

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌
溪為例

Erosion Mechanism and Erodibility Evaluation of Riverbed with Soft Rock –
the Pa-Chang River as an Example



研究生：林文凱
指導教授：廖志中 博士

中華民國九十七年七月

軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例
Erosion Mechanism and Erodibility Evaluation of Riverbed with Soft
Rock – the Pa-Chang River as an Example

研究生：林文凱

Student：Wen-Kai Lin

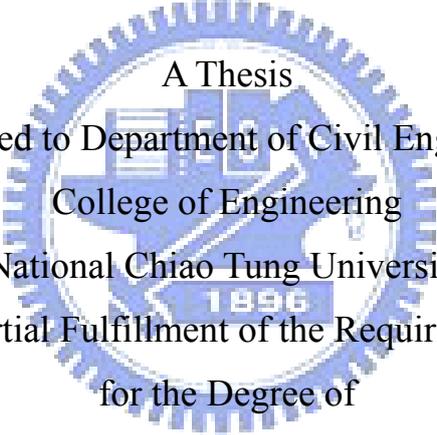
指導教授：廖志中 博士

Advisor：Dr. Jyh-Jong Liao

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized representation of a building or a bridge structure. The year '1896' is inscribed at the bottom of the inner circle.

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 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例

學生：林文凱

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

我國西部麓山帶之地質年代極為年輕，出露之岩層主要為上新世及更新世的地層，此類岩體在強度性質上為介於岩石與過壓密土壤之間的「軟岩」材料。當河道護甲層沖失使此類岩體出露於河床後，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為研究我國西部河川沖蝕的重要課題。

目前對於河床沖蝕的分析，大都採用計算分布於河床上的剪應力或流功的方式來評估沖蝕的量與速率，很少考慮到岩床本身地質條件的不同影響到沖蝕機制，進而改變沖蝕的結果。本研究藉由八掌溪發生嚴重侵蝕的河段，透過歷史資料比對，加上詳細的現場調查獲得地質條件作為基礎，用以追溯河道侵蝕的演進，提出該河段可能的軟岩河床沖蝕機制，進而對不同沖蝕機制下作沖蝕速率的比較。本研究中亦使用 Annandale (2006) 提出的沖蝕指數(erodibility)評分方法，評估河床材料受沖蝕的可能性，探討該方法在軟岩河床的適用性。

關鍵詞：軟岩、河道沖蝕、沖蝕機制、八掌溪

Erosion Mechanism and Erodibility Evaluation of Riverbed with Soft Rock – the Pa-Chang River as an Example

Student : Wen-Kai Lin

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

In the Western Foothills of Taiwan, sedimentation and diagenesis for the Pliocene and Pleistocene formations are still short in geological timescale. Their engineering behaviors are tended to be like soft-rock, e.g. poor cementation, high deformability, and low strength. Severe erosion in river channel caused by water flow is often observed once the armor layer has vanished.

The processes of river erosion on soft-rock beds are not the same with for granular materials beds. So river incision models used commonly considering only on shear stress or stream power are not suitable for soft-rock. Geological condition, e.g. discontinuity properties, strength, etc. do have significant effects on the river erosion rate.

The Pa-Chang River is studied in this research. Based on the historical surveying data and the results of intensively field investigation, the erosion mechanisms are proposed and used to compare different erosion rates. The erodibility index proposed by Annandale (2006) is also adopted for assessing the erosion possibility of the river.

Key Words: soft rock, riverbed erosion, erosion mechanism, The Pa-Chang River

誌謝

哇...林文凱終於出書了！在交通大學土木系的六個年頭就這樣飛逝而過，特別充實的研究所生涯也就此劃下句點，許多回憶湧上心頭——與學長、同學、學弟們一同吃火鍋、一同打球的歡笑、一起熬夜趕 meeting 進度看日出、一起出差風吹日曬雨淋的歷練...隨著這本完成的論文要跟同伴們道別了，滿溢的感謝在心裡，僅能以文字作為表述。

感謝恩師廖志中老師與潘以文老師無私地給予栽培指教，不只是課業、研究上，在待人處世的價值觀上也教導我步上正軌。

感謝我最好的同窗戰友智仁、永奇、聰吉總是與我出生入死共進退。

感謝蟻肉葷團隊的成員——老大明萬學長、國維學長、佩錚學弟、炳宏學弟、里泉學弟、俊文學弟一起上山下海的研究過程永生難忘。

感謝大地魔獸團隊——前團長貓脖、現任團長智仁、聰吉、比爾、猛虎、忠哥、神手 777、阿德、重錡、全修、政輝、小白、小雞、柏翰、伯碩，常常陪我出團「輸」解壓力。

感謝國際事務處好姐妹們——Betty、心昱、開雯、瑄瑄、雅琪、穎璇給我的關心、照顧與無限的歡樂。

最後當然要感謝總是尊重我的抉擇、分擔我的煩惱，支持我完成學業的家人與女友怡伶。

謹將這本論文獻給以上愛我的人與我愛的人。

目錄

中文摘要	i
ABSTRACT	ii
目錄	iv
表目錄	viii
圖目錄	x
照片目錄	xiv
第壹章、緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	3
第二章、文獻回顧	4
2.1 河床侵蝕速率的合理化公式	4
2.1.1 紊流造成的變動壓力	5
2.2 河床侵蝕的機制	6
2.2.1 磨蝕沖蝕(abrasion)	8
2.2.2 塊體抽離沖蝕(plucking)	8
2.2.3 穴蝕沖蝕(cavation)	9
2.2.4 顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)	10
2.2.5 風化造成的沖蝕(weathering)	13
2.2.6 攔河堰下方沖蝕坑的發展	13



2.2.7 突降點後退蔓延的機制	14
2.3 沖蝕指標評估- Erodibility index	15
2.3.1 簡介	15
2.3.2 Erodibility Index K_h 值	16
2.3.3 水流侵蝕能量(Erosive Power of Water)計算	25
2.3.4 評估方法	28
2.3.5 國外應用案例探討	30
2.4 文獻回顧總結	38
第三章、研究方法與研究區域	40
3.1 研究方法	40
3.1.1 研究流程	40
3.1.2 現場調查	41
3.2 研究區域	43
3.2.1 八掌溪流域概況	43
3.2.2 研究區域劃定	44
3.2.3 區域地質	44
3.2.4 研究區域人工構造物	46
3.2.5 研究區域歷年斷面資料	48
3.2.6 研究區域既有鑽孔與試驗資料	50



第四章、研究結果與討論.....	53
4.1 現地調查結果.....	53
4.1.1 研究區 1/5000 地質圖與地質剖面圖製作.....	53
4.1.2 不同岩層侵蝕速率的比較.....	70
4.2 研究區域沖蝕現象探討.....	71
4.3 軟岩現地沖蝕機制及其沖蝕速率比較.....	77
4.3.1 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形.....	77
4.3.2 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為.....	81
4.3.3 砂頁岩互層的差異磨蝕，薄層厚層互相牽動.....	85
4.3.4 粉砂岩的切穿.....	88
4.3.5 現地沖蝕機制的沖蝕速率比較.....	91
4.4 仁義潭攔河堰下方的侵蝕.....	94
4.4.1 仁義潭攔河堰下游的歷史照片比對.....	94
4.4.2 航空照片判釋成果.....	101
4.4.3 仁義潭攔河堰下方侵蝕的演化.....	110
4.5 Erodibility Index 沖蝕指標適用性評估.....	111
4.5.1 Erodibility Index K_h 值的估算.....	112
4.5.2 Erodibility Index K_h 值與岩層侵蝕速率的比較.....	116
4.5.3 水流流功(Stream power)的計算.....	117

4.5.4 八掌溪攔河堰下游的沖蝕性	119
4.5.5 沖蝕指標方法的適用性討論	121
第五章、結論與建議	124
5.1 結論	124
5.2 建議	125
參考文獻	127
附錄 I 既有室內試驗資料	129
附錄 II 歷年斷面測量套繪	131
附錄 III 水理演算結果	138
附錄 IV 歷年洪峰流量紀錄	139
附錄 V 現地調查資料	143



表目錄

表 2-1 岩石的 M_s 值(Kirsten,1982).....	18
表 2-2 凝聚性土壤的 M_s 值(Kirsten,1982).....	18
表 2-3 非凝聚性土壤的 M_s 值(Kirsten,1982).....	19
表 2-4 節理組數參數 J_n (Kirsten, 1982)	20
表 2-5 節理面粗糙參數 J_r (Kirsten, 1982).....	22
表 2-6 節理改變參數 J_a (Kirsten, 1982)	23
表 2-7 地盤構造條件參數 J_s (Kirsten,1982).....	25
表 2-8 Gibson Dam K_h 值與容許侵蝕威力值計算(Frizell, 2006).....	31
表 2-9 作用在衝擊區的水流流功(Frizell, 2006)	33
表 2-10 K_h 值及容許水流流功(Annandale, 2006).....	35
表 2-11 四次歷史洪水事件流量(Annandale, 2006).....	36
表 3-1 河床沖蝕評估現場調查記錄表.....	43
表 3-2 研究區域 1/25000 地質圖各岩層描述	46
表 3-3 研究區域既有鑽孔資料整理.....	50
表 3-4 液塑性試驗結果與土壤分類.....	52
表 4-1 仁義潭攔河堰下游至 94 號斷面間地質剖面分層	54
表 4-2 觸口攔河堰至 112 斷面間地質剖面分層	61
表 4-3 各年份航照拍攝日期.....	104

表 4-4 仁義潭攔河堰下方泥質頁岩沖蝕指數評分	113
表 4-5 觸口堰下游厚層泥岩沖蝕指數.....	115
表 4-6 95 號斷面下游極厚層粉砂岩沖蝕指數評分	116
表 4-7 越頂流速 $V_c=4\text{m/s}$ ，侵蝕高程的改變	119



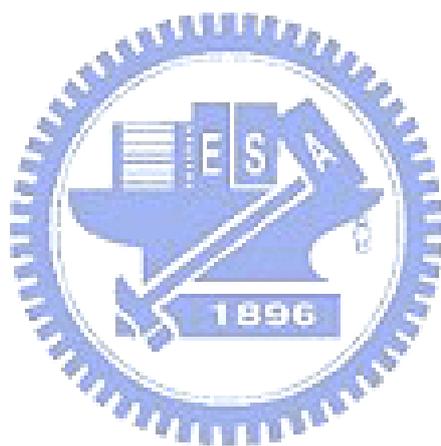
圖目錄

圖 2-1 河床表面岩體表面受到變動壓力而破壞的情形(Annandale, 2006)	7
圖 2-2 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995).....	8
圖 2-3 岩塊抽離機制(Whipple, et al., 2000)	9
圖 2-4 河床載運動的水平與垂直分量(Sklar & Dietrich, 2004).....	11
圖 2-5 有效的侵蝕工具與床底沉積物的轉換(Sklar & Dietrich, 2004).....	11
圖 2-6 河床載彈跳撞擊所造成之岩床磨損模式(Sklar & Dietrich, 2004)	12
圖 2-7 攔河堰下游沖刷坑的發展(Bollaert and Schleiss, 2003)	14
圖 2-8 突降點下方的侵蝕機制(Sdiel, 2002).....	15
圖 2-9 不連續面的形狀(Barton, 1974)	21
圖 2-10 岩塊長度比值 y/x (Annandale, 2006).....	24
圖 2-11 瘦長的塊體較等邊的塊體抗侵蝕能力高(Annandale, 2006).....	24
圖 2-12 Headcut 下游水流的侵蝕(Annandale, 2006)	27
圖 2-13 突降點下游水流的侵蝕(Annandale, 2006).....	28
圖 2-14 Erodibility Index 評估岩床侵蝕的方法(Annandale, 1995).....	30
圖 2-15 衝擊區的面積 (Frizell, 2006).....	32
圖 2-16 K_h 值與水流流功關係圖(Frizell, 2006).....	34
圖 2-17 Ricobayo Dam 場址(Annandale, 2006).....	35
圖 2-18 Ricobayo Dam 溢洪道縱剖面圖(Annandale, 2006)	35

圖 2-19 還原歷年河床條件(Annandale, 2006).....	36
圖 2-20 1935 年洪水(Annandale, 2006).....	37
圖 2-21 1936 年洪水(Annandale, 2006).....	37
圖 2-22 1939 年洪水(Annandale,2006).....	38
圖 2-23 1962 年洪水(Annandale,2006).....	38
圖 3-1 研究流程.....	40
圖 3-2 研究區域劃定.....	44
圖 3-3 研究區域 1/25000 地質圖(中央地質調查所).....	45
圖 3-4 仁義潭攔河堰下游固床工(攔河堰至 18 號固床工).....	47
圖 3-5 仁義潭攔河堰下游固床工(心上橋至 3 號固床工).....	47
圖 3-6 歷年深槽最低點連線.....	49
圖 3-7 河床平均坡降.....	49
圖 3-8 採樣點位置.....	51
圖 3-9 液塑性試驗結果.....	52
圖 4-1 研究區 1/5000 地質圖繪製區域.....	56
圖 4-2 仁義潭攔河堰至 94 斷面 1/5000 區域地質圖與剖面圖.....	57
圖 4-3 仁義潭攔河堰至 94 斷面露頭層面統計.....	58
圖 4-4 仁義潭攔河堰至 94 斷面節理統計.....	59
圖 4-5 觸口攔河堰至 112 斷面 1/5000 區域地質圖.....	63

圖 4-6 觸口攔河堰至 112 斷面露頭層面統計.....	64
圖 4-7 觸口攔河堰至 112 斷面節理統計.....	65
圖 4-8 95 與 96 斷面 1:5000 地質縱剖面細分.....	66
圖 4-9 95 斷面地質橫剖面與歷年斷面測量.....	67
圖 4-10 96 斷面地質橫剖面與歷年斷面測量.....	67
圖 4-11 113 斷面-民國 78 年地質橫剖面圖.....	68
圖 4-12 113 斷面-民國 85 年地質橫剖面圖.....	68
圖 4-13 113 斷面-民國 89 年地質橫剖面圖.....	69
圖 4-14 113 斷面-民國 95 年地質橫剖面圖.....	69
圖 4-15 粉砂岩侵蝕速率較慢形成障礙物.....	90
圖 4-16 圖 4-15-sec.A 橫剖面圖.....	91
圖 4-17 各種現地侵蝕機制主要出現位置.....	92
圖 4-18 民國 72 年河道航拍與素描.....	105
圖 4-19 民國 76 年河道航拍與素描.....	106
圖 4-20 民國 77 年河道航拍與素描.....	107
圖 4-21 民國 78 年河道航拍與素描.....	108
圖 4-22 民國 79 年河道航拍與素描.....	109
圖 4-23 仁義潭攔河堰下方侵蝕的演化示意圖.....	111
圖 4-24 仁義潭攔河堰下游河床高程變化(95 年八掌溪下游沖刷河段治理方	

案之研析).....	112
圖 4-25 Heardcut 下游水流的侵蝕(Annandale, 1995).....	118
圖 4-26 水流流功與岩盤抗侵蝕能量比較.....	120
圖 4-27 八掌溪研究區域的沖蝕指標評估區塊.....	121



照片目錄

照片 4-1 仁義潭攔河堰下游至 94 號斷面間岩層照片	55
照片 4-2 觸口攔河堰至 112 號斷面間岩層照片	62
照片 4-3 現地符合硬岩沖蝕機制的照片	73
照片 4-4 現地觀察到的軟岩沖蝕現象	76
照片 4-5 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形	79
照片 4-6 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為	83
照片 4-7 砂頁岩互層的差異磨蝕(abrasion),薄層厚層互相牽動	87
照片 4-8 壺穴(pothole)與滑槽(flute)的現象	90
照片 4-9 歷史照片比對-從仁義潭攔河堰右側往河道拍	96
照片 4-10 歷史照片比對-從仁義潭攔河堰上方向下拍	98
照片 4-11 歷史照片比對-從仁義潭攔河堰下方向上拍	100

第壹章、緒論

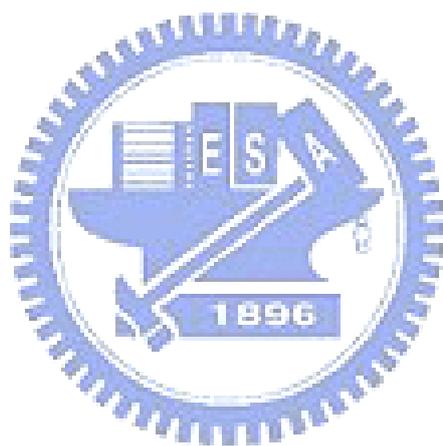
1.1 研究動機

我國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，此類岩石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。

以往提到河川的沖蝕問題，就工程觀點，都把焦點著重於橋樑橋墩、人工跨河構造物、固床工、護岸上，認為只要岩石基礎未被破壞就沒有問題。在分析時岩石河床(bed rock)、岩石河岸都被假設為侵蝕的終點，但真正去觀察台灣西部地區河流的沖蝕，會發現河流的沖蝕並沒有因為到達岩石河床與岩石河岸而有停止的情形，甚至嚴重到危及構造物，影響到人身的安全。

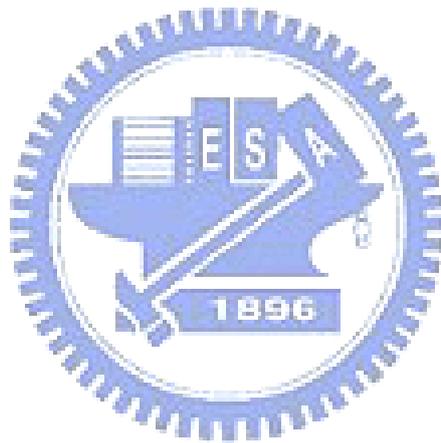
因此，岩石河床與岩石河岸的沖蝕問題是需要被研究的，尤其是在地質年代較年輕的岩層—軟岩地區。對於岩石河床下切與沖蝕的研究，在地形學或地質學既有的研究裡，多著重於整個流域的侵蝕行為對地形地貌的影響，河床的沖蝕量多以描繪河床面剪應力的合理化沖蝕率公式來計算，但此類方式於考慮局部及工程的水理計算無法反應出受到侵蝕的河床地質條

件。本研究期望能由大地工程學的角度出發，探討軟岩地區的沖蝕問題。



1.2 研究目的

本研究以八掌溪劇烈沖蝕河段為例，及歷史資料比對，加上詳細的現場調查獲得地質條件作為基礎，用以追溯河道侵蝕的演進，提出該河段合理的軟岩河床沖蝕機制；並使用 Annandale (2006)提出的沖蝕指數 (Erodibility Index) 評分方法，評估河床材料受沖蝕的可能性，探討該方法在軟岩河床的適用性。



第二章、文獻回顧

2.1 河床侵蝕速率的合理化公式

本節將河床侵蝕速率的合理化公式分為層流造成的剪應力與紊流造成的變動壓力兩個小節，分別介紹 Howard & Kerby (1983)的岩床下切速率公式，以及 Annandale(2006)提出流功(Stream Power)的計算方法取代紊流狀態下產生的變動壓力(Fluctuating Pressure)的估算方式。

2.1.1 層流造成的剪應力

過去研究提及河床侵蝕問題多數從水流的流速及剪應力著手，由河床裸露的岩床面能抵抗輸送沉積物的磨蝕剪應力，提出與下切速率正相關的合理化公式。Howard & Kerby (1983)假設岩床下切速率 E 與床面剪應力 τ_b 有下列冪函數相關性：

$$E \propto \tau_b^a \dots\dots\dots(2.1)$$

假設床面剪應力存在一個啟動沖蝕的門檻值 τ_b ，可以將代表超越門檻值的剪應力值 $(\tau_b - \tau_c)$ 取代上式的 τ_b 來估算下切速率：

$$E \propto (\tau_b - \tau_c)^a \dots\dots\dots(2.2)$$

Howard & Kerby (1983)認為岩床下切速率 E 與河川沉積料輸送率也會存在正相關之關係，因此他們以河川水流量(用上游集水面積 A 代表流量)與坡度 S 來代表河川沉積料輸送率，提出了岩床下切速率 E 與河川沉積料輸送率的關係式。

$$E = KA^m S^n \dots\dots\dots (2.3)$$

其中 K 、 m 、 n 為模式中的參數，依照不同流域特性可由建議的表格查得。

後來有學者對於 m 、 n 值作進一步的探討，Seidl & Dietrich (1992) 歸納許多流域之 (m/n) 比值，發現當河床坡度小於 0.2， (m/n) 值約為 1.0，當河床坡度大於或等於 0.2， (m/n) 值大致接近 0.7。Seidl & Dietrich(1992)也指出岩床下切不但受到流水沖蝕、懸浮載與河床載磨蝕、偶發土石流之掏刷、與突降點(knick point)，整體來說 (m/n) 值的差異並不大。此外他們也認為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。

Whipple & Tucker (1999)的研究提出 n 值受岩床沖蝕不同機制之影響甚大；Wohl & Ikeda (1998) 檢視日本幾個不同河川之岩床斷面，並探討流域大範圍沖蝕型態與流域縱斷面之關連。他們認為當岩床具有相對較高的阻抗比及岩層走向橫越河川條件下，較易出現突降點 (knick point) 與階狀地貌；基於許多案例比較，他們斷定單純之合理化公式 (譬如基於流功的沖蝕速率關係) 並不能完全考慮河川流域縱斷面的發育，岩床之岩性與構造、沖蝕型態等因素無法由單一合理化公式納入考量。

2.1.2 紊流造成的變動壓力

Annandale (2006)提出，河床的侵蝕多半集中發生在劇烈水流的湍流情況下，流過材料表面的水流為紊流的狀態，因此他認為應該以紊流狀

態下產生的變動壓力(Fluctuating Pressure)來代表產生侵蝕作用的水流行為，而非在層流狀態下的剪應力；但是變動壓力的表示方法不容易，需要同時考慮到頻率、振幅與延時等，因此他引用了 Fiorotto & Rinaldo (1994) 的研究，該研究透過實驗證明能量消散(Rate of Energy Dissipation)與變動壓力為一線性的正比關係，而能量消散能以簡單的流功 (Stream Power)來表示。

除了 Annandale(2006)認為壓力波動才是造成渦流情況下岩體的沖蝕指標依據，Heibaum (2002)也認為河床地層中之孔隙水壓不但有週期性波動且會有延遲反應。地層中之孔隙水壓隨時間之變動也因此可能造成對抗沖蝕能力的不利影響。

流功的概念是指水流真正作用在岩床侵蝕所消耗的能量，能以水單位重 γ 、單寬流量 q 、能量消耗 ΔE 的乘積表示：

$$P = \gamma q \Delta E \dots\dots\dots(2.4)$$

計算出來的 P 值定義為在單寬流量 q 下水流作用在單位面積岩床侵蝕的能量，單位為 kW/m^2 。

2.2 河床侵蝕的機制

Annandale(1995)利用了一連串的過程描述河床岩體表面受到變動壓力而破壞的情形，如圖 2-1，包括材料弱化、水流進入逐漸頂開弱面(wedging)、水流夾帶的砂粒造成弱面磨蝕、弱面裂口擴展，最後無法抵抗上揚力而使

岩塊受到拉拔作用抽離原本的位置，這觀念除了水流的影響也必須考慮到砂的磨蝕作用，更有可能因為懸浮載的大顆粒撞擊產生裂縫而加速弱面的擴展。

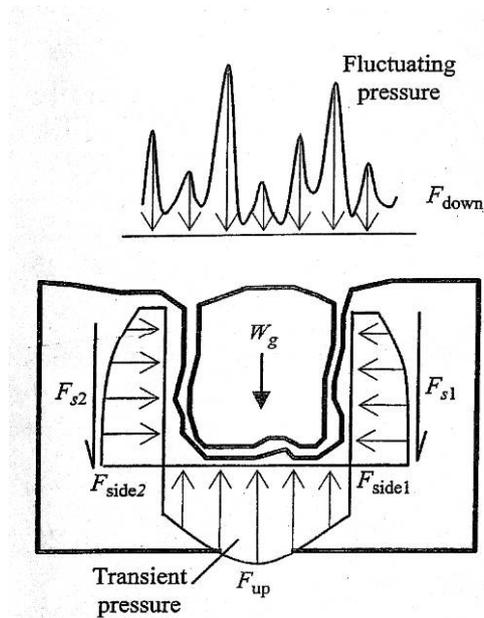


圖 2-1 河床表面岩體表面受到變動壓力而破壞的情形(Annandale, 2006)

