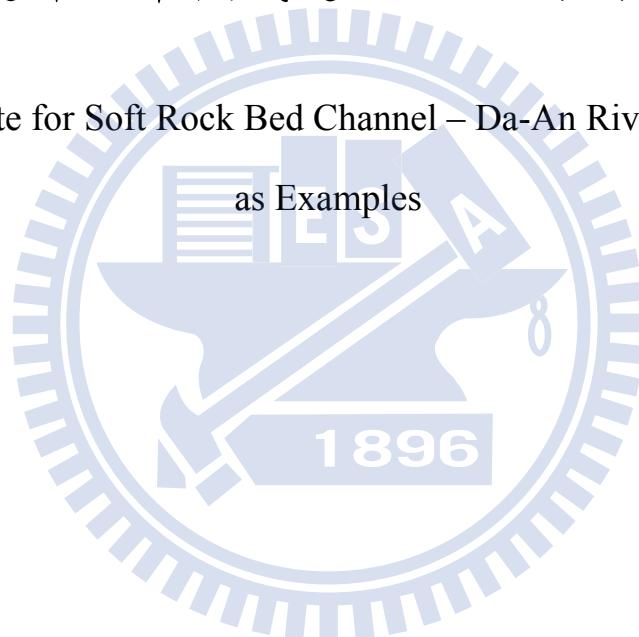


國立交通大學  
土木工程學系碩士班  
碩士論文

軟弱岩床河道沖蝕率模式建立-以大安溪及八掌溪為例

Empirical Erosion Rate for Soft Rock Bed Channel – Da-An River and Ba-Chang River



研 究 生：彭俊文

指 導 教 授：廖 志 中 博 士

中華民國九十八年七月

軟弱岩床河道沖蝕率模式建立-以大安溪及八掌溪為例

Empirical Erosion Rate for Soft Rock Bed Channel – Da-An River and Ba-Chang  
River as Examples

研究生：彭俊文

Student : Chun-Wen Peng

指導教授：廖志中 博士

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of

Master

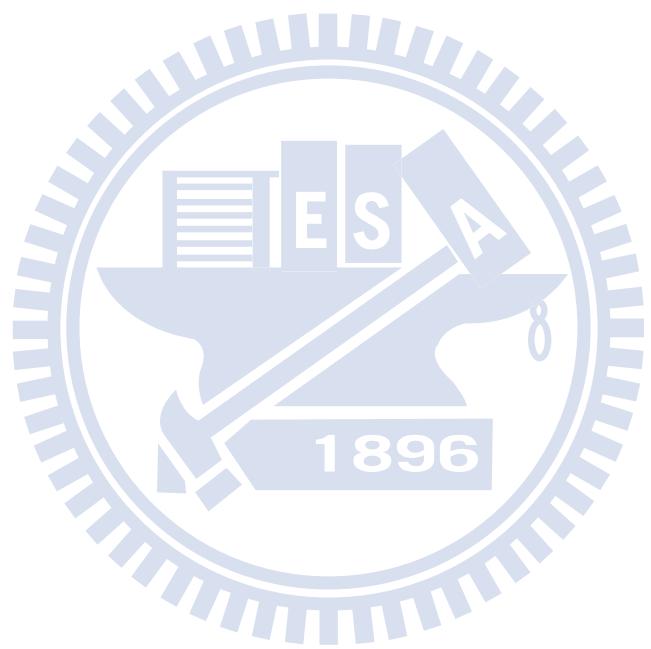
in

Civil Engineering

July 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月



# 軟弱岩床河道沖蝕率模式建立-以大安溪及八掌溪為例

學生：彭俊文

指導教授：廖志中 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 中文摘要

由於自然環境變遷或人為因素影響，台灣西部河川中、下游大多流經軟弱岩床河道，並出現嚴重河道下切現象。會造成如此劇烈之沖蝕行為，在大安溪是因 921 地層抬昇隆起，造成河川快速下切，在八掌溪，是由於上游興建攔河堰、固床工等建設，影響河道砂石向下游的運輸，造成嚴重河道下切。國內對於河道沖蝕問題的探討及處理，多侷限於沖積層河道，缺乏對於岩石河床、岩石河岸的研究。

基於國內多缺乏於軟弱岩床河道的研究，所以本論文特對台灣西半部軟弱岩床河道進行分析研究。如何正確掌握軟岩之沖刷機制及評估方法，是現在比較急迫的問題。雖然現在國內學者近年已對軟弱岩石力學性質與行為、基礎工程行為、邊坡工程行為、隧道工程開挖行為有了略為了解，但對於水流與岩床河道相互行為尚未有深入的探討。

本研究藉由大安溪及八掌溪的地表地質調查、沖蝕現象調查、歷年地文及水文條件整理分析等結果，透過回歸分析方式提出沖蝕率的經驗式，經驗式採用之重要因素包括洪水事件之最大流量、累積流量等水文因子，以及河道坡降等地形因子，沖蝕量則是採用河道主深槽的深度變化量。

關鍵字：大安溪、八掌溪、軟弱岩床、沖蝕機制、沖蝕率模式

# Empirical Erosion Rate for Soft Rock Bed Channel – Da-An River and Ba-Chang River as Examples

Student : Chun-Wen Peng

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

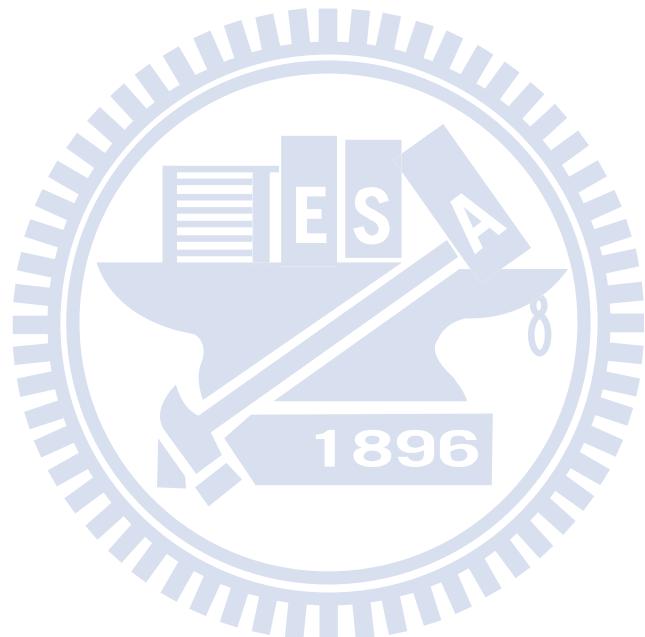
## Abstract

Because of environmental changes or human factors, middle and downstream of rivers of western of Taiwan are flowing through the soft rock bed channel which appears drastic river-bed incision problems. The erosion of soft rock bed channel at two rivers, the Da-An river and the Ba-Chang river is studied in this thesis. The reasons to cause the strong erosion between two rivers are different. The Da-An river is caused by the river bed uplift induced by the 1999 Chi-Chi earthquake. The Ba-Chang river is caused by the the weir building and gravel mining. In Taiwan, Study and mitigation of riverbed erosion is limited to alluvium riverbed.

This thesis aims to propose an empirical erosion rate model based on the study on the two rivers. To development the model, the erosion mechanisms for soft rock bed channel are investigated. Based on the field results, the factors affected the erosion rate are explored including the stream hydraulics, geology, geomorphology, etc. The erosion depth of main channel is calculated from DEM preparing from areal photos and LiDAR with different periods. Also, the corresponding hydraulics data

are collected. Then, regression analysis is adopted for developing the models. An empirical erosion rate model in terms of channel slope, peak discharge, and accumulated discharge is presented in this thesis.

Keywords: Da-An river; Ba-Chang river; softrock riverbed; rock mechanisms; erosion rate model



## 誌謝

很快的，兩年半的時間就這樣消失了，在這兩年半的時間內終於完成了我的碩士論文，真的是一把鼻涕一把眼淚啊...，而能夠讓這論文完成的最重要人物莫過於我的指導教授廖志中老師，很感謝廖老師在這兩年半裡面的「包容」與「鞭策」，才能讓這麼水昆的我能夠畢業，真的很感謝廖老師的細心指導。此外也要感謝另外一位雖然不是指導教授，但是在咪聽時也會一語道破問題在哪的潘以文老師，在這兩年半的期間，這兩位給予鼓勵、包容與鞭策，才能使這本論文生產出來，在此對兩位老師致上無比的敬意。

另外也要感謝四位口試委員謝勝彥副署長、陳春宏博士、陳昭旭老師以及吳建宏老師，不計代價與不辭辛勞的替我口試了「兩次」，真的很感謝各位口試委員，也因為有你們中肯到不行的建議，得以讓這本論文完成。

還有在碩士求學過程中，感謝方永壽老師、林志平老師、單信瑜老師以及黃安斌老師親囊相授的教學，讓我在課堂中獲得不少知識。

接下來就是要感謝潘廖最強的學長，最接近老師境界的黃明萬學長，如果沒有明萬學長，可能論文還是會一直在天上飛，所以明萬學長真的是除了老師以外，在我生命中貴到不行的大貴人，在此對明萬學長致上崇高的敬意。

還有就是外務組一起出差生命與共的潘廖同門師兄弟們，初代隊長國維、防災文驥公主、二代隊長聰吉、龜小開龜炳宏、無色敵鬼里泉、流砂王子偉欽、萬夫莫敵佩錚、認真上課的紹宇、很晚煞車的楚鈞以及內務組辛苦到炸掉的不是肉魚的若瑜、有大腦的禹霆和神龍見

首的詩鳳，喔，忘了還有已畢業(故)的學長，智仁、文凱、永奇，這兩年多的生命有你們一起陪著度過，對於碩士求學生涯，也增添了很多的光采，也很感謝你們在有困難時都很樂意幫忙，讓我度過難關。

當然還有同窗的永政(一八三)、智棟(auto)、哲毅(放空之神)、瑞陽(小朱)、意婷(搜欸)、聖峯(峯哥)、奕蓁(蓁姐)、柏碩(陳魔獸)、彥森(小森森)以及提早離開我們的瑛玲與很久不見的彥琅，感謝你們一起經歷這兩年快樂的時光。

此外還有防災中心的佳廷學姊(沒有你，我們就不用過活了@o@)、慧蓉學姊(大地之母的稱號當之無愧)、俊宏學長夫婦檔(可以探聽到林門動態!?)，感謝你們在我拼命趕論文時給予的激勵。

講了這麼多人，當然也要感謝大學同學們的鼓勵與加油，才能讓我有動力繼續奮戰下去！

最後要感謝我的父母體諒我每天晚回家以及在背後的用力支持與女友玉靈，這才是讓我完成論文的最大動力，因為要感謝的人太多了，所以最後用一句話表示：

**謝謝，有你們，真好！！**

謹將這本論文獻給最愛我的父母

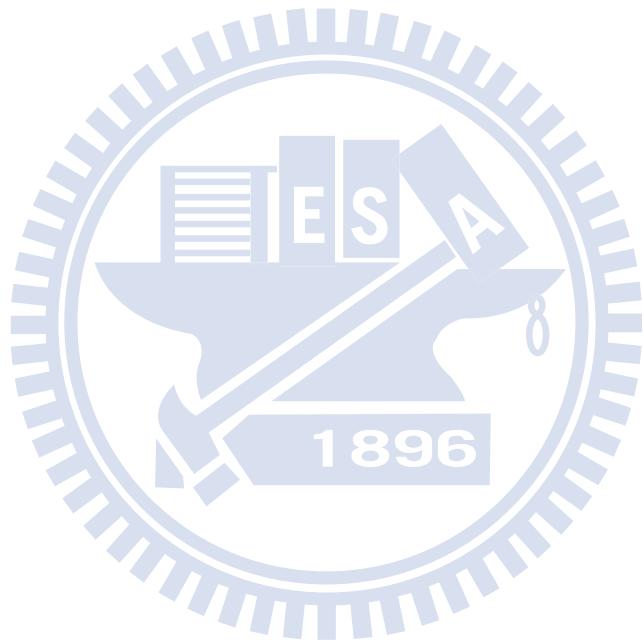
# 目錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
第一章 緒論 .....	1
1-1 研究動機 .....	1
1-2 研究目的 .....	2
1-3 研究流程 .....	2
1-4 論文章節及內容 .....	4
第二章 文獻回顧 .....	5
2-1 岩床河道沖蝕機制 .....	5
2-1-1 磨蝕沖蝕機制(Abrasion) .....	5
2-1-2 塊體抽離機制(Plucking).....	6
2-1-3 穴蝕機制(Cavitation) .....	7

2-1-4 顆粒彈跳沖蝕機制(Saltation).....	8
2-1-5 風化沖蝕機制(Weathering).....	9
2-2 岩床河道沖蝕模式回顧.....	9
2-2-1 Howard and Kerby(1983)岩床沖蝕下切模式 .....	9
2-2-2 Sklar and Dietrich (2004)磨蝕沖蝕模型 .....	10
2-2-3 Greimann and Vandeburg(2008)岩石沖蝕模型 .....	13
2-3 研究區域概況 .....	16
2-3-1 大安溪概況.....	16
2-3-2 八掌溪概況.....	19
2-4 文獻回顧總結 .....	23
第三章 研究方法 .....	26
3-1 相關沖蝕資料整理 .....	26
3-1-1 現地調查 .....	26
3-1-2 數值高程資料製作 .....	26
3-1-3 歷年水文流量資料 .....	36
第四章 研究成果 .....	38
4-1 大安溪地表地質調查 .....	38
4-2 八掌溪地表地質調查 .....	41
4-3 岩床河道沖蝕現象的影響因素 .....	43

4-4 大安溪河道沖蝕成因機制探討 .....	44
4-4-1 常見沖蝕特徵 .....	44
4-4-2 分區沖蝕現象整理說明 .....	46
4-4-3 沖蝕機制探討 .....	50
4-5 八掌溪河道沖蝕成因機制探討 .....	55
4-5-1 研究區域沖蝕現象探討 .....	55
4-5-2 軟岩現地沖蝕機制 .....	61
4-6 沖蝕機制綜合討論 .....	75
4-7 大安溪沖蝕率模型建立 .....	86
4-7-1 沖蝕量計算 .....	86
4-7-2 水文參數 .....	91
4-7-3 地形參數 .....	91
4-7-4 沖蝕量與參數關係 .....	91
4-8 沖蝕率模型驗證 .....	98
4-8-1 八掌溪資料整理 .....	98
4-8-2 八掌溪參數驗證大安溪模型 .....	103
第五章 結論與建議 .....	104
5-1 結論 .....	104
5-2 建議 .....	105

參考文獻.....	106
附錄.....	108
附錄 I 數值影像匹配步驟.....	109
附錄 II 八掌溪大斷面套繪.....	124
附錄 III 大安溪坡度分段分析資料.....	131



## 表目錄

表 2- 1 岩床強度參數 $K_v$ 率定表.....	11
表 3- 1 相機型號資料 .....	27
表 3- 2 大安溪地面控制點測量成果 .....	29
表 3- 3 完成製作之數位高程資料及正射影像 .....	30
表 4- 1 大安溪與八掌溪沖蝕機制形成比較表 .....	83
表 4- 2 各年度各岩層之平均沖蝕量 .....	88
表 4- 3 各年度各岩層之平均沖蝕量 .....	89
表 4- 4 八掌溪歷年大斷面沖蝕量成果 .....	98
表 4- 5 軍輝橋流量站歷年最大瞬時流量紀錄表 .....	100
表 4- 6 八掌溪累積流量估算表 .....	101
表 4- 7 八掌溪歷年坡度 .....	102

# 圖目錄

圖 1- 1 研究流程圖 .....	3
圖 2- 1 土石顆粒磨蝕岩床表面示意圖 .....	6
圖 2- 2 岩塊抽離示意圖 .....	7
圖 2- 3 岩塊抽離機制 .....	7
圖 2- 4 有效的侵蝕工具與床底沉積物的轉換 .....	8
圖 2- 5 流功與抗沖蝕指數關係圖 .....	14
圖 2- 6 大安溪河道縱向剖面圖 .....	16
圖 2- 7 大安溪與車籠埔斷層位置圖 .....	18
圖 2- 8 大安溪區域地質圖 .....	18
圖 2- 9 道將圳至斷面 95 .....	20
圖 2- 10 斷面 95 至吳鳳橋 .....	20
圖 2- 11 八掌溪流域之區域地質圖 .....	21
圖 3- 1 航照片重疊區及地面控制點分布圖 .....	29
圖 3- 2 大型 GPS 示意圖 .....	31
圖 3- 3 大安溪輔助斷面與坡度位置 .....	33

圖 3- 4 大安溪沖蝕量計算示意圖 .....	33
圖 3- 5 斷面修正前示意圖 .....	34
圖 3- 6 斷面修正後示意圖 .....	34
圖 3- 7 主深槽消除雜訊前 .....	35
圖 3- 8 主深槽消除雜訊後 .....	35
圖 3- 9 八掌溪歷年大斷面測量最低點連線 .....	36
圖 3- 10 大安溪流域雨量站位置分佈 .....	37
圖 4- 1 大安溪劇烈沖蝕河段地表地質圖 .....	40
圖 4- 2 大安溪劇烈沖蝕河段地表地質 AA' 剖面圖 .....	40
圖 4- 3 仁義潭攔河堰至 94 斷面 1/5000 區域地質圖與剖面圖 .....	42
圖 4- 4 光滑的磨蝕表面及滑槽 .....	45
圖 4- 5 碉石之衝擊刮蝕痕跡及對於節理的擴張 .....	45
圖 4- 6 岩塊抽離現象 .....	45
圖 4- 7 水流衝擊或渦流所造成的孔洞沖蝕痕跡 .....	45
圖 4- 8 順向河段砂頁岩互層的侵蝕現象 .....	47
圖 4- 9 順向河段塊狀砂岩的侵蝕現象 .....	47

圖 4- 10 砂頁岩互層的岩塊抽離與階梯狀地形 .....	48
圖 4- 11 水平河段塊狀砂岩的流槽與塊體抽離 .....	48
圖 4- 12 逆向河段層狀岩石及塊狀砂岩的侵蝕現象 .....	49
圖 4- 13 極厚層頁岩的侵蝕現象 .....	49
圖 4- 14 順向河段層狀岩石的差異侵蝕機制 .....	50
圖 4- 15 順向河段層狀岩石由下游向上游方向侵蝕機制 .....	51
圖 4- 16 水平河段層狀岩石的侵蝕機制 .....	52
圖 4- 17 水平河段塊狀砂岩的侵蝕機制 .....	53
圖 4- 18 逆向河段的主要侵蝕機制 .....	54
圖 4- 19 現地符合文獻沖蝕機制的照片 .....	57
圖 4- 20 現地觀察到的軟岩沖蝕現象 .....	60
圖 4- 21 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形 .....	64
圖 4- 22 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為 .....	68
圖 4- 23 砂頁岩互層的磨蝕侵蝕 .....	71
圖 4- 24 粉砂岩侵蝕速率較慢形成障礙物 .....	73
圖 4- 25 壺穴與滑槽的現象 .....	73

圖 4- 26 圖 4-21-sec.A 橫剖面圖 .....	74
圖 4- 27 南二高橋至仁義潭攔河堰各斷面位置 .....	76
圖 4- 28 差異侵蝕所造成的塊體抽離 .....	77
圖 4- 29 大安溪下游塊體抽離 .....	77
圖 4- 30 八掌溪穴蝕侵蝕 .....	78
圖 4- 31 大安溪下游頁岩風化 .....	78
圖 4- 32 落差大河段與顆粒彈跳沖蝕圖 .....	79
圖 4- 33 大安溪穴蝕侵蝕 .....	79
圖 4- 34 大安溪各機制分佈圖 .....	84
圖 4- 35 八掌溪各機制分佈圖 .....	85
圖 4- 36 歷年主深槽位置之縱向地形高程 .....	86
圖 4- 37 判斷沖蝕種類示意圖 .....	90
圖 4- 38 歷年主深槽縱向地形與地層分佈圖 .....	90
圖 4- 39 歷年數值地形與歷年洪水事件時間關係圖 .....	92
圖 4- 40 沖蝕量與最大流量之關係 .....	93
圖 4- 41 沖蝕量與累積流量之關係 .....	94

圖 4- 42 沖蝕量與最大流量×累積流量之關係.....	94
圖 4- 43 沖蝕量與坡度之關係 .....	95
圖 4- 44 沖蝕量與最大流量×坡度之關係.....	96
圖 4- 45 沖蝕量與累積流量×坡度之關係.....	96
圖 4- 46 沖蝕量與坡度×最大流量×累積流量之關係 .....	97
圖 4- 47 八掌溪資料與大安溪資料關係圖 .....	103
A2- 1 100、99、98 歷年斷面測量資料 .....	124
A2- 2 97、96、95 歷年斷面測量資料 .....	125
A2- 3 101、102、103 歷年斷面測量資料 .....	126
A2- 4 104、105、106 歷年斷面測量資料 .....	127
A2- 5 107、108、109 歷年斷面測量資料 .....	128
A2- 6 110、111、112 歷年斷面測量資料 .....	129
A2- 7 113、114、115 歷年斷面測量資料 .....	130
A3- 1 88 年坡度修正前與修正後 .....	131
A3- 2 89 年坡度修正前與修正後 .....	132
A3- 3 90 年坡度修正前與修正後 .....	133

A3- 4 91 年坡度修正前與修正後 .....	134
A3- 5 93 年坡度修正前與修正後 .....	135
A3- 6 94 年坡度修正前與修正後 .....	136
A3- 7 95 年坡度修正前與修正後 .....	137
A3- 8 96 年坡度修正前與修正後 .....	138
A3- 9 97 年坡度修正前與修正後 .....	139
A3- 10 98 年坡度修正前與修正後 .....	140



# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機

台灣西部麓山帶之地質年代極為年輕，出露之岩層包括上新世及更新世的地層，其組成岩石大多由節理不發達、層理明顯、厚度不一的砂岩、頁岩、及砂頁岩互層所組成。此類岩石普遍具有膠結不良、遇水極易軟化且極易受沖蝕之特性。在強度性質上為介於岩石與過壓密土壤之間的「軟岩」材料。當此類岩石在護甲層沖失後裸露於河床，在水流的作用下會產生嚴重的沖刷侵蝕，且其沖蝕行為與顆粒性材料有相當大之差異，所以瞭解軟岩河床的沖蝕行為為研究我國西部河川沖蝕的重要課題。

台灣西部主要河川之中、下游大多流經西部麓山帶軟岩分布區域，近年來由於受到自然環境變遷或人為因素影響，部分河段已經出現嚴重河道下切現象。本論文研究區域中，大安溪卓蘭大橋上游河段受到921地震影響河道抬昇隆起，八掌溪是由於上游興建攔河堰、固床工等建設，影響河道砂石向下游的運輸，漸漸使得軟岩河床裸露而造成目前嚴重下切狀況。

國內對於河道沖蝕問題的探討及處理，多侷限於沖積層河道，缺乏對於岩石河床、岩石河岸的研究，雖然現在國內學者近年已對軟弱岩石力學性質與行為有了略為了解，但對於水流與岩床河道相互行為尚未有深入的探討。所以本研究係針對台灣西部大安溪及八掌溪的軟弱岩床河道進行，期能正確掌握軟岩之沖刷機制及評估方法。

## 1-2 研究目的

本研究以大安溪及八掌溪為例，針對軟岩岩床劇烈沖蝕河段的沖蝕成因與過程進行資料蒐集與現場調查，探討沖蝕機制，建立沖蝕率模式，主要研究目的為：

- 1.依據現地調查歸納之沖蝕機制，探討地形、岩性、水文等各相關參數對於河道沖蝕之影響。
- 2.蒐集整理歷年地形及水文資料，以及研究區域之岩性資料，據以建立軟弱岩床河道沖蝕率模式。
- 3.軟弱岩床河道沖蝕率模式驗證與探討。

## 1-3 研究流程

圖 1-1 為本研究之流程圖，包含以下幾個工作項目：

### 1.文獻回顧：

文獻回顧主要內容包括岩床河道沖蝕機制、岩床河道沖蝕模型與研究區域介紹等等。

### 2.現地調查：

調查岩床河道的沖蝕現象，依據調查結果歸納沖蝕機制。

### 3.河道沖蝕資料收集、建立、與分析：

數值高程製作：使用 PCI GEOMATICA 將航空照片做影像解算，進行數值高程資料製作，以及由空載光達獲得之數值高程資料，作為軟岩河道地形變化之基礎資料，計算其地形參數與沖蝕量。

### 4.水文參數：

採用控制雨量站資料，以運動波-地貌瞬時單位歷線模式 (Kinematic Wave based Geomorphic Instantaneous Unit Hydrograph,

KW-GIUH)進行卓蘭站(卓蘭大橋)流量歷線計算，獲得水文參數因子。

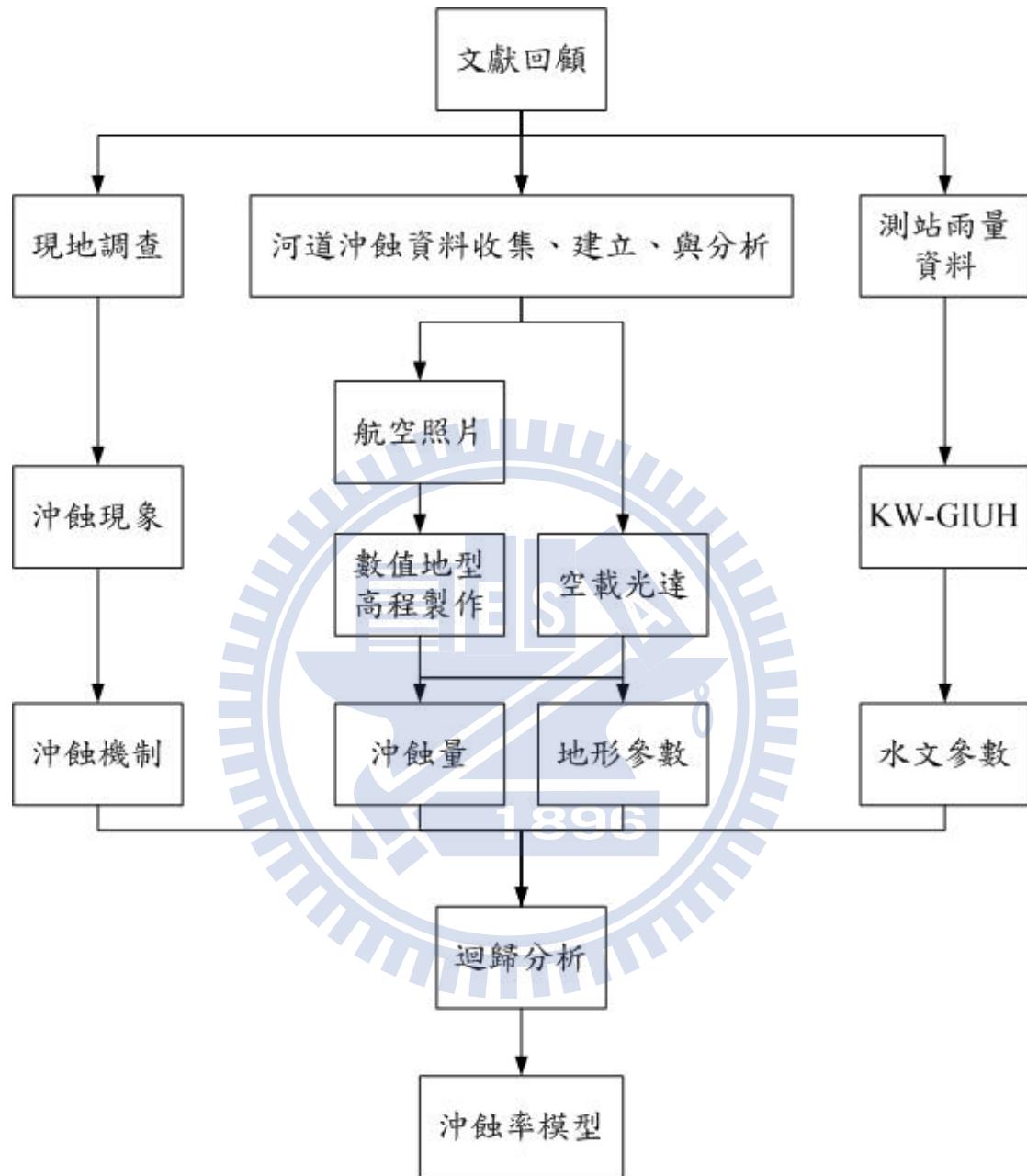


圖 1-1 研究流程圖

## 1-4 論文章節及內容

本論文共分為六章，各章主要內容說明如下：

第一章：說明本論文之研究動機、目的與研究流程。

第二章：回顧河道沖蝕機制及沖蝕經驗式，包含磨蝕沖蝕和塊體抽離沖蝕的機制、公式，介紹研究區域大安溪及八掌溪概況。

第三章：說明本論文沖蝕量、水文因子及地形參數如何獲得及使用參數介紹。

第四章：探討說明軟弱岩床沖蝕成因與機制。

第五章：說明本論文的研究成果。

第六章：本研究之結論與建議。



## 第二章 文獻回顧

軟弱岩床的沖蝕行為與河床岩石條件、水流條件與地形條件息息相關，要建立合理的軟弱岩床沖蝕率模式，須妥善考量這些相關因素的影響作用。本論文將以各學者所提的沖蝕機制與沖蝕模型為基礎，進行沖蝕因子的探討，配合現場觀察，作為建立軟弱岩床沖蝕率模式的基礎。

本章整理討論相關文獻與研究區域背景資料，內容包括：(1)岩床河道沖蝕機制(2)岩床河道沖蝕經驗式模型(3)研究區域概況(4)文獻回顧總結。

### 2-1 岩床河道沖蝕機制

#### 2-1-1 磨蝕沖蝕機制(Abrasion)

Whipple et al. (2000) 進行一系列現地岩床沖蝕案例之探討，指出影響岩床沖蝕機制之影響因子。他們認為影響岩床沖刷機制有關岩體本身的影響參數包括岩性、弱面間距、層面與節理性質等。當岩床岩體之弱面間距大於一公尺時，此岩體視為完整岩盤，而此種岩體所受之沖蝕主控機制為流水本身或流水夾帶懸浮載及河床載顆粒磨蝕岩床之表面，使岩床表面以膠結的顆粒逐漸脫離而造成磨蝕沖蝕(abrasion)之破壞行為。在流況改變(如渦流)下，河水流動複雜，會出現較劇烈的磨蝕沖蝕，形成滑槽(flute)與壺穴(potheole)等沖蝕現象如所示。

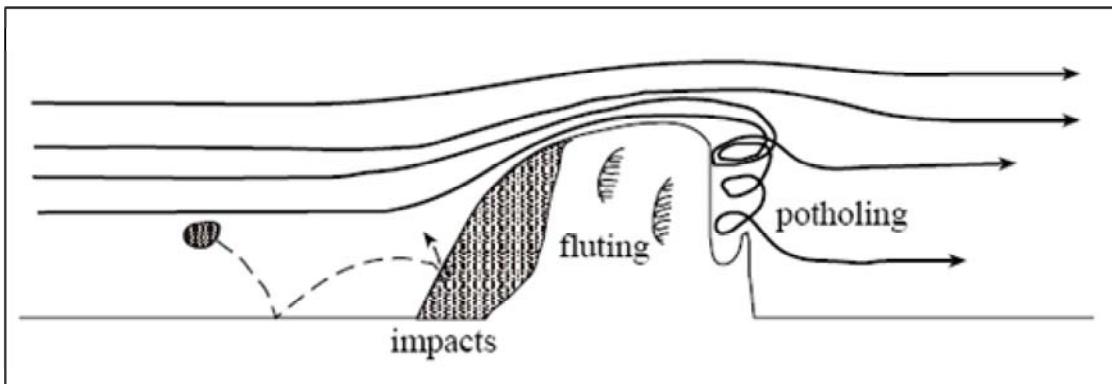


圖 2-1 土石顆粒磨蝕岩床表面示意圖(Whipple, et al., 2000)

Graham (1987) 認為懸浮載沖蝕效應會受局部河床地形地貌影響甚大，其原因在於不規則地形易於發生渦流，而當渦流加劇，穴蝕強化懸浮載沖蝕效應，局部沖蝕必然也更為顯著。由混凝土材料的研究結果顯示，脆性岩石之穴蝕阻抗與材料之壓縮強度正相關，當膠結破壞，材料中之顆粒就脫離，因此膠結力(cementation)甚具重要性，顆粒之硬度則無大的影響。

## 2-1-2 塊體抽離機制(Plucking)

Annandale(1995) 曾提出一個由岩塊脫離之定性沖蝕模式如圖 2-2，然而岩塊脫離過程乃非常複雜之過程，可能需經歷一系列材料風化、流入沙粒逐漸頂開弱面(sand-wedging)、弱面經磨蝕、弱面裂口擴展、經水流強烈作用而帶離等過程之交互作用，岩塊也可能因懸浮載中大顆粒撞擊而脫離，其種種內含非常複雜，欲做到完全定量預測之模型時有其困難。

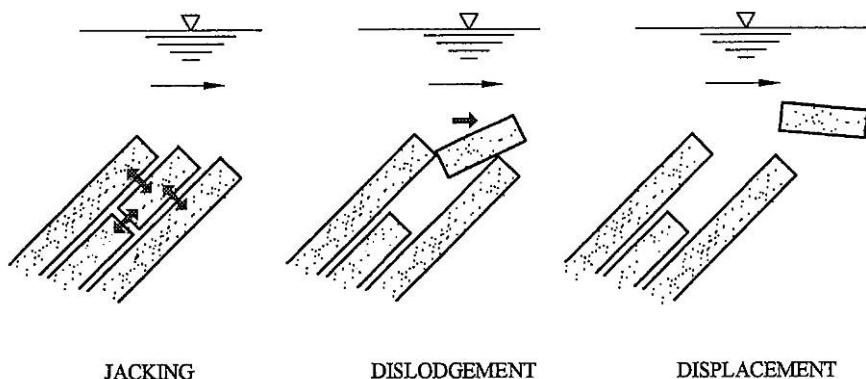


圖 2-2 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)

Whipple et al. (2000) 定性探討影響與形成岩塊抽離之重要程序，如圖 2-3 所示，抽離過程中可能先需小裂縫經水力推張擴大為破裂面、隨著河床顆粒逐漸地透過磨蝕作用沖蝕弱面、再加上物理或化學風化作用，讓弱面完全擴展連通，最後終於導致獨立岩塊之鬆動、脫離。當岩體內弱面間距小於一公尺時，岩塊脫離就可能成為岩床河道下切之重要機制。

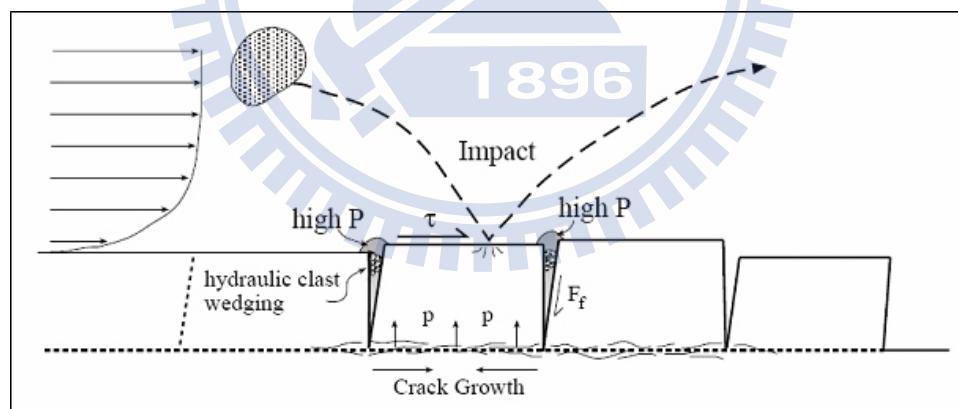


圖 2-3 岩塊抽離機制(Whipple, et al., 2000)

### 2-1-3 穴蝕機制(Cavitation)

Whipple et al. (2000) 提出當水流受到障礙物或階狀落差造成流況改變時，其下游側受沖蝕特別顯著。河川中若有障礙物，其下游側較為顯著之岩床沖蝕，則多源自水流中夾帶懸浮載之磨蝕沖蝕貢獻。

除了磨蝕損耗，穴蝕(cavitation)之角色也不能忽視，壺穴與滑槽之構造常與渦流流況下出現之穴蝕沖蝕有關。

#### 2-1-4 顆粒彈跳沖蝕機制(Saltation)

Whipple & Tucker (1999) 討論河床載顆粒彈跳對於岩床沖蝕之影響，認為較大顆粒彈跳對於岩性十分軟弱或岩石之弱面不發達的岩體，破壞效果與程度具有顯著之跡象。

Gilbert(1877) 認為河川沈積料(sediment)供應一方面可扮演磨削岩床之工具性效應(tool effect)，一方面又可扮演覆蓋保護之覆蓋性效應(cover effect)，最大岩床磨蝕率會出現在相對中等程度之河川沈積料供應條件下。

Sklar & Dietrich (2004) 提出河床受河床載磨蝕衝擊的頻率與帶動顆粒運動的能力受河床載顆粒大小所控制，河床載顆粒被帶起、跳動對床底的磨蝕行為，是河床載作為有效的侵蝕工具與成為床底沉積物的轉換關係如圖 2- 4。

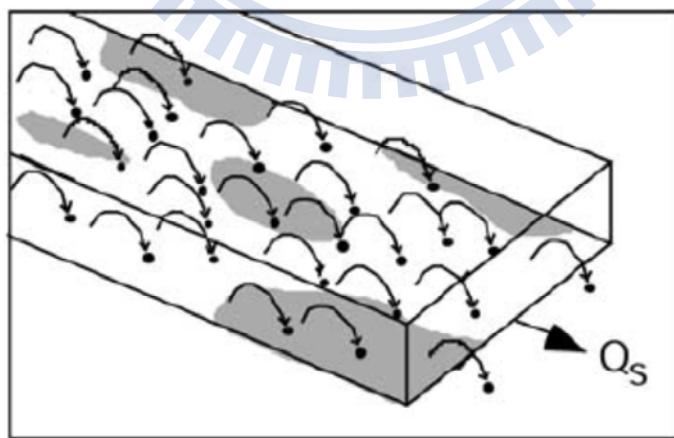


圖 2- 4 有效的侵蝕工具與床底沉積物的轉換(Sklar & Dietrich, 2004)

## 2-1-5 風化沖蝕機制(Weathering)

Stock, et al. (2005) 長期實際量測、整理世界多處(包含台灣)岩床河道之沖蝕速率資料。這些岩床河道受河床載磨蝕(bed-load abrasion)或塊體抽離(plucking)作用，其底床岩石多少都傾向於受反覆乾濕循環而由完整岩石漸弱化成頁狀或碎片狀材料，而易於被強大水流所帶走。Stock, et al. (2005)整理岩石張力強度與沖蝕速率之相對數據，認為沖蝕速率與張力強度平方根成反比。若無沖積層作為護甲層，此類易於因風化作用所致之易弱化岩床其下切速率甚至高於造山運動之地殼抬升速率。

## 2-2 岩床河道沖蝕模式回顧

### 2-2-1 Howard and Kerby(1983)岩床沖蝕下切模式

許多探討岩床下切的基本概念皆源自於假設岩床下切速率與岩床面抵抗來自河川沉積料輸送所造成之磨蝕剪應力成正相關，進而推導出某種合理化公式。基於此一概念，Howard and Kerby 假設岩床下切速率  $E$  與床面剪應力為幕函數相關性，繼而考量岩床下切速率  $E$  與河川沉積料輸送率也會存在正相關之關係。又因為河川沉積料輸送率與河川水流量與坡度正相關，因此岩床下切速率  $E$  就應該與上游集水區面積  $A$ (供應下游河川沉積量與流量)與坡度  $S$  有正相關之關係，典型的表示可如下式：

$$E = KA^m S^n \quad (\text{式 2-1})$$

其中  $K$ ， $m$  與  $n$  皆為模式中的參數

## 2-2-2 Sklar and Dietrich (2004) 磨蝕沖蝕模型

泥沙顆粒在岩盤上的運動，是因為顆粒碰撞到裸露岩盤所引發沖蝕現象。推移載(bed load)和懸浮載(suspension load)對於磨蝕沖蝕都有貢獻。

許多經驗式的岩石沖蝕模型都有企圖合併水力與磨蝕沖蝕兩個模型成為一個單一方程式。Sklar and Dietrich(2006)整理關於磨蝕沖蝕與水力沖蝕相關模型種類與比較，包含如下：

1. 沒有泥沙顆粒的影響。
2. 只有粒徑大小的影響。
3. 泥沙供應量的影響。
4. 只有泥沙供應和粒徑大小的影響。
5. 只有粒徑大小和工具效應的影響。
6. 只有工具層與覆蓋層效應的影響。
7. 工具、覆蓋效應和運動門檻值的影響。
8. 工具、覆蓋、運動的門檻值和懸浮載的門檻值影響。

另外也增加了額外有關於沖刷率的影響項目，包括顆粒尺寸、泥砂供應量、工具或是覆蓋效應。

Sklar and Dietrich (2004) 由顆粒在岩床上彈跳，提出了一個磨蝕的基本物理模型。岩床沖刷率的表示方式為單位顆粒衝擊岩石平均剝離體積、單位面積單位時間下顆粒的衝擊率與岩床裸露比率三項乘積。除了顆粒質量與岩床特性外，剝離體積是和顆粒衝擊速度垂直分量的平方成正比。顆粒衝擊率與泥沙流通量成正比，但與彈跳長度成反比。最後此沖蝕率模型可表示如下：

$$E_a = \frac{Y}{k_v \sigma_T^2} \frac{w_s^2 q_s}{L_s} F_e \quad (式 2-2)$$

$E_a$  為河床載的磨蝕沖蝕率(m/s)； $w_s$  為泥沙顆粒衝擊速度(m/s)； $L_s$  為泥沙顆粒彈跳長度(m)； $q_s$  為每單位寬度的泥砂供應量(kg/m/s)； $Y$ 為岩石彈性模數(MPa)； $k_v$ 為岩石沖蝕參數； $\sigma_T$ 為岩石張力強度(MPa)； $F_e$ 為岩石裸露比率。

軟岩的 $\sigma_T$ 與 $Y$ 須使用岩心在實驗室試驗獲得。Sklar and Dietrich (2004)嘗試使用多樣化岩石種類，從實驗室磨蝕試驗直接量測 $k_v$ 如表 2- 1。

表 2- 1 岩床強度參數  $K_v$  率定表 (Sklar and Dietrich, 2004)

Table 4b. $K_v$ Calibration From Single-Grain Abrasion Mill Experiments					
Rock Type	$\sigma_t$ , MPa	$\rho_s$ , kg/m <sup>3</sup>	$E$ , g/hr	$E^a$ , m/s	$k_v$
Artificial (20:1) <sup>b</sup>	0.163	2300	215	$8.69 \times 10^{-7}$	$4.07 \times 10^{12}$
Artificial (6:1)	0.448	2300	71	$2.87 \times 10^{-7}$	$1.63 \times 10^{12}$
Artificial (4:1)	1.12	2300	5.1	$2.06 \times 10^{-8}$	$3.63 \times 10^{12}$
Sandstone	1.583	2450	2.9	$1.11 \times 10^{-8}$	$3.37 \times 10^{12}$
Graywacke	9.1	2500	0.22	$8.18 \times 10^{-10}$	$1.38 \times 10^{12}$
Limestone	9.78	2600	0.21	$7.51 \times 10^{-10}$	$1.30 \times 10^{12}$
Welded tuff	10.9	2600	0.036	$1.26 \times 10^{-10}$	$6.23 \times 10^{12}$
Quartzite	19	2600	0.008	$2.86 \times 10^{-11}$	$9.09 \times 10^{12}$
Andesite	24.4	2600	0.030	$1.06 \times 10^{-10}$	$1.47 \times 10^{12}$

<sup>a</sup>Erosion rate units conversion made with bedrock disc area of 0.03 m<sup>2</sup>.  
<sup>b</sup>Numbers in parenthesis indicate sand to Portland cement ratios for artificial sandstone.

