

廢白土污泥再用於水泥混凝土之探討

王偉哲	黃雅蘭	吳宇婷	韓道昀	李增欽*
國立聯合大學土木與防災工程學系副教授	國立聯合大學土木與防災工程學系研究生	國立聯合大學土木與防災工程學系研究生	國立聯合大學土木與防災工程學系兼任助理教授	國立聯合大學土木與防災工程學系教授

摘要

白煙(White Carbon)是橡膠煉製所需之補強劑與填充劑，其製程所產生的廢白土污泥(White Carbon Sludge; WCS)，含有團聚狀之二氧化矽(SiO_2)奈米粒子，於廢棄過程可能對生態環境造成污染之疑慮。但因該廢白土污泥經 XRD 分析與卜作嵐活性指數試驗結果為一卜作嵐材料，甚值資源再用於混凝土。本文嘗試以四個控制因子(Control Factors)，三種配置水準(Levels)之 $L9(3)^4$ 直交法(Orthogonal Array)的實驗設計，進行水泥砂漿試體之灌鑄，量測其抗壓強度，並以 S/N 比求得抗壓強度相對最佳化之配比，進而灌鑄成廢白土污泥混凝土試體與純混凝土試體，進行抗壓強度、超音波量測及質量成長量測等工程性質試驗，試驗結果顯示，廢白土污泥混凝土之抗壓強度與純混凝土試體相近而略高，其他工程性質亦相近，若能應用於工程實務上，既能避免污染環境，又可減少水泥之生產，對地球永續發展應有助益，一舉數得。

關鍵詞：廢白土；奈米粒子；抗壓強度；混凝土；實驗設計

Reuse of White Carbon Sludge in Cement Concrete

Abstract

White carbon sludge (WCS), which is a by-product of the white carbon manufacturing process and an industry waste. Since WCS contains agglomerated nanoparticles, disposing of them has possibilities of polluting our ecological environment. Nevertheless WCS was confirmed as a pozzolanic material by XRD analysis and compression testing analysis, the feasibility of reuse in concrete is worth doing research. In this study, four control factors with three levels each in $L9(3)^4$ orthogonal array are considered to design this experiment. The compressive strength of each cement mortar samples is measured and the corresponding S/N ratios are calculated to investigate the optimal setting. The properties of WCS sludge-blended cylindrical concrete (SBCC) specimens were for compressive strength test, ultrasonic pulse velocity measurement, mass growth measurement, and other engineering properties test. The experimental test reveals that the compressive strength of SBCC specimens are comparable to the ordinary Portland cement concrete specimens in all curing age, the other engineering properties were similar. Hence, the WCS sludge can be converted to a useful resource by exempting the difficulty of disposal problems and appeal to the environmental sustainability.

Keywords: White carbon sludge; Nanoparticle; Compressive strength; Cement Concrete; Design of experiments

一、前言

白煙為製造橡膠的補強劑與填充劑，在混煉橡膠產品之製造過程，必須添加一定比例之白煙(二氧化矽)，使其產生化學反應，其橡膠、矽橡膠才有延展性、耐磨性、與抗疲勞性，且其密度、硬度與結合度之物理性質方能符合各種產品之需。而白煙之產製過程，其矽石、矽砂、白土與矽酸鈉等經溶解、矽酸鈉壓濾、反應、熱交換、化學凝結等過程會產生無機性污泥，該污泥通稱為廢白土污泥(White Carbon Sludge; WCS)，目前業界均將其視為事業廢棄物，委託清除掩埋處理，但因其含有團聚狀之二氧化矽(SiO_2)奈米粒子，於廢棄過程可能對生態環境造成污染之疑慮。茲因台灣橡膠產業每年所衍生的廢白土量可達數十萬公噸以上，其潛藏之問題不容忽視，目前廢白土是屬於一般事業廢棄物，大部分都採衛生掩埋的方式處理，倘若覆土不當則容易造成二次污染與安全問題。我國環保署與經濟部合作，於2002年共同擬訂廢棄物處理行動方案(WDA)，提出43項需減量或再生利用之工業廢棄物，其中包含碎屑鐵片、碎屑玻璃、碎屑木頭、水淬高爐石、廢陶瓷磚瓦、廢鑄砂與廢白土等[1]。有關廢白土之再生利用，王年福[2]曾將廢白土當成水泥生料添加於旋窯中煅燒，用以製作水泥之添加料使用。Mana, et al. [3]則將廢白土溶液中之重金屬鉛(Pb)予以吸附處理，經XRD、FTIR分析結果，其重金屬鉛之移除效果頗佳，Weng, et al. [4]曾以廢白土將廢污水中之重金屬銅(Cu)予以吸附處理，經分析評估結果其成本頗低而有效，其後Weng, et al. [5]再以廢白土將溶液中之重金屬鉻(Cr)予以吸附處理，此法成本很低，對廢污水中重金屬鉻之吸附極具價值。而Weng and Pan [6]則以廢白土吸附負離子染料(甲基藍；methylene blue)，試驗結果亦有良好之成效，廢白土可有效的將染料自廢水吸附，成本很低，就廢棄物再利用於處理染料廢水之可行性頗高。Ho, et al. [7]將下水污泥、廢白土與稻殼以6:2:2之比例予以混合，共同堆肥，以較短時間獲得成熟之堆肥肥料，成效良好。Antonis, et al. [8]將下水污泥、廢白土與沸石混合，探討其於堆肥前、中、後期之重金屬型態變化，觀察得鉻(Cr)由可交換態、碳酸鹽由結合態與有機結合態逐漸轉變為殘餘態。上述各文獻均著重於吸附重金屬之環境保護研究，與農業堆肥之資源再利用為主。但橡膠工業之廢白土則尚無任何文獻針對其資源再用之研究，本文嘗試以橡膠工業之廢白土取代部分水泥，以四個主要控制因子(Control Factors)，三種不同配置水準(Levels)之 $L_9(3)^4$ 直交(Orthogonal Array)實驗設計法，鑄成 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 之廢白土水泥砂漿試體，分別量測其抗壓強度，以S/N比分別獲得最佳化配比，進而灌鑄成廢白土污泥混凝土試體與純混凝土試體，進行各項試驗，期使未來橡膠工業所產生的廢白土可資源化再利用，而對行政院所推動之「永續發展行動方案」有所助益。

