

生物型自癒混凝土之發展與應用

林仲威 / 羅威科技股份有限公司 總經理

邱暉仁 / 台灣混凝土學會 秘書長

前言^[1]

混凝土為最常用的建築材料之一，它已被廣泛應用於建築、水壩、儲槽、海港、道路、橋梁、隧道、地鐵等基礎設施的建設，在許多領域發揮著不可或缺的作用。混凝土主要是水、骨材（粗骨材和細骨材）和水泥的混合物，其中水泥是混凝土材料中最重要的部分，它黏結所有原料，並填補粗顆粒和細顆粒之間的空隙，以達到高抗壓強度、耐久性以及與鋼筋的相容性，亦具有低廉的價格、簡單的施工和容易按所需形狀和尺寸澆鑄的可能性，使混凝土成為許多工程所選擇使用的材料。

儘管混凝土具有許多優點，但它易形成裂縫，從而使腐蝕性化學物質滲透到結構中，而裂縫是混凝土劣化和耐久性下降的主要原因之一。混凝土裂縫可以在塑性和硬固狀態下形成，發生原因包括混凝土表面水分的快速流失、模板移動、塑性沉降和塑性收縮導致混凝土在塑性狀態下產生裂縫；另外，老化、乾燥收縮、熱應力、設計細節誤差、化學反應、潛變應力、外部荷載等因素則都是混凝土硬化狀態下裂紋形成的原因。

此外，混凝土結構的抗拉強度和延展性相對較低，為解決抗拉強度和延展性低的問題，混凝土通常採用預埋鋼筋進行強化；透過鋼筋可有效控制塑性收縮對裂縫寬度的束制，但不能完全防止裂縫的形成。雖然裂縫在早期不會危及混凝土的強度，但其形成則

無疑會對混凝土的長期壽命造成嚴重的威脅。每年，世界上許多國家都撥出可觀的預算用於修復現有的水泥混凝土結構，據統計，混凝土裂縫修復和維護的直接成本估計為每立方公尺 147 美元，而此成本實已較混凝土的生產成本 65 ~ 80 美元 / 立方公尺為高。因此，採取預防措施抑制和阻止混凝土裂縫的早期形成是至關重要的工作。

混凝土裂縫和孔隙的處理一般可分為被動處理和主動處理二類，被動處理只能修復表面裂縫，而主動處理則可以填充混凝土內部和外部的裂縫。為了提高耐久性並防止腐蝕性材料滲透到混凝土中，被動處理可以通過外部塗層來完成，如化學混合物或聚合物的應用。在被動處理中，用於密封的化學材料（膠）將被注入或噴射到裂縫中，這些密封劑通常包括環氧樹脂、氯化橡膠、蠟、聚氨酯、丙烯酸和矽氧烷等；雖然此類被動處理適用於許多現有的混凝土結構，但它們仍具有許多使用上的限制而阻礙其修復。其中使用化學密封劑的缺點是耐候性差、潮濕敏感性低、耐熱性低、不可持續性、及與混凝土的黏結行為較差，此外隨修復時間的增長，將產生解離和分層的可能性，此問題之原因可能主要來自於混凝土和密封劑之間存在不同熱膨脹係數所造成。

主動處理技術亦稱為自癒合技術，可以在不同的條件下獨立運行，而不受裂縫位置的影響，它們還具有在裂縫形成時立即激活

以封閉裂縫的能力。混凝土的自癒合機制可以通過三種主要策略來建立 (1) 混凝土自癒合；(2) 高分子材料的封裝；(3) 微生物生產碳酸鈣等；其中最理想的修復方法應該具有高品質、耐用期長、應用廣泛性和無限次重覆癒合裂縫的能力。

混凝土自癒合是存在水分或潮溼的情況下，混凝土裂縫修復的自然過程。混凝土自癒合係藉由未水化的水泥顆粒水化或溶解的氫氧化鈣碳化以填充混凝土裂縫的過程，其中氧化鈣因水合作用產生氫氧化鈣，氫氧化鈣可與大氣中的二氧化碳發生反應；從方程式 1 和方程式 2 可以看出，這些反應將產生碳酸鈣。由於其豐富的性質和與膠凝成分的相容性，碳酸鈣是一種用以堵塞混凝土中孔隙和裂縫最有效的填充物。