Sklar and Dietrich (2004)基於水流與泥沙特性之下，對於 $w_s$ 與 $L_s$ 做了解釋，一個對於彈跳長度的經驗方程式可以由一些實驗資料獲得，其方程式如下：

$$\frac{L_s}{D_s} = 8 \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^{0.88} \left[ 1 - \left( \frac{u_*}{w_f} \right)^2 \right]^{-0.5} \quad (式 2-3)$$

$D_s$  為泥沙參數； $\tau, \tau_c$  為床底剪應力與臨界剪應力； $w_f$  為泥沙沉降速度； $u_*$  為剪力速度( $\sqrt{\tau/\rho}$ )。

當  $u_*/w_f$  變小，泥沙粒徑增加，從而導致彈跳長度減小與增加泥沙磨蝕。

衝擊速度( $w_s$ )假設是泥沙顆粒平均沉降速度( $w_d$ )的二次方，泥沙顆粒的平均沉降速度從實驗的資料獲得，可得方程式如下：

$$\frac{w_d}{u_*} = 0.4 \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^{0.18} \left[ 1 - \left( \frac{u_*}{w_f} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{式 2-4})$$

當泥沙粒徑增加，衝擊速度也會增加。

合併磨蝕沖蝕模型所有方程式，可以將方程式寫成如下：

$$E_a = \frac{0.08 R_b g Y}{k_v \sigma_T^2} q_s \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^{-0.5} \left[ 1 - \left( \frac{u_*}{w_f} \right)^2 \right]^{1.5} F_e \quad (\text{式 2-5})$$

$R_b = \rho/\rho_s - 1$ 。在最初的模型， $F_e = 1 - q_s/q_t$  使用來解釋岩石的裸露程度， $q_t$  為每單位寬度的泥沙供應量( $\text{kg/m/s}$ )，而且  $F_e$  也可以解釋覆蓋層效應，表達方式為  $F_e = 1 - h_s/h_{tr}$ 。

上式的磨蝕沖蝕模型有以下特性：

- (1) 隨著適當的泥沙供應流通量( $q_s$ )，將會使沖蝕達到最大量，其中持續增加泥沙供應將會減少侵蝕，這是由於岩盤上的沉積物的緣故。
- (2) 沖蝕開始發生在當床底剪應力大於臨界剪應力時，但是增加床底剪應力會減少沖蝕率，這是由於泥沙的懸浮載增加與彈跳長度增加的緣故。
- (3) 相同的沖蝕情況之下，較大的沉降速度會造成較大的沖蝕速率。

(以上整理自 Greimann and Vandeburg(2008))

### 2-2-3 Greimann and Vandeburg(2008)岩石沖蝕模型

除了河床載可以造成岩床磨蝕之外，清水水流亦可以造成岩床的沖蝕，例如包含閉口節理的岩體，受到水流瞬間強烈沖擊或是持續沖擊的狀況下，造成節理連通使岩塊鬆動後，即可受水流帶動而脫離岩體造成侵蝕作用 (Bollaert and Schleiss, 2005)。水力沖蝕對於軟弱或是高度破碎的岩塊是一個重要的機制(Sklar and Dietrich, 2004)，台灣大多數河床岩石為軟岩，水力沖蝕可能是很重要的機制，沖刷的估計或模式建立時應該包含此機制。

水力沖蝕率通常是水流作用力的函數，但是水流作用力變數的選取並不容易。理論上，瞬間壓力差和剪應力比穩定的力量作用在岩石上，更容易產生岩石破壞(Annandale, 2006)。這指出瞬間剪應力或是紊流波動應該使用在水力沖蝕中。然而，對於建立模型，使用瞬時量是不實際的，必須使用平均量。因此，水力力量對於岩石沖刷的方程式，通常是經驗的性質。所以應該注意的是，即使在水力沖蝕控制的某個特定場址，經驗式的水力沖蝕模型可能會表現不佳。

有一些經驗的沖蝕模型在過去已經有用來估計岩床的沖蝕，Sklar and Dietrich (2006)整理出一個典型的函數如下：

$$E = C\psi^n \quad (\text{式 2-6})$$

$E$  為沖蝕率， $C$  為岩石的經驗常數， $\psi$ 為水流參數(ex：流功或剪應力)， $n$  為經驗指數。

水流參數包含了兩種主要的形式：流功或剪應力， $C$  及  $n$  必須依據場址條件律定， $C$  為無因次化常數。

藉由 Annandale(1995, 2006)流功與沖蝕指數相關研究，其臨界流功  $P_{crit}(\text{kW/m}^2)$  與沖蝕指數  $K_h$  之實測資料關係式如下：

$$P_{crit} = \begin{cases} 0.48K_h^{0.44} & , K_h \leq 0.1 \\ K_h^{0.75} & , K_h > 0.1 \end{cases} \quad (\text{式 2-7})$$

這些資料在過去尚未被發表，但是從這些資料可以看出有沖刷與未沖刷的分布點，藉此做出一條沖刷與未沖刷的分界線，如圖 2-5。

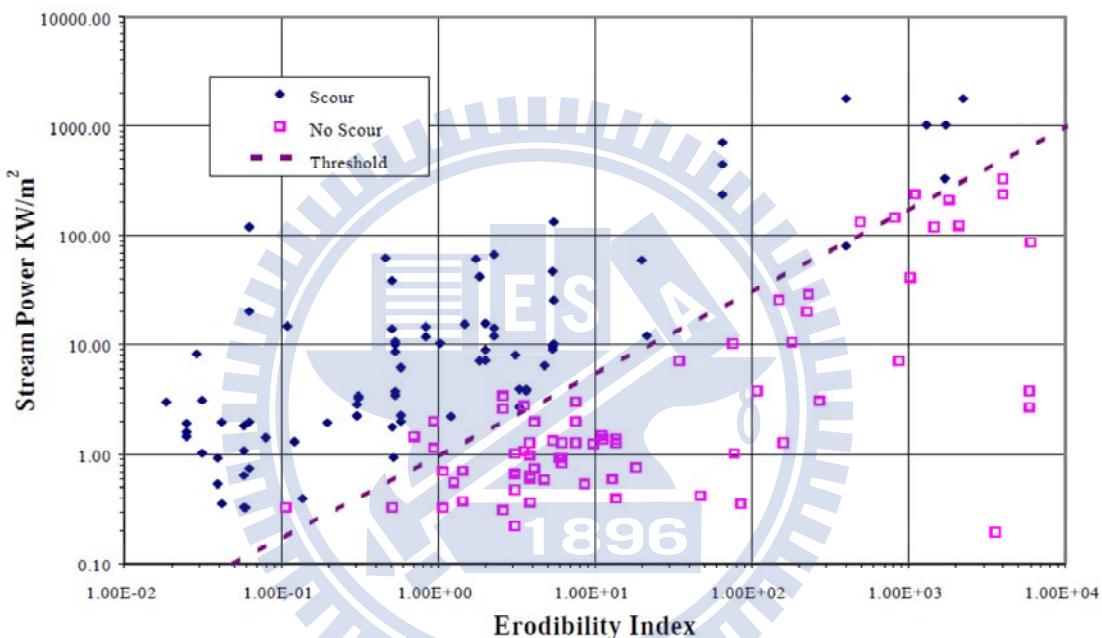


圖 2-5 流功與抗沖蝕指數關係圖(Annandale, 2006)

Annandale(2006)並未繼續發展這個想法去計算岩石材料的沖蝕率，只有計算何時開始沖蝕與最大沖刷深度。

抗沖蝕指數獲得方法於第三章與附錄 I 有詳細說明。

透過現地觀察可以評估一個研究區域河床岩石的主要沖蝕機制，這可能是水力沖蝕機制主控，或是磨蝕沖蝕機制主控，或者是兩者結合的機制所主控。

Greimann and Vandeburg(2008) 提出了岩石沖蝕模型。岩石沖刷率的計算方法為合併以流功為基礎的水力沖蝕模型(包含超額剪應力)與推移載磨蝕沖蝕模型，方程式如下：

$$E = k_p U \left( \frac{\tau}{\tau_{cri}} - 1 \right)^n \left( 1 - \frac{h_s}{h_{tr}} \right) + E_a \quad (式 2-8)$$

$E$  為總岩石沖蝕率(m/s)； $k_p$  為水力沖蝕係數； $U$  為深度平均沉降速度(m/s)； $\tau, \tau_{cri}$  為水力沖刷的剪應力與臨界剪應力； $h_s, h_{tr}$  為岩石的覆蓋層厚度與過渡層厚度(transition thickness)(m)， $n$  為經驗指數， $E_a$  為磨蝕沖刷速率(m/s)。

Greimann and Vandeburg(2008)推導臨界剪應力的計算方法，採用 Annandale(1995; 2006)所提出的臨界流功概念，將臨界流功與臨界剪應力的關係式表為：

$$\tau_{cri} = \left[ \frac{P_{cri} \sqrt{\rho}}{7.66} \left( \frac{k_s}{R} \right)^{\frac{1}{6}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (式 2-9)$$

$\rho$ 為水密度， $R$  為水力半徑， $k_s$  代表粗糙高度。 $k_s/R$  的次方項只有  $1/9$ ，其影響範圍只介於  $0.6\sim0.9$  之間。(以上整理自 Greimann and Vandeburg(2008))

## 2-3 研究區域概況

### 2-3-1 大安溪概況

大安溪位於台灣中部台中縣、苗栗縣境內，南臨大甲溪，北為後龍溪。上游發源於雪山山脈之大壩尖山(海拔 3,488 公尺)，全流域地勢由東側高峻逐漸向西傾斜，主流長度約 96 公里，流域面積約 758 平方公里，海拔 100 公尺以下面積僅有 17 平方公里。大安溪上游自發源地至雙崎屬山地區域，河道平均坡降約為 1/50，雙崎以下河流漸出谷嶺而較為平緩，河道平均坡降約為 1/76(圖 2- 6)。

(圖片修改自大安溪流域聯河整體治理規劃報告，91 年)

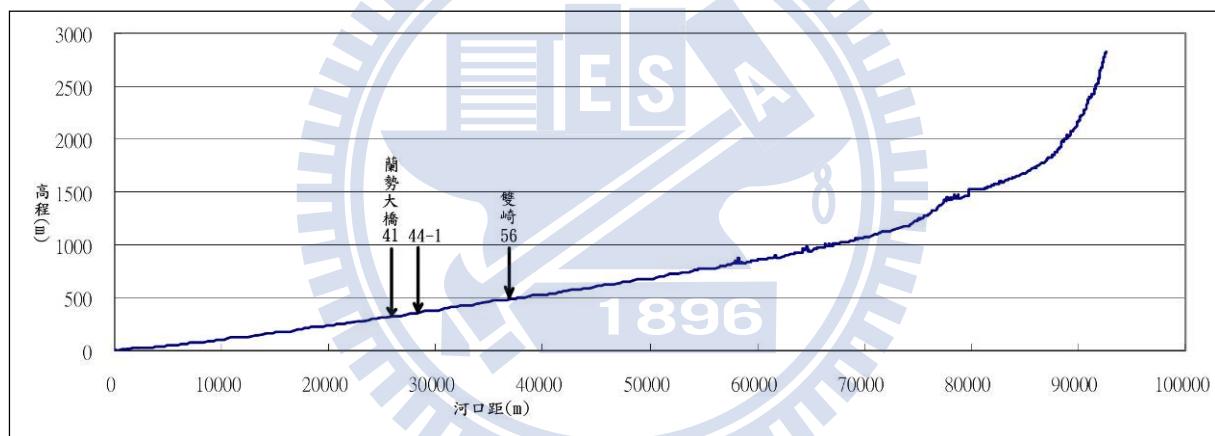


圖 2-6 大安溪河道縱向剖面圖

民國 88 年 9 月 21 日台灣中部發生芮氏規模 7.3 強烈地震，此次地震乃車籠埔斷層活動所引起，該斷層為一南北走向、由東向西逆衝之斷層，斷層長約 100 公里，斷層活動結果造成上盤（東側）隆起自 1 公尺以下至 8、9 公尺不等，大致上隆起高度由南向北遞增，斷層活動範圍南至瑞竹以南的桶頭，北至豐原之後即轉向東，在大甲溪流域的石岡東勢一帶產生一些新破裂面，並繼續延伸至大安溪卓蘭內灣一帶(圖 2- 7)(地調所，88 年)。

大安溪達峽谷段河寬約為 500 公尺，由於 921 地震將大安溪大峽谷段抬升，抬升河段岩體如同拱隆般突出於河道上，造成砂石淤積於上游，拱隆河段上由於坡度變陡，原上覆卵礫石層逐漸向下游流失而至使岩床裸露，直接受到水流侵蝕，至使軟弱岩床快速向下游侵蝕切割型成峽谷狀之深槽流路，主深槽從 88 年至 97 年最大沖刷深度超過 20 公尺，98 年開始回淤。

圖 2-8 為大安溪 1/50000 區域地質圖，大安溪於 921 地震中受到抬昇作用的河段，河道表層原本有良好的卵礫石層覆蓋。沖積礫石層以下岩層主要是上新世—更新世的卓蘭層(厚度大約在 1,500 到 2,500 公尺之間)，由砂岩、粉砂岩、泥岩、和頁岩的互層組成。砂岩常呈淡青灰色或淡灰色，細粒，略含雲母質，層厚為數十公分到 2 公尺不等，有些較厚的砂岩可以達到 5 公尺以上的厚度。頁岩和泥岩呈現青灰色或暗灰色，一般層厚在 20 至 50 公分間，部分地方也出現有較厚的頁岩層(何春蓀，83 年)。

1896

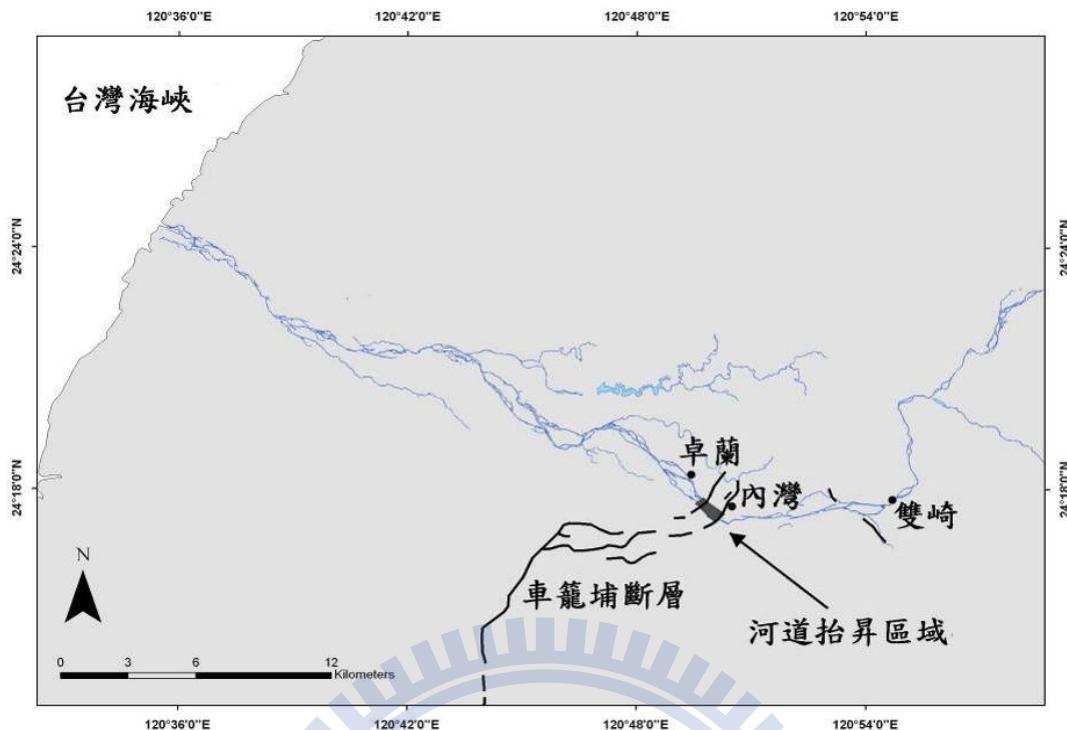


圖 2-7 大安溪與車籠埔斷層位置圖(水利署，2008a)



圖 2-8 大安溪區域地質圖(地調所)

## 2-3-2 八掌溪概況

八掌溪位於嘉義縣、市與台南縣交界處，北鄰朴子溪，東與曾文溪及曾文水庫上游集水區相接，南側為白河水庫集水區及急水溪流域，西臨台灣海峽。主流發源於嘉義縣番路鄉奮起湖山(標高 1,940m)，略呈東西流向，流經嘉義縣水上鄉忠和村中庄附近匯入支流赤蘭溪，並於台南縣白河鎮蓮潭至北埔附近匯入支流頭前溪，繼經南靖、菁寮、義竹、布袋等地區，於嘉義縣新塭鄉好美村注入台灣海峽，幹流長約 80.86 公里，流域面積約 474.74 平方公里。(水利署，2006)

流域內有仁義潭及蘭潭兩座水庫。仁義潭水庫位於嘉義縣番路鄉，為八掌溪右側之離槽水庫，蓄水容量為 3,200 萬  $m^3$ ，有效蓄水量為 2,864 萬  $m^3$ ，年供水量約為 5,520 萬  $m^3$ 。蘭潭水庫位於嘉義市，蓄水容量為 950 萬  $m^3$ ，有效蓄水量為 935 萬  $m^3$ 。(水利署，2006)

八掌溪劇烈沖蝕現象可從歷年大斷面測量看出，本研究大斷面測量資料有民國 78 年、民國 85 年、民國 90 年以及民國 94 年 4 個年份大斷面測量資料。

圖 2-9 與圖 2-10 為八掌溪仁義潭攔河堰至道將圳斷面位置圖，78 年仁義潭攔河堰至心上橋之兩岸已築堤完成，河寬約為 200 公尺至 300 公尺，並無明顯深槽；至 85 年因大量開採砂石與仁義潭攔河堰完工造成河床全面下降，此時護甲層已逐漸消失且泥岩裸露，其河寬寬度約為 70 公尺至 100 公尺；至 90 年則明顯出現深槽下切現象，深槽寬約 15 公尺至 30 公尺；至 94 年斷面 98 因第 7 號固床工之回淤，下切現象已較為緩和，但仍有橫向沖刷之現象。斷面 100 從 78 年至 94 年最大沖刷深度達 28 公尺。



圖 2-9 道將圳至斷面 95(水利署, 2006)



圖 2-10 斷面 95 至吳鳳橋(水利署, 2006)

本研究研究區域為八掌溪主流之仁義潭攔河堰到南二高橋的河段，圖 2-11 為研究區範圍仁義潭區域地質圖：

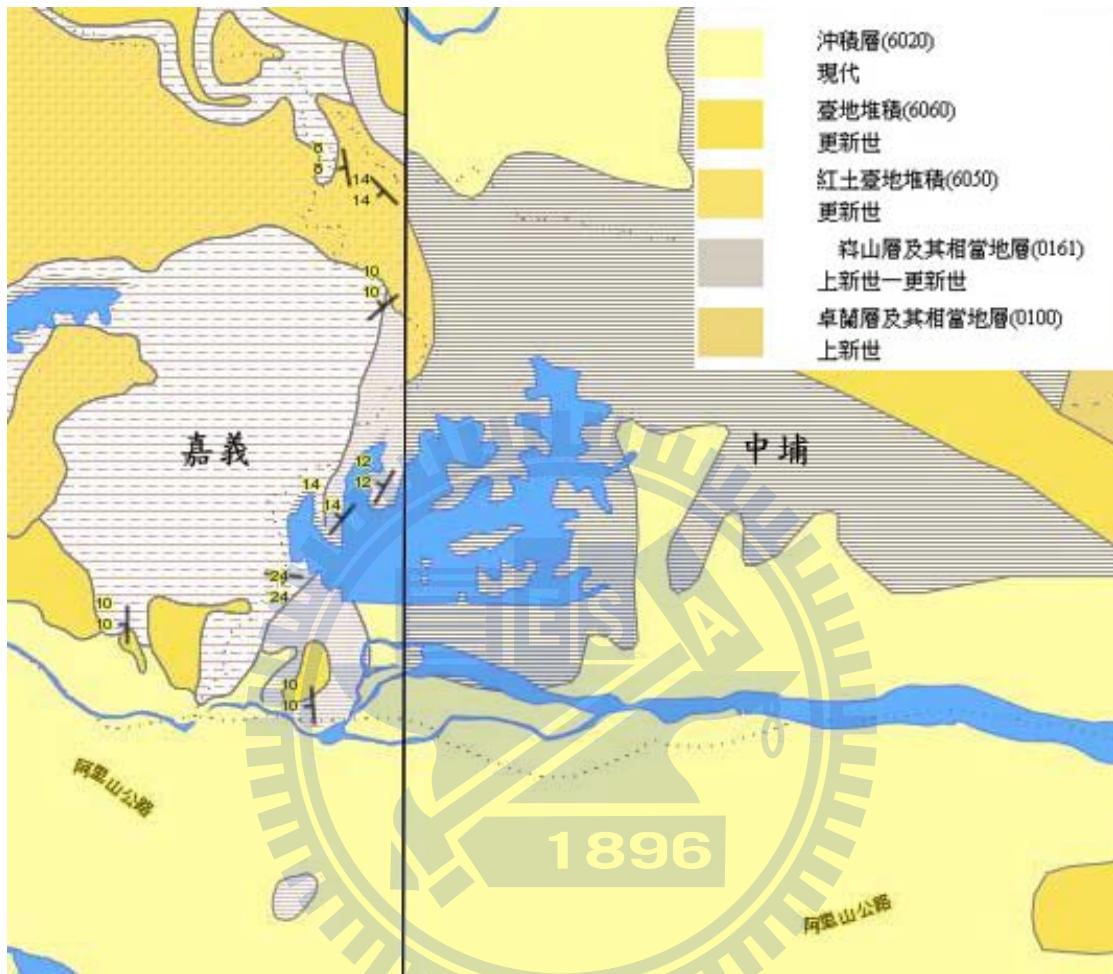
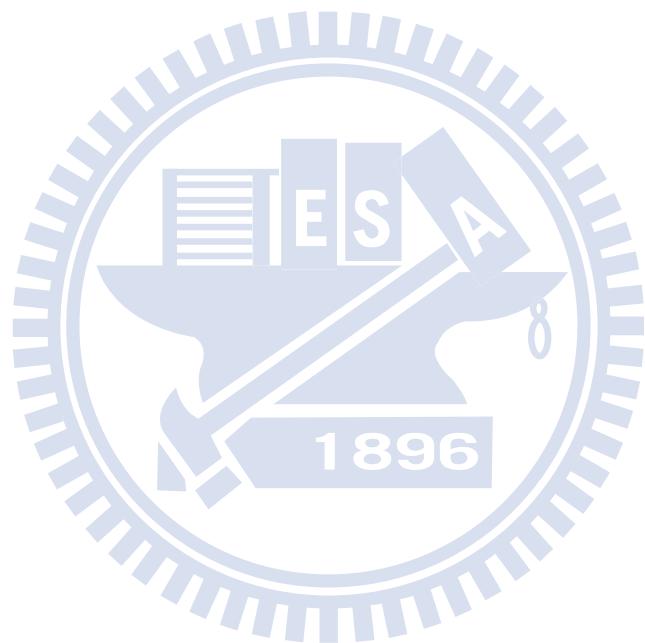


圖 2-11 八掌溪流域之區域地質圖(地調所)

八掌溪流域之區域地質圖如所示，流域中上游地區之地層為更新世礫石、土、砂的臺地堆積及中新世砂岩、頁岩所構成。臺地堆積是由河流堆積成河谷盆地沉積物及地表堆積物所形成，皆由未膠結之礫石及夾在其中傾斜平緩的砂質或粉質凸鏡體組成。礫石常含不同比例之砂、粉砂、粘土混雜，層理及淘選度很差。中新世地層是由白、灰色砂岩，深灰色頁岩和砂、頁岩互構而成。分佈於此區之地層為更新世地層所組成，地層由老至新為與頭嵙山層(Tks)相當的崁下寮層、二

重溪層、六雙層和沖積層四個地層為主，其地層走向約成南北走向，  
傾向與河道流向相同，傾角約為  $10^{\circ}$  向西傾。(水利署，2006)



## 2-4 文獻回顧總結

綜合上述文獻回顧整理，可將沖蝕率模式歸納為 Howard and Kerby(1983)與 Greimann and Vandeburg(2008)所整理的岩石沖蝕模式二大型式，其中 Howard and Kerby(1983)主要為探討流量與坡度的關係，其型式如下：

$$E = KA^m S^n$$

其中  $K$ ， $m$  與  $n$  皆為模式中的參數

本模式原始定義為岩床下切速率  $E$  與剪應力  $\tau_b$  有冪函數相關性：

$E \propto \tau_b^a$ ，假設床面剪應力存在一個啟動沖蝕的門檻值  $\tau_b$ ，可以將代表超越門檻值的剪應力值  $(\tau_b - \tau_c)$  取代  $\tau_b$  來估算下切速率： $E \propto (\tau_b - \tau_c)^a$ ，但岩床下切受到流水沖蝕、懸浮載與突降點（knick point）之後退蔓延等不同機制之影響，欲以單一岩床下切速率模式考慮各種河川沖蝕之現象並不合宜。

Greimann and Vandeburg(2008)所提出的岩石沖蝕模式，此沖蝕模式包含了水力沖蝕模式與磨蝕沖蝕模式形式如下：

$$E = k_p U \left( \frac{\tau}{\tau_{cri}} - 1 \right)^n \left( 1 - \frac{h_s}{h_{tr}} \right) + \frac{0.08 R_b g Y}{k_v \sigma_T^2} q_s \left( \frac{\tau}{\tau_{cri}} - 1 \right)^{-0.5} \left[ 1 - \left( \frac{u_*}{w_f} \right)^2 \right]^{1.5} \left( 1 - \frac{h_s}{h_{tr}} \right)$$

水力沖蝕模式即是模擬塊體抽離行為，磨蝕沖蝕模式則是針對顆粒跳動衝擊所造成之沖蝕量評估，本模式所得為兩者侵蝕量之總和，亦可選擇僅評估其中一種模式之侵蝕量。另外如風化侵蝕主要的作用為岩石的弱化崩解，穴蝕侵蝕需要極高度的流速而且主要發生於溢洪道與跌水池，懸浮載所造成之磨蝕等，均不在本公式之考量範圍。

Greimann and Vandeburg(2008)公式中的參數包括臨界剪應力( $\tau_{cri}$ )、水力沖蝕係數( $k_p$ )與岩石沖蝕參數( $k_v$ )等均對沖蝕量之估算有重大影響。臨界剪應力為發生沖蝕的門檻，一旦床底剪應力大於臨界剪應力，即發生沖蝕行為，此參數受抗沖蝕指數( $k_h$ )影響；水力沖蝕參數( $k_p$ )會影響沖蝕發生後，所造成沖蝕量的大小；岩石沖蝕參數( $k_v$ )反應材料的強度，其值越大所形成的沖蝕量越小。

要決定臨界剪應力( $\tau_{cri}$ )、水力沖蝕係數( $k_p$ )與岩石沖蝕參數( $k_v$ )這三個參數的困難如下：

因臨界剪應力( $\tau_{cri}$ )與水力沖蝕係數( $k_p$ )受抗沖蝕指數( $k_h$ )影響，而  $K_h$  原始發展目的為判斷溢洪道下游是否發生沖蝕，主要係由硬岩沖蝕資料所發展，並由顆粒性材料粒徑及摩擦角的概念擴充至評估顆粒性材料沖蝕發生可能性的判斷。對於軟弱岩石材料而言，由  $K_h$  值依式(式 2-7)計算臨界流功之經驗式是否適用，需要加以驗證探討。

岩床強度參數  $K_v$  由 Abrasion Mill Experiments 結果及理論推導來加以率定(表 2- 1)，其變化並未見規律性，且表中提供之材料種類有限，如何獲得適合現地軟岩材料之參數值仍須進一步加以探討。

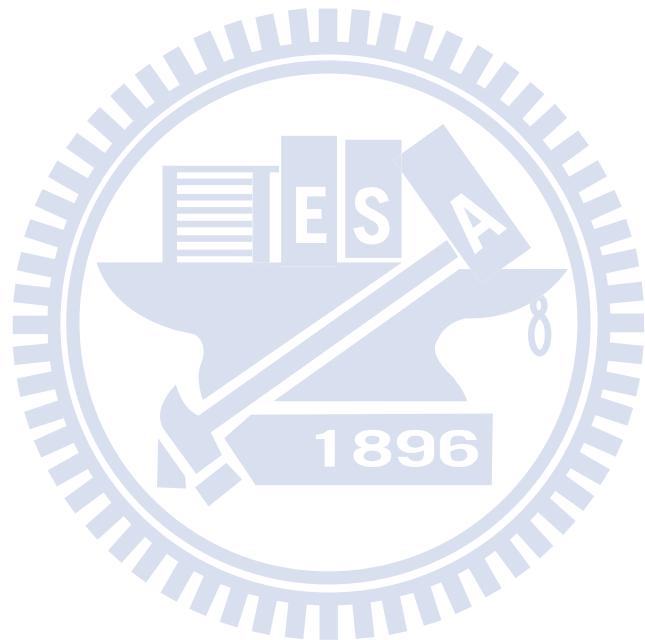
這三個參數皆可能隨現地條件變化而改變，假設大安溪研究區中的參數率定出來，不一定適用於八掌溪河段，必須進行更進一步探討或利用現場條件率定才可適用於其他河段。

由上述沖蝕率模式可以發現，影響河道岩床沖蝕之重要參數可以歸納為流量( $Q$ )、坡度( $s$ )、流速( $U$ )、剪應力( $\tau$ )、臨界剪應力( $\tau_{cri}$ )、岩石張力強度( $\sigma_T$ )與岩石彈性模數( $Y$ )較為顯著。

本文研究區域於大安溪大峽谷段(如圖 2- 7)與八掌溪劇烈沖蝕段(道將圳攔河堰至仁義潭攔河堰，如圖 2- 9、圖 2- 10)，大安溪從民國

88 年至民國 98 年沖刷深度超過 20 公尺，年平均沖蝕速率約為 2.0 公尺，八掌溪由斷面資料可看出從民國 78 年至 94 年，沖刷深度可達 30 公尺，年平均沖蝕速率約為 1.9 公尺，由此可見兩條溪的河道沖蝕相當劇烈。

本論文將使用大安溪歷年軟岩河道沖刷資料建立模型，並使用八掌溪資料做驗證，目的為檢驗此模型之適用性，作為後續研究之參考。



## 第三章 研究方法

### 3-1 相關沖蝕資料整理

#### 3-1-1 現地調查

現地調查主要為了解現場的沖蝕機制，藉由調查現場情況進行歸納整理，與文獻所述之機制進行比較，並比較大安溪與八掌溪沖蝕機制異同之處。

##### 3-1-1-1 沖蝕機制

本研究就第二章文獻回顧所提到之機制(1)磨蝕沖蝕(2)塊體抽離(3)穴蝕沖蝕(4)彈跳沖蝕(5)風化沖蝕等五個機制，於現場進行詳細調查，在大安溪部分，將調查結果歸納為沖蝕現象與沖蝕成因探討兩方面說明；在八掌溪部分，調查結果則歸納為沖蝕現象探討與軟岩現地沖蝕機制。詳細觀察結果與比較說明於第四章內容。

#### 3-1-2 數值高程資料製作

為了得到研究區數值高程資料，採用影像解算軟體(PCI-GEOMATICA)將航空照片做影像解算。製作數值高程需要有以下資料：(1)航空照片(2)相機參數(3)地面控制點或相機外方位參數。

(1)相片來源

本研究區域之數值地形高程製作為使用行政院農林航測所販售之航空照片，航空照片像比例尺約為 1/17000 至 1/20000，使用的航空相片如表 3- 2。

## (2)相機參數

表 3-1 為本研究使用之相機資料，相機參數採用行政院農委會農林航測所提供之相機參數律定報告，在此採用的資料為相機焦距與相片對應相機的框標。

表 3-1 相機型號資料

相機型號	焦距(mm)
RMKTOP15-144116	152.818
RC10-3113	152.99
RMKTOP15-149986	152.242

## (3)地面控制點(Ground Control Point, GCP)

由於農林航測所並未提供相片的外方位參數，所以改採用地面控制點進行數值高程製作。

地面控制點是決定影像解算的重點之一，有良好的地面控制點，可以使解算的數值高程資料有較好的精度，量測步驟如下：

### 1.套繪航空照片對重疊區域。(圖 3-1)

把研究區歷年航空照片匯入地理資訊系統，將每張照片的範圍標示，然後再套疊所有範圍。

### 2.選擇歷年皆能辨識的地面控制點。

製作數值高程資料所需的控制點至少需要六個，在歷年套疊的重複範圍內，尋找相同且地表無太大變化，容易辨識的地點，做為地面控制點，控制點的分布範圍均勻分布於重疊區域內效果較好。

### 3.大型 GPS 現地施測。(圖 3-2)

使用大型 GPS 儀器在所選定的控制點量測座標，量測方法為同時架設三個 GPS 測站，架設完畢後將接收器打開，先接收五分鐘，

訊號穩定後再開始為時一小時接收時間，此步驟會影響 GPS 測量精度。

#### 4. 地面控制點測量成果計算(表 3- 2)。

將大型 GPS 所接收到的數據，配合一個固定站做解算，獲得地面控制點的計算成果。

使用地面控制點成果製作數值地形高程，本研究共計完成製作 13 對數位高程資料及正射影像，年份及航線編號如表 3- 3 所示。

大安溪空載光達資料已將數值地形高程製作完畢，直接可以使用，不用再進行處理，數值高程製作流程於附錄 II 有詳細介紹。



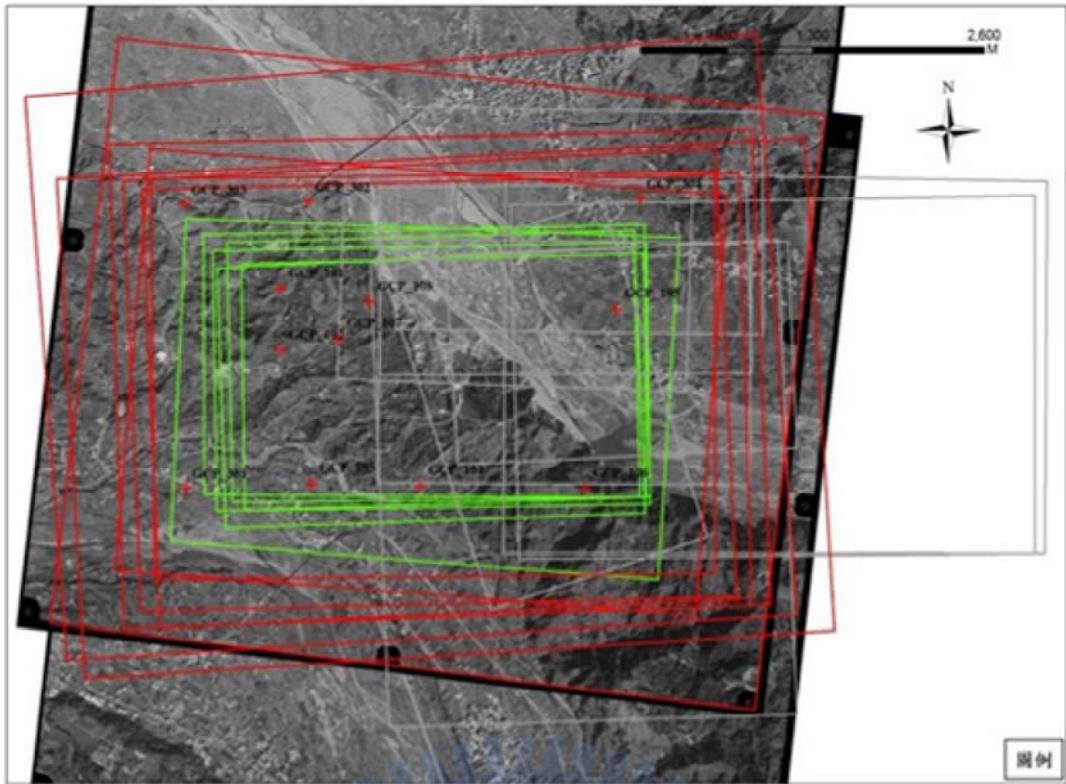


圖 3-1 航照片重疊區及地面控制點分布圖(水利署，2008a)

表 3-2 大安溪地面控制點測量成果(水利署，2008a)

站名	N	E	H
GCP101	2687766	230704	426.499
GCP102	2687602	230696	448.546
GCP103	2686590	230888	346.704
GCP104	2686593	231717	397.347
GCP105	2687899	233206	396.988
GCP106	2686581	232973	512.926
GCP107	2687684	231125	466.991
GCP108	2687915	231339	447.304
GCP301	2686551	229917	332.66
GCP302	2688670	230873	350.988
GCP303	2688670	229946	354.956
GCP304	2688698	233377	389.268

表 3-3 完成製作之數位高程資料及正射影像(水利署, 2008a)

NAME	E(97)	N(97)	DATE
96R011	231800	2688055	960131
96R011	231806.5	2686671	960131
95R037	231804	2686612	951025
95R037	231821.9	2687963	951025
94R070	231797.1	2686659	941027
94R070	231784.5	2688043	941027
93R059	231871.6	2686657	931003
93R059	231841.6	2688041	931003
91R026	231800.2	2686593	910611
91R026	231804.6	2687970	910611
90R098	231784.1	2686580	901112
90R098	231795.8	2687973	901112
89C088	231890.9	2686130	891108
89C088	231888.9	2688073	891108
88P095	231776.9	2686849	881210
88P095	231655.9	2688119	881210
88P090	231794.9	2688231	881118
88P090	231879.9	2686600	881118

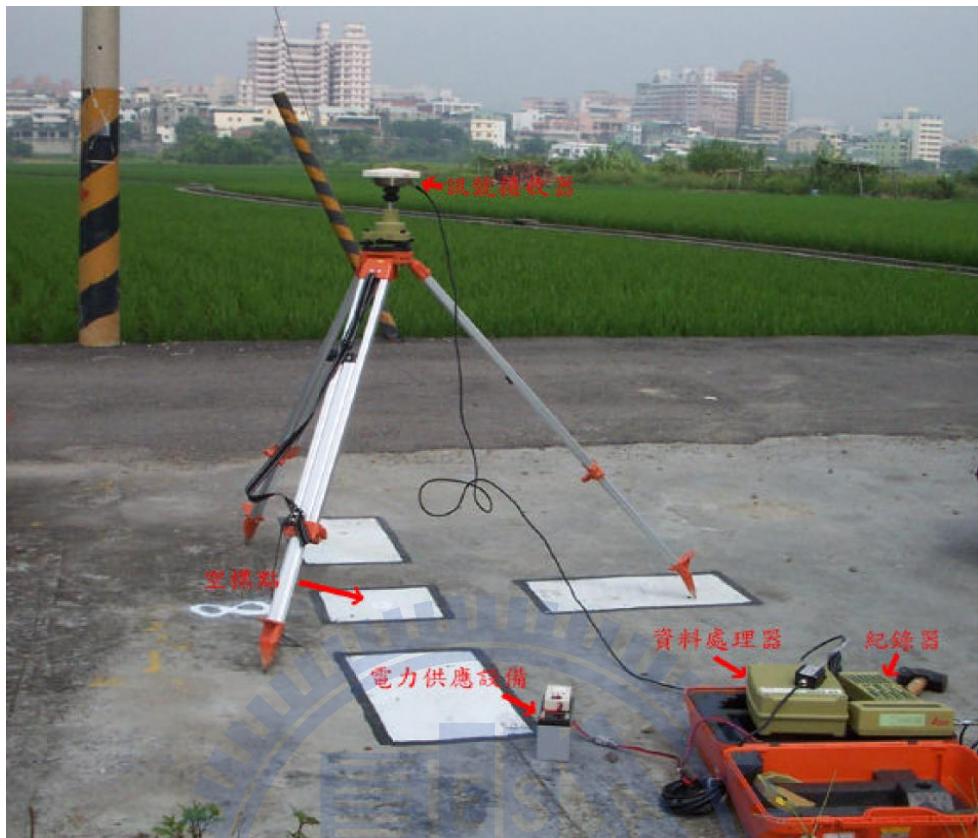


圖 3-2 大型 GPS 示意圖(蔡政修, 2003)

### 3-1-2-1 沖蝕量計算

本研究在大安溪河段以每 20 公尺為間隔，繪製輔助橫斷面，共 41 斷面，如圖 3-3 所示，接著將歷年數值高程資料匯入地理資訊系統，並擷取輔助斷面上的高程資料；本研究採用之沖蝕量為主深槽河道之下切量。

沖蝕量的計算的計算方式是配合航照，在地理資訊系統中將歷年主深槽描繪出來如圖 3-3，然後擷取主深槽的高程資料，接著以圖 3-4 之方式進行計算，圖中  $E_1$  代表  $N$  年高程， $E_2$  代表  $N+1$  年高程，將  $E_2-E_1$  即可得該年度之沖蝕量  $d$ 。

沖蝕量之考量限制於岩盤裸露範圍，各年度岩床裸露位置均透過航空照片與紅綠立體對影像的觀察加以判斷，說明如下：

1. 在輔助斷面 16 下游，河道深槽位置在 88 年至 98 年間均位於河道中央；在輔助斷面 16 上游部分，深槽位置在 93 年以前並不固定，但因為 93 年之前本位置之深槽尚均由卵礫石所覆蓋，所以深槽位置變化並不影響沖蝕量之計算比較。
2. 各年度岩床裸露位置經研判觀察如下，在 88 年並未出現岩盤；89 年至 91 年出露於輔助斷面 16~17 下游；93 年出現至輔助斷面 24 下游；94 年後深槽全部為岩床出露。

對於影像解算所得之數值地形高程，其結果在於某些部分難免有瑕疵，原因可能為相片品質或是地表控制點設置不佳，影響了解算品質。對於先前所擷取之輔助斷面高程資料，為了確定所獲得之斷面資料是否有不合理處，所以使用解像軟體所產生出來之紅綠立體影像對配合紅綠立體眼鏡校正所切出來之橫斷面，是否接近正確河道概況，如斷面上有明顯不符合現況之值出現，如圖 3-5 中圈起部分，將其值刪除，直接與下一點合理值連線，如圖 3-6。

八掌溪沖蝕量的計算方法為使用歷年大斷面測量，各年度最低點的差值做為沖蝕量，八掌溪大斷面測量資料於附錄 III 有詳細圖型。

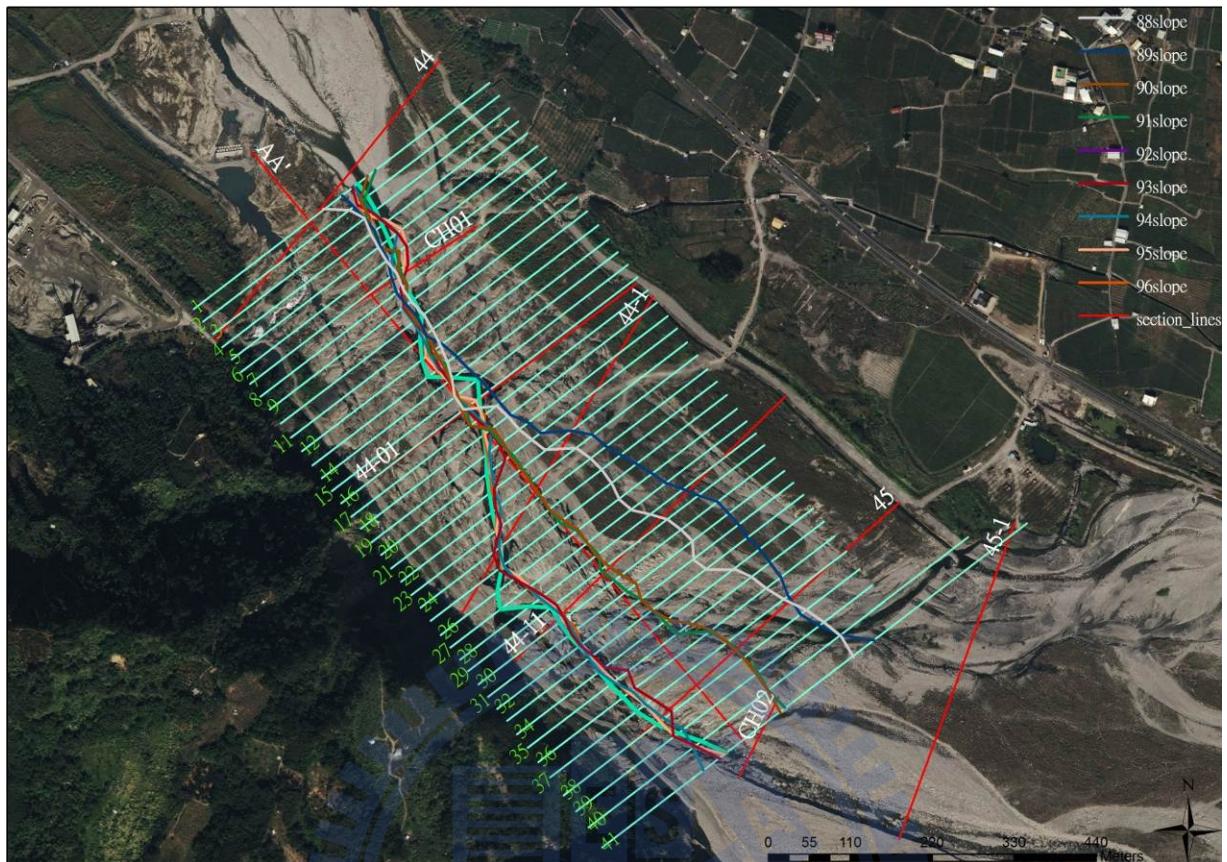


圖 3-3 大安溪輔助斷面與坡度位置

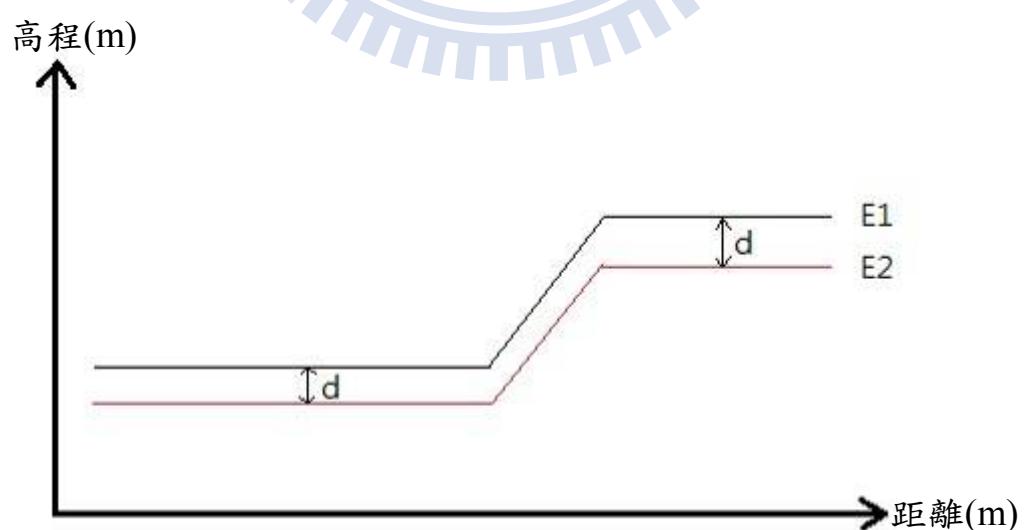


圖 3-4 大安溪沖蝕量計算示意圖

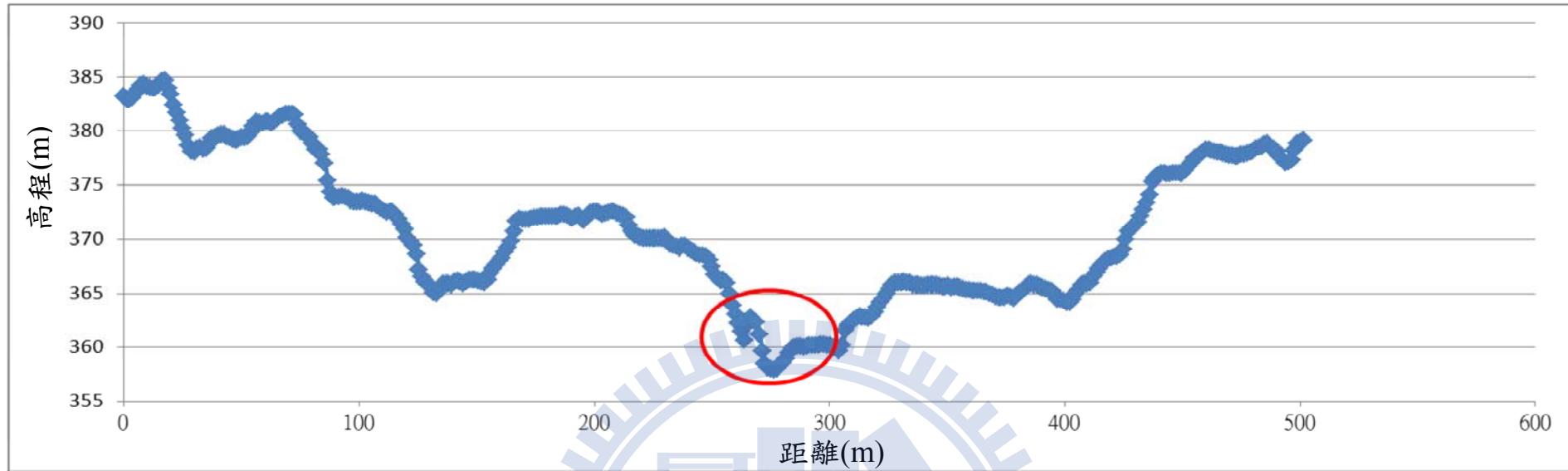


圖 3-5 斷面修正前示意圖

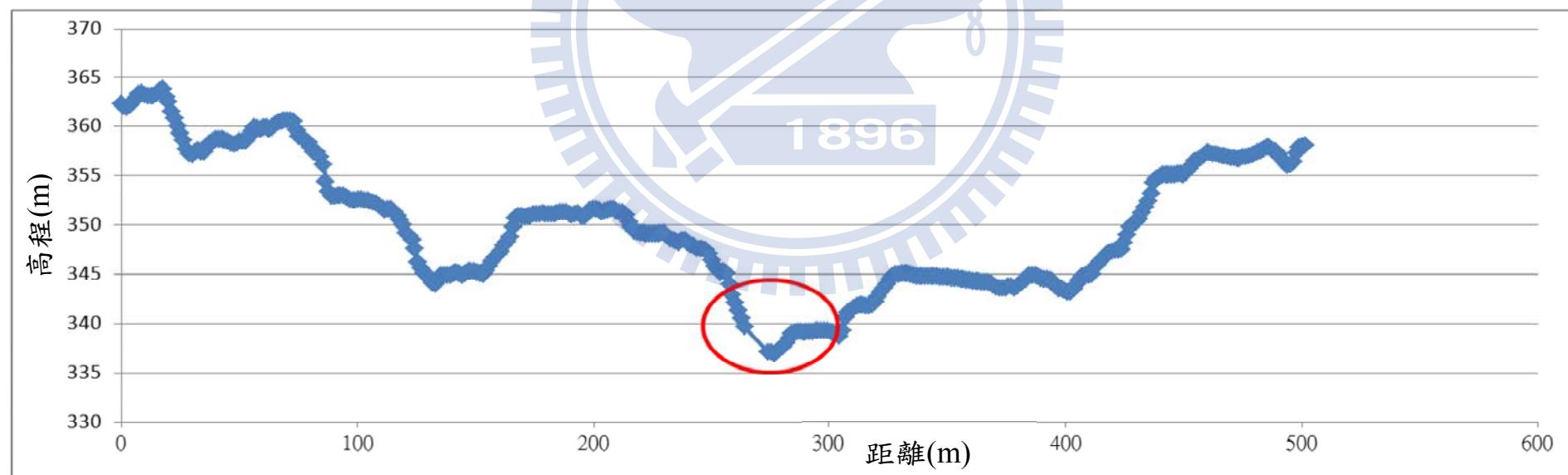


圖 3-6 斷面修正後示意圖

### 3-1-2-2 地形參數

由 3-1-2-1 所得到的歷年河道主深槽高程資料，將地形主要變化趨勢上的劇烈跳動，使用分段回歸方式找出主要趨勢(坡度平滑化)，消除這些跳動影響，過濾雜訊，如圖 3-7、圖 3-8，本方法採用統計迴歸式的方式處理跳動的坡度值，找出其趨勢，符合合理坡度概況，所得的坡度分段於附錄 IV 有詳細圖示。

