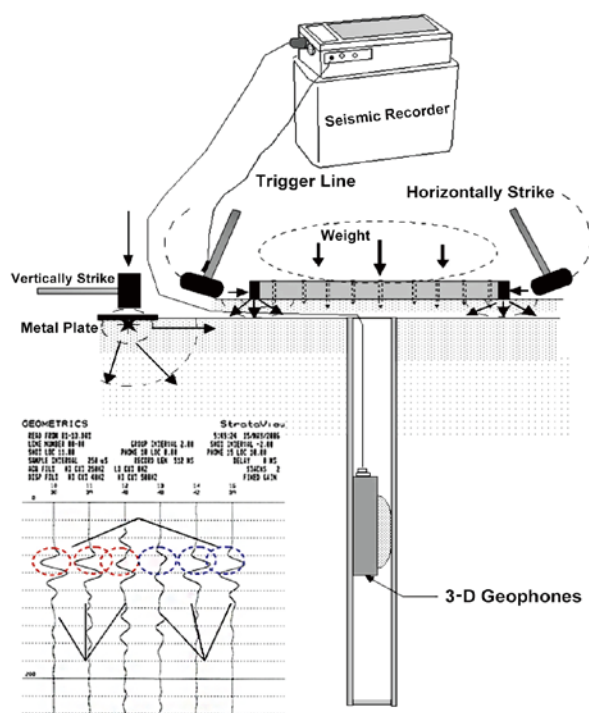


圖 2 下孔式速度井測現地施測示意圖

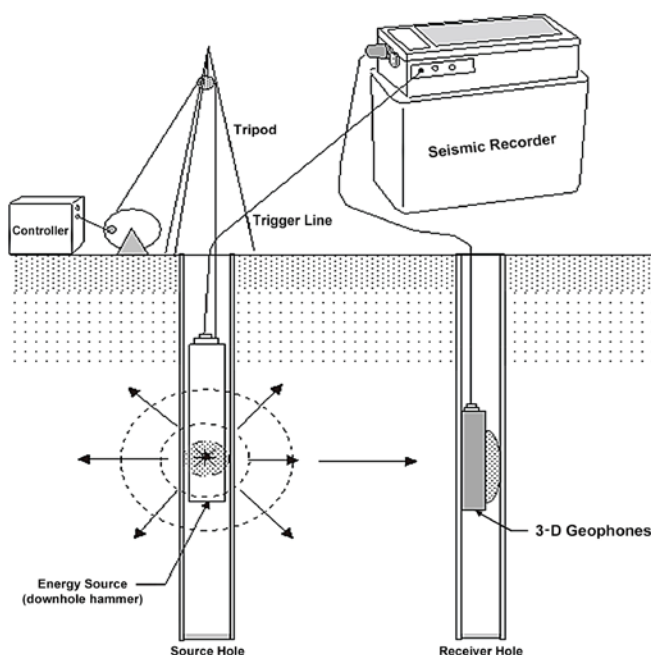


圖 3 跨孔式速度井測現地施測示意圖

器相同高度，利用氣壓裝置撐開震源緊靠孔壁裝置，利用孔內重錘裝置分別向上與向下錘擊，產生 180 度相位差的震波分別記錄並存檔。以捲揚器同時將受波器及震源向上提升 1 公尺，進行下一次施測，重複上述步驟直到地表，現場配置及施測示意如圖 3。

多頻道表面波量測震測法

震波測勘所記錄之表面波多以雷利波（Rayleigh Wave）為主，而表面波其所內含之各種不同頻率或波長，具有不同波傳相速（Phase Velocity），其所代表的涵意為不同地層厚度（深度）之地層訊息，即短波長之表面波反應的為近地表淺層特性，而愈長波長反應的為地表至較深層地層之綜合效應（圖4）。地層之剪力（S）波波速多與表面波相速成正相關，通常表面波波速約為剪力波波速的0.9至0.95倍，故藉由多頻道之表面波記錄，分析表面波各頻率所對應之相速度變化，可獲得表面波之頻散曲線（Dispersion Curve），進而反演獲致地層之剪力波速度模型剖面。

本案採用多頻道表面波量測震測法（Multi-channel Analysis of Surface Wave method, MASW），使用震測系統儀器設備主要包括：多個受波器、電纜、觸發器、震波放大器、信號加強器、震波資料處理器、震波記

