

添加爐石粉與飛灰混凝土配比設計與水泥強度效益分析

湛淵源* 吳啟週**

關鍵字：修正 DMDA，矩陣法，CSE，爐石粉，飛灰

摘要

本文以修正 DMDA 及矩陣法設計爐石粉與飛灰混凝土配比(13 組)，經拌合後測試工作性及抗壓強度，計算水泥強度效益值(CSE)，評估在台灣綠建築 EEWB 系統減廢指標的適合性。結果顯示，矩陣分析法配合電腦快速計算，比傳統代數法簡潔、便利、效率。配比內束制拌和水量(150 kg/m³)摻入高性能減水劑，有助於工作性及抗壓強度。w/cm=0.40 與 28 天齡期，其中四組配比 C40(Type I 水泥)、M40(中細度爐石粉水泥)、H40(高細度爐石粉水泥)、A40II(傳統混凝土 Type II 水泥)，抗壓強度都大於 41 MPa。56 天 CSE 值分別為 55.8, 113.7, 115.7, 14.3 psi/kg，而水泥用量只用 A40II 配比的 25.9, 13.0, 13.0%。高卜作嵐比例(p/b)及 CSE 值，可符合 EEWB 綠建築系統的 CO₂ 減量與廢棄物減量指標。加拿大溫哥華曾舉辦 2010 冬季奧運，所有場館設施，採用低水量與飛灰和爐石粉配比通過 LEED 銀級以上認證可供參考。

Mix Design Method and Cement Strength Efficiency for Concrete Incorporating Slag and Fly Ash

Y. Y. Chen* Chi-Tsou Wu**

KEYWORDS: DMDA, Matrix Method, Cement Strength Efficiency (CSE), GBFS, Fly Ash

ABSTRACT

This paper mainly uses modified DMDA and the numerical matrix method to construct a concrete mixture with slag and fly ash. The workability and compressive strength were tested and the cement strength efficiency (CSE) were calculated to assess the aptness of waste reduction of the EEWB system for green building in Taiwan from the use of a trial batch. The results showed that the matrix analysis method with a computer quick calculation and a traditional algebraic method was simple, convenient, and efficient. Restricting the mixing water and adding a superplasticizer enhances the workability and compressive strength of concrete. With w/cm = 0.40, aged for 28 days, and the use of the following four different mixtures: C40 (Type I cement), M40 (medium fineness slag cement), H40 (high fineness slag cement), and A40II (traditional concrete Type II cement) results in a compressive strength greater than 41 MPa. After aging 56 days, the CSE values were 55.8, 113.7, 115.7, and 14.3 psi/kg, while the amount of cement used was only A40II 25.9, 13.0, and 13.0%. A high pozzolans ratio (p/b) and CSE values met the EEWB system indexes for CO₂ reduction and waste reduction. A potential reference case can be seen from the venues for the 2010 Winter Olympics held in Vancouver, Canada which used fly ash and slag concrete to achieve LEED Silver certification.

收件日期：2013.09.05；接受日期：2014.02.20

* 華夏科技大學建築系副教授(通訊作者 Email: cyy@cc.hwh.edu.tw)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Haw Hsia University of Technology, Taiwan

** 華夏科技大學室內設計系講師

臺灣科技大學營建研究所博士班研究生

Lecturer, Dept. of Interior, Haw Hsia University of Technology, Taiwan

PhD. Student, Dept. of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan

DOI: 10.3966/101632122014090089002



一、卜作嵐配方設計

混凝土配比設計，自 ACI 318-95 以來(ACI 318-08, 2008)，允許配比中加入除水泥外的礦物摻料(卜作嵐膠結材)(黃兆龍，2002；黃兆龍及湛淵源，2001)，這些材料絕大部分來自工業廢棄回收物再生利用-如爐石粉、飛灰、矽灰等(財團法人中興工程顧問社，2007)，經國內外長期科研及實務應用，證實不僅可取代水泥與細粒料外，可改善新拌、硬固等性質，對耐久性、體積穩定性(水化熱)等等有增強和強化功能，再加上高性能減水劑，降低水膠比及拌合水量(Chang, et al., 2001；Chang, 2004；Chen, et al., 2013)，更可塑造永續性建築(Malhotra & Mehta, 2005)；現代混凝土由原四相-水、水泥、砂、石，變成六相組合-水、水泥、礦物摻料、化學摻料、砂、石(湛淵源，1999；劉娟宏及宋少民，2011；陳俊村，2012)。本土化礦物摻料來自於煉鋼廠廢棄爐渣，水淬後研磨成細粉，可取代水泥；由燃煤電廠煙囪因環保要求嚴格回收灰塵，可用於取代砂及水泥；這些廢棄物都是經過高溫(>1000°C)轉變成玻璃質含高量矽、鋁、鈣、鐵質等，可添加至混凝土，在水泥三相圖(CaO-SiO₂-Al₂O₃)上，爐石粉(主成分 CaO, SiO₂)與水泥接近，屬黏結材(cementitious material)，F 級飛灰(主成分 SiO₂, Al₂O₃)與水泥相隔遠，屬卜作嵐膠結料(黃兆龍，2003)；爐石粉與飛灰使用前，按規範 ACI 318-08(2008)與營建署 402-94(內政部營建署，2011)等版本，必須經配比設計並且驗證所需性能，核可後據以使用，是屬於一種性能規範(Performance Specification)(黃兆龍及湛淵源，2001；Siddique, 2004；Hannesson, et al., 2012；Proske, et al., 2013)，一切性質與行為必須經過配方設計及印證所需性能後，方可依配比及施工規定嚴謹使用，小心養護。

The New York Times 在 2009/04/14 報載(Science & Technology, 2009)，美國橫跨密西西比河州際公路 I-35W 的 The St. Anthony Falls Bridge 重建，是一座低碳足跡的混凝土橋，橋面箱型梁、橋墩、基礎的 p/b(爐石粉、飛灰、矽灰)值為 25~85%，CSE 值 20~70

psi/kg 間，是一座典型的節能減碳的橋樑。加拿大溫哥華主辦 2010 冬季奧運會，為呼應國際奧會場館應具備節能減碳、永續使用要求，所有運動競賽硬體設施皆採用飛灰與爐石粉-本土卜作嵐混凝土興建，分別通過國際綠建築 LEED 銀級、黃金級、白金級等標章認證(Hooton & Weir, 2010)；國內綠建築 EEWB 標章系統認證，在減廢指標中定有非金屬再生建材使用率優待倍數，依使用高爐水泥、高性能混凝土、再生面磚、地磚等比率加總，同時高爐水泥取代率(CCR 或 CWR 質)，及 56 天 CSER 值(Cement Strength Efficiency Ratio, CSER)等優惠計算數據(內政部建築研究所，2009)。國內外傳統混凝土膠結材採單相((水泥)與兩相(水泥+一種卜作嵐)組合，國內更採用三相(水泥+爐灰混合)以取代水泥方式設計配比，只用一般經驗法則及強度為基準(詹文宗，1988；湛淵源，1999)。本文配比設計參考修正 DMDA 為基礎，同時採用代數法(Su, et al., 2001；Chang, 2004；Khokhar, et al., 2010)與數值矩陣法(葉淑通，2005)，推演配方計算，並於試驗室拌製混凝土，依據 ASTM C143 測試新拌工作度及 ASTM C31 與 C192 和 C617 測試各齡期(7 天至 1 年)強度發展，計算水泥強度效益 CSE 值(鄭凱維，2002；湛淵源等，2013)，評估 CSE 值及爐石粉和卜作嵐使用率，是否符合台灣 EEWB 綠建築系統減廢指標-非金屬再生建材使用率規定(湛淵源等，2010)。