河川於岩床河道之下切沖蝕可歸諸於不同之形成機制，包括岩塊抽離 (plucking) 作用、底床上因卵礫石衝擊出碎片或岩塊 (abrasion with saltation) 之磨蝕作用、水流、懸浮載或河床載等剪切河床之磨蝕 (abrasion) 作用所造成顆粒尺度之逐漸耗損 (wear) 作用、物理與化學風化 (weathering) 作用、與穴蝕 (cavitation) 作用。有時候於較陡較小的集水區範圍內，土石流也可能為岩床河道下切之主控因素。當尺度再放大一點，端看水流經過一個人工構造物造成流況變化對河床的影響，如攔河堰下游沖蝕坑的發展，或是受岩體不連續面影響，造成河床容易產生突降點進而向上游發展發生向源侵蝕等問題亦為形成河床沖蝕的原因。

2.2.1 磨蝕沖蝕(abrasion)

Whipple, *et al.* (2000) 利用一系列現地之實例定性地探討影響岩床沖蝕機制之影響因素。他們認為影響岩床沖蝕機制的幾個重要參數為岩性、弱面間距、節理、層面等。當岩床的弱面不發達，即間距大於 1m 時，可以視為完整岩盤，此種岩床沖蝕主控機制為水流本身或是夾帶的懸浮載及河床載顆粒磨蝕岩床的表面，使岩體本身已膠結的顆粒一粒一粒逐漸脫離而造成磨蝕沖蝕(abrasion)的行為。在渦流情況下，水流流動複雜，會出現局部劇烈的磨蝕沖蝕，常常會伴隨著形成滑槽(flute)與壺穴(pothole)等現象。

2.2.2 塊體抽離沖蝕(plucking)

Annandale(1995)提出了一個簡單的示意圖(圖 2-2)來解釋岩塊抽離的過程，他舉了一河流流向與岩層呈逆向的例子來表現岩塊抽離的步驟是按照頂開(wedging)、移出(dislodgement)、脫離(displacement)這三個階段。

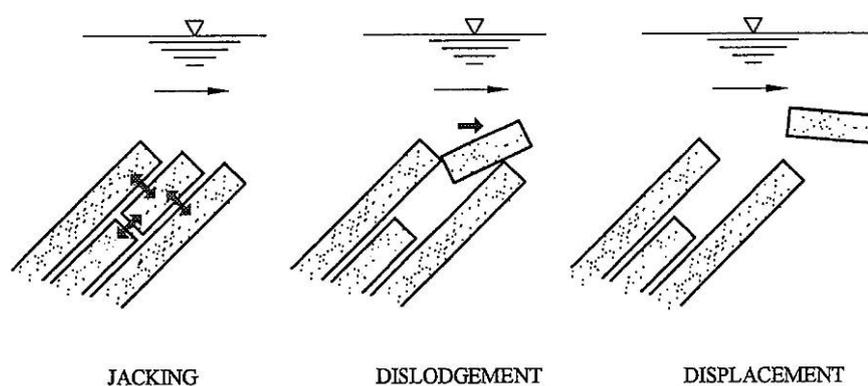


圖 2-2 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)

Whipple, *et al.* (2000)認為抽離過程中可能先需小裂縫經水力作用擴大為破裂面、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(圖 2-3)。當岩體內弱面的間距小於約 1 米，岩塊脫離 (plucking) 就可能成為岩床河道下切之重要機制。

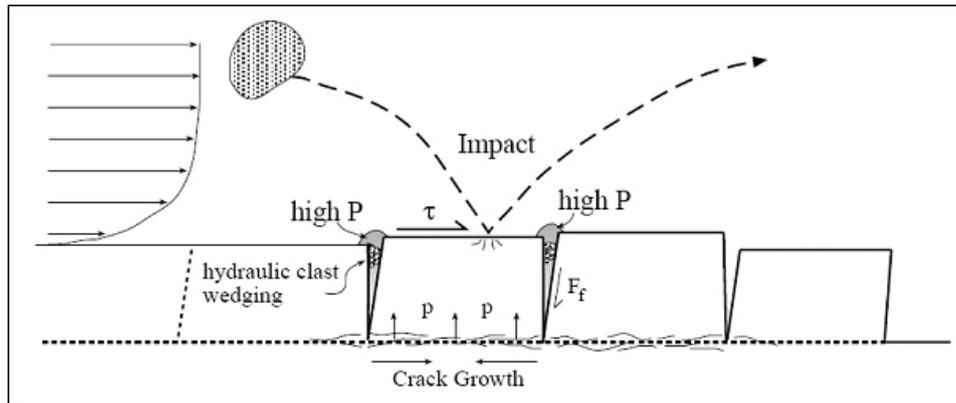


圖 2-3 岩塊抽離機制(Whipple, et al., 2000)

有關 plucking 的侵蝕機制在 Annandale(1995)提出的模式裡就已有接近完整的定性描述，Whipple, et al. (2000)提出的模式更加以定義了侵蝕機制的重要參數，提出節理間距 1m 以下主導侵蝕機制多為 plucking 的行為，確立了此種機制的定義。

2.2.3 穴蝕沖蝕(cavation)

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(Whipple, et al. , 2000)。

懸浮載沖蝕效應會受局部河床地形地貌影響甚大，其原因在於不規則而易於發生渦流，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 (Graham, 1987)。

2.2.4 顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)

Whipple & Tucker (1999)討論河床載大顆粒彈跳對沖蝕之貢獻，認為大顆粒彈跳可能對節理發達岩體的岩塊抽離機制之重要性遠高於對塊狀完整岩石(massive, unjointed rocks)之沖蝕程度與效應。然而當岩石之岩性十分軟弱時，即使岩石之弱面相當不發達，顆粒彈跳的破壞效果與程度可能仍顯著。

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) 認為所有河流都攜帶某個「量」的沉積物，相較於別的機制的行成，需有特殊的條件，例如 cavitation 要有高速水流、plucking 要在弱岩或是高度破裂岩體，顆粒撞擊(saltation)是最常出現且是消散能量最有效的方法。因此他們提出一個針對河床載彈跳撞擊(saltation)所造成之岩床磨損模式，他們的模式之基本假設為岩床磨損率會隨著河床流量與河床載運動之垂直分量正相關，如圖 2-4，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(圖 2-5)。該模型所作出的研究結果(圖 2-6)，顯示了河床載顆粒的覆蓋與啟動之間轉換，對河床的磨蝕與保護之間的關係，由此模式可呼應 Gilbert (1877) 對河川沈積料供應所扮演角色之假說

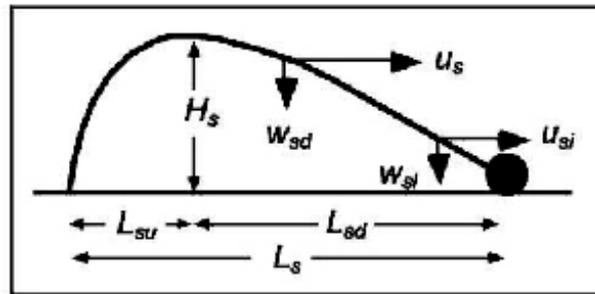


圖 2-4 河床載運動的水平與垂直分量(Sklar & Dietrich, 2004)

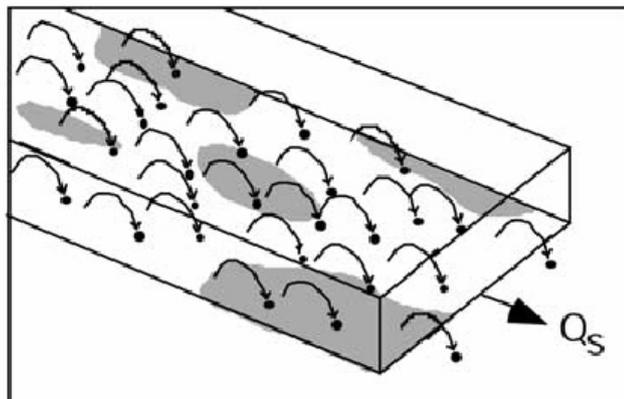


圖 2-5 有效的侵蝕工具與床底沉積物的轉換(Sklar & Dietrich, 2004)

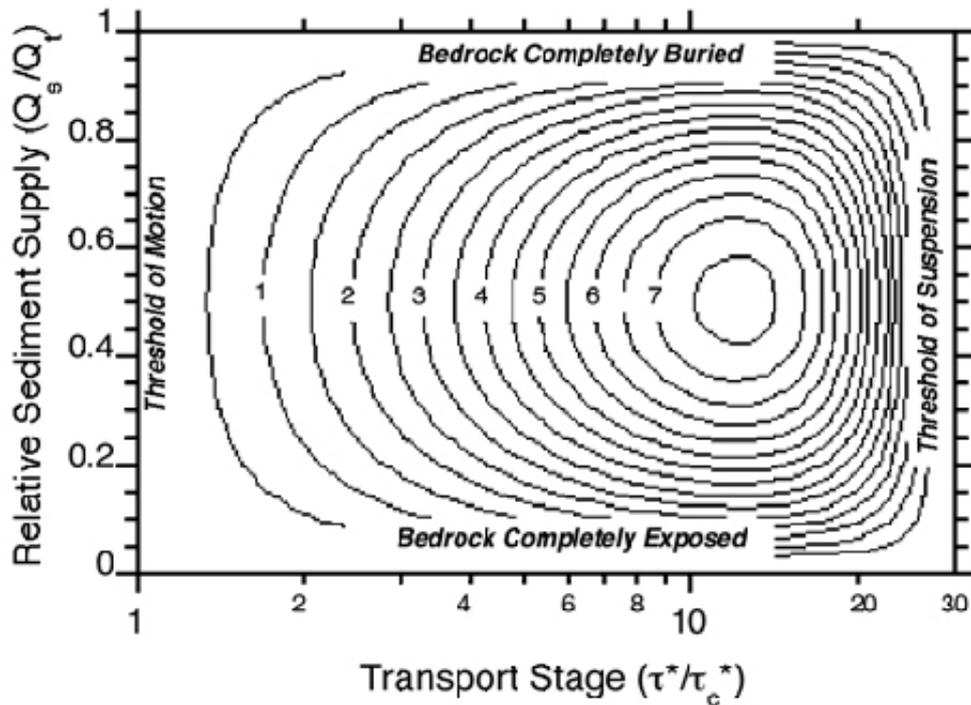


圖 2-6 河床載彈跳撞擊所造成之岩床磨損模式(Sklar & Dietrich, 2004)

Sklar & Dietrich (2006)進一步將他們的模式由局部尺度之力學分析放大至探討流域尺度之地形分析，所有牽涉參數（如流量、顆粒尺寸、河川沈積料供應...等）都需找出所考量時間與空間範圍內之代表值。他們透過該模式以整理比較不同既有河床下切模式中考慮之變數，認為影響河川下切速率與河床穩態坡度最重要之影響變數依序為：(1)啟動門檻、(2)沈積物供應之覆蓋性效應、(3)沈積物供應之工具性效應。河床下切模式中若未考慮啟動門檻，則低剪應力下會高估下切率，並可能低估河道坡度。河床下切模式中若未考慮覆蓋性效應則於高沈積物供應下會高估下切率。河床下切模式中若未考慮工具性效應則於低沈積物供應下會低估下切率。

2.2.5 風化造成的沖蝕(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。

2.2.6 攔河堰下方沖蝕坑的發展

Bollaert and Schleiss (2003)提出位於攔河堰下方沖刷坑的行成機制，主要包括了六個步驟(圖 2-7)，經由一個跌水的衝擊力，產生散佈的剪力層，水流傳到沖刷坑底部的壓力波動造成岩體水力破裂以及塊體受上揚力擠出的情形，最後遭破裂的塊體遭水流搬離等一連串的行為。

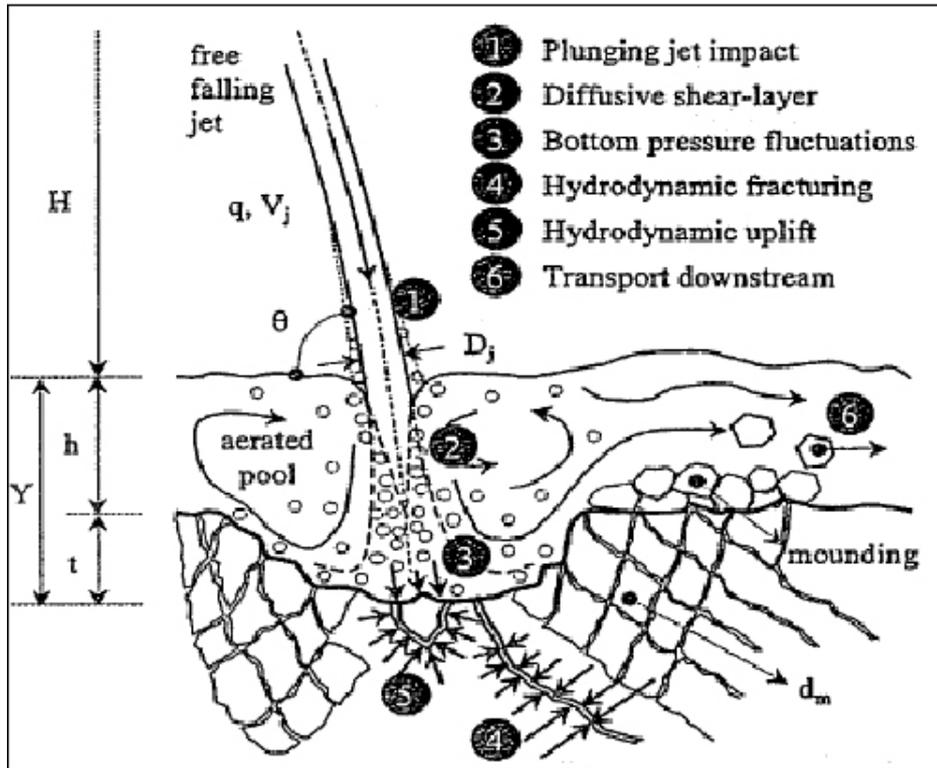


圖 2-7 攔河堰下游沖刷坑的發展(Bollaert and Schleiss, 2003)

2.2.7 突降點後退蔓延的機制

Sdiel(1992)針對河流出現突降點的下方進行了研究，先引用 Howard & Kerby (1983)的方法從流域的尺度著手對整個流域進行分析，再縮小範圍至研究區域(Eel River, Northern California, USA)，觀察突降點對河流沖刷的影響，發現其發生侵蝕的行為若突降點為主控機制，則會出現圖 2-8 上方這種向上游後退蔓延的向源侵蝕情形；若有其他侵蝕機制主導，如磨蝕機制等，則此種特徵會不明顯，而出現圖 2-8 下方的垂直向侵蝕情形。

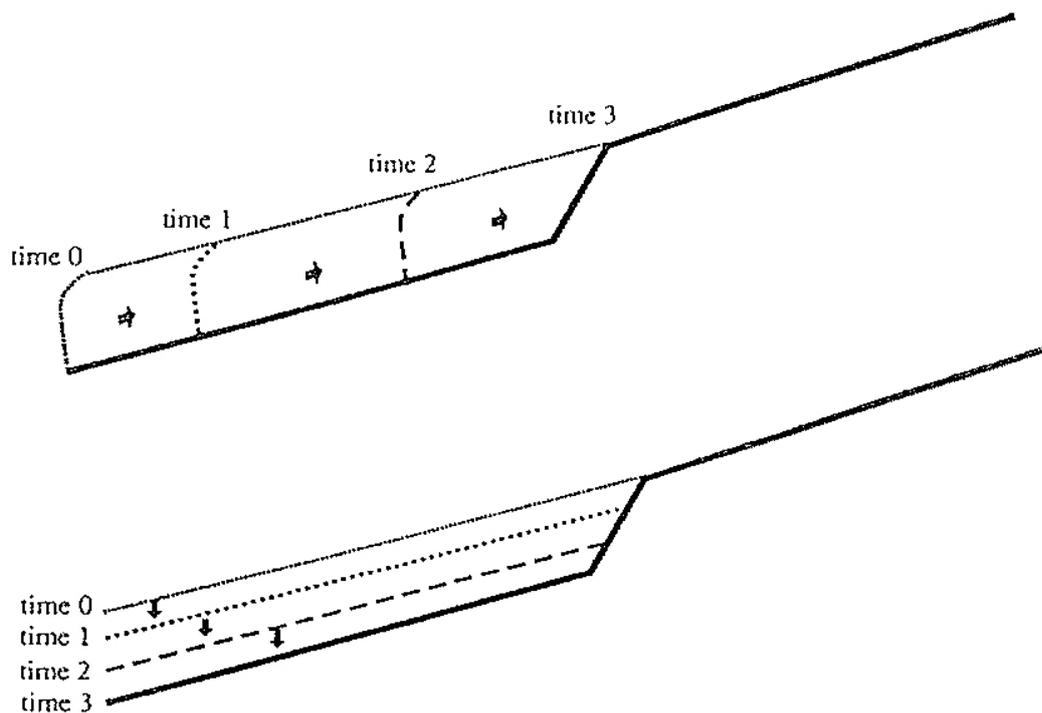


圖 2-8 突降點下方的侵蝕機制(Sdiel, 2002)

2.3 沖蝕指標評估- Erodibility index

2.3.1 簡介

Annandale(1995)認為岩床沖蝕研究應該同時考慮水流的情況與岩石河床的地質條件，理想的情況應該是像天平的兩端兩者平衡，而過去的研究大多偏向某一邊的考量—如 2.1 節所述 Howard & Kerby (1983)提出的下切速率合理化公式僅考慮流域的水流條件，而 Kirsten(1982)仿照 Q-System(Barton, 1974)所作的岩體抗侵蝕評分方法僅偏重岩石河床地質條件，在 2.2 節會提出詳細說明。所以 Annandale(1995)考慮水流侵蝕力 (Erosive Power of Water)與岩石河床抗侵蝕指標(Erodibility index K_h value)提出沖蝕指標方

法，如此保持天平兩端的平衡。

所謂沖蝕指標評估方法是透過河床條件給定一抗侵蝕指標(Erodibility Index K_h value)，與作用於河床的水流侵蝕力 (Erosive Power of Water)作比較評估是否發生侵蝕的方法。

2.3.2 Erodibility Index K_h 值

Kirsten(1982)仿照 Q-System 岩體品質評分系統(Barton, 1974)建立抗沖蝕指數(Erodibility Index)，此一指數為四項參數的乘積(式 2.5)。

$$K_h = M_s \times K_b \times K_d \times J_s \dots\dots\dots(2.5)$$

這四項參數分別為代表材料強度的 M_s 、代表顆粒或塊體尺寸的 K_b 、代表弱面或顆粒間抗剪強度 K_d 、代表地盤構造條件的 J_s 。各參數依不同條件給予不同之指定值，由四項之乘積得到抗沖蝕指數，所得到的 K_h 值越高則代表岩體抗侵蝕能力越高。Annandale(1995)引用了 Kirsten(1982)在抗侵蝕指標評估方法裡作為岩石河床的抗侵蝕指標使用。

在 Kirsten(1982)的評分系統裡，只針對「岩體」，即塊體、弱面間隙等考量進行評分，而 Annandale(1995)提出的評分方法裡，認為將材料可以依照表面的特性分為岩體(Rock)、凝聚性土壤(Cohesive soil)與非凝聚性土壤(Non-Cohesive soil)等，加入了顆粒性材料的評分建議標準。而本研究的重點在於我國西部麓山帶的軟岩河床，理應屬於岩體研究的範疇，以下會詳細介紹有關岩體材料抗沖蝕參數的給定方法：

1. 材料強度參數(mass strength number, M_s) :

對於岩體材料，評估強度參數的代表參數是無圍壓縮強度(UCS)，可以用下式(式 2.6、式 2.7、式 2.8)計算 M_s 值：

$$M_s = C_r \cdot (0.78) \cdot (UCS)^{1.05} \quad , \text{當 } UCS \leq 10MPa \dots\dots\dots(2.6)$$

$$M_s = C_r \cdot (UCS) \quad , \text{當 } UCS > 10MPa \dots\dots\dots(2.7)$$

其中 C_r 值是相對密度係數(Coefficient of Relative Density)

$$C_r = \frac{g \cdot \rho_r}{27 \times 10^3} \dots\dots\dots(2.8)$$

ρ_r 為岩石的密度(單位 kg/m^3)、 g 為重力加速度、 27×10^3 為岩石參考單位重 (reference unit weight of rock)。

除了用無圍壓縮強度的計算公式求得 M_s 值外，也可以採用建議的表格 (表 2-1) 透過簡易的現場判斷查表得 M_s 值。

另外凝聚性土壤的 M_s 值以剪力強度作為參考依據(表 2-2)，非凝聚性土壤以標準貫入試驗 SPT-N 值作為參考依據(表 2-3)。

表 2-1 岩石的 M_s 值(Kirsten,1982)

Hardness	Identification in Profile	Unconfined Compressive Strength (MPa)	Mass Strength Number (M_s)
Very soft rock	Material crumbles under firm (moderate) blows with sharp end of geological pick and can be peeled off with a knife; is too hard to cut triaxial sample by hand.	Less than 1,7	0,87
		1,7 - 3,3	1,86
Soft rock	Can just be scraped and peeled with a knife; indentations 1 mm to 3 mm show in the specimen with firm (moderate) blows of the pick point.	3,3 - 6,6	3,95
		6,6 - 13,2	8,39
Hard rock	Cannot be scraped or peeled with a knife; hand-held specimen can be broken with hammer end of geological pick with a single firm (moderate) blow.	13,2 - 26,4	17,70
Very hard rock	Hand-held specimen breaks with hammer end of pick under more than one blow.	26,4 - 53,0 53,0 - 106,0	35,0 70,0
Extremely hard rock	Specimen requires many blows with geological pick to break through intact material.	Larger than 212,0	280,0

表 2-2 凝聚性土壤的 M_s 值(Kirsten,1982)

Consistency	Identification in profile	Vane shear strength (kPa)	Mass strength number (M_s)
Very soft	Pick head can easily be pushed in up to the shaft of handle. Easily molded by fingers.	0-80	0.02
Soft	Easily penetrated by thumb; sharp end of pick can be pushed in 30-40 mm; molded by fingers with some pressure.	80-140	0.04
Firm	Indented by thumb with effort; sharp end of pick can be pushed in up to 10 mm; very difficult to mold with fingers. Can just be penetrated with an ordinary hand spade.	140-210	0.09
Stiff	Penetrated by thumbnail; slight indentation produced by pushing pick point into soil; cannot be molded by fingers. Requires hand pick for excavation.	210-350	0.19
Very stiff	Indented by thumbnail with difficulty; slight indentation produced by blow of pick point. Requires power tools for excavation.	350-750	0.41

表 2-3 非凝聚性土壤的 M_s 值(Kirsten,1982)

Consistency	Identification in profile	SPT blow count	Mass strength number (M_s)
Very loose	Crumbles very easily when scraped with geological pick	0-4	0.02
Loose	Small resistance to penetration by sharp end of geological pick	4-10	0.04
Medium dense	Considerable resistance to penetration by sharp end of geological pick	10-30	0.09
Dense	Very high resistance to penetration of sharp end of geological pick—requires many blows of pick for excavation	30-50	0.19
Very dense	High resistance to repeated blows of geological pick—requires power tools for excavation	50-80	0.41

由此可以看出強度與 M_s 值存在正相關的關係，強度越高則材料抗侵蝕能力越強。

2. 顆粒或塊體尺寸參數(Block or particle size number, K_b) :

K_b 值由岩體的岩心的岩石品質指標 RQD 與節理組數參數 J_n 來定義

(式 2.9) :

$$K_b = RQD / J_n, \text{ 其中 } 5 \leq RQD \leq 100, 1 \leq J_n \leq 5 \dots\dots\dots(2.9)$$

當沒有真正鑽孔取樣時，RQD 值可以用簡單的經驗公式推得(式

2.10) :

$$RQD = \left[105 - \frac{10}{(J_x \cdot J_y \cdot J_z)^{0.33}} \right] \dots\dots\dots(2.10)$$

J_x 、 J_y 、 J_z 分別為 xyz 三個方向上每公尺出現的節理組數。

另外節理組數參數 J_n 非直接使用節理組數的值，而必須查表 2-4 才

能得 J_n 值。

表 2-4 節理組數參數 J_n (Kirsten, 1982)

