

國防大學理工學院環境資訊及工程學系

軍事工程碩士班

碩士學位論文

生物自癒混凝土力學性質與裂縫修補能力之研究

The study on the mechanicd properties and the crack  
repair ability of bio-self-healing concrete



研 究 生：丁慶榮

指 導 教 授：陳國賢

共同指導教授：蔡營寬

中華民國一一〇年五月十四日

國防大學理工學院碩士學位論文

指導教授推薦書

環境資訊及工程學系軍事工程碩士班丁慶榮君所提之論文

生物自癒混凝土力學性質與裂縫修補能力之研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授：陳國賢 (簽名)

110 年 6 月 2 日

國防大學理工學院  
學位論文考試委員會審定書

環境資訊及工程學系軍事工程碩士班研究生丁慶榮君，所提  
論文

生物自癒混凝土力學性質與裂縫修補能力之研究

The study on the mechanic properties and the crack repair ability  
of bio self-healing concrete

經本委員會審議，符合碩士學位標準，特此證明。

碩士學位論文考試委員會

委員

翁孟嘉 蔡崇寬  
連國賢

指導教授

連國賢

組長

蔡崇寬

系主任

翁明達

中華民國                      年                      月                      日

## 誌謝

時光飛逝，轉眼間，兩年的研究生活也將接近尾聲了，在行囊滿是收穫及祝福之際，即將畢業了，暮然回首，內心感受五味雜，此時此刻的心情更是充滿著無限的感恩。

本論文能夠順利完成，心中最感謝的就是我的指導老師-陳國賢教授，兩年來悉心指導，無論是在學術上的提攜、生活上的照顧，恩師總是毫無保留的關懷。恩師潛心學術研究，孜孜不倦，為人謙卑。學生有幸追隨恩師求學，不僅在研究態度及方法上啟發良多、受益匪淺，在為人處世方面，更是影響深遠。在此向恩師致上我最崇高的敬意與最誠摯的感激。

再者，口試期間承蒙口試委員國立陽明交通大學土木工程學系翁孟嘉教授及國防大學理工學院環境資訊及工程學系蔡營寬教授的細心指正，提供諸多寶貴意見，使本論文更臻完備，在此致上深深的謝意。

感謝研究所全體同學們的關懷與互相幫助，皓軒、嘉偉、良駿等學長學弟們在這些日子的互相鼓勵，恭喜我們順利走過這兩年並順利畢業。

此外，要感謝我親愛的家人，因為有你們一路的支持與鼓勵，才能讓我無後顧之憂的朝目標挑戰，努力向前。。

最後，僅將這份完成碩士學業的喜悅獻給所有關心、愛護、協助及鼓勵我的你們，謝謝你們總是包容我的一切，給我的支持與鼓勵，感謝你們。

丁慶榮 謹誌於國防大學理工學院

環境資訊及工程學系

# 生物自癒混凝土力學性質與裂縫修補能力之研究

國防大學理工學院環境資訊與工程學系碩士班碩士論文

學生：丁慶榮

指導教授：陳國賢

共同指導教授：蔡營寬

## 摘要

混凝土的脆性本質造成在長期的使用過程中極易產生裂縫，這些裂縫的存在及發展會降低混凝土的強度和耐久性，所以混凝土裂縫修復問題一直是學術界和工程界關注和研究的議題。傳統的裂縫修復方法是在出現或檢測到裂縫後再進行被動修補，因介入時機晚，且往往只能修補淺層之裂縫，故效果不佳。若能在宏觀裂縫產生之前對混凝土結構中的微小裂縫進行及時填充與修補，屬主動修復，具防微杜漸之效，修補效果佳。因此，混凝土裂縫自癒材料的研製及相關自癒技術之研究，因具可有效解決混凝土結構重大問題-裂縫的潛力，而成為熱門之研究議題。本研究即利用自癒原劑及一系列試驗，探討生物自癒混凝土之自癒行為。

試驗包括混凝土工程性質試驗及裂縫修補觀察試驗二類，其中工程性質試驗包含抗壓試驗、吸水率試驗等二種試驗，以了解混凝土加入自癒原劑後，是否可有效提升混凝土強度，降低混凝土的滲透性；而裂縫修補觀察試驗則是為了解混凝土加入自癒原劑後混凝土裂縫修補效果。

研究結果顯示，添加自癒原劑至混凝土中，其 28 天抗壓強度增加 6.2%~18.7%、吸水率減少 3.9%~16.2%，證實因微生物誘導礦化晶作用，形成碳酸鈣沉積而填補混凝土內部微小孔隙以及受外力所產生的裂縫，可減少內部孔隙，而提升混凝土強度；而由裂縫修補觀察試驗，則顯示在本研究試驗條件下，

添加自癒原劑對寬度小於 0.3mm 左右裂縫，有極佳的修補效果。

關鍵詞：生物自癒混凝土、裂縫修復、自癒原劑



# The study on the mechanical properties and the crack repair ability of bio-self-healing concrete

The thesis of Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

MS Student: Ching-Jung Ting

Thesis Advisor: kuo- hsien Chen

Co-Advisor: Ying-kuan Tsai

## Abstract

The brittle nature of concrete results the cracks are easy to form in the long-term use process. The existence and development of these cracks will reduce the strength and durability of concrete significantly. Therefore concrete crack repair has been the important issue of concern and research in academic and engineering practice. The traditional crack repair methods are passive to repair the cracks when they appeared or detected, so the repair effect is not good usually and often can only to effectively repair shallow cracks. If the small cracks in the concrete structure can be filled and repaired in time before the macro cracks are produced, then the repair effect will be good because it is active and preventive. Therefore, the development of concrete crack self-healing materials and related technologies become a hot research topic due to its potential to effectively solve the major problem of concrete structure, i.e. the crack. This study uses self-healing agent and a series of tests to explore the self-healing behavior of bio-self-healing concrete.

The tests include concrete engineering property test and crack repair observation test, in which the engineering property tests, including compression test and water absorption test, will be conducted to understand the effect of

adding self-healing agent on the compressive strength and the permeability of concrete. And the crack observation test is to understand the effect of concrete crack repair after the addition of self-healing agent.

The results showed that adding self-healing agent to concrete, 28 days pressure strength increased by 6.2% to 18.7%, water absorption rate decreased by 3.9% to 16.2%. This confirms that due to microbial induced mineralization of crystals, the formation of calcium carbonate deposition and fill the concrete internal small pores and cracks caused by external forces, can reduce internal pores, and enhance the strength of concrete; The observation test of crack repair shows that under the test conditions of this research, the addition of self-healing agent has an excellent repair effect on cracks with a width less than about 0.3mm.

Keywords: bio-self-healing concrete, crack repair, self-healing agent





# 目錄

誌謝 .....	i
摘要 .....	ii
目錄 .....	vi
表目錄 .....	viii
圖目錄 .....	ix
1. 緒論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動機與目的 .....	2
1.3 研究方法與架構 .....	2
2. 文獻回顧 .....	5
2.1 自癒混凝土的原理 .....	5
2.2 自癒混凝土的自癒技術及其研究現況 .....	5
2.2.1 結晶沉澱法 .....	5
2.2.2 滲透結晶法 .....	6
2.2.3 微膠囊法 .....	8
2.2.4 液芯光纖/纖維法 .....	9
2.2.5 微生物法 .....	11
2.2.6 SMA 法 .....	13
2.3 生物混凝土的性能 .....	14
2.4 細菌生物技術於土木材料上應用研究 .....	16
2.4.1 增加混凝土之抗壓強度 .....	16
2.4.2 降低混凝土之滲透性 .....	17
2.4.3 混凝土裂縫之修補 .....	17
2.4.4 不同環境下混凝土之自癒合效果 .....	18

2.5 混凝土裂縫產生方法.....	18
2.5.1 無損法.....	18
2.5.2 破損法.....	19
3.研究方法.....	20
3.1 試驗目的.....	20
3.2 試驗材料.....	20
3.3 試驗設備.....	22
3.4 自癒原劑.....	25
3.5 試體製作與試驗規劃.....	27
3.5.1 配比設計.....	27
3.5.2 混凝土之拌製.....	27
3.5.3 試體養護方法.....	27
3.5.4 試驗規劃.....	28
4.試驗結果與討論.....	32
4.1 抗壓試驗.....	32
4.2 吸水率試驗.....	36
4.3 混凝土裂縫修補觀察試驗.....	39
5. 結論與建議.....	46
5.1 結論.....	46
5.2 建議.....	47
參考文獻.....	48
自傳.....	52



## 表目錄

表 2.1 微生物劑對抗壓強度，滲透性和吸水率的影響.....	15
表 2.2 控制組與試驗組的抗壓強度比較表.....	16
表 3.1 混凝土配比表.....	27
表 3.2 混凝土抗壓試驗規劃表.....	29
表 3.3 混凝土吸水率試驗規劃表.....	31
表 3.4 混凝土裂縫修補觀察試驗規劃表.....	31
表 4.1 混凝土抗壓試驗結果.....	33
表 4.2 自癒原劑含量對不同齡期抗壓強度增加率結果.....	34
表 4.3 混凝土吸水率試驗結果.....	37
表 4.4 自癒原劑含量對不同齡期吸水率降低率之結果.....	38



## 圖目錄

圖 1.1 研究流程.....	4
圖 2.1 結晶沉澱法自癒的機理圖.....	6
圖 2.2 滲透結晶型材料自癒機理圖.....	7
圖 2.3 微膠囊自癒示意圖.....	9
圖 2.4 液芯纖維法自癒過程示意圖.....	10
圖 2.5 微生物誘導碳酸鈣沉澱的裂縫自癒情況.....	12
圖 2.6 預留裂縫示意圖.....	19
圖 3.1 水泥及天然砂.....	21
圖 3.2 粗骨材及自癒原劑.....	21
圖 3.3 蓋平石膏.....	22
圖 3.4 混凝土拌合機.....	23
圖 3.5 電動混凝土攪拌機.....	23
圖 3.6 100 噸試體抗壓機.....	24
圖 3.7 裂縫寬度觀測儀.....	24
圖 3.8 自癒原劑.....	25
圖 3.9 自癒原劑原理示意圖.....	26
圖 3.10 本研究混凝土試體之養護方式.....	28
圖 3.11 製作完成之混凝土抗壓試體.....	30
圖 4.1 各混凝土抗壓強度試驗組之抗壓強度發展曲線.....	34
圖 4.2 自癒原劑含量對不同齡期抗壓強度增加率之關係圖.....	35
圖 4.3 文獻控制組與試驗組的強度比較.....	35
圖 4.4 各組混凝土吸水率隨齡期之變化圖.....	37
圖 4.5 自癒原劑含量對不同齡期吸水率降低率之關係圖.....	38
圖 4.6 混凝土裂縫修補觀察試驗結果.....	44

圖 4.7 各組混凝土裂縫寬度修補情形隨齡期之變化圖..... 45



# 1. 緒論

## 1.1 研究背景

混凝土材料具有原料豐富、成本低廉、生產流程簡單的優點，故其使用量越來越大；復以混凝土材料又具有較高的抗壓強度、良好的耐久性和強度等級範圍寬等特點，因此被大規模應用於現代土木工程中，包括建築工程、道路工程、地下工程、橋樑工程、核電和水利水電工程、港口和海洋工程等。而隨著混凝土性能的提高和施工技術的改進，目前混凝土工程已朝向高聳結構、巨型結構、大跨結構和特種結構等之應用與發展[1,2]。然而，在長期的使用過程中以及周圍複雜環境的影響下，混凝土會因各種原因而不可避免地產生不同程度的裂縫損害[3-8]。當混凝土結構出現裂縫後，會對混凝土結構的壽命和耐久性造成不利影響，包括導致鋼筋銹蝕，降低結構的耐久性和強度；降低結構對有害介質（水、氣、離子）傳輸的抵抗能力，甚至造成滲漏現象；降低結構的剛度，增加變形量等。因此，當混凝土結構產生裂縫等損傷後，輕者減少結構的使用壽命，重者則會對結構的安全性造成威脅，故採取有效措施針對混凝土結構裂縫進行修復，對增加結構的安全性和提高使用壽命具有重要的意義。

近年來，土木材料與環境工程之專家結合微生物、地質化學，嘗試利用菌體將土壤顆粒固化成類似砂岩之材料。研究焦點在於如何利用自然生物成長過程，在短時間內將淤泥或土壤顆粒固化或固結，而提升土壤材料之強度。這些自然界原本存在之固化作用與演化過程，在試驗室環境內經添加微生物並提供充足的營養源後，即可快速完成複製。

## 1.2 研究動機與目的

微裂縫是一般混凝土幾乎不可避免的特徵，若微裂縫形成連續的網絡，會增加空氣中的水份或腐蝕性物質進入混凝土的機會，增加混凝土的滲透性，造成耐久性降低。但並非所有的初始微裂縫都會發展成有害或不穩定的裂縫，許多研究顯示在某些情況下，一些小裂縫基於水泥的持續水化作用或其他物理和機械行為是可以自行修補[9,10]，這種現象被稱為「自體癒合」或「混凝土自癒」。在混凝土內部，碳酸鈣沉澱被認為是影響混凝土的自體癒合最顯著因素，而生物礦化作用主要行為即為碳酸鈣沉澱作用。

Boquet 等人(1973)研究發現，自然界中某些微生物能通過代謝產生碳酸鈣[11]。受此啟發，科學家們提出了將微生物與混凝土結合的構想，即當有裂縫出現時，微生物能夠誘導產生碳酸鈣之類的礦物質及時修復裂縫。利用微生物對混凝土進行自體癒合相比傳統的修復方法具有及時高效、環保等優點，而且可以通過使用比傳統修補材料更具有混凝土相容性和環境友好性的材料來保護現有混凝土結構。微生物自體癒合可以通過修復混凝土裂縫提高建築材料的耐久性，從而延長使用壽命[12,13]。因此微生物自體癒合在近幾年混凝土裂縫自癒的研究中得到眾多學者的廣泛關注，基於微生物碳酸鈣沉澱的混凝土自體癒合技術的發展也日益成熟。

本研究目的即透過試驗方法探討自癒原劑對混凝土之強化作用與裂縫修補能力之影響情形。

## 1.3 研究方法與架構

本研究透過添加自癒原劑與未添加自癒原劑之混凝土試體，進行混凝土工程性質及裂縫修補觀察試驗，針對試驗結果進行分析、比較，以探討自癒原劑對混凝土工程性質之影響及裂縫修補之能力。

本計畫研究流程圖如圖 1.1 所示，各研究工作分述如后：

### (1) 文獻回顧

分別針對現有國內外曾嘗試探討細菌應用於固化研究之相關文獻，進行整理分析。主要針對生物礦化研究應用於生物自癒混凝土技術之研究成果進行收集分析。

### (2) 自癒混凝土試體製作

本研究依設計的配比分別製作控制組（未加入自癒原劑）與試驗組（加入自癒原劑）試體，其中抗壓試驗、吸水率試驗及裂縫修補觀察試驗之試體為  $\emptyset 10 \times 20\text{cm}$  圓柱試體。

