

台灣地區使用卜作嵐材料對海砂混凝土之成效

王和源*

The Effectiveness of Integrating the Pozzolans into the Sea-Sand Concrete in Taiwan

Her-Yuan Wang*

摘 要

台灣屬於海域環境及溫度異常地區，因此特別突顯混凝土設計時考量耐久性的重要性，且河川砂石嚴重缺乏之際，如何利用卜作嵐材料抑制海砂混凝土之硫酸鹽侵蝕將更形重要。本研究係以台灣濱海地區含有海砂/海水之混凝土對結構物造成腐蝕及破壞情況，及以本土化之卜作嵐材料(如飛灰、爐石等)應用於添加具有海砂或海水之混凝土時產生防止腐蝕之效果作研究，期能建立完整的資料庫，藉以防範台灣地區鋼筋混凝土日益嚴重的腐蝕問題。結果顯示適量的添加卜作嵐材料於海砂(水)混凝土時具有抑制硫酸鹽侵蝕的良好效果。

關鍵詞：卜作嵐材料；海砂混凝土；硫酸鹽侵蝕。

ABSTRACT

As Taiwan is of subtropical areas with variant temperatures and great humid, the durability is regarded as an important factor for concrete designing. And, how to control the corrosion of the sea-sand concrete is also crucial due to lack of the river sand today. This research is to study the corrosive condition of the constructions on the Taiwan seashore, made by sea sand/salty water concrete or more with the pozzolans such as fly ash. It's expected to establish a complete database for future improvement of the corrosive problems which is getting worse in Taiwan day by day. The result shows the appropriate addition of the pozzolanic materials in the sea-sand /salty water concrete is able to restrain the sulfate attack.

Keywords: pozzolans; the sea-sand concrete; sulfate attack.

國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所
Associate Professor in Civil Engineering Department of National Kaohsiung University of Applied Science
* 連絡作者 (TEL:07-3814526)

一、前言

海砂屋事件的發生，引起了大家對公共安全的關心，也突顯了資源規劃的問題，原本本省四面環海，高山陡直，河川砂石資源不虞匱乏，然近年來公共工程大量興建，河川砂石日漸缺乏，優良骨材更是欠缺，影響混凝土成本及品質甚鉅。根據經濟部之估計，全省河川可採砂石量僅餘數億公噸，短期內河川砂石將全面短缺，須積極尋求替代來源，以維持建設工作之推展^[1]。因此為保護河川，避免造成更大危害，部分地區業已禁採使得良好品質混凝土所用之骨材取得困難。因此如何尋求替代骨材及適當骨材資源是刻不容緩的工作。考諸本省環海，海砂或浚渫砂石似乎是可取之材，部份預拌業者基於上述種種因素早已摻加部分海砂於混凝土內。然因海域含有氯鹽及硫酸鹽等潛在侵蝕鋼筋及混凝土結構體易引起耐久性的問題^[1]，在海砂、海水可能被部分取用的情況下，惟有利用相生相剋的觀念，採用降低水膠比、具有抑制硫酸鹽侵蝕的抗硫酸鹽水泥及飛灰、爐石粉等能產生卜作嵐反應之卜作嵐材料加以有效的運用^[1,2]，以達到改善混凝土品質、節省能源，並提昇其實用價值及成本效益。

卜作嵐材料的添加對於混凝土具有良好的效果^[3]，卜作嵐材料的使用策略與功效，以卜作嵐材料取代水泥或部分砂，可降低拌合水量，改善工作度，增加水密性，降低水化熱，孔隙減少，增進晚期強度。尤其是在具有硫酸鹽及氯鹽侵蝕之混凝土更能顯示其抑制效果。

二、影響海砂(水)混凝土的耐久性基因與對策

完善品質的混凝土具有良好的強度及耐久性，並可作鋼筋之保護層，減少鋼筋鏽蝕機會。但若使用海砂或海水，則因其含有氯化鈉(NaCl)、硫酸鎂(MgSO₄)、硫酸鉀(K₂SO₄)與碳酸鈣(CaCO₃)等物質，其中氯鹽與硫酸鹽會溶於混凝土之水中產生氯