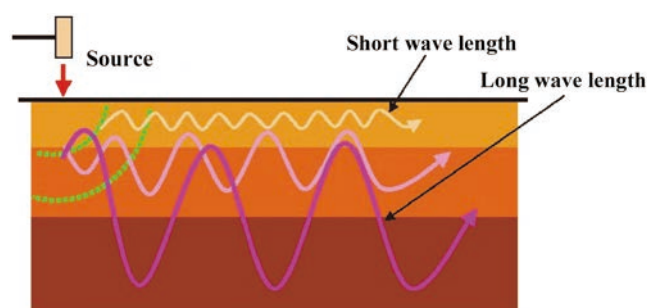


圖 4 表面波探測震波傳播示意圖 (摘自 [7])

錄儀及人工震源（如重鎚或震盪車）等，將多個受波器設置於同一直線上，反覆敲擊並疊加收取之訊號，可達到消除雜訊，提高表面波品質之目的。

案例分析

本案場址位於基隆河畔的觀山河濱公園，根據現地三個孔位鑽探紀錄，該場址的地層由地表至地表下 3.5 公尺為回填棕灰色粉質黏土夾紅磚、草根與細砂，標準灌入試驗 N 值範圍為 1 ~ 5 不等；3.5 公尺至 30 公尺為灰色粉質黏土偶夾貝屑，標準灌入試驗 N 值範圍為 0 ~ 4 不等，地下水位距地表以下 1.5 至 3.8 公尺不等。土層剪力波之四種地球物理探測分析如下說明。

懸盪式速度井測

圖 5 為懸盪式速度井測探測系統，由一組自發性人工震源，以及二組 1 公尺距離之垂直與水平方向受波器結合成的探測棒組成，震源經孔壁—地層傳遞至近端及遠端受波器，由讀取近端與遠端受波器的震波波列時間差，以分別計算二受波器距離範圍內地層的 P 波與 S 波波速，通常 P 波會遠早於 S 波到達。

圖 6 為典型懸盪式速度井測量測波形圖，其中 V1 與 V2 分別代表遠端與近端垂直向受波器訊號，訊號到達起始時間用量測 P 波波速，圖中所在土層 P 波波速為每秒 1515.2 公尺；H + 1 與 H + 2 分別代表正向水平震波下，遠端與近端水平向受波器訊號，H - 1 與 H - 2 分別代表反向水平震波下，遠端與近端水平向受波器訊號，正向與反向水平震波所形成的訊號，其相位差恰恰相反，可用於決定 S 波訊號到達起始時間，圖中所在土層 S 波波速為每秒 141.4 公尺。

於土層每公尺處反覆進行上述土層波速量測，繪製預定深度的土層波速成果剖面。本場址三鑽孔的懸盪式速度井測其土層 S 波速度剖面圖如圖 7 所示，土層 S 波波速隨深度增加而持續遞增，由每秒 135 公尺增至每秒 230 公尺，沒有明顯波速劇變的現象，且三個鑽孔內土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超過每秒 20 公尺。