混凝土自癒合的成功與否在很大程度上取決於周圍環境中的水或濕度、未水化水泥的數量和混凝土基質成分等因素。此外，也有人指出，只有 0.1 ~ 0.3 mm 的裂縫才能通過混凝土自癒合來填充。雖然降低水灰比是改善混凝土自體癒合的一種實用方法，然而，增加水泥摻量以降低水灰比會對混凝土收縮和工作性產生不利的影響，應用時應權衡其優缺點。

高分子材料的封裝是另一種主動處理的方法。這種方法可以通過在存在水分的情況下將癒合劑轉化為泡沫來填充裂縫。雖然從混凝土內部的空心纖維中釋放化學物質可以填充裂縫，但在許多情況下，這些材料的性能與混凝土成分不同，在某些情況下，它們可能會導致現有裂縫的擴展。此外，該技術

需要膠囊以封裝修補需要的化學物質，這種膠囊需要可以很容易與混凝土均勻混合，並能在混凝土基體中存活。更重要的是，所嵌入的膠囊必須能長期保護癒合劑，且不能影響混凝土的工作性和力學性能。基於這些要求，商業化的封裝技術在自癒混凝土的應用上是一個較難以實踐的範疇。

由於現有混凝土自癒方法的缺陷，需要開發替代的創新主動修復技術。近年來，以生物應用技術作為解決主動和被動修復的議題引起了研究人員的注意，其中生物癒合過程是以生物礦化生產碳酸鈣為基礎的技術。若這種創新處理方法的成功實施將會延長混凝土結構的使用壽命，並顯著減少水泥生產和結構更換。

生物型自癒原理

存在於自然界的大量細菌中，只有少數細菌能夠存活在澆置後的混凝土中。這些特殊的菌種不僅能適應混凝土的高鹼性環境，還能形成孢子以抵抗大多數不同形式的侵害，如高壓、化學物質侵蝕、高溫 and 缺水環境。而當有適當的營養物質和水供給時，孢子就會發芽，把它們從新陳代謝不活躍的細菌轉變成為具有活力的細菌。此種活性細菌可以產生石灰石作為一種代謝的副產物，特別是在鹼性和鈣離子豐富的环境中，例如在混凝土中（圖 1）。

石灰石或碳酸鈣是一種相容於混凝土的材料，非常適合用於封阻（或阻水）混凝土的裂縫。全世界已有好幾個研究單位開發出以細菌為基礎的混凝土癒合劑，可用以增強水泥漿、砂漿和混凝土於開裂後的自癒能力。台夫特理工大學（Delft University of Technology）研究小組的創新性實驗室研究表明，以乳酸為基

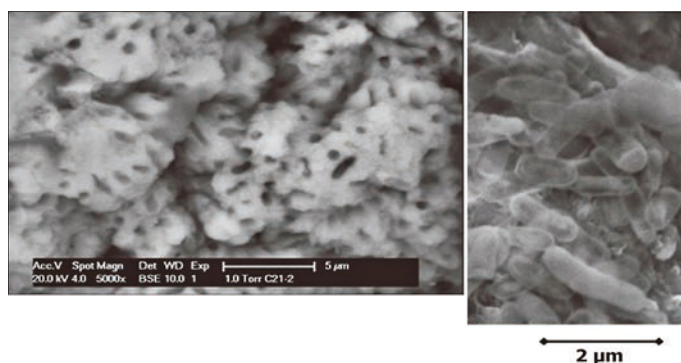


圖 1 混凝土中存在的活性細菌可以產生石灰石作為一種代謝的副產物^[2]

礎的有機化合物，如乳酸鈣和乳酸聚合物，是適合細菌的碳源化合物並且與混凝土相容，因為以它們作為混凝土添加劑時，在一定摻用範圍內並不會對混凝土的強度發展產生負面影響。此外，根據歐洲外加劑標準，則已允許乳酸作為混凝土外加劑。

由台夫特理工大學研究小組開發的這種基於細菌的自癒劑成分包括細菌孢子和營養物質，其中細菌孢子可抵抗並存活於混凝土中，而營養物質是孢子萌發所必需的鈣源。而激發此自癒劑的物質是進入混凝土裂縫的水，它會引發暫時休眠於混凝土中的細菌孢子開始萌發。當具有活性的細胞隨後將乳酸衍生物轉化為以碳酸鈣為基礎的不溶性礦物質形成、堵塞和防水裂縫。