離子(Cl⁻)及硫酸根離子(SO₄²⁻)，可能造成混凝土的析晶現象^[4]，使氯離子更易侵蝕鋼筋。而硫酸鹽會使混凝土的耐久性降低^[4]，硫酸根離子的存在，易造成由氫氧化鈣溶解至石膏結晶反應將產生體積膨脹，且由石膏與單硫型鋁酸鈣水化物結合成膨脹性之鈣鈣石，造成鋁酸鈣侵蝕，此過程導致最嚴重的侵蝕，產生局部應力而破裂，增大滲透性並加速混凝土之惡化^[5]，且造成外界有害物如氯鹽的侵入，間接加速鋼筋腐蝕的發生。

同時鈉和鉀等鹼金屬離子可能導致混凝土產生膨脹性的鹼骨材反應^[6]，且隨著含鹽分濃度的不同，會影響混凝土的凝結時間和強度的發展，加以一般海砂的級配太細，將會降低混凝土的強度。至於海水主要係氯化鈉，以氯離子濃度最高，海水之pH值高低視溶解之CO₂或未分解之硼酸鹽之緩衝作用而定，一般在7.8-8.3間，且多數海水表面具超飽和碳酸鹽^[7]，易對混凝土造成劣化反應，因此海砂(水)對混凝土易造成下列不良之影響^[8]：

1. 混凝土物理劣化因素

海域環境下結構物，因溫度及溼度差異而造成混凝土微裂縫，尤其在潮汐帶更為嚴重。潮汐帶的混凝土因溫度差異，則造成溫差應力，也可能造成離子擴散速率的增加。乾濕交替作用和鹽類結晶壓力更加速劣化速度。另外由於海浪沖擊或海上漂流物撞擊，將使混凝土表面的磨耗及減少鋼筋保護層厚度。

2. 混凝土化學劣化因素

混凝土是多孔材料即使在無裂縫狀態下，海水中的各種元素，亦會漸進侵入混凝土內部，造成混凝土的損害，此種元素離子如Cl⁻、Mg²⁺、SO₄²⁻等均會影響混凝土的品質。

3. 表面隆起且呈褐色銹蝕

混凝土天花板產生如蚯蚓鑽土般之鼓起，並隨時間緩慢延伸，此皆是典型鋼筋混凝土樓板及天花

板的腐蝕症狀，一般住戶對此類型之銹蝕最為恐慌，因為最明顯，也常指之為「海砂屋」之症狀，實際上此種銹蝕常是保護層不足或混凝土水灰比過大所造成。

4. 大片腐蝕龜裂剝落

如果鋼筋受到全方位生銹產生推擠力，在保護層足夠下，裂縫蔓延而接觸，易造成整片或銹片剝落，產生原因最主要為混凝土中含氯離子過高，鋼筋外圍之鈍化層被破壞，或混凝土之水灰比過大，或施工期間工人擅自大量加水，造成品質劣化所致。

使用海砂、海水於混凝土時對於構造物造成不同程度的侵蝕，導致耐久性的降低，要完全避免鋼筋混凝土不發生腐蝕極為不易，但若在設計與材料選用、施工等過程能多加注意方可延遲腐蝕的發生，或減低侵蝕之程度，而增長結構物的使用壽命。

三、卜作嵐材料對海砂混凝土的抑制功效

由於台灣海砂之級配情形與河砂比較，如表 1 所示，其單位重及細度模數皆較小，易降低混凝土之抗壓強度；添加海砂與海水之水泥砂漿其泌水較為嚴重，且因其含有較高含量的氯化鈉鹽類而具速凝作用以致於凝結時間提前現象。因此海砂(水)對混凝土硫酸鹽侵蝕之巨微觀結構性質有相當程度之影響，如適量添加卜作嵐材料的飛灰或爐石後皆有良好的抑制效果。

1. 提昇晚期抗壓強度

如圖 1 所示使用抗硫酸鹽水泥(TYPE II 及 TYPE V) 之水泥砂漿抗壓強度皆較普通水泥 (TYPE I) 為佳，當添加飛灰時因晚期卜作嵐作用；能由不定形 (Amorphous) 之硫酸鹽及氫氧化鈣作用