### (3) 生物自癒混凝土試驗

試驗設計為混凝土工程性質試驗及裂縫修補觀察試驗二部分，工程性質試驗包括抗壓試驗（探討自癒原劑對混凝土抗壓強度之影響）、吸水率試驗（探討自癒原劑對混凝土孔隙之影響）。裂縫修補觀察試驗則係利用裂縫寬度觀測儀觀察裂縫修補情形。

### (4) 生物自癒混凝土之成效評估

依據混凝土工程性質試驗及裂縫修補觀察試驗之結果，探討自癒原劑含量對混凝土抗壓強度、吸水率之影響情形，以評估生物自癒原劑應用於混凝土之成效。此外，藉由觀察不同寬度裂縫隨時間之癒合情況，評估自癒原劑對混凝土裂縫修補之效能。



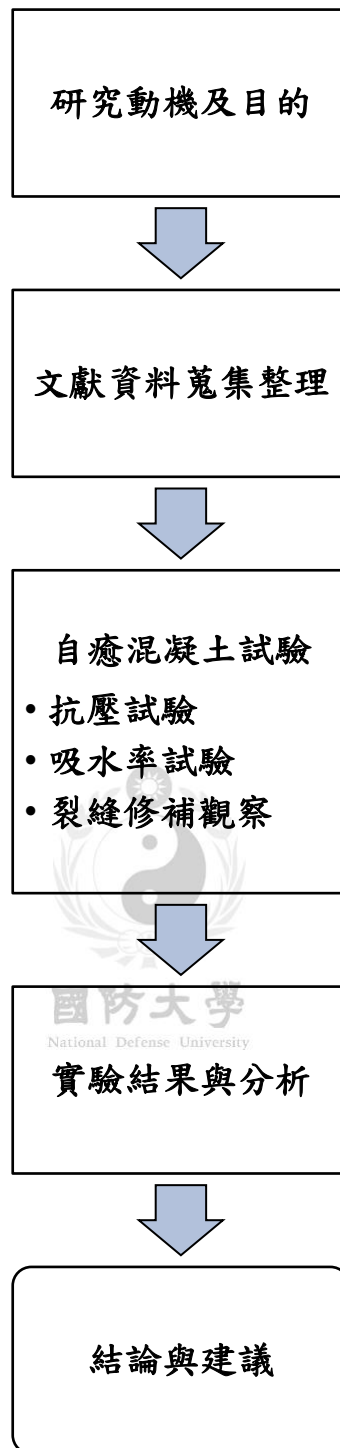


圖 1.1 研究流程

## 2. 文獻回顧

### 2.1 自癒混凝土的原理

自癒的概念離我們並不遙遠，生物的一個特性就是自癒，自癒需要物質和能量的雙重補給，物質具填補作用，而能量為物質填補提供動力。自癒混凝土即模仿生物機體損傷中的骨組織損傷再生機理，採用內含修復性膠粘劑的纖維與混凝土相結合的措施，當混凝土出現裂紋或其他損傷時，膠粘劑可以對其進行修復，達到修復後的材料之各項性能保持正常甚至高於先前材料性能之目的[14]。

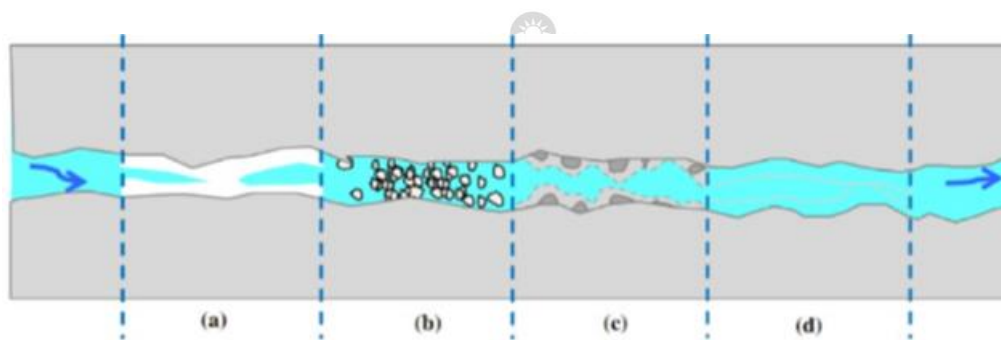
### 2.2 自癒混凝土的自癒技術及其研究現況

混凝土是目前建築結構材料中最大宗的材料之一，屬脆性材料，故其表面與內部會無可避免地出現裂縫，這個事實促使人們致力於研究混凝土的各種自我修復方法。通過查閱大量國內外相關文獻的介紹，目前水泥混凝土自癒方法主要有六種：(1)結晶沉澱法；(2)滲透結晶法；(3)微膠囊法；(4)液芯光纖/纖維法；(5)微生物法；(6) SMA(Shape memory alloy)法。本研究即針對基於微生物法方式的自癒混凝土進行研究和探索。

#### 2.2.1 結晶沉澱法

1913年，Abrams 將測完 28 天抗壓強度的混凝土損傷試體置於戶外，8 年後他意外發現這些損傷試體的抗壓強度增長為 28 天時的兩倍多[15]。這是一個普遍存在地自然現象，即在有水存在的條件下，混凝土裂縫會逐漸自動癒合，且隨著時間的推移，水通過裂縫的滲透性逐漸減弱甚至消失。從大量的混凝土工程實例，以及近代關於混凝土工作的科學研究中，可以看出，混凝土結構會不可避免的出現裂縫。結晶沉澱法修復裂縫是一個自

然現象，包含了一系列複雜的物理、化學及力學過程。這種方法與其他的自癒方法不同，它是一種持續的、不依賴外部手段支持的自修復方法。當混凝土結構直接暴露於水環境中時，由未水化水泥顆粒（如  $C_3S$ ,  $C_2S$  等）繼續水化所生成的水化產物修復裂縫，此修復作用影響甚微，並不是混凝土基體自癒的主要原因。研究顯示，發生自癒的混凝土裂紋表面有大量  $CaCO_3$  結晶沉澱生成，這說明  $CaCO_3$  才是混凝土基體自癒的主要因素。其原理是大氣中的  $CO_2$ ，與混凝土硬化體中的微溶於水的水化產物  $Ca(OH)_2$  發生如下反應  $Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$ ，在混凝土裂縫處生成碳酸鈣結晶沉澱，並隨著碳酸鈣結晶沉澱的增加，裂縫逐漸癒合[16]，圖 2.1 為結晶沉澱法自癒的機理圖。



(a)  $CaCO_3/Ca(OH)_2$  的形成；(b) 顆粒沉積；(c) 繼續水化；(d) 混凝土基材膨脹

圖 2.1 結晶沉澱法自癒的機理圖[16]

### 2.2.2 滲透結晶法

1942 年，德國化學家 Lauritz Jensen 研發出了水泥基滲透結晶型防水材料（cementitious capillary crystalline waterproofing materials，簡稱 CCCW 材料）。其組成材料為石英砂或矽砂、普通矽酸鹽水泥以及某種特殊的活性化學物質。該材料最常見的應用就是用作防滲材料，將它應用於混凝土結構迎水面，形成有效的防水塗層，以防滲防漏。但也有學者將其內摻於混凝

土中，形成滲透結晶型自癒合混凝土。

2001年，中國同濟大學就進行了這方面的研究，他們以某種特殊的無機摻和料和有機化合物相結合作為活性化學物質，前者的二次水化反應和後者在鹼性環境中緩慢硬化，使混凝土材料微裂縫實現多次自癒合。

從理論上可知，水泥水化生成矽酸鈣膠體的同時，產生大量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和遊離  $\text{Ca}^{2+}$  等鹼性物質，同時由於水化矽酸鈣的包裹作用，使得水泥混凝土中含有部分未水化水泥顆粒和一些具有水化活性的物質，在一定的條件下可繼續反應，形成結晶體沉澱堵塞孔隙與裂縫，實現混凝土裂縫的自癒合。滲透結晶型自癒合混凝土作用機理正是基於此理論而建立的，其作用過程如圖 2.2 所示[17]。

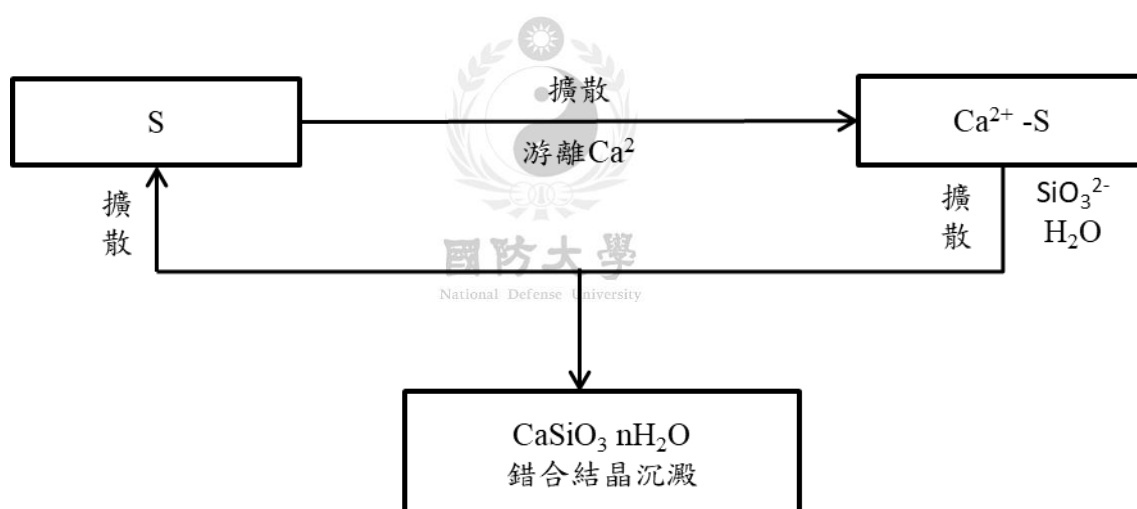


圖 2.2 滲透結晶型材料自癒機理圖[17]

滲透結晶型材料中所含活性化學物質（以 S 表示）遇水成為一種催化劑，在壓力差和濃度差兩者共同的作用下，S 以水為載體在混凝土內部孔隙中滲透移動，與混凝土中的遊離  $\text{Ca}^{2+}$  發生化學反應生成不溶於水的結晶沉澱，由於水的作用，結晶沉澱在混凝土孔隙中擴散，遇到活性較高及未水化水泥、水泥膠體等，S 就會被更穩定的  $\text{SiO}_3^{2-}$ 、 $\text{AlO}_3^{3-}$  等取代，發生絡合、

結晶沉澱反應，形成更穩定的化合物，填充混凝土中裂縫和毛細孔隙，而活性物質 S 則重新成為自由基，繼續隨水在混凝土內部遷移，該過程是一個不斷迴圈的過程，使得出現裂縫的混凝土材料可實現多次自癒合。混凝土乾燥時，由於缺少水作為擴散介質，活性物質 S 處於休眠狀態；當混凝土開裂有水滲入時，該活性物質就被啟動，催化發生錯合、結晶沉澱反應，實現混凝土裂縫的自癒合[17,18]。此修復技術在於它可以顯著提高混凝土結構的強度和密實度，但是該方法對寬度大於 0.4 mm 的裂縫的自癒效果不甚理想。

中國安徽工業大學黃偉[17]等自製了一種 SJ 滲透結晶型複合材料，通過滲透結晶型自癒合混凝土的強度試驗及抗滲試驗，研究了不同摻量對其自癒合性能的影響，得出結論：SJ 滲透結晶型複合材料的摻入，使混凝土抗滲性能最多可提高 400%，抗壓強度、抗彎強度也有明顯增加，由此可知混凝土的性能得以顯著改善。



### 2.2.3 微膠囊法

此方法係以膠粘劑作為修復單體，將修復單體微膠囊化之後，再將其植入混凝土基體中，同時在基體中分散催化劑，其中催化劑能使修復單體聚合，當基體材料被損傷，產生微裂紋時，裂紋尖端的微膠囊由於應力集中作用被撕裂，修復單體在毛細管的虹吸作用下滲入裂紋內部，與分散於基體中的催化劑相接觸，修復膠粘劑單體被誘發聚合反應，從而封堵裂紋，使基體材料在一定程度上得以自修復[19]，性能也得以較大改善，微膠囊自癒示意圖如圖 2.3 所示。

- (a)材料出現裂紋
- (b)裂紋穿透微膠囊，微膠囊破裂，  
修復劑流出滲入裂紋
- (c)修復劑與催化劑相接觸，發生聚合反應，修復裂紋

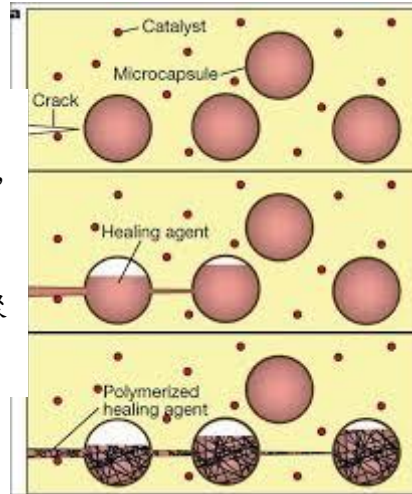
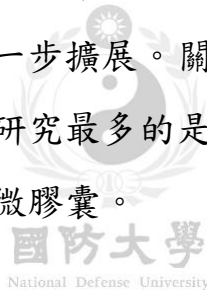


圖 2.3 微膠囊自癒示意圖[19]

這是一個比較複雜的系統，它結合有機合成、精細化工、高分子化學、微膠囊技術、埋植技術以及生物生命系統等，來實現結構內部損傷的自我修復，阻止其內部微裂紋的進一步擴展。關於利用微膠囊實現材料自癒在國內外已有一定的研究，目前研究最多的是脲醛樹脂包覆 DCPD 的微膠囊以及脲醛樹脂包覆環氧樹脂的微膠囊。



#### 2.2.4 液芯光纖/纖維法

液芯光纖與纖維法兩者的修復機理是類似的，利用空芯光纖或者中空纖維裝載修復膠粘劑，再將其埋入混凝土中，形成智慧型仿生自癒合混凝土。當混凝土結構在服役、使用過程中出現損傷和微裂紋時，光纖/纖維破裂，其內部所含修復膠粘劑流出，並滲入裂紋，修復裂紋。圖 2.4 為液芯纖維法自癒過程示意圖。

