

## 骨材堆積對高性能混凝土耐久性質之研究

王和源\*、湛淵源\*\*、方裕欽\*\*\*

### The Effect of Densified Aggregate on the Engineering Property of High Performance Concrete

Her-Yuan Wang, Yuan-Yuan Chen and Yu-Chin Fang

#### 摘 要

本研究參考法國活性粉混凝土 (RPC) 之強度提昇理論，配合優生混凝土 (EC) 配比邏輯，以骨材顆粒緻密堆積為主架構，分別探討不同水泥漿質與量變化，不同級配型態，添加鋼纖維及不同養護環境下之工程性質。結果顯示緻密優生混凝土為一高流動性（符合坍度=250±20mm；坍流度=600±100mm）；高強度、高電阻、低電滲、低乾縮之高品質混凝土。經優生緻密配比邏輯設計之優生混凝土，即使因粒徑降低，導致表面積增加，亦能使之具高流動性，且將傳統的水泥強度效益由10psi/kg提昇至60psi/kg，印證骨材堆積愈緻密，有助於提昇工程性質。

關鍵字：骨材緻密堆積、優生混凝土、級配、水泥效益、氯離子電滲量

#### ABSTRACT

This research is to discuss the construction properties of concrete with different water-cementitious ratio, different water amount, different aggregate grading, and different curing conditions and the increase of steel fiber based on the strength improvement theory in reactive power concrete (RPC) in France, and the mixture logic in eugenic concrete. The main structure of the research is aggregate compacted accumulation; the voids among aggregate decide the volume of cement paste. The result shows that compacted eugenic concrete is equipped with high flowing (slump=230-270mm, slump flow=500-700mm), high strength, high electric resistivity, low chloride ion penetration, and low dry shrinkage. Eugenic concrete produced according to eugenic compacted mixture theory still possesses high flowing even though the granular diameter decreases and result in the increase of surface area. The strength efficiency of cement can even be promoted from 10 psi/kg to 60 psi/kg. This proves that aggregate compaction can increase engineering property.

Keywords: aggregate dense packing, eugenic concrete, grading, cement efficiency, chloride ion penetrability.

---

\* 國立高雄應用科技大學土木系

Dept. of Civil Engineering National Kaohsiung University of Applied Science

\*\* 私立華夏工商專校建築工程科

Dept. of Architecture Engineering Hwa Hsia College of Technology and Commerce

\*\*\* 國立台灣科技大學營建工程系

Dept. of Construction Engineering and Technology National Taiwan University of Science and Technology.

## 一、前言

隨著人們求知、求新及求變的需求下，使許多材料及發明因應而生。在即將邁入21世紀，混凝土依然是目前較為經濟且被廣泛使用的營建材料。近十幾年來，混凝土科技飛速發展，日新月異，在各國的努力下進入了百家爭鳴的時代，日本以高水泥粉體漿量配合強塑劑及增黏劑發展出自充填混凝土（SCC）；而法國以顆粒堆積配合微纖維調配出高強度、高韌性的活性粉混凝土（RPC）；加拿大以經驗法則設計高性能混凝土來建造跨海大橋。在國內，各公共工程在投標廠商相互競爭，壓低價格搶標下，使得工地加水、偷換試體、或混凝土產生裂縫被視為理所當然。混凝土的長期服務性能是建立在耐久性和體積穩定性的基礎上。消費者所需被告知的是建築物的服務性能及使用年限，而設計者也該擁有混凝土耐久性能之知識，並非僅僅強度及彈性模數。而在設計之初即考慮到混凝土病變問題的「優生混凝土」，乃利用材料之「相生相剋」法則，取長補短，藉由骨材顆粒緊密堆積建立自身強度，再以「卜作嵐材料」來填塞孔隙並參與反應、以延續長期強度及減少惡化因子，透過「降低用水量及水泥用量」之手段提昇混凝土體積穩定性及耐久性，減少外界有害物質直接攻擊之危害，在混凝土表面無裂縫的情況下，外界有害物質之滲透只能以擴散來進行。如此一來優生混凝土便可達到「安全性、耐久性、經濟性、工作性、生態性」等五項設計準則。本研究以優生混凝土配比設計邏輯，採用天然級配及人工調整之緻密級配，添加高矽質骨材（矽砂）及鋼纖維，進行混凝土配比設計，共製作18組不同配比。測試所設計之混凝土工程性質，驗證是否滿足優生混凝土五項設計準則。

