

高爐石粉取代部分水泥對流動化混凝土質流性質之影響

顏聰¹ 湯兆緯² 陳冠宏³ 陳俊欽³

關鍵詞：流動化混凝土、高爐石粉、質流性質。

摘要

本文旨在探討高爐石粉取代水泥對流動化混凝土 (其坍度大於 150mm) 質流性質的影響。研究上, 針對水膠比為 0.4、0.5 及 0.6 三個系列混凝土, 以高爐石粉取代水泥比例 (0% ~ 60%) 為其試驗變數; 而質流性質之測定以質流試驗為主, 另輔以坍度儀試驗, 並將兩者之試驗結果做一比較。研究結果顯示, 隨著混凝土水膠比之改變, 高爐石粉對其質流性質的影響亦不相同。高水膠比所使用的水量較多, 各骨材之間有足夠的水分以供潤滑, 高爐石粉在此時提供適當的黏滯性提升, 可對工作性產生顯著的正面助益; 但在低水膠比時, 高爐石粉用量愈多, 漿體將愈為黏稠, 爐石粉本身因斥水效應所產生的游離水將不足以潤滑骨材表面, 導致過於乾澀而無法流動。就高爐石粉取代水泥量而言, 若同時考量混凝土之工作性與 28 天抗壓強度, 水膠比為 0.4 者, 其爐石粉的適當取代量為 30%; 至於 0.5 與 0.6 水膠比者, 其爐石粉取代量則以 20% 為宜。

EFFECTS OF PARTIAL REPLACEMENT CEMENT USING BLAST-FURNACE SLAG ON THE RHEOLOGICAL PROPERTY OF FLOWING CONCRETE

Tsong Yen Kuan-Hung Chen Jiunn-Chin Chen

*Department of Civil Engineering
Chung-Hsiung University
Taichung, Taiwan 402, R.O.C.*

Chao-Wei Tang

*Department of Civil Engineering
Cheng-Shiu University
Kaohsiung, Taiwan 833, R.O.C.*

Key Words: flowing concrete, blast-furnace slag, rheological property.

ABSTRACT

This research is aimed at investigating the effect of partial replacement cement using blast-furnace slag on the rheological property of flowing concrete, of which the slump value is great than 150mm. Samples of concrete were prepared with three different water-binder ratios (*i.e.* 0.4, 0.5 and 0.6 by weight) and various cement replacement levels (*i.e.* 0 ~ 60% cement by weight replaced by slag). Experimentally, the rheology test was adopted as a major method to determine the rheological property of fresh concrete, while the slump test was also conducted for comparison. Test results show that the effects of slag on rheological parameters are different for concrete with various water-binder ratios. The concrete of higher water-binder ratio can content more water that provide all components of

¹ 國立中興大學土木系教授

² 正修科技大學土木系副教授

³ 國立中興大學土木研究所

concrete sufficient water for lubricating while the slag will enhance the proper viscosities in concrete thus produce positive influence for the workability of concrete. The concrete containing more slag for lower water-binder ratio will make the paste more adhesive, where free water will not be sufficient to lubricate the surface of aggregate in concrete. This results in a concrete too dry and unflowable. As to the cement replacement levels, if both the workability and 28-days compressive strength are concerned, it is recommended to be 30% for concrete with water-binder ratio of 0.4, and 20% for concrete with water-binder ratio of 0.5 or 0.6, respectively.

一、前言

混凝土是由多種材料所組成的複合材料，故其性質與組成材料的物化性質及混合比例、拌和方法等，有著密不可分之關係。過去數十年來，混凝土科研不斷創新，期能改善混凝土的缺點，以增進其性能。而隨著強塑劑的研發成功與卜特蘭礦物摻料的有效使用，已促成高性能混凝土或特殊混凝土的發展，這些新興混凝土材料除具有高強度的特性之外，同時也擁有高耐久性之高工作性。高爐石即為一種卜特蘭材料，它係一貫作業煉鋼廠在煉鐵過程中所產生的副產品，依冷卻方式之不同，可分為水淬爐石及氣冷爐石。將水淬爐石加以研磨所製成的細粉，一般即稱為高爐石粉（簡稱爐石），可摻用於混凝土以取代部分水泥，不僅節省混凝土成本，還可改善混凝土的性質 [1]。

爐石摻用於混凝土時，在常溫下會與水泥水化產物中的氫氧化鈣發生卜特蘭反應，形成類似卜特蘭水泥的水化物，對水泥漿體可起填充作用，使其密實，不僅提高混凝土的晚期強度，也可增進混凝土的耐久性 [2~4]。此外，爐石取代部分水泥後，水泥漿體中 C_3S 與 C_3A 含量比例相對減少，熱釋放率降低，可降低初期水化熱及混凝土內部溫度上升之速率，故添加爐石熟料的水泥漿體，其初凝、終凝結時間有比純水泥漿體延長的趨勢 [5~8]。至於爐石對混凝土凝結時間的影響，則與混凝土初始溫度（亦即澆置時的混凝土溫度）有很大關係，尤以水泥用量較低的混凝土為甚。一般而言，混凝土初始溫度較高（約高於 $30^{\circ}C$ ）時，凝結時間沒有太大改變；然而，若混凝土初始溫度太低（約低於 $15^{\circ}C$ ），則可能有明顯的緩凝現象發生，且其影響程度係隨爐石粉添加量而異，在常溫（ $23^{\circ}C$ ）下，混凝土之初凝時間可能會延長半小時至一小時 [1]。另一方面，若有足夠的水量，以適量爐石替代相等重量的水泥，可改善新拌混凝土之工作性。此乃因爐石的比重（約為 2.90）略小於水泥比重（約為 3.15），以相等重量的爐石替代部分水泥時，漿體實質佔有之體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，可獲得較好的潤滑效果，而有助於混凝土之工作性。此外，相較於水泥顆粒，爐石之表面較不吸附水分，可使游離水增加，故摻用爐石之混凝土，在相同的拌和水量下，其坍度略為增加；再者，由於爐石之水化反應較慢，新拌混凝土之坍度損失可減緩。