(CH+A/S+H→C-A-/S-H) 結合成 C-S-H 膠體及 C-A-H 鹽類，可減少孔隙，增加抗硫酸鹽侵蝕能力增加，以致於強度增加。

以飛灰取代水泥會影響強度性質，Berry 與 Malhotra^[9] 曾指出在 20°C 養護 1 天時，其卜作嵐反應剛剛發展，而 28 天齡期時其強度則漸為成長，圖 2 所示係飛灰取代量為 40% 時有最佳的混凝土抗壓強度，同時以海砂取代河砂之混凝土抗壓強度僅約略低 10%，至於更晚齡期後飛灰添加則可能有更好的抑制效果。

2. 增加握裹力

如圖 3 所示，以氣乾養護較海水養護之握裹強度為佳，同時以海砂取代河砂之握裹強度在飛灰取 40% 時僅略低 10%，顯示飛灰的添加對海砂、海水有抑制侵蝕之作用。

3. 增進體積穩定性

為了解混凝土體積穩定性可以熱壓膨脹率試體方式加速方鎂石及游離石灰產生反應，如圖 4 所示，以不同類型抗硫酸鹽水泥中，使用海砂者其熱壓膨脹較標準砂試體為大，海砂加 20% 飛灰後則略為收縮，由於飛灰在水化過程中鈣氫石及單硫型鋁酸鈣水化物相對地減少，因而減低體積膨脹，增加耐久性。印證 Mehta 所述^[10]，添加飛灰時較未加者有較少的膨脹率。因而飛灰的添加可增進混凝土體積穩定性。換言之，添加飛灰及高溫下海砂有和水泥產生固結之效應。

4. 提高水密性

摻加卜作嵐材料以填塞空隙，降低滲透性係數可減少硫酸離子滲入混凝土為重要之策略。混凝土的水密性與孔隙、強度及體積穩定皆有直接的關係，而飛灰形狀多呈圓球形，粒徑細小，能影響水泥漿體的流變性，若用適當配比取代水泥，則可減少拌合水用量，改善工作度，增加水密性。如圖 5 所示，係以齡期僅 7 天時，用海水拌合，則飛灰含

量越多，透水率均逐漸增加；而自來水拌合以 20% 飛灰時有較小的吸水率，透水性則標準砂大於海砂，至於更晚齡期後飛灰的卜作嵐反應可能有更好的水密性。

5. 消耗氫氧化鈣 (CH) 含量

圖 6 所示以高雄海水及飛灰取代部分水泥時因飛灰之卜作嵐反應消耗 CH 形成 C-S-H 膠體，此可減少水泥漿體中 CH 的含量，減少混凝土表面白華現象及減低因 CH 溶解流失使水泥漿體孔隙增加而降低水密性的機會，進而改善水泥漿體抵抗化學侵蝕能力。

6. 抑制鹼骨材反應

鹼骨材反應係指混凝土內的鹼離子 (Alkali ion)、氫氧根離子 (Hydroxyl ions) 與骨材中的某些活性矽質成份發生化學反應，造成混凝土膨脹、龜裂、強度損失、彈性係數減低、耐久性差等問題。鹼骨材反應足以造成混凝土構造物的損害，甚至導致全面破壞^[9]。此作用於混凝土產生地圖狀裂縫 (Map crack)，表面爆開和破片剝落，伴隨著黏性之鹼矽液體逸出混凝土。以卜作嵐材料添加可有效地抑制鹼骨材膨脹反應作用。

7. 降低氯離子含量

混凝土添加礦物摻料如飛灰、爐石及矽灰等卜作嵐材料之應用，對防止腐蝕與氯離子危害有良好效果，Dhir^[11]曾指出飛灰中之鋁酸鹽 (Al_2O_3) 在波特蘭水泥水化過程中之鹼性環境裡，釋放出溶解性氧化鋁，此類氧化鋁會與自由性氯離子化學結合成氯鋁酸鹽 (Chloro-aluminates)，因而減低硬固混凝土內自由性氯離子含量，此種效應在長期卜作嵐反應發生後更為顯著，含有飛灰之混凝土在一年後之自由性氯離子含量，較一般混凝土少 25%^[11]。

8. 提昇混凝土耐久性

以烘乾與浸泡飽和硫酸鈉溶液加速反覆循環十

次試驗結果，如圖 7 所示，試體表面皆已受侵蝕及有不同程度的裂縫產生，稜角部分已風化。由於添加飛灰將可減少水泥漿體中 CH 含量，增進混凝土的抗化學侵蝕能力^[6]，因此以使用高度抗硫酸鹽水泥及飛灰含量越高或水灰比較低的試體越完整，裂縫最小。

