

混凝土材料韌性加強機構

潘煌鏗

國立高雄科學技術學院土木工程技術系副教授

摘 要

混凝土材料的韌性強化機構和陶瓷材料非常相似。使用材料性質較水泥砂漿軟的介在物，或者用應力引起相變的高分子顆粒，使得混凝土裂縫區邊緣產生一壓應力而阻止裂縫繼續傳播，此種裂縫防衛機構能夠加強混凝土材料的韌性。另一種韌性強化機構，受混凝土介在物存在而改變裂縫傳播方向，使材料的應變能不致累積。因此，材料母體性質，以及介在物性質、形狀和排列情形，皆會影響混凝土材料的韌性。結果顯示，不管針對阻止裂縫傳播而言，或者對以改變裂縫傳播方向而增加材料韌性，圓盤狀或薄餅形狀介在物效果最好。若介在物性質比砂漿性質強時，建議使用扁平狀介在物來增加混凝土材料韌性，且可防止混凝土強度的降低。

一、前 言

混凝土材料是屬於脆性材料，其抗壓強度極佳。然而，吸收能量的效果並不好，常會有裂縫出現，不管是製造過程產生的缺陷(Flaw)或者載重引起的裂縫，皆會影響材料品質及強度。一般採用增加材料韌度(Toughness)或控制缺陷來提高材料使用時之可靠性(Reliability)。破壞韌度(Fracture Toughness)是材料阻礙裂縫伸展的能力。在大多數的荷重狀況下，裂縫傳播所需應力和材料的破壞韌性成正比。因控制材料缺陷的效果有某種程度限制，導致韌性強化(Toughening)成為研發人員或學術界喜好的課題。

韌性強化機構由裂縫行為區分成裂縫防衛(Crack Shielding)和裂縫交替作用(Crack Interaction)兩大類。在主裂縫周圍之處理區(Process Zone)內受裂縫尖端附近高應力的影響，而產生結構變化或者殘餘應變(Residual Strain)，使此區的張應力減小，導致主裂縫不再擴展。此時，必須再加更多載重，裂縫才會繼續傳播，這種類似增加韌度而

防衛主裂縫的行為，稱為裂縫防衛機構。另由外荷重引起裂縫傳播時因介在物(Inclusion)影響成為裂縫橋阻(Crack Bridging)與裂縫變位(Deflection)現象，促使材料內應力產生重組現象，稱為裂縫交替作用。本文主要是研究影響材料韌度的機構，且探討目前材料韌性強化的方法，為一物理性描敘而省略詳細的推導理論或模式。應力強度因子 K (Stress Intensity Factor) 和韌度 Γ 之間關係為 $K = \sqrt{2E\Gamma}$ ， E 為楊氏係數。若沒有特別聲明，這裡所謂的材料韌度常指應力強度因子。為了方便探討各韌性機構，除了裂縫變位外，各機構分別討論其形成因素及影響。

二、應力誘導相變強化韌度

為了增加韌度，一般陶瓷材料(Ceramic Materials)所用的介在物為 ZrO_2 。當材料受力時，在裂縫端附近會產生高拉應力，使裂縫端附近某一範圍(俗稱處理區，Process Zone)之 ZrO_2 發生相變(Phase Transformation)。相變形成時， ZrO_2 的體積膨脹，此時材料性質並沒有多大改變，但相變區內存有壓應力而處理

區其餘部份則為張應力以保持物體平衡。這些應力最後會在主裂縫表面附近形成一壓力 (Compression) 再由裂縫消散(Relaxation)促使裂縫閉合，不會繼續延伸[1,2]，見圖一。這種麻田散式轉變(Martensitic Transformation)之永久變形，會使陶瓷材料的韌度增加。

