

現有結構物安全評估及維護研究(Ⅲ)-
港區混凝土構造物鹼質與粒料反應
調查與潛勢分析研究

台灣省政府交通處

港灣技術研究所

台中 梧棲

中華民國八十八年 六 月

港區混凝土構造物鹼質與粒料反應 調查與潛勢分析研究

全程計劃：自民國 86 年 7 月至民國 89 年 6 月
執行單位：港工材料組

計劃 主持人：饒 正 副研究員兼組長

共同 主持人：李 釗 教授

陳桂清 副研究員

研 究 人 員：張道光、羅建明

（港灣技術研究所）

許書王、黃書猛、柯正龍

羅一傑、陳登義、黃心華

巫柏蕙（國立中央大學）

審 查 委 員：顏 聰、黃 然、楊仲家

李賢華、王榮祥、賴淵光

林坤田、吳啟東

港區混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究

摘要

本研究主要目的為調查台中、基隆、蘇澳及花蓮港港區之混凝土構造物鹼質與粒料反應的情形及其潛在勢能。研究內容除對全港區現有混凝土構造物進行目視檢測，並擇重點進行非破壞性檢測及鑽取混凝土試體進行相關實驗室試驗等，以瞭解調查標的物之鹼質與粒料反應情形，另針對混凝土可能使用材料進行料源調查及採樣進行試驗並調查港區環境因素（溫度及相對溼度），探討粒料發生鹼質與粒料反應的潛在勢能，再與花蓮港區混凝土構造物進行比較，希望藉此研究建立港區混凝土構造物之鹼質與粒料反應資訊及調查模式，提供設計、施工或維護單位參考。

研究結果顯示，經由現場目視檢測及鑽心試體判斷，基隆港東防波堤消波塊、花蓮港新東堤堤身及西堤消波塊外表具有明顯的地圖狀裂縫及膠體，微觀分析結果亦發現其含有鹼質與粒料反應活性的生成物（鹼矽膠體），已有混凝土發生鹼質與粒料反應之現象。台中港南、北防波堤及消波塊則無明顯因鹼質與粒料反應產生之外部徵候，蘇澳港南外廓防波堤及漁港北外堤等構造物亦無。各港區混凝土可能使用之砂石粒料，以粒料活性化學法試驗及 X 光繞射分析發現部份砂石粒料，具有鹼質與粒料反應活性和潛在活性，水泥含鹼量偏高及溫度使混凝土有發生鹼質與粒料反應之潛能，為確保混凝土構造物日後使用安

全無虞，建議日後濱海新建或需維護之混凝土結構物，應針對混凝土材料，尤以水泥和砂石粒料進行鹼質與粒料反應活性相關試驗。

目錄

摘要	I
表目錄	VII
圖目錄	IX
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 混凝土構造物劣化之原因	3
2-1-1 化學性侵蝕	5
2-1-2 物理性侵蝕	7
2-2 鹼質與粒料反應的種類	7
2-2-1 鹼-氧化矽反應	8
2-2-2 鹼-碳酸鹽反應	8
2-2-3 鹼-矽酸鹽反應	8
2-3 鹼質與粒料反應的機理	9
2-3-1 鹼質與粒料反應的機制之相關學說	9
2-3-2 鹼質與粒料反應的過程	11
2-3-3 鹼金屬的來源	13
2-3-4 活性粒料	15
2-4 影響鹼質與粒料反應膨脹的因素	16
2-4-1 鹼含量對鹼質與粒料反應的影響	16
2-4-2 活性粒料對鹼質與粒料反應的影響	17

2-4-3 鈣離子濃度對鹼質與粒料反應的影響	18
2-4-4 孔隙濃度對鹼質與粒料反應的影響	19
2-4-5 溫度對鹼質與粒料反應的影響	19
2-4-6 濕度對鹼質與粒料反應的影響	19
2-4-7 水灰比對鹼質與粒料反應的影響	20
2-5 混凝土構造物發生鹼質與粒料反應的原因	21
2-6 鹼質與粒料反應之徵候判測	22
2-6-1 混凝土構造物外部徵候	22
2-6-2 混凝土構造物內部徵候	28
2-7 鹼質與粒料反應的改善與維修方法	28
2-7-1 表面被覆法	31
2-7-2 裂縫封阻法	32
2-7-3 裂縫封阻法與表面被覆法合併使用	32
2-7-4 其他材料可能抑制的方法	33
2-8 混凝土鹼質與粒料反應之檢測方法	33
2-8-1 混凝土粒料活性潛能檢測方法	33
2-8-2 現有混凝土構造物鹼質與粒料反應檢測	35
2-9 台灣地區鹼質與粒料反應之相關學說	35
第三章 研究方法及進行步驟	37
3-1 試驗材料	37
3-2 研究流程	38
3-3 試驗設備及分析儀器	39
3-4 調查方法及與步驟	39
3-4-1 現場目視檢測	39
3-4-2 現場非破壞性檢測	39

3-4-3 鑽心試體之分析	43
3-4-4 港區粒料來源砂石取樣及試驗	46
3-4-5 國內水泥含鹼量調查	55
3-4-6 環境因素調查	55
第四章 結果與討論	57
4-1 現場目視調查	57
4-1-1 混凝土道路及碼頭部分	57
4-1-2 堤防部分	58
4-1-3 消波塊部分	59
4-1-4 建築物部分	61
4-2 現場非破壞性檢測	61
4-2-1 電阻係數試驗	65
4-2-2 試錘試驗	65
4-2-3 中性化試驗	67
4-3 鑽心試體之分析	69
4-3-1 抗壓強度試驗	70
4-3-2 X 光繞射分析	71
4-3-3 試體斷面粒料之岩相分析	72
4-3-4 SEM 觀測結果	75
4-3-5 浸泡試驗膨脹量	82
4-3-6 超音波脈波速率試驗	88
4-3-7 壓汞孔隙分析試驗	95
4-4 港區粒料來源砂石取樣及試驗	97
4-4-1 粒料活性化學分析試驗	97
4-4-2 水泥砂漿棒膨脹量試驗	99

4-5 國內水泥含鹼量調查	103
4-6 環境因素調查	104
第五章 結論與建議	107
5-1 結論	107
5-2 建議	107
參考文獻	108
附錄一 現場調查照片	附錄 1-1
附錄二 混凝土構造物反彈錘測試值	附錄 2-1
附錄三 鑽心試體之粒料分類	附錄 3-1
附錄四 XRD 繞射波峰圖	附錄 4-1

表目錄

表 2-1 混凝土發生劣化的原因及現象	4
表 3-1 水泥化學成份	37
表 3-2 水泥砂漿棒試驗各粒徑粒料重量百分比	53
表 4-1 電阻試驗檢測位置及鑽心取樣試體代號	62
表 4-2 混凝土構造物電阻係數量測結果	63
表 4-3 電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係	64
表 4-4 混凝土構造物試錘反彈值與混凝土推估強度	65
表 4-5 試錘反彈值與混凝土抗壓強度關係	66
表 4-6 混凝土構造物中性化檢測結果	68
表 4-7 混凝土構造物鑽心試體強度試驗值	69
表 4-8 XRD 試驗各點位置及可能具活性之成份	71
表 4-9 台中港鑽心試體粒料種類分析	72
表 4-10 基隆港鑽心試體粒料種類分析	73
表 4-11 蘇澳港鑽心試體粒料種類分析	74
表 4-12 花蓮港鑽心試體粒料種類分析	75
表 4-13 混凝土鑽心試體浸泡於 38°C · 1N NaOH 溶液之膨脹量	83
表 4-14 混凝土鑽心試體浸泡於 38°C · 100% 相對溼度環境之膨脹量	83
表 4-15 台中港鑽心試體超音波脈波速率量測結果	89
表 4-16 基隆港鑽心試體超音波脈波速率量測結果	90
表 4-17 蘇澳港鑽心試體超音波脈波速率量測結果	91
表 4-18 台中港鑽心試體超音波脈波速率變化情形	92
表 4-19 基隆港鑽心試體超音波脈波速率變化情形	93
表 4-20 蘇澳港鑽心試體超音波脈波速率變化情形	94

表 4-21 鑽心試體壓汞孔隙分析試驗結果	96
表 4-22 粒料活性化學分析試驗結果	97
表 4-23 港區粒料來源水泥砂漿棒膨脹量試驗結果	100
表 4-24 港區環境因素溫度調查結果	104
表 4-25 港區環境因素相對溼度調查結果	104
表 4-26 構造物混凝土鹼質與粒料反應 (AAR) 綜合判斷	106

圖目錄

圖 2-1 Powers 與 Steinour's 之蛋白石顆粒反應模式	10
圖 2-2 鹼質與粒料反應之過程	12
圖 2-3 水泥中鹼含量對鹼質與粒料反應膨脹量之關係	14
圖 2-4 粒料之結晶構造示意圖	16
圖 2-5 活性粒料粒徑對鹼質與粒料反應膨脹量之關係	18
圖 2-6 相對溼度對鹼質與粒料反應膨脹量之關係	20
圖 2-7 鹼質與粒料反應在平面混凝土所造成典型裂縫型式	24
圖 2-8 鹼質與粒料反應引起裂縫典型模式	24
圖 2-9 橋樑護欄鹼質與粒料反應之表面裂縫情形	25
圖 2-10 鹼質與粒料反應構造物爆裂情形	25
圖 2-11 混凝土發生鹼質與粒料反應之外部徵候之一	26
圖 2-12 混凝土發生鹼質與粒料反應之外部徵候之二	26
圖 2-13 鋼筋混凝土樑發生鹼質與粒料反應之外部徵候	27
圖 2-14 鋼筋混凝土柱發生鹼質與粒料反應之外部徵候	27
圖 2-15 混凝土發生鹼質與粒料反應之內部徵候之一	29
圖 2-16 混凝土發生鹼質與粒料反應之內部徵候之二	29
圖 2-17 混凝土發生鹼質與粒料反應之內部徵候之三	30
圖 3-1 研究流程	38
圖 3-2 台中港平面圖與檢測位置	41
圖 3-3 基隆港平面圖與檢測位置	41
圖 3-4 蘇澳港平面圖與檢測位置	42
圖 3-5 蘇澳港平面圖與檢測位置	42
圖 4-1 台中港 SEM 觀察結果	77

圖 4-2 基隆港 SEM 觀察結果	78
圖 4-2 基隆港 SEM 觀察結果 (續)	79
圖 4-3 蘇澳港 SEM 觀察結果	80
圖 4-4 花蓮港 SEM 觀察結果	81
圖 4-5 台中港鑽心試體浸泡試驗膨脹量結果	84
圖 4-6 基隆港鑽心試體浸泡試驗膨脹量結果	85
圖 4-7 蘇澳港鑽心試體浸泡試驗膨脹量結果	86
圖 4-8 花蓮港鑽心試體浸泡試驗膨脹量結果	87
圖 4-9 混凝土鑽心試體孔隙分佈圖	95
圖 4-10 粒料化學法試驗分析結果	98
圖 4-11 水泥砂漿棒膨脹試驗結果	101
圖 4-11 水泥砂漿棒膨脹試驗結果 (續)	102
圖 4-12 國內水泥含鹼量調查結果	103
圖 4-13 港區環境因素溫度調查結果	105
圖 4-14 港區環境因素相對溼度調查結果	105

第一章 前言

1-1 研究動機

臺灣四週環海，氣候溫濕多雨，港灣混凝土構造物因直接受海水侵襲，具有較高的濕度及鹽分，發生腐蝕劣化的機率很高，其中鹼質與粒料反應因常於構造物建造後 5-12 年，甚至更久時間發生，往往常被忽略，相關調查研究迄今仍尚未完備，港灣混凝土構造物因處在高相對濕度和鹽分等環境條件下，產生鹼質與粒料反應而造成劣化的機率非常高，容易因鹼質與粒料反應造成劣化，降低港埠實際功能，縮短其使用壽命。

近年來因經濟建設急速發展，政府為擴大內需投資多項重大建設，致所需之相關建材需求驟增，其中又以混凝土需求量最大，須耗用大量水泥及砂石粒料，但國內堪用之優良粒料日漸缺乏，加以政府全面禁採台北縣市等主要河川砂石以及實施水泥工業東移政策，混凝土粒料及水泥原料採用東部砂石乃必然趨勢，惟國內相關研究指出花蓮台東等地區某些河川砂石^(2-4, 13-15)可能具反應活性，部分廠商生產或進口之水泥含鹼量亦有超過規範規定之情形⁽⁴⁾，如使用作為混凝土材料，在台灣高溫多雨的環境條件下，混凝土極易發生鹼質與粒料反應。由於港灣工程使用混凝土數量非常龐大，其濱臨海洋之環境較諸其他構造物更易發生鹼質與粒料反應的危害威脅，在政府大力推動東砂西運政策及業者進口境外反應活性不明之粒料等原因，各港區混凝土構造物使用俱反應活性大的粒料發生鹼質與粒料反應機率大增，為未雨綢繆，使能在混凝土構造物劣化之前及早

發現並速採用適當對策，建立預警及防制措施，將對混凝土構造物安全之確保使充分發揮服務功能，避免遭受重大的生命、財產損失有很大助益，為使研究品質提昇，本研究與國立中央大學土木工程研究所李釗教授共同合作完成。

1-2 研究目的

本研究目的除了瞭解國內幾個重要港口（台中基隆、蘇澳及花蓮），港區混凝土構造物可能發生鹼質與粒料反應的情形外，並期望藉由現場目視檢測和料源調查（粒料、水泥）及實驗室試驗結果，進行潛勢分析，確認港區混凝土構造物其鹼質與粒料反應情況，及可能的潛在勢能，提供使用或維護單位在進行維修時之參考，期能確保港區混凝土構造物的使用安全。

1-3 研究範圍

1. 調查台中、基隆、蘇澳及花蓮港港區現有混凝土構造物鹼質與粒料反應之現況。
2. 調查台中、基隆、蘇澳及花蓮港港區附近混凝土構造物可能使用粒料來源其粒料鹼質與粒料反應活性潛能。
3. 調查國內廠商目前生產及進口之水泥含鹼量。
4. 調查台中、基隆及蘇澳港港區附近環境(溫度、溼度)。
5. 提出混凝土鹼質與粒料反應之預防和改善對策

第二章 文獻回顧

混凝土發生鹼質與粒料反應最初係由 Stanton 在西元 1940 年發表於 Engineering News Record，其反應是粒料中含有活性矽的成份會被氫氧根離子分解，再與水泥中的鹼金屬(鈉、鉀)結合形成鹼矽膠體 (Alkali-silica gel) 在吸水後會發生膨脹，使混凝土產生地圖狀的裂縫，致使結構物強度與承載能力降低和構件變形，嚴重時甚至會造成混凝土構造物的崩毀。之後包括日本、丹麥、加拿大等相當多的國家，都陸續發表鹼質與粒料反應的研究報告，西元 1970 年後，各國對於鹼質與粒料反應的影響更為關注，主要因為配合節省水泥製程和經濟且含鹼量低的水泥不容易獲得，同時陸續發現具活性大的粒料及混凝土構造物發生鹼質與粒料反應產生混凝土劣化而崩損的案例時有所聞，如再加上常態性的荷重、衝擊甚或地震，其損失將嚴重到無法估計等等，國內目前已有少數鹼質與粒料反應調查案例及粒料活性的研究報告^(2-4, 13-15)，但在優良粒料日漸缺乏及使用活性粒料機會增加的情形下，值得吾人瞭解造成鹼質與粒料反應的原因和預防措施。

2-1 混凝土構造物劣化之原因

混凝土為一種複合材料，從材料準備到施工、養護的過程中，易受人為因素或自然氣候影響，無法達到混凝土預期品質，造成水份及氯離子等有害物質侵入，導致混凝土發生龜裂、剝落。以材料角度而言，海洋環境對混凝土構造物的侵蝕，可分

為對水泥水化產物侵蝕和對混凝土內鋼筋腐蝕兩種。侵蝕方式分為化學性侵蝕和物理性侵蝕兩類⁽⁵⁾。混凝土發生劣化的原因及現象如表 2-1 所示。其中較重要的幾項說明以下：

表 2-1 海洋混凝土劣化之原因及現象

要因		劣化之原因	劣化現象	與潮位之關係 海潮波大 中汐濺氣 區帶帶帶
化學的要因	外界作用	硫酸鹽作用	形成鈣鈣石與膨脹破壞	□ □ ○
		氯化物作用	形成溶解性鹽類與多孔性	□ □ ○
	內在要因	碳化作用	pH 值降低與促進鋼筋腐蝕	○ ○ ○
		水泥硬化體之溶解	Ca (OH) ₂ 溶解與多孔性	□ □ ○
物理的要因	外界作用	使用活性粒料	形成鈣鈣石與膨脹破壞	□ □ ○
		氣象作用	風化及表層破壞	○ □ □
	內在要因	波浪作用	混凝土表面受沖蝕破壞	□ □
		海流作用	混凝土表面受沖蝕及孔蝕破壞	□ □
	外界作用	凍融作用	膨脹及表面破壞	○ □
		乾濕反覆作用	由於受拘束生表面及內部龜裂	○ ○ □
	內在要因	氣溫循環作用	鹽類之濃縮及結晶化的膨脹壓力	□ □
		結構體承受巨大負荷	熱脹冷縮作用	○ □ □
	外界作用	鋼筋腐蝕	混凝土受破壞	□ □ ○
			膨脹裂痕及保護層破壞	○ □ □

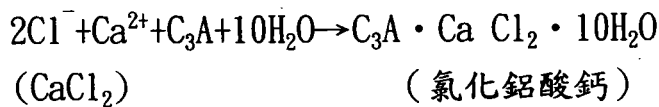
□：發生容易 ○：發生次等

2-1-1 化學性侵蝕

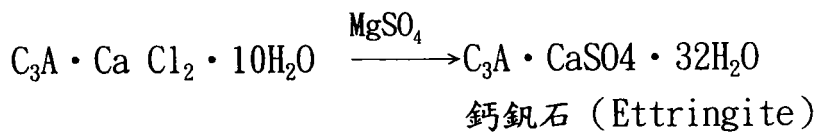
一般混凝土可能受到化學性侵蝕的模式有下列數種：

(1) 氯離子侵蝕

當水泥水化產物 C-S-H 膠體與氯離子接觸時會形成高溶解性的氯化鈣 (CaCl_2)，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管孔隙體積和滲透性，造成混凝土強度的損失。其反應式如下：



氯化鋁酸鈣在含有硫酸鹽類的海洋環境下會發生化學反應生成鈣釩石 (Ettringite)，使得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：



混凝土構造物內部如有配置鋼筋，當混凝土之 pH 值降低至 10 以下，氯離子會侵入混凝土內部會破壞鋼筋保護膜造成鋼筋腐蝕，鋼筋腐蝕將使鋼筋體積膨脹增加並導致混凝土體積跟著膨脹而發生龜裂。

(2) 硫酸鹽侵蝕

硫酸鹽侵蝕的反應過程甚為複雜，發生硫酸鹽侵蝕時將使得水泥漿體積膨脹形成內應力導致混凝土構造物龜裂。土壤中

可溶性硫酸鹽濃度超過0.1%（水中含 SO_4^{-2} 150mg/l）時會危害混凝土，含0.5%以上時（水中含 SO_4^{-2} 超過2000 mg/l）將具嚴重影響。

（3）碳化（中性化）作用

一般混凝土構造物其 pH 值約在 13 左右，混凝土中性化為當混凝土中的氫氧化鈣與空氣中的二氧化碳結合產生碳酸鈣，使得混凝土 pH 值降低稱之，其將導致混凝土內部的鋼筋易受侵蝕而腐蝕，使混凝土進一步劣化。一般海水的 pH 值介於 7.8 至 8.3 之間，並不會對混凝土造成不利的影響，但如受到污染而含有大量的有機物，會因分解有機物而釋出大量的二氧化碳，此時海水的 pH 值下降至 7.0 以下，即可能會對混凝土有害。

（4）鹼質與粒料反應

當混凝土中含有足夠的活性矽與鹼量時，在有水的環境下會產生鹼質與粒料反應，導致混凝土龜裂甚或崩毀。絕大部分的混凝土鹼質與粒料反應為屬鹼-氧化矽反應。混凝土發生鹼質與粒料反應，受到混凝土中孔隙溶液影響，多數為局部性的。同一混凝土構造物所發生的反應會有不同的範圍和面積，其原因為活性粒料在混凝土內任意分佈及混凝土材質的不等向性，各孔隙中之孔隙溶液也不相同⁽²⁴⁾。

（5）鎂離子侵蝕

海水中的氯化鎂（ MgCl_2 ）和硫酸鎂（ MgSO_4 ）會與水泥水化物（氫氧化鈣）進行陽離子交換，生成溶解度較低的氫氧化鎂

($\text{Mg}(\text{OH})_4$)。由於反應生成物中含有高溶解性且易析出的氯化鈣和石膏，造成混凝土材料流失使混凝土的孔隙增加；同時鎂離子取代 C-S-H 膠體中的鈣離子變成不具膠結性的 M-S-H 膠體，造成混凝土強度降低，使有害物質更易滲入而加速混凝土之劣化。

(6) 混凝土施工

混凝土如因施工不當，會加速氯離子、氧氣、二氧化碳、水份等有害物質的侵入，使混凝土劣化速度加快，其中以搗實和養護的影響最為深遠。

2-2-1 物理性侵蝕

一般物理性侵蝕的原因，大致上分為表面磨損和開裂兩大類：

(1) 表面磨損

由於磨耗、剝蝕和形成孔穴作用，造成表面磨損和質量損失。

(2) 開裂

由於溫度和溼度梯度的劇烈變化，鹽類在孔隙中之結晶壓力、結構荷重以及暴露於劇烈變化的溫度環境下，如結冰或火災等，很容易引起混凝土的體積變化，進而使混凝土開裂。

2-2 鹼質與粒料反應的種類

依粒料成份和性質的不同，鹼質與粒料反應可分為三類⁽¹⁹⁾：

2-2-1 鹼-氧化矽反應(Alkali-Silica Reaction, ASR)

鹼-氧化矽反應為水泥與粒料經水拌合後，水泥漿體中的鹼金屬離子（如鈉、鉀等）滲透至粒料內部，破壞氧化矽（ SiO_2 ）之矽與氧的鍵結（ Si-O-Si ），使鹼與矽發生反應形成一種鹼矽膠體，此膠體吸水後具有膨脹性，膨脹產生後的壓力會使混凝土產生龜裂。發生鹼氧化矽反應的案例較多，如花蓮港區消波塊龜裂的情形即可能屬鹼-氧化矽反應所造成。

2-2-2 鹼-碳酸鹽反應(Alkali-Carbonate Reaction, ACR)

引起鹼-碳酸鹽反應的粒料大多為一些白雲石、石灰石，這類粒料共同特點為具有豐富的碳酸鈣及氧化鈣、氧化鎂等。鹼-碳酸鹽反應對混凝土的影響與鹼-氧化矽反應類似，但鹼-碳酸鹽反應其發生膨脹較鹼-氧化矽反應緩慢且持久，亦即其膨脹到達平衡所需的時間較長。

鹼-碳酸鹽反應具有下列特性：

1. 無明顯膠體滲出
2. 外觀與鹼-氧化矽反應不同
3. 添加卜作嵐材料對膨脹沒有抑制效果

2-2-3 鹼-矽酸鹽反應(Alkali-Silicate Reaction)

混凝土構造物發生鹼-矽酸鹽反應的原因，為粒料中含有 Grewacke、粘土質岩及千枚岩（phylite）等成分，其膨脹速度非常緩慢。此類岩石經X光繞射分析結果發現含有蛭石

(Vermiculite)，與黏土膨脹現象因素類似。形成鹼-矽酸鹽反應之活性粒料種類較少，膠體滲出量也很少，此反應機理目前仍未完全瞭解，因與鹼-氧化矽反應常同時出現不易直接判斷。

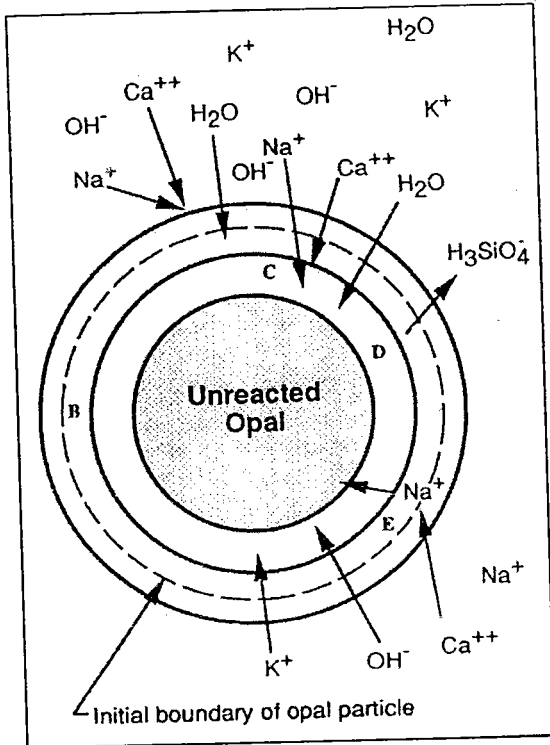
2-3 鹼質與粒料反應的機理

2-3-1 鹼質與粒料反應的機制之相關學說^(16, 19, 32, 33)

混凝土發生鹼質與粒料反應的機制，目前相關學說主要分為兩派，一為 Powers 及 Steinour(1950 年)所提出，另一為 Chatterji 等人(1972 年)所提出。

(1) Powers 及 Steinour 之學說

主要以探討蛋白石 (Opal) 為活性粒料進行探討，如圖 2-1 所示。當活性粒料所處環境為低鹼濃度時，活性二氧化矽會先被中和，若為高鹼濃度則粒料內部具活性的二氧化矽因鹼矽作用而生成膠體。膠體依膨脹特性分為高膨脹性與低膨脹性，鹼矽膠體中鈣-矽膠體屬於低膨脹性，對混凝土而言屬於安全的膠體；鈉-矽膠體屬於高膨脹性，對混凝土而言屬於不安全的膠體。反應過程中隨著漿體中孔隙溶液鹼濃度的降低，鈣離子濃度增加，因此生成的膠體屬於低膨脹性的鈣-矽膠體，而在高鹼濃度時因反應所需消耗的鹼量不多，鈣離子濃度低，生成高膨脹性的鈉-矽膠體，會對混凝土產生危害。粒料中的矽將隨著非膨脹性的鈣-矽膠體，自粒料中擴散而出，而卜作嵐材料能與氫氧化鈣起反應，減緩鹼矽粒料反應的發生。此學說強調只有氫氧化鈣才會參與反應，混凝土內鈣離子將控制反應生成物的形式。



- A. 基材中的孔隙溶液，包括 Ca^{++} ， Na^+ ， OH^- ，水分等
- B. 最初之C-N-S-H無膨脹行膠體，其中鈣含量取決於孔隙溶液中之 Na^+ 濃度
- C. 孔隙溶液中之離子因擴散作用穿越膠體和蛋白石反應
- 膨脹的：低 Ca^{++} → N-S-H膠體膨脹
安全的：高 Ca^{++} → 無N-S-H膠體膨脹
- D. 為安全反應， H_3SiO_4 會因使膠體(水、 Ca^{++} Na^+)擴散滲入而溶出
- E. Ca^{++} 和N-S-H膠體反應釋出 Na^+ ，使 Na^+ 再度生成

圖2-1 Powers 與 Steinour's 之蛋白石顆粒反應模式⁽³²⁾

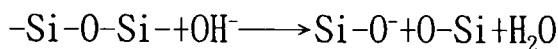
(2) Chatterji 之學說

Chatterji 認為活性矽粒料在 pH 值大於 7 的環境下， OH^- 會滲透到粒料內部，滲透量隨著孔隙溶液 pH 值的增加或離子強度的提升而增加，滲透量的大小依序為鉀離子 > 鈉離子 > 鋰離子 > 鈣離子。活性粒料因 OH^- 作用而釋出部分的矽離子，釋出量多寡則由鈣離子濃度所控制，鈣離子濃度愈高，釋出量愈少，若鉀、鈉、鋰、鈣離子或 OH^- 及水分等的滲入量大於矽的擴散量，將會

產生膨脹。孔隙溶液中增加鹼濃度，將加速鹼質與粒料反應的發生。此學說認為水泥漿體中之鈣離子濃度控制活性粒料中矽的擴散或滲透相對量。

2-3-2 鹼質與粒料反應的過程

綜合上述鹼質與粒料反應可能的機理，整理出如圖2-2所示較易瞭解的過程⁽¹⁶⁾，當水泥水化後其孔隙溶液中會產生鈉（帶一個正電荷）、鉀（帶一個正電荷）、鈣（帶二個正電荷）、氫氧根（帶一個負電荷）等離子，若混凝土中含有活性粒料，氫氧根離子會打斷粒料中結合能量較低的矽氧鍵結（結晶不完整），產生帶負電的-Si-O⁻：



帶負電的-Si-O⁻基於平衡原則須與帶正電的陽離子結合，形成穩定的反應產物，反應過程中，鈉和鉀離子因帶一個正電，其原子比鈣小較容易和-Si-O⁻先結合成鹼矽膠體(alkali-silica gel)。此鹼矽膠體在有水的情況下會吸水膨脹，造成混凝土內部產生膨脹壓力，混凝土本身無法承受此內部壓力時，混凝土體積增加導致龜裂以釋放內部壓力。鹼矽膠體在形成初期，因尚未吸水呈較乾的膠體，吸水後除會造成體積膨脹外，膠體黏度亦會降低，若持續吸水，會變成流體狀物質，流至混凝土中的孔隙而降低鹼矽膠體的膨脹壓力。

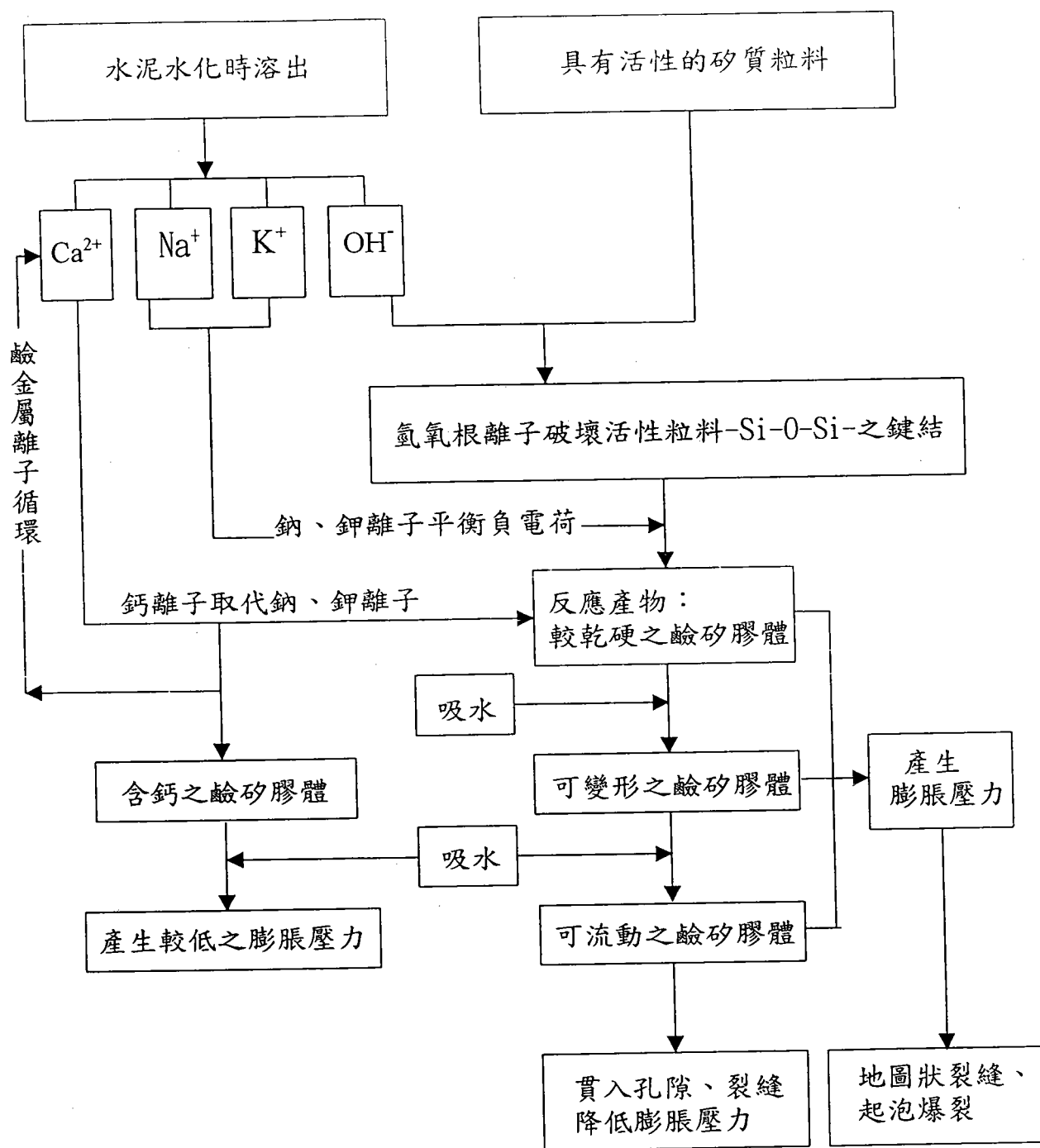


圖2-2 鹼質與粒料反應之過程

2-3-3 鹼金屬的來源

水泥材料為混凝土中主要的鹼金屬來源，在水泥產製高溫燒結的過程中，鹼金屬會被揮發出來，如未隨其他廢氣排入大氣中，會在廢熱回收和預熱系統中循環，而與硫酸鹽結合成硫酸鈉、硫酸鉀或兩者之固溶液 (solid solution)，這類含鹼金屬的硫酸鹽為水溶性質，在混凝土拌和時通常會溶解出來。在燒結水泥時，部份鹼金屬會以固溶液的型態進入水泥單礦物，存在於水泥中，其中鈉會取代鋁酸三鈣 (C_3A) 中的鈣形成 NaC_3A ；鉀會取代矽酸二鈣 (C_2S) 中的鈣形成 $KC_{23}S_{12}$ 。水泥水化後單礦物中之鹼金屬多數會隨水化過程釋出，進入孔隙溶液參與鹼質與粒料反應⁽¹⁶⁾。

增加水泥的用量將增加混凝土構造物的含鹼量，同時會增加發生鹼質與粒料反應的機會，為防止混凝土發生鹼質與粒料反應，ASTM規定混凝土中所使用的水泥其總含鹼量不得超過0.6%，而英國則規定混凝土中總含鹼量不得超過 3kg/m^3 。圖2-3為Swamy研究水泥中總鹼量與膨脹量的關係⁽²⁶⁾，但不同地區因水泥性質不同會有不一樣的結果。目前國內產製的水泥部份鹼含量已經超過0.6%的規定，此外使用高水泥用量之混凝土，即使其水泥含鹼量未超過0.6%，但混凝土總鹼含量亦有可能超過 3kg/m^3 。

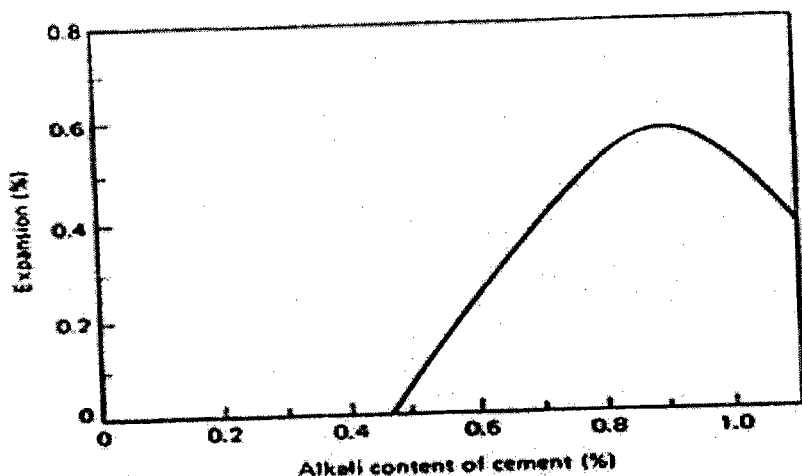


圖2-3 水泥中鹼含量對鹼質與粒料反應膨脹量之關係

混凝土材料中水、附加劑、海水、去冰鹽、含鹼鹽之粒料等，亦為混凝土中鹼金屬的可能來源^(1,2)，目前相關規範對這些材料的最低含鹼量尚無規定。

對於總含鹼量如未考慮氯離子的影響，可以公式(1)計算之

(19)

$$Na_2O_{eq} = Na_2O \% + 0.658 (K_2O) \% < 0.60 \% \dots\dots\dots(1)$$

式中 Na_2O_{eq} 為水泥之當量含鹼量

總含鹼量考慮氯離子的影響時，則以公式(2)計算之⁽¹²⁾

$$R_t = R_2O/100 \times C + 0.9 Cl^- + R_m < 3kg/m^3 \dots\dots\dots(2)$$

式中 R_t ；混凝土之總含鹼量 (kg/m^3)

R_2O ；水泥之總含鹼量 (%)

R_m ；混合粒料之總含鹼量 (%)

C ；水泥單位用量 (kg/m^3)

Cl^- ；細粒料含氯離子量 (%)

2-3-4 活性粒料

活性粒料與一般正常粒料的差異，主要在其結晶構造，一般正常粒料其結晶完整如圖2-4(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質與粒料反應；活性粒料則結晶不完整如圖2-4(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，造成鹼質與粒料反應。可能產生鹼質與粒料反應的活性粒料包括⁽¹⁹⁾：

- (1) 結晶不良或含水的矽質粒料
- (2) 含玻璃質或半結晶的粒料
- (3) 微細結晶或半結晶的石英
- (4) 曾受極大應力發生結晶變形的石英

可能產生鹼質與粒料反應的礦物：蛋白石、方英石、鱗英石、酸類或中性類基性火山玻璃、玉燧石、隱晶質或粗晶質大顆粒且結晶格子扭曲或富次生包體之石英、微石英。其反應岩種包括頁岩、砂岩、矽化碳酸岩、燧石、流紋岩、英安岩、玄武岩、千枚岩、板岩、安山岩、石英岩、石英雲母片岩、片麻岩、片麻狀片麻岩、長石砂岩、粉砂岩、火山岩、泥質板岩、

粗屑岩、花崗岩、花崗閃石岩、，此外白雲石則為鹼碳酸岩反應岩類。

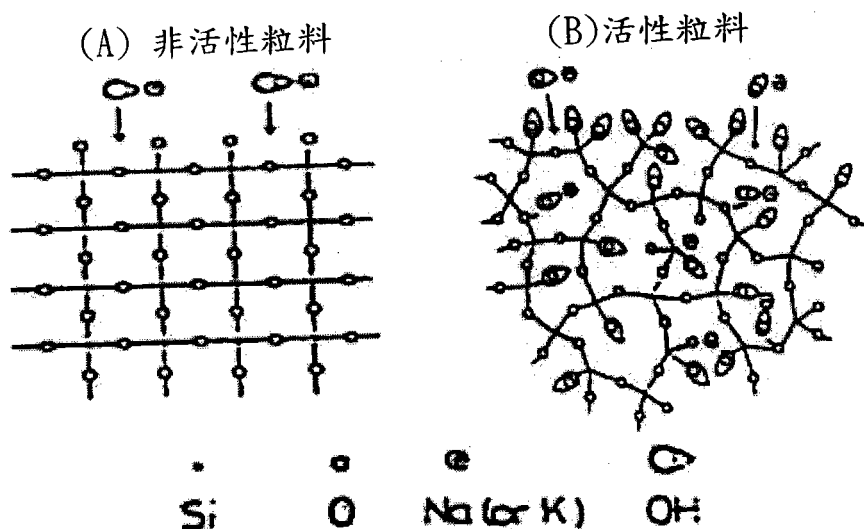


圖2-4 粒料之結晶構造示意圖

2-4 影響鹼質與粒料反應膨脹的因素

2-4-1 鹼含量對鹼質與粒料反應的影響

鹼金屬的種類和膠體的膨脹量有關，混凝土中主要的鹼含量來源，一般以氫氧化鉀及氫氧化鈉為主。在加速試驗中以不同的氫氧化鹽（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaOH 、 KOH 等）來提高試體含鹼量，以氯化鈉來模擬海水對混凝土的影響。氫氧化鉀及氫氧化鈉會提高溶液中氫氧根離子濃度及鹼含量，加速反應速度，氯化鈉則因和水泥中 C_3A 及水化產物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反應，形成 C_3ACaCl_2 將氫氧根

離子置換出來，無形中增加氫氧根離子濃度，故當混凝土受到海水作用時，發生鹼質與粒料反應的機會增加⁽²⁴⁾。

Davis指出在早期反應過程中，氫氧化鉀所生成的膠體比氫氧化鈉快，但是在晚期階段總膨脹量以氫氧化鈉所生成的膠體較大⁽⁴⁶⁾。

2-4-2 活性粒料對鹼質與粒料反應的影響

活性粒料對鹼質與粒料反應的影響主要包括：(1) 二氧化矽之性質 (2) 二氧化矽之數量 (3) 粒徑大小。

(1) 二氧化矽之性質

一般粒料的活性程度視Si-O鍵結情形而定，可能形成的活性粒料有：結晶不完全的矽質粒料、玻璃質或半結晶的矽質粒料、結晶小的石英、曾受極大應力破壞或變形之石英晶體等。粒料是否具有活性，一般可用岩相分析、粒料反應潛能之化學分析法及水泥砂漿棒膨脹試驗法等來作為判斷依據。

(2) 二氧化矽之數量

混凝土膨脹量會隨著具活性二氧化矽之數量的增加而增大，但當活性二氧化矽之數量超過某一限量後，膨脹量反而降低，此一膨脹量臨界點所對應的活性粒料量稱為「pessimism percentage」。當活性粒料數量較低時，粒料經氫氧根離子分解後，二氧化矽會與孔隙溶液中游離鹼金屬離子結合，僅會造成局部膨脹，此時膨脹量會隨著活性粒料含量的增加而增加。但當活性粒料含量過多時，如無氫氧根離子可充分滲入粒料內部進行結合反應時，膨脹量反而會降低。

(3) 粒徑大小

活性粒料之粒徑大小對鹼質與粒料反應之影響，亦具有 pessimum 的現象，中間粒徑的粒料會有較大的膨脹量，粒料粒徑較小時其表面積增加分散了反應中心，粒料粒徑較大時，則因接觸面積減少，其膨脹量均較中間粒料的粒徑小，如圖2-5所示。

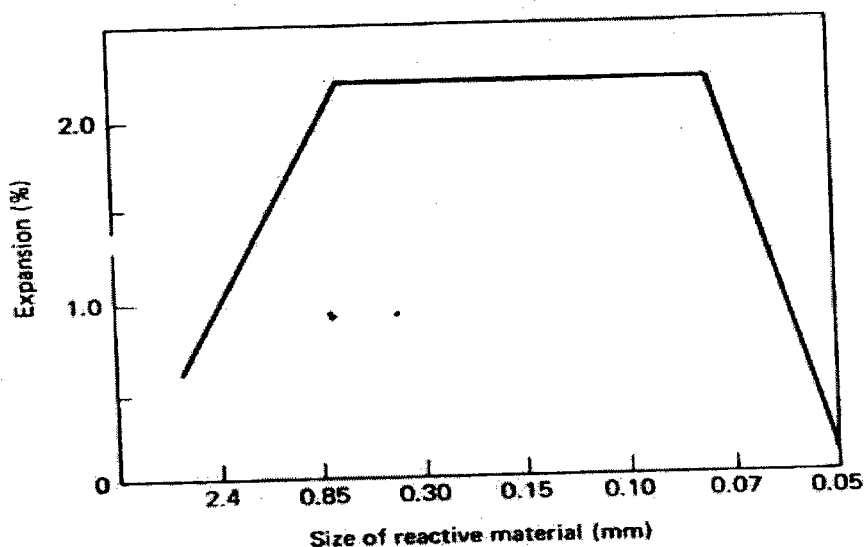


圖2-5 活性粒料粒徑對鹼質與粒料反應膨脹量之影響⁽¹⁹⁾

2-4-3 鈣離子濃度對鹼質與粒料反應的影響

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)，鈉、鉀離子釋放出來後，會進入孔隙溶液中繼續與活性粒料反應生成鹼矽膠體，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⁽³²⁾。

2-4-4 孔隙溶液對鹼質與粒料反應的影響

鹼質與粒料反應在同一結構上，發生反應可能是局部發生的，包括不同大小的地圖形裂縫面積、範圍，其發生取決於孔隙溶液的性質，即其局部的反應成分；混凝土粒料如為低吸收性的，孔隙溶液會大部分侷限在粒料以外的孔隙中，粒料如為多孔性，則粒料孔隙亦會有孔隙溶液的存在，就轉換區而言，由於其相對於粒料及漿體的多孔性，高鹼性的孔隙溶液容易充滿其中，粒料的比表面積在相同粒料孔隙率下，對於發生鹼質與粒料反應的速率而言就顯得相當重要。文獻中指出較大的活性粒料，發生鹼質與粒料反應相對於較小的粒料較遲緩，僅有較細的活粒料存在時，其鹼質與粒料反應的速率相對較快，太細的活性性粒料摻配於混凝土中，其鹼質與粒料反應甚至於快到在水化時期就已完成。

2-4-5 溫度對鹼質與粒料反應之影響

一般而言，若提高溫度將使反應速率增加，如水分充足則膨脹很快就會發生。但溫度提高亦會造成水分的蒸發，膠體吸收到的水分量也會減少，反而減緩反應的發生。試體養護溫度在 40℃ 左右，其膨脹量較大，Hobbs 指出過低的溫度例如在 4℃ 時，水泥砂漿棒一年的膨脹量約僅為 20℃ 時之 30% ⁽¹⁹⁾。

2-4-6 濕度對鹼質與粒料反應之影響

水泥砂漿試體或混凝土構造物實際所處環境之濕度會影響混凝土中孔隙溶液的鹼濃度以及鹼質與粒料反應過程中所供給的

水量，在低溼度環境下，孔隙溶液的鹼濃度上升，初期反應過程活潑，但在某一界線以下的溼度環境中，不會進行吸水膨脹，一般而言，此界線約為相對溼度 85%；相對溼度若大於 90%，容易起泡爆裂。此外水泥砂漿之膨脹量與存在於水泥砂漿由溼度決定的自由水成正比關係，如圖 2-6 所示。。

2-4-7 水灰比對鹼質與粒料反應之影響

混凝土澆置過程中，若改變水灰比則不僅將影響到孔隙溶液中的鹼濃度且將影響到混凝土的物理性質，這些都會影響到鹼質與粒料反應的進行。

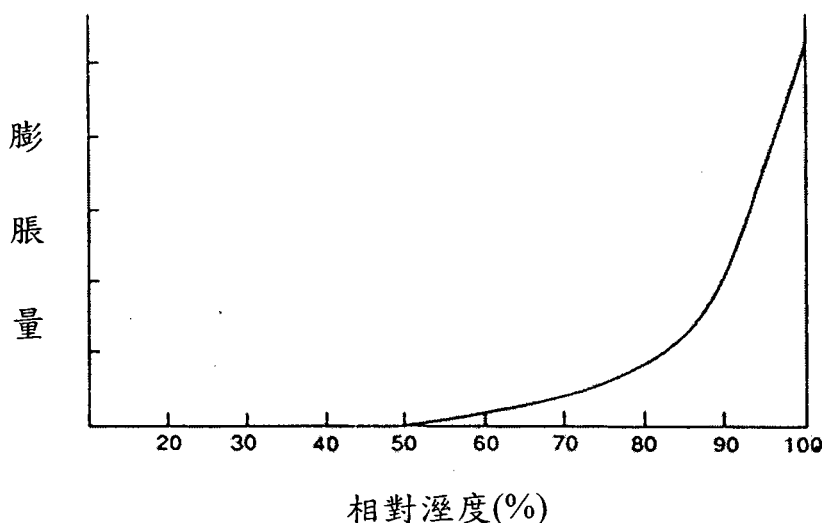


圖2-6 相對溼度對鹼質與粒料反應膨脹量之影響⁽²⁶⁾

2-5 混凝土構造物發生鹼質與粒料反應之原因

混凝土構造物發生鹼粒料反應有三個條件必須同時存在，除了混凝土本身條件與所處環境外，與混凝土構造物的處理有密切關係，茲分述如下：

(1) 電化學去鹽法

電化學去鹽法主要用於混凝土構造物鋼筋已發生腐蝕現象者，係利用電學原理將混凝土內部氯離子移出，減少鋼筋受氯離子侵蝕的程度，達到防止鋼筋腐蝕的效果。使用電化學去鹽法，氯化物解離同時氯離子被移至混凝土構造物表面外，混凝土內帶正電之鈉、鉀、鈣等離子會增加其 pH 值，即使原混凝土中的含鹼量未達產生鹼質與粒料反應的程度，也會因此提高其含鹼量，若混凝土使用含有活性之粒料及處於潮濕環境等條件下，將發生鹼質與粒料反應。

