

蘇澳港防波堤改善工程規劃

總 結 報 告

委託單位：省交通處基隆港務局蘇澳港分局

承辦單位：省交通處港灣技術研究所

中華民國八十六年二月

蘇澳港防波堤改善工程規劃

計畫總主持人：邱永芳研究員

參與人員：李兆芳教授

陳正興教授

邱逢琛教授

許泰文教授

陳景文教授

張憲國副教授

李 釗副教授

蔣德普副教授

何良勝研究員

陳桂清副研究員

洪憲忠副研究員

莊文傑副研究員

饒 正副研究員

柯正龍助理研究員

黃國祥助理

行政督導 所長

張金機

副所長

莊甲子

海工組組長

黃清和

目 錄

- 壹.緒論
- 貳.蘇澳港防波堤損壞現況之調查研究
- 參.混凝土材料劣化損壞評估與改善研究
- 肆.颱風波浪資料分析及預測模式之建立
- 伍.防波堤受力之現場觀測與分析
- 陸.防波堤基礎穩定分析
- 柒.港池振盪數值之模擬
- 捌.蘇澳港暴潮模式之建立
- 玖.進出港操船及繫纜船舶運動計算系統之研究
- 拾.蘇澳港地震災害調查與初步分析
- 拾壹.蘇澳港防波堤損壞成因檢討
- 拾貳.受損防波堤之改善方法探討
- 拾參.總結
- 拾肆.建議
- 拾伍.本計畫執行具體成果
- 拾陸.蘇澳港應再探討之問題

壹.緒論

蘇澳港位於台灣東北方，地處中度地震區及颱風發生頻仍地帶，因此歷年來受天然災害的損失甚巨。如民國75年11月的地震造成船塢塢口裂縫沉陷，碼頭後側沉陷，港區建物的損壞，伸縮縫裂開等，由災害照片可明顯發現，此地層移位災害與日本神戶港地震的土壤液化損壞有相類似之情形，因此地震對蘇澳港的影響應進一步探討。從民國83年7月到83年10月間連續四個颱風經過蘇澳港直接對外廓防波堤造成破壞，其中以沉箱破壞及胸牆流失，拋石堤流失，消波塊流失等連續式的破壞，而此造成連續的颱風災害之主要可能發生的背景因素為颱風期間大浪作用而引起大量越波，造成防波堤堤面受力增大及沉箱震動。同時在天候條件對混凝土骨材較不利的環境下常年累月的影響，使得骨材壽命減短又外力加大的雙重作用下，形成破壞的連續擴大。避免蘇澳港防波堤災害的繼續擴大，對於地震災害原因的調查，颱風湧浪的推測，混凝土骨材的調查及破壞原因的鑑定及改善，港池的穩靜與颱風期間的船舶繫纜，及防波堤的基礎穩定性等問題，應再詳細研究，並研擬必要對策，以妥為因應。鑑於以上之說明，本研究計畫共分成十一個子計畫，各子計畫執行成果如后：

貳. 蘇澳港防波堤損壞現況之調查研究

- (1) 防波堤係於民國 64 年 1 月開工，施工期間曾遭多次颱風襲擊，其後又發生兩次重大颱風災害，致漁港北外堤 FNB8、FNB9 兩座沉箱主體嚴重損壞及堤面塌陷。民國 83 年 8 至 10 月間更因連續四個颱風來，導致拋石、消波塊流失及南外廓防波堤 SB19、SB31 兩座沉箱主體嚴重損毀、消波胸牆與堤面發生塌陷，民國 85 年 8 月賀伯颱風過境後，南外廓防波堤 SB23 沉箱海側潮線下方又發現一高約六公尺，寬約二十公尺之巨大破洞，影響防波堤結構安全甚巨。
 - (2) 護基方塊無明顯受損或發生位移。
 - (3) 南外廓防波堤 SB1~SB9 沉箱與漁港北外堤交角處，雙 T 塊損壞率約為 10~60%，SB13~SB14 沉箱海側菱型塊損壞率約在 40~60%。北外廓防波堤延長段 LNB1~LNB6 沉箱海側菱型塊損壞率約為 30~60%，漁港北外堤 FNB3~FNB5 沉箱北側雙 T 塊損壞率約在 40~60%。
4. 由港務局施工期間與完工後每年之高程水準測量記錄顯示，防波堤沉陷量應已漸趨穩定。

