

氧化鋯強化高性能混凝土樑韌性 Zirconia-Toughened High Performance Concrete Beams (KUAS-92-CI-001)

粘志偉¹ 潘煌鏗*
國立高雄應用科技大學土木工程系

摘要

探討高性能混凝土之膠結材和砂漿添加完全穩定氧化鋯對材料抗壓強度、彈性模數和破壞韌性的影響，並對氧化鋯混凝土樑進行反覆載重試驗。結果顯示，氧化鋯體積含量在4%時，所獲得的高性能水泥基複合材料性質最佳，在28天齡期之高性能水泥漿和高性能砂漿的抗壓強度分別增加15%和11%，而破壞韌性分別增加6%和5%；當氧化鋯體積含量達6%時，因微裂縫或其他因素，將不利於氧化鋯強化高性能混凝土。氧化鋯混凝土樑受正弦反覆位移作用時，初期載重和未添加氧化鋯的混凝土樑相同，但隨著反覆作用次數增加其應內部應力值會降低，這顯示氧化鋯混凝土能增加混凝土樑的韌性。

Abstract

The cement paste and the mortar of high performance concrete adding stabilized zirconia have been investigated to show their strength, elastic moduli and fracture toughness. Meanwhile, zirconia-toughened concrete beams are subjected to a cycle loading here. Results show that the matrix of HPC obtains the optimum materials properties when the volume fraction of zirconia is at 4%. The compressive strength of cement paste and the mortar at the 28th day of the age increases 15% and 11% individually, and their fracture toughness increases 6% and 5% in turns. Zirconia at 6% volume concentration of the binders will degrade the material properties of HPC due to the microcracking or some other unknown factors. If a sine cycle deformation apply to zirconia-toughened concrete beams, the stresses in the beam do not have much differences with and without adding zirconia in the beginning, and the stresses in the beam with zirconia decrease when the numbers of cycle continue to increase. This reveals that zirconia can enhance the fracture toughness of the concrete beams.

1. 前言

台灣地區位處於地震帶上，地震力之影響就像施加不規則反覆載重之情形，因此造成複雜的力學行為發生。近幾年來台灣地區地震頻傳且規模也較大(如921集集大地震)，造成建築物嚴重損毀倒塌，使得工程界開始著重於結構耐震設計方面，卻忽視混凝土材料可能造成的影響。耐震良好結構物受外力作用雖然結構沒損害，但由於混凝土材料韌性性質差內部存在之裂縫，將因反覆載重於持續荷重下造成裂縫寬度會持續增加而使得鋼筋裸露【1】，一旦與外界空氣相接觸將造成鋼筋產生腐蝕及體積膨脹情形發生，對整體結構性能也有影響，所以除了重視結構耐震外，混凝土材料韌性問題也應該值得重視。

陶瓷材料屬於脆性材料且韌性差，對拉力的抵抗力較弱，所以材料容易產生裂縫，因此近年來學術界提出許多強化脆性材料韌性理論【2-4】，並實際的應用到陶瓷材料上而研發出許多高性能陶瓷材料。近20年來，在強化陶瓷材料韌性的主要機理中，應用最廣且經證實有效果的方式是在陶瓷材料加入氧化鋯(ZrO_2)，這是因為氧化鋯的特殊物理性質可抑制裂縫的成長及傳播，且能強化材料的韌性、強度與耐磨耗等性質。

由於混凝土材料屬於陶瓷材料一種，只是兩者製程方式不同，但其性質都是屬於脆性材料，所以混凝土材料也同樣面臨著韌性差的問題。目前國內營建工程仍然普遍使用鋼筋混凝土材料，主要因為混凝土材料具有較高可塑性、經濟性及工作性佳等優點，所以鋼筋混凝土材料仍然為主流。

混凝土材料在國內外學術研究已有很久的歷史，由早期傳統混凝土不斷改良演進至今高性能混凝土，仍然無法給使用者感到完全滿意，而主要原因是混凝土屬於脆性材料，雖具有很高的抗壓強度，但其抗拉能力約為抗壓力強度的1/10，所以混凝土不常被使用在抵抗拉力的構件上。當混凝土

拌合完成後，由開始初凝至硬化期間因溫度變化及乾縮等因素影響，使混凝土體積變化，間接的造成混凝土內部有些許裂縫的產生，由於混凝土抗拉能力差，所以只要混凝土在受到微量拉力與彎曲變形，內部裂縫就會開始延伸造成混凝土構件損傷。為了避免裂縫的延伸及增加其韌性，以前研究曾在混凝土中加入鋼纖維或玻璃纖維，而鋼纖維的增韌機制來自於纖維與基材間的握裹、纖維橋接及裂縫的偏轉【5-6】，利用纖維所產生之屏障使裂縫交替機制得以發揮【7-8】。

