

以田口法規劃再生骨材混凝土抗壓強度之研究

蔡得時(Der-Shys Tsay)

中國科技大學建築研究所副教授

蕭添進(TIEN-CHIN HSIAO)

中國科技大學室設系副教授

呂建宏(Chien-Hung Lu) 喬守勇(Shou-Yung Chiao)

中國科技大學室設系碩士生

摘要

本研究主要以緻密配比法拌製再生骨材混凝土安全性質製程，應用田口實驗計劃法，配置因子 A 水膠比(0.37、0.40 及 0.43)、並以因子 B 再生混凝土細骨材取代天然細骨材，其取代率三種水準分別為(45 %、15 %及 30 %)、因子 C 再生混凝土粗骨材取代天然粗骨材，取代率三種水準分別為(0 %、50 %及 100 %)及因子 D 爐石取代水泥，取代率三種水準分別為(0 %、20 %及 40 %)作為製程輸入因子，研究上述四種控制因子，對 56 天齡期抗壓強度之影響、以評估再生混凝土安全性質的最佳製程；實驗結果影響再生混凝土安全性方面，以 56 天齡期抗壓強度顯示與因子 A 水膠比為 0.37、因子 B 再生細骨材取代率為 45 %、因子 C 再生粗骨材取代率為 0 %、因子 D 爐石取代率為 0 %有關，其中以因子 A 及因子 D 為較重要的控制因子；安全性的最佳製程 56 天齡期抗壓強度為 46.59 MPa。

關鍵字：田口法、再生骨材混凝土、抗壓強度、安全性

Study on Compressive strength of Recycled aggregates concrete Using The Taguchi Method

Abstract

Taguchi method is applied to four factors, water-to-cementitious-material ratio (W/C), recycled fine aggregate, recycled coarse aggregate and slag. Experimental variables include different W/C (water-cementitious material) ratios (0.37, 0.40 and 0.43), replacements of recycled fine aggregate (45%, 15% and 30%) , replacements of recycled coarse aggregate (RCA) (0%, 50% and 100%) and three replacement ratios of slag (0%, 20% and 40%) for the evaluation of Compressive strength of Recycled aggregates concrete. The results show that, the optimal mixture Compressive strength is found to be 0.37 of W/C, 45% of recycled fine aggregate, 0% of recycled coarse aggregate and 0% of slag that has the Compressive strength of 46.59 MPa.

Keywords : Taguchi method, Recycled aggregate concrete, Compressive strength

壹、前言

由於都市更新或使用年限已到、地震毀損等，迫使建物必須被拆除，因此產生了大量的混凝土廢棄物，又因經濟發展與建物更新的加速，而有日益增加的趨勢；另一方面，台灣本島土地狹小、國內天然資源有限，主要的材料如水泥、砂石、鋼鐵等在國建計畫大力進行下以漸形短缺，影響所及不容忽視；而經多數工程專家研究，再生混凝土具有寬廣的工程性質變化，已明確地提議適當的處理和再使用當作新混凝土骨材的可能性；若能有效的回收、利用建築廢棄混凝土碎化後充當骨材，將可使有限的資源再利用；不但解決廢棄混凝土的處理問題，又能降低環境衝擊、同時減緩天然有限資源的消耗；混凝土是所有建設中最普遍、最重要的材料，廢棄物減量及再利用、將是永續發展的重要議題，而必定成為國土資源在未來規劃環境保護及資源運用時的重要政策。