(2) 電化學還鹼法

電化學還鹼法係將已中性化之混凝土構造物，運用電化學原理予以改善，恢復混凝土高鹼性性質以達到保護內部鋼筋的目的，一般而言，還鹼工法使用的電解液有氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 碳酸鈉 (Na_2CO_3)、硝酸鈉 (NaNO_2) 等，因係將混凝土構造物內部改善為高鹼性環境，會造成孔隙溶液中鹼金屬離子的增加，提高混凝土發生鹼質與粒料反應的機率。。

(3) 在去冰鹽的環境中

Sibbick 等指出在鹽份溶液之浸泡實驗中，混凝土即使其 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 的含量比英國規範規定的最低含量 (3kg/m^3) 還少，或混凝土構造物使用時間已超過 20 年，也會發生鹼質與粒料反應。混凝土暴露於去冰鹽環境中，因發生鹼質與粒料反應，膨脹會持續發展⁽²⁴⁾，其中混凝土中之鋁酸三鈣 (C_3A) 含量與氯化鈉扮演相當重要的角色，水泥中 C_3A 含量較高的試體因發生鹼質與粒料反應的關係，其膨脹量高於 C_3A 含量低的試體。

(4) 在有水的環境中

水是混凝土發生鹼質與粒料反應的三項主要條件之一，當混凝土本身具有活性粒料及處於高鹼含量環境中，在有水的潮濕環境下，將會產生具危害的鹼質與粒料反應⁽¹⁹⁾。

(5) 其它

乾濕循環、凍融循環、曝露於較高溫度的環境等，也會造成或加速鹼質與粒料反應，同樣的混凝土在不同的環境下，發生鹼值與粒料反應的程度也會不同。

在一項快速試驗中指出⁽³³⁾，混凝土試體發生鹼質與粒料反應其膨脹量與浸泡溶液侵入試體的速率和浸泡溶液中氫氧根離子的濃度有密切關係，溫度愈高，會有比較大的膨脹量。

2-6 鹼質與粒料反應之徵候判測

2-6-1 混凝土構造物外部徵候

由於鹼質與粒料反應是一種內部的化學性反應，故混凝土內

如發生鹼質與粒料反應最直接反應於外部特徵即是龜裂，鹼質與粒料反應在平面混凝土所造成龜裂如圖2-7所示⁽¹⁹⁾，導致混凝土發生龜裂之發展模型如圖2-8所示^(19, 20)。其中第一階段的反應為膠質產物生成，內應力開始發生但不出現微裂縫；第二階段為內應力大到足以使活性粒料周圍產生微裂縫，但膨脹仍未顯著發生；第三階段為膠質移動進入一些微裂縫中並重新衍生出新的內應力；第四階段則在填滿膠體的微裂縫中產生明顯的膨脹，而使內應力增加造成裂縫再擴張延伸。

在海洋環境下混凝土會因乾濕循環以及硫酸鹽侵蝕、氯離子侵蝕、甚至凍融循環等原因，造成混凝土構造物表面發生裂縫。純混凝土構造物發生鹼質與粒料反應後，其表面裂縫呈不規則的地圖狀，如圖2-8所示。裂縫的寬度及密度隨著膨脹量的增加而增加。在環境條件不變下，裂縫寬度及密度會隨著膨脹量的增加而增加。其裂縫寬度可從小於0.1mm到成長至15mm之間⁽¹³⁾。由於混凝土中粒料分佈的不規則性，發生鹼質與粒料反應的裂縫，其生成多始於活性粒料較集中位置形成焦點中心，數條不同走向的裂痕併交會於焦點中心⁽¹⁹⁾，於混凝土表面甚至有起泡爆裂的現象，如圖2-10所示。在未受磨蝕與沖刷時，混凝土表面裂縫處可觀察到滲出呈透明、白色或濕點狀之反應物（膠體），圖2-11及圖2-12為其外部徵候之一。

混凝土內如有排列鋼筋存在時，發生鹼質與粒料反應所產生的裂縫會受到內部鋼筋的束制，以鋼筋混凝土樑為例，為呈平行於橫向鋼筋的方向，柱則為呈平行於縱向鋼筋的方向，當鹼質與粒料反應已達極度惡化時，混凝土表面才會發生地圖狀裂縫，如圖2-13及圖2-14所示。

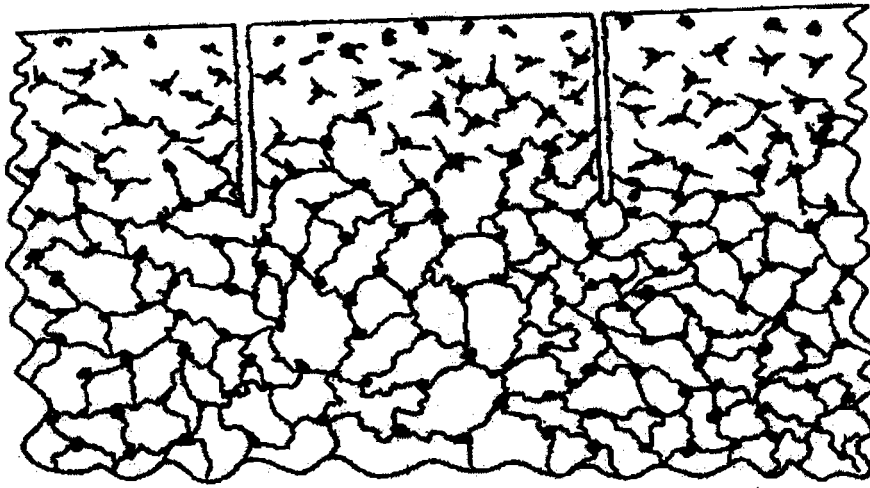


圖 2-7 鹼質與粒料反應在平面混凝土所造成典型裂縫型式

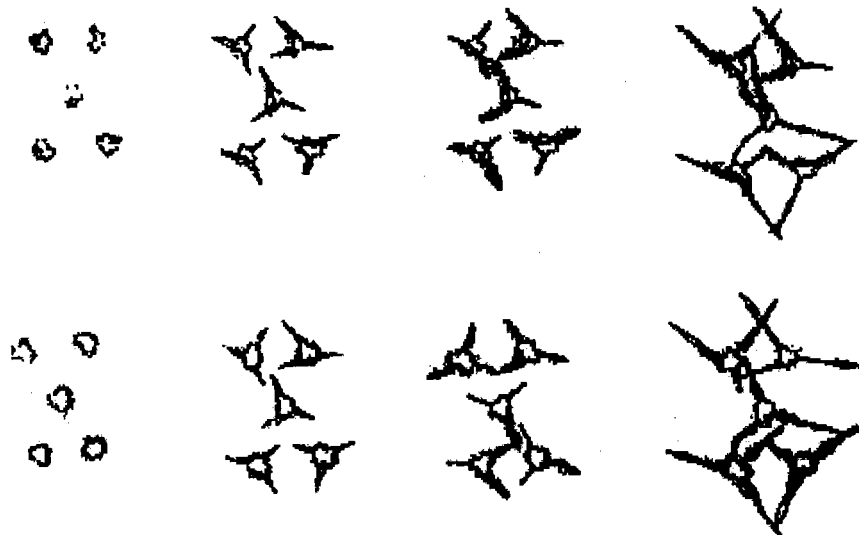


圖2-8 鹼質與粒料反應引起裂縫典型模式

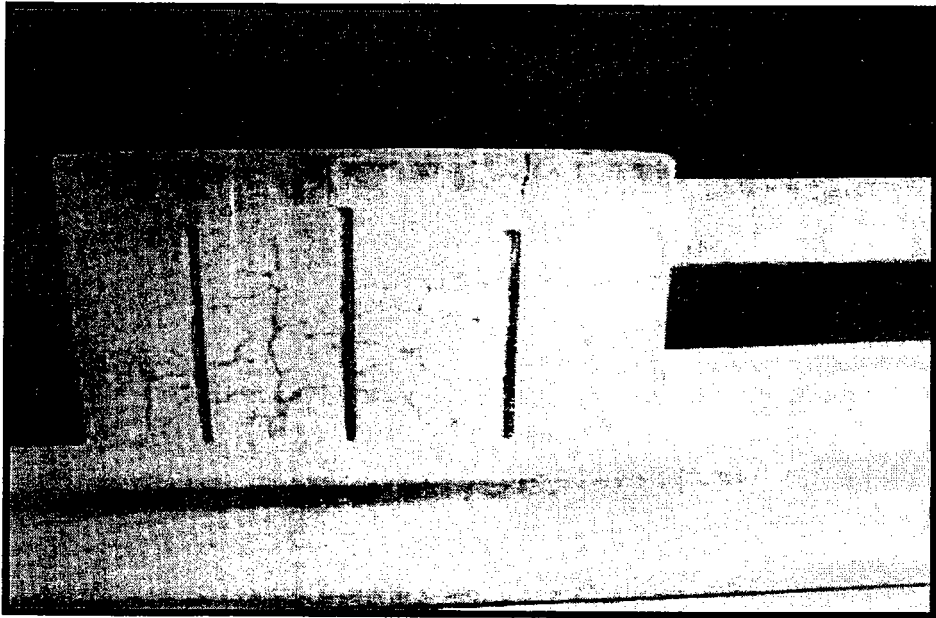


圖2-9 橋樑護欄鹼質與粒料反應之表面裂縫情形⁽²¹⁾

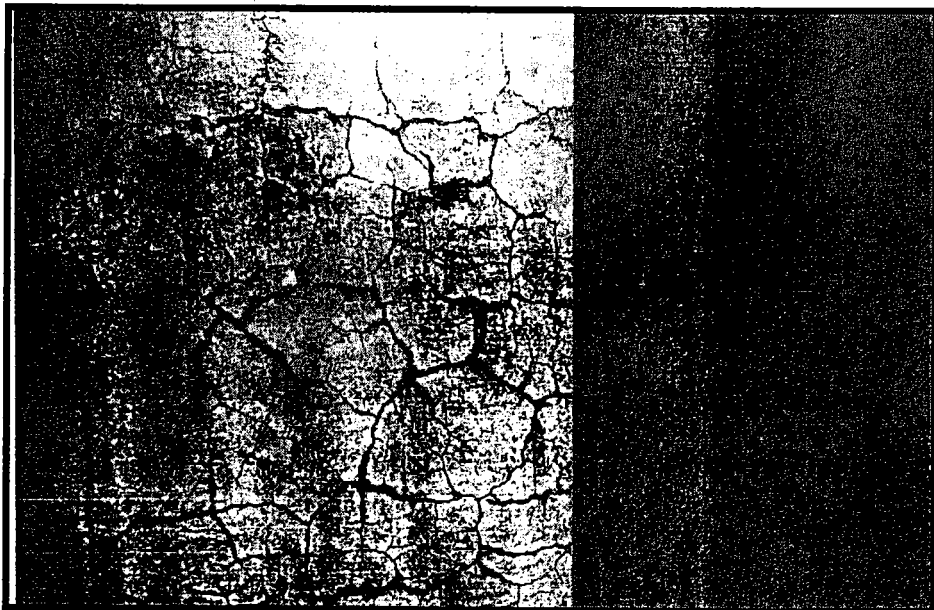


圖2-10 鹼質與粒料反應構造物爆裂情形⁽²¹⁾

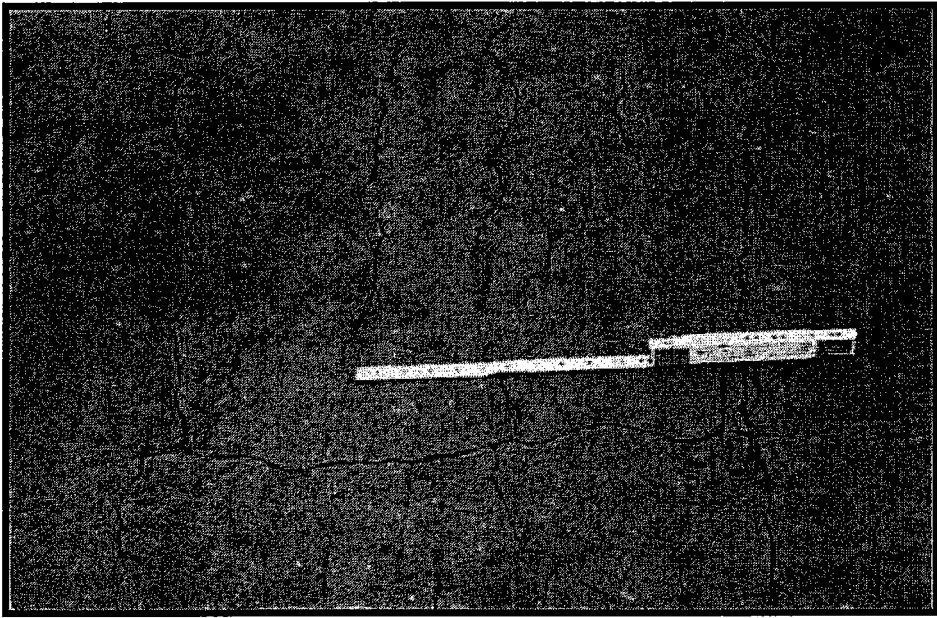


圖2-11 混凝土發生鹼質與粒料反應之外部徵候之一⁽¹⁹⁾

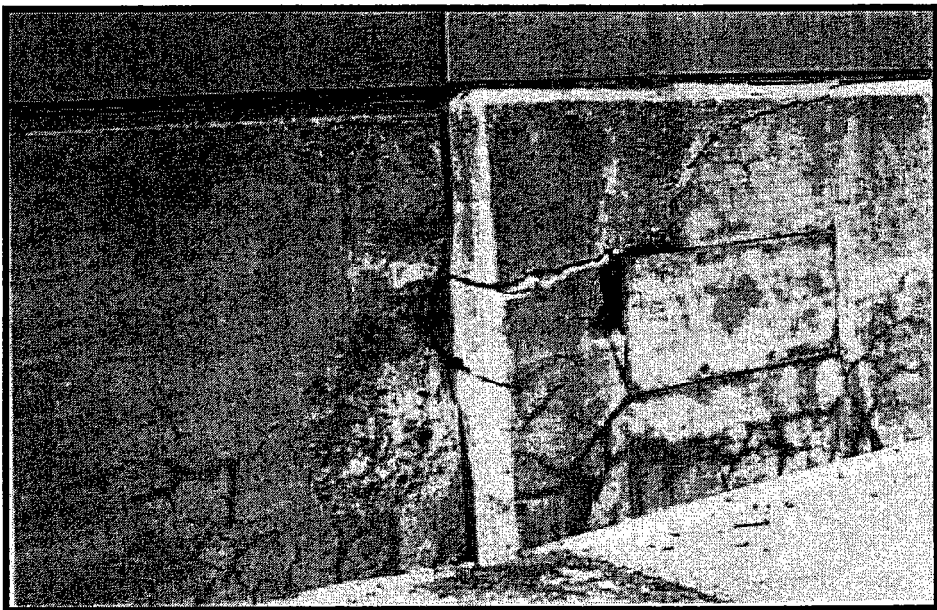


圖2-12 混凝土發生鹼質與粒料反應之外部徵候之二⁽¹⁹⁾

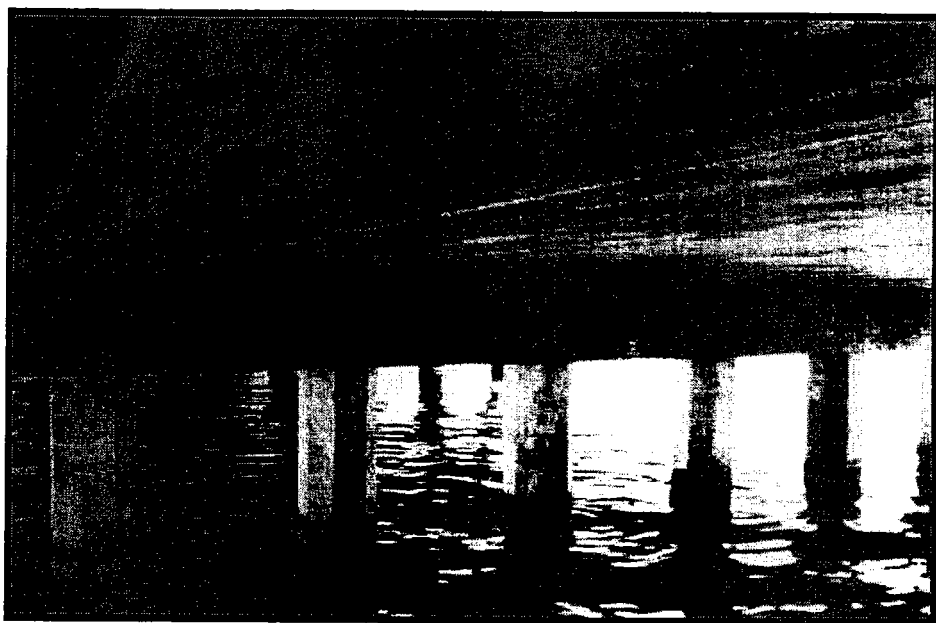


圖2-13 鋼筋混凝土樑發生鹼質與粒料反應之外部徵候⁽¹⁹⁾

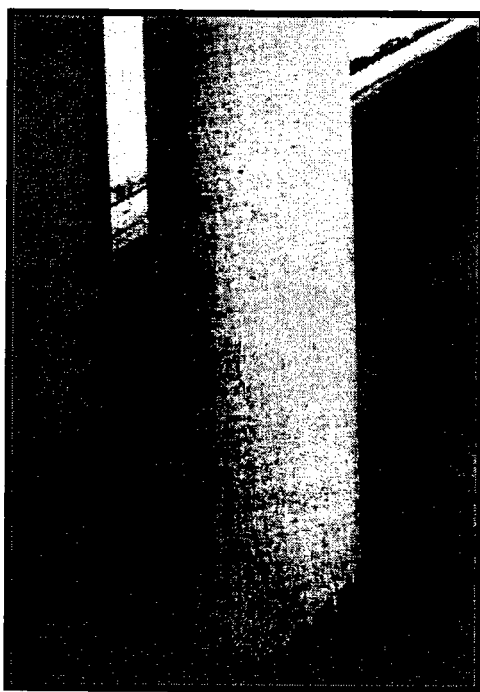


圖2-14 鋼筋混凝土柱發生鹼質與粒料反應之內部徵候⁽¹⁹⁾

2-6-2 混凝土構造物內部徵候

混凝土發生鹼質與粒料反應後，其內部徵候包括⁽¹⁶⁾：

- (1) 微細裂縫過粒料，連接孔隙，並延伸至水泥漿。
- (2) 在裂縫或孔隙中發現無色或白色半透明之反應物。
- (3) 粒料周圍有暗色的反應圈。

由於混凝土構造物發生鹼質與粒料反應時，外部出現地圖狀裂縫的徵候，此裂縫係由混凝土內部生成逐漸擴散至表面，裂縫深度通常出現在混凝土暴露面下的25—150mm深的範圍內⁽²⁰⁾。因此觀察混凝土內部是否存在有微細裂縫是確認鹼質與粒料反應重要的方法之一，活性矽與水泥中的鹼金屬反應生成鹼矽膠體並吸水膨脹，使混凝土構造物發生龜裂，混凝土表面部分甚可看到呈透明、白色或濕點狀的物質，此物質由混凝土內部生成後由裂縫流出。混凝土發生鹼質與粒料反應後，內部存在鹼矽膠體之反應物，反應順序為先在粒料周圍再逐漸滲入粒料內部，粒料周圍有否出現暗色的反應圈，亦是判定鹼質與粒料反應的重點之一⁽¹⁹⁾，內部徵候如圖2-15及圖2-17所示。

2-7 鹼質與粒料反應之改善與維修方法

混凝土發生鹼質與粒料反應須具備以下條件^(1, 19)：

- 1、孔隙溶液中有氫氧根離子與鹼金屬離子
- 2、粒料含有活性矽成分
- 3、具有充足的水分

預防鹼質與粒料反應策略時，應掌控其發生條件，若能控

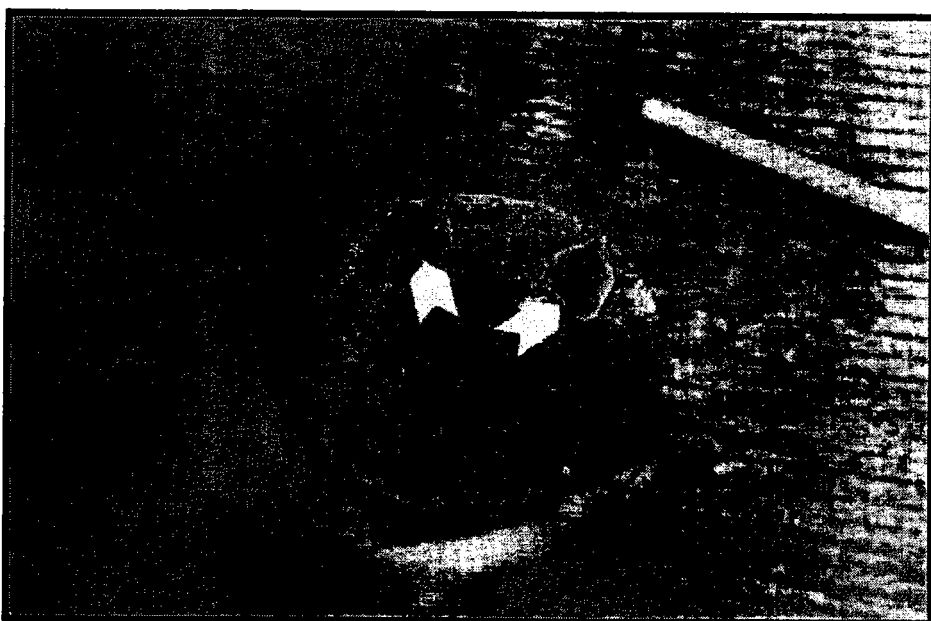


圖2-15 混凝土發生鹼質與粒料反應之內部徵候之一⁽²¹⁾

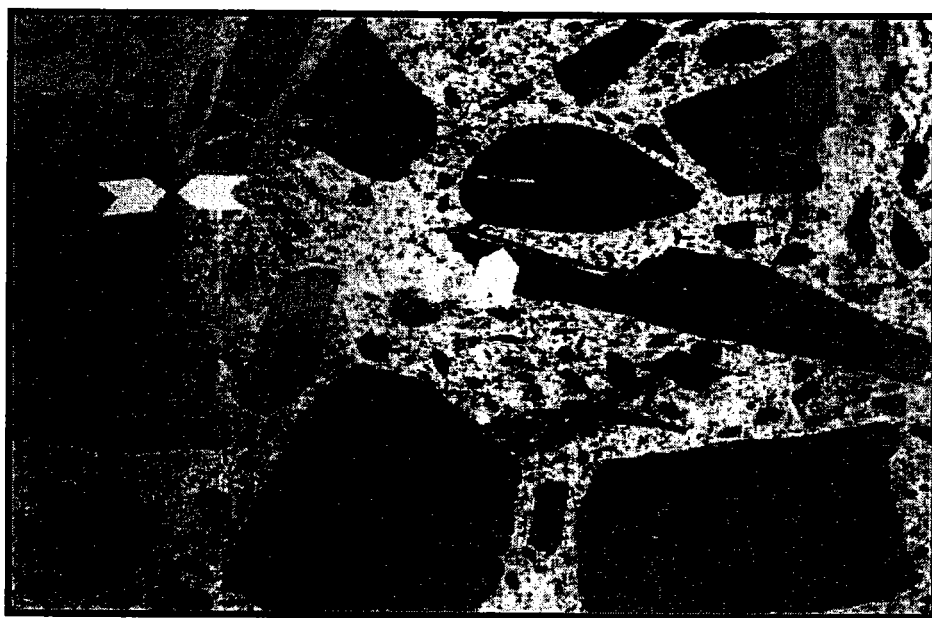


圖2-16 混凝土發生鹼質與粒料反應之內部徵候之二⁽²¹⁾

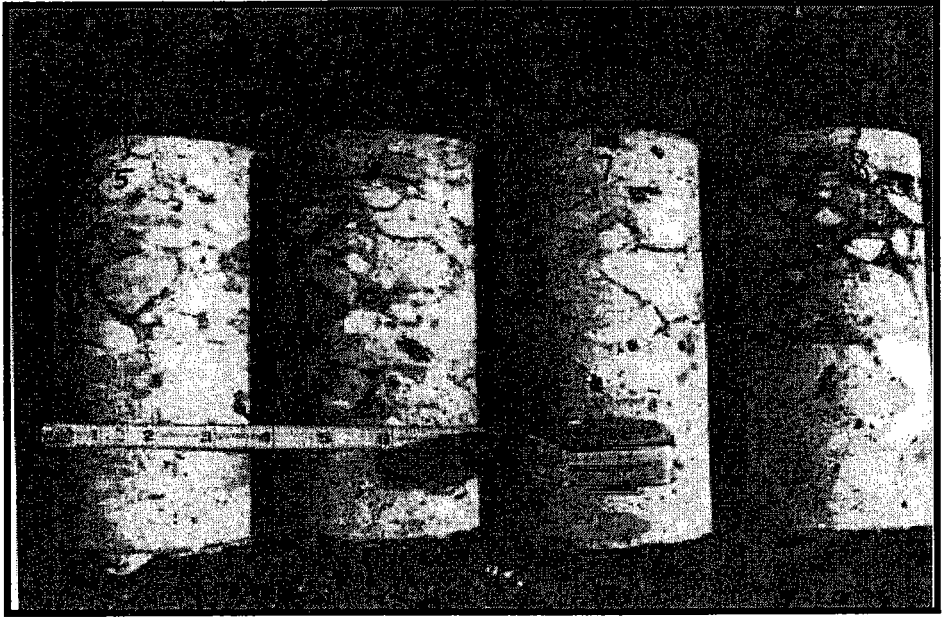


圖2-17 混凝土發生鹼質與粒料反應之內部徵候之一⁽²¹⁾

制其任何一項不使發生則可降低發生機會，一般預防策略包含如下列方法：

- (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) 摻用適當的卜作嵐材料
- (7) 做好混凝土的防水工作
- (8) 使用品質良好的粒料

混凝土構造物發生鹼質與粒料反應後，除了表面會有地圖狀的裂縫，嚴重時會起泡爆裂，影響混凝土之設計功能和服務性，降低混凝土之強度，甚至造成構造物崩毀。發現混凝土構造物發生鹼質與粒料反應後，應先評估結構物安全性，並進行下列改善步驟：

- (1) 利用可行的方法，探討構造物是否合乎原設計需求。
- (2) 移除環境中水份，以減緩鹼質與粒料反應作用。
- (3) 填補裂縫。
- (4) 覆蓋構造物表面。
- (5) 定期監測。

改善現有混凝土發生鹼質與粒料反應的方法，以填補裂縫及覆蓋構造物表面最常應用，惟其工法會因施工材料品質、施工良劣和外在環境、材料壽命及維修材料與混凝土相容性等問題而影響成效。

在現有混凝土構造物中，最可行的方法為排除或斷絕混凝土中的水份^(16, 19)，以表面封阻為最有效的方法，因此使用於表面封阻的材料特性，為改善混凝土鹼質與粒料反應最重要的因素。

混凝土發生鹼質與粒料反應後，維修方法主要有下列幾種：

2-7-1 表面被覆法

混凝土發生鹼質與粒料反應所生成的膠體，會因吸水膨脹，導致混凝土構造物無法自行吸收內部壓力，進而膨脹造成構造物產生裂縫以釋放內部壓力。在反應初期，表面封阻法對於防止混凝土劣化有其成效，但混凝土因鹼質與粒料反應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，仍需考量結構安全結構符合要求後，再行評估改善的可行性。表面封阻法所使用的材料以環氧樹脂以及高分子材料加水泥漿居多，厚度由0.7mm以上不等，表面封阻法因僅能使混凝土表面與水隔絕，鹼質與粒料反應暫時趨緩或終止，但如水份再進入後，反應又立即恢復，因此使用表面封阻法須注意其阻水效力和封阻材料之耐久性。

2-7-2 裂縫封阻法

裂縫封阻法係以加壓的方法將封阻材料灌入混凝土構造物表面由於鹼質與粒料反應產生之裂縫中，防止水份進入混凝土構造物內部，避免膠體吸水膨脹，本法對構造物混凝土強度已降低者，因灌入封阻材料而有提升混凝土強度的作用。常用之裂縫封阻材料包括下列幾種：

- (1) 環氧樹脂 (Epoxy)
- (2) 高分子水泥漿 (Polymer cement paste)
- (3) 兩液型或單液型填縫膠

2-7-3 裂縫封阻法與表面被覆法合併使用

合併上述兩種方法使用，將裂縫先行以灌入的方法填塞，

再用覆面材料將表面被覆。由於同時混凝土表面實施封阻和被覆，對於防止水份進入可獲致較佳效果，但如橋面底版、橋墩等構造物因其所處環境條件相對溼度常偏高無法有效降低，維修採用之材料應審慎考量材料耐久性、相容性以及施工品質需要。

2-7-4 其它材料可能抑制的方法

(1) 以鋰化合物可以改善鹼質與粒料反應之膨脹行為，雖然鋰和鈉鉀一樣會和活性矽作用，但鋰離子和活性矽作用形成不溶性之產物，此化合物不會溶解也不吸水，因此不會發生膨脹性的反應。

(2) 應用電化學技術降低混凝土中含鹼量。

(3) 添加化學藥劑

構造物其損壞情況如無法修復或不符合經濟效益，必須敲除重建。

2-8 鹼質與粒料反應之檢測方法

2-8-1 混凝土粒料活性潛能檢測方法

1. 化學法

依據ASTM C289 測定矽濃度(S_c)與氫氧化鈉消耗量(R_c)，一般以繪製 R_c - S_c 座標圖（半對數圖， R_c v. s. $\log S_c$ ）後，判斷粒料是否為有害、潛在性有害或是無害，如 S_c 大於 R_c ，且 R_c 超過70，粒料試樣為具潛在活性，如果 S_c 大於 $35 + (R_c/2)$ 且 R_c 小於70，則該粒料試樣為具有害活性。

2. 水泥砂漿棒膨脹量試驗

依據 ASTM C227 規範，調整水泥含鹼量製作水泥砂漿棒（試體尺寸： $28.5 \times 25 \times 25\text{mm}$ ），定期量測其伸長量與規定數據比較判斷粒料是否具有活性，如試體三個月膨脹量大於0.05%或六個月膨脹量大於0.10%時，視粒料為具有活性反應之危害潛能。

3. 粒料岩相分析法

依據 ASTM C295 規範利用岩石礦物之偏光特性，依各岩石之光譜、偏光角、晶相及組成成分之不同，藉由偏光顯微鏡在單偏光系統及正交偏光系統進行觀察分析，可將粒料進行分類並判斷其礦物組成，試驗時需將岩石磨製成0.03 mm薄片。

4. 混凝土稜柱體膨脹量試驗

為使試驗能更符合現地混凝土構造物情況，國外目前有許多混凝土稜柱體試驗方法其試驗方法和所需條件不一，其中美國 ASTM C1293 規範係先調整水泥含鹼量製作混凝土稜柱體（試體尺寸： $285 \times 75 \times 75\text{mm}$ ）後，定期量測其伸長量據以與規定數據比較判斷粒料是否具有活性。評估方法為試體之一年膨脹量如大於0.04%時，粒料為具活性反應之危害潛能。

5. 浸泡溶液或增溫、增壓等加速試驗

前述方法因試驗所需時間甚長，無法迅速得到結果，因此各國相關研究人員正致力加速方法的研究，發展以浸泡溶液、增溫或增壓方式，期望能提早在較短時間內即可得知粒料活性潛能，以日本為例，係先製作 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 砂漿棒，添加氫氧化鉀調整水泥含鹼量至1.5%，試體於澆置24

小時後拆模置於0.15-0.02Mpa壓蒸4-5小時，以0.1% 的膨脹量作為判測是否為活性粒料的依據。

6. 其他

美國SHRP提出先用稀釋後之鈾噴於新鮮的混凝土表面，再以波長254 μm 的紫外線照射，如有淡黃綠色的螢光出現，則表示有鹼質與粒料反應⁽³²⁾。

2-8-2 現有混凝土構造物鹼質與粒料反應檢測

現有混凝土構造物除了依據其外部徵候初步判測是否有發生鹼質與粒料反應外，可進行鑽心取樣獲得試體，觀察其內部徵候及在試驗室應用儀器進行微觀分析或針對試體中之粒料進行岩相分析等試驗，並將試體利用加速方式量測其長度變化，一般多將試體置於100% 相對溼度環境或浸泡於1N NaOH溶液中再綜合研判之。

2-9 台灣地區鹼質與粒料反應之相關規範

目前中國國家標準（CNS）列有混凝土岩相分析指引（總號1361，類號A3353）、水泥與粒料之組合潛在鹼質與粒料反應試驗法（水泥砂漿棒法，總號13619，類號A3355）、粒料之潛在鹼質與二氧化矽反應性試驗法（化學法，總號13618，類號A3354）、碳酸鹽質岩石用作混凝土粒料之潛在鹼質反應性試驗法（總號13620，類號A3356），其它有關混凝土構造物鹼質與粒料反應之規定有：

1. 港灣及海岸結構物設計基準⁽¹⁰⁾

港灣及海岸結構物設計基準中提到鹼性粒料反應之對策：

為控制鹼質與粒料反應，原則上可採用下列四種任一對策為之。

- (1) 使用已確認為安全之粒料，無害的粒料即依JIS A5308 預拌混凝土附註說明書之規定辦理。可用 ASTM C289「粒料之潛在反應試驗方法」或ASTM C227「粒料之潛在反應試驗方法」替代之。
- (2) 使用低鹼水泥，須符合日本JIS A5210 卜作嵐水泥之規定。
- (3) 使用可有效控制鹼質與粒料反應之混合水泥，例如高爐水泥。
- (4) 混凝土中含鹼總量之控制
使用含鹼量每立方混凝土在3.0公斤以下之卜作嵐水泥。

2. 台灣省政府礦物局建議抑制鹼質與粒料方面的意見為⁽¹²⁾：

混凝土使用之水泥其原料採用含鈉、鉀及鹼性較低者，以減低水泥之含鹼量。

- (1) 混凝土所使用之粒料，其鹽分(NaCl)應維持在0.04%以下或氯離子含量應在0.024%以下。
- (2) 混凝土使用之混合材料，其含鹼量($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)應在0.06%以下。
- (3) 混凝土拌合用水其氯化物含量應在0.1%以下。
- (4) 鋼筋混凝土氯離子含量每立方公尺應維持在0.3kg以下。
- (5) 排除採用具有鹼質與粒料反應活性之蛋白石、玉燧石、沸石及
火山玻璃質等碎石粒料。
- (6) 鋼筋混凝土之建造材料、施工作業及養護工作應確實。

第三章 研究方法及進行步驟

3-1 試驗材料

(1) 波特蘭水泥

本研究水泥砂漿棒膨脹量試驗採用之水泥為台灣水泥公司所生產之波特蘭第 I 型水泥，其化學成分如表3-1所示。

表 3-1 水泥化學成份

檢驗項目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	不溶物	游離石灰
含量 (%)	20.90	5.96	3.58	62.34	1.61	2.16	0.09	0.57	0.465	0.14	1.44

(2) 粒料

本研究所採用之粒料主要為現有或興建中之港區混凝土構造物所採用者，粒料來源河川東部有蘭陽溪、和平溪、花蓮溪、木瓜溪、月眉溪，西部有大甲溪、濁水溪及烏溪等。其中大甲溪、濁水溪及烏溪的粒料為台中港之粒料來源，花蓮溪、濁水溪為基隆港，蘭陽溪及和平溪為蘇澳港木瓜溪、月眉溪則為花蓮港所使用。

(3) 水泥含鹼量調整

本研究水泥砂漿棒膨脹量試驗採用之水泥原有當量含鹼量為0.465%，為符合 ASTM C227 規範要求，另再添加氫氧化鈉 (NaOH)，調整其含鹼量

至1.0%

3-2 研究流程

研究流程如圖3-1所示

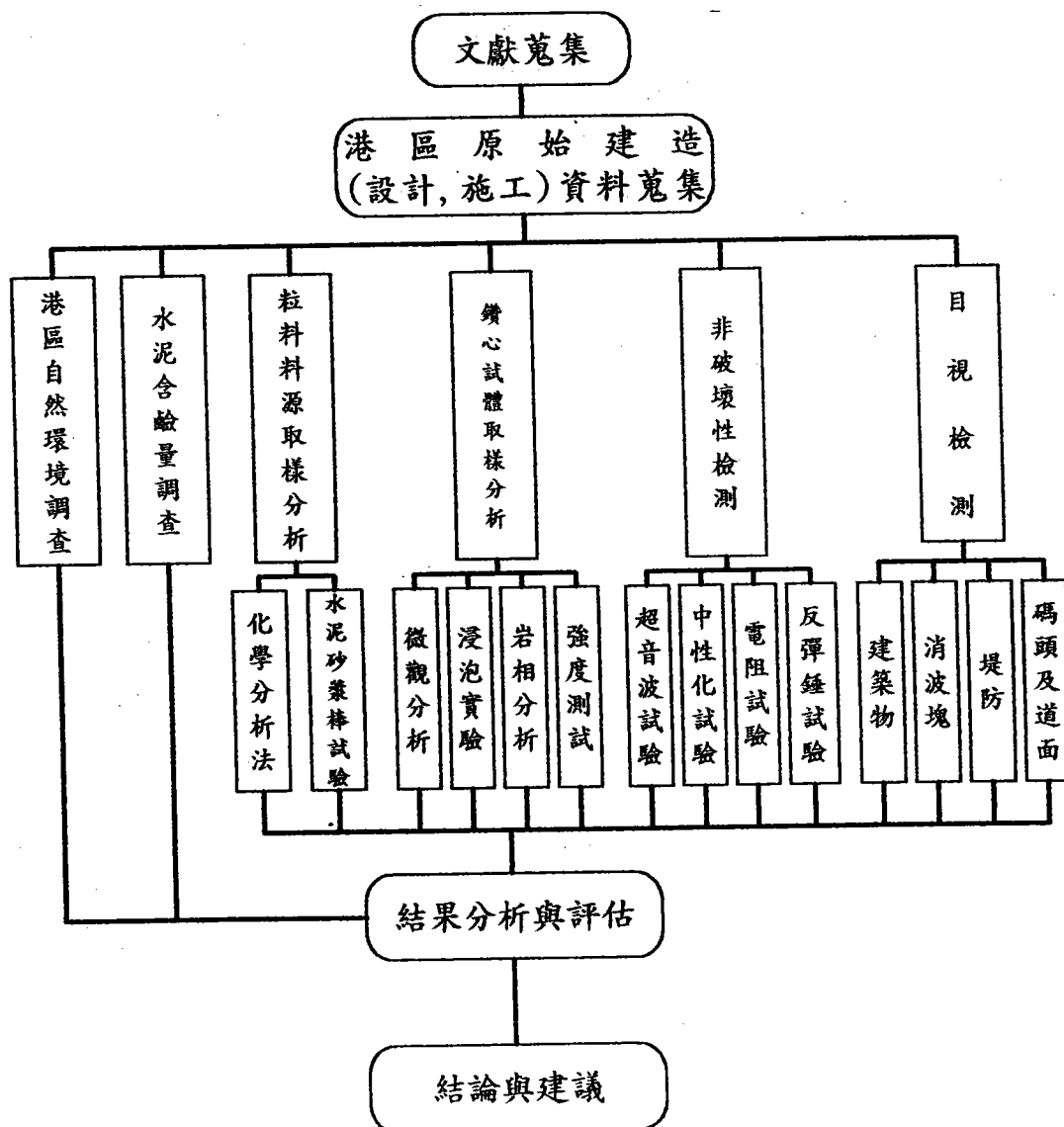


圖3-1 研究流程圖

3-3 試驗設備及分析儀器

3-3-1 現場量測設備

1. 混凝土鑽心機
2. 混凝土電阻量測儀
3. 反彈鎚
4. 超音波脈波速率試驗儀
5. 照像機

3-3-2 試驗室試驗設備

1. 數位式比長儀。
2. 灌置砂漿棒用模具。
3. 壓克力儲存槽。
4. 溫、溼度控制室。
5. 分光光度計。
6. 蒸餾水及去離子水製造機。
7. 電子天秤，精度分別為0.01、0.001、0.0001克。
8. 大型及小型顎碎機
9. X光繞射分析儀（XRD）。
10. 掃描式電子顯微鏡（SEM）。
11. 壓汞式孔隙分析儀（MIP）

3-4 調查方法與步驟

3-4-1 現場目視檢測

混凝土構造物如發生鹼質與粒料反應後，從混凝土表面的徵候可做初步判測⁽¹¹⁾，本研究首先對混凝土構造物的表面進行目視初步檢測。調查前先會同港灣技術研究所研究人員勘查現場外，並對檢測人員進行訓練後，對港區混凝土構造物進行全面性的目視檢測。

目視檢測範圍包括台中、基隆及蘇澳港港區防波堤、海

堤、消波塊、碼頭、路面、倉庫及辦公大樓。

3-4-2 現場非破壞性檢測

完成目視檢測調查後，篩選出台中、基隆蘇澳港各港區防波堤、消波塊、碼頭等可能發生鹼質與粒料反應之混凝土構造物，進行現場非破壞性檢測，各港檢測位置如圖3-2至圖3-5所示。檢測方法分述如下：

(1) 試錘試驗

以試錘(test hammer)撞擊混凝土表面所得之反彈值數據，檢測混凝土構造物之表面硬度，檢測時依構造物面積大小，選擇面積約 $1 \times 2\text{M}$ 的混凝土表面，繪製 20cm 見方之方格進行試錘試驗，每一方格測試12個數據，計算時將最大與最小值剔除後，求出平均值，依儀器所附之反彈值與混凝土抗壓強度推估曲線，獲得混凝土表面硬度。將結果與鑽心試體之抗壓強度試驗結果進行比對，探討混凝土強度變化和鹼質與粒料反應間之可能關係。

(2) 電阻係數量測

混凝土構造物內部，若含水量增加和離子濃度增加，混凝土的電阻係數會隨之降低，如有微細裂縫，所測之電阻係數與無微細裂縫混凝土構造物所測之電阻係數不同，由量測混凝土的電阻係數可間接印證鹼質與粒料反應。量測時係利用兩個探針(頭)型之電阻量測儀進行試驗。

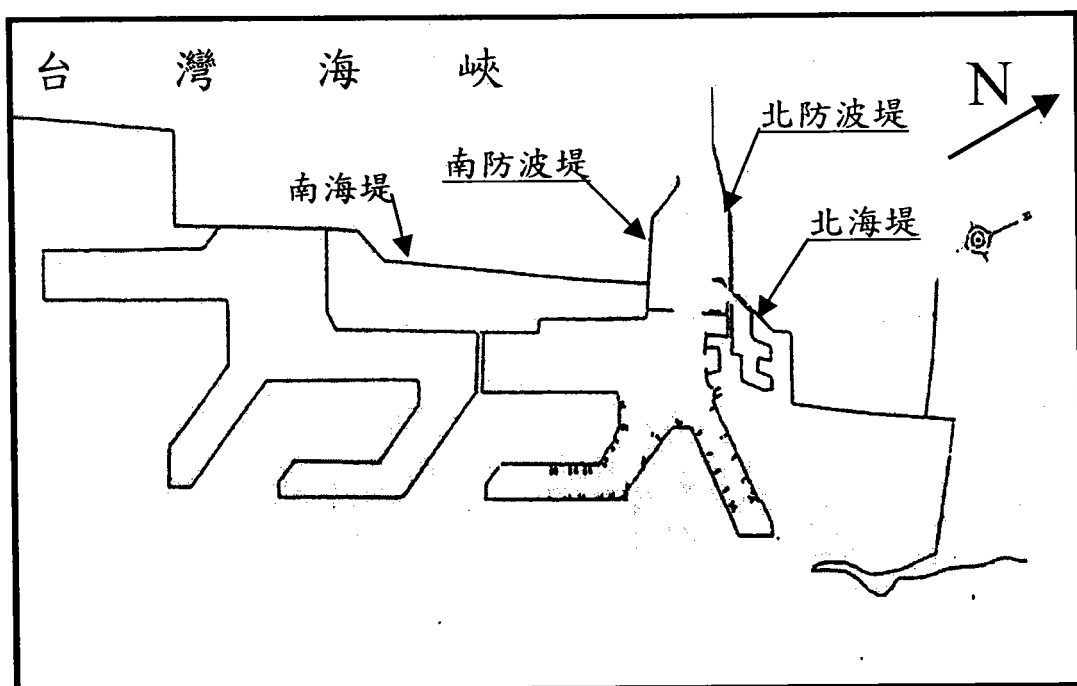


圖3-2 台中港平面圖與檢測位置

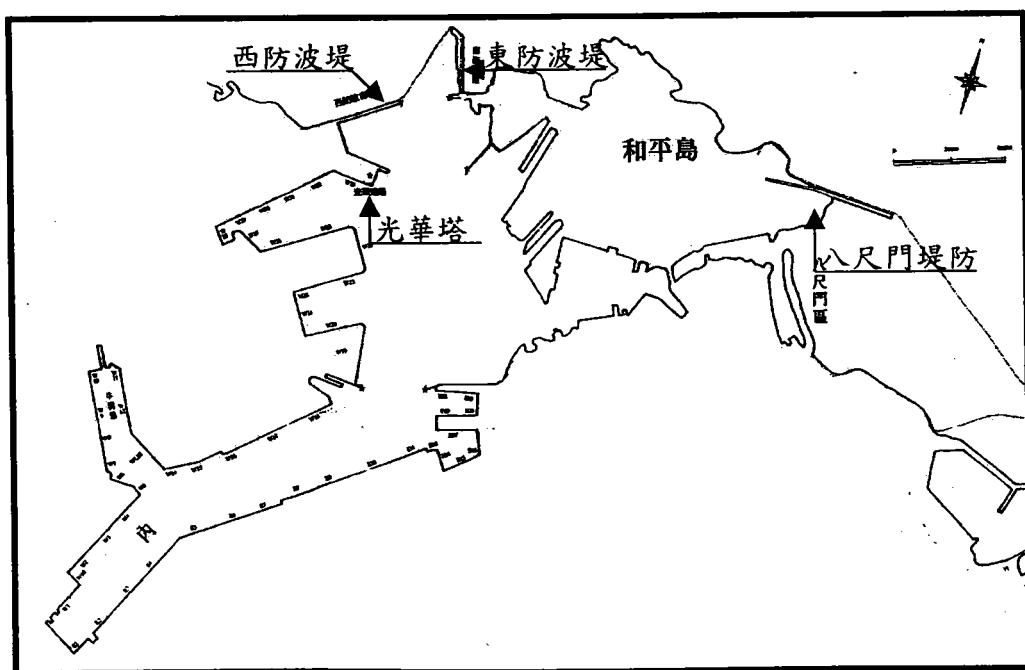


圖3-3 基隆港平面圖與檢測位置

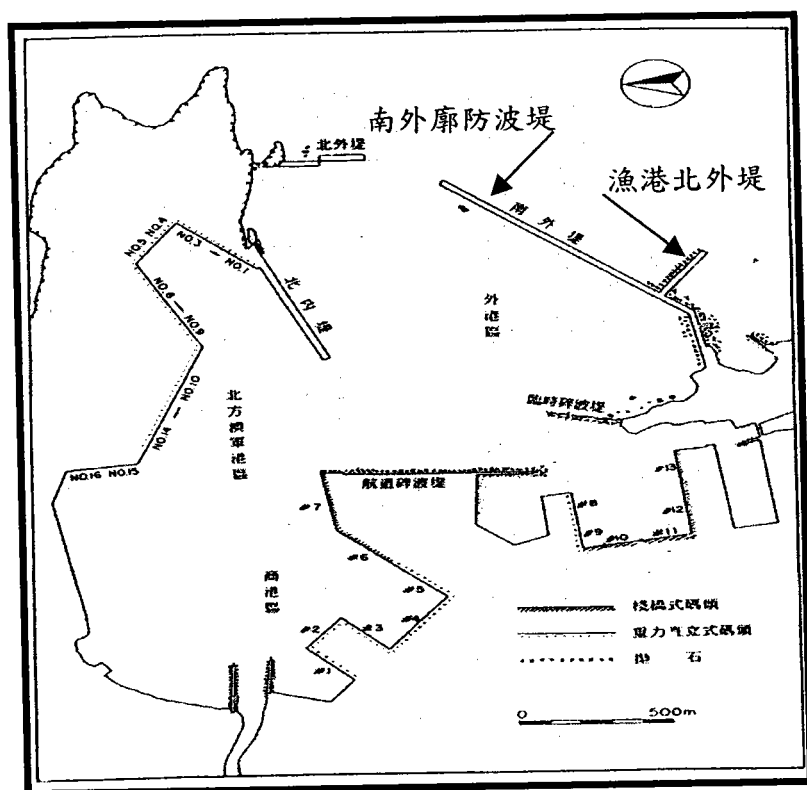


圖3-4 蘇澳港平面圖與檢測位置

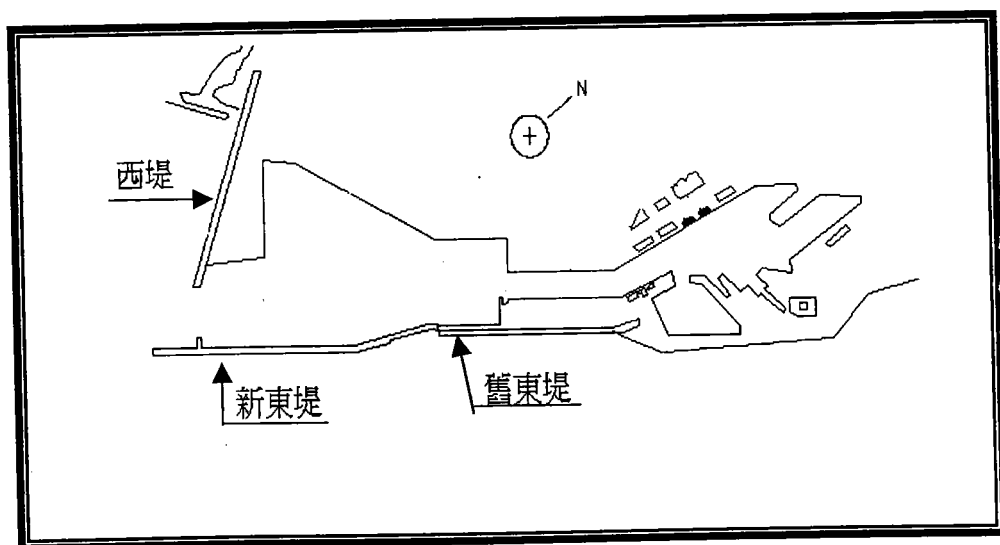


圖3-5 花蓮港平面圖與檢測位置

(3) 混凝土中性化試驗

本試驗主要係探討混凝土構造物中性化的程度，並與其他試驗結果相互比較分析。試驗時乃利用電鑽或鐵鎚敲取混凝土結構體表面小塊試體，以酚酞指示劑噴灑（刷）之，觀測混凝土試體面上顏色變化，量取其中性化深度進行判測。