近年來混凝土發展主要求得較高之強度及耐久性，在高強度要求下混凝土極限強度也變得較高，相對的其脆性性質就顯得較差，當受到彎曲行為作用將造成樑外圍混凝土材料無預警性破壞，所以提昇混凝土材料韌性就顯的格外重要，因高韌性材料可吸收較多能量，使得混凝土材料破壞時產生預警作用。因此，希望利用氧化鋯能強化陶瓷材料韌性之特性，將氧化鋯與混凝土材料相結合，可改變混凝土材料成為高韌性的複合材料，並探索氧化鋯對混凝土材料是否持續有正面影響，使得結構破壞時產生預警作用不至於造成嚴重的傷亡。

本研究目的首要是探討氧化鋯添加於高性能混凝土材料之可行性，並了解不同氧化鋯含量對於母材(matrix)強度與破壞韌性之影響，以了解氧化鋯高性能混凝土的力學行為。為探討氧化鋯添加於水泥基複合材料中強度與韌性行為，以水泥基為母材，氧化鋯為介質(inclusions)。水泥基有水泥漿(cement paste)與水泥砂漿(mortar)兩種；氧化鋯為具單斜結構(monoclinic structure)之完全穩定氧化鋯(FSZ)，氧化鋯體積含量 c_1 (volume fraction) 有四種，即 $c_1 = 0$ ， $c_1 = 0.02$ ， $c_1 = 0.04$ ， $c_1 = 0.06$ ，有三種齡期為14、28和90天。最後，由這四種含量中找出對高性能混凝土強度與韌性有效的最佳氧化鋯含量，將此含量添加於高性能RC梁中進行反覆載重實驗，以瞭解其做為結構耐震材料的可能性。

2. 文獻回顧

2.1 脆性材料對裂縫成長之影響

對工程材料而言，材料破壞型式大致可分為延性與脆性兩種，兩者型式的差異在於材料本身破壞前是否吸收能量且產生塑性變形。延性材料在破壞前會吸收能量產生較大的塑性變形；脆性材料正好相反甚至完全沒有塑性變形產生。通常脆性材料破壞的發生都由材料本身內部缺陷或裂縫處所引起，因為外作用應力將造成缺陷或裂縫尖端處呈現放大集中效應，此放大效應的大小視裂縫方位和形狀而定， σ_0 為外作用張應力， σ_m 為裂縫尖端最大應力，兩者的關係式為：

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 a 為裂縫長度， ρ 為裂縫尖端曲率半徑。

外作用應力與裂縫尖端應力之間有放大效應關係，若將 σ_m/σ_0 就可知兩者間呈現幾倍的效應，此值稱為應力集中因子 K_t ：

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

然而材料本身的性質對於裂縫的成長也是有影響的，如延性材料破壞前，內部已存在的裂縫尖端附近處將產生塑性變形，並且吸收能量造成裂縫成長變的緩慢或者停止，除非持續增加外應力才能驅使裂縫繼續成長延伸；相反的脆性材料破壞前，由於材料本身不易產生塑性變形，所以裂縫尖端附近處將產生較少的塑性變形，一但裂縫產生就會迅速的延伸甚至直到材料破壞為止。

¹粘志偉，土木與防災科技研究所研究生；*潘煌鏗，土木工程系教授

Griffith 認為脆性材料的破壞可分為裂縫的生成和裂縫的成長兩各階段，Griffith【9】的理論主要論點在於裂縫的成長。當脆性材料受到張力作用時裂縫將會持續的成長，裂縫前進的過程中隨之釋放應變能；同時表面又會產生新的自由表面能，藉由這兩種能量之平衡觀念，導出對於脆性材料破壞所需之應力，此公式包含材料性質與缺陷對材料強度的影響，即：

$$\sigma_c = \left[\frac{2E\gamma_i}{\pi a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中 σ_c = 材料破壞時的應力， a = 已存在裂縫長度， E = 楊氏模數， γ_i = 裂縫成長表面應變能。

作用在材料之外應力與裂縫對於材料破壞時有三種不同的破壞方式，一般脆性材料的破裂以載重模式 I 最常發生，為了求得在 X-Y 平面上載重模式 I 破壞裂縫附近任何一點的應力狀況可由下式得之。

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad (4)$$

$$\sigma_{xy} = \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}$$

其中 K_I = 載重模式 I 的應力強度因子 (Stress Intensity Factor)， r = 某點至裂縫尖端的距離， θ = 某點至 x 軸的夾角， ν = 柏松比。應力強度因子以 K_I 表示，可表示為

