

蘇澳港防波堤改善工程規劃

第二子計劃

混凝土材料劣化損壞評估與改善研究

李 釗 陳桂清

委託單位：省交通處基隆港務局蘇澳港分局

承辦單位：省交通處港灣技術研究所

協辦單位：國立中央大學土木工程研究所

中華民國八十六年二月

第二子計劃

混凝土材料劣化損壞評估與改善研究

計劃主持人：國立中央大學土研所

副教授 李 釗博士

共同主持人：港研所港工材料組

副研究員 陳桂清博士

候選人

摘 要

蘇澳港外防波堤及漁港防波堤工程，於民國 64 年初開工建造，工程分兩期進行，至民國 70 年底全部完工。由於蘇澳港位於台灣東北方，面臨太平洋，地處風災地震較多之地方，歷年來受天然災害的損失甚巨。因此，蘇澳港防波堤堤身結構體發生塌陷損壞，除受所處環境影響外，建造當時之工程設計、材料選用、施工品質.....等等因素亦影響甚大。為此，本研究特以材料觀點對結構體混凝土材質進行評估與鑑定，尋找防波堤結構體發生塌陷損壞可能之原因，調查範圍為南外廓防波堤與漁港北防波堤等七座沉箱。

本研究經現場非破壞性檢測及鑽心取樣攜回試驗室內進行詳細分析後，所得結果為沉箱結構體外觀(堤身混凝土表面)，有許多剝落、破裂、鋼筋裸露，堤身面板板上多處位置有裂縫及輕微沉陷現象，沉箱與沉箱間之接縫處損壞較嚴重。沉箱混凝土材料透水係數偏高，氯離子及硫酸根離子含量有較高的現象，內部鋼筋可能已處於腐蝕狀態外，其它混凝土特性雖有部份侵蝕現象但尚可接受。又骨材檢測時發現有疑似鹼骨材反應現象，未來需持續觀察。

由分析結果顯示，造成防波堤損壞塌陷的原因，因混凝土材料劣化所引起損壞的機率較小，大致上應屬受到外力破壞的機率較大。

目 錄

摘要	I
目錄	II
圖目錄	IV
表目錄	VII
照片目錄	VIII
第一章 前言	1
1-1 研究動機	1
1-2 研究目的	2
1-3 研究範圍	2
第二章 文獻回顧	3
2-1 化學性侵蝕	3
2-2 物理性侵蝕	7
2-3 其它原因；鹼骨材反應	8
第三章 研究方法與過程	22
3-1 堤身結構體外觀檢視分析	22
3-2 現場非破壞性檢測...	22
3-3 試驗室內分析	24

第四章 試驗結果與討論	28
4-1 堤身結構體外觀檢視分析結果	28
4-2 現場非破壞性檢測結果	29
4-3 試驗室分析結果	31
第五章 結論與建議	93
參考文獻	95
附錄	97

圖 目 錄

圖 2-1	鹼骨材反應之機理與過程	15
圖 2-2	骨材之結晶構造示意圖	16
圖 2-3	活性骨材之檢驗流程與相關規範	17
圖 3-1	混凝土電阻量測簡示圖	26
圖 3-2	鋼筋腐蝕電位值量測簡示圖	26
圖 3-3	透水試驗裝置簡示圖	27
圖 4-1	蘇澳港防波堤檢測位置示意圖	38
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)	39
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-8)	40
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	41
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))	42
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))	43
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	44
圖 4-2	試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	45
圖 4-3	保護層厚度等高線分佈圖，(沉箱編號 SB-23)	46
圖 4-3	保護層厚度等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	47
圖 4-4	電阻係數等高線分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)	48
圖 4-4	電阻係數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	49

圖 4-4	電阻係數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	50
圖 4-4	電阻係數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	51
圖 4-5	鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖，(沉箱編號 SB-8)	52
圖 4-5	鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	53
圖 4-5	鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))	54
圖 4-5	鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))	55
圖 4-5	鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	56
圖 4-5	鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	57
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖，(沉箱編號 FNB-2)	58
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)	59
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-8)	60
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	61
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-19)	62
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	62
圖 4-6	鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	63
圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)	64
圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)	64
圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-8)	65
圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	65
圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19)	66
圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	67

圖 4-7	C1 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	67
圖 4-8	試體孔隙分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)	68
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)	68
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-8)	69
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	69
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))	70
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))	70
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	71
圖 4-8	試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	71
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖，(沉箱編號 FNB-2)	72
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)	72
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-8)	73
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-18)	73
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))	74
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))	74
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-23)	75
圖 4-9	試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-24)	75
圖 4-10	鹼骨材反應鑑定判定圖	76

表目錄

表 2-1	海洋混凝土的劣化原因及現象	18
表 2-2	水泥水化產物受海水侵蝕反應機理摘要	19
表 2-3	鋁酸三鈣的水化過程及其所造成之問題	20
表 2-4	鋁酸三鈣水化時各化合物分子量、密度和莫耳體積的關係	21
表 4-1	堤身外觀目視檢測結果(低水位線以上)	77
表 4-2	堤身外觀目視檢測結果(低水位線以下)	78
表 4-3	試錘反彈數與混凝土估計強度之關係	79
表 4-4	沉箱鋼筋混凝土結構體保護層厚度之檢測結果	79
表 4-5	電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係	79
表 4-6	鋼筋腐蝕機率與電位值之關係(ASTM C-876 規範)	80
表 4-7	沉箱結構體鑽心取樣試體之抗壓強度檢測結果	80
表 4-8	鑽心試體透水試驗結果	81
表 4-9	鑽心試體氯離子含量分佈量測結果	81
表 4-10	鑽心試體硫酸根離子(SO_4^{2-})含量分佈量測結果	82
表 4-11	氯離子含量與鋼筋腐蝕之關係	82
表 4-12	試體壓汞孔隙分析試驗結果	83
表 4-13	鑽心試體 XRD 及 SEM 檢測結果	84
表 4-14	鹼骨材潛能反應試驗結果	84
表 4-15	調查之沉箱結構體整體檢測結果	85

照片目錄

照片 4-1	SB12 和 SB13 沉箱港側銜接處損壞情形	86
照片 4-2	SB38 和 SB39 沉箱港側銜接處損壞情形	86
照片 4-3	SB19 沉箱破壞情形	87
照片 4-4	SB17 和 SB18 沉箱港側銜接處堤面損壞情形	87
照片 4-5	SB6 沉箱港側損壞情形	88
照片 4-6	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 FNB-2)	89
照片 4-7	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 FNB-4)	89
照片 4-8	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-8)	90
照片 4-9	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-18)	90
照片 4-10	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-19)	91
照片 4-11	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-23)	91
照片 4-12	掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-24)	92

第一章 前言

1-1 研究動機

混凝土為一經濟、取材方便、又具耐久性之工程材料，大量使用於港灣工程中，然而大部份之港灣結構物諸如碼頭、防波堤、消波塊.....等，長年浸泡於海洋惡劣環境下，混凝土原為具多孔隙之材料，更易受到海水中氯鹽、硫酸鹽類...等有害物質的侵入，構造物中之混凝土品質開始劣化、表面龜裂、剝落、內部鋼筋腐蝕、體積膨脹、開裂.....等不良現象，加上波浪外力不斷的衝擊，結構體可能造成破損、斷裂、塌陷等嚴重損壞。

蘇澳港位於台灣東北方，面臨太平洋，地處風災地震較多之地方，因此歷年來受天然災害的損失甚巨。鋼筋混凝土結構物因劣化而損壞，除受所處環境影響外，建造當時之工程設計、材料選用、施工品質.....等等因素亦影響甚大。如築港材料若使用含有活性之矽質骨材，和含高鹼量之水泥時，則混凝土可能產生鹼骨材反應，時間一久，混凝土結構物外觀會產生地圖狀的裂縫、內部起泡爆裂、混凝土剝落、結構變形、強度損失，嚴重時破壞整個結構物。

台灣東部，高山聳立環繞，河川密佈短促，水流湍急，向來河川砂石、礦石等建築骨材蘊藏豐富，不虞匱乏，除供應當地需求外亦運銷台灣其它地區，甚至曾有大量外銷日本。近年來，據聞日本使用台灣東部骨材的經驗，已發現有鹼骨材反應之案例。花蓮港東防波堤外之護基消波塊，亦發現有疑似鹼骨材反應的現象。由於蘇、花兩地，地緣相近，港灣工程建設所需之建材，就地取材建造，既經濟又適當，但如骨材成份有問題時則製作之混凝土，便潛在有發生病變劣化的威脅。因此骨材的取用必須小心

總之港灣混凝土結構物，長年累月浸泡於海水環境下，結構體受到海水中之有害物質的侵蝕，混凝土品質極易劣化、表面產生裂縫、體積膨脹、剝落、破洞...等損壞現象，加上波浪外力不斷的衝擊，最後造成結構物損毀塌陷，危及使用年限與安全甚巨。

1-2 研究目的

本計畫旨在調查蘇澳港防波堤堤身結構體發生塌陷損壞可能之原因。混凝土結構物之劣化損壞除受所處環境之影響外，建造時所使用的材料、施工品質...等因素亦影響甚巨。因此，本研究除對混凝土材料基本性質探討外，特針對混凝土材料是否因潛在病變，造成結構體劣化損壞，進行分析探討。

1-3 研究範圍

1. 堤身結構體外觀檢視分析
2. 現場非破壞性檢測
3. 鑑定混凝土材質病變原因
4. 探討改善對策

第二章 文獻回顧

混凝土在正常環境下，被公認為一耐久性極佳的建材，但是沒有一種材料其耐久性是固定不變的。由於混凝土是多孔性且易脆之材料，受到所處周圍環境相互作用的結果，容易受到外界有害物質的滲入侵襲，材料的微觀結構性質便隨時間而產生變化。因此，除了對混凝土所處環境需有正確的配比設計外，仍須要有適當的預防措施，否則混凝土在不同的環境下仍然易於受到侵襲而造成劣化損壞的威脅。

海洋環境下對鋼筋混凝土的侵蝕，為一相當複雜的過程，以材料的角度而言，主要可分為對水泥水化產物的侵蝕和對混凝土內鋼筋的腐蝕等兩部份。以侵蝕的方式而言，則可分為化學性侵蝕和物理性侵蝕等兩種，若加上外力(諸如波浪作用、固體物之衝擊、自然力...等)的作用，使鋼筋混凝土的表面產生裂縫，則會加速混凝土的侵蝕而更形劣化。相關劣化的原因及現象簡列於表2-1。海洋環境下混凝土劣化的原因如下：

2-1 化學性侵蝕

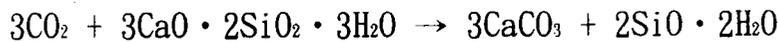
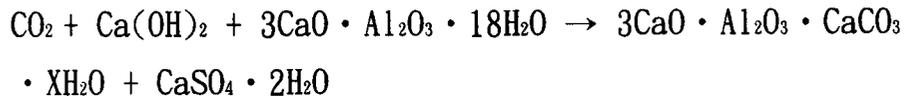
海水為一巨量的天然溶劑，其化學成份複雜主要包含有氯化鹽類(諸如 NaCl 、 MgCl_2 、 CaCl_2 、 KCl)、硫酸鹽類(諸如 MgSO_4 、 Na_2SO_4)等水溶性的化合物，各化合物的陰離子和陽離子，對水泥的水化產物和鋼筋具有不同的侵蝕能力。表2-2簡述水泥水化產物受到海水侵蝕之反應機理。一般混凝土可能受到化學性侵蝕的模式有下列數種：

2-1-1 碳化作用的反應機理

一般溶解在海水中之二氧化碳的量不多，海水的Ph值約在7.8至8.3之間，對混凝土並不會造成不利的影響，但是若海水受污染

而含有大量的有機物時，在有機物分解後，會釋出大量的二氧化碳，使海水的Ph值降至7.0以下，此時即可能對混凝土有害。水泥水化後產生大約24%的氫氧化鈣(Ca(OH)₂)，在遇到二氧化碳時會生成溶解性較低的碳酸鈣(CaCO₃)，若混凝土繼續受碳化作用，碳酸鈣會轉變成溶解性較高的碳酸氫鈣 (Ca(HCO₃)₂)，析出混凝土而增加混凝土的空(孔)隙，造成混凝土強度遞減的現象，並使有害物質更易滲入；

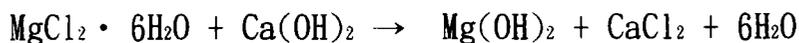
若碳化情形嚴重，在混凝土中亦有可能進行如下的反應：



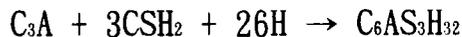
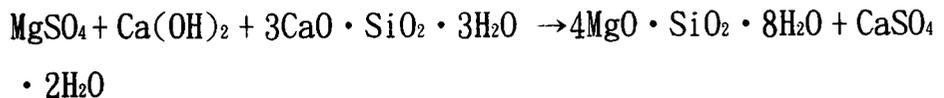
由於石膏在海水中的溶解性很高，會析出混凝土而增加混凝土的滲透性，和降低混凝土的強度；而C-S-H 膠體是混凝土中主要的膠結材料，若其被分解，則對混凝土的各項工程性質，均有相當不利的影響。

2-1-2 鎂離子對混凝土侵蝕的反應機理

混凝土接觸海水後，海水中的氯化鎂(MgCl₂)和硫酸鎂(MgSO₄)會與水泥水化後產生之氫氧化鈣，進行陽離子交換，生成溶解度較低的氫氧化鎂(Mg(OH)₂, brucite)；



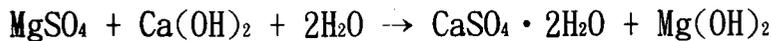
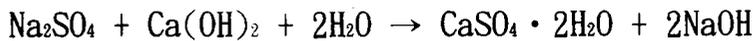
由於反應所生成的氯化鈣和石膏的溶解性甚高，易析出混凝土造成材料流失，使混凝土的孔隙增加，同時鎂離子取代 C-S-H 膠體中之鈣離子，而變成不具膠結的 M-S-H，造成混凝土強度降低，並使有害物質更易滲入混凝土內，加速混凝土的惡化。又石膏生成物可能再與水化水泥合成物作用而產生鈣鈣石(C₃ACaSO₄·32H₂O，ettringite) 或可能稀釋水泥造成混凝土之軟化。



2-1-3 硫酸鹽侵蝕的反應機理

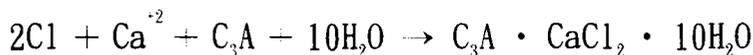
硫酸鹽侵蝕的反應過程非常複雜且涉及許多次要的反應過程。一般混凝土最廣泛常見之化學侵蝕的型式即為硫酸鹽侵蝕。硫酸鹽侵蝕的確實反應機理，目前尚有爭論，一般較被為接受的反應機理，是由鈣鈣石二度膨脹和石膏腐蝕兩種反應組合而成。形成鈣鈣石二度膨脹的主要原因乃是水泥中鋁酸三鈣(C₃A)的水化產物對硫酸鹽不穩定所造成。表2-3摘錄顯示鋁酸三鈣的水化過程，和其可能造成的問題。純鋁酸三鈣的水化速率相當快，會造成混凝土閃凝的現象，而影響混凝土的工作性與強度。所以在水泥中加入石膏，以控制鋁酸三鈣的水化速率。當鋁酸三鈣與石膏進行水化反應時，會在鋁酸三鈣顆粒表面形成含硫量較多的鈣鈣石，體積膨脹約8.15倍，但此時混凝土尚在塑性狀態，對混凝土不會造成損害。若反應系統中之石膏含量，不足於使全部的鋁酸三鈣水化形成鈣鈣石時，則尚未水化的鋁酸三鈣，會與鈣鈣石共同分享鈣鈣石中的硫，而生

成含硫較低的單硫型鋁酸鈣。單硫型鋁酸鈣對硫不穩定，若遇到外來的硫酸鹽，會再度轉變成鈣鈣石，此時混凝土已產生硬固，體積膨脹2.27倍，可能發生剝落、破裂和強度降低等硫酸鹽侵蝕的現象。表2-4為鋁酸三鈣水化時各化合物分子量、密度與莫耳體積之關係。水泥中之矽酸二鈣(C₂S)及矽酸三鈣(C₃S)在水化後，除生成具有膠結性的C-S-H膠體外，亦生成氫氧化鈣，氫氧化鈣與海水中之鈉離子(或鎂離子)作用生成石膏，此反應為一膨脹性反應，稱為石膏腐蝕。石膏腐蝕之化學反應式如下：



2-1-4 氯離子對混凝土侵蝕的機理

氯離子除了對 R.C. 結構物中之鋼筋會造成腐蝕外，Cl 之侵入亦會致使混凝土材料在水化硬固過程中，發生水泥水化物膠體結構上的變化，致使硬固混凝土體積發生極大的變化。一般研究學者熟知，當水泥水化產物 C-S-H 膠體與 Cl 接觸時會形成高溶解性的氯化鈣(CaCl₂)，而使原來具緻密性之 C-S-H 膠體溶出，變為多孔性的網狀結構，增加了水泥漿體的毛細孔隙體積。由於滲透性的增加，使得海水中之鎂(Mg)離子更易侵入混凝土內，取代 C-S-H 膠體中之鈣，而變成不具膠結性的 M-S-H，成混凝土強度損失。同時當氯化鈣與水泥中之鋁酸三鈣(C₃A)反應時，會生成氯化鋁酸鈣；其反應式如下：

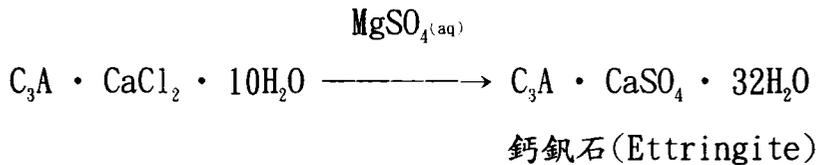


(CaCl₂)

Chloraluminite

(氯化鋁酸鈣)

氯化鋁酸鈣在含有硫酸鹽類的環境下會發生化學反應生成鈣礬石(ettringite)，致使混凝土體積膨脹，導致結構物龜裂降低耐久性。其反應過程如下：



2-2 物理性侵蝕

物理性侵蝕的原因，除可能受到海氣象變化作用、波浪或漂流固體物所撞擊外，混凝土材料本身因內部變化，產生體積變化不均，發生局部張應力的破壞，則會造成混凝土的裂縫或剝離。一般物理性侵蝕的原因可簡單歸納為下列兩大類；

2-2-1 表面磨損

此類乃是由於磨耗、剝蝕和形成孔穴作用(cavitation),造成表面磨損和質量損失。

2-2-2 開裂

由於溫度和溼度梯度變化劇烈，鹽類在孔隙中的結晶壓力，結構荷重以及曝露於劇烈急變的溫度環境下(諸如結冰或火災),很容易引起混凝土之體積變化，產生混凝土之開裂。

2-3 其它原因；鹼骨材反應

鹼骨材反應是由於骨材中含有活性矽的成份，會被氫氧根離子分解，再結合水泥中的鹼金屬(鈉、鉀)形成鹼矽膠體(alkali-silica gel)，在吸水後會產生膨脹，使混凝土產生地圖狀的裂縫，因而會使結構物強度降低和構件變形，嚴重時甚至會造成混凝土構造物的崩毀。由於鹼骨材反應，屬於發病期較慢的混凝土病變，其發病期達5-12年或是更久，國內目前雖未見明顯的鹼骨材反應案例，但在目前骨材料源缺乏的情形下，使用未知特性骨材的機會增加。因此值得吾人瞭解造成鹼骨材反應的原因和預防方法。

2-3-1 鹼骨材反應的症狀

硬固混凝土構造物在發生鹼骨材反應之後，如果混凝土內部無法吸收鹼骨材反應所產生的膨脹量時，混凝土表面會產生裂痕，由於混凝土構造物有埋設鋼筋與純混凝土構造物之分，其受力行為不同，因此以下分開討論。

1. 純混凝土構造物

純混凝土構造物，在發生鹼骨材反應之後其表面會產生不規則的地圖狀裂縫，且此裂縫可能會隨時間而變寬，由於骨材分佈的不規則性，裂縫的生成始於反應(活)性骨材較集中的地方，並形成焦點中心，有數條不同走向的裂紋並交會於焦點中心。在近混凝土表面活性骨材產生鹼骨材反應，混凝土表面會有起泡爆裂(pop-out)的情形，在沒有受到磨蝕與沖刷的情形下，其表面的裂痕或混凝土表面可觀察到滲出反應物膠體，呈透明、白色、或濕點狀。

2. 鋼筋混凝土構造物

鹼骨材反應造成之地圖狀裂縫，會受到結構物受力的情形而改變，鋼筋混凝土構造物在有鹼骨材反應之現象時，由於鋼筋的束制，其裂縫沿著主應力方向開裂或與鋼筋平行，惟鋼筋混凝土構造物有時其表面會有鐵銹斑出現。

3. 混凝土內部症狀

一般而言在凍融、乾濕循環以及硫酸鹽侵蝕的情況下，也會造成混凝土構造物表面的龜裂，因此有必要從混凝土內部加以確認，當混凝土發生鹼骨材反應時其內部的症候包括微細裂縫、膠體反應產物、骨材周圍有暗色的反應圈。

2-3-2 鹼骨材反應概論

2-3-2-1 鹼骨材反應的種類

Gillott 依骨材成份和性質的不同，將鹼骨材反應分為三類：

1. 鹼—氧化矽反應(alkali-silica reaction)

鹼氧化矽反應發生的案例較多，且花蓮港區消波塊龜裂的情形亦可能屬於鹼氧化矽反應所造成，所以本章節將針對鹼氧化矽反應進行討論。

2. 鹼—矽酸鹽反應(alkali-silicate reaction)

混凝土發生鹼矽酸鹽反應，主要係由於使用如 phyllites, grey wackes, argillites 和 granitic 等岩石所製成的骨材，此反應的速率比鹼氧化矽的速率反應慢，所以

ASTM C227和 C289的規範並無法有效鑑定此種骨材的活性。

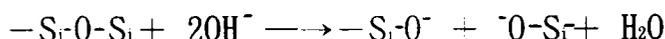
3. 鹼-碳酸鹽反應(alkali-carbonate reaction)

使用夾雜有黏土的含鎂石灰石 (dolomitic limestone, $MgCO_3/CaCO_3$) 作為混凝土骨材，是造成鹼碳酸鹽反應的可能原因，但是其反應機理目前尚未完全瞭解。

2-3-2-2 鹼骨材反應機理

1. 鹼骨材反應的過程

鹼骨材反應的機理目前仍有多種說法，其中較易瞭解的機理如圖2-1所示，當水泥水化後在混凝土的孔隙溶液中會產生 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{++} 和 OH^- 等離子，若混凝土中含有活性骨材， OH^- 會打斷骨材中結合能量較低的矽氧鍵結，產生帶負電的 $-SiO^-$ ：



帶負電的 SiO^- 須與帶正電的陽離子結合，形成穩定的反應產物，在此反應系統中， Na^+ 和 K^+ 因帶一個正電且原子比 Ca^{++} 小，較易和 SiO^- 先結合成鹼矽膠體 (alkali-silica gel)。鹼矽膠體在有水的情況下會吸水而膨脹，因而造成混凝土內部產生膨脹壓力，當混凝土本身無法承受此內部壓力時，混凝土的體積會增加，進而龜裂以釋放內部壓力。

鹼矽膠體在形成初期，由於尚未吸水為較乾的膠狀體，在吸水後除會造成體積膨脹外，膠體的黏度亦會降低，若持續吸水膠體會變成流體狀的物質，流至混凝土中之孔隙，而降低鹼矽膠體的膨脹壓力。

鹼矽膠體在形成後若周圍有足夠的鈣離子，鈣離子會取代鹼矽膠體中的鈉、鉀離子，形成含鈣的鹼矽膠體(lime-alkali-silica gel)，而鈉、鉀離子釋放出來後，會再進入混凝土的孔隙溶液中，繼續與活性骨材反應生成鹼矽膠體，此種含鈣的鹼矽膠體，其吸水後的膨脹壓力小於不含鈣的鹼矽膠體，鹼矽膠體吸水膨脹的能力會受其組成成份及環境因素的影響，Diamond 在一項為期四個月於密閉室溫的環境中，發現膠體的膨脹量並不固定，對不活潑的膠體，其膨脹量小於2%，而較活潑的膠體，其膨脹量高達63%。

2. 鹼金屬的來源

混凝土中的鹼金屬主要來自水泥原料，在產製水泥高溫燒結時，鹼金屬會揮發出來，若未隨廢氣排入大氣，就在廢熱回收和預熱系統循環，與硫酸鹽結合成硫酸鈉、硫酸鉀或二者的固溶液(solid solution)，此種鹼金屬的硫酸鹽為水溶性，通常在拌合混凝土時即會溶解出來。另外，在燒結水泥時，部分的鹼金屬會進入水泥單礦物，以固溶液的型態存在於水泥中，一般鈉會取代鋁酸三鈣(C_3A)中的鈣形成 $Na_2C_8A_3$ ；鉀會取代矽酸二鈣(C_2S)中的鈣變成 $KC_{23}S_{12}$ 。在水泥水化後，單礦物中大部份的鹼金屬會隨水化過程釋放出來進入孔隙，參與鹼骨材反應。

3. 活性骨材

活性骨材與一般正常骨材的差異，主要在其結晶構造，一般正常的骨材結晶完整，如圖2-2(a)所示，其原子間的鍵結能量高，不易被氫氧根離子打斷產生鹼骨材反應；而活性骨材的結晶不完整，如圖2-2(b)所示，其原子排列散亂，矽

—氧間的鍵結易被氫氧根離子打斷，而進行鹼骨材反應。

一般可能會產生鹼骨材反應的活性骨材包括：(1)結晶不良或含水的矽質材料，如opal, chert,和flint等；(2)含玻璃質或半結晶的骨材，如rhyolite, andesite, dacite, latites及人造玻璃等；(3)微細結晶或半結晶的石英(quartz)；(4)曾受極大應力發生結晶變形的石英等。在工程實務上有一套判斷骨材是否具有活性的試驗方法，將另行說明。

2-3-2-3 防止鹼骨材反應的策略與方法

綜合前述的反應機理，混凝土發生鹼骨材反應須具備以下的條件

:

1. 孔隙溶液中有氫氧根離子與鹼金屬離子
2. 骨材含有活性矽的成份
3. 混凝土含有足夠的水份

防止鹼骨材反應的策略，則掌握其發生的條件，若能控制其中任何一項不發生，則可降低產生鹼骨材反應的機會，所以一般預防策略包括下列八種方法：

- (1) 控制孔隙溶液中的pH值。
- (2) 控制含水量。
- (3) 控制活性矽的含量。
- (4) 控制鹼金屬的濃度。
- (5) 改變鹼矽膠體。
- (6) 使用適當的波蜀蘭物質。
- (7) 做好混凝土的防水。
- (8) 使用品質良好記錄良好的骨材。

在工程實務上可藉下述的手段達到預防鹼骨材反應的目標：

1. 使用低鹼水泥

使混凝土中僅含有少量的鹼金屬離子，ASTM C150規定水泥中的鹼金屬當量(equivalent $\text{Na}_2\text{O}\%$ = $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)應低於 0.6%，但是此規定未考慮混凝土的水泥用量及其他來源的鹼金屬離子，因此數位學者建議利用混凝土中的鹼金屬總量控制鹼骨材反應，Hobbs建議混凝土中之水溶性鹼金屬應低於 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、酸溶性鹼金屬含量應低於 $3.25\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2. 避免使用活性骨材

藉試驗的方法選用適當的骨材，試驗流程如圖2-3所示。

3. 添加波蜀蘭物質

以波蜀蘭物質取代部份水泥，藉波蜀蘭反應消耗氫氧根離子和鹼金屬離子。

4. 降低混凝土滲透性與做好混凝土防水，減少鹼矽膠體吸水的機會。

5. 使用輸氣劑，使鹼矽膠體在吸水膨脹時，有適當的孔隙容納膨脹的鹼矽膠體，因而降低膨脹壓力。

2-3-2-4 混凝土發生鹼骨材反應後的維修方法

當混凝土已發生鹼骨材反應現象時，前述屬於施工時的預防措施已無法進行，僅能運用防水的策略，以阻止鹼骨材反應繼續造成危害，目前混凝土發生鹼骨材反應的維修方法包括了下列幾種：

(1) 表面被覆法

由於鹼矽膠體吸水膨脹是造成混凝土破裂的關鍵因素，因此採行表面封阻法，防止鹼矽膠體吸水，使鹼骨材反應減緩或停止，但是若防水失效，水份再度進入後，鹼骨材反應即會恢復，因此表面封阻的有效性以及封阻材料的耐久性的重要關鍵。對於已經產生鹼骨材反應的混凝土構造物在早期而言對於防止混凝土劣化有其成效，然而當混凝土因鹼骨材反應已經使構造物強度急遽下降及彈性模數降低時，即使表面封阻已有成效，但是結構上的安全考量會是最重要的指標，也就是結構上的安全評估已符合要求後，再行評估改善的可行性，始有成效。目前表面封阻法所使用的材料在文獻中以環氧樹脂以及高分子材料加水泥漿居多。

(2) 裂縫封阻法

當混凝土構造物由於鹼骨材反應，其於混凝土表面會產生裂縫，本法係以加壓的方法將封阻材料灌入裂縫中，其目的之一為防止水份進入混凝土構造物內部，以免內部之膠體吸水而膨脹，此外本法對於已降低強度之混凝土構造物，有提升的作用，目前文獻中大部分使用的裂縫封阻材料包括：環氧樹脂 (epoxy)、高分子水泥漿 (polymer cement paste)、兩液型或單液型填縫膠等。

