

# 國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

凝聚性沉滓傳輸機制之模擬應用研究

Simulation and Application Study on Cohesive Sediment

Transport Mechanism



研究生:許佑民

指導教授:葉克家 博士

中華民國九十七年七月

# 凝聚性沉滓傳輸機制之模擬應用研究

學生:許佑民

指導教授:葉克家

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

凝聚性沉滓運移機制相當複雜，其內部凝聚力受到許多因素所影響，對於基本運移機制可由沉滓之沉降速度、淤積公式、啟動條件、沖刷公式等傳輸行為加以探討，而本研究主要採用前人實驗結果及理論公式，利用一維有限解析法動床模式加以分析探討其運移行為。

首先，本研究在既有之一維有限解析法動床模式架構上，植入可同時模擬凝聚性沉滓及非凝聚性沉滓運移行為的機制，並假設沖刷與淤積案例來驗證是否符合其物理機制，並且考慮可能影響凝聚性沉滓沖刷與淤積的因子，進行敏感度測試，以助往後模擬結果之分析，最後再以石門水庫現場案例來加以模擬應用，所得結果可供水庫排砂計畫之參考。

# **Simulation and Application Study on Cohesive Sediment Transport Mechanism**

Student: You-Min Hsu

Advisor: Prof. Keh-Chia Yeh

**Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University**

## **ABSTRACT**

The mechanism of cohesive sediment transport is very complicated, with the cohesive force being influenced by many factors. The transport mechanism can be examined through the following processes: settling, deposition, initiation of movement, and erosion. This study uses 1-D finite analytic mobile-bed model to analyze the transport mechanism according to the previous investigators' experimental results and theoretical formulas.

On the basis of the existing 1-D finite analytic mobile-bed model, this study builds in the mechanisms of simultaneously simulating the processes of cohesive and non-cohesive sediment transport. Several hypothetical erosion and deposit cases have been proposed to examine the model's capability. In addition, sensitivity analysis is carried out on the possible influential factors of the cohesive erosion and deposit processes to assist farther analysis of the simulation results. Finally, the Shihmen Reservoir's deposition case study is simulated and the results provide some useful information for the reservoir flushing operation in the future.

## 謝誌

首先誠摯的感謝指導教授葉克家博士，老師悉心的教導使我學得相關理論與實務領域的深奧，不時的討論並指點我正確的方向，使我在這些年中獲益匪淺，老師對學問的嚴謹更是我輩學習的典範。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯，你/妳們的陪伴讓兩年的研究生生活變得絢麗多彩，讓人永生難忘懷。最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親，感謝他們在我求學過程中給予我的支持與鼓勵。



# 目錄

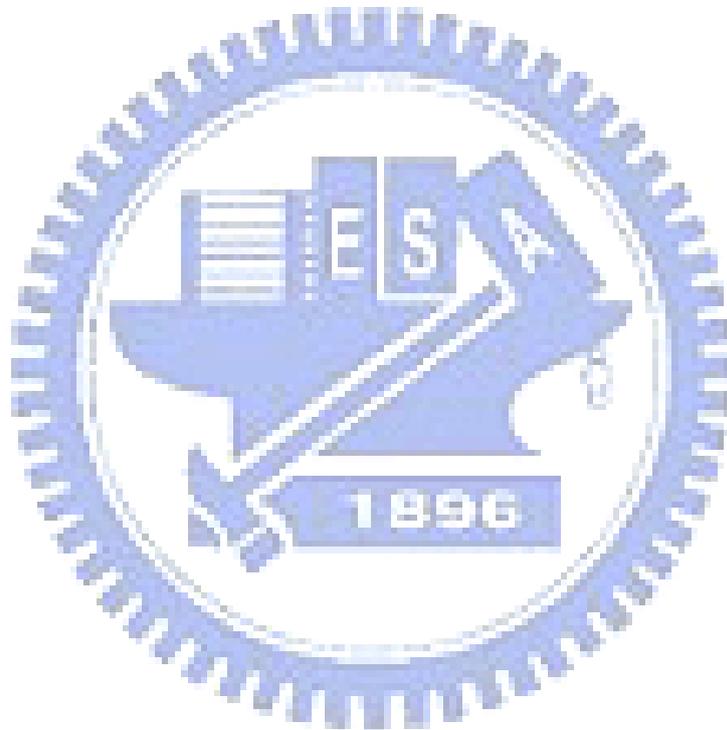
|  |     |
|--|-----|
| 中文摘要.....                                    | I   |
| 英文摘要.....                                    | II  |
| 謝誌.....                                      | III |
| 目錄.....                                      | IV  |
| 表目錄.....                                     | VI  |
| 圖目錄.....                                     | VII |
| 符號說明.....                                    | IX  |
| 第一章 緒論.....                                  | 1   |
| 1.1 前言.....                                  | 1   |
| 1.2 文獻回顧.....                                | 2   |
| 1.3 研究內容.....                                | 6   |
| 第二章 數模理論基礎.....                              | 8   |
| 2.1 模式概述.....                                | 8   |
| 2.2 控制方程式.....                               | 9   |
| 2.2.1 水流控制方程式.....                           | 9   |
| 2.2.2 輸砂控制方程式.....                           | 10  |
| 2.3 輸砂輔助方程式.....                             | 11  |
| 2.3.1 無黏性沉滓輸砂輔助關係式.....                      | 11  |
| 2.3.1.1 河床載通量(bed load flux, $Q_{bk}$ )..... | 11  |
| 2.3.1.2 作用層厚度( $E_m$ ).....                  | 12  |
| 2.3.1.3 非凝聚性懸浮載源( $S_k$ ).....               | 13  |
| 2.3.1.4 作用層源( $S_{ak}$ ).....                | 14  |
| 2.3.2 黏性沉滓輸砂輔助關係式.....                       | 14  |
| 2.3.2.1 凝聚性沉滓起動條件.....                       | 15  |
| 2.3.2.2 凝聚性沉滓沖刷公式.....                       | 16  |
| 2.3.2.3 凝聚性沉滓沉降速度.....                       | 17  |
| 2.3.2.4 凝聚性沉滓沉淤公式.....                       | 19  |
| 第三章 數值方法.....                                | 21  |
| 3.1 求解水理方程式之數值方法.....                        | 21  |
| 3.2 求解輸砂方程式之數值方法.....                        | 22  |
| 第四章 凝聚性沉滓運移之模擬.....                          | 27  |
| 4.1 凝聚性沉滓沉積模擬.....                           | 27  |
| 4.1.1 不同沉淤經驗式之模擬結果分析.....                    | 28  |
| 4.1.2 各沉淤因子之敏感度分析.....                       | 31  |
| 4.2 凝聚性沉滓沖刷模擬.....                           | 33  |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 4.2.1 不同沖刷經驗式之模擬結果分析..... | 34 |
| 4.2.2 各沖刷因子之敏感度分析.....    | 36 |
| 第五章 現場案例應用及分析.....        | 40 |
| 5.1 模擬條件概述.....           | 40 |
| 5.2 模擬成果及分析.....          | 42 |
| 第六章 結論與建議.....            | 46 |
| 6.1 結論.....               | 46 |
| 6.2 建議.....               | 47 |
| 參考文獻 .....                | 49 |



# 表目錄

|   |    |
|---|----|
| 表 2-1 實驗參數表(摘錄 Roberts et al.1998) .....        | 53 |
| 表 4-1 敏感度分析表_Krone 沉淤公式採用 Migiot 沉降速度 .....     | 54 |
| 表 4-2 敏感度分析表_Krone 沉淤公式採用 Krishnappan 沉降速度..... | 55 |
| 表 4-3 敏感度分析表_Krone 沉淤公式採用 You 沉降速度.....         | 56 |
| 表 4-4 敏感度分析表_Shrestha 沉淤公式 .....                | 57 |
| 表 4-5 敏感度分析表_Roberts et al.凝聚性沉滓沖刷機制.....       | 58 |
| 表 4-6 敏感度分析表_Krone 凝聚性沉滓沖刷機制 .....              | 59 |
| 表 4-7 敏感度分析表_Partheniades 凝聚性沉滓沖刷機制.....        | 60 |
| 表 4-8 敏感度分析表_非凝聚性沉滓機制 .....                     | 61 |



# 圖目錄

|  |    |
|--|----|
| 圖 1-1 固結時間和土壤深度與底床剪應力強度之關係圖(Parchure & Mehta 1985)   | 62 |
| 圖 1-2 粒徑為 5.7 微米時濕密度隨深度及固結時間之變化(Roberts et al. 1998) | 62 |
| 圖 2-1 凝聚性沉滓力平衡示意圖                                    | 63 |
| 圖 2-2 不同粒徑及濕密度下之啟動剪應力(摘錄 Wilbert et al. 2004)        | 63 |
| 圖 2-3 團絮密度與沉降速度關係(摘錄 Krishnappan 2000)               | 64 |
| 圖 2-4 沉淤速度與濃度關係圖 (摘錄 You 2004)                       | 64 |
| 圖 3-1 懸浮沈滓之移流特性軌跡                                    | 65 |
| 圖 4-1 底床變化量圖(Migniot 1989)                           | 66 |
| 圖 4-2 懸浮濃度變化圖(Migniot 1989)                          | 66 |
| 圖 4-3 懸浮載源變化圖(Migniot 1989)                          | 66 |
| 圖 4-4 底床變化量圖(Krishnappan 2000)                       | 67 |
| 圖 4-5 懸浮濃度變化圖(Krishnappan 2000)                      | 67 |
| 圖 4-6 懸浮載源變化圖(Krishnappan 2000)                      | 67 |
| 圖 4-7 底床變化量圖(You 2004)                               | 68 |
| 圖 4-8 懸浮濃度變化圖(You 2004)                              | 68 |
| 圖 4-9 懸浮載源變化圖(You 2004)                              | 68 |
| 圖 4-10 底床變化量圖(Shrestha 1996)                         | 69 |
| 圖 4-11 懸浮濃度變化圖(Shrestha 1996)                        | 69 |
| 圖 4-12 懸浮載源變化圖(Shrestha 1996)                        | 69 |
| 圖 4-13 底床變化量圖(Roberts et al. 1998)                   | 70 |
| 圖 4-14 懸浮濃度變化圖(Roberts et al. 1998)                  | 70 |
| 圖 4-15 懸浮載源變化圖(Roberts et al. 1998)                  | 70 |
| 圖 4-16 底床變化量圖(Krone 1999)                            | 71 |
| 圖 4-17 懸浮濃度變化圖(Krone 1999)                           | 71 |
| 圖 4-18 懸浮載源變化圖(Krone 1999)                           | 71 |
| 圖 4-19 底床變化量圖(Partheniades 1965)                     | 72 |
| 圖 4-20 懸浮濃度變化圖(Partheniades 1965)                    | 72 |
| 圖 4-21 懸浮載源變化圖(Partheniades 1965)                    | 72 |
| 圖 4-22 底床變化量圖(Q=250cms)                              | 73 |
| 圖 4-23 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Migniot 1989)             | 74 |
| 圖 4-24 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Migniot 1989)             | 74 |
| 圖 4-25 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Krishnappan 2000)         | 75 |
| 圖 4-26 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Krishnappan 2000)         | 75 |
| 圖 4-27 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(You 2004)                 | 76 |

|   |    |
|---|----|
| 圖 4-28 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(You 2004).....       | 76 |
| 圖 4-29 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Shrestha 1996).....  | 77 |
| 圖 4-30 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Shrestha 1996).....  | 77 |
| 圖 4-31 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Roberts et al. 1998) | 78 |
| 圖 4-32 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Roberts et al. 1998) | 78 |
| 圖 4-33 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Krone 1999).....     | 79 |
| 圖 4-34 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Krone 1999).....     | 79 |
| 圖 4-35 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Partheniades 1965).. | 80 |
| 圖 4-36 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Partheniades 1965).. | 80 |
| 圖 4-37 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例(Van Ri jn 1984)..... | 81 |
| 圖 4-38 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例(Van Ri jn 1984)..... | 81 |
| 圖 5-1 石門水庫下游水位歷線圖(艾利颱風).....                    | 82 |
| 圖 5-2 石門水庫上游流量歷線圖(艾利颱風).....                    | 83 |
| 圖 5-3 石門水庫上游入砂濃度歷線圖(艾利颱風).....                  | 84 |
| 圖 5-4 下游水庫出流量與實測結果比較圖(艾利颱風).....                | 85 |
| 圖 5-5 石門水庫模擬結束底床變化_水位圖(艾利颱風).....               | 86 |
| 圖 5-6 石門水庫模擬結束底床變化量圖(艾利颱風).....                 | 87 |
| 圖 5-7 石門水庫模擬結束各粒徑懸浮濃度變化情形圖.....                 | 88 |
| 圖 5-8 石門水庫壩址濃度變化圖(艾利颱風期間).....                  | 88 |
| 圖 5-9 石門壩址處濃度變化與實測值比較圖.....                     | 89 |
| 圖 5-10 模擬非凝聚性狀態下各粒徑懸浮濃度變化情形圖.....               | 89 |
| 圖 5-11 石門水庫漲水時刻各粒徑組成變化情形圖(T=36000s).....        | 90 |
| 圖 5-12 石門水庫尖峰時刻各粒徑組成變化情形圖(T=93600s).....        | 90 |
| 圖 5-13 石門水庫模擬結束各粒徑組成變化情形圖.....                  | 91 |
| 圖 5-14 模擬非凝聚性狀態下各粒徑組成變化情形圖.....                 | 91 |

# 符號說明

## 一般符號

- A : 通水斷面積
- a : 砂丘高度之一半
- B : 渠道寬
- $C_k$  : 顆粒 k 之平均濃度
- $C_c$  : 代表凝聚性沉滓之懸浮載濃度
- $C$  : 顆粒蔡司係數
- $c_w$  : 凝聚性沉滓含水率
- $D$  : 凝聚性沉滓淤積造成之懸浮通量
- d : 顆粒粒徑
- $E$  : 凝聚性沉滓沖刷造成之懸浮通量
- $E_m$  : 作用層厚度
- g : 重力加速度
- h : 水深
- k : 凝聚性沉滓強度常數
- $m_w$  : 凝聚性沉滓之濕比重
- $m_d$  : 凝聚性沉滓之乾比重
- n : 曼寧值

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| $P$             | : 凝聚性沉滓沉淤機率        |
| $p$             | : 孔隙率              |
| $Q$             | : 流量               |
| $Q_s$           | : 懸浮載之擴散通量(flux)   |
| $Q_{bk}$        | : 粒徑 $k$ 之河床載通量    |
| $q_l$           | : 單位渠長之支流側流量       |
| $R$             | : 水力半徑             |
| $s$             | : 砂比重              |
| $S_c$           | : 凝聚性沉滓之懸浮載源       |
| $S_k$           | : 粒徑 $k$ 之懸浮載資源項   |
| $S_{ak}$        | : 粒徑 $k$ 於作用層底部資源項 |
| $\Delta\bar{s}$ | : 疊代修正向量           |
| $T_k$           | : 輸送參數             |
| $TK$            | : 非均勻沉滓之代表粒徑數      |
| $TC$            | : 凝聚性沉滓之代表粒徑數      |
| $t$             | : 時間               |
| $\Delta t$      | : 時間間距             |
| $\Delta t'$     | : 模擬輸砂時間間距         |
| $U$             | : 水體流速             |



$u_l$  :單位渠長之支流側流速

$u_*$  :有效河床剪力速度

$u_{*c}$  :臨界剪應力

$W$  :Stoke 定理之沉降速度

$W_c$  :凝聚性沉滓沉降速度

$w_{lk}$  :顆粒向上躍起之速度

$w_k$  :非凝聚性沉滓 k 之沉降速度

$x$  :沿渠道中心線之距離

$\Delta x$  :兩斷面間間距

$Z$  :水位

$Z_b$  :底床高程

### 希臘符號

$\alpha$  :沖刷權重因子

$\beta$  :底床粒徑百分比

$\beta_k$  :作用層內粒徑 k 之百分組成

$\beta_c$  :作用層內凝聚性沉滓之百分組成

$\beta_w$  :動量校正係數

$\zeta$  :隱藏因子

$\rho$  :水體密度



|             |                 |
|-------------|-----------------|
| $\rho_b$    | : 凝聚性土壤濕密度      |
| $\rho_s$    | : 非凝聚性沉滓密度      |
| $\nu$       | : 運動滯度          |
| $\kappa$    | : von Karman 係數 |
| $\tau_b$    | : 底床剪應力         |
| $\tau_{cd}$ | : 凝聚性沉滓沉降剪應力    |
| $\eta$      | : 水黏滯係數         |
| $\nu$       | : 運動黏滯係數        |
| $\mu$       | : 絕對黏滯度         |
| $\psi_c$    | : 連續方程式之時間加權因子  |
| $\psi_m$    | : 動量方程式之時間加權因子  |



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

凝聚性沉澱在流場中的傳輸行為相當複雜，而凝聚性沉澱往往會受土壤種類、鹽度、水中正負離子、沉澱濃度等影響，加上台灣地區河川大多較短且水流湍急，因此河川的沖淤變化為劇烈，往往造成下游地區及河口飽受淤泥之沉積阻礙排水，在水庫方面也常因豪暴雨的發生導致凝聚性沉澱濃度升高及淤積，不但影響供水系統操作，還嚴重減少水庫壽命。

依據美國地球物理聯合會(AGU)之粒徑分類標準，粉土(silt)粒徑介於  $2\ \mu\text{m}$  ~  $62\ \mu\text{m}$  之間，黏土(clay)則在  $2\ \mu\text{m}$  以下，而本研究之採用的凝聚性沉澱包括粉土與黏土。一般所謂的凝聚性沉澱為顆粒之間有一黏滯力，凝聚性沉澱在水中作用後，粒子與粒子之間結合成剪應力強度較大的絮狀(flocs)或是團絮物(aggregate)，漸漸因重力增加往下沉積，到達剪應力很強的底床上方，假如這些絮狀物的剪力強度不夠，便會受到底床水流剪應力的作用下遭到破壞，再度的回到懸浮狀態，假如絮狀物的剪應力強度夠大，則粒子可以沉降到底床上與底床緊密結合，此時底床附近將形成一高濃度的區域，主要是因為這些剛落淤的沉澱所致。

懸浮質落淤到底床一定時間後，底床與這些落淤的懸浮質開始緊

密的結合，因而凝聚性土壤強度增加，過一段長時間底床上又有新的沉積沉滓落淤，而先前的沉積物則因這些新的沉積物及水體重量作用下，變成更為堅硬的底床，此為凝聚性沉滓的壓密現象，在現場量測壓密程度可藉由鑽孔看其垂直密度變化，愈下層愈為緊密，凝聚性沉滓不易被沖刷原因之一。

過去對非凝聚性沉滓之運移行為已有相當程度的研究，但對於凝聚性沉滓，其在流場中之運移行為相當複雜，至目前為止乃有部分機制尚未清楚被定義。本研究主要針對凝聚性沉滓如黏土及粉土運移特性之模擬分析，而在做凝聚性傳輸機制分析之前，首先必須了解這些細小顆粒之物理化學特性，再針對這些特性將其運移機制合理納入在模式中。

## 1.2 文獻回顧

在膠體化學中，凝聚性土壤是具有特殊結構之結晶性物質，組成黏土顆粒主要單位為二維片狀之矽-氧四面體與二維陣列狀之鋁(鎂)-氫氧跟八面體，在自然界中最常見者為高嶺土、蒙脫土和伊萊土。凝聚性沉滓為矽酸鹽類礦物的岩石經化學風化過程，成為含水礦物，黏土多以土團的方式出現，而土壤主要包括黏土及塑性的粉土。黏土具有內部的凝聚力，凝聚力又受固結過程、壓密程度、內部的化學鍵結、土壤的含水量、鹽類濃度、沉滓種類及水溫度等因素之影響，

這也是凝聚性沉澱與非凝聚性沉澱之間的主要差異。

在凝聚性沉澱沖刷方面，Grissinger (1966)曾就黏土性質對沖刷的影響問題進行一些探索，得到以下結論(1)黏土顆粒互相間的排列組合對沖刷影響很大；(2)在一般情況下，土壤中黏土含量增加，將會加大土壤的抗沖能力；(3)在試驗前土壤的含水率與沖刷率有很大之關係；(4)土壤式樣受壓與不受壓可使沖刷率差到十倍；(5)水溫自 20°C 增加到 35°C，可使沖刷率加大一倍。Partheniades (1971)曾分析比較剛淤積不久的凝聚性土壤與固結過的凝聚性土壤，在相同的水流剪應力之下，剛淤積的黏土土壤沖刷率較經過固結的黏性土壤沖刷率為高。Parchure 與 Mehta (1985)提到黏性土固結時間越長，其底床剪應力強度就越高，同時也會隨著深度增加，底床剪應力強度也有越高的趨勢，如圖 1-1 所示。Roberts et al. (1998)以濕密度(bulk density,  $\rho_b$ )來表示凝聚性土壤的壓密程度，其中凝聚性沉澱強度與含水率( $c_w$ )有極大的關係，含水率又與土壤的乾濕比重( $m_d$ 、 $m_w$ )有關，因此可由  $c_w = \frac{m_w - m_d}{m_w}$  及  $\rho_b = \frac{\rho_s \rho}{\rho + (\rho_s - \rho)c_w}$  推求出濕密度(bulk density,  $\rho_b$ )；另外，濕密度隨時間與深度都會有遞增的趨勢，如圖 1-2 所示。(註：乾比重為單位體積內乾燥物體的重量；濕比重為單位體積內濕潤物體的重量。)

對於粗顆粒的泥砂，係以單顆粒的方式啟動；而細顆粒的泥砂，

由於黏滯力和水流脈動的影響，往往以數十個或是數百個顆粒組成群體型式啟動，啟動後顆粒之間的黏結力遭受破壞故以單顆粒的形式在水流中運動，床面上則留下片狀的痕跡。竇國仁(1999)認為凝聚性顆粒周圍有水膜環繞，其最接近顆粒表面非自由水，具有某種固體性質，其壓力的傳遞不符合巴斯卡定理，因而兩顆粒接觸面積受到上邊水柱壓力的作用，其為顆粒啟動與否的一大關鍵。Wilbert et al. (2004)則利用 Roberts et al. (1998)的實驗室資料進行凝聚性沉滓的啟動剪應力迴歸，發現當河床土層的濕密度(bulk density)愈大時，沉滓啟動方式為群體的型式運動，而顆粒之間的黏滯力也相對較高。

Kamphuis (1990)發現當水中同時含有凝聚性沉滓及非凝聚性沉滓時，含凝聚性沉滓的底床沖刷會受到這些非凝聚性沉滓的影響，當入流含有非凝聚性沉滓時，將可能破壞凝聚性沉滓間的凝聚力，導致底床的沖刷加劇，且比清水沖刷可刷起更多的凝聚性沉滓。

在凝聚性沉滓淤積方面，沉降速度佔了非常重要的因素，最早有學者提出布朗運動、不等速沉降和流速梯度的機制，後來才有許多靜水沉降試驗，分析其凝聚性沉滓落淤過程中的行為與其非凝聚沉滓沉降間的差異。當凝聚性沉滓膠結之後，其沉降速度會比原本的單顆粒粒子還大許多，Lau 與 Krishnappan (1992)利用高嶺土土壤做環形河道沉積試驗，研究結果顯示細小的沉滓能夠落淤是因為這些沉滓是以

絮狀物(flocs)的型態沉積，而主要是因為顆粒之間加入某些有機物後，這些有機物會對沉澱造成吸引力改變原來沉澱的大小，因而加快其沉降速度，例如在一穩定且不含鹽分之河川中，顆粒間的排斥力大於吸引力，使得黏土顆粒不易經由絮結作用形成絮狀物；相反的，在一含鹽的渠道中，由於陽離子的存在，將排斥力減弱，因此，黏土顆粒較易經由絮結作用，產生較大的黏土顆粒結構，所以在河口及沿海地區含鹽份較高，會形成尺寸較大之絮集體。Migniot (1989)則將Stokes定理算出單一顆粒沉降速度，再乘上一凝聚性因子F作為黏性沉澱沉降速度之修正。

Erik (1993)提到如考慮沉澱中為凝聚性沉澱與非凝聚性沉澱時，在沉降管實驗中，非凝聚性沉澱會先沉降於底部，而具有凝聚性的黏土則會沉澱在上方，並且當上方的黏土壓密後，會形成如土體般的結構。Krishnappan (2000)對絮狀物的大小與其沉降速度做一比較，認為當絮狀物的粒徑大於 $175\ \mu\text{m}$ 時，其絮狀物密度趨近於水的密度，故其沉降速度為零，而其絮狀物粒徑為 $55\ \mu\text{m}$ 時，有最大的沉降速度為 $0.7\ \text{mm/s}$ 。而Nicholson and O'Connor (1986)認為當濃度大於 $25\ \text{g/l}$ 時，泥水交界面的沉降速度會隨著濃度增加造成顆粒相互干擾而變慢。因此，You (2004)認為凝聚性沉澱的沉降速度並非凝聚性顆粒大小為主要關鍵的前提下，利用控制體積之質量守恆求出一沉降速度積分式，在

濃度在 $0.3g/l$ 以下沉降速度為一定值，濃度介於 $0.3g/l$ 至 $4.3g/l$ 時，沉降速度為非線性方式遞增，而濃度大於 $4.3g/l$ 時沉降速度則迅速遞減。

在沉淤通量判定方面，Krone (1962)以港灣淤泥實驗結果，定義出一沉降剪應力值，當底床剪應力小於沉降剪應力時，則懸浮的沉滓最後都將落淤下來，當底床剪應力大於沉降剪應力時，則懸浮的沉滓只有少數部分會落淤，懸浮物濃度會達到平衡濃度。Ziegler (1994)將凝聚性沉滓之沉降剪應力範圍界定在 $0.06N/m^2 \sim 1.1N/m^2$ 之間，而沉降剪應力大小受土樣的種類以及懸浮濃度的影響，目前尚無函數關係式可以求得其值，大多採用率定方式及大地試驗求得其合理值。

### 1.3 研究內容

鑒於凝聚性沉滓沖淤特性不同於一般粗顆粒土壤與在工程防治上的困難，實需要對於其沖淤機制進行研究。本研究延續陳氏(2002)之一維顯式有限解析法動床數值模式，建置可同時模擬凝聚性沉滓及非凝聚性沉滓運移機制，且探討不同凝聚性沉滓沉積經驗式及沖刷經驗式之差異性，以利往後之應用。

本研究首先將凝聚性沉滓機制加入動床模組，包括凝聚性沉滓啟動條件、沖刷經驗式、沉降速度公式及沉淤經驗式。另外，再假設一實驗渠道進行模擬，以利探討不同公式的差異性及驗證模組物理現象

之合理性，最後則以石門水庫之現場案例進行模式應用。



## 第二章 數模理論基礎

### 2.1 模式概述

本研究採用之動床數值模式可分成水理及輸砂兩大部分。在水理計算方面，在滿足de Saint Venant之基本假設下，採用顯式有限解析法 (explicit finite analytic method, EFA) 模式直接求解水流之連續方程式及動量方程式。EFA法有推導容易及精度良好之優點，且此法在計算流力與水力計算領域之應用已證明成果相當不錯。

在沉滓運移計算方面，因天然河床由多種不同粒徑之沉滓所組成，且由於水庫迴水區甚長，能流淤在壩址前之沉滓一般均為細顆粒者，且經由水庫防淤操作排放至下游河道之沉滓多屬細小之黏土或粉土，其特性將與其下游河床上之底質有所差異，因此所採用之模式須具有模擬非均勻沉滓之特點，以反映水庫內淤積及排淤與河道原有沉滓之不同特性。此外，為考慮懸浮載與河床載不同之運移機制，故將兩者予以分開計算，並考慮沉滓在渠道底床附近發生沉淤與再懸浮之情形，因此模式引入懸浮載與河床載間之交換機制，藉以推估水體中各懸浮沉滓之濃度變化，以及河床上床質粒徑之組成。本研究採用適於雙曲線型方程式之特性法求解懸浮載質量守衡方程式，並與河床載質量守衡方程式及整體河床輸砂之質量守衡方程式進行結合演算，利用Newton-Raphson 疊代聯立求解。茲分述水流及沉滓運動之控制方程

式與模式所採用之數值方法如下：

## 2.2 控制方程式

### 2.2.1 水流控制方程式

水理演算係根據de Saint Venant所推導之一維緩變非穩流控制方程式計算之，而de Saint Venant之基本假設如下：

#### 1. 流速均勻分佈：

流速均勻分佈在通水面積上，即每一個通水斷面積僅存在一個流速，此即一維水流。

#### 2. 靜水壓分佈：

假設渠道中水流之垂向流線曲率很小而且忽略其垂直加速度，因此水深方向速度梯度為零，可忽略垂向加速度，則假設成立。

#### 3. 渠道定量流摩擦損失估計：

渠底摩擦與紊流效應對水流所造成的損失，可以定量流摩擦律估算。

#### 4. 底床坡度甚小：

當假設成立時，重力沿渠道所造成的分力將會很小，甚至可忽略不計，亦即水深可以垂向水面與渠底高程差表示。

#### 5. 忽略柯氏力及風力的影響：

以重力、靜水壓、摩擦力為主。對於不可壓縮水流之控制方程

式，包括水流連續方程式與水流動量方程式，為如下形式。

水流連續方程式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (2-1)$$

水流運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta_w \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gAS_f - q_l u_l = 0 \quad (2-2)$$

式中， $A$ =通水斷面積； $Q$ =流量； $t$ =時間； $x$ =沿渠道中心線之距離； $g$ =重力加速度； $Z$ =水位； $\beta_w$ =動量校正係數； $q_l$ =單位渠長之支流側流量； $u_l$ =單位渠長之支流側流速， $S_f = \frac{Q|Q||n|^2}{A^2 R^3}$ =摩擦坡降，其中 $R$ =水力半徑， $n$ =曼寧值。

### 2.2.2 輸砂控制方程式

輸砂控制方程式將河道輸砂通量分離為非均勻之懸浮載與河床載兩部份，同時求解某一粒徑之懸浮載、河床載質量守恆，及整體河床質載之質量守恆等控制方程式，分別表示如下：

$$\frac{\partial(C_k A)}{\partial t} + \frac{\partial(C_k Q)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + S_k \quad k=1,2,\dots,TK \quad (2-3)$$

$$(1-p) \frac{\partial(\beta_k B E_m)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_{bk})}{\partial x} + S_k - S_{ak} = 0 \quad k=1,2,\dots,TK \quad (2-4)$$

$$(1-p) \frac{\partial(BZ_b)}{\partial t} + \sum_{k=1}^{TK} \left[ \left( \frac{\partial Q_b}{\partial x} + S \right)_k \right] = 0 \quad (2-5)$$

上三式中， $C_k$ =某一代表粒徑 $k$ 之懸浮載濃度； $Q_s = C_k Q$ =懸浮載之擴散通量(flux)； $\rho_s$ =沉澱密度； $p$ =孔隙率； $\beta_k$ =作用層內粒徑 $k$ 之百分

組成； $E_m$  = 作用層厚度； $Q_{bk}$  = 粒徑 $k$ 之河床載通量； $S_k$  = 粒徑 $k$ 之懸浮載資源項； $Z_b$  = 底床高程； $B$  = 渠道寬； $TK$  = 非均勻沉滓之代表粒徑數； $A$  = 通水面積。

至於對於凝聚性沉滓部分，則因為河床載之影響遠小於懸浮載部分，故在此可將河床載通量假設為零，並考慮凝聚性沉滓所造成之懸浮載，故凝聚性沉滓輸砂質量守恆方程式可表示如下：

$$\frac{\partial(C_c A)}{\partial t} + \frac{\partial(C_c Q)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \frac{\partial C_c}{\partial x} \right) + S_c \quad c = 1, 2, \dots, TC \quad (2-6)$$

$$(1-p) \frac{\partial(\beta_c B E_m)}{\partial t} + S_c - S_{ak} = 0 \quad c = 1, 2, \dots, TC \quad (2-7)$$

$$(1-p) \frac{\partial(B Z_b)}{\partial t} + \sum_{k=1}^{TC} S_c = 0 \quad (2-8)$$

$S_c$  = 凝聚性沉滓所造成的懸浮載源； $TC$  = 凝聚性沉滓之代表粒徑數；

$C_c$  = 代表凝聚性沉滓之懸浮載濃度； $\beta_c$  = 作用層內凝聚性沉滓之

百分組成。

## 2.3 輸砂輔助方程式

### 2.3.1 無黏性沉滓輸砂輔助關係式

#### 2.3.1.1 河床載通量 (bed load flux, $Q_{bk}$ )

Van Rijn (1984a) 係以中值粒徑為代表粒徑來計算非均勻河床載之體積通量。其後，Spasojevic & Holly (1990) 針對每一粒徑 ( $D_k$ )，將 Van Rijn 公式稍加修正。假設河床載運移僅發生在作用層內，其中某

粒徑之百分組成表示為  $\beta_k$ ，且考慮較小粒徑在水體中會形成懸浮載，可引入懸浮載與河床質載之比值  $\gamma$  (Van Rijn, 1984b)，對河床載通量作修正。此外，在一般非均勻之河床質中，較細顆粒可能被隱藏在較粗顆粒之間，而不易被水流帶動，故 Karim et al. (1987) 提出一經驗因子，稱之為隱藏因子 (hiding factor,  $\zeta$ )，對河床載通量予以修正。綜合上述之影響因子可得粒徑為  $D_k$  之河床載通量如下：

$$Q_{bk} = (1-\gamma)\zeta_k \beta_k q'_b(D)_k B = (1-\gamma)\zeta_k \beta_k (0.053)\sqrt{(s-1)D_k} D_k \frac{T_k^{2.1}}{D_{*k}^{0.3}} B \quad (2-9)$$