因此，基於細菌的自癒劑的應用領域僅限於暴露在潮濕條件下的混凝土，因為需要水來激活細菌。另外，在混凝土生產和澆築的過程中，混凝土的 pH 值遠遠高於 11.5，因此在這一階段不發生芽孢的活化；當 pH 值因為外部水進入裂縫而降至 8 ~ 11.5 範圍內時，應用的親鹼細菌孢子始會被激活（萌發）。

生物型自癒劑應用於混凝土之效益

混凝土自癒：自癒原劑（healing agent）是使混凝土擁有自癒能力的關鍵原料，它是一種固體粒子狀的添加劑，尺寸約 0 ~ 2 mm，可添加至乾燥或潮濕的砂漿或混凝土中使用，每立方米最高可使用 10 公斤。只要熟料

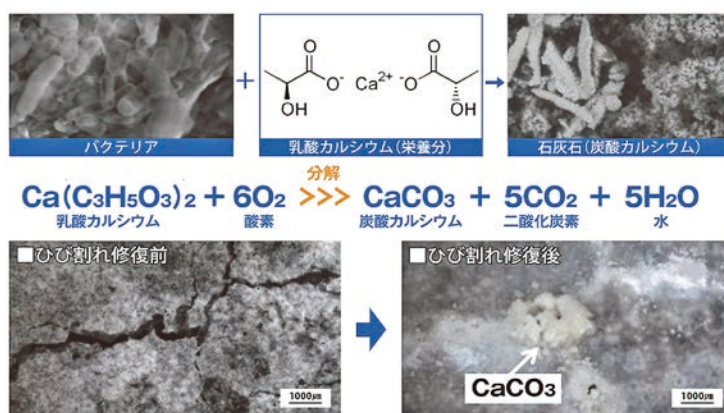


圖 2 台夫特理工大學研究以乳酸為基礎的細菌混凝土癒合劑修復原理^[2]

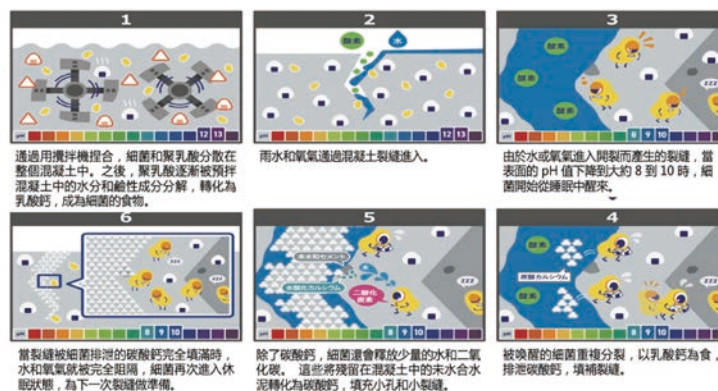
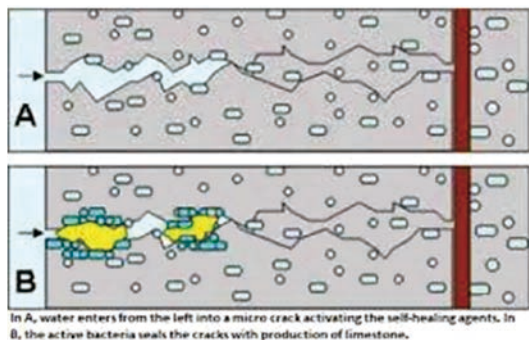


圖 3 台夫特理工大學研究之乳酸為基礎的細菌混凝土癒合劑修復過程^[2]

含量超過 30% 的普通水泥都可以使用。分佈在砂漿或混凝土中的自癒原劑粒子會在建築物表層出現裂縫或孔隙、並有水份滲入時開始作用。當原劑接觸到水時，裡面的細菌會被啟動並自行將原劑裡的成分轉化為含有碳酸鈣並將 0.8 mm 內的裂縫或孔隙封住。這種機制可大幅降低維修成本並延長建築物的使用壽命。

修復裂縫：自癒原劑最適合用在表面需要避免水份滲入的區域，例如蓄水池、地下室、水上建築物或灌溉系統。使混凝土保持水密非常困難，目前的所用的方式包含使用防水膜或增加鋼筋來降低裂縫的寬度、使混凝土能夠恢復原本的水密性。以後者來說，有時增加的鋼筋會比原本的設計高出一倍的量，這些多加的鋼筋除了對建築物在使用上沒有幫助外，也會增加環境和經濟成本，也可能因為複雜而密集的鋼筋籠而增加灌注的難度而影響品質。



