

## 高性能混凝土抑制中性化之研究

王和源\*

### The Study on Restraining the Neutralization of the High Performance Concrete

H. Y. Wang

#### 摘 要

在理想狀態下，混凝土應具有良好且持久的工程性質，然受到外在環境或施工等因素影響，混凝土表面易受侵蝕而破壞，甚至於當表面發生龜裂後，二氧化碳使得中性化的現象加速，造成鋼筋的腐蝕速度增快，易引起混凝土耐久性的問題。本研究以摻加適量卜作嵐摻料的高性能混凝土，驗證抑制中性化之策略。結果顯示，以低水膠比之高性能混凝土，界面頗為緻密，卜作嵐反應消耗氫氧化鈣，低滲透性等直接有效的抑制混凝土的中性化，可減低裂縫機率，進而提昇混凝土的耐久特性。

關鍵詞：高性能混凝土、卜作嵐材料、中性化。

#### ABSTRACT

The concrete should have good and durable engineering property under the ideal condition, but due to the environmental or working reasons, the surface is easily corroded, and even cracked to expedite the neutralization by the  $\text{CO}_2$  and speed the corrosion on steels, and finally to cause the durability problem. This study is mainly to verify the strategy of restraining the neutralization by adding appropriate pozzolanic admixtures to concrete. The result shows the High Performance Concrete (HPC) with low W/B normally has denser surface, consuming the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  by pozzolanic reaction and low permeability, which are allowed to restrain effectively the neutralization to decrease the cracking for better durability on concrete.

Keywords: High Performance Concrete (HPC), Pozzolanic Admixtures, Neutralization

---

\* 國立高雄應用科技大學土木系  
Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University Applied Sciences, Taiwan.

## 一、緒言

混凝土結構物長期的與空氣接觸，經過一段時間就可能產生許多的化學作用，而中性化(亦稱碳化)就是其中之一。混凝土中性化的成因，是空氣中的二氧化碳與混凝土中的鹼性化合物，產生化學反應而造成混凝土由鹼性轉變成中性。這種化學作用會使混凝土中的鋼筋容易生鏽，進而造成結構物產生破壞，影響結構物的耐久性，但是由於中性化反應速率到達鋼筋發生腐蝕的時間緩慢，所以需要長期的觀測才能見到結構物的破壞。近年來高性能混凝土正全面的研發及推廣，係以緻密配比法，添加適量飛灰、爐石等卜作嵐材料填塞骨材間空隙、減少水泥量，配合骨材顆粒堆積以及低水膠比等策略[1]，藉由降低滲透性，減低裂縫機率，強化界面強度等。驗證高性能混凝土可直接間接有效的抑制混凝土中性化之產生，增進防蝕之功效。

## 二、混凝土中性化原因與影響

在正常的情況之下，混凝土屬於高鹼性的環境，因為水泥水化作用產生的氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )能迅速飽和，使混凝土 pH 值達到 12.5，若考慮到水泥中少量的氧化鈉( $\text{Na}_2\text{O}$ )與氧化鉀( $\text{K}_2\text{O}$ )，則 pH 值將達到 13.2 以上，因為高鹼性的環境，混凝土中的鋼筋會形成氧化鐵鈍態膜，此層氧化鐵鈍態膜具有良好的抗腐蝕性，所以能保護鋼筋以免受到鏽蝕的作用。

混凝土在水泥發生水化反應或混凝土在澆置時，或多或少會造成大小不等的孔隙存在，使其成為一個多孔且易脆的材料，若加上所處的環境惡劣或使用不當，將造成混凝土的裂縫，使其滲透率增加。當混凝土的滲透性很高或混凝土有裂縫存在時，將使得有害物質經由最短的路徑直接侵入混凝土中，當中性化發生之後，混凝土的 pH 值將下降到 9 以下，因此鋼筋的氧化鐵鈍態膜失去保護作

