

聚丙烯纖維混凝土應用在水中結構物之研究

Study on the Polypropylene Fiber Concrete for Submerged Structures

萬能科技大學營建科技系

講師

詹榮鑑*

Jung-Chien Chan

萬能科技大學營建科技系

教授

楊紹洋

Shaw-Yang Yang

農業工程研究中心

研究員兼組長

陳獻

Shinne Chen

摘要

本研究針對廢棄物資材化再利用為題，將聚丙烯棄邊絲添加於混凝土中，探討混凝土組成材料耐磨的基本行為，以及應用在水中結構物之可行性。考慮試驗變數包括聚丙烯棄邊絲添加量、水灰比及材齡等，依據 ACI 211.1 規範設計混凝土配比，測試混凝土之力學性質和耐磨耗等。研究結果顯示，0.5~1% 聚丙烯棄邊絲添加量可提高混凝土之抗壓、抗彎及劈裂等強度，且混凝土耐磨耗、抗衝擊及水中磨耗等性質隨聚丙烯棄邊絲添加量增加而增強。藉由微觀分析得知，掃描式電子顯微鏡(SEM) 分析顯示，添加聚丙烯棄邊絲和爐石粉混凝土界面處的早齡期水化物以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 較多，晚齡期則以 C-S-H 和 C-A-H 等較多。X 光能譜儀分析(EDXA)顯示，混凝土主要元素為 Ca 和 Si，次要元素為 K 和 Fe。綜合以上試驗結果得知，混凝土中添加適量聚丙烯棄邊絲和爐石粉等，可提升混凝土之力學性質和耐磨性質，有利於應用在農田水利之水中結構物。

關鍵詞：生態混凝土，聚丙烯棄邊絲，爐石粉，耐磨耗。

ABSTRACT

The study is focusing on the reuse and resource cycling of the discarding garbage, and investigating the basic behaviors of the ecological concrete. The feasibility of the polypropylene fiber concrete applied on the submerged structures is also investigated. The factors of the polypropylene (PP) fiber, water-to-cement ratio, and time period are considered as following test design. This study is based on the rule of material composition, and follows the specification of ACI211.1, then establishes the mixture design algorithm of the ecological concrete and can be referred to the engineering design. The cylinder made

*通訊作者，萬能科技大學營建科技系講師，32061 桃園縣中壢市水尾里萬能路 1 號，jan@msa.vnu.edu.tw

of ecological concrete is tested to obtain the properties of the engineering and abrasion. The research results indicate that the concrete added 0.5 ~ 1 % PP fiber can be enhanced the engineering properties. In addition, the properties of the abrasion, pound, and attrition in water for the ecological concrete increase with PP fiber. The SEM analysis indicates that the hydrate of ecological concrete transition zone contains $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mainly at early period, however the hydrate contains C-S-H and C-A-H mainly at later period. The EDXA indicates that the main aggregate elements are Si and Ca and the minor aggregate elements are K and Fe. Concluding the test results of each item, the properties of ecological concrete added the slag powder and PP fiber behaves better than using cement as bonding material only. This ecological concrete can be utilized for the submerged structures on the irrigation and drainage engineering.

Keywords: Ecological concrete, Polypropylene (PP) fiber, Slag powder, Abrasion.

一、前 言

混凝土係由水泥、卜索蘭材料、骨材及摻料等多項材料所組成，其組成成份複雜且非均質等向性材料，很難以材料組成建立混凝土磨耗之模式。對混凝土抗壓強度而言，水灰比、材齡及摻料含量等因素具有不同程度的影響，通常採用已知抗壓強度混凝土配比所建立的強度與磨耗之關係曲線，做為橋樑、路面及渠道等設計參考依據。對一般混凝土而言，抗壓強度與磨耗間具有良好的相關性。然而，混凝土的配比、材齡及棄邊絲含量等變數組成並非一致性，混凝土磨耗與材齡的關係曲線會有較大的差異性。

以往對環境保護的行動，著重於廢棄物的處理和去除，伴隨產生最終處置的問題。近年來，綠建材永續發展的觀念漸漸受到重視，廢棄物再生利用和資材化的理念孕育而生。本研究運用綠建材永續發展的觀念，以廢棄物再生利用和資材化之理念，製作聚丙烯(PP)棄邊絲混凝土，添加適量的爐石粉和聚丙烯棄邊絲於混凝土中，改善新拌混凝土之工作性，提升混凝土強度、水密性、抗蝕性及耐磨耗等性質。試驗設計變數包括聚丙烯(PP)棄邊絲添加量、水灰比及材齡等，以及新拌混凝土空氣含量和單位重等。將混凝土之聚丙烯添加量、水灰比及材齡等，視為混凝土磨耗的主要參數，藉由混凝土巨觀性質和微觀性質

等試驗，探討聚丙烯纖維混凝土之力學性質和耐磨耗性質，提供農田水利工程應用聚丙烯纖維混凝土的可行性。

二、國內外文獻回顧

混凝土組成材料具有多孔隙的性質，使其常因外在環境而劣化，影響其耐久性。混凝土耐久性分為物理性侵蝕和化學性侵蝕等，用以說明混凝土耐久性劣化的原因。大部份劣化原因係與混凝土表面組成和環境條件等相關，混凝土組成表面之孔隙結構體受外力作用，而發生微細裂縫劣化，進而導致結構整體或局部之破壞。

爐石粉(Slag powder)為高爐煉鐵過程中，產出的爐渣廢料，近年來廣泛地被添加於混凝土中，當做卜索蘭材料使用。爐石粉具有十分穩定而優異的物理和化學等性質，其主要成份為 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 及 MgO 等，次要成份為 MnO 、 FeO 、 TiO_2 及 S 等，與水泥化學成份在 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 三相平衡圖上的位置很接近，因而水化過程中，可與水化物氫氧化鈣(CH)、C-S-H膠體及石灰等進行卜索蘭反應(Pozzolanic reaction)。添加適量的爐石粉於混凝土中，除可填塞混凝土中空隙和孔隙等外，亦能減少水泥的用量，改善新拌混凝土之工作性。所以，爐石粉之卜索蘭反應對混凝土強度、水密性及抗蝕性等，具有良好的增強效果。黃兆龍和黎綱雄(1986)

指出，水淬爐石粉取代部份水泥用量，對新拌混凝土凝結時間有延緩之趨勢，降低混凝土早期抗壓強度，而對晚期抗壓強度則有增強之效果。有關添加爐石粉在水泥漿體中之混凝土力學行為，國內外諸多學者研究著重於巨、微觀性質之探討，磨耗方面研究，則探討中、高強度混凝土之力學性質，或以磨損、水中磨耗及衝擊等試驗結果相互印證。然而，添加爐石粉和 PP 棗邊絲等摻料於混凝土中之磨耗研究，仍缺乏較明確的論述。沈永年等(1993)以 X-RAY 分析印證飛灰具有緩慢卜索蘭反應之性質，水泥漿體隨著飛灰取代量增加，則早齡期混凝土孔隙呈增加，而晚齡期則呈遞減。從 SEM 觀察早齡期試體，不易觀測到飛灰顆粒反應，而晚齡期飛灰顆粒圓球表面有 C-S-H 膠體和 C-A-S-H 等結晶產生。經由核磁共振光譜，可測得含飛灰水泥漿體水化產物中之不定形 C-S-H 膠體成份，以佐證卜索蘭反應之程度。