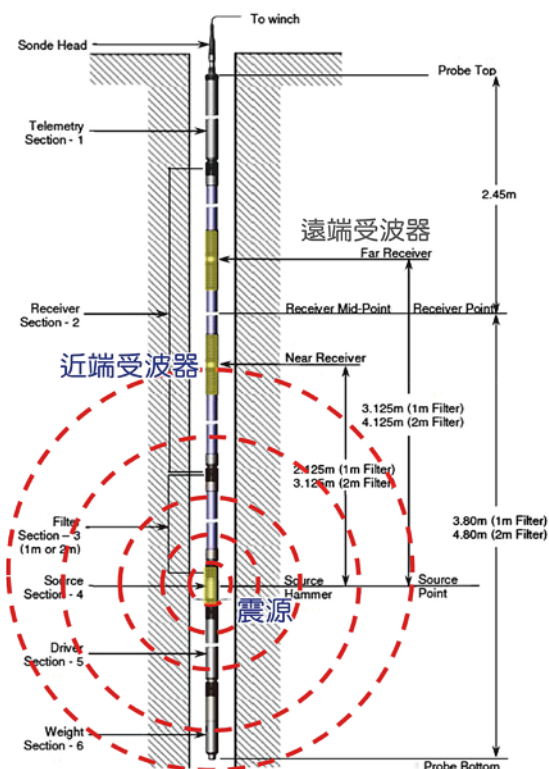


圖 5 懸盪式速度井測探測運作示意圖

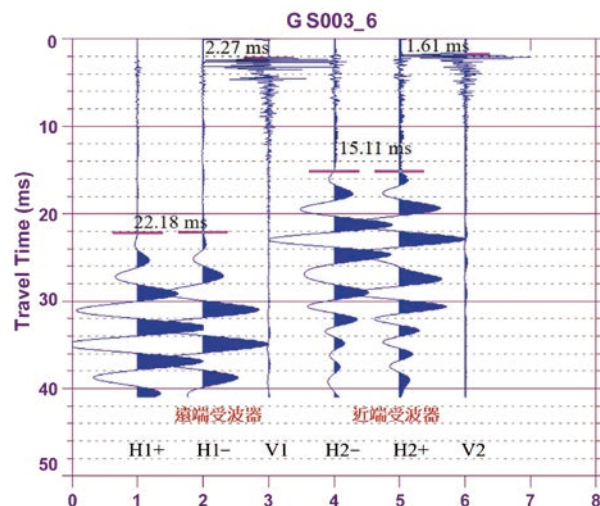


圖 6 典型懸盪式速度井測探測資料圖

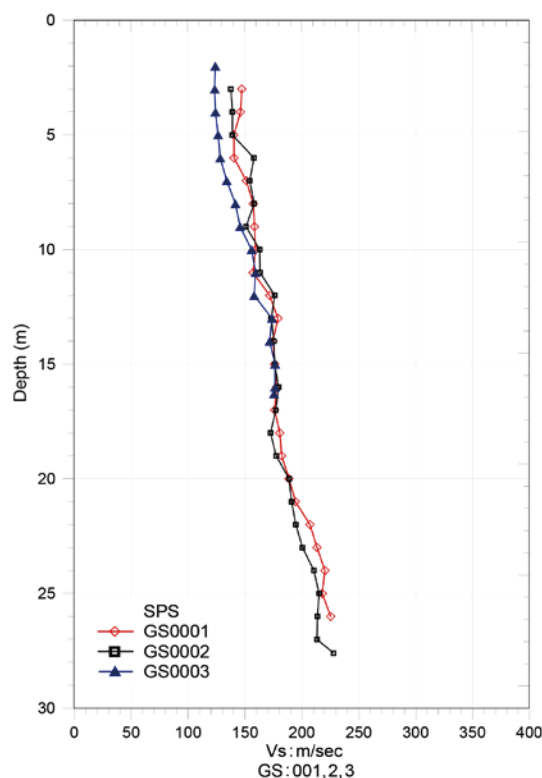


圖 7 懸盪式速度井測之三鑽孔土層 S 波速度剖面圖

下孔式速度井測

下孔式速度井測法的施作原理與懸盪式速度井測相仿，惟震源置於地表，由以鐵鎚重擊地表枕木或金屬塊以製造一人工震源，受波器設置於孔內，記錄在特定的深度震波所傳達之時間，人工震源有垂直方向敲擊，以及水平方向側擊枕木塊，產生水平方向震波，前者主要式量測 P 波波速，後者為量測 S 波波速，其中水平方向側擊分別正向及反向，以獲取 180 度位相位差之震波，以利波形辨認。

圖 8 為典型下孔式速度井測法量測波形圖，為受波器於 7、8、9 公尺深處所量測之訊號資料，所量測深度位置各有 6 道訊號，由左至右訊號依序分別為頻道 Ch1 至 Ch6，頻道 Ch1 ~ Ch3 分別為水平正向敲擊下，兩組水平向受波器訊號與垂直向受波器訊號，頻道 Ch4 為垂直向敲擊下，垂直向受波器訊號，頻道 Ch5 與 Ch6 為水平負向敲擊下，兩組水平向受波器訊號。先判釋出各深度之訊號到達起始時間，與懸盪式速度井測訊號判釋方式相仿，垂直向受波器訊號代表 P 波訊號，水平向受波器訊號代表 S 波訊號，P 波到達時間通常較易決定，S 波到達時間，則利用正向與反向

水平震波所形成的訊號，其相位差恰恰相反，以決定 S 波訊號到達起始時間。

將各深度位置的 P 波與 S 波到達時間，即震波走時點繪出如圖 9 所示，任意相鄰兩點的斜率倒數即為該段土層的 P 波波速與 S 波波速，圖 8 中深度 7 至 9 公尺處的 S 波訊號所對應之波速約為每秒 148 公尺。於土層每公尺處反覆進行上述土層波速量測，繪製預定深度的土層波速成果剖面。本場址三鑽孔的下孔式速度井測法其土層 S 波速度剖面圖如圖 10 所示，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 150 公尺增至每秒 220 公尺，且三個鑽孔內土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超過每秒 20 公尺。