(3) 裂縫封阻法加表面被覆法

本法係以前述兩種方法合併使用，先行以灌入的方法將裂縫填塞，再以覆面材料將表面被覆，使用的材料亦如前述，由於封阻和被覆同時施做，因此對於防止水份的進入有較佳的效果。

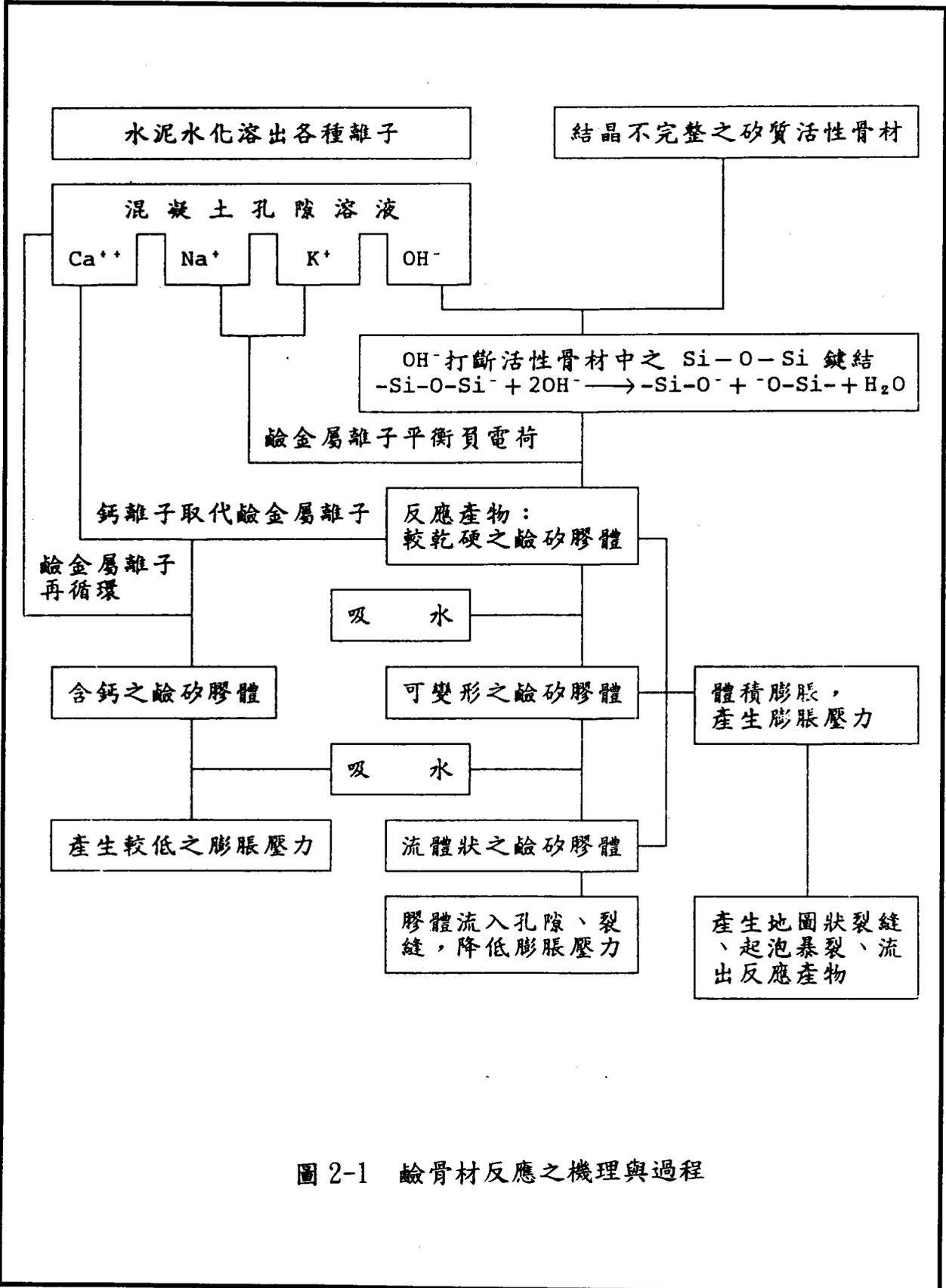
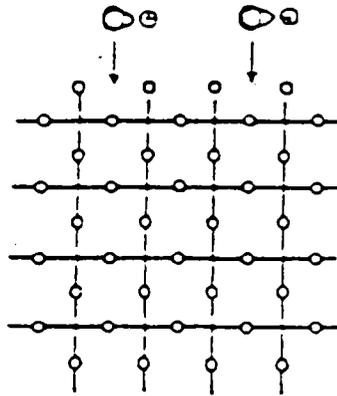


圖 2-1 鹼骨材反應之機理與過程

(a) 非活性骨材



(b) 活性骨材

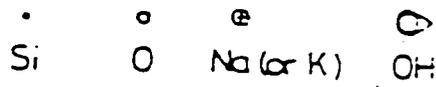
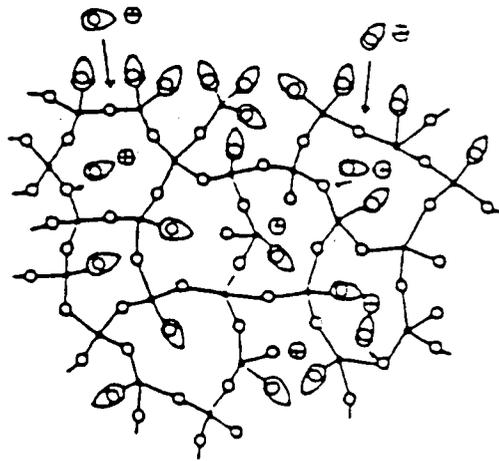


圖 2-2 骨材之結晶構造示意圖

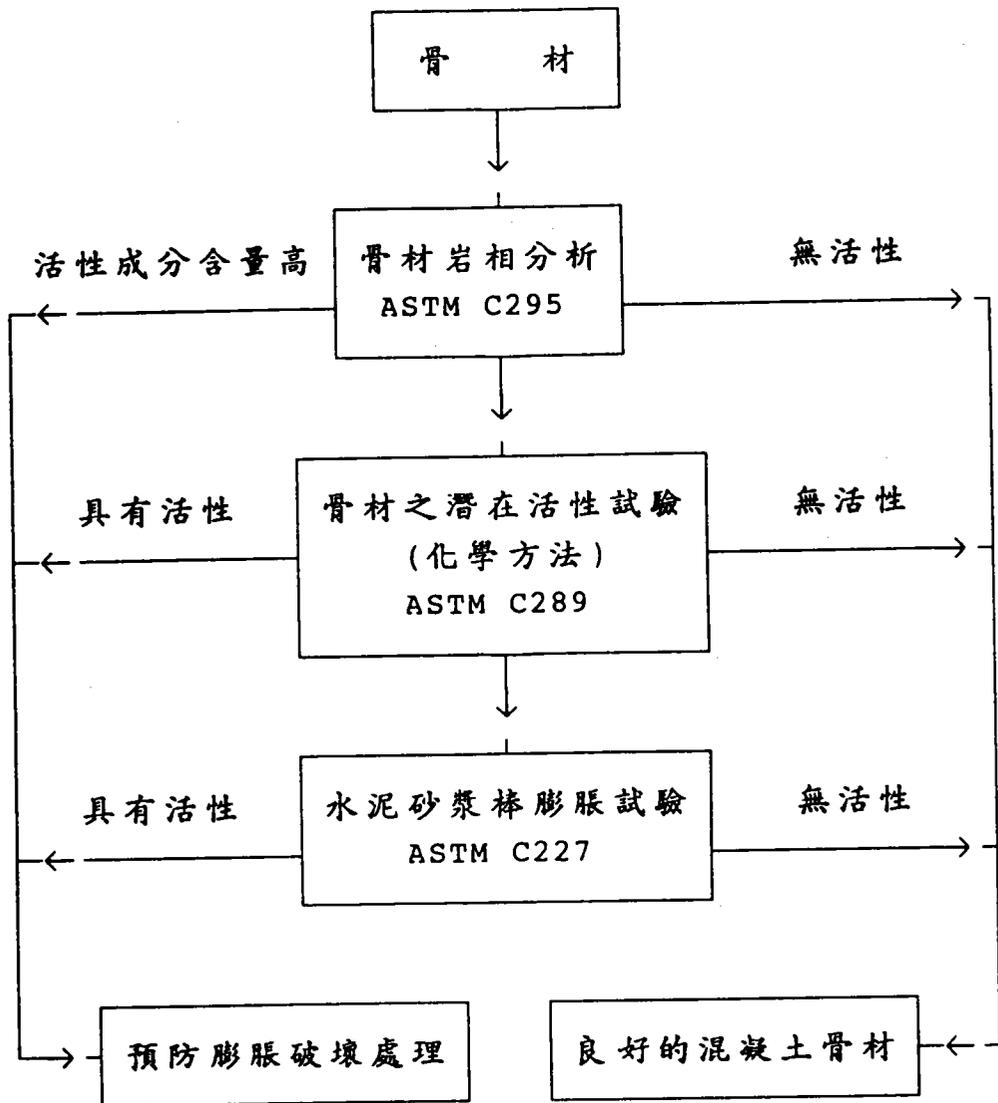


圖 2-3 活性骨材之檢驗流程與相關規範

表 2-1 海洋混凝土的劣化原因及現象

要 因		劣化之原因	劣化現象	與潮位之關係 海潮漲大 中汐澱氣 區帶帶帶
化 學 的 要 因	外 界 作 用	硫酸鹽作用 氯化物作用 碳化作用	形成鈣氫石與膨脹破壞 形成溶解性鹽類與多孔性 Ph之降低與促進鋼筋腐蝕	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	內 在 要 因	水泥硬化體之溶解 使用反應性骨材	Ca(OH) ₂ 之溶解與多孔性 形成鈣氫石與膨脹破壞	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
物 理 的 要 因	外 界 要 因	1. 氣象作用 2. 波浪作用 3. 海流作用 4. 凍融作用 5. 乾濕反覆作用 6. 氣溫循環作用 7. 結構體承受巨大負荷	風化及表面層破壞 混凝土表面受沖蝕破壞 混凝土表層受沖蝕及孔蝕破壞 膨脹及表面層破壞 1. 由於受拘束生表面及內部龜裂 2. 鹽類之濃縮及結晶化的膨脹壓 熱脹冷縮作用 混凝土受破壞	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	內 在 要 因	鋼筋之腐蝕	膨脹裂痕及保護層破壞	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

： 發生容易 ： 發生次等

表 2-2 水泥水化產物受海水侵蝕反應機理摘要

水 泥 成 分	水 化 產 物	海水侵蝕方式	侵 蝕 結 果
矽酸二鈣 (C_2S) 矽酸三鈣 (C_3S)	C-S-H 膠體	碳化作用分解	失去膠結性
		鎂離子侵蝕	失去膠結性
		氯離子侵蝕	變成網狀結構
	氫氧化鈣	碳化作用	析出，降低 pH 值
		鎂離子侵蝕	析出，降低 pH 值
鋁酸三鈣 (C_3A) + 石膏	單硫型鋁酸鈣	硫酸鹽侵蝕	鈣釩石二度膨脹
		氯離子侵蝕	形成氯化鋁酸鈣
鐵鋁酸四鈣(C_4AF) + 石膏	鈣釩石	碳化作用	形成 thaumasite

表 2-3 鋁酸三鈣的水化過程及其所造成之問題

鋁酸三鈣和石膏之莫耳比	水化產物	水化過程	造成之問題及改善
0	水化石榴石 Hydrogarnet	$C_3A + 21H \rightarrow C_4AH_{13} + C_2AH_8$ $\rightarrow 2C_3AH_6 + 9H$ Hydrogarnet	短時間內放出大量水化熱，並造成閃凝，須加入適量石膏，以控制 C ₃ A 的凝結
<1.0	單硫型鋁酸鈣 固態溶液 Monosulfoaluminate Solid Solution	1. 在 C ₃ A 顆粒表面形成鈣鈦石 $C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$ 石膏 鈣鈦石	若有外來之硫酸根離子入侵時，單硫型鋁酸鈣會轉變成密度較低的鈣鈦石，造成硫酸鹽侵蝕現象 $C_4ASH_{12} + 2CSH_2 + 16H$
1.0	單硫型鋁酸鈣 Monosulfoaluminate	2. 當反應系統中之石膏含量，不足以使全部之 C ₃ A 水化形成鈣鈦石時，未水化之 C ₃ A 會與已形成之鈣石共同分享硫酸離子，形成單硫型鋁酸鈣 $2C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$ 鈣鈦石 單硫型鋁酸鈣	$\rightarrow C_6AS_3H_{32}$ 為避免混凝土受硫酸鹽侵蝕，可使
1.0 - 3.0	鈣鈦石及單硫型鋁酸鈣 Ettringite and Monosulfoaluminate	$2C_3A + C_6AS_3H_{32} + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$ 鈣鈦石 單硫型鋁酸鈣	用 C ₃ A 含量較低之第二型中度抗硫水泥，或第五型抗硫水泥，及以較低之水灰比配製混凝土，降低混凝土的滲透性。
3.0	鈣鈦石 Ettringite	$C_3 + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$	降低混凝土強度，增加收縮量，故對水泥而言，有其最佳石膏含量，以達最高強度，最小收縮量。

表 2-4 鋁酸三鈣水化時各化合物分子量、密度和莫耳體積的關係

化合物之分子式	分子量 g / mole	密度 g / cm ³	莫耳體積 cm ³ / mole
CaSO ₄ · 2H ₂ O	172.1	2.32	74.1
H ₂ O	18.0	1.00	18.0
3CaO · Al ₂ O ₃ · CaSO ₄ · 12H ₂ O	622.3	1.95	319.1
3CaO · Al ₂ O ₃ · 3 CaSO ₄ · 32H ₂ O	1254.5	1.73	725.1
3CaO · Al ₂ O ₃	270.2	3.04	88.8

第三章 研究方法與過程

3-1 堤身結構體外觀檢視分析

以目測方式觀察堤身表面外觀損壞狀況，如裂縫、剝落、破洞...等初步之觀察鑑定，描繪記錄裂縫位置。裂縫通常是混凝土劣化的前兆，為外界有害物質侵入的捷徑，亦是造成內部鋼筋銹蝕的主要原因。

3-2 現場非破壞性檢測

選定適當的檢測位置點，本研究計劃調查檢測 7 座沉箱結構體，分屬港側及海側迎浪面，檢測範圍為潮汐帶以上之部份，進行下列檢測項目：

3-2-1 試錘試驗

以試錘(test hammer)衝擊堤身混凝土表面，量測結構體混凝土材料目前的強度。檢測面積約 4m(長) x 2m(寬)，於檢測範圍內在縱橫兩方向，每隔 20cm 距離之交叉點繪一網點，進行試錘試驗，記錄量測資料並繪製反彈數(強度)分佈圖。

3-2-2 電阻係數量測

利用兩個探針(頭)型之電阻量測儀量測混凝土之電阻係數，本試驗可輔助研判混凝土內部微觀之結構孔隙含量與鋼筋腐蝕之難易程度。在檢測之區域範圍內，做數點不同位置的電阻係數量測。電阻係數量測儀量測過程簡示圖如圖 3-1 所示。

3-2-3 鋼筋混凝土保護層厚度量測

利用鋼筋探測儀(R-meter)所產生之磁力場作用力，使混凝土內部之鋼筋會使磁場作用會發生偏離，即可迅速地測出鋼筋的位置，同時由磁力的強弱可辨別鋼筋混凝土保護層之厚度。

3-2-4 混凝土中性化深度量測

利用電鑽(或鐵鎚)敲取沉箱結構體混凝土表面小塊試體，以酚酞指示劑噴灑(刷)之，觀測混凝土小塊試體面上顏色之變化，即可量測出混凝土中性化的深度。

3-2-5 鋼筋腐蝕電位量測

以半電池腐蝕電位儀(half-cell potential instrument)，量測堤身內部鋼筋的腐蝕電位值，由腐蝕電位值之分佈狀況可判斷鋼筋銹蝕的範圍與腐蝕程度。腐蝕電位儀量測簡圖如圖 3-2 所示。圖中顯示，銅/硫酸銅飽和溶液所構成之半電池為參考電極(陰極)，混凝土中之鋼筋為陽極，混凝土為一電解質，整個系統形成一通路，即可量測任何位置通過鋼筋之電位大小。

3-2-6 鑽心取樣

使用試體鑽心設備鑽取試體，將試體攜回試驗室進行相關試驗，如抗壓強度試驗、鹼骨材反應潛能鑑定、微觀結構(晶)分析、化學成份分析、...等等。

3-3 試驗室內分析

3-3-1 鑽心試體骨材級配描繪

以透明描繪紙描繪鑽心試體表面外觀之骨材粒徑大小、分佈狀況，藉以瞭解混凝土之級配、拌合是否均勻適當。

3-3-2 鑽心試體抗壓強度試驗

將鑽心取樣之圓柱形試體，依據 ASTM C39-93a 之試驗規範，進行試體抗壓強度試驗，以瞭解混凝土表面強度現況，同時間接地亦可輔助了解混凝土材質配比是否適當。

3-3-3 試體化學成份分析(Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量檢測)

將鑽心取樣之圓柱形試體，依試體長度之不同，自表面約略分成三段深度，分別研磨成粉末狀並依規定過篩之，將粉狀顆粒依據 ASTM C114-85 及 AASHTO T-260 等相關規範，進行硫酸根離子(SO_4^{2-})及氯離子(Cl^-)濃度含量分析。

3-3-4 透水試驗

本試驗主要為測定混凝土之透水係數，可間接瞭解混凝土的緻(水)密性(或孔隙)。透水係數之推算乃是依據達西定律(Darcy's law)求得，其相關之原理及試驗過程簡略列於附錄，試驗裝置如圖 3-3。透水係數與氯離子之滲透分佈及壓汞孔隙分析試驗之結果，可相互印證比較。

3-3-5 鑽心試體壓汞孔隙分析試驗

本試驗之目的係利用壓汞式孔隙分析儀(mercury intrusion poro-simetry, MIP)，瞭解混凝土試樣內部微觀結構

中之孔隙大小分佈情形，並由壓力與汞之累積貫入量間之關係圖求出孔隙的含量、毛細管徑分佈、.....等，同時亦可求得試體之虛(鬆)比重(bulk density)及視比重(apparent density)與孔隙率等。

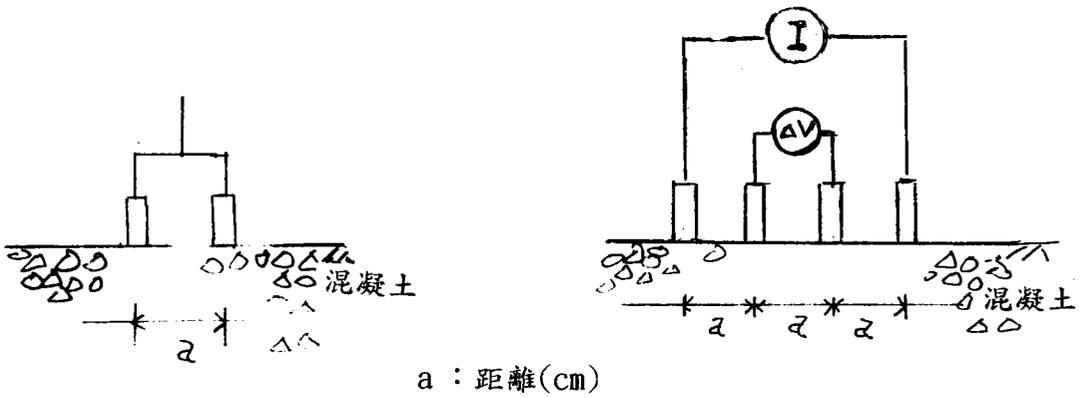
3-3-6 鑑定混凝土材質病變原因

3-3-6-1 微觀分析

將鑽心試體依不等深度分別切片，研磨成粉末，使用 X-光繞射分析儀(XRD)、掃描式電子顯微鏡(SEM)....等精密儀器，觀察混凝土內部結構變化，諸如水泥水化物品相變化或其它有害物之形成等，並鑑定可能病變原因。

3-3-6-2 鑑定鹼骨材反應潛能

取鑽心試體內之骨材在試驗室內依據 ASTM C-289 之規範，進行鹼骨材反應潛能試驗，檢測骨材是否含有活性矽化物之成份。相關之規範及試驗過程請參閱附錄。



(a) 兩探頭(針)式

(b) 四探頭(針)式

圖 3-1 混凝土電阻量測簡示圖

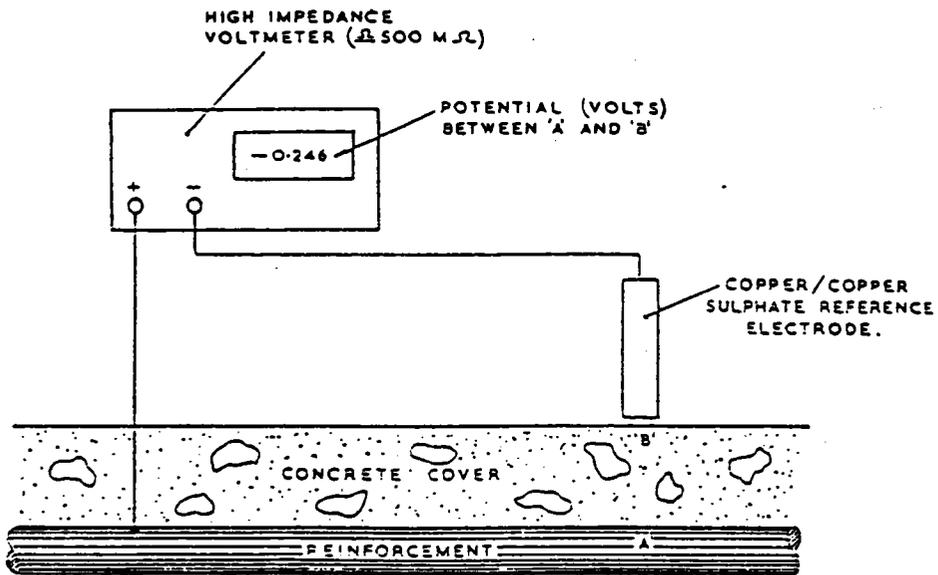


圖 3-2 鋼筋腐蝕電位值量測簡示圖

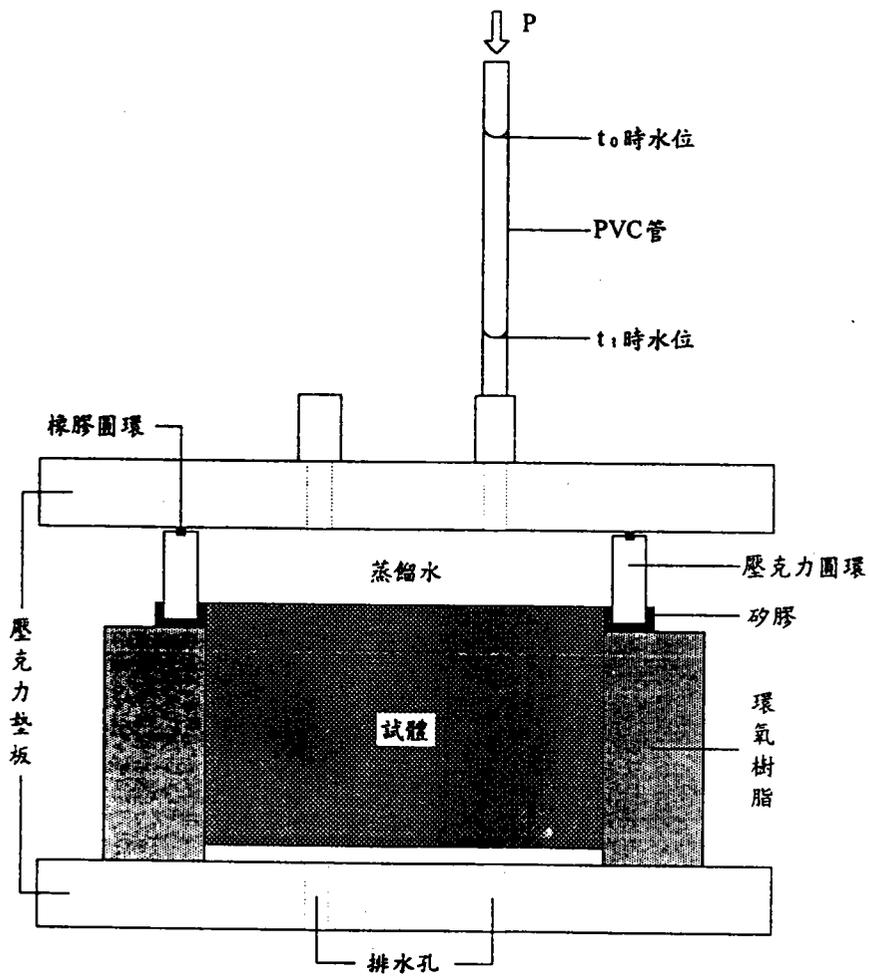


圖 3-3 透水試驗裝置簡示圖

第四章 試驗結果與討論

4-1 堤身結構體外觀檢視分析

4-1-1 防波堤檢測位置

本研究調查檢測之防波堤位置如圖4-1所示。調查範圍包括南外廓防波堤(沉箱編號SB-1至SB-39)及漁港北外堤(沉箱編號FNB-1至FNB-7)。

4-1-2 堤身檢視結果

在防波堤上巡回踏勘，以目視檢測記錄堤面損壞狀況，及配合潛水工作人員，搭船從海面上圍繞防波堤，由外圍海面上正面觀察檢測防波堤沉箱主體於低潮位線以上之損壞情形並拍照存証。本次進行之防波堤外觀檢測結果，簡列於表4-1及表4-2所示。表4-1中顯示堤身外觀在低水位線以上之損壞狀況，大多為沉箱外牆剝落、鋼筋裸露，且大部份損壞均發生於沉箱與沉箱接縫處，又整座防波堤於中間部份位置，曾受到多次颱風侵襲，堤身嚴重塌陷而出現缺口。表4-2為低水位線以下堤身外觀檢測之狀況。上述兩表係依據潛水人員在現場調查拍照記錄等資料加以分析研判之結果，其詳細狀況請參考本研究計劃之『防波堤損壞調查分析』部份。調查期間，於沉箱編號為SB-19及SB-31處仍為缺口狀態。部份損壞的位置及現況如照片4-1至照片4-5所示。

4-2 現場非破壞性檢測結果

4-2-1 試錘試驗

以反彈試錘在堤身外壁胸牆檢測混凝土現有強度分佈狀況，檢測結果如圖4-2所示。圖4-2中顯示大部份的沉箱結構體之反彈讀數約介於30 ~ 40之間，如參照表4-3之試錘反彈讀數與混凝土估計強度之關係，則大部份的沉箱混凝土表面之強度約為205kg/cm²(約3000 psi)至350kg/cm²(5000 psi)之間，均比沉箱原始設計強度(i.e.封層部份為2000 psi，主體部份為3000 psi)高出甚多，本試驗結果與鑽心試體經抗壓強度檢測所得結果之趨勢大致相近。而沉箱編號SB-19及SB-23在檢測範圍內，有局部數個檢測點之反彈讀數低於25(亦即混凝土強度低於3000 psi)，顯示混凝土有局部劣化跡象。整體而言，檢測之沉箱之混凝土表面強度仍屬正常狀況。

4-2-2 中性化深度量測

現場檢測混凝土結構體受中性化侵襲之情形，經以敲取小塊試體施灑酚欵指示劑後，發現堤身結構體混凝土之中性化程度輕微，鑽(敲)取之試體其中性化深度僅2~3mm左右，顯示在正常的混凝土內部仍應為鹼性環境，對鋼筋仍具適當的保護作用。

4-2-3 鋼筋混凝土之保護層厚度量測

沉箱結構體經鋼筋探測儀檢測後，測得其保護層厚度之結果大致如表4-4所示。編號FNB-2與FNB-4之沉箱所檢測之範圍為封層部份(i.e.混凝土內部無鋼筋配置)及編號SB-19為塌陷沉箱之結構體不予量測外，編號為SB-23之沉箱在量測的區域內，約有二分之一的範圍其保護層厚度僅為4~5公分左右，且有數點檢測點低於4公分以下，有明顯不足現象，推斷原因或許沉箱在建造時，模版內

配置之鋼筋在澆置混凝土時，可能受到鋼筋自重或外力之因素，發生鋼筋傾斜偏離或移位等現象所造成的，其餘SB-8, SB-18和SB-24等沉箱之保護層均達8~10公分左右，符合海洋結構體設計之規範。調查沉箱之保護層厚度分佈狀況如圖4-3所示。

4-2-4 電阻係數量測

以兩個探針(probe)式之電阻儀器，量測堤身混凝土結構體之電阻係數，電阻係數量測結果如圖4-4所示。一般而言，電阻係數愈低鋼筋腐蝕速率愈快，其電阻係數與鋼筋腐蝕速率的關係如表4-5所示。編號SB-8, SB-18和SB-19的沉箱所測得之電阻係數大部份都介於5~15k Ω -cm之間，顯示在這些沉箱中的鋼筋已在發生腐蝕了且可能會有較大的腐蝕速率。FNB-2沉箱所測得的電阻係數在大部份量測之區域範圍內約介於10~15k Ω -cm，顯示混凝土之電阻升高時，其內部鋼筋之銹蝕情況比前述沉箱較不易發生。而SB-23及SB-24沉箱之電阻係數在檢測範圍內除了少數幾個檢測點外，幾乎整個檢測範圍內之混凝土電阻均小於5k Ω -cm以下，顯然混凝土內之鋼筋極易趨向腐蝕，經檢測其鋼筋腐蝕電位值後，發現其腐蝕電位值大部份都小於-350mV，印證了鋼筋腐蝕機(速)率與電阻之關係大致如表4-5之關係。

