

卜特蘭石灰石水泥混凝土 性質與使用手冊介紹

楊仲家 / 國立臺灣海洋大學河海工程學系 教授、台灣混凝土學會 理事長

呂良正 / 國立臺灣大學土木工程學系 教授

詹穎雯 / 國立臺灣大學土木工程學系 教授、台灣混凝土學會 名譽理事長

陳育聖 / 財團法人臺灣營建研究院 組長

梁喬茵 / 財團法人臺灣營建研究院 研發工程師

前言

近年地球暖化、氣候變遷加劇，為節能減碳保護地球，臺灣也積極地跟上國際的減碳腳步，蔡前總統在 2021 年 4 月 22 日世界地球日宣示 2050 淨零轉型是全世界目標，也是臺灣的目標，目前全球已有超過 130 個國家宣示在 2050 年達到溫室氣體的淨零排放。而國發會在 2022 年 3 月 30 日正式公布臺灣 2050 淨零排放路徑及策略後，同年底國發會再進一步宣布「淨零轉型 12 項關鍵戰略行動與計畫」，以落實推動 2050 淨零，並將 2030 年臺灣減碳目標上修至 $24 \pm 1\%$ ，這數字比先前預定的 20% 來得更高，這也是政府有史以來時程最長、規模最大國家發展計畫。可見全世界及我國對淨零排放的高度重視及決心，營建產業自無法置身於外，面對淨零轉型的巨大浪潮，未來營建業中每個角色都要想盡辦法來減碳。

2023 年初立法院三讀通過「氣候變遷因應法」，將 2050 淨零排放目標入法，預計 2025 年將針對年排碳量逾 2.5 萬公噸，近 300 家排碳大戶開徵碳費，依 2021 年度溫室氣體排放情形來看，除電力業外，以塑化、水泥、鋼鐵產業排放占比為最高。若臺灣的碳費

費率要對標世界平均水準，預期企業未來將面臨每年 20% 以上的碳費漲幅，因此企業轉型勢在必行。企業若要減少碳排甚至是增加碳匯，必須從製程減碳、增加再生能源使用比例及碳捕捉等方面著手。有鑑於此，國內水泥生產廠家多已制定轉型計畫，包括綠能、鈣迴路技術碳捕捉、循環經濟及低碳水泥等，預計於 2030 年減碳 25% ~ 27%，其中以石灰石水泥取代傳統卜特蘭 I 型水泥為一快速有效的方法，因此國內水泥廠近年亦積極開發生產石灰石水泥並進行製程之調整，目前已有多家水泥廠可量產石灰石水泥，本文將介紹本團隊以石灰石水泥應用於混凝土之研究成果，以及所編撰「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」內容，使讀者能對卜特蘭石灰石水泥之應用有更進一步的瞭解。

卜特蘭石灰石水泥添加礦物摻料之混凝土試驗規劃

卜特蘭石灰石水泥為 CNS 15286 中所規定的混合水泥，過去工程會施工綱要規範規定「若工程使用水硬性混合水泥時，不得另添加礦物摻料」，這對於國內已習慣使用三合一配比的混凝土來說，採用 V 但不添加飛灰

和爐石粉，如此反而會增加混凝土總體碳排，完全沒有達到減碳的效果，因此本團隊規劃一系列試驗來比較添加礦物摻料與卜特蘭 I 型水泥在添加礦物摻料後之差異，以供各界參考並作為規範修正的依據。

本試驗以國內廠商生產的卜特蘭 I 型水泥和卜特蘭石灰石水泥 (IL) 進行各種礦物摻料添加比例的探討，包含 50% 爐石粉、25% 飛灰、35% 爐石粉 +15% 飛灰、35% 爐石粉 +30% 飛灰，並搭配 3 種水膠比 (0.4、0.5、0.6) 進行試驗，各組配比如表 1 所示，進行的試驗項目說明如下。

混凝土新拌性質

混凝土新拌性質試驗將包含坍度、坍損 (40 分)、單位重、含氣量、泌水率、初終凝、氯離子含量、pH 值等。

混凝土力學性質試驗

混凝土力學性質試驗包含抗壓強度、彈性模數及劈裂抗張強度試驗。其中，抗壓強度試驗將依據 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法」進行，試驗齡期分別為 3 天、7 天、28 天、56 天、91 天及 180 天，

共 6 個齡期；彈性模數試驗將依據 ASTM C469「Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression」進行，試驗齡期為 28 天及 56 天；劈裂抗張強度試驗將依據 CNS 3801「混凝土圓柱試體劈裂抗張強度試驗法」進行，試驗齡期為 28 天及 56 天。

