

表層滲透塗封劑對混凝土特性影響之研究

翁在龍*、卓世偉*、楊仲家*、黃然**

Study of the Effect of Surface Penetrating Sealer on the Properties of Concrete

T. L. Weng*, S. W. Cho1*, C. C. Yang1*, and R. Huang**

摘 要

本研究主要探討使用滲透塗封劑(penetrating sealer, PS)對混凝土表層孔隙結構，力學性質及耐久性的影響。不同水灰比 ($w/c=0.35, 0.45, 0.55$) 的混凝土試體，分別用PS以不同噴塗時間及不同劑量進行表面處理。利用抗壓強度試驗評估PS對混凝土力學性質的影響及利用氯離子快速滲透試驗探討PS對混凝土耐久性的影響。

試驗結果顯示噴塗PS對水泥基混凝土的力學性質及耐久性皆有正面的影響。利用SEM微觀觀測及EDS分析PS的滲透深度可達2cm，本研究試驗探討的滲透性塗封劑可分類為深層滲透塗封劑 (Deep penetrating sealer, DPS)。

關鍵詞：滲透塗封劑，DPS，混凝土，氯離子

ABSTRACT

The effect of penetrating sealer (PS) on the structure of surface pore, mechanical properties, and durability of concrete was studied. Concrete specimens with various water/cement ratios ($w/c=0.35, 0.45, 0.55$) were cast and treated surfaced with various amounts of PS at different ages. The effect of PS on the mechanical properties of concrete was assessed by compressive strength and the rapid chloride permeability test was also explored to test concrete durability.

Test results indicate that the application of PS significantly improves concrete compressive strength and durability. By using SEM observation and EDS analysis, the penetrating depth of PS can be determined and is about 2 cm. The PS in this study may be categorized as deep penetrating sealer.

Keywords: penetrating sealer, DPS, concrete, chloride ion

* 國立臺灣海洋大學材料工程研究所
Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University.

** 國立臺灣海洋大學河海工程系所
Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University.

一、前言

混凝土係由水、水泥、骨材及摻料等利用適當配比所組成，一般可達到強度、耐久性、安全性、工作性及經濟性等需求。但若增加組成材料的相容性，則可以使混凝土發揮更大的效能；近年來混凝土的發展由傳統的混凝土演進到高強度混凝土 (high strength concrete, HSC) 更至今日的高性能混凝土 (high performance concrete, HPC)，耐久性之優劣為混凝土構造物使用年限的重要影響因素之一，而影響材料耐久性的外在因素有風化、磨損、析出及硫酸鹽侵蝕等；內在影響因素包含鹼骨材反應、透水性及體積變化等，一般降低混凝土滲透性方法，除了添加卜作嵐材料增加混凝土緻密性外（如添加爐石粉對抗硫酸鹽侵蝕與氯離子滲入有明顯之助益）^[1]，使用混凝土表面封層材料亦是增加混凝土耐久性之重要方法。一般表面防護方式主要有三種，分別為使用滲透式塗封劑 (penetrating sealer, PS) 防護，使用塗封劑 (sealer) 防護、以及表面塗層 (coating)^[2] 防護。

本文主要探討使用混凝土表面滲透塗封劑時，噴塗時機和噴塗劑量對混凝土性質的影響，以便提供使用者參考。

二、試驗範圍及方法

在不同水灰比 ($w/c=0.35, 0.45, 0.55$) 的混凝土試體表面依照設計的噴塗齡期 (1天、7天、14天、27天)，及劑量 ($65g/m^2, 90g/m^2, 130g/m^2, 155g/m^2$) 施以PS探討其入滲深度及對混凝土力學性質及耐久性之影響，並決定PS之最佳噴塗齡期、劑量及噴塗時混凝土之含水狀態。