4-2-5 鋼筋腐蝕電位量測

以Cu/CuSO₄之參考電極，量測沉箱結構體之鋼筋腐蝕電位值，量測結果如圖4-5所示。大部份所調查之沉箱結構體其內部之鋼筋腐蝕電位值均介於-200mV至-350mV之間，依據ASTM C-876規範之說明(如表4-6所示之關係)，則其沉箱結構體內部之鋼筋發生腐蝕生銹之機率為50%以上，如鋼筋腐蝕電位值小於-350mV以下時，則其內部鋼筋發生腐蝕之機率更提高至95%以上。

在圖4-5中編號為SB-8、SB-18之沉箱所測得之鋼筋腐蝕電位值大多在-200mV至-350mV之間，顯然內部鋼筋發生腐蝕之機率有50%。而編號為SB-19、SB-23及SB-24之沉箱大部份檢測範圍內之鋼筋腐蝕電位則幾乎都小於350mV，甚至達-550mV至-650mV之間，推斷其內部鋼筋已發生腐蝕行為。

4.3 試驗室分析結果

4.3.1 鑽心試體骨材級配描繪

鑽心試體骨材級配描繪結果如圖4-6所示。各沉箱結構體之混凝土之骨材大小粒徑分佈、級配及拌合大致均勻正常。

4-3-2 鑽心試體抗壓強度

鑽心試體抗壓強度量測結果如表4-7所示。從表中檢測數據顯示沉箱結構體之混凝土強度仍然良好，大部份沉箱(除了編號SB-19及SB-24外)之混凝土強度為 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ (約4500 psi)以上，均比原設計強度2000 psi(封層部份)及3000 psi(主體部份)高出甚多。為求慎重起見，本試驗在中央大學進行後，同時亦將部份試體再經由港研所來檢測比較，雙方所得結果大致相近，顯見沉箱混凝土之強度目前仍無劣化跡象。

4-3-3 透水係數試驗

表4-8為鑽心試體之透水係數試驗結果，試體之透水係數約介於 $0.128 \times 10^{-10} \sim 7.191 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{sec}$ 之間。編號SB-24沉箱之試體之透水係數最大($7.191 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{sec}$)，約為其它試體的數倍至數十倍。整體而言，編號SB-8、SB-19、SB-23及SB-24等沉箱之透水係數較高，顯示這些沉箱之混凝土較易受到外界有害因子之

侵入，造成增加混凝土內部鋼筋腐蝕的機率。

4-3-4 化學成份分析(Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量分佈)

各鑽心試體之 Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量分佈情形如圖4-7所示。詳細之檢測數據分別列於表4-9至表4-10。表4-9中顯示各試體在第一段深度內之氯離子含量均高於 $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以上，沉箱SB-18及FNB-2之含量約為 $7\text{kg}/\text{m}^3$ ，沉箱編號SB-23及SB-24之含量更高達 $11\text{kg}/\text{m}^3$ 以上，遠遠超過 CNS 3090『預拌混凝土』及CNS 12891『混凝土配比設計準則』對新拌混凝土中之水溶性氯離子含量之限制甚多(i.e.亦即需作耐久性考量之鋼筋混凝土內，最大允許之水溶性氯離子含量為 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$)。如假設沉箱原始混凝土配比設計中，每立方混凝土水泥用量為 350kg 時，再參照與表4-11比較之下，即可發現大部份試體內部之鋼筋可能受到相當嚴重的腐蝕。上述之檢測數據應可與鋼筋腐蝕電位值檢測之結果相互印證。硫酸根離子濃度之增加表示混凝土中的水泥漿體可能受到硫酸鹽侵蝕，且形成膨脹性的水化產物會導致混凝土破裂，嚴重時會造成水化產物分解。由表4-10的結果顯示，硫酸根離子含量隨著試體深度的增加有逐漸減少的趨勢。沉箱FNB-4、SB-18及SB-19試體內部硫酸鹽含量較少，顯示混凝土材質尚具有抵抗海洋環境侵蝕的能力。

4-3-5 鑽心試體壓汞孔隙分析試驗

試體經壓汞孔隙分析試驗所得結果如圖4-8所示，圖中顯示各試體內部孔隙直徑大小與汞累積貫入量之關係，詳細數據列於表4-12中。表中列示混凝土內部毛細孔隙大小的分佈、含量多寡、總孔隙量等數據，壓汞式孔隙分析中總孔隙量包括有毛細孔隙量與膠體孔隙量，其分類的方式為大於 $0.05\mu\text{m}$ 的孔隙為大毛

細孔隙，介於 $0.05\mu\text{m}$ 及 $0.01\mu\text{m}$ 間者為中毛細孔隙，小於 $0.01\mu\text{m}$ 者為膠體孔隙。一般而言，混凝土內毛細孔隙含量高時其透水係數相對亦高，因此孔隙率的大小可間接與透水係數、氯離子滲透...等結果相互比較與印證，研判混凝土目前的品質狀況。表 4-12 結果顯示 FNB-2, FNB-4, SB-18 的膠體孔隙量較高，而混凝土中的膠體孔隙含量如有明顯減少時，表示混凝土內部水化產物與外界侵入的物質發生反應，生成之產物填塞孔隙因而造成膠體孔隙含量的減少，由上述之現象可見混凝土已受到相當嚴重的侵蝕。

4-3-6 鑑定混凝土材質病變原因

4-3-6-1 微觀分析結果

鑽心試體經 X-光繞射分析儀 (XRD) 及掃描式電子顯微鏡 (SEM) 的分析結果如表 4-13 所示。分析結果顯示，混凝土長期浸泡於海水中，由於海水中之硫酸鹽類的侵入，材質內部已有鈣礬石水化物 (ettringite) 的產生，此種化合物數量一旦生成甚多時，會造成混凝土體積的膨脹，最後造成結構體之龜裂而破損。SEM 分析的結果如照片 4-6 至照片 4-12 所示。照片中均顯示出針狀的結構 (i.e. 鈣礬石)。XRD-繞射波峰圖如圖 4-9 所示。

4-3-6-2 鑑定鹼骨材潛能反應結果

本試驗依據 ASTM C-289 (化學法) 規範，進行骨材『潛在性鹼-矽反應』的檢測，檢測結果如表 4-14 所示。表 4-14 中之 R_c 值 (消耗之鹼量濃度) 與 S_c 值 (SiO_2 的濃度)，經繪製座標圖如圖 4-10 (半對數圖， R_c v.s. $\log S_c$) 後，發現 S_c 及 R_c 數值均落於『有潛在性鹼骨材反應』的區域內，值得有關單位做更深入的分析調查與探討，以確保結構體的安全性。

綜合上述之各項試驗分析，本計劃所調查之沉箱結構體整體檢測結果，彙整簡列於表4-15中。各沉箱結構體詳細檢測結果分述如下：

FNB-2 沉箱

結構體外牆混凝土有剝落、內部鋼筋裸露等現象，混凝土強度檢測試錘讀數為 30 (i.e. 估計強度為 $205\text{Kg}/\text{cm}^2$)，約略維持在原設計強度。鑽心試體之抗壓強度為 $332\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，高出設計強度甚多。鑽心試體之透水係數為 $1.547 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{sec}$ 有偏高現象，顯示混凝土內部之孔隙結構緻密性有下降的趨勢，海水滲入容易，致使在混凝土厚度 10 公分段內，所測得之氯離子含量為 $7.355\text{Kg}/\text{m}^3$ 濃度偏高，依據相關規範及表 4-11 之關係，混凝土內部鋼筋一定發生腐蝕作用。因此，結構體之保護層厚度如小於 10 公分時，外界有害物質更容易在極短時間內即能促使鋼筋腐蝕，降低結構體耐久性甚巨。XRD 及 SEM 之分析結果顯示，混凝土內部有鈣礬石等有害化合物生成，惟生成量不多，短期內對結構體威脅不大。鹼骨材反應之鑑定中發現 R_c 及 S_c 值之座標點雖位於“潛在性有害性骨材區域”之範圍內，但已甚接近“有害性骨材區域”範圍中，因此未來長期間之變化，應持續追蹤觀察。整體而言目前沉箱結構體混凝土材料之品質尚無明顯劣化現象。

FNB-4 沉箱

沉箱結構體外牆局部混凝土有剝落、內部鋼筋裸露、斷裂等現象。混凝土表面試錘讀數為 30 (i.e. 估計強度為 $205\text{Kg}/\text{cm}^2$)，與原設計強度相當，鑽心試體之抗壓強度為 $361\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，高出設計強度甚多，顯示目前結構體混凝土材料之品質仍屬良好。鑽心試體之透水係數為 $0.897 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{sec}$ ，顯示混凝土內部之孔隙結構緻密性尚佳。氯離子含量在混凝土厚度 0~9 公分

段內為 $3.829\text{Kg}/\text{m}^3$ 含量低，但仍比 CNS 規範要求高出甚多。由於封層部份內部並無鋼筋配置，無鋼筋腐蝕問題存在，因此對結構體之耐久性影響不大。XRD 及 SEM 之分析顯示，混凝土內部有鈣礬石產生，生成量不多。鹼骨材反應之鑑定中 R_c 及 S_c 值之座標點位於”潛在性有害性骨材區域”之範圍內，亦甚接近”有害性骨材區域”範圍中，應持續追蹤檢測。整體而言沉箱結構體混凝土材料之品質亦無明顯劣化現象。

SB-8 沉箱

結構體外觀尚良好，無明顯嚴重損壞。鋼筋混凝土保護層厚度約為 10 公分，符合海洋結構體規範之要求。沉箱混凝土外牆試錘讀數 34 (i.e. 估計強度為 $270\text{Kg}/\text{cm}^2$)，鑽心試體之抗壓強度為 $311\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，顯示混凝土材質仍屬良好狀況。混凝土電阻係數為 $4.2\sim 13.3\text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，導電能力(離子游動性)屬中等，亦即電荷易於在混凝土介質中游動，容易造成混凝土內鋼筋腐蝕速率增快，此結果與測得之鋼筋腐蝕電位值($-200\text{mV}\sim -350\text{mV}$)之趨勢相互一致。鑽心試體之透水係數值為 $3.806 \times 10^{-10}\text{ m}/\text{sec}$ 亦屬偏高。又混凝土厚度為 0~9 公分段內，所測得之氯離子含量僅 $2.849\text{ Kg}/\text{m}^3$ ，含量不高，對內部鋼筋尚不構成腐蝕威脅。鹼骨材反應結果屬於”潛在性有害骨材區域”範圍內，亦接近”有害骨材區域”範圍，其潛在危險性需持續觀察。

SB-18 沉箱

結構體外觀在沉箱與沉箱接縫處有明顯混凝土剝落、損壞、鋼筋外露等現象。鋼筋混凝土保護層厚度約為 10 公分，符合海洋結構體規範之要求。試錘讀數為 28 (i.e. 估計強度小於 $200\text{kg}/\text{cm}^2$) 稍為偏低，但鑽心試體之抗壓強度達 $320\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，顯示混凝土強度仍屬正常狀況。混凝土電阻係數為

3.3~11.1 k Ω -cm，混凝土介質之導電能力高，混凝土內鋼筋腐蝕速率相對亦高，與腐蝕電位值量測之結果(-200mV~-350mV)一致，顯示鋼筋有 50% 機率發生腐蝕。鑽心試體透水係數較低，約為 0.128×10^{10} m/sec)，但氯離子含量在混凝土厚度 0~7 公分段內卻高達 7.058 Kg/m^3 ，此濃度已能致使內部鋼筋發生腐蝕行為。鹼骨材反應之結果屬”潛在性有害骨材”與”有害性骨材區域”範圍甚接近，其潛在危險性需持續觀察。

SB-19 沉箱

沉箱結構體上部之胸牆、沉箱封層及外壁，均已塌陷損壞，沉箱內部砂石嚴重流失，僅殘存隔艙壁面隨時有沉陷發生。隔艙混凝土壁面強度檢測結果，試錘讀數 28 稍為偏低，鑽心試體抗壓強度為 273 kg/cm^2 。壁面混凝土電阻係數為 3.9~11.5 k Ω -cm，混凝土環境屬於較易導電的環境，內部鋼筋腐蝕電位值達 -500mV~-650mV，有嚴重腐蝕傾向。混凝土之透水係數為 6.821×10^{10} m/sec 有偏高趨勢，氯離子含量為 7.058 Kg/m^3 ，顯然沉箱結構體混凝土材料品質已在劣化中。骨材檢測結果為”潛在性有害骨材區域”之範圍內甚接近”有害骨材區域”，其潛在危險性需持續觀察。

SB-23 沉箱

沉箱結構體外觀有嚴重的損壞狀況，如外牆裂縫、剝落、內部鋼筋露出等現象。混凝土保護層為 4~12 公分，有二分之一的測範圍內，其厚度在 5 公分以下，保護層嚴重不足，對結構物耐久性影響甚巨。混凝土電阻係數為 1.7~7.5 k Ω -cm，混凝土介質屬於易導電性的環境。因此內部鋼筋甚易發生腐蝕作用，從鋼筋腐蝕電位值量測結果(-350mV~-450mV)亦顯示鋼筋有 95% 機率腐蝕。XRD 及 SEM 分析結果顯示混凝土內部有鈣礬石存在，生成

量不多，短期內對結構體威脅不大。整體而言，此沉箱部份區域其外牆保護層厚度嚴重不足，內部鋼筋有嚴重腐蝕現象，如沒有做適當的處置，在惡性循環作用下，可能加速混凝土品質之外劣化，對結構體的耐久性影響甚巨。

SB-24 沉箱

沉箱結構體外觀狀況良好，混凝土保護層厚度為 8~12 公分，符合海洋結構體規範之要求。沉箱外牆混凝土試錘讀數為 34，鑽心試體抗壓強度為 248kg/cm^2 ，壁面混凝土電阻係數較低為 2.1~7.1 k Ω -cm，混凝土環境屬於較易導電的環境。混凝土之透水係數為 7.191×10^{-10} m/sec 比正常品質混凝土之透水係數高出甚多，氯離子含量亦高達 11.0 Kg/m^3 （在 0~3 公分段內），內部鋼筋腐蝕電位達 -300mV~-500mV，有嚴重腐蝕現象。

防波堤檢測取樣位置：SB-8, SB-18, SB-19, SB-23, SB-24, FNB-2 及 FNB-4, (其中 SB-19 與 SB-31 已破損)

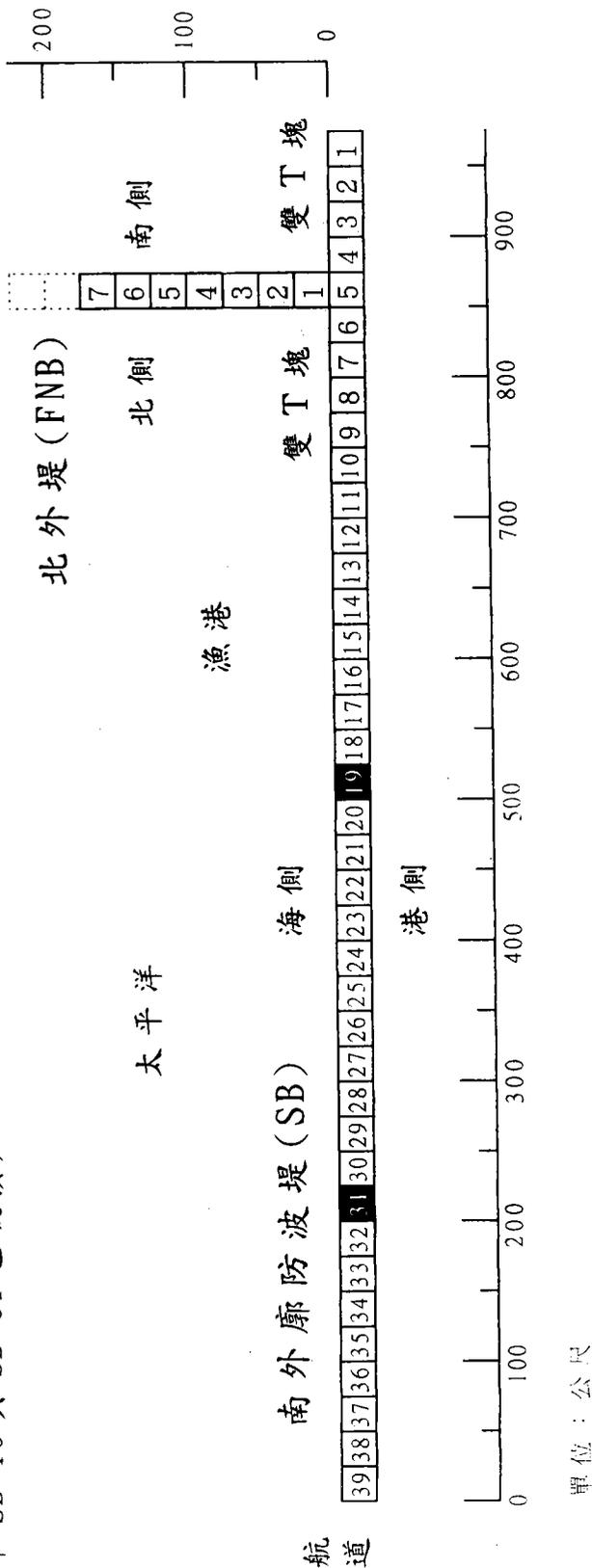
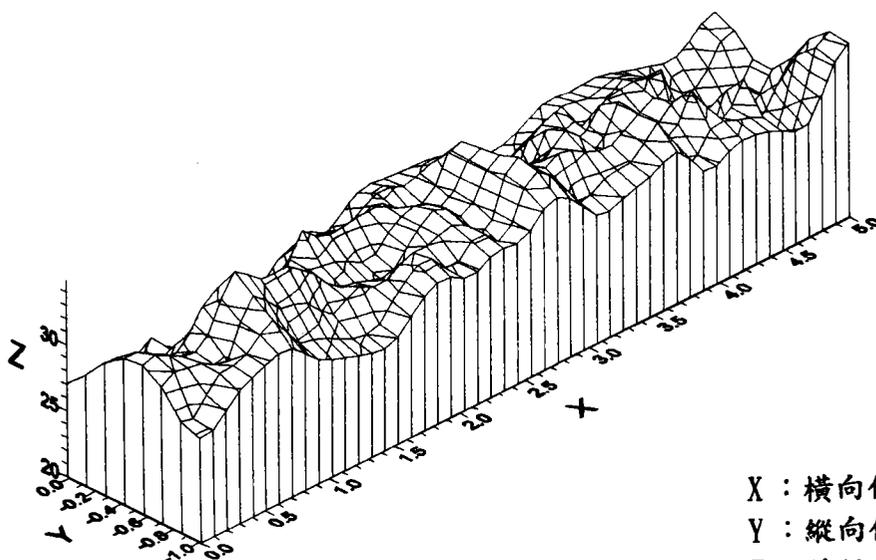
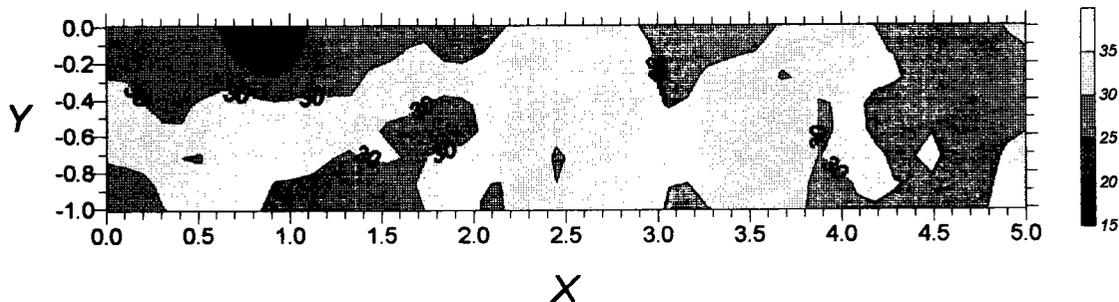


圖 4-1 蘇澳港防波堤檢測位置示意圖

FNB-2 HAMMER

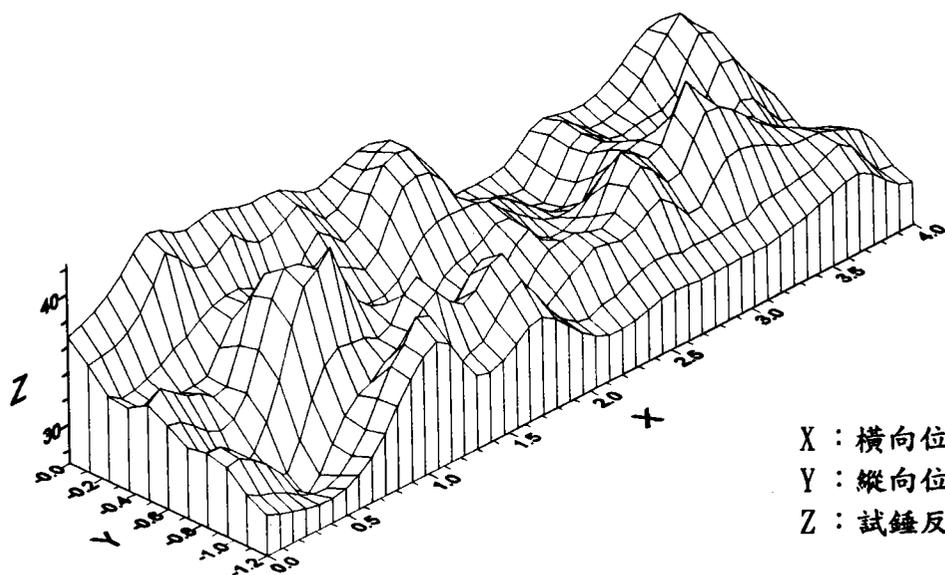
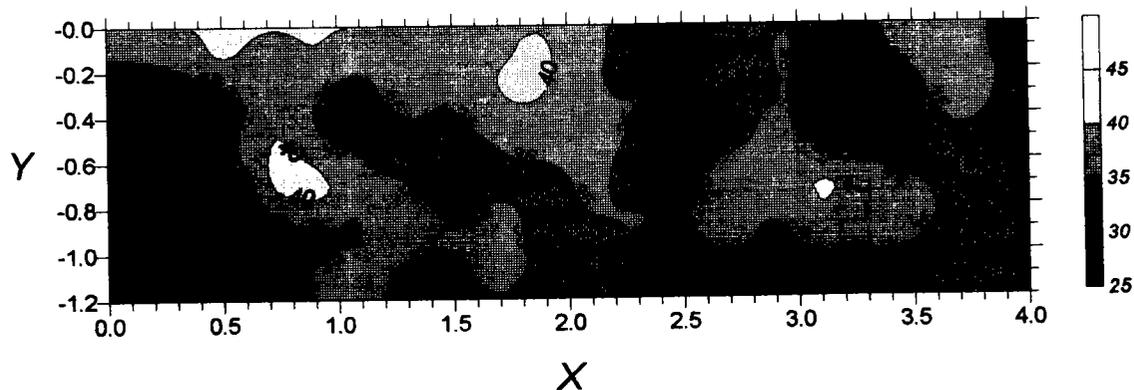


X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 試錘反彈讀數

27	24	29	23	18	27	29	27	31	28	30	32	31	31	31	29	28	29	31	30	31	29	28	27	30
30	27	29	28	26	27	27	33	31	32	32	30	30	34	32	28	32	32	29	31	31	31	25	25	27
32	30	31	36	33	34	33	29	29	27	31	33	30	34	32	30	34	28	35	28	31	23	30	26	27
31	31	29	34	32	32	29	31	31	31	31	32	29	35	32	34	32	32	33	30	33	29	32	25	33
27	31	31	33	29	29	28	27	30	32	29	32	30	34	32	29	31	31	33	27	30	30	29	26	33

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)

SB-8 HAMMER2

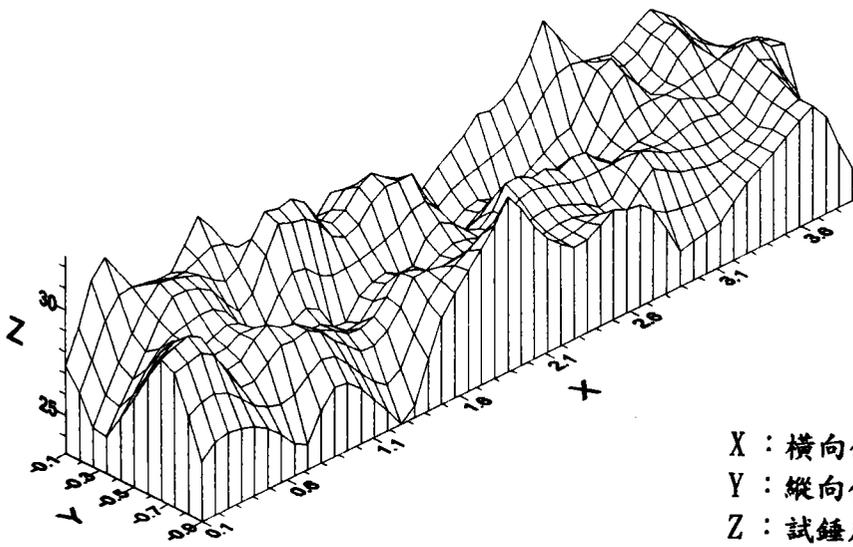
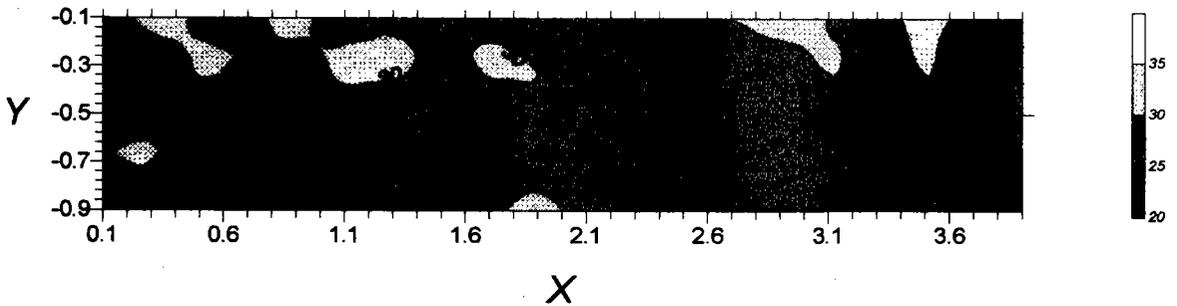


X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 試錘反彈讀數

36	37	42	38	40	38	40	37	39	41	37	31	32	32	36	34	34	37	39	33
32	32	33	36	35	32	38	34	41	41	35	35	33	31	36	33	33	33	39	34
36	34	33	41	35	33	33	33	36	37	37	34	33	33	37	32	32	31	34	31
31	31	32	41	43	37	35	29	33	33	36	32	33	38	36	41	37	36	33	29
37	31	26	32	33	33	40	35	40	31	35	36	35	38	33	39	34	35	35	35
30	29	29	31	36	39	32	33	37	33	31	31	33	32	32	32	33	33	35	31

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-8)

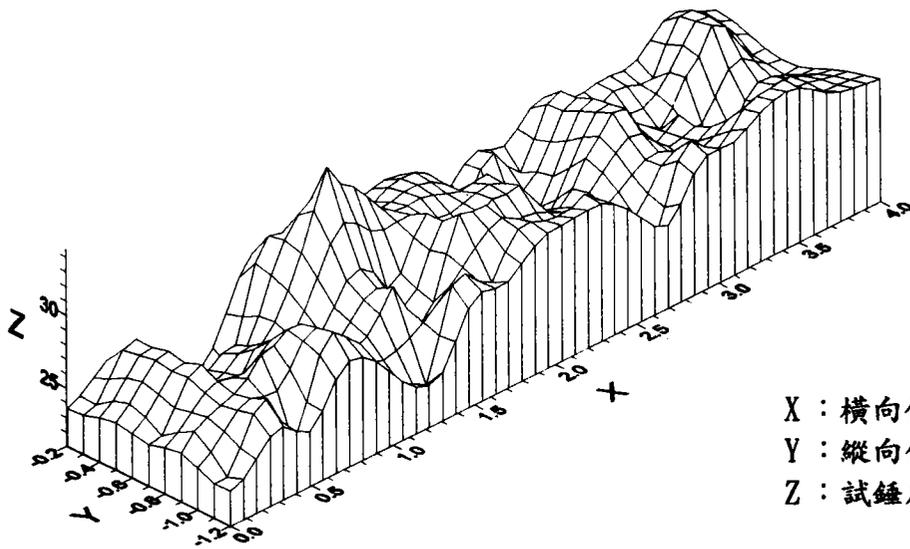
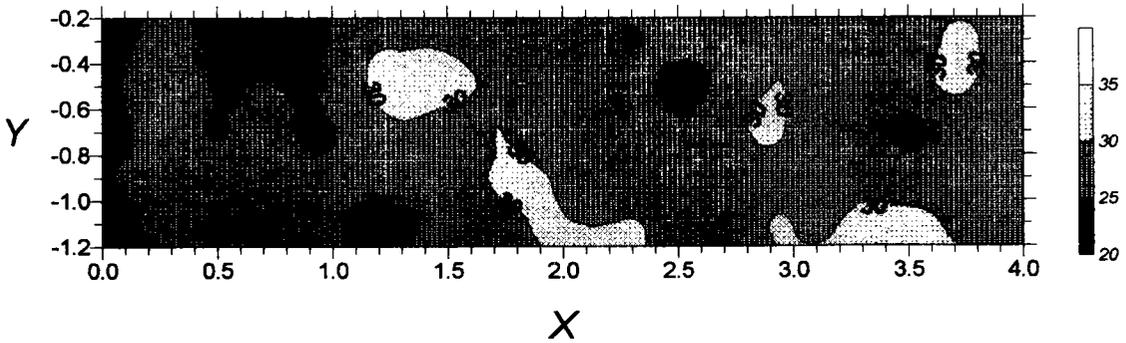
SB-18 HAMMER1



