

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

彎道效應對縱向延散係數之影響分析研究

Analysis of Bend-Flow Effect on
Longitudinal Dispersion Coefficient

研究生：邱欣瑜

指導教授：楊錦釗 博士

謝德勇 博士

中華民國九十五年六月

彎道效應對縱向延散係數之影響分析研究

Analysis of Bend-Flow Effect on
Longitudinal Dispersion Coefficient

研究生：邱欣瑜

Student: Hsin-Yu Chiu

指導教授：楊錦釗

Advisor: Jinn-Chuang Yang

謝德勇

Te-Yung Hsieh

國立交通大學

土木工程研究所



A Thesis Submitted to Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Civil Engineering
June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

謝 誌

承蒙恩師 楊教授錦釗與謝博士德勇在攻讀碩士學位期間於研究與生活上的悉心指導，使本論文得以順利完成，並感謝口試委員曾教授明性與郭博士志禹之指正與寶貴建議，使本論文更趨完善；此外，亦感謝系上老師於課業上的啟發，使學生受益匪淺，在此謹致由衷的敬意與感謝。

感謝就學期間研究室東霖學長、夢祺學長、祥禎學長、胤隆學長、昇學學長、士偉學長、曉蘋學姊在學業生活上之照顧與提攜；益家學長與峰志學長於碩一至今給予生活上的啟發與忙碌閒暇之活動參與；亦感謝同學浩榮於程式上的幫助、宣汝於低潮期之相互陪伴、仲達及力璋之相互砥礪。

同時，感謝大學時期班導 蕭老師松山與摯友彥彰、立群、張宇、志毓、柏源、柏壽、建鋒、勁毅、孟蓉、珮敏、尚津、靖筠、廷欣、慧敏於此段求學時間傾聽於壓力上之排解與精神上之鼓勵。

更由衷感謝心中摯愛的父母養育栽培，哥哥於每回對吾人的關心與亦友之相處，得以在無後顧之憂下順利完成論文並獲得學位。最後，謹以此論文獻給我深愛的父母、哥哥、姑姑及所有參與此過程中的大夥來共同分享喜悅。

彎道效應對縱向延散係數之影響分析研究

研究生：邱欣瑜

指導教授：楊錦釗

謝德勇

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究旨在探討彎道效應對縱向延散係數之影響，根據前人之相關研究，探討影響縱向延散係數正確性之無因次延散係數 α (Elder, 1959)與 β (Liu, 1977)差異性後，選擇在不同河川應用上具有變動程度與估算誤差較小之 β 為基礎，進行彎道效應因子之分析討論。進行分析前，首先檢討流速剖面型態對無因次延散係數之影響，結果發現側向速度剖面影響頗巨，且不確定性甚高，因此分析中忽略流速剖面型態之影響，模擬案例均採用均勻入流型態之入流邊界做進一步模擬分析。敏感度分析結果顯示，二次流強度因子 SI 為影響 β 之重要參數，且二者呈現正相關趨勢；隨著彎道長度因子 θ_b 之增加，固定 SI 情況下， β 展現漸增之趨勢，直至 $\theta_b = 0.222$ 附近增加幅度趨於穩定。由二次流重要性分析所得之 $\beta - SI - \theta_b$ 關係曲線，說明 SI 之產生即對 β 值造成影響，且該曲線亦可提供做為彎道縱向延散係數決定之參考。

關鍵詞：延散係數、彎道水流、二次流

Analysis of Bend-Flow Effect on Longitudinal Dispersion Coefficient

Student: Hsin-Yu Chiu

Advisors : Jinn-Chuang Yang

Te-Yung Hsieh

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the bend-flow effect on longitudinal dispersion coefficient. The dimensionless dispersion coefficient β (Liu, 1977) is adopted herein because of its relatively small variability for the real case. The examination on the effect of velocity distribution shows that β varies with the pattern of velocity profile. Hence the following analysis will omit the influence of velocity pattern to avoid its uncertainty. For the inflow boundary in the bend-flow cases the uniform velocity distribution is assumed. The relationship between β and bend-flow effect is investigated through the methods of sensitivity and regression analysis. The results show that the relative strength of secondary current (SI) caused by bend-flow effect is significant and direct proportional to β . Finally, while relative length of channel bend (θ_b) is increasing, the analysis shows β is reaching a stable tendency while θ_b approaches towards 0.222. The $\beta - SI - \theta_b$ curve derived in this study can be used for estimating the longitudinal dispersion coefficient in bend-flow case.

Keywords : *dispersion coefficient ; bend flow ; Secondary current*

目 錄

謝誌.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目 錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
符號表.....	viii
第一章 緒論	1-1
1.1 研究動機	1-1
1.2 文獻回顧	1-2
1.3 問題解析	1-5
1.4 研究架構	1-7
第二章 理論基礎	2-1
2.1 無因次延散係數理論基礎	2-1
2.2 二維水理模式	2-2
2.2.1 模式理論架構	2-2
2.2.2 數值架構	2-5
第三章 彎道效應對無因次延散係數之影響分析	3-1
3.1 流速分布型態之影響探討	3-1
3.2 彎道影響因子之因次分析	3-1
3.3 模擬案例設計	3-2
3.4 無因次延散係數推求	3-3
3.5 無因次參數重要性分析	3-4
3.6 β 與 SI 之相關性分析.....	3-5

3.7 θ_b 與 β 之相關性分析	3-5
3.8 二次流重要性分析	3-6
第四章 結論與建議	4-1
參考文獻.....	R-1
附錄一.....	A-1



表目錄

表 1.1	延散係數之現地測量整理分析表	1-8
表 1.2	無因次延散係數分類比較表	1-9
表 1.3	水力條件與延散係數實地量測表	1-10
表 1.4	α 與 β 差異性分析表	1-12
表 1.5	無因次延散係數 β 正確率比較表	1-14
表 3.1	不同流速剖面之 β 計算結果	3-7
表 3.2	水理部分測試案例一覽表	3-7
表 3.3	無因次參數於各角度與 $\text{Ln}(\beta)$ 之影響程度迴歸係數表	3-8
表 3.4	無因次參數忽略 F_r 、 $\frac{h}{B}$ 與 Re 情況下於各角度與 $\text{Ln}(\beta)$ 之影響程度迴歸係數表	3-8
表 3.5	不同 θ_b 之 β 與 SI 之回歸函數一覽表	3-8

圖目錄

圖 1.1	Elder 與 Liu 之延散係數公式比較(Seo and Cheong ,1998).....	1-16
圖 1.2	分析流程圖	1-17
圖 2.1	控制體積法示意圖	2-10
圖 3.1	流速剖面型態示意圖	3-9
圖 3.2	彎道示意圖	3-10
圖 3.3	單一斷面示意圖	3-10
圖 3.4	不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(1).....	3-11
圖 3.4	不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(2).....	3-12
圖 3.4	不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(3).....	3-13
圖 3.5	不同 θ_b 之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖(1).....	3-14
圖 3.5	不同 θ_b 之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖(2).....	3-15
圖 3.5	不同 θ_b 之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖(3).....	3-16
圖 3.6	不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(4).....	3-17
圖 3.7	二次流效應重要性分類圖	3-17
圖 3.8	$\beta-SI-\theta_b$ 關係圖	3-18

符號表

A = 面積；

B = 渠道寬度；

C = 濃度；

C_f = 摩擦係數；

C_0 = 常數；

c = Chezy 係數；

D_L = 縱向延散係數；

$D_{L(M)}$ = 縱向延散係數測量值；

$D_{L(P)}$ = 縱向延散係數估算值；



d = 水深；

E = 糙度因子；

F_r = 福祿數；

g = 重力加速度；

h = 平均水深；

h_1 、 h_2 = ξ 、 η 方向轉換係數；

h^0 = 無因次水深；

k = von Karman's 係數；

L = 渠道長度；

L_r =環流流場的環流長度；

N_{total} =模擬案例總計算格點數目；

n =曼寧糙度係數；

Q =流量；

$q(z)$ =單寬流量；

q^0 =無因次單寬流量；

R =水力半徑；

Re =雷諾數；

R_c =渠道中心線平均曲率半徑；

r =曲率半徑；

r_c =渠道中心線曲率半徑；



SI =二次流強度因子；

S_0 =渠道坡度；

T_k =輸送參數；

T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13} =有效剪應力項；

t =時間；

U = ξ 方向平均速度；

u = ξ 方向速度；

u_w =近固體邊界的水深平均速度；

u_* =剪力速度；

V = η 方向平均速度；

$v = \eta$ 方向速度；

$X_{i,j}$ = 某計算格點之模擬結果；

$Y_{i,j} = X_{i,j}$ 相對應計算格點之正確結果；

y_w = 固體邊界與鄰近固體邊界格點的距離；

z_b = 底床高程；

z_s = 水面高程；

α = 無因次延散係數；

β = 無因次延散係數；

ε_z = 側(Z)方向擴散係數；

ε_1 、 ε_2 = ξ 、 η 方向之亂流傳輸係數；

μ = 流體動力黏滯係數；



ν_l = 層流黏滯係數；

ν_t = 亂流黏滯係數；

θ_b = 彎道長度因子；

ρ = 流體密度；

τ_{b1} 、 τ_{b2} = 底床剪應力在 ξ 與 η 方向之分量；

ξ 、 η = 平面上兩正交曲線座標方向；

ζ = 距離底床之高度與水深之比值；

ζ_h = 隱藏因子；

Δt = 時間間距；

Δx 、 $\Delta y = \xi$ 、 η 方向之格網間距。

上標

0=無因次；

m =疊代次數；

$n = n\Delta t$ 時刻之已知變數；

$n+1 = (n+1)\Delta t$ 時刻之未知變數；

$n+1/2 = (n+1)\Delta t$ 時刻與 $n\Delta t$ 間之未知變數；

$(\bar{\quad})$ =時間平均；

$(\overline{\quad})$ =水深平均；

$(\overset{\circ}{\quad})$ =時間平均瞬時擾動量。

下標

c =模擬值；

$M = A$ 、 D 之中點值；

m =實驗值；

s =變數在水面的值；

b =變數在底床的值。



第一章 緒論

1.1 研究動機

工商業快速發展，使得現代化結果所附加之環境污染、公害與生物種類的損害。其中，各類科技廠房與民生使用廢水之不當排放、不肖業者圖己之便於河川上游處釋放污染物或致命性物質，均造成下游水資源使用者之損失與生命疑慮；因此，了解河川中之污染擴散問題，除了可減少河川於污染擴散後造成之傷害外，在河川管理上亦為必需項目之一。

為了了解河川污染傳輸問題並減少損害，因此，描述水中傳輸係數-縱向延散係數(longitudinal dispersion coefficient)之預測與推估工作則更為重要；縱向延散係數，除了應用於河川污染物傳輸變化外，同時，也應用在各類電廠的冷卻水排放口週遭溫度變化情形、郵輪渡船排放水與油類污染擴散情形，以及河海口感潮河段鹽度變化情形。於河川中，該係數可應用於突發之致命性與放射性物質遭排放時，用以預測下游各種污染物濃度傳輸與擴散速率之即時資訊，藉以告知下游民眾污染物相關資料並實施防範措施以減少災損。

目前有許多現地實驗方法可較正確觀測縱向延散係數，例如應用螢光劑或放射性同位素進行量測；此類方法雖可以量測正確之縱向延散係數，但因測量過程耗費時間與人力資源、放射性同位素法造成之第二次環境污染以及該量測方式僅適用於單一斷面之單一流量下等問題，因此，發展一簡易之計算方法較為適宜。

綜觀上述，為了更適切估算縱向延散係數，本研究方向即針對影響縱向延散係數正確性之無因次延散係數(dimensionless dispersion coefficient)，進行影響因子相關性研究，以作為河川水資源環境管理

分析參考。

1.2 文獻回顧

早期已有許多針對延散問題之相關研究。Taylor(1954)首先提出延散係數概念，應用於紊流流況之直線圓管中；Aris(1956)提出數學公式解決任一形狀之管線於完全擴展流下之延散問題；Thomas(1958)則推導二維明渠之延散公式。

有關延散係數估算方面，Elder(1959)假設對數流速分佈下之均勻流寬型渠道，提出縱向延散係數計算公式，式(1.1)

$$D_L = \alpha h u_* \quad (1.1)$$

$$u_* = \sqrt{gRS_0} \quad (1.2)$$

式中， D_L = 縱向延散係數； α = 縱向無因次延散係數=5.93； h = 平均水深； u_* = 剪力速度； R = 水力半徑； S_0 = 渠道坡度； g = 重力加速度。

但是該無因次延散係數包含許多未知因子，如寬深比、摩擦係數、污染物施放點與斷面幾何形狀等，因此，致使該係數變異性大而較不適宜應用於自然河川。

Fischer(1968)有鑑於前人提出之計算式應用於自然河川時，將會低估延散係數值，同時，各經驗式中並無描述自然河川延散之主要效應，因此，提出考慮側向(lateral)擴散機制為主之延散係數三重積分式，如式(1.3)與式(1.4)；並提出延散過程中，側向速度剖面之影響比垂直向(vertical)速度剖面重要之概念。

$$D_L = -\frac{1}{A} \int_0^B q'(z) \int_0^z \varepsilon_z^{-1}(z) h^{-1}(z) \int_0^z q'(z) dz dz dz \quad (1.3)$$

$$q'(z) = \int_0^{h(z)} u'(y, z) dy = q(z) - Uh(z) \quad (1.4)$$

式中， A = 斷面面積； B = 渠道寬度； $q'(z)$ = 單寬流量變化量； ε_z = 側方向擴散係數； u' = 速度變化量； q = 單寬流量； U = 斷面平均流速。

McQuivey and Keefer(1974)應用一維流場與一維延散方程式之相似性，並彙集前人實驗等相關數據進行兩方程式之比較與推導，提出簡易延散係數計算式。

$$D_L = 0.058 \frac{Q}{S_0 B} \quad (1.5)$$

式中， Q = 流量。

Fischer(1975)針對 McQuivey and Keefer(1974)提出式(1.3)之計算繁複問題，進行修正後得近似之求解法。

$$D_L = 0.011 \frac{U^2 B^2}{hu_*} \quad (1.6)$$

Liu(1977)以式(1.3)為基礎，應用無因次化之參數整理而得式(1.7)；同時，利用式(1.7)與現地量測數據，如表 1.1，進行迴歸分析，得無因次延散係數計算式(1.8)。

$$D_L = \beta \frac{U^2 B^2}{hu_*} \quad (1.7)$$

$$\beta = 0.18 \left(\frac{u_*}{U} \right)^{1.5} = 0.18 \left(\frac{\sqrt{gRS_0}}{U} \right)^{1.5} \quad (1.8)$$

式中， β = 無因次延散係數。

Seo and Cheong(1998)以前人現地量測數據，並利用 Elder(1959)、McQuivey and Keefer(1974)、Fischer(1975)、Liu(1977)、Magazine(1988)與 Iwasa and Aya(1991)提出之縱向延散係數計算式進行比較後，再應用非線性迴歸法分析現地數據，得到更近似之計算式。

$$\frac{D_L}{hu_*} = 0.64 \left(\frac{B}{h} \right)^{1.23} \left(\frac{U}{u_*} \right)^{1.25} \quad (1.9)$$

此外，以實驗方式探討延散係數之研究分別有：Sayre and Chang(1968)利用不同分散劑、污染施放點與各種水力情況，進行渠槽濃度分佈量測，以探討各情況與延散係數之相關性。Fischer(1969)分別設計一河寬窄且交替彎曲之渠道與一河寬廣而連續彎曲之渠道，實驗結果指出，前者可視為均勻流況，後者則須考慮彎道效應之影響。Godfrey and Frederick(1970)利用無線電追蹤方式進行5個自然河川與1個灌溉渠道之量測，並與前人公式進行比較，得到真實河川中之延散係數值大於計算值。Magazine(1988)設計交錯與非交錯之底床糙度與邊界糙度分布型態進行模擬，得到以糙度參數為主之無因次延散係數式。Singh and Beck(2003)利用同位素法量測河川支流濃度變化情況，以最佳化方式求得各支流平均速度與延散係數值；並利用前人延散係數計算式推求濃度變化情形進行比較。

以前人現地與試驗數據分析者：Koussis and Rodriguez-Mirasol (1998)應用 Fischer 理論與 von Karman's 欠損率(defect law)，改變斷面平均速度表示法，並以現地量測數據求得平均無因次縱向延散係數，進而推得延散係數公式，但分析過程忽略渠道曲折相關因子。Deng 等(2001)說明欲求得式(1.2)則需計算3個未知數，分別為平均水深 h 、縱方向速度變化 u' 與側向擴散係數 ε_z ；其針對三者分別求得經驗式後，帶入式(1.2)整理得一無因次延散係數計算式；同時，根據量測數據與前人公式進行比較，提出求解法。Kashefipour and Falconer (2002)研究中，分別針對 U 、 h 、 B 、 u_* 、 Uh 與 UB 六個影響因子，以及前人研究之 $\frac{U}{u_*}$ 與 $\frac{B}{h}$ 兩無因次參數進行迴歸分析，並應用統計法進行各經驗式之比較後，結合部分 Seo and Cheong(1998)之公式，提出縱向延

散係數計算式。Tayfur and Singh(2005)利用前人測量數據，結合類神經網路(Artificial Neural Network)進行延散係數值之學習，指出 ANN 模式為較好的預測方法；同時，經由敏感度分析，於不同參數範圍下，主控延散係數之參數亦會改變。

探討河道斷面形狀與流速分佈影響之研究有：Liu and Dieter(1978)利用現地數據討論，提出無因次延散係數 β 值與河川寬度大小無關；同時針對不同寬深比、寬度與河床最深處距離岸邊距離比之三角型渠道進行比較，得知，延散係數隨著兩者比值越大而增加。Seo and Baek(2004)以 β 機率密度函數製造側向速度平緩或曲折之分佈型態，並將無因次參數以 β 函數表示後，與式(1.2)做結合而提出縱向延散係數表示式。

1.3 問題解析



一、 α 與 β 適用性分析

為使得延散係數預測之概念趨於完整，本研究係根據前人發展，將無因次延散係數概分為 α 與 β 兩大類，如表 1.2 所示； α 與 β 分別由 Elder(1959)與 Liu(1977)提出，其中前者包含許多未知影響因子，因此容易因各數值間之差異性造成 α 值變動程度大；然而 β 則簡化各影響因子而單純化，以降低數值變動程度問題。