## 二、骨材堆積的性能及模式

顆粒材料堆積精確量化的推導是一項複雜且困

難的工作，就骨材而言，為方便推導而過度簡化為單一或二種尺寸粒徑之骨材，卻因忽略骨材級配的事實，將造成配比設計之不便及與事實不符。材料內部包含多種大小不同顆粒，在大顆粒間可更小之顆粒所填充。理論上，堆積受到骨材粒徑分佈，牆效應及搗實方法的影響[1,2,3]。但在理想化的假設下，有許多理論堆積模式被推演出來。比較著名的是Furnas (1929) [4]，Stovall 等人 (1986) [5]，Fedor和Landdel (1979) [6]，Aim和Goff (1967) [7]，Toufar 等人 (1976) [8] 與Larrard和Buil (1987) [3]等學者所推演的數學模型，表1 [4~9] 顯示各顆粒堆積模式的特徵。這些模式主要考慮小顆粒填塞在大顆粒之空隙內，或大顆粒取代小顆粒的方式，基本上並未說明填塞的方法，大都由理想顆粒來推演。文獻[9]推導出本土化高性能混凝土緻密充填配法，並實際成功應用於高雄 T & C Tower 的HPC產製計劃中，亦證實骨材單位重愈大強度愈高。

## 三、養護環境溫濕度的影響

養護濕度對混凝土性質的影響，端視濕度對毛細管孔的影響程度而定。如果養護濕度低於80%時，除水化會終止外，另外也會因毛細孔水的失去而產生裂縫。但密封的水泥漿體，如果水灰比(W/C)小於0.42時，則又會發生「自體乾縮」，甚至如果水泥漿過多，則有塑性收縮的可能性增大，以致混凝土失去整體性。因此，水份喪失不全是造成收縮的唯一因素。惟缺乏養護工作將導致顯著的收縮現象。

養護溫度對混凝土的影響，可由「利」及「弊」二方面來思考。「利」方面為養護溫度的提高，可以加速水泥的水化速率，當然可促使強度早期發展。7天前，養護溫度提高都有較高的強度[10]。「弊」方面為高溫下，水泥漿體內各種結晶物與骨材，隨溫度會有不同的變形，產生溫度差異變形應力，造成晶面劣化現象，在界面產生裂縫的現象，

尤其有骨材存在的環境下，這種現象會更加明顯。所以，不論定溫養護或初時溫度養護的狀況，長期強度反而有劣化現象而減弱，這現象除非有卜作嵐摻料的環境下得以改善，否則溫度的影響導致劣化是無法避免的，甚至會有失去整體性的可能，應特別注意。

#### 四、級配型態與配比設計

本研究共採用二種級配型態：(1)天然級配；(2)緻密級配（機製砂及高矽質砂）。天然級配係自砂石場取得骨材後，經清洗、烘乾、儲存後即進行篩分析試驗。天然級配是將不同比例砂和飛灰進行單位重試驗，當飛灰填入砂的比例為 $\alpha$ 時，可以得到最大單位重，作為混凝土的骨架。

緻密級配係先將骨材進行過篩的工作，分為#8，#16，#30，#50，#100，#200等6種粒徑。再利用「填塞」空隙的觀念來進行級配的調整，其填塞步驟係「將最大粒徑顆粒的空隙以次低粒徑的顆粒，填入其空隙中，遺留之空隙再以更小粒徑之顆粒填入」。如此的填塞法方可獲得最小孔隙即最大單位重( $UW_{max}$ )。對本研究而言，即利用#16去填充#8顆粒所留下之孔隙，再以#30去填充#8及#16所留下之孔隙，如此依序填充下來方可得到最小孔隙及最大單位重( $UW_{max}$ )。

