

生物對混凝土之侵蝕

林維明* 論述

Biological Attack to Concrete

W. M. Lin*

摘要

混凝土可能受細菌、海藻、海苔、青苔和海草等生物之侵蝕，細菌對混凝土之作用可分為好氧菌及厭氧菌兩大類。硫酸根還原菌將造成鋼筋腐蝕及混凝土惡化。海藻之侵蝕性較細菌差，甚至可形成一保護層。海苔與青苔以碳酸鹽出現其腐蝕性較微。海草附著於混凝土結構物上將含有海水，蒸發時濃度增高，海水中含 Cl^- 及 SO_4^{2-} 及 CO_2 等對混凝土會造成惡化現象，本文探討其腐蝕機理及防制對策。

一、前言

生物對混凝土之侵蝕可定義為生物之侵蝕，對於混凝土的外觀或性能有直接影響者，由於微生物與混凝土組成物質起化學反應，而對混凝土性質造成不利之影響性，另外為加強混凝土之抗拉強度，通常製作鋼筋混凝土，其中鋼筋亦可能受微生物之作用，而造成腐蝕現象加速其破壞。雖然有許多化學性侵蝕鹼性骨材反應，硫酸鹽或海水侵蝕及凍霜傷害等都可能比有機物之侵害更受重視。然而由於生物之侵害所造成之修理費用亦相當可觀，因此有必要對此專題深入探討。

二、有機生物之種類

有機物種類包括黴菌 (Fungi)，細菌 (Bacteria)，藻類 (Algae)，地衣 (Lichens) 及青苔 (Moss) 等。

細菌可分為好氧菌及厭氧菌兩大類，圖1為硫化菌之循環反應。

硫磺菌生長在廢水和下水道中，混凝土污水管在水面上之部份受嚴重之污染如圖2所示。

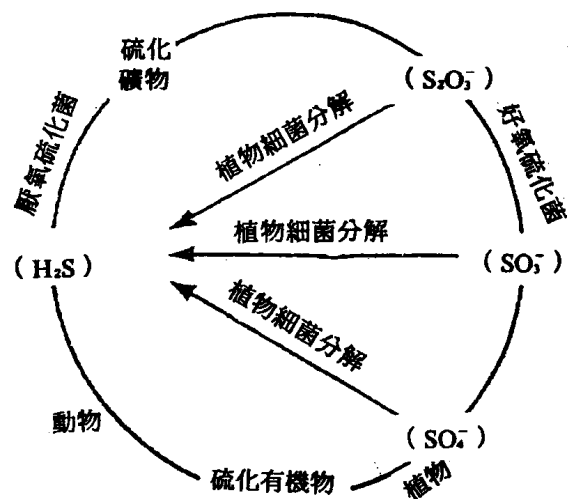


圖1 硫化循環⁽¹⁾

*省交通處臺灣技術研究所研究員，國立交通大學土木工程研究所博士班研究生

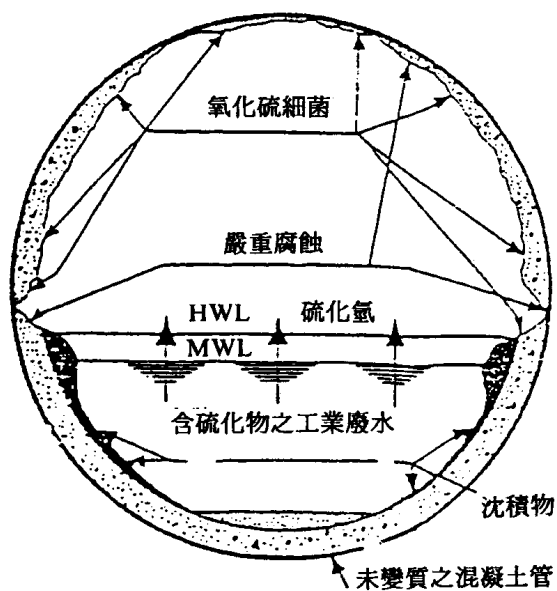


圖 2 混凝土污水管、硫化菌之腐蝕⁽¹⁾

在土壤或岩石中含有硫酸根之還原菌可能會還原為具厭氧性之 H_2S ，在有氧氣與濕氣之作用下，又形成好氧菌（ H_2SO_4 ），而與混凝土作用會造成稀釋，而形成坑狀或膨脹龜裂現象。圖 3 為在混凝土地板上可能形成之坑狀現象。

