

港形變化對港灣污染擴散能力影響之研究

目 錄

摘 要	1
第一章 計畫背景與目的	2
第二章 港形比較推估中高兩港污染擴散之效率	3
2-1 延散係數之文獻回顧	4
2-2 台中港港池延散係數之推估	7
2-3 高雄港港池延散係數之推估	9
2-4 兩港延散係數之比較及分析	11
第三章 現場實測比較中高兩港污染擴散之效率	12
3-1 理論依據	12
3-2 台中港現場流場實測及資料分析	14
3-3 高雄港現場流場實測及資料分析	17
3-4 中高兩港現場流場實測分析比較	19
第四章 模型試驗探討高雄港污染擴散之效率	21
4-1 計畫內容及工作項目	21
4-2 高雄港潮流資料分析	22
4-3 理論分析	26
4-4 高雄港海域溢油資料分析	31
4-5 實驗設備及規劃	32
4-6 模型試驗結果	34
4-7 結論與建議	37
第五章 結論及建議	40
第六章 參考文獻	42

港形變化對港灣污染擴散能力影響之研究

摘 要

本研究主要針對港形變化對污染擴散能力之影響加以研究做為將來國內現有老舊港灣再開發之參考。並以台中港及高雄港為例實際進行流場調查、模型試驗以瞭解死水區的分佈、延散係數的大小推估以剖析污染擴散的主要機制，再據以提供建議有效改善日益惡化的污染現況。

壹、計畫背景及目的

早期的港灣規劃主要著重在船舶航行的安全，而對環境景觀的影響以及港池自淨能力往往欠缺事前的考量。這幾年來隨著港灣業務競爭以及對環境品質需求的提昇，港池的污染防治逐漸受到大家的重視，消極的除對污染物的排放進行前處理以及總量管制以外，也積極的在硬體方面設法改善港池形狀如截灣取直減少死水區或開闢二港口以增加潮起潮落所引致港域環流對污染物的沖洗。港形變化包括外廓堤防的改變以及港內碼頭和水域的配置在規劃初期往往需要考量兩個看似幾乎完全相斥的條件亦即「港內靜穩度」與「沖洗效率」〈也就是港灣污染擴散能力〉，一般較大的開口或較多的開口可提高港池的沖洗效率但相對的也可能降低港內的靜穩度，因此如何在諸多條件下權衡利益得失同時兼顧船舶進出的安全往往是港灣規劃的重要考量。影響港池污染擴散能力的因素包括港形變化也就是港口開口的大小和方向以及碼頭水域的配置等問題，而港口所在位置的海氣象條件諸如潮差大小以及潮流或沿岸流的大小及方向影響頗巨，惟老舊港灣的再開發若就如何改善污染擴散能力而言積極地僅能就港池形狀及港內碼頭配置做些許修改，消極地在港內死水區減少排放污染物或採總量管制要求污染排放前需進行處理等管制措施。本研究主要針對港形變化對污染擴散能力之影響加以研究做為將來國內現有老舊港灣再開發之參考。並以台中港及高雄港為例實際進行流場調查、模型試驗以瞭解死水區的分佈、延散係數的大小推估以剖析污染擴散的主要機制，再據以提供建議有效改善日益惡化的污染現況。

貳、港形比較推估中高兩港污染擴散之效率

影響港池污染擴散效率（也就是水質稀釋能力）之最主要參數是港池延散係數。延散係數大表示水質稀釋能力強，反之則差。而延散係數一般由港域內的流場特性來決定，並非一定值。港域內的流場特性和污染物分佈狀況係依據二維之連續方程式(Continuity Equation)、水深平均之動量方程式(Depth-averaged Momentum Equations)、密度傳輸方程式(Density Transport Equation)和濃度擴散方程式(Diffusion Equation)。茲分述如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [U(h + \eta)]}{\partial x} + \frac{\partial [V(h + \eta)]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{DU}{Dt} - fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x^w - \tau_x^b}{\rho_o(h + \eta)} + g \frac{(h + \eta)}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{DV}{Dt} + fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y^w - \tau_y^b}{\rho_o(h + \eta)} + g \frac{(h + \eta)}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{1}{h + \eta} \nabla(K_h(h + \eta)\nabla\rho) \quad (4)$$

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{1}{h + \eta} \nabla(K_h(h + \eta)\nabla C) + R \quad (5)$$

其中 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y}$ 為實質導數， U 、 V 分別為在 x 、 y 方面之水深平均流速， ρ 為水深平均水的密度， ρ_0 為參考密度， f 為科氏力參數， h 為水深， h 為水面位移高程， g 為重力加速度， t^w 為風所造成之剪應力， t^b 為底床剪應力， K_h 為水平方向之延散係數， c 為污染物濃度， R 為污染物化學反應速率。計算時可用有限差分法或有限元素法對計算區域加以網格分割，再加上適當的起始條件和邊界條件。但此方法須輸入正確的擴散係數和邊界條件（例如潮汐之流速，水位之變化，底泥對污染物之吸附或釋放率等），方能準確的計算出污染物之分佈 (Signell and Butman, 1992)。延散係數受流速剖面、潮汐、風驅流及密度層變之作用將於下節中加以說明。

2-1 延散係數之文獻回顧

Bowden(1964)對於海域表面剪力流中之延散係數提出以下理論解析：

1. 在海岸及河口地區因剪力效應所導致的水平混合主要來自潮流、密度流及風驅流等，其中水平方向有效延散係數 K_x 、 K_y 與垂直方向 K_z 成反比。
2. 縱向水平延散受制於橫向速度梯度及紊流混合，且與垂直方向之速度分佈有關。
3. 導因於潮流的水體運動受半日週期影響來回震盪，就污染物的長時間擴散而言，這種隨時間變化的影響必須加以考慮。
4. 穩定的密度梯度將有效增加水平混合程度。
5. 通常潮流的相位角隨深度變化不大。

Bowden(1964)分析不同速度剖面之水平有效延散係數 (Effective values of K_x) 分別爲

1.潮流：

速度剖面	$K_x(U^*)$	$K_x(\bar{U}) \text{ k}=0.002$
Log	$5.9 U^* h$	$0.26 \bar{U} h$
Log+parabolic	$14.0 U^* h$	$0.625 \bar{U} h$

2.風驅流： $\Phi=10^{-3} (U^2 h^2 / K_x)$

$h=0.25D$	$K_x=8.3\Phi$	$K_y=0.02\Phi$
$h=1.25D$	$K_x=5.3\Phi$	$K_y=1.1\Phi$

D 代表磨擦影響深度(The depth of frictional influence)

$\bar{U}h$ 代表的是單位寬度的流量，在河口或港池內由於受潮流來回震盪的影響，事實上 $\bar{U}h$ 是隨時間及位置改變。

一般而言：

$$K_x (\text{來回流}) \cong 1/2 K_x (\text{定常流})$$

Csanady(1963)對忽倫湖(Lake Huron)之紊流擴散做了以下分析：

1.潮流：

管流 $K_x = 10.1 u^* a$

渠道 $K_x = 5.9 u^* h$

2.風驅流：

$$\tau = 0.0012 \rho_a U^2 \quad U : \text{海面上10米風速}$$

$$\rho_a : \text{空氣密度} \quad \rho_w : \text{海水密度}$$

$$u^* = \left(\frac{\tau}{\rho_w} \right)^{1/2} = \left(0.0012 \frac{\rho_a}{\rho_w} \right)^{1/2} U$$