2.1 試驗變數

本研究以不同水灰 ($W/C=0.35, 0.45, 0.55$) 製作混凝土試體 ($\phi 10 \times 20cm$)；試驗變數列於表

2.1。為模擬工地實際施工情況及避免塗封劑泡水稀釋試體採用空氣養護。

表2.1 試驗變數

Table 2.1 Test variables

水灰比 (w/c)	噴塗時齡期 (days)	噴塗劑量 (g/m ²)	噴塗時混凝土 含水狀態
0.35	1	65	面乾內飽和 (SSD) 氣乾(AD)
0.45	7	90	
0.55	14	130	
	27	155	

2-2 試驗材料及配比設計

滲透塗封劑 (penetrating sealer, PS)

本研究所採用之進口PS由試驗結果得知主要元素成份為鈉、矽及氧，其化合物為矽酸鈉類 (Na_2SiO_3)。

混凝土配比

本研究配比係參照ACI 211 及ACI 363配比設計步驟求得水灰比為0.35、0.45及0.55的配比詳如表2.2所示，試體編號如表2.3所示第一碼為水灰比、第二碼為噴塗齡期、第三碼為噴塗劑量。

表2.2 混凝土之配比

Table 2.2 Mixing proportions

試體編號	水灰比	水泥 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)
A	0.35	685	197	746	661
B	0.45	533	199	743	794
C	0.55	436	199	740	880

表2.3 試體編號

Table 2.3 Concrete specimen designation

編號	水灰比	編號	噴塗時齡期 (days)	編號	噴塗劑量 (g/m ²)
A	0.35	0	1	A	65
B	0.45	1	7	B	90
C	0.55	2	14	C	130
		4	27	D	155

2.3 氯離子快速滲透試驗

本研究係參考AASHTO T277-96規範及ASTM C1202-97進行^{[3][4]}，試片尺寸為φ10×5cm，依試驗設計所定齡期及劑量在SSD狀態下噴塗DPS。

當電場通以60伏特電壓，可得第一個電流，以後每隔30分鐘記錄1次，一直到6小時為止。將記錄的電流值代入方程式(2-1)即可獲得累積電量。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_t + \dots + 2I_{300} + I_{360}) \quad (2-1)$$

Q：電量(coulombs)

I₀：初始電流(ampers)

I_t：在時間tmin時的電流(ampers)

2.4 SEM微觀觀察

本研究所進行之SEM觀察，配合基座大小切割試片如圖2.1所示。觀察0、1、2、3點之結構。

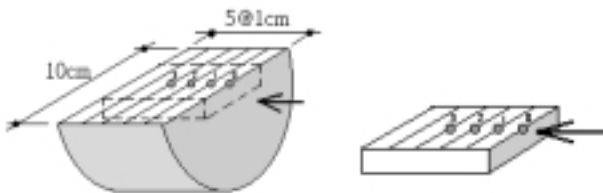


圖2.1 試片切割位置示意圖

Fig. 2.1 Section cutting diagram

2.5 EDS分析試驗

本試驗採與SEM試驗同一試片同一位置點以便互相比對如圖2.1所示，每隔1cm為一定點，進行EDS試驗，記錄及列印元素分析結果。

2.6 X光繞射分析

將PS結晶粉末烘乾，放入X光繞射分析儀內進行分析，將得到之X光繞射強度圖(Intensity Diagram)，做化合物之尖峰值(peak)比對。

三、結果與討論

3.1 PS成份分析

本試驗係將PS溶液放在烤箱中烤成白色結晶物再取四個樣本進行EDS之元素分析，其主要組成元素為鈉、矽及氧，其化合物經XRD分析判定為矽酸鈉類(Na₂SiO₃、Na₄SiO₄)及雜環烴類(C₆H₄O₅•2H₂O)。