根據 Seo and Cheong(1998)之研究，本研究綜合前人量測數據，表 1.3 所示，分別利用式(1.1)(α 採用 5.93)與式(1.7)計算縱向延散係數，並將估算值($D_{L(P)}$)與量測值($D_{L(M)}$)進行比較，結果如圖 1.1 所示，得知應用 α 值計算則較 β 值低估，即應用 β 值計算縱向延散係數與實際量測值較為接近。

接續利用表 1.3 所使用之量測數據進行 α 與 β 值差異性比較，利

用實際量測之 D_L 反推式(1.1)、(1.7)與(1.9)之無因次延散係數值 α 與 β ，表 1.4 所示，得知應用量測值所反推之 β 所造成之變動程度較小，為 389 倍。且經由實測值與計算值之比值計算誤差，得應用以 α 為主之 Elder(1959)與 Seo and Cheong(1998)計算公式，造成數值變動範圍較大；同時，應用 Liu(1977) 與 Seo and Cheong(1998)之計算式求各案例誤差比較，於 73 個案例中，前者具有 41 個優於後者之誤差量。根據上述得知，以 β 為主之計算式造成整體誤差變動範圍低於利用 α 之結果，因此，利用 β 則較 α 適切。為了了解 β 估算值與量測值之間的變動程度，本研究引用 White. et. al.(1973)文中提及之差異比 (discrepancy ratio)與正確率(accuracy)之概念進一步比較。根據差異比定義，式(1.10)，若差異比為 0，則估算值與量測值相等，若大於 0，則估算值大於量測值；其中，當差異比介於-0.3~0.3 則視為正確值，並以其數量佔總數之百分比稱為正確率，式(1.11)。故利用表 1.3 之數據進行分析，結果如表 1.5 所示，應用 β 為主之計算式得正確率為 54.79%，優於以 α 為主之計算結果。

$$\text{差異比} = \log \frac{D_{L(P)}}{D_{L(M)}} \quad (1.10)$$

$$\text{正確率} = (\text{差異比介於}-0.3\sim 0.3\text{之數量}) / (\text{案例總量})\% \quad (1.11)$$

二、 β 之問題

根據表 1.3，以 Liu(1977)所引用之量測值計算之正確率為 42.86%，但所引用之數據僅有 4 組屬彎曲性河川，雖可應用於自然河川中，但對於彎道之影響性仍有考慮不足之處；又於前人研究中，如 Liu(1977)、Seo and Cheong(1998)等人提及渠道彎曲型態亦影響縱向延散係數推估工作，卻又未將其相關影響因子考量於研究中。

三、研究目的

故本研究即接續 Liu(1977)提出 β 積分式之概念，將其應用於彎道情況中，以分析彎道相關因子對 β 值之影響。

1.4 研究架構

前面已闡述本研究之緣起、文獻回顧、研究目的，以下將對本研究之流程與方法，如圖 1.2，進行說明。

本研究以 β 為基礎，首先針對眾多影響縱向延散係數因子進行探討，並依前人研究中未詳加考慮之彎道效應因子進行討論。

在進行彎道效應之分析前，首先檢討流速剖面影響因子。係假設不同流速分佈型態下，具有相同平均流速、平均流量與平均水深之矩形斷面渠道，直接進行無因次延散係數之積分後，以探討不同分佈型態下造成無因次延散係數之變動程度分析，做為彎道模擬案例邊界條件設計之參考。

彎道影響因子方面，以無因次延散係數積分式(Liu,1977)為基礎，針對彎道相關影響參數，進行無因次化分析，以推求無因次影響參數；為求得無因次延散係數於彎道之效應，故使用一能考量彎道效應之二維水理模式進行案例模擬，以計算各案例之無因次延散係數值；接著，針對無因次影響參數與無因次延散係數進行參數敏感度與分析工作，推求重要的影響因子，進行參數討論，以推估無因次延散係數受彎道效應影響下之可能形態。

表 1.1 延散係數之現地量測整理分析表(Liu,1977)

測量點	坡度 (10^{-3}) (1)	水力半徑 (m) (2)	剪力速度 (m/s) (3)	流量 (m^3/s) (4)	面積 (m^2) (5)	河寬 (m) (6)	平均流速 (m/s) (7)	延散係數 (m^2/s) (8)	
Cooper Creek (below gage)	1.3	0.491	0.079	1.54	6.55	15.7	0.235	15.0	
Clinch River (below gage)	0.360	0.953	0.058	9.14	36.2	67.4	0.252	9.10	
Cooper Creek (above gage)	2.92	0.378	0.104	0.99	5.30	17.1	0.187	9.10	Crooked
Powell River	0.324	0.851	0.052	3.96	24.2	34.4	0.164	26.8	Crooked
Clinch River (above gage)	0.324	0.666	0.046	6.80	37.5	34.7	0.181	19.7	
Cooper Creek (below gage)	1.30	0.848	0.104	8.49	13.8	18.2	0.616	41.8	
Clinch River (below gage)	0.40	1.84	0.085	84.9	101	60.0	0.838	11.1	
Coachella Canal	0.121	1.56	0.043	25.5	37.3	24.7	0.683	17.7	
Coachella Canal	0.121	1.56	0.043	26.9	37.7	24.7	0.713	17.7	
Clinch River (below gage)	0.40	1.47	0.076	51.0	77.4	59.1	0.658	11.1	
Cooper Creek (below gage)	1.3	0.454	0.076	1.36	5.63	16.1	0.241	15.4	
Missouri River	0.200	3.05	0.077	957	561	187.8	1.71	1490	Crooked
Fluorescent dye	0.224	1.10	0.049	8.78	27.4	29.9	0.320	6.50	Crooked
Radio-isotope	0.05	6.33	0.056	107.1	395	48.8	0.271	3.56	
Radio-isotope	0.0059		0.019						

Crooked: 彎曲型河川

表 1.2 無因次延散係數分類比較表

無因次延散係數	α	β
發展者	Elder(1959)	Liu(1977)
計算式	$D_L = \alpha hu_*$ $\alpha = 5.93$	$D_L = \beta \frac{U^2 B^2}{hu_*}$ $\beta = 0.18 \left(\frac{u_*}{U} \right)^{1.5}$
差異性	<p>該值放入許多未知影響因子，造成影響因子間因數值差異造成無因次延散係數變異性大。</p>	<p>利用無因次化簡化影響因子，降低數值間差異性造成的變異性。</p>

表 1.3 水力條件與延散係數量實地量測表

來源	測量河川	河寬 (m)	水深 (m)	流速 (m/s)	坡度	剪力速度 (m/s)	延散係數 (m ² /s)	Elder 式(1.1)	Liu 式(1.7)
Liu (1977)	Cooper Creek	13.34	0.49	0.24	0.00130	0.079	15.00	0.2300	8.89
	Clinch River	37.99	0.95	0.25	0.00036	0.058	9.10	0.3278	32.96
	Cooper Creek	14.02	0.38	0.19	0.00292	0.104	9.10	0.2331	13.05
	Powell River	28.44	0.85	0.16	0.00032	0.052	26.80	0.2624	15.80
	Clinch River	56.31	0.67	0.18	0.00032	0.046	19.70	0.1817	78.20
	Cooper Creek	16.27	0.85	0.62	0.00130	0.104	41.80	0.5230	14.22
	Clinch River	54.89	1.84	0.84	0.00040	0.085	11.10	0.9275	78.66
	Coachella Canal	23.91	1.56	0.68	0.00121	0.043	17.70	0.3978	11.31
	Coachella Canal	24.17	1.56	0.71	0.00121	0.043	17.70	0.3978	11.80
	Clinch River	52.65	1.47	0.66	0.00040	0.076	11.10	0.6625	75.91
	Cooper Creek	12.40	0.45	0.24	0.00130	0.076	15.40	0.2046	8.25
Missouri River	183.93	3.05	1.71	0.00020	0.077	1490.00	1.3927	724.47	
Fluorescent dye	24.91	1.1	0.32	0.00022	0.049	6.50	0.3196	12.72	
Radio-isotope	62.40	6.33	0.27	0.00005	0.056	3.56	2.1021	13.64	
Seo and Cheong (1998)	Antietam Creek, MD	12.80	0.30	0.42	0.00095	0.057	17.50	0.1014	15.21
	Antietam Creek, MD	24.08	0.98	0.59	0.00135	0.098	101.50	0.5695	25.61
	Antietam Creek, MD	11.89	0.66	0.43	0.00095	0.085	20.90	0.3327	7.37
	Antietam Creek, MD	21.03	0.48	0.62	0.00100	0.069	25.90	0.1964	34.30
	Monocacy River, MD	48.70	0.55	0.26	0.00050	0.052	37.80	0.1696	90.25
	Monocacy River, MD	92.96	0.71	0.16	0.00045	0.046	41.40	0.1937	187.95
	Monocacy River, MD	51.21	0.65	0.62	0.00040	0.044	29.60	0.1696	119.95
	Monocacy River, MD	97.54	1.15	0.32	0.00045	0.058	119.80	0.3955	202.88
	Monocacy River, MD	40.54	0.41	0.23	0.00045	0.040	66.50	0.0973	69.21
	Conococheague Creek, MD	42.21	0.69	0.23	0.00060	0.064	40.80	0.2619	56.39
	Conococheague Creek, MD	49.68	0.41	0.15	0.00060	0.081	29.30	0.1969	119.44
	Conococheague Creek, MD	42.98	1.13	0.63	0.00060	0.081	53.30	0.5428	66.47
	Chattahoochee River, GA	75.59	1.95	0.74	0.00072	0.138	88.90	1.5958	168.55
	Chattahoochee River, GA	91.90	2.44	0.52	0.00037	0.094	166.90	1.3601	137.75
	Salt Creek, NE	32.00	0.50	0.24	0.00033	0.038	52.20	0.1127	35.20
	Difficult Run, VA	14.48	0.31	0.25	0.00127	0.062	1.90	0.1140	15.16
	Bear Creek, CO	13.72	0.85	1.29	0.02720	0.553	2.90	2.7874	33.67
	Little Pincy Creek, MD	15.85	0.22	0.39	0.00130	0.053	7.10	0.0691	29.55
	Bayou Anacoco, LA	17.53	0.45	0.32	0.00054	0.024	5.80	0.0640	10.77
	Comite River, LA	15.70	0.23	0.36	0.00058	0.039	69.00	0.0532	22.86
	Bayou Bartholomew, LA	33.38	1.40	0.20	0.00007	0.031	54.70	0.2574	11.28
	Amite River, LA	21.34	0.52	0.54	0.00048	0.027	501.40	0.0833	19.03
	Tickfau River, LA	14.94	0.59	0.27	0.00117	0.080	10.30	0.2799	10.01
	Tangipahoa River, LA	31.39	0.81	0.48	0.00061	0.072	45.10	0.3458	40.71
	Tangipahoa River, LA	29.87	0.40	0.34	0.00069	0.020	44.00	0.0474	33.11
	Red River, LA	253.59	1.62	0.61	0.00007	0.032	143.80	0.3074	998.30
	Red River, LA	161.54	3.96	0.29	0.00009	0.060	130.50	1.4090	156.46
	Red River, LA	152.40	3.66	0.45	0.00009	0.057	227.60	1.2371	182.94
	Red River, LA	155.14	1.74	0.47	0.00008	0.036	177.70	0.3715	323.87
	Sabine River, LA	116.43	1.65	0.58	0.00014	0.054	131.30	0.5284	261.72
	Sabine River, LA	160.32	2.32	1.06	0.00013	0.054	308.90	0.7429	477.10
	Sabine River, TX	14.17	0.50	0.13	0.00029	0.037	12.80	0.1097	5.01
	Sabine River, TX	12.19	0.51	0.23	0.00018	0.030	14.70	0.0907	4.36
	Sabine River, TX	21.34	0.93	0.36	0.00013	0.035	24.20	0.1930	9.89
	Mississippi River, LA	711.20	19.94	0.56	0.00001	0.041	237.20	4.8480	691.86
	Mississippi River, MO	533.40	4.94	1.05	0.00012	0.069	457.70	2.0213	2790.84
	Mississippi River, MO	537.38	8.90	1.51	0.00012	0.097	374.10	5.1194	2235.22
	Wind/Bighorn River, WY	44.20	1.37	0.99	0.00150	0.142	184.60	1.1536	96.24
	Wind/Bighorn River, WY	85.34	2.38	1.74	0.00100	0.153	464.60	2.1593	284.20
	Cooper Creek, VA	16.66	0.49	0.30	0.00135	0.080	16.84	0.2325	15.80
	Clinch River, VA	48.46	1.16	0.21	0.00085	0.069	14.76	0.4746	43.86
	Cooper Creek, VA	18.29	0.38	0.15	0.00332	0.116	20.71	0.2614	20.90
	Powell River, TN	36.78	0.87	0.13	0.00032	0.054	15.50	0.2786	23.45
Clinch River, VA	28.65	0.61	0.35	0.00039	0.069	10.70	0.2496	37.64	
Cooper Creek, VA	19.61	0.84	0.49	0.00132	0.101	20.82	0.5031	18.33	
Clinch River, VA Coachella canal, CA	57.91	2.45	0.75	0.00041	0.104	40.49	1.5110	68.81	
Clinch River, VA	24.69	1.58	0.66	0.00010	0.041	5.92	0.3841	11.42	
Clinch River, VA	53.24	2.41	0.66	0.00043	0.107	36.93	1.5291	56.26	
Cooper Creek, VA	16.76	0.47	0.24	0.00135	0.080	24.62	0.2230	14.91	
Missouri River, IA	180.59	3.28	1.62	0.00020	0.078	1487.45	1.5171	636.20	
Bayou Anacoco, LA	25.91	0.94	0.34	0.00049	0.067	32.52	0.3735	19.40	

	測量河川	河寬 (m)	水深 (m)	流速 (m/s)	坡度	剪力速度 (m/s)	延散係數 (m ² /s)	Elder 式(1.1)	Liu 式(1.7)
	Bayou Anacoco, LA	36.58	0.91	0.40	0.00050	0.067	39.48	0.3616	43.33
	Nooksack River, WA	64.01	0.76	0.67	0.00963	0.268	34.84	1.2078	411.21
	Wind/Bighorn River, WY	59.44	1.10	0.88	0.00131	0.119	41.81	0.7762	187.09
	Wind/Bighorn River, WY	68.58	2.16	1.55	0.00133	0.168	162.58	2.1519	200.00
	John Day River, OR	24.99	0.58	1.01	0.00346	0.140	13.94	0.4815	72.88
	John Day River, OR	34.14	2.47	0.82	0.00134	0.180	65.03	2.6365	32.63
	Yadkin River, NC	70.10	2.35	0.43	0.00044	0.101	111.48	1.4075	78.44
	Yadkin River, NC	71.63	3.84	0.76	0.00044	0.128	260.13	2.9147	75.01

資料來源: Liu(1977)&Seo and Cheong (1998)



