

卜作嵐材料對混凝土阻尼係數的影響

林佩誼¹ 潘煌鏗² 潘坤勝³ 蔡焱凱⁴

¹ 高雄應用科技大學土木工程系學士, 07-3814526#5280, 1101312121@kuas.edu.tw

² 高雄應用科技大學土木工程系教授, 07-3814526#5231, pam@kuas.edu.tw

³ 正修科技大學土木與空間資訊系副教授, 07-7310606#3121, kspan@csu.edu.tw

⁴ 高雄應用科技大學土木工程系研究生, 07-3814526#5280, 1101312121@kuas.edu.tw

摘要

材料的阻尼比是衡量材料減震性能的指標，若混凝土結構物有良好的自減震性能對衝擊荷重、風力和地震會有較好的舒緩能力，能改善結構物的動態性能。本文檢視卜作嵐材料對混凝土阻尼係數的影響，卜作嵐材料有矽灰、飛灰和爐石，含量有 0%、10%、20% 與 30%，總共 10 種配比，齡期有 3 天、7 天、28 天和 56 天，研究參數有卜作嵐材料、含量和齡期，比較抗壓強度、彈性模數和阻尼比性質。利用 GeoSIG 地震儀測出材料自由衰減反應，計算阻尼比。試驗結果指出，矽灰混凝土的阻尼比會隨著矽灰含量增加而降低；飛灰混凝土和爐石混凝土的阻尼比則會隨著添加量增加而提高。隨著齡期增加，混凝土抗壓強度會增加，但是阻尼比卻會逐漸降低。添加 10% 矽灰之混凝土能同時提高混凝土的抗壓強度和阻尼比。當齡期在 56 天時，爐石混凝土的阻尼比都比 PC 低，欲同時提高阻尼比和強度之爐石含量最好超過 30%。添加飛灰能夠提高混凝土的阻尼比，但是要留意高含量飛灰的混凝土抗壓強度會低於 PC。與爐石和矽灰比較，添加飛灰可以提供混凝土較佳的阻尼比。

關鍵字：減震、卜作嵐材料、混凝土、阻尼比

Abstract

Damping ratio of materials is an index of seismic reducing. Concrete structures with good self-damping properties can improve the dynamic performance of structures induced by impact load, wind and earthquakes. This study investigated the effect of pozzolanic materials on damping coefficient of concrete. Cement replaced by three pozzolanic materials with the fraction of 0%, 10%, 20 % and 30% were selected, where pozzolanic materials are silica fume, fly ash and blast furnace slag, respectively. Concrete with four material ages of 3 days, 7 days, 28 days and 56 days, respectively, was also examined. Damping ratio, based on free decay reaction, is calculated and measured by using GeoSIG seismograph. Results show that damping ratio of silica fume concrete reduces with increasing silica fume. However, damping ratio of concrete enhances with increasing fly ash or slag. Compressive strength of concrete gradually develops with material ages, but damping coefficients are reversed. Concrete with partial cement replaced by 10% silica fume improves its compressive strength and damping ratio simultaneously. This is also true for concrete with 30% slag. At the age of 56 days, all damping ratios of slag concrete are smaller than that of PC material. Compared with PC material, adding fly ash to concrete can raise its damping ratio; nevertheless, higher fly ash in concrete will lower its strength. To increase damping ratio, fly ash is the best choice compared with silica fume and blast furnace slag.

