



台灣混凝土學會積極推動低碳與循環經濟趨勢下的規範變革

台灣混凝土學會秘書長 / 邱暉仁

因應全球氣候變遷及循環經濟趨勢，水泥與混凝土的組成原料將有所變革，包含水泥使用各式工業副產品替代石灰石、鐵礦、矽礦、燃料、或調整熟料比例，亦或混凝土使用多元膠結材輔助材料替代部分水泥等，相關混凝土規範勢必檢討與修訂。為此，台灣混凝土學會近年來推動規範檢討與修訂工作，主要概述如下：

混凝土氯離子規範修訂

1. 新增硬固混凝土水溶性氯離子規定

本會於歐昱辰主任委員的協助下，已完成修訂內政部國土管理署「建築物混凝土結構設計規範」中硬固混凝土之規範值，並已於 113 年 2 月 19 日以內授國建管字第 11308007841 號函勘誤「建築物混凝土結構設計規範」部分之規定，於第 19.3 節混凝土耐久性要求之混凝土中氯離子含量相

關規定進行了修正（如表 1、表 2），以參考 ACI 318-19 之硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量限值，替代既往作為新建混凝土工程之施工品質控管之新拌混凝土中氯離子含量規定，即 CNS 3090 中對於新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量限制值為 0.15 kg/m^3 。其中對於非預力混凝土，ACI 318-19 要求硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量為相對於配比中總膠結材質量比，並針對不同暴露環境給予合適之含量限值，其中 C0 為乾燥環境，例如沙漠地區，因鋼筋腐蝕之疑慮甚低，因此允許更高的混凝土氯離子含量，該分級不適用於臺灣海島環境，而對於臺灣潮濕環境多屬於 C1 等級，其氯離子與總膠結材質量比上限皆為 0.30%；鄰近海濱之環境因有外來氯鹽之影響，則歸屬於 C2 等級，其氯離子與總膠結材質量比上限皆為 0.15%；對於預力混凝土，不論暴露程度，氯離子與總膠結材質量比上限皆為 0.06%。



表 1 勘誤前新版規範表 19.3.2.1 中混凝土中氯離子含量

暴露分級	最大 w/cm	最小 f_c' (kgf/cm ²)	新拌混凝土中最大水溶性氯離子 (Cl-) 含量, kg/m ³		額外規定
			非預力混凝土	預力混凝土	
C0	N/A	210	應符合 CNS 3090「預拌混凝土」中有關「新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量」之相關規定		—
C1	N/A	210			—
C2	0.40	350			混凝土保護層厚度

表 2 勘誤後新版規範表 19.3.2.1 中混凝土中氯離子含量

暴露分級	最大 w/cm	最小 f_c' (kgf/cm ²)	硬固混凝土中最大水溶性氯離子含相對於配比中 總膠結材質比 (%)		額外規定
			非預力混凝土	預力混凝土	
C0	N/A	210	1.00	0.06	—
C1	N/A	210	0.30	0.06	—
C2	0.40	350	0.15	0.06	混凝土保護層厚度

內政部國土管理署亦於 113 年 12 月 19 日以台內國字第 1130814258 號令頒布「施工中建築物混凝土氯離子含量檢測實施要點」，以逐步將硬固混凝土中最大水溶性氯離子含量限值納為工程勘驗報告之一環。另已建請內政部地政司將「成屋買賣定型化契約應記載及不得記載事項」中，原使用新拌混凝土氯離子規定，改成硬固混凝土的氯離子規範，一方面落實耐久性設計。

2. 調整新拌混凝土中水溶性氯離子之規定值

根據日本土木學會的混凝土標準示方書— 施工篇規定，新拌混凝土中氯離子含量限

制為 0.3 kg/m³。而臺灣 CNS3090 標準歷經多次修訂，1994 年規定一般環境之新拌鋼筋混凝土構件 (RC) 中水溶性氯離子含量限制為 0.6 kg/m³，需考量耐久性環境之 RC 為 0.3 kg/m³，預力混凝土構件 (PC) 中水溶性氯離子含量限制為 0.15 kg/m³；1998 年修訂將 RC 的環境考量去除，以最嚴格之 0.3 kg/m³ 為標準；2015 年進一步將 RC 標準制定為更嚴苛的 0.15 kg/m³，故 RC 與 PC 新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量限制皆為 0.15 kg/m³，如表 3 所示；惟此水溶性氯離子含量向下修訂是因應早年部分不肖建商使用淡水河海砂，致生海砂屋問題及輿論壓力，較欠缺科學依據，應有修正空間。

