

鋼-聚丙烯混合纖維混凝土之工程性質

作者／洪秀鳳上尉

提 要

本文以扁平波浪 (indented、flat-wave、crimped) 及端鈎型 (hooked-end) 等二種不同型式之鋼纖維各以 15kg/m^3 、 20kg/m^3 及 25kg/m^3 三種含量比，分別加入含量比 0.6kg/m^3 之聚丙烯纖維混合混凝土中，以探討鋼纖維-聚丙烯混合型纖維混凝土之工程性質。實驗結果發現，該種混合纖維混凝土因兩種纖維之互補作用，使其較單添加鋼纖維之混凝土工程性質為佳，其中端鈎鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土之工程性質又較扁平鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土為佳。另外，該混合型纖維混凝土隨鋼纖維含量之增加而使混凝土抗壓、劈裂抗拉、破裂模數及韌性指數抗提升越大，並對於降低混凝土之乾縮應變與磨耗量等均有顯著幫助。

關鍵詞：鋼纖維、聚丙烯纖維、混合型纖維混凝土

前 言

土木建築構造物中，混凝土是不可缺少之主要構材之一，但因混凝土脆硬易裂性質，及硬固時體積收縮變化產生無可避免的裂縫，使其成為影響結構物安全及耐久性的致命缺陷¹。為改善混凝土材料的性質，目前已有許多種類、型式及高性能的纖維被開發出來²，加上建築施工方法的進步，促使纖維材料已廣泛應用在混凝土中³。

纖維加入混凝土中可改善混凝土諸多性質⁴，如增加抗壓、抗彎及剪力強度，增加抗磨、滑動性⁵，增加抗衝擊力，增加抗裂韌性，提高疲勞強度，增加抗腐蝕性及耐久性，減少乾縮及潛變等⁶。而現今使用最普遍之纖維材料為鋼纖維及聚丙烯纖維兩種。

¹ M.L. Reis, B.C., I.C. Neves, A.J.B. Tadeu, and J.P.C. Rodrigues, High-temperature compressive strength of steel fiber high-strength concrete, J. Mater. Civ. Eng., 13(3) (2001)230-234.

² L.Taerwe, and A. Van-Gysel, Influence of steel fibers on design stress-strain curve for high-strength concrete, J. Eng. Mech., 22(8)(1996) 695-704.

³ Z. Bayasi, and M. McIntyre, Application of fibrillated polypropylene fibers for plastic shrinkage cracking in silica fume concrete, ACI Mater. J. 99(4) (2002) 337-344.

⁴ L. Taerwe, A.V. Gysel, Influence of Steel Fibers on Design Stress-Strain Curve for High-Strength Concrete, J. Eng Mech 22(8) (1996)695-704.

⁵ M. Kakemi, D. Hannant, Effect of Autoclaving on Cement Composites Containing Polypropylene, Glass and Carbon Fibers, Cem Concr Compos 18(1) (1996)61-66.

⁶ P.S. Song, S. Hwang, and B.C. Sheu, Assessment of Statistical Variations in Impact Resistance of High-Strength Concrete and High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete, Cem Concr Res, 35(2005)393-399.

