

本計畫烈嶼客運碼頭替選區位研擬中就沙溪堡及東崗碼頭研擬初步配置構想，為瞭解碼頭配置對水域穩靜狀況及設施設立後對海岸之影響，乃進行數值分析及人工岬灣分析，以為規劃參考。

## (一) 水域穩靜數值分析

### 1. 數值計算模式

本計畫海岸變遷數值模式，主要使用西班牙政府環境部所研發之 SMC (Coastal Modeling System) 數值模式，以 SMC 中海岸平面變化 (Mopla) 計算模式之波浪傳輸模組 (Oluc) 進行本計畫現況海岸及碼頭布置波浪分布情形。

波浪傳輸模組 (Oluc) 主要內容為模擬不規則底床下，單一波浪 (Oluc-mc) 及隨機波浪 (Cluc-sp) 由深海傳遞至近岸處，波浪受到地形變化或海岸結構物之影響，所產生淺化、繞射和折射等波浪變形的現象。波場分佈計算結果將與水深地形侵淤比較，藉以探討波浪能量與地形侵淤潛勢之相關性。假設在固定水深下，Berkhoff (1972) 方程式可簡化為常係數的 Helmholtz 方程式，將勢能函數  $\phi = \phi(x, y, z, t)$  表示為

$$\phi(x, y, z, t) = \hat{\phi}(x, y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-i\omega t}$$

式中， $\phi$  為二維之勢能函數、 $h$  為水深、 $k$  為波數 (wave number)、 $t$  為時間， $x$ 、 $y$  及  $z$  分別為垂直海岸方向、沿岸方向及水深方向坐標。將  $\hat{\phi}$  分解為入射波  $\hat{\phi}^+$  (incident waves) 和反射波  $\hat{\phi}^-$  (reflected waves) 項，即  $\hat{\phi} = \hat{\phi}^+ + \hat{\phi}^-$ 。考慮浪與流交互作用下之波浪變形，Mei 和 Tuck (1980) 將勢能函數用振幅型態表示，即為  $A=A(x, y)$  延散振幅 (scaling assumption)，則

$$\hat{\phi} = -\frac{ig}{\omega} A(x, y) e^{ikx}$$

Kirby 和 Dalrymple(1983a)將波數分成  $l$  ( $l=k\cos\theta$ ) 和  $m$  ( $m=k\sin\theta$ ) 兩個分向量 ( $k=(l,m)$ ,  $k=|\vec{k}|$ )，則分散關係式(dispersion relation)可表示為  $\omega(l=k, m=0)^2 = gk \tanh kh$ ,  $\omega = 2\pi/T$ ,  $\omega$  為角頻率(wave frequency),  $T$  為週期,  $k = (l^2 + m^2)^{1/2}$ , 並做雙變數泰勒展開 (two-variable Taylor series expansion), 展開至  $\omega(l=k, m=0)$ , 利用拋物線近似法(parabolic approximation), 即可得波、流交互作用下振幅型態之緩坡方程式。(詳細推導可參考 Kirby 和 Dalrymple 1985; 1986a)。此即為波浪傳輸模組之控制方程式：

$$\begin{aligned} & (C_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(k_0 - k)(C_g + U)A + \frac{\sigma}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{C_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V}{\sigma} \right) \right] A \\ & - \frac{1}{4k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (CC_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left[ \sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\ & - \frac{\beta}{4} \left\{ 2i\omega U \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{\sigma} \right) + 2i\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) - 2UV \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\ & - \frac{\beta}{4} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (CC_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{4k} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right] \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{A}{\sigma} \right) \\ & + \frac{\gamma A}{2} + \frac{i\sigma}{2} G(|A|, kh) A = 0 \end{aligned}$$

式中之  $\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U} = (gk \tanh kh)^{1/2}$  為波流交互作用下之波數,  $\vec{U} = (U, V)$  為向量型態之平均流速,  $U$  為  $x$  方向之平均流速,  $V$  為  $y$  方向之平均流速。  $i = \sqrt{-1}$ ,  $C = \sigma/k$  為波速,  $C_g = \partial\sigma/\partial k$  為群波波速,  $k_0$  為深水波數,  $\gamma$  為波浪能量之消散項, 而式(3)中係數  $\beta$  及函數  $G(|A|, kh)$  可表示如下式：

$$\beta = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2k^2(CC_g - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} [k(CC_g - U^2)]$$

$$G(|A|, kh) = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ k^2 D |A|^2 \\ (1 + f_1 K^2 |A|^2 D) \frac{\tanh(kh + f_2 k |A|)}{\tanh(kh)} - 1 \end{array} \right\}$$

式中

$$D = \frac{\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh}{8 \sinh(kh)}$$