3.2 PS滲透深度

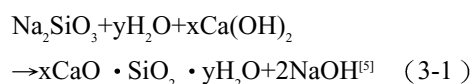
本試驗以Na元素為指標，將水灰比為0.55，第7天齡期噴塗155g/m²劑量的混凝土試體切成薄片如圖2.1所示，從噴塗表面開始，每隔1cm之定點進行EDS成份分析，結果控制組無Na元素存在，而噴塗PS之混凝土，發現深入2cm處還有Na之存在，由此顯示本試驗所用之滲透塗封劑(PS)滲入深度為2cm左右。依其定量分析Na所佔之重量百分比從表面往內部遞減，表面為5.22，距表面1cm處為4.96，距表面2cm處為0.78，距表面2.5cm及3cm處為0；因此可以看出PS之滲透量是隨著深度遞減如表3.1所示。

表3.1 鈉含量與深度關係

Table 3.1 Penetrated depth of Na versus weight percentage diagram

成份	表面	1cm	2cm	3cm
Na(W-%)	5.22	4.96	0.78	0

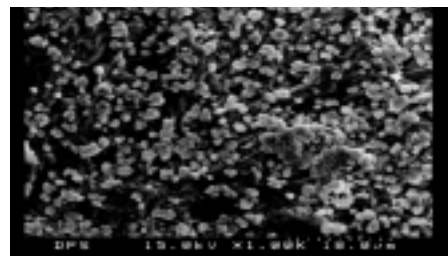
PS噴塗於混凝土表面時即從表層滲透進入內部其化合物矽酸鈉(Na_2SiO_3)會與混凝土中之氫氧化鈣反應產生另一帶有結晶水之矽酸鈣膠體及氫氧化鈉其反應式如3-1式所示。



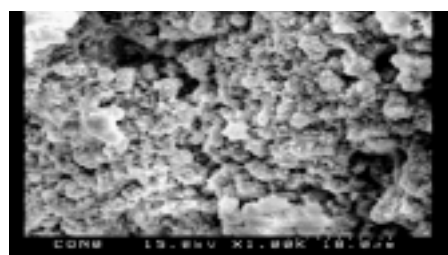
再經由相對應於上述EDS成份分析之各定點進行SEM晶相放大1K之微觀分析如圖3.1~圖3.4所示；可以發現噴塗PS所產生的微小粒子(約 $1\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$)也由表面隨著深度遞減至2cm後其量極微，亦可印證滲透深度可達2cm，又滲入水泥質表面2mm以上者可視為滲透劑(penetrating sealer, PS)^[6]，而本研究所用之PS滲入深度可達2cm應為深層滲透封劑劑(deep penetrating sealer, DPS)，簡稱為DPS。

3.3 使用DPS對混凝土抗壓強度之影響

本試驗依ASTM C39進行，試體為 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ，為模擬工地實際施工及避免泡水DPS劑量被稀釋，採用空氣中養護，在不同齡期噴塗設計劑量分別進行28天及91天混凝土的抗壓強度試驗。



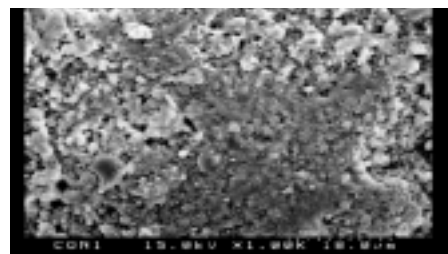
(a)



(b)

圖3.1 SEM晶相圖(a)控制組表面(b)噴塗PS表面

Fig. 3.1 The SEM crystal phrase picture (a)the surface of controlled (b)PS surfaced



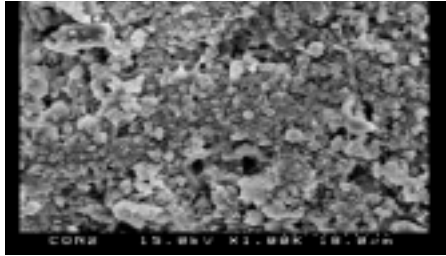
(a)



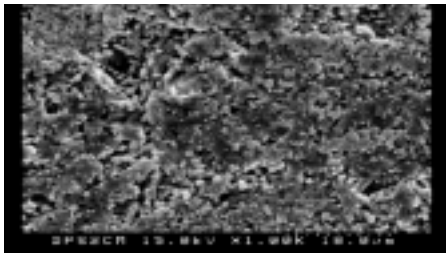
(b)