9. 緻密顯微晶相結構

由於水泥中添加飛灰水化後，後期可產生卜作嵐反應直接將飛灰之矽或鋁與 CH 結合，而產生緻密的鈣-鋁-水化合物 (C-A-H) 及低密度膠體的鈣矽化合物 (C-S-H) 吸附於飛灰顆粒周圍，且由外至內逐層反應強化，以致強度增加^[12]，如圖 8(1) 所示係添加 40% 飛灰於海砂水泥砂漿時，晶相結構組織已頗緻密，而 8(2) 係進一步浸泡在硫酸鹽溶液時，也遲滯了鈣鈣石的破壞，增加抗硫酸鹽侵蝕之能力。圖 8(3) 係以第五型抗硫酸鹽水泥、20% 飛灰及海砂之水泥砂漿 SEM 晶相圖，經過 1 天齡期養護後明顯的有針刺狀的 C-S-H 水化合物能抑制硫酸鹽侵蝕之效果。由圖 9 係圖 8(1) 之 EDAX 分析顯示含有多量的矽 (Si) 及鈣 (Ca)，此矽酸鈣之主要水化產物為連續母體之 C-S-H 膠體^[13]對強度有相當大的貢獻。同時其水化產物已有顯著改變，印證添加卜作嵐材料可填塞孔隙及抑制硫酸鹽侵蝕。

四、結論

1. 台灣海砂 (水) 之氯離子含量常因位置不同而異，細度模數皆較河砂小，以海砂 (水) 拌合之水泥砂漿其泌水現象較為顯著，且含鹽量對混凝土有速凝效果。
2. 添加 40% 飛灰及高度抗硫酸鹽水泥於海砂水泥砂漿及混凝土，當晚齡期時有較佳的強度表現，且熱壓膨脹較小。
3. 添加飛灰或水淬爐石粉於海砂 (水) 水泥砂漿之抗壓強度，在齡期為 28 天時仍隨含量的增加而略為降低，如再添加適量的卜作嵐材料可提

高晚期強度性質，而海水養護時則飛灰含量40%時較佳，顯示飛灰有抑制硫酸鹽侵蝕之效果。

4. 隨著飛灰含量的增加，對標準砂與海砂之水泥砂漿有不同程度的熱壓膨脹率，飛灰添加可增加混凝土體積穩定性。
5. 在齡期僅7天時，飛灰含量越高，則其吸透水性率均有越大趨勢，顯示早齡期卜作嵐反應未充分發揮時其水密性尚差，至於晚齡期則有待研究。
6. 以飛灰取代部份水泥時，可減少水泥漿體之CH含量，有抑制化學侵蝕之能力。
7. 含飛灰之海砂（水）水泥砂漿試體晶相結構組織頗為緻密，有防止侵蝕的C-S-H多孔洞網狀外觀並可遲滯鈣鈦石及氫氧化鎂結晶的破壞，增加抗硫酸鹽侵蝕之能力。且飛灰含量越高會消耗CH形成連續母體C-S-H，此屬矽酸鈣之水化產物可增進抗硫酸鹽侵蝕能力。