因可相變之 ZrO_2 無法在室溫存在，且受製造混凝土環境限制，並不能利用混凝土本身的拘限力(Constraint)來阻止 ZrO_2 相變，故必須尋找新材料。若要混凝土材料使用類似麻田散式轉變之介在物，建議使用某些離一分子(Ion-mer)材料。這種分子材料在相變，不僅體積會膨脹，且材料性質也有顯著增強，針對改善材料韌度及強度而言，開發使用高分子介在物之混凝土是未來值得研究的方向。

有關應力誘導相變強化韌度(Stress-Induced Transformation Toughening)的理論預測，最出名的是利用權函數理論(Weight Function Theory)[3]所推導的韌度變化量[2]。

$$\Delta K = -0.22c_1 \frac{E}{1-\nu} \sqrt{H} \epsilon_{kk}^{ph} \dots \dots \dots (1)$$

此式適用於 Mode I 荷重之穩定成長裂縫，見圖一(b)。 ΔK 是韌度變化量，負值表示材料的應力強度減少，使得處理區韌度 $K_{tip} = \Delta K + K_0 < K_0$ 。若 $K_{tip} < K_c$ (破壞時之韌度)，則材料裂縫不再延伸。 c_1 是介在物的體積比 (Volume Fraction)， H 表示處理區的一半高度， E 和 ν 為材料的楊氏係數與柏松比， $\epsilon_{kk}^{ph} = \epsilon_x^{ph} + \epsilon_y^{ph} + \epsilon_z^{ph}$ 是相變所生成之應變。但是這個公式的缺點是複合材料(含介在物及裂縫之混凝土)性質必須事先獲得，且未考慮介在物形狀對韌性的影響。為了不使公式太複雜，我們利用 Eshelby 模式[8]修正公式(1)。

$$\Delta K = -0.22c_1 \frac{E_0}{1-\nu_0} \sqrt{H} (p_{11} \epsilon_x^{ph} + p_{22} \epsilon_y^{ph} + p_{33} \epsilon_z^{ph}) \dots (2)$$

其中 E_0 和 ν_0 為材料母體(Matrix)的楊氏係數及柏松比，所謂材料母體在這裡指無介在物存在之混凝土或砂漿。為數 P_{11}, P_{12} 和 P_{33} 和

介在物的體積比，材料性質，排列與形狀有關[4]。若介在物是三度空間散佈在混凝土裡，三種特殊形狀之介在物的 p_{11}, p_{12} 和 p_{33} 如下：

(1) 圓形介在物(Spherical Inclusion)

$$p_{11} = p_{12} = p_{33} = \frac{k_1(3k_0 + 4\mu_0)}{k_0(3k_1 + 4\mu_0) + 4\mu_0(k_1 - k_0)c_1} \dots \dots (3)$$

其中 k 和 μ 分別為材料的容積模數(Bulk Modulus)及剪力模數(Shear Modulus)，下標“0”表示材料母體，“1”為介在物。

(2) 針狀介在物(纖維, $r_2 = r_3$)

$$p_{11} = \frac{3k_1(k_0 + \mu_0) + \mu_0(3k_1 - 2k_0) - 2\mu_0(k_1 - k_0)c_1}{k_0(\mu_0 + 3\mu_0 + 3k_1) + (k_1 - k_0)(\mu_0 + 3\mu_0)c_1} \dots (4)$$

$$p_{22} = p_{33} = \frac{3k_1(k_0 + \mu_0) + k_0\mu_0 + \mu_0(k_1 - k_0)c_1}{k_0(\mu_0 + 3\mu_0 + 3k_1) + (k_1 - k_0)(\mu_0 + 3\mu_0)c_1} \dots (5)$$

(3) 圓盤狀介在物($r_1 \rightarrow 0$)

$$p_{11} = 1 \dots \dots \dots (6)$$

$$p_{22} = p_{33} = \frac{3k_1k_0 + 6k_1\mu_0 - 2k_0\mu_0 - 2\mu_0(k_1 - k_0)c_1}{k_0(3k_1 + 4\mu_0) + 4\mu_0(k_1 - k_0)c_1} \dots \dots (7)$$

