

水泥裹漿厚度對高性能混凝土影響之研究

謝素蘭

土木與環境工程系

摘要

本文主旨探討 HPC 及 SCC 混凝土之最佳水泥基膠結料「質」與「量」的理論及相關應用。研究係以 Full 級配曲線模擬「緻密配比」的粒料顆粒分佈曲線，透過粒料顆粒為圓球形的基本假設，求解出最小空隙量(V_v)，再藉由調整水泥漿包裹厚度(t)及質(w/b)，解析水泥漿「質」和「量」與混凝土流變行為及硬固性質之交互關係，俾探討水泥膠結料較適漿量厚度。結果顯示水泥基材包裹漿厚度對混凝土工作性存在著臨界值，低於臨界厚度之混凝土呈近零坍度，高於臨界厚度則可藉由強塑劑之用量而改變流變行為；水泥基材厚度愈厚、質愈佳時，混凝土早期強度愈高，但晚期強度反而是水泥基材量(t)越少，其硬固性質愈佳；微觀結構顯示水泥膠結料的量愈多，水化產物較為鬆散。

一、前言

一般高性能混凝土^[1]和日本自充填混凝土，本質上皆沿用傳統 ACI 模式配比^[1]，以用水量滿足工作性為首要考慮條件，此舉常導致多水、高水泥用量之結果，除了容易造成混凝土產生泌水或析離現象外，體積穩定性將不佳；根據美國混凝土委員會的研究顯示，降低用水量為減少泌水及增加體積穩定性最主要策略^[3]。為了減少水量又達到良好工作性，黃氏研究群透過簡單的緻密堆積原理，以實驗獲得混合粒料（粗骨材、細骨材和飛灰）之最大單位重，此舉可降低潤滑水泥漿體積量。混凝土性質深受粒料堆積的影響，而以粒料緻密堆積為基礎的高性能混凝土「緻密配比」法(DMDA)，發展迄今已 13 年(1990~2003)的時間，有極豐富的理論及經驗，並多次在 SCI 及 EI 檢索期刊上發表，實務上則應用於高雄 85 國際廣場大樓、台北 101 金融大樓基樁工程、屏東車城海生館和彰化車測中心等建築結構。初期發展係以粒料緻密堆積為主，求出粒料最小空隙量 V_v 後，依水泥漿 $V_p = N \times V_v = V_v + S \cdot t$ 定出最適當漿量，其量是以假設 N 值(水泥漿放大倍數)決定之^[1,2]；基本上，此方法不同於 ACI 211.1R 配比，係強調骨材間最緻密關係是不變的，除此在水膠比(w/cm)之要求則相似。然而，對水泥基質膠結漿「質」與「量」而言，潤漿厚度的改變將有多少種可能的配比可資運用，欠缺理論的推導，且在實務的應用仍有缺陷。因此，介於粒料間水泥基質膠結漿「質」或「量」的厚度(t)必需多少 μm ，才能夠符合 HPC 及 SCC 的工程性質需求，將是值得探討的課題。本研究擬採用「富勒級配曲線」(Fuller's Curve)為假設基礎，其顆粒範圍可涵蓋 mm, μm 至 nm；水泥基質漿厚度決定後，為了能探討最佳水泥基質漿「質」或較適漿「量」厚度，需要進行一系列改變潤漿厚度與漿質對混凝土性質之影響，以求得較佳化粒料配合比例下之最少包裹厚度(t_{min})。

二、 文獻探討

混凝土 Fuller and Thomson 於 1976 年發表之文章，係最早定義固體顆粒粒徑分佈曲線之理論，其曲線下部為橢圓線形的一段，自縱坐標 7% 處開始，此段意義即說明了細粒料(飛灰或細粒料)最少應占全部粒料的 7%；橢圓線的右端在大約 $D/10$ 處終止。曲線往上為一段直線，左端在 $D/10$ 附近和橢圓相切，右端直線連接最大粒徑 D 即縱坐標 100% 處。橢圓部分代表飛灰及砂的級配，直線代表粗粒料級配^[4]。