Chieh(1985)對二維溫排水排入海岸水域之水平延散係數提出以下
延散係數估算經驗式 $D_L = 4.53 * 10^{-4} L^{4/3}$

$$D_L : \text{水平延散係數，單位 } m^2 / s$$

$$L : \text{Scaling dimension of dispersion process in } m$$

Fisher等人(1979)對水平縱向延散係數受潮汐來回震盪影響下之時變
性提出下列關係

$$K = K_0 f(T') \quad , \quad \text{其中} \quad T' = \frac{T}{T_c}$$

T : Tidal period

T_c : The cross-sectional mixing time

K_0 : Dispersion Coefficient as $T \gg T_c$

當斷面相較寬而淺時則密度的影響可忽略不計

$$K_0 = 0.1 \bar{u}^2 T_c \quad \text{其中 } T_c = W^2 / \varepsilon_t$$

即 $K = 0.1 \bar{u}^2 T \left[(1/T') f(T') \right]$ 其中 W : 為斷面寬度

ε_t : Transverse Mixing Coefficient

2-2 台中港港池延散係數之推估

台中港由於港池形狀特殊（成狹長形，長約七、八公里而寬僅半公里左右）且其主航渠為 NNE 走向，與冬季東北季風之主要方向(85%發生機率)相同，尤其瞬間風速可達每秒一、二十公尺以上，此時風驅流的影響已不容忽視。加以台中港地處台灣海峽中部，為一受限海域其平均潮差在 4.6 公尺以上，由潮汐漲落所引致的港域環流（Circulation current）對污染物的沖洗（Flushing out）有很大的影響。

台中港港池背景條件：

Length : 8000 M

Width : 500 M

Water Depth : 13 M

Tidal Range : 4.6 M

Wind speed : 15m/s

Tidal Excursion = $8000 \times 4.6/13 = 2830\text{m}$

Mean Tidal Velocity $\bar{U} = 2830\text{m}/6.25\text{hr} = 0.13 \text{ m/s}$

Rate of Transverse Mixing (Assumption)

$U^* = 0.1 \bar{U} = 0.013\text{m/s}$

代入上述學者的推導公式可估算台中港港池之水平延散係數：

1.(Bowden,1964)

潮流：

$$K_x = 0.625 \bar{U} h = 0.625 \times 0.13 \times 13 = 1.06 \text{ m}^2/\text{s}$$

(for log+parabolic velocity profile)

$$K_x = 0.26 \bar{U} h = 0.26 * 0.13 * 13 = 0.44 \text{ m}^2 / \text{s}$$

(for log velocity profile)

風驅流：

$$\Phi = 10^{-3} \left(U^2 h^2 / K_x \right) = 10^{-3} * (15 * 15 * 13 * 13 / 1.06) = 35.87 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$K_x = 5.3 \Phi \sim 8.3 \Phi = 5.3 * 35.87 \sim 8.3 * 35.87 = 190 \sim 298 \text{ m}^2 / \text{s}$$

(for wind speed 15m/s)

2.(Csanady,1963)

潮 流：

$$\text{渠道} \quad K_x = 5.9 u^* h = 5.9 * 0.013 * 13 = 0.997 \text{ m}^2 / \text{s}$$

風驅流：

$$u^* = \left(\frac{\tau}{\rho_w} \right)^{1/2} = \left(0.0012 \frac{\rho_a}{\rho_w} \right)^{1/2} U = (0.0012 * 1.19 / 1003)^{1/2} * 15 = 0.019 \text{ m/s}$$

$$K_x = 5.9 u^* h = 5.9 * 0.019 * 13 = 1.46 \text{ m}^2 / \text{s}$$

3.(Shin-Huang Chieh,1985)

水平延散係數與數值模擬範圍的尺度有關，因此亦有由歸納導出的經驗法則如Shin-Huang Chieh(1985)關係式 $k_L = 4.53 * 10^{-4} L^{4/3}$ ，此處若 L 代入橫向寬度 500m 則 $k_L = 1.8 \text{ m}^2 / \text{s}$ 左右。

4.(Fisher,1979)

潮 流：

$$\varepsilon_t = 0.6 d U^* = 0.6 * 13 * 0.013 = 0.10 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$T_c = (500 \text{ m})^2 / 0.1 \text{ m}^2 / \text{s} = 2500000 \text{ s}$$

$$T' = T / T_c = 45000 / 2500000 = 0.018$$

Referred to Fig 7.4 Fischer(1979)

$$K = 0.1U^2T(0.04) \approx 0.1(0.2\bar{U}^2)(45000)(0.04) \approx 0.61m^2/s$$

2-3 高雄港港池延散係數之推估

高雄港港池背景條件：

長(Length)：4000 m(考慮一、二港口皆開闢，允許海水交換)

寬(Width)：500 m

水深(Water Depth)：11 m

潮差(Tidal Range)：0.7 m

風速(Wind Speed)：2.3 m/sec

潮流入侵距離(Tidal Excursion)= $4000 \times 0.7 / 11 = 254.5$ m

平均潮流速度(Mean Tidal Velocity) $\bar{U} = 254.5 / (6.25 \times 3600) = 0.011$ (m/sec)

橫向混合速率(Rate of Transverse Mixing)

(Assumption) $U^* = 0.1 \bar{U} = 0.0011$ (m/sec)

代入上述學者的推倒公式，可估算高雄港港池的水平延散係數：

1. Bowden, 1964

潮流：

$$K_x = 0.625h\bar{U} = 0.625 \times 11 \times 0.011 = 0.0756(m^2/s)$$

(for log parabolic velocity profile)

$$K_x = 0.26h\bar{U} = 0.26 \times 11 \times 0.011 = 0.0315(m^2/s)$$

(for log velocity profile)

風驅流：

$$\Phi = 10^{-3}(U^2 h^2 / k_x) = 10^{-3} \times (2.3^2 \times 11^2 / 0.0756) = 8.47(m^2 / s)$$

$$K_x = 5.3\Phi \sim 8.3\Phi = 44.89 \sim 70.30(m^2 / s)$$

(for wind speed 2.3m/s)

2. Csanady, 1963

潮流：

$$\text{渠道} \quad K_x = 5.9hU^* = 0.0714(m^2 / s)$$

風驅流：

$$U^* = (\tau / \rho_w)^{1/2} = (0.0012 \frac{\rho_a}{\rho_w})^{1/2} U = 0.0027(m / s)$$

$$K_x = 5.9hU^* = 0.1752(m^2 / s)$$

3. Shin-Huang Chieh, 1985

$$K_L = 4.53 \times 10^{-4} L^{4/3} = 1.8(m^2 / s)$$

4. Fisher, 1979

潮流：

$$\varepsilon_t = 0.6dU^* = 7.26 \times 10^{-3}(m^2 / s)$$

$$T_c = L^2 / \varepsilon_t = 34435261(\text{sec})$$

$$T' = T/T_c = 45000/34435261 = 1.31 \times 10^{-3}$$

$$K = 0.1U^2T(0.01) = 1.1 \times 10^{-3} (m^2/s)$$

2-4 兩港延散係數之比較及分析

比較兩港幾何形狀寬度大致都在500公尺、水深11~13公尺左右，唯長度高港約為中港的一半而潮差高港只有中港的15%，最重要的不同是高港有兩個港口中港只有單一出口，季節風產生風驅流的影響在中港不容忽視而高港幾乎沒有。由上述參數可知，高港因潮流引起之水平延散約為 $0.05 \sim 0.1 m^2/s$ 之數量級，約為中港擴散係數($0.5 \sim 1.0 m^2/s$)的十分之一。此原因推論主要是因高港潮差值小，風驅流亦較小所致，顯見多開口的功效反而抵不過大潮差所產生的幫浦效應(Pumping Force)及強大風驅流所產生循環水流的加成影響，為印證此一觀點將進一步進行兩港現場流況實測加以比較。

參、現場實測比較中高兩港污染擴散之效率

3.1 理論依據

3.1.1 流速剖面

依據 UCM-40 電磁式流速計或 RCM-7 旋轉式流速儀可量得每一測站之水平流速值, V , 及其方位角(正北為零度)隨水深之變化。已知南向主航道之方位角為 201° , 故可由二者之角度差, θ 及水平流速值 V 求得縱向(沿主航道)之水平流速, V_x , 及側向(向岸)之水平流速, V_y 。即

$$V_x = V \cos \theta$$

$$V_y = V \sin \theta$$

3.1.2 浮標追蹤

若浮標 j 在時間 i 的水平座標點位置定義為 (X_{ij}, Y_{ij}) , 從這些座標可以推估浮標的拉格蘭治速度 (Lagrangian velocity) 以及算出浮標組的形心位置(List et al.,1990) 對 N 個浮標組在時間 i 時的形心之 X 座標可定義為