$$f_1(kh) = \tanh^5(kh)$$

$$f_2(kh) = \left[ \frac{kh}{\sinh(kh)} \right]^4$$

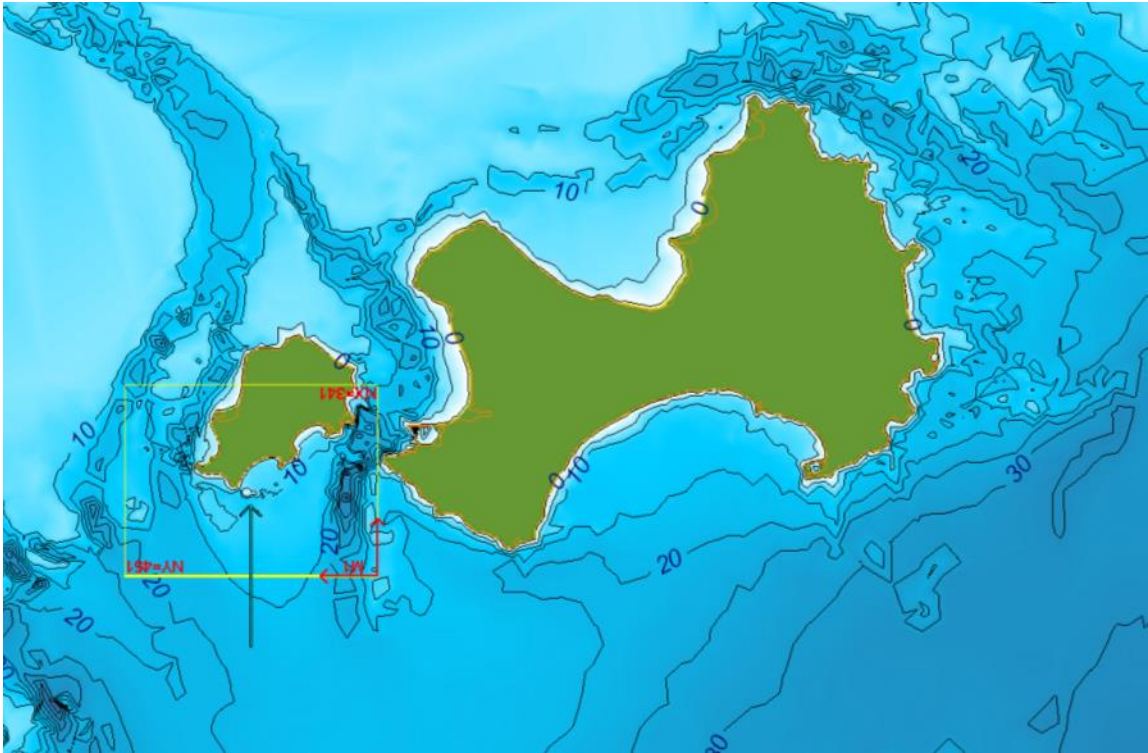
## 2. 輸入條件及計算範圍

參考第二章基本資料蒐集分析之季風及颱風波浪結果，本計畫數值模式計算條件，颱風波浪、季風波浪及潮位如附表 3-1 所示。

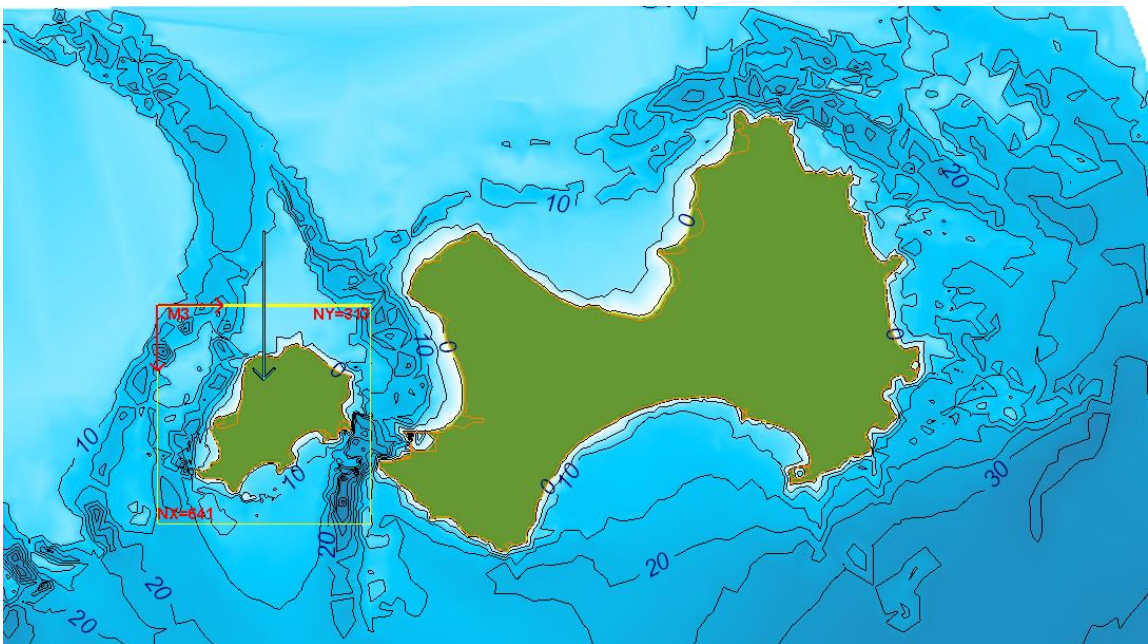
附表3-1 烈嶼客運碼頭數值計算輸入條件

內容	輸入條件		
	波向	波高(公尺)	週期(秒)
颱風波浪	SSW	4.6	9.0
	S	6.6	10.8
	SSE	6.1	10.4
	SE	7.1	11.2
季風波浪	N	2.0	7.0
	S	1.5	7.0
計算潮位	颱風(暴潮位)		+6.63
	季風(平均高潮位)		+4.97

海岸颱風波浪及季風波浪計算範圍，分別如附圖 3-1 及 3-2 所示，颱風波浪離散網格尺寸為 20m，計算網格數為 451×341，季風波浪離散網格尺寸 X 向為 12.5m 及 Y 向 25m，計算網格數為 541×343。



附圖3-1 颱風波浪計算範圍



附圖3-2 季風波浪計算範圍

### 3. 數值計算結果

沙溪堡及東崗碼頭分屬不同區位，所面對波浪條件各有不同，應以碼頭配置與現況比較，比以波向進而比較兩案配置的遮蔽效果更具重要性。因此，本計算結果以各波向比較現況與碼頭配置(包括沙溪堡及東崗碼頭配置)為主，波向包括 SSW、S、SSE、