二、配比設計

傳統 DMDA 緻密配比基本配方邏輯是採用飛灰與細粒料混合堆疊緻密後，再與粗粒料充填得到最大鬆容重作為骨架，推求水泥量時，添加 5% 爐石粉取代水泥，整體配比飛灰量遠遠高過爐石粉(Chang, et al., 2001；Tu, et al., 2006；Bui, et al., 2013)。本文為大量使用工業廢棄回收物-高爐石粉，並呼應國內 EEWB 綠建築系統，在減廢指標上以大量摻用爐石粉，並在非金屬廢棄回收物上鼓勵使用爐石粉，並有優惠措施，而進行修正 DMDA 配比設計與相關試驗分析。本文乃以緻密配方架構下，先以高細度爐石粉(5561



cm²/g)和 F 級飛灰進行充填，最後決定爐石粉:飛灰=2:3(取代量 $\Psi=40\%$)作為設計值；再以 40%爐石粉及飛灰混合料，與不同細粒料充填，得出混合料比例($\alpha=20\%$)，有最大的鬆容重；爾後將爐石粉、飛灰、細粒料最佳比率在與不同比例粗粒料，進行單位重試驗，得出最後最適比例($\beta=55\%$)，組合粒料所得到最大鬆容重 U 為 2150 kg/m³，依 w/cm(0.28~0.40)及拌合水量(150 kg/m³)決定總膠結料和水泥用量，最後採用 Type I(編號 C 組)、中細度爐石粉水泥(1:1，編號 M 組)、高細度爐石粉水泥(1:1，編號 H 組)、Type II 水泥(傳統混凝土，編號 A40II)等調製不同配方；本文以 Ψ 、 α 、 β 、 U_{agg} 、 w/cm 、 $U_{concrete}$ (含有無陷入空氣 V_a)等 6 個公式，求出水(含 SP 劑)、水泥、爐石粉、飛灰、細粒料、粗粒料，分別用 W_w 、 W_c 、 W_{SL} 、 W_{Flyash} 、 W_{Sand} 、 W_{Stone} 符號表示，基本設計及材料參數，見表 1。配比計算可分成代數法及矩陣法，分述如下：

2.1 代數法(Algebra method)

Step 1：配比材料基本試驗

由中聯爐石粉資源化公司供應水泥(Type I 及 Type II，台泥)、中細度與高細度爐石粉水泥、高細度爐石粉、飛灰；依據 ASTM 與 CNS 規範進行配比材料基本試驗，含水泥物化性質；粒料(高屏溪)基本性質、粒料堆積測試找出最佳值；爐石粉與飛灰性質測試；化學摻料 SP(啟欣公司)性質試驗等，見表 2 及表 3。

Step 2：決定設計強度及所需工作性

依據資料庫參考，Age-w/cm-fc，建立所需強度、齡期之 w/cm 為若干；或建立三種以上水膠比，在不同齡期測試抗壓強度及所需性能，建構配比設計資料庫，供未來應用。本研究以後者執行高爐石粉添加量測試工作，作為日後參考應用。工作性初始坍度與坍流度設定在 240mm、500mm 以上，同時測試 60 分鐘的工作性變化。

Step 3：修正 DMDA 設計方法詳(鄭凱維，2002；湛淵源等，2010；Chen, et al., 2013)

$$V_{Agg.} = 1 - n \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^4 \frac{W_i}{\gamma_i}\right) \quad (1)$$

則所需粒料如式 2 至式 5，

$$W_{Slag}^* = \frac{\alpha \cdot \Psi}{1 - \alpha} \cdot W_{Sand}^* \quad (2)$$

$$W_{Flyash}^* = \frac{\alpha \cdot (1 - \Psi)}{1 - \alpha} \cdot W_{Sand}^* \quad (3)$$

$$W_{Stone}^* = \frac{(1 - \beta)}{\beta \cdot (1 - \alpha)} \cdot W_{Sand}^* \quad (4)$$

$$W_{Sand}^* = \frac{V_{Agg.}}{\left(\frac{\alpha \cdot \Psi}{1 - \alpha}\right) \cdot \frac{1}{\gamma_{Slag}} + \frac{\alpha \cdot (1 - \Psi)}{1 - \alpha} \cdot \frac{1}{\gamma_{Flyash}} + \frac{1}{\gamma_{Sand}} + \frac{1 - \beta}{\beta \cdot (1 - \alpha)} \cdot \frac{1}{\gamma_{Stone}}} \quad (5)$$

則，水泥用量如式 6，

$$W_{Cement} = \frac{V_p - (W_{Flyash} + W_{Slag}) \cdot \frac{\lambda}{\gamma_{Water}}}{\frac{\lambda}{\gamma_{Water}} + \frac{1}{\gamma_{Cement}}} \quad (6)$$

而水用量則為式 7，

$$W_{Water} = \lambda \cdot W_{Cement} \quad (7)$$

Step 4：決定 SP 劑量與最後用水量

由於不同廠牌高性能減水 SP 劑的物化性能迥異、及本土材料不同而異，實際使用量應經過試拌決定之，初始工作性以能達到坍度 240mm、坍流度 500mm 以上，且無目視析離與浮水。

爐石粉、飛灰、石子、砂、水泥、水可用式 2 至式 7 表示，配比計算結果如表 4。表 4 係假設空氣含量 $V_a=0\%$ ，且一般水泥、中細度爐石粉水泥、高細度爐石粉水泥比重有差異，同一 w/cm 使用相同合成水泥量取代，單位體積量不足，與實驗室及工程使用條件有所出入，無法真正反映混凝土各相材料組合，只能近似表示材料配方概況，為能落實符合現況，本研究以數值矩陣法建立設計參數各項材料間關聯性，同時以往實際經驗測得空氣含量值($V_a=1.5\%$)，及 ACI 211.1(ACI Committee 211, 2010)建議標稱粒料最大粒徑所設計混凝土的空氣含量值分三種情況輸入解得

表 1 混凝土配比基本資料與設計參數

λ	ψ	α	β	γ_{Water}
0.28~0.40	40%	20%	55%	1000 kg/m ³
γ_{Cement}	γ_{Slag}	γ_{Flyash}	γ_{Sand}	γ_{Stone}
3140 kg/m ³	2870 kg/m ³	2650 kg/m ³	2630 kg/m ³	2640 kg/m ³
$\gamma_{MFCement}$	$\gamma_{HFCement}$	V_V	V_a	W_{Water}
3060 kg/m ³	3050 kg/m ³	0.271 m ³	0~2.5%	150 kg/m ³

表 2 膠結料基本性質

Component	Type I Cem.	Type II Cem.	MSCem.	HSCem.	MGBFS	HGBFS	Fly Ash
SiO ₂ (S)	21.5	22.4	-	26.8	34.0	-	51.3
Al ₂ O ₃ (A)	4.8	4.6	-	9.2	14.7	-	24.3
Fe ₂ O ₃ (F)	3.1	4.9	-	1.9	0.3	-	6.2
S+A+F	29.4	31.8	-	37.8	49.0	-	81.8
CaO	62.4	60.7	-	53.1	42.0	-	6.3
MgO	2.9	3.1	-	5.4	6.3	-	1.6
SO ₃	2.1	2.0	-	0.8	0.4	-	0.6
K ₂ O	0.7	0.5	-	0.4	0.3	-	-
Na ₂ O	0.2	0.1	-	0.4	0.2	-	-
C ₂ S	21.8	37.5	-	-	-	-	-
C ₃ S	55.3	39.4	-	-	-	-	-
C ₃ A	7.6	3.9	-	-	-	-	-
C ₄ AF	9.5	14.8	-	-	-	-	-
LOI, %	-	-	-	-	0.33	-	4.9
Fineness, cm ² /g	3622	3420	3866	4602	4302	5651	3101
G _s	3.14	3.13	3.06	3.05	2.87	2.88	2.65
AI ₇ , %	-	-	-	-	89.2	101.7	-
AI ₂₈ , %	-	-	-	-	115.4	139.7	-

