台中港港池水理調查研究

計畫主持人:曾哲茂副研究員

共同主持人: 周憲德 博士
朱佳仁 博士

參與人員: 林柏青
紀丁元、 林建章
董世傑、 鄭瑞元
詹國華、 李坤樹

台中港港池水理調查研究

目 錄

摘要 ----------1
第一章 計畫背景與目的----------2
1-1 台中港港池現場調查----------2
1-2 台中港港池數值模擬----------3

第二章 港池延散係數推估----------4
2-1 延散係數之文獻回顧----------5
2-2 台中港港池延散係數之推估----------7

第三章 現場調查項目與內容----------9
3-1 流速剖面---------- 9
3-2 浮標追蹤----------10
3-3 染料釋放----------10
3-4 潮汐遲角觀測----------10

第四章 理論依據及資料分析----------11
4-1 理論依據----------11
4-2 資料分析與討論----------13

第五章 結論及建議----------16

第六章 參考文獻----------18

附圖----------19~51

台中港港池水理調查研究

摘　要

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。台中港域自民國65年營運後，因接受附近梧棲、沙鹿排入污水，嚴重污染港池水質。為能有效管理和改善港域水質，瞭解港池內之水理特性和擴散情形實為首要工作。本研究以現場調查方法對台中港港域的流場情況和擴散特性進行研究。現場調查內容含港域流場量測、水平延散係數、風速、港池內潮差、水鹽度及温度等水理特性，以對港域內流況和擴散特性做全域的瞭解。現場調查之結果並可用為數值模式之驗証，及工程規劃之參考。

壹、計劃背景及目的：

台中港位於台灣省西海岸中部，自開港營運以來，對疏解北部基隆港與南部高雄港之容量負荷及平衡北、中、南地區發展有很大貢獻。 然台中港上游特定區包括清水、沙鹿、梧棲、龍井四鄉鎮由於開發進展緩慢致污水處理系統未能適時建立，使特定區之家庭污水與工業廢水直接排入港池產生嚴重污染，除影響近海生態環境外亦引發漁民陳情索賠案件屢見不鮮。 又因港池內如南泊渠、重件橋等多處死角與港外海水交換率不高，擴散能力亦較差，水質皆屬乙~丙類水質〔見行政院環保署台中港港灣污染整治規劃，1992〕，污染情形十分嚴重。台中火力電廠奉准設立於航道南端的工業港區後，又因航道需求將外廓海堤合攏，使得進入南端港池之污水無法再直接擴散稀釋至大海，致工業港池之污染日形嚴重並隨南堤路之打通而波及商港區之港域水質。

為能有效管理和改善港域水質，必須先瞭解港灣的水理特性和污染物傳輸狀況，而台中港因特殊的地理環境，位於台灣海峽中央，大甲溪和大渡溪之間，潮差大且東北季風強烈，港池航道方面又與風向大略一致，港池內水理特性及擴散情形受潮汐和風力之影響頗大。前人研究此問題多採取現場調查及數值模擬兩種方法，相關文獻說明如下：

1-1 台中港港池現場調查：

國內對於台中港港域水質已有多次的現場調查〔見行政院環保署台中港港灣污染整治規劃，1992〕，這些現場調查多著重於污染物濃度作點的量測，量測項目包括溶氧量（Dissolved Oxygen）、生化耗氧量（B.O.D.）懸浮顆粒（Suspended Solid）濃度及酸鹼值（pH）等水質參數。但對港域之水理特性，如潮汐所引致之環流(Tide-induced Residual Circulation Current)、風驅流(Wind-induced Drift Current) 和港外海水交換率(Exchange) 等參數因量測困難並未有一全盤性之調查研究，因而港域的污染物擴散 (Diffusion) 情形無法做深入的瞭解。

1-2 台中港港池數值模擬：

代表港域內的流場特性和污染物分佈狀況亦可以數值模式模擬計算，所依據方程式為連續方程式、動量方程式(一維或二維)、密度傳輸方程式和擴散方程式。

對於台中港港池內污染物傳輸的模擬曾有Hwang (1985) 提出二維數值模式來計算流況和污染物傳輸，但其模式因當時南堤路尚未打通，僅模擬港口至商港區，並未考慮工業港區開放和台中火力發電廠抽取港池內海水對港池內流況和擴散的影響。且黃之模式假設正弦潮位與實際潮位變化不同且未與任何實測數據比較，固無法得知其模式的正確性。張仁德(1994)亦曾以二維有限元素之數值模式來計算流況和污染物傳輸，然其擴散係數假定為45m^2/s，並未經現場驗証；港內潮流之分佈仍須實測值加以証實。

中興工程顧問社曾於1991使用丹麥水利研究所(Danish Hydraulic Institute)所發展之數值模式MIKE II 計算港域中B.O.D.與D.O.之分佈，但MIKE II 為一維模式，其模擬結果與現場調查結果相差甚大（台中港港灣污染整治規劃期末報告, 1991)。

本研究採用現場量測方式對港域流況和污染物擴散情形進行研究。研究內容含量測港域流場、紊流擴散係數、風速、港池內潮差、水鹽度及温度等水理特性，以對港域內流況和擴散特性做全域的瞭解。實測所得之結果可用以驗証日後之數值模式。期能對台中港港域流況和污染物擴散情形有更深入之瞭解，以對港域水質作更有效之管理。

貳、港池延散係數之推估

港域內之延散係數是港池水質稀釋能力最重要的參數。延散係數之值大表示港池水質稀釋能力強，反之亦然。而延散係數為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：

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

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

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

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

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

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_o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^s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）分別為

（1）、潮　　流：

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

（2）、風驅流：$\Phi=10^{-3}\left(U^2h^2/K_z\right)$

h=0.25D	K_x=8.3Φ	K_y=0.02Φ
h=1.25D	K_x=5.3Φ	K_y=1.1Φ

D 代表磨擦影響深度(The depth of frictional influence)
$\overline{U}h$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$\overline{U}h$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　　$K_x = 10.1u^*a$

渠道　　$K_x = 5.9u^*h$

（2）、風驅流：

$\tau = 0.0012\rho_a U^2$　　U：海面上10米風速

ρ_a：空氣密度

ρ_w：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)對二維温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：水平延散係數，單位　m^2/s

L：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　$T >> T_c$

當斷面相較寬而淺時則密度的影響可忽略不計

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

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 *4.6/13=2830m
Mean Tidal Velocity $\bar{U}$= 2830m/6.25hr = 0.13 m/s
Rate of Transverse Mixing (Assumption)
U* = $0.1\bar{U}$=0.013m/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：

$K_x = 0.625\bar{U}h = 0.625*0.13*13 = 1.06\ m^2/s$
(for log+parabolic velocity profile)

$K_x = 0.26\bar{U}h = 0.26*0.13*13 = 0.44\ m^2/s$
(for log velocity profile)

風驅流：

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

$K_x = 5.3\Phi \sim 8.3\Phi = 5.3*35.87 \sim 8.3*35.87 = 190 \sim 298\ m^2/s$
(for wind speed 15m/s)

(2)、(Csanady,1963)

潮　流：

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

風壓流：

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

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

(3)、(Shin-Huang Chieh,1985)

由於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 $k_L = 1.8m^2/s$ 左右。

(4)、(Fisher,1979)

潮　流：

$$\varepsilon_t = 0.6dU^* = 0.6*13*0.013 = 0.10\ m^2/s$$

$$T_c = (500m)^2/0.1m^2/s = 2500000s$$

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

Referred to Fig 7.4 Fischer(1979)

$$K = 0.1U'^2T(0.04) \approx 0.1(0.2\overline{U}^2)(45000)(0.04) \approx 0.61m^2/s$$

參、現場調查項目及內容

本研究就潮汐和風力影響下港域水理特性和擴散情形，進行現場調查並量測港內水域垂直斷面流速分佈、水平延散係數、風速分佈、港池內潮差、水鹽度及溫度等水理參數。現場調查在冬夏兩季各一潮位周期中，選擇港池內數點量測流速、溫度及鹽度剖面再利用雷諾類比法推估上述之流況參數，並在工業港內量測風驅流與潮汐之流況互動。這些現場實測資料將可增加對港域內水理特性和擴散機制的瞭解，並可用於驗証或校正數值模式。本計畫之港域現場量測原預定為冬季季風期及非冬季季風期各作業乙次；但因第一次部份儀器故障乃加作一次總共出海三次。 日期分別為: 第一次為 85 年 2 月 27 日，第二次為 85 年 3 月 30 日， 第三次為 85 年 6 月 8 日。

3.1 流速剖面量測

港池內流速剖面量測係以船上作業，以衛星定位儀(GPS)定出測站位置，定點下錨後，以 UCM-40 電磁式流速計或 RCM-7 旋轉式流速儀由水面往下每間隔 1-2 公尺水深處定點量測流速 2 分鐘。為瞭解風驅流對港池的影響，採樣點分別選擇在主航道兩個直線段上如圖一所示。為配合潮汐週期之流況觀測及限於儀器之記憶體容量，除測站五外，每個測站漲退潮各一次。因此包含流速剖面量測、船舶移動以及起、拋錨時間，每次船上作業共量測得五個測站九次之流速剖面資料。

第一次流速量測係採用 UCM-40 電磁式流速計，因該儀器之啓動設定功能發生問題，使得量測結果無法使用。 為爭取時效第二次改用挪威製 RCM-7 旋轉式流速儀，但由於受速度起始限制為 2cm/s 、誤差± 2%、方向起始速限為 5cm/s 、誤差在± 7.5%左右影響，因此使得部份速度量測剖面因現場流速較小、方向變化頗巨誤差甚大。僅得 ST.1 及 ST.3 兩個測站下午退潮時沿航道方向流速資料較為理想，其餘均因誤差甚大而無法使用。為彌補上述缺點第三次量測則改用修正後之 UCM-40 電磁式流速計。

3.2 浮標追蹤

本研究之浮標製作含三部份，最上部為細鋼管及三角形布旗以利追蹤觀測，中間為直徑 30cm 之浮球，下部為二片垂直相交之鐵片以穩定浮標。經測試結果，浮標在水面漂浮相當穩定。 浮標自流速剖面量測之作業船上施放，早上及下午漲、退潮各一次，每次各兩個；同時在岸邊選擇一長 500 公尺之基線，兩端各利用一部電子經緯儀(Zeiss, Model Elta-6)以前方交會法進行追蹤浮標。並依據浮標之漂流軌跡分別推算出風驅流速度及水平延散係數(List,1990) 。為減少來往船舶所產生的尾跡波干擾，施放位置儘量選擇在港池較裡側，即台電卸煤碼頭北側附近海域進行。總共進行三次：第一次二月二十七日海面風速約為 15-20m/s 左右，然因風速過大，經緯儀不能架設。 第二次三月三十日海面為 10m/s 左右；第二次為六月八日當時海面風速為 2~3m/s 幾近無風。追蹤軌跡將於下一章加以說明。

3.3 染料施放及濃度量測

染料施放本欲利用人造衛星(SPOT 及 LANDSET)進行觀測，然因施放染料的需要量甚多且需掌握衛星通過時間，同時必須有良好的能見度，有其技術上的限制及困難，因此只好放棄。 第一次染料施放及觀測於南迴船池進行，然因風浪過大，以致船隻定位及染料施放困難，無功而返。第二次及第三次之染料施放則採沿岸邊定點定量釋放。 本研究使用薔薇紅螢光染料(Rhodamine B)，以定量加藥幫浦(順益， Model NE4) 持續施放固定流量(1-2 L/min) 及固定濃度(1g/L)之染料，亦即以點源之方式排入港域。 下游之染料濃度則經採樣器取得表面海水並以螢光染料濃度計(Turner Filter Fluorometer, Model 450)分析而得。 經施放 40~60 分鐘後，濃度幾近達到一穩定狀態後，在岸邊不同距離採樣量測濃度，並將濃度及距源頭距離繪在雙對數紙上以求其延散係數。

3.4 潮汐遲角觀測

為推估潮汐在港池內之變化及其受風吹流之影響程度，本研究在港口北端進口處之西二號化學品碼頭邊及港內南端之台電 101 號碼頭處，各裝置一部潮波儀，利用時間序列分析其水位變化及相對應之潮汐遲角。

肆、理論依據及資料分析

4.1 理論依據

（一）、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,β,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

$$V_x = V \cos\beta$$

$$V_y = V \sin\beta$$

（二）、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

$$\overline{X_i} = \frac{\sum_j X_{ij}}{N}$$

同樣的Y座標為

$$\overline{Y_i} = \frac{\sum_j Y_{ij}}{N}$$

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

$$\sigma_{x_i}^2 = \frac{\sum_j (X_{ij} - \overline{X_j})^2}{(N-1)} \quad \text{和} \quad \sigma_{y_i}^2 = \frac{\sum_j (Y_{ij} - \overline{Y_j})^2}{(N-1)}$$

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)

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

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。

(三)、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_o，Q為點源流量，C_o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 $D = A_1x^{4/3}$ (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。

(四)、潮汐遲角估算

因台中港航道狹長、水深僅約 13m，可以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_1, 為

$$t_1=L/(gh)^{0.5}$$

4-2 資料分析與討論

(一)、流速剖面

本研究第二次及第三次之五個流速剖面測站位置如圖一所示，作業方式由南端之測站一 (St.1)開始，依次至測站五(St.5)再漸次折回至測站一。 第二次量測(85/3/30)之流速剖面如圖一至圖十所示。第二次流速量測(85/3/30)採用 RCM-7 旋轉式流速儀，測站一上午之流速剖面(圖二)較不規則, 下午之流速剖面則有明顯之風驅流剖面, 表面水流之速度約為 0.30 m/sec, 並於水下約 7m 處產生迴流。測站三下午之流速剖面(圖 7)亦有明顯之風驅流剖面, 其表面水流速度約 0.25 m/sec, 迴流則發生於水下約 4m 處。其他三站之速度剖面因速度值較小, 且流速方向較不規則。 第三次流速剖面量測(85/3/30)改採 UCM-40 電磁式流速計，量測之結果如圖十一至圖十九所示。 一般而言, 因當日幾近無風, 所以並無風驅流之剖面產生。測站一因偏港池裡側，較接近台電火力電廠之取水口, 及受當日卸煤碼頭之船隻作業之影響, 流速分佈呈不規則鋸齒狀(圖十一至圖十三)。 測站一至測站五之上午(低潮)平均潮流速度依次約為:0.1m/sec, 0.15m/sec, 0.15m/sec, 0.22m/sec 及 0.17m/sec;下午之平均潮流流速則依次為 0.08m/sec, 0.12m/sec, 0.13m/sec, 0.20m/sec 及 0.17m/sec. 且由圖

中可見潮流速度雖以縱向為主,然橫向之速度值仍不可忽略。靠近底床1m處(儀器之最低量測點)之潮流速度仍約有5-20cm/sec之流速。

(二)、浮標追蹤觀測

第二次浮標觀測(3/30/96)之軌跡見圖廿至圖廿三,第三次浮標觀測之結果見圖廿四至圖廿五。 圖中之水平座標為沿岸之縱向(SSW),橫座標為離岸橫向(SEE)。 圖廿至圖廿三所示,浮標軌跡與風驅流方向一致,即由NNE偏向SSW,平均風驅流速度約為0.20m/sec。第三次浮標追蹤(圖廿四至圖廿五),因當日天晴風微且非東北季風期,浮標之方向為SSW,另一浮標則為SEE方向,平均速度為0.10m/sec. 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 $K_X=0.517m^2/sec$, $K_y=0.152m^2/sec$;下午之量測結果則得 $K_X=1.69m^2/sec$, $K_y=0.134m^2/sec$ 。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%。

(三)、染料施放及濃度量測

將兩次染料濃度隨距離變化之關係表示如圖廿六及圖廿七。由圖上可知濃度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 $A_1=1.83*10^{-4}\ m^{2/3}/sec$, 第三次量測之 $A_1=1.14*10^{-5}\ m^{2/3}/sec$ 。若取下游尺度X=1000m ,則二次港域流況擴散係數分別為為 $1.83m^2/sec$(第二次, 85/3/30)及 $0.114m^2/sec$(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。

(四)、潮汐遲角估算

由第二次潮波儀之資料(圖廿八),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。

（五）溫度剖面

UCM-40流速儀上同時可觀測得溫度之剖面(第三次量測，85/6/8)，如圖三十至圖三十四所示。 圖上較高溫度之曲線為下午之量測結果，較低之曲線為早上之測量結果。 當日港池內之平均水溫度約為28℃，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℃-28.4℃)，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℃(上午)至1.2℃(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。

（六）鹽度剖面

UCM-40流速儀上測得之鹽度剖面（85/6/8）如圖三十五至三十九所示。台中港池內之平均鹽度約為3320ppm，除測站一外，其他測站之鹽度均有隨水深增加之趨勢。因港池內有排水溝渠排入淡水（靠近測站二及測站四），故測站二、三、四靠水表面之鹽度較低。測站五因靠近主航道口，故其鹽度則較高。

伍、結論及建議

（一）、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。

（二）、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=0.517m^2/sec ，K_y=0.152m^2/sec ；下午之量測結果則得 K_X=1.69m^2/sec ，K_y=0.134m^2/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。

（三）、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 $A_1=1.83*10^{-4}$ m$^{2/3}$/sec ， 第三次量測之 $A_1=1.14*10^{-5}$ m$^{2/3}$/sec 。若取下游尺度 X=1000m ，則二次港域流況擴散係數分別為為 1.83m^2/sec(第二次， 85/3/30)及 0.114m^2/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。

（四）、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℃-28.4℃），其他測站則有

明顯的二層温度現象,其上層之混合層（mixed layer)厚度約為4-6m,與下層（未混合層)之温度差約為0.6℃(上午)至1.2℃(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。

（五）、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。

（六)、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。

（七）、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。

陸、參考文獻

(一)、G. T. Csanady(1963),"Turbulent Diffusion in Lake Huron "

(二)、K. F. Bowden(1964),"Horizontal Mixing in the Sea due to a Shearing Current"

(三)、Fisher,List,Koh,Imberger,Brooks(1979), "Mixing in Inland and Coastal Waters "

(四)、Shin-Huang Chieh(1985),"Two-dimensional Model of Thermal Discharges "

(五)、Ioannis K. Tsanis(1989),"Simulation of Wind_Induced Water Currents",Journal of Hydraulic Engineering. Vol. , No.8, p1113~1134

(六)、張仁德(1994), "港灣水質污染擴散數值模擬",中國土木水利工程學刊，第六卷，第三期，pp. 321-327.