3-4-3 鑽心試體之分析

利用鑽心設備鑽取混凝土構造物現有硬固混凝土之試體，將鑽心試體攜回實驗室進行岩相分析、抗壓試驗、X光繞射分析、掃描式電子顯微鏡分析與加速浸泡試驗、超音波速率量測、壓汞孔隙分析等。試驗項目敘述如下：

(1) 岩相分析

粒料具有活性為混凝土發生鹼質與粒料反應的必要條件之一。鑽心試體攜回實驗室進行切片後，委請地質專家學者鑑定岩石種類，並與活性粒料或證實為活性粒料之岩石種類進行比對，探討鑽心試體中粒料是否具有反應活性的危害潛能。

(2) 抗壓試驗

混凝土鑽心試體攜回實驗室切成適當長度後，依規範養護蓋平後進行抗壓強試驗，由其抗壓強度變化情形探討強度和鹼質與粒料反應可能的影響。

(3) X光繞射分析 (XRD)

以X光發射管發出一已知波長之X光射線，經狹縫過濾形成夾角很小的平行光，將其照射於試體上，利用接收器配合測角器，量測獲得最大X光射線強度時之角度，再由Bragg繞設定理算出結晶體之格子面間隔距離d，其公式為：

$$\lambda = 2(d/n)\sin\theta$$

式中 λ ：X光波長
 d：結晶體之格子面間隔距離
 θ ：X光射線與晶面之夾角
 n：反射次數

根據此一關係探討結晶體之構造特性，並進行礦物鑑別及定性分析。藉由XRD分析可鑑定混凝土化性（化合物）變化，進一步探討可能病變原因。

（4）掃描式電子顯微鏡分析（SEM）

係利用電子槍發射高能量聚焦電子光束，以磁力線圈的作用有系統的將電子光束在試體表面來回掃瞄，當電子光束撞擊試體表面時會在附近產生很多訊號，這些訊號基本上是低能階之次光電子，此刻若以偏壓訊號收集器來偵測訊號，則可將訊號傳輸顯現於陰極射線管上，得到試體表面外形或晶像之外觀（外觀型態，Morphology）。

SEM晶相觀察可以直接觀察到混凝土內部圍觀的構造及變化，藉由SEM分析可微觀混凝土孔隙結構分佈、晶相變化，觀察反應產物以鑑定可能病變原因，提供對試驗結果更有利

的佐證。試驗前須先對試樣做好之準備工作如下：

- (1) 自欲觀察之混凝土試體取下試樣。
- (2) 將試樣浸泡於甲醇溶液中，使試樣中之水分被其取代。
- (3) 將試樣置於烘箱內以 55°C 之溫度烘乾24小時。
- (4) 於試樣表面鍍上一層金膜或碳膜，使試樣表面可以通電，在置於儀器上進行觀察及照相。

(5) 加速浸泡實驗

將鑽心試體經適當裁切後，表面粘設測點，量出初始長度後，將試體(1)置於 38°C ，相對溼度為100%環境中和(2)浸泡於 38°C ，1N NaOH的溶液之環境，定期量測試體長度變化及觀察試體外觀徵候，藉以探討其是否發生鹼質與粒料反應。

A. 置於 38°C ，相對溼度為100%環境中

混凝土發生鹼質與粒料反應的環境條件，主要係在一定濕度以上的環境，其中以相對溼度為100%之環境影響最大。本試驗將從各港港區取回之鑽心試體經適當裁切，並於試體表面黏置測點後，置於 38°C 、相對溼度為100%環境中，分別量測其置放前與置放後一個月、三個月與五個月之測點間長度，以瞭解試體伸長量變化的情形。

B. 浸泡於38°C之1N NaOH溶液中

鑽心試體經適當裁切，並於試體表面黏置測點後，浸泡於38°C 1N NaOH的溶液中，以較高之鹼性環境促使試體鹼質與粒料反應加速進行，分別量測其置放前與置放後定期一段時間之測點間長度，以瞭解試體伸長量變化的情形。本研究於試體浸泡前與浸泡後一個月、三個月與五個月分別量測試體測點間之長度。

(6) 超音波試驗

本試驗主要係探討超音波脈波在混凝土中之傳遞速率，判斷混凝土品質及均勻穩定程度。鑽心試體應用直接法求出速率後，可配合混凝土試體密度及彈性模數，判斷混凝土品質及均勻穩定程度。

(7) 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 porosimetry, MIP)，瞭解混凝土試樣內部微觀結構中之孔隙分佈情形，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。

3-4-4 港區粒料來源砂石取樣及試驗

粒料取樣依據 CNS 10989 A3209 「現場粒料樣品減量為試驗樣品取樣法」進行。粒料取樣關係到粒料活性

試驗之代表性，取樣時應審慎實施，由各港務局相關資料顯示，各港區混凝土構造物使用粒料來源詳如3-1 (2) 所述，主要自東部及中部河川取得，本研究除蒐集各港區混凝土粒料來源活性資料外，並擇要赴現場進行採樣，攜回實驗室進行試驗，鑑定砂石試樣是否具有鹼質與粒料反應活性危害潛能。

試驗方法依據 ASTM C289 及 ASTM C227 規範進行。

(1) ASTM C289 化學法粒料活性檢測

ASTM C289 試驗係檢測粒料是否具有與鹼質反應的活性，分別測定矽濃度 Sc 與氫氧化鈉消耗量 Rc ，判別是否為有害、潛在性有害或是無害。

試驗首先製作檢量曲線，將欲進行試驗之粒料篩取、沖洗及烘乾後，分別置於耐鹼耐熱之反應容器中，並注入25ml之 1N氫氧化鈉後密封，依規定之存放時間及環境後取出冷卻後，分別使用鉬酸鉍及草酸溶液充分混勻各量瓶中之試液，測定矽濃度 Sc 與氫氧化鈉消耗量 Rc ，再依 ASTM C289 所附化學法判斷之標準圖座標位置判別是否為有害、潛在性有害或是無害，如 Sc 大於 Rc ，且 Rc 大於70，粒料試樣為具潛在活性，如果 Sc 大於 $35 + (Rc/2)$ 且 Rc 小於70，則該粒料試樣為具有害活性。

矽離子由粒料以氧化鈉溶出後，於酸性溶液中(特別是pH值在1.2~1.5間)會與鉬酸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

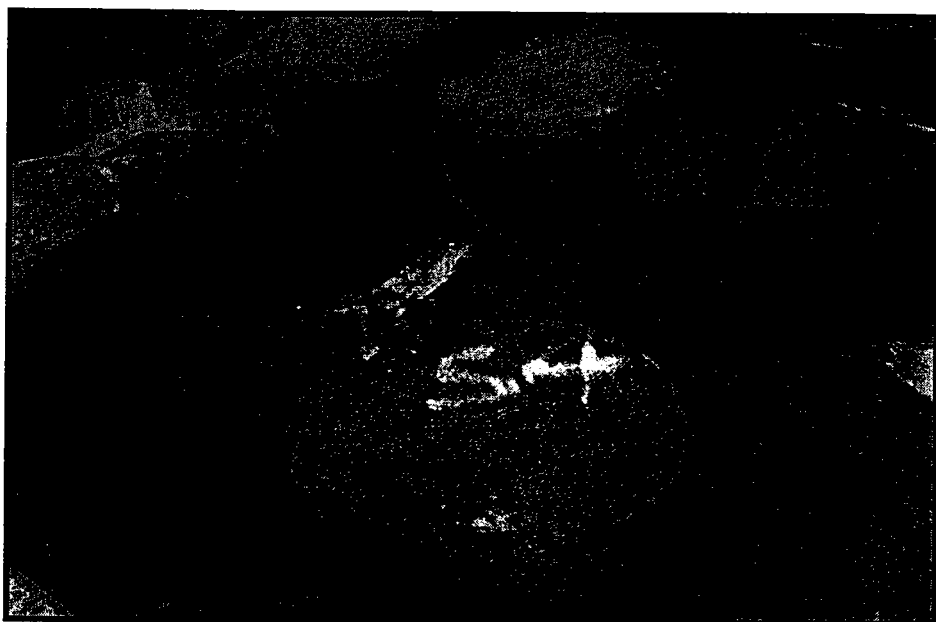
度下大致成一正比例關係，因此利用光線吸收度的原理，事先配製已知矽濃度之數種溶液，以分光光度計測定光線吸收度，製作檢量曲線，試體中溶出之矽濃度即可以分光光度計配合檢量曲線求出，氫氧化鈉之消耗量則是以滴定方式測定。

A. 製作檢量曲線

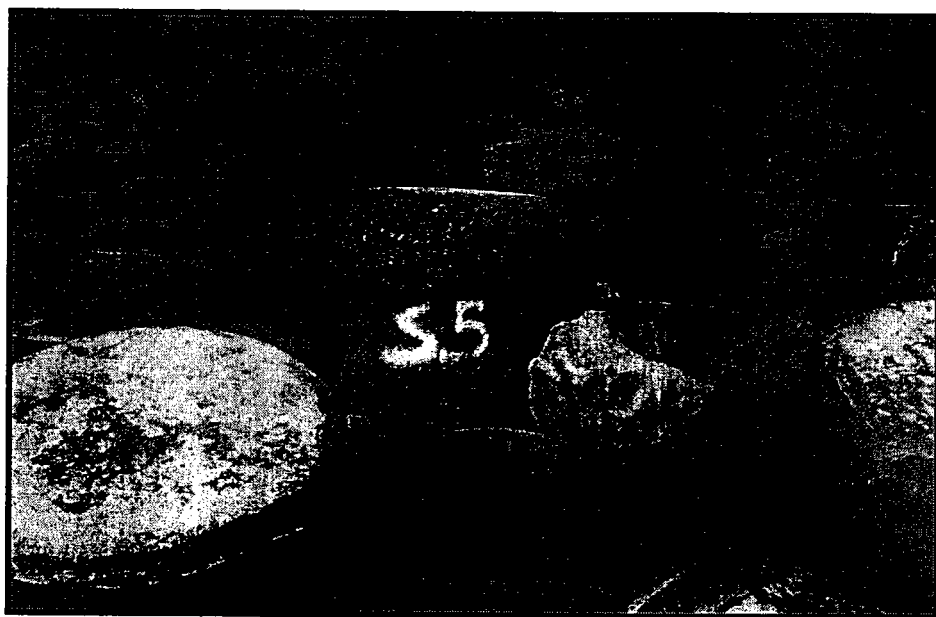
- a. 以矽酸鈉溶於水中，配製二氧化矽標準溶液(濃度為 10 mmol/l)。
- b. 溶解 10 g 之鉬酸銨($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)於 100 ml 水中。
- c. 溶解 10 g 含兩個結晶水之草酸於 100 ml 水中。
- d. 於 100 ml 量瓶中，分別加入定量之二氧化矽標準溶液，配製不同濃度之二氧化矽溶液，濃度範圍由 $0.01\text{--}0.05\text{ mmol/l}$ 。
- e. 各個量瓶中，分別加入 2 ml 之鉬酸銨溶液及 1 ml ($1+1$) 濃鹽酸溶液，以圈旋方式搖晃量瓶將試液均勻混溶之。於室溫下將溶液靜置 15 分鐘後，加入 $1.5 \pm 0.2\text{ ml}$ 之草酸溶液，再以蒸餾水稀釋至 100 ml ，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 410 nm 之分光光度計吸槽內，分別測定其光線吸收度。
- f. 將各已知濃度之矽溶液與光線吸收度，製作成檢量曲線。

B. 量測矽濃度(S_c)

- a. 將粗粒料利用小型顎碎機打碎減小粒料粒徑，以通過標稱孔寬為 4.75mm(#4)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 $150\mu\text{m}$ (#100)之部分，將樣品於標稱孔徑為 $150\mu\text{m}$ 之試驗篩上沖洗，沖洗後之樣品以 105°C 之溫度烘乾 20 ± 4 小時。
- b. 稱取三份各 $25 \pm 0.05\text{g}$ 具代表性之試樣，分置於耐鹼、耐熱的反應容器中，以吸管各加入 25ml 1N 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。
- c. 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濾液。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，並以去離子水將其稀釋至 200ml，此溶液稱為甲溶液。
- d. 於約含半滿純水之 100ml 量瓶中加入甲溶液 10ml，分別加入 2ml 之鉬酸銨溶液及 1ml 之(1+1)濃鹽酸溶液，以圈旋方式搖晃量瓶混溶之。於室溫下將溶液靜



照片17 台中港南防波堤堤消波塊開裂情形



照片18 台中港南防波堤堤消波塊混凝土粒料析離外露情形

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

式中

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上，由 S_c 與 R_c 之交叉座標點落於圖中之區域，即可判斷粒料是否具活性反應之危害潛能。

(2) ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法

本試驗係依據 ASTM C227 測定粒料中是否具有活性反應，水泥砂漿對鹼質（鈉及鉀）的氫氧化物膨脹反應，於指定養護條件下，量測儲存期間砂漿棒長度變化，而判斷其是否具反應活性之危害潛能。

參與膨脹反應之鹼金屬通常來自水泥，或可能源自外界或混凝土其他的組成成分。粒料鹼金屬反應可分成兩種型式：

(I) 鹼金屬與二氧化矽之反應：包括某些矽質砂岩、礦物，以及天然人造玻璃等。

(II) 鹼金屬與碳酸鹽之反應：包括某些方解石質、白雲岩及白雲石質、石灰石等白雲系岩類。

本試驗法較不適於檢驗第(II)種反應，因鹼金屬與碳酸鹽之反應所引起砂漿棒之膨脹量，常甚小於鹼金屬與二氧化矽之反應。

A. 器具

試驗所用器具需符合下列規定：

a. 天秤

秤量 1000g，準確至 0.1g。

b. 玻璃量筒：需符合合適容量，可一次量得足量之壘料拌合水。

c. 模具：用於測定砂漿棒之長度變化，試體之模具需為多槽併聯式，可用於製作25mm×285mm之方型柱試體，其有效標距為250mm。有效標距係指用為參考點之兩金屬螺絲最內端之間的距離。組裝完成之模具，各組件應密合牢固，且其表面需光滑無凹痕。模具需由鋼或其他抗水泥漿體侵蝕之硬質金屬製成，邊框需堅固能防扭曲變形，模子內寬許可誤差為±0.7mm，模具之每一端板於砂漿凝結之

過程中均應正確組裝穩固定位。

B. 溫度及溼度

- a. 試體模組裝室及乾燥材料存放室之溫度應為 20～27.5℃之間，而拌合水，溫養櫃或濕養室，試體長度量測室之溫度需控制在 $23.0 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 。
- b. 試體模裝室之相對溼度不得低於 50%，內部封存有試體之容器，其儲存之溫度需控制在 $37.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 。

C. 材料之選擇

粒料需符合表3-2之規定，粒料篩分成各種不同篩號粒徑後，每一尺度之粒料須於篩網上以水沖洗，除去沾附其上粉塵及細料，水洗後停留在各篩網上之部分需經乾燥處理，除非立即使用者外，各粒徑粒料之篩洗乾料需儲存於具密封頂蓋之潔淨容器中備用。

表3-2 水泥砂漿棒膨脹試驗粒料級配規定

篩號尺度		
通過	停留	重量百分比%
#4	#8	10
#8	#16	25
#16	#30	25
#30	#50	25
#50	#100	15

D. 水泥之選擇

在任一狀況下之試驗，均以 eq. Na_2O 表示之鹼含量超過 0.6% 之水泥。用於本試驗之水泥，在使用前需以孔徑為 150 μm 之試驗篩篩除結塊之部分。

E. 試驗步驟

試驗用之砂漿棒之配比為一份水泥對 2.25 份之粒料（乾基重量比對每一種水泥與粒料之組合，至少需裝作取自乙盤次之試體）。拌合水之用量須使拌成之新拌砂漿的流動度達 105-120，所用之拌合水量須以對水泥之重量百分比表示之。流動度之測定方式係按 CNS 1010 規範之相關規定，惟流動台須大約 6 秒鐘內落擊 10 次，落擊高度差 13mm，而非 CNS 1010 規範中所規定之 15 秒鐘內落擊 25 次。每一模具完成試體製作後，立即將試體併模置入濕養櫃或濕養室中，養護 24 ± 2 小時後脫模，試體經過適當標記，在濕潤狀況下量測其初始長度，量測長度須紀錄準確至 0.002mm。

試體豎立於儲存之容器內，其底部不得觸及養護水，儲存容器密封後至於溫度調控在 $37.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 之恆溫櫃或恆溫室 12 天，再將容器移置於溫度調控在 $23.0 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 恆溫櫃或恆溫室中至少 16 小時始可打開儲存容器，並俟試體齡期達 14 天時量測其長度。14 天齡期量測完成後，再將試體置回 $37.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 之儲存環境中，或對更長之齡期作量測，以獲得更多有用之資訊。一般於試體齡期為 1、2、3、4、6、9 及 12 個月時再量測期長度，12 個月後，若仍有需要，則每 6 個月至

少再量測一次。

試體夾上長度比長儀量測時，須以相同之一端向上，量測完後之試體放回儲存容器，須與前一段時間試體放置之方向相反。

反應性之判斷係參照ASTM C33附錄之規定，於六個月齡期後長度發生0.10% 以上之膨脹者，一般可認為是具有有害活性；未達六個月時，可以三個月齡期之膨脹量是否超過0.05% 以上，來判斷該組合是否具潛在有害活性。

3-4-5 國內水泥含鹼量調查

水泥是釋出鹼質最主要的材料，增加水泥的用量將增加混凝土構造物的含鹼量，會增加發生鹼質與粒料反應的機會，國內水泥製造廠家數眾多，並且分散各地，熟料性質不一，生產設備亦有差異。為預防鹼質與粒料反應發生，ASTM C150 規定水泥含鹼量不得超過 (eq. $\text{Na}_2\text{O} < 0.6\%$)，本調查擬就國內各地區水泥廠之水泥進行含鹼量調查及分析，探討發生鹼質與粒料反應之可能性。

3-4-6 環境因素調查

一般而言，混凝土構造物所處環境，長期所提供的溼度為造成鹼質與粒料反應的主要來源。由於鹼質與粒料反應所生成的膠體產物有吸水膨脹的特性，水的存在成為發生鹼質與粒料反應的必要條件之一，港區混凝土構造物因所處環境

溼度較高，故發生機率相對較高，尤以常受波浪作用之消波塊、碼頭面版底下部位、防波堤等為最。此外溫度提高將會增加鹼質與粒料反應速率，如配合充水分足則膨脹將更快發生，因此環境因素調查主要項目為溫度及相對溼度。

第四章 結果與討論

4-1 現場目視檢測

各港區現場目視檢測日期分別為：台中港：87/8/4~87/8/5 及 87/9/8~87/9/12，基隆港：87/8/11~87/8/12 及 87/9/14~87/9/15，蘇澳港：87/9/1~887/9/4，花蓮港：86/9/3~87/9/4 內容包括實地勘查及檢測、拍照後攜回試驗室進行比對，結果詳述如後：

4-1-1 混凝土道路及碼頭部份

附錄一照片 1 至照片 2 為台中港，照片 3 至照片 4 為基隆港，照片 5 至照片 6 蘇澳港，照片 7 至照片 8 花蓮港等港區混凝土道路及碼頭構造物調查結果，調查對象主要包括碼頭岸壁、鋪面及堤防混凝土道路。損壞情形，台中港以西 21 號碼頭較為明顯，基隆港為西防波堤，蘇澳港則為南外廓防波堤 SB17-18 靠港測道路。破壞型態包括了船隻撞擊損壞碼頭岸壁、混凝土道路發生橫向裂縫、縱向裂縫、角裂縫，鋪面收縮裂縫及鋼筋外露等模式。

花蓮港民國 86 年因颱風所造成的破壞，新東堤明顯可見 PC 胸牆整齊斷裂及消波室隔艙鋼筋遭拉斷的痕跡，其破壞模式經研判應屬施工縫斷裂及拉力破壞所致，可能為 PC 分層灌築時未做是當之剪力樁致設計強度無法承受外力，造成部份堤防傾倒，並撞到堤面使堤面破裂及道路緣石毀損等現象，調查時現場尚有遭海浪撞擊損毀之巨大胸牆混凝土塊，存留於道路上餘則掉入海中，況相當嚇人幸未釀成巨災，如因鹼質與粒料反應使混凝土弱化在先，進而因巨浪之衝擊力引發破壞，未來進行復舊規劃或新建設計時宜加以考量。

4-1-2 堤防部份

(1) 台中港區

附錄一照片 9 至照片 10 為台中港港區堤防損壞情形。

台中港南北防波堤及海堤則為民國 61 年至 65 年興建⁽⁷⁾，民國 84 年為改善港域穩定，北防波堤又向外興建 850 公尺長；損壞模式為伸縮縫損壞，不規則裂縫，鋼筋混凝土欄杆腐蝕劣化，鏽斑外露等。

(2) 基隆港區

附錄一照片 11 至照片 12 為基隆港港區堤防損壞情形。

基隆港東、西防波堤其建造時間可追溯至日據時期，由於使用時間較長，故有較多明顯的破損情形⁽⁸⁾，其損壞模式多為伸縮縫損壞，不規則裂縫等。

(3) 蘇澳港區

附錄一照片 13 至照片 14 為蘇澳港港區堤防損壞情形，南外廓防波堤 SB34、SB35 兩座沉箱有較嚴重的損壞，其它損壞模式包括伸縮縫損壞，不規則裂縫及沉箱接縫間鋼筋外露等。

蘇澳港外廓防波堤係建造於民國 64 年至 70 年，施工期間及其後又發生多次重大颱風災害，南外廓防波堤 SB19、SB31 兩座沉箱主體曾嚴重損毀、消波胸牆與堤面發生塌陷⁽⁹⁾，民國 85 年 8 月 SB23 沉箱海側在潮線下方發現一高約六公尺，寬約二十公尺之巨大破洞，影響防波堤結構安全甚巨。民國 71 年安迪颱風來襲更造成漁港北外堤（編號 FNB8，FNB9）兩座沉箱自水面下-3.0M~-5.0M 間攔腰折斷和南外廓防波堤 SB30~SB39 之間胸牆損毀約 136 公尺長，為防止損毀繼續發生，南外廓防波堤原有

胸牆已逐年改建為單艙式消波胸牆。

(4) 花蓮港區

附錄一照片 15 至照片 16 為花蓮港港區堤防損壞情形

a. 新東堤

新東堤全長共 1837 公尺，建造時間自民國 67 年 7 月至民國 80 年 12 月止，損壞模式包括：伸縮縫損壞、不規則裂縫、地圖形狀裂縫等。和鹼質與粒料反應之地圖狀裂縫相比對，類似部份不在少數，並可清楚看到混凝土表面地圖狀裂縫有白色的滲出物，與鹼質與粒料反應外部徵候極為相符。

b. 舊東堤

舊東堤前段（即 0K +000~0K +200）係日據時期民國 26 年所製造，中段（即 0K +200~0K +000）係民國 83 年起分四年全部翻修加固，尾段（即 1^k+000~1^k+330）除胸牆係民國 69 年加高外，沉箱仍為日據時期所建造。其龜裂範圍較新東堤輕微，少數區域有地圖狀裂縫，由其所處環境研判發生鹼質與粒料反應應機率不高。

c. 西堤

西堤全長共 1050 公尺亦屬於港務局第四期擴建部份，建造時間自民國 69 年 4 月至民國 78 年 1 月止，堤身部份發生裂痕但並不嚴重。

4-1-3 消波塊部份

(1) 台中港區

附錄一照片 17 至照片 20 為台中港消波塊調查結果，除南防波堤少數消波塊，混凝土有粒料析離現象外，尚無發現明顯地圖形裂縫。南海堤部分消波塊，更由於港區擴建後，未與海水直接接觸，外表並未發現明顯鹼質與粒料反應之特徵裂縫。

(2) 基隆港區

附錄一照片 21 至照片 24 為基隆港消波塊調查結果，其中東防波堤可明顯看到有與鹼質與粒料反應特徵相似之地圖形裂縫，將此混凝土構造物外部徵候與圖 2-9 至圖 2-12（鹼質與粒料反應的外部徵候）比對，十分類似；而且裂縫寬度大小不一，顯示裂縫仍有成長的趨勢，東防波堤消波塊具地圖形狀裂縫者，數量眾多，並有反應滲出物的情形，部份裂損相當嚴重，而西防波堤消波塊部分亦發現地圖形狀裂縫，但數量很少，且不十分明顯，從混凝土外觀判斷可能為收縮裂縫，屬於鹼質與粒料反應機率較低。光華燈塔及八尺門堤防消波塊則尚無發現明顯地圖形裂縫，八尺門消波塊部份受海浪沖蝕嚴重。

(3) 蘇澳港區

附錄一照片 25 至照片 26 為蘇澳港消波塊調查結果，漁港北外堤南北兩側之消波塊，有混凝土破損內部鋼筋生鏽腐蝕之現象，但未發現明顯地圖狀裂縫。消波塊因受波浪直接衝擊，可發現有許多破損情形，惟尚不嚴重影響防波堤之使用功能。

(4) 花蓮港區

附錄一照片 27 至照片 28 為花蓮港消波塊調查結果，花蓮港消波塊外觀有明顯之地圖狀裂縫，與鹼質與粒料反應的外部徵候頗為相符，其裂縫寬度大小不一，顯示其裂縫仍在有成長，其中西堤全區 10 噸鼎型塊及 20 噸雙 T 塊有地圖狀裂縫者為數不少，部份有白色生成物滲出，裂損相當嚴重，雖然消波塊損壞重新灌鑄排放，但如使用時間未達設計年限即已損壞，不僅不符經濟效益，就維護港區安全而言，過多消波塊發生嚴重裂損，會降低消波功能，造成受其保護之堤防崩損甚至影響港區安全。

花蓮港務局近五年已製拋超過 500 個無筋之 30 噸林克塊補充歷年流失之消波塊，使用混凝土材料水泥為卜作嵐Ⅱ型水泥，粒料來源為木瓜溪，由目視研判原吊排之 20 噸雙 T 型消波塊裂損相當嚴重，其裂損徵候與鹼質與粒料反應之外部徵候極為符合。

綜合上述各港區調查結果，基隆港東、西防波堤及花蓮港西堤消波塊破損情形，相對其他混凝土構造物較為嚴重，且混凝土外表與發生鹼質與粒料反應的外部徵候，類似吻合的數量不少，因此本研究特別增加基隆港東、西防波堤及花蓮港西堤消波塊混凝土鑽心試體試樣的個數，攜回實驗室進行相關試驗，做更進一步之探討，以明瞭發生鹼質與粒料反應的可能性。

4-1-4 建築物部份

附錄一照片 29 至照片 32 為各港港區建築物之現象，損壞情形包括：鋼筋外露，地圖狀龜裂、保護層剝落等現象，其中鋼筋外露與保護層剝落可能肇於施工及維護因素或海水鹽份的侵蝕所致，裂縫可能屬於收縮等原因，初步判斷發生鹼質與粒料反應的可能性不高，部分老舊倉庫、建物損壞情形則較其他建物損壞跡象稍為明顯。花蓮區漁會建築物，在本次調查中所發現的損壞，包括了鋼筋外露，圖形狀龜裂、保護層剝落等現象，其中鋼筋外露與保護層剝落較屬施工等因素，而圖形狀龜裂則有屬於 ASR 的可能，倉庫建物損壞情形較舊辦公區輕微。

4-2 非破壞性檢測

依據非破壞性檢測實驗結果，茲分析如下：

4-2-1 電阻係數試驗

混凝土電阻係數量測結果如表 4-2，檢測位置代號詳表 4-1。

(1) 台中港區

台中港所檢測之結構體電阻係數約在 4.1-18.0 Kohm-cm 範圍，以北防波堤及北海堤較低，老舊構造物則有稍微偏低現象。

(2) 基隆港區

基隆港所檢測之結構體電阻係數約在 5.4-22.5 Kohm-cm 範圍，以西防波堤混凝土較低，八尺門新建堤身混凝土電阻係數則較高，東防波堤消波塊則約在 9.8-20.0 Kohm-cm 左右。依據混凝土電阻係數特性，八尺門新建堤身因是較新構築之構造物，電阻係數相對較大。

(3) 蘇澳港區

蘇澳港所檢測之結構體電阻係數約在 4.1-18.0 Kohm-cm 範圍，以南外廓防波堤及漁港北外堤較低，老舊構造物則有稍微偏低現象。

(4) 花蓮港區

西堤電阻係數除了編號 W11 為 8.6 外其餘均超過 10，舊東堤堤身則均超過 10，新東堤堤身在十組測試位置中小於 10 的佔有八組，雖是較新構築之混凝土構造物，但電阻係數卻相對較小，其可能原因得討論，對照表 4-7 中花蓮港區混凝土構造物鑽心試體強度試驗值，亦可看出舊東堤堤頂的混凝土鑽心試體強度，較新東堤的鑽心試體強度高。

表4-1 電阻試驗及鑽心取樣位置試體代號

電阻試驗及鑽 心 取樣位置	試體 代號	電阻試驗及鑽 心 取樣位置	試體 代號	電阻試驗及鑽 心取樣位置	試體 代號	電阻試驗及鑽 心 取樣位置	試體 代號
北防波堤1-1	T01	八尺門消波塊01	K01	FNB4堤面1	S01	新東堤NE 1K+800	HI01
北防波堤1-2	T02	八尺門消波塊02	K02	FNB4堤面2	S02	新東堤NE 1K+600	HI02
北防波堤2-1	T03	八尺門堤面new-0	K03	FNB6堤面1	S03	新東堤NE 1K+400	HI03
北防波堤2-2	T04	八尺門堤面new-0	K04	FNB6堤面2	S04	新東堤NE 1K+200	HI04
北防波堤延長段01	T05	八尺門堤面old-0	K05	FNB北側消波塊01	S05	新東堤NE 1K+000	HI05
北防波堤延長段02	T06	八尺門堤面old-0	K06	FNB北側消波塊02	S06	新東堤NE 0K+800	HI06
北防波堤延長段03	T07	光華塔消波塊1	K07	FNB南側消波塊02	S07	新東堤NE 0K+600	HI07
北防波堤延長段04	T08	光華塔消波塊2	K08	FNB南側消波塊03	S08	新東堤NE 0K+400	HI08
北防波堤延長段05	T09	光華塔堤面1-01	K09	SB19堤面1	S09	新東堤NE 0K+200	HI09
北防波堤延長段06	T10	光華塔堤面1-02	K10	SB19堤面2	S10	新東堤NE 0K+000	HI10
北海堤堤身1-1	T11	西堤消波塊1-01	K11	SB19路面1	S11	舊東堤OE 1K+200	HI11
北海堤堤身1-2	T12	西堤消波塊1-02	K12	SB19路面2	S12	舊東堤OE 0K+690	HI12
北堤消波塊1-1	T13	西堤消波塊2-01	K13	SB26堤面1	S13	舊東堤OE 0K+360	HI13
北堤消波塊1-2	T14	西堤消波塊2-02	K14	SB26堤面2	S14	西堤W1	HI14
北堤消波塊2-1	T15	西堤消波塊3-01	K15	SB26路面1	S15	西堤W7	HI15
北堤消波塊2-2	T16	西堤消波塊3-02	K16	SB26路面2	S16	西堤W11	HI16
南防波堤消波塊1-	T17	西堤堤面1-01	K17	SB35堤面1	S17	西堤W19	HI17
南防波堤消波塊1-	T18	西堤堤面1-03	K18	SB35堤面2	S18	西堤W22	HI18
南防波堤消波塊2-	T19	西堤堤面2-01	K19	SB35路面1	S19		
南防波堤消波塊2-	T20	西堤堤面2-03	K20	SB35路面2	S20		
南防波堤堤身1-1	T21	東堤消波塊1-01	K21	碎波堤消波塊1-1	S21		
南防波堤堤身1-2	T22	東堤消波塊1-02	K22	碎波堤消波塊1-2	S22		
南防波堤堤身2-1	T23	東堤消波塊17-01	K23	碎波堤消波塊2-1	S23		
南防波堤堤身2-2	T24	東堤消波塊17-03	K24	碎波堤消波塊2-2	S24		
南海堤消波塊4-01	T25	東堤消波塊18-01	K25	碎波堤堤面1-1	S25		
南海堤消波塊4-03	T26	東堤消波塊18-03	K26	碎波堤堤面1-2	S26		
南海堤堤身S1-2	T27	東堤消波塊19-01	K27	碎波堤堤面2-1	S27		
南海堤堤身S1-3	T28	東堤消波塊19-02	K28	碎波堤堤面2-2	S28		
南海堤堤身S1-4	T29	東堤消波塊2-01	K29				
南海堤堤身S4-1	T30	東堤消波塊2-02	K30				
南海堤堤身S4-3	T31	東堤消波塊3-01	K31				
高性能混凝土短柱	T32	東堤消波塊3-03	K32				
高性能混凝土短柱	T33	東堤消波塊4-01	K33				
高性能混凝土牆身	T34	東堤消波塊4-03	K34				
高性能混凝土牆身	T35	東堤堤面1	K35				
		東堤堤面2	K36				

表4-2 混凝土構造物電阻係數量測結果

檢測位置 (台中港)	電阻係數 Kohm-cm	檢測位置 (基隆港)	電阻係數 Kohm-cm	檢測位置 (蘇澳港)	電阻係數 Kohm-cm	檢測位置 (花蓮港)	電阻係數 Kohm-cm
北防波堤1-1	7.5	八尺門消波塊01	15.5	FNB4堤面1	10.0	新東堤NE 1K+800	9
北防波堤1-2	8.5	八尺門消波塊02	14.6	FNB4堤面2	8.9	新東堤NE 1K+600*	7.6
北防波堤2-1	10.3	八尺門堤面new-01	20.1	FNB6堤面1	10.3	新東堤NE 1K+400*	11
北防波堤2-2	4.1	八尺門堤面new-02	22.4	FNB6堤面2	4.1	新東堤NE 1K+200	4.1
北防波堤延長段01	12.3	八尺門堤面old-02	13.6	FNB北側消波塊01	9.0	新東堤NE 1K+000	7.8
北防波堤延長段02	11.8	八尺門堤面old-01	15.0	FNB北側消波塊02	8.5	新東堤NE 1K+800	5.9
北防波堤延長段03	15.4	光華塔消波塊1	12.0	FNB南側消波塊02	9.8	新東堤NE 1K+600	12.6
北防波堤延長段04	15.0	光華塔消波塊2	11.2	FNB南側消波塊03	7.5	新東堤NE 1K+400	4.3
北防波堤延長段05	14.1	光華塔堤面1-01	13.6	SB19堤面1	12.0	新東堤NE 1K+200	8.7
北防波堤延長段06	10.2	光華塔堤面1-02	10.5	SB19堤面2	12.5	新東堤NE 1K+000*	6.6
北海堤堤身1-1	7.2	西堤消波塊1-01	20.1	SB19路面1	14.0	舊東堤OE 1K+200	11.8
北海堤堤身1-2	5.1	西堤消波塊1-02	14.7	SB19路面2	15.5	舊東堤OE 1K+690	11.8
北堤消波塊1-1	12.9	西堤消波塊2-01	18.5	SB26堤面1	13.2	舊東堤OE 1K+360	10.8
北堤消波塊1-2	12.2	西堤消波塊2-02	12.5	SB26堤面2	14.3	西堤W1	19.9
北堤消波塊2-1	13.5	西堤消波塊3-01	8.1	SB26路面1	12.0	西堤W7	10.8
北堤消波塊2-2	8.5	西堤消波塊3-02	9.4	SB26路面2	8.8	西堤W11	8.4
南防波堤消波塊1-1	8.9	西堤堤面1-01	12.6	SB35堤面1	12.5	西堤W19	17.5
南防波堤消波塊1-2	11.7	西堤堤面1-03	16.4	SB35堤面2	12.0	西堤W22	12.9
南防波堤消波塊2-1	17.8	西堤堤面2-01	6.3	SB35路面1	11.5		
南防波堤消波塊2-3	17.5	西堤堤面2-03	5.4	SB35路面2	9.8		
南防波堤堤身1-1	11.7	東堤消波塊1-01	12.5	碎波堤消波塊1-1	6.2		
南防波堤堤身1-2	10.7	東堤消波塊1-02	12.0	碎波堤消波塊1-2	4.2		
南防波堤堤身2-1	12.8	東堤消波塊17-01*	18.1	碎波堤消波塊2-1	7.5		
南防波堤堤身2-2	14.6	東堤消波塊17-03*	16.8	碎波堤消波塊2-2	6.3		
南海堤消波塊4-01	12.8	東堤消波塊18-01*	15.0	碎波堤堤面1-1	11.2		
南海堤消波塊4-03	15.3	東堤消波塊18-03*	11.8	碎波堤堤面1-2	9.8		
南海堤堤身SI-2	18.0	東堤消波塊19-01*	20.0	碎波堤堤面2-1	7.2		
南海堤堤身SI-3	17.6	東堤消波塊19-02*	6.8	碎波堤堤面2-2	8.9		
南海堤堤身SI-4	15.9	東堤消波塊2-01	14.6				
南海堤堤身S4-1	12.1	東堤消波塊2-02	10.0				
南海堤堤身S4-3	8.3	東堤消波塊3-01*	9.8				
		東堤消波塊3-03*	13.4				
		東堤消波塊4-01*	11.3				
		東堤消波塊4-03*	10.5				
		東堤堤面1	22.5				
		東堤堤面2	18.2				

註*: 外觀發現地圖狀裂縫

綜合上述各港區之電阻係數與表 4-3 電阻係數與腐蝕速率之關係，比照解析後，混凝土構造物如內部有配置鋼筋，則鋼筋出現腐蝕的機率頗大。

表 4-3 電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係

電阻係數 $k\Omega\cdot\text{cm}$	鋼筋腐蝕速率
<5	非常高
5-10	高
10-20	較低
>20	非常低

4-2-2 試錘試驗

包括堤防、路面、消波塊等處試錘試驗結果如表 4-4 所示。以台中港北海堤堤身，基隆港東防波堤有偏低的情形，此現象有可能是因為台中港北海堤堤身因淤沙積存，含有鹽分的水，使混凝土表面易受到風化和有害物質侵蝕。消波塊部份其強度則屬正常值以上。花蓮港施測位置為東堤及西堤兩處，其中包括東堤堤身、東堤下路面、西堤堤身、西堤堤頂、消波塊等處，舊東堤堤身以及其堤下路面之表面硬度有偏低的情形，西堤部份其堤身大致維持在設計強度 ($210\text{Kg}/\text{cm}^2$) 以上，而西堤堤面則有偏低的情形五處檢測位置有四處僅為設計之 85% 或更低此現象亦有可能是因為堤面較易積存含有鹽分的水，使混凝土表面易受到風化和侵蝕，導致反彈錘此種偏重混凝土表面硬度的試驗產生誤差。消波塊混凝土強度則屬正常值以上。

表4-2 港區混凝土構造物反彈值與抗壓強度關係

試體編號 (台中港)	反彈值	推估強 kg/cm ²	試體編號 (基隆港)	反彈值	推估強 kg/cm ²	試體編號 (蘇澳港)	反彈值	推估強 kg/cm ²	試體編號 (花蓮港)	反彈值	推估強 kg/cm ²
北防波堤消波塊1	33.0	248	光華塔堤身	33.2	250	FNB4 堤面	25.8	154	NE 1K+800	37.5	314
北防波堤消波塊2	32.2	236	光華塔消波塊	29.4	198	FNB6堤面	25.8	153	NE 1K+600	39.9	341
北防波堤消波塊3	31.4	225	東堤堤面	30.4	210	FNB北消波塊02	22.6	115	NE 1K+400	34.6	271
北海堤身1	31.9	231	八尺門OLD堤身	33.2	250	FNB消波塊01	27.0	169	NE 1K+200	42.2	386
北海堤身2	30.9	218	八尺門NEW堤身	27.1	169	SB 19路面	28.9	192	NE 1K+000	40.9	365
北堤延長段堤身1	31.5	227	八尺門消波塊	30.0	205	SB 32路面	36.7	301	NE 0K+800	39.2	338
北堤延長段堤身2	32.8	245	西堤堤身	31.7	229	SB 34 路面	20.0	83	NE 0K+600	39.6	344
北堤延長段堤身3	28.2	183	西堤堤身S2	31.8	230	南堤SB19 防波堤	33.5	255	NE 0K+400	39.8	347
北堤延長段堤身4	30.8	216	東堤消波塊1	29.0	193	南堤SB32防波堤	29.7	202	NE 0K+200	41.2	370
北堤延長段堤身5	30.6	214	東堤消波塊2	34.7	272	南堤SB34 防波堤	37.1	308	NE 0K+000	41.2	370
北堤延長段堤身6	32.8	245	東堤消波塊3	36.0	290	碎波堤消波塊 2	27.0	169	OE 1K+200	41.2	371
南防波堤SB1消波塊1	35.8	288	東堤消波塊4	37.1	308	碎波堤消波塊02	30.4	210	OE 0K+690	28.9	190
南防波堤SB1消波塊2	33.2	250	東堤消波塊5	29.6	201	碎波堤消波塊03	30.3	209	OE 0K+360	26.8	159
南防波堤SB2消波塊1	39.9	349	東堤消波塊6	29.6	200	碎波堤消波塊04	29.8	202	西堤W1	31.9	232
南防波堤SB2消波塊2	37.3	311	西堤消波塊1	27.7	177	碎波堤消波塊05	32.0	234	西堤W7	40.5	359
南防波堤SB2堤身	36.8	303	西堤消波塊2	31.2	223	碎波堤消波塊1	27.1	170	西堤W11	36.2	293
南海堤S1-1堤身	36.9	304	西堤消波塊3	34.1	263	碎波堤堤面1	30.3	209	西堤W19	30.0	205
南海堤S1-2堤身	31.6	228	西堤消波塊4	33.0	248	碎波堤堤面2	22.6	115	西堤W22	38.1	323
南海堤S4消波塊1	32.4	239	西堤消波塊5	35.5	283				W7消波塊	41.5	376
南海堤S4消波塊2	29.9	204							W7消波塊	38.7	331
南海堤S4消波塊3	29.7	201									
南海堤S4堤身	33.2	250									

4-2-3 中性化試驗

港區混凝土構造物中性化程度經試驗結果詳如表 4-5 所示，本次調查構造物之中性化程度均不高，台中港部分中性化深度在 1mm 大至 5 mm 間，基隆港和蘇澳港中性化深度亦只在 1mm 至 5 mm 間，中性化深度均尚不屬嚴重程度。花蓮港防波堤堤身之中性化程度較路面為高，若以位置區分，新東堤之中性化程度較舊東堤嚴重，而且新東堤 0^k+800 至 1^k+800 之間堤身中性化深度小則 4mm 大至 10 mm，比起蘇澳港中性化程度約 2 mm 而言有兩倍以上的差距，雖然本次實驗中性化深度最大者僅為 10 mm 尚不屬最嚴重，但是以建造時間觀察，新東堤屬較新之構造物，但混凝土中性化程度卻相對最明顯，此現象值得注意。