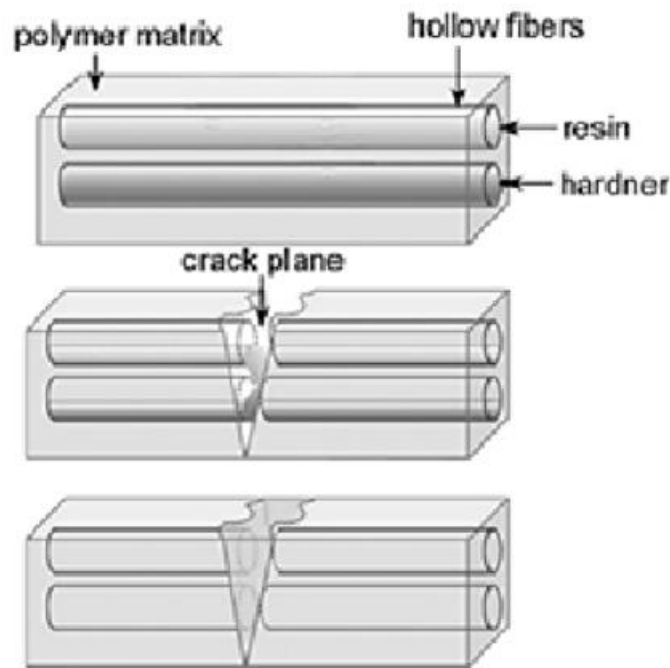


圖 2.4 液芯纖維法自癒過程示意圖[24]

其中光纖更具有自診斷的能力，當光的強度、波長、偏振、及相位等發生變化時，監測系統可及時監測，並準確判斷基體損傷及損傷位置。結合工程實務，可利用無損檢測對其疲勞、衝擊、振動、缺陷、損傷和腐蝕等進行即時監測，再以傳統的被動事後修補方式，如灌漿、嵌縫封堵以及混凝土置換等對其進行修補。而空芯光纖則結合了兩者的優點，不但能進行即時監測，而且混凝土的損傷、裂縫也能得到及時修復，實現了損傷自診斷、自癒的一體化。但光纖/纖維與混凝土結構存在相容性問題，如果相容性不好，相當於在混凝土中引入了介面缺陷，這會影響混凝土基體的力學性能和耐久性[20-23]。

張妃二等[24]對利用空芯光纖作為自診斷、自癒系統的總體方案進行了分析研究。主要研究內容為空心光纖的傳輸特性及其與混凝土結構強度的匹配性、混凝土結構內部損傷、裂縫的自診斷。以粘度較小的縮聚高分子溶液作為修復劑，將其注入空芯纖維來研究混凝土的自癒，驗證了該方案

的可行性，為空心光纖用於混凝土結構損傷的自診斷與自癒提供了研究依據。

1994年，來自於美國伊利諾斯大學的 Carolyn Dry 以縮醛高分子溶液作為修復膠粘劑，將其注入空心玻璃纖維，隨後再將裝有修復劑的玻璃纖維埋置於混凝土中形成自癒體系。通過三點彎曲試驗發現，修復後的混凝土試體的強度和延性都在一定程度上得到了改善。

在此基礎上，Carolyn Dry 教授還將某種聚合反應引發劑注入多孔編織纖維網，以含有單聚物的磷酸鈣水泥為基體材料，將前者加入基體材料中，在水泥水化、硬化過程中，多孔編織纖維網釋放出引發劑，引發單聚物聚合，生成大量高聚物，聚合反應生成的水參與水泥水化。所以，在纖維網的表面有大量產物生成，這種產物互相穿插連接，是一種由有機物質和無機物質相結合的複合材料，具有較高的強度和延性，其結構特徵及性能與動物骨骼很相似。在結構材料服役過程中，當有裂紋或損傷發生時，該體系會自動釋放高聚物，以此來癒合裂紋或損傷。

九十年代初期，日本東北大學的三橋博三等[25]也做了這方面的研究。他們以水玻璃和環氧樹脂等材料作為修復劑，將其注入空心玻璃纖維，再埋置於混凝土結構材料中，製成齡期分別為 7 天和 28 天的混凝土試體，測定經不同修復劑對損傷和微裂縫修復前後的強度值，以此來計算混凝土試體的強度恢復率。

### 2.2.5 微生物法

目前已有不少基於微生物誘導碳酸鈣沉澱的自我修復技術的相關研究，該技術可用於修復混凝土表面缺陷以及內部結構裂紋。

基於微生物誘導碳酸鈣沉澱的自我修復技術是將特定的細菌（好氧嗜鹼芽孢桿菌）事先加入到混凝土材料中，混凝土中的高鹼缺氧環境使這種



無害細菌處於休眠狀態。當混凝土結構遭受破壞出現裂紋，氧氣和水分開始滲入，休眠狀態的細菌孢子被啟動，其新陳代謝功能得以恢復，好氧微生物新陳代謝過程中產生  $\text{CO}_2$ ，這些  $\text{CO}_2$  與混凝土材料中的  $\text{Ca}^{2+}$  反應生成碳酸鈣沉澱，填補裂縫，防止水和其他化學物質進一步侵入[26,27]。

Eric Schlangen 和 Henk Jonkers(2009)將混凝土自癒所需的細菌孢子和營養物質作為摻和料摻入混凝土拌合物中。修復前後的狀態示意圖如圖 2.5 所示。初始混凝土裂紋的情況如圖(a)所示。隨著齡期的發展(70 天)，從圖(b)中可以看出，該混凝土基體表面上的裂縫由微生物引起的碳酸鈣沉澱填充，說明該自癒技術是可行的，且效果顯著[26]。但有研究表明，這種自癒合功能僅能修復小於 0.5mm 的裂縫。

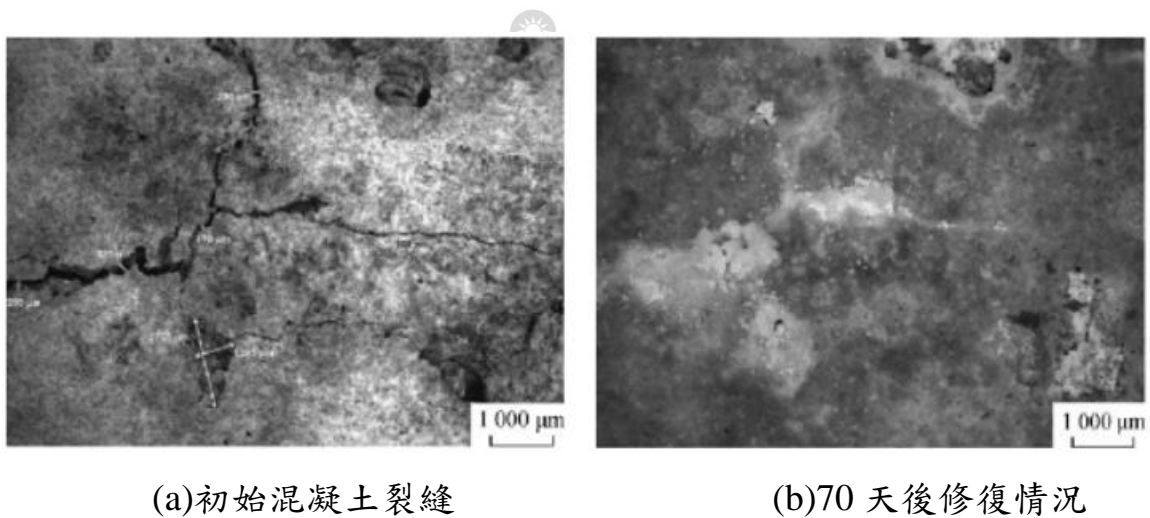


圖 2.5 微生物誘導碳酸鈣沉澱的裂縫自癒情況[26]

微生物法是由微生物新陳代謝引起的，比現有常規修復方法更天然、無污染，具有很大的應用前景。本文也主要針對基於微生物法方式的自癒混凝土進行研究和探索。

## 2.2.6 SMA 法

SMA，即形狀記憶合金，它是一種具有形狀記憶效應的功能型金屬材料，與液芯光纖一樣可以實現長期、線上、即時監測，並進一步實現結構的自癒功能。如果將在高溫下定形的 SMA 在常溫下拉伸至一定的塑性變形，再把它重新加熱到一定溫度，它就會恢復變形前的形狀，這就是形狀記憶效應。

基於 SMA 的自癒混凝土，首先將 SMA 預拉伸，然後再在混凝土結構的受拉區埋入經預拉伸的 SMA，當混凝土結構在使用過程中出現不允許的裂縫或裂縫寬度超過限制時，對裂縫處或裂縫附近的 SMA 通電，通過加熱使其產生收縮變形，從而使裂縫閉合，限制裂縫的進一步發展，如此就同時具備結構的監測和修復，即結構就具有了自診斷、自癒的功能。

近些年來，國內外已經有不少學者對 SMA 自癒混凝土進行了研究，如 Song 等[28]，中國南京航空航太大學陶寶棋等[29]。在 1998 年，陶寶棋等人[29]提出了形狀記憶合金自癒混凝土。將經過預拉伸的 SMA 和光纖預先埋入到混凝土結構中的易開裂區域，這樣結構就成了具有自診斷、自癒功能的智慧混凝土結構。後來，他們結合液芯光纖做了更深入的研究分析。以雙組分膠粘劑環氧樹脂作為修復劑，將其注入光纖內部，形成液芯光纖。將 SMA 和液芯光纖同時植入到混凝土中。當損傷發生或出現了不允許的裂縫或裂縫寬度超過限制時，局部刺激損傷處及附近的 SMA，產生局部壓應力，正是這種壓應力之作用使液芯光纖斷裂，修復劑流出並滲入裂縫，使損傷處及裂縫得以自癒。

但只有加熱才能利用 SMA 的形狀記憶效應，而溫度過高會影響 SMA 的記憶性能，且較長時間使用之後，SMA 本身會產生潛變，工作穩定性亦變差，這些都限制了它的工作和應用範圍。另一方面，由於 SMA 材料本身的電阻不大，採用電加熱方式激勵 SMA 時需要較大的電流，所以需要較粗

的導線。此外，SMA 價格昂貴，是普通鋼材價格的 700 倍。這些缺點都限制了 SMA 材料在混凝土基材自癒中的應用[30]。

## 2.3 生物混凝土的性能

混凝土最重要的性質是抗壓強度和耐久性。評估生物礦化對這些屬性的影響。裂縫、孔徑及其分佈對混凝土性能產生不利影響，從而影響混凝土結構的使用壽命。通過減少吸收、滲透和擴散作為將流體和氣體輸送到混凝土中的主要機理，可以提高混凝土的耐久性。多項研究報導了生物癒合劑對混凝土滲透性和吸水率的影響。從表 2.1 可以看出，因加入生物試劑，可降低混凝土結構的滲透性和吸水率。Wang 等人(2012a)，研究了碳酸鈣沉澱對固定化球形芽孢桿菌細胞摻入通透性的影響。發現與沒有細菌的樣品相比，具有聚氨酯固定細菌的樣品之滲透性降低了六倍。此外，Wang 等人(2012b)研究固定在矽藻土中的球形芽孢桿菌對吸水的有效性，研究顯示，固定化細菌標本的吸水率為無細菌標本的 50%。Achal 等人(2011)將球形芽孢桿菌加入混凝土中，結果顯示在 168 小時內，其吸水係數較純混凝土試體小 6 倍。此現象可能與細菌新陳代謝導致新形成的碳酸鈣有關。

與耐久性相關的研究文獻相比，在微生物對混凝土強度之影響方面的研究，則有相互矛盾的結果。例如，在灰漿中添加包囊的球形芽孢桿菌會導致壓縮強度降低 15%到 34% (Wang 等人，2014b)，而加入球形芽孢桿菌的水泥砂漿其 7 天和 28 天抗壓強度(Achal 等人，2013)。Bang 等人(2010)研究巴氏鏈球菌對砂漿抗壓強度的影響，研究發現，固定化的巴氏鏈球菌可使砂漿試體的抗壓強度最多提高 24%。此外，Erşan 等人(2015a)，研究加入固定化尿素和反硝化細菌對混凝土抗壓強度之影響。結果顯示，在混凝土中使用球形芽孢桿菌，其 7 天和 28 天抗壓強度分別降低 63%和 60%。但若將硝化還原酶固定在膨脹粘土和粒狀活性炭中，卻可略微提高混凝土

之抗壓強度。

表 2.1 微生物劑對抗壓強度，滲透性和吸水率的影響[31]

Microorganism	Effect on compressive strength		Effect on durability		References
	Effect	Time (day)	Permeability	Water absorption	
Bacillus sphaericus	N	28	P		Wang et al. (2014 c)
	N	90			
	P	3		P	Achal et al. (2011)
	P	7			
	P	21			
				P	Wang et al. (2012b) Achal et al. (2013)
	P	7	P		
	P	28			
S. pasteurii			P		Wang et al. (2014b) Wang et al. (2012a) Bang et al. (2010)
			P		
	P	7			Chahal et al. (2012) Chahal et al. (2012)
	P	28		P	
Bacillus cohnii	P	7			Chahal et al. (2012) Chahal et al. (2012)
	P	28			
	P	56			
Bacillus pseudofirmus	N	3			Jonkers et al. (2010)
	N	7			
	N	28			
Diaphorobacter nitroreducens	N	7			Erşan et al. (2015a)
	N	28			

N : negative effect, P : positive effect

## 2.4 細菌生物技術於土木材料上應用研究

### 2.4.1 增加混凝土之抗壓強度

陳貽瑱[32]使用好氧嗜鹼性（耐鹼）的芽孢桿菌(*Bacillus pasteurii*)，先將 *Bacillus pasteurii* 以提高溫度的方式處理成孢子狀態，在將處理好的輕質骨材浸入營養源溶液中 30 分鐘，浸泡完成後瀝乾取出，將含有營養源的輕質骨材，浸入細菌孢子溶液中 30 分鐘，即完成含有生物菌種之輕質骨材，後續加入混凝土中拌合。

研究顯示將 *Bacillus pasteurii* 孢子作為生物菌種添加至混凝土中，可增加混凝土抗壓強度，尤其是混凝土早期強度，其 7 天強度較未添加時成長約 32.8%，如表 2.2。

張越[33]通過對不同鈣源的微生物砂漿的力學性能和物理性能的試體和分析發現，微生物砂漿的碳酸鈣生成量、密度和吸水率與鈣源的選擇無關，但以乙酸鈣為鈣源的微生物砂漿的力學性能明顯優於用氯化鈣、硝酸鈣兩種鈣源試體，在相同的條件下，乙酸鈣試體之單軸抗壓強度和劈裂抗拉強度為氯化鈣試體的 1.3~2.4 倍，彈性模數則是氯化鈣試體的 1.1~2.0 倍。

表 2.2 控制組與試驗組的抗壓強度比較表[32]

單位：MPa

齡期 組別	7 天	28 天	56 天	91 天
控制組	19.04	26.89	31.10	31.20
試驗組	25.28	29.15	33.18	33.92

## 2.4.2 降低混凝土之滲透性

陳貽瑱[32]由透水試驗結果，得知含有生物菌種的輕質骨材混凝土經破壞後不論利用空氣或是循環養護，透水面積都較未含有生物菌種的輕質骨材混凝土來的小，表示添加生物菌種可以修復破壞後的混凝土並增加其緻密性，另含有生物菌種的輕質骨材混凝土利用有額外加鈣源的養護水及空氣循環養護，其混凝土修復的效果較空氣養護為好，顯示額外加鈣源可以使 *Bacillus pasteurii* 在作用時有更多的鈣離子可以反應生成碳酸鈣沉澱。故陳貽瑱認為，添加生物菌種至混凝土中能使混凝土強度增加、滲透性降低，並且藉由生物作用可以填補混凝土內部微小孔隙以及受外力所產生的裂縫。