Keywords: seismic reducing, pozzolanic materials, concrete, damping ratio

一、前言

台灣位於地震帶上，為減輕地震對結構體造成破壞或振動對高科技廠房高精度儀器設備的正常運行，除了使用阻尼裝置外，建築材料也扮演相當重要的角色。影響結構材料耐震性質有鋼筋和混凝土的握裹、自重、構件勁度、頻率與阻尼比[1]，其中阻尼比是衡量材料減振性能的重要指標，在結構動力分析中，阻尼比的大小對結構物的動態行為有明顯的影響。

由應力-應變圖得知，混凝土材料可視為彈塑性材料，在低應力作用下表現為彈性，在未破壞之高應力作用時則為彈塑性；事實上，在低應力作用下的混凝土彈性和塑性是同時存在。在週期反覆載重的應力-應變曲線，所構成的應力-應變封閉曲線面積和阻尼的耗能量成正比[2]。為了提高混凝土的阻尼係數，採用方法是增加混凝土內部各質點間的內摩擦、改變混凝土的孔隙特徵，提高混凝土性質之黏彈性材料組成成分的比例等[3]。已知部分的普通混凝土、輕質骨材混凝土、飛灰混凝土、高分子混凝土和橡膠混凝土的阻尼比結果[1,3-13]。

台灣對於混凝土材料的減振性能研究較少，有添加輕質骨材[1]和橡膠粉[11]來增加混凝土的阻尼比。而台灣的混凝土普遍使用之卜作嵐材料以飛灰和爐石粉為主，但是有關阻尼係數的基本資料並不完備，必須有本土性的混凝土阻尼係數資料。本文使用卜作嵐材料添加在混凝土，對簡支梁進行衝擊試驗，利用地震儀測出材料自由衰減反應，計算阻尼比。卜作嵐材料有爐石、飛灰和矽灰，取代水泥 0%、10%、20%與 30%含量，在齡期 3 天、7 天、28 天和 56 天量測極限抗壓強度 f'_c 、彈性模數 E 值與阻尼係數 ξ 值。

二、實驗計畫

2.1 實驗材料

混凝土有四種膠結材，水泥採用東南水泥之卜特蘭水泥第一型，符合規範 CNS61；矽灰主要成分為二氧化矽，為非壓密顆粒，形狀是圓球形，細度 $20,000\text{m}^2/\text{kg}$ ，比重 2.2；飛灰是興達發電廠生產，比重 2.11，細度 $326\text{m}^2/\text{k}$ ；水淬爐石為中聯公司生產，比重 2.87，細度 $572\text{m}^2/\text{kg}$ ；骨材採用里港砂石，其中粗骨材通過 3/8"；強塑劑採用日本竹本(Takemoto)製造之 SSP104 型號，主要成分為丙烯酸共聚物(acrylic graft copolymer)陰離子型高分子介面活性劑，符合 ASTM Type-G 等級。

2.2 材料配比

為探討摻料與齡期對混凝土阻尼係數的影響，將水泥混凝土(控制組)配比的抗壓強度設在 35MPa，其他配比是分別添加 0%、10%、20%與 30%之爐石、飛灰和矽灰取代控制組的部分水泥，如表 1。為了有較佳的工作性，避免骨材析離與泌水情形，各配比的坍度控制在 13cm~18cm 之間。

表 1 混凝土配比

配比代號	水	水泥	矽灰	飛灰	爐石粉	細骨材	粗骨材	強塑劑
PC	211.52	480.75	0	0	0	750.19	875.3	—
SF10	211.52	432.68	48.08	0	0	750.19	875.3	1.3%
SF20	211.52	384.60	96.15	0	0	750.19	875.3	1.75%
SF30	211.52	336.53	144.23	0	0	750.19	875.3	2.0%
FA10	211.52	432.68	0	48.08	0	750.19	875.3	0.7%
FA20	211.52	384.60	0	96.15	0	750.19	875.3	0.8%
FA30	211.52	336.53	0	144.23	0	750.19	875.3	0.9%
SL10	211.52	432.68	0	0	48.08	750.19	875.3	0.5%