二、試驗材料與方法

2.1 試驗材料

- (1) 廢白土污泥(WCS)：取自苗栗縣某化工廠，比重0.23。
- (2) 水泥：台泥所出產波特蘭I型水泥，比重3.15，細度為 $3380 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。
- (3) 標準砂：合於ASTM C778之渥太華標準砂，比重2.63。
- (4) 細骨材：取自苗栗縣大安溪中游，其比重2.57，而細度模數為2.83，吸水率為

1.6%。

- (5) 粗骨材：取自苗栗縣大安溪中游，六分石面乾內飽和比重 2.59，細度模數 6.72，吸水率 1.0%；三分石面乾內飽和比重 2.57，細度模數 6.72，吸水率 1.3%。

2.2 試驗方法

2.2.1 掃描式電子顯微鏡觀察與能量頻譜分析(SEM/EDS)

掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope; SEM)，簡稱掃描電鏡 (SEM)。是一種利用利用高速電子束打擊樣品表面，並將所產生的各種訊號予以收集，利用收集所得的訊號進行成像或是定性與定量分析。並以附加裝置之 EDS(Energy Dispersive x-ray Spectrometry, INCAX- sight)進行試樣之微觀觀測與化學成分之分析。

2.2.2 XRD 分析

X 光繞射分析(x-ray diffraction analysis, XRD)係以日本製之 X 光粉末繞射儀 (Rigaku, D/Max-2200, Japan)分析試樣之晶相物種型態，其以 $\text{CuK}\alpha 1$ 放射 X 光，並以 2θ 掃描 $10^\circ \sim 80^\circ$ 之範圍；掃描速率以每秒 0.05° 之計數進行。X 射線粉末繞射分析儀主要依據 Bragg's Law，將 X 光束以 θ 角撞擊物質內部，因結晶物質之原子排列具一週期性之排列，不同物種之晶格特性相異，由內部 K 層電子所反射回之 2θ 角度形成該物種之特定波長，依此可判定其物種之型態。

2.2.3 實驗配置方法與程序

本文研究係為改善廢白土水泥砂漿試體，因其流動度遠低於純水泥砂漿試體，故嘗試添加 G Type(超性能減水緩凝劑)，先以田口法 $L9(3)^4$ 之直交表實驗設計，灌鑄成 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$ 之砂漿試體，實驗配置分別以增減水泥使用量 15% 變化，並依 ASTM 規範規定水泥使用總量之 85%、100% 與 115% 為控制因子 A 之三水準設計；並以廢白土添加 8%、10% 與 12% 之水泥用量為控制因子 B 之三水準設計；以 G Type 強塑劑以添加 5%、6% 與 7% 為控制因子 C 之三水準設計；再以水灰比 0.445、0.485 與 0.525 為控制因子 D 之三水準設計；以上四個控制因子各有三水準，採用 $L9(3)^4$ 之直交表實驗配置，如表 1

表 1 實驗設計之四個控制因子與三個水準

Level	Factor			
	A (cement)	B (WCS)	C (G Type)	D (W/C)
Level 1	85%	8%	5%	0.445
Level 2	100%	10%	6%	0.485
Level 3	115%	12%	7%	0.525

與表 2 所示，以九個樣本代替一般實驗需 $81(3^4)$ 個樣本[9,10]之全因子配置。經上述九個樣本之試驗結果進行分析最佳強度之配比組合，並進行該組合之驗證實驗，期以最少之實驗次數與最少之時間與資源，獲得相對最佳化之抗壓強度配比，進而灌鑄成混凝土試體，供資源回收業與營建材料業之參考。