表 1.4 α 與 β 差異性分析表

	延散係數	α	$\alpha = \frac{D_L}{(Ru_c)}$	誤差	式(1.9)	$\alpha = \frac{D_L}{(Ru_c)}$	誤差	式(1.8)	$\beta = \frac{D_L u_c R^3}{Q^2}$	誤差
Antietam Creek, MD	17.5	5.93	1023.4	1.0	786.0	1023.4	0.2	0.009	0.0104	0.1
Antietam Creek, MD	101.5	5.93	1056.9	1.0	309.7	1056.9	0.7	0.012	0.0483	0.7
Antietam Creek, MD	20.9	5.93	372.5	1.0	170.1	372.5	0.5	0.016	0.0449	0.6
Antietam Creek, MD	25.9	5.93	782.0	1.0	1040.6	782.0	0.3	0.007	0.0050	0.3
Monocacy River, MD	37.8	5.93	1321.7	1.0	1188.2	1321.7	0.1	0.016	0.0067	1.4
Monocacy River, MD	41.4	5.93	1267.6	1.0	1221.3	1267.6	0.0	0.028	0.0061	3.5
Monocacy River, MD	29.6	5.93	1035.0	1.0	3758.2	1035.0	2.6	0.003	0.0008	3.1
Monocacy River, MD	119.8	5.93	1796.1	1.0	1274.6	1796.1	0.3	0.014	0.0082	0.7
Monocacy River, MD	66.5	5.93	4054.9	1.0	1620.8	4054.9	0.6	0.013	0.0125	0.0
Conococheague Creek, MD	40.8	5.93	923.9	1.0	499.0	923.9	0.5	0.026	0.0191	0.4
Conococheague Creek, MD	29.3	5.93	882.3	1.0	505.0	882.3	0.4	0.071	0.0175	3.1
Conococheague Creek, MD	53.3	5.93	582.3	1.0	730.1	582.3	0.3	0.008	0.0067	0.2
Chattahoochee River, GA	88.9	5.93	330.4	1.0	469.5	330.4	0.4	0.014	0.0076	0.9
Chattahoochee River, GA	166.9	5.93	727.7	1.0	471.2	727.7	0.4	0.014	0.0168	0.2
Salt Creek, NE	52.2	5.93	2747.4	1.0	1067.4	2747.4	0.6	0.011	0.0168	0.3
Difficult Run, VA	1.9	5.93	98.9	0.9	413.5	98.9	3.2	0.022	0.0028	7.0
Bear Creek, CO	2.9	5.93	6.2	0.0	56.5	6.2	8.2	0.051	0.0044	10.6
Little Pincy Creek, MD	7.1	5.93	608.9	1.0	1494.6	608.9	1.5	0.009	0.0022	3.2
Bayou Anacoco, LA	5.8	5.93	537.0	1.0	1474.9	537.0	1.7	0.004	0.0020	0.9
Comite River, LA	69	5.93	7692.3	1.0	1856.8	7692.3	0.8	0.006	0.0194	0.7
Bayou Bartholomew, LA	54.7	5.93	1260.4	1.0	325.4	1260.4	0.7	0.011	0.0533	0.8
Amite River, LA	501.4	5.93	35712.3	1.0	2610.3	35712.3	0.9	0.002	0.0530	1.0
Tickfau River, LA	10.3	5.93	218.2	1.0	155.9	218.2	0.3	0.029	0.0299	0.0
Tangipahoa River, LA	45.1	5.93	773.3	1.0	616.1	773.3	0.2	0.010	0.0116	0.1
Tangipahoa River, LA	44	5.93	5500.0	1.0	4448.8	5500.0	0.2	0.003	0.0034	0.2
Red River, LA	143.8	5.93	2773.9	1.0	12758.0	2773.9	3.6	0.002	0.0003	5.9
Red River, LA	130.5	5.93	549.2	1.0	439.0	549.2	0.2	0.017	0.0141	0.2
Red River, LA	227.6	5.93	1091.0	1.0	831.5	1091.0	0.2	0.008	0.0101	0.2
Red River, LA	177.7	5.93	2836.8	1.0	3977.8	2836.8	0.4	0.004	0.0021	0.8
Sabine River, LA	131.3	5.93	1473.6	1.0	2337.4	1473.6	0.6	0.005	0.0026	1.0
Sabine River, LA	308.9	5.93	2465.7	1.0	4840.7	2465.7	1.0	0.002	0.0013	0.5
Sabine River, TX	12.8	5.93	691.9	1.0	188.3	691.9	0.7	0.027	0.0698	0.6
Sabine River, TX	14.7	5.93	960.8	1.0	405.0	960.8	0.6	0.008	0.0286	0.7
Sabine River, TX	24.2	5.93	743.5	1.0	556.1	743.5	0.3	0.005	0.0133	0.6
Mississippi River, LA	237.2	5.93	290.1	1.0	1363.7	290.1	3.7	0.004	0.0012	1.9
Mississippi River, MO	457.7	5.93	1342.8	1.0	6096.7	1342.8	3.5	0.003	0.0005	5.1
Mississippi River, MO	374.1	5.93	433.3	1.0	3068.5	433.3	6.1	0.003	0.0005	5.0
Wind/Bighorn River, WY	184.6	5.93	948.9	1.0	520.1	948.9	0.5	0.010	0.0188	0.5
Wind/Bighorn River, WY	464.6	5.93	1275.9	1.0	1091.8	1275.9	0.1	0.005	0.0077	0.4
Cooper Creek, VA	16.84	5.93	429.6	1.0	255.5	429.6	0.4	0.025	0.0264	0.1
Clinch River, VA	14.76	5.93	184.4	1.0	253.6	184.4	0.4	0.034	0.0114	2.0
Cooper Creek, VA	20.71	5.93	469.8	1.0	103.5	469.8	0.8	0.122	0.1213	0.0
Powell River, TN	15.5	5.93	329.9	1.0	192.0	329.9	0.4	0.048	0.0319	0.5
Clinch River, VA	10.7	5.93	254.2	1.0	554.6	254.2	1.2	0.016	0.0045	2.5
Cooper Creek, VA	20.82	5.93	245.4	1.0	222.0	245.4	0.1	0.017	0.0191	0.1
Clinch River, VACoachella canal, CA	40.49	5.93	158.9	1.0	370.0	158.9	1.3	0.009	0.0055	0.7
Clinch River, VA	5.92	5.93	91.4	0.9	606.9	91.4	5.6	0.003	0.0014	0.9
Cooper Creek, VA	36.93	5.93	143.2	1.0	280.1	143.2	1.0	0.012	0.0077	0.5
Cooper Creek, VA	24.62	5.93	654.8	1.0	205.0	654.8	0.7	0.035	0.0572	0.4
Missouri River, IA	1487.45	5.93	5814.0	1.0	3927.9	5814.0	0.3	0.002	0.0044	0.6
Bayou Anacoco, LA	32.52	5.93	516.4	1.0	288.1	516.4	0.4	0.016	0.0264	0.4
Bayou Anacoco, LA	39.48	5.93	647.5	1.0	561.5	647.5	0.1	0.012	0.0112	0.1
Nooksack River, WA	34.84	5.93	171.1	1.0	469.8	171.1	1.7	0.046	0.0039	10.8
Wind/Bighorn River, WY	41.81	5.93	319.4	1.0	1055.7	319.4	2.3	0.009	0.0020	3.5
Wind/Bighorn River, WY	162.58	5.93	448.0	1.0	723.8	448.0	0.6	0.006	0.0052	0.2
John Day River, OR	13.94	5.93	171.7	1.0	774.7	171.7	3.5	0.009	0.0018	4.2
John Day River, OR	65.03	5.93	146.3	1.0	107.7	146.3	0.3	0.019	0.0369	0.5
Yadkin River, NC	111.48	5.93	469.7	1.0	254.9	469.7	0.5	0.020	0.0291	0.3
Yadkin River, NC	260.13	5.93	529.2	1.0	216.9	529.2	0.6	0.012	0.0431	0.7
Cooper Creek	15	5.93	386.7	1.0	145.2	386.7	0.6	0.035	0.0592	0.4

Clinch River	9.1	5.93	164.6	1.0	373.6	164.6	1.3	0.020	0.0055	2.6
Cooper Creek	9.1	5.93	231.5	1.0	113.5	231.5	0.5	0.075	0.0520	0.4
Powell River	26.8	5.93	605.6	1.0	201.5	605.6	0.7	0.032	0.0545	0.4
Clinch River	19.7	5.93	643.0	1.0	832.1	643.0	0.3	0.023	0.0058	3.0
Cooper Creek	41.8	5.93	474.0	1.0	223.8	474.0	0.5	0.012	0.0367	0.7
Clinch River	11.1	5.93	71.0	0.9	728.3	71.0	9.3	0.006	0.0008	6.1
Coachella Canel	17.7	5.93	263.9	1.0	582.7	263.9	1.2	0.003	0.0045	0.4
Coachella Canel	17.7	5.93	263.9	1.0	623.2	263.9	1.4	0.003	0.0040	0.3
Clinch River	11.1	5.93	99.4	0.9	775.3	99.4	6.8	0.007	0.0010	5.8
Cooper Creek	15.4	5.93	446.3	1.0	158.3	446.3	0.6	0.032	0.0595	0.5
Missouri River	1490	5.93	6344.5	1.0	4776.9	6344.5	0.2	0.002	0.0035	0.5
Fluorescent dye	6.5	5.93	120.6	1.0	310.1	120.6	1.6	0.011	0.0055	1.0
Radio-isotope	3.56	5.93	10.0	0.4	76.6	10.0	6.6	0.017	0.0044	2.8
<i>MIN</i>			6.2		56.5	6.2		0.002	0.0003	
<i>MAX</i>			35712.3		12758.0	35712.3		0.122	0.1213	
<i>MIN/MAX</i>			5788		226	5788		71	389	



表 1.5 無因次延散係數 β 正確率比較表

	α	$\alpha = \frac{D_L}{(Ru_*^3)}$	差異比	正確率	式(1.9)	$\alpha = \frac{D_L}{(Ru_*^3)}$	差異比	正確率	式(1.8)	$\beta = \frac{D_L u_* R^3}{Q^2}$	差異比	正確率
Antietam Creek, MD	5.93	1023.39	-2.24	X	785.97	1023.39	-0.11	V	0.01	0.01	-0.06	V
Antietam Creek, MD	5.93	1056.85	-2.25	X	309.70	1056.85	-0.53	X	0.01	0.05	-0.60	X
Antietam Creek, MD	5.93	372.55	-1.80	X	170.09	372.55	-0.34	X	0.02	0.04	-0.45	X
Antietam Creek, MD	5.93	782.00	-2.12	X	1040.58	782.00	0.12	V	0.01	0.01	0.12	V
Monocacy River, MD	5.93	1321.68	-2.35	X	1188.25	1321.68	-0.05	V	0.02	0.01	0.38	V
Monocacy River, MD	5.93	1267.61	-2.33	X	1221.35	1267.61	-0.02	V	0.03	0.01	0.66	X
Monocacy River, MD	5.93	1034.97	-2.24	X	3758.17	1034.97	0.56	X	0.00	0.00	0.61	X
Monocacy River, MD	5.93	1796.10	-2.48	X	1274.59	1796.10	-0.15	V	0.01	0.01	0.23	V
Monocacy River, MD	5.93	4054.88	-2.83	X	1620.83	4054.88	-0.40	X	0.01	0.01	0.02	V
Conococheague Creek, MD	5.93	923.91	-2.19	X	498.99	923.91	-0.27	V	0.03	0.02	0.14	V
Conococheague Creek, MD	5.93	882.26	-2.17	X	504.97	882.26	-0.24	V	0.07	0.02	0.61	X
Conococheague Creek, MD	5.93	582.32	-1.99	X	730.10	582.32	0.10	V	0.01	0.01	0.10	V
Chattahoochee River, GA	5.93	330.36	-1.75	X	469.50	330.36	0.15	V	0.01	0.01	0.28	V
Chattahoochee River, GA	5.93	727.68	-2.09	X	471.15	727.68	-0.19	V	0.01	0.02	-0.08	V
Salt Creek, NE	5.93	2747.37	-2.67	X	1067.37	2747.37	-0.41	X	0.01	0.02	-0.17	V
Difficult Run, VA	5.93	98.86	-1.22	X	413.51	98.86	0.62	X	0.02	0.00	0.90	V
Bear Creek, CO	5.93	6.17	-0.02	V	56.46	6.17	0.96	X	0.05	0.00	1.06	X
Little Pincy Creek, MD	5.93	608.92	-2.01	X	1494.59	608.92	0.39	X	0.01	0.00	0.62	X
Bayou Anacoco, LA	5.93	537.04	-1.96	X	1474.87	537.04	0.44	X	0.00	0.00	0.27	V
Comite River, LA	5.93	7692.31	-3.11	X	1856.77	7692.31	-0.62	X	0.01	0.02	-0.48	X
Bayou Bartholomew, LA	5.93	1260.37	-2.33	X	325.40	1260.37	-0.59	X	0.01	0.05	-0.69	X
Amite River, LA	5.93	35712.25	-3.78	X	2610.31	35712.25	-1.14	X	0.00	0.05	-1.42	X
Tickfau River, LA	5.93	218.22	-1.57	X	155.89	218.22	-0.15	V	0.03	0.03	-0.01	V
Tangipahoa River, LA	5.93	773.32	-2.12	X	616.14	773.32	-0.10	V	0.01	0.01	-0.04	V
Tangipahoa River, LA	5.93	5500.00	-2.97	X	4448.84	5500.00	-0.09	V	0.00	0.00	-0.12	V
Red River, LA	5.93	2773.92	-2.67	X	12758.04	2773.92	0.66	X	0.00	0.00	0.84	X
Red River, LA	5.93	549.24	-1.97	X	439.04	549.24	-0.10	V	0.02	0.01	0.08	V
Red River, LA	5.93	1090.98	-2.26	X	831.46	1090.98	-0.12	V	0.01	0.01	-0.09	V
Red River, LA	5.93	2836.85	-2.68	X	3977.76	2836.85	0.15	V	0.00	0.00	0.26	V
Sabine River, LA	5.93	1473.63	-2.40	X	2337.37	1473.63	0.20	V	0.01	0.00	0.30	V
Sabine River, LA	5.93	2465.68	-2.62	X	4840.66	2465.68	0.29	V	0.00	0.00	0.19	V
Sabine River, TX	5.93	691.89	-2.07	X	188.28	691.89	-0.57	X	0.03	0.07	-0.41	X
Sabine River, TX	5.93	960.78	-2.21	X	404.96	960.78	-0.38	X	0.01	0.03	-0.53	X
Sabine River, TX	5.93	743.47	-2.10	X	556.09	743.47	-0.13	V	0.01	0.01	-0.39	X
Mississippi River, LA	5.93	290.14	-1.69	X	1363.71	290.14	0.67	X	0.00	0.00	0.46	X
Mississippi River, MO	5.93	1342.78	-2.35	X	6096.72	1342.78	0.66	X	0.00	0.00	0.79	X
Mississippi River, MO	5.93	433.34	-1.86	X	3068.55	433.34	0.85	X	0.00	0.00	0.78	V
Wind/Bighorn River, WY	5.93	948.91	-2.20	X	520.08	948.91	-0.26	V	0.01	0.02	-0.28	V
Cooper Creek, VA	5.93	429.59	-1.86	X	255.53	429.59	-0.23	V	0.02	0.03	-0.03	V
Clinch River, VA	5.93	184.41	-1.49	X	253.59	184.41	0.14	V	0.03	0.01	0.47	X
Cooper Creek, VA	5.93	469.83	-1.90	X	103.54	469.83	-0.66	X	0.12	0.12	0.00	V
Powell River, TN	5.93	329.93	-1.75	X	191.96	329.93	-0.24	V	0.05	0.03	0.18	V
Clinch River, VA	5.93	254.22	-1.63	X	554.64	254.22	0.34	X	0.02	0.00	0.55	X
Cooper Creek, VA	5.93	245.40	-1.62	X	222.03	245.40	-0.04	V	0.02	0.02	-0.06	V
Clinch River, VACoachella canal, CA	5.93	158.91	-1.43	X	370.02	158.91	0.37	X	0.01	0.01	0.23	V
Clinch River, VA	5.93	91.39	-1.19	X	606.85	91.39	0.82	X	0.00	0.00	0.29	V
Clinch River, VA	5.93	143.21	-1.38	X	280.07	143.21	0.29	V	0.01	0.01	0.18	V
Cooper Creek, VA	5.93	654.79	-2.04	X	205.00	654.79	-0.50	X	0.03	0.06	-0.22	V
Missouri River, IA	5.93	5813.99	-2.99	X	3927.93	5813.99	-0.17	V	0.00	0.00	-0.37	X
Bayou Anacoco, LA	5.93	516.35	-1.94	X	288.11	516.35	-0.25	V	0.02	0.03	-0.22	V
Bayou Anacoco, LA	5.93	647.53	-2.04	X	561.47	647.53	-0.06	V	0.01	0.01	0.04	V
Nooksack River, WA	5.93	171.05	-1.46	X	469.77	171.05	0.44	X	0.05	0.00	1.07	X
Wind/Bighorn River, WY	5.93	319.40	-1.73	X	1055.73	319.40	0.52	X	0.01	0.00	0.65	X
Wind/Bighorn River, WY	5.93	448.03	-1.88	X	723.77	448.03	0.21	V	0.01	0.01	0.09	V
John Day River, OR	5.93	171.67	-1.46	X	774.74	171.67	0.65	X	0.01	0.00	0.72	X
John Day River, OR	5.93	146.27	-1.39	X	107.71	146.27	-0.13	V	0.02	0.04	-0.30	V
Yadkin River, NC	5.93	469.69	-1.90	X	254.94	469.69	-0.27	V	0.02	0.03	-0.15	V
Yadkin River, NC	5.93	529.24	-1.95	X	216.88	529.24	-0.39	X	0.01	0.04	-0.54	X
Cooper Creek	5.93	386.71	-1.81	X	145.18	386.71	-0.43	X	0.04	0.06	-0.23	V
Clinch River	5.93	164.63	-1.44	X	373.56	164.63	0.36	X	0.02	0.01	0.56	X

Cooper Creek	5.93	231.48	-1.59	X	113.47	231.48	-0.31	X	0.07	0.05	0.16	V
Powell River	5.93	605.62	-2.01	X	201.49	605.62	-0.48	X	0.03	0.05	-0.23	V
Clinch River	5.93	643.03	-2.04	X	832.10	643.03	0.11	V	0.02	0.01	0.60	X
Cooper Creek	5.93	473.97	-1.90	X	223.84	473.97	-0.33	X	0.01	0.04	-0.47	X
Clinch River	5.93	70.97	-1.08	X	728.30	70.97	1.01	X	0.01	0.00	0.85	X
Coachella Canel	5.93	263.86	-1.65	X	582.75	263.86	0.34	X	0.00	0.00	-0.19	V
Coachella Canel	5.93	263.86	-1.65	X	623.15	263.86	0.37	X	0.00	0.00	-0.18	V
Clinch River	5.93	99.36	-1.22	X	775.29	99.36	0.89	X	0.01	0.00	0.83	X
Cooper Creek	5.93	446.33	-1.88	X	158.28	446.33	-0.45	X	0.03	0.06	-0.27	V
Missouri River	5.93	6344.48	-3.03	X	4776.89	6344.48	-0.12	V	0.00	0.00	-0.319	X
Fluorescent dye	5.93	120.59	-1.31	X	310.10	120.59	0.41	X	0.01	0.01	0.29	V
Radio-isotope	5.93	10.04	-0.23	V	76.65	10.04	0.88	X	0.02	0.00	0.58	X
正確率 Accuracy				2.74%				46.58%				54.79%

(V:介於合理範圍；x:未介於合理範圍)



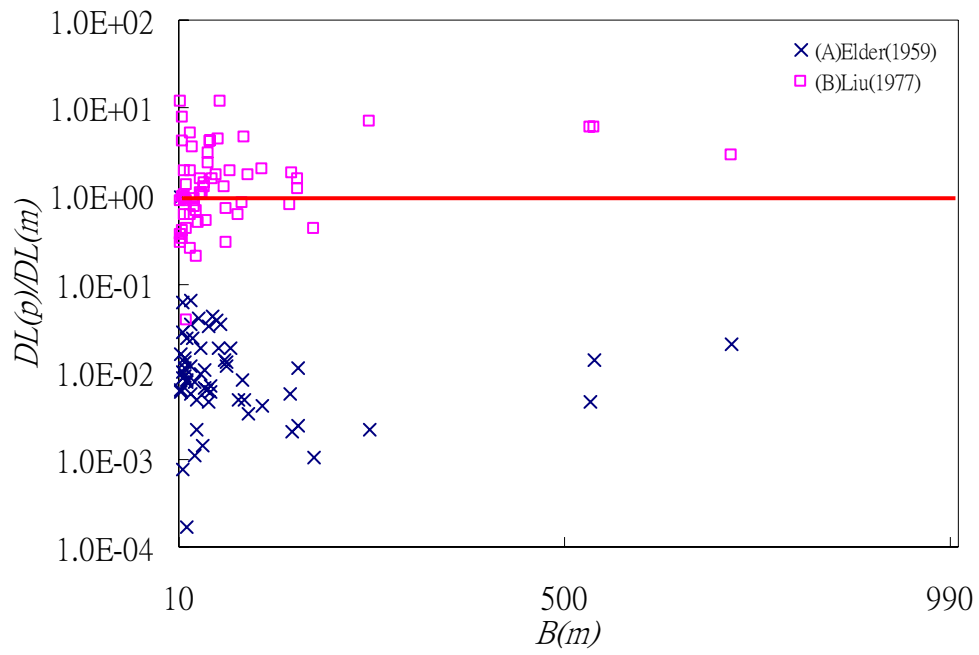


圖 1.1 Elder 與 Liu 之延散係數公式比較(Seo and Cheong, 1998)