SE 颱風波浪，及 S、N 向季風波浪，成果說明如下。

(1)SSW 向颱風波浪

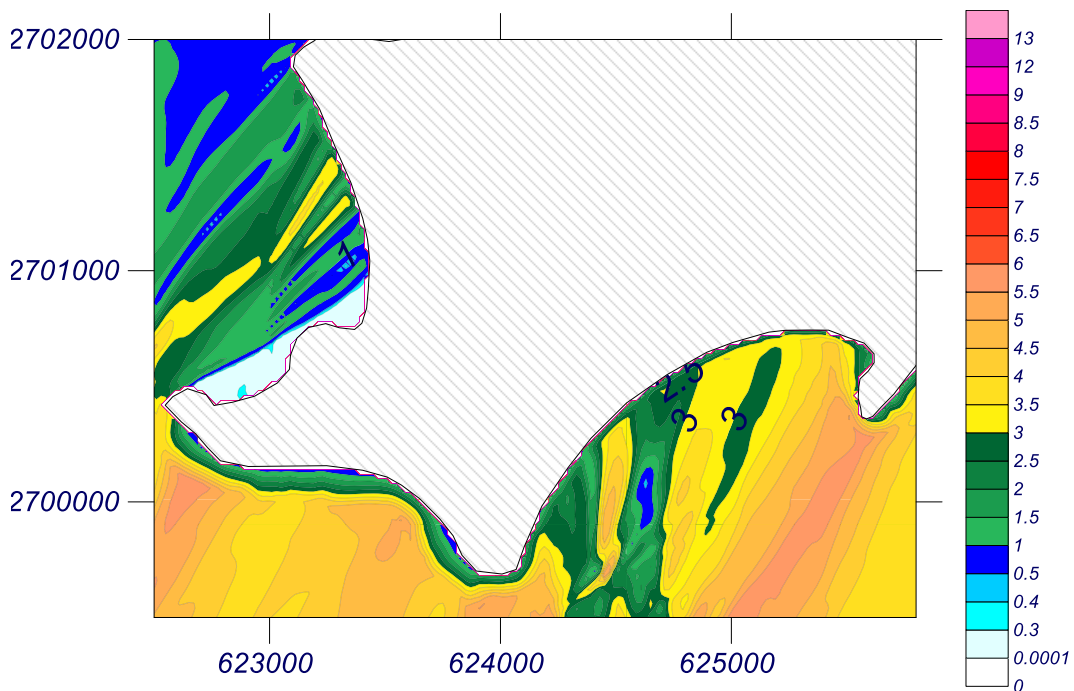
現況及近期改善配置數值計算結果如附圖 3-3 及附圖 3-4 所示，說明如下：

A.現況結果

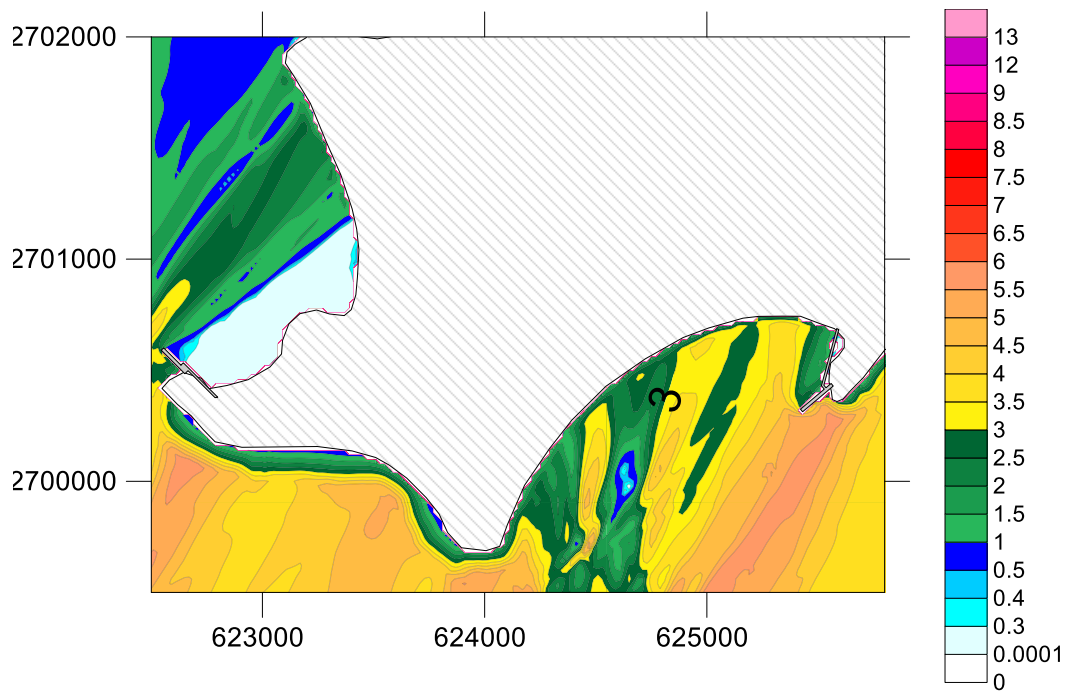
由附圖 3-3 可知其青岐東崗海岸對 SSW 向波浪遮蔽較少，故沿岸波高分布較大約 1m~5m 間，由於本段地形較陡峭，碎波帶寬度較窄，碎波後波高約為 1~2.5m 間；青岐沙溪堡海岸由於有岬頭遮蔽，海岸波高分佈多小於 0.3m，海岸地形較平緩，故碎波帶較寬且位於較外面海域，波浪進入本段海岸沿岸區域已經碎波。

B. 配置碼頭後結果

由附圖 3-4 可知東崗碼頭興建後，由於堤體遮蔽效果，堤後區域之波高，由原來 3m~5m 降至 1m~3m；沙溪堡碼頭興建後，由於突堤形成岬頭外延，遮蔽區域變大，海岸波高分佈小於 0.3m 區域變大。