參考文獻

1. P. K. Mehta, "Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement" ACI Journal, pp.994-1000 (1986).
2. 李鈞，李明君，「亞硝酸鈣抑制鋼筋腐蝕之初步研究」，中華民國防蝕工程學會78年年會暨綜合防蝕研討會論文集，台北，第75~80頁(1989)。
3. Proceedings of First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago (2002).
4. J. F. Young, and S. Mindess, "Concrete", Prentice-Hall, Engliwood, New Jersey (1986)。
5. 黃兆龍，王和源，「硫酸鹽侵蝕對水泥漿體微觀結構影響之研究」，中國土木水利工程學刊，第一卷，第二期，第95-101頁(1989)。
6. P. K. Mehta, "Concrete Structures Properties and Materials", Prentice-Hall Inc (1986)。
7. 吳建國，「海水特性簡介」，防蝕工程，第六卷，第一期，第22-24頁(1992)。
8. 王和源，「卜作嵐摻料增進海砂混凝土強度之研究」，陸軍官校75週年校慶綜合學術研討會，第56-61頁，高雄(1999)。
9. E. E. Berry and Malhotra, "Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review", ACI Journal, March-April (1980)。
10. P. K. Mehta "Pozzolanic and Cementitious By-Productions as Mineral Admixtures for Concrete-A Critical Review" ACI SP-79, Detroit, pp.1-46 (1983)。
11. R. K. Dhir and M. R. Jones, "Influence of PFA on Proportion of Free Chlorides in Salt Contained Concrete," Corrosion of Reinforcement in Concrete," Ed. C. L. Page, Elsevier Applied Science (1990).
12. S. K. Chatterji, "Pozzolanic Property of Natural and Synthelic Pozzolans : A Comparative study", ACI SP-79, Detroit, pp.221-266 (1983).
13. Sidney Diamond, "The Occurrence of Duplex Film on Fly Ash Surface", Cement and Concrete Research, pp.697-701 (1980).

表1. 細骨材性質

Table 1. The properties of the fine aggregates

項目 種類	單位重 (kg/m ³)	細度 模數	比重	吸水率 (%)	含泥量 (%)	氯離子含量 (%)
河砂 (高屏溪)	1650	2.77	2.60	1.71	3.64	0.0103
海砂 (高雄)	1452	1.60	2.55	2.92	1.22	0.3626
海砂 (台南)	1435	1.73	2.62	2.98	1.04	0.6065

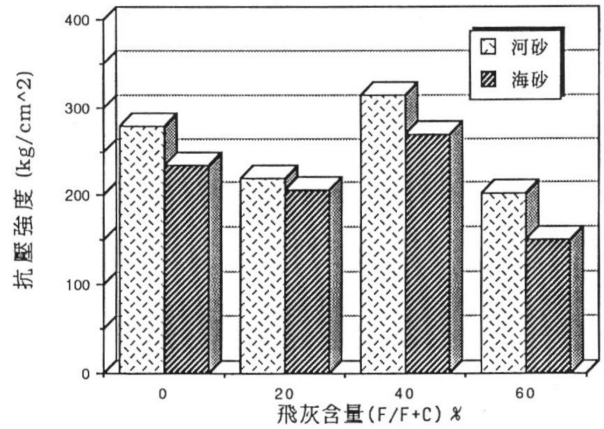


圖2. 不同飛灰含量及海水拌合之混凝土經海水養護 28 天之抗壓強度。

Fig. 2 The compressive strengths of the concrete mixed with different dose of fly ash and salty water thru 28-day sea water curing.

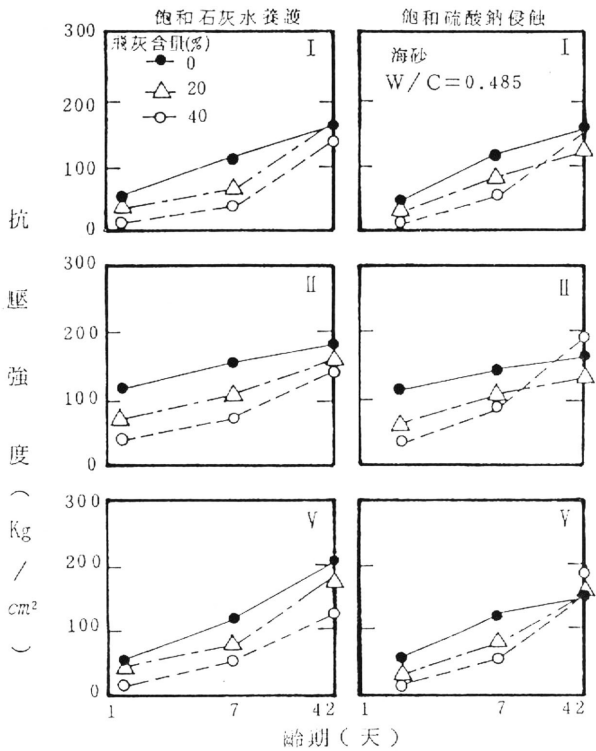


圖1. 海砂水泥砂漿添加不同飛灰含量之抗壓強度。

Fig. 1 The compressive strengths by adding different dose of fly ash in sea-sand mortar

