

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

集水區泥砂運移概念模式探討分析

A Conceptual Model
for Sediment Movement in Watershed



研究生：李昀軒

指導教授：楊錦釗 博士

謝德勇 博士

中華民國九十九年七月

集水區泥砂運移概念模式探討分析

A Conceptual Model
for Sediment Movement in Watershed

研究生：李昶軒

Student: Yun-Hin Li

指導教授：楊錦釗

Advisor: Jinn-Chuang Yang

謝德勇

Te-Yung Hsieh

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis Submitted to Civil Engineering

College of Engineering

Nation Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

謝 誌

承蒙恩師 楊教授錦釗與謝博士德勇於論文研究期間之悉心指導，與研究上之協助，使得本論文得以順利完成，在此謹致由衷的敬意與感謝。在論文審定期間，感謝口試委員許教授少華與賴教授進松之細心匡正與寶貴建議，使本論文更臻完善。

感謝就學期間研究室胤隆學長、世偉學長、浩榮學長、建華學長、弘恩學長、昇學學長、仲達學長、仁凱學長、柏傑學長、振家學長、歆淳學姐、俊宏學長、全謚學長、冠曄學長、宇翔學長於課業與生活上的提攜與照顧，亦感謝同學明儒、俊騰、勁頤、新詠、群玲、綺雯、仁猷在研究生活中的陪伴。

同時，由衷感謝研究室之學弟妹幫忙與扶持。

最後謹以本論文獻給我親愛的父母與妹妹，感謝你們長久以來對我無條件的付出與支持，給我最大的力量與溫暖。

集水區泥砂運移概念模式探討分析

學生：李昀軒

指導教授：楊錦釗 博士

謝德勇 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究旨在發展一集水區泥砂遞移概念模式，以分析坡地泥砂遞移率與控制點泥砂產量。此概念模式首先將集水區細分成眾多網格，並以地文參數為基礎，利用最大坡降法建立坡地水砂運移路徑。接著藉由崩塌模式推估坡地泥砂來源(忽略地表沖蝕)，搭配以線性水庫概念建構的坡地泥砂遞移模式，進行坡地泥砂推移與控制點泥砂產量分析。

本研究先以設計案例進行集水區測試模式模擬結果之合理性。再將此概念模式應用於石門水庫，以艾利颱風事件為例，估算集水區坡地泥砂遞移率與控制點之泥砂產量(歷線)及粒徑分佈。

關鍵詞:線性水庫、泥砂遞移率、崩塌模式。

A Conceptual Model for Sediment Movement in Watershed

Student : Yun-Hin Li

Advisors : Jinn-Chuang Yang

Te-Yung Hsieh

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a conceptual model to analyze the sediment delivery ratios and sediment yield in watershed. The key concept of the model is to divide watershed into numerous grids and use the maximum slope method to establish the migration paths of sediment based on physiographic parameters. Then, a landside model is used to estimate the sediment inflow (neglect surface erosion).

In conjunction with the model of the sediment delivery ratio of slope constructed by following the linear reservoir concept, the movement of sediment and the sediment yield in watershed can be first was examined analysed.

This conceptual model was tested on the basis of hypothetically designed cases to examine its reliability. The conceptual model was then applied to Shihmen Reservoir watershed during Typhoon Aere to estimate the sediment delivery ratio of the watershed, the sediment yield of the control point (sediment hydrograph), and the distribution of the diameter of sediment particles.

***Keywords: Linear reservoir , Sediment Delivery Ratio, Shallow
landslide model***



目錄

謝誌.....	I
摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XII
符號說明.....	XIV
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	3
1-3 研究方法.....	9
1-4 章節介紹.....	10
第二章 集水區泥砂運移概念模式建立.....	11
2-1 模式架構.....	11
2-2 集水區系統化.....	11
2-2-1 集水區網格劃分.....	11
2-2-2 網格流向.....	12
2-3 崩塌模式.....	15

2-4 坡地泥砂遞移模式.....	15
2-4-1 理論基礎.....	15
2-4-2 輔助方程式：.....	17
2-4-3 數值方法.....	21
第三章集水區泥砂運移模式測試.....	23
3-1 參數代表意義探討.....	23
3-2 泥砂運移測試.....	24
3-3 控制點泥砂產量測試.....	25
第四章石門水庫案例之應用.....	33
4-1 地理背景.....	33
4-2 集水區網格劃分與流向分析.....	33
4-3 崩塌模擬結果.....	34
4-4 泥砂遞移模擬參數說明.....	35
4-5 模擬結果.....	36
4-5-1 泥砂粒徑對遞移率之影響分析.....	36
4-5-2 控制點泥砂產量(歷線)分析.....	44
第五章 結論與建議.....	47
5-1 結論.....	47
5-2 建議.....	48

參考文獻.....	49
附錄一 崩塌模式理論架構.....	52
附錄二 模式測試之後續分析.....	55



圖目錄

圖 1- 1 不同區域間沖積物輸砂率與集水區面積之關係	4
圖 1- 2 SDR 與流域面積之關係圖(Roehl, 1962)	8
圖 1- 3 台灣地區水庫集水區之面積與 SDR 之關係圖	8
圖 1- 4 研究流程圖	10
圖 2- 1 模式主要流程圖	11
圖 2- 2 集水區劃分為網格示意圖	12
圖 2- 3 八流向網格演算法示意圖	13
圖 2- 4 八流向網格演算法示意圖	14
圖 2- 5 線性水庫示意圖	16
圖 2- 6 線性水庫概念應用於泥砂運移示意圖	16
圖 3- 1 單點崩塌示意圖	24
圖 3- 2 泥砂遞移測試	25
圖 3- 3 模擬集水區示意圖	26
圖 3- 4 模擬集水區高程圖	27
圖 3- 5 CASE(1) 中水深 $H=0.1\text{m}$	28
圖 3- 6 CASE(1) 中水深 $H=0.2\text{m}$	28
圖 3- 7 CASE(1) 中水深 $H=0.3\text{m}$	29
圖 3- 8 CASE(1) 中水深 $H=0.4\text{m}$	29

圖 3- 9 CASE(1) 中水深 $H=0.5m$	30
圖 3- 10 CASE(2) 礫石(Gravel)泥砂到達量.....	31
圖 3- 11 CASE(2) 砂(Sand)泥砂到達量.....	31
圖 3- 12 CASE(2) 沉泥(Silt)泥砂到達量.....	32
圖 3- 13 CASE(2) 黏土(Clay)泥砂到達量.....	32
圖 4- 1 石門水庫之 DTM.....	34
圖 4- 2 艾利颱風石門水庫崩塌地點	35
圖 4- 3 石門水庫子集水區劃分圖	36
圖 4- 4 子集水區之出口控制點	37
圖 4- 5 白石子集水區各時刻泥砂到出口控制點 A.....	38
圖 4- 6 白石子集水區各時刻泥砂到出口控制點 E.....	39
圖 4- 7 泰崗子集水區各時刻泥砂到出口控制點 B.....	40
圖 4- 8 泰崗子集水區各時刻泥砂到出口控制點 E.....	40
圖 4- 9 玉峰子集水區各時刻泥砂到出口控制點 C.....	41
圖 4- 10 玉峰子集水區各時刻泥砂道出口控制點 E.....	42
圖 4- 11 三光子集水區各時刻泥砂到出口控制點 D.....	43
圖 4- 12 三光子集水區各時刻泥砂到出口控制點 E.....	43
圖 4- 13 石門子集水區各時刻泥砂到出口控制點 A.....	44
圖 4- 14 石門水庫到達出口時泥砂量歷程	46

圖 b- 1 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.1m$	55
圖 b- 2 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.2m$	56
圖 b- 3 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.3m$	56
圖 b- 4 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.4m$	57
圖 b- 5 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.5m$	57
圖 b- 6 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.1m$	58
圖 b- 7 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.2m$	59
圖 b- 8 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.3m$	59
圖 b- 9 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.4m$	60
圖 b- 10 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.5m$	60
圖 b- 11 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.1m$	61
圖 b- 12 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.2m$	62
圖 b- 13 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.3m$	62
圖 b- 14 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.4m$	63
圖 b- 15 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.5m$	63
圖 b- 16 Case(2)水深=0.2m 礫石案例.....	64
圖 b- 17 Case(2)水深=0.2m 砂案例.....	64
圖 b- 18 Case(2)水深=0.2m 沉泥案例.....	65
圖 b- 19 Case(2)水深=0.2m 黏土案例.....	65

圖 b- 20 Case(2)水深 $H=0.3\text{m}$ 礫石案例	66
圖 b- 21 Case(2)水深 $H=0.3\text{m}$ 砂案例	66
圖 b- 22 Case(2)水深 $H=0.3\text{m}$ 沉泥案例	66
圖 b- 23 Case(2)水深 $H=0.3\text{m}$ 黏土案例	67
圖 b- 24 Case(2)水深 $H=0.4\text{m}$ 礫石案例	67
圖 b- 25 Case(2)水深 $H=0.4\text{m}$ 砂案例	68
圖 b- 26 Case(2)水深 $H=0.4\text{m}$ 沉泥案例	68
圖 b- 27 Case(2)水深 $H=0.4\text{m}$ 黏土案例	68
圖 b- 28 Case(2)水深 $H=0.5\text{m}$ 礫石案例	69
圖 b- 29 Case(2)水深 $H=0.5\text{m}$ 砂案例	69
圖 b- 30 Case(2)水深 $H=0.5\text{m}$ 沉泥案例	70
圖 b- 31 Case(2)水深 $H=0.5\text{m}$ 黏土案例	70



表目錄

表 2- 1 漫地流速度常數表	20
表 3- 1 Case(1)測試條件與結果.....	27
表 3- 2 Case(2)測試條件與結果.....	30
表 4- 1 依據美國標準篩為例分為八種粒徑	36
表 4- 2 子集水區之總崩塌點與總崩塌量	37
表 4- 3 白石子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率	38
表 4- 4 泰崗子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率	39
表 4- 5 玉峰子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率	41
表 4- 6 三光子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率	42
表 4- 7 石門子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率	44
表 4- 8 白石子集水區泥砂遞移率.....	45
表 4- 9 泰崗子集水區泥砂遞移率	45
表 4- 10 玉峰子集水區泥砂遞移率	45
表 4- 11 三光子集水區泥砂遞移率	45
表 4- 12 石門子集水區泥砂遞移率	45
表 4- 13 石門水庫總到達量與遞移率	46
表 b- 1 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$	55
表 b- 2 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$	58

表 b- 3 Case(1)捕獲率 $ev=0.9$	61
表 b- 4 Case(2)水深 $H=0.2m$ 時.....	64
表 b- 5 Case(2)水深 $H=0.3m$ 時.....	65
表 b- 6 Case(2)水深 $H=0.4m$ 時.....	67
表 b- 7 Case(2)水深 $H=0.5m$ 時.....	69



符號說明

SDR	: 泥砂遞移率；
e	: 集水區泥砂產量；
y	: 傳輸到達出口處泥砂產量；
R	: 集水區分水嶺平均高程與泥砂產量河床高程之間的差值；
L	: 泥砂產量量測處至集水區分水嶺的主河道長；
L1	: 所有級序河川總長；
SLP	: 主河道坡度百分比；
A	: 流域面積；
RO	: 年逕流量；
Rc	: 河川密度；
$r_h(t)$: 重力沉積 r_g 與粒子滲透 r_{in} ；
r_g	: 單位時間重力沉積；
r_{in}	: 單位時間粒子滲透；
C	: 平均含砂量；
w_t	: 重力沉降速度；
w_{in}	: 粒子滲透速度；
H	: 平均水深；
t_f	: 泥砂重力沉積；



- t_{in} : 泥砂粒子滲透時間；
- e_v : 捕獲率 (trapping efficiency)；
- C_{in} : 集水區上游泥砂含量；
- C_{out} : 集水區經過植被下游泥砂含量；
- d_i : 與河道之距離；
- v_i : 泥砂傳輸時之流速；
- S_i : 坡度；
- a_i : 流經植被之係數；
- t_h : 集流時間；



第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

台灣地理位置位於太平洋島弧上，處於歐亞大陸板塊與菲律賓板塊交接處，因中央山脈縱貫，地形為東西陡峭、南北狹長，河川也大多為東西流向。台灣河川特性為溪流長度短，而且河床坡度隨山區地形的變化，河床坡度大，雖然平均降雨量超過2500mm，但大多集中於5~10月之間，主要為颱風季節，且其降雨強度大；而降雨量又在山區明顯較大於平地，受限於降雨之時間空間不均影響，河谷狹窄，庫容有限，故水庫雖多，總容量卻不大。

伴隨著經濟發展與人口增加的壓力，人們對土地的需求亦與日劇增，開發需求轉往山坡地，山區土地利用及土地覆蓋型態改變，更加促使集水區坡面土層的不穩定，然而台灣地質年代較新，山區土壤鬆軟，加上颱風帶來大量的豪雨以及人為不當的開發，造成土壤受到沖蝕、崩塌機會增加。

集水區之整治偏重水土保持，較少著墨泥砂產出量多寡對中下游影響。當土砂來源的不足，將致下游河川中的結構物面臨到淘刷與侵蝕危機；另一方面過多土砂產量，將造成水庫淤積致使水庫壽命縮短。可見土砂產量對中下游河道穩定平衡，及水庫淤積之問題是一不可忽略的課題，如何精確的掌握土砂生產的估算對於集水區經營管理上有

其重要的意義。

本研究目的即是希望能以土砂生產的機制及泥砂遞移概念為基礎，發展集水區泥砂運移概念模式，期能較為合理的推估控制點之泥砂產量。



1-2 文獻回顧

泥砂遞移是研究流域侵蝕與泥砂產量相關性的關鍵與焦點 (Walling, 1983)，為解釋集水區內泥砂侵蝕、運移、堆積過程的一種簡化途徑，但須將集水區視為一整體來考量，方能聯繫各種泥砂輸送的複雜作用機制(錢寧，1985)。

關於泥砂遞移率之研究，常涉及時間與空間上範圍的定義，景可等人(1993)則指出關於泥砂遞移率的定義，無須做過多的限制與修正，因為泥砂產量、沖蝕量等均已明確說明其研究的時間空間範疇。

集水區泥砂遞移率分析，可分為坡面泥砂遞移率及河道泥砂遞移率兩部分，而集水區某一斷面處之流出泥砂總量，稱為控制點泥砂產量。

泥砂遞移率 (Sediment Delivery Ratio; SDR)(Walling 1988, Soil Erosion Research Methods) 定義為某集水區上游泥砂流失量和出口泥砂產量的比值，可表示為

$$SDR=y/e \quad (1-1)$$

式中，

e：集水區泥砂產量；y：傳輸到達出口處泥砂產量

在泥砂遞移率推估的公式上，流域集水區面積為最被探討的變數之一(Walling，1983)，而遞移率亦因不同的泥砂粒徑、速度、水深、

寬度、長度、坡降、重力加速度等複雜因素而有所變異。遞移率集水區特性之相關性早已廣泛地為學者所研究；陳樹群等人(1999)依據 Walling(1994)泥砂運移之面積增大遞移率減少之概念，推估台灣八個水庫(西勢、翡翠、白河、曾文、石門、明德、德基、霧社)之泥砂平衡結果與遞移情形，且泥砂總產量可以分由崩塌與沖蝕兩部分而來。在集水區沖蝕與泥砂產量的研究方面，學者普遍認為集水區面積具有一定之影響能力，根據美國諸多水庫淤砂分析資料顯示，產砂量與流域面積之 0.8 次方成正比，而 Walling(1983)及 Kleo(1979)亦指出集水區輸砂之相關性，可表示如下圖 1-1 所示。

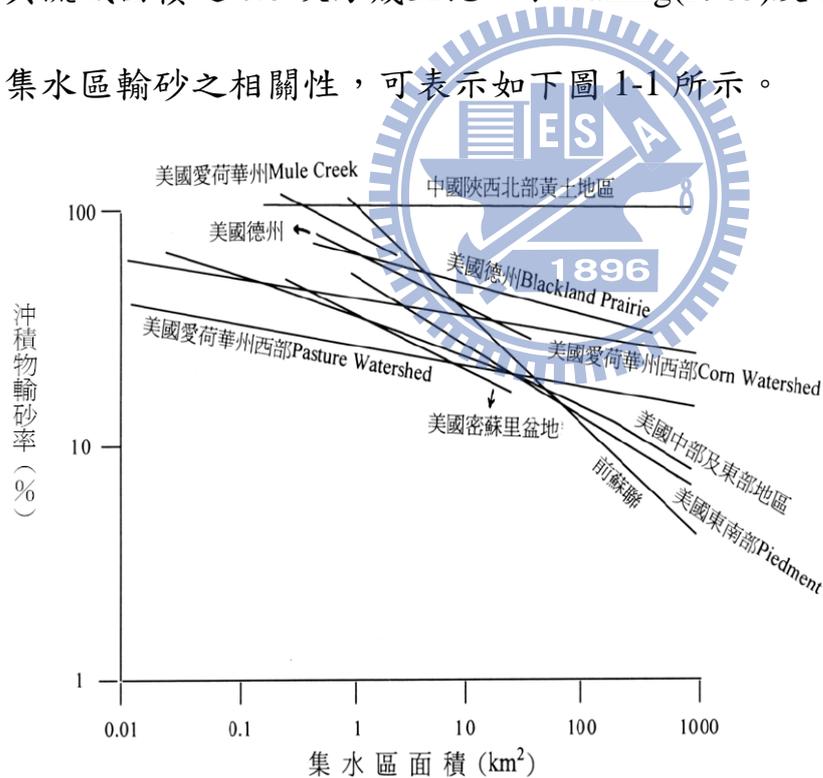


圖 1-1 不同區域間沖積物輸砂率與集水區面積之關係

(摘錄自 Walling , 1983)

將各相關研究分述於下：

(一) Maner and Barnes (1953) 從德州Blackland Prairie 地區中，便發現泥砂遞移率與集水區面積有明確重要之相關性。

(二) 美國農業水土保持局根據美國德州及奧克拉荷馬州之資料，分析得出泥砂遞移率隨集水區面積增加而遞減之關係。

(三) Maner (1958) 以起伏量比來表示泥砂遞移率的變量，關係式為：

$$\log\text{SDR}=2.94259-0.82362\log R/L$$

式中，R：集水區分水嶺平均高程與泥砂產量河床高程之間的差值。

L：泥砂產量量測處至集水區分水嶺的主河道長。

(四) Roehl (1962) 分析美國東南山麓15 個流域的資料，求得兩組關係式其中泥砂遞移率與L1，R的關係式為：

$$\log\text{SDR}=2.88753-0.83291\log R/L1$$

泥砂遞移率只與L1的關係式為：

$$\text{LogSDR}=1.62791-0.64818\log L1$$

式中，R：集水區分水嶺平均高程與泥砂產量河床高程之間的差值。

L1：所有級序河川總長。

顯示L1愈長，泥砂在到達出口前愈易沉積。

(五) Williams and Berndt(1972)研究美國德州Brushy Creek 之資料得到一關係式為：

$$SDR=0.627SLP^{0.403}$$

式中，SLP：主河道坡度百分比。

(六) Trimble (1975) 研究美國東南部地區，發現地上的一些因素如落差、集水區面積、河川級數、河川長度、分歧比、起伏量比及排水密度等均與泥砂遞移率有相當之關聯性。

(七) Mutchler and Bowie (1976) 以美國密西西比河流域之Pigeon Roost Creek 為例，發展泥砂遞移率公式得：

$$SDR=0.448-0.006A+0.010RO$$

式中，A：流域面積，RO：年逕流量

(八) Vanoni (1977) 與Williams (1977) 曾以泥砂遞移率之觀念探討泥砂運移特性。據其研究與泥砂遞移率相關之因子主要為集水區起伏量比、集水區面積、分岔比及主流河道平均坡度。

(九) Mou 和Meng (1980) 研究中國陝西達利河流域資料，得泥砂遞移率關係式為：

$$SDR=0.29+1.371\ln Rc-0.0251\ln A$$

式中，Rc：河川密度 $\frac{L_0}{A}$ (1/km)，L₀：集水區內河川總長度(km)

A：集水區面積(km²)

(十) Roehl (1990) 分析美國 15 個流域資料，求得 SDR 關係式：

$$\log \text{SDR} = 1.91349 - 0.33852 \log A$$

A：集水區面積(km²)

(十一) Ichim (1990) 以羅馬尼亞之摩爾達維雅台地與喀爾巴阡山等地區進行研究，發現泥砂遞移率與河川級序呈反向關係。

(十二) 陳中憲 (1988) 以濁水河流域為對象所進行之研究指出，泥砂遞移率主要與集水區起伏量比 (R/L) 及觀測區段與主流河道平均坡度比值Rs有關。



式中，R：集水區內最高點至最低點的高程差

L：集水區主流長度

S_{ci}：i級序河川之平均坡度

S_{ci-1}：i-1級序河川之平均坡度

(十三) 賴益成 (1998) 集水區泥砂遞移率之推估研究中求得集水區泥砂遞移率關係式為：

$$\text{SDR} = 165.67 * A^{-0.24}$$

式中，A：集水區面積(km²)