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

其中 a = 裂縫長度， σ = 外作用應力， Y = 與裂縫形狀有關的參數，應力強度因子 K 的單位為 $MPa\sqrt{m}$ 。

2.2 破壞韌性

高韌性材料表示其內部裂縫很難因外載重作用而繼續蔓延；反之，則內部裂縫容易因外載重作用而發生繼續延伸現象。材料內部裂縫是否成長可由應力強度因子 K_I 作為判斷，應力強度因子可以決定裂縫周圍的應力強度狀況，可作為材料破壞時的指標。當外應力越大，材料內部所引起的應力強度因子 K_I 值也隨著變大，此時裂縫還沒開始成長；當應力強度達到某一臨界應力值 σ_c 時，裂縫將會開始成長，此時的應力強度因子可定義為 K_{Ic} (破壞韌性)。由這兩者的關係可以得知， $K_I < K_{Ic}$ 時表示材料對裂縫成長有阻止能力，則材料不會破裂；相反的 $K_I > K_{Ic}$ 時，則材料就會破裂。

2.3 鋼筋混凝土樑

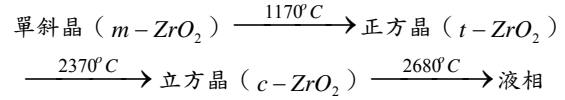
鋼筋混凝土樑之設計理念是希望結構物為預警性破壞，所以必需提昇樑之延展性及撓曲強度，Lin and Lee【10】提出增加拉力筋量可提昇樑之撓曲強度；而提高混凝土強度、增加壓力筋量或拉力筋量，亦可增加樑之延展性，其中延展性具有預警作用，另外，撓曲強度會減少樑的變位撓度。反覆載重對結構物有一定的影響，由過去相關研究顯示鋼筋混凝土材料在反覆載重下承力行為受到下列因素影響【11-12】：(1) 混凝土強度 (2) 縱向鋼筋比 (3) 加載方式 (4) 正負撓曲鋼筋比，(5) 剪力筋間距等，影響的因素相當多且複雜。

結構的疲勞通常在反覆應力或應變循環作用一段長時間之後發生，如橋樑。疲勞對結構物破壞可分為三個階段：(1) 裂縫產生，裂縫在高應力集中處某一點產生；(2) 裂縫成長，裂縫在應力反覆循環下造成裂縫不斷前進；(3) 破壞，當裂縫成長達到某一臨界時破壞非常迅速。鋼筋混凝土的疲勞數據通常以 S-N 圖來表示，S 為應力；N 為破壞荷重循環次數之對數關係。一般而言，混凝土至少超過 10^7 荷重循環都不會出現疲勞極限【13】。

2.4 氧化鋁

陶瓷材料屬於脆性材料。它的破壞韌性一般都低於 $10 MPa\sqrt{m}$ ，反之有些金屬材料破壞韌性大約在 $100 MPa\sqrt{m}$ 左右，顯示陶瓷材料破壞韌性很差。因為陶瓷複合材料製造過

程中將會產生缺陷與裂縫存在，而脆性材料對缺陷的存在非常的敏感，這兩項因素也將損害材料本身的強度與韌性。近年來提出許多強化脆性材料韌性理論，其中強化陶瓷複合材料的機制，以添加氧化鋁方式增韌，添加後對於陶瓷複合材料無論在強度及韌性上皆有明顯的突破，克服了陶瓷材料先天缺陷，一般而言完全穩定氧化鋁的強度和韌性較差；部分穩定氧化鋁 (PSZ) 具有較高的韌性。氧化鋁會隨這不同的溫度呈現不同的晶體結構如下：



在室溫下氧化鋁為單斜晶狀態，若要讓氧化鋁在室溫下維持正方晶 (tetragonal) 及立方晶 (cubic) 相，必須添加 MgO、CaO、 Y_2O_3 、 Al_2O_3 等安定劑，使得高溫的穩定相能在室溫下存在。為了改善陶瓷材料的破壞韌性，有兩個主要機制被證明是有效的：相變增韌和微裂縫增韌。因此，氧化鋁的增韌機制可分為氧化鋁相變增韌和微裂縫的增韌兩種，早期氧化鋁的增韌被認為只有相變增韌，後來又提出微裂縫增韌【14】。