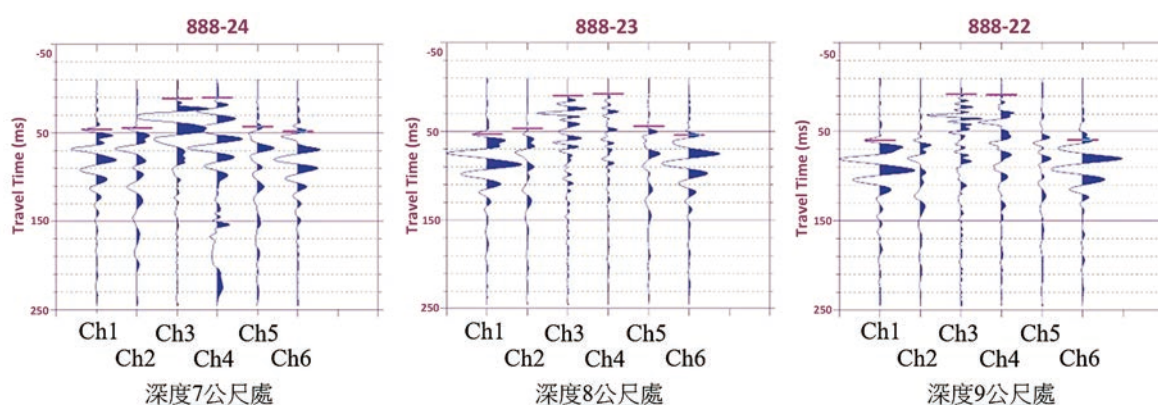


圖 8 典型下孔式速度井測資料圖

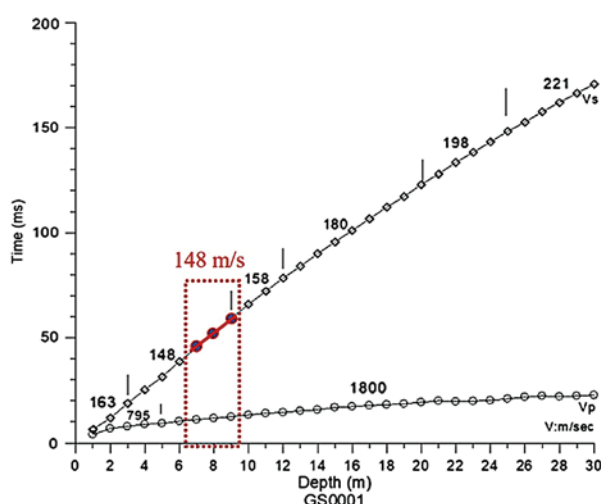


圖 9 下孔式速度井測土層 P 波、S 波對應深度走時曲線及速度成果圖

跨孔式速度井測

跨孔式速度井測法的施作原理與下孔式速度井測相仿，惟震源置於另一鑽孔內，利用孔內重鎚裝置分別向上與向下鎚擊，以製造一人工震源，受波器設置於相同深度之接收孔，記錄在特定的深度時，震波

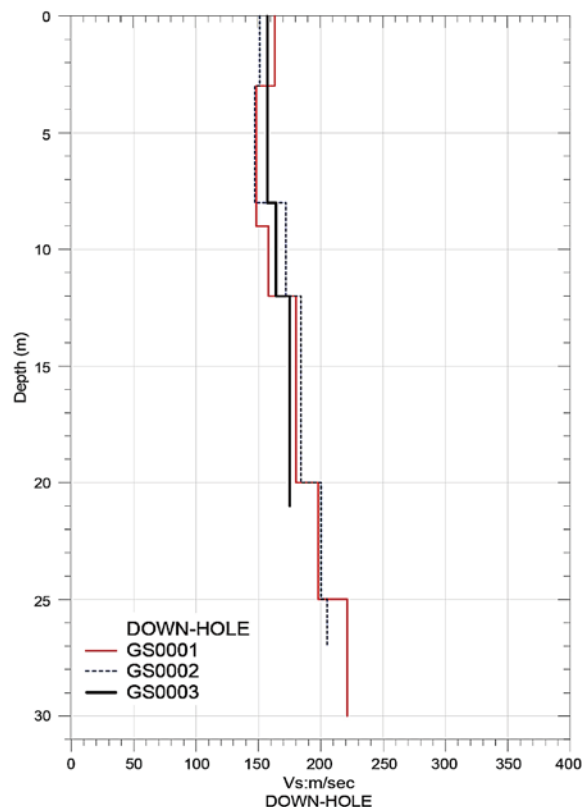


圖 10 下孔式速度井測三鑽孔土層 S 波速度成果圖

由震源孔至接收孔所傳達之時間，利用垂直向受波器紀錄向上與向下錘擊訊號，以獲取 180 度位相位差之震波，以利 S 波波形辨認。

圖 11 為典型跨孔式速度井測法量測波形圖，所量測深度位置有 6 道訊號，由左至右訊號依序分別為頻道 Ch1 至 Ch6，頻道 Ch1 ~ Ch3 分別為向上敲擊時，兩組水平向受波器訊號與垂直向受波器訊號，頻道 Ch4 ~ Ch6 分別為向下敲擊時，垂直向受波器訊號與兩組水平向受波器訊號。跨孔式速度井測法只需判釋出各深度之垂直向受波器訊號到達起始時間，該訊號與橋擊方向平行，代表土層傳遞的 S 波訊號，與懸盪式速度井測訊號判釋方式相仿，則利用向上與向下敲擊震波所形成的訊號，其相位差恰巧相反，以決定 S 波訊號到達起始時間。