附圖3-3 現況 SSW 向颱風波浪計算結果



附圖3-4 近期改善配置 SSW 向颱風波浪計算結果

(2)S 向颱風波浪

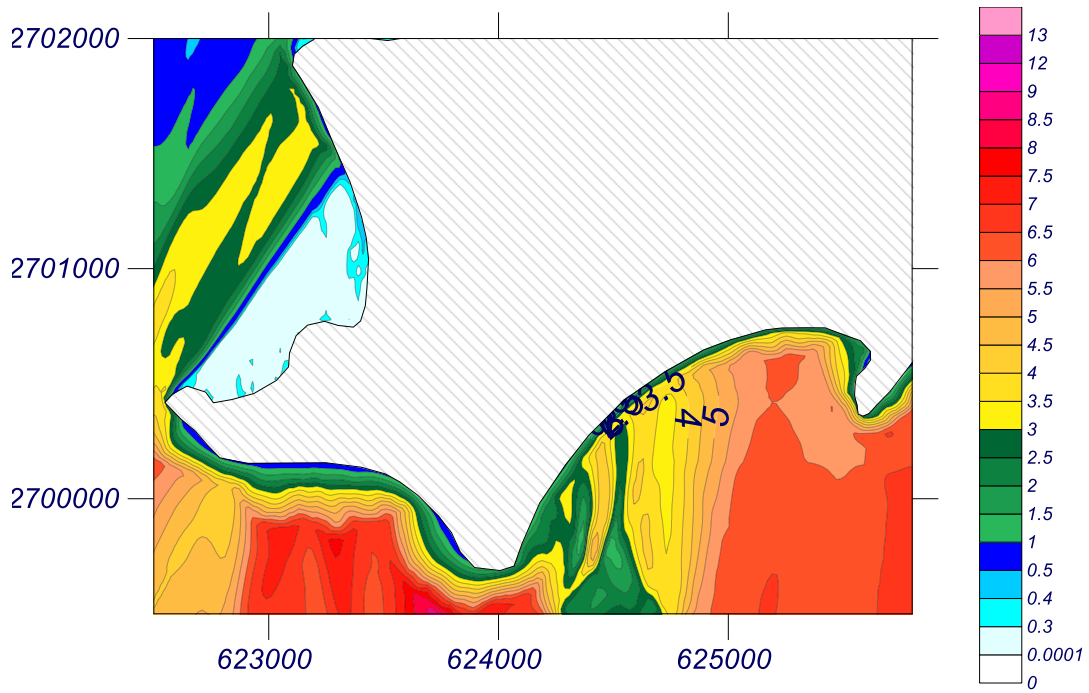
現況及近期改善配置數值計算結果如附圖 3-5 及附圖 3-6 所示，說明如下：

A.現況結果

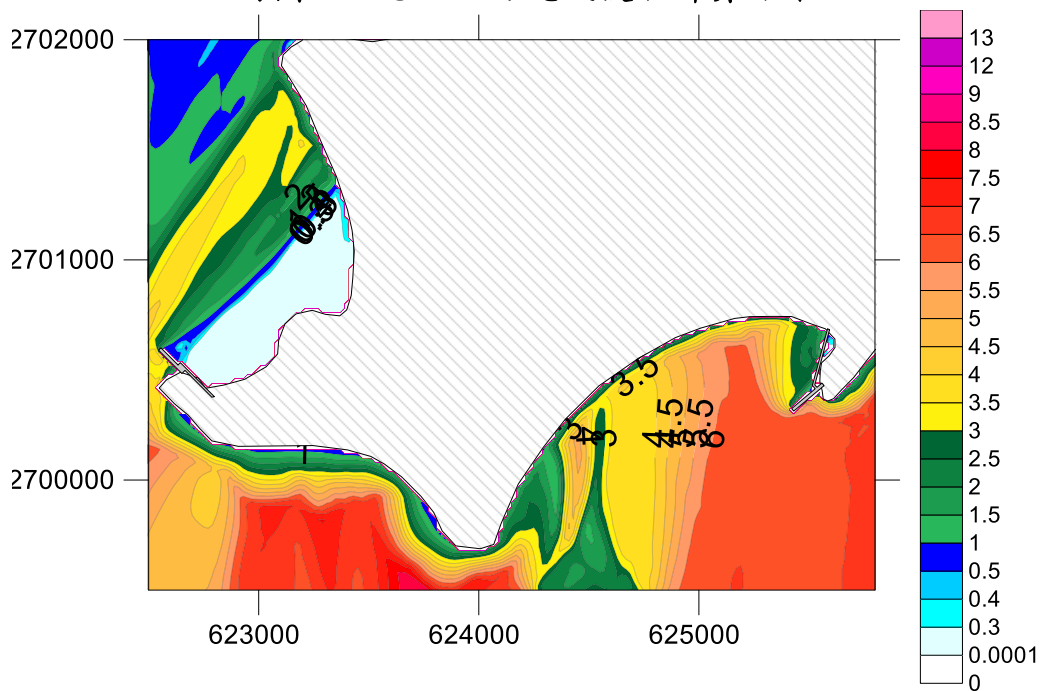
由附圖 3-5 可知其青岐東崗海岸對 S 向波浪遮蔽較少，故沿岸波高分布較大約 1m~6m 間，由於入射波高較大，較早於外海碎波，故碎波帶寬度較 SSW 向稍寬，碎波後波高約為 1~2.5m 間；青岐沙溪堡海岸由於有岬頭遮蔽，海岸波高分佈多小於 0.3m，因 S 向波浪較 SSW 向波浪斜向進入本段海岸，故海岸波高分佈小於 0.3m 區域較 SSW 向寬很多。

B. 配置碼頭後結果

由附圖 3-6 可知其東崗碼頭興建後，由於堤體遮蔽效果，堤後區域之波高，由原來 3m~6m 降至 1m~3.5m；沙溪堡碼頭興建後，由於突堤形成岬頭外延，遮蔽區域變大，海岸波高分佈小於 0.3m 區域變大。



附圖3-5 現況 S 向颱風波浪計算結果



附圖3-6 近期改善配置 S 向颱風波浪計算結果

(3) SSE 颱風波浪

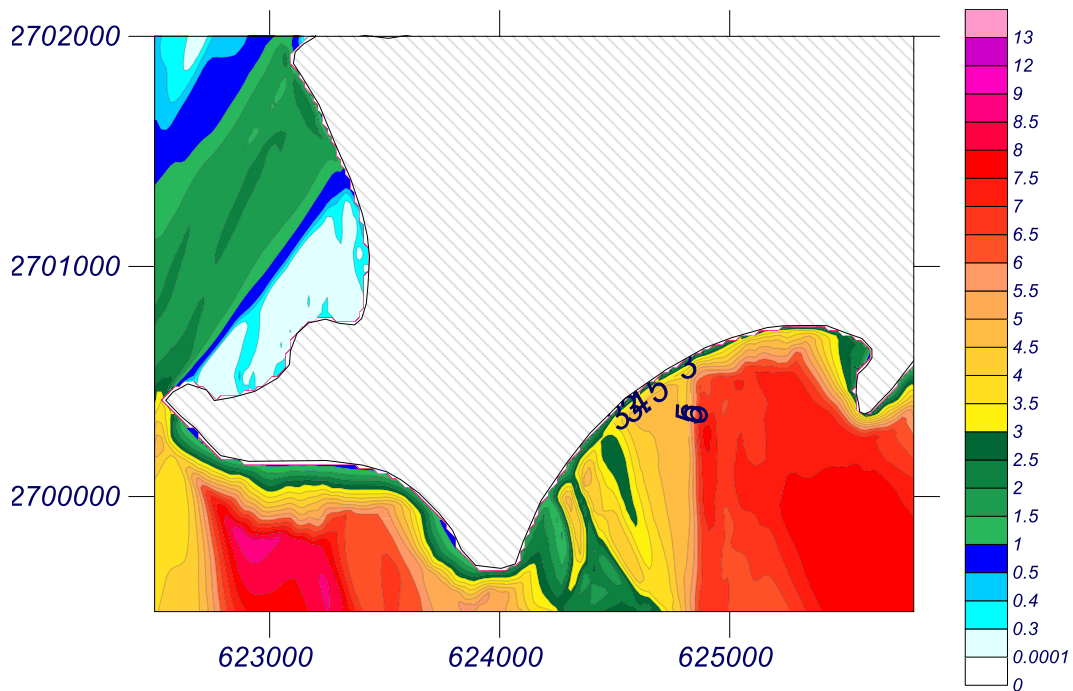
SSE 向波浪對青岐東崗海岸較正向入射，對青岐沙溪堡海岸越斜向，現況及近期改善配置數值計算結果如附圖 3-7 及附圖 3-8 所示，說明如下：

A.現況結果

由附圖 3-7 知 SSE 向波浪對青岐東崗海岸較正向，故沿岸波高分布較大約 1m~6.5m 間，碎波帶寬度及碎波後波高約與 S 向相近；青岐沙溪堡海岸入射角度更斜，由於有岬頭遮蔽區域較大，海岸波高分佈小於 0.3m 區域亦較 SSW 及 S 向寬很多。

