

## 氧化鋁混凝土韌性強化之研究-- 微裂縫機制

### Zirconia Toughened Concrete – Microcrack Mechanism

潘煌鏗<sup>1</sup> 郭文田<sup>2</sup> 蔡偉隆<sup>3</sup>

Huang Hsing Pan, Wen-Ten Kuo, Wei-Long Tsai

<sup>1</sup>高雄應用科技大學土木工程系教授

<sup>2</sup>高雄應用科技大學土木工程系副教授

<sup>3</sup>高雄應用科技大學土木工程系研究生

Department of Civil Engineering

Kaohsiung University of Applied Sciences

#### 摘要

混凝土添加具單斜結構之氧化鋁顆粒會使水泥砂漿產生許多額外的微裂縫，導致混凝土韌性增加，這是一種裂縫防衛機理。利用權函數理論、分解技巧和均值法所推導的裂縫周圍之韌性公式，可以適當求出脆性材料含微裂縫之韌性。氧化鋁混凝土的韌性和微裂縫含量與混凝土柏松比有關，但和微裂縫形狀無關。試驗結果顯示，水泥砂漿添加氧化鋁能夠增加砂漿強度、彈性模數及韌性。氧化鋁砂漿在 28 天材齡時，3% 氧化鋁體積含量可使抗壓強度提高 17%、彈性模數增加 14%、韌性增強 26%；若氧化鋁含量增加至 6% 時，其效果也約增加 2 倍；但當氧化鋁含量增加至 10% 時，強化性質的增加率會降低。

**關鍵字:**微裂縫、韌性強化、氧化鋁、混凝土

#### Abstract

Concrete consisting of the mortar and the monoclinic zirconia contains many micro-cracks. This leads to the toughness increments of concrete. It belongs to a kind of crack-shielding mechanisms. The analytic form of the toughness of the cracked solids is derived by means of the weight function theory, the decomposition technique and the mean-field approach. This formula is suitable for the crack-tip toughness of the damaged solid. The toughness change of zirconia toughened concrete depends on the crack density and the Poisson ratio of the concrete, but independent of the shape of the crack. Experimental results show that the mortar containing zirconia can increase its the compressive strength, the elastic moduli and the toughness. When the age of the zirconia toughened mortar is on the 28<sup>th</sup> day, the mortar with 3% zirconia increases 17% of its strength, 14% of its elastic moduli and 26% of its toughness. While the mortar contains 6% zirconia, the increasing rate of its effects will be almost two times of that with 3% zirconia. However, the increasing rate reduces if the concentration of zirconia is up to 10%.

**Key Words:** microcracks, toughening, zirconia, concrete

## 一、前言

本研究是高性能陶瓷材料的開發研究之一部份，主要是以微裂縫強化材料韌性(toughness)為研究目標，促使能有效阻止脆性材料中的主裂縫(main crack)繼續成長，即增加材料之韌性。研究重點是考量應力誘導微裂縫強化韌性機理在混凝土材料之功能，探討氧化鋁含量和混凝土材料韌性增加的關係。所選用陶瓷材料是以混凝土為主，而氧化鋁(zirconia)材料則是具有單斜結構(monoclinic structure)的顆粒，顏色為純白色，顆粒大小約在 $40\mu$ 左右。

當單斜結構氧化鋁均勻分佈在混凝土時，氧化鋁混凝土(ZTC)強度會比普通混凝土強度高；且混凝土在破壞之前會在氧化鋁顆粒附近會產生微裂縫，進而吸收能量，促使混凝土破壞韌性增加，具有增加材料韌性的優點。因此，本研究推導具不同微裂縫含量之雙相(two-phase)陶瓷材料微裂縫強化韌性理論為首要任務。其次，製造含微裂縫之氧化鋁混凝土，並試驗其相關力學性質，結果和本研究所推導之韌性強化理論做比較，以印證氧化鋁混凝土之可靠性，做為日後製造具耐震效果之氧化鋁混凝土的參考。