Number of Joint Sets	Joint Set Number (J_n)
Intact, no or few joints/fissures	1,00
One joint/fissure set	1,22
One joint/fissure set plus random	1,50
Two joint/fissure sets	1,83
Two joint/fissure sets plus random	2,24
Three joint/fissure sets	2,73
Three joint/fissure sets plus random	3,34
Four joint/fissure sets	4,09
Multiple joint/fissure sets	5,00

因此，RQD 越大、節理組數越少則 K_b 越大，即岩體越完整(塊體尺寸越大)抗侵蝕能力越高。

另外在凝聚性土壤與非凝聚性土壤的 K_b 參數以河床材料的 D_{85} 粒徑作為代表性參數，依式 2.11 求得：

$$K_b = 1000D^3 \dots\dots\dots (2.11)$$

由式 2.11 可知，顆粒材料粒徑越大，抗侵蝕能力越高。

3. 弱面或顆粒間抗剪強度參數 (Discontinuity/interparticle bond shear strength number, K_d) :

K_d 值由岩體的節理面粗糙參數(Joint Roughness Number, J_r)與節理改變參數(Joint Alteration Number, J_a)來定義(式 2.12) :

$$K_d = J_r / J_a \quad (2.12)$$

節理面粗糙參數 J_r 代表著不連續面分離的兩個面間間的粗糙度，受到不連續面的形狀影響，如參考圖 2-9，判斷節理的兩面是否分離之後再依不同

的接觸面形狀可以查表 2-5 得此參數。

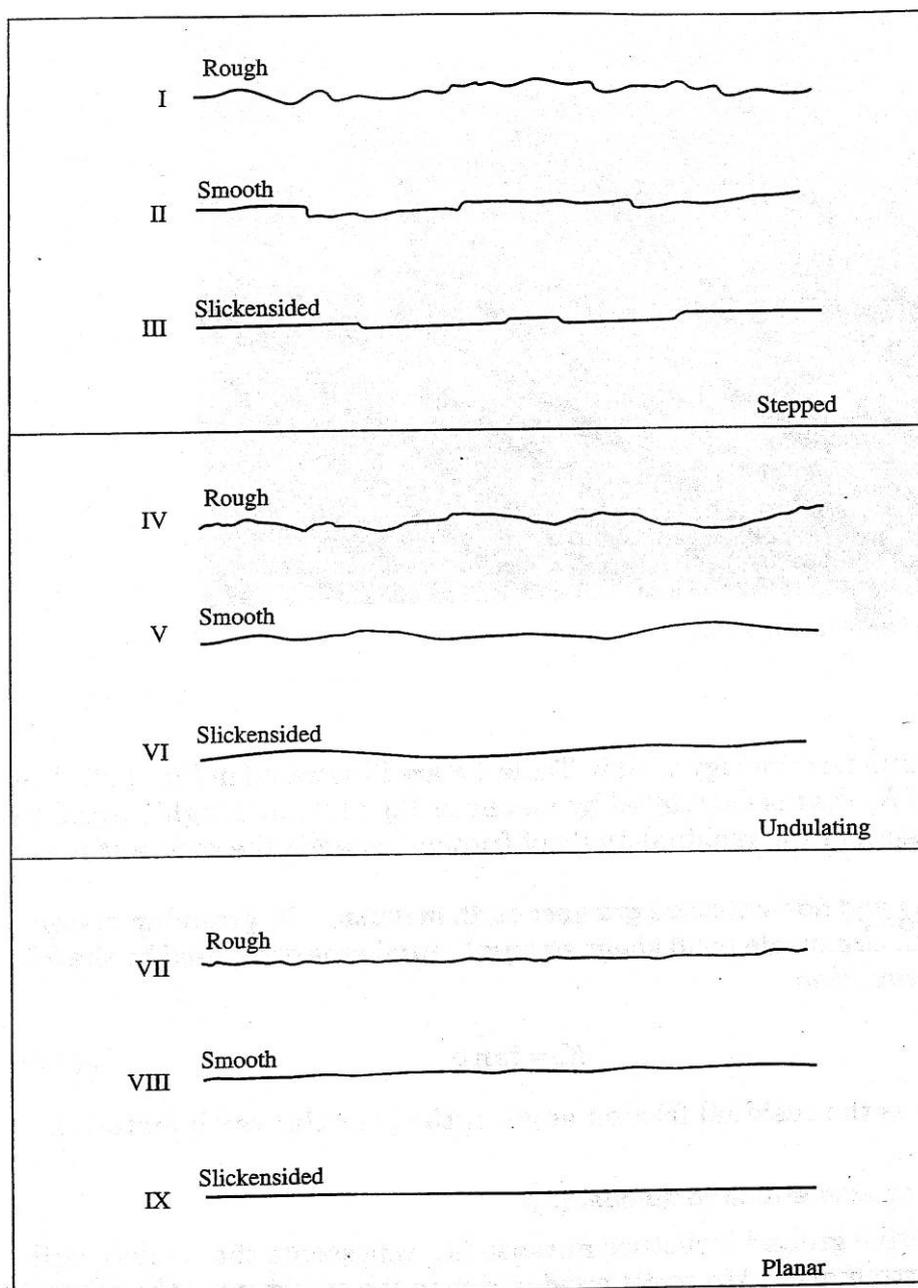


圖 2-9 不連續面的形狀(Barton, 1974)

表 2-5 節理面粗糙參數 J_r (Kirsten, 1982)

Joint Separation	Condition of Joint	Joint Roughness Number
Joints/fissures tight or closing during excavation	Discontinuous joints/fissures	4,0
	Rough or irregular, undulating	3,0
	Smooth undulating	2,0
	Slickensided undulating	1,5
	Rough or irregular, planar	1,5
	Smooth planar	1,0
	Slickensided planar	0,5
Joints/fissures open and remain open during excavation	Joints/fissures either open or containing relatively soft gouge of sufficient thickness to prevent joint/fissure wall contact upon excavation.	1,0
	Shattered or micro-shattered clays	1,0

節理改變參數 J_a 與不連續面的空隙內填充材料有關，如植生、鏽染、凝聚性或非凝聚性材料填充，會影響到不連續面的磨擦力，查表 2-6，判斷節理分離的程度後再檢視空隙的填充材料性質可得此參數。



表 2-6 節理改變參數 J_a (Kirsten, 1982)

Description of Gouge	Joint Alteration Number (J _a) for Joint Separation (mm)		
	1,0'	1,0 - 5,0'	5,0'
Tightly healed, hard, non-softening impermeable filling	0,75	-	-
Unaltered joint walls, surface staining only	1,0	-	-
Slightly altered, non-softening, non-cohesive rock mineral or crushed rock filling	2,0	2,0	4,0
Non-softening, slightly clayey non-cohesive filling	3,0	6,0*	10,0*
Non-softening, strongly over-consolidated clay mineral filling, with or without crushed rock	3,0*	6,0**	10,0
Softening or low friction clay mineral coatings and small quantities of swelling clays	4,0	8,0*	13,0*
Softening moderately over-consolidated clay mineral filling, with or without crushed rock	4,0*	8,0**	13,0
Shattered or micro-shattered (swelling) clay gouge, with or without crushed rock	5,0*	10,0**	18,0

Note: 1. Joint walls effectively in contact.
 2. Joint walls come into contact after approximately 100 mm shear.
 3. Joint walls do not come into contact at all upon shear.
 4. * Values added to Barton et al's data.
 5. ** Also applies when crushed rock occurs in clay gouge without rock wall contact.

在凝聚性與非凝聚性土壤方面，由於沒有節理，顆粒間抗剪強度參數 K_d 值由殘餘摩擦角 ψ 計算(式 2.13)，摩擦角越大表顆粒間抗剪能力越高，抗侵蝕度也越高。

$$K_d = \tan \phi \dots\dots\dots(2.13)$$

4. 地盤構造條件參數(Relative ground structure number, J_s) :

相對地盤構造參數 J_s 和水流流向與岩床較密節理的傾向、節理傾角、以及岩塊的形狀有關。岩塊的形狀因素，採用節理間距比(Ratio of joint spacing, r)來代表岩塊形狀比對抗侵蝕的影響，從水流過岩床的縱剖面(圖 2-10)看兩個方向的岩塊長度比值 y/x 來作 r 的計算(式 2.14)，其中 y/x 值最大取到 8 :

$$r = 1 : y/x \quad \text{when } y/x > 8, \quad r = 1 : 8 \dots\dots\dots(2.14)$$

r 參數能反應出岩石河床材料受到侵蝕時，瘦長的塊體較等邊的塊體抗侵蝕能力高的行為，如圖 2-11。

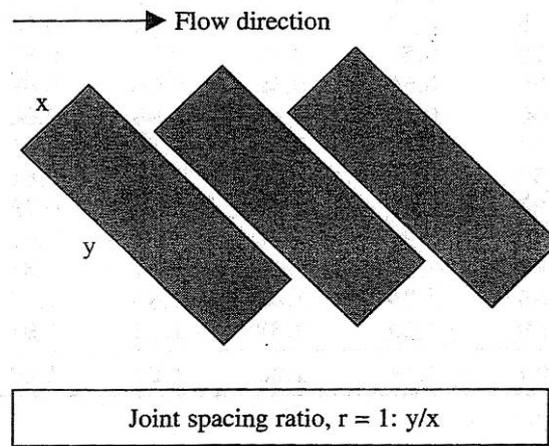


圖 2-10 岩塊長度比值 y/x (Annandale, 2006)

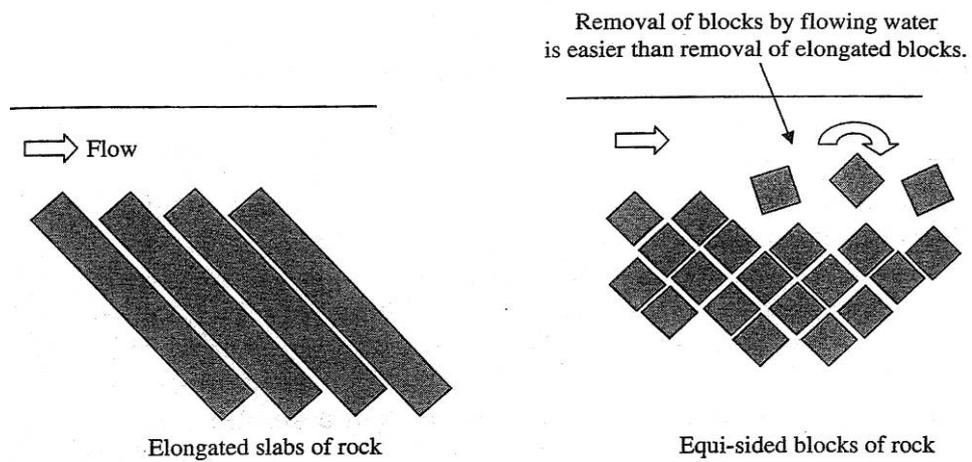


圖 2-11 瘦長的塊體較等邊的塊體抗侵蝕能力高 (Annandale, 2006)

判定河流的流向與岩層位態的關係—岩層位態順著河向或逆著河向將影響地盤構造條件參數，依照上述資料可以由表 2-7 得 J_s 值。

表 2-7 地盤構造條件參數 J_s (Kirsten,1982)

Dip Direction of Closer Spaced Joint Set (degrees)	Dip Angle of Closer Spaced Joint Set (degrees)	Ratio of Joint Spacing, r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	90	1,14	1,20	1,24	1,26
In direction of stream flow	89	0,78	0,71	0,65	0,61
	85	0,73	0,66	0,61	0,57
	80	0,67	0,60	0,55	0,52
	70	0,56	0,50	0,46	0,43
	60	0,50	0,46	0,42	0,40
	50	0,49	0,46	0,43	0,41
	40	0,53	0,49	0,46	0,45
	30	0,63	0,59	0,55	0,53
	20	0,84	0,77	0,71	0,67
	10	1,25	1,10	0,98	0,90
	5	1,39	1,23	1,09	1,01
1	1,50	1,33	1,19	1,10	
0/180	0	1,14	1,09	1,05	1,02
Against direction of stream flow	-1	0,78	0,85	0,90	0,94
	-5	0,73	0,79	0,84	0,88
	-10	0,67	0,72	0,78	0,81
	-20	0,56	0,62	0,66	0,69
	-30	0,50	0,55	0,58	0,60
	-40	0,49	0,52	0,55	0,57
	-50	0,53	0,56	0,59	0,61
	-60	0,63	0,68	0,71	0,73
	-70	0,84	0,91	0,97	1,01
	-80	1,26	1,41	1,53	1,61
	-85	1,39	1,55	1,69	1,77
-89	1,50	1,68	1,82	1,91	
180/0	-90	1,14	1,20	1,24	1,26

Notes: 1. For intact material take $K_s = 1,0$
 2. For values of r greater than 8 take K_s as for r = 8

2.3.3 水流侵蝕能量(Erosive Power of Water)計算

水流的侵蝕能量(Erosive Power of Water)(式 2.4)就是水流能量發生侵蝕消耗的能量，這是 Annandale(2006)認為能將真正造成侵蝕，卻難以估算的變動壓力的量化方法，依照此想法利用學理能計算得不同情況水力條件下的流功(Stream power)計算公式，如自然明渠(Open channel)、水流越頂(Hydraulic headcuts)、水流流過突降點 (Flow over a knickpoint)等，Annandale(2006)提出不同情況下可以直接使用的計算公式：

1. 直線段明渠(Open channel flow—Straight reaches.)

在直線段明渠的情況下，可以由下式計算得水流侵蝕能量：

$$P_{channel} = 7.853\rho\left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{3/2} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\tau_w = \rho g y s$$

τ_w : 牆面剪應力, ρ : 水的密度, g : 重力加速度, y : 水深, s : 河道橫剖面的邊長

2. 水流越頂(Headcut)

在水壩或是攔河堰的下游，水流的情形為 headcut 的狀態(圖 2-12)，此時的水流侵蝕能量主要是由 q_3 的渦流控制，有關這種狀況侵蝕能量的計算

可以利用式 2.16 求得：

$$SP_{impact} = \gamma q y_c \left[\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2} + \frac{y_1}{y_c} - \frac{1}{4} \left(\frac{3}{2} + \frac{\Delta z}{y_c} \right) \left(1 + \frac{1.06}{\sqrt{\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2}}} \right) \right]^2 \dots\dots\dots(2.16)$$

式中 $y_c \left[\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2} + \frac{y_1}{y_c} - \frac{1}{4} \left(\frac{3}{2} + \frac{\Delta z}{y_c} \right) \left(1 + \frac{1.06}{\sqrt{\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2}}} \right) \right]^2$ 的部份即為式 2.4 所提的能量消

散 ΔE 。

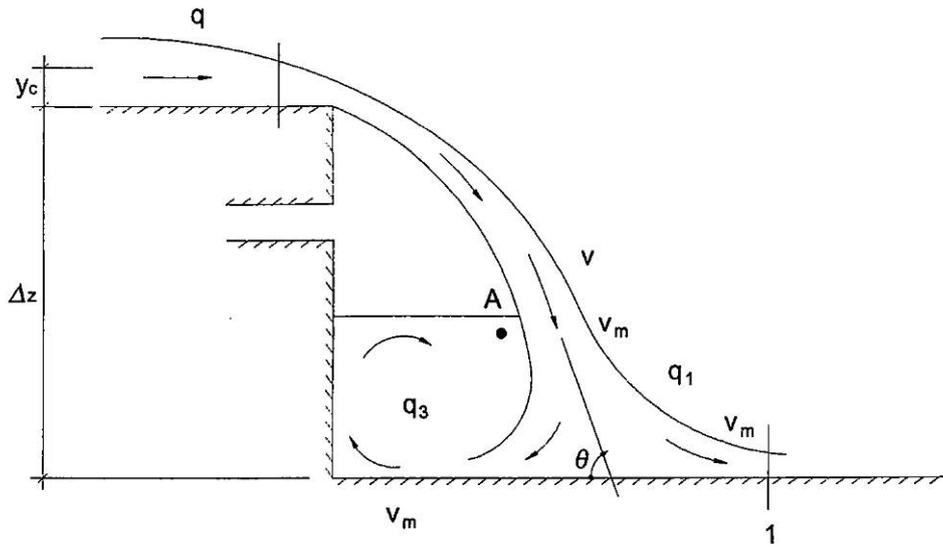


圖 2-12 Headcut 下游水流的侵蝕(Annandale, 2006)

3. 突降點坡度變化(Flow over a knickpoint)

正常河床常會有突降點的產生(圖 2-13)，當能夠明確的知道突降點上下兩側的坡度時，可以用式 2.17 來計算水流流過此突降點對下方造成的侵蝕威力，產生侵蝕威力的主要力量為 q_3 造成的渦流，其中

$\frac{1}{L} \left[\frac{1 - \cos(\theta - \alpha)}{1 + \cos(\theta - \alpha)} K_1 \frac{V_g^2}{2g} + LS_f \right]$ 的部份即為式 2.4 所提的能量消散 ΔE 。

$$SP_{kp} = \gamma \frac{q}{L} \left[\frac{1 - \cos(\theta - \alpha)}{1 + \cos(\theta - \alpha)} K_1 \frac{V_g^2}{2g} + LS_f \right] \dots \dots \dots (2.17)$$

L: 轉換區長度

S_f : 水流流過突降點的平均能量坡降

K_1 : 考慮非流體力學的能量計算，在下游區(zone3)的一個係數

其中 L 與 S_f 的估算在 Annandale(2006)提出的建議裡並沒有明確的公式與理論值，他只有建議可以依工程上的角度利用上下游能量坡降自行判斷，也

讓這個式子的使用上有不確定的因素。

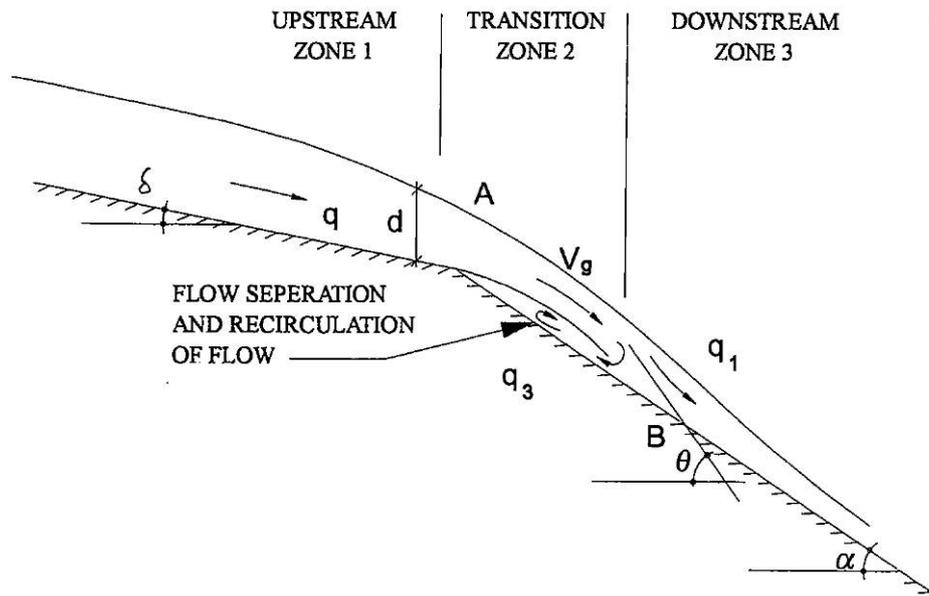


圖 2-13 突降點下游水流的侵蝕(Annandale, 2006)

2.3.4 評估方法

Annandale(1995)的想法是，由水的侵蝕能量(Erosive Power of Water)以及岩石的可能侵蝕度(Erodibility)，可以建立河床的能量消散率(P)與抗侵蝕指標的關係(式 2.18)：

$$P = f(K_h) \dots\dots\dots(2.18)$$

Annandale(2006)收集了南美(Sourth Africa) 與美國農務署(USDA)的現地資料約兩百例，做了各個案例的侵蝕能量計算與 Erodibility Index K_h 值的評分，將它們點在 x 軸(K_h 值)及 y 軸(侵蝕消散率)的圖上(圖 2-14)，依現場觀察侵蝕情況，有發生侵蝕的場址點為實心黑點、沒有發生的則點為空心的白點；如此可以劃分出黑點與白點的界線即發生侵蝕與不侵蝕的界線，

可得關係式 2.18 為式 2.19 與 2.20，其中式 2.19 為圖上右半部代表河床為岩體材料的部分，而式 2.20 能代表左半部河床為顆粒性沉降材料的部份，以 K 值為 0.1 作為分界分段的原因與 K 值估算由顆粒性材料與岩體兩種方法求得有關。

$$Pc = 0.48(K)^{0.44}, K \leq 0.1 \dots\dots\dots(2.19)$$

$$Pc = K^{0.75}, K > 0.1 \dots\dots\dots(2.20)$$

如此一來要使用此評分方法只需要將現地河床條件進行 K_h 值評分，再將 K_h 值與需要了解的河段水流侵蝕威力計算值點在圖圖 2-14 上，若落在圖的上半部則為可能發生侵蝕的情況，反之，落在下半部則為不發生侵蝕的情況；或是直接利用推估的公式，依 K_h 值算出能抵抗侵蝕能量的臨界流功值，若現地的水流侵蝕能量大於臨界值則會發生侵蝕。



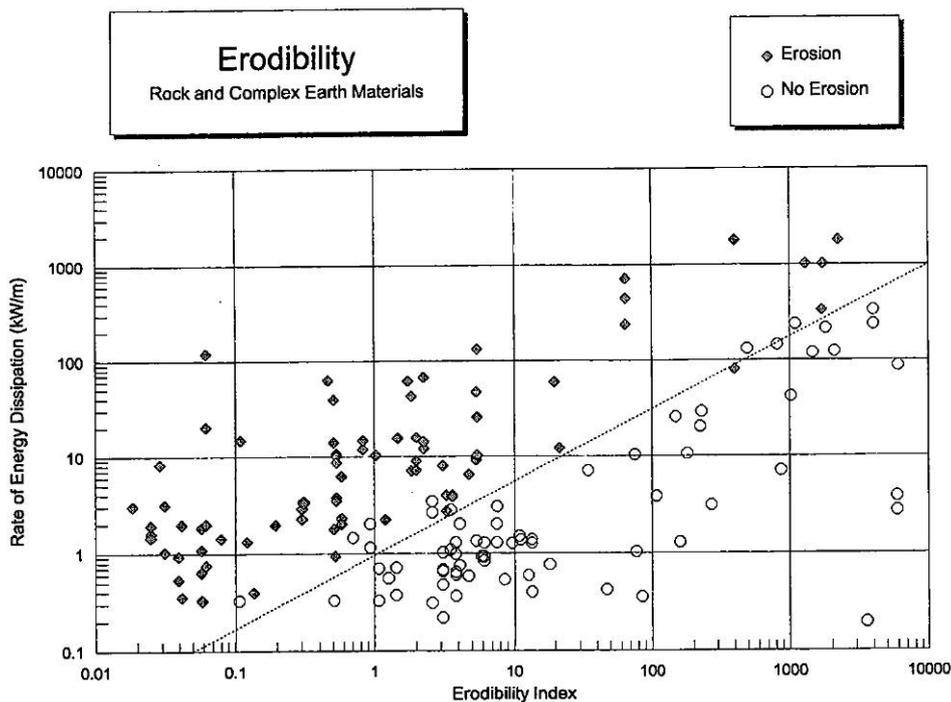


圖 2-14 Erodibility Index 評估岩床侵蝕的方法(Annandale, 1995)

2.3.5 國外應用案例探討

對於 Annandale(2006)提出的沖蝕指標評估方法，國外已有許多使用案例，如加拿大 Gibson Dam 壩下方水流衝擊區的補強計劃、西班牙 Ricobayo Dam 溢洪道出口的侵蝕評估等，以下舉出這兩個案例，作為該方法的使用實例。

1. Gibson Dam

這個案例的場址是在加拿大的 Gibson Dam，這個壩的設計能容許水流在超過壩體設計庫容時適當的越過壩的頂部自然溢流，一但前方衝擊區 (impact area) 受沖蝕超過預期會使壩本身基礎掏空，危及整個壩體的安全，所以對於溢流後水作用在壩體下方的衝擊區能抵抗沖蝕的能力就很重要。