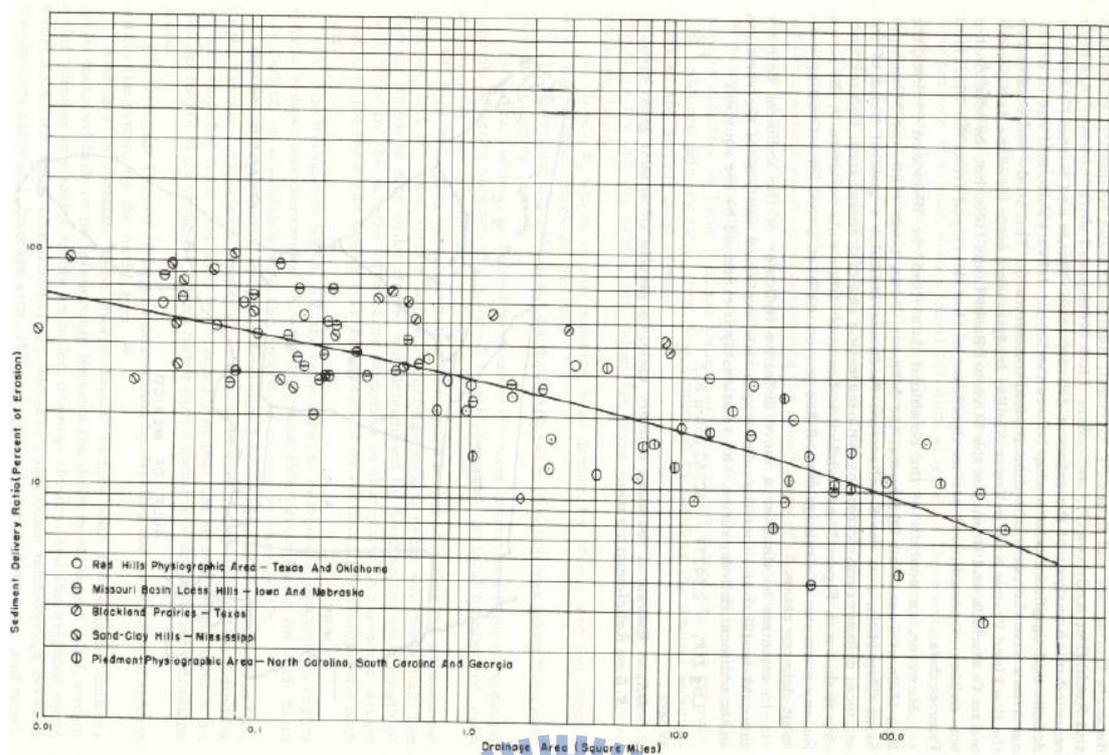


圖 1-2 SDR 與流域面積之關係圖(摘錄自 Roehl, 1962)

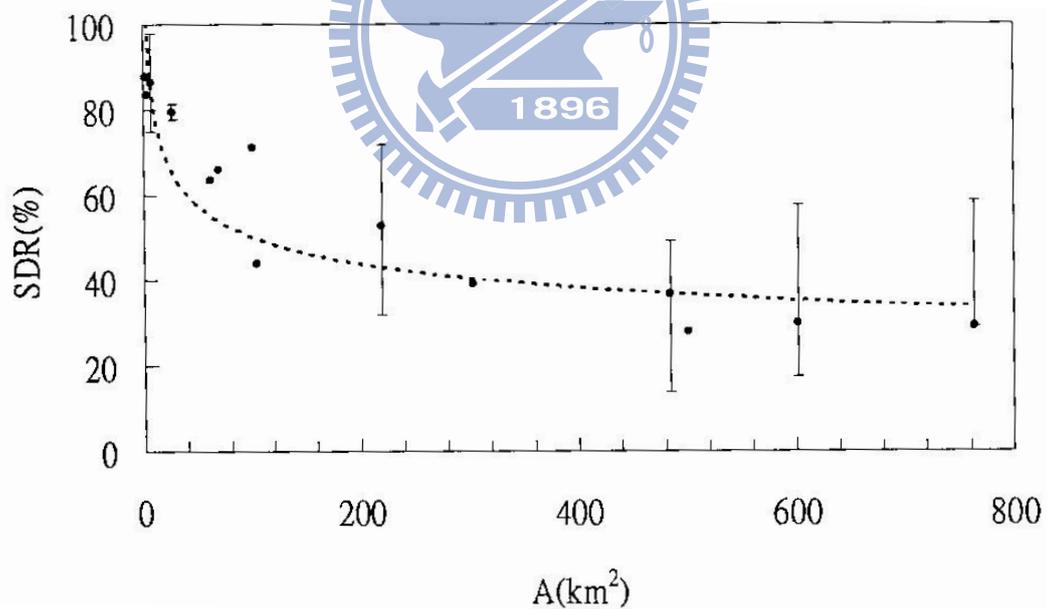


圖 1-3 台灣地區水庫集水區之面積與 SDR 之關係圖

綜觀上述泥砂遞移率的分析，大部分研究著重於現場觀測資料，進行迴歸分析計算，未考量泥砂運動時的物理機制，如粒徑、運移時

間...等，只能從量測資料中得到泥砂總量，然而本研究以簡易的概念模式，主要是模擬坡地上泥砂傳遞，探討泥砂傳輸之物理現象，推估每個時刻泥砂到達量(歷線)及粒徑組成分佈。

1-3 研究方法

本研究為了解集水區泥砂輸送過程，本研究建立模式進行估算，內容包括物理機制之建立與模擬程式之撰寫，討論泥砂輸送歷程。

本研究方法先將龐雜的集水區簡化為網格，使其具有空間分散及參數集塊特性 (spatially varied and lumped parameter)的概念模式後，再以集水區坡地崩塌與表土沖蝕做為泥砂產量，以簡易的線性水庫概念，考量物理機制條件下計算集水區之產砂量，然後以數值模擬方式進行泥砂遞移之量化計算。最後整合上述之概念模式以實際案例進行模式之測試。

1-4 章節介紹

本研究分為六章，各章之要旨如下：

第一章 研究之動機及研究目的、方法概略說明本研究前人研究與架構以及本文組織介紹。

第二章 模式建立，數值參數模式建立，理論基礎說明模式之數值方法。

第三章 模式測試，假設案例模擬。

第四章 應用所發展之數值模式於實際案例之應用，估算其泥砂產量，並討論其結果。

第五章 結論與建議，針對模擬的結果提出具體之結論與建議。

研究流程由下圖 1-4 表示

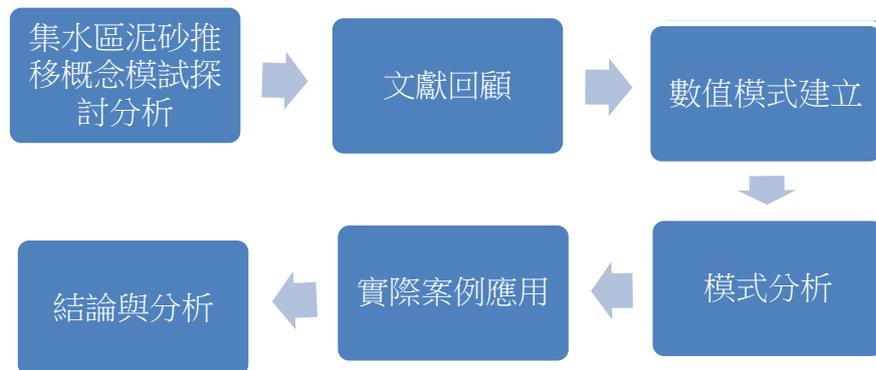


圖 1-4 研究流程圖

第二章 集水區泥砂運移概念模式建立

2-1 模式架構

就模式整體架構(如圖 2-1 所示)而言，首先需將整個集水區系統化，先將集水區網格之劃分，再決定各網格之流向，網格流向可以估算各網格內泥砂運移之時間。由崩塌模式的模擬結果可求得各網格崩塌量，視為泥砂來源，接著利用坡地泥砂遞移模式，即可求得控制點泥砂產量。

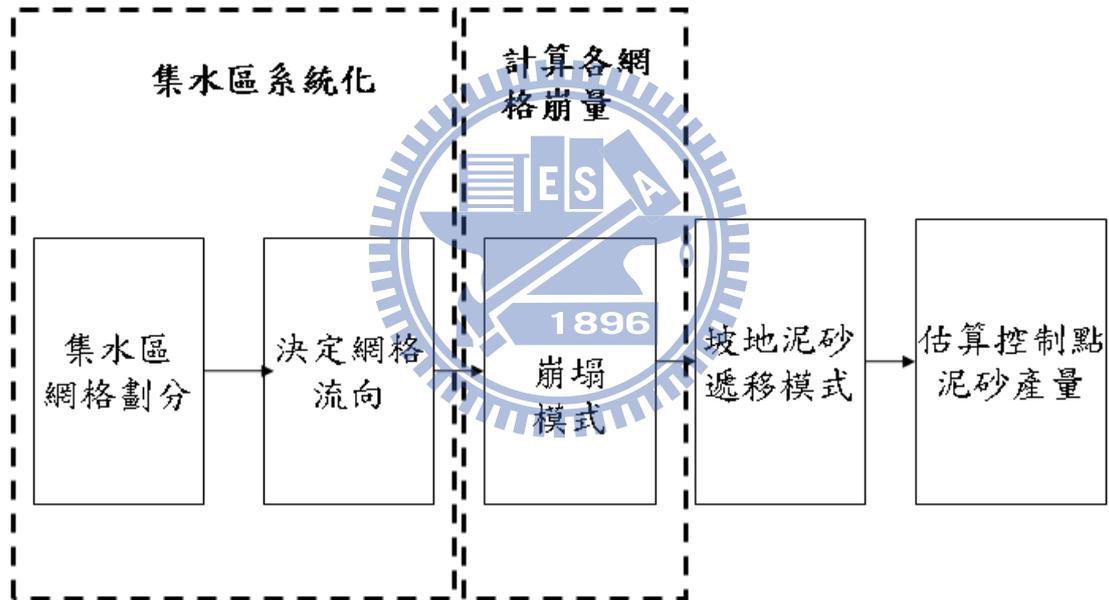


圖 2-1 模式主要流程圖

2-2 集水區系統化

2-2-1 集水區網格劃分

如前所述，基於實際集水區之地形、土壤、地質及土地利用等地理、水文狀況相異，如果將整個集水區視為一個整體，不僅難以分析，也無法獲得滿意的成果，因此將集水區細分成許多較小之網格(如圖

2-2所示)，使每一網格之地文、水文條件趨於均一，再針對每一網格進行分析，藉此獲得各項參數並瞭解其特性後，再將網格集結原先所探討之整個集水區。

由下圖(2-2)所示

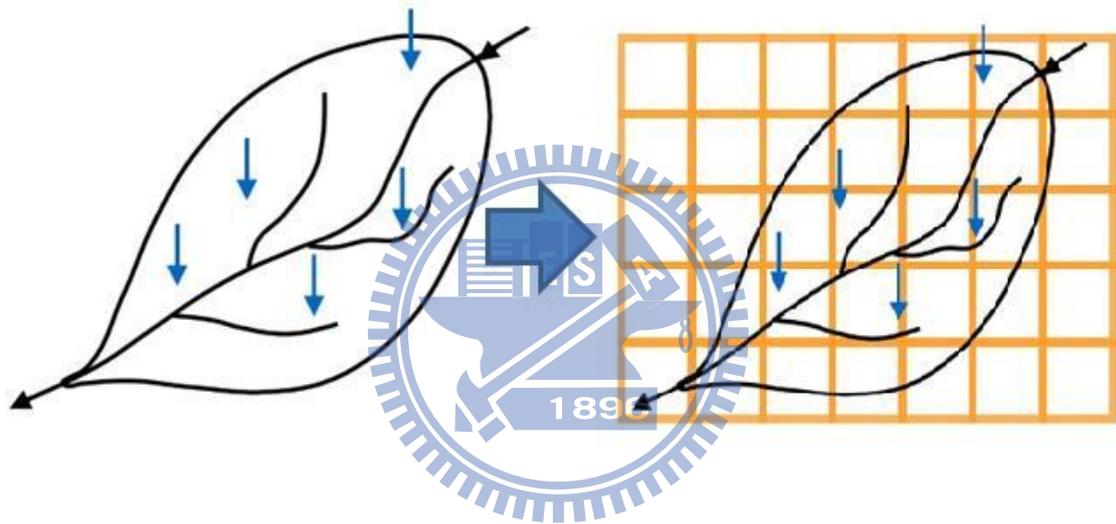


圖 2-2 集水區劃分為網格示意圖

2-2-2 網格流向

現今網格流向方法眾多，包括1.八流向演算法(Deterministic 8,D8)
，2. Rho8流向演算法(Randomized single flow direction, Rho8) ，3.
Aspect-driven 流向演算法(Aspect-driven kinematic routing lgorithm) ，
4. 多流向演算法(Multiple flow direction, MFD)) ，5.DEMON流向演

算法(Digital Elevation Model Networks, DEMON), 6. 無限流向演算法 (Deterministic Infinity, D-infinity)等。本研究選擇最簡易網格流向方法, 在此選用八流向法或稱為D8法或最大坡降法。在此演算法中, 定義該網格點之值為其網格中心點之高程。而以一個3×3網格所組成之移動視窗為一基本運算單位, 中心網格之模擬水流可往周圍八個網格之方向進行, 而流入高差最大(亦即坡度最陡)之鄰點網格中。此種演算法為在DEM網格點上計算水流路徑與累積流量之最普遍常用之方法, 由O`Callaghan and Mark在1984年所提出。

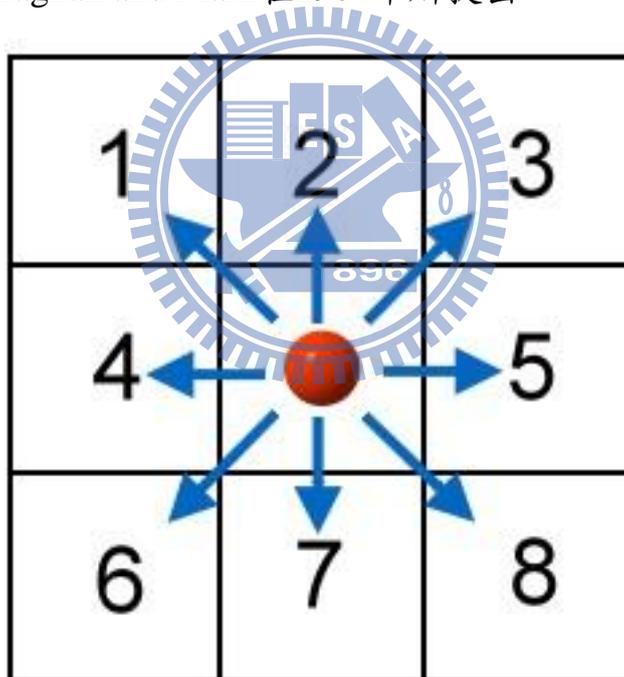


圖 2- 3 八流向網格演算法示意圖

此演算法假設每個網格上均模擬一個單位深度的水量, 而後藉由坡度、坡向的分析來求取每一網格的水流方向, 再根據這水流方向, 我們可以藉此判定泥砂運移之路徑, 其演算步驟為:

- 1、 決定出計算每一網格點其周圍之八個網格之距離與高程資訊。
- 2、 根據周圍之八個網格之高程資料，求得計算網格點的流向，舉例說明(如圖2-4, 途中括號內三個數字分別為平面X,Y座標與高程Z值), 首先我們知道各點之X,Y座標與高程Z值, 由各點之高程與距離(計算時考慮距離加權問題, 對角線網格 $\times 1/\sqrt{2}$ 之權重) 可以得到坡度, 並以坡度最大(圖中為正下方的網格)方向視為水砂運移方向。

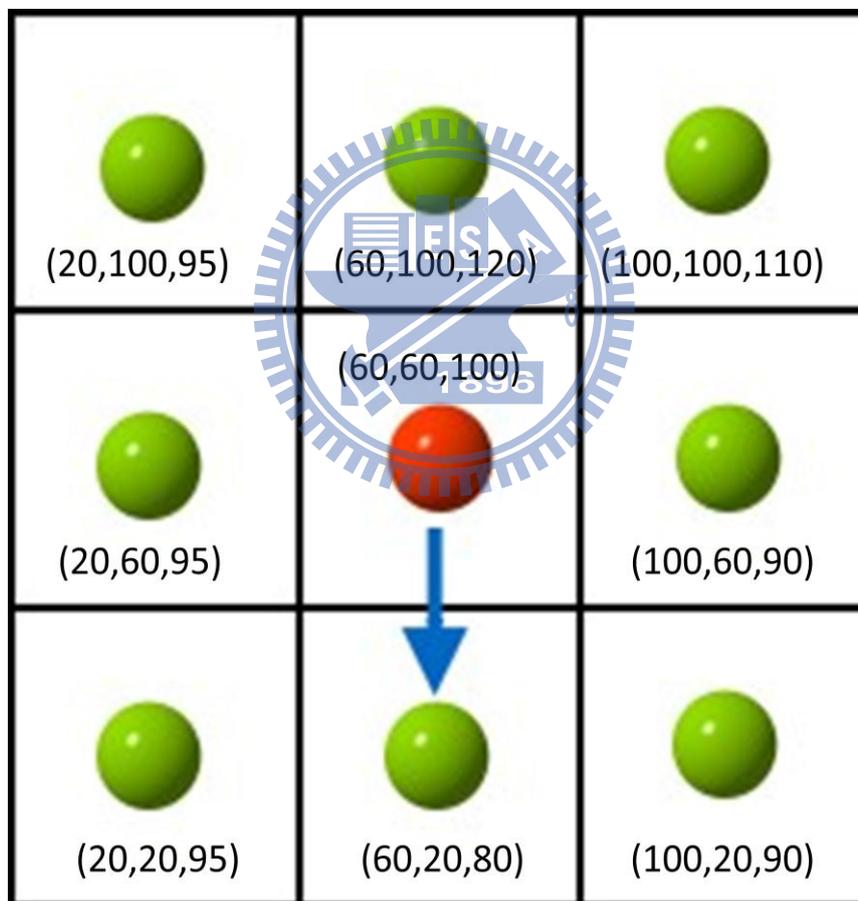


圖 2- 4 八流向網格演算法示意圖

2-3 崩塌模式

泥砂產量主要來源為淺層崩塌與地表沖蝕，目前沖蝕公式僅能算單場事件之全區沖蝕量，較無法準確的分析出各個網格之泥砂產量，故本研究暫不考慮沖蝕部分的影響，泥砂來源主要以坡地崩塌之為主。本研究在估算泥砂來源之崩塌模式部分，將選用Tsai and Yang (2006)所發展之坡地崩塌模式。該模式以力學為基礎，利用無限邊坡理論建立定率模式，相關理論架構可參考附錄一。

2-4 坡地泥砂遞移模式

2-4-1 理論基礎

本研究坡地遞移模式採用線性水庫概念做為模式理論基礎。線性水庫之概念模式早期多用於水文分析最具實用者為英國水文學者Nash (1957) 所研創之二參數數學模式，可示意，如圖2-5所示：

$I(t)$ 為入流量， $Q(t)$ 為出流量，兩者間之差值即為蓄水量 $S(t)$ 之時間變化率。

$$I(t) - Q(t) = dS(t)/dt \quad (2-1)$$

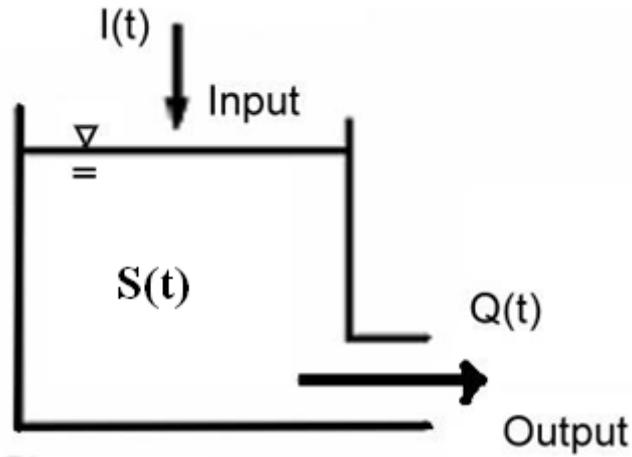


圖 2-5 線性水庫示意圖

因泥砂在地表上傳遞會產生沉積現象，因此當線性水庫概念應用於坡地泥砂遞移分析時，就必須多考量沉積因素。如圖 2-6 所示， $e(t)$ 為集水區泥砂產量，視為線性水庫概念模式之入砂量， $y(t)$ 為傳輸到達出口處泥砂到達量， $r(t)$ 為沉積量， $S(t)$ 為泥砂儲蓄量。

$$\frac{dS(t)}{dt} = e(t) - r(t) - y(t) \quad (2-2)$$

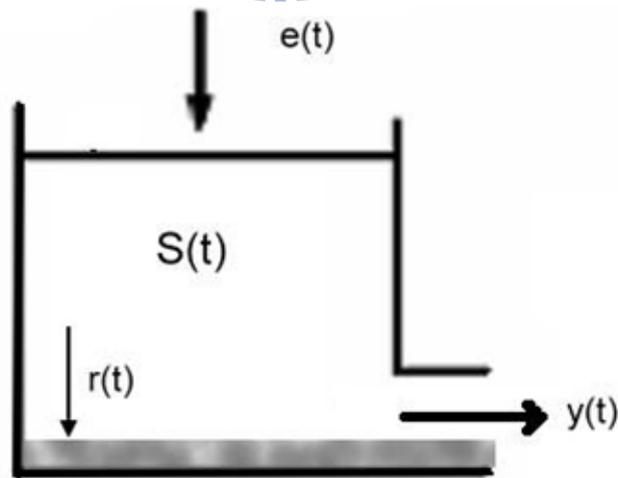


圖 2-6 線性水庫概念應用於泥砂運移示意圖

在山坡上泥砂沉積物理現象主要發生於三個部分：1.重力沉積

(gravitational settling) 2. 顆粒入滲 (particle infiltration) 3. 過濾粒子表面粗糙度 (filtration particles)。