良好的級配除了有助於混凝土整體的緻密性，亦因骨材於各粒徑間有緊密之堆積及分佈，對混凝土結構之體積穩定性，包括潛變、乾縮、彈性模數、比重等都有密切關係。而級配理論是由富勒氏(Fuller)及湯普生(Thompson)於1907[11,12]年提出骨材間孔隙為最小之曲線方程式，如公式(1)所示：

$$P_i = \left[ \frac{d}{D_{max}} \right]^{1/2} \text{-----}(1)$$

式中：

pt = 通過百分率

d = 某篩之通過百分率

$D_{max}$  = 最大骨材粒徑

當各項材料混合比例接近此理想級配曲線時，其孔隙率愈少，相對地，緻密度提高，比重大。二人根據此理論提出一完整之配比方法，指出水泥漿完全填滿其孔隙時，其密度高，比重大，有助於工程性質之提昇。然而早期混凝土技術並無卜作嵐材料填塞微孔隙，及強塑劑分散顆粒間吸附之自由水，導致混凝土的工作性未獲得解決，但現今此問題已獲得解決，富勒氏曲線將是日後朝緻密化努力的重要參考指標。

配比設計法係採用「黃氏緻密配比法」。三種水膠比(0.24, 0.27及0.30)、拌和水量(150, 160, 170kg/m<sup>3</sup>)。部分配合採用矽灰，添加鋼纖維。設計結果如表2所示。配比以不同符號表示。DC表示調整粒料級配後含矽灰的緻密配比；DSF為調整粒料級配後含矽灰與纖維的配比；EC為自然級配粒料含矽灰的配比；符號中24、27、30表示w/cm = 0.24、0.27和0.30；16則表示拌和水量為160kg/m<sup>3</sup>。試驗項目包含工作性試驗(ASTM C143)；抗壓強度(ASTM C31, C192, C617)；表面電阻(CNS Wenner 四極式)；氯離子電滲(ASTM C1202-93)；乾縮量(ASTM C490 & C551)。

#### 五、工程行為與耐久性

##### 1. 工作性

本研究針對機製砂在拌和水量為160kg/m<sup>3</sup>，變化三組水膠比(w/cm = 0.24, 0.27, 0.30)，調製天然級配及緻密級配共6組配比。由於緻密級配係利用「填塞」空隙的觀念來進行，當級配調整後，其緻密度遠大於天然級配，因此就緻密級配而言，飛灰的填入量相對小於天然級配(緻密級配12.5%；天然級配15%)，故在同一膠結量下，以工作性而言，緻密級配優於天然級配。文獻[13]提出骨材堆緻密

有助於提昇工作性。但由於配比中有不同飛灰量，所以在低水膠比的配比下，緻密級配有較大之工作性損失，如圖1所示。而天然級配因水泥量較少，而飛灰量較多，在60分鐘後工作性反而提昇。整體而言，此6組配比仍能符合坍度 $250 \pm 20\text{mm}$ ；坍流度 $600 \pm 100\text{mm}$ 之設計要求。

添加纖維後會使單位重變小，表示孔隙增加，必須使用改變後之單位重，否則使所用之漿量無法有效填充孔隙，造成潤滑漿量不足，將導致工作性降低。本研究添加纖維之混凝土工作性比未添加纖維之配比略差，主要原因為纖維所形成的糾結互鎖效應，其次為了比較有無添加纖維對混凝土性質之影響，故採無修正之單位重，使得工作性降低，不過仍符合高流動性規定範圍內。

## 2. 抗壓強度

本研究針對三種不同養護條件（一般養護、自生養護、 $50^\circ\text{C}$ 加溫養護），而養護環境差異僅是測試溫濕度改變對強度之影響，對於相對濕度而言，須注意勿使濕度低於80%，因乾燥之外圍環境將促使水泥漿體部份水向外擴散排出，甚至水化終止而導致強度降低。而當相對濕度高於80%，無終止水化反應之虞時，溫度將是影響混凝土成熟度的要因，溫度愈高，可以加速水泥的水化速率，溫度可以促使強度早期發展，但在高溫下，因水化反應迅速，將造成水泥水化生成物排列散亂，且因骨材及水泥漿體不同的膨脹收縮現象，產生溫度差異變形應力，造成晶面劣化現象，以致晚期強度不佳。圖2為 $w/\text{cm}=0.27$ ， $W_w = 160\text{kg}/\text{m}^3$ 不同級配混凝土於三種養護條件下強度與齡期關係。早期強度仍以 $50^\circ\text{C}$ 加溫養護最高，自生養護次之，一般養護最低。28天齡期時，一般養護與自生養護強度接近，原因在於自生養護藉由自身之水化放熱溫度加以絕熱而進行養護。一般優生混凝土水化熱曲線高峰為 $12^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ ，而放熱峰溫度隨著水泥量之多寡而有高低及反應快慢。一般養護之溫度（ $23^\circ\text{C}$ ）較自生養護低，