貳、文獻回顧

目前政府積極推動綠建築的永續發展，其中廢棄物減量指標為重要之課題，依[1]張清雲研究指出台灣地區平均每年產生約 726 萬 m³(1,162 萬公噸)之建築拆除廢棄物，其中廢棄混凝土塊約為 639 萬噸，而[2]詹雅竹研究指出國外對於營建拆除廢棄物回收再利用已行之多年，建築及拆除廢棄物主要包含：混凝土塊、瀝青、磚瓦、紙張、木材、金屬、玻璃等；由[3]邱建豪亦指出台灣每年產生大量營建廢棄物，其中以廢混凝土塊及磚瓦類佔大多數；又依 [4] Tam 研究指出三種預泡處理再生骨材方法，在浸泡處理後再生骨材的行為已被改進，經預泡處理後的再生骨材混凝土的彈性模數和抗壓強度、撓曲強度，其品質有明顯的改進；[5] Li 實驗結果指出水膠比是再生混凝土對齡期是最主要的影響，超細飛灰的含量對再生骨材混凝土的抗壓強度有正影響，而再生骨材含量百分比對再生骨材混凝土的抗壓強度有影響。

依[6]洪敏琮研究指出再生高性能混凝土之水灰比為0.3及強塑劑添1.2%時有最佳表現，因此選定水膠比分別為0.37、0.40及0.43三種水準；由[7] Tam研究指出二階段混合方法可改善再生骨材混凝土的抗壓強度和減小強度變異性，當再生粗骨材替代比例為0%至30%之間，30%再生粗骨材替代量時，由於再生骨材既有孔隙和預先混合的配比過程，使骨材堆積體內一些孔隙被填滿，形成一個較密集的混凝土，在28天的抗壓強度可提高31%，因此選定再生粗骨材取代量分別為再生粗骨材量的0%、50%、100%三種水準；由[8] Khatib 研究指出再生砂的調查包含直徑小於5公厘的壓碎混凝土和壓碎磚塊骨材，養護28天之後，含有壓碎混凝土或壓碎磚塊的混凝土的強度發展率比控制組高些，因此選定再生細骨材取代量分別為再生粗骨材量的45%、15%、30%三種水準；依[9]黃兆龍研究指出添加飛灰能夠改善混凝土工作性、耐久性及長期性質，添加爐石能夠改善混凝土流動性，提高再生骨材混凝土工作性；依[10]彭獻生研究指出飛灰與爐石等波索蘭材料應用於混凝土中，有改善工作性且增加長期抗壓強度之效果，試驗結果顯示，飛灰及

爐石取代水泥用量分別為30% 與50% 以下時，可有效增加再生混凝土長齡期之抗壓強度以及彈性模數，達到與普通混凝土相當之水準，且再生混凝土工作性不佳及坍度損失較大之缺點，亦可獲得大幅改善；由上述可知爐石的添加能夠改善混凝土流動性，可提高再生混凝土工作性；又依[11]符哲武研究指出採用抗壓強度為3000psi至5000psi之廢棄混凝土試體，在添加25%~30%之飛灰用以生產高流動化混凝土，其坍度及坍流度等工作度需求符合TAICON定義之高流動化混凝土，且其各種工程力學性質與採用天然粗骨材生產之高流動化混凝土差異不大；依[12] Tu研究顯示再生骨材亦可用來製作具有高流動性(超過180公厘坍度和大過550mm的坍流度)之高性能再生混凝土，因此選定爐石取代水泥用量分別為0%、20%、40%三種水準。

依[13、14]李輝煌及徐世輝研究指出一般俗稱的田口品質工程方法，主要是指穩健設計(Robust Design)，採用田口玄一博士在1949年提出運用直交表作實驗設計，此法可以最少的實驗，在有限的資源下進行製程最佳化。田口法的統計實驗設計係以系統方法，同時改變許多因子，以確認有關因子的主效果與交互效果，他將平均數視為信號，變異數視為雜音，而其比值信號雜音比(Signal to Noise Ratio，簡稱S/N比)做為分析改善的對象，用來衡量產品品質特性的一種統計量度，它可以表示製程或產品的水準及其雜音因素的影響程度，作為整合最佳化品質特性與最小化變異為單一指標。S/N比根據品質特性之望小、望大與望目特性三種，本研究S/N比採用望大品質特性，亦即S/N比大的設計就是最佳參數設計，當品質特性為越大越好時，如產品的壽命、強度、汽油每公升公里數等；S/N比望大品質特運算式如下[13]