用，使得混凝土中的鋼筋發生鏽蝕，鐵鏽體積變成原來的 6 倍左右。並且由於鐵鏽生成時會產生張應力，作用於鋼筋周圍的混凝土，當張應力超過混凝土的張力強度時，就會使得原先的裂縫成長並擴大，縮短中性化的時間，加速鋼筋的腐蝕，如圖 1 [2] 所示。鋼筋遭受腐蝕後，不僅鋼筋的斷面積因鐵鏽的生成而減少，使得力學性質降低，並且鐵鏽生成所導致混凝土的開裂，也將使得混凝土構件在抵抗外載重時之有效斷面積縮小，減低構件之勁度，使得結構物降低使用年限，甚至造成結構物的破壞 [1、2]。

當空氣中的相對濕度在 100~20RH 之下，二氧化碳容易和氫氧化鈣以及 C-S-H 膠體產生碳化作用，因而產生碳酸鈣( $\text{CaCO}_3$ )造成碳化收縮，但反應速率受混凝土滲透性性質的影響，若水灰比大、滲透性大，則碳化作用越深入越完全，更促使微裂縫的擴大 [3]。

碳化深度與混凝土品質良窳有關。鋼筋混凝土結構中對混凝土碳化深度的影響，一般可分為材料因素和環境因素 [3~5]。

### (一) 材料因素

混凝土之材料因素或稱內在因素，此與混凝土本身的性能有關，包括滲透性、水灰比、水泥種類與用量、齡期、摻料、施工品質和養護條件、強度有關。

#### (1) 水灰比

無論是普通波特蘭水泥混凝土，或爐石波特蘭水泥混凝土，其碳化深度均隨水灰比的減少而降低，此因水灰比是決定混凝土滲透性的主要因素，因此也是影響混凝土碳化速度的主要因素。如圖 2 所示 [4]，碳化隨水灰比增加而增加。

#### (2) 水泥種類和用量

由於不同種類的水泥和不同摻料的使用，水化產物中的鹼性物品質有差別，故對混凝土的碳化速

度有直接影響。對於同一配比的混凝土，採用爐石波特蘭水泥時碳化較快，由於影響水泥水化產物中鹼性物質含量的因素較多。同時，混凝土中膠結料所含能與  $\text{CO}_2$  反應的  $\text{CaO}$  總量越高，則碳化速度越慢 [5]，碳化深度與水泥用量成反比。

### (3) 摻料

強塑劑的添加能增進混凝土均勻性而減弱混凝土碳化作用，至於適量的添加發泡劑，輸氣劑或速凝劑也能大大降低混凝土的滲透性。而Nagataki[6]則指出以飛灰取代水泥時，飛灰添加量越多，則中性化程度較大。如圖3所示[1]，惟pH的折減值並不大。以相同卜作嵐材料含量時則以含氧化鈣較少的飛灰混凝土之中性化速率大於含爐石者。

### (4) 施工品質和養護條件

養護條件對混凝土碳化速度有很大的影響，如果混凝土早期養護不良，表層水分失去較快，將使混凝土滲透性增大，抗碳化能力降低。由於混凝土澆置和養護的影響，同一等級混凝土的不同構件，甚至同一構件的不同部位，其碳化速度或有顯著差別。在同為 28 天齡期之混凝土抗壓強度下，水養護的試體中碳化深度比空氣中養護的試體降低約 20%~50% [7]。

### (5) 混凝土強度

由於中性化過程中由  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  釋出的水有益於尚未水化水泥顆粒進一步水化，以致於會造成表面硬度、強度的增加、降低表面滲透性[7]，同時碳化深度隨混凝土的強度升高而下降。