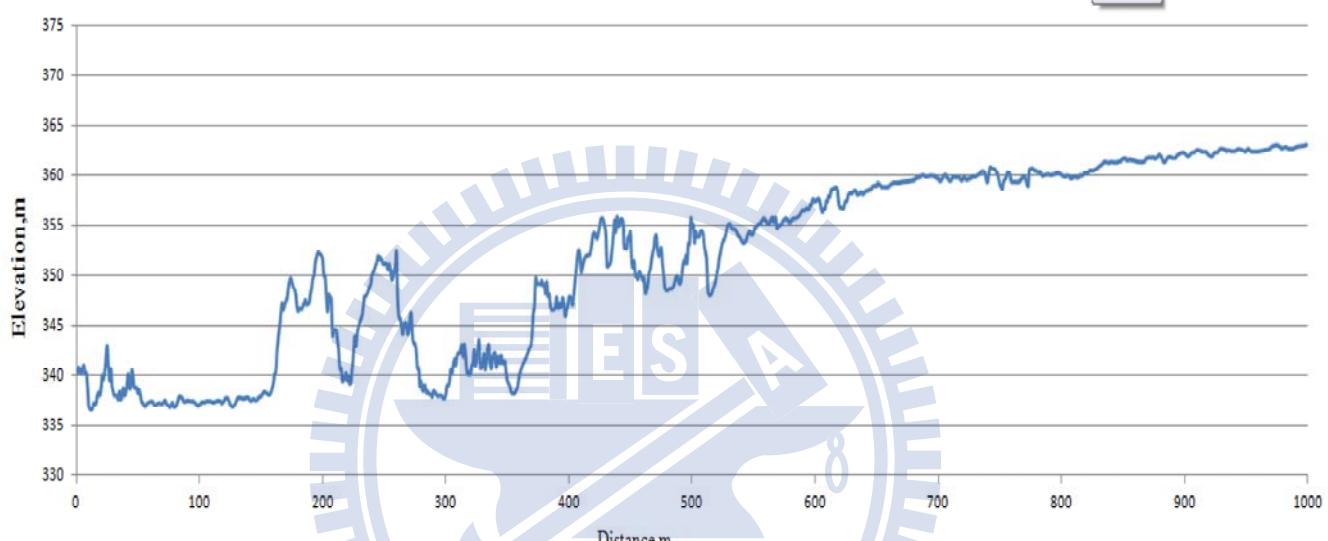


圖 3-7 主深槽消除雜訊前

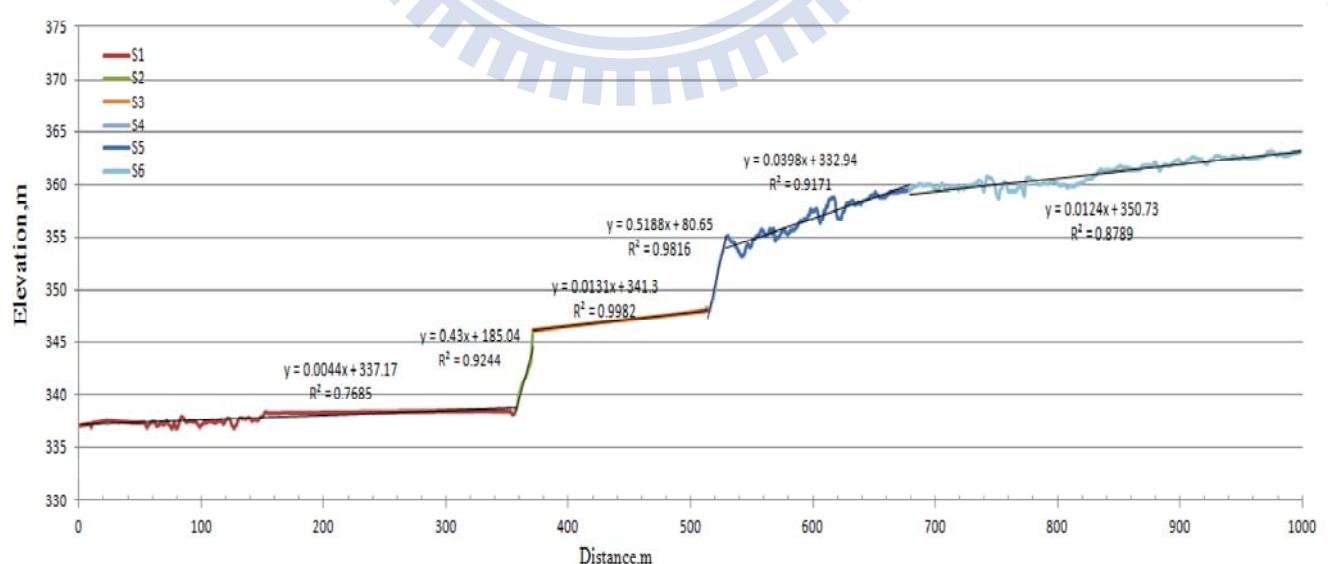


圖 3-8 主深槽消除雜訊後

八掌溪地形參數獲得方式為將歷年大斷面測量資料最低點連線，如圖 3-9，將可得到河道地形線，接著計算將斷面樁與斷面樁之間的坡度，即可獲得八掌溪地形參數。

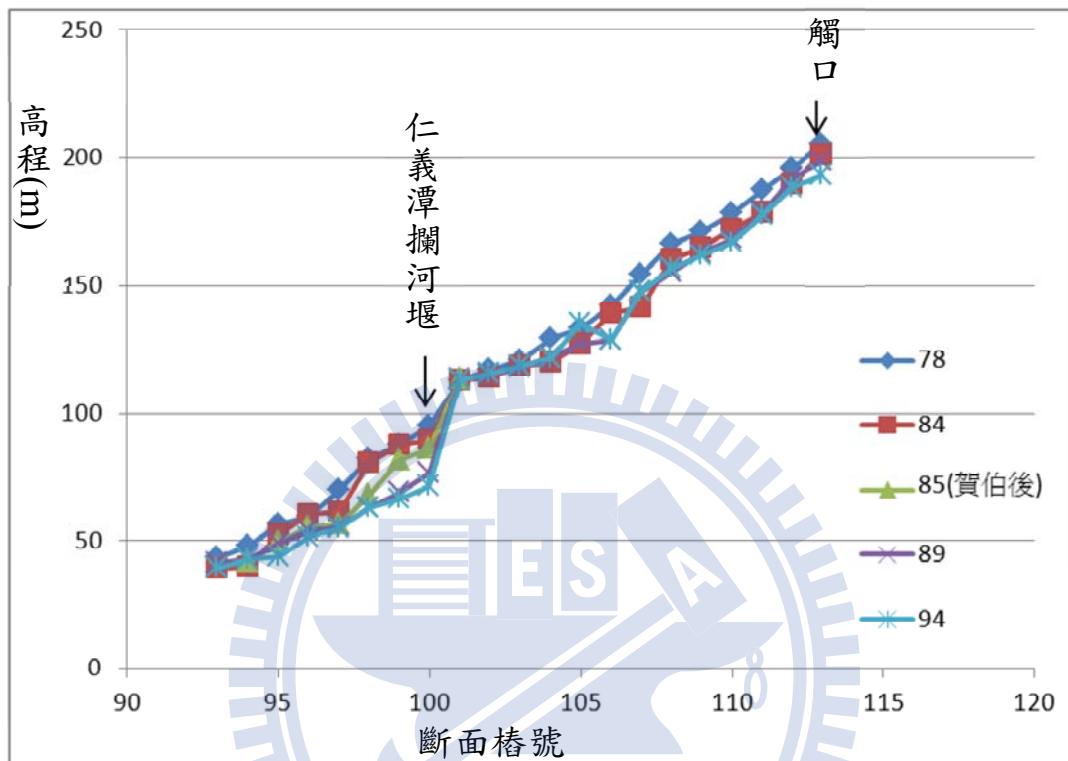


圖 3-9 八掌溪歷年大斷面測量最低點連線

### 3-1-3 歷年水文流量資料

有鑑於大安溪卓蘭站流量資料之欠缺與不足，本研究採用運動波-地貌瞬時單位歷線模式 (KW-GIUH) 進行卓蘭站之流量推估，卓蘭以馬達拉、象鼻、雙崎、卓蘭、松安、雪嶺等六站為集水區雨量控制站，其分佈位置如圖 3-10 所示，各雨量站控制面積百分比以徐昇氏多邊形法求得，依序分別為 36.5%、12%、13.7%、2.5%、13.7%、21.6%。而在 2005 年後半年後，馬達拉站雨量資料多有缺測，之後馬達拉站缺測之事件，控制面積百分比以其他五站徐昇式法重新劃分，自象鼻起依序為 9.4%、11.4%、1.8%、42.9%、34.5%。(水利署，2009)



圖 3-10 大安溪流域雨量站位置分佈(水利署，2008a)

八掌溪的水文資料為使用經濟部水利署水文水資源資料管理供應系統提供之資料，水利署於八掌溪主流共設置三個流量站，分別為觸口橋、軍輝橋以及厚生橋等，其中觸口站(流域面積  $98.5\text{km}^2$ )位於仁義潭攔河堰上游約 8.4 公里，軍輝橋(流域面積  $118.88\text{km}^2$ )位於道將圳攔河堰下游約 1 公里，本研究採用軍輝橋的流量資料做為代表八掌溪之水文資料。

1896

## 第四章 研究成果

本章先說明研究區地表地質結果，然後進行兩條溪的沖蝕機制成因與比較。接下來使用第三章研究方法所獲得之參數進行建立沖蝕率模型，該模型建立之用意在於藉由直接的觀察資料，進行沖蝕量的評估，評估在一場洪水事件下，可能會發生多少沖蝕量。

### 4-1 大安溪地表地質調查

大安溪大峽谷河段出露之岩層主要是由上新世—更新世的卓蘭層，由砂岩、粉砂岩、泥岩、和頁岩的互層組成。岩層位態依東勢背斜構造大至區分為三區，下游背斜西翼岩層與河流順向(zone 1)，中央軸部岩層大致水平(zone 2)，上游背斜東翼岩層與河流逆向(zone 3)。節理較常見的包含垂直河道的摺皺作用張力裂縫，及平行河道的解壓節理。

本河段河道之露頭條件相當良好，透過地表及峽谷狀深槽可清楚觀察岩盤組成，下游背斜西翼(zone 1)與上游背斜東翼(zone 3)之岩層均可逐層觀察及量測位態，背斜中央軸部(zone 2)之岩層由於位態大致為水平，調查上僅能於峽谷下切之區域進行。

依據地表地質調查結果，將岩層區分成以下 8 層：

I: 極厚層塊狀砂岩。

II: 砂頁岩互層。

III: 極厚層頁岩。

IV: 砂頁岩互層。

V: 極厚層塊狀砂岩。

VII: 砂頁岩互層。

VIII: 極厚層塊狀砂岩。

VIII: 砂頁岩互層。

地表地質圖如圖 4-1，剖面圖如圖 4-2 所示，本河段之地層分佈主要受到區域內主要構造東勢背斜的影響，下游背斜西翼(zone 1)與上游背斜東翼(zone 3)的岩層大至對應良好，但地層的厚度則有部分出入，這是因為沉積厚度的差異或是此背斜構造受到過大地應力的擠壓作用，造成部分軟弱岩層厚度上發生變化所造成。背斜中央軸部(zone 2)地層大致為水平。

(此部分詳細資料可以參考「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例(2/3)」)



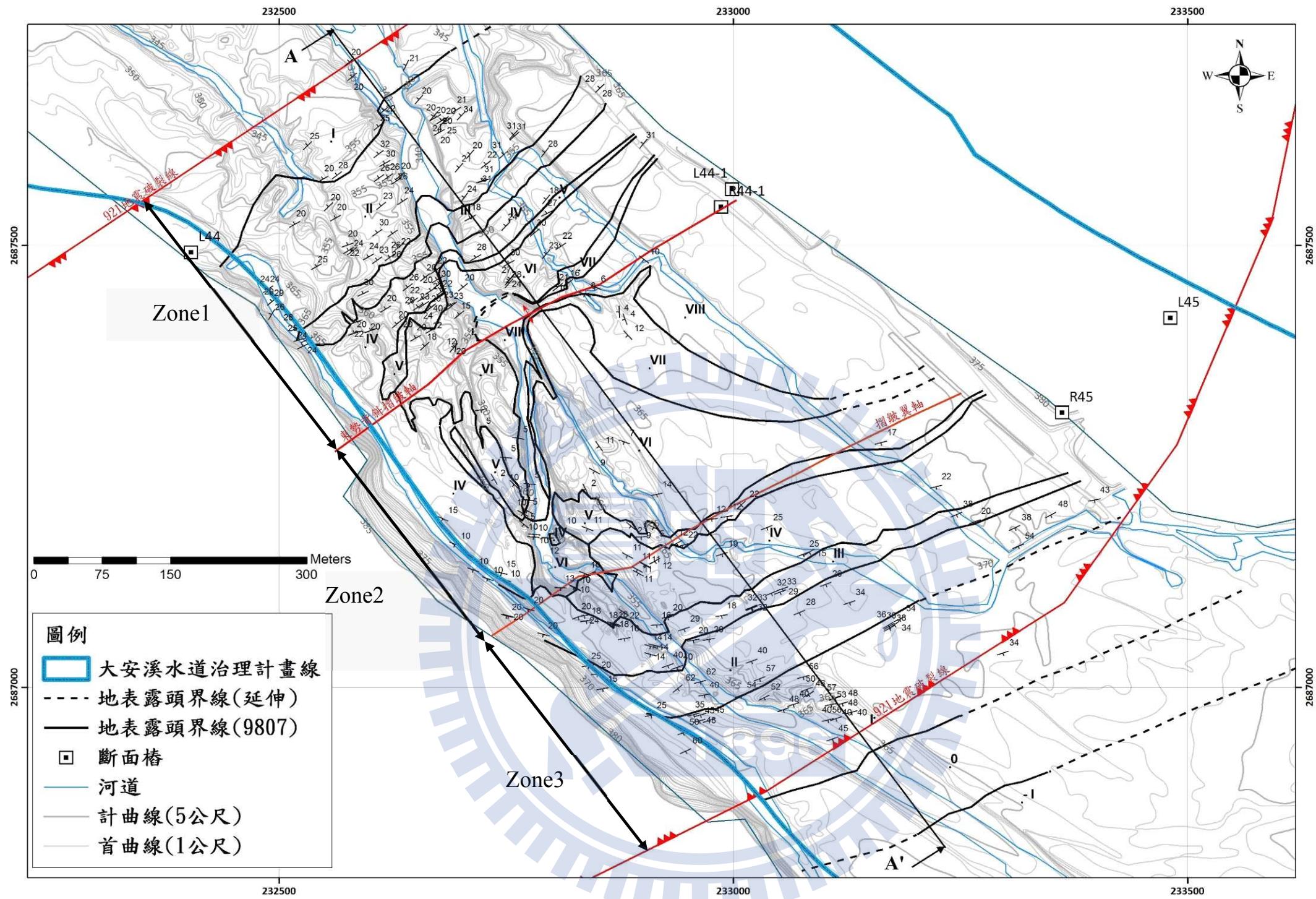


圖 4-1 大安溪劇烈沖蝕河段地表地質圖(水利署, 2009)

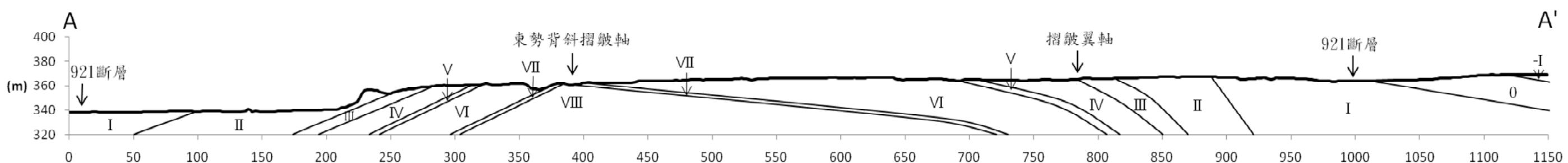


圖 4-2 大安溪劇烈沖蝕河段地表地質 AA'剖面圖(水利署, 2009)

## 4-2 八掌溪地表地質調查

本論文針對仁義潭攔河堰，由現地調查所得露頭資料，配合河道縱剖面高程(圖)與民國 92 年相片基本圖所描繪的等高線及河道，繪製研究區 1/5000 區域地質圖與剖面圖加以說明如圖 4-3。

本區域主要以泥(或砂)質頁岩與厚層泥(或砂)岩的互層組成，含頁理或不含頁理的岩層間隔出現，單一岩相可能出現的厚度為 30 公分至數 10 公尺不等，偶而出現強度較高、抗侵蝕能力較強的粉砂岩，在斷面 95 下游的粉砂岩層厚超過 5 公尺。

此區量得的岩層位態明顯只有一組，也就是調查紀錄的層面，走向為 N20E、10NW，河的流向與岩層傾向約略一致，屬順向河；除了解壓節理外，某些岩層存在著一組或兩組節理，其 normal 指向(trend)分別為  $135^\circ$  與  $315^\circ$  兩個方向。

(本部分引用自國立交通大學碩士論文—林文凱，2008，軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例)

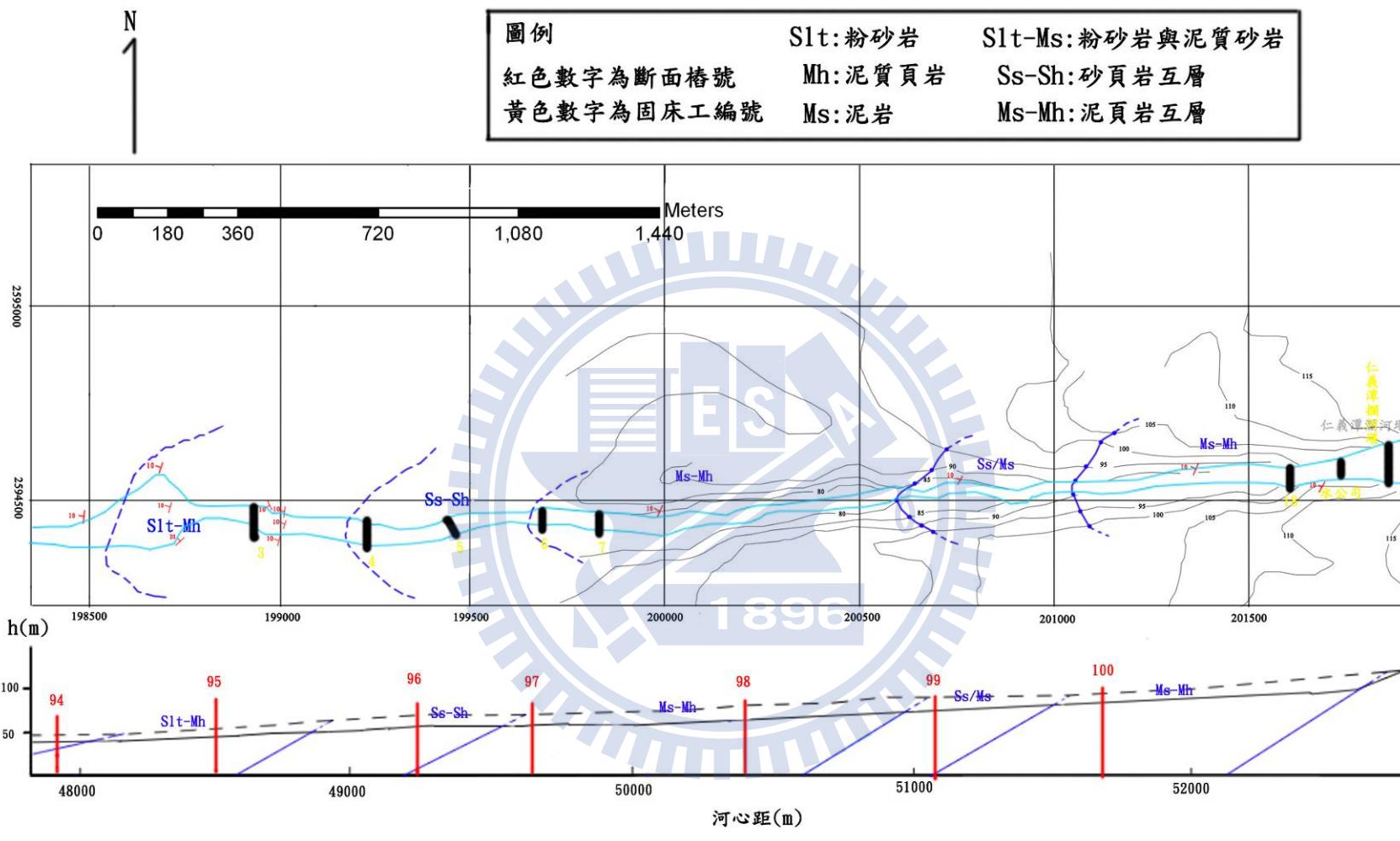


圖 4-3 仁義潭攔河堰至 94 斷面 1/5000 區域地質圖與剖面圖(林文凱, 2008)

## 4-3 岩床河道沖蝕現象的影響因素(整理水利署, 2008)

(1)水流：大規模颱洪期間，水位升高且淹沒範圍大，流量的大幅增加使得侵蝕及搬運能力增強，造成河道主要的沖蝕現象(礫石跳動衝擊及懸浮載磨蝕、岩塊抽離搬運、穴蝕)，地形上通常有較大的變化。大規模颱洪過後，水位降低且流量小，水位面以下沖蝕現象以磨蝕為主，出露水面之河床河岸則以風化作用為主。

(2)河床材料：包含岩性、塊體大小、塊體間的不連續面條件、及位態及塊體形狀等。岩性為岩石材料內在的膠結狀況與強度，不包含岩體之整體性質與外在之地質條件。岩性可能受到風化作用的影響而改變，河道中岩石長期處於飽和狀態，不同之岩性受影響之程度有相當大之差異，如頁岩之岩性即非常容易受到含水量變化之影響。Annandale(1995)的抗沖蝕指數( $K_h=M_sK_bK_dJ_s$ )中以無圍壓縮強度 USC 來計算材料強度參數  $M_s$ ，Annandale(2006)歸納以往岩石材料的脆性破裂或疲勞破壞的相關經驗式研究中，以無圍壓縮強度 USC 與岩體強度之相關性最強。塊體越大則需要越大的水流搬運能力，為抗沖蝕指數中的塊體尺寸參數( $K_b$ )。塊體間的不連續面條件愈緊密、粗糙不規則之不連續面愈不易被水流搬運，為抗沖蝕指數中的顆粒間抗剪強度參數 ( $K_d$ )。位態及塊體形狀可以抗沖蝕指數中的地盤構造條件參數 ( $J_s$ ) 做說明，當節理間距比為 1:1 時，順向或逆向並無差異 ( $J_s=0.78\sim1.50$ )；當塊體近似正方體時，比長方形塊體容易被水流搬運；而當塊體為長方形，岩層位態與水流順向之岩塊比逆向的岩塊容易被帶走。

## 4-4 大安溪河道沖蝕成因機制探討(整理自水利署，2008a)

### 4-4-1 常見沖蝕特徵

1. 磨蝕沖蝕(abrasion): 主要可區分為水流中運移之懸浮載以及推移載對岩床所造成的侵蝕。抗沖蝕能力較佳的岩石表面常可見到光滑的磨蝕痕跡以及流槽(flute)(圖 4- 4)，也常見到礫石跳動對岩石表面所留下的衝擊與切割痕跡，以及砂礫石留存於節理裂隙中，可幫助節理的擴張作用(圖 4- 5)。

2. 塊體抽離(plucking): 層狀岩石無論厚層或薄層都可能因節理之發展(解壓或侵蝕)，造成岩石塊體鬆動而產生岩塊抽離的現象(圖 4- 6)。

3. 穴蝕沖蝕(cavitation): 河道受到地形的影響，局部區域的流況變化造成水流衝擊或渦流的現象所形成之孔洞沖蝕痕跡(圖 4- 7)。

(此部分詳細資料可以參考「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例(2/3)」)



圖 4-4 光滑的磨蝕表面及滑槽(flute)(水利署，2008a)

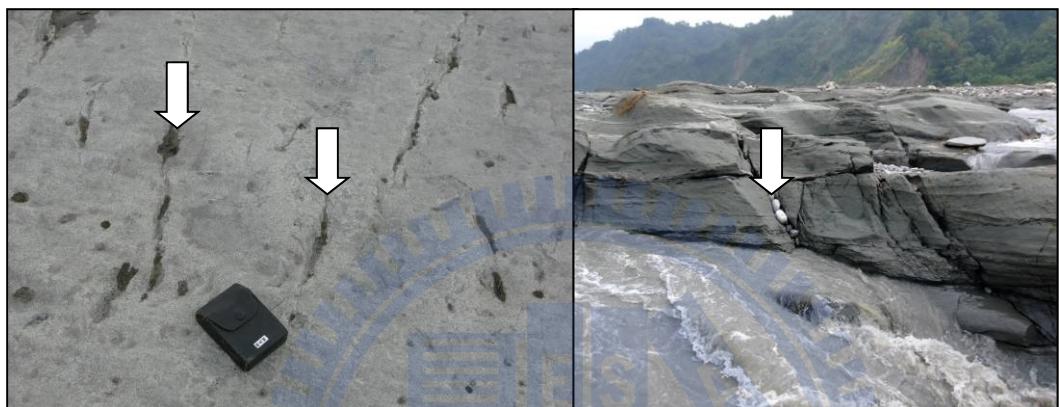


圖 4-5 碰石之衝擊刮蝕痕跡及對於節理的擴張(水利署，2008a)

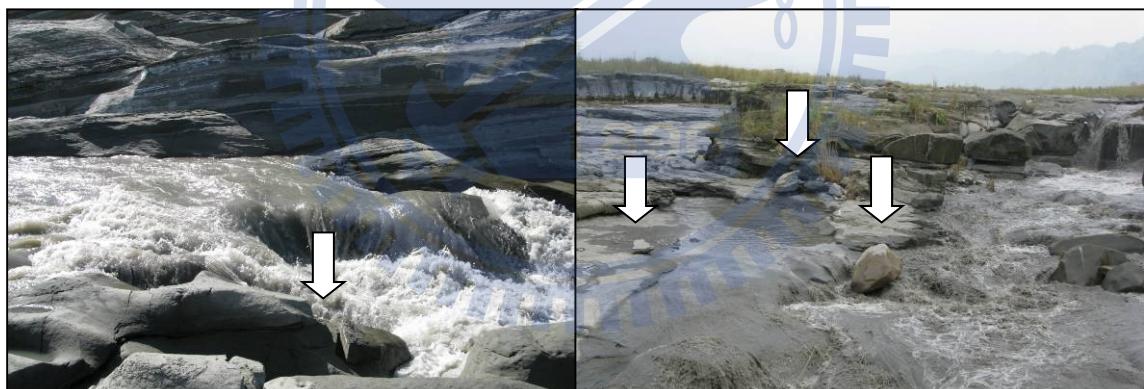


圖 4-6 岩塊抽離現象(水利署，2008a)



圖 4-7 水流衝擊或渦流所造成的孔洞沖蝕痕跡(水利署，2008a)

## 4-4-2 分區沖蝕現象整理說明

本研究區域河段出露之岩層可區分為極厚層頁岩、砂頁岩互層、與極厚層塊狀砂岩等三大主要種類。由沖蝕現象調查結果中顯示，極厚層頁岩之沖蝕現象受岩層位態之變化影響很小，而極厚層塊狀砂岩與砂頁岩互層之沖蝕現象則均明顯受岩層位態之影響。所以在以下沖蝕現象探討中，將依據地表地質調查與岩層分類結果，依岩層位態與水流方向關係區分成順向河段(zone 1)、水平岩層區域(zone 2)、與逆向河段(zone 3)等三區進行說明(區域分段請參考圖 4-1)。

### 1、順向河段(zone 1)：

在以砂頁岩互層為主之層狀岩石方面，主要侵蝕現象可歸納為二，一是由上游而下游的方向產生砂頁岩的差異侵蝕現象(磨蝕)，另一是由下游而上游的方向產生片狀(或塊狀)剝離侵蝕現象(岩塊抽離)(圖 4-8)。

在塊狀砂岩方面，由於抵抗侵蝕之能力較佳，水流沿弱面侵蝕而於表面形成蝕溝或滑槽(磨蝕)；蝕溝或滑槽附近區域的岩石在節理解壓後塊體由下游而上游的方向掉落(岩塊抽離)(圖 4-9)。

(此部分詳細資料可以參考「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例(2/3)」)



圖 4-8 順向河段砂頁岩互層的侵蝕現象(水利署，2008a)



圖 4-9 順向河段塊狀砂岩的侵蝕現象(水利署，2008a)

## 2、水平河段(zone 2)：

在以砂頁岩互層為主之層狀岩石方面，侵蝕作用主要沿岩層弱面下切(磨蝕)，節理解壓使沿塊鬆動而造成塊體抽離(岩塊抽離)，常形成階梯狀地形(圖 4- 10)。

本區域之塊狀砂岩抗侵蝕力良好，表面常形成流槽地形(磨蝕)。流槽下切至一定深度後，塊狀砂岩隨節理發展而產生塊體抽離(岩塊抽離)(圖 4- 11)。



圖 4- 10 砂頁岩互層的岩塊抽離與階梯狀地形(水利署，  
2008a)

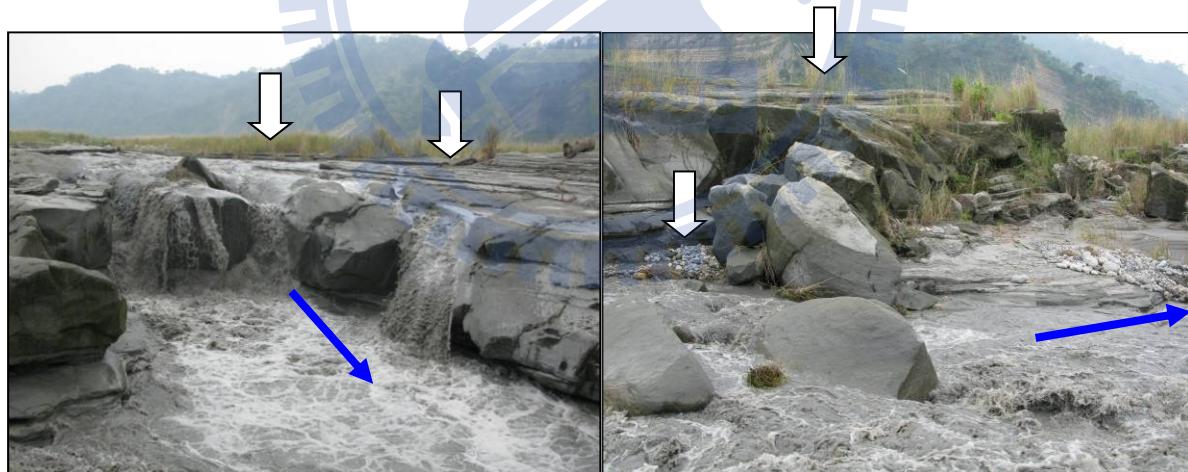


圖 4- 11 水平河段塊狀砂岩的流槽與塊體抽離(水利署，  
2008a)

3、逆向河段(zone 3)：

如圖 4- 12 所示，本區域之層狀岩石及塊狀砂岩其侵蝕現象較為類似，由抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩先被水流侵蝕搬運(磨蝕)，

留下抗侵蝕力較佳的厚層或塊狀砂岩在節理貫通後而產生塊體抽離現象(岩塊抽離)。

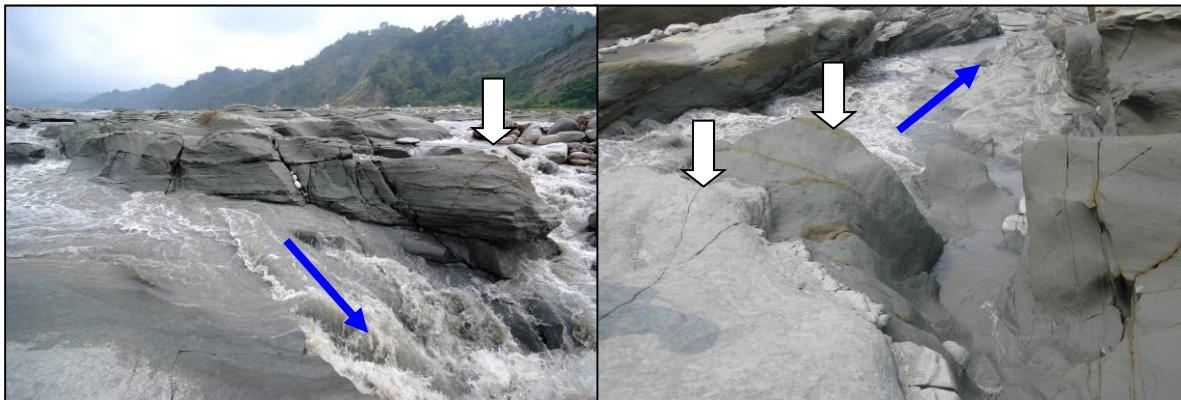


圖 4-12 逆向河段層狀岩石及塊狀砂岩的侵蝕現象(水利署，2008a)

#### 4、極厚層頁岩(不分區)：

如圖 4-13 所示，頁岩之沖蝕主要受風化作用影響。新鮮頁岩之沖蝕特徵與砂岩相似，具光滑表面(磨蝕)；頁岩之節理不發達，風化後常於表面形成侵蝕溝，而風化作用在頁岩表層產生之疏鬆碎屑，易於被水流帶走，受位態影響小(岩塊抽離)。



圖 4-13 極厚層頁岩的侵蝕現象(水利署，2008a)

#### 4-4-3 沖蝕機制探討(整理自水利署，2008a)

河道之侵蝕與眾多因素有關，如同前述最主控的因素為材料因素、水流特性與地質條件，控制了河道下切與拓寬的機制。因為在相同的岩性及水流條件下，沖蝕現象會因為岩層位態與水流方向的關係而不同，因此本章節將依此關係分類探討軟弱岩床在順向河段(zone 1，水流方向與岩層傾向相同)、水平河段(zone 2，水平岩層)、逆向河段(zone 3，水流方向與岩層傾向相反)，不同岩性條件下的侵蝕機制。

##### (一)順向河段(zone 1，水流方向與岩層傾向相同)

順向河段砂頁岩互層(層狀岩石)的常見沖蝕機制包含兩種，一是由於砂頁岩互層中砂岩與頁岩的抗侵蝕能力不同，沖蝕結果造成差異侵蝕，產生部分岩層懸空的狀況，進而造成岩塊掉落的現象如圖 4-14 所示。

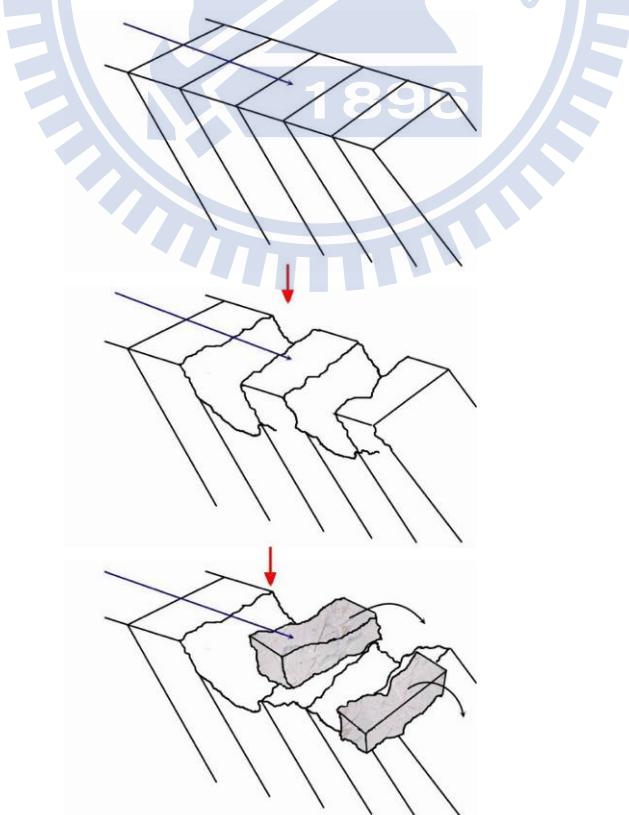


圖 4-14 順向河段層狀岩石的差異侵蝕機制(水利署，2008a)

另一種則是順向岩盤地層中水流容易沿著層面滲入，造成岩塊容易沿著層面由下游而上游的方向逐漸產生片狀(或塊狀)的剝離掉落，如圖 4-15 所示。

而在順向河段塊狀砂岩方面，水流容易沿著岩弱面侵蝕而形成蝕溝，蝕溝逐漸下切後造成塊狀砂岩節理解壓，由下游而上游的方向脫離掉落。

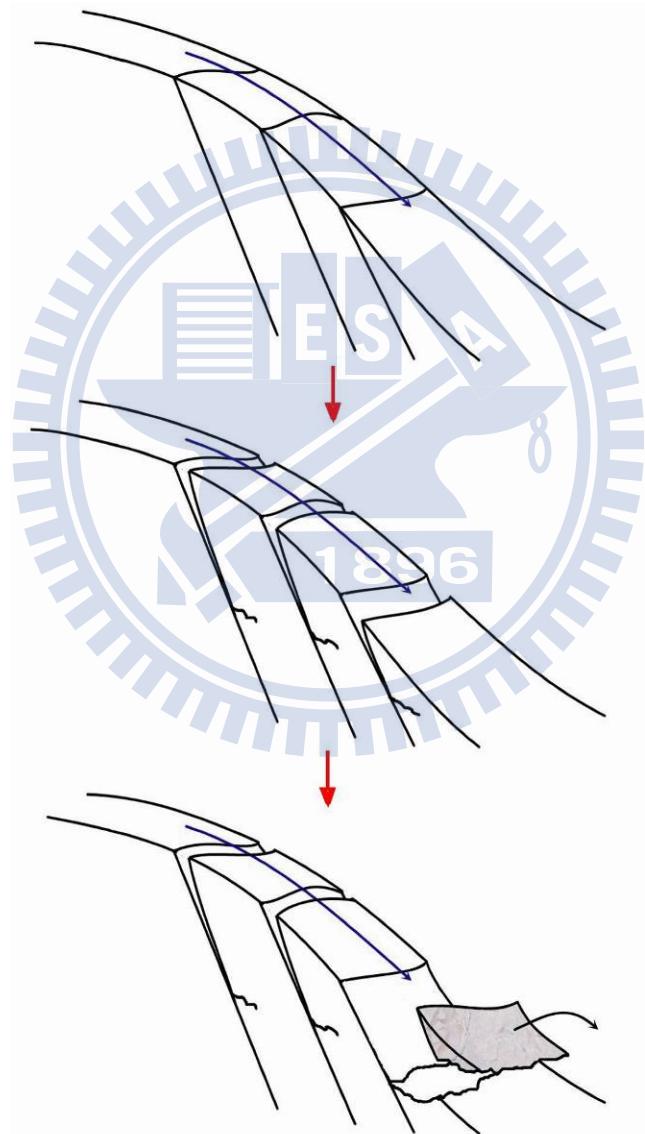


圖 4-15 順向河段層狀岩石由下游向上游方向侵蝕機制(水利署，2008a)

## (二)水平河段(zone 2, 水平岩層)

在以砂頁岩互層為主之層狀岩石方面，常見侵蝕作用主要沿岩層弱面下切，節理與壓使沿塊鬆動而造成塊體抽離，常形成階梯狀地形，侵蝕機制示意圖如圖 4- 16 所示。

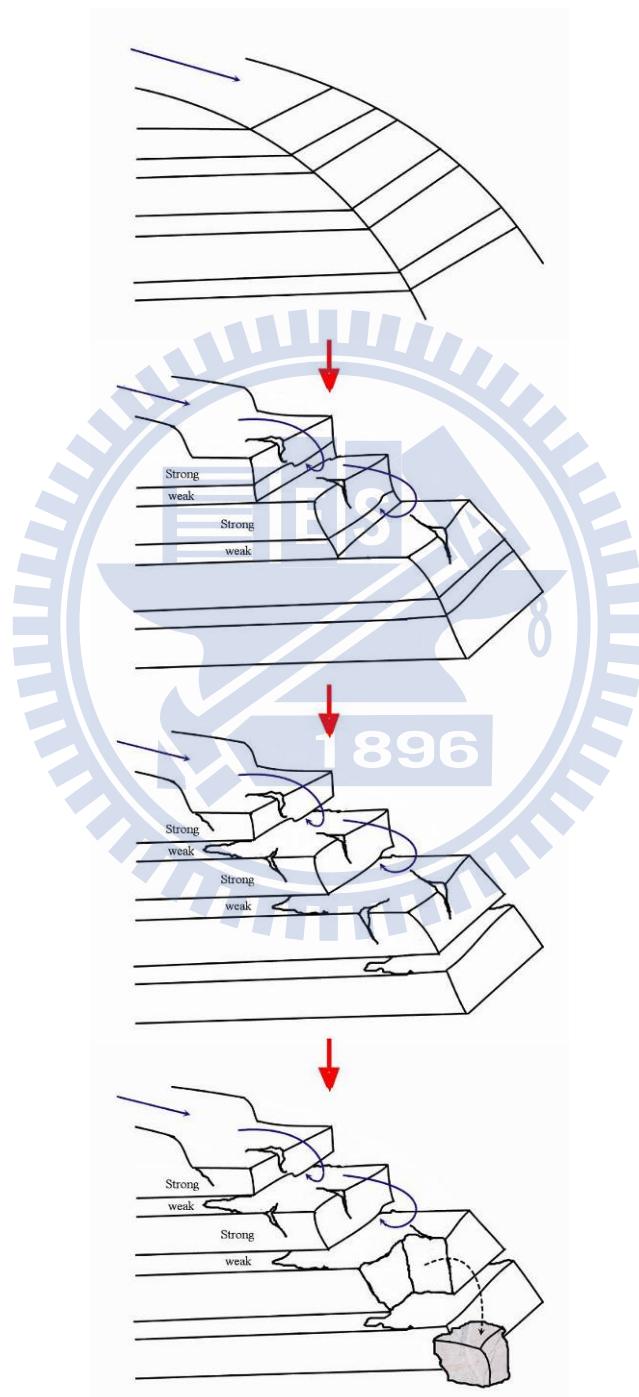


圖 4- 16 水平河段層狀岩石的侵蝕機制(水利署，2008a)

