

第二屆高雄應用科技大學 學術研討會

Proceedings of the 2nd KUAS Academic Symposium, 2002

氧化鋯混凝土可行性之研究

郭文田

潘煌錕

中華民國九十一年五月十八日

氧化鋯混凝土可行性之研究

KUAS-90-CI-009

郭文田*、潘煌鏗

國立高雄應用科技大學土木工程系

一、中文摘要

本研究嘗試開發一種能增加混凝土韌性的新材料，即氧化鋯混凝土 (Zirconia Toughened Concrete, ZTC) 之可行性。利用混凝土承受載重時會在材料內部已存在微裂縫附近產生應力集中現象，促使相變區之部份穩定氧化鋯 (ZrO_2) 產生相變，造成氧化鋯體積膨脹而限制裂縫延伸，因此會增加混凝土韌性。研究結果顯示氧化鋯混凝土之工作性沒有多大變化，但添加氧化鋯時，氧化鋯混凝土強度會比普通混凝土強度稍強，且混凝土在破壞之前會在氧化鋯顆粒附近產生微裂縫，進而吸收能量。使混凝土破壞韌性增加，兼具有部份提高強度及增加韌性之優點。

關鍵詞：相變、氧化鋯、混凝土

ABSTRACT

This study is to develop the technique of zirconia toughened concrete (ZTC). ZTC consists of the concrete matrix and partially stabilized zirconia. partially stabilized zirconia will undergo the phase transformation when concrete is loaded. This leads to the volumetric expansion of zirconia, and it will increase the toughness. Based on the mixture design of concrete, the engineering properties of ZTC are measured. It seems that the workability of ZTC does not have a lot of change comparing with the normal concrete. The strength of ZTC is slight higher than the normal concrete. Meanwhile, microcracks take place surrounding the zirconia inclusions if the loading is applied. This leads to the fracture toughness increment of concrete because of the dissipation of energy.

Keywords: Phase Transformation, Zirconia, Concrete.

二、前言

最近二十幾年來 (1975 迄今)，具備有韌性強化之陶瓷材料—所謂高性能陶瓷 (High Performance Ceramics) — 已陸續被開發，如陶瓷引擎、陶瓷刀具、有外型記憶陶瓷等。混凝土材料歸屬為陶瓷類材料，屬於陶瓷材料的一種。為了改善混凝土的性質，目前已陸續發展出高強度混凝土、輕質骨材混凝土、高流動性混凝土、鋼纖維混凝土等材料。其中為了增加混凝土韌性，常在混凝土中添加玻璃纖維或鋼纖維。本研究提出一種已知在陶瓷材料之韌性強化效果非常好的添加物—氧化鋯，作為混凝土添加物，即所謂氧化鋯混凝土，以改善混凝土之韌

性性質。

氧化鋯混凝土是在普通混凝土中添加部份穩定氧化鋯顆粒 (tetragonal- ZrO_2)，利用氧化鋯在低於轉換溫度時被保留之立方結構及正方結構 (如圖 1 所示)，因受外力作用 (Stress-induced Transformation) 促使晶體結構解除束縛而產生穩定之單斜結構，此時會伴隨體積膨脹，使得混凝土內部裂縫周圍產生壓應力而限制裂縫繼續成長，達到增加混凝土韌性的目的。氧化鋯產生相變的動力，對混凝土材料或結構而言，可為外載重或地震力引起之應力集中所造成。

民國 88 年 9 月 21 日台灣發生集集大地震，許多生命財產的損失大都是因為建築物倒塌造成。若能開發具韌性之氧化鋯混凝土，使混凝土脆性且無預警的破壞行為因韌性增加而轉換為具有彈-塑性行為 (Elasto-plastic Behavior)，將可延長混凝土破壞之前置時間，而增加人們逃生機會，經濟效益是無可限量。

因所開發生產的氧化鋯混凝土韌性較普通混凝土好，使得氧化鋯混凝土在相變後之耐震能力增加；且具有破壞前因相變會在裂縫尖端前面產生許多微小裂縫 (Microcracks) 及塑性變形的特點，而形成材料破壞前之破裂延遲時間增加，類似有預警作用之韌性破壞，可減少因結構物破壞移位或倒塌對生命財產造成損失，降低因人身傷害所造成之額外社會成本。理論上，生產氧化鋯混凝土是可行的。但有關氧化鋯混凝土的工作性及力學性質，在已知文獻上記載並不多 (幾乎沒有)，其各項材料性質並不清楚。為使這種新混凝土材料能可靠的使用在土木營建工程上，必須要事先充分了解其特性，使材料設計者及使用者無安全顧慮。因此本研究旨在添加完全穩定及部份穩定氧化鋯於混凝土中，藉由量測其工作性及強度，探討氧化鋯混凝土之可行性。