2.4.1 氧化鋁相變增韌機制

根據熱力學平衡的理論，在兩相陶瓷材料中應力誘發相變轉換的形況是建立的。室溫下氧化鋁以正方晶相存在，對相變轉換增韌來說，當一成長裂縫尖端靠近高應力區，部分穩定氧化鋁在母材中受到應力誘導下將使正方晶氧化鋁 ($t-ZrO_2$) 轉換成單斜晶氧化鋁 ($m-ZrO_2$) 的過程稱為相變，此相變被認為是一種馬氏體相變 (麻田散型) 轉換且吸收應變能，在這過程中相的轉換需要一個相當數量的體積膨脹，約引起 3%~5% 的體積變化，對於裂縫尖端產生一個壓的應力，同時消耗能量有助於減少應力強度因子。靠近裂縫尖端的微裂縫可以減緩裂縫的成長，使得裂縫延伸就需要更高的壓應力，因此而改善它的增韌，如圖 1。

對於某些脆性材料而言顆粒受到應力誘發將導致馬氏體的相變轉換，馬氏體的相變主要是根據能量的變化所伴隨的相變，使得材料韌性增加。此韌性的增加可能來至於殘留應變發展下的相變和極限裂縫開始延伸兩項結果所造成，對於相變增韌的問題有許多理論可以解得韌性的變化

2.4.2 微裂縫的增韌機制

主裂縫導致氧化鋁相變產生外，體積膨脹的過程中，使得單斜晶周圍形成微裂縫，將主裂縫分岔，並吸收能量阻止裂縫的延伸，因此提高破壞韌性，如圖 2。Hoagland 和 Embury【15】談到微裂縫數目確實有助於韌性增加作用，一般微裂縫增韌模數包括微裂縫密度、微裂縫長度和微裂縫分佈狀況；Rose【16】認為雖然微裂縫有增韌的效果，但當微裂縫增加到一定量後增韌效果就開始減少，主要因為當有足夠的微裂縫密度時，微裂縫開始連接形成大裂縫以穩定的方式前進。

3. 試驗計劃

3.1 試驗材料

本試驗使用的材料性質如下：

- (1) 水泥：台灣水泥公司生產之品牌第 I 型普通水泥，比重 3.15，其性質符合 CNS 61 之規定。
- (2) 飛灰：台電興達廠生產，比重 2.19，細度 (Blaine) $3110 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。
- (3) 爐石：高雄中聯爐石公司生產，比重 2.87，細度 $4350 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。
- (4) 粗骨材：高雄荖濃溪河砂，比重 2.67，細度模數 $FM=3.05$ 。
- (5) 粗骨材：高雄荖濃溪骨材，比重 2.65。
- (6) 強塑劑：高正公司生產之 Type-G 強塑劑，符合美國 ASTM C494 G-Type 級規範。
- (7) 氧化鋁：格雷蒙股份有限公司 (Gredmann) 所製造之產品，比重 5.8，粒徑 $10 \mu\text{m}$ 。
- (8) 鋼筋：#3 鋼筋， $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ 。

3.2 試驗配比

水膠比 (W/B) = 0.32，其中添加物 (介質) 為完全穩定氧化鋁，體積含量 c_i 分別為 0%、2%、4% 和 6%，如表 1；高性能混凝土配比如表 2；而水泥基材是已知高性能混凝土配比中，若不包括粗細骨材，則母材 (基材) 為水泥漿，配比如表 3；若

不包括粗骨材，則母材為砂漿，配比如表 4。

3.3 試體製作

兩種水泥基材，齡期包括 14、28、90 天，每種配比分別製作兩組不同尺寸的圓柱試體，即 $5\phi * 10\text{cm}$ 和 $10\phi * 20\text{cm}$ ，總共製作 216 個抗壓試體；抗彎試體尺寸為 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ ，並在試體中央處邊緣預留 0.4cm 的裂縫，總共製作 144 個抗壓彎試體。有關試體拌合程序依 CNS 1230 規定，製作過程及搗實依照 CNS 1231 規定。另外，選用最佳配比之高性能水泥基材製造 RC 短樑，短梁尺寸為 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 53\text{cm}$ ，且置入兩根 3 號鋼筋如圖 3，氧化鋁含量為 0% 和 4%，每種配比至少製作 2 根，齡期 28 天。

3.4 試驗方法

在不同齡期之圓柱試體上架設軸向與側向伸長計，並置於 MTS 試驗機，以應變率 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-5} / \text{sec}$ 的速率加載，量測完整的應力-應變曲線和抗壓強度，且計算楊氏模數 E 值和柏松比 ν 值；並用三點彎矩法對抗彎試體進行試驗，利用破壞韌性公式。【17】

$$K_c = \frac{3Pl}{2bh^2} Y \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