## 二、損傷材料韌性理論

為了求得含裂縫之損傷材料的韌性，首先利用微觀力學理論(micromechanics)及均值法(mean-field approach) [1-3]觀念來推導雙相複合材料的平均等效轉換應變(equivalent transformation strain)，經計算後得到

$$c_1 \langle \varepsilon_{kk}^* \rangle = m \varepsilon_{kk}^0 \quad (1)$$

其中  $c_1$ 、 $\varepsilon_{kk}^*$  和  $\varepsilon_{kk}^0$  分別為裂縫體積含量、等效轉換應變與施加外應力所產生的應變，符號  $\langle \rangle$  表示括符裏面變數的體積平均值。若裂縫為橢圓形(elliptic)且 3 度空間散佈在材料內部，則材料參數  $m = c_1 p = c_1 (p_2 / p_1)$ ，且

$$p_1 = 1 + c_1 [(a_{11} + a_{12} + a_{13})(S_{1111} + S_{2211} + S_{3311} - 1) + (a_{21} + a_{22} + a_{23}) \cdot (S_{1122} + S_{2222} + S_{3322} - 1) + (a_{31} + a_{32} + a_{33})(S_{1133} + S_{2233} + S_{3333} - 1)] / 3$$

$$p_2 = (a_{11} + a_{12} + a_{13} + a_{21} + a_{22} + a_{23} + a_{31} + a_{32} + a_{33}) / 3 \quad (2)$$

有關參數  $a_{ij}$  和  $S_{ijkl}$  可參閱 Pan and Weng [3]。

因材料韌性常用破壞韌性  $K_c$  來表示，而裂縫尖端的應力強度因子  $K_{tip} = K_0 + \Delta K$ ，此應力強度因子的變化  $\Delta K$  受微裂縫影響， $K_0$  為不含微裂縫之材料應力強度因子。本文採用權函數理論(weight function theory)來計算  $\Delta K$  如下[4]

$$\Delta K = \kappa_0 \int_A \langle c_1 \varepsilon_{kk}^* \rangle h_{i,i} dA \quad (3)$$

其中  $\kappa_0$ 、 $\mathbf{h}$ 、 $A$  分別代表母材的容積模數、權函數和裂縫尖端附近微裂縫區的面積。為了計算(3)式，必須使用分解法(decomposition sketch)[5]使得

$$\frac{K_{tip}}{K_0} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \left( \frac{K_{tip}^0}{K_0} \right) \left( \frac{K_{tip}}{K_{tip}^0} \right) \quad (4)$$

由(1)-(4)式及 J-積分[6]可求得含裂縫材料與不含裂縫材料之韌性比為

$$\frac{K_{tip}}{K_0} = f\sqrt{g} \quad (5)$$

若材料因外在環境改變使得內部有微裂縫產生，裂縫密度參數[7]為 $\eta$ ，當微裂縫形狀為圓形(circular crack)時，損傷材料之裂縫尖端附近的韌性可用(5)式計算，此時參數 $f$ 和 $g$ 為

$$f = \frac{27 + 96k_1(1 + \nu_0)^2 \eta}{27 + 4(1 + \nu_0)^2 \eta} \quad (6)$$

$$g = \{45(2 - \nu_0)[(45(2 - \nu_0) + 16(1 - \nu_0^2)(10 - 3\nu_0)]\} / \{45(2 - \nu_0)^2[45 + 32(5 + \nu_0)\eta] + 1024(1 - \nu_0^2)(5 - \nu_0)(5 - 2\nu_0)\eta^2\} \quad (7)$$

其中， $\nu_0$ 為母材的柏松比。常數 $k_1$ 在裂縫靜止時為 $1/24$ ；當裂縫以穩定狀態延伸時， $k_1 = -1/192$ 。

在使用(6)和(7)式計算材料韌性時，(5)式的 $K_0 = K_I$ 為第一種模式載重(Mode-I loading)狀態下的應力強度因子。

### 三、單斜氧化鋯混凝土

為了解氧化鋯混凝土韌性(ZTC)的韌性，採用臺灣水泥公司品牌第I型普通水泥，細骨材為符合ASTM C778規範之沃太華(Ottawa) C109標準砂，比重2.65，吸水率0.24%，而氧化鋯( $ZrO_2$ )比重5.8，顆粒粒徑 $40\mu$ 。