註:1.MSCem.→Medium fineness slag cement(中細度爐石粉水泥)，水泥:中細度爐石粉=1:1(重量比)。
 2.HSCem.→High fineness slag cement(高細度爐石粉水泥)，水泥:高細度爐石粉=1:1(重量比)。
 3.LOI→Loss of ignition(燒失量)。AI₇→7d activity index(7 天活性指數)。AI₂₈→28d activity index (28 天活性指數)。

表 3 粗、細粒料基本性質

Properties	Sand	Stone
Gravity (SSD)	2.63	2.64
Gravity (OD)	2.62	2.63
Absorption (%)	2.2	1.1
D _{max.}	2.36	12.5
Fineness of modulus	2.82	6.08
Bulk density for the dried rodding, kg/m ³	1644	1536
< #200 content (%)	4.29	0.76

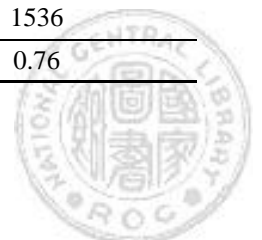


表 4 代數法配比計算結果

Batch	w/cm	Water	Cement	Slag	Flyash	Sand	Stone	Cem. Type
C28	0.28	150	319	87	130	869	888	Type I
M28	0.28	150	319	87	130	869	888	MFCem.
H28	0.28	150	319	87	130	869	888	HFCem.
C32	0.32	150	245	90	135	897	917	Type I
M32	0.32	150	245	90	135	897	917	MFCem.
H32	0.32	150	245	90	135	897	917	HFCem.
C36	0.36	150	187	92	138	918	939	Type I
M36	0.36	150	187	92	138	918	939	MFCem.
H36	0.36	150	187	92	138	918	939	HFCem.
C40	0.40	150	141	94	140	936	957	Type I
M40	0.40	150	141	94	140	936	957	MFCem.
H40	0.40	150	141	94	140	936	957	HFCem.
All40	0.40	219	548	0	0	642	795	Type II

1. MFCem.:Medium Fineness Slag Cement ; Type I:MFCem.=1:1(In weight)。
2. HFCem.: High Fineness Slag Cement ; Type I:HFCem.=1:1(In weight)。
3. Va=0%。

配方；且高爐石粉水泥(中、高細度)和 Type I 及 Type II 型水泥密度不同，在比較水泥量與拌合水量固定外，由於密度差異所造成單位體積不一致，在數值矩陣法須加以修正。

2.2 矩陣法(Matrix method)

配比設計除可以用數學代數法解得所需材料外，也可以採用矩陣建構材料需求方程式，運用數值方法及電腦運算快速解得所需材料，方法如下：

Step 1：配比材料基本試驗

同代數法。

Step 2：決定設計強度及所需工作性

依據 DMDA 所建立資料庫，Age-w/cm-fc，依所需強度、齡期之 w/cm 為若干；或建立三種以上水膠比，在不同齡期測試抗壓強度及所需性能，建構配比設計資料庫，供未來應用；自 ACI 318-95(1995)規範問世後，允許配方內添加卜作嵐材料，傳統依水灰比理論建立設計參數不一定適用，而建議採用卜作嵐材料後，應依配比試拌決定添加量及所需齡期和 w/cm 的關係，配比試拌變成混凝土工業的經常性業務。本研究以後者進行高爐石粉添加量測試工作，作為日後

參考應用。工作性初始坍度與坍流度設定在 240mm、500mm 以上，無目視泌水及析離，同時測試 60 分鐘的工作性變化。

Step 3：建立材料相關方程式

數值法總漿量 V_p 及最小粒料空隙體積 V_v 和代數法有所差異， V_p 指除粗、細粒料外統稱膠結漿量， V_v 則指粗、細粒料緻密所組成剩餘的空隙體積。

$1m^3$ 混凝土體積是總漿量 V_p 、粗細粒料用量 $V_{agg.}$ 、及陷入混凝土內空氣量 V_a 組合而成，如式 8 所示：

$$V_p + V_{Agg.} + V_a = 1 \quad (8)$$

將 $V_p = V_v + S \cdot t = nV_v$ 帶入式 8，

$$V_{Agg.} = 1 - nV_v - V_a$$

則如式 9，

$$\frac{W_{Sand}}{\gamma_{Sand}} + \frac{W_{Stone}}{\gamma_{Stone}} = 1 - nV_v - V_a \quad (9)$$

而， $V_p = nV_v$ ，則將膠結漿用量轉成體積，如式 10 所示：

$$\frac{W_{Water}}{\gamma_{Water}} + \frac{W_{Cement}}{\gamma_{Cement}} + \frac{W_{Slag}}{\gamma_{Slag}} + \frac{W_{Flyash}}{\gamma_{Flyash}} = nV_v \quad (10)$$

令粒料比例，見式 11：



$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{W_{Stone}}{W_{Stone} + W_{Sand} + W_{Slag} + W_{Flyash}}; \\
 P_2 &= \frac{W_{Sand}}{W_{Stone} + W_{Sand} + W_{Slag} + W_{Flyash}}; \\
 P_3 &= \frac{W_{Flyash}}{W_{Stone} + W_{Sand} + W_{Slag} + W_{Flyash}}; \\
 P_4 &= \frac{W_{Slag}}{W_{Stone} + W_{Sand} + W_{Slag} + W_{Flyash}}; \\
 U_{Agg.} &= W_{Stone} + W_{Sand} + W_{Slag} + W_{Flyash}
 \end{aligned} \tag{11}$$

整理可得式 12 至式 15：

$$\frac{W_{Stone}}{P_1} = \frac{W_{Sand}}{P_2} = \frac{W_{Slag}}{P_3} = \frac{W_{Flyash}}{P_4} = U_{Agg.} \tag{12}$$

則，

$$W_{Slag} = \frac{P_4}{P_1} W_{Stone}, \quad W_{Slag} - \frac{\alpha\beta\psi}{(1-\beta)} W_{Stone} = 0 \tag{13}$$

則，

$$W_{Flyash} = \frac{P_3}{P_1} W_{Stone}, \quad W_{Flyash} - \frac{\alpha\beta(1-\psi)}{(1-\beta)} W_{Stone} = 0 \tag{14}$$

則，

$$W_{Sand} = \frac{P_2}{P_1} W_{Stone}, \quad W_{Sand} - \frac{\beta(1-\alpha)}{(1-\beta)} W_{Stone} = 0 \tag{15}$$

令水膠比 $\lambda = \frac{W_{Water}}{W_{Cement} + W_{Slag} + W_{Flyash}}$

則如式 16：

$$W_{Water} - \lambda W_{Cement} - \lambda W_{Slag} - \lambda W_{Flyash} = 0 \tag{16}$$

