

裂縫對鋼筋混凝土腐蝕之影響探討

王和源*、賴崇胡

The Crack Influence on the Corrosion of the Reinforced Concrete

H. Y. Wang*, C. H. Lai

摘 要

混凝土梁構件的腐蝕損害為現今許多建築物破壞的主因，而導致其腐蝕損害的原因有氯離子誘發鋼筋發生腐蝕生銹、混凝土碳化、施工的疏忽等，主因則是裂縫的產生。本文主要探討如何有效防止裂縫的產生及延伸的方法，期能減少裂縫發生並減緩鋼筋不遭受腐蝕，有利於鋼筋混凝土之耐久性控制。

關鍵詞：腐蝕；裂縫；鋼筋混凝土。

ABSTRACT

Corrosion to Reinforced Concrete beam is one of the main causes and will damage the RC structure. There are many corrosive coefficients such as steel corrosion induced by chloride. Concrete carbonization and working negligence. But initialed from the occurrence of the crack. In this paper .We discuss the formulation of the crack and the crack reductions in the concrete members. It is anticipated that the durability of concrete will be enhanced by reducing cracks.

Keywords : Corrosion; Crack; Reinforced concrete.

1. 前言

鋼筋混凝土結構是目前土木工程上應用最多的結構形式之一，隨著結構物的老化和環境污染的影響，鋼筋混凝土結構耐久性問題越來越引起國內外學者的關注。在第二屆國際混凝土耐久性會議上，Mehta 教授提出他的見解：「當今混凝土破壞原因為鋼筋腐蝕、凍害、物理化學作用等」。他很明白地將"鋼筋腐蝕"排在影響混凝土耐久性因素的首位。而造成鋼筋腐蝕最初的原因為混凝土於開始時產生微裂縫及裂縫。混凝土的滲透性和裂縫，是決定有害物質侵入鋼筋混凝土的重要因素，其次是侵入的有害物質，最後才是以其它的方法保護鋼筋和混凝土不受侵蝕^[1]。

混凝土在預拌廠生產中或實驗室中都會因水化作用、不均勻搗實、人為因素...等；固化中之混凝土，因溫度變化、乾燥收縮、環境氣候(氣溫、濕度、日照、風吹...等)；固化後又因自體應力、束制應力，嚴重超載，反覆載重...等產生微裂縫、裂縫及開裂等破壞行為，這些行為都難以避免。實際上一般混凝土的裂縫，首先使結構體讓人有個刻板印象：「有礙觀瞻之外表」，導致讓人有種對此結構之安全已產生問題的錯覺。

一旦鋼筋混凝土內部產生裂縫會使有害的腐蝕介質如氯離子、硫酸根離子、硫化物、二氧化碳、氧、水等入侵，造成結構物內部所埋設之鋼筋與混凝土界面可能會發生明顯的化學反應，腐蝕介質侵入到混凝土內到達鋼筋處，經過化學反應後，造成鋼筋膨脹，腐蝕持續進行的話，導致裂縫也跟著擴大成開裂狀態，混凝土開裂之後，造成結構物滲漏，最後直到混凝土塊剝落破壞為止。開裂是由裂縫及微裂縫因應力集中於裂縫尖端而連結成髮型裂縫，ACI 規範設計中對耐久性結構物在裂縫未發生前均可抑制或延遲腐蝕反應之產生，但在裂縫一開裂後，則鋼筋不再受混凝土之保護，而腐蝕效應隨之增加^[2]。

由上述得知混凝土裂縫之重要性，本文主要針對裂縫對腐蝕影響之探討，以謀日後如何尋求防止裂縫之目標。

2. 裂縫產生原因及對腐蝕之影響

2.1 裂縫產生原因與型式

2.1.1 裂縫原因

裂縫有微裂縫、裂縫、葉狀裂縫及化學反應裂縫(由於鹼性反應，硫酸鹽促生)等，微裂縫指的是肉眼看不見之裂縫，長度為 $10\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ ，只能在顯微鏡底下才能觀測到它們，如圖 1、2 為掃描式電子顯微鏡(SEM)所觀測到之裂縫。

裂縫指的是肉眼可見之裂痕，也就是一般裂縫，像混凝土在凝結之水化過程中，即使只有一天亦將產生微裂縫，一旦超出混凝土的抗拉強度，也會跟著產生裂縫，而葉狀裂縫、化學反應裂縫等次要裂縫因佔少部份，一概以裂縫看之。