參. 混凝土材料劣化損壞評估與改善研究

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

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

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

肆. 颱風波浪資料分析及預測模式之建立

根據中央氣象局統計 96 年(1986-1992)侵襲台灣之颱風，每年平均發生 3.5 次，而在蘇澳港通過或沿岸經過者，佔約 40 %，對於蘇澳港防波堤而言，每年需面臨 1.4 次颱風波浪直接強烈作用，對防波堤安全性是極大之考驗。所以，本計畫主要研究之目的乃為建立一個波浪推算之模式，其中包括統計迴歸方法及數值計算方法二種，去推算蘇澳港之颱風波浪。

由利用收集颱風及颱風波浪資料，整理分析，經統計分析迴歸出推算颱風波浪之公式，並利用極值統計分析迴歸出各種重現期之波浪特性。

推算颱風湧浪之特性為

$$H_S = 1.4 + 6.5 \left(\frac{\Delta p}{100} \right) e^{3.0 \left(\frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_S)$$

$$T_S = 4.0 + 52.69 \left(\frac{\Delta p}{100 \cdot g} \right)^{1/2} e^{0.75 \left(\frac{R_7}{D} \right)^{1/2}} (1 - A_S)$$

而推算風浪公式為

$$H_w = 1.4 + 95.68 \left(\frac{\Delta p}{100} \right) (1 - A_S)$$

$$T_w = 4.0 + 120.5 \left(\frac{\Delta p}{100 \cdot g} \right)^{1/2} (1 - A_S)$$

蘇澳港 50 年重現期之波高，經極值統計分析約為 10.3 ~ 11.7 公尺，標準偏差為 0.7 ~ 1.2 公尺之間。波浪週期為 11.84 ~ 13.88 秒之間。

本計劃所發展出之推算波浪公式，因颱風波浪資料尚少，且局部於花蓮港之單點數據，可靠性較低，且極值分析所選擇之樣本僅 10 年，樣本數尚少，應再做更深入且樣本數多之分析。

伍. 防波堤受力之現場觀測與分析

本計畫於蘇澳港外廓防波堤 SB19 沉箱壁面裝設波壓計、波高計、表面型地震計、埋入型地震計、沉箱下裝設孔隙水壓計，而於岸上設立資料擷取站，由資料記錄站可使用數據機直接將訊號傳送回港研所做立即的監測與資料處理，亦即本計畫建立了一套自動即時的資料監測系統，由量測而得之壁面波壓與波高目前已建立了一個簡易而明確的轉換關係，用於由壁面之水位變化來推測壁面所受之波壓力。防波堤下之孔隙水壓力變化亦與水位變化有明顯的轉換關係，唯應再進一步確認其間之關係式。

利用堤面上之波壓與波高變化之統計結果得到如下之轉換函數，供未來預測堤面受力之設計使用。

示性波

$$\frac{P_{1/3}}{\rho g H_{1/3}} = EXP \left[-0.905 \frac{w_{1/3}^2 z}{g} - 0.027 \right]$$

$$\frac{(P_c)_{1/3}}{\rho g H_{1/3}} = EXP \left[-0.756 \frac{w_{1/3}^2 z}{g} - 1.021 \right]$$

$$\frac{(P_t)_{1/3}}{\rho g H_{1/3}} = EXP \left[-0.644 \frac{w_{1/3}^2 z}{g} - 1.087 \right]$$

十分之一波

$$\frac{P_{1/10}}{\rho g H_{1/10}} = EXP \left[-1.267 \frac{w_{1/10}^2 z}{g} - 0.062 \right]$$

$$\frac{(P_c)_{1/10}}{\rho g H_{1/10}} = EXP \left[-0.800 \frac{w_{1/10}^2 z}{g} - 1.153 \right]$$

$$\frac{(P_t)_{1/10}}{\rho g H_{1/10}} = EXP \left[-0.663 \frac{w_{1/10}^2 z}{g} - 1.222 \right]$$