$$S/N \text{ 比} = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

其中y為每一種實驗組合的n個實驗數據

參、實驗結果與分析

本研究以田口實驗計劃法規劃，配合緻密配比法拌製再生粗骨材混凝土製程，所採用的試驗材料有天然粗骨材、天然細骨材、再生粗骨材、天然細骨材、及飛灰、爐石、水泥、強塑劑等如表1至表3所示；其中並以水膠比及再生細骨材取代天然細骨材比率、再生粗骨材取代天然粗骨材比率、爐石粉取代水泥比率作為的輸入因子，如表4所示；而以56天齡期抗壓強度結果作為輸出因子，運用田口法的直交表作實驗設計，如表5所示，並以雜音因子S/N比最大的實驗組合設計就是最佳設計。

3.1 輸入因子的選擇

製程輸入因子有(1). 因子A水膠比具有三種水準分別為0.37、0.40及0.43；(2).

並以因子B因子再生骨材混凝土細骨材取代天然細骨材，其取代率三種水準分別為45 %、15 %及30 %；(3).而C因子再生骨材混凝土粗骨材取代天然粗骨材，取代率三種水準分別為0 %、50 %及100 % (4). D因子爐石取代水泥，取代率三種水準分別為(0 %、20 %及40 %)作為製程輸入因子，研究上述四種控制因子對56天齡期抗壓強度之影響，以評估再生骨材混凝土安全性質的最佳製程。

3.2 輸出因子的選擇

本研究為評估再生骨材混凝土的安全性，以量測再生骨材混凝土56天齡期抗壓強度為主要依據作為評估製程的輸出因子，以探討輸入因子對輸出因子的影響，並尋求安全性最佳化的製程組合。

3.3 以 56 天齡期抗壓強度為輸出因子的望大特性分析

以再生骨材混凝土 56 天齡期抗壓強度為實驗的輸出因子，應用田口法的望大特性，計算各製程條件的信號 / 雜音比(S/N 比)結果，如表 6 最右欄所示；A、B、C 及 D 各輸入因子 56 天齡期抗壓強度的信號 / 雜音比(S/N 比)差異範圍值，如表 7 所示；依次分別為 1.69 dB、0.94 dB、1.06 dB 及 2.44 dB，而表 7 中最後一列標示各輸入因子之 S/N 比影響程度，各輸入因子影響程度由大到小依序排名分別為 D、A、C 及 B。

依田口方法建議，選取較重要之一半控制因子 (即其中兩個因子)，亦即挑選可使 S/N 比值影響較大的前兩名水準 D、A，以進行交互影響分析，由表 7 觀察得知兩個 D、A 因子中，使得 S/N 比較高的水準分別為 A2 (31.83 dB)及 D1 (32.52 dB)，為識別 A、D 兩個別因子之間的交互作用影響程度，如表 8 所示，實驗編號 1 中因子 A1 及 D1 交互影響 S/N 比最大為 33.36 dB，比因子 A1 (31.71 dB)及 A2 (31.83 dB)與 D1 (32.52 dB)分別增加 2.65 dB 及 1.53 dB 與 0.84 dB，故因子 A1 及 D1 彼此有交互影響，可確認 A、D 兩因子間存在著交互作用；經表 8 的交叉分析，因子 A1、D1 各出現 1 次，表示因子重要性一致；由於表 7 的 A1 (31.71 dB)與交互影響之 A1D1 (33.36 dB)組合增加 2.65 dB 比 A2 (31.83 dB)增加 1.53 dB 的影響效果大，因此將 A1、D1 優選為配比主要因子，至於剩餘 B 及 C 次要因子水準之選擇，以製程方便性為原則，分別選擇因子 B 再生細骨材取代量之水準為 B1，因子 C 再生粗骨材量取代量之水準為 C1；綜合上述得知，影響再生混凝土安全性配比的因子為(A1)水膠比 0.37、(B1) 再生細骨材取代量 45 %、(C1) 再生粗骨材量取代量 0 % 及(D1) 爐石取代量 0 %，此配比因子組合與表 6 的實驗編號 1 一樣，不必進行確認驗證實驗，抗壓強度值為 46.59 MPa。