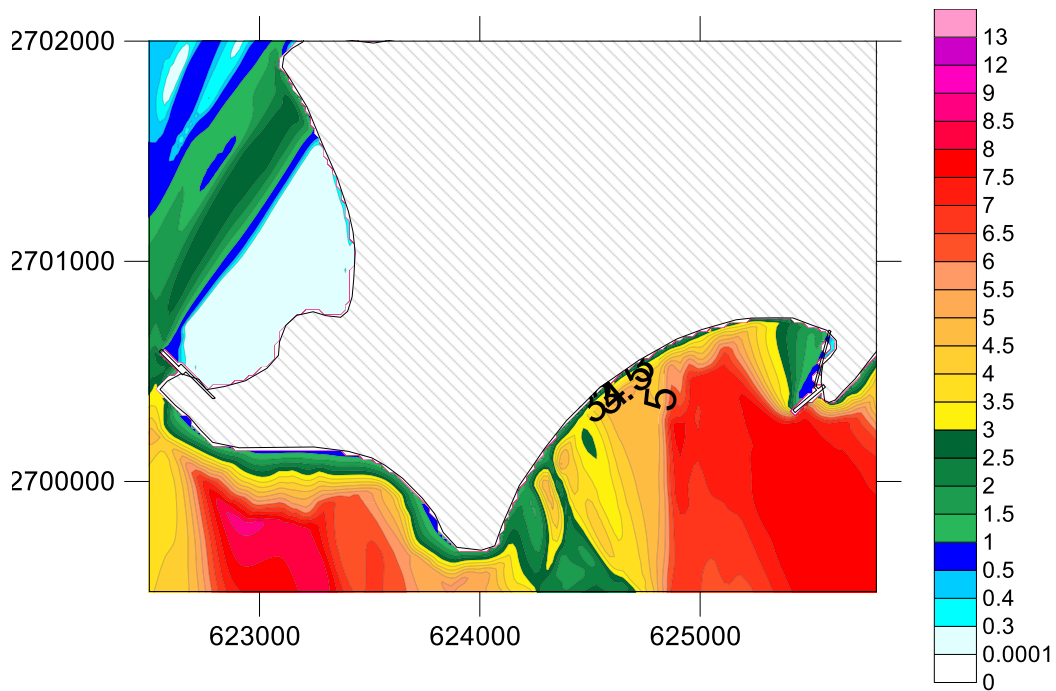
#### B. 配置碼頭後結果

由附圖 3-8 知東崗碼頭興建後，與 S 向結果相似，由於堤體遮蔽效果，堤後區域之波高，由原來 3m~6m 降至 1m~3.5m；沙溪堡碼頭興建後，由於突堤形成岬頭外延，遮蔽區域變大，海岸波高分佈小於 0.3m 區域變大。



附圖3-7 現況 SSE 向颱風波浪計算結果





附圖3-8 近期改善配置 SSE 颱風波浪計算結果

(4)SE 颱風波浪

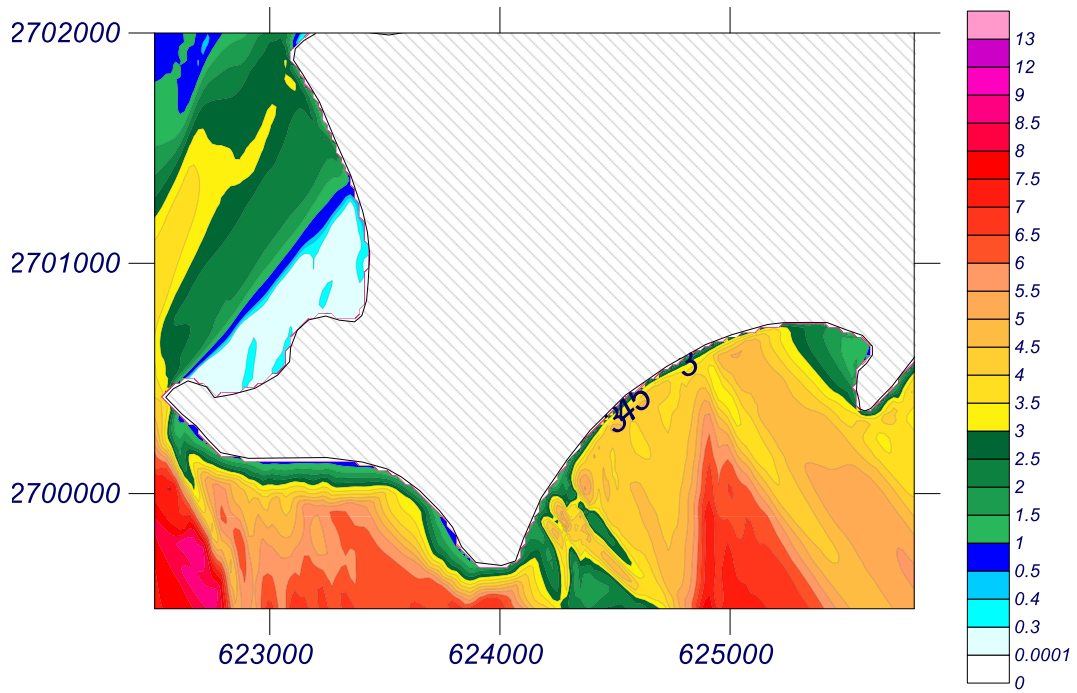
SE 向波浪對青岐東崗海岸約呈正向入射，對青岐沙溪堡海岸越成斜向入射，現況及近期改善配置數值計算結果如附圖 3-9 及附圖 3-10 所示，說明如下：

A. 現況結果

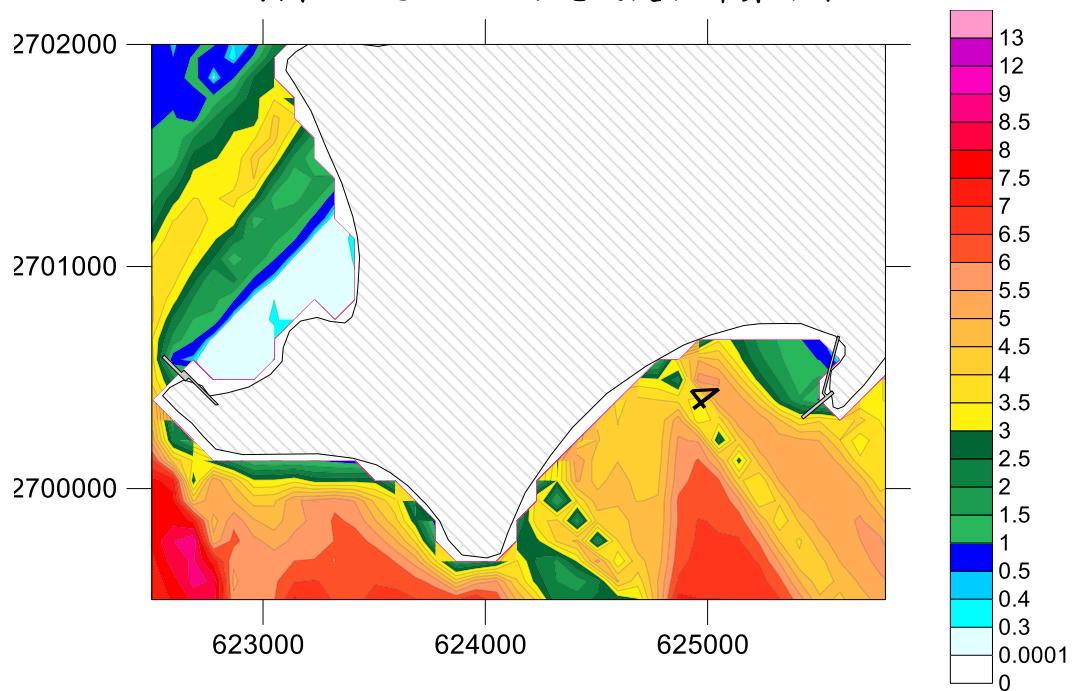
由附圖 3-9 知 SE 向波浪對青岐東崗海岸正向入射，岬頭遮蔽變大，故沿岸波高分佈較大約 1m~4.5m 間，碎波帶寬度及碎波後波高約與 S 向相近；青岐沙溪堡海岸雖入射角度更斜，但 SE 向週期較長，故海岸波高分佈小於 0.3m 區域亦較 SSW 及 S 向寬度小。