表 2 L9(3)⁴ 直交表實驗配置樣本數

Sample No.	Factor			
	A	B	C	D
Sample 1	1	1	1	1
Sample 2	1	2	2	2
Sample 3	1	3	3	3
Sample 4	2	1	2	3
Sample 5	2	2	3	1
Sample 6	2	3	1	2
Sample 7	3	1	3	2
Sample 8	3	2	1	3
Sample 9	3	3	2	1

2.3 新拌混凝土試驗

2.3.1 坍度試驗

依據 CNS 1176 混凝土坍度試驗法，使用坍度錐來測定新拌混凝土之坍塌程度與流動性，可作為工地或實驗室在判斷新拌混凝土工作度好壞的品質依據。

2.3.2 單位重及空氣含量

試驗之目的量測新拌混凝土之單位重量與空氣含量(壓力法)來確認新拌混凝土單位重量及空氣含量(壓力法)是否與配比設計有過大的差異，若有太大差異則須修正調整配比，本試驗係依據 CNS 11151 及 CNS 9661 之規範規定進行。

2.3.3 氯離子含量檢測

本試驗使用 RIKIN 公司製造 CL-1B 型之水溶性氯離子含量測定儀，用以檢測混凝土中氯離子含量。

2.4 硬固混凝土試驗

2.4.1 抗壓強度試驗

本研究經由 L9(3)⁴ 直交法(Orthogonal Array)實驗，經 S/N 比所得之進行水泥砂漿試體之灌鑄，量測其抗壓強度，並以 S/N 比求得抗壓強度相對最佳化之配比；選定廢白土污泥(White Carbon Sludge；WCS)添加量為 12%，G Type 強塑劑添加量 1%，其中 WCS 試體依水泥用量 100%和 115%而分別命名為 WCS(100%-12%)試體、WCS(115%-12%)試體，與純混凝土試體(OPCC；水泥用量 100%)，依據 CNS 1232 規範規定之混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法，進行抗壓強度比較。

2.4.2 超音波脈衝波速量測

將齡期達 1 天、3 天、7 天、14 天、28 天、56 天與 91 天之圓柱試體由養護槽取出，並以乾布擦拭試體表面使其呈現面乾內飽和(S.S.D.)之狀態下，進行超音波波速量測(Ultrasonic Pulse Velocity Measurement)，本文試驗用之超音波量測儀，是以壓電

效應的方式產生彈性應力波，並將其導入介質中，量測在已知路徑中壓力波傳遞的時間，以所經路徑長度除以時間得到波速。測試儀器使用在混凝土試體上的操作方法，須先將試體之量測表面作適當之磨平處理，使其受測試之表面平整，並量取試體高度 D ，其次將儀器的發射器(Transmitter)與接收器(Receiver)以耦合液(Viscous coupling fluid)接合於試體之相對兩端，並稍施壓力以確保其緊密接合。發射器產生脈衝訊號時，儀器內之計時器亦同時啟動，當脈衝經過混凝土試體而傳遞至接收器時，計時器即停止並將經過時間顯示於顯示器上，因此可量測得圓柱試體之超音波波速(UPV)資料。

2.4.3 質量成長量測

將終凝後的圓柱試體拆模置於恆溫養生槽中進行養護，分別於 1 天、3 天、7 天、14 天、28 天、56 天與 90 天等養護齡期時，取出擦拭至面乾內飽和狀態，次將 OPCC 與 SBCC 圓柱試體進行質量量測，採用精密電子磅秤(HJ-21KE 21kg/0.1g, 新光電子株式會社, Japan)進行秤重，其最小秤重讀數為 0.1g，該圓柱試體一般重量約 3700 g，因此其量測精度約可達 1/37000，而可量測得試體質量之微量變化，亦可藉以探討混凝土質量成長趨勢及質量成長和抗壓強度之關聯性。