表4-6 混凝土中性化試驗結果

單位：mm

檢測位置 台中港	中性化 深度	檢測位置 基隆港	中性化 深度	檢測位置 蘇澳港	中性化 深度	檢測位置 花蓮港	中性化 深度
北防波堤1-1	2.5	八尺門消波塊01	1.8	FNB4堤面1	2.5	NE 0k+000堤	3.3
北防波堤1-2	2.0	八尺門消波塊02	1.5	FNB4堤面2	2.0	NE 0k+000路	2.7
北防波堤2-1	1.3	八尺門堤面new-01	3.3	FNB6堤面1	1.3	NE 0k+200堤	3.3
北防波堤2-2	1.8	八尺門堤面new-02	1.5	FNB6堤面2	1.8	NE 0k+200路	2.3
北防波堤延長段01	1.3	八尺門堤面old-01	1.0	FNB北側消波塊01	1.3	NE 0k+400堤	6.0
北防波堤延長段02	1.0	八尺門堤面old-02	1.5	FNB北側消波塊02	1.0	NE 0k+400路	3.7
北防波堤延長段03	2.0	光華塔消波塊1	1.0	FNB南側消波塊02	2.0	NE 0k+600堤	2.3
北防波堤延長段04	1.0	光華塔消波塊2	1.5	FNB南側消波塊03	1.0	NE 0k+600路	2.0
北防波堤延長段05	1.0	光華塔堤面1-01	2.0	SB19堤面1	1.0	NE 0k+800堤	10.0
北防波堤延長段06	2.5	光華塔堤面1-02	2.0	SB19堤面2	2.5	NE 0k+800路	6.7
北海堤堤身1-1	2.0	西堤消波塊1-01	1.0	SB19路面1	2.0	NE 1k+000堤	4.3
北海堤堤身1-2	1.5	西堤消波塊1-02	1.5	SB19路面2	1.5	NE 1k+000路	5.7
北堤消波塊1-1	2.0	西堤消波塊2-01	1.0	SB26堤面1	2.0	NE 1k+200堤	4.0
北堤消波塊1-2	1.5	西堤消波塊2-02	1.5	SB26堤面2	1.5	NE 1k+200路	2.7
北堤消波塊2-1	1.0	西堤消波塊3-01	1.0	SB26路面1	1.0	NE 1k+400堤	5.3
北堤消波塊2-2	1.3	西堤消波塊3-02	1.3	SB26路面2	1.3	NE 1k+400路	2.3
南防波堤消波塊1-1	4.0	西堤堤面1-01	1.5	SB35堤面1	4.0	NE 1k+600堤	5.0
南防波堤消波塊1-2	1.0	西堤堤面1-03	2.5	SB35堤面2	1.0	NE 1k+600路	4.7
南防波堤消波塊2-1	2.0	西堤堤面2-01	1.5	SB35路面1	2.0	NE 1k+800堤	5.0
南防波堤消波塊2-3	1.5	西堤堤面2-03	3.5	SB35路面2	1.5	NE 1k+800路	3.0
南防波堤堤身1-1	2.3	東堤消波塊1-01	2.0	碎波堤消波塊1-1	2.3	NE 0k+430路	3.0
南防波堤堤身1-2	1.5	東堤消波塊1-02	2.5	碎波堤消波塊1-2	1.5	OE 0k+360堤	1.3
南防波堤堤身2-1	1.5	東堤消波塊17-01	1.5	碎波堤消波塊2-1	1.5	OE 0k+360路	0.7
南防波堤堤身2-2	2.3	東堤消波塊17-03	2.5	碎波堤消波塊2-2	2.3	OE 0k+690堤	2.7
南海堤消波塊4-01	1.8	東堤消波塊18-01	1.5	碎波堤堤面1-1	1.8	OE 0k+690路	2.0
南海堤消波塊4-03	3.0	東堤消波塊18-03	2.0	碎波堤堤面1-2	3.0	OE 1k+200堤	3.7
南海堤堤身S1-2	2.0	東堤消波塊19-01	1.5	碎波堤堤面2-1	2.0	OE 1k+200路	4.3
南海堤堤身S1-3	2.0	東堤消波塊19-02	2.0	碎波堤堤面2-2	2.0	W1堤身	6.3
南海堤堤身S1-3	1.0	東堤消波塊2-01	1.5			W1堤面	5.0
南海堤堤身S1-4	1.0	東堤消波塊2-02	1.5			W7堤身	2.0
南海堤堤身S1-4	2.5	東堤消波塊3-01	1.0			W7堤面	3.7
南海堤堤身S4-1	2.3	東堤消波塊3-03	2.0			W11堤身	2.7
南海堤堤身S4-3	1.5	東堤消波塊4-01	3.5			W11堤面	2.3
高性能混凝土短柱1	1.3	東堤消波塊4-03	3.0			W19堤身	8.3
高性能混凝土短柱2	2.0	東堤堤面1	1.5			W19堤面	7.7
高性能混凝土牆身1	1.5	東堤堤面2	2.5			W22堤身	5.0
高性能混凝土牆身2	1.5					W22堤面	3.3

4-3 鑽心取樣試驗

4-3-1 鑽心試體抗壓強度試驗

表 4-7 為鑽心試體抗壓強度試驗結果。本試驗係將取回直徑為 10 公分、長度約為 30 公分之圓柱鑽心試體，進行裁切成為直徑為 10 公分長度為 10 至 20 公分之試體，經以研磨機將兩

表 4-7 港區混凝土構造物鑽心試體抗壓強度試驗值

試體編號		抗壓強度 Kg/cm ²	試體編號		抗壓強度 Kg/cm ²
台中港	北海堤堤身1-1	235	蘇澳港	FNB南側消波塊	299
	南防波堤消波塊2-2	318		SB35堤面	289
	南防波堤堤身1-3	212		碎波堤堤面1	289
	南海堤消波塊S4-2	348		碎波堤堤面2	305
	南海堤堤身S1	329	花蓮港	新東堤 0 ^K +255	385
	南海堤堤身S4-2	303		新東堤 0 ^K +360	327
基隆港	西堤堤面2-2B	312		新東堤 0 ^K +800	375
	西堤堤面1-2	239		新東堤 1 ^K +200	366
	東堤消波塊1-3	178		新東堤 1 ^K +250	307
	東堤消波塊17-2	418		舊東堤 OE N	240
	東堤消波塊19-3	334		舊東堤 0 ^K +000	424
	東堤消波塊2-3	167		舊東堤 0 ^K +360	253
	東堤消波塊3-2	297		NE 1 ^K +625 V	408
	東堤消波塊4-2	394		NE 1 ^K +625 L	250
	-----	----		新東堤下路面 NE 1 ^K +625	419

面磨平後，依據 ASTM C39-93a 之試驗規範進行試體抗壓強度試驗，藉以瞭解混凝土目前之強度狀況，鑽心取樣的位置對堤身約為在 160 公分高之位置，堤面及消波塊的取樣位置；取樣時多以隨機取樣的方式進行，如有明顯外部徵候之構造物，亦為本次取樣之目標。試驗結果顯示混凝土強度多大於 210Kg/cm^2 之設計強度，多處並超過 280Kg/cm^2 ，顯示混凝土構造物抗壓強度並無弱化跡象，由於有明顯外部徵候之消波塊鑽心取樣時，並未特別選取裂縫發生處，因此其強度與其他試體並無明顯減小的現象。

4-3-2 鑽心試體之 X 光繞射分析 (XRD)

表 4-8 為鑽心試體之 X 光繞射分析測試結果，本試驗係將各港港區混凝土構造物，將鑽心試體擇要敲取碎片，各試樣壓碎之碎片分袋，分別取出部份碎片，依規定研磨至通過所需篩號 (#100) 之粉末，進行 XRD 實驗，試驗結果如附錄二所示，經比對可能具有活性之成分，活性成分主要有 Tridymite (鱗英石)、Cristobalite (方英石)、 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ (鹼矽膠體) 及可能使混凝土發生膨脹之 Ettringite (鈣釩石) 等，含有鹼矽膠體之試樣數量以基隆港東防波堤消波塊最多，經比對消波塊外觀與鹼質與粒料反應外部徵候相似，顯示確有發生鹼質與粒料反應之跡象。蘇澳港含有鹼矽膠體之試樣數量次之，台中港最少，但混凝土外觀尚無明顯外部徵候，此可能為膠體之數量仍少尚不足構成立即性危害，長期而言，則有發生之潛能。

表 4-8 XRD 試驗各點位置及可能具活性之成分

港區	位置	可能具活性之成分			
台中港	南海堤堤身 S1	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈	蘇澳港	碎波堤堤面1	Tridymite Cristobalite
	南海堤堤身 S4-2	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		碎波堤消波塊1	Tridymite
	南海堤消波塊 S4-1	Tridymite		SB19堤面1	Tridymite
	高性能混凝土短柱	Tridymite		SB26堤面1	Tridymite
	南防波堤消波塊 1-1	Tridymite		SB35堤面1	Tridymite Cristobalite
	北防波堤延長段 3	Tridymite Cristobalite Ettringite		FNB4堤面1	Tridymite
	北海堤堤身 2-1	Tridymite		FNB6 堤面 1	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈
	北防波堤消波塊 1-1	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		FNB北側消波塊	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈
	北防波堤堤面 2	Tridymite		FNB南側消波塊	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈
基隆港	東堤堤面 1	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈	花蓮港	NE 0 ^k +255	Tridymite Cristobalite
	東堤消波塊 1-1	Tridymite		NE 0 ^k +360	Tridymite Cristobalite Opal
	東堤消波塊 2-2	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		NE 0 ^k +800	Tridymite Cristobalite
	東堤消波塊 3-2	Tridymite		NE 1 ^k +200	Tridymite
	東堤消波塊 4-1	Tridymite		NE 1 ^k +250	Tridymite
	東堤消波塊 17-2	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		NE1 ^k +625 牆身	Tridymite
	東堤消波塊 18-2	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		NE 1 ^k +625v	Tridymite
	東堤消波塊 19-2	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		堤頂 NE0 ^k +360	Tridymite
	西堤堤身 1-3	Tridymite Cristobalite		OE N	Tridymite Cristobalite
	西堤堤身 2-2	Tridymite		OE 0	Tridymite
	西堤消波塊 3-1	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		W11A	Tridymite
	光華堤身 1-2	Tridymite (Ca, Na)(Si, Al) ₄ O ₈		西堤消波塊	Tridymite

註：Tridymite：鱗英石 Cristobalite：方英石 (Ca, Na)(Si, Al)₄O₈：鹼矽膠體

Ettringite：鈣鉬石 白雲石 Dolomite

4-3-3 鑽心試體斷面粒料之岩相分析

表 4-9 及表 4-12 為鑽心試體斷面之粒料岩相分析結果。本研究委請中央地質調查所與中原大學兩位地質專家進行岩石種類目視判別，經分析整理並比對其岩石種類部份試體分析結果含有沉積岩、變質岩、火成岩體，經整理並比對其岩石種類，其中具活性粒料包括石英岩、砂岩、板岩等，鑽心試體斷面之粒料分布如附錄三所示。花蓮地區粒料與西部地區比較其岩種相對多出許多。

表 4-9 台中港鑽心試體粒料種類分析

取樣位置	粒料種類	說明
北防波堤堤身 1-1	砂岩，石英岩，變質砂岩，板岩	以砂岩，石英岩，變質砂岩為主
北防波堤堤身 2-1	砂岩，石英岩，變質砂岩（似為河川礫石）	3-5mm 大小者，以砂岩為主
北防波堤延長段 1	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	
北防波堤延長段 4	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	種類多樣化
北海堤堤身 1-1	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩	1-2mm 大小者，以砂岩及板岩屬為主，似為河川礫石
北海堤堤身 2-1	砂岩，石英岩，變質砂岩（以石英岩礫為主）	1-2mm 大小者，以砂岩及板岩屬為主，似為河川礫石
北堤消波塊 1-1	砂岩，石英岩，變質砂岩（以石英岩礫為主）	來源應為變質砂岩區
北堤消波塊 2-1	砂岩，石英岩，變質砂岩（以石英岩礫為主）	1-2mm 大小者，以砂岩及板岩屬為主，似為河川礫石
南防波堤消波塊 1-1	砂岩，石英岩，變質砂岩（以石英岩礫為主）	3-8mm 大小者，以砂岩為主 來源應為變質砂岩區
南防波堤消波塊 2-3	砂岩，板岩，石英岩 （以砂岩及石英岩為主）	砂岩膠結良好 似為變質岩區之卵礫石
南防波堤堤身 1-1	砂岩，石英岩（以砂岩及石英岩為主）	3-8mm 大小者，以砂岩為主
南防波堤堤身 2-1	砂岩，石英岩，變質砂岩（以砂岩及石英岩為主）	
南海堤消波塊 S4-2	砂岩，石英岩，變質砂岩（以石英岩礫為主）	3-8mm 大小者，以砂岩為主 來源應為變質砂岩區
南海堤堤身 S2-3	砂岩，石英岩 （以砂岩為主）	砂岩膠結良好 似為變質岩區之砂岩
南海堤堤身 S4-3	砂岩，板岩，石英岩 （以石英岩礫為主）	來源應為變質岩區礫石 來源應為變質砂岩區卵礫石

表 4-10 基隆港鑽心試體粒料種類分析

取樣位置	粒料種類	說明
八尺門消波塊	砂岩，石英岩，變質砂岩	0.5-1mm 以砂岩屑為主 3-8mm 亦以砂岩為主
八尺門 NEW 堤身	砂岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	以粉砂岩、細砂岩為主 2-3mm 以粉砂岩、細砂岩為主
八尺門 OLD 堤身	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	以粉砂岩、細砂岩為主 0.5-2mm 以粉砂岩、細砂岩為主
光華塔消波塊 2	砂質砂岩，變質砂岩 (來源應為沉積岩區)	粒料大小顆粒同質性高 2-5mm 以粉砂岩、細砂岩為主
光華塔堤面	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	以粉砂岩、細砂岩為主 來源應為沉積岩區之河川礫石
西堤消波塊 1-1	砂岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	2-3mm 白色顆粒為脈石英 1-2mm 亦以砂岩為主
西堤消波塊 2-1	砂質細砂岩，粉砂岩	粒料大小顆粒同質性高 1-2mm 長條形以粉砂岩為主
西堤消波塊 3-1	大理石，綠色岩，粗粒砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	種類多樣化
西堤堤身 1-3	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	粒料似經洗選 0.5-以下部份幾乎都被洗走
西堤堤身 2-1	細砂岩，變質粗砂岩 (以砂岩為主)	0.5-1mm 岩屑以砂岩屑為主 2-3mm 顆粒亦為砂岩
東堤消波塊 1-1	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	
東堤消波塊 2-3	砂質細砂岩，粉砂岩，脈石英	粒料大小顆粒同質性高
東堤消波塊 3-3	砂質細砂岩，粉砂岩，脈石英	0.5 以下似被洗走 2-3mm 顆粒亦為砂岩
東堤消波塊 4-3	砂岩，石英岩，脈石英	粒料大小顆粒同質性高 2-3mm 顆粒亦為砂岩
東堤消波塊 17-1	砂質細砂岩，粉砂岩，脈石英	粒料大小顆粒同質性高 1-3mm 顆粒亦為砂岩
東堤消波塊 18-1	砂岩，粗粒白砂岩，石英岩	0.5-1mm 岩屑以砂岩屑、粉砂岩為主
東堤消波塊 19-1	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	以細砂岩為主 部份有鐵質風化的礫石
東堤堤身 1-1	砂岩，板岩，石英岩，變質砂岩，脈石英	

表 4-11 蘇澳港鑽心試體粒料種類分析

取樣位置	粒料種類	說明
漁港北外堤北側消波塊	砂岩，粗粒石英岩，脈石英，變質砂岩，板岩	3-5mm 大小者，以砂岩碎屑為主
漁港北外堤南側消波塊	砂岩，粗粒石英岩，變質砂岩	5-8mm 大小者，以砂岩為主 1-2mm 大小者，以砂岩碎屑為主
漁港北外堤沉箱 6 堤面	砂岩，變質砂岩	3-7mm 大小礫石，以砂岩為主
漁港北外堤沉箱 4 堤面	砂岩，粗粒石英岩，變質砂岩	3-5mm 大小者，以砂岩為主 水泥漿體孔隙較其他試樣大
碎波堤堤身 5	砂岩，板岩，粗粒石英岩，變質砂岩	3-5mm 大小者，以砂岩為主
碎波堤消波塊 2	砂岩，變質砂岩，石英岩，板岩	2-3mm 大小者，以砂岩為主
南外廓防波堤 SB19 堤身	砂岩，變質砂岩，脈石英，石英岩	5-8mm 大小礫石，以砂岩為主 2-3mm 大小者，以砂岩為主
南外廓防波堤 SB19 路面	砂岩，石英岩，脈石英，綠色岩，板岩	以石英岩及脈石英為主 1-2mm 大小者，以石英砂岩
南外廓防波堤 SB26 堤身	砂岩，粗粒石英岩，細粒變質砂岩	以石英岩為主 0.5-1mm 大小者，以砂岩為主
南外廓防波堤 SB26 路面	砂岩，石英岩	3-5mm 大小者，以砂岩為主
南外廓防波堤 SB35 堤身	砂岩，石英岩，脈石英，變質砂岩	以石英岩及脈石英為主 1-2mm 大小者，亦以砂岩為主
南外廓防波堤 SB35 路面	砂岩，石英岩，脈石英，變質砂岩，板岩	以板岩及變質砂岩為主 3-5mm 大小者，以砂岩為主

表 4-12 花蓮港鑽心試體粒料種類分析

取樣位置	粒料種類	說明
新東堤 0K+255-1	砂岩，石英岩，大理石，片岩，石灰岩	
新東堤 0K+800-1	砂岩，石英岩，大理石，片岩，石灰岩，板岩	
新東堤 0K+360	石英岩，大理石，砂岩，板岩	
新東堤 0K+360-1	石英岩，大理石，片岩，板岩	
新東堤 1K+200-1	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩，頁岩	
新東堤 1K+625V-1	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩	
新東堤 1K+625L-1	石英岩，大理石，砂岩，板岩，頁岩	
新東堤 1K+625-1	石英岩，大理石，片岩，砂岩，安山岩	
舊東堤 0K+000	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩	
舊東堤 1K+300 修補部份	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩，頁岩，安山岩	
舊東堤 1K+300	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩，頁岩	
西堤消波塊	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩	
西堤 W11 2A 堤身	砂岩，石英岩，大理石，板岩，頁岩	
西堤 W11-1 B2 堤身	石英岩，大理石，片岩，砂岩，板岩	

4-3-4 鑽心試體之 SEM 觀測結果

一般而言，鹼質與立料反應的生成物形狀可分為三大類：

1. 無定形膠體組織(Amorphous)：為顆粒狀、海綿狀或葉狀的聚集膠體 (Massive gel)組織，放大 1500 到 3000 倍時可以清楚地發現；多位於粒料周圍之水泥漿裂縫孔隙中，在裂縫或混凝土表面滲出物亦可以找到，常在粒料的周圍生成白環 (white rim)。

2. 結晶化產物(Crystalline)：形狀如玫瑰花瓣、薄片、纖維或細絲狀，與聚集膠體比較下，其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和鈉。
3. 次等產物(Secondary Products)：伴隨著鹼質與粒料反應的第二種共存反應生成物，可能是鈣礬石(Ettringite)，鈣礬石多存在於水泥漿或孔隙中。

SEM 觀測結果如圖 4-1 至圖 4-4 所示，基隆港東堤及花蓮港西堤部份消波塊其內部有微細裂縫清晰可見，在裂縫邊緣並有海綿狀體之膠結物，新東堤部份其形狀包括了海綿狀體之膠結物、細絲狀等，而西堤部份有海綿狀體之膠結物與前述之第一類相符屬於活性粒料和鹼性物質反應所生成的產物，部份形狀包括了海綿狀體之膠結物、細絲狀等，顯示其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和鈉之膠體，與外部徵候調查結果相互印證，應有鹼質與粒料反應之生成物存在。台中港及蘇澳港部份雖亦發現有類似之膠體，但可能因混凝土構造物使用時間多僅為 20 年左右或混凝土內部尚有足夠孔隙可吸收膨脹應力，故外部徵候尚無發現鹼質與粒料反應之現象，惟與 XRD 試驗、岩相分析結果綜合判斷，兩港區應有發生鹼性物質反應之潛能。



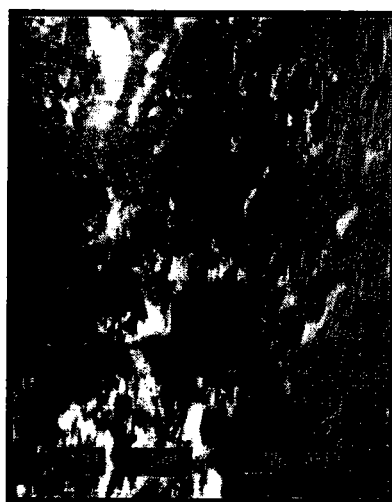
(a)北防波堤延長段3



(b)北防波堤堤面2-1



(c)北防波堤消波塊2



(d)北海堤堤面2-1

圖4-1 台中港鑽心試體SEM觀測結果



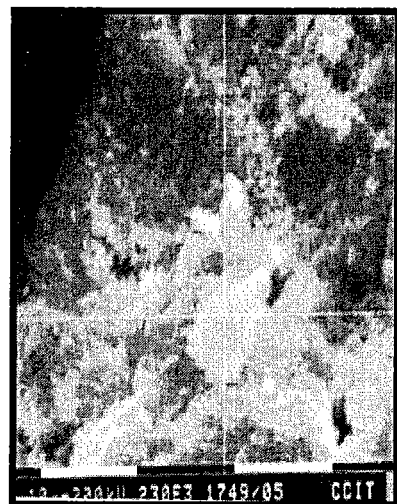
(a)東堤堤面1-1



(b)東堤消波塊2-1



(c)東堤消波塊3-1



(d)東堤消波塊4-1

圖4-2 基隆港鑽心試體SEM觀測結果



(e)東堤消波塊17-1



(f)東堤消波塊18-1



(g)東堤消波塊18-2

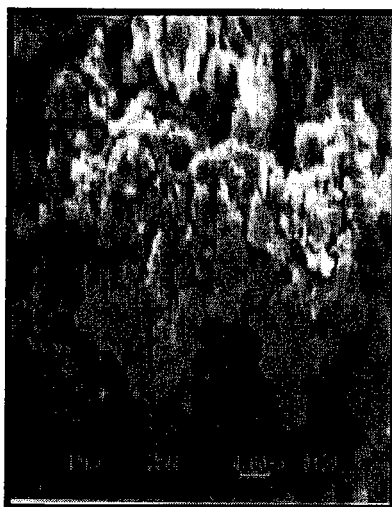


(h)東堤消波塊19-1

圖4-2 基隆港鑽心試體SEM觀測結果(續)



(a) 漁港北外堤南側消波塊



(b) 漁港北外堤北側消波塊



(c) 碎波堤堤面



(d) 碎波堤消波塊

圖4-3 蘇澳港鑽心試體SEM觀測結果



(a) 新東堤0^k+255-3



(b) 新東堤0^k+360-6



(c) 新東堤0^k+800-2



(d) 新東堤0^k+800-4(1)

圖4-4 花蓮港鑽心試體SEM觀測結果2

4-3-5 鑽心試體浸泡試驗膨脹量

圖 4-5 及圖 4-8 為鑽心試體於埋置測點及量取初始值後，置於 38°C，100%相對溼度環境及 38°C，1N NaOH 溶液中，膨脹量變化結果（鑽心試體代號詳表 4-1），各港區試體膨脹量列於表 4-13 及 4-14。鑽心試體在兩種加速環境下均有明顯膨脹的情形，試驗時間達 5 個月後，台中港之試體膨脹量分別介於 0.03—0.08%、0.03—0.07% 間，基隆港為 0.04—0.08%、0.05—0.12% 間，蘇澳港為 0.04—0.07%、0.05—0.09% 間，花蓮港試驗時間達 7 個月後，膨脹量為 0.01—0.08%、0.01—0.12 在其中基隆港試體膨脹情形明顯大於台中、蘇澳港。以不同環境條件比較，在 NaOH 溶液中的試體膨脹量大於置於 100%相對溼度環境的試體膨脹量，可能為 NaOH 屬於高鹼性溶液，對鑽心試體有較明顯的加速反應作用，但台中港部分試體可明顯觀察到內部有較大孔隙，兩者間膨脹量差異不大，其原因可能為試體內部仍有孔隙足以減低膨脹量之影響。與相關文獻比較發現鑽心試體如已發生鹼質與粒料反應，由於混凝土膨脹量已大致發展至某一程度，甚至接近平衡狀態，浸泡加速試驗膨脹量相對有限，若混凝土中含有活性粒料，且尚未有明顯徵候之試體，因鹼值與粒料試驗尚未全部完成反應，在加速試驗中會有明顯的膨脹行為，故試驗時應先避免直接鑽取有明顯裂縫之混凝土⁽⁴⁾。

綜合各港區鑽心試體膨脹量結果分析，如欲藉由試驗室加速試驗判斷混凝土將來有無發生鹼質與粒料反應，取樣時應鑽取無明顯徵候之混凝土，若試驗結果有明顯膨脹行為，則可推斷將來有發生鹼質與粒料反應可能，對已有明顯地圖狀裂縫之混凝土，進行加速試驗反而可能誤判，建議可於採樣後直接進行岩相分析和微觀分析，即可確認有無發生鹼質與粒料反應。由於鹼質與粒料反應其行為發展屬長期性，目前尚無法遽以評斷。

表4-13 混凝土鑽心試體浸泡於38℃，1N NaOH溶液之膨脹量（%）

試體 代號	浸泡時間		試體 代號	浸泡時間			試體 代號	浸泡時間			試體 代號	置放時間	
	3個	5個		1個	3個	5個		1個	3個	5個		個	7個月
T01	0.03	0.04	K01	0.03	0.07	0.09	S01	0.01	0.02	0.06	HL01	0.03	0.06
T03	0.03	0.04	K03	0.03	0.07	0.08	S03	0.06	0.08	0.09	HL02	0.05	0.09
T05	0.03	0.05	K05	0.04	0.08	0.11	S05	0.06	0.08	0.09	HL03	0.03	0.04
T07	0.06	0.07	K07	0.03	0.09	0.11	S07	0.03	0.05	0.07	HL04	0.06	0.06
T09	0.04	0.05	K09	0.02	0.05	0.09	S09	0.03	0.05	0.06	HL05	0.01	0.02
T11	0.03	0.05	K11	0.03	0.08	0.13	S11	0.02	0.05	0.06	HL06	0.03	0.03
T13	0.03	0.06	K13	0.04	0.05	0.08	S13	0.03	0.05	0.06	HL07	0.03	0.04
T15	0.03	0.04	K15	0.03	0.04	0.05	S15	0.03	0.05	0.08	HL08	0.06	0.13
T17	0.04	0.06	K17	0.03	0.05	0.06	S17	0.02	0.04	0.05	HL09	0.08	0.11
T19	0.03	0.03	K19	0.04	0.06	0.07	S19	0.06	0.07	0.08	HL10	0.03	0.04
T21	0.02	0.04	K21	0.03	0.05	0.07	S21	0.03	0.05	0.07	HL11	0.07	0.14
T23	0.03	0.05	K23	0.04	0.11	0.13	S23	0.02	0.04	0.05	HL12	0.08	0.20
T25	0.02	0.04	K25	0.04	0.11	0.13	S25	0.07	0.07	0.08	HL13	0.07	0.10
T27	0.03	0.05	K27	0.04	0.07	0.08	S27	0.03	0.04	0.06	HL14	0.03	0.13
T29	0.03	0.03	K29	0.05	0.12	0.12					HL15	0.05	0.14
T31	0.06	0.06	K31	0.06	0.09	0.1					HL16	0.01	0.06
T33	0.02	0.04	K33	0.07	0.11	0.12					HL17	0.05	0.11
T35	0.05	0.06	K35	0.07	0.09	0.12					HL18	0.04	0.05

註：試體取樣位置與代號關係請參考表4-1

表4-14 混凝土鑽心試體置於38℃，100%相對溼度環境之膨脹量（%）

試體 代號			試體 代號	置放時間			試體 代號	置放時間			試體 代號	置放時間	
	3個	5個		1個	3個	5個		1個	3個	5個		個	7個月
T02	0.05	0.06	K02	0.01	0.03	0.04	S02	0.02	0.04	0.05	HL01	0.03	0.03
T04	0.02	0.04	K04	0.01	0.03	0.04	S04	0.02	0.05	0.07	HL02	0.03	0.03
T06	0.04	0.06	K06	0.02	0.04	0.05	S06	0.02	0.05	0.07	HL03	0.02	0.09
T08	0.02	0.05	K08	0.01	0.04	0.06	S08	0.01	0.05	0.07	HL04	0.02	0.05
T10	0.03	0.04	K10	0.02	0.03	0.05	S10	0.02	0.03	0.07	HL05	0.03	0.05
T12	0.06	0.07	K12	0.01	0.03	0.04	S12	0.02	0.04	0.05	HL06	0.01	0.03
T14	0.03	0.05	K14	0.01	0.02	0.03	S14	0.02	0.04	0.06	HL07	0.04	0.05
T16	0.03	0.03	K16	0.03	0.06	0.08	S16	0.03	0.05	0.07	HL08	0.03	0.06
T18	0.05	0.06	K18	0.02	0.04	0.05	S18	0.03	0.05	0.07	HL09	0.06	0.12
T20	0.05	0.06	K20	0.03	0.05	0.07	S20	0.02	0.04	0.04	HL10	0.03	0.06
T22	0.03	0.03	K22	0.02	0.03	0.05	S22	0.02	0.04	0.05	HL11	0.02	0.02
T24	0.05	0.08	K24	0.02	0.03	0.04	S24	0.02	0.04	0.05	HL12	0.01	0.02
T26	0.04	0.04	K26	0.02	0.05	0.06	S26	0.02	0.04	0.07	HL13	0.03	0.11
T28	0.02	0.04	K28	0.03	0.05	0.07	S28	0.02	0.04	0.05	HL14	0.01	0.02
T30	0.05	0.06	K30	0.01	0.04	0.04					HL15	0.02	0.02
T32	0.03	0.04	K32	0.02	0.04	0.05					HL16	0.00	0.04
T34	0.04	0.05	K34	0.03	0.06	0.08					HL17	0.03	0.09
T36	0.02	0.03	K36	0.02	0.06	0.06					HL18	0.01	0.05

註：試體取樣位置與代號關係請參考表4-1

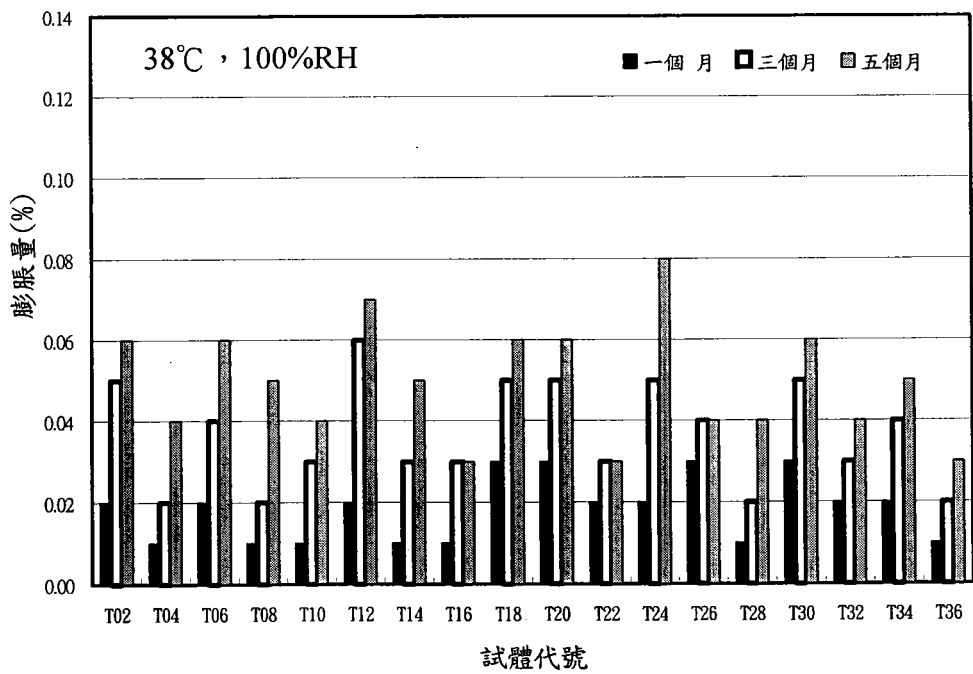
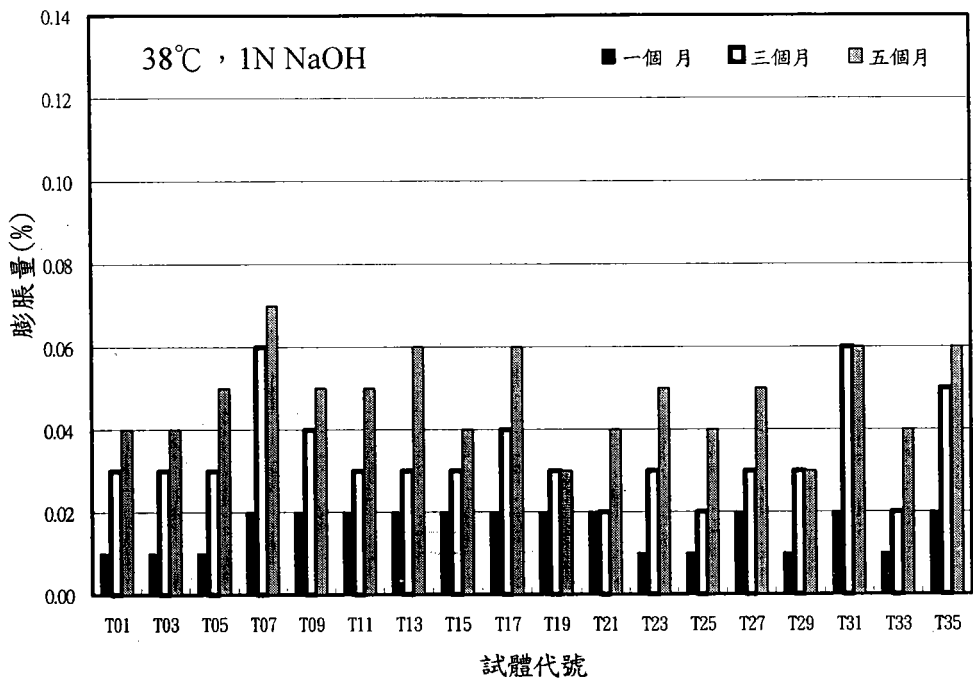


圖 4-5 台中港混凝土鑽心試體浸泡膨脹試驗結果

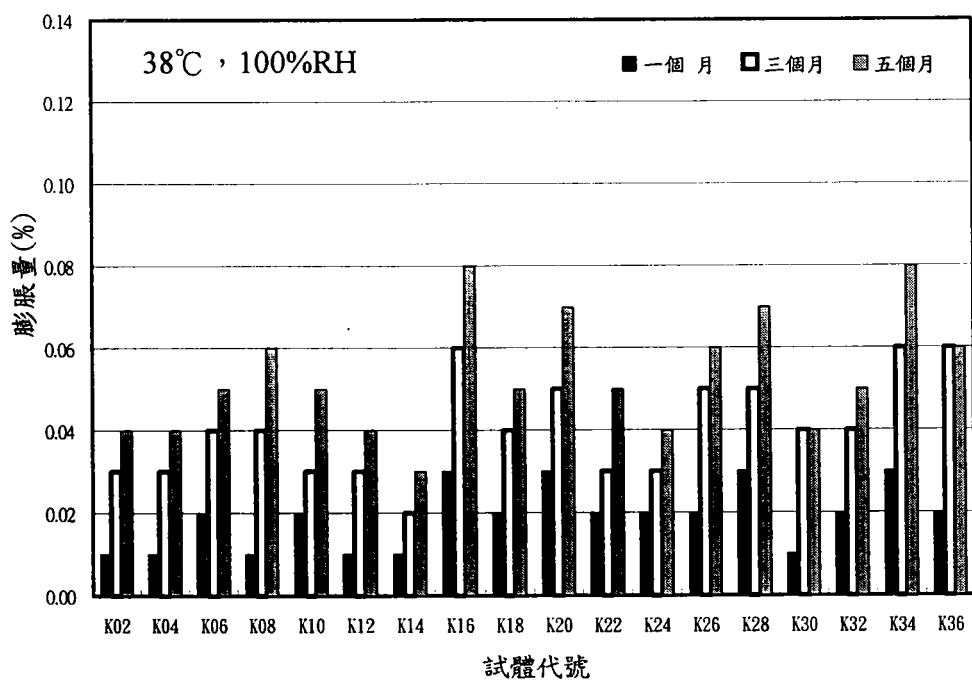
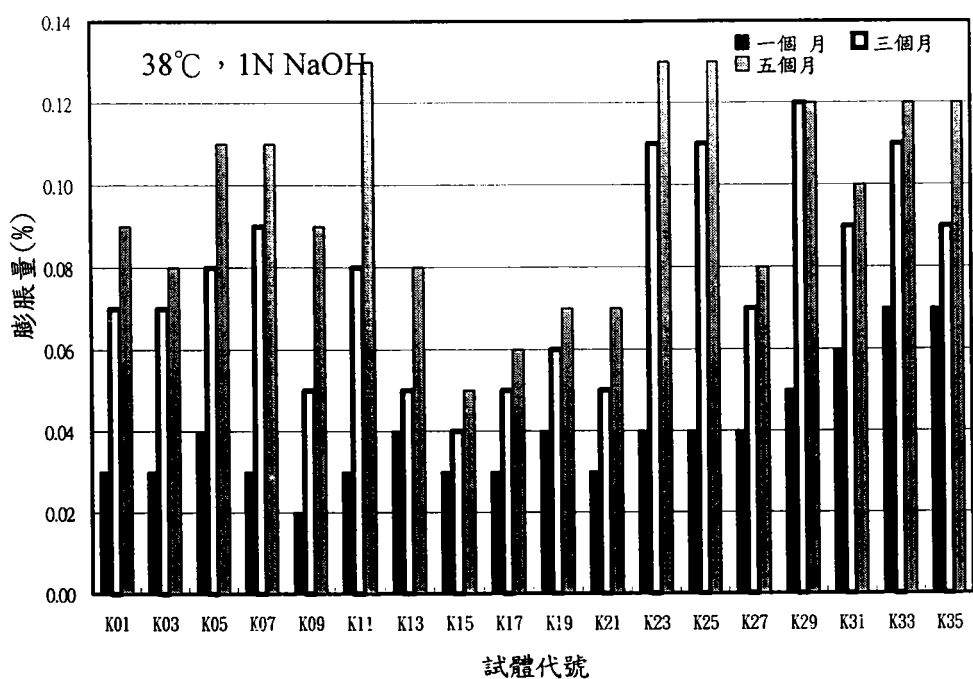


圖 4-6 基隆港混凝土鑽心試體浸泡膨脹試驗結果

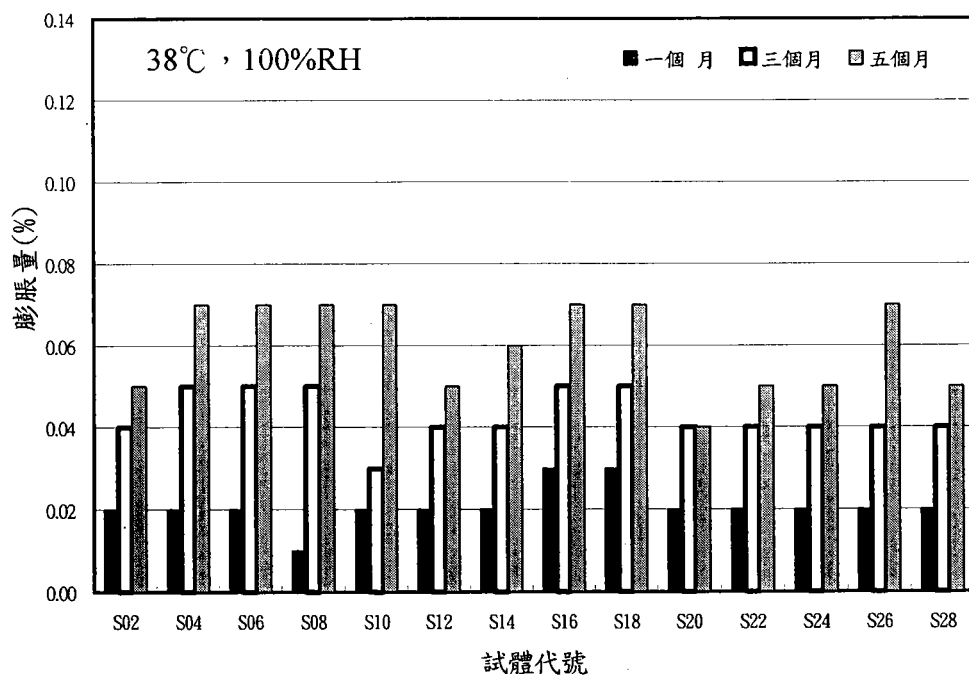
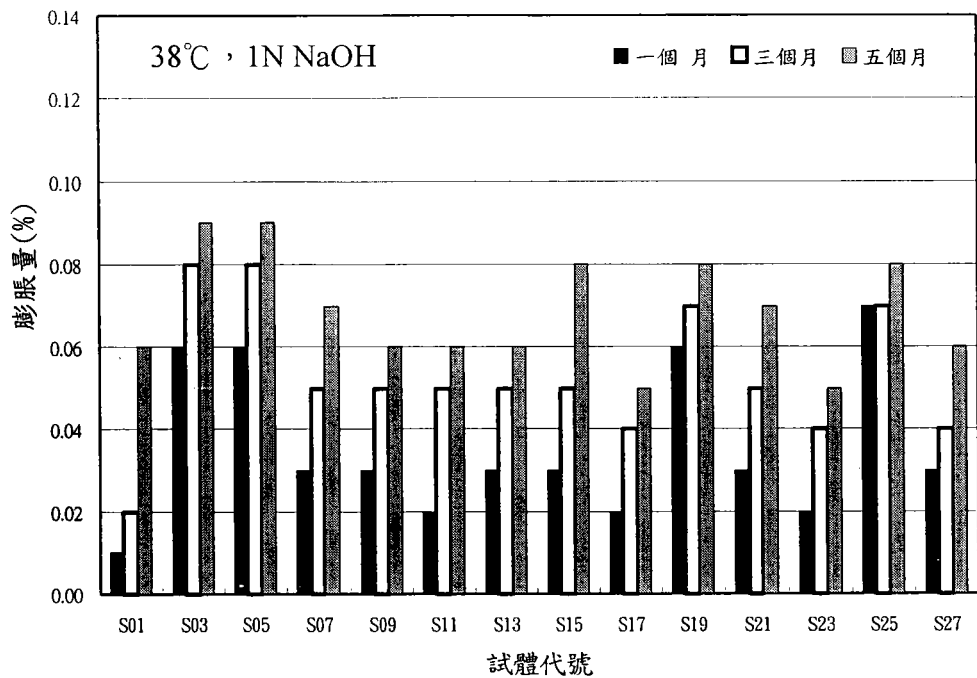


圖 4-7 蘇澳港混凝土鑽心試體浸泡膨脹試驗結果

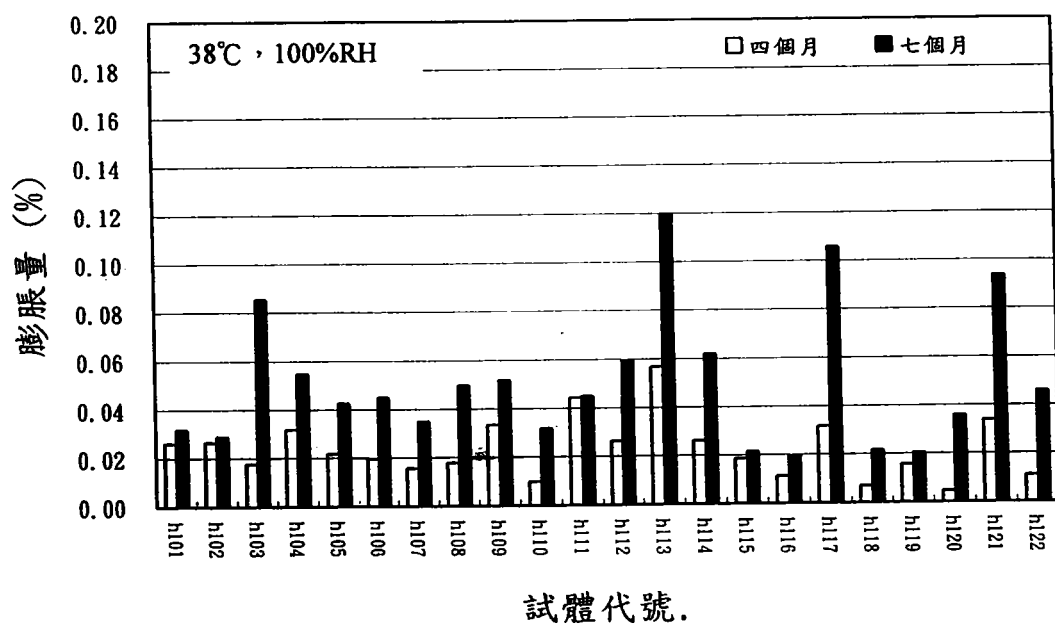
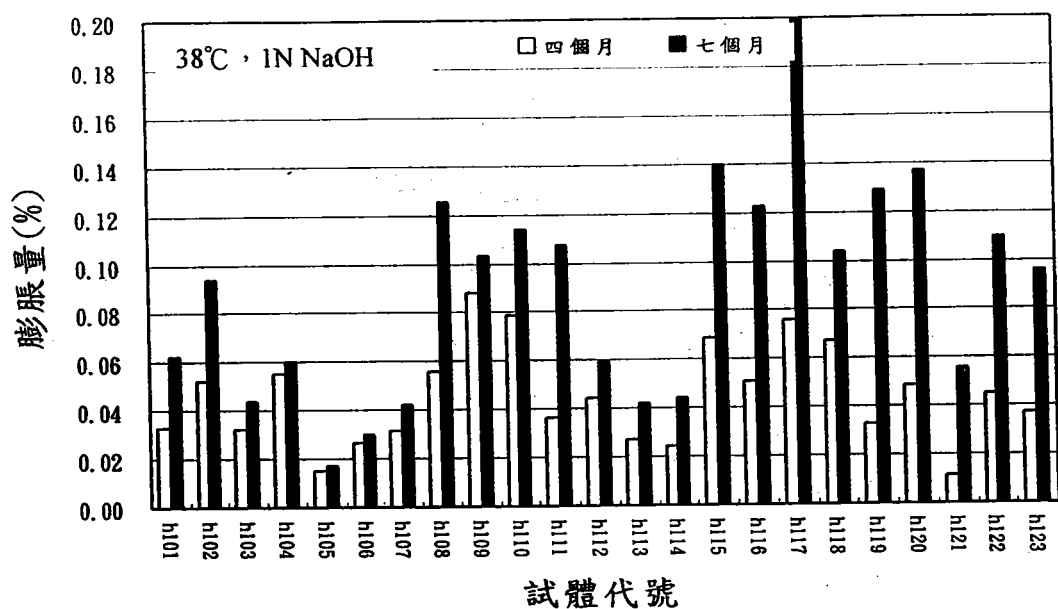


圖 4-8 花蓮港混凝土鑽心試體浸泡膨脹試驗結果

4-3-6 鑽心試體超音波脈波速率試驗

一般而言，混凝土發生鹼質與粒料反應之超音波脈波速率較正常混凝土低，其差距大約可達到 10% 左右，相關研究之現場檢測資料顯示，當脈波速率小於 4.0 km/sec 時，混凝土就可能有某些程度的惡化，脈波速率在 3.0—3.7 km/sec 時，惡化的可能性更高。日本曾於發生鹼質與粒料反應影響的構造物上直接量測其脈波速率，一般都小於 3.5 km/sec，較嚴重者更低至 1.0—2.0 km/sec⁽¹³⁾。

本研究在進行鑽心試體浸泡試驗同時利用超音波脈波量測通過試體之速率，表 4-15 至表 4-17 為其量測結果。浸泡時間為 3 個月及 5 個月與浸泡前其脈波速率都小於 3.0 km/sec，量測所得結果差異不大，由於鑽心試體取樣位置大都為消波塊、堤防等之混凝土，一般而言，其設計強度並非很高，故脈波速率如介於 1.0—2.0 km/sec 間時，混凝土品質應屬尚可範圍，但就鹼質與粒料反應發生可能性而言，則具有潛在危害。表 4-18 至表 4-20 為試體在不同時間與環境量測超音波脈波速率之變化情形，台中港在浸泡後 3 個月量測結果發現超音波脈波速率衰減百分比在 1N NaOH 溶液與 100% 相對濕度下，分別為 0.1—6.9%、0.0—5.8%，5 個月衰減百分比分別為 1.9—8.7%、0.7—6.7%，基隆港 3 個月衰減百分比分別為 0.3—9.5%、-1.6—11.1%，5 個月衰減百分比分別為 0.8—10.1%、-1.2—11.6%，蘇澳港 3 個月衰減百分比分別為 1.4—6.7%、-1.1—2.7%，5 個月衰減百分比分別為 3.6—8.8%、0.7—4.8%，與試驗前之量測結果均在 10% 左右，在 1N NaOH 溶液中，台中與蘇澳港衰減百分比明顯大於 100% 相對濕度，基隆港則兩者差異不大，但衰減百分比比較台中、蘇澳港大，亦顯示基隆港混凝土試體發生鹼質與粒料危害機率較高。