肆、結論

評估再生骨材混凝土的安全性，以 56 天齡期抗壓強度為輸出因子值採用望大特性分析，顯示再生骨材混凝土抗壓強度與因子(A1)水膠比為 0.37、因子(B1) 再生細骨材取代天然細骨材比率為 45 %、因子(C1) 再生粗骨材取代天然粗骨材比率為 0 %、因子(D1) 爐石粉取代水泥比率為 0 %有關，其中以因子(A1)水膠比為 0.37 及因子(D1) 爐石粉取代水泥比率為 0 %為較重要的控制因子，其抗壓強度為 46.59 MPa。

表 1 試驗材料表

材料	比重	吸水率(%)	細度模數	添加(取代)比例 (%)
水泥(Cement)	3.15	1	—	—
天然粗骨材	2.70	0.73	6.48	—
天然細骨材	2.68	1.30	3.12	$\alpha=0.186$; $\beta=0.672$ [緻密配比法] 求出
飛灰(Fly)	2.21	—	—	
爐石(Slag)	2.85	—	—	0 %、20 %、40 %
再生粗骨材	2.43	5.24	7.09	0 %、50 %、100 %
再生細骨材	2.53	10.04	2.57	45 %、15 %、30 %
強塑劑(SP)	1.19	—	—	—

表2 再生細骨材篩分析表

篩號	各篩上骨材殘留量		殘留於篩上骨材累積百分比(%)
	(Kg)	%	
3	0	0	0
3 / 2"	0	0	0
3 / 4"	0	0	0
3 / 8"	0	0	0
#4	0	0	0
#8	0.044	4.4	4.4
#16	0.166	16.6	21
#30	0.300	30	51
#50	0.346	34.6	85.6
#100	0.090	9	94.6
底盤	0.054	5.4	100
總計	1	100	細度模數(FM)=2.57

表3 再生粗骨材篩分析表

篩號	各篩上骨材殘留量		殘留於篩上骨材累積百分比(%)
	(Kg)	%	
3"	0	0	0
3 / 2"	0	0	0
3/ 4"	0.288	14.4	14.4
3 / 8"	1.596	79.8	94.2
#4	0.116	5.8	100
#8	0	0	100
#16	0	0	100
#30	0	0	100
#50	0	0	100
#100	0	0	100
底盤	0	0	100
總計	2	100	細度模數(FM)=7.09

表 4 製程因子與水準的設定

	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D
	水膠比	再生細骨材取代率	再生粗骨材取代率	爐石粉取代率
水準 1	0.37	45%	0%	0%
水準 2	0.40	15%	50%	20%
水準 3	0.43	30%	10%	40%

表 5 田口法製程因子的水準的配置直交表

實驗編號	實驗順序	水膠比	再生細骨材取代率	再生粗骨材取代率	爐石粉取代率	配比內容
1	9	0.37	45%	0%	0%	A1B1C1D1
2	5	0.37	15%	50%	20%	A1B2C2D2
3	1	0.37	30%	100%	40%	A1B3C3D3
4	6	0.40	30%	0%	20%	A2B3C1D2
5	4	0.40	45%	50%	40%	A2B1C2D3
6	8	0.40	15%	100%	0%	A2B2C3D1
7	3	0.43	15%	0%	40%	A3B2C1D3
8	2	0.43	30%	50%	0%	A3B3C2D1
9	7	0.43	45%	100%	20%	A3B1C3D2