混凝土之裂縫發生有很多不同要因，如圖3^[1,2]所示，其範圍由水化作用等所產生的微裂縫，到因外力作用下產生可見之裂縫，微裂縫雖對混凝土承載能力影響很小，但為因果論的因，是由混凝土組成材料及周遭環境之交互影響所決定，慢慢地形成明顯可見之裂縫，進一步在溫度、濕度改變之交互作用下，結構物加速形成局部較大的裂縫。

2.1.2 裂縫型式

一般常見的裂縫型式有自體收縮裂縫、塑性收縮裂縫、乾燥收縮裂縫及溫度收縮裂縫，其產生原因分別簡述^[3,4]：

(1) 自體收縮裂縫：

主要因為水灰比小於 0.42 時不足以提供水化反應所需之水量，使得水泥顆粒吸附 C-S-H 膠體或孔隙內的微孔水，造成體積收縮，產生裂縫。

(2) 塑性收縮裂縫：

施工過程中若混凝土表面泌水率或由外界提供的水分小於大氣蒸發率，將造成混凝土表面呈鳥爪型之裂縫。此因蒸發水量引起毛細管張力超過水泥漿之張力強度，如圖 4 所示^[4]。也跟水泥漿量有密切關係，水泥漿量愈多，也愈容易產生塑性收縮裂縫。

(3) 乾燥收縮裂縫

任何水分在混凝土內外的移動都是發生乾燥收縮的原因之一，常出現在拆模後，表面出現呈 V 型的裂縫或翹曲變形，可藉由規範來控制，或規則化收縮縫以增加結構安全性。

(4) 溫度收縮裂縫

由於水化過程會產生水化熱使溫度上升，待回復室溫後造成的冷縮量與一般混凝土的極限拉伸值不一，尤其水泥用量愈多，水化熱也愈大，愈容易引起龜裂或溫度收縮裂縫等破壞，因此設計與施工時需降低水化熱和控制溫度來減少發生溫度收縮的機率。

2.2 混凝土裂縫與腐蝕兩者之關係

由圖 5^[5] 可以看出在結構物初期時裂縫少，受鋼筋腐蝕影響較小，隨著時間增加，腐蝕造成的損害逐漸增大，是以加速度的方式增加。同時可瞭解鋼筋開始腐蝕後，短時間內往往看不出鋼筋正在腐蝕，但是一旦產生裂縫或剝落後，結構受損程度便加速惡化。因此一旦發現腐蝕狀況時，不要以為過去有相當一段時間並沒有腐蝕現象，就以相同速率預測未來可能的破壞情況。因為一個結構物鋼筋腐蝕十年只造成裂縫，卻只需再花五年便可使得樓板崩落^[5]。下面簡述裂縫與腐蝕兩者之間的關係：

2.2.1 含水量與裂縫

水泥漿體之含水量，在混凝土體積中約佔 15~20%，在水化初期，其透水係數(K) 約為 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec^[1]，隨著水化作用進行，透水係數隨齡期增長而減小。在水泥漿體中，透水性主要為毛細管孔隙所控制，而毛細管孔隙依水化程度與水灰比而定，水泥之水化作用，產生 C-S-H 膠體，因水不易透過膠孔 <1000 nm，故當 C-S-H 膠體在水泥顆粒間成長，而產生填塞空間之作用時，阻隔了毛細管孔隙之連續性，加上 CH 之填塞孔隙現象，使透水係數減小。在水泥漿 - 骨材界面與混凝土透水性之關係中，水泥漿體中加入骨材，會增大透水性。

混凝土透水性高於水泥漿體，主要在於骨材與水泥漿體間界面之微裂縫^[6]，即在早期時，水化不

完全，界面處之 CH 與單硫型鋁酸鈣未完全成長，無法覆住骨材，形成界面孔隙，此時強度較低，在乾縮、溫度收縮、外力載重等狀況作用下，導致水泥漿與骨材不同應變而形成裂縫。