上式中， $D_{*k} = D_k \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$ ，無因次顆粒粒徑； $T_k = \frac{u_*^2 - (u_{*c})_k^2}{(u_{*c})_k^2}$ ，輸送參數； $u_* = \frac{u\sqrt{g}}{c}$ ，有效河床剪力速度； $c = 18 \log\left(\frac{12d}{3D_{90}}\right)$ ，顆粒蔡司係數；

$s = \frac{\rho_s}{\rho}$ ，砂之比重； $\nu$  = 運動滯度； $u_{*c}$  = 臨界剪應力； $\zeta_k = \left(\frac{D_k}{D_{50}}\right)^{0.85}$ ；

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \frac{u_*}{w_k} \geq 10 \\ 0.25 + 0.325 \ln\left(\frac{u_*}{w_k}\right) & 0.4 < \frac{u_*}{w_k} < 10 \\ 0 & \frac{u_*}{w_k} \leq 0.4 \end{cases}$$

上式中， $w_k$  = 粒徑  $k$  之沉降速度。

### 2.3.1.2 作用層厚度 ( $E_m$ )

沖刷現象發生時，根據 Bennet 與 Nordin (1977) 之研究， $E_m$  可以下式表示：

$$E_m^{n+1} = -C(Z_b^{n+1} - Z_b^n) \quad (2-10)$$

式中， $C$  為數值參數 (模式設定為 20)。當河床表面接近護甲條件時

(armored condition)，作用層厚度接近零，在這種情況下，可用 Borah et al. (1982)所提出護甲層之厚度(armored-layer thickness)，予以修正：

$$E_m^{n+1} = -C(Z_b^{n+1} - Z_b^n) + \frac{1}{\sum_{k=m}^k \beta_k} \frac{D_m}{1-p} \quad (2-11)$$

式中， $D_m$  為不動之最小顆粒粒徑。另外，作用層在淤積期間可定義為：

$$E_m^{n+1} = E_m^n + (Z_b^{n+1} - Z_b^n) \quad (2-12)$$

上式中之上標代表 $n$ 及 $(n+1)$ 時刻。

### 2.3.1.3 非凝聚性懸浮載源( $S_k$ )

懸浮載源係由懸浮質向下之通量與底床亂流剪力作用產生河床質向上之通量交互作用之結果。使懸浮質下移到河床表面，主要是受到重力之影響。懸浮質之沈降速度決定向下沈淤之通量，所以對某一粒徑 $k$ 之懸浮質而言，其向下之通量可表為：

$$Q_{dk} = Bw_k C_{dk} \quad (2-13)$$

式中，

$$C_{dk} = [3.25 + 0.55 \ln(\frac{w_k}{K u_*})] C_k \quad (\text{Lin}, 1984);$$

其中， $C_k$  = 顆粒 $k$ 之平均濃度； $K$  = von Karman 係數。

另一方面，床面沈滓成為懸浮質，主要受到底床之亂流作用所造成。Bennet and Nordin (1977)認為對某一粒徑 $k$ 而言，河床質向上之通

量可表為：

$$Q_{e_k} = B w_{lk} C_{ak} \quad (2-14)$$

式中，

$$\frac{w_{lk}}{u_*} = 3.2 - 4.5 \log \Theta \quad \Theta < 1.2 \quad (\text{Hu \& Hui, 1996});$$

$$= 3.1 \quad \Theta > 1.2$$

$$\Theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD}$$

$$C_{ak} = 0.015 \frac{D_k T_k^{1.5}}{a D_{*k}^{0.3}} \quad (\text{Van Rijn, 1984b});$$

$w_{lk}$  = 顆粒向上躍起之速度； $\tau_b$  = 底床剪應力； $a$  = 砂丘高度之一半。

由(2-13)及(2-14)式知，對某一粒徑 $k$ 之懸浮載源可表為：

$$S_k = B(w_{lk} C_{ak} - w_k C_{dk}) \quad (2-15)$$

#### 2.3.1.4 作用層源( $S_{ak}$ )

作用層源係表示介於作用地層(active stratum)控制體積間河床粒徑改變量，由於作用地層頂面之升降而產生，當其下降時，

$$S_{ak} = -(1-p) \frac{\partial}{\partial t} [\beta_{sk} (BZ_b - BE_m)] \quad (2-16)$$

其中， $\beta_{sk}$  為作用地層內某一粒徑之百分組成。如作用地層之厚度增加，即其頂面上升時，(2-16)式中之 $\beta_{sk}$ 則改為 $\beta_k$ 。

#### 2.3.2 黏性沉滓輸砂輔助關係式

本研究在一維有限解析法動床模式架構上，植入可同時模擬凝聚性沉滓及非凝聚性沉滓運移行為的機制。輔助機制乃屬懸浮載源部份，

懸浮質為向下之通量與底床亂流剪力作用產生河床質向上之通量交互作用之結果。運移機制包括啟動條件、沖刷公式(向上懸浮通量)、沉降速度、淤積公式(向下沉淤通量)。

目前探討凝聚性沉滓運移過程中，不計算河床載部分而只針對凝聚性沉滓所造成之懸浮載源作計算：

$$\text{凝聚性沉滓懸浮載源 } S_c = B(\beta_c E - D) / 100 \rho_s \quad c = 1, 2, \dots, TC \quad (2-17)$$

上式中，

$E$  : 凝聚性沉滓沖刷造成之向上懸浮通量 ( $g/cm^2 \cdot s$ ) ;

$D$  : 凝聚性沉滓淤積造成之向下懸浮通量 ( $g/cm^2 \cdot s$ ) 。

在模式中定義粒徑小於 0.01mm 屬於凝聚性沉滓，大於 0.01mm 屬於非凝聚性沉滓，另外可選擇是否考慮凝聚性機制。

### 2.3.2.1 凝聚性沉滓起動條件

對於凝聚性沉滓起動方面除了須考慮重力、升力、阻力外，還必須考慮黏滯力，Wilbert et al. (2004) 根據 Roberts et al. (1998) 實驗數據，迴歸出一套半理論半經驗的凝聚性沉滓啟動機制。圖 2-1 利用力矩平衡  $F_d b = (F_g - F_l) a$  中，考慮黏滯力  $F_c$  可以推求出啟動剪應力：

$$\tau_c = \left( \frac{F_g + F_c}{F_g} \right) \tau_{cn} = \left( 1 + \frac{c_4}{c_3 d^2} \right) (0.414 \times 10^3 d) \quad (2-18)$$

上式中， $c_3 = \pi(\rho_s - \rho)g/6$  ;  $c_4 \approx \tau_c(\rho_b, 5) \times 10^{-4}$ ，而  $\tau_c(\rho_b, 5) = a_1 e^{b_1 \rho_b}$  表示為粒徑 5  $\mu m$  時根據實驗數據推導出不同濕密度下之迴歸式，其中  $a_1 = 7$

$\times 10^{-8} N/m^2$ 、 $b_1 = 9.07 L/Kg$ ，最後可以推算出如圖 2-2 對應在不同壓密程度下之啟動剪應力。

### 2.3.2.2 凝聚性沉澱沖刷公式

本研究探討之公式如下：

1. Roberts et al. (1998) 利用粒徑  $5 \mu m$  至  $1350 \mu m$  的石英材質在不同的壓密土壤進行沖刷試驗，研究結果顯示在粒徑大小為  $222 \mu m$  時，可判別顆粒是否具有凝聚性質，經驗參數  $n_c$ 、 $m_c$  隨粒徑變大而增加，在粒徑大於  $222 \mu m$  時，沖刷速率已與土壤的濕密度無關。

$$E = A_c \tau^{n_c} \rho_b^{m_c} \rho_s \quad (2-19)$$

上式中  $\tau = \rho u_*^2$ ，

$\tau$ ：底床剪應力 ( $N/m^2$ )；

$A_c$ 、 $n_c$ 、 $m_c$ ：由實驗室結果，歸納如表 2-1；

$\rho_b$ ：凝聚性土壤濕密度 ( $g/cm^3$ )。

2. Krone (1999) 採納 Roberts et al. (1998) 實驗結果迴歸出經驗公式，認為沖刷速率和土壤濕密度存在著線性關係，在土壤濕密度為  $1.77 g/cm^3$  時，其土壤沖刷率大小之分界，公式如下：

$$E = 1.84 \times 10^{-3} (1.80 - \rho_b) \tau^2 \quad \rho_b < 1.77 g/cm^3 \quad (2-20)$$

$$E = 3.65 \times 10^{-4} (1.92 - \rho_b) \tau^2 \quad \rho_b > 1.77 g/cm^3 \quad (2-21)$$

3. Partheniades (1965) 之凝聚性沉澱沖刷率

$$E = E_f \left[ \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right]^\alpha \quad \tau > \tau_c \quad (2-22)$$

上式中，

$\tau_c$  : 啟動剪應力 ( $N/m^2$ ) ;

$E_f$  : 團絮沖刷通量 ( $g/cm^2 \cdot s$ ) ;

$\alpha$  : 沖刷權重因子。

當水流剪應力大於凝聚性沉滓啟動剪應力時，開始有沖刷行為產生，Parchure 與 Mehta (1985) 由實驗室測試凝聚性啟動條件，認為  $\tau_c$  介於  $0.04 N/m^2$  到  $0.62 N/m^2$  之間。當水深大時難以測定  $E_f$  及  $\alpha$ ，Ellegaard 與 Christiansen (1994) 由實驗室結果認為  $E_f$  介於  $0.45 \times 10^{-4} g/cm^2 \cdot s$  和  $0.162 \times 10^{-3} g/cm^2 \cdot s$  之間，而  $\alpha$  值介於 1.45 和 3.64 之間。Johnsen et al. (1994) 則建議在現場案例中， $E_f = 0.00136$ ， $\alpha = 3.64$ 。

### 2.3.2.3 凝聚性沉滓沉降速度

沉降速度在凝聚性沉滓沉積佔了重要角色，顆粒在水中可能相互結合成團絮而影響沉降速度，本研究採用以下學者提出的沉降速度公式：

1. Migiot (1989) 提出凝聚性沉滓之凝聚作用，其沉降速度比單一粒

徑的還大，故須修正其沉降速度，式子如下：

$$W_c = F \times W \quad (2-23)$$

上式中，

$W_c$  : 凝聚性沉澱沉降速度(m/s)；

$W$  : Stoke 沉降速度(m/s)；

其中， $W_c$  為凝聚後的沉降速度， $F$  為凝聚因子其值約  $250d^{-1.8}$ ，而  $W$  為 Stoke 定理得出之沉降速度，其公式表示為  $W = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{gd^2}{18\nu}$ 。

## 2. Krishnappan (2000)之沉降速度公式

$$W_c = (1.65/18) \exp(-0.0015d^{1.7})gd^2/\nu \quad (2-24)$$

當 floc 粒徑為  $55 \mu m$  時，其沉降速度為最大值  $0.7 mm/s$ ；當粒徑大於  $175 \mu m$  時，floc 密度趨近於水的密度，故凝聚性沉澱之沉降速度為零，如圖 2-3。

## 3. You (2004)認為凝聚性沉澱沉降必非顆粒大小為主要原因，其紊流、濃度、鹽度亦是重要因素，然而利用控制體積之質量守恆推求沉降速度，如圖 2-4 所示：

$$W_c = \frac{\int_0^h [C_c(z,t) - C_c(z,t+\Delta t)] dz}{\int_t^{t+\Delta t} C_0(t) dt} \quad (2-25)$$

迴歸後其經驗公式

$$\frac{W_c \Delta t'}{h} = \exp(-6.1952 + 0.9779C_c - 0.108C_c^2) \quad (2-26)$$

上式中，

$\Delta t'$  : 模擬輸砂時間間距；

$h$  : 水深。

### 2.3.2.4 凝聚性沉澱沉淤公式

當水流剪應力低於沉降剪應力時，其凝聚性顆粒將落淤於河床上，

以下將探討本研究採用之沉淤公式：

1. Krone (1962)之凝聚性沉澱公式如下：

$$D = W_c \times C_c \times P / 10 \quad (2-27)$$

$$P = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}}\right) \quad (2-28)$$

式中

$P$  : 沉淤機率因子；

$\tau_{cd}$  : 凝聚性沉澱沉降剪應力，在物理上為沉澱對於底床的附著力，由於目前乃無學者對此機制有一完整定義，一般以率定方式給之 ( $N/m^2$ )。

Krone (1962)利用沉淤機率因子  $P$  判斷淤積與否，當  $\tau$  大於  $\tau_{cd}$  時， $P$  為零即表示無沉淤產生。

2. Shrestha 與 Orlob (1996)利用 Krone (1962)所做之實驗室數據迴

歸，並提出沉降剪應力速率的概念來顯示凝聚性沉澱沉降作用，

得到以下關係式：

$$D = B_c(G)C_c^{N(G)} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}}\right) \frac{1}{h} \quad (2-29)$$

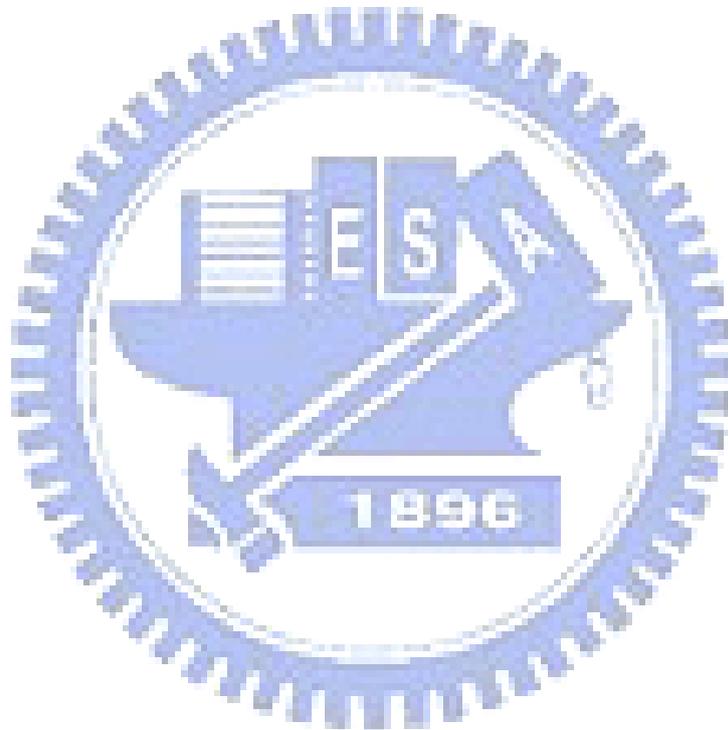
其中

$$G = \sqrt{\frac{\overline{u\tau}}{\mu h}} \quad (2-30)$$

$$B_c(G) = \exp(-4.20706 + 0.1465G) \quad (2-31)$$

$$N(G) = 1.1075 + 0.0386G \quad (2-32)$$

其中， $\mu$  為動力黏滯度； $B_c(G)$ 、 $N(G)$  均為平均剪力速度的實驗表示式，由實驗室資料求得，其中亦有 Krone 之沉淤機率因子。



## 第三章 數值方法

河道水理計算之控制方程式為非線性聯立方程組，本數值模式沿用葉等(1996)成果進行河道水理演算。水理模式採用顯式有限解析法(EFA)進行水理控制方程式之離散化，此數值方法主要係用以求解雙曲線型偏微分方程式，符合移流項之數學形式。輸砂模式方面採用與水理分離演算(uncoupled)的計算方式，即在每一計算時段內先求解水理條件，再以此推估輸砂量與底床沖淤量等，反之水理條件受到輸砂行為的影響則在累進時間的過程中反應。

### 3.1 求解水理方程式之數值方法

連續方程式保存保守型方程式之特性，並以控制體積的觀念來差分之，用以求得水位變化量。動量方程式則因其具有雙曲線型方程式之特性，故針對移流項之部份採用顯式有限解析法予以處理。由式(2-1)經離散後之連續控制方程式如下：

$$\frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta t} + \left[ \psi_c \left( \frac{Q_{i+1}^{n+1} - Q_{i-1}^{n+1} \pm q_{li}^{n+1}}{2\Delta x} \right) + (1 - \psi_c) \left( \frac{Q_{i+1}^n - Q_{i-1}^n \pm q_{li}^n}{2\Delta x} \right) \right] = 0 \quad (3-1)$$

式中，上標為時間點，下標為空間位置， $A$ 表示通水面積， $Q$ 表示流量， $\Delta t$ 為時間間距， $\Delta x$ 為兩斷面間間距， $A_i^{n+1}$ 為未知數，上標為 $(n+1)$ 者，係先給定 $n$ 時刻之量測值，經反覆疊代後，再將 $(n+1)$ 時刻所計算之值帶入； $\psi_c$ 與以下的 $\psi_m$ 分別為連續方程式與動量方程式之時間

加權因子(time weighting factor) ，其範圍在(0,1)之間。  $q_{li}$  為支流流量，合流時  $q_{li}$  為負，分流時  $q_{li}$  為正。式(2-2)經離散後之動量控制方程式如下：

$$\begin{aligned} & \frac{Q_i^{n+1} - Q_\xi^n}{\Delta t} + \left[ \psi_m Q_i^{n+1} \beta \left( \frac{v_r^{n+1} - v_l^{n+1}}{n_d \Delta x} \right) + (1 - \psi_m) Q_\xi^n \beta \left( \frac{v_r^n - v_l^n}{n_d \Delta x} \right) \right] \\ & + \left[ \psi_m g A_i^{n+1} \left( \frac{Z_r^{n+1} - Z_l^{n+1}}{n_d \Delta x} \right) + (1 - \psi_m) g A_\xi^n \left( \frac{Z_r^{n+1} - Z_l^{n+1}}{n_d \Delta x} \right) \right] \quad (3-2) \\ & + g A_i^n S_{fi}^n - q_{li}^n u_{li}^n = 0 \end{aligned}$$

式中，  $Q_i^{n+1}$  為未知數，而結合特性線與有限解析法之觀念，依水流方向及流況採用不同的差分方式。當流況為亞臨界流( $-1 < Fr < 1$ )時，則  $r = i + 1$ ，  $l = i - 1$ ，  $n_d = 2$ ，代表中央差分；當流況為正（向下游）之超臨界流( $Fr > 1$ )，則  $r = i$ ，  $l = i - 1$ ，  $n_d = 1$ ，代表後項差分；當流況為負（往上游）之超臨界流時( $Fr < -1$ )，  $r = i + 1$ ，  $l = i$ ，  $n_d = 1$ ，代表前項差分， $i$  為計算點位置。上標者為時間點，下標者為空間位置， $\Delta t$  為時間間距， $\Delta x$  為二斷面之間距，下標符號  $\xi$  者為  $n$  時段上之特性線位置，該特性線係由  $n + 1$  時段上之計算點向後（backward）投射，此為顯式有限解析法求解特色之一。

### 3.2 求解輸砂方程式之數值方法

由於各物理量具有高度之相關性，如河床質與懸浮質藉著懸浮載源連結，河床高程及作用層內之粒徑百分組成又因懸浮載源而變動等，

故有賴結合演算方式求解此之，所採用之方法為半隱式法差分聯立求解。因懸浮載之質量守恆方程式依物理特性可分割為移流及反應項 (advection-reaction term) 與擴散項 (diffusion term) 二部份，故首先將懸浮載質量守恆之移流及反應項與作用層質量守恆方程式、整體河床質載守恆方程式，利用 Newton-Raphson 法疊代聯立求解；然後，根據所獲得之變數值，再與懸浮載質量守恆方程式之擴散項反覆疊代至收斂為止。各控制方程式離散後之形式如下：

(i) 作用層質量守恆差分式：

$$\begin{aligned} & \frac{(1-p)}{\Delta t} [(\beta_k BE_m)_i^{n+1} - (\beta_k BE_m)_i^n] + \frac{\theta}{2 \cdot \Delta x} [(Q_{bk})_{i+1}^{n+1} - (Q_{bk})_{i-1}^{n+1}] \\ & + \frac{(1-\theta)}{2 \cdot \Delta x} [(Q_{bk})_{i+1}^n - (Q_{bk})_{i-1}^n] + \theta(S_k + S_c + S_a)_i^{n+1} + (1-\theta)(S_k + S_c + S_a)_i^n = 0 \end{aligned} \quad (3-3)$$

(ii) 整體河床質載守恆差分式：

$$\begin{aligned} & \frac{(1-p)}{\Delta t} [(BZ_b)_i^{n+1} - (BZ_b)_i^n] + \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \sum_{k=1}^n \{ \theta [(Q_{bk})_{i+1}^{n+1} - (Q_{bk})_{i-1}^{n+1}] \\ & + (1-\theta) [(Q_{bk})_{i+1}^n - (Q_{bk})_{i-1}^n] \} + \sum_{k=1}^n [ \theta S^{n+1} + (1-\theta) S^n ] = 0 \end{aligned} \quad (3-4)$$

上式中， $S = S_k + S_c$

圖 3.1 以一維空間為例示意沈滓之移流軌跡。就  $t^{n+1}$  計算時刻之計算點 A 而言，移流軌跡存在於  $t^{n+1}$  與  $t^n$  時刻之間，定義  $t^{n+1}$  時刻之端點 A 為到達點 (arrival point)， $t^n$  時刻之端點 D 為離開點 (departure point)。離開點 D 之懸浮沈滓濃度可由初始條

件求得，但由於模式採用固定格點，故離開點  $D$  並不能保證剛好落在格點上，因此該點之濃度必須藉由鄰近格點濃度以內插的方式求得。

一般情況下，河床質移動量遠小於懸浮質移動量，因而兩者在時間尺度上相差甚大，在必須聯立求解的前提下，懸浮載方程式必須使用較大之可蘭數(Courant number)，此將導致移流軌跡穿越若干個計算格點空間，因而必須採分段處理以求得較正確之移流軌跡。假設移流軌跡從離開點  $D$  至到達點  $A$  共跨越  $LNS$  個計算格點空間，將該軌跡進入及離開各計算格點空間之座標依序編號為  $(LNS+1)$  個節點，各節點間的相對位置可以表示為：

$$x_k = x_{k+1} - \frac{(u_{k+1} + u_k)}{2} (t_{k+1} - t_k) \quad l=1, 2 \dots LNS \quad (3-5)$$

其中，下標  $l$  為節點編號， $l=LNS+1$  代表到達點  $A$ ， $l=1$  代表離開點  $D$ 。利用式(3-5)推求各節點位置，必須要先知道各節點上的移流速度，但移流速度又與節點位置有關，可利用疊代收斂的方式來推求一正確的移流軌跡。

(iii) 懸浮載質量守恆特性方程式：

當運動軌跡已知後，可積分懸浮載質量守恆控制方程式，其離散化之

方程式為：

$$\begin{aligned}
 (C_k A)_{arr} - (C_k A)_{dep} &= \sum_{k=1}^{LNS} [(S_{k+1} + S_k + S_{c+1} + S_c) \frac{t_{k+1} - t_k}{2}] + \\
 &\frac{\theta A}{(\Delta x)^2} [(C_k)_{i+1}^{n+1} - 2(C_k)_i^{n+1} + (C_k)_{i-1}^{n+1}] \Delta t + \frac{(1-\theta)A}{(\Delta x)^2} [(C_k)_{i+1}^n - 2(C_k)_i^n + (C_k)_{i-1}^n] \Delta t - \\
 &C_i A \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} \tag{3-6}
 \end{aligned}$$

由上式可清楚瞭解到，在水深平均模式中沈澱交換速率  $S$  所造成之影響會直接反應在水深平均濃度的改變上，應被視為一源項，其正確性將左右模式的表現，為影響沈澱濃度分佈的重要物理量。

經由以上數值離散處理後，在非均勻沈澱共區分為  $TK$  個粒徑區間的情況下 ( $TK \geq 2$ )，任一計算點共可得  $(2TK+1)$  條代數關係式，包括  $TK$  條懸浮載質量守恆離散式、 $TK$  條作用層質量守恆離散式及 1 條整體河床輸砂質量守恆離散式。但在考慮均勻沈澱的情況下，則僅存懸浮載與整體河床輸砂質量守恆離散式各 1 條，至於作用層質量守恆離散式則退化成  $\beta=1$  的恆等式，符合單一粒徑時之情況。

為方便說明起見，在計算點上之未知量可以向量形式表式如下：

$$\bar{s}^{n+1} = (z_b, \bar{c}_1, \beta_1, \dots, \bar{c}_k, \beta_k, \dots, \bar{c}_{TK}, \beta_{TK})^{n+1} \tag{3-7}$$

或更簡潔地寫成：

$$\bar{s}^{n+1} = (s_1, s_{2k}, s_{2k+1})^{n+1} \quad k=1, 2, \dots, TK \tag{3-8}$$

其中， $k$  為粒徑區間之標號。則整體河床輸砂質量守恆離散式、作用層質量守恆離散式與式(3-6)可分別寫成：

$$F_1(\bar{s}^{n+1})=0 \quad (3-9)$$

$$F_{2k}(\bar{s}^{n+1})=0 \quad k=1,2,\dots,TK \quad (3-10)$$

$$F_{2k+1}(\bar{s}^{n+1})=0 \quad k=1,2,\dots,TK \quad (3-11)$$

以上三式為非線性代數式，可線性化後利用 Newton-Raphson 法疊代求解：

$$\left[\frac{\partial F_1}{\partial \bar{s}}\right]\Delta\bar{s} = -F_1({}^m\bar{s}^{n+1}) \quad (3-12)$$

$$\left[\frac{\partial F_{2k}}{\partial \bar{s}}\right]\Delta\bar{s} = -F_{2k}({}^m\bar{s}^{n+1}) \quad (3-13)$$

$$\left[\frac{\partial F_{2k+1}}{\partial \bar{s}}\right]\Delta\bar{s} = -F_{2k+1}({}^m\bar{s}^{n+1}) \quad (3-14)$$

式中， $\partial F/\partial \bar{s}$  為 Jacobian 係數矩陣中之列向量； ${}^m\bar{s}^{n+1}$  為前一次疊代所得之向量，上標  $m$  為疊代計數； $\Delta\bar{s}$  為疊代修正向量，可表為  $\Delta\bar{s} = (\Delta s_1, \Delta s_{2k}, \Delta s_{2k+1})$ 。解得修正向量  $\Delta\bar{s}$  後，可得新的  ${}^{m+1}\bar{s}^{n+1}$  向量：

$${}^{m+1}\bar{s}^{n+1} = {}^m\bar{s}^{n+1} + \Delta\bar{s} \quad (3-15)$$

當  $\Delta\bar{s}$  小於某一收斂容許值時，疊代得以結束。對於解凝聚性沉滓部分，與上述利用 Newton-Raphson 法同理，只需將非凝聚性粒徑組成換置成凝聚性組成即可。

## 第四章 凝聚性沉滓運移之模擬

在文獻回顧及數模理論基礎部分已將凝聚性沉滓物理化學特性有所敘述，而本章節將針對凝聚性沉滓沖刷、淤積機制做進一步分析，主要目的為探討凝聚性沉滓基本運移機制是否合理，及針對各影響因子作敏感度分析。

### 4.1 凝聚性沉滓沉積模擬

假設一梯型渠道長 8000 公尺、渠頂寬 100 公尺、渠底寬 60 公尺、渠高 30 公尺、渠道坡度為 0.0005，Chow(1959)對於黏土曼寧係數建議為 0.017。在凝聚性沉滓模擬時，首先將針對凝聚性沉滓沉淤過程及不同公式做一比較分析，以及採用沉降剪應力、入砂濃度、底床坡度、粒徑大小等因子做一敏感度比較。相關模擬條件如下：

| 模擬條件   |                    |                      |
|--|--------------------|----------------------|
| (a)上游入流量為 7cms<br>(b)單一粒徑 0.01mm<br>(c)上游入砂濃度為 5000ppm<br>(d)沉降剪應力 $0.3\text{N/m}^2$<br>(e)模擬時間為五天 |                    |                      |
| 沉淤公式   | 沉降速度公式             | 敏感度分析因子              |
| Krone (1962)   | Migniot (1989)     | 沉降剪應力、入砂濃度、底床坡度、粒徑大小 |
|  | Krishnappan (2000) | 沉降剪應力、入砂濃度、底床坡度、粒徑大小 |
|  | You (2004)         | 沉降剪應力、入砂濃度、底床坡度、粒徑大小 |
| Shrestha & Orlob (1996)  | 無                  | 沉降剪應力、入砂濃度、底床坡度、粒徑大小 |

#### 4.1.1 不同沉淤經驗式之模擬結果分析

##### 1. Krone (1962)沉淤公式配合 Migniot (1989)沉降速度公式

Migniot (1989)採用法國南部羅亞爾河(Loire Estuary)河口底床泥砂進行沉降速度推演，依史托克定理(Stoke's)算出單一顆粒沉降速度後，再乘上一團絮因子(flocculation factor)用以修正團絮物落淤的速度，最後再配合 Krone (1962)之經驗式，以算出沉淤通量。

模擬五天結果如圖 4-1，由於凝聚性沉滓淤積通量不大，因此以底床變化量來表示沉淤的情形，在圖 4-1 可發現底床變化在沉淤第一、二天時，由於中下游處之底床水流剪應力尚大於凝聚性沉滓沉降剪應力，對於 Krone (1962)所定義的沉降機率將降低，因此凝聚性顆粒沉淤情形尚未傳輸到下游處，往後幾天沉降機率增加以及上游入砂量不斷供應，整條渠道才開始有落淤的狀況發生。

圖 4-2 懸浮濃度變化情形可發現，當上游入砂濃度給定 5000ppm 時，凝聚性沉滓在水中運移速度相當快速，在模擬四至五天時，整條模型渠道已接近濃度均勻狀態，也表示在低濃度的狀態下，凝聚性沉滓在水中不易相互吸引，因此降低落淤於底床上的機率。

圖 4-3 為懸浮源變化情形，所謂懸浮源變化即是凝聚性沉滓向下之通量與底床亂流剪應力作用產生河床質向上之通量交互作用之結果，相對於底床的改變量，隨著模擬時間增加，凝聚性沉滓愈往下游

傳輸。

## 2. Krone (1962)沉淤公式配合 Krishnappan (2000)沉降速度公式

Krishnappan (2000)採用加拿大菲沙河(Fraser River)河床沉滓，認為當一凝聚性顆粒在水中時，因黏滯力關係將吸附更多的顆粒沉滓，而導致沉降速度之增加，最後再配合 Krone (1962)之經驗式，算出沉淤通量。

模擬五天結果如圖 4-4，與 Migniot (1989)模擬結果相比，由底床變化圖 4-1 可見渠道淤積量幾乎是 Migniot (1989)模擬結果的四分之一倍，可由 Krishnappan (2000)文獻中得知沉淤公式粒徑為團絮結合後的粒徑大小，但在目前文獻中，尚未對單一凝聚性顆粒結絮成一團絮粒徑大小有明確的研究，而模擬中採用粒徑為凝聚性沉滓的單一顆粒粒徑，意味假設凝聚型沉滓在水中不發生凝聚作用，因此有低估沉降速度的情形發生，導致向下淤砂通量減少。故在未知團絮粒徑大小分佈時，Krishnappan (2000)沉降速度公式只適合用於較低濃度狀況或不考慮凝聚作用下使用。

圖 4-5 濃度變化情形，與 Migniot (1989)模擬結果的濃度變化圖 4-2 比較，懸浮濃度運移過程相似，故在凝聚性沉滓沉淤通量不大之下，短時間內在水中傳輸機制不易受沉降速度的快慢及沉淤通量多寡之影響。

圖 4-6 為懸浮源變化情形，相對於底床變化的趨勢，可見 Krishnappan (2000)與 Migniot (1989)懸浮源變化模擬結果，發現垂直傳遞通量減少許多，沿下游傳遞速度也較為緩慢，同樣可視為假設顆粒在水中無凝聚發生而降低沉淤的機率。

### 3. Krone (1962)沉淤公式配合 You (2004)沉降公式

You (2004)針對三個不同濃度區間之沉降行為，利用沉降管中不同濃度泥砂沉降行為，得到一統計結果再配合控制體積之質量守恆方式進行迴歸，用以描述不同濃度之沉降速度，最後再配合 Krone (1962)之經驗式，以算出沉淤通量。

模擬五天結果如圖 4-7，與 Migniot (1989)底床變化模擬結果圖 4-1 相比，可知當上游入砂濃度為 5000ppm 時，模擬結果趨勢是差不多的。但值得注意的是 Migniot (1989)與 Krishnappan (2000)皆考量粒徑的大小來判斷其沉降速度，在高濃度時 Baldock (2004)指出沉降速度將可能折減 20~30%，而由 You (2004)的迴歸式得知在相同水深下濃度大於 5000ppm 時，沉降速度將迅速下降，所以當高濃度時採用 Migniot (1989)與 Krishnappan (2000)的沉降速度公式將有可能誤判沉降速度的情形發生。

### 4. Shrestha & Orlob (1996)沉淤公式

Shrestha & Orlob (1996)提出剪力速率(shear rate)的觀念，認為在

沉滓形成時，水流強度會相對產生壓密作用以擠壓落淤沉滓，因此落淤的凝聚性沉滓將不易被破壞，以此觀念再加上 Krone (1962)公式針對三籐市灣沉積實驗所得之資料，率定迴歸出沉積經驗式。