孔隙水壓力與波高變化之統計結果，得到如下轉換函數供預測孔隙水壓力使用

示性波

$$\frac{P_{1/3}}{\rho g H_{1/3}} = E_{xp} \left[-2.413 \frac{W_{1/3}^2 z}{g} - 0.265 \right]$$

$$\frac{(P_c)_{1/3}}{\rho g H_{1/3}} = E_{xp} \left[-2.738 \frac{W_{1/3}^2 z}{g} - 0.225 \right]$$

$$\frac{(P_t)_{1/3}}{\rho g H_{1/3}} = E_{xp} \left[-2.798 \frac{W_{1/3}^2 z}{g} - 0.261 \right]$$

十分之一波

$$\frac{P_{1/10}}{\rho g H_{1/10}} = E_{xp} \left[-1.958 \frac{W_{1/10}^2 z}{g} - 0.422 \right]$$

$$\frac{(P_c)_{1/10}}{\rho g H_{1/10}} = E_{xp} \left[-2.662 \frac{W_{1/10}^2 z}{g} - 0.314 \right]$$

$$\frac{(P_t)_{1/10}}{\rho g H_{1/10}} = E_{xp} \left[-2.397 \frac{W_{1/10}^2 z}{g} - 0.400 \right]$$

使用本計畫之「颱風波浪資料分析及預測模式之建立」與「蘇澳港港池振盪數值模擬」等二計畫之成果，即蘇澳港 50 年之設計波高為 11.5 公尺週期 13 秒，推算到堤面上之波高為 16.2 公尺週期 13 秒。再使用這些設計條件運用本文提出之轉換數推算其堤面之受力為 362.51 T/M，抵抗力矩為 4545.91 T-M/M

陸.防波堤基礎穩定分析

蘇澳港港內之防波堤久受風浪作用，已有部份損壞之現象。本研究之主要目的乃探討堤址基礎可能損壞之原因，並研議防治之道，以供相關單位在修護既存防波堤及設計新防波堤基礎時之參考。除整理蘇澳港附近區域之一般地質及工程地質外並分析現場地質鑽探及土壤力學試驗所得數據及觀測資料，以求得防波堤基礎土壤之特性及影響破壞機制之主要參數，並進行基礎穩定分析。藉由現場量測所得之波浪與海床孔隙水壓分佈及鑽探所得之海床土壤數據及穩定分析結果，可了解蘇澳港防波堤基礎在波浪作用下之行為。由分析之結果，可知防波堤損壞原因可歸於(1)沉箱抗滑力不足；(2)抗傾倒力矩不足；(3)因沉箱搖動引起基礎破壞，因此針對上述三種損害原因再參酌數起海岸結構物之修復案例，提出如下之整建對策，(1)沉箱尺寸於波浪作用方向由原先25增為35m或加強與前後沉箱之連接，(2)沉箱之內填回填土以巨積混凝土取代，(3)基礎部份護基工程再予加強，求其澈底完善。由於基礎水深達23m，故底床之施工不易，可檢討考慮於港內側施打預力板樁，並加長護床之長度以增加側向之抗波力，如此則施工較為可行，而護基方塊可考慮較大型噸數之型塊，以免因基礎搖晃而移動流失。

柒. 港池振盪數值之模擬

本計畫研究主旨乃針對蘇澳港池地形作港池振盪之數值計算，了解蘇澳港域之波浪特性，並對於改善工程提出改進規畫方案，作為今後港域運轉維護之重要參考。目前依照計畫進度已完成的所有工作項目，包括現場資料收集、數值模式發展、計算條件之確立、計算蘇澳港港池波浪特性、建議改善方案等。

海氣象資料方面，冬季季節風向以西北西、西北向為主，夏季季節風向則以東南東、南、與南南東為主，平均每年約有 2 個颱風侵襲蘇澳港附近海域。港域較大波浪主要由東～東南方傳入，而週期在 2～25 秒的波浪均可能在蘇澳港區內造成港池振盪現象。

數值模式採用混合有限元素法將海域分為外海等水深區與港內不等水深區兩個計算領域進行模式的發展，並選取一矩形等水深港池進行測試計算，經與過去學者不同模式計算結果或試驗結果進行比較，驗證本計畫建立模式之正確性。由於模式已考量了港池不等水深的影響，預期本模式計算蘇澳港港池振盪亦能得到合理的結果。模式計算所需的條件依據目前收集的資料顯示，入射波浪條件將以 SE、SSE、NE 為主要入射方向；波浪計算週期則以 10～160 秒之中、長週期的大浪為範圍。