在混凝土磨耗研究方面，Huang (1990)探討界面對捕捉裂紋(arrest)、裂紋偏斜(deflect)及變鈍(blunting)等功能，由於界面區存在，所提供之韌性增量，導致基材尖端附近勁度降低，進而減少應力集中之現象。陳志賢(1995)提出骨材與水泥漿體之界面微觀對其破裂行為之影響，利用水泥、骨材及摻料等材料之混凝土配比組成過程，因水化、乾縮、泌水及骨材基材與水泥漿體間之化學反應，骨材基材與水泥漿體形成多孔隙區域，此水泥水化區域為混凝土較弱的區域，進而影響混凝土之強度和磨耗等。湯維堯(1998)研究高強度混凝土水中磨耗性質與早期收縮行為之關係，探討卜索蘭材料、鋼纖、聚丙烯纖維網等材料對水中磨耗性質的影響，對實際工程應用的配比做研究和探討。研究得知，添加卜索蘭材料和鋼纖維之混凝土，混凝土抗磨耗能力確實有所提升。李志信(1999)探討不同鋼纖維含量對混凝土抗壓強度、抗衝擊及抗磨耗等性質之影響，並研究活性粉混凝土在不同養護條件下，對混凝土抗壓強度、抗衝擊及抗磨耗等影響。研究結果顯示，鋼纖維含量對混凝土抗壓強度、抗衝擊及抗磨耗等性質增強；當抗壓強度高於某一強度值

時，混凝土抗磨耗能力的提升並不顯著，在低中抗壓強度時較為明顯。詹穎雯(1999)指出混凝土耐磨性與抗壓強度為非線性之關係。

在纖維混凝土研究方面，分為 Polyethylene terephthalate (PET) 聚乙烯纖維混凝土(閻嘉義和呂昀諭，1991)和 Polypropylene (PP) 聚丙烯纖維混凝土(劉欣達和黃兆龍，1998；葛其榮，2001；賴勝權，2002；鄧作樸等，2003；鄭伯乾，2003；李敏和符振輝，2006；孫海燕，2007)等兩類。林利垣(1992)以水灰比、材齡、纖維長度及纖維體積比等變數，探討碳纖維混凝土強度、韌性及抗裂等力學性質。葛其榮(2001)探討 PP 纖維在水利工程的應用研究，進行 PP 纖維混凝土力學性質試驗，並應用在現地實務施工上。詹榮鑑和簡顯光(2004)研究 PP 棗邊絲混凝土之工程性質，進行纖維混凝土巨觀和微觀等性質分析。在巨觀性質方面，混凝土水灰比與抗壓強度成反比。在微觀性質方面，早期存在初步水化物和單硫型鋁酸鈣水化產物(AFM)生成物等，晚期則以針刺狀的 C-S-H 和 CH 等較多，混凝土中卜索蘭反應產生 CH 填塞孔隙，產生緻密反應。由 EDXA 分析得知，主要元素為 Ca、Si 及 O 等。董蘋和楊華金(2006)藉由單摻 PP 纖維、混摻 PP 纖維和鋼纖維等混凝土力學性能，進行纖維混凝土抗裂性能研究。研究結果顯示，PP 纖維能抑制混凝土早期塑性和乾縮裂縫等性質，提高混凝土早期抗彎韌性，對混凝土抵抗早期裂縫有明顯影響，但對混凝土晚期抗裂性沒有明顯作用。混摻 PP 纖維和鋼纖維明顯提高混凝土的力學性能，改善混凝土早期和晚期的抗裂性能。祖福興等(2006)應用 PP 纖維混凝土在船閘輸水廊道，分析 PP 纖維對混凝土性能的改善機理。楊春光等(2006)提出水工混凝土抗衝磨性能的試驗，研究指出，添加較多煤灰之混凝土具有乾縮率小、施工容易及造價低等優點。薛喜文和張東升(2006)探討西霞院工程溢洪排沙構造物混凝土的抗衝磨性能，研究結果顯示，混凝土中添加一定量的纖維和砂粉，可顯著提升混凝土的抗衝耐磨強度，有利於水工構造物的安全性。孫海燕等(2007)以 PP 纖維混凝土進行物理力學性能試驗，試驗結果顯示，在混凝土

中摻入一定量 PP 纖維，能有效地提高混凝土的抗裂性能。鄒傳學等(2007)進行 PP 纖維補償收縮混凝土性能試驗研究，在不同養護條件下，不同體積摻量 PP 纖維混凝土的力學性質。試驗結果顯示， $0.7 \sim 0.9 \text{ kg/cm}^3$ PP 纖維體積摻量時，可獲得良好的混凝土抗裂性能。

三、混凝土試驗變數及配比設計

本研究混凝土試驗材料及其基本性質分述如下：(1)水泥採用台灣水泥公司生產之卜索蘭第一型水泥，比重為 3.15；(2)爐石粉採用中聯爐石處理資源公司提供之爐石粉，比重為 2.64；(3)棄邊絲使用大懋股份有限公司提供之聚丙烯棄邊絲，長度 2 cm，比重 0.90；(4)粗骨材和砂採用桃園大溪預拌廠所提供之砂石，級配符合 ASTM C-33 要求，面乾內飽和骨材比重分別為 3.03 和 2.59；(5)使用自來水做為混凝土拌合用水。

本試驗探討混凝土組成材料(水泥漿體、骨材、聚丙烯棄邊絲及卜索蘭材料等)對抗壓強度、抗彎強度、劈裂強度、耐衝擊及耐磨耗等性質之影響，混凝土配比試驗變數包括水泥漿體量、材齡、聚丙烯棄邊絲含量、爐石粉含量、粗細骨材含量及水灰比等(如表 1 所示)，並將空氣含量(取 3% 以下)和坍度(取 $10 \pm 2 \text{ cm}$)等參數納入混凝土組成的基本要件。混凝土初步配比係以 ACI 211.1 規範，求得水灰比、水、水泥、細骨材、

粗骨材及卜索蘭材料替代量等，混凝土設計強度選定 300 kgf/cm^2 ，混凝土初步配比 1 m^3 所需材料重量列於表 2，其中，拌合水重量固定為 202 kg/m^3 ，選取 0.45、0.50 及 0.55 等水灰比，以 20% 爐石粉取代細粒料用量，以 0%、0.5%、1% 及 3% 等聚丙烯棄邊絲取代混凝土中粗骨材用量。以爐石粉和聚丙烯棄邊絲等摻料分別取代細粒料和粗骨材等時，混凝土之坍度和空氣含量分別改變為 8~11.5 cm 和 1.2~2.9% 等。為減少混凝土過渡區及骨材與聚丙烯棄邊絲底下水袋孔隙的存在，以及掌控混凝土抗壓強度、衝擊及磨耗等變異性，各組混凝土坍度控制在 8~11.5 cm 之間，且無泌水、骨材分離及析離等現象產生。測試各組新拌混凝土坍度合格後，再量測混凝土單位重($2149 \sim 2380 \text{ kg/m}^3$)和空氣含量(1.2~2.9%)等要求條件，決定 300 kgf/cm^2 以上目標抗壓強度。進行混凝土試拌，置於常溫飽和石灰水中養護。待 7、14 及 28 天等材齡進行力學強度和耐磨耗等試

表 1 混凝土配比設計試驗變數

項目		變數範圍
水灰比		0.45、0.50、0.55
設計強度(kgf/cm^2)		300
材齡(天)		7、14、28
爐石粉取代細粒料含量(%)		20
聚丙烯棄邊絲取代粗骨材含量(%)		0、0.5、1、3

表 2 混凝土試體配比資料 (1 m^3)

材料 分組	水灰比 W/C	水 (kg)	水泥 (kg)	粗粒料 (kg)	細粒料 (kg)	爐石粉 (kg)	聚丙烯 棄邊絲 (kg)	強塑劑 (kg)	新拌混凝土		
									單位重 (kg/m^3)	坍度 (cm)	空氣含量 (%)
A1	0.45	202	449	1041.0	732.0	0	0	1.0100	2230	8.1	2.90
A2				1036.0	586.0	146.0	5.205	1.1716	2343	8.0	2.00
A3				1030.6	586.0	146.0	10.410	1.1110	2333	8.1	2.10
A4				1009.9	586.0	146.0	31.230	1.0706	2225	8.3	1.35
B1	0.50	202	404	1041.0	774.0	0	0	1.0100	2230	10.0	1.80
B2				1036.0	619.2	154.8	5.205	1.1716	2333	11.5	2.00
B3				1030.6	619.2	154.8	10.410	1.1110	2302	9.0	1.50
B4				1009.9	619.2	154.8	31.230	1.0706	2149	11.0	1.20
C1	0.55	202	367	1041.0	797.0	0	0	1.0100	2230	10.5	1.40
C2				1036.0	637.6	159.4	5.205	1.1716	2380	8.0	1.30
C3				1030.6	637.6	159.4	10.410	1.1110	2271	10.0	1.50
C4				1009.9	637.6	159.4	31.230	1.0706	2194	9.5	2.00