每公尺進行跨孔式速度檢測法，紀錄並判釋 S 波到達時間，本場址兩孔之間距離為 5.2 公尺，即可計算每一公尺深度之 S 波波速。本場址兩鑽孔的跨孔式速度井測之土層 S 波速度剖面圖如圖 12 所示，圖中實線為 2 號孔（震源）至 1 號孔（接收）的波速圖，虛線為 1 號孔（震源）至 2 號孔（接收）的波速圖，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 130 公尺增至每秒 215 公尺，且兩者推算的土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超過每秒 10 公尺。

多頻道表面波量測震測法

多頻道表面波量測震測係將 10 個或 10 個以上之受波器，以直線方式等距鋪設於待測地表上，本案測線跨越 1 號孔與 2 號孔，計安設 23 顆受波器，受波器間距為 3 公尺，1 號孔與 2 號孔約於測線中央位置，以獲致最佳訊號；於兩兩相鄰受波器的中點位置，以重錘製造一人工震源，並記錄每次敲擊的所有受波器訊號。

圖 13 為典型多頻道表面波量測震測土層 S 波速度剖面處理流程，資料處理時，先將震波記錄依施測之震源、接收器位置作整理排序，獲得每個同中點（Common Midpoint, CMP）及該處之不同展距表面波記錄。計算每處同中點表面波記錄之相位，隨距離（即記錄展距）之改變作交叉比對，透過時間、頻率域之空間與速度轉換，疊加獲得頻散曲線圖；每個同中點由震波相速 - 頻率分布圖，可將各頻率之集中穩定相速度揀選出來，即可獲得該同中點之表面波頻散曲線；再據此進行地層波速模型之反演運算，以獲致該同中點最佳一維 S 波速度與深度關係剖面圖；將所有同中點的一維 S 波速度與深度剖面，整合繪製為二維成果剖面圖。