混凝土體積穩定性試驗

混凝土體積穩定性質試驗包含自體收縮、乾燥收縮及塑性收縮。其中，自體收縮試驗將於 1 天拆模後開始量測，乾燥收縮將於養護 7 天後開始量測，並依據 CNS 14603「硬固水泥砂漿及混凝土長度變化試驗法」進行量測。

混凝土耐久性試驗

混凝土耐久性試驗包含氯離子擴散係數 (Ponding test)、非穩態氯離子遷移係數試驗 (RCM) 及硫酸鹽浸泡試驗。其中，氯離子擴散係數將依據 ASTM C1543「Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding」進行，試驗齡期為 56 天；非穩態氯離子遷移

表 1 不同礦物摻料取代比例之混凝土配比

礦物摻料 取代率	配比 編號	w/cm	配比材料用量 (kg/m ³)							
			水泥	爐石	飛灰	水	粗粒料		細粒料	藥劑 (%)
							六分	三分		
飛灰 25%	F25H	0.4	345	0	115	184	162	648	871	1.0
	F25M	0.5	278	0	92	185	162	648	952	1.0
	F25L	0.6	233	0	77	186	162	648	1004	1.0
爐石粉 50%	S50H	0.4	230	230	0	184	162	648	894	1.0
	S50M	0.5	185	185	0	185	162	648	967	1.0
	S50L	0.6	155	155	0.0	186	162	648	1019	1.0
爐石粉 35% 飛灰 15%	S35F15H	0.4	230	161	69	184	162	648	874	1.0
	S35F15M	0.5	185	129	56	185	162	648	954	1.0
	S35F15L	0.6	155	108	47	186	162	648	1006	1.0
爐石粉 35% 飛灰 30%	S35F30H	0.4	161	161	138	187	162	648	853	1.0
	S35F30M	0.5	130	129	111	185	162	648	939	1.0
	S35F30L	0.6	109	108	93	186	162	648	991	1.0

係數試驗將依據 NT BUILD 492 「Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments」進行，試驗齡期為 56 天；硫酸鹽浸泡試驗將參考 CNS 14794 「水硬性水泥砂漿棒暴露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法」進行，於試體養護 28 天後開始測試。

混凝土性能驗證結果

工作性

每組混凝土配比皆以 20 ± 2 cm 作為設計坍度，試驗結果如圖 1 所示。由試驗結果可以看出，兩種水泥混凝土之 40 分鐘坍損沒有很明顯的差異。僅有幾組配比的坍損稍大一些，包含卜特蘭 I 型水泥混凝土組添加 50% 爐石

粉、35% 爐石粉 +15% 飛灰及 35% 爐石粉 +30% 飛灰於高水膠比時 40 分鐘坍損較大，分別為 2.0 cm、2.5 cm 及 5.0 cm；而卜特蘭石灰石水泥混凝土則在添加 50% 爐石粉且水膠比 0.6、35% 爐石粉 30% 飛灰且水膠比 0.5 時 40 分鐘坍損較大，分別為 3.0 cm 及 4.5 cm。

凝結時間

凝結時間試驗結果如圖 2 所示，試驗結果顯示，大部分配比中，卜特蘭石灰石水泥混凝土的初凝時間和終凝時間，較卜特蘭 I 型水泥混凝土快，初凝時間約快 0 ~ 1.7 小時、終凝時間約快 0 ~ 2.8 小時；僅有添加飛灰 25% 在高水膠比時，卜特蘭石灰石水泥混凝土凝結時間較慢，約差 0.2 小時。