SL20	211.52	384.60	0	0	96.15	750.19	875.3	0.56%
SL30	211.52	336.53	0	0	144.23	750.19	875.3	0.6%

2.3 試驗製作與養護

抗壓試體依CNS1230規定製作 $\phi 100 \times 200$ mm圓柱試體，每種配比有3個試體有4種齡期，共計120個試體。試體灌製完成後拆模，並於飽和石灰水中養護，到達齡期前一天取出，在空調環境放置24小時後進行抗壓試驗。在試體上加裝伸長計(extensometer)，使用MTS試驗機進行軸向壓力試驗及量測軸向應變，計算極限抗壓強度 f'_c 和楊氏彈性模數 E 值。另外，阻尼比試驗需要矩形梁，將材料分三層置入 $100 \times 150 \times 1000$ mm的木模內，每層搗實200下，製作10根矩形梁如圖1。

試體在灌製完成之後，將試體放入密封夾鏈袋中，放置室溫48小時硬化後拆模，在將試體放入飽和石灰水中養護(圖2)，並依齡期取出進行抗壓試驗及阻尼試驗。



圖 1. 矩形梁製作



圖 2 試體養護

2.4.試驗方法

2.4.1 抗壓試驗

以 CNS 1232 規範進行抗壓試驗，試驗前之圓柱試體先以研磨機磨平，防止應力集中影響結果，並在軸向加裝 50mm 的伸長計，用 MTS 試驗機在試體上施加 5×10^{-6} 應變率(加載速率 0.03mm/min)，擷取時間、載重、軸向應變量。

2.4.2 阻尼係數試驗法

混凝土阻尼試驗的試體常用矩形梁[1]或懸臂梁[3,5-6,8-9,13]，本研究的混凝土阻尼係數試體採用矩形梁，如圖 3。矩形梁是置放在兩端支承的滾軸(roller)上，在梁中央放置地震儀(含加速度規)，敲擊梁試體使矩形梁產生自然振動，如圖 4，藉由加速度規和測震儀獲得自然振動頻率與加速度衰減率，計算阻尼比。

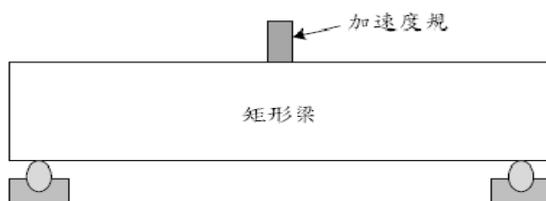


圖 3 阻尼比試驗：試驗架設



圖 4 阻尼比試驗：敲擊矩形梁

2.4.3 阻尼比計算

假設阻尼比試驗的力學系統是單自由度系統如圖 5 所示，由彈簧常數 k 和阻尼係數 B 組成。當質量 m 的物體承受外力 F 作用，產生位移 x ，得到控制微分方程式：

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

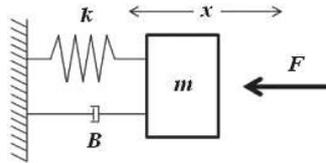


圖 5 單自由度系統

令 $n = \frac{B}{2m}$ ， $w = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，則(1)改寫成

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + w^2x = 0 \quad (2)$$

因進行阻尼比試驗時的系統產生自由振動，則混凝土材料的振動行為屬於次臨界組尼系統 (sub-critically damped system)，即(2)有共軛複根，此時 $n < w$ ，可解二階齊性常微分方程式(2)，的位移 $x(t)$

$$x(t) = Ae^{-nt} \cos(w_d t - \alpha_d) \quad (3)$$

其中 $A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0 + nx_0}{w_d}\right)^2}$ ，自然頻率 (damped natural frequency) $w_d^2 = w^2 - n^2$ ，相位角

$$\alpha_d = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{x}_0 + nx_0}{w_d x_0}\right) \quad (4)$$

