

提高混凝土耐久性骨材品控之策略研究

王和源 *

Strategic Study on the Quality Control of Aggregate for Improving the Durability of Concrete

H-Y Wang*

摘 要

骨材在混凝土中佔有約 70% 左右之體積比，近代材料的科學研究結果，骨材已由以往被認為是填充料轉成爲主要架構材料，如高性能混凝土高強度的主要來源，因此骨材的良窳對於混凝土性質有舉足輕重的影響。本研究即針對骨材的特性及品質好壞對混凝土性質可能影響作驗證。結果顯示：骨材性質（如級配、吸水率、有害物質、耐久性）及顆粒堆積對混凝土之耐久性有相當程度的影響，如要產製優質的高性能混凝土，選用潔淨粗砂及碎石，配合緻密配比，將是提高高性能混凝土耐久性的必要策略。

關鍵詞：骨材、耐久性、緻密配比、鹼骨材反應。

ABSTRACT

The aggregate holds about 70% volume proportion in concrete. The results of scientific research in modern times, the aggregate has transformed to the main skeleton that used to be deemed as a filler, such as a main source of high strength of high performance concrete, as a result, the quality of the aggregate plays a critical role in the quality of concrete. This research aims at verifying the characteristics of aggregate and the quality that will probably affect the quality of concrete. The result shows that the nature of aggregate (such as gradation, absorption capacity, deleterious substances, durability) and the granular has a quiet critical effect on the durability of concrete. In case to produce high performance concrete, using clean coarse sand and crashed stone, operating with densified-mixture design algorithm will be the necessary strategy to enhance the durability of High Performance Concrete.

Key words: Aggregate, durability, densified-mixture, Alkali-Aggregate reaction.

一、緒言

在我國經濟突飛猛進之際，公共工程建設驟

增，使得砂石需求量激增，而常年超量開採河川砂石，骨材資源逐漸枯竭耗盡，工程品質更廣受重視。混凝土長久以來被普及應用，研究工作不

* 國立高雄科學技術學院土木工程系
Department of Civil Engineering, National Kaohsiung Institute of Technology

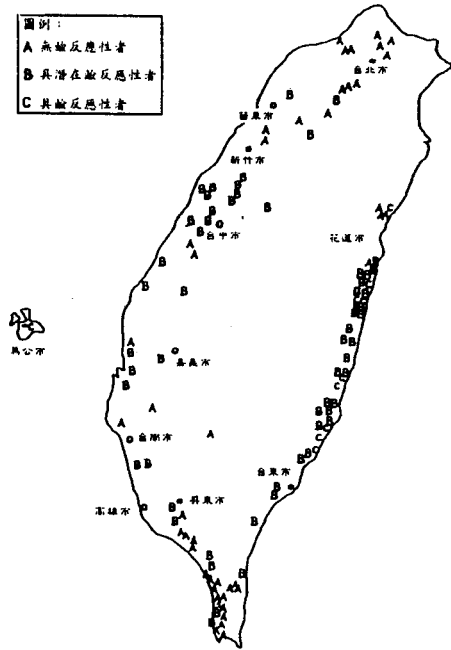


圖 1 台灣地區混凝土骨材鹼性反應分佈圖。
 Fig. 1 Analysis on the Alkali Reaction of the Aggregate in Taiwan.

斷進行，然而混凝土的問題及糾紛仍層出不窮，使得耐久性考驗著混凝土被進一步認同，甚至影響到混凝土結構物的安全性及服務品質^(1,2)。根據行政院公共工程委員會，針對交通部國工局等十九個重大工程計劃主辦機關所作的問卷調查顯示，在 1997 年 6 月至 1999 年 12 月期間，重大工程短缺之河川砂石量約為 2080 萬立方公尺，約為全部調查之砂石總需求量的 28%^(3,4)。政府為維護橋樑安全、水土資源及生態環境，於是禁止濫採河川砂石，導致砂石嚴重缺乏⁽⁵⁾，且砂石骨材之品質日漸低落，尤其是我國即將加入 WTO 等國際衝擊下，預拌混凝土相關業者如何全面提昇混凝土材料之品質已是刻不容緩之事。而在混凝土材料中為大宗的骨材更因河川砂石來源缺乏，成本不斷高漲下，部分不肖業者已有濫用農砂、海砂等品質不符標準之砂石，國內相關研究指出花蓮台東等地區某些河川砂石可能出現具有反應活性，如