## 2.4.3 混凝土裂縫之修補

鄧輝凱[34] 在進行混凝土裂縫修補試驗前，最初嘗試採用菌液與海藻粉混合當作修補劑以進行修復，此外也嘗試過將菌液分別混合在淤泥土、細砂或水泥細砂內，再添加至混凝土抗彎試體的裂縫內之方式進行修補。試驗結果顯示，利用菌液水泥砂漿來修補混凝土裂縫，因細菌數量較多，有加快誘導碳酸鈣沉澱的效果，使修補的成效較佳；而當混凝土裂縫寬度在 0.6 mm 至 2 mm 時，以菌液水泥砂漿修補裂縫的效果相當，不受裂縫寬度之影響。

楊博[36]研究以巴氏芽孢八疊球菌修補混凝土裂縫技術及對帶裂縫混凝土耐久性的改善程度，其研究方法係先將菌液和尿素溶液混合靜置 2 小時後再和硝酸鈣溶液依次注入到混凝土裂縫中，並在標準養護條件下進行養護，研究結果顯示，此技術具有良好的修補效果，經 12 次注液就可完全封閉裂縫表面。

Ramakrishnan 和 Day(2010)借助聚安酯(PU)、石灰及粉煤灰來固定保護細菌以進行混凝土裂縫之修復[37]。其研究結果顯示，碳酸鈣的沉積主要是

發生在裂縫表面，故使用細菌方法應用於混凝土裂縫之修復，具有極大之開發潛力。Belie 等人(2012)應用生物礦化技術來修復混凝土及灰泥試體之表面，其方法為在試體表面塗上 0.5~1mm 厚的離心尿素水解酶，在硬化後將試體放入不同培養液及鈣源溶液中，經 2~3 天後即可發現試體表面沉積而形成之礦化層。

#### 2.4.4 不同環境下混凝土之自癒合效果

武少贊[38] 研究開裂混凝土在不同環境條件下之自癒合效果，這些環境條件包括：溶液浸沒（海水、淡水和氫氧化鈉溶液等）、乾濕交替和大氣環境等。由試驗結果得知，裂縫癒合率隨癒合時間逐漸提高，癒合產物不斷增多，自癒合填充效果也越為明顯，但隨著時間的增長，癒合率將趨於穩定。此外，環境條件對自癒合效果有顯著影響，標準養護條件中由於液態水供應不足，導致自癒合效果最差，海水環境中自癒合效果優於淡水，因淡水中離子含量較低，自癒合礦物主要是文石或方解石，而海水中富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  等，這些離子可形成文石或方解石、鎂石、鈣礬石、石膏等礦物，這些礦物的形成能大幅提高裂縫的自癒合效果。

### 2.5 混凝土裂縫產生方法

裂縫產生是研究裂縫自癒合首要解決的問題，文獻[39-41]中採用了多種方法使混凝土試體中形成裂縫，這些方法大致可分兩類：無損法和破損法。

#### 2.5.1 無損法

無損法是通過在新拌混凝土中埋設薄銅片或其他材料，然後在混凝土凝硬化前取出，從而獲得所需裂縫的方法[39,40]。這種方法所得裂縫有易

加工、靈活性好、可靠度高和重複性好等優點；但相比於實際裂縫還存在一些差異：裂縫曲折性、連通性和粗糙性較差，裂縫表面水泥漿較多，而且這種方法得到的裂縫相對較寬。延永東等人[41]先將 0.2 mm 的不鏽鋼片垂直插入新拌混凝土中，然後重新抹平混凝土表面，為順利拔出鋼片，在預埋約 40 分後拔出 2~3 mm，2 小時後垂直取出。為了防止裂縫在後期養護過程中被堵塞，試驗採用塑膠紙封閉裂縫，如圖 2.6 所示。Marsavina 等人[42]採用無損法，通過將預製好的薄銅片插入新拌混凝土中，得到 0.2 mm、0.3 mm 和 0.5 mm 寬度的裂縫，用來研究開裂混凝土中氯離子的滲透情況。

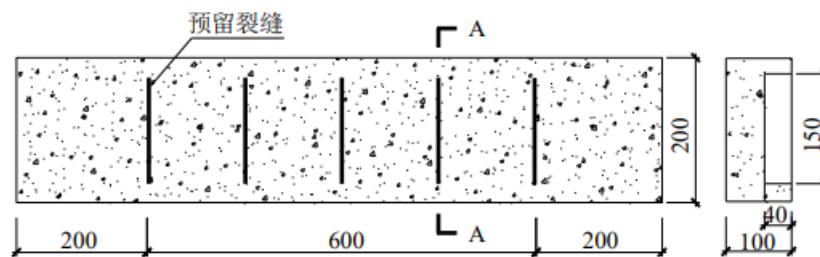


圖 2.6 預留裂縫示意圖[41]

## 2.5.2 破損法

所謂破損法係對混凝土施以載重，使其破裂而產生裂縫。此法可以產生與實際混凝土相似的裂縫，體現在裂縫的曲折性、連通性及粗糙性等方面。由於加載過程的不確定性，相比於無損法，該方法很難避免主裂縫產生過程中附加微裂縫和內部損壞的產生，也很難精準控制裂縫的產生與擴展[29]。破損法包括劈拉開裂法、膨脹法、彎曲法和楔入劈拉法等。劈拉開裂法和膨脹法通常得到的是平行裂縫；彎曲法和楔入劈拉法產生的裂縫特徵更接近於實際裂縫[33]。



## 3.研究方法

### 3.1 試驗目的

主要目的在於了解加入自癒原劑的混凝土其之強化作用與裂縫癒合能力。拌製含不同百分比自癒原劑及未含自癒原劑(控制組)之二種混凝土，並進行混凝土工程性質試驗及裂縫修補觀察試驗，以探討自癒原劑應用於混凝土強度增加及裂縫修補之效果。

### 3.2 試驗材料

- (1)水泥：採用台灣水泥公司所產生之波特蘭第一型水泥，如圖 3.1。
- (2)水：一般自來水。
- (3)天然砂：在一般建材行購買，本試驗取過#16 篩以下的天然砂，如圖 3.1。
- (4)粗骨材：在一般建材行購買，符合 ASTM C33 之規定，如圖 3.2。
- (5)自癒原劑：菌種為芽孢桿菌(bacillus)，粉末膠囊裡面含有細菌、養分和催化劑，如圖 3.2。
- (6)蓋平石膏：台灣製，型號 S350，25kg/包，抗壓強度為  $350\text{kg/cm}^2$ (5000psi)，如圖 3.3。



圖 3.1 水泥及天然砂



圖 3.2 粗骨材及自癒原劑



圖 3.3 蓋平石膏

### 3.3 試驗設備

- (1) 混凝土拌合機 (如圖 3.4): 廠牌 Summit, 型號 HK201, 規格 20L, 符合 CNS1230-A3045 規格, 由不鏽鋼製成, 無吸水性且不被水泥所侵蝕, 用於生物自癒混凝土之拌合。
- (2) 電動混凝土攪拌機 (如圖 3.5): 廠牌 SYNTESI, 型號 S190, 用於混凝土之均勻拌合。
- (3) 100 噸試體抗壓機 (如圖 3.6): ELE ADR-Auto V2.0 Range 全自動抗壓試驗, 用於混凝土試體抗壓試驗。
- (4) 裂縫寬度觀測儀 (如圖 3.7): 型號為 ZBL-F130, 可量測 0-10mm 寬度裂縫, 可用於橋樑、隧道、牆體、混凝土路面、金屬表面等裂縫寬度的定量檢測。



圖 3.4 混凝土拌合機



圖 3.5 電動混凝土攪拌機



圖 3.6 100 噸試體抗壓機



圖 3.7 裂縫寬度觀測儀

### 3.4 自癒原劑

本研究使用之生物自癒原劑為芽孢桿菌(bacillus)之細菌，由荷蘭微生物學家 Hendrik Marius Jonkers 發明，台灣業者「羅威科技」(Basilisk Taiwan) 引進此項新式建築材料，如圖 3.8，其外觀為粉末狀，內含有細菌、養分和催化劑。混凝土在拌合的過程中會產生高鹼性，一開始細菌在此高鹼性環境中並不會有反應，直到 72 小時後，在有水和氧氣之條件下，當遇到混凝土內部之  $\text{Ca}^{2+}$  時，因礦化作用而生成碳酸鈣沉澱，並沉積在孔隙或裂縫內，而達到填塞孔隙或封堵裂縫之目的，此時芽孢桿菌因混凝土內部缺乏水和氧氣而進入休眠狀態，直到新裂縫出現帶來水和氧氣時再度活化與作用，相關原理如圖 3.9 所示。自癒原劑是源自於一種會產生石灰石的細菌，當遇到水、氧氣和養分時，這種細菌會開始繁殖，且大量分佈在裂痕中，並將這些養分轉換為碳酸鈣（石灰石），最後將裂痕封閉起來。裂痕封閉後，細菌將無法再接觸到水和氧氣，因此會回到原本的”休眠”狀態，直到再次出現裂痕並啟動自我修復的機制。

修復期間所需之環境條件如下：

- (1) 氧氣
- (2) 水分：混凝土內部水分或由裂縫滲入之外來水分。
- (3) 溫度：10~40°C（20°C 最佳）。



圖 3.8 自癒原劑[42]

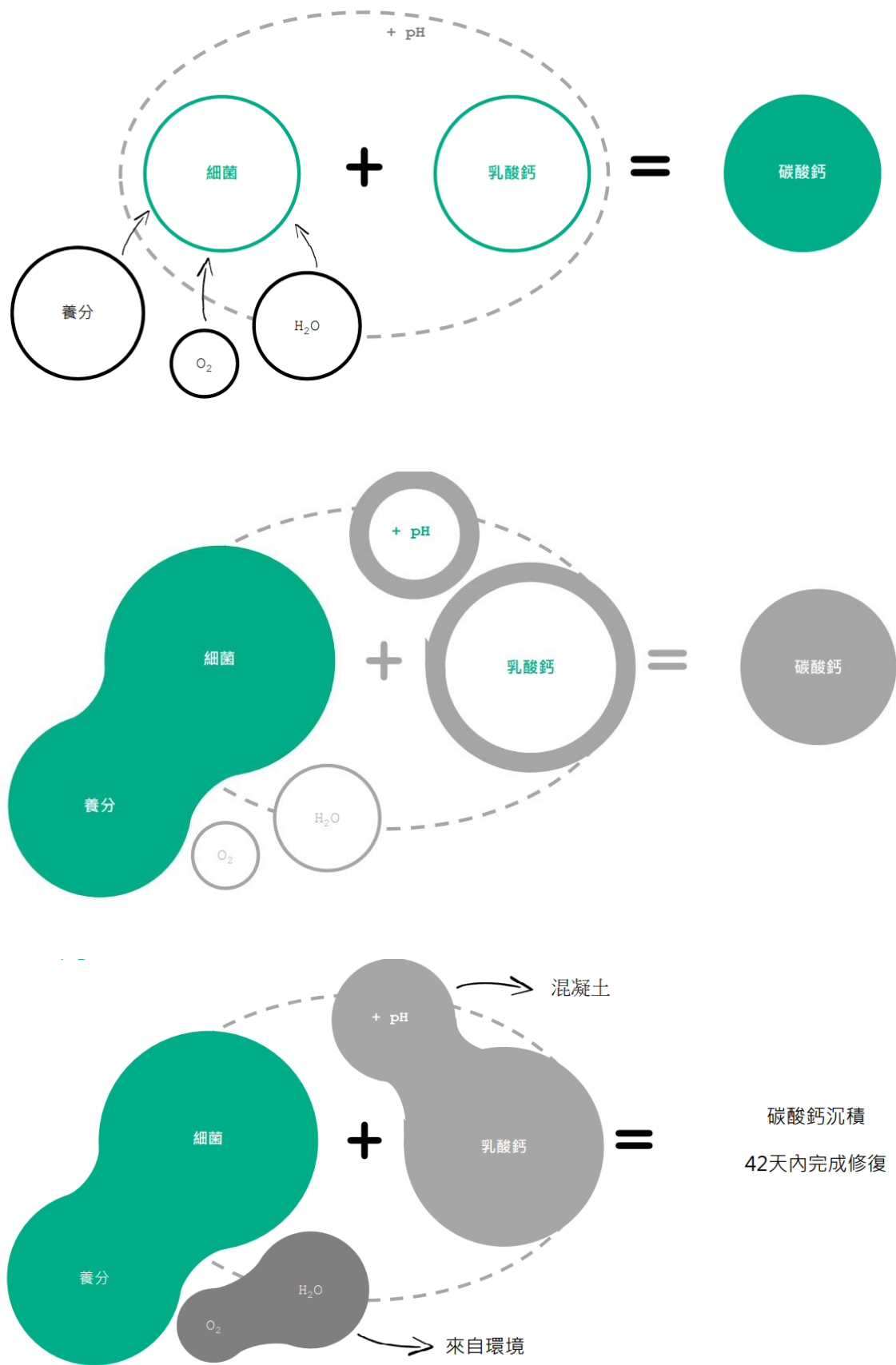


圖 3.9 自癒原劑原理示意圖[42]

### 3.5 試體製作與試驗規劃

#### 3.5.1 配比設計

本研究混凝土試體設計強度為  $210 \text{ kg/cm}^2$  (3000 psi)。依混凝土配比設計，水灰比為 0.59，計算所得材料之配比如表 3. 1 所示。由上述計算所得到之配比，先進行混凝土試拌，再根據試拌結果加以調整。

表 3. 1 混凝土配比表

材料	水 ( $\text{kg/m}^3$ )	水泥 ( $\text{kg/m}^3$ )	細骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )	粗骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )
每 $1\text{m}^3$ 混凝土 所需材料	166.9	337	835.9	982.4

#### 3.5.2 混凝土之拌製

分別製作控制組（未加入自癒原劑）與試驗組（加入自癒原劑）的混凝土試體，其製作流程如下：

- (1)依配比設計計算灌製混凝土所需材料用量。
- (2)將量秤好的粗骨材、細骨材及水泥依序加入混凝土拌合機中，以每分鐘  $33 \pm 2$  轉的速率乾拌約 1 分鐘後，再加入水拌合 5 分鐘。
- (3)混凝土拌製完成後，立即進行抗壓試驗、吸水率試驗及裂縫修補觀察試驗等試體之灌製。

#### 3.5.3 試體養護方法

考量自癒原劑中芽孢桿菌需要氧氣及水方能發揮作用，若使用傳統混凝土試體浸水養護方式，則會因缺乏氧氣之供給，使芽孢桿菌無法發揮其作用，故本研究針對混凝土試體之養護方法係採麻布覆蓋灑水養護，對麻布持續灑水，使其保持潮濕，並向下滲流，以維持混凝土試體 100%