表4-15 台中港鑽心試體超音波脈動速率量測結果

試體編號	試體 長度 (cm)	1		2		3		備註
		Time μ S	V (km/sec)	Time μ S	V (km/sec)	Time μ S	V (km/sec)	
北防波堤1-1	29.3	69.8	2.38	69.3	2.37	68.2	2.33	N
北防波堤2-1	23.5	73.4	3.12	73.3	3.12	72.0	3.06	N
北防波堤延長段01	30.2	69.7	2.31	68.3	2.26	67.2	2.23	N
北防波堤延長段03	28.7	73.6	2.56	69.8	2.43	68.8	2.40	N
北防波堤延長段05	23.4	78.4	3.35	76.6	3.27	75.1	3.21	N
北海堤堤身1-1	30.5	67.8	2.22	66.1	2.17	65.1	2.13	N
北堤消波塊1-1	18.9	69.8	3.69	66.1	3.50	63.8	3.38	N
北堤消波塊2-1	26.1	73.4	2.81	70.3	2.69	69.6	2.67	N
南防波堤消波塊1-1	27.7	74.3	2.68	69.2	2.50	67.8	2.45	N
南防波堤消波塊2-1	23.6	61.0	2.58	58.3	2.47	58.3	2.47	N
南防波堤堤身1-1	31.1	55.7	1.79	53.0	1.70	52.6	1.69	N
南防波堤堤身2-1	28.4	50.6	1.78	48.8	1.72	47.8	1.68	N
南海堤消波塊4-01	33.2	68.3	2.06	65.8	1.98	63.6	1.92	N
南海堤堤身S1-1	28.5	55.5	1.95	54.8	1.92	53.9	1.89	N
南海堤堤身S4-1	27.5	59.2	2.15	58.3	2.12	57.4	2.09	N
高性能混凝土短柱1	30.3	48.4	1.60	48.0	1.58	47.2	1.56	N
高性能混凝土牆身1	23.2	57.1	2.46	55.9	2.41	55.8	2.41	N
北防波堤1-2	28.2	73.7	2.61	72.2	2.56	71.1	2.52	R
北防波堤2-2	28.9	68.2	2.36	65.3	2.26	64.5	2.23	R
北防波堤延長段02	31.9	68.7	2.15	67.5	2.12	66.3	2.08	R
北防波堤延長段04	28.5	71.4	2.51	70.1	2.46	68.5	2.40	R
北防波堤延長段06	22.8	65.6	2.88	64.2	2.82	63.2	2.77	R
北海堤堤身1-2	26.0	65.2	2.51	64.6	2.48	64.1	2.47	R
北堤消波塊1-2	27.5	73.7	2.68	73.0	2.65	72.5	2.64	R
北堤消波塊2-2	26.7	74.1	2.78	71.8	2.69	70.5	2.64	R
南防波堤消波塊1-2	19.7	67.0	3.40	64.2	3.26	63.1	3.20	R
南防波堤消波塊2-3	28.3	62.4	2.20	58.8	2.08	58.2	2.06	R
南防波堤堤身1-2	25.6	64.3	2.51	62.8	2.45	62.1	2.43	R
南防波堤堤身2-2	30.2	52.4	1.74	51.4	1.70	50.4	1.67	R
南海堤消波塊4-03	29.9	54.2	1.81	54.2	1.81	53.8	1.80	R
南海堤堤身S1-2	28.1	42.8	1.52	42.0	1.49	41.2	1.47	R
南海堤堤身S4-3	26.1	70.5	2.70	69.2	2.65	69.0	2.64	R
高性能混凝土短柱2	22.7	55.2	2.43	54.5	2.40	53.5	2.36	R
高性能混凝土牆身2	23.4	57.0	2.44	55.7	2.38	54.9	2.35	R

註 N:浸泡於38℃，1N NaOH溶液

R:置於38℃，100%環境中

μ S: 1×10^{-6} sec

表4-16 基隆港鑽心試體超音波脈動速率量測結果

試體編號	試體 長度 (cm)	1		2		3		備註
		Time μ S	V (km/sec)	Time μ S	V (km/sec)	Time μ S	V (km/sec)	
八尺門消波塊01	33.4	86.7	2.60	85.5	2.56	85.2	2.55	N
八尺門堤面new-01	32.0	95.4	2.98	86.3	2.70	85.8	2.68	N
八尺門堤面old-01	33.2	88.3	2.66	84.2	2.54	81.7	2.46	N
光華塔消波塊1	29.6	69.3	2.34	67.6	2.28	67.2	2.27	N
光華塔堤面1-01	29.7	75.2	2.53	74.3	2.50	73.6	2.48	N
西堤消波塊1-01	30.8	78.0	2.53	76.4	2.48	75.2	2.44	N
西堤消波塊2-01	29.8	75.7	2.54	73.6	2.47	73.4	2.46	N
西堤消波塊3-01*	28.2	68.2	2.42	68.0	2.41	67.6	2.40	N
西堤堤面1-01	29.1	72.0	2.47	71.6	2.46	71.4	2.45	N
西堤堤面2-01	32.9	81.6	2.48	80.1	2.43	79.6	2.42	N
東堤消波塊1-01	24.8	60.3	2.43	59.0	2.38	58.2	2.35	N
東堤消波塊17-01*	25.5	62.2	2.44	61.0	2.39	60.8	2.38	N
東堤消波塊18-01*	22.5	56.3	2.50	54.5	2.42	53.9	2.40	N
東堤消波塊19-01*	24.2	58.7	2.43	58.2	2.40	57.6	2.38	N
東堤消波塊2-01	24.8	66.4	2.68	63.8	2.57	61.7	2.49	N
東堤消波塊3-01*	29.3	73.4	2.51	71.7	2.45	70.5	2.41	N
東堤消波塊4-01*	24.5	64.0	2.61	63.4	2.59	63.1	2.58	N
東堤堤面1	34.1	84.3	2.47	81.2	2.38	80.8	2.37	N
八尺門消波塊02	30.6	81.8	2.67	81.2	2.65	80.5	2.63	R
八尺門堤面new-02	29.6	89.8	3.03	84.2	2.84	82.5	2.79	R
八尺門堤面old-02	34.0	90.4	2.66	89.8	2.64	89.2	2.62	R
光華塔消波塊2	30.1	74.3	2.47	72.6	2.41	72.1	2.40	R
光華塔堤面1-02	28.8	76.6	2.66	75.7	2.63	75.4	2.62	R
西堤消波塊1-02	29.7	73.5	2.47	73.3	2.47	72.8	2.45	R
西堤消波塊2-02	27.5	71.3	2.59	71.5	2.60	72.0	2.62	R
西堤消波塊3-02*	33.0	79.0	2.39	79.7	2.42	78.8	2.39	R
西堤堤面1-03	28.3	70.1	2.48	71.2	2.52	68.8	2.43	R
西堤堤面2-03	25.5	64.4	2.53	64.4	2.53	64.0	2.51	R
東堤消波塊1-02	27.7	69.4	2.51	69.6	2.51	69.2	2.50	R
東堤消波塊17-03*	23.2	55.6	2.40	56.3	2.43	55.8	2.41	R
東堤消波塊18-03*	19.9	49.8	2.50	51.0	2.56	51.0	2.56	R
東堤消波塊19-02*	25.7	62.8	2.44	64.2	2.50	62.5	2.43	R
東堤消波塊2-02	34.0	93.2	2.74	93.4	2.75	92.8	2.73	R
東堤消波塊3-03*	28.7	76.4	2.66	79.2	2.76	78.4	2.73	R
東堤消波塊4-03*	20.7	52.7	2.55	53.7	2.59	51.6	2.49	R
東堤堤面2	30.2	72.7	2.41	72.2	2.39	72.0	2.38	R

註 N:浸泡於38°C，1N NaOH溶液

R:置於38°C，100%環境中

*:外觀發現地圖狀裂縫

μ S:1 $\times$ 10⁻⁶sec

表4-17 蘇澳港鑽心試體超音波脈動速率量測結果

試體編號	試體 長度 (cm)	1		2		3		備註
		Time μ S	V (km/sec)	Time μ S	V (km/sec)	Time μ S	V (km/sec)	
FNB4堤面1	28.1	81.7	2.91	76.2	2.71	74.5	2.65	N
FNB6堤面1	28.8	66.7	2.32	64.3	2.23	62.9	2.18	N
FNB北側消波塊01	29.3	70.8	2.42	67.8	2.31	66.3	2.26	N
FNB南側消波塊02	25.0	62.4	2.50	60.4	2.42	59.1	2.36	N
SB19堤面1	33.2	81.7	2.46	80.0	2.41	78.2	2.36	N
SB19路面1	27.2	71.5	2.63	68.6	2.52	67.1	2.47	N
SB26堤面1	30.8	77.8	2.53	76.7	2.49	75.0	2.44	N
SB26路面1	28.0	68.6	2.45	66.0	2.36	64.5	2.31	N
SB35堤面1	30.9	77.5	2.51	75.4	2.44	73.7	2.39	N
SB35路面1	31.7	76.3	2.41	73.2	2.31	71.6	2.26	N
碎波堤消波塊1-1	32.0	78.7	2.46	76.2	2.38	74.5	2.33	N
碎波堤消波塊2-1	33.2	83.6	2.52	80.7	2.43	78.9	2.38	N
碎波堤堤面1-1	28.8	66.2	2.30	64.3	2.23	62.9	2.18	N
碎波堤堤面2-1	29.7	71.7	2.41	68.7	2.31	67.2	2.26	N
FNB4堤面2	33.0	95.2	2.88	95.2	2.88	94.5	2.86	R
FNB6堤面2	28.5	64.8	2.27	64.4	2.26	63.0	2.21	R
FNB北側消波塊02	29.9	71.8	2.40	71.3	2.38	69.7	2.33	R
FNB南側消波塊03	22.5	56.2	2.50	55.4	2.46	54.2	2.41	R
SB19堤面2	31.0	76.0	2.45	76.4	2.46	74.7	2.41	R
SB19路面2	33.4	87.0	2.60	88.0	2.63	86.1	2.58	R
SB26堤面2	28.0	71.0	2.54	70.7	2.53	69.1	2.47	R
SB26路面2	22.9	56.3	2.46	55.9	2.44	54.7	2.39	R
SB35堤面2	14.9	33.7	2.26	33.4	2.24	32.7	2.19	R
SB35路面2	29.9	72.8	2.43	72.7	2.43	71.1	2.38	R
碎波堤消波塊1-2	32.0	78.1	2.44	77.3	2.42	75.6	2.36	R
碎波堤消波塊2-2	31.2	78.8	2.53	77.0	2.47	75.3	2.41	R
碎波堤堤面1-2	27.7	70.8	2.56	69.7	2.52	68.2	2.46	R
碎波堤堤面2-2	30.3	74.2	2.45	72.2	2.38	70.6	2.33	R

註 N:浸泡於38℃，1N NaOH溶液

R:置於38℃，100%環境中

μ S: 1×10^{-6} sec

表4-18 台中港鑽心試體超音波脈動速率變化情形

試體編號	1N		1R		2N		2R		3N		3R	
	V	(km/sec)	V	(km/sec)	V	(km/sec)	Loss	(%)	V	(km/sec)	Loss	(%)
北防波堤1	2.4	2.61	2.4	2.4	0.7	2.56	2.0	2.3	2.3	2.52	3.5	3.5
北防波堤2	3.1	2.36	3.1	0.1	2.26	4.3	3.1	1.9	2.23	5.4	5.4	5.4
北防波堤延長段01	2.3	2.15	2.3	2.0	2.12	1.7	2.2	3.6	2.08	3.5	3.5	3.5
北防波堤延長段03	2.6	2.51	2.4	5.2	2.46	1.8	2.4	6.5	2.40	4.1	4.1	4.1
北防波堤延長段05	3.4	2.88	3.3	2.3	2.82	2.1	3.2	4.2	2.77	3.7	3.7	3.7
北海堤堤身1	2.2	2.51	2.2	2.5	2.48	0.9	2.1	4.0	2.47	1.7	1.7	1.7
北堤消波塊1	3.7	2.68	3.5	5.3	2.65	0.9	3.4	8.6	2.64	1.6	1.6	1.6
北堤消波塊2	2.8	2.78	2.7	4.2	2.69	3.1	2.7	5.2	2.64	4.9	4.9	4.9
南防波堤消波塊1	2.7	3.40	2.5	6.9	3.26	4.2	2.4	8.7	3.20	5.8	5.8	5.8
南防波堤消波塊2	2.6	2.20	2.5	4.4	2.08	5.8	2.5	4.4	2.06	6.7	6.7	6.7
南防波堤堤身1	1.8	2.51	1.7	4.8	2.45	2.3	1.7	5.6	2.43	3.4	3.4	3.4
南防波堤堤身2	1.8	1.74	1.7	3.6	1.70	1.9	1.7	5.5	1.67	3.8	3.8	3.8
南海堤消波塊4	2.1	1.81	2.0	3.7	1.81	0.0	1.9	6.9	1.80	0.7	0.7	0.7
南海堤堤身S1	1.9	1.52	1.9	1.3	1.49	1.9	1.9	2.9	1.47	3.7	3.7	3.7
南海堤堤身S4	2.2	2.70	2.1	1.5	2.65	1.8	2.1	3.0	2.64	2.1	2.1	2.1
高性能混凝土短柱	1.6	2.43	1.6	0.8	2.40	1.3	1.6	2.5	2.36	3.1	3.1	3.1
高性能混凝土牆身	2.5	2.44	2.4	2.1	2.38	2.3	2.4	2.3	2.35	3.7	3.7	3.7

註 1N:浸泡於38°C，1N NaOH溶液第一次量測

1R:置於38°C，100%環境中第一次量測

表4-19 基隆港鑽心試體超音波脈動速率變化情形

試體編號	1N		1R		2N		2R		3N		3R	
	V	(km/sec)	V	(km/sec)	V	(km/sec)	V	(km/sec)	V	(km/sec)	V	(km/sec)
八尺門消波塊	2.60		2.67		2.56		2.56		2.55		2.55	
八尺門堤面new	2.98		3.03		2.70		2.70		2.68		2.68	
八尺門堤面old	2.66		2.66		2.54		2.54		2.46		2.46	
光華塔消波塊1	2.34		2.47		2.28		2.28		2.27		2.27	
光華塔堤面1	2.53		2.66		2.50		2.50		2.48		2.48	
西堤消波塊1	2.53		2.47		2.48		2.48		2.44		2.44	
西堤消波塊2	2.54		2.59		2.47		2.47		2.46		2.46	
西堤消波塊3*	2.42		2.39		2.41		2.41		2.40		2.40	
西堤堤面1	2.47		2.48		2.46		2.46		2.45		2.45	
西堤堤面2	2.48		2.53		2.43		2.43		2.42		2.42	
東堤消波塊1	2.43		2.51		2.38		2.38		2.35		2.35	
東堤消波塊17*	2.44		2.40		2.39		2.39		2.38		2.38	
東堤消波塊18*	2.50		2.50		2.42		2.42		2.40		2.40	
東堤消波塊19*	2.43		2.44		2.40		2.40		2.38		2.38	
東堤消波塊2	2.68		2.74		2.57		2.57		2.49		2.49	
東堤消波塊3*	2.51		2.66		2.45		2.45		2.41		2.41	
東堤消波塊4*	2.61		2.55		2.59		2.59		2.58		2.58	
東堤堤面1	2.47		2.41		2.38		2.38		2.37		2.37	

註 1N:浸泡於38℃，1N NaOH溶液第一次量測

1R:置於38℃，100%環境中第一次量測

*:外觀發現地圖狀裂縫

表 4-20 蘇澳港鑽心試體超音波脈動速率變化情形

試體編號	1N		IR		2N		2R		3N		3R	
	V (km/sec)		V (km/sec)		V (km/sec)	Loss (%)	V (km/sec)	Loss (%)	V (km/sec)	Loss (%)	V (km/sec)	Loss (%)
FNB4堤面	2.91		2.88		2.71	6.7	2.88	0.0	2.65	8.8	2.86	0.74
FNB6堤面	2.32		2.27		2.23	3.6	2.26	0.6	2.18	5.7	2.21	2.80
FNB北側消波塊	2.42		2.40		2.31	4.2	2.38	0.7	2.26	6.3	2.33	2.88
FNB南側消波塊	2.50		2.50		2.42	3.2	2.46	1.4	2.36	5.3	2.41	3.59
SB19堤面	2.46		2.45		2.41	2.1	2.46	-0.5	2.36	4.2	2.41	1.69
SB19路面	2.63		2.60		2.52	4.1	2.63	-1.1	2.47	6.2	2.58	1.08
SB26堤面	2.53		2.54		2.49	1.4	2.53	0.4	2.44	3.6	2.47	2.61
SB26路面	2.45		2.46		2.36	3.8	2.44	0.7	2.31	5.9	2.39	2.89
SB35堤面	2.51		2.26		2.44	2.7	2.24	0.9	2.39	4.9	2.19	3.07
SB35路面	2.41		2.43		2.31	4.1	2.43	0.1	2.26	6.2	2.38	2.33
碎波堤消波塊1	2.46		2.44		2.38	3.2	2.42	1.0	2.33	5.3	2.36	3.20
碎波堤消波塊2	2.52		2.53		2.43	3.5	2.47	2.3	2.38	5.6	2.41	4.43
碎波堤堤面1	2.30		2.56		2.23	2.9	2.52	1.6	2.18	5.0	2.46	3.72
碎波堤堤面2	2.41		2.45		2.31	4.2	2.38	2.7	2.26	6.3	2.33	4.84

註 1N:浸泡於38℃，1N NaOH溶液第一次量測

IR:置於38℃，100%環境中第一次量測

4-3-7 鑽心試體壓汞孔隙分析試驗

試體經壓汞孔隙分析試驗的結果如圖 4-9 所示。詳細數據列於表 4-21 中。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、氯離子等結果相互比較與印證，研判混凝土的品質。表 4-20 結果顯示基隆港部份孔隙率在 11—28% 之間，以東堤消波塊 18-2、19-2 等試樣最低，其膠體孔隙值亦相對較少，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，由上述現象可見混凝土內已受到相當嚴重的侵蝕，台中港部份孔隙率在 18—22% 之間，且數值無劇烈變化，表示混凝土受侵蝕程度相對基隆港較不嚴重。

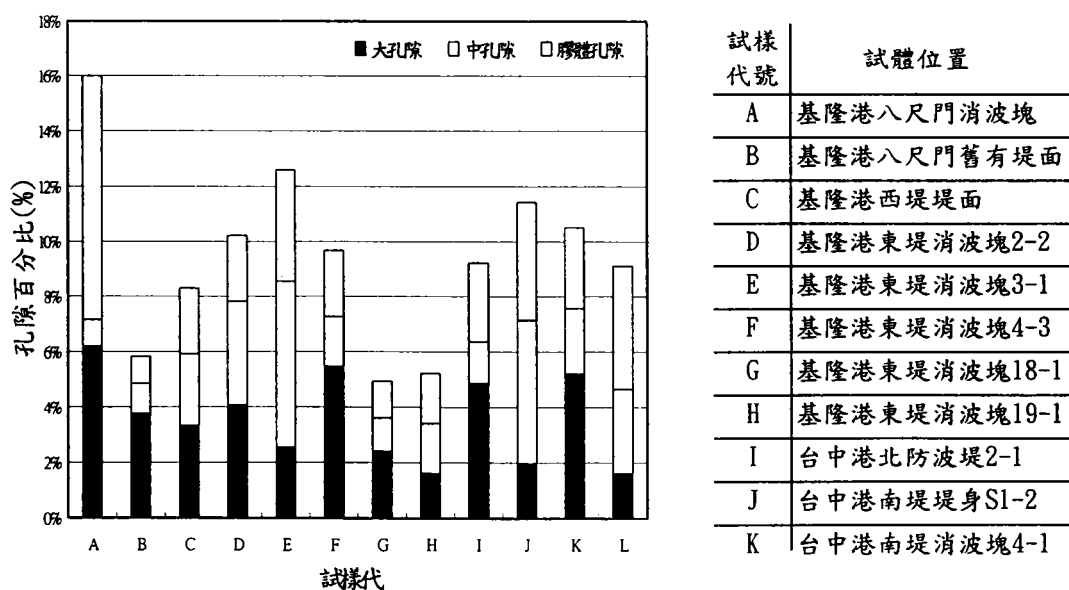


圖 4-9 混凝土鑽心試樣孔隙分佈圖

表 4-21 鑽心試體壓汞孔隙分析試驗結果

試驗 結果 試體 位置	大毛細 孔隙量 (mg/l) (1) 孔隙直徑 >0.05 μm	中毛細 孔隙量 (mg/l) (2) 孔隙直徑 0.01-0.05 μm	膠體 孔隙量 (mg/l) (3) 孔隙直徑 >0.05 μm	毛細 孔隙量 (mg/l) (4) =(1)+(2)	總孔隙 含量 (mg/l) (5) =(3)+(4)	視比 重 g/cm^3	統體 比重 g/cm^3	孔隙 率 %
基隆港八尺門 消波塊	0.06204 (38.75)	0.0096 (6.03)	0.08840 (55.22)	0.07170 (44.78)	0.1601 (100)	2.58	2.24	13.10
基隆港八尺門 舊有堤面	0.03775 (64.75)	0.01074 (18.43)	0.00981 (16.82)	0.04849 (83.18)	0.0583 (100)	2.46	1.77	28.27
基隆港西堤 堤面	0.03331 (40.13)	0.02587 (31.16)	0.02382 (28.70)	0.05918 (71.30)	0.0830 (100)	2.40	2.01	16.64
基隆港東堤 消波塊2-2	0.04073 (39.81)	0.03744 (36.60)	0.02413 (23.59)	0.07817 (76.41)	0.1023 (100)	2.60	2.06	21.05
基隆港東堤 消波塊3-1	0.02559 (20.31)	0.06001 (47.63)	0.04040 (32.06)	0.08560 (67.94)	0.1260 (100)	2.51	1.91	24.06
基隆港東堤消 波塊4-3	0.05481 (56.62)	0.01792 (18.51)	0.02407 (24.87)	0.07273 (75.13)	0.0968 (100)	2.60	2.08	20.11
基隆港東堤消 波塊18-1	0.02414 (48.96)	0.01189 (24.11)	0.01327 (26.93)	0.03603 (73.07)	0.0493 (100)	2.58	2.29	11.27
基隆港東堤消 波塊19-1	0.01613 (30.91)	0.01803 (34.54)	0.01804 (34.55)	0.03416 (65.45)	0.0522 (100)	2.59	2.28	11.93
台中港北防波 堤2-1	0.04868 (52.75)	0.01499 (16.23)	0.02863 (31.02)	0.06367 (69.98)	0.0923 (100)	2.49	2.02	18.70
台中港南海堤 堤身S1-2	0.01976 (17.28)	0.05168 (45.18)	0.04296 (37.55)	0.07144 (62.45)	0.1144 (100)	2.46	1.92	21.95
台中港南海堤 消波塊4-1	0.05210 (49.53)	0.02371 (22.54)	0.02939 (27.93)	0.07581 (72.07)	0.1052 (100)	2.48	1.97	20.68
高性能混凝土 短柱1	0.01619 (17.75)	0.03033 (33.25)	0.04468 (49.00)	0.04652 (51.00)	0.0912 (100)	2.54	2.06	18.81

4-4 港區粒料取樣試驗

4-4-1 粒料活性化學分析試驗

表 4-22 及圖 4-10 為各港區粒料來源試樣之 ASTM C289 粒料活性化學分析試驗結果，台中港粒料來源中濁水溪、烏溪細粒料為潛在有害，基隆港之花蓮溪及和平溪細粒料為有害、濁水溪細粒料為潛在有害，蘇澳港之和平溪細粒料為有害及蘭陽溪細粒料為潛在有害，花蓮港粒料木瓜溪粒料為有害，月眉溪粒料為無害，各港區之粗粒料來源則均屬對鹼質與粒料反應無

表 4-22 粒料活性化學分析試驗結果

粒料代號	粒料來源	S_c	R_c	S_c/R_c	鑑定結果
A	大甲溪粗粒料	76.1	116.5	0.65	無害
B	濁水溪細粒料	127.2	108.5	1.17	潛在有害
C	花蓮溪粗粒料	33.2	140.0	0.24	無害
D	花蓮溪細粒料	72.4	58.5	1.24	有害
E	和平溪粗粒料	96.8	173.5	0.56	無害
F	和平溪細粒料	137.7	50.5	2.72	有害
G	蘭陽溪粗粒料	138.5	158.5	0.87	無害
H	蘭陽溪細粒料	139.3	105.0	1.33	潛在有害
I	烏溪粗粒料	44.5	97.5	0.46	無害
J	烏溪細粒料	85.4	81.5	1.05	潛在有害
K	木瓜溪粒料	90.6	26.1	3.47	有害
L	月眉溪粒料	46.9	59.2	0.79	無害

註：試驗粒料屬台中港粒料來源：大甲溪、濁水溪及烏溪

基隆港粒料來源：花蓮溪、濁水溪及和平溪

蘇澳港粒料來源：蘭陽溪及和平溪

蘇澳港粒料來源：蘭陽溪及和平溪

花蓮港粒料來源：木瓜溪及月眉溪

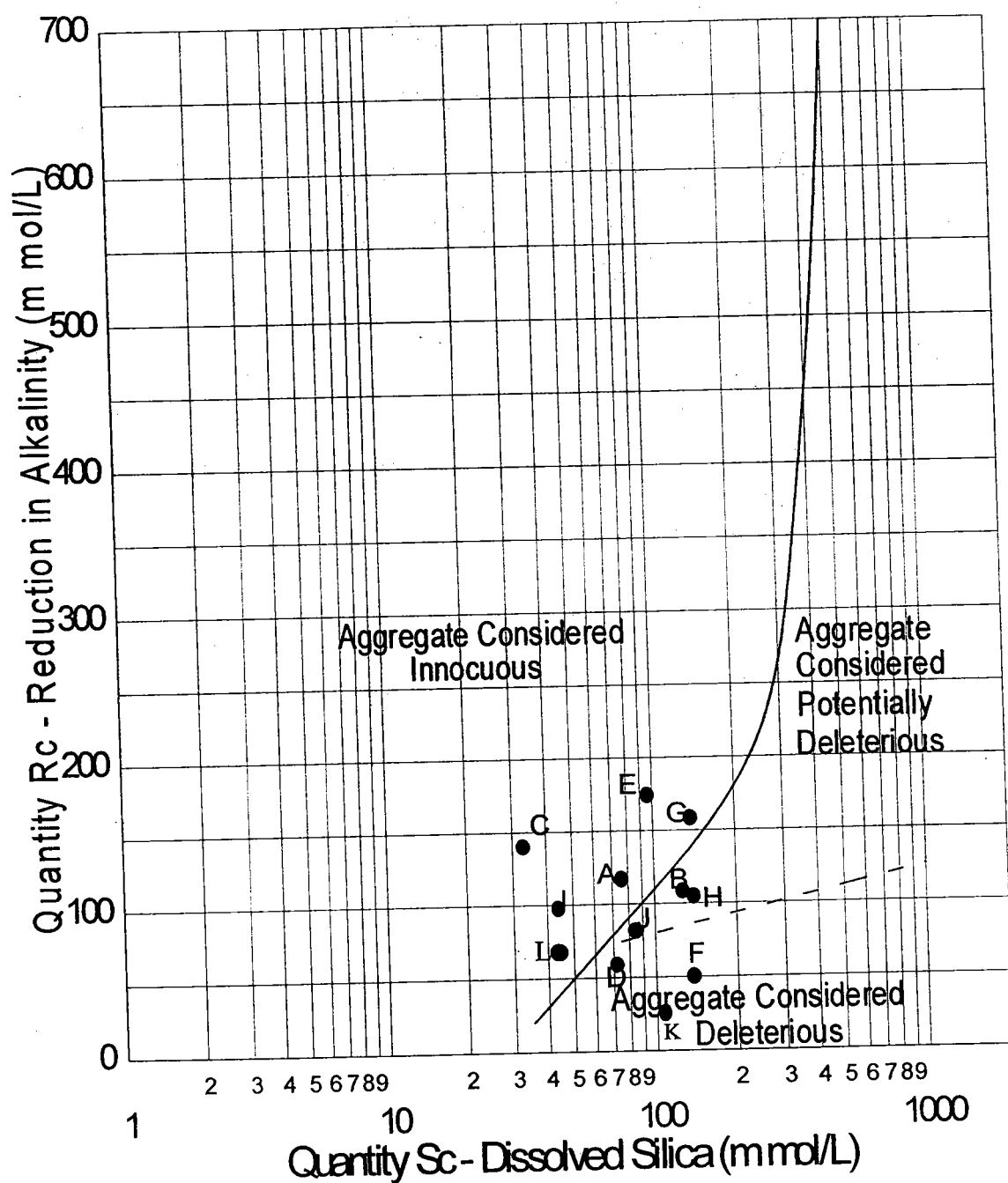


圖 4-10 粒料化學法試驗分析結果

害。基隆港由於台北縣市河川砂石政府已明令禁採，粒料因取得不易，料源除自中南部北運外，部分則自東部河川，甚有採用進口粒料來源繁雜，因境外進口粒料物化性質資訊不易迅速獲得，故建議施工前應需審慎檢驗，混凝土發生鹼質與粒料反應之機率方可降至最低。比較各試樣之 S_c/R_c 值，發現不具反應活性危害之粒料其 S_c/R_c 值均小於 1，具反應活性潛在危害或有害之粒料其 S_c/R_c 值均大於 1。

4-4-2 水泥砂漿棒膨脹量試驗

表 4-23 及圖 4-11 為將粒料依據 ASTM C227 規範規定，製作成水泥砂漿棒膨脹量變化情形，水泥砂漿棒齡期達 28 天後，將配置於相對濕度 100%、1N NaOH 溶液及三種不同濃度(21、35、49 kg/m³) NaCl 溶液等五種環境中，觀察其膨脹量變化行為。試驗結果顯示，試體齡期達三個月後，各種環境中之試樣膨脹量均未大於 0.05%，依據相關規範判斷粒料應未具活性反應，本試驗初期因故直接浸泡溶液，致 14 天之膨脹量部分稍大於 28 天之膨脹量，雖發現後即予改正且往後之膨脹量仍持續呈線性發展，但後續需引以為誡。水泥含鹼量調整時參酌相關研究及目前國內水泥調查結果後，添加 NaOH 調整至 1.0%，國內有研究報告指出當水泥含鹼量調整為 1.2%時，濁水溪上游粒料膨脹量試驗有明顯的活性反應，因此實際採用這些粒料作為混凝土材料前，建議仍須依現場可能狀況，進行必要的試驗或採取防制措施。

表4-23 港區粒料來源水泥砂漿棒膨脹量試驗結果

粒料 齡期 (天)		蘭陽 溪粗 粒料	蘭陽 溪細 粒料	花蓮 溪粗 粒料	花蓮 溪細 粒料	和平 溪粗 粒料	和平 溪細 粒料	大甲 溪粗 粒料	濁水 溪細 粒料	烏溪 粗 粒料	烏溪 細 粒料
A	14	0.002	0.004	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004
	28	0.003	0.007	0.009	0.005	0.003	0.004	0.007	0.002	0.003	0.008
	90	0.021	0.022	0.021	0.016	0.017	0.020	0.017	0.019	0.023	0.023
	135	0.031	0.033	0.028	0.034	0.032	0.027	0.028	0.026	0.033	0.028
B	14	0.006	0.005	0.003	0.001	0.003	0.004	0.002	0.004	0.006	0.008
	28	0.010	0.008	0.007	0.004	0.007	0.005	0.006	0.007	0.011	0.005
	90	0.026	0.023	0.024	0.021	0.024	0.028	0.020	0.018	0.024	0.021
	135	0.038	0.031	0.031	0.027	0.036	0.040	0.031	0.026	0.034	0.027
C	14	0.008	0.009	0.010	0.010	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008
	28	0.013	0.011	0.013	0.009	0.014	0.015	0.011	0.013	0.013	0.013
	90	0.024	0.022	0.025	0.027	0.026	0.025	0.023	0.018	0.023	0.021
	135	0.032	0.034	0.031	0.036	0.035	0.031	0.028	0.027	0.030	0.029
D	14	0.011	0.003	0.006	0.010	0.012	0.010	0.009	0.009	0.009	0.007
	28	0.012	0.030	0.005	0.010	0.013	0.011	0.010	0.008	0.010	0.007
	90	0.025	0.042	0.018	0.027	0.027	0.026	0.022	0.021	0.023	0.018
	135	0.044	0.056	0.026	0.046	0.036	0.043	0.030	0.033	0.033	0.030
E	14	0.008	0.012	0.010	0.007	0.006	0.010	0.010	0.003	0.008	0.005
	28	0.009	0.010	0.014	0.012	0.008	0.011	0.013	0.008	0.011	0.008
	90	0.031	0.029	0.038	0.029	0.030	0.031	0.030	0.023	0.028	0.023
	135	0.041	0.053	0.042	0.042	0.041	0.038	0.036	0.036	0.041	0.033

註：A：100% 相對溼度

B：1N NaOH 溶液

C：21kg/cm³ NaCl 溶液

D：35kg/cm³ NaCl 溶液

E：49kg/cm³ NaCl 溶液

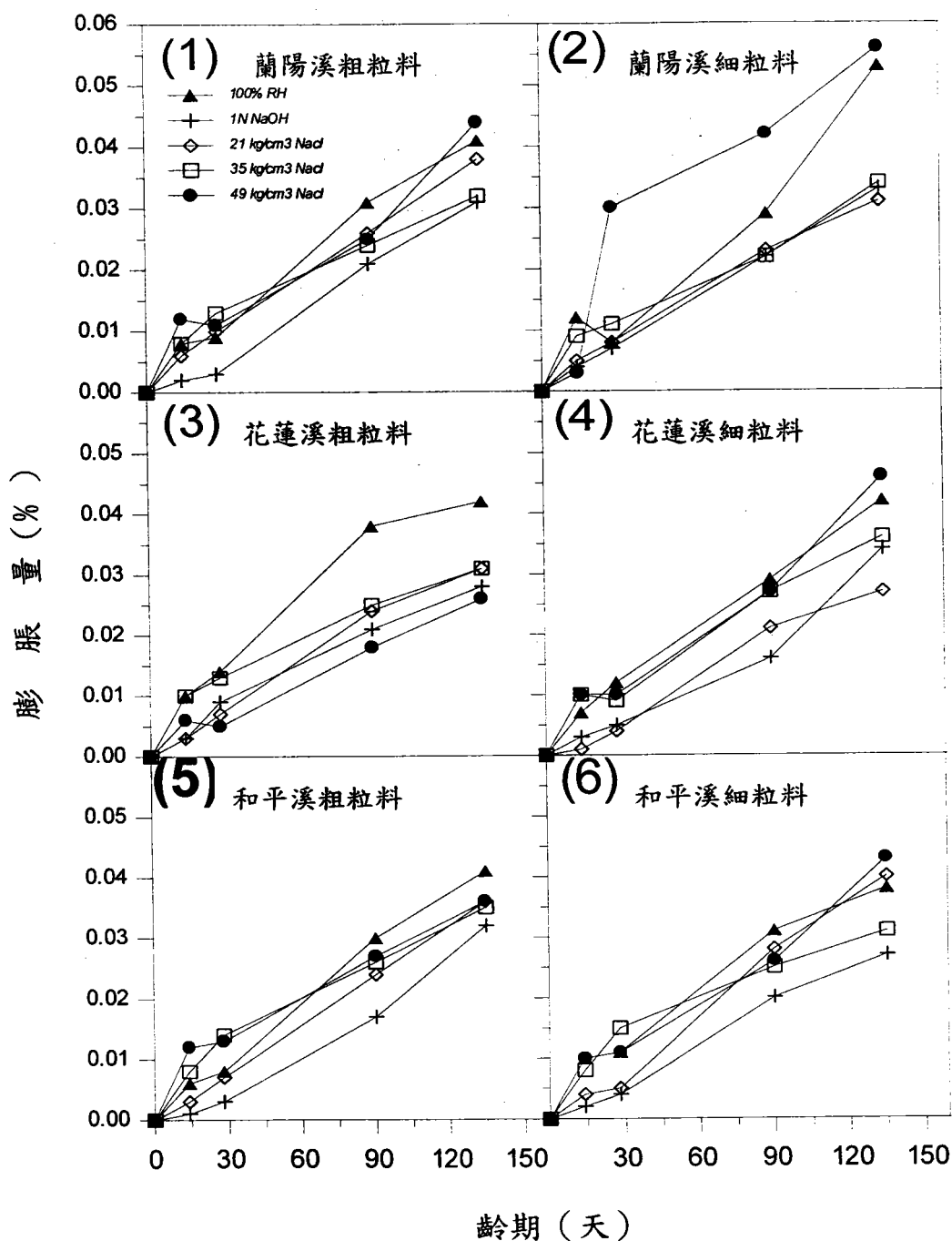


圖 4-11 水泥砂漿棒膨脹量試驗結果示意圖
(含鹼當量=1.0%)

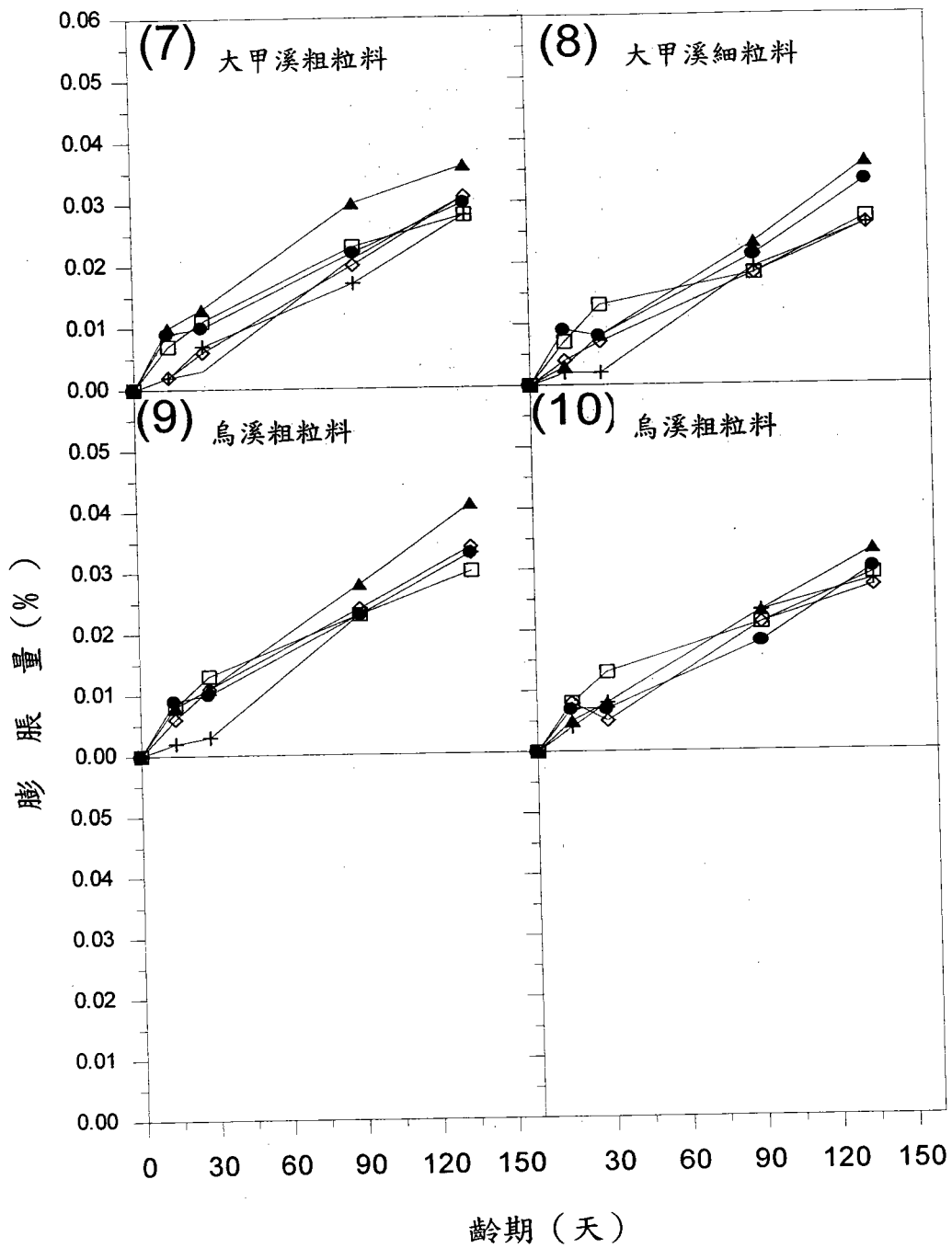


圖 4-11 水泥砂漿棒膨脹量試驗結果示意圖(續)
(含鹼當量=1.0%)

4-5 國內水泥含鹼量調查

圖 4-12 為國內各廠牌 I 型水泥含鹼量比較圖。為預防混凝土構造物發生鹼質與粒料反應，CNS 61 及 ASTM C150 等規範規定水泥中的鹼金屬當量應低於 0.6%，國內大部份的 I 型水泥其含鹼量目前調查結果均超過此一規定，在 18 件試樣中，鹼金屬當量小於 0.6% 者僅佔 1 件，0.6% —0.8% 者有 5 件，0.8% —1.0% 者有 6 件，大於 1.0% 者則有 6 件，即水泥鹼金屬當量超過規範規定之比率已超過 90% 以上，如只計算大於 1.0% 之比率亦超過 33%。港區混凝土構造物在海洋潮濕環境下，如同時使用活性粒料及高含鹼量水泥，發生鹼質與粒料反應的機率很高。基於改善水泥製程和環境保護需要考量，未來水泥中的含鹼量將有增無減，因此如何預防因水泥含鹼量增加而使鹼質與粒料反應發生的影響，採取其他適當配合措施，是日後亟需探討的努力方向。

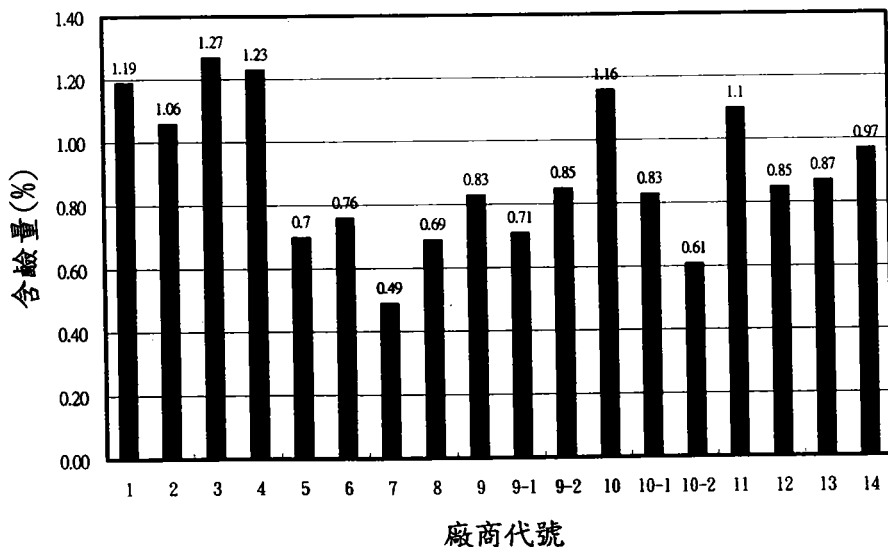


圖 4-12 國內水泥含鹼量調查結果

4-6 環境因素調查

本研究環境因素調查主要有溫度及相對濕度兩項，調查時間自民國八十七年一月至同年十二月止。溫度調查結果如表 4-24 及圖 4-13 所示，相對濕度調查結果如表 4-25 及圖 4-14 所示。結果顯示各港區同月份溫度及相對濕度差異不大，各港區溫度值均遠大於造成鹼質與粒料反應停止或減緩的溫度（4℃以下），表示各港區溫度並不會使鹼質與粒料反應停止或減緩發生，且部分月份溫度較高，更有助長反應加速發生的可能。

各港區相對濕度值多小於構成鹼質與粒料反應發生因素（80%），本項調查可以提供為何同一港區不同位置之混凝土構造物發生反應不一的現象，雖然同一港區可能同時使用相同活性粒料及高含鹼量水泥，但因所處環境相對濕度不同，故長期受到海水直接或間接侵襲之消波塊或防波堤等構造物，發生鹼質與粒料反應之機會較其他構造物高出許多。

表 4-24 港區環境因素溫度調查結果（單位：℃）

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
台中港	16.5	16.6	20.6	23.9	26.3	26.6	28.2	28.0	26.5	25.5	22.5	19.2
基隆港	16.0	16.4	18.7	21.4	24.9	26.1	28.3	29.0	25.4	23.5	21.5	19.4
蘇澳港	16.2	16.5	19.9	22.0	25.0	25.8	28.2	28.6	25.4	23.6	21.8	18.8
花蓮港	17.9	17.9	20.7	22.9	25.4	26.1	27.8	28.3	25.9	24.5	22.7	20.3

表 4-25 港區環境因素相對濕度調查結果（單位：%）

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
台中港	72	80	75	73	74	84	76	79	73	75	69	77
基隆港	76	78	81	78	78	80	76	75	78	82	76	82
蘇澳港	76	79	77	75	76	81	76	79	79	82	76	83
花蓮港	77	83	81	81	80	84	81	81	80	82	75	82

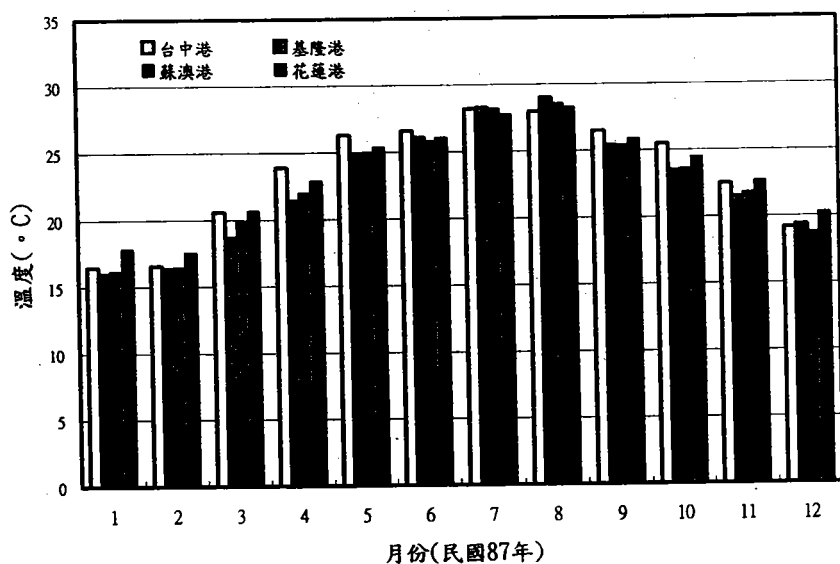


圖 4-13 港區環境因素 (溫度) 調查結果

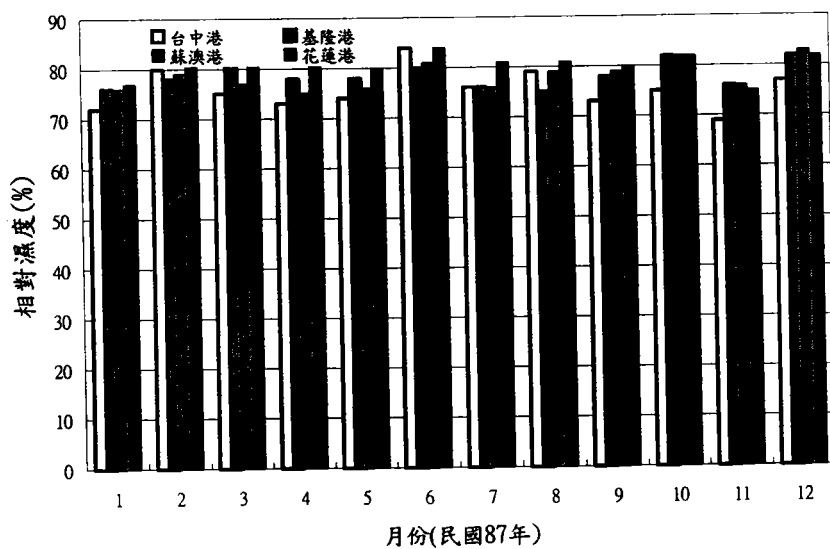


圖 4-14 港區環境因素調查 (相對溼度) 調查結果

表 4-26 構造物混凝土鹼質與粒料反應 (AAR) 綜合判斷

位置 \ 檢測項目	外部徵候	內部徵候	岩相分析	SEM 觀測結果	X 光繞射分析	加速浸泡最大膨脹量%	發生 AAR 之可能性
台中港北海堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.05 * 0.07 **	有潛能
台中港北防波堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.07 0.06	有潛能
台中港北防波堤消波塊	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.06 0.05	有潛能
台中港南海堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.06 0.06	有潛能
台中港南防波堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.05 0.08	有潛能
台中港南防波堤消波塊	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.06 0.06	有潛能
基隆港西堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.07 0.07	有潛能
基隆港西堤消波塊	Y1	N1	Y2	Y3	Y4	0.13 0.08	有潛能
基隆港光華塔消波塊	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.11 0.04	有潛能
基隆港八尺門堤防	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.11 0.05	有潛能
基隆港八尺門消波塊	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.09 0.04	有潛能
基隆港東堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.07 0.06	有潛能
基隆港東堤消波塊	Y1	Y1	Y2	Y3	Y4	0.12 0.06	已發生
蘇澳港南外廓防波堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.13 0.08	有潛能
蘇澳港漁港北外堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.08 0.07	有潛能
蘇澳港漁港北外堤消波塊	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.09 0.07	有潛能
蘇澳港碎波堤	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.08 0.07	有潛能
蘇澳港碎波堤消波塊	N1	N1	Y2	N3	Y4	0.07 0.05	有潛能
花蓮港新東堤堤身	Y1	Y1	Y2	Y3	Y4	0.11 0.08	已發生
花蓮港西堤消波塊	Y1	Y1	Y2	Y3	Y4	0.12 0.05	已發生