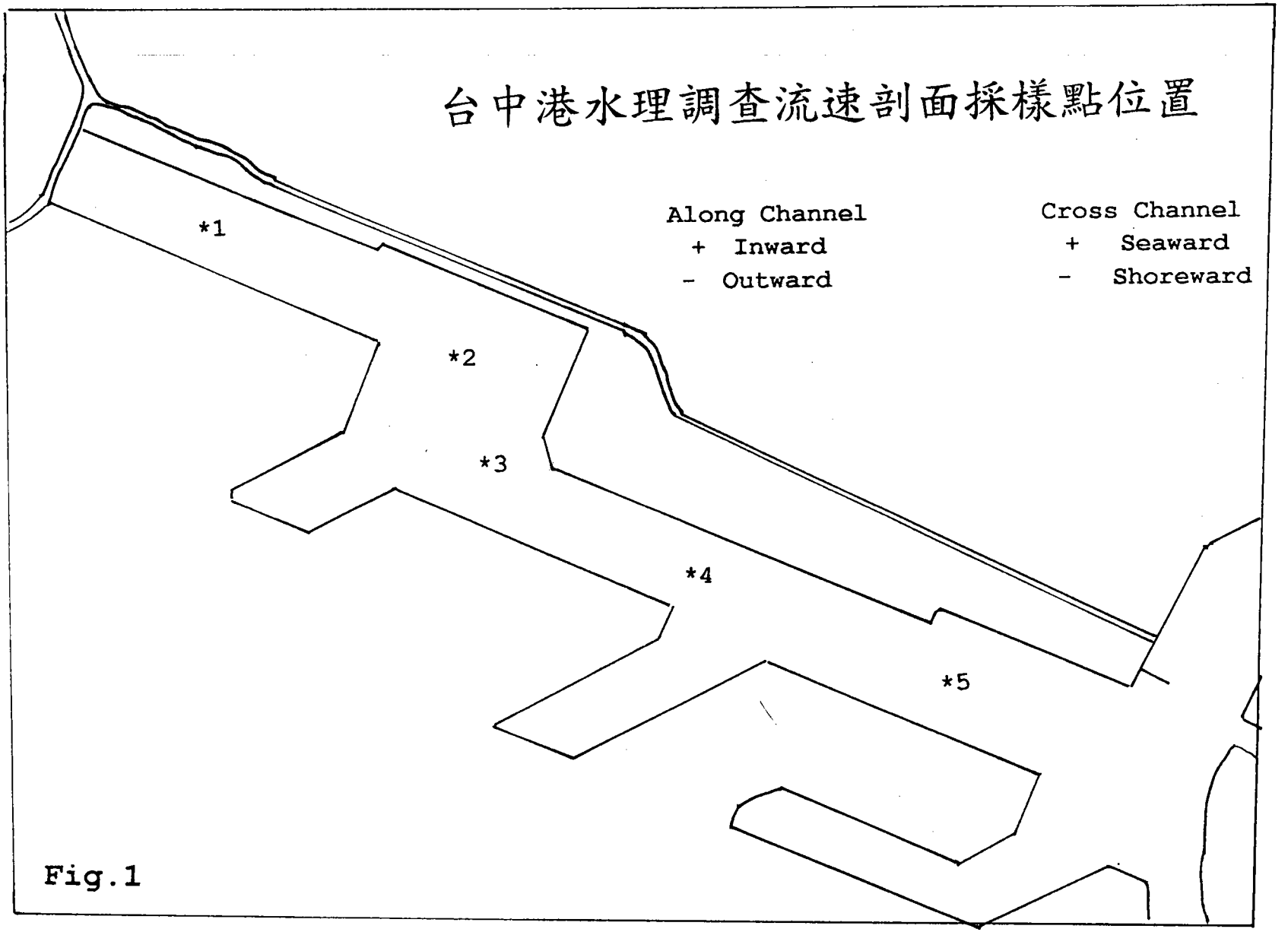
台中港水理調查流速剖面採樣點位置
Along Channel
+ Inward
- Outward
Cross Channel
+ Seaward
- Shoreward
*1
*2
*3
*4
*5