圖 4-17 為水平岩盤河道塊狀砂岩常見河道下切機制，塊狀砂岩之抗侵蝕力佳，水流侵蝕作用初期只能在表層沿著弱面侵蝕，長期的侵蝕結果將在塊狀砂岩表面形成流槽(flute)，流槽下切至一定深度後，塊狀砂岩隨節理發展而產生塊體抽離。

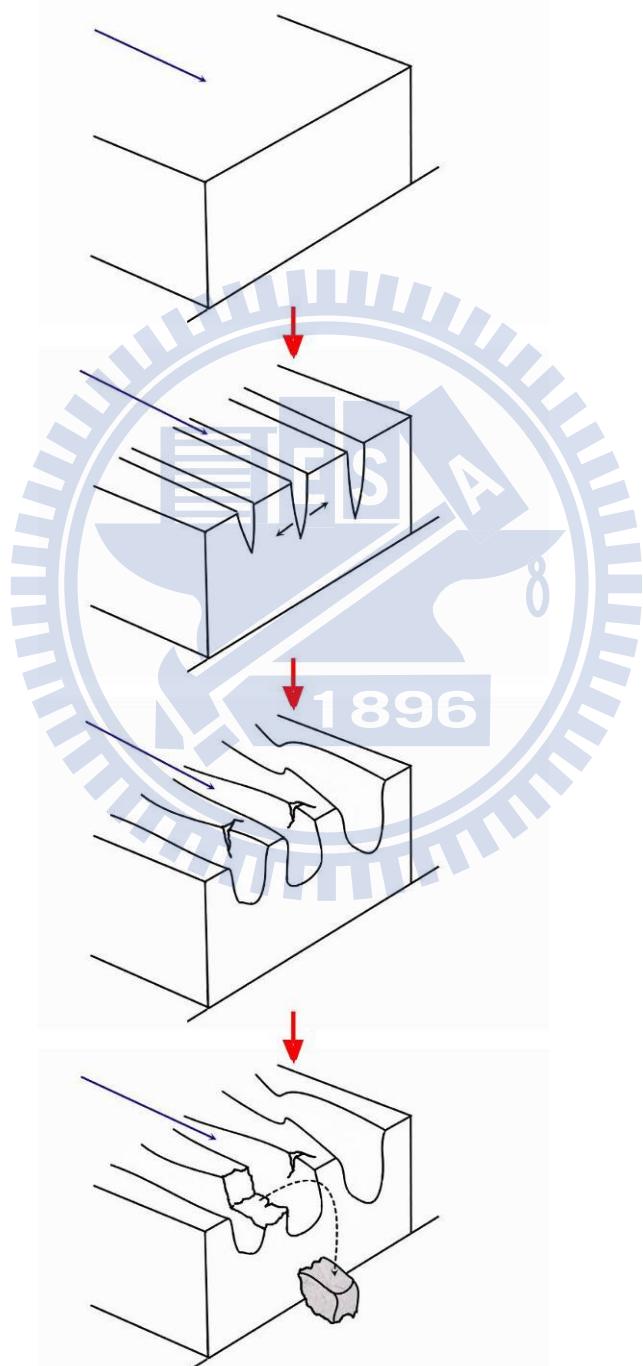


圖 4-17 水平河段塊狀砂岩的侵蝕機制(水利署，2008a)

### (三)逆向河段(zone 3，水流方向與岩層傾向相反)

圖 4- 18 為逆向河段常見的河道下切機制，本區域之層狀岩石及塊狀砂岩其侵蝕現象較為類似，由抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩先被水流侵蝕搬運，留下抗侵蝕力較佳的厚層或塊狀砂岩在節理貫通後而產生塊體抽離現象。

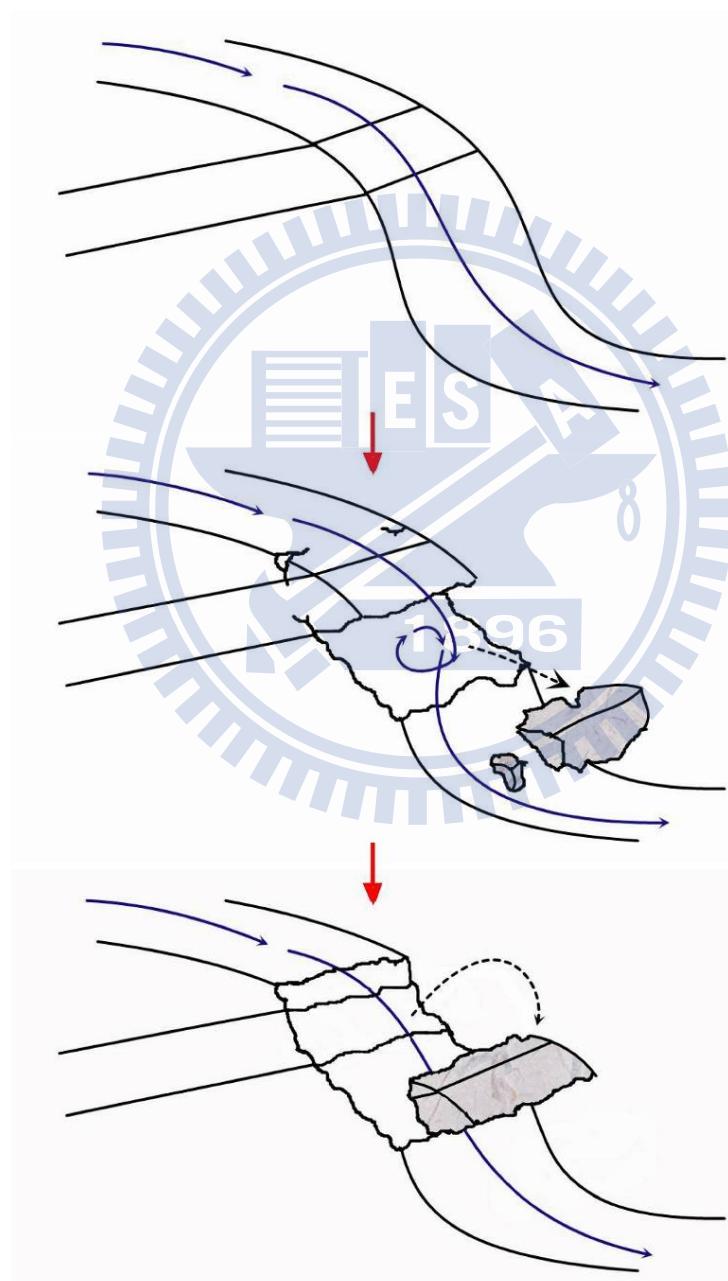


圖 4- 18 逆向河段的主要侵蝕機制(水利署，2008a)

## 4-5 八掌溪河道沖蝕成因機制探討(整理自林文凱，2008)

### 4-5-1 研究區域沖蝕現象探討

研究區域內觀察到某些現地沖蝕的現象符合文獻所提的河床的沖蝕現象相同，配合圖 4-19 說明如下：

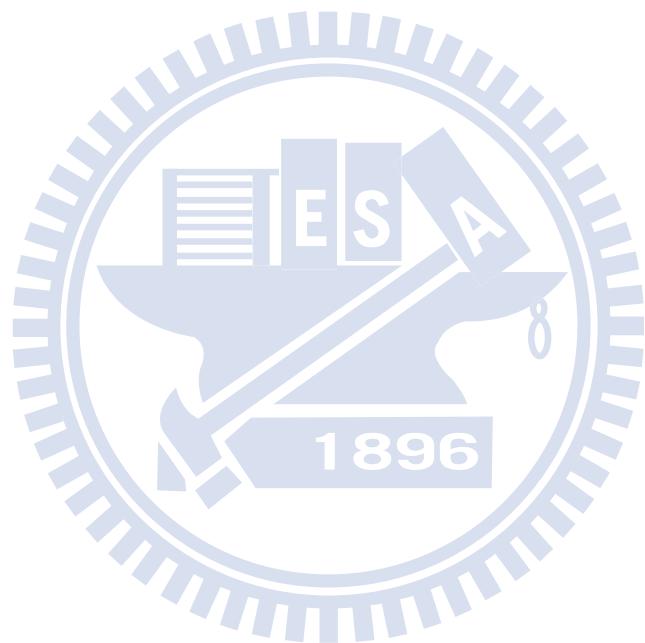
1.塊體抽離：圖 4-19(a)位於 110 號斷面附近，由照片可見岩石塊體脫離原本的位置掉落至照片下方；圖 4-19 (b)岩床的邊緣呈現規則的塊體形狀證明沖蝕的方式是以塊體為單位。這兩張照片符合岩塊抽離(plucking)作用，發生此種現象的岩性為厚層泥岩。

2.磨蝕沖蝕：圖 4-19 (c)位於 95 斷面下游，河床表面光滑，應為粉砂岩受水流、懸浮載或河床載等磨損(wear)所造成的磨蝕(abrasion)作用。

3.顆粒彈跳沖蝕：圖 4-19 (d)與圖 4-19 (e)分別位於 95 號斷面下游與 100 號斷面附近，岩性為厚層泥岩，表面的凹洞為顆粒材料撞擊造成，為底床上因卵礫石彈跳引起之磨蝕作用(abrasion with saltation)之作用。

4.穴蝕沖蝕：圖 4-19 (f)與圖 4-19 (g)為 95 號斷面下游粉砂岩表面的穴蝕(cavitation)痕跡，觀察到壺穴與滑槽現象。

5.風化沖蝕：圖 4-19 (h)位於觸口攔河堰下游，泥岩表面受乾溼循環作用而乾裂，材料風化後易被水流帶走，屬於物理與化學風化 (weathering) 作用產生的沖蝕。



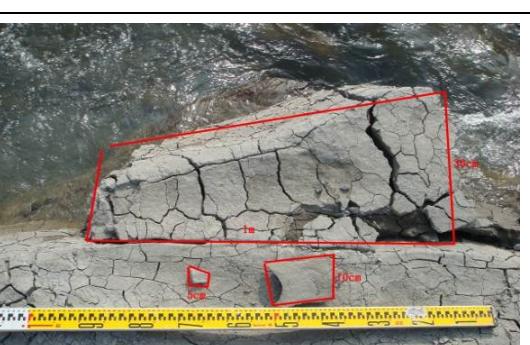
	
(a) 塊體抽離的情形	(b) 塊體抽離的情形
	
(c) 磨蝕沖蝕的光滑表面	(d) 顆粒彈跳沖蝕產生的磨蝕
	
(e) 顆粒彈跳沖蝕產生的磨蝕	(f) 壺穴與滑槽
	
(g) 障礙物下方產生穴蝕	(h) 風化沖蝕造成塊體破碎

圖 4-19 現地符合文獻沖蝕機制的照片(林文凱，2008)

由於本研究區屬軟岩河床，同一地點常可見不同的沖蝕現象，且非為典型的硬岩河床沖蝕現象，在研究區域內觀察到可能較具軟岩河床代表性的沖蝕現象配合圖 4-20 說明如下：

1. 水流侵蝕弱面引致的岩塊脫離：當岩床本身具有一組岩層傾向順著河流流向的順向河情況時，水流沿著岩體的弱面產生侵蝕的情形如圖 4-20 (a)；當弱面繼續被水流作用加深、加寬後，不相接觸而懸空的岩體，因為水流作用方向在下緣產生張力裂縫，或因為重力的作用在上緣產生張力裂縫，張力裂縫繼續擴展後會形成圖 4-20 (b) 這種塊體掉落的現象。這種現象廣泛地分布於仁義潭攔河堰下游段泥質頁岩出現的區域。
2. 乾裂造成的岩塊脫離：本研究區域的上游段，即觸口攔河堰到五虎寮段觀察到岩床風化現象，這區的岩層多為灰色泥岩，層厚約 30 公分到數公尺不等，在現地利用地質錐敲擊水位面以上新鮮的岩體表面僅能刻出鑿痕，利用強度試驗儀測定岩體表面以下 10 公分強度約 5~10MPa；而在水位升降可達的部份，則可觀察到此種泥岩泡水後水再蒸發產生乾裂的情形，岩體從完整變成破碎，用手就能輕易剝開，破碎的塊體尺寸約為數公分至 1 公尺(圖 4- 20 (c))，這種乾裂風化的影響深度在現場量測約為 30 公分，水位升起帶走破碎的塊體後留下的沖蝕痕跡如圖 4-20 (d)。
3. 差異侵蝕引致的岩塊脫離：對於薄層與厚層的沖蝕作用，在直覺的判斷上薄層由於不連續面發達，侵蝕的速率應該比厚層來的快，但是在現地觀察到的侵蝕情形卻不是如此。由於厚層的砂岩因為膠結力較弱，在較容易分離為顆粒材料被水流帶走的情況下，侵蝕速率明顯較快，而比薄層的含泥質稍高的頁岩較早被侵蝕。在

96 斷面附近觀察到薄層與厚層差異侵蝕的現象(圖 4-20 (e))。但是在薄層失去厚層束制之後容易受水流等外力影響而造成片狀剝離(圖 4-20 (f))，所被帶走的材料已經不是顆粒一粒一粒的帶離的情形，而是整片整片材料的剝離行為。

4. 穴蝕產生壺穴與滑槽：由研究區域內 95 斷面下游觀察到，當極厚層(層厚數公尺以上)粉砂岩出現時，它的抗侵蝕性相對地較上下層泥質或砂質岩與頁岩互層高，在上下層泥岩或砂岩與頁岩互層先被侵蝕後，侵蝕速率較慢的粉砂岩會殘留在河道上成為障礙物，水流越過此障礙時出現穴蝕沖蝕的情況，由圖 4-20 (g)與圖 4-20 (h)可以見到壺穴與滑槽等現象。

(本部分引用自國立交通大學碩士論文—林文凱，2008，軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例)

	
<p>(a) 水流沿著岩體的弱面產生侵蝕</p>	<p>(b) 塊體掉落的現象</p>
	
<p>(c) 破碎的塊體尺寸</p>	<p>(d) 破碎的塊體被帶走後的痕跡</p>
	
<p>(e) 薄層與厚層差異侵蝕的現象</p>	<p>(f) 薄層片狀剝離的現象</p>
	
<p>(g) 粉砂岩表面的滑槽、壺穴現象</p>	<p>(h) 粉砂岩表面的壺穴現象</p>

圖 4-20 現地觀察到的軟岩沖蝕現象(林文凱，2008)

## 4-5-2 軟岩現地沖蝕機制

由各學者提出的現地沖蝕機制，可能因為現地水流或地質條件的不同而以複合的型式出現在不同的流域裡，單一的侵蝕機制無法對真正的沖蝕狀況做完整的解釋，由現場調查的觀察將可以發現符合研究區域內的沖蝕機制。本研究經由現地的觀察，在 4-3-1 提出可能較具軟岩河床代表性的沖蝕現象為：1. 水流侵蝕弱面引致的岩塊脫離、2. 乾裂造成的岩塊脫離、3. 差異侵蝕引致的岩塊脫離、4. 穴蝕產生壺穴與滑槽，依循這些沖蝕現象，本章節提出在研究區域裡主要的四種沖蝕機制，分別為：1. 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形、2. 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為、3. 砂頁岩互層的差異 abrasion，薄層厚層互相牽動、4. 粉砂岩的切穿等，本節將就它們出現的條件以及發展的步驟，透過簡單的示意圖配合現地照片佐證進行說明。

### 4-5-2-1 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形

當岩床為完整岩石時，即岩體表面無明顯弱面，水流的侵蝕作用通常會是純水流、懸浮載或河床載等沖蝕(abrasion)作用所造成顆粒尺度之逐漸磨損(wear)行為，但若岩床有一組以上不連續面時，水流會沿著弱面侵蝕，將弱面擴展，而後由於各種外力的影響，如水流的剪力或自重會使岩體被分解成塊體，這種由岩體變成塊體而後被水流帶走的情況可以解釋為塊體抽離(plucking)作用，在形成塊體的期間若底床上因卵礫石衝擊出碎片或岩塊(abrasion with saltation)之作用則會加速弱面的侵蝕而使沖蝕作用加速。

在研究區域裡觀察到，當岩床本身具有一組岩層傾向順著河流流向的順向河情況時，水流沿著岩體的弱面產生侵蝕的情形，可以用圖

4-21 的六個步驟示意圖說明如下：

1. 沉積後的成岩作用使岩體本身含有一組原生的不連續面一層面。
2. 地層受擠壓作用後水流的方向與岩層的傾向相同而形成順向河。
3. 當護甲層被移除後，水流沿著岩體的弱面，也就是層面侵蝕，使原本緊密接合的面產生縫隙。
4. 不連續面繼續侵蝕，被加深、加寬的作用而使岩體彼此不相接觸。
5. 不相接觸而懸空的岩體，因為水流作用方向在下緣產生張力裂縫，或因為重力的作用在上緣產生張力裂縫。
6. 張力裂縫繼續擴展，最後岩體變成塊體而完全脫離的 plucking 機制。

(本部分引用自國立交通大學碩士論文—林文凱，2008，軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例)

示意圖	現地照片
1.沉積後成岩、層理發達	(a)
2.地表風化，水流流向呈順向河情形	(b)
3.水流沿弱面(即層面)侵蝕	(c)

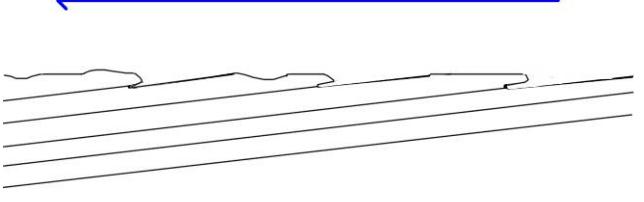
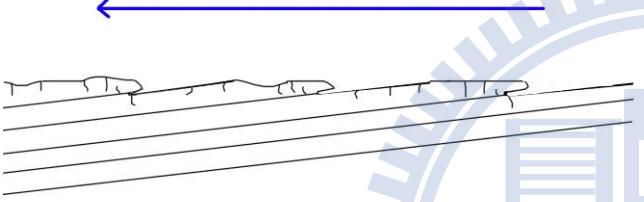
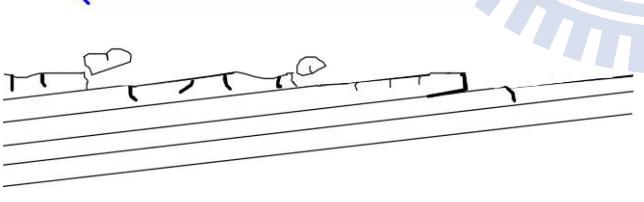
	
4. 侵蝕後弱面明顯被刻深	(d)
	
5. 自重或水流造成岩體表面張力裂縫發展	(e)
	
6. 裂縫發展，岩體形成塊體脫離	(f)

圖 4-21 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形(林文凱，2008)

#### 4-5-2-2 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為

Stock, et al. (2005)長期量測整理世界多處(包含台灣)岩床河道之沖蝕速率資料，他提出底床岩石多少都傾向於受反覆乾溼循環而由完整岩石漸弱化成頁狀或碎片狀材料，而易於被強大水流所帶走。這種反覆乾溼循環使完整岩石漸弱化成頁狀或碎片狀材料的風化情形在本研究區域並沒有出現，關鍵可能在於硬岩與軟岩岩性的不同造成。

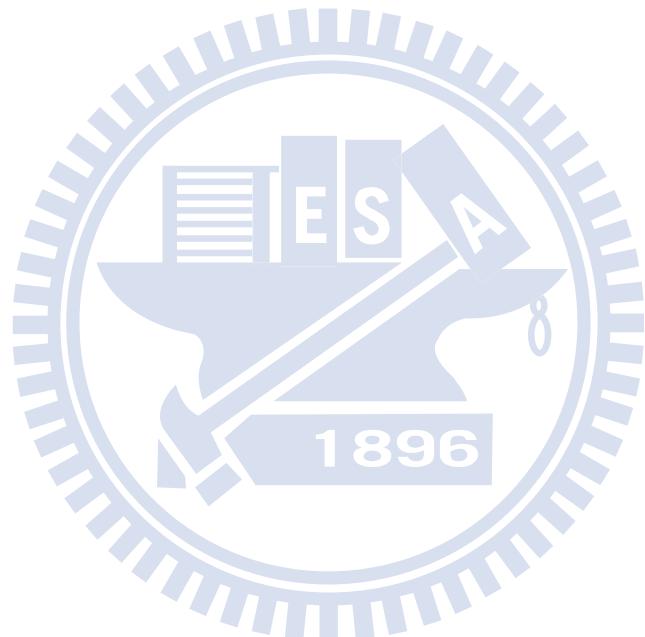
本研究在研究區域的上游段，即觸口攔河堰到五虎寮段觀察到岩床風化現象，這區的岩層多為灰色泥岩，層厚約 30 公分到數公尺不等，新鮮且質硬。在現地利用地質鎚敲擊水位面以上新鮮的岩體表面僅能刻出鑿痕，利用強度試驗儀測定岩體表面以下 10 公分強度約 5~10MPa。但是在水位面以下的岩體表面疏鬆，泡水易鬆散，水流流過表面可以明顯的看到顆粒一粒一粒被帶走的磨蝕(abrasion)行為。而在水位升降可達的部份，則可觀察到此種泥岩泡水後水再蒸發產生乾裂的情形，岩體從完整變成破碎，用手就能輕易撥開，破碎的塊體尺寸約為數公分至 1 公尺，這種乾裂風化的影響深度在現場量測約為 30 公分，未來應有量化資料。

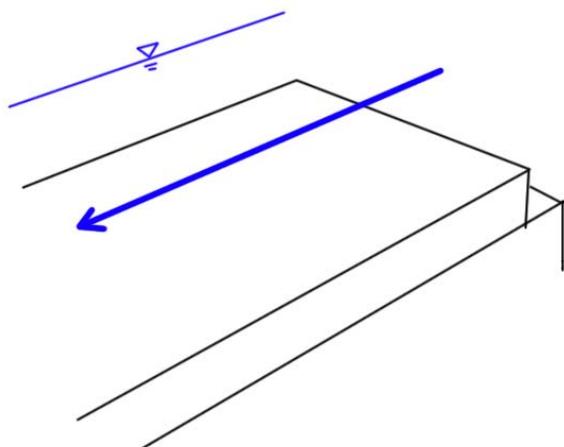
這種泥岩受反覆乾溼循環的乾裂行為可以由圖 4-22 的示意圖來說明：

1. 完整的岩層，新鮮強度 5-10MPa，水位面抬升後泡水軟化，岩層表面發生 abrasion 的行為。
2. 水位降低後泡水的岩體乾縮、乾裂成粉碎狀塊體，塊體尺寸由數公分到 1 米不等，乾裂的影響深度約 30 公分。

3. 乾裂後的粉碎狀塊體在下一次水位面再升起的時候能輕易的被水流帶走，較大的塊體會有帶走的順序問題，這種行為可以解釋為 plucking 的侵蝕機制。
4. 水流帶走整層材料後繼續影響下層的岩體。

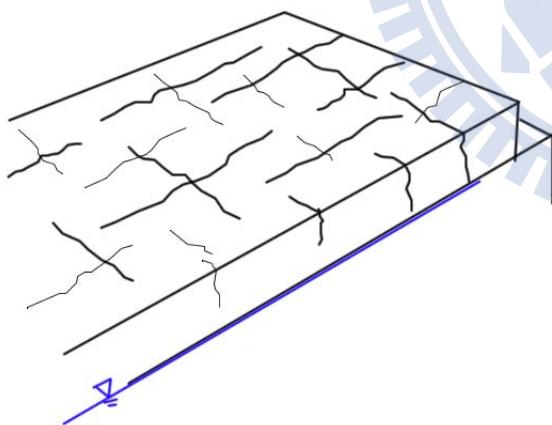
(本部分引用自國立交通大學碩士論文—林文凱，2008，軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例)





1.完整的岩層新鮮強度約 5~10MPa，泡水後軟化 abrasion

(a)



2.水位降低後岩體乾縮、乾裂

(b)

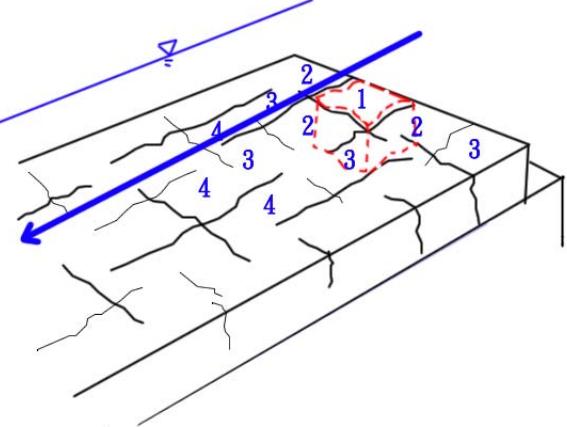
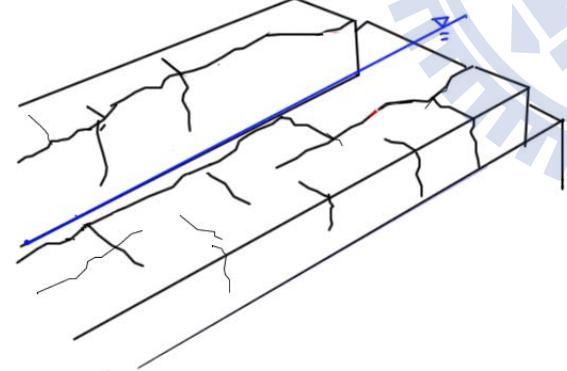
	
<p>3. 岩體失去強度，水位漲高能輕易帶走 (數字表帶走的順序)</p>	<p>(c)</p>
	
<p>4. 水流帶走整層材料</p>	<p>(d)</p>

圖 4-22 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為(林文凱，2008)

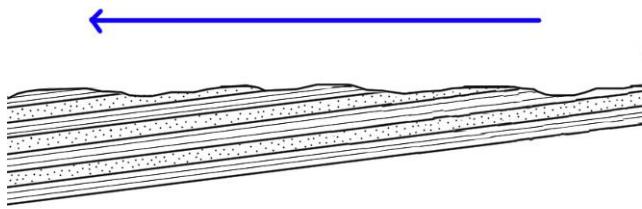
#### 4-5-2-3 砂頁岩互層的差異磨蝕，薄層厚層互相牽動(林文凱，2008)

由 4-2 可知，本研究區域常出現砂岩(或粉砂岩)和頁岩(或泥岩)的互層，如 4 號固床工下游、3 號固床工下游，這種砂頁岩互層呈 30 公分間隔出現的型態，可以看成厚層砂岩的厚度為 30 公分，而薄層頁岩總厚 30 公分，頁理間距約 1-2 公分。

對於薄層與厚層的沖蝕作用，直覺的判斷薄層由於不連續面發達，侵蝕的速率應該比厚層來的快，但是在現地觀察到的侵蝕情形卻不是如此。由於厚層的砂岩反而因為膠結力較弱，在水流流過岩層表面發生 abrasion 的情況下侵蝕速率明顯較快，而比薄層的含泥質稍高的頁岩較早被侵蝕，所以在現地隨處可看到薄層與厚層差異侵蝕的現象。但是在薄層失去厚層束制之後容易受水流等外力影響而造成片狀抽離，所被帶走的材料已經不是磨蝕(abrasion)差異侵蝕階段顆粒一粒一粒的帶離，而是整片整片材料的抽離(plucking)行為。

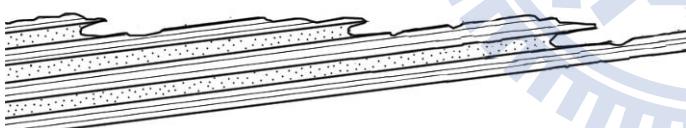
這種砂頁岩互層的差異侵蝕行為，薄層與厚層侵蝕速率又互相牽連的關係，可以由圖 4-23 的示意圖來說明：

1. 沉積環境形成砂頁岩互層，每層厚約 30 公分，泥質含量較高、顆粒較細的頁岩薄層每層約 1-2 公分，砂質含料較高的厚層膠結力較弱。
2. 水流作用在岩床表面，顆粒材料被一粒一粒帶離的 abrasion 行為，因為厚層砂岩膠結力較弱，侵蝕速率大於薄層的頁岩而產生差異侵蝕，薄層也因此失去束制。
3. 當薄層失去束制後材料受水流作用容易沿著弱面一片一片的撥離，此時這種行為為 plucking。
4. 片狀材料被帶離後薄層的侵蝕趕上厚層的侵蝕。



1. 侵蝕前河道，河床為砂頁岩互層

(a)



2. 差異 abrasion, 薄層失去束制

(b)

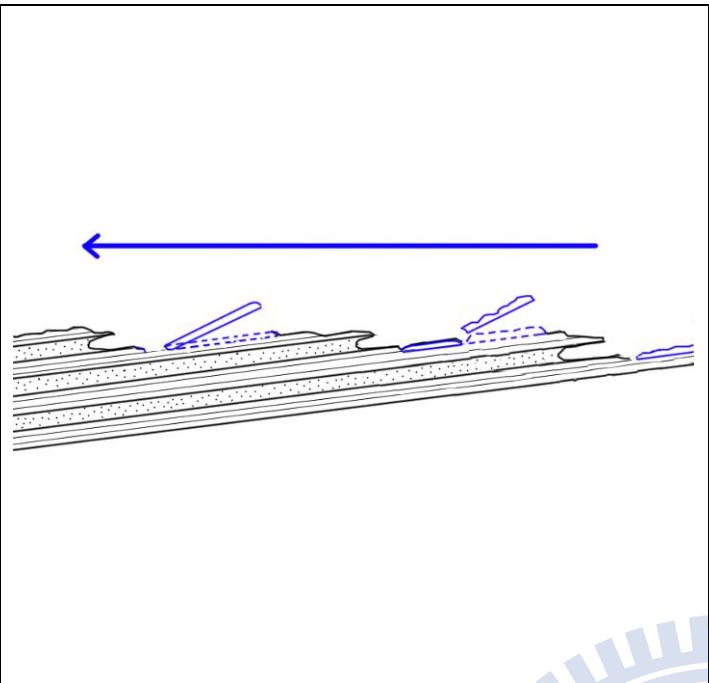
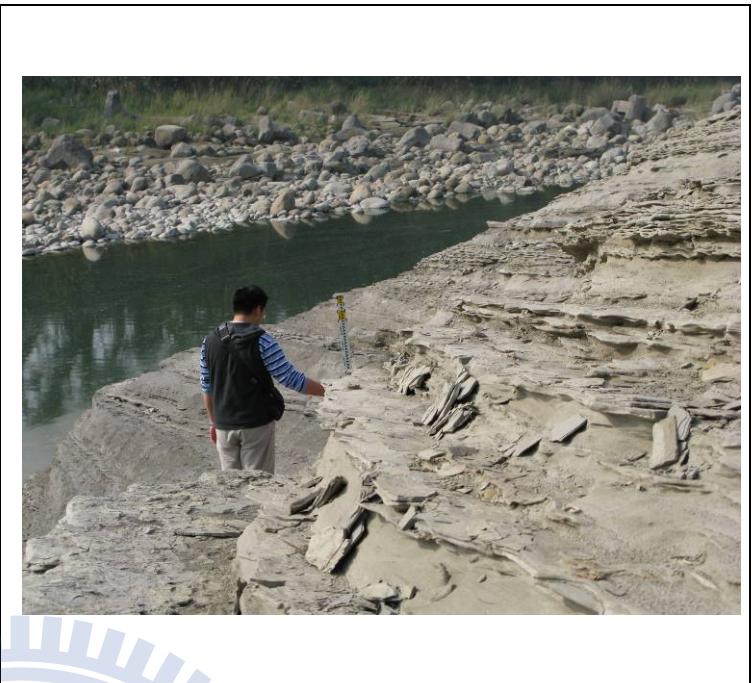
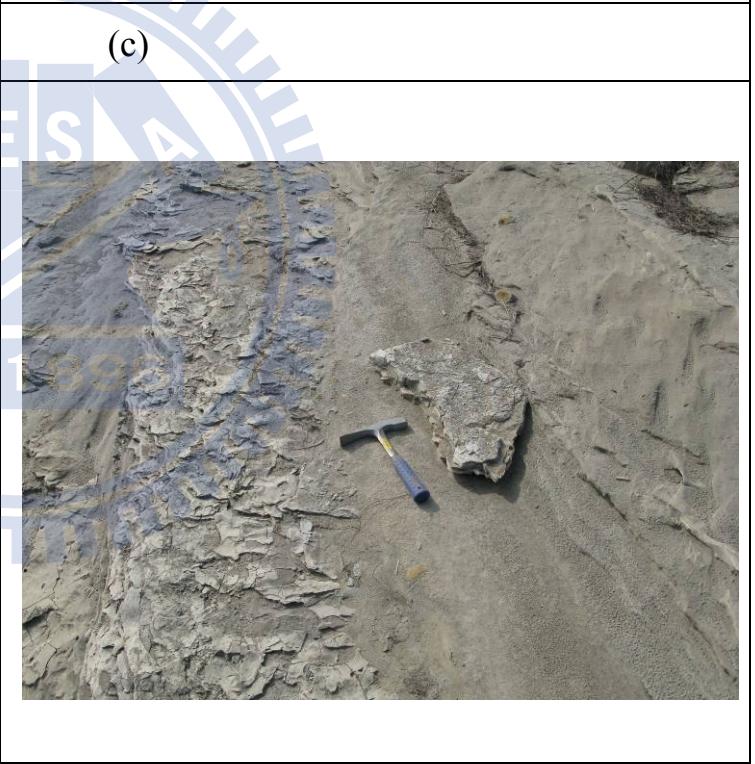
	
<p>3. 薄層片狀撥離，Plucking 啟動</p>	<p>(c)</p> 
<p>4. 片狀材料被帶離</p>	<p>(d)</p>

圖 4-23 砂頁岩互層的磨蝕侵蝕(abrasion), 薄層厚層互相牽動(林文凱, 2008)

#### 4-5-2-4 粉砂岩的切穿

文獻回顧提到，當水流受到障礙物或階狀落差時，其下游側局部沖蝕特別顯著。河川中若有障礙物，其下游側較為顯著之岩床沖蝕，則多源自懸浮載之磨蝕沖蝕。除了磨蝕損耗，穴蝕(cavitation)之角色也不能忽視，壺穴與滑槽之構造常與渦流流況下出現之穴蝕沖蝕有關(Whipple, *et al.* , 2000)。由研究區域內 95 斷面下游觀察到，當極厚層(層厚數公尺以上)粉砂岩出現時，它的抗侵蝕性相對地較上下層泥質或砂質岩與頁岩互層高，在上下層泥岩或砂岩與頁岩互層先被侵蝕後，侵蝕速率較慢的粉砂岩會殘留在河道上成為障礙物，(虛線可以視為侵蝕後的河床條件)，水流越過此障礙時出現出現穴蝕沖蝕的情況，由圖 4- 25 可以見到壺穴與滑槽等現象。



圖 4-24 粉砂岩侵蝕速率較慢形成障礙物(林文凱，2008)

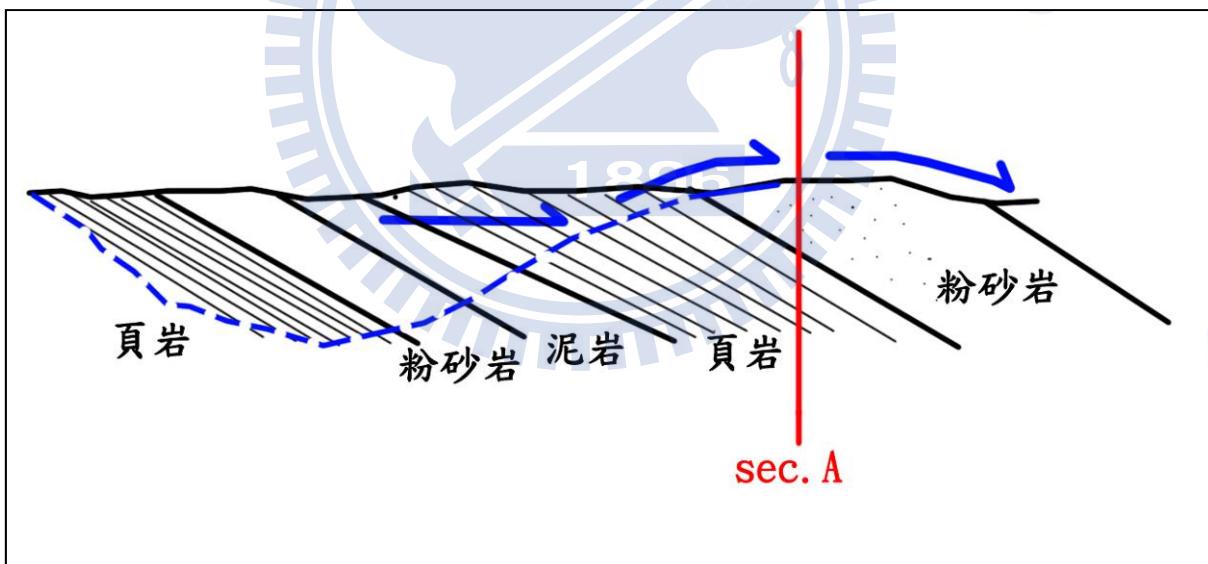


圖 4-25 壺穴(potheole)與滑槽(flute)的現象(林文凱，2008)

此種極厚層粉砂岩進一步沖蝕的發展，可以由 sec.A 解釋，粉砂岩的侵蝕切穿是由上向下與由下向上兩個方向的競賽：

圖 4- 26 的上部，當粉砂岩表面的壺穴與滑槽構造逐漸加深、加寬，彼此之間會串連形成紊亂的河道，這種串連的情形會使水流產生渦流的情形加劇，最後切穿整層粉砂岩來到下一層形成深槽主流路。

圖 4- 26 的下部，可以看到粉砂岩的下層是較容易侵蝕的頁岩時，水流順著障礙物的前緣先侵蝕掉底部頁岩層，上部的粉砂岩則會因為失去底層受重力影響而產生張力裂縫崩落。

(本部分引用自國立交通大學碩士論文—林文凱，2008，軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例)

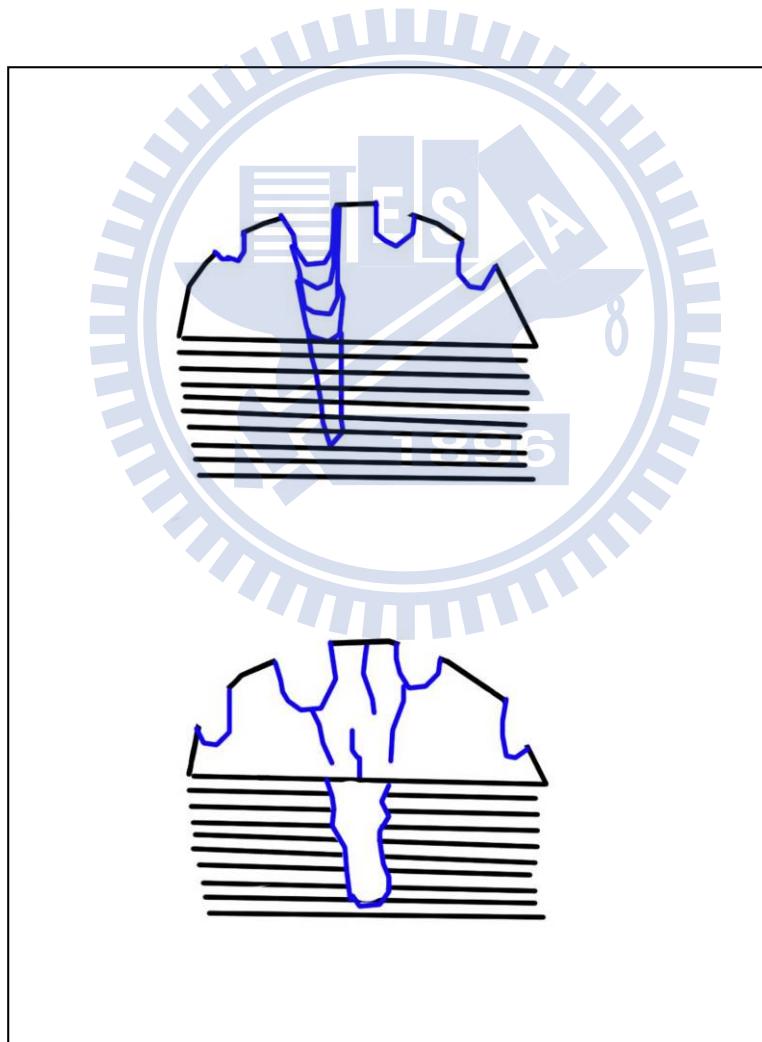


圖 4- 26 圖 4-21-sec.A 橫剖面圖(林文凱，2008)

## 4-6 沖蝕機制綜合討論

影響大安溪與八掌溪沖蝕機制條件可能有地質條件、水文條件以及地形參數條件等等，此小結就針對大安溪與八掌溪之異同做討論。

### (一)地質條件之比較：

1.大安溪大峽谷段為上新世地層的卓蘭層，由淡青或青灰色砂岩、粉砂岩、青灰色或暗灰色泥岩與頁岩的互層組成，區域構造大多為東北-西南走向，構造依據岩層位態分布區分為三區：第一區為背斜西翼，岩層傾角分佈大至由西側的 22 度逐漸變陡至東側 38 度；第二區為背斜軸部，大至為水平岩層；第三區為背斜東翼，岩層傾角分佈大至由西側的 12 度逐漸變陡至東側的 68 度。傾向則有與河流流向相同的順向(第一區)，與河流平行的順層(第二區)跟與河流流向相反的逆向(第三區)。

2.八掌溪仁義潭攔河堰段為更新世地層，由老至新為崁下寮層、二重溪層、六雙層與沖積層，崁下寮層由頁岩和一些砂岩互層為主；二重溪層由灰色泥岩夾淺灰色粉砂岩及泥質砂岩的互層組成；六雙層大部分由暗青色至青灰色泥岩和夾有砂岩和粉砂岩互層的頁岩組成，區域構造大多成南-北走向，傾向與河道流向相同，傾角約為 10 度。

3.大安溪三個區的岩層位態都不一樣，八掌溪只有順向河段，所以在形成沖蝕機制方面，大安溪之河流平行的順層(第二區)跟與河流流向相反的逆向(第三區)等兩區所形成的岩石沖蝕機制應有別於八掌溪。

4.圖 4- 27 為南二高橋至仁義潭攔河堰各斷面位置圖，八掌溪仁義潭攔河堰至斷面 98，以泥質的岩層居多，泥岩的強度並不如砂岩，所以一旦流量增大，很容易就造成塊體抽離沖蝕，故此區的主要沖蝕

機制為塊體抽離；斷面 95 至 98 為砂頁岩互層與泥頁岩互層，容易先產生磨蝕沖蝕造成差異侵蝕後，於下孤立的岩塊就轉變成塊體抽離沖蝕；南二高橋至斷面 95 主要岩層為粉砂岩，它的抗侵蝕相對較泥質或砂質岩與頁岩互層高在上下層泥岩或砂岩與頁岩互層先被侵蝕後，侵蝕速率較慢的粉砂岩會殘留在河道上成為障礙物，水流越過此障礙時出現出現穴蝕沖蝕的情況。

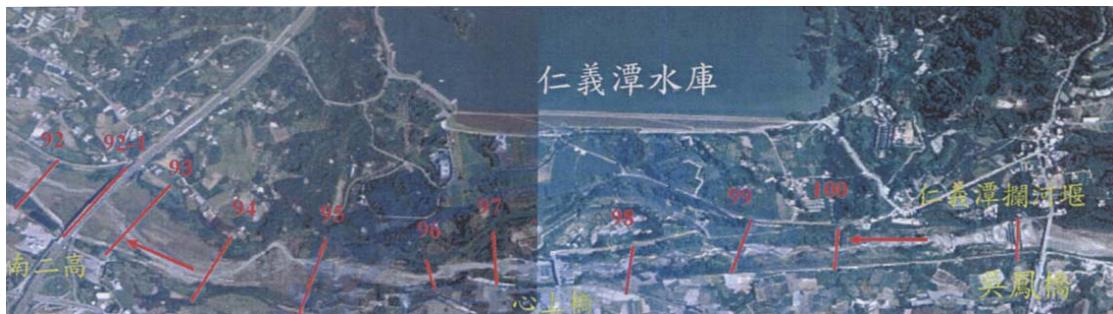


圖 4-27 南二高橋至仁義潭攔河堰各斷面位置(水利署, 2006)