計算材料的破壞韌性，其中 K_c = 破壞韌性； P = 破壞載重； l = 試體跨度； b = 試體斷面寬度； h = 試體斷面高度； a = 預留裂縫；本研究 $a = 0.4\text{cm}$ ，形狀因子 $Y = 0.97$ 。

RC 梁加載方式以位移控制加載，反覆位移為 $0.85 \pm 0.25 \text{ mm}$ 以正弦(sine)波加載，頻率為 0.5Hz；週期 2 秒。

4. 結果與討論

4.1 抗壓強度與變形

對高性能混凝土中的母材(水泥漿和砂漿)添加氧化鋁，在不同齡期和氧化鋁含量之極限抗壓強度 σ 結果見圖 4 和圖 5。毫無疑問的，在相同氧化鋁含量下，不管是水泥漿和砂漿的抗壓強度都會隨齡期增加而增加。當氧化鋁含量增加時，水泥漿和砂漿的抗壓強度亦會隨含量增加而增加，其抗壓強度的增加率 σ / σ_0 ，在氧化鋁含量 4% 時達到高峰，即抗壓強度約增加 10%~15%，其中 σ_0 為 $c_1 = 0$ 的材料極限抗壓強度；但當氧化鋁含量在 6% 時之材料抗壓強度的增加率反而下降，尤其在齡期 90 天的抗壓強度比不加氧化鋁時的強度還低，這意味著高性能混凝土使用氧化鋁來增加抗壓強度的含量限制。

由圖 6 得知，高性能水泥漿極限強度時之應變量 ϵ 會隨齡期增加而減少；且除了氧化鋁含量 6% 外，添加氧化鋁亦能夠增加其極限強度時之應變量，這隱含著添加氧化鋁能夠強化高性能水泥基複合材料的韌性。

4.2 破壞韌性

由應力-應變曲線所得楊氏模數和柏松比經計算後，得到未添加氧化鋁之高性能水泥基複合材料 ($c_1 = 0$) 的容積模數 κ (bulk modulus) 和剪力模數 μ (shear modulus) 如表 5，而氧化鋁容積模數為 172.5 GPa，剪力模數為 79.6 GPa。比較高性能水泥基複合材料和氧化鋁的彈性模數，知道氧化鋁的彈性模數比水泥基複合材料的彈性模數高，因此理論上將氧化鋁加入水泥基複合材料應該會增加材料的抗壓強度和彈性模數，且其破壞韌性會變小。但由圖 4、圖 5 所示，當砂漿的氧化鋁含量在 6% 時，因微裂縫的影響大於材料性質的影響導致其強度和彈性模數反而降低，這表示微裂縫數目是隨著氧化鋁含量增加而增加，因此含氧化鋁之高性能水泥基複合材料的破壞韌性亦會受微裂縫影響而改變。

經由抗彎試驗和破壞韌性計算所得之高性能水泥基複合材料破壞韌性 K 見表 6、表 7，或圖 7。由破壞韌性的結果顯示，不管是水泥漿或砂漿的破壞韌性都會隨著齡期和氧化鋁含量增加。圖 8 和圖 9 為兩種材料的破壞韌性增加率 (K_m / K_0)，其中 K_0 為未添加氧化鋁材料的破壞韌性，以齡期 90 天的破壞韌性增加率為例，水泥漿含 4% 和 6% 氧化鋁的韌性增加率分別為 7% 和 11%，而砂漿則分別為 1% 和 2%，因此水泥漿的破壞韌性增加率比砂漿大，這是因為高性能砂漿內的水泥漿含量比高性能水泥漿少所導致的。

4.3 反覆載重

對於 28 天齡期之高性能混凝土短梁受反覆載重作用下，無添加與添加 4% 氧化鋁含量之抗壓強度結果見圖 10 和圖 11。在相同位移控制下兩根 RC 樑反覆作正弦波位移加載，載重強度大約都在 65 kN~20 kN 區間，顯示兩試體初期反覆加載並無差異。但在長時間反覆位移下如圖 12，發現反覆加載越久試體雖然沒有破壞，但 RC 樑應力有下降現象，顯示疲勞破壞第一階段(疲勞微裂縫)可能已經產生；比較 0% 氧化鋁與添加 4% 氧化鋁之 RC 樑應力，在加載位移時的應力值都很接近，約 61kN，但在卸載時之 RC 樑應力則不同，0% 氧化鋁之應力約 21kN，但 4% 氧化鋁之 RC 樑應力則降為 17kN，顯示添加氧化鋁之 RC 樑能夠吸收額外能量，具耐震效果。