當介在物和材料母體的性質相同時，不管介在物是何種形狀， $p_{11} = p_{12} = p_{33} = 1$ ，則公式(2)等於公式(1)。這印證公式(1)並不適用於介在物料性質與材料母體差異太大的複合材料。尤其在使用混凝土材料時，最好使用公式(2)來計算韌性強化效應。經比較公式(3)-(7)發現，若 $k_1 < k_0$ 且 $\mu_1 < \mu_0$ (砂漿強度較骨材強度大)，則圓盤狀介在物(Disc)的韌性強化效果最好。

三、微裂縫強化韌度

微裂縫問題在混凝土材料是非常重要的，不僅對強度會造成重大影響，還可改變材料行為，絕不可忽視。但微裂縫並不一定對材料有負面影響，只要控制得當，反而能增加材料的使用價值。材料除了在製造過程會產生微裂縫外，還可能因溫度升降變化，相變誘導，或者外載重作用而出現，常沿著最低破壞能路徑(The Lowest Fracture Energy Paths)可發現其蹤跡。微裂縫能抵消局部應力，即減少材料應變能(Strain Energy)的貯存。首先，在主裂縫端的高拉應力會使材料產生開口微裂縫(Open-Microcrack)，這個作用好像材料中的一點突

然擴張成斑點(Spot)，使處理區內產生殘餘應變。此擴張作用類似相變，引起壓應力來消除內張應力。其次，由於微裂縫出現在處理區內，使區域的平均彈性模數較原材料為低，和相變情況有些不同。所以膨脹作用與彈性模數降低，皆對材料的韌度有加強效果。

影響韌性變化的因素很多，主要是材料的內部結構，處理區形狀，微裂縫方向與密度等。目前常用 TEM(Transmission Electron Microscopy) 或 SAM(Scanning Acoustic Microscopy) 來觀測材料內部變化。在穩定狀態 Steadystate) 及均值應力(Mean Stress) 作用之裂縫生成所增加的韌度[5]。

$$\Delta K = 0.32E \theta_T \sqrt{H} \dots\dots\dots(8)$$

其中 θ_T 為全部的殘餘應變(相似於 $c_1 \epsilon_{kk}^{pp}$)，和裂縫密度與所負荷的應力有關。要如何估算 θ_T ，則尚有待努力。

有關彈性模數折減(Moduli Reduction) 所提供的韌性強化，Hutchinson[6] 提出最低階公式(The Lowest Order Formula)。

其中

$$\frac{\Delta k}{k_0} = (k_1 - \frac{5}{8}) \delta_1 + (k_2 + \frac{3}{4}) \delta_2 \dots\dots\dots(9)$$

$$\delta_1 = \frac{1}{1 - \nu_0} [\frac{\mu_0}{\mu} - 1]$$

$$\delta_2 = \frac{1}{1 - \nu_0} [\nu \frac{\mu_0}{\mu} - \nu_0]$$

其中 ν 和 μ 為混凝土含裂縫之柏松比及剪力模數。 K_1 與 K_2 和處理區的形狀有關，但與其形狀大小無關。當裂縫成長在穩定狀態， $K_1 = 0.0166$ 及 $K_2 = -0.0433$ 。公式(9)只適用於低裂縫密度之混凝土材料。雖然 Hutchinson 又提出修正公式(Modified Formula) 來推算高密度裂縫材料的韌度變化，且結果和數值解[7] 非常接近，但此修正公式並沒有合理解釋及推導。若利用 Eshelby-Mori-Tanaka 理論[8,9] 和權函數理論重新計算上述問題，得出含微裂縫材料韌度變化。

$$\frac{k_{tip}}{k_0} = f \sqrt{g} = \dots\dots\dots(10)$$

其中參數 f 與 g 和材料的柏松比，裂縫密度及處理區形狀有關。若微裂縫為圓形且均分佈在等向性材料裡，模數折減所強化的韌度為

$$f = \frac{27 + 96k_1(1 + \nu_0)^2 \eta}{27 + 4(1 + \nu_0)^2 \eta} \dots\dots\dots(11)$$

$$g = \frac{45(2 - \nu_0)[45(2 - \nu_0) + 16(1 - \nu_0^2)(10 - 3\nu_0)]}{45(2 - \nu_0)^2[45 + 32(5 + \nu_0)\eta] + 1024(1 - \nu_0^2)(5 - \nu_0)(5 - 2\nu_0)\eta^2} \dots\dots\dots(12)$$