2.2.2 裂縫寬度與腐蝕速率

混凝土與鋼筋受外加载重作用影響下，當拉力側混凝土達到破裂應變時，鋼筋內之應力約達到其降伏強度之 1/10，梁之破裂強度 (M_{cr}) 約為極限強度 (M_n) 的 1/10。在設計載重 (DL+LL) 作用下，鋼筋周圍混凝土之應變已遠超過其破裂應變，構材表面已產生裂縫或由已存在之裂縫再加以擴張，得知裂縫的大小與鋼筋應力的大小有關係。如果所施加的載重超過彈性範圍，結構體進入非線性之行為，當載重移開後，裂縫無法完全密合，而此種未密合的裂縫將容許外界的腐蝕介質到達鋼筋的表面而造成鋼筋的腐蝕。試驗證明^[7]腐蝕速率的大小與裂縫的寬度有密切的關係，因此設計上有破裂寬度之限制。

結構體裂縫密合與裂縫保持未密合之情況下，鋼筋腐蝕的速率有相當大的差別。為了防止持續性破裂所引起之腐蝕問題，若結構體產生之破裂無法因卸載而密合時，此種裂縫必須加以彌封以防止混凝土持續性破裂造成內部鋼筋之腐蝕。

容許裂縫寬度時僅限於水灰比低於某種程度才具有意義^[8]，故緻密性混凝土結構物，具裂縫寬度控制界限之水灰比約為 0.6。容許裂縫寬度與保護層厚度之關係密切，在混凝土保護層表面，如裂縫寬度相同，若保護層較厚，則表面露出之面積較小，因此具有自我癒合之機率性增高。

在一特定裂縫寬度下，腐蝕速率與保護層厚度成反比，並認為在相同之裂縫寬度，光面鋼筋比變形鋼筋有較輕微之腐蝕現象。Beeby^[9]認為，混凝土龜裂與鋼筋尺寸、保護層厚度、鋼筋間距及混凝土強度有密切關係。在沿鋼筋埋置的方向常引發裂縫，造成較大面積的鋼筋腐蝕，在此區域必須加以保護防止裂縫生成，而其發生之原因有：

- (1) 側向壓力造成鋼筋彎曲。
- (2) 由於鋼筋受壓，造成橫向壓力。

- (3) 超過握裹應力。
- (4) 混凝土之反覆乾縮膨脹。
- (5) 因腐蝕產物或冰等造成之壓力。

2.2.3 腐蝕介質與鋼筋

混凝土本身屬於脆性材料，當構件承受壓力狀況下有極高的性能，但構件承受拉力時，容易造成既有裂縫成長。一旦混凝土產生裂縫，將導致一些有害的腐蝕介質如氯離子、硫酸根離子、硫化物、二氧化碳、氧及水等直接侵入，腐蝕介質侵入混凝土保護層到達鋼筋處，造成腐蝕現象的發生，此時耐久性降低，直到結構破壞。而混凝土中的裂縫，是決定有害物質侵入鋼筋混凝土的重要因素之一。

鋼筋本身構件的抗腐蝕程度，最主要取決於混凝土的保護層厚度及混凝土的品質^[10]。鋼筋在高鹼性環境之下，會形成一層 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，惰性氧化膜保護鋼筋不受腐蝕。但由於裂縫增加，腐蝕介質容易滲入混凝土中及破壞鋼筋表面的惰性氧化膜，即使是在鹼性的環境下，亦能夠產生局部破壞惰性保護膜而發生腐蝕。

腐蝕介質進入混凝土中破壞惰性氧化膜，使其氧化為 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，造成鋼筋的腐蝕，當鋼筋被腐蝕時，在鋼筋表面會形成一層氧化物，這就是一般所看到的鐵銹，此鐵銹體積較未腐蝕前膨脹六倍左右^[11]，並由於鐵銹生成時對周圍之混凝土產生張應力，當張應力超過混凝土張力強度時，就會使原先的裂縫更為擴大，形成腐蝕-撓曲-裂縫擴大的惡性循環作用。

3. 腐蝕裂縫之補救

3.1 裂縫預防

減少裂縫的產生，首先就是要降低混凝土透水性，圖 6 為混凝土透水性之影響關係。

Mehta 建議之方法包括^[12]

- (1) 高強度 (60MPa) 配比，通常具低透水性。
- (2) 低水灰比 (Max=0.40)。
- (3) 高品質之粗骨材，具較小之粒徑 (Max=20mm)。