圖 1 所示⁽⁴⁾，部份廠商或進口之水泥含鹼量亦有超出規定之情形，在台灣高溫多雨的環境下，造成混凝土多種化學病變，如混凝土鹼骨材反應、硫酸鹽侵蝕等不斷產生⁽⁶⁾。其中鹼質與粒料反應常在構造物建造後 5~12 年，甚至更久時間發生，往往常被忽略，如未加以防範，其引發耐久性的品質問題必將嚴重影響到公共工程之混凝土品質水準。對於近年來國內外皆積極研發及推廣的高性能混凝土品質保證亦是一大挑戰，面對多樣的骨材料源在使用前，對於其各項工程性質皆須審慎驗證，以避免造成工程品質的問題⁽⁷⁾。本研究係將骨材對混凝土耐久性影響作深入之驗證，期能提供未來國內混凝土耐久性設計考量的參考依據。以材料的角度而言，混凝土劣化的原因可為一化學侵蝕及物理侵蝕。以材料角度而言，海洋環境對混凝土構造物的侵蝕，分為水泥水化產物侵蝕、及混凝土內鋼筋腐蝕。而侵蝕方式包括有兩種⁽⁴⁾：

(一) 化學侵蝕之成因：

1. 氯離子侵蝕：(1)水泥漿體毛細管孔隙上昇(2)產生鈣氫石以致於混凝土龜裂，導致耐久性降低 (3)PH<10 鋼筋腐蝕體積膨脹引起龜裂。
2. 硫酸鹽侵蝕：土壤中可溶性硫酸鹽濃度>0.1% 危害到混凝土。
3. 碳化（中性化）作用：一般混凝土 PH 值為 13，而海水 PH 值在 7.8~8.3，如果混凝土中性化時，即混凝土中的氫氧化鈣與空氣中的二氧化碳結合產生碳酸鈣，使混凝土的 PH 值降低，導致混凝土內部的鋼筋易受侵蝕。
4. 鹼質與粒料反應：混凝土與足夠活性矽鹼量及水，且多數是局部性之反應。
5. 鎂離子侵蝕：使混凝土材料流失，孔隙增加，強度下降而加速劣化。
6. 混凝土施工不當：使有害物質侵入，混凝土劣化，以搗實及養護之影響最深。

(二) 物理侵蝕之成因

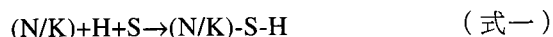
1. 表面磨損—磨耗，剝蝕，形成孔穴作用造成。
2. 開裂—由於溫度，濕度梯度劇烈變化。

二、骨材的耐久性與有害物質對混凝土之影響

混凝土中骨材佔約 60~75% 體積，明顯的骨材對混凝土的影響也是必須加以重視的。現階段混凝土耐久性和試驗方法，受到骨材耐久性質的影響，為了測試這種性質，通常都是採用「加速檢測」的方式，其檢測技術及骨材與混凝土耐久性均有相關性，然而進階的檢測仍須累積長期耐久性作觀測研究。而在台灣主要的影響因素，包括有鹼骨材反應(AAR)、抗磨耗作用、抗硫酸鹽侵蝕及氯化物等其他有害物質。

(一) 鹼骨材反應(AAR)

骨材因含有酸性的矽酸鹽及鋁酸鹽，或鹼性的碳酸鈣或碳酸鎂，如果受到水泥中或混凝土中之強鹼，如氫氧化鈣、氫氧化鈉或氫氧化鉀的接觸，將產生中和作用，或堆積沉澱作用，而發生鹼骨材反應，因為這種反應產生有害之膨脹作用，使骨材分解，見圖 2 所示，其簡化反應如公式一所示。



(來自水泥、砂、水) (來自骨材) (膨脹脹體)

近年來國際環境保護的要求標準提高，水泥製造過程之高溫揮發粉塵被回收，其中含大量鈉(N)及鉀(K)之氧化物，這些物質回收而混在水泥中，造成水泥中所含之鉀及鈉過高，使原來歸屬「潛在活性」或「惰性」的骨材變活躍。同時近年來河川砂石禁採，農地田砂或路砂被濫採，內常含

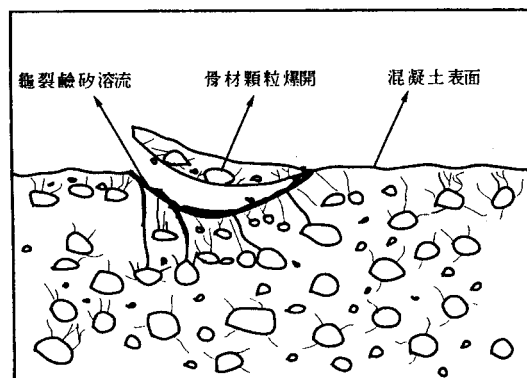


圖 2 鹼骨材反應症狀示意圖。

Fig. 2 Indicative Illustration of the Alkali-Aggregate Reaction Symptom.