## (二) 環境因素

所謂的環境因素又稱為外在因素，諸如相對濕度、溫度、 $\text{CO}_2$  含量、風壓、應力狀態等 [6,8]。

### (1) 相對溼度

混凝土的滲透性與其濕潤狀態有關，一般常用的混凝土，空氣相對濕度在 60% - 90% 之間時，混

凝土的碳化速度幾乎是一樣的，低於此值時，碳化的深度隨相對濕度的降低而增加，當空氣的相對濕度為40%時達到最大值 [4]。

### (2) 溫度

溫度對碳化的影響相當複雜，當相對濕度不變時，混凝土的濕度隨著溫度的升高而降低，而碳化速度會增大。混凝土在炎熱的氣候下的碳化速度比在溫和氣候下快，並與變化的幅度、頻率、結構幾何尺寸和形狀以及混凝土的孔隙率有關。

### (3) 二氧化碳含量

環境溫濕度基本條件相同時，若大氣的 $\text{CO}_2$  含量越高則碳化越快，碳化速度與 $\text{CO}_2$  濃度的平方根為一似線性關係。

### (4) 風壓

經由橋樑混凝土碳化深度的測試結果 [3]，顯示直接受風壓作用面的碳化深度大於間接受風壓作用面的碳化深度，其均值之比為 155 / 100，原因可能是空氣不似一般的擴散行為，並且當風突然產生時，由於壓力的變化而滲入混凝土孔隙中[3]。

### (5) 應力狀態

鋼筋混凝土橋結構中，由於混凝土所處結構位置的不同承受不同的應力，在拉應力作用下，加速了混凝土微裂縫的擴張與延伸，以及微裂縫間的連接貫通，增大混凝土的空隙，降低混凝土的抗滲性，進而削弱混凝土的抗碳化能力。由橋樑調查中發現，鋼筋鏽蝕引起的混凝土崩裂都發生在拉力區，而壓力區多安然無恙，此應與前述因素有關。

## 三、試驗方法

本研究係以低水膠比混凝土探討防蝕效能，一般之試驗係參考 ASTM 或 CNS 相關規範檢測。裂縫敏感度主要為觀察及量測混凝土在新拌階段，暴

露於外界乾燥環境下產生的塑性裂縫寬度 [9]。乾縮量測則利用比長儀係依 ASTM C490 及 C551 規範製成 4" × 4" × 4" 之混凝土乾縮試體, 設定於溫度 23 °C, 相對溫度 100% 的環境中, 隔日拆模並達到測定齡期後量測長度變化值。動彈性模數試驗以共振頻率測定儀量測圓柱試體縱向共振及扭轉共振找出最大共振點之頻率, 再計算成動彈性模數。超音波則量測試體之縱向波速。至於混凝土氯離子電滲試驗則根據 ASTM C 1202 利用混凝土本身電流通的難易及大小, 來判斷氯離子滲透的可能性。電阻量測係採用 C.N.S. Electronics LTD 生產之 Concrete Resistivity Meter 於預備承受載重之位置量測混凝土之電阻係數, 作為判斷混凝土緻密性之指標, 有助於解釋耐久性的問題。

而量測中性化深度的方法有很多種, 諸如化學分析法、酚酞指示劑、X 射線繞射法 (X-ray diffraction)、紅外線光譜 (Infra-Red Spectroscopy) 及熱重分析法 (Thermo-gravimetric analysis) 等 [6]。本研究係以不同水膠化, 添加卜作嵐材料以及不同齡期為變數, 製作高性能混凝土試體並置於地下室作氣乾養護, 在達到測試齡期後將已作完抗壓試驗之試體以酚酞指示劑 (1% 酚酞與 70% 乙醇溶液) 噴灑於試體剖開之斷面上 [10], 觀察顏色變化, 並量測中性化區域。中性化區域表示法如圖 4 所示, 只有表面有中性化反應, 量測其未中性化的部分, 圈選相似於圓的區域, 量其直徑 (換算成半徑), 求未中性化的面積與圓面積的比, 再扣除後得到中性化的面積佔多少百分比。例: 混凝土圓柱面直徑 15cm, 未中性化的區域約 12cm, 未中性化的區域圓面積/混凝土圓柱面面積 =  $6 \times 6 \times \pi / 7.5 \times 7.5 \times \pi = 64\%$ , 則中性化的區域圓面積 =  $1 - 64\% = 36\%$ 。對於混凝土未中性化部分, 酚酞會使其成為紫紅色, 而中性化部分則不改變顏色。