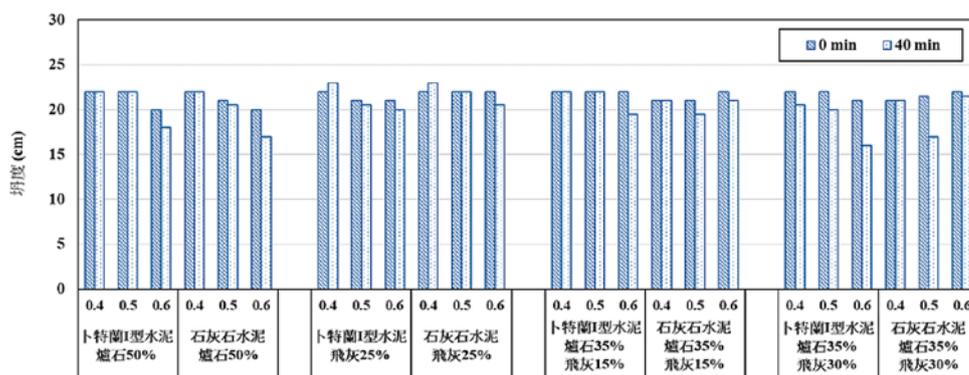


圖 1 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土坍度變化比較

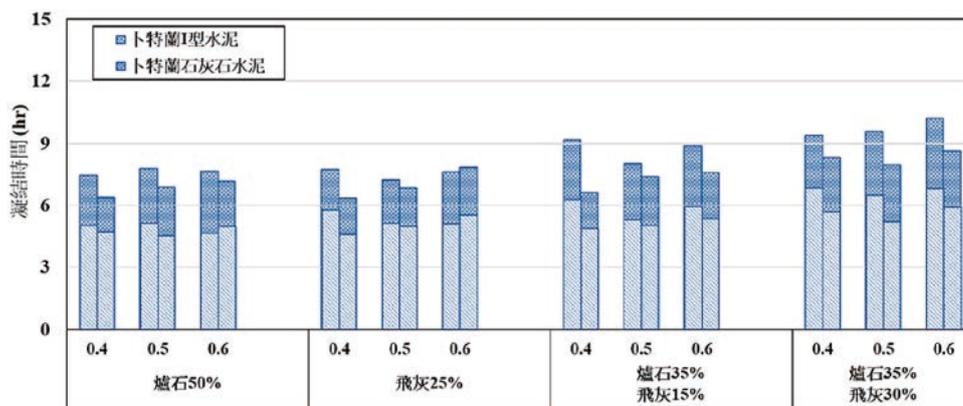


圖 2 卜特蘭石灰石水泥與傳統卜特蘭水泥混凝土初終凝時間比較

泌水率

由泌水率試驗結果可看出，如圖 3 所示，卜特蘭石灰石水泥混凝土不論水膠比及礦物摻料添加比例，整體泌水率較卜特蘭 I 型水泥混凝土平均且大多低於 4%，除了添加 25% 飛灰在高水膠比 0.6 時泌水率較高，約為 11.4%。另一方面，卜特蘭石灰石水泥混凝土與卜特蘭 I 型水泥混凝土之泌水率關係中，可以看出與

水膠比有較大關係。其中，低水膠比時，卜特蘭石灰石水泥混凝土泌水率皆高於卜特蘭 I 型水泥混凝土，而高水膠比時，卜特蘭 I 型水泥混凝土整體泌水率大幅提升，因此相較卜特蘭石灰石水泥混凝土而言，高出約 1.7 ~ 3.5 倍。