27	32	29	29	32	27	29	28	30	25	27	28	30	30	33	30	29	31	29	27
24	27	31	30	28	32	32	29	31	31	25	27	25	27	27	31	28	31	27	29
27	29	28	29	25	28	25	27	27	28	27	29	29	29	27	28	29	28	30	29
30	31	27	29	29	27	27	29	28	28	27	28	27	26	29	28	27	27	29	23
26	27	26	24	27	25	23	27	29	32	29	27	28	28	25	25	27	28	29	25

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)

SB-19A HAMMER

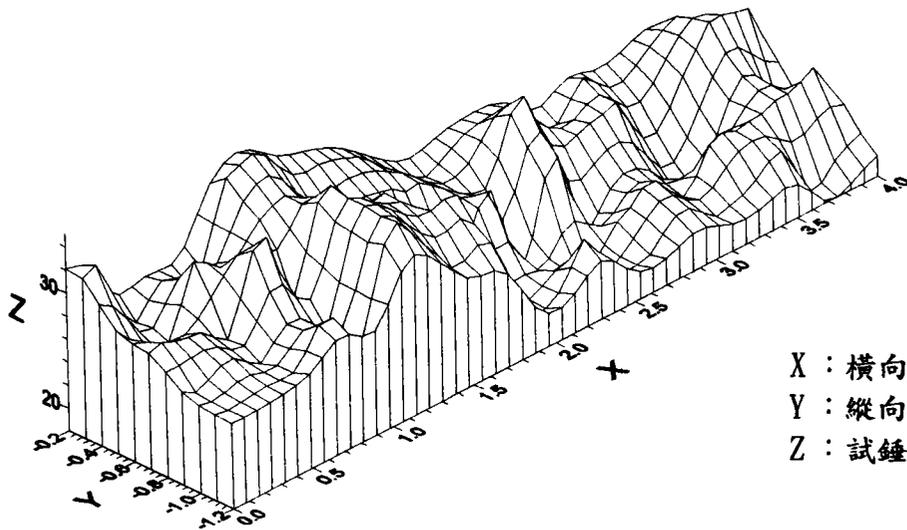
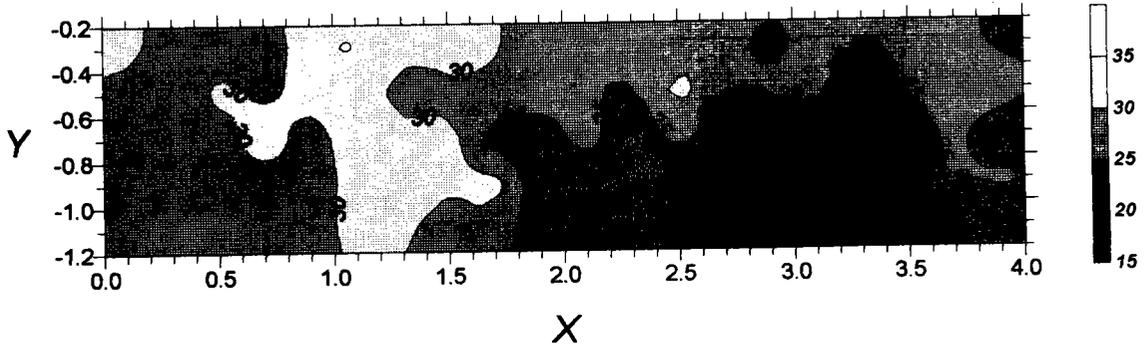


X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 試錘反彈讀數

24	28	23	21	22	30	29	29	28	29	29	24	28	25	30	27	28	30	31	29
25	28	25	26	25	28	35	32	29	29	28	29	22	26	30	29	25	28	32	28
24	28	24	27	24	26	29	26	30	27	29	29	26	29	31	27	28	22	27	27
26	26	28	30	26	26	27	24	31	31	27	27	27	27	29	27	29	27	30	
23	28	23	30	28	24	23	30	27	31	32	31	28	24	31	29	31	32	29	

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))

SB-19B HAMMER

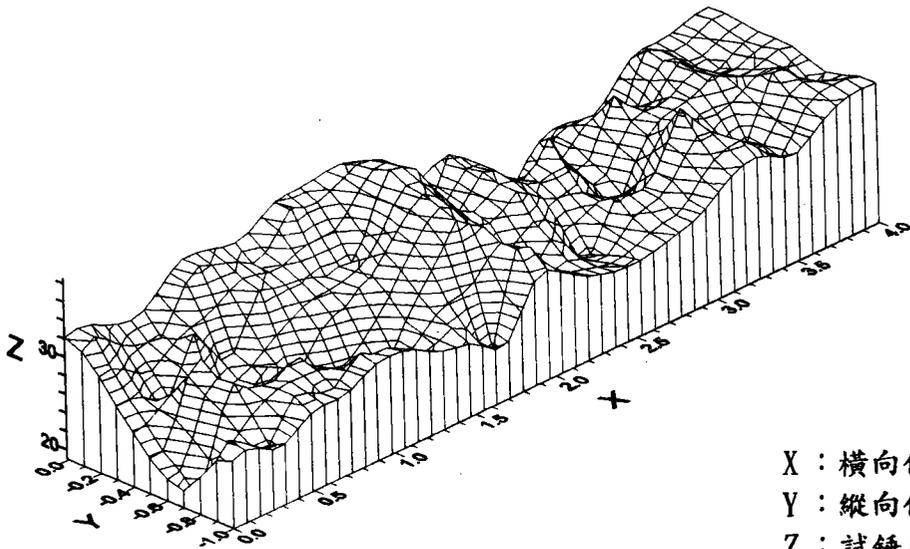
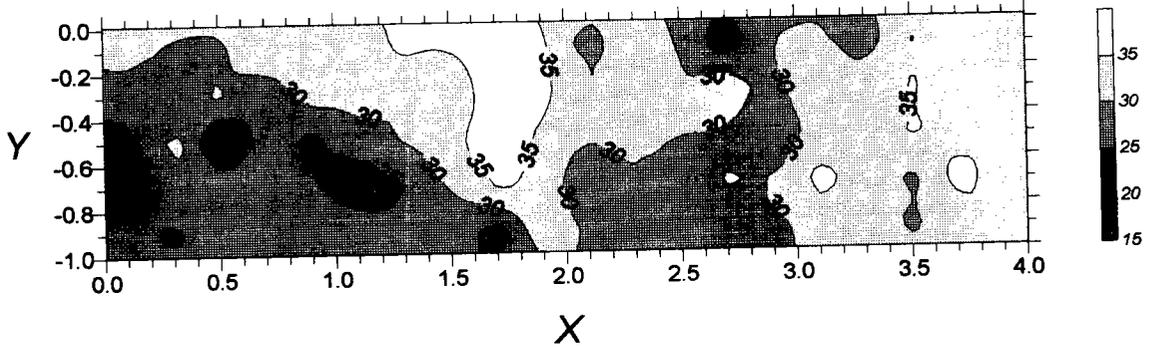


X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 試錘反彈讀數

33	25	28	26	34	35	32	31	30	28	25	27	28	28	23	27	25	27	28	23
27	25	32	29	32	33	28	29	29	28	26	25	32	25	26	23	21	25	30	29
29	28	26	35	26	35	31	32	23	21	28	17	28	18	22	22	17	21	26	20
25	27	25	27	25	34	33	31	32	21	21	20	18	22	24	21	25	24	25	27
25	26	26	30	25	35	31	27	29	20	20	25	20	20	23	20	21	23	17	20

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))

SB-23 Hammer

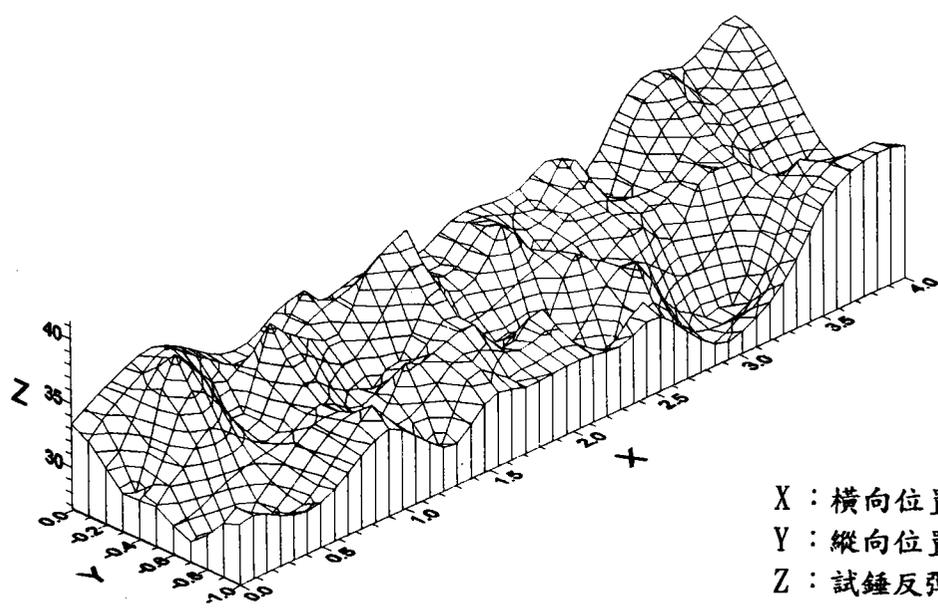
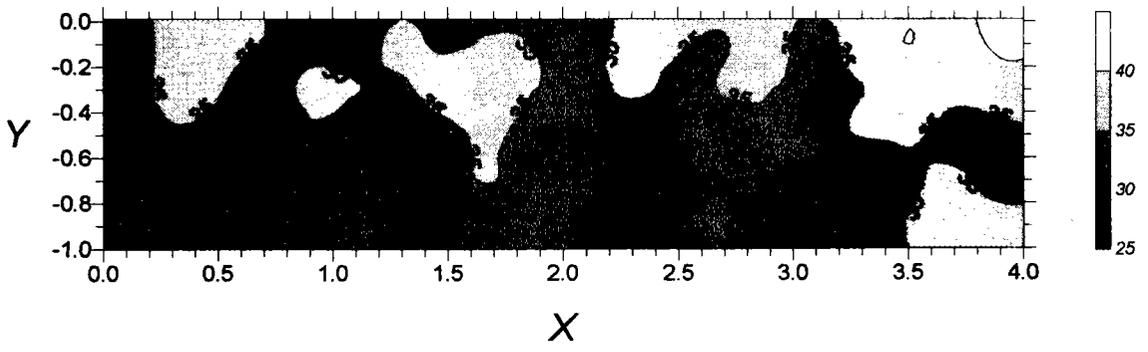


X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 試錘反彈讀數

32	29	29	35	33	32	36	35	37	36	27	34	29	22	30	31	27	35	33	35
27	24	31	25	32	31	30	30	38	37	30	34	30	34	28	35	32	35	32	34
23	33	18	27	24	29	30	34	37	34	31	33	30	29	25	32	32	35	34	35
19	30	28	30	26	20	25	31	36	34	25	29	24	31	30	37	32	29	37	32
28	24	29	27	30	29	27	28	22	34					29	33	29	34	35	

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

SB-24 Hammer



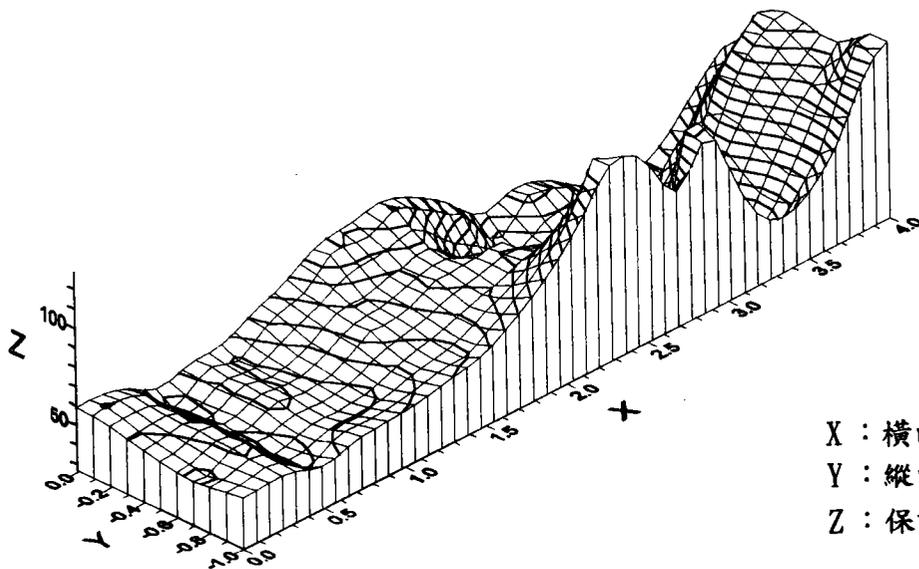
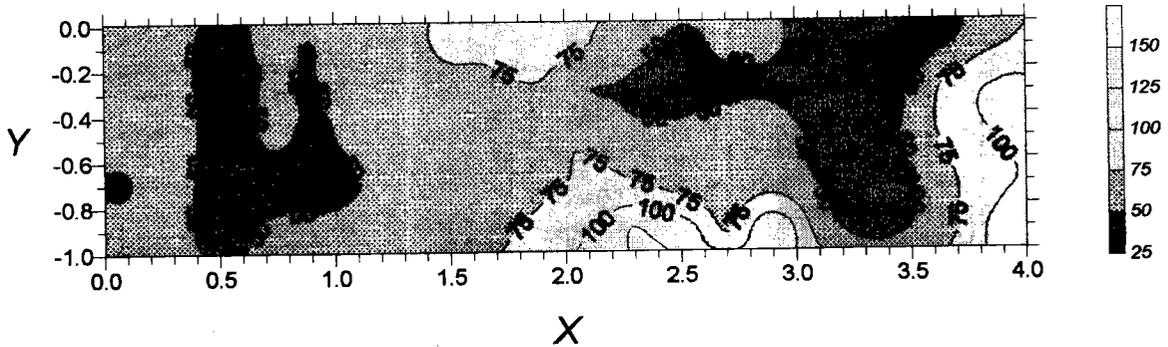
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 試錘反彈讀數

34	36	37	35	33	33	37	33	35	35	33	36	35	34	38	31	39	40	37	41
29	39	36	30	38	35	34	39	41	35	33	37	33	35	35	34	34	38	36	38
31	34	32	31	34	32	31	32	37	28	31	28	35	33	35	32	37	36	33	33
27	27	30	33	33	30	35	35	35	32	35	27	26	34	29	27	27	34	36	32
32	30	30	32	35	32	29	34	32	32	32	31	34	30	27	28	30	36	37	37

圖 4-2 試錘反彈數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

SB-23 cover depth distribution

unit:mm



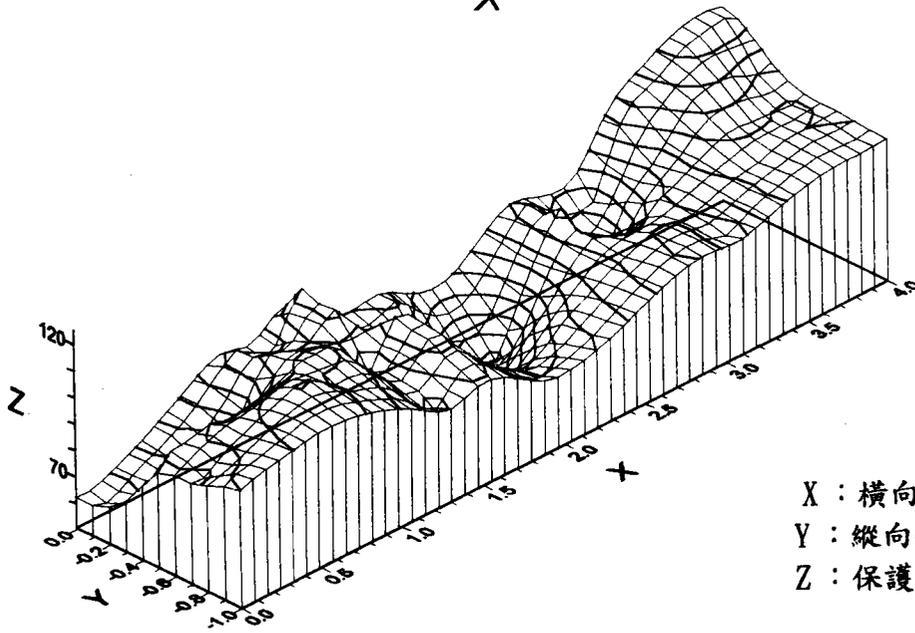
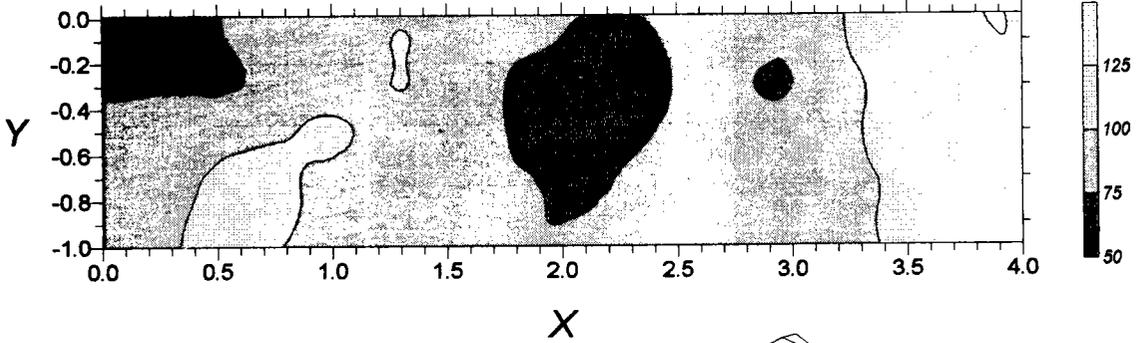
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 保護層厚度(公厘)

61	58	41	54	49	62	66	82	78	86	76	65	41	58	54	39	31	33	51	73
55	57	44	52	49	54	64	65	70	73	48	42	39	41	46	42	29	53	93	109
52	58	44	52	49	53	63	64	72	73	78	59	60	71	62	46	25	60	87	103
49	58	41	47	48	49	56	61	66	71	77	75	54	58	57	49	24	47	76	93
53	55	43	53		58	59				98	129	119	67	132	60	41	50	72	117

圖 4-3 保護層厚度等高線分佈圖 ，(沉箱編號 SB-23)

SB-24 cover depth distribution

unit: mm



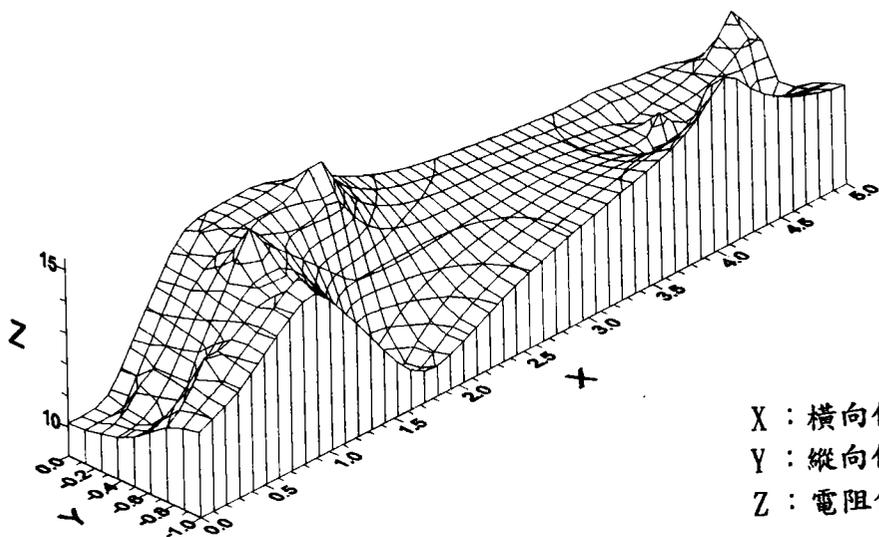
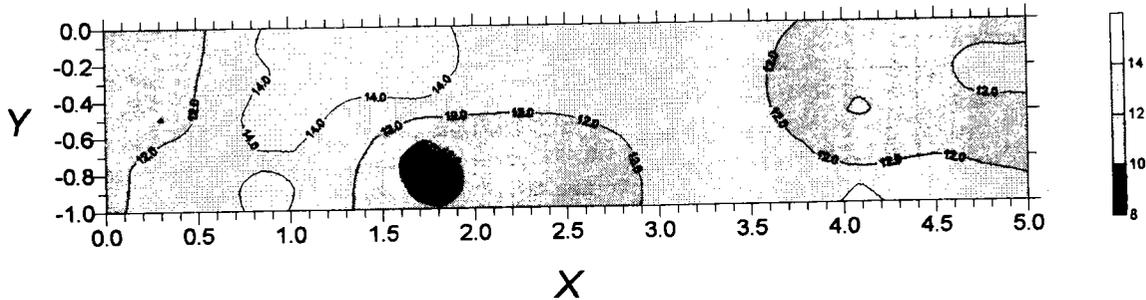
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 保護層厚度(公厘)

61	69	74	84	94	83	106	79	78	82	68	99	83	80	110	116	123	126
68	71	70	78	98	94	103	87	81	61	52	98	63	88	98	113	115	109
95	97	95	98	102	102	84	103	87	48	70	93	88	95	100	106	105	104
88	96	102	107	98	97	87	100	84	75	80	91	96	95	99	101	105	106
97	99	103	102	99	93	82	94	86	75	81	94	97	93	99	103	105	104

圖 4-3 保護層厚度等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

FNB-2 Resistivity

unit: Kohm-cm



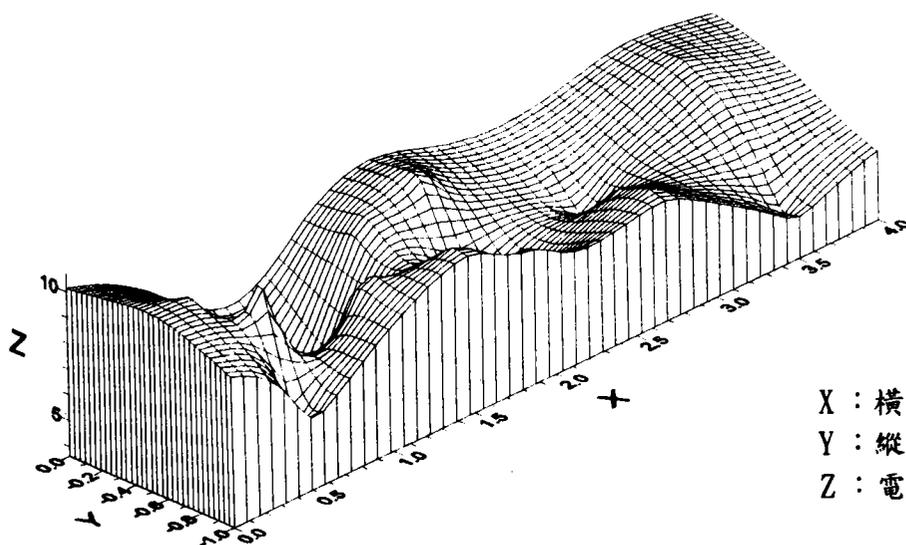
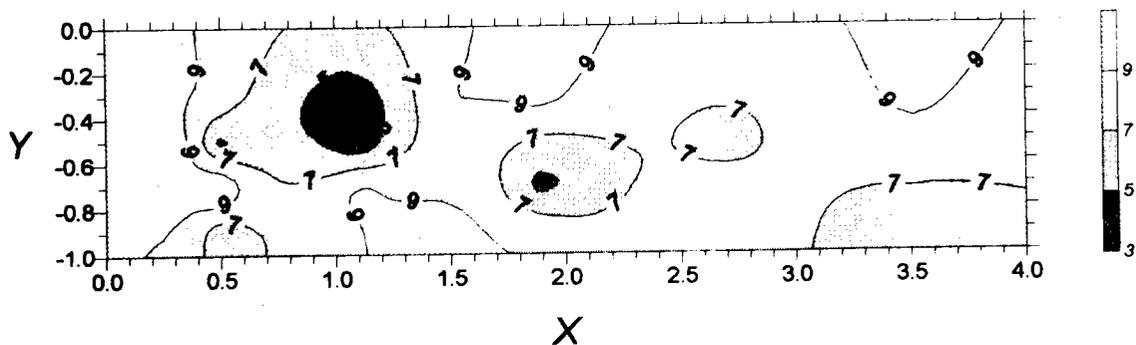
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 電阻係數(kΩ-cm)

10.0	14.6	14.3	12.0	11.3
11.5	13.8	15.8	11.3	14.0
9.8	15.5	12.0	12.5	10.5
13.2	13.4	8.8	9.2	11.8

圖 4-4 電阻係數等高線分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)

SB-18 Resistivity

unit: Kohm-cm



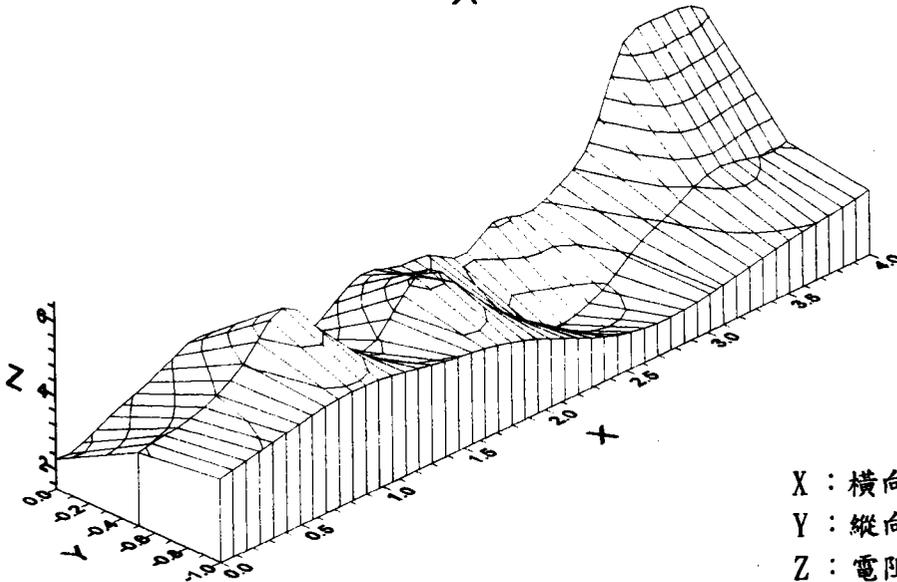
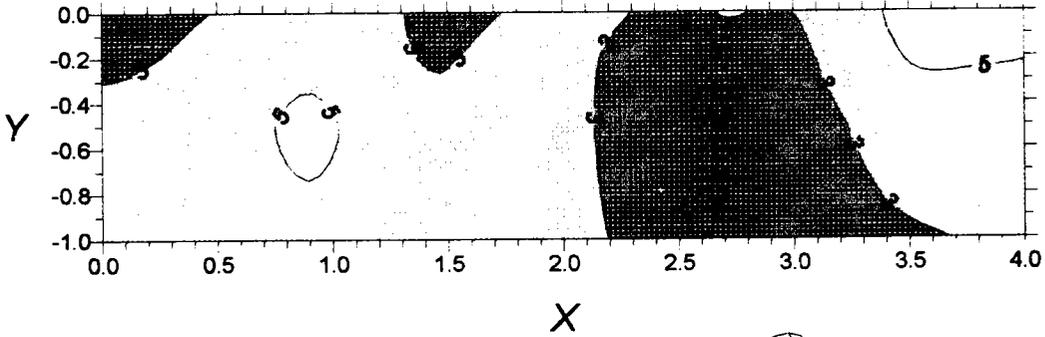
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 電阻係數(kΩ-cm)

9.4	8.5	4.1	9.0	9.8	7.5	9.4
10.3	4.3	3.3	8.1	6.7	6.0	8.7
9.8	11.1	9.4	8.5	4.2	7.9	7.2
8.9	5.7	8.9	9.9	8.5	8.5	5.0

圖 4-4 電阻係數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)

SB-23 Resistivity

unit: Kohm-cm



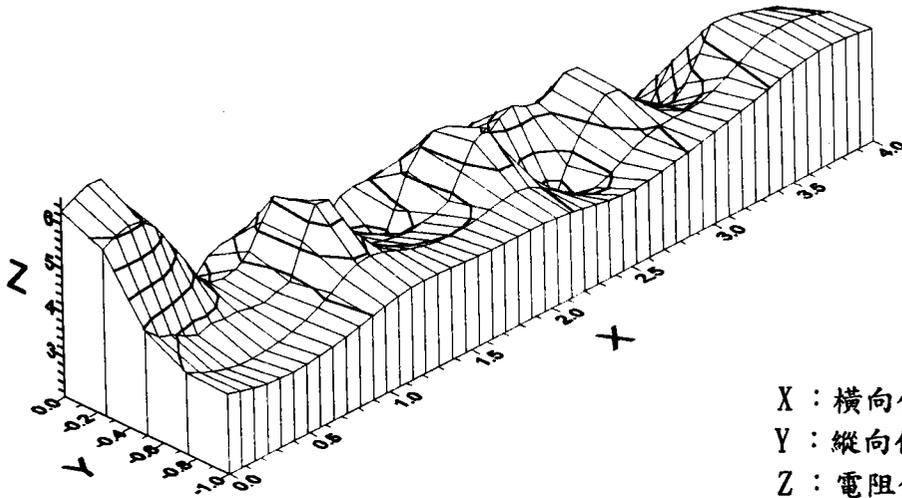
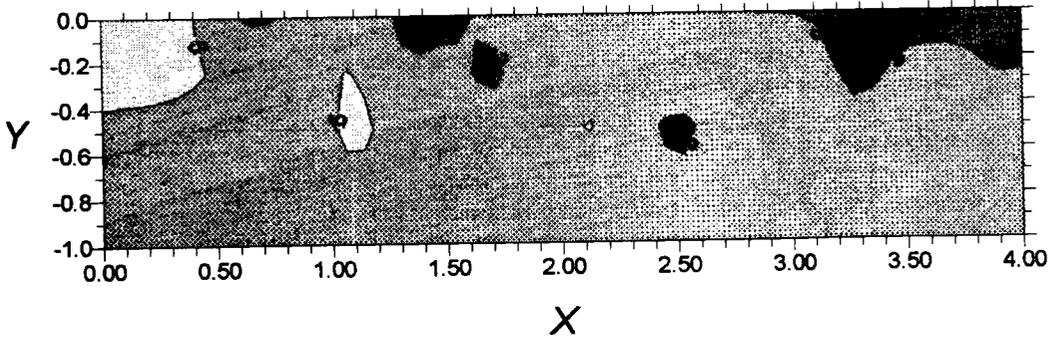
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 電阻係數(kΩ-cm)