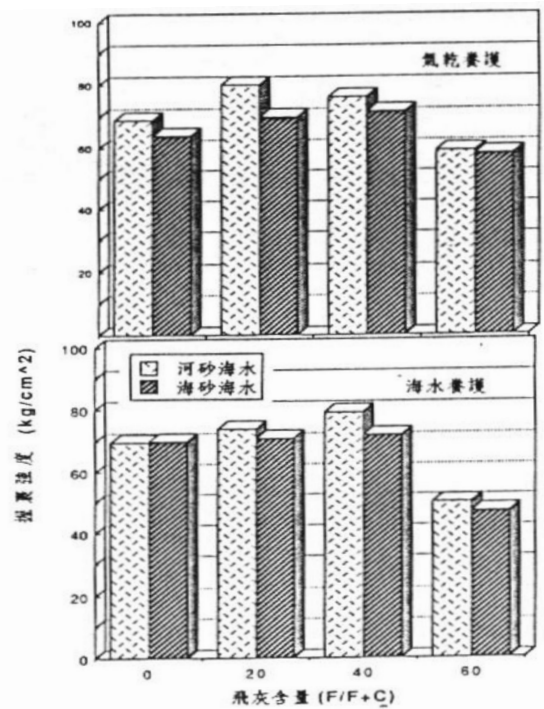


圖3. 加飛灰於海砂(水)之混凝土握裹強度。

Fig. 3 The binding strengths of the sea-sand/salty water concrete with addition of fly ash

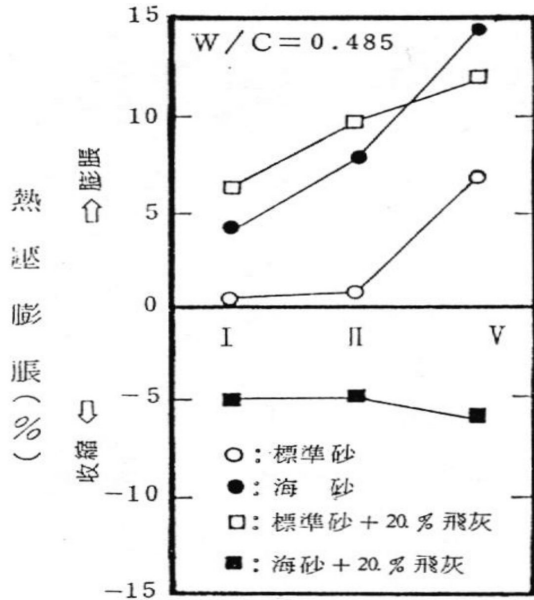


圖4. 海砂使用各類型水泥及飛灰之水泥砂漿熱壓膨脹情形。
Fig. 4 The expansion condition, by heat tension, of the mortar mixed with different types of cement, fly ash and sea-sand.

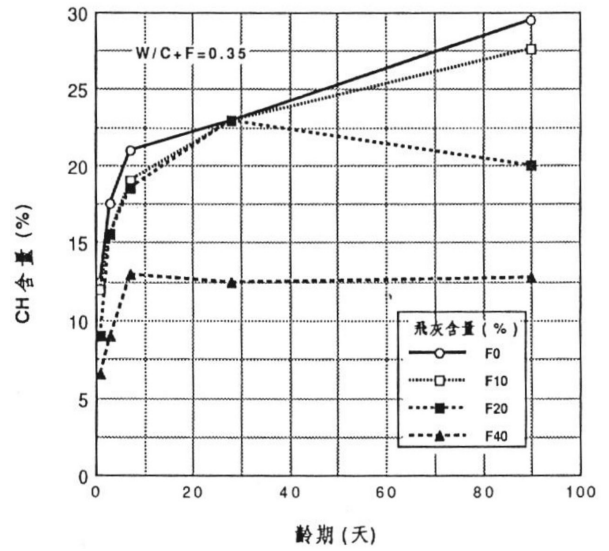


圖6. 不同飛灰含量水泥漿之CH含量變化。
Fig. 6 The CH content of the paste with different dose of fly ash.