圖3.2 距表面1cm處 SEM晶相圖(a)控制組(b)噴塗PS

Fig. 3.2 The SEM crystal phrase picture of the place 1 cm from the surface (a)the surface of controlled (b)PS surfaced



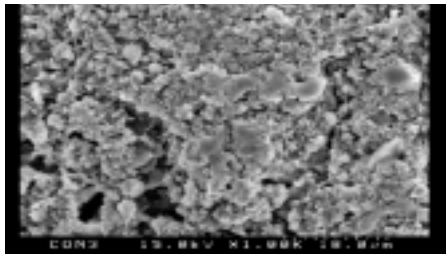
(a)



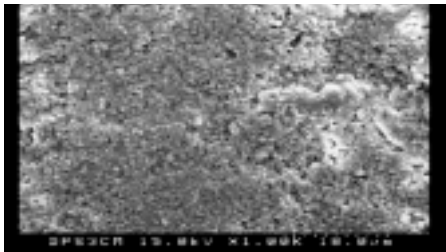
(b)

圖3.3 距表面2cm SEM晶相圖 (a)控制組 (b)噴塗 PS

Fig. 3.3 The SEM crystal phrase picture of the place 2 cm from the surface (a)the surface of controlled (b)PS surfaced



(a)



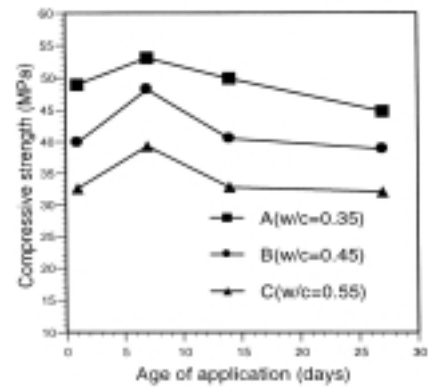
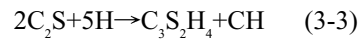
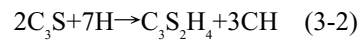
(b)

圖3.4 距表面3cm處SEM晶相圖(a)控制組 (b)噴塗 PS

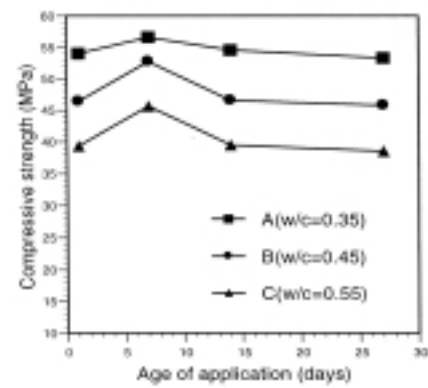
Fig. 3.4 The SEM crystal phrase picture of the place 3 cm from the surface (a)the surface of controlled (b)PS surfaced

噴塗齡期之影響

由圖3.5所示，齡期7天時噴塗之效能最佳，由3-1式顯示DPS之化合物 Na_2SiO_3 必須與 H_2O 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反應才能產生新的化合物顆粒，矽酸鈣膠體(C-S-H)及氫氧化鈉(NaOH)。而混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的由來是水泥之 C_3S 、 C_2S 與水反應而產生，其反應式如下：^[7]



(a)



(b)

圖3.5 DPS噴塗齡期與混凝土抗壓強度之關係 (a)28天抗壓強度(b)91天抗壓強度

Fig. 3.5 The age of application of DPS versus the compressive strength of concrete (a)the 28 days compressive strength of concrete (b)the 91 days compressive strength of concrete