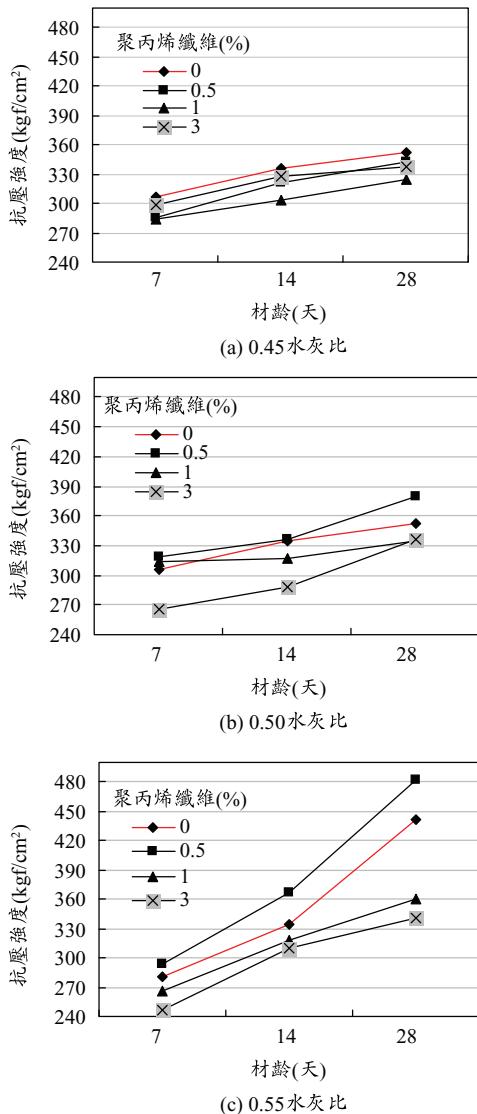


圖 1 內烯棄邊絲混凝土抗壓強度與材齡之關係

驗，分析試驗數據，求得聚丙烯纖維混凝土之最佳配比。

四、材料試驗結果與討論

4.1 巨觀性質分析

4.1.1 抗壓強度

依據 CNS 1230 規範混凝土圓柱試體抗壓強度試驗，製作 $10\phi \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 高圓柱試體，置於常溫飽和石灰水中養護，待 7、14 及 28 天等材齡，進行抗壓強度試驗。混凝土抗壓強度與材齡

之關係曲線如圖 1 所示，圖 1a 顯示，0.45 水灰比、20% 爐石粉及 0%、0.5%、1% 及 3% 等 PP 棄邊絲添加量之混凝土試體，7 天材齡時，棄邊絲組混凝土抗壓強度均較對照組為小，由大而小依序為對照組、3% 棄邊絲組、0.5% 棄邊絲組、1% 棄邊絲組。14 天材齡時，混凝土抗壓強度發展情形與 7 天材齡時相似。28 天材齡時，對照組抗壓強度為最大，0.5% 棄邊絲組次之，而 1.5% 棄邊絲組抗壓強度增加速率較緩慢，僅大於 1% 棄邊絲組。由圖 1b 顯示，0.50 水灰比、7 天材齡時，僅 3% 棄邊絲組抗壓強度小於對照組，且混凝土抗壓強度隨著棄邊絲添加量增加而遞減。14 天和 28 天材齡時，僅 0.5% 棄邊絲組抗壓強度大於對照組，混凝土抗壓強度隨著棄邊絲組添加量增加而降低。由圖 1c 顯示，0.55 水灰比時，僅 0.5% 棄邊絲組抗壓強度大於對照組，混凝土抗壓強度隨著棄邊絲添加量增加而降低。由上述分析結果得知，當 0.45 水灰比時，棄邊絲組抗壓強度均低於對照組，而 0.50 和 0.55 水灰比時，僅 0.5% 棄邊絲組抗壓強度大於對照組，此說明 20% 爐石粉、適當的水灰比及 PP 棄邊絲添加量將有助於增強混凝土的抗壓強度。

4.1.2 抗彎強度

依據 CNS 1231 規範混凝土抗彎強度試驗(簡支樑三分點荷重法)，製作 $150 \times 150 \text{ mm}$ 尺寸之樑斷面，其長度為厚度之三倍加 50 mm，置於常溫飽和石灰水中養護，待 7、14 及 28 天等材齡，進行抗彎試驗。混凝土抗彎強度與材齡之關係曲線如圖 2 所示，圖 2a 顯示，0.45 水灰比、0%、0.5%、1% 及 3% 等 PP 棄邊絲添加量之混凝土試體，7 天材齡時，棄邊絲組混凝土抗彎強度均較對照組為低，且其抗彎強度由大而小依序為對照組、1% 棄邊絲組、0.5% 棄邊絲組、3% 棄邊絲組。14 天材齡時，僅 1% 棄邊絲組抗彎強度大於對照組。28 天材齡時，棄邊絲組抗壓強度均高於對照組，1% 棄邊絲組抗彎強度為最大，0.5% 棄邊絲組次之，而 3% 棄邊絲組抗彎強度較差，對照組抗彎強度隨著材齡增長速率較為緩慢，其抗彎強度為最差。由圖 2b 顯示，0.50 水灰比、7 天材齡時，棄邊絲組混凝土抗彎強度均小於對

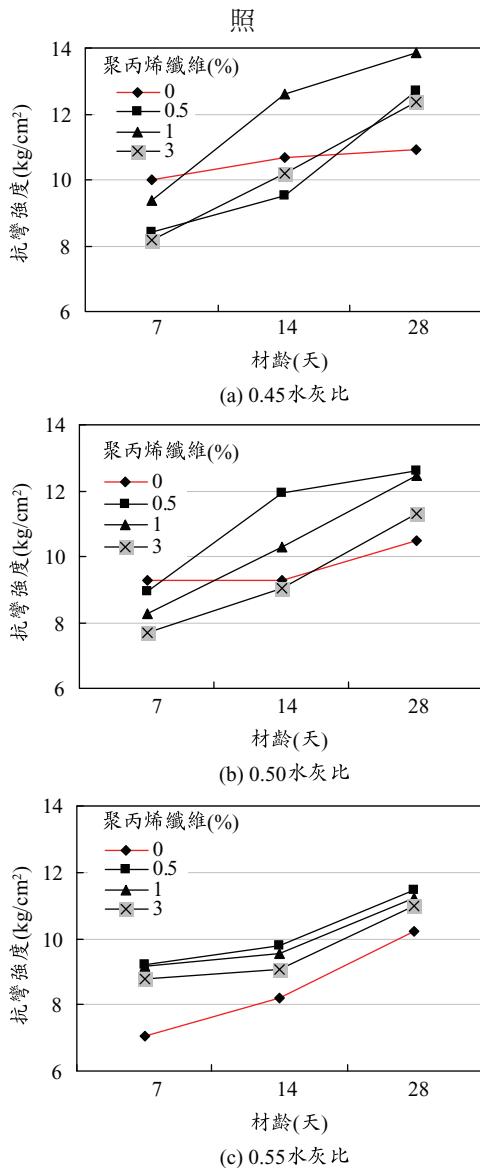


圖 2 聚丙烯棄邊絲混凝土抗彎強度與材齡之關係

組。14 天材齡時，僅 3% 棄邊絲組抗彎強度小於對照組。28 天材齡時，棄邊絲組混凝土抗彎強度均大於對照組；且其抗彎強度隨著棄邊絲添加量而遞減，以 0.5% 棄邊絲組抗彎強度為最佳。由圖 2c 顯示，0.55 水灰比、7、14 及 28 天材齡時，棄邊絲組抗彎強度均較對照組為大，棄邊絲組混凝土抗彎強度隨著棄邊絲添加量增加而降低。綜合以上分析結果顯示，0.45、0.50 及 0.55 水灰比、