隨著公共工程品質之提昇及消費者意識抬頭，對土木材料品質之要求也日趨嚴格。為滿足人們的需求及建築品質的提高，繼單一種類之纖維材料加入混凝土後，混合型纖維材料也漸漸受到業界重視，其中以鋼纖維加聚丙烯纖維最受青睞⁷。其原因乃混凝土內加入聚丙烯纖維，則千萬根均勻纖細的聚丙烯纖維，將填充在混凝土中的每一個角落與方位，把所受應力導向聚丙烯纖維軸向，以阻止塑性收縮裂縫的產生，如此一來混凝土表面的裂縫將大幅減少，當然存在混凝土內之裂縫也同樣減少⁸。但聚丙烯纖維因楊氏係數較低，故在高應力下無法阻止裂縫之生長與傳播，再者聚丙烯纖維亦無法橫跨較大之裂縫。⁹鋼纖維則較聚丙烯有較大之長度及楊氏係數，故可跨越較大之裂縫且有效控制裂縫成長，進而增加材料之韌性¹⁰。Qian 等¹¹以鋼纖維及聚丙烯纖維混合¹²，加至高強度飛灰混凝土，發現其抗壓、抗拉及抗彎強度、斷裂韌性等均較純混凝土及單一纖維混凝土為佳。Yao 等¹³以聚丙烯、碳纖維分別與鋼纖維混合後，添加至一般混凝土，發現碳纖維與鋼纖維混合之纖維混凝土，其抗壓、抗拉、抗彎強度及韌性指數均較聚丙烯與鋼纖維混合之纖維混凝土為佳。Banthia 等¹⁴將鋼纖維及聚丙烯纖維混合後加至水泥砂漿試體，發現混合纖維能成功抑制裂縫成長及裂縫集結行為。Song 等¹⁵探討鋼纖維-聚丙烯纖維混合混凝土之抗衝擊能力，發現其初裂強度是鋼纖維混凝土的 1.05 倍，其破壞強度是鋼纖維混凝土的 1.08 倍。Lawler 等¹⁶以聚乙烯醇纖維分別與細絲鋼纖維及粗鋼纖維混合加入混凝土，發現聚乙烯醇與粗鋼纖維混合混凝土之抗拉、抗彎強度較好，但聚乙烯醇與細鋼纖維混合混凝土則在滲透力及裂縫收縮抵抗能力較佳。

事實上混合纖維混凝土之工程性質受纖維之型式、含量等影響甚巨，基於

⁷ V. Bindiganavile, N. Banthia, Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading-part 2: Flexural toughness, *ACI Mater. J.* 98(1) (2001) 17-24.

⁸ P. S. Song, S. Hwang, Mechanical properties of high-strength steel fiber- reinforced concrete, *Constr Build Mater* 18 (9) (2004) 669-673.

⁹ P.S. Song, S. Hwang, B. C. Sheu, Strength properties of nylon- and polypropylene -fiber-reinforced concretes, *Cem Concr Res* 35(8)(2005)1546-1550.

¹⁰ Z. Bayasi, M. McIntyre, Application of Fibrillated Polypropylene Fibers for Plastic Shrinkage Cracking in silica Fume Concrete, *ACI Mater. J.* 99(4) (2002) 337-344.

¹¹ C.X. Qian, P. Stroeven, Fracture Properties of Concrete Reinforced with Steel- Polypropylene Hybrid Fibers, *Cem Concr Compos* 22(4) (2000)343-351.

¹² C. Qian, P. Stroeven, Development of hybrid polypropylene-steel fiber- reinforced concrete, *Cem Concr Res.* 30(1) (2000) 63-69.

¹³ U. Yao, J. Li, and K. Wu, Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction, *Cem Concr Res.* 33(1) (2003)27-30.

¹⁴ N. Banthia, and N. Nandakumar, Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites, *Cem Concr Compos*, 25(1) (2003)3-9.

¹⁵ P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. Sheu, Statistical analysis of impact and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, *Constr Build Mater* 19(1) (2005) 1-9.

¹⁶ J. S. Lawler, D. Zampini, S. P. Shah, Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete, *J. Mater Civil Eng* 17 (5) (2005) 595-604.

此，本文採兩種型式及各三種含量之鋼纖維分別與聚丙烯纖維混合加入混凝土內，以探討鋼纖維-聚丙烯纖維混合纖維混凝土之工程性質，並與添加單一纖維混凝土之工程性質比較，以提供未來使用混合纖維混凝土之參考。

實驗步驟

一、試驗材料選定

本試驗所用材料為卜特蘭 I 型水泥，粗骨材最大粒徑 2.54 cm，細骨材之細度模數 2.86，混凝土之配比為水泥、水、細骨材、粗骨材，重量分別為 300，192，850，1050 kg/m³。所添加之鋼纖維為扁平波浪狀(S1)及端鈎狀(S2)等兩種型式，其長度均為 50mm，而聚丙烯纖維則為折曲型單絲(P1)，該纖維長短不一，為混合型，長度介於 10~25mm 之間，其細度為 2.5 Denier。三種纖維之物理性質如表一。