經試拌後，混凝土砂漿配比是固定以1:4.5之水泥與骨材重量比，並用固定0.4水膠比(W/B)做為配比依據，加入不同氧化鋯含量。本研究是以氧化鋯占砂漿體積0%、3%、6%、10%來製造氧化鋯混凝土，有關氧化鋯混凝土砂漿的材料用量見表一。

表一 氧化鋯砂漿單位體積用量( $kg/m^3$ )

材料	0%*	3%*	6%*	10%*
水	187	266	347	447
水泥	468	454	450	422
標準砂	2105	2042	2021	1895
氧化鋯	0	209	418	697

\*為氧化鋯體積含量。

氧化鋯砂漿試體尺寸為直徑10cm高20cm的圓柱，試驗材齡為7天、14天、21天和28天，依CNS 1230規定製造及養生，每種配比和材齡的試體至少有6個。試驗時，MTS試驗機是以0.002mm/sec速率施加载重，同時架設兩種伸長計(extensometer)來量測軸向及橫向變位，直到材料破壞為止。

經由相關試驗及量測，可以獲得氧化鋯砂漿的抗壓強度( $f_c'$ )、楊氏模數( $E$ )、柏松比( $\nu$ )、應力-應變曲線( $\sigma - \epsilon$ )、單位體積應變能( $U$ )等，並可用下列公式計算應力強度因子( $K$ )

$$K = \sqrt{2EG} \quad (8)$$

其中 $E$ 為材料破壞時之割線楊氏模數(secant Young's modulus)， $G$ 為單位面積的能量，和單位體積應變能 $U$ 有 $G = U \times 1$ (單位長度)的關係，而單位體積應變能 $U$ 為應力-應變曲線下的全部面積。

#### 四、結果與討論

經由權函數理論和均值法所推導含裂縫之損傷材料韌性，可以用(5)式--(7)式之簡單公式表示，損傷材料的韌性和母材的柏松比與裂縫密度有關。若材料受外力作用且主裂縫成長為穩定狀態(steady-state)，結果顯示，裂縫材料的柏松比越大，其韌性會較大，且裂縫密度越大，亦有相同情形；但當改變裂縫形狀時，發現損傷材料的韌性和微裂縫形狀無關。

有關氧化鋁砂漿的性質，圖 1 為抗壓強度與齡期關係，水泥砂漿添加氧化鋁會增加材料的抗壓強度，且隨著氧化鋁含量與材齡增加而增加，例如 28 天齡期時，氧化鋁在 3%、6%、10% 體積含量之氧化鋁砂漿抗壓強度會分別增加 17%、36%、40%，這顯示氧化鋁有增加混凝土材料強度的效果。

圖 2 為氧化鋁砂漿彈性模數與齡期關係，其中彈性楊氏模數(elastic Young's modulus)是由應力-應變曲線並依照 ASTM C49 規範計算求得。氧化鋁砂漿彈性模數和圖 1 類似，會隨著氧化鋁含量增加而增加，例如 28 天齡期時，氧化鋁在 3%、6%、10% 含量之砂漿彈性模數  $E$  值增加率分別為 14%、27%、37%，表示氧化鋁亦有增加混凝土材料彈性模數的效果。

比較圖 1 和圖 2 得知，氧化鋁體積含量在 3% 和 6% 時，砂漿抗壓強度與彈性模數  $E$  值的增加率皆約為兩倍；但在 10% 氧化鋁時之增加率則不再隨氧化鋁體積含量呈線性增加，這有可能此時隨著氧化鋁體積增加，氧化鋁砂漿內部的微裂縫增加快速而影響抗壓強度與彈性模數。