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_j X_{ij}}{N}$$

同樣的 Y 座標為

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_j Y_{ij}}{N}$$

則浮標組的平均速度簡單的就是其位置座標的導數。浮標位置

的變異 (Variance) $\sigma_{x_i}^2$ 及 $\sigma_{y_i}^2$ 定義為

$$\sigma_{x_i}^2 = \frac{\sum_j (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{(N-1)} \quad \text{和} \quad \sigma_{y_i}^2 = \frac{\sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2}{(N-1)}$$

依據 Okubo(1974)浮標分佈的延散可定義為

$$\sigma_i^2 = \frac{(\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2)}{2}$$

則可得相對延散係數 K (Relative dispersion coefficient)

$$K(t_i) = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_i^2}{\partial t} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_i^2}{\Delta t}$$

而空間有關的相對延散係數 (Spatially dependent relative dispersion)為

$$K_x(t_i) = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_{x_i}^2}{\partial t} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_{x_i}^2}{\Delta t}$$

$$K_y(t_i) = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_{y_i}^2}{\partial t} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta \sigma_{y_i}^2}{\Delta t}$$

上述 $K(t)$ 和 σ^2 之間的關係在浮標數目足夠而每一個浮標組能充分代表整體(Ensemble)特性的假設下方能成立。

3.1.3 染料施放

點源(point source)在具橫向流之三維流場中的濃度擴散可表示為下式 (Fischer et al.,1979)

$$C(x,y,z) = \frac{M'}{4\pi Dx} \exp\left[-\frac{(y^2 + z^2)u}{4Dx}\right]$$

式中 $C(x,y,z)$ 為濃度， M' 為質量通率(mass flux)，即 $M'=QC_0$ ， Q 為點源流量， C_0 為點源濃度， D 為擴散係數， u 為縱向(x 方向)速度。當 $y=z=0$ 時可得斷面最大濃度，即

$$C(x,0,0) = \frac{M'}{4\pi Dx}$$

在紊流擴散中之擴散係數可表示為 $D = A_1 x^{4/3}$ (Okubo, 1974)。由上式中斷面最大濃度 $C(x,0,0)$ 與下游距離之關係，可求得係數 A_1 ，及擴散係數 D 值。

3.1.4 潮汐遲角估算

因中高兩港航道狹長、水深僅約 11~13m，可用淺水波理論來估算二潮位站之遲角延時(time lag)。若二測站之距離為 L ，平均水深為 h ，則二潮位站之遲角延時， t_l ，為

$$t_l = L / (gh)^{0.5}$$

3.2 台中港現場流場實測及資料分析

1. 根據文獻資料以臺中港背景資料代入，顯現由潮汐漲落所導致的水平延散係數(m^2/s)其數量級大都在 10^0 左右；而由風驅流所導致的則在 10^2 左右，由此可見在冬季季風期間風驅流所導致的港域環流對污染物的沖洗相較於潮汐漲落所導致的影響來得大，因此以台中港為例：港池污染的數值模擬宜分為兩階段來進行即季風期及非季風期兩種，季風期以風驅流影響較為明顯而非季風期則以潮汐漲落影響較為顯著。

此外風驅流在季風期間又受日週期影響，每日下午二至三點風速較大，而入夜以後又逐漸變小，深夜甚至無風。由於潮汐漲落及風驅流均受一週期性影響或日週期、或半日週期使得流場變化更形複雜，更具挑戰性。

2. 本研究依據 List 等人(1990)之浮標追蹤法求得水平之延散係數,第二次浮標觀測(3/30/96)上午(剛退潮)之 $K_x=0.517\text{m}^2/\text{sec}$, $K_y=0.152\text{m}^2/\text{sec}$; 下午之量測結果則得 $K_x=1.69\text{m}^2/\text{sec}$, $K_y=0.134\text{m}^2/\text{sec}$ 。推估表面流速約在 25~35 cm/s 左右與流速剖面之量測結果頗為吻合，以當時平均風速 10m/s 計算大約為其 3.5%。顯然文獻推估值與現場量測值相當的接近其數量級大致在 10^0 左右。
3. 由兩次染料濃度隨距離變化之關係知濃度 C 與距離 X 之斜率為 -7/3 次方關係，亦即滿足 $D=A_1X^{4/3}$ 之關係。第二次量得之 $A_1=1.83*10^{-4}\text{m}^{2/3}/\text{sec}$, 第三次量測之 $A_1=1.14*10^{-5}\text{m}^{2/3}/\text{sec}$ 。若取下游尺度 $X=1000\text{m}$, 則二次港域流況擴散係數分別為 $1.83\text{m}^2/\text{sec}$ (第二次, 85/3/30)及 $0.114\text{m}^2/\text{sec}$ (第三次, 85/6/8)。二次之差異原因主要是表面風驅流之差異及潮汐相位角不同。第二次量測 (85/3/30) 時風速約為 10m/sec ; 潮位為退潮中。第三次量測時 (85/6/8) , 風速約為 0-3m/sec ; 潮位則由低潮開始轉為漲潮。由現場染料之軌跡觀測顯示染料之擴散範圍及軌跡會因潮流或風向而改變性，故精確之量測方式應包含全域或斷面上之多點採樣量測。
4. 觀測溫度剖面,各測站之溫度剖面有分層之現象，測站一因較靠近台中火力電廠取水口,其分層位置較複雜,分別為4m及15m,亦即在水下4m到15m間之溫度約為定值 (28.2°C-28.4°C),其他測站則有明顯的二層溫度現象,其上層之混合層 (mixed layer)厚度約為4-6m,與下層 (未混合層)

之溫度差約為 0.6°C (上午)至 1.2°C (下午)。根據推估其理查生數(Richardson No)為70左右有輕微的密度層變現象。

- 5.由第二次潮波儀之資料，可知兩個潮位站低潮延時為9分42秒。若以水深為12m，兩潮位站之距離為6.2km，並以淺水波估算得兩站之潮差延時為9分32秒，與觀測值頗為相近。而由圖廿八中亦可看出港裡側之潮差較外側之潮差略小，顯示潮差有消減之效應。而在低潮時，水位或水體內部有一週期約為1.3小時之振盪。若以風力引起之振盪其週期約為0.41小時，顯示港池內可能有內波或其他機制造成此一水壓之波動。
- 6.流速剖面量測結果因受旋轉式流速計起始速度 2cm/s 限制，方向量測在流速 5cm/s 以下誤差幾近 10%，使得部份斷面流速較小無法精確量測，因而轉換為沿風向及橫風向兩斷面時誤差更大。若改用電磁式流速計因無起始速度限制應可有效改善此一缺點。
- 7.染料施放理不應在岸邊，容易受邊界效應影響；但若在航道中央施放染料及採樣有其技術上的困難。尤其是定位須進一步研究改善。此外濃度量測當濃度愈小背景濃度干擾影響愈大也是有待克服的問題。

綜合以上討論知道延散係數除受水面風速即表面摩擦影響外底床粗糙度及水深、速度剖面分佈亦為重要影響因子。若能以上述諸變數求解出延散係數之解析解或近似解析解，則可有效改善數值模擬時相關參數推估所遭遇的瓶頸，這將是今後努力的重點方向。