首先該工作團隊先對壩址前方水流衝擊區進行勘查，包括現勘、鑽探、現地實驗等，將所有要使用 Erodibility Index 方法評估的參數皆加以調查，並依材料的不同分成三個區段，分別是混凝土區(concrete)、破碎岩石區(fractured rock)及硬岩基礎區(Hard foundation rock)，然後將得到的參數經計算轉換成 K_h 值，為了工程上的保守起見三個區域都取了最低的 K_h 值與最高的 K_h 值，然後依照 K_h 值經由公式得到容許的水流流功(表 2-8)。

表 2-8 Gibson Dam K_h 值與容許侵蝕威力值計算(Frizell, 2006)

Material	Erodibility Index (K)	Threshold Stream Power Density (P_c) (kW/m^2)
concrete - low	6400	715
concrete - high	8500	885
fractured rock - low	200	53
fractured rock - high	400	89
Hard foundation rock - low	5100	603
Hard foundation rock - high	12000	1146

依照這個抗沖蝕評估的方法，有了容許水流侵蝕威力後，只需要與不同水流流量情況下真正的侵蝕威力作比較就可以知道是否發生侵蝕，所以他們選用了 1964 年發生的歷史洪水事件，在洪峰流量 $Q=18500 \text{ ft}^3/\text{s}$ 下，水流越過壩頂 3.23ft 來進行演算，由這個資料可以估得衝擊區的面積(圖 2-15)與作用在衝擊區的水流侵蝕威力(表 2-9)

最後把 K_h 值與水流流功值點在畫有啟動侵蝕臨界值的圖上(圖 2-16)，他們發現破碎岩石在這樣的流量造成的侵蝕威力下可能會無法抵抗而造成

侵蝕，因此在他們提出的結論裡建議，此區進行補強的工作。



圖 2-15 衝擊區的面積 (Frizell, 2006)

表 2-9 作用在衝擊區的水流流功(Frizell, 2006)

El. Nappe under side	Area of jet footprint (ft ²)	Stream power density (ft-lb/s/ft)	Stream power density (ft-lb/s-ft ²)	Stream power density (HP/ft ²)	Stream power density (kW)
4729.00	7.43	176966	23809	43	347
4728.00	7.59	188843	24897	45	363
4727.00	7.66	200720	26212	48	383
4726.00	7.72	212597	27541	50	402
4725.00	7.78	224474	28868	52	421
4724.00	7.83	236351	30186	55	441
4719.00	8.08	295735	36600	67	534
4714.00	8.32	355120	42690	78	623
4709.00	8.55	414505	48465	88	707
4704.00	8.78	473889	53945	98	787
4699.00	9.02	533274	59150	108	863
4694.00	9.25	592659	64101	117	935
4689.00	9.48	652043	68815	125	1004
4684.00	9.70	711428	73308	133	1070
4679.00	9.93	770812	77596	141	1132
4674.00	10.16	830197	81691	149	1192
4670.00	10.35	877705	84638	154	1239
4669.00	10.70	889582	83152	151	1213
4664.00	12.46	948966	76152	138	1111
4661.00	13.52	984597	72828	132	1063
4660.00	13.87	996474	71833	131	1048
4659.00	14.22	1008351	70887	129	1035
4654.00	15.99	1067736	66783	121	975
4649.00	17.75	1127120	63495	115	927
4644.00	19.51	1186505	60801	111	887
4639.00	21.28	1245889	58553	106	855
4634.00	23.04	1305274	56650	103	827
4629.00	24.80	1364659	55017	100	803
4624.00	26.57	1424043	53601	97	782
4619.00	28.33	1483428	52361	95	764
4614.00	30.09	1542813	51266	93	748
4609.00	31.86	1602197	50293	91	734
4604.00	33.62	1661582	49421	90	721
4599.00	35.38	1720966	48637	88	710
4594.00	37.15	1780351	47927	87	699
4589.00	38.91	1839736	47281	86	690
4584.00	40.67	1899120	46691	85	681
4579.00	42.44	1958505	46151	84	674
4574.00	44.20	2017890	45653	83	666
4569.00	45.96	2077274	45194	82	660

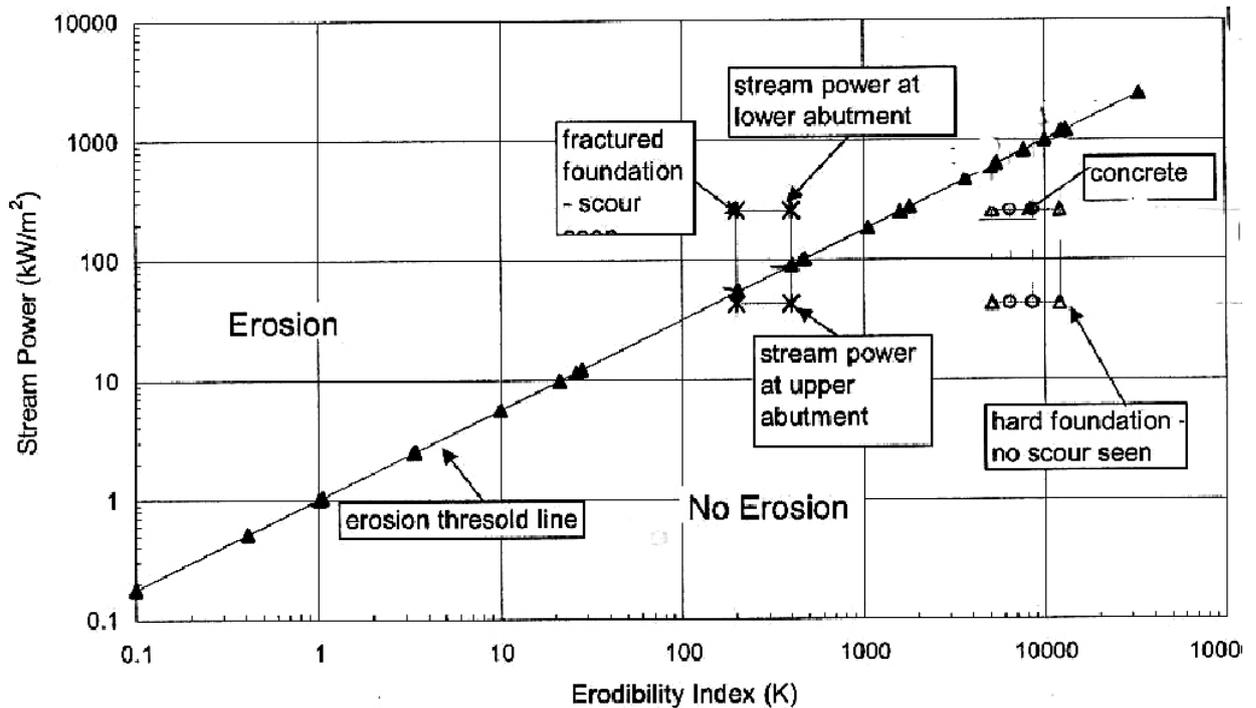


圖 2-16 K_h 值與水流流功關係圖(Frizell, 2006)

2. Ricobayo Dam

這個案例是針對一個溢洪道的下游靜水池沖蝕探討(圖 2-17)，靜水池基礎有一個背斜通過(圖 2-18)，調查區域被分為區域 1 與區域 2，岩石材料為節理發達的花崗硬岩，有 A 與 B 兩組節理，值得注意的是區域 1 的部分為沖蝕主要的部分，節理條件使河床呈現順向河的情況，侵蝕作用甚劇，並且有類似突降點後退蔓延的情形。

透過參數的取得，計算研究區域的花崗岩體與混凝土區的 K_h 值及容許水流侵蝕威力得表 2-10，計算上一樣有上下限值作為工程保守考量彈性使用。

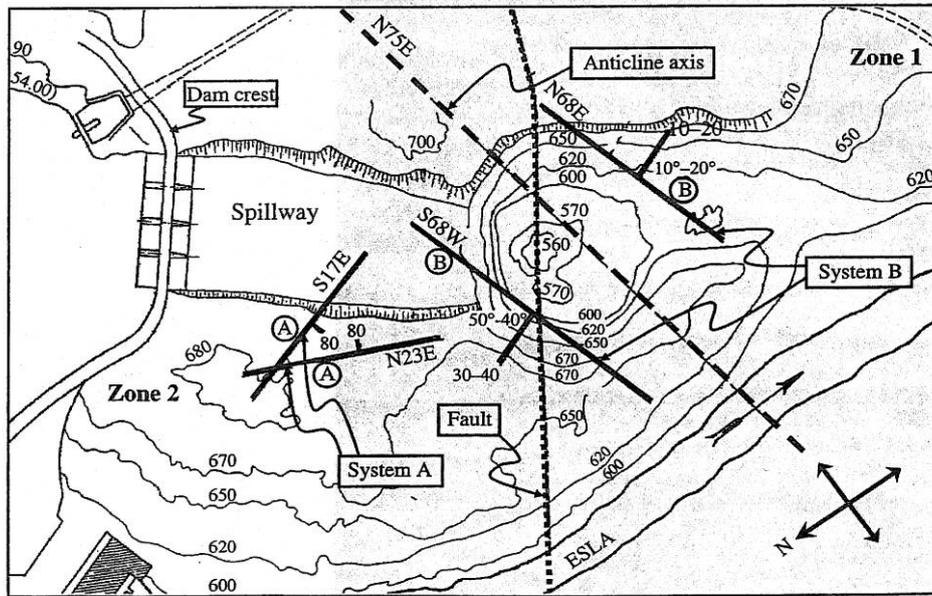


圖 2-17 Ricobayo Dam 場址(Annandale, 2006)

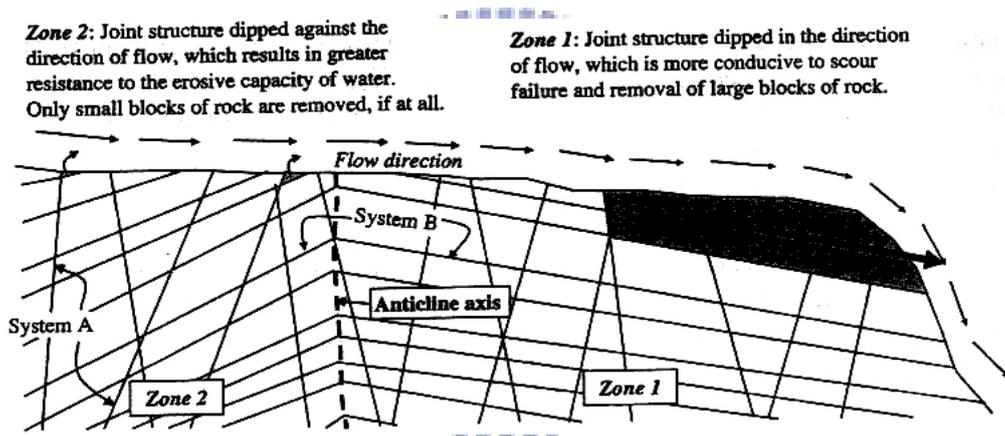


圖 2-18 Ricobayo Dam 溢洪道縱剖面圖(Annandale, 2006)

表 2-10 K_h 值及容許水流流功(Annandale, 2006)

Unit	UCS (Mpa)	M_s	RQD	J_n	K_b	J_r	J_a	K_d	J_s	Erodibility index (K)	Resisting power (kW/m^2)
Granite-zone 2-high	75	75	70	2.73	25.64	1.50	2	0.75	0.5	721.15	139.16
Granite-zone 2-low	75	75	70	2.73	25.64	1.50	4	0.38	0.5	360.58	82.75
Concrete (high)	35	35	100	1.5	66.67	3.00	1	0.58	1	1347.15	222.36
Concrete (low)	15	15	100	1.5	66.67	3.00	1	0.58	1	577.35	117.78

本例共取 4 次歷史洪水事件作分析以計算流功(表 2-11)。這個研究針對

4 次歷史事件，還原當時的河床條件(圖 2-19)，進行容許水流流功與真正水流侵蝕能量的比較(圖 2-20.圖 2-21.圖 2-22.圖 2-23，其中圖 2-20 與圖 2-21 代表 1935 年與 1936 年歷史洪水事件)。分析結果發現確實會對床底材料造成侵蝕，虛線為評估的可能侵蝕深度，成果接近真正的侵蝕情況。但是圖 2-22 與圖 2-23 發現，在 1939 年與 1962 年發生的洪水事件下，床底岩石材料理應發生侵蝕破壞，但是確沒有實際發生侵蝕的現象，他們認為這是因為侵蝕到某種強度很高的材料，因此圖 2-22 與圖 2-23 將高程 570m 以下的材料以問號顯示。

表 2-11 四次歷史洪水事件流量(Annandale, 2006)

Date	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)
1935	1000	24.7
1936	1280	31.6
1939	3230	79.8
1962	4800	118.5

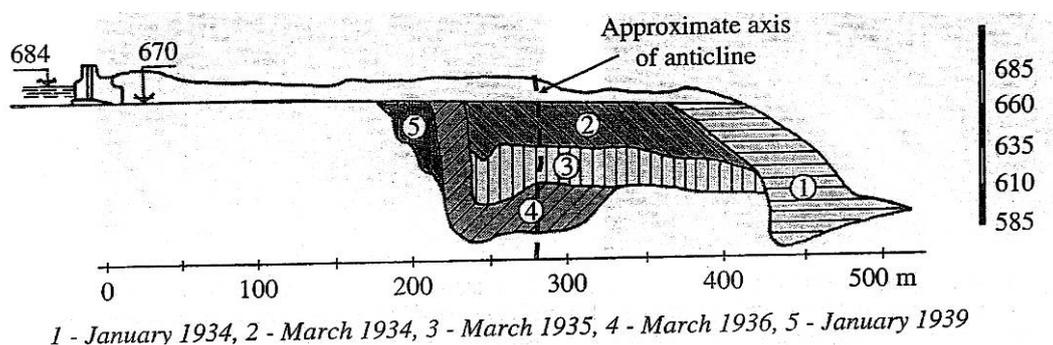


圖 2-19 還原歷年河床條件(Annandale, 2006)

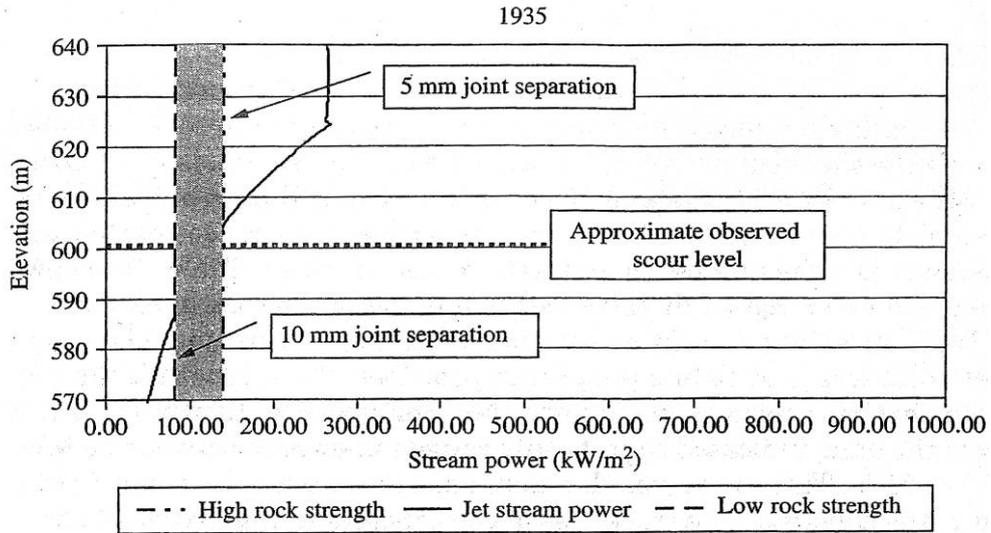


圖 2-20 1935 年洪水(Annandale, 2006)

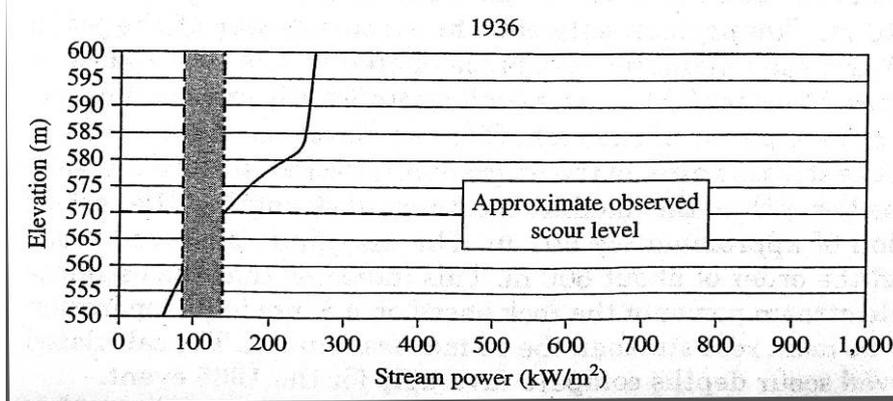


圖 2-21 1936 年洪水(Annandale, 2006)

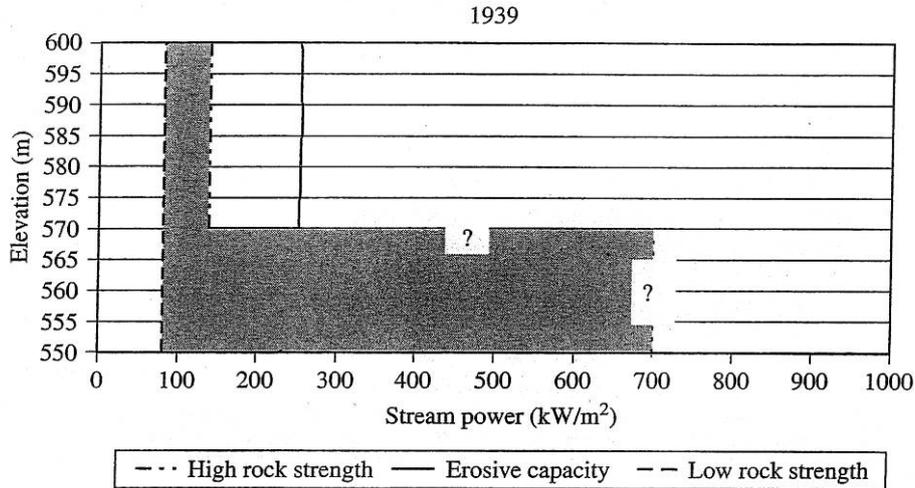


圖 2-22 1939 年洪水(Annandale,2006)

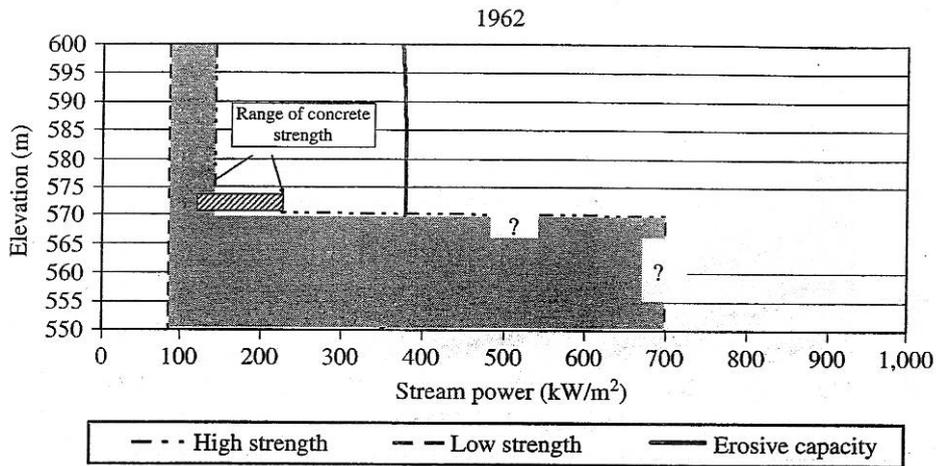


圖 2-23 1962 年洪水(Annandale,2006)

2.4 文獻回顧總結

岩床之材料型態除基本岩性之差異，又可依弱面是否發達略分為完整塊狀岩石與弱面發達之岩體兩類，其暴露在河床/河岸所受之沖蝕作用可因主控之沖蝕機制之差異而有甚大的差異。如 2.1 節討論，過去地形學或地質學之相關學者對於岩床下切沖蝕之既有研究大致係以流域的尺度著手，其關心的問題重心大多集中於大範圍之沖蝕趨勢對地形地貌發育之關係，該等學理原則上並不適合由大地工程角度來探討局部區域之相關沖蝕問題（譬

如攔河堰、跨河構造等下游河床、河岸之穩定與保護)。

由文獻整理大致可歸納得：1. 當弱面間距在 1m 以內，岩塊抽離機制往往是岩床沖蝕之主控機制；2. 當岩石相當完整，鮮少弱面時，則源自懸浮載或河床載之顆粒衝撞所造成之磨蝕作用，則往往成為岩床沖蝕之主控機制；3. 軟岩經風化作用材料弱化後，易於碎裂瓦解而被強烈水流帶走；4. 高速水流下或渦流高雷諾數條件下之穴蝕機制；5. 上游較陡河床發生之土石流促成之大量切削作用等。國內有許多攔河堰、跨河構造之所在區域之岩層屬於年代相對年輕或受構造影響而較為破碎之岩層，經常出現過度沖蝕之現象，不但危及河床、河岸之穩定，甚而威脅構造物之安全，現階段仍缺乏合宜之學理與分析方法能定量地掌握問題的關鍵。

Annandale(2006) 考慮水流侵蝕力 (Erosive Power of Water)與岩石河床抗沖蝕指標(Erodibility index K_h value)提出的抗沖蝕指標評估方法，能使用在顆粒性材料與岩石材料上，透過一套完整的抗沖蝕指標評分便能推估岩石河床的抗沖蝕能力。本研究認為結合現地機制與地質條件，搭配 Annandale(2006) 的抗沖蝕指標評估方法能對岩石河床做出合理的抗沖蝕評估。

第三章、研究方法與研究區域

3.1 研究方法

3.1.1 研究流程

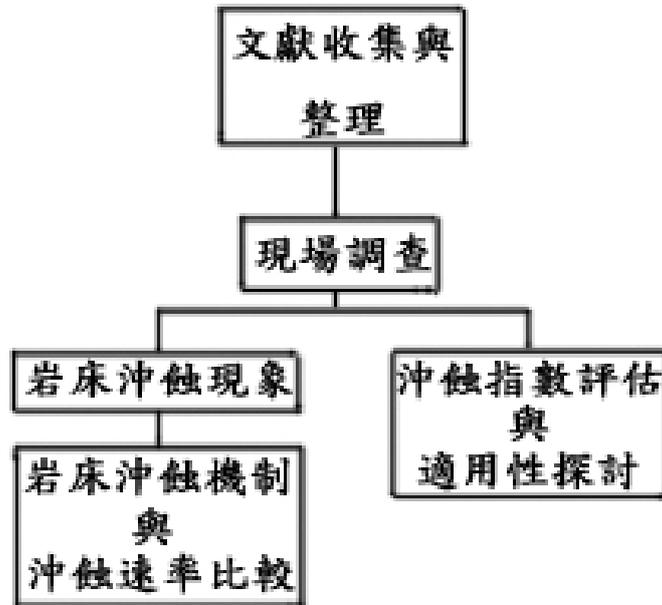


圖 3-1 研究流程

本研究流程如圖 3-1 所示，研究將由文獻回顧與研究區域資料蒐集出發，在取得現場調查所需要的基本資料，如區域地質圖、地形圖、航空照片等後，安排符合研究所需的現場調查，現場調查的重點在 3.1.2 節會詳述，有了現場調查的資料後，在與原本有的資料相結合，經過彙整，期望能得到兩個重要的研究成果：1.研究區域軟岩河床的沖刷機制沖刷並更進一步做不同機制下沖蝕速率的比較；2.Erodibility Index 沖蝕指數評估方法的實際運用與適用性的探討。