抗壓強度

抗壓強度試驗結果如圖 4 所示，由試驗結果可看出較為顯著的差異為，卜特蘭石灰石水

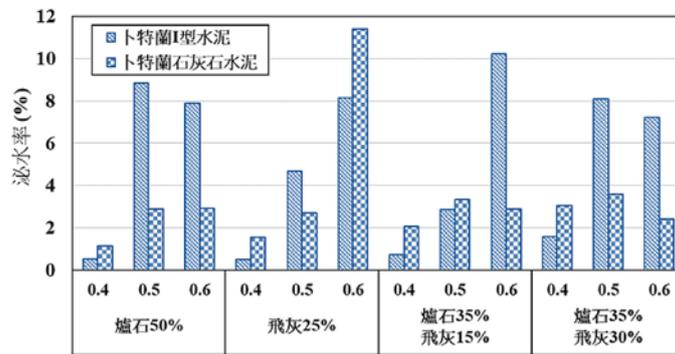


圖 3 卜特蘭石灰石水泥與傳統卜特蘭水泥混凝土泌水率比較

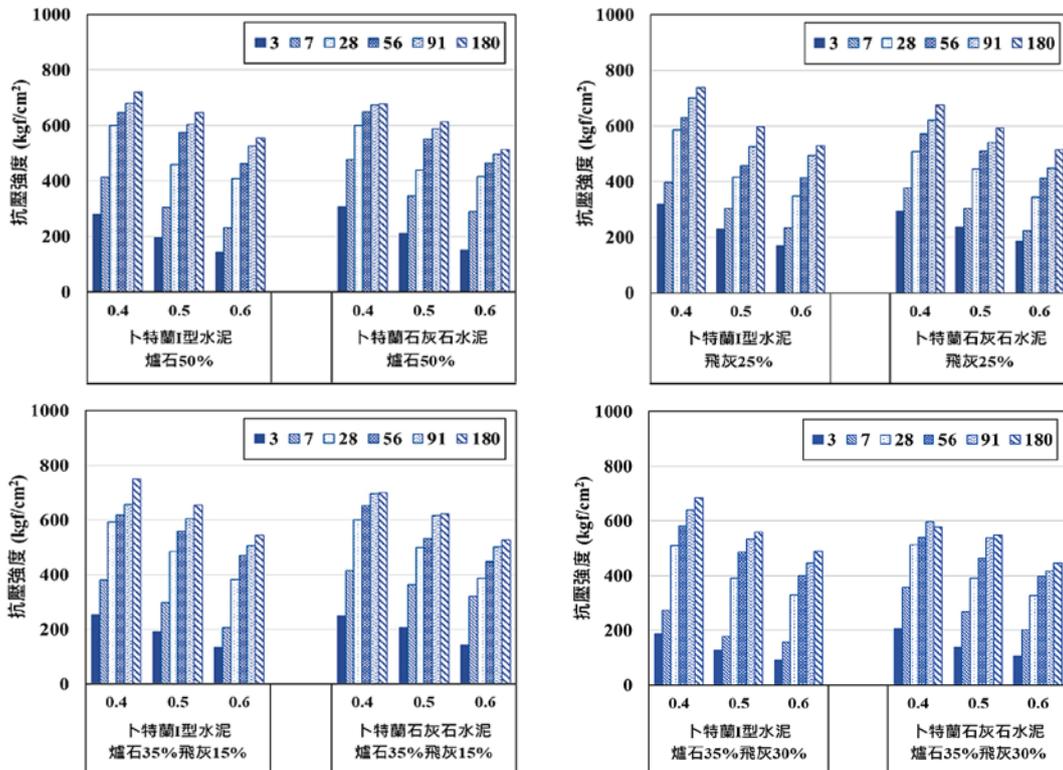


圖 4 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土抗壓強度比較

泥混凝土的早齡期抗壓強度，較卜特蘭 I 型水泥混凝土為高，其中又以有添加爐石粉的組別更為明顯，爐石粉取代 50% 之組別，7 天抗壓強度約增加 13% ~ 40%，爐石粉取代 35% 及飛灰取代 15% 之組別約增加 10% ~ 63%，爐石粉取代 35% 及飛灰取代 30% 之組別約增加 17% ~ 59%，而僅飛灰取代 25% 的組別，則與卜特蘭 I 型水泥相近。

而在 28 天與 56 天齡期時，卜特蘭石灰石水泥的混凝土抗壓強度與卜特蘭 I 型水泥相近或略高，而在較長的 91 天及 180 天齡期，則有部分組別較卜特蘭 I 型水泥為低，其差異約在 10% 以內。

彈性模數

彈性模數試驗結果如圖 5 所示，由試驗結果可看出，大部分卜特蘭石灰石水泥的組別，其彈性模數較卜特蘭 I 型水泥組別為高，其中爐石粉取代 50% 之組別，28 天齡期約增加 8% ~ 22%，56 天齡期約增加 0% ~ 19%，其餘組別則相近或略高。