Fig.1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.1
96-03-30 Morning

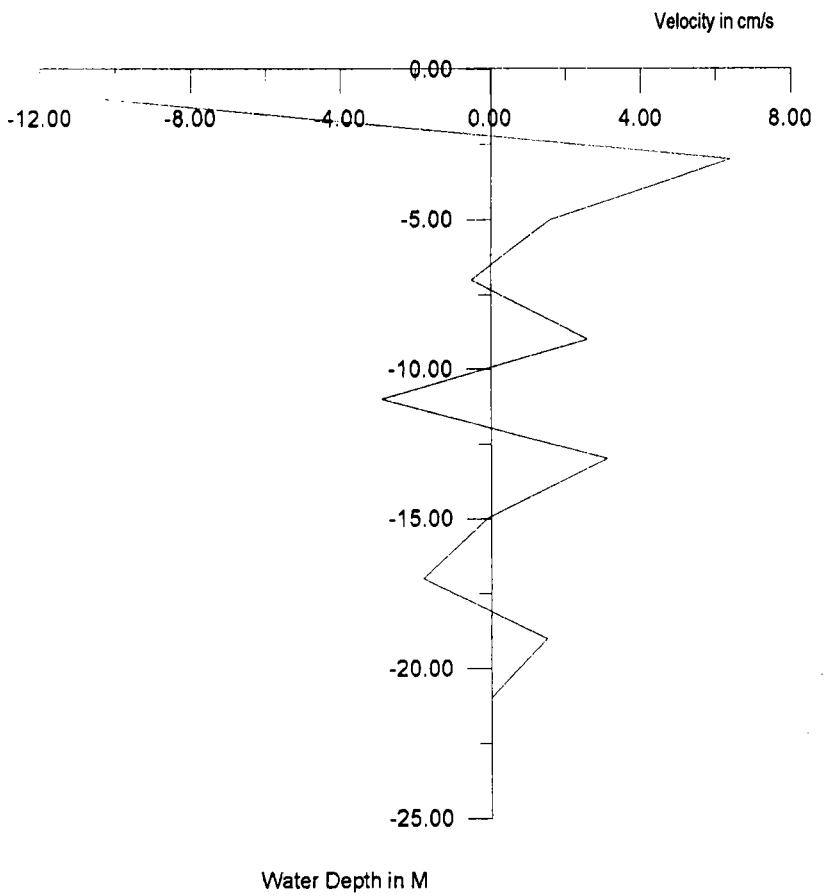

Fig.2-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.1
96-03-30 Morning

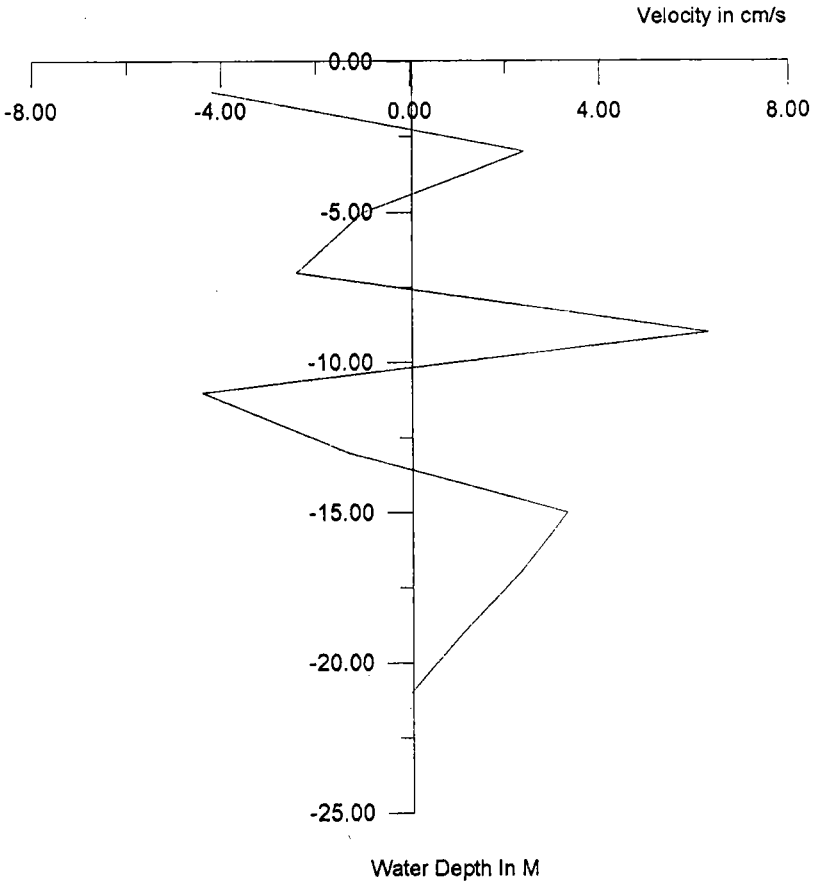

Fig.2-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.1
96-03-30 Afternoon

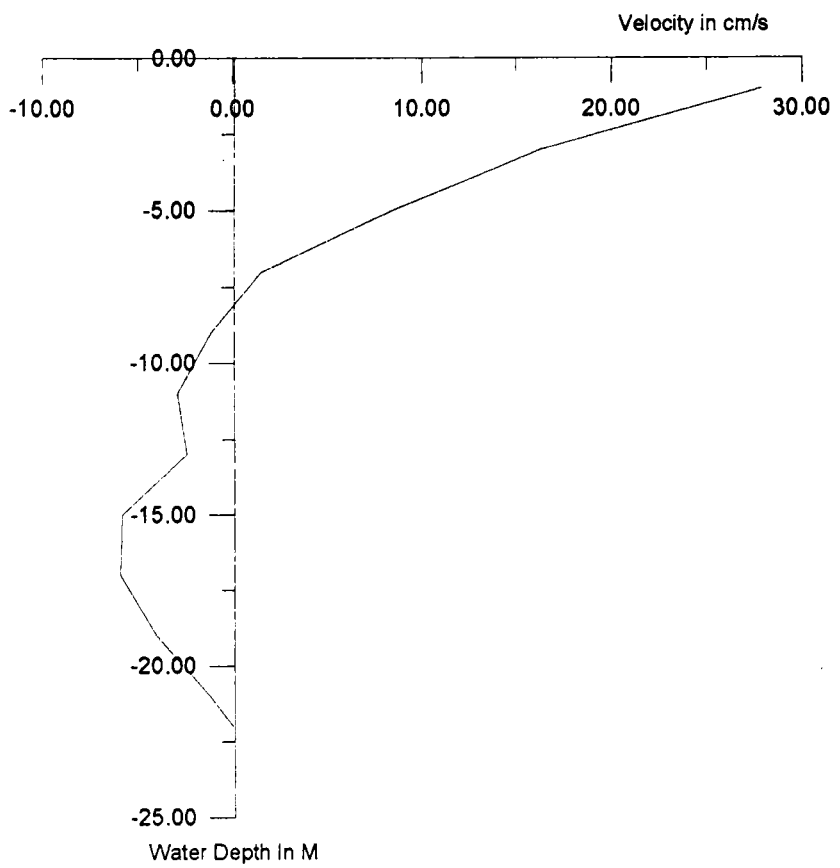

Fig.3-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.1
96-03-30 Afternoon

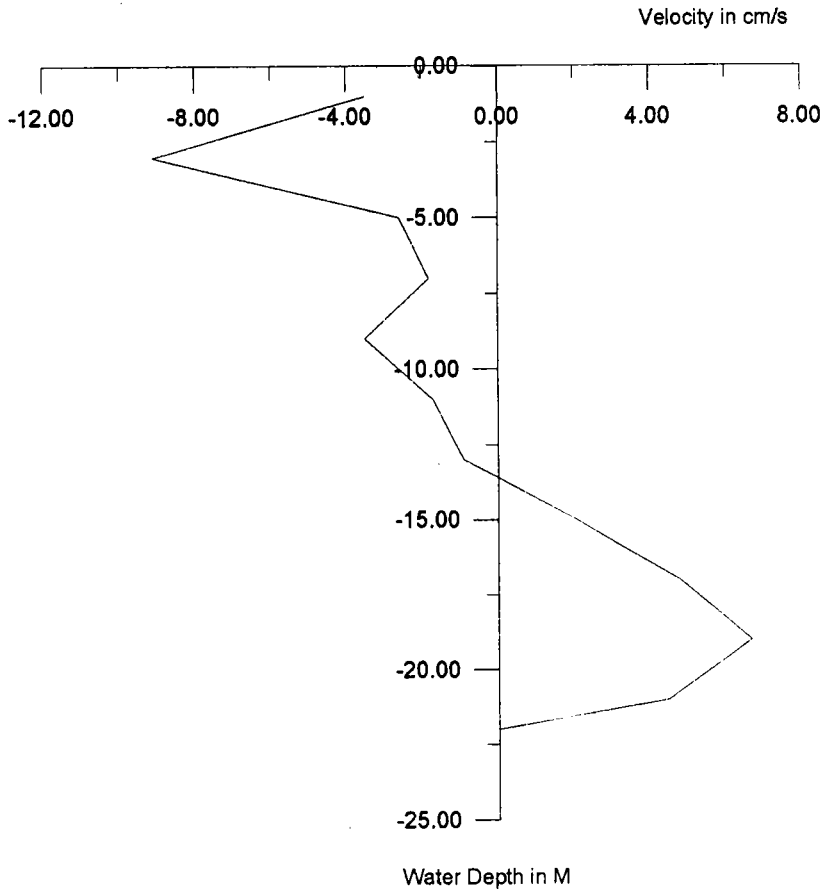

Fig.3-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.2
96-03-30 Morning

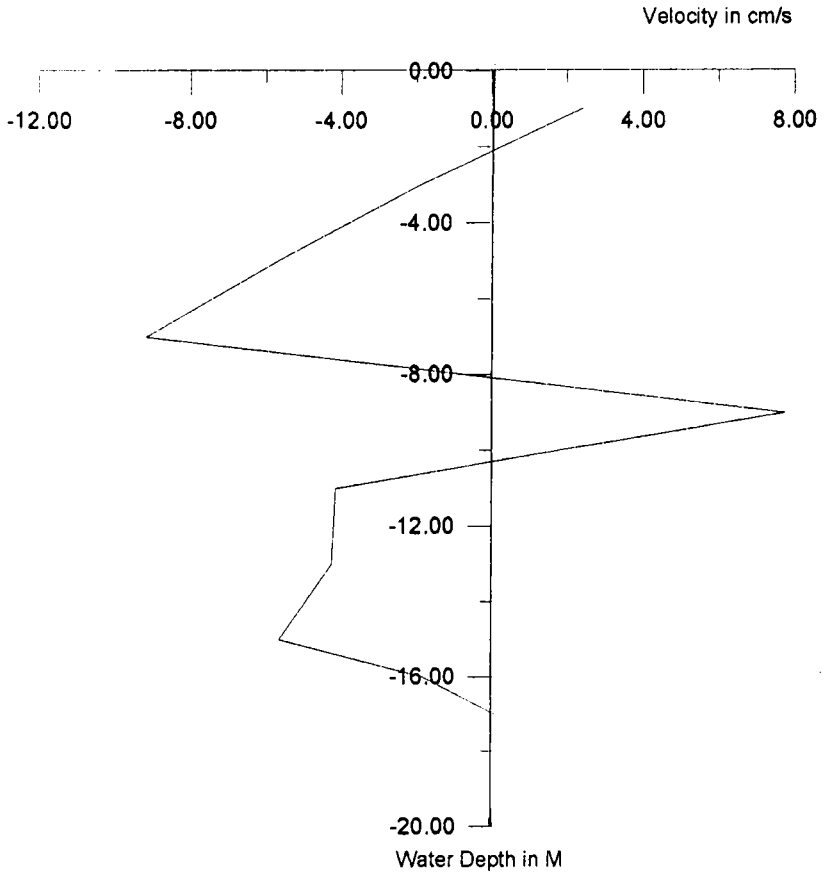

Fig.4-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.2
96-03-30 Morning

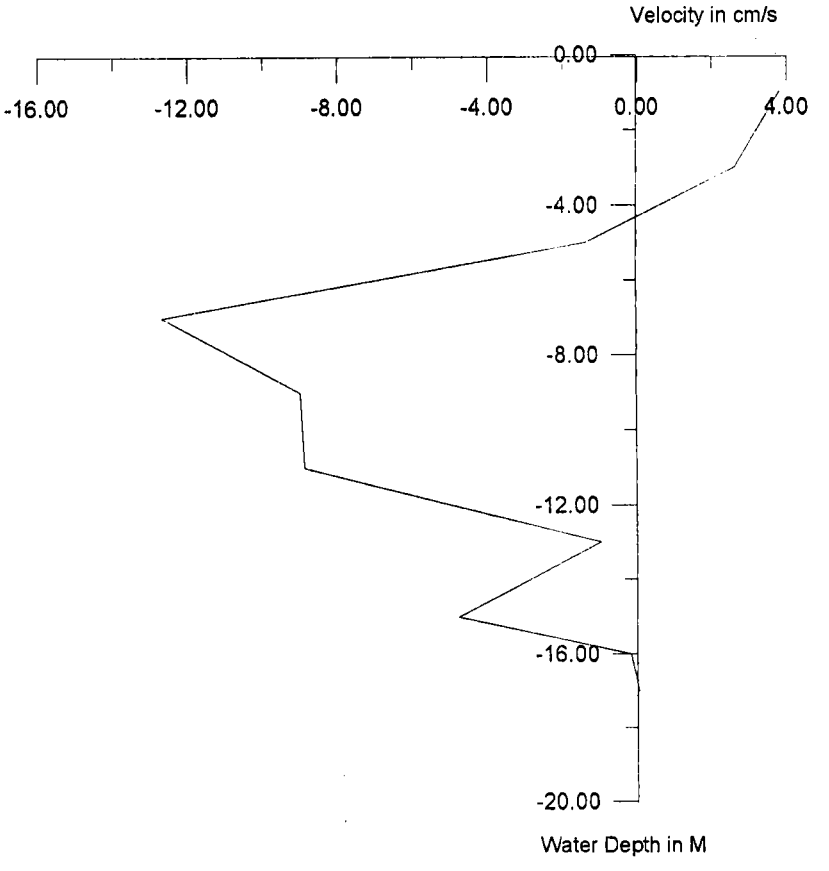

Fig.4-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.2
96-03-30 Afternoon

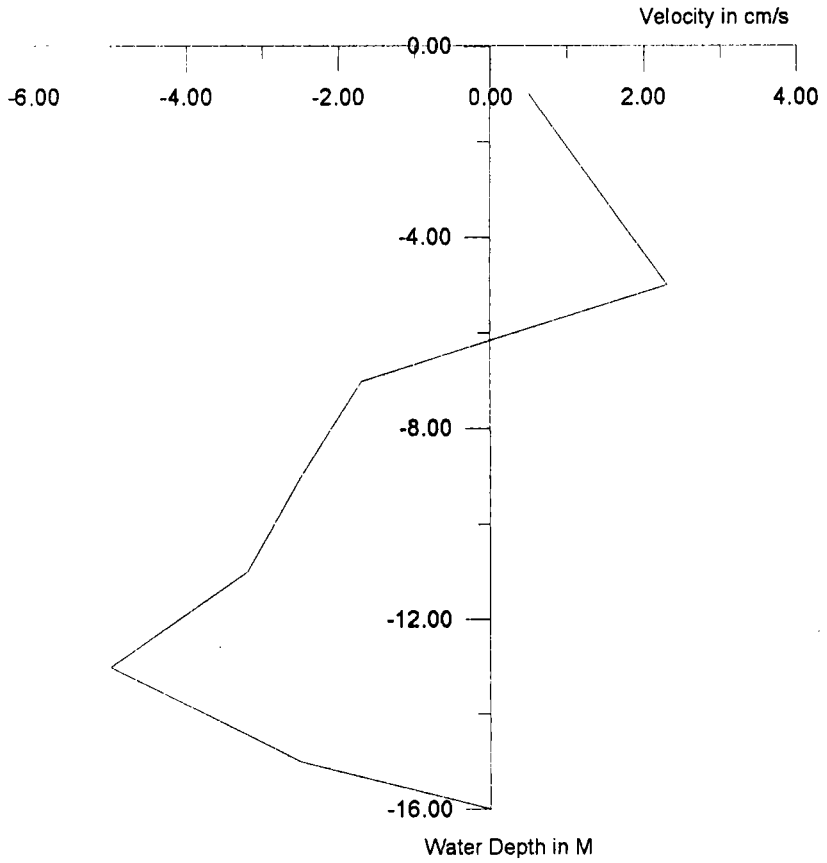

Fig.5-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.2
96-03-30 Afternoon

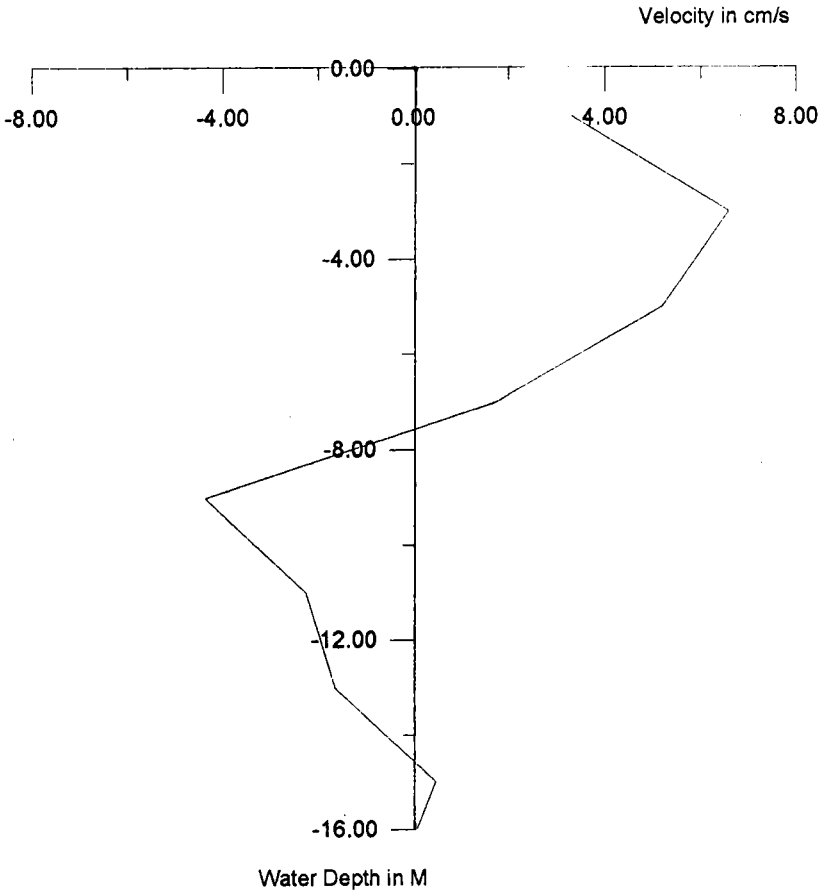

Fig.5-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.3
96-03-30 Morning

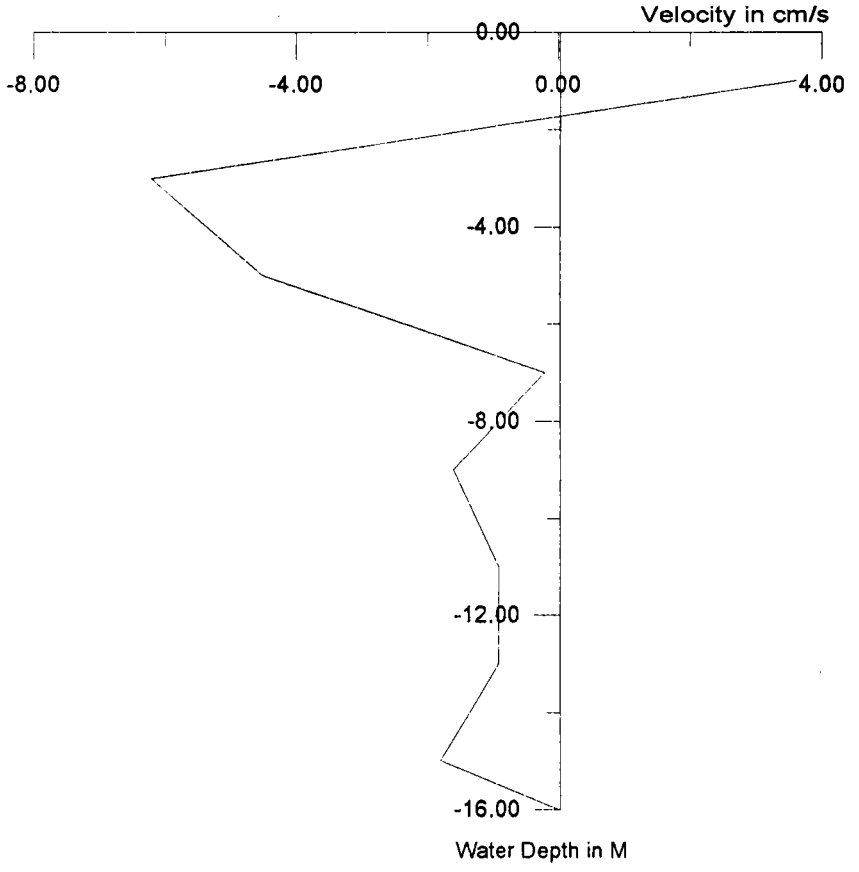

Fig.6-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.3
96-03-30 Morning

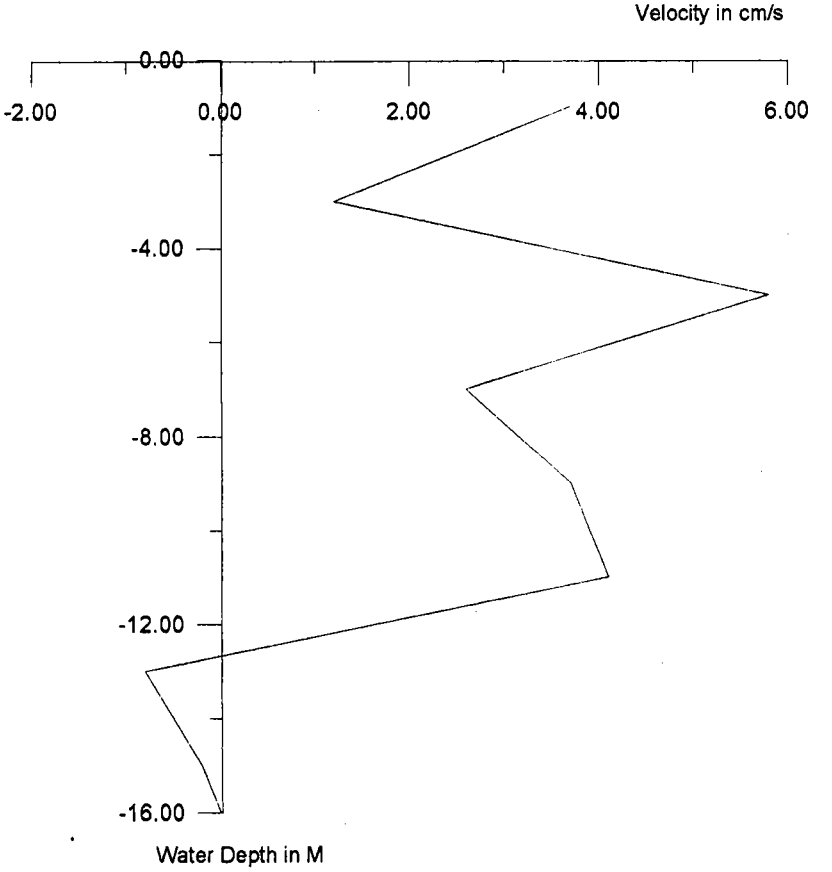

Fig.6-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.3
96-03-30 Afternoon

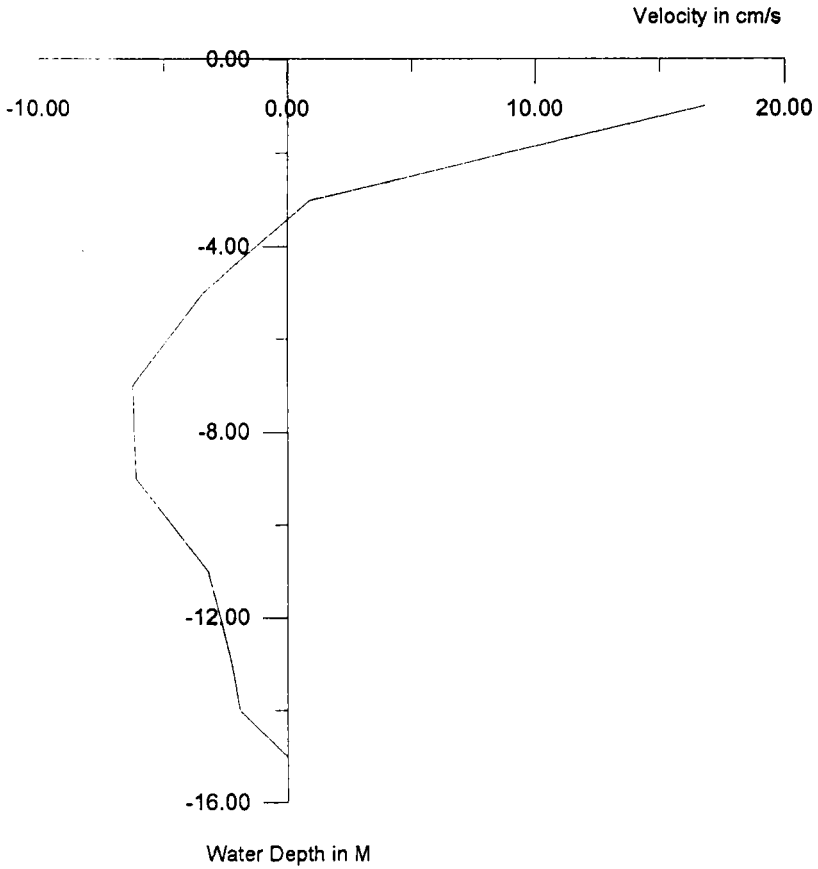

Fig.7-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.3
96-03-30 Afternoon

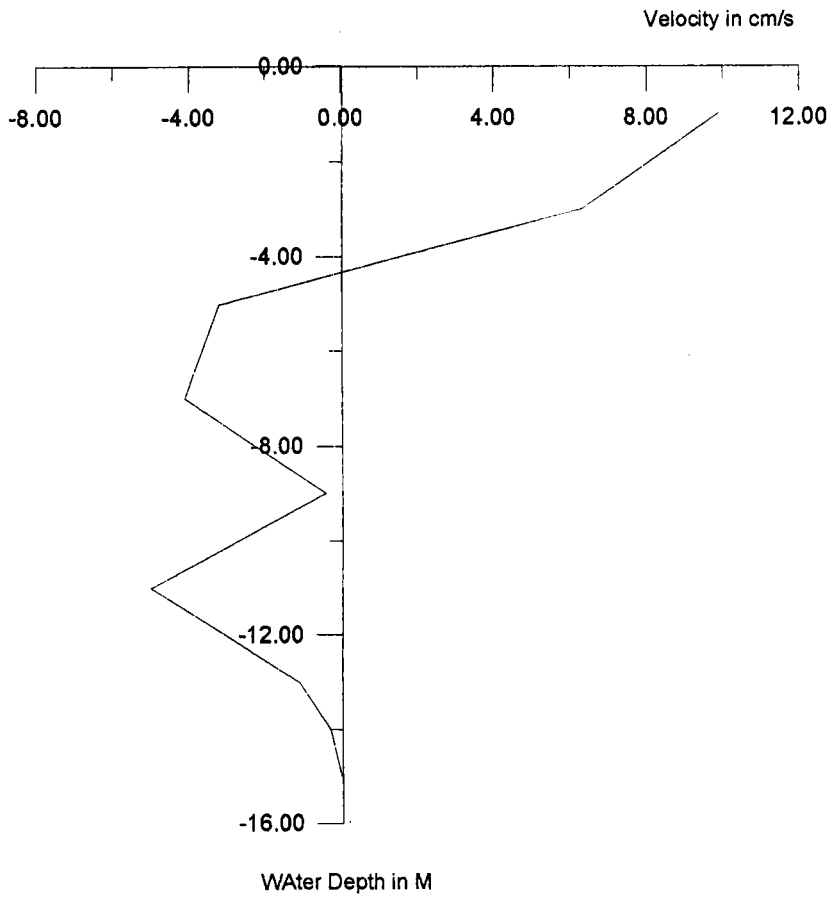

Fig.7-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.4
96-03-30 Morning

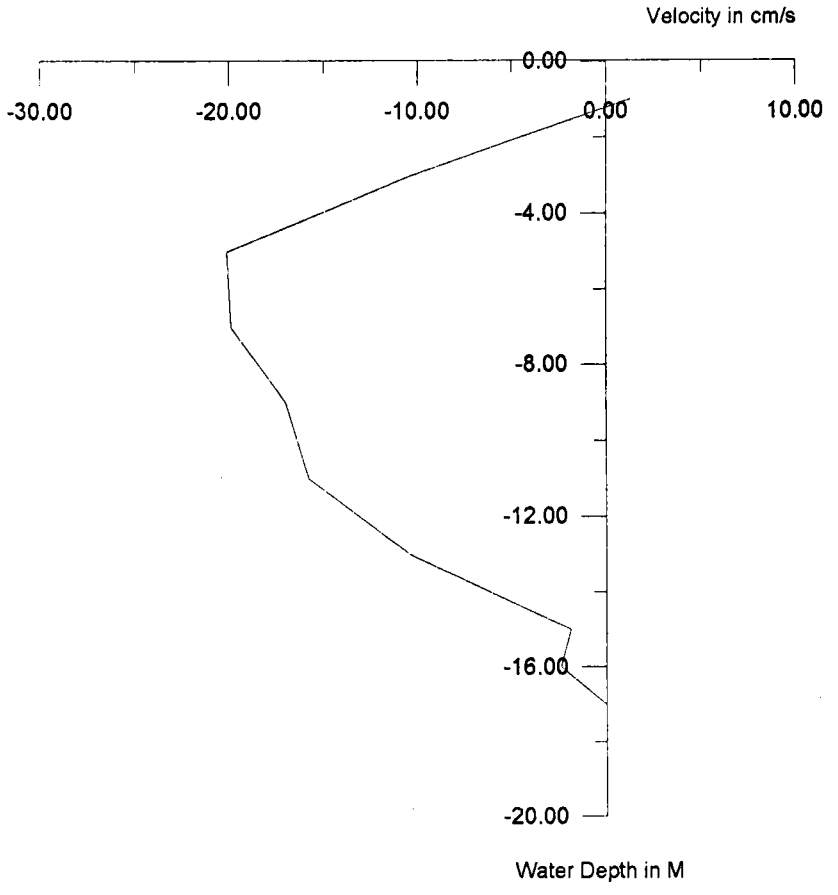

Fig.8-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.4
96-03-30 Morning

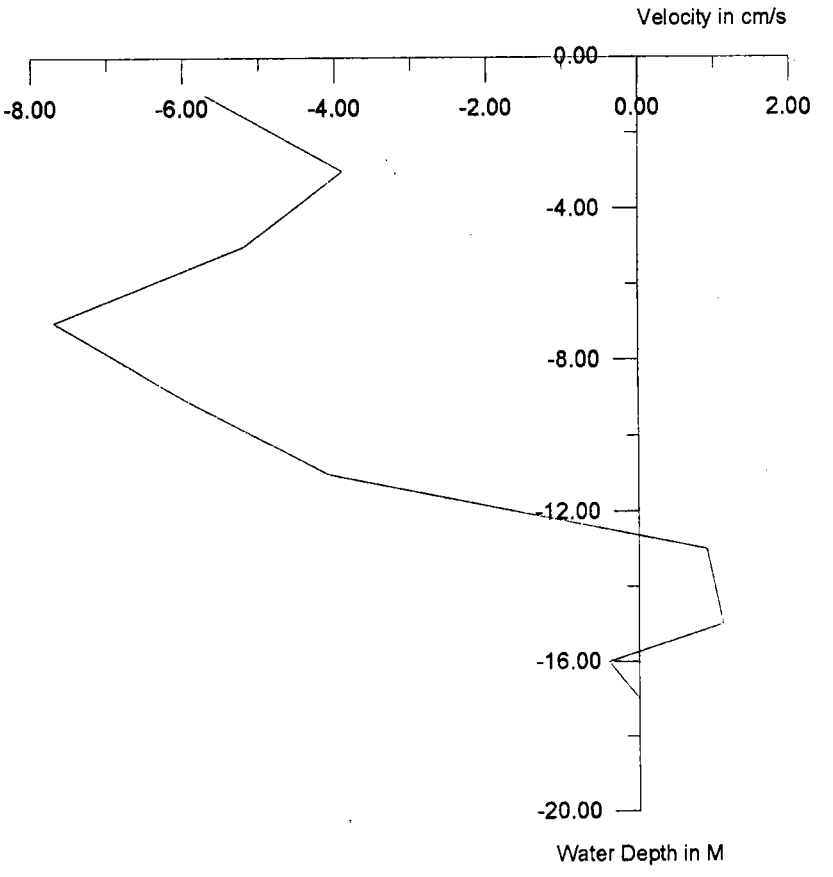

Fig.8-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.4
96-03-30 Afternoon

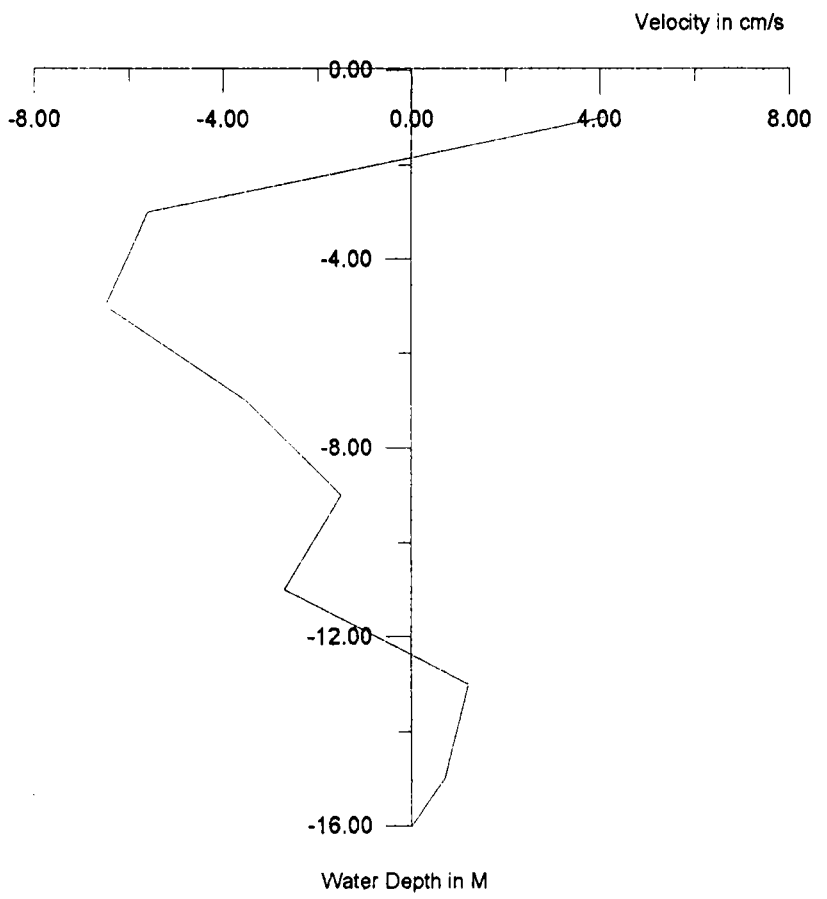

Fig.9-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.4
96-03-30 Afternoon

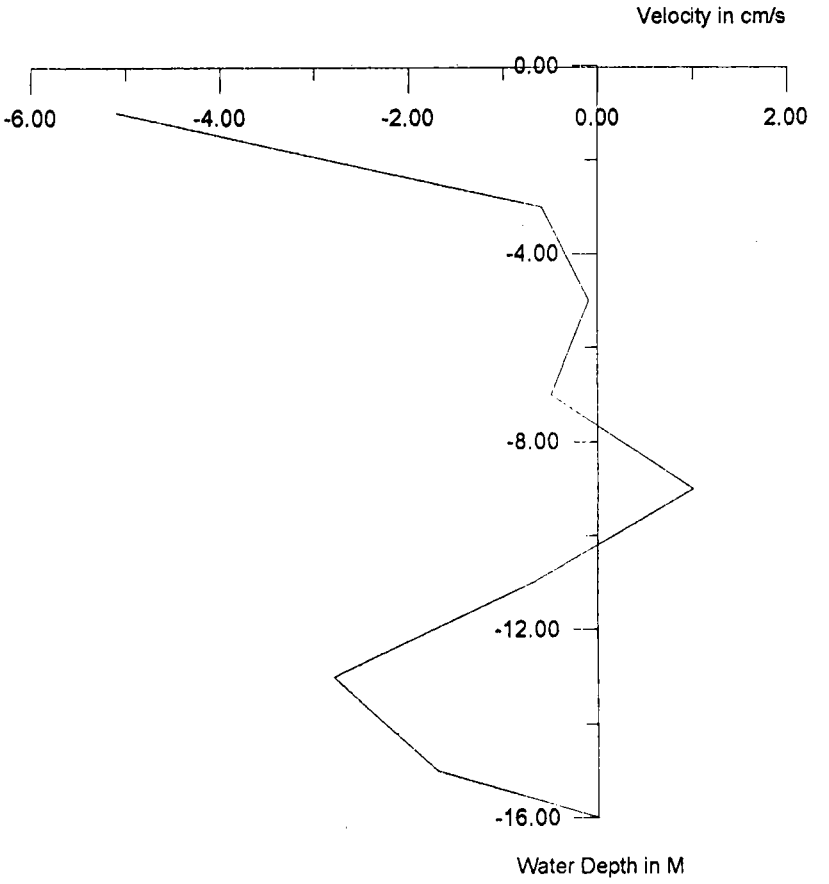

Fig.9-2

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.5
96-03-30 Noon

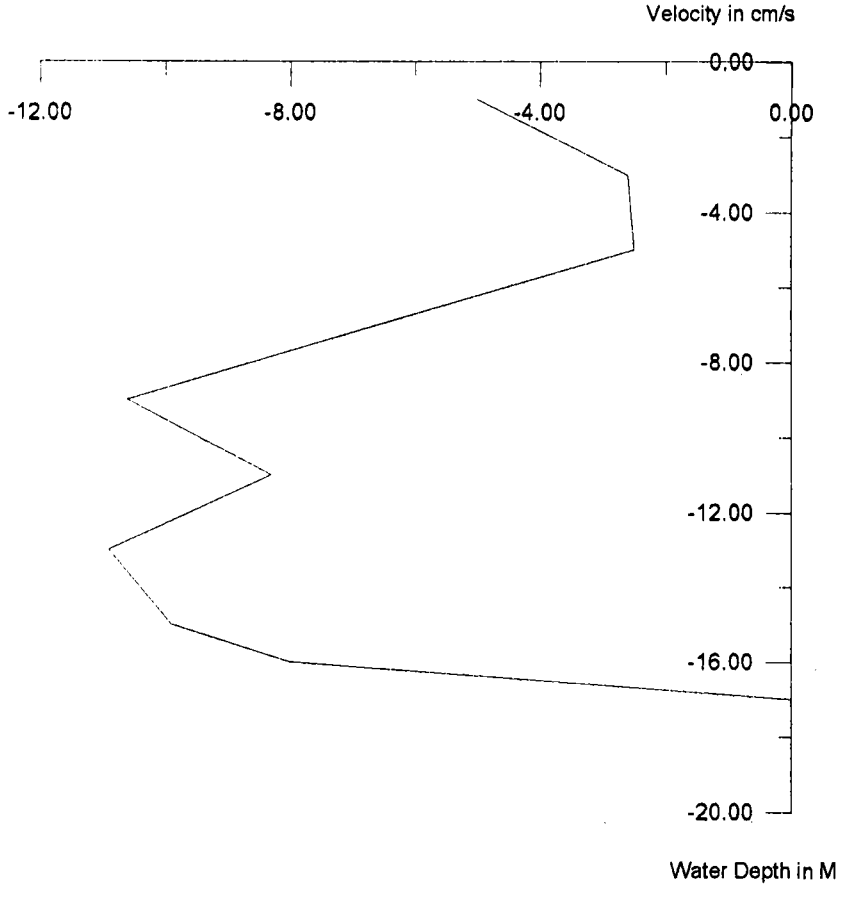

Fig.10-1

Velocity Profile Of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.5
96-03-30 Noon