表一 各型纖維物理性質
資料來源：作者整理

纖維編號	S1	S2	P1
纖維種類	鋼纖維	鋼纖維	聚丙烯纖維
纖維照片			
外觀形狀	扁平波浪狀	端鈎狀	折曲絲
纖維長度	50mm	50mm	10-25mm 混合
纖維直徑	1mm	0.75mm	2.5 Denier*
根數/Kg	2400 根	5600 根	2 億根
張力強度	800 MPa	1000MPa	550MPa
比重	7.48	7.48	0.91
楊氏係數	200 GPa	200 GPa	3.5GPa

* 1 Denier = 0.05g/450m

二、試體製作

本試驗各組試體之纖維種數及含量如表二。試體拌合首先將粗、細骨材置於拌合機內乾拌 1 分鐘，續將水泥加入乾拌 1 分鐘，再加入拌合水拌合 2 分鐘後，將纖維均勻撒佈於混凝土漿體上，繼續拌合 3 分鐘，以期纖維能均勻散佈

於混凝土中。完成之新拌纖維混凝土分別填入 150mm×300mm 圓柱形試體模內，以為抗壓、劈裂抗拉強度及撞擊試驗用；填入 150mm×150mm×530mm 之長方形鋼模，製成抗彎韌性試驗試體，填入 200mm×200mm×50mm 及 100mm×100mm×50mm 之模內則分別為耐磨及乾縮試驗。當試體澆置完成，靜置 24 小時後拆模，並置於 $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 水櫃中養護 28 天後，進行各種強度試驗，其中各組試驗均製作 6 個試體作為試驗之用。

表二 各種試體之纖維種類及含量

資料來源：作者自行整理

試體編號	鋼纖維		聚丙烯纖維	
	型式	含量(kg/m^3)	型式	含量(kg/m^3)
PC	--	0	--	0
P1	--	0	P1	0.6
S11	S1	15	--	0
S12	S1	20	--	0
S13	S1	25	--	0
S21	S2	15	--	0
S22	S2	20	--	0
S23	S2	25	--	0
S11-P1	S1	15	P1	0.6
S12-P1	S1	20	P1	0.6
S13-P1	S1	25	P1	0.6
S21-P1	S2	15	P1	0.6
S22-P1	S2	20	P1	0.6
S23-P1	S2	25	P1	0.6

三、試驗方法

(一) 抗壓實驗

依 ASTM C39 圓柱狀混凝土試體抗壓強度試驗法¹⁷，以萬能油壓機測之，油壓機荷重控制於每秒 0.3MPa 施加壓力荷重於試體，直到試體破壞為止。

(二) 劈裂抗拉實驗

¹⁷ ASTM C 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book ASTM Standards, 4 (04.02), 2002.

依 ASTM C496 圓柱狀混凝土試體劈裂強度試驗法¹⁸。試驗時，荷重增加平順且連續，每分鐘劈裂拉應力增加率為 900KPa，直到試體破壞為止。

（三）破裂模數實驗與韌性指數

各種型式纖維混凝土之破裂模數 (Modulus of rupture, MOR) 量測，依 ASTM C1018 纖維混凝土撓曲及初裂強度試驗法¹⁹，以三點式荷重並以位移控制方法，將載重及位移控制匣分別採用 100kN 及 100mm 的範圍，由 MTS 荷重計得荷重訊號，LVDT 得位移訊號，應變計得表面應變，由資料收集器(TDS)量測並記錄後，求其破裂模數；另每組試體並依試驗所得載重-變位曲線，以初始裂縫發生所對應之變位為基準，分別乘以 3、5.5、15.5 倍所得之變位與其對應載重所包含的面積計算韌性指數 I_5 、 I_{10} 、 I_{30} 值，以分析纖維混凝土之韌性指數。

（四）乾縮實驗

依 ASTM C157 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete²⁰，各組試體於灌製後 24 小時拆模，即進行初始值量測後，將試體置入 23°C、50%R.H.的恆溫恆濕櫃中，養護 40 天期齡後，再進行試體收縮量量測。

（五）耐磨耗實驗

以 ASTM C944 旋轉磨削試驗法²¹進行實驗，本法乃將試體置於耐磨機基座後，先於試體面施以 197N 荷載，再以 200 r/min 轉速之磨削輪研磨試體表面，依磨耗時間分別計算混凝土之磨耗損失量。

結果與討論

一、抗壓強度

各種型式纖維混凝土之抗壓強度、劈裂抗拉強度及破裂模數列於表三，由表可看出混合型纖維混凝土各種強度隨纖維型式及含量有所改變。各種型式纖維混凝土之抗壓強度較純混凝土之增量值如圖一。當混凝土添加 P1 聚丙烯纖維後，其抗壓強度增量為 3.2%。當混凝土單添加 S1 鋼纖維後，抗壓強度依含量之增加，較純混凝土分別增大 15.2%、17.7%、及 21.2%；添加 S2 鋼纖維後，依含量之增加，能使純混凝土分別增大 19.4%、21.9%、及 23.7%，顯示添加

¹⁸ ASTM C 496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, Annual Book ASTM Standards, 4 (04.02), 2002.