有害物質，而提昇被侵蝕的機率，所以如何防止鹼骨材反應變得非常重要⁽²⁾。而混凝土發生鹼質與粒料反應須具備以下條件^(8,9)：(1)孔隙溶液中有氫氧根離子與鹼金屬離子。(2)粒料含有活性矽成分。(3)具有充足的水分。鹼骨材反應在一定的條件或狀態下才會發生，即須有活性矽、鹼量、水份三項因素同時存在，當周圍的環境符合要件時，危害性的膨脹反應才會發生。

一般鹼骨反應會有下列程序，包括矽酸鹽水解，形成(N/K)-S-H膠體，膠體膨脹導致破裂、更形成流動溶液而沿裂隙流出。當鹼骨材反應發生後，若混凝土構造物中的鹼含量未耗盡或外界繼續供應，則在混凝土中反應仍會持續進行使損害更加嚴重，一般當混凝土結構物發生鹼骨材反應時，會具有外部及內部的徵候⁽⁴⁾。

1.外觀方面

裂隙的生長為鹼—骨材反應造成的最明顯特徵，當混凝土構造物發生鹼—骨材反應時，若混凝土內部無法吸收鹼—骨材反應所產生的膨脹，則混凝土表面會產生裂痕。由於混凝土構造物有埋設鋼筋與純混凝土構造物之分，所以產生的裂縫形式也會不同。在純混凝土構造物方面，表面會產生不規則的地圖狀裂縫，且此裂縫會隨時間

增長而變寬，由於內部骨材分佈的不規則性，裂縫的生成始於反應性骨材較集中的地方，並形成焦點中心，呈現數條不同走向的裂紋交會於焦點中心的現象。此外，混凝土表面會有起泡爆裂的情形，在外表沒有受到磨蝕與沖刷的情形下，於混凝土表面可觀察到透明、白色、或濕點狀的反應膠體滲出。在含鋼筋的混凝土構造物方面，鹼—骨材反應造成之裂縫，會受到結構物受力的情形而改變。

2. 混凝土構造物內部徵候

混凝土發生鹼質與粒料反應後，其內部徵候包括下列三種⁽¹⁰⁾：

(1)微細裂縫橫過粒料，連接孔隙，並延伸至水泥漿。

(2)在裂縫或孔隙中發現無色或白色半透明之反應物。

(3)粒料周圍有暗色的反應圈。

為能控制鹼骨材反應可由設計及控制材料本身使之不會產生反應，或快速消耗產生反應之鹼質物，鹼—骨材反應的防治方法，可透過影響鹼—骨材反應的因素加以控制，而影響鹼—骨材反應進行的因素主要有：(1)活性二氧化矽的數量(2)鹼含量(3)孔隙溶液中的 PH 值(4)鹼矽膠體之性質及(5)水分。要作好鹼—骨材反應防治的工作最主要可從控制上述因子來進行，將可有效防止鹼骨材反應，其原則包括：

(1)限制水泥中鹼的含量使 $N+0.66K < 0.66\%$ ，以有效的減低膨脹量，如圖 3 所示，可用減少混凝土中水泥用量，以相對減少鹼的供應量。

(2)避免使用活性骨材，以控制活性矽(SiO_2)含量。

(3)減低含水量，減少溶解矽酸鹽之「水」，如減少拌和水量。

(4)使用卜作嵐摻料，即利用比骨材更加活躍的「卜作嵐材料」來搶奪鹼性物質，與各種氧化物反

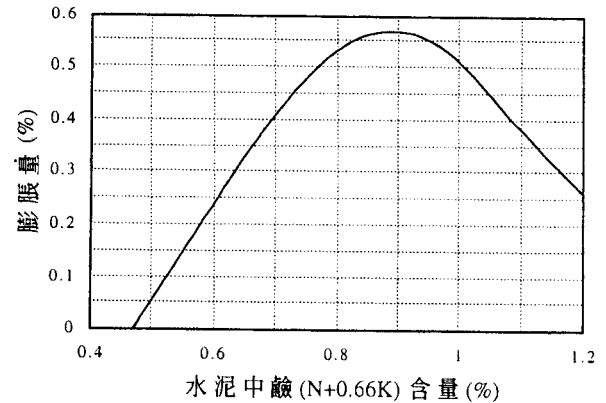


圖 3 水泥中鹼含量對混凝土膨脹之影響。

Fig. 3. Influence in cenent of the Alkali content to Concrete Inflation.