最常見之海洋生物型態為：

- (1) 具有硬殼者：如環蟲（Annelids）、藤壺（Barnacles）、殼狀苔蘚蟲（Bryzoa）、軟體動物（Mollusks）、及珊瑚等。
- (2) 未具硬殼者：如海藻、絲狀苔蘚蟲、腔腸動物（Coelenterater）、水螅（Hydroids）、被囊類動物（Tunicates）以及含鈣質或矽土質的海綿。

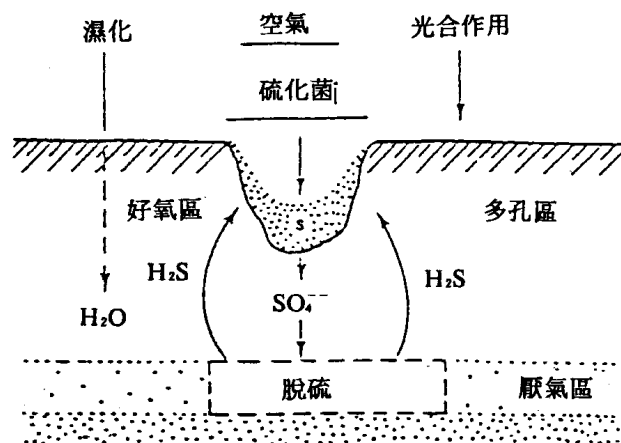


圖 3 硫酸根還原菌造成之侵蝕⁽¹⁾

如圖 4 所示，當結構試體浸於海中，剛開始在表面上有生物黏液（Slime）附著，接著形成細菌或海藻，然後迅速發展成為有機物。

圖 5 為好氧及厭氧菌生物膜形成之情形。

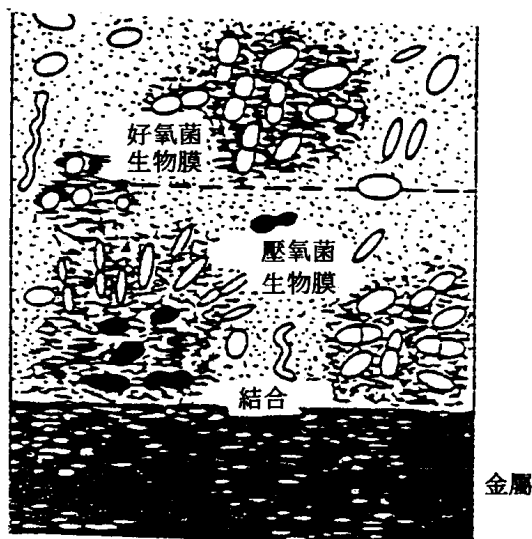


圖 5 好氧及厭氧菌生物膜形成情形⁽²⁾

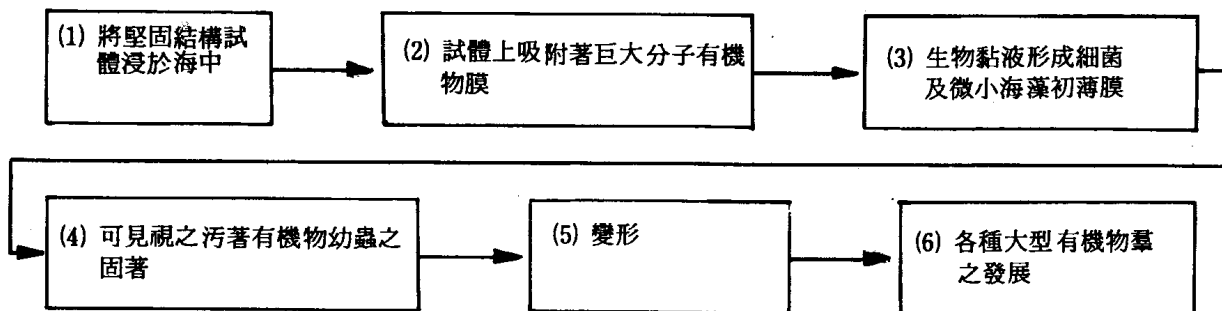


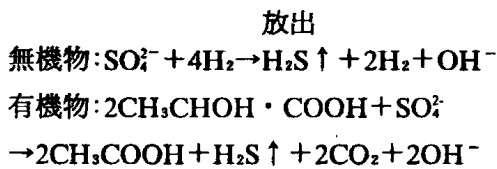
圖 4 海洋生物污著事件之程序圖⁽²⁾

三、混凝土受生物作用發生惡化之機理

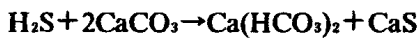
1. 混凝土受細菌作用發生惡化之機理

(1) 硫酸根還原細菌之作用：自還原菌還原為硫化根形成嫌氣性細菌腐蝕情況。

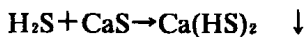
• H₂S 之形成



• 在混凝土中形成弱酸



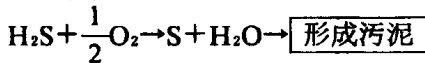
可溶性



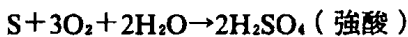
可溶性 → 稀 釋

(2) 形成硫酸根作用：好氣菌之形成

• H₂S 氧化

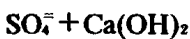
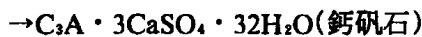
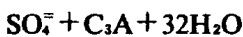