- (4) 使用減水劑 (如強塑劑)。
- (5) 使用礦物摻料 (濃縮矽灰、飛灰或高爐水泥等卜作嵐材料)。

其中增加卜作嵐用量可以使微裂縫能自動癒合 (Self-Healing)^[12]，並且使混凝土長期維持均勻穩定的品質，使混凝土之長期強度能永續成長。有添加卜作嵐材料的高性能混凝土仍是以 ACI 規範為主，加上以減少外在環境對混凝土侵蝕因子的特別考量為設計目標，使結構物增加對有害物質之抵抗能力達到耐久的效能。

高性能混凝土配比為了達到「安全性、耐久性、工作性、經濟性、生態性」，其配比邏輯與傳統 ACI 法有所不同。係以「最小孔隙」為其配比之指導原則，因此，高性能混凝土的配比方法係先由減少孔隙著手，配出「最小孔隙」後再據以計算出主要材料，骨材及礦物摻料之含量，最後將剩餘之空隙填入水泥漿。

高性能混凝土也具有材料界面的防蝕特性^[12]如下介紹：

(1) 材質緻密性佳

由於高性能混凝土應用顆粒骨材緻密堆積理論，以固體材料(粗骨材、細骨材、飛灰)間混合乾搗單位重之方式，尋求最佳之混合比例，並產生緻密之基材，其原理為顆粒堆積以充份「填塞」孔隙之觀念，用最大且具級配之顆粒，以次低尺寸之顆粒填入其孔隙中，可使孔隙減少許多。換言之，產生裂縫的機會也越少^[14]。

(2) 添加卜作嵐材料

混凝土拌和水量如果不考慮工作性，而單純就材料而言，水的用量愈高，混凝土中孔隙量越高，而產生裂縫的機會也越高，所以飛灰與高爐石粉等卜作嵐材料已是高性能混凝土中不可缺少的重要材料之一，而卜作嵐反應所形成的 C-S-H 膠體孔隙與毛細管孔，使得孔隙變得不連續且其分佈狀況由大孔至小孔區間。

卜作嵐材料對混凝土中的微裂縫有特殊的自癒性，因為卜作嵐材料有效減少 OH^- 的含量，增加對外來有害物質的抵抗能力，而達到較高的抗蝕能力。同時對封孔有特殊效果，可減低透水性^[14]，阻

止裂縫發生。

(3) 高體積穩定性效果

如果混凝土內外部溫度或濕度差異過大，會因水份蒸散而產生表面裂縫。而體積穩定性主要影響因素為水泥漿量、水膠比、拌和水量、骨材性質、骨材與水灰比及摻料，如果使用過高水泥量，則 W/C 通常小於 0.42，即會發生自體乾縮現象而產生裂縫，高性能混凝土在體積穩定性策略上，以降低水膠比 (W/B) 及水固比 (W/S)、用水量 (W) 及水泥用量 (C) 之方法⁴¹，基本上可以控制或減少自體收縮，尤其減低水泥漿量時，效果更加明顯。

(4) 優質的品質保證

參與工程的工作人員及承包商皆應擬定品質保證計畫書，針對製程品質、環境保護理念、組織系統、設備器具及人員訓練等，建立整體品管後產官學再協調共識。從材料品管、預拌廠管制、出貨控制以及在現地的品管、即時的養護等，進行全面的管制達到優質的混凝土品質保證。

3.2 腐蝕後之修復

在修復工作前必需把造成受損之導因找出來並加以排除，否則修復工作僅屬臨時性，以下針對幾種修復方法做一簡單敘述^[5,7]：

(1) 使用預力系統

對原結構體施加預力，以所施加之預力產生與載重相反之效應減低構件在載重作用下之應力及位移量。特別在鋼筋混凝土構件之拉力側，它可有效防止混凝土之破裂發生或使破裂面更密合。

(2) 使用防水劑

防水劑如矽烷化合物可滲入混凝土內，在毛細孔內和混凝土產生化學反應而形成防水膜。由於混凝土的毛細孔填充了反應物，因此可防止水份侵入鋼筋。使用滲入型防水劑，同時也會增加混凝土的電阻及可以減緩混凝土中性化作用，避免混凝土中性化導致鋼筋腐蝕。

(3) 裂縫注入法

過去，當沒有摻用海砂的鋼筋混凝土結構產生裂縫時，大都會使用稠度低而强度高之聚合樹脂，

以高壓或真空方式灌注於混凝土之裂縫及鋼筋與混凝土間，將鋼筋阻絕包圍，以防止水氣侵入造成鋼筋生銹。此法在混凝土沒有氯離子的情況下的確可以達到降低鋼筋腐蝕的效果。然而當氯離子已經在混凝土中(如摻用海砂)時，裂縫注入法並無法降低或仰制鋼筋的腐蝕。