Step 4：建立矩陣計算式

將式 9、式 10、式 13、式 14、式 15、式 16 整理如式 17 矩陣所示：

$$\begin{bmatrix}
 \frac{1}{\gamma_{Water}} & \frac{1}{\gamma_{Cement}} & \frac{1}{\gamma_{Slag}} & \frac{1}{\gamma_{Flyash}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\gamma_{Sand}} & \frac{1}{\gamma_{Stone}} \\
 1 & -\lambda & -\lambda & -\lambda & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{\alpha\beta(1-\psi)}{1-\beta} \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{\alpha\beta\psi}{1-\beta} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{\beta(1-\alpha)}{1-\beta}
 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
 nV_v \\
 1 - V_a - nV_v \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 W_{Water} \\
 W_{Cement} \\
 W_{Slag} \\
 W_{Flyash} \\
 W_{Sand} \\
 W_{Stone}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 W_{Water} \\
 W_{Cement} \\
 W_{Slag} \\
 W_{Flyash} \\
 W_{Sand} \\
 W_{Stone}
 \end{bmatrix} \tag{17}$$

則各項材料經計算如式 18：

$$\begin{bmatrix}
 W_{Water} \\
 W_{Cement} \\
 W_{Slag} \\
 W_{Flyash} \\
 W_{Sand} \\
 W_{Stone}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \frac{1}{\gamma_{Water}} & \frac{1}{\gamma_{Cement}} & \frac{1}{\gamma_{Slag}} & \frac{1}{\gamma_{Flyash}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\gamma_{Sand}} & \frac{1}{\gamma_{Stone}} \\
 1 & -\lambda & -\lambda & -\lambda & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{\alpha\beta(1-\psi)}{1-\beta} \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{\alpha\beta\psi}{1-\beta} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{\beta(1-\alpha)}{1-\beta}
 \end{bmatrix}^{-1}
 \times
 \begin{bmatrix}
 nV_v \\
 1 - V_a - nV_v \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix} \tag{18}$$

式 18 為本文含爐石粉與飛灰混凝土配比計算矩陣通式，經電腦計算(以高斯消去法或 EXCEL 2010 版本)解得反矩陣，並與已知矩陣聯合求得各項材料矩陣，將表 1 至表 3 材料及設計參數輸入，如表 5 至表 8。

2.3 配方設計參數分析

本研究混凝土配比設計基本及設計參數，帶入後代數法計算結果，見表 4；基本資料，以數值矩陣法將參數逐筆帶入電腦計算，最後結果見表 8；以 $w/cm=0.28$ 為例， $V_a=0、1.5、2.5\%$ 空氣含量帶入計算，表 7 顯示 $V_a=0\%$ 時，以代數法與矩陣法相差在 0.1% 以內； $V_a=1.5\%$ 時，若拌合水量束制在 150 kg/m^3 時，其他材料均改變用量，混凝土單位重減少變成 2404 kg/m^3 ； $V_a=2.5\%$ 時，若一樣拌合水量束制在 150 kg/m^3 時，則混凝土單位重減少變成 2377 kg/m^3 ，隨著陷入空氣含量增加，所有材料逐漸減少而變輕，陷入空氣多寡與配比材料組成及施工確實等有關，尤其提升 1% 空氣量將損失 5% 的強度，不得不慎。以矩陣法計算採用各種水泥、 $V_a=1.5\%$ 、拌合水量 150 kg/m^3 時為基準，用實際材料密度解得各配比材料用量。比較表 4 與表 8，陷入空氣含量由 0% 增加至 1.5% 時，各配比水泥用量稍有增加，在拌合水量不變下，其他材料都降低，尤其是用量高的粗、細粒料，主要因為陷入空氣量將排擠，佔據粗、細粒料位置，使得用量顯著減少，整體單位重降低，但設計現況接近使用條件。



表 5 C28(w/cm=0.28)輸入正矩陣參數

正矩陣					
Water	Cement	Slag	Flyash	Sand	Stone
0.001	0.00031847	0.00034843	0.0003774	0	0
0	0	0	0	0.000382	0.00038023
1	-0.28	-0.28	-0.28	0	0
0	0	1	0	0	-0.0977778
0	0	0	1	0	-0.1466667
0	0	0	0	1	-0.9777778

表 6 C28(w/cm=0.28)逆矩陣計算結果和已知矩陣

逆矩陣						已知矩陣	
467.8586633	-7.1823691	0.53214134	-0.0140174	-0.02755	0.00274136	0.33159127	=n*Vv
1670.923797	-350.09529	-1.6709238	-1.0500621	-1.0984	0.13362416	0.66840873	=1-Va-n*Vv
0	129.777588	0	1	0	-0.0495334	0	
0	194.666381	0	0	1	-0.0743001	0	
0	1297.77588	0	0	0	0.5046657	0	
0	1327.27078	0	0	0	-0.5065919	0	

表 7 C28(w/cm=0.28)輸出矩陣與文獻值比較

輸出矩陣	Va=0%	Va=1.5%	Va=2.5%	文獻	已知條件	
Water	150	150	151	150	$\alpha=$	0.20
Cement	320	325	329	319	$\beta=$	0.55
Slag	87	85	84	87	$\Psi=$	0.40%
Flyash	130	127	125	130	$\lambda=$	0.28
Sand	867	848	835	869	$Vv=$	0.271m ³
Stone	887	867	854	888	$Va=$	0%
單位重	2442	2403	2377	2443	$n=$	1.224

表 8 數值矩陣法配比計算結果

Batch	w/cm	Water	Cement	Slag	Flyash	Sand	Stone	Cem. Type
C28	0.28	150	325	85	127	848	867	Type I
M28	0.28	150	326	84	127	845	864	MFCem.
H28	0.28	150	326	84	127	844	863	HFCem.
C32	0.32	150	251	88	131	875	895	Type I
M32	0.32	150	252	87	131	873	893	MFCem.
H32	0.32	150	252	87	131	873	892	HFCem.
C36	0.36	150	194	90	135	897	917	Type I
M36	0.36	150	194	89	134	895	915	MFCem.
H36	0.36	150	194	89	134	894	915	HFCem.
C40	0.40	150	148	91	137	914	934	Type I
M40	0.40	150	148	91	137	912	933	MFCem.
H40	0.40	150	148	91	137	912	933	HFCem.
All40	0.40	219	548	0	0	642	795	Type II

1. MFCem.:Medium Fineness Slag Cement ; Type I:MFCem.=1:1(In weight)。
2. HFCem.: High Fineness Slag Cement ; Type I:HFCem.=1:1(In weight)。
3. Va=1.5%。



三、卜作嵐比例與 CSE 值分析

3.1 非金屬材料

台灣 EEWH 綠建築評估系統減廢指標中，CO₂ 減量與廢棄物減量兩項次指標，通過比率不到 15% 以下 (湛淵源等，2010)，顯示在綠建築申請案中建築商、設計監造和施工等單位，基於對減廢指標缺乏自信心、繁瑣，不重視環保等所致。系統中規定使用耐久性設計之高性能混凝土，及添加非金屬回收物-爐石粉與卜作嵐，有優惠措施係數 6，且混凝土水泥效益與傳統混凝土效益(訂為 10 *psi/kg*)，比值 CSER 越大越有利，且如同 ACI 318-95(1995)之後規範鼓勵採用性能規範，大量使用本土化非金屬廢棄回收物-爐石粉與飛灰，取代極高污染水泥用量，和高性能混凝土以強化建築物最基本構造材料的耐久性，EEWH 系統減廢指標極具有節能減碳、耐久永續、環境親合等等優勢。