其中 η 為 Budiansky 和 O'Connell 所定義的裂縫密度參數(Crack Density Parameter)[10]。若為靜止狀態(Stationary) 裂縫， $K_1 = 1/24$ ；若為穩定成長之裂縫傳播狀態， $K_1 = 0.0072$ 。由圖二得知，所推算的結果是較高階解(The Higher Order Solution)，非常接近數值解及 Hutchinson 修正公式。

四、介在物強化韌度

1. 軟性介在物強化韌度

除了利用均勻微裂縫或受應力發生相變的介在物來增加混凝土材料韌度外，尚可摻材料性質較純混凝土或砂漿為軟的介在物，如高分子材料或均勻分佈的孔隙(Voids) 等。所加軟性介在物不僅能降低原有材料脆性，還可使裂縫成長產生變位。

以最典型的軟性介在物—孔隙—為例，見圖三。因為主裂縫的傳播是在被處理區所包圍之材料母體內，故除了要考慮處理區的彈性模數變化外，還需要知道裂縫端的奇異效應(Singularity)。此時韌性計算必須重組[6]。

$$\frac{k_{tip}}{k_0} = \lim_{\rho \rightarrow 0} (\frac{k_{tip}^0}{k_0}) (\frac{k_{tip}}{k_{tip}^0}) \dots\dots\dots(13)$$

其中 k_{tip}^0 為被處理區包圍之材料母體韌度， ρ 是裂縫端至處理區的距離。最後計算結果和公式(10) 相同，但參數 f 和 g 不同。若為球形孔隙。

$$f = \frac{8C_0 + 24K_1C_1(1 + \nu_0)}{8C_0 + C_1(1 + \nu_0)} \dots\dots\dots(14)$$

$$g = \frac{c_0(7-5\nu_0)[2(7-5\nu_0) + c_1(1+\nu_0)(13-15\nu_0)]}{2[180c_1^2(1-\nu_0) + 3c_0c_1(7-5\nu_0)(9-5\nu_0) + c_0^2(7-5\nu_0)^2]} \dots \dots \dots (15)$$

其中 $c_0=1-c_1$ 為材料母體的體積比。含孔隙材料的韌度變化只和材料母體的柏松比及體積比有關。

2. 橋阻強化韌度

當裂縫受荷重而在混凝土傳播時，因介在物存在會使裂縫伸展受阻，其作用分為在物脫離 (Debonding) 和裂縫橋阻 (Bridging) 兩種，見圖四。一般發生在含硬性介在物之軟性材料母體內，即為混凝土常見的裂縫破壞模式。

材料發生脫離情形，最常見於纖維 (Fibers) 或短纖維 (Whiskers) 加勁混凝土。纖維強化韌度 (非應力強度因子) 的增加量 $\Delta \Gamma$ [11]。

$$\Delta \Gamma/c_1 d S^2/E - E(\epsilon_{kk}^r)^2 + 4(\Gamma_1/R)/(1-c_1) + (\tau/d)(h_i^2/R) \dots \dots \dots (16)$$

其中 d 與 R 分別是纖維脫離長度 (Debond Length) 及半徑， S 為纖維強度， ϵ_{kk}^r 是纖維和材料母體的應變差異量 (Musfit Strain) 是單位面積所需的破壞能量， τ 為纖維脫離面上滑動阻抗 (Sliding Resistance)， h_i 表示纖維被抽出長度 (Pullout Length)。(16)式之第一項 S^2/E 是纖維所貯存的應變能；而第二項表示在脫離長度之殘餘應變能，對材料韌度有不良影響；第三項是形成脫離表面所需要的破壞能量；最後一項則為纖維被拉出材料母體的阻抗。