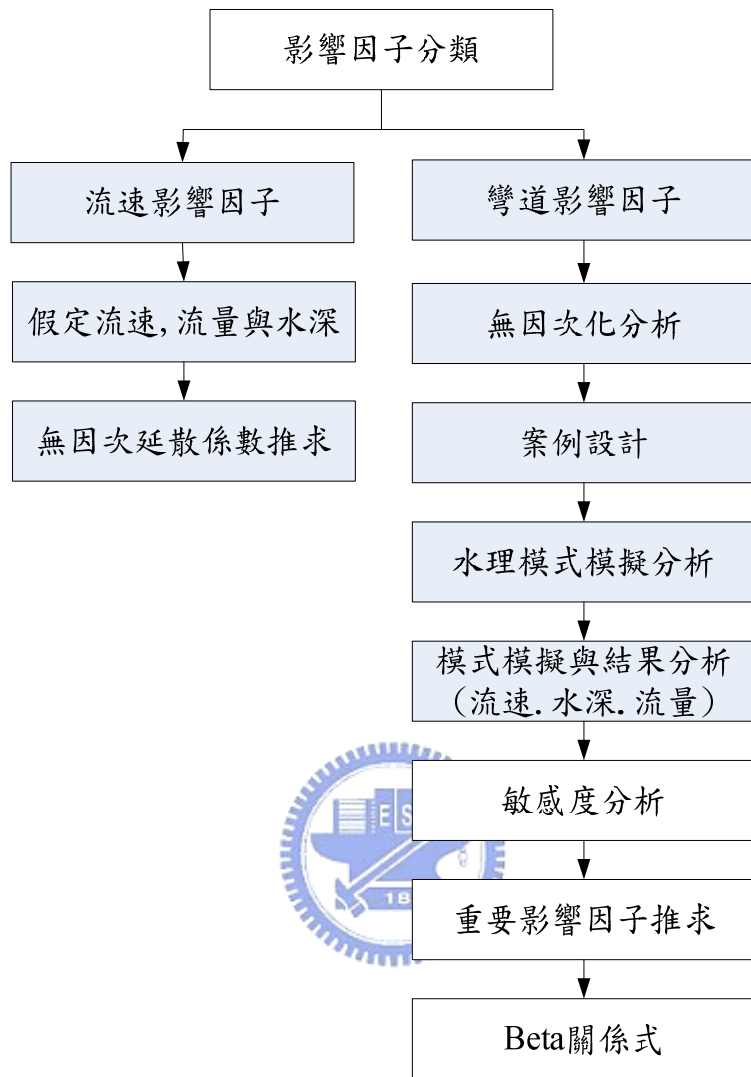


圖 1.2 分析流程圖

第二章 理論基礎

2.1 無因次延散係數理論基礎

為了解無因次延散係數對縱向延散係數之影響，首先針對污染物排入河川之混合傳輸機制進行概述；當該機制於斷面間完全發生後，縱向延散效應即成為最主要之影響方式，以下將進一步針對縱向延散係數進行理論說明。

污染之縱向延散對於計算風險與災害預防極為重要，污染物之延散過程主要利用移流擴散項進行描述，式(2.1)，根據式(2.1)可得知，水中傳輸過程與污染物運移結果亦受縱向延散係數影響。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

式中， C 為濃度； t 為時間。根據 1.2 節所述，目前已有許多相關研究；其中 Liu(1977)利用 Fischer(1967)提出之縱向延散係數三重積分式，式(1.3)與(1.4)，進行無因次化分析。

$$D_L = -\frac{1}{A} \int_0^B q'(z) \int_0^z \varepsilon_z^{-1}(z) h^{-1}(z) \int_0^z q'(z) dz dz dz \quad (1.3)$$

$$q'(z) = \int_0^{h(z)} u'(y, z) dy = q(z) - Uh(z) \quad (1.4)$$

Liu(1977)應用檢視分析(inspectional analysis)，提出無因次化因子如下

$$y = Ry^0, \quad h = Rh^0, \quad z = Bz^0, \quad u = Uu^0, \quad q = URq^0 \quad (2.2)$$

將式(2.2)帶入式(1.4)中，得到

$$q'(z) = RU \int_0^{h^0} (u^0 - 1) dy^0 = RU(q^0 - h^0) \quad (2.3)$$

其中，式(1.3)之側向擴散係數可表示為

$$\varepsilon_z = k h u_* \quad (2.4)$$

將式(2.3)與式(2.4)代入式(1.3)，可得

$$D_L = \beta \frac{U^2 B^3}{u_* A} \quad (2.5)$$

其中， β 為無因次延散係數，表示如下

$$\beta = -\frac{1}{k} \int_0^1 (h^0 - q^0) \int_0^{z^0} (h^0)^{-2} \int_0^{z^0} (h^0 - q^0) dz^0 dz^0 dz^0 \quad (2.6)$$

本研究係利用 Liu(1977)提出之式(2.6)為基礎，利用已知之水深、流速與流量資料，進行無因次延散係數三重積分式計算。

2.2 二維水理模式

為分析彎道效應對縱向延散係數之影響，因此，需採用具有彎道模擬功能之二維水理數值模式進行計算，以求得無因次延散係數分析過程中，所需之水深、流速等相關資訊。

本研究係採用 Hsieh and Yang (2003) 所發展之二維彎道模式進行案例模擬，該模式係透過座標系統轉換將控制方程式轉換為正交曲線座標系統方程式，再將此控制方程式作時間平均及水深平均後，即可推得水深平均二維正交曲線座標模式所需之控制方程式。其中水理控制方程式包含水理連續及動量方程式，茲將理論基礎與數值架構敘述如下：

2.2.1 模式理論架構

一、控制方程式

為適度減化複雜的控制方程式，需將數學模式做若干假設，分為(1)不可壓縮牛頓流體(incompressible Newtonian fluid)；(2)靜水壓分布；(3)忽略風剪力；(4)忽略科氏力。則水深二維正交曲線座標水理

控制方程式可表示為

(1) 水流連續方程式

$$h_1 h_2 \frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 \bar{u} d) + \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 \bar{v} d) = 0 \quad (2.7)$$

(2) 水流動量方程式

ξ 方向：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\bar{u}}{h_1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \frac{\bar{v}}{h_2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \eta} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \bar{u} \bar{v} - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} \bar{v}^2 = \\ & - \frac{g}{h_1} \frac{\partial}{\partial \xi} (z_b + d) + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 T_{11}) + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 T_{12}) \\ & + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} T_{12} - \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} T_{22} - \frac{\tau_{b1}}{\rho d} \\ & + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \left[- (h_2 \tau_{11})_s \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + (h_2 \tau_{11})_b \frac{\partial z_b}{\partial \xi} - (h_1 \tau_{12})_s \frac{\partial z_s}{\partial \eta} + (h_1 \tau_{12})_b \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

η 方向：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\bar{u}}{h_1} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \xi} + \frac{\bar{v}}{h_2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} \bar{u} \bar{v} - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \bar{v}^2 = \\ & - \frac{g}{h_2} \frac{\partial}{\partial \eta} (z_b + d) + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 T_{12}) + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 T_{22}) \\ & - \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} T_{11} + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} T_{12} - \frac{\tau_{b2}}{\rho d} \\ & + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \left[- (h_2 \tau_{12})_s \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + (h_2 \tau_{12})_b \frac{\partial z_b}{\partial \xi} - (h_1 \tau_{22})_s \frac{\partial z_s}{\partial \eta} + (h_1 \tau_{22})_b \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

式中，

$$T_{11} = \int_{z_b}^{z_s} \left[\tau_{11} - \rho \bar{u}^2 - \rho (\bar{u} - \bar{u})^2 \right] dz \quad (2.10)$$

$$T_{22} = \int_{z_b}^{z_s} \left[\tau_{22} - \rho \bar{v}^2 - \rho (\bar{v} - \bar{v})^2 \right] dz \quad (2.11)$$

$$T_{12} = T_{21} = \int_{z_b}^{z_s} \left[\tau_{12} - \rho \bar{u}' \bar{v}' - \rho (\bar{u} - \bar{u}) (\bar{v} - \bar{v}) \right] dz \quad (2.12)$$

以上諸式中， ξ 、 η = 平面上兩正交曲座標方向； h_1 = ξ 方向轉換係數；

h_2 = η 方向轉換係數； u = ξ 方向速度； v = η 方向速度； ρ = 流體密度；

d = 水深； g = 重力加速度； t = 時間； z_b = 底床高程； z_s = 水面高程；
 τ_{b_i} = 底床剪應力在 ξ 與 η 方向之分量； $(\bar{\quad})$ = 時間平均； $(\bar{\quad})$ = 水深平均；
 (\cdot) = 時間平均瞬時擾動量；下標 s 、 b 分別代表變數在水面與底床的
 值； T_{11}, T_{12}, T_{22} = 有效剪應力項(effective stress term)，包含層流剪應力、
 亂流剪應力與延散剪應力(dispersion stresses)。

二、輔助關係式

(1) 底床剪應力

底床剪應力採用 Rastogi and Rodi (1978) 之經驗式

$$\tau_{b_1} = C_f \rho \bar{u} \left(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

$$\tau_{b_2} = C_f \rho \bar{v} \left(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

式中， $C_f = \frac{g}{c^2}$ = 摩擦係數； c = Chezy 係數。

(2) 層流與亂流剪應力

採用 Boussinesq 之渦流黏性理論，層流與亂流剪應力可合併表示為

$$\frac{\tau_{11} - \overline{u'^2}}{\rho} = 2\nu \left[\frac{1}{h_1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \frac{\bar{v}}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \right] \quad (2.15)$$

$$\frac{\tau_{22} - \overline{v'^2}}{\rho} = 2\nu \left[\frac{1}{h_2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \frac{\bar{u}}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} \right] \quad (2.16)$$

$$\frac{\tau_{12} - \overline{u'v'}}{\rho} = 2\nu \left[\frac{h_2}{h_1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\bar{v}}{h_2} \right) + \frac{h_1}{h_2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\bar{u}}{h_1} \right) \right] \quad (2.17)$$

式中， $\nu = \nu_l + \nu_t$ ； ν_l = 層流黏滯係數； ν_t = 亂流黏滯係數 = $\frac{k u_* d}{6}$ (Falcon,

1979)； $u_* = \left(\frac{\tau_b}{\rho} \right)^{1/2}$ = 剪力速度； k = von Karman's 係數(約等於 0.4)。

(3) 延散剪應力

為積分水深平均所產生之延散剪應力項，須對流速剖面作一適當假設。本模式在延散剪應力的處理方面，僅考量二次流的影響，並採用 de Vriend (1977)對二次流速度剖面之假設：

$$\bar{u} = \bar{u} \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{kc} + \frac{\sqrt{g}}{kc} \ln \zeta \right] = \bar{u} f_m(\zeta) \quad (2.18)$$

$$\bar{v} = \bar{v} f_m(\zeta) + \frac{\bar{u}d}{k^2 r} \left[2F_1(\zeta) + \frac{\sqrt{g}}{kc} F_2(\zeta) - 2 \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{kc} \right) f_m(\zeta) \right] \quad (2.19)$$

式中， $F_1(\zeta) = \int_0^1 \frac{\ln \zeta}{\zeta - 1} d\zeta$ ； $F_2(\zeta) = \int_0^1 \frac{\ln^2 \zeta}{\zeta - 1} d\zeta$ ； $r =$ 曲率半徑； $\zeta = \frac{(z - z_b)}{d} =$

距離底床之高度與水深之比值。

de Vriend (1977)之二次流速度剖面之適用範圍為(1)水深遠小於渠道寬度；(2)渠道寬度遠小於渠道之曲率半徑；(3)單一二次流(single secondary eddy only)；(4)完全發展流況(developed flow)。

三、邊界條件

本模式目前考量三種邊界條件設定，分別為渠道入流、渠道出流與固體邊界。一般而言，渠道入流邊界條件設定為單位寬度入流量，渠道出流邊界條件則採用水位高程設定。在固體邊界處，應用側壁理論(law of the wall)，設定靠近固體邊界的邊界條件為

$$\frac{u_w}{U_*} = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad (2.20)$$

式中， $u_w =$ 近固體邊界的水深平均速度； $E =$ 糙度因子=9.0(Lien 等 1999b)； $y^+ = \frac{y_w U_*}{\nu}$ ， $y_w =$ 固體邊界與鄰近固體邊界格點的距離。

2.2.2 數值架構

一、隱式雙階分割操作趨近法

本研究基於分割操作之觀念，將動量方程式分割成兩個步驟(延散

步驟及傳播步驟)，並利用隱式數值方法求解。延散步驟求解移流項和擴散項，擴散步驟求解壓力項、底床剪應力量項和連續方程式。據此，水理控制方程式可改寫成

延散步驟

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)^{n+\frac{1}{2}} = -(V^n \cdot \nabla)V^{n+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot T^{n+\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

傳播步驟

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)^{n+1} - \left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)^{n+\frac{1}{2}} = -g \nabla(z_b + d)^{n+1} - \frac{\tau_b}{\rho d} \quad (2.22)$$

$$\nabla \cdot V^{n+1} = 0 \quad (2.23)$$

式中， V = 速度向量； T = 擴散及延散項； $n+1 = (n+1)\Delta t$ 時刻之未知變數； $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ ； $n = n\Delta t$ 時刻之已知變數； $n + \frac{1}{2} = (n+1)\Delta t$ 與 $n\Delta t$ 間之未知變數。



(2.21)~(2.23)的一般式可表示為

延散步驟

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = & -\frac{\bar{u}}{h_1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} - \frac{\bar{v}}{h_2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \eta} - \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial h_1}{\partial \eta} \bar{u} \bar{v} - \frac{\partial h_2}{\partial \xi} \bar{v}^2 \right] \\ & + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial (h_1 T_{12})}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial (h_2 T_{11})}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} T_{12} - \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} T_{22} \quad (2.24) \\ & + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \left[-(h_2 \tau_{11})_s \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + (h_2 \tau_{11})_b \frac{\partial z_b}{\partial \xi} - (h_1 \tau_{12})_s \frac{\partial z_s}{\partial \eta} + (h_1 \tau_{12})_b \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = & -\frac{\bar{u}}{h_1} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \xi} - \frac{\bar{v}}{h_2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} - \frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial h_2}{\partial \xi} \bar{u} \bar{v} + \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \bar{u}^2 \right] \\
& + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial (h_2 T_{12})}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial (h_1 T_{22})}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} T_{11} + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} T_{12} \quad (2.25) \\
& + \frac{1}{\rho h_1 h_2 d} \left[-(h_2 \tau_{12})_s \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + (h_2 \tau_{12})_b \frac{\partial z_b}{\partial \xi} - (h_1 \tau_{22})_s \frac{\partial z_s}{\partial \eta} + (h_1 \tau_{22})_b \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right]
\end{aligned}$$

傳播步驟

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{g}{h_1} \left(\frac{\partial (z_b + d)}{\partial \xi} \right) - \frac{C_f \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{d} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{g}{h_2} \left(\frac{\partial (z_b + d)}{\partial \eta} \right) - \frac{C_f \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{d} \quad (2.27)$$

和

$$h_1 h_2 \frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial (h_2 \bar{u} d)}{\partial \xi} + \frac{\partial (h_1 \bar{v} d)}{\partial \eta} = 0 \quad (2.28)$$

針對 $n+1$ 時刻的水深值(d^{n+1})做線性化處理，且僅保留一階項，
(2.28)式可改寫成

$$h_1 h_2 \frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\alpha_1 \frac{\partial (\Delta d)}{\partial \xi} + \beta_1 \Delta d + \gamma_1 \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\alpha_2 \frac{\partial (\Delta d)}{\partial \eta} + \beta_2 \Delta d + \gamma_2 \right) = 0 \quad (2.29)$$

式中， $\alpha_1 = -\frac{h_2 g \Delta t}{C_r h_1} d^n$ ； $\beta_1 = \frac{h_2}{C_r} \bar{u}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{h_2 g \Delta t}{C_r h_1} \left[\frac{\partial z_b^{n+1}}{\partial \xi} + \frac{\partial d^n}{\partial \xi} \right]$ ； $\gamma_1 = \beta_1 d$ ；

$\alpha_2 = -\frac{h_1 g \Delta t}{C_r h_2} d^n$ ； $\beta_2 = \frac{h_1}{C_r} \bar{v}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{h_1 g \Delta t}{C_r h_2} \left[\frac{\partial z_b^{n+1}}{\partial \eta} + \frac{\partial d^n}{\partial \eta} \right]$ ； $\gamma_2 = \beta_2 d^n$ ；

$$C_r = 1 + \Delta t \frac{C_f \sqrt{\left(\bar{u}^{n+\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(\bar{v}^{n+\frac{1}{2}} \right)^2}}{d^n} ; \Delta d = d^{n+1} - d^n .$$

二、數值差分式

在數值差分方法選的考量上，利用顯示數值方法求解時，演算時間間隔將會受到很大的限制，在模擬天然明渠水流問題時將耗費冗長的演算時間與龐大的電腦計算量，在應用上有其困難存在。為解決這個問題，本研究採用隱式數值方法求解。

本模式採用控制體積(control volume)法的觀念來離散控制方程式，控制體積法的基本概念如圖 2.1 所示，其中(a)圖為實際區域，(b)圖為計算區域，E、W、N、S 表相鄰格點，e、w、n、s 表控制面。在水理控制方程式中，除了移流項採用一階精度混合型上風法(hybrid scheme)(Spalding 1972)差分外，所有空間差分均採用二階精度的中央差分法。另外，時間項則採用簡單的前項差分法。

中央差分法可表示為

$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \xi}\right)_p^{n+1} = \frac{\Psi_e^{n+1} - \Psi_w^{n+1}}{\Delta \xi} \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \eta}\right)_p^{n+1} = \frac{\Psi_n^{n+1} - \Psi_s^{n+1}}{\Delta \eta} \quad (2.31)$$