模擬五天底床變化量結果如圖 4-10，由濃度變化圖 4-11 及懸浮源變化圖 4-12 可見，凝聚性沉滓傳遞速度都較上述沉淤公式要高估，而沉淤過程不考慮凝聚性沉滓的沉降速度，而是用水流強度來推估沉淤通量的多寡。在定量流時，水流強度固定，底床沉淤情形幾乎隨時間以線性變化遞增，而凝聚性沉滓沉降速度在高濃度時，將隨著濃度增加而遞減趨勢看來，將減少落淤的通量，因此當渠道中濃度隨時間變化達到高濃度的情形，此公式依舊隨時間以線性趨勢遞增，故可以判斷 Shrestha & Orlob (1996)公式適用於低濃度的渠道。

#### 4.1.2 各沉淤因子之敏感度分析

凝聚性沉滓易造成水庫底床淤積之增加，為值得深入探討之課題，在此對於可能造成淤積產生的因子進行敏感度測試，用以探討影響凝聚性沉滓沉淤的因素。探討的因子為沉降剪應力、入砂濃度、坡度及粒徑大小，進而針對各變數調整幅度皆為正負百分之十進行測試，並針對底床及濃度變化作一比較。

分析結果由表 4-1 至表 4-4 分別依序為: Krone (1962)沉淤公式配合 Migniot (1989)沉降速度公式、Krone (1962)沉淤公式配合

Krishnappan (2000)沉降速度公式、Krone (1962)沉淤公式配合 You (2004)沉降公式及 Shrestha 與 Orlob (1996)沉淤公式，表中正號代表正成長；負號為負成長，以表 4-1 為例，當上游入砂濃度減少百分之十時，整體渠道底床中最小改變量即降低 $4.63 \times 10^{-6}$  m，最大改變量為降低 $1.78 \times 10^{-5}$  m 皆為負成長，以此類推。

由表 4-1 至表 4-4 可以觀察到凝聚性沉滓的一些物理特性，例如當沉降剪應力增加時，表示粒徑在沉淤過程中易吸附於底床上，導致增加沉淤機率，而水中濃度則有降低的趨勢。由表中也可以發現凝聚性沉滓粒徑對底床變化的影響，當粒徑縮小百分之十時，底床淤積有增加的趨勢，不因重量變輕而減少淤積，原因在於凝聚性顆粒愈小時，顆粒之間凝聚力有增大趨勢。當顆粒接觸底床時，沉滓淤積通量漸增，濃度方面也因沉滓沉降速度增加而降低，因此凝聚性沉滓的黏滯力比顆粒重力重要，符合凝聚性沉滓物理特性。

圖 4-23、圖 4-24 分別為 Krone (1962)沉淤公式採用 Migiot (1989)沉降速度之敏感度影響圖表，依序分別為各影響因子對底床及濃度變化影響比例。在底床變化方面，由圖 4-23 可見凝聚性沉滓沉降剪應力及底床坡度為影響底床淤積的主要因子，影響比例分別佔了 52% 及 34%，相對發現入砂濃度多寡及粒徑大小並不會直接造成底床淤積，原因在於入砂濃度及粒徑雖然對沉降速度有相對的影響，但由於凝聚

性沉滓之沉降速度非常緩慢，以致粒徑及濃度的影響並不會即時對底床淤積有明顯影響；反之沉降剪應力有粒徑接觸底床時所造成吸附力的涵義，底床坡度也直接影響水流強度，因此沉降剪應力、底床坡度對底床淤積有極大的影響。在濃度變化方面，由圖 4-24 可發現上游入砂濃度影響程度最大，比例佔 76%，因此更可以顯示凝聚性沉滓在不易淤積的情況下，加上沉滓重量輕運移速度快，在水中容易受水流的影響，極易導致渠道水體高濃度的現象，而沉降剪應力、底床坡度在影響水體濃度分別比例只佔了 13% 及 9%，影響程度依序為入砂濃度、沉降剪應力、底床坡度及顆粒大小。

圖 4-25 至圖 4-30 分別為 Krone (1962) 沉淤公式採用 Krishnappan (2000)、You (2004) 沉降速度及 Shretha & Orlob (1996) 沉淤公式之結果，依序分別為各影響因子對底床及水體濃度變化之敏感度影響比例。

## 4.2 凝聚性沉滓沖刷模擬

本節將探討凝聚性沉滓沖刷機制以及比較不考慮凝聚性狀況下的差異性。在不同環境之下河床層的壓密程度有所不同，而導致沖刷速率有所差異，加上外部地形、水理條件等複雜性影響下，故針對可能影響凝聚性沉滓傳輸因子作以下分析，相關模擬條件如下：

|                   |
|-------------------|
| 模擬條件              |
| (a) 上游入流量為 100cms |

|   |                       |                    |
|---|-----------------------|--------------------|
| (b)單一粒徑 0.01mm<br>(c)濕密度(bulk density)為 1.8g/cm <sup>3</sup><br>(d)模擬時間為十天<br>(e)清水沖刷 |                       |                    |
| 沖刷公式  | 啟動機制                  | 敏感度分析因子            |
| Roberts et al.(1998)  | Wilbert et al. (2004) | 濕密度、入流流量、粒徑大小、底床坡度 |
| Krone (1999)  |                       | 濕密度、入流流量、粒徑大小、底床坡度 |
| Partheniades (1965)   |                       | 濕密度、入流流量、粒徑大小、底床坡度 |

#### 4.2.1 不同沖刷經驗式之模擬結果分析

##### 1. Wilbert et al. (2004)啟動機制配合 Roberts et al. (1998)沖刷公式

凝聚性沉澱沖刷模擬為探討河床層壓密程度對沖刷過程的影響，因此首先假設不同壓密程度進行討論，圖 4-13 分別為 Roberts et al. (1998)經驗公式在不同河床層濕密度下底床改變量的結果，由圖可以看出當濕密度越小時，沖刷的深度呈現非線性的變化，而河床層濕密度達到 1.85g/cm<sup>3</sup> 左右時，水流強度已小於凝聚性沉澱的啟動強度，因此不會造成任何的沖刷情形，在沿渠道變化也可以發現水流因能量損失關係沖刷的深度也越來越小，且沖刷現象幾乎發生在渠道中上游。

另外，為區別沉澱凝聚性與否的差異性，假設顆粒為非凝聚性沉澱採用 Van Rijn 輸砂公式進行模擬，模擬結果發現沖刷深度比凝聚性沉澱機制還要深，原因為顆粒沖刷時因顆粒之間沒有黏滯性的關係，

水流在沖刷處會產生破壞，持續對底床向下淘刷，因此會有越刷越深的趨勢。

在圖 4-14 懸浮濃度變化情形可發現，由於沉滓重量輕在懸浮中易被水流帶走，因此清水沖刷案例中凝聚性沉滓傳遞速度相當快，在模擬十天後之渠道中下游部分濃度已達均勻分布，而採用 Van Rijn 輸砂公式模擬結果也因沖刷較深，因此帶起的懸浮質較凝聚性沉滓機制多，在下游段同樣也達到濃度均勻分布情形。

圖 4-15 為懸浮載源變化情形，相對底床變化情形，用來表示凝聚性沉滓向下之通量與底床亂流剪應力作用產生河床質向上之通量交互作用之結果，當河床層濕密度越小時，表示河床土層中含水量愈大，凝聚性沉滓越容易被帶起，因此造成的懸浮沉滓通量越多。

## 2. Wilbert et al. (2004) 啟動機制配合 Krone (1999) 沖刷公式

圖 4-16 為 Krone (1999) 公式所模擬底床變化之結果，Krone (1999) 採用 Roberts et al. (1998) 的實驗室資料進行迴歸，在相同模擬條件下，壓密程度越鬆散，沖刷程度與 Roberts et al. (1998) 的結果差異性也越大，原因在於 Krone (1999) 認為河床層濕密度在小於  $1.77\text{g/cm}^3$  時，比大於  $1.77\text{g/cm}^3$  時還更容易造成沖刷，為沖刷率更大的線性關係，因此在進行沖刷模擬時應針對凝聚性土壤強度做一完整分析。圖 4-17、圖 4-18 分別為濃度變化及懸浮源變化情形。

### 3. Wilbert et al. (2004)啟動機制配合 Partheniades (1965)沖刷公式

圖 4-19 為 Partheniades (1965)所模擬底床變化量之結果，由圖可以發現底床變化跟河床層濕密度有相當大關連，變化幅度比其他公式也相對大，幾乎在濕密度小於  $1.7 \text{ g/cm}^3$  以下才有明顯的沖刷情形發生，而圖 4-22 分別針對各沖刷公式以流量 250cms 再進行沖刷模擬，目的即增加水流剪應力，模擬發現 Partheniades (1965)沖刷公式結果，當河床層濕密度小於  $1.65 \text{ g/cm}^3$  時，反推凝聚性河床層含水率為 37%，沖刷深度已大於不考慮沉滓凝聚性之模擬結果，因此可以得知在河床土層中含水量愈高時，將表示沉滓間的凝聚力將變小，沖刷的趨勢愈趨近非凝聚性機制的機制，圖 4-20、圖 4-21 分別為濃度變化及懸浮源變化情形。

#### 4.2.2 各沖刷因子之敏感度分析

凝聚性沉滓沖刷機制相對於非凝聚性沉滓沖刷機制多了許多複雜因子，無論化學方面如水溫、鹽性、及顆粒中電荷大小等或是物理方面如河床層的壓密程度、底床坡度、顆粒大小等，將可能影響沖刷程度的變異性，而現階段在化學因素所造成沖刷率影響並無完善的理論架構。因此，此小節將針對濕密度、入流流量、粒徑的大小及底床坡度等物理因子作敏感度測試，將有助往後應用時之參考，並驗證是否合乎物理機制。由於河床層濕密度(bulk density)相對於其他因子對

凝聚性沉滓沖刷率影響甚重要，故調整幅度為百分之五，以利方便說明，其他因子則調整幅度為百分之十，選擇底床變化量、濃度變化量及懸浮源變化量，與原始結果作一比較。

由表 4-5 至表 4-7 依序為 Roberts et al. (1998)、Krone (1999)、Partheniades (1965)沖刷公式配合 Wilbert et al. (2004)啟動機制之模擬結果。可以發現河床層濕密度愈小時對其底床、濃度、懸浮載源變化影響最大，原因在於濕密度越小代表土壤含水量愈高，而顆粒間凝聚力易遭水分子破壞，導致壓密程度愈為鬆散，故容易遭受水流帶走。相對於其他變數可以看出其影響是較不顯著。另外，表中凝聚性顆粒增大百分之十時，其底床變化、濃度變化、懸浮懸變化皆為正成長，更可以證得凝聚性沉滓顆粒愈大時，顆粒間凝聚力會降低，導致沖刷率變大，即沖刷行為愈趨近非凝聚性性質，尚合乎物理現象，表 4-8 則為 Van Rijn 輸砂公式針對非凝聚性沉滓進行敏感度分析之結果。

由圖 4-31、圖 4-32 可看出 Roberts et al. (1998)沖刷公式在各變數中對整體渠道底床變化及濃度變化的影響程度，而河床土層濕密度在正負百分之五的變動下，其影響依舊是佔極大比例，分別佔了 82% 及 87%，依序分別為入流流量、底床坡度及粒徑。因此凝聚性沉滓沖刷中，河床層壓密程度是判斷沖刷量多寡的主要因素，當河床土層受到外力擠壓時，即立刻影響到沉滓啟動的臨界剪應力，而沖刷量也會

隨著改變，而凝聚性粒徑大小幾乎不會造成底床改變及水體濃度變化影響，所佔比例僅 1% 及 2%。相對在整體渠道濃度變化方面，其濕密度對濃度影響甚大，因此可以證實凝聚性沉滓被水流帶起後，立即會在附近造成高濃度情形，加上凝聚性沉滓運移速度快，將快速影響整條渠道濃度的改變。圖 4-37、圖 4-38 則為非凝聚性沉滓模擬結果，在不考慮凝聚性的狀況下，入流流量、底床坡度及粒徑大小皆對底床及濃度變化有一定的影響。圖 4-33 至圖 4-36 則分別為 Krone (1999)、Partheniades (1965) 沖刷公式中各變數對底床及濃度影響比例。

由以上模擬結果可得到下列結論：

1. 凝聚性顆粒愈小時，顆粒間的凝聚力愈大，加上凝聚性沉滓凝聚力遠比重力重要，導致沉滓淤積時沉淤通量會有增加之趨勢，在沖刷時，因沉滓顆粒愈大其凝聚力愈小，故沖刷效能增加，其沖刷行為將趨近於非凝聚性沉滓之行為。
2. Migniot (1989) 沉降速度公式僅考慮粒徑大小，主要原因為沉滓在低濃度時，顆粒重力具有其影響；相對在高濃度時，不考慮濃度對沉降速度的影響，因此對於沉降速度修正有所欠缺。Krishnappan (2000) 沉降速度公式對於顆粒在水中凝聚成較大的團絮粒徑尚未有具體考量，因此會低估其沉降速度。
3. 凝聚性沉滓的沉降速度由於重力非主要考量因素，因此沉降速度

非常緩慢，以致於粒徑及濃度的影響並不會即時對底床淤積有明顯影響，而沉降剪應力在凝聚性沉澱淤積則是佔了非常重要的因素，在物理上有凝聚性沉澱吸附底床的含意。

4. 沉降剪應力至今乃無一特定函數關係，現今許多模式及文獻中直接將其值由率定方式給之，本研究將此當作一模擬因子，藉以了解沉降剪應力對沉降機制的變化。
5. 凝聚性河床層之濕密度在沖刷過程中佔極重要的因子，當壓密愈鬆散時，各公式的差異性愈大，原因在於凝聚性沖刷時，土層含水量愈多，即凝聚行為已較為不明顯，沖刷率可能呈現非線性變化，趨勢將趨向於非凝聚性沖刷行為，各公式皆有可能高估或低估其沖刷率。
6. 在清水沖刷案例中，河床層濕密度對濃度變化則是佔非常重要因素，因凝聚性沉澱在懸浮中運移速度快，加上濃度變化源於沖刷的多寡，而河床層濕密度又直接反應到沖刷率的大小。

## 第五章 現場案例應用及分析

### 5.1 模擬條件概述

石門水庫於民國 52 年 5 月導水隧道封堵開始蓄水，營運已逾四十年，依據累計至民國 92 年 4 月淤積測量顯示，水庫淤積已佔水庫總容量 18.07%，進而影響到水庫的取水系統。本研究案例為利用一維 EFA 模式模擬石門水庫庫區羅浮至壩址處，分析泥砂在庫區中之運移、沖淤和分布規律，選擇民國 93 年 8 月之艾利颱風事件，模擬庫區水體底床、濃度及輸砂傳輸的變化情形。對於下游石門大壩，本案例假設為虛擬結構物，即水流輸砂量均勻分佈排出庫區，茲將相關模擬參數設定敘述如下：

1. 底床高程：水庫自開始運轉以來，每年均進行斷面淤積測量，根據北區水資源局提供的斷面淤積測量資料，可做為模式初始底床資料，採用民國 92 年艾利颱風前之底床量測資料。
2. 模擬時間：模擬時間為艾利颱風事件之時程，為民國 93 年 8 月 24 時上午 5 時，迄至 8 月 27 日凌晨 1 時止，共六十九小時。
3. 上游入流量：採用由北區水資源局提供之艾利颱風期間石門水庫入流量資料，其流量歷線如圖 5-2。
4. 壩址前水庫水位資料：水庫管理單位每日之水庫運轉日報表，詳

細記載水庫水位之變化歷程，紀錄時間間距為 1 小時，可提供模式之下游邊界條件，艾利颱風期間之水位歷線如圖 5-1 所示。

5. 沉澱粒徑：目前台灣水庫沉澱粒徑分佈之基本資料相當缺乏或不夠齊全，就石門水庫而言，粗顆粒沉澱約介於 0.05~3mm，壩址前的淤砂多為凝聚性沉澱，粒徑約介於 0.003~0.05mm 之間。因此在模擬案例中將沉澱粒徑設定為三種，分別為 0.003、0.05、3mm。
6. 沉澱粒徑百分組成：上述三種粒徑之底床初始組成比例設定為均勻分布，各佔全部入砂量 1/3。
7. 上游入砂濃度：艾利颱風在 93 年 8 月 23 日至 8 月 26 日期間，入砂濃度採用「石門水庫集水區保育整體方案-集水區治理計畫」報告之研究，得知上游入砂濃度歷線如圖 5-3，而以假設凝聚性沉澱所佔的懸浮濃度最多，非凝聚沉澱所佔比例最少，即粒徑 0.003、0.05 及 3mm 分別佔 50%、33% 及 17%。
8. 凝聚性沉澱：凝聚性沉澱公式方面，由於前章節敏感度分析結果，對於沉降速度公式將採用 You 於 2004 年提出適用於高濃度渠道的公式，並配合 Krone (1962) 的沉淤公式。另外在沖刷公式採用 Wilbert et al. (2004) 提出之凝聚性沉澱啟動條件並配合 Krone (1999) 的沖刷公式。
9. 凝聚性沉澱參數設定：在沉降剪應力採用 Lumborg (2005) 建議黏

土及泥漿的沉降剪應力值為  $0.1\text{N/m}^2$ ，凝聚性沉滓則假設濕密度為  $1.65\text{g/m}^3$ ，另選擇粒徑  $0.003\text{mm}$  當作為凝聚性沉滓，粒徑  $0.05\text{mm}$  及  $3\text{mm}$  則視為非凝聚性沉滓。

## 5.2 模擬成果及分析

以 EFA 水理輸砂模式進行石門水庫庫區沉滓傳輸底床沖淤模擬，採用 92 年 4 月之原始底床模擬 93 年 8 月艾利颱風對水庫之影響。圖 5-4 為水庫在模擬期間，下游水庫出流量實測值與模擬結果比較圖，其中實測出流量包括水庫放流量與洩洪量，在模擬期間之水庫總出水量為  $4.7 \times 10^7$  噸與模擬總出水量約為  $4.77 \times 10^7$  噸差異不大，因此水理驗證方面有不錯的結果，在輸砂運移方面，由圖 5-5 可見模擬範圍羅浮至壩址前整體河床及水位變化情形，圖 5-6 為底床變化量與實測結果之比較，與實測相比，整體趨勢也有相當不錯的結果。而鑑於淤積面日漸升至發電進水口擋泥牆頂，石門水庫管理局於民國 67 年起開始規劃壩前庫區之清淤計畫，因此民國 74 年起在下游段庫區以水力抽泥船清淤壩前 1.5 公里範圍之淤泥，每年抽泥 300,000 至 450,000  $\text{m}^3$ ，淤積面亦平均下降 7.2m，故為造成模擬結果在壩址前 1.5 Km 庫區差異之可能原因。在庫區下游部分，亦有 2 至 5 公尺的低估誤差結果，主要原因為斷面測量時間間距為一年左右，而本案例模擬時間僅挑選民國 93 年造成石門水庫入流流況衝擊最大的颱風事件，相對於當年

其他颱風暴雨事件，假設對凝聚性沉澱淤積沖刷影響力不大，以及凝聚性沉澱的沉澱速度極緩慢，參考周(2005)對於石門水庫中凝聚性沉澱沉澱試驗歸納出石門水庫沉降速度迴歸式，而推算每天石門水庫沉澱深度約數公分左右，因此當石門水庫下游為靜水狀態時，年估沉澱深度也將達到三至四公尺，此為模擬結果在石門下游沉澱低估的主因之一。對於水庫庫區長期下來皆處於靜水狀態，而凝聚性沉澱在高濃度狀況下，長時間沉澱過程亦是造成水庫淤積原因之一。

為比較凝聚性沉澱與非凝聚性沉澱之差異性，假設另一組無凝聚性之案例，比較模式中考慮凝聚性與否對水庫沖澱的影響。利用 Van Rijn 非凝聚性沉澱運移機制進行模擬，圖 5-6 可以發現底床淤積位置皆在最上游庫區，而其餘庫區域細顆粒皆無沉澱的情形發生，與考慮凝聚性沉澱機制結果差異甚大。由圖 5-14 粒徑組成可以很明顯的發現主要沉澱為代表粒徑 3mm 者所造成的，而中下游庫區則各顆粒依舊為初始粒徑組成狀態。對於非凝聚性懸浮質下移到河床表面，主要是受重力的影響，因懸浮質的沉降速度決定向下沉澱的移流通量，而最小代表粒徑 0.003mm 由於重量輕相對沉降速度緩慢，Stoke 定理換算出單一顆粒之沉降速度約  $2.69 \times 10^{-6} m/s$  為一極小值，導致不考慮凝聚性時，此細顆粒沉澱幾乎形成懸浮質狀態，故模擬結果可以發現中下游處無細顆粒沉澱落淤的情形發生，為考慮沉澱凝聚性與否的主要

差異性。因此，由圖 5-10 為不考慮凝聚性狀況下，代表粒徑 0.003mm 相對圖 5-7 考慮凝聚性狀況下，有較大的懸浮濃度。在凝聚性沉澱方面，由第一章文獻回顧及敏感度分析得知，沉澱大小並非為沉澱速度的考量因素，而在於顆粒間的凝聚力，由此由石門水庫案例可知在不考慮沉澱的凝聚性方面，沉降速度是有明顯低估，因此產生模擬結果有甚大的差異。

在濃度變化結果方面，圖 5-7 為颱風模擬結束後各粒徑懸浮濃度變化情形，由圖 5-7 得知退水時程結束後，其上游已無含砂量的加入，因此在上游並無明顯的濃度變化，而在下游庫區處，代表粒徑 0.003mm 及 0.05mm 所造成的含砂濃度愈往下游愈大，達到壩址前已達 70,000ppm 左右，而最大代表粒徑 3mm 所造成的濃度為 34,000ppm 左右，低於凝聚性沉澱部分，但因艾利颱風高流量的衝擊之下，易造成不少非凝聚性沉澱的懸浮濃度。

圖 5-8 為石門水庫壩址在艾利颱風期間濃度變化的情形，模擬結果發現石門壩址處在漲水時段與尖峰時段間，濃度快速的提升，而在退水期間濃度才緩慢的降低，因此可見沉澱在下游處易造成高濃度的現象，且水體中之沉澱濃度因沉降速度緩慢不容易沉澱下來，符合凝聚性沉澱的物理現象。圖 5-9 係假設艾利颱風退水歷線形式為  $Q_t = Q_0 K^t$  退水歷線公式，式中 K 為退水常數，設定為 0.99，持續模

擬至 29 日 13 時的濃度變化圖，與水庫實測濃度值相比較，模擬結果發現濃度較為線性趨勢變化且變化量不大，原因在於一維模式中濃度已經水深平均處理，加上凝聚性沉澱在水中易相互影響，濃度不易有劇烈變化，必須經過長時間的沉澱作用，庫中濃度才會緩慢的降低，模擬趨勢尚符合物理現象，模擬值與實測值相比較，一維有限解析法動床模式在凝聚性沉澱運移機制方面有不錯的結果。

在粒徑組成方面，如圖 5-11、圖 5-12、圖 5-13 所示，為各粒徑在模擬案例中漲水段、尖峰段及退水段之粒徑組成模擬結果比較圖，可以發現漲水段時期非凝聚性沉澱為上游段淤積的主因之一，而中下游段粒徑分佈幾乎為初始的狀態，尚還未受到颱風的影響，在尖峰時刻時，可發現中下游處已有變化，凝聚性沉澱的比例逐漸提升，表示凝聚性沉澱已受到上游龐大入砂量的影響而開始沉澱。在颱風事件退水後，可觀察到粗顆粒 3mm 在上游端庫區淤積部分佔了極大的比例，相較代表粒徑 0.003mm 及 0.05mm 則是佔了一小部分，因此在底床變化圖中庫區上游段幾乎是非凝聚沉澱所造成的，而凝聚性顆粒則因顆粒重量輕，易被水流帶往中下游處，而愈往下游可發現凝聚性沉澱的比例是有遞增的趨勢，在壩址前五公里至壩址處，代表粒徑 0.003mm 幾乎是造成水庫淤積的主要原因。

## 第六章 結論與建議

本研究利用一維 EFA 動床模式，探討凝聚性沉澱傳輸機制，參考國內外文獻，對凝聚性沉澱基本特性進行敘述，在沖刷淤積案例中，以粒徑 0.01mm 為凝聚性沉澱進行模擬，並針對各影響因子作一系列敏感度分析，另採用石門水庫為案例，並比較凝聚性沉澱與非凝聚性沉澱之間差異性，以下是本研究獲致之結論與建議。

### 6.1 結論

1. 在敏感度分析中，沉澱機制之沉降剪應力為底床變化主要因子，佔了近六成的影響比例，而在影響濃度變化方面，上游入砂濃度則是佔了七成以上的比例；相對凝聚性沖刷機制中，河床層濕密度為主要因子，對河床變化及水體濃度影響甚為重要，可供往後相關學者進一步研究分析。
2. 當濃度很小時，僅考慮粒徑大小影響的 Migniot 沉降速度公式與團絮大小尚未研究建全的 Partheniades 沉澱公式仍可使用。但在高濃度時，其沉澱間的距離縮小，顆粒相互吸引力增加，將對沉降速度有所影響，因此將會錯估濃度造成的影響。
3. 針對各沖刷公式以較大流量進行沖刷測試時，由 Partheniades (1965)沖刷公式模擬結果，發現當河床層濕密度小於  $1.65 \text{ g/cm}^3$  時，反推凝聚性河床層含水率為 37%，此時沖刷深度已大於沉澱為非凝聚

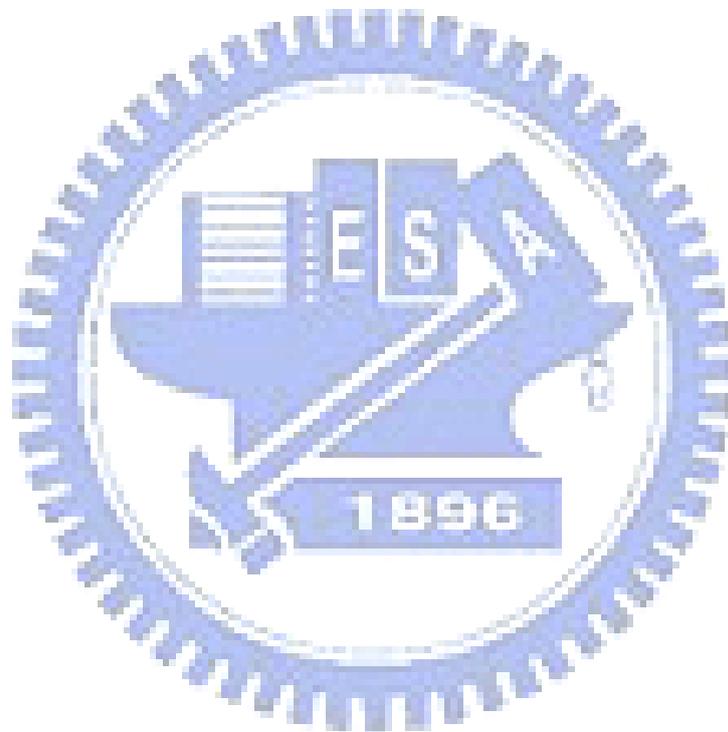
性狀態之模擬結果，因此可以得知在河床土層中含水量愈高時，將表示沉滓間的凝聚力將變小，沖刷的趨勢愈趨近非凝聚性機制。

4. 從石門水庫案例中，入庫的粗顆粒沉滓多落淤於中上游處，模擬期間(尖峰時段至退水時段)能運移至壩前的比例，平均從三成掉至約一成以下，而凝聚性沉滓在中下游比例約從五成增加至九成以上的分佈。而針對於沉滓皆為非凝聚性狀態下，各沉滓在中下游粒徑分佈卻接近初始狀態，即表示各沉滓在水庫底床無運移作用，幾乎在水體中處於懸浮狀態，為模式中考慮到沉滓有無凝聚性功能的差異性。而在凝聚性沉滓物理特性中，因沉降速度緩慢，故底床淤積通量速度也會跟著降低，加上洪水過後入流量劇減，水庫大多處於靜水狀況，長久下來亦是造成水庫淤積原因之一。

## 6.2 建議

1. 在現場案例應用時，除了作粒徑分析外，凝聚性沉滓部分應針對其現場採樣之顆粒性質做一完整性分析，例如針對某一渠道應對其凝聚性沉滓做沉降速度分析，以及渠道在不同河段和深度進行土壤試驗求得土壤含水率，正確迴歸土壤臨界剪應力，以供模式採用。
2. 本研究為凝聚性沉滓之基本輸砂運移行為之模擬分析，但為更了解應用水庫及河口之沉滓影響因子，應配合實驗結果得到完整研究。
3. 凝聚性沉滓之沉降剪應力至今乃無一特定函數關係式，由敏感度

測試得知其重要性，現今許多模式及文獻中直接將其值由率定方式給之。本研究將此當作一模擬因子，藉以了解沉降剪應力對沉降機制的變化，在未來應用時為一值得探討的變數。



## 參考文獻

1. Borah, D. K., Alonso, C. V., and Prasad, S. H. (1982). "Routing graded sediments in streams: formulations." J. Hydr. Div., ASCE, 108(12),1486-1505.
2. Bennet, J. P., and C. F. Nordin, (1977). " Simulation of sediment transport and armouring." Hydrological Sciences Bulletin, XX II .
3. Baldocka, T. E., Tomkinsa, M. R., Nielsena, P., and Hughes, M. G. (2004). "Settling velocity of sediment at high concentrations," J. Coast. Eng., Vol.51, 91-100.
4. Chow, V. T. (1959). "Open Channel Hydraulics, " McGraw-Hill, New York, 110-113.
5. Ellegaard, A. C., and Christiansen, N. (1994). Laboratory experiments with dredging spoils. Derivation of material-specific parameters for numerical modelling of sediment transport. Report no. 7174. DHI/LIC Joint Venture.
6. Erik, A., and Jean, E. (1993). "Mathematical modeling of cohesive sediment settling and consolidation." Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, 167-183.
7. Ellegaard, A. C., and Christiansen, N. (1994). "Laboratory experiments with dredging spoils. Derivation of material-specific parameters for numerical modelling of sediment transport." Report no. 7174. DHI/LIC Joint Venture.
8. Grissinger, E. H. (1996). "Resistance of selected clay systems to erosion by water." Water Resources Res., 2 (1), 131-138.
9. Hu, C., and Hui, Y. (1996). "Bed-load transport. I: mechanical characteristics. " J. Hydr. Eng., ASCE, 122 (5), 245-254.
10. Krone, R. B. (1962). "Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes." Final Report, J. Hydr. Engr Lab Sanitary

Engr Res Lab, Univ, of California, Berkeley, 110pp.

11. Krone, R. B. (1999). "Effects of bed structure on erosion of cohesive sediments." *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 125(12), 1297-1301.
12. Kamphuis, J. W. (1990). "Influence of sand or gravel on the erosion of cohesive sediment." *J. Hydr. Res., IAHR*, 28(1), 43-53.
13. Karim, M. F., and Kennedy, J. F. (1987). "ALLUVIAL: A computer-based flow and sediment routing model for alluvial stream and its application to the Missouri River." Report No. 250, Iowa Inst. of Hydr. Res., Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.
14. Krishnappan, B. G. (2000). "In situ size distribution of suspended particles in the Fraser River." *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 126(8), 561-569.
15. Lau, Y. L., and Krishnappan, B. G. (1992). "Size distribution and settling velocity of cohesive sediment during settling." *J. Hydr. Res, IAHR*, 30(5), 673-684.
16. Lin, P. N., and Shen, H. W. (1984). "Two-D flow with sediment by characteristics method." *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 110(5), 615-625.
17. Migiot, C. (1989). "Bedding-down and rheology of muds, Part I." *La Houille Blanche*, Vol.1, 11-29.(in French)
18. Nicholson, J., and O'Connor, B. A. (1986). "Cohesive sediment transport model." *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 112, 621-640.
19. Partheniades, E. (1965). "Erosion and deposition of cohesive soils." *J. Hydr. Div., ASCE*, 91 (HY1), 105-139.
20. Partheniades, E. (1971). "Erosion and deposition of cohesive materials." Chapter 25, in *River Mechanics*, by H. W. Shen, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
21. Parchure, T. M. (1985). "Erosion of soft cohesive sediment deposits."