Fuller's curve 簡化後之拋物線：

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

式中， (d/D) 項的指數一般可寫成 $(d/D)^h$ 形式， h 不一定是 1/2；通常 $h = 0.3 \sim 0.5$ 之間，其中 $h = 0.45$ 在瀝青混凝土級配上比較實用^[5]，此為廣義理解的 Fuller 拋物線。 h 值愈小，曲線欲往上升，此意味著推薦級配中細粒料應愈多些，一般評論指出，此曲線微細部分似乎稍嫌過少。對於理想骨材級配之定義，陸續有其他學者提出，其中瑞士學者 Bolomey^[6] 強化足夠數量微細顆粒的重要性，將其中之 10% 抽出，以確保混凝土具有良好之工作性，而將公式修正為： $P = 10 + 90 \sqrt{\frac{d}{D}}$ 。法國 R.Feret^[7] 理論係以獲得混凝土最大密度和最高強度為原則，發展出強度法：

$$R = K \left(\frac{C}{C + E + V} \right)^2 = K \left(\frac{1}{1 + \frac{E + V}{C}} \right)^2$$

其中， C 、 E 、 V 分別為水泥、水、空隙的絕對體積； K 為常數，視水泥強度而定。

因此，混凝土強度為 $\frac{C}{E + V}$ 之函數，當水泥量固定，若用水量及空隙率能達到最小值，則強度將會最高。

法國綜合級配法係將配比擴大為整個混凝土固體顆粒材料的部份，亦即為粗骨材-細骨材-水泥三元材料之級配規則：

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

其中， A —水泥佔所有乾燥材料之比例，一般為 4~12。

根據 R.Feret 理論，持續被發展為連續級配理論(*granulometrie continue*)及不連續級配理論(*granulometrie discontinue*)。其中 R.Vallette&J.Vicley 研究之不連續級配理論，對於固體顆粒材料部分提及，混凝土骨材係由少數幾個粒級區間所構成，藉以形成間斷性之級配，而粒級間必須符合：

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{8}$$

其中， d_1 ：第一粒級之平均粒徑

d_2 ：第二粒級之平均粒徑

粗骨材中 d_1 顆粒組成之空隙空間，恰為 d_2 顆粒充填進入，剩餘空間由細骨材填充，粗-細骨材之殘餘空間則由水泥漿填充，以此模式構成混凝土結構網。1955 年代英國公路研究記載中，提及 McIntosh & Erntroy 之成果，係依據法國研究之級配理論，設計一系列典型骨材級配曲線之區域範圍，應用於英國公路工程及建築業^[9,10]。

國立中興大學由顏聰教授領導之團隊，曾於 1988 年嘗試運用潤滑漿厚決定混凝土用漿量($V_p = V_v + S \cdot t$)，惟因當時卜作嵐材料應用技巧未明及高效能減水劑並未普遍，致使所得混凝土工作性不佳問題未得解決。研究結論提及水泥漿之平均覆蓋厚度(T_{avg})主宰混凝土之水泥用量；經試驗結果顯示，當 T_{avg} 大於 0.1mm 時，其水泥效率逐漸減低，而 T_{avg} 小於 0.1mm 時之夯實度又急遽上昇，將有損及混凝土之工作度，因此基於經濟性與工作性之考慮，可判定 0.1mm 包裹漿厚度。

三、 試驗計劃

本研究之試驗材料均符合中國國家標準(CNS)，其中膠結料包含台灣水泥公司第 I 型水泥、台電興達火力發電廠之 F 級飛灰，粗細粒料採用花蓮木瓜溪所生產之碎石及河砂，各粒料之粒徑分佈，如圖 1 所示；另外，強塑劑採用 HI CON 公司之 MTP-A30 型高性能減水劑。在配比變數方面，規劃三種裹漿厚度($t = 10 \mu m$ 、 $20 \mu m$ 、 $30 \mu m$)及三種水膠比($w/cm = 0.28$ 、 0.32 、 0.40)，各材料之組成，如表 1 所示。