B. 配置碼頭後結果

由附圖 3-10 知東崗碼頭興建後，與 S 向結果相似，由於入射波向較正向，堤體遮蔽區域變大，堤後區域之波高，由原來 3m~6m 降至 1m~3.5m；沙溪堡碼頭興建後，由於突堤形成岬頭外延，遮蔽區域變大，海岸波高分佈小於 0.3m 區域變大。



附圖3-9 現況 SE 向颱風波浪計算結果



附圖3-10 近期改善配置 SE 颱風波浪計算結果

(5) S 向季風波浪

S 向季風波浪現況及近期改善配置數值計算結果如附圖 3-11 及附圖 3-12 所示，說明如下：

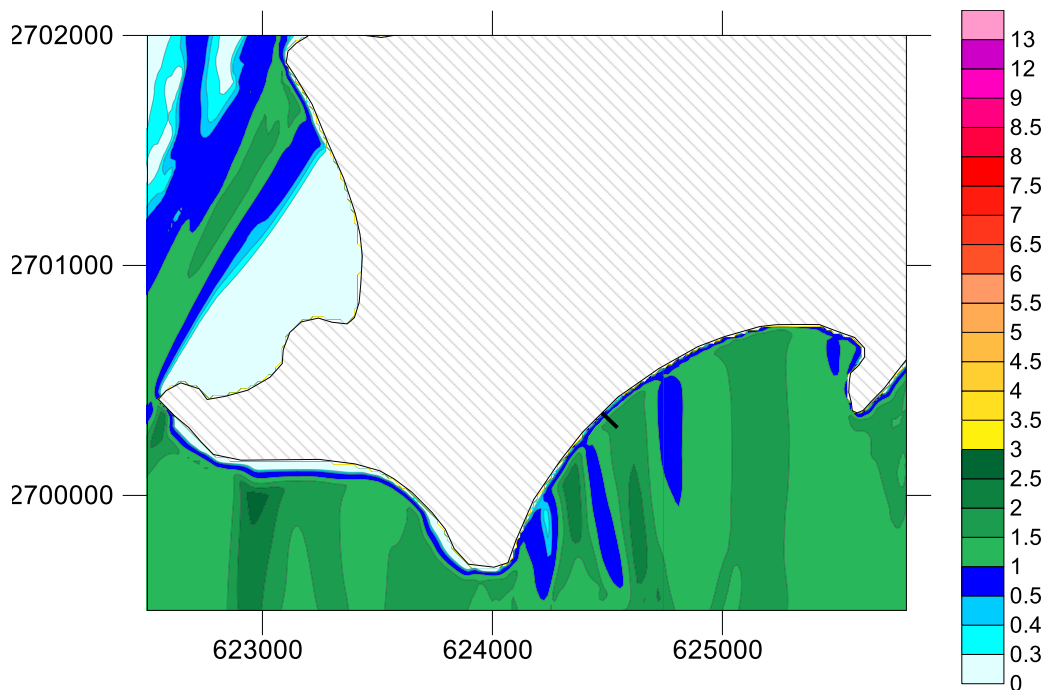
A. 現況結果

由附圖 3-11 可知其青岐東崗海岸對 S 向波浪遮蔽較少，

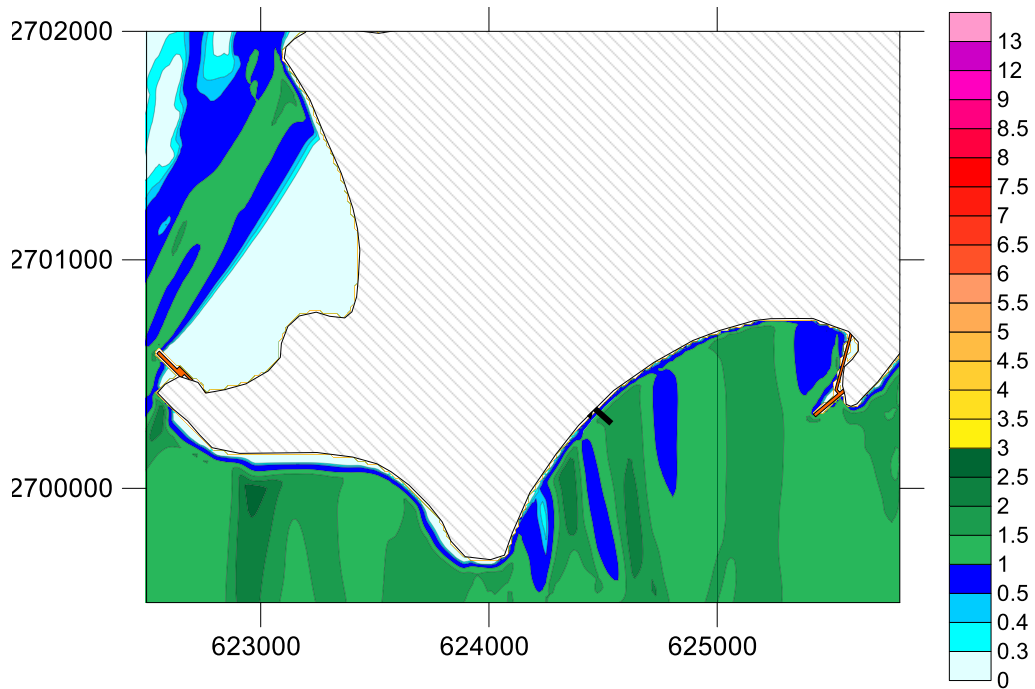
故沿岸波高分布較大約 0.3m~1.5m 間，碎波後波高約為 0.3~0.5m 間；青岐沙溪堡海岸由於有岬頭遮蔽，海岸波高分佈小於 0.3m。

#### B. 配置碼頭後結果

由附圖 3-12 可知東崗碼頭位置波高分佈為 0.5m~1.0m，興建碼頭後波高分佈依舊為 0.5m~1.0m，但由於堤體遮蔽效果，堤後波高 0.5m 區域變大；沙溪堡碼頭興建後，由於突堤形成岬頭外延，遮蔽區域變大，海岸波高分佈小於 0.3m 區域變大。