如前所述，爐石使用在混凝土中，所採用的方式主要就是取代部分水泥。就新拌混凝土的工作性而言，將爐石加入新拌混凝土拌和時，因其保水性較差，可排出部分水

量，這種機制有益於材料間的相對滑動。不過，合宜的爐石添加量，應該就其物理及化學效應，詳加考量。再者，現場施工中，拌和與澆置兩者在時間上有所差異，所以在討論到混凝土工作性時，時間因素的考量與評估便有其必要性。就硬固混凝土的力學性質而言，混凝土可因適量摻入卜特蘭材料，得以減少拌和水量、降低混凝土孔隙含量，而對其強度及耐久性有正面的效用。若以爐石來取代部分的水泥，其取代百分比愈高，早期強度降低的趨勢愈顯著，而晚期強度的發展也愈慢。由此觀之，欲獲得足夠的工作性且維持一定水準的早期強度，適當選擇爐石取代量顯然甚具關鍵性。

綜上所述，適量的添加爐石將可為混凝土帶來正面的助益，但是基於爐石的物理、化學性質及其在混凝土中之反應特性，對於爐石的使用方法及其取代水泥用量之多寡，均須審慎考量並有進一步研討之必要。本文即採取取代水泥的方式添加爐石，並探討其取代量對混凝土質流性質的影響。試驗上，乃針對水膠比為 0.4、0.5 及 0.6 的混凝土，分別以爐石取代水泥比例為試驗變數，再適量添加強塑劑使其擁有良好工作性（坍度大於 150mm）且不致發生析離，以質流試驗量測混凝土之質流性質，並與坍度試驗結果做一比較。此外，另輔以力學性質試驗，進而分析爐石取代水泥量對混凝土硬固階段性質的影響。

二、試驗工作

2.1 試驗目的

本文在水膠比 (W/B) 為 0.4、0.5 及 0.6 三個系列混凝土的試驗中，以爐石取代水泥重量百分比為試驗變數，其目的如下所列：

- (1) 測析爐石取代水泥含量變化對各種水膠比混凝土質流性質之影響及其差異性。
- (2) 分析比較質流試驗與坍度試驗量測結果之相關性。
- (3) 探討爐石含量對於不同水膠比混凝土抗壓強度之影響，並分析彼此間之差異。
- (4) 參酌工作性與力學性質兩方面因素，針對不同水膠比混凝土配比，建議其合宜的爐石取代水泥量。

2.2 試驗材料與配比

本文試驗工作所使用的材料包括水泥、水、爐石、粗細骨材及強塑劑等。水泥為台灣水泥公司生產之 Type I 卜

特蘭水泥，其物性與化性詳列於表 1；爐石比重為 2.86，Blaine 細度為 $3860\text{cm}^2/\text{g}$ ，其物性與化性詳列於表 1；骨材取自大甲溪，粗骨材最大粒徑為 12.5mm，面乾內飽和比重為 2.61，乾搗單位重為 $1373\text{kg}/\text{m}^3$ ；細骨材之 F.M. 為 2.39，面乾內飽和比重為 2.64；強塑劑為 HICON HPC1000，符合美國材料試驗協會 ASTM C494 G-TYPE 級規範。在水膠比為 0.4、0.5 及 0.6 三個系列混凝土的試驗中，以爐石取代水泥重量百分比為試驗變數。如表 2 所示，水膠比為 0.4 之系列，其爐石取代水泥量之百分比分別為 10%、20% 及 30%；水膠比 0.5 與 0.6 系列者，其爐石取代水泥量之百分比則分別為 20%、40% 及 60%；各系列均製作純水泥之混凝土（即其爐石取代水泥量之百分比為 0%），以作為控制組。至於混凝土中粗骨材所佔有的體積百分比（ ϕ_G ）則固定為 40%，即水泥砂漿佔有的體積百分比（ ϕ_M ）為 60%；而骨材內之砂率則取 40%。為使各系列水膠比不同爐石取代量的各組配比

表 1 水泥與爐石之物化性質

物理性質	水泥	爐石
比重	3.13	2.86
細度 (cm^2/g)	3400	3860
燒失量 (%)	0.74	2.33
不溶殘渣	0.13	0.31
健度	0.165	-
抗壓強度	7 天 (MPa)	30.2
	28 天 (MPa)	37.8
化學性質	水泥	爐石
SiO ₂ (%)	19.8	32.20
Al ₂ O ₃ (%)	5.88	14.29
Fe ₂ O ₃ (%)	3.61	0.39
CaO (%)	40.34	40.34
MgO (%)	3.64	8.09
SO ₃ (%)	2.20	0.03
Na ₂ O (%)	0.35	0.20
K ₂ O (%)	0.78	0.32
S (%)	-	0.65

表 2 混凝土之試驗變數

水膠比 ¹ (W/B)	配比 編號	爐石取代 水泥比例	強塑劑 含量 ² (SP/B)	砂率 (S/A)	粗骨材 體積 (ϕ_G)
0.4	C4	0%	1.5%	40%	40%
	C4S1	10%			
	C4S2	20%			
	C4S3	30%			
0.5	C5	0%	0.8%	40%	40%
	C5S2	20%			
	C5S4	40%			
	C5S6	60%			
0.6	C6	0%	0.3%	40%	40%
	C6S2	20%			
	C6S4	40%			
	C6S6	60%			

註：

1：W/B = 水重量 / (水泥重量 + 爐石重量)

2：SP/B = 強塑劑重量 / (水泥重量 + 爐石重量)

均達到流動化之要求，且不致發生析離現象，強塑劑劑量的決定是關鍵所在。在本研究中，強塑劑之使用策略主要為相對增加水量，以提高混凝土坍度；經參酌試拌結果，水膠比 0.4、0.5 及 0.6 三個系列混凝土的強塑劑用量依序為 SP/B = 1.5%、0.8% 及 0.3%，而整個試驗之混凝土配比組成以及各組配比之空氣含量與單位重試驗結果如表 3 所示。