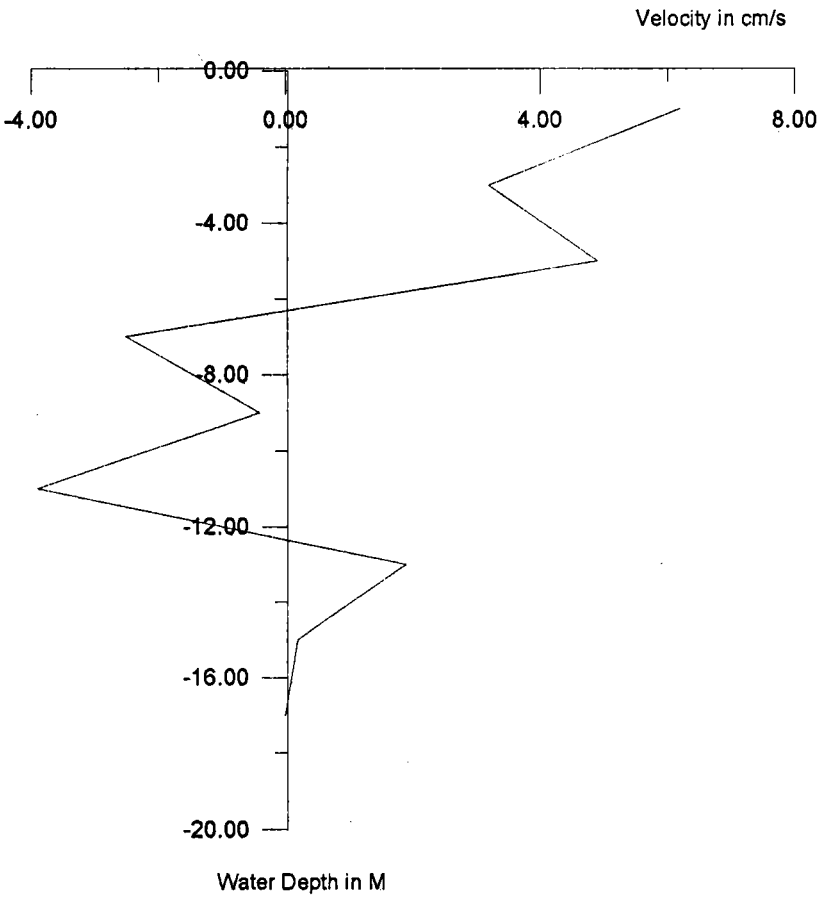

Fig.10-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.1
96-06-08 Morning

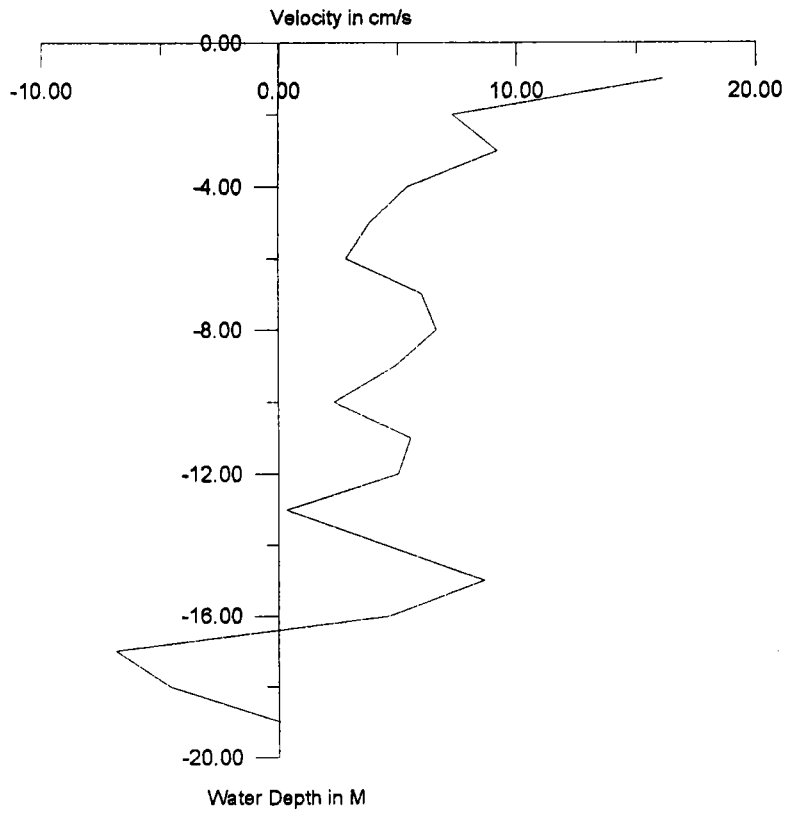

Fig. 11-1

Velocity Profile of Taichung Harbor (cross channel) ST.1
96-06-08 Morning

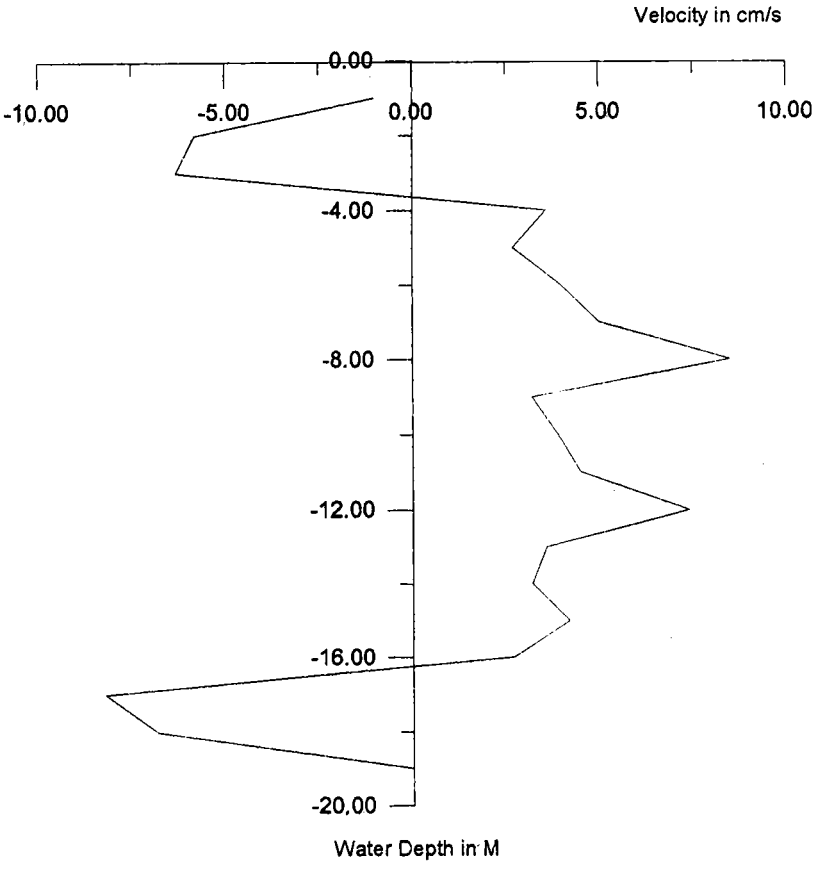

Fig.11-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.1
96-06-08 Afternoon

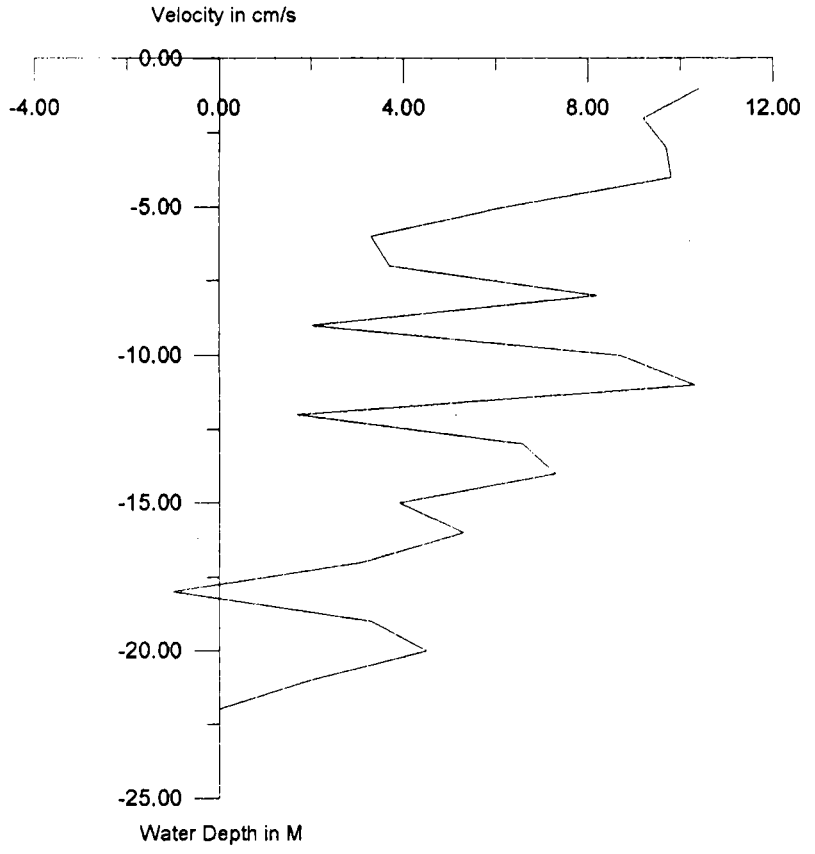

Fig.12-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.1
96-06-08 Afternoon

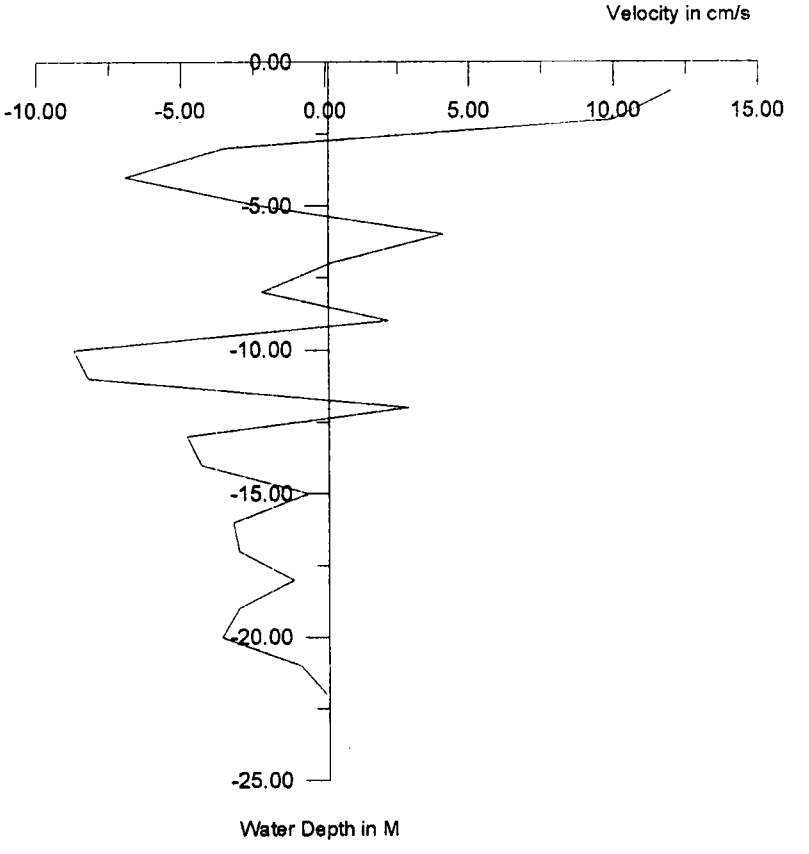

Fig.12-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.2
96-06-08 Morning

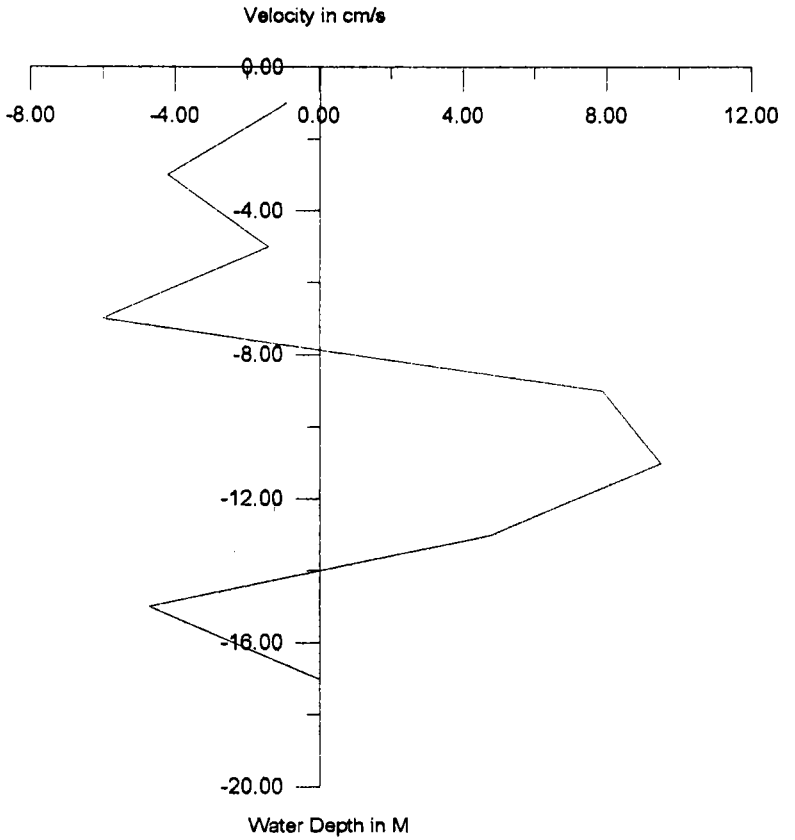

Fig.13-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.2
96-06-08 Morning

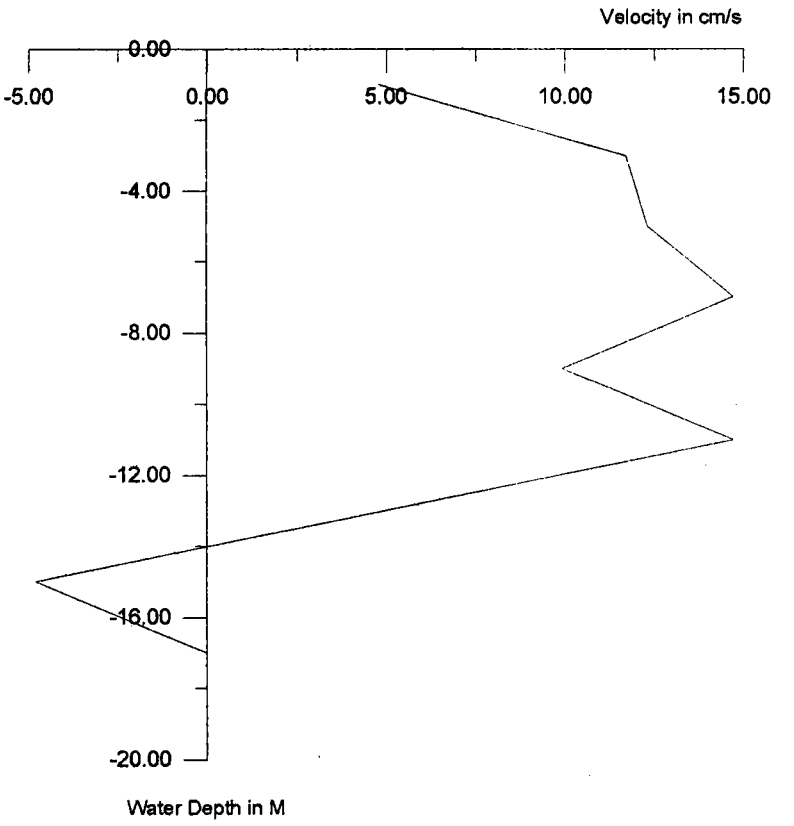

Fig.13-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST. 2
96-06-08 Afternoon

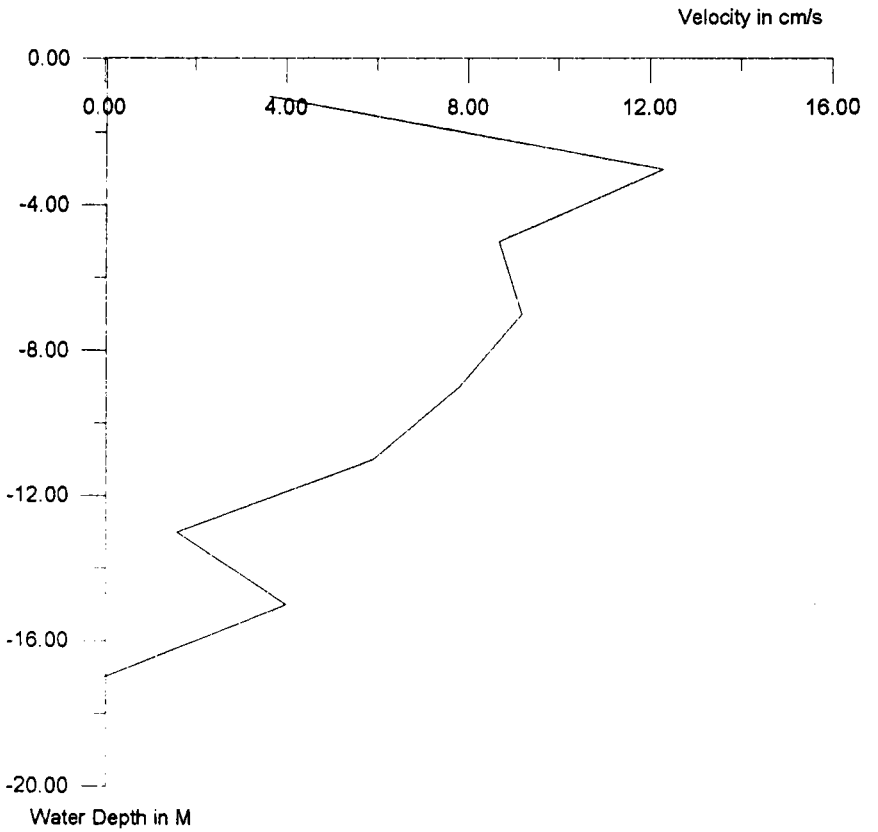

Fig.14-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.2
96-06-08 Afternoon