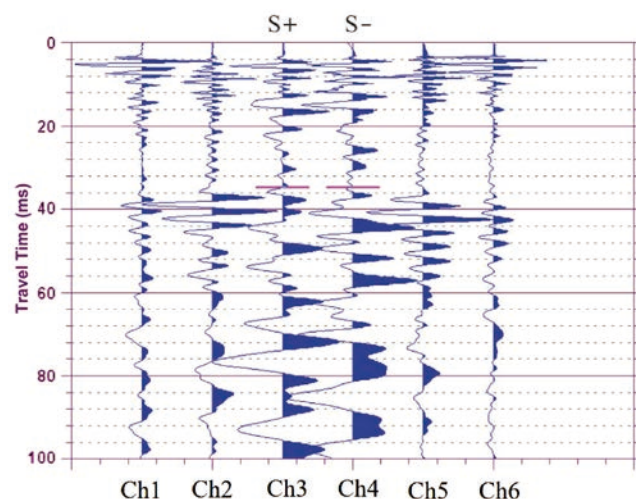


圖 11 典型跨孔式速度井測資料圖

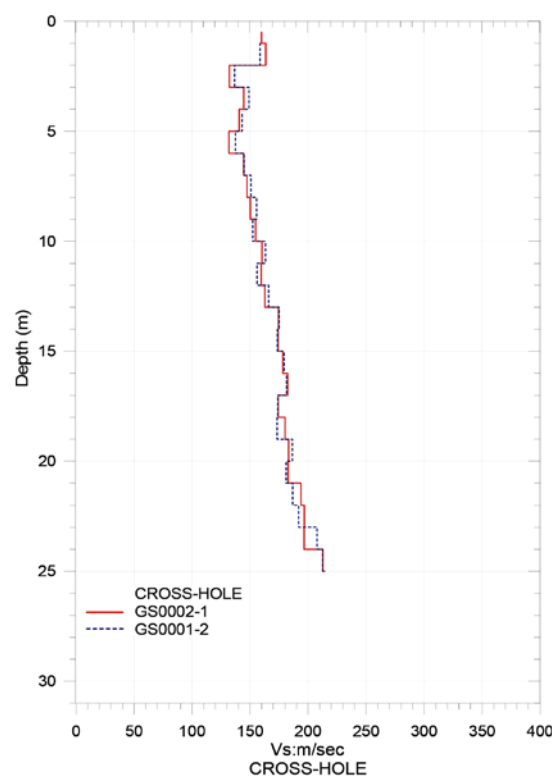


圖 12 跨孔式速度井測雙鑽孔土層 S 波速度成果圖

鄰近 1 號鑽孔附近的同中點處，其頻散曲線圖與一維 S 波速度剖面圖繪於圖 14，表面波頻散曲線上波速由低頻的每秒 190 公尺，隨頻率增加快速降至每秒 150 公尺，並穩定於該值，再經地層波速模型反算的一維 S 波速度剖面圖，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 150 公尺增至每秒 220 公尺。擷取 1 號鑽孔前後各 30 公尺內的一維 S 波速度剖面圖，整合繪製成二維成果剖面圖如圖 15 所示，土層 S 波波速大致隨深度增加而持續遞增，由每秒 150 公尺增至每秒 240 公尺。