由阻尼比定義 $\xi = \frac{n}{w}$ ，得知 $w_d = \sqrt{w^2 - n^2} = w\sqrt{1 - \left(\frac{n}{w}\right)^2} = w\sqrt{1 - \xi^2}$ ，因此經過 j 個週期後的阻尼比 ξ 公式為[14]

$$\xi = \frac{1}{2\pi \cdot j} \ln \frac{x_j}{x_{j+1}} \quad (5)$$

其中 x_1 和 x_j 分別是自由衰減歷時曲線第 1 個和第 j 個振動次數的峰值，使用(5)計算混凝土的阻尼比。

三、結果與討論

3.1 混凝土的靜態性質

3.1.1 抗壓強度

每組配比有 3 顆試體進行單軸抗壓試驗，求出平均值的極限抗壓強度，圖 5~圖 7 是純混凝土及卜作嵐混凝土之極限抗壓強度。圖 5 顯示添加矽灰在各齡期之抗壓強度隨著添加比例上升，

抗壓強度也增加；而添加飛灰及爐石之抗壓強度隨著添加比例上升而下降如圖 6~圖 7，其中，圖 7 之爐石混凝土在 20% 的抗壓強度明顯較常態不足，原因是灌製試體時骨材沉澱影響摻料混凝土試體的均勻性，導致抗壓試驗產生無法如已知預期的會增加強度結果。

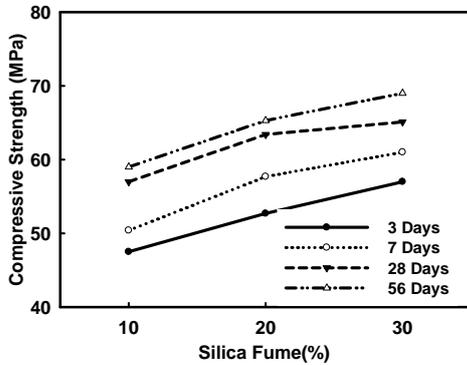


圖 5 矽灰混凝土齡期與抗壓強度

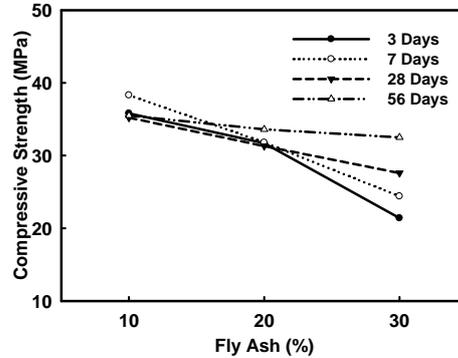


圖 6 飛灰混凝土齡期與抗壓強度

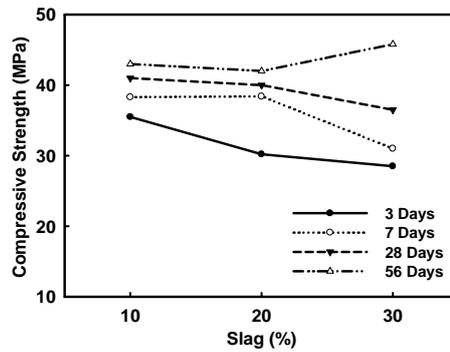


圖 7 爐石混凝土齡期與抗壓強度

3.1.2 彈性模數

混凝土應力應變曲線並非線性關係，彈性模數計算參考 ASTM C469，以應變 0.00005 的應力到 $0.4 f'_c$ 之切線斜率計算彈性模數 E ，結果在圖 8~圖 11。圖 8 和圖 9 是齡期 3 天與 7 天之混凝土彈性模數，顯示添加卜作嵐材料之混凝土的早期彈性模數都高於純混凝土，其中添加飛灰及爐石之混凝土會依添加比例增加而下降，且與抗壓強度成正比。當混凝土超過齡期 28 天(圖 10 和圖 11)，有部分卜作嵐材料之混凝土的彈性模數開始低於純水泥混凝土的彈性模數。圖 8 到圖 11 也顯示，含卜作嵐材料混凝土的彈性模數並不依照極限強度越高而成正比關係。