3.3 高雄港現場流場實測及資料分析

1.根據文獻資料，以高雄港背景資料分析，顯示由潮汐漲落所導致的水
平延散係數(m^2/s)其數量級大都在0.1左右。

2.86年1月28日現場浮標觀測，浮標漂移的軌跡亦受到船隻尾跡流的影響
很大，且觀測至90分鐘時，浮標竟被漁民撈走了。故浮標所量測的時
間不夠長，而其所計算的延散係數也有震盪的情形。且在第16及17個
兩觀測值有不合理的現象，推測其原因可能是浮標被船隻撞到或船隻
經過附近水域所引起較大的波浪而導致此現象。依Okubo(1974)方法求
得之延散係數K值的範圍在 $0.17\sim 16.6m^2/sec$ 之間。此值遠較理論估算值
為大，主要原因是港池內浮標受船尾跡流及船波(bow wave)之效應很
大，已非原先潮流之效應，故取消第二、三次現場浮標觀測之項目。

3.86年1月28日流速量測結果為：

第一港口(測站2)及第二港口(測站10)之流速均向東(即向港內)，一港口
之表面流速約 $10cm/sec$ ，二港口約 $12cm/sec$ ，故漲潮時海水分別由一、
二港口湧入，而在49號碼頭(測站5)、55號浮筒(測站6)及前鎮河口(測站
7)其潮流速度較小，可視為二股向港內潮流互相牽制之結果。

4. 86年5月7日量測結果為：

(1) 上午之量測時是退潮階段，一港口之潮流速度約為 $30cm/sec$ (一港
口狹水道邊浮球段)，在一港口狹水道中央之底部最大速度達
 $60cm/sec$ 。而港內之潮流速度較小，約在 $10cm/sec$ 以內。

(2) 下午漲潮時，第一港口之流速約 $20\sim 25cm/sec$ 。故知一港口之流速
較二港口為大，此乃一港口狹水道較二港口窄及淺之地形所致。

5.86年6月6日量測結果為：

- (1) 量測時正逢大潮，且高雄地區在6月4、5日適逢暴雨，故河川水位高漲，港內水位因而提高。上午量測時為退潮，一港口之表面潮流速度約54cm/sec；二港口之潮流速度則約為20~25cm/sec(向外)。
- (2) 下午漲潮時，因受河川水位上升之效應，表面水流仍向港外流，而在水面下則明顯有海水入流(即鹽楔)之情形。在一港口量測得水面之流速為30cm/sec(向港外)，約在水下3公尺以後海水才向港內流入；在二港口狹水道，水面二公尺以內水流向外，以下則海水向港內流，港內之流速約10cm/sec。
- (3) 本次測得在水面一公尺以下，海水流入港內最大流速可達60cm/sec，故可知高雄港潮差小，河川水位高低對於港內流速之方向及大小影響顯著。

6.溫度、鹽度剖面量測結果：

- (1) 5月7日港池之平均水溫約為27.3℃。上午的水面與四公尺以下之海水溫度差約0.2℃；下午水面之溫差則以25號碼頭處之1℃最大。基本而言，靠近底床之水溫約為27.2℃，而水面之溫度以靠近港口處較低，港內較高。鹽度剖面於水表面處約3280ppm(退潮)~3310ppm(漲潮)，水道底約3340~3400ppm。而二港口狹水道之鹽度較一港口之鹽度值為高，顯示港池內之水主要是由一港口流出。
- (2) 水溫隨水深遞增，在水面下約八公尺左右，水溫呈一定值，不再增加，其溫度約28℃左右。而其溫度剖面隨水深變化以水面下四公尺內之變化最為明顯。此乃因暴雨逕流造成河水溫度下降所致。港池內水面之鹽度約1000ppm(靠第一港口)~2000ppm(靠第二港口)左右。鹽度亦隨水深遞增，在水面下約八公尺左右，鹽度呈一定值，

不在增加，其值約3400ppm左右。由鹽度之分布再次證明主要之河渠流量是由一港口流出，而在漲潮時，水面下三公尺內仍可視為淡水，亦即有鹽楔產生。

3.4 中高兩港現場流場實測分析比較

根據兩港實測資料顯示水平延散係數平行航道方向與垂直航道方向大致相差一個數量級也就是十比一左右，以中港為例理論推估值與實測值蠻接近的但高雄港由於開發較早船舶進出頻繁現場量測主要受港池內船尾跡流及船波(bow wave)之效應很大，已非原先潮流之效應導致延散係數遠較理論推估值為大。密度分層現象以溫度而言水面下 4~6 公尺較受海面溫度影響早晚各有不同但底層則較穩定，但鹽度分佈單開口及雙開口的港口則有明顯的不同以雙開口為例其鹽度分佈遠較單一開口之港池來得均勻。

至於多年來高港最受爭議的到底漲退潮時兩個港口是一進一出或者是雙進雙出，若是雙進雙出則兩個港口之間何處是停滯點？根據初步分析結果，一港口的平均流速較二港口大很多漲潮時尤其明顯兩者相差懸殊，潮流在漲潮時由一港口進二港口出而退潮時則由一港口出二港口入；兩者同進同出的情形只有在漲平潮或退平潮的情況下才會發生，但往往這時的流速多不大甚至低於流速計舵板的啓始速度，方向頗不穩定尤其二港口更為明顯。因此我們認為高雄港平均潮差僅在70~80cm之間，港內流場由潮汐漲落的水位變化影響相較於潮汐產生的沿岸流影響要小的多；加以一、二港口走向使得潮流大部份經由一港口進出即使二港口相較於一港口來得寬，這是一個很有趣的現象。此外所謂停滯點應該只有

在上述漲退平潮兩者同進同出的情形下才會發生且時間也很短暫並不明顯。上述結論係由進行兩個港口長達25Hr潮流觀測推論所得，以下擬再以模型試驗來印證上述推論的正確性以及此一流場機制對污染擴散效率之影響。

肆、模型試驗探討高雄港污染擴散之效率

高雄港港域遼闊，水域寬敞，為本省最大國際港。貨物吞吐量佔全省三分之二，但高雄港因位居仁愛河、前鎮河、鹽水溪及一、二、三、五號船渠等主要污水涵渠之下游，納入大量未經適當處理之汙水，致港池水質受嚴重污染。本研究再以模型試驗對高雄港全域的流況和擴散特性及港池內表面溢油之傳輸分佈進行探討，並以既有之潮位水流資料及港池內、外溢油之衛星遙測資料加以驗證。本計畫量測港域之流速分佈，一、二港口之漲退潮之流向及流速剖面，港域內之擴散係數及溢油事件發生的表面溢油面積之分佈。本研究成果可提供數值模式所需之水理參數，使模型試驗配合現場資料及數值模式三者互相驗證。經由本研究之水理分析，對於高雄港域之水理特性，污染擴散能力及溢油範圍之傳輸將有更深入的了解，並得以對港域水質及油污之監測管理做更完整有效之規劃及評估。

4.1 計畫內容及工作項目

本試驗研究之內容包含港域流速之量測，港域內擴散係數推求，水面油污之範圍量測及港池裡、外溢油之衛星遙測資料收集分析。本研究之現場流場範圍約10公里×10公里，試驗試驗則採水平縮比1/2000及垂直縮比1/200。本研究以超音波流速儀(ADV)量測模型港域之潮流速度，以粒子追蹤法推求港域內之擴散係數，並以攝影機及相機量測油污之範

圍。本試驗研究之量測結果可增進對港域內水理特性及油污擴散之了解。各項工作項目說明如下包括：

1. 流速量測：以港外測得之現場潮流及水位資料做為邊界條件，以確定模型試驗之正確性。並於潮汐之不同相位，量測港池內及一、二港口處之潮流分佈以了解漲退潮，高雄港池內海水之交換情形。速度之量測並以超音波流速儀ADV(Nortek)及旋轉流速計(Armfield)互相驗證。
2. 港池內之延散係數：原擬以雷射光源(Argon,4W)及螢光染料(Rodamin B)量測在不同潮流下，在港區各位置之濃度分佈並藉以求出港池內之延散係數。而由於雷射光源故障,本研究改用粒子追蹤及亂流擴散理論來推求表面流場之水平延散係數。
3. 池油污傳輸量測：以照相機(Nikon,FM2)及攝影機(Panasonic,NV-DP1,30fps)求出港內油污在不同潮流時及不同位置時之分佈情形。
4. 現場資料驗證：根據現有之潮流資料及漏油資料（地面及衛星影像）與模型試驗結果相驗證。