三、試驗結果與討論

3.1 SEM/EDS 觀測與分析

本試驗係透過 SEM 觀察廢白土之微觀狀態，於放大 1,000 倍後，試樣呈現不規則之團聚狀泥塊之形狀，其尺寸約為 1-20 μm ，如圖 1(a)所示。

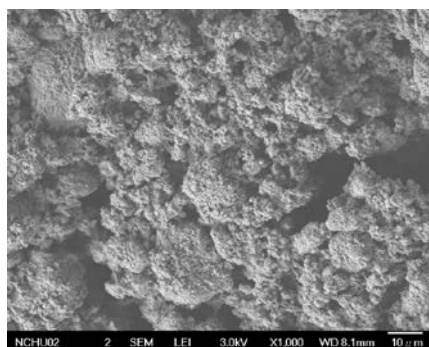


圖 1(a) SEM×1,000 微觀圖

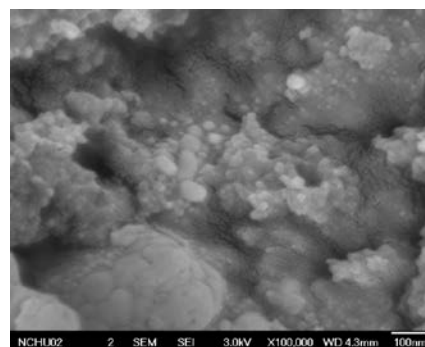


圖 1(b) SEM×100,000 微觀圖

圖 1 廢白土之 SEM 觀測

並以 EDS 進行化學成分之分析，其元素成分為 Si 與 O，化學成分為 SiO_2 ，如表 3 所示。將其放大以 100,000 倍觀測，則呈現其團聚狀顆粒係由更小之奈米球狀顆粒組成，如圖 1(b)所示。

表 3 廢白土 EDS 分析之元素表

元素	Si	O	Al
Atomic%	27.15	72.52	0.33

3.2 XRD 分析

廢白土經取樣烘乾後進行 X 光粉末繞射分析，所得圖譜如圖 2 所示，呈現一寬廣之帶狀圖形，並於 $18\sim 28^\circ$ 間有一彎曲之帶狀，此為典型之非晶質 SiO_2 之特徵，為一卜作嵐材料。

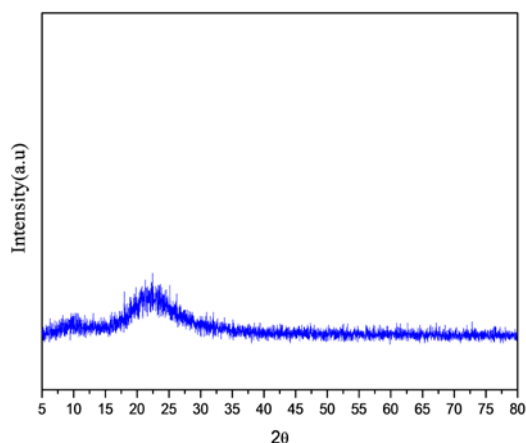


圖 2 XRD 分析圖譜

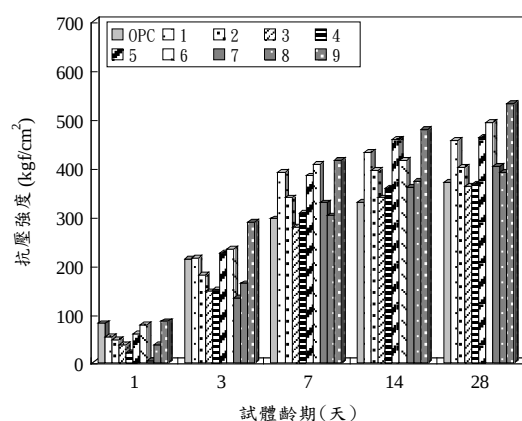


圖 3 抗壓強度成長柱狀圖

3.3 流度試驗

本試驗依 ASTM 規範取 $W/B=0.485$ 拌合成純水泥砂漿(OPCM)與各樣本的砂漿，經流度試驗結果，純水泥砂漿之流度值為 73.86%，而樣本 4，5，7 與樣本 8 之流度值均大於 OPCM，介於 91.22-126.88%之間，顯現其施工軟度之優越性，亦即添加強塑劑對流度之改進非常顯著，如表 4 所示。

表 4 各試樣之流度試驗值

	流度值(mm)	流度(%)
OPC	173.86	73.86%
樣本 1	134.58	34.58%
樣本 2	159.22	59.22%
樣本 3	175.87	75.87%
樣本 4	226.87	126.87%
樣本 5	191.22	91.22%
樣本 6	137.39	37.39%
樣本 7	226.88	126.88%
樣本 8	200.56	100.56%
樣本 9	156.47	56.47%

3.4 水泥砂漿抗壓強度試驗

依田口法 $L9(3)^4$ 直交試驗之四個控制因子(水泥、WCS、G Type 與水膠比)，三個水準(三種水泥用量、三種 WCS 用量、三種 G Type 強塑劑用量與

三種水膠比)，灌鑄成 9 種樣本，並加灌鑄一組純水泥砂漿為對照組(OPCM)進行比對，以尋求其可能之最佳強度配比。上述 10 種試樣進行抗壓強度試驗結果如圖 3 與表 5 所示，樣本 1、5、6 與樣本 9 於養護齡期為 1、3、7、14 與 28 天時，分別為 OPCM 強度的 66~131%、73~139%、96~138%與 105~145%之間；樣本 2、3 與樣本 4 於養護齡期 1、3、7、14 與 28 天時，分別為 OPCM 強度的 57~119%、46~103%與 24~108%之間；樣本 7 與樣本 8 於養護齡期 1、3、7、14 與 28 天時，分別為 OPCM 強度的 6~111%與 46~113%之間。上述各樣本中以樣本 9 之抗壓強度為最佳，惟其流度較 OPCM 為差，約為 OPCM 之 76.5%。如考慮樣本之流度值應比 OPCM 好，則以樣本 5 之抗壓強度較佳。