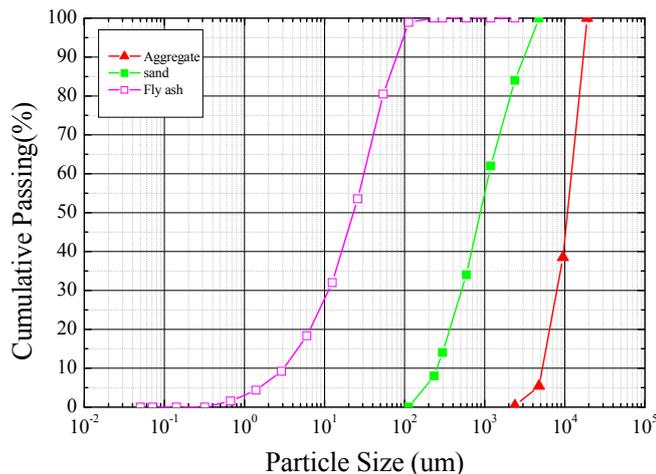


圖 1 各粒料之粒徑分佈

表 1 混凝土材料配比

No.	coating thickness (t), μm	w/cm	Material(kg/m ³)					
			Coarse aggregate	Fine aggregate	Fly ash	Cement	Water	SP
T1028	10	0.28	912.2	877.7	170.0	324.9	138.6	5.5
T2028	20		871.4	838.5	162.4	385.1	153.3	4.3
T3028	30		834.2	802.6	155.4	440.3	166.8	3.5
T1032	10	0.32	912.2	877.7	170.0	293.8	148.4	3.2
T2032	20		871.4	838.5	162.4	350.8	164.2	2.8
T3032	30		834.2	802.6	155.4	402.9	178.7	2.3
T1040	10	0.40	912.2	877.7	170.0	242.1	164.8	1.8
T2040	20		871.4	838.5	162.4	293.6	182.4	1.5
T3040	30		834.2	802.6	155.4	340.6	198.4	1.2

四、 結果分析

本研究之結果首先由 Fuller 曲線決定各固態材料之比例，再依此比率及量測之 V_v ，求得各材料之累積表面積 S 後，根據不同包裹漿厚計算漿量 $V_p = V_v + S \cdot t$ ，而以「矩陣分析」反推混凝土配比，最後藉由新拌性質決定最適包裹漿之用量。

4.1 顆粒堆積特性

1. Fuller 理論級配曲線及偏差函數推估各粒料混合比例

根據 Fuller's curve $P_i = 100 \left(\frac{d_i}{D} \right)^h$, $h = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ (1)

求得 $P_1 : P_2 : P_3 \dots : P_n$ (Ex : $P_{stone} : P_{sand} : P_{fly\ ash}$)

針對不同 h 值之顆粒粒徑與留篩率之關係，如圖 2 所示，顯示 h 值愈小，曲線愈往上升，表示細粒料之通過率愈多，其佔整體粒料之比例愈高。當粗粒料比例過低時會造成混凝土體積不穩定，若 h 值愈高則飛灰量愈少，不利於混凝土耐久性，因此本研究選擇以 $h=0.4、0.45$ 及 0.5 來進行粒料堆積試驗；而實際設計之粒料組合與 ASTM C33、Fuller 級配曲線之比較，如圖 3 所示，顯示 h 值愈大，細粒料愈趨近 Fuller 級配曲線，粗粒料則反而愈遠離。

2. 計算粒料總表面積(S)

經由級配曲線堆積計算之粒料級配資料後，再利用

$$K_{SS,j} = \frac{6}{(\ln d_{i,j+1} - \ln d_{i,j})} \left(\frac{1}{d_{i,j}} - \frac{1}{d_{i,j+1}} \right) \text{ 求得各粒料比表積，再以}$$

$$K_{Sst} = \sum_{j=1}^{10} \left[\left(\frac{p_1}{\gamma_1} a_{1,j} + \frac{p_2}{\gamma_2} a_{2,j} \right) K_{SS,j} \right] \text{ 計算粒料總表面積。}$$

3. 包裹漿量厚度估算

利用實驗求得理論混合粒料之鬆容積比重(Uw)，以獲得最大堆積密度，如圖 4 所示，顯示最大堆積密度為 $h = 0.45 \sim 0.5$ 間。決定漿量厚度(t)後，再藉由推導出之公式

$$Vc(\text{水泥漿體積}) = \sum \frac{W_i}{G_{si} \cdot r_w} - V_v = S \cdot t \text{ 計算水泥用量。}$$

4. 各組成材料用量計算

高性能混凝土組成料一般可分為：粗粒料(w_{stone})、細粒料(w_{sand})、飛灰(w_{flyash})、水泥(w_{cement})、水淬爐石(w_{slag})及水(w_{water})，依其關係求解各組成材料比率並推導各組成材料之使用量。