裂縫橋阻強化韌度是因殘餘應力誘導橋阻 (Residual Stress-Induced Bridging) 所產生，此時裂縫伸展所形成的中間橋阻四周會有圍壓應力 (Circumferential Compression) 來壓抑裂縫繼續伸長。到目前為止，要如何預測韌性加強效果，仍有許多爭議，有待未來繼續研究。若在穩定狀態下，溫度變化 ΔT 所引起的橋阻強化韌度 [12]。

$$\Delta K = 2.5c_1 E \Delta \alpha \Delta T \sqrt{R} \dots \dots \dots (17)$$

其中 R 是橋阻顆粒半徑， $\Delta \alpha$ 為熱膨脹係數的差異量。

五、結 語

混凝土材料的主要韌性加強機構已簡要闡明，且部分力學模式所推導的計算公式，也在本文列出。不管是在相變強化韌度，裂縫之韌性加強，或者使用軟性介在物來增加材料韌度，利用權函數理論及 E-M-T 理論所推算之修正公式，可涵蓋介在物形狀影響，更可使用在較高濃度介在物之混凝土材料裡。事實上，各個韌性加強機構是彼此影響及互相牽制。若只考慮其中某幾個機構來預測材料韌度，和試驗比較，常會低估。因此韌性加強機構的聯合作用之力學模式，尚有待努力。有關混凝土材料摻可引起相變之介在物研究，在高性能混凝土 (HPC) 開發過程是很值得探討的問題。對於裂縫變位 [13] 及橋阻強化韌度的力學行為和試驗分析，亦是未來繼續努力的方向。

參考文獻

- (1) Evans, A.G. and A.H. Heuer 1980 Review-transformation toughening in ceramics: martensitic transformations in crack-tip stress fields. J. Am. Ceram. Soc. 63(5-6): 241-248.
- (2) McMeeking, R.M. and A.G. Evans 1982 Mechanics of transformation-toughening in brittle materials. J. Am. Ceram. Soc. 65(5):242-246.
- (3) Rice, J.R. 1989 Weight function theory for three-dimensional elastic crack analysis. Fracture Mechanics, ASTM STP 1020:29-57.
- (4) Pan, H.H. and G.J. Weng 1992 Thermal stress and volume change during a cooling process involving phaes transformation J. Thermal stresses 15:1-23.
- (5) Evan, A.G. 1990 Perspective on the Deve-

- lopment of high-toughness ceramics. J. Am. Ceram. Soc. 73(2):187-206 .
- (6) Hutchinson, J.W. 1987 Crack tip shielding by micro-cracking in brittle solids Acta metall.35(7):1605-1619 .
- (7) Steif, P.S. 1987 A semi-infinite crack partially penetrating a circular inclusion. J. App. Mech.54:87-92 .
- (8) Eshelby, J.D. 1957 The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion. and relation problems. Proc. Rroc. Roy. Soc., Lon. A241:376-396 .
- (9) Mori, T. and K. Tanaka 1973 Average stress in the matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. Acta metall.21:571-574 .
- (10) Budiansky, B. and R.J. O'Connell 1976 Elastic moduli of a cracked solid. Inter J. Solids Struct. 8:81-97 .
- (11) Campbell, G.H. M., Ruhle, B.J. Dalgleish, and A.G. Evans 1990 Whisker toughening: a comparison between aluminum oxide and silicon nitride toughened with silicon carbide. J. Am. Ceram. Soc. 73(3):521-530.
- (12) Shum, W. 1989 Bridging effects on toughness. Ph.D. Thesis, Harvard University.
- (13) Faber, K.T. and A.G. Evans 1983 Crack deflection processes. Acta metall. 31 (4):565-584 .