4.2 高雄港潮流資料分析

4.2.1 早期觀測資料

1. 在第二港口未開口時，高雄港務局測量隊於民國 52 年 8 月~10 月使用 Ekman-Merz 流速儀施測港內六個定點，自水面下 1、3、5 流速之平均值，得漲潮時以 0.2~0.3m/s 流速流向港內；退潮時亦以 0.2~0.3m/s 流速流向港外。以浮標追蹤法測得漲潮表面流速為 0.68m/s；退潮時為 0.73m/s。
2. 第二港口開口後，港務局於民國 58 年 7~8 月間，在港口內外各選定

6 個測站，使用 OC 型及 CM-II 型流速儀來量測潮流，結果得港外流速為 0.8m/s，港內流速為 0.52m/s，而港口流速達 0.8m/s 以上。

3. 第二港口未開闢前，港內潮流大致有一定軌跡，漲潮流進入港口後偏向旗津沿岸，落潮時偏向哨船頭沿岸，然後繞行而流出港口；在外海的潮流，漲潮時向『南流』，落潮時則向『西北流』。二港口開闢後已有變化，港內潮流在漲潮時，由第一港口及第二港口流入後，各向中島區附近進行；落潮時由前鎮河口之主航道分向各港口流出，其中第一港口狹水道之流速較第二港口狹水道之流速為大。
4. 依台灣大學理學院海洋研究所於民國 66 年之調查結果現示：高雄內港之潮流退潮時，5 號船渠及仁愛河所排出之污水係經由第一港口排出，前鎮河所排出之污水則向東南移動，經由第二港口排出，且愈近第二港口流速愈大，高雄內港於退潮時之流向分界線約在 50 號碼頭附近，污水出港後，順潮流被帶往西北方；漲潮時，由於港外沿岸潮流為東南向，正對第一港口，故潮水由第一港口湧入，同時第二港口航道與潮流方向垂直，造成『抽吸』內港水之作用，使第二港口於漲潮時向港內流出之作用不明顯，反而有大部分時間係向港外流出，而整個高雄港池之水流亦呈現向第二港口流動之情況，為流速較退潮時為小。

4.2.2 近期觀測資料

4.2.2.1 港外潮流資料

根據港灣技術研究所(洪等人,1995)於 1992 之 1 月~12 月於第二港口外 20m 處之長期海流儀觀測資料顯示，夏季西風季節及冬季之潮流能譜均以平行海岸為主，其主軸代表潮流速度約為 23cm/sec。

由海流玫瑰圖之分析可知潮流以 NW 及 SE 方向為主。在 3、11、12 月之潮流主頻週期為 12.19 小時，其他月份之潮流主頻則為 23.3 小時。

曾和孫(1997)分別於 1997 年 4 月至 7 月以一部自記式都卜勒剖流儀(ADCP)測得高雄港內外之三個潮流速度剖面。大林埔站之潮流漲潮為東南向(120°)，表面流速為 60cm/sec，退潮則為西北向(300°)，表面流速則為 50cm/sec。

本所於86年10月28日至11月7日於高雄港大林埔及中洲外海分別佈設二部潮流儀。86年10月29日0時至86年11月7日0時潮位及向北之水平潮流速度可知退潮時，潮流向北；反之漲潮時水流向南，與前述記錄相符。故可知高雄港域位於沿岸之大渦迴流區內，且與深海之潮流方向相反。兩測站之最大潮流速度值為90cm/sec，大林埔站之平均潮流速度值為30.7cm/sec，中洲站之平均潮流速度值則為27.0cm/sec。由南北向之平均潮流可知有一恆流為西北方向，即大林埔站之平均潮流速度為7.8cm/s向西及9.7cm/s向北；中洲站之平均潮流速度則為18.2cm/s向西及14.1cm/s向北；另由大林埔之流速向量圖可明顯看出潮流之方向為西北方向。另小潮時以一日二回潮較明顯；在大潮時，則以全日潮較明顯。

4.2.2.2 港內潮流資料

曾和孫(1997)分別於 1997 年 5 月至 7 月以一部自記式都卜勒剖流儀(ADCP)測得港內 48 號碼頭處之漲潮流向為 150° ，流速為 25cm/sec，退潮流向則為 330° ，流速為 20cm/sec。而前鎮河口處(57 號碼頭)之值與第二測站之值相近。

由上述近期資料可知高雄港內及外港之潮流主要均沿東南/西北走向，即漲潮向東南流，退潮則為西北流。與早期資料顯示：退潮時，5 號船渠及仁愛河所排出之污水係經由第一港口排出，前鎮河所排出，經由第二港口排出，高雄內港於退潮時之流向分界線約在 50 號碼頭附近；漲潮時港外潮水由第一港口湧入，同時第二港口向港內流出之作用不明顯，反而有大部分時間係向港外流出，而整個高雄港池之水流亦呈現向第二港口流動之情況，為流速較退潮時為小。兩者並不一致，故必須有第 1、2 港口同時之潮流資料加以驗證。

為確定第 1、2 港口之潮流方向，港研所遂於 1997 年 6 月 20 日於第 1、2 港口同時佈設兩部海流儀以量測其潮流流向。結果顯示大部份時間為漲潮由一港口進，二港口出；退潮則為二港口進，一港口出，第一、二港口之東向速度(U_x)如圖 2-6 所示。一港口之漲潮最大流速為 75cm/sec，退潮流速則 50cm/sec。二港口之漲退潮流速則相近，約為 25cm/sec。

去年在高雄港港域 86年1月28日流速量測結果為：第一港口(測站2, 8 am)及第二港口(測站10, 12 am)之流速均向東(即向港內)，一港口之表面流速約10cm/sec，二港口約12cm/sec，而在49號碼頭(測站5)、55號碼頭(測站6)及前鎮河口(測站7)其潮流速度較小，可視為二股向港內潮流互相牽制之結果。86年5月7日量測結果為：上午之量測時是退潮階段，一港口之潮流速度約為30cm/sec (一港口狹水道邊浮球段)，在一港口狹水道中央之底部最大速度達60cm/sec。而港內之潮流速度較小，約在10cm/sec以內。下午漲潮時，第一港口之流速約20~25cm/sec。故知一港口之流速較二港口為大，此乃一港口狹水道較二港口窄淺之地形所致。86年6月6日量測結果為：量測時正

逢大潮，且高雄地區在6月4、5日適逢暴雨，故河川水位高漲，港內水位因而提高。上午量測時為退潮，一港口之表面潮流速度約54cm/sec；二港口之潮流速度則約為20~25cm/sec（向外）。下午漲潮時，因受河川水位上升之效應，表面水流仍向港外流，而在水面下則明顯有海水入流（即鹽楔）之情形。在一港口量測得水面之流速為30cm/sec（向港外），約在水下3公尺以後海水才向港內流入；在二港口狹水道，水面二公尺以內水流向外，以下則海水向港內流，港內之流速約10cm/sec。本次測得在水面一公尺以下，海水流入港內最大流速可達60cm/sec，故可知高雄港潮差小，河川水位高低對於港內流速之方向及大小影響顯著。

4.3 理論分析

4.3.1 不等比水工試驗之理論

因為重力和慣性力顯著，所以一般河川或港灣模型通常使用福祿數相似定律，在不等比模型中，速度比 U_r 和時間比 T_r 要符合福祿定律。

$$U_r = Y_r^{0.5}$$

$$T_r = L_r Y_r^{0.5}$$

其中 r ：模型數與原型之比(scale)