三、試驗計畫

1. 試驗材料

- (1) 水泥：採用台泥公司所生產之卜特蘭第一型水泥，比重為 3.15，Blaine 細度為 $3200\text{cm}^2/\text{g}$ ，其化學成份與物理性質都符合 CNS 61 之規定。
- (2) 粗骨材：係採自高屏溪之河砂及天然卵石所製成之碎石，其物理性質如表一所示。

表一 粗細骨材物理性質

項目	粗骨材	細骨材
比重	2.65	2.65
吸水率 (%)	0.61	2.34
單位重 (kg/m^3)	1438	—
洛杉磯磨損率 (%)	20.1	—
細度模數 (F.M.)	6.25	2.78
最大粒徑 (")	3/4	—

2. 試驗過程

本研究首先進行混凝土厚度為 15cm、抗壓強度為 175、210kgf/cm² 之配比設計，配比設計結果如表二所示。並分別添加 5% 及 10% (水泥重量比) 之完全穩定及部份穩定氧化鋁，製作 ϕ 12cm x 24cm 之圓柱試體，並以相同配比之水泥砂浆製作 4cm x 4cm x 16cm 之水泥砂浆抗擊試驗，分別進行 3、7、14 及 28 天之抗壓強度試驗及 charpy 試驗，分別得到其抗壓強度及衝擊能 (impact energy)。

表二本研究使用之配比 (kg/m³)

材料	$f_c' = 175 \text{kgf/cm}^2$	$f_c' = 210 \text{kgf/cm}^2$
水泥	322	364
水	271	270
粗骨材	1101	1048
細骨材	475	496

四、試驗結果與討論

1. 工作性

添加 5% 及 10% (水泥重量比) 之完全穩定及部份穩定氧化鋁於混凝土中時，發現對混凝土坍度無多大影響，究其原因 5% 及 10% 之完全穩定及部份穩定氧化鋁對整體材料而言係屬少量，且在水泥水化初期，氧化鋁並不影響水泥之水化行為，故對工作性亦無明顯之影響。

2. 抗壓強度

混凝土雖歸屬陶土材料範圍，但混凝土因製程技術和一般陶土材料需要高溫不同，是採拌合後水化製成。在拌合製造和成形過程容易產生許多微裂縫 (microcracks) 和孔洞 (pore)，造成混凝土強度因應力集中 (stress concentration) 而偏低。為強化混凝土性質，並改善其耐震能力 (吸收能量) 較低的缺點，在目前已知混凝土材料之韌性強化技術開發，大多數著重於裂縫交替作用機理之研究，如玻璃纖維混凝土 (glass fiber reinforced concrete) 與鋼絲纖維混凝土 (steel fiber reinforced concrete) 等皆利用所添加之長短纖維或顆粒使主裂縫延伸成長產生裂縫橋阻 (crack bridging)、裂縫分叉 (crack bowing)、裂縫變位 (crack deflection) 現象，或因纖維分離 (fiber debonded) 作用，使混凝土內部主裂縫受到適當阻擋或阻礙，造成材料應力強度因子 (stress intensity factor) 降低而增加材料韌性，使材料韌性強化效果互相牽制抵消，最後只能靠混凝土和纖維間之分離拉扯作用來達成韌性強化，使強化效果被打折扣。

氧化鋁混凝土是在普通混凝土中添加部份穩定氧化鋁顆粒 (tetragonal-ZrO₂)，利用氧化鋁在低於轉換溫度時被保留之立方結構及正方結構 (如圖 1 所示)，因受外力作用 (Stress-induced Transformation) 促使晶體結構解除束縛而產生穩定之單斜結構，此時會伴隨體積膨脹，使得混凝土內部裂縫周圍產生壓應力而限制裂縫繼續成長，達到增加混凝土韌性的目的。氧化鋁產生相變的動力，對混凝土材料或結構而言，可為外載重或地震力引起之應力集中所造成。氧化鋁混凝土是在普通混凝土中添加部份穩定氧化鋁顆粒 (tetragonal-ZrO₂)，利用氧化鋁在低於轉換溫度時被保留之立方結構及正方結構 (如圖 1 所示)，因受外力作用 (Stress-induced Transformation) 促使晶體結構解除束縛而產生穩定之單斜結構，此

時會伴隨體積膨脹，使得混凝土內部裂縫周圍產生壓應力而限制裂縫繼續成長，達到增加混凝土韌性的目的。氧化鋁產生相變的動力，對混凝土材料或結構而言，可為外載重或地震力引起之應力集中所造成。