本研究所設計，各種 *w/cm*，添加爐石粉混凝土 (Type I)，中、高細度爐石粉水泥配方，水泥用量僅為 Type I 配比的一半，各配比水泥與各卜作嵐和總體卜作嵐材料比例，見表 9，以 C 組水泥量比例，從 C28=60.2% 到 C40=39.2%(矩陣法)，而中、高細度爐石粉水泥 M(H)28=30.2% 至 M(H)40 =19.5%，是 C 組的二分之一；而 M28 與 H28 水泥用量不及總膠結料三分之一，M40 及 H40 則只有五分之一不到，但是各齡期抗壓強度與 C 組相似；使用高細度爐石粉水泥

配比，有些時候優於使用 Type I 水泥；以 *w/cm*=0.40，早期傳統混凝土水泥量設計值著實太高，目前可往下修正用量。爐石粉比例，矩陣法 C 組在 15.8%(C28) 至 24.3%(C40)之間屬中度用量，而 M(H)28 至 M(H)40 介於 46.1% 至 43.9% 屬高用量比例；飛灰用量，無論何種配比，則在 23.6% 33.6% 間，屬於高飛灰比例；最終卜作嵐用量比例，C 組在 39.5% 到 60.8%，M(H) 組介於 69.8% 至 80.5% 之間，越高水膠比，比例越大，超過內政部營建署(2011)頒布結構混凝土施工規範 402-94，與國際 ACI 318-08 (2008) 規範，卜作嵐用量比例 50% 以下，容許值之規定；然而，採用性能規範 (Performance Specification) 設計混凝土，只要設計產製完成後結構混凝土，所需混凝土設計與試驗性能符合建築構造需求，是一種節能減碳可行應用場合。

3.2 工作性

依表 4 代數法設計結果進行試驗室試拌，參考 ASTM C143 測試工作性；試驗結果如表 10 所示，表中可看出在拌合初期階段(Initial time)，添加爐石粉混凝土配比坍度均大於 240mm 以上，坍流度大於 500mm 以上，呈現如自充填混凝土高工作性，流動時間在 80 秒以上；60 分鐘後，各配比坍度在 180mm 以上，高細度爐石粉水泥比中細度爐石粉水泥配比，表現較為出色，顯示爐石粉磨得更細有助於改善工作性。傳統混凝土配比，即使採用 Type II 水泥，由於水泥用量多，水化熱大工作性損失大。

表 9 各配比水泥與各卜作嵐和整體卜作嵐用量比例(代數法/矩陣法)

Batch	<i>w/b</i> (<i>cm</i>) <i>W_{Water}</i> /(1)	<i>c/b</i> , % (2)=100-(3)	<i>p/b</i> , % (3)/(1)	<i>s/b</i> , % (4)/(1)	<i>f/b</i> , % (5)=(3)-(4)
C28	0.28	59.5/60.5	40.5/39.5	16.2/15.8	24.3/23.6
M28	0.28	29.8/30.2	70.2/69.8	46.0/46.1	24.3/23.7
H28	0.28	29.8/30.2	70.2/69.8	46.0/46.1	24.3/23.7
C32	0.32	52.1/53.0	47.9/47.0	19.1/18.8	28.7/28.2
M32	0.32	26.1/26.7	73.9/73.3	45.2/45.3	28.7/28.0
H32	0.32	26.1/26.7	73.9/73.3	45.2/45.3	28.7/28.0
C36	0.36	44.8/46.0	55.2/54.0	22.1/21.6	33.1/32.4
M36	0.36	22.4/23.1	77.6/76.9	44.5/44.7	33.1/32.1
H36	0.36	22.4/23.1	77.6/76.9	44.5/44.7	33.1/32.1
C40	0.40	37.6/39.2	62.4/60.8	25.1/24.3	37.3/36.5
M40	0.40	18.8/19.5	81.2/80.5	43.9/43.9	37.3/36.6
H40	0.40	18.8/19.5	81.2/80.5	43.9/43.9	37.3/36.6
All40	0.40	100.0	0	0	0

*(1)b:cement+slag+flyash；(2)c:cement；(3)p: slag+flyash；(4)s:slag；(5)f:flyash

表 10 混凝土新拌性質工作性

Mix	Initial Time			60 Minutes		
	Slump, mm	Flow, mm	Flow Time, sec.	Slump, mm	Flow, mm	Flow Time, sec.
C28	250	565	100	230	465	80
M28	245	545	120	240	450	80
H28	240	510	154	225	440	125
C32	275	640	125	240	430	115
M32	250	660	130	250	590	150
H32	280	685	146	280	620	130
C36	245	600	85	220	430	65
M36	265	660	83	235	425	62
H36	260	580	85	240	450	58
C40	255	620	106	190	300	50
M40	255	540	86	180	290	48
H40	240	600	90	240	510	83
A40II	170	235	4	130	215	2

3.3 抗壓強度與 CSE

(1) 強度發展

本研究以代數法求出配比進行試拌後，澆製不同齡期抗壓試體，測試至一年時間抗壓強度發展，如表 11 與圖 1 所示，圖中顯示左、中、右小圖分別表示 DMDA 採用 Type I(C)、中細度爐石粉水泥(M)、高細度爐石粉水泥(H)所拌製混凝土，不同水膠比各齡期強度發展。以 Type I 水泥及高細度爐石粉水泥，各水膠比強度發展相近，而中細度爐石粉水泥強度發展較為遲緩，原因為使用 Type I 水泥，飛灰量大於爐石量，見表 9，水泥水化產物較多，提供卜作嵐反應的 CH 量多，此有利於早期強度與晚齡期強度發展；而高細度爐石粉水泥，因高細度爐石粉細度達 5651 cm²/g，合成細度為 4602 cm²/g，較中細度爐石粉水泥細度 3866 cm²/g 高，水化反應快速，更有助於早期和晚期強度，在應用上應將爐石粉磨細，可獲得新拌與強度性質，雖然中細度爐石粉水泥不如高細度者，但用於一般與高強度場合仍適宜，高細度則於一般、高強、和特殊工程皆適用。

傳統 DMDA 設計法，只使用 5% 爐石粉有待商榷，使用高細度爐石粉水泥其工程與經濟效益立即可見，不過需佐以低拌合水量搭配高性能減水劑，避免產生浮水、析離現象，且施工後必須要加強養護工作

(因早期強度低)，避免發生塑性龜裂，而失去整體性。以 56 天齡期為例，使用中、高細度爐石粉水泥 M 與 H 配比，強度均較 Type I 的 C 配比稍高，顯示強度發展的優勢；一年齡期，w/cm<0.32 配比，C 及 H 組強度發展相當，見圖 1，M 組較低，w/cm>0.32 時，C 組很顯然略優於 M 及 H 組配比，以此推論，爐石粉磨的越細，有助於強度取得；A40II 採用 ACI 設計法，水泥用量 548 kg/m³ 而 C40、M40、H40 分別使用 141、70.5、70.5 kg/m³ 用量相差懸殊，但是只得到 3 天前高強度，之後反較 M 與 H 組低，尤其 56 天後，較高細度爐石粉 H 配比更低，水泥用量七倍以上，顯見傳統配比採高水泥量的問題。

(2) CSE 值分析

各發展齡期測試抗壓強度(MPa)，再乘以 145.6 轉換成(psi)，分母為配比 1m³ 混凝土水泥(不含卜作嵐材料)重量，並計算混凝土單位水泥重的強度效益值(Cement Strength Efficiency, CSE)；CSE 值定義如式 19：

$$CSE = \frac{\text{Compressive strength}(MPa \text{ or } psi)}{\text{Cement content}(kg/m^3)} \quad (19)$$

CSE 值是評定配比內水泥所能發揮的工程經濟(最重要者抗壓強度)效率，對高污染水泥工業而言有特殊的意義及重要性，國內傳統混凝土(不添加卜作嵐)，只有 10~20 psi/kg 的效益值(湛淵源，1999)。