以致早期強度發展較緩，但至中長期（90天）後，一般養護之強度漸漸趕上 $50^\circ\text{C}$ 加溫養護，如此可知，養護溫度在不傷及混凝土（不使混凝土產生微裂縫）的情況下，混凝土強度發展在長期來看，仍受到水固比影響，養護溫度高，只是將常溫養護下28天之結果提前至3天或是7天表現罷了，對於長期其成長幅度不如一般常溫養護，強度甚至低於一般養護。

## 3. 耐久性質、表面電阻值

混凝土電阻可以反應阻抗性和防蝕性能。是耐蝕的重要指標。圖3顯示緻密級配之電阻性質均優於天然級配，由於骨材顆粒堆積使得緻密級配之單位重較大，早期亦因水泥量較多，水化反應迅速，有較多之CH刺激卜作嵐材料參與反應，形成化學固化改善界面，使得緻密級配之電阻性質均高於天然級配。

由圖3顯示，本研究之添加纖維組別在電阻性質均低於未添加纖維之組別，原因除了未修正單位重而導致漿體無法有效填塞孔隙及包覆纖維、骨材等因素，亦因為鋼纖維具有良好之導電性，隨著添加導電性材料，混凝土之電阻係數亦隨之降低，但90天仍達到 $99\text{k}\Omega\text{-cm}$ 。高電阻值表示具有高耐久性質，此歸因於低拌和水量、卜作嵐反應與緻密的巨微觀結構。

## 4. 耐久性、氯離子電滲量

圖4為不同混凝土之電滲量，而緻密級配之電滲量不論是在低水膠或高水膠比之配比下，均較天然級配之電滲量低，其原因為緻密級配透過堆積使得粒徑各區間有緊密分佈，且有較多之水泥量產生氫氧化鈣（CH）提供給卜作嵐材料產生「卜作嵐反應」，有效地將孔隙量減少或變為不連通，提高混凝土緻密性，降低滲透性。由此看來當漿量固定，級配愈佳，則整體之緻密愈高，滲透性隨之降低。除此之外，亦因人工調整級配，對材料控管較嚴

格，增加了混凝土之穩定性及品質。

圖5顯示緻密級配與天然級配隨時間增加，通過混凝土之電量極小。以ASTM C1202的判斷為非常低(Very Low)的氯離子滲透性，而有優異的耐久性。

圖5亦顯示本研究添加鋼纖維後，通過混凝土電流量隨之提高，但經計算後之電滲量仍屬「很低」的範圍內，雖鋼纖維具有導電性，提供了離子移動一個良好的途徑。除此之外，亦因未對其單位重修正，使得原有之漿量不足以包覆骨材及鋼纖維，其緻密度較達添加鋼纖維之配比低，導致滲透性較高，但因緻密堆積使得孔隙少，使得電滲量有效地控制在很低的情況下。

## 5. 乾縮性質

圖6，圖7顯示本研究之緻密級配其體積穩定性均優於天然級配，顯示級配最佳化，使得粒徑各區間之緊密分佈，有助於體積穩定性，也說明骨材對體積乾縮膨脹的穩定有了相當大的助益。此外亦顯示早期Fuller提倡級配最佳化之配比設計理念有助於混凝土工程性質，但早期無卜作嵐材料級配曲線及應用強塑劑分散顆粒，增進工作性，使得級配最佳化難以達到現場使用之困擾，而目前之混凝土技術已克服此項問題，使得緻密級配在體積穩定性有顯眼之表現。

圖8顯示添加纖維對混凝土之乾縮膨脹均有束制之作用，主要是因混凝土之拉應力，轉為纖維軸向應力承受，使得在乾縮方面有效地減少。由此看來，纖維除了增加混凝土的韌性、抗裂性，對體積穩定亦有相當的助益。

## 六、結論

本研究主要探討不含粗粒料的骨材堆積型態，對混凝土工程性質和耐久行為的影響。採用緻密配比模式，可以減少粒料的空隙量，採用介面潤滑技

術，即使拌和水量(含SP)介於150至170kg/m<sup>3</sup>，都可以獲得60分鐘仍可維持高工作性。低拌和水量和水泥用量的設計機制，使得混凝土防蝕耐久性指標，電阻值可達90k Ω-cm以上，氯離子電滲量在非常低(Very Low)的等級內。乾縮量則比一般高性能混凝土低。緻密骨材堆積型式有助於提昇混凝土的耐久性和體積穩定性。