- J. Hydraul. Eng., ASCE, 111(10), 1308-1326.
22. Roberts, J., Jepsen, J. Gotthard, D., and Lick, W. (1998). "Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles." J. Hydraul. Eng., ASCE, 124(12), 1261-1267.
23. Shrestha, P. L., and Orlob, G. T. (1996). "Multiphase distribution of cohesive sediment and heavy metals in estuarine systems." J. Env. Eng., ASCE, 122(8), 730-740.
24. Spasojevic, M., and Holly, F. M. (1990). "2-D bed evolution in natural watercourses—New simulation approach." J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering., ASCE, 116(4), 425-443.
25. Van Rijn, L. C. (1984a) "Sediment transport, Part I: bed load transport." J. Hydraul. Eng., ASCE, 110(10), 1431-1456.
26. Van Rijn, L. C. (1984b) "Sediment transport, Part II: suspended load transport." J. Hydraul. Eng., ASCE, 110(11), 1613-1641.
27. Wilbert, L., Lijun, J., and Joe, G. (2004) "Initiation of movement of quartz particles." J. Hydraul. Eng., ASCE, 130(8), 755-761.
28. You, Z. J. (2004) "The effect of suspended sediment concentration on the settling velocity of cohesive sediment in quiescent water." J. Ocean. Eng., Vol.31, 1955-1965.
29. Ziegler, C. K., and Nisbet, B. C. (1994). "Fine-grained sediment transport in Pawtuxet River, Rhode Island." J. Hydraul. Eng., ASCE, 120(5), 561-575.
30. 周正倫(2005), 「凝聚性沉泥沈降至壓密之壓力實驗分析」, 國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
31. 許至聰(2002), 「二維有限解析法明渠水理與輸砂模式之研發與應用」, 國立交通大學土木工程研究所博士論文。
32. 葉克家、蔡惠峰、沈澄宇、許至聰(1996), 「蜿蜒河道有限解析法動

床模式之研發及應用(I)」,行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告。

- 33.郭峰志(2006),「顯式有限解析法模式於動床主支流之研究」,國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 34.陳昇佑(2002),「沉滓交換機制之模擬與應用」,國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 35.陳弘翰(1999),「凝聚性沉滓傳輸機制之模擬與分析」,國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 36.鄭文鈴(1992),「黏性沉澱物之沉降模式」,國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- 37.謝沃田(1992),「二維非均勻質輸砂模式之研究」,國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 38.蘇志秋(2001),「黏性土壤沖刷之數值模擬」,國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 39.國立交通大學防災工程研究中心(2006),「石門水庫泥沙運移模擬及排砂方案之研究」,經濟部水利署北區水資源局。
- 40.錢寧、萬兆惠(1991),「泥砂運動力學」,科學出版社。
- 41.竇國仁(1999),「再論泥砂起動流速」泥砂研究。

表 2-1 實驗參數表(摘錄 Roberts 1998)

| Mean diameter of sediment particles ( $\mu m$ ) | $N_c$ | $M_c$ | $A_c$                 |
|---|-------|-------|-----------------------|
| 5.7   | 1.9   | -29.0 | $3.28 \times 10^4$    |
| 14.8  | 2.27  | -27.4 | $2.68 \times 10^4$    |
| 18.3  | 2.31  | -25.6 | $1.49 \times 10^4$    |
| 48  | 2.23  | -23.8 | $8.27 \times 10^3$    |
| 75  | 2.1   | -22.3 | $4.70 \times 10^3$    |
| 125   | 2.82  | -20.6 | $4.23 \times 10^3$    |
| 222   | 3.32  | 0     | $1.25 \times 10^{-2}$ |
| 432   | 2.56  | 0     | $2.25 \times 10^{-2}$ |
| 1020  | 2.51  | 0     | $1.14 \times 10^{-2}$ |
| 1350  | 2.92  | 0     | $6.74 \times 10^{-3}$ |

表 4-1 敏感度分析表\_Krone 沉淤公式採用 Migiot 沉降速度

| 淤積公式                | Krone 沉淤公式採用 Migiot 沉降速度 |           |           |           |           |           |           |
|---------------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數                | 變動量                      | 底床變化      |           | 濃度變化      |           | 懸浮值變化     |           |
|                     |                          | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 上游入砂濃度              | -10%                     | -4.63E-06 | -1.78E-05 | -4.82E+02 | -4.99E+02 | -2.75E-05 | -5.40E-05 |
|                     | +10%                     | +4.62E-06 | +1.78E-05 | +4.82E+02 | +4.99E+02 | +2.75E-05 | +5.40E-05 |
| 沉降剪應力               | -10%                     | -4.64E-05 | -1.54E-04 | +4.97E+00 | +1.73E+02 | -2.77E-04 | -4.63E-04 |
|                     | +10%                     | +6.10E-05 | +1.26E-04 | -4.06E+00 | -1.59E+02 | +3.63E-04 | +3.77E-04 |
| 顆粒大小                | -10%                     | +1.04E-05 | +2.08E-05 | -6.70E-01 | -2.77E+01 | +6.22E-05 | +6.73E-05 |
|                     | +10%                     | -1.02E-05 | -2.03E-05 | +6.50E-01 | +2.71E+01 | -6.06E-05 | -6.60E-05 |
| 坡度                  | -10%                     | +4.34E-05 | +8.68E-05 | -2.77E+00 | -1.14E+02 | +2.56E-04 | +2.76E-04 |
|                     | +10%                     | -4.11E-05 | -8.22E-05 | +2.64E+00 | +1.11E+02 | -2.45E-04 | -2.77E-04 |
| 註：“+”代表正成長，“-”代表負成長 |                          |           |           |           |           |           |           |

表 4-2 敏感度分析表\_ Krone 沉淤公式採用 Krishnappan 沉降速度

| 淤積公式   |      | Krone 沉淤公式採用 Krishnappan 沉降速度 |           |           |           |           |           |
|--------|------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數   | 變動量  | 底床變化                          |           | 濃度變化      |           | 懸浮值變化     |           |
|        |      | 最小改變量                         | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 上游入砂濃度 | -10% | -1.12E-06                     | -4.20E-06 | -4.96E+02 | -5.00E+02 | -6.71E-06 | -1.27E-05 |
|        | +10% | +1.12E-06                     | +4.20E-06 | +4.96E+02 | +5.00E+02 | +6.71E-06 | +1.27E-05 |
| 沉降剪應力  | -10% | -1.12E-05                     | -3.64E-05 | +1.17E+00 | +4.14E+01 | -6.72E-05 | -1.10E-04 |
|        | +10% | +1.49E-05                     | +2.97E-05 | -9.60E-01 | -3.89E+01 | +8.89E-05 | +9.21E-05 |
| 顆粒大小   | -10% | +5.30E-07                     | +2.70E-06 | -8.00E-02 | -1.40E+00 | +3.18E-06 | +8.37E-06 |
|        | +10% | -1.27E-06                     | -1.59E-06 | +3.90E-01 | +4.70E-01 | -5.07E-06 | -7.58E-06 |
| 坡度     | -10% | +1.02E-05                     | +2.05E-05 | -6.60E-01 | -2.86E+01 | +6.04E-05 | +6.95E-05 |
|        | +10% | -9.69E-06                     | -1.94E-05 | +6.20E-01 | +2.72E+01 | -5.76E-05 | -6.72E-05 |

註：“+”代表正成長，“-”代表負成長

表 4-3 敏感度分析表\_ Krone 沉淤公式採用 You 沉降速度

| 淤積公式   | Krone 沉淤公式採用 You 沉降速度 |           |           |           |           |           |           |
|--------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數   | 變動量                   | 底床變化      |           | 濃度變化      |           | 懸浮值變化     |           |
|        |                       | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 上游入砂濃度 | -10%                  | -4.33E-06 | -1.71E-05 | -4.83E+02 | -4.99E+02 | -2.58E-05 | -5.27E-05 |
|        | +10%                  | +4.33E-06 | +1.71E-05 | +4.83E+02 | +4.99E+02 | +2.58E-05 | +5.28E-05 |
| 沉降剪應力  | -10%                  | -4.33E-05 | -1.48E-04 | +4.76E+00 | +1.64E+02 | -2.58E-04 | -4.43E-04 |
|        | +10%                  | +5.71E-05 | +1.20E-04 | -3.87E+00 | -1.50E+02 | +3.40E-04 | +3.62E-04 |
| 顆粒大小   | -10%                  | +1.16E-05 | +2.39E-05 | -7.70E-01 | -3.03E+01 | +6.94E-05 | +7.20E-05 |
|        | +10%                  | -1.09E-05 | -2.22E-05 | +7.20E-01 | +2.83E+01 | -6.52E-05 | -6.68E-05 |
| 坡度     | -10%                  | +4.41E-05 | +9.04E-05 | -2.88E+00 | -1.16E+02 | +2.66E-04 | +2.74E-04 |
|        | +10%                  | -4.05E-05 | -8.10E-05 | +2.60E+00 | +1.07E+02 | -2.41E-04 | -2.58E-04 |

註：“+”代表正成長，“-”代表負成長

表 4-4 敏感度分析表\_ Shrestha 沉淤公式

| 淤積公式   |      | Shrestha 沉淤公式 |           |           |           |           |           |
|--------|------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數   | 變動量  | 底床變化          |           | 濃度變化      |           | 懸浮值變化     |           |
|        |      | 最小改變量         | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 上游入砂濃度 | -10% | -7.83E-06     | -2.52E-05 | -4.73E+02 | -4.99E+02 | -4.64E-05 | -7.67E-05 |
|        | +10% | +7.83E-06     | +2.52E-05 | +4.73E+02 | +4.99E+02 | +4.63E-05 | +7.68E-05 |
| 沉降剪應力  | -10% | -7.87E-05     | -2.18E-04 | +7.04E+00 | +2.64E+02 | -4.68E-04 | -6.86E-04 |
|        | +10% | +1.01E-04     | +1.78E-04 | -5.76E+00 | -2.40E+02 | +5.29E-04 | +5.98E-04 |
| 顆粒大小   | -10% | +1.81E-05     | +2.75E-05 | -8.90E-01 | -3.99E+01 | +8.10E-05 | +1.08E-04 |
|        | +10% | -1.81E-05     | -2.72E-05 | +8.80E-01 | +3.98E+01 | -8.01E-05 | -1.08E-04 |
| 坡度     | -10% | +4.01E-05     | +5.09E-05 | -1.61E+00 | -8.56E+01 | +1.43E-04 | +2.69E-04 |
|        | +10% | -7.87E-05     | -1.37E-04 | +2.76E+00 | +1.72E+02 | -2.48E-04 | -6.00E-04 |

註：“+”代表正成長，“-”代表負成長

表 4-5 敏感度分析表\_ Roberts et al.凝聚性沉滓沖刷機制

| 沖刷公式 |      | Roberts 凝聚性沉滓沖刷機制 |           |           |           |           |           |
|------|------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數 | 變動量  | 底床變化              |           | 濃度變化      |           | 懸浮質變化     |           |
|      |      | 最小改變量             | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 濕密度  | -5%  | +9.41E-06         | +3.24E-04 | +7.66E-01 | +1.92E+01 | +2.92E-05 | +1.03E-03 |
|      | +5%  | -3.45E-07         | -7.93E-05 | -1.87E-01 | -4.72E+00 | -2.20E-06 | -2.53E-04 |
| 入流流量 | -10% | -1.33E-07         | -1.75E-05 | -1.43E-02 | -5.54E-01 | -5.80E-07 | -5.17E-05 |
|      | +10% | +1.86E-07         | +1.88E-05 | +1.36E-02 | +5.57E-01 | +8.14E-07 | +5.43E-05 |
| 顆粒大小 | -10% | -0.00E+00         | -3.87E-06 | -9.14E-03 | -2.27E-01 | -3.74E-08 | -1.23E-05 |
|      | +10% | +2.39E-07         | +3.92E-06 | +8.64E-03 | +2.34E-01 | +3.68E-08 | +1.16E-05 |
| 坡度   | -10% | -7.95E-08         | -2.27E-05 | -3.52E-02 | -1.20E+00 | -3.29E-07 | -7.31E-05 |
|      | +10% | +1.06E-07         | +2.46E-05 | +3.60E-02 | +1.27E+00 | +3.50E-07 | +7.90E-05 |

註：“+”代表正成長，“-”代表負成長

表 4-6 敏感度分析表\_ Krone 凝聚性沉滓沖刷機制

| 沖刷公式 |      | Krone 凝聚性沉滓沖刷機制 |           |           |           |           |           |
|------|------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數 | 變動量  | 底床變化            |           | 濃度變化      |           | 懸浮質變化     |           |
|      |      | 最小改變量           | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 濕密度  | -5%  | +5.96E-06       | +1.24E-04 | +2.93E-01 | +7.52E+00 | +1.87E-05 | +3.94E-04 |
|      | +5%  | -1.40E-07       | -3.34E-05 | -7.90E-02 | -2.04E+00 | -5.61E-07 | -1.06E-04 |
| 入流流量 | -10% | -7.00E-08       | -6.44E-06 | -3.93E-03 | -1.89E-01 | -2.63E-07 | -1.91E-05 |
|      | +10% | +8.00E-08       | +6.83E-06 | +3.66E-03 | +1.87E-01 | +3.49E-07 | +2.01E-05 |
| 顆粒大小 | -10% | -0.00E+00       | -1.41E-06 | -3.33E-03 | -8.45E-02 | -1.26E-08 | -4.48E-06 |
|      | +10% | +0.00E+00       | +1.32E-06 | +3.13E-03 | +9.12E-02 | +1.35E-08 | +4.21E-06 |
| 坡度   | -10% | -3.00E-08       | -8.52E-06 | -1.29E-02 | -4.54E-01 | -1.25E-07 | -2.74E-05 |
|      | +10% | +4.00E-08       | +9.06E-06 | +1.30E-02 | +4.73E-01 | +1.30E-07 | +2.92E-05 |

註：“+”代表正成長，“-”代表負成長

表 4-7 敏感度分析表\_ Partheniades 凝聚性沉澱沖刷機制

| 沖刷公式 |      | Partheniades 凝聚性沉澱沖刷機制 |           |           |           |           |           |
|------|------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數 | 變動量  | 底床變化                   |           | 濃度變化      |           | 懸浮質變化     |           |
|      |      | 最小改變量                  | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 濕密度  | -5%  | +3.05E-06              | +8.65E-04 | +2.02E+00 | +4.50E+01 | +1.17E-05 | +2.75E-03 |
|      | +5%  | -9.00E-08              | -2.60E-05 | -6.03E-02 | -1.31E+00 | -3.59E-07 | -8.28E-05 |
| 入流流量 | -10% | -1.00E-08              | -7.96E-06 | -1.32E-02 | -3.18E-01 | -3.86E-08 | -2.46E-05 |
|      | +10% | +1.00E-08              | +9.93E-06 | +1.45E-02 | +3.65E-01 | +3.49E-08 | +3.01E-05 |
| 顆粒大小 | -10% | -4.00E-08              | -1.17E-05 | -2.71E-02 | -5.91E-01 | -1.59E-07 | -3.71E-05 |
|      | +10% | +7.00E-08              | +1.75E-05 | +4.07E-02 | +8.93E-01 | +2.36E-07 | +5.57E-05 |
| 坡度   | -10% | -3.00E-08              | -9.32E-06 | -1.66E-02 | -4.59E-01 | -1.26E-07 | -2.98E-05 |
|      | +10% | +5.00E-08              | +1.16E-05 | +1.94E-02 | +5.80E-01 | +1.59E-07 | +3.72E-05 |

註：“+”代表正成長，“-”代表負成長

表 4-8 敏感度分析表\_非凝聚性沉澱機制

| 沖刷公式                | 非凝聚性沉澱機制 |           |           |           |           |           |           |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 敏感參數                | 變動量      | 底床變化      |           | 濃度變化      |           | 懸浮質變化     |           |
|                     |          | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     | 最小改變量     | 最大改變量     |
| 濕密度                 | -5%      | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  |
|                     | +5%      | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  | 0.00E+00  |
| 入流流量                | -10%     | -7.10E-07 | -1.84E-04 | -1.41E-01 | -4.51E+00 | -0.00E+00 | -5.53E-04 |
|                     | +10%     | +7.50E-07 | +1.95E-04 | +1.30E-01 | +4.10E+00 | +0.00E+00 | +5.74E-04 |
| 顆粒大小                | -10%     | -1.10E-07 | -1.19E-04 | -2.85E-01 | -5.32E+00 | -0.00E+00 | -3.93E-04 |
|                     | +10%     | +1.00E-07 | +1.19E-04 | +2.86E-01 | +5.19E+00 | +0.00E+00 | +3.94E-04 |
| 坡度                  | -10%     | -1.30E-07 | -1.93E-04 | -4.60E-01 | -1.05E+01 | -0.00E+00 | -6.36E-04 |
|                     | +10%     | +1.00E-07 | +2.08E-04 | +3.70E-01 | +9.85E+00 | +0.00E+00 | +6.59E-04 |
| 註：“+”代表正成長，“-”代表負成長 |          |           |           |           |           |           |           |

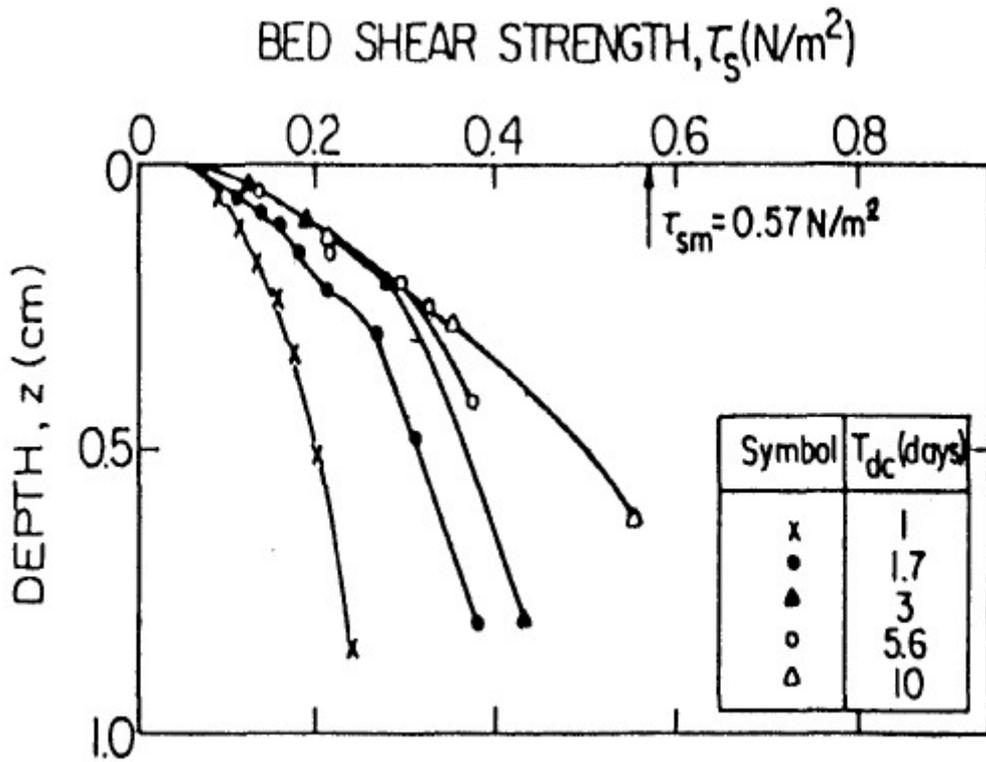


圖 1-1 固結時間和土壤深度與底床剪應力強度之關係圖 (Parchure & Mehta 1985)

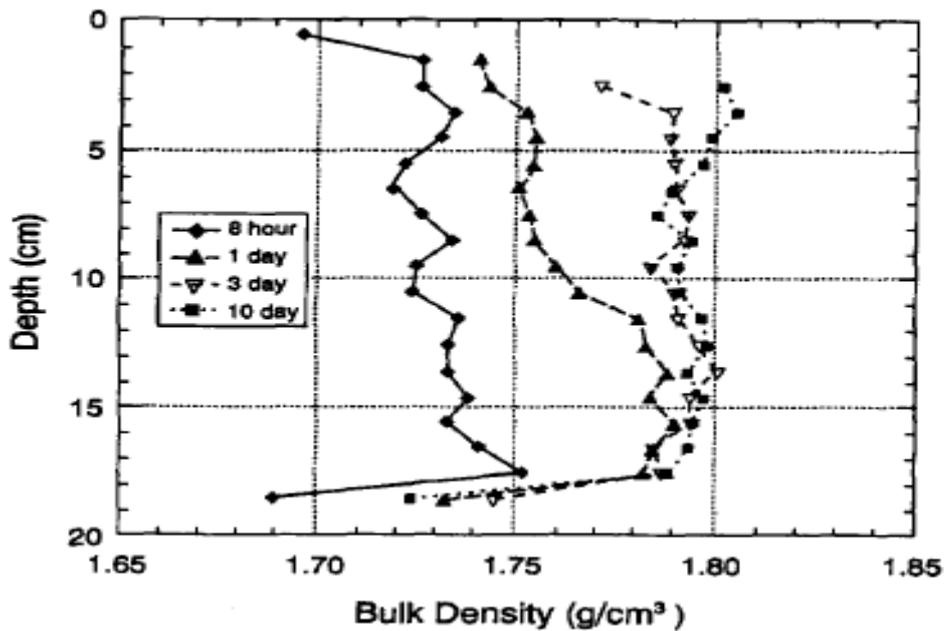


圖 1-2 粒徑為 5.7 微米時濕密度隨深度及固結時間之變化 (Roberts et al. 1998)

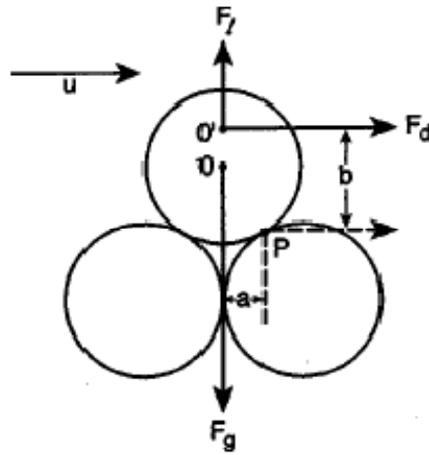


圖 2-1 凝聚性沉澱力平衡示意圖

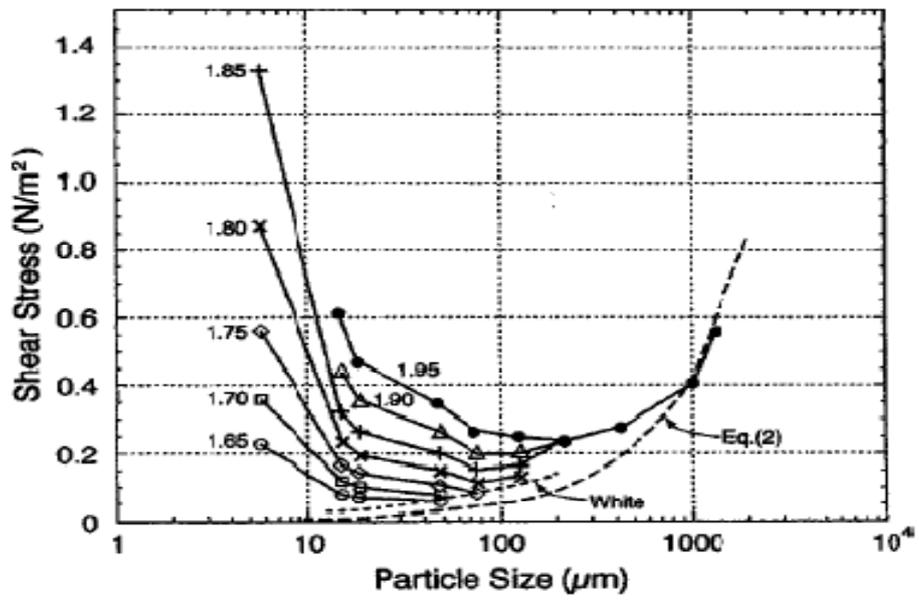


圖 2-2 不同粒徑及濕密度下之啟動剪應力(摘錄 Wilbert et al.2004)

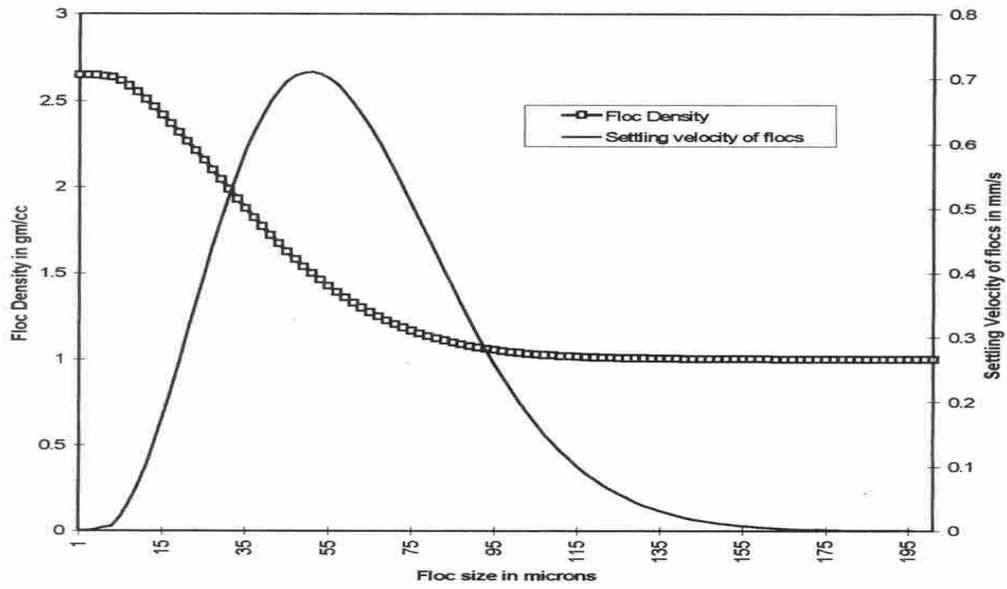


圖 2-3 團絮密度與沉降速度關係(摘錄 Krishnappan 2000)

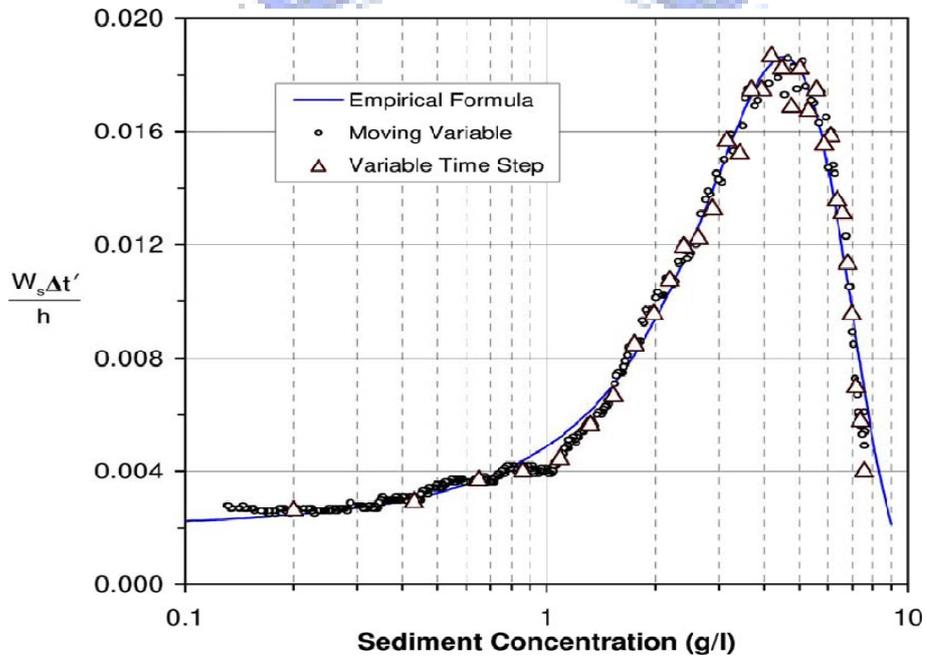


圖 2-4 沉澱速度與濃度關係圖 (摘錄 You 2004)

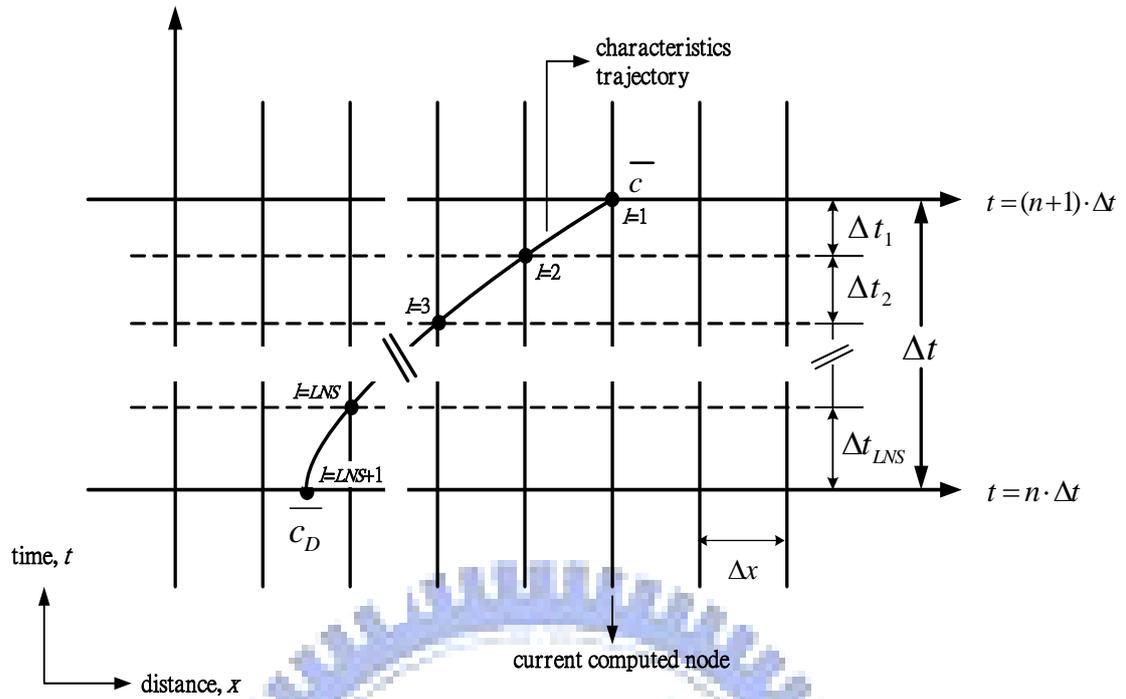


圖 3-1 懸浮沈滓之移流特性軌跡



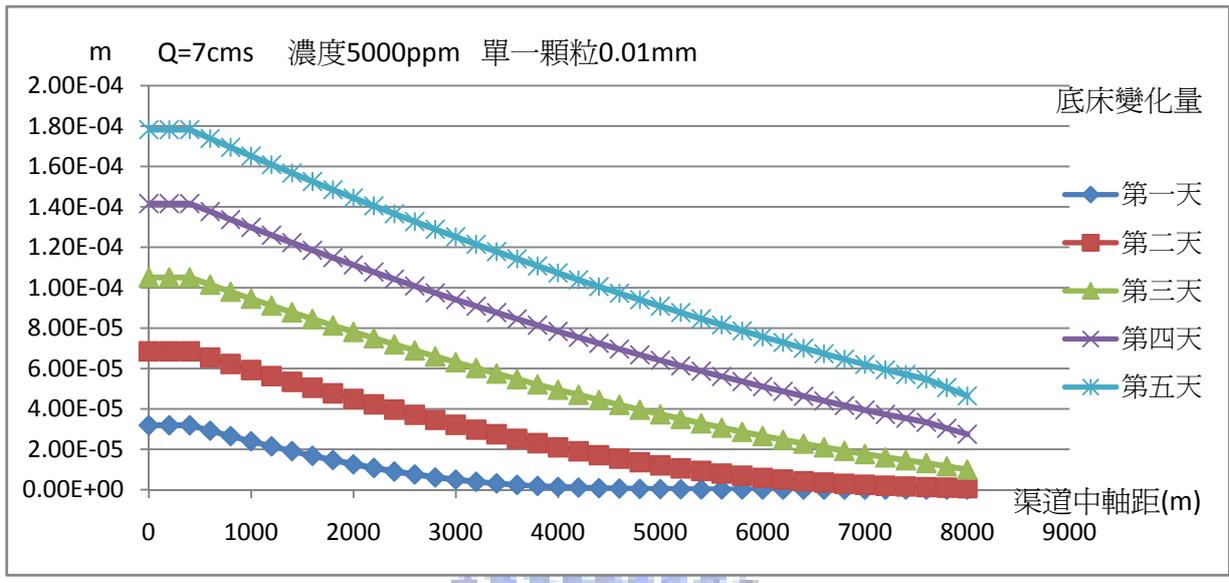


圖 4-1 底床變化量圖 (Migniot 1989)

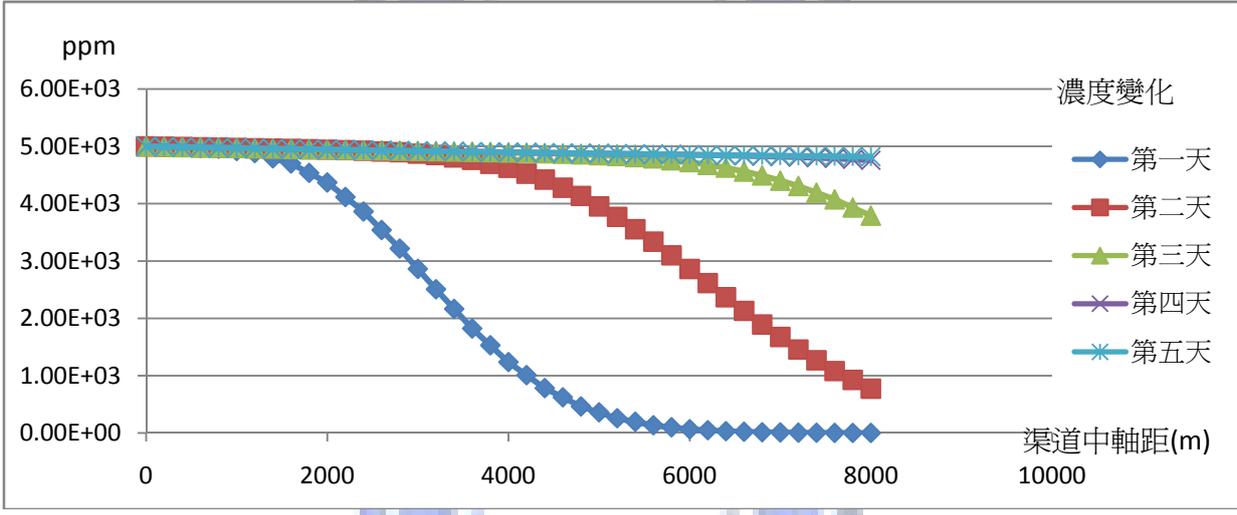


圖 4-2 懸浮濃度變化圖 (Migniot 1989)