式中，

$$\Psi_e^{n+1} = 0.5 \cdot (\Psi_E^{n+1} + \Psi_P^{n+1}) = 0.5 \cdot (\Psi_{i+1,j}^{n+1} + \Psi_{i,j}^{n+1}) \quad (2.32)$$

$$\Psi_w^{n+1} = 0.5 \cdot (\Psi_P^{n+1} + \Psi_W^{n+1}) = 0.5 \cdot (\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i-1,j}^{n+1}) \quad (2.33)$$

$$\Psi_n^{n+1} = 0.5 \cdot (\Psi_N^{n+1} + \Psi_P^{n+1}) = 0.5 \cdot (\Psi_{i,j+1}^{n+1} + \Psi_{i,j}^{n+1}) \quad (2.34)$$

$$\Psi_s^{n+1} = 0.5 \cdot (\Psi_P^{n+1} + \Psi_S^{n+1}) = 0.5 \cdot (\Psi_{i,j}^{n+1} + \Psi_{i,j-1}^{n+1}) \quad (2.35)$$

Ψ 可表示為 u, v, h_1, h_2, d, z_s 和 z_b 。

混合型上風法為上風法(upwind scheme)與中央差分法組合而成，當移流效應重要時，採用上風法；移流效應不重要時，則採用中央差分法。至於移流效應重要性的判斷，則採用格網雷諾數(mesh Reynolds

number) R_x 、 R_y 作為判斷的因子，當 $|R_x|$ 或 $|R_y|$ 小於等於 2 時，移流效應可視為不重要，差分方法採用中央差分法。

混合型上風法應用於本研究移流項的處理可表示成

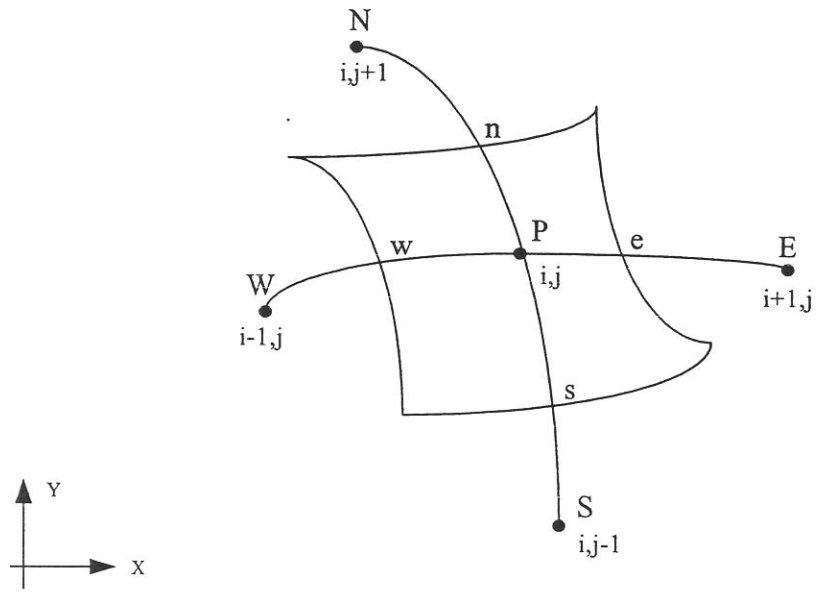
$$\frac{\bar{u}^n}{h_1} \left(\frac{\partial \Phi^{n+1}}{\partial \xi} \right) = 0.5 \frac{\bar{u}_{i,j}^n}{h_{1,i,j}} \left[(1 - \alpha_x) \left(\frac{\Phi_{i+1,j}^{n+1} - \Phi_{i,j}^{n+1}}{\Delta \xi} \right) + (1 + \alpha_x) \left(\frac{\Phi_{i,j}^{n+1} - \Phi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta \xi} \right) \right] \quad (2.36)$$

$$\frac{\bar{v}^n}{h_2} \left(\frac{\partial \Phi^{n+1}}{\partial \eta} \right) = 0.5 \frac{\bar{v}_{i,j}^n}{h_{2,i,j}} \left[(1 - \alpha_y) \left(\frac{\Phi_{i,j+1}^{n+1} - \Phi_{i,j}^{n+1}}{\Delta \eta} \right) + (1 + \alpha_y) \left(\frac{\Phi_{i,j}^{n+1} - \Phi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta \eta} \right) \right] \quad (2.37)$$

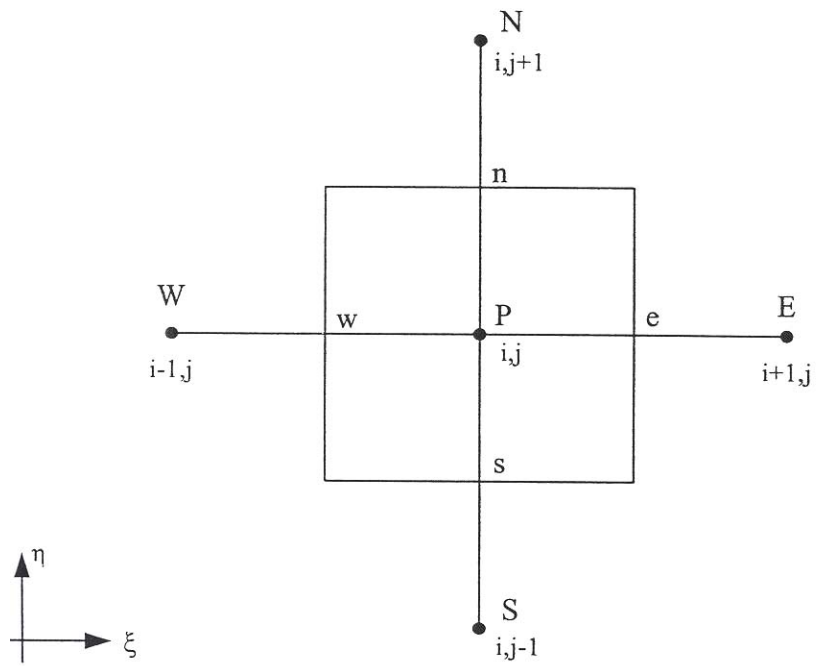
其中

$$\alpha_x = \begin{cases} 0 & |R_x| \leq 2 \\ 1 & R_x \geq 2 \\ -1 & R_x < -2 \end{cases} ; \quad \alpha_y = \begin{cases} 0 & |R_y| \leq 2 \\ 1 & R_y \geq 2 \\ -1 & R_y < -2 \end{cases} \quad (2.38)$$

上列諸式中， $R_x = \frac{\bar{u}_{i,j}^n h_{1,i,j} \Delta \xi}{\mu / \rho}$ ； $R_y = \frac{\bar{v}_{i,j}^n h_{2,i,j} \Delta \eta}{\mu / \rho}$ ； μ = 流體動力黏滯係數 (dynamic viscosity)； Φ 可表示為 u 或 v 。



(a)



(b)

圖 2.1 控制體積法示意圖 (a)實際區域 (b)計算區域

第三章 彎道效應對無因次延散係數之影響分析

3.1 流速分佈型態之影響探討

根據前人研究，提及底床形狀影響延散係數之正確性，然而，底床形狀影響著流速分佈之型態，因此，本節將針對此一現象，假設於矩形渠道下，三種不同流速分佈型態，分別為一組均勻入流型態與兩組自然分佈型態之影響，如圖 3.1。

假設三種流速型態具有相同平均流速與平均水深，平均流速為 20m/s，平均水深為 5cm，河道寬度為 1m；根據圖 3.1 所配置之流速、距離與水深資料，應用 Liu(1977)提出之積分式進行積分，得無因次延散係數值，表 3.1 所示。

由表 3.1 之結果，當流速屬均勻分佈型態(圖 3.1a)，因為斷面之流速不具變化性致使無因次延散係數 β 之結果等於零；當流速分佈非均勻下(圖 3.1b 與 3.1c)，即單一斷面間速度具變異性外，不同之流速分佈剖面，亦造成無因次延散係數 β 極具變化。

但由於速度剖面型態隨著不同渠道與水力狀態變動程度大，因此較無法通盤性考量。故本研究僅定性探討此現象之影響性，而不列入下章節之彎道影響因子探討。依此結果，本研究於彎道模擬案例邊界條件設定時，則以均勻入流之流速剖面之條件進行分析。

3.2 彎道影響因子之因次分析

本節針對無因次延散係數 β 與彎道影響因子進行因次分析工作。其中，影響污染物於河川中之延散特性因子可分為三大類，分別為流體性質、水力特性與幾何型態。流體性質包括流體密度 ρ 、黏滯係數 μ 等；水力特性包括平均速度 U 、 V 、平均水深 h 、渠道寬度 B 、渠

道長度 L 、渠道中心線曲率半徑 r_c 、渠道坡度 S_0 、重力加速度 g 、剪力速度 u_* 等；幾何型態包含底床型態之糙度係數 c 。本研究中，探討分析之案例設定為矩形渠道斷面之單一彎道案例，因此 β 相關因子可整理為

$$\beta = f_1(\rho, \mu, g, L, U, V, h, B, r_c, S_0, c) \quad (3.1)$$

式中 $c = \text{Chezy 糙度係數} = \frac{R^{1/6}}{n}$ ； $n = \text{曼寧糙度係數}$ ； $R = \text{水力半徑}$

於本研究採用正交曲線座標的情況下， V 之效應可忽略不計。因此(3.1)剩下 10 個獨立變數的情況下，利用柏金漢(Vaschy-Buckingham)理論得到 7 個無因次參數，可表示為

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho U h}{\mu}, \quad F_r = \frac{U}{\sqrt{g h}}, \quad \theta_b = \frac{L}{2\pi r_c} \\ SI &= \frac{U h}{u_* r_c} = \frac{h}{R_c \sqrt{C_f}}; \quad \frac{h}{B}; \quad S_0; \quad C_f = \frac{g}{c^2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

式中， $\text{Re} = \text{雷諾數(Reynolds number)}$ ； $F_r = \text{福祿數(Froude number)}$ ； $\theta_b = \text{彎道長度因子(relative length of channel bend)}$ ； $SI = \text{二次流強度因子(relative strength of secondary current)}$ ； $\frac{h}{B} = \text{寬深比(depth-width ratio)}$ ； $C_f = \text{摩擦因子(friction factor)}$ ； $u_* = \sqrt{C_f} U = \text{剪力速度(shear velocity)}$ 。

因此，無因次分析可表示為

$$\beta = f_2(\text{Re}, F_r, \theta_b, SI, \frac{h}{B}, S_0, C_f) \quad (3.3)$$

3.3 模擬案例設計

為了探討式(3.3)中各無因次參數對 β 之影響程度，本研究採用

Hsieh and Yang (2003)設計之 289 個案例進行測試，如表 3.2 所示，以利進行水理模式之模擬分析；其中各案例之設定，僅變動單一參數而固定其餘參數。案例中，渠道幾何型態均為矩形斷面之單一彎道案例，且此單一彎道前後各連接長 10m 之直線渠道，如圖 3.2，以避免邊界條件設定困難之問題；同時，根據 3.1 節所述，本研究僅採用均勻入流之流速剖面進行模擬。

在符合 de Vriend (1977) 二次流流速剖面的假設下，測試案例涵蓋的水理條件範圍為： $\frac{h}{B}$ 範圍為 $4.5 \times 10^{-3} \sim 9.41 \times 10^{-2}$ 、 $\frac{h}{r_c}$ 範圍為 $4.5 \times 10^{-4} \sim 4.2 \times 10^{-2}$ 、 Re 範圍為 $2.74 \times 10^3 \sim 5.27 \times 10^5$ 、 F_r 範圍為 $0.088 \sim 0.942$ 、 SI 範圍為 $0.004 \sim 0.409$ 、 θ_b 範圍為 $0 \sim 0.25$ 、 C_f 範圍為 $2 \times 10^{-3} \sim 9.81 \times 10^{-2}$ 。由設定範圍，可知本研究所使用之水理條件範圍相當廣，可概括性的描述各種水理發生情形，以貼近真實河川狀態。

3.4 無因次延散係數推求

根據 3.3 節之案例設計，並經由水理模式計算後，得到各案例下之流速、流量與水深等資料。為進行無因次延散係數之推求，茲將 289 個案例中，各案例之彎道部分細分為 90 個斷面，即每 1 度取一個斷面，如圖 3.3，同時每斷面下具有 N 個格點，而格點上均有流速與水深值，並依無因次延散係數推求所需，將各格點之水理模擬資料進行整理。

以上，說明資料之彙整工作，接著將進一步闡述無因次延散係數之計算過程。首先，根據 Liu(1977)之無因次延散係數積分式，式(2.6)，並配合整理之水理資料進行計算，得單一斷面下之無因次延散係數 β 值；因此，於單一案例下，共有 90 組 β 值；而 289 個案例下，共計有 289×90 個 β 值。

3.5 無因次參數重要性分析

根據 3.4 節所得到 289×90 個 β 值之結果，並利用無因次分析所得之七個無因次參數，式(3.3)，將其應用於 MINITAB 軟體進行參數重要性分析工作。

首先，針對 289×90 個 β 值進行分析；將七個無因次參數與 β 值取自然對數，其目的為降低八個數值間，因為數值大小之差異性所造成之影響；例如 β 值介於 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ ，與 Re 值介於 0.088~0.942 時，其兩數值位數間之差異，亦造成影響因子分析過程之正確性；其經過參數重要性分析結果如表 3.3 所示。根據表 3.3，針對所有 β 值與七個無因次參數進行分析，其影響 β 值最大之三類因子分別為寬深比 $\frac{h}{B}$ 、雷諾數 Re 與二次流強度因子 SI 。

然而，本研究之測試案例中，均屬於明渠水流之情況，故 F_r 必會對模擬之結果造成相當大之影響，但本研究重點在探討彎道水流流速的重新分配情況，而非著重於探討重力效應造成之明渠水流問題，因此本研究在影響性分析中將忽略 F_r 的效應(Hsieh and Yang, 2003)。同時，Yen(1965)與 Rozovskii(1961)均指出，當 $\frac{h}{B} \ll 1$ 時，彎道二次流效應與 $\frac{h}{B}$ 無關，在本研究水理測試案例之 $\frac{h}{B}$ 均很小 ($4.5 \times 10^{-3} \sim 9.41 \times 10^{-2}$) 的情況下，本研究於影響性分析中亦忽略 $\frac{h}{B}$ 之效應。另外，Seo and Cheong(1998)指出，於自然河川中，大多屬於完全紊流與粗糙河床之型態，因此忽略雷諾數 Re 之效應。

根據以上陳述，重新進行影響性分析，結果如表 3.4 所示。表中可看出在不考慮 F_r 、 $\frac{h}{B}$ 與 Re 三參數影響情況下，顯示 SI 對 β 之影響程度為最大。

3.6 β 與 SI 之相關性分析

圖 3.4 為不同 θ_b 下， β 與 SI 之關係圖，其中 β 係取自與長度因子 θ_b 相對應之斷面處，由圖中可看出 β 均會隨著 SI 增大而變大。另外圖 3.4 中各角度下關係曲線之迴歸函數列表 3.5 所示，說明 θ_b 增大時整體迴歸函數 R^2 亦有增加之趨勢，即 β 與 SI 之相關性於入彎道後愈趨明顯。

根據 Liu(1977)研究中未考慮彎道效應所提出之關係式($\beta \propto \frac{U}{u_*}$)與本研究考慮彎道效應分析結果之($\beta \propto SI$)進行比較分析。圖 3.5 為利用本研究測試案例所模擬計算結果，繪製不同 θ_b 下， β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖；由圖中可得知， β 與 $\frac{U}{u_*}$ 關係較為分散，因而無顯著之關係存在。

根據圖 3.4 與圖 3.5 所示，在相同 θ_b 下，考慮彎道效應之($\beta \propto SI$)關係優於前人所提及未考慮彎道效應情況下之($\beta \propto \frac{U}{u_*}$)關係；因此，考慮彎道之 SI 效應優於 $\frac{U}{u_*}$ 所造成之影響。

3.7 β 與 θ_b 之相關性分析

為了進一步探討 β 於彎道效應下，不同角度之變異情形，因此，繪製不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖。圖 3.6 為將圖 3.4 中各 θ_b 處之 β 與 SI 之關係曲線繪於同一張圖上，在固定 SI 的情況下，由圖中可看出 β 均會隨著 θ_b 的增加而變大。誠如 de Vriend(1981)所言，二次流效應於彎道入口處開始發生作用，但此效應需經一段距離後，二次流對流場之效應才會完全達到穩定狀態。如圖 3.6 所示，在固定 SI 的情況下，愈靠近彎道入口處， β 隨著 θ_b 的增加而變大，最後慢慢趨近於穩定；當在

$\theta_b = 0.2222$ (80 度) 時，所有案例均幾乎達到穩定狀態。

3.8 二次流重要性分析

於無因次延散係數 β 分析案例中，二次流強度與 SI 及 θ_b 之關係可繪製如圖 3.7 所示；以本研究之模擬數據，並以 $\theta_b = 0.222$ 為例，利用其迴歸分析結果進行計算，當 $SI < 5.06 \times 10^{-3}$ 之區域下， β 值為零，表示二次流效應對 β 影響很小；但此二次流影響判斷點之範圍極小，亦即一但有二次流的產生，即對 β 產生影響；由此可見， β 與 SI 兩者息息相關。

繪製三個固定 β 值 (2.5×10^{-8} 、 7.5×10^{-8} 與 1.0×10^{-7}) 下之 SI 與 θ_b 關係曲線，稱為 β - SI - θ_b 關係曲線，圖 3.8 所示。圖中雖然於某些固定 β 值下趨勢較不顯著，但大致可看出 SI 與 θ_b 呈現反比之趨勢；且於固定 SI 下， θ_b 越大則 β 也越大。其趨勢不顯著之原因可能為所分析之資料數不多，造成曲線無法廣泛性的考量。然而，本關係曲線亦可用以定性說明，當 SI 趨近於零時 β 亦趨近於零，即一旦產生 SI 則對 β 造成影響；故可用以說明，考慮與不考慮二次流效應下，造成 β 值變動程度之影響。