重力沉積與顆粒入滲主要為垂直於地表的通量，而過濾粒子表面粗糙度為覆蓋土壤表面之植被，緩慢的漫地流延長泥砂運移時間與增加泥砂沉積物，該現象在此考慮為山坡捕獲率(trapping efficiency)之效應。

線性水庫概念模式配合質量守恆原理可推求出坡地泥砂遞移控制

方程式：

$$\frac{dS(t)}{dt} = e(t) - r_h(t) - y(t) \quad (2-3)$$

$$y(t) = (1 - e_v) S(t) / t_h \quad (2-4)$$

$$r_h(t) = r_g + r_{in} \quad (2-5)$$

$r_h(t)$ 為重力沉積與粒子滲透所殘留無法被帶往出口的泥砂量； e_v 為過濾粒子表面粗糙度所留下的泥砂產量； t_h 為泥砂在坡地傳遞時間。

2-4-2 輔助方程式：

$r_h(t)$ 為垂直作用於地表之通量，包括重力沉積 r_g 與粒子滲透 r_{in} ，

數學表示式為：

$$r_g = w_t C \approx \frac{w_t S}{H} = S / t_f \quad (2-6)$$

$$\text{其中重力沉積時間 } t_f = H / w_t \quad (2-7)$$

$$r_{in} = w_{in} C \approx \frac{w_{in} S}{H} = S / t_{in} \quad (2-8)$$

$$\text{其中粒子滲透時間 } t_{in} = H/w_{in} \quad (2-9)$$

式中， r_g 與 r_{in} [$M/L^2/T$] 為重力沉積與粒子滲透之通量， C 為平均含砂量 [M/L^3]， w_t 與 w_{in} [L/T] 為重力沉降與粒子滲透速度， H [L] 為平均水深， t_f 與 t_{in} [L] 為泥砂因重力沉積與粒子滲透時間。

重力沉積主要影響因素為沉降速度，而沉降速度主要影響因子為粒徑大小，在此使用史托克定律(Stoke' s law)求其通量：

$$w_t = \frac{g}{18\mu} (\rho_s - \rho) d^2 \quad (2-10)$$

式中， ρ_s 與 ρ 分別為泥砂密度與水之密度 [M/L^3]， μ 為水的動力黏滯係數 [M/L^3]， d 為泥砂粒徑 [m]， g 為重力加速度 [m/s]。

粒子滲透的入滲速度接近於垂直飽和土壤，飽和土壤的滲透係數相較於滲透係數較大的不飽和土壤，坡面水流條件下，入滲速度 w_{in} 在不同區域土壤種類有不同之數值，應依據實地量測資料做設定。

坡地泥砂運移動力主要為漫地流，在漫地流通過地表時上泥砂運移時間與泥砂沉積物受植被、地表構造物影響，捕獲率 e_v (trapping efficiency)定義為：

$$e_v = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (2-11)$$

式中， C_{in} 為集水區上游泥砂含量， C_{out} 為集水區經過植被下游泥砂含量。

本研究中因泥砂運移主要為漫地流，故集流時間本研究定義為：

水流由集水區內水力上之最遠點，流至集水區出口所需時間。

概念集流時間， t_h 可以下式估算(Jain and Kothyari, 2000)：

$$t_h = d_i / v_i \quad (2-12)$$

式中， d_i ：與河道之距離[m]， v_i ：泥砂傳輸時之流速[m/s]。

漫地流流速可以下式表示：

$$v_i = a_i \sqrt{S_i} \quad (2-13)$$

又可將(2-12) 改寫為

$$t_h = d_i / a_i \sqrt{S_i} \quad (2-14)$$

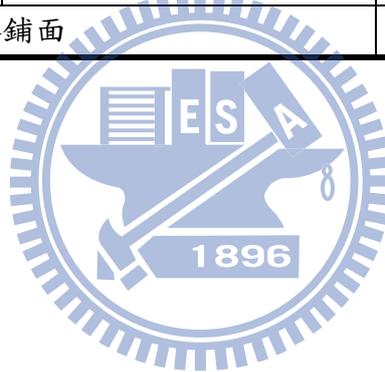
式中， S_i ：坡度， a_i ：漫地流速度係數

漫地流速度係數，本研究採用李光敦(2005)水文學書中之建議值
(如表 2-1)。



表 2-1 漫地流速度常數表

地表覆蓋		$a_i(m/s)$
森林	茂密矮樹叢	0.21
	稀疏矮樹叢	0.43
	大量枯枝落葉	0.76
草叢	百慕達草	0.30
	茂密草叢	0.46
	矮短草叢	0.64
	放牧地	0.40
農耕地	有殘株	0.37
	無殘株	0.67
農作地	休耕地	1.37
	等高耕	1.40
	直行耕作地	2.77
道路鋪面		6.22



2-4-3 數值方法

(2-3), (2-4), (2-5)式可進一步改寫為：

$$S(t) = t_h y / (1 - e_v) \quad (2-15)$$

$$\frac{t_h}{(1 - e_v) y} = e^{-r_h - y} \quad (2-16)$$

$$\frac{t_h}{(1 - e_v)} \frac{dy}{dt} = e^{-\left(\lambda_h \frac{t_h}{(1 - e_v)} + 1\right) y} \quad (2-17)$$

$$\text{其中, } \lambda_h = \frac{1}{t_f} + \frac{1}{t_{in}} = \frac{w_t + w_{in}}{H} \quad (2-18)$$

推導出的控制方程式，性質上屬於非線性常微分方程式，而就其時間變數而言，則是常見的初始值問題 (initial-value problem)。因此在問題的運算及分析過程中，必須先給定其初始條件 (initial conditions)，然後才可配合適當的數值方法來加以積分求解。在本文選用已廣泛應用的四階 Runge-Kutta 法。

不管是幾階的 Runge-Kutta 法，在其積分計算中都是單一步驟法，也就是說對於一個一階常微分方程式 $y' = f(x, y)$ ，若要求得其 y_{n+1} 項，則只需要知道 (t_n, y_n) 的初始值就可行。因此 Runge-kutta 法顯得比其他數值方法簡便許多，其四階法的運算公式如下：

設一階常微分方程式 $y' = f(t, y)$ ，初始條件 (t_n, y_n)

則

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

其中：

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + hk_3)$$

上列式中 h 為 t_n 到 t_{n+1} 的距離，為步徑 (step-size)。 h 取得越小，計算結果就越為準確，不過如果 $y' = f(t, y)$ 太過於複雜，程式運算也必需花費較長之時間。

當給定各相關初始值條件，即可在模式中配合適當的步徑，運用 Runge-kutta 積分公式可算出：在 $t = t_0 + ih$ 時之變量，其

$$y = y_0 + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$


第三章集水區泥砂運移模式測試

3-1 參數代表意義探討

由文獻回顧中，許多前人研究皆指出集水區之遞移率與集水區面積、坡度、與長度占有非常大的關係，本章節將先探討各參數所代表之意義，供後續模式測試參考。

本研究中泥砂運移時間為 $t_h = \frac{d_i}{a_i \sqrt{S_i}}$ ，由方程式可知運移時間 t_h 與距離 d_i 成正比關係，當距離越大時所需運移時間就越長。植被糙度越大代表著漫地流受植被影響流速較小，然後運移時間也會越長。坡度 S_i 越大時，代表著坡面越陡當坡面越陡時，流速也會較大，相較於流速變大，當然所需的運移時間也就越短。

接著探討重力沉積與粒子滲透之參數 r_h ，其重力沉積之速度與粒子滲透之速度，兩者都與粒徑 d 關係較大，當粒徑 d 較大時，其沉降與滲透速度也較大，所以相同水砂條件下當粒徑較大時會比粒徑小容易沉積於山坡上，故泥砂到達量也會相對較小。

捕獲率 e_v 部分，漫地流運移過程中皆會受到植被影響，由此可知當 e_v 較大代表著捕獲量越多，捕獲量越多當然出口泥砂到達量也就越少，本研究在此項因無法求得實際植被數量，故無法得知捕獲率與植被之準確關係，在模擬部分為假設值，其值為介於0到1之間。

漫地流水深 H ，當水深較深時，流量也會較大，水深較深流量較

大其所能夠運移至出口之泥砂也會較多，故水深與到達量也為正比關係。

本研究目前不考慮水深 H 值之詳細估算方法，故在此以合理範圍之水深當作為輸入參數。

3-2 泥砂運移測試

本案例主要以單點崩塌後泥砂之運移歷程，來進行模式的測試如圖 3-1 所示，單點崩塌測試分別以 0.01 小時、1 小時、10 小時三個時間點來檢視泥砂傳遞量變化情況。捕獲率 e_v 以 0、0.5、0.99 設定，粒徑設定為 0.001mm、0.01mm、0.1mm、1mm、10mm 進行分析。如下圖

3-2 所示



圖 3-1 單點崩塌示意圖

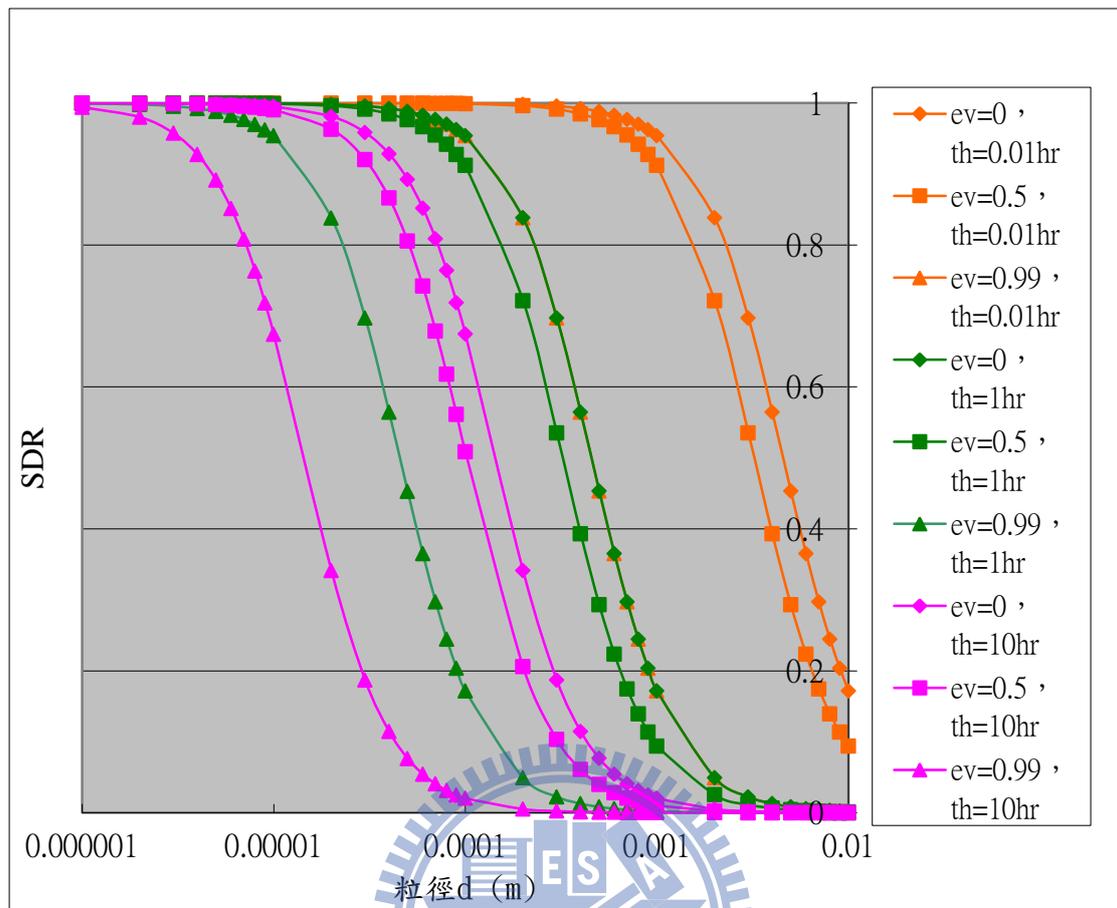


圖 3-2 泥砂遞移測試

模擬結果如圖 3-2 所示可以發現在運移時間 $t_h=0.01$ 小時，泥砂遞移率(SDR)比 $t_h=10$ 小時來的大；在粒徑較大時，因為重力沉積與粒子滲透速度較快，故 SDR 也會越來越小，大約在 5mm 時，其 SDR 漸漸趨近於 0；運移時間較短，捕獲率對於細顆粒影響並不是非常顯著，而隨著時間變大，當時間拉長成 10 小時，較可以看出對細顆粒之影響。

3-3 控制點泥砂產量測試

章節 3-2 不固定其控制點，主要是檢驗不同運移時間對於泥砂到達量之變化，本節以假設之集水區與模擬事件，固定其出口點來分析

粒徑 d 、捕獲率 e_v 、水深 H 與泥砂到達量之變化。

假設案例模擬事件之集水區條件如下：以左右高程及坡度相同之對稱集水區如圖 3-3 與 3-4 所示，網格為 $40\text{m}\times 40\text{m}$ ，在時間 $t=0$ 時，同時發生崩塌且崩塌深度為 1m ，植被係數 a_i 為 0.7626 。

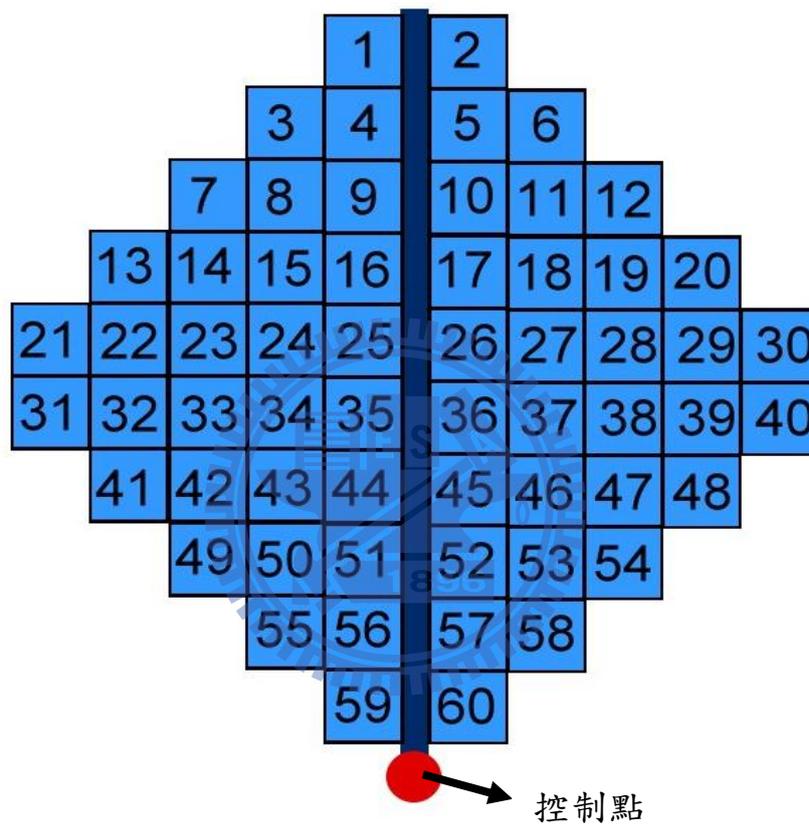


圖 3-3 模擬集水區示意圖

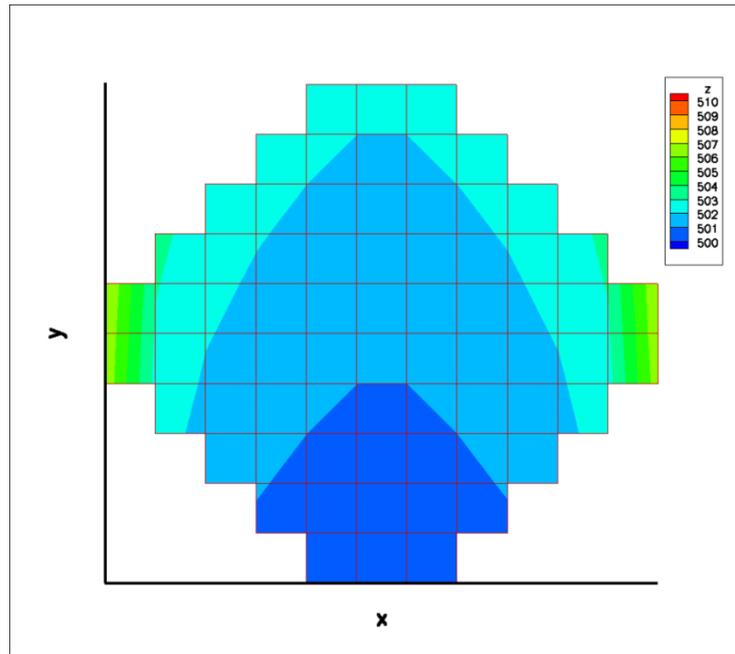


圖 3-4 模擬集水區高程圖

水深部分，在相同捕獲率下，以 10 種不同粒徑藉由改變水深來探討泥砂到達量的變化。模擬結果如表 3-1 與圖 3-5~圖 3-9 所示

表 3-1 Case(1)測試條件與結果

SDR 單位為百分比(%)

粒徑	4.76	2	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.01	0.001	0.0001
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
e_v	0									
水深	0.1(m)									
SDR	0.68	3.66	12.69	18.14	27.49	44.53	74.63	91.85	99.91	99.99
水深	0.2(m)									
SDR	1.34	6.95	21.83	29.72	41.86	60.46	85.14	95.71	99.95	99.99
水深	0.3(m)									
SDR	1.99	9.95	28.94	38.10	51.18	69.13	89.47	97.09	99.97	99.99
水深	0.4(m)									
SDR	2.63	12.69	34.70	44.53	57.80	74.63	91.85	97.80	99.98	99.99
水深	0.5(m)									
SDR	3.25	15.23	39.51	49.68	62.80	78.45	93.35	98.23	99.98	99.99