2.3 試驗方法與設備

拌和完成後之混凝土，即量測其空氣含量及單位重，並鑄造 $10\phi \times 20\text{cm}$ 之圓柱試體，一天後拆模，隨即置於飽和石灰水內養護。試體養護至試驗齡期（3、7、28 及 56 天）前一天先取出氣乾，以萬能抗壓試驗機參照 ASTM C39 規定進行抗壓強度試驗之試驗。另一方面，混凝土拌製完成後，也隨即進行質流試驗及坍流度試驗。從拌製完成開始起算的第 0 分鐘、第 30 分鐘及第 60 分鐘三個時間點，每一組混凝土配比均進行質流試驗。質流試驗採用自行研發的質流儀 (FHPCM) [9,10] (如圖 1 所示)，係利用轉桿在混凝土中旋轉時，讀取所需要的轉桿扭矩；試驗過程中，轉桿轉速之變化為階梯式，即轉桿轉速（每分鐘轉數）之變化為：50 → 20 → 10 → 5rpm，每一轉速均持續 30 秒鐘，而將最高轉速定為 50rpm，主要乃防止混凝土中骨材發生析離之情形。設計上，轉桿連接於同步馬達，當轉桿受力時，經由內部彈簧的變形，由計測器轉換記錄其扭矩值，並連接至電腦儲存。資料擷取系統將讀取的扭矩值傳送至電腦中儲存，每五秒讀取一筆資料，每一轉速記錄 6 筆資料，刪除掉不合理的資料後，取其平均值進行後續試驗結果分析工作。

坍度試驗採用一般常用的混凝土坍度試驗錐。混凝土在完成拌製後第 0 分鐘、第 30 分鐘及第 60 分鐘時，依照 ASTM C143-90 或 CNS 1176-A3040「混凝土稠度檢驗法」進行試驗，以量測其坍度。在坍度試驗之同時，依日本土木學會之坍流度試驗規定，隨即對坍落擴大的混凝土，於互成九十度的直徑方向上量測其自由擴散直徑，取其平均值為坍流度值。

三、試驗結果分析與討論

3.1 質流試驗結果

本文基於兩點試驗法 [11]，將試驗能量、應力與變形予以定量，並賦與其物理意義，利用自行研發的質流測儀探討所拌製混凝土的流變行為。各系列混凝土自拌和完成之時間起算，分別於 0、30 及 60 分鐘取混凝土試樣進行質流試驗。試驗結果顯示，質流測儀轉桿的轉速 N 與轉桿扭矩 T 呈現相當好的線性關係，可表示如下：

$$T = g + hN \quad (1)$$

其中 g 代表直線與轉桿扭矩軸之截距，而 h 為直線之斜率。利用式(2)、式(3)， g 、 h 分別則可轉換成降伏應力 τ_0 及塑性黏滯係數 μ [9]：

$$\tau_0 = \frac{g}{\left[\frac{2\pi R_b^3}{3} + \frac{4\pi H \ln(R_c/R_b)}{(1/R_b^2 - 1/R_c^2)} \right]} \quad (2)$$

表 3 混凝土配比以及空氣含量與單位重試驗結果

配比編號	W/B	SP/B	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	強塑劑 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	空氣含量 (%)	單位重 (kg/m ³)
C4	0.40	1.5%	174.2	435.4	6.5	0	701.3	1048	1.80	2396
C4S1	0.40	1.5%	174.2	391.9	6.5	43.5	701.3	1048	1.20	2411
C4S2	0.40	1.5%	174.2	348.3	6.5	87.1	701.3	1048	1.20	2417
C4S3	0.40	1.5%	174.2	304.8	6.5	130.6	701.3	1048	1.20	2422
C5	0.50	0.8%	193.0	386.0	3.1	0	701.3	1048	0.70	2398
C5S2	0.50	0.8%	193.0	308.8	3.1	77.2	701.3	1048	0.90	2385
C5S4	0.50	0.8%	193.0	231.6	3.1	154.4	701.3	1048	0.90	2389
C5S6	0.50	0.8%	193.0	154.4	3.1	231.6	701.3	1048	0.90	2371
C6	0.60	0.3%	207.6	345.9	1.0	0	701.3	1048	1.10	2357
C6S2	0.60	0.3%	207.6	276.8	1.0	69.2	701.3	1048	1.10	2343
C6S4	0.60	0.3%	207.6	207.6	1.0	138.4	701.3	1048	0.95	2345
C6S6	0.60	0.3%	207.6	138.4	1.0	207.6	701.3	1048	1.05	2346

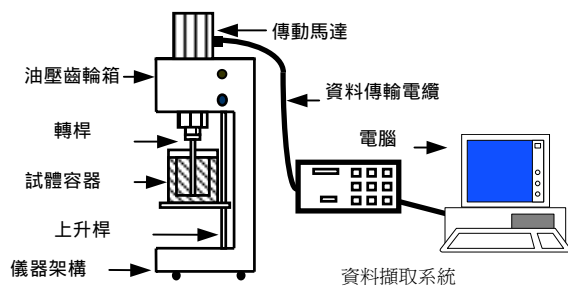


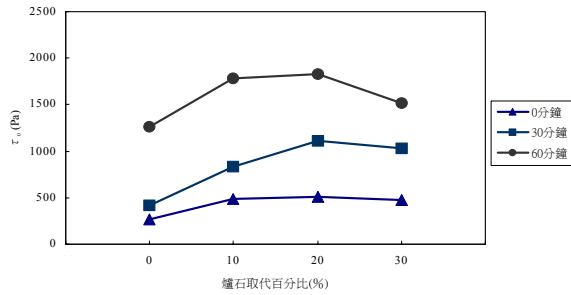
圖 1 質流儀示意圖

$$\mu = \frac{h}{\left[\frac{8\pi^2 H}{(1/R_b^2 - 1/R_c^2)} + \frac{\pi^2 R_b^4}{d} \right]} \quad (3)$$

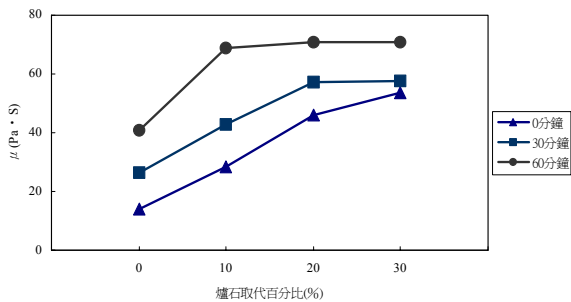
式中， R_c 為質流儀試體容器半徑、 R_b 為旋桿中心至葉片邊緣之距離、 H 為旋桿葉片之高度、 D 為旋桿葉片下緣至試體容器底部之距離。質流試驗結果如表 4 所示，茲分析討論如以下各節：