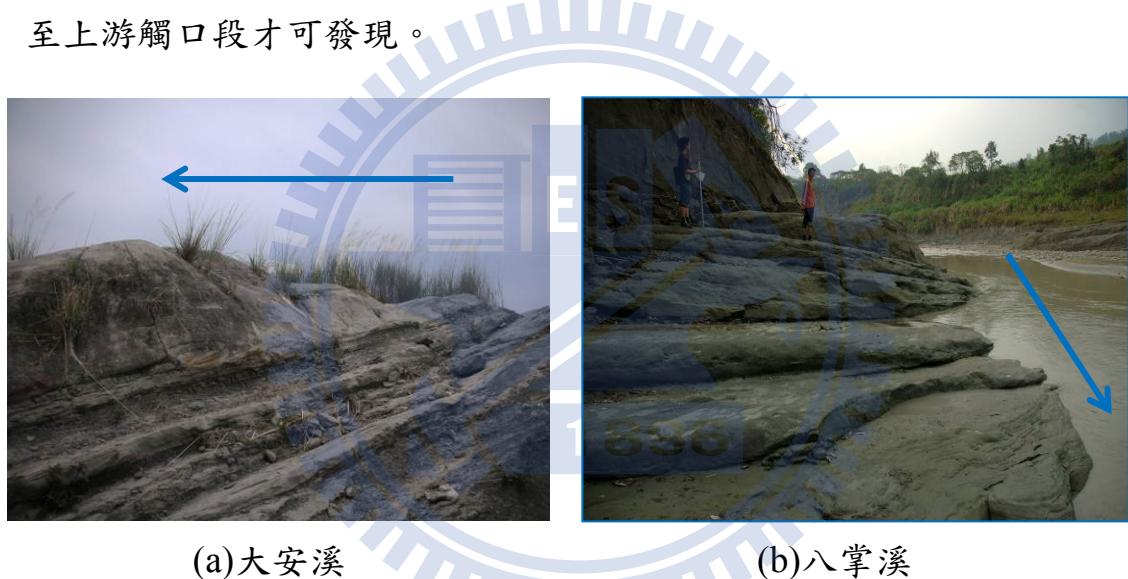
5. 大安溪下游為順向河，此區所引發沖蝕現象的岩層為砂頁岩互層與塊狀砂岩。砂頁岩互層在此區常見的沖蝕現象有兩種，一種為容易因為差異侵蝕現象而形成塊體抽離侵蝕，與由下游而上游的方向產生片狀(或塊狀)剝離侵蝕現象(塊體抽離侵蝕)。砂岩則為水流容易岩弱面侵蝕而形成蝕溝，蝕溝逐漸下切後造成塊狀砂岩節理解壓，由下游而上游的方向脫離掉落。

6. 大安溪中游為水平岩層，以砂頁岩互層為主之層狀岩石方面，侵蝕作用主要沿岩層弱面下切，使岩塊鬆動脫離；砂岩抗侵蝕力良好，表面常形成流槽地形。流槽下切至一定深度後，塊狀砂岩隨節理發展而產生塊體抽離；所以中游主要侵蝕機制為塊體抽離。

7. 大安溪上游為逆向河段，本區域之層狀岩石及塊狀砂岩其侵蝕現象較為類似，由抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩先被水流侵蝕搬運，

留下抗侵蝕力較佳的厚層或塊狀砂岩在節理貫通後而產生塊體抽離侵蝕。

8. 大安溪下游順向河段與八掌溪仁義潭攔河堰段相同點為在岩層互層區，發生的沖蝕現象行為相同，先產生差異侵蝕，後發生塊體抽離(圖 4-28)，同時在砂岩侵蝕部分也有穴蝕的機制產生；相異點除了岩性不同外，大安溪塊狀砂岩在主深槽段容易發生塊體抽離方式(圖 4-29)，而八掌溪則以磨蝕沖蝕和穴蝕為主(圖 4-30)，且大安溪下游有受風化作用的頁岩(圖 4-31)，此機制於仁義潭攔河堰段並未發現，至上游觸口段才可發現。



(a)大安溪

(b)八掌溪

圖 4- 28 差異侵蝕所造成的塊體抽離



圖 4- 29 大安溪下游塊體抽離



圖 4-30 八掌溪穴蝕侵蝕



圖 4-31 大安溪下游頁岩風化

(二)水文條件之比較：

大安溪幹流全長約 96 公里，流域面積約 758 平方公里，自 88 年至 98 年最大流量為 7376cms(卓蘭站流量站)，重現期距洪峰流量 (Q100)為 13800cms。卓蘭站輸砂量率定曲線： $Q_s = 1.1939Q^{1.803}$ 。

八掌溪幹流全長 80.86 公里，流域面積約 474.74 平方公里，自 78 年至 94 年最大流量為 2210cms(軍輝橋流量站)，重現期距洪峰流量 (Q100)為 2090cms。仁義潭攔河堰下游輸砂量率定曲線： $Q_s = 14.314Q^{0.8014}$ 。

### (三)地形條件比較：

大安溪河道坡度自 88 年至 97 年，變化範圍為 1/50 至 1/40，98 年下游開始淤積，坡度為 1/64。

八掌溪河道坡度自 78 年至 94 年，變化範圍為 1/100 至 1/214。

依據大安溪大峽谷河段全段平均坡降，其坡度較陡，所以水流的速度勢必較快，產生的磨蝕沖蝕與顆粒彈跳沖蝕較大(圖 4-32(a))，所以大安溪的磨蝕沖蝕與彈跳顆粒沖蝕皆大於八掌溪；當遇到落差較大的河段時(圖 4-32(b))，容易在其下產生較深的沖刷坑，也會在河道岩壁出現渦流現象出現，所以大安溪與八掌溪皆會發生穴蝕沖蝕情況(圖 4-30、圖 4-33)。



(a)顆粒彈跳沖蝕 (b)落差較大河段

圖 4-32 落差大河段與顆粒彈跳沖蝕圖



圖 4-33 大安溪穴蝕侵蝕

#### (四)大安溪與八掌溪綜合比較

本研究 2-1 節回顧岩床河道沖蝕機制，目的為至現場觀察時，是否有出現類似之機制，以下將歸納大安溪與八掌溪所見之沖蝕機制：

##### 1.磨蝕沖蝕沖蝕機制：

大安溪於順向河段、水平河段與逆向河段均有發生磨蝕沖蝕機制，但此三區所發生的原因卻不一樣，順向河段發生的原因為砂頁岩互層產生差異侵蝕；水平河段發生的原因為在以砂頁岩互層為主之層狀岩石方面，侵蝕作用主要沿岩層弱面下切；逆向河段的原因則為抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩先被水流侵蝕搬運。

八掌溪研究區河段屬於順向河，且多為與頁岩互層的岩層，所以當水流從岩層上流過時，由於厚層的砂岩因膠結力較弱，在水流流過岩層表面發生磨蝕的情況下，侵蝕速率明顯較快，而比薄層的含泥質稍高的頁岩較早被侵蝕，所以在現地隨處可看到薄層與厚層差異侵蝕的現象。

##### 2.彈跳顆粒沖蝕機制：

顆粒彈跳沖蝕於大安溪與八掌溪皆可見，特別是在岩性較硬的岩體更容易發現，在大安溪的塊狀砂岩區與八掌溪的粉砂岩區皆可觀察到此沖蝕現象。

##### 3.塊體抽離沖蝕機制：

塊體抽離機制在大安溪三種河段皆可發現，但由於岩層構造的差異，所以大安溪的塊體抽離機制發生原因區分為三種，以下就分別對順向、水平以及逆向河段做討論。

順向河段發生原因有兩個，分別為 1.岩層為砂頁岩互層時，差異侵蝕產生部分岩層懸空的狀況，進而造成岩塊掉落的現象，2.岩層為

塊狀砂岩石，侵蝕溝或滑槽附近區域的岩石在節理解壓後塊體由下游而上游的方向掉落。

水平河段發生原因有兩個，1.當岩層為砂頁岩互層時，侵蝕作用主要沿岩層弱面下切，節理解壓使沿塊鬆動而造成塊體抽離，2.當岩層為塊狀砂岩時，岩層表面形成流槽，當流槽下切至一定深度後，塊狀砂岩隨節理發展而產生塊體抽離。

逆向河段發生原因為岩層受水流侵蝕，當節理貫通後而產生塊體抽離現象。

八掌溪會產生塊體抽離的原因有兩個：1. 仁義潭攔河堰下游段泥質頁岩區，水流沿弱面侵蝕造成岩體懸空，因水流或重力作用產生張力裂縫，引致岩塊脫離，2. 由於厚層的砂岩因為膠結力較弱，比薄層的含泥質稍高的頁岩較早被侵蝕，造成差異侵蝕引致的岩塊脫離。

#### 4. 穴蝕沖蝕機制：

穴蝕沖蝕機制發生在水流遇到障礙物或是流況改變時，造成水流沖擊與形成渦流而產生，大安溪與八掌溪研究區段皆可發現此沖蝕機制。

#### 5. 風化沖蝕機制：

大安溪發生風化沖蝕機制的岩層為極厚層頁岩區，由於反覆乾溼循環造成此機制的產生。

八掌溪研究區內因無此種岩性所以沒有這項沖蝕機制，但位在上游觸口攔河堰到五虎寮橋段觀察到岩床風化現象，這區的岩層多為灰色泥岩，在水位升降可達的部份，則可觀察到此種泥岩泡水後水再蒸發產生乾裂的情形，屬於風化沖蝕機制的現象。

表 4-1 為大安溪與八掌溪的沖蝕機制形成比較表，探討各條溪的沖蝕機制有無，圖 4-34 與圖 4-35 為各沖蝕機制分布位置。由表 4-1 中可以看到大安溪與八掌溪在沖蝕機制有(1)磨蝕沖蝕(2)顆粒彈跳沖蝕(3)塊體抽離沖蝕(4)穴蝕沖蝕(5)風化沖蝕等五種，所以現場狀況差異不大。

由以上將八掌溪的沖蝕機制與大安溪比較如下：

#### 1.水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形

→與大安溪順向河段-塊狀砂岩的侵蝕機制相同

此機制是屬於先進行磨蝕，然後進行塊體抽離的機制。

#### 2.泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為

→與大安溪極厚層頁岩的風化侵蝕相同

此機制為風化沖蝕。

#### 3.砂頁岩互層的差異侵蝕，薄層厚層互相牽動

→與大安溪順向河段-砂頁岩互層侵蝕機制相同

此機制是屬於先進行磨蝕，然後進行塊體抽離的機制。

#### 4.粉砂岩的切穿

→與大安溪水平河段-砂岩侵蝕機制相同

此機制為先進行磨蝕，然後可能造成穴蝕沖蝕或塊體抽離。

大安溪與八掌溪的沖蝕機制可以說是相當類似，其唯一差別為逆向河段抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩被水流侵蝕搬運，水流侵蝕造成節理貫通，造成塊體抽離現象。

表 4-1 大安溪與八掌溪沖蝕機制形成比較表

沖蝕機制	形成原因	大安溪	八掌溪	發生位置
磨蝕沖蝕	差異侵蝕	有	有	大安溪發生於順向河段的砂頁岩互層；八掌溪發生於約斷面 95 至 98 處
	水流沿弱面侵蝕造成下切	有	有	大安溪發生於水平河段的砂頁岩互層
	抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩被水流侵蝕搬運	有	無	大安溪發生於逆向河段的砂頁岩互層
彈跳顆粒沖蝕	顆粒撞擊岩床	有	有	在大安溪與八掌溪的河道皆可發現
塊體抽離沖蝕	差異侵蝕造成岩塊懸空掉落	有	有	大安溪發生於順向河段的砂頁岩互層；八掌溪發生於約斷面 98 至仁義潭攔河堰處
	節理解壓塊體由下游往上游掉落	有	有	大安溪發生於順向河段的塊狀砂岩層
	水流沿弱面下切造成塊體鬆動	有	有	大安溪發生於水平河段的砂頁岩互層
	流槽下切貫通	有	有	大安溪發生於水平河段的塊狀砂岩層
	水流侵蝕造成節理貫通	有	無	大安溪發生於逆向河段的砂頁岩互層
	水流沿弱面侵蝕造成塊體懸空	無	有	八掌溪發生於約斷面 98 至仁義潭攔河堰處
穴蝕沖蝕	因流況改變或遇障礙物造成	有	有	兩條溪的河道皆可見此沖蝕機制
風化沖蝕	反覆乾溼循環變化	有	有	兩條溪的河道皆可見此沖蝕機制

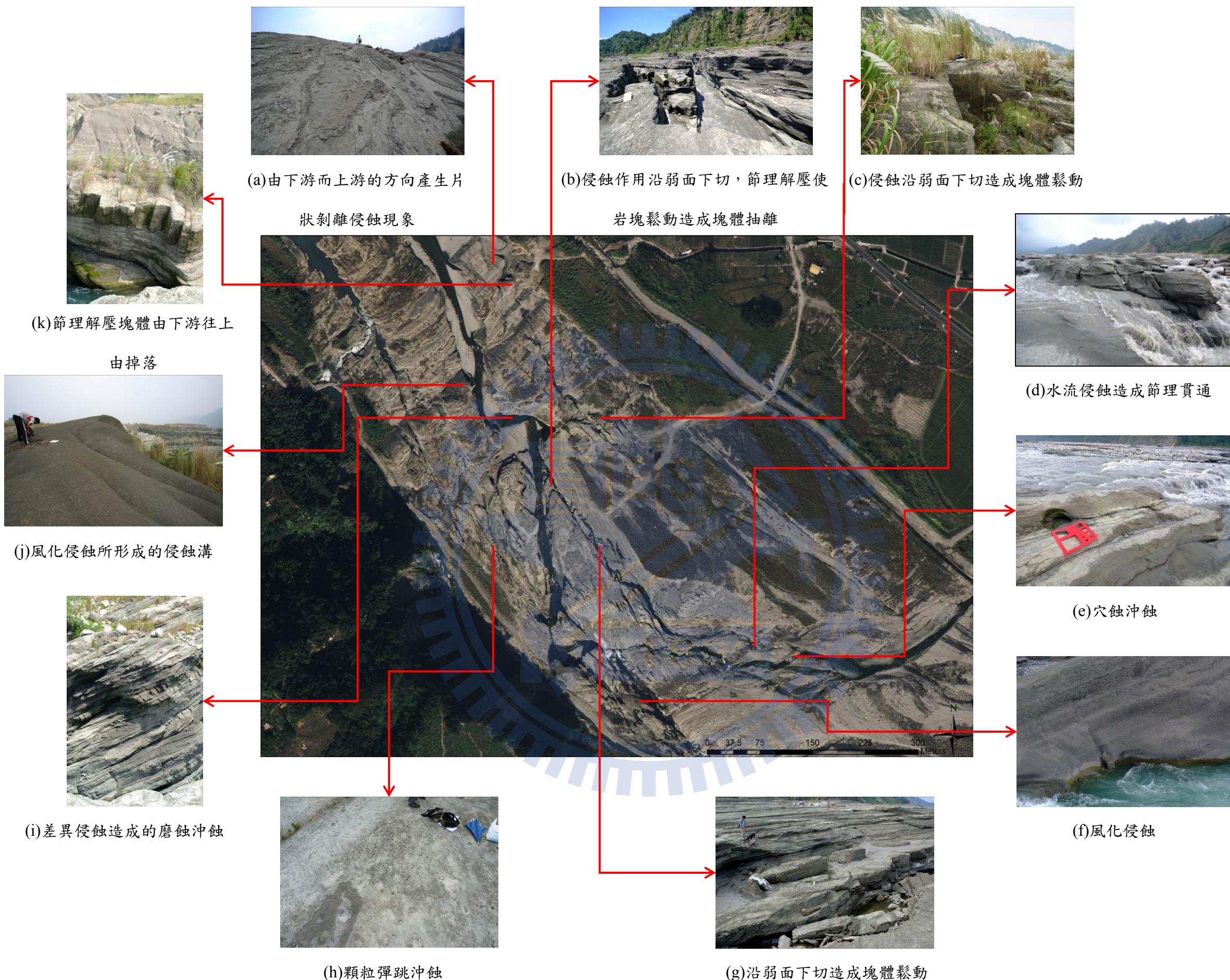


圖 4-34 大安溪各機制分佈圖



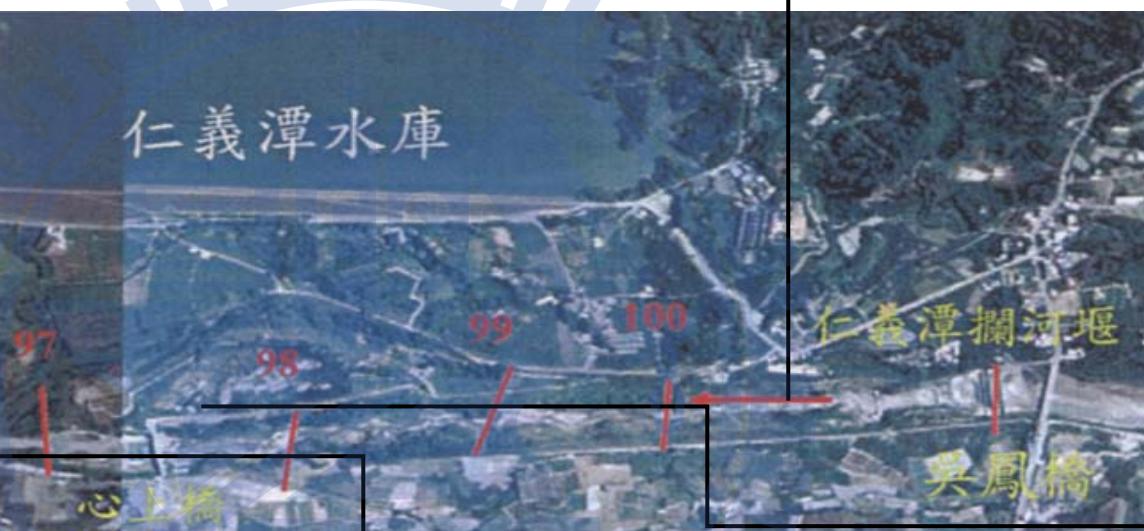
(a) 差異侵蝕形成所的磨蝕沖蝕



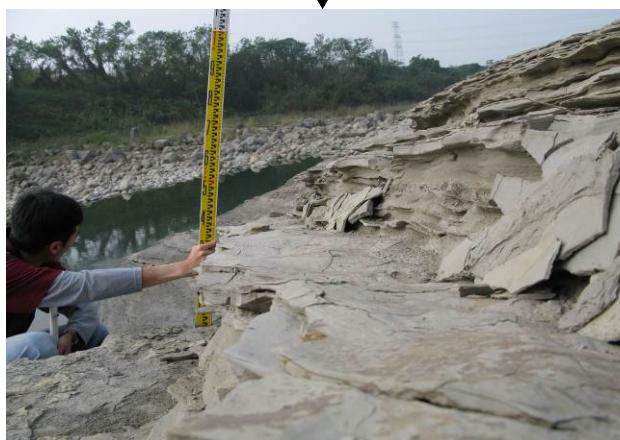
(b) 塊體抽離沖蝕



(c) 顆粒彈跳沖蝕



(f) 上游觸口段風化的泥岩層



(d) 差異侵蝕造成岩塊懸空掉落



(e) 穴蝕沖蝕



(d) 水流沿弱面侵蝕造成塊體懸空掉落

圖 4-35 八掌溪各機制分佈圖

## 4-7 大安溪沖蝕率模型建立

### 4-7-1 沖蝕量計算

由第三章數值地形高程製作與沖蝕量計算的工作步驟所得到的歷年河道配合輔助斷面最低點連線如圖 4- 36：

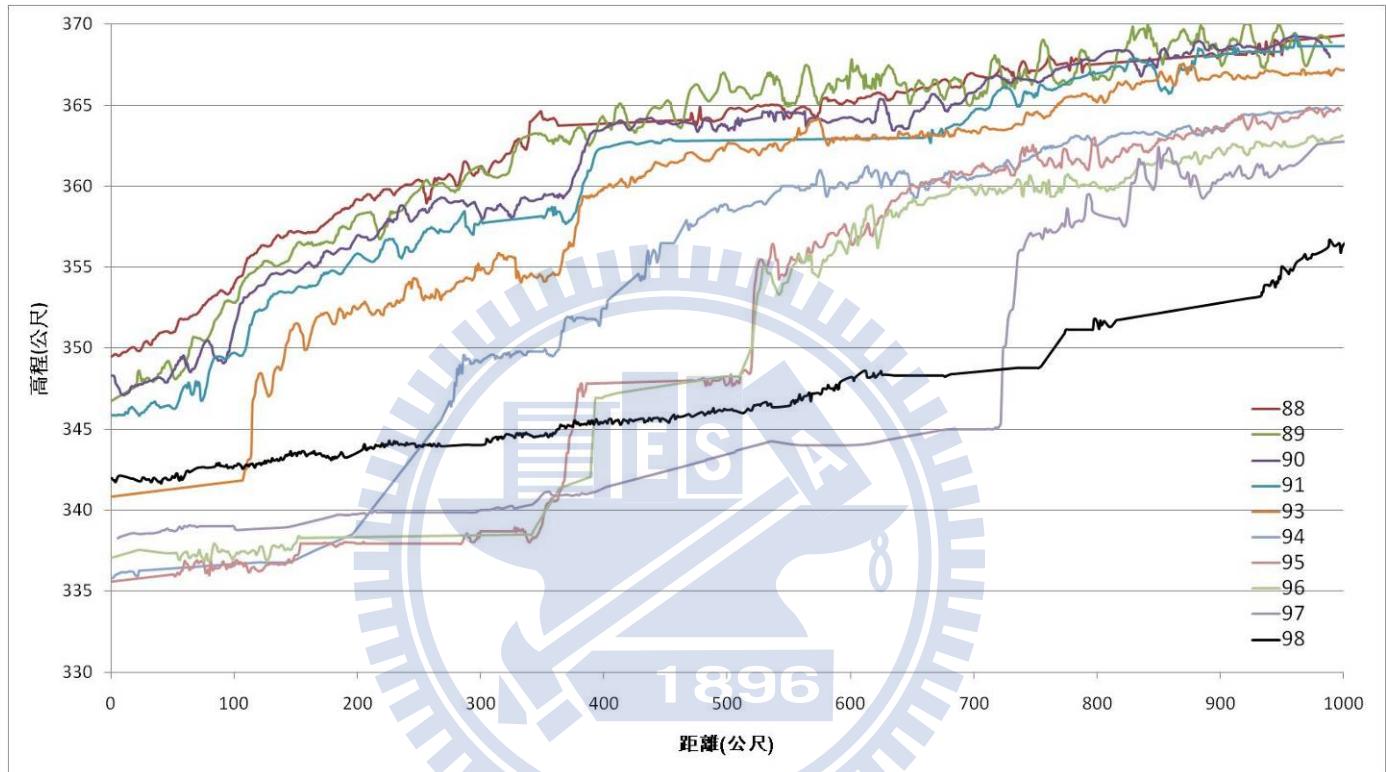


圖 4- 36 歷年主深槽位置之縱向地形高程(水利署, 2009)

圖 4- 36 為歷年主深槽位置之縱向地形高程比較，以下針對歷年主深槽縱向侵蝕變化狀況提出說明：

- (1)侵蝕作用由下游往上游方向進行。
- (2)88 年至 91 年間侵蝕作用屬於均勻的磨蝕(abrasion)作用。
- (3)93 年於下游側(縱向距離 100 附近)開始出現一遷急點(坡度急遽變陡)，遷急點下游出現大規模沖刷下切，深度約在 5 公尺左右，推測應由塊體抽離(plucking)作用為主所造成，屬遷急點上溯作用；而在遷急點上游處仍以均勻的磨蝕(abrasion)作用為主。

(4)93 年至 98 年可以觀察到清楚的遷急點上溯變遷，兩個年度的遷急點之間均產生巨大的沖刷下切量。

(5)96 年後(至縱向距離 300 為止)下游開始出現淤積現象。

(6)本河段的沖蝕機制應包含磨蝕與塊體抽離兩種，巨大的塊體抽離量形成河道的遷急點快速上溯現象。

圖 4-37 為沖蝕種類判斷示意圖，由於從圖中只能大略看出磨蝕沖蝕與塊體抽離沖蝕，且塊體抽離的沖蝕量通常較大，所以當有發生明顯突降點變化之處都列為塊體抽離種類，其餘皆歸於磨蝕沖蝕種類，此種判斷方法在例如圖 4-37 中紅圈處，較難判斷屬於塊體抽離或是磨蝕沖蝕，但其突降點較不明顯，所以歸於磨蝕沖蝕種類。

將圖 4-36 配合地層分界，並將分界標示於河道地形圖上，可以明確觀察出大安溪河道每層沖蝕情形，如圖 4-38，本研究計算沖蝕量的方式為，以坡度分段以及地層分段，分層計算其平均沖蝕量，結果如表 4-2。

沖蝕量因 90 年至 91 年、以及 95 年至 96 年期間為枯水季節，其中並無洪水事件，而其侵蝕量也相當小，在此加以忽略不納入分析。

表 4-2 各年度各岩層之平均沖蝕量

88~89	岩層	1	2	2	3	5	6							
	沖蝕量	2.3	1.2	1.0	1.7	0.7	0.8							
	沖蝕種類	A	A	A	A	A	A							
89~90	岩層	1	2	2	2	3	4	5	6					
	沖蝕量	0.2	2.0	2.4	1.1	1.1	1.4	3.0	3.5					
	沖蝕種類	A	A	P	A	A	A	P	P					
90~91	岩層	1	2	2	3	4	4	5	6					
	沖蝕量	1.8	1.9	1.2	1.3	1.7	1.2	0.7	1.2	2.0				
	沖蝕種類	A	A	A	A	A	A	A	A					
91~93	岩層	1	2	2	2	3	4	5	6	6	6			
	沖蝕量	5.4	7.8	5.1	2.8	3.6	3.4	2.1	3.7	2.0	1.5			
	沖蝕種類	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A			
93~94	岩層	1	2	2	3	4	5	6	7	6	5	4	3	2
	沖蝕量	4.8	5	12.4	13.2	9.3	5.6	5	4.8	4.9	2.9	2.6	3.1	3.1
	沖蝕種類	A	A	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A	A

表 4-3 各年度各岩層之平均沖蝕量(續)

	岩層	1	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2	1
94~95	沖蝕量	0.39	0.00	0.00	4.45	10.88	11.25	10.31	5.62	8.38	3.92	2.11	0.34	1.03	0.25	0.22
	沖蝕種類	A	A	A	A	P	P	P	P	P	A	A	A	A	A	A
96~97	岩層	1	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2	1
	沖蝕量	-1.21	-1.43	-1.34	-1.46	-1.43	-1.53	-1.68	4.2	4.93	13.74	3.2	2.78	0.95	1.37	0.34
	沖蝕種類	d	d	d	d	d	d	d	P	P	P	P	A	A	A	A
97~98	岩層	1	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2	1
	沖蝕量	-3.29	-4.0	-3.64	-4.16	-4.13	-4.34	-4.5	-3.32	-3.24	3.2	8.0	7.1	8.01	7.68	6.62
	沖蝕種類	d	d	d	d	d	d	d	d	d	P	P	P	P	P	P

註：d 為淤積、A 為磨蝕沖蝕、P 為塊體抽離沖蝕，沖蝕量單位為公尺。

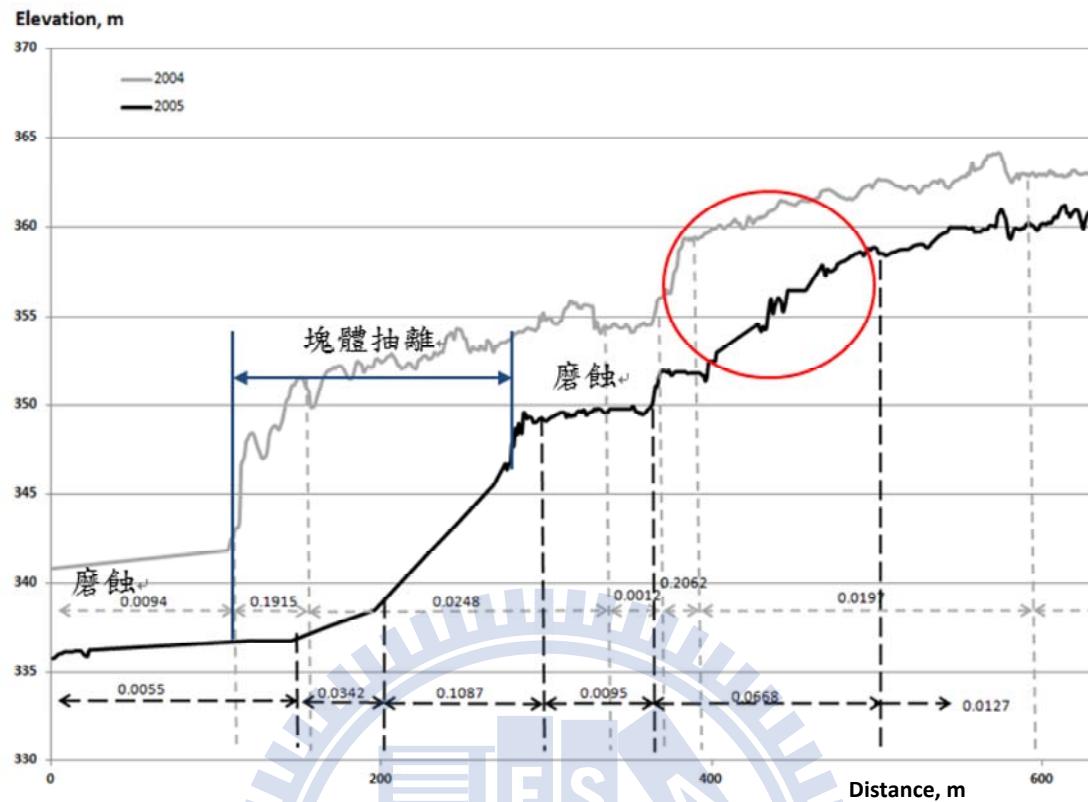


圖 4-37 判斷沖蝕種類示意圖(水利署，2009)

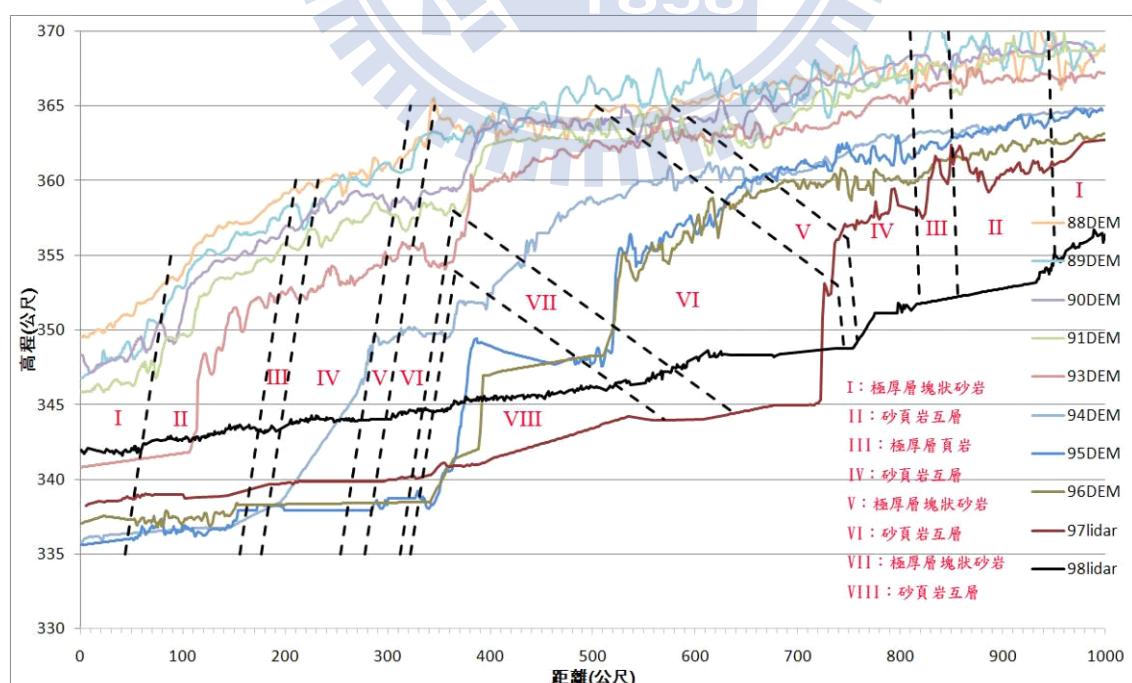


圖 4-38 歷年主深槽縱向地形與地層分佈圖(水利署，2009)

## 4-7-2 水文參數

本研究水文參數獲得由 KW-GIUH 獲得各年度模擬流量資料，對於大安溪沖蝕率模型建立，使用的水文資料為該年度所有洪水事件下單場的最大流量與最大流量之累積量，流量與流速有正相關之關係 ( $Q = U \times A$ )，流量與流功也為正相關之關係 ( $Q \propto U \propto SP$ )，以及最大流量與坡度相乘也可反應剪應力的大小，所以流速與流功可以藉由流量參數來表達其所造成的沖蝕量，故採用此最大流量與累積流量兩個水文條件。

## 4-7-3 地形參數

本研究採用的地形參數為坡度，大安溪坡度獲得由歷年數值高程資料配合各輔助斷面的最低點連線，但在地形面的主要變化趨勢上均有小尺度的劇烈跳動，為消除這些跳動影響，採用分段回歸方式找出主要變化趨勢(坡度平滑化)，消除雜訊影響，獲得成果如附錄 IV。

## 4-7-4 沖蝕量與參數關係

圖 4-39 為歷年洪水事件與歷年數值高程資料的時間關係，由於航空照片之拍攝時間無固定，且並非每次的航空照片之品質均適用製作數值高程資料，所以地形間隔時間不一定相同。

於是本研究採用兩年數值高程資料相減獲得年度沖蝕量，配合年度水文事件，例如：89 年減 90 年數值高程資料，配合 89 年至 90 年間的水文資料及地形資料等等，建立沖蝕模型。

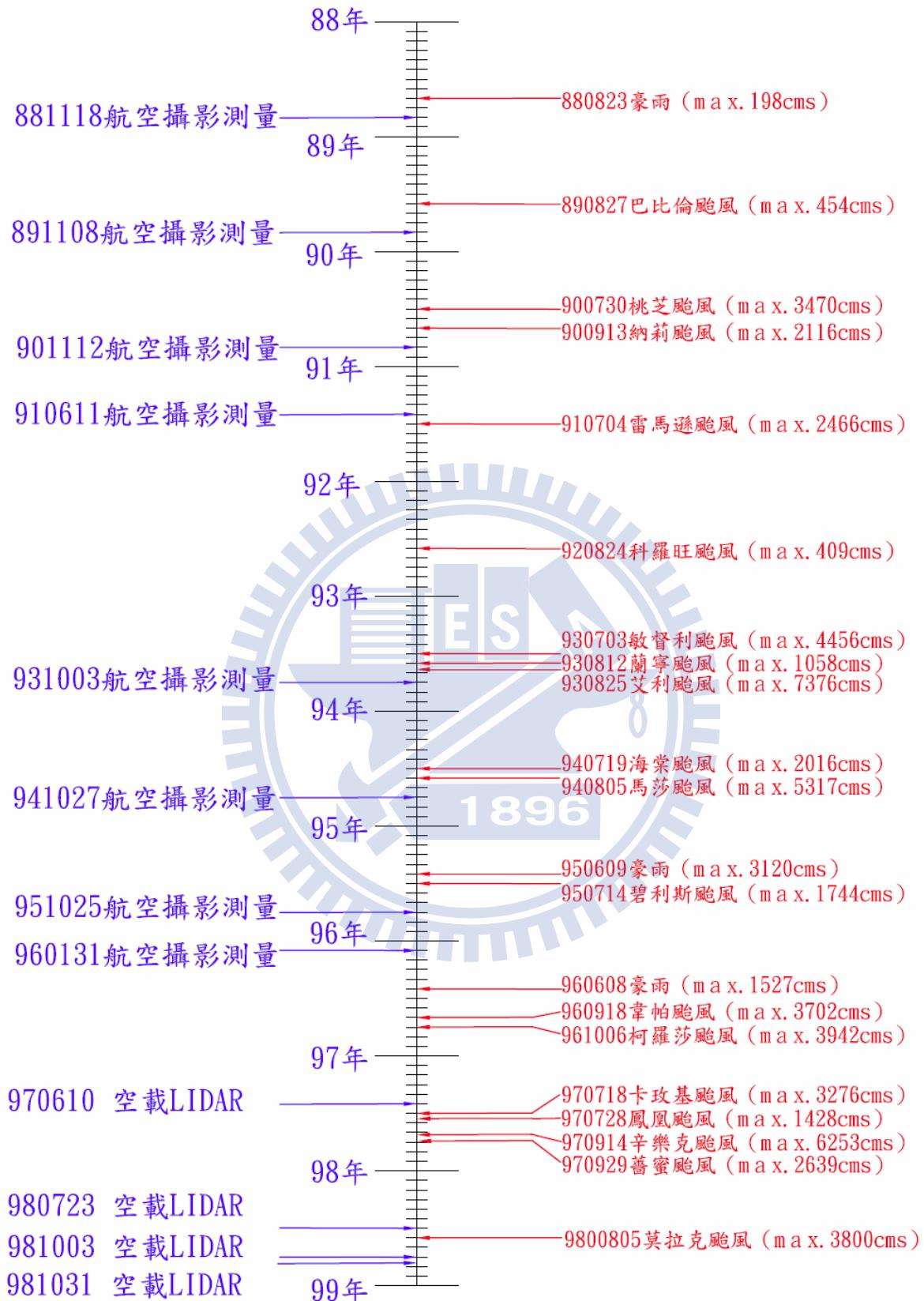


圖 4-39 歷年數值地形與歷年洪水事件(卓蘭站)時間關係圖  
(水利署, 2009)

#### 4-7-4-1 沖蝕量與水文參數關係

圖 4-40 為沖蝕量與歷年最大流量之關係，由圖型散佈點的趨勢觀察，可得到結果如下：

1. 沖蝕量對於磨蝕沖蝕在最大流量下有正相關趨勢存在，從低流量至較高流量都可見到磨蝕沖蝕的分布。
2. 塊體沖蝕發生存在於較高流量時，且塊體沖蝕分布的沖蝕量範圍相當廣。

圖 4-41 為沖蝕量與累積最大流量之關係，由圖上散佈點的趨勢觀察，除與圖 4-38 有類似的趨勢外，並無其他明顯趨勢。

圖 4-42 為沖蝕量與最大流量  $\times$  累積流量之關係，由圖上散佈點趨勢觀察，除與圖 4-38 有類似的趨勢外，並無其他明顯趨勢。

從圖 4-40 至圖 4-42，沖蝕量對於水文因子的關係，似乎只有磨蝕沖蝕對於流量分布的範圍較廣與塊體沖蝕對於沖蝕量分布較廣外，並無其他明顯趨勢，所以應該要搭配其他參數做考量。

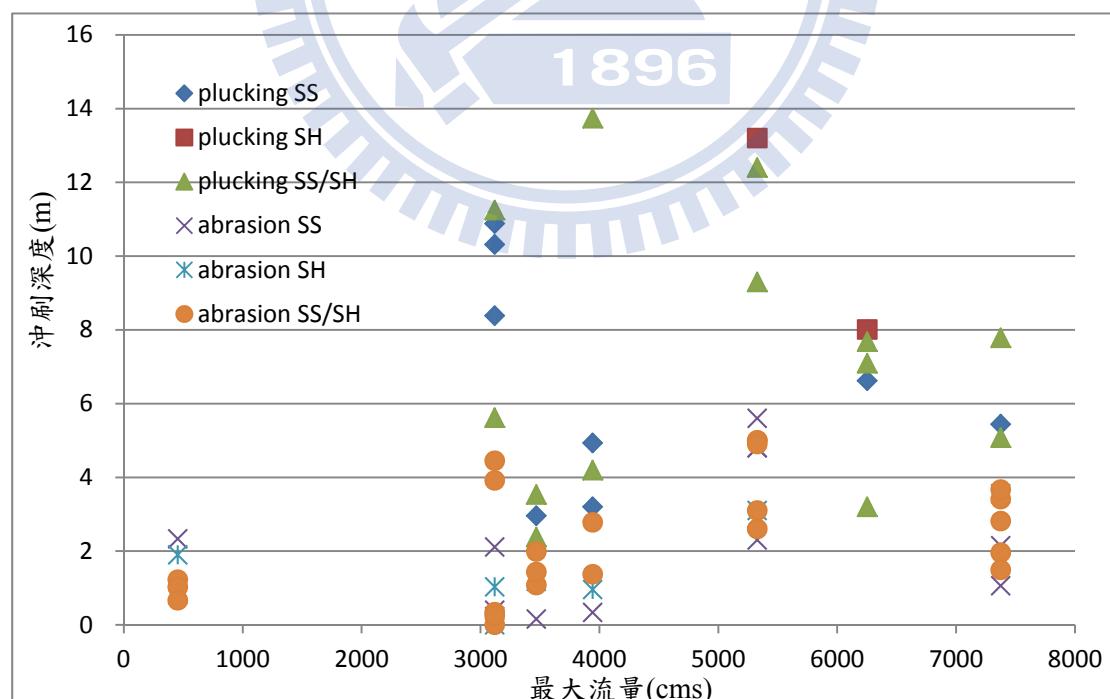


圖 4-40 沖蝕量與最大流量之關係

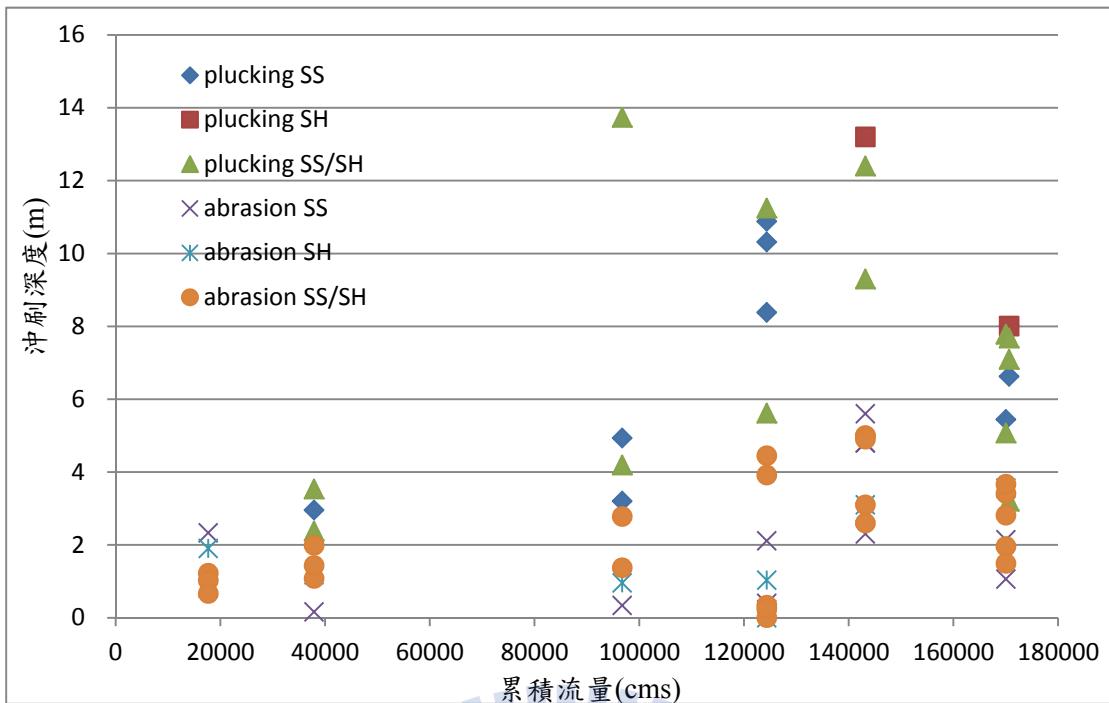


圖 4-41 沖蝕量與累積流量之關係

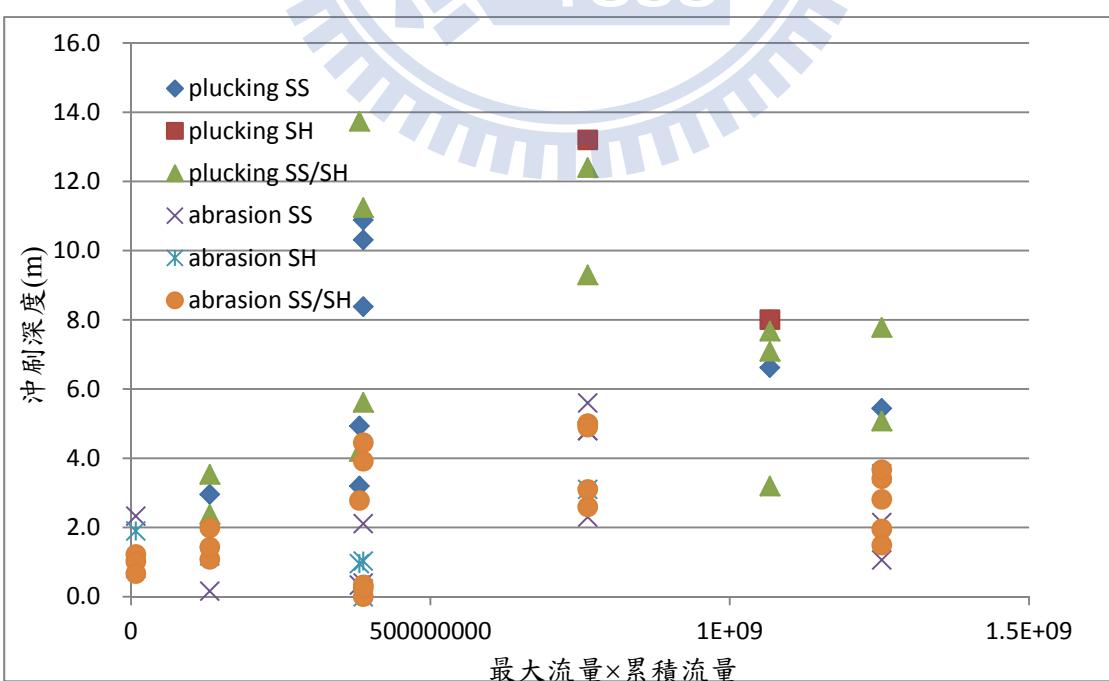


圖 4-42 沖蝕量與最大流量×累積流量之關係

#### 4-7-4-2 沖蝕量與地形參數關係

圖 4-43 為沖蝕量對於地形參數之影響，除了磨蝕沖蝕分布在較緩坡度與塊體沖蝕發生在較陡坡度外，其餘並無明顯趨勢。

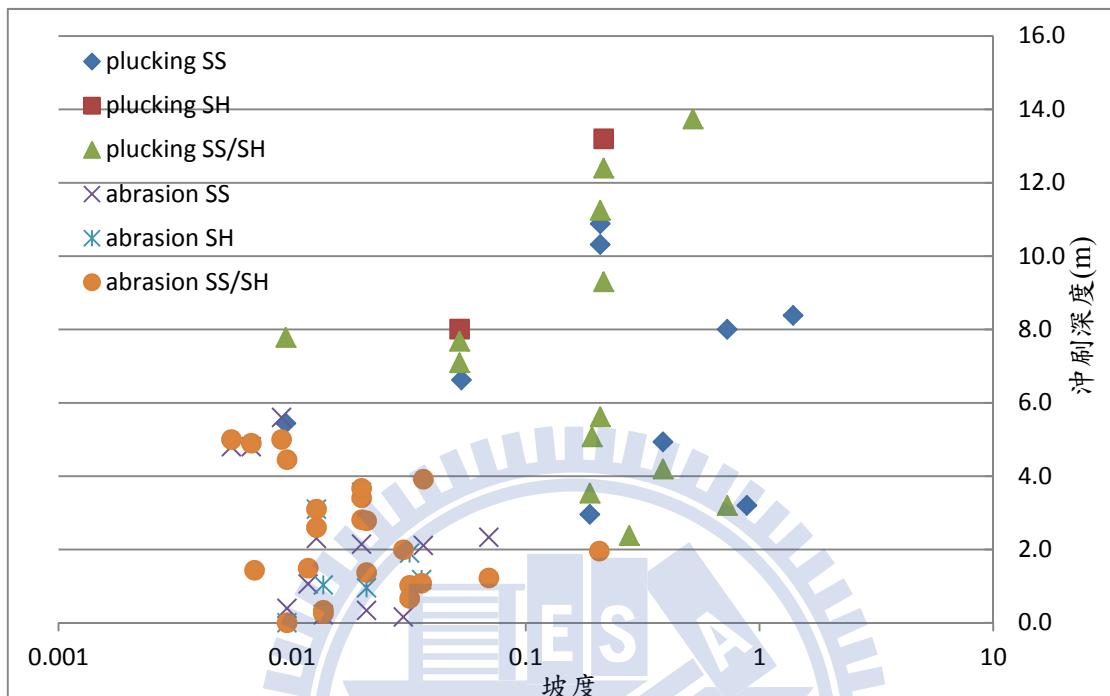


圖 4-43 沖蝕量與坡度之關係

#### 4-7-4-3 沖蝕量與影響因子配對影響關係

由圖 4-44 與圖 4-45 可以觀察到，圖中紅色虛線所示，似乎有正相關之趨勢，所以沖蝕量對於最大流量 $\times$ 坡度與累積流量 $\times$ 坡度時有不錯的趨勢出現。