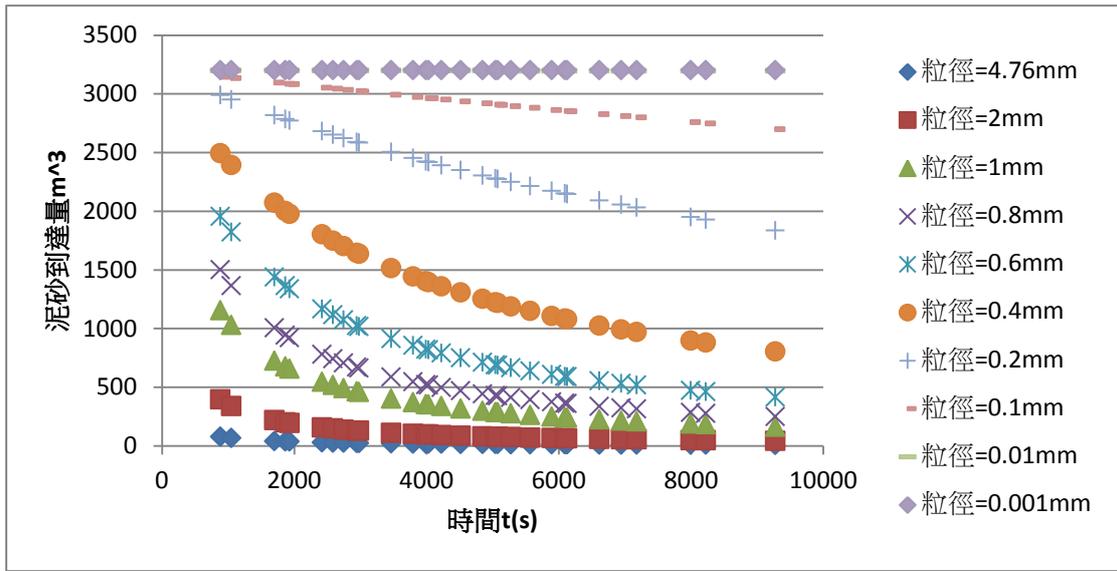


圖 3- 5 CASE(1) 中水深 H=0.1m

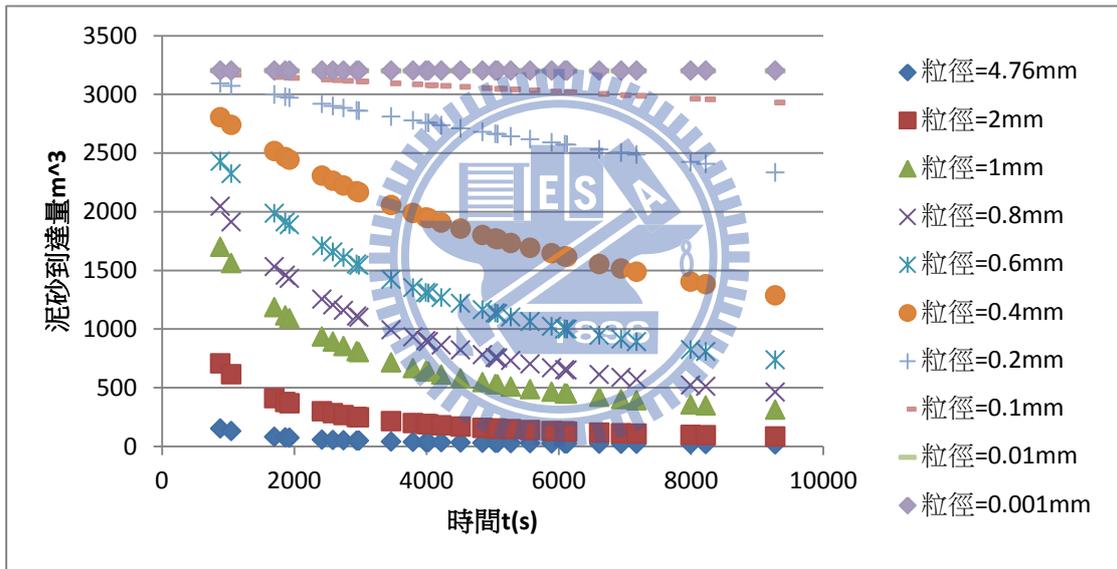


圖 3- 6 CASE(1) 中水深 H=0.2m

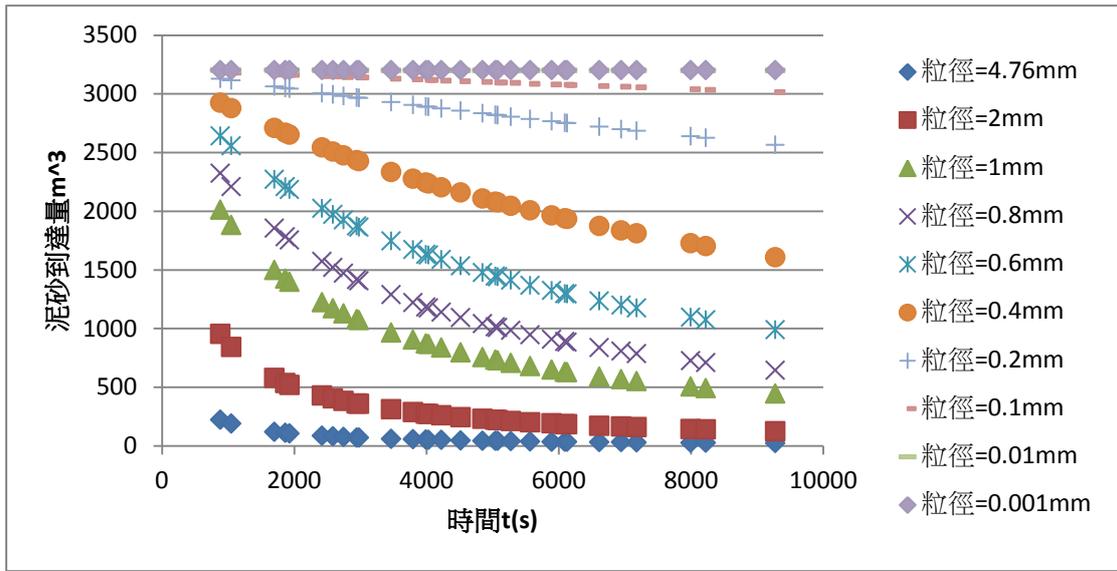


圖 3- 7 CASE(1) 中水深 H=0.3m

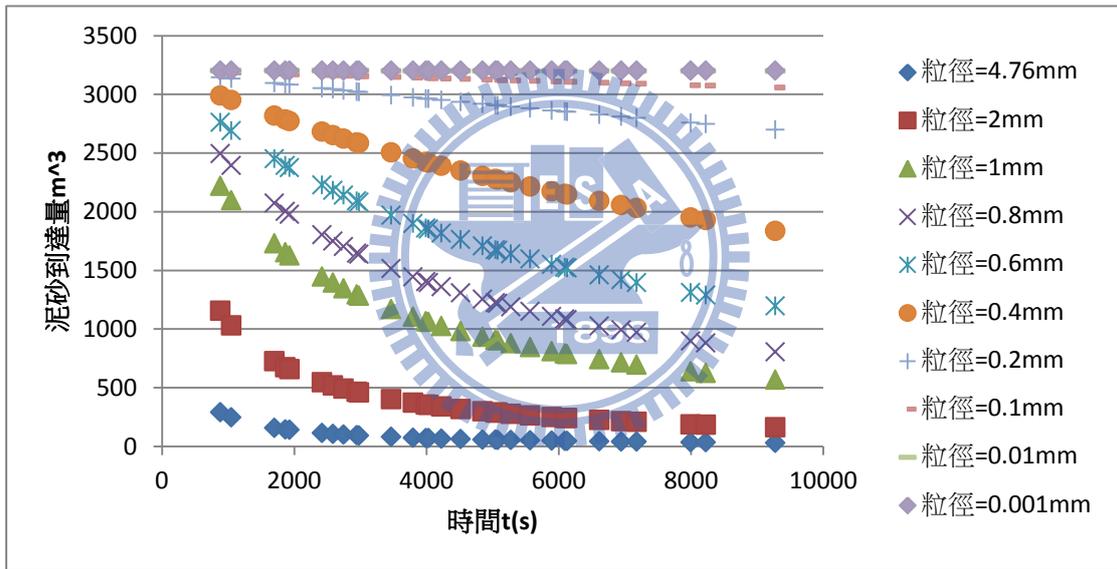


圖 3- 8 CASE(1) 中水深 H=0.4m

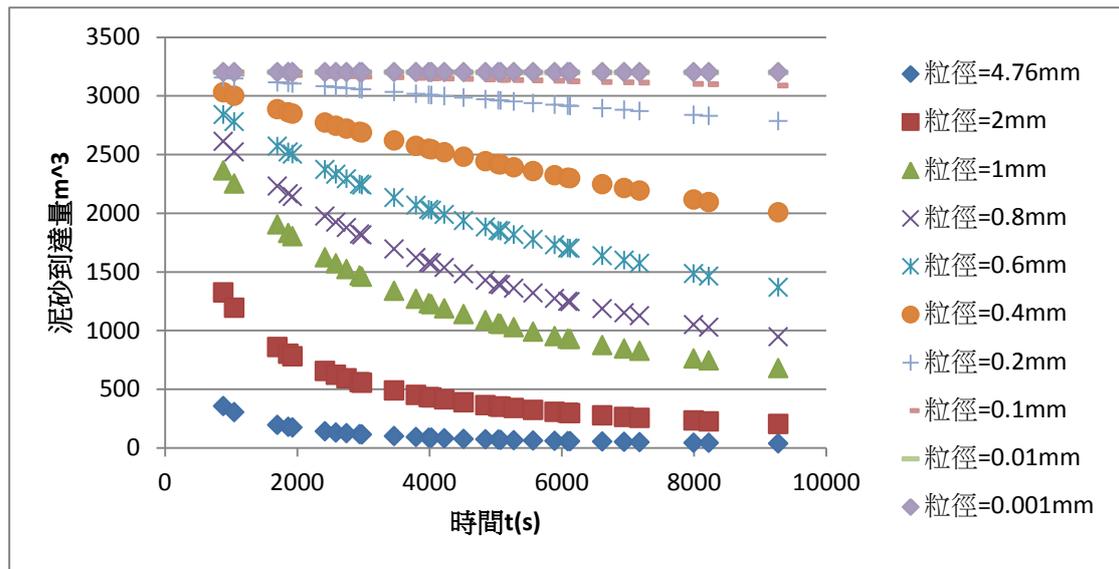


圖 3- 9 CASE(1) 中水深 H=0.5m

本研究在比較不同水深對應不同捕獲率 e_v 時，亦模擬 $e_v=0.3$ 、 $e_v=0.6$ 、 $e_v=0.9$ 對應水深 $H=0.1m$ 、 $H=0.2m$ 、 $H=0.3m$ 、 $H=0.4m$ 、 $H=0.5m$ 之泥砂到達量，此部分可以參考附錄二。

在粒徑部分，分為礫石(Gravel)、砂(Sand)、沉泥(Silt)及黏土(Clay)，比較相同水深不同捕獲率 e_v 對於泥砂到達量之變化，表 3-2 及圖 3-10~圖 3-16 所示

表 3- 2 Case(2)測試條件與結果

SDR 單位為百分比(%)

種類	水深	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR
Gravel	0.1m	0	0.68	0.3	0.48	0.6	0.27	0.9	0.07
Sand			3.66		2.61		1.2		0.39
Silt			95.33		93.48		89.23		68.59
Clay			99.64		99.49		89.23		96.53

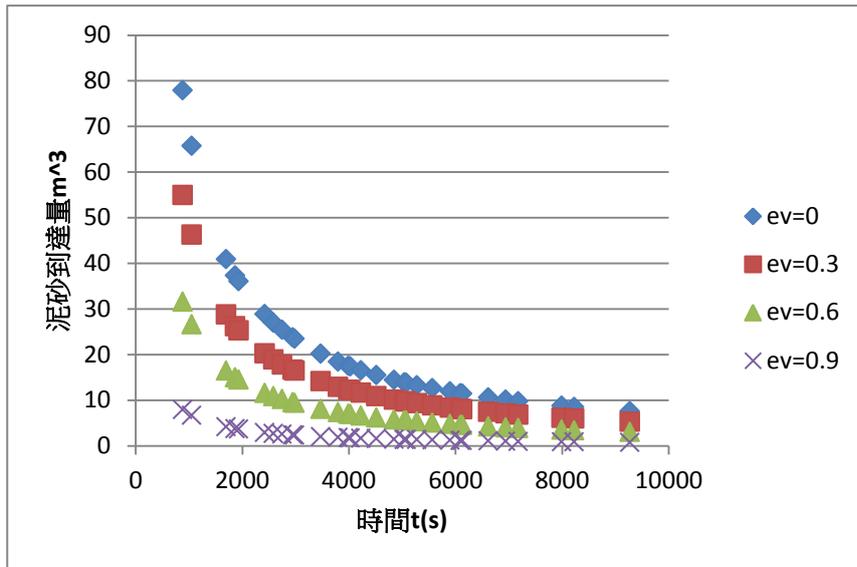


圖 3- 10 CASE(2) 礫石(Gravel)泥砂到達量

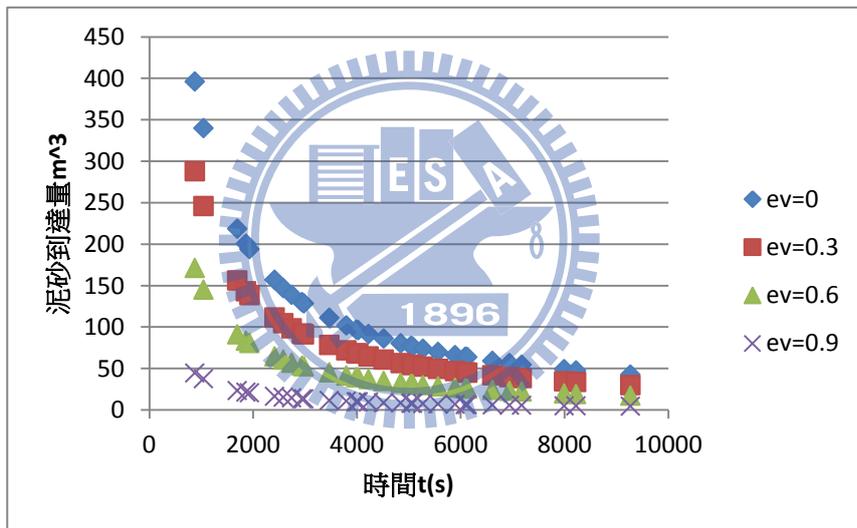


圖 3- 11 CASE(2) 砂(Sand)泥砂到達量

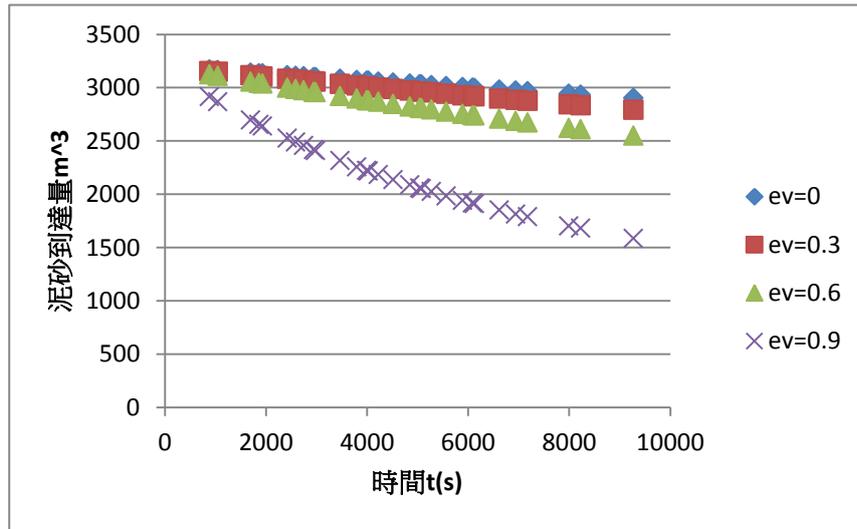


圖 3- 12 CASE(2) 沉泥(Silt)泥砂到達量

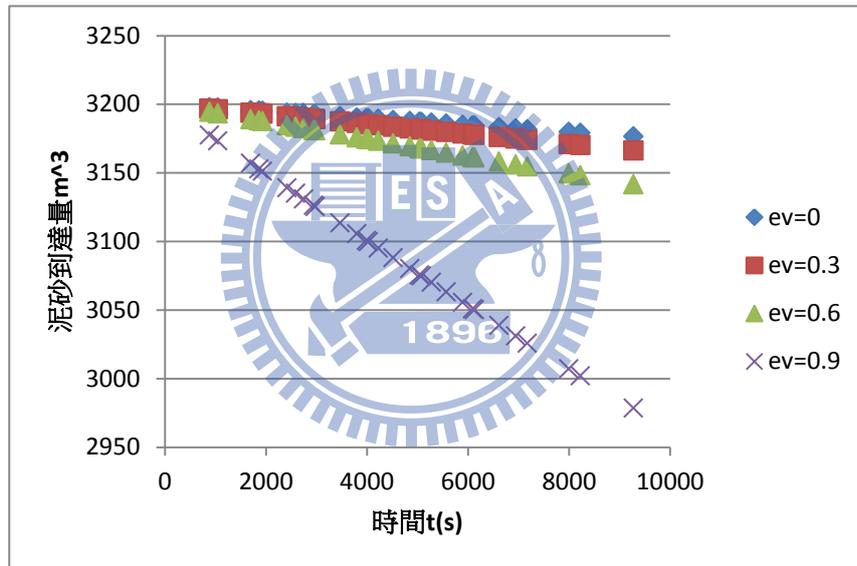


圖 3- 13 CASE(2) 黏土(Clay)泥砂到達量

本研究在比較礫石(Gravel)、砂(Sand)、沉泥(Silt)及黏土(Clay)，不同捕獲率 e_v 時，亦模擬水深 $H=0.2m$ 、 $H=0.3m$ 、 $H=0.4m$ 、 $H=0.5m$ 之泥砂到達量，此部分可以參考附錄二。

第四章石門水庫案例之應用

本章節主要為模式應用之實例，內容包括地理背景資料，模式參數給定與模式應用，模擬石門水庫集水區在艾利颱風發生崩塌時，其流域控制點泥砂到達量。

4-1 地理背景

石門水庫集水區位於雪山山脈之西北部，居於東經 $121^{\circ}10'15''$ ~ $121^{\circ}23'10''$ ，北緯 $24^{\circ}25'45''$ ~ $24^{\circ}51'20''$ ，略呈南北向之長腰形，地形大致自西北向東南逐漸增高，西北部為丘陵地帶，東南部為山岳地帶。雪山山脈主峰—雪山(3,884m)在大漢溪源頭之西約5km，自雪山向東北綿延至品田山，始分歧兩支山嶺線，圍成石門水庫集水區，此兩支山嶺線為與東面蘭陽溪、東北新店溪、西面頭前溪之分水嶺。集水區地勢大致上由南端向北方降低，區域內地形除羅浮西北端較低緩之丘陵地外，大部分均為山岳地帶，地勢起伏由海拔135m(石門水庫壩址)變化至3,529m，平均高度為1,752m，以南端的品田山為最高，呈一南北向狹長型之集水區。

4-2 集水區網格劃分與流向分析

先以地理資訊系統(ArcGIS9.2)將集水區分割成40m*40m之網格，再以地理資訊系統(ArcView3.2)之擴充套件將DTM(如圖4-1)資料匯入模組，以Hec-GeoHMS(1.0)進行集水區劃分，再以最大坡降法決定

網格流向。



4-3 崩塌模擬結果

利用Tsai and Yang (2006)所發展之坡地崩塌模式進行艾利颱風期間石門水庫之崩塌模擬。由結果可知在石門水庫集水區中共有6287個網格點發生崩塌，本研究假設崩塌發生於同一時刻，崩塌深度參考石門水庫集水區崩塌與庫區風險評估研究(3/3)，採用下式計算。

$$h = -0.0716 \times \alpha + 5.66 \quad (4-1)$$

h = 崩塌深度(m)

α = 坡度(度)

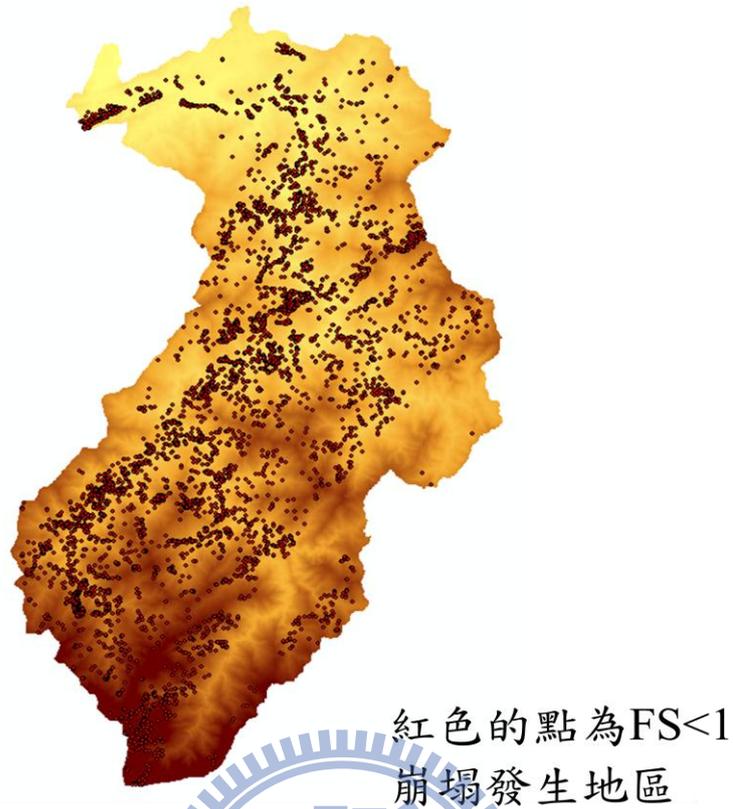


圖 4-2 艾利颱風石門水庫崩塌地點

4-4 泥砂遞移模擬參數說明

本研究為依據水土保持局石門水庫集水區特性劃分五大子集水區，分別為：石門、玉峰、三光、白石及泰岡可參考石門水庫子集水區劃分圖圖(4-3)，五個子集水區皆有集水區之控制點，模擬各時刻到各出口控制點之泥砂量與總泥砂到達量，再與整個石門水庫之控制點總泥砂到達量作比較。

在其他參數部分假定 e_v 為 0.3，水深為 0.5m，八種粒徑(表 4-1)



圖 4-3 石門水庫子集水區劃分圖

表 4-1 依據美國標準篩為例分為八種粒徑

篩號	4	10	20	40	60	100	140	200
孔目(mm)	4.76	2.0	0.84	0.42	0.25	0.149	0.105	0.074

4-5 模擬結果

4-5-1 泥砂粒徑對遞移率之影響分析

本研究把整個石門水庫，切割成 5 個集水區，分別令其出口點代號為 A、B、C、D、E(如圖 4-4 表示)，各子集水區之總崩塌點與總崩塌量如表 4-2 所示。



圖 4-4 子集水區之出口控制點

表 4-2 子集水區之總崩塌點與總崩塌量

子集水區	崩塌點	崩塌量
白石	1649 個	7500542m ³
泰崗	1276 個	5747081m ³
玉峰	991 個	4358599m ³
三光	434 個	1909019m ³
石門	1937 個	8263521.2m ³

一. 白石子集水區

此子集水區出口控制點為 A，模式模擬其泥砂到達出口控制點 A 與石門水庫集水區出口控制點 E 如表 4-3 與圖 4-5、4-7 所示。

表 4-3 白石子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率

粒徑(mm)	集水區	子集水區	子集水區	子集水區	子集水區
		A 之到達量	A 之遞移率	E 之到達量	E 之遞移率
#4	4.76	297451.7	0.039657	37433.73	0.004991
#10	2	1199315	0.159897	207023	0.027601
#20	0.84	3382564	0.450976	1035605	0.138071
#40	0.42	5481512	0.730815	2908954	0.387833
#60	0.25	6553868	0.873786	4785187	0.637979
#100	0.149	7101868	0.946847	6220084	0.829285
#140	0.105	7279684	0.970554	6789868	0.90525
#200	0.074	7373192	0.983021	7114965	0.948593