應消耗鹼質，並促進膠結反應，降低滲透性，提高強度，有助於長期性質^(6,11)。

(5)增加混凝土中的孔隙率，以緩和膠體吸水膨脹的壓力，而使混凝土的膨脹量逐漸減低。欲增加孔隙率可利用輸氣劑及使用多孔隙之天然骨材及輕質骨材來減少鹼—骨材反應的膨脹。但孔隙率的增加亦將使混凝土強度下降，應審慎評估。

(6)添加活性較大的鹼鹽：添加鋰或鉍等離子活性高於鈉與鉀的鹽類可降低膠體的膨脹壓力⁽³⁾。

(二) 磨耗作用

磨耗性質係指骨材與其他材料，或骨材間的磨損特性，亦為間接判定骨材堅硬程度的指標，此種特性對機場跑道、溢洪道、排水溝渠、及路面工程等有磨耗顧慮之工程，深具意義。一般係使用「洛杉磯磨損試驗」測定，然而所得數據與混凝土實地量測數據關係不佳，但仍不失為一種重要指標。一般要求高強度混凝土中之骨材，磨損率須小於 40%，而一般混凝土之骨材則不應大於 50%。

(三) 硫酸鹽侵蝕

抗硫酸鹽侵蝕性之目的在估算骨材抵抗風化之

表 1 骨材中有害物質之檢驗規範

Table 1. Specification for testing the Venomous materials in the aggregate

有害物質種類	許可值(%)	對混凝土的影響	依據規範	
			ASTM	CNS
有機物	顏色淡於標準色	影響凝結及硬固時間可能造成惡化	C40	11153
通過 #200 號篩(75 μ m)細料	<1.0 (粗) <3 細 (磨耗) <5 細 (一般)	影響黏著性，增加用水量	C87 C117	491
煤或褐煤或其他輕質物	(外觀) (一般)	影響耐久性，可能造成污染及爆開	C123	1164 1172 10990
柔軟顆粒	<10	增加用水量影響耐久性	C851	1173
土塊與易碎顆粒($\gamma < 2.40$)	<3	影響工作及耐久性，可能造成爆開	C142	1171
角岩($\gamma_{SSD} < 2.40$)	<8	影響耐久性，可能造成爆開	C295	-
氯化性	<0.1	不正常凝結，造成混凝土中鋼筋銹蝕	-	1240 12891
磨損率	<50	造成較大之磨耗結果	C131 C295 C536	3048 490
硫酸鎂健性 (5 循環)	<18	影響耐久性，造成表面粉化分解	C88	1167
骨材鹼性反應膨脹	<0.05 (3 個月) <0.16 (6 個月)	不正常膨脹，淵生地圓狀爆裂	C289 C229 C342 C441	13617 13618 13619 13620

能力，測定骨材「健性」的方法很多。一般依據 ASTM C88「骨材健性試驗」或使用 CNS 1167「使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健康試驗法」，將骨材泡入「飽和硫酸鈉或硫酸鎂」溶液中，固定時間後，取出加以烘乾，測定重量損失，重複多次浸泡工作，以模擬水在冰凍膨脹時對骨材之破壞力。此試驗因係以加速耐久方式進行，故與實際環境之試驗條件不盡相同，惟對於骨材抗風化能力之相對值比較仍值得參考。

(四) 有害物質

骨材的「取料點」或「料源」通常在山區或河川地，因此受到地域性的影響，或骨材本身岩石的屬性不同，或骨材處理過程之污染，致含有多種有害物質，包括有機不潔物，細粉料，多孔物

質，柔軟顆粒，易碎顆粒，氯化物，外界磨耗，硫酸鹽及化學侵蝕物質，見表 1 所示⁽¹⁾。表中基本上可看出骨材中之有害物質，對混凝土可能造成某些不當化學反應，這些反應包括(1)干擾或改變水泥的水化凝結反應行為，(2)使水泥漿體、骨材或兩者產生顯著的體積變化（膨脹反應），(3)產生其它有害品質之副產物。

三、驗證及評估

由於目前砂石嚴重短缺，骨材的品質好壞將嚴重影響混凝土的耐久性，引起工程品質問題。而骨材耐久性如以試驗作驗證，用標準方法則須要長期試驗，無法作立即有效防制措施，因此先以文獻彙整方式，評估骨材之耐久性影響基因包括有鹼骨材反應、磨耗作用、硫酸鹽侵蝕及有害物

質等因素，並以骨材之基本性質與原理作評估，如骨材緻密級配時水泥漿量減少，則相對的具有裂縫減低的物理現象，骨材含水量變化由公式推估將影響空隙及水膠比等混凝土品質，而骨材之有害物質可依據 CNS 或 ASTM 相關規範作檢測是否符合許可值。另由如何嚴格控管骨材品質，抑制影響骨材耐久性基因以及使用高性能混凝土等策略作評估，期能提供立即有效的方式以增進混凝土的耐久性品質。

四、骨材強化混凝土耐久性之策略

一般良好之骨材應具有潔淨、堅硬、堅韌、強度、耐久、形狀及級配之性質。細粒料的形狀和紋理只影響工作性，但粗骨材特性由於影響力學結合而涉及混凝土的力學及耐久性質。同時骨材性質對混凝土性質有直接的關係與影響。因此如要產製優質的高性能混凝土須選用潔淨粗砂及碎石，並把握下列應用策略，方能充分發揮骨材應有的特質，進而強化混凝土的耐久性。