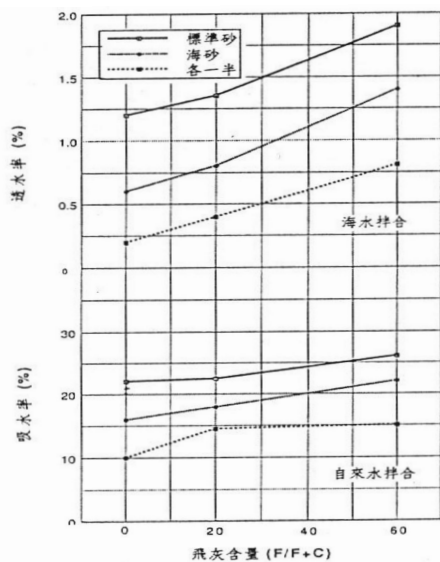


圖5. 飛灰使用於海砂(水)之水泥砂漿水密性(W/C=0.485, 齡期7天)。
Fig. 5 The water tenseness of the sea-sand mortar with addition of fly ash (W/C = 0.485, at 7-day age).

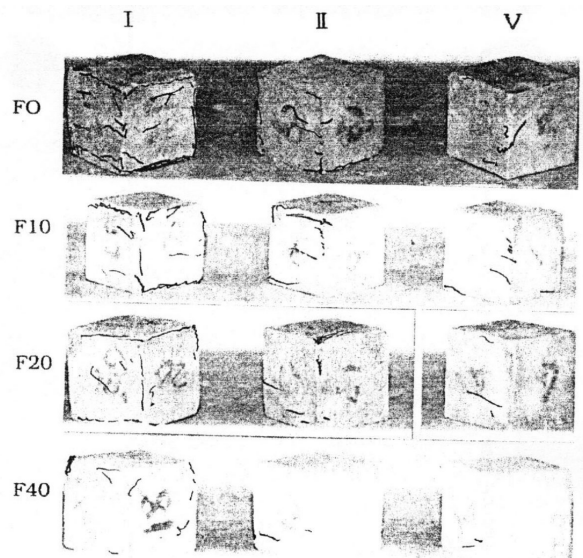
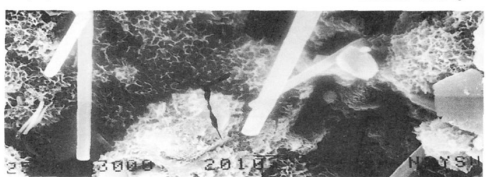


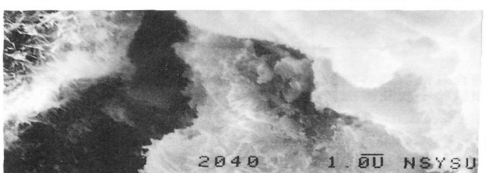
圖7. 飛灰與各型抗硫酸鹽水泥之海砂水泥砂漿試體耐久性試驗結果。
Fig. 7 The durability of the specimens made by the mortar mixed by different types of sulfate resistant and fly ash.



(1) I型水泥，40F，石灰水養護七天



(2) I型水泥，40F，硫酸鹽侵蝕一天



(3) V型水泥，20F，石灰水養護一天

圖8. 添加飛灰及海砂之水泥砂漿SEM微觀相圖。

Fig. 8 The SEM microstructure of mix fly ash and sea-sand in mortar.

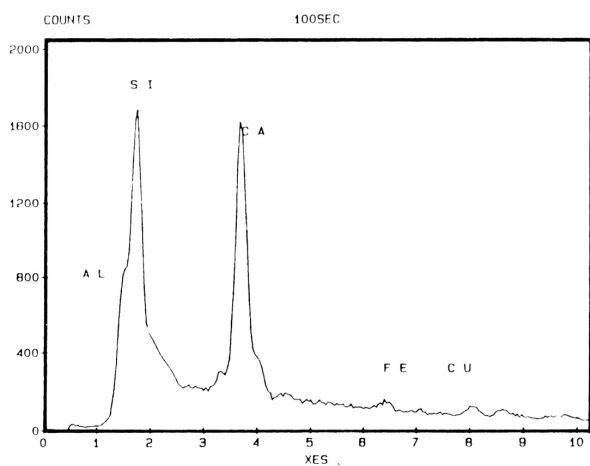


圖9、圖8 (1) 之EDAX分析。

Fig.9 EDAX analysis of Fig. 8 (1) .