2.2	2.9	3.2	3.7	4.4	3.2	3.4	2.1	3.1	3.8	3.0	3.1	1.9	3.2	2.4	3.0	3.3	6.7	6.2	6.3
3.4	3.1	3.7	3.8	7.5	3.9	2.3	2.2	5.9	4.9	2.5	2.8	0.7	1.7	1.8	3.4	3.2	4.8	4.6	3.6

圖 4-4 電阻係數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

SB-24 Resistivity

unit: Kohm-cm



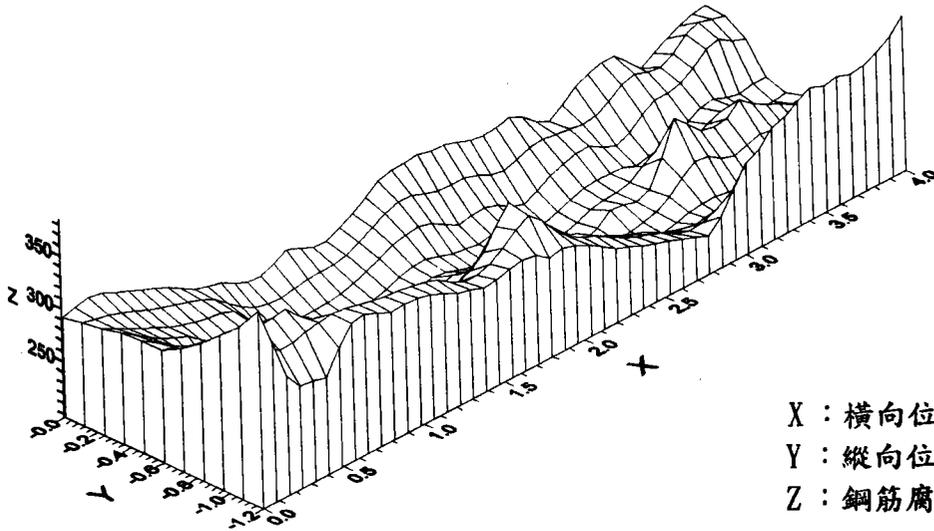
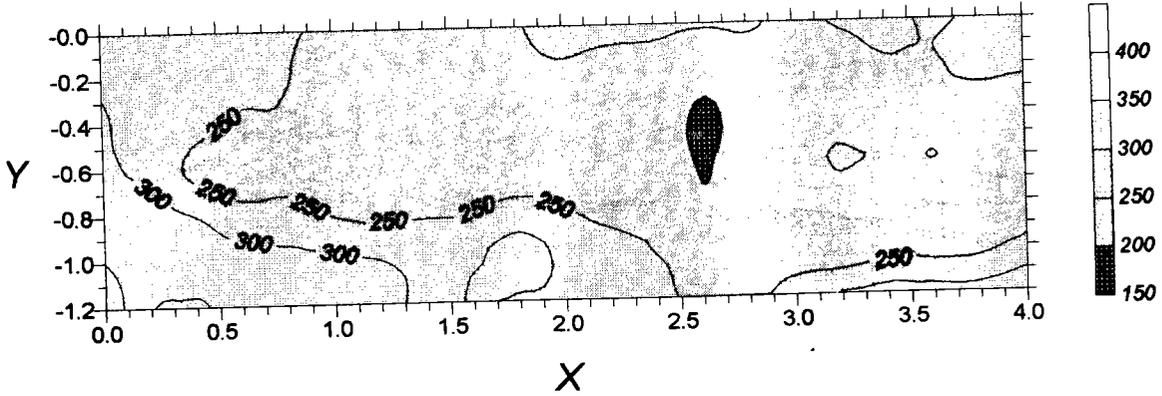
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 電阻係數(kΩ-cm)

6.5	7.3	3.0	2.5	4.1	3.9	3.0	2.2	3.8	3.6	3.8	2.9	4.1	3.3	3.2	3.3	2.1	2.4	2.3	2.7
5.8	5.1	4.2	4.1	5.7	3.0	4.1	2.2	4.5	5.1	4.0	4.5	4.2	5.0	3.8	2.4	3.9	4.0	2.9	
4.1	3.7	3.8	3.7	3.9	5.6	4.0	3.7	3.7	3.9	5.2	3.7	2.4	3.8	4.5	3.6	3.5	4.8	4.7	4.5

圖 4-4 電阻係數等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

SB-8 Potential

unit:-mV



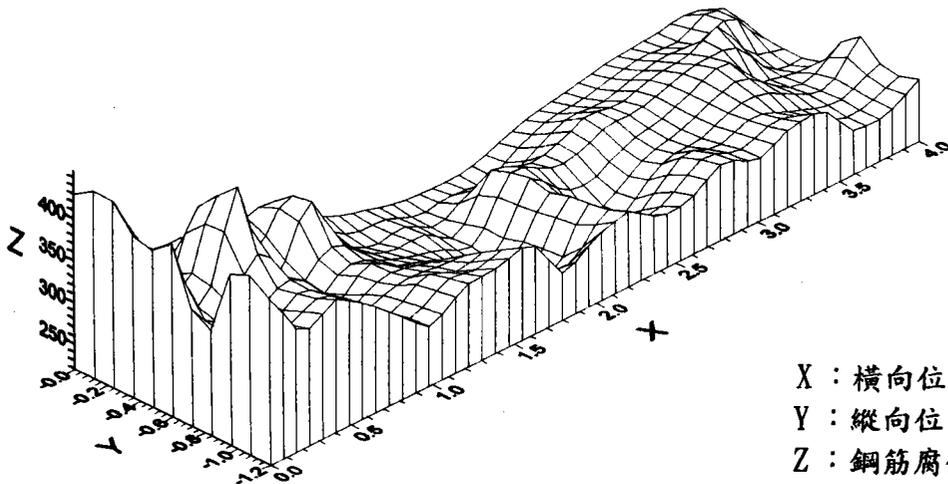
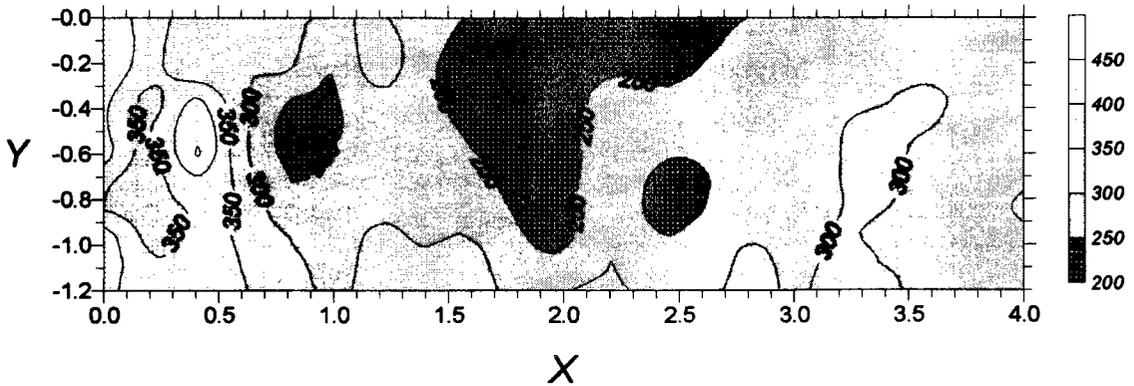
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 鋼筋腐蝕電位值(-mV)

292	299	285	272	254	245	231	243	231	246	268	270	266	255	260	233	257	268	238	256	266
297	282	268	260	255	218	213	214	222	239	246	233	228	209	229	238	219	251	247	283	260
305	282	268	244	248	217	207	207	209	220	210	208	214	194	205	208	204	198	226	207	216
304	290	226	237	247	215	210	216	217	231	220	212	214	197	218	208	275	243	255	236	224
321	320	303	252	263	240	230	244	242	259	250	231	225	202	196	210	218	200	216	208	218
349	335	345	323	316	310	310	284	293	346	281	272	251	241	224	216	201	227	219	224	263
384	292	286	332	318	318	304	294	302	290	287	267	253	243	231	281	306	324	319	320	343

圖 4-5 鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-8)

SB-18 Potential

unit: -mV



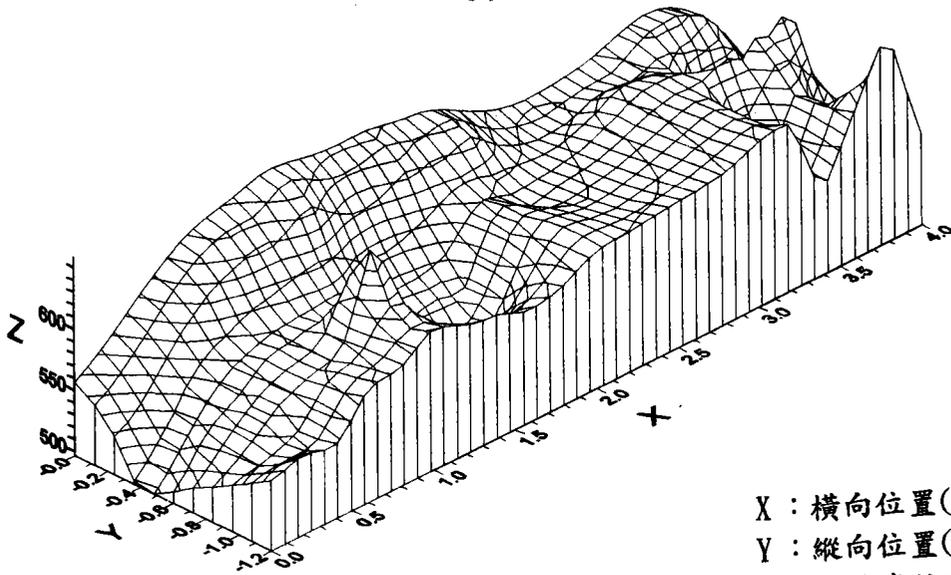
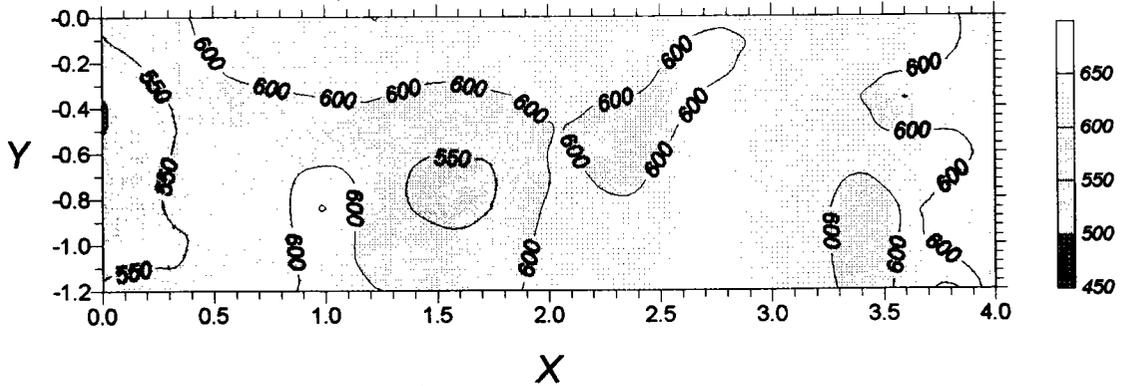
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 鋼筋腐蝕電位值(-mV)

457	375	292	304	322	243	350	254	232	241	217	235	220	248	268	265	277	285	272	310	251
408	312	450	303	238	241	272	258	243	244	216	295	274	275	293	284	297	299	329	251	250
427	327	462	306	236	252	288	265	252	226	221	293	258	253	274	283	299	318	268	262	257
324	316	359	348	253	281	287	285	279	238	230	302	220	244	275	280	300	306	283	267	320
455	338	368	343	307	283	315	294	309	260	233	306	256	273	308	288	305	287	273	272	284
418	356	380	355	321	288	318	321	333	275	300	310	284	287	313	293	314	318	271	270	294

圖 4-5 鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)

SB-19A Potential

unit: -mV



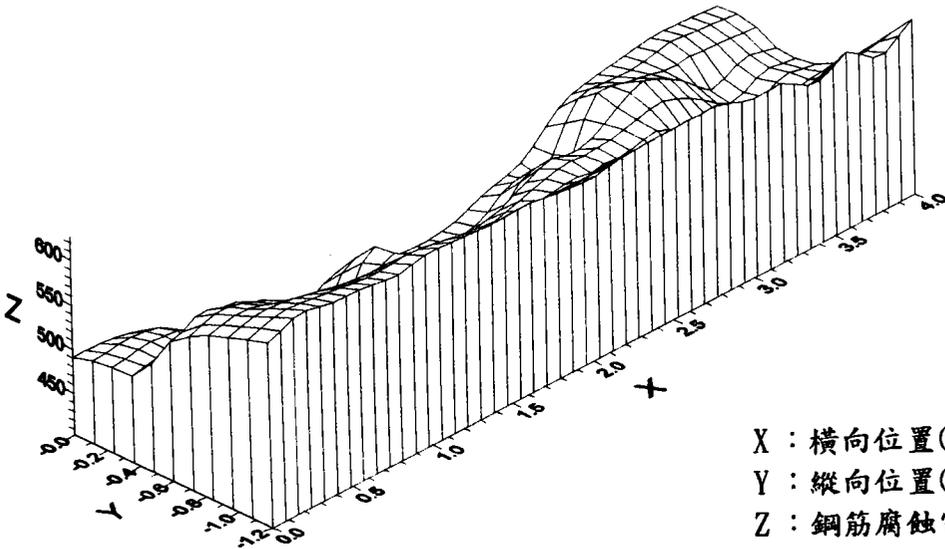
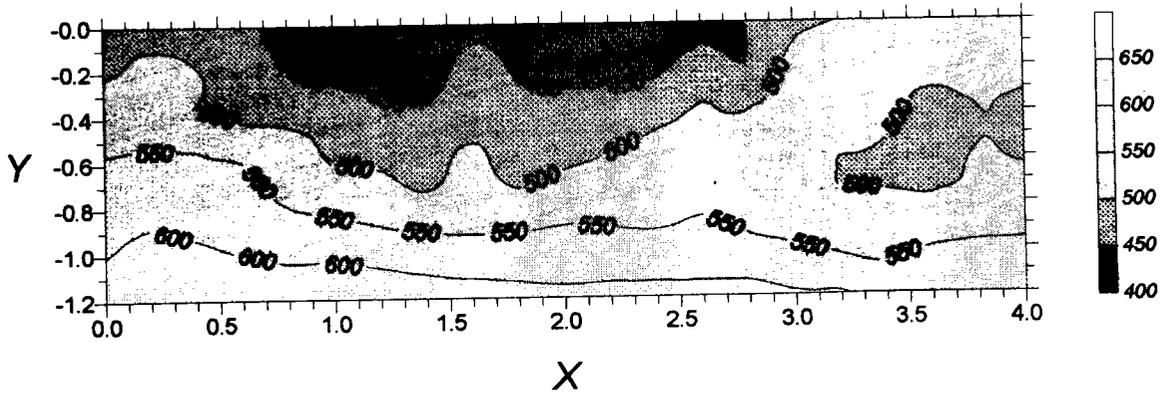
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 鋼筋腐蝕電位值(-mV)

537	556	589	615	628	623	648	625	620	635	620	635	607	596	595	605	600	622	622	610	551
490	525	563	574	584	593	592	575	574	584	604	595	597	599	610	626	623	599	529	551	550
506	541	557	579	583	574	579	553	558	554	606	593	599	602	611	621	523	638	639	658	557
522	543	569	576	580	675	573	544	520	556	607	602	600	606	614	624	625	549	616	562	562
538	541	546	585	588	608	587	572	566	584	611	606	605	610	617	624	625	547	619	566	567
554	464	556	590	593	613	602	598	588	594	608	610	614	616	619	630	633	564	618	671	572

圖 4-5 鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續), (沉箱編號 SB-19(a))

SB-19B Potential

unit: -mV



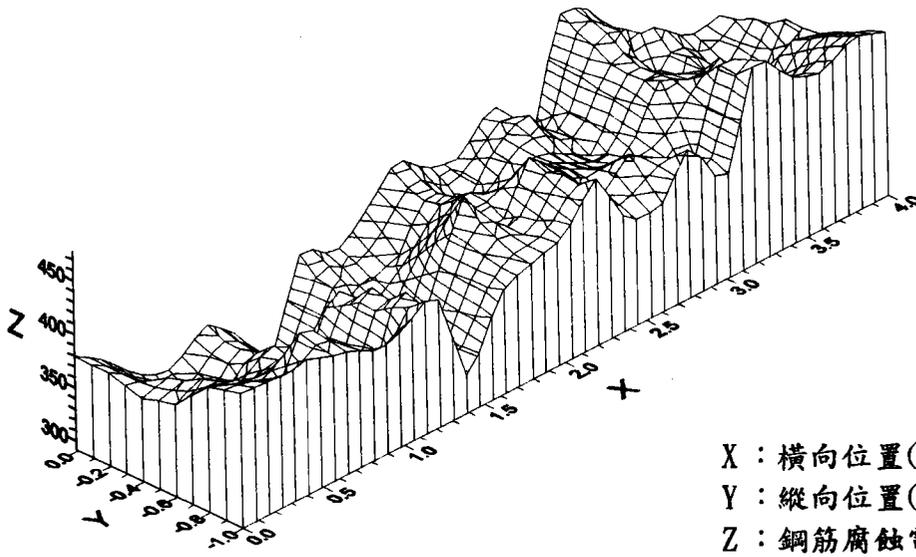
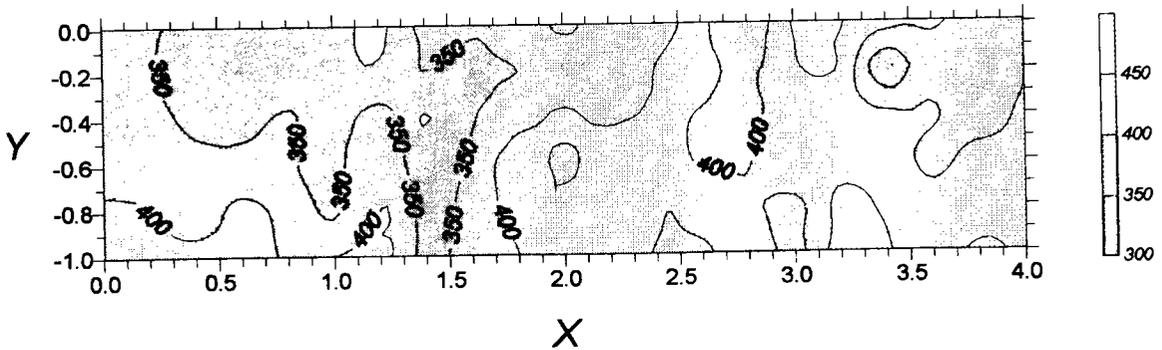
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 鋼筋腐蝕電位值(-mV)

500	508	507	483	444	434	417	402	490	439	435	431	433	474	435	529	515	511	522	515	512
502	507	500	486	498	489	476	462	492	468	471	480	497	511	507	515	538	517	474	501	490
560	579	568	555	519	497	498	485	516	474	493	503	506	504	505	516	498	490	487	505	497
585	593	582	565	547	537	523	505	517	515	533	530	530	548	521	506	504	508	501	510	517
599	610	608	602	598	600	590	583	574	577	578	573	568	567	566	560	540	528	555	560	559
611	627	619	617	611	619	617	615	618	612	607	614	617	618	618	604	606	584	602	573	600

圖 4-5 鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))

SB-23 Potential

unit:-mV



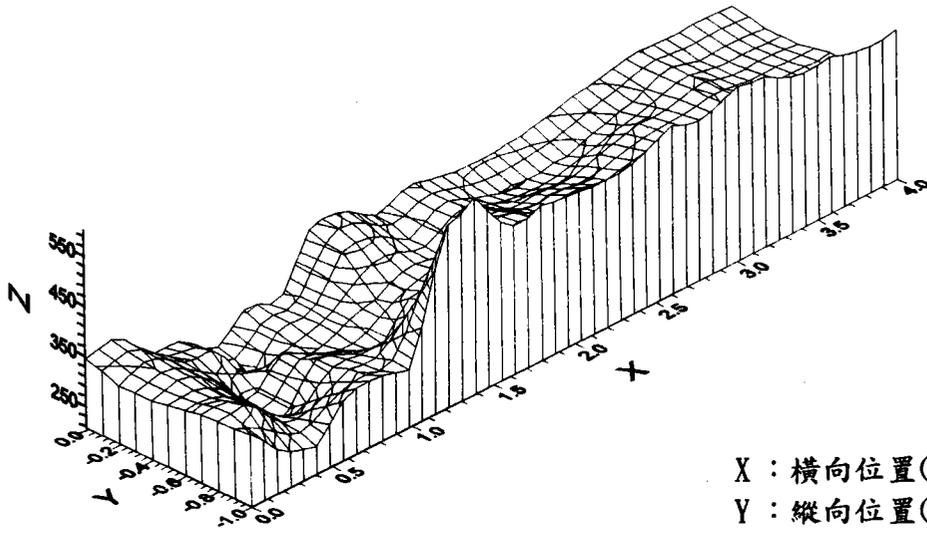
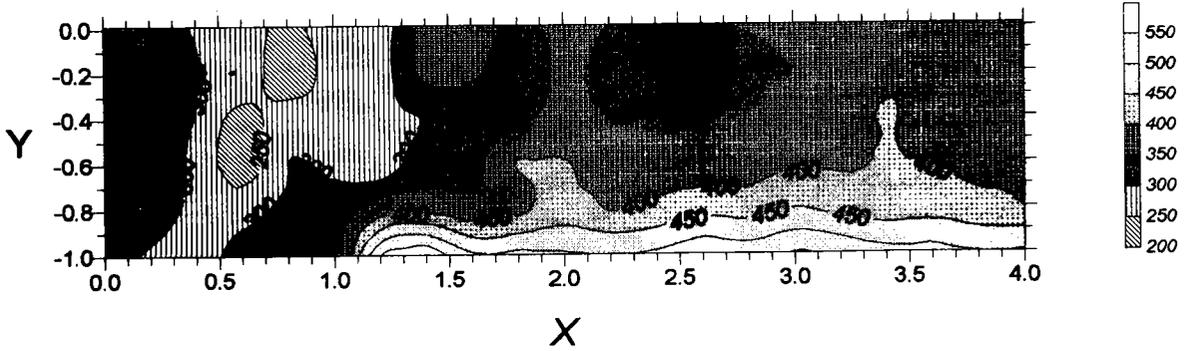
X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 鋼筋腐蝕電位值(-mV)

380	359	330	322	347	322	281	373	350	376	410	384	380	415	340	466	455	423	407	382	387
379	357	311	301	338	316	298	353	336	348	392	358	405	420	388	446	449	375	400	362	400
369	377	332	338	360	321	388	288	347	387	409	391	406	396	379	437	425	414	411	360	414
378	391	370	363	356	330	404	306	366	436	382	440	413	396	395	449	434	425	378	425	414
410	401	365	425	383	332	413	326	376	409	398	438	396	426	406	380	470	438	416	440	430
418	416	419	407	395	401	422	322	386	400	409	449	391	389	436	379	485	450	438	456	445

圖 4-5 鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

SB-24 Potential

unit:-mV



X : 橫向位置(公尺)
 Y : 縱向位置(公尺)
 Z : 鋼筋腐蝕電位值(-mV)

345	360	285	284	228	290	257	383	380	335	365	349	343	346	356	374	384	401	396	401	396
320	345	303	304	199	277	275	369	360	320	360	336	315	319	325	348	370	402	384	388	382
324	340	298	218	294	254	285	300	331	318	382	346	350	344	368	386	386	405	386	390	382
337	331	290	209	307	293	260	340	338	410	407	372	384	369	383	390	396	403	398	398	397
346	356	278	280	319	316	377	379	350	380	422	392	405	430	418	450	420	411	423	408	399
352	279	258	338	338	320	588	604	506	516	507	500	510	545	525	557	547	516	520	502	506

圖 4-5 鋼筋腐蝕電位值等高線分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

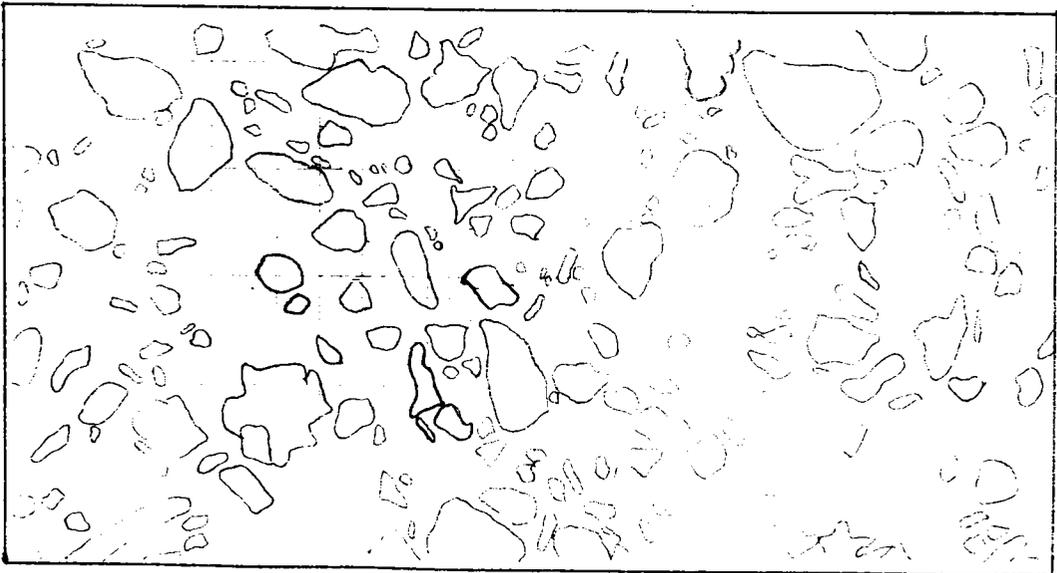
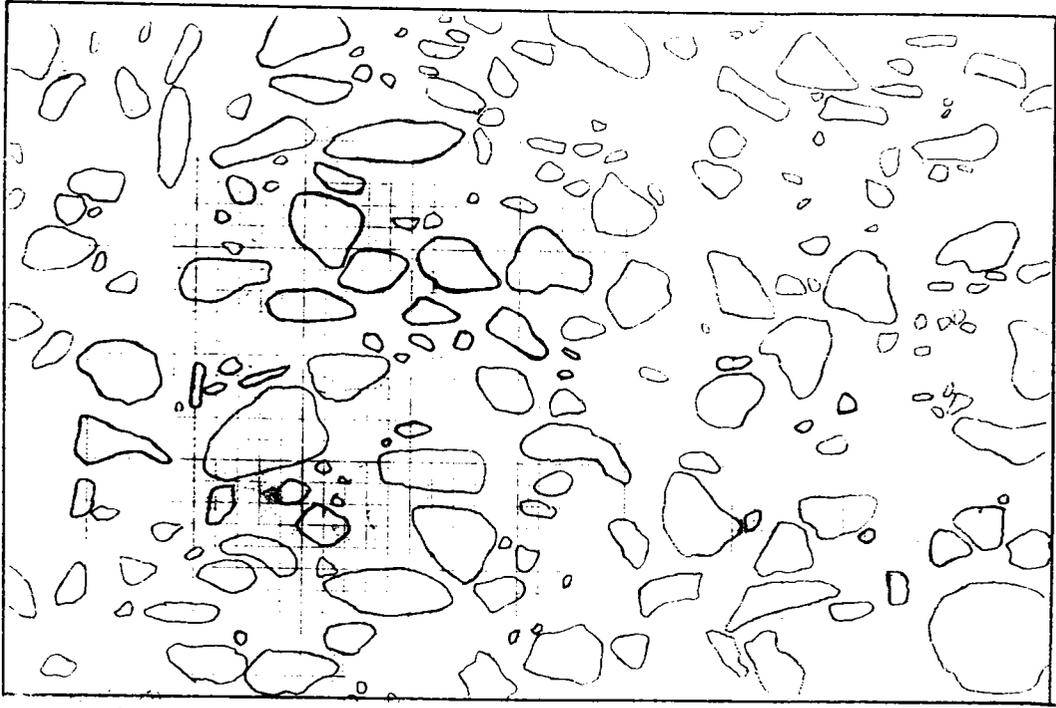


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖，(沉箱編號 FNB-2)