4.2 較適水泥漿厚度

不同包裹漿厚度(t)之各種配比新拌性質(坍度及坍流度)顯示漿質固定($w/cm = 0.28$)時，包裹漿厚已達 $33.92\mu m$ ，混凝土仍為近零坍度，但厚度提昇至 $47.14\mu m$ 以上即可達 $250mm$ 之高流動性，顯示包裹漿厚度與工作性間存在一臨界值。若漿量固定，不同漿質對混凝土新拌性質之影響，如圖 5 所示，顯示包裹漿厚度 $10\mu m$ 之坍度損失最大 $60min$ 達 $74mm$ ，而 $w/cm = 0.32、0.28$ 之配比，並無此現象，因此相對於低水泥用量及工作性

優先的考量下，採用裹漿厚度較薄且高濃度水泥漿之配比，則必須注意包裹漿質之降伏應力及黏滯性相對地增加，促使工作性降低。對於物理特性及實際工作性之表現，飛灰或微細粒料可均勻溶入水泥漿體，新拌期間用以潤滑粗、細骨材混合粒料，硬化後則作為包裹漿厚度，因此水膠比愈高，此臨界厚度愈低，包裹漿厚若低於此臨界值，混凝土呈近零坍度；但一超過該值即必須應用材料技術使其達到高流動性。

4.2 包裹漿「量」與「質」對工程性質之影響

不同漿量厚度(μm)與強度之關係，如圖 6 所示，顯示曲線斜率隨著齡期而慢慢減小，由此發現固定漿質(w/cm)，包裹漿厚度越低，初期強度較差，但長期成長幅度則較大，而漿質濃度愈高，其晚期強度愈佳，表示水膠比愈低，此現象愈明顯。推論早期各配比之材料比例關係經由水泥水化填補空間後，剩餘之孔隙量差異不大；而晚期卜作嵐反應激化後，低裹漿厚度之配比，其水灰比較大，混凝土內部有多餘水提供卜作嵐反應可持續發生，進而修補混凝土內部微細孔隙，因此導致低裹漿厚度混凝土晚期強度較高。

4.3 包裹漿對微觀結構之影響

不同裹漿厚度之顯微結構，如圖 7 所示，顯示水泥基質包裹漿厚度較高其產生鈣礬石(Ettringite)之鬆散狀水化產物較多，孔隙則愈多，而裹漿厚度低者較為緊密。一般混凝土孔隙分為毛細管孔隙與膠體孔隙，其中孔徑大於 10nm 者為毛細管孔隙，此孔隙大部份存在於水泥漿中水化水所填充的空間；不同包裹漿「質」之孔隙分佈，如圖 8(a)所示，結果顯示固定裹漿厚度下，水膠比(w/cm)愈低，孔隙愈多；為了簡化及深入研究「孔隙」，通常依據孔徑大小區分為各類型孔隙，若將孔隙結構以鮑爾氏(Powers)模式之分類加以分析，顯示總孔隙及毛細管孔隙與水泥基材漿質成正比，膠體孔隙則與水泥基材漿質之相關性不大，如圖 8(b)所示。