(4) 陰極防蝕法

鋼筋混凝土陰極防蝕技術使用已有 20 年左右。其應用範圍最初偏重於交通設備如橋樑及立體停車場，目前則漸漸應用到建築物上。美國聯邦公路管理局 (FHWA) 推薦陰極防蝕法為唯一能有效抵制混凝土中鋼筋受氯離子侵害之對策。陰極防蝕的基本原理即是藉外加電流或犧牲陽極強制鋼筋形成陰極。陽極不斷的輸出電子使鋼筋周圍呈陰極反應，這樣鋼筋上之 Fe 離子就沒機會釋出，因而得到保護的效果。

(5) 電化學去鹽

摻用海砂於混凝土中，鋼筋表面的氯離子含量如果超過一定值，鋼筋就可能生銹。同理可推，如果鋼筋表面的氯離子含量可以用某種方法降低至一個安全的程度，鋼筋就不會生銹，混凝土也就不會因膨脹而剝落。但當氯離子已經因為摻用海砂而深埋在混凝土內時如何將氯離子驅離鋼筋的表面呢？原理簡述如下：先施予鋼筋一個電流，帶負電的氯離子會遠離陰極而朝向陽極集中，而且給的電流愈大，氯離子的移動速度愈快。

電化學去鹽技術就是將鋼筋安排成陰極，當電流接通後，鋼筋表面的氯離子含量會逐漸降低，直到不會造成鋼筋生銹的程度。此一方法的處理時間約需 10 週左右，處理過的鋼筋經化學分析之後證實其表面氯離子含量明顯降低，已腐蝕的鋼筋會中止腐蝕。

4. 結論

裂縫在製造鋼筋混凝土之過程中無可避免，但因裂縫能有效吸收地震能量及不會造成建築物太快倒塌，所以裂縫有存在的必要，但也由於裂縫的存在，造成鋼筋混凝土更容易腐蝕，腐蝕介質透過裂

縫大小來決定其腐蝕速率，由於在鋼筋埋置的方向常引起裂縫，而造成較大面積的腐蝕，這方面的腐蝕在初期不易察覺，而是在最後階段才發覺，此時已為時已晚，所以防範未然對結構物腐蝕極為重要。

高性能混凝土除了添加飛灰外，其骨材的緻密性可把鋼筋完整包裹，配合它有較佳的體積穩定性，可防止混凝土自體收縮，尤其目前比較講求耐久性，而非強度，其中腐蝕對結構物之耐久性影響最大，所以只要針對混凝土裂縫控制得當，則結構物受腐蝕侵入的機率越小。

參考文獻

1. P. K. Mehta and P. Monteiro, in: "Concrete, Structure, Properties and Materials" 2nd, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J. 1992.
2. 陳建成，「高性能鋼纖維混凝土抗蝕策略之應用」，高性能鋼筋混凝土抗蝕策略研討會論文集，王和源主編，台灣高雄，1999.4.23，pp.61-82。
3. 陳肇元，「高強混凝土應用中的幾個問題」，吳中傳院士從事科教工作六十年學術研討會，北京，1999，pp.1-8。
4. 黃兆龍，in: 「高性能混凝土理論與實務」，詹氏書局，台灣台北，2004。
5. 施建志，林葆喜，黃忠梅，張英傑，「摻用海砂結構物防蝕處理成效」，海砂屋防範及善後策略研習會，台灣台北，1995.10.27-28，pp.181-200。
6. B. K. Nyame, "Permeability of Normal and Lightweight Mortars", Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.130 (1985) pp.44-48.
7. 林草英，「鋼筋混凝土結構維修及成效評估」，海砂屋防範及善後策略研習會論文集，台灣台北，1995.10.27-28，pp.201-236。
8. S. Mindess and J. F. Young, in: "Concrete", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.1981.
9. A. W. Beeby, "Concrete in The Oceans Cracking and Corrosion", Cement and Concrete Association, Technical Report No.1,1976.
10. 楊仲家，卓益揚，「鋼筋腐蝕對於耐久性影響之研究」，第四屆結構工程研討會論文集，1998，pp.197-203。
11. P. K. Mehta, "Durability of Concrete Expose to Marine Enviroment A Fresh Look", ACI, sp109-1, 1988.
12. 王和源，「HPC 材料界面的防蝕特性」，高性能鋼筋混凝土防蝕策略研討會論文集，1999，pp.109-128。
13. Malhotra,Dr, "Fly Ash, Blast Furance Slag, Silica Fume and Highly Reactive Metakaolin", Proceedings of R&D and Promotion of High Performance Concrete, 1997, pp.163-246.