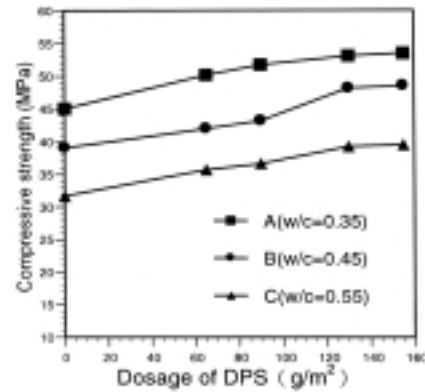
齡期1天時噴塗因水泥之水化作用初開始由C₃A及C₃S控制，隨後C₂S才陸續反應所以Ca(OH)₂不足，致使噴塗效能不佳，齡期7天混凝土已經產生足夠Ca(OH)₂可與DPS反應且因水化尚未完成毛細孔隙連通較多^[8]，滲透劑(DPS)較易滲入各孔隙進而產生微小粒子之化合物(約1 μm~2 μm)如前節圖3.1~圖3.3所示且正好可以填充毛細孔隙(0.01 μm~10 μm)^[1]，改善了表層孔隙結構之緻密性及抗壓試體表層緻密後的圍束作用，使抗壓強度隨著提高，又隨著齡期增加其連通之毛細孔隙逐漸減少^[8]，而齡期27天之混凝土水化作用已經達相當程度所以毛細孔隙之連通較少，DPS不易滲入孔隙，僅是結晶沉澱物積留於表面類似薄膜，所以齡期27天噴塗DPS對28天及91天之抗壓強度改善的效能不明顯。

DPS使用量之影響：

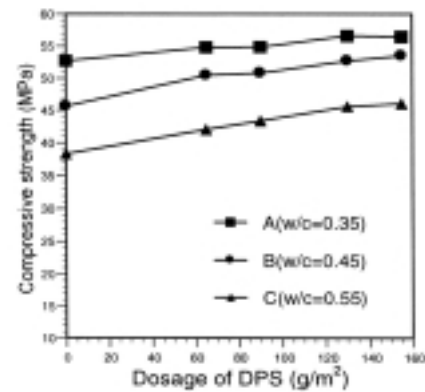
由圖3.6所示，齡期7天噴塗時，DPS使用量在130 g/m²以下壓力強度與劑量成正比，在130g/m²~155g/m²之間成平緩狀態，應為其飽和用量，亦為最佳用量。

混凝土含水狀態對噴塗DPS效能之影響：

使用130g/m²量之DPS於混凝土在SSD及AD(溫度約25℃、相對濕度約70%)狀態下噴塗，試體抗壓強度試驗結果如由表3.2所示試體在SSD狀態下噴塗效果較AD狀態下為佳，28天強度SSD狀態為AD之1.07~1.23倍，91天強度SSD狀態為AD之1.06~1.19倍，此乃因孔隙飽和時DPS較易因濃度不同隨液體以擴散方式^[9]進入各孔隙中，又因有足夠之水可與DPS反應如3-1式所述，進而產生化合物填充孔隙，改善孔隙結構，而AD狀態下之孔隙中僅有微量水其餘為空氣，所以DPS僅能被吸附而進入孔隙且無足夠水可與DPS反應以致效能較差。



(a)



(b)

圖3.6 DPS使用量與混凝土抗壓強度之關係 (a)28天抗壓強度 (b) 91天抗壓強度

Fig.3.6 The dosage of DPS versus the compressive strength of concrete (a)the 28 days compressive strength of concrete (b)the 91 days compressive strength of concrete

表3.3顯示混凝土在第7天齡期噴塗及最佳使用劑量(155g/m²)下強度增加百分比，會隨著水灰比增加而增加，此乃因高水灰比之孔隙較多改善效果較顯著，又DPS對28天抗壓強度之影響效能較91天抗壓強度顯著，此因齡期91天混凝土強度發展趨於成熟，DPS表層效應較不顯著。

表3.2 混凝土在不同含水狀態下噴 DPS 之抗壓強度 (MPa)

Table 3.2 The compressive strength of DPS surfaced concrete with different water containment (MPa)