表 3.1 不同流速剖面之 β 計算結果

流速剖面	β
A	0
B	18.78
C	985.09

表 3.2 水理部分測試案例一覽表

編號	單寬流量	渠道寬度	曲率半徑	坡度(10^{-3})	CHEZY 係數
1-67	0.0167-0.6667	3,6,9,12,15	50	1.0	30
68-133	0.0167-0.0667	6,15	25,75,100,125,150	1.0	30
134-212	0.0042-0.8001	6	50	0.1,0.5,2.5, 5.0,7.5,10	30
213-289	0.0050-0.6667	6	50	1.0	10,20,40,50,60,70

表 3.3 無因次參數於各角度與 $\text{Ln}(|\beta|)$ 之影響程度迴歸係數表

參數	$\text{Ln}(\text{Re})$	$\text{Ln}(\text{Fr})$	$\text{Ln}(\text{SI})$	$\text{Ln}(\text{So})$	$\text{Ln}(\text{theta})$	$\text{Ln}(h/B)$	$\text{Ln}(\text{Cf})$
$\text{Ln}(\beta)$	-1.38	-0.26	0.708	0.886	0.0999	2.39	-0.664

($R^2 = 43.8\%$)

表 3.4 無因次參數忽略 F_r 、 $\frac{h}{B}$ 與 Re 情況下於各角度與 $\text{Ln}(|\beta|)$ 之影

響程度迴歸係數表

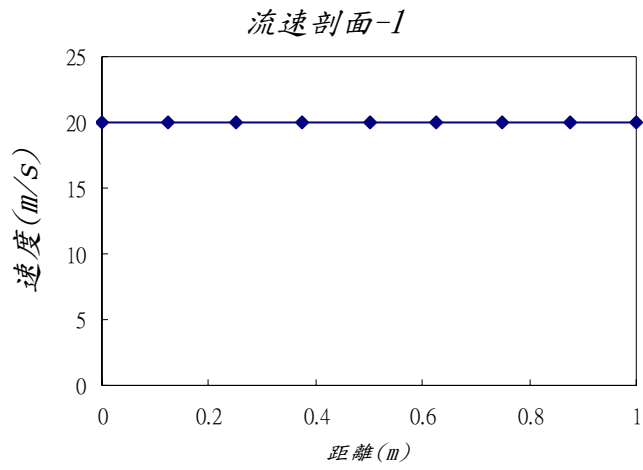
參數	$\text{Ln}(\text{SI})$	$\text{Ln}(\text{So})$	$\text{Ln}(\text{theta})$	$\text{Ln}(\text{Cf})$
$\text{Ln}(\beta)$	0.733	0.0937	0.0999	0.169

($R^2 = 16.3\%$)

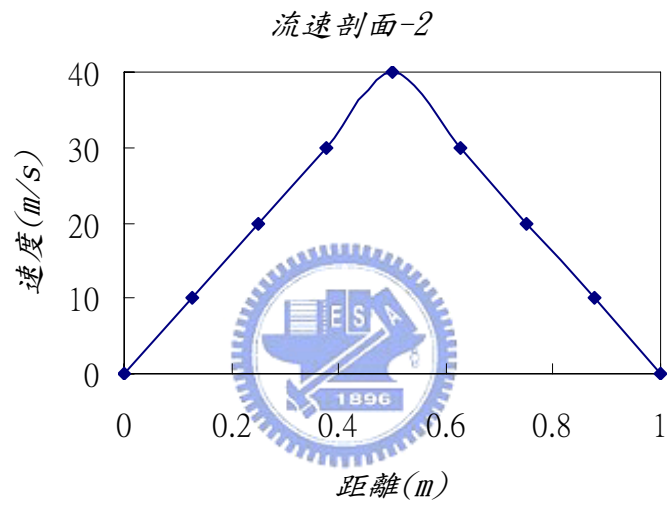


表 3.5 不同 θ_b 之 β 與 SI 之迴歸函數一覽表

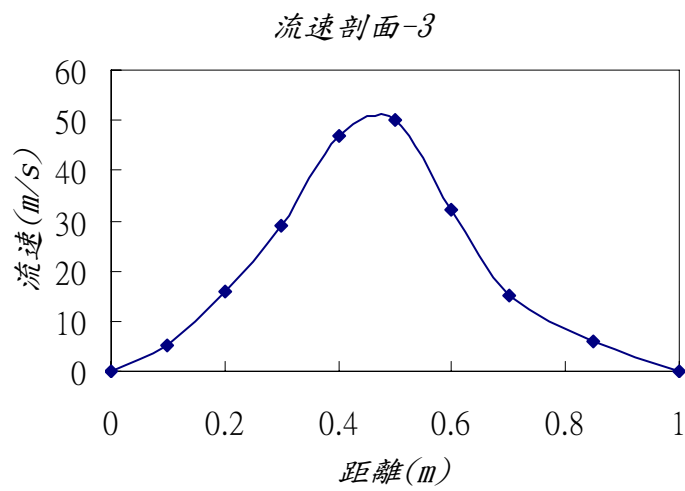
θ_b	迴歸函數	R^2
0.0278	$\beta = -3\text{E-}06(\text{SI})^2 + 6\text{E-}07(\text{SI}) + 2\text{E-}08$	0.0940
0.0556	$\beta = -1\text{E-}06(\text{SI})^2 + 7\text{E-}07(\text{SI}) + 2\text{E-}08$	0.2029
0.0833	$\beta = 2\text{E-}06(\text{SI})^2 + 5\text{E-}07(\text{SI}) + 2\text{E-}08$	0.3033
0.1111	$\beta = 4\text{E-}06(\text{SI})^2 + 4\text{E-}07(\text{SI}) + 2\text{E-}08$	0.3893
0.1389	$\beta = 4\text{E-}06(\text{SI})^2 + 4\text{E-}07(\text{SI}) + 2\text{E-}08$	0.4526
0.1667	$\beta = 4\text{E-}06(\text{SI})^2 + 5\text{E-}07(\text{SI}) + 2\text{E-}08$	0.4909
0.1944	$\beta = 3\text{E-}06(\text{SI})^2 + 7\text{E-}07(\text{SI}) + 1\text{E-}08$	0.5041
0.2222	$\beta = 2\text{E-}06(\text{SI})^2 + 8\text{E-}07(\text{SI}) + 4\text{E-}09$	0.5180



(a)



(b)



(c)

圖 3.1 流速剖面型態示意圖

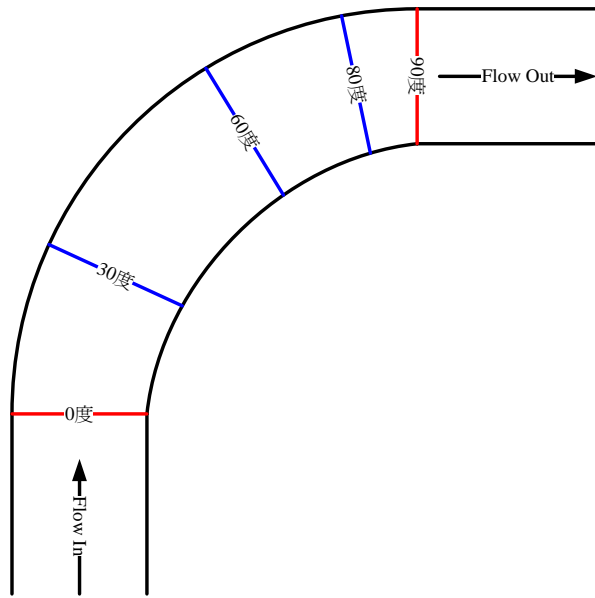


圖 3.2 彎道示意圖

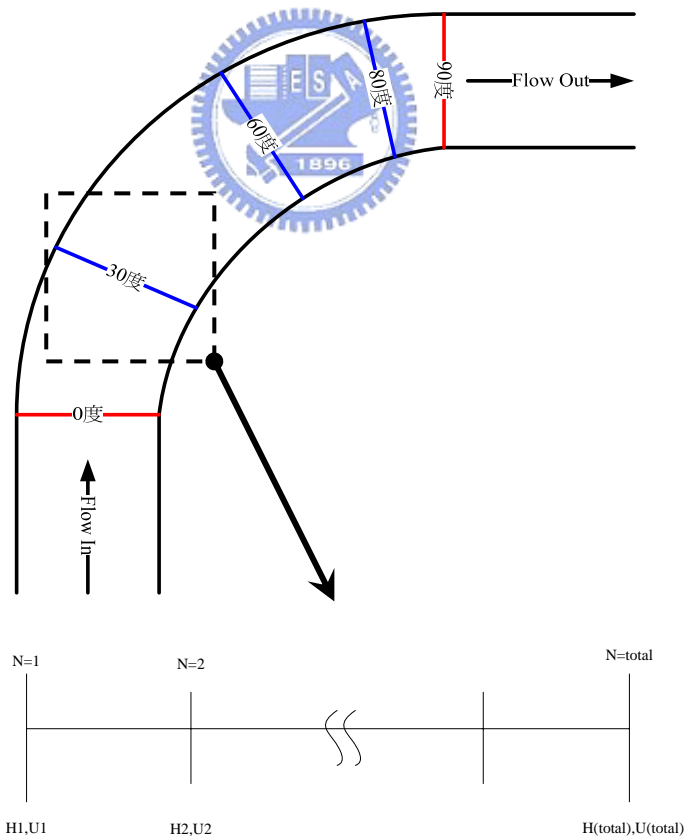


圖 3.3 單一斷面示意圖

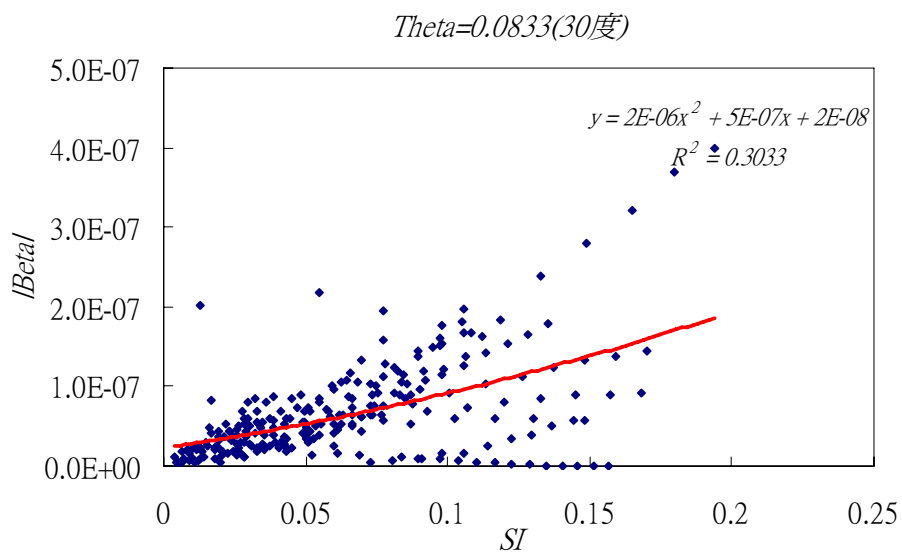
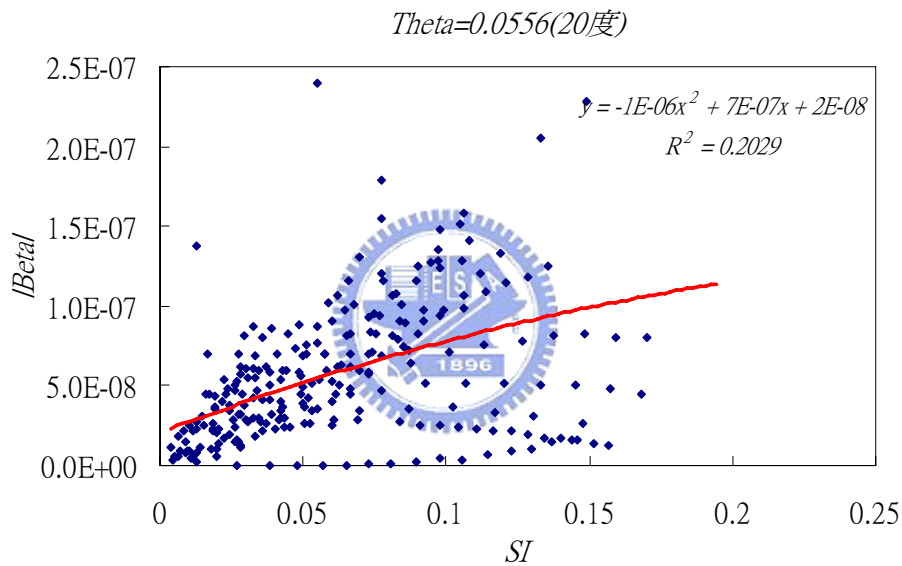
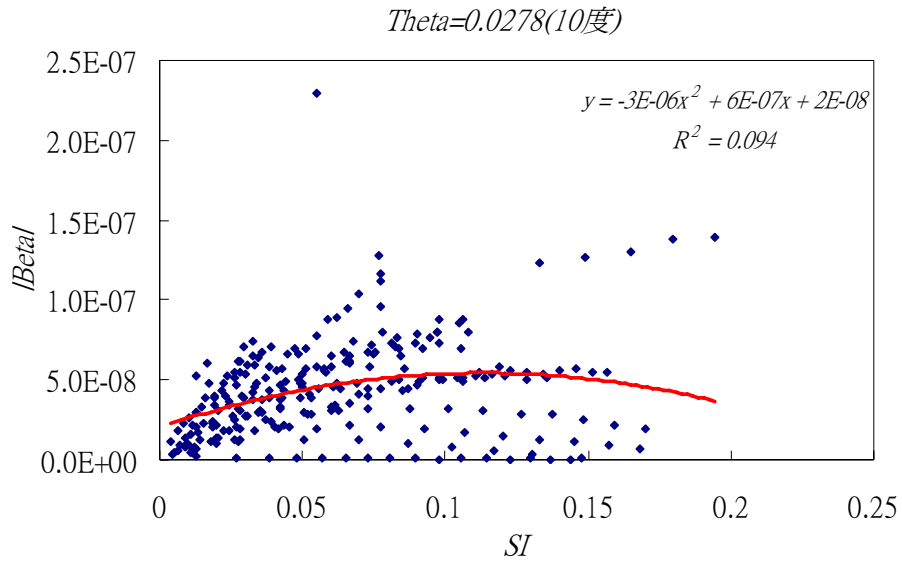


圖 3.4 不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(1)

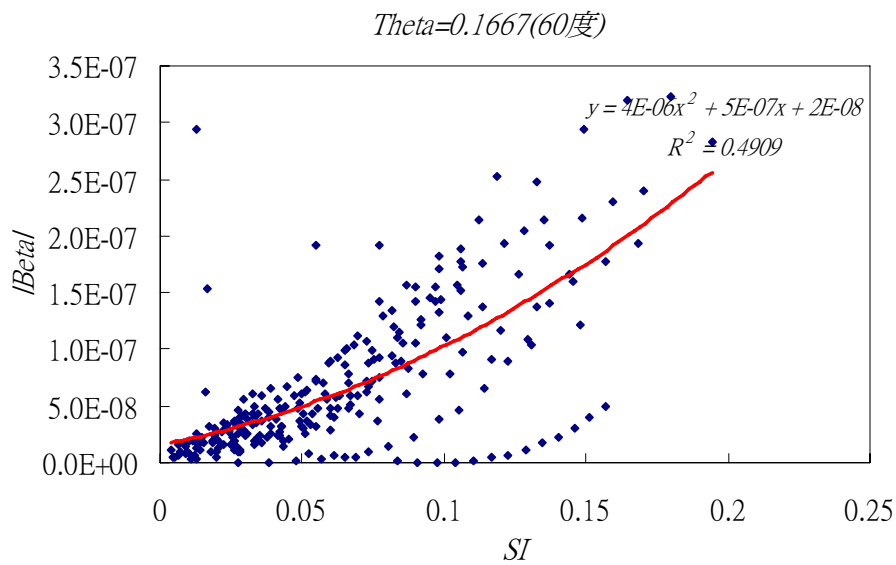
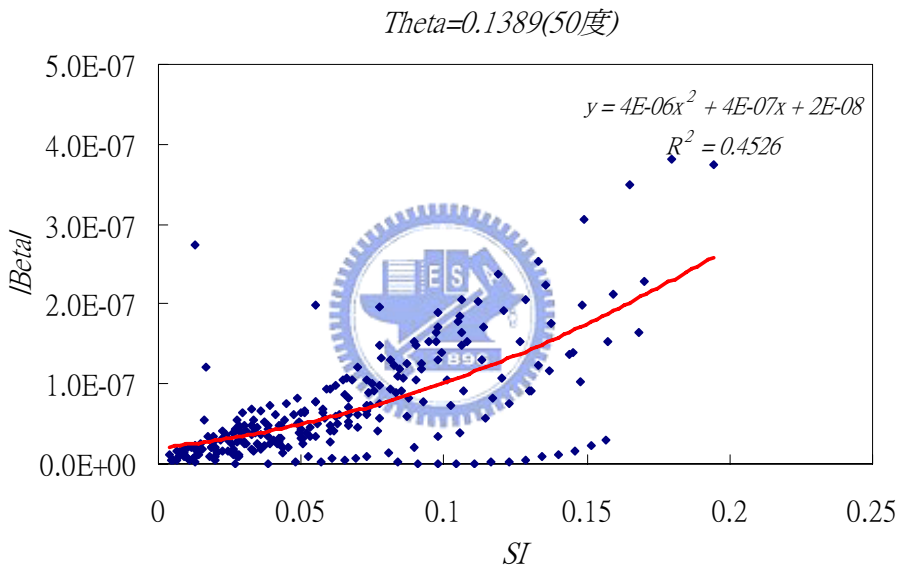
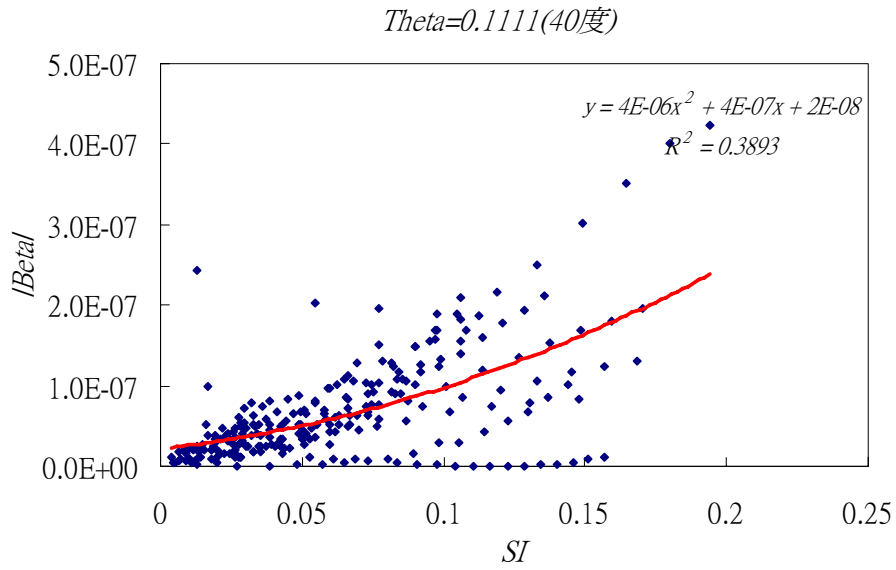