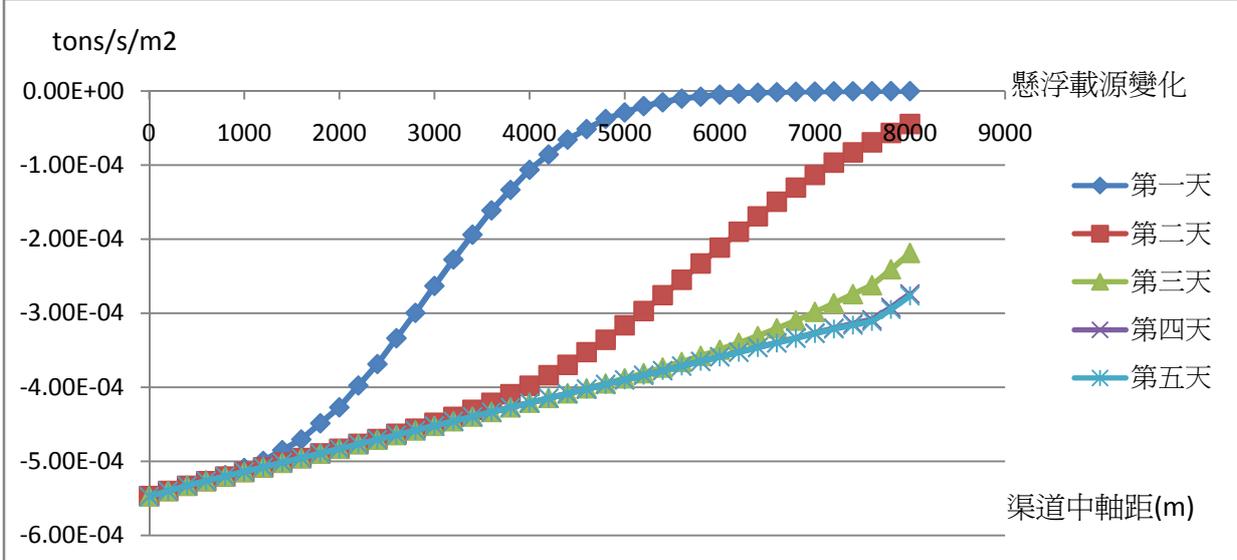


圖 4-3 懸浮載源變化圖 (Migniot 1989)

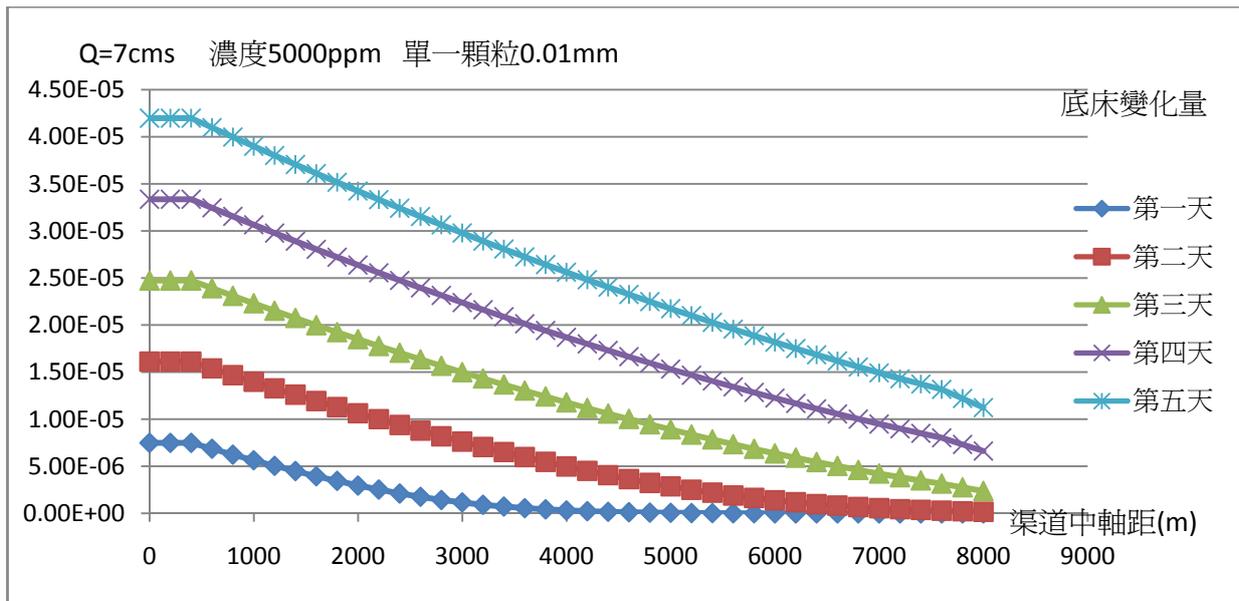


圖 4-4 底床變化量圖( Krishnappan 2000)

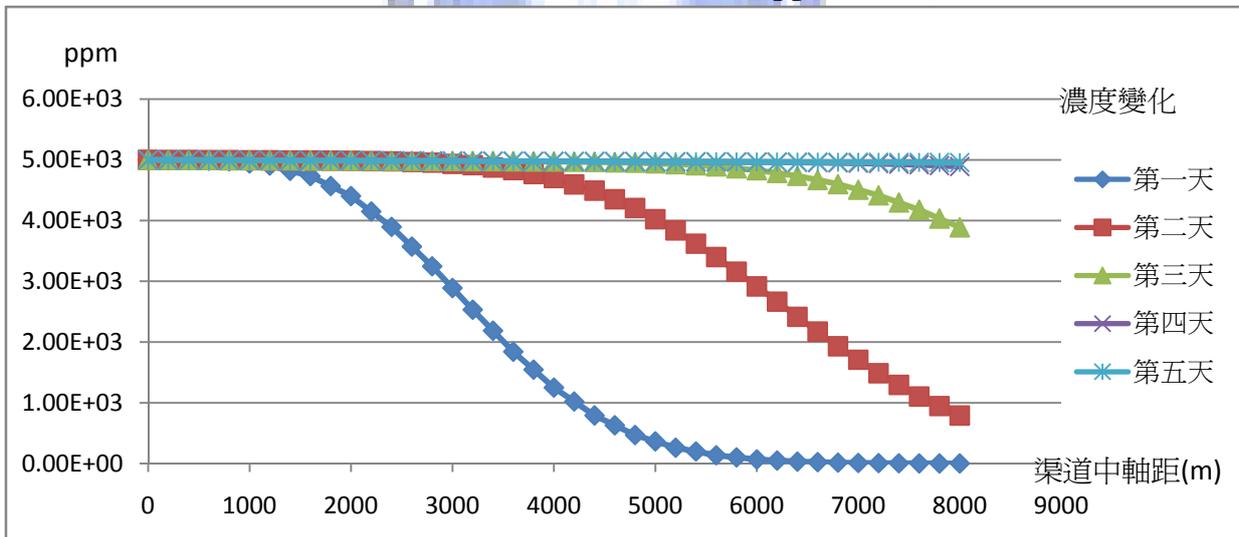


圖 4-5 懸浮濃度變化圖( Krishnappan 2000)

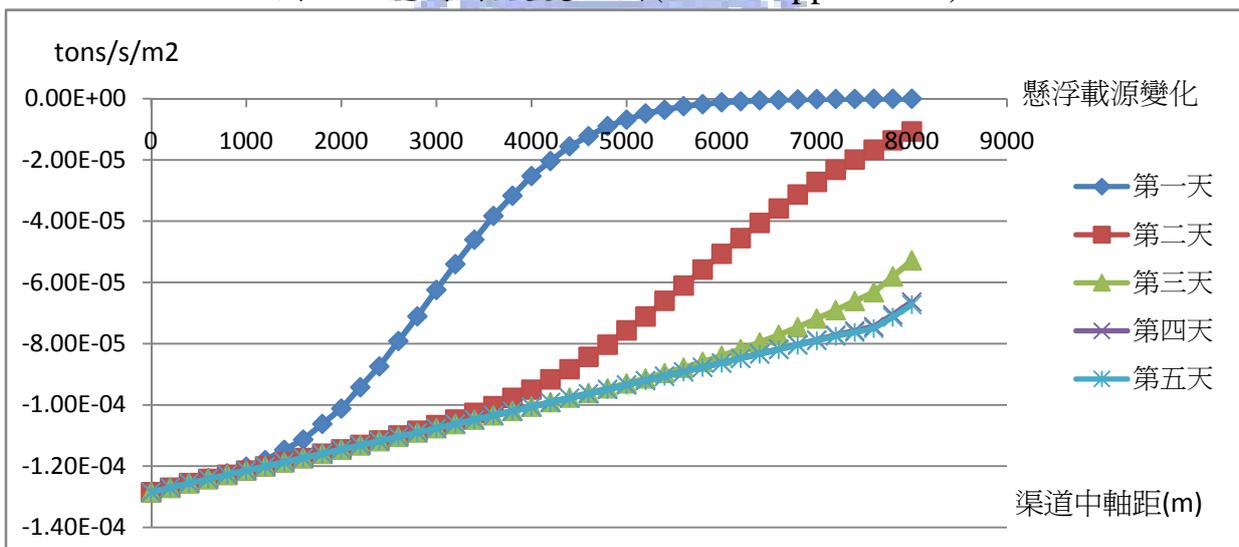


圖 4-6 懸浮載源變化圖( Krishnappan 2000)

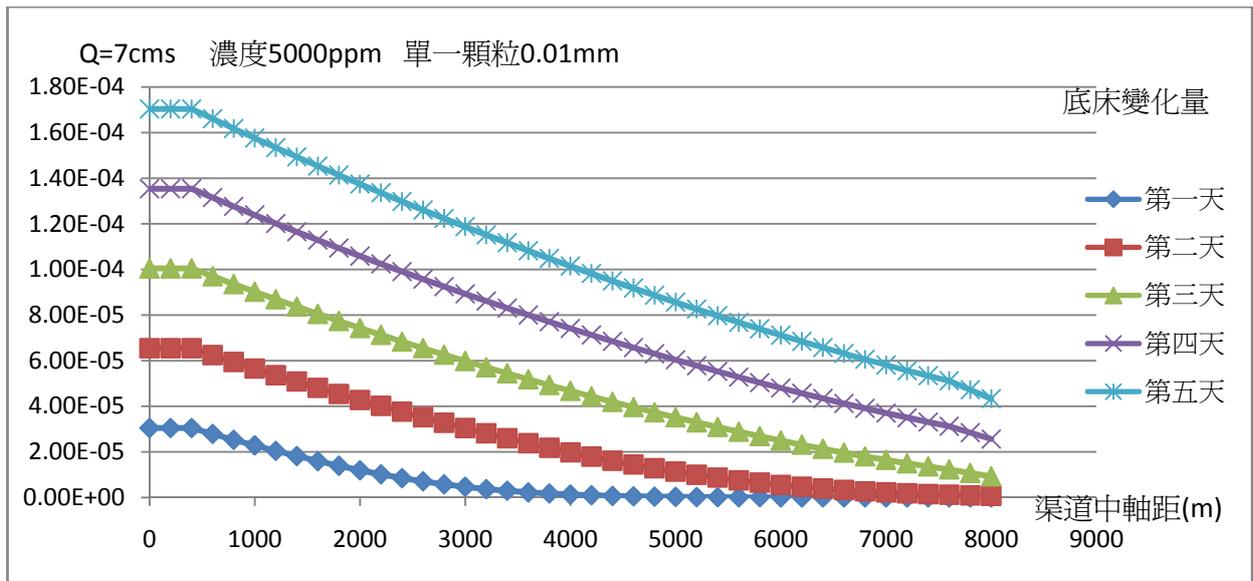


圖 4-7 底床變化量圖( You 2004)

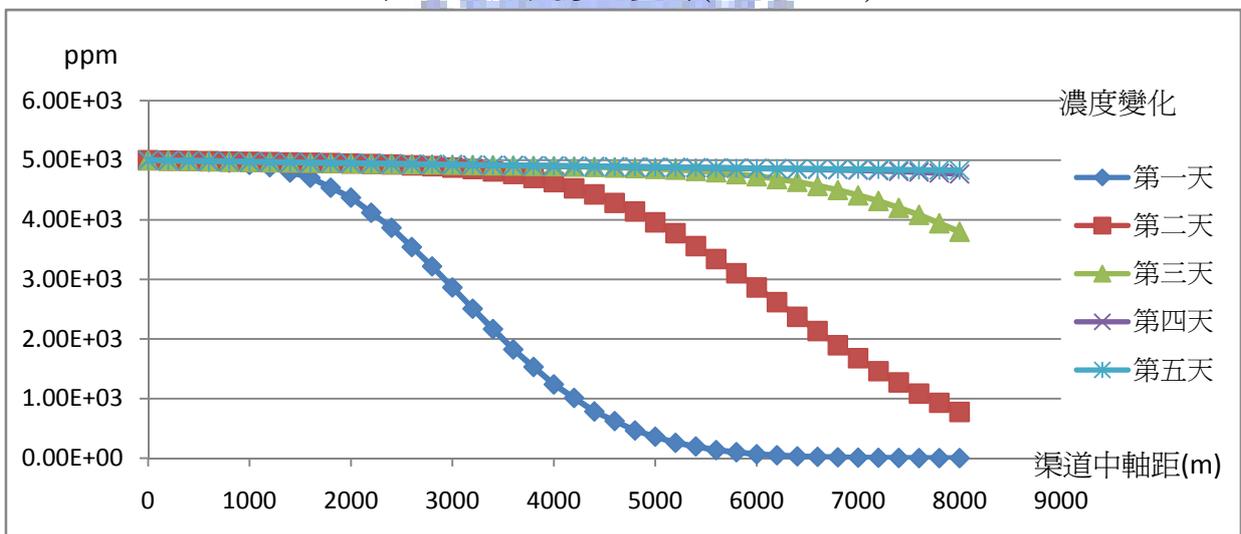


圖 4-8 懸浮濃度變化圖( You 2004)

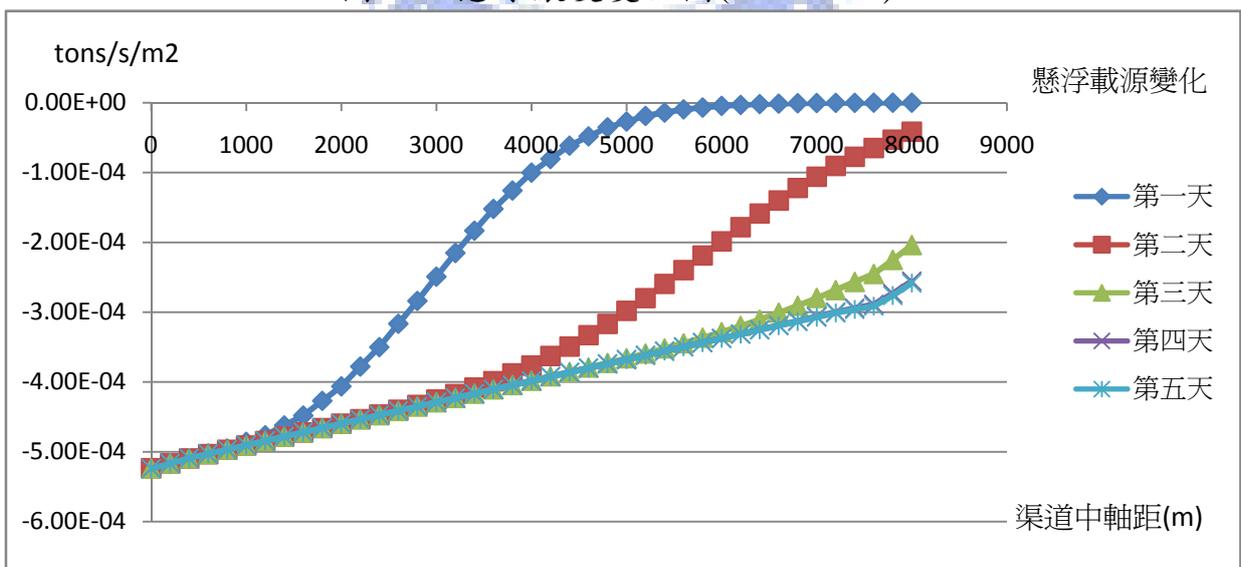


圖 4-9 懸浮載源變化圖( You 2004)

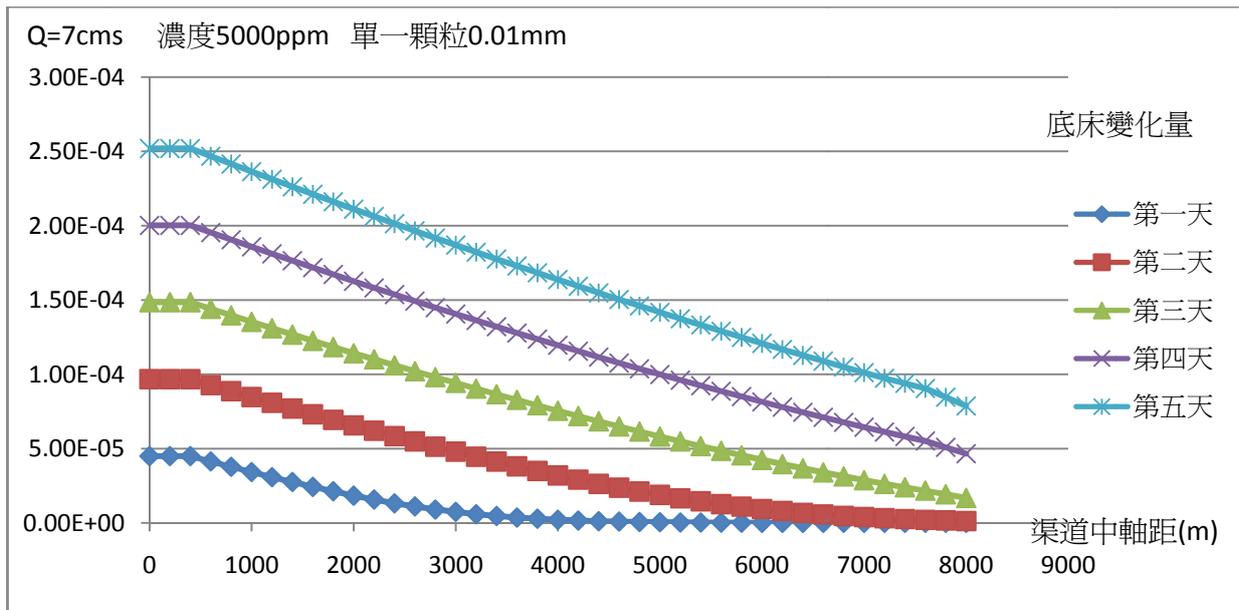


圖 4-10 底床變化量圖( Shrestha 1996)

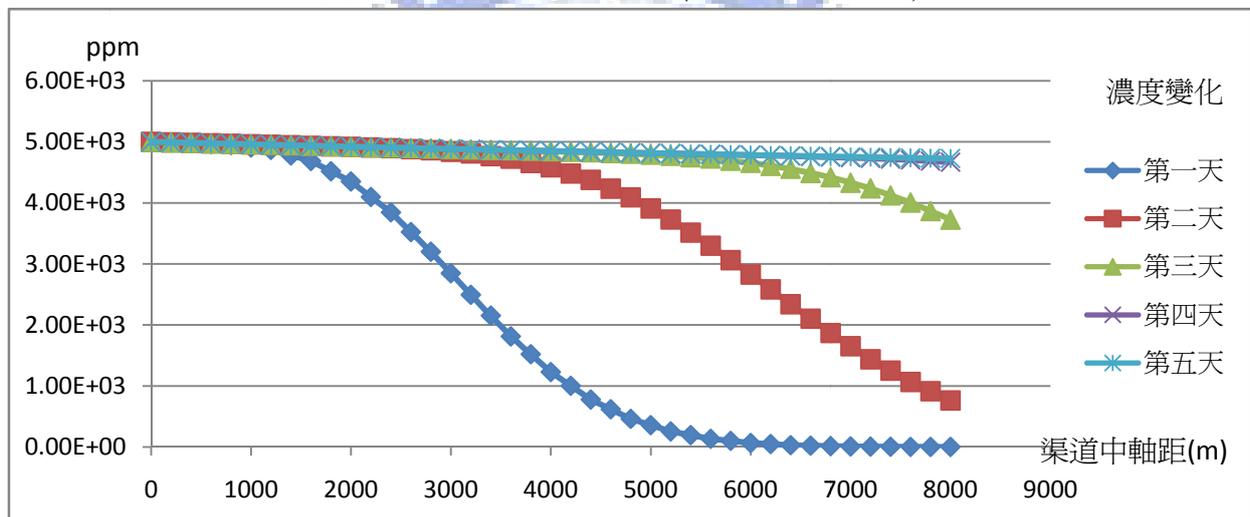


圖 4-11 懸浮濃度變化圖( Shrestha 1996)

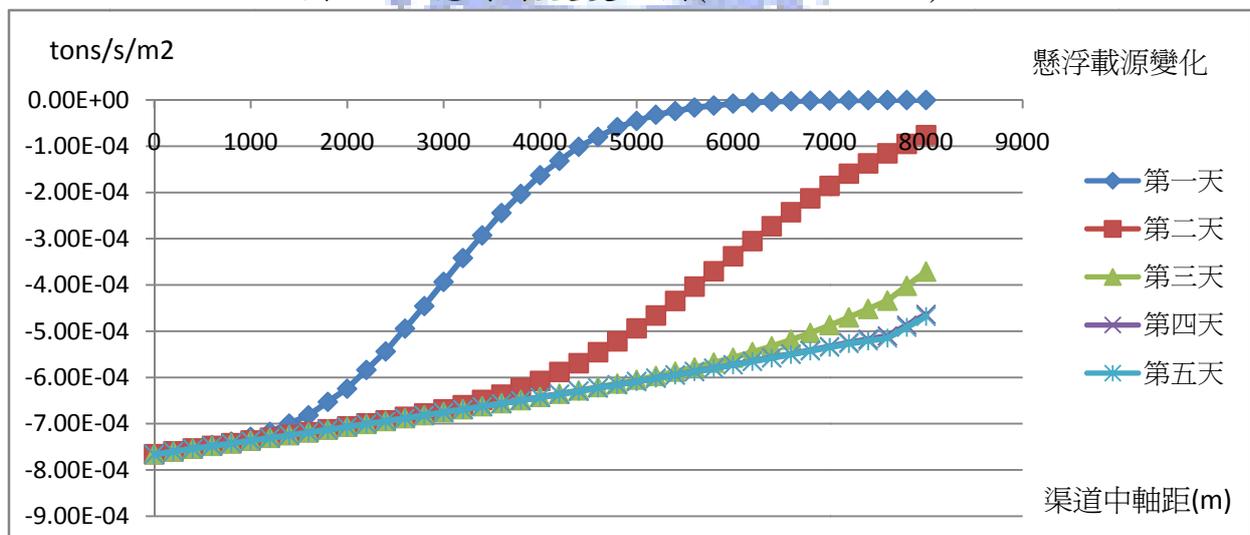


圖 4-12 懸浮載源變化圖( Shrestha 1996)

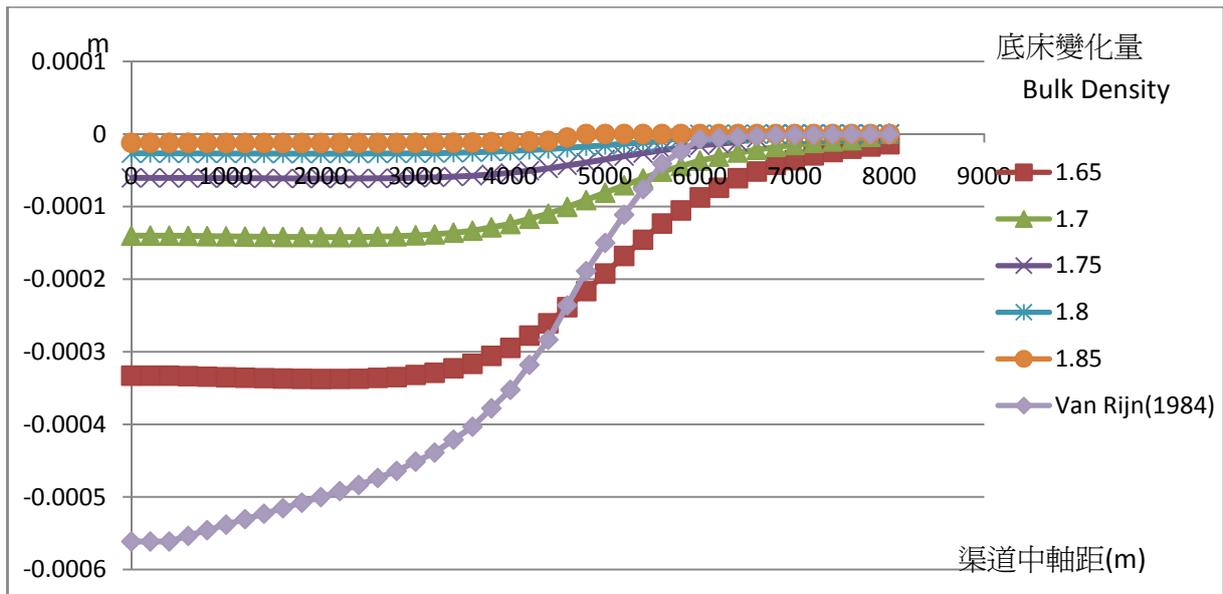


圖 4-13 底床變化量圖( Roberts et al.1998)

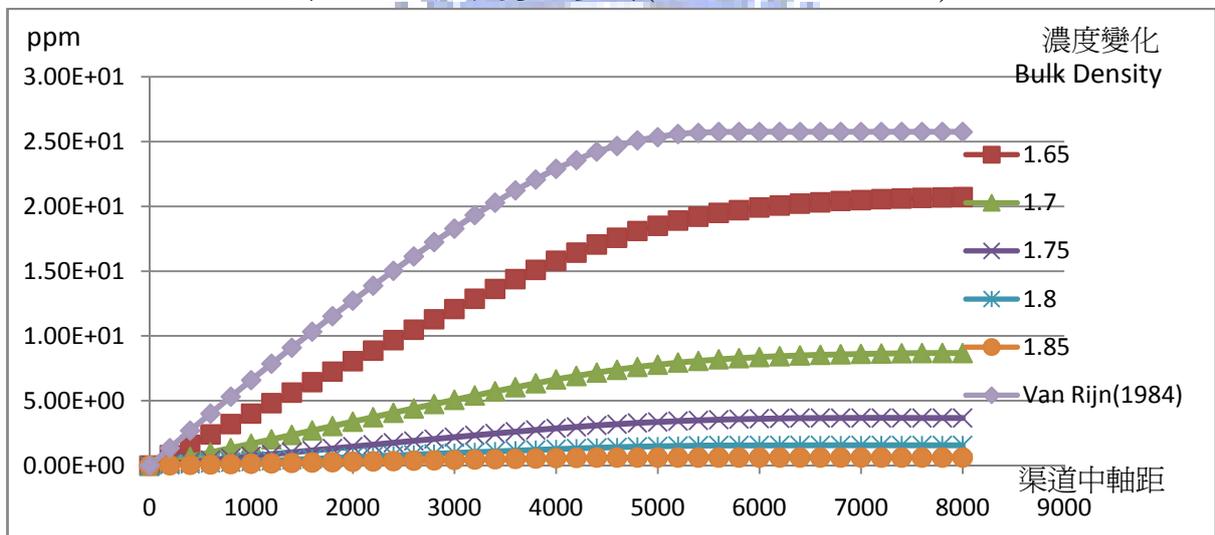


圖 4-14 懸浮濃度變化圖( Roberts et al.1998)

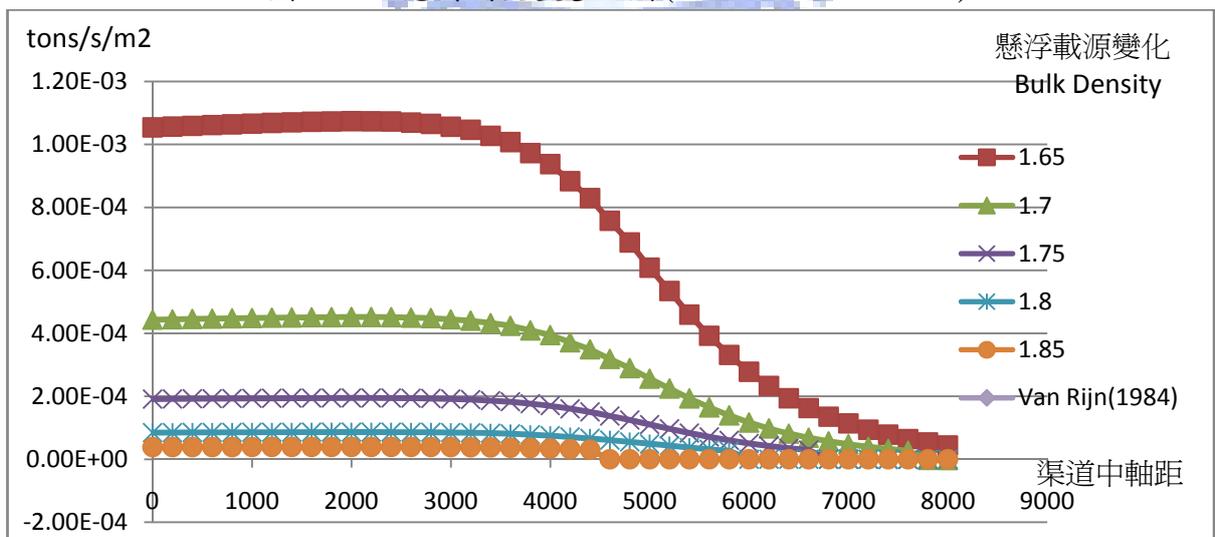


圖 4-15 懸浮載源變化圖( Roberts et al.1998)

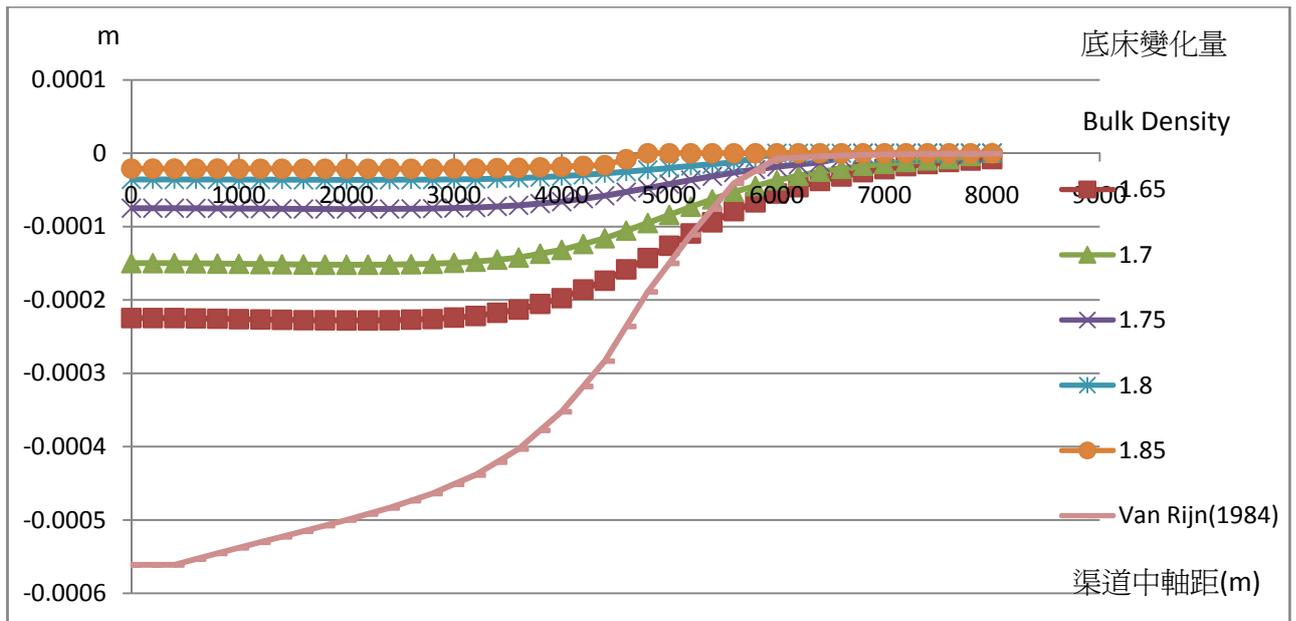


圖 4-16 底床變化量圖( Krone 1999)

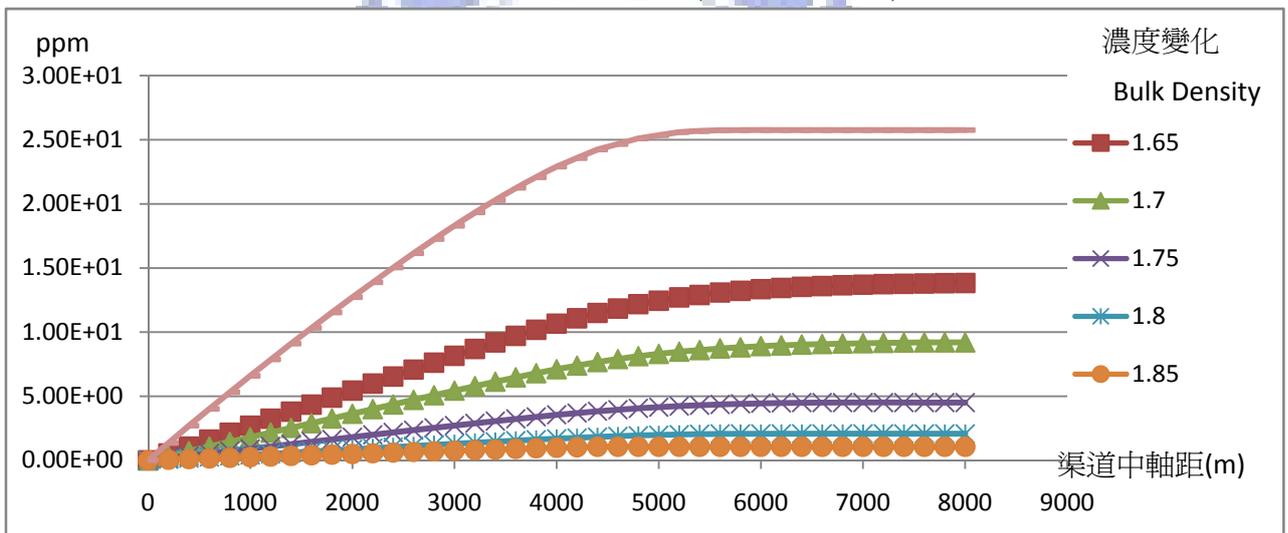


圖 4-17 懸浮濃度變化圖( Krone 1999)