3.1.1 各系列混凝土之試驗結果

水膠比 0.4 系列各組配比於不同時間量測之質流參數 (降伏應力與塑性黏滯係數) 分別如圖 2 所示，由圖中可觀察出，三個時間點 (0、30 以及 60 分鐘) 所得數據顯示，降伏應力及塑性黏滯係數都隨著時間延長而遞增，這應該是新拌混凝土中，水化作用隨著時間持續反應的緣故。又從圖 2(a) 中各組的 30~60 分鐘之間，降伏應力有明顯的大幅成長看來，此系列水膠比之水化作用在拌和開始約 30 分鐘後，會顯著地增強。另外，觀察圖 2 可知，此水膠比之降伏應力，受到各組間不同的爐石取代率之影響，所量測的三個時間點都呈現著同一個趨勢，即在爐石取代率為 0~20% 時，各組新拌混凝土之降伏應力隨著爐石取代率之增加而增大，但是當爐石取代率超過 20% 以上時，其降伏應力便開始呈現下降趨勢。上述的現象代表著，水膠比 0.4 新拌混凝土之爐石取代率為 0~20% 時，各組新拌混凝土之初始流動性隨著爐石取代率增加而逐漸變差，但是當爐石取代率超過 20% 以上時，其初始流動性便開始有改善的趨勢。觀察圖 2(b) 可知，在各量測時間點大致都呈現塑性黏滯係數隨著爐石取代率的增加而增大之趨勢；換言之，以

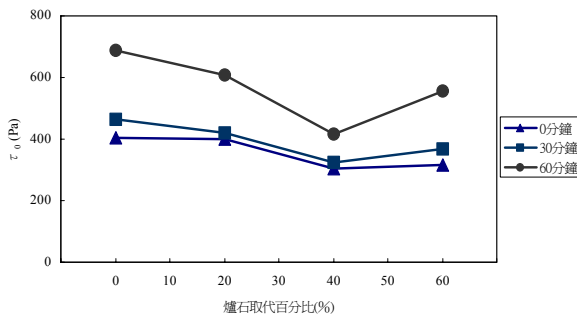


(a) 各組配比在不同時間點之降伏應力

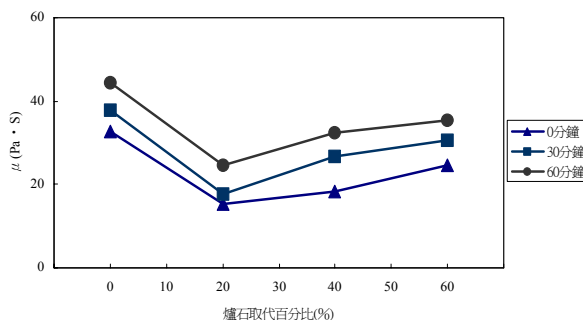


(b) 各組配比在不同時間點之塑性黏滯係數

圖2 水膠比 0.4 系列各組配比在不同時間點之質流參數



(a) 各組配比在不同時間點之降伏應力



(b) 各組配比在不同時間點之塑性黏滯係數

圖3 水膠比 0.5 系列各組配比在不同時間點之質流參數

爐石取代部分水泥時將使新拌混凝土之黏滯性增加，不過在取代率超過 20% 以上時，其黏滯性增加幅度趨緩。而爐

石使新拌混凝土之黏滯性增加之機理，應該是因為爐石的細度較水泥高的緣故。

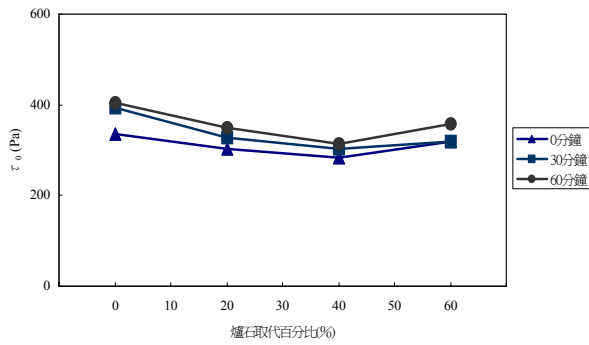
在水膠比 0.5 系列中，於不同時間量測所得之質流參數如圖 3 所示。從圖上可觀察出，本系列各組配比之降伏應力及塑性黏滯係數都隨量測時間之增加而增大。而從圖 3(a) 中各組的 30 ~ 60 分鐘降伏應力有明顯的成長看來，此系列水膠比之水化作用也是在拌和開始約 30 分鐘後會顯著地增強；另外，降伏應力隨爐石含量的增加而降低，且隨著時間的增長，此一趨勢更為明顯，一直到爐石取代率達 40 ~ 60% 時才反而升高。另由圖 3(b) 可知，此系列各組塑性黏滯係數在開始用爐石取代水泥後 (20%) 便下降，然後在爐石取代水泥 40%、60% 後逐漸上升；也就是在爐石取代水泥 20 ~ 60% 時，其塑性黏滯係數 (黏滯性) 隨爐石含量的增加而增大。此外，值得注意的是，C5 (爐石取代水泥 0%) 之塑性黏滯係數在各量測時間點都是最高的。這表示有爐石取代部分水泥之新拌混凝土，其黏滯性雖然隨爐石含量的增加而增大，但是基本上，在此系列水膠比爐石的添加卻使得黏滯性降低了，這顯示爐石保水性差而產生的排水功能發揮，可增加新拌混凝土中的游離水造成其黏滯性降低。

至於在水膠比 0.6 系列中，於不同時間量測之質流參數如圖 4 所示。從圖上可觀察出，在本研究各組之降伏應力及塑性黏滯係數，都隨量測時間增加而增大。由圖 4(a) 可知，降伏應力隨爐石含量的增加而降低，直到爐石取代率到達 60% 時才反而升高。這個現象和水膠比 0.5 系列之降伏應力隨爐石含量的發展趨勢相似，但並未如水膠比 0.5 系列一般，隨著時間的增加讓此一趨勢更為明顯，而是在 60 分鐘內緩慢穩定地增加。易言之，在 60 分鐘內的降伏應力都只有小幅成長，顯示拌和用水量的增加，已經延遲了水化作用的反應。另一方面，由圖 4(b) 可看出，此系列各組之塑性黏滯係數值並沒有和爐石取代率有明顯的關聯性，但可以肯定的是，此系列各組的黏滯性差異都不大。由此可見，用水量對新拌混凝土所造成之稀釋，使得爐石難以將其細度大的特性充分施展，故無法對新拌混凝土之黏滯性造成大幅影響。