¹⁹ ASTM C 1018, Test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (Using beam with third-point loading), Annual Book ASTM Standards, 4 (04.02), 2002.

²⁰ ASTM C157, Standard test method for length change hardened hydraulic- cement mortar and concrete, Annual Book ASTM Standards, 4 (04.02), 2002.

²¹ ASTM C 944-99, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method, Annual Book ASTM Standards, 4 (04.02), 2005.

S2 鋼纖維較 S1 鋼纖維更具提升混凝土之抗壓強度效果，此乃 S2 鋼纖維比 S1 鋼纖維具有較大的抗張強度且單位體積鋼纖維含量較多所致，此較多的鋼纖維在混凝土內可分散更多的外力²²，而纖維抗張强度高則可承受較多的抗壓增量²³。另外，由圖亦可看出，S1 鋼纖維與聚丙烯纖維混合加入混凝土，其抗壓強度能分別較單添加 S1 鋼纖維之混凝土再提高 2%-3%，而 S2 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土較 S2 鋼纖維混凝土再提高 3%-7%，顯示鋼纖維-聚丙烯纖維組成之混合型纖維混凝土具有更佳之抗壓強度。

表三 各種型式纖維混凝土之強度實驗結果與強度增量值

資料來源：作者整理

試體編號	抗壓強度 (MPa)	較 PC 增量 (%)	劈裂抗拉強度 (MPa)	較 PC 增量 (%)	破裂模數 (MPa)	較 PC 增量 (%)
PC	28.0		2.4		4.6	
P1	28.9	3.2	2.5	4.3	4.7	2.2
S11	32.2	15.2	2.7	13.4	4.8	5.2
S12	32.9	17.7	3.0	25.7	5.3	15.6
S13	33.9	21.2	3.0	25.8	5.4	17.4
S21	33.4	19.4	2.8	17.4	5.2	13.2
S22	34.1	21.9	3.1	27.3	5.4	18.0
S23	34.6	23.8	3.1	30.8	5.5	20.1
S11-P1	32.9	17.9	2.9	20.8	5.0	8.6
S12-P1	33.5	19.8	3.2	31.9	5.4	17.3
S13-P1	34.9	24.7	3.3	37.2	5.7	23.9
S21-P1	34.3	22.5	3.0	25.2	5.3	16.1
S22-P1	35.4	26.6	3.2	32.4	5.6	21.9
S23-P1	36.5	30.4	3.4	39.8	6.4	39.1

²² Metha PK. Concrete Structure, Properties and Materials. Materiaux, Prentice-Hall 1986.

²³ P.S. Song, S. Hwang, B. C. Sheu, Strength properties of nylon- and polypropylene -fiber-reinforced concretes, Cem Concr Res 35(8)(2005)1546-1550.