之相對濕度，同時保持其空氣接觸狀態（圖 3.10）。



圖 3.10 本研究混凝土試體之養護方式

National Defense University

### 3.5.4 試驗規劃

為探討自癒原劑對混凝土力學性質及裂縫修補之影響，各項試驗之混凝土試體均規劃控制組（未加自癒原劑）及試驗組（添加不同含量自癒原劑），各試驗規劃說明如下：

#### (1) 混凝土力學性質試驗

##### a. 抗壓試驗

混凝土抗壓試驗之規劃如表 3.2 所示，5 組試體（1 控制組，4 組試驗組）於 4 個不同養護時間，進行 3 個試體之抗壓試驗，共製作 60 個混凝土試體。

表 3.2 混凝土抗壓試驗規劃表

試體數量 組別 \ 齡期	7	14	28	56
控制組(無自癒原劑)	3	3	3	3
試驗組 1(自癒原劑 1%)	3	3	3	3
試驗組 2(自癒原劑 2%)	3	3	3	3
試驗組 3(自癒原劑 3%)	3	3	3	3
試驗組 4(自癒原劑 5%)	3	3	3	3
小計	15	15	15	15
合計	60			

註：自癒原劑百分比係以水泥重量為基準

將依配比設計拌製好的混凝土漿體製作成  $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$  的圓柱試體，試體於灌製完成後 1 天拆模，再進行養護（如圖 3.11），直至齡期 7、14、28、56 天時取出，以濕布擦拭表面多餘的水後，進行石膏蓋平，至石膏硬化後，再以 100 噸抗壓試驗機進行抗壓強度試驗。

抗壓強度試驗依照 CNS1232 A3045 混凝土圓柱試體抗壓強度試驗的試驗方式進行，以 274 kgf/sec 的速率進行加載至試體破壞為止。



圖 3.11 製作完成之混凝土抗壓試體

國防大學  
National Defense University

#### b. 吸水率試驗

混凝土吸水率試驗之規劃如表 3.3 所示，5 組試體（1 控制組，4 組試驗組）於 4 個不同養護時間，進行吸水率試驗，共製作 20 個試體。

將依配比設計拌製好的混凝土漿體製作成  $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$  的圓柱試體，試體於灌製完成後 1 天拆模，再進行養護，直至齡期 7、14、28、91 天時，以濕布擦拭表面多餘的水後，取出量測重量，而後放入  $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$  之烘箱烘乾，直至完全乾燥，取出再秤其重量，並求得含水量。

表 3.3 混凝土吸水率試驗規劃表

試體數量 組別 \ 齡期	7	14	28	91
控制組(無自癒原劑)	1	1	1	1
試驗組 1(自癒原劑 1%)	1	1	1	1
試驗組 2(自癒原劑 2%)	1	1	1	1
試驗組 3(自癒原劑 3%)	1	1	1	1
試驗組 4(自癒原劑 5%)	1	1	1	1
小計	5	5	5	5
合計	20			

(2) 混凝土裂縫修補觀察試驗

混凝土裂縫修補觀察試驗之規劃如表 3.4 所示，2 組試體，不同裂縫寬度，並於 4 個不同養護時間，進行裂縫修補觀察試驗，共製作 12 個試體。

表 3.4 混凝土裂縫修補觀察試驗規劃表

試體數量 組別 \ 裂縫寬度 (mm)	0.1	0.3	0.5
試驗組 1(自癒原劑 2%)	2	2	2
試驗組 2(自癒原劑 5%)	2	2	2
小計	4	4	4
合計	12		

將依配比設計拌製好的混凝土漿體製作成  $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$  的圓柱試體，並利用無損法產生人為裂縫(0.1、0.3、0.5mm)，試體於灌製完成後 1 天拆模，將試體切割成  $\varnothing 10 \times 3 \text{cm}$  的圓餅狀後進行養護，再依各試驗組於 3、7、14、21、28、56 天時取出，以裂縫寬度觀測儀觀察裂縫狀況。

## 4. 試驗結果與討論

本研究分別進行控制組（未加自癒原劑）與試驗組（加不同含量自癒原劑）的混凝土試體，並分別進行抗壓試驗、吸水率試驗及裂縫修補觀察等試驗，旨在探討生物自癒混凝土之強化作用與及裂縫癒合能力。

### 4.1 抗壓試驗

混凝土抗壓試驗結果如表 4. 1 所示，可見表中各試驗組各齡期 3 個試體之抗壓強度數值均極為接近，彼此最大誤差小於 3.5%，顯示本研究製作之混凝土試體品質控制極為良好，試驗品質差異小。若將數據繪製成抗壓強度發展曲線（圖 4. 1），由圖中可知無論是控制組或試驗組其強度均隨齡期而增加，且各試驗組的各齡期強度均高於控制組。若以控制組各齡期抗壓強度為基準，計算各試驗組在各齡期其抗壓強度增加率（表 4. 2），可繪得自癒原劑含量對不同齡期抗壓強度增加率之關係圖（圖 4. 2），由此圖顯示，混凝土各齡期抗壓強度增加率隨自癒原劑含量(0~5%)增加而約呈線性增加，充分說明添加自癒原劑明顯可強化混凝土抗壓強度。若以 28 天抗壓強度為例，隨自癒原劑含量從 1% 增加至 5%，抗壓強度增加率從 6.2% 增加至 18.7%。此外，由圖可發現，添加自癒原劑後，混凝土 14 天抗壓強度之增加率顯著高於其他齡期，顯示芽孢桿菌在 7 天~14 天時其活性達到最高，將  $\text{Ca}^{2+}$  反應生成  $\text{CaCO}_3$  沉澱之礦化作用最為顯著，此  $\text{CaCO}_3$  之沉積可減少孔隙，並膠結其他材料，而導致抗壓強度之增加。而後隨水化作用持續進行，水化產物逐漸填塞孔隙，混凝土內部孔隙逐漸減少，內部氧氣量逐漸降低，造成芽孢桿菌之活性逐漸下降，使碳酸鈣沉澱量減少，而導致抗壓強度增加速率逐漸減少。

陳貽瑱[32]在混凝土中加入嗜鹼性芽孢桿菌，並灌製  $\text{Ø}10 \times 20\text{cm}$  的混凝土

土圓柱試體進行控制組（未加嗜鹼性芽孢桿菌）及試驗組（加嗜鹼性芽孢桿菌）不同齡期之抗壓試驗，試驗結果示繪製於圖 4.3。由圖可知添加嗜鹼性芽孢桿菌之試驗組 I 其各個齡期強度均比未加嗜鹼性芽孢桿菌之控制組高，而試驗組 I 的 28 天抗壓強度與控制組相比成長 8.4%，此數據低於本研究之 6.2%~18.7%。

表 4.1 混凝土抗壓試驗結果

單位：kgf/cm<sup>2</sup>

齡期 組別	7 天		14 天		28 天		56 天	
	強度	平均	強度	平均	強度	平均	強度	平均
控制組	123.9	124.87	211.6	212.67	255.4	258.3	275.8	275.57
	123.5		215.0		260.1		276.4	
	127.2		211.4		259.4		274.5	
試驗組 1	134.4	132.9	237.9	233.37	271.7	274.3	301.1	302.3
	133.2		231.3		278.9		300.2	
	131.1		230.9		272.3		305.6	
試驗組 2	137.1	135.17	241.0	243.87	281.7	286.13	316.2	315.5
	133.2		248.2		287.9		315.9	
	135.2		242.4		288.8		314.4	
試驗組 3	137.7	139.83	255.3	257.67	296.4	295.1	321.4	323.3
	139.3		254.8		298.2		324.8	
	142.5		262.9		290.7		323.7	
試驗組 4	149.3	146.53	272.3	275.73	303.8	306.5	339.7	342.37
	144.2		273.7		310.5		342.3	
	146.1		281.2		305.2		345.1	

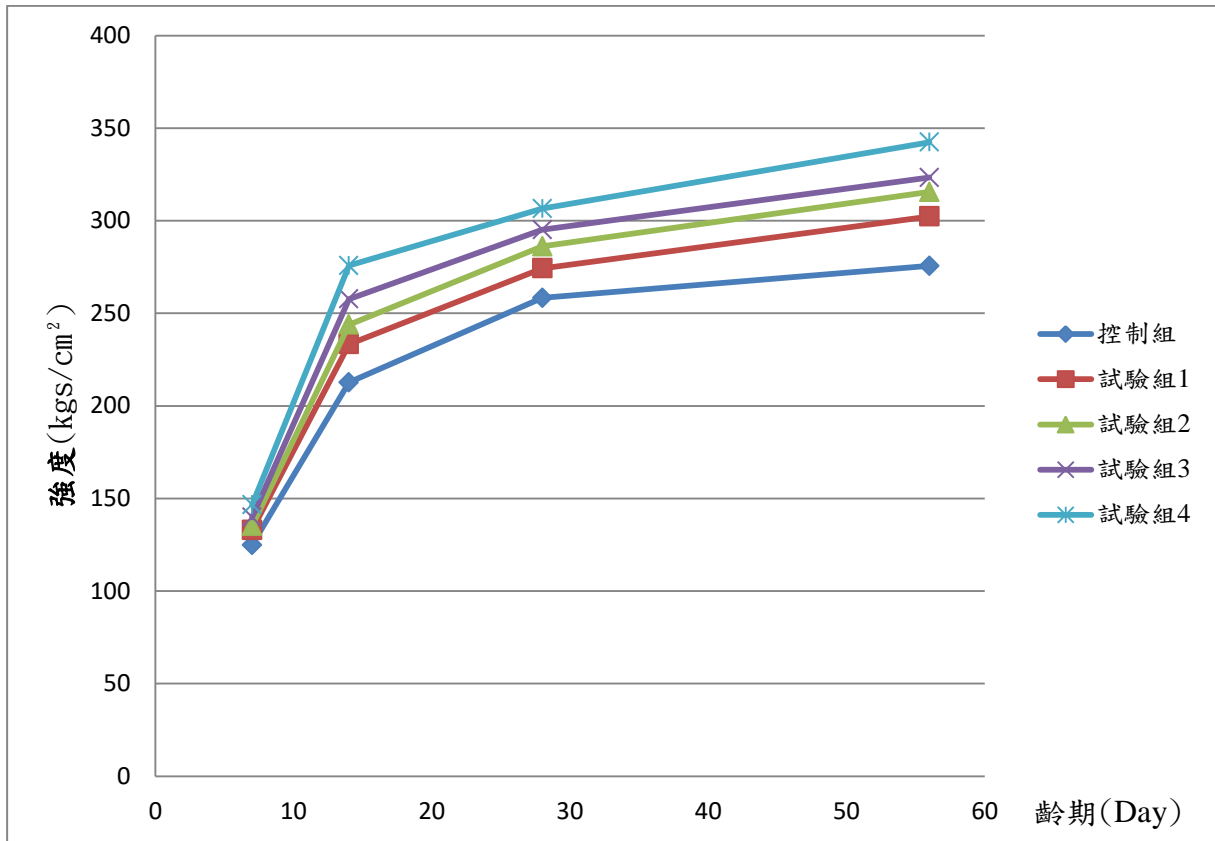


圖 4.1 各混凝土抗壓強度試驗組之抗壓強度發展曲線

表 4.2 自癒原劑含量對不同齡期抗壓強度增加率結果

增加率 自癒原劑(%)	齡期 (%)	7 天	14 天	28 天	56 天
1		6.4	9.7	6.2	9.7
2		8.3	14.7	10.8	14.5
3		12	21.2	14.3	17.3
5		17.4	29.7	18.7	24.2