對蘇澳港現況模擬結果顯示，波浪在東南方向入侵會引起較其他方向嚴重的港池不穩定。較長波浪週期在港內波浪之分佈已漸和入侵方向無關，因此可說蘇澳港現況港池配置對較長波浪的防禦效果很小。對於港池穩定改善方案之考慮，本研究已收集歷年來所研究之改善方案可行性，然後再加以評估其效果和可行性。而由歷次改善結果顯示，較可行的改善方案在改變現有港池配置。藉此本研究乃在僅可能不影響現有航道的情形下建議一改善方案，然而經研究探討結果顯示，本建議改善方案對 15 秒以下入侵波浪會有些改善，但對於較長週期的波浪則改進相當有限。對於港池今後改善港池穩定性規劃方向之建議，本研究參考蘇澳港過去已作之規劃案配合目前本研究所作之結果比較，認為可能較有效的改善方案為遠程規劃案。即在現有防波堤外再加設外防波堤，以達到較明顯的防波效果。然而以現階段電腦計算的能力已遠超出當初規劃的

預測，因此為得更正確的建議再進一步作規劃計算。另外，蘇澳港現階段港內實測資料相當欠缺有礙數值計算模式之驗證，因此，建議未來蘇澳港應一面做到現場資料的監測，一面作到數值模式的校核，以能更正確的作港池穩定的計算，同時更正確的提供給遠程規劃設計的參考。

本研究計畫各工作項目均依預定進度順利完成，所完成成果為：1. 瞭解現況港池振盪波浪分佈情形，2. 計算改善方案對於港池安定性影響結果，3. 建議今後改善港池安定性遠程工作方向，作為長期監測規畫考量之參考。

捌. 蘇澳港暴潮模式之建立

本文首先利用調和分析求出蘇澳港海域各分潮之調和參數，分析結果顯示蘇澳海域乃是以 M_2 潮為主的一日兩回潮，並利用各分潮之調和參數作潮位變化之預測。

在颱風暴潮偏差計算方面則利用選擇性堆積二階段顯式有限元素法計算蘇澳海域當颱風入侵時之暴潮偏差的變化，計算結果顯示選擇性堆積二階段顯式有限元素法具有高效率的計算速度與對不規則邊界處理方便上的優點。實際計算 Norris 颱風與 Andy 颱風通過東部海域時所引致的暴潮偏差上得到不錯的結果，更進一步將各種重現期的颱風規模與颱風路徑作一數值模擬，所得的結果可供工程設計所參考。

利用調和分析所得各分潮的調和常數，應用選擇性堆積二階段顯式有限元素法模擬出蘇澳海域之潮流流場。由計算結果顯示在港內堤口流速最大可達 4.6 cm/sec。

玖. 進出港操船及繫纜船舶運動計算系統之研究

本研究針對邱、曾採用日本的深水域 MMG 為數學模式，以評估平靜開闊深水域中的船舶操縱性能為目的所發展之模擬計算系統予以擴充，使之能在考慮風、浪、流等環境外力作用下，進行操船模擬計算，並建立可輸入實際港口幾何及階段式操船指令，而於給定港池內外之風、浪、流分布下進行操船模擬之計算系統，以供港埠規劃時進行進出港操船評估之用。

繫纜船舶運動係依循邱、廖所發展之斜波中船體運動非線性截片理論計算法，並予以擴充，考慮大波高波浪中繫纜船體水下形狀之時間變化所造成的橫向與縱向運動之耦合效應，以及包含依動量理論處理的橫傾衝擊力(flare impact)在內的非線性效應，而船速效應則予以去除，至於繫纜復原力則為簡便計，且考慮不規則波中線性疊加之應用而採用線性彈性常數。

在此理論架構下，本研究對於繫纜船舶，建立了可輸入繫纜位置、方向、彈性常數，而計算其船體運動與繫纜力時序列之程式，提供港灣技術研究所於算得反應函數，並給定港池內之波浪分布時，即可進行繫纜船舶運動與繫纜力統計分析之用，而有助於考慮繫纜船舶運動之港埠規畫之進行。