• S 氧化

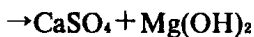


↓ 與混凝土作用

稀 釋 — 膨 脹



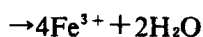
膨 脹



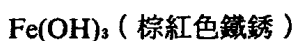
可溶性 稀 釋

(3) 鋼鐵氧化菌之作用：形成好氧菌腐蝕

• Fe²⁺ 氧化



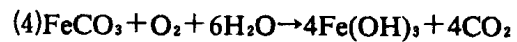
↓



↓ 鐵銹體積膨脹作用在混凝土

混凝土剝落

• 副產品 CO₂



↓

造成孔蝕、中性化

2. 海洋生物污著鋼材發生局部腐蝕反應之機構

海生物附著鋼材上影響其 pH 值，溫度及離子濃度之變化使之產生電化學反應 (圖 6)，其機構大致為：

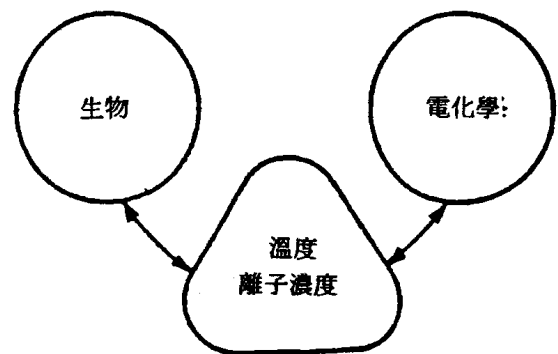


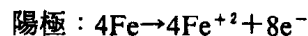
圖 6 金屬浸於海水中其表面受生物及電化學作用之關係圖⁽²⁾

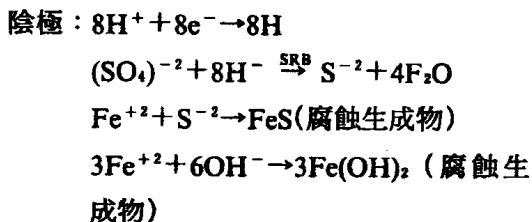
(1) 產生酸：

由於生物之新陳代謝或分泌物產生有機酸或無機酸，加速材料之局部腐蝕。

(2) 產生硫化物：

由於受污染使海水中硫化物含量增加，且因含有硫氧化菌之存在，而使這些硫化物氧化為硫酸根加速材料腐蝕，而在厭氧環境下，硫酸根被硫酸鹽還原菌還原為硫化氫，與金屬表面反應形成暫時性之硫化亞鐵保護膜，降低腐蝕速度，但由於鐵離子或亞鐵離子的增加，硫化亞鐵與鐵之偶合作用，形成的伽凡尼效應而加速腐蝕。其電化學反應式如下：