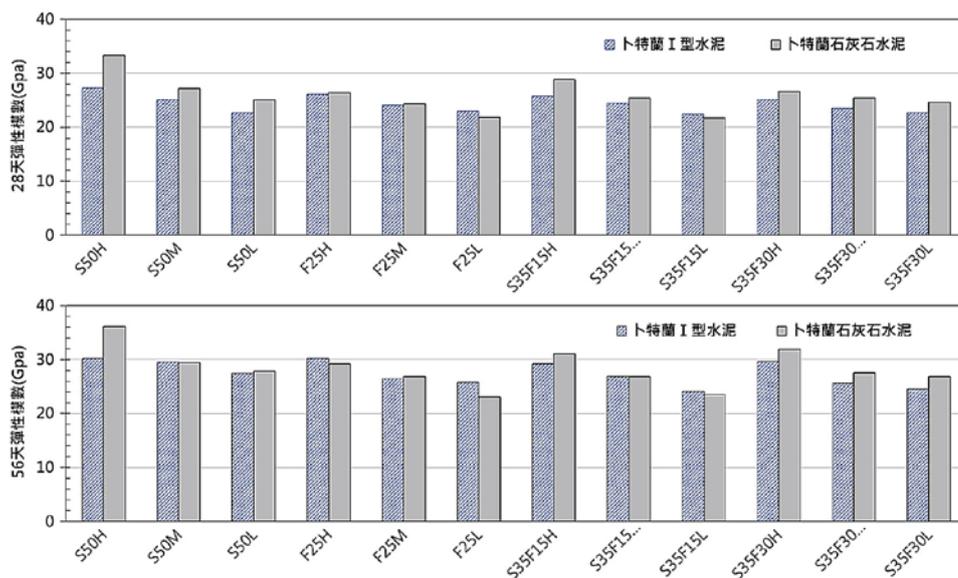


圖 5 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土彈性模數比較

劈裂強度

劈裂強度試驗結果如圖 6 所示，由試驗結果可看出，28 天齡期時大部分卜特蘭石灰石水泥的組別，其劈裂強度略高於卜特蘭 I 型水泥組別，而 56 天齡期則與卜特蘭 I 型水泥組別較接近，其中爐石粉取代 35% 及飛灰取代 15% 之組別，28 天齡期約增加 0% ~ 28%，56 天齡期約增加 3% ~ 14%，其餘組別亦有類似的現象。

體積穩定性

自體收縮試驗結果如圖 7 所示，由圖中可看出無論是純水泥或添加爐石粉 35% 飛灰 15% 的組別，其混凝土的自體收縮發展趨勢非常接近。而乾燥收縮試驗結果如圖 8 所示，由圖中可看出卜特蘭石灰石水泥的乾燥收縮量有略低於卜特蘭 I 型水泥的現象，但差異有限。

