

溫泉環境使用資源材料混凝土之耐久性研究 Study on Durability of Concrete Resource materials in Hot Spring Environment

張榮南¹、王和源*²、蔣秉洋²、林志忠³
Jung-Nan Chang¹, Her-Yung Wang*²、Bing-Yang Chiang²、Chih-Chung Lin³

中文摘要

溫泉養生已是現代人健康生活不可或缺的趨勢，台灣地區天然溫泉環境甚廣，溫泉地質變化甚大，對於影響到建築混凝土的耐久性有很大的影響，藉由本研究來對溫泉水中硫酸根離子，氯離子和 pH 值加以探討混凝土耐久性的問題。本研究材料以飛灰、爐石及廢液晶玻璃等資源材料添加於混凝土內提高效益並能達到節能減碳來提升混凝土耐久性，試驗水膠比為 $W/B = 0.5$ ，材料利用爐石、飛灰和廢玻璃砂混合取代配比為(0、40、80%)浸泡於不同的環境(自來水、溫泉水)，並探討耐久性。

試驗結果顯示三組抗壓強度相近，而溫泉水養護的強度在控制組的 0.998 ~ 1.013 倍，超音波波速 7 ~ 120 天齡期皆於 4200 ~ 4700 (m/s)之間，表面電阻溫泉水養護下在 56 天齡期時近於 98 kΩ-cm 有良好的耐久性，硫酸鹽侵蝕試驗齡期 56 天經 5 次循環後控制組已出現膨脹導致的裂痕，爐灰玻璃砂 40 及 80% 產生微膨脹裂縫，快速氯離子滲透爐灰玻璃砂庫倫數較控制組低，有較佳的耐久性；研究顯示添加適量爐石、飛灰及玻璃砂等資源材料於溫泉環境混凝土，可提升混凝土工程及耐久性。

關鍵詞：溫泉環境、資源材料混凝土、抗硫酸鹽侵蝕、耐久性。

Abstract

Hot spring health is an indispensable trend for modern people's healthy life. The natural hot spring

收到日期：111 年 11 月 28 日

修訂日期：112 年 01 月 16 日

接受日期：112 年 02 月 24 日

¹ 輔英科技大學 休閒與遊憩事業管理系

¹ Department of Tourism and Recreation Management, Fooyin University

² 國立高雄科技大學 土木工程系

² Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³ 高雄醫學大學 總務處

³ Office of General Affairs, Kaohsiung Medical University

*聯絡作者：wangho@nkust.edu.tw

environment in Taiwan is very extensive, and the hot spring geological changes are very big. It has a great influence on the durability of building concrete. The research is to use the sulfate in hot spring water. Ions, chlorides and pH are used to investigate the problem of concrete durability. The research materials are added to the concrete by using resource materials such as fly ash, hearthstone and waste liquid crystal glass to improve the efficiency and achieve energy saving and carbon reduction to improve the durability of the concrete. The test water-to-binder ratio is $W/B = 0.5$, and the material utilization hearthstone, the blending ratio of fly ash and waste glass sand is (0, 40, 80%) immersed in different environments (tap water, hot spring water), and the durability is explored.

The test results show that the three groups have similar compressive strength, while the intensity of hot spring water conservation is between 0.908 and 1.013 times in the control group, and the ultrasonic wave velocity is between 4200 and 4700 (m/s) in the 7 to 120-day age. Surface resistance hot spring under water conservation, it has good durability at 98 days old at nearly 98 k Ω -cm. After 5 cycles of sulfate attack test, the control group has cracks caused by expansion, and the ash glass sand 40 and 80 % produces micro-expansion cracks. The fast chloride ion permeation furnace has a lower columbic number than the control group and has better durability. Studies have shown that concrete engineering and durability can be improved by adding appropriate amount of materials such as hearth, fly ash and glass sand to the hot spring environment concrete.

Keywords: Hot spring environment; Resource material concrete; Sulfate resistance; Durability.