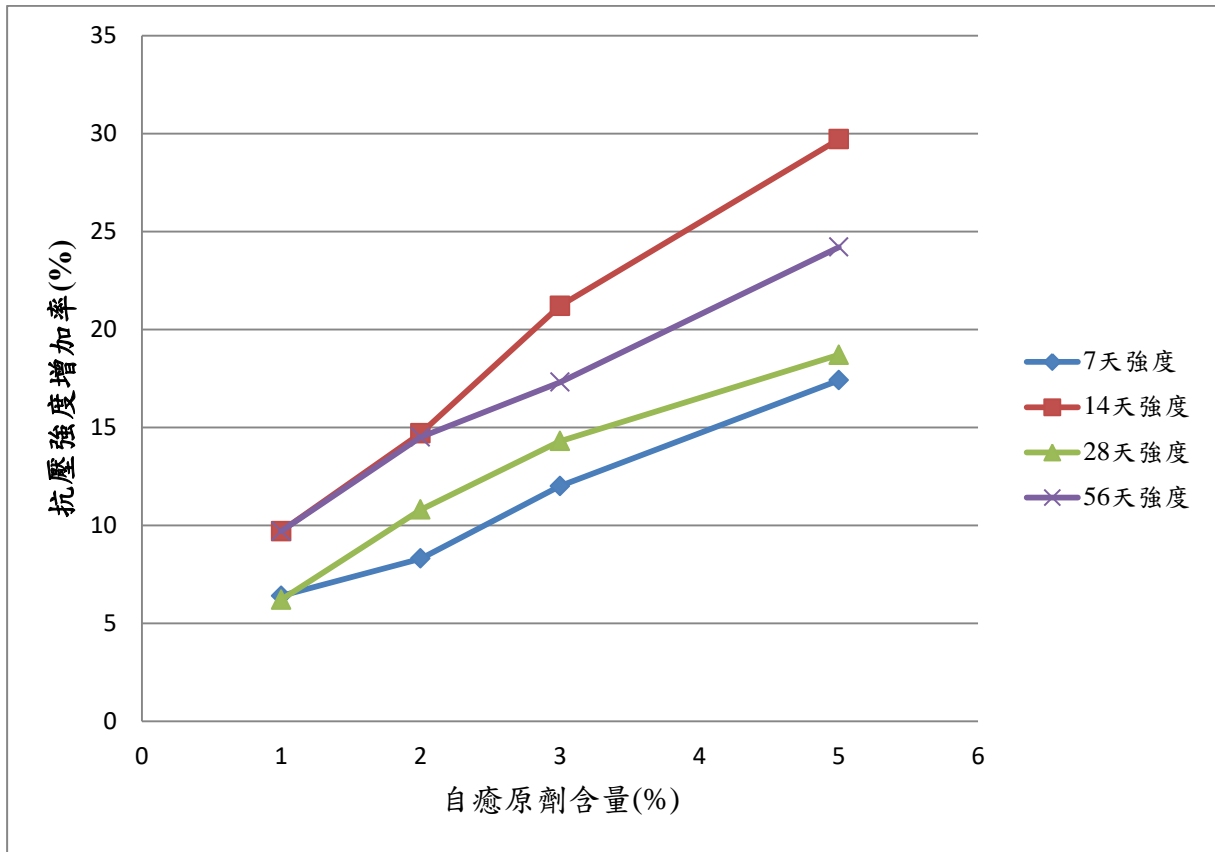


圖 4.2 自癒原劑含量對不同齡期抗壓強度增加率之關係圖

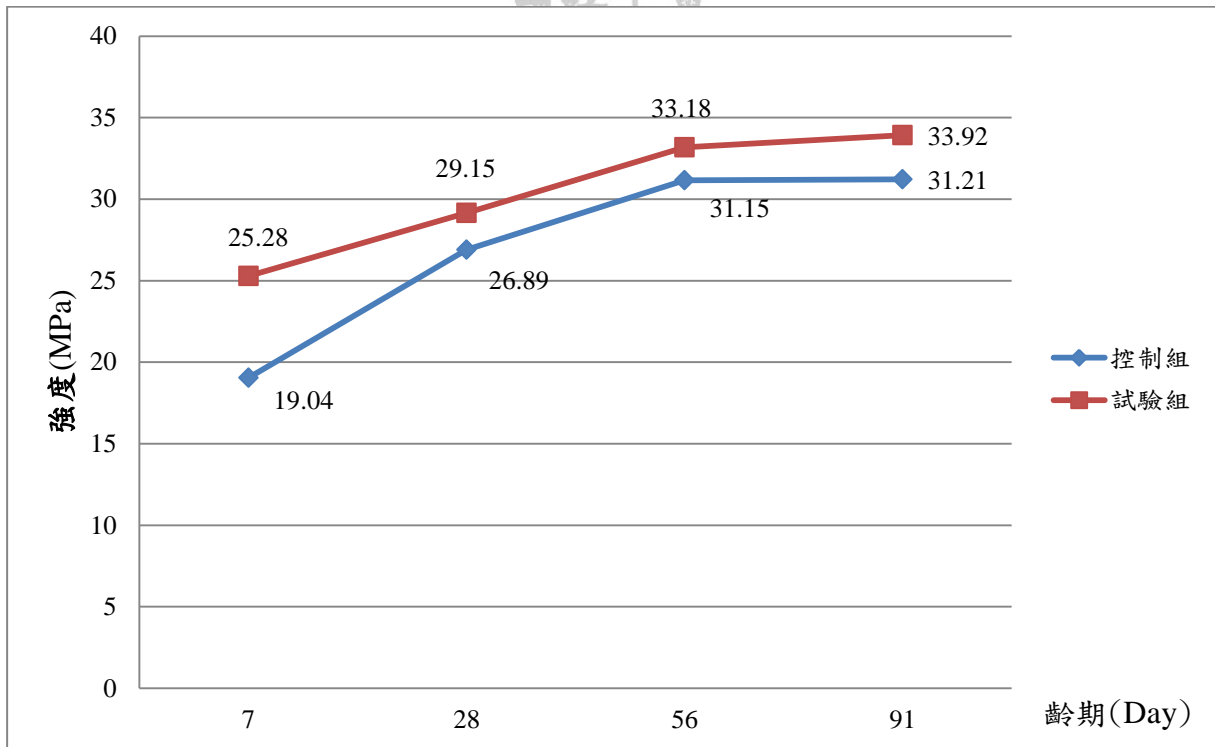


圖 4.3 文獻控制組與試驗組的強度比較[32]



## 4.2 吸水率試驗

混凝土吸水率試驗結果如表 4.3 及圖 4.4 所示，由圖可知：

1. 各組混凝土吸水率均隨齡期增加而逐漸降低，此乃因隨齡期增加愈多的水泥水化產物產生，使孔隙減少，造成吸水率降低。
2. 隨自癒原劑含量增加，混凝土吸水率逐漸降低，說明添加自癒原劑對降低混凝土吸水率之效果顯著。

若以控制組各齡期吸水率為基準，計算各試驗組在各齡期其吸水率之降低率（表 4.4），可繪得自癒原劑含量對不同齡期吸水率降低率之關係圖（圖 4.5）。由此圖顯示，混凝土各齡期吸水率降低率隨自癒原劑含量(0~5%)增加而均呈線性增加，充分說明添加自癒原劑明顯可有效降低混凝土吸水率。若以 28 天吸水率降低率為例，隨自癒原劑含量從 1% 增加至 5%，吸水率降低率從 3.9% 增加為 16.2%。此外，由圖可發現，當自癒原劑含量在較少的 1~2% 時，7 天~14 天時，混凝土吸水率降低率達到最大，而後隨齡期增加而降低；當自癒原劑含量為較高之 3~5% 時，吸水率降低率隨齡期增加而增加，尤其在 28~91 天時，其降低效果甚為顯著。此結果說明當自癒原劑含量較低時，多數芽孢桿菌均發生礦化作用且在 7~14 天時活性最高，導致碳酸鈣沉積，造成孔隙減少使吸水率降低之效果，在 7~14 天時達到最大，而後逐漸降低；然在自癒原劑含量較高時，在短期內部分芽孢桿菌因水或氧氣不足而活性降低，而後隨齡期增加，持續滲入的水或空氣，活化這部分的芽孢桿菌，致更多的  $\text{CaCO}_3$  沉積而填補混凝土中微小的孔隙，導致混凝土吸水率進一步的降低。

表 4.3 混凝土吸水率試驗結果

吸水率 組別 \ 齡期 (%)	7 天	14 天	28 天	91 天
控制組	10.38	10.25	9.53	9.41
試驗組 1	9.88	9.6	9.16	9.11
試驗組 2	9.64	9.49	9.06	8.97
試驗組 3	9.4	9.23	8.21	8.04
試驗組 4	9.28	9.13	7.99	7.68

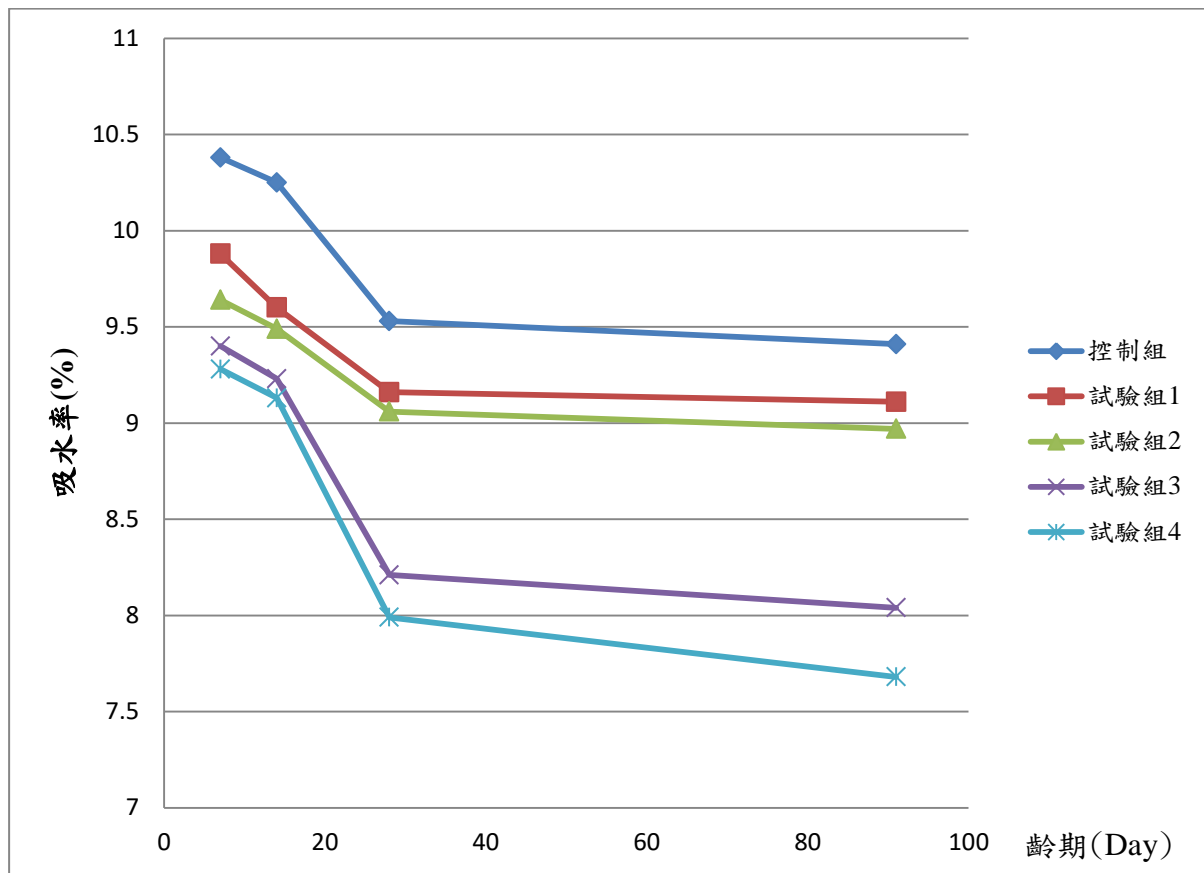


圖 4.4 各組混凝土吸水率隨齡期之變化圖

表 4.4 自癒原劑含量對不同齡期吸水率降低率之結果

降低率 自癒原劑(%)	齡期 (%)	7 天	14 天	28 天	91 天
1		4.8	6.3	3.9	3.2
2		7.1	7.5	4.9	4.7
3		9.4	10	13.9	14.6
5		10.6	11	16.2	18.3