3.5 田口試驗分析

茲以上述田口法配置之 9 種樣本的實驗數據進行分析，依 28 天抗壓強度 S/N 比四個控制因子回應值，欲得最高強度，其控制因子 A(水泥)，以水泥用量次多之水準 2(A2)為最佳。控制因子 B(廢白土)，則以水準 3(B3)為最佳。控制因子 C(G Type)，為以水準 1(C1)較佳。控制因子 D(水灰比)，則以水準 1(D1)為最佳。綜合上述選出之最佳強度之配合為 A2B3C1D1，如圖 4 所示。

表 5 田口試驗之抗壓強度表

	抗壓強度(kgf/cm ²)				
	1 天	3 天	7 天	14 天	28 天
OPC	80.3 (100%)	212.5 (100%)	295.0 (100%)	329.2 (100%)	369.9 (100%)
樣本 1	53.4 (66%)	214.6 (101%)	389.2 (132%)	431.3 (131%)	454.6 (123%)
樣本 2	46.2 (57%)	180.2 (85%)	337.5 (114%)	393.2 (119%)	400.8 (108%)
樣本 3	36.8 (46%)	145.5 (68%)	277.1 (94%)	338.0 (103%)	361.8 (98%)
樣本 4	19.5 (24%)	149.5 (70%)	306.2 (104%)	356.9 (108%)	365.7 (99%)
樣本 5	58.7 (73%)	224.7 (106%)	382.8 (130%)	456.9 (139%)	461.0 (125%)
樣本 6	77.3 (96%)	232.0 (109%)	406.2 (138%)	413.7 (126%)	491.5 (133%)
樣本 7	4.4 (6%)	132.6 (62%)	327.6 (111%)	359.0 (109%)	401.9 (109%)
樣本 8	36.8 (46%)	161.9 (76%)	300.9 (102%)	370.7 (113%)	389.8 (105%)
樣本 9	84.7 (105%)	287.0 (135%)	414.7 (141%)	477.5 (145%)	530.6 (143%)

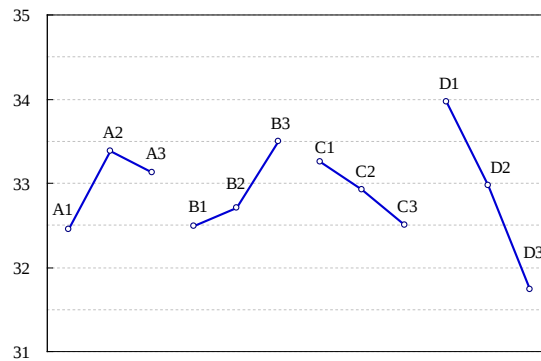


圖 4 田口實驗 28 天抗壓強度 S/N 比四個控制因子回應圖

3.6 新拌混凝土試驗結果

3.6.1 新拌混凝土坍度試驗

新拌混凝土需具有適當之工作度，使澆置灌漿、搗實等工作進行，而新拌混凝土坍度選用大於 15 cm 以上者，多半會添加化學藥劑(如高性能減水劑)用以控制混凝土之用水量，以免過多而產生粒料析離之現象，坍度選用過小則會造成施工上的困難，所以本試驗選用之設計坍度為 12.5 ± 2.5 cm，而實際量測所得之新拌混凝土坍度值如表 6 所示，表中顯示 WCS(100%-12%)(亦稱 WCSA2B3)及 WCS(115%-12%)混凝土(亦稱 WCSA3B3)，其坍度值分別為 10.5cm 及 11cm 小於 OPCC 混凝土坍度值 15cm，但皆符合設計範圍，尚不影響工作度，顯示添加 G Type 強塑劑有其效用。

表 6 新拌混凝土之坍度、單位重、空氣含量與氯離子含量試驗

試驗項目	新拌混凝土試驗(W/B=0.6)		
	OPCC	WCS(100%-12%)	WCS(115%-12%)
坍度試驗(cm)	15	10.5	11
單位重(kg/m ³)	2318	2277	2258
空氣含量(%)	0.8	1.5	1.5
氯離子檢測(kg/m ³)	0.035	0.084	0.078

註: (1). WCS(100%-12%)係指水泥用量 100%(與純混凝土相同)，廢白土用量為 12%，樣本簡稱 WCSA2B3。

(2). WCS(115%-12%)係指水泥用量 115%(比純混凝土多 15%)，廢白土用量為 12%，樣本簡稱 WCSA3B3。

3.6.2 新拌混凝土單位重

新拌混凝土之單位重量，係依 ASTM C138 試驗方法，量測新拌混凝土之單位體積重量，而本文所選定 OPCC、WCSA2B3 與 WCSA3B3 新拌混凝土單位重量量測結果如表 6 所示，顯現添加廢白土污泥(WSC)之混凝土比 OPCC 混凝土之單位重為小，其原因係為 WSC 之單位重遠小於水泥之緣故。