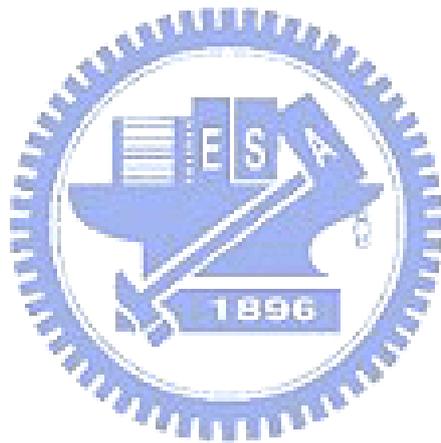
3.1.2 現場調查

為了達成本研究兩個重要的目的，提出現地岩床侵蝕機制與侵蝕指標評估方法的探討，在初步研究的階段，完整的現場調查是本研究的首要重點，透過現場調查不僅能觀察到現地實際發生的侵蝕行為與國外現有文獻的侵蝕行為之異同，並提出符合本研究區域的現地河床侵蝕機制，另一個重點是經調查可取得完整的侵蝕參數，如岩體強度、不連續面的組數、形狀、狀態等以供評估現有岩床抗侵蝕力指教的適用性。所以現場調查除了觀察現地不同的侵蝕行為(如岩塊的抽離行為、懸浮載與河床載的磨蝕行為、沖蝕坑的發展、突降點的後退蔓延等)；針對沖蝕指數的參數所需要的項目加以詳細調查記錄，調查紀錄項目包含下列幾點：

1. 岩體本身的強度，做為材料強度參數 M_s 值的參考
2. 岩體的節理組數與出現間距，做為 RQD 與節理組數參數 J_n 值的參考，以得到顆粒或塊體尺寸參數 K_b 。
3. 風化的岩體表面觀察不連續面的形狀(圖 2-9)作為節理面粗糙參數 J_r 的參考，並觀察不連續面內填充材料，若不連續面有分離的狀況則需要記錄分離的間距 d 作為節理改變參數 J_a 的參考，以得到弱面或顆粒間抗剪強度參數 K_d 。
4. 記錄岩石河床的位態(走向/傾角)與河流的流向夾角，配合第 3 點的節理間距能得到岩快長度比值 r (式 2.14)，能得到地盤構造條件參數

J_s。

野外調查除了詳細紀錄每張照片的拍攝方位、拍攝描述與手持 GPS 定位記錄拍攝地點外，每筆調查資料依表 3-1 詳盡記錄上述四個要點。



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 。(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

3.2.2 研究區域劃定

根據歷年來八掌溪河川治理報告(76 年、89 年、95 年)資料的整理，有關河床受到侵蝕的河段，多指出為觸口攔河堰到南二高橋段，即歷年斷面測量樁號 113 號到 94 號之間，因此將本研究的研究區域定為八掌溪主流之觸口攔河堰到南二高橋的河段(圖 3-2)

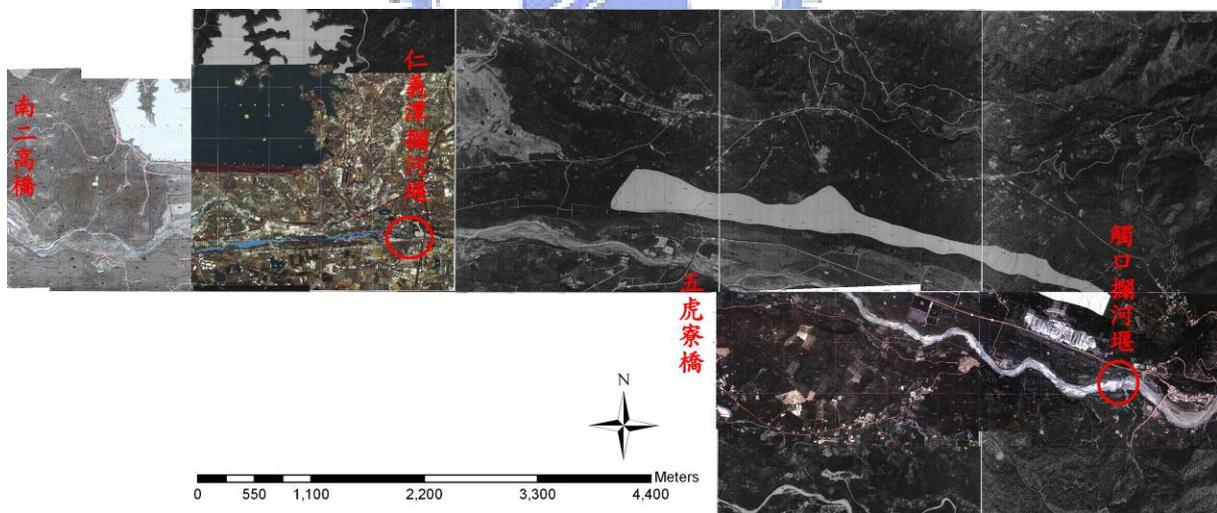


圖 3-2 研究區域劃定

3.2.3 區域地質

八掌溪流域之區域地質圖如圖 3-3 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嵛山層(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° 向西傾。各地層之描述如表 3-2。

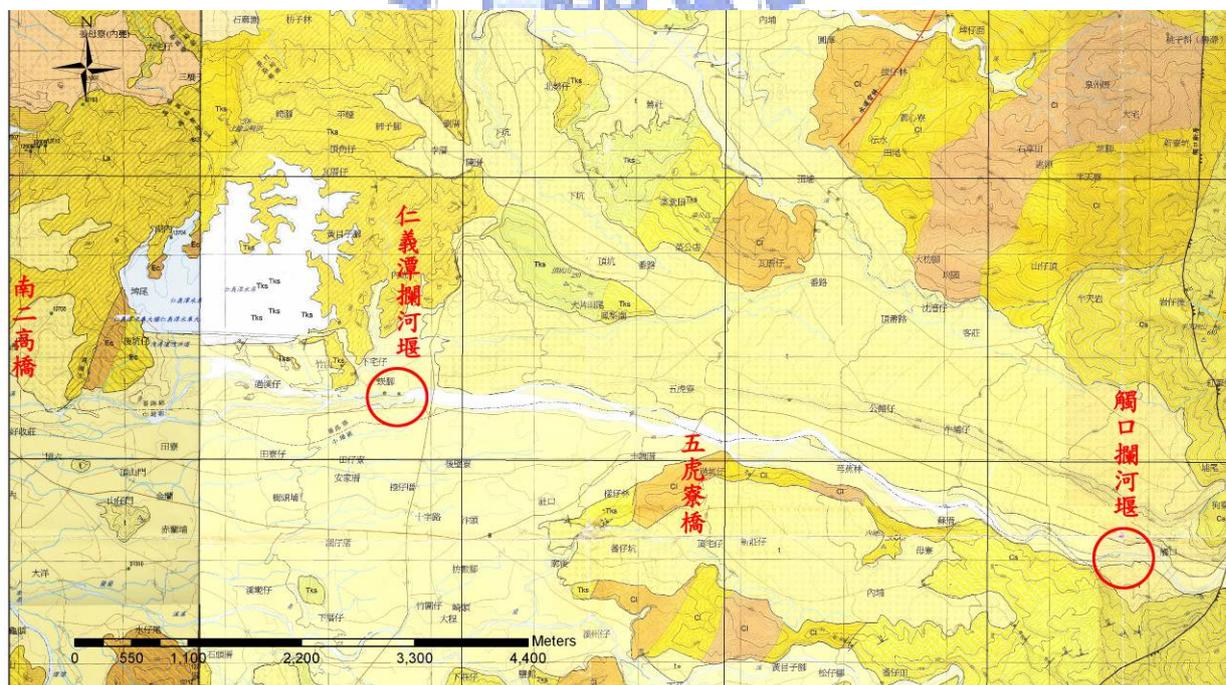


圖 3-3 研究區域 1/25000 地質圖(八掌溪仁義潭攔河堰下游冲刷河段治理方案之研析報告(2006))

表 3-2 研究區域 1/25000 地質圖各岩層描述

岩層名	層厚	岩性
(4)沖積層		由未固結、大小不一之礫石、砂及黏土所組成。
(3)六雙層	約 1000 公尺	大部份由暗灰色至青灰色泥岩和夾有砂岩和粉砂岩互層的頁岩組成，六雙層的上部和下部也含有少數較厚的砂岩層。
(2)二重溪層	約 400 公尺	由淺灰色至灰色細至中粒砂岩夾灰色泥岩，灰色泥岩夾淺灰色粉砂岩及泥質砂岩的互層組成
(1)崁下寮層	540~1000 公尺	此層有時被認為相當於卓蘭層的上段，但中油的地質圖則認為可以與香山砂岩段的下部相對比，以頁岩和一些砂岩互層為主。

(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

3.2.4 研究區域人工構造物

研究區域河段之橋樑共計 3 座，分別為南二高橋、仁義潭大橋、五虎寮橋；

攔河堰共計 3 座，分別為仁義潭攔河堰、五虎寮攔河堰、觸口攔河堰；固

床工共計 8 座，其中仁義潭攔河堰至心上橋有 2 座、心上橋至南二高橋有 6 座，根據 95 年八掌溪仁義潭攔河堰下游冲刷河段治理報告的調查資料可知仁義潭攔河堰下游人工跨河構造物的歷史資料整理如圖 3-4 與圖 3-5：

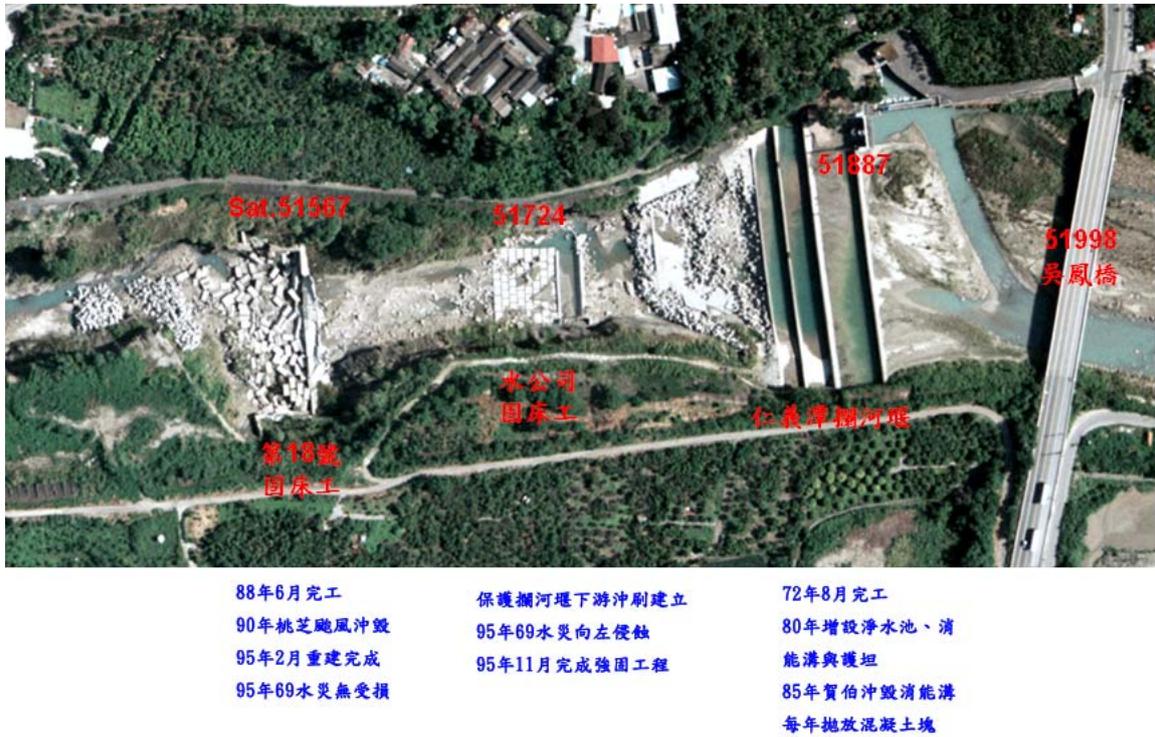


圖 3-4 仁義潭攔河堰下游固床工(攔河堰至 18 號固床工)

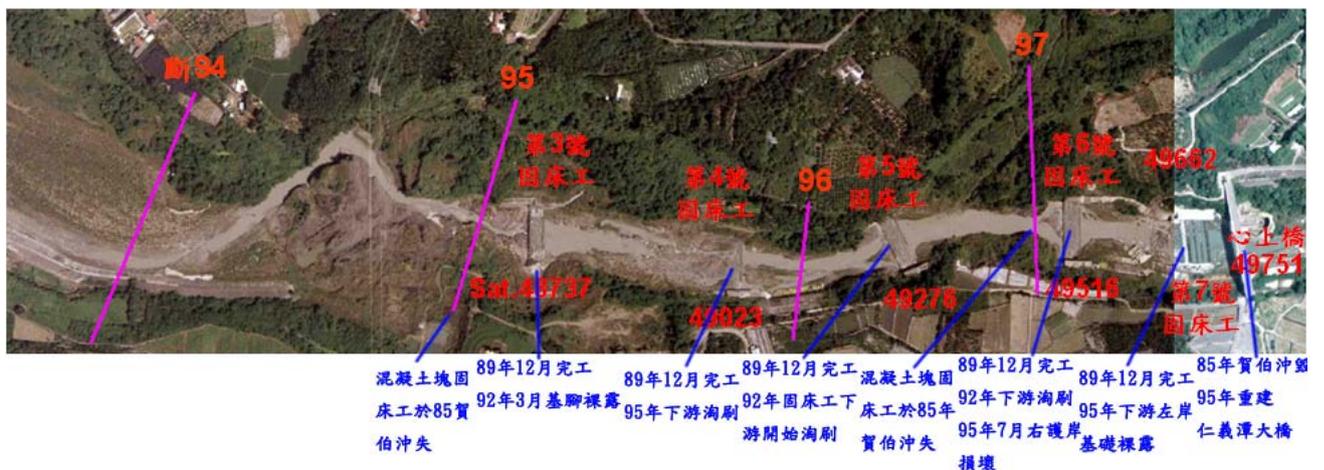


圖 3-5 仁義潭攔河堰下游固床工(心上橋至 3 號固床工)

3.2.5 研究區域歷年斷面資料

由歷年斷面測量資料，除了可以得到各斷面歷年來的變化外，將各斷面侵蝕的深槽低點連線，會得到歷年的河床縱剖面連線

1. 歷年斷面變化

歷年斷面變化主要由歷年大斷面測量資料套繪得，可以作為研究區域的地形資料使用，本研究搜集的大斷面測量資料包括民國 78、85、90 及 94 四個年份，套繪結果與八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006)所做結果相同，置於附錄 II 供本研究引用。

2. 歷年河床縱剖面線(深槽最低點連線)

將歷年斷面測量深槽的最低點連線，可得研究區域河床侵蝕高程的河道縱剖面圖(圖 3-6)，由圖可以看出研究區域以仁義潭攔河堰為界能分成兩個區域：1. 仁義潭攔河堰下游劇烈沖蝕段、2. 觸口攔河堰至仁義潭攔河堰的平均沖蝕段。

依縱剖面高程求得不同河段的平均坡降如圖 3-7，由圖 3-7 可知在民國 78 年河床侵蝕高程沒有明顯變動前，整個研究區域的平均坡降約為 1/62(紅色虛線)；民國 95 年時河床的平均坡降可以分為三段，分別為觸口攔河堰至仁義潭攔河堰段的 1/71(藍色虛線)、仁義潭攔河堰正下方的 1/12、100 斷面至 95 斷面的 1/109(藍色虛線)。

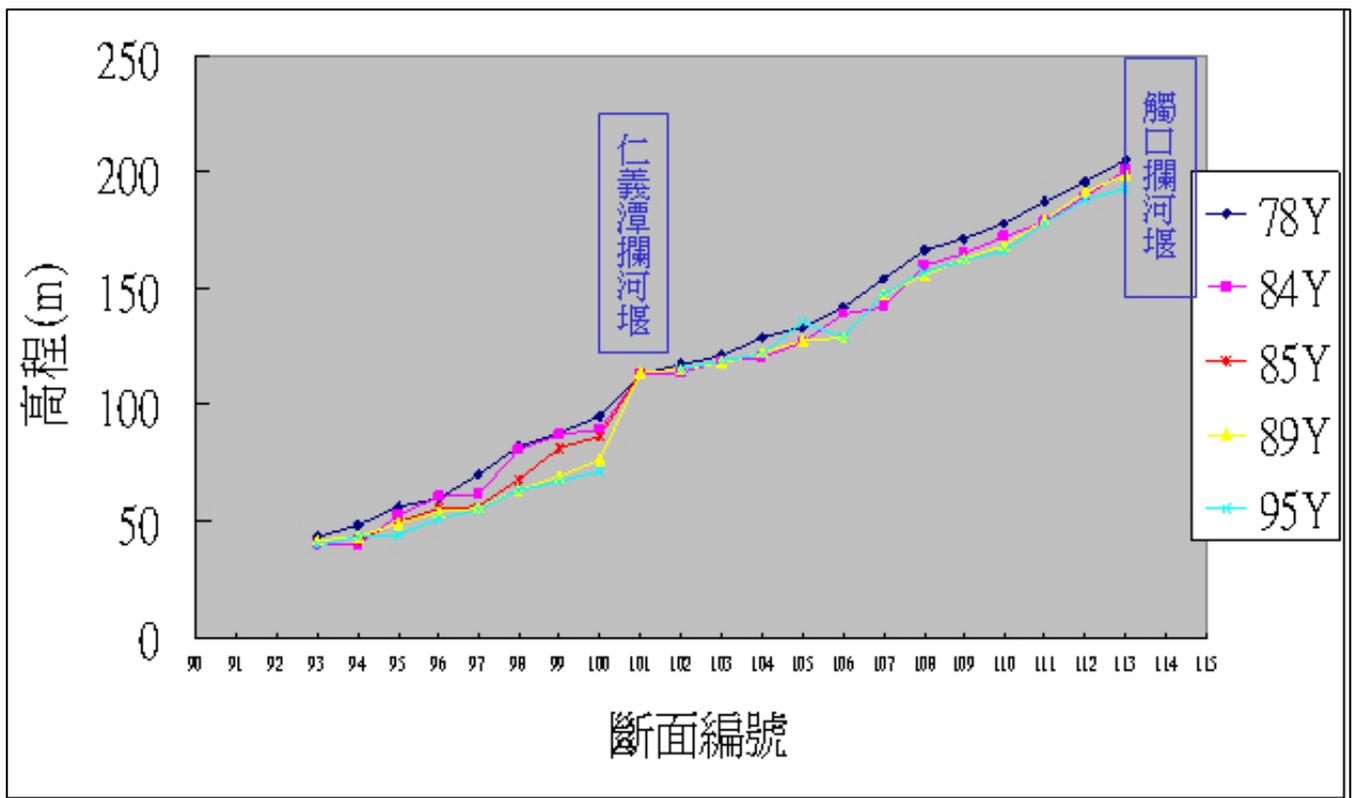


圖 3-6 歷年深槽最低點連線

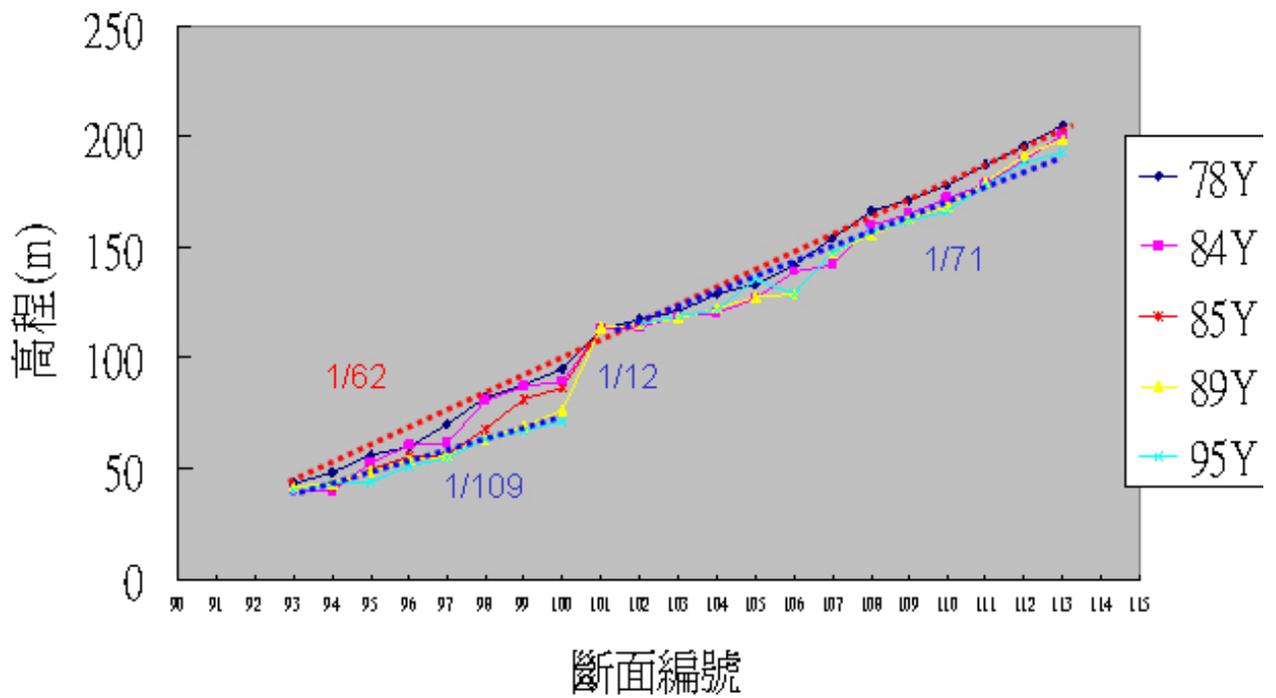


圖 3-7 河床平均坡降

3.2.6 研究區域既有鑽孔與試驗資料

1.地質鑽孔

八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006)共進行了三個鑽孔的地質鑽探，鑽探孔號分別為 DH-1、DH-2 及 DH-3，資料整理如表 3-3。

表 3-3 研究區域既有鑽孔資料整理(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

孔號	位置	岩性
DH-1	103 斷面與 104 斷面左岸	灰色泥岩、砂岩及細粒砂岩互層
DH-2	第 3 號固床工下游左岸	表層為土黃色風化細粒砂岩，底部為灰色細粒砂岩
DH-3	忠義橋上游 90 斷面右岸	淺灰色、砂及灰色砂岩質礫石

2.既有室內試驗資料

八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006)對鑽孔取樣所做室內試驗資料如下：

A.土壤一般物理性質試驗如附錄 I

由試驗結果由鑽孔取樣的土壤為無塑性之沉泥質砂、沉泥質不良級配礫石及低塑性沉泥組成。

B.岩石一般物理性試驗如附錄 I

由試驗結果，鑽孔 DH-1 與 DH-2 所在位置岩盤大致屬灰色砂質泥岩。

C. 岩石單軸壓縮試驗

岩層之單壓強度由室內實驗結果，介於 2.273~5.042 kg/cm²。

3. 本研究採樣進行室內試驗結果

本研究在研究區域進行現場採樣，取回現地河床新鮮的岩塊進行液塑性試驗，現場採樣點位置如圖 3-8、試驗結果如圖 3-9 與表 3-4。由試驗結果可知研究區域內岩層土壤含量主要為沉泥質粉土，且部分具有塑性，此結果與前述鑽孔取樣所做室內試驗結果稍有不同。