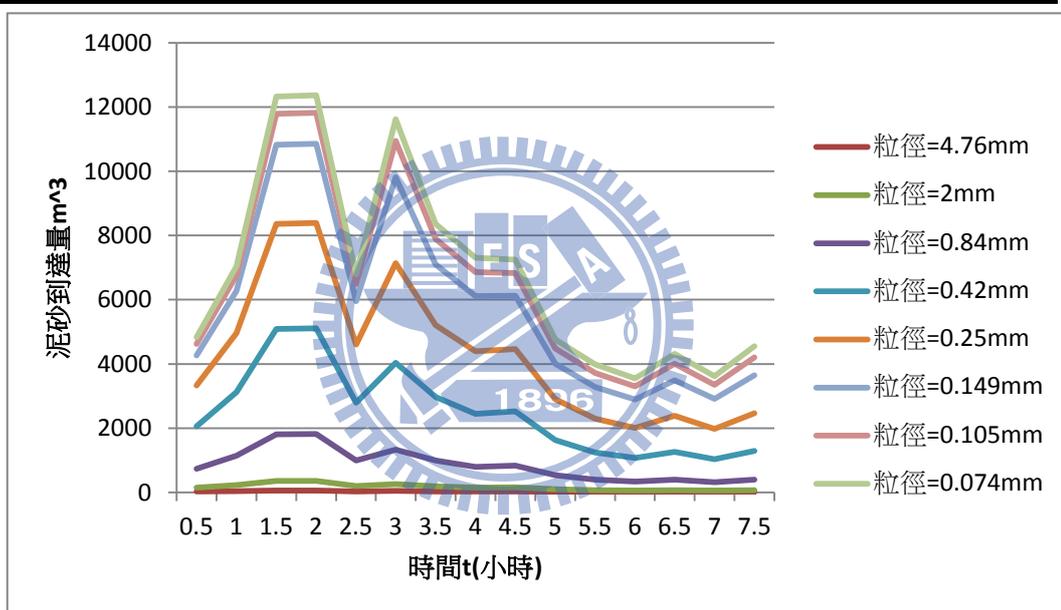


圖 4-5 白石子集水區各時刻泥砂到出口控制點 A

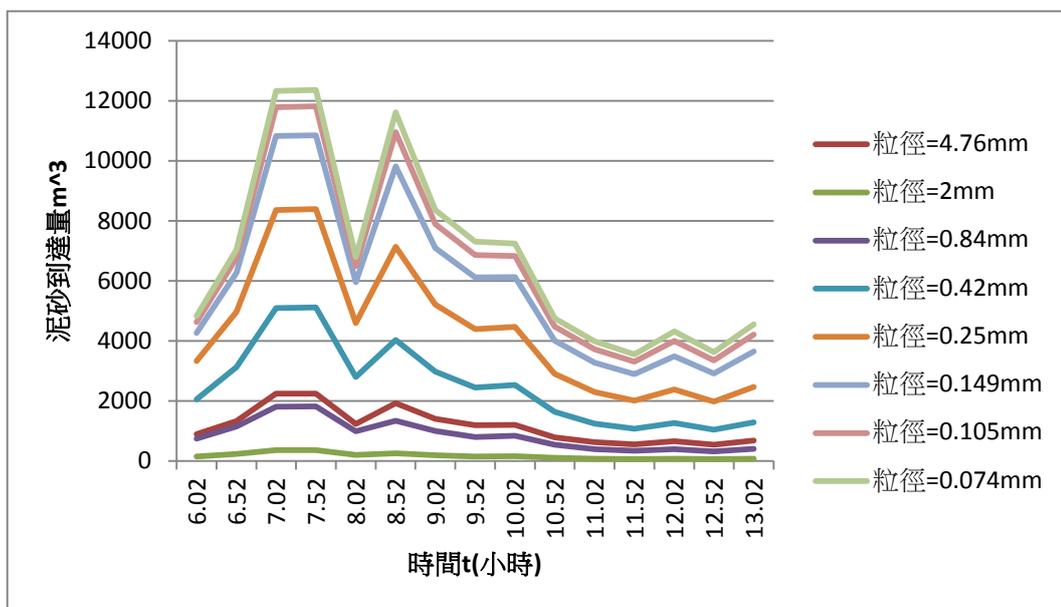


圖 4-6 白石子集水區各時刻泥砂到出口控制點 E

二. 泰崗子集水區

此子集水區控制點為 B，模式模擬其泥砂到達控制點 B 與石門水庫集水區控制點 E 如表 4-4 與圖 4-7、4-8 所示

表 4-4 泰崗子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率

粒徑(mm)	集水區	子集水區	子集水區	石門水庫	石門水庫
		B 之到達量	B 之遞移率	E 之到達量	E 之遞移率
#4	4.76	259219.2	0.045104	28731.58	0.004999
#10	2	997951.3	0.173645	158876.2	0.027645
#20	0.84	2665396	0.463783	794312.6	0.138211
#40	0.42	4216156	0.733617	2229506	0.387937
#60	0.25	5023462	0.874089	3668122	0.638258
#100	0.149	5448282	0.948009	4772611	0.830441
#140	0.105	5588759	0.972452	5213076	0.907082
#200	0.074	5663248	0.985413	5465037	0.950924

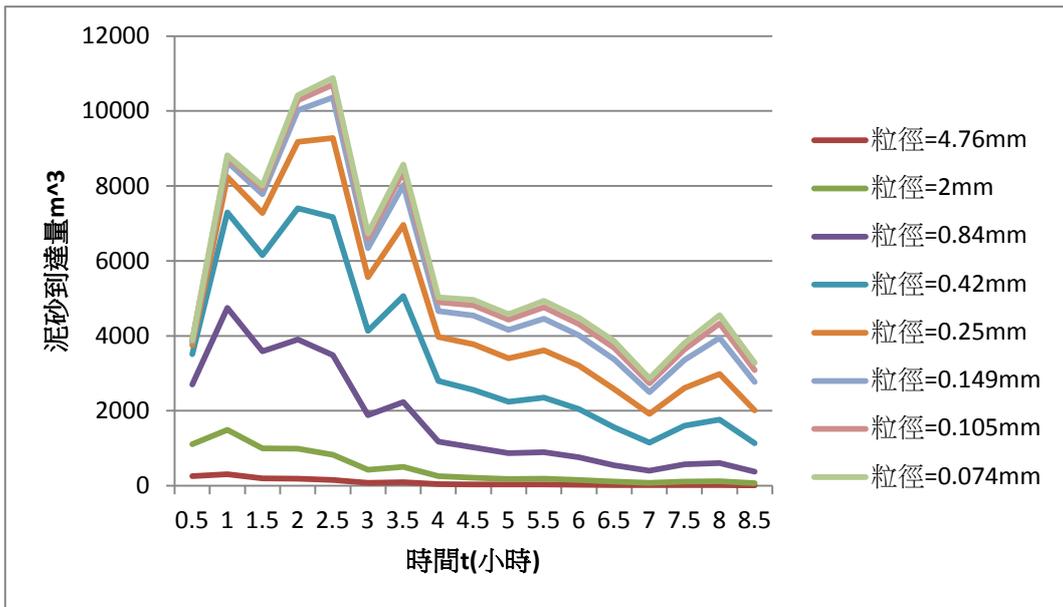


圖 4-7 泰崗子集水區各時刻泥砂到出口控制點 B

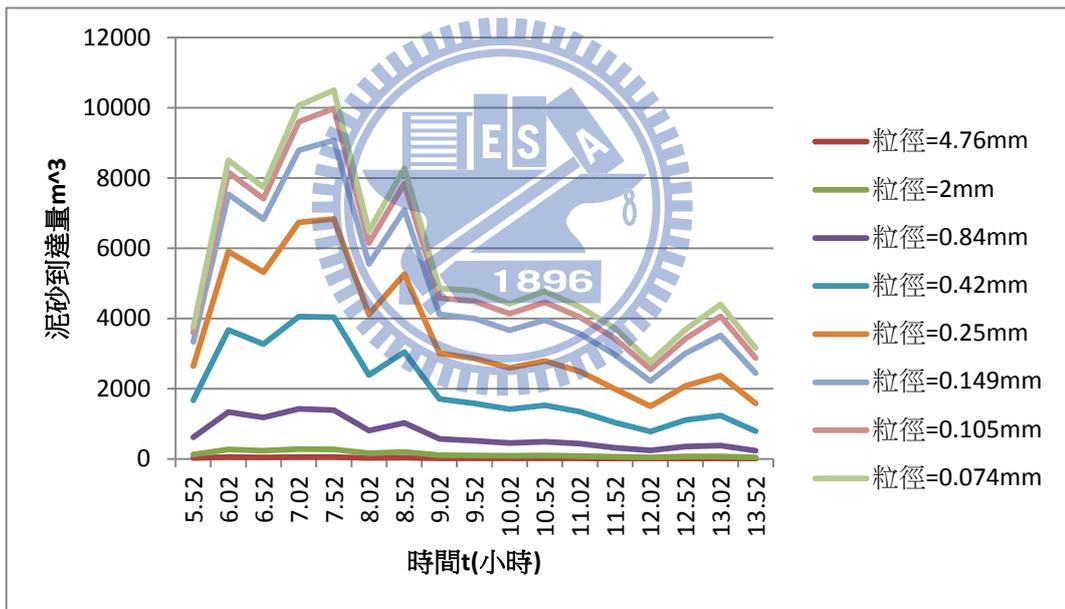


圖 4-8 泰崗子集水區各時刻泥砂到出口控制點 E

三. 玉峰子集水區

此子集水區控制點為 B，模式模擬其泥砂到達控制點 B 與石門水庫集水區控制點 E 如表 4-5 與圖 4-9、4-10 所示

表 4-5 玉峰子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率

粒徑(mm)	集水區	子集水區	子集水區	石門水庫	石門水庫
		C 之到達量	C 之遞移率	E 之到達量	E 之遞移率
#4	4.76	149541.3	0.034309	94813.08	0.021753
#10	2	607556	0.139393	461147.2	0.105802
#20	0.84	1768241	0.40569	1582435	0.36306
#40	0.42	3008026	0.690136	2884187	0.661723
#60	0.25	3706294	0.850341	3640417	0.835226
#100	0.149	4082644	0.936687	4054165	0.930153
#140	0.105	4207816	0.965406	4192757	0.961951
#200	0.074	4274268	0.980652	4266538	0.978878

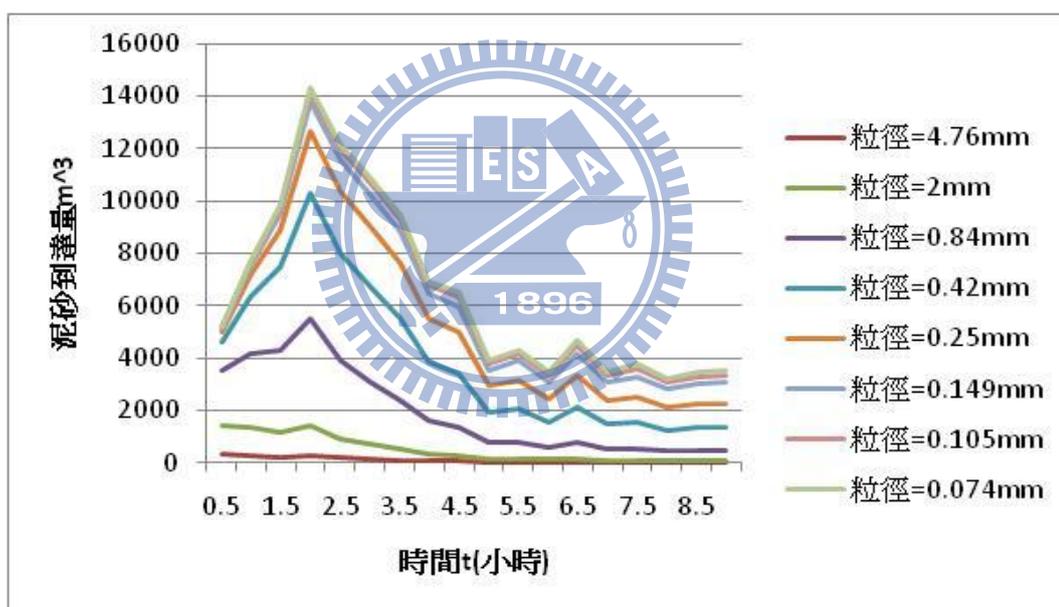


圖 4-9 玉峰子集水區各時刻泥砂到出口控制點 C

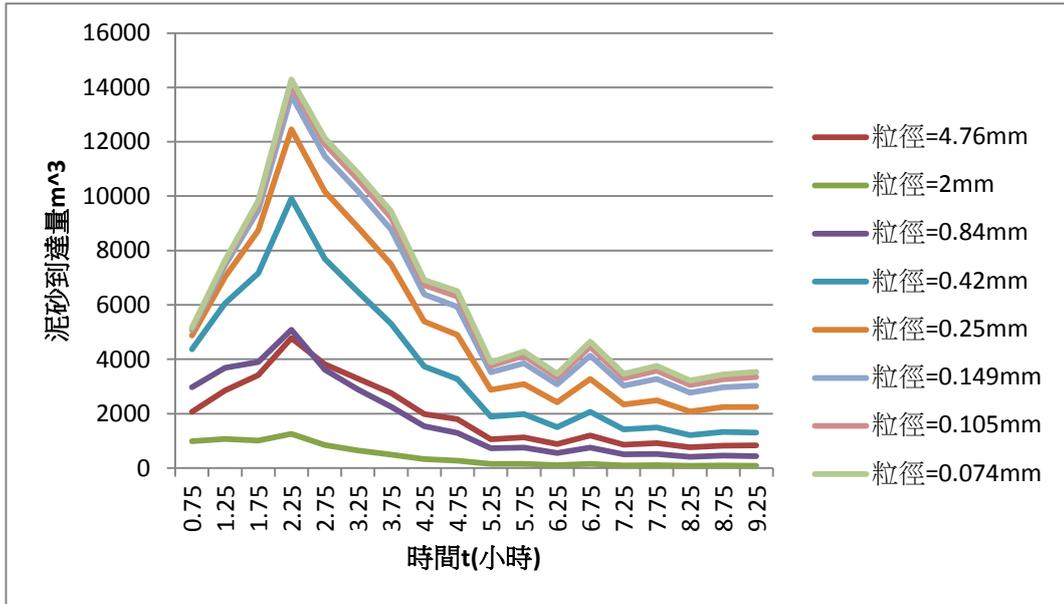


圖 4-10 玉峰子集水區各時刻泥砂道出口控制點 E

四. 三光子集水區

此子集水區控制點為 D，模式模擬其泥砂到達控制點 D 與石門水庫集水區控制點 E 如表 4-6 與圖 4-11、4-12 所示



表 4-6 三光子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率

粒徑(mm)	集水區	子集水區	子集水區	石門水庫	石門水庫
		D 之到達量	D 之遞移率	E 之到達量	E 之遞移率
#4	4.76	86090.66	0.045097	47424	0.024842
#10	2	318156.1	0.166659	227383.4	0.11911
#20	0.84	851844.9	0.446221	746701	0.391144
#40	0.42	1363995	0.714501	1300399	0.681187
#60	0.25	1642843	0.860569	1610559	0.843658
#100	0.149	1795237	0.940398	1781523	0.933214
#140	0.105	1846769	0.967392	1839546	0.963608
#200	0.074	1874359	0.981844	1870658	0.979905

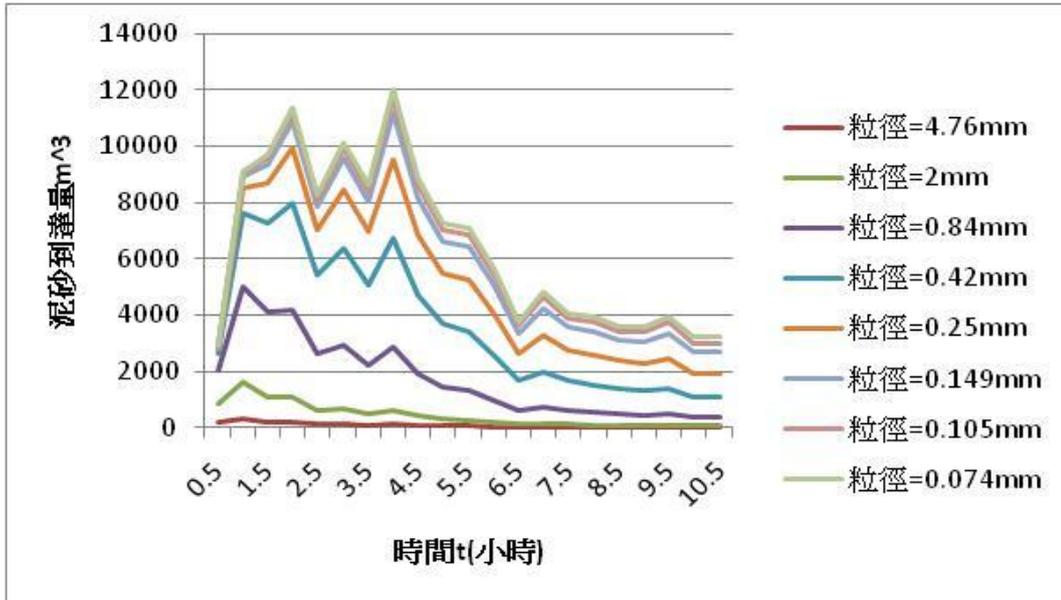


圖 4-11 三光子集水區各時刻泥砂到出口控制點 D

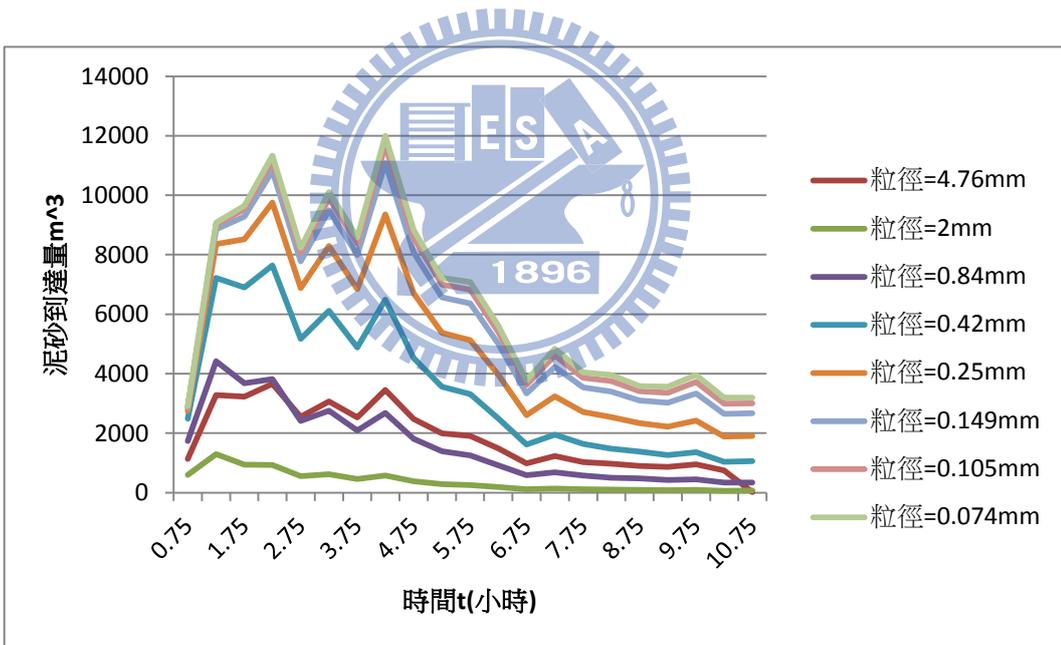


圖 4-12 三光子集水區各時刻泥砂到出口控制點 E

五. 石門子集水區

最靠近下游控制點之集水區，故在此子集水區控制點與石門水庫控制點相同，其泥砂到達量與遞移率如表 4-7，各時刻泥砂到達量圖

4-13 所表示。

表 4-7 石門子集水區與石門水庫出口控制點之遞移率

粒徑(mm)	集水區	子集水區	子集水區
		E 之到達量	E 之遞移率
#4	4.76	1628486	0.197069
#10	2	3764360	0.455539
#20	0.84	6173798	0.747115
#40	0.42	7276675	0.880578
#60	0.25	7621419	0.922297
#100	0.149	7759086	0.938956
#140	0.105	7799008	0.943788
#200	0.074	7819132	0.946223