(一) 骨材緻密級配

良好級配的目的在於(1)使工作度「最佳化」(工作性)，及(2)減少漿體用量(經濟性)。減少空隙(V_v)及降低表面積(S)和潤滑漿量厚度(t)是很重要的手段，也是優生高性能混凝土重要的策略⁽¹⁾。用漿量(V_p)過高，則漿體本身會產生微裂縫而影響到混凝土之耐久性，而達成此目的之基本原則為：

1. 使用顆粒大的骨材，可減少空隙空間和表面積，因為大粒徑之骨材表面積比同重量較小粒徑骨材有較少之表面積。所以對「高強度混凝土」而言，採用高膠結量下，通常採用「粗砂」取代「細砂」的用意即在此。當然傳統認為粗骨材亦可沿用此策略，然而實際上粗骨材粒徑受限於鋼筋間距、模板與鋼筋距離及樓板厚度，常無法達

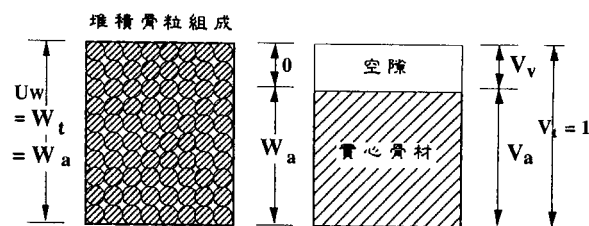


圖 4 單位重與空隙之關係示意圖。

Fig. 4 Relation between the Unit Weight and Voids.

成。

2. 需要適量細粒料以增加「黏滯性」和避免骨材「析離」；採用良好的級配可減少空隙量。然而過多細粒將增加總表面吸附水量，亦會造成過於黏稠而不利施工性。對於優生高性能混凝土則因採用大量飛灰，所以適當之配比下，可避免黏稠問題。
3. 採用圓形及光滑的骨材，可減少潤滑用漿量，因圓形及光滑顆粒表面積比較少，且接觸點少，摩擦剪力低，以致於可減少潤滑漿量⁽¹⁾。

以上級配原則對一般混凝土而言是非常恰當的，但對低漿量高強度之優生高性能混凝土而言，若要求超過 560kg/cm^2 的抗壓強度， 250mm 的坍度下，其粗骨材之粒徑，則不可太大，以免總鍵結強度不夠，因為在高強度條件下，水泥膠結料漿量較高，最弱面在界面，因此同一鍵結應力下增加表面積，可增加「總鍵結強度」。對細骨材而言，則細度必須較粗，如此可減少表面積，避免黏度過稠，因為有相當量的「卜作嵐材料」配比中，若細骨材過細，即相應之表面積較大，則潤滑漿量將不足。

(二) 以單位重推算空隙

優生高性能混凝土的緻密配法，即以級配或顆粒材料體積及互填方式對空隙造成正面之效果，單位重被定義為「單位容積的材料重量」，以 kg/m^3 為單位。利用單位重與實體單位重之關係

可以找出骨材間之空隙率，圖 4 所示即為骨材單位重量與空隙之關係⁽¹⁾。

$$\text{單位重量 } UW = Wa \quad (\text{式二})$$

$$\text{容積密度 } \gamma_a = BSG \cdot \gamma_w \quad (\text{式三})$$

$$\text{骨材體積 } Va = \frac{Wa}{\gamma_a} = \frac{UW}{BSG \cdot \gamma_w} \quad (\text{式四})$$

$$\text{總體積 } Vt = Va + Vv = 1 \quad (\text{式五})$$

所以空隙率

$$Vv = 1 - Va = 1 - \frac{Wa}{BSG \cdot \gamma_w} = \frac{BSG \cdot \gamma_w - UW}{BSG \cdot \gamma_w} \quad (\text{式六})$$

空隙率一般在 0.25~0.4 間，視級配狀況而異，當粗細骨材混合，亦可以「混合單位重」求出最佳混和比例，而獲取「最小空隙」，此時混合料級配曲線會落在標準級配的中點，而且近似「富勒曲線」。因為空隙減少時，同一工作性所需之漿量亦可因此減少，不僅有利經濟性外，也因為漿少，則漿體裂縫及骨材界面輻射裂縫機率降低，對長期耐久性亦有幫助。混合單位重的計算方法，係依重量關係調配細骨材與粗骨材比率，並依容積單位重之方法量測出單位重，見圖 5，經以「最小乘方法」，求出最大單位重之點，即可反求最小空隙，此乃潤滑漿之低限，通常水泥漿量為空隙的倍數。