拾. 蘇澳港地震災害調查與初步分析

蘇澳港位處臺灣地震最頻繁的地區，由歷史上的災害性地震與近代地震儀器觀測記錄，顯示蘇澳港具有遭受強烈地震侵襲的可能性。根據交通部最新頒佈之「公路橋樑耐震設計規範」，由地震危害度分析結果，蘇澳地區 475 年回歸期之設計最大地表加速度為 $0.33g$ ，而蘇澳港為國家重要建設之一，當考慮用途係數為 1.2 時，則蘇澳港碼頭耐震設計用之最大地表加速度應為 $0.4g$ ，遠超出建港時之耐震設計標準。考慮蘇澳港之重要性及發展性，實宜針對本港之各項設施進一步檢討其耐震安全性。

蘇澳港區所有港埠用地皆由填築而成，根據鑽探結果顯示，現有港區地面下約 30 公尺範圍內皆為沉泥質細沙偶含礫石，於進行井 4 碼頭檢討分析時，因建港時之室內土壤力學試驗資料不足及原始設計資料不齊全，使得檢討分析工作相當困難，目前只能依照標準貫入試驗 N 值估計回填土壤之抗剪摩擦角 ϕ 作初步分析，進一步之分析應根據詳細之地質調查資料，包括回填土壤之分佈及材料性質以及沉箱底部土壤之性質等，這些資料都必須重新調查，方足以進行詳細之分析。此外，民國 67 年建港時之土壤液化潛能分析方法過於簡略，僅將回填土壤之粒徑分佈曲線與日本新瀉 1964 年大地震液化區土壤粒徑分佈範圍作比較，此種評估方式過於簡略；鑑於日本神戶港於 1995 年初地震時發生嚴重土壤液化現象，造成港區非常嚴重之損壞，實宜針對蘇澳港之土壤液化潛能作進一步之分析。

由於蘇澳港井 4 碼頭於民國 75 年 11 月 15 日地震時曾有災害發生，因此本報告針對該碼頭重力式沉箱之穩定性進行初步分析；分析結果顯示，該碼頭沉箱之靜態穩定性安全無慮，然而在動態穩定性方面，依照

常用之擬靜態法分析結果顯示其防止滑動的安全係數偏低；若參照現行之交通部耐震設計標準，其安全性明顯不足，應進一步改善其耐震安全性。

針對井 4 碼頭重力式沉箱受民國 75 年 11 月 15 日地震之滑動行為分析，本研究根據 Newmark (1965) 的滑動塊體觀念，使用剛塑性模式模擬滑動面之受剪行為；水側之動態水壓力引用 Westergaard(1933)理論解計算；至於陸側之動態土壓力則依照 Mononobe-Okabe 法計算，其位於水面下之動態土壓力依 Ishibashi et. al. (1985)之修正地震係數角 θ 考慮，至於陸側之動態水壓力效應則參照 Anzo (1936)與 Ishibashi et. al. (1994)建議之 m 值估計；分析時忽略沉箱運動與動態水壓力反應之相位差，使用視質量的觀念估算動態水壓力。計算結果顯示，該沉箱受民國 75 年 11 月 15 日地震加速度之作用可能產生約 50 公分之滑動位移，此分析所用之參數雖屬概估，但分析結果與該沉箱受民國 75 年 11 月 15 日地震之災害情況相當吻合，顯示該沉箱若遭受更大之地震侵襲，有可能產生位移現象，宜詳細詳估其穩定性。

為改善蘇澳港井 4 碼頭重力式沉箱受地震作用的穩定性，除針對港區之地質條件重做調查以詳細評估其耐震安全性外，建議可採用背拉式錨碇法(如圖 7-1)加強其抗滑與抗傾倒之穩定性。惟設計時應注意下列各點：

- (1) 拉桿至錨碇塊之長度應超過(最大設計地震係數下)破壞土楔區域，且錨碇塊足以發揮承载力提供拉力。
- (2) 拉桿之抗拉強度與斷面應該足以提供最大設計地震係數下動態水壓力與土壓力及自重慣性力三者合力之平衡。