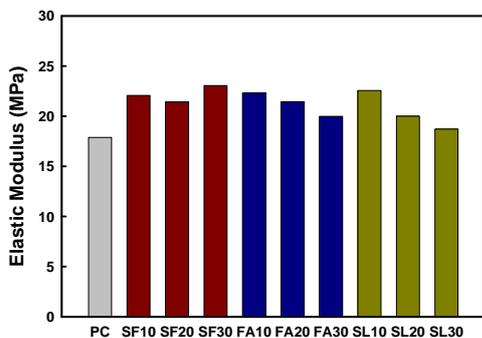


圖 8 3 天齡期彈性模數

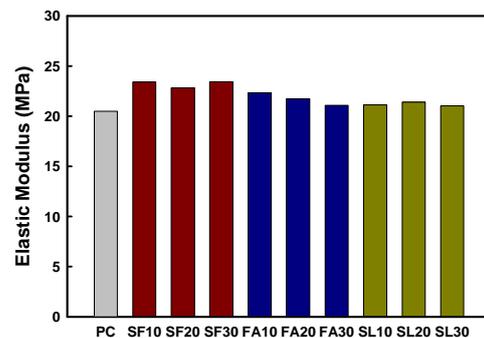


圖 9 7 天齡期彈性模數

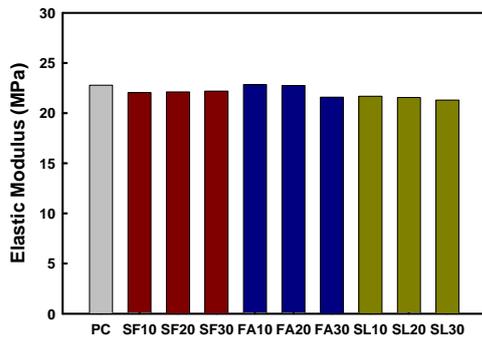


圖 10 28 天齡期彈性模數

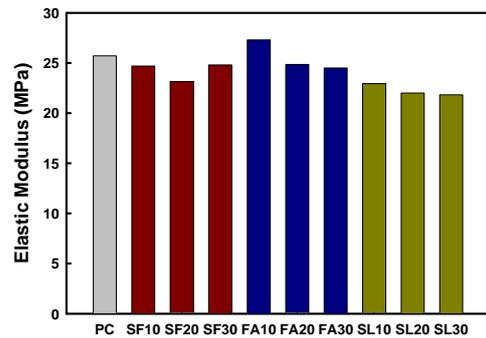


圖 11 56 天齡期彈性模數

3.1.3 混凝土的阻尼性質

影響混凝土阻尼係數的因子很多，若粗骨材和水泥基材的界面結合越弱，或混凝土的含水量越大，則混凝土的的阻尼越大。但隨著齡期的增加，內部水分子在蒸發作用後也逐漸減少，會發生抗壓強度及彈性模數增加、阻尼係數降低的現象[3]。依不同卜作嵐材料含量及配比製作的矩形梁試體，用重量 4.65 公斤的鐵塊敲擊混凝土梁製造自由振動，藉地震儀和資料擷取器來量測振動頻率以求得阻尼係數，圖 12 是 7 天齡期之 SL30 試體的垂直方向振動位移與時間關係，並加以分析及計算。