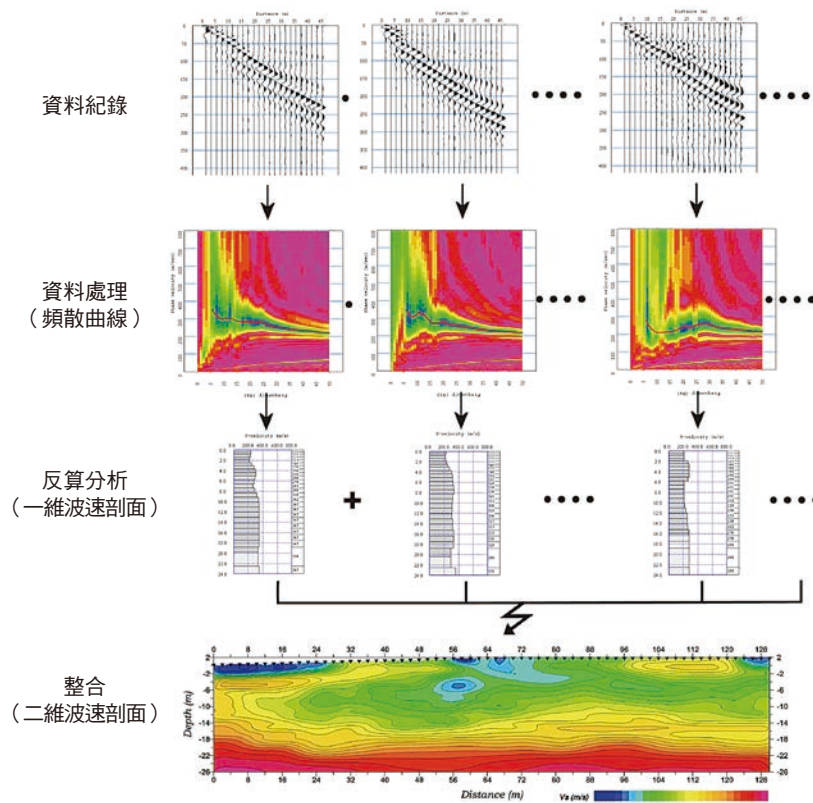


圖 13 多頻道表面波量測震測法土層 S 波速度剖面處理流程

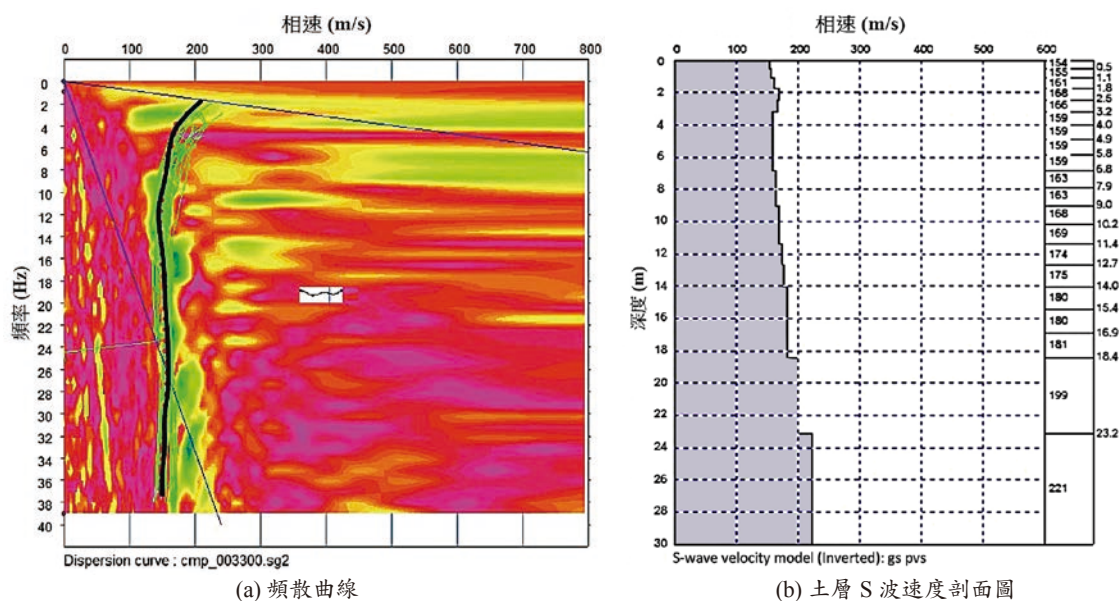


圖 14 多頻道表面波量測震測法

將 1 號孔處所進行之懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法等四類地球物理探測，地表下 30 公尺內之土層剪力波波速調查彙整為圖 16，該處土層 S 波波速原則上隨深度增加而持續遞增，由每秒 140 公尺增至每秒 240 公尺，且四種檢測方法測得之土層 S 波波速均相仿，最大誤差不超

過每秒 30 公尺；相形之下，懸盪式速度井測、下孔式速度井測，以及跨孔式速度井測結果又較為接近，可能原因為：懸盪式速度井測、下孔式速度井測，以及跨孔式速度井測均是在土層中直接量測剪力波波速，然而多頻道表面波量測震測則是透過表面波反算推估土層剪力波波速，多次分析反算均會造成波速計算誤差量較高。

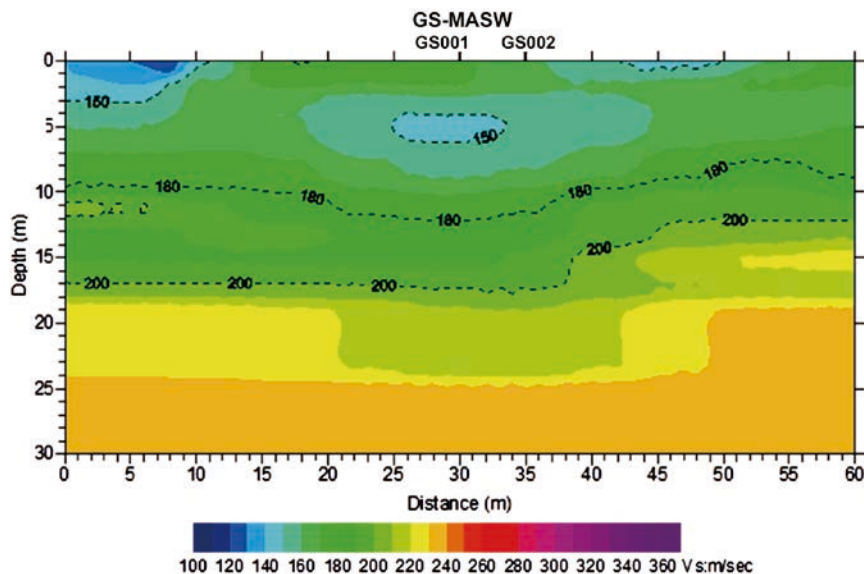


圖 15 多頻道表面波量測震測法之土層二維 S 波速度成果圖

結論

本文係採常用土層剪力波波速量測四種技術，分別為懸盪式速度井測、下孔式速度井測、跨孔式速度井測、多頻道表面波量測震測法等四類地球物理探量測技術，針對基隆河河岸某一場址，其地表下 30 公尺內之土層進行剪力波波速調查，相關現地量測案例顯示：

1. 原則上土層波速隨深度增加而增加，大致由每秒 140 公尺增至每秒 240 公尺，且此四種探測技術測得之土層 S 波波速分布狀況均相仿，足見探測技術具相當穩定性與準確性。
2. 懸盪式速度井測、下孔式速度井測，以及跨孔式速度井測結果較為接近，可能原因為此三類探測技術均是在土層中直接量測剪力波波速；而多頻道表面波量測震測則是透過表面波反算推估土層剪力波波速，多次分析反算均會造成波速計算誤差量較高。

參考文獻

1. 陳正興、陳家漢 (2014)，「地震引致的土壤液化與側潰現象」，科技發展，第 498 期，第 12-17 頁。
2. 黃俊鴻、陳正興、蔡祁欽、王國隆、許尚逸、楊炫智、張為光、陳家漢 (2016)，「美濃地震台南地區土壤液化與地工災害之踏勘調查」，國家地震工程研究中心報告，報告編號 NCREE-16-004，臺北，臺灣。
3. Wightman, W.E., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K. (2003), Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems, Report No. DTFH68-02-P-00083, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, Colorado, U.S.A.
4. Butler, D.W. (editor-in-chief) (2005), Near-Surface Geophysics, Investigations in Geophysics No. 13, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 525-550.
5. Society of Exploration Geophysicists of Japan. (2014), Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems, European Association of Geoscientists & Engineers (EAGE), Houten, the Netherlands.
6. 胡志昕、謝盛雄、蔡曜竹、謝文誠、王鶴翔 (2017)，「地球物理探測在土壤液化區之研究」，工程環境會刊，第 37 期，第 60-75 頁。
7. Hayashi, K. (2003), "Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Waves," the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003) Short Course, San Antonio, Texas, U.S.A.