收到日期：2003 年 7 月 25 日

修訂日期：2004 年 7 月 23 日

接受日期：2004 年 8 月 22 日

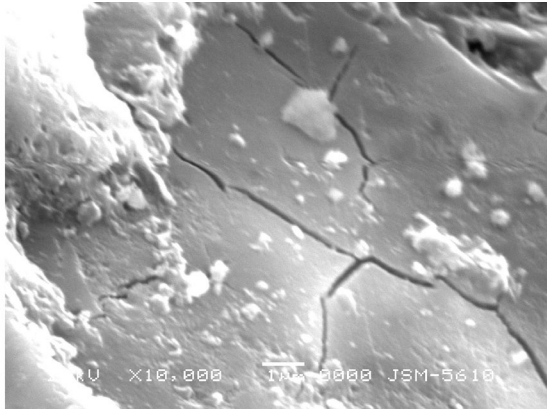


圖1. SEM觀測之混凝土微裂縫(X10000)
Figure 1 Measuring the micro-crack of concrete by SEM (X10000).

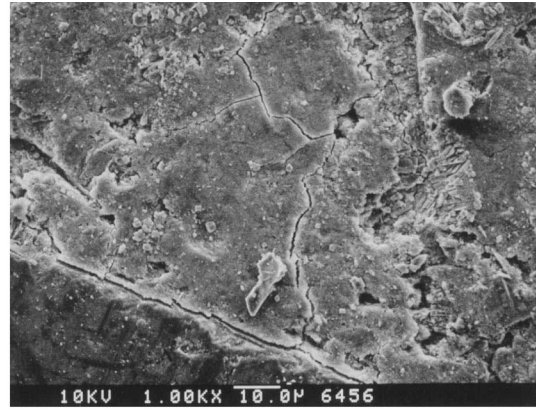


圖2. SEM觀測之混凝土裂縫(X1000)
Figure 2 Measuring the micro-crack of concrete by SEM (X1000).