(三) 控制吸水率變化

骨材的含水狀態常受到環境乾濕、溫度變化等的影響，在實際施工拌和時必須加以修正，否則因含水量變化，將使支配混凝土強度之水灰比 (W/C)，水膠比 (W/B) 改變，而變化強度性質，或工作性，對混凝土均勻性及穩定性均不利，所以

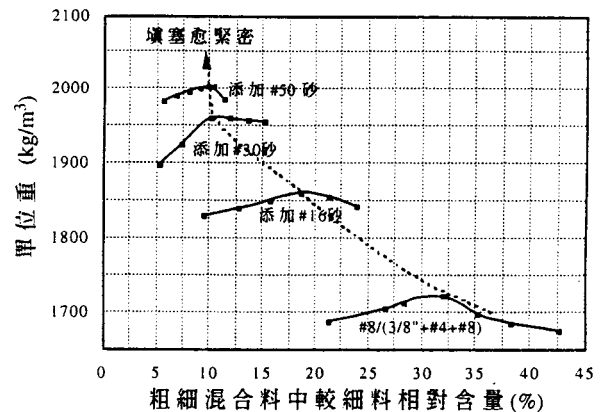


圖 5 粗細骨材混合料單位重的變化。
Fig. 5 Variation on the Unit Weight of the Coarse and Fine Aggregates.

骨材含水量的修正及確保拌和水量的正確必須特別重視。骨材之含水狀態，包括有烘乾(OD)、氣乾(AD)、面乾內飽和(SSD)及潮濕(Wet)等四種狀態，在使用前必須作正確之量測，否則骨材內多餘之水份與水泥反應，使水化形成為膠體或晶體及氫氧化鈣。水量愈多，易溶於水的氫氧化鈣越容易產生，並匯集在混凝土中骨材之底邊及結構物附近。以 C3A 為例，充分水化所需的水不須太高，W/C=W/S 只要 0.24 即足夠，然如混凝土中水泥漿與骨材比重相等的條件下，所需的 W/C 應是 0.096 以下，如圖 6 所示⁽¹⁾。而一般強度混凝土 W/C 大於 0.4 以上，故骨材必然沉澱至底部，而水及水泥漿皆會有上浮傾向，產生泌水或析離，部分泌水累積在骨材下方將造成骨材與水泥漿的弱界面，因此多餘的水又對混凝土均勻性有不利的影響。

(四) 避免使用有害物質

骨材如含有有害物質時對混凝土品質及耐久性有相當不利的影響，因此使用前須依據如表 1 所示 ASTM 或 CNS 相關規範進行檢測是否符合規範。骨材如含有過量的懸浮固體物質，會使骨材吸附大量水分，而會增加同一工作性之需水量，增加

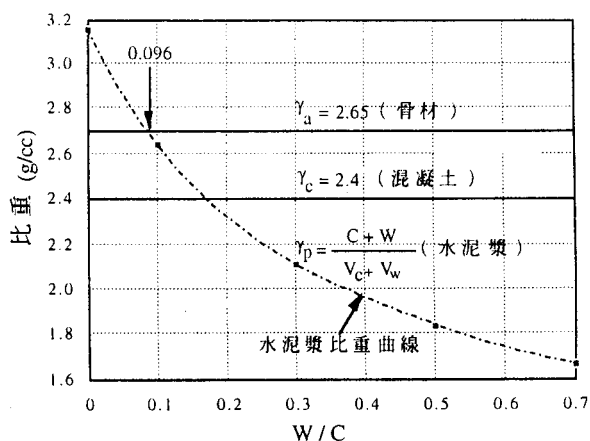


圖 6 水泥漿 W/C 與混凝土材料比重之關係。
Fig. 6 Relationship between the W/C and Material Density of Concrete.

乾燥收縮，將直接影響混凝土長期的體積穩定性。而骨材中之礦物組成若抗風化力小，則易使內部膠結的碳酸鈣物質溶解，所產生的玻璃質遇水時易吸水膨脹或流失，使結構疏鬆，易崩解使強度低至 0.98 Mpa (10kg/cm²) 以下。孔隙率越高，透水係數越高，強度越低⁽¹²⁾。

在骨材表面若含有角岩、煤或褐煤或其他輕質物存在，則可能分解、爆開或造成污點。柔軟顆粒、土塊及易碎顆粒等皆易吸水膨脹造成混凝土表面爆開⁽¹³⁾。如骨材使用海砂或浸泡於海水中則表面易吸附有氯化物，將侵蝕鋼筋表面鈍化膜，產生膨脹或孔隙混凝土之劣化現象。因此在使用前須作完整的品質驗證，以杜絕骨材內含有害物質。

