

活體建築展望：生物代謝與自癒合機制之綠建材研究

(1) 書籍或文章之閱讀動機：從「古羅馬盔甲」到「生物皮膚」

建築，長久以來被視為抵禦環境侵蝕的死物。然而，在全球氣候變遷與減碳壓力下，傳統建材的碳足跡與維護成本已成沉重負擔。我的閱讀動機始於對兩個極端時間點的對比：二千年前的古羅馬萬神殿（Pantheon）與二十一世紀的工程活體材料（ELMs）。萬神殿的長壽揭示了一種「被動防禦」的智慧。透過閱讀關於「熱混合技術（Hot mixing）」與「石灰碎屑（Lime Clasts）」的研究，我發現古羅馬混凝土如同一具「具有自結痂功能的盔甲」。它在材料內部預留了修復因子，一旦水分入侵，便啟動礦物反應封堵裂縫。然而，這種被動機制在現代城市中顯得不足——它無法主動捕捉二氧化碳，且修復深度受限。

隨後，我轉向當代生物科技。閱讀《Matter》期刊中有關 ELMs 的文獻，讓我意識到建築材料可以演化為「具有自癒能力的皮膚」。與萬神殿不同，ELM 引入了活細胞的「代謝路徑」，這不僅是封堵，更是「組織再生」。這種從「被動防禦」轉向「主動感應」的設計邏輯，激發了我針對台灣特殊環境開發「呼吸建材」的強烈動機。

(2) 獲得啟發之章節內容：針對性修復與生物保護機制

透過深度研讀 Jonkers (2011)、Heveran (2020) 等關鍵文獻，我將其核心章節內容轉化為本研究的技術骨幹：

A. 空間針對性：內部儲存庫機制

受 Jonkers (2011) 第 2 章（生物自癒合試劑）啟發，設計核心在於「封裝技術」。不同於萬神殿隨機分布的石灰，現代 ELM 將細菌孢子（如芽孢桿菌）與營養源預先儲存於多孔輕質骨材中。

這種「內部儲存庫」確保了當地震引發裂縫、水氣滲入時，修復反應能精準地在受損核心啟動，而非僅止於表面。

B. 代謝針對性：多樣化的生物引擎

Heveran (2020) 在第 4 節關於「活體材料再生」中提到，透過不同的代謝路徑（如異營尿素分解或二氧化碳濃縮），材料可以獲得不同的機械性能。這啟發我：修復不應只有一種模式。對於結構支柱，應啟動高強度的礦化路徑；對於外牆裝飾，則可啟動高孔隙率的「呼吸路徑」以加強碳捕捉。

C. 檢測科學：量化「活性」

文獻中提到利用「滲透性測試 (Permeability Test)」與「氧氣消耗量測」來監測材料。這讓我明白，一個成功的自癒合設計必須包含一套驗證機制。若水流量降至 0ml/h，則視為 100% 完全癒合，這為我的構想提供了量化的科學標竿。

(3) 反思自己的論述與觀點：台灣土地的在地化實踐

將上述技術置於台灣的地理背景下，我進行了深度的反思與策略調整。台灣具備「高濕度」、「頻繁地震」與「高二氧化碳排放」三大特徵，這使我的設計必須超越文獻中的理想模型。

濕度：從「威脅」轉化為「動力」

在傳統材料學中，台灣的高濕度（平均 75% 以上）是加速鋼筋鏽蝕與發霉的負面因素。但反思後，我認為這反而是 ELM 運作的最佳環境。水氣不再是敵手，而是啟動細菌孢子的「開關」。我的設計構想是：材料表層應具備微孔隙，主動吸附空氣中的水氣與 CO₂，將其引導至內部的修復中心。

地震：針對深層損傷的修復策略

台灣處於地震帶。萬神殿式的「邊緣封堵」雖能防雨，但在強震造成的深層裂縫面前力有未逮。我提出的觀點是：**必須建立「混**

合修復系統」。外層採用仿羅馬的石灰混合物進行快速物理封堵，內層則由 ELM 進行生物性的結構重新連結。這種「雙層防線」能確保震後建築不因內在鏽蝕而迅速失效。

呼吸與減碳：城市規模的碳匯

台灣都市人口稠密，交通排放大量 CO₂。我設想的「呼吸材料」不只是為了自癒，更是為了環境。透過光合細菌（如藍綠菌）的代謝，建築外牆能像植物一樣進行碳捕捉。反思目前的綠建築標章，多偏向節能（EEWH），而我認為「主動貢獻型建材」——即能隨時間增長而持續減碳的材料，才是台灣未來都市更新的關鍵。

(4) 參考文獻

1. **Jonkers, H. M. (2011).** *Bacteria-based self-healing concrete.* (針對細菌封裝與生物礦化基礎理論)
2. **Heveran, C. M., et al. (2020).** *Biomanufacturing of structural living-like materials.* (針對活體材料代謝與再生機制)
3. **Seymour, L. M., et al. (2023).** *Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete.* (針對萬神殿石灰碎屑修復邏輯)
4. **Tang, L., et al. (2021).** *Sensing and Response in Engineered Living Materials.* (針對 ELM 環境感知與主動觸發之分析)
5. **Yildirim, G., et al. (2022).** *Self-Healing of Cementitious Composites to Reduce High CO₂ Emissions.* (針對高濕度環境下之碳中和效益評估)
6. **Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011).** *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete.* (針對裂縫修復率之定量檢測方法)