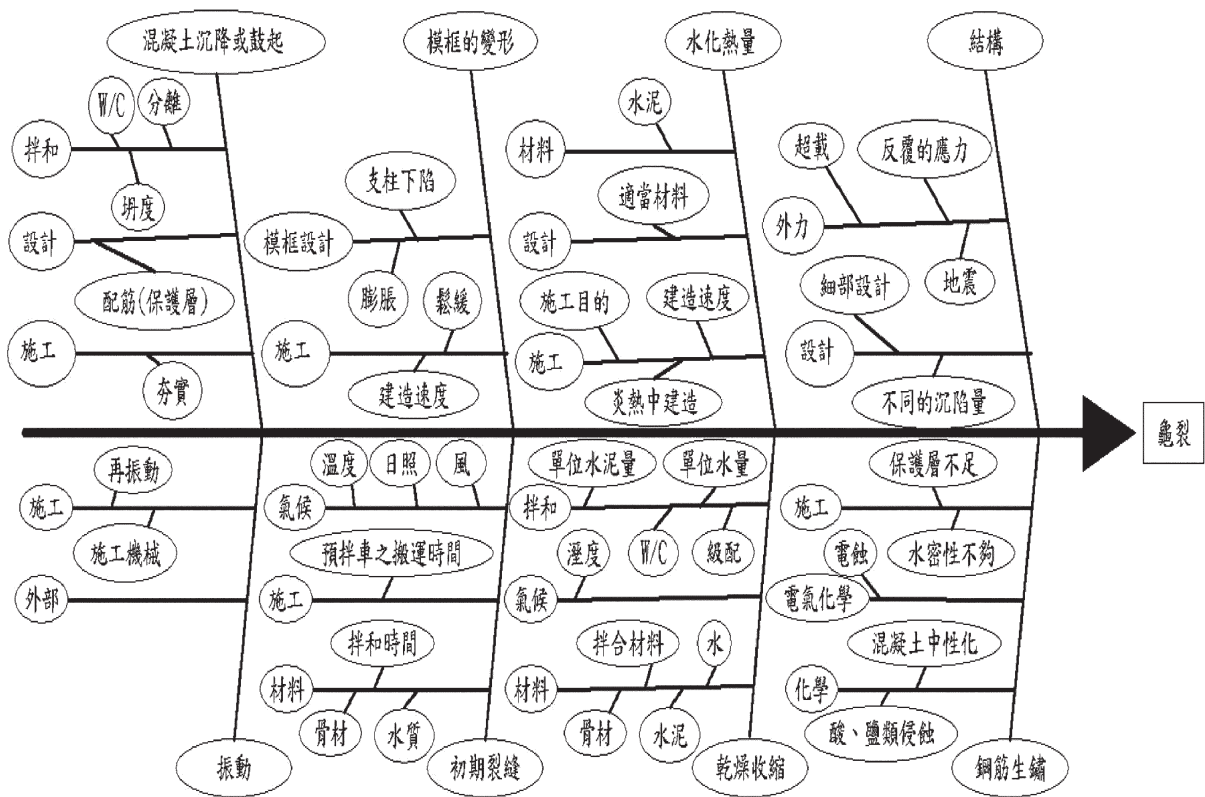


圖3. 混凝土龜裂特性要因圖。
Figure 3 The cause and effect diagram of concrete chaps.

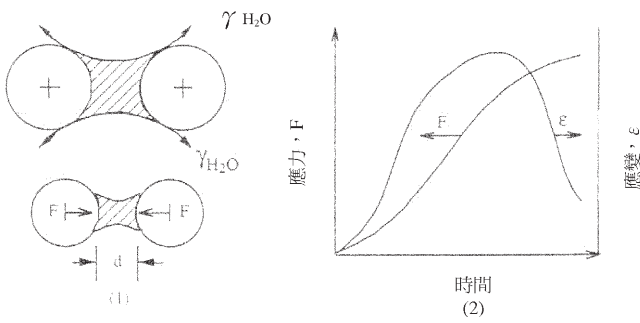


圖 4. 水分蒸發造成之混凝土表面張力作用。
Figure 4 Moisture evaporation causes the concrete surface tension function .

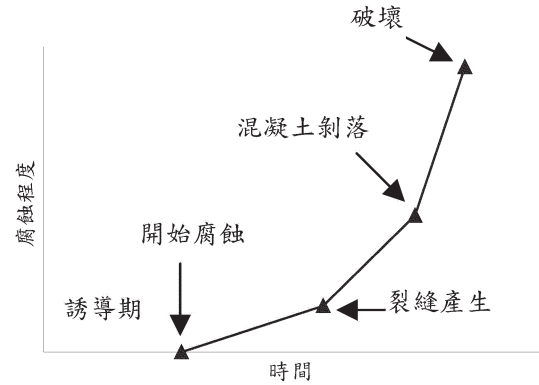


圖 5. 結構物腐蝕階段^[4]。
Figure 5 The step of structure corrosion^[4] .

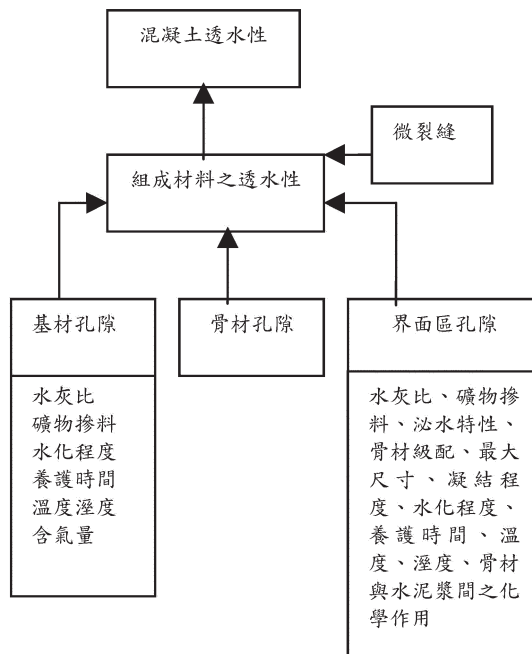


圖 6. 混凝土透水性之影響因素^[1]。
Figure 6 The effect of concrete permeability^[1].