## 致謝

本文之完成，得感謝台科大營建系黃兆龍教授提供寶貴建議，及國科會補助全部計畫經費(NSC-89-2211-E151-009)。

## 參考文獻

1. F. De Larrard, "Optimization of High-Performance Concrete," Seminar of High-Performance Concrete, ed. By J.C. Chen, pp.31~44, Taiwan, (1993)
2. T.C. Powers, The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc. USA, pp.57~86, pp.424~428 (1968).
3. F. De Larrard, and M. Buil, "Granularite et compacite dans les materiaux de genie civil," Material et Structure, 20, pp.117~126 (1987).
4. C. C. Furnas, "Flow of Gasses Through Beds of Broken Solids," Bur. Mines Bulletin, 307, 74ff (1929). (from ref.5).
5. T. Stovall, F. De Larrard, and M. Buil, "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures," Powder Technology, 48, pp.1~12 (1986).
6. R. F. Fedor, and R.F. Landdel, "An Empirical Method of Estimating the Void Fractioin in Mixtures of Uniform."
7. R. B. Aim, and P.L. Goff, "Effect de Paroi dans les

Empilements D'esordonee's de Sph eres et Application  $\alpha'$  la Porosite de Me'langes Binaires," Powder Technology 1, pp.281~90(1967).

8. W. Toufar, M. Born, and Toufar. W., M. Born, and E.Klose,"Beitrag zur Optimierung der Packungsdichte Polyddisperser Korniger System," Freiburger Forschungsheft A 558, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
9. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-89) and Commentary (ACI 318R-83), ACI, Detroit.
10. 楊至弘, 「高性能混凝土預鑄構件產製自動化技術研發」, 碩士論文, 國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所 (1996)
11. V. Johansen, and P.J. Andersen, "Particle Packing and Concrete Properties, "Materials Science of Concrete II, Edited by J. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, pp.111~147, (1989).
12. 王櫻茂, 「混凝土」, 73年3月, 五版, pp. 35~51。
13. 侯松安, 「緻密配比方式對優生混凝土工程性質之影響研究」, 碩士論文, 國立台灣科技大學營建工程技術研究所, 台北(1999)。

表1 典型顆粒堆積模式[4~9]

模式	名稱	基本構量	關係式	說明
1	雙層堆積 (Sph)	小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 填充大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙	$V_1 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1)$ $V_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1$	1. 大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙率為 P <sub>1</sub> 。 2. 小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 填充大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙。 3. 可推測「雙層堆積」之空隙率, 在該堆積模式中。
2	雙層堆積 (Sph)	小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 填充大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙, 且大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 亦填充小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 之空隙	雙層堆積之關係式: $V_1 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1)$ (大顆粒) $V_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1$ (小顆粒) 雙層堆積: $V_1 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1)$ $V_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1$	雙 d <sub>1</sub> d <sub>2</sub> = 0.22 時最佳。
3	雙層堆積 (Sph)	小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 填充大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙, 且大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 亦填充小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 之空隙	$V_1 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1)$ $V_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1$ $V_3 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1) P_2$	雙 d <sub>1</sub> d <sub>2</sub> = 0.22 時最佳。
4	雙層堆積 (Sph)	小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 填充大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙, 且大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 亦填充小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 之空隙	$V_1 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1)$ $V_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1$ $V_3 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1) P_2$ $V_4 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1 P_2$	雙 d <sub>1</sub> d <sub>2</sub> = 0.22 時最佳。
5	雙層堆積 (Sph)	小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 填充大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 之空隙, 且大顆粒 (d <sub>2</sub> ) 亦填充小顆粒 (d <sub>1</sub> ) 之空隙	$V_1 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1)$ $V_2 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1$ $V_3 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1) P_2$ $V_4 = \frac{d_2^3}{d_1^3} P_1 P_2$ $V_5 = \frac{d_2^3}{d_1^3} (1 - P_1) P_2 P_3$	1. 假設各顆粒材料之填充率之方式均為 P <sub>1</sub> 。 2. 假設各顆粒材料之填充率之方式均為 P <sub>2</sub> 。