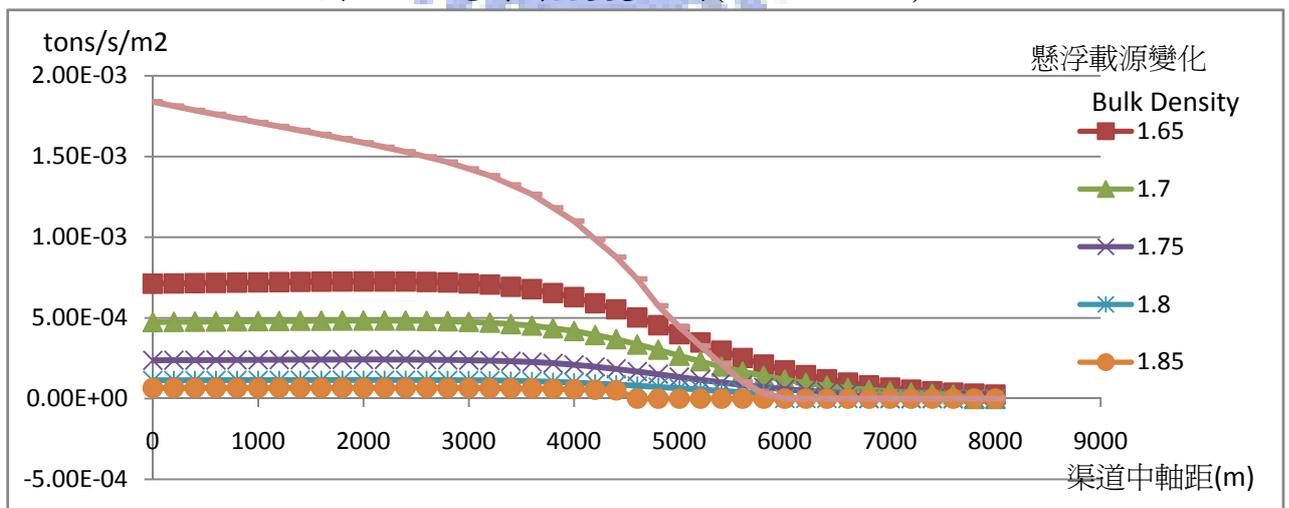


圖 4-18 懸浮載源變化圖( Krone 1999)

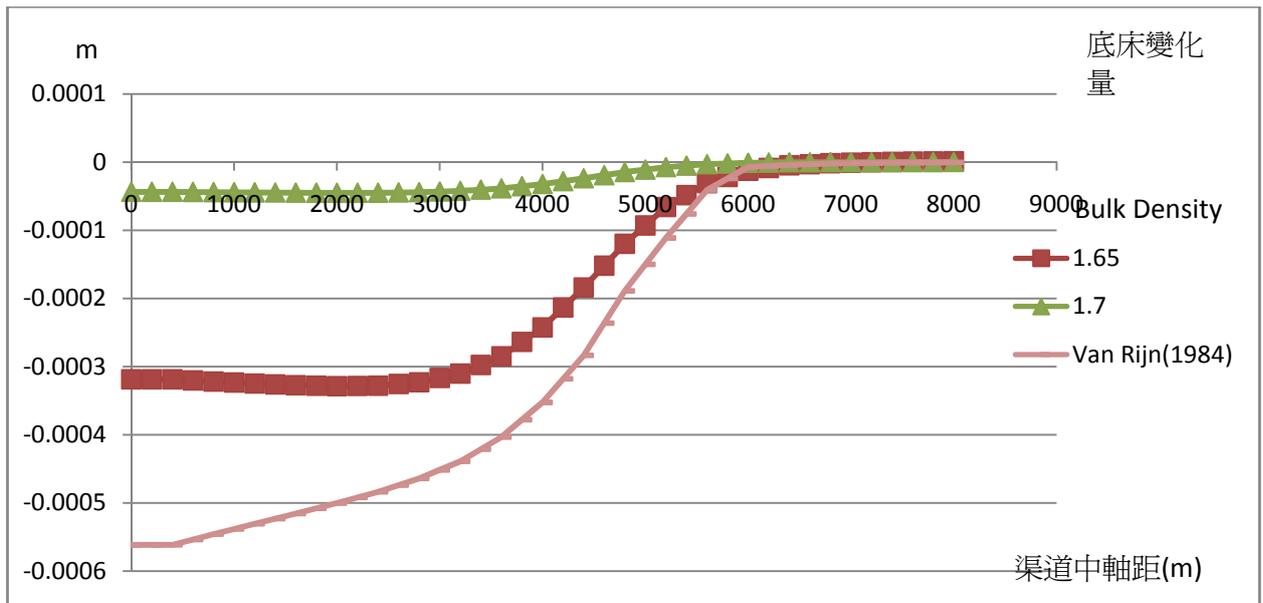


圖 4-19 底床變化量圖( Partheniades 1965)

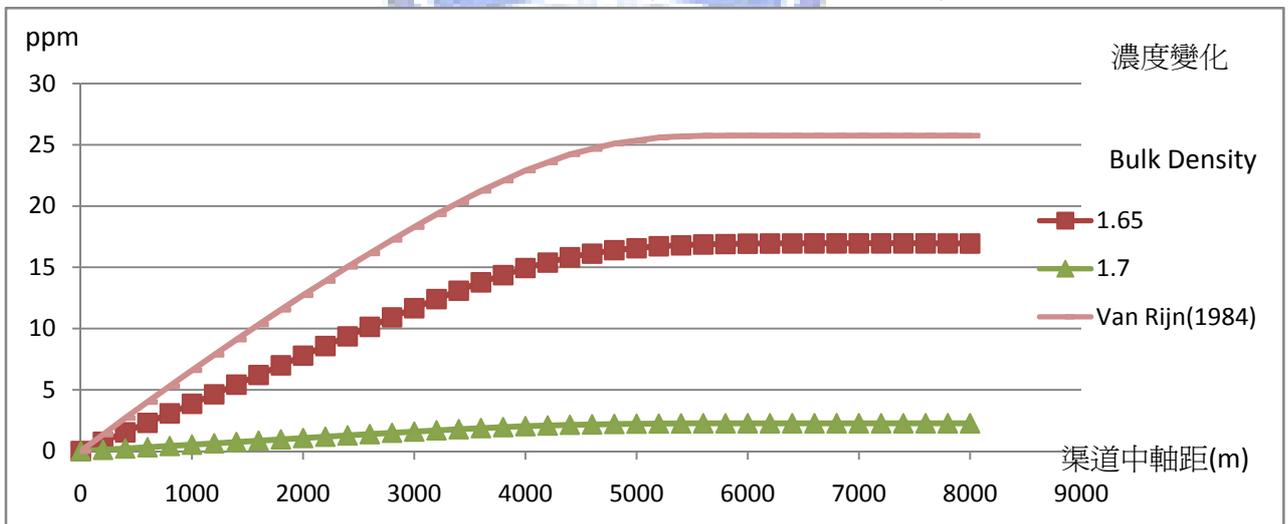


圖 4-20 懸浮濃度變化圖( Partheniades 1965)

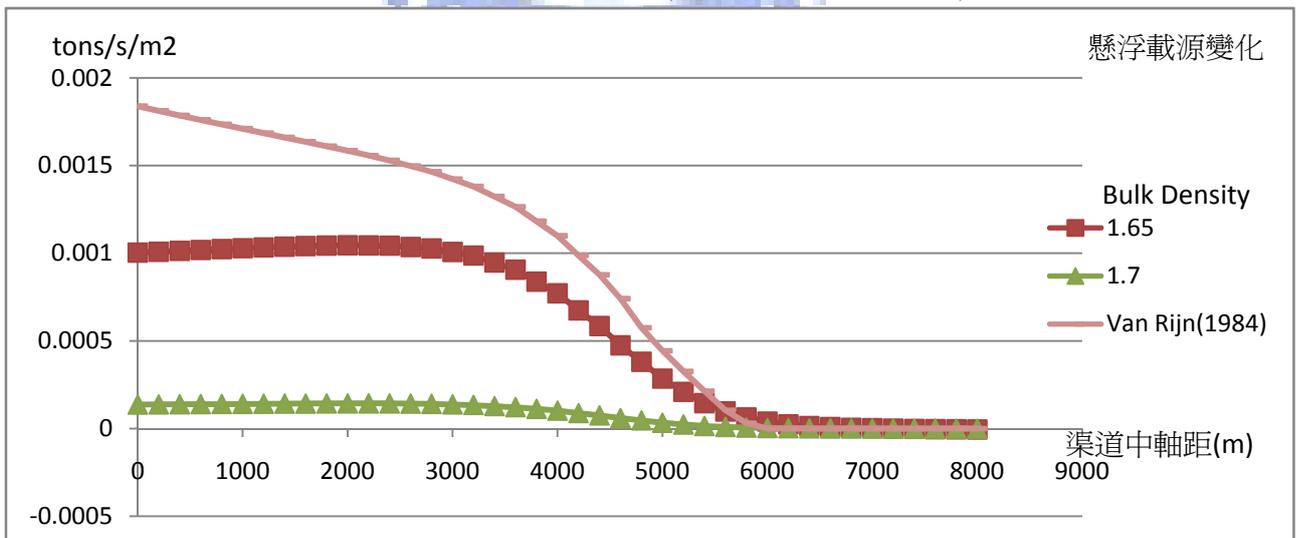


圖 4-21 懸浮載源變化圖( Partheniades 1965)

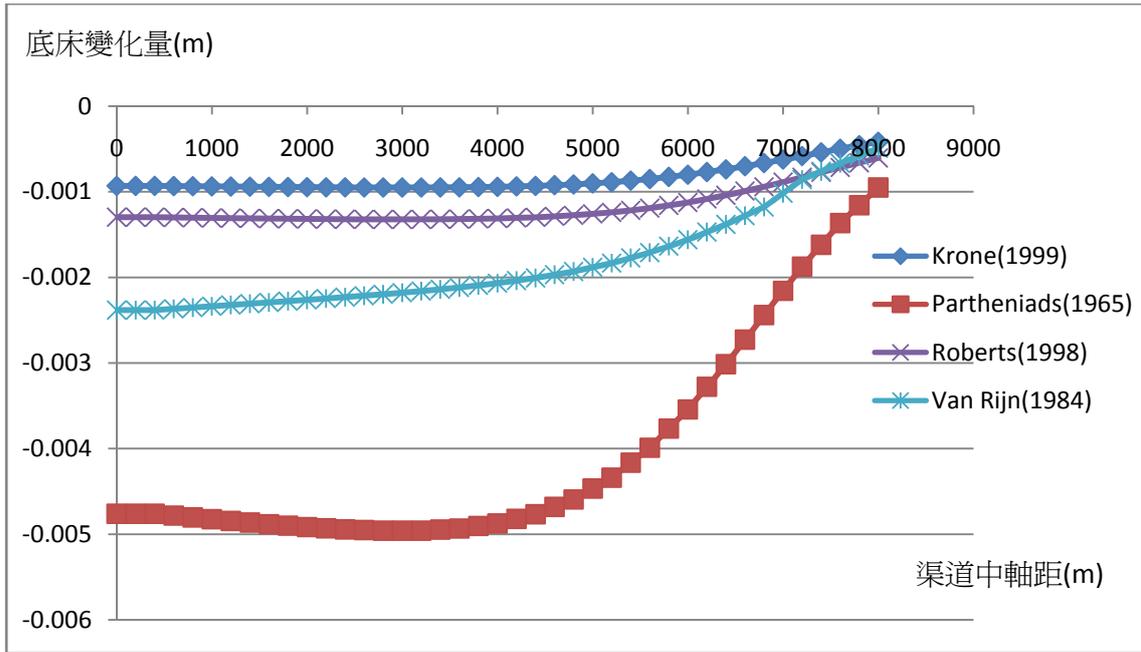


圖 4-22 底床變化量圖(Q=250cms)



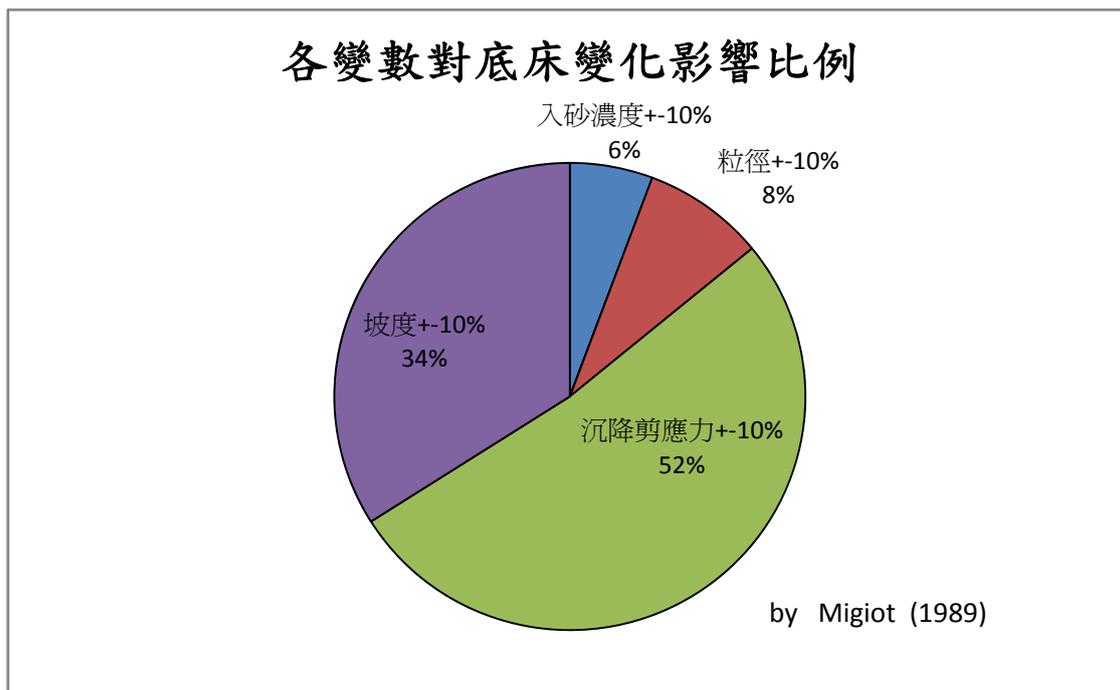


圖 4-23 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Migiot 1989)

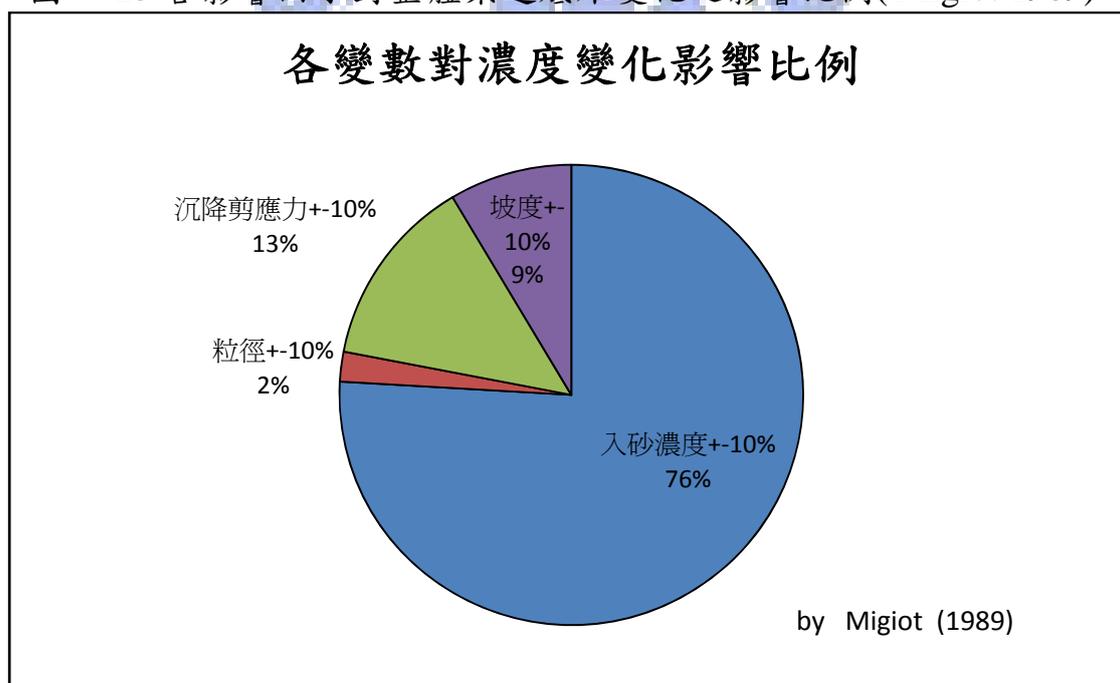


圖 4-24 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Migiot 1989)

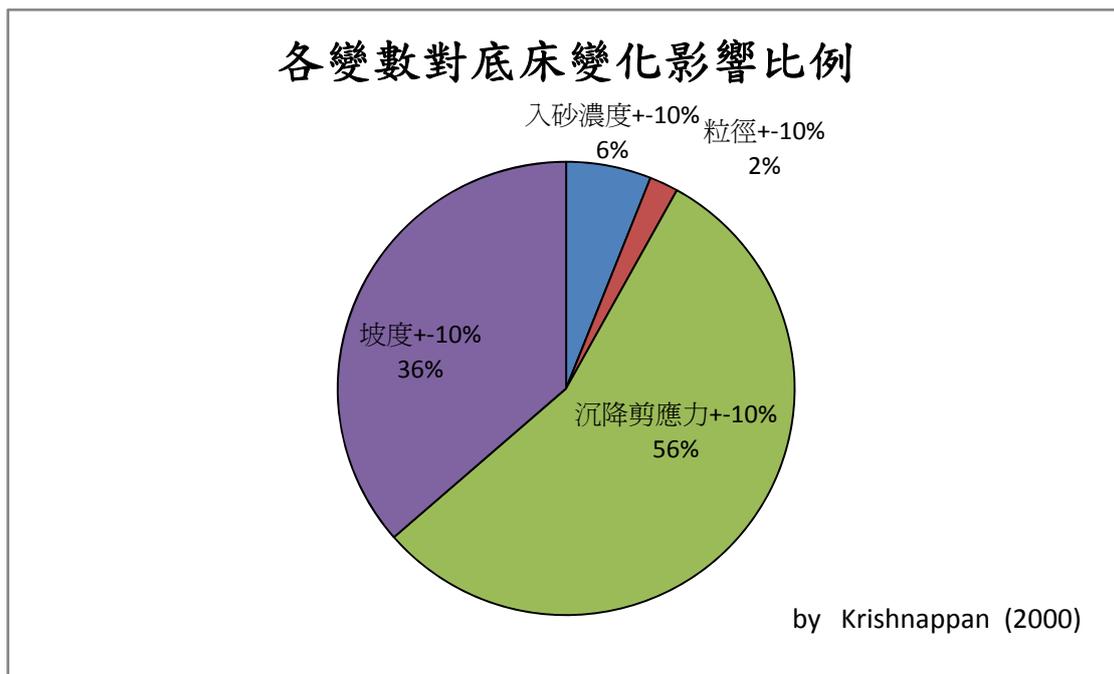


圖 4-25 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Krishnappan 2000)

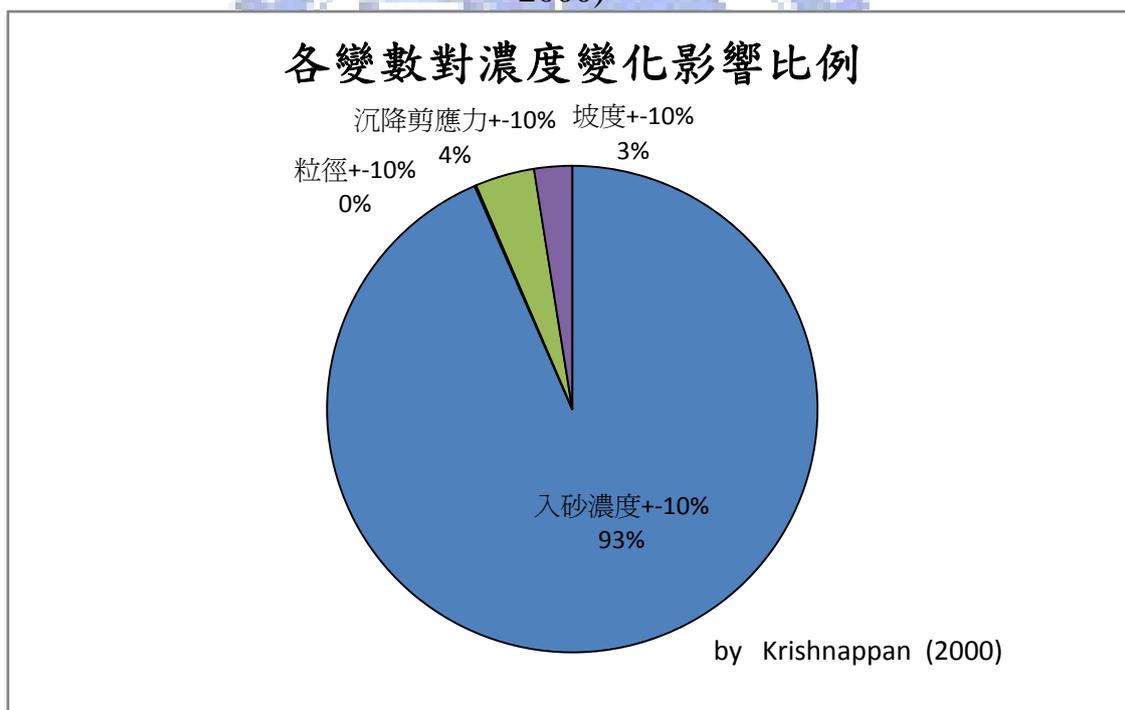


圖 4-26 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Krishnappan 2000)

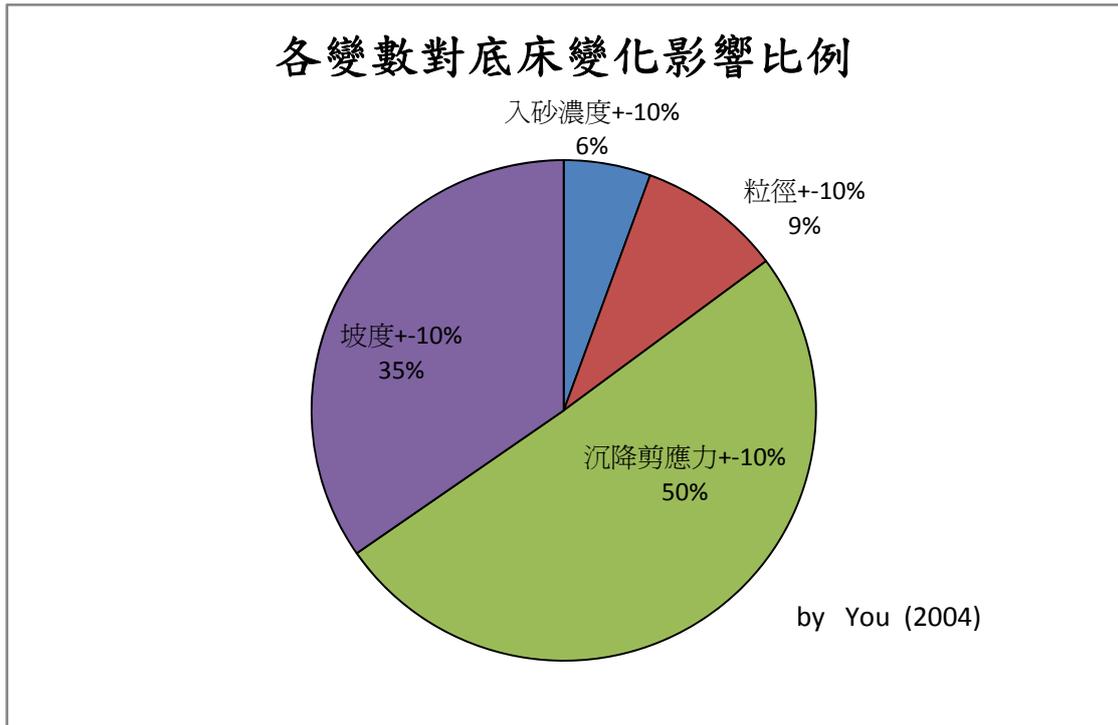


圖 4-27 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( You 2004)

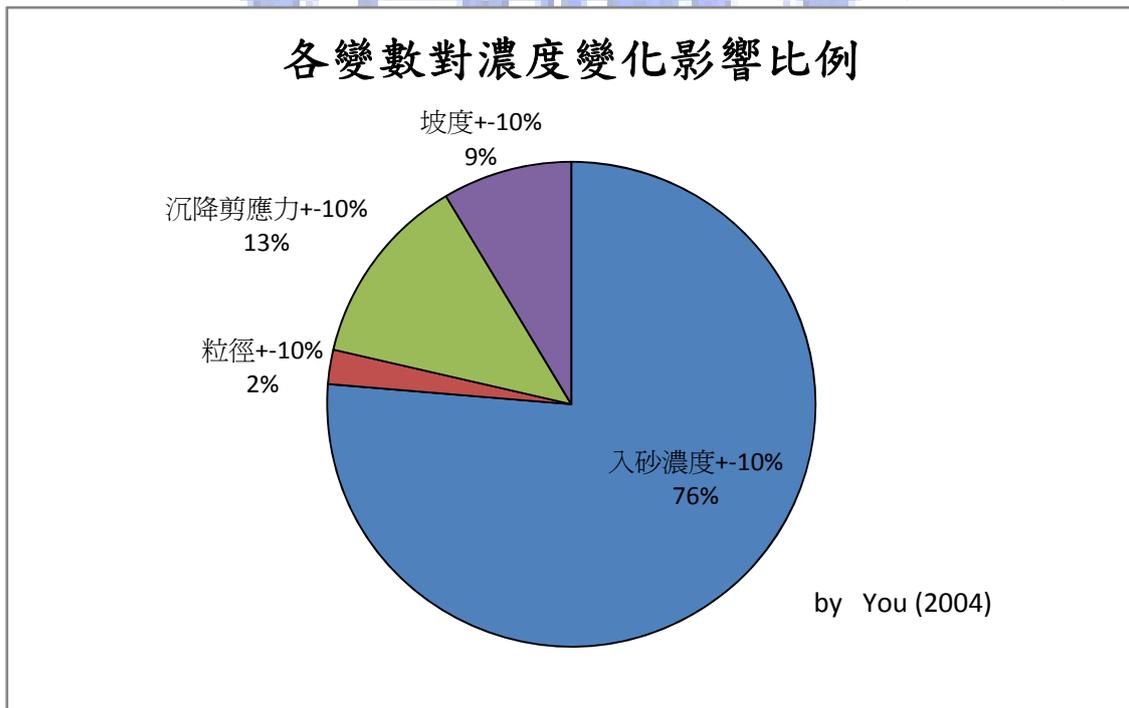


圖 4-28 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( You 2004)

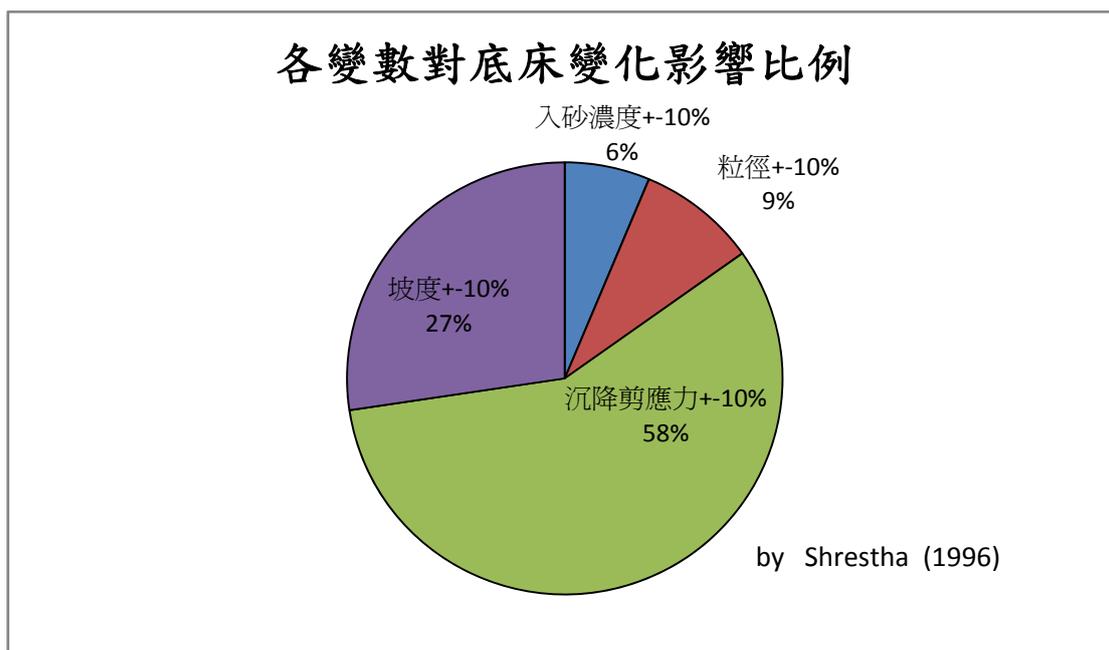


圖 4-29 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Shrestha 1996)

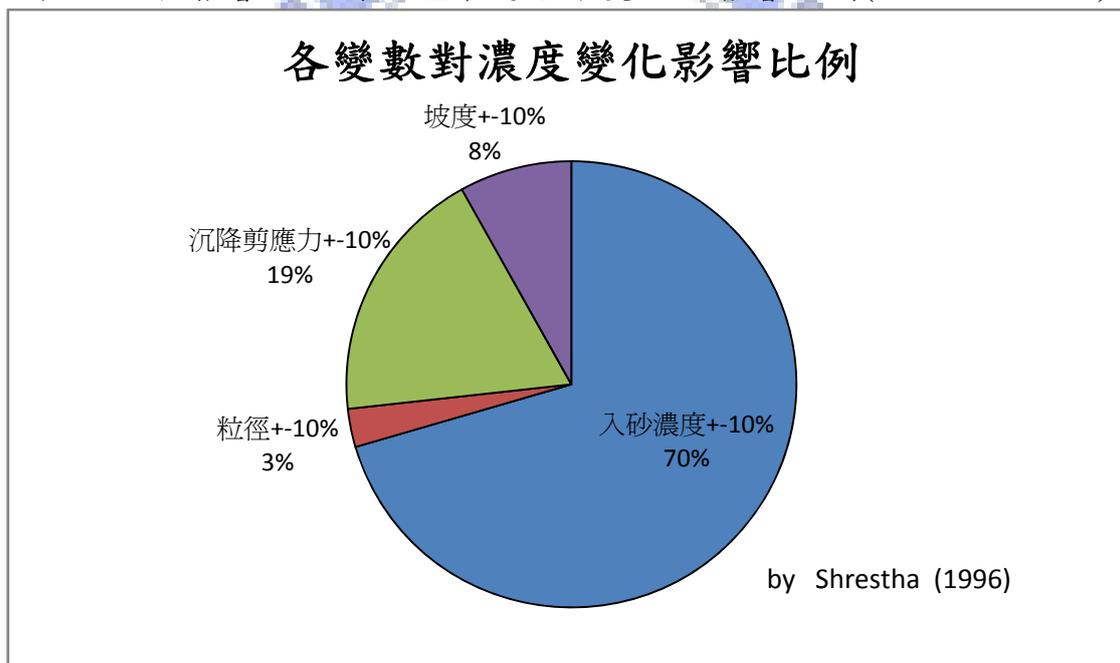


圖 4-30 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Shrestha 1996)