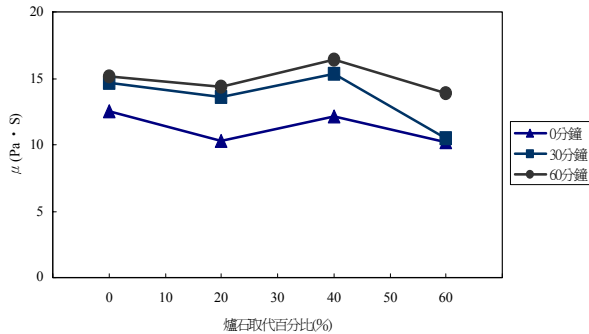
3.1.2 質流試驗之綜合分析

將三系列水膠比各組混凝土之質流試驗結果彙整如圖 5，由圖中可知，所測得的降伏應力約介於 250 ~ 2000Pa 之間，塑性黏滯係數則大致介於 10 ~ 70Pa·s。若再以水膠比細分質流試驗結果，對於 0.4 水膠比系列的混凝土，其降伏應力約介於 250 ~ 2000Pa 之間，塑性黏滯係數則大致介於 14 ~ 70Pa·s，兩質流參數所包含的範圍最廣，此原因在於水泥砂漿母體的黏滯性變化較大所致，且隨時間的變化也較為明顯；對於 0.5 水膠比系列的混凝土，其降伏應力約介於 300 ~ 700Pa 之間，塑性黏滯係數則大致介於 15 ~ 37Pa·s，而 0.6 水膠比系列的混凝土的降伏應力在 280 ~ 400Pa，塑性黏滯係數介於 10 ~ 15Pa·s 間，顯示此系列混凝土的質流參數範圍較窄，爐石取代比率的影响很小。

本質上，新拌混凝土之降伏應力隱含著其初始的流動界限，降伏應力愈高就愈難流動；而塑性黏滯係數愈高，



(a) 各組配比在不同時間點之降伏應力



(b) 各組配比在不同時間點之塑性黏滯係數

圖 4 水膠比 0.6 系列各組配比在不同時間點之質流參數

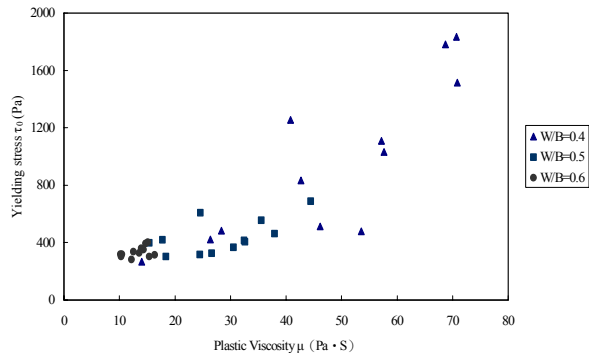


圖 5 各組配比降伏應力與塑性黏滯係數之散佈圖

則代表新拌混凝土之黏滯性也就愈大。綜觀上述三系列水膠比所量測出之質流參數(降伏應力、塑性黏滯係數)可知,拌和用水量的多寡,會影響新拌混凝土中爐石改善工作性的作用機理,拌和用水量不同會使爐石有不同的性能發揮。若從上述三系列水膠比之降伏應力發展來看,0.4 水膠比者其降伏應力會隨爐石取代百分比(0%、10%及20%)增加而增大;而0.5與0.6水膠比者之降伏應力,卻是隨爐石取代百分比(0%、20%及40%)增加而減少。

由上述關於各系列水膠比新拌混凝土降伏應力之描述得知,降伏應力隨爐石取代百分比之發展趨勢主要是由用水量所控制,也就是說,爐石取代比率對於新拌混凝土降伏應力有何影響,要看新拌混凝土中的用水量是否足夠。用水量不足(水膠比為0.4)時,爐石取代造成新拌混凝土

的初始流動性變差;用水量過多(水膠比為0.6)時,爐石取代將造成新拌混凝土的初始流動性變好,不過影響幅度小;用水量適當(水膠比為0.5)時,爐石取代可明顯使新拌混凝土的初始流動性變好,並在爐石取代比率40%時,使降伏應力降到最低。

而就上述三系列水膠比之塑性黏滯係數變化趨勢觀之,本實驗所規劃量測水膠比為0.4者,其塑性黏滯係數都是隨爐石取代比率的增加而增大,但是其它水膠比之塑性黏滯係數的發展卻不相同。水膠比0.5系列之塑性黏滯係數在各不同時間點的比較結果顯示,沒有爐石取代的C5有最高的塑性黏滯係數,另外三組(取代比率20%、40%及60%)之塑性黏滯係數則隨爐石之取代比率增加而增大。而就水膠比0.6之塑性黏滯係數的發展來看,並沒有隨爐石取代比率增加而產生明顯的趨勢,只有如圖4(b)所示的震盪走勢,但其實際數值的差異性不大,故可知爐石取代比率對於水膠比0.6之塑性黏滯係數的影響很小。

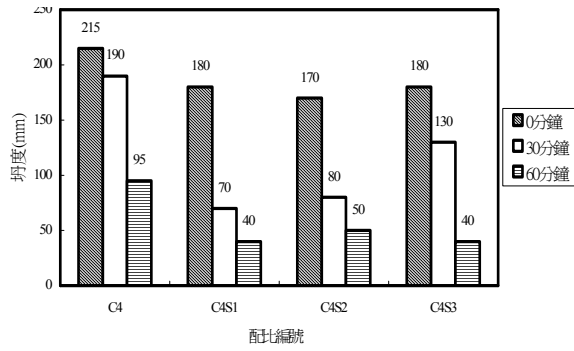
3.2 坍度及坍流度試驗

三系列混凝土之坍度及坍流度試驗結果顯示,坍度最高達215mm,最低則為40mm,而坍流度最高可達590mm。水膠比0.4系列不同爐石取代量的坍度試驗結果,如圖6(a)所示。各組配比在0分鐘的坍度以C4的215mm最高,其餘各組之坍度值則在180mm左右增減。從圖中可看出,最明顯的跡象是坍度隨時間損失的傾向頗大,且爐石的添加讓坍度有輕微的減少;不同爐石取代量的各組,其三個時間點的坍度增減量差異大的原因,應是爐石添加量不同造成的緩凝效果不一所致。而坍流度試驗結果如圖6(b)所示,有爐石取代的各組,其坍流度從30分鐘後都無變化,值得注意的是,從圖6可看出,爐石的添加對坍度及坍流度試驗結果的影響產生很相似的趨勢。