1. 前言

台灣近幾年溫泉資源大量開發，溫泉養生文化已經開始慢慢變成人民不可或缺的型態，且台灣溫泉地熱資源非常充裕，包括中央山脈及雪山山脈等的變質岩溫泉平均每年溫泉產量約一千六百萬噸^[1]。本研究四重溪溫泉為弱鹼性碳酸氫鈉泉，溫度 40 ~ 80 °C 泉質極佳，酸鹼值：pH 8。主要化學組成 Na^+ 及 HCO_3^- 其他條件有鈣離子和鎂離子含量較少^[2]；溫泉水在地熱環境下 40 ~ 70 °C 溫泉水環境中對混凝土的試件顯著提高強度在早期養護齡期能增長高於常規條件下^[3, 4]；提高溫度可加速水化放熱速率產生催化作用而使水化潛伏期縮短，使水泥漿體較快獲得早期強度，並提高混凝土之早期強度^[5]。

另外，近年由於混凝土再生綠建材的研發及研究成果，證實添加飛灰、水淬爐石粉及玻璃砂混凝土能增加混凝土特性及效益，可以應用於混凝土中之再生綠建材。經溫泉水養護後探討混凝土之工程性質，結果顯示溫泉水早期可以提升混凝土強度，晚期可提升混凝土的耐久性及體積穩

定性^[6]。而添加資源材料於混凝土在溫泉環境下能產生低庫倫穿越電流與高電阻性質工程性質，同時也能提升混凝土之耐久性^[7]。而添加適當水淬爐石粉或飛灰等工業廢棄物取代部分水泥或砂，卜作嵐反應可已提升混凝土晚期強度且降低氯離子滲透係數提升混凝土的耐久性^[8, 9]。

2. 試驗計畫

2.1 試驗材料

水泥爐石及飛灰如圖 1 水所示，骨材及物化性質如圖 2 及表 1 及表 2 所示。水泥使用台灣水泥公司生產的普通 I 型水泥；爐石為中國鋼鐵公司所生產的水淬爐石粉，經中聯爐石資源處理公司研磨成細粉；飛灰採用台電興達火力發電廠之 F 級飛灰，符合 CNS 3036 之規格；骨材採取自里港溪開採之粒料，符合 CNS1240 規範之規定；廢液晶玻璃砂經由破碎機、球磨機進行乾式研磨，研磨方式以 $\phi = 10$ mm 氧化鋯球 50 顆、運轉速率 400 rpm、5 min 一正(逆)轉、研磨時間 30 min，研磨成細小的極高粒徑均質性之液晶玻璃砂，玻璃砂比重為 2.42，細度模數為 3.37，外

觀如圖 2 所示。物化性質如表 1 及表 2 所示；水養護為高雄一般自來水，符合 CNS 1237 混凝土用水規定；四重溪溫泉水養護以位於屏東縣車城

鄉溫泉村，屬於鹼性碳酸泉 pH 值為 7.6 ~ 8.0，含有碳酸根及硫酸根離子，採溫泉水養護。溫泉水性質如表 3 所示。



圖 1 水泥、飛灰及爐石之外觀。
Figure 1 Appearance of cement, fly ash and slag.



圖 2 粗骨材、細粒料、玻璃砂之外觀。
Figure 2 Appearance of coarse aggregate, fine aggregate, and glass sand.

表 1 水泥、飛灰、爐石及廢液晶玻璃之化學成分。

Table 1 Chemical composition of cement, fly ash, slag and waste liquid crystal glass.

Unit: %

Item	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LoI
Cement	20.74	4.65	3.10	62.85	3.43	2.36	—	—	—	—	2.11
Fly Ash	48.27	38.23	4.58	2.84	—	—	1.16	0.21	1.42	—	5.38
Slag	34.70	13.71	0.33	41.00	6.60	—	—	—	—	—	0.95
LCD glass	62.48	16.67	9.41	2.70	—	—	0.20	0.64	0.01	0.01	—

表 2 粒料物理性質。

Table 2 Physical properties of aggregate.

Item	Dmax (mm)	Bulk Density (kg/m ³)	Unit Weight (kg/m ³)	Water Absorption (%)	F.M.
Coarse aggregate	19.0	2700	1540	2.0	—
Fine aggregate	8.5	2690	1760	2.0	2.8
LCD glass	7.8	2420	1680	0.45	3.37

表 3 自來水及四重溪溫泉水之化學性質。

Table 3 Chemical properties of tap water and Sichongxi hot spring water.