28 天材齡，棄邊絲組抗彎強度均大於對照組，此

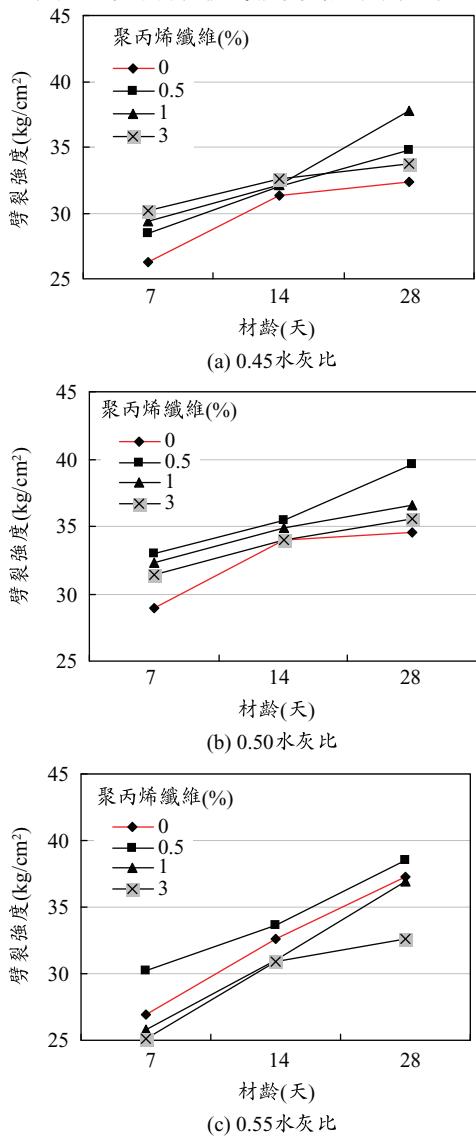


圖 3 聚丙烯棄邊絲混凝土劈裂強度與材齡之關係

說明添加 20 % 爐石粉和 PP 棄邊絲將有助於混凝土抗彎強度的提升。

4.1.3 劈裂強度

依據 CNS 3801 規範混凝土圓柱試體劈裂強度試驗，製作 $10\phi \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 高圓柱試驗體，置於常溫之飽和石灰水中養護，待 7、14 及 28 天等材齡進行劈裂強度試驗。圖 3a 顯示，0.45 水灰比、20 % 爐石粉及各 PP 棄邊絲添加量之混凝

土試體，7 天材齡時，棄邊絲組混凝土劈裂強度均較對照組為大，且其劈裂強度隨著棄邊絲添加量增加而增強。14 天材齡時，混凝土劈裂強度發展情況與 7 天材齡時相同。28 天材齡時，1% 棄邊絲組劈裂強度為最大，0.5% 棄邊絲組次之，而 3% 棄邊絲組劈裂強度增加較為緩慢，其劈裂強度僅大於對照組。由圖 3b 顯示，0.50 水灰比時，7、14 及 28 天材齡時，棄邊絲組劈裂強度均較對照組為大，混凝土劈裂強度由大而小依序為 0.5% 棄邊絲組、1% 棄邊絲組、3% 棄邊絲組、對照組。由圖 3c 顯示，0.55 水灰比，僅 0.5% 棄邊絲組劈裂強度大於對照組，混凝土劈裂強度隨著棄邊絲添加量增加而降低。由以上分析結果得知，於 28 天材齡時，0.45 和 0.50 水灰比等棄邊絲組劈裂強度均較對照組為大，而 0.55 水灰比時，僅 0.5% 棄邊絲組劈裂強度大於對照組。此說明較小的水灰比和 PP 棄邊絲添加量可提升混凝土的劈裂強度。

4.1.4 衝擊能量

製作混凝土衝擊試驗試體，試件尺寸為 $150\phi \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ 高，置於常溫飽和石灰水中養護，待 28 天材齡進行衝擊試驗。依據 ACI 1544 規範，計算衝擊能量 $W = nmgh$ ，其中， W 為衝擊能量($\text{N}\cdot\text{m}$)； n 為錘擊次數； h 為衝擊錘落下高度(m)； m 為衝擊錘質量(kg)； g 為重力加速度(m/s^2)。試驗時，衝擊錘中心線與試件中心對齊，將 2 kg 重衝擊錘從高度 $h = 900 \text{ mm}$ 自由落下，反覆衝擊，直至試件出現裂縫時，記錄打擊的次數。

20% 爐石粉和各 PP 棄邊絲添加量之混凝土試體的衝擊能量如圖 4 顯示，0% 棄邊絲組和 0.5% 棄邊絲組混凝土試驗的抗衝擊能量，以 0.55 水灰比組為最佳、0.50 水灰比組其次，而 0.45 水灰比組為最差，此說明水灰比越大混凝土抗衝擊能量也越大。一般理論而言，水灰比越大混凝土抗衝擊能量應越小，造成此原因可能是試體製作養護或試體抗壓速率等偏差產生。1% 棄邊絲組混凝土試體的抗衝擊能隨著水灰比減少而增大，此因混凝土試體內部骨材/棄邊絲/水泥砂漿體界面處水化程度完整，以及各基材界面交錯處應為最佳之

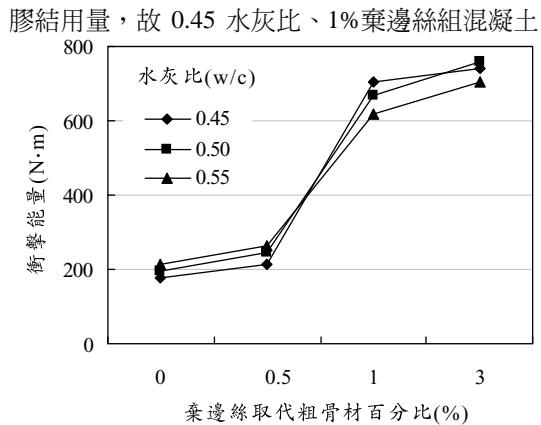


圖 4 聚丙烯棄邊絲混凝土衝擊能量之比較

抗衝擊能量為最佳，且於 0.50~1% 棄邊絲添加量時，混凝土抗衝擊能量增長最快。3% 棄邊絲添加量時，0.50 水灰比組和 0.45 水灰比組混凝土抗衝擊能量很接近，0.55 水灰比組為最小。對混凝土抗衝擊而言，0.50 水灰比、3% 棄邊絲組為最佳抗衝能量之混凝土配比。相同水灰比時，對照組混凝土(0% 棄邊絲)抗衝擊能量為最差，約為 180~210 N·m；0.5% 棄邊絲組抗衝擊能量相較對照組提高約 1.12~1.27 倍；1% 棄邊絲組抗衝擊能量大幅提高約 2.9~3.8 倍；3% 棄邊絲組抗衝擊能量為最大，提高約 3.3~3.9 倍。由以上分析結果得知，相同水灰比時，棄邊絲組抗衝擊能量均大於對照組，且隨著 PP 棄邊絲添加量增加而增大。又由圖 1 分析結果得知，較大的 PP 棄邊絲添加量，使得混凝土的抗壓強度降低，此說明聚丙烯棄邊絲是軟纖，對混凝土抗壓強度增加不大，但對抗衝擊能量有大幅提高的效益。

由衝擊試驗觀察試體破裂情況得知，0.45 水灰比時，對照組混凝土衝擊破裂呈“一”字型裂紋，0.5% 棄邊絲組破裂型式為“之”字型，1% 棄邊絲組破裂呈放射性裂紋，3% 棄邊絲組裂紋呈“之”字型。由上述試體衝擊破裂呈現可知，以 1% 棄邊絲組混凝土衝擊裂紋較多，具有最佳抗衝擊之效果。0.50 水灰比時，對照組混凝土衝擊破裂呈“V”字型裂紋，0.5% 和 1% 棄邊絲組破裂型式為“一”字型，3% 棄邊絲組破裂呈放射性裂紋。0.55 水灰比時，對照組和 0.5% 棄邊絲組破裂