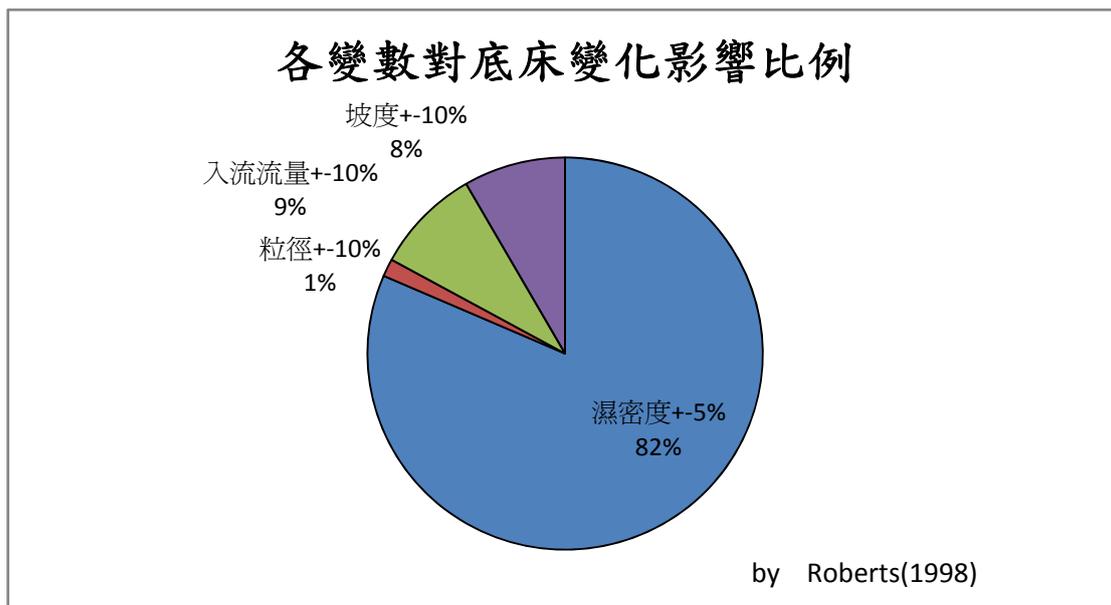


圖 4-31 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Roberts et al. 1998)

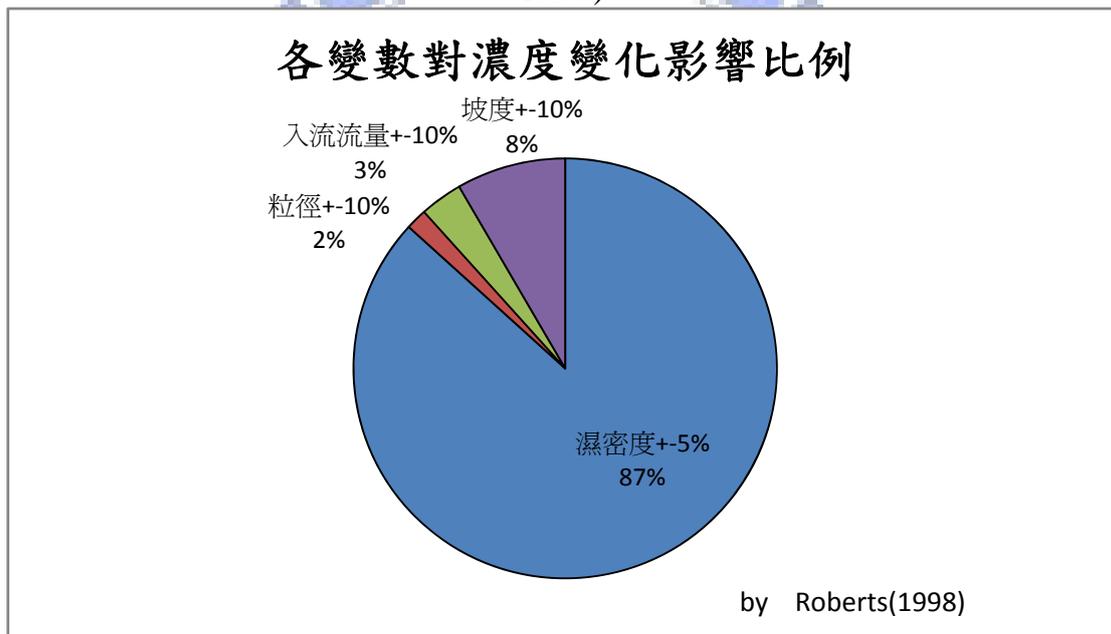


圖 4-32 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Roberts et al. 1998)

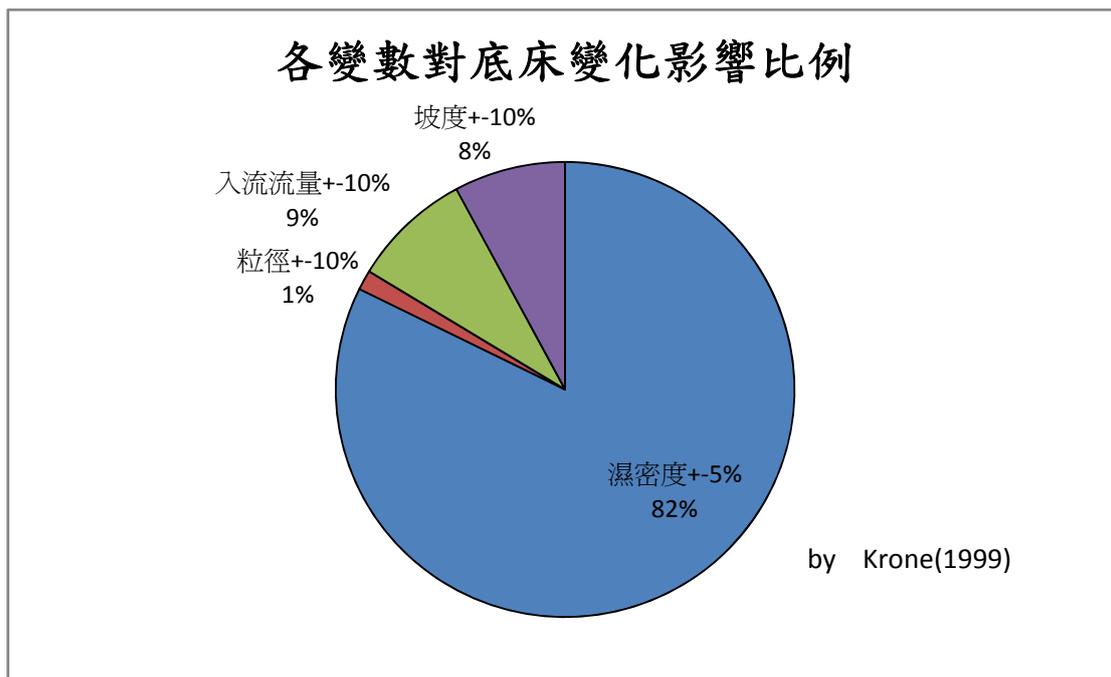


圖 4-33 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Krone 1999)

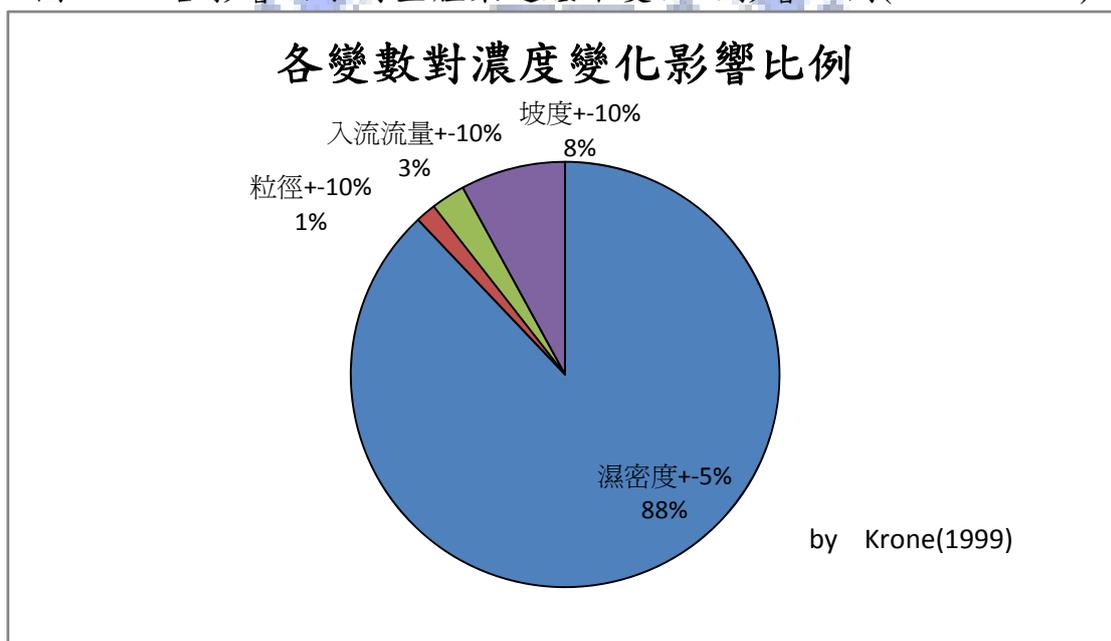


圖 4-34 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Krone 1999)

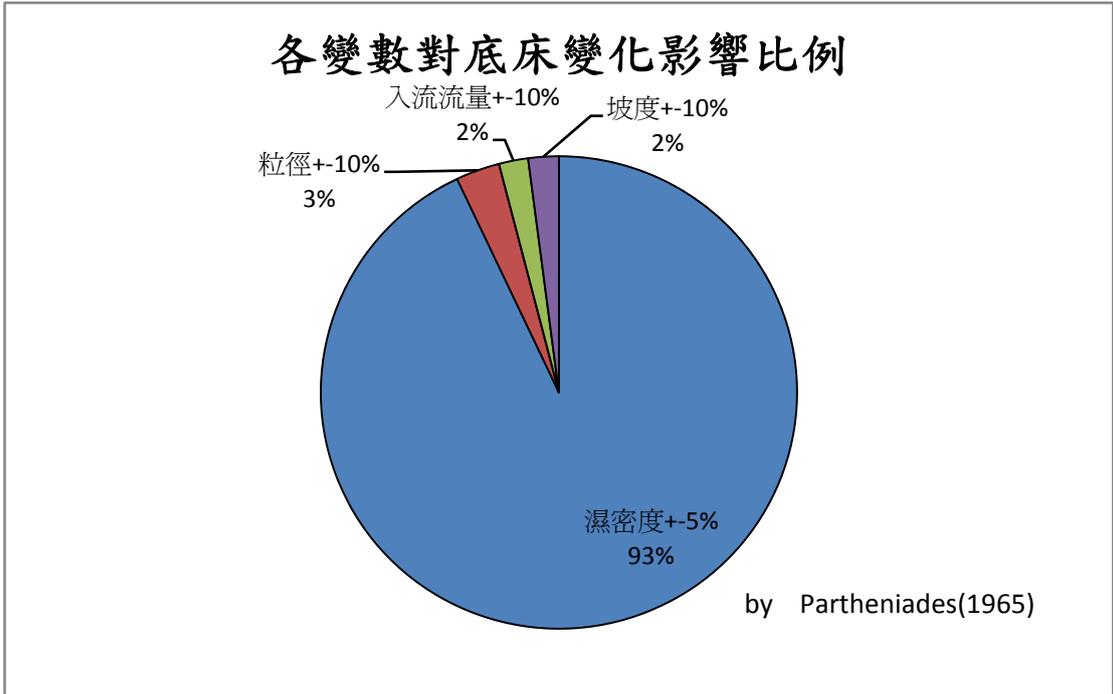


圖 4-35 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Partheniades 1965)

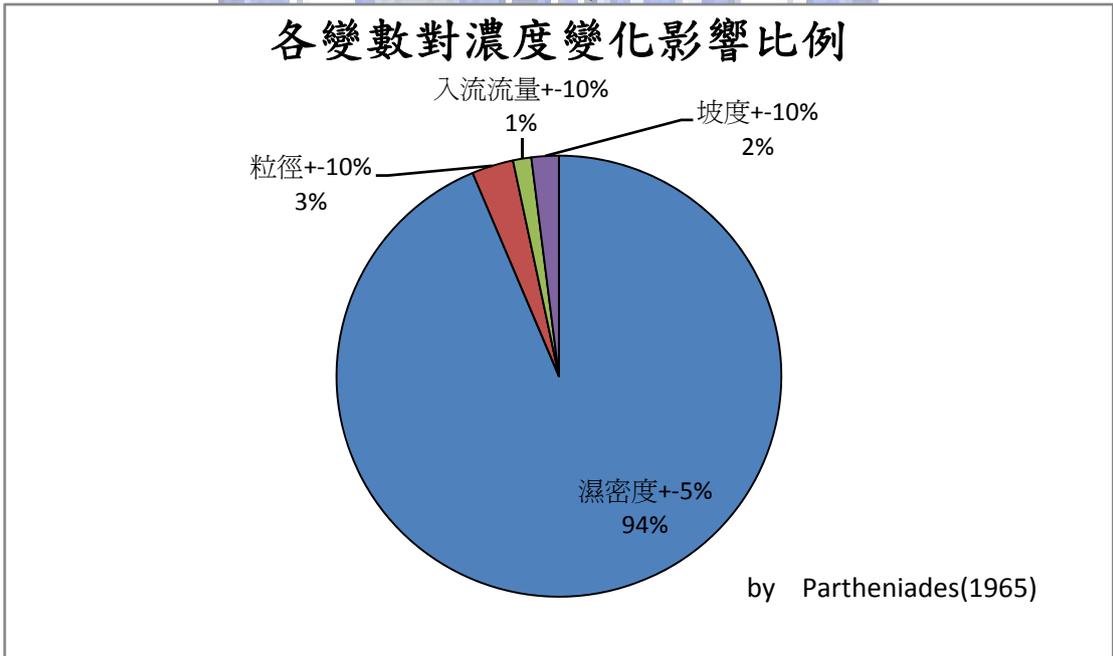


圖 4-36 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Partheniades 1965)

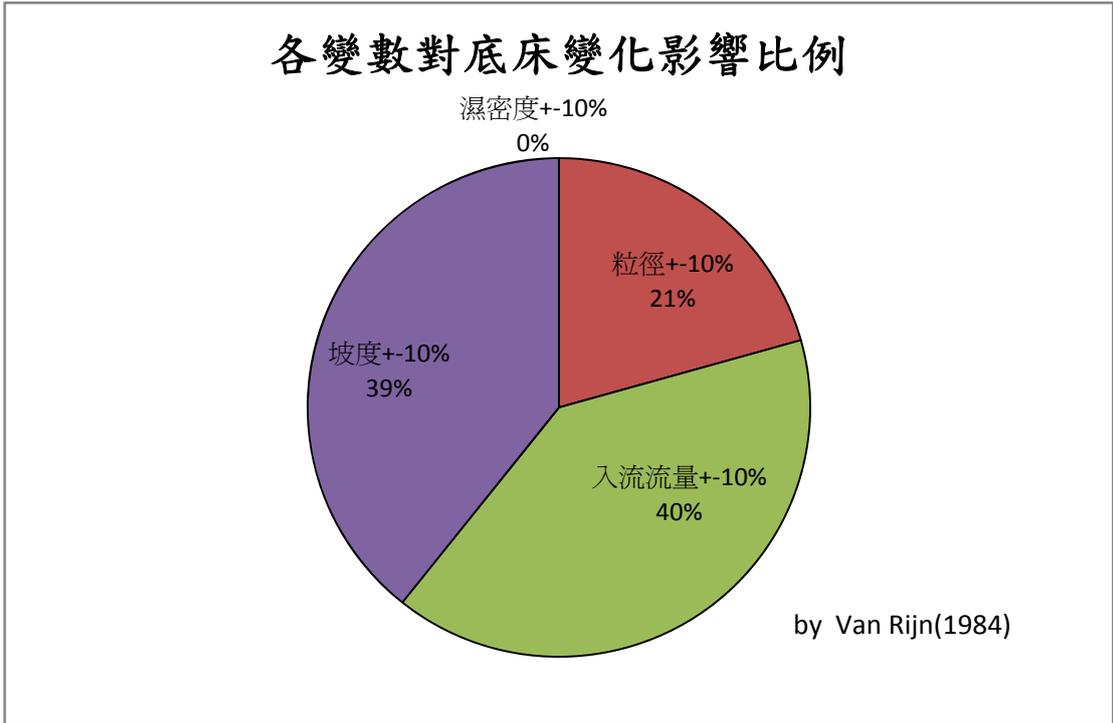


圖 4-37 各影響因子對整體渠道底床變化之影響比例( Van Rijn 1984)

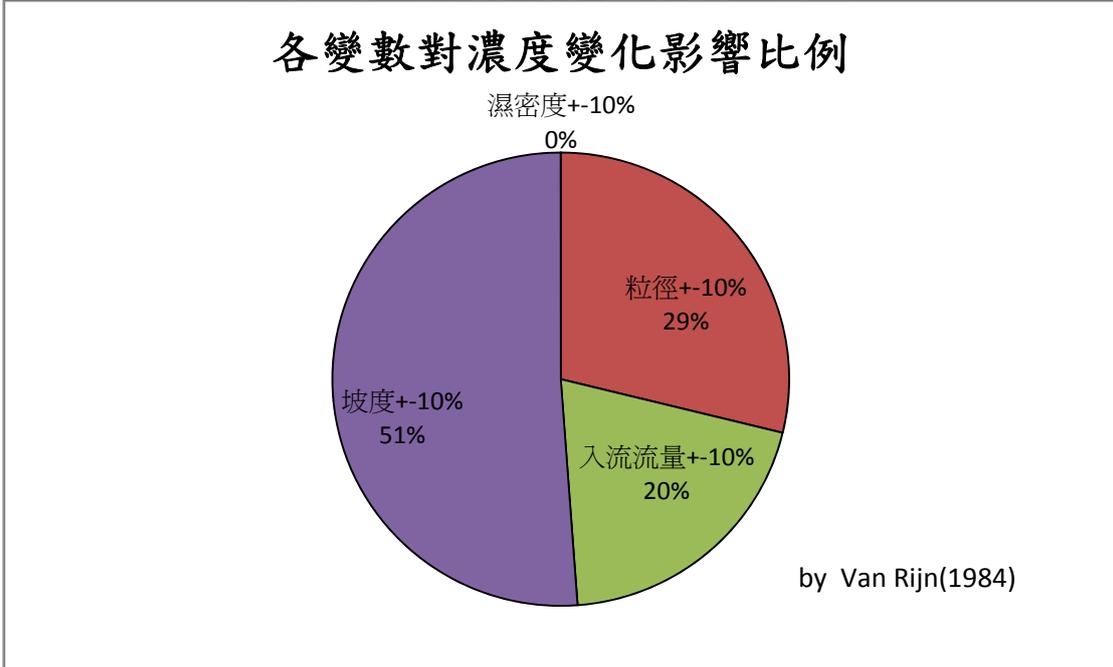
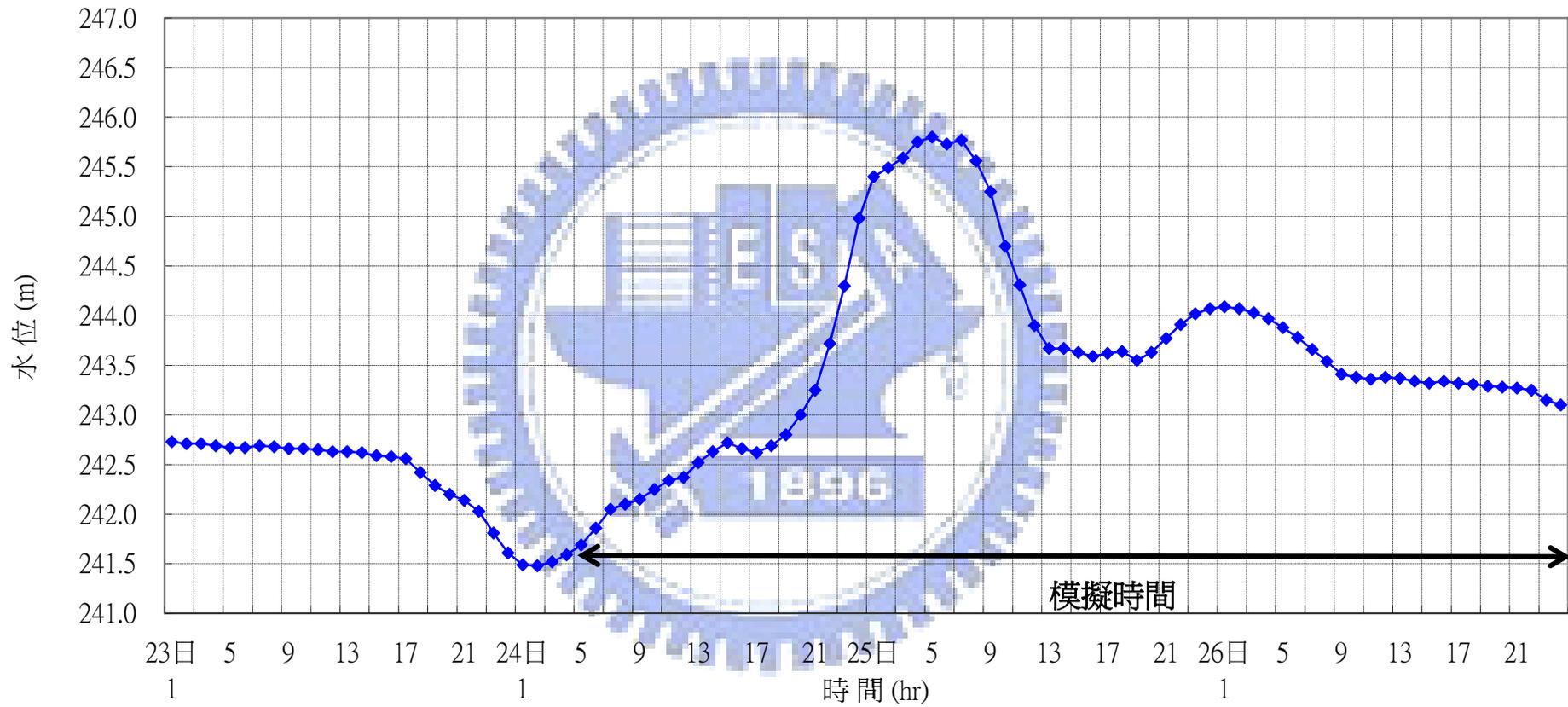


圖 4-38 各影響因子對整體渠道濃度變化之影響比例( Van Rijn 1984)

石門水庫水位歷線圖(艾利颱風)  
(93年8月23日1時~93年8月26日24時)



5

圖 5-1 石門水庫下游水位歷線圖(艾利颱風)

石門水庫流量歷線(艾利颱風)  
(93年8月23日1時~93年8月26日24時)

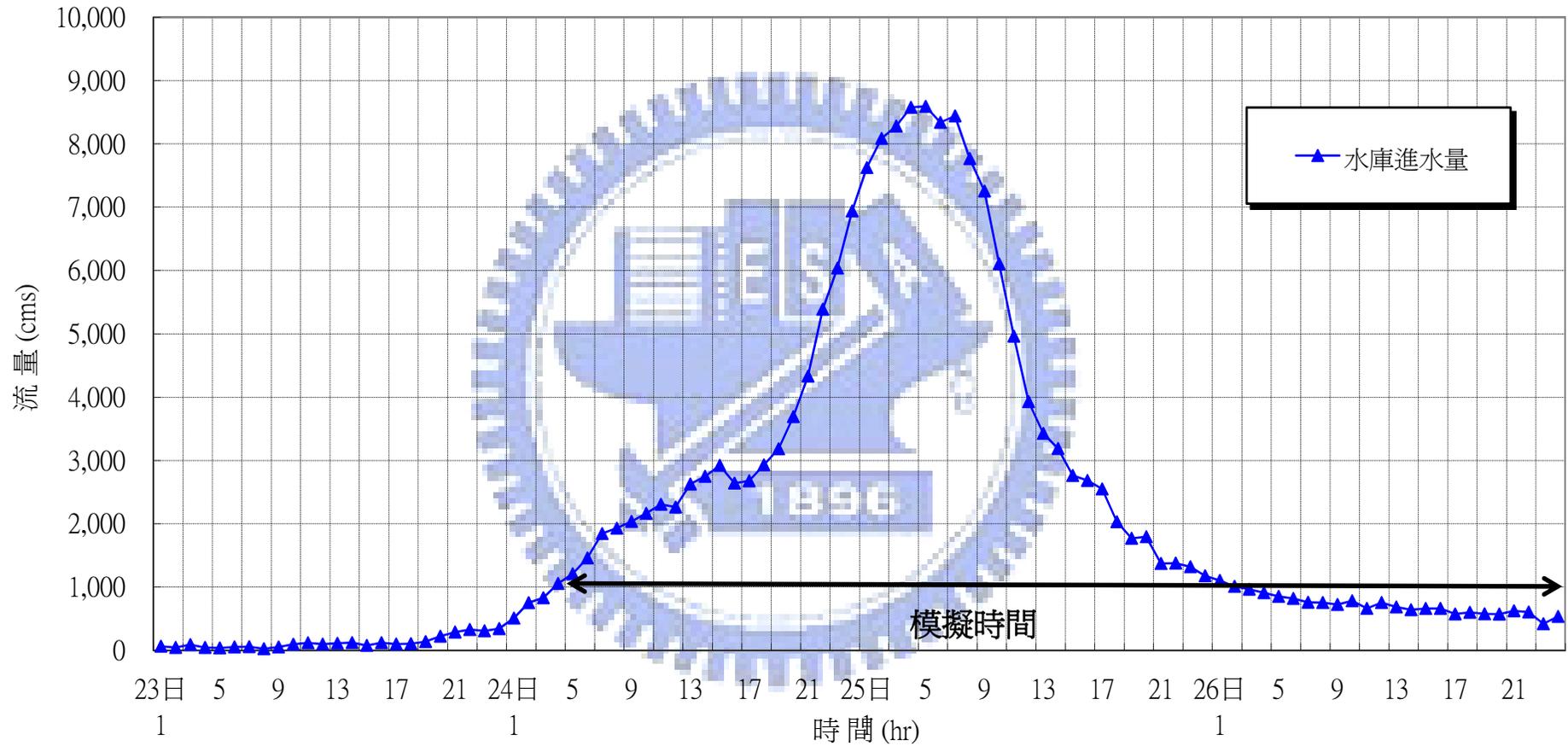


圖 5-2 石門水庫上游流量歷線圖(艾利颱風)

石門水庫上游入砂歷線(艾利颱風)  
(93年8月23日1時~93年8月26日24時)

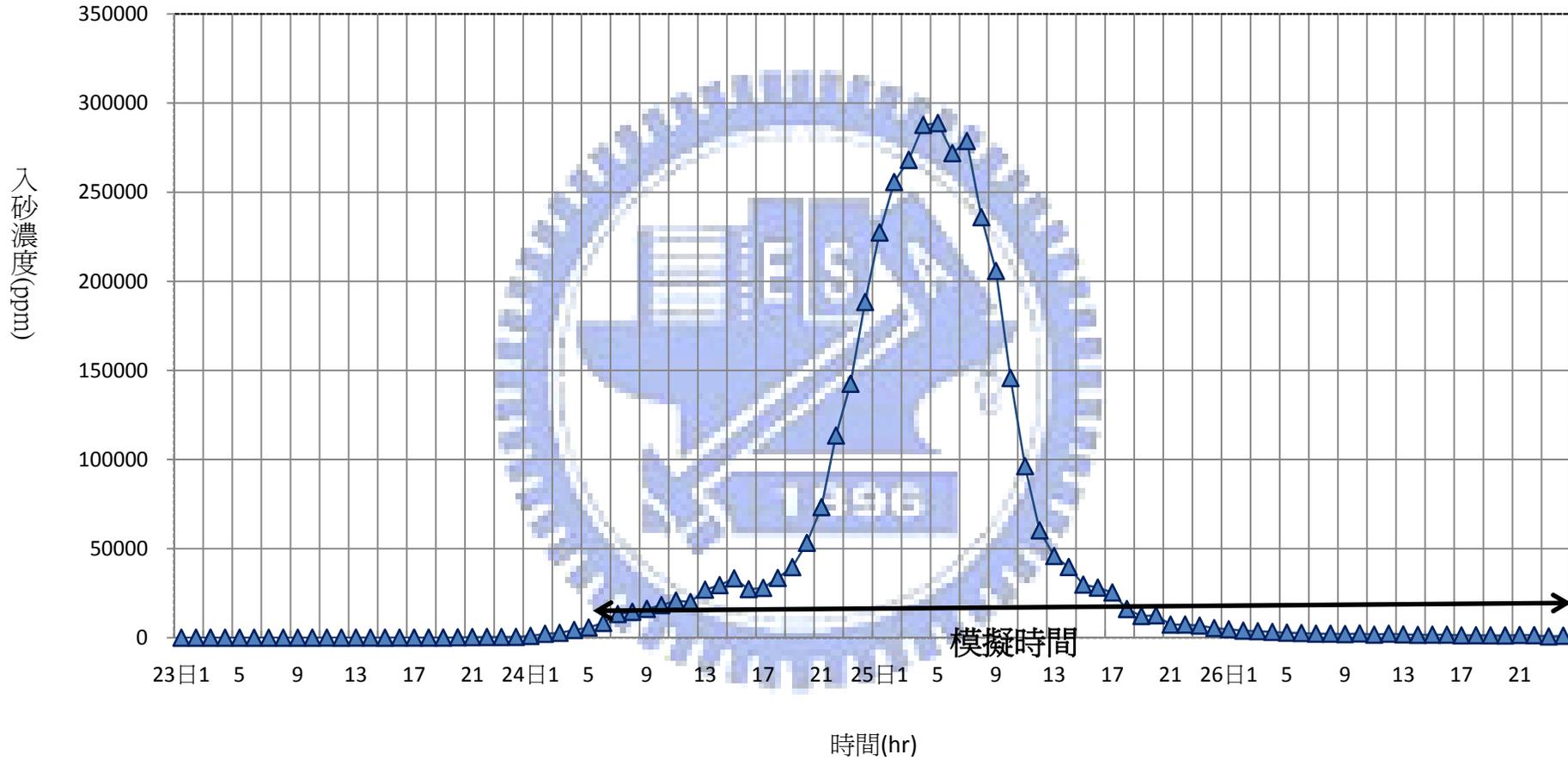


圖 5-3 石門水庫上游入砂濃度歷線圖(艾利颱風)

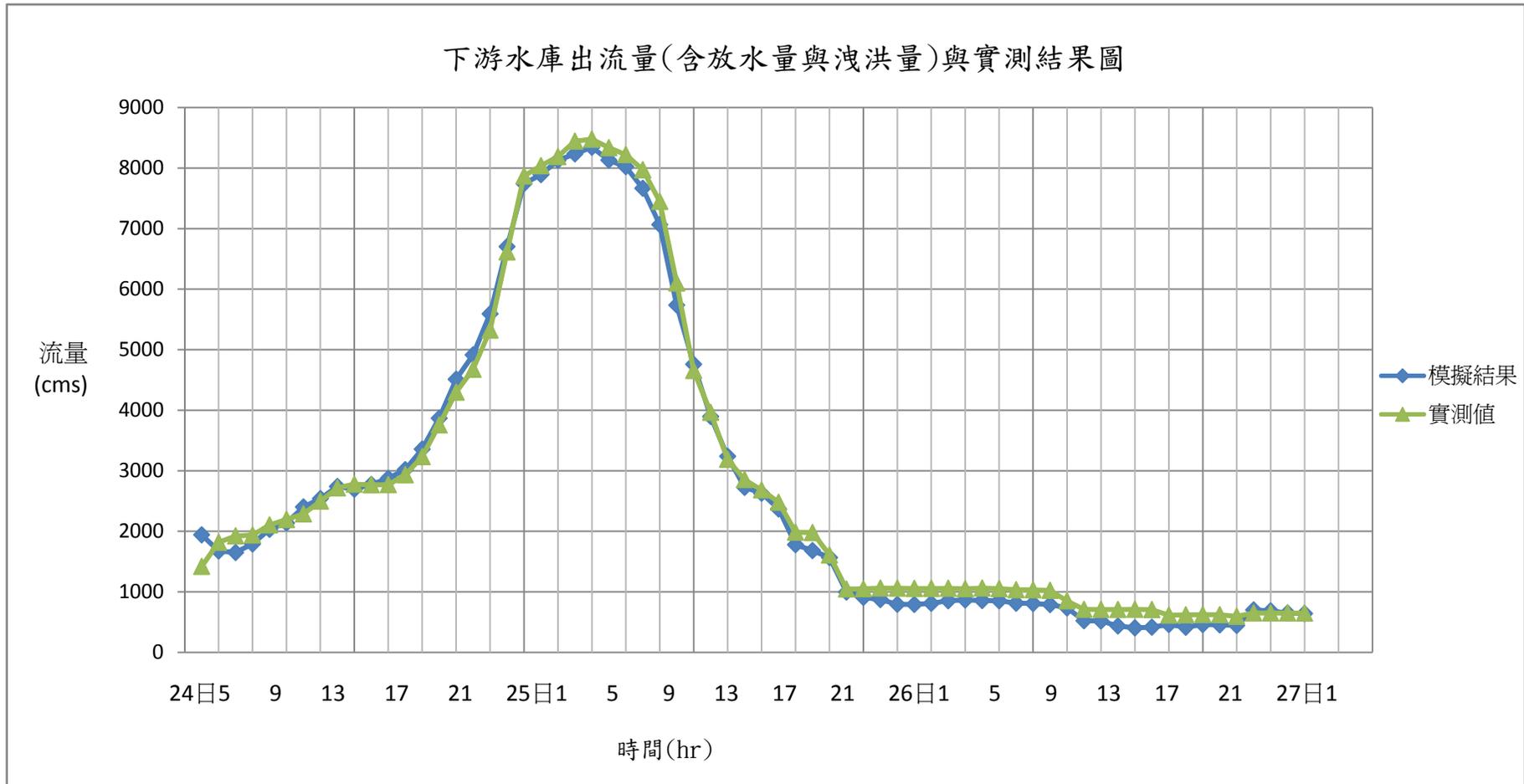


圖 5-4 下游水庫出流量與實測結果比較圖(艾利颱風)