表2(a) 緻密骨材及含矽砂鋼纖緻密優生混凝土配比表

Table 2(a) Mixture Proportion of Dense Aggregate Included Silica Sand and Steel Fiber of Eugenic Concrete

配比組別	w/cm	wc	w/s	漿量 n	材料配比 (kg/m <sup>3</sup> )												
					#8	#16	#30	#50	#100	#200	Fly	Slag	Cement	Silica	Water	SP	Fiber
DC2416	0.24	0.413	0.0712	1.794	528.9	284.8	271.2	230.1	146.1	118.5	225.7	22.1	387.6	31.4	114.1	45.9	-
DC2716	0.27	0.508	0.0716	1.633	549.5	295.9	281.8	239.1	151.8	123.1	234.5	17.9	314.5	25.5	121.3	38.7	-
DC3016	0.30	0.624	0.0719	1.506	566.0	304.8	290.3	246.3	156.4	126.8	241.5	14.6	256.5	20.8	136.9	23.2	-
DSF2416	0.24	0.0413	0.0712	1.719	529.0	284.9	271.3	230.2	146.2	118.5	225.7	22.0	387.4	31.4	114.1	45.9	11.7
DSF2716	0.27	0.0508	0.0716	1.566	549.6	296.0	281.9	239.2	151.8	123.1	234.5	17.9	314.6	25.5	121.3	38.7	11.7
DSF3016	0.30	0.0624	0.0720	1.444	566.0	304.8	290.3	246.3	156.4	126.8	241.5	14.6	256.5	20.8	136.9	23.2	11.7

表2(b) 自然骨材及含矽砂緻密優生混凝土配比表

Table 2(b) Mixture Proportion of Natural Aggregate Included Silica Sand of Eugenic Concrete

配比組別	w/cm	w/c	w/s	漿量 n	材料配比 (kg/m <sup>3</sup> )						
					Sand	Fly	Slag	Cement	Silica	Water	SP
DC2416	0.24	0.467	0.0716	1.361	1566.3	276.4	19.5	342.8	27.8	125.3	34.7
DC2716	0.27	0.596	0.0721	1.230	1627.2	287.1	15.3	268.4	21.8	134.2	25.8
DC3016	0.30	0.766	0.0724	1.125	1675.9	295.8	11.9	208.7	16.9	140.7	19.3

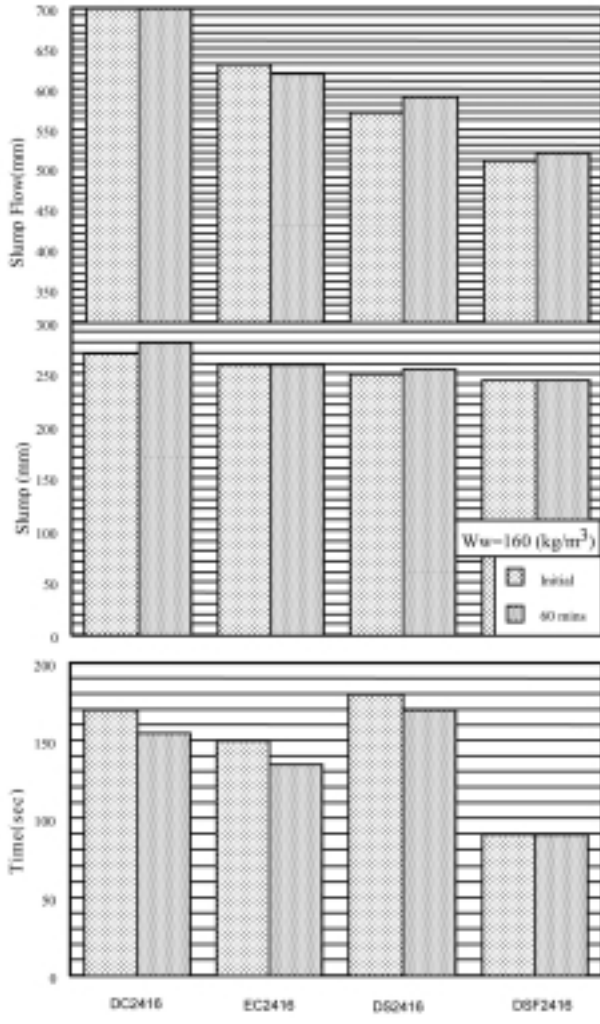


圖1 不同混凝土水膠比比工作性關係圖 (w/cm=0.27)