表 3 新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量限制整理

國家	規範	新拌混凝土中最大水溶性氯離子含量 (kg/m ³)
日本	混凝土標準示方書施工篇	0.30
台灣	CNS 3090 預拌混凝土	0.15



因應淨零碳排政策，本會在水泥公會及預拌混凝土公會的合作下，建請國家標準檢驗局於 CNS 61 中，I 型水泥氯離子含量由 240 ppm 提升至 350 ppm，以及 CNS 3090 中，一般混凝土氯離子含量由 0.15 kg/m^3 提升至 0.3 kg/m^3 。目前國家標準技術委員會已審查通過。預計近期將公告實施。

卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊之制訂

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，未來營建業應配合於各階段減碳。

有鑑於此，國內水泥生產業者多已推動包括綠能、鈣迴路技術碳捕捉、循環經濟及低碳水泥等減碳方案，預計於 2030 年減碳 25% ~ 27%，其中以卜特蘭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，目前已有多家水泥廠可量產卜特蘭石灰石水泥。

台灣混凝土學會以「結合從事混凝土材料與工程相關之產官學力量，共同促進混凝土科技提升及產業發展，增進工程品質」為宗旨，近年與國內多家水泥廠合作，積極驗證卜特蘭

石灰石水泥與傳統卜特蘭水泥的物理特性及化學特性，以及使用不同礦物摻料、不同骨材的施工性與耐久性影響，並已於 113 年 3 月將團隊以卜特蘭石灰石水泥應用於混凝土之研究成果編撰成「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」，以使工程產業界能對卜特蘭石灰石水泥之應用有更進一步的瞭解。

該手冊內容說明卜特蘭石灰石水泥應用於混凝土時，兩種水泥混凝土之 40 分鐘坍損沒有很明顯的差異，卜特蘭石灰石水泥混凝土的初凝時間和終凝時間則較卜特蘭 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；在抗壓強度部分卜特蘭石灰石水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，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% 以內且皆已高於配比之設計強度值。彈性模數試驗結果，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，體積穩定性上無論是純水泥組別或添加爐石粉 35% 飛灰 15% 的組別，其混凝土的體積穩定發展趨勢非常接近。

至於環境耐久性部分，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，但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，顯示若工程有暴露於



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。在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 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。

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。

國內在產學的努力下，已建立「卜特蘭石灰石水泥混凝土使用手冊」，將有助於工程師在進行混凝土工程的減碳設計與施工時應用，也讓混凝土產業的 2050 淨零碳排目標更加接近一步。

近年來台灣地區混凝土品質有長足的進步，但是泵送施工管理上則需共同來合作來改善，尤其是泵送人員的教育訓練與人員、泵車的認證制度建立。日本全國混凝土壓力輸送商業協會聯合會透過產業安全衛生法規定的特殊教育、完成特殊教育者的再教育、舉辦的全國統一安全技術研討會、混凝土泵送核心技術人員的培訓、合格混凝土泵送施工技術人員的施工推廣、推動混凝土泵車法定檢驗等，值得我們台灣來效法改進。

表 4 卜特蘭石灰石水泥混凝土第三方驗證結果彙整表

項目	石灰石水泥（PLC）混凝土 vs. I 型水泥混凝土
工作性 （坍度、坍損）	與 I 型水泥混凝土相當或 P 略佳
泌水率	與 I 型水泥混凝土相當或 P 略佳
凝結時間	PLC 混凝土較短，初凝約減少 0 ~ 1.7 小時，終凝約減少 0 ~ 2.8 小時。
抗壓強度	PLC 混凝土 3 天及 7 天抗壓強度略高於 I 型水泥混凝土，28 天後則相當。 添加 35%S+15%F 和 50%S 表現更佳
彈性模數、劈裂強度	與 I 型水泥混凝土相當或略佳
乾燥收縮、自體收縮	與 I 型水泥混凝土相當
抗硫酸鹽能力	PLC 混凝土略差，同 I 型可透過添加礦物摻料改善
抗氯離子能力	與 I 型水泥混凝土相當
不同粒料之影響	與 I 型水泥混凝土一致