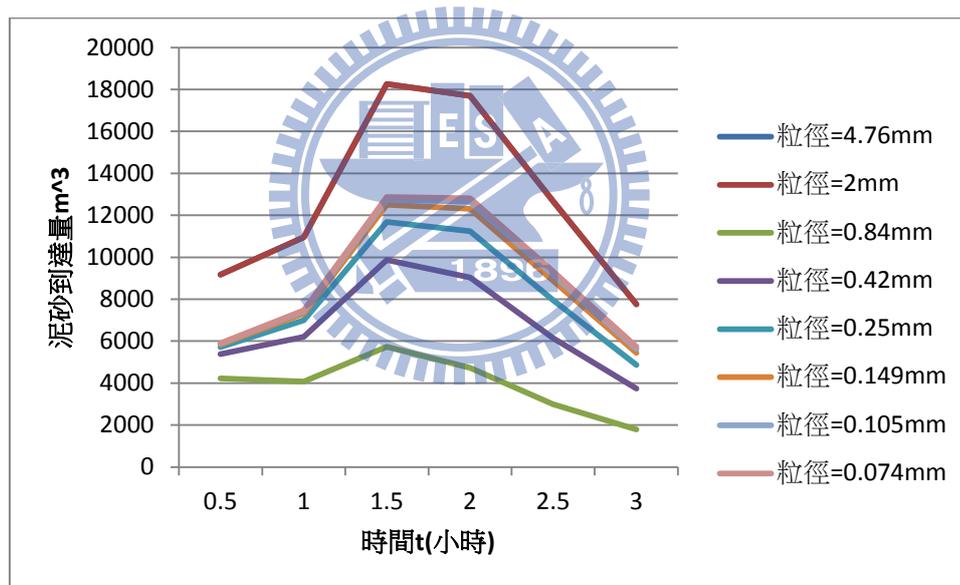


圖 4-13 石門子集水區各時刻泥砂到出口控制點 A

4-5-2 控制點泥砂產量(歷線)分析

前一節中，本研究是以單點來做粒徑到達比較，在本節中根據河道粒徑採樣資料，粗略設定各子集水區代表粒徑，進行泥砂到達量(歷線)與遞移率分析。分析結果如表 4-8~表 4-13 與圖 4-14 所示。

表 4-8 白石子集水區泥砂遞移率

粒徑單位：mm

粒徑	19.0	12.50	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
含量	0.246	0.06	0.14	0.11	0.08	0.05	0.13	0.08	0.07	0.034
總到達量	1285897m ³				泥砂遞移率			0.171441		

表 4-9 泰崗子集水區泥砂遞移率

粒徑單位：mm

粒徑	19.0	12.50	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
含量	0.33	0.08	0.04	0.05	0.03	0.09	0.18	0.13	0.03	0.04
總到達量	986312.9m ³				泥砂遞移率			0.17162		

表 4-10 玉峰子集水區泥砂遞移率

粒徑單位：mm

粒徑	19.0	12.50	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
含量	0.24	0.07	0.04	0.07	0.11	0.08	0.11	0.15	0.05	0.08
總到達量	1430632m ³				泥砂遞移率			0.328232		

表 4-11 三光子集水區泥砂遞移率

粒徑單位：mm

粒徑	19.0	12.50	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
含量	0.19	0.06	0.14	0.08	0.07	0.1	0.08	0.11	0.07	0.1
總到達量	628702.8m ³				泥砂遞移率			0.329333		

表 4-12 石門子集水區泥砂遞移率

粒徑單位：mm

粒徑	19.0	12.50	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
含量	0.05	0.04	0.03	0.1	0.14	0.19	0.24	0.14	0.04	0.03
總到達量	4919732m ³				泥砂遞移率			0.595355		

表 4-13 石門水庫總到達量與遞移率

	總到達量	總崩塌量	遞移率
石門	4919732	8263521	0.595355
玉峰	1430632	4358599	0.328232
白石	1285897	7500542	0.171441
泰崗	986312.9	5747081	0.17162
三光	628702.8	1909019	0.329333
石門水庫全區	9251277	27778762	0.333034

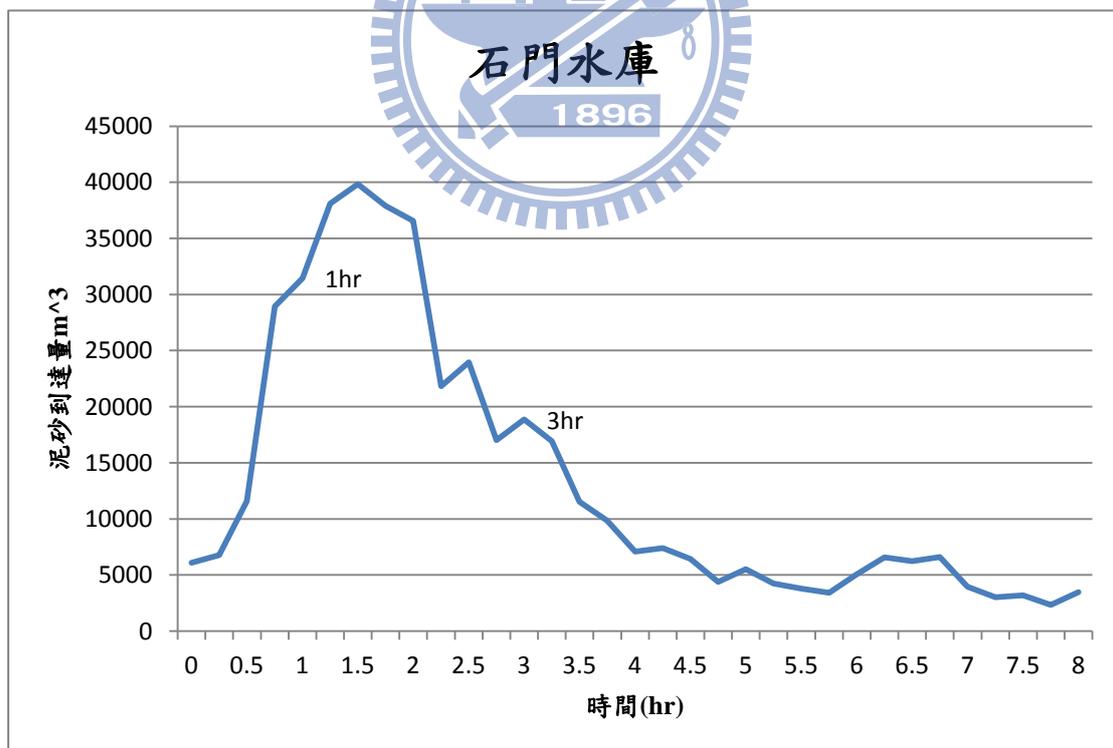


圖 4-14 石門水庫到達出口時泥砂量歷程

第五章 結論與建議

5-1 結論

1. 本研究利用線性水庫概念，發展一集水區泥砂運移概念模式，以分析集水區泥砂遞移率與控制點泥砂產量。
2. 模式測試中，以單點崩塌與假設集水區檢驗，結果顯示泥砂遞移時間越長，其泥砂到達量越少；粒徑越大沉積現象也越明顯，其泥砂能到達下游的量越少；水深較大時，因流量大故能運移至下游之泥砂也就越多；捕獲率 e_v 在粒徑較小時較不顯著等，其結果都能符合物理現象。
3. 實際案例模擬中，石門子集水區因距離較短可達快60%的遞移率，玉峰與三光位於中間，約有30%之遞移率，而較遠的白石、泰崗之遞移率約為20%，全區之遞移率約33.3%。

5-2 建議

1. 集水區泥砂運移之情形在本研究中因網格內只計算崩塌產量，故只有考慮到崩塌的情形，未來應可納入各網格之沖蝕量加以討論。
2. 運移時間為泥砂遞移之最重要的部分，在網格流向之部份，尚有許多種方法可以進行模擬之研究，尚有改進的空間。
3. 本研究中，在水深部分為假設值，將來可引進水深計算之推估，使其在水深條件部分更能符合實際值。
4. 本研究假設崩塌同一時間發生，並未考慮崩塌時間性之問題與實際情況有所差距，可作為未來研究課題。



參考文獻

1. 錢寧，1985，「黃學研究前景遼闊」，人民黃河，6:6~8。
2. 景可等，1993，「黃河泥砂與環境」，科學出版社。
3. 陳樹群、賴益成，1999，「河川與集水區泥砂遞移率之推估」中華水土保持學報，30(1)：47~57。
4. 馮美禎，2001，「台灣集水區泥砂遞移率之探討」國立中興大學碩士論文。
5. 賴益成，1998，「集水區泥砂遞移率之推估研究」國立中興大學碩士論文。
6. 李光敦，2005，「水文學」五南出版社。
7. 陳弘恩，2005，「降雨引發坡地潛崩塌模式之建立與探討」國立交通大學碩士論文。
8. 國立交通大學期末報告書，2008，「石門水庫集水區崩塌與庫區淤機風險評估研究(3/3)」。
9. 莊永忠，2004，「台灣山地集水區河川網路自動化萃取之特性分析與符合度探討」。
10. 蔡元融，2005，「流域水砂生產及輸送模式之研究」國立成功大學碩士論文。
11. 李振裕，2004，「集水區水砂生產及輸送之整合研究」成功大學碩

- 士論文。
- 12.行政院農業委員會水土保持局，2006，「石門水庫土砂評量與整治率評估模式建立」。
 - 13.行政院農業委員會水土保持局，2009，「石門水庫集水區泥砂抑制條件與入庫泥砂量關聯性之研析應用」。
 - 14.流域土砂管理模式之研究(3/3)，經濟部水利署，2002
 - 15.集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究。
 - 16.石門水庫集水區泥砂產量推估之研究(1/3)，經濟部水利署
 - 17.集水區砂產生及輸送之整合研究，2004
 - 18.石門水庫集水區崩塌地航測調查報告，1976
 - 19.Walling,D.E.,The sediment delivery problem. Journal of Hydrology65,209-237,1983
 - 20.Roehl,J.W.,1962,"Sediment Source Areas,Delivery Ratios and Influencing Morphological Factors,"IAHS Publ.,No.59,Commission of Land Erosion,pp.20~213
 - 21.Hua.lu.,Modelling Sediment Delivery Ratio Based on Physical Principles
 - 22.C.T.Haan.,Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments
 - 23.Joesph D.Skufca:Analysis Still Matters:A Surprising Instance of Failure of Runge-Kutta-Felberg ODE Solvers}, SIAM Review vol.46, No.4,pp.729-737

24. Trimble, S.W. and P.U.S. Crosson, soil erosion rates - myth and reality. Science 289, 248-250, 2000.
25. Tsai T.L. and Yang J. C. (2006) "Modeling of rainfall-triggered shallow landslide", Environment Geology. Vol.50:525-534
26. Sivapalan, M., C. Jothityangkoon and M. Menabde, Linearity and non-linearity of basin response as a function of scale: Discussion of alternative definitions. Water Resour. Res. 38(2): 4.1-4.5, 2002.
26. Walling. 1988, Soil Erosion Research Methods



附錄一 崩塌模式理論架構

邊坡破壞之標準可定義為對系統的載重(loading, S)超過系統阻抗能力(Resistance, R)，應用於無限邊坡穩定分析時，土層重力所產生之剪應力與土壤剪力強度(抗剪強度)，分別代表上述之載重與系統阻抗能力，當土層中某一臨界面其抗剪強度降低至小於剪應力，或其剪應力增加至大於抗剪強度，即產生邊坡斜面之滑動破壞。因此土壤抗剪強度與重力所產生剪應力之比值，也就是安全係數(FS)，其值小於1時即代表坡地發生崩塌。利用莫爾庫倫理論所發展之無限邊坡穩定分析，配合時變壓力水頭之計算即可估計降雨入滲是否引發崩塌。安全係數計算方式可表示如下：

$$FS = \frac{\tan \phi + \frac{\psi(Z,t)\gamma_w}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi}{Z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{c}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha}}{\tan \alpha} \quad (a.1)$$

其中 FS 為安全係數，當 FS 大於1時土層為穩定，反之 FS 小於1時土層即為不穩定； t 為時間(T)； Z 為垂向深度(L)； $\psi(Z,t)$ 為第 t 時刻位於地表下方 Z 公尺處之壓力水頭(pressure head)(L)； ϕ 為土壤內摩擦角(friction angle)； c 為土壤凝聚力(cohesion) ($ML^{-1}T^{-2}$)； α 為坡度(slope angle)； γ_w 與 γ_{sat} 則分別代表地下水與飽和土壤之單位重(unit weight) ($ML^{-2}T^{-2}$)。

基於 Iverson 模式(Iverson, 2000)可知，在淺崩塌且土壤趨於飽和假設下，坡地因降雨而產生入滲之控制方程式可表示為：

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D_0 \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial Z^2} \quad (\text{a.2})$$

其中 $D_0 = K_{sat}/C_0$ ， K_{sat} 為飽和水力傳導係數(hydraulic conductivity) (LT^{-1})， C_0 表示 $C(\psi)$ 之最小值，而 $C(\psi) = d\theta/d\psi$ 表示含水量(θ)與壓力水頭之比值。由陳弘恩(2005)研究成果顯示， ψ 會隨著土層垂向深度變大，且 ψ 越大時則 FS 越小。當坡度愈大、內摩擦角愈小，或初始地下水位深度與土層厚度之比值愈小，即初始地下水位愈高，則愈容易產生坡地破壞，所以本研究於此之壓力水頭乃為破壞最大與土層垂向深度最大處之值。求解式(2.2)需要之初始條件與邊界條件可表示如下：

初始條件

$$\psi(Z,0) = (Z - d_z) \cos^2 \alpha \quad (\text{a.3})$$

其中 d_z 為初始地下水水位(groundwater table) (L)。

邊界條件

若坡地土層厚度為 d_{Lz} ，且土層底部為不透水邊界，則坡地底部之邊界條件可表示為：

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(d_{Lz}, t) = \cos^2 \alpha \quad (\text{a.4})$$

考量土壤入滲能力時變效應，則地表面降雨入滲邊界條件如以下二式表示：

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0,t) = -I_z/K_{sat} + \cos^2 \alpha \quad \text{if } \psi(0,t) \leq 0 \text{ and } t < T_d \quad (\text{a.5})$$

$$\psi(0,t) = 0 \quad \text{if } \psi(0,t) > 0 \text{ and } t < T_d \quad (\text{a.6})$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0,t) = \cos^2 \alpha \quad \text{if } t > T_d \quad (\text{a.7})$$

其中 I_z 為降雨強度 (rainfall intensity) (LT^{-1})； T_d 為降雨延時 (rainfall duration) (T)。

在數值方法上，Tsai and Yang (2006) 利用有限差分法求解式(2.2)。

先假設降雨完全入滲，也就是入滲能力大於降雨強度，利用式(2.5)計算壓力水頭分佈，若地表面之壓力水頭小於或等於零 ($\psi(0,t) \leq 0$)，表示完全入滲之假設正確並計算下一個時距；然而若地表面之壓力水頭大於零 ($\psi(0,t) > 0$)，表示產生窪蓄現象 (ponding)，即入滲能力小於降雨強度，在不考慮窪蓄造成漫地流 (overland flow) 水深影響下，改變地表邊界條件，令地表面之壓力水頭為零，如式(2.6)所示，再進行壓力水頭分佈之計算。

附錄二 模式測試之後續分析

表 b- 1 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$

SDR 單位為百分比(%)

粒徑	4.76 (mm)	2 (mm)	0.8 (mm)	0.6 (mm)	0.4 (mm)	0.2 (mm)	0.1 (mm)	0.01 (mm)	0.001 (mm)	0.0001 (mm)
e_v	0.3									
水深	0.1(m)									
SDR	0.48	2.61	9.37	13.67	21.39	36.60	67.72	88.82	99.87	99.99
水深	0.2(m)									
SDR	0.94	5.02	16.66	23.29	34.12	52.31	80.23	94.01	99.94	99.99
水深	0.3(m)									
SDR	1.41	7.27	22.62	30.68	42.96	61.55	85.73	95.91	99.96	99.99
水深	0.4(m)									
SDR	1.86	9.37	27.64	36.60	49.58	67.72	88.82	96.89	99.97	99.99
水深	0.5(m)									
SDR	2.31	11.35	31.96	41.51	54.74	72.15	90.81	97.50	99.97	99.99

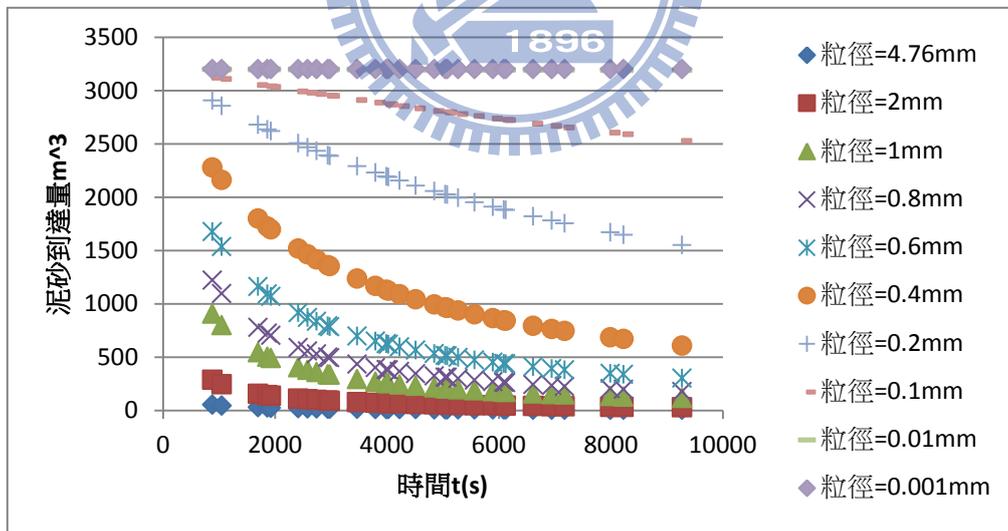


圖 b- 1 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.1m$

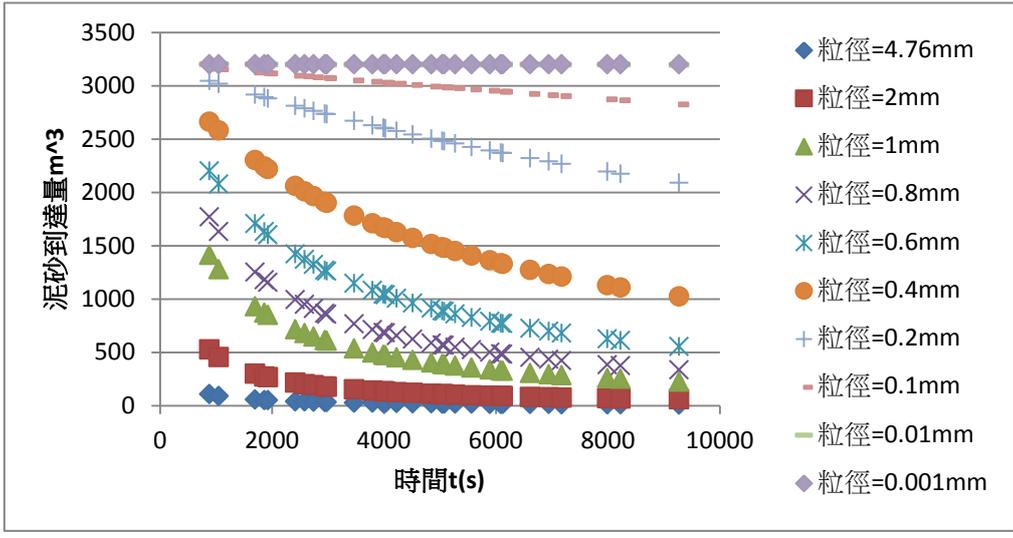


圖 b- 2 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.2m$

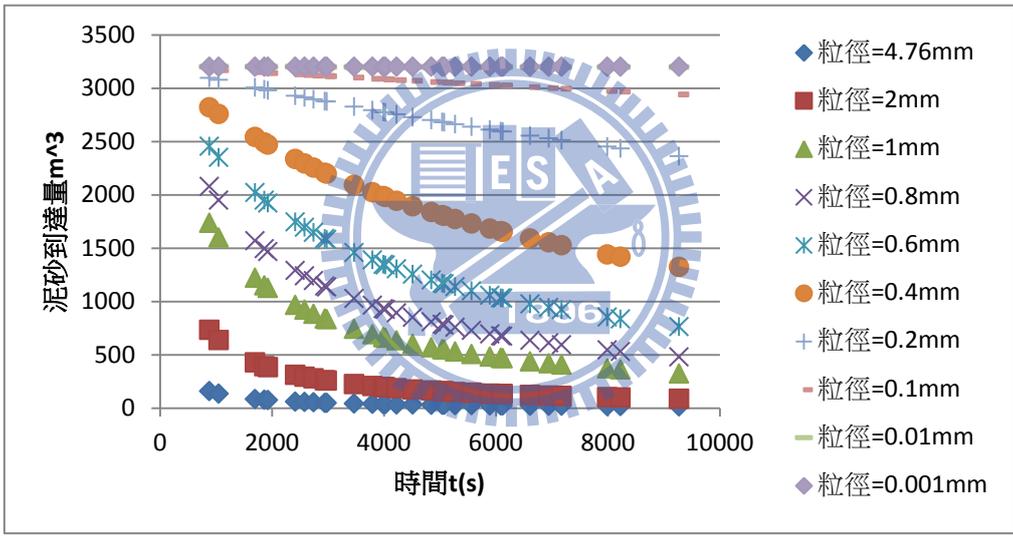


圖 b- 3 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.3m$

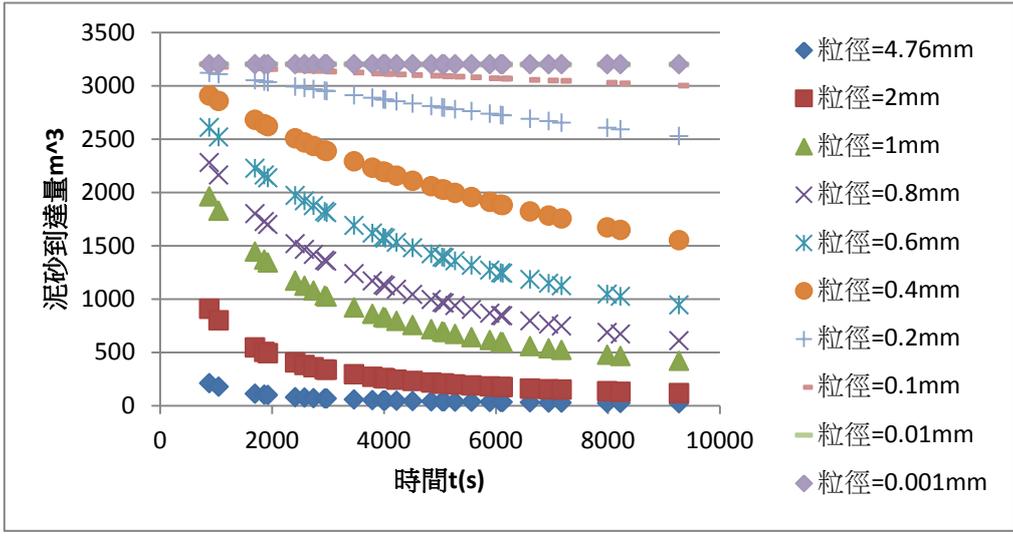


圖 b- 4 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.4m$

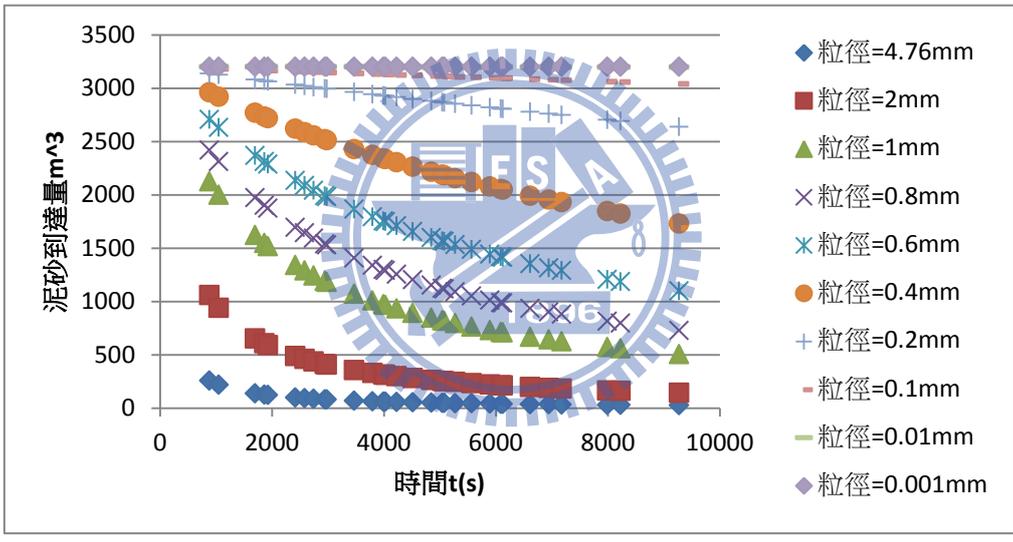


圖 b- 5 Case(1)捕獲率 $e_v=0.3$ 水深 $H=0.5m$

表 b- 2 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$

SDR 單位為百分比(%)