圖 3.4 不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(2)

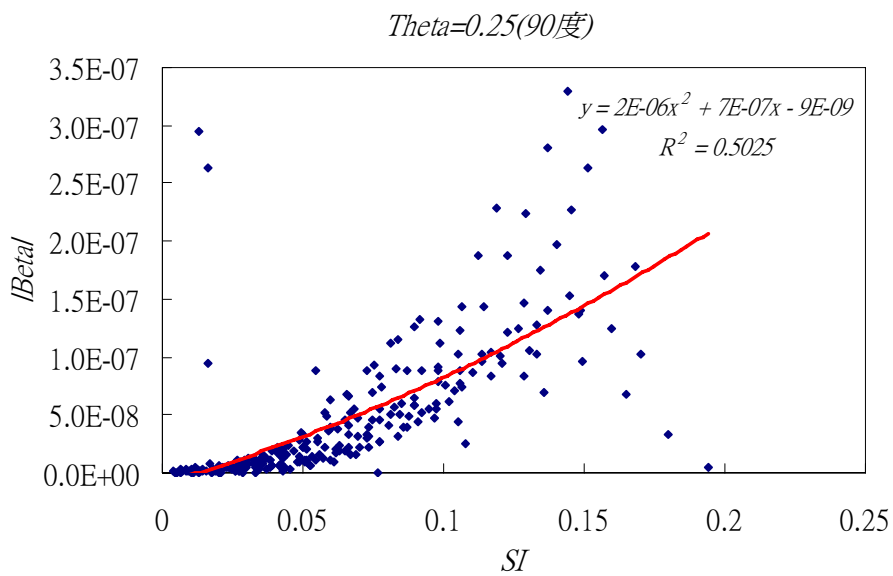
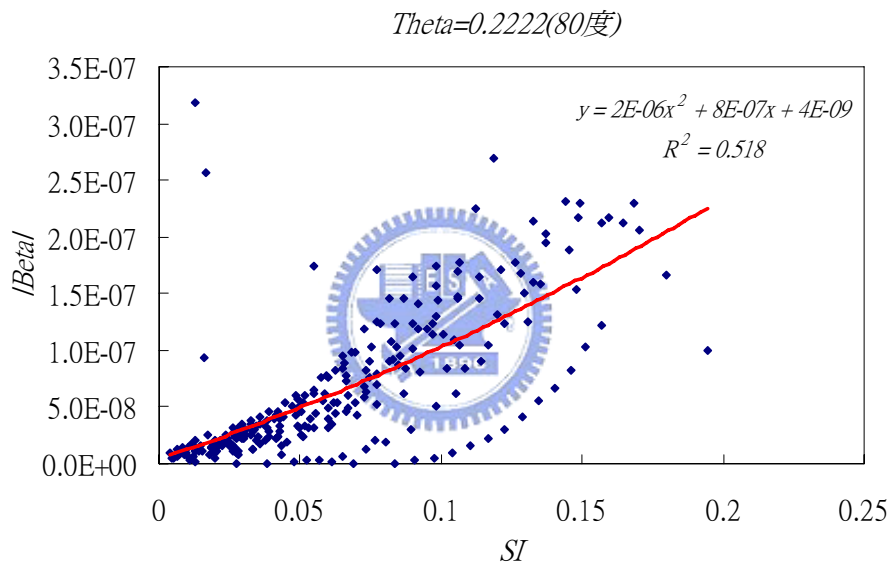
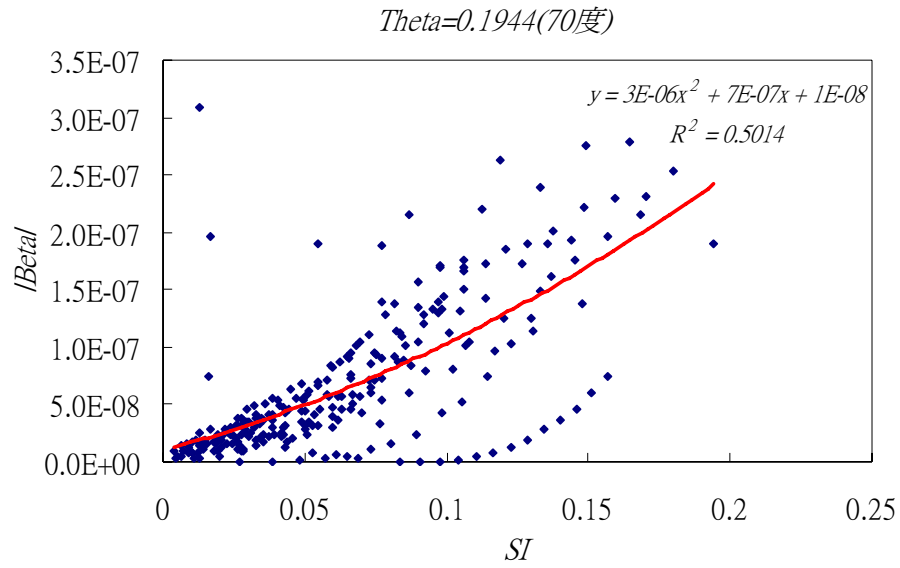


圖 3.4 不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(3)

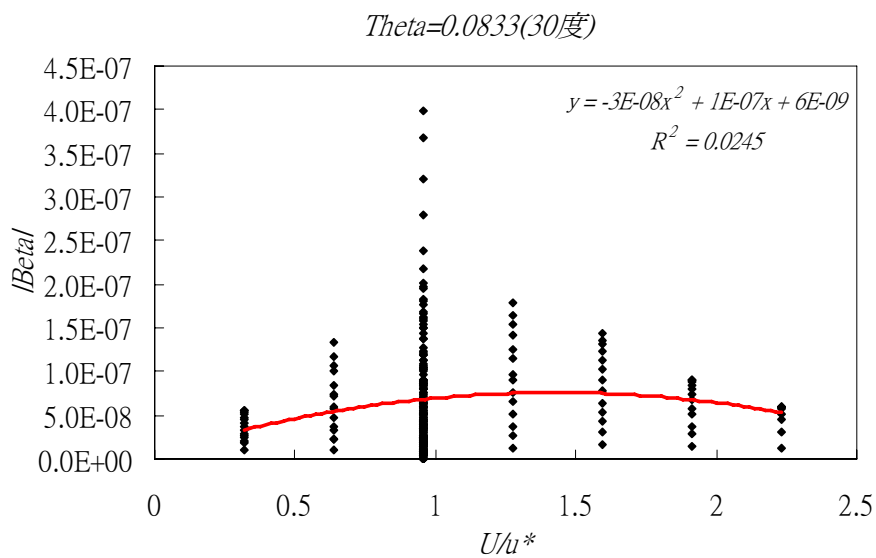
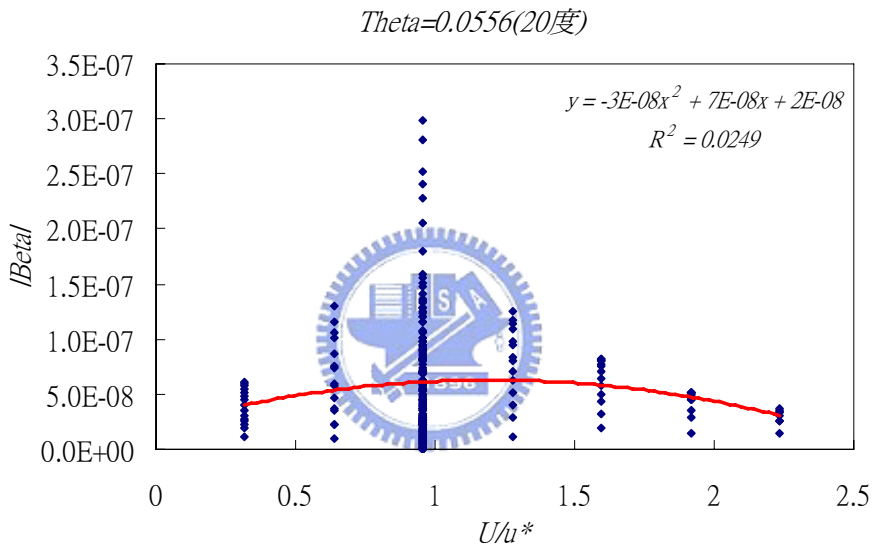
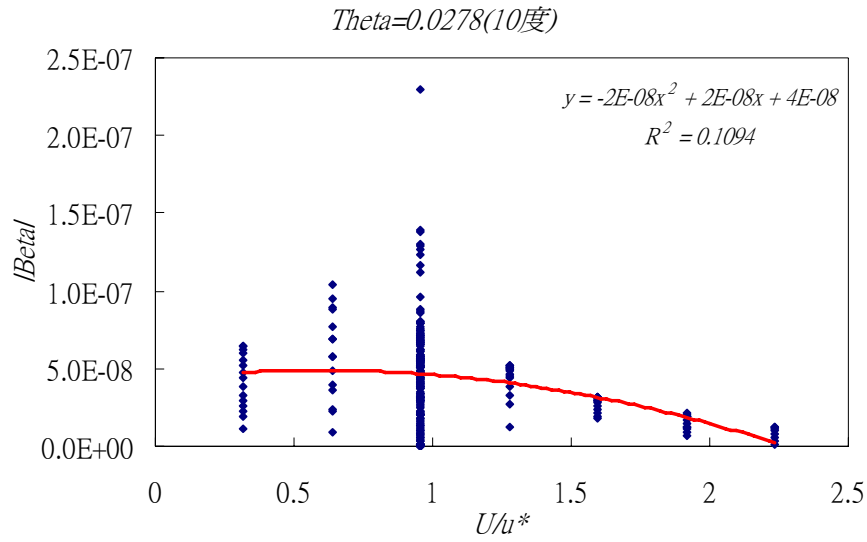


圖 3.5 不同 θ_b 之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖(1)

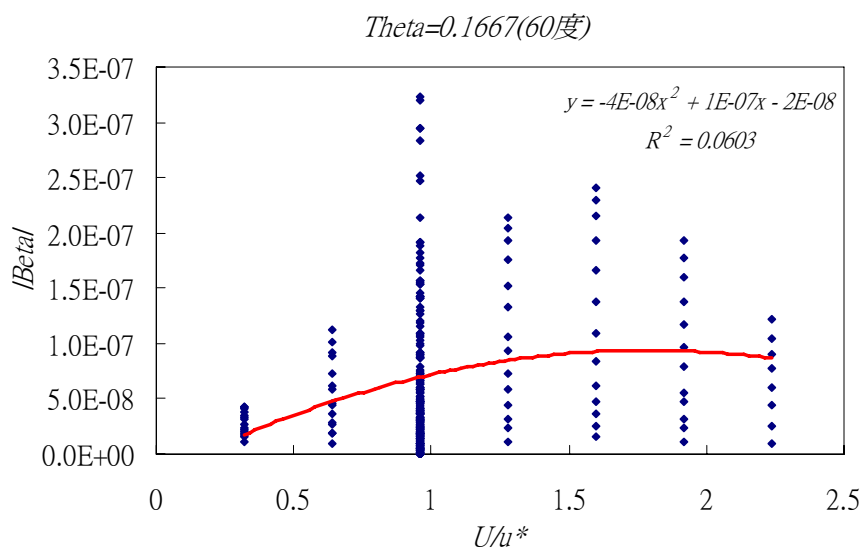
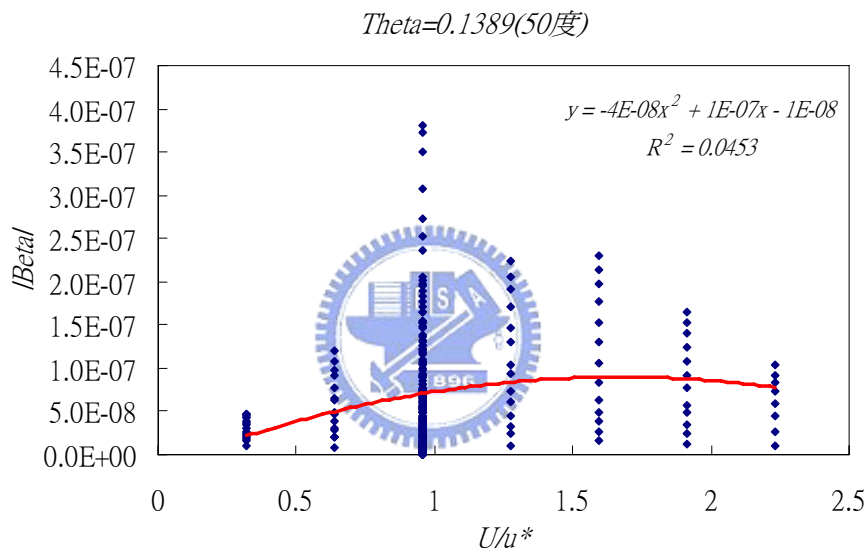
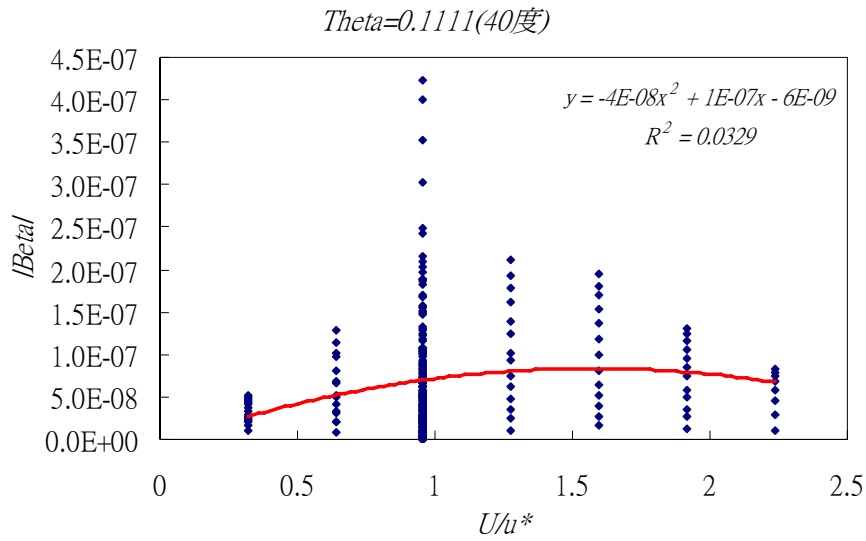


圖 3.5 不同 θ_b 之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖(2)

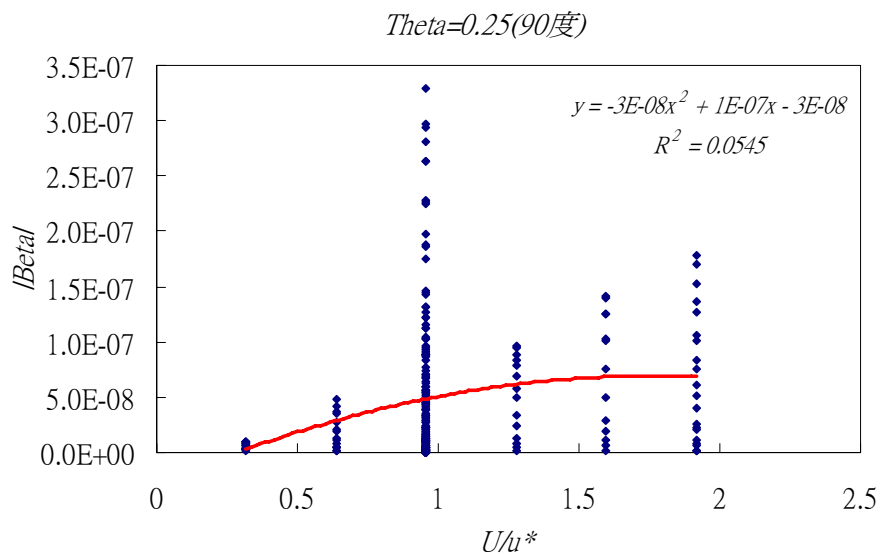
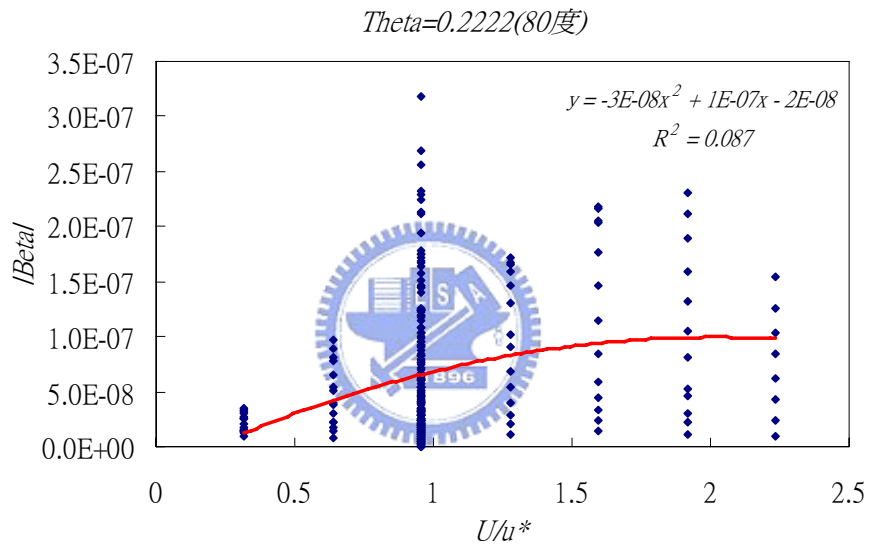
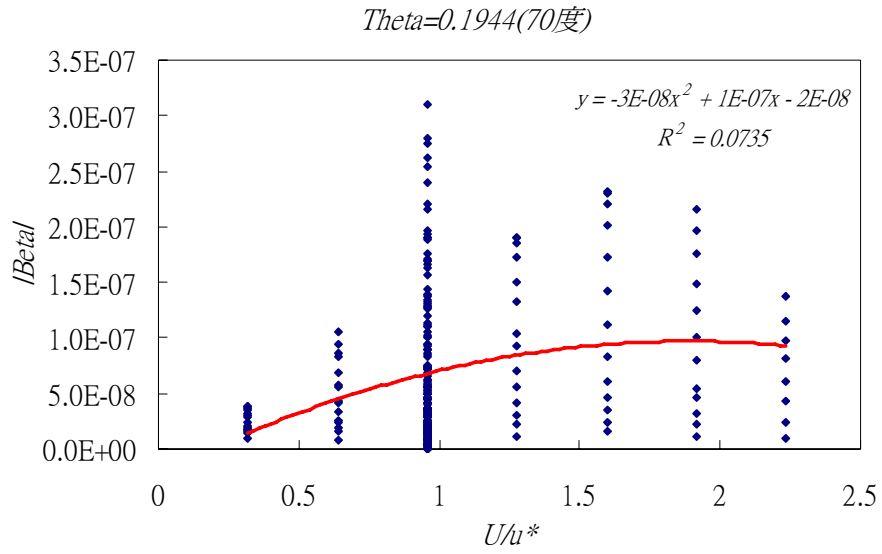