## 四、結果與分析

使用具有緻密配比、最小孔隙、骨材顆粒堆積, 添加適量卜作嵐材料、減低水膠比等原則, 由材料管制、配比管制、產製與施工管制及結構品質驗證等品質保證之高性能混凝土時可有效抑制混凝土中性化之產生。

### (一) 減少中性化程度

將高性能混凝土試體與普通混凝土試體作中性化程度, 經量測結果如表 1 所示, 齡期半年以上之中性化程度、深度皆不到 0.1mm, 亦即中性化區域僅為表面, 且佔圓柱頂面積由 20% ~ 40% 不等。然傳統的 ACI 配比混凝土則表面佔有較大的中性化區域。顯示高性能混凝土之中性化程度僅是微量反應, 並不足以構成裂縫或其他耐久性的問題。

### (二) 降低裂縫指數

新拌混凝土在施工時常有塑性收縮裂縫之情況產生, 然而裂縫一旦產生, 有害物質侵入混凝土內部的管道即增加, 將使滲透性大為提高, 導致降低混凝土長期的耐久性, 因此以裂縫敏感度試驗來量測塑性裂縫寬度, 且以裂縫指數作為指標 [9]。如圖 5 所示 [11], 裂縫指數隨 W/B 降低而減少, 因較低 W/B 配比時 W/C 亦隨之降低, 水泥漿抗張強度形成較早且較高, 故能抑制因毛細管張力所產生的塑性收縮, 減少早期塑性收縮裂縫和裂縫指數。

### (三) 減低滲透係數

高性能混凝土係調整級配使得大小粒徑骨材互填, 俾能將孔隙縮小, 此觀念如同材料科學中, 原子的堆積, 堆積密度越大其性質愈佳 [1]。硬固混凝土之滲透性為影響混凝土抗化學物侵蝕之耐久最主要的原因。在水化後混凝土孔隙之體積與其不透水性及強度成負性關係。基本上有害物質在混凝土傳輸的行為, 可分濃度差所引起的擴散現象及因壓力差而降低水分子移動的滲透現象。有害物質在混凝土中滲透或擴散, 都是透過電動勢的趨動, 高性能



### (八) 減低氯離子電流量，提昇電阻係數

量測電流量與時間等電阻係數已漸成為混凝土耐久性之指標，一般混凝土之電流量越低，表示孔隙、蜂窩或裂縫越小(少)，則空氣中  $\text{CO}_2$  或濕氣或硫酸鹽或氯鹽等有害物質浸入混凝土內部，或使鋼筋腐蝕的機率就更低。以圖 10 所示 [12]，在同漿量 1.6n 中隨水膠比的降低，電流量也跟著降低且斜率值逐漸變小，原因為毛細孔隙體積與水膠比成正比關係。故在低水膠比時有較少可透水的孔隙體積，且在 W/B 接近 0.45 時可得到 2000 庫倫以下的電流量。亦顯示此種以骨材堆積密度為主軸，採用「低漿」、「少水」、「大量使用卜作嵐材料」的配比觀念，對採用 BOT 模式設計、須有百年以上服務年限的結構物而言，更形重要 [17]。另由圖 11 所示 [12] 在相同漿量下，隨水膠比愈低所得之電阻係數愈大。一般要求電阻至少  $20\text{k } \Omega\text{-cm}$  以防止鋼筋生銹。

## 五、結論

考量耐久性設計之低水膠比之高性能混凝土，經由驗證可直接或間接抑制中性化產生而獲得下列結論：

- (一) 高性能混凝土試體經量測結果，因裂縫、孔隙較少且緻密性高，中性化程度相對減少及微量。
- (二) 具混凝土塑性收縮裂縫指標之裂縫指數，常隨水膠比降低而減少，且低漿量時具有較低水化熱，易產生較低蒸發率而減少裂縫產生，直接增進防蝕能力。
- (三) 使用較少水泥用量及添加卜作嵐材料，明顯的較低水膠比時可增加中後期強度，增進結構體抗蝕能力。
- (四) 添加卜作嵐材料之低水膠比混凝土產生卜作嵐反應，消耗氫氧化鈣能力，使界面緻密，而提昇鍵結強度，增進混凝土之水密性。