當以 5% 和 10% 之氧化鋁含量加入混凝土時，其抗壓強度試驗結果如圖 2 至 5 所示。添加 5% 及 10% 完全穩定氧化鋁時，抗壓強度皆有提高之現象。但 175kgf/cm² 之增加量大於 210kgf/cm² 者，且 5% 之增加量大於 10% 者。添加 5% 和 10% 之部份穩定氧化鋁者亦有同完全穩定氧化鋁者。

3. 衝擊能量

衝擊能量以 charpy 試驗進行，當以 5% 和 10% 之氧化鋁含量加入混凝土時，其衝擊能量試驗結果如圖 6 至 9 所示。發現混凝土強度增加約 10% 以內；但其韌性增加量卻只有些微增加，與理論值比較非常少，並不明顯。結果顯示，混凝土內之氧化鋁相變量少，促使相變範圍 (高度) 非常小，因此韌性強化效果無法顯現。

五、結論

1. 氧化鋁混凝土之工作性與普通混凝土差異不大。
2. 氧化鋁混凝土由於相變機理使抗壓強度會比普通混凝土強度稍強。
3. 氧化鋁混凝土之韌性增加量卻只有些微增加，與理論值比較非常少，並不明顯。原因有待進一步加以探討。

六、參考文獻

- (1) Evans, A. G. and Heuer, A. H., "Review-Transformation Toughening in Ceramics: Martensitic transformations in Crack-Tip Stress Fields," J. American Ceramics Society, Vol. 63, (1980), p.241-248.
- (2) Lange, F. F., "Transformation Toughening," J. Materials Science, Vol. 17, (1982), p.225-262.
- (3) McMeeking, R. M. and Evans, A. G., "Mechanics of Transformation-Toughening in Brittle Materials," J. American Ceramics Society, Vol. 65, (1982), p.242-246.
- (4) Budiansky, B., Hutchinson, J. W. and Lambropoulos, J. C., "Continuum Theory of Dilatant Transformation Toughening in Ceramics," Inter. J. Solids Structures, Vol. 19, (1983), p.337-355.
- (5) Lambropoulos, J. C., "Shear, Shape and Orientation Effects in Transformation Toughening," Inter. J. Solids Structures, Vol. 22, (1986), p.1083-1106.
- (6) Budiansky, B., "On the Elastic Moduli of Some Heterogeneous Materials," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 13, (1965), p. 223-227.
- (7) Eshelby, J. D., "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Relation Problem," Proceedings of the Royal Society, London, A-241, (1957), p.376-396.
- (8) Mori, T. and Tanaka, K., "Average Stress in

- the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta metallurgica*, Vol. 21, (1973), p.571-574.
- (9) Weng, G. J., "Some Elastic Properties of Reinforced Solids, with Special Reference to Isotropic Ones Containing Spherical Inclusion," *Inter. J. Eng. Science*, Vol. 22, (1984), p.845-856.
 - (10) Pan, H. H. and Weng, G. J., "Thermal Stress and Volume Change During a Cooling Process Involving Phase Transformation," *J. Thermal Stresses*, Vol. 15, (1992), p.1-23.
 - (11) Tandon, G. P. and Weng, G. J., "Average Stress in the Matrix and Effective Moduli of Randomly Oriented Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 27, (1986), p.111-132.
 - (12) Mura, T. ed., *Micromechanics of Defects in Solids*, (1987), Martinus Nijhoff, Dordrecht.
 - (13) Evans, A. G. and Cannon, R. M., "Toughening of Brittle Solids by Martensitic Transformations," *Acta metallurgica*, Vol. 34, (1986), p.761-800.
 - (14) Hannink, R. H. J., "Growth Morphology of the Tetragonal Phase in Partially Stabilized Zirconia," *J. Materials Science*, Vol. 13, (1978), p.2487-2496.
 - (15) Paris, P. C., McMeeking, R. M. and Tada, H., "The Weight Function Method for Determining Stress Intensity Factors, Cracks and Fracture," *ASTM STP 601*, (1976), p.471-489.
 - (16) Rice, J. R., "Three- Dimensional Elastic Crack Tip Interactions with Transformation Strains and Dislocations," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 21, (1985), p.781-791.
 - (17) Pan, H. H. and Weng, G. J., "Elastic Moduli of Heterogeneous Solids with Ellipsoidal Inclusions and Elliptical Cracks," *Acta Mechanica*, Vol. 110, (1995), p.73-94.
 - (18) Porter, D. L. and Heuer, A. H., "Mechanisms of Toughening Partially Stabilized Zirconia," *J. American Ceramics Society*, Vol. 60, (1977), p.183-184.
 - (19) Heuer, A. H., "Transformation Toughening in ZrO₂-Containing Ceramics," *J. American Ceramics Society*, Vol. 70, (1987), p.689-698.