5. 結論

- (1) 高性能水泥基複合材料添加氧化鋁能夠增加材料的抗壓強度；但氧化鋁含量超過 4% 時，其抗壓強度反而降低，顯示增加氧化鋁含量會導致水泥基複合材料產生額外的微裂縫。
- (2) 高性能水泥基複合材料極限強度的應變會隨著齡期增加而減小；在氧化鋁含量小於 6% 時，增加氧化鋁含量能夠提高材料的應變量。
- (3) 氧化鋁的破壞韌性比一般高性能水泥基複合材料 ($c_1 = 0$) 低，但因含氧化鋁的複合材料破壞時會在氧化鋁顆粒附近產生一些微裂縫，有助於增加高性能水泥基複合材料的韌性。
- (4) 使用氧化鋁來強化高性能水泥基複合材料性質，其含量以 4% 最佳。
- (5) 結果顯示，RC 樑添加氧化鋁在反覆載重作用下確實能吸收外載重的能量，可作為一種新耐震材料。

參考文獻

1. Nawy, E. G., "Crack Control in Reinforced Concrete Structure," ACI Journal, Oct., pp.825-836, 1968.
2. Evans, A.G., and Fu, Y., "Some Effects of Microcracks on the Mechanical Properties of Brittle Solids - II. Microcrack Toughening," Acta Metallurgica, Vol.33, pp. 15, 1985.
3. Becher, P.F., and Tiegs, T. N., "Toughening Behavior Involving Multiple Mechanisms: Whisker Reinforcement and Zirconia Toughening," Journal of American Ceramics Society, Vol. 70, pp. 651-654, 1987.
4. 蔡偉隆、潘煌鏗，"氧化鋁混凝土的力學性質"，專題研究論文，2002。
5. Mandel, J., S. Wei, and S. Said, "Studies of the Properties of the Fiber-Matrix Interface in Steel Fiber Reinforced Mortar," ACI Materials Journal, Vol. 84, pp.101-109, 1987.
6. Stang, H., Z. Li, S. P. Shah, "Pull-out Problem: Stress Versus Fracture Mechanical Approach," ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, pp.2136-2150, 1990.
7. Swamy, R. N., Ail. S. A. R., and Theodorakopoulos, D. D., "Engineering Properties of Concrete Composites Materials Incorporating Fly Ash and Steel Fibers," ACI SP-79, Detroit Michigan, pp.558-559, 1983.
8. Tarng, K. M., Chern, J. C. and Chen, H. W., "Determination of R-Curves of Steel Fiber Reinforced Concrete from Size Effect Tests," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 14, No.2, pp. 173-184, 1991.
9. Griffith, A. A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," Philos. Trans.R.Soc. Lond., A221, 163.
10. Lin, C. H., and Lee, F. S., "Ductility of High-Performance Concrete Beams with High-Strength Lateral Reinforcement," ACI Structural Journal, V.98, No.4, July-Aug., pp.600-608, 2001.
11. Fenwick, R. C. and Fong, A., "The Behaviour of Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading," Bulletin, New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.12, No.2, June, pp.158-167, 1979
12. Naim C. K. and Darwin, D., "Cyclic Behavior of Lightly Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Sept.-Oct.,

pp.777-783, 1986.

13. William D. Callister, JR. "Materials Science and Engineering Introduction," 5/E, John Wiley & Sons.
14. S. Sridharan, M. Toumozawa, "Toughening of glass - ceramics by both Transformable and transformed zirconia," Journal Of Non Crystalline Solids pp262-270, 1995
15. Hoagland, R. G. and Embury, J. D., "A Treatment of Inelastic Deformation Around a Crack Tip due to Microcracking," J. American Ceramics Soc., Vol. 63, No.7-8, pp404-410, 1980
16. Rose, L. R. F., "Effective Fracture Toughness of Microcracked Materials," J. American Ceramics Soc., Vol.69, No.3, pp.212-214, 1986.
17. J. E. Srawley, "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens," Int. J. Frac. Mech., 12, pp475-476, 1976