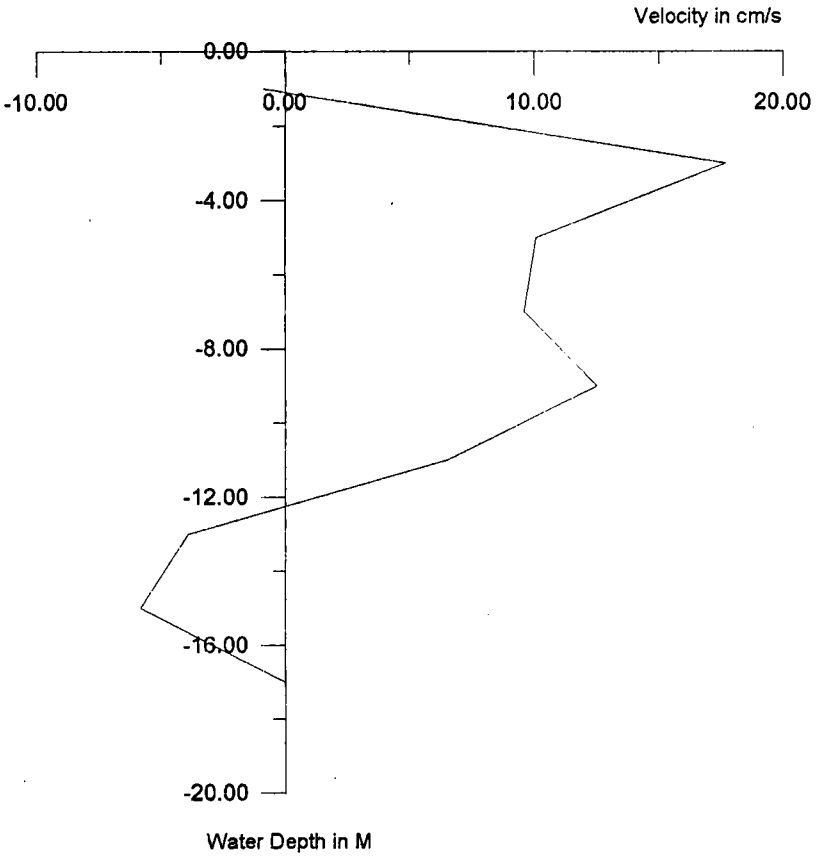

Fig.14-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.3
96-06-08 Morning

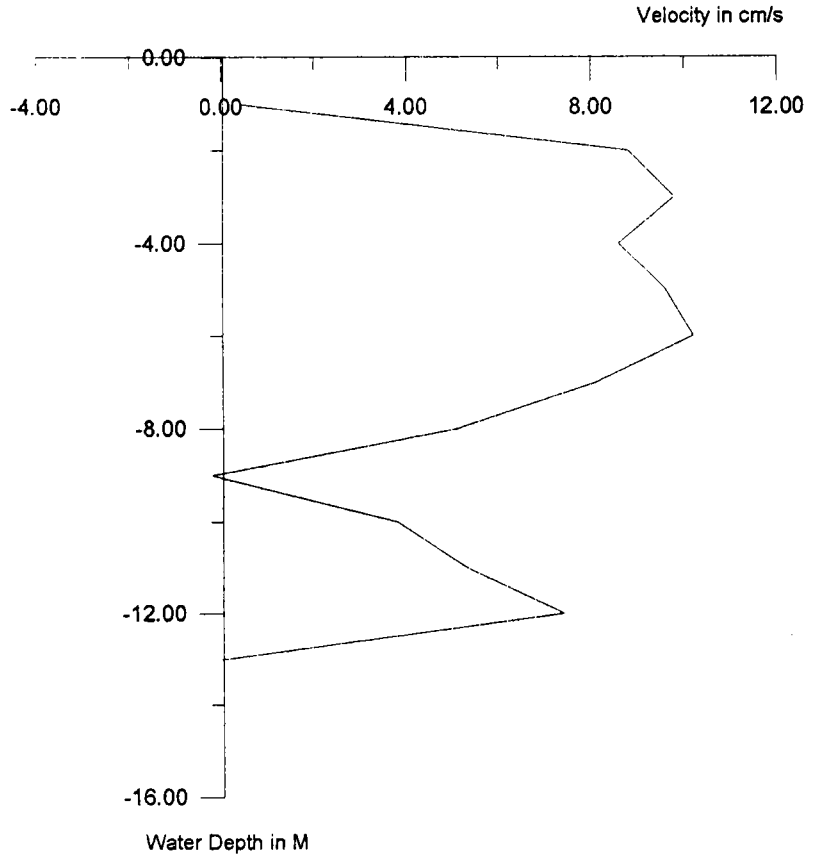

Fig.15-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.3
96-06-08 Morning

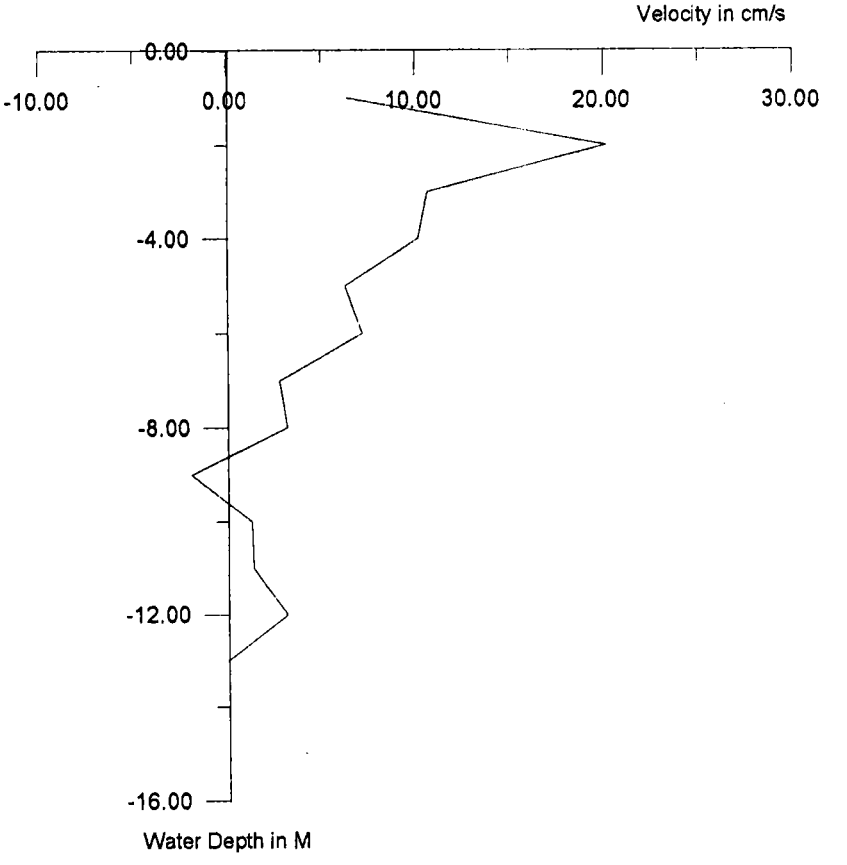

Fig.15-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.3
96-06-08 Afternoon

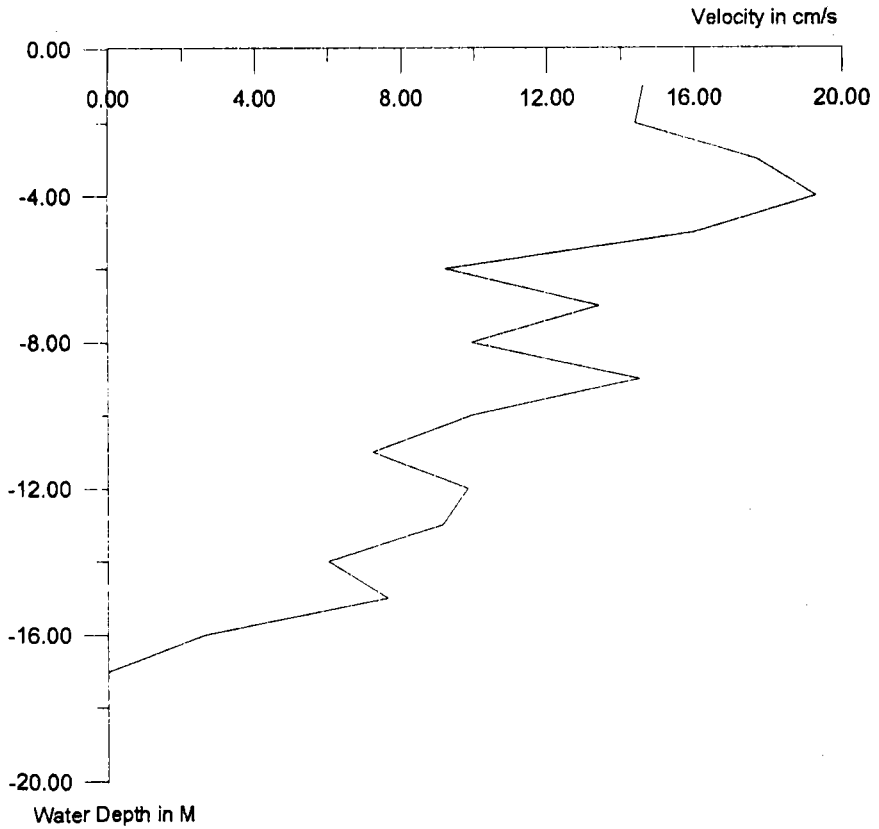

Fig.16-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.3
96-06-08 Afternoon

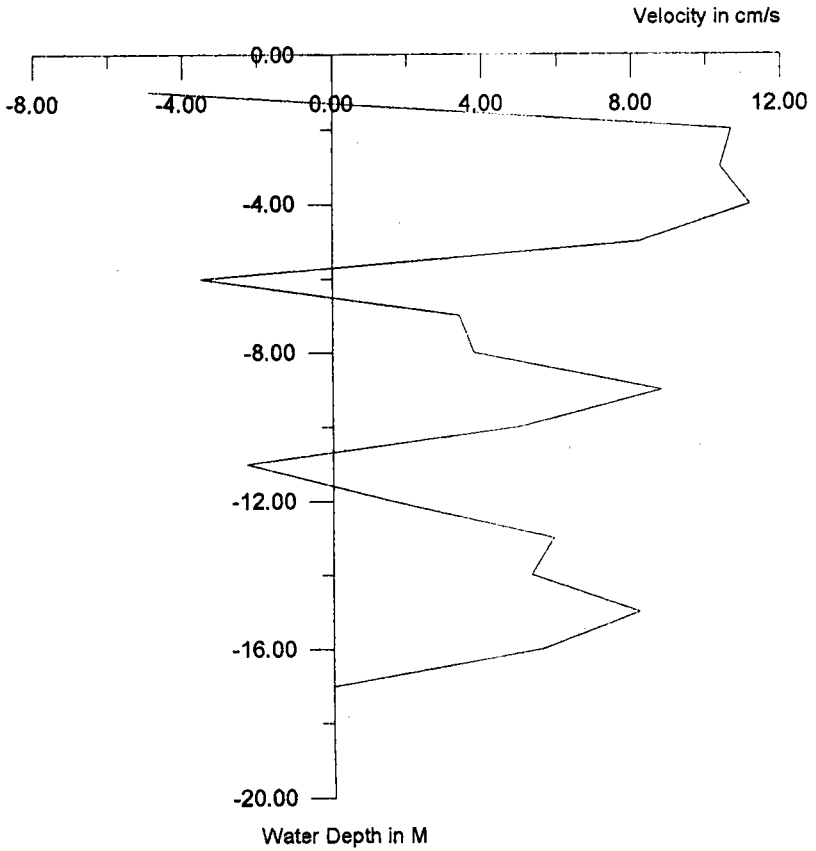

Fig.16-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.4
96-06-08 Morning

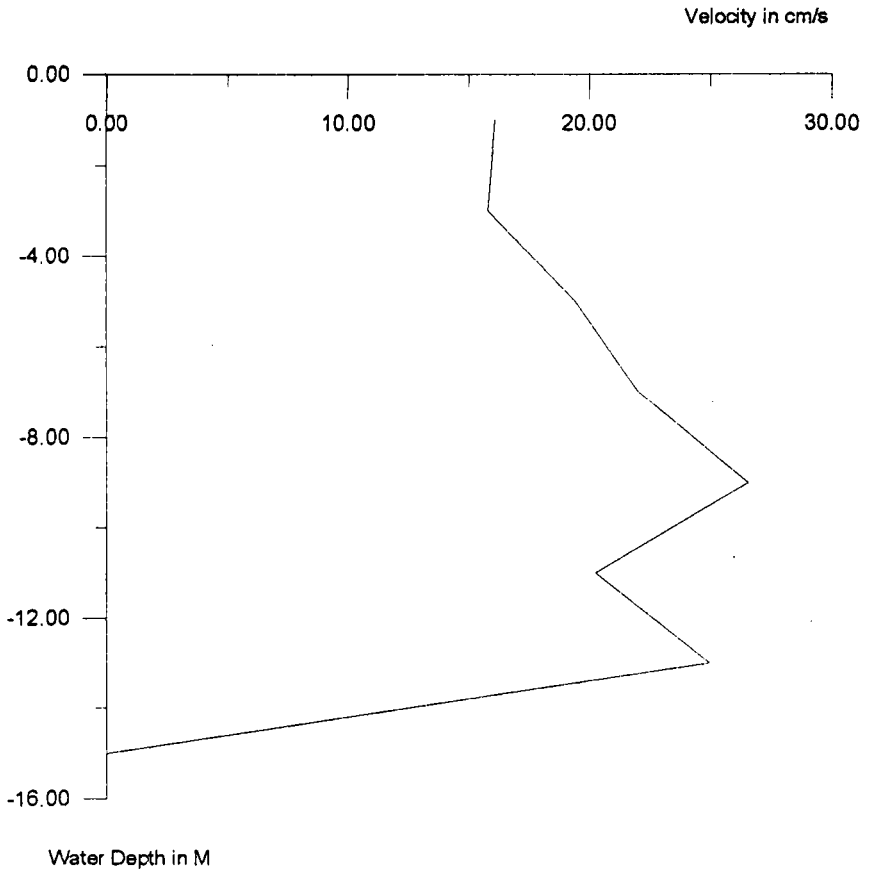

Fig.17-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.4
96-06-08 Morning

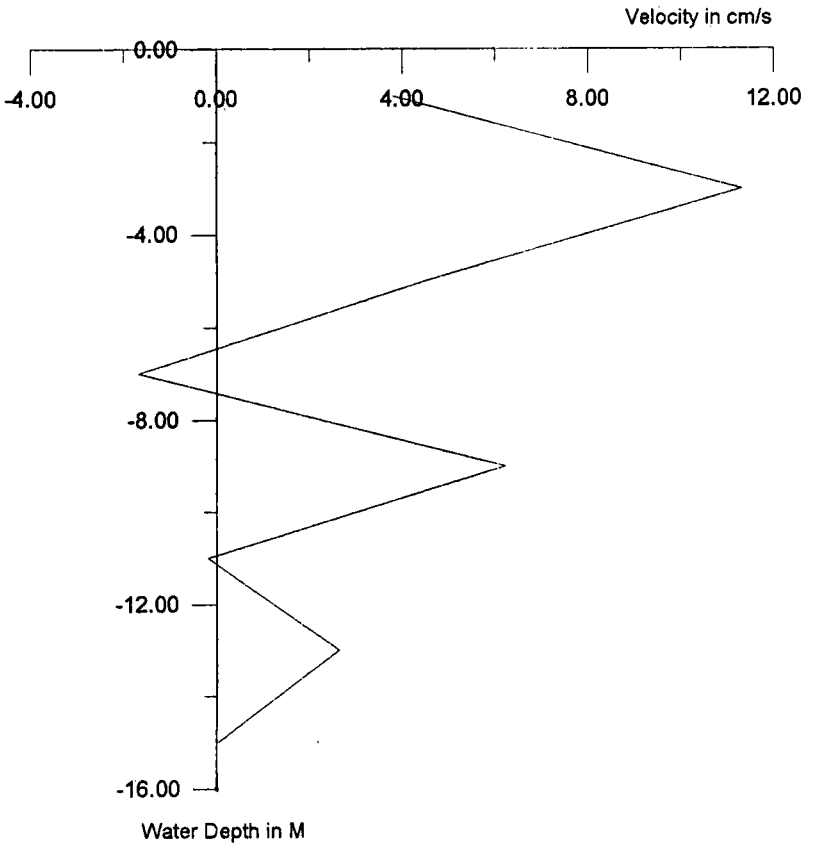

Fig.17-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.4
96-06-08 Afternoon

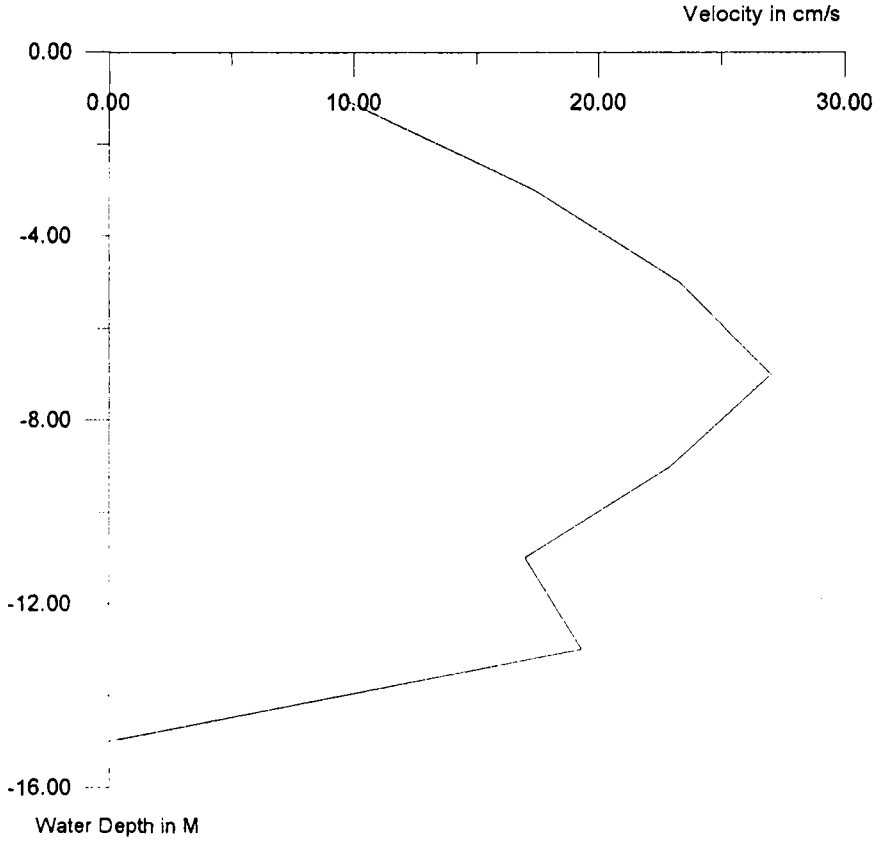

Fig.18-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.4
96-06-08 Afternoon

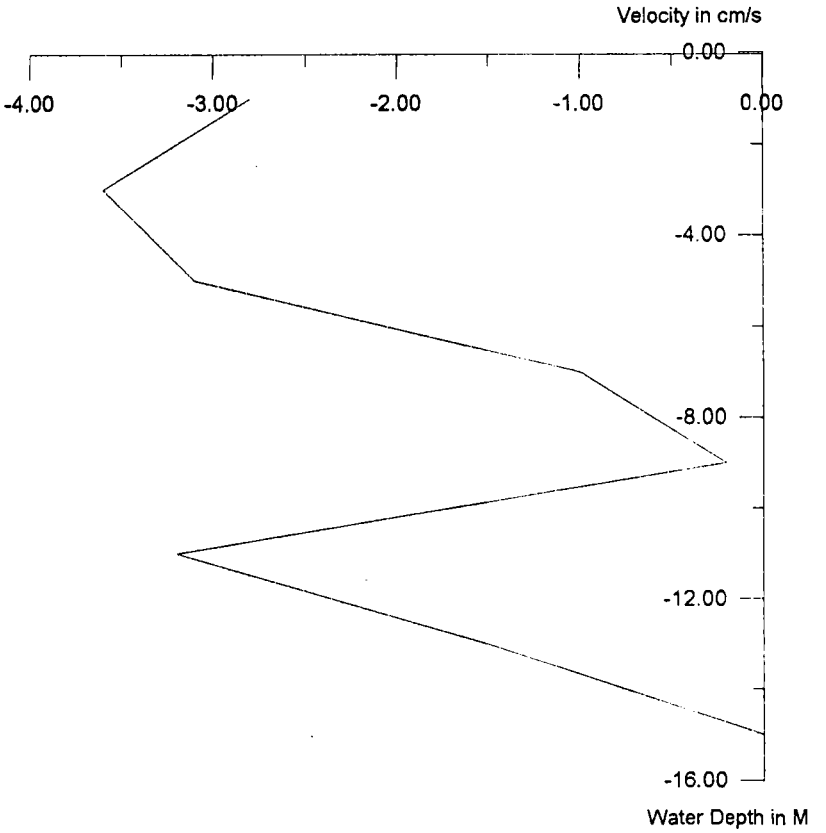

Fig.18-2

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (along channel) ST.5
96-06-08 Morning