硫酸鹽還原菌、硫化鐵及氫氧化鐵之關係如圖 7 所示。在鋼材上，鐵硫化物之變化關係如圖 8 所示。

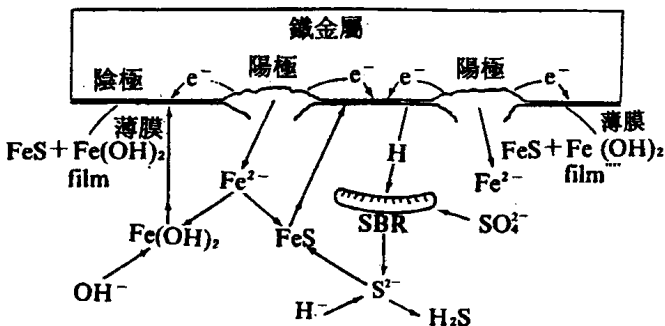


圖 7 在一銹蝕之鋼材表面上，硫酸鹽還原菌與硫化鐵及氫氧化亞鐵間之關係⁽²⁾

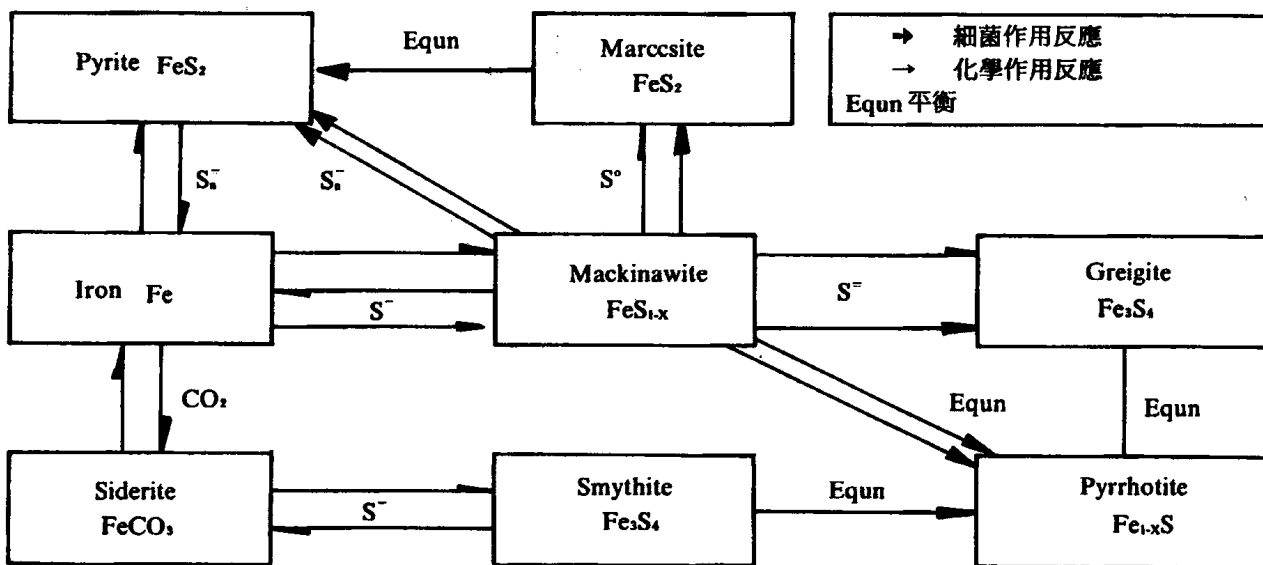


圖 8 鋼材上硫化物間關係圖⁽²⁾

(3) 氧濃淡電池效應：

海生物分泌的黏膜或微生物產生的腫胞 (Tubercle) 附於金屬表面上，由於氧不易擴散或內層微生物消耗膜內之氧氣，而造成內外氧的濃度不同，因此形成氧濃度電池 (圖 9) 發生孔蝕現象。另外由於覆蓋物底端缺氧形成厭氧條件，提供硫酸根還原菌之存在空間，加速孔蝕之發生。

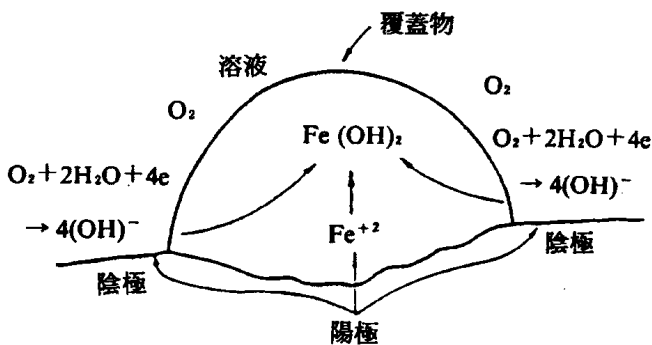


圖 9 氧濃度差效應圖⁽²⁾

(4) 保護膜被破壞：

由於海生物附著而使鋼材表面保護氧化膜不易形成，或已產生者遭受破壞造成腐蝕。而有些

機體，使用各種保護性的有機塗料作為養分而破壞其保護功能，或有些貝類成長中破壞塗料，因

而無法達到保護功效。

(5)陰極去極化效應 (Cathodic Depolarization) :