(五) 嚴格控管骨材品質

混凝土使用的天然骨材及碎石料，一般要求必須「潔淨、堅硬、耐久，且不含有害物之塵埃、泥土及有機物，和適當的顆粒形狀」。因此骨材在使用前皆須依據 CNS 或 ASTM 相關規範作檢測，且每處料源每批須取樣一次，管制內容包括篩分析、小於 0.075mm 篩之材料含量、比色法檢

驗有機物、粘土塊與易碎顆粒試驗及其他規範所要求者，如比重、單位質量、含砂當量、氯含量與硫酸鹽含量等，粗骨材並須增加洛杉磯磨損試驗。同時須做骨材之進料管制，如檢查材料供應商之試驗分析報告及前後報告之差異，複驗各料源以校核其報告之可靠性。在製程之控制上做好骨材材料之驗收、儲存與處理，以產製優質的混凝土品質。

(六) 抑制影響骨材耐久性基因

由於與骨材耐久性相關並直接影響到混凝土耐久性的因素可能原因有鹼骨材反應、抗磨耗作用、抗硫酸鹽侵蝕及氯化物等其他有害物質⁽¹⁾。為能有效抑制上述基因可由多種方式加以防範或處理。

1. 降低水膠比

減低混凝土之拌合水量，進而降低空隙連通性以及減少骨材與水泥漿界面之孔隙，防止硫酸鹽進入結構體內，並提昇混凝土之電阻效果。

2. 採用上作嵐材料

添加如飛灰、高爐石粉等卜作嵐材料，有效地消耗氫氧化鈣的能力，減少石膏反應之產生機率。同時可取代細骨材填塞空隙、降低滲透係數並減少硫酸根離子滲入混凝土內，更因緩慢水化而使界面更加緻密，直接或間接皆可增進混凝土的耐久性。

3. 降低水泥用量

減少水泥用量，直接可降低收縮裂縫的產生，整體上可減少混凝土中 C₃A 量及氫氧化鈣生產量，進而降低石膏及鈣矽石反應之機率，確保骨材與水泥漿間之界面無裂縫產生。

4. 使用高性能混凝土

近年來國內外皆積極的進行高性能混凝土的研發與推廣應用，主要係將混凝土經過品質保證技術，確保品質一致及穩定性，以滿足營建工程優良品質之需求。從混凝土規劃設計及配比時即能

考量達到耐久性、工作性、經濟性、安全性及生態性之準則。由整個過程包括材料、配比及試拌、產製及品質檢驗、澆鑄、養護、品質管制、品質檢測及驗收皆能做好品質保證工作⁽¹⁴⁾，因此混凝土於「料源管制」階段，即可確保各材料之來源及品質穩定性，進而杜絕影響骨材之耐久性基因。

5.妥善的修補

當混凝土構造物發生鹼-骨材反應時，其表面會產生地圖狀裂縫，嚴重時甚至起泡爆裂，因此將會影響混凝土原有的設計功能，強度也會大幅的降低，嚴重者甚至造成構造物的崩壞。因此當確認混凝土構造物有鹼-骨材反應，應先評估結構物安全性，並進行下列改善步驟：①利用可的方法，探討構造物是否合乎原設計需求。②移除環境中水分，以減緩鹼質與粒料反應作用。③填補裂縫。④覆蓋構造物表面，⑤定期監測。通常一般的維修方法係以填補裂縫或覆層為主，但此種施工方式會因材料品質、施工良窳、外在環境的影響、材料壽命和維修材料與混凝土之相容性等問題而影響修補成效。目前混凝土發生鹼-骨材反應的維修方法除傳統的表面被覆法外包括下列幾種：

(1)裂縫封阻法

此係以加壓的方法將封阻材料灌入混凝土構造物表面由於鹼質與粒料反應產生之裂縫中，防止水份進入混凝土構造物內部，避免膠體吸水膨脹，本法對構造物混凝土強度已降低者，因灌入封阻材料而有提升混凝土強度的作用。常用之裂縫封阻材料包括有環氧樹脂、高分子水泥漿、兩液型或單液型填縫膠等三種。

(2)裂縫封阻法與表面被覆法合併使用

合併上述兩種方法使用，將裂縫先行以灌入的方法填塞，再用覆面材料將表面被覆。由於同時混凝土表面實施封阻和被覆，對於防止水份進入可獲致較佳效果，其它方法如以鋰化合物可以改

善鹼質與粒料反應之膨脹行為，應用電化學技術降低混凝土中含鹼量及添加化學藥劑。

構造物其損壞情況如無法修復或不符合經濟效益，必須敲除重建。當混凝土構造物已發生因鹼-骨材反應導致的龜裂情形，可利用防止水分繼續入侵的表面被覆法、裂縫封阻法或兩者並用，以及改變反應生成物的電學處理進行保護修補的工作，但由於此類補強措施所費不貲且修補工作曠日費時，因此事先的預防依然是最好的防治的策略⁽¹⁰⁾。