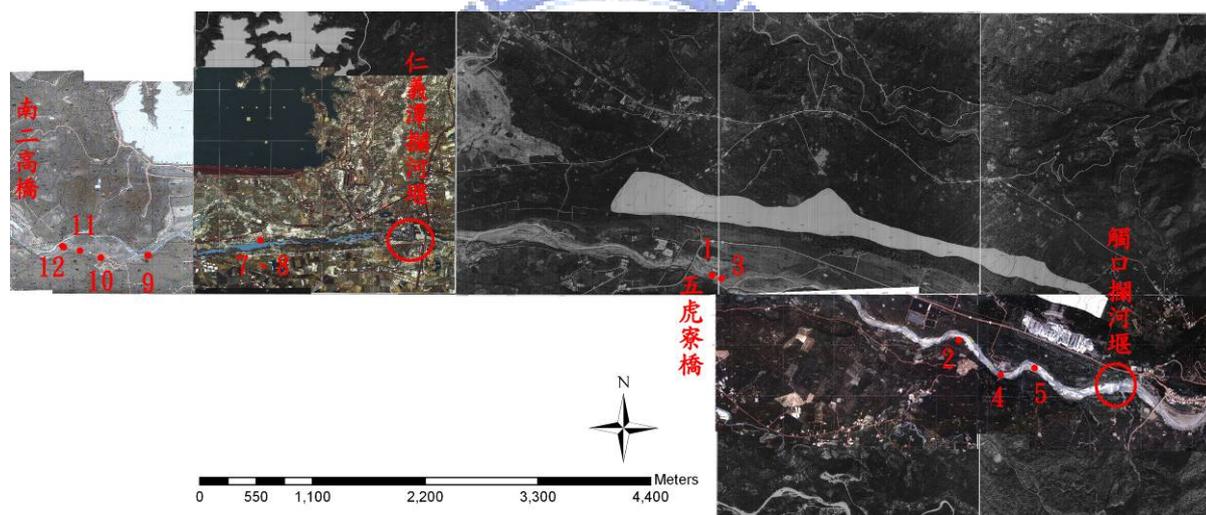


圖 3-8 採樣點位置

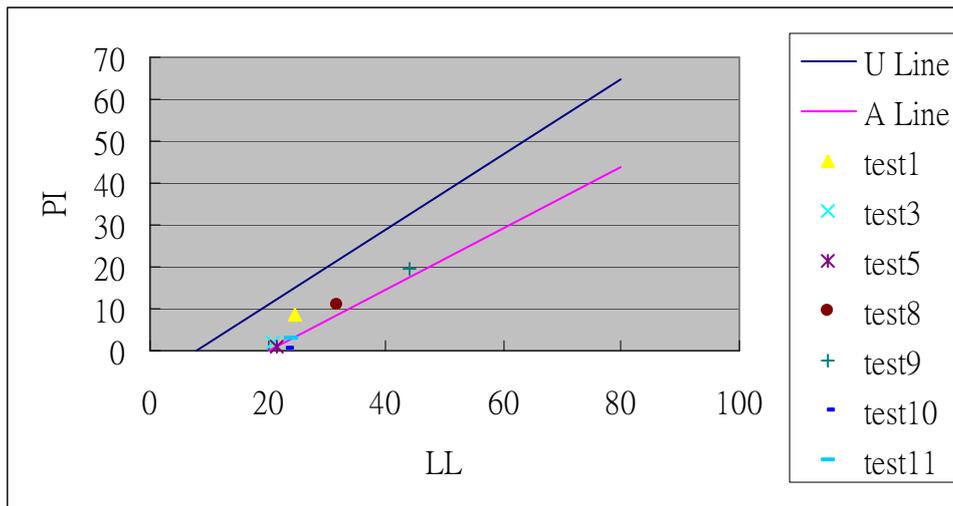


圖 3-9 液塑性試驗結果

表 3-4 液塑性試驗結果與土壤分類

試體編號	LL	PL	PI	統一土壤分類
1	24.63	16.24	8.39	CL
2				-
3	20.78	18.89	1.89	ML
4				-
5	21.49	20.30	1.19	ML
6				-
7				-
8	31.78	20.79	10.99	CL
9	44.09	24.76	19.33	CL
10	23.36	23.02	0.34	ML
11	23.92	20.86	3.06	ML
12				-

第四章、研究結果與討論

4.1 現地調查結果

本研究為探討軟弱岩層河床的沖蝕機制、抗沖蝕力及沖蝕速率，而以八掌溪劇烈沖蝕河段進行詳細的現地調查。調查內容包括河道地質及沖蝕現象；並依據調查結果建立軟弱岩層之沖蝕機制，最後以現有斷面測量資料及水文資料，提出其平均沖蝕速率及檢討 Annandale(2006)之抗沖蝕指標評估方法在台灣的適用性。

4.1.1 研究區 1/5000 地質圖與地質剖面圖製作

本論文針對圖 4-1 的二個區段，由現地調查所得露頭資料，配合河道縱剖面高程(圖 3-6)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 區域地質圖加以說明，分別為：區域 1.仁義潭攔河堰下游至 94 號斷面、區域 2.觸口堰下游至 112 斷面兩個部份。

1. 仁義潭攔河堰下游至 94 號斷面間含地質剖面圖(圖 4-2)。

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 公分至數十公尺不等，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 米。

此區量得的 80 組岩層位態經節理統計軟體 Dips 統計後所得結果如圖

4-3(層面)與圖 4-4(節理面)。由圖 4-3 得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；由圖 4-4，除了散布在圓四周的解壓節理外，某些岩層存在著一組或兩組節理，其 dip 的 normal 指向(trend)在立體投影圖上分別為 135° 與 315° 兩個方向。

有關此區地質圖上的岩性如表 4-1，岩層排列順序由下至上。

表 4-1 仁義潭攔河堰下游至 94 號斷面間地質剖面分層

岩層	照片	層厚(m)	岩性
Ms-Mh	4-1(a)	170	灰色極厚層泥岩與灰色極厚層泥質頁岩的互層
SS/Ms	4-1(b)	80	黃色厚層砂岩夾灰色厚層泥岩
Ms-Mh	4-1(c)	250	灰色極厚層泥岩與灰色極厚層泥質頁岩的互層
Ss-Sh	4-1(d)	120	黃色厚層砂岩與黃色厚層砂質頁岩互層
Slt-Mh	4-1(e)	140	黃色極厚層粉砂岩與灰色極厚層泥質頁岩互層

照片 4-1 仁義潭攔河堰下游至 94 號斷面間岩層照片

	
<p>照片 4-1(a) Ms-Mh</p>	<p>照片 4-1(b) Ss/Ms</p>
	
<p>照片 4-1(c) Ms-Mh</p>	<p>照片 4-1(d) Ss-Sh</p>
	
<p>照片 4-1(e) Slt-Mh</p>	

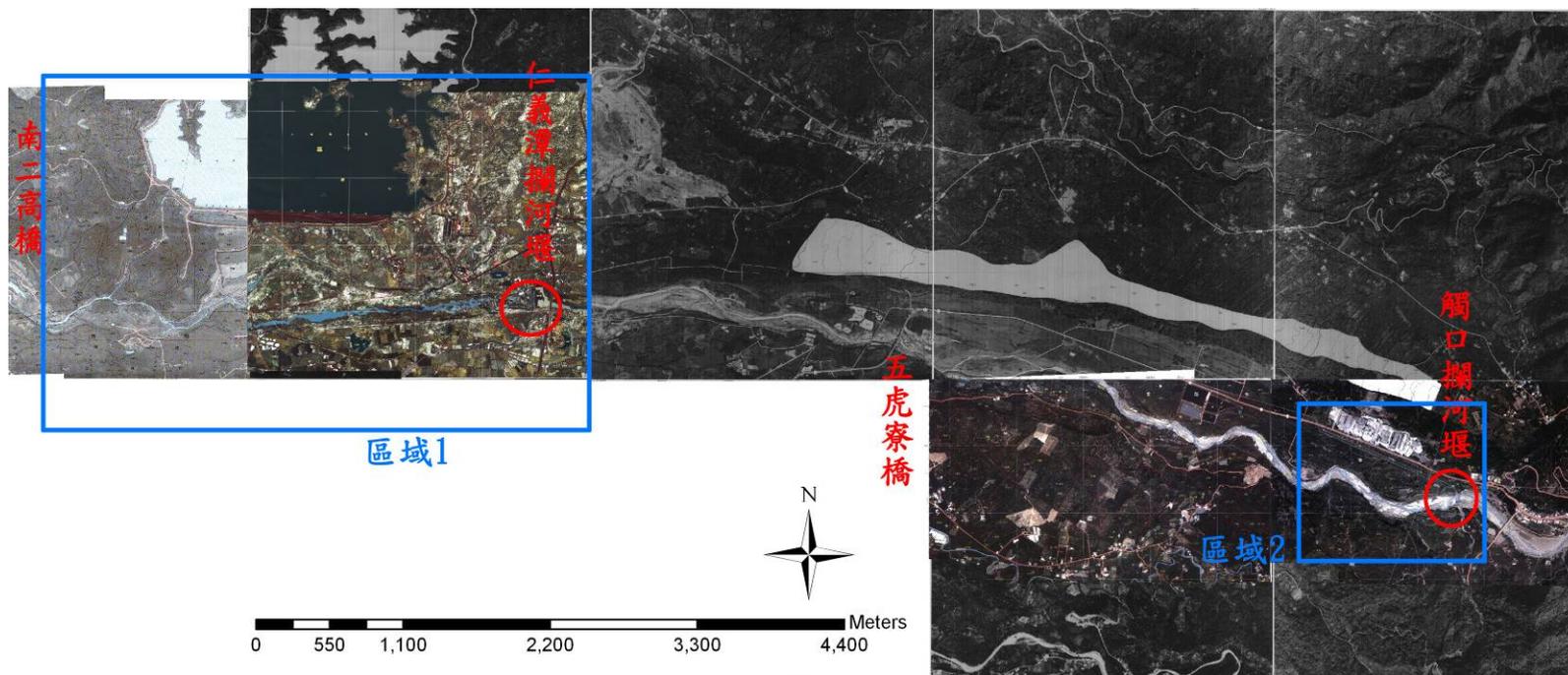


圖 4-1 研究區 1/5000 地質圖繪製區域

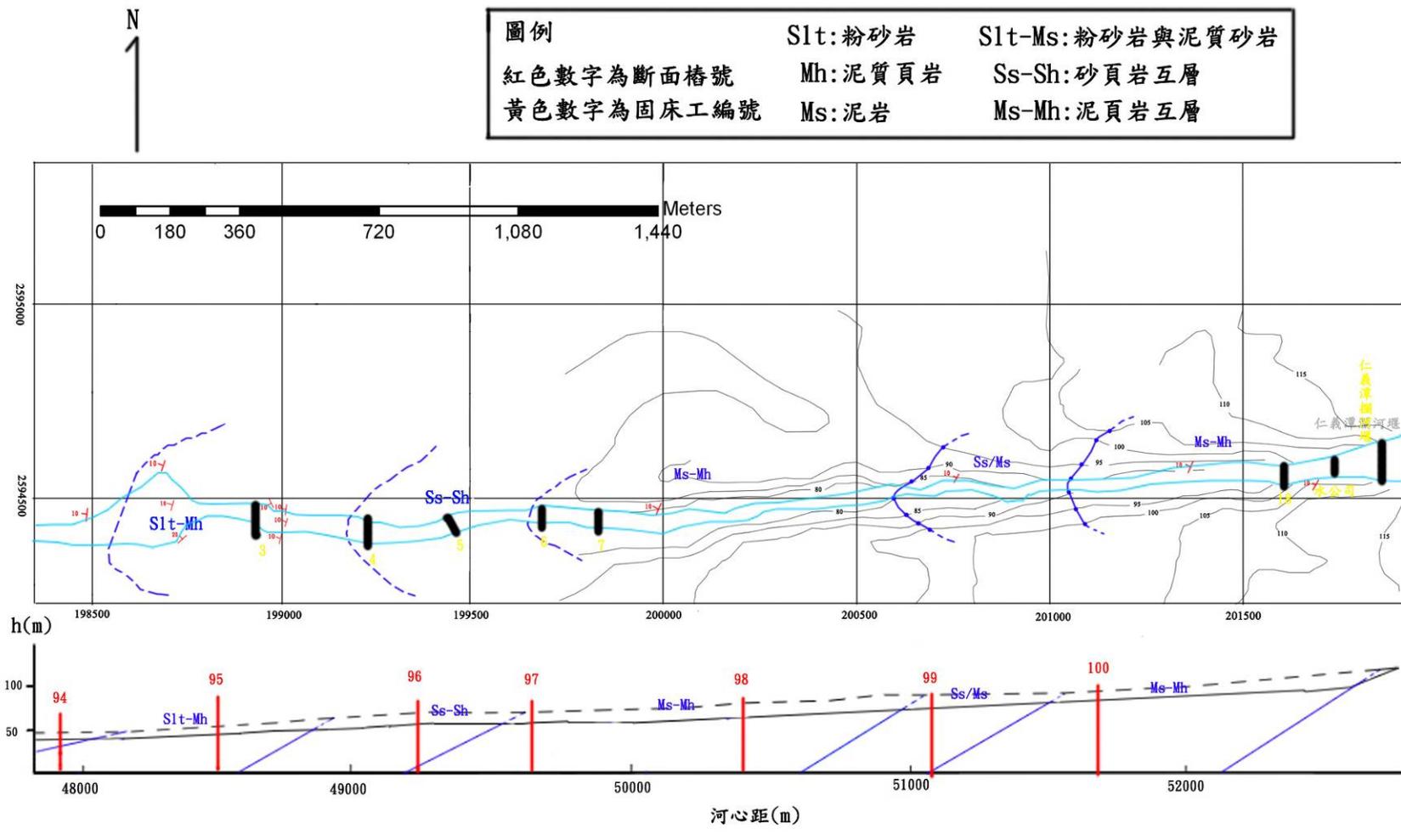


圖 4-2 仁義潭攔河堰至 94 斷面 1/5000 區域地質圖與剖面圖

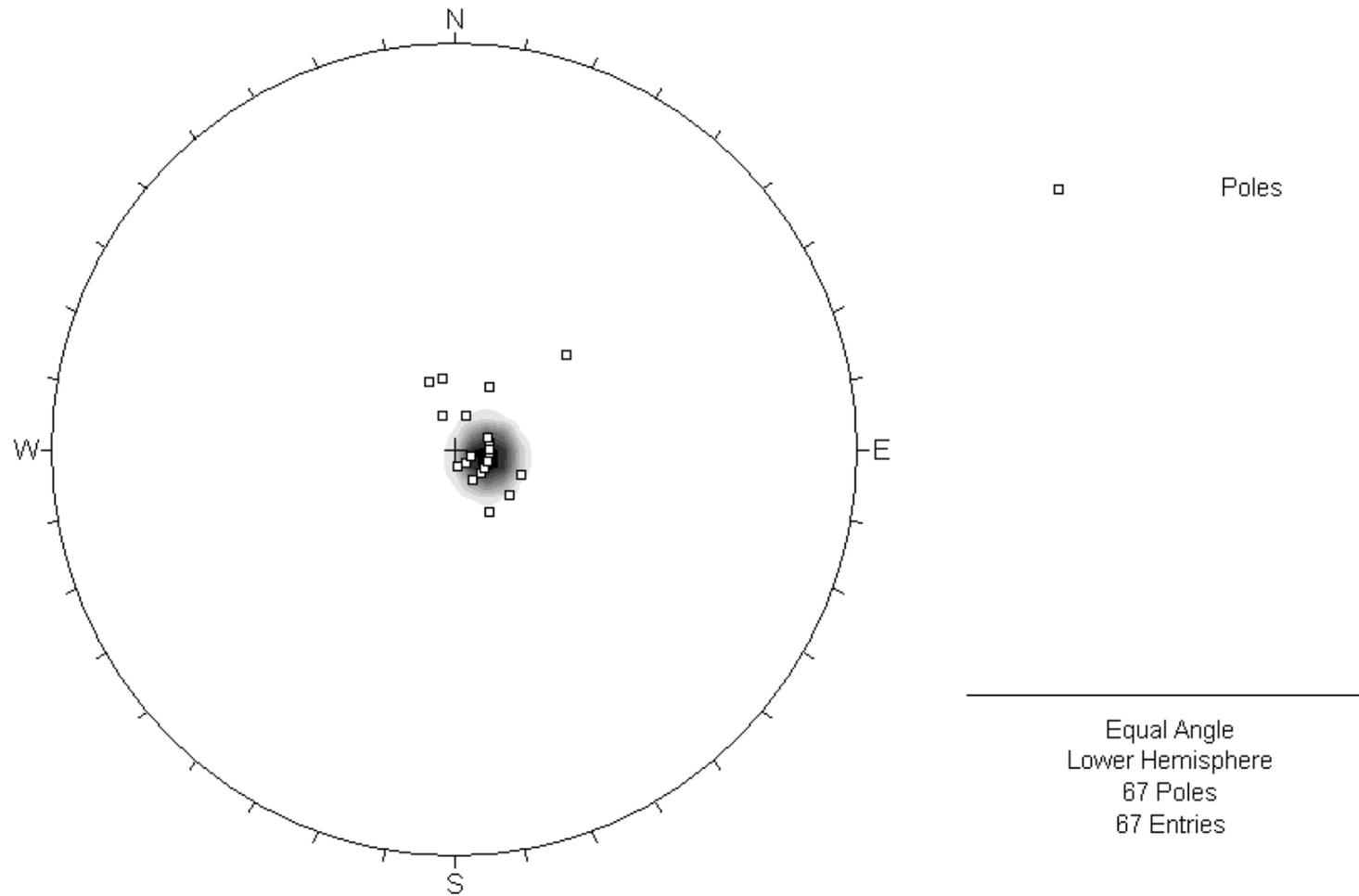


圖 4-3 仁義潭攔河堰至 94 斷面露頭層面統計

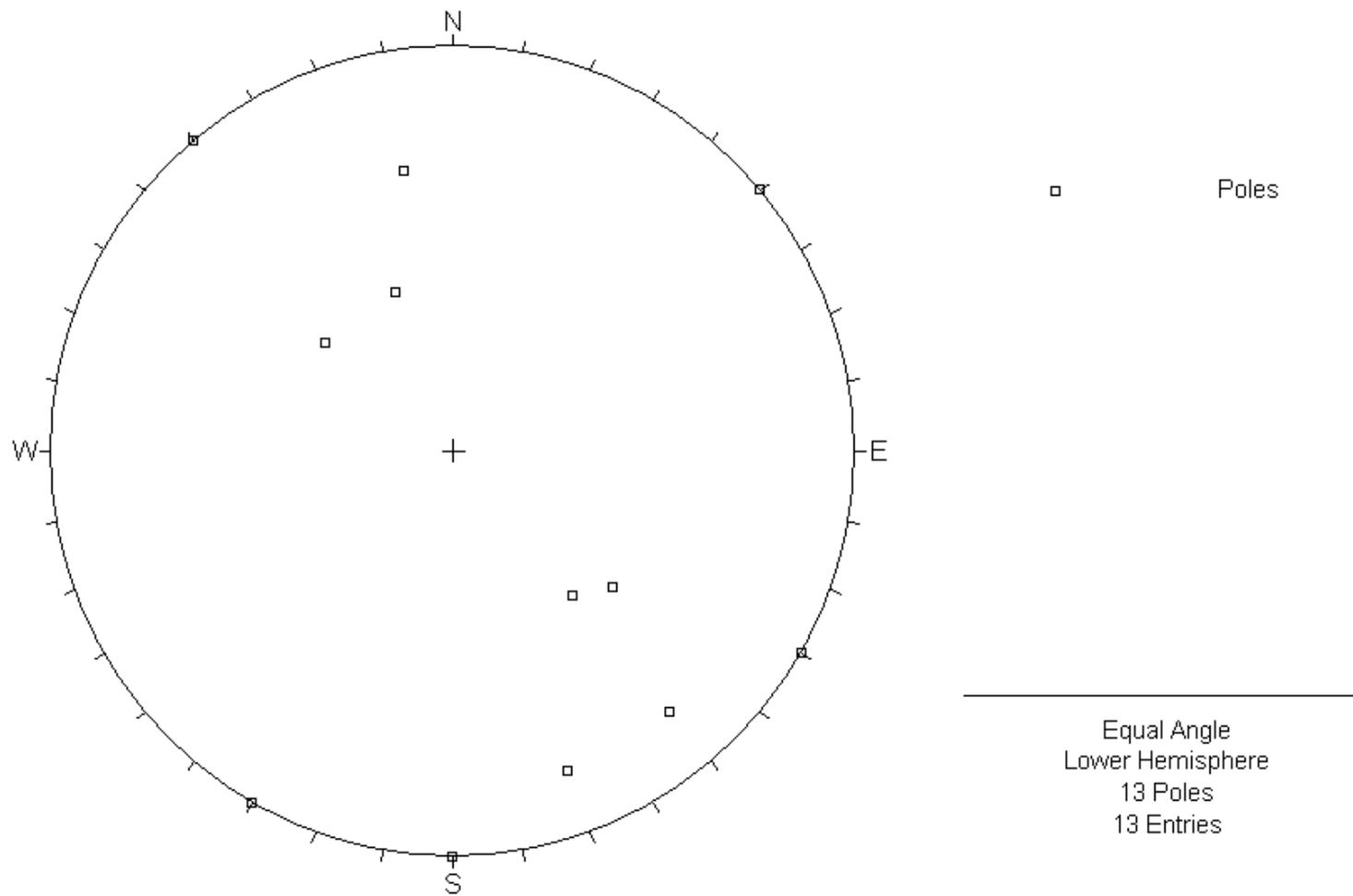


圖 4-4 仁義潭攔河堰至 94 斷面節理統計

2. 觸口堰下游至 112 斷面區域地質圖(圖 4-5)：

經現場調查發現，在研究區域內觸口堰至五虎寮橋之間的岩性與仁義潭攔河堰下游岩性有所差異。這個區域裡常可見灰色厚層泥岩表面泡水後經太陽照射產生乾縮、乾裂而完全失去強度變成粉碎狀的情形，這種泥岩層新鮮與風化後的樣貌完全不同。本研究將觸口堰下游至 112 斷面間將這種泥岩細分成 Ms1 至 Ms4 四種，圖中紅色標記點為現場調查有紀錄的點，紀錄結果與編號位於附錄 V。



此區量得的 31 組岩層位態資料經節理統計軟體 Dips 統計後所得結果如圖 4-6(層面)與圖 4-7(節理面)，主要的岩層不連續面為層面，位態約為 N60E、10NW，可以發現這個區域與仁義潭攔河堰下游的岩層走向有些微不同，另外這區的露頭位態調查資料統計後也顯示了有幾組散亂的節理或解壓節理分布，由圖 4-7 得節理多落在圓的右上角與右下角，可以解釋這些節理為沿著河道流向的解壓節理，且角度多為垂直向；河流流向在此區有許多轉折因此產生有順向河與順層河的流況。

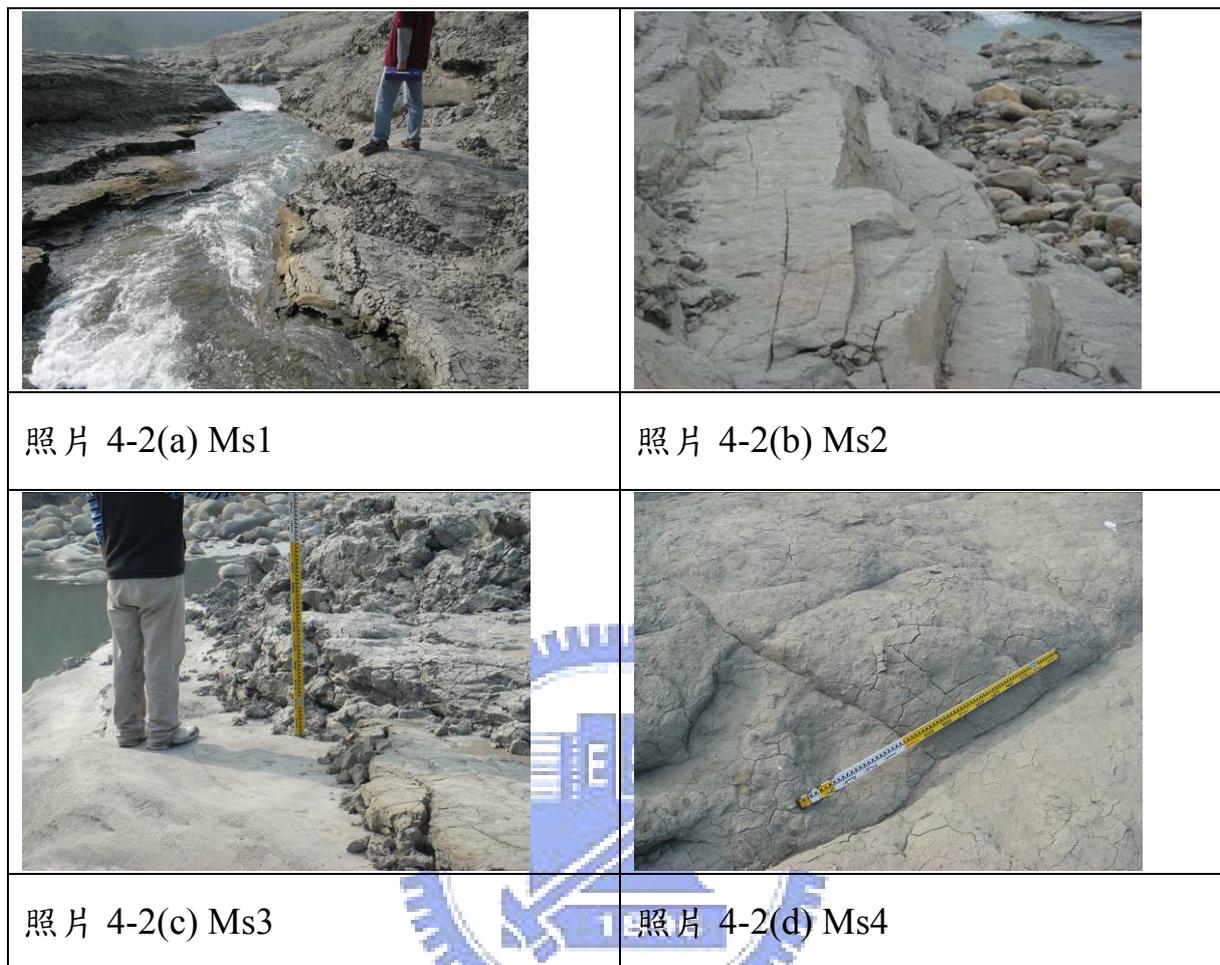
有關此區地質圖上的岩性如表 4-2，岩層排列順序由下至上。

表 4-2 觸口攔河堰至 112 斷面間地質剖面分層

岩層	照片	層厚(m)	岩性
Ms1	4-2(a)	10 以上	只有一組層理的厚層灰色泥岩
Ms2	4-2(b)	20	有一組層理與解壓節理的厚層灰色泥岩
Ms3	4-2(c)	20	表面嚴重乾裂的厚層灰色泥岩
Ms4	4-2(d)	50 以上	具有一組層理與兩組節理的黃色砂質泥岩