增加表面密度：混凝土表層的品質對於建築物的使用壽命和耐用性非常重要。除此之外，混凝土表層必須處於良好的狀態以保護裡面的鋼筋，建築物才能利用鋼筋來緩解對抗拉力的不足。混凝土表層若處於良好狀態時，水分是很難被吸收的，這也代表有害物質不易滲入混凝土內部。

使用後的差異

自癒原劑可使裂縫成為水密狀態，可修復的裂縫也比未添加原劑的混凝土寬兩倍以上。由於原劑是屬於碳酸鹽類的物質，因此須避免接觸過強的酸性溶劑以免降低修復效果，但對於阻擋一般水分的滲入則沒有任何限制。而且自癒原劑能夠重複使同一條裂縫形成水密狀態，這是與其他產品、例如膨脹型添加劑，最不同的地方。既使讓同一條裂縫開裂三次，裂縫一樣會完全修復。

經過更多次針對裂縫漏水的自癒測試後，在無水壓的狀態下可以修復的裂縫寬度可達 1 mm，若是在有水壓的狀態下，建議依水壓強度留一個適當的導水孔。

添加自癒原劑的另一項功能是可加強混凝土的表面密度。添加自癒原劑可使吸水率減少一半以上，使有害的物質不易滲入，因此可延長混凝土的壽命。

成本

由於添加自癒原劑可使自行修復的裂縫寬度增加兩倍，因此可減少控制開裂的鋼筋的使用量、略為放寬原本可承受的裂縫寬度。這樣的作法可減少成本與對環境的影響，而附加的優點是建築物不再需要為了維修而停止使用。由於添加自癒原劑會增強混凝土表面密度，使有害物質不易滲入，因此可減少一半的維修率。



圖 4 生物型自癒混凝土裂縫自修補的過程^[2]

生物型自癒混凝土於工程實例應用之介紹

生物型自癒劑雖是近年才開發之產品，然其已於國外許多混凝土工程中予以應用並驗證其功效，以下我們以鹿特丹港口的消防蓄水池案例來介紹生物型自癒混凝土的效果，而該工程之相關資訊彙整如表 1~表 5。

本案例之施工分別先在兩側區域 1 至 9 及 11 至 19 澆置混凝土，待隔牆定型後（收縮及膨脹）後，再澆置第 10 區的混凝土。這樣的施工方式是便於之後比較區域 10 及 9 以及 10 及 11 之間冷縫的滲水情形。自癒原劑僅在南側的混凝土摻用，以比較南、北兩側阻水之差異性，而兩側之滲水觀察如下說明。

南側（添加自癒原劑）

2019 年 4 月 25 日的觀察可發現，於冷縫中間高程的 10B 處已有形成明顯的碳酸鈣

（石灰石）修補痕跡，這部分在 2018 年 12 月 19 日的監測中亦已有觀察到相似狀態，而此處裂縫周圍的大黑斑，可能是由於施工期間的各種條件（脫模油使用過量、在脫模時造成殘留等）所造成表面的色差現象，並非因滲水所造成之顏色，因為此處壁體表面實已乾透。在北側（未添加自癒原劑）圖約略相同位置的 10D 處，則可觀察到潮濕與黑斑所造成的不同色差，在此處可以明顯看出冷縫是呈現潮濕狀態，但由於色差的緣故，在右側出現一個黑斑。

在南側的 10C 處（冷縫接近地表的高程處）則表面呈現完全乾燥，但此處於 2018 年 12 月 19 日的監檢結果顯示此裂縫於之前是為潮濕狀態，在 5 個月後之自癒修復實已達到止滲的效果。

北側（未添加自癒原劑）

1. 2019 年 4 月 25 日於北側 10B 處的觀察可發現，冷縫的表面仍然是（明顯）潮濕狀態，顯示混凝土雖亦可自然形成石灰石，但是此作用係因為新拌混凝土在剛開始的一至二週內產生卜作嵐反應的自我修復效果（即白華），但由於水槽底部冷縫處較寬且水壓較大（水壓約 5 米高程），則混凝土自然生成之石灰石量並不足以修補該裂縫。
2. 在 2019 年 4 月 25 日的 10D 處其垂直裂縫的表面仍然是潮濕狀態，觀察其表面並未產生卜作嵐反應，顯示混凝土無法自我修復。雖然此高度的水壓遠低於結構底部的水壓，但裂縫（冷縫）的寬度可能導致無法產生卜作嵐反應。
3. 在 11C 部分，自 12 月 19 日開始監視以來，此裂縫處並未產生任何變化且表面可