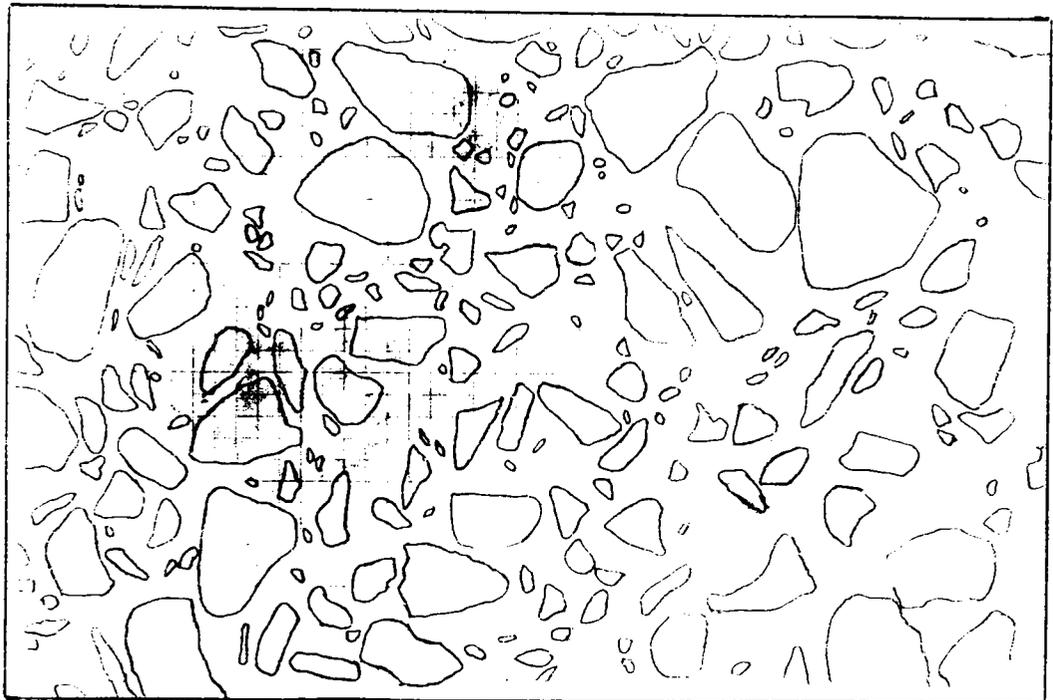
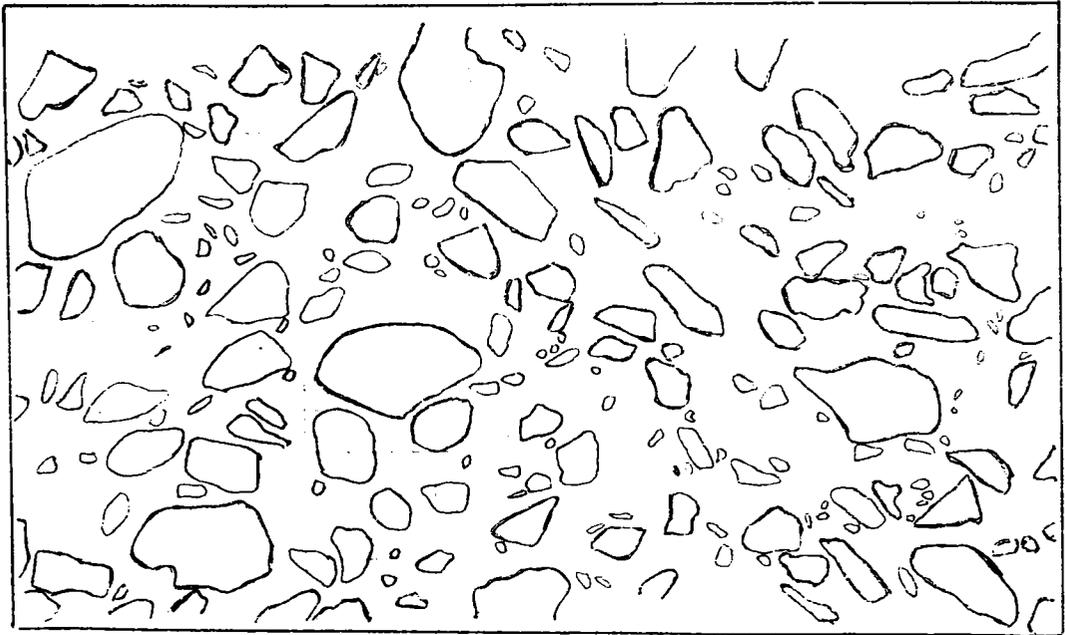


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)

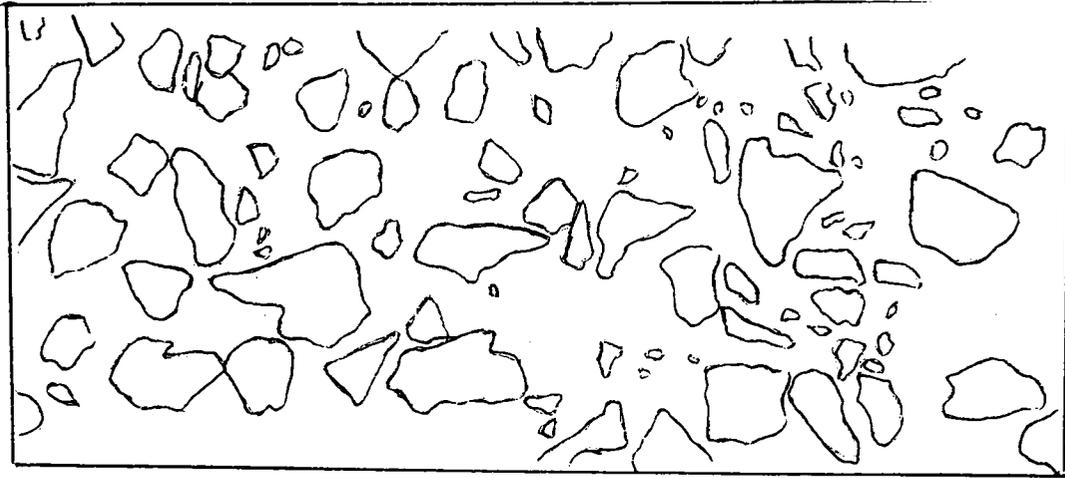


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-8)

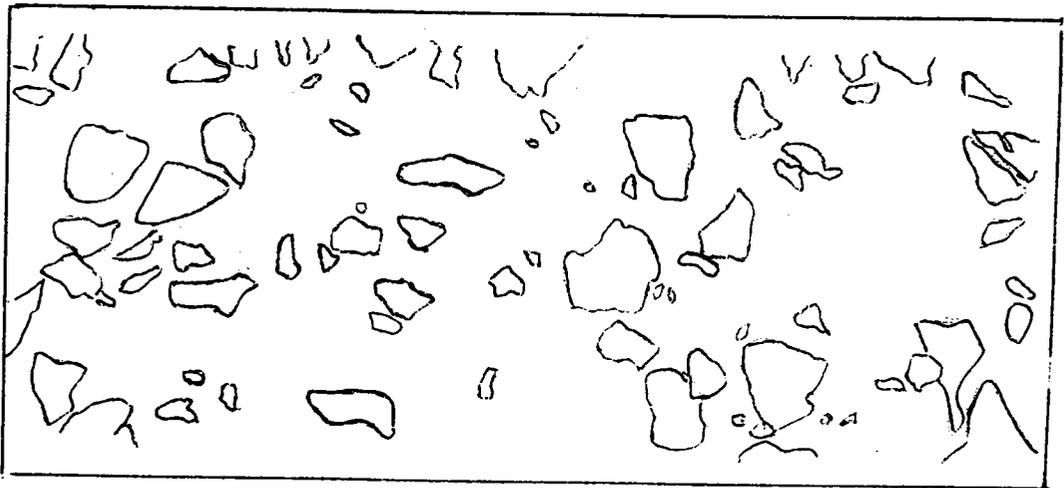


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-18)

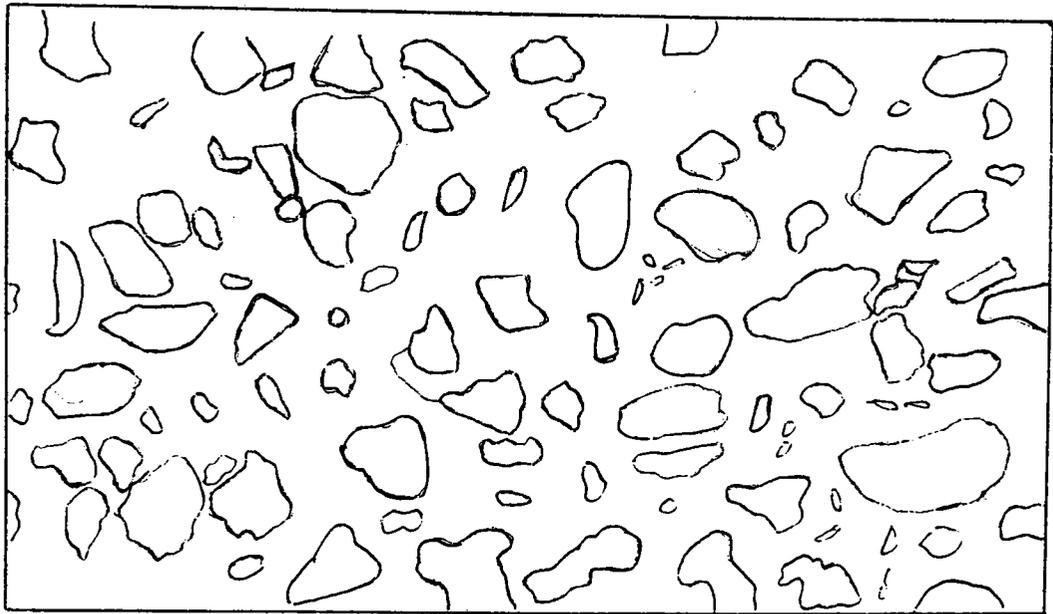


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-19)

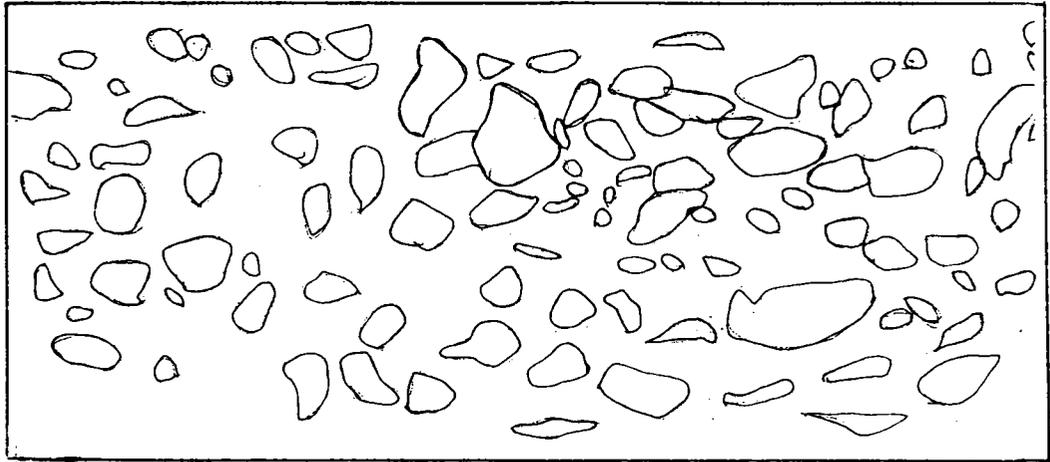
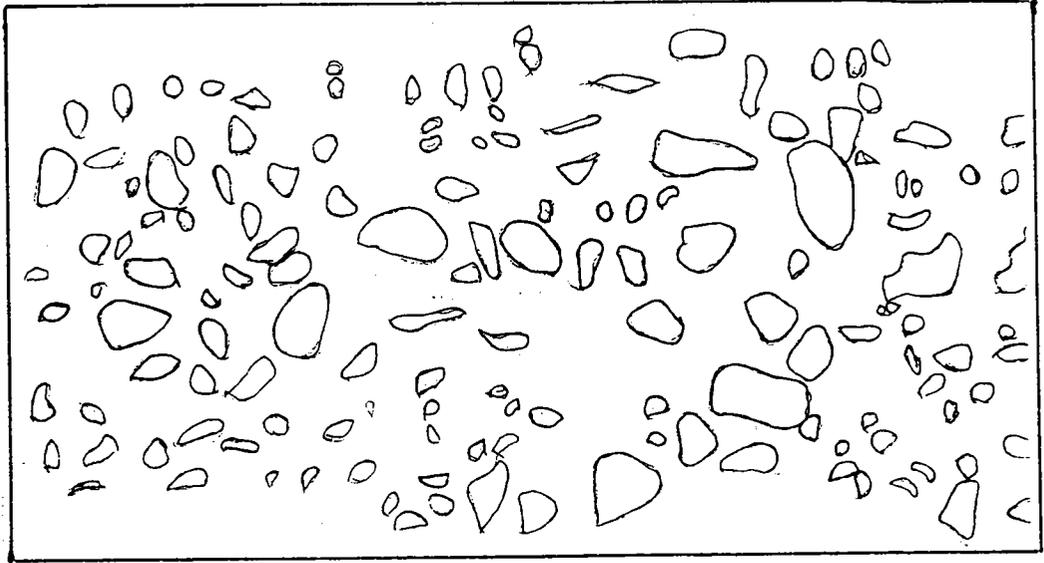


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

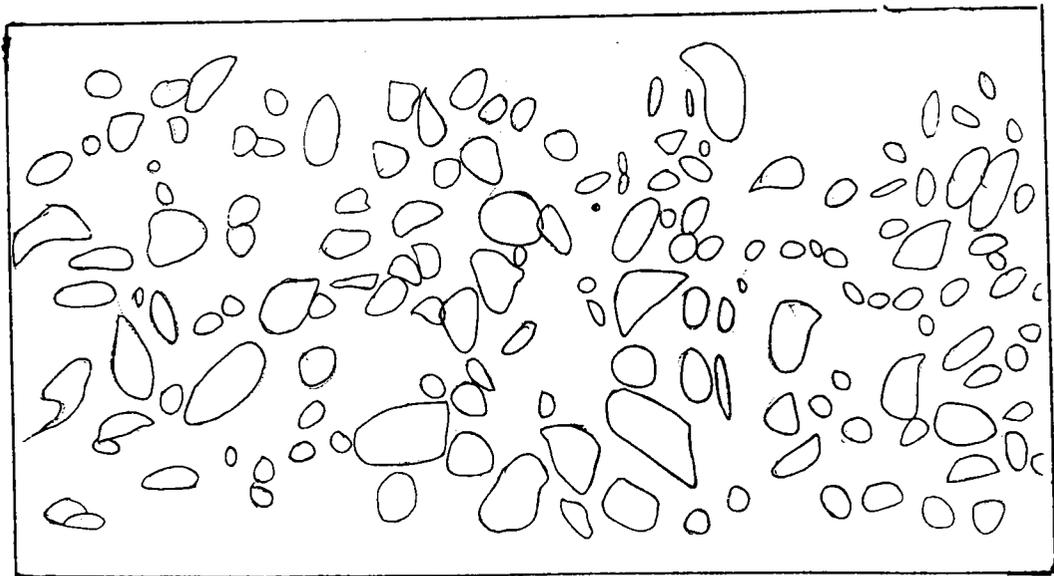
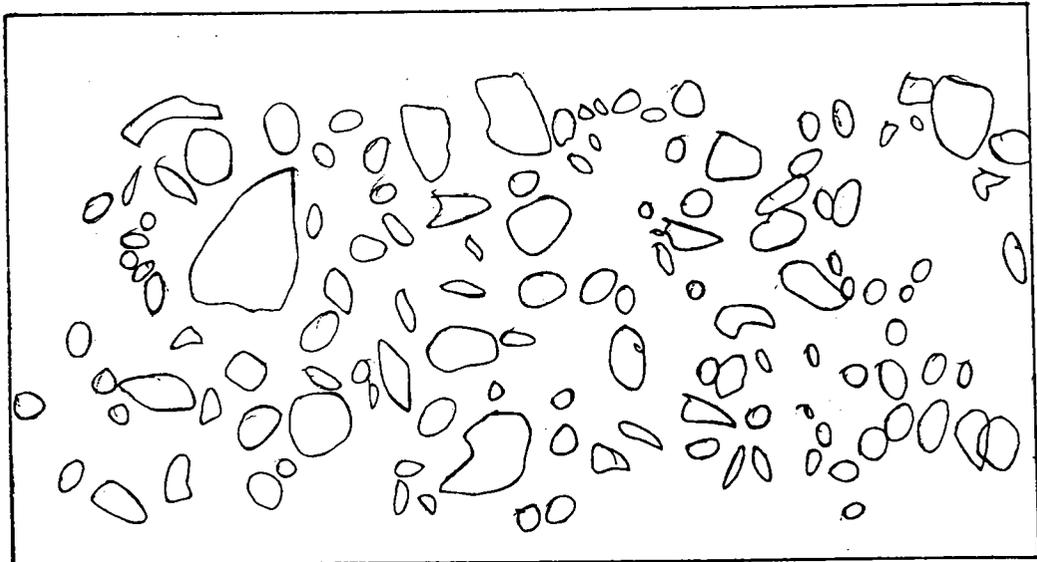


圖 4-6 鑽心試體外觀骨材分佈描繪圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

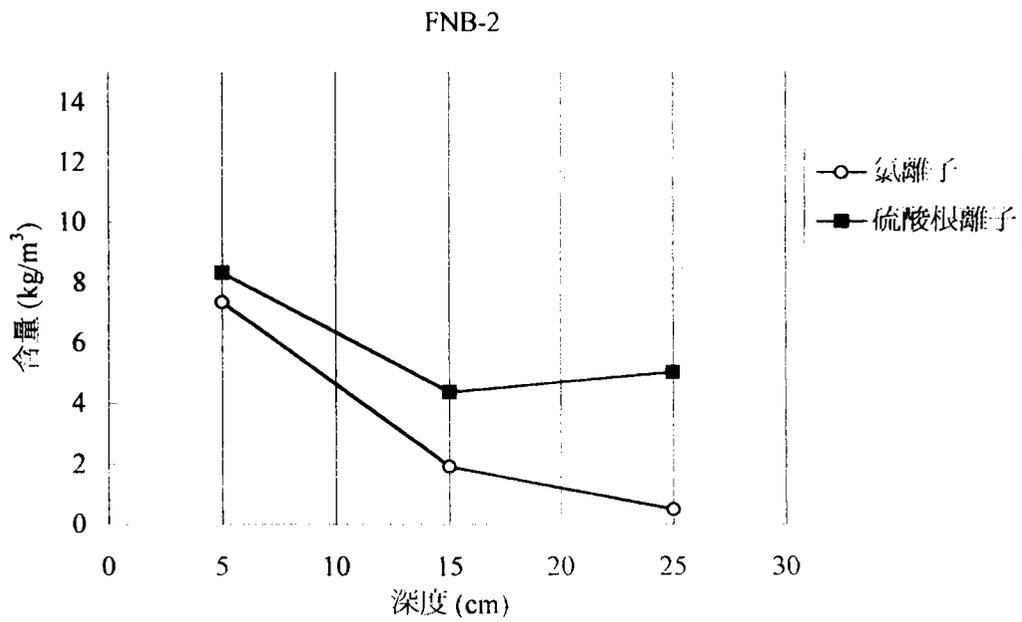


圖 4-7 Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)

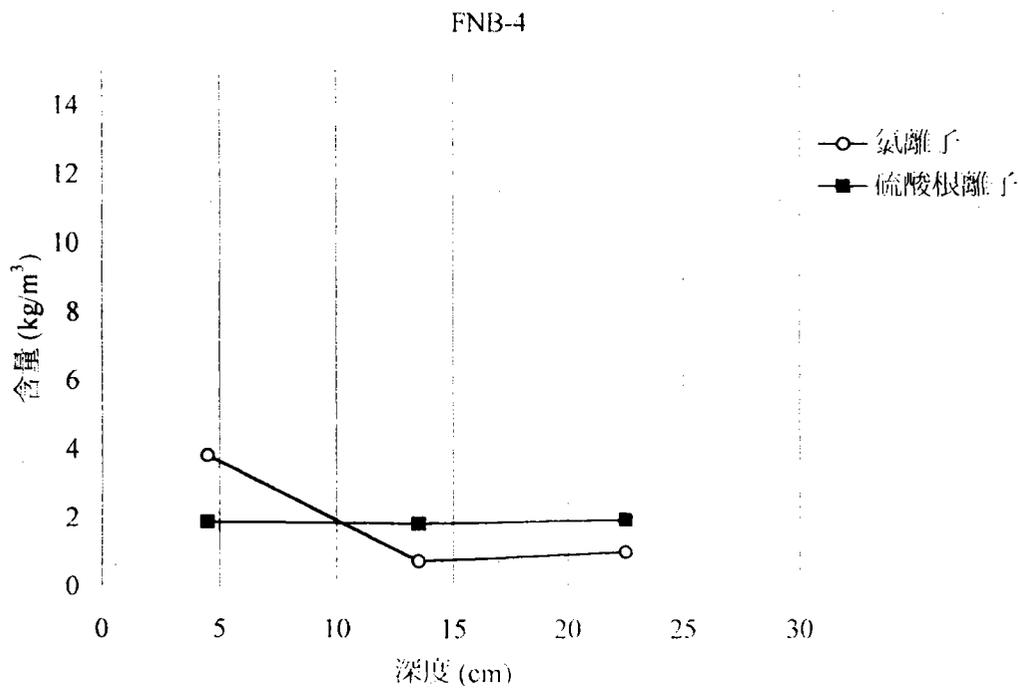


圖 4-7 Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)

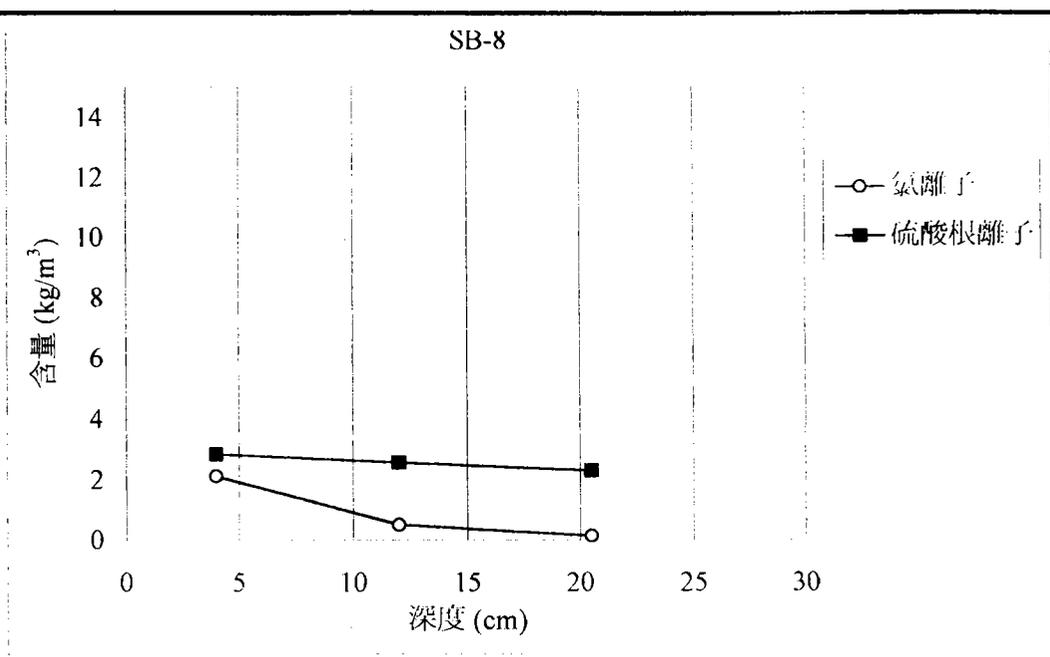


圖 4-7 Cl⁻及 SO₄²⁻含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-8)

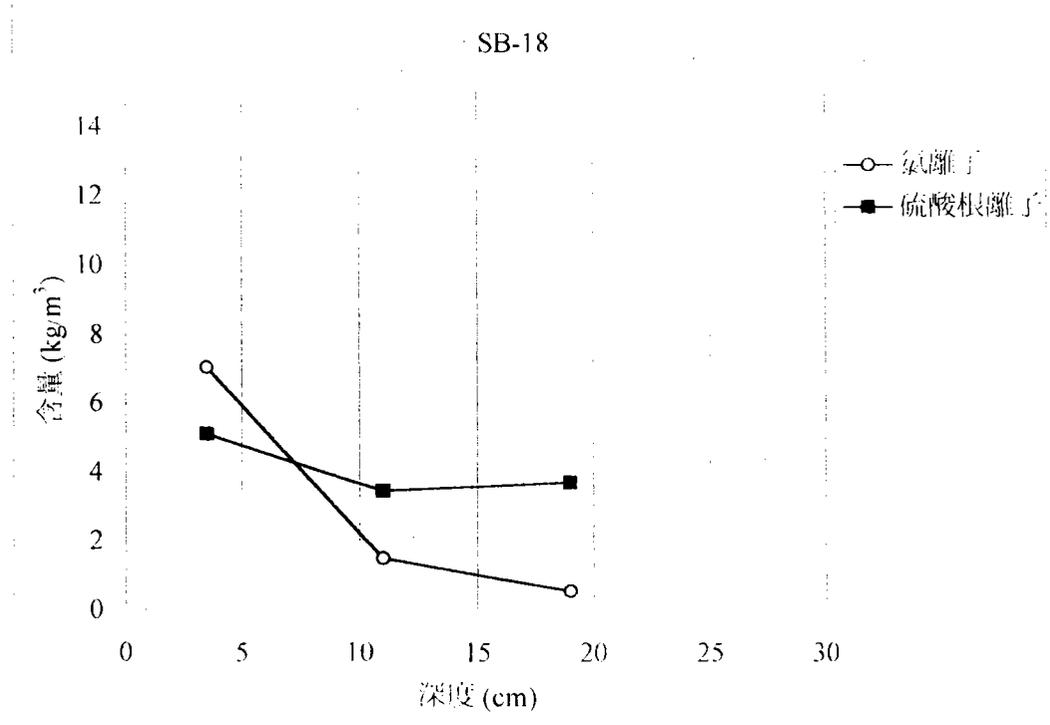


圖 4-7 Cl⁻及 SO₄²⁻含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-18)