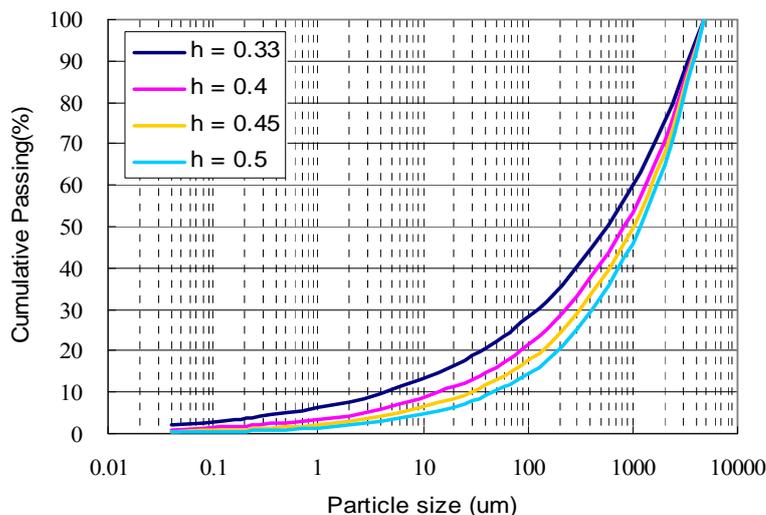


圖 2 不同 h 值顆粒粒徑與累積通過率之關係

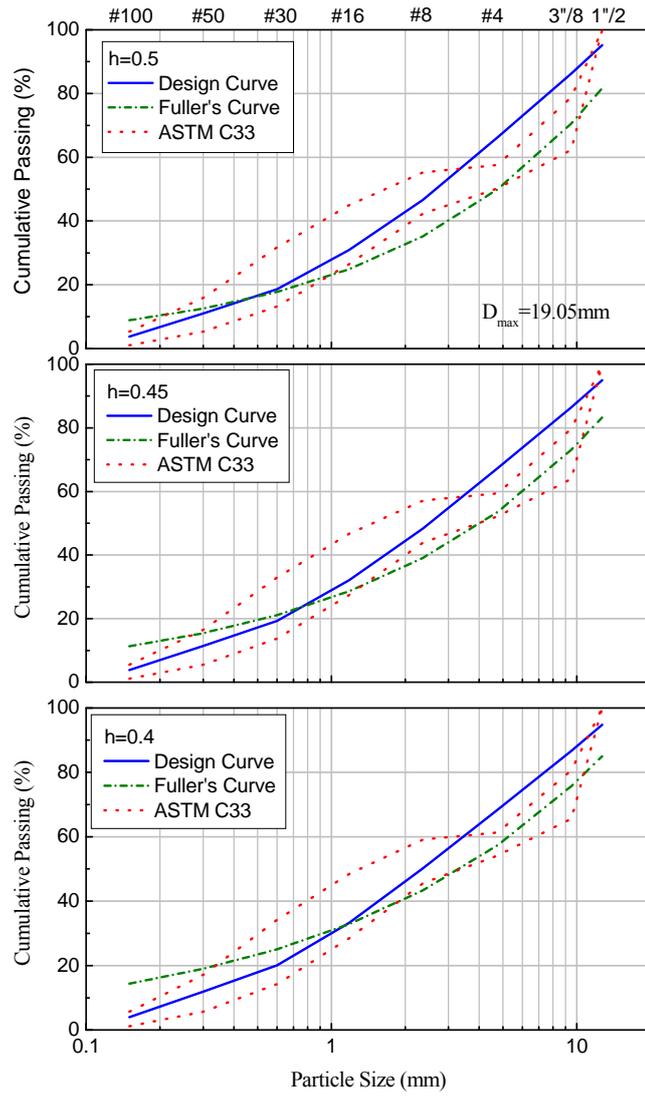


圖 3 Fuller's curve 及粒料混合曲線與 ASTM C33 之粒徑分佈比較圖

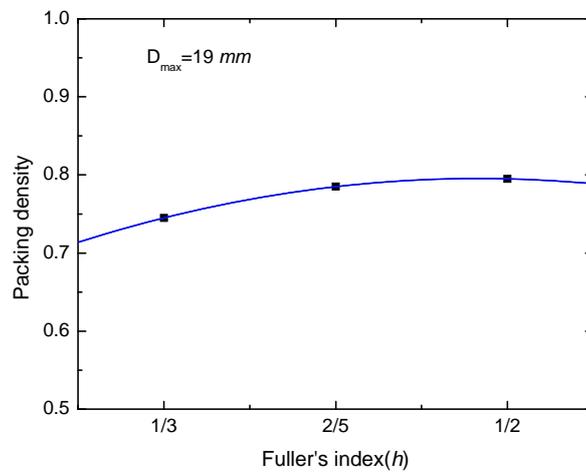