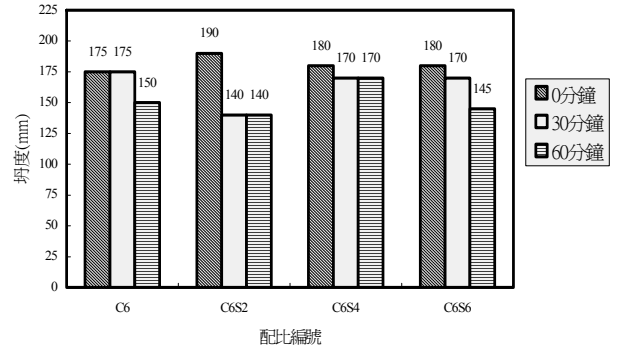
水膠比0.5系列坍度試驗結果如圖7(a)所示,顯然爐石的添加成功地提高坍度,爐石取代比率20%時,產生本系列最高的坍度,而後隨著爐石取代比率增加而逐漸降低,而且這樣的趨勢,在各量測時間點皆相同。再觀察圖7(b)之坍流度結果發現,坍流度的發展正如坍度一樣。造成這種現象的原因,應是有適量的拌和水量配合,爐石的摻加乃可提供增進工作性之效能。而圖7(b)中值得注意的是,有爐石取代的各組都在60分鐘後失去了坍流度。

水膠比0.6系列之坍度、坍流度試驗結果如圖8所示。本系列新拌混凝土中,由於有大量的拌和水,致使爐石的影響產生與前兩個系列不同的影響趨勢。這裡的坍度、坍流度在60分鐘內,並沒有明顯的隨時間增加而減少,都幾乎只有少量的變化,可見新拌混凝土中的游離水會與爐石一起加強緩凝作用的效果;易言之,拌和水量充足讓爐石取代率的影響變小。

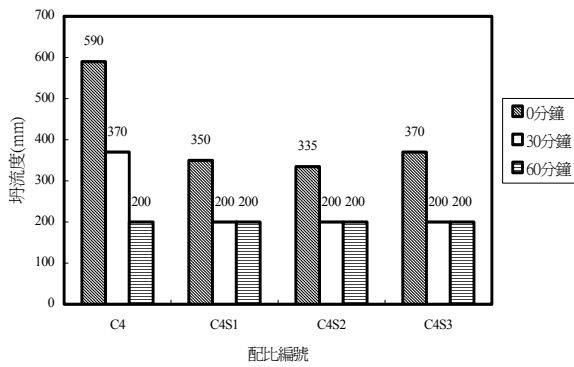
另外,由試驗結果可知,降伏應力以及塑性黏滯係數與各組之坍度、坍流度都有明顯的相關性。以水膠比0.4系列為例,如圖9所示,降伏應力與各組之坍度大致呈現反比的趨勢,而塑性黏滯係數與各組之坍流度也大致呈現反比的趨勢。換言之,新拌混凝土之降伏應力以及塑性黏滯係數愈高,其坍度以及坍流度就會愈低。