清楚看到因自我修復的石灰石痕跡，此高度的水壓也低於結構底部之水壓（圖 10B）。雖然此高度等於 10D 裂縫處之高度，但裂縫寬度則僅為 0.1 毫米，由此對照 10D 之現象可以說明混凝土雖然可形成石灰石以自我修復，但當裂縫寬度大於 0.1 毫米以上者，則可能該自我修補的機制並無法完全填充裂縫，至使裂縫滲水之問題將持續發生。

本項結構之設計非常完美，因此可在設計（水泥類型、鋼筋）及施工（施工及灌漿順序）方面防止形成裂縫，同時也因添加了自癒原劑作為額外補強措施，使得最終於任何一側均無新的裂縫發生。



圖 5 鹿特丹港口地面型消防用水儲存槽試驗案例 (1) [2]



圖 6 鹿特丹港口地面型消防用水儲存槽試驗案例 (2) [2]

表 1 本工程專案之基本資料

專案資料	
名稱	Bluswaterbassin Rotterdam (BWR) P20180602
完成年分	2018
結構	地面型消防用水儲存槽
地點	荷蘭鹿特丹港
委託單位	鹿特丹港務局
承包商	BAM Infra

表 2 本工程專案混凝土使用之水泥類型與材料組成

混凝土成分	
水泥類型	CEM III/B 42,5 N 320 ~ 340 kg/m ³
普通波特蘭水泥	33.3 %
水泥熟料	66.7 %
混凝土水灰比	< 0.5
自癒原劑用量	5 kg/m ³
補充說明	CEM III/B 屬於一種低波特蘭水泥 (OPC) 含量的重要水泥類型，根據結構技師使用規範，最終的強度可能低於標準組混凝土，但仍可符合規定範圍。由於添加自癒原劑的關係，可容許裂縫寬度將提升為 0.27 毫米，因此可考慮減少鋼筋使用量。

表 3 本工程設計之結構設計條件

結構設計	
強度等級	C30/37 (劈裂抗拉 度 30 Mpa、方塊試體強度 37 Mpa、彈性模數 32 Gpa、抗拉強度 2.9 Mpa)
環境條件 (曝露等級)	外部 XC4 (乾溼交替) 內部 XF4 (凍融循環度高，會接觸除冰劑或海水)

表 4 本工程設計之設計規格

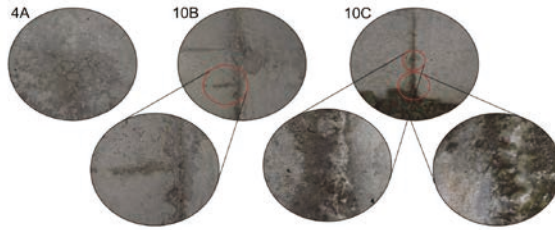
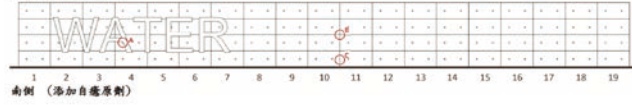
設計規格	
隔牆厚度	300 mm
可允許裂縫寬度	0.12 mm (鋼筋配比依此參數設計)
結構高度	4,900 mm
水位高度	4,200 mm
滲流量	0.13 L/min (依 Poiseuille 公式計算)
結構長度	47,200 mm
結構寬度	5,350 mm
混凝土用量	
• 含自癒原劑	70 m ³
• 不含自癒原劑	284 m ³
• 總計	354 m ³
示範性專案之原則	水槽於其北側設有未添加自癒原劑之隔牆，而南側的隔牆則添加自癒原劑。

表 5 本工程設計之混凝土強度

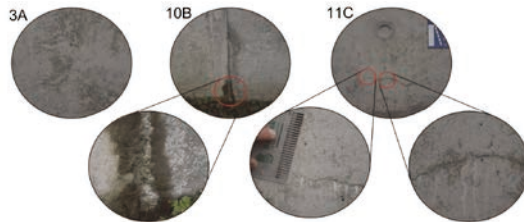
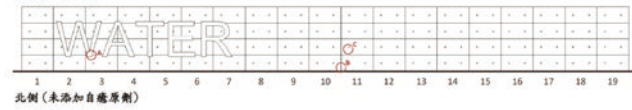
28 天養護結果		
	自癒性混凝土	標準組混凝土
抗壓強度 (立方體)	41.7 N/mm ²	41.9 N/mm ²