圖 3.5 不同 θ_b 之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 之關係圖(3)

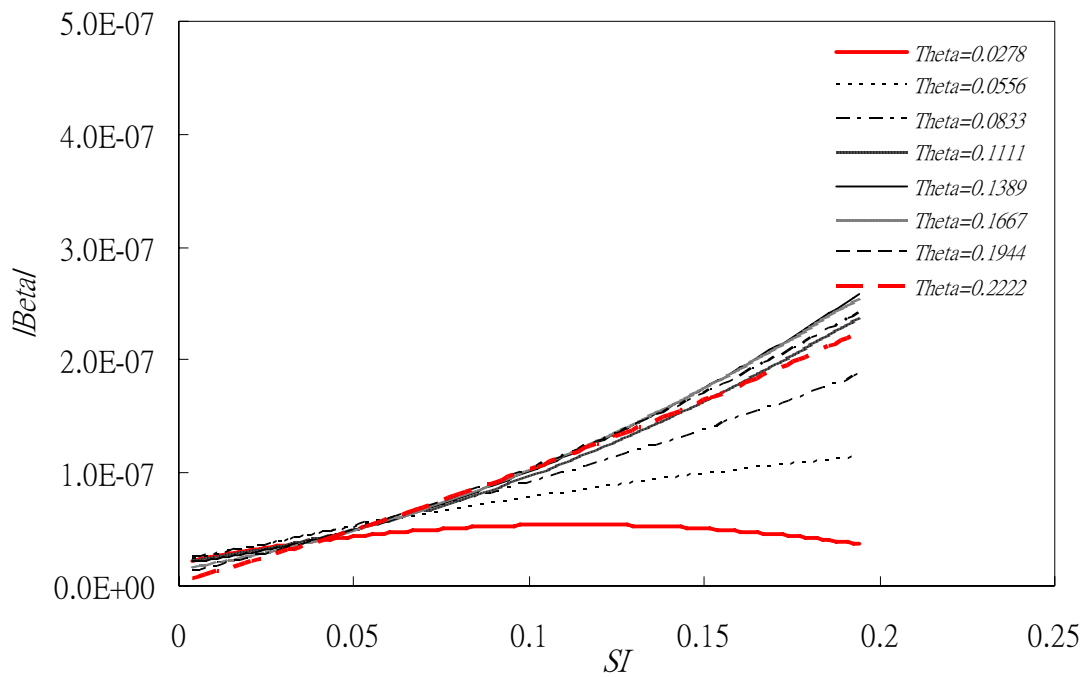


圖 3.6 不同 θ_b 之 β 與 SI 之關係圖(4)

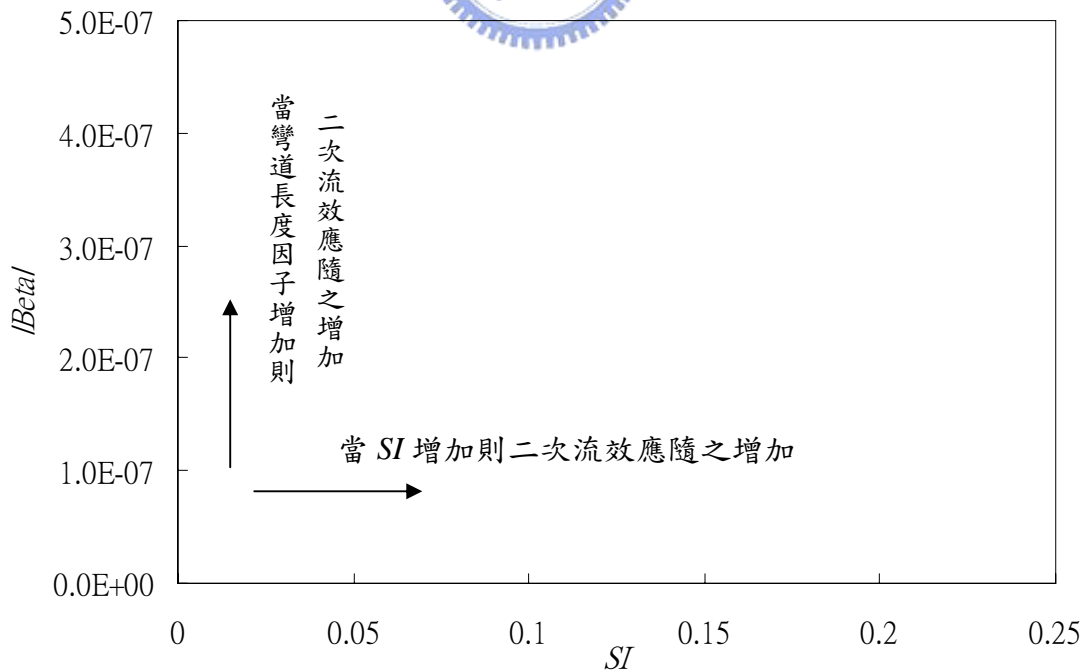


圖 3.7 二次流效應重要性分類圖

$\beta - SI - \theta_b$

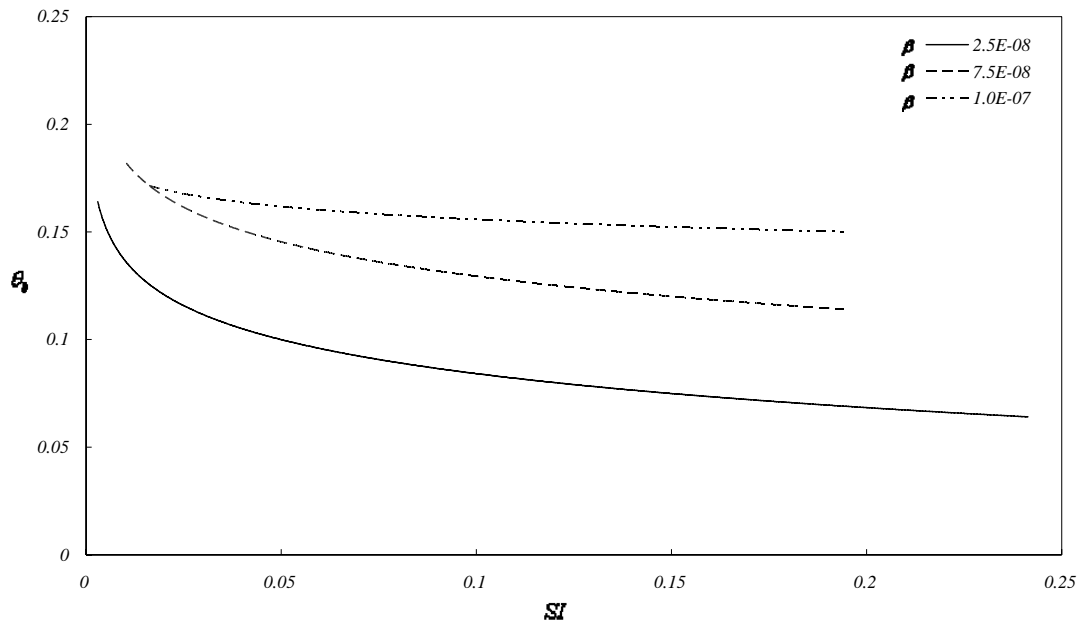


圖 3.8 $\beta - SI - \theta_b$ -關係曲線



第四章 結論

研究中，首先探討延散係數對污染擴散傳輸之重要性，進而討論影響延散係數正確性之無因次延散係數值以及其相關因子；依此概念，即針對前人之無因次延散係數相關研究進行探討。根據討論結果，係利用 Liu(1977)提出之無因次延散係數三重積分式，配合二維水理模式計算，分析彎道相關影響因子與流速分布影響。

本研究之分析結果如下所述：

1. 根據流速分布型態影響因子方面，係設計三組具有相同平均流量、水深之不同流速分佈型態進行計算。首先針對均勻入流與非均勻入流比較，得知於非均勻入流下，使得側方向速度分佈具有差異性，即造成延散係數之產生；其次，於非均勻入流下，不同流速剖面型態，亦造成延散係數變化性大。
2. 於彎道效應影響分析中，經由二維彎道水理模式之案例模擬計算，得 289 組無因次延散係數值後，以進行影響因子重要性分析。分析結果顯示， SI (二次流強度因子) 為影響 β (無因次延散係數) 之最重要參數。
3. 根據迴歸分析結果顯示， SI 越大則 β 越大；同時，隨著 θ_b (彎道長度因子) 之增加， SI 與 β 之相關性隨之增大，直至彎道出口處趨近穩定。
4. 考慮彎道效應下，模擬案例之 β 與 $\frac{U}{u_*}$ 關係式並不誠如 Liu(1977) 所指有顯著之相關性；反倒是 β 與 SI (ie., $SI = \frac{Uh}{u_* R_c}$) 有較明確之關係。

5. 於固定 β 下， SI 與 θ_b 呈現反比之趨勢，且於固定 SI 下， θ_b 越大則 β 也越大；當 SI 趨近於零時 β 亦趨近於零，即一旦產生 SI 則對 β 造成影響；因此考慮與不考慮二次流效應下，對延散係數值亦造成影響。



參考文獻

- 謝德勇(2003)「二維水理、污染傳輸及沉滓運移模式之研發與應用」，
國立交通大學土木工程研究所博士論文。
- Almquist, C. W., and Holley, E. R. (1985). "Transverse mixing in meandering laboratory channels rectangular and naturally varying cross-section." *Tech. Rep. (205)*, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.
- Aris, R. (1956). "On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube." *Proc. R. Soc., London U.K., Ser. A.235*, 67-77.
- de Vriend, H. J. (1977). "A mathematical model of steady flow in curved shallow channels." *J. Hydr. Res.*, Delft, The Netherlands, 15(1), 37-54.
- de Vriend, H. J. (1981). "Steady flow in shallow channel bends." *Communications on Hydraulics 81-3*, Dept. of Civil Engrg., Delft Univ of Tech., Delft, the Netherlands.
- Deng, Z., Singh, V. P., and Bengtsson, L. (2001). "Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, 127(11), 919-927
- Elder, J. W. (1959). "The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow." *J. Fluid Mech.*, 5(4), 554-560.
- Fischer, H. B. (1967a). "The mechanics of dispersion in natural streams." *J. Hydr. Div. ASCE.*, 93(6),187-216.
- Fischer, H. B. (1968a). "Dispersion predictions in natural stream." *J. Sanit. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 94(5), 927-943.
- Fischer, H. B. (1969). "The effect of bends on dispersion in streams." *Water Res.*, 5(2), 496-506.
- Fischer, H. B. (1975). "Discussion of 'Simple method for predicting dispersion in stream' by R. S. McQuivey and T. N. Keefer." *J. Environ.*

- Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 101(3), 453-455.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brookes, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic, San Diego.
- Fukuoka, S., and Sayre, W. W. (1973). "Longitudinal dispersion in sinuous channels." *J. Hydr. Div., ASCE*, 99(1), 195-217.
- Guymer, I. (1998). "Longitudinal dispersion in sinuous channels with changes in shape." *J. Hydr. Eng., ASCE*, 124(1), 33-40.
- Godfrey, R. G., and Frederick, B. J. (1970). "Stream dispersion at selected sites." *U.S. Geological Survey Prof. Paper.*, 433-K, Washington, D.C.
- Hsieh, T. Y., and Yang, J. C. (2003). "Investigation on the suitability of two-dimensional depth-averaged models for bend-flow simulation." *J. Hydr. Eng., ASCE*, 129(8), 597-612.
- Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows." *Proc., Int. Symp. On Envir. Hydr.*, Hong Kong, 505-510.
- Kashefipour, M. S., and Falconer, R. A. (2002). "Longitudinal dispersion coefficients in natural channels." *Water Res.*, 36(6), 1596-1608.
- Kolmogoroff, A. N., (1941). "Dissipation of energy in locally isotropic turbulence." *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences de L'Union des Republiques Sovietiques Socialistes, Leningrad, U.S.S.R.*, Vol. 32
- Koussis, A. D., and Rodriguez-Mirasol, J. (1998). "Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams." *J. Hydr. Eng., ASCE* 124(3), 317-320.
- Krenkel, P. A. (1960). "Turbulent Diffusion and the Kinetics of Oxygen Absorption." Thesis presented to the University of California, at Berkeley, Calif., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- Lien, H. C., Hsieh, T. Y., Yang, J.C., and Yeh, K. C. (1999b). "Bend-flow simulation using 2D depth-average model." *J. Hydr. Eng., ASCE*,

125(10), 1097-1108

- Liu, H. (1977). "Predicting dispersion coefficient of stream." *J. Environ. Eng. Div.*, 103(1), 59-69.
- Liu, H., and Dieter, J.E. (1978). "Predicting pollutant dispersion in rivers." Missouri water resources research center.
- Magazine, M. K., Pathak, S. K., and Pande, P. K. (1988). "Effect of bed and side roughness on dispersion in open channels." *J. Hydr. Eng.*, 114(7), 766-782.
- McQuivey, R. S., and Keefer, T. N. (1967). "Convective model of longitudinal dispersion." *J. Hydr. Div.*, 102(10), 1409-1424.
- Parker, F. L. (1961). "Eddy diffusion in reservoirs and pipelines." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 87(3), 151-171.
- Rastogi, A.K., and Rodi, W. (1978). "Prediction of heat and mass transfer in open channels." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 104(3), 397-420.
- Rozovskii, I. L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. The Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Sayre, W. W., and Chang, F. M. (1968). "A Laboratory investigation of open channel dispersion processes for dissolved, suspended, and floating dispersants." *U.S Geological Survey Professional Paper.*, 433-E, 1-71.
- Seo, I. W., and Cheong, T. S. (1998). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams." *J. Hydr. Eng.*, 124(1), 25-32.
- Seo, I. W., and Baek, K. O. (2004). "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams." *J. Hydr. Eng.*, 130(3), 227-236.
- Singh, S. K., and Beck, M. B. (2003). "Dispersion coefficient of stream from tracer experiment data." *J. Envir. Eng.*, 129(6), 539-546.
- Spalding, D.B. (1972). "A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives."

Int. J. Numer. Methods Eng., 4, 551-559.

Tayfur, G., and Singh, V. P. (2005). "Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network." *J. Hydr. Eng.*, 131(11), 991-1000.

Taylor, G. I. (1954). "The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe." *Proc. Royal. Soc., London, U.K., Ser. A*, 223, 446-468.

Thomas, I. E. (1958). "Dispersion in open-channel flow." Ph.D. thesis. Northwestern University.

White, W.R., Milli, H., and Carbbe, A, D. (1973). "Sediment transport: An appraisal methods, Vol. 2: Performance of theoretical methods when applied to flume and field data." *Hydr. Res. Station Rep., No. IT119*, Wallingford, U.K.

Yen, B.C. (1965). "Characteristics of subcritical flow in a meandering channel." *Rep. No. G-18988*, Institute of Hydraulic Research, University of Iowa.



附錄一

移流擴散方程式(Convective-Diffusion Equation)

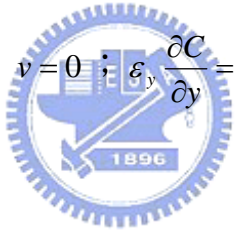
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[C \frac{\partial u}{\partial x} + C \frac{\partial v}{\partial y} + C \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (\text{A-1})$$

其中 u, v, w = 各方向之時間平均速度分量； $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ = 各方向之紊流係數 (turbulent mixing coefficient)。

邊界條件設定(Boundary Condition)

假設為無質量傳輸通過水體表面與邊界濕周範圍，則

水體表面邊界條件


$$v = 0 ; \varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (\text{A-2})$$

固體邊界條件

$$v = 0 ; w = 0 ; \varepsilon_y = 0 ; \varepsilon_z = 0 \quad (\text{A-3})$$

三維方程式簡化(Reduction of three-Dimensional Equation)

根據

$$C(x, y, z, t) = \bar{C}(x, t) + c'(x, y, z, t) \quad (\text{A-4})$$

$$u(x, y, z) = \bar{u} + u'(x, y, z) \quad (\text{A-5})$$

其中

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int_A u dA ; \bar{C} = \frac{1}{A} \int_A C dA \quad (\text{A-6})$$

將式(A-2)~(A-5)帶入式(A-1)中，經過整理可得

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}' c') - \varepsilon_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial c'}{\partial x} \right) \quad (\text{A-7})$$

其中，等號右邊之第一項為移流傳輸項，第二項為紊流傳輸項。

又

$$-\frac{\partial}{\partial x}(u'c') \approx K_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{A-8})$$

$$\varepsilon_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial c'}{\partial x} \right) \approx \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{A-9})$$

式中， K_c =due to differential convection； ε_x =due to turbulent diffusion。

式(A-1) 即可簡化為一維擴散方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad (\text{A-10})$$

式中， K_x =縱向延散係數。