Fig.1 Workability of variable water to cementitious ratios for different concrete mixture (w/cm=0.27)

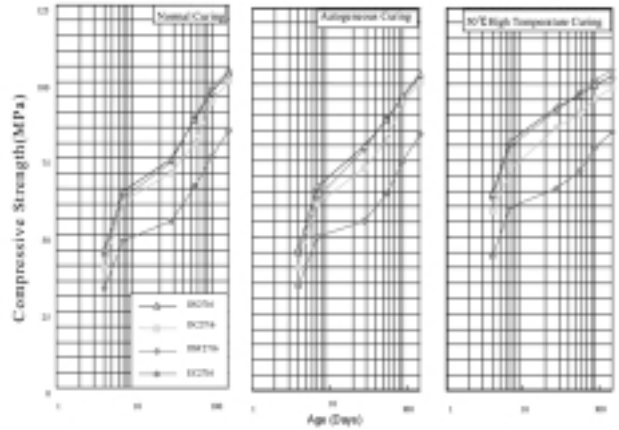


圖2 不同混凝土於不同養護環境下齡期與抗壓強度之關係(w/cm=0.27, Ww=160kg/m³)

Fig.2 Development of compressive strength of different curing conditions (w/cm=0.27, Ww=160kg/m³)

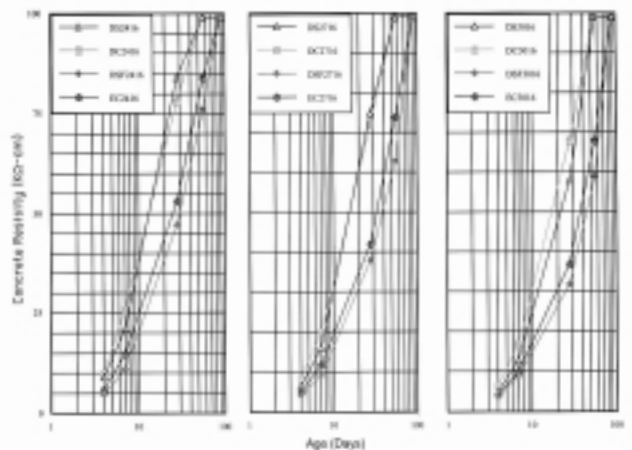


圖3 不同混凝土在一般養護下齡期與電阻係數之關係(w/cm=0.24, 0.27, 0.30, Ww=160kg/m³)

Fig.3 Concrete resistivity of different concrete mixtures (normal curing condition, w/cm=0.24~0.30, Ww=160kg/m³)

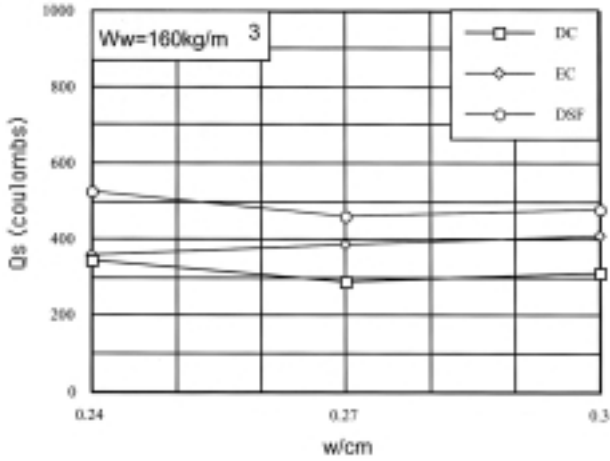


圖4 不同混凝土水膠比與氯離子滲量之關係  
Fig.4 Charge passed of variable water to cementitious ratios of different concrete mixture (Ww=160kg/m<sup>3</sup>)