粒徑	4.76 (mm)	2 (mm)	0.8 (mm)	0.6 (mm)	0.4 (mm)	0.2 (mm)	0.1 (mm)	0.01 (mm)	0.001 (mm)	0.0001 (mm)
e_v	0.6									
水深	0.1(m)									
SDR	0.27	1.52	5.68	8.48	13.84	25.59	55.39	82.19	99.77	99.99
水深	0.2(m)									
SDR	0.54	2.96	10.52	15.23	23.55	39.51	70.41	90.05	99.89	99.99
水深	0.3(m)									
SDR	0.81	4.35	14.73	20.82	30.99	48.73	77.78	93.10	99.92	99.99
水深	0.4(m)									
SDR	1.08	5.68	18.48	25.59	36.94	55.39	82.19	94.71	99.94	99.99
水深	0.5(m)									
SDR	1.34	6.95	21.83	29.72	41.86	60.46	85.14	95.71	99.95	99.99

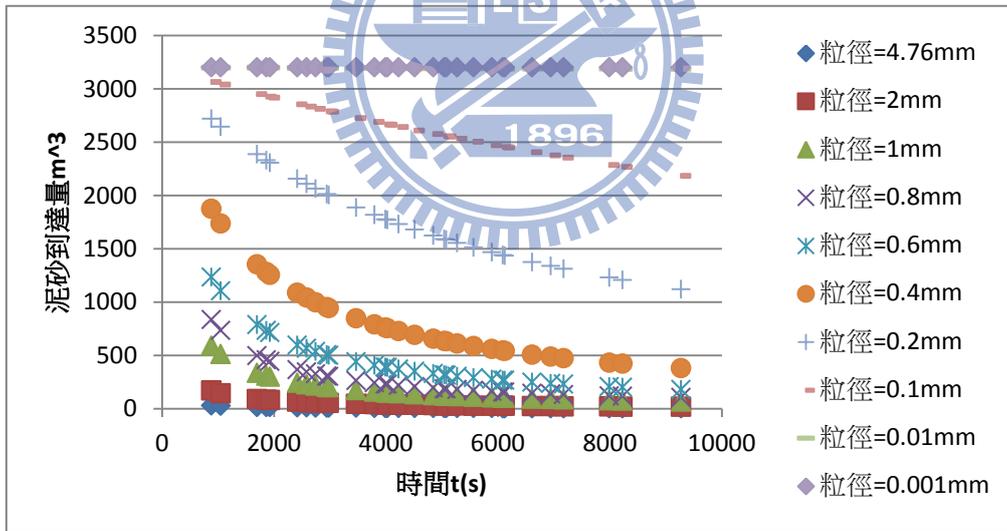


圖 b- 6 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.1m$

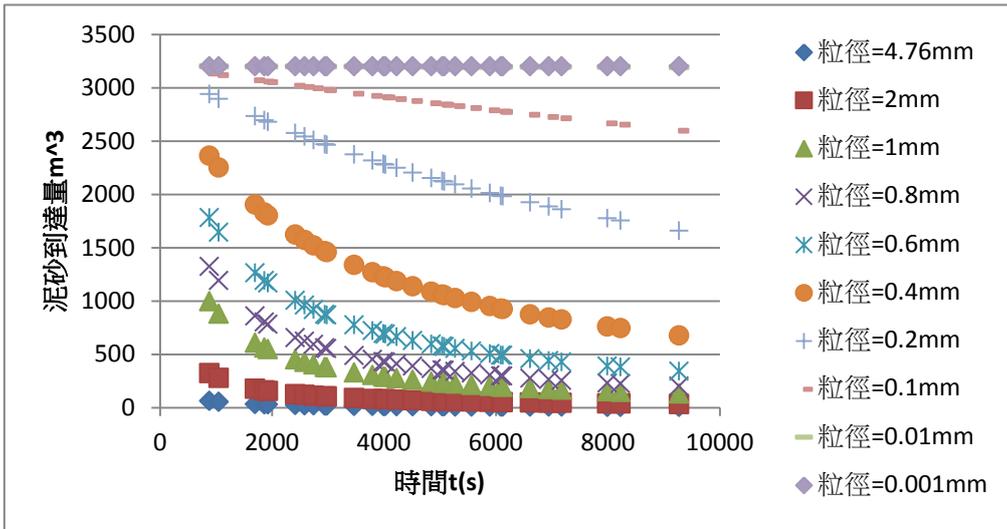


圖 b- 7 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.2m$

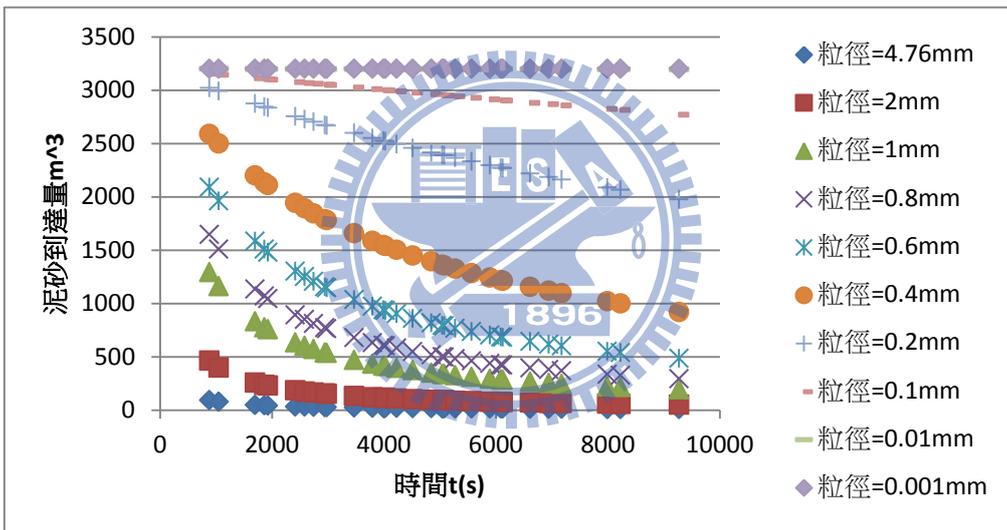


圖 b- 8 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.3m$

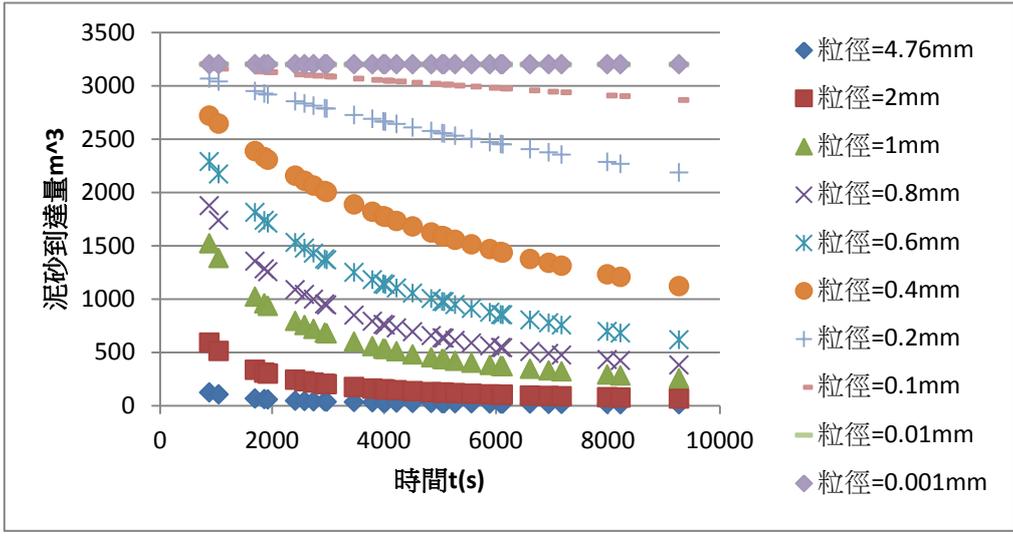


圖 b- 9 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.4m$

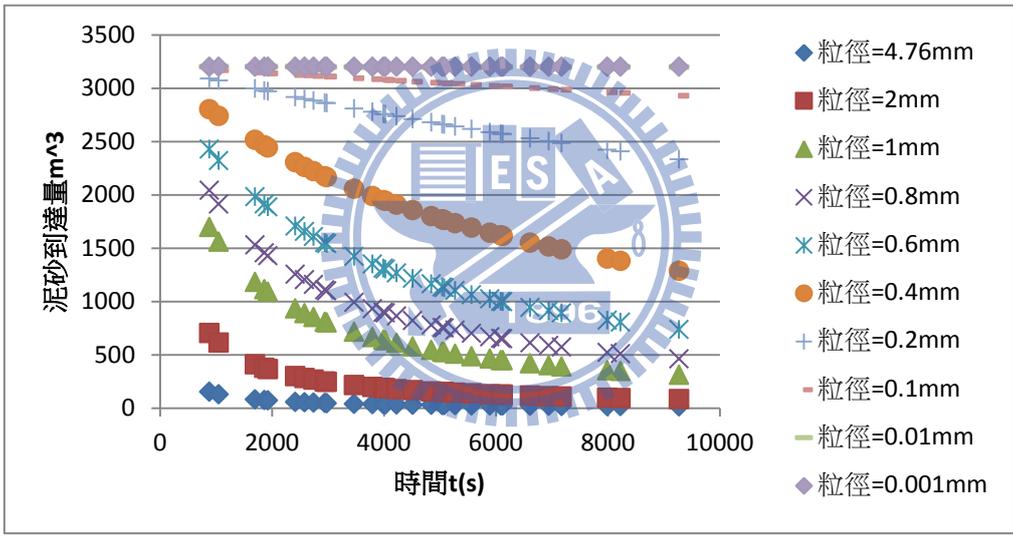


圖 b- 10 Case(1)捕獲率 $e_v=0.6$ 水深 $H=0.5m$

表 b- 3 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$

SDR 單位為百分比(%)

粒徑	4.76 (mm)	2 (mm)	0.8 (mm)	0.6 (mm)	0.4 (mm)	0.2 (mm)	0.1 (mm)	0.01 (mm)	0.001 (mm)	0.0001 (mm)
e_v	0.9									
水深	0.1(m)									
SDR	0.07	0.39	1.52	2.34	4.04	8.48	25.58	55.39	99.10	99.99
水深	0.2(m)									
SDR	0.14	0.77	2.96	4.52	7.64	15.23	39.51	70.41	99.55	99.99
水深	0.3(m)									
SDR	0.20	1.14	4.35	6.56	10.89	20.82	48.73	77.78	99.70	99.99
水深	0.4(m)									
SDR	0.27	1.52	5.68	8.48	13.84	25.59	55.39	82.19	99.77	99.99
水深	0.5(m)									
SDR	0.34	1.88	6.95	10.30	16.55	29.72	60.46	85.14	99.82	99.99

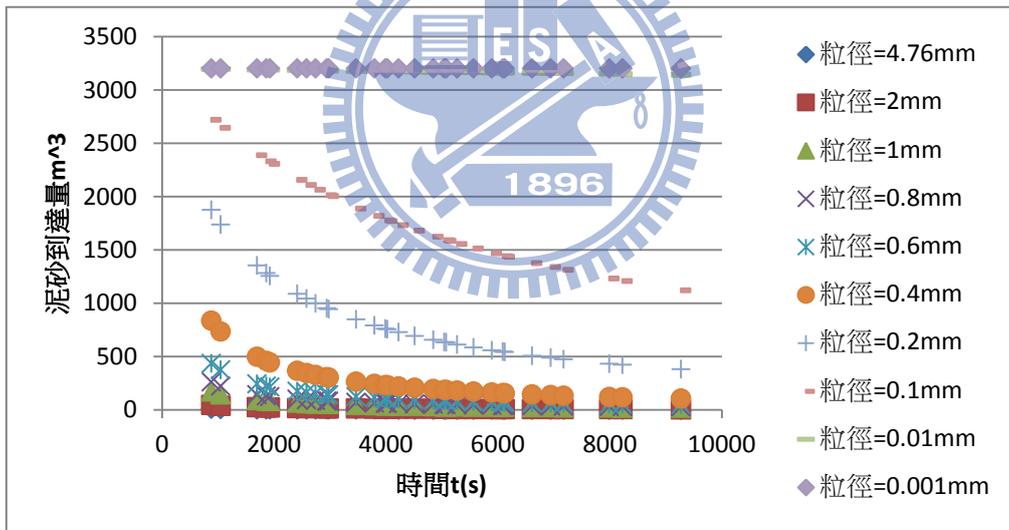


圖 b- 11 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.1m$

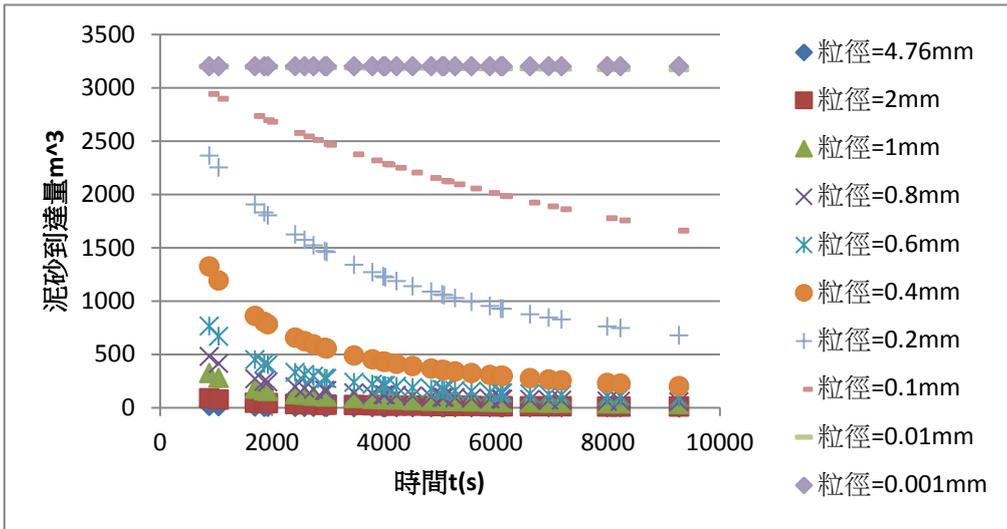


圖 b- 12 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.2m$

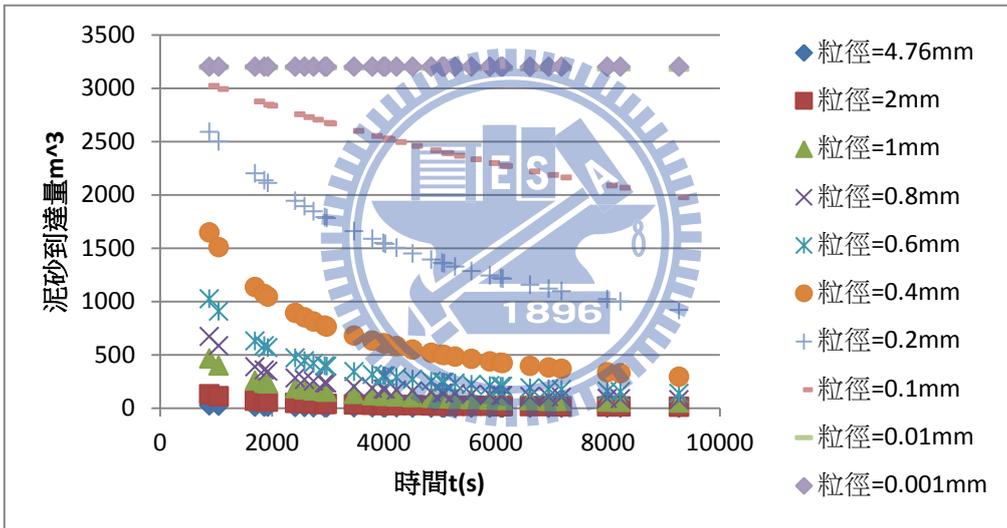


圖 b- 13 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.3m$

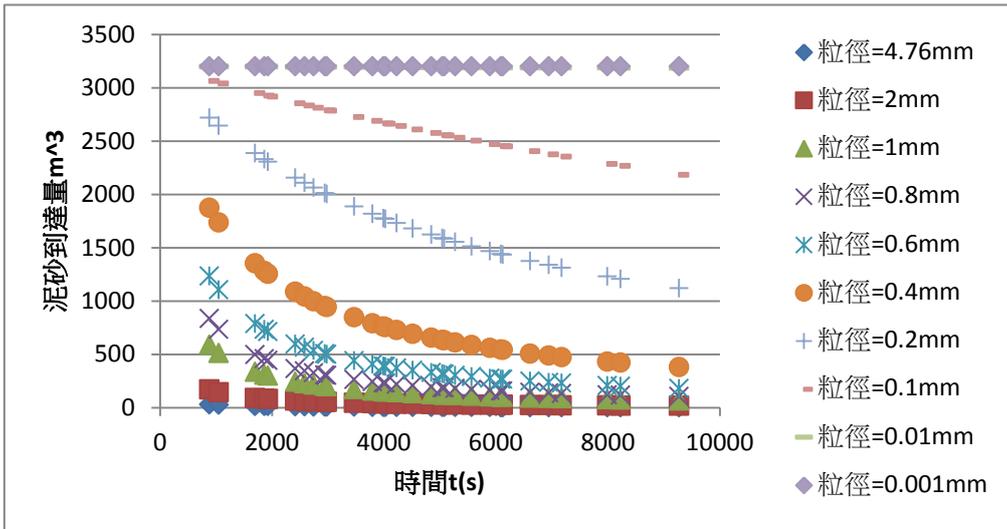


圖 b- 14 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.4m$

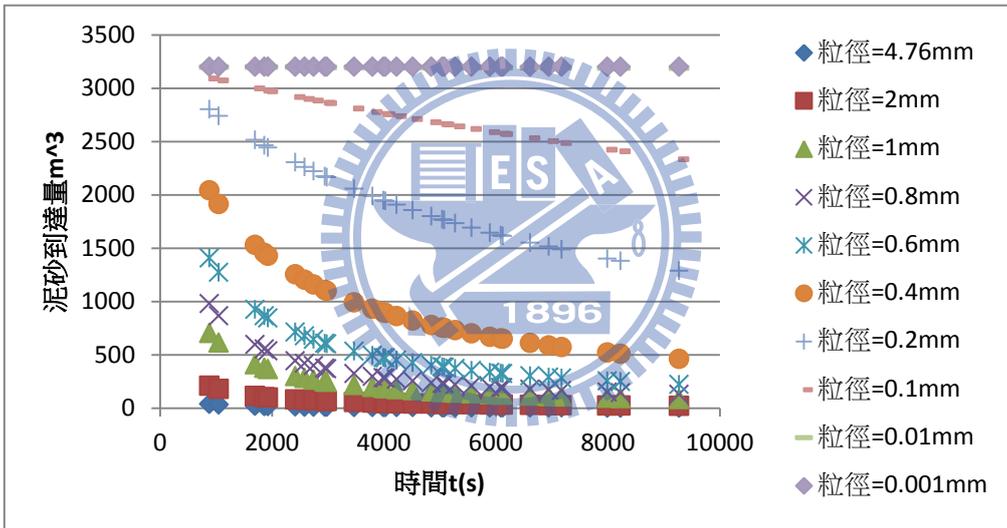


圖 b- 15 Case(1)捕獲率 $e_v=0.9$ 水深 $H=0.5m$

表 b- 4 Case(2)水深 H=0.2m 時

SDR 單位為百分比(%)