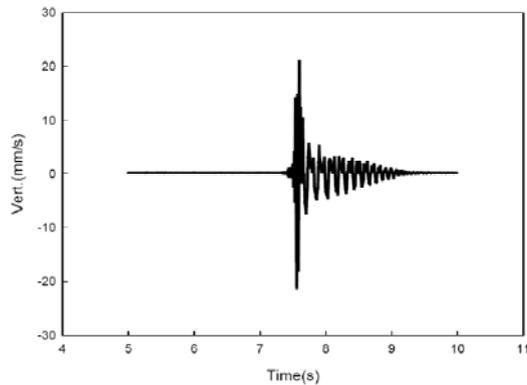


圖 12 齡期 7 天 SL30 垂直位移震動訊號

圖 13~圖 15 是添加卜作嵐材料含量與齡期之阻尼比關係，其中 ξ_{PC} 是純混凝土的阻尼比， ξ_{SF} 、 ξ_{FA} 、 ξ_{SL} 分別是混凝土的部分水泥被矽灰、飛灰和爐石取代之阻尼比，為了方便起見，使用 ξ_{PC} 做為正規化阻尼比的基礎，比較添加卜作嵐材料、含量與齡期之阻尼比關係。

圖 13 結果顯示，矽灰混凝土之阻尼比是隨著矽灰添加量增加而下降，且齡期越高則下降比例越小，表示適當的矽灰可以增加混凝土的阻尼比，即少量的矽灰如 10% 取代水泥的阻尼比最高。由圖 5 得知，隨著齡期和含量的增加矽灰混凝土的強度也增加，但是卻使阻尼比(圖 13)反而降低。

圖 14 是添加飛灰之混凝土的阻尼比，當飛灰的添加量增加時，混凝土的阻尼比會提高，而圖 6 的抗壓強度也顯示，飛灰含量超過 20% 時，強度急速下降，顯示抗壓強度與阻尼比有成反比的趨勢；但是同比例之矽灰含量的阻尼比卻是隨著齡期的增長而下降，且齡期越高下降比例逐漸縮小，可推論出混凝土的齡期越大，阻尼係數會越低。

當混凝土添加爐石時如圖 15，阻尼比會隨著爐石含量增加而提高，但是爐石取代水泥量超過 20% 且 7 天齡期後之阻尼比的增加效益不如由 10% 增加到 20%。爐石混凝土的阻尼比和矽灰

混凝土與飛灰混凝土一樣，具有齡期越大的阻尼係數越低趨勢。

考慮卜作嵐材料種類對混凝土阻尼比的影響，結果與 PC 的阻尼比比較。圖 16 的矽灰混凝土的阻尼比在 1.0~1.1，只有含量 20%~30%矽灰在 56 天齡期的阻尼比低於純水泥混凝土(PC 材) 阻尼比，其餘都高於純水泥混凝土，且矽灰含量越多的阻尼比越低。比較圖 5 得知，添加 10% 矽灰之混凝土會同時提高抗壓強度和阻尼比。

當以飛灰取代部分水泥量時，如圖 17 飛灰混凝土的阻尼比在 1.0~1.45，飛灰混凝土的阻尼比都比 PC 高，且含量越多的飛灰愈能夠提高混凝土的阻尼比，因此混凝土添加飛灰能夠提高混凝土的阻尼比，但是要留意高含量飛灰的混凝土抗壓強度會低於 PC。

當部分水泥被爐石取代時，圖 18 爐石混凝土的阻尼比在 0.85~1.15，爐石混凝土的阻尼比會隨著爐石添加量增加而提高，與添加飛灰趨勢相同，且齡期越大的阻尼比越小；除了 3 天齡期與部分 7 天齡期外，爐石混凝土阻尼比會比純水泥混凝土還低，尤其齡期 56 天的爐石混凝土阻尼比都比 PC 低，因此要同時提高爐石混凝土的阻尼比和強度之爐石含量最好超過 30%。