照片 4-2 觸口攔河堰至 112 斷面間岩層照片



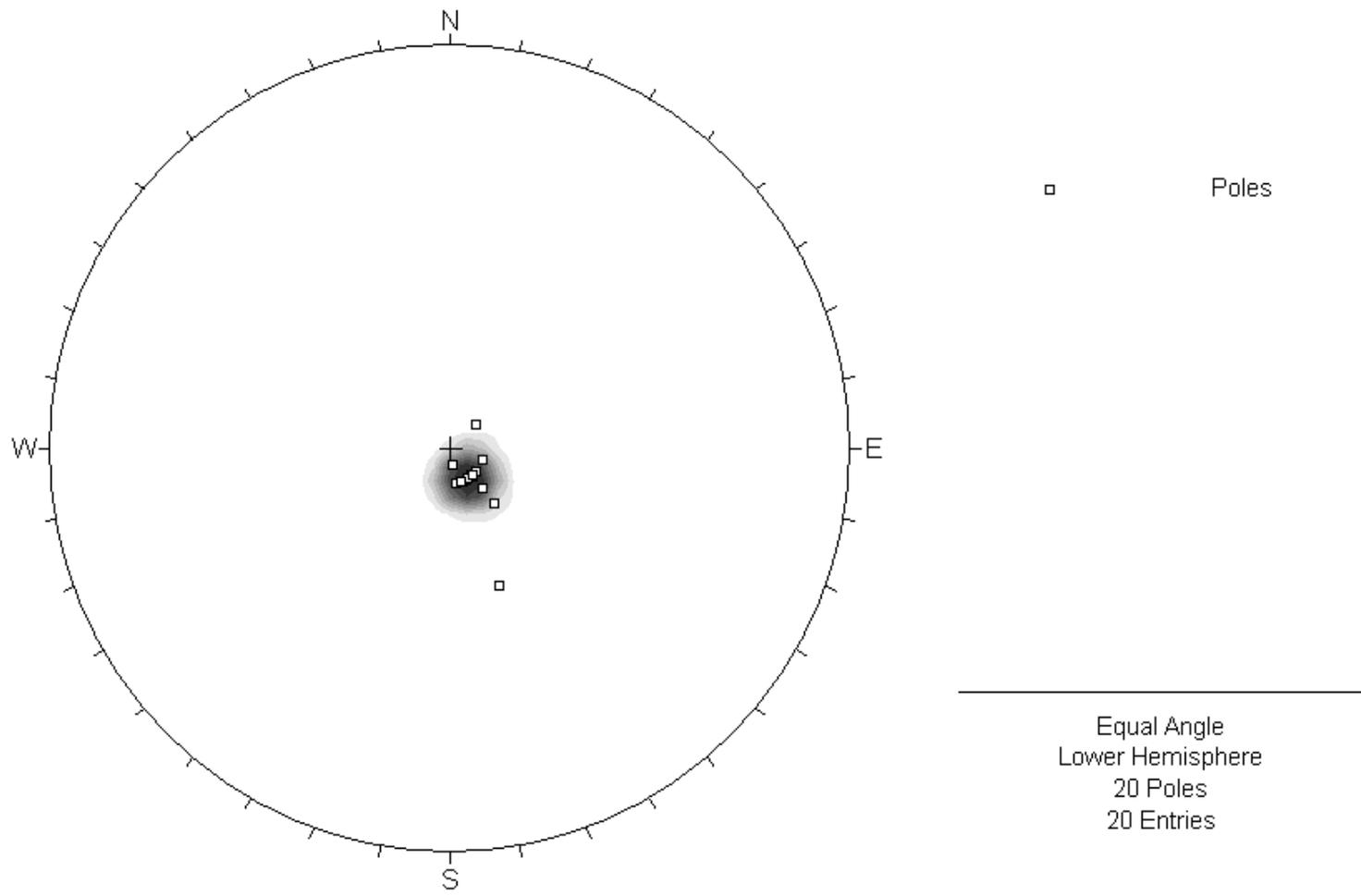


圖 4-6 觸口攔河堰至 112 斷面露頭層面統計

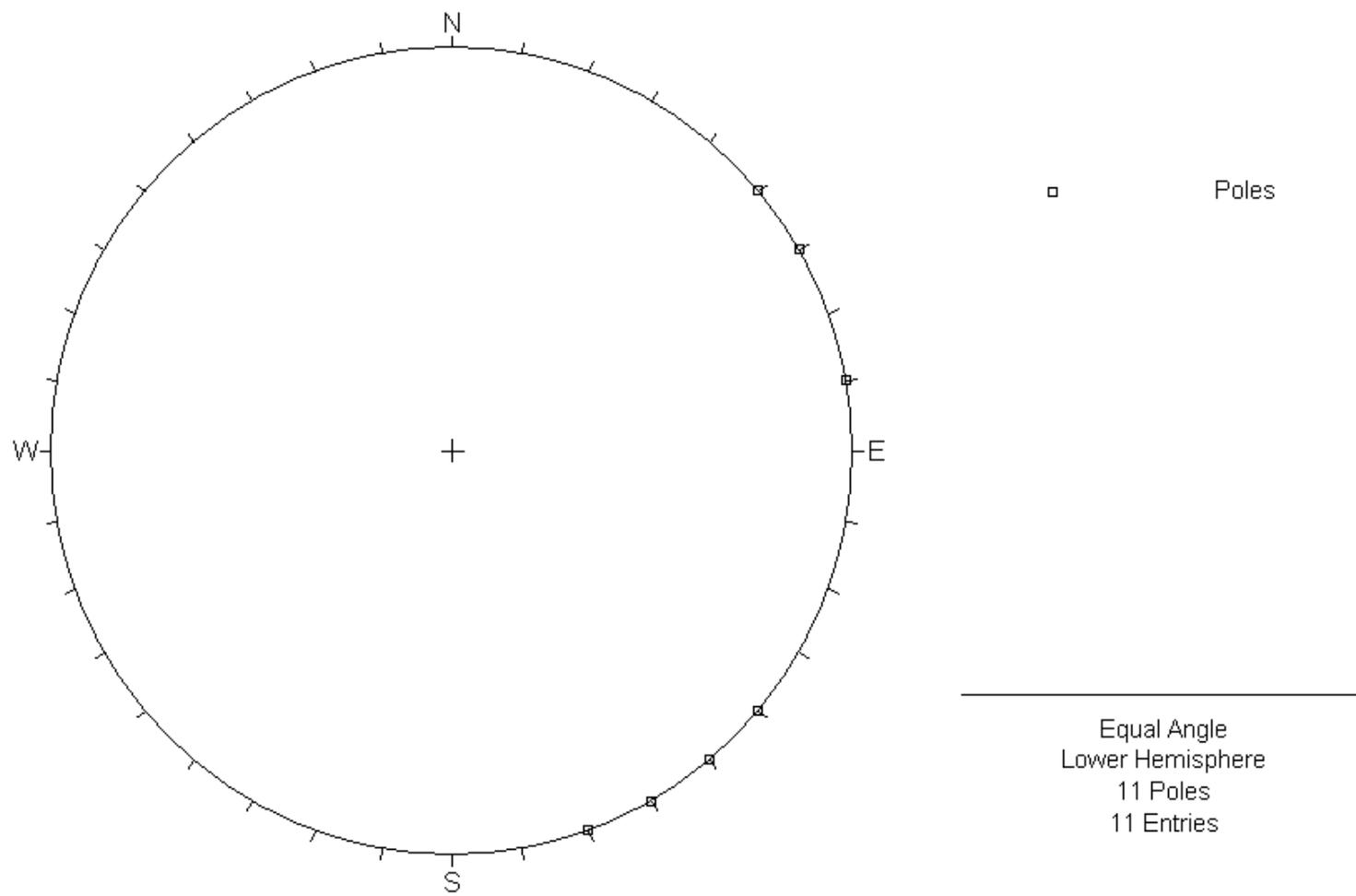


圖 4-7 觸口攔河堰至 112 斷面節理統計

由區域地質圖配合地形資料製作地質剖面圖，本研究參考的地形資料包括相片基本圖與歷年河道斷面測量高程，由縱剖面高程資料配合露頭調查製作的地質圖，可得沿河道中心線切剖面的縱剖面地質剖面圖(圖 4-2)，其中河床實線的部份代表民國 95 年的河床高程、虛線代表民國 78 年時的河床高程，由不同年的河床資料配合橫剖面就可以知道某個河段受到侵蝕的岩層是屬於何種岩性，因此本文分別製作縱、橫向地質剖面圖，以供後續研究參考。

但若利用地質圖(圖 4-2)直接製作橫剖面地質圖，則因地質圖比例過小會使整個斷面都是同一種岩性，而無法做更細部的比較，例如斷面 95 在圖 4-2 上看起來都是屬於粉砂岩與泥質頁岩的互層，斷面 96 都是屬於砂岩與砂質頁岩互層，所以有必要對岩層進行更進一步的分層。圖 4-8 為 95 與 96 斷面附近的縱剖面比例尺放大，並利用調查資料，將個細層加以標示所得。由圖 4-8 便可以配合 95 與 96 斷面歷年橫斷面測量資料製作橫剖面圖，結果如圖 4-9 與圖 4-10

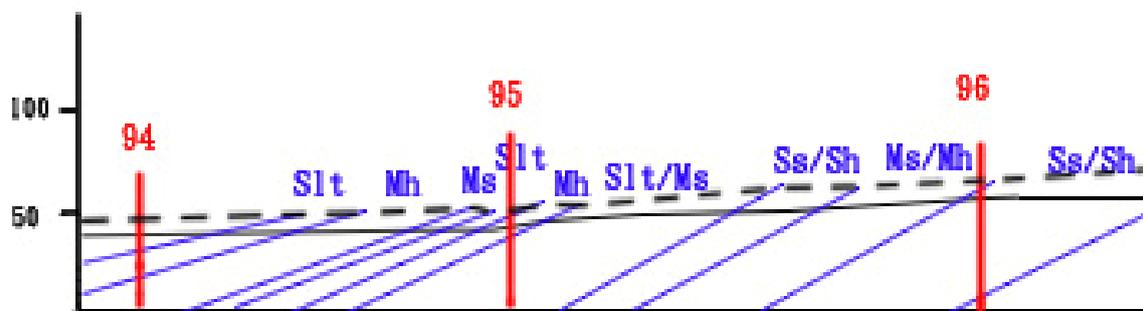


圖 4-8 95 與 96 斷面 1:5000 地質縱剖面細分

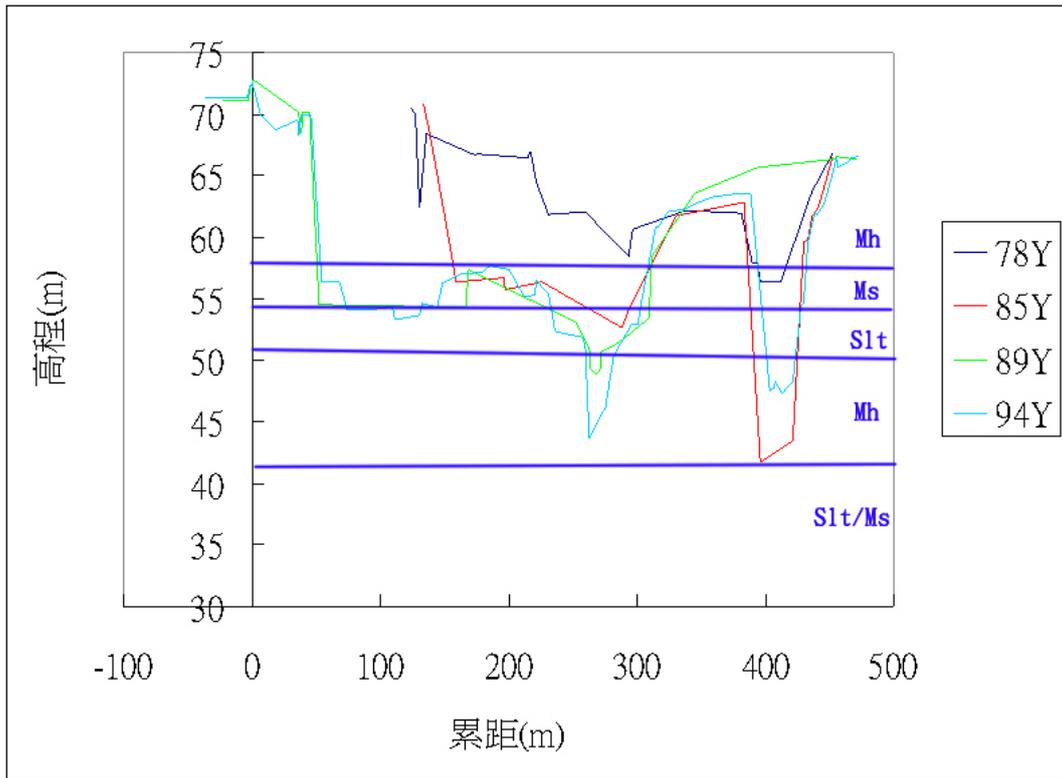


圖 4-9 95 斷面地質橫剖面與歷年斷面測量

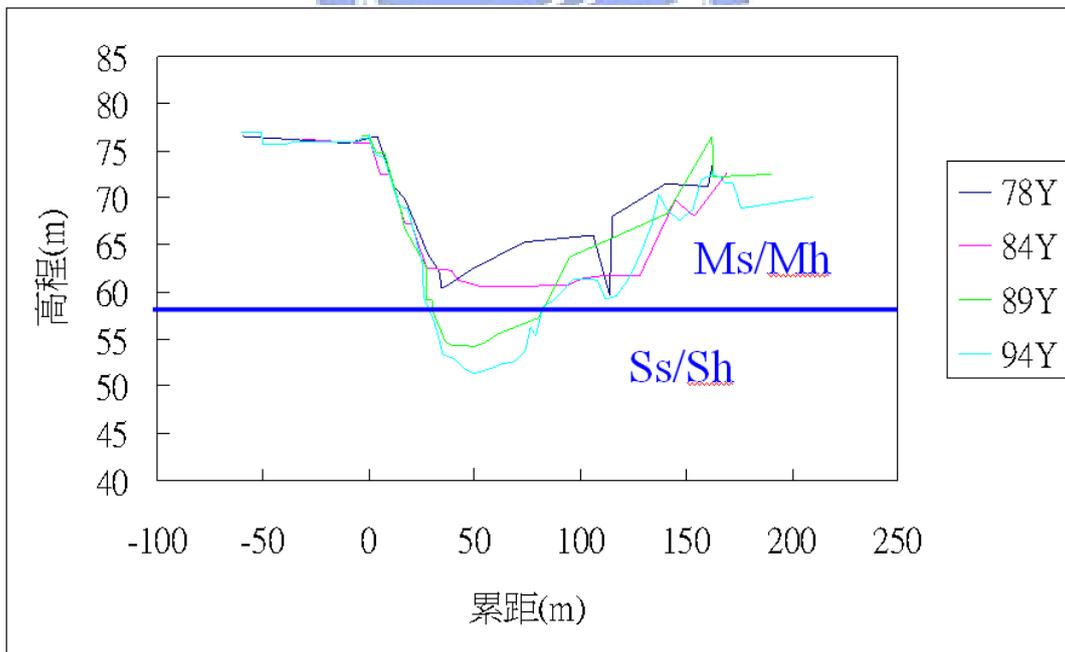


圖 4-10 96 斷面地質橫剖面與歷年斷面測量

因為觸口攔河堰下游至 112 斷面之地質圖時已將泥岩區分為四個種類 (Ms1-Ms4)，所以由地質圖直接製作的縱斷面地質圖亦可顯現出不同的岩

性，但是由 113 斷面歷年斷面測量資料發現，本斷面歷年測量樁號位置不一，因此在製作 113 斷面地質橫剖面圖時無法與圖 4-9 與圖 4-10 一樣將歷年斷面資料都套疊在相同的平面上做比較，所得結果如圖 4-11 至圖 4-14，僅能就四個年份受侵蝕的岩層做比較。

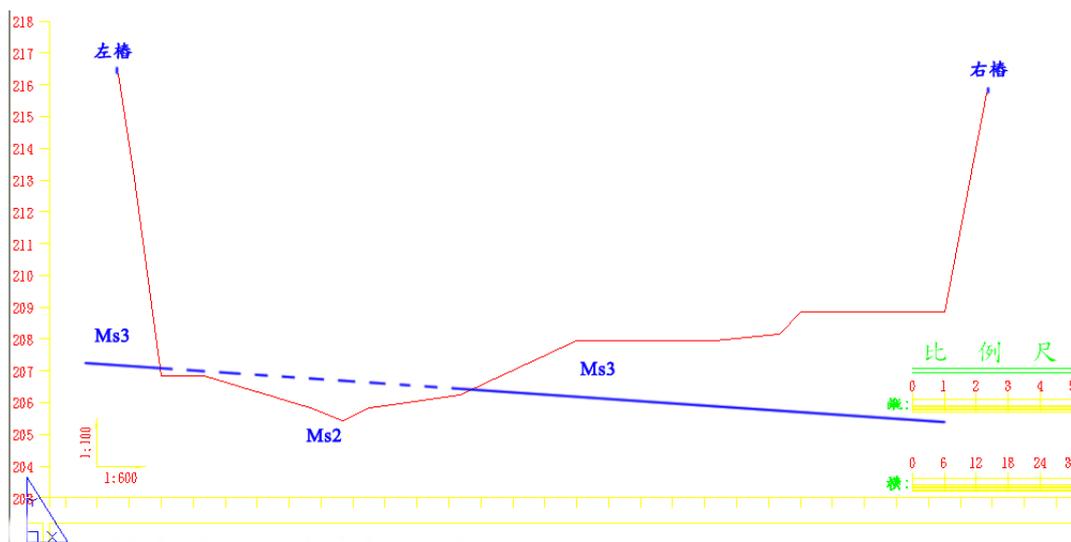


圖 4-11 113 斷面-民國 78 年地質橫剖面圖

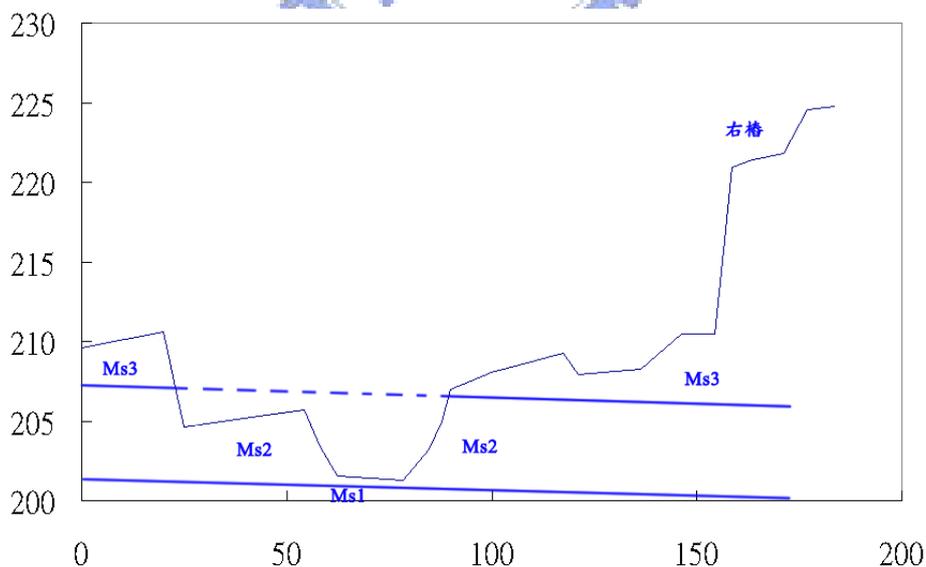


圖 4-12 113 斷面-民國 85 年地質橫剖面圖

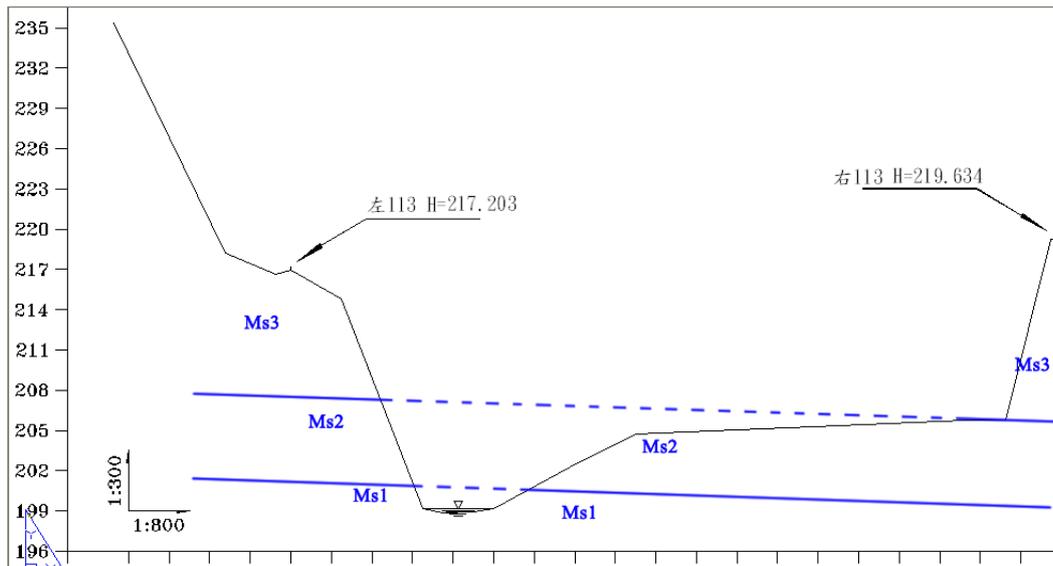


圖 4-13 113 斷面-民國 89 年地質橫剖面圖

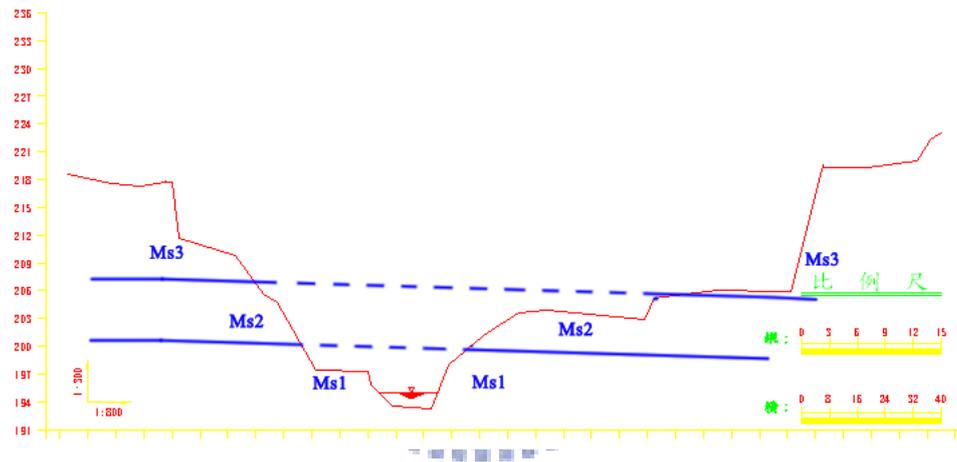


圖 4-14 113 斷面-民國 95 年地質橫剖面圖

4.1.2 不同岩層侵蝕速率的比較

由 4.1.1 節的地質剖面圖可以獲得不同時間河床侵蝕到達的岩層，比對的結果將可以得到不同岩層侵蝕速率的比較，以下分成 95 斷面、96 斷面與 113 斷面討論：