現場裂縫滲水照片記錄

觀察時間：2018/12/19



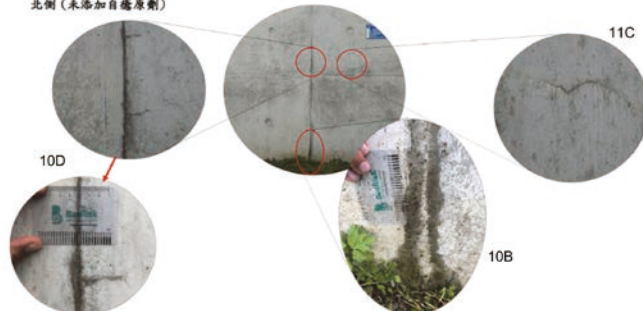
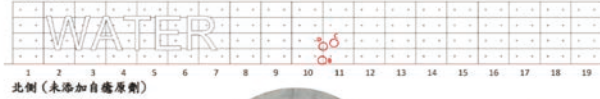
觀察時間：2018/12/19



觀察時間：2019/4/25



觀察時間：2019/4/25



生物型自癒原劑之使用指南

在混凝土拌合料添加自癒原劑時的注意事項。

石灰石形成的條件：

1. 持續保持潮濕。細菌需要水和氧氣才能被激活。
2. 若在環保等級 XA1 至 XA3（根據 EN 1992-1-1：2004）的混凝土添加自癒原劑時，必須事前和 Basilisk 研討建築物之功能與特性。
3. 在混凝土表面使用抗菌藥劑將影響自癒原劑的效果。
4. 每分鐘的水流量不得超過 1.4 公升，結構體之可容許裂縫寬度，可依牆壁厚度和所承受的水壓按附件 I-A 所述的 Poiseuille 公式計算。
5. 水泥類型：水泥熟料含量不得低於 30%，若水泥熟料含量低於 50%，請和 Basilisk 聯絡，水泥含量會影響自癒原劑之劑量及可容許裂縫寬度。
6. 激活自癒原劑所需的水溫應在攝氏 10 及 40 度之間，最佳溫度為攝氏 20 度。

混凝土添加自癒原劑後的注意事項

1. 養護：添加自癒會影響強度的養成，影響的關鍵在於水泥中的水泥熟料含量。若有不確定性或參考數據不足時，建議在施工前先測試含有自癒原劑的試體，以便確認強度養成狀況。根據現有資料，我們觀察到以下情形：
 - 水泥熟料含量在 50% 以上時（CEM I / CEM III A）：於前 72 小時內，強度養成可能會較緩，但經 28 天養護後的最終強度將高於標準組混凝土的強度。
 - 水泥熟料含量最低在 30% 時（CEM III B / CEM III A）：於前 72 小時內，強度養成可能較緩，而所需的最終強度有可能

低於控制組混凝土的強度時。

2. 乾縮裂縫：上述的因素將會影響乾縮情形，因此有時須選用不同類型的水泥來控制開裂程度。在混凝土中添加自癒原劑可輔助控制乾縮的情形。
3. 裂縫寬度：石灰石所能修補的最大裂縫寬度（部分區域）會因依水泥熟料含量而定，計算出的 w_{crit} 代表可防止滲漏的最大裂縫寬度。通常可參考下列資訊：
 - 水泥熟料最低含量為 50% 之波特蘭水泥：可容許裂縫寬度達 0.8 毫米（包含）
 - 水泥熟料含量至少為 30% 之波特蘭水泥：可容許裂縫寬度達 0.4 毫米（包含）
4. 效果：關於混凝土添加自癒原劑後可產生的效能，請施工單位參照關於上述所提之要點。

若考慮將鋼筋減量，可參考石灰石可修補的最大裂縫寬度，並請注意水泥的類型會影響修復性能。

結論

混凝土建築物或構件需要防水時可添加自癒原劑，尤其是當裂縫寬度不易控制（< 0.2 mm）或必須增加成本時（例如增加鋼筋用量），使用自癒原劑可協助解決問題並節省成本。

參考文獻

1. Mostafa Seifan, "Bioconcrete: next generation of self-healing concrete", School of Engineering, Faculty of Science and Engineering, The University of Waikato, Hamilton, New Zealand.
2. Renée M. Morsa, Henk M. Jonkers, "Bacteria based self healing concrete: evaluation of full scale demonstrator projects", RILEM Technical Letters (2019) 4: 138-144. 