L_r ：水平長度比

Y_r ：垂直長度比

則剪力速度之比率為

$$u_{*r} = (g_r Y_r S_r)^{1/2} = Y_r L_r^{-1/2} \quad (4-1)$$

其中 g_r 爲 1

$$S_r = \frac{Y_r}{L_r}$$

$$(\sigma_x)_r = L_r$$

其中 σ_x 爲縱方向雲團尺寸大小

$$E = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma_x^2$$

$$E_r = \frac{L_r^2}{T_r} = L_r Y_r^{1/2}$$

4.3.2 垂直速度梯度下之延散係數

如果垂直速度在延散過程是主要的變量，Elder(1959)指出在均勻流中延散係數

$$E_v = 5.9 h u_* \quad (4-2)$$

其中 h 爲水深

而原型與模型的垂直速度分佈和紊流擴散性須相似。延散係數率可從 eq.(1)、(2) 獲得

$$(E_v)_r = Y_r^2 L_r^{-1/2} \quad (4-3)$$

4.3.3 橫向速度梯度控制下之側向擴散係數

$$\text{Fischer(1967)指出 } E_l = (u'^2) b^2 / R u_* \quad (4-4)$$

其中 b ：水面最大速度到河岸的距離

R ：水力半徑

u''^2 ：任一點速度和斷面平均速度之差

在之後的分析，假設半寬用 b 代替，水深用 R 代替。

E.A.Prych(1967)指出：

$$(E_t)_r = L_r^{5/2} Y_r^{-1} \quad (4-5)$$

$$T' = T / T_c \quad (4-6)$$

其中 T ：振盪週期

T_c ：斷面紊流混合的特徵時間

$$T_c = \lambda^2 / e \quad (4-7)$$

其中 λ ：斷面完全混合時紊流擴散的距離

e ：延散係數

T_c 的測量需要橫向斷面完全的混合。

對於天然河道， T_c 用來定義垂直與橫向混合的時間尺度，而 T_c 取決於特徵長度與水深 h ，寬度 b

$$T_{cv} = \frac{h^2}{e_v} \quad (4-8)$$

$$T_{ct} = \frac{b^2}{e_t} \quad (4-9)$$

對於平直渠道 e_v 和 e_t 接近(Elder 1959)

$$e_v = 0.067hu_* \quad (4-10)$$

$$e_t = 0.23hu_* \quad (4-11)$$

定義無因次

$$T'_v = \frac{T}{T_{cv}} \quad (4-12)$$

$$T'_t = \frac{T}{T_{ct}} \quad (4-13)$$

可由式(4-8)-(4-13)及(4-1)得

$$(T'_v)_r = \left(\frac{L_r}{Y_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-14)$$

$$(T'_t)_r = \left(\frac{Y_r}{L_r} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4-15)$$

計算曼寧 n 值，由 Manning 公式 $V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$ 推求出

$$V_r = \frac{1}{n_r} (R_h)_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (4-16)$$

$$Y_r^{1/2} = \frac{1}{n_r} \times (Y_r)^{2/3} \left(\frac{Y_r}{L_r} \right)^{1/2} \quad (4-17)$$

$$n_r = Y_r^{2/3} L_r^{-1/2} \quad (4-18)$$

4.3.4 高雄港池尺度縮比的關係

以高雄港池為例，現場之尺寸為

$$L=10km$$

$$B=500m$$

$$h=12m$$

$$T=11.38hr$$

不等比的水工模型分別為

$$L_r = \frac{1}{2000} \quad Y_r = \frac{1}{200}$$

以下計算 U_r 、 T_r 、 $(E_v)_r$ 、 $(E_t)_r$ 、 $(T'_v)_r$ 、 $(T'_t)_r$ 、 n_r 分別為

$$U_r = Y_r^{1/2} = \frac{1}{14}$$

$$T_r = L_r Y_r^{-1/2} = \frac{1}{141}$$

$$(E_v)_r = Y_r^2 L_r^{-1/2} = \frac{1}{894}$$

$$(E_t)_r = L_r^{5/2} Y_r^{-1} = \frac{1}{894427}$$

$$(T'_v)_r = \left(\frac{L_r}{Y_r} \right)^{1/2} = \frac{1}{3.16}$$

$$(T'_t)_r = \left(\frac{Y_r}{L_r} \right)^{3/2} = 31.6$$

$$\text{曼寧 } n \text{ 值 } n_r = Y_r^{2/3} L_r^{-1/2} = (1/200)^{2/3} \times (1/2000)^{-1/2} = 1.31 ,$$

亦即模擬試驗中之粗糙度為現場之1.31倍。比較高雄港原型與模型的尺度關係可列表如下：

表4-1 高雄港原型與模型的尺度關係

	$L(m)$	$B(m)$	$H(cm)$	$V(cm/s)$	$T(min)$
原型	10000	500	1200	80	720
模型	5	0.25	6	5.7	5.09

4.4 高雄港海域溢油資料分析

4.4.1 港內之溢油污染

高雄港內之溢油污染，則以中島加工區(42-48 號)碼頭及(55,56,57 號碼頭)及浮筒處之老舊船舶溢油情形最嚴重，而 55-57 號碼頭因擴散效應不良，常有溢油堆積消散不易之現象。另外在 1-10 號碼頭亦有老舊船舶(以越南，巴拿馬籍籍本國籍)最嚴重，而一般貨櫃輪船之設備新穎，問題很少。

4.4.2 港外之溢油污染

1. SAR 影像資料

本計畫所使用的兩張影像為 ERS-1 SAR，C-Band，4 Look 之高雄附近海域影像，影像獲取時間分別為 1994 年 10 月 22 日以及 1996 年 3 月 7 日，影像解析度為 12.5 公尺，涵蓋範圍為 50 公里× 50 公里，而影像分析之區域限制在 12 海浬之領海範圍內(曲線範圍)。從區域影像，可看到油污分布，並且其背景灰度值有相當程度之變化。

將油污區塊邊界覆疊於原始影像後，再經局部放大後所得之影像，

可看到研究中所發展之模式可偵測到區塊邊界上之細微變化。

2. SPOT 衛星影像資料

本計畫收集 85 年 8 月 10 日中油外海輸油浮筒漏油及 86 年 10 月 7 日長運輪於二港口外海發生之氣爆漏油案例之 SPOT 衛星影像可看出油污擴散之方向與前述西北向恆流一致，並可經由影像處理得到溢油範圍。唯其精度為 30m，且為可見光波長，不能用於夜間或天候不良時監測。

4.5 實驗設備及規劃

4.5.1 實驗設備

本實驗之平面循環水槽位於中央大學環境流體力學實驗室內，尺寸為 8m(長)× 6m (寬)× 0.7m (高)。於水槽內製作高雄港港域之模型，以進行港域流速及潮位之量測，水面油污之範圍量測等試驗。本研究之現場範圍約 10 公里× 10 公里，故模型分別採水平縮比 1/2000 及垂直縮比 1/200 之壓克力模型。

本實驗利用二維聲波都普勒流速儀(Nortek, Advlab)，量測流場速度。流速儀探針為 Y 字形，探針中間為聲波發射端及兩側各有一訊號接收端，經由接收之訊號，換算與探針同平面之二維速度。聲波發射端之聲波頻率為 10MHz；量測之流速範圍最大可達± 2.5m/s；精確度可達 0.1mm/s；探針取樣頻率從 0.1~25Hz；取樣點體積小於 0.25cm³；取樣點距聲波發射端約 5cm。實驗時，若探針之前方之邊界在 25cm 內，量測數據可顯示出取樣點及聲波發射點與邊界之距離。流速並另以螺旋式流速儀(Armfield H33 model)來驗證 ADV 之精確性。本實驗以台車率定 ADV 及螺旋式流速儀相關係數分別為 0.9968 及 0.9997。

溢油擴散及粒子追蹤以相機(Nikon, FM2)及攝影機率(Panasonic,

NV-DP1,30fps) 來觀察軌跡之變化。溢油則以機油(Aral,10W-40)並加上油性染料(Unisol,Liquid Red B, 比重 1.0)以便於可視化觀測。粒子追蹤使用 5mm 之塑膠粒子(密度為 1.0g/cm^3)置於觀測點(9 個測站)，並記錄粒子位置隨時間之變化。