為了獲得砂漿添加氧化鋁後的材料韌性，氧化鋁砂漿之單位體積應變能( $U$ )可經由計算應力-應變曲線下之全部面積求得。圖 3 是氧化鋁砂漿單位應變能與齡期關係，隨著氧化鋁含量增加應變能亦增加，這是因為氧化鋁砂漿強度及應變量都增加的緣故，其中應變量會增加是因為氧化鋁造成之微裂縫增多之故。

圖 4 是氧化鋁砂漿韌性  $K$  與齡期關係，韌性是由(8)式、圖 3 之單位應變能和材料破壞時之割線楊氏模數計算而繪出的。由圖 5 得知，氧化鋁含量能夠增加砂漿韌性，其增加率  $K/K_0$  在材料齡期初期時效果越好；隨著氧化鋁含量增加而遞減。

若氧化鋁砂漿韌性  $K = K_0 + \Delta K$ ， $\Delta K$  為砂漿添加氧化鋁所增加的韌性，則材料裂縫尖端之應力強度因子  $K_{tip} = K_0 - \Delta K$ 。圖 6 為氧化鋁砂漿與水泥砂漿之應力強度因子比  $K_{tip}/K_0$  與齡期關係，結果顯示氧化鋁含量增加，砂漿韌性也隨著增加，因此證明氧化鋁確實能夠改善混凝土的韌性。