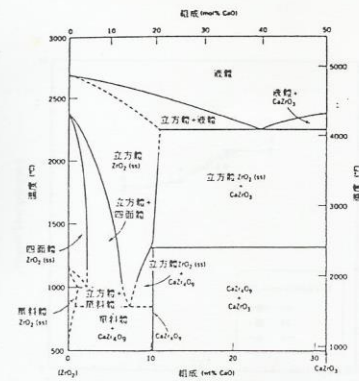


圖 1 氧化鋯—氧化鈣相圖

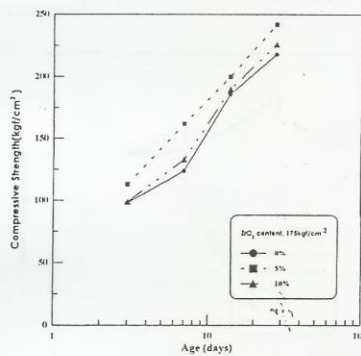


圖 2 添加完全穩定氧化鋯對抗壓強度之影響 ($f_c = 175 \text{ kgf/cm}^2$)

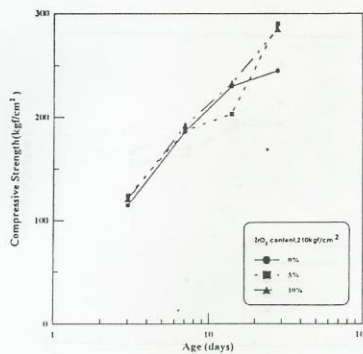


圖 3 添加完全穩定氧化鋯對抗壓強度之影響 ($f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$)

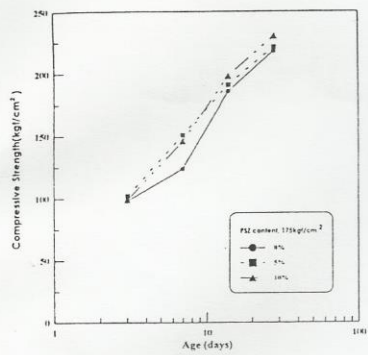


圖 4 添加部份穩定氧化鋅對抗壓強度之影響 ($f_c = 175 \text{ kgf/cm}^2$)

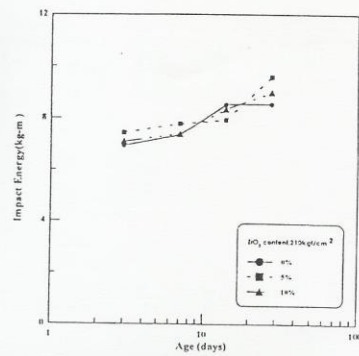


圖 7 添加完全穩定氧化鋅對衝擊能量之影響 ($f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$)

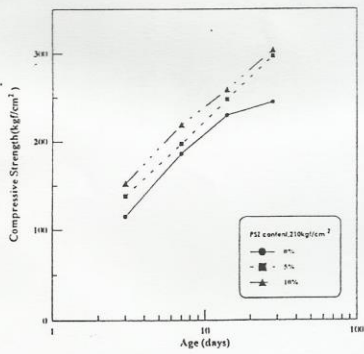


圖 5 添加部份穩定氧化鋅對抗壓強度之影響 ($f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$)

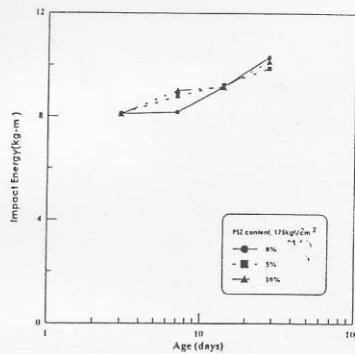


圖 8 添加部份穩定氧化鋅對衝擊能量之影響 ($f_c = 175 \text{ kgf/cm}^2$)

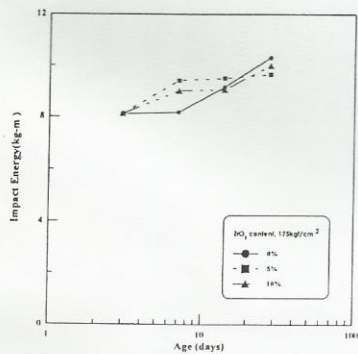


圖 6 添加完全穩定氧化鋅對衝擊能量之影響 ($f_c = 175 \text{ kgf/cm}^2$)

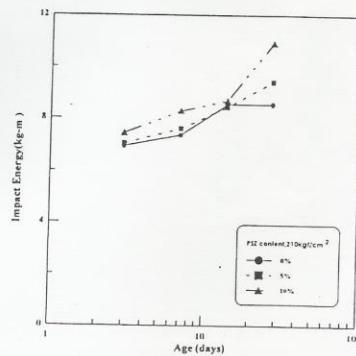


圖 9 添加部份穩定氧化鋅對衝擊能量之影響 ($f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$)