種類	水深	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR
Gravel	0.2	0	1.34	0.3	0.94	0.6	0.54	0.9	0.13
Sand			6.95		5.01		2.96		0.7
Silt			97.5		96.6		94.2		80.87
Clay			99.8		99.74		99.5		98.22

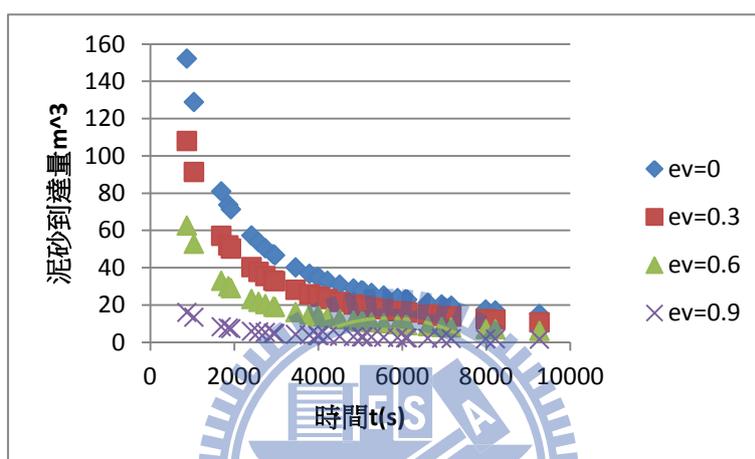


圖 b- 16 Case(2)水深=0.2m 礫石案例

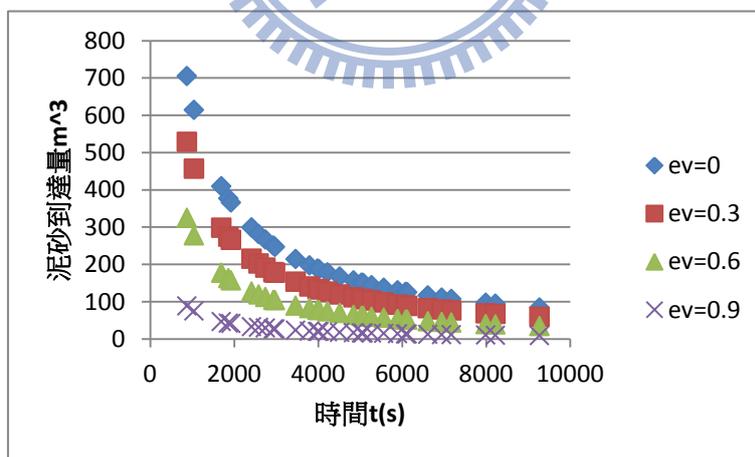


圖 b- 17 Case(2)水深=0.2m 砂案例

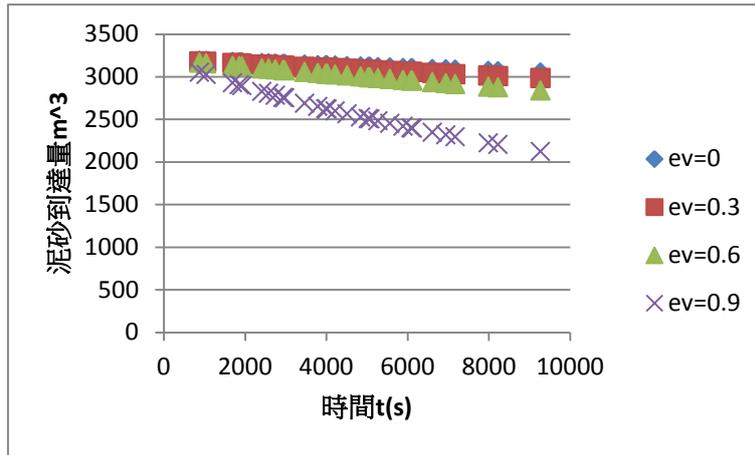


圖 b- 18 Case(2)水深=0.2m 沉泥案例

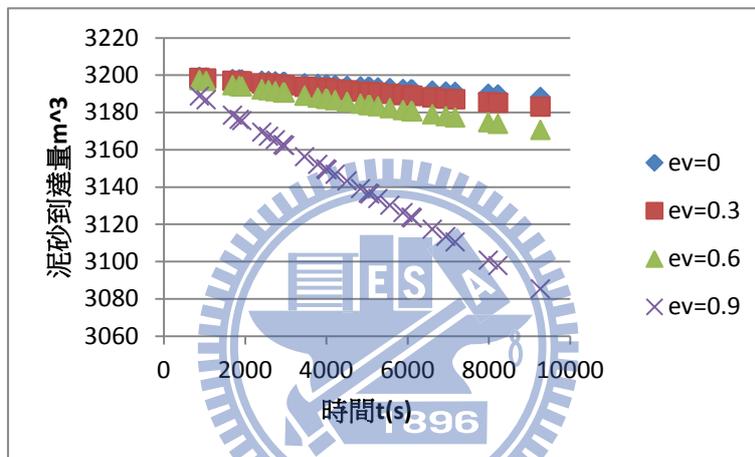


圖 b- 19 Case(2)水深=0.2m 黏土案例

表 b- 5 Case(2)水深 H=0.3m 時

SDR 單位為百分比(%)

種類	水深	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR
Gravel	0.3	0	1.99	0.3	1.40	0.6	0.81	0.9	0.20
Sand			9.94		7.26		4.34		1.14
Silt			98.3		97.7		96.07		86.22
Clay			99.8		99.8		99.69		98.81

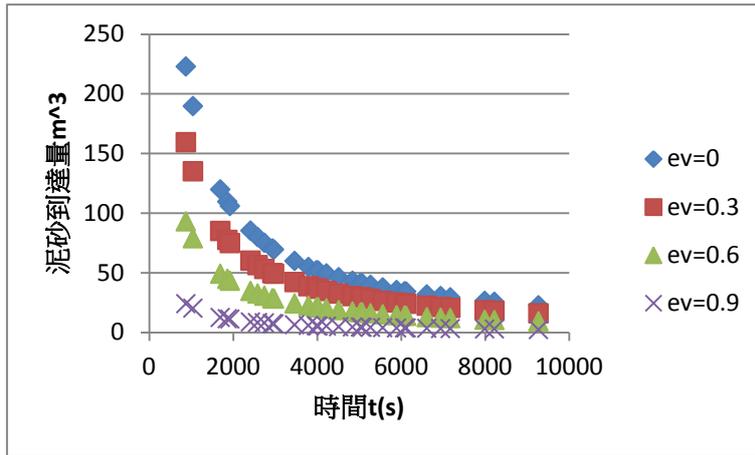


圖 b- 20 Case(2)水深 H=0.3m 礫石 案例

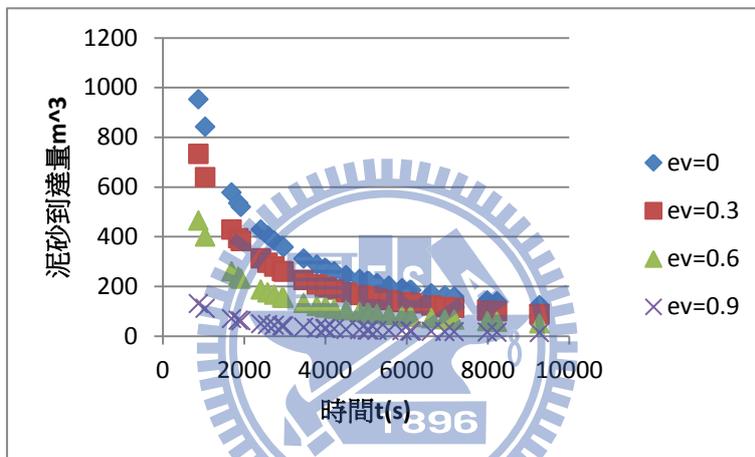


圖 b- 21 Case(2)水深 H=0.3m 砂 案例

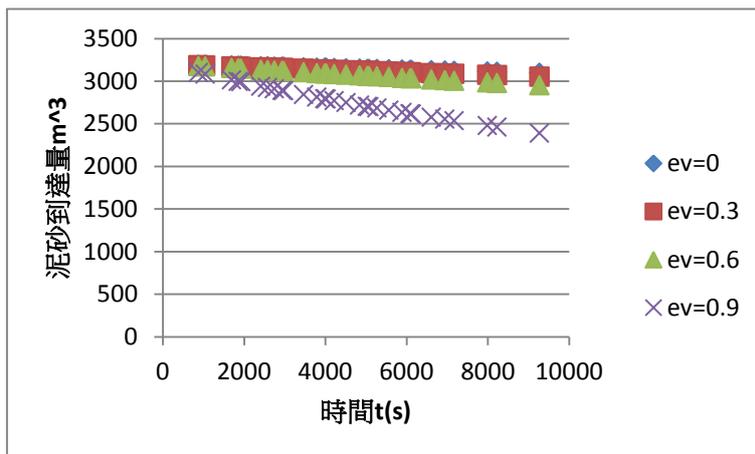


圖 b- 22 Case(2)水深 H=0.3m 沉泥 案例

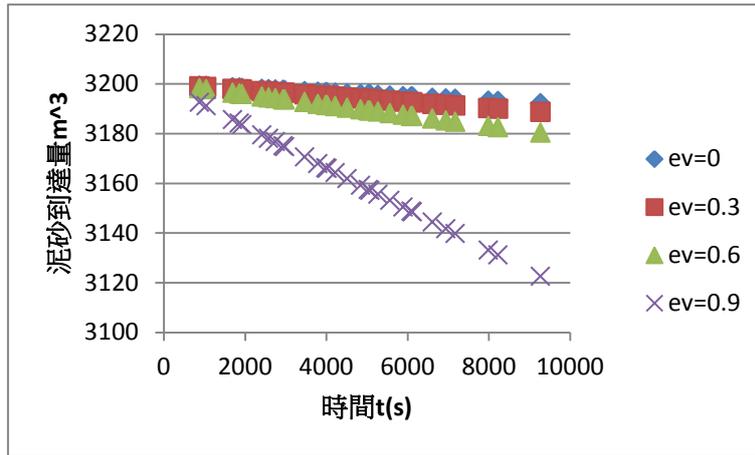


圖 b- 23 Case(2)水深 H=0.3m 黏土案例

表 b- 6 Case(2)水深 H=0.4m 時

SDR 單位為百分比(%)

種類	水深	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR
Gravel	0.4	0	2.62	0.3	1.86	0.6	1.07	0.9	0.27
Sand			12.69		9.37		5.67		1.51
Silt			98.78		98.26		97.01		89.22
Clay			99.9		99.8		99.77		99.1

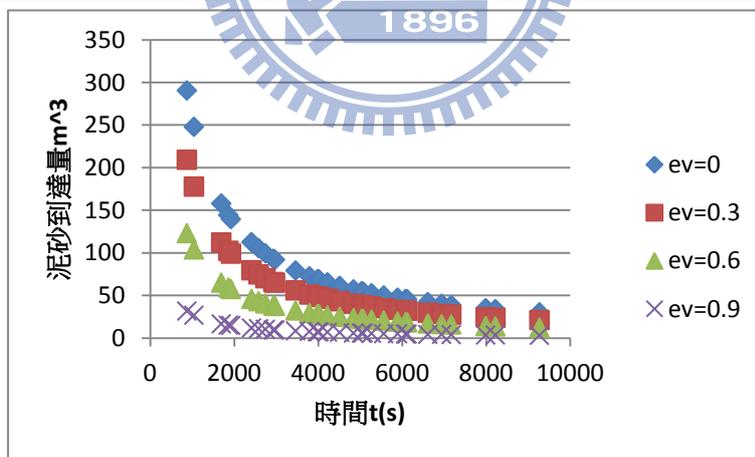


圖 b- 24 Case(2)水深 H=0.4m 礫石案例

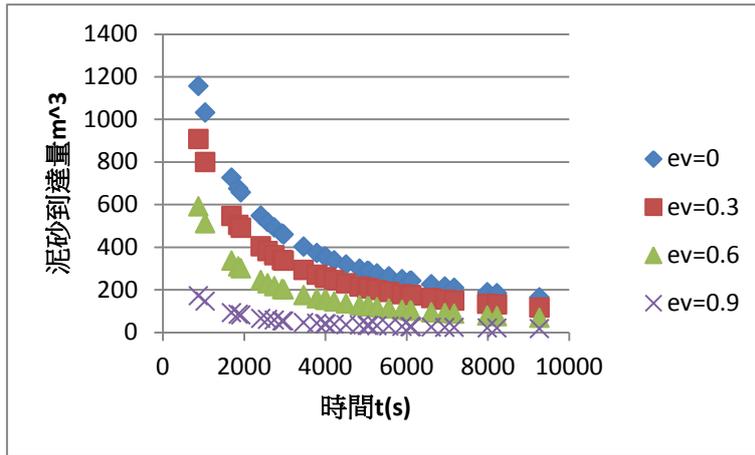


圖 b- 25 Case(2)水深 H=0.4m 砂案例

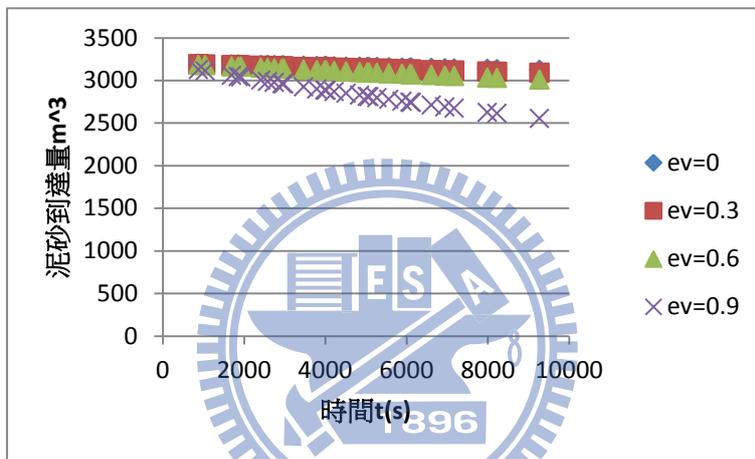


圖 b- 26 Case(2)水深 H=0.4m 沉泥案例

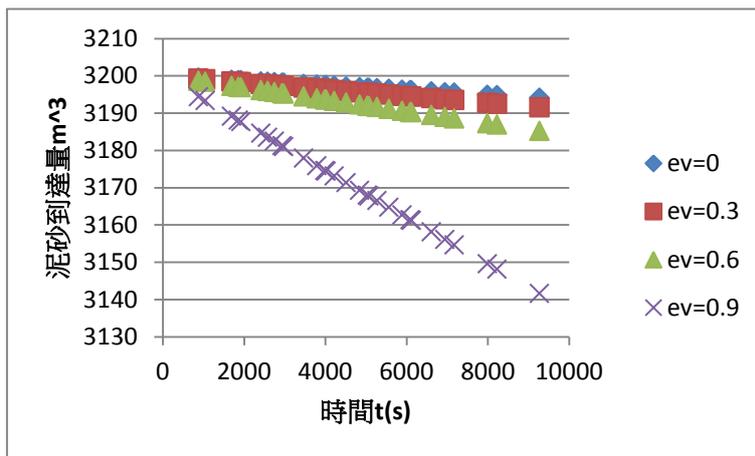


圖 b- 27 Case(2)水深 H=0.4m 黏土案例

表 b- 7 Case(2)水深 H=0.5m 時

SDR 單位為百分比(%)

種類	水深	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR	e_v	SDR
Gravel	0.5	0	3.25	0.3	2.31	0.6	1.34	0.9	0.34
Sand			15.22		11.34		6.95		1.88
Silt			99.02		98.6		97.59		91.15
Clay			99.9		99.89		99.81		99.28

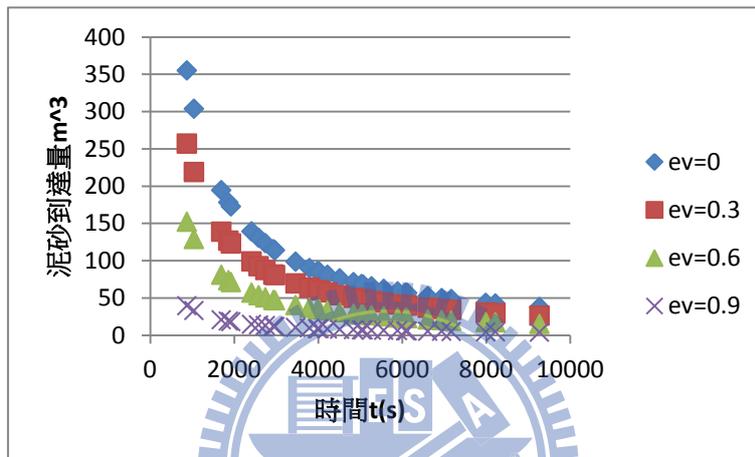


圖 b- 28 Case(2)水深 H=0.5m 礫石案例

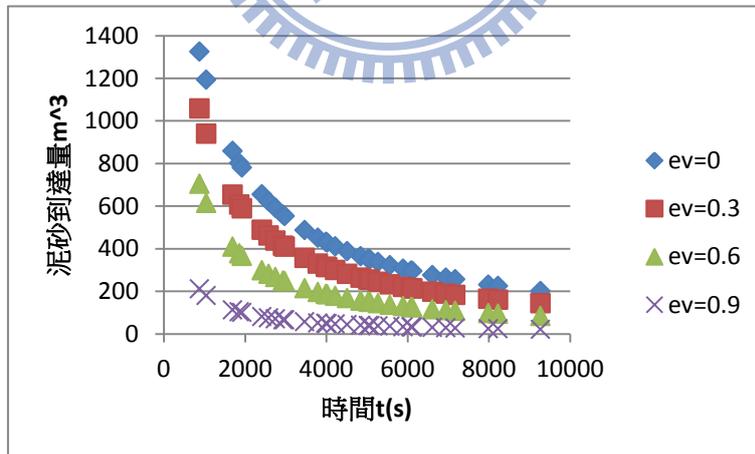


圖 b- 29 Case(2)水深 H=0.5m 砂案例

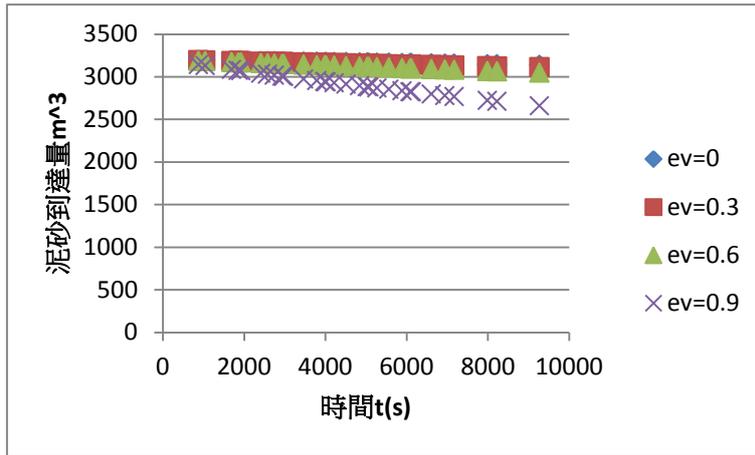


圖 b- 30 Case(2)水深 H=0.5m 沉泥案例

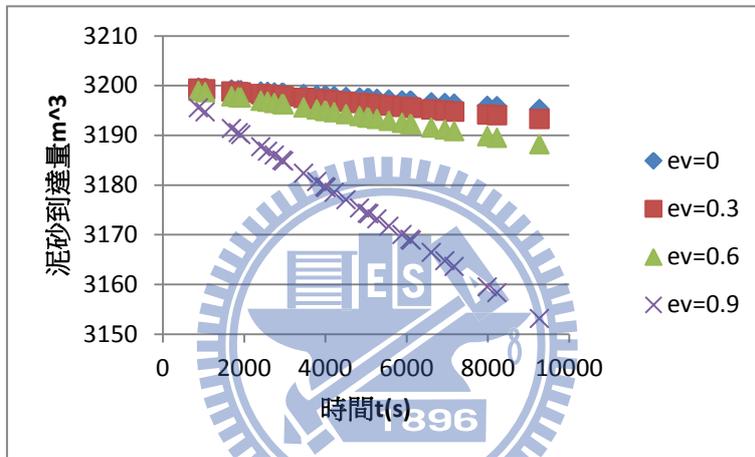


圖 b- 31 Case(2)水深 H=0.5m 黏土案例