金屬離子或電子能迅速被移走，將使金屬腐蝕速率加快，主要移走電子之反應為移走氫氣。而硫酸還原菌具有氫活化酵素，能移走金屬表面的氫氣，還原硫酸根變為硫化物，使鐵離子之溶解量更多而加速腐蝕，此種效應稱為陰極去極化效應。

(6)綜合反應機構：

微生物腐蝕反應機構相當複雜，很可能由上述各種反應機構同時或部份作用產生所致，由實驗室所得之反應機構，往往與實際情況有根大的差異，因此應詳加探討反應機構。對於海生物污著之防制方法，可利用流速降低藤壺之形成，根據本研究所與工材所，在台中港進行浸泡試驗結果發現，主要海生物為藤壺，面向海浪者含量少，而背向海浪者含量多，熱浸鍍鋅材料有抑制藤壺附著之功效，目前所採用防制海生物污著法以加氯殺菌，陰極防蝕可增加金屬表面的鹼性抑制硫酸還原菌之成長，以及防污塗料中含毒性，不斷溶解防止海生物附著，另一種形成為利用非黏性的樹脂如鐵弗龍，以其表面張力低的特性，使海生物不易附著而達到防污效果為主。

四、防制對象

生物對混凝土侵蝕可能造成表面外觀不雅，地板鼓起及混凝土惡化，相關之侵蝕情形及防制對策概述如下：

1. 混凝土表面之影響

(1)侵蝕現象

有許多有機物如果能提供充分的養分、氧氣、濕氣及陽光等，則在混凝土表面可以生長旺盛。而他們很少對混凝土造成破壞性，黴菌包括黴 (Mold)、霉 (Mildew) 及酵母 (Yeast) 需有機物以供其成長，黴 (Mold) 以各種顏色