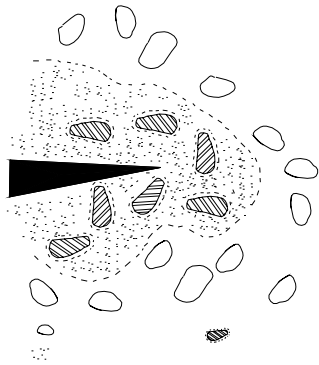


圖 1 轉換增韌

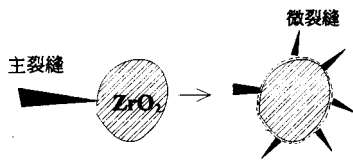


圖 2 微裂縫增韌

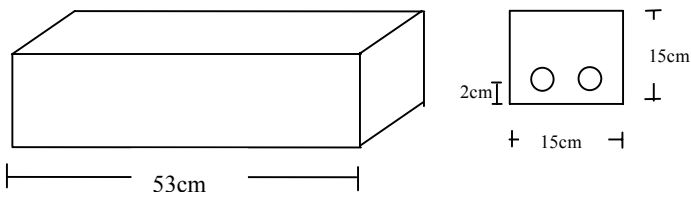


圖 3 短梁尺寸圖

表 1 介質體積含量

c_1	0	0.02	0.04	0.06
水泥基材	100 %	98 %	96 %	94 %
氧化鋯	0 %	2 %	4 %	6 %

表 2 高性能混凝土與氧化鋯之配比 (kg/m³)

材料 ZrO_2 含量	水泥	爐石	飛灰	砂	骨材	水	強塑劑	ZrO_2
0%	447	26	80	728	971	165	11.6	0
2%	438	24	78	704	953	162	11.3	116
4%	428	23	77	689	932	159	11.1	232
6%	419	23	76	673	913	155	10.9	348

表 3 水泥漿與氧化鋯之配比 (kg/m³)

材料 ZrO_2 含量	水泥	爐石	飛灰	水	強塑劑	ZrO_2
0%	1226	68	219	468	16.3	0
2%	1210	67	215	459	15.6	116
4%	1177	66	211	449	15.3	232
6%	1153	65	206	440	15.3	348

表 4 砂漿與氧化鋯之配比 (kg/m³)

材料 ZrO_2 含量	水泥	爐石	飛灰	砂	水	強塑劑	ZrO_2
0%	704	39	127	1123	270	9.2	0
2%	690	38	125	1100	265	9.0	116
4%	676	37	122	1078	259	8.8	232
6%	662	37	120	1055	254	8.6	348

表 5 高性能水泥基複合材料 ($c_1 = 0$) 彈性模數 (GPa)

材料性質		14 天	28 天	90 天
水泥漿	容積模數 κ	7.15	8.52	10.65
	剪力模數 μ	5.59	7.27	8.06
砂漿	容積模數 κ	8.35	10.88	11.57
	剪力模數 μ	9.83	10.54	11.05

表 6 高性能水泥漿破壞韌性 K_m ($MPa\sqrt{m}$)

ZrO_2 含量	14 天	28 天	90 天
0%	0.210	0.261	0.288
2%	0.230	0.271	0.296
4%	0.242	0.276	0.308
6%	0.247	0.282	0.313

表 7 高性能砂漿破壞韌性 K_m ($MPa\sqrt{m}$)

ZrO_2 含量 \ 齡期	14 天	28 天	90 天
0%	0.401	0.443	0.482
2%	0.426	0.451	0.483
4%	0.436	0.464	0.486
6%	0.437	0.465	0.489