3.6.3 新拌混凝土空氣含量試驗

本文之新拌混凝土空氣含量試驗係依據 ASTM C231 方法進行量測，其試驗係將新拌混凝土依規定分層灌鑄於一定容積內，再將儀器內部與容器混

凝土存在的空間以水注滿，並使加壓氣室達一定壓力，再予以釋放壓力，致使水受氣室壓力而擠入新拌混凝土空隙中，其測得之值即為以壓力法所測得之新拌混凝土空氣含量。本試驗於配比設計時，依據 ACI 211.4 建議，當混凝土之骨材最大粒徑為 19 mm 時，其空氣含量建議以 2.0% 計算，而本試驗所量測之新拌混凝土空氣含量為 0.8% 至 1.5% 之間，由量測數據顯示添加 WCS，會使空氣含量增加，詳表 6 所示。

3.6.4 新拌混凝土氯離子含量實驗

新拌混凝土氯離子含量量測，係使用 RIKIN 公司製造之 CL-1B 型之水溶性氯離子含量測定儀，提供本研究快速量測得知混凝土中之氯離子含量，依據國內 CNS 3090 規範規定，一般非預力混凝土中氯離子含量不得大於 0.30 kg/m^3 ，而預力混凝土則不得大於 0.15 kg/m^3 ，若是氯離子含量為 0.3 kg/m^3 至 0.6 kg/m^3 時，鋼筋應作防蝕處理。本實驗量測所得之新拌混凝土氯離子含量，為 $0.035 \sim 0.084 \text{ kg/m}^3$ 之間，如表 6 所示，均遠低於法規之規定值，顯示添加 WCS 之新拌混凝土，並不會使新拌混凝土之氯離子含量增高。

3.7 硬固混凝土試驗結果

3.7.1 硬固混凝土抗壓強度

試驗結果顯示，WCSA2B3 與 WCSA3B3 之污泥混凝土試體於 3-91 天齡期之強度，均比 OPCC 混凝土試體之強度為高，亦即於 7、14、28、56 與 91 天齡期時之 WCS 混凝土試體強度，分別為 OPCC 混凝土試體強度之 111%~136%，如圖 5 所示，此成果與原先田口法於水泥砂漿試體之抗壓強度試驗結果相似。上述試驗成果顯現 WCS 污泥中之 SiO_2 奈米粒子，會填充於混凝土之孔隙中，使其組織結構更為緻密。同時該 SiO_2 奈米粒子因具極高之活性，亦會提升水泥之水化反應，進而改善混凝土之微結構[11-14]。爰因 SiO_2

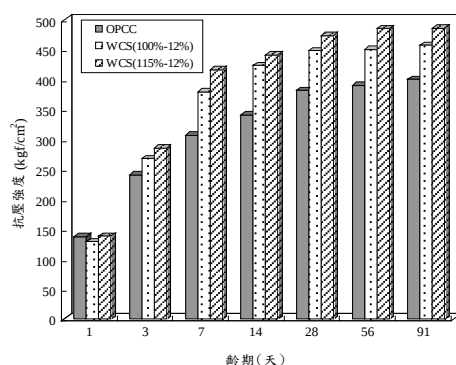


圖 5 混凝土試體各齡期之抗壓強度柱狀圖

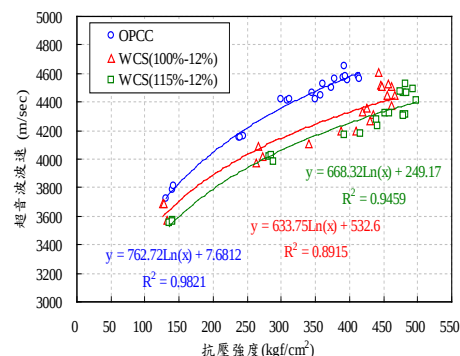


圖 6 混凝土試體之超音波波速與抗壓強度關係圖

奈米粒子會與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶體作用，形成 CSH 與 CASH 膠體，進而減少孔隙，同時則增加水泥漿膠體結構之密度。此種較少水泥用量卻有更大強度之成長現