附圖3-11 現況 S 向季風波浪計算結果



附圖3-12 近期改善配置 S 季風波浪計算結果

(6)N 向季風波浪

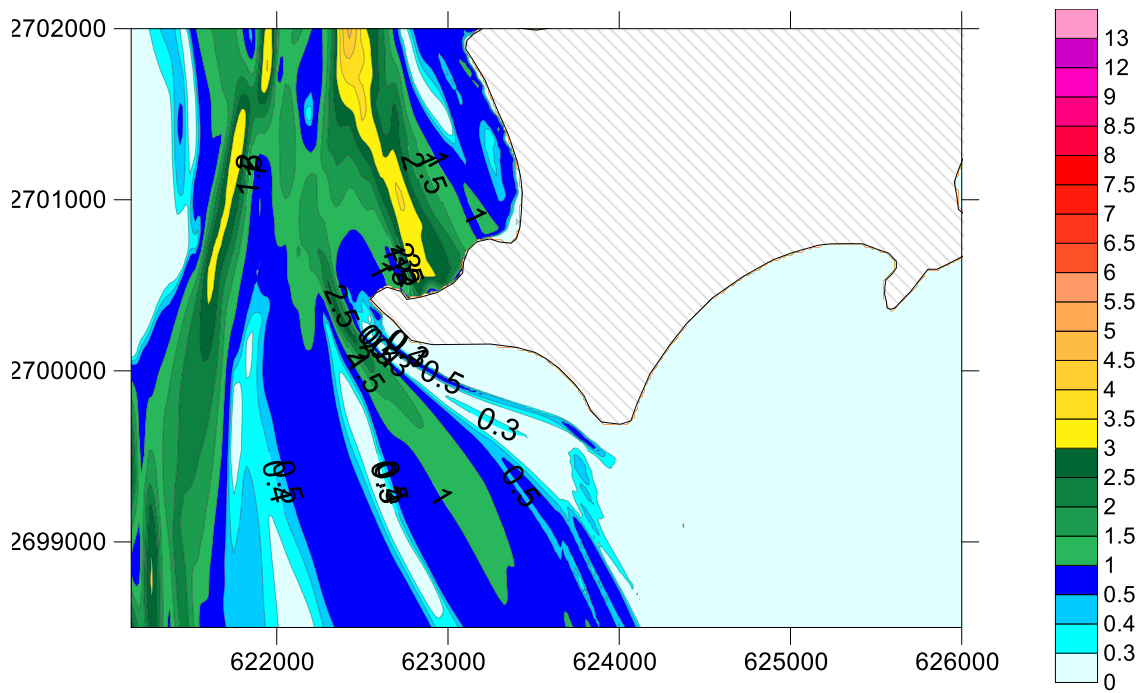
N 向季風波浪現況及近期改善配置數值計算結果如附圖 3-13 及附圖 3-14 所示，說明如下：

A.現況結果

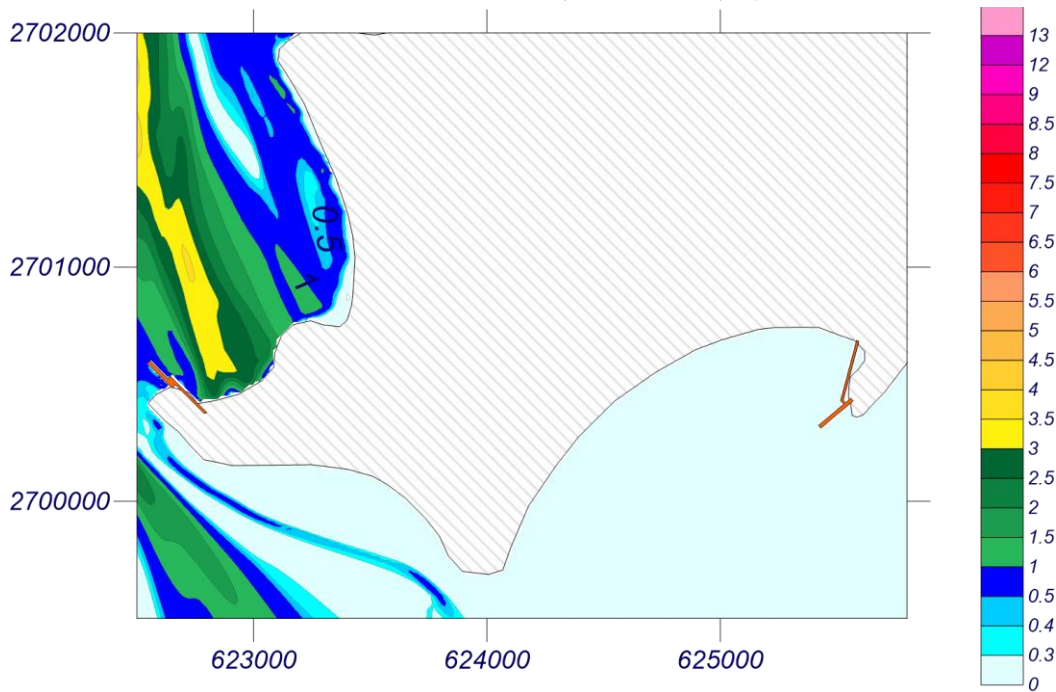
由附圖 3-13 可知青岐東崗海岸由於烈嶼島本身遮蔽，N 向季風波浪幾乎不會作用至本海岸；青岐沙溪堡海岸岬頭附近海岸直接受 N 向季風波浪作用，且由於受部分海岸地形影響，入射波有折射集中情形，海岸波高分佈為 0.5m~3.0m。

B. 配置碼頭後結果

由附圖 3-14 可知沙溪堡碼頭興建後，由於配置突堤堤向並未對 N 向季風波浪形成遮蔽，故海岸海岸波高分佈為依然維持 0.5m~3.0m。



附圖3-13 現況 N 向季風波浪計算結果



附圖3-14 近期改善配置 N 季風波浪計算結果

#### 4. 綜合計算結果

對於颱風波浪之影響，沙溪堡受西北向岬頭遮蔽，其碼頭配置方案水域於各波向下波高均在 1m 以下；而東崗碼頭配置水域隨著波向偏東水域波高略降，但由於東崗海岸面朝西南，其波高

均 1m 以上。

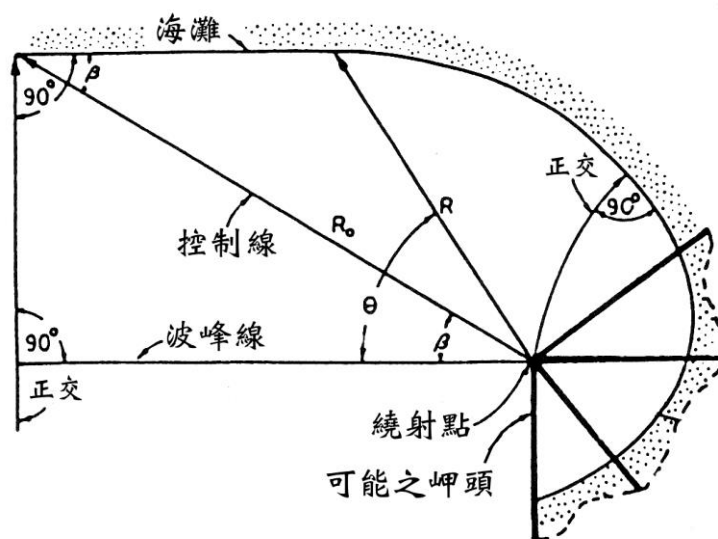
季風影響之下，沙溪堡碼頭配置方案於 S 向季風下水域相當穩靜，東崗碼頭配置方案則水域不穩靜；另 N 向季風對東崗碼頭配置方案並無影響，但沙溪堡碼頭配置則無遮蔽效果。