拾壹. 蘇澳港防波堤損壞成因檢討

蘇澳港附近海域受海底地形之影響波況相當惡劣，因此防波堤經常承受較大波浪拍擊及長年浸泡於海洋惡劣環境下，混凝土容易形成劣化等不良現象。加上波浪不斷的衝擊施加能量更形加速結構體破裂塌陷等嚴重損壞之可能性。本研究即從各研究子題內歸納出防波堤破壞發生的現象來探討防波堤可能損壞的成因，並做合理性說明。

基於本研究對各種現象與成因之討論，大致可推測整個沉箱斷裂步驟，其模擬如下：

- (一)防波堤長期受波力及地震作用，而發生震動或微震。
- (二)颱風期間大浪造成沉箱內移。
- (三)內移後港側相接海側間隙變寬，形成楔形夾縫。
- (四)港側因沉箱振動產生擠壓或波壓力集中衝擊造成港側堤頂破壞。
- (五)沉箱內填材料因常期震動或微震而搗實材料重新排列，形成大小不一之空隙。
- (六)空隙形成後，海側側牆所受之背填土壓力減少，相對的版厚不足，因此側牆版產生振動破裂。
- (七)海側側牆破裂後，沉箱蓋板及消波室受波力與氣壓衝擊，震動加速。
- (八)上部結構震動造成橫側牆的拉力與拉彎矩，使得橫側牆受拉力破壞。
- (九)進而第二隔艙橫側牆破洞，第二隔艙內填材料往外帶加破洞擴大。

(十)橫側牆接連破壞更形成下一個側面的受拉彎矩的增大破壞加速。

(十一)終於沉箱各隔牆無法承受上截荷重及震動拉力導致全體斷裂。

(十二)斷裂之上部結構物材料便往前傾墮入大海，散落在堤址前方。

拾貳. 受損防波堤之改善方法探討

考量鋼筋混凝土骨材之修補是似乎找不到相關文獻論及海洋環境上鋼筋混凝土結構物之修補，本文依陸上工法來評估結果發現環氧樹脂塗抹法、鋼板覆蓋填充法皆不可行。依消波之觀點來減低防波堤之波力，即增加堤前消波堤或設立離岸潛堤等方式，在蘇澳港之地形環境，海氣象條件下，似乎可行性不高。以陸上施工方式，使用灌漿方式將靠海側第一隔艙用水泥砂漿灌注令其固結，增加海側側牆厚度，無形中即增加抵抗波力之能力，又可增加沉箱重量改善原始設計重量不足之問題，故灌漿方式經評估其施工可行性較其他工法為佳。

灌漿在施工可行性上較其他工法為佳，但應再進一步評估何種灌漿工法最佳及較經濟性，如能先期評估將能獲得最佳解決方式，故本研究提出灌漿試驗工作計畫書，建議基隆港務局能編列預算先行灌注 SB22 沉箱，一方面做灌漿工法之評估作為往後全面施灌之依據。另一方面 SB22 已有裂縫出現，應儘早改善趁此亦能達維護 SB22 沉箱之目的，否則可能在往後颱風期間會使裂縫變成破洞，那修復將再花費不貲。

拾參.總 結

經過本計畫各項子計畫之研究，最後提出防波堤損壞成因檢討及改善方法，茲將各子計畫之結論綜合如下：

- 一、防波堤除SB31、SB23、SB19嚴重破壞外，目前SB19已經修復，SB31和SB23正在設法搶修。其餘沉箱目前損壞不是很嚴重，但仍具有相當之潛在性危機，往後颱風期間應特別觀測與注意，很有可能在SB20附近有較大損壞出現。
- 二、依目前搜集之數據使用因次分析及極端值統計方法，分析得到蘇澳港50年之設計波高可採用 $H_{1/3}=11.5$ 公尺， $T_{1/3}=13$ 秒，此結果所引用之數據仍感不足，應再實測颱風資料做校正，以確保及符合機率特性。
- 三、混凝土強度目前仍符合設計強度，尚未發生劣化現象，但仍含有潛在性鹼骨材效應及鋼筋腐蝕之問題。
- 四、蘇澳港中長期自動監測系統已經建好，可同時量測波高、堤面波壓、防波堤下之孔隙水壓、防波堤下之地震震度、防波堤表面震度等訊號，供分析使用。地震時亦有自動擷取所有物理量同時間之訊號記錄。
- 五、使用堤面上之波壓力和波高之現場實測記錄，經因次分析及往昔研究方式，建立了堤面上波高與波壓之轉換函數關係，可借由此關係直接推測防波堤之受力狀況，對防波堤之安全甚具價值。
- 六、依原始設計方法和Goda公式及經驗公式三種方式來探討防波堤之安全性，發現以往設計之防波堤重量不足，易發生防波堤之移位和晃動，因防波堤之移位和晃動造成沉箱受損。