象，即為卜作嵐反應之特徵，亦即 SiO_2 奈米粒子會催化卜作嵐反應，增加試體之抗壓強度。

3.7.2 硬固混凝土超音波波速之變化

本試驗係將混凝土圓柱試體灌鑄終凝後，將模具與試體中靜置於飽和氫氧化鈣水溶液中，於灌鑄後 23 小時，即移出恆溫水槽($23.0^\circ \pm 1.7^\circ\text{C}$)，迅速拆模並隨即將圓柱試體放入恆溫水槽中養護，於齡期達 1 天、3 天、7 天、14 天、28 天、與 56 天時，將混凝土圓柱試體由恆溫養護水槽取出依 ASTM C128-04 規定以擰乾之濕布擦拭試體表面，使其表面不具水之亮光為止，視為面乾內飽和狀態(Saturated-surface-dry, SSD)，再進行超音波波速量測(UPV Measurement)，並記錄各齡期下 WCSC 試體與 OPCC 試體之超音波波速(UPV)資料。由紀錄之資料計算得知 OPCC 試體之超音波脈衝波速 UPV 與 WCSA2 B3 與 WCSA3B3 污泥混凝土趨勢相近，因而再將試體抗壓強度與超音波波速間之變化趨勢繪製成圖 6，該圖呈現 WCSC 試體(實驗組)之抗壓強度與超音波波速呈正相關係，其迴歸分析之趨勢線彼此略呈弧形之平行線關係，其添加廢白土污泥(WCS)者，抗壓強度較高，且波速較快。其迴歸分析之 R^2 值介於 0.8915~0.9821 之間，整體而言，WCSC 與 OPCC 混凝土之強度與 UPV 之關聯性均佳。

3.7.3 質量成長變化之量測

本實驗將 OPCC 與 WCSC 混凝土試體，分別於養護齡期達 1、3、7、14、28、56 與 91 天時，各取 3 顆試體進行質量成長量測，為使各顆試體能於同一標準中進行質量成長比較，因而將其第 1 天齡期之質量正規化為 1.0000，而可得其他各齡期之正規化質量值，再將 3 顆試體之正規化質量取其平均值，而得平均正規化質量值。

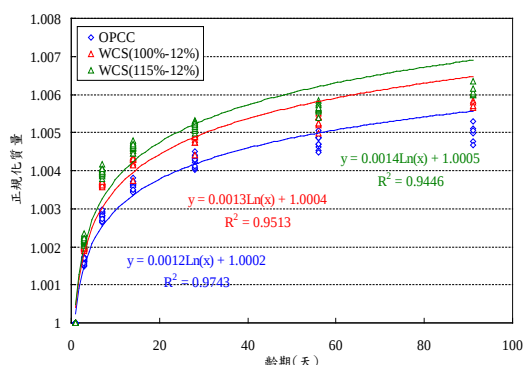


圖 7 WCSC 與 OPCC 混凝土正規化質量成長曲線圖

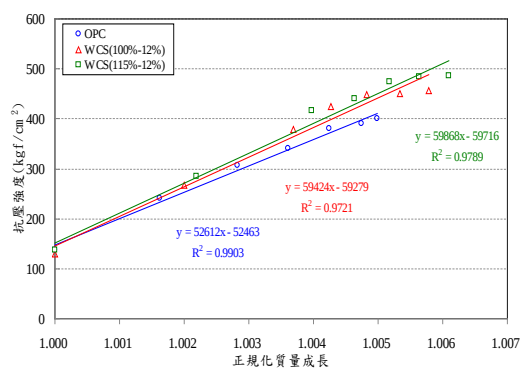


圖 8 WCSC 與 OPCC 混凝土抗壓強度與正規化質量成長關係圖

WCSC 與 OPCC 混凝土試體，其養護齡期於 1 至 91 天期間，試體面乾內飽和之平均正規化質量成長趨勢曲線，如圖 7 所示。其成長曲線類似強度成長圖，由圖可知 WCSC 混凝土之正規化質量，其線性迴歸曲線之 R^2 值介於 0.9446 與 0.9743 之間，顯示彼此密切相關，符合度良好。因質量之增加爰

於水化合物之增加，並填充於混凝土孔隙內，使其結構更為緻密，因而增強抗壓強度，圖 8 則為 WCSC 與 OPCC 混凝土正規化抗壓強度與正規化質量成長之關係圖，呈現正比之線性關係，其線性迴歸之 R^2 值介於 0.9721 與 0.9903 之間，顯示彼此密切相關，符合度良好。上述試驗成果似顯現卜作嵐反應之結果，比此互為佐證。

四、結論

本文研究係以田口法 $L9(3)^4$ 之直交表實驗設計，添加 G Type 強塑劑與廢白土，並調整水泥用量與水膠比灌鑄成 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$ 之廢白土砂漿試體，進行所有 9 種樣本之抗壓強度試驗，再依據其實驗結果分析得最佳強度之配比，其後依該配比再灌鑄成混凝土試體，進行抗壓強度等相關試驗，而獲致如下結論：