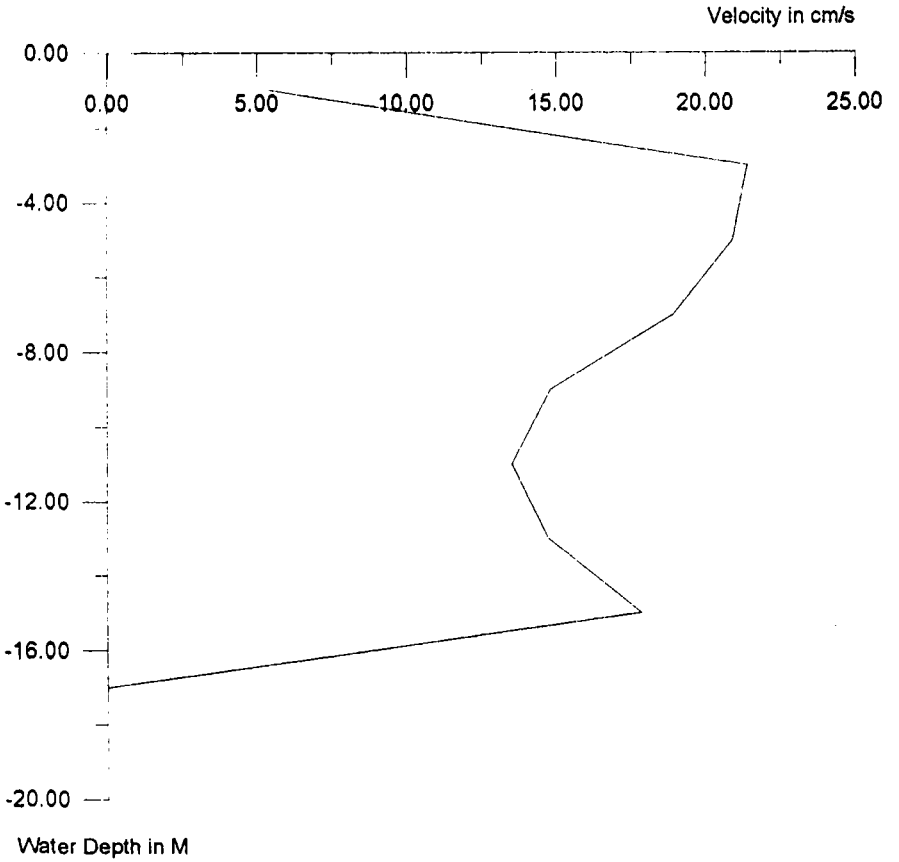

Fig.19-1

Velocity Profile of Taichung Harbor Basin (cross channel) ST.5
96-06-08 Noon

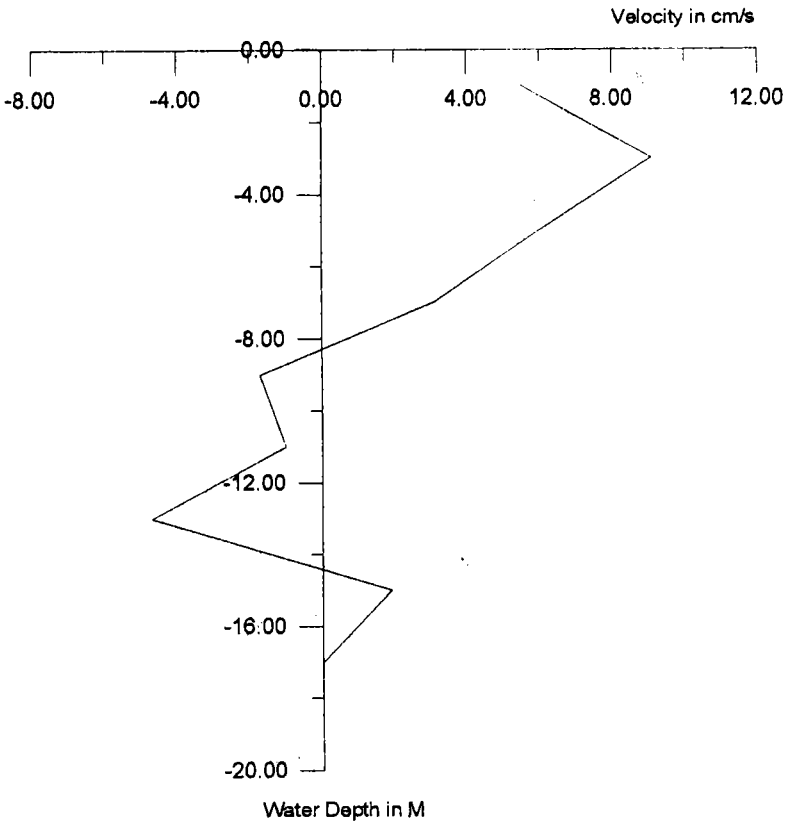

Fig.19-2

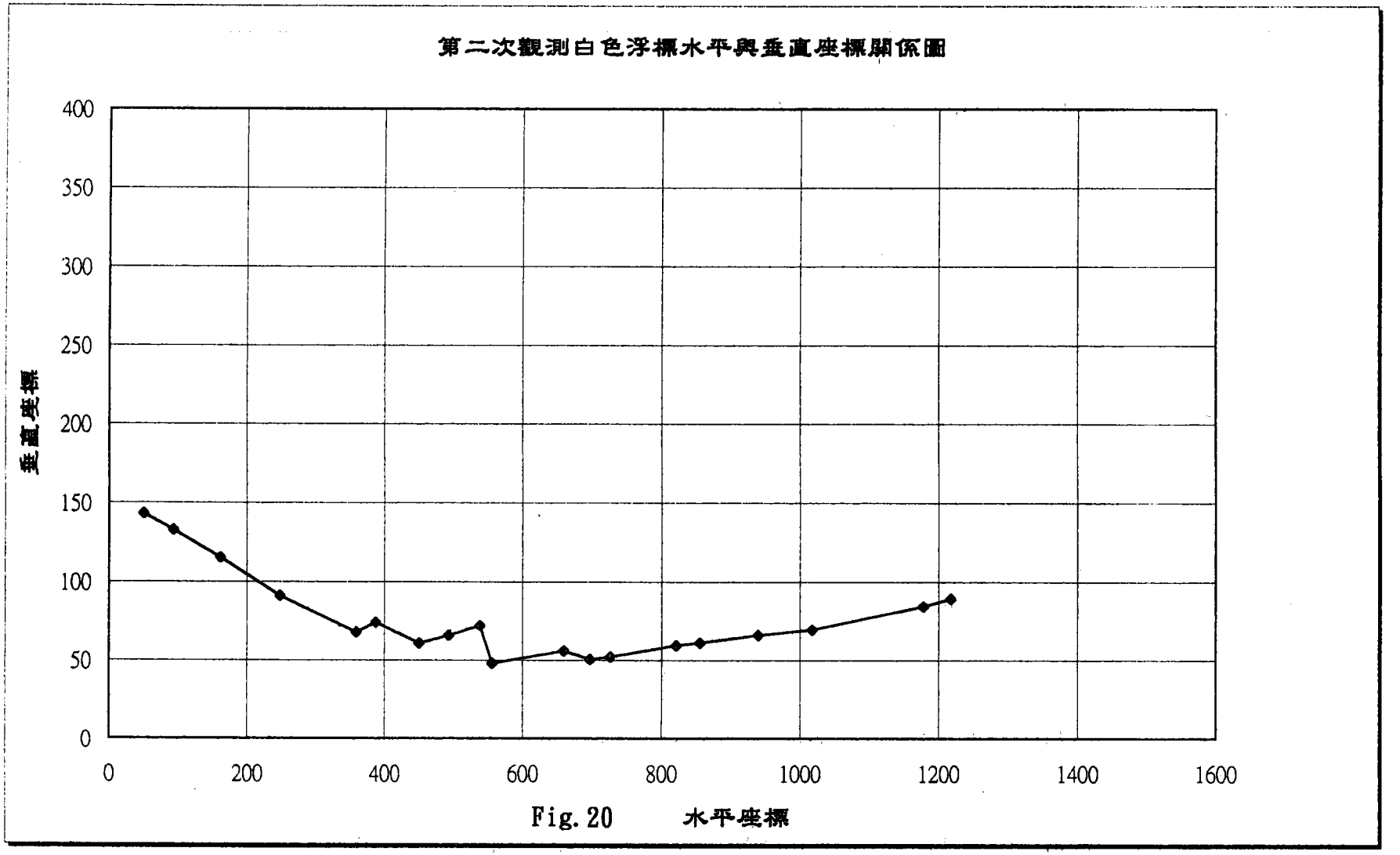
第二次觀測白色浮標水平與垂直座標關係圖
垂直座標
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
水平座標

Fig. 20

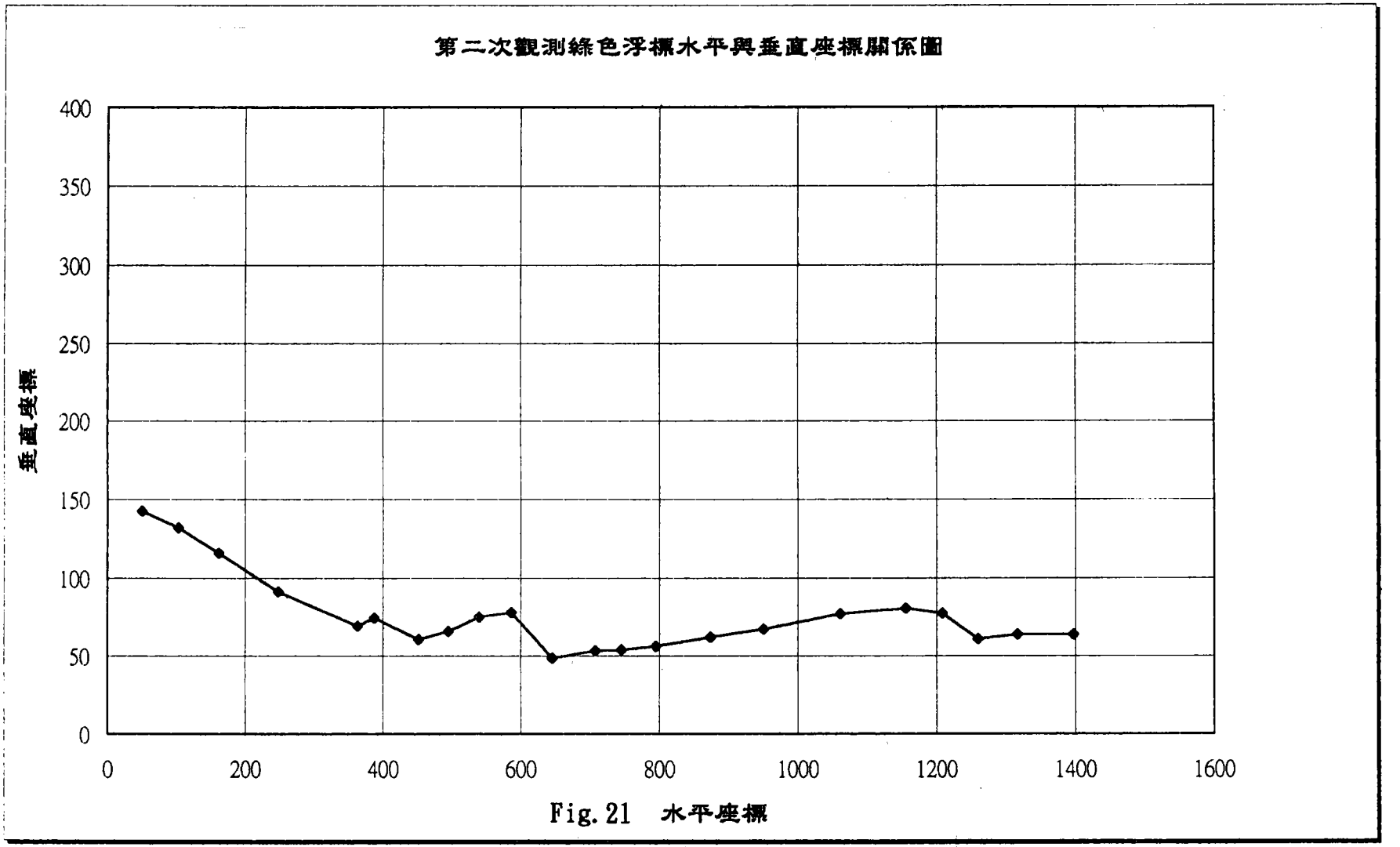
第二次觀測綠色浮標水平與垂直座標關係圖
垂直座標
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600

Fig. 21 水平座標

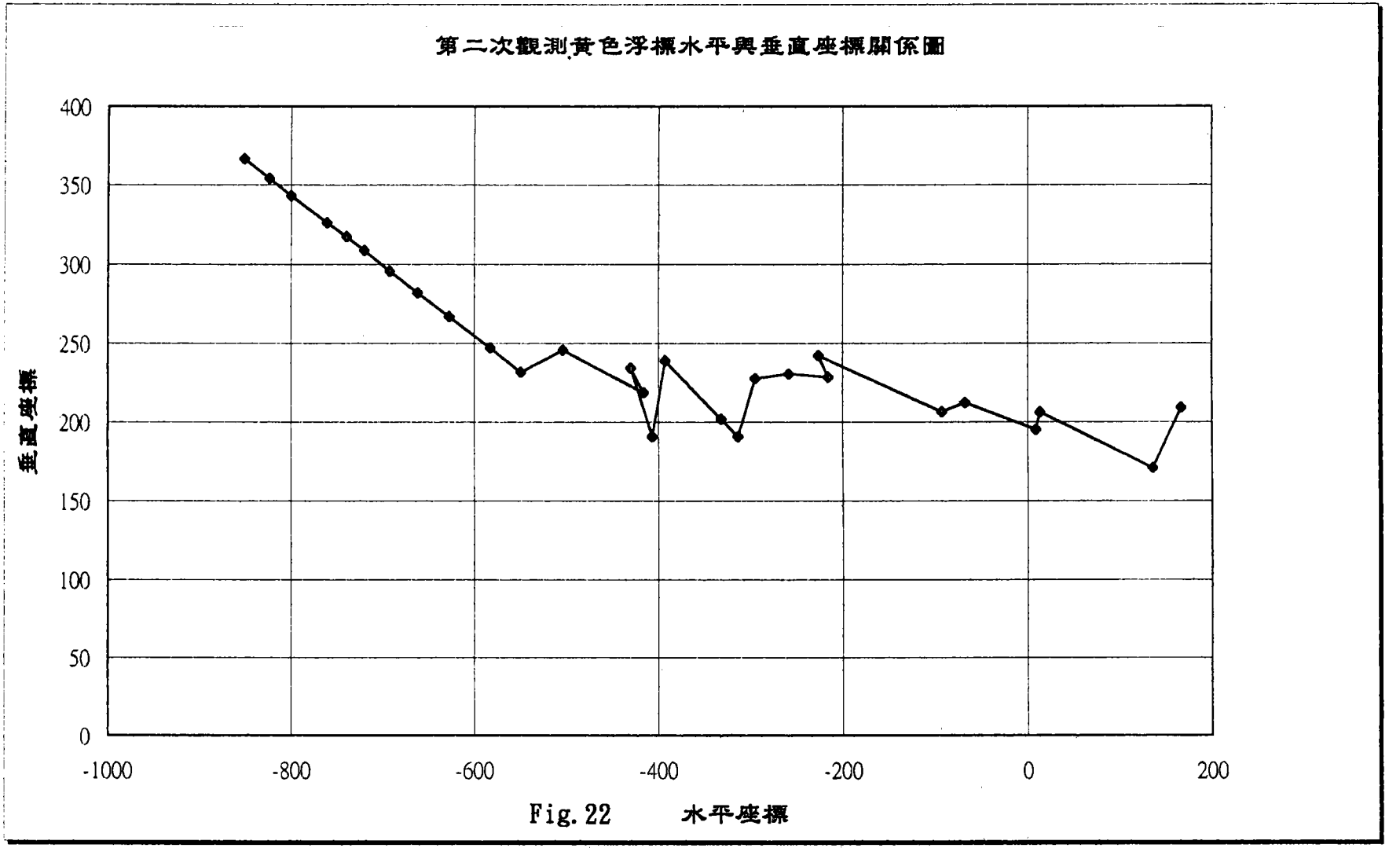
第二次觀測黃色浮標水平與垂直座標關係圖
垂直座標
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-1000
-800
-600
-400
-200
0
200
水平座標

Fig. 22

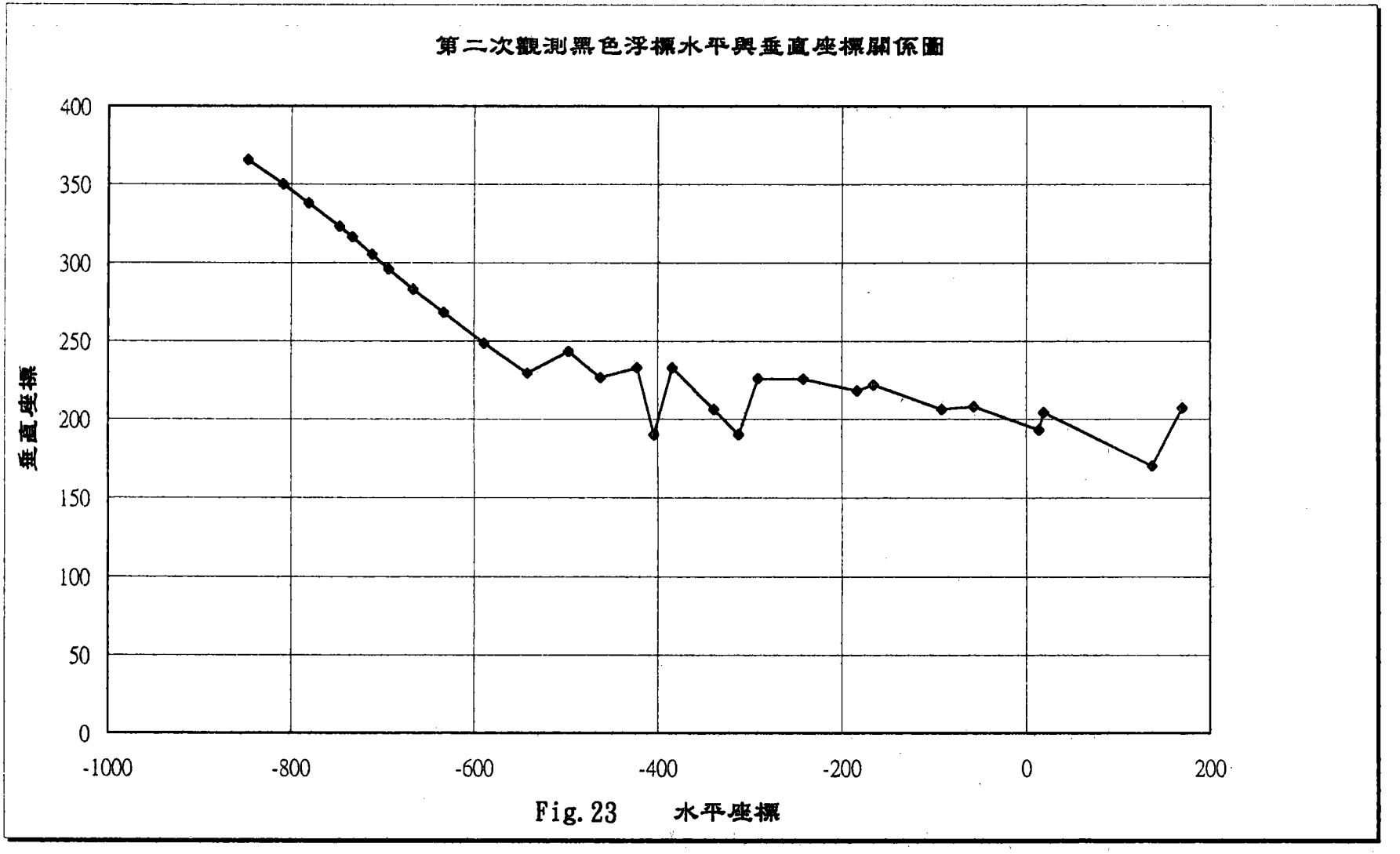
第二次觀測黑色浮標水平與垂直座標關係圖
垂直座標
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-1000
-800
-600
-400
-200
0
200
水平座標

Fig. 23

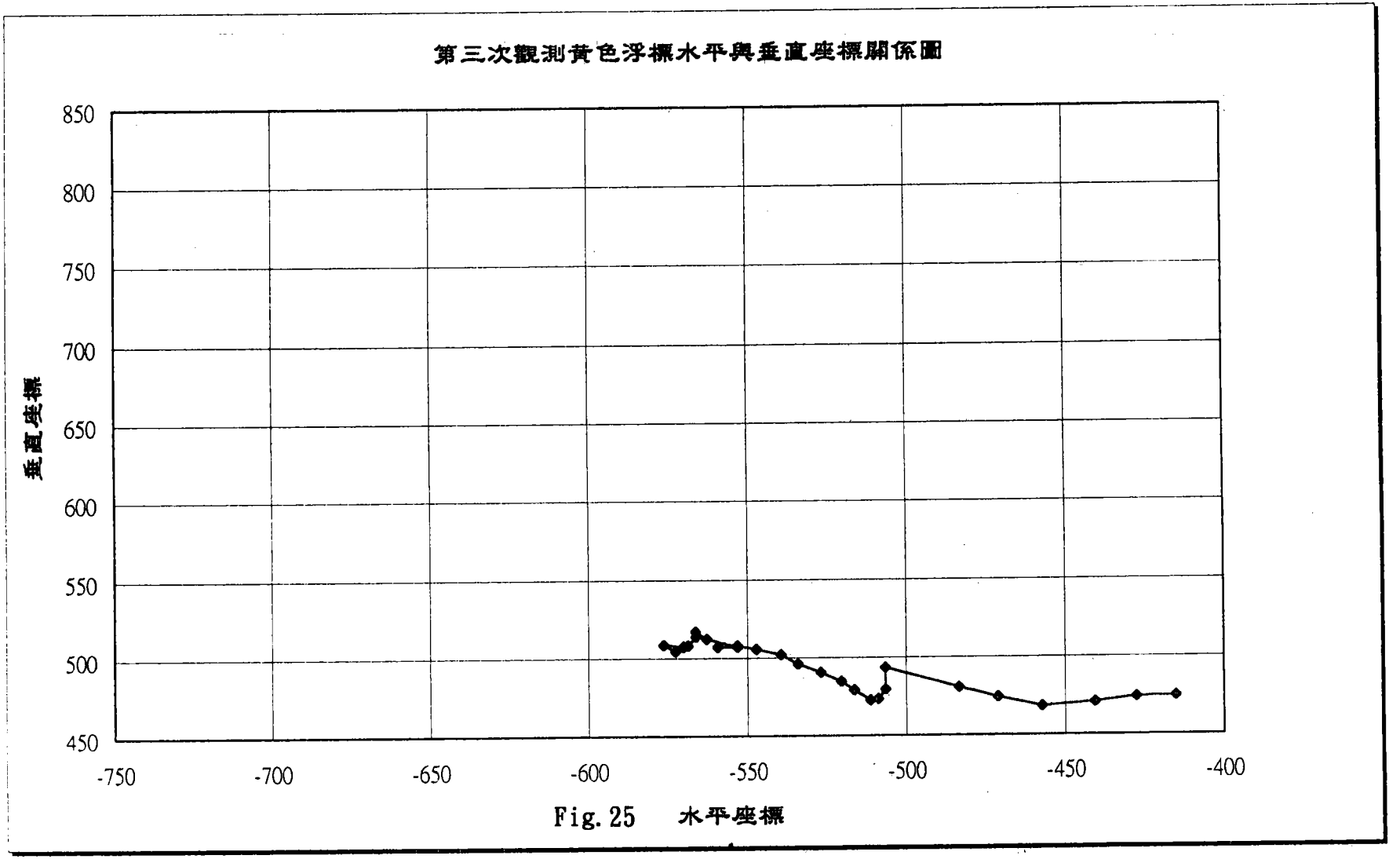
第三次觀測黃色浮標水平與垂直座標關係圖
垂直座標
850
800
750
700
650
600
550
500
450
-750
-700
-650
-600
-550
-500
-450
-400