型式為“一”字型，1%棄邊絲組破裂紋呈放射

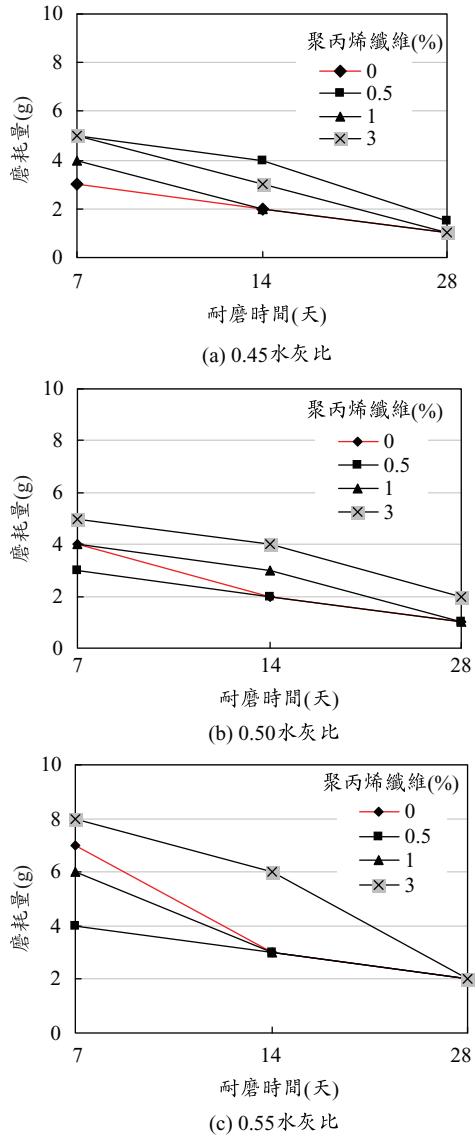


圖 5 聚丙烯棄邊絲混凝土磨耗量之比較

性裂紋，3%棄邊絲組裂紋呈“V”字型。由混凝土衝擊破裂型式觀之，混凝土衝擊裂紋隨 PP 棄邊絲添加量增加而增多，呈現較佳抗衝擊之效果。

4.1.5 磨耗量

製作混凝土磨耗試驗試體，試體尺寸 13 mm 厚、63 mm 外徑之圓盤試件。置於常溫飽和石灰水中養護，待 7、14 及 28 天等材齡，進行磨耗

試驗。圖 5 表示添加 PP 棄邊絲混凝土磨耗量與材齡之關係，由圖可知，各組混凝土磨耗量均隨材齡的增加而減少。由圖 5a 顯示，0.45 水灰比、20% 爐石粉及各 PP 棄邊絲添加量之混凝土試體，7 天材齡時，混凝土磨耗量以對照組為最少，1% 棄邊絲組次之，而 0.5% 和 3% 棄邊絲組為最多。此時期混凝土拌合水尚存於骨材和棄邊絲的表面，又因骨材/棄邊絲/水泥砂漿之界面 CH 和 C-S-H 等水化產物尚未充分緊密結合，導致棄邊絲混凝土有較大的磨耗量。14 天材齡時，試體磨耗量以 0.5% 棄邊絲組為最大，3% 棄邊絲組次之，而對照組和 1% 棄邊絲組為最小。28 天材齡時，0.5% 棄邊絲組試體磨耗量為最大，其餘各組試體磨耗量均相近。由圖 5b 顯示，0.50 水灰比、7 天材齡時，僅 0.5% 棄邊絲組混凝土磨耗量小於對照組，14 天材齡時，3% 棄邊絲組試體磨耗量為最大，1% 棄邊絲組為次之，而對照組和 0.5% 棄邊絲組磨耗量為最小。28 天材齡時，僅 3% 棄邊絲組混凝土磨耗量大於對照組，其餘各組磨耗量均相同。由圖 5c 顯示，0.55 水灰比、7 和 14 天齡期時，僅 3% 棄邊絲組混凝土磨耗量大於對照組，於 28 天材齡時，各組混凝土磨耗量均相同。由以上試驗結果得知，水灰比愈大混凝土磨耗量愈大，且混凝土磨耗量於材齡初期，隨著 PP 棄邊絲添加量增加而增大，故較低水灰比和 PP 棄邊絲添加量可減少混凝土的磨耗量。

4.1.6 水中磨損量

本試驗採用 ASTM C1138 規範水中磨耗法試驗，製作 0.55 水灰比、20 % 爐石粉及各 PP 棄邊絲添加量之混凝土試體， $30\phi\text{cm} \times 10\text{ cm}$ 高圓盤試體，待 28 天養護材齡後取出試驗，進行 72 小時水中磨損試驗儀器水槽中放入半滿的水和鋼珠，其鋼珠數量為 1 in 10 顆、3/4 in 35 顆及 1/2 in 25 顆，鋼珠總重 1530~1900 g，攪拌葉片轉速為 $1200 \pm 100\text{ rpm}$ ，葉片旋轉帶動水流、推動鋼珠滾動，混凝土試體表面因而產生磨耗。以磨耗損失重量做為混凝土抗磨耗能力之指標，即試體損失重量較少，則混凝土抗磨耗能力較佳。照片 1 顯示，0.45 水灰比、0.5% 棄邊絲組混凝土於水中磨耗 72 小時後，

試體表面之磨耗情況。由於，試體所含材料強度



照片 1 0.5% 聚丙烯棄邊絲混擬土試體水中磨損之情形(水灰比 0.45)

不同，在骨材/棄邊絲/水泥漿體界面處強度不一致，而有不同的磨耗量，試體表面產生高低起伏之現象。其原因为混凝土圓柱試體抗壓試驗之破裂情況，沿骨材/棄邊絲/水泥漿體界面處弱面產生破壞，即此界面 CH 和 C-S-H 水化反應區較大，在貼近骨材/棄邊絲界面處，較遠離骨材或棄邊絲所形成的水灰比為大，致使過渡區或水袋區形成弱面，骨材和棄邊絲實際上對尖端裂縫的抑制有明顯幫助。圖 6 顯示，0.45、0.50 及 0.55 水灰比時，混凝土水中磨耗累積量均隨磨耗時間增加而遞增，棄邊絲組磨耗累積量均較對照組為小，且隨著 PP 棄邊絲添加量增加而減少。此因混凝土試體表面水化較內部水化程度完整，其內部水泥砂漿體/骨材/棄邊絲界面交錯處和各材料下方可能產生水袋，易生弱面和弱帶等，故混凝土在水中之磨耗量有增加的趨勢。混凝土試體水中磨耗試驗中，初期(0~12 小時)磨耗量較大，中期(12~48 小時)磨耗量最小，末期(48~72 小時)磨耗量又增大。此因混凝土表面氣乾現象較試體內部水化完整。在水中磨耗過程中，混凝土試體並無骨材脫落的情形，於磨耗力作用下，材料界面有弱面產生，試體磨耗初期，為試體表面水泥砂漿的剝離，PP 棄邊絲周圍水泥砂漿剝離而產生鬃毛現象，此現象具有抑制混凝土磨耗作用，且有助於微生物附著於棄邊絲，可提升農田圳路的生態性。