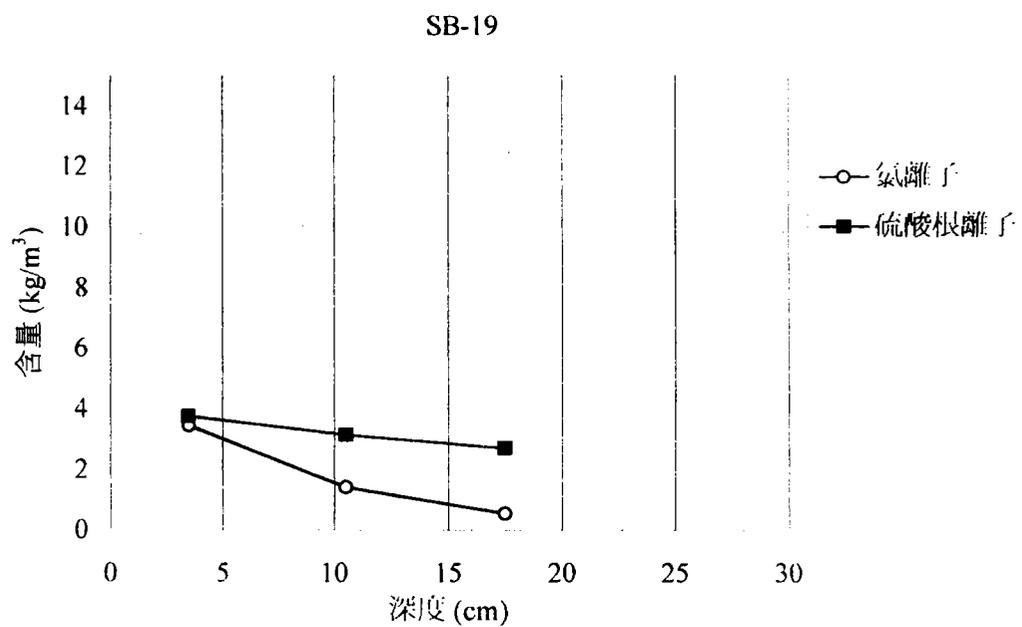


圖 4-7 Cl^- 及 SO_4^{2-} 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19)。

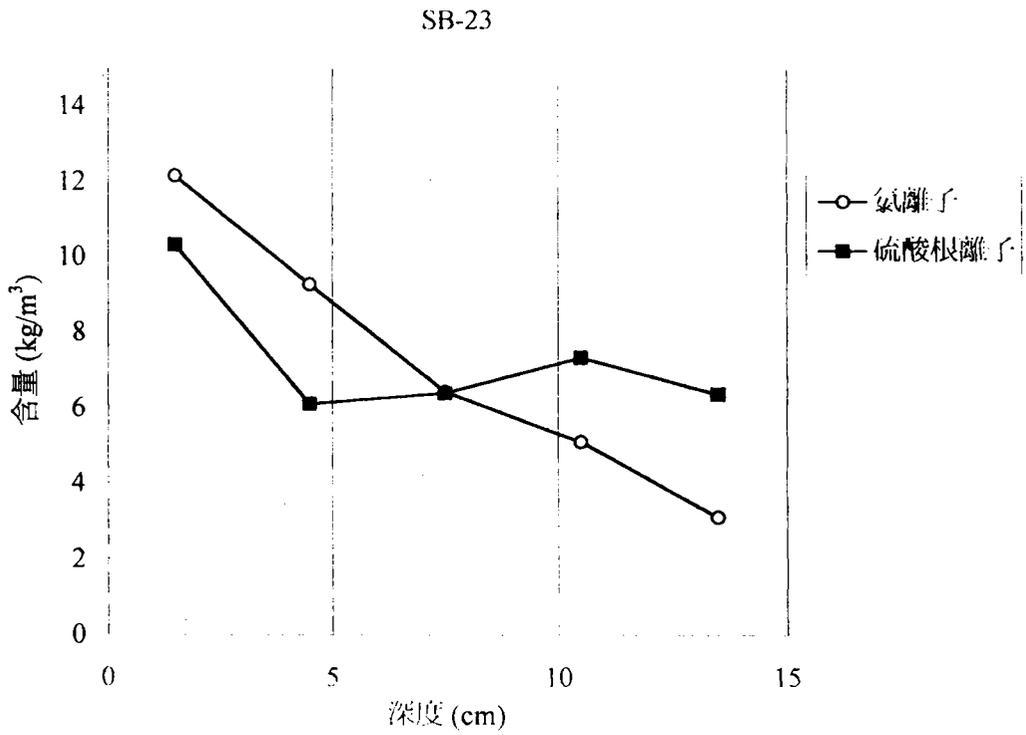


圖 4-7 Cl⁻ 及 SO₄²⁻ 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

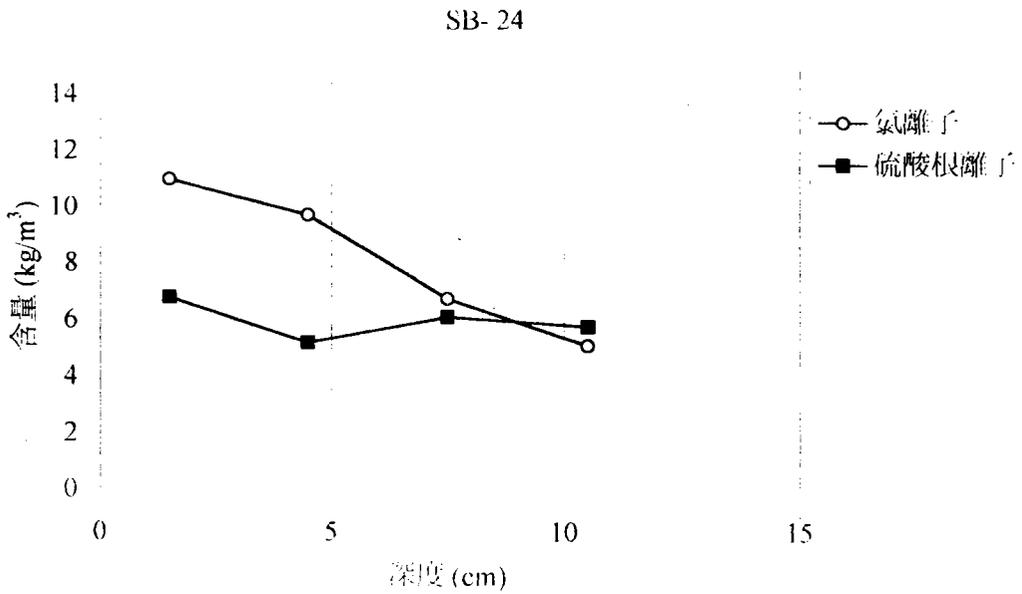


圖 4-7 Cl⁻ 及 SO₄²⁻ 含量分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

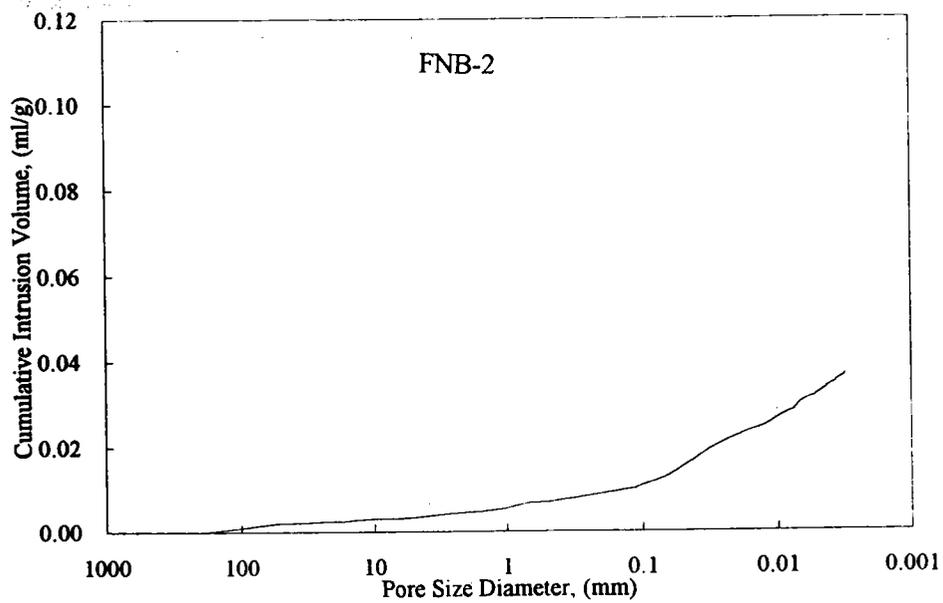


圖 4-8 試體孔隙分佈圖，(沉箱編號 FNB-2)

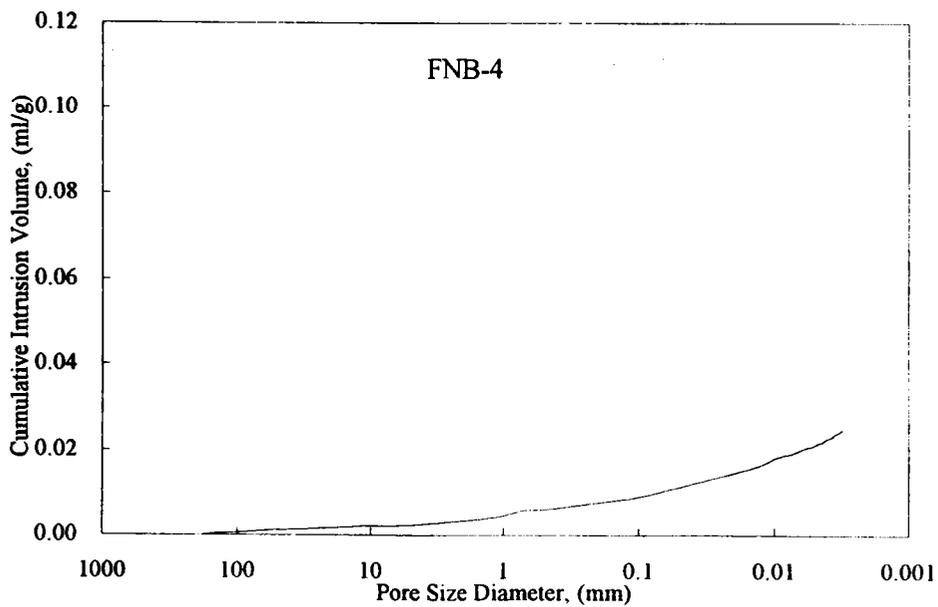


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)

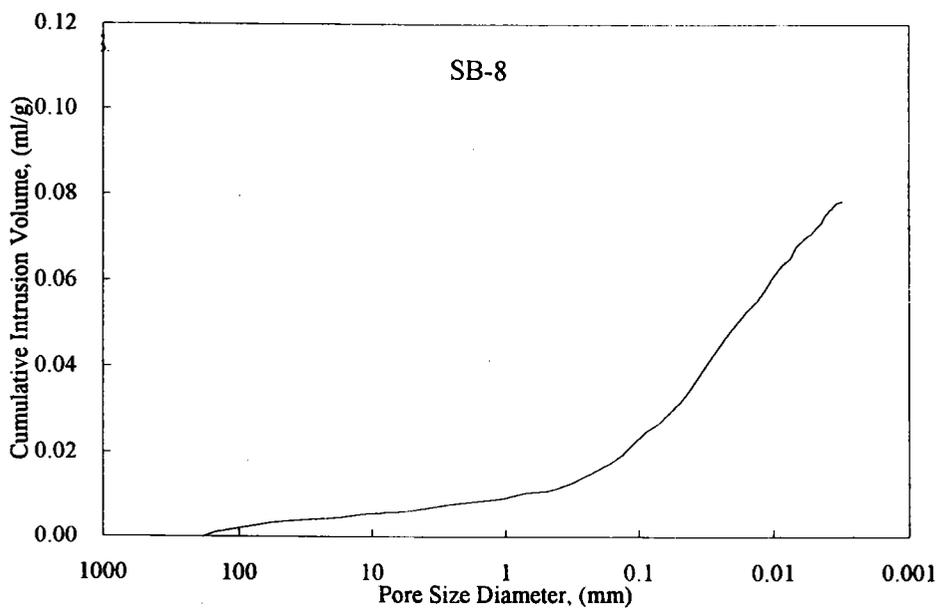


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)。(沉箱編號 SB-8)

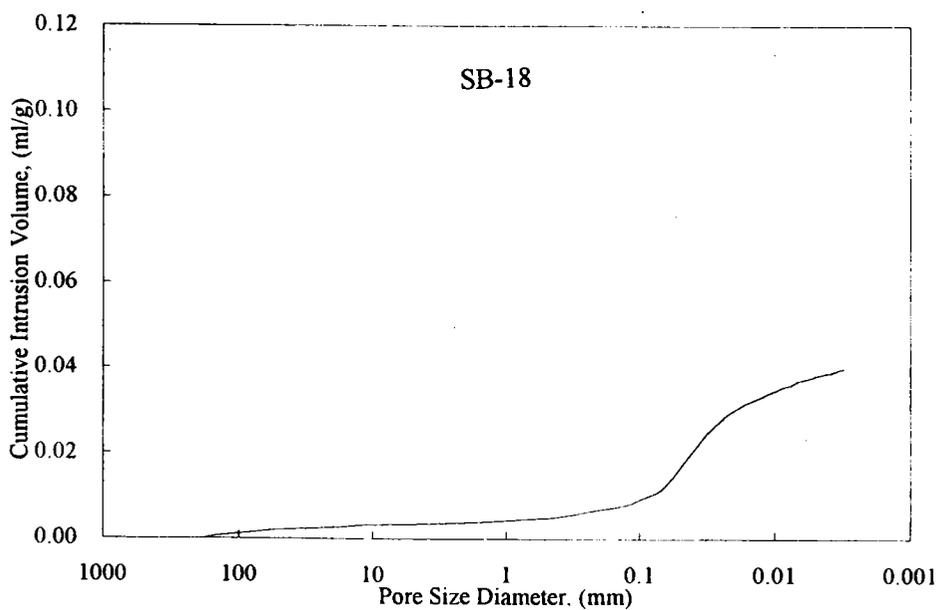


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)。(沉箱編號 SB-18)

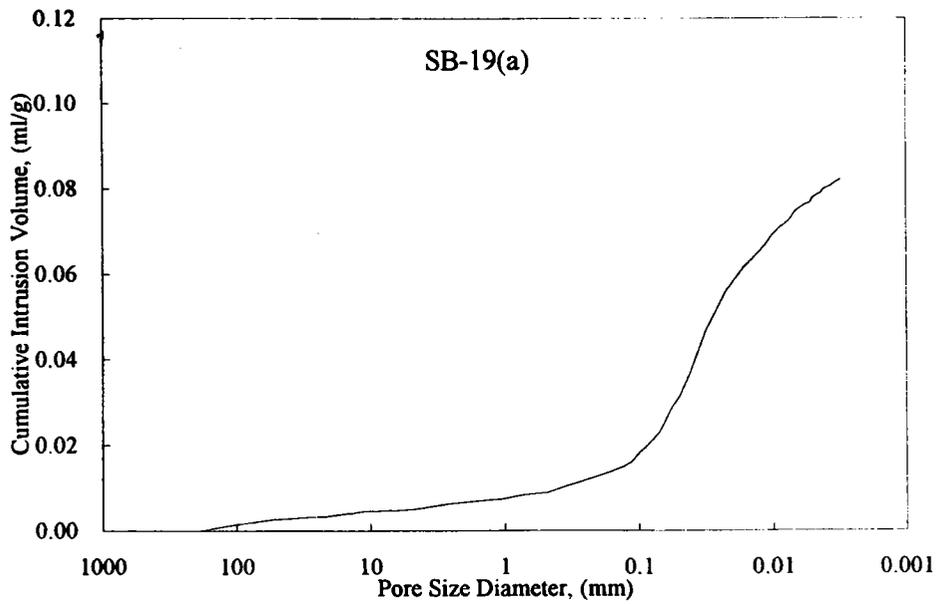


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))

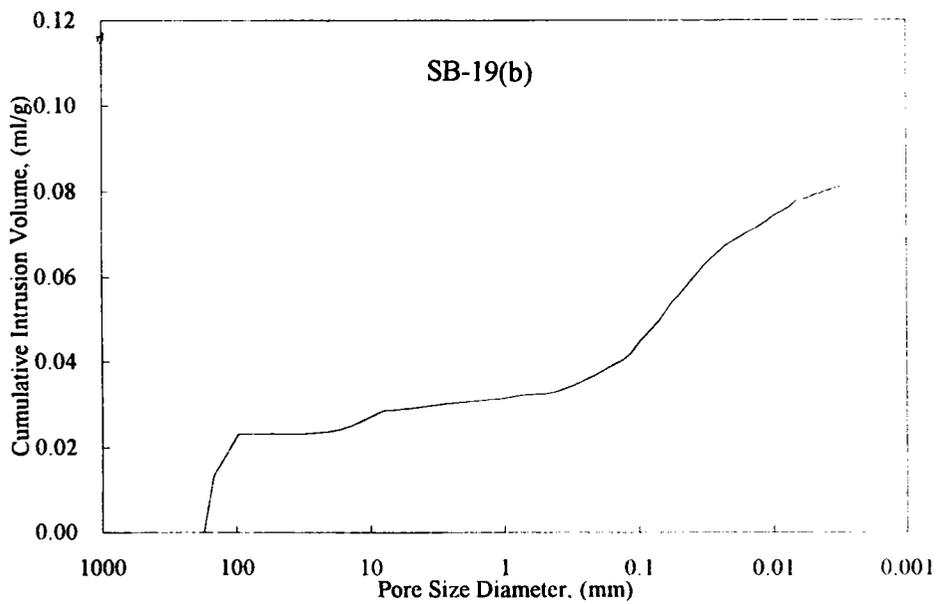


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))

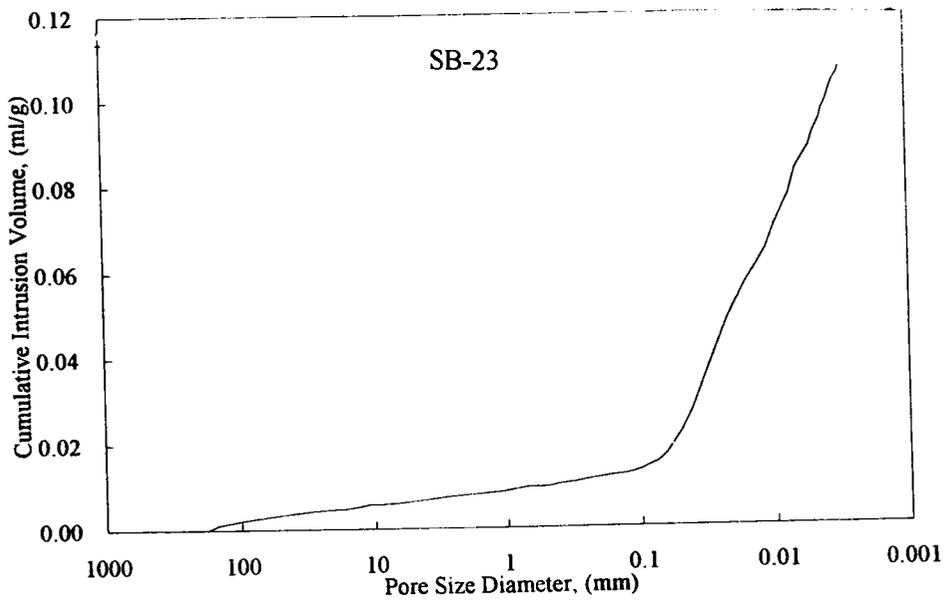


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

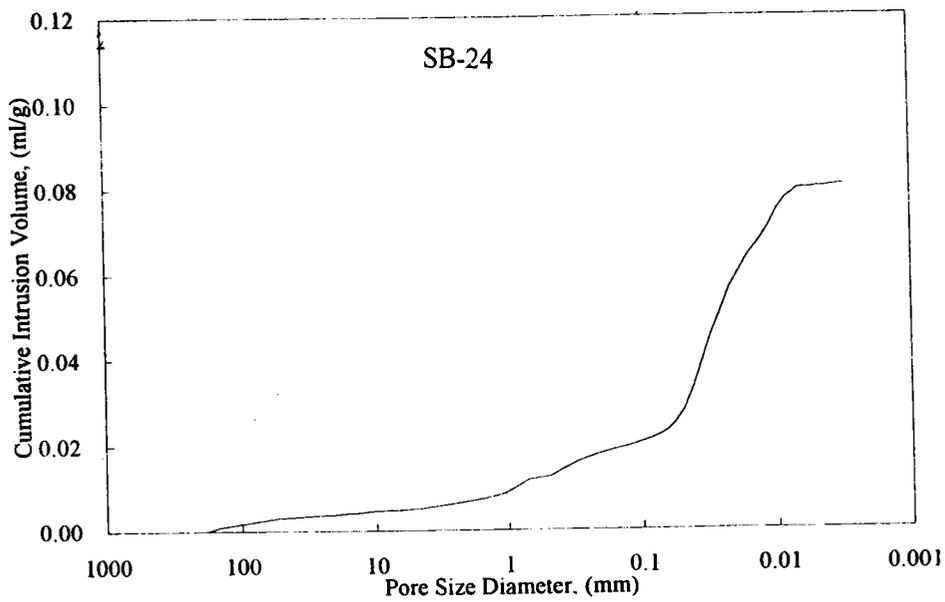


圖 4-8 試體孔隙分佈圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

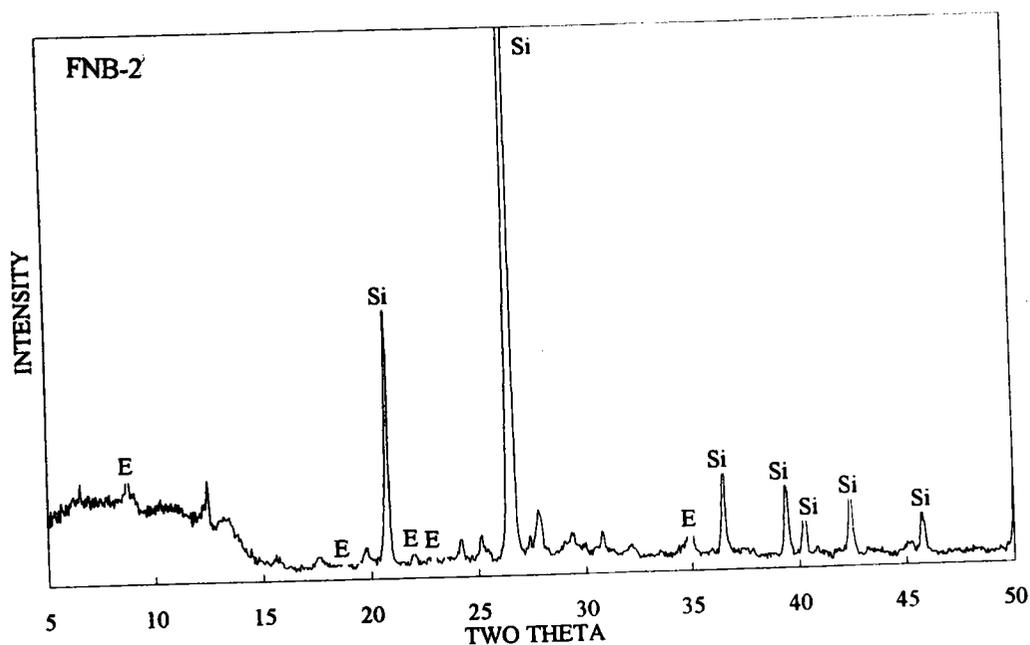


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 FNB-2)

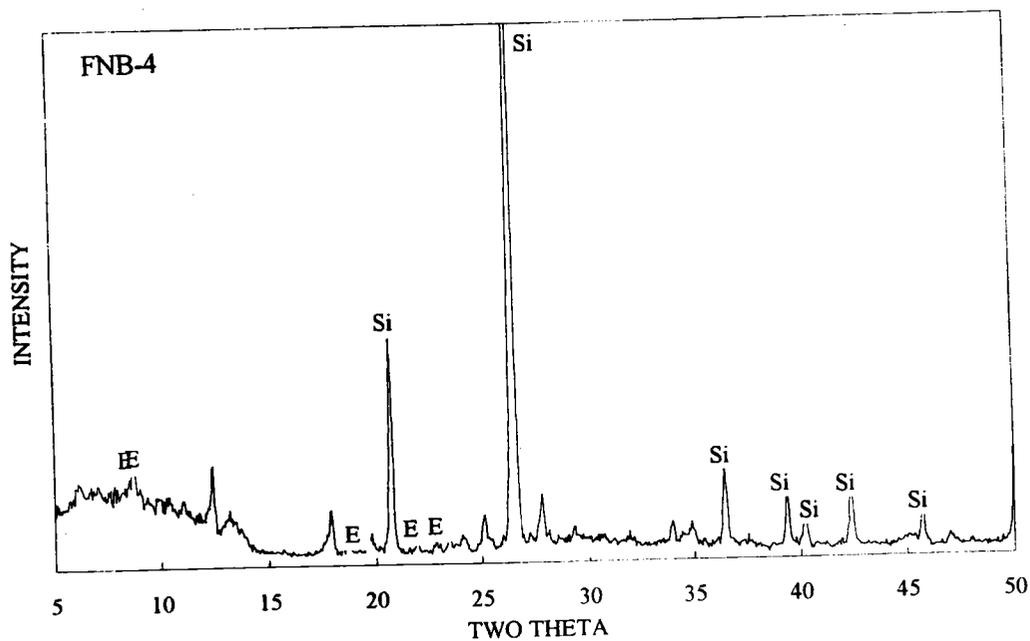


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 FNB-4)

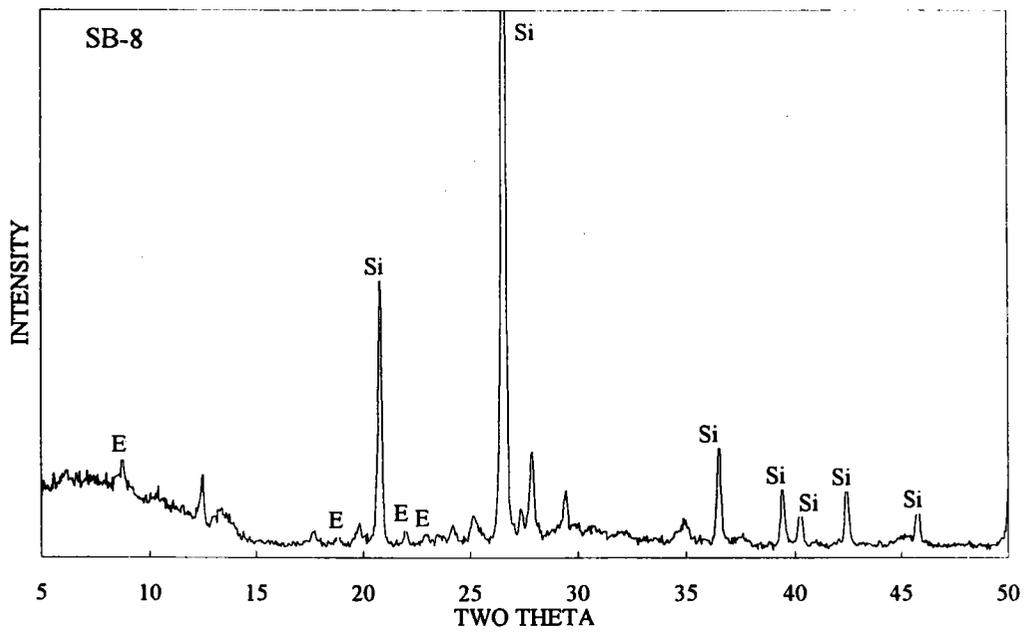


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-8)

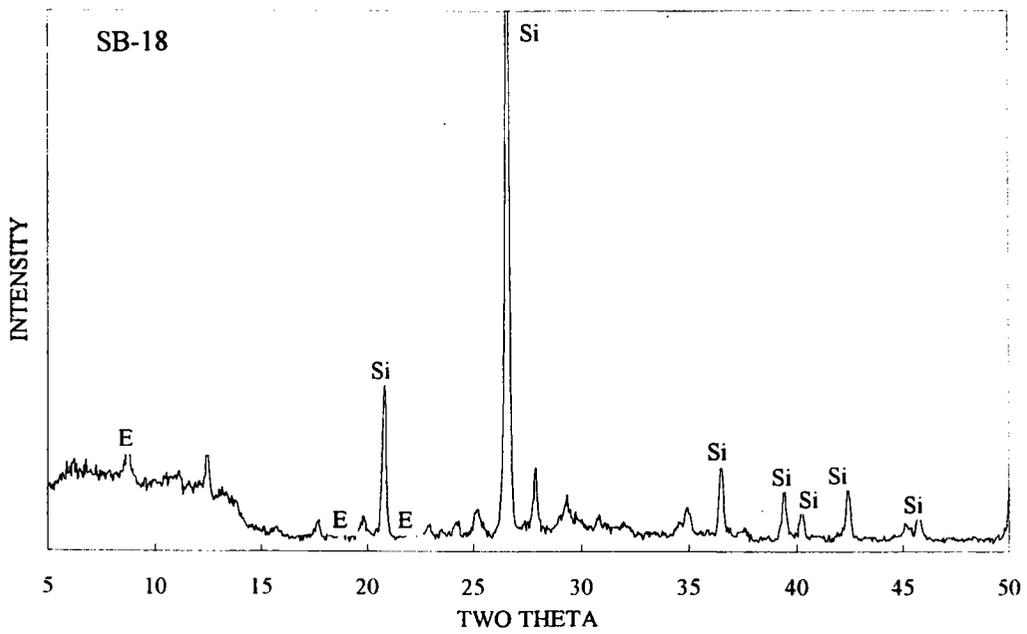


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-18)

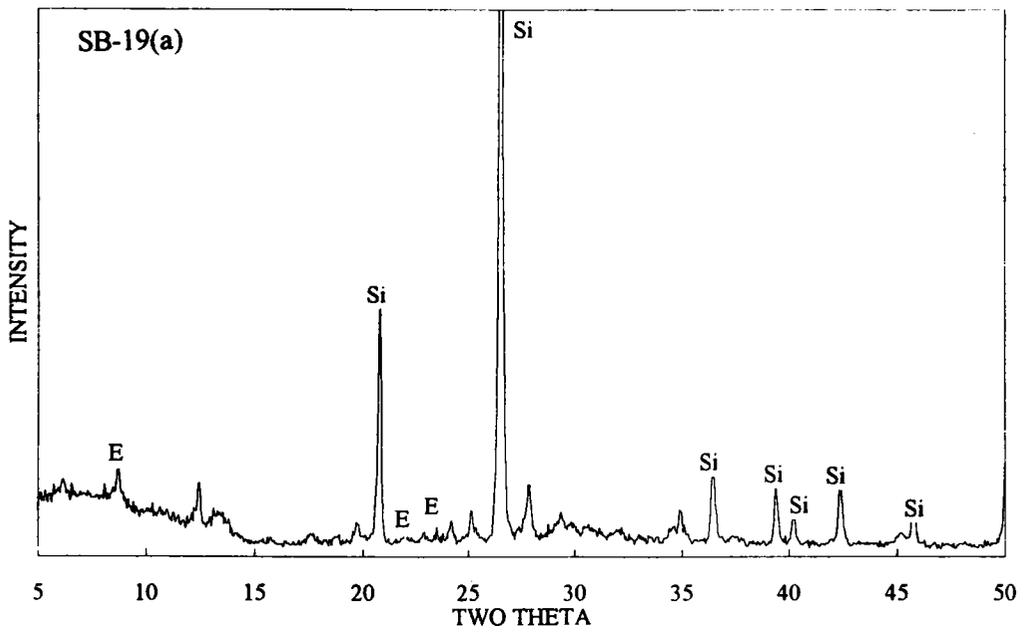


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-19(a))

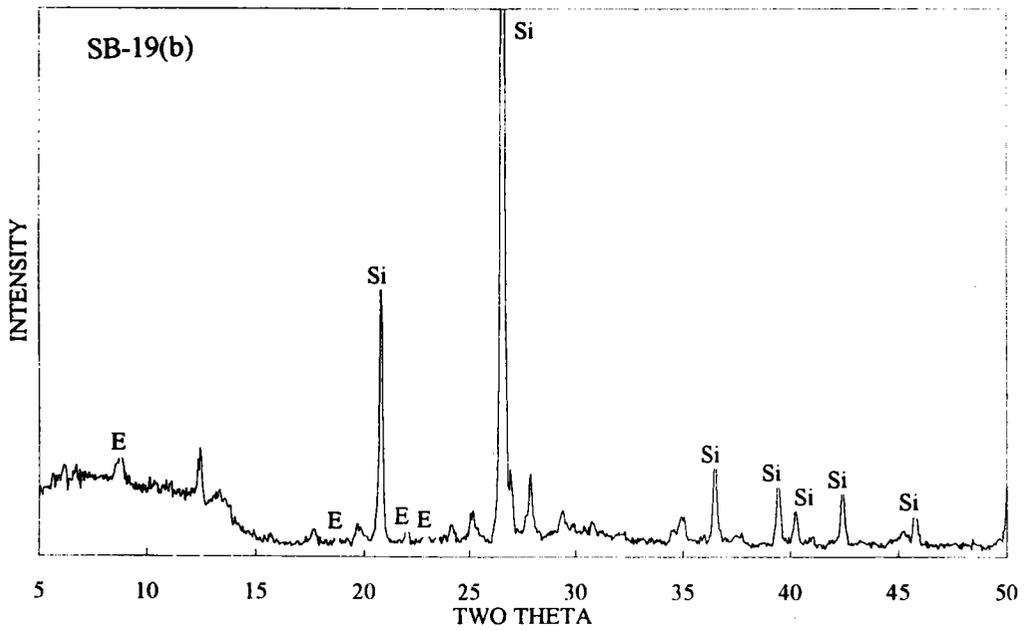


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-19(b))