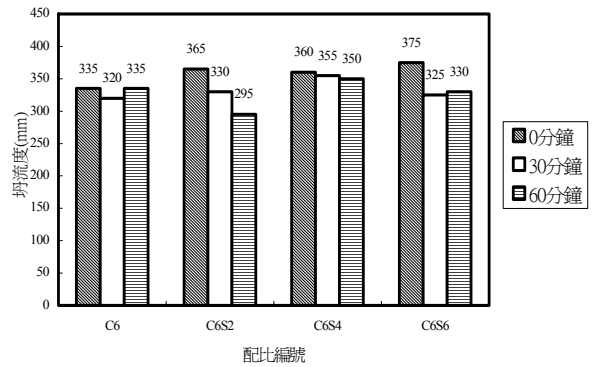
(a) 各組配比之坍度



(a) 各組配比之坍度



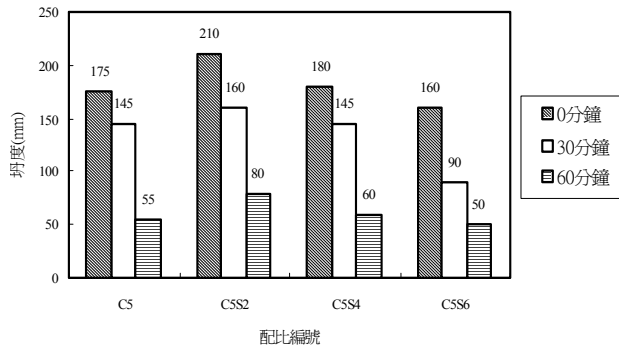
(b) 各組配比之坍流度



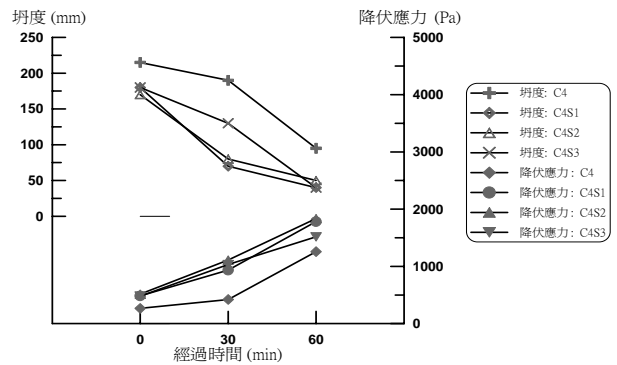
(b) 各組配比之坍流度

圖 6 水膠比 0.4 系列各組配比之坍流度試驗結果

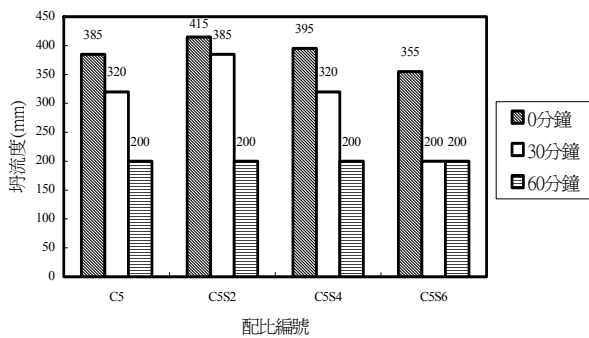
圖 8 水膠比 0.6 系列各組配比之坍流度試驗結果



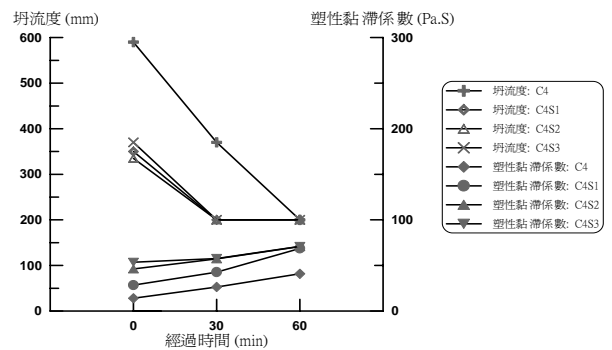
(a) 各組配比之坍度



(a) 降伏應力與坍度之關係



(b) 各組配比之坍流度



(b) 塑性黏滯係數與坍流度之關係

圖 7 水膠比 0.5 系列各組配比之坍流度試驗結果

圖 9 質流參數與坍度、坍流度之關係

3.3 抗壓強度分析比較

基於高流動性之考量而參加爐石時，對混凝土硬固後之力學性質，是否存在不良的影響因子，是爐石參加策略必須審慎評估之課題。本文為確認參加爐石之硬固混凝土力學性質，是否仍合乎高性能混凝土之相關規定，乃將拌和好後之混凝土澆置試體，於材齡 3、7、28 及 56 天時進行抗壓強度試驗。

水膠比 0.4 系列各組 28 天及 56 天抗壓強度皆大於控制組，且 28 天抗壓強度介於 55.86 ~ 62.23MPa 之間，皆大於高強度高性能混凝土之規定值 42MPa (6000psi)，而 56 天之抗壓強度則可達 63MPa 以上，如圖 10 所示。值得注意的是，因為爐石的緩凝作用，使得 C4S2 及 C4S3 之 3 天強度以及 C4S3 之 7 天強度均較控制組 C4 為低。

0.5 系列之水膠比較大，其試驗結果如圖 11 所示。觀察圖上結果得知，其 28 天抗壓強度除 C5S2 組外，皆低於控制組 C5 之抗壓強度 40.05MPa；而其 56 天齡期抗壓強度則只有 C5S6 這組低於控制組，其餘介於 35.66 ~ 40.18MPa 之間。再對照控制組之 3、7 天之抗壓強度，除 C5S2 很接近以外，其餘各組均低於 C5 組。由此觀之，爐石取代量影響了早期強度成長比率，也就是早期強度會隨取代量之增加而顯著降低。而 28 天以後的晚期強度，如表 4 所示，56 天抗壓強度之成長比率，則隨取代量之增加而增大，且成長比率 (100.5 ~ 106.1%) 除了 C5S6 以外，皆大於 C5 之成長比率 101.8%。但值得注意的是，除 C5S2 組以及 C5S4 之 56 天抗壓強度以外，各組於各齡期之抗壓強度皆低於控制組 C5，此為在高水膠比條件下，以爐石取代水泥造成混凝土中產生水化作用的能力降低，又鹼質不足，使卜特蘭反應無法充分發揮所致，所以必須審慎考量爐石的取代比率。

0.6 系列之水膠比更大，其試驗結果如圖 12。觀察圖上結果得知，其 28 天抗壓強度皆高於控制組 C6 之抗壓強度 32.72MPa，而其 56 天齡期抗壓強度也全都高於控制組，介於 33.21 ~ 40.79MPa 之間。不過若是再對照控制組之 3、7 天之抗壓強度，則發現其餘各組均低於 C6 組。本系列爐石取代量更明顯的延緩了早期強度成長比率，早期強度隨取代量之增加而降低，而 28 天後晚期強度發展情形，如 56 天抗壓強度成長比率 (100.7 ~ 102.5%)，除了 C6S4 以外，皆大於 C6 之成長比率。此外，值得注意的是，比較 C5S6 與 C6S6 之試驗結果可發現，C5S6 的 3、7 天抗壓強度優於 C6S6 者，但 C6S6 的 28、56 天抗壓強度卻優於 C5S6 者，值得注意。

3.4 最適爐石取代量之探究

爐石與強塑劑近來已成為流動性混凝土的基本組成材料，添加爐石可提升或改善混凝土的新拌與硬固性質，但是過量的使用爐石非但不能對混凝土有所助益，反而會有害於混凝土，而失去了參加爐石的原意。所以，應就不同的配比，參酌工作性與力學性質兩方面因素，選擇一合宜的取代量。

就水膠比 0.4 系列而言，在工作性方面若考慮坍度、坍流度及其降伏應力，以取代 30% 水泥量的 C4S3 在工作性上的表現最為優異；而力學性質上，C4S3 的表現也較好。

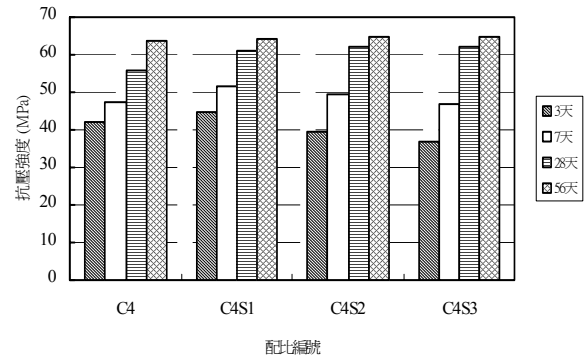


圖 10 水膠比 0.4 系列各組配比之抗壓強度

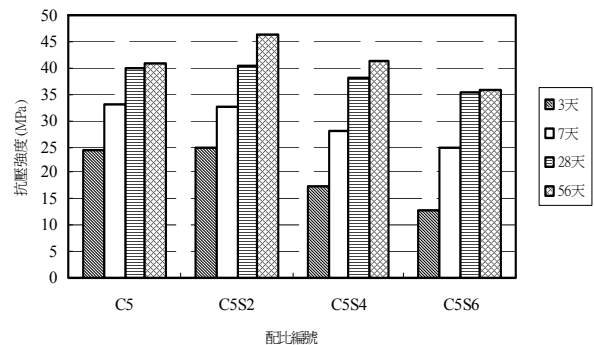


圖 11 水膠比 0.5 系列各組配比之抗壓強度

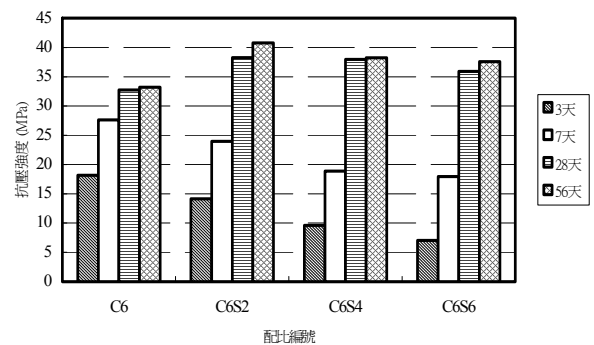


圖 12 水膠比 0.6 系列各組配比之抗壓強度

在實際應用上，若著重於工作性的優劣，建議爐石取代量為 30% 左右，但若強調混凝土的早期強度，以取代 10% 水泥的爐石取代量較佳，若以 28 天抗壓強度或長期強度為考量時，爐石取代量建議可達 30%。