(五) 低水膠比時含有較少水量，且卜作嵐可轉換水化生成物 C-S-H 膠體，而減少長度變化等乾縮情況，增進長期體積穩定性。

(六) 磨耗時間愈短，水膠比越低則磨耗抵抗力越大，增加穴蝕及孔蝕之抵抗能力。

(七) 水膠比越低時，則減低氯離子電流量，增加電阻係數，顯示孔隙、蜂窩或裂縫皆較少，可防止濕氣侵入及抑制硫酸鹽侵蝕與中性化程度，進而增進混凝土的耐久性。

## 六、致謝

感謝國科會八十八年度專題研究計劃(計劃編號 89-2211-E-151-009)，國科會八十九年度大專學生參與專題研究計劃(計劃編號 NSC89-2815-C-151-018R-E) 補助部分經費，以及國立台灣科技大學營建系黃兆龍教授之指正與國立高雄應用科技大學土木系曾學雄老師及楊雅雲、吳坤達、曹文銘等同學的協助得以順利完成，特予致謝。

## 參考文獻

1. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，(1999)。
2. 楊仲家等，「腐蝕混凝土梁構件力學行為之研究」，八十四年度防蝕學會論文輯，第 135~140 頁，台北(1996)。
3. 梁明德、梁智信、洪照亮，「混凝土橋樑的碳化分析及碳化深度預測方法」，中興工程，第六十四期，第25~44頁，台北(1999)。
4. 賴正義，「台灣地區飛灰混凝土之應用」，運用飛灰提昇混凝土品質研討會，財團法人台灣營建中心，第 35~54 頁，台北(1996)。
5. 許溶烈主編，「近代混凝土技術」，陝西科學技術出版社(1988)。
6. 黃然、陳君弢「混凝土中性化機理試驗方法及

預測模式之探討」，土木技術，第一卷，第七期，第133~139頁(1998)。

7. M. Ben Bassat, P.J. Nixon and J.Hardcastle, The effect of differences in the composition of Portland cement on the properties of hardened concrete, Magazine of Concrete Research, 42(151), pp. 55-66(1990).

8. 黃兆龍、王和源、陳建成、邱英嘉，「混凝土碳化行為及機理」，proc.of The 1994 Annual Conf. of The Corrosion Engineering Association of R.O.C, pp.91-95 (1994)

9. O.Bjontegard, T.A.Hammer and E.J.Sellevold, "Cracking in High Performance Concrete before Setting", International Symposium on High-Performance and Reactive Power Concretes, Vol.1, pp1~16 (1998)。

10. CPC18 Measurement for Hardened Concrete Carbonation Depth, RILEM TC14-CPC,(1998).

11. 楊偉奇，「優生混凝土耐久性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建研究所 (1999)。

12. 廖東昇，「優生水中混凝土在工程性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建研究所 (1997)。

13. Nagataki, S. and I. Vjike, "Air Permeability of Concrete Mixed with Fly Ash and Condensed Silica Fume", ACI SP-91, pp.1049~1068 (1986)。

14. Metha, P.K., "Concrete : structure, properties, and Materials", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1993)。

15. 王和源，「如何運用飛灰提高耐久性」，如何使用飛灰以提高混凝土品質研討會，財團法人台灣營建研究院，第121~146頁，台北(1997)。

16. 苗伯霖，「正確使用飛灰提高混凝土耐久性」，運用飛灰提昇混凝土品質研討會，財團法人台灣營建研究院，第177~186頁，台北 (1996)。

17. Laszlo Dunaszegi, " High-Performance Concrete a Key Component in the design of the Confederation Bridge", BETON CONCRETE CANADA, Vol.1, NO.3, Dec.pp.1~3 (1996)。