4.5.2 實驗規劃

4.5.2.1 潮流流況

本研究之循環水槽之最大流量可達 $1\text{cm}^3/\text{sec}$ ，其流向則由控制板上調整馬達之轉向求得。水流經由幫浦、蜂巢濾層、整流片及整流層再進入水槽內，經測試結果，斷面均勻性良好。模型則以透明壓克力板(8mm 厚)依港池形狀及水深分佈依縮比製成。一港口處之水深為 5.5cm(現場 11m)，二港口處則為 8cm (現場 16m)。因高雄港之流況乃大尺度之沿岸潮流所主控，實測資料中大林蒲、中洲及一、二港口間之潮位相角差值均極小。另一方面，高雄港之平均潮差值僅 70cm，故若以模型比例則僅為 0.35cm，因受表面張力及實驗精度之限制，模型將以水平潮流為主，而忽略潮位變化之效應。ADV 之流速量測以 25Hz 頻率取 2 分鐘之平均值來代表測點之流速。

水槽之潮流系統以大林蒲潮流為邊界條件，由 1997 年 10 月 29 日至 11 月 7 日之現場資料分析得退潮最大流速為 80cm/sec (平均方向約 320°)，漲潮則為 60cm/sec (平均方向約 130°)，其平均橫流潮流方向為北偏西 37.8° (或 322°)。中洲站之平均橫流方向則為北偏西 18.7° 或 341° ，平均最大漲潮速度與大林蒲站相近。由中洲測站之水深平均退潮速度為 5.34 cm/sec (偏角為 344° ，與實測資料接近)，模擬現場則為 75.6cm/sec 。漲潮平均速度則為 4.78cm/sec (偏角為 170° - 190°)，模擬現場則為 67.6cm/sec 。

4.5.2.2 粒徑及底床粗糙度分析

由前面分析得知底床粗糙度之比值 $n_r=1.31$ ，而由底床粗糙度與粒徑大小之關係式為 (Garde and Raju , 1977)

$$n = kd^{1/6}$$

所以
$$n_r = n_m/n_p = (d_m/d_p)^{1/6} = 1.31$$

其中
$$d_m = 5.05 d_p$$

由港研所大林蒲實測海床粒徑之中質粒徑為 0.23mm，故可推求實驗室之底床砂礫粒徑為 1.162mm，本實驗乃選用越南矽砂(其中質粒徑為 1.167mm)來代表底床粗糙度。其底床則依海圖 5 公尺等深線鋪砂至水深為 30 公尺處(模型為 15cm 深)。

4.5.2.3 延散係數及溢油擴展分析

本研究原擬用雷射光源及螢光染料推求港池內全域之濃度分佈，但因雷射電路板故障，故依第三章亂流延散理論求粒子團之擴散情形，以攝影機拍攝多個質點之不同時間軌跡，由停格分析(1/30 秒)來推求延散係數，同理由溢油之面積位置變化亦可定量描述油污在港池內之傳輸過程。

4.6 模型試驗結果

4.6.1 港域內外之潮流流線

由於退潮時潮流為西北流，海水乃由第二港口流入，而因二港口之防波堤之遮蔽效應，在旗津海岸產生大小不同之兩個迴流旋渦，最大者長約 7Km，寬約 3Km 之大渦流及靠二港口北堤之較小渦流。港內

在進入二港口處偏向南側，且於外廓堤處有迴流，在靠第四貨櫃中心之渠道亦有明顯迴流，而大林商港處及五號船渠處則水流極小，可視為死水區。海水經由第一港口偏北側(哨船頭)流出，並於外廓堤二側產生迴流。由漲潮之流況可知港外之迴流區尺度較退潮時小，海水由一港口流入後，偏向旗津半島，而在主航道上有多個渦流存在。在前鎮河以北之水流偏向旗津，而在前鎮河以南則流線轉向第三貨櫃中心，並於 114 號碼頭產生大渦流。二港口狹水道之水流則偏由北側流出。

4.6.2 港內粒子之路徑徑線

為了解污染介質之路徑及港池內沖洗時間 (flushing time) 之特性，本研究將中性密度塑膠球 (B B 彈，直徑 5mm) 置於港口處，以攝影機(Panasonic, NV-DP1)追蹤其路徑。由退潮時之 4 次粒子徑線圖，測況之箭頭及向量表示測沿速度 (1/2 水深位置)，圖中所示時間為四粒子經過各測點之時間。由四粒子追蹤可知徑線與流線極為相似。粒子由二港口 (測點 9) 流入至一港口 (測點 0) 流出所需之時間為 2'01"~2'46"，平均值約 2'25" (現場則約 6 小時)，可見大林埔及五號船渠皆為死水區，且在二港口靠旗津側有一迴流區形成。粒子在二港口狹水道偏向旗津側，在一港口狹水道則偏向北側船頭處。由漲潮時之四次粒子行徑，粒子由一港口 (測點 0) 流入，而由二港口 (測點 9) 流出，粒子進入一港口狹水道時，偏向旗津側，進入港域內側則折向第二船渠，在主渠道 (測點 3 至測點 7) 粒子主要沿航道方向，而測點 7 之流速小且有迴流，粒子之停留時間長，延散性差。在二港口狹水道之潮流則偏向旗津，且在二港口有明顯迴流。四次粒子之港池停留時間為 5'40"~11'38"，平均約為 8'23"，遠較退潮時為大。可見港池內退潮之水流傳輸遠比漲潮時佳。

4.6.3 港域內之流速分佈及剖面

退潮時一港口狹水道之流速為 10cm/sec，二港口之狹水道流速為 4.6 cm/sec。漲潮時一港口狹水道之流速為 3.7cm/sec，二港口狹水道則為 3.2cm/sec。可見退潮時海水之交換率較漲潮時為佳。中洲站之退潮流速較漲潮為大。主航道測站 3 及測站 5 之平均潮流速度約 5 cm/sec。

4.6.4 港池延散係數推求

依據前章之延散係數理論，本研究分別於 10 個流速測點及二個死水區(死水區 1 為五號船渠，死水區 2 為大林埔商港)，同時於水面放四個塑膠粒子(BB 彈,5mm 直徑)，並依其位置之變異推求水平延散係數。表 6-3 為退潮時之水平延散係數，死水區 1 (五號船渠)及死水區 2 (大林埔商港)之延散係數僅為 3.1cm²/sec 及 2.9 cm²/sec。二港口之延散係數則為 9.5 cm²/sec 及 14.5 cm²/sec，航道中除測點 7 因介於迴流邊緣有較大之延散係數為 49.6 cm²/sec 外，其他測點之值約為 5 cm²/sec。一港口狹水道之延散係數值則為 7 cm²/sec，一港口出口處則 40.8 cm²/sec。由表中可知延散主要以沿航道方向(K_y)為主。漲潮時之延散係數在死水區均較退潮時為小，二港口及 7-8 測站亦有減小之趨勢，然而在測站 1-5 則較退潮為大。此一現象為與漲潮外主航道在這些斷面有產生渦流，其剪力較強致延散較佳。二港口之延散係數為 1.6 cm²/sec，一港口則為 17.9 cm²/sec。故綜合而言，港池之延散以沿航道方向為主，且退潮時之擴展較漲潮時為佳。

4.6.5 溢油擴散分析

爲了解溢油發生後之傳輸範圍，由港內常發生溢油之位置整理出九個位置並以機油(10W-40)加上紅色油性染料，滴於上述位置，並用攝影機(Panasonic,NV-DP1)觀測其不同時刻之溢油範圍。由退潮時 9 個位置油團之擴展情形可看出溢油除沿水流方向平移外，並沿流向拉長，而第 9 點(108 號碼頭，紅毛港處)，因位於死水區內，故溢油擴展不易，其餘均較易擴展。反之漲潮時之油汙擴展情形，則因流速較緩，在死水區內之油汙第 3 點(五號船渠)及第 9 點(108 號碼頭)均不易傳輸，然其他船渠因有迴流其擴展反較退潮的爲大，其他各點仍沿流向傳輸爲主。