表 11 混凝土硬固性質

性質	齡期	C28	M28	H28	C32	M32	H32	C36	M36	H36	C40	M40	H40	A40II
抗	7d	52	42	60	41	37	50	34	33	43	33	29	31	40
壓	28d	60	61	68	54	54	63	52	52	52	47	43	48	48
強	56d	65	66	73	57	62	65	55	59	57	54	55	56	54
度	91d	79	72	83	65	66	77	65	64	69	64	60	64	57
MPa	1yr	89	78	87	84	72	86	83	70	75	72	62	67	63
水	7d	23.7	38.3	54.8	24.2	43.6	58.9	26.5	51.4	67.0	35.1	59.9	64.0	10.6
泥	28d	27.4	55.7	62.1	31.8	63.7	74.3	40.5	81.0	81.0	48.5	88.8	99.1	12.8
效	56d	29.7	60.2	66.6	33.6	73.1	76.6	42.8	91.9	88.8	55.8	113.6	115.7	14.3
益	91d	36.1	65.7	75.8	38.3	77.8	90.8	50.6	99.7	107.4	66.1	123.9	132.2	15.1
psi/kg	1yr	40.6	71.2	79.4	49.5	84.9	101.4	64.6	109.0	116.8	74.3	128.0	138.4	16.7

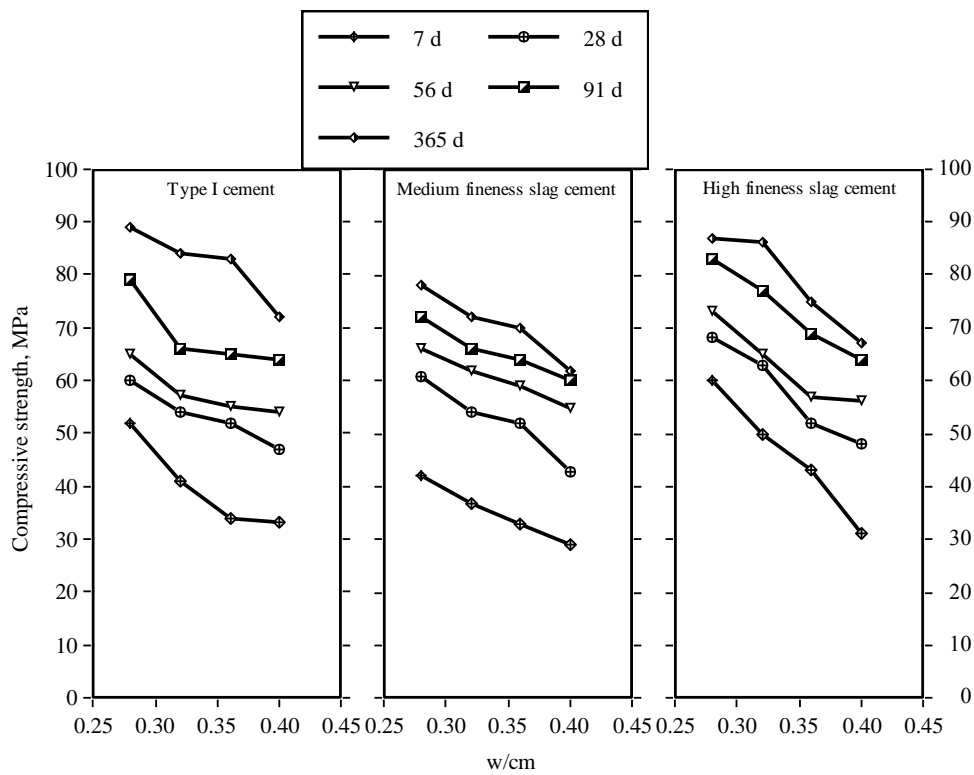


圖 1 不同水泥配比在各種水膠比齡期發展抗壓強度值

國際上，表 12 為加拿大 CANMET 的 Malhotra 設計兩相混凝土抗壓強度發展與水泥效益，由於拌合水量固定 120 kg/m^3 ，添加高性能減水劑，使工作坍度維持在 10cm 左右，編號 5 配比水泥量與飛灰分別為 150 及 200 kg/m^3 ，編號 6 純水泥 485 kg/m^3 ，編號 3 與 4 配方添加矽灰，編號 1 及 2 為添加爐石粉配比，表中發現，28 天前，矽灰配比強度最高，接續是爐石粉及傳統配比，最低為添加飛灰配方，原因為矽灰卜作嵐反應快速，有早強功能，爐石粉有增加水泥膠結料功

用，而添加 F 級飛灰，晚期(56 天後)卜作嵐反映逐漸顯露出來；但在 91 天後，飛灰組強度 83 MPa 最高，超過其他配比，在十年後，鑽心試驗已大幅超前其他組，但配比水泥用量是其他各組二分之一以下，也是傳統三分之一以下，Malhotral 直指編號 5 配方具有基礎構造材料「綠色、環境、永續」的生態意義；CSE 值部分，28 天時，CSE 為 48 psi/kg 大於其他組別；十年時，強度= 112 MPa 、CSE= 109 psi/kg 兩項指標都是最高，呈現早期低晚期高強特徵。



表 12 加拿大 Malhotra 設計兩相混凝土抗壓強度與 CSE 值(MPa/psi/kg)

Age \ Mix	1	2	3	4	5	6
1d	42/19	46/21	58/19	69/24	8/8	42/12
3d	64/30	55/25	64/21	-	27/26	48/14
7d	63/29	57/26	63/21	72/24	34/33	51/15
28d	69/32	63/29	67/22	76/26	50/48	60/18
91d	71/33	63/29	69/22	73/25	83/80	76/23
180d	70/32	69/32	71/23	79/27	87/84	74/22
365d	79/36	76/35	79/26	81/28	96/93	88/26
546d	77/35	79/36	80/26	82/28	101/98	95/28
730d	79/36	84/39	85/28	85/29	100/97	96/29
912d	82/38	84/39	-	-	97/94	96/29
1460d	84/39	97/45	87/28	88/30	110/107	99/30
3650d	88/40	100/46	91/30	89/30	112/109	102/31
膠結材料 kg/m ³	315(C) 135(SL)	317(C) 167(SL)	449(C) 39(SF)	427(C) 59(SF)	150(C) 200(FA)	485 -

(本文整理分析)