五、結論與建議

骨材的各項性質，如顆粒級配、吸水率、最大粒徑、表面紋理、礦物成份、骨材強度、比重、內部孔隙結構、有害物質、健性等因素均與混凝土之耐久性有密切之關係，由本文就幾項主要因素的驗證與討論中，可歸納出下列的結論：

1. 骨材的耐久性與有害物質對混凝土有相當之影響，主要的因素包括有鹼骨材反應、抗磨耗作用、抗硫酸鹽侵蝕及氯化物、有機物等其他有害物質。
2. 骨材緻密級配可減少漿體用量、減少容隙及降低表面積與潤滑漿量厚度，宜多使用顆粒大之骨材，適量細粒料，取用圓形及光滑骨材等策略。
3. 骨材級配以互填方式，由單位重推算空隙，以粗細骨材混合單位重求出最佳比例，則可獲取最小空隙及減少水泥漿量，提昇耐久性。
4. 骨材吸水率、含水狀態等影響混凝土的水灰（膠）比以及相關工程性質，檢測控制吸水率變化以掌控混凝土應有之品質。
5. 骨材之有害物質直接影響混凝土耐久性，使用前宜依相關規範作檢測，避免使用造成危害。
6. 在使用骨材前宜嚴格控管骨材品質，作品質驗證與製程保證，以製造優質的混凝土品質。並應建立台灣地區骨材之鹼反應性質資料庫，提供工程

界參考。

7. 有效抑制骨材影響耐久性基因，可選用降低水膠比，控制含水量及活性矽含量，選用品質良好粒料，採用卜作嵐材料，降低水泥用量，使用高性能混凝土等方式達成。
8. 當結構物產生鹼骨材反應時，宜採用修補方式如表面被覆，裂縫封阻或兩者合併等妥善處理，以增進耐久性。

誌謝

感謝國科會八十七年度專題研究計劃，（計畫編號 NCS 87-2211-E-151-004），國科會八十九年度大專學生參與專題研究計畫（計畫編號 NSC 89-2851-C-151-001-E）及國立高雄科學技術學院八十八年度專題研究計畫（計畫編號 NKIT-87-CI-002）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，土木系曾學雄老師及楊雅雲、張景揮、蘇秋樺與鍾美玲等同學的協助得以順利完成，特予感謝。

參考文獻

1. 黃兆龍，「混凝土性質與行爲」，詹氏書局(1999)。
2. 王和源、楊雅雲、黃兆龍，「骨材對混凝土耐久性影響之研究」，八十八年度防蝕學會論文集，第 27~35 頁，南投(1999)。
3. 田永銘、王淑慧、潘亮宇、陳維民，「混凝土鹼骨材反應劣化與防治」，構造物破壞原因探討與

- 處置，pp.125-146 (1999)。
4. 饒正、李鈞、陳桂清，「現有結構物安全評估及維護研究(III)，港區混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究」，台灣省政府交通處，港灣技術研究所 88 研(十三)-2，pp.4-33 (1999)。
 5. 陳家榮，「台灣地區砂石供給問題與解決方案建議」，營造天下，第 26 期，第 4~7 頁(1998)。
 6. 王和源，「混凝土鹼骨材反應病變與防治對策」，中華民國建築學會 1998 建築研究成果發表會，第 17~22 頁(1998)。
 7. 田永銘、楊世和、彭柏翰，「台灣東部反應性骨材之探討及分析」，土木工程科技之回顧與展望研討會論文集，第 135~161 頁，台南(1999)。
 8. 王櫻茂，「制訂混凝土耐久性試驗方法及規範研究」，內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告 MOIS 840018 (1995)。
 9. D. W. Hobbs, "Alkali-Silica Reaction in Concrete", Thomas Telford London (1988)
 10. Chau Lee, "Available Alkalis in fly Ash and their Effect on Alkali Aggregate Reaction", PHD disseration, Iowa state University (1986).
 11. S. Mindess and J. F. Young, "Concrete", Prentice-Hall, inc, N.J. (1991).
 12. 張大鵬、林秉如、莊福昌、林黃欽，「粗骨材性質對高性能混凝土強度與彈性性質的影響」，高性能混凝土之應用研習會，第 10-1 至 10-18 頁，台中(1991)。
 13. Mehta, P. K. and P. J. M. Monteiro, "Concrete Structure, Properties and Materials", 2nd Ed, Prentice-Hall Englwood Cliff, N.J. (1993).
 14. Rangan, B. B. "High-Performance High-Strength Concrete: Design Recommendations" ACI Concrete Internation, pp. 63-68 (1998).