- (1). 摻合適量之廢白土污泥與 G Type 強塑劑，確能有效而大幅提昇水泥砂漿試體之流度與抗壓強度。
- (2). 以田口法 $L9(3)^4$ 直交法實驗結果，以樣本 9(A3B3C2D1) 之抗壓強度最佳，其 3 天齡期之強度即達純水泥砂漿試體（對照組）之 135%，而 7 天至 28 天之強度則介於 105% 至 145% 之間，成效甚為良好。經 S/N 比四個控制因子回應值之分析結果，其最佳強度配比則為 A2B3C1D1。
- (3). WCSC 混凝土之新拌性質，大都與 OPCC 差異不大，其空氣含量略多，氯離子含量略高，WCSC 混凝土單位重則比 OPCC 略輕，但其坍度則遞減，應予妥慎注意。
- (4). WCSC 混凝土之抗壓強度與 OPCC 試體相較，該試體於 3-91 天齡期之強度，均比 OPCC 混凝土試體之強度為高，亦即於 7-91 天齡期時 WCSC 混凝土試體強度，分別為 OPCC 混凝土試體強度之 111%~136%，其試驗結果呈現 WCS 污泥取代部分水泥用於混凝土之潛能與可行性。
- (5). 各種混凝土試體之正規化抗壓強度與正規化質量成長均呈現正比之線性關係，且線性迴歸之符合度極佳。
- (6). WCSC 試體之抗壓強度成長曲線，與超音波波速(UPV) 成長曲線均與 OPCC 試體彼此相近，顯示兩者量測值之相關性良好，似可佐證水化作用與卜作嵐反應，使質量增加，並填充於混凝土之孔隙間，使其結構組織越趨密實，因此超音波波速亦相對增加。

本文將有害事業廢棄物廢白土取代部分水泥使用於水泥砂漿與混凝土中，除了可免於掩埋後仍可能危害環境之虞，復因可替代水泥使用而可減少水泥之產量與 CO_2 之排放，一舉二得，對地球之永續發展應有助益。

誌謝

本文試驗承蒙國科會提供研究經費，敬致謝忱，研究計畫編號：NSC 101-2221-E-239-029-。又，本文試驗所需之廢白土污泥，由立順興資源科技股份有限公司提供，亦表謝意。

參考文獻

- [1] W.T. Tsai, Y.H. Chou, "Government policies for encouraging industrial waste reuse and pollution prevention in Taiwan", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 12, pp. 725-736 (2004).
- [2] 王年福,「水泥製程於資源再利用之研究」,碩士論文,國立中央大學土木工程研究所,桃園(2003)。
- [3] Mohamed Mana, Mohand Said Ouali, Marc Lindheimer, Louis Charles de Menorval, "Removal of lead from aqueous solutions with a treated spent bleaching earth", *J. Hazard. Mater.*, vol. 159, pp. 358-364 (2008).
- [4] C.H. Weng, C.Z. Tsai, S.H. Chu, Y.C. Sharma, "Adsorption characteristics of copper (II) onto White Carbon Sludge", *Separation and Purification Technology*, vol. 54, pp. 187-197 (2007).
- [5] C.H. Weng, Y.C. Sharma, S.H. Chu, "Adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions by White Carbon Sludge", *J. Hazard. Mater.*, vol. 155, pp. 65-75 (2008).
- [6] C.H. Weng, Y.F. Pan, "Adsorption of a cationic dye (methylene blue) onto White Carbon Sludge", *J. Hazard. Mater.*, vol. 144, pp. 355-362 (2007).
- [7] C.P. Ho, S.T. Yuan, S.H. Jien, Z.Y. Hseu, "Elucidating the process of co-composting of biosolids and White Carbon Sludge", *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 8280-8286 (2010).
- [8] Antonis A. Zorpas, Vassilis J. Inglezakis, Maria Loizidou, "Heavy metals fractionation before, during and after composting of sewage sludge with natural zeolite", *Waste Management*, vol. 28, pp. 2054-2060 (2008).
- [9] J. Wei, S.M.L. Nai, C.K. Wong, L.C. Lee, "Glass-to-glass anodic bonding process and electrostatic force", *Thin Solid Films*; vol. 462, pp. 487– 491 (2004).
- [10] J.H. Ting, S.H. Shiau, Y.J. Chen, F.M. Pan, H. Wong, G.M. Pu, C.Y. Kung, "Preparation and properties of sputtered nitrogen-doped cobalt silicide film", *Thin Solid Films*, vol. 468, pp. 155– 60 (2004).
- [11] Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou, "Microstructure of cement mortar with nano- particles", *Compos. Part B*, vol. 35, pp. 185-189 (2004).
- [12] Hui Li, Hui-gang Xiao, Jin-ping Ou, "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, pp. 435-438 (2004).
- [13] Byung-Wan Jo, Chang-Hyun Kim, Ghi-ho Tae, Jong-Bin Park, Kim CH, Tae GH, Park JB, "Characteristics of cement mortar with nano -SiO₂ particles", *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, pp. 1351-1355 (2007).
- [14] T. Ji, "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂", *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1943-1947 (2005).