註:C:Cement ; SL:Slag ; SF:Silica Fume ; FA:Fly Ash

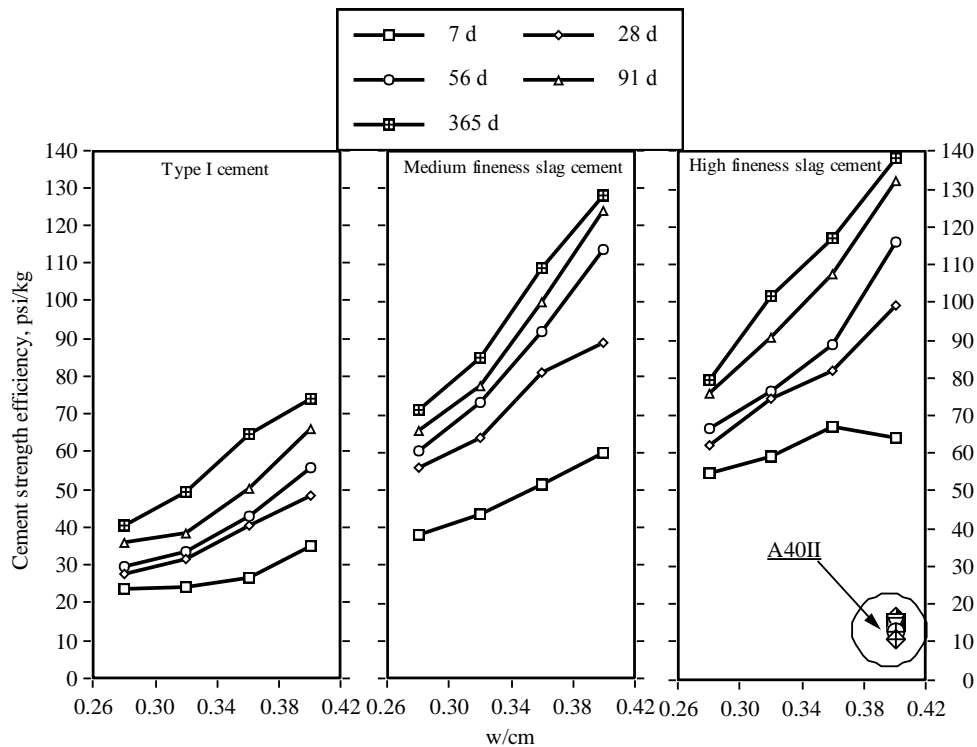


圖 2 不同水泥配比在各種水膠比齡期發展水泥強度效益值

本文各配比 CSE 值如表 11 與圖 2 所示；添加卜作嵐材料及使用爐石粉水泥，56 天齡期，C28 約 30 psi/kg，M28 及 H28 大於 60 psi/kg 以上，C40、M40、H 40 的 CSE 值分別為 55.8、113.6、115.7 psi/kg，呈現高 CSE 值現象；在 1 年時，為 74.3、128.0、138.4 psi/kg，是傳統混凝土 Type II(1 年為 16.7 psi/kg)4~8

倍之多。台灣 EEWB 綠建築評估系統中，鼓勵建築物構造多使用非金屬再生材料-爐石粉與飛灰卜作嵐，其綠色、環保、生態、永續意義即在此，圖 1 及圖 2 清楚顯示，無論 C、M、H 組，使用卜作嵐配比，在低拌合水量下(150 kg/m³)，加入大量本土化卜作嵐(爐石粉、飛灰)，仍不失於強度，CSE 及強度值更超



過傳統配方；只要配比得當，採用混凝土性能規範 (ACI 318-08, 2008)，即可通過 EEWB 減廢指標規定，本文建議以爐石粉與飛灰的改良式 DMDA 混凝土模組，是一種可行選擇。EEWB 減廢指標的 CCR(CO₂ 減量)及 CWR(廢棄物減量)指標計算，都是採用爐石粉為基準，事實上，以國內 HPC 施工案例中(黃兆龍，2003)，應用 DMDA 設計混凝土，使用高量飛灰與少量爐石粉，卜作嵐用量比例 p/b 為 30-50%，混凝土性能優異，飛灰應用得當(Hooton & Weir, 2010)與爐石粉，因碳足跡都歸於發電及煉鋼產品上，環境生態效益一樣。

四、結論與建議

本研究修正緻密配比 DMDA 模式，以代數法及數值分析法建構配比計算公式，求出非金屬再生建材使用率，透過新拌與強度試驗，分析各配比水泥強度效益值 CSE，評估在台灣綠建築 EEWB 系統減廢指標的適宜性，所得結論如下：

- (1) 配比設計以代數法及數值矩陣法，兩種設計方法各有其適應條件，代數法較適合傳統採用計算機工作場合，數值矩陣法適合應用電腦大量計算分析場合；考慮到混凝土陷入空氣量(Va=1.5%)時，兩種設計結果較接近混凝土產製實務。
- (2) 添加爐石粉與飛灰混凝土配比，拌合水量固定 150kg/m³，使用高性能減水劑，新拌混凝土初期工作性都可達到高流動性(坍度>240mm，坍流度>500mm)，無目視析離、泌水現象；60 分鐘後，坍度 >180mm，適合一般工程應用場合 (150±2.5mm)。
- (3) 各齡期抗壓強度，w/cm ≤ 0.32，Type I 水泥(C 組) 配比與高細度爐石粉水泥(H 組)配方，抗壓強度表現近似；w/cm > 0.32，抗壓強度 C 組>H 組>M 組，添加爐石粉與飛灰(M 及 H 組)，水泥用量僅為 C 組一半，且與各齡期強度值差異不大，爐石粉越細(高細度)有益於強度發展。
- (4) w/cm=0.40，28 天齡期以前，A40II 屬高水泥用量及低 w/c，較 C40、M40、H40 強度高，56 天後，

強度變得較低，顯示 A40II 配比高早強，晚期強度發展遲滯，此為傳統混凝土的缺失；添加爐石粉及飛灰配比，水泥用量 C 組是 A40II 的 25.9%，M 與 H 的 13.0%，傳統配方水泥量著實太高，宜向下修正；A40II 與 H40，28 天時，抗壓強度相似，證實爐石粉磨得越細，強度發展越佳。

- (5) 56 天，C40、M40、H 40 的 CSE 值分別為 55.8、113.6、115.7 psi/kg，呈現高 CSE 值；C、M、H 組各水膠比至 1 年齡期在 23~74、38~128、54~139 psi/kg 之間，較 Malhotra(十年齡期 109 psi/kg)研究結果高，主要因為本研究採用爐石粉水泥(1:1)，A40II 配方低於 17 psi/kg 以下，配比設計宜修正水泥用量，結合性能規範、添加卜作嵐及高性能減水劑、降低 w/cm 與低拌合水量等策略。
- (6) 台灣 EEWB 綠建築評估系統，減廢指標非再生建材使用率 CCR(CO₂ 減量)及 CWR(廢棄物減量)中，使用爐石粉添加比率計算，以國內建築工程實務部粉採用 SCC 與 HPC 施工，應以本土化卜作嵐材料比例(p/b)-爐石粉+飛灰計算使用率，飛灰應用得當(Hooton & Weir, 2010)較爐石粉碳足跡更低，因都歸於發電及煉鋼產品上。
- (7) 本研究 C、M、H 組配比 1m³ 混凝土水泥用量分別約總膠結的 60%、20%、20%，較傳統配比設計水泥量更為經濟；M40、H40 配比的水泥用量，只有 A40II 的五分之一不到，28 天抗壓強度都大於 41 MPa-6000 psi，且差異不大；建議配方設計宜多採用爐石粉與飛灰，爐石粉磨得更細效果更佳，以結構混凝土設計施工規範參考 ACI 318-95(1995)及土木水利 402-88 含以上版本(內政部營建署，2011)性能規範，但施工時應加強養護作業，避免發生塑性龜裂。

誌謝

本文能完成，首先，要感謝國立台灣科技大學營建系綠建材研究室-CMRL 工作團隊支援與支持和討論；鄭凱維先生提供試驗數據和中聯爐石資源化公司



提供所需材料與經費；另外國科會亦長期經費援助(計畫編號: 102-2221-E-146-010-)等,在此一併致上深沉謝意。

參考文獻

內政部營建署(2011)。《混凝土施工規範與解說 402-94》。台北市：營建署全國資訊網站。

內政部建築研究所(2009)。《綠建築解說與評估手冊》。台北市：五南文化廣場。

財團法人中興工程顧問社(2007)。《卜作嵐使用手冊》。台北市：中國土木水利學會混凝土工程委員會。

陳俊村(2012)。《矽灰混凝土配比簡化模式建構與相應工程性質之研究》。未出版之博士論文。國立台灣科技大學營建工程研究所，台北市。

湛淵源(1999)。《水泥漿「質」與「量」對混凝土工程行為影響之探討》。未出版之博士論文。國立台灣科技大學營建工程研究所，台北市。

湛淵源，林建宇，陳學政(2010)。本土化高性能混凝土應用在綠建築 CO₂ 減量指標分析。《中華民國建築學會第二十二屆第一次建築研究成果發表會論文集》(pp. 274-282)。台北市：中華民國建築學會。