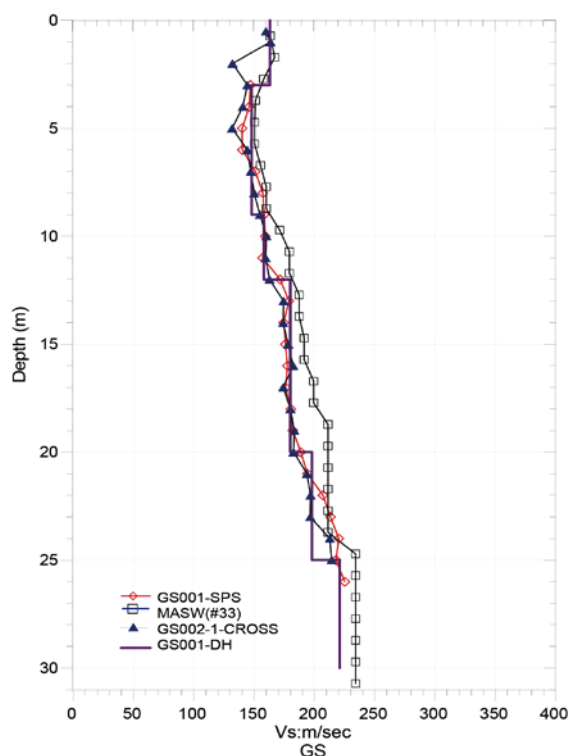
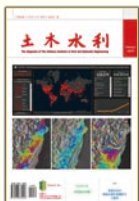


圖 16 觀山河濱公園各項調查之土層剪力波速度成果比較圖



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏／封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3 期 9 折， 4 期以上 8.5 折	

刊登月份：

○ 47.3 ○ 47.4 ○ 47.5 ○ 47.6 ○ 48.1 ○ 48.2 共 次
(6月) (8月) (10月) (12月) (2月) (4月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收掣據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱： (請蓋公司印)
商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款 帳號	0	0	0	3	0	6	7	8	金 額 新台幣 (小寫)	仟萬	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	--------------------	----	----	----	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- ☐ 常年會員年費 1,200 元
☐ 初級會員年費 300 元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

- ☐ 國內・個人會員 新台幣 300 元
☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 1,800 元
自第 卷第 期起， 年期雙月刊 份

訂閱中國土木工程學刊，一年八期

- ☐ 國內・個人會員 新台幣 1,600 元
☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 3,600 元
☐ 國外・個人 美金 80 元
☐ 國外・機關團體 美金 200 元
自第 卷第 期起 年期學刊 份

收款戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄 款 人	
地 址	主管：	
電 話	經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

- ◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓 名		款 別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	繳納會費 ☐ 常年會員年費 1,200 元 ☐ 初級會員年費 300 元
會員證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 ☐ 國內・個人會員 新台幣 300 元 ☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 1,800 元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
身分證號碼			訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期 ☐ 國內・個人會員 新台幣 1,600 元 ☐ 國內・非會員及機關團體 新台幣 3,600 元 ☐ 國外・個人 美金 80 元 ☐ 國外・機關團體 美金 200 元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
卡 別 ☐ VISA ☐ MASTER CARD ☐ JCB			白天聯絡電話
信用卡卡號			通信地址
信用卡簽名欄最後三碼			
信用卡有效期限 (月 / 年)			
信用卡簽名			
繳 費 金 額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請 寄 款 人 注 意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

分毫不差

才足以教人驚豔

搏得滿堂喝采的每一場演出，廣為客戶信賴的每一回肯定，
台灣世曦連番榮耀背後的，永遠都只是「專業」的累積，
以及「用心」的執著。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

FEGC

五楊高架段

國道 4 號臺中環線
豐原潭子段 714 標

台肥南港漢來大飯店

板橋 Google 大樓

豐富經驗

永續經營

台 61 白沙屯

淡江大橋

台中車站

台中捷運

創新工法

永保領先



台中捷運井基精進工法



TPKE Google 辦公大樓無支撐工法



與日本 JV 預鑄住宅大樓



台肥 C2 旅館及辦公大樓



遠揚營造工程股份有限公司