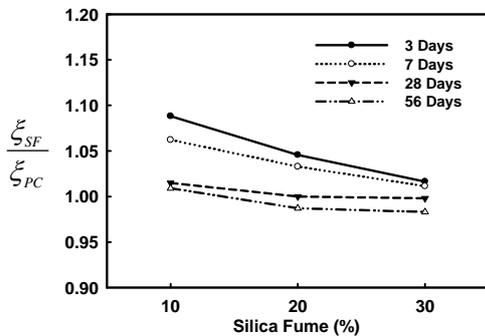


圖 13 添加矽灰之阻尼比與齡期

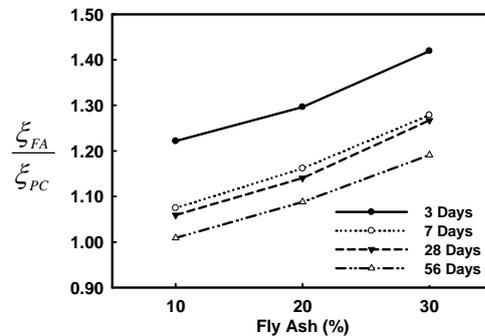


圖 14 添加飛灰之阻尼比與齡期

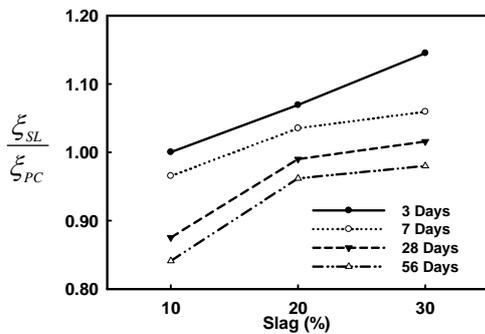


圖 15 添加爐石之阻尼比與齡期

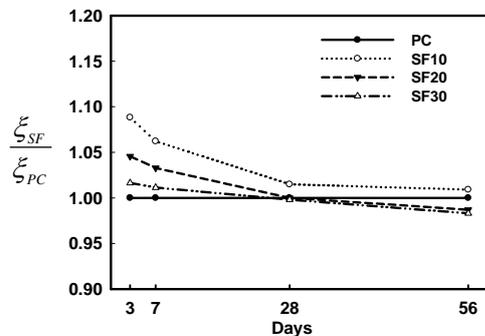


圖 16 矽灰混凝土與純 PC 阻尼比值

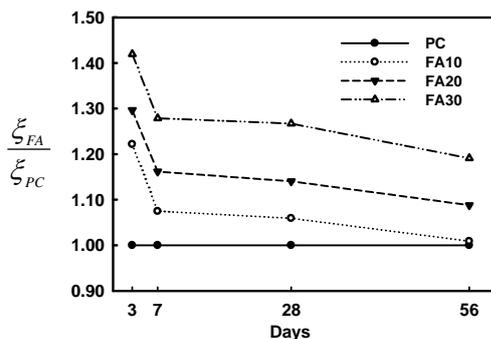


圖 17 飛灰混凝土與純 PC 阻尼比值

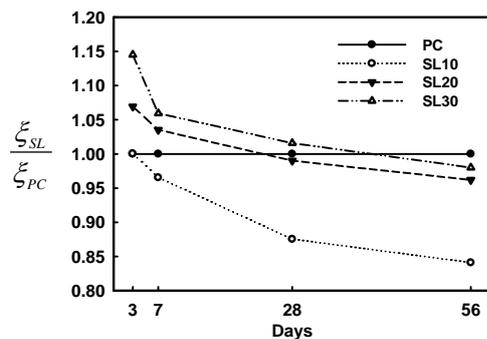


圖 18 爐石混凝土與純 PC 阻尼比

四、結論

以 10%~30%的卜作嵐材料取替部分水泥，並考慮 3 天、7 天、28 天、56 天齡期來探討卜作嵐材料種類、含量與混凝土齡期對阻尼比的影響，結果如下。

1. 混凝土添加卜作嵐材料的抗壓強度會隨著齡期增加而增加，但是阻尼比則隨著齡期增加而降低。
2. 矽灰混凝土的阻尼比會隨著矽灰添加量增加而降低，只有含量 20%~30%矽灰在 56 天齡期的阻尼比會低於純水泥混凝土(PC)阻尼比，其餘都高於 PC。另外，添加 10%矽灰之混凝土能同時提高混凝土的抗壓強度和阻尼比。
3. 飛灰混凝土的飛灰含量增加時，混凝土的阻尼比會持續提高，且都比 PC 高，因此添加飛灰能夠提高混凝土的阻尼比，但是要留意高含量飛灰的混凝土抗壓強度會低於 PC。
4. 爐石混凝土的阻尼比隨著爐石含量增加而提高，但是爐石取代水泥量超過 20%且 7 天齡期後之阻尼比的增加效益較低。當齡期在 56 天時，爐石混凝土阻尼比都比 PC 低，因此要同時提高爐石混凝土的阻尼比和強度之爐石含量最好超過 30%。
5. 比較 PC 對照組，矽灰混凝土的阻尼比在 1.0~1.1，飛灰混凝土在 1.0~1.45，爐石混凝土在 0.85~1.15，可推論出添加飛灰可以提供較高的阻尼比，且比添加矽灰和爐石的效益高。

四、致謝

感謝鄭筱潔、許傑樺、李源智共同協助試驗及國科會 101-2815-C-151-024-E 經費贊助。

五、參考文獻

- [1] 高章育，「輕質骨材混凝土之耐震性質研究」，碩士論文，中興大學(2002)。
- [2] 戴德沛，「阻尼技術的工程應用」，清華大學出版社，北京(1991)。
- [3] 柯國軍、陳俊杰、石建軍、陳振富、郭長青，「混凝土阻尼試驗研究及其機理分析」，噪音與振動控制，第 25 卷，第 5 期，第 60-64 頁(2005)。