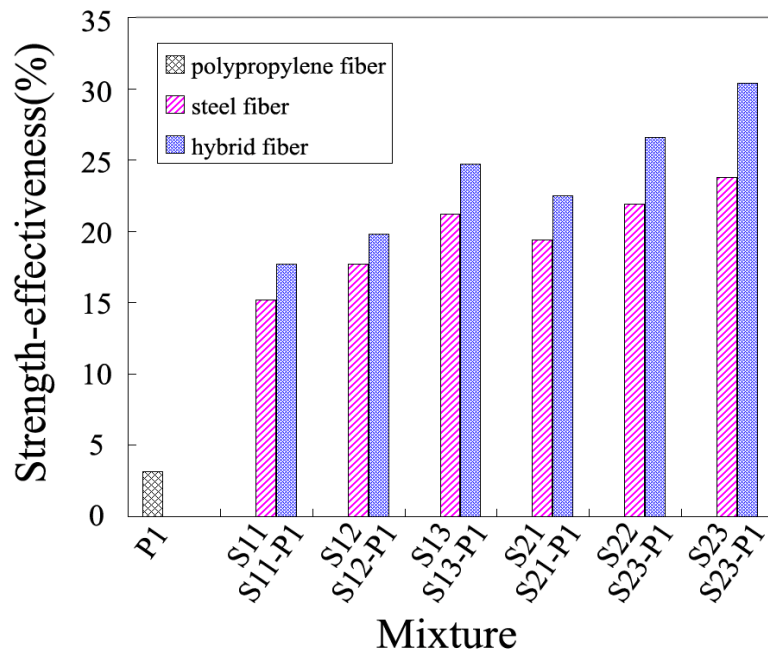


Fig. 1. Compressive strength-effectiveness of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concretes

圖一 各種型式纖維混凝土之抗壓強度較純混凝土之增量值
資料來源：作者整理

二、劈裂抗拉強度

各種型式纖維混凝土之劈裂抗拉強度增量如圖二。添加聚丙烯纖維之混凝土其劈裂抗拉強度較純混凝土提升 4.3%；而添加鋼纖維之混凝土，其劈裂抗拉強度則是添加 S2 鋼纖維較 S1 鋼纖維有較大之劈裂抗拉強度增量。依纖維含量之增加，S2 鋼纖維混凝土之劈裂抗拉強度增量分別較純混凝土大 17.9%、27.3% 及 30.8%。另外，混合型纖維混凝土之劈裂抗拉強度又比鋼纖維混凝土為佳，其中 S1 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土較 S1 鋼纖維混凝土之劈裂抗拉強度提高 6.2%~11.4%，S2 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土則提高 5.1%~9%。混合型纖維混凝土具有較大之劈裂抗拉強度，乃因混凝土中之二種相異之纖維分別於不同階段減緩混凝土受劈裂抗拉時之破壞機理，當混凝土母體初期開裂時，混凝土中細緻且數量眾多之聚丙烯纖維發揮跨架(bridge)作用而阻止試體劈裂處繼續擴張，若試體繼續破壞，纖維跨架作用將漸轉移至彈性模數更高之鋼纖維上，使混凝土繼續承受拉應力，進而增加提升混凝土之劈裂抗拉強度。另外，從圖亦可看出，各種型式纖維混凝土之劈裂抗拉強度均隨纖維含量之增加而加大，此與 Potrebowski²⁴之研究指出試體受劈裂抗拉作用時，防止試體劈裂處繼續擴張能力

²⁴ J. Potrebowski, The splitting tensile test applied to steel fibre reinforced concrete, Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr. 5(1) (1983)49-53.

與破裂面上之纖維量成正比的结果相同。

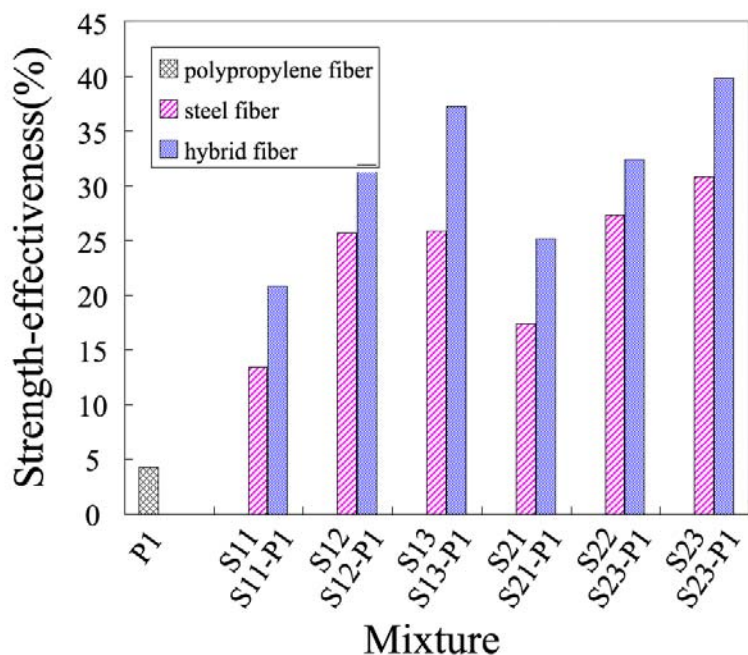


Fig. 2. Splitting strength-effectiveness of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced

圖二 各種型式纖維混凝土之劈裂抗拉強度
資料來源：作者整理

三、破裂模數 (Modulus of rupture, MOR)

各種型式纖維混凝土之破裂模數增量如圖三。由圖中顯示各種混凝土之破裂模數依序為聚丙烯纖維、S1 鋼纖維、S1 鋼纖維-聚丙烯纖維、S2 鋼纖維、S2 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土，且其破裂模數與添加纖維之含量成正比。以 S2 鋼纖維-聚丙烯纖維之混合型纖維混凝土為例，依纖維含量之增加分別較純混凝土之破裂模數增加 16.1%、21.9%及 39.1%，較 S2 鋼纖維混凝土增加 2.9%、3.9%及 19%，其主因是當混凝土樑受力時，試體中性軸下方拉力區之破壞裂面上因纖維能以其良好之拉伸能力承擔來自母體之拉應力，當細微之聚丙烯纖維破壞斷裂後，勁度高之鋼纖維能繼續有效抵制破裂面分離，直至纖維被拉脫或斷裂為止，充份扮演了吸能角色，亦同時疏解了裂尖周邊微裂區之應力，故提高混凝土之破裂模數。

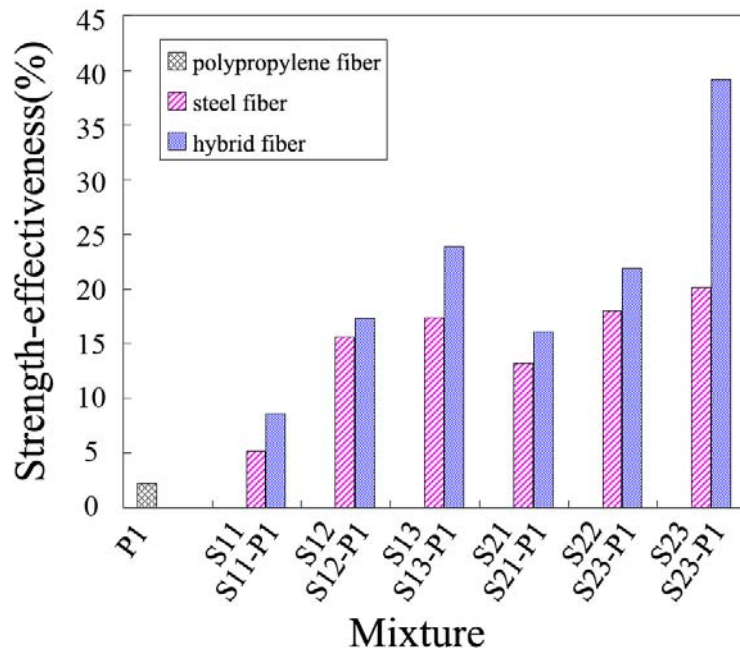


Fig. 3. Modulus of rupture of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concretes

圖三 各種型式纖維混凝土之破裂模數增量
資料來源：作者整理

四、韌性指數(Toughness index)

韌性指數是指樑受荷重產生特定撓度時所能吸收之能量，係根據材料三點抗彎試驗所得到之載重—變形曲線下之面積所得。圖四為混凝土分別添加聚丙烯纖維、S2 鋼纖維及兩種混合纖維之抗彎載重-變形曲線，由圖可看出，混凝土添加混合纖維後能明顯改善混凝土之韌性。各種型式纖維混凝土之韌性指數如表四，純混凝土之韌性指數在撓度為 3δ 時的 I_5 ， 5.5δ 時的 I_{10} 及 15.5δ 時的 I_{30} ²⁵，三指數之值皆為 1，表示其屬於彈-脆性材質；而添加聚丙烯纖維之混凝土三指數之值分別為 1.2、1.6、2.5，該值顯示其對混凝土之韌性提升甚小；而添加 S1、S2 鋼纖維或混合型纖維混凝土，則有較大之韌性指數，表示已能有效改善混凝土低韌性之缺點。對混合型纖維混凝土而言，纖維含量愈高，越能吸收混凝土破壞時之能量，進而產生較高之韌性，以 S13-P1 與 S23-P 之混合型纖維混凝土為例，其 I_5 、 I_{10} 及 I_{30} 之值分別為 4.7、6.7、12.8 與 4.9、6.8、15.3。

²⁵ ACI Committee 544, State of the art report of fiber reinforced concrete. Concr. Int.: Des. Construct. 4 (5) (1982)9-30.