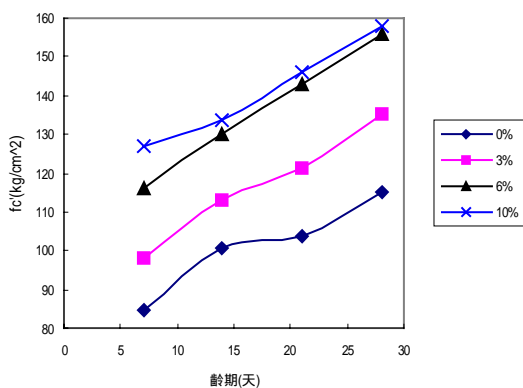


圖 1 氧化鋁砂漿抗壓強度與齡期關係

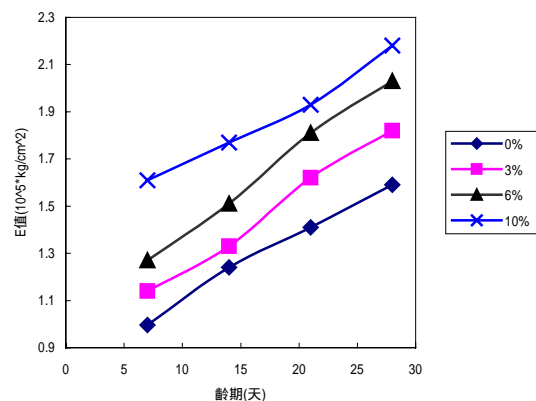


圖 2 氧化鋁砂漿彈性模數與齡期關係

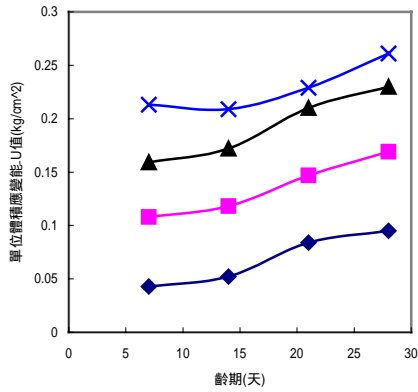


圖 3 單位體積應變能(U)與齡期關係

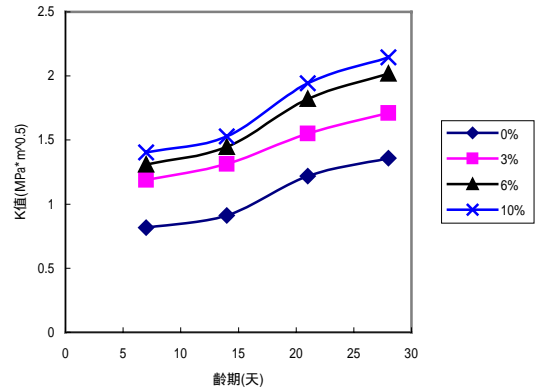


圖 4 氧化鋁砂漿韌性與齡期關係

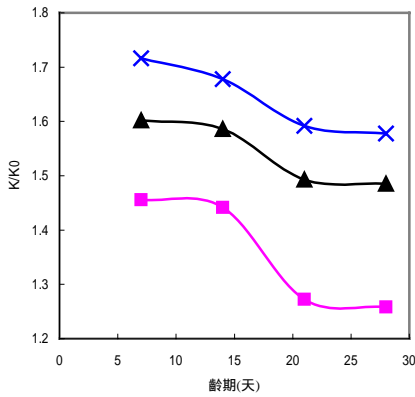


圖 5 氧化鋁砂漿韌性比  $K/K_0$  與齡期關係

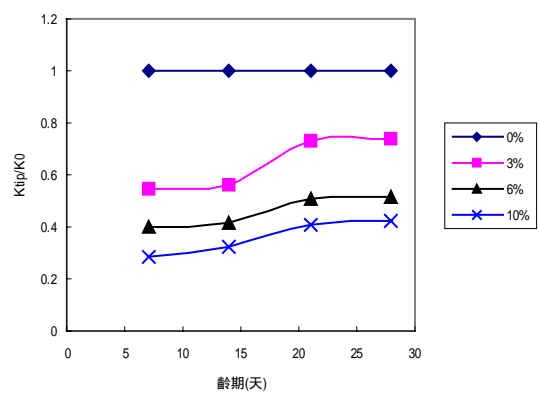


圖 6 應力強度因子比  $K_{tip}/K_0$  與齡期關係

## 五、結果與討論

本研究得到成果如下：

1. 推導含裂縫之損傷材料的韌性公式，只要量測材料裂縫密度及母材柏松比，就可計算材料韌性增加量。
2. 混凝土添加單斜結構氧化鋁有增加抗壓強度、彈性模數及韌性的功效。
3. 添加 3%、6%、10% 氧化鋁體積含量之氧化鋁砂漿，在 28 天齡期時，抗壓強度會分別增加 17%、36%、40%；彈性模數  $E$  值增加率分別為 14%、27%、37%。
4. 隨著氧化鋁含量增加，氧化鋁砂漿應變能亦會增加，這是因為氧化鋁砂漿強度及應變量都增加的緣故，其中應變量會增加是因為氧化鋁造成砂漿內之微裂縫增多。
5. 氧化鋁體積含量在 6% 以下時的功效較佳。

## 六、致謝

本研究感謝國科會 NSC 90-2211-E-151-004 提供專題計畫之補助。

## 七、參考文獻

1. Eshelby, J.D., "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problem," Proc. Royal Soc., London, Ser. A 241, pp. 376-396 (1957).

2. Mori, T. and Tanaka, K., "Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metall.*, Vol. 21, pp. 571-574 (1973).
3. Pan, H.H. and Weng, G.J., "Elastic Moduli of Heterogeneous Solids with Ellipsoidal Inclusions and Elliptic Cracks," *Acta Mechanica*, Vol. 110, pp.73-94 (1995).
4. Rice, J. R., "Weight Function Theory for Three -Dimensional Elastic Crack Analysis," *Fracture Mechanics*, ASTM STP 1020, pp. 29-57 (1989).
5. Hutchinson, J. W., "Crack Tip Shielding by Micro-Cracking in Brittle Solids," *Acta Metallurgica*, Vol. 35, pp. 1605-1619 (1987).
6. Rice, J. R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Crack," *J. Applied Mech.*, pp. 379-386 (1968).
7. Budiansky, B. and O'Connell, R. J., "Elastic Moduli of a Cracked Solid," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 12, pp. 81-97 (1976).