註：N1 不明顯 Y1 明顯 N2 無活性岩種 Y2 含活性岩種

N3 無明顯之鹼矽膠體 Y3 含明顯之鹼矽膠體

N4 無活性生成物 Y4 含有活性生成物

* 浸泡於 1N NaOH 溶液中 5 個月 ** 置於 100% 相對溼度環境中 5 個月

第五章 結論與建議

5-1 結論

1. 綜合現場調查及試驗結果分析研判，基隆港東防波堤消波塊部份已發生鹼質與粒料反應。
2. 台中及蘇澳港區混凝土構造物目視檢測調查結果，尚無發現鹼質與粒料反應的現象，但部份鑽心試體及粒料經微觀分析後，發現可能存有活性反應物，長期而言，仍有發生明顯鹼質與粒料反應之潛能。
3. 由 ASTM C289粒料活性化學分析試驗結果顯示，各港區混凝土使用之部份細粒料試樣具有活性或潛在活性。
4. 國內水泥含鹼量調查結果顯示，超過規範之比率甚高，且環境因素調查結果顯示各港區溫度俱備發生鹼質與粒料反應作用能力。

5-2 建議

1. 各港區混凝土構造物具有發生鹼質與粒料反應的潛能，為防患未然，實有必要修訂相關規範，如水泥含鹼量、混凝土含鹼量..等。
2. 由於國內粒料日趨匱乏，使用活性粒料機會增加，對於重大之港灣工程在施工規範上應針對新拌混凝土有關鹼質與粒料反應之檢測項目明確規範，以確保該工程品質及服務性。
3. 對於境外進口之粒料，其檢測項目應增列粒料活性檢測要求。
4. 國內水泥含鹼量有偏高現象，為預防混凝土發生鹼質與粒料反應，應考量添加飛灰或爐石粉等卜作嵐材料或採取適當的

防制方法。

5. 港區混凝土構造物之例行檢查工作，應加入鹼質與粒料反應檢測項目。

6. 港區混凝土構造物鹼質與粒料反應檢測，應包含以下項目：

- (1) 混凝土構造物外部徵候調查。
- (2) 利用鑽心取得之試體，應觀察混凝土試體內部徵候變化。
- (3) 鑽心試體應在試驗室進行微觀分析（電子顯微鏡、X光繞射分析）及岩相（粒料種類）分析。
- (4) 鑽心試體應在試驗室進行加速試驗，預判發生鹼質與粒料反應之潛能。
- (5) 增加混凝土構造物環境因素調查。

參考文獻

1. 王櫻茂，「制訂混凝土耐久性試驗方法及規範研究」內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告，MOIS840018。
2. 儲炳麟、顏聰、盧俊寬，「台灣西部地區砂石料源鹼質反應調查研究」交通部國道新建工程局研究報告，1994年3月。
3. 李釗，許書王，陳桂清，「由破裂之消波塊探討鹼骨材反應」港灣報導，PP. 30-40，1996年10月。
4. 李釗，許書王，「花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查研究」台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1998年6月。
5. 李釗，陳桂清，「混凝土材料劣化損壞評估與改善研究」台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告，1997年6月。
6. 「台灣地區東砂北運、東泥西運可行性之研究」研究報告，台灣省政府交通處港灣技術研究所，1995年6月。
7. 「台中港第一期工程完工報告」，台灣省交通處台中港務局，1976年6月。
8. 「港灣鋼筋混凝土構造物耐久性研究」研究報告，台灣省政府交通處港灣技術研究所，1991年6月。
9. 「蘇澳港興建工程」，台灣省交通處基隆港務局蘇澳港工程處，1983年6月。
10. 「港灣及海岸結構物設計基準」，台灣省政府交通處港灣技術研究所專刊地123號，1997年1月。
11. 謝文凱，「抑制鹼-骨材反應之基礎研究」國立中央大學土木工程研究所碩士論文，1997年6月。

12. 王天送,「鋼筋混凝土與鹼-矽反應防範對策之探討」土木水利,第二十三卷第二期,1996。
13. 廖肇昌,蕭興台,「混凝土內骨材鹼性反應之特性及其對鋼筋混凝土構件之影響」結構工程,第二十三卷第二期,1996。
14. 陳仁達,「花東地區鹼-骨材反應及防制方法」國立中央大學土木工程研究所碩士論文,1998年6月。
15. 楊世和,「台灣東部反應性骨材之探討及分析」國立中央大學土木工程研究所碩士論文,1997年6月。
16. Chau Lee, "Available Alkalies in Fly Ash and Their Effects on Alkali-Aggregate Reaction", PHD Dissertation, Iowa State University, 1986.
17. Sidney Mindess and Young J. F, "Concrete," Prentice-Hall, Inc, 1981.
18. P. K. Mehta, "Concrete Structure, Properties, and Materials", Prentice-Hall, Inc, 1986.
19. D. W. Hobbs, "Alkali-Silica Reaction in Concrete", Thomas Telford London, 1988.
20. Jaw-Chang Laiw, "Structural Integrity and Protection of Concrete Related to Chloride Penetration and ASR", PHD Dissertation, Sheffield University. 1992.
21. G. M. Idorn, "Fear of Flying?", AAalborg Portland, Denmark, pp1-10, 1978.
22. R. G. Sibbick, Page C. L., "Mechanisms Affects the Development of Alkali-Silica Reaction in Hardened Concretes Exposed to Saline

- Environment", magazine of concrete research , 1998, 50, N02.
23. K. Okada, Nishibayashi S., Kawamura M., "Alkali- Aggregate Reaction", ICAAR, 8th International Conference, 1989.
24. Sibbick R. G., Page C. L., "Effects of Sodium Chloride on the Alkali-Silica Reaction in Hardened Concretes", ICAAR, 10th International Conference. 1996. pp822-829.
25. J. Duchesne, Berube M. A., "Effect of Deicing Salt and Sea Water on ASR New Considerations Based on Experimental ate", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp830-837.
26. R. N. Swamy, "Assessment and Rehabilitation of AAR-Affected Structures", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp68-83.
27. M. Kawamura, Takeda T., Takeuchi K., "Role of Gypsum in Expansion of Mortars Containing Reactive Aggregate in NaCl Solution", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp838-845.
28. Y. Ohama, Demura K, Suzuki D., "Evaluation of Alkali-Silica Reaction Inhibitors by Partial Immersion Test of Concrete in 2.5% NaCl Solution", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp846-852.
29. J. Wang, Humphrey M., Bayer D., "Control of ASR Expansion by Coatings", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp622-629.
30. M. Kawamura, Torii K., Takeuchi K., Tanikawa S., "Long-Term ASR Expansion Behaviour of Concrete Cubes in Outdoor

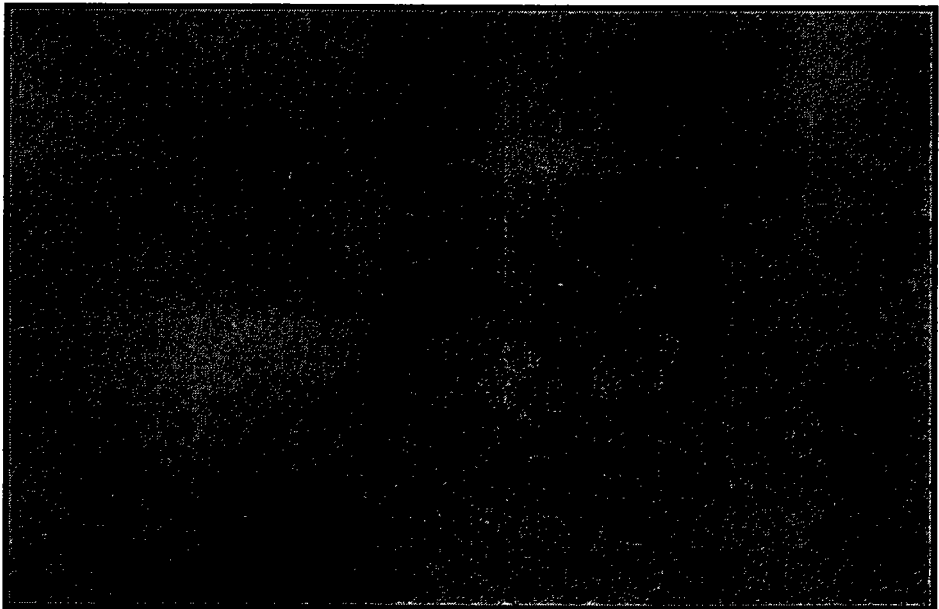
- Exposure Conditions", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp630-636.
31. T. K. M. Al-Kadhim, Banfill P. F. G., "The Effect of Elector-chemical Re-Alkalisiation on Alkali-Silica Expansion in Concrete", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp637-644.
 32. Z. Shu., Deng M., "Alkali-Silica Reaction in The Cement Concrete Pavements of Airport", ICAAR, 10th International Conference, 1996. pp251-256.
 33. SHRP-C-342, "Alkali Silica Reactivity: An Overview of Research", Strategic Highway Research program, 1993.
 34. SHRP-C-343., "Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity", Strategic Highway Research Program, 1993.
 35. SHRP-C/FR-91-101 Hanbook For The Identification Of Alkali-Silica Reactivity In Highway Structures", Strategic Highway Research Program, 1991.
 36. Z. Fan, Hanson J. M., "Effect of Alkali-Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beam" ACI Structural Journal, 1998.
 37. R. G. Sibbick, Page C. L., "Mechanisms Affecting Development of Alkali-Silica Reaction in Harded Concretes Expanded to Saline Environments" Magazine of Concrete Research, 50, No2, 1998.
 38. "Testing During Concretes Construction " Proceeding of An International RILEM Workshop, edited by H. W. Reinhardt, 1990. Research, 50, No2, 1998.
 39. P. J. M. Monteiro , Wang K. , Sposito G. , "Influence of Mineral

Admixtures on the Alkali-Aggregate Reaction"Concrete Cement Research, Vol. 27, No. 12, 1997.

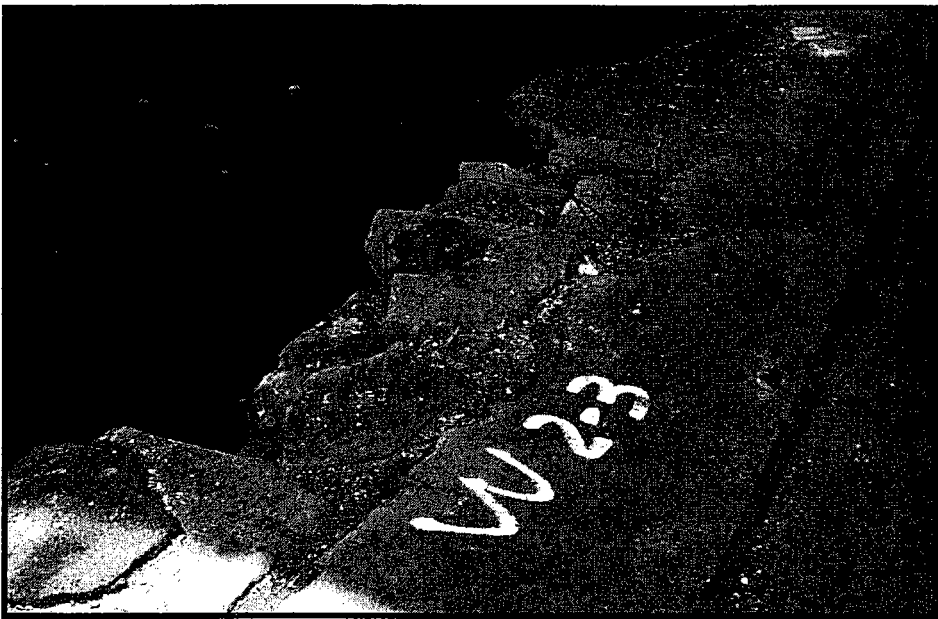
40. Feng Naiqian , Jia Hongwei, Chen Enyi, "Study on the Suppression Effect of Natural Zeolite on Expansion of Concretes Due to Alkali- Aggregate Reaction " Magazine of Concrete Research, 50, No.1, 1998.
41. B.Fournier, V. M. Malhotra, W. S. Langley, G. C. Hoff, "Alkali-Aggregate Reactivity Potential of Selected Canadian Aggregate for Use in Offshore Concrete Structures "Durability of Concrete 3th International Conference, 1994.
42. A. Criaud, C. Defosse, V. Andrei, "An Accelerated Method for the Evaluation of ASR Risks in Actual Concrete Composition "Durability of Concrete 3th International Conference, 1994.
43. J. S. Guedon, A. Le Roux, "Influence of Microcracking on the Onset and Development of the Alkali-Silica Reaction" Durability of Concrete 3th International Conference, 1994.
44. V. Jensen, "Distribution and Significance of the Alkali-Aggregate Reaction in Southern Norway" Durability of Concrete 3th International Conference, 1994.
45. Y. Furusawa, H. Ohga, T. Uomoto, "An Analytical Study Concerning Prediction of Concrete Expansion Due to Alkali- Silica Reaction " Durability of Concrete 3th International Conference, 1994.



照片1 台中港22號碼頭岸壁因輪船碰撞破損情形



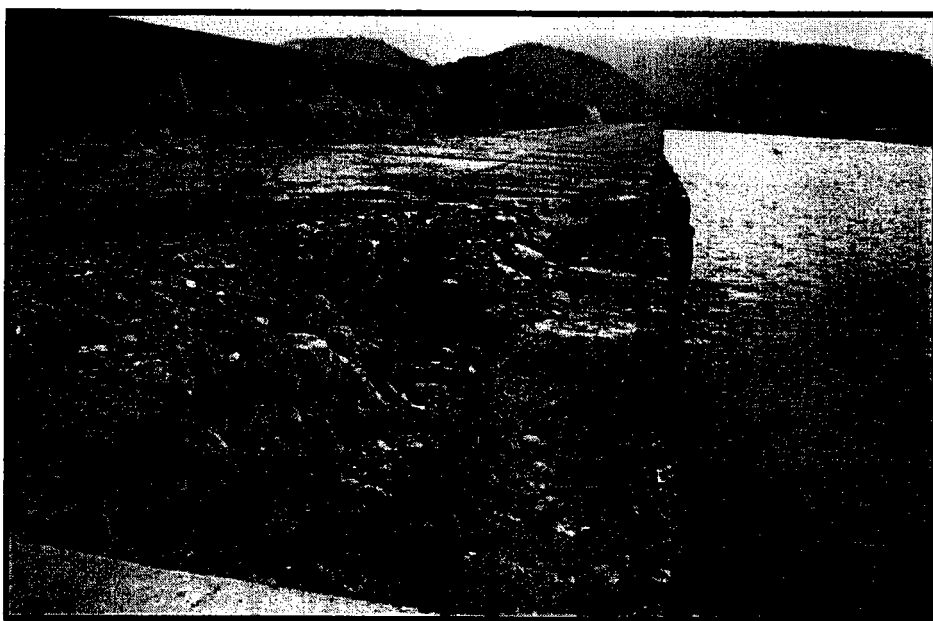
照片2 台中港南海堤路面收縮龜裂情形



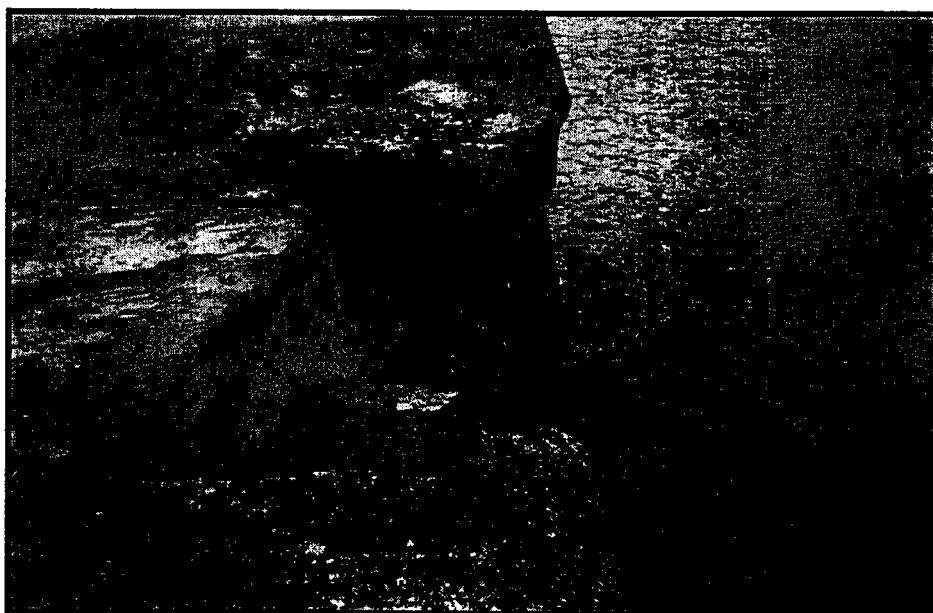
照片3 基隆港西防波堤碼頭岸混凝土破損鋼筋外露情形



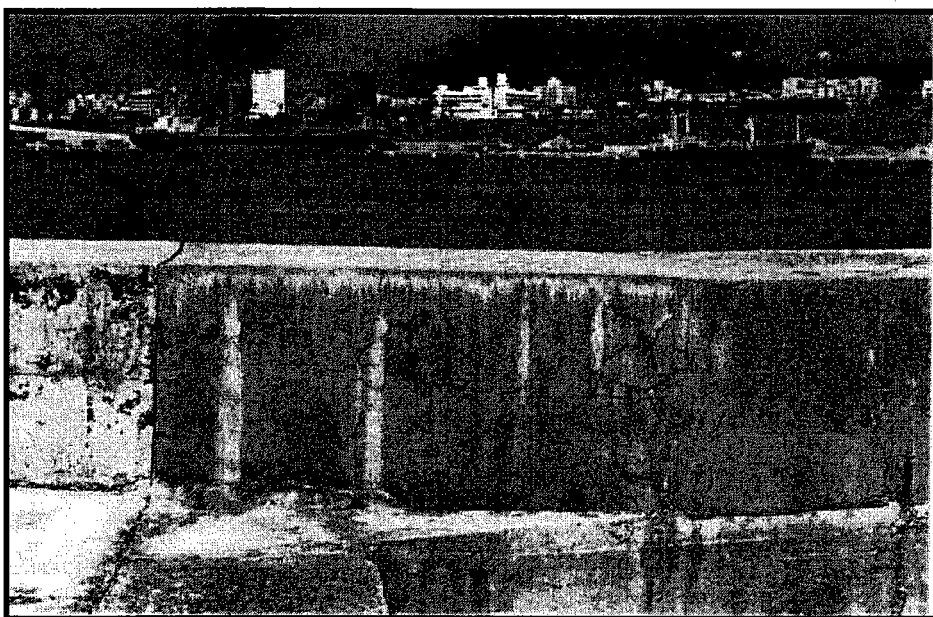
照片4 基隆港船交中心旁碼頭混凝土老舊劣化情形



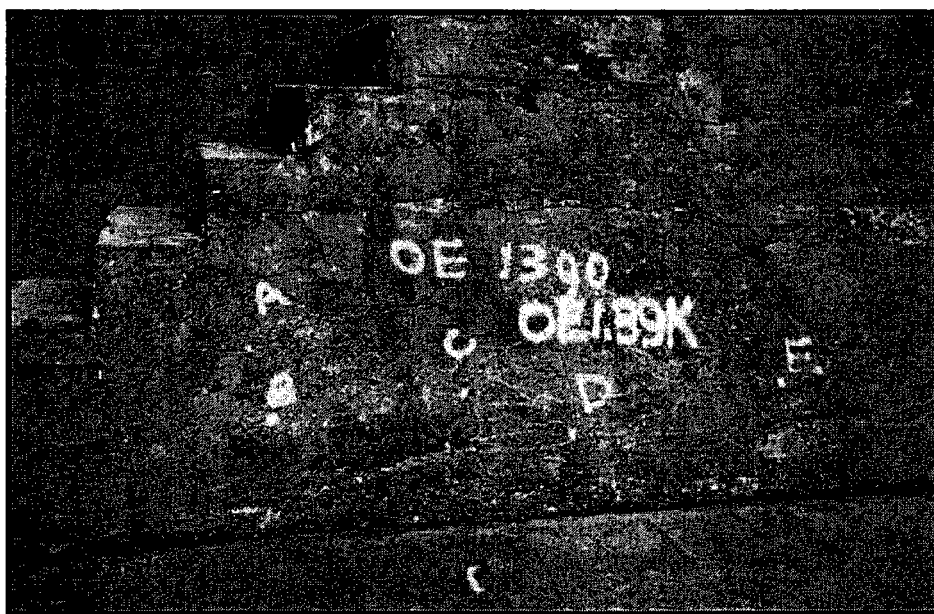
照片5 蘇澳港南外廓防波堤沉箱混凝土破損情形之一



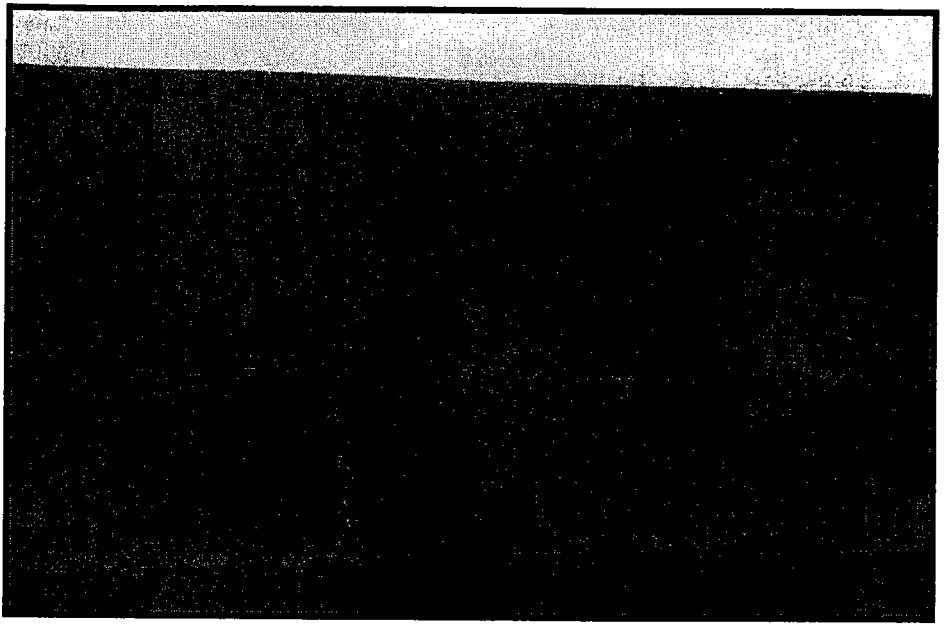
照片6 蘇澳港南外廓防波堤沉箱混凝土破損情形之二



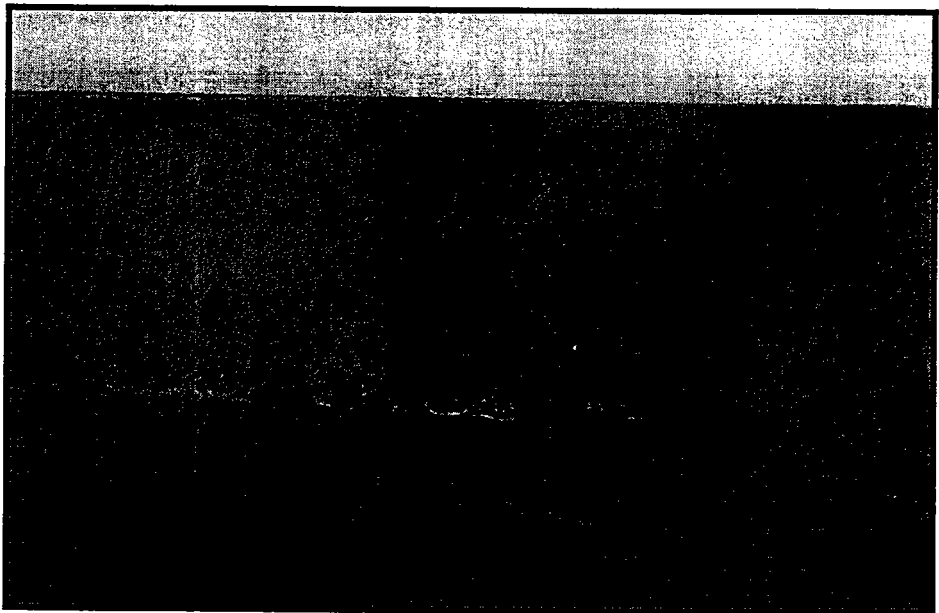
照片7 花蓮港新東堤消波胸牆破壞情形之一



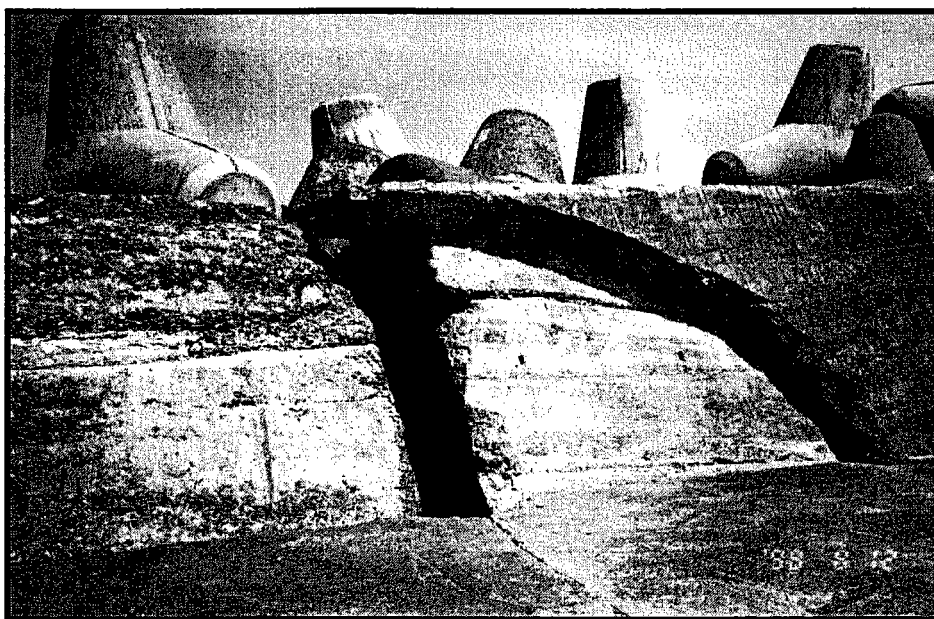
照片8 花蓮港舊東堤鹼質與粒料反應(地圖狀裂縫)



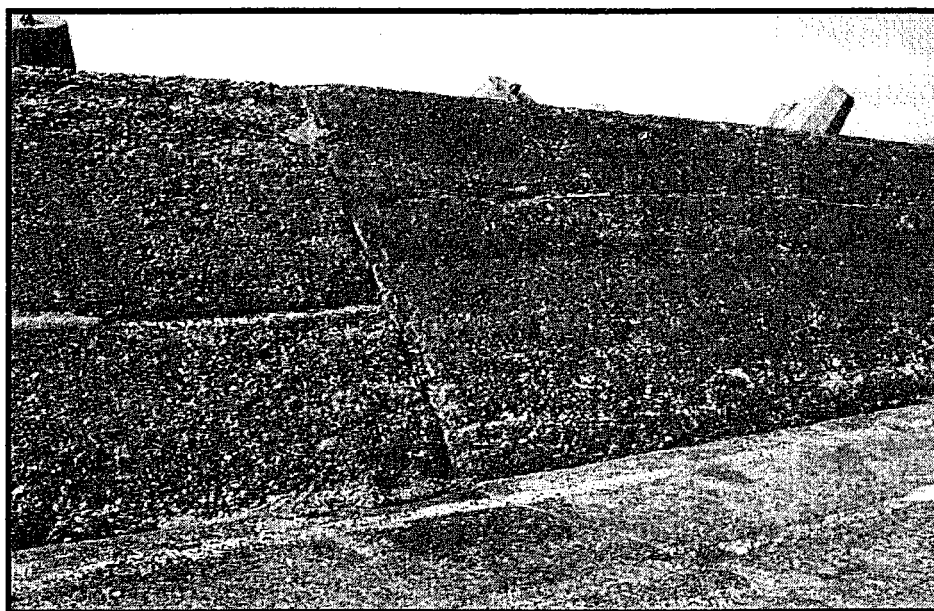
照片9 台中港北防波堤堤身混凝土裂縫情形



照片10 台中港北防波堤堤身裂縫情形



照片11 基隆港西防波堤堤身破損情形



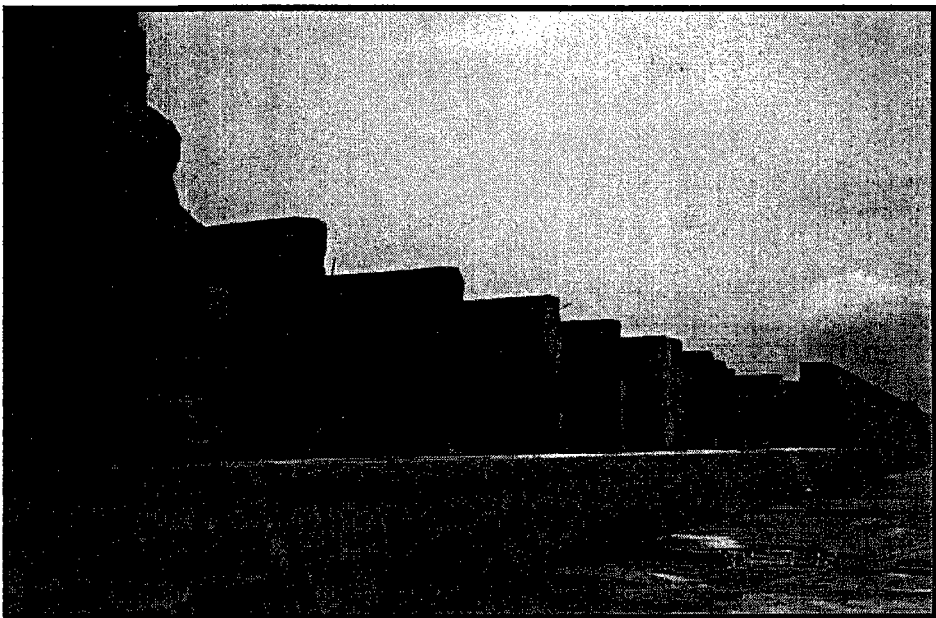
照片12 基隆港西防波堤堤身劣化情形



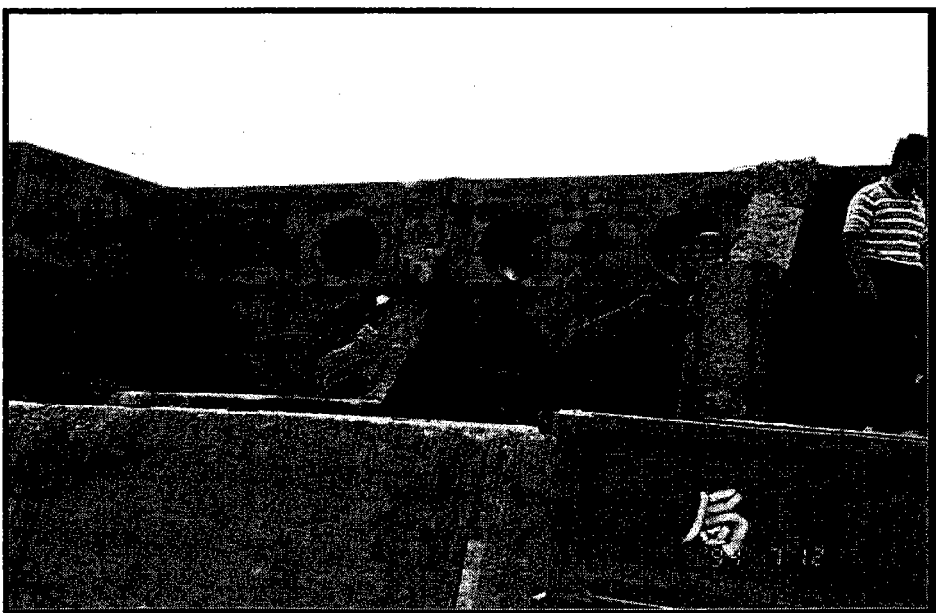
照片13 蘇澳港南外廓防波堤消波胸牆破壞情形之一



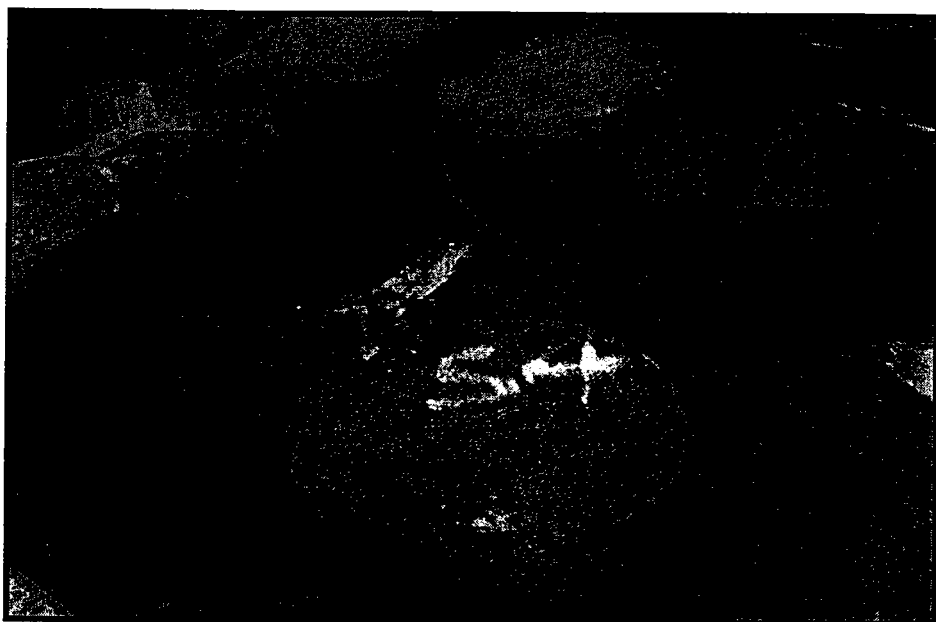
照片14 蘇澳港南外廓防波堤消波胸牆破壞情形之二



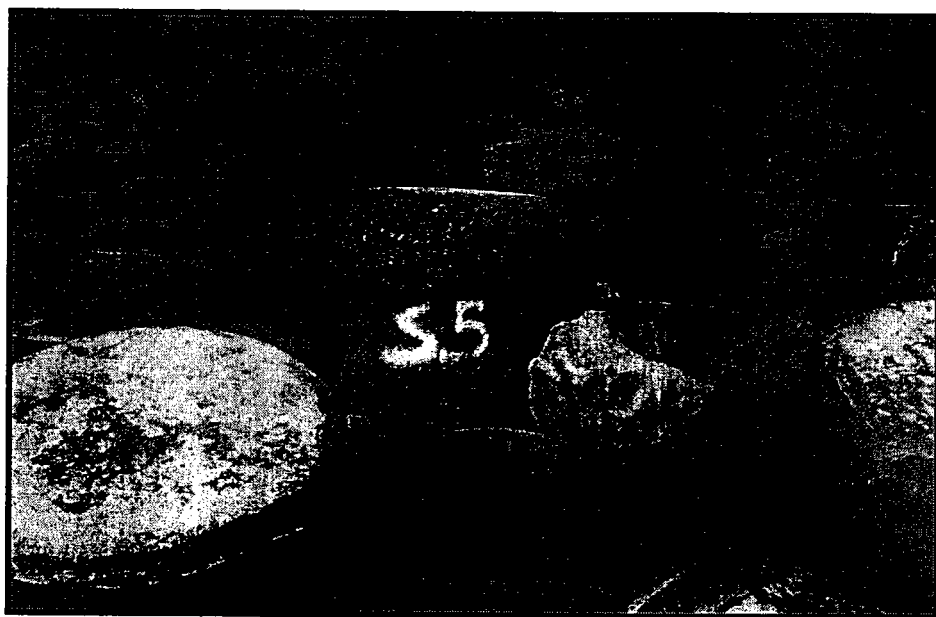
照片15 花蓮港新東堤消波胸牆破壞情形之一



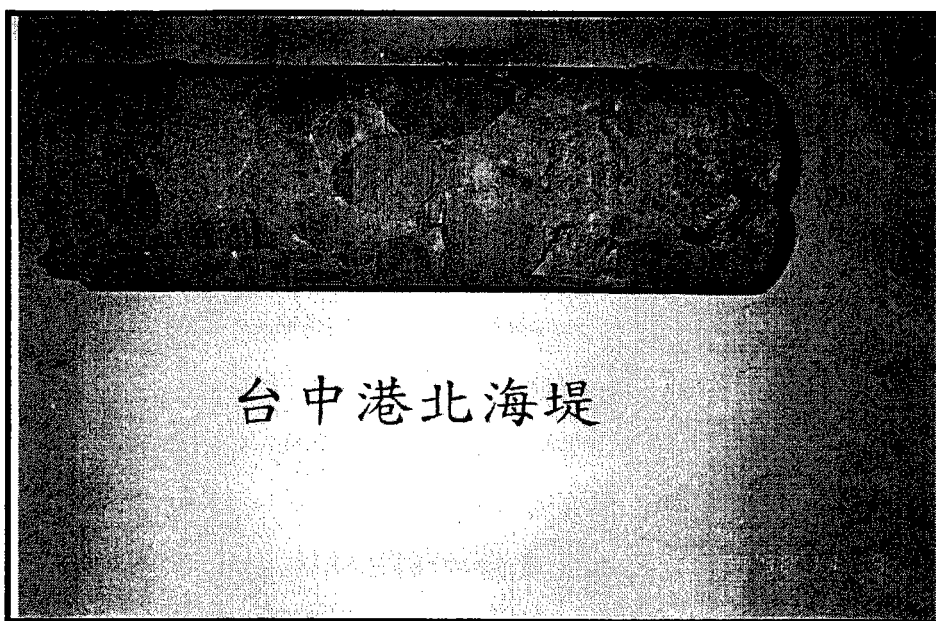
照片16 花蓮港新東堤消波胸牆破壞情形之二



照片17 台中港南防波堤堤消波塊開裂情形



照片18 台中港南防波堤堤消波塊混凝土粒料析離外露情形



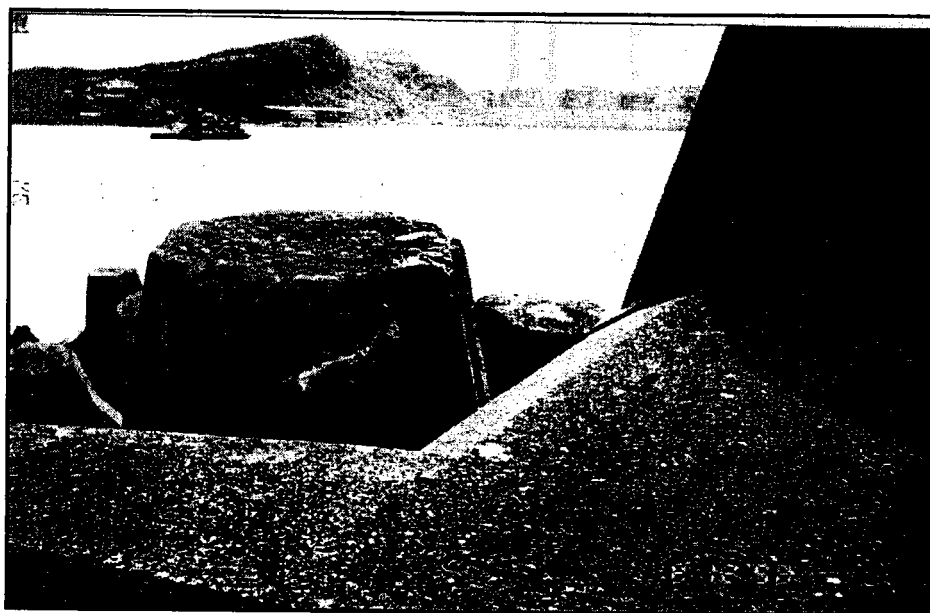
照片19 台中港北防波堤堤消波塊鑽心試體之一



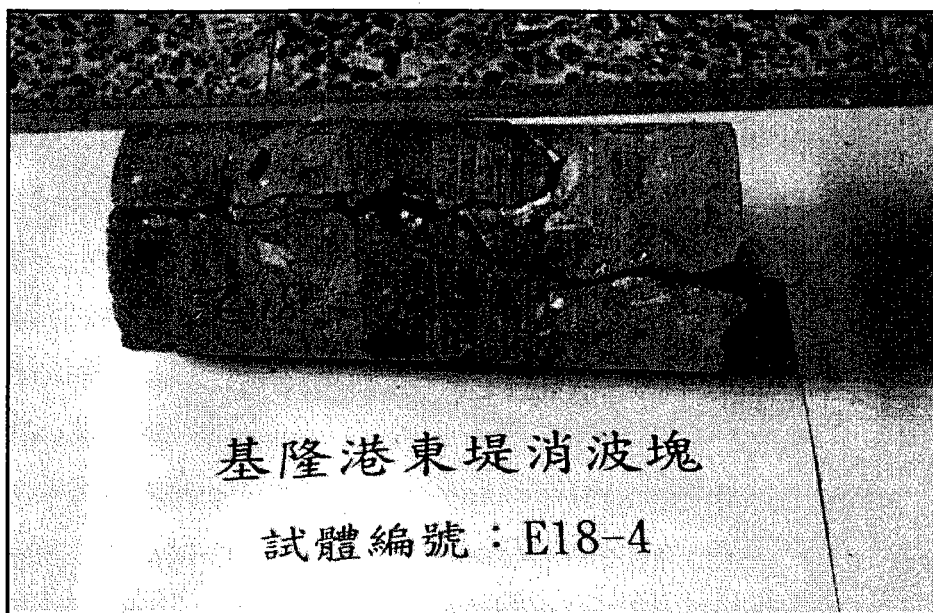
照片20 台中港北防波堤堤消波塊鑽心試體之二



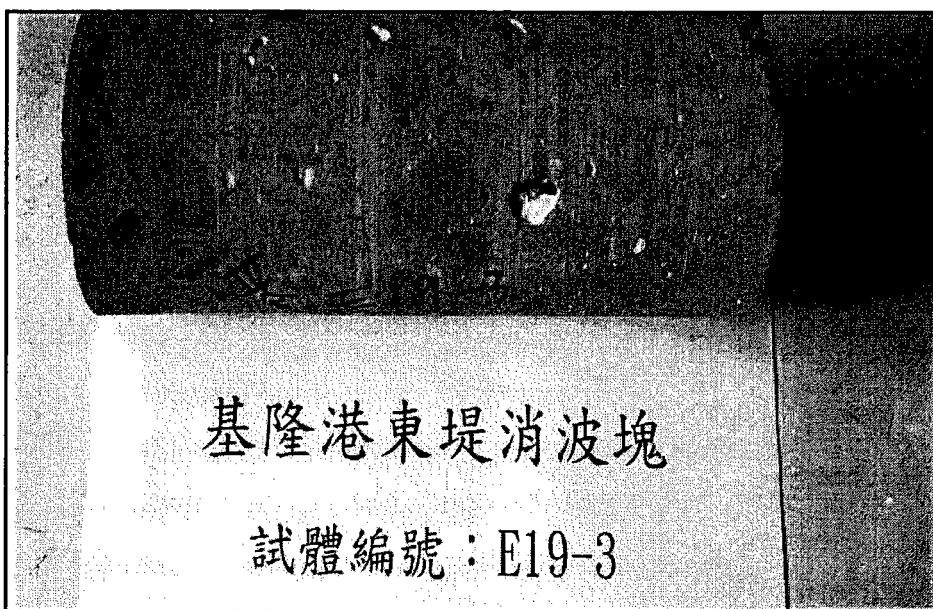
照片21 基隆港東防波堤消波塊地圖狀裂縫之十一



照片22 基隆港東防波堤消波塊地圖狀裂縫之十二



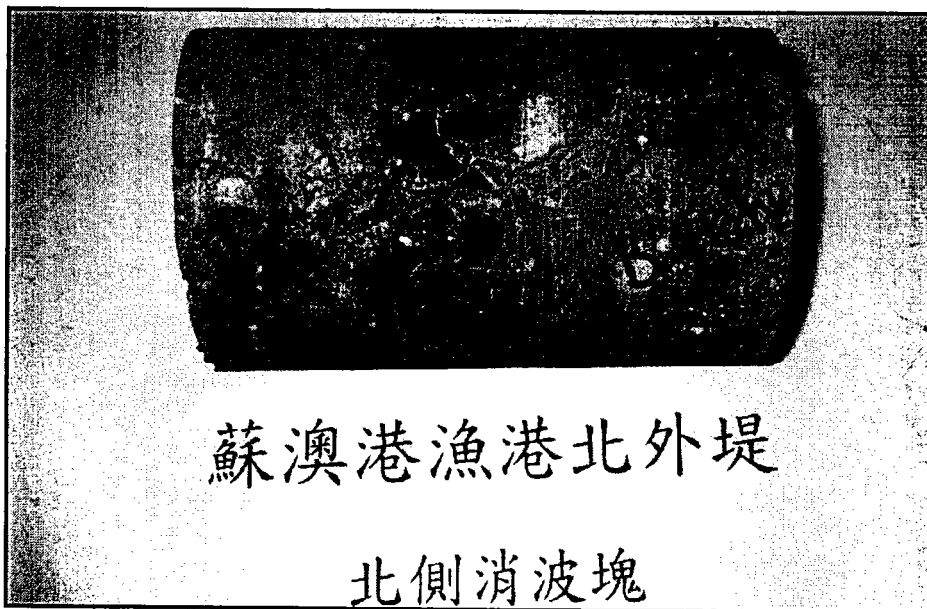
照片23 基隆港東防波堤消波塊地圖狀裂縫鑽心試體
(試體編號：E18-4)



照片24 基隆港東防波堤混凝土鑽心取樣表面孔隙
(試體編號：E19-3)