Item	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄	pH	Suspended solid
Unit	Mg/L	Mg/L	Mg/L	Mg/L	Mg/L	Mg/L	Mg/L	—	Mg/L
Tap water	< 0	< 0	8.7	3.0	122.3	—	—	7.3	0.05
Hot Spring Water	573	2.99	2.15	< 1	28.4	195	44.7	8	3.5

2.2 試驗配比與變數

研究針對兩種不同養護環境分別為：溫泉環境及一般水環境混凝土中進行試驗及探討，採用固定水膠比(W/B = 0.5)，以爐石、飛灰以及玻璃砂來部分取代水泥、砂以及三分石；在 7、28、56、91、120 天養護進行耐久性質分析於溫泉環境下混凝土各項性質。配比單位重如表 4 所示。

2.3 試驗項目與方法

- (1) 抗壓強度，依據 ASTM C39 規範。
- (2) 超音波波速，依據 ASTM C597 規範。
- (3) 表面電阻依據，依據 ASTM C876 規範。
- (4) 抗硫酸鹽侵蝕，依據 ASTM C1012 規範。
- (5) 快速氯離子滲透，依據 ASTM C1202 規範。

表 4 混合再生綠建材之混凝土配比單位重。

Table 4 Concrete ratio unit weight of mixed recycled green building materials.

Specimen ID	Total substitution	Cement	Slag	Fly ash	Glass sand	Sand	Coarse aggregate	Water
Control	0	410	0	0	0	840	955	205
SCWAFs-40	40	369	41	83.4	191	750.6	764	205
SCWAFs-80	80	328	82	166.8	382	667	573	205

Unit: kg/m³

3. 結果及分析

3.1 抗壓強度

圖 3 結果顯示不論浸泡於純水或溫泉水隨著齡期在添加爐灰玻璃砂替代率增加強度也隨之增加，且養護齡期 7 天、28 天及 120 天時，添加資源材料抗壓強度有增加趨勢，自來水養護控制組強度提升至 50.914 MPa，抗壓強度爐灰玻璃砂

40%及爐灰玻璃砂 80%，溫泉水養護的強度在控制組的 0.998 ~ 1.013 倍，在 45 °C環境養護下無發生晚齡期 120 天折減強度的趨勢，與控制組性能相近試驗結果不論浸泡於自來水或溫泉水養護皆為取代量 40%晚期強度較高，結果顯示添加資源材料時能助於提升抗壓強度發展。

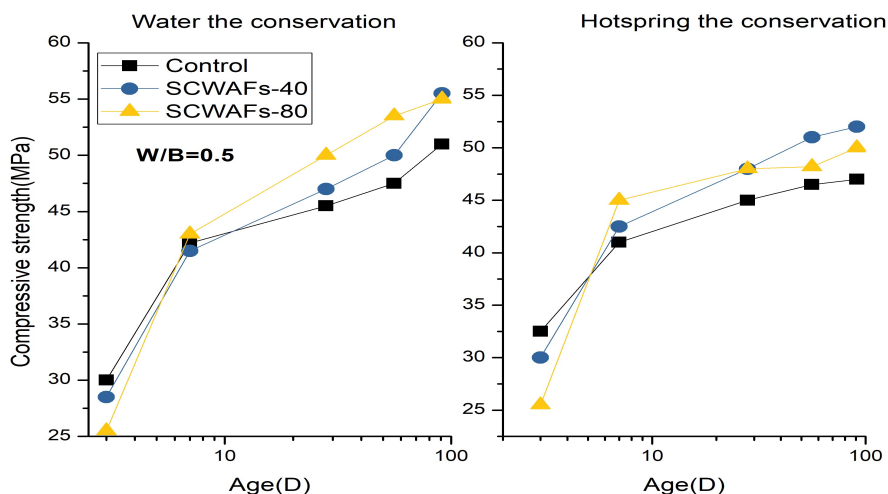


圖 3 溫泉環境使用資源材料之混凝土之抗壓強度。

Figure 3 Compressive Strength of Concrete Using Resource Materials in Hot Spring Environment.