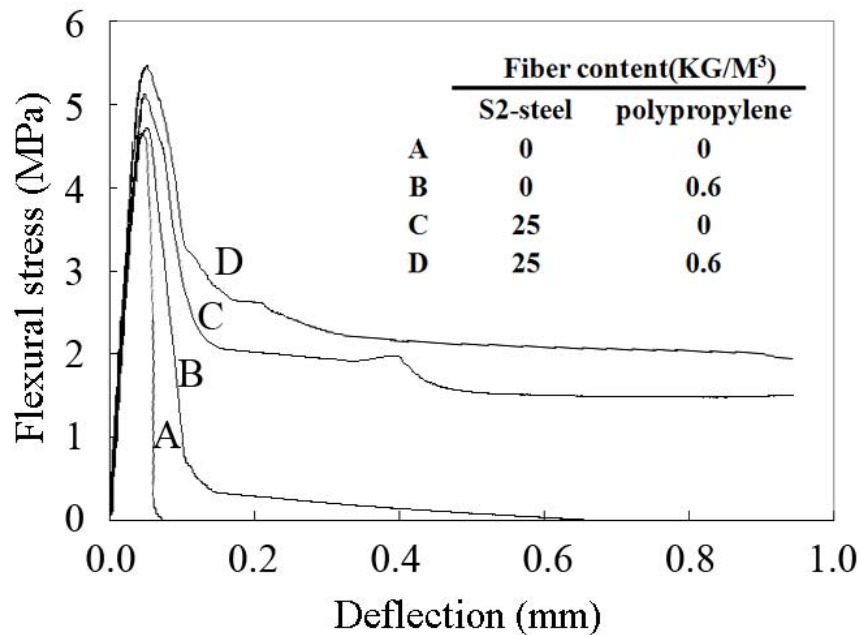


Fig. 4. The load-deflection curves of fiber-reinforced concretes

圖四 混凝土分別添加聚丙烯纖維、S2 鋼纖維及兩種混合纖維之抗彎載重-變形曲線
資料來源：作者整理

表四 各種混合型纖維混凝土之韌性指數值

資料來源：作者自行整理

	I_5	I_{10}	I_{30}
PC	1.0	1.0	1.0
P1	1.2	1.2	1.5
S11	3.7	5.3	7.7
S12	3.8	5.8	11.9
S13	4.4	6.2	12.5
S21	3.7	5.5	9.7
S22	4.3	6.3	12.3
S23	4.6	6.5	14.1
S11-P1	3.8	5.6	10.4
S12-P1	3.9	6.1	12.4
S13-P1	4.7	6.7	12.8
S21-P1	3.9	5.9	11.2
S22-P1	4.5	6.2	13.2
S23-P1	4.9	6.8	15.3

韌性指數示意圖

五、乾縮應變

各型纖維混凝土之乾縮應變量如表五。純混凝土乾縮應變量為 5.96×10^{-4} ，若相對乾縮應變量設定為 1，則添加各種型式纖維之混凝土其相對乾縮應變量均小於 1，且混合型纖維混凝土之相對乾縮應變量均較單一纖維混凝土之相對乾縮

應變量為小。以混合型纖維混凝土為例，依纖維含量增加，S1 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土試體相對乾縮應變量分別降至 0.866、0.837 及 0.817；S2 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土試體相對乾縮應變量分別降至 0.827、0.824 及 0.804，顯示當二種纖維混合後，能在混凝土內以不同方向均勻散佈並受漿體裹握，達到減少泌水，增加混凝土之彈性應變量，進而降低混凝土乾縮應變。