照片25 蘇澳港漁港北外堤消波塊破壞情形



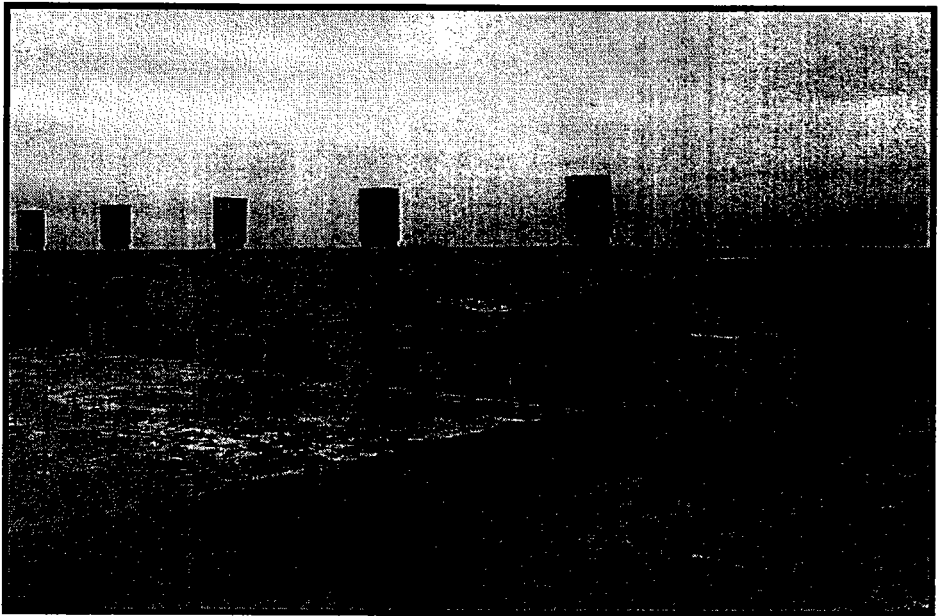
照片26 蘇澳港漁港北外堤北側消波塊鑽心試體情形



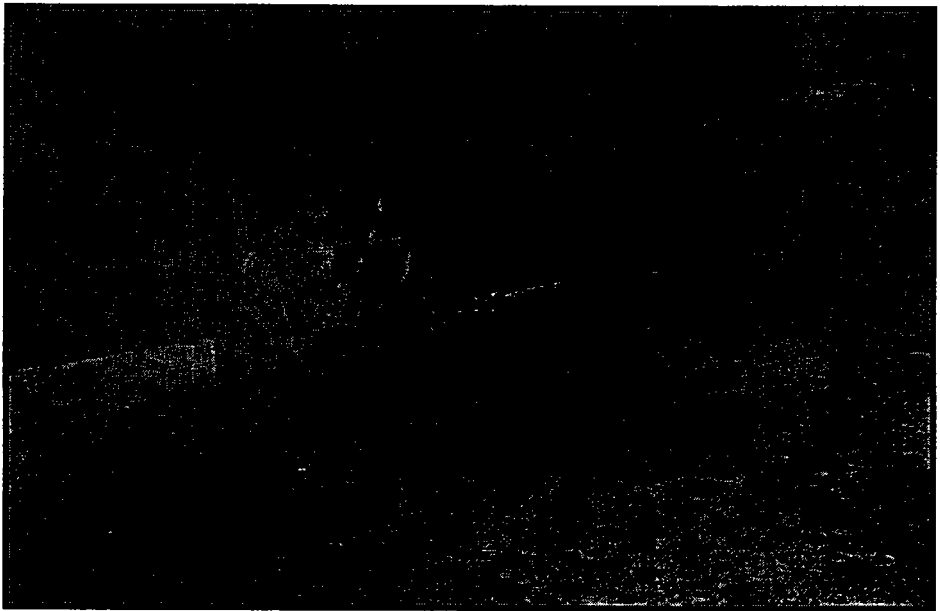
照片27 花蓮港西堤消波塊地圖狀裂縫



照片28 花蓮港航道消波塊地圖狀裂縫



照片29 台中港南防波堤欄杆鋼筋混凝土劣化情形



照片30 台中港北防波堤欄杆鋼筋混凝土劣化情形

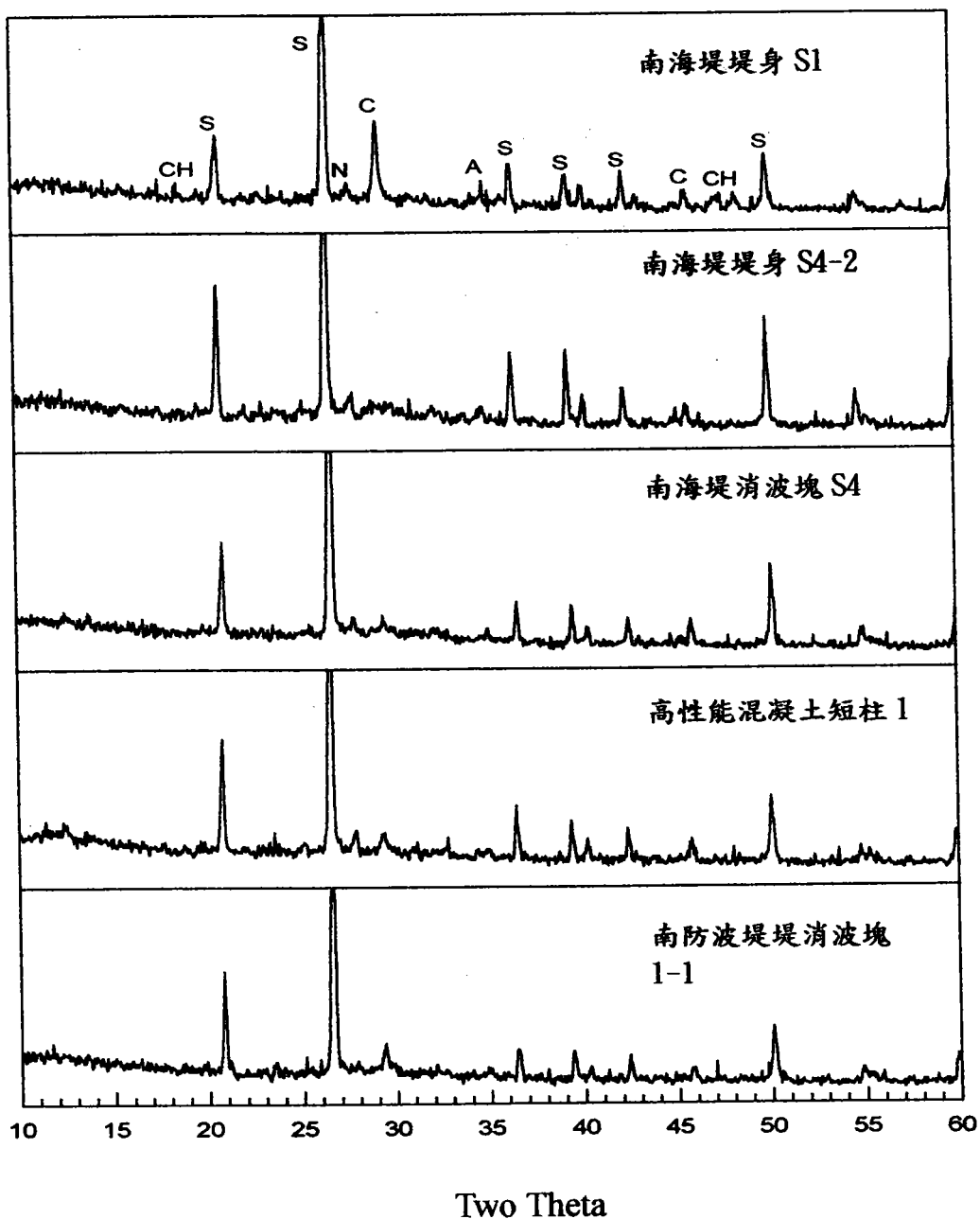


照片31 基隆港西防波堤混凝土收縮裂縫情形



照片32 基隆港光華塔混凝土收縮裂縫情形

CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ S : SiO_2 C : CaCO_3
 E : Ettringite N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
 A : Al_2O_3 T : Tridymite Cr : Cristobalite



台中港鑽心試體 X 光繞射圖

CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$

S : SiO_2

C : CaCO_3

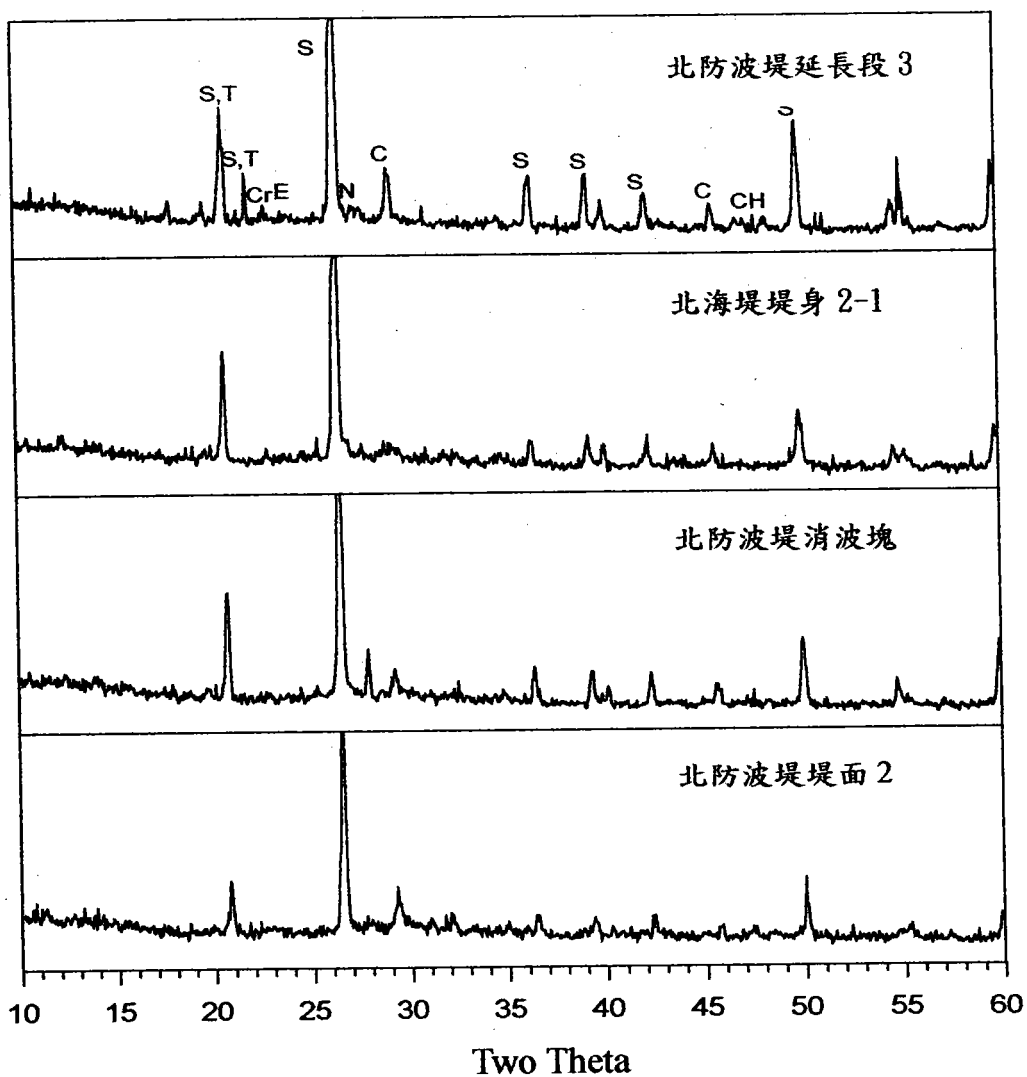
E : Ettringite

N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$

A : Al_2O_3

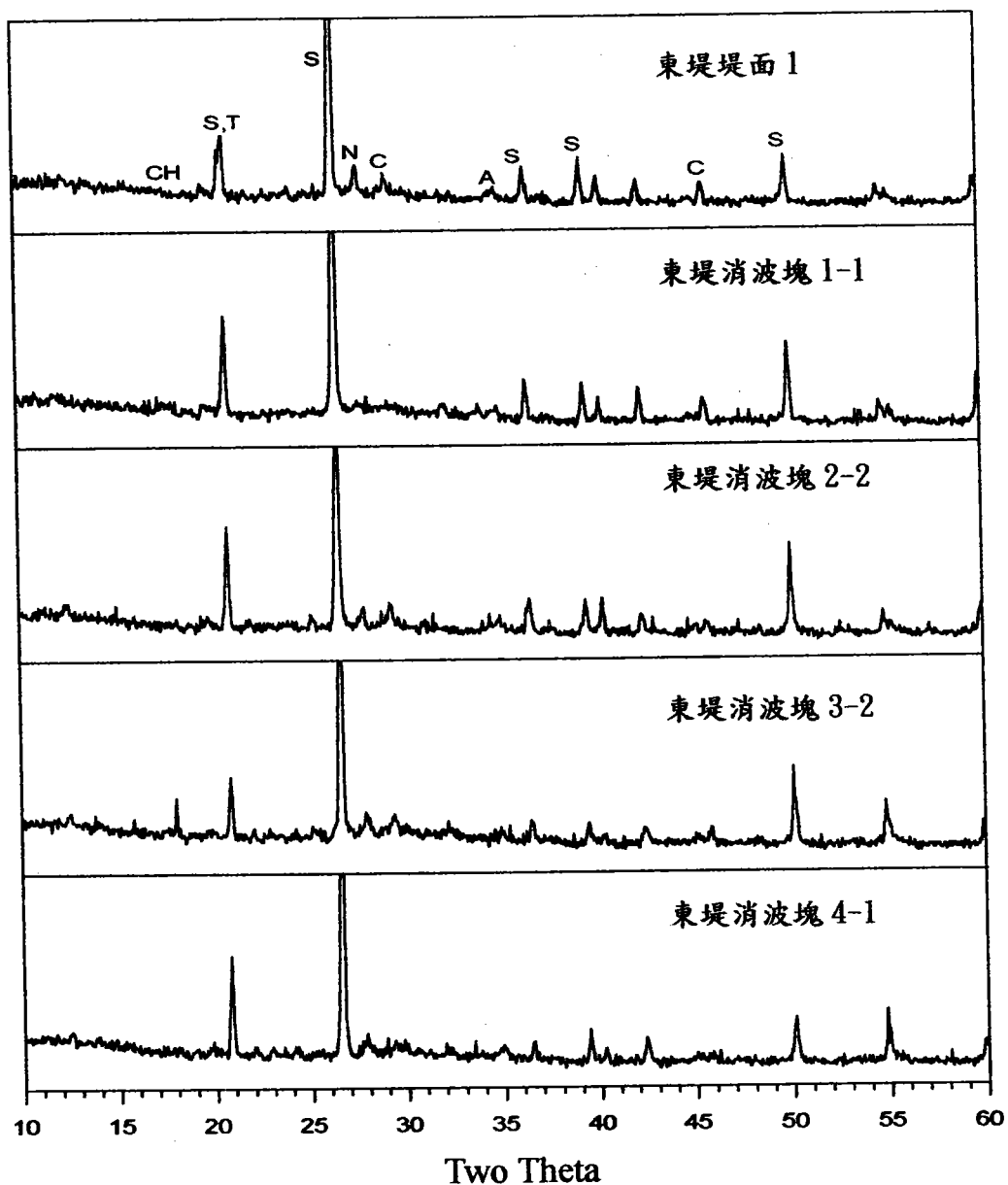
T : Tridymite

Cr : Crisldoalite



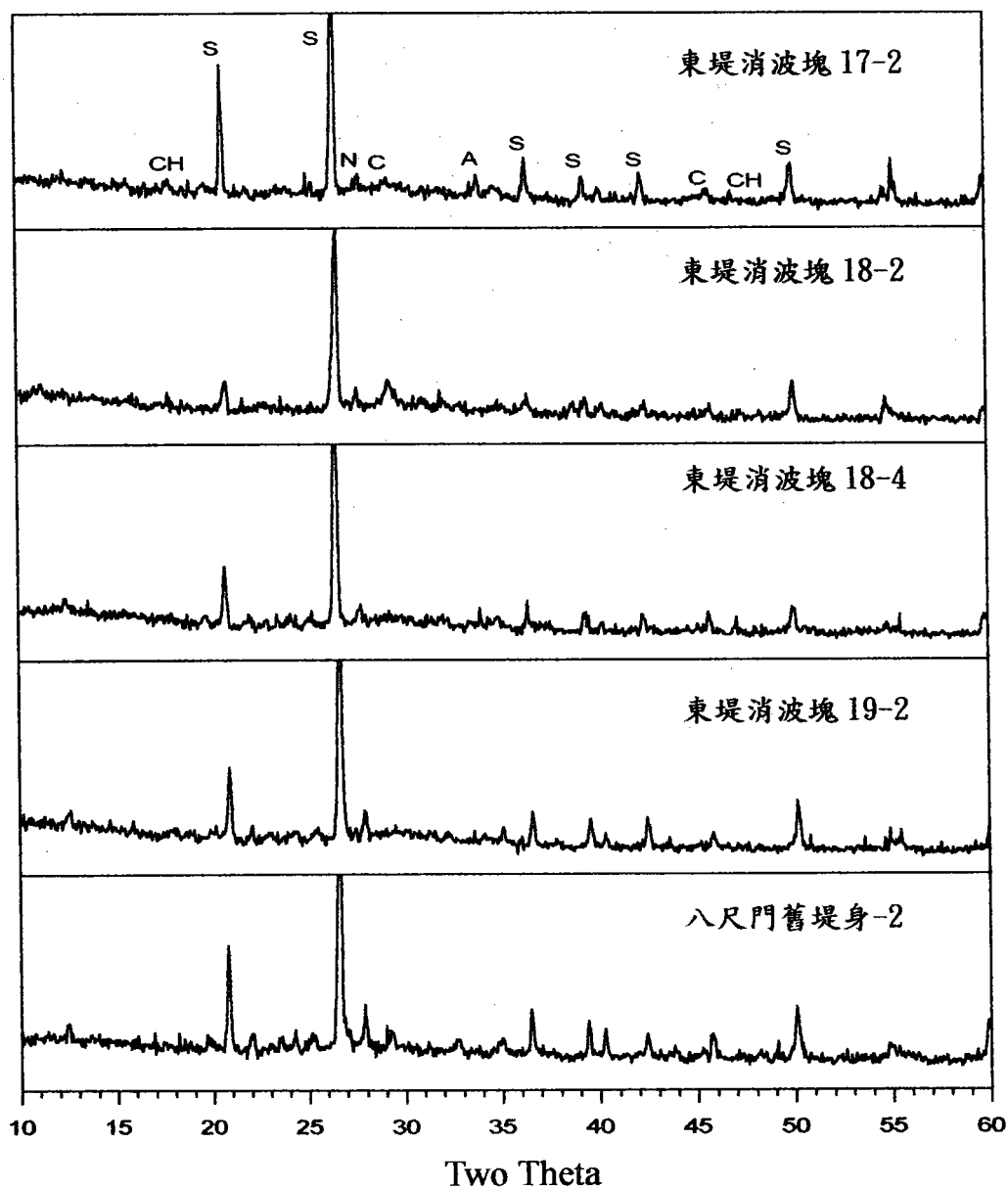
台中港鑽心試體 X 光繞射圖

CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ S : SiO_2 C : CaCO_3
 E : Ettringite N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
 A : Al_2O_3 T : Tridymite Cr : Crisloalite



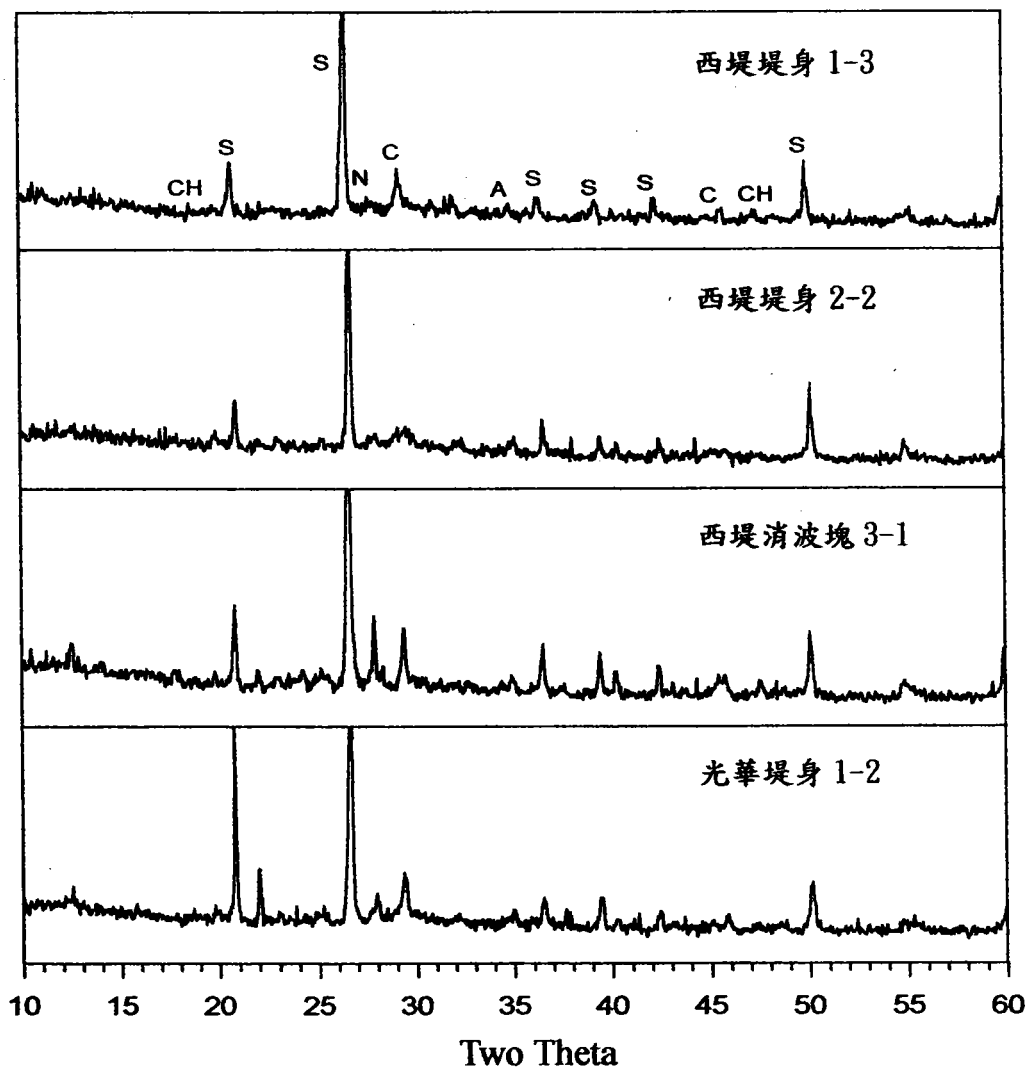
基隆港鑽心試體 X 光繞射圖

CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ S : SiO_2 C : CaCO_3
 E : Ettringite N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
 A : Al_2O_3 T : Tridymite Cr : Crisdoalite



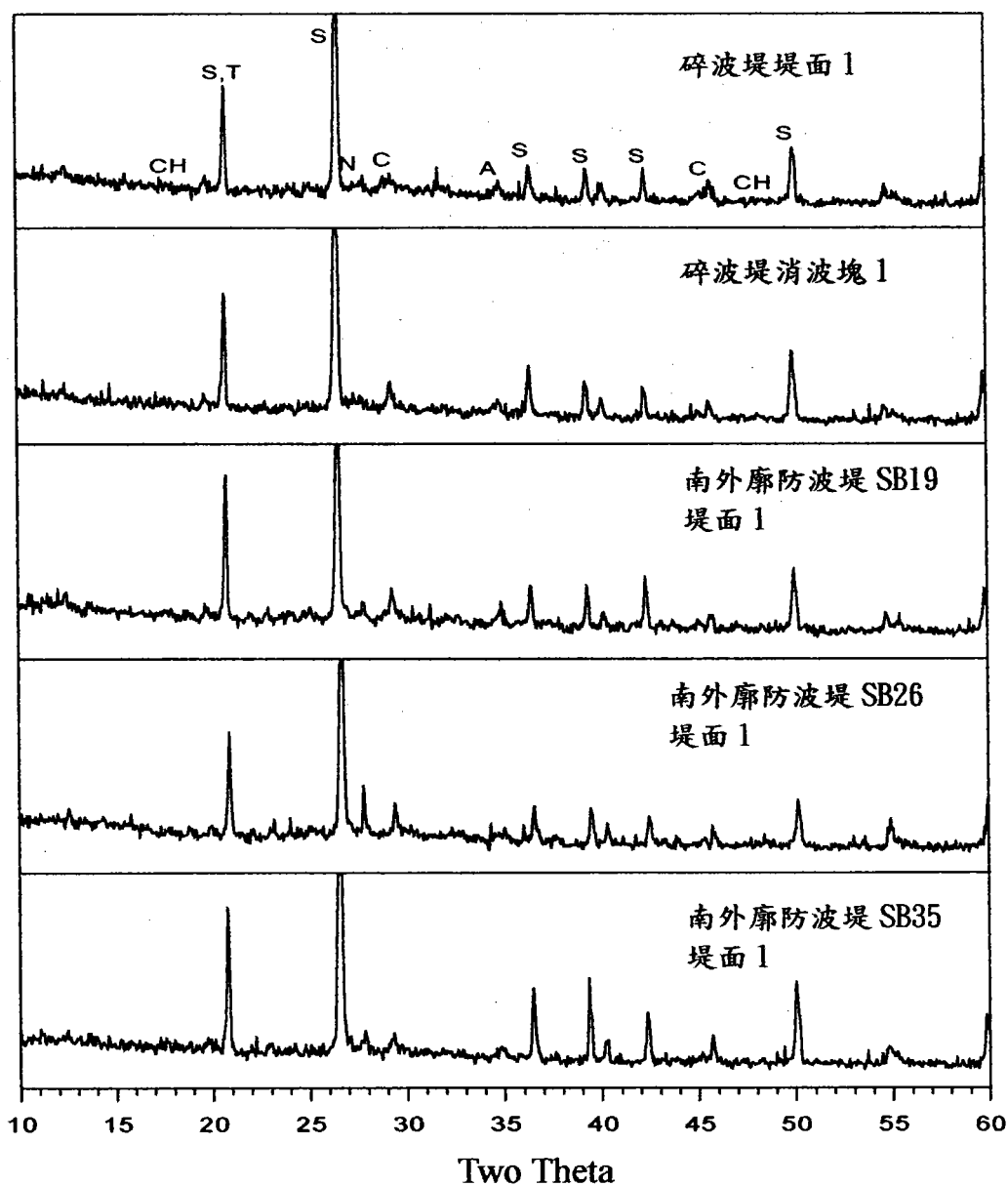
基隆港鑽心試體 X 光繞射圖

CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ S : SiO_2 C : CaCO_3
 E : Ettringite N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
 A : Al_2O_3 T : Tridymite Cr : Crisidoalite



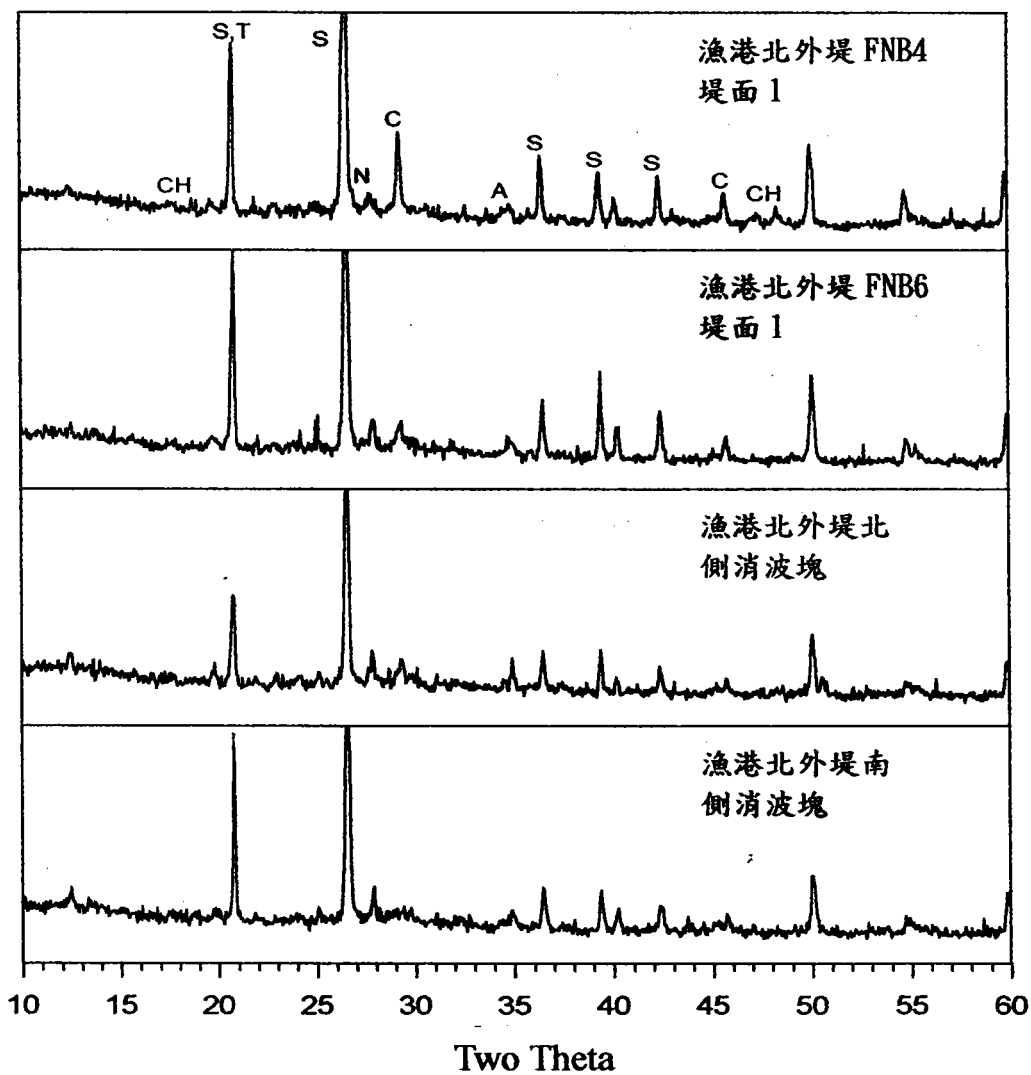
基隆港鑽心試體 X 光繞射圖

CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ S : SiO_2 C : CaCO_3
 E : Ettringite N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
 A : Al_2O_3 T : Tridymite Cr : Crisloalite

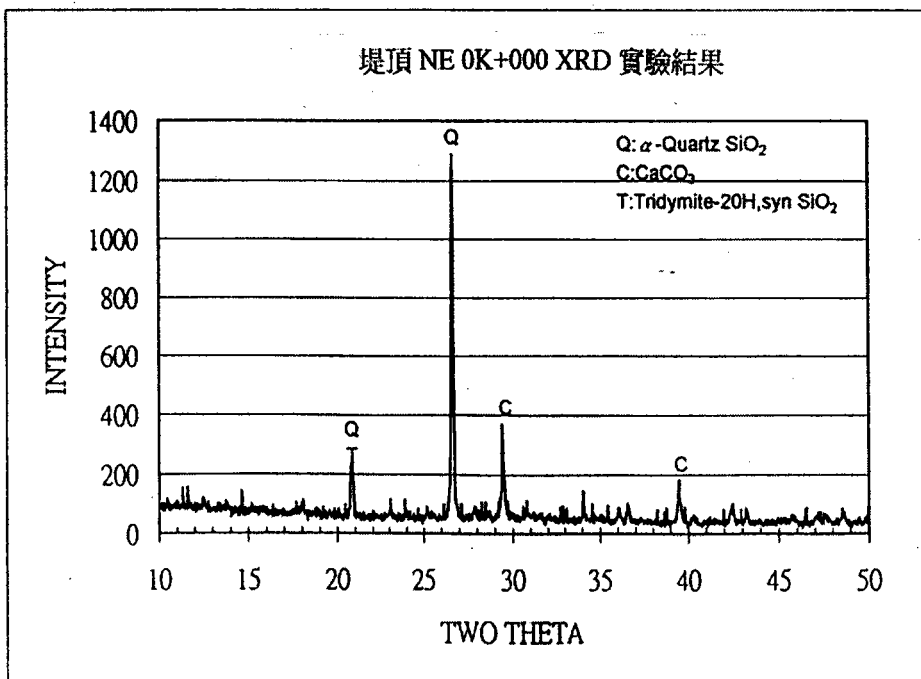
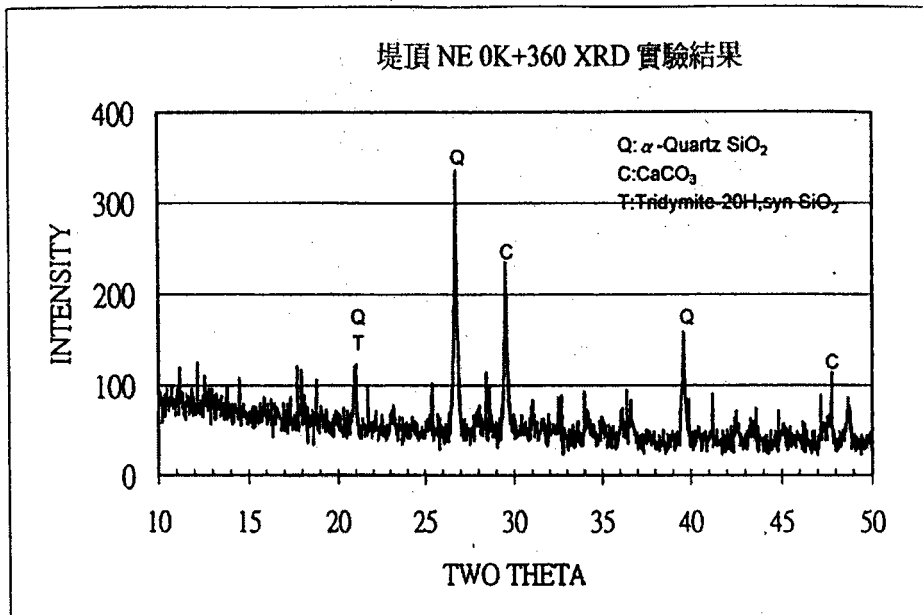


蘇澳港鑽心試體 X 光繞射圖

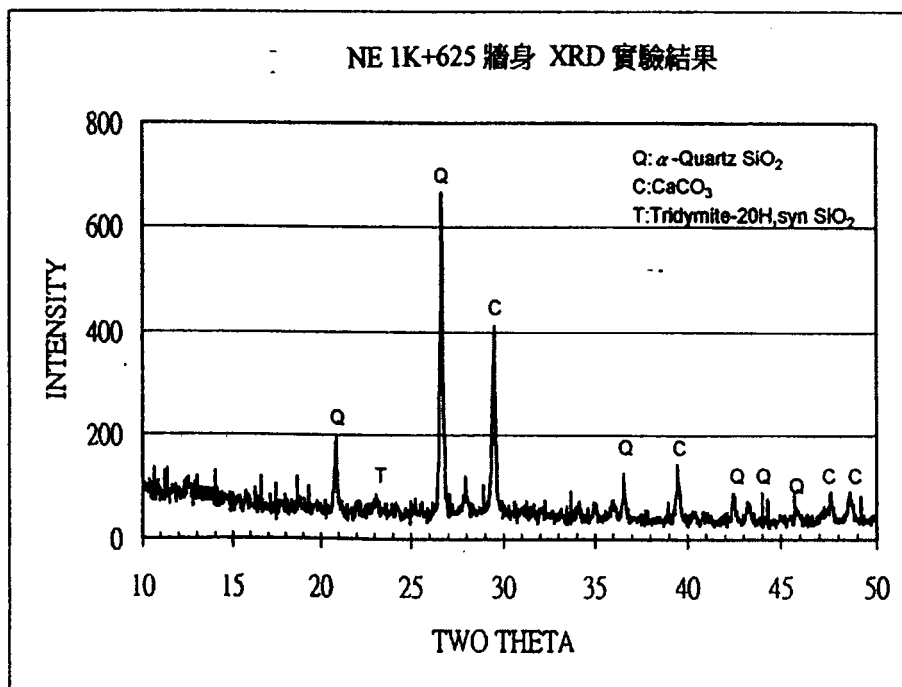
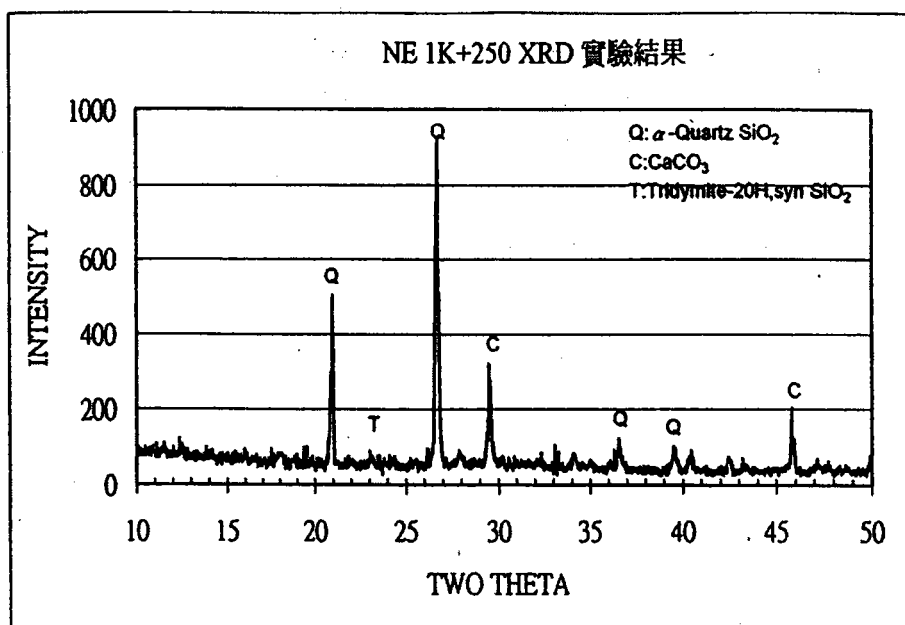
CH : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ S : SiO_2 C : CaCO_3
 E : Ettringite N : $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
 A : Al_2O_3 T : Tridymite Cr : Crisdoalite



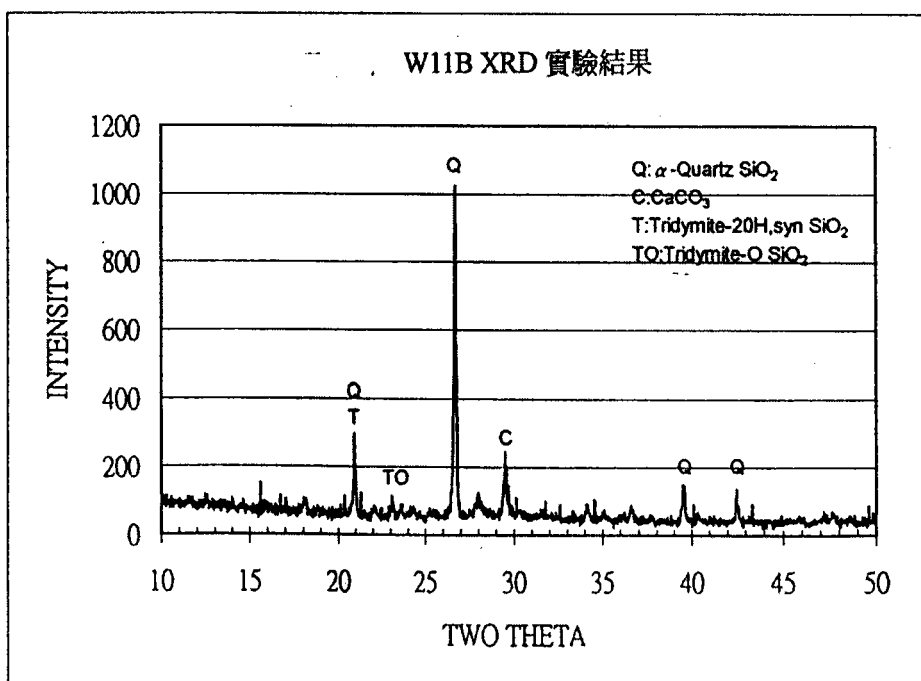
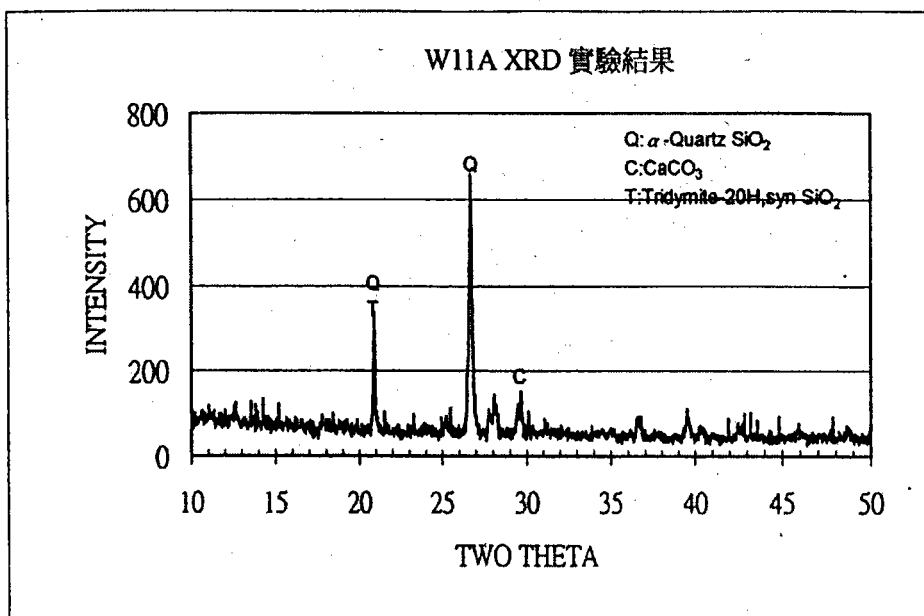
蘇澳港鑽心試體 X 光繞射圖



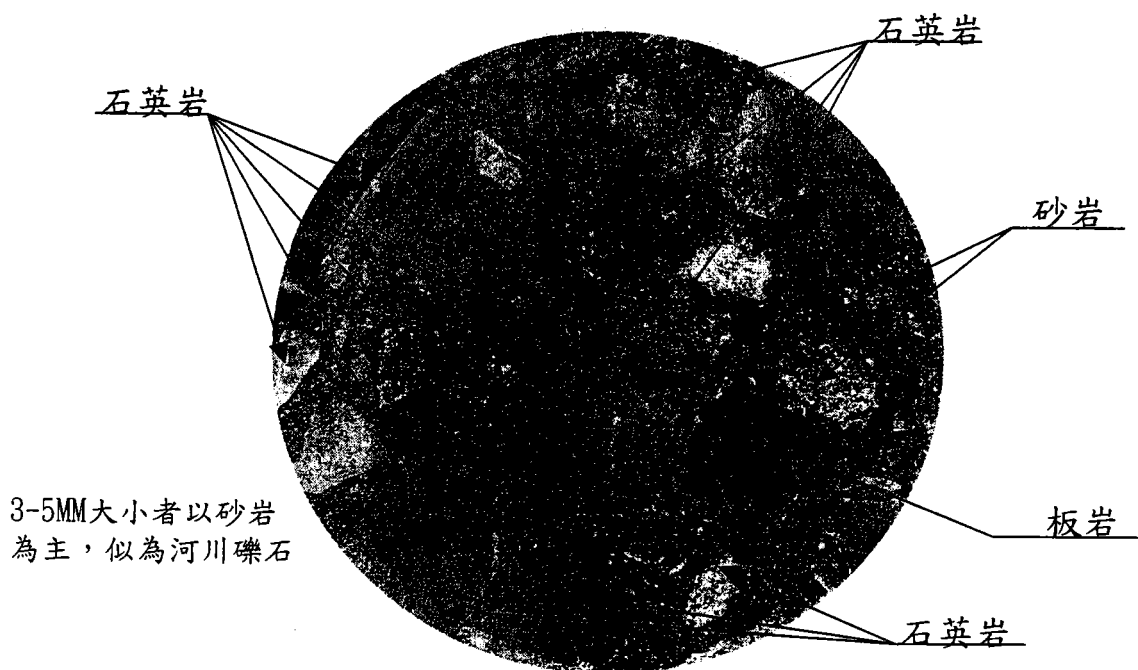
花蓮港鑽心試體岩相分析(粒料種類)



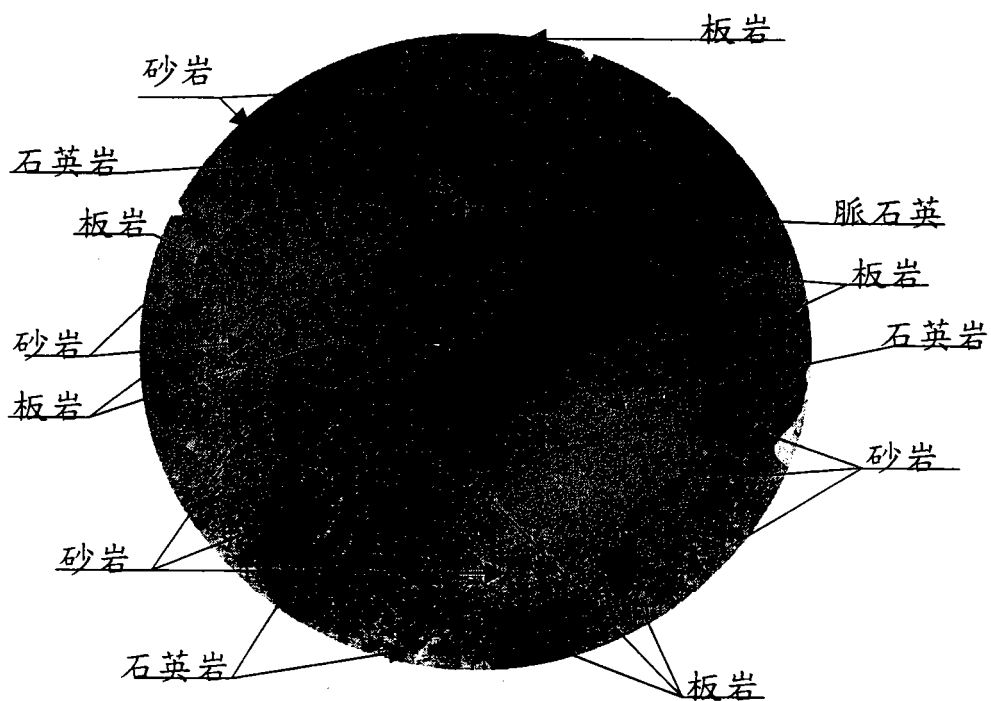
花蓮港鑽心試體岩相分析(粒料種類)



花蓮港鑽心試體岩相分析(粒料種類)