3.2 超音波波速

圖 4 為超音波波速試驗結果，各組試體皆隨著齡期的上升而增加，漿體的硬固膠體的緻密程度，皆會影響到超音波的波速。超音波波速在養護齡期超音波波速 7 ~ 120 天齡期皆 4200 ~ 4700 (m/s)之間 120 天達到良好的等級，爐灰玻璃砂 40%至 80%的組別依取代的量越多使超音波波速遞減，雖然隨著取代量的增加波速較低，但皆有達到一定的緻密性 40000 m/s 以上。在 120 天齡期不論浸泡在自來水或溫泉水控制組接隨著齡期成長，試驗結果超音波波速皆頗為相近。

3.3 表面電阻

本試驗主要測定混凝土電阻值之微結構的緻密程度，故在早期會受水化反應的影響，水化反應速率愈快者其微觀結構物的組織愈佳，能夠延長或阻止電導通路而使電阻值提高。圖 5 為爐灰玻璃砂混凝土電阻接隨著養護齡期的增加而增加。而添加爐灰玻璃砂經溫泉水養護時，電阻值在早期電阻上升比自來水養護快速，溫泉水的爐灰玻璃砂 80%時，在 7 天到 28 天電阻增加明顯，在 28 天後上就趨於平緩。顯示添加爐灰粉能提升電阻，而 56 天養護齡期爐灰玻璃砂 80%

可達 98 kΩ-cm，爐灰玻璃砂 40%則可上升到 55 kΩ-cm 能與快速氯離子印證具有較佳耐久性。

自來水中電阻值雖成長較溫泉水中緩慢，至 91 天爐灰玻璃砂 40%的電阻值為 41 kΩ-cm，爐灰玻璃砂 80%的電阻值為 72 kΩ-cm，成線性增加。

3.4 抗硫酸鹽侵蝕

圖 6 結果顯示自來水養護較高溫泉水養護，且三組配比依序為 0%、40%、80%，研究試驗硫酸鹽侵蝕於 56 天齡期時進行 5 次硫酸鹽浸泡試驗，並觀察其損失重量變化；試驗結果控制組為 0.0164%及 0.0157%爐灰玻璃砂 40%為 0.019%及 0.020%；爐灰玻璃砂 80%為 0.025%及 0.020%。硫酸鹽考慮在中等暴露環境損失重量須小於 0.1%，嚴重暴露環境須小於 0.05%，故本研究皆合於嚴重暴露環境標準，在試驗 5 次循環後控制組產生微裂縫，爐灰玻璃砂 40 及 80%產生微裂縫推測其未達試體可膨脹之上限所導致。因有添加較多的爐石及飛灰，故在硫酸鹽侵蝕方面停留在膨脹階段沒有崩解，印證耐久性能力的上升。

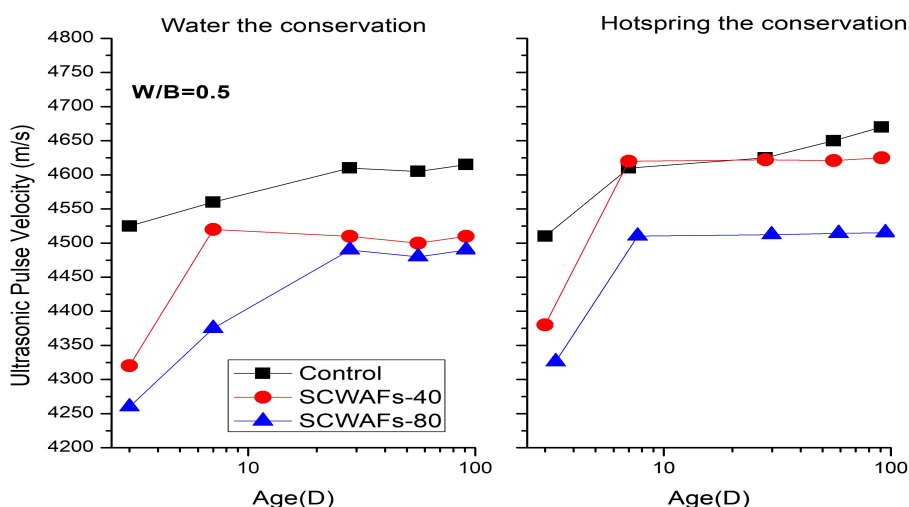


圖 4 溫泉環境使用資源材料混凝土之超音波波速。

Figure 4 Ultrasonic Wave Velocity of Concrete Using Resource Materials in Spring Environment.