硫酸鹽侵蝕試驗

硫酸鹽侵蝕試驗結果如圖 9 所示。由圖中可看出，無論是純水泥或添加爐石粉 35%

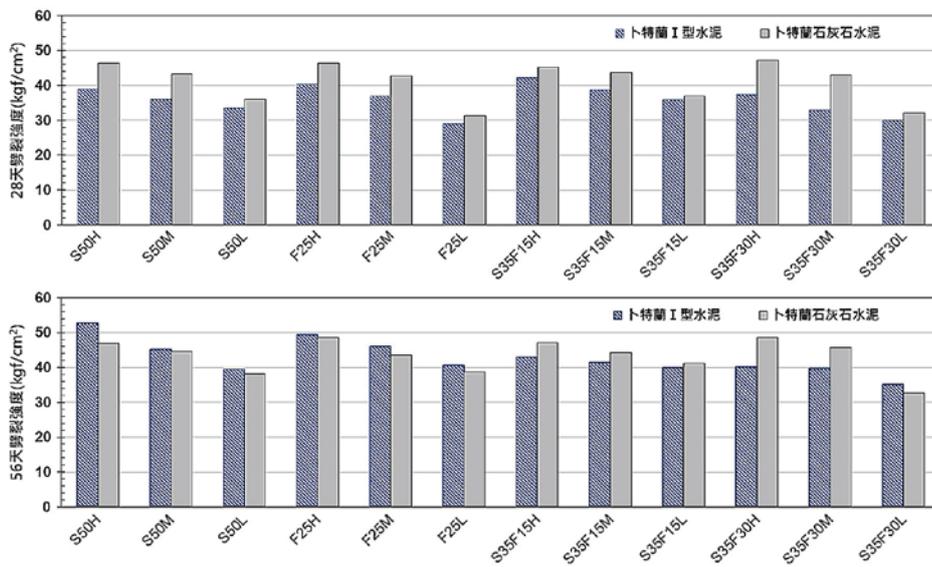


圖 6 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土劈裂強度比較

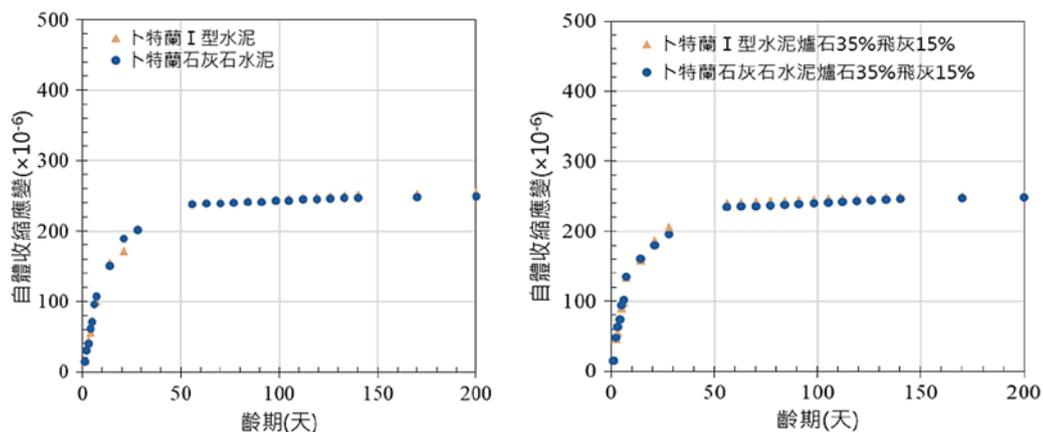


圖 7 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土自體收縮比較

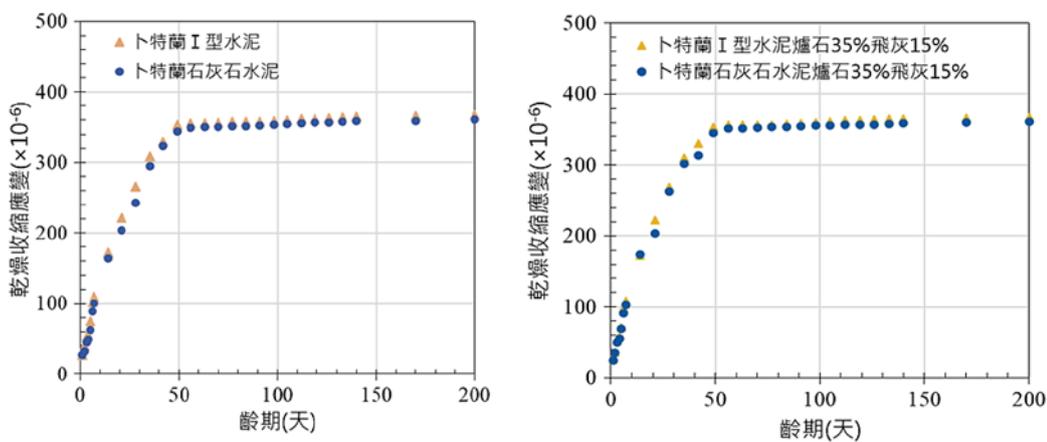


圖 8 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土乾燥收縮比較

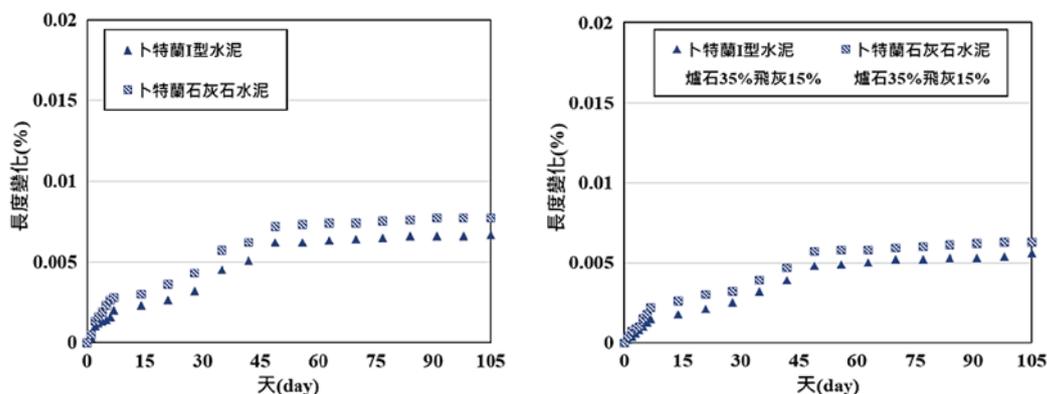


圖 9 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥混凝土浸泡硫酸鹽長度變化

飛灰 15% 的組別，卜特蘭石灰石水泥混凝土浸泡硫酸鹽後的長度變化率，皆較卜特蘭 I 型水泥混凝土為高，浸泡 15 週後，長度變化率約差 0.0007% ~ 0.001%。另一方面，當混凝土中添加輔助膠結材料後，其浸泡硫酸鹽後的長度變化量皆會明顯降低，而卜特蘭石灰石水泥添加爐石粉 35% 飛灰 15% 後的長度變化量，則與卜特蘭 I 型水泥混凝土相當，此試驗結果顯示，雖然卜特蘭石灰石水泥混凝土的抗硫酸鹽侵蝕性能較卜特蘭 I 型水泥差，但在添加輔助膠結材料後仍有效地改善。因此，若工程有暴露於硫酸鹽環境，可依相關規範進行膠結材料組合後之硫酸鹽溶液浸泡試驗並量測其膨脹率，以確保混凝土有足夠抵抗硫酸鹽侵蝕之能力。

非穩態傳輸係數試驗 (RCM)