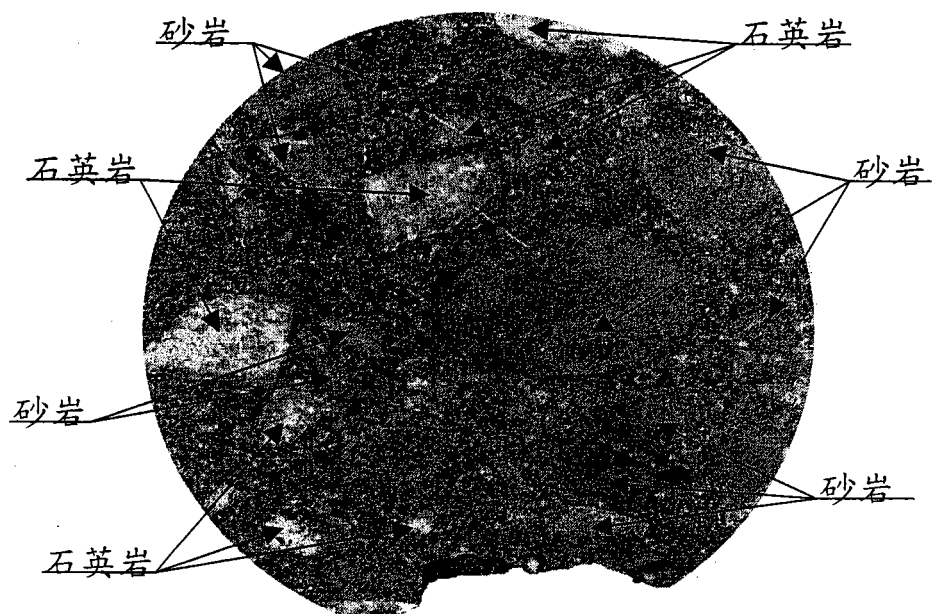


台中港北防波堤延長段堤身1

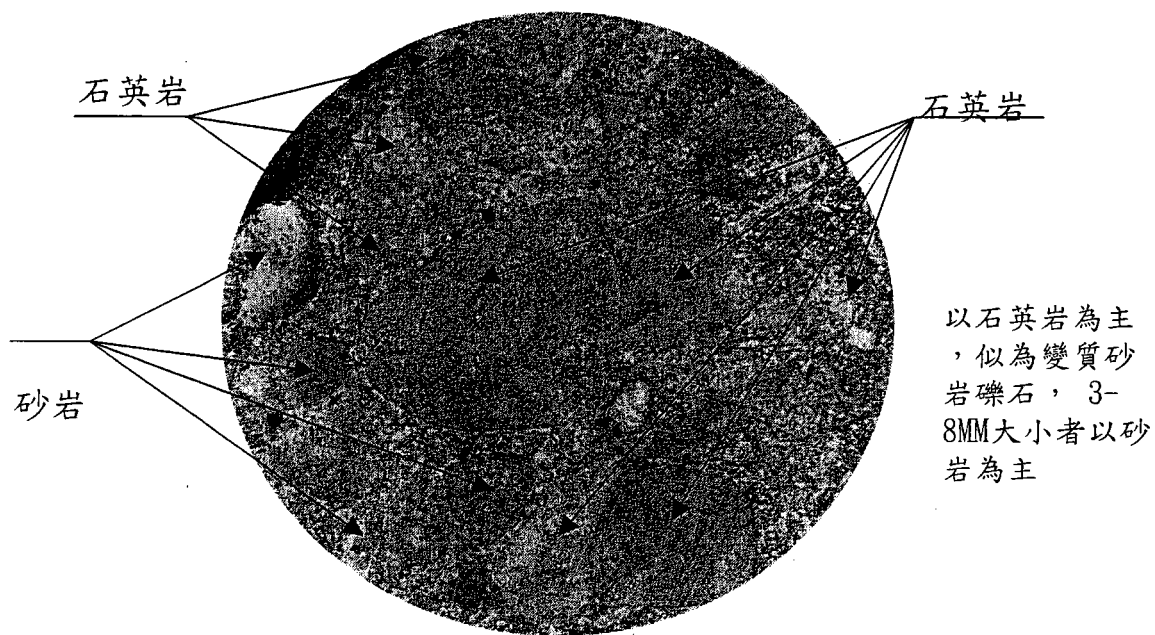


台中港北防波堤延長段堤身4

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

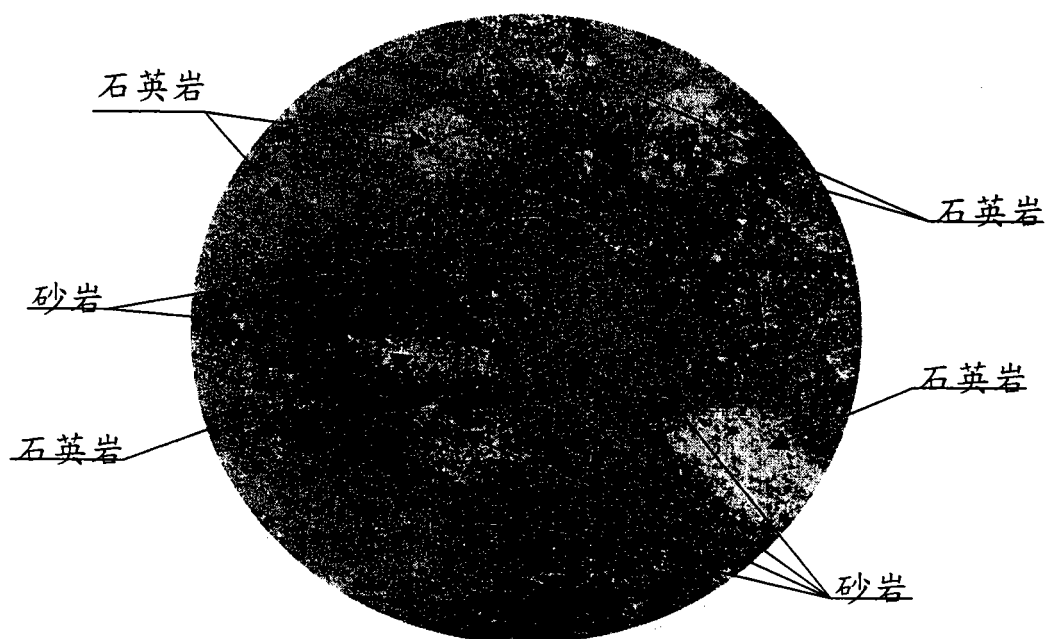


台中港北堤堤身2-1

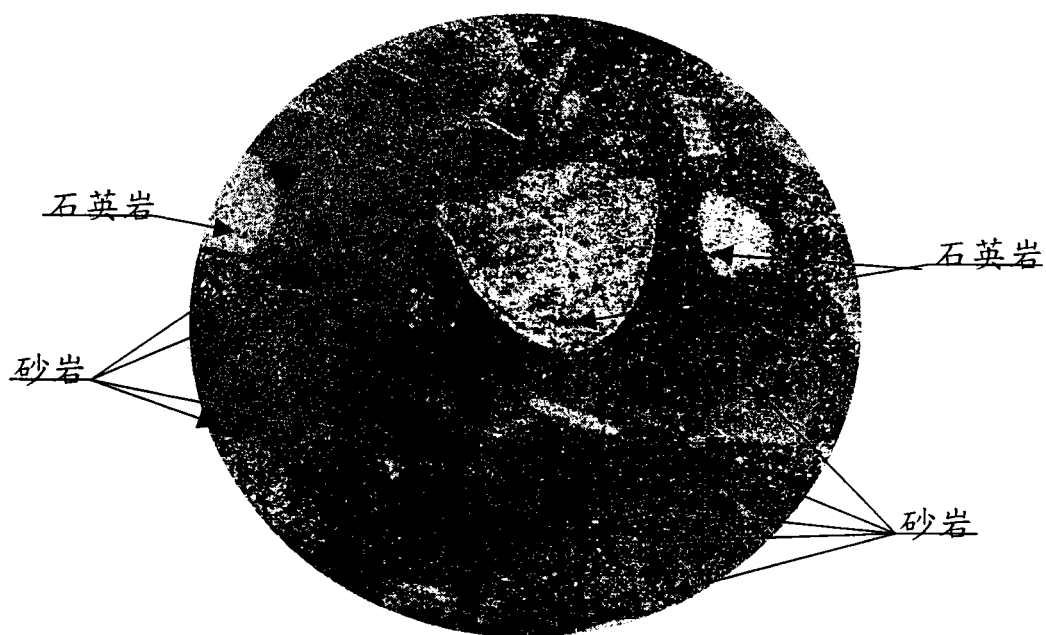


台中港北堤消波塊1-2

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

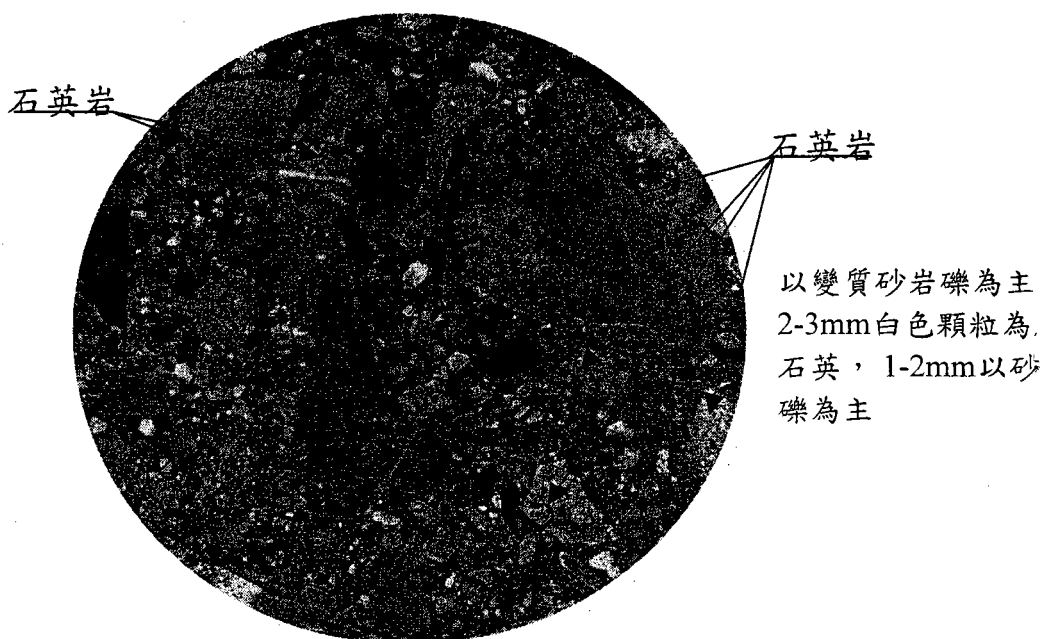


台中港南防波堤堤身1-1

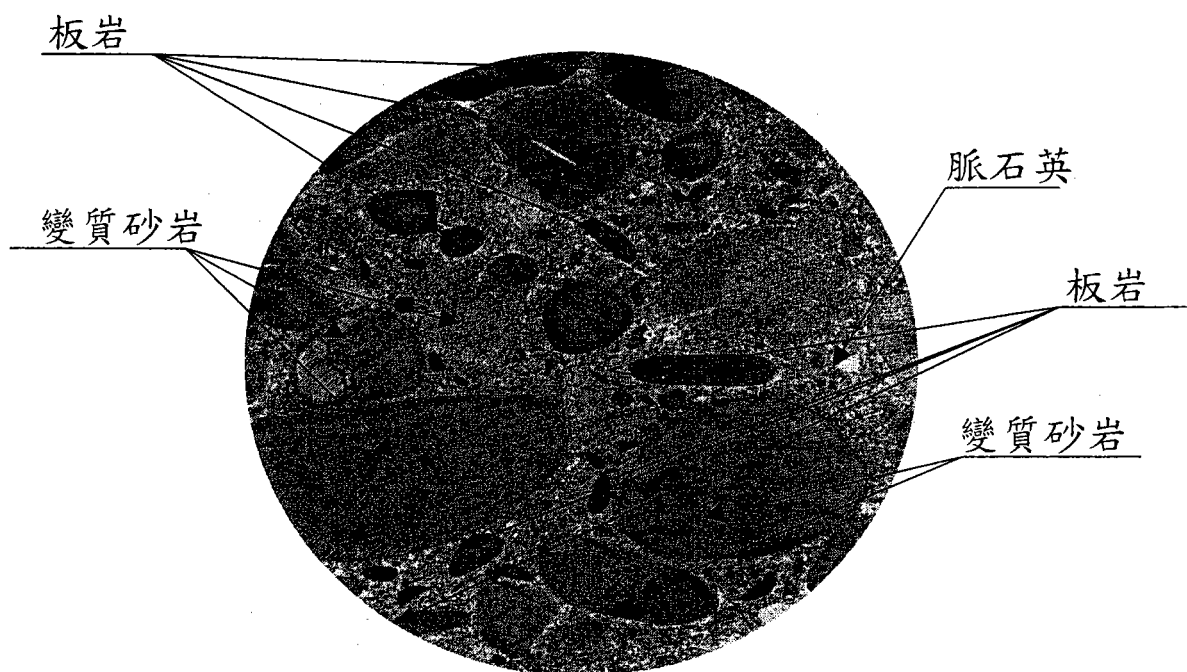


台中港南防波堤堤身2-3

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

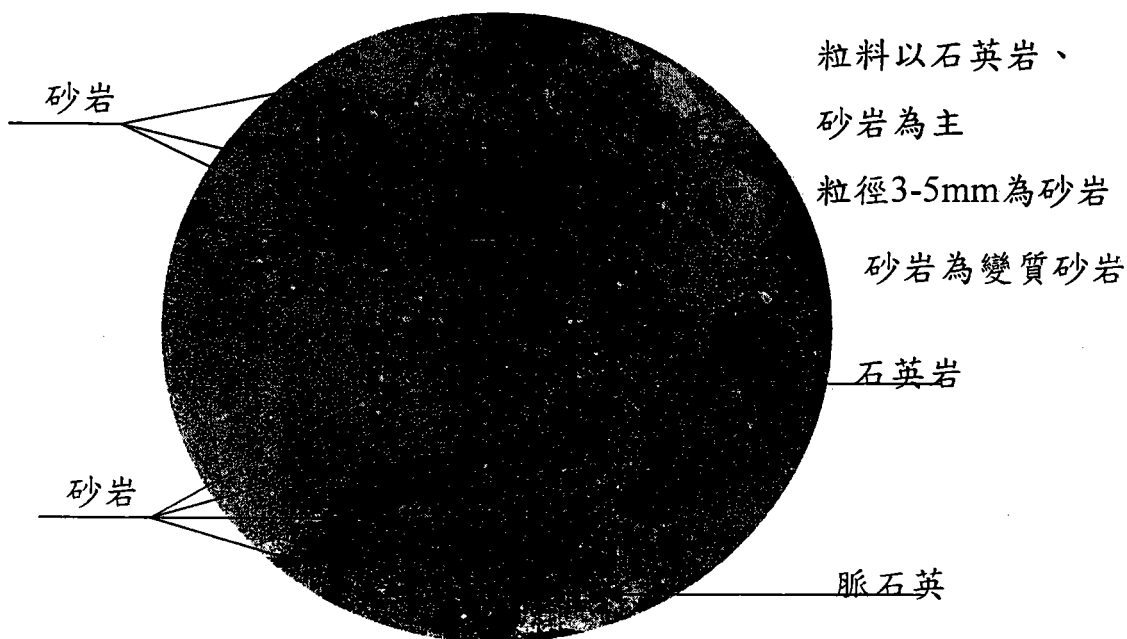


基隆港西防波堤消波塊1-1

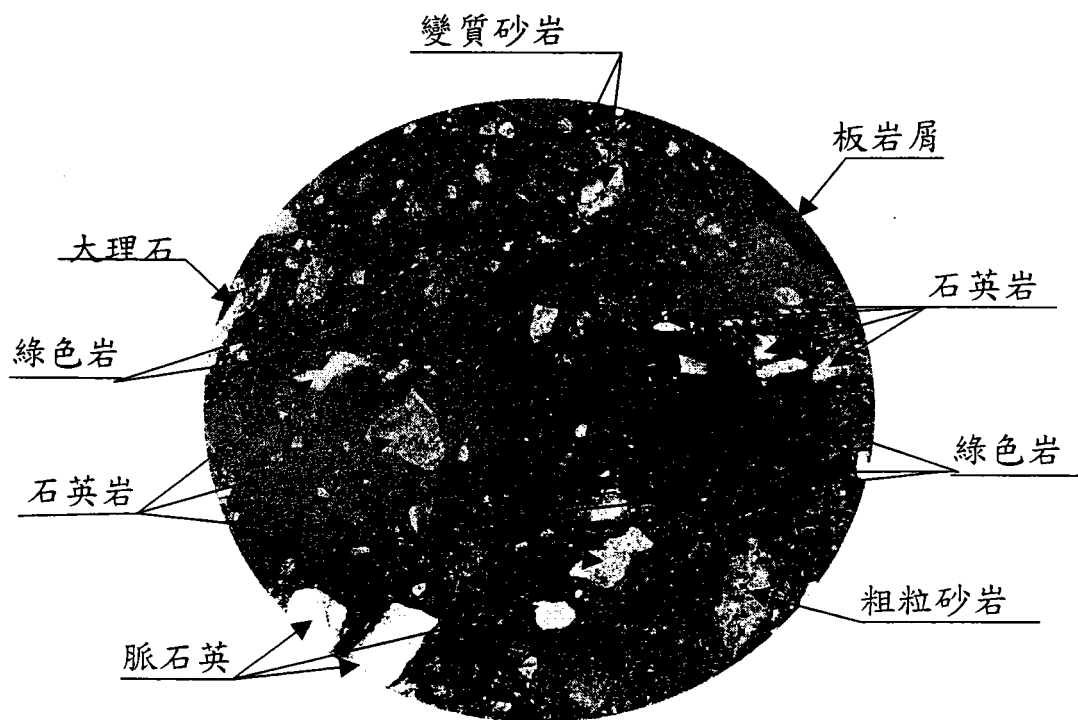


基隆港西防波堤堤身1-3

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

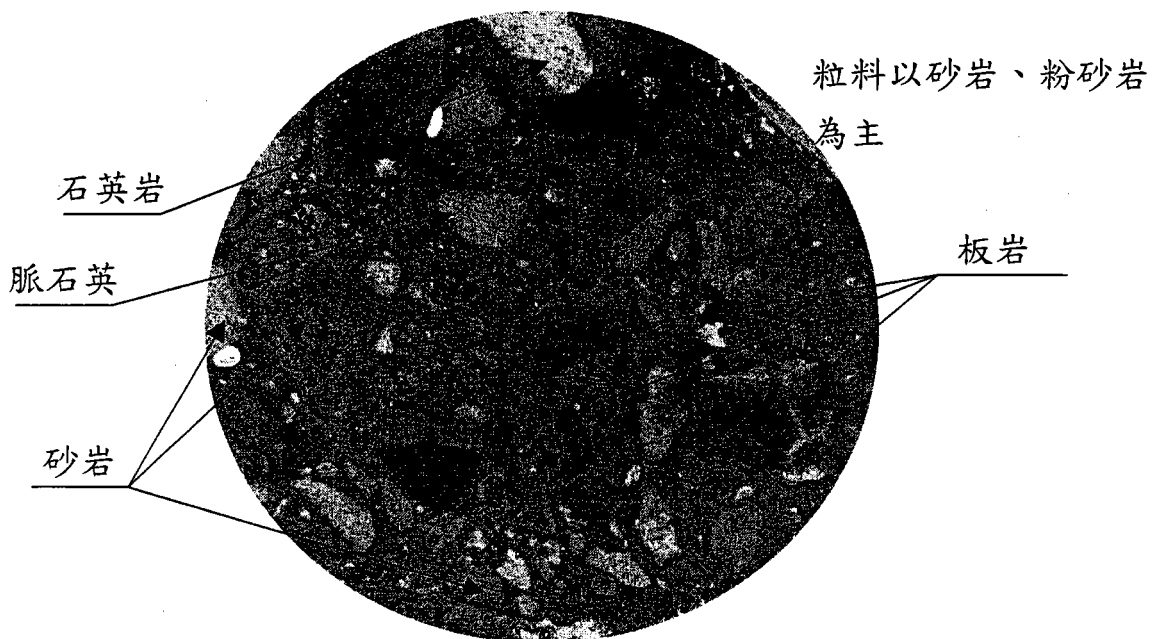


基隆港東防波堤消波塊2-2

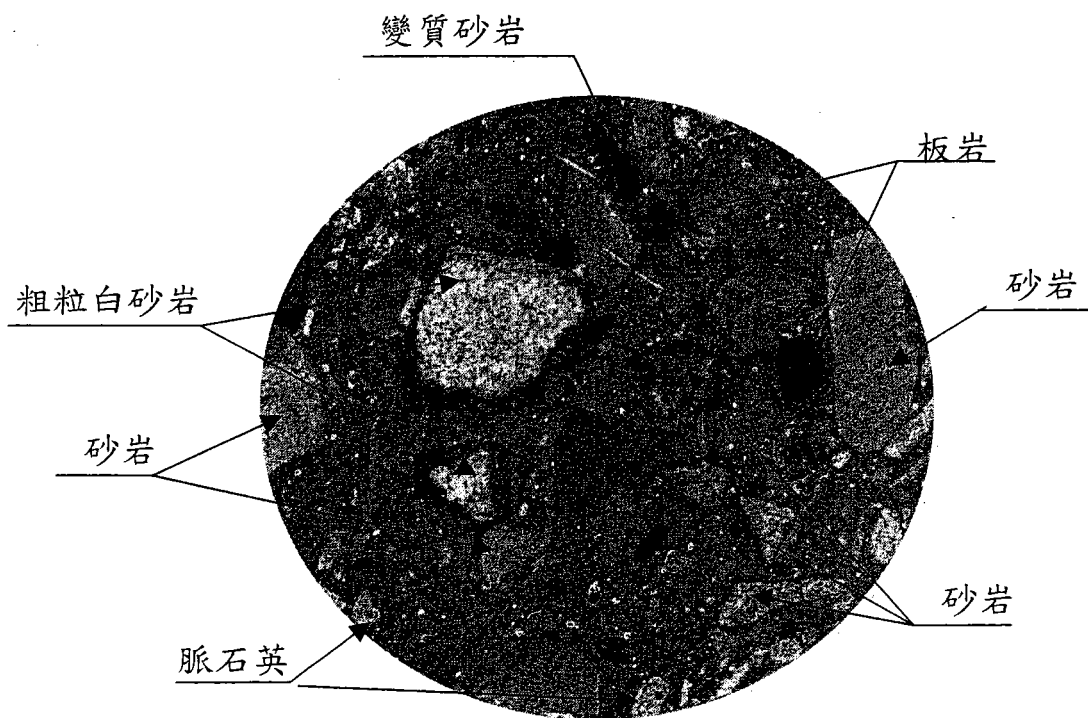


基隆港東防波堤消波塊3-2

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

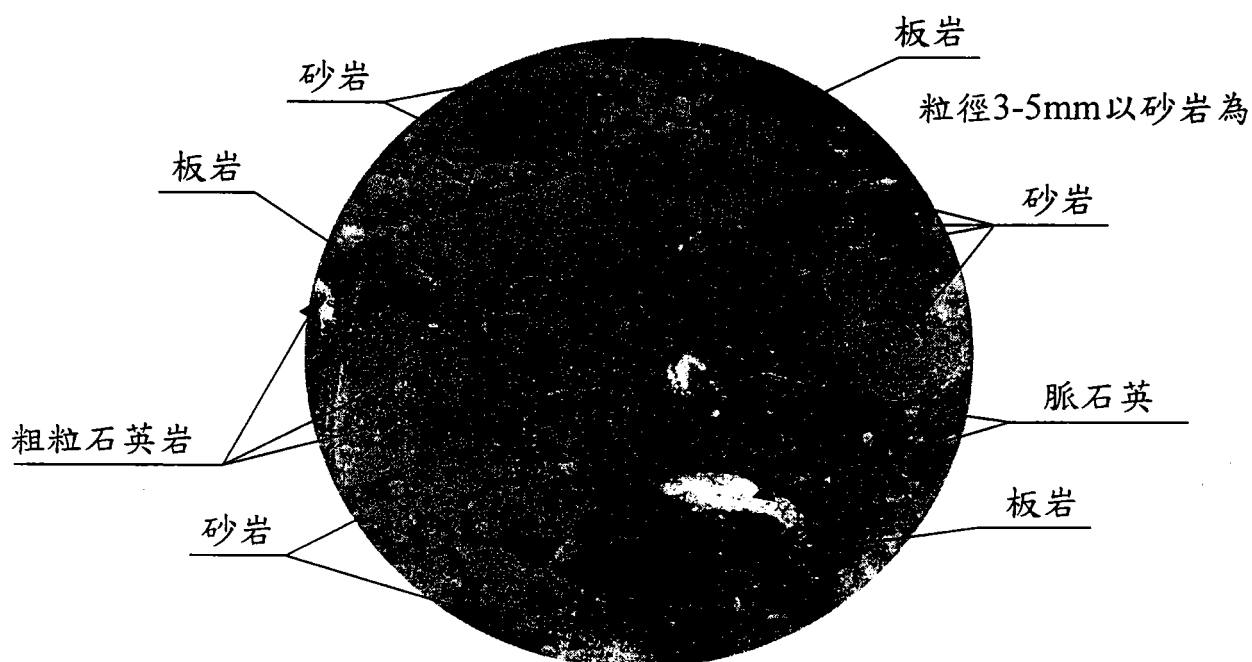


基隆港東防波堤消波塊17-1

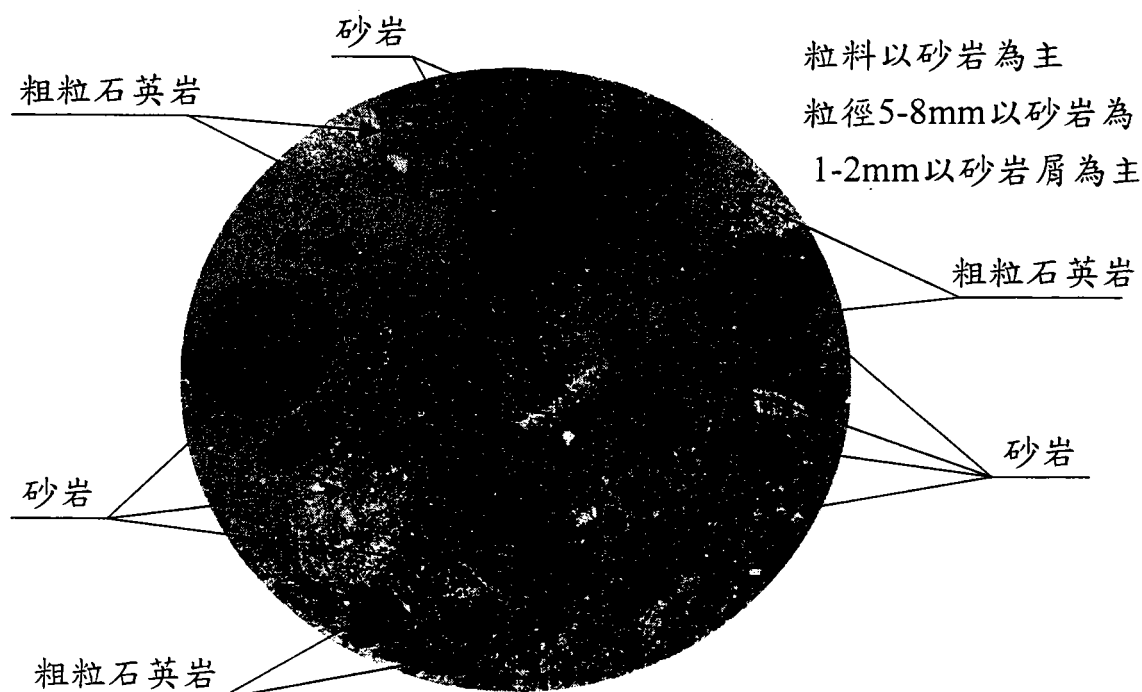


基隆港東防波堤消波塊18-2

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

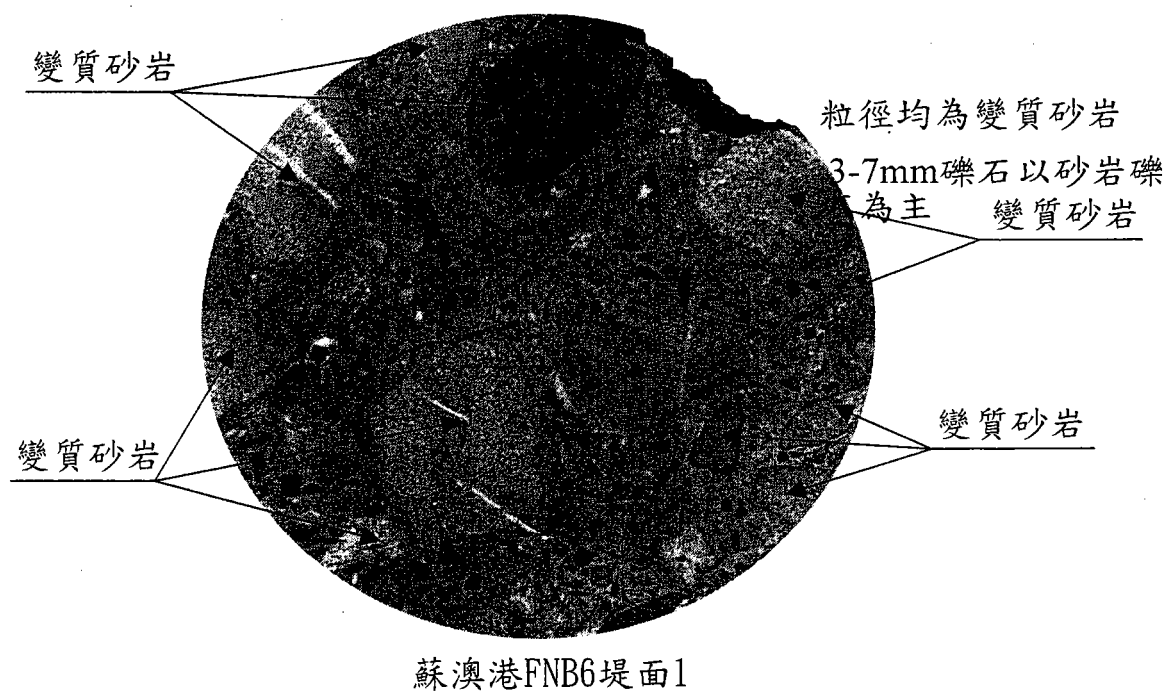
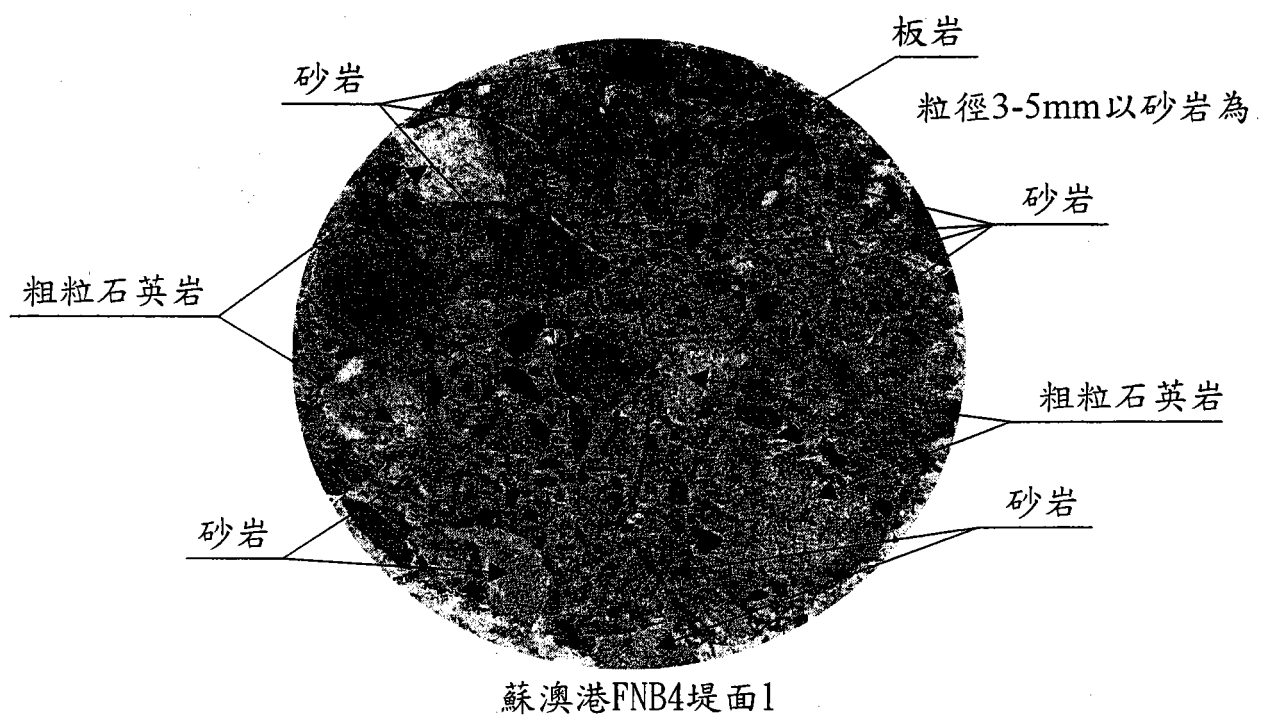


蘇澳港FNB北側消波塊1

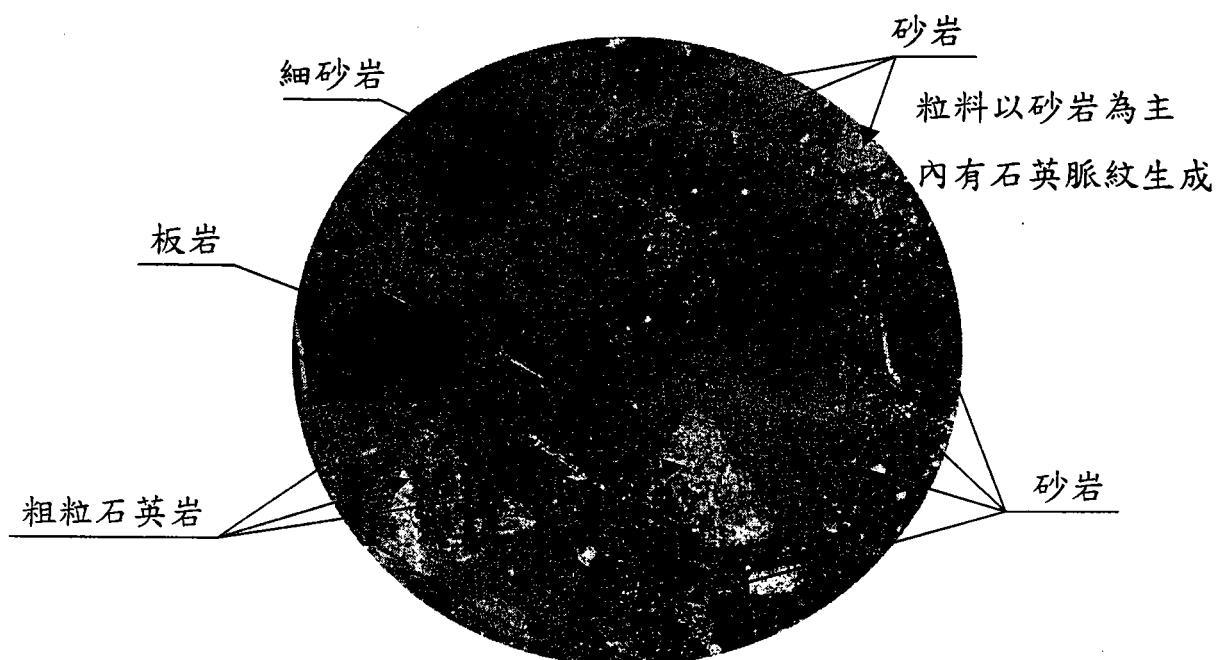


蘇澳港FNB南側消波塊1

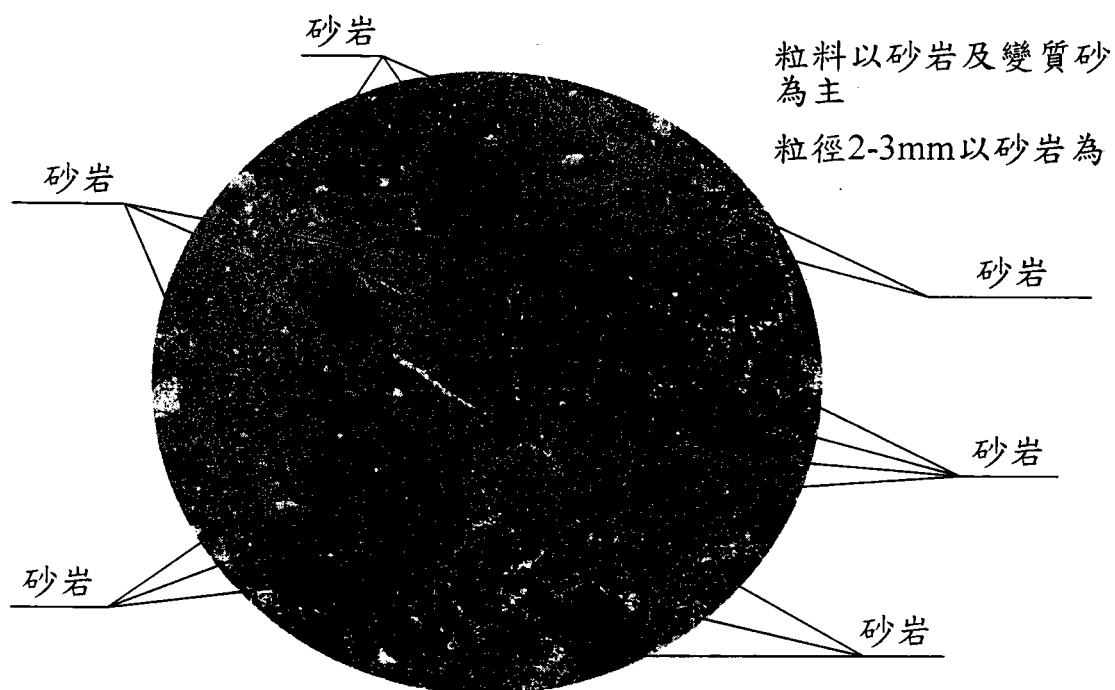
鑽心試體岩相分析(粒料種類)



鑽心試體岩相分析(粒料種類)



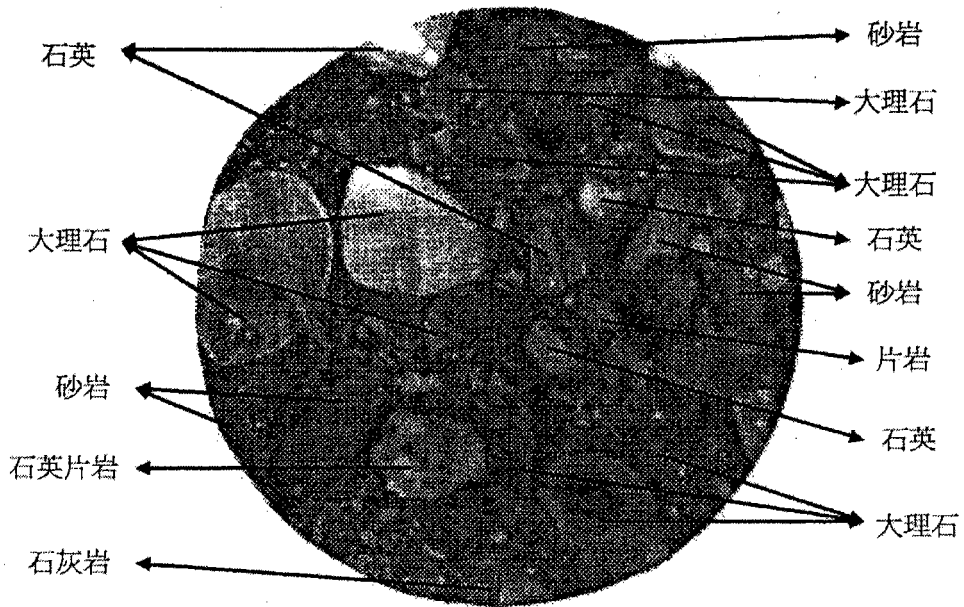
蘇澳港碎波堤堤身5



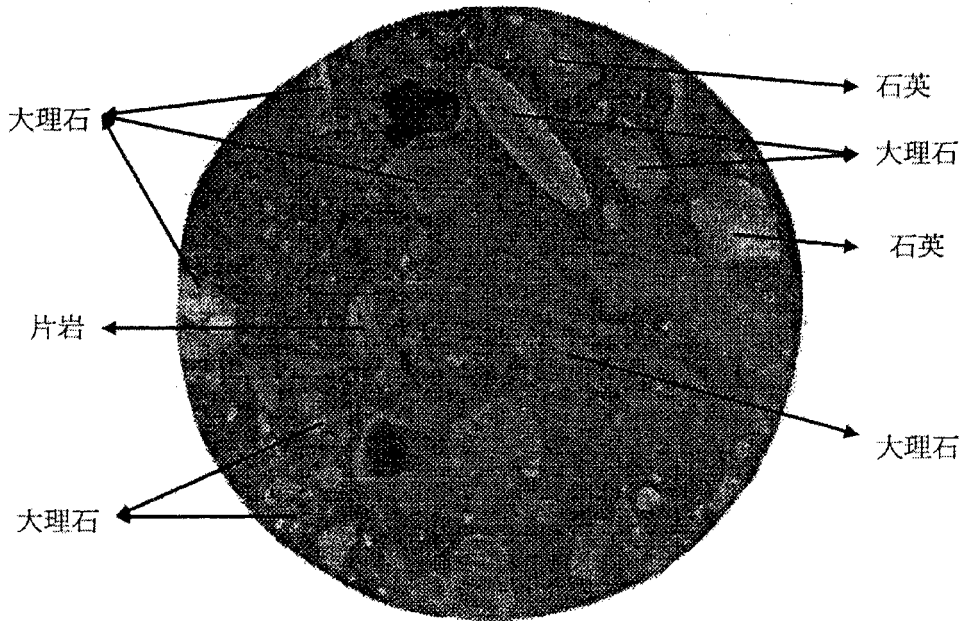
蘇澳港碎波堤消波塊1

鑽心試體岩相分析(粒料種類)

新東堤堤身 NE 0K+255

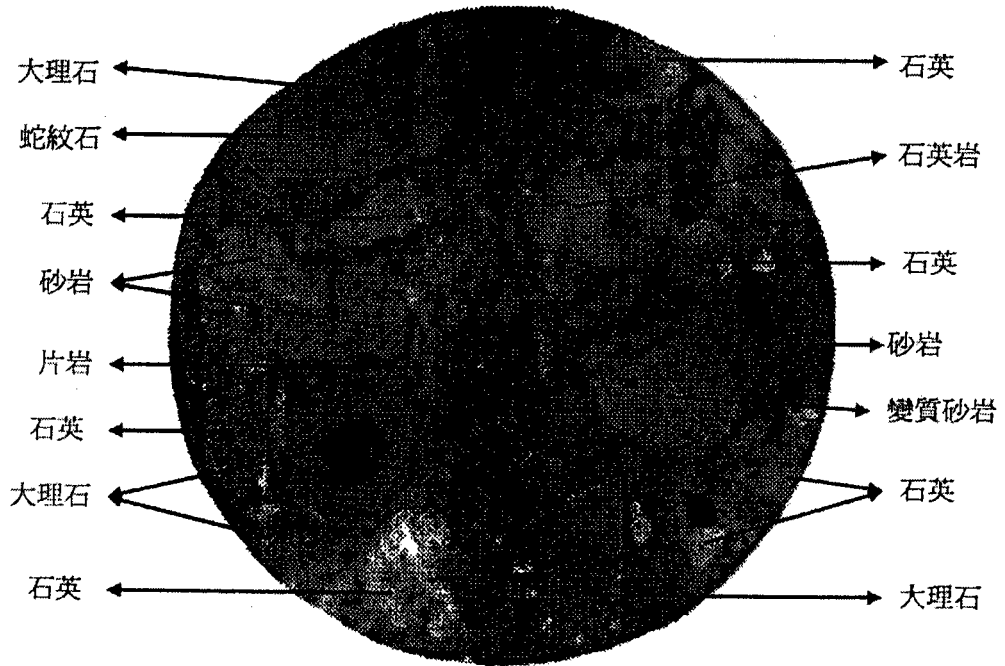


新東堤堤身 NE 0K+ 360

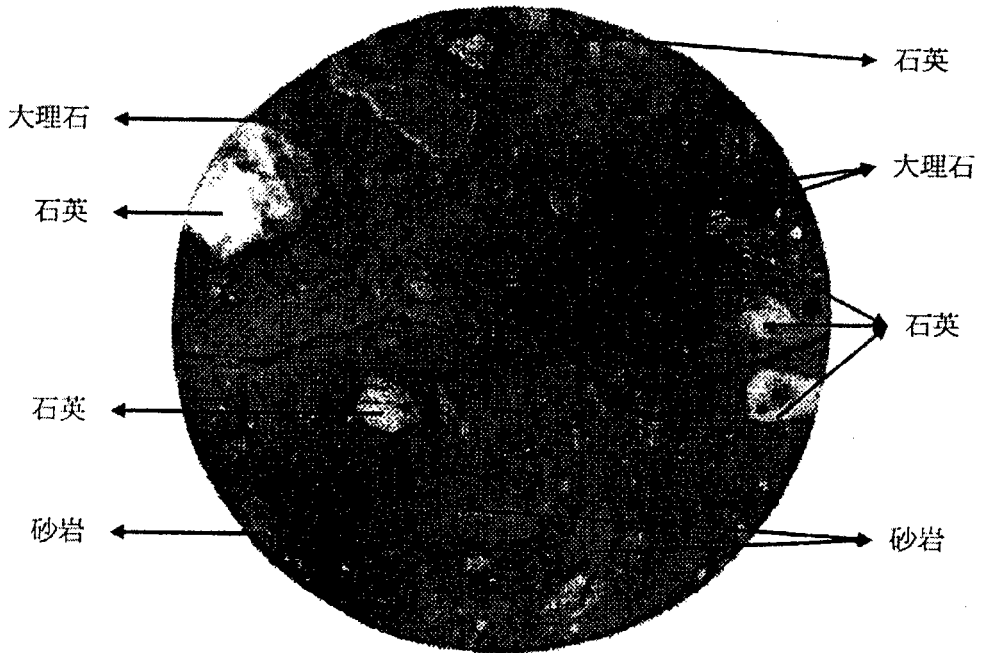


花蓮港鑽心試體岩相分析(粒料種類)

舊東堤堤頂 OE 0K+000

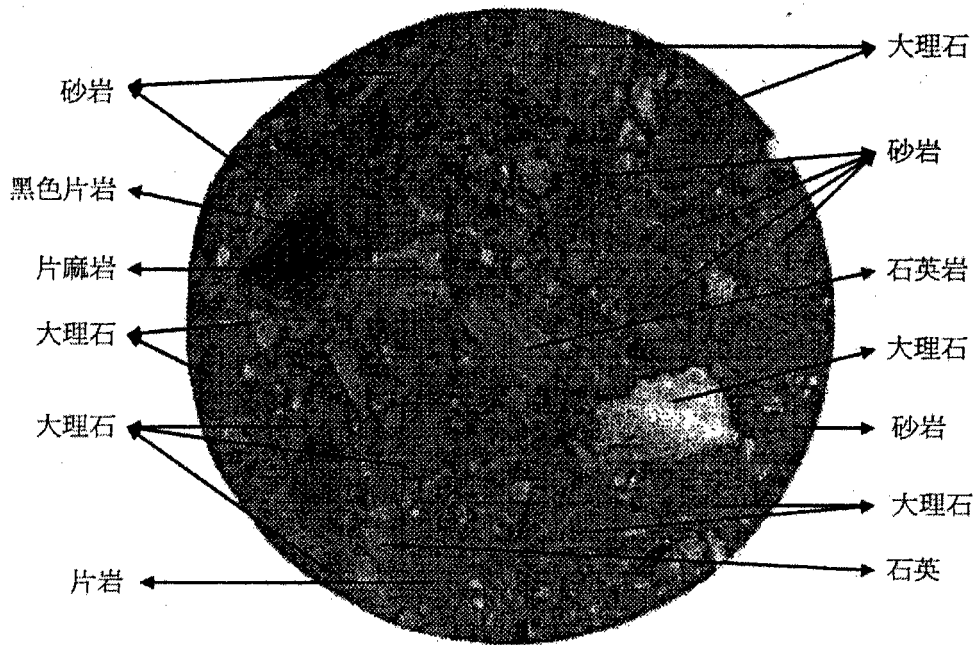


新東堤堤頂 NE 0K+360

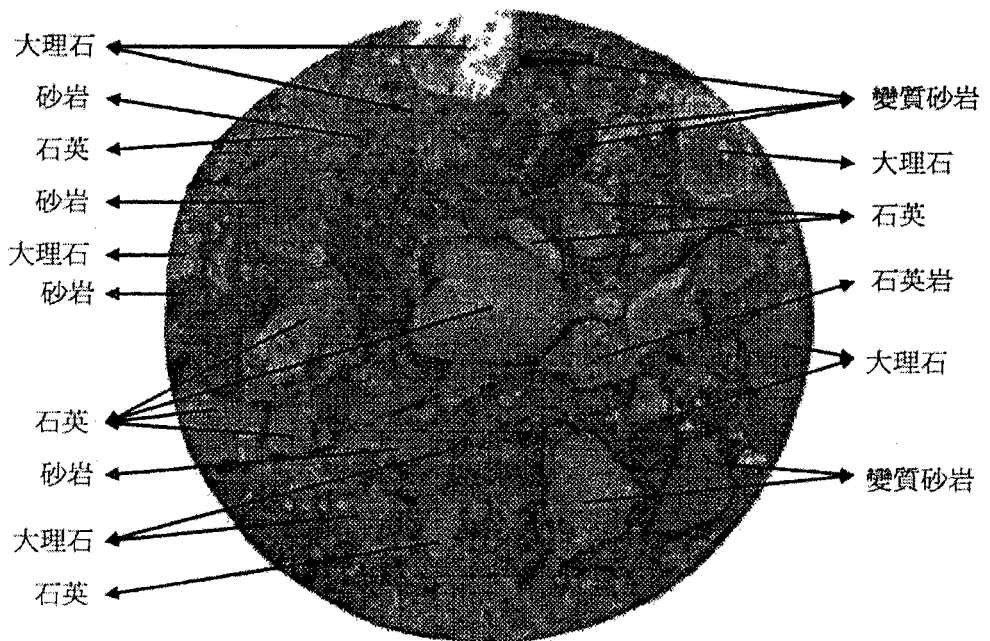


花蓮港鑽心試體岩相分析(粒料種類)

因颱風破壞之斷面 NE 1K+625V 牆身



因颱風破壞之斷面 NE 1K+625L



花蓮港鑽心試體岩相分析(粒料種類)