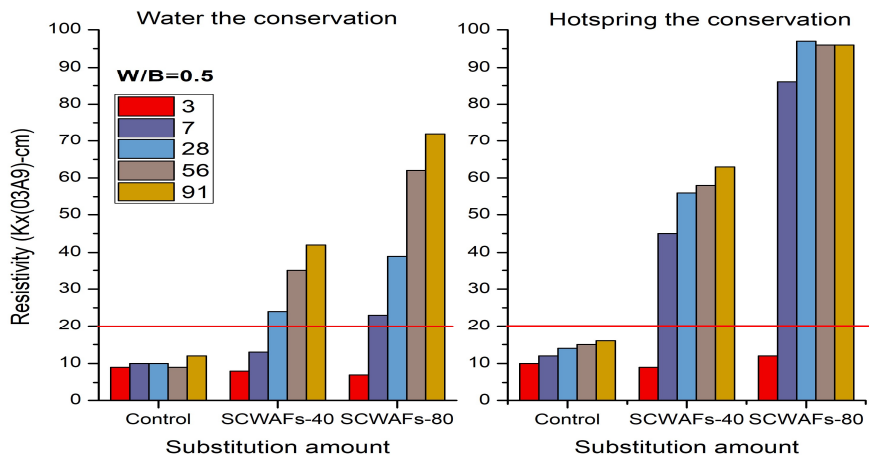


圖 5 溫泉環境使用資源材料之混凝土之電阻。
Figure 5 Resistance of Concrete Using Resource Materials in Hot Spring Environment.

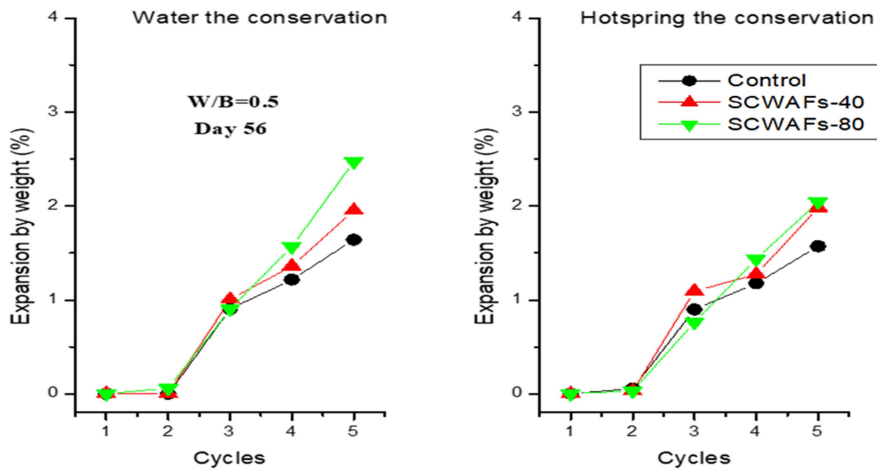


圖 6 溫泉環境使用資源材料之混凝土之硫酸鹽侵蝕。
Figure 6 Sulfate attack of concrete using resource materials in hot spring environment.