- [4] Orak, S., "Investigation of Vibration Damping on Polymer Concrete with Polyester Resin," *Cement Concrete Research*, Vol. 30, pp. 171-174 (2000).
- [5] 柯國軍、郭長青、胡紹全、陳振富、石建軍、孫德綸、陳俊杰，「輕骨料混凝土阻尼比研究」，全國科學建築核心期刊，第 156 期，第 10 期，第 34-37 頁(2002)。
- [6] 柯國軍、郭長青、胡紹全、陳振富、石建軍，「混凝土阻尼比研究」，建築材料學報，第 7 卷，第 1 期，第 35-40 頁(2004)。
- [7] 陳振富、柯國軍、胡紹全、石建軍、郭長青、陳俊杰、孫德綸，「橡膠混凝土小變形阻尼研究」，噪音與震動控制，第 24 卷，第 3 期，第 32-34 頁(2004)。
- [8] 陳振富、石建軍、柯國軍、郭長青、孫德綸、陳俊杰、胡紹全，「聚丙烯纖維混凝土小變形阻尼研究」，工業建築，第 34 卷，第 6 期，第 59-60, 30 頁(2004)。
- [9] 陳振富、柯國軍、郭長青、胡紹全、石建軍、孫德綸、陳俊杰，「鋼筋混凝土小變形阻尼研究」，四川建築科學研究，第 30 卷，第 2 期，第 10-12 頁(2004)。
- [10] 許靜、朱涵、劉春生、師燕超，「橡膠集料混凝土阻尼比的初步試驗研究」，全國中文核心期刊，第 11 期，第 40-42 頁(2005)。
- [11] 林俊宏，「混凝土摻料與配比影響阻尼比」，碩士論文，成功大學建築研究所(2007)。
- [12] Zheng, L., Huo, X. S., and Yuan, Y., "Experimental Investigation on Dynamic Properties of Rubberized Concrete," *Construction Building Materials*, Vol. 22, pp. 939-947 (2008).
- [13] Lin, C. Y., Yao, G. C., and Lin, C. H., "A Study on the Damping Ration of Rubber Concrete," *J. Asian Arch. Build. Eng.*, Vol. 9, pp. 423-429 (2010).
- [14] Chopra, A. K., "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering," Prentice Hall, Inc., pp. 50-51 (1995).