Fig. 25　水平座標

第三次觀測藍色浮標水平與垂直座標關係圖

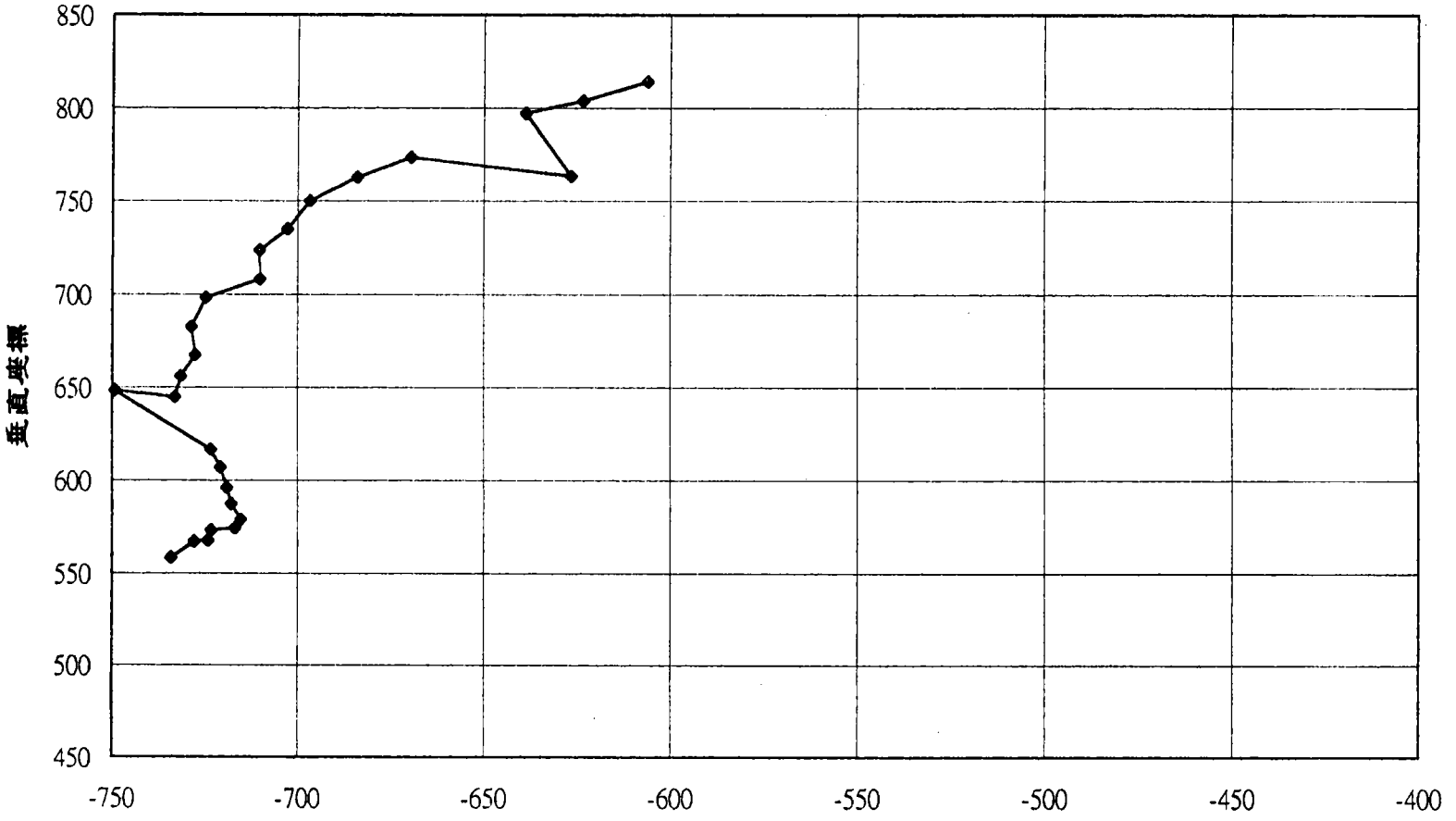

Fig. 24

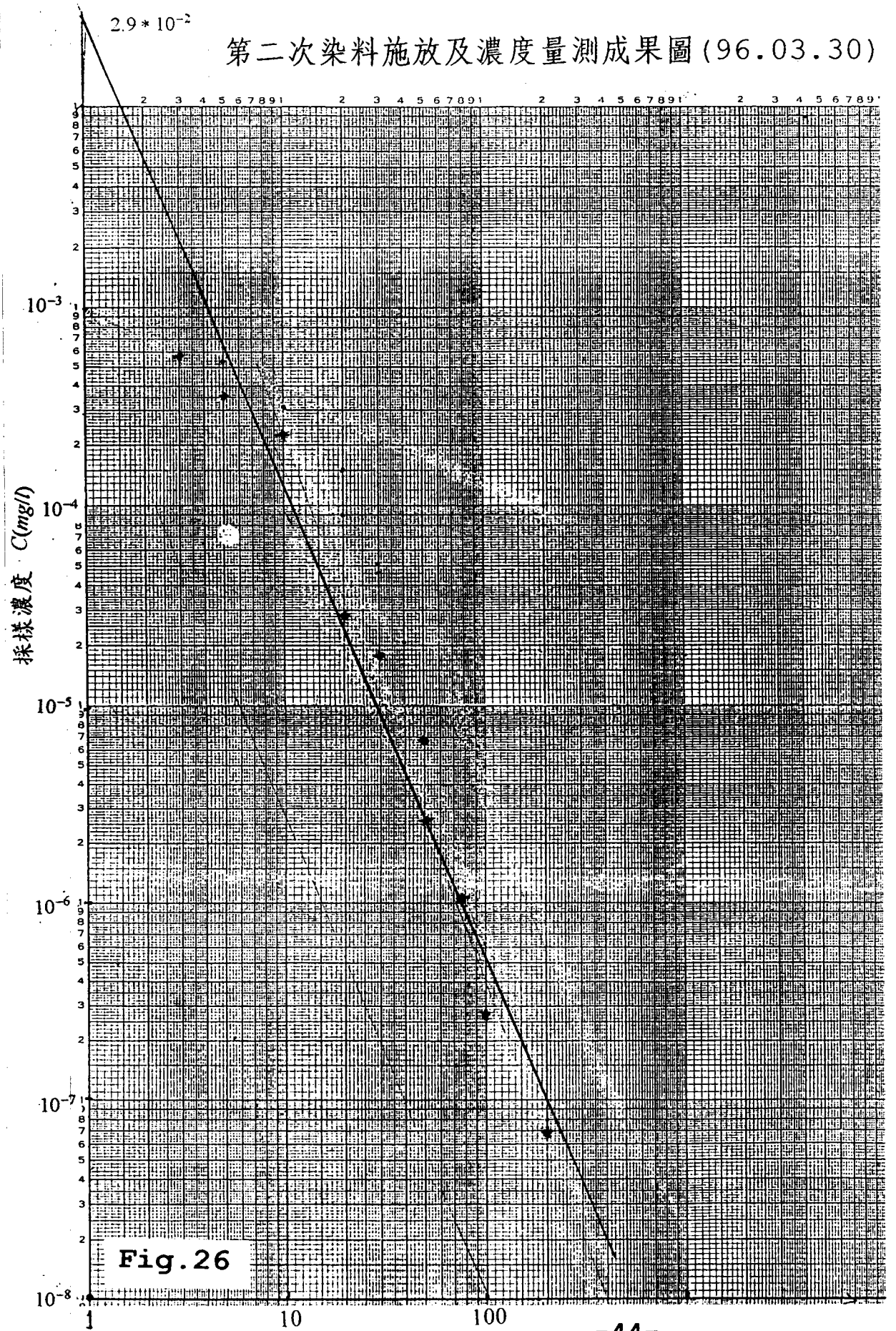
第二次染料施放及濃度量測成果圖(96.03.30)
2.9 * 10⁻²
採樣濃度 C(mg/l)
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
10⁻⁶
10⁻⁷
10⁻⁸
1
10
100

Fig.26

第三次染料施放及濃度量測成果圖(96.06.08)

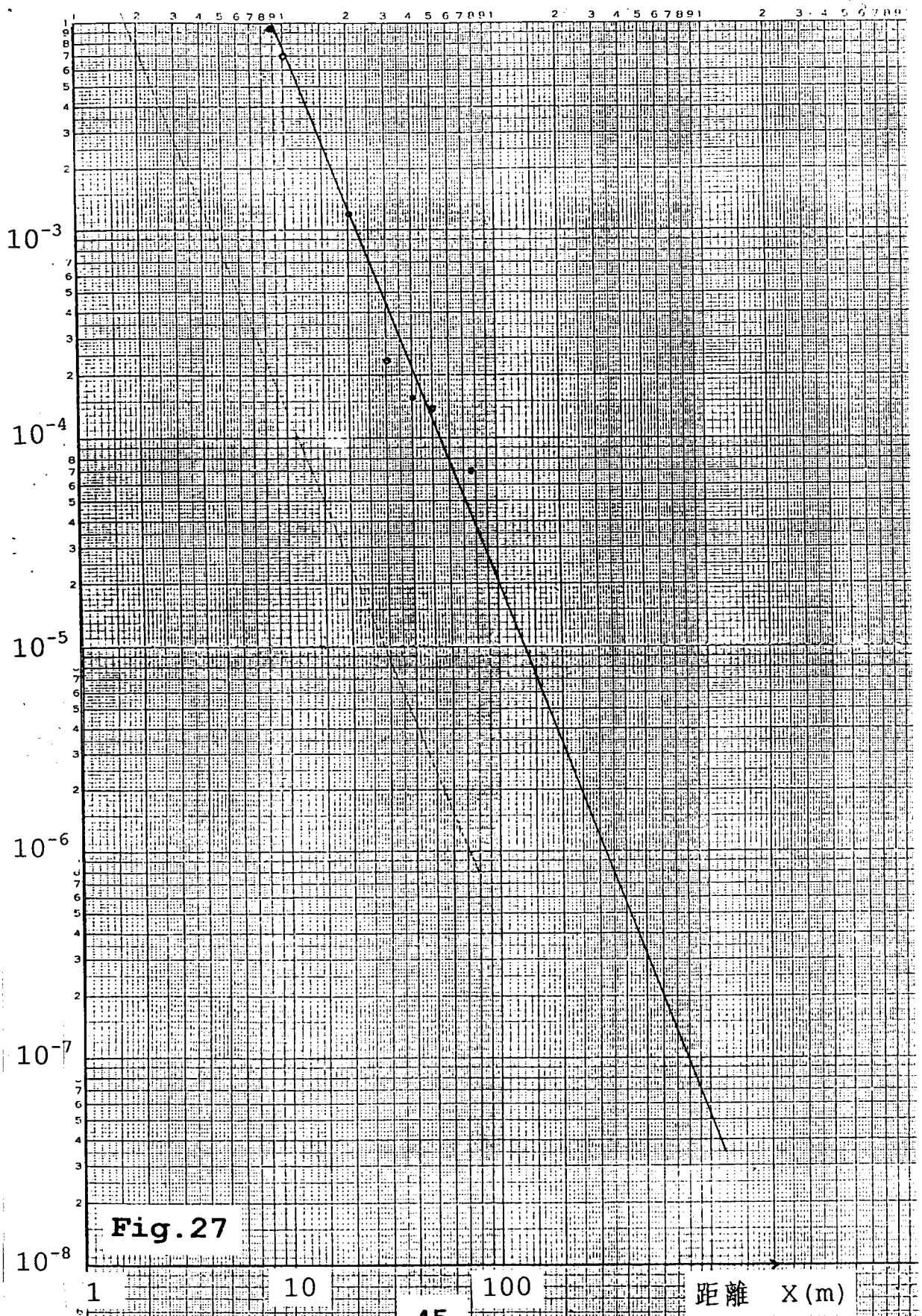

Fig.27

Tide-change in Wharf #W2 & #101 (1996/02/27)

Time-lag = 9'42"

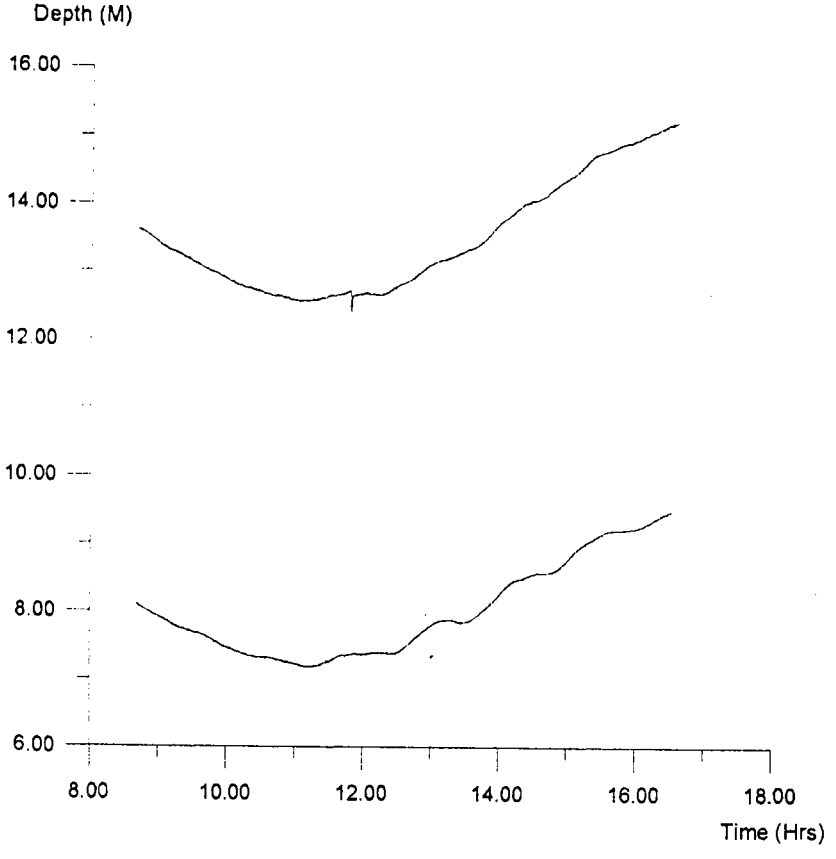

Fig.28

Tide-Change in Wharf #W2 & #101 (1996/06/08)

Time-lag = 8'58"