3.5 快速氯離子滲透電量

圖 7 所示為 91 天齡期電流滲透電量 (Coulombs)，數值越低代表致密性質越佳。研究顯示添加較多爐灰玻璃砂時有較佳抗氯離子能力，可能是溫泉水加速爐石與飛灰反應生成的 C-S-H 膠體，填充混凝土的孔隙，漿體與骨材間界面能緊密地結合，使混凝土內部結構更緻密。

試驗結果控制組自來水與溫泉水分別 5160 及 4563 (Coulombs) 添加爐灰玻璃砂 40% 時自來水與溫泉水分別為 1125 及 574 (Coulombs)，爐灰玻璃砂 80% 時 570 及 287 (Coulombs)，結果表示爐灰玻璃砂 40 及 80% 組比控制組有較佳的耐久性。

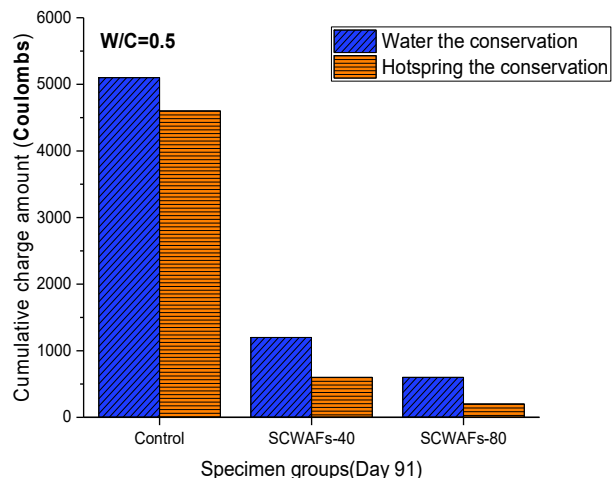


圖 7 溫泉環境使用資源材料之混凝土之快速氯離子滲透電量。
Figure 7 Rapid Chloride Ion Permeation Electricity of Concrete Using Resource Materials in Hot Spring Environment.

4. 結論

1. 抗壓強度爐灰玻璃砂 40%及爐灰玻璃砂 80%，溫泉水養護的強度在控制組的 0.998 ~ 1.013 倍，取代 40 與 80%的資源材料具有安全性與耐久性。
2. 超音波波速 7 ~ 120 天齡期皆在 4200 ~ 4700 (m/s)之間，120 天齡期組別幾乎在好的評分階級與優良之間。
3. 表面電阻含有爐灰玻璃砂 80%的組別，溫泉環境養護下呈現跳躍式增長相當明顯，在 56 天齡期時近於 98 kΩ-cm，能與快速氯離子印證明具有耐久性。
4. 抗硫酸鹽侵蝕，控制組已出現膨脹導致的裂痕，爐灰玻璃砂組產生微裂縫推測其未達試體可膨脹之上限所導致，顯示耐久性的提升。
5. 快速氯離子滲透依據電流滲透之電量(庫倫)，數值越低代表緻密性質越佳，自來水與溫泉水研究顯示爐灰玻璃砂 40 及 80%組有較佳的耐久性。

參考文獻

- [1] 溫紹炳，「台灣溫泉資源之成因分佈與調查」，溫泉資源開發技術與保育管理研討會論文集，第 17-38 頁，2003。
- [2] 張榮南，in：「臺灣溫泉概論 Taiwan hot springs introduction」，中華民國溫泉觀光協會-華立圖書(台灣，新北，2013)。
- [3] “Strength and durability of concrete in hot spring environments”，H. J. Chen. T. Y. Yang, and C. W. Tang, Computers and Concrete, 6 (2009) pp. 269-280.
- [4] “Experimental study of shotcrete and concrete strength development in a hot spring environment”，C. H. Lee, T. T. Wang, and H. J.

Chen, Tunneling and Underground Space Technology, 38 (2013) pp. 390-397.

- [5] 工業技術研究院能源與資源研究所，「台灣溫泉水資源之調查及開發利用」，經濟部水資源局，2007。
- [6] 張榮南，「台灣恆春地區溫泉環境對混凝土影響之研究」，國立高雄應用科技大學—土木工程與防災科技研究所碩士論文，2009。
- [7] 楊宗岳，「溫泉環境下之混凝土行為」，國立中興大學土木工程學系博士論文，2009。
- [8] 黃兆龍，「卜作嵐混凝土使用手冊」，財團法人中興工程顧問社，2007。
- [9] 黃兆龍，in：“高性能混凝土理論與實務”，詹氏書局(台灣，台北，2014)。