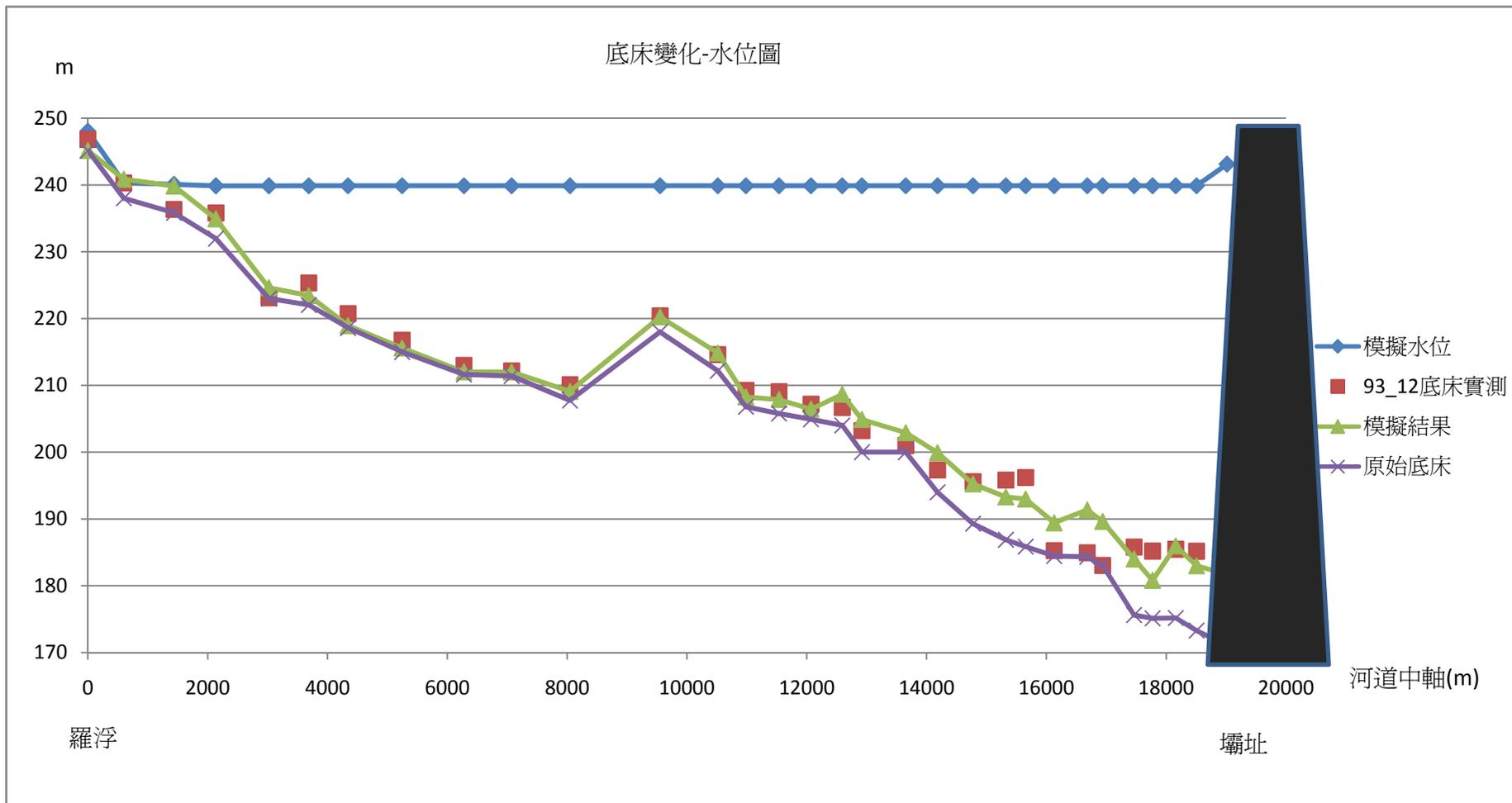


圖 5-5 石門水庫模擬結束底床變化\_水位圖(艾利颱風)

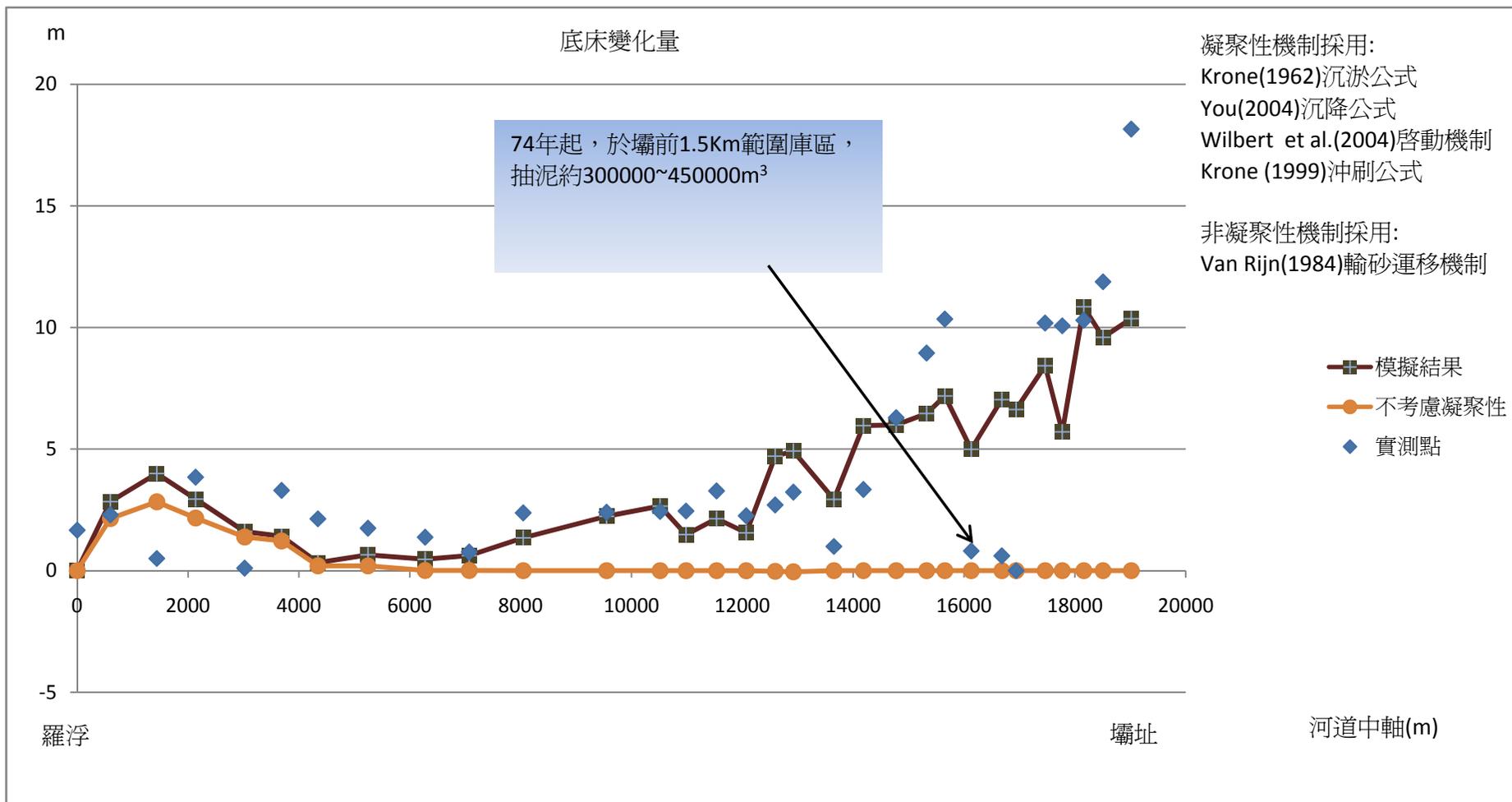


圖 5-6 石門水庫模擬結束底床變化量圖(艾利颱風)

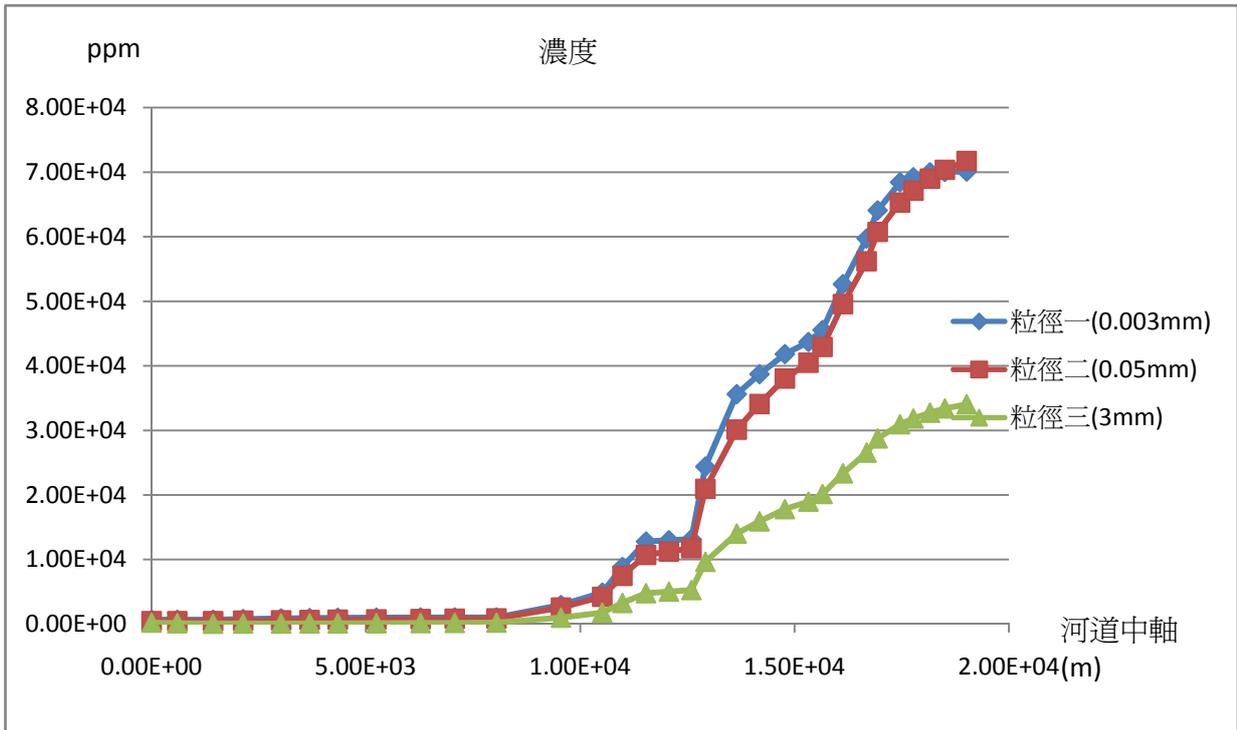


圖 5-7 石門水庫模擬結束各粒徑懸浮濃度變化情形圖

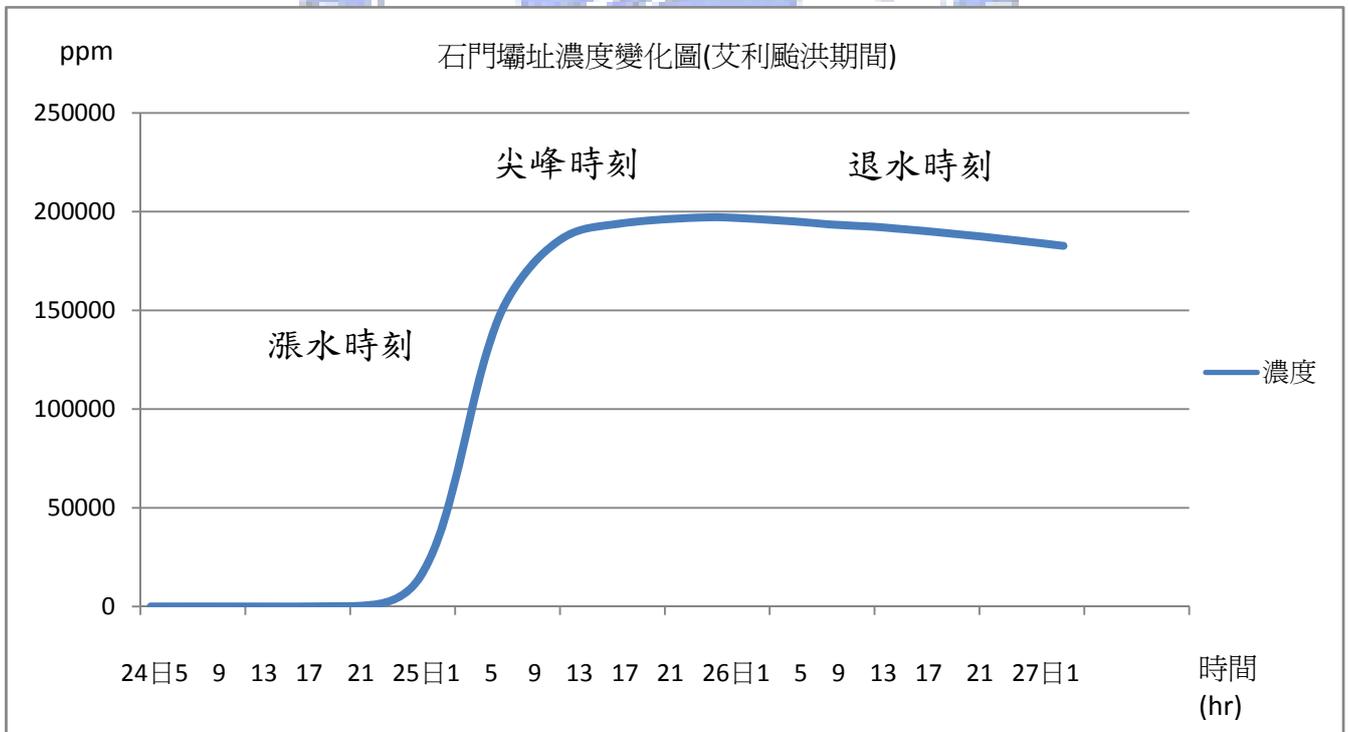


圖 5-8 石門水庫壩址濃度變化圖(艾利颱風期間)

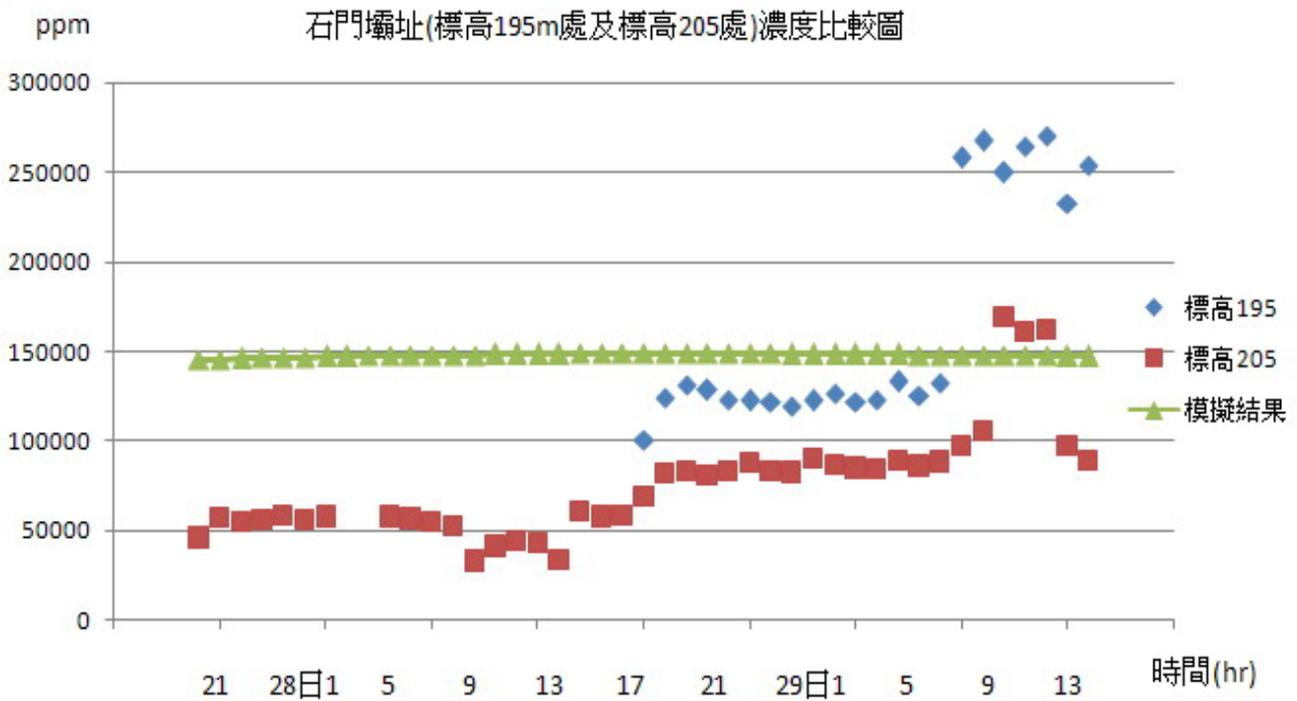


圖 5-9 石門壩址處濃度變化與實測值比較圖

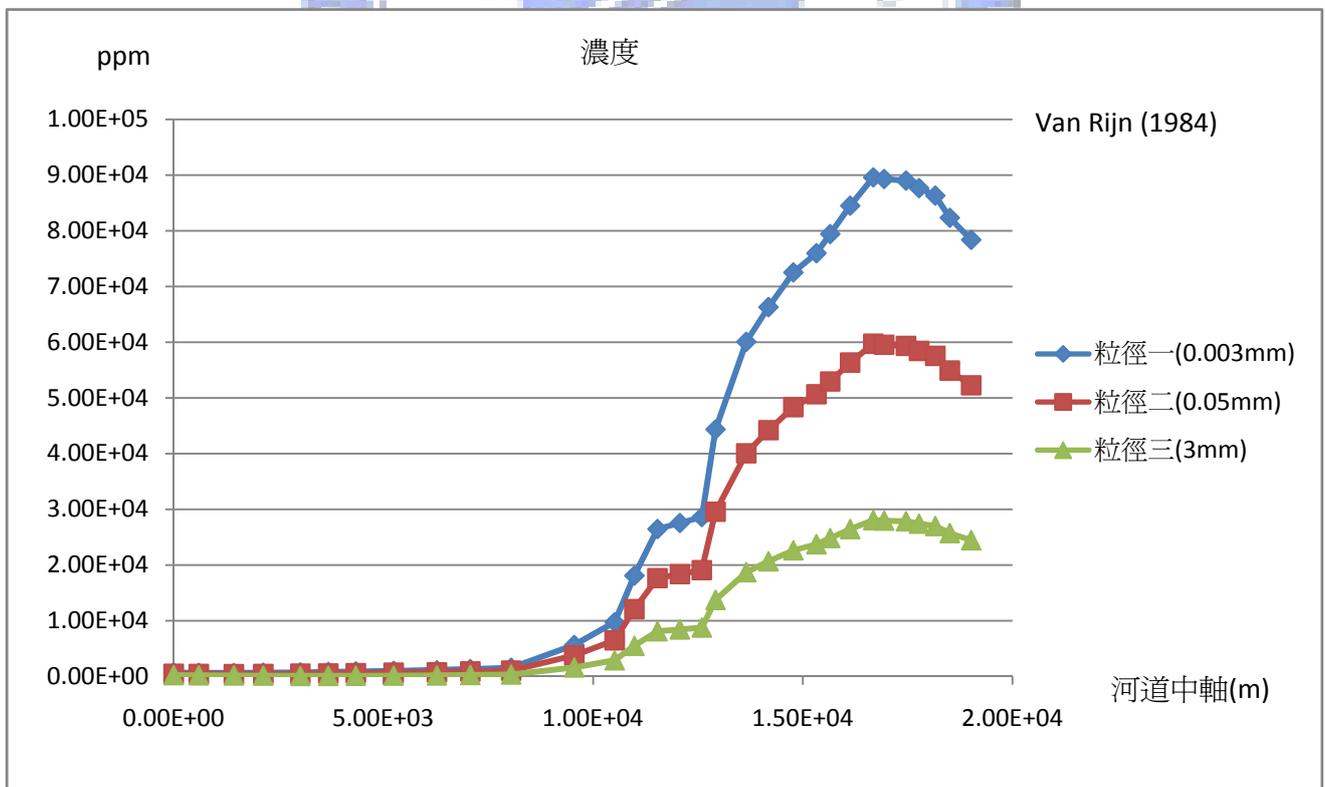


圖 5-10 模擬非凝聚性狀態下各粒徑懸浮濃度變化情形圖

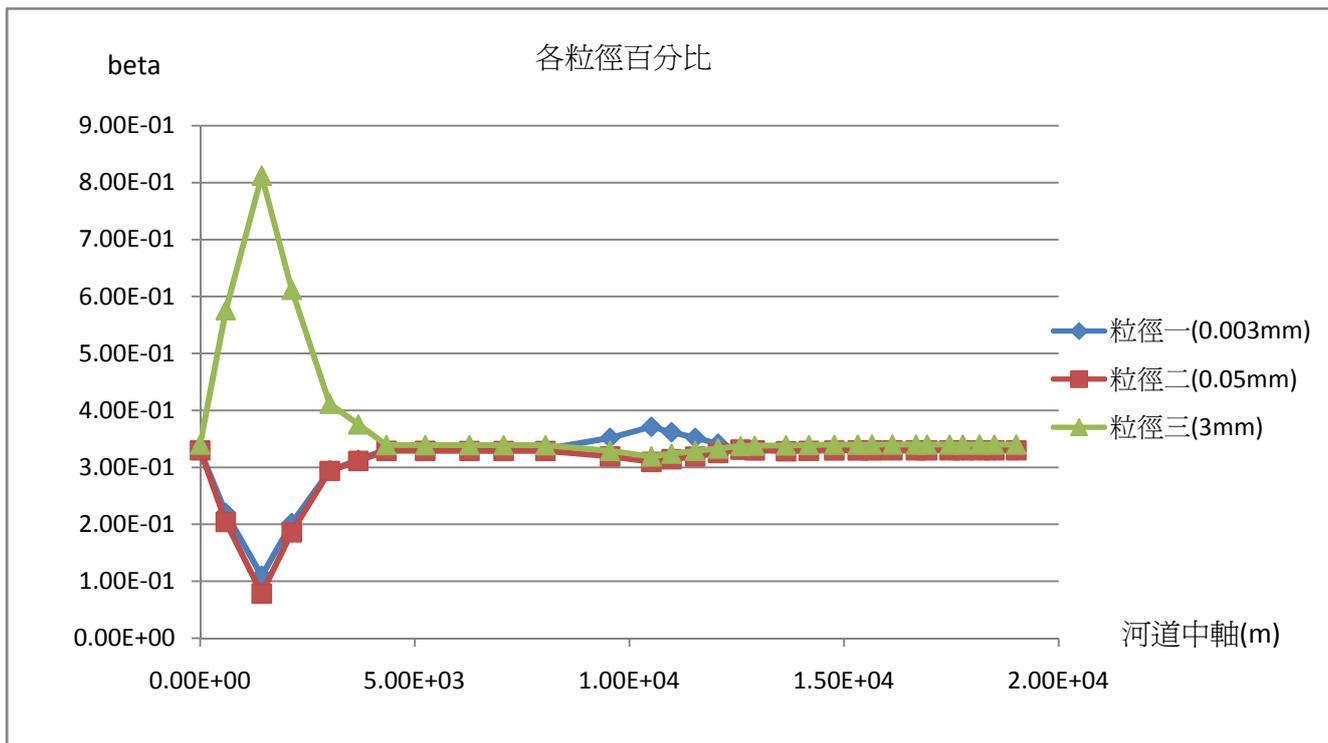


圖 5-11 石門水庫漲水時刻各粒徑組成變化情形圖(T=36000s)

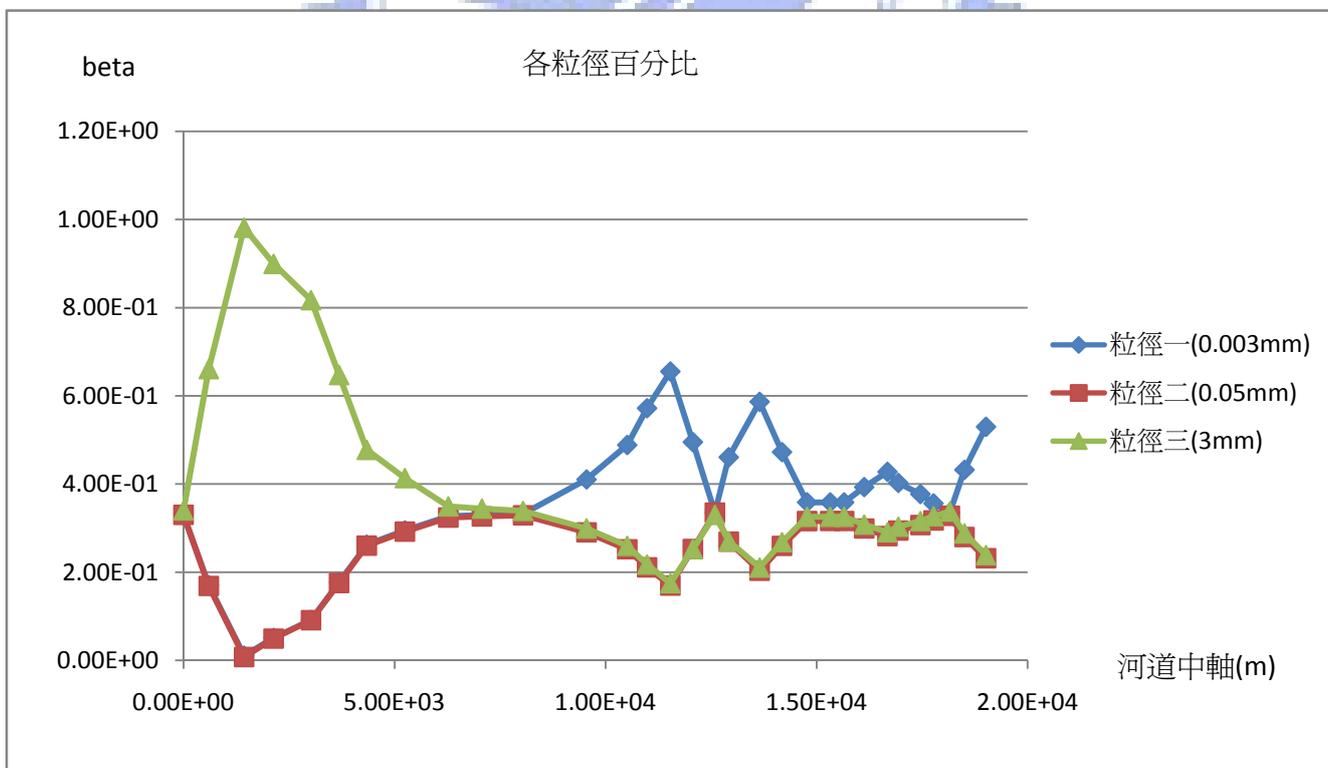


圖 5-12 石門水庫尖峰時刻各粒徑組成變化情形圖(T=93600s)

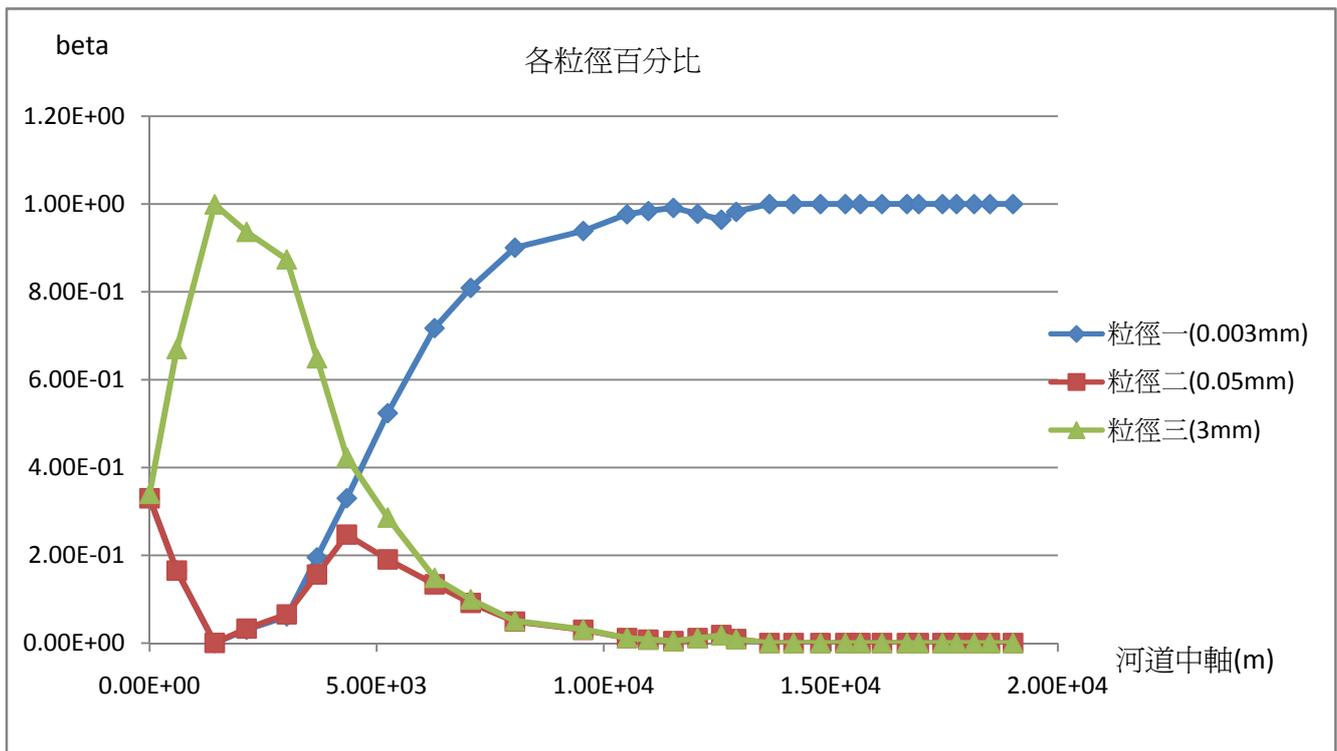


圖 5-13 石門水庫模擬結束各粒徑組成變化情形圖

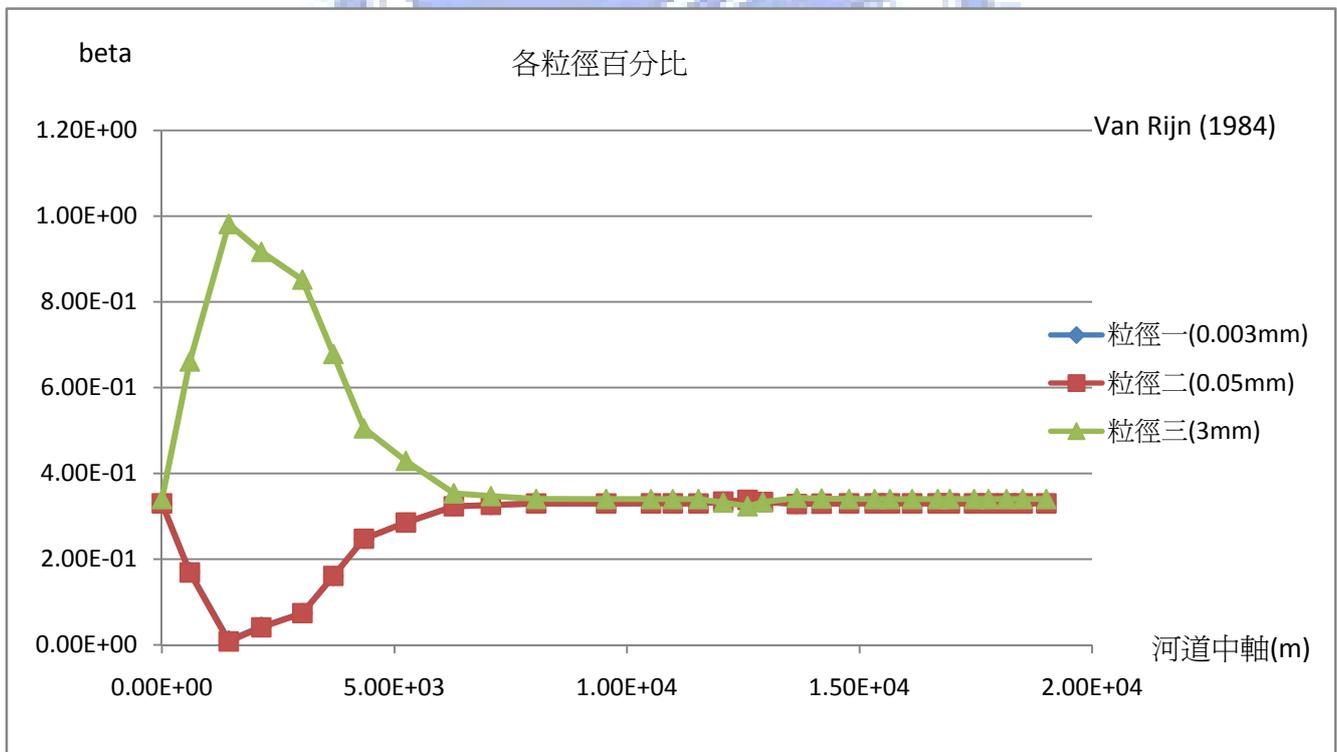


圖 5-14 模擬非凝聚性狀態下各粒徑組成變化情形圖