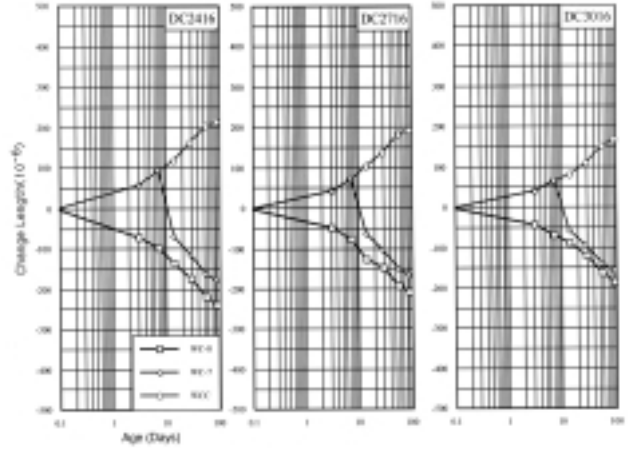


圖6 緻密優生混凝土養護時間和齡期變化關係 (Ww=160kg/m<sup>3</sup>, T=23°C, RH=80%)  
Fig.6 Length change of dense packing eugenic concrete (Ww=160kg/m<sup>3</sup>, T=23°C, RH=80%)

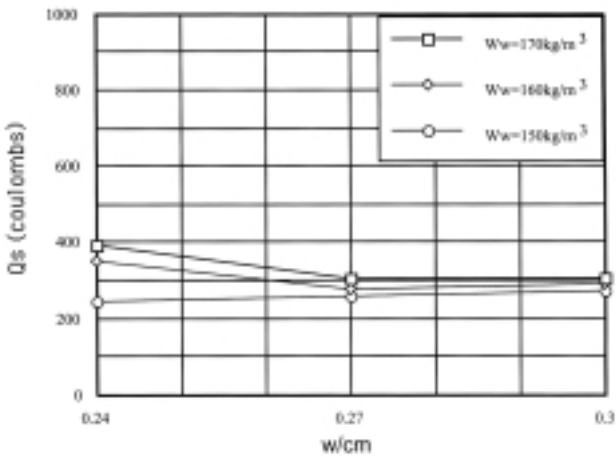


圖5 含矽砂緻密優生混凝土水膠比與氯離子滲量之關係  
Fig.5 Charge passed of eugenic concrete included silica sand (w/cm is variable)

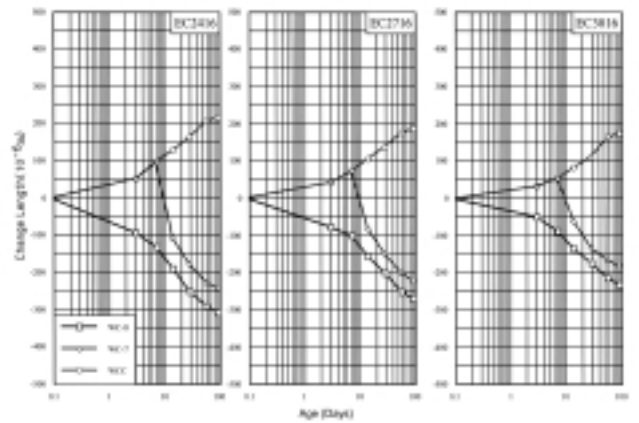


圖7 優生混凝土養護時間和齡期變化關係 (Ww=160kg/m<sup>3</sup>, T=23°C, RH=80%)  
Fig.7 Length change of natural sand eugenic concrete (Ww=160kg/m<sup>3</sup>, T=23°C, RH=80%)



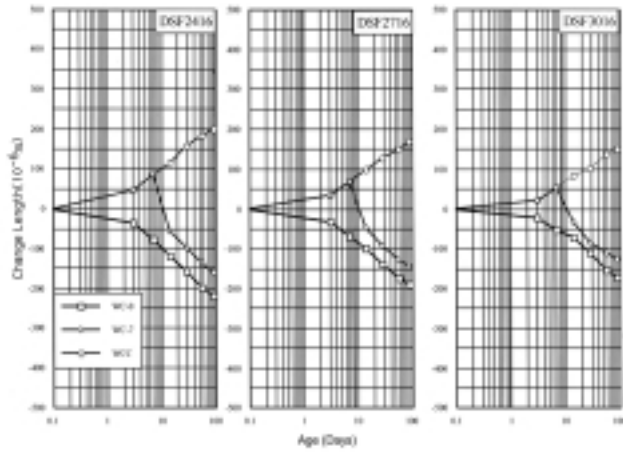


圖8 含砂鋼纖優生混凝土養護時間和齡期變化關係(Ww=160kg/m<sup>3</sup> , T=23℃ , RH=80%)

Fig.8 Length change of dense packing eugenic concrete included steel fiber (Ww=160kg/m<sup>3</sup> , T=23℃ , RH=80%)