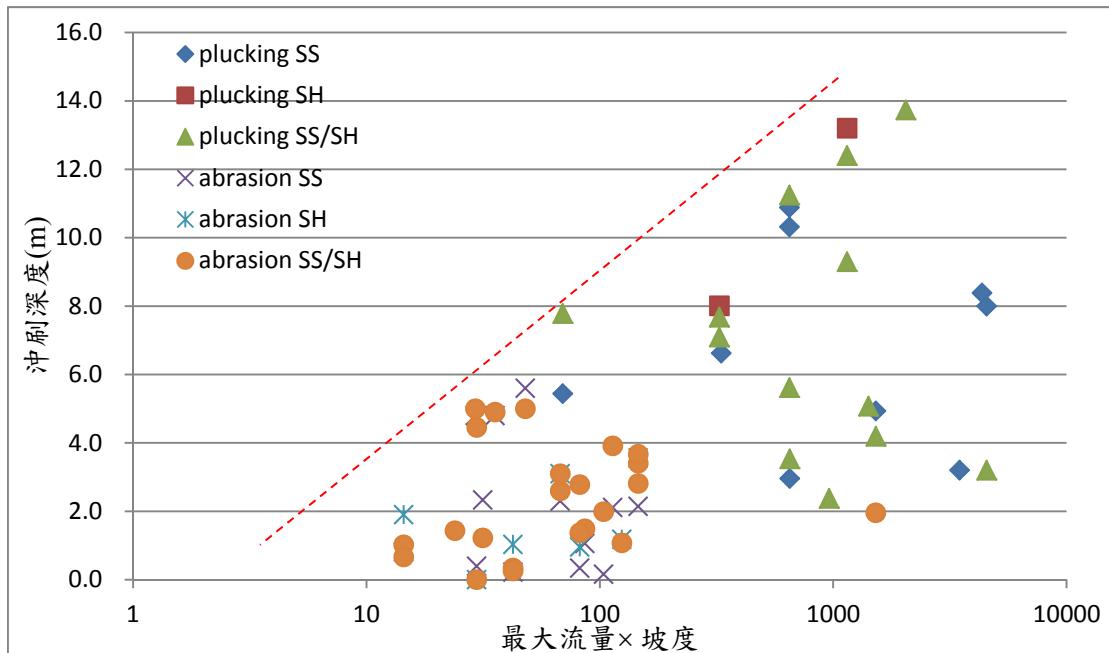


圖 4-44 沖蝕量與最大流量  $\times$  坡度之關係

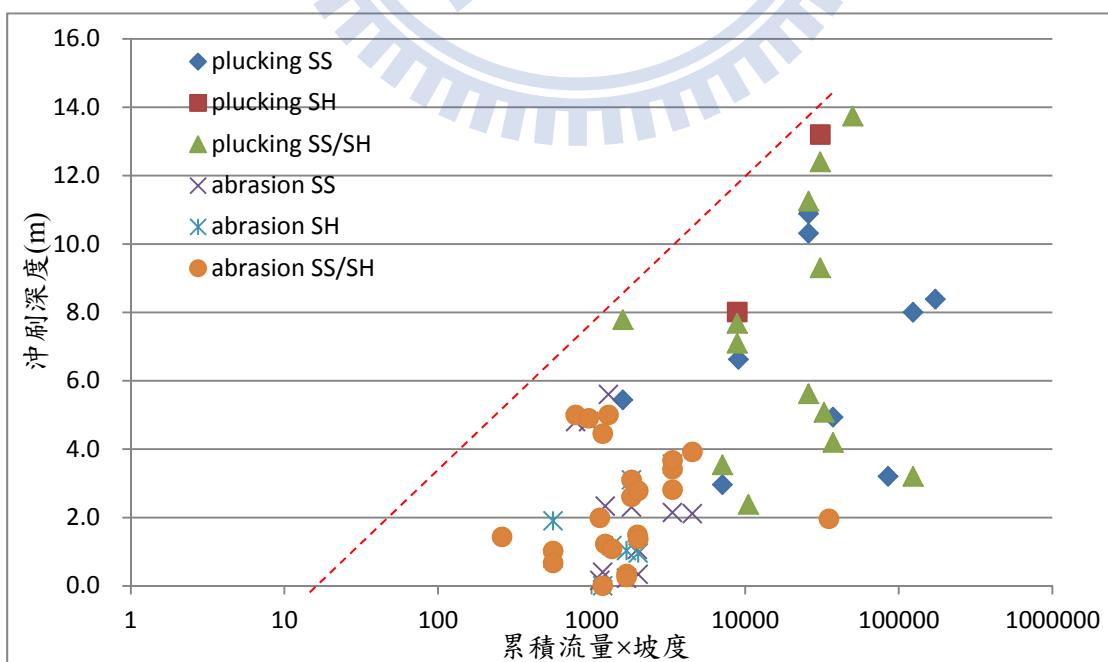


圖 4-45 沖蝕量與累積流量  $\times$  坡度之關係

圖 4-46 為將最大流量、累積流量與地形坡度做乘積與沖蝕量的關係表示圖，本圖可用來估計單場洪水下的最大沖蝕量，可以發現其橫軸上各最大沖蝕量點位之變化趨勢大約可用通過座標原點之的直線來加以描述。圖中黑色的包絡線方程式如下，此方程式為估計沖蝕量時的上限值。

$$E = 1.7642 \ln(Q_p \times Q_m \times s) - 20.068$$

$E$  為沖蝕量(m)， $Q_p$  為最大流量， $Q_m$  為累積流量， $s$  為坡度。

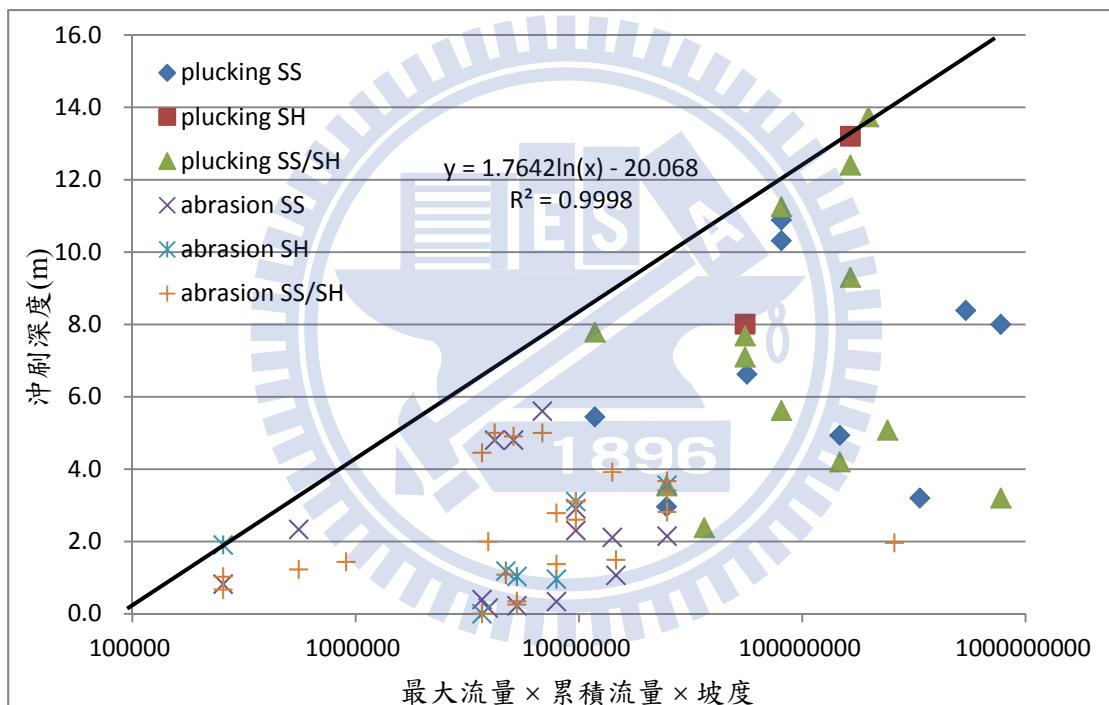


圖 4-46 沖蝕量與坡度×最大流量×累積流量之關係

## 4-8 沖蝕率模型驗證

4-7 節已將大安溪沖蝕率模型建立完成，本小節主要使用八掌溪資料驗證成果。

### 4-8-1 八掌溪資料整理

#### (一) 沖蝕量：

八掌溪沖蝕量計算方式在第三章已說明，表 4-6 為使用歷年大斷面資料計算之成果，本研究採用沖蝕量為將表中結果除以年度間距所得的平均值做為分析處理。

表 4-4 八掌溪歷年大斷面沖蝕量成果(單位：公尺)

斷面號碼	78~84	84~85	85~89	84~89	89~94	78~94
93	-4.09			2.27	-2.23	-4.05
94	-8.2	1.89	1.05	2.94	0.03	-5.23
95	-3.79	-2.96	-0.86	-3.82	-5.05	-12.66
96	0.91	-4.88	-1.52	-6.4	-2.78	-8.27
97	-8.74	-4.91	-1.04	-5.95	-0.41	-15.1
98	-1.26	-12.72	-4.9	-17.62	0.05	-18.83
99	-0.14	-6.09	-12.39	-18.48	-2.18	-20.8
100	-5.43	-3.54	-9.76	-13.3	-4.84	-23.57
101	-0.15	0.79	0.09	0.88	-0.61	0.12
102	-3.105			1.045	0.51	-1.55
103	-1.9			-0.57	0.29	-2.18
104	-8.669			1.979	-0.79	-7.48
105	-6.138			0.178	8.13	2.17

106	-3.082			-10.378	0.13	-13.33
107	-12.57			5.8	0.31	-6.46
108	-6.322			-4.688	1.4	-9.61
109	-6.217			-2.093	-1.04	-9.35
110	-5.932			-3.708	-1.73	-11.37
111	-8.766			0.496	-1.13	-9.4
112	-6.348			1.868	-3.32	-7.8
113	-4.168			-2.432	-5.62	-12.22

## (二)水文資料：

八掌溪水文成果資料整理自水利署水文水資源資料管理供應系統，採用成果如表 4-7、表 4-8 與表 4-9，為了對應大安溪沖蝕模型的水文資料，在八掌溪資料處理方式為使用年度間最大瞬時流量與年度間平均累積流量做為水文資料。

年度平均累積流量資料獲得由日平均流量計算而得，於是先按照年度區分(78~84 年、84~89 年與 89~94 年)，接著將年度內的日流量資料相加，再乘以 24 小時除以年度間距，則得到年度間的平均累積流量資料，除此之外尚有與水文水資源資料管理供應系統申請時流量資料，但該資料有缺少某些年份的流量，且日流量只要乘以 24 小時，所得的資料與時流量資料值相當接近，誤差不到 2%，所以改採日流量資料。

表 4-5 軍輝橋流量站歷年最大瞬時流量紀錄表

年份	瞬時流量(cms)	年份	瞬時流量(cms)
61	842	81	966
62	252	82	213
63	593	83	676
64	1510	84	310
65	629	85	1650
66	1070	86	604
67	440	87	630
68	695	88	2210
69	949	89	352
70	890	90	1570
71	777	91	73.4
72	304	92	57.5
73	263	93	866
74	563	94	795
75	734		
76	847		
77	887		
78	790		
79	379		
80	550		

表 4-6 八掌溪累積流量估算表

年份	78~84	84~89	89~94
累積流量( $m^3$ )	307300.6	319512.7	283877.8
平均累積流量資料( $m^3$ )	51216.76	63902.54	56775.55

其中 88 年最大瞬時量達 2210cms，因該年集水區並無明顯較大暴雨，且上游觸口站最大瞬時流量為 179cms，下游義竹站僅 576cms，因此 88 年最大瞬時量應當有誤，另外 91 年與 92 年所測得之最大瞬時流量僅為 73.4cms 與 57.5cms，其值與歷年最大瞬時流量相比過於偏低，所以 88 年、91 年與 92 年在分析時不採用。

(三)地形參數：

地形參數整理如表 4-7，以第 93 號斷面為起點至 113 斷面為終點，獲得方法在第三章已說明。

表 4-7 八掌溪歷年坡度

斷面號碼	78slope	84slope	85slope	89slope	95slope
93					
94	0.0047	0.0006		0.0013	0.0036
95	0.0083	0.0127	0.0078	0.0059	0.0008
96	0.0033	0.0080	0.0060	0.0054	0.0077
97	0.0105	0.0009	0.0009	0.0013	0.0037
98	0.0117	0.0192	0.0114	0.0075	0.0080
99	0.0056	0.0068	0.0134	0.0059	0.0037
100	0.0075	0.0022	0.0048	0.0074	0.0047
101	0.0180	0.0233	0.0276	0.0375	0.0417
102	0.0041	0.0011		0.0013	0.0024
103	0.0037	0.0049		0.0033	0.0030
104	0.0082	0.0014		0.0040	0.0029
105	0.0042	0.0067		0.0049	0.0139
106	0.0089	0.0119		0.0014	-0.0066
107	0.0123	0.0028		0.0190	0.0192
108	0.0121	0.0183		0.0079	0.0090
109	0.0047	0.0048		0.0074	0.0049
110	0.0069	0.0072		0.0056	0.0049
111	0.0093	0.0064		0.0106	0.0112
112	0.0088	0.0112		0.0126	0.0104
113	0.0094	0.0115		0.0072	0.0049

#### 4-8-2 八掌溪參數驗證大安溪模型

將以上八掌溪資料帶入圖 4-46 內，可以得到圖 4-47，從圖 4-47 可見有一個點分佈在黑色沖蝕量分界線上，這一個點分布於斷面 97~斷面 99 處，推測沖刷如此劇烈原因為 85 年賀伯颱風來時，河道瞬間流量達 1650cms 和斷面 97 至斷面 99 之間主要岩層為泥岩與砂頁(泥)岩互層，其泡水易軟的物理性質與抗沖蝕指數介於 38.86~96.26 偏低緣故(相對於砂岩 83.08~437.05)，加上攔河堰落差造成下方岩盤遭受強力水流衝擊，形成沖蝕坑，所以才會造成如此劇烈沖刷。

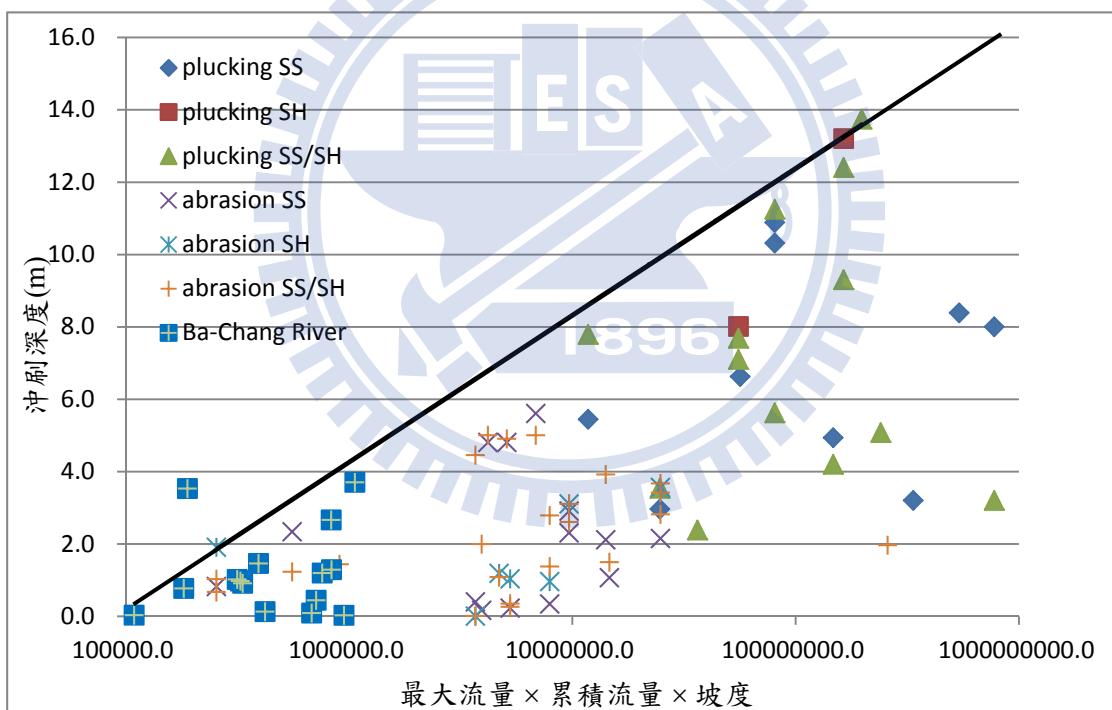


圖 4-47 八掌溪資料與大安溪資料關係圖

八掌溪共有 18 個資料點，只有 1 個點位於分界線範圍以外，初步推測應可能是受到軟弱泥岩特性及攔河堰局部沖刷所影響。所以若以位在分界線之內 17 個點的比例而言，約有 94%，說明八掌溪的軟岩沖蝕條件與大安溪有極高的相似性。

## 第五章 結論與建議

### 5-1 結論

本研究為建立沖蝕率模式，以大安溪為詳細現地調查點，調查河道地質及沖蝕現象，依照結果建立沖蝕率模式，使用八掌溪資料做驗證，以下將所建立的模型得到結論如下：

- (1)影響河道岩床沖蝕之重要參數可以歸納為流量( $Q$ )、坡度( $s$ )、流速( $U$ )、剪應力( $\tau$ )、臨界剪應力( $\tau_{cri}$ )、岩石張力強度( $\sigma_T$ )與岩石彈性模數( $Y$ )等。
- (2)本研究利用航空照片製作數值高程資料，以此資料進行河道沖蝕量計算，由於大安溪研究區每年沖刷深度皆大於 2 公尺，而解算軟體的精度可以解算至 1 公尺，就本研究在劇烈河段的應用而言係屬可行。
- (3)大安溪與八掌溪的沖蝕機制可以說是相當類似，其唯一差別為逆向河段抗侵蝕力較差的薄層砂岩或頁岩被水流侵蝕搬運，水流侵蝕造成節理貫通，造成塊體抽離現象。
- (4)將最大流量、累積流量與地形坡度做乘積與沖蝕量的關係表示圖，可以發現其橫軸上各最大沖蝕量點位之變化趨勢大約可用通過座標原點之的直線來加以描述，方程式為  $E = 1.7642 \ln(Q_p \times Q_m \times s) - 20.068$ ，應可用於估算單場洪水作用下之最大可能沖蝕深度。
- (5)八掌溪共有 18 個資料點，只有 1 個點位於分界線範圍以外，初步推測應可能是受到軟弱泥岩特性及攔河堰局部沖刷所影響。所以若

以位在分界線之內 17 個點的比例而言，約有 94%，說明八掌溪的軟岩沖蝕條件與大安溪有極高的相似性。

## 5-2 建議

此模型並未完善，尚有改進空間，以下為此模型的建議

- (1) 八掌溪之相關資料與大安溪相較之下仍相當不足，目前之比較僅及於初步概估，未來應補充資料蒐集工作，採相同類型資料進行計算比較。
- (2) 建議製作八掌溪歷年數值高程資料，以了解河道地形的詳細變化；由於製作數值高程時需要進行航空照片與地面控制點位置的比對，本研究使用手繪方式記錄地面控制點設立位置，這容易因為人為因素及主觀概念所繪的位置容易漏掉重要地標，造成比對困難，於是建議使用拍照方式，避免使用手繪。
- (3) 仁義潭攔河堰河段下游岩層的抗沖蝕指數調查尚有不足，建議未來應進行補充調查。
- (4) 可以嘗試使用多變量分析參數間之相關性，接著配合學者所提的沖蝕率模式，進行多變量迴歸分析。

1896

## 參考文獻

1. 環境流體力學，科技圖書。
2. GIS 與空間決策分析 :Arc GIS 入門與進階，新文京書局。
3. 吳宗儒，2003，數值覆蓋模型、正射影像及萃取房區之研究，國立交通大學土木工程學系論文
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2006，「八掌溪仁義潭(攔河堰)下游沖刷河段治理方案之研析」
5. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2008，「台灣西部多砂河川沖淤模式研發及復育研究計畫」
6. 林文凱，2008，軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估-以八掌溪為例，國立交通大學土木工程學系論文
7. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2008，「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例(1/3)」
8. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2008，「台灣西部多砂河川沖淤模式研發及復育研究計畫」
9. 蔡建成，2009，以空載光達同步航空攝影製作高程模型品質探討，國立交通大學土木工程學系論文。
10. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2009，「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例(2/3)」
11. Annandale, G. W. (1995) "ERODIBILITY," Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 4, pp 471-494.
12. Annandale, G. W. (2006) "Scour technology: mechanics and engineering practice," New York, McGraw-Hill.

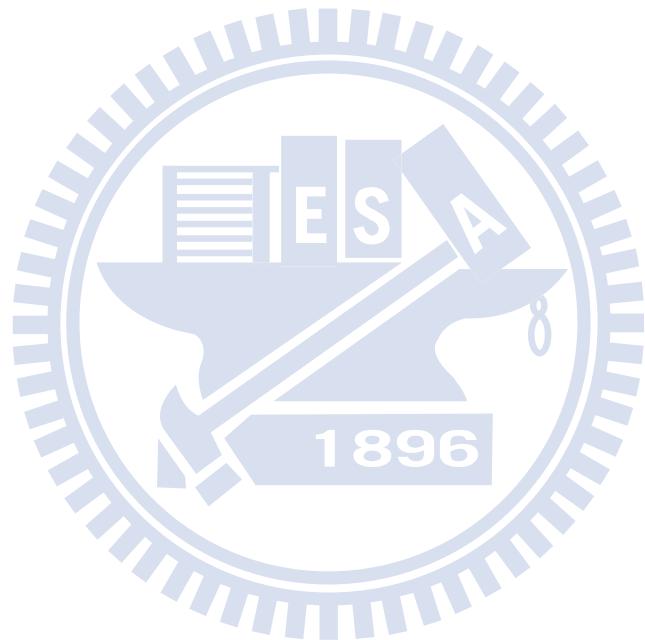
13. Gilbert, G. K. (1880), "Report on the Geology of the Henry Mountains:Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region." ,pp.160.
14. Greimann, Blair P. and Vandeberg, M., (2008) "Predicting Rock Scour," Technical Report No. SRH-2008-01, Technical Service Center, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
15. Sklar, Leonard S., and William E. Dietrich (2004) "A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load," Water Resources Research, Vol. 40, No. 6, pp 063011-0630121.
16. Sklar, L.S., and Dietrich, W.E. (2006). "The Role of Sediment in Controlling Steady-State bed Channel Slope: Implications of the Saltation-Abrasion Incision Model," Geomorphology, 82, pp.58-83
17. Stock, J.D., Montgomery, D.R., Collins, B.D., Dietrich, W.E., and Sklar, L., 2005, "Field measurements of incision rates following bedrock exposure: Implications for process controls on the long profiles of valleys cut by rivers and debris flows," Geological Society of America Bulletin, v117, pp174-194.
18. Whipple, K. X., G. S. Hancock, and R. S. Anderson (2000) "River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation," Geological Society of America Bulletin, Vol. 112, No. 3, pp 490-503.

# 附錄

附錄 I 數值影像匹配步驟

附錄 II 八掌溪大斷面套繪

附錄 III 大安溪坡度分段分析



# 附錄 I 數值影像匹配步驟

蔡建成(2009)

OrthoEngine 之數值影像匹配有六步驟：

一、建立工作專案

二、載入航空照片與框標設定

三、選取地面控制點與連接點

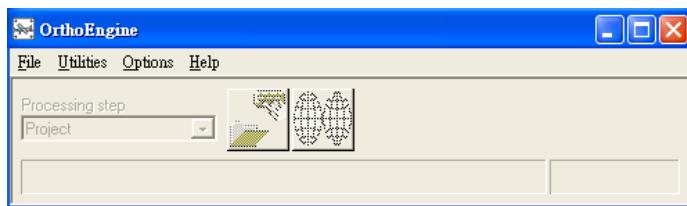
四、光束法平差

五、建立核影像

六、自動影像匹配 DEM

一、建立工作專案

(一)開啟 OrthoEngine，建立新專案，File>New。



(二)於 Project Information 視窗：

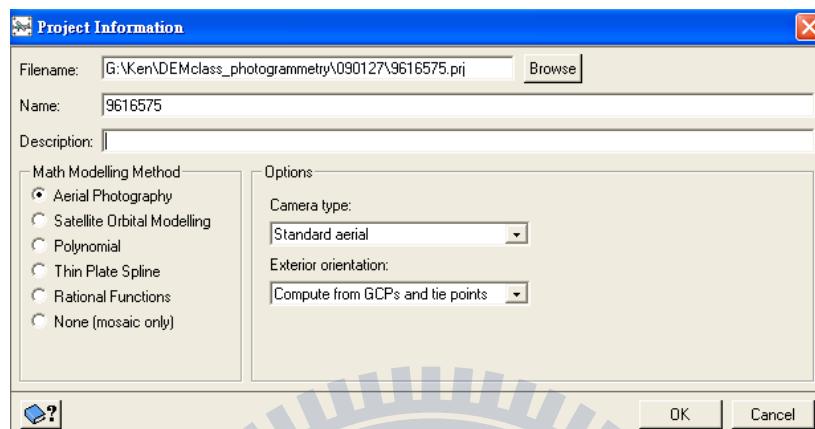
Filename：決定專案檔路徑與專案檔名（.prj）。

Name：決定專案名稱。

Math Modelling Method : 點選 Aerial Photography。

Camera aerial : 選擇 Standard aerial。

Exterior orientation : 選擇 Compute from GCPs and tie points。



(三)於 Set Projection 視窗，建立投影系統與決定解析度。

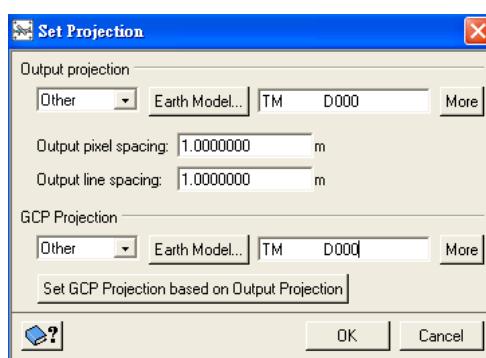
Output projection: 投影系統選擇 Transverse Mercator( Gauss-Krueger )，

基準選擇 WGS 1984，中央子午線為 121 度 E，尺度比為 0.9999，坐標西移量為 250000m。

Output pixel spacing : 1m。

GCP Projection : 與投影系統相同，點選”Set GCP Projection based on

Output Projection”。



#### (四) 設定相機率定資訊：

資訊由相機率定報告取得。(以下所述”可忽略”，為未輸入值也可計算)

Focal length：率定焦距。

Principal point of symmetry：像主點偏移量，可忽略。

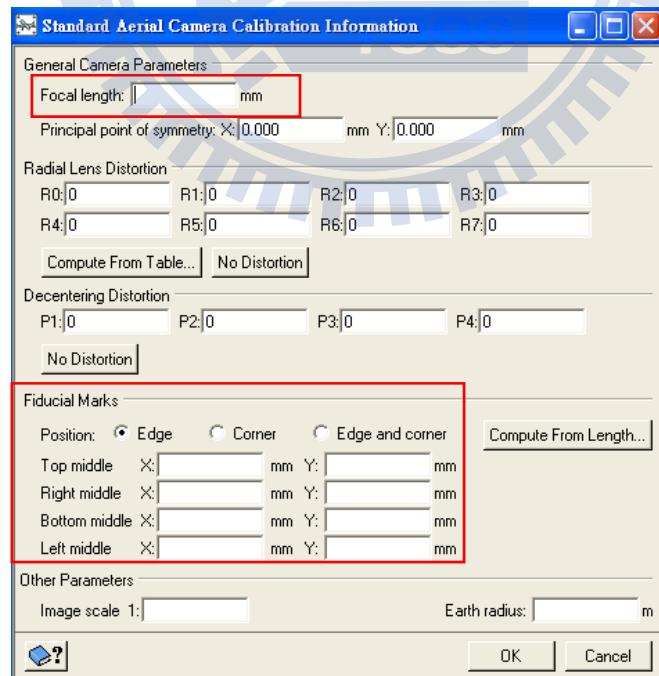
Radial Lens Distortion：鏡頭畸變差改正，可忽略。

Decentering Distortion：離心畸變差改正，可忽略。

Fiducial Marks：框標值，此案例為 Edge and corner。

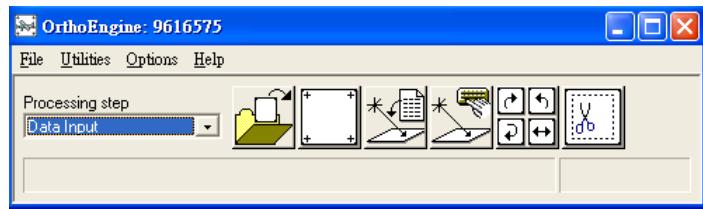
Image scale：像比例尺，可忽略。

Earth radius：地球半徑，可忽略。

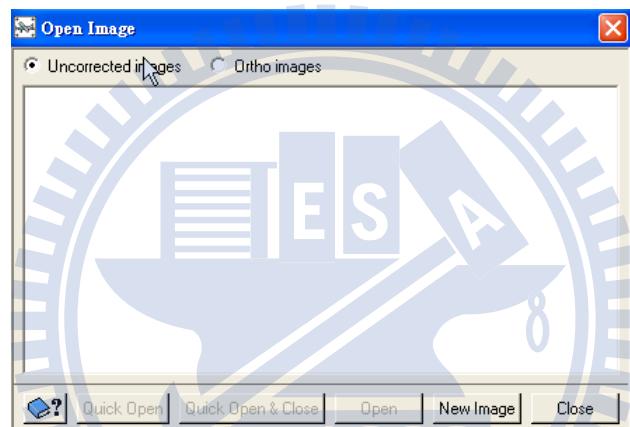


#### 二、載入航空照片與框標設定

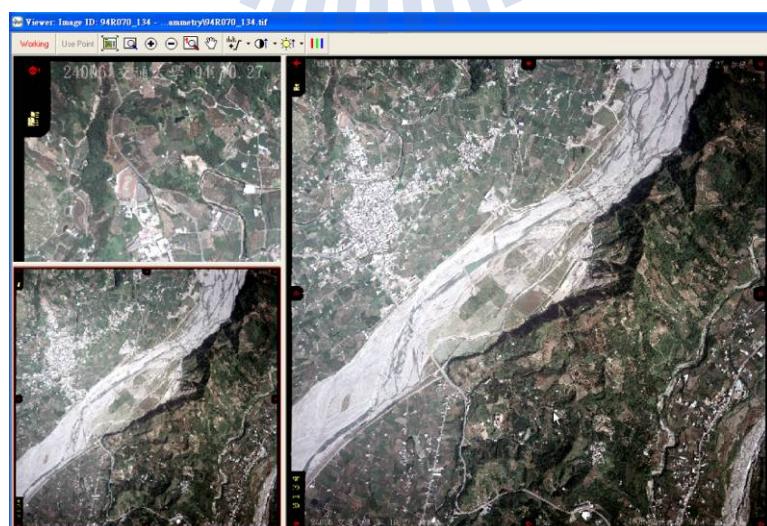
(一)Processing step 選擇 Data Input，開啟右方工具例。

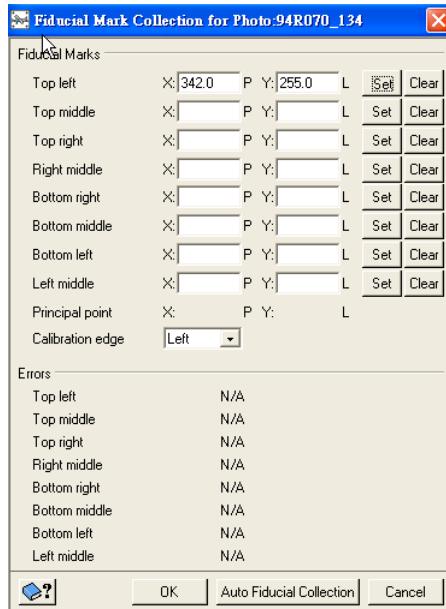


(二)點選工具例第一個方塊，開啟 Open Image 視窗，點選“New Image”，將航照 (.tif 檔) 載入 OrthoEngine，並分別將載入後之航照以“Quick Open”開啟。



(二)航照開啟後，軟體會自動跳出 Fiducial Mark Collection for Photo 視窗與展示航照視窗，採集像片框標點。



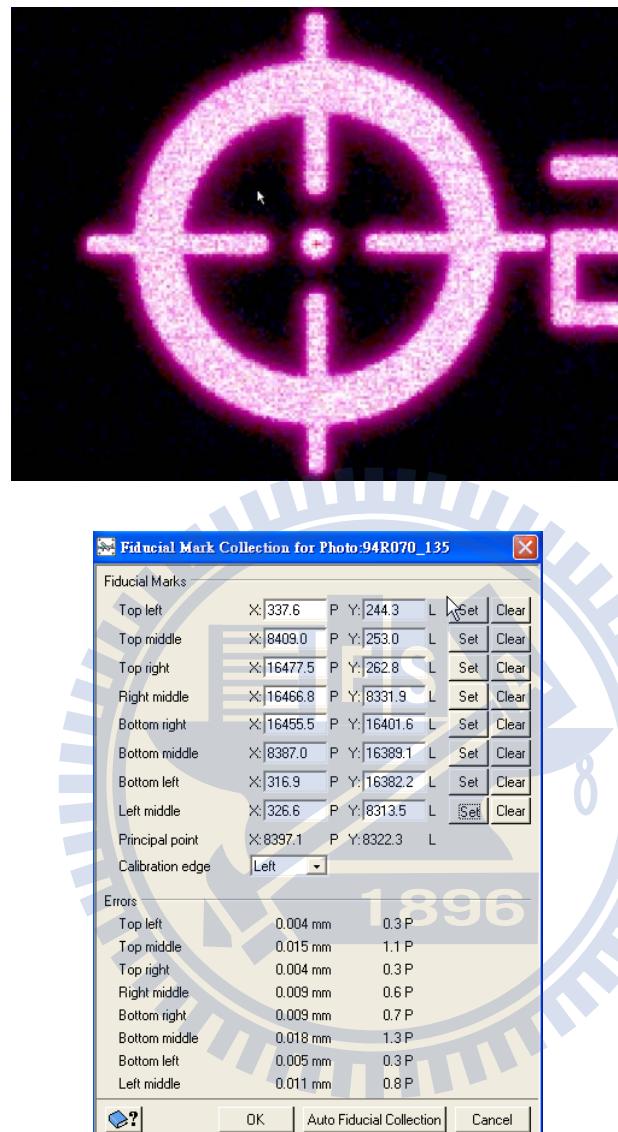


(四)採集像片框標點。將滑鼠紅十字標置於像片框標正中央，慢慢放大至 8 倍以上，確認紅十字標正確置於框標正中央，於 Fiducial Mark Collection for Photo 視窗中，點選相對應框標的 “Set”，視窗會自動顯示紅十字所在的像片坐標，若操作者不滿意，可以點選相對應框標的 “Clear”，重新設定。將所對應的照片框標設定完成後，Fiducial Mark Collection for Photo 視窗下方將會產生殘差值。

註：若使用半手動採集，完成第一張航照的框標採集後，先不要點選 OK

手動採集：必需兩張航照均依步驟(四)設定。

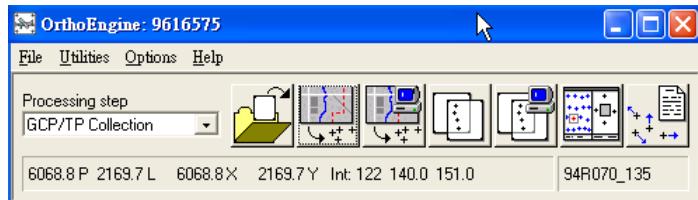
半手動採集：第一張航照完成框標採集後，點選“Auto Fiducial Collection”，會出現對話框「Do you want to overwrite images with fiducial marks」，點選“NO”，之後點選“OK”。使用者資料匣



(C:\Program Files\PCI Geomatics\Geomatica\_V101\user) 會自動產生 fiducial.rpt 檔，敘述第二張航照經自動採集後的殘差，若殘差為可接受的範圍，點選 Fiducial Mark Collection 視窗下方“OK”，完成設定。

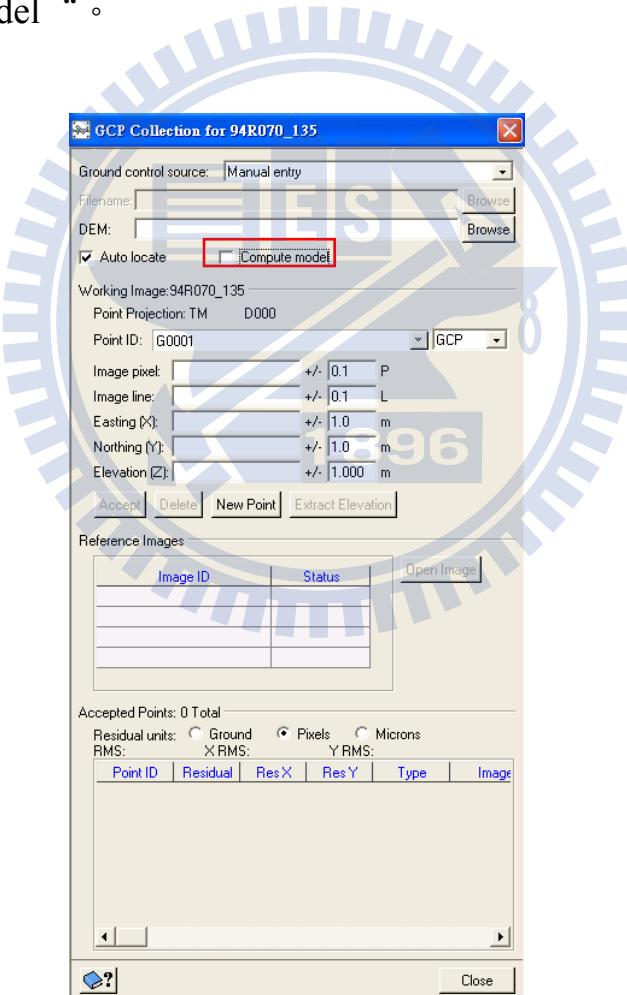
### 三、選取地面控制點與連接點

(一) Processing step 選擇 GCP/TP Collection，選取地面控制點與連接



點。

(二) 點選右方工具列第二個方塊，開啟 GCP Collection 視窗，並打開“Compute model”。



(三) 選取控制點，最少需要六個地面控制點均勻分佈在像對重疊區。

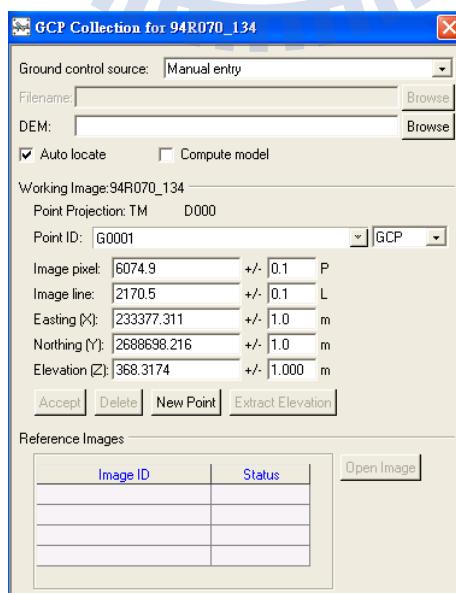
在作業時，兩張航照其一為 working image，另一張則為 reference image，設定每個控制點時必需一致。

(四)此步驟必需同時開啟三個視窗便於作業，GCP Collection 及兩張航照展示視窗。以 94R070\_134 及 94R070\_135 為例，前者為 working image，後者為 reference image 作業。首先於 94R070\_135 展示視窗，找尋最佳控制點位置，點選視窗右上角 “Use Point “，於影像上顯示 G0001 。



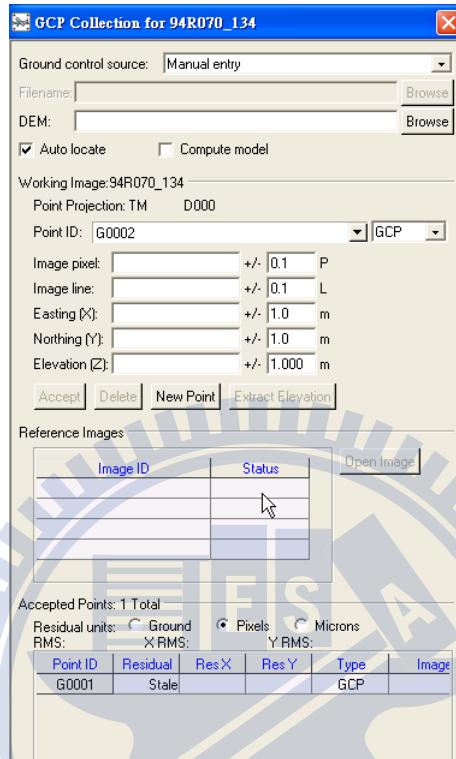
(五)再於 94R070\_134 展示視窗，找尋最佳控制點位置，點選視窗右上角 “Use Point “，於影像上顯示 G0001，及 GCP Collection 中顯示 Image pixel / line 。

(六)於 GCP Collection 視窗，首先確認 Working Image 為 94R070\_134，



鍵入坐標 NEH，按“Accept”，完成 G0001。

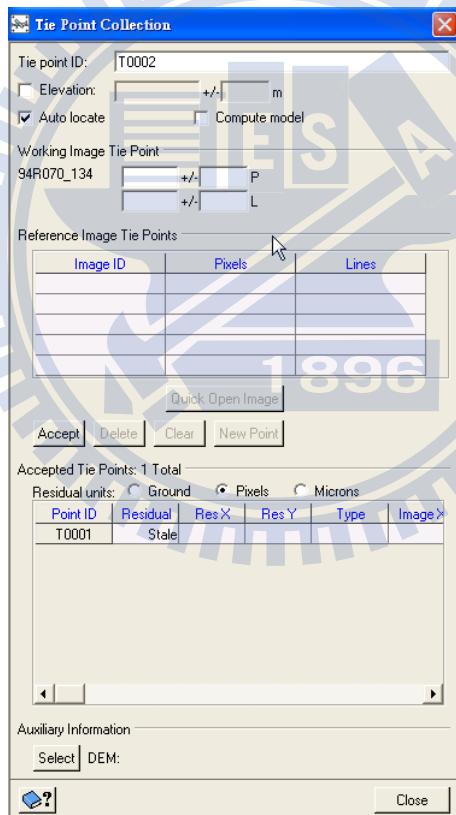
(七)完成上步驟，G0001 則會顯示於 Accepted Point 欄位，並且會自動新增 G0002。重覆(四)(五)繼續完成其餘控制點。



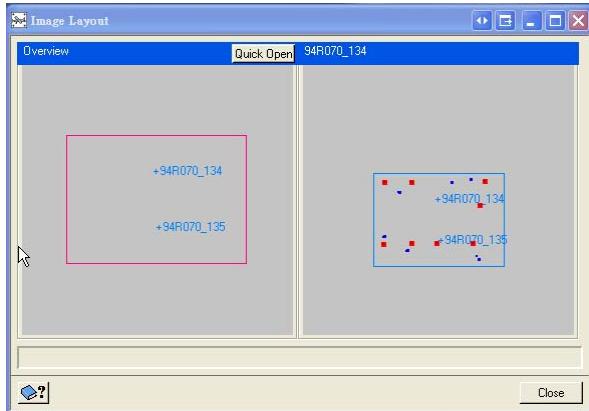
(八)於 GCP/TP Collection，點選第四個工具，開啟 Tie Point Collection 視窗。同選取控制點的作法，以 94R070\_134 為 working image 及 94R070\_135 為 reference image 作業。首先於 94R070\_135 展示視窗，找尋像對覆蓋區共軛點位置，點選視窗右上角“Use Point”，於影像上顯示 T0001。

(九)再於 94R070\_134 展示視窗，找尋共軛點位置，點選視窗右上角“Use Point”，於影像上顯示 T0001，及 Tie Point Collection 中顯示 Image pixel / line。