試體編號	齡期28天	齡期91天
A1C (SSD)	53.05	56.59
A1C (AD)	49.76	53.52
B1C (SSD)	48.17	52.72
B1C (AD)	39.56	45.20
C1C (SSD)	39.27	45.62
C1C (AD)	31.81	38.41

表3.3 噴塗DPS 抗壓強度增加百分比

Table 3.3 The compressive strength increasing percentage with DPS surfaced

試體編號	齡期28天	齡期91天
A1D	18.6%	7.3%
B1D	24.2%	15.5%
C1D	24.8%	20.2%

3.4 DPS對混凝土RCPT累積電量影響

利用電荷通過混凝土試片累積電量（庫侖）來評估混凝土噴塗DPS 後試體抗氯離子穿透能力。本研究採用直徑10cm厚5cm之圓形試體，於SSD 狀態下在第7天及第27天的齡期噴塗DPS (65 g/m², 90 g/m², 130 g/m², 155 g/m²) 然後進行RCPT試驗。

由圖3.7~圖 3.9顯示A、B、C三種配比，第7天噴塗DPS之累積電量較第27天噴塗為低，即抗氯離子穿透能力較佳，且在噴塗劑量為65g/m² 狀況下較明顯，在155g/m²之噴塗劑量下較不明顯。此乃因混凝土第7天齡期已有足夠 Ca (OH)² 可與DPS 反應及水化反應尚未完成其毛細孔隙連通性較大，DPS

較易隨連通孔隙滲入，形成微小顆粒之化合物填塞毛細孔隙，改變混凝土之緻密性，此可由圖3.1~圖3.3 觀察得之。而27天齡期混凝土水化反應大致完成，毛細孔隙之連通性較少，DPS 較不易滲入，因此只改善表面之緻密性，所以效果較第7天噴塗為差，但如果有足夠之DPS 劑量使其表面之緻密性足夠，則其效果會與第7天噴塗接近。而表3.4 為第7天、第27天噴塗 155 g/m² 之DPS 劑量下之累積電量減少百分比（%），以低水灰比試體降低百分率最高。

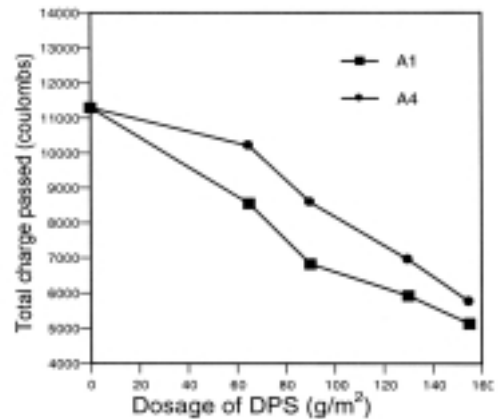


圖3.7 w/c =0.35 時噴塗劑量與累積電量的關係

Fig.3.7 The dosage of DPS versus total charge passed at w/c=0.35

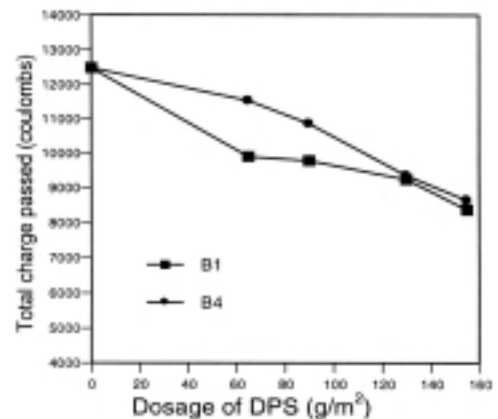


圖3.8 w/c=0.45 時噴塗劑量與累積電量的關係

Fig.3.8 The dosage of DPS versus total charge passed at w/c=0.45

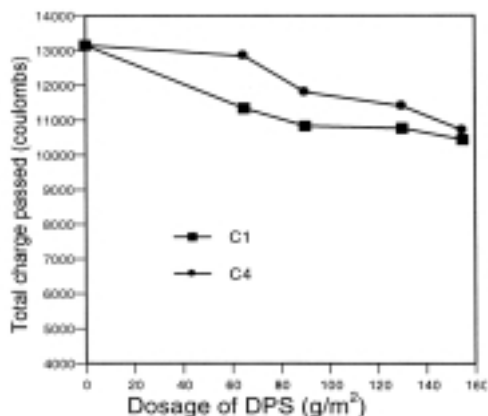


圖 3.9 w/c=0.55 時噴塗劑量與累積電量的關係
Fig.3.9 The dosage of DPS versus total charge passed at w/c=0.55