表1. 高性能混凝土中性化程度量測

Table 1. Measurement about the Neutralization of the HPC

性質 NO	坍度 (cm)	流度 (cm)	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	中性化程度
ACI-1	10	40	235	中性化區域為表面，約佔80~90%圓柱頂面積
ACI-2	12	41	226	中性化區域為表面，約佔80~90%圓柱頂面積
HPC-1	25	52	393	中性化區域為表面，約佔30~40%圓柱頂面積，深度不到 0.1 mm
HPC-2	25	52	415	中性化區域為表面，約佔20~30%圓柱頂面積，深度不到 0.1 mm
HPC-3	24	50	408	中性化區域為表面，約佔20~30%圓柱頂面積，深度不到 0.1 mm
備註	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ACI 及 HPC 之設計強度分別為 210 及 350 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>● 試體為氣乾養護，齡期為 210 天</li> </ul>			

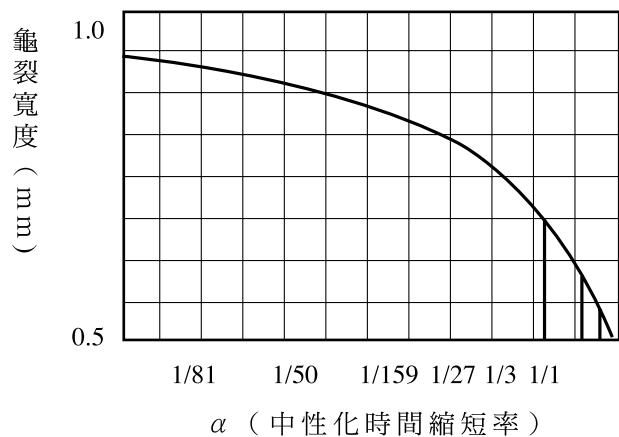


圖1. 龜裂寬度與中性化時間縮短率 [2]  
Fig.1 Relationship between the cracking width and the variation of the neutralization time

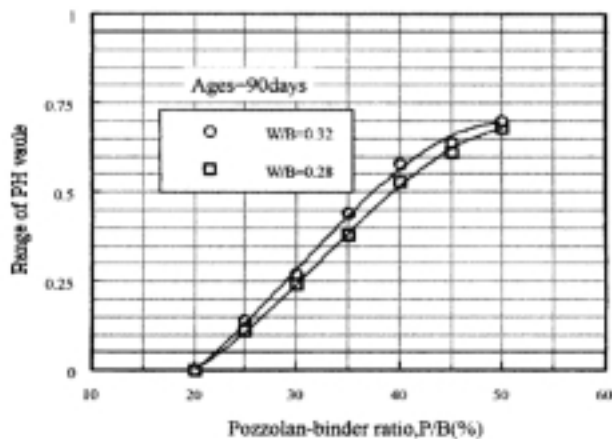


圖3. 添加卜作嵐材料對 pH 值之影響 [1]  
Fig.3 Effect of adding pozzolanic material to PH value

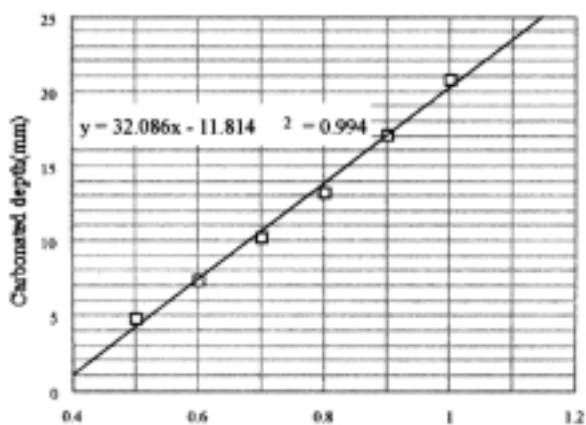


圖2. 混凝土水灰比與碳化深度之關係 [4]  
Fig.2 Relationship between the W/C ratio and carbonization depth of the Concrete