(十)完成上步驟，T0001 則會顯示於 Accepted Tie Point 欄位，並且會自動新增 T0002。重覆(七)繼續完成其餘連接點。

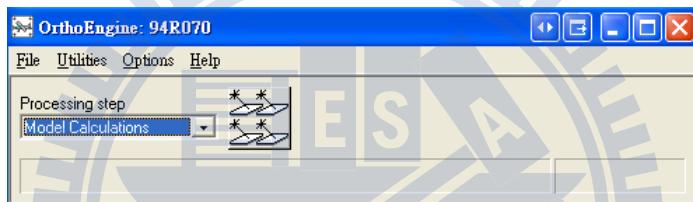


(十一)於 GCP/TP Collection，點選第六個工具，開啟 Image Layout 視窗，檢視航照連接情形。



#### 四、光束法平差

解算外方位參數，可使空中三角測量的誤差最小。Processing step 選擇 Model Calculations，點選右方工具例的方塊，軟體計算完畢後，



按“OK”即可。

#### 五、建立核影像

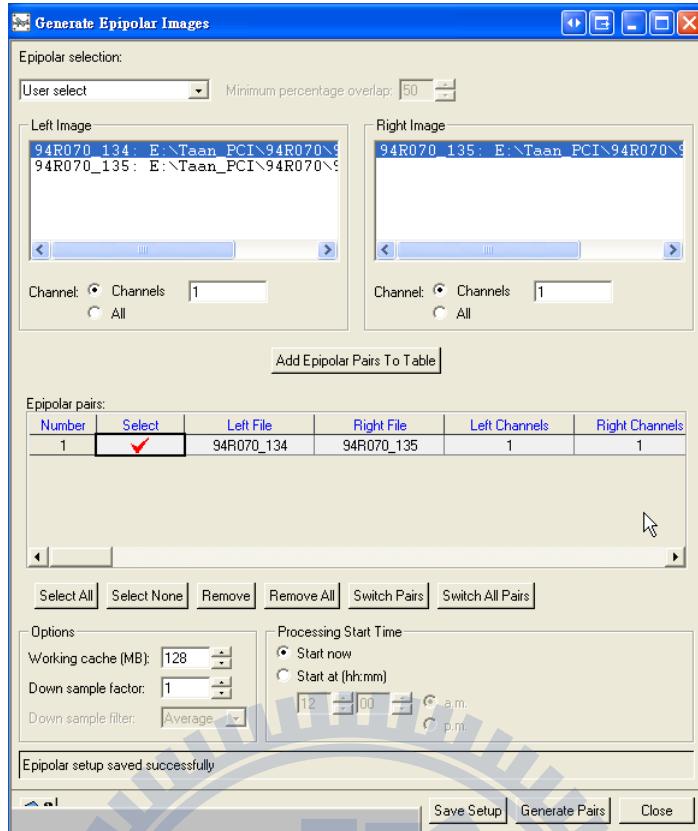
(一) Processing step 選擇 DEM From Stereo。

(二) 點選右方工具例第一個方塊，開啟 Generate Epipolar Images 視窗。

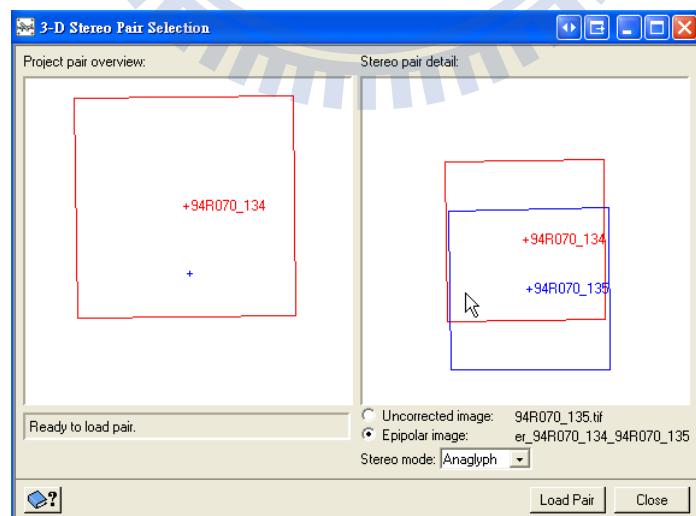
於 Left Image 欄位選擇左像 94R070\_134，Right Image 欄位選擇右像



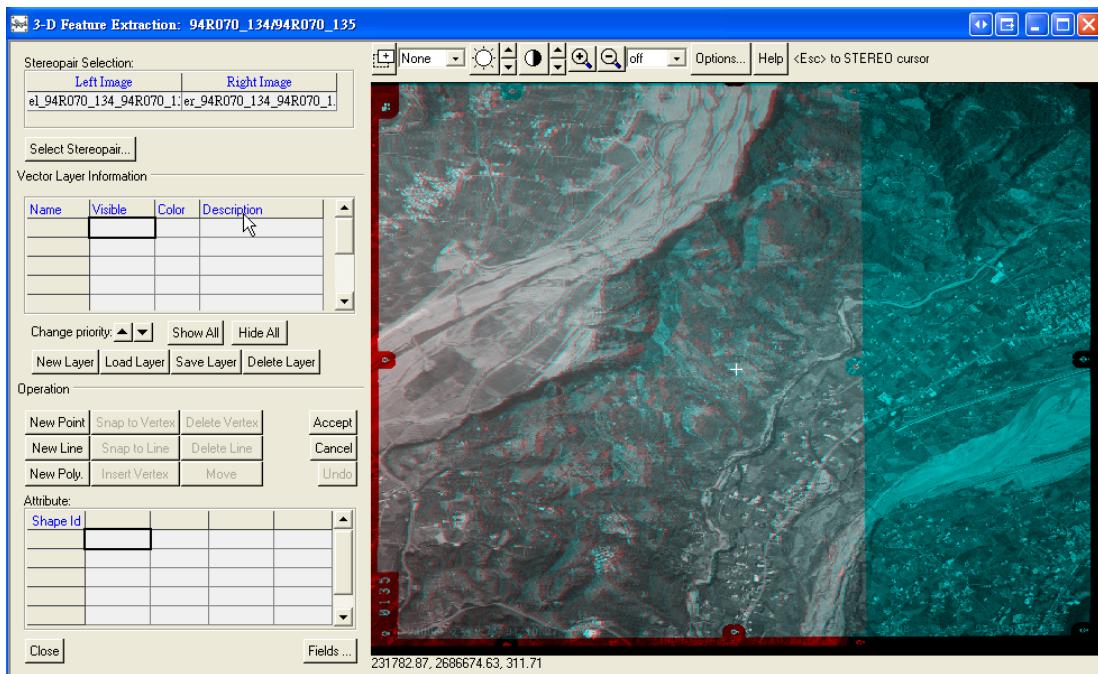
94R070\_135。點選“Add Epipolar Pairs To Table”，將核像對加入，於 Epipolar pairs 欄位顯示。點選“Save Setup”，再點選“Generate Pairs”。



(三)核影像完成後，即可展示紅藍立體對。Processing step 選擇 3-D Operations，選擇右方工具例第四個方塊，開啟 3-D Stereo Pair Selection 視窗。於 Project pair overview 欄位選擇 working image，Stereo pair detail 欄位選擇 reference image，點選 Epipolar image，再點選“Load Pair”即可。



“Load Pair”即可。



## 六、自動影像匹配 DEM

(一) Processing step 選擇 DEM From Stereo。

(二) 點選右方工具列第二個方塊，開啟 Automatic DEM Extraction 視窗。於 Stereo Pairs 勾選將匹配的立體對。其於功能如下介紹：

Minimum/Maximum elevation：用以相關分析估計搜尋範圍，較佳的範圍可提高速率及正確率，通常軟體會自動產生數值。

Failure value：指定匹配失敗的像素值，內定值為-100。

Background value：指定 DEM 內沒有像素值的網格，內定值為-150。

DEM detail：決定使用何種層級的精度來匹配，分為 High、Medium、Low。選擇 Low 時，軟體匹配將會在低相關性時停止。

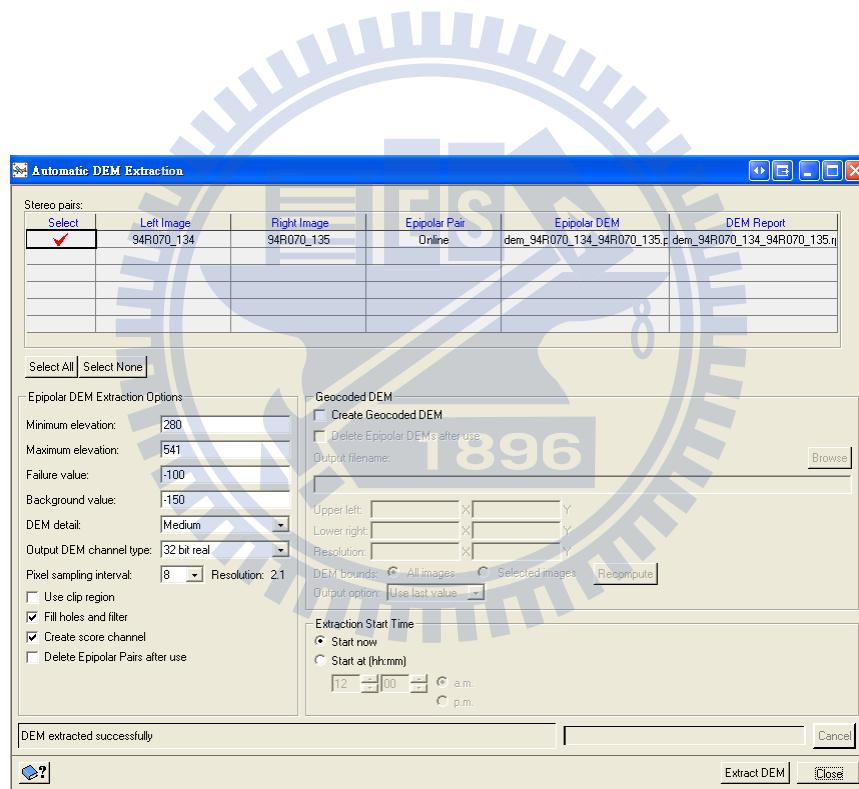
Output DEM channel type：“16 bit signed”只算到整數位，“32 bit real”可算至小數點。

Pixel sampling interval：決定匹配過程中網格的取樣間隔，選擇的值愈大，則 DEM 的網格就愈大，軟體的處理的速度愈快。

Use clip region：匹配的範圍只限原始影像的指定區域，有定義剪裁區域才使用。

Fill holes and filter：自動在失效區域添加數據並且基于鄰近像素對高程值進行過濾，通常會使用此功能。

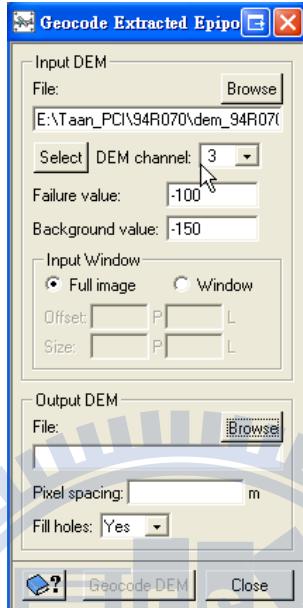
Create score channel：記錄每個像素的相關係數。



Delete Epipolar Pairs after use：完成匹配後，刪除核影像對。

註：完成此步驟後，軟體會自動產生 dem.pix（無地理坐標資訊的高程值）與 dem.rpt（匹配報告）。

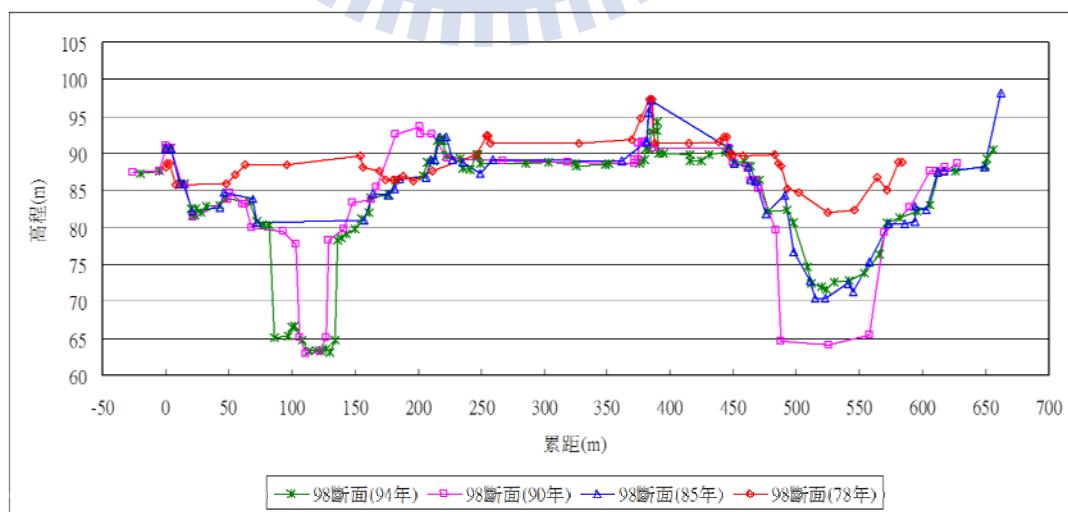
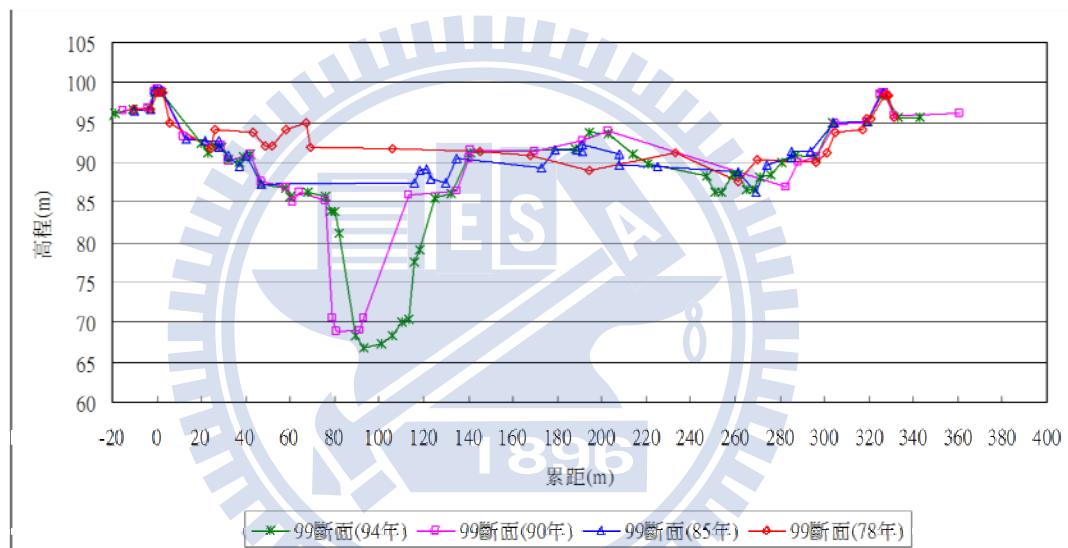
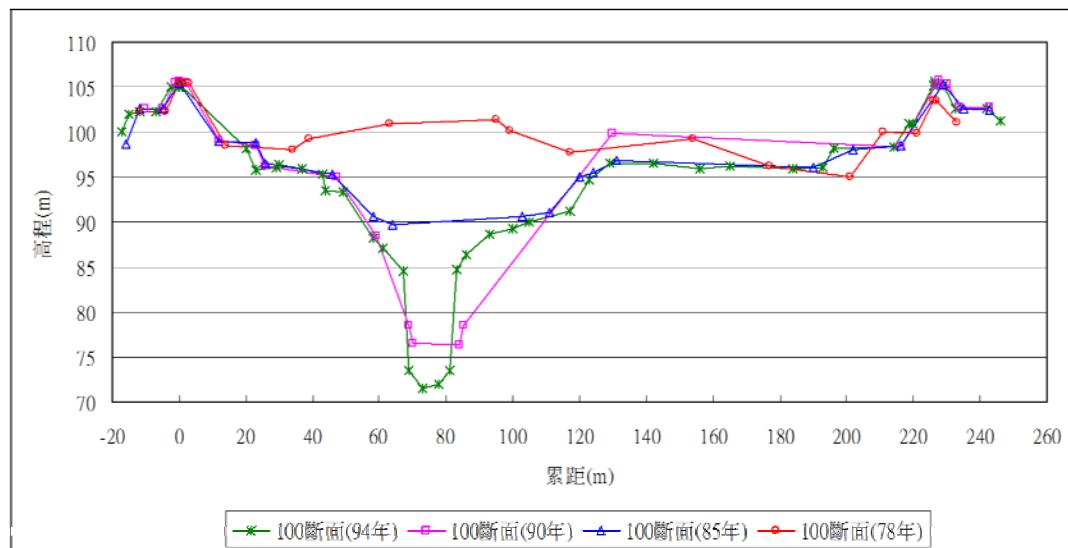
(三)點選右方工具例第四個方塊，開啟 Geocode Extracted Epipolar DEM 視窗。於 Input DEM 欄位，載入步驟（二）產生的 dem.pix。於 Output DEM 欄位，定義輸出 DEM 的路徑、網格大小、是否將匹配



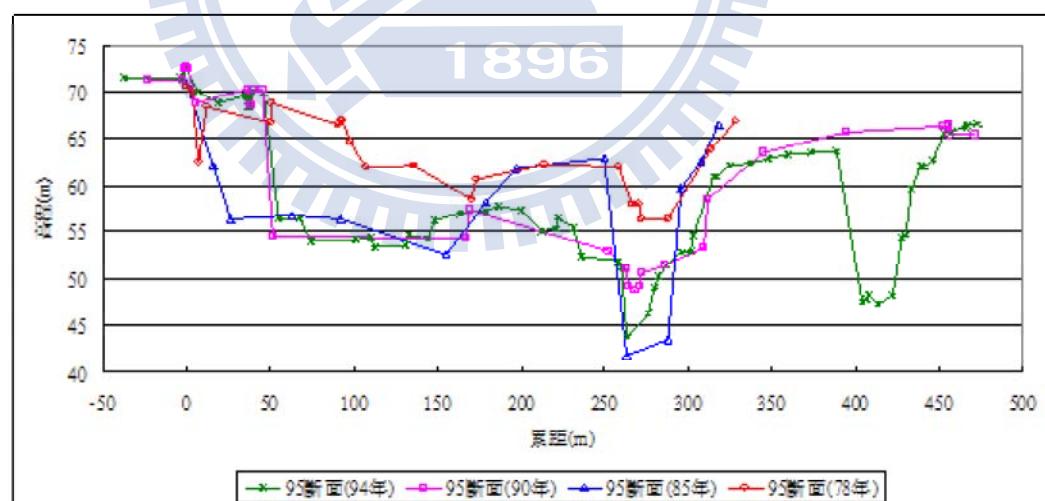
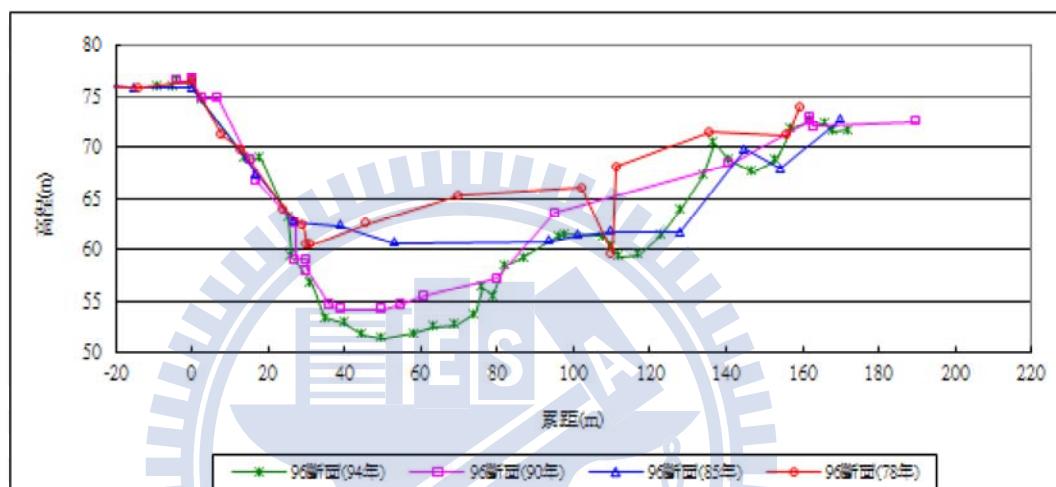
失敗之高程值以內插值取代，點選 “Geocode DEM” 。

(四)匯出高程文件檔 (.XYZ)。點選右方工具例第五個方塊，開啟 Export Extracted DEM 視窗。載入步驟（三）產生的.pix，定義取樣間隔及輸出路徑，點選 “Export DEM” 。

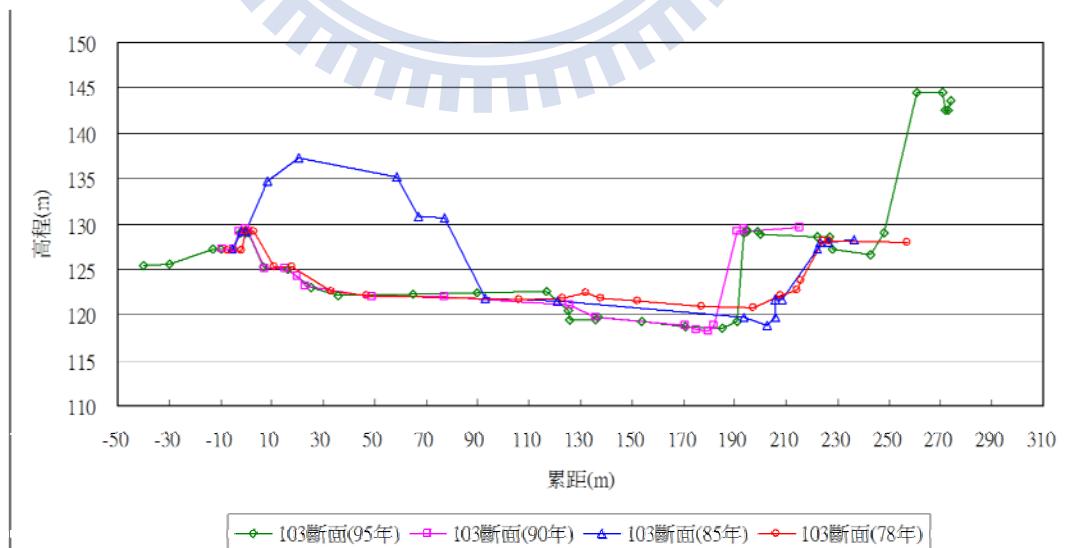
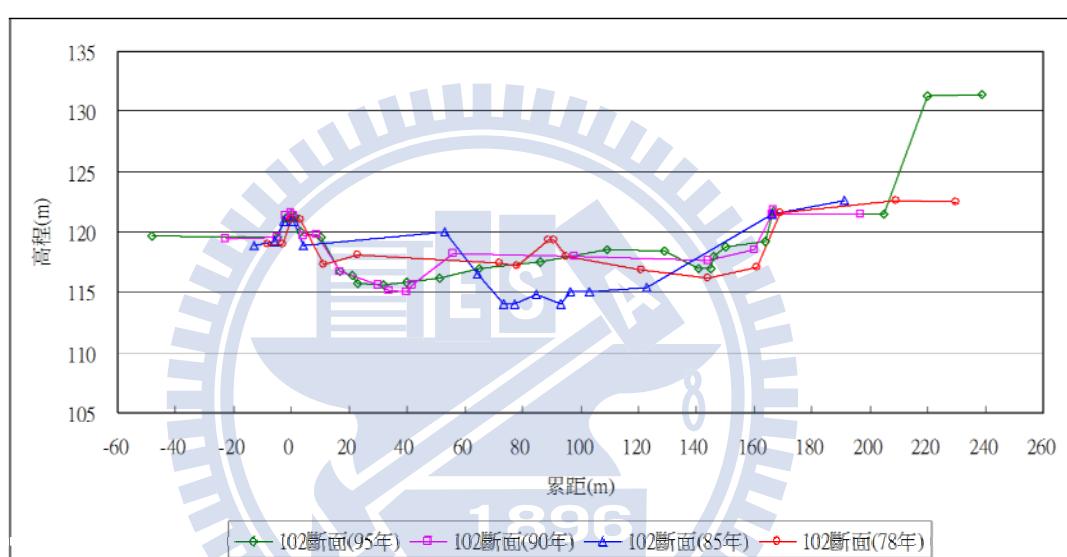
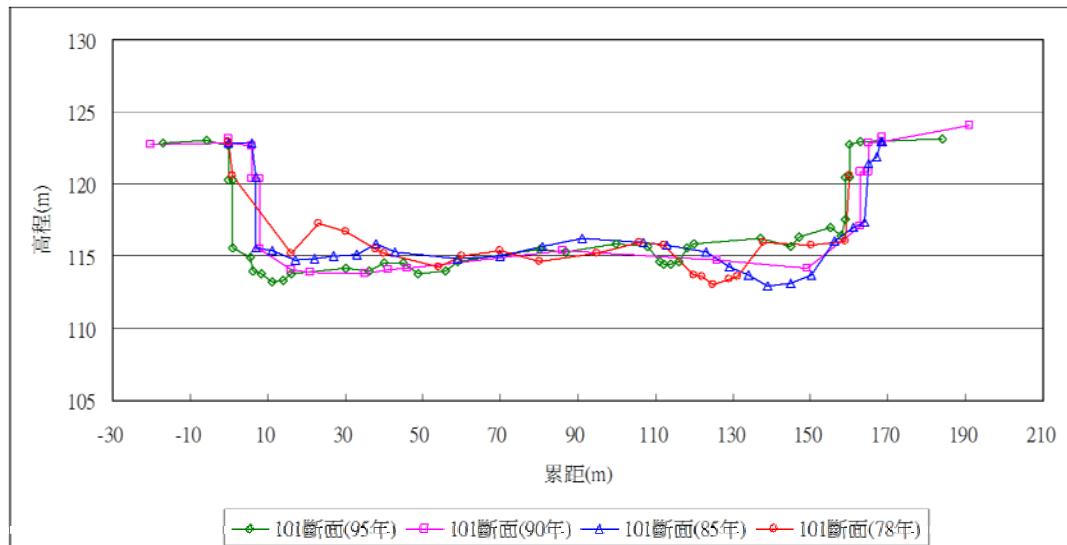
## 附錄 II 八掌溪大斷面套繪



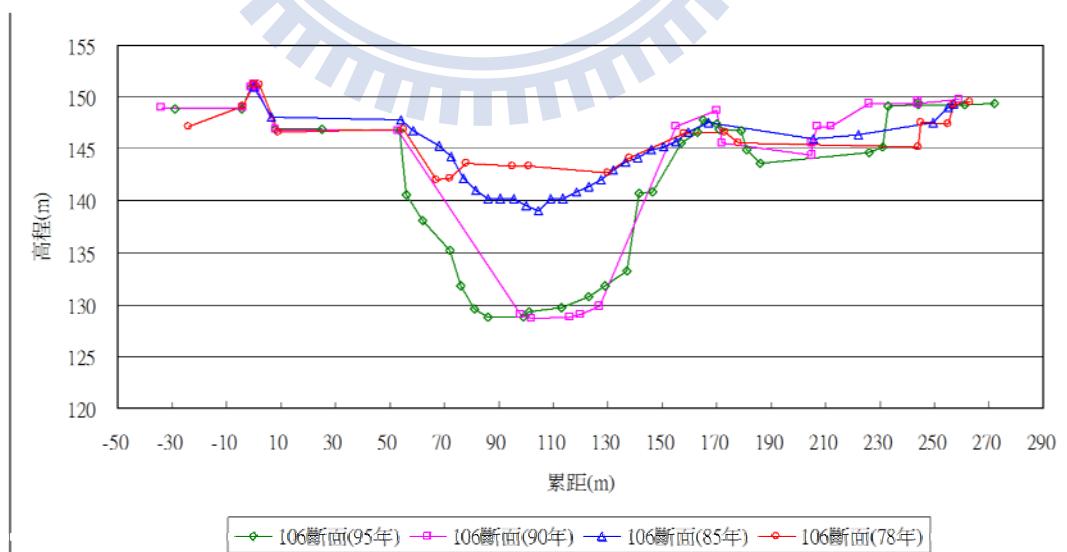
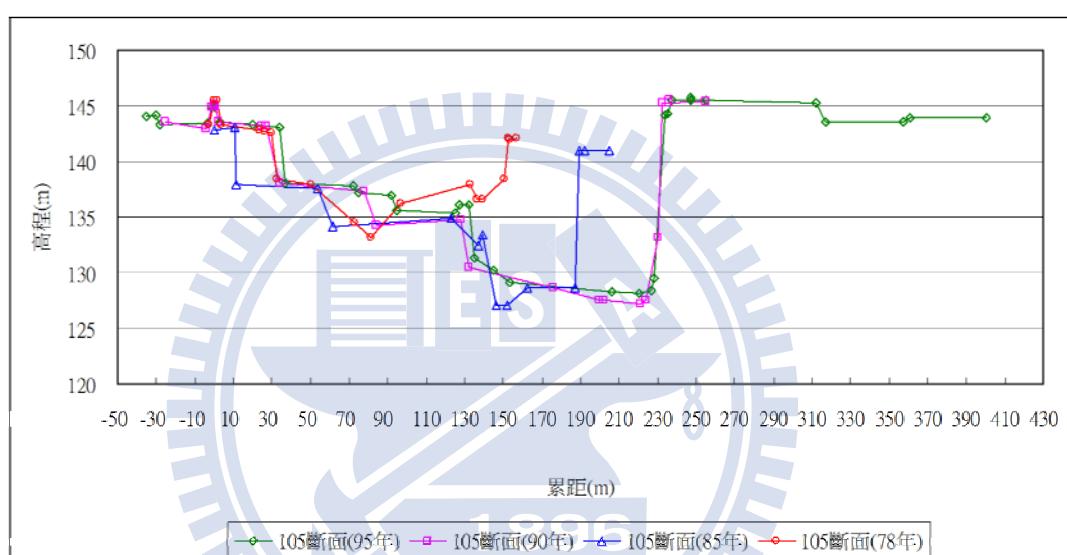
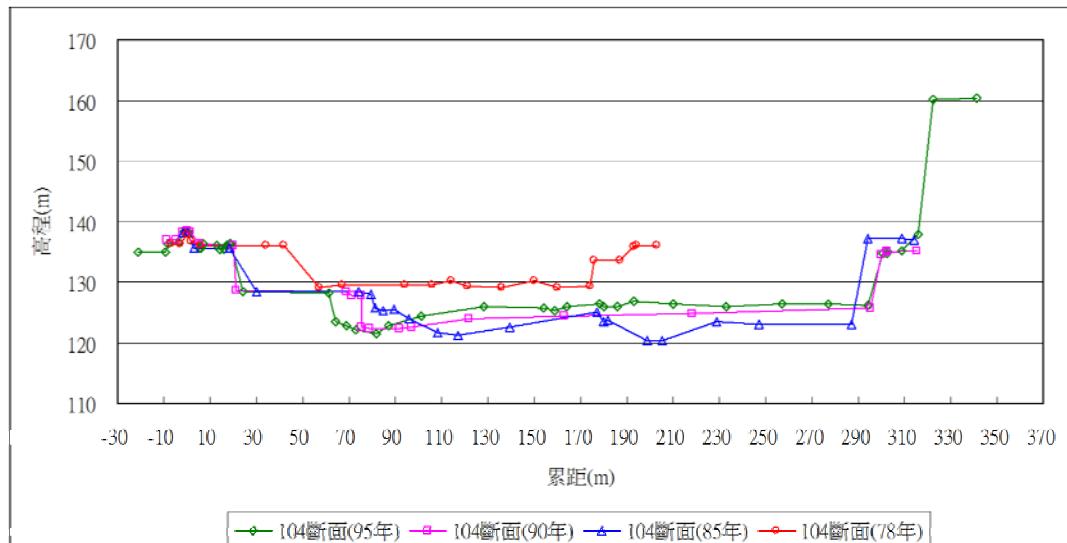
A2-1 100、99、98 歷年斷面測量資料



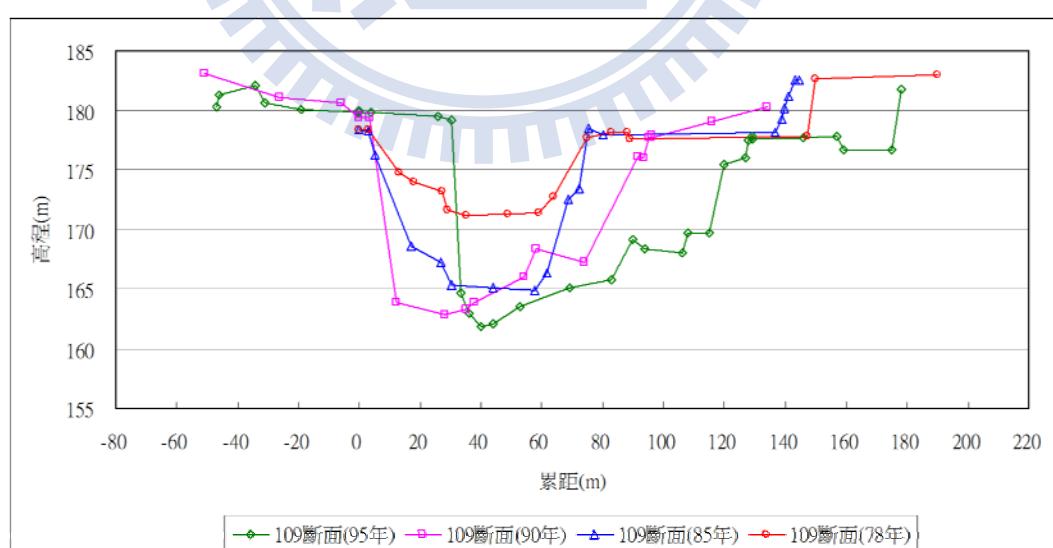
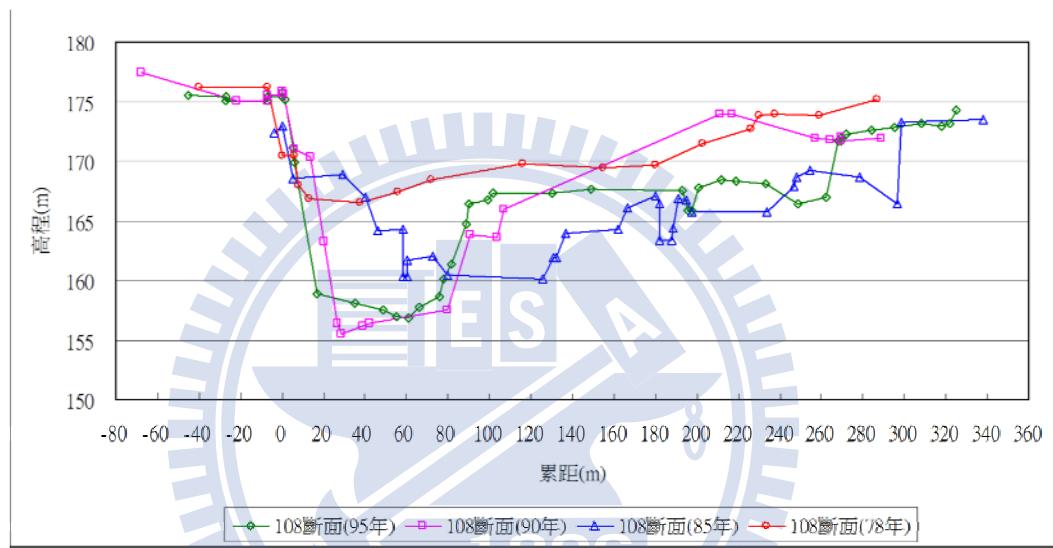
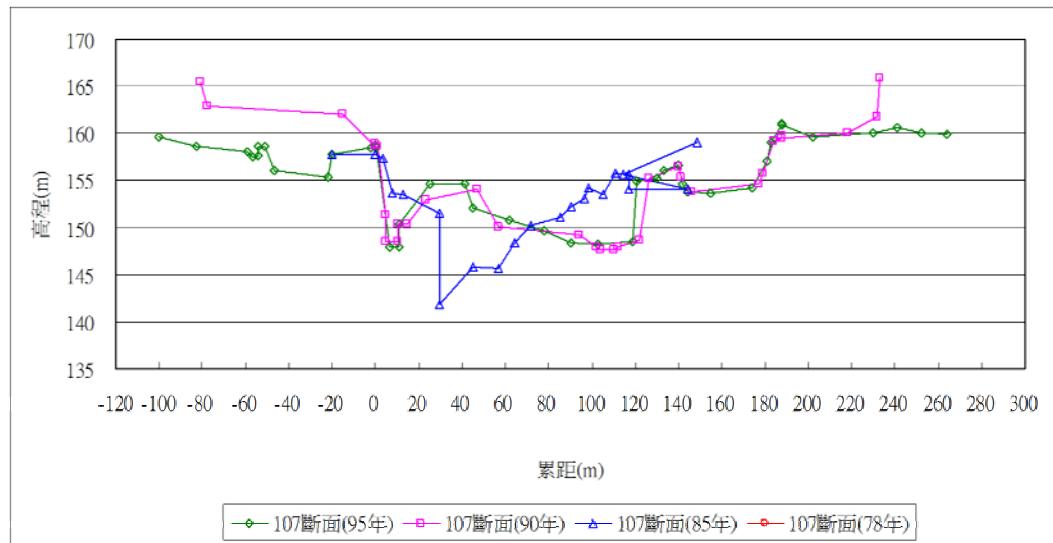
A2- 2 97、96、95 歷年斷面測量資料



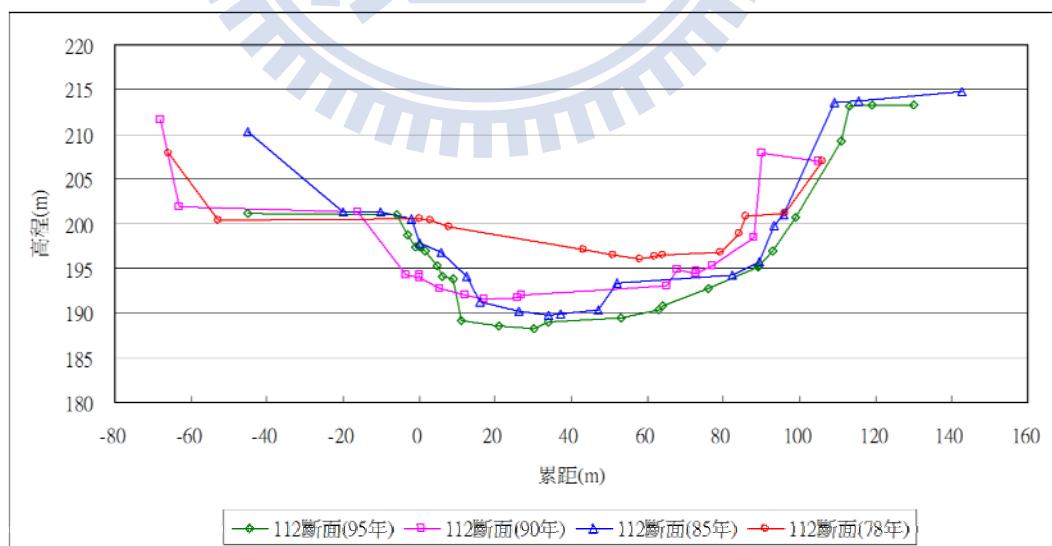
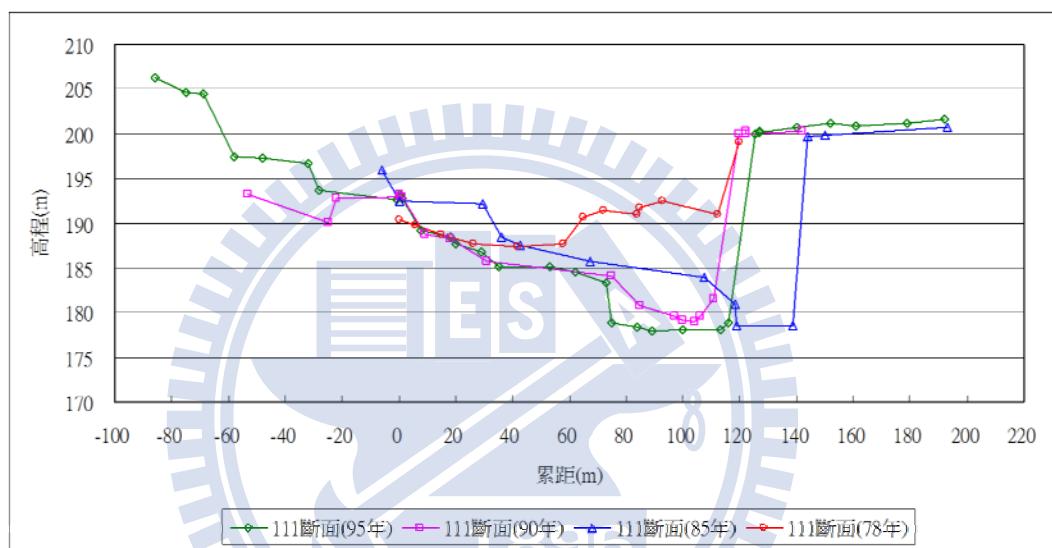
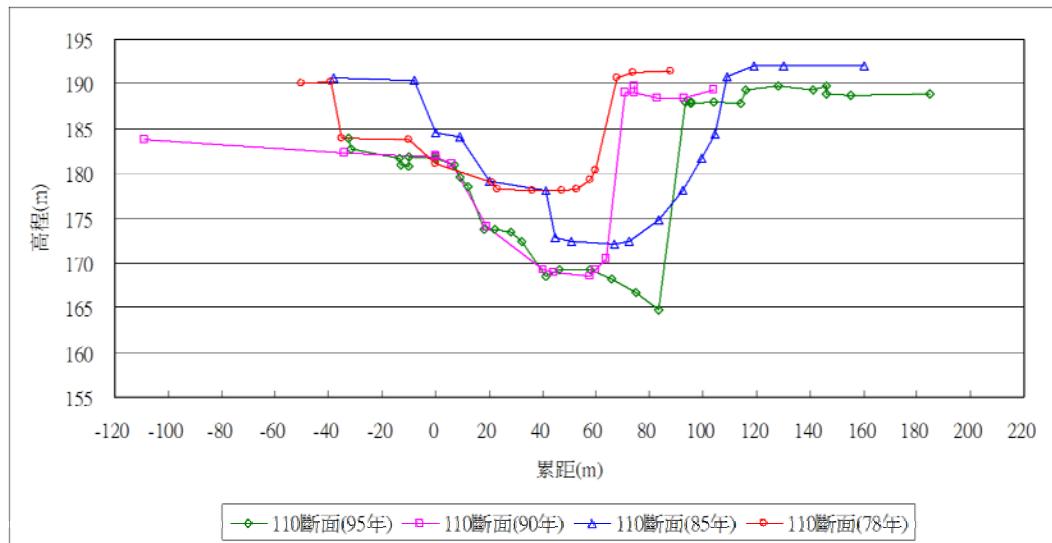
## A2-3 101、102、103 歷年斷面測量資料



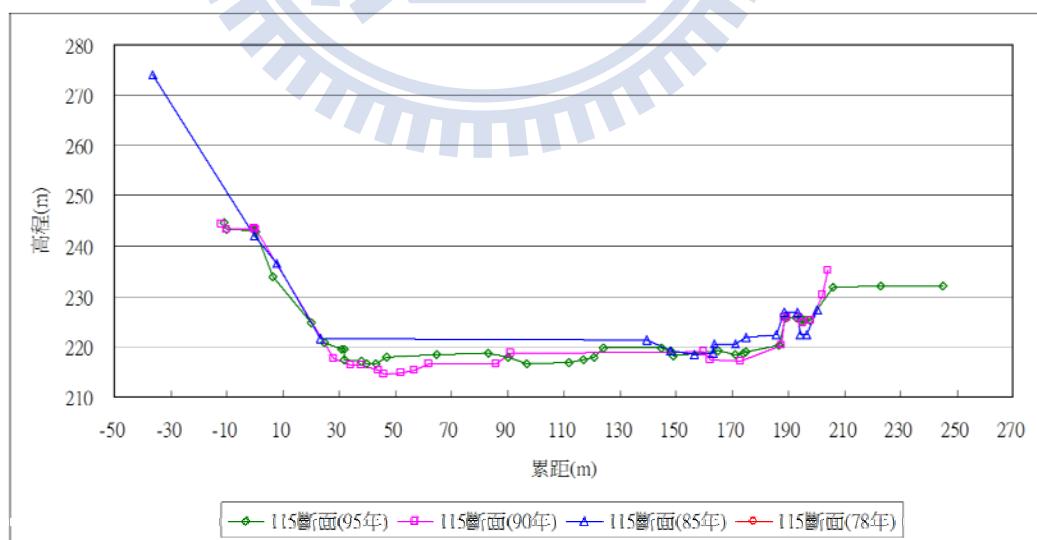
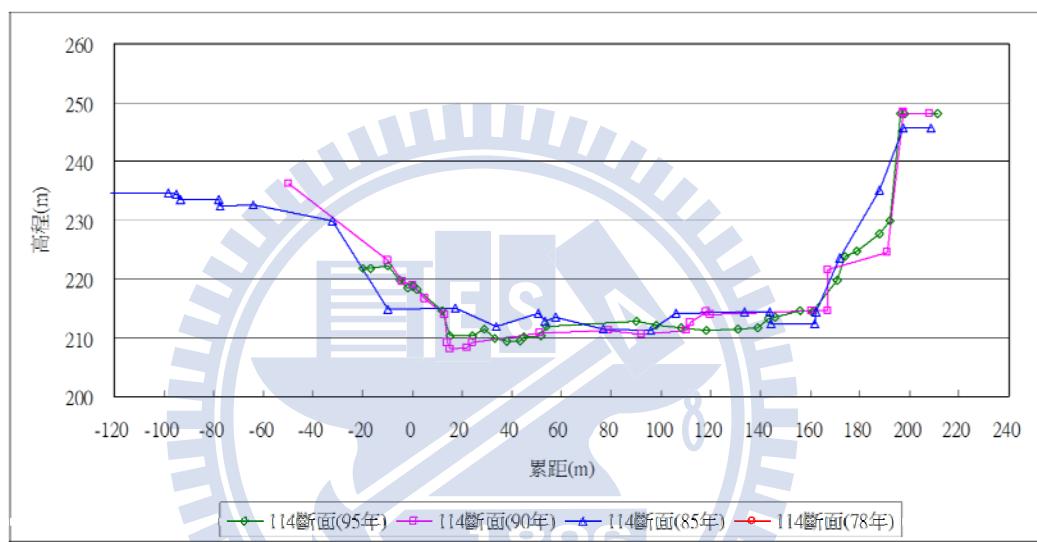
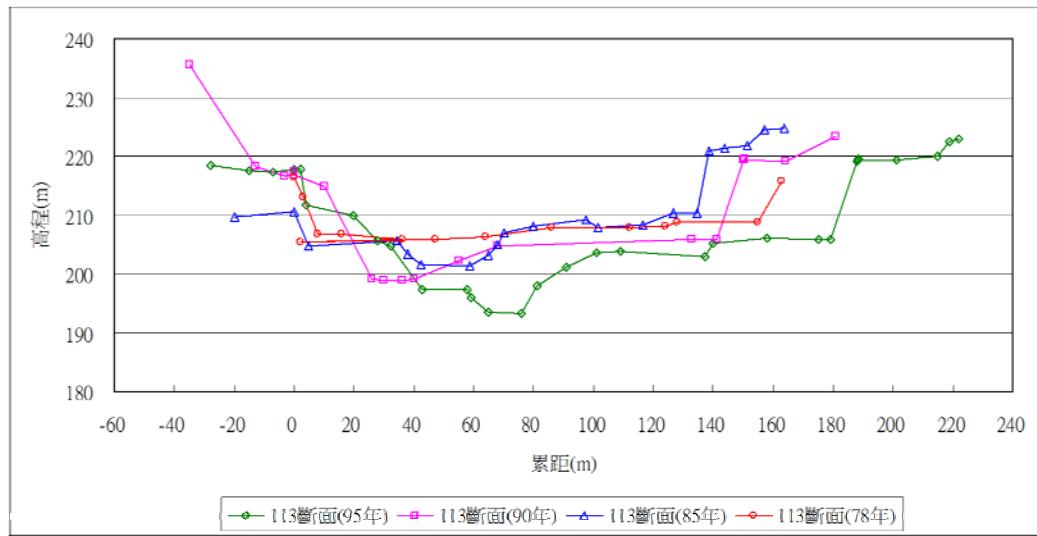
## A2- 4 104、105、106 歷年斷面測量資料