湛淵源，陳俊村，吳啟週，葉淑通，洪培耕(2013)。複合四相混凝土材料配比設計與產製。2013 年中國土木水利學會電子計算機工程應用研討會，工程計算組(三)論文輯(pp. 516-520)。台北市：土木水利學會電子計算機委員會。

黃兆龍(2002)。《混凝土性質與行為》。台北市：詹氏書局。

黃兆龍(2003)。《高性能混凝土理論與實務》。台北市：詹氏書局。

黃兆龍，湛淵源(2001)。建築結構混凝土抗鹽害設計與驗證。《建築學報》，(36)，39-52。

詹文宗(1988)。《以表面積理論探討高強度混凝土之配合設計法》。未出版之碩士論文。國立中興大學土木工程研究所，台中市。

葉淑通(2005)。《以理想級配曲線估算緻密混合比及飛灰水泥漿包裹漿厚度評估混凝土性質之探討》。未出

版之碩士論文。國立台灣科技大學營建工程研究所，台北市。

鄭凱維(2002)。《緻密爐石水泥混凝土工程性質之研究》。未出版之碩士論文。國立台灣科技大學營建工程研究所，台北市。

劉娟紅，宋少民(2011)。《綠色高性能混凝土技術與工程應用》。北京市：中國電力出版社。

ACI Committee 211 (2010). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-10*. MI, USA: American Concrete Institute.

ACI 318-08 (2008). *Building Code Requirement for Structural Concrete ACI 318-08*. MI, USA: American Concrete Institute.

Chang, P. K. (2004). An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 623-629.

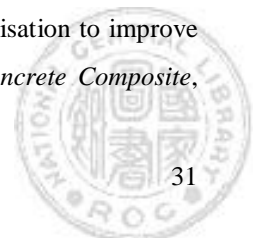
Chang, P. K., Peng, Y. N., & Hwang, C. L. (2001). A design consideration for durability of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composite*, 23(4), 375-380.

Chen, Y. Y., Tuan, B. L. A., & Hwang, C. L. (2013). Effect of paste amount on the properties of self-consolidating concrete containing fly ash and slag. *Construction and Building Materials*, 47, 340-346.

Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R., & Lehman, D. (2012). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 161-168.

Hooton, R. D., & Weir, A. (2010). Green concrete goes for the gold at 2010 Winter Olympics. *ACI Concrete International*, 32(2), 45-48.

Khokhar, M., Roziere, E., Turcry, P., Grondin, F., & Loukili, A. (2010). Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength. *Cement and Concrete Composite*,



32(5), 377-385.

- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2005). *High-Performance, High Volume Fly Ash Concrete*. Ottawa, CA: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C. A. (2013). Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents— Mix design principles and laboratory tests. *Cement and Concrete Research*, 51, 38-46.
- Science & Technology (2009). *The New York Times*, (April 14), 6.
- Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 487-493.
- Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1799-1807.
- Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950.
- Tuan, B. L. A., Hwang, C. L., Lin, K. L., Chen, Y. Y., & Young, M. P. (2013). Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 334-339.

REFERENCES in English

- ACI Committee 211 (2010). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-10*. MI, USA: American Concrete Institute.
- ACI 318-08 (2008). *Building Code Requirement for Structural Concrete ACI 318-08*. MI, USA: American Concrete Institute.
- Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior (2009). Green Building Commentary

and Assessment Manual.. Taipei: Wu Nan Book Store.

- Chang, P. K. (2004). An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 623-629.
- Chang, P. K., Peng, Y. N., & Hwang, C. L. (2001). A design consideration for durability of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composite*, 23(4), 375-380.
- Chen, C. T. (2012). *The Simplified Proportioning Model of Silica Fume Concrete and Its Relevant Properties*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei.
- Chen, Y. Y. (1999). *The Study of Quality and Quantity of Cement Paste on the Concrete Properties*. Unpublished doctoral dissertation. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei.
- Chen, Y. Y., Chen, C. T., Wu, C. T., Yeh, S. T., & Hong, P. G. (2013). An integrated quadruple materials method on the mix design and mixing sequence of concrete. *Proceedings of the Conference on Computer Applications in Civic and Hydraulic Engineering CCACHE* (pp. 516-520). Taipei: Computer Committee published.
- Chen, Y. Y., Lin, J. Y., & Chen, X. Z. (2010). Analysis and application on waste reduction of CO₂ of local high-performance concrete. *Proceedings of the 22th Architectural Institute of Taiwan Symposium of Research, Section 1* (pp. 274-282). Taipei: Architectural Institute of Taiwan.
- Chen, Y. Y., Tuan, B. L. A., & Hwang, C. L. (2013). Effect of paste amount on the properties of self-consolidating concrete containing fly ash and slag. *Construction and Building Materials*, 47, 340-346.
- Construction and Planning Agency, Ministry of the



- Interior (2011). *Concrete Construction Code and Commentary 402-94*. Taipei: Website of Construction and Planning Agency.
- Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R., & Lehman, D. (2012). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 161-168.
- Hooton, R. D., & Weir, A. (2010). Green concrete goes for the gold at 2010 Winter Olympics. *ACI Concrete International*, 32(2), 45-48.
- Hwang, C. L. (2002). *The Properties and Behaviors of Concrete*. Taipei: Chan's Arch-Publishing.
- Hwang, C. L. (2003). *The Theory and Practice of High-Performance Concrete*. Taipei: Chan's Arch-Publishing.
- Hwang, C. L., & Chen, Y. Y. (2001). The design and verification criteria of structural concrete under marine environment. *Journal of Architecture*, (36), 39-52.
- Khokhar, M., Roziere, E., Turcry, P., Grondin, F., & Loukili, A. (2010). Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength. *Cement and Concrete Composite*, 32(5), 377-385.
- Liu, J. H., & Song, S. M. (2011). *Green High Performance Concrete Technology and Application in Construction*. Beijing: China Electric Power Press.
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2005). *High-Performance, High Volume Fly Ash Concrete*. Ottawa, CA: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C. A. (2013). Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents— Mix design principles and laboratory tests. *Cement and Concrete Research*, 51, 38-46.
- Science & Technology (2009). *The New York Times*, (April 14), 6.
- Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 487-493.
- Sinotech Engineering Consultants. INC (2007). *Pozzolanic Manual*. Taipei: Chinese Institute of Civil and Hydraulic Concrete Works Committee.
- Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1799-1807.
- Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950.
- Tuan, B. L. A., Hwang, C. L., Lin, K. L., Chen, Y. Y., & Young, M. P. (2013). Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 334-339.
- Yeh, S. T. (2005). *An Approaching of Using Ideal Gradation Curve and Coating Paste Thickness to Evaluate the Concrete Performance*. Unpublished master's thesis. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei.
- Zhan, W. Z. (1988). *Mix Proportioning of H.S.C by Surface Area Method*. Unpublished master's thesis. Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taichung.
- Zheng, K. W. (2002). *The Study on the Engineering Properties of Densify Concrete with High Volume Slag Content*. Unpublished master's thesis. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei.