表 6 56 天齡期抗壓強度試驗結果與 S/N 比

單位：Mpa & dB

實驗編號	實驗順序	配比編號	抗壓強度 (MPa)				S/N 比
			試驗(1)	試驗(2)	試驗(3)	平均值	(dB)
1	9	A1B1C1D1	45.85	47.81	46.12	46.59	33.36
2	5	A1B2C2D2	42.62	39.30	38.41	40.11	32.04
3	1	A1B3C3D3	30.40	30.30	31.38	30.69	29.74
4	6	A2B1C2D3	32.79	32.90	32.81	32.83	30.33
5	4	A2B2C3D1	43.57	47.35	47.04	45.99	33.23
6	8	A2B3C1D2	39.45	40.25	38.94	39.55	31.94
7	3	A3B1C3D2	30.11	28.27	29.40	29.26	29.32
8	2	A3B2C1D3	32.98	30.93	32.91	32.27	30.17
9	7	A3B3C2D1	39.21	30.77	37.73	35.90	30.95
平均						37.02	31.23

表 7 四個因子水準的 56 天齡期抗壓強度與 S/N 影響順序

單位：dB

因子 水準	A 水膠比	B 再生細骨材量取代	C 再生粗骨材量取代	D 爐石取代量
水準 1	30.71	31.00	31.82	32.52
水準 2	31.83	31.81	31.11	31.10
水準 3	30.14	30.88	30.76	30.08
差異	1.69	0.94	1.06	2.44
排序	2	4	3	1

表 8 56 天齡期抗壓強度製程因子 A 及 D 間的交互影響

單位：dB

	D1 爐石粉取代水泥率 0%	D2 爐石粉取代水泥率 20%	D3 爐石粉取代水泥率 40%
A1 水膠比 0.37	33.36	32.04	29.74
A2 水膠比 0.40	33.23	31.94	30.33
A3 水膠比 0.43	30.95	29.32	30.17

參考文獻

- 1、張清雲，“實驗計畫法應用於再生混凝土最適化配比設計之研究”，國立台灣科技大學營建系研究所碩士論文，(2001)。
- 2、詹雅竹，“再生混凝土及高溫後砂漿工程性質之研究”，國立臺灣科技大學營建工程系研究所碩士論文，(2005)。
- 3、邱建豪，“火害後混凝土性質變化之探討”，台國立中興大學土木工程研究所碩士論文，(2001)。
- 4、Tam, Vivian W.Y. ; Tam, C.M. and Le, K.N., “Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches” Resources, Conservation and Recycling, v 50, n 1, March, 2007, p 82-101.
- 5、Li, Jun; Yin, Jian; Zhou, Shiqiong and Li, Yijin, “Study on the strength of recycled aggregate concrete based on orthogonal experiment” China Civil Engineering Journal, v39, n9, September, 2006, p 43-46.
- 6、洪敏琮，“營建廢棄物應用於高性能混凝土之研究”，中原大學土木工程研究所碩士論文，(2005)。
- 7、Tam, V.W. Y., Gao, X.F. and Tam, C.M., “Quality improvement of recycled aggregate concrete,” Key Engineering Materials, Vol. 302-303, Environmental Ecology and Technology of Concrete, 2006, pp. 308-313.
- 8、Khatib, J.M. “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate” Cement and Concrete Research, v 35, n 4, April, 2005, p 763-769.
- 9、黃兆龍，“混凝土性質與行為”，詹氏書局，(2002)。
- 10、彭獻生，“波索蘭材料對再生混凝土強度及工作性之影響”，台國立中興大學土木工程研究所碩士論文，(1999)。
- 11、符哲武，“再生粗骨材用以生產高流動化混凝土之可行性與其工程性質研究”，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，(2000)。
- 12、Tu, T.Y., Chen, Y.Y. and Hwang, C.L., “Properties of HPC with recycled aggregates,” Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 5 ,2006., pp. 943-950
- 13、李輝煌，“田口方法品質設計的原理與實務”，高立圖書有限公司，(2004)。
- 14、徐世輝，“品質管理”，三民書局，(1996)。