## A2-5 107、108、109 歷年斷面測量資料

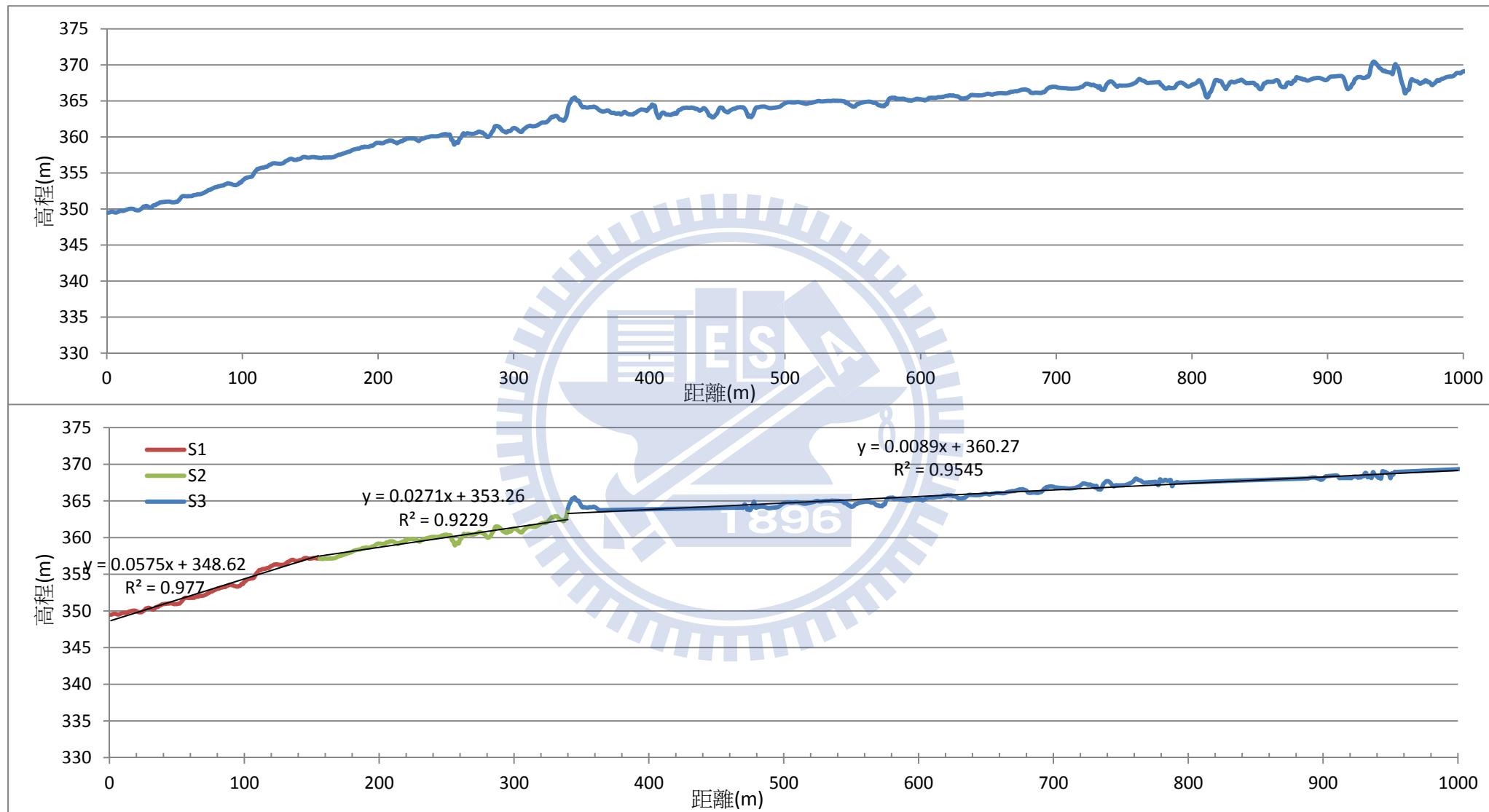


A2- 6 110、111、112 歷年斷面測量資料

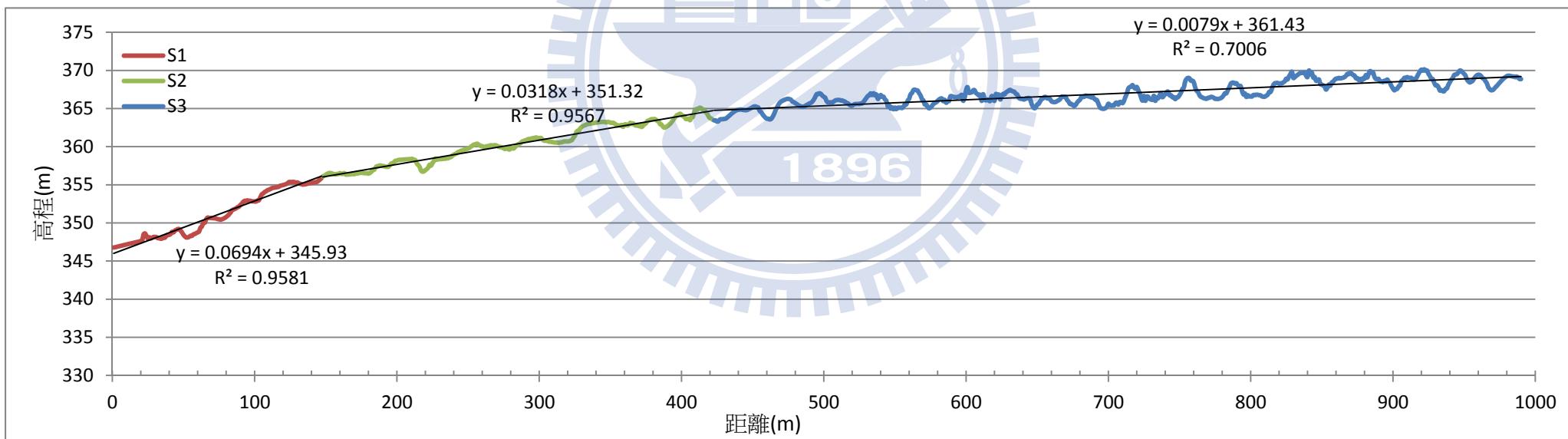
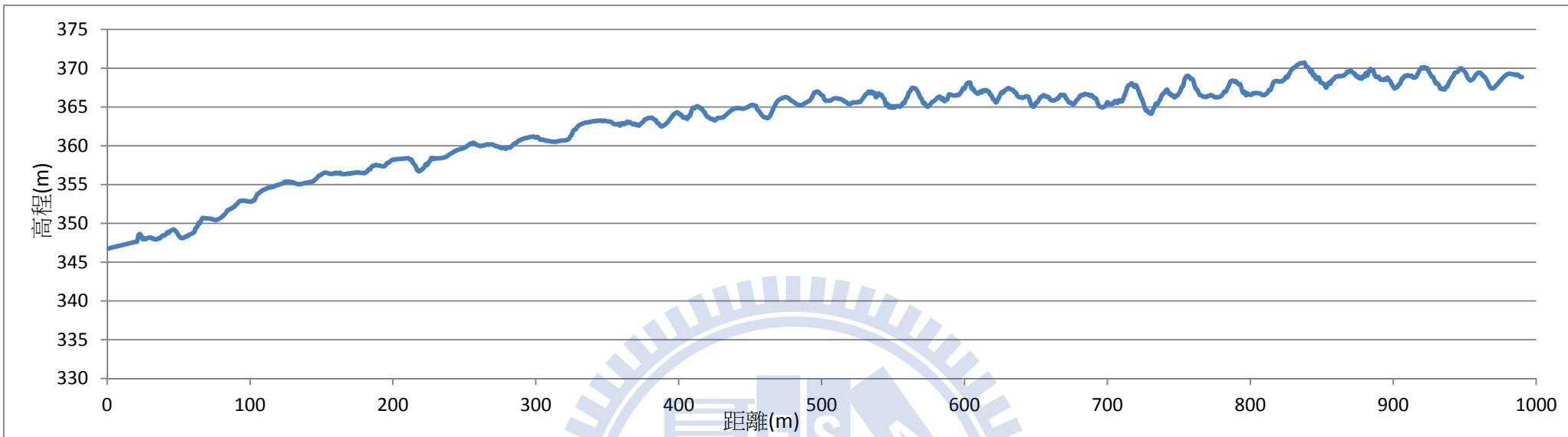


## A2-7 113、114、115 歷年斷面測量資料

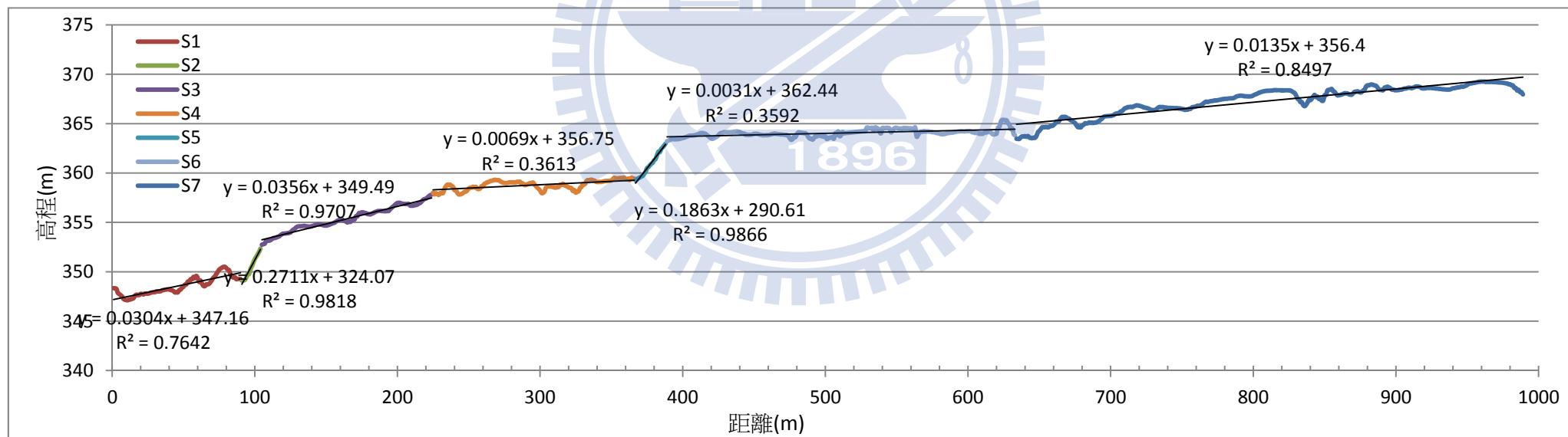
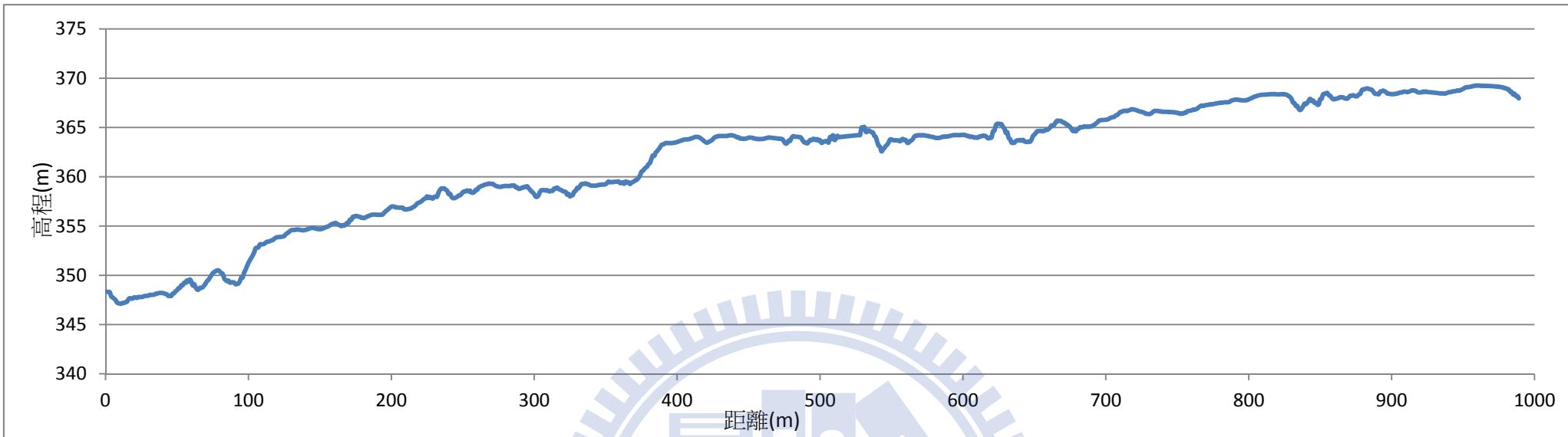
### 附錄 III 大安溪坡度分段分析資料



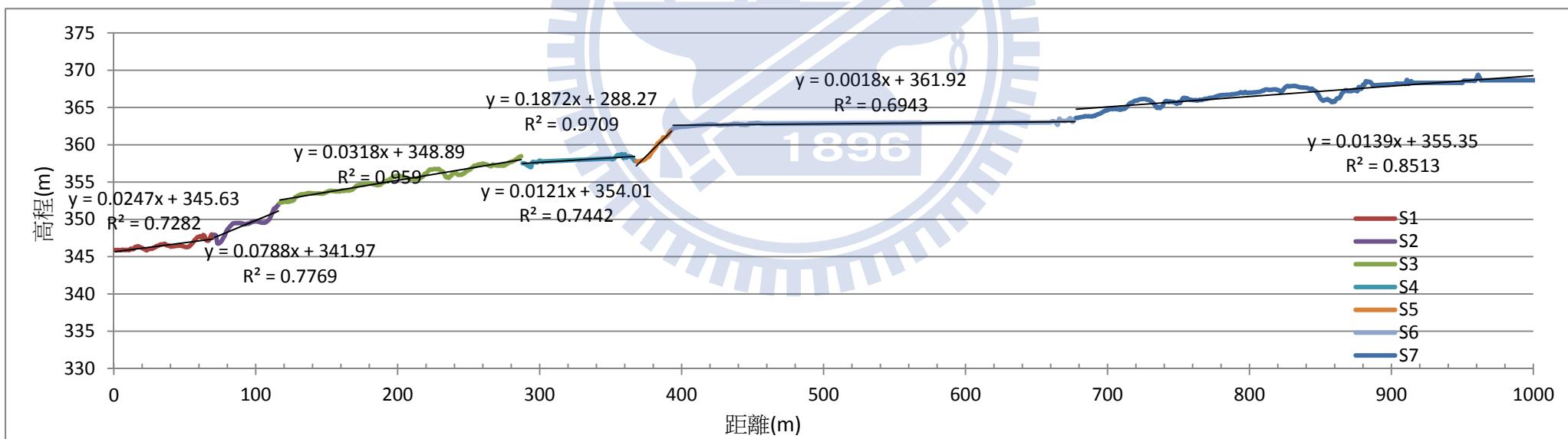
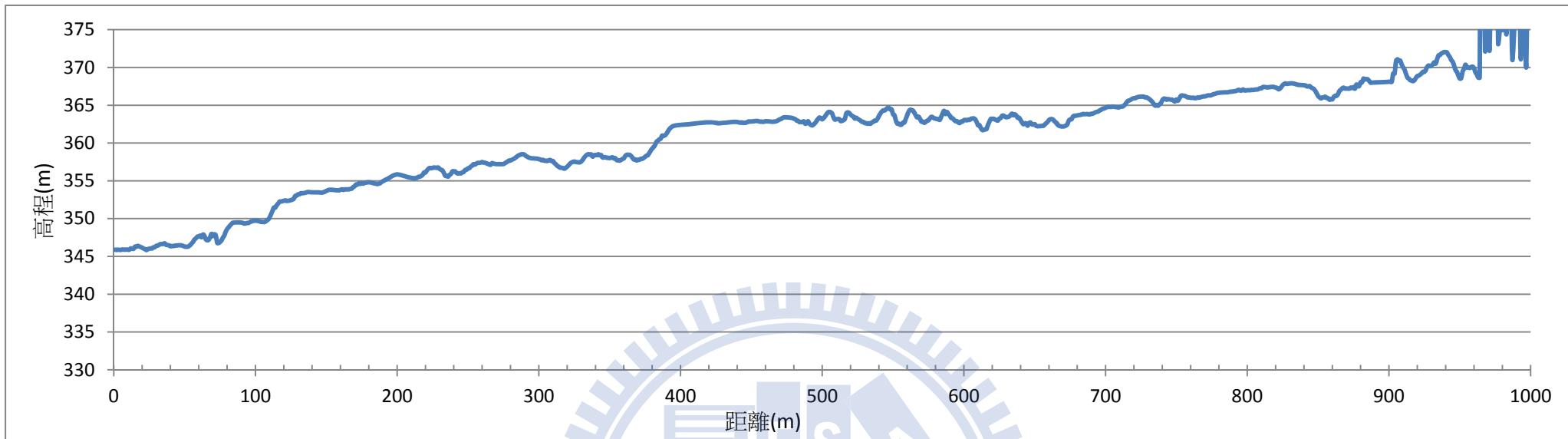
A3-1 88 年坡度修正前與修正後



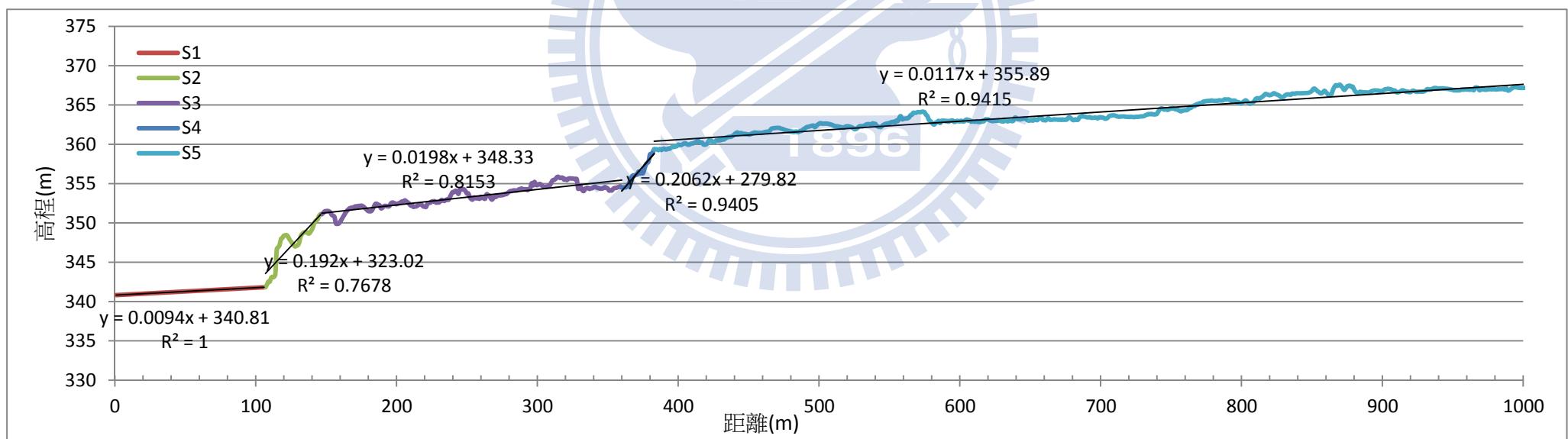
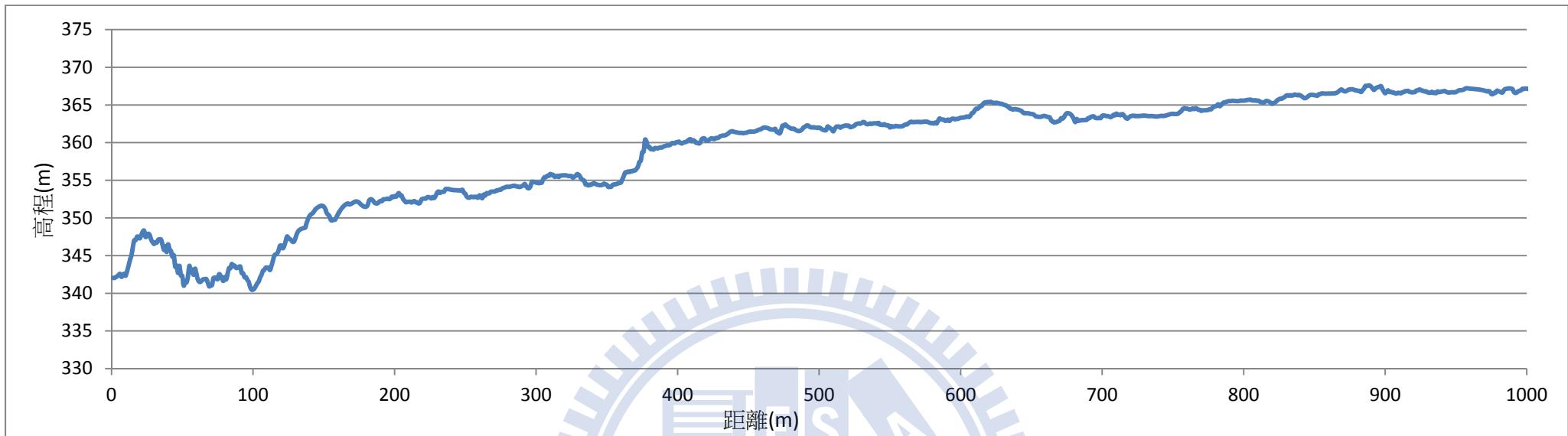
A3- 2 89 年坡度修正前與修正後



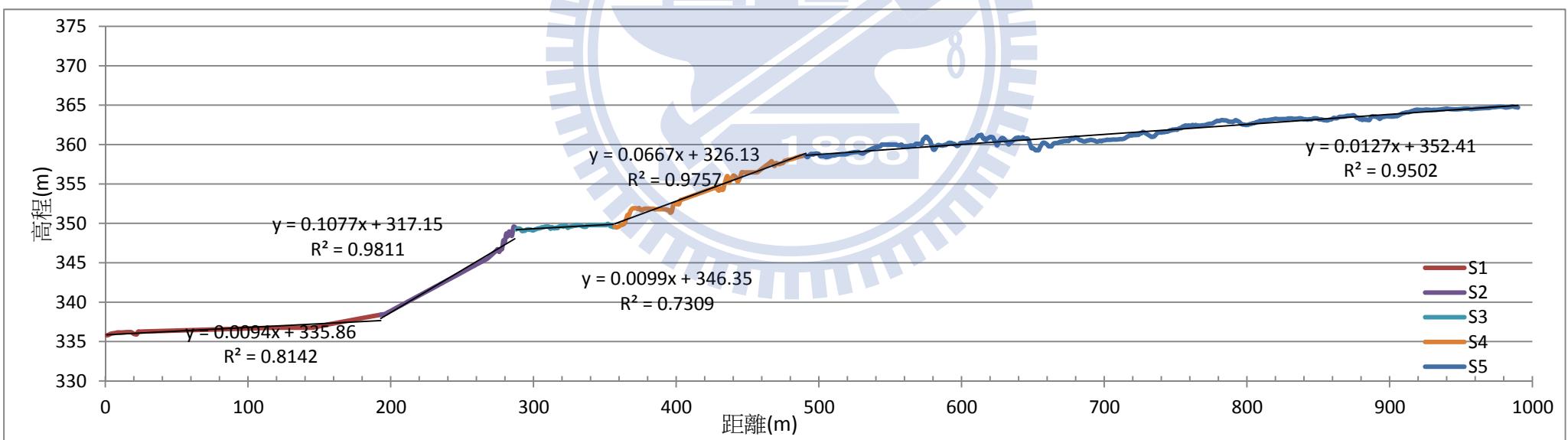
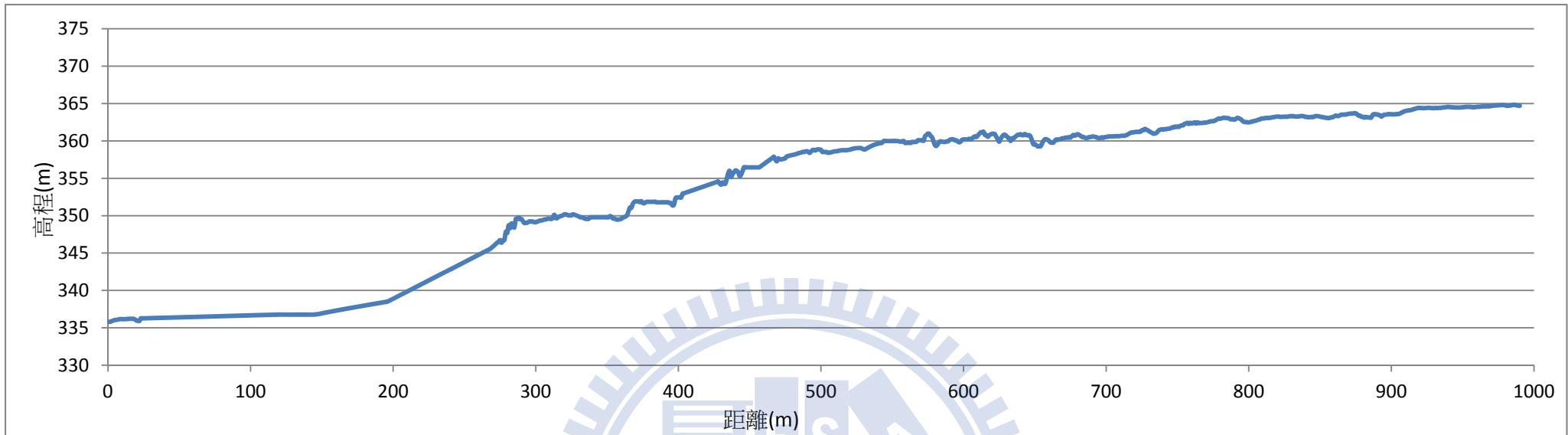
A3-3 90 年坡度修正前與修正後



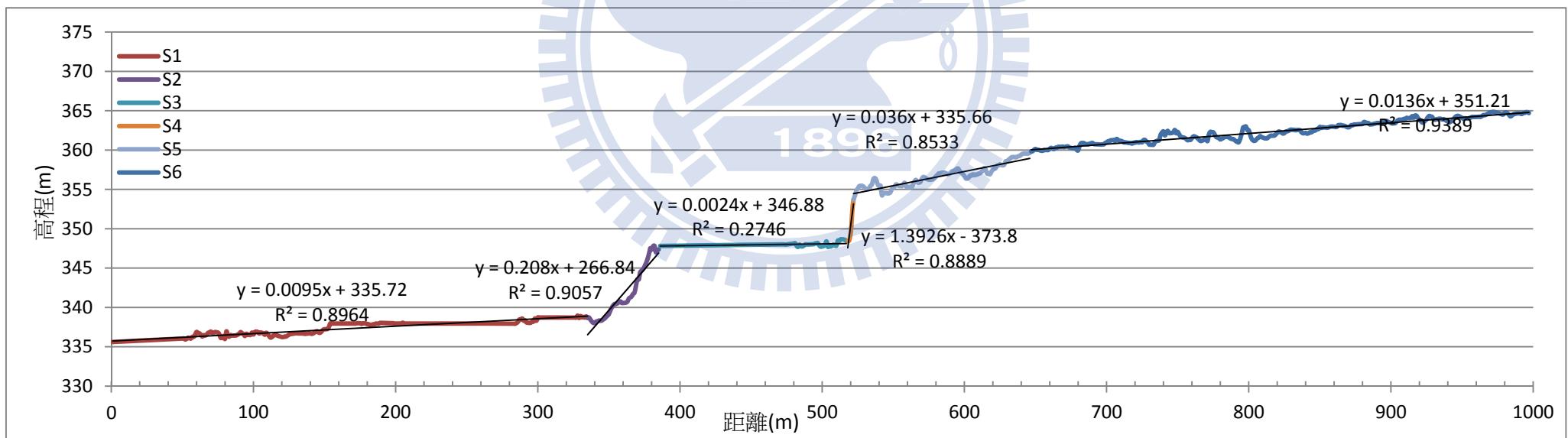
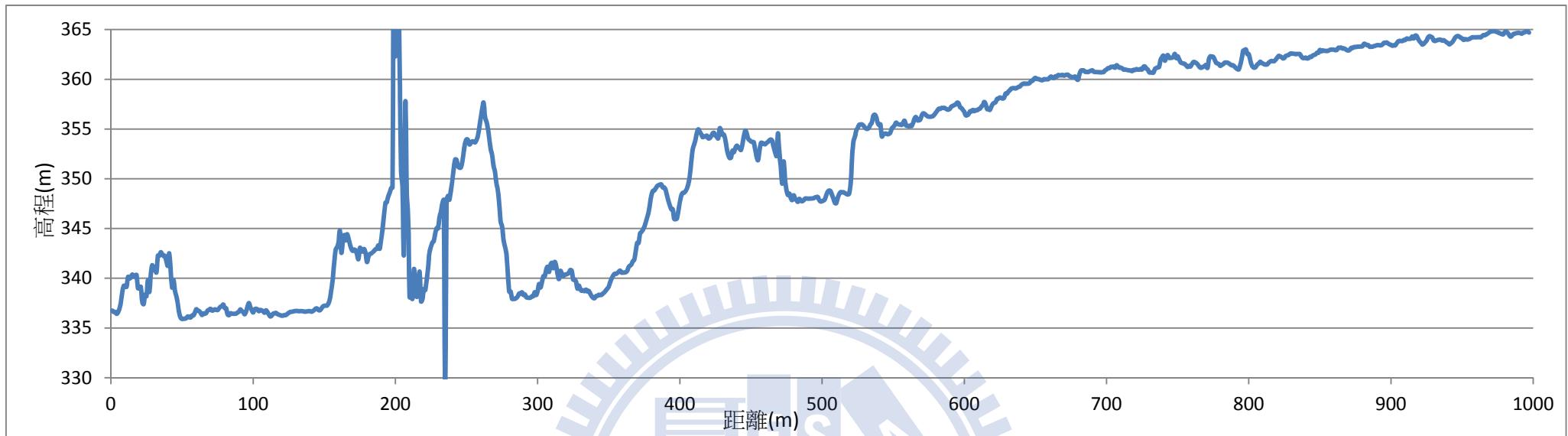
A3-4 91年坡度修正前與修正後



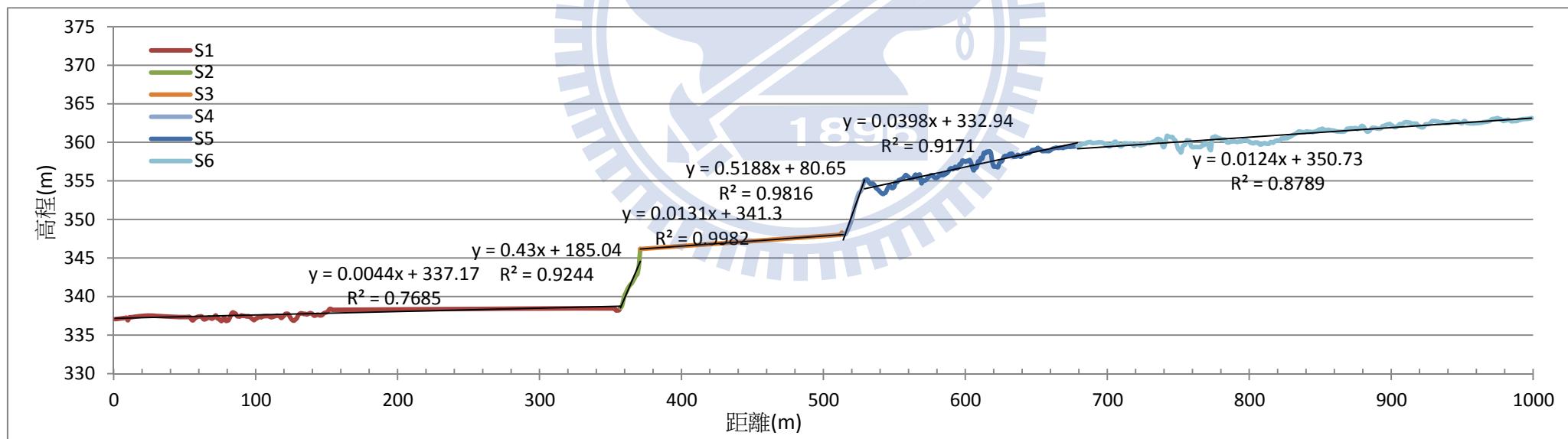
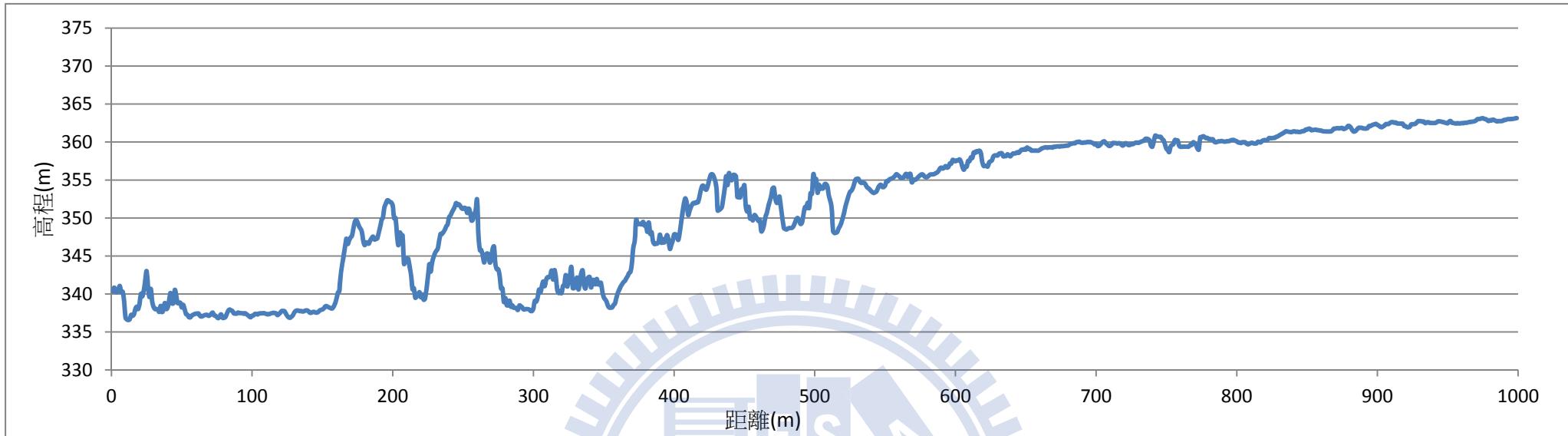
A3-5 93 年坡度修正前與修正後



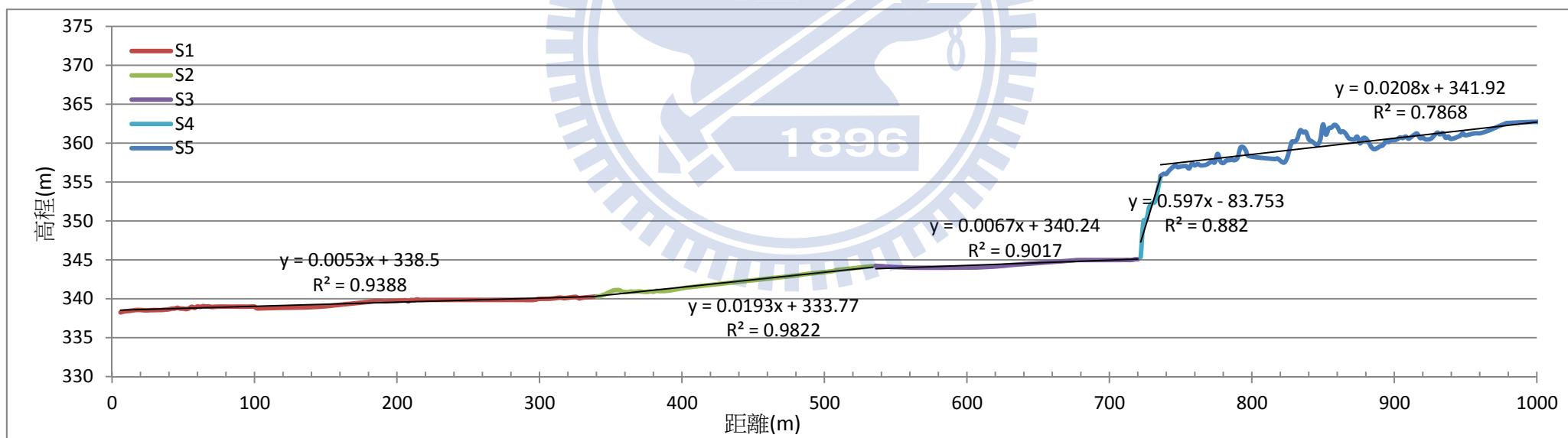
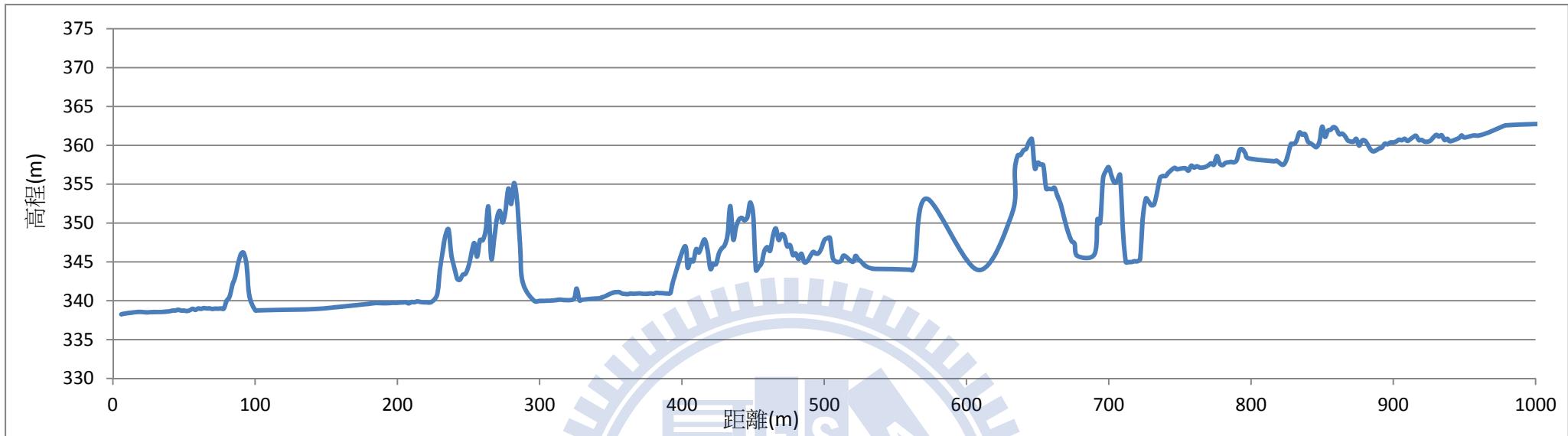
A3-6 94年坡度修正前與修正後



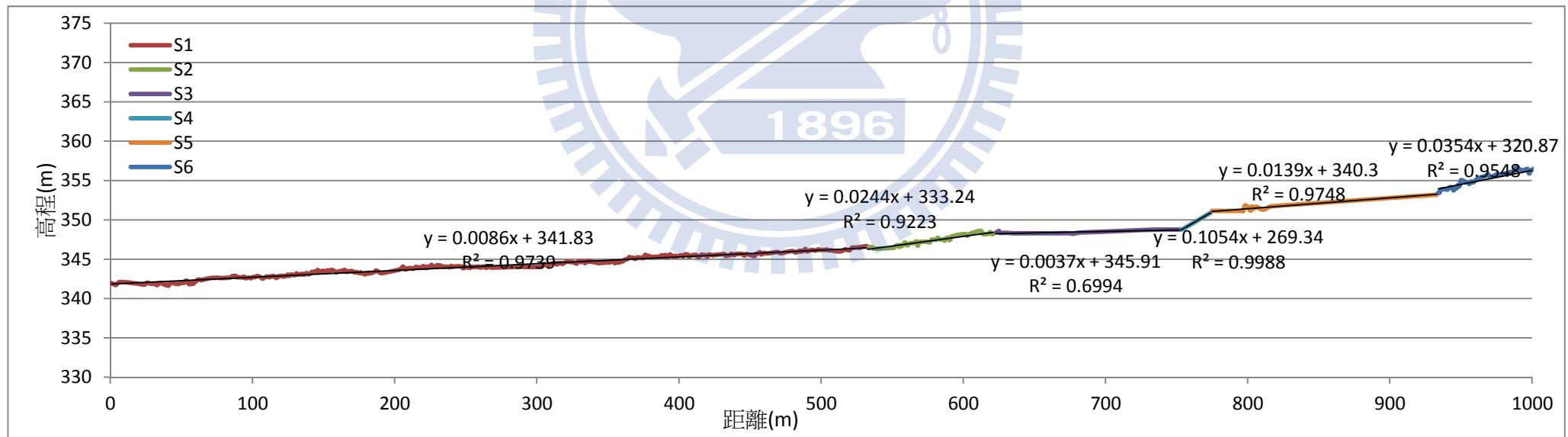
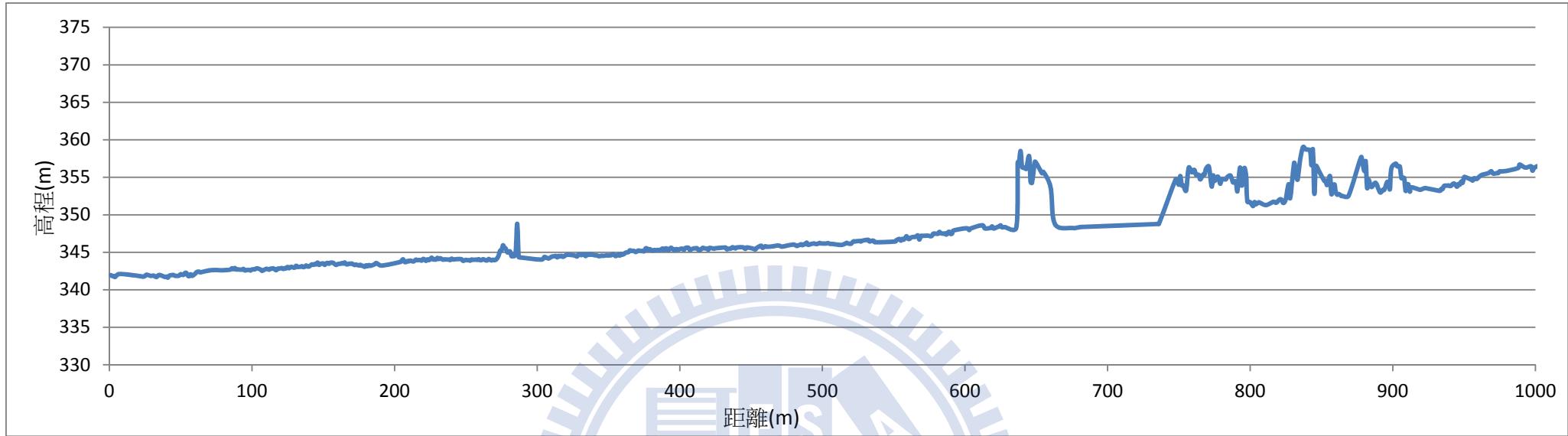
A3-7 95 年坡度修正前與修正後



A3-8 96 年坡度修正前與修正後



A3-9 97 年坡度修正前與修正後



A3- 10 98 年坡度修正前與修正後