如灰、綠、黑或褐色出現斑點或斑紋 (Patch)。霉 (Mildew) 則偶而發生在潮濕的內部表面上，係因通風不良所致，其出現使結構體顯得很不雅觀而且相當不衛生。地衣 (Lichens) 是一種介於藻類和黴菌類之中間物。易在潮濕的環境下產生。而通常是在隱僻的雕刻物和碑銘上可以發現到。在石綿水泥 (Asbestos cement) 產品上的斑點常出現地衣。藻類為可自由移居 (Free-living) 之植物，其種類有二萬多種，他們以粉狀之污染物 (Powdery discoloring) 或黏液 (Slime) 在潮濕的混凝土上產生。地錢 (Liverwort) 及青苔 (Moss) 係以堅韌之組織 (Heathery tissue) 出現在有土壤及泥土堆積之混凝土結構體上的轉角，裂縫內或表面上。

(2)防制對策

常使用有毒之化葯劑沖洗，包括家用漂白劑，如含有5%之次氯酸鈉 (Sodium hypochlorite)，2%甲醛液 (馬林) (甲醛溶液中加入少量之甲醇)，1%之二氯苯 (Dichlorophene)，2%之五氯酚鈉 (Sodium pentachlorophenate)，3—5%之硫酸鈉和硝酸銅之水溶液和28克商用洗衣清潔劑加上84克之磷酸三鈉加上0.95公升洗衣漂白粉溶解在2.85公升之水中等方式處理。青苔 (Moss) 斑點可能需用磺酸銨 (Ammonium sulphate)，而防止藻類成長可能需在製作混凝土時，拌合水中添加0.1%之硫酸銅。

其他由微生物所造成之表面侵蝕型態，包括柏油塗裝於潮濕之混凝土或防水混凝土上。當這種微生物在此種環境下仍然會旺盛地生長，此時這種微生物可能會侵害柏油層。必須應用上述有毒之化學劑加以沖洗。

2. 地板發生鼓脹

(1)發生現象

在文獻上曾報導有在地面層上之板 (Slab) 發生鼓脹之事例。經過追蹤發現是受到化學一微

生物作用所致。這種情形通常進行相當慢，也許在施工後1~5年後才會發現到地板發生。鼓脹會妨害到設備的排列，而且可能對隔牆、配件和門等之接合造成危害，圖 10 說明一建築物在五年期間內地板移動的最大移量為5~6公分，換句話說在32個月期間，地板高程之鼓速率為0.18公分/月。