非穩態傳輸係數試驗結果如圖 10 所示，當採用純水泥配比時，卜特蘭石灰石水泥混凝土的非穩態傳輸係數略高於卜特蘭 I 型水泥混凝土，在添加 35% 爐石粉及 15% 飛灰後，卜特蘭 I 型水泥混凝土降低了 68%，卜特蘭石灰石水泥混凝土降低了 79%，此結果顯示，添加爐石粉及飛灰，有助提升混凝土抵抗氯離子之耐久性能。

氯離子擴散係數試驗

貯鹽試驗之氯離子擴散係數試驗結果如圖 11 所示，當採用純水泥配比時，卜特蘭石灰石水泥混凝土的氯離子擴散係數與卜特蘭 I 型水泥混凝土相當，在添加 35% 爐石粉及

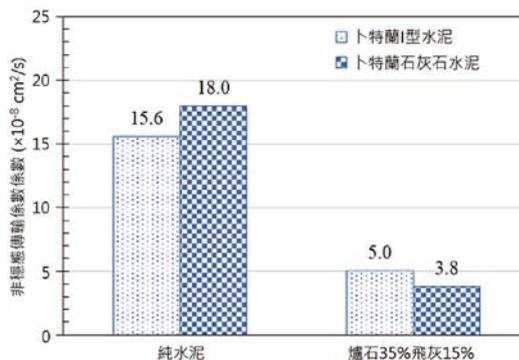


圖 10 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥非穩態傳輸係數比較

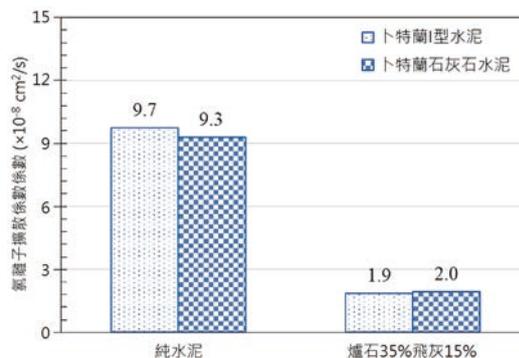


圖 11 卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥氯離子擴散係數比較

15% 飛灰後，卜特蘭 I 型水泥混凝土降低了 80%，卜特蘭石灰石水泥混凝土降低了 78%，此結果同樣顯示，添加爐石粉及飛灰，有助提升混凝土抵抗氯離子之耐久性能。

卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊

台灣混凝土學會為了提供工程界對於卜特蘭石灰石水泥在混凝土工程上正確使用方法，以確保混凝土工程之品質，並期能降低混凝土之碳排，以達到節能減碳之目標，特於今年 4 月出版「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」如圖 12。

此手冊編撰小組的召集人為台灣混凝土學會理事長楊仲家教授，委員包含臺灣營建研究院呂良正院長、臺灣大學土木系詹穎雯教授、台灣水泥公司林尚毅資深經理、亞東預拌公司邱暉仁經理、臺灣營建研究院陳育聖組長、李銘智研究員、許瑞紋工程師、梁喬茵工程師等人；另外亦委由審查小組協助審視手冊之內容，審查小組的召集人為臺灣大學土木系詹穎雯教授，委員包含台灣混凝土學會楊仲家理事長、國土管理署陳威成專門委員、臺灣大學土木系廖文正教授、中央大學土木系王韡菡教授、金門大學土木系卓世偉教授、中興顧問公司梁智信主任、林同棧顧問公司彭康瑜副總經理、臺灣營建研究院彭獻生博士等。

手冊共分 7 個章節，包括第一章「總則」、第二章「石灰石水泥」、第三章「石灰石水泥混凝土之性質」、第四章「石灰石水泥混凝土之應用及效益」、第五章「配比設計」、第六章「混凝土之產製與施工」、第七章「品質管理」。手冊之內容則包括使用石灰石水泥混凝土之設計與施工各主要階段應注意事項及所需資訊，簡述如下。