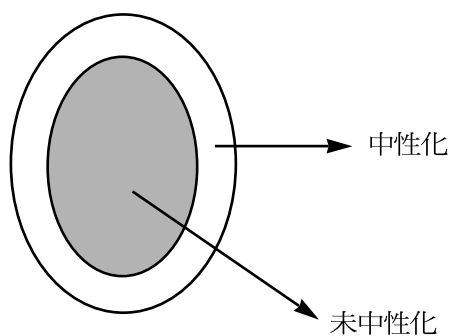


圖4. 中性化區域量測示意圖  
Fig.4 Measurement of the Neutralization Zone



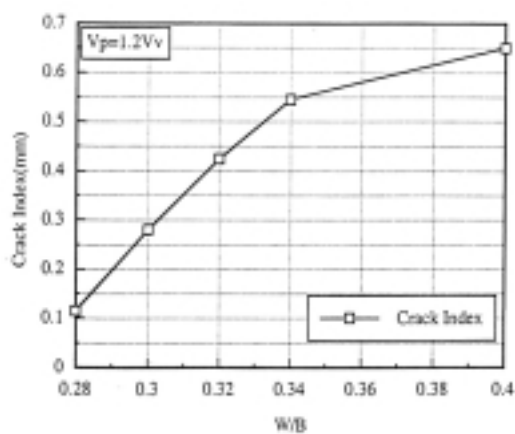


圖5. 不同混凝土水膠比與裂縫指數的關係 [11]  
Fig.5 Relationship between the concrete with different W/B and the cracking index

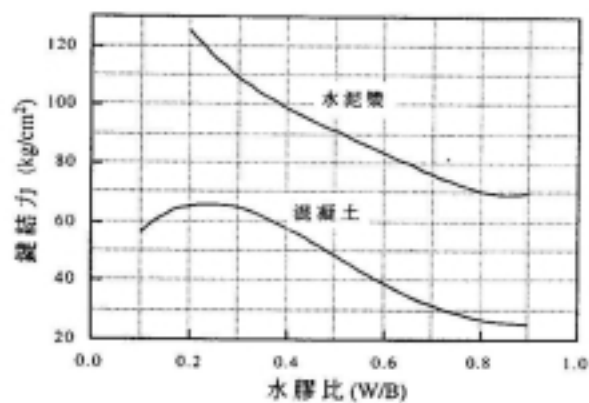


圖7. 降低水膠比增進鍵結力 [1]  
Fig.7 The improvement of the binder strength by reducing the W/B

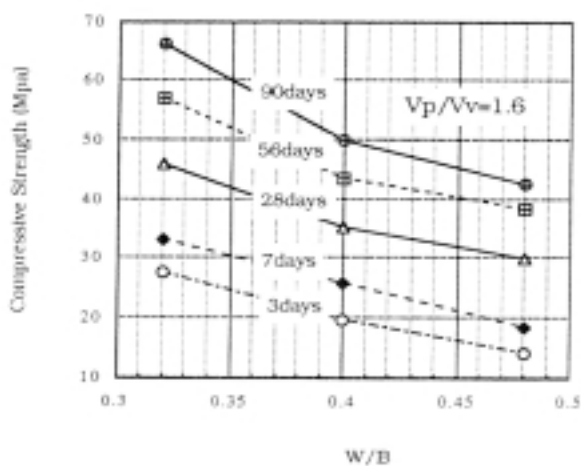


圖6. 不同齡期水膠比之抗壓強度 [12]  
Fig.6 The compressive strength of the W/B in different age