## (二)突堤效應分析

海岸增設人工結構物可能對原有海岸環境造成衝擊，前節分別研擬青岐沙溪堡及青岐東崗海岸碼頭配置方案，自岬頭處延伸向外配置碼頭設施，對於下游海岸會否造成影響，本節就人工岬灣理論探討對現有海岸之影響。

### 1.人工岬灣理論概述

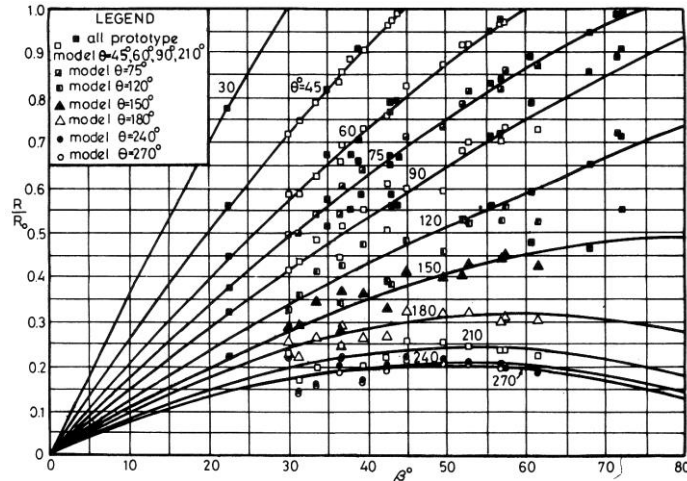
主要應用 Hsu & Evans (1989 年)及 Hsu & Silvester(1993、1997) 倡導以新的座標定位，即以拋物線型灣岸模式(parabolic bay shape)，來描述灣岸的變化，如附圖 3-15 所示。



附圖3-15 Hsu 等人(1989)之岬灣關係示意圖

其次可由附圖 3-16 的數據，岬灣形狀與入射波波向可以建立一個二階多項式的關係如下式：

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2$$



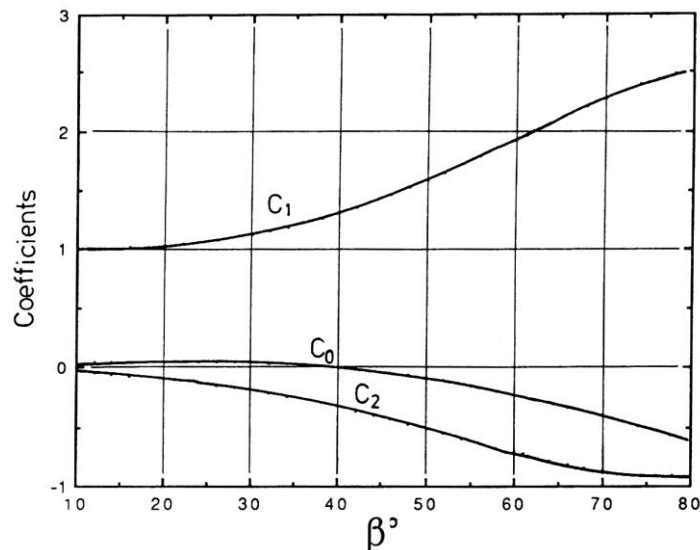
附圖3-16 靜態平衡海灣半徑比  $R/R_0$  與入射角  $\beta$  及海岸各點方向角  $\theta$  關係圖(Hsu 等人，1989)

式中之  $C_0$ 、 $C_1$  及  $C_2$  值經電腦以數學迴歸法求得，其關係式如下，其關係如附圖 3-17 所示

$$C_0 = -0.05821 + 0.00982\beta - 0.000210\beta^2$$

$$C_1 = 0.78803 + 0.00982\beta + 0.000216\beta^2$$

$$C_2 = 0.28129 - 0.01622\beta + 0.000004\beta^2$$



附圖3-17 二階多項式係數與波浪入射角之關係圖(Hsu 等人，1989)

## 2.青岐東崗及沙溪堡海岸人工岬灣

本項分析主要應用中山大學許榮中教授以人工岬灣理論為基礎發展之 Mepbay 程式，分析各海岸及突堤之人工岬灣平衡線。

### (1)青岐東崗

青岐東崗海岸原海岸及新建突堤後之人工岬灣平衡線分別如附圖 3-18 中所示各別平衡線，過程及結果說明如下：

#### A.原海岸平衡線

取青岐東崗海岸東側岩石作為上游端控制岬頭，波向決定主要以波峰線平行下游端控制點海岸線，移動下游端控制點找到人工岬灣平衡線接近目前海岸線形狀。

#### B.新建突堤海岸平衡線

移動上游端控制岬頭至新建突堤堤頭，並維持原波向及下游端控制點，可以找到新的人工岬灣平衡線。

#### C.效果分析

由附圖 3-18 可知，新建突堤後新海岸平衡線會移至目前海岸線外海，依海岸沙源及情況不同，可產生不同結果如下：

(A)如果下游沙源充足，則會在突堤後側形成新的沙灘。

(B)下游沙源不足時，則會有刮下海平直段沙源補充新的平衡灣；如下游海岸為岩盤地形時，則會由海岸底床刮取沙源補充趨勢，故下游沙源不足時，會有下游海岸侵蝕或海底底床坡度變陡情形。

(C)本段海岸下游端控制點附近恰位於海岸消波塊之最北端，顯示控制點以西海岸為侵蝕海岸，今新建突堤後由於突堤效應而對下游海岸沙灘侵蝕情形可能更為嚴峻。





附圖3-18 青岐東崗人工岬灣結果

## (2) 青岐沙溪堡

青岐沙溪堡海岸原海岸及新建突堤後之人工岬灣平衡線分別如附圖 3-19 中所示個別平衡線，進行過程同東崗海岸。

由附圖 3-19 可知，新建突堤後新海岸平衡線會移至目前海岸線外海，由於距離新突堤約 600m 處有岩盤存在，故主要影響海岸為岩盤下游海岸，由於本段海岸為沙岸，新建突堤後應會有部分沙灘產生侵蝕情形，而堆積於岩盤附近海岸。



附圖3-19 青岐沙溪堡人工岬灣結果