對水膠比 0.5 系列而論，若考量高流動性，則在高水膠比限制條件下，本文試驗結果即顯示，C5S2 組之坍度與坍流度皆有良好的表現，所以建議爐石取代量為 20% 左右；若是考量其力學性質，要兼顧混凝土早期強度之發展時，建議爐石取代量仍為 20% 左右，而若著重於混凝土晚期強度之發展，則建議爐石取代量可以達到 40% 左右。

至於水膠比 0.6 系列，若和控制組 C6 比較，本系列之各組都有不錯之流動性，且各個流動儀器所量測出之結果其差異性也不大。所以在選擇爐石取代比率時，應該首要把注意力放在其力學性質上，不過本系列水膠比混凝土以爐石取代後，其早期強度明顯不如控制組，但 28 及 56 天

抗壓強度則都高於控制組。因此，若著重於本系列水膠比之晚期強度的話，爐石取代比率選擇 20% 可以有最佳的表現。

四、結 論

本文針對流動化混凝土添加爐石，探討其質流性質與相關性質。試驗配比設計為 0.4、0.5 以及 0.6 三種水膠比，主要皆以爐石取代水泥重量的比例作為探討變數。基於質流原理，探討爐石取代水泥用量比例對其質流參數（降伏應力 τ_0 及塑性黏滯係數 μ ）之影響，並輔以相關工作性試驗，以獲得爐石對混凝土在質流性質及工作性上之影響，再配合力學性質之試驗結果，建議出適宜的爐石取代水泥用量。綜合研究成果，提出下列結論：

1. 在水膠比較低的情形下， τ_0 及 μ 值大致隨爐石取代量之增加而提高，且對照組都高於控制組，並隨量測時間增長而增大；顯然此時爐石取代水泥量愈多，則新拌混凝土初始較不易流動，且黏滯性亦愈大。但在足夠的用水量配合下，斥水效應使骨材間的游離水增加，減低新拌混凝土之 τ_0 ，並適當保持其黏滯性，讓爐石發揮了減少拌和用水的功能。
2. 水膠比 0.4 系列混凝土之拌和水量較少，在初期（0 分鐘 ~ 30 分鐘）階段，各組 τ_0 及 μ 值的差異並不大；而在 30 ~ 60 分鐘階段，由於水化反應進行速率加快，使此階段各組之 τ_0 值急遽增加，可見時間對於 τ_0 值的影響較為明顯，而爐石取代量則對 μ 值的影響較大，因 μ 值主要受制於新拌混凝土中的水量變化以及爐石取代量的關係。
3. 水膠比 0.5 系列混凝土之拌和水量較多，其各組之降伏應力及塑性黏滯係數值之依時變化，也有與 0.4 水膠比相似的狀況。在初期（0 ~ 30 分鐘階段）階段，各組 τ_0 及 μ 值的差異並不大；在 30 ~ 60 分鐘階段，由於水化反應進行速率加快，使此階段各組之 τ_0 值急遽增加，而 μ 值仍主要受到拌和系統中的水量變化及爐石取代量之互動關係的影響。
4. 水膠比 0.6 系列混凝土之拌和水量更多，其各組配比 0 ~ 60 分鐘的 τ_0 及 μ 值差異並不大，而且因為拌和系統中之水量較多的緣故，而使爐石取代量對 μ 值之影響性大減。
5. 對水膠比 0.4 系列而言，若著重於工作性的優劣並以 28 天抗壓強度或長期強度為考量時，爐石取代量建議可達 30%。對水膠比 0.5 系列而論，若考量高流動性並兼顧混凝土早期強度之發展時，建議爐石取代量為 20% 左右；若著重於混凝土晚期強度之發展，則建議爐石取代量可

以達到 40% 左右。水膠比 0.6 系列各組都有不錯之流動性，所以在選擇爐石取代比率時，應該首要把注意力放在其力學性質上。

參考文獻

1. 行政院公共工程委員會主編，「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，民國 90 年 11 月出版。
2. Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 271–284 (1993).
3. Mindess, S., and Young, J.F., *Concrete*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 194–197 (1981).
4. ACI Committee 233, “Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete,” American Concrete Institute, Detroit (1996).
5. 黃兆龍，「爐石在混凝土的應用」，台灣營建中心 (1985)。
6. 沈得縣，「高爐熟料之卜特蘭反應機理及對水泥漿體巨微觀性質之研究」，台灣工業技術學院博士論文 (1991)。
7. 沈得縣，黃兆龍，「高爐熟料與飛灰對新拌水泥漿體水化機理影響之研究」，中國土木工程 D 系列，第 3 卷，第 4 期，第 333–338 頁 (1991)。
8. 張淳晏，「普通水泥添加高爐熟料水化熱機理之研究」，台灣工業技術學院碩士論文 (1987)。
9. Yen, T., Tang, C.W., Chang, C.S., and Chen, K.H., “Flow Behavior of High Strength High-Performance Concrete”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 413–424 (1999).
10. Tang, C.W., Yen, T., Chang, C.S., and Chen, K.H., “Optimizing Mixture Proportions for Flowable High Performance Concrete via Rheology Tests”, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 6, November-December, pp. 493–502 (2001).
11. Tattersall, G.H., and Banfill, P.F.G., *The Rheology of Fresh Concrete*, Boston: Pitman Books, pp. 136–191 (1983).

92 年 10 月 31 日	收稿
93 年 9 月 29 日	修改
93 年 11 月 1 日	接受