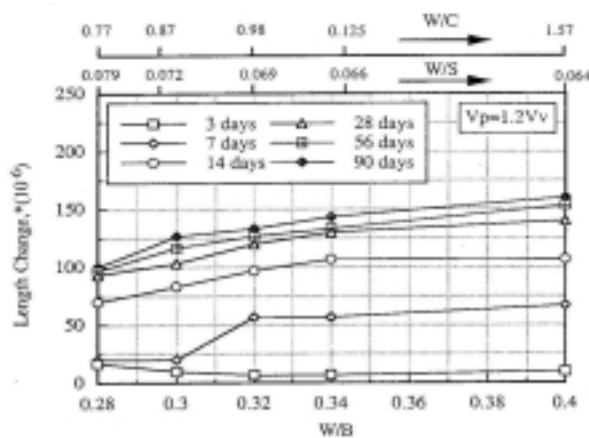


圖8. 同一漿量混凝土W/B與長度變化之關係 [11]  
Fig.8 Relationship between the W/B and length of the concrete at same amount

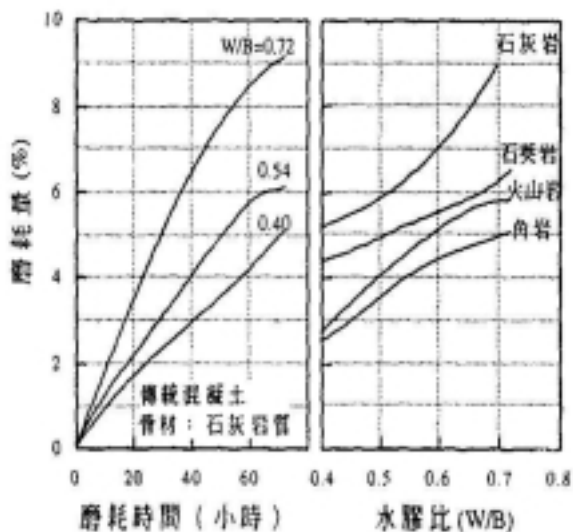


圖9. 混凝土的磨耗特性與磨耗時間、水膠比及骨材種類有關 [1]

Fig.9 Relationship between the frictional property, Frictional time, W/B and different structural materials of concrete

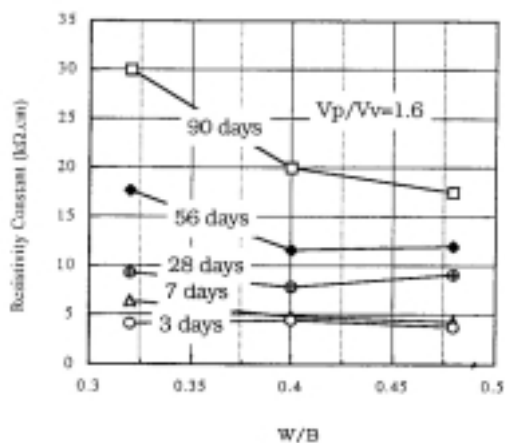


圖11. 不同齡期水膠比之電阻係數 [12]

Fig.11 Resistivity of the W/B ratio in different age

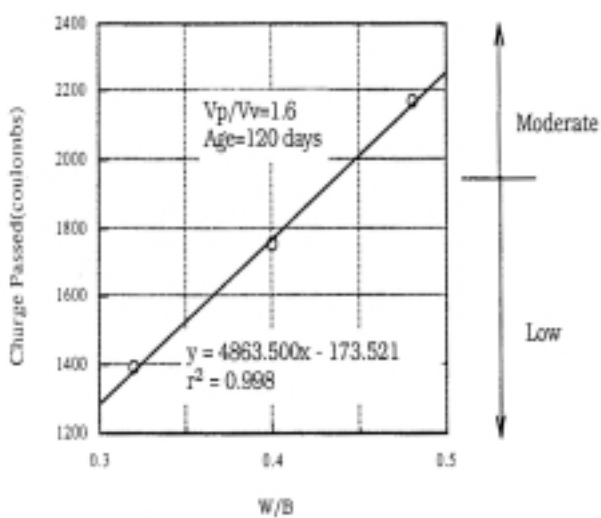


圖10. 混凝土水膠比變化與電流量之關係 [12]

Fig.10 Relationship between the W/B and charge Passed