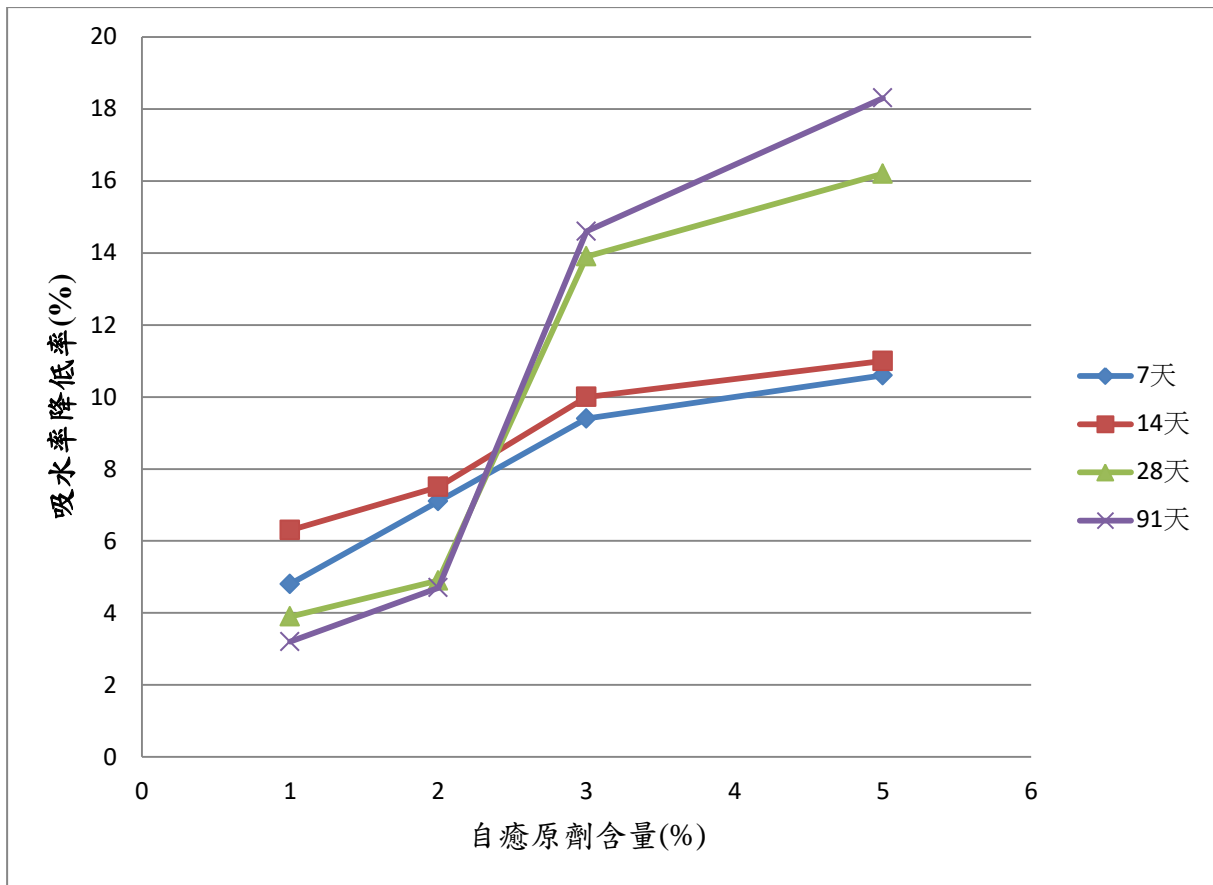


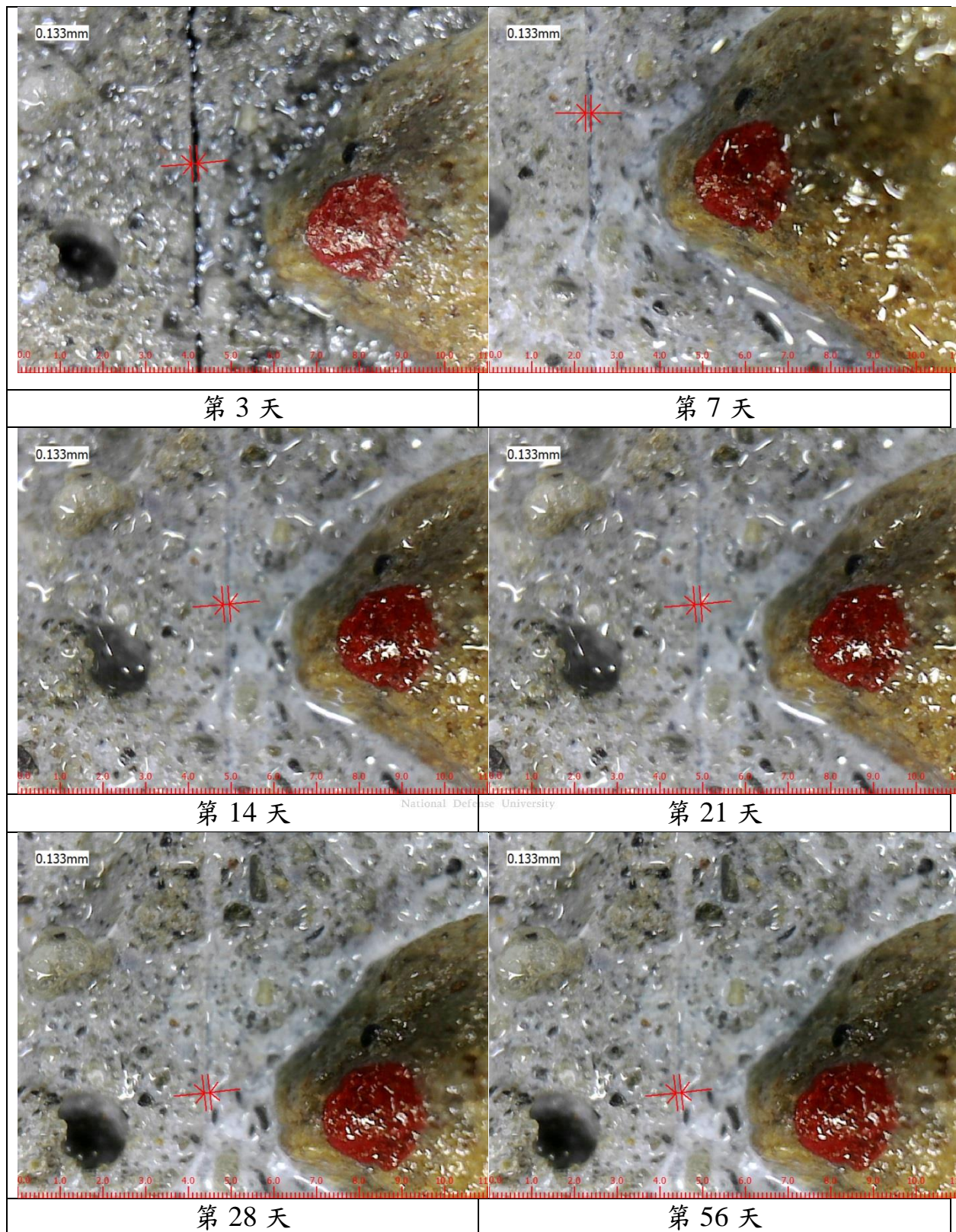
圖 4.5 自癒原劑含量對不同齡期吸水率降低率之關係圖

### 4.3 混凝土裂縫修補觀察試驗

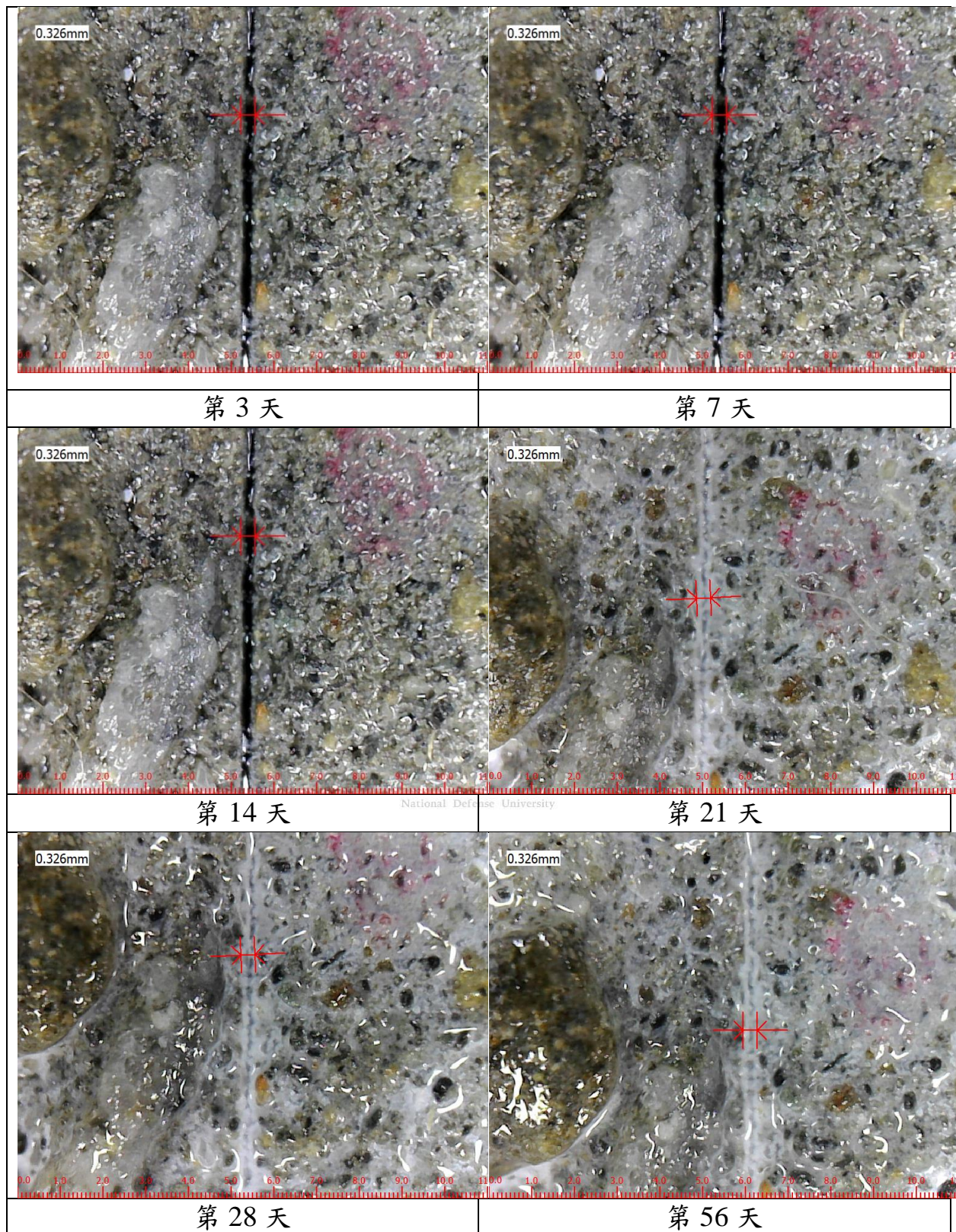
本研究試驗設計的裂縫寬度為 0.1mm~0.5mm 不等，但因使用無損法製造人為裂縫，故實際裂縫寬度為 0.133mm~0.726mm 不等。圖 4.6 為裂縫觀察結果，圖 4.7 為混凝土裂縫寬度修補情形隨齡期之變化圖，由試驗結果可發現：

- (1) 當裂縫寬度在 0.33mm 以下時，自癒原劑對裂縫修補的效果極佳；然當裂縫寬度超過 0.5mm 時，在試驗觀察時間內（56 天），自癒原劑裂縫修補效果不明顯。
- (2) 寬度 0.133mm 之裂縫，在第 7 天表面即已幾乎癒合，而寬度為 0.326mm 之裂縫，其表面在 21 天時方大致癒合，顯示裂縫寬度愈小，其表面完成癒合所需時間愈短。