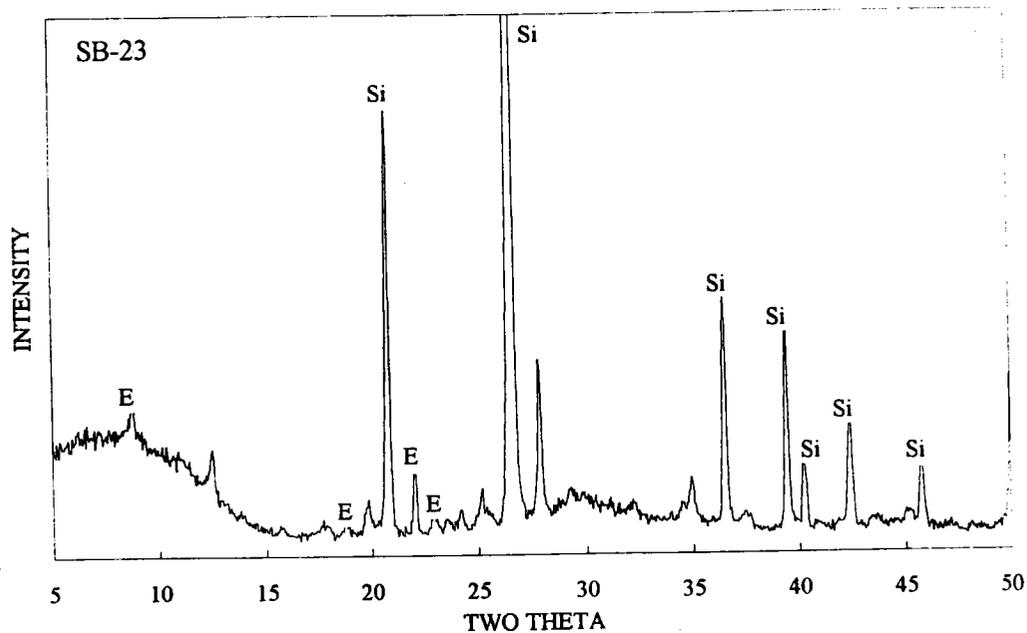


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-23)

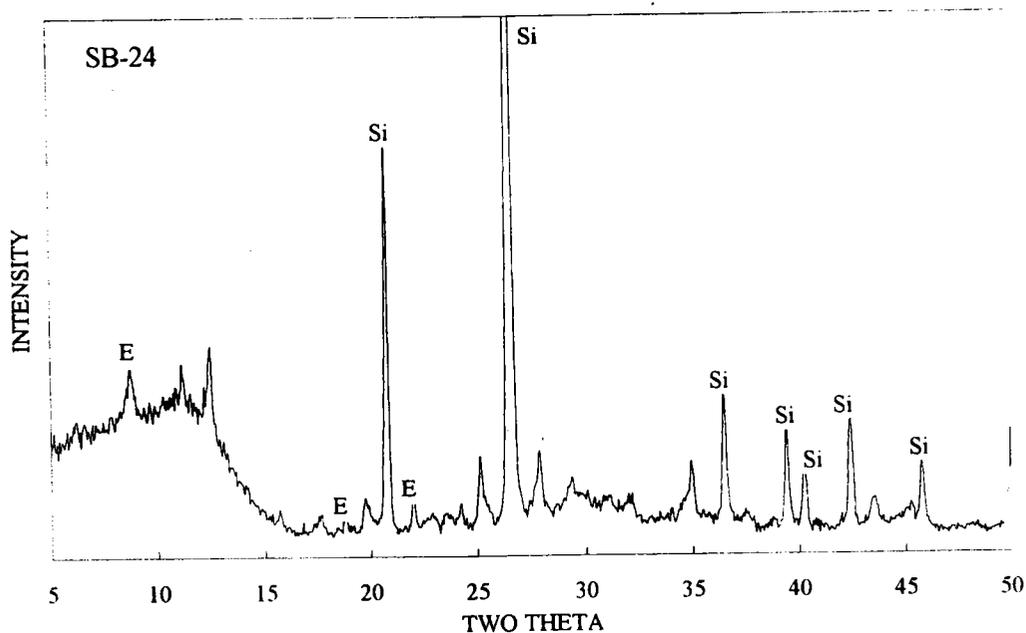


圖 4-9 試體 X-光繞射波峰圖(續)，(沉箱編號 SB-24)

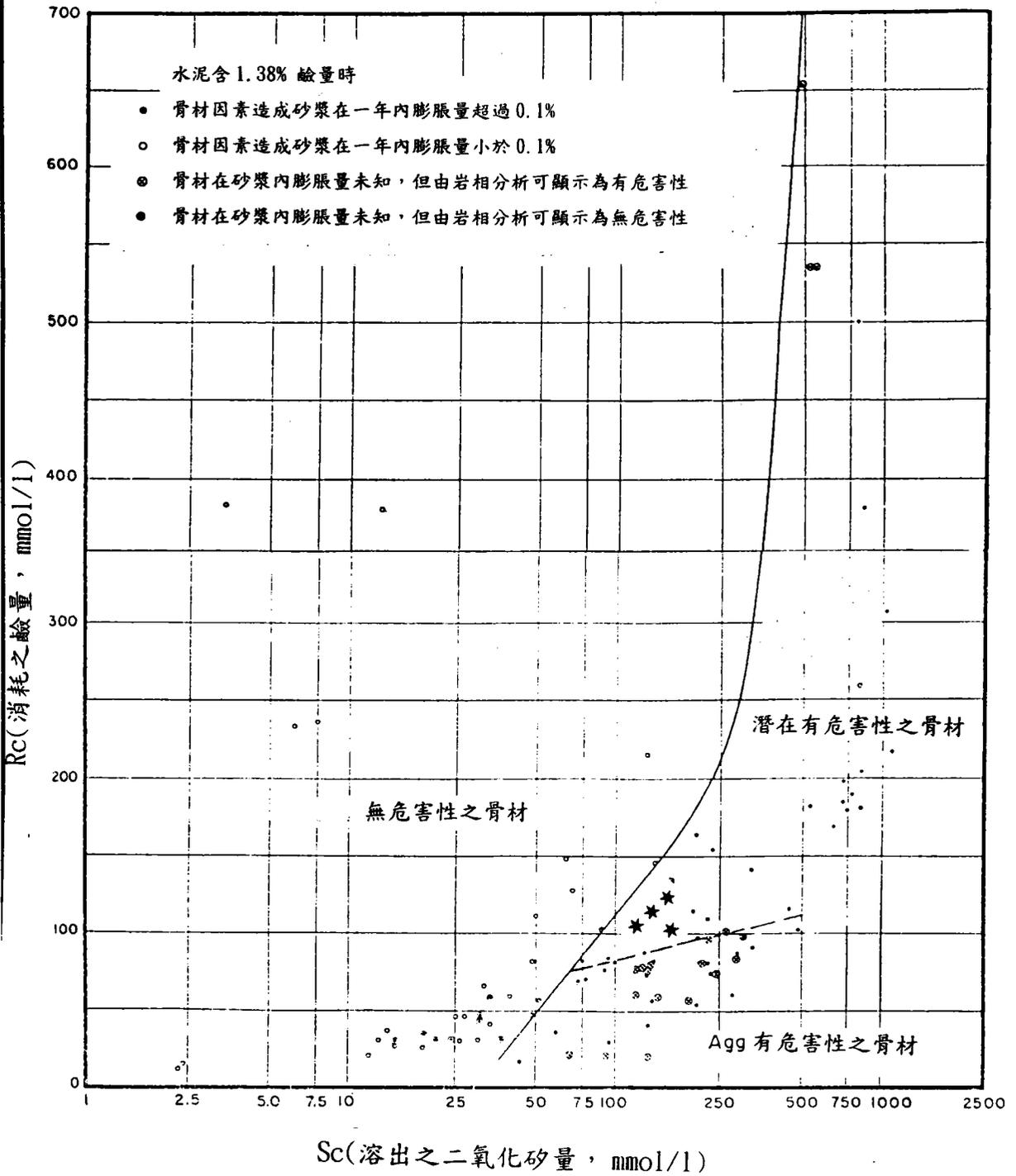


圖 4-10 鹼骨材反應鑑定判定圖



照片 4-3 SB19 沉箱破壞情形



照片 4-4 SB17 和 SB18 沉箱港側銜接處堤面損壞情形

表4-6 鋼筋腐蝕機率與電位之關係(ASTM C-876規範)

鋼筋腐蝕電位值(mV) v.s.(CSE)	腐蝕機率
>-200	5%
-200 ~ -350	50%
<-350	95%

表 4-7 沉箱結構體鑽心取樣試體之抗壓強度檢測結果

沉箱鑽心取樣位置編號	抗壓強度(kg/cm ²)
FNB-2	332
FNB-4	361
SB-8	311
SB-18	320
SB-19	273
SB-23	384
SB-24	248

表 4-8 鑽心試體透水試驗結果

沉箱鑽心取樣位置編號	透水係數值(m/sec)
FNB-2	1.547×10^{-10}
FNB-4	0.897×10^{-10}
SB-8	3.806×10^{-10}
SB-18	0.128×10^{-10}
SB-19	6.821×10^{-10}
SB-23	4.072×10^{-10}
SB-24	7.191×10^{-10}

表 4-9 鑽心試體氯離子含量分佈量測結果

沉箱鑽心取樣位置編號	氯離子(Cl ⁻)含量分佈(kg/m ³)		
	第一段深度	第二段深度	第三段深度
FNB-2	7.355kg/m ³ (0~10cm)	1.911kg/m ³ (10~20cm)	0.483kg/m ³ (20~30cm)
FNB-4	3.829kg/m ³ (0~9cm)	0.745kg/m ³ (9~18cm)	1.014kg/m ³ (18~27cm)
SB-8	2.118kg/m ³ (0~8cm)	0.510kg/m ³ (8~16cm)	0.144kg/m ³ (16~25cm)
SB-18	7.058kg/m ³ (0~7cm)	1.497kg/m ³ (7~15cm)	0.672kg/m ³ (15~23cm)
SB-19	3.456kg/m ³ (0~7cm)	1.407kg/m ³ (7~14cm)	0.552kg/m ³ (14~21cm)
SB-23	12.16Kg/m ³ (0~3cm)	9.27Kg/m ³ (3~6cm)	6.43Kg/m ³ (6~9cm)
SB-24	11.0kg/m ³ (0~3cm)	9.47kg/m ³ (3~6cm)	6.77kg/m ³ (6~9cm)

表 4-10 鑽心試體硫酸根離子(SO₄²⁻)含量分佈量測結果

沉箱鑽心取 樣位置編號	硫酸根離子(SO ₄ ²⁻)含量分佈(Kg/m ³)		
	第一段深度	第二段深度	第三段深度
FNB-2	8.328kg/m ³ (0~10cm)	4.360kg/m ³ (10~20cm)	5.030kg/m ³ (20~30cm)
FNB-4	1.897kg/m ³ (0~9cm)	1.835kg/m ³ (9~18cm)	1.966kg/m ³ (18~27cm)
SB-8	2.849kg/m ³ (0~8cm)	2.566kg/m ³ (8~16cm)	2.297kg/m ³ (16~25cm)
SB-18	5.112kg/m ³ (0~7cm)	3.443kg/m ³ (7~15cm)	3.698kg/m ³ (15~23cm)
SB-19	3.760kg/m ³ (0~7cm)	3.139kg/m ³ (7~14cm)	2.697kg/m ³ (14~21cm)
SB-23	10.31kg/m ³ (0~3cm)	6.11kg/m ³ (3~6cm)	6.40kg/m ³ (6~9cm)
SB-24	6.80kg/m ³ (0~3cm)	5.23kg/m ³ (3~6cm)	6.13kg/m ³ (6~9cm)

表 4-11 氯離子含量與鋼筋腐蝕之關係

Cl ⁻ 含量(佔水泥量 之百分率,%)	每 m ³ 混凝土 Cl ⁻ 含量(kg)	鋼筋腐蝕狀態
< 0.4	1.5	忽略
0.4 - 1.0	1.5~3.5	可能腐蝕
1.0 - 2.0	3.5~7.0	或有腐蝕
> 2.0	7.0	一定腐蝕

註：以每 m³ 混凝土水泥用量為 350kg

表 4-12 試體壓汞孔隙分析試驗結果

試驗結果	防波堤沉箱位置	FNB-2	FNB-4	SB-8	SB-18	SB-19(a)	SB-19(b)	SB-23	SB-24
大毛細孔隙量(ml/g), 孔隙直徑 > 0.05μm	(1)	0.0150 (40.98%)	0.0112 (45.41%)	0.0312 (39.75%)	0.0165 (41.35%)	0.0307 (37.44%)	0.0556 (68.30%)	0.0217 (20.36%)	0.0271 (33.71%)
中毛細孔隙量(ml/g), 孔隙直徑 0.01~0.05μm	(2)	0.0115 (31.42%)	0.0068 (27.42%)	0.0298 (37.96%)	0.0182 (45.61%)	0.0385 (46.95%)	0.0188 (23.10%)	0.0477 (44.75%)	0.0472 (58.71%)
膠體孔隙量(ml/g), 孔隙直徑 < 0.05μm	(3)	0.0101 (27.60%)	0.0068 (27.42%)	0.0175 (22.29%)	0.0052 (13.04%)	0.0128 (15.61%)	0.0070 (8.60%)	0.0372 (34.89%)	0.006 (7.58%)
毛細孔隙量(ml/g), 總孔隙含量(ml/g), 總孔隙率(%)	(4)	0.0265 (72.40%)	0.0180 (82.58%)	0.061 (77.71%)	0.0347 (86.96%)	0.0692 (84.39%)	0.0744 (91.40%)	0.0694 (65.11%)	0.0061 (92.42%)
虛(鬆)比重(g/ml)	(5)	0.0366 (100%)	0.0248 (100%)	0.0785 (100%)	0.0399 (100%)	0.0820 (100%)	0.0814 (100%)	0.1066 (100%)	0.0804 (100%)
視比重(g/ml)		8.77	6.12	16.93	9.36	16.96	17.26	21.18	15.79
		2.3978	2.4697	2.1575	2.3471	2.0675	2.1216	1.9863	1.9641
		2.6283	2.6307	2.5971	2.5896	2.4898	2.5643	2.5200	2.3323

註：(3)=(1)+(2), (5)=(3)+(4)

表 4-13 鑽心試體 XRD 及 SEM 檢測結果

沉箱試體編號	可能之有害產物
FNB-2	鈣礬石
FNB-4	鈣礬石
SB-8	鈣礬石
SB-18	鈣礬石
SB-19	鈣礬石
SB-23	鈣礬石
SB-24	鈣礬石

表 4-14 鹼骨材潛能反應試驗結果

防波堤沉箱編號	S _c	R _c	鹼骨材反應性之判定
FNB-2	114	100	具潛在性反應
FNB-4	100	105	具潛在性反應
SB-8	118	100	具潛在性反應
SB-18	120	90	具潛在性反應
SB-19	119	70	具潛在性反應

表 4-15 調查之沉箱結構整體檢測結果

沉箱編號 檢測結果	FNB-2	FNB-4	SB-8	SB-18	SB-19	SB-23	SB-24
結構外觀	外牆剝落、 鋼筋外露	外牆剝落、 鋼筋外露	良好	破洞、鋼 筋外露	塌陷損壞	裂縫、外牆剝落、 鋼筋外露，破洞	良好
保護層厚度(公厘)	**	**	10	10	**	4-12	8-12
試錘讀數(平均值)	30	30	34	28	28	31	34
中性化深度(公分)	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
抗壓強度(kg/cm ²)	332	361	311	320	273	384	248
電阻係數(kΩ-cm)	8.8-15.8	**	4.2-13.3	3.3-11.1	3.9-11.5	1.7-7.5	2.1-7.3
鋼筋腐蝕電位(-mV)	**	**	200-350	200-350	500-650	350-450	300-500
透水係數 (1×10^{-10} m/sec)	1.547	0.897	3.806	0.128	6.821	4.072	7.191
鹼骨材反應	潛在性	潛在性	潛在性	潛在性	潛在性	**	**
XRD 分析	鈣礬石	鈣礬石	鈣礬石	鈣礬石	鈣礬石	鈣礬石	鈣礬石
SEM 分析	針狀結構 (鈣礬石)	針狀結構 (鈣礬石)	針狀結構 (鈣礬石)	針狀結構 (鈣礬石)	針狀結構 (鈣礬石)	針狀結構 (鈣礬石)	針狀結構 (鈣礬石)

註：**表示沒有量測



照片 4-1

SB12 和 SB13 沉箱港側銜接處損壞情形



照片 4-2

SB38 和 SB39 沉箱港側銜接處損壞情形



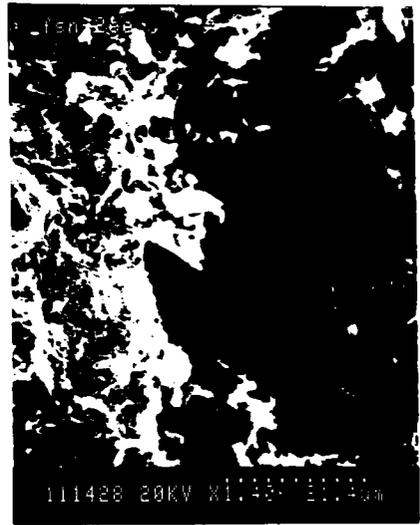
照片 4-3 SB19 沉箱破壞情形



照片 4-4 SB17 和 SB18 沉箱港側銜接處堤面損壞情形



照片 4-5 SB6 沉箱港側損壞情形...



照片 4-6 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 FNB-2)



照片 4-7 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 FNB-4)



照片 4-8 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-8)



照片 4-9 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-18)



照片 4-10 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-19)



照片 4-11 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-23)



照片 4-12 掃描式電子顯微鏡分析結果(沉箱編號 SB-24)

第五章 結論與建議

蘇澳港北防波堤經現場非破壞性檢測及鑽心取樣攜回試驗室內進行詳細分析後，所得結論如下：

1. 沉箱結構體外觀(堤身混凝土表面)，有許多剝落、破裂、鋼筋裸露，堤身面板上多處位置有裂縫及輕微沉陷現象，沉箱與沉箱間之接縫處損壞較嚴重。
2. 非破壞性檢測結果顯示，沉箱混凝土材料除內部鋼筋可能處於腐蝕狀態外，其它混凝土特性雖有部份侵蝕現象但尚可接受。
3. 試驗室分析結果顯示，由於混凝土內透水係數偏高，因此氯離子及硫酸根離子含量有較高的現象，值得注意。同時骨材檢測時發現有疑似鹼骨材反應現象，亦即骨材可能具有潛在膨脹性的危險，未來需持續觀察。
4. 造成防波堤之損壞、塌陷的原因，大致上應屬受到外力的破壞的機率較大，混凝土材料本質因劣化所引起損壞的機率較小。

建議：

1. 防波堤損壞、塌陷的部份，應適時修補，避免損壞範圍擴大。
2. 沉箱內部塌陷、淘空或基礎流失等之修補，可嘗試採用壓力灌漿固結的方式，將沉箱內部的拋石等基料凝聚鞏固。
3. 建造新工程設施時，必需檢驗砂石骨材成份，避免不慎使用活(鹼)性骨

材，造成混凝土產生鹼骨材反應，影響結構物的安全。

4. 日後新建工程時，應依中國國家標準(CNS)等相關規定選擇適當的材料與混凝土配比，如採用第二型水泥和波索蘭材料，降低水灰比，以降低混凝土的滲透性，防止海水中之Cl及SO₄²⁻入侵，造成鋼筋腐蝕和硫酸鹽侵蝕。

參考文獻

1. Mehta, P.K., "Concrete-Structures, Properties and Materials", Prentice-Hall, Inc., N.J., U.S.A., 1986.
2. Mindess, S and J. F. Young, "Concrete", Prentice-Hall, Inc., N.J., U.S.A., 1981.
3. Taylor Woodrow Research Lab., "Marine Durability Survey of the Tongue Sands Towers", Concrete in the Ocean Technical Report No.5, The Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1980.
4. J. Beslac, "Durability of Concrete to Marine Environment", Durability of Concrete, 2nd. International Conference, Vol.1, SP.126, pp.599-608, Montreal, Canada 1991.
5. "Durability of Concrete", ACI, SP.131, 1992.
6. C. K. Nmai and P. D. Krauss, "The Influence of Fly Ash on the Resistivity and Rate of Corrosion of Reinforced Concrete", Durability of Concrete, pp.245-262, 3rd. International Conference, Nice, France, 1994.
7. "Annual book of ASTM standards", Volume 04.02, 1994.
8. KGC Berkeley and S. Pathmanaban, "Cathodic Protection of Reinforcement in Concrete", Butterworth & Co. Ltd. 1990.
9. J. H. Bungey and S. G. Millard, "Testing of Concrete in Structures", p.169, third edition, Blackie Academic & Professional, London, UK, 1996.
10. 李釗, "鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會"論文集, pp.45~65, 港灣技術研究所, 1987年10月3、4日。
11. "港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究"期末報告, 80-研(九), 港灣技術研究所, 1991年6月。

12. "港灣 R.C. 結構物修理系統之評估研究" 期末報告, 83-研(十一), 港灣技術研究所, 1994 年 6 月.
13. 李釗, "由破壞性之消波塊探討鹼骨材反應", 港灣報導 No. 38, 港灣技術研究所, 1996 年 10 月.
14. 陳尚廉等編輯, "蘇澳港興建工程", 基隆港務局蘇澳工程處, 民國 72 年 11 月.
15. 川上光男, "鋼筋混凝土構造物之耐久性", 中日鋼筋混凝土構造物耐久性研討會論文集, pp. 1-10, 民國 77 年 3 月.
16. 海洋混凝土構造物之防蝕指針(案), 日本混凝土工學協會 .

附 錄

透水試驗

本試驗之設備係參考美國佛羅里達大學多年來在研究發展混凝土滲透性測試裝置加以修改而成，如圖 3-3 所示。試驗原理係以固定壓力的方式使水分流經試體內部，再以達西定律(Darcy's Law)求得滲透係數，其計算公式如下式所示：

$$k = \rho hQ/PA$$

其中， k =滲透係數(cm/s)

ρ = 試驗時溫度之水密度(g/cm³)

h =試體高度(cm)

Q =流率(cm³/s)

P =水壓(gf/cm²)

A =試體斷面積(cm²)

試驗之過程如下：

1. 利用切割機將鑽心試體切割成長度 5 公分、直徑 10 公分左右之圓柱試體。
2. 將此圓柱試體上下兩底之斷面磨平，並且量測其切割後之實際長度與直徑。
3. 將試體置於壓克力圓模中，在試體與圓模間周圍之空隙灌注防水性 A B 膠，以防止水份經由空隙間流過，待防水膠硬化後將試體圓模安裝在滲透試驗儀上。

4. 先以固定壓力之水壓施加於各試體上，以便讓試體呈飽和的狀態(通常約放置 24 小時)。
5. 試體飽和後，再用氣壓施加於試體上方之水柱，讀取水柱下降一定高度所需之時間，可藉此求出水滲透之流率。
6. 將此一流率代入上述公式，即可求出滲透係數。

鹼骨材潛能反應試驗

試驗規範：ASTM C-289 化學法

本試驗依據 ASTM C289 測定骨材中是否具鹼性反應，測定值分為矽濃度(S_c)及氫氧化鈉之消耗量(R_c)，再由兩者相互之關係判定之。

矽濃度之測定係利用光線吸收度的原理採用分光光度計法；經氫氧化鈉溶出之矽離子於酸性溶液中(特別是 Ph 1.2 ~ 1.5)會與鉬酸離子反應而生成黃綠色之鉬酸矽醋鹽，此化合物之色澤深淺與矽成分在一定濃度下大致成一正比例關係，因此可配置已知矽濃度之多種溶液，以分光光度計測定光線吸收度，製作出一條校正曲線(calibration curve)，而試體中溶出之矽濃度即可以分光光度計配合校正曲線求出；至於氫氧化鈉之消耗量則是以滴定方式測定。

校正曲線製作

1. 以矽酸鈉溶於水中，配製二氧化矽標準溶液(濃度為 10 mmol/l)。
2. 溶解10g之鉬酸銨 $[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$ 於100 ml之水中。
3. 溶解10g含兩個結晶水之草酸於100ml 之水中。

4. 於100ml量瓶中，分別加入定量之二氧化矽標準溶液，配製成一系不同濃度之二氧化矽溶液，濃度範圍由0.0~0.5 mmol/l。
5. 各個量瓶中，分別加入2ml之鉬酸銨溶液及1ml(1+1)濃鹽酸溶液，以圈旋方式搖幌量瓶將試液均勻混溶之。於室溫下將溶液靜置15分後，加入 1.5 ± 0.2 ml之草酸溶液，再以蒸餾水稀釋至100ml，然後充分混合各量瓶中之試液。靜置 5.0 ± 0.1 分鐘後，分別注入於波長為410nm之分光光度計吸收槽內，分別測定其光線吸收度。
6. 將各已知濃度之矽溶液與其光線吸收度製作成校正曲線。

量測矽濃度(S_c)

1. 將鑽心試體之骨材與砂漿分離，篩取骨材部份，利用小型顎碎機打碎粗粒料減小骨材粒徑，以通過標稱孔寬為4.75mm之試驗篩。再以類似篩砂之方式篩分打碎之粗粒料，截取粒徑大於 $150\mu\text{m}$ 之部分，而篩除通過 $150\mu\text{m}$ 之部分。

為確保所有粒徑小於 $150\mu\text{m}$ 之細料均已篩除，須將樣品於標稱孔寬為 $150\mu\text{m}$ 之試驗篩上沖洗，沖洗後之樣品以 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 之溫度，烘乾 20 ± 4 小時。
2. 稱取三份各 $25 \pm 0.05\text{g}$ 具代表性之試樣，分置於三只耐鹼、耐熱反應容器中，以吸管各加入25ml(1.0N濃度)之氫氧化鈉溶液，而於第四只反應容器中，亦用吸管注入25ml相同濃度之氫氧化鈉溶液充當空白試驗組，將四只容器封蓋，並緩緩旋搖容器使溶液中之空氣逸出。容器封蓋後立即將其置於 $80 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 之恆溫水槽中，經過 $24 \pm 1/4$ 小時後，將反應容器由恆溫水槽中移出，以流動之自來水沖浸冷卻 15 ± 2 分鐘，使反應容器溫度降低至 30°C 以下。
3. 反應容器冷卻後立即將其打開，以過濾器及適當之濾紙過濾溶液，分離粒料殘渣。打開抽氣器調整其真空度至大約51kPa，過濾之操作宜至濾液濾出之速率慢至大約每10秒1滴止，過濾完成後，立即攪拌濾液以確保其均勻性，然後以吸管抽取10ml之濾液至200ml之量瓶內，並以純水將其稀釋至200ml，此溶液稱為甲溶液。

4. 於約含半滿純水之100ml量瓶中加入甲溶液10ml，分別加入2ml之鉬酸鉍溶液及1ml之(1+1)濃鹽酸溶液，以圈旋方式搖幌量瓶混溶之。於室溫下將溶液靜置15分後，加入 1.5 ± 0.2 ml之草酸溶液，再以蒸餾水稀釋至100ml，然後充分混勻各量瓶中之試液。靜置 5.0 ± 0.1 分鐘後，分別注入於波長為410nm之分光光度計之吸收槽內，分別測定其光線吸收度。
5. 與刻度曲線比對，求出二氧化矽濃度 C ，並計算 S_c 。若試液之透光度低於30% 或高於50%時，則所抽取甲溶液之量，須分別使用較少或較多於10ml之量。
6. 甲溶液中所含溶解二氧化矽之濃度，可依下式計算：

$$S_c = 20 \times (100/V) \times C$$

S_c ：甲溶液中二氧化矽之濃度 (mmol/l)

V ：甲溶液之量(ml)

C ：由光度計測得甲溶液中二氧化矽之濃度 (mmol/l)

量測溶液消耗之鹼量(R_c)

1. 試驗步驟

以吸管吸取甲溶液20ml，移入一只125ml之三角燒瓶內，加入2或3滴之酚太指示劑(試液顏色為紅色)，以0.05N濃度之鹽酸溶液滴定至滴定終點(紅色消失)止。

2. 溶液消耗鹼量之計算：

$$R_c = (20 \times N/V_1)(V_3 - V_2) \times 1000$$

R_c ：溶液消耗之鹼量(mmol/l)

N ：鹽酸滴定液之濃度(0.05N)

V_1 ：甲溶液吸取量(20ml)

V_2 ：試樣達滴定終點所耗用鹽酸之體積(ml)

V_3 ：空白試驗組達滴定終點所耗用鹽酸滴定溶液之體積(ml)

將上述試驗所測得之 S_c 與 R_c 值，繪於ASTM C 289所附之化學法判斷標準圖(圖4-10)，由 S_c 與 R_c 之交叉座標點落於圖中之區域，即可判斷骨材是否具鹼反應性。