- 七、沉箱艙內之填充材料因防波堤長年震動搗實骨材重新排列，形成隔艙內有空隙出現，依調查結果，目前約在50公分左右，甚至高達1公尺左右。應儘速填滿此空隙以免因空隙形成薄版振動破壞。
- 八、經考慮船舶進港、北方澳軍港、蘇澳港碼頭、停車距離等因素後提出改善港池穩靜度之改善方案，但經模式計算後發現雖有較現況改善，但效果不是相當顯著，因此在港池尚未擴建之今，對港內配置不宜改變，僅維持現況即可，俟外廓防波堤擴建後，再考量整體佈置。
- 九、防波堤損壞改善方案，採用灌漿方式來增加抵抗波力及增加重量，為一可行之方法，但在執行灌漿前應先做灌漿試驗，以確定最佳灌漿工法及最符合工程經濟之工法。本研究研提了三種灌漿法以供試驗比較，並提出檢驗灌漿效果之檢驗項目與方法。
- 十、蘇澳港4號碼頭於民國75年11月15日地震時曾有災害發生，因此針對該碼頭重力式沉箱之穩定性進行初步分析，分析結果顯示，該碼頭沉箱之靜態穩定性安全無慮，然而在動態穩定性方面，依照常用之擬靜態法分析結果顯示，其防止滑動的安全係數偏低，並參照現行之交通部耐震設計標準，其安全性明顯不足，應進一步改善其耐震安全性。

拾肆.建議

1. 蘇澳港建立之中長期自動監測系統，在同一斷面上同時監測多項物理量在國內外尚屬少見。亦為國內第一次之防波堤堤面觀測計劃，觀測儀器相當精密，應每年編列預算加以維護，以發揮其最大功效。
2. 本計畫在數值模擬上建立了一套預測颱風行進位置對蘇澳港之整體影響之數值模式，本計算模式同時包括進港操船及擊纜力推算，但本模式至目前僅是初步設定，為求模式更加精準，應在現地設立港內量測波高或水位之控制點，並量測港池之平面流況與流速，來校檢數值模式中所設立之參數，如能有進一步之現場觀測資料配合改善數值模式，將能建立一套港內靜穩度的預警系統，提供進出港與靠泊之參考與管理。同時在港區擴建時方能提供快速而正確的改善結果預測，不必再使用物理模型試驗來預估。
3. 由於蘇澳港位於台灣地震最頻繁地區，由地震危害度分析結果蘇澳地區475年回歸期之設計最大地表加速度為 $0.33g$ ，考慮用途係數 1.2 時，蘇澳港碼頭耐震設計用之最大地表加速度應為 $0.4g$ ，遠超出建港時之耐震設計標準。實宜針對本港之各項設施進一步檢討其耐震安全性。

拾伍. 本計畫執行具體成果

(1) 建立蘇澳港防波堤安全中長期即時監測系統

此系統包括壁面波壓、波高、防波堤下孔隙水壓、地震震度之即時量測及定時採樣。

(2) 建立整套數值模擬程式

本數值模式包括颱風模擬、港池之波流況及進出港操船計算及船舶繫纜力計算，可做為船舶及碼頭管理之參考。

(3) 蘇澳港損壞成因探討與改善方法的建議

提出防波堤破壞過程模擬及以灌漿方式來改善其安全性。

拾陸.蘇澳港應再探討之問題

- (1) 南外廓防波堤灌漿試驗以求取最佳工法。
- (2) 中長期監測系統之維護。
- (3) 數值模擬系統之進一步改良，以求最精確之預測，並可提供碼頭管理之參考。
- (4) 耐震安全性之檢討。
- (5) 結構物自然振動頻率資料庫建立，做為非破壞性檢測之依據。