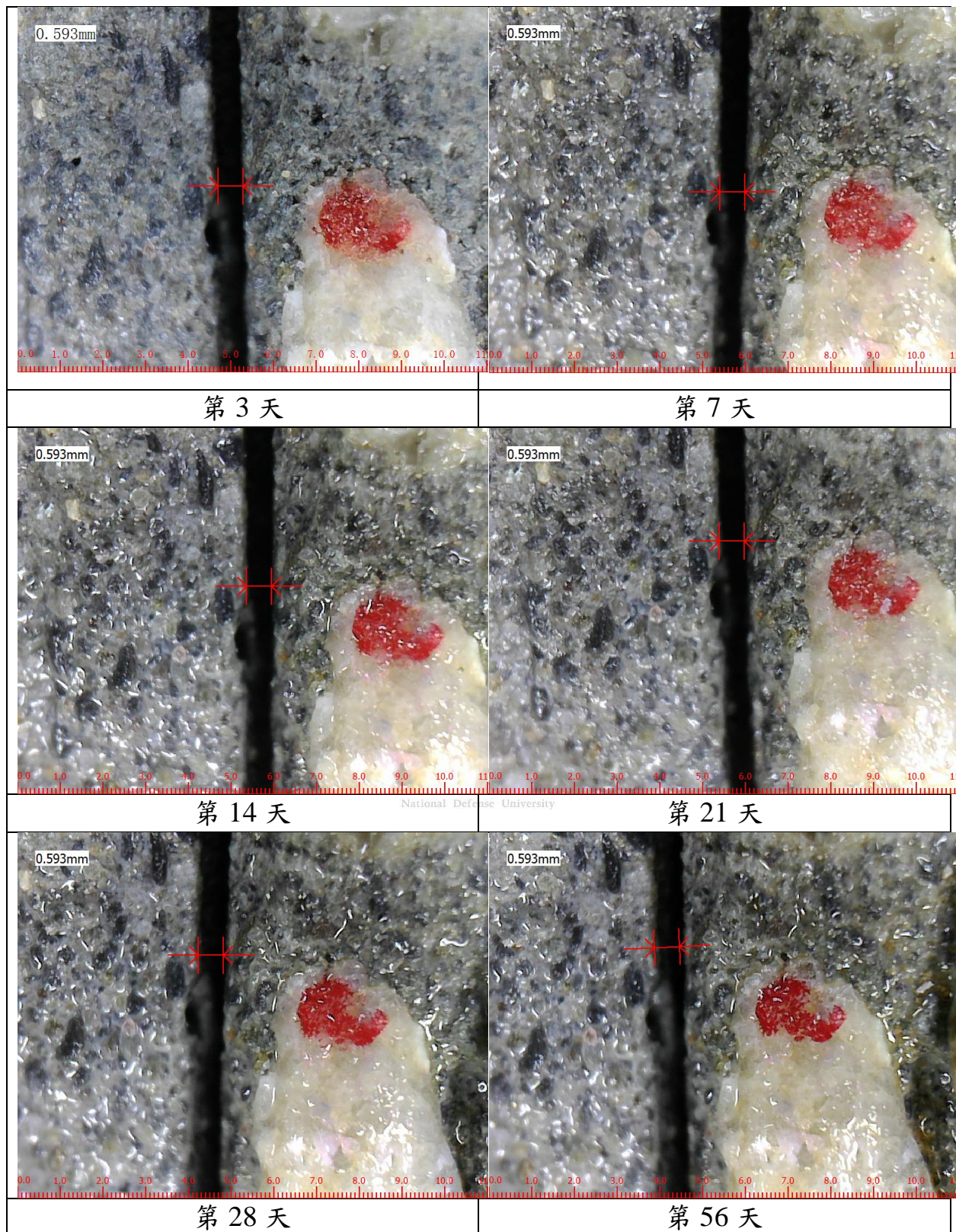




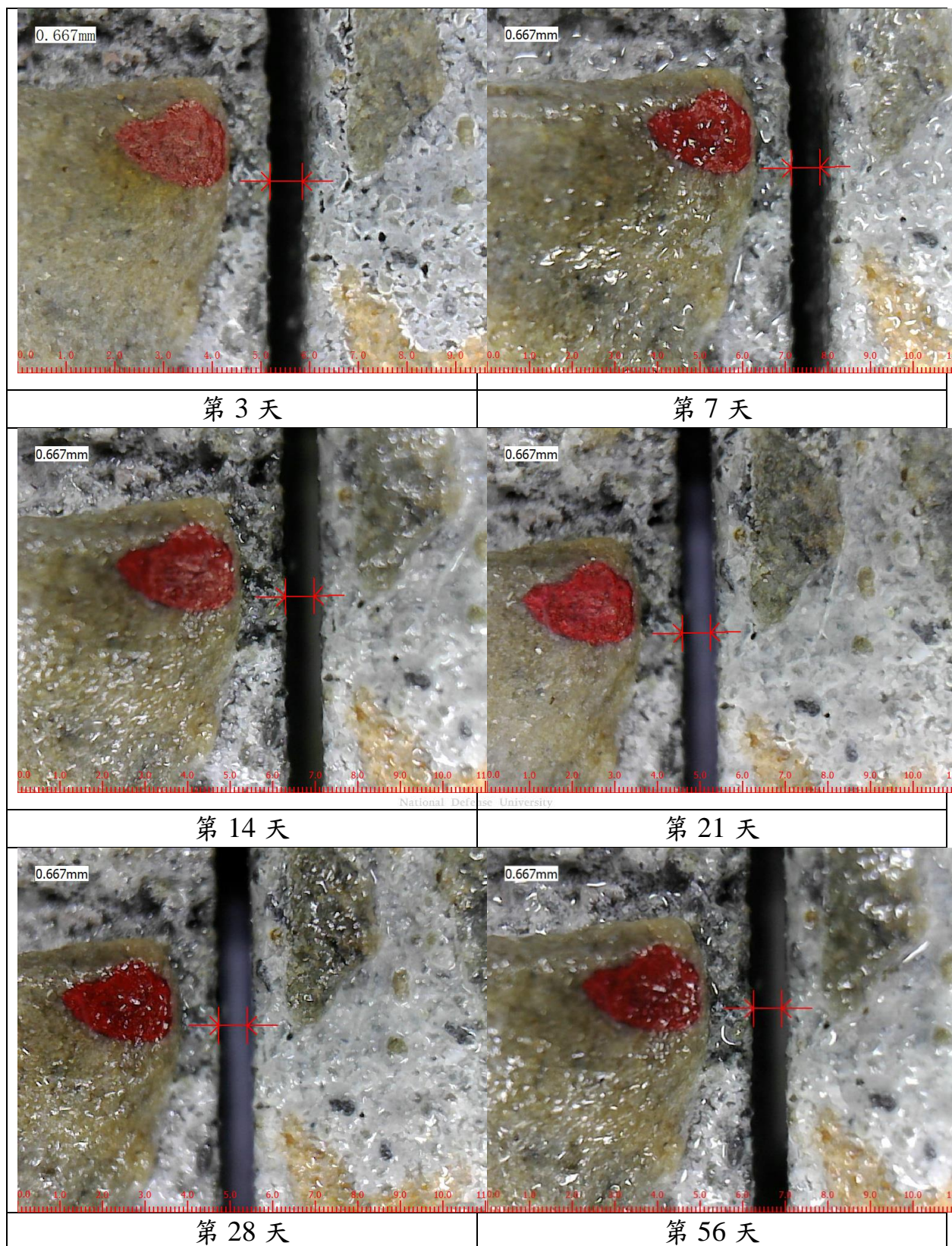
(a) 試驗組 2-裂縫寬度 0.133mm



(b) 試驗組 2-裂縫寬度 0.326mm

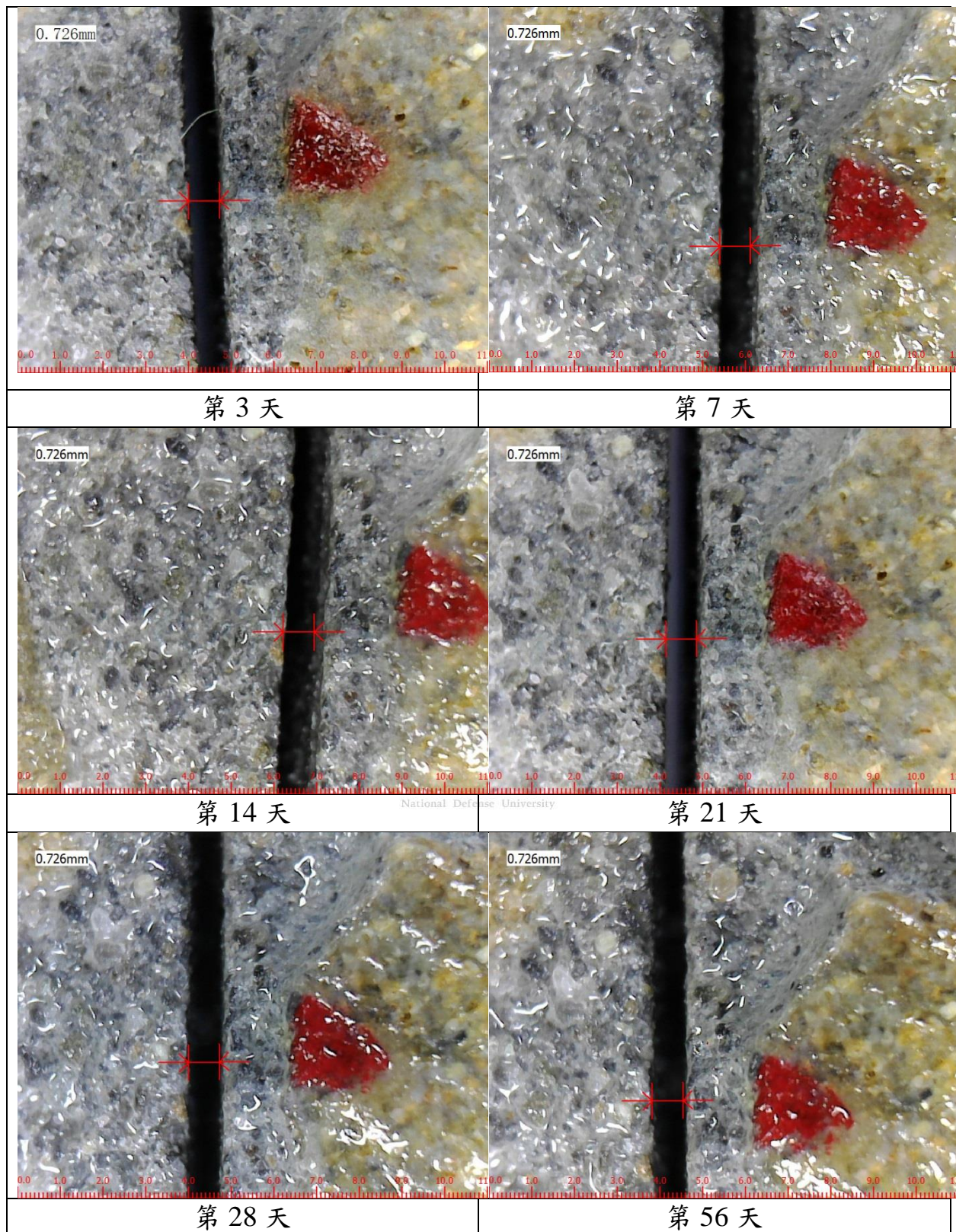


(c) 試驗組 1-裂縫寬度 0.593mm



(d) 試驗組 2-裂縫寬度 0.667mm





(e) 試驗組 1-裂縫寬度 0.726mm

圖 4.6 混凝土裂縫修補觀察試驗結果

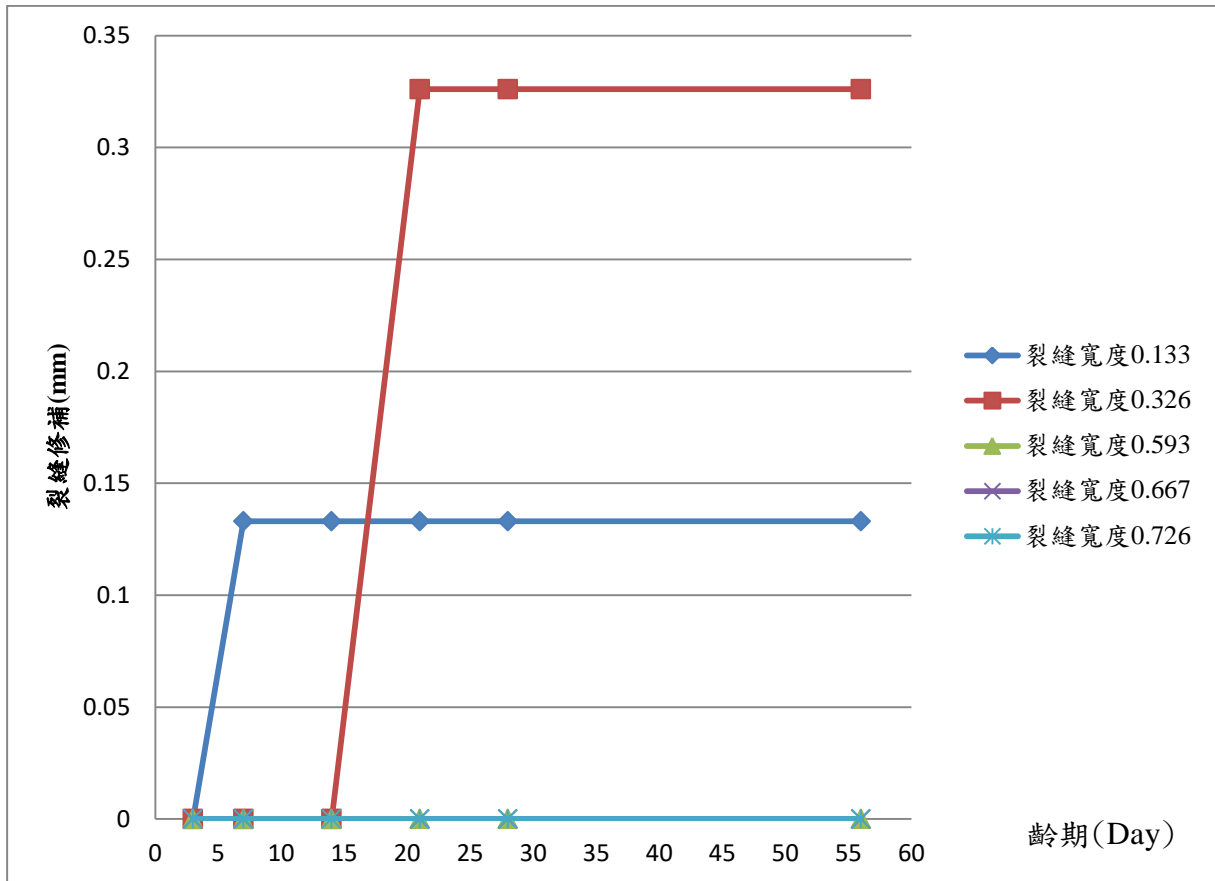


圖 4.7 各組混凝土裂縫寬度修補情形隨齡期之變化圖

# 1. 結論與建議

本研究進行混凝土抗壓強度試驗及吸水率試驗，藉以了解自癒原劑含量對混凝土抗壓強度、吸水率之影響情形，以評估生物自癒原劑應用於混凝土之成效，並藉由觀察不同寬度裂縫隨時間之癒合情況，評估自癒原劑對混凝土裂縫修補之效能。依據研究成果，提出結論與建議如下：

## 5.1 結論

根據本研究試驗結果與分析，綜合結論如下：

- (1) 抗壓強度試驗中充分說明添加自癒原劑明顯可強化混凝土抗壓強度。若以 28 天抗壓強度為例，隨自癒原劑含量從 1% 增加至 5%，抗壓強度增加率從 6.2% 增加至 18.7%。
- (2) 添加自癒原劑後，混凝土 14 天抗壓強度之增加率顯著高於其他齡期，顯示芽孢桿菌在 7 天~14 天時其活性達到最高，將  $\text{Ca}^{2+}$  反應生成  $\text{CaCO}_3$  沉澱之礦化作用最為顯著。
- (3) 混凝土吸水率降低率隨自癒原劑含量(0~5%)增加而均呈線性增加，充分說明添加自癒原劑可有效降低混凝土吸水率。若以 28 天吸水率降低率為例，隨自癒原劑含量從 1% 增加至 5%，吸水率降低率從 3.9% 至 16.2%。
- (4) 從裂縫修補觀察試驗可知，添加自癒原劑對寬度為 0.33mm 以下之裂縫，裂縫癒合效果極佳，然當裂縫寬度超過 0.5mm 時，其修補效果則不明顯。
- (5) 添加自癒原劑至混凝土中，藉由生物之礦化作用造成碳酸鈣沉積而填補混凝土內部微小孔隙，在無裂縫狀況時，即可增加混凝土強度、降低其滲透性，而當存在裂縫時，微生物之礦化作用甚至可有效修補一定寬度

之裂縫。故添加本研究之自癒原劑，可明顯提升混凝土工程性質，並對寬度小於 0.3mm 之裂縫具有極佳的修補能力。

## 5.2 建議

根據本研究之試驗過程與結果，提供未來進行類似或後續研究之建議如下：

- (1) 因受限於養護設備空間不足之限制，本研究混凝土試體養護方式採覆蓋麻布灑水之養護方式，建議仍應以恆溫恆濕櫃進行混凝土試體之養護，以降低環境因素之影響。
- (2) 本研究僅以小型混凝土圓柱試體進行一系列試驗，建議日後可進行更大尺寸混凝土構件之試驗，以驗證在外部自然環境中生物自癒的實用性。
- (3) 本研究裂縫修補觀察試驗僅以自癒原劑含量 2% 及 5% 進行試驗，建議日後可增加自癒原劑的含量，以驗證自癒原劑的含量對裂縫修補的效果。



## 參考文獻

- [1] 吳中偉、廉慧珍，1999，高性能混凝土，中國鐵道出版社，北京。
- [2] 馮乃謙，2004，高性能混凝土結構，機械工業出版社，北京。
- [3] 過鎮海、時旭東，2003，鋼筋混凝土原理和分析，清華大學出版社，北京。
- [4] 狄生奎、花尉攀、汲生偉等，2010，約束態 SMA 混凝土梁的裂縫監測及自修復，建築材料學報，13(2)：237-242。
- [5] 楊和禮，2004，原材料對基礎大體積混凝土裂縫的影響與控制，武漢大學博士論文，武漢。
- [6] 藍宗建，2008，混凝土結構設計原理，東南大學出版社，南京。
- [7] 盧曉，2007，市政隧道大體積混凝土裂縫的控制研究，同濟大學碩士論文，上海。
- [8] 王建敏，2009，靜水壓力環境下混凝土裂縫擴展與雙 K 斷裂參數試驗研究，大連理工大學博士論文，遼寧。
- [9] Edvardsen C., 1999, Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, *ACI Material Journal*, 96 : 448-54.
- [10] Hearn N., 1998, Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference, *Material Structure*, 31 : 563-7.
- [11] Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A., 1973, Production of calcite(calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon, *Nature*, 246 (5434) : 527-529.
- [12] Achal V., Mukerjee A., Reddy M. S., 2013, Biogenic treatment improves the durability andremediates the cracks .f concrete structures, *Construction & Building Materials*, 48 (19) : 1-5 。
- [13] Tittelboom K. V., Belie N. D., 2013, Self-healing in cementitious

materials-a review, *Materials*, 6(6):2182.

- [14] 張肖寧，1993，瀝青混合料低溫抗裂性能評價方法的研究，*中國公路學報*，6(1):3-9。
- [15] 湯華、李相國，2008，水泥基材料裂縫自癒合效應的研究，*武漢理工大學學報*，30(4)26-28。
- [16] 姚武、吳科如，2001，水泥基材料損傷自癒合的理論與方法，北京冶金工業出版社，31-35。
- [17] 黃偉、王平、尹萬雲等，2010，滲透結晶型裂縫自癒合混凝土的抗滲性能及其機理，*混凝土*，28-30。
- [18] 陳光耀，2010，水泥基滲透結晶型防水劑及其裂縫自修復性能的研究，華南理工大學材料科學與工程學院碩士論文，廣州。
- [19] 汪海平、容敏智、章明秋，2010，微膠囊填充型自修復聚合物及其複合材料，*化學進展*，2(12)：2397-2407。
- [20] 邢鋒、倪卓等，2013，自修復混凝土系統的研究進展，*深圳大學學報理工版*，30(5) 486-494。
- [21] White S. R., Scottos N. R., Geubelle P. H., 2001, Autonomic healing of polymer composites, 794-797.
- [22] Kessler M. R., Sottos N. R., White S. R., 2003, Self-healing structural composite materials, *Composites: PartA*, 743-753.
- [23] Sottos N. R., White S. R., Bond I., 2007, Introduction: Self-healing polymers and composites, *J R Soc Interface*.
- [24] 張妃二、姚立寧，2003，光纖智慧混凝土結構自修復的研究，*功能材料與器件學報*，9(1)91-94。
- [25] Trask R. S., Williams G. J., Bond I. P., 2007, Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres, *Journal of the Royal Society Interface*, 4(13)：363-371.

- [26] 高禮雄、孫國文，2013，微生物技術在混凝土裂縫自修復中應用的研究進展，*矽酸鹽學報*，41(5)：627-636。
- [27] 錢春香、李瑞陽等，2013，混凝土裂縫的微生物自修復效果，*東南大學學報(自然科學版)*，43(2)：360-364。
- [28] 崔迪，2007，形狀記憶合金及其智慧混凝土結構研究，大連理工大學博士論文，大連。
- [29] 陶寶祺、梁大開、熊克等，1998，形狀記憶合金增強智慧複合材料結構的自診斷、自修復功能的研究*航空學報*，19(2)：250-252。
- [30] 邢鋒、倪卓等，2013，自修復混凝土系統的研究進展，*深圳大學學報理工版*，30(5)：486-494。
- [31] Mostafa Seifan, Aydin Berenjian, Ali Khajeh Samani, 2016, *Bioconcrete: next generation of self-healing concrete*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [32] 陳貽瑱，2016，生物基材自癒混凝土，國立中興大學碩士論文，臺中。
- [33] 張越，2014，微生物用於砂土膠凝和混凝土裂縫修復的試驗研究，北京清華大學工業碩士論文，北京。
- [34] 鄧輝凱，2010，微生物應用於淤泥固化及混凝土修復之研究碩士論文，國立中興大學，臺中。
- [35] Ramachandran S. K., Ramakrishnan V., and Bang S. S., 2001, "Remediation of concrete using micro-organisms," *ACI Material Journal*, 98(1), 3-9.
- [36] 楊博，2018，微生物作用下混凝土裂縫癒合與性能補償研究，哈爾濱工業大學碩士論文，哈爾濱。
- [37] Ruixing W., Chunxiang Q., Restoration of defects on the surface of cement-based materials by microbiologically precipitated  $\text{CaCO}_3$ , 東南

大學學報（矽酸鹽）。

- [38] 武少贊，2019，混凝土裂縫自癒合機理研究，大連理工大學碩士論文，大連。
- [39] 穆松、劉建忠，2015，基於混凝土裂縫特徵的氯離子傳輸性質研究進展，矽酸鹽學報，43(6)：829-838。
- [40] Šavija B., 2014, Rimental and numerical investigation of chloride ingress in cracked concrete, Delft: Delft University of Technology.
- [41] 延永東、金偉良、王海龍，2011，自癒合對氯離子在開裂混凝土內侵蝕的影響，工業建築，41(5):6-9.
- [42] 網站：<http://www.basiliskconcrete.com>。





## 自傳

作者丁慶榮，民國 68 年 9 月 21 日出生於雲林縣。學歷：指職軍官 91 年班。軍中歷練：陸軍五三工兵群排長、副連長、後勤官、陸軍後勤指揮部工程官、陸軍馬祖防衛指揮部參謀官，負責所屬單位工程相關作業，因工作所需及對工程興趣，於民國 108 年 8 月進入國防大學理工學院軍事工程研究所攻讀碩士學位，並於民國 110 年 5 月 14 日通過論文口試。