圖 4 不同 h 之 Fuller 級配粒料堆積密度

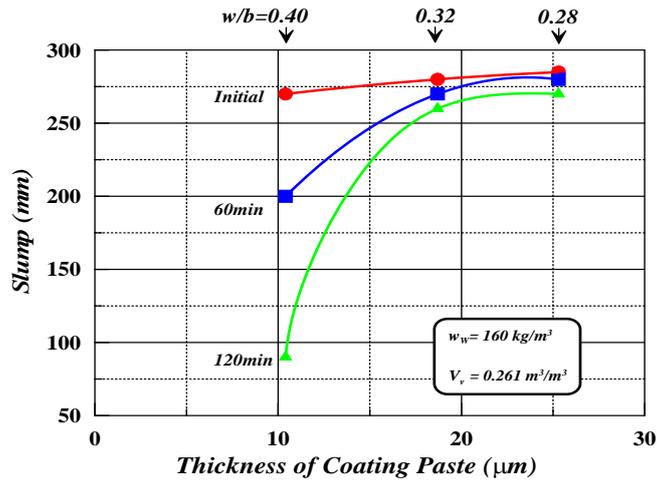


圖 5 包裹漿厚與坍度關係圖

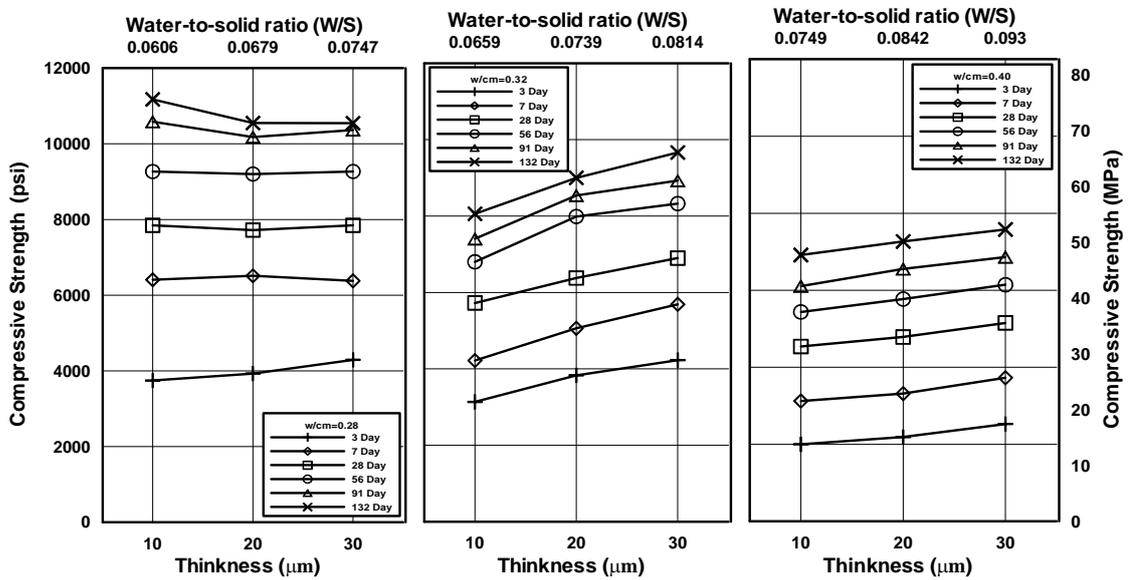
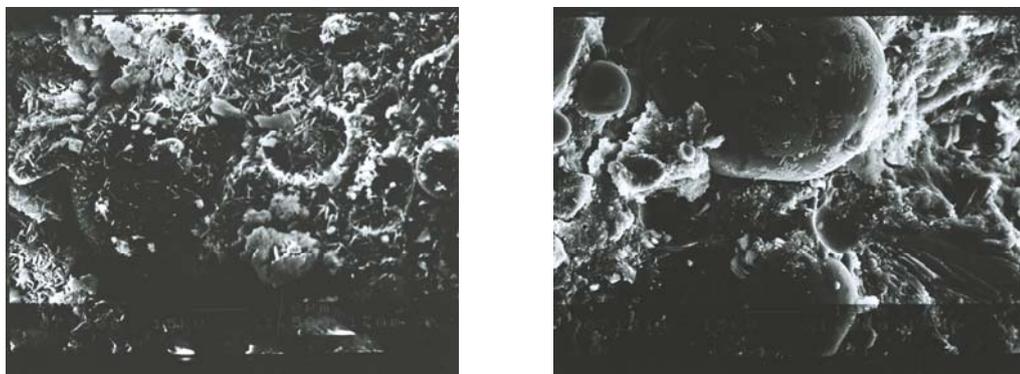