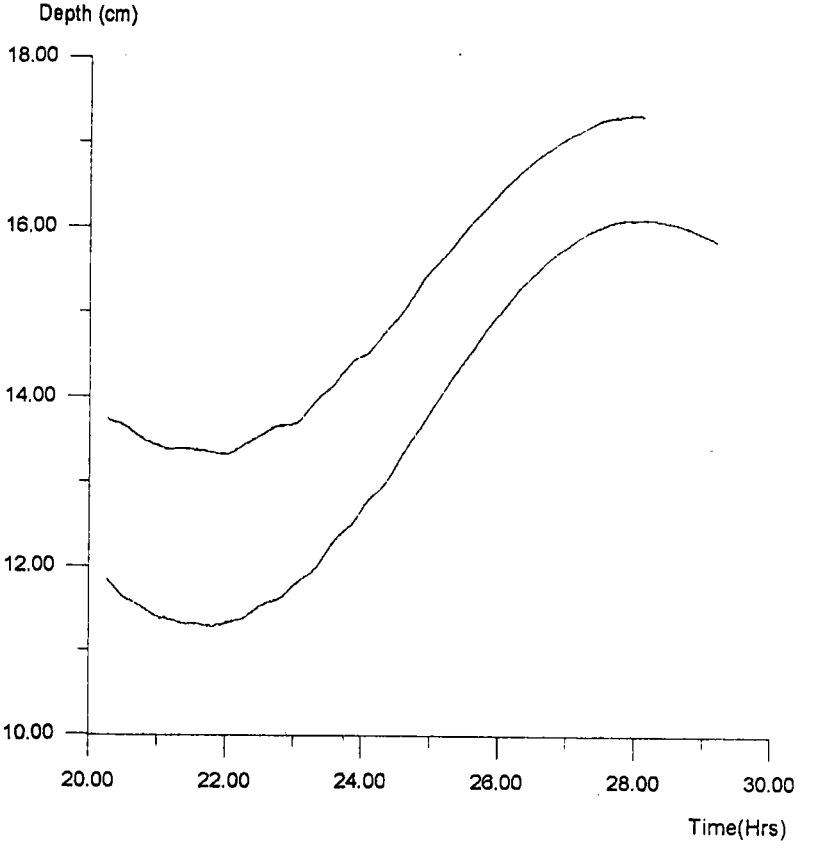

Fig.29

Temperature profile of Taichung Harbor Basin
ST.1 96-06-08

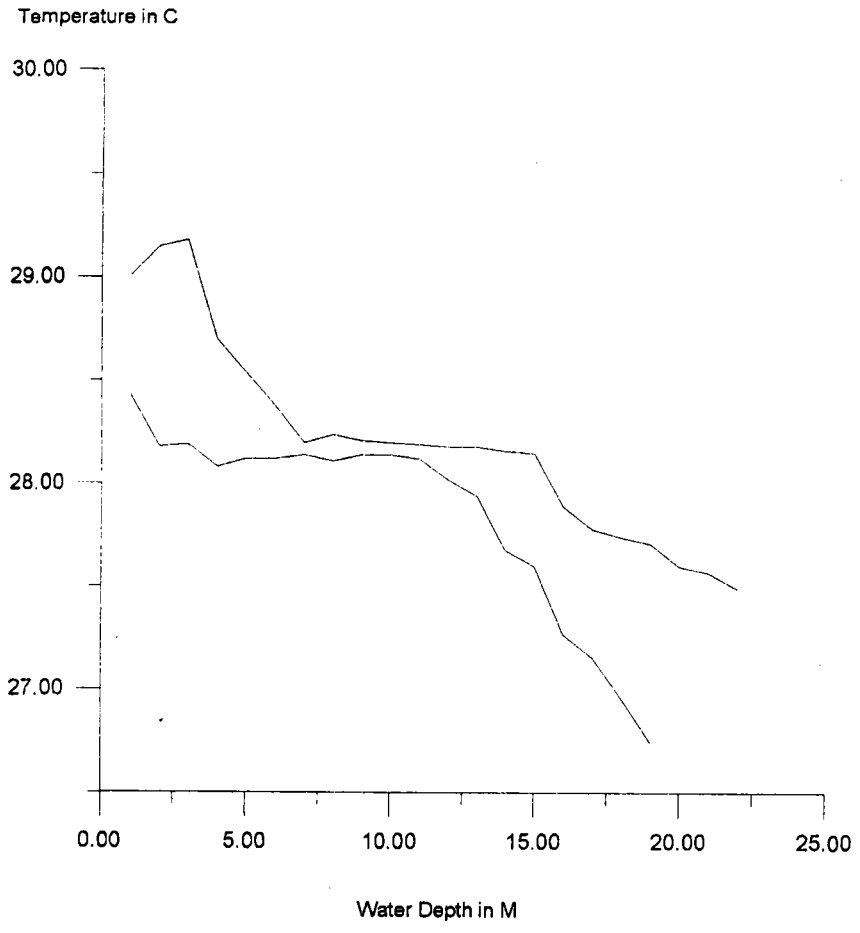

Fig.30

Temperature profile of Taichung Harbor Basin
ST.2 96-06-08

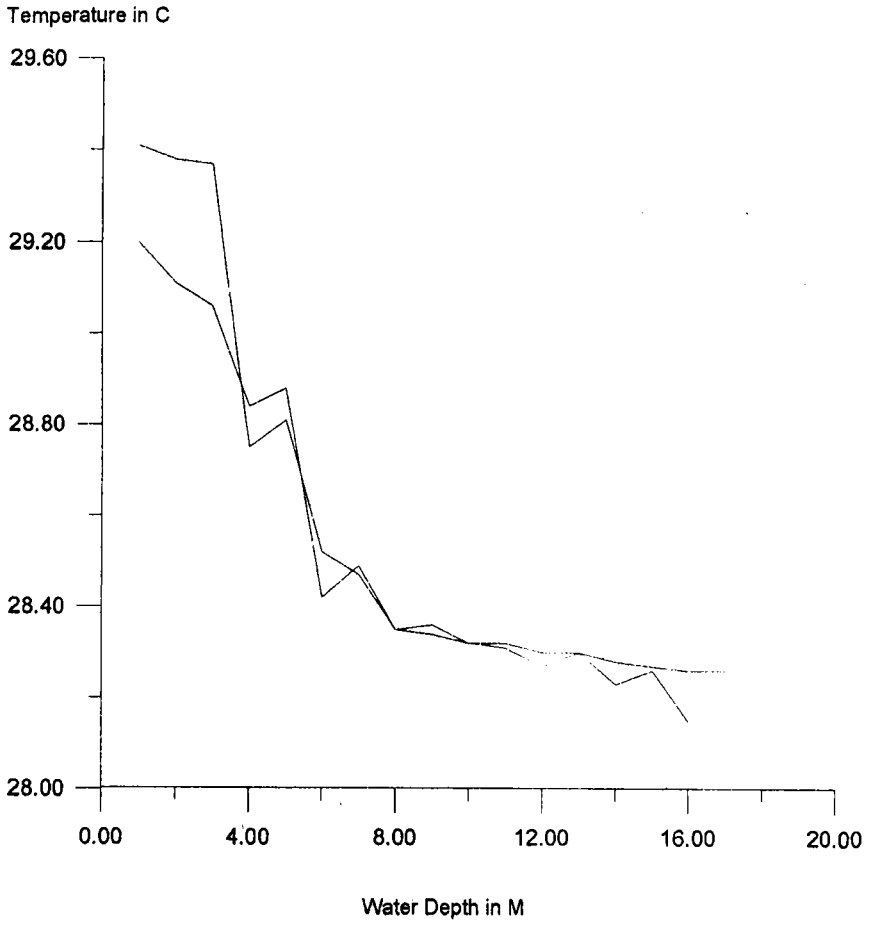

Fig.31

Temperature profile of Taichung Harbor Basin
ST.3 96-06-08

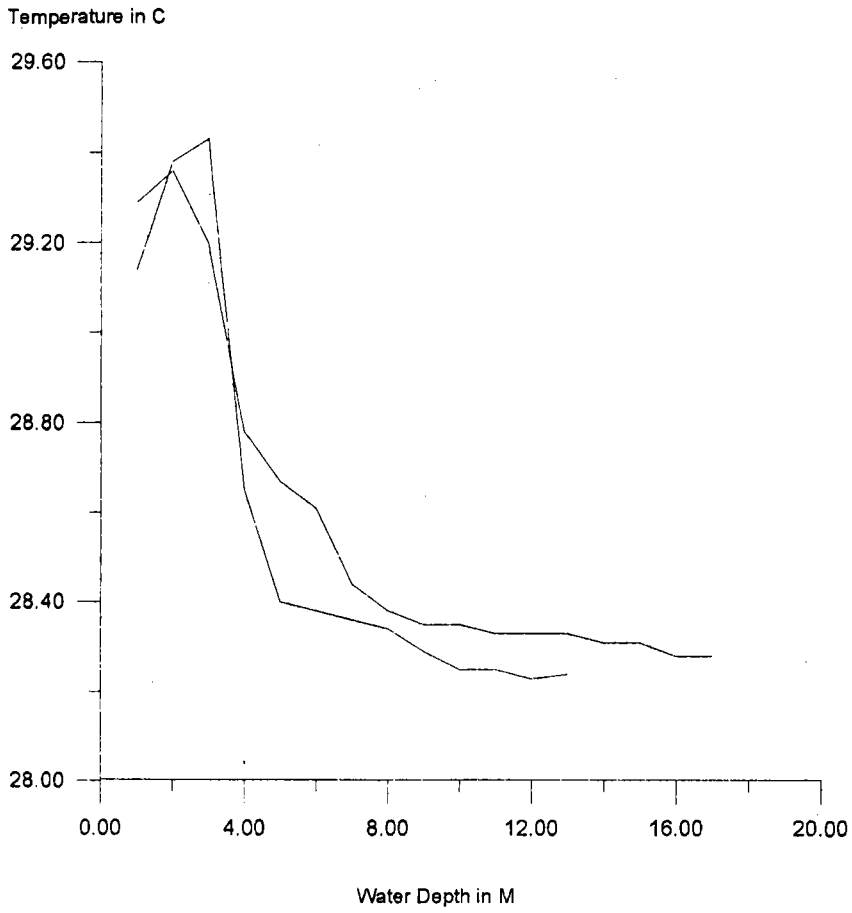

Fig.32

Temperature profile of Taichung Harbor Basin
ST.4 96-06-08

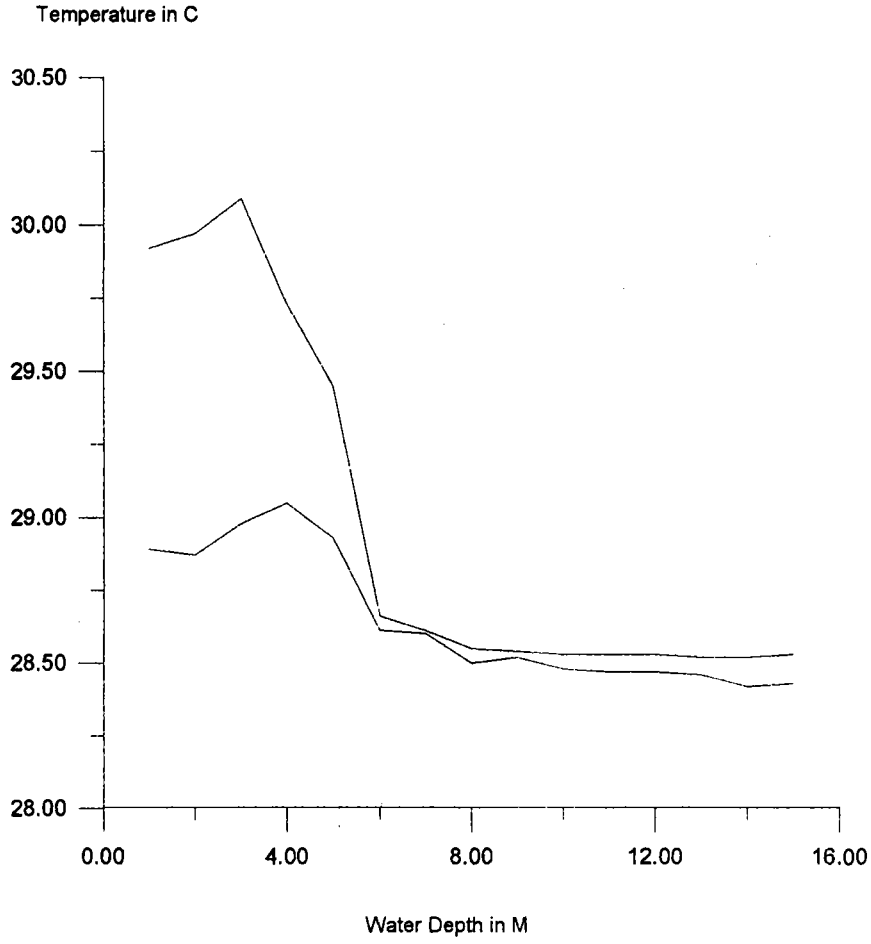

Fig.33

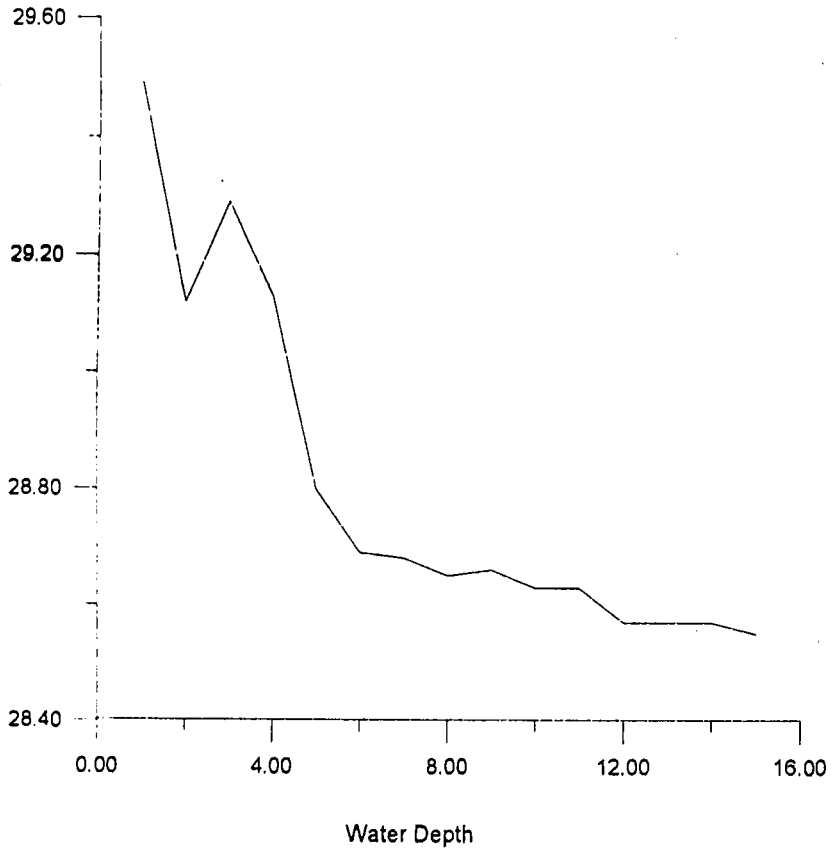
Temperature profile of Taichung Harbor Basin
ST.5 96-06-08
29.60
29.20
28.80
28.40
0.00
4.00
8.00
12.00
16.00
Water Depth

Fig.34

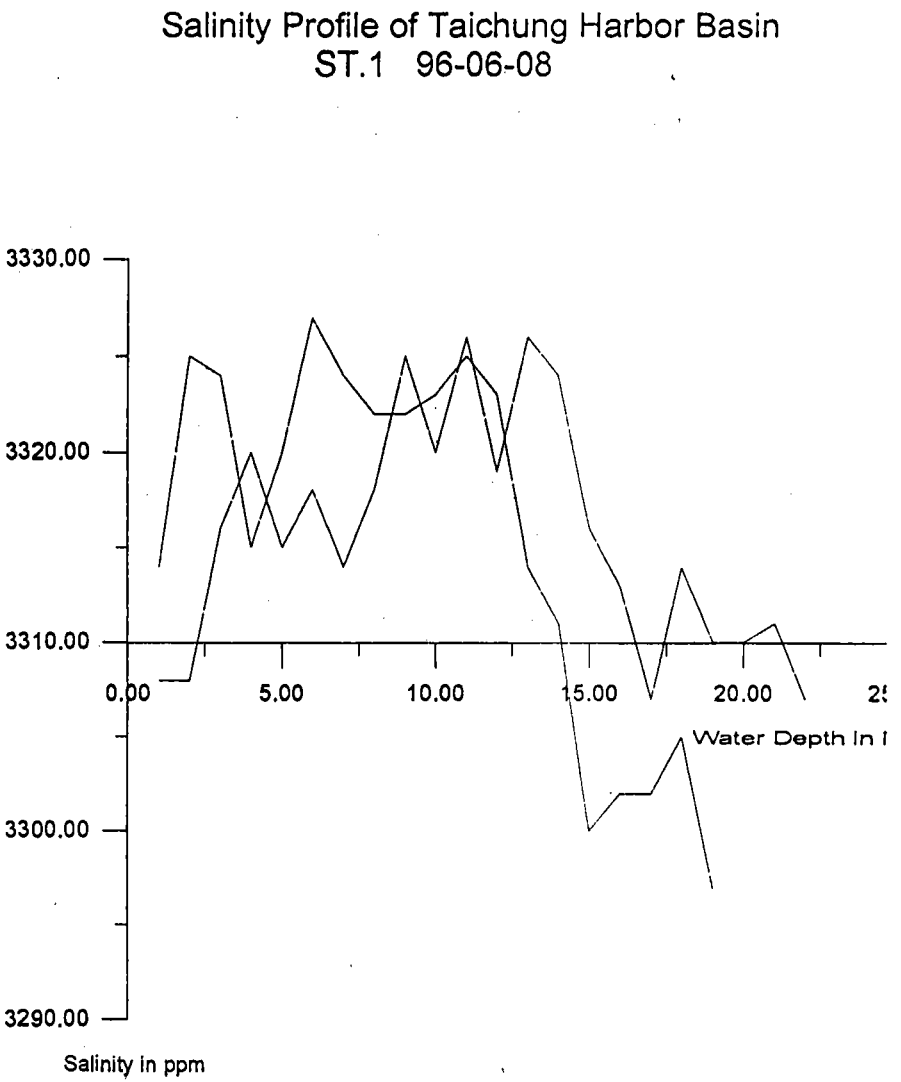
Salinity Profile of Taichung Harbor Basin
ST.1 96-06-08
3330.00
3320.00
3310.00
3300.00
3290.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
Water Depth In
Salinity in ppm

Fig.35

Salinity Profile of Taichung Harbor Basin
ST.2 96-06-08

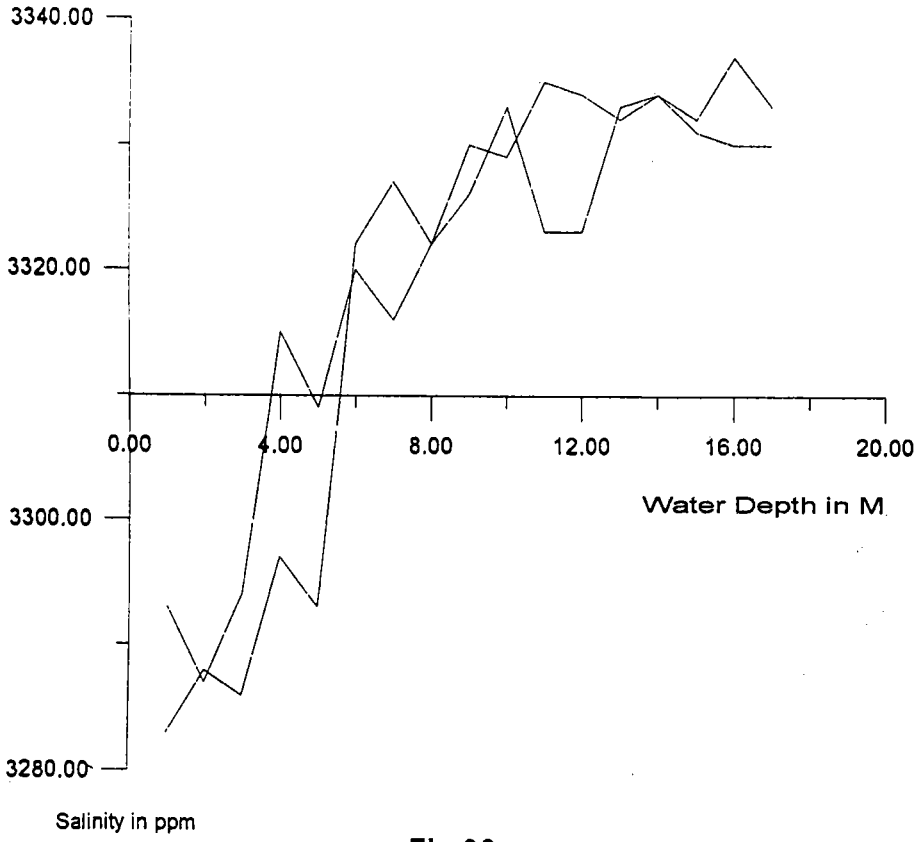

Fig.36

Salinity Profile of Taichung Harbor Basin
ST.3 96-06-08

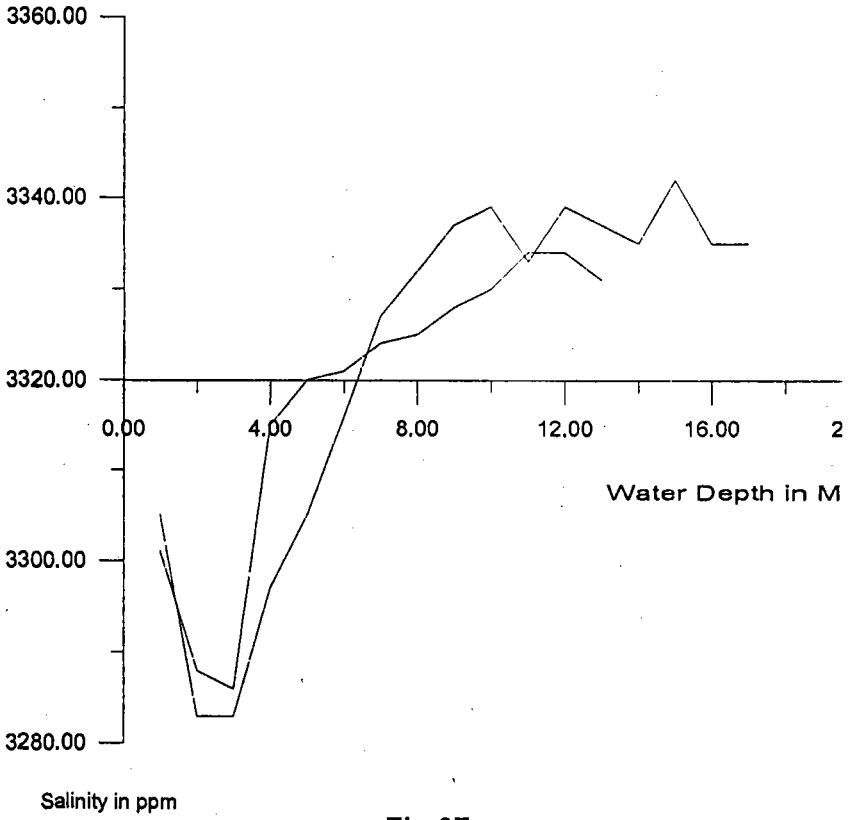

Fig.37

Salinity Profile of Taichung Harbor Basin
ST.4 96-06-08

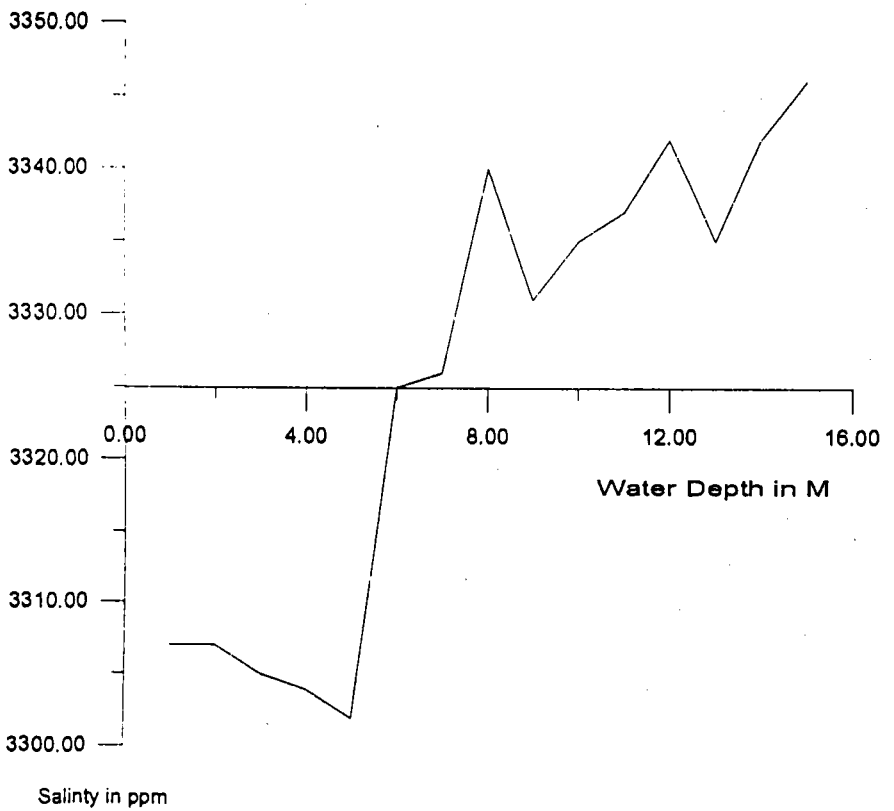

Fig.38

Salinity Profile of Taichung Harbor Basin
ST.5 96-06-08

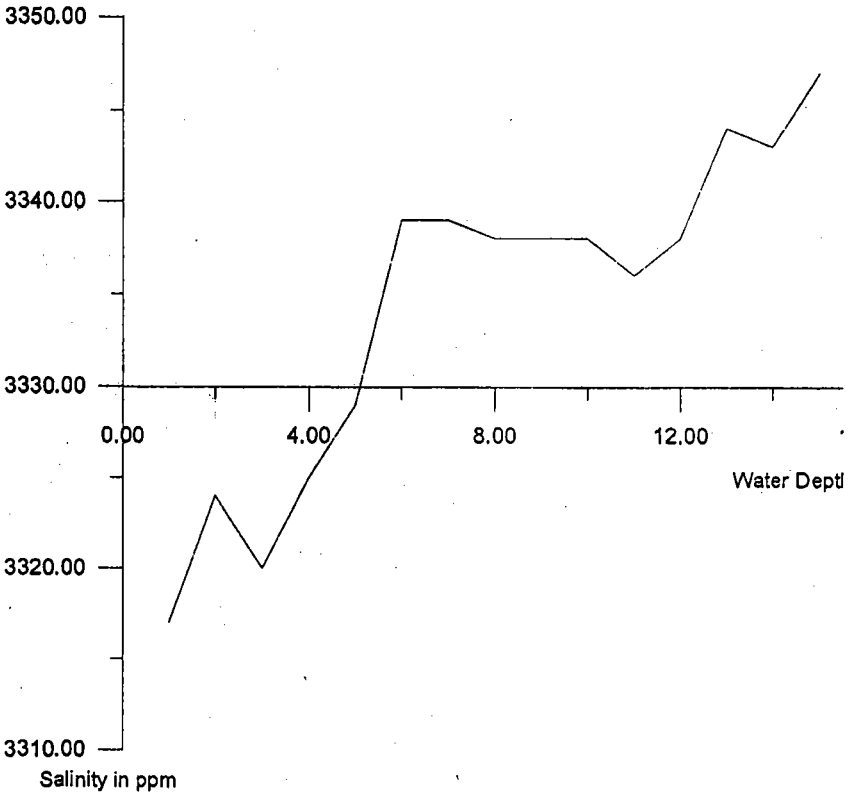

Fig.39