4.1.7 混凝土強度預測

上小節中 72 小時水中磨耗試驗完成後，將

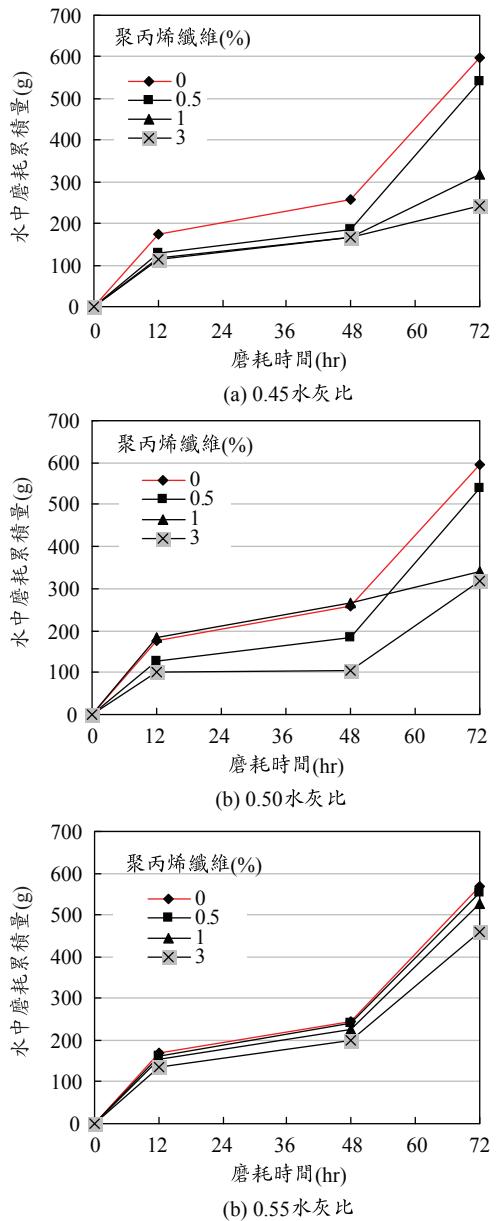
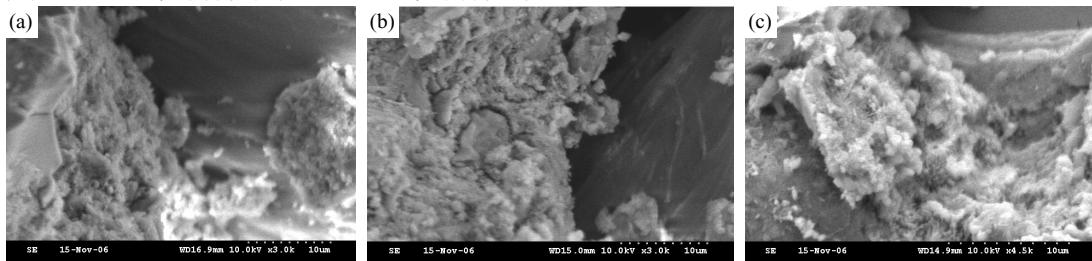


圖 6 聚丙烯棄邊絲混擬土水中磨耗累積量與磨耗時間之關係

試體以自來水清洗擦乾，以數位相機拍照，再將照片以 CAD 2004 繪圖軟體處理，獲得骨材表面積、骨材周長及水泥砂漿面積等數據，各參數與 PP 棄邊絲混擬土之關係如圖 7 所示。由圖得知，對照組混凝土表面骨材面積為最小，1% 棄邊絲

組次之，3 %棄邊絲組再次之，0.5%棄邊絲組為



照片 2 7 天齡期混凝土 SEM 照片

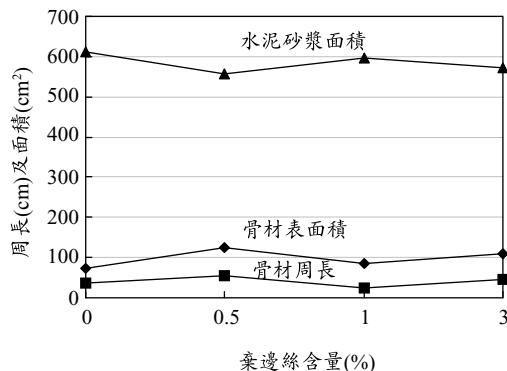


圖 7 混凝土試體磨損表面骨材面積、骨材周長及水泥砂漿面積與棄邊絲含量之關係

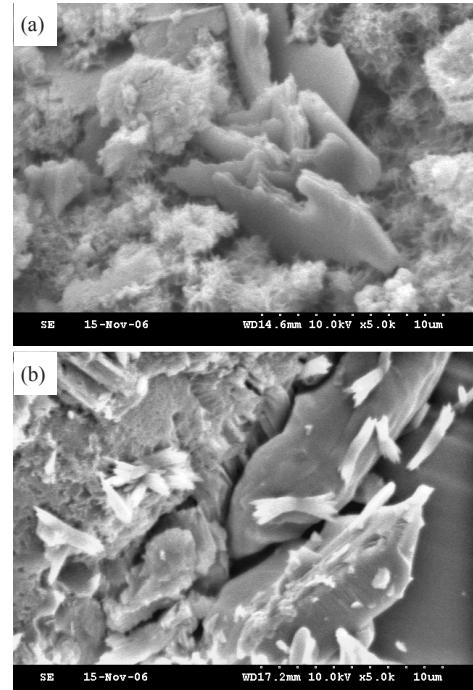
最大，且其試體磨損表面骨材總面積隨著 PP 棈邊絲含量增加而增大。骨材總周長方面，對照組混凝土試體磨損表面骨材總周長僅大於 1% 棈邊絲組。又 1% 棈邊絲組混凝土中骨材總面積大於對照組，但其骨材總周長卻小於對照組，此表示 1% 棈邊絲組混凝土中所含骨材粒徑相較對照組為大。在水泥砂漿面積方面，對照組混凝土中水泥砂漿面積為最大，1% 棈邊絲組次之，0.5% 棈邊絲組為最小，與骨材面積成反比之關係。此說明混凝土中骨材面積愈多，混凝土耐磨特性愈佳。

4.2 微觀性質分析

4.2.1 掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測分析

藉由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測混凝土之顯微結構，研判完整水化產物結晶顆粒大小、結晶程度、水化特性及空間關係等。C-S-H 膠體係

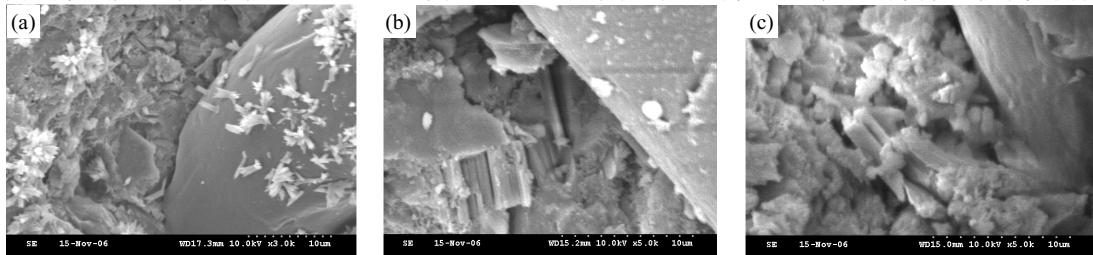
C_3S 或 C_2S 與水化反應之主要產物，此水化產物



照片 3 14 天齡期混凝土 SEM 照片

的外觀如針刺狀或不定形狀；CH 係 C_3S 與 C_2S 之水化反應而產生，為層片狀結構、無孔條紋式，良好結晶型；硫鋁酸鈣水化物($\text{C}-\text{A}-\text{F}-\text{S}-\text{H}_x$)係 C_3A 與 C_4AF 水化可得 $\text{C}-\text{A}-\text{S}-\text{H}_x$ 水化產物之混凝土。其中，水化產物鈣釗石(AFt)為六角針狀，單硫鋁酸鈣(AFm)水化物呈六角薄片狀、不規則玫瑰狀等形狀。針對 0.45 水灰比、20% 爐石粉及 1.5 % PP 棈邊絲添加量之混凝土試體，SEM 觀測結果如照片 2 (7 天材齡)、照片 3 (14 天材齡)