圖 6 混凝土裹漿厚度與抗壓強度之關係圖



(a) $t=30\mu\text{m}$ (b) $t=10\mu\text{m}$

圖 7 不同裹漿厚度之微觀結構

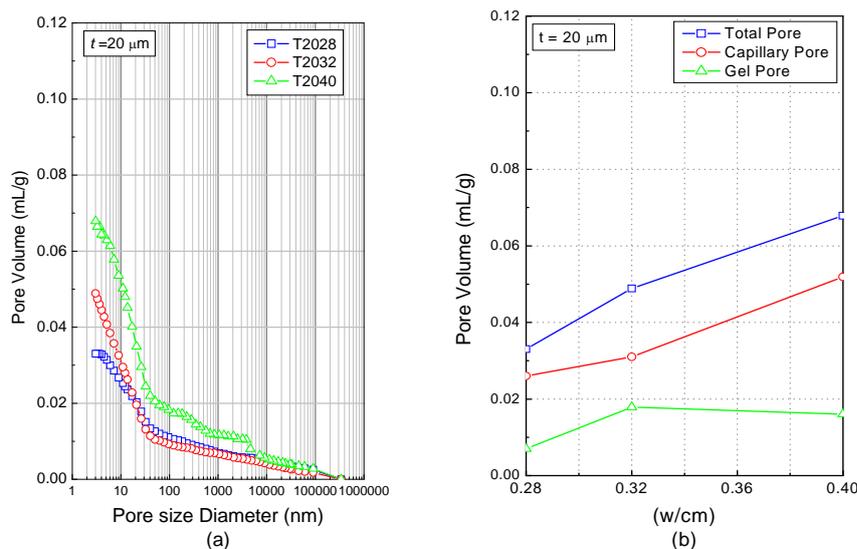


圖 8 不同裹漿「質」之孔隙分佈

五、結論與建議

5.1 結論

1. Fuller's 級配曲線之 h 值愈小，曲線愈往上升，其細粒料之通過率愈多，其佔整體粒料之比例愈高，相較於實際設計之粒料組構， h 值愈大，細粒料愈趨近 Fuller 級配曲線。
2. Fuller 理想配比法之混凝土流變性存在臨界包裹漿厚度，水膠比愈高，此臨界厚度愈低，包裹漿厚若低於此臨界值，混凝土呈近零坍度；但一超過該值即可利用材料技術使其達到高流動性。
3. 固定包裹漿質，混凝土裹漿厚度愈低，早期混凝土強度愈低，但晚期強度較高，包裹漿質愈低，此現象愈明顯。
4. 裹漿厚度較高之混凝土，其產生鈣礬石(Ettringite)之鬆散狀水化產物較多，而總孔隙及毛細管孔隙與包裹漿「質」成正比，但膠體孔隙則相關性不大。

5.2 建議

1. 選用理想級配曲線需注意其限制條件，因實際顆粒之粒徑、粒形與理想狀態必有所不同，應就多組理想級配曲線資料分別施作鬆容積重試驗，而以最大堆積密度為選用原則。
2. 混凝土應儘速導入材料科學之定量研究，以確定操控各基礎材料之有效特徵值及相互組合模式機理，將有助於提昇複合材料之使用效益。

參考文獻

1. 黃兆龍，「高性能混凝土—理論與實務」，詹氏書局，台灣(2003)。
2. Tsai, C. T., Lee, L. S., and Hwang, C. L., “The Effect of Aggregate Gradation on Engineering Properties of High Performance Concrete”, Journal of ASTM Interantional, (2006).
3. Shakhmenko, G., and Birsh, J., “Concrete Mix Design and Optimization,” PhD Symposium in Civil Engineering. Budapest(1998).
4. Fuller, W. B., and Thompson, J. E., “The Laws of Proportioning Concrete,” A.S.C.E. Transavtions, Vol. LIX, pp.67~172(1926).
5. MacDonald, K. A., and Lukkarila, M., “Design Globally, Proportion Locally,” ACI Shotcrete, Summer (2003).
6. Bolomey, J., “Determination of Compressive Strength of Mortar & Concrete,” Schweiaerische Bauzeitung, pp.26(1926).
7. Feret, R., “Sur la Compactite des Mortiers Hydrauliques,” 1892; Soc. d’Ind. Natl, 1897; Le Genie Civil, (1936).
8. Svoboda, L., “Design of Aggregate Mix,” CTU, Vol. A, Prague, pp.606~607(2002).
9. J. D. McIntosh & H. C. Erntroy, “The Workability of Concretet Mixes with $\frac{3}{8}$ in Aggregates.” Cement Concrete Assoc. Res. Rep. London(1955).
10. J. D. McIntosh, “The use in mass Concrete of aggregate of large maximum size.” Civil Engineering, London(1957).
11. C.F. Mora, A.K.H. Kwan & H.C. Chan, “Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing,” Cem Con Res, Vol.28, No.6, pp.921~93(1998).
12. 詹文宗(顏聰指導)，以表面積理論探討高強度混凝土之配合設計法，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，臺中(1988)。