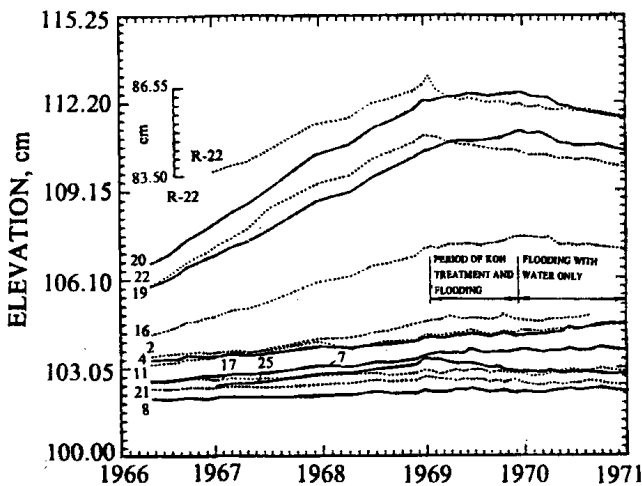


圖 10 一建築物地板高程之變化⁽³⁾

Penner等學者⁽³⁾曾調查地板鼓脹時，發現建築物建造於黑頁岩之基礎上已有0.7~1.0公尺深度受到化學及物理之變化。各種不同深度所採取之礦物試樣調查結果顯示在此變化區30~60公分中的頁岩薄層中主要含有石英、石膏（無色結晶）及少量之 Jarosite, $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ （為黃褐色之沉積物）和硫化鐵（Pyrite），而在此變化區30~60公分深下之薄層間的柔軟材料中含有大量的Jarosite及石膏，而在未改變深度120~180公分下，則不含石膏和Jarosite，僅出現有硫化鐵、方解石（ $CaCO_3$ ），伊利土（Illite）和石英等。

在未改變區有硫化鐵共及在改變區有各種不同之生物出現。而在改變區的pH值低（pH=22-4.5）及鐵細菌—含硫菌群（Ferrobacillus-

Thioacillus group）的微有機物之存在（圖 11）等現象，因此使人聯想到硫化鐵風化為一化學—微生物之氧化反應程序。自我製造養分（Autotrophic）細菌的氧化已知在煤礦中曾發生過，在該處的細菌，其成長之能量係由大氣中氧氣出現的無機化合物產生氧化作用所捕足的，主要的氧化反應式如下所示：

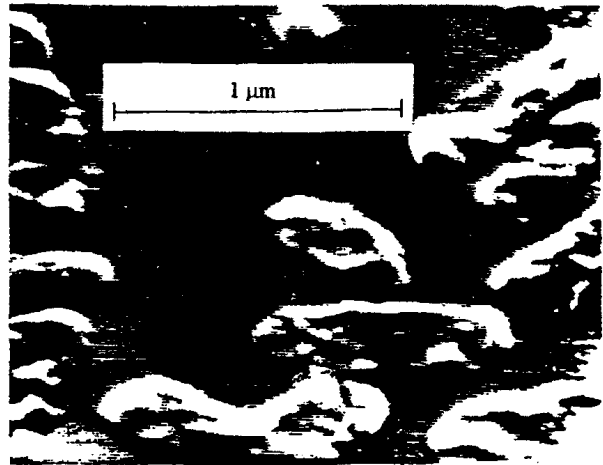
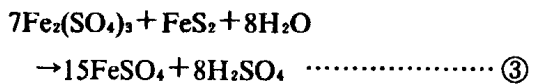
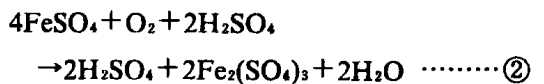
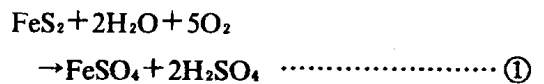
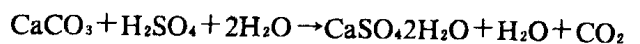


圖 11 鐵細菌—含硫菌群的微有機物之存在現象⁽⁶⁾



式①為在自然之反應，可藉自我製造養分之細菌，而式②似乎幾乎完全由細菌產生的。因為它不能在酸性溶液下進行化學反應。硫化鐵之氧化可藉式③之產物硫化鐵製造養分之情況下發生反應的。

頁岩含碳酸鈣，因此與 H_2SO_4 中性化，而形成石膏如下式：



Jarosite 亦在酸性環境下的主要反應產物，在 Jarosite 產物中之鉀 (K) 係由黏土礦物之剝蝕和在有酸性出現下，鹽基交換反應所得到的，上列反應所引起生成物鼓脹現象係因產物之分子體積比作用物為大，例如硫化鐵變為 Jarosite，其分子體積的增加115%，而方解石變為石膏則其分子體積增加103%，石膏結晶之方向成長，更促使其更加地膨脹。

(2)防制對策

在地下室地板已經鼓起之處，補救之措施是包括製造一個不利於細菌生長之條件，例如以鹼性溶液與頁岩發生中性化或提昇受風化區之地下水份以減少空氣之侵入及酸之形成等方式，均可滿意地控制地板之鼓起現象（如圖 10 所示）。