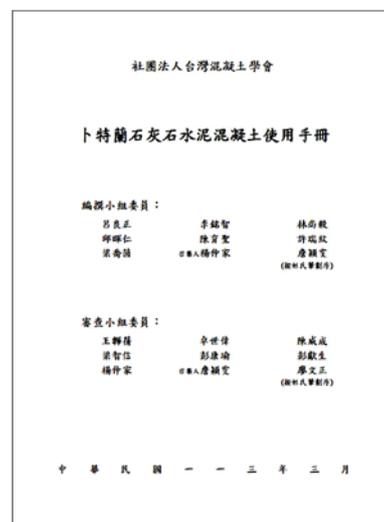
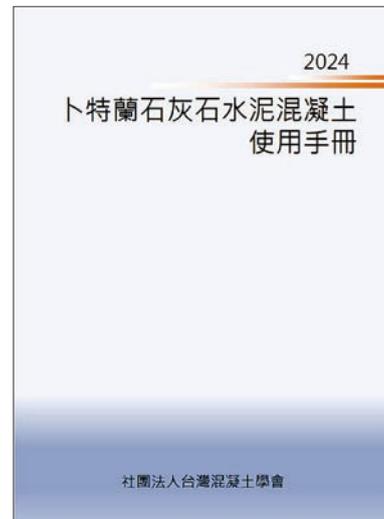


圖 12 PLC 使用手冊之封面及內頁^[1]

材料

材料之品質為混凝土品質之基礎，混凝土所需使用之各種材料，包含水泥、水、粗粒料、細粒料、輔助膠結材料及化學摻料等均需符合國家標準，本手冊不再另外說明，而石灰石水泥其品質則應符合 CNS 15286 「水硬性混合水泥」之規定，管制項目為其化學成分與物理性質，詳如第二章。產製石灰石水泥之廠商與預拌混凝土廠宜參考該章相關規定將石灰石水泥納入品管作業中，以確保石灰石水泥之品質。

石灰石水泥混凝土之性質說明如第三章所述，使用石灰石水泥之混凝土不論在新拌性質與硬固性質，與卜特蘭 I 型水泥混凝土並沒有太大的差異，但工程單位在選擇材料時，仍應對石灰石水泥有足夠之認識，以發揮石灰石水泥混凝土之最大效益。

配比設計

石灰石水泥混凝土之應用案例及效益詳如第四章，而石灰石水泥混凝土應依據使用目的及其混凝土所需求之性能，做適當之配比設計，詳如第五章所述，配比設計方面最重要的事項應以能達混凝土性能要求為基本原則，石灰石水泥混凝土配比設計後，應經試拌確認其混凝土品質及工程性質，符合要求方可使用。

施工

有關石灰石水泥混凝土拌和與產製應注意事項詳如本手冊第六章所述，混凝土預拌廠應依 CNS 3090 [預拌混凝土] 相關規定進行產製作業，施工單位在進行澆置、養護與拆模時，應依工程特性與施工環境參照本手冊之規定辦理。

品質管理

石灰石水泥混凝土之品質管理與檢驗應注意事項如本手冊第七章所述，該章係參照 CNS 15286 [水硬性混合水泥] 及內政部「結構混凝土施工規範」之相關要求編撰。

卜特蘭石灰石水泥已成為國際趨勢

歐洲使用石灰石水泥已有近 60 年的歷史，依據歐洲水泥協會（Cembureau, European Cement Association）統計資料

顯示，2000 ~ 2010 年間歐洲使用最多的水泥類型為 CEM II（Portland composite cement，卜特蘭混合水泥），約占總使用量之 60%，而 CEM II 水泥中又以卜特蘭石灰石水泥的使用量最高，約占 CEM II 水泥用量的一半，推估歐洲石灰石水泥的使用量約占全部水泥用量的 30%；美國約從 2020 年底開始大量生產石灰石水泥，當時卜特蘭水泥協會（Portland Cement Association, PCA）推出了一個網站，透過討論混合水泥的應用和優點來促進其使用，並於 2021 年 10 月發布混凝土的碳中和路線圖，其中石灰石水泥即被列為減碳的重要途徑，而截至 2024 年 2 月為止，美國各州皆已同意使用石灰石水泥^[2,3]。國內在產官學各界的努力下，於今年 5 月初所召開的施工綱要規範編審會議中，已將第 03050 章的條文修改為：「若工程使用水硬性混合水泥時，不得另添加礦物摻料。惟使用 IL（卜特蘭石灰石水泥）經工程司提出第三者專業機構驗證，並報經機關同意後，可另添加礦物摻料」，未來工程師在進行混凝土工程的減碳設計與施工時，又多了一個利器，也讓混凝土產業的 2050 淨零碳排目標更加接近一步。

參考文獻

1. 社團法人台灣混凝土學會（2024），「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」。
2. R.D. Hooton, M.A. Nokken, and M.D.A. Thomas, (2007). "Portland-Limestone Cement: State-of-the-Art Report and Gap Analysis for CSA A3000", Cement Association of Canada, SN 3053.
3. <https://www.cement.org/cement-concrete/cement-and-concrete-basics-faqs/lists/cement-concrete-basics-faqs/what-is-portland-limestone-cement> 