表五 各型纖維混凝土乾縮應變量
資料來源：作者整理

混凝土編號	乾縮應變($\times 10^{-4}$)	相對乾縮量
PC	5.96	1
P1	5.19	0.871
S11	5.19	0.871
S12	5.13	0.861
S13	5.10	0.856
S21	5.12	0.859
S22	5.08	0.852
S23	5.05	0.847
S11-P1	5.16	0.866
S12-P1	4.99	0.837
S13-P1	4.87	0.817
S21-P1	4.93	0.827
S22-P1	4.91	0.824
S23-P1	4.79	0.804

六、耐磨耗強度

各種纖維混凝土在不同時程下之磨耗率如表六，由表中發現磨耗率受纖維型式及含量影響甚大，且隨磨耗時間之增加，磨耗率會顯著增加。纖維混凝土試體磨耗初期因混凝土面層光滑且多為砂漿層，各組磨耗率無一定趨勢，繼續加載磨耗，試體耐磨耗能力之差異趨於明顯，以最終磨耗時間 6 分鐘而言，聚丙烯纖維混凝土磨耗率為 0.068%，而鋼纖維及鋼纖維-聚丙烯混合型纖維混凝土，均以添加 25kg/m^3 含量之 S2 纖維對混凝土之抗磨耗能力最佳，當 S2 纖維含量從 15kg/m^3 提高至 25kg/m^3 時之鋼纖維混凝土，其磨耗率從 0.065% 降低至 0.042%；而 S2 鋼-聚丙烯混合型纖維混凝土，其磨耗率遂從 0.043% 降低至 0.020%。

觀查各種型式纖維混凝土之抗磨耗能力，發現與抗壓強度有密切關係，即抗壓強度越高，磨耗損失越低，此一結果與 Liu 等之研究成果相同²⁶。

表六 各型纖維混凝土抗磨耗損失試驗值

資料來源：作者整理

混凝土編號	磨耗損失(%)		
	2min	4min	6min
PC	0.040	0.065	0.080
P1	0.032	0.048	0.068
S11	0.040	0.063	0.075
S12	0.028	0.042	0.056
S13	0.024	0.040	0.051
S21	0.040	0.055	0.065
S22	0.034	0.042	0.054
S23	0.015	0.028	0.042
S11 P1	0.022	0.030	0.047
S12 P1	0.020	0.028	0.045
S13 P1	0.020	0.024	0.034
S21 P1	0.011	0.018	0.043
S22 P1	0.011	0.016	0.022
S23 P1	0.009	0.016	0.020

結 論

- 一、添加各種型式纖維於混凝土中，均可提高其抗壓、劈裂抗拉強度及破裂模數，並以添加混合型纖維效益最大，其中 S2 鋼纖維-聚丙烯纖維混凝土表現最佳。隨鋼纖維含量之增加，該混合型纖維混凝土之抗壓、劈裂抗拉強度及破壞模數較 S2 鋼纖維混凝土分別提昇 3.1%~6.6%、5.1%~9%及 2.9%~19%。
- 二、混凝土添加鋼纖維及鋼-聚丙烯混合纖維後，可明顯改變混凝土之韌性行為，且纖維整體含量愈多，韌性指數越大，其中又以添加 S2 纖維高於 S1 纖維。以添加 S2 鋼纖維 25kg/m³之混合型纖維混凝土為例，其 I₅ 值為 4.9，I₁₀ 及

²⁶ Liu, T.C., Abrasion Resistance of Concrete, ACI Mater. J. 78(5) (1981) 341-350.

I_{30} 之值分別為 6.8 與 15.3。

- 三、混合型纖維對降低混凝土之乾縮應變效果最佳，且隨纖維含量增加，乾縮應變漸減少。以純混凝土相對乾縮應變為 1 時，添加 15kg/m^3 、 20kg/m^3 及 25kg/m^3 之 S2 鋼-聚丙烯混合型纖維混凝土，其乾縮應變量分別降至 0.827、0.824 及 0.804。
- 四、纖維混凝土磨耗率受添加纖維型式及含量影響甚大，其中以 S2 鋼-聚丙烯混合型纖維混凝土耐磨能力較最佳，當 S2 纖維含量從 15kg/m^3 提高至 25kg/m^3 時，其磨耗率遂從 0.043% 降低至 0.020%。

作者簡介

洪秀鳳上尉，專業軍官班 96-1 期、國立高雄第一科技大學營建工程所碩士；曾任排長、副連長、教官，現任職於陸軍工兵學校軍事工程組教官。