4.7 結論與建議

- 1.本研究以大林埔站之流向爲邊界，並以中洲站之漲退潮潮流速度爲驗證，試驗結果與實測值頗爲符合。
- 2.由模型相似律可推求高雄港原型與不等比的水工模型縮比，水平1/2000及垂直1/200， 的尺度關係可列表如下：

	L(m)	B(m)	H(cm)	V(cm/s)	T(min)
原型	10000	500	1200	80	720
模型	5	0.25	6	5.6	5.09

- 3.本計畫收集到高雄港港內、外之溢油污染記錄，其中以 18 至 20 號碼

頭常出現油污為嚴重，究其原因乃其為高雄港進港船舶加油的主要碼頭。而 51 至 57 號碼頭其發生油污原因不一，但亦常因擴散效應不良，常有亦由堆積消散不易之現象。此外，中島加工區（42 至 48 號）碼頭及浮筒處老舊船舶溢油情形亦相當嚴重，如同 1 至 10 號碼頭之老舊船舶（越南、巴拿馬籍等）漏油問題較多。除地面資料外，本計畫並配合 SPOT（可見光）及 SAR（合成口徑雷達）之影像監測資料，可進一步判讀油污範圍及位置。

- 4.退潮時潮流為西北流，因二港口之防波堤之遮蔽效應，在旗津海岸產生大小不同之兩個迴流旋渦。港內在進入二港口處偏向南側，且於外廓堤處有迴流，大林商港處及五號船渠處則水流極小，可視為死水區。漲潮時港外之迴流區尺度較退潮時小，海水由一港口流入後，偏向旗津半島，而在主航道上有多個渦流存在。在前鎮河以北之水流偏向旗津，而在前鎮河以南則流線轉向第三貨櫃中心。二港口狹水道之水流則偏由北側流出。
- 5.由粒子追蹤可知大林埔及五號船渠皆為死水區。退潮時粒子由二港口流入至一港口流出所需之時間約 2'25"（現場則約 6 小時）。漲潮時粒子由一港口（測點 0）流入，而由二港口（測點 9）流出之時間約為 8'23"，遠較退潮時為大。可見港池內退潮之水流傳輸遠比漲潮時佳。
- 6.退潮時一港口狹水道之流速為 10cm/sec，二港口之狹水道流速為 4.6 cm/sec。漲潮時一港口狹水道之流速為 3.7cm/sec，二港口狹水道則為 3.2cm/sec。可見退潮時海水之交換率較漲潮時為佳。

7.退潮時之水平延散係數，死水區 1 (五號船渠)及死水區 2 (大林埔商港)之延散係數僅為 $3.1\text{cm}^2/\text{sec}$ 及 $2.9\text{cm}^2/\text{sec}$ 。二港口之延散係數則為 $9.5\text{cm}^2/\text{sec}$ ，航道中測點之值約為 $5\text{cm}^2/\text{sec}$ 。一港口狹水道之延散係數值則為 $7\text{cm}^2/\text{sec}$ ，。延散主要以沿航道方向為主。漲潮時之延散係數在死水區均較退潮時為小，然而在測站 1-5 則較退潮為大。此一現象為與漲潮外主航道在這些斷面有產生渦流，其剪力較強致延散較佳。二港口之延散係數為 $1.6\text{cm}^2/\text{sec}$ ，一港口則為 $17.9\text{cm}^2/\text{sec}$ 。綜合而言，港池之延散以沿航道方向為主，且退潮時之擴展較漲潮時為佳。

8. 溢油在死水區內(五號船渠及 108 號碼頭紅毛港處)擴展較緩。在主航道上，溢油除沿水流方向平移外，並沿流向拉長。因退潮時流速較快，故退潮時之溢油擴展較漲潮時為快。

伍、結論及建議

1. 港池水域對污染擴散效率主要決定於海水的交換率而影響海水交換的控制因子很多諸如潮汐的漲落所產生的幫浦效應，大潮差所產生的海水交換率自然較大；小潮差自然對污染的擴散較為不易。還有沿狹長港池的強風產生的風驅流所引致的強制循環水流對污染擴散的功效亦不容忽視。由以上推論顯見比較中高兩港在對污染的擴散效率上中港則優於高港儘管高港有兩個開口。倘若再加計水道尾端臺電火力電廠抽取港內水冷卻再排放港外所產生的人為強制交換則中港的海水交換率遠勝於高港許多。
2. 高港多年來最受爭議的到底漲退潮時兩個港口是一進一出或者是雙進雙出，若是雙進雙出則兩個港口之間何處是停滯點？根據本研究分析結果，一港口的平均流速較二港口大很多漲潮時尤其明顯兩者相差懸殊，潮流在漲潮時由一港口進二港口出而退潮時則由一港口出二港口入；兩者同進同出的情形只有在漲平潮或退平潮的情況下才會發生且方向頗不穩定尤其二港口更為明顯。因此我們認為高雄港平均潮差僅在 70~80cm 之間，港內流場由潮汐漲落的水位變化影響相較於潮汐產生的沿岸流影響要小的多；加以一、二港口走向使得潮流大部份經由一港口進出即使二港口相較於一港口來得寬，這是一個很有趣的現象。此外所謂停滯點應該只有在上述漲退平潮兩者同進同出的情形下才會

發生且時間也很短暫並不明顯。

- 3.在規劃港池形狀於低潮差區域時此時形狀因素就顯得舉足輕重了，形狀愈接近圓形而開口愈接近中心則港池水域的海水交換率愈佳；反之水域愈成狹長形若欲提高海水交換率則開口宜選擇於狹長端的中心點則對污染的擴散效率將有很大的幫助。高潮差區域建港對污染的擴散效率較高但相對的船舶的碇靠設備在設計上就顯得費時及費力相對工程費也會增加，因此如何取捨這就是設計最佳化所必需考量的問題。

陸、參考文獻

- 1.洪憲忠,廖慶堂,曾哲茂 (1995),“高雄港潮流特性之研究”,第十七屆海洋工程研討會論文集, pp.1671-1683.
- 2.曾若玄,孫佩君(1997),”近岸海潮流邊界層特性”,第19屆海洋工程研討會論文集, pp.381-385.
- 3.曾哲茂,蘇青和,周憲德 (1997),“高雄港池水理調查研究”,第19屆海洋工程研討會論 , pp.469-476
- 4.高雄港務局,“高雄港量測記錄”,高雄港務局測量資料,民國54年
- 5.Bowden K.F., (1964),”Horizontal Mixing in the Sea due to a Shearing Current”,*J. Fluid Mech.*, Vol.21, Part 2, pp.83-95.
- 6.Csandy, C.T. (1963),”Turbulent Diffusion in Lake Huron”, *J. Fluid Mech.*, Vol.17,, pp.360-384.
- 7.Elder,J.W.(1959),”The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow”,
J. Fluid Mech.,5(4),544-560.
- 8.Fischer,H.B.(1967),”The mechanics of dispersion in natural streams”,

J. Hydraulic Div. ,ASCE, pp.187-216.

9. Fischer , List , Koh , Imberger , Brooks (1979), *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York.
10. Garde and Raju (1977) *Mechanics of sediment Transport and Alluvial Stream Problems*. John Wiley and sons, 483p.
11. List ,E.J., G. Gartell and C.D. Winant, (1990), "Diffusion and dispersion in coastal waters", *J. of Hydraulic Engineering*, Vol.116, No.10, pp.1158-1179.
12. Pratt William K. (1991), *Digital Image Processing* ,2nd Edition, John Wiley & Sons.
13. Gonzalez, R. C. and R. E. Woods(1992), *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.
14. Robinson I. S.(1994), *Satellite Oceanography*, John Wiley & Sons.
15. Shin-Huang Chieh (1985), "Two-dimensional Model of Thermal Discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.111 , No.4 , pp1113~1134.

16. Tsanis, I.B. (1989), "Simulation of Wind Induced Water Currents", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.115, No.8, pp1113~1134.