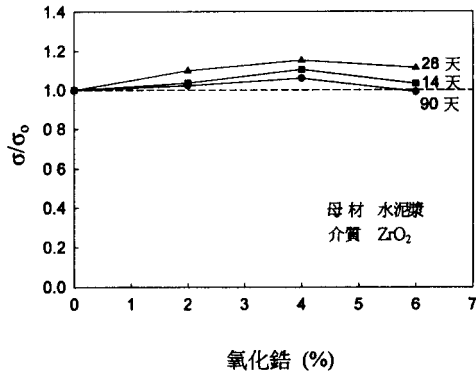


圖 4 高性能水泥漿抗壓強度增加率。

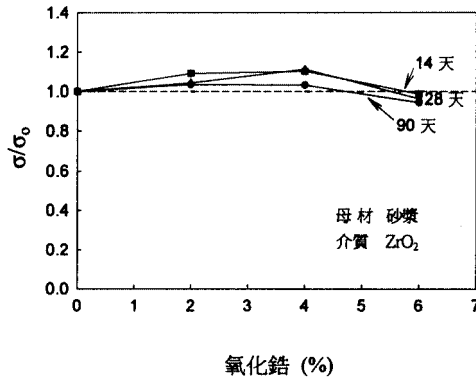


圖 5 高性能砂漿抗壓強度增加率

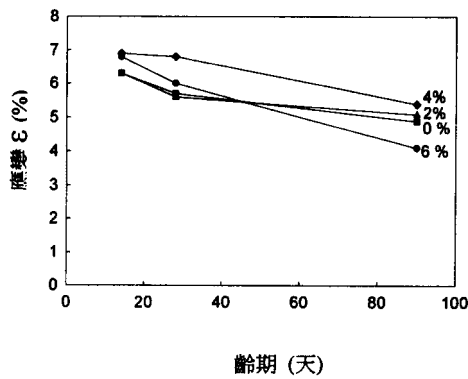


圖 6 高性能水泥漿極限強度時應變。

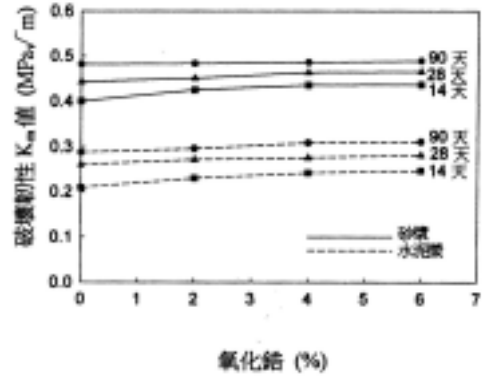


圖 7 高性能水泥基複合材料破壞韌性。

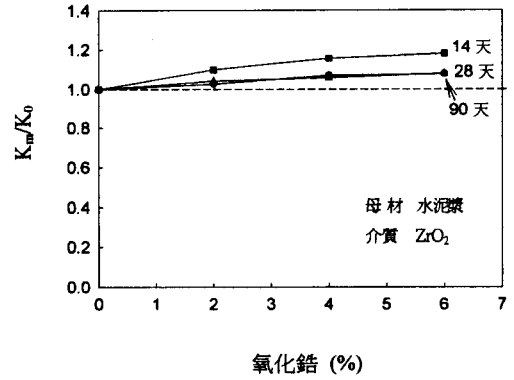


圖 8 高性能水泥漿韌增加率。

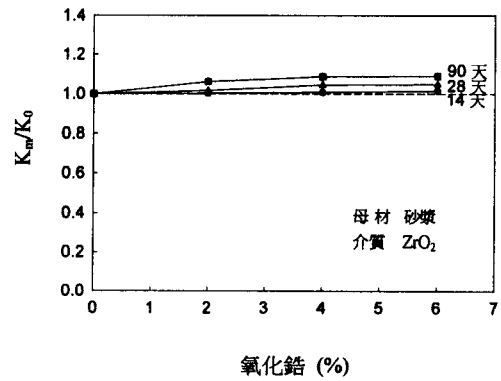


圖 9 高性能砂漿韌增加率。

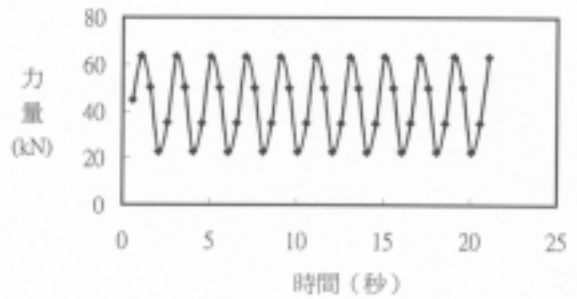


圖 10 0%氧化鋯高性能 RC 梁應力

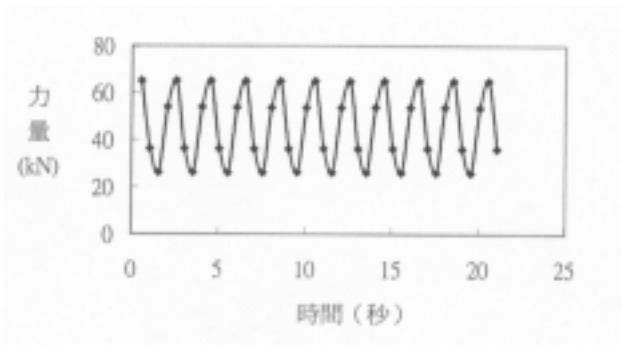


圖 11 4%氧化鋁高性能 RC 梁應力

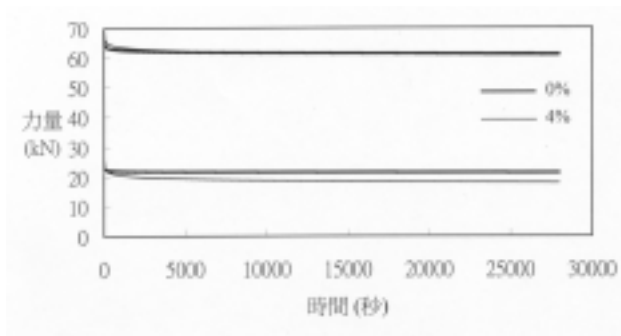


圖 12 0%與 4%高性能 RC 梁長期應力