及照片 4 (28 天材齡)等。混凝土 0.45 水灰比、7



照片 4 28 天齡期混凝土 SEM 照片

水泥漿體界面處水泥漿體誘發爐石粉和水化反應 C-S-H 膠體水化產物，照片右上部為棄邊絲材料，左半部顯示充滿 CH 水化產物，右半部顯示 PP 棄邊絲；照片 2b 左半部顯示充滿 CH 水化產物，右半部為 PP 棄邊絲材料；照片 2c 右上部為 PP 棄邊絲，左下部顯示骨材和 C-S-H 膠體界面上充滿 CH 晶體。混凝土 14 天材齡而言，添加 20 % 爐石粉和 1.5 % PP 棄邊絲混凝土試體，在棄邊絲/水泥漿體界面上充滿著 CH 晶體、孔隙及針刺或不定形狀。照片 3a 中顯示出微細的 C-S-H、C-(N/K)-S-H 和玫瑰片狀的單硫型鋁酸水化物，此乃混凝土在拌合時，因水泥水化時會釋出 CH、K⁺ 及 Na⁺ 等鹼性成份，誘發爐石粉與水泥水化反應，形成酸膜，促使爐石粉二次水化反應，而產生 C-S-H、C-(N/K)-S-H 及單硫型鋁酸水化物等。照片 3b 顯示，混凝土試片在棄邊絲/水泥漿體/骨材界面處，照片右半部觀察到少許長棒狀的鋁酸鈣水化物，左半部較多 CH 晶體、孔隙及針刺狀的水化產物等。故此時混凝土抗壓強度也隨之增加。混凝土 28 天材齡而言，在棄邊絲/水泥漿體界面上，觀察到玫瑰片狀的單硫型鋁酸和長棒狀的鋁酸鈣水化物及 CH 晶體等。照片 4a 顯示，混凝土試片在棄邊絲/骨材/水泥漿體界面處充滿 C-S-H 膠體，照片右半部份觀察到棄邊絲和少量長棒狀的鋁酸鈣水化物等，以及棄邊絲表面和混凝土界面情況之微結構；照片左半部則有 C-S-H、CH 及玫瑰片狀的單硫型鋁酸水化產物等。照片 4b 顯示，混凝土試片在棄邊絲/水泥漿體界面處充滿著細長薄板，照片右半部顯示 PP 棄邊絲表面附著少許水化產物，在右下部顯示出

帶有針刺或不定形狀的 C-S-H 膠體；左半部觀察到細長六角薄板狀和硫鋁酸鈣水化物等，以及不規則針刺 C-S-H 膠體。照片 4c 顯示，混凝土試片在棄邊絲/水泥漿體處充滿 CH 晶體、孔隙及 C-S-H 膠體等，照片右半部區域有 PP 棄邊絲，混凝土邊界處充滿水化產物，而右下部有 C-S-H 和 CH 水化產物等；照片左半部充滿著 CH 晶體、孔隙及針刺狀或不定形狀的 C-S-H 膠體等。由上述現象說明，因爐石粉與卜索蘭反應較慢，以爐石粉取代水泥用量，混凝土水泥用量會隨著水灰比增加而減少，故爐石粉取代 20 % 水泥用量之混凝土，早期強度的發展上較晚期強度為差。

4.2.2 混凝土化學元素分析

以 SEM 附設之 X 光能譜儀 (Energy Dispersive X-RAY Analysis; EDXA)，對爐石粉和 PP 棄邊絲等組成之混凝土試體，選取小面積試樣，做混凝土試體材料定點化學成份分析，以了解其化學成份的基本趨勢重量百分比。0.55 水灰比、20% 爐石粉及 1% PP 棄邊絲含量之混凝土試體，由圖 8 顯示，其主要成份為 SiO₂、CaO、Al₂O₃ 及 MgO 等，次要成份為 MnO、FeO、TiO₂、K 及 C 等，屬矽酸鹽類材料。就理論而言，由於 Si 含量高之石英構造最穩定、強度最大，且混凝土中沒有 S 元素，除受外界污染外，並不致於結合成 Fe₂S(黃鐵礦)，對混凝土造成化學性侵蝕。但由於混凝土試體中出現 K 元素，潛在鹼骨材反應，對長期的混凝土工程性質將有影響，值得後續進一步探討。

4.2.3 X 光繞射分析(X-RAD)

混凝土水泥砂漿體水化反應過程中，CH 隨

著材齡增長而遞減，但在晚材齡時，卜索蘭水化反應會消耗 CH，而形成 C-S-H 膠體，此現象可

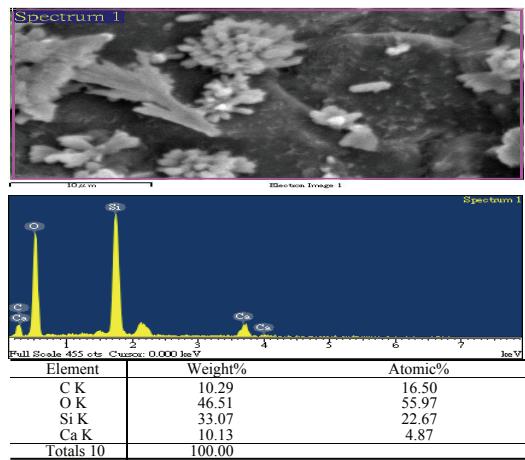


圖 8 添加爐石粉和聚丙烯棄邊絲混凝土之 EDXA 分析圖

藉由 X 光繞射強度來瞭解卜索蘭水化反應之程度。將混凝土之水泥砂漿體研磨成細粉末，在 X 光繞射下所產生的特徵 X 光繞射圖，以 21.680、26.090 及 50.920 等相對應強度高峰值，推測水泥砂漿體中 CH 含量之相對變化情形。0.45 水灰比、20% 爐石粉及 1% PP 棄邊絲混凝土之水泥砂漿體的 X 光繞射圖如圖 9 所示，由圖顯示出，水泥砂漿體中 CH 峰隨著材齡增長而遞減，而晚期材齡時，CH 峰隨著材齡增加而減少。

以上巨微觀試驗數據分析成果統計，列於表 3。綜合試驗結果得知，20% 爐石粉和適量聚丙烯棄邊絲添加量，可提高混凝土的力學強度、水密性及耐磨耗等性質。

五、結論

本研究係以混凝土組成材料，探討聚丙烯棄邊絲混凝土之耐磨性質，進而建立混凝土耐磨與力學性質之關係，以供農田水利工程設計之參考。研究成果結論如下：

1. 混凝土工程性質而言，於 28 天材齡，0.45 水灰比時，添加 20% 爐石粉和各 PP 棄邊絲組抗壓強度均低於對照組，0.50 和 0.55 水灰比時，
2. 對混凝土抗衝擊、耐磨及水中磨耗等性質而

僅 0.5% 棄邊絲組抗壓強度為最佳；棄邊絲組混凝土抗彎強度均高於對照組；0.45 和 0.50

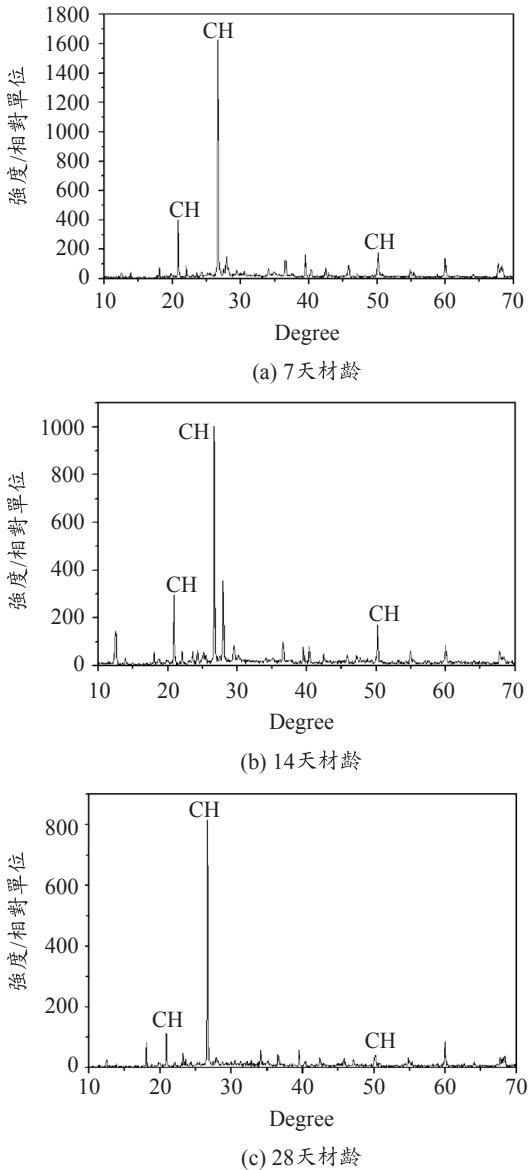


圖 9 混凝土水泥砂漿之 X 光繞射圖

水灰比，棄邊絲組混凝土劈裂強度均高於對照組，而 0.55 水灰比時，僅 0.5% 棄邊絲組劈裂強度大於對照組。故適量的 PP 棄邊絲添加量，可提高混凝土的抗壓強度、抗彎強度及劈裂強度等工程性質。