表 3.4 不同配比累積電量減少百分比
Table 3.4 the decrease percentage of the total charge passed with different mixing proportions

編號	齡期7天噴塗	齡期27天噴塗
A	55 %	49 %
B	33 %	31 %
C	21 %	19 %

*噴塗劑量為155g/m²

四、結論

使用混凝土表層滲透塗封劑時，對混凝土力學性質及耐久性皆有正面影響，就試驗結果列出下面結論：

1. DPS主要組成元素為Si (15.33%)、Na (38.71%)、O (45.97%)，反應後產生微小粒徑(約1 μm~2 μm)之化合物，可填塞毛細孔隙(約0.01 μm~10 μm)使混凝土緻密，滲透深度約2 cm左右。
2. 噴塗DPS對混凝土壓力強度之影響以混凝土齡期

7天時噴塗效果最佳，而使用量愈多有利於壓力強度的增加，但以130 g/m²~155 g/m²為宜，且高水灰比之混凝土強度影響較大，本研究中齡期7天時噴塗劑量155g/m²狀態下28天強度配比A增加18.6%、B增加24.2%、C增加24.8%，91天強度配比A增加7.3%、B增加15.5%、C增加20.2%，又含水狀態為SSD時使用DPS效能較佳，齡期7天時噴塗劑量130g/m²狀態下則28天壓力強度SSD為AD之1.07~1.23倍，91天強度SSD為AD之1.06~1.19倍。

3. 水灰比愈高的混凝土試體其RCPT通過累積電量則越高但噴塗DPS後之混凝土累積通過電量有顯著下降，第7天噴塗之抗氯離子滲透之效能較第27天噴塗為佳，第7天噴塗DPS (155g/m²)累積通電量下降率配比A為55%、B為33%、C為21%，第27天噴塗DPS (155g/m²)累積通電量下降率配比A為49%、B為31%、C為19%。

五、誌謝

本研究承蒙馨橋股份有限公司提供DPS材料，特此致謝。

參考文獻

1. 黃然, 鄭安, "水淬高爐爐石粉應用於鋼筋混凝土構造物之耐久性", 台灣營建研究院 民國89年.
2. I. J. Vries, and R. B. Polder, "Hydrophobic Treatment of Concrete", Construction and Building Materials 11 (4), pp. 259-265, (1997).
3. ASTM C1202-91, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", American Society for Testing and Material, Philadelphia, (1992).
4. R. J. Detwiler, T. Kojundic, and P. Fidjestol,

- "Evaluation of Bridge Deck Overlays", Concrete International, Vol. 19, No. 8, pp.43-45, (1997).
5. J. T LaRosa, " Characterization of Silicate Sealers on Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.27, No. 10, pp.1561 -1567 , (1997).
 6. G. G. Litvan, "Waterproofing of Parking Garage Structures with Sealers and Membranes : the Canadian Experience", Construction and Building Materials 10 (1), pp. 95-100, (1996).
 7. M. S. J. Gani., "Cement and Concrete", Glondon; New York: Chapman & Hall, (1997).
 8. S. Mindness and J. F. Young, "Concrete", Prentice-Hall, pp. 94-95, (1981).
 9. W. J. McCarter, M. Emerson, and H. Ezirim, "Properties of Concrete in the Cover Zone: Developments in Monitoring Techniques", Magazine of Concrete Research (47), pp. 243 -251, (1995).