另外方法是撤除鼓起之地板，而以良質之土壤更換原來之頁岩，並更換結構地板等方式而加以改善。

而對於新建築物在一已知會發生鼓起的硫化鐵岩石上建造，則必須遵循下列之建議：

- ①在地下室之地面以下之頁岩，以最少之擾動情況下開挖，打碎岩床，使空氣易於進入頁岩中。
- ②在所有頁岩曝露空氣中超過24小時之地區，以一層混凝土水泥漿或柏油包覆於頁岩表面上，此包括服務之壕溝及曝露區可以回填至地面上。
- ③以混凝土完全填充基礎壕溝。
- ④由於氧化進行速率與細菌活躍隨著溫度上升而增加，因此將溫度超過常溫之地下室之地板絕緣。
- ⑤避免建築物建造於相當粉碎之頁岩上，若無法避免則考慮使用一結構地板系統。此種系統將可解除不宜之鼓起趨勢，但在選用系統時必須考慮由於風化過程中所產生之酸性結果。
- ⑥避免使用從鄰近開挖或從煤礦廢土等含有

硫化鐵之頁岩或其他不穩定之材料作為填充地下室之基礎或在服務之壕溝上使用之材料。

3. 混凝土惡化之防制

混凝土惡化至一泥狀之稠度，可能發生在它是直接位於風化之黑色頁岩上。這種侵害可能歸因於硫酸鹽溶液（由頁岩中硫化鐵氧化，而經細菌促進產生的）和混凝土上的硫酸鹽侵害為與明礬頁岩之接觸⁽⁴⁾。此類之侵害可在清除頁岩與混凝土間之接觸而加以防止，有時曾建議在頁岩與混凝土間包覆之保護法，然而其效果不彰，除非有效地塗裝可以有效地清除所有空氣。有一些混凝土惡化型態例如在一隧道出口之內襯上可能由硫還原菌和硫氧化菌之合成作用所引起的。

Thronton⁽⁵⁾ 發現硫酸鹽和硫化物之濃度高和有利之環境，例如水深大於 6 公尺以上其含氧量少（對於硫酸鹽還原菌之繁榮及由於硫酸鹽還原產生 H₂S 為一有利之情況）等為混凝土惡化之必須條件，除外在隧道具有細菌可氧化 H₂S 或 H₂SO₄ 之條件，H₂SO₄ 之形成導致混凝土中之水泥漿受到侵蝕，其防策措施為：

- ①通風除去 H₂S。
- ②沖洗牆壁，清除表面之沉積物。
- ③提昇虹吸管之入口，抽取在含硫化物多之岩石之水分。

五、結 論

生物對混凝土之侵蝕，雖然其量不大，但是對維修方面仍是一大問題，因此對於建物所處的土壤環境及環境中是否含有細菌亦詳加調查，以策安全。

參考文獻

- (1)林維明，1988，7月，「混凝土耐久性相關之化學性侵蝕現象（上）」營建世界，81: 86-94。
- (2)林維明，1991，1月，「海洋鋼結構物腐蝕影響因素之檢討」工程64卷1期，pp 50-69。
- (3)E. Penner, W. J. Eden and J. E. Gillott "Floor

- Heave due to Biochemical Weathering of Shale”
Proc. of the 8th International Conference on Soil
Mechanics and Foundation Engineering, 2, part 2,
session 4, pp 151-158 Moscow (1973).
- (4) J. Moum and I. T. Rosenquist, Proc. Am. Concr.,
Inst. 56, 257 (1960).
- (5) H. T. Thornton, “Acid Attack of Concrete by Sul-
far Bacteria Action” US Army Engineering
Waterway Experimental Station, Vicksbury. U.S.A.
(1977).
- (6) V. S. Ramachandran “Concrete Science” Heyden
& Son Ltd., 1981, pp 352-357.