言，20%爐石粉、1% PP 棄邊絲添加量混凝土

可獲最佳之耐磨性質，棄邊絲組混凝土可獲最

表 3 聚丙烯棄邊絲混凝土試驗成果

28 天材齡

試驗項目	試驗研究成果
抗壓強度試驗	20%爐石粉、0.5%棄邊絲含量為最適添加量。
抗彎強度試驗	棄邊絲組抗彎強度均較對照組為大，棄邊絲組混凝土抗彎強度隨著棄邊絲添加量增加而降低。
劈裂強度試驗	較小的水灰比和 PP 棄邊絲添加量可提升混凝土的劈裂強度。
衝擊試驗	棄邊絲組抗衝擊能量均大於對照組，且隨著 PP 棄邊絲添加量增加而增大。0.50 水灰比、3%棄邊絲組為最佳抗衝擊能量之混凝土配比。
磨耗試驗	水灰比愈大混凝土磨耗量愈大。
水中磨耗法試驗	初期(0~12 小時)磨耗量較大，中期(12~48 小時)磨耗量最小，末期(48~72 小時)磨耗量又增大。
掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測	爐石粉取代 20 %細粒料用量之混凝土，早期強度的發展上較晚期強度為差。
X 光能譜儀(EDXA)觀測	聚丙烯混凝土主要成份為 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 及 MgO 等，次要成份為 MnO 、 FeO 、 TiO_2 、K 及 C 等。
X 光繞射分析(X-RAD)	水泥砂漿體中 CH 峰隨著材齡增長而遞減，而晚期材齡時，CH 峰隨著材齡增加而減少。

佳之抗衝擊和水中磨耗等性質。故 1~3% PP 棄邊絲添加量可提高混凝土抗衝擊、耐磨性及水中磨耗性等性質。

- 由混凝土試體磨損表面得知，0.45 水灰比時，以 20 %爐石粉和 0.5 % PP 棄邊絲添加量可獲混凝土試體磨損表面骨材總面積和骨材總周長等最大，而水泥砂漿面積呈現相反之結果。此結果可預測添加適量棄邊絲能提高混凝土之耐磨強度。
- 由 SEM 和 X-RAD 等分析得知，CH 決定混凝土早期抗壓強度之成長率，在水泥漿體/骨材/棄邊絲界面有較多 CH 晶體、孔隙及針刺或不定形狀水化產物等時，會因卜索蘭反應而消耗部份 CH，使得 CH 含量隨著混凝土材齡增長而減少；而 C-S-H 和 C-A-H 膠體隨著混凝土材齡增長而增加。因而，混凝土抗壓強度隨著材齡增長而增強。
- 由 EDXA 分析得知，混凝土主要元素為 Si 和 Ca 等成份，次要元素為 K 和 Fe 等成份；晚期材齡時，混凝土因 C-S-H 膠體之增加，但 K 元素出現，有可能產生鹹骨材反應，對混凝土長期工程性質有所影響，值得追蹤探討。
- 聚丙烯混凝土具有減廢和生態性，添加適量的

爐石粉和聚丙烯纖維於混凝土中，可改善新拌混凝土之工作性，以及提升混凝土強度、水密性及耐磨耗等性質。混凝土磨耗後表面產生鬃毛現象，有助於微生物的附著，以及較佳的抗滑性和生態性，適合應用在農田水利的工程設施。

誌謝

本研究計畫承蒙行政院農業委員會農科研究計畫 95 農科-11.2.1-利-b1(3)經費資助，大懋股份有限公司提供聚丙烯棄邊絲，萬能科技大學營建科技系專題生在材料試驗的協助，以及萬能科技大學碩士生江慶星和電子工程系曾淑惠老師等協助試驗資料整理，特此誌謝。另外，感謝匿名審查委員細心審閱，提供諸多寶貴的意見和建議，使本文更臻完整。

參考文獻

- 李志信(1999)「鋼纖維混凝土材料之水中磨耗性質與機理之探討」，國立台灣大學土木工程研究所，碩士論文，台北。
- 李敏、符振輝(2006)，「聚丙烯纖維混凝土在樂灘水電站的應用」，紅水河，25(3)，中國。

3. 沈永年、林仁益、黃兆龍(1993)，「核磁共振解析含飛灰水泥漿體之卜索蘭反應」，中國土木水利工程學刊，5(4)，387-392。
4. 林利垣(1992)，「碳纖維混凝土之工程性質研究」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文，新竹。
5. 祖福興、鍾明全、李洪英、劉建國、張光平(2006)，「聚丙烯纖維混凝土在船閘輸水廊道中的應用」，水運工程，2，中國。
6. 孫海燕、龔愛民、彭玉林(2007)，「聚丙烯纖維混凝土性能試驗研究」，雲南農業大學學報，22(1)，中國。
7. 陳志賢(1995)，「骨材與水泥漿體之界面微觀結構對其破裂行為之影響」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，台南。
8. 黃兆龍、黎綱雄(1986)，「不同廠牌水泥添加水淬爐石對其力學性質及體積穩定性之影響研究」，高爐石與飛灰資源在混凝土工程上應用研討會，財團法人台灣營建研究中心。
9. 湯維堯(1998)，「高強度混凝土水中磨耗性質與早期收縮行為之研究」，國立台灣大學土木工程研究所，碩士論文，台北。
10. 鄒傳學、李秋義、張同波(2007)，「聚丙烯纖維補償縮混泥土性能試驗研究」，青島理工大學學報，28(1)，中國。
11. 董藝、楊華金(2006)，「纖維混凝土抗裂性能研究」，人民長江，37(8)，中國。
12. 楊春光、王正中、田江永(2006)，「水工混凝土抗沖磨性能試驗研究」，人民黃河，水利水電工程，28(4)，中國。
13. 葛其榮(2001)，「聚丙烯纖維混凝土在水利工程中的應用研究」，聚丙烯纖維混凝土在水利工程中的應用研究課題組，中國。
14. 詹穎雯(1999)，「水工結構物混凝土之耐磨設計」，中興工程顧問期刊，61，台北。
15. 詹榮鑑、楊紹洋、曾淑惠(2004)，「混凝土工程性質之研究」，九十三年度農業工程研討會，桃園農田水利會，1328-1337，桃園市。
16. 詹榮鑑、簡顯光(2004)，「聚丙烯棄邊纖維混凝土之性質研究」，第七屆結構工程研討會，154-155，桃園。
17. 劉欣達、黃兆龍(1998)，「優生高性能纖維混凝土工程性質之研究」，八十七年第三屆鋪面材料再生學術研討會，219-228，台北市。
18. 闍嘉義、呂昀諭(1991)，「聚酯纖維混凝土力学特性之研究」，興大工程學刊，2。
19. 鄧作樸、張福安、璩貽安、金驥生、周承劉(2003)，「鋼纖維混凝土板於低速撞擊下破壞行為之研究」，中華民國力學期刊，19(2)，125-141。
20. 鄭伯乾(2003)，「聚丙烯纖維混凝土之抗裂力學行為」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，台南。
21. 賴勝權(2002)，「聚丙烯纖維增強混凝土機械性能之研究」，國立東華大學材料科學與工程研究所，碩士論文，花蓮。
22. 薛喜文、張東升(2006)，「西霞院工程抗磨混凝土應用研究與實施」，人民黃河，28(9)，中國。
23. Huang, Q. J. (1990), "Micromechanical modeling of the fracture behavior of second-phase reinforced cementitious materials", Ph.D., Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

收稿日期：民國 97 年 4 月 10 日

修正日期：民國 97 年 7 月 18 日

接受日期：民國 97 年 7 月 21 日