1. 95 斷面：由圖 4-9，95 斷面主要分為右側的舊河道與左側的新河道兩股流路。右側舊河道在民國 78 年到 85 年間迅速向下侵蝕了泥岩層、粉砂岩層與泥質頁岩層，到粉砂-泥頁岩互層而停止，侵蝕深度約 10 公尺，不過因每次斷面測量時間間隔太長，無法估計泥岩層、粉砂岩層與泥質頁岩層的各別侵蝕速率；左側河道於 78 年至 85 年間泥岩層受到侵蝕，年平均侵蝕速率約為 1m/年(7m/7 年)；85 年至 89 年間水流侵蝕粉砂岩層，年平均侵蝕速率約為 0.75m/年(3m/4 年)；89 年至 95 年下切泥質頁岩層，年平均侵蝕速率約為 1.4m/年(7m/5 年)。由年平均侵蝕速率約略可以看出岩層受水流侵蝕的速率之間的快慢比較為泥質頁岩層(1.4m)>泥質岩(1m)>粉砂岩(0.75m)。若由此岩層沖蝕速率推估右側河道完成 78 年至 85 年間沖刷深度所需時間，結果為泥岩 2 年(2m/ 1m/s) + 粉砂岩 4 年(3m/ 0.75m/s) + 泥質頁岩 6.4 年(9m/ 1.4m/s)，總共需 12.4 年，但實際上達到此沖刷深度只歷經 7 年，其可能原因為民國 78 年至 85 年發生間的洪水強度，比用來推估年侵蝕速率的民國 85 年至 94 年洪水強度大，如民國 85 年賀伯颱風等(洪水紀錄見附錄 IV)，對相同岩層(即相同抗沖蝕

能力的岩層)造成的沖蝕能量不同，所以在民國 78 年至 85 年間的沖蝕速率比民國 85 年至 94 年快。

2. 96 斷面：由圖 4-10，96 斷面主要分為上半部的泥岩與泥質頁岩的互層，與下半部的砂岩與砂質頁岩互層兩層。85 年至 89 年間受水流的沖蝕包含了兩種岩層，年平均侵蝕速率約為 1m/年(5m/5 年)；89 年至 95 年間沖蝕砂岩與砂質頁岩互層，年平均侵蝕速率約為 0.8m/年(4m/5 年)。
3. 113 斷面：由圖 4-11 與圖 4-12 可以知道，在民國 78 年到 85 年這七年間，Ms2 岩層侵蝕高程僅由 205m 發展至 202m，且河道的形狀呈 U 字型，又由現場調查得到 Ms2 的岩性屬於泡水後表面會乾裂的泥質岩層，可以推估這種岩層的平均侵蝕速率約為 0.5m/年(3m/7 年)，而從圖 4-13 與圖 4-14 以相同的方式推測 85 年到 89 年與 89 年到 95 年 Ms1 的平均侵蝕速率為 0.75m/年與 1m/年。

最後對上述三個斷面的岩層平均年侵蝕速率作比較，可得結果為：泥質頁岩層(1.4m)>泥質岩(1m)>泥(砂)岩與泥(砂)質頁岩互層(0.8m~1m/年)>粉砂岩(0.75m)>泡水後表面會乾裂的泥岩(0.5m~1m/年)。

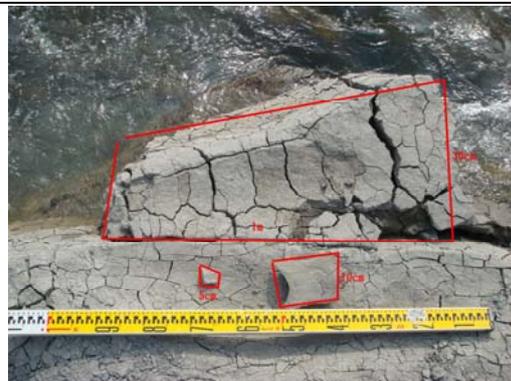
上述平均侵蝕速率除了與受沖蝕的河床岩性有關，亦會受水流作用的影響。

4.2 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硬岩河床的沖蝕現象相同，配合照片 4-3 說明如下：

1. **塊體脫離現象**：照片4-3(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；照片4-3(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. **河床面光滑的磨蝕現象**：照片4-3(c)位於95號斷面下游，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. **岩床表面凹陷粗糙的現象**：照片4-3(d)與照片4-3(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. **壺穴與滑槽現象**：照片4-3(f)與照片4-3(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. **乾裂現象**：照片4-3(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。

照片 4-3 現地符合硬岩沖蝕機制的照片

	
照片 4-3(a) 塊體脫離的情形	照片 4-3(b) 塊體脫離的情形
	
照片 4-3(c) 磨蝕作用的光滑表面	照片 4-3(d) 顆粒撞擊產生的磨蝕
	
照片 4-3(e) 顆粒撞擊產生的磨蝕	照片 4-3(f) 壺穴與滑槽
	
照片 4-3(g) 障礙物下方產生穴蝕	照片 4-3(h) 風化作用造成塊體破碎

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照片4-4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照片4-4(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照片4-4(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，在現地利用地質錘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(照片4-4(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照片4-4(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

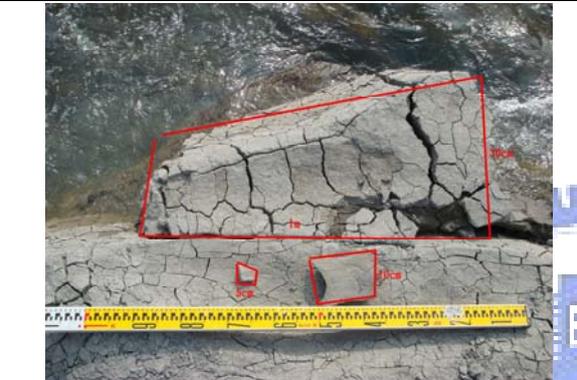
容易分離為顆粒材料被水流帶走的情況下，侵蝕速率明顯較快，而比薄層的含泥質稍高的頁岩較早被侵蝕。在 96 斷面附近觀察到薄層與厚層差異侵蝕的現象(照片 4-4(e))。但是在薄層失去厚層束制之後容易受水流等外力影響而造成片狀剝離(照片 4-4(f))，所被帶走的材料已經不是顆粒一粒一粒的帶離的情形，而是整片整片材料的剝離行為。

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，由照片 4-4(g)與照片 4-4(h)可以見到壺穴與滑槽等現象。

上述有別於硬岩河床的沖蝕行為，其沖蝕機制將在進一步加以建立與驗證。



照片 4-4 現地觀察到的軟岩沖蝕現象

	
<p>照片 4-4(a) 水流沿著岩體的弱面產生侵蝕</p>	<p>照片 4-4(b) 塊體掉落的現象</p>
	
<p>照片 4-4(c) 破碎的塊體尺寸</p>	<p>照片 4-4(d) 破碎的塊體被帶走後的痕跡</p>
	
<p>照片 4-4(e) 薄層與厚層差異侵蝕的現象</p>	<p>照片 4-4(f) 薄層片狀剝離的現象</p>
	
<p>照片 4-4(g) 粉砂岩表面的滑槽、壺穴現象</p>	<p>照片 4-4(h) 粉砂岩表面的壺穴現象</p>

4.3 軟岩現地沖蝕機制及其沖蝕速率比較

由各學者提出的現地硬岩沖蝕機制，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 4.2 節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，最後再依各種機制出現的岩層特性，配合 4.1.2 節不同岩層侵蝕速率比較的結果，得到這四種軟岩沖蝕機制的沖蝕速率比較。

4.3.1 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岩塊抽

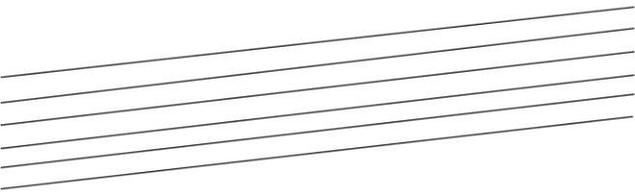
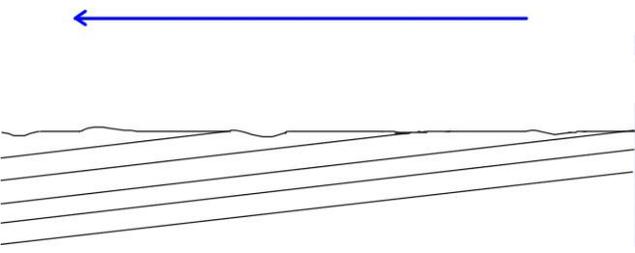
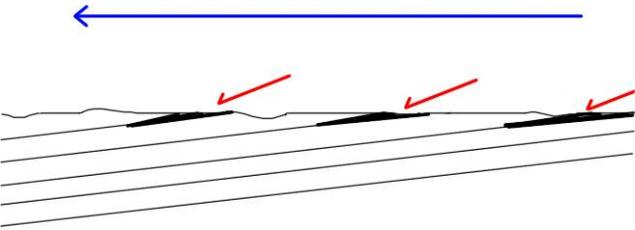
離 (plucking) 作用，在形成塊體的期間若底床上因卵礫石衝擊出碎片或岩塊 (abrasion with saltation) 之作用則會加速弱面的侵蝕而使沖蝕作用加速。

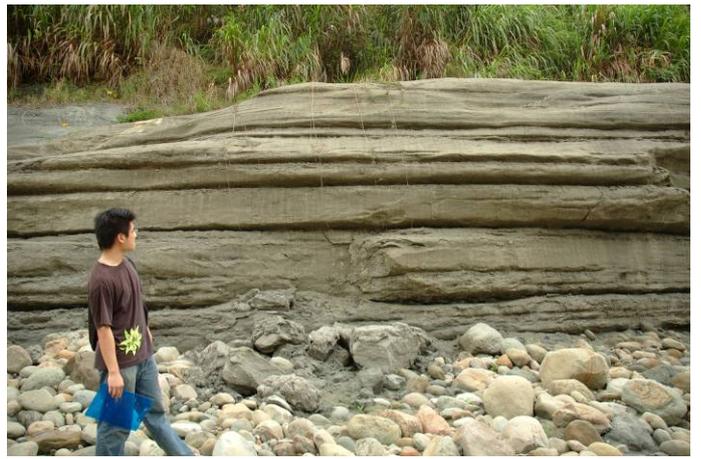
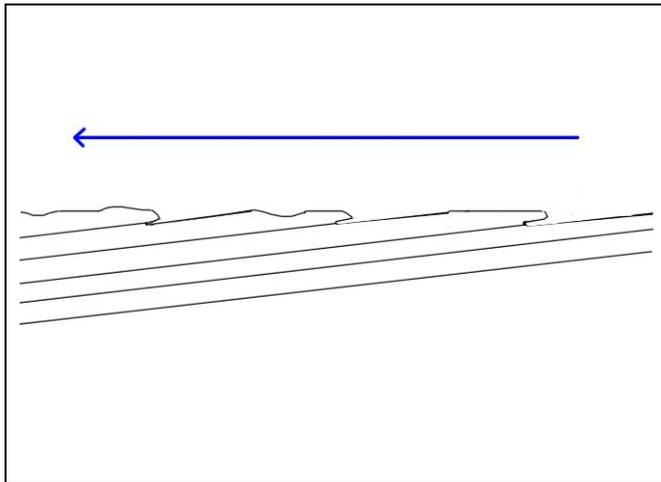
在研究區域裡觀察到，當岩床本身具有一組岩層傾向順著河流流向的順向河情況時，水流沿著岩體的弱面產生侵蝕的情形，可以用照片 4-5 的六個步驟示意圖說明如下：

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—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，水流延著岩體的弱面，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。



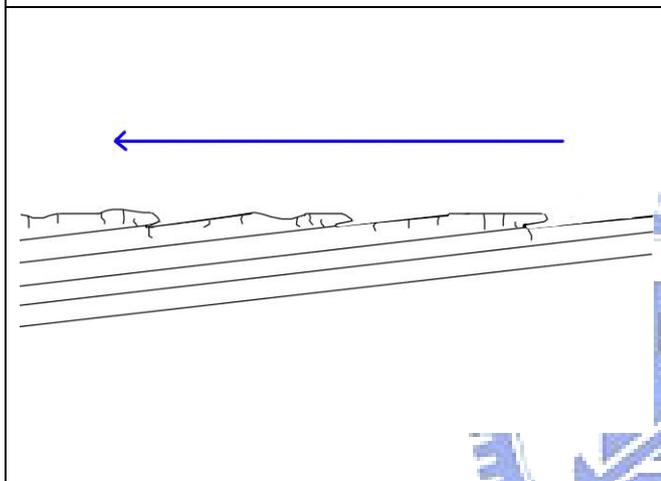
照片 4-5 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形

示意圖	現地照片
	
<p>1. 沉積後成岩、層理發達</p>	<p>照片 4-5(a)</p>
	
<p>2. 地表風化，水流流向呈順向河情形</p>	<p>照片 4-5(b)</p>
	
<p>3. 水流沿弱面(即層面)侵蝕</p>	<p>照片 4-5(c)</p>



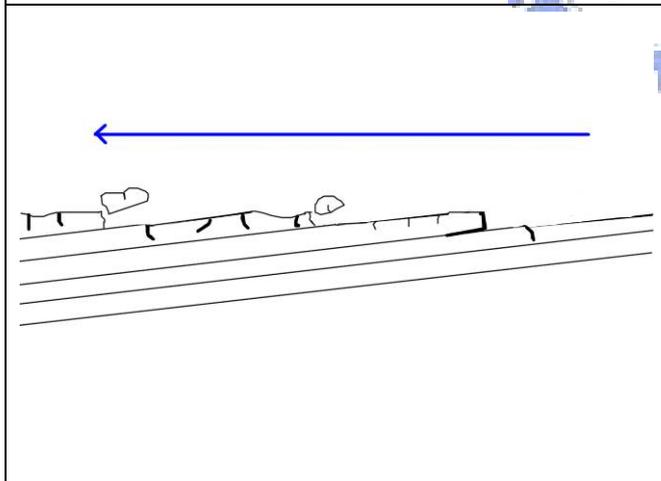
4. 侵蝕後弱面明顯被刻深

照片 4-5(d)



5. 自重或水流造成岩體表面張力裂縫發展

照片 4-5(e)



6. 裂縫發展，岩體形成塊體脫離

照片 4-5(f)

4.3.2 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。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。在現地利用地質錘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 米，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照片 4-6 的示意圖來說明：

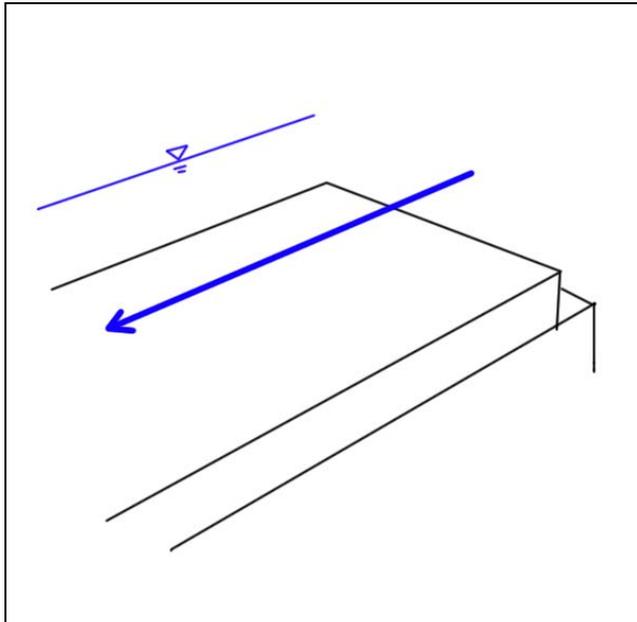
1. 完整的岩層，新鮮強度 5-10MPa，水位面抬升後泡水軟化，岩層表面發生 abrasion 的行為。
2. 水位降低後泡水的岩體乾縮、乾裂成粉碎狀塊體，塊體尺寸由數公分到

1 米不等，乾裂的影響深度約 30 公分。

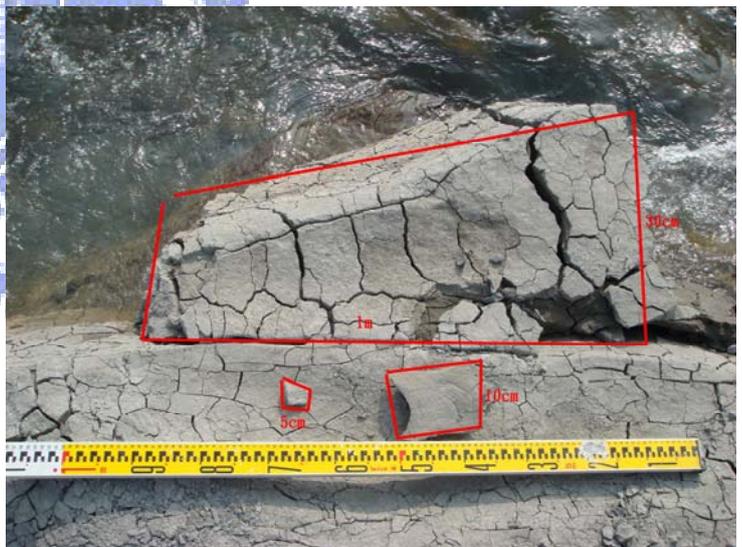
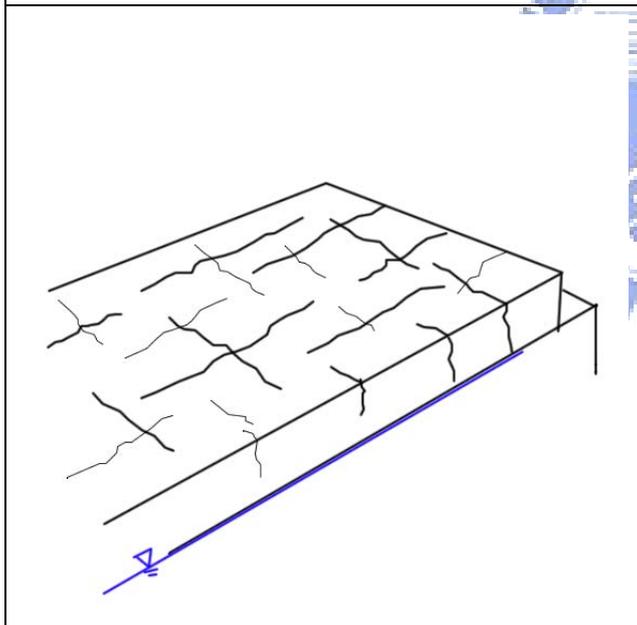
3. 乾裂後的粉碎狀塊體在下一次水位面再升起的時候能輕易的被水流帶走，較大的塊體會有帶走的順序問題，這種行為可以解釋為 plucking 的侵蝕機制。
4. 水流帶走整層材料後繼續影響下層的岩體。



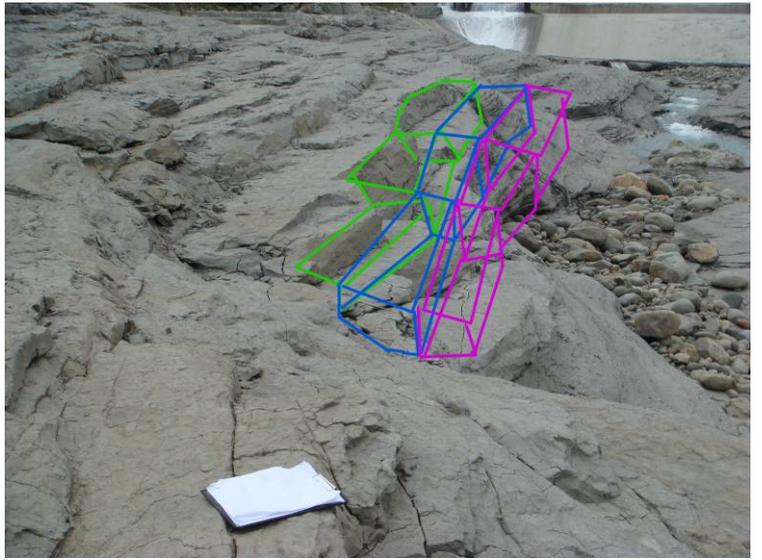
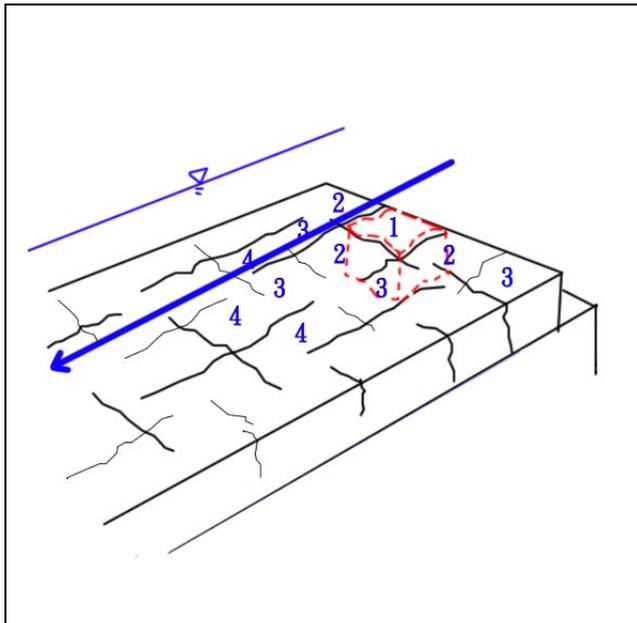
照片 4-6 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為



1.完整的岩層新鮮強度約 5~10MPa，泡水後軟化 abrasion 照片 4-6(a)

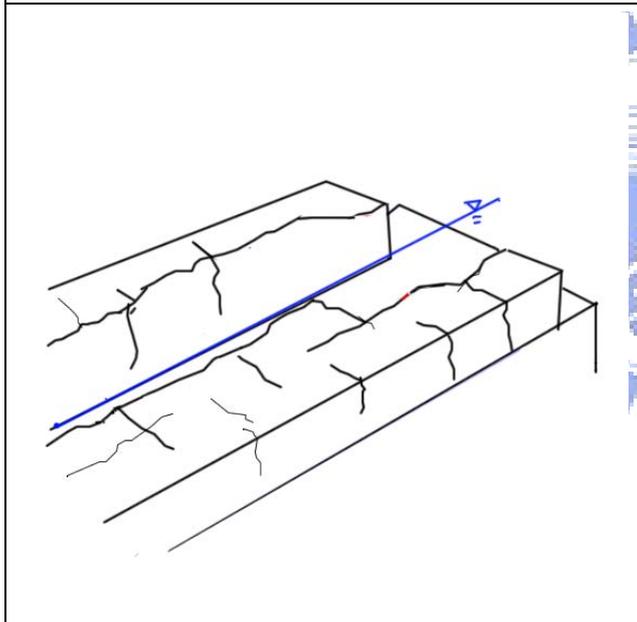


2.水位降低後岩體乾縮、乾裂 照片 4-6(b)



3.岩體失去強度，水位漲高能輕易帶走(數字表帶走的順序)

照片 4-6(c)



4.水流帶走整層材料

照片 4-6(d)

4.3.3 砂頁岩互層的差異磨蝕，薄層厚層互相牽動

由 4.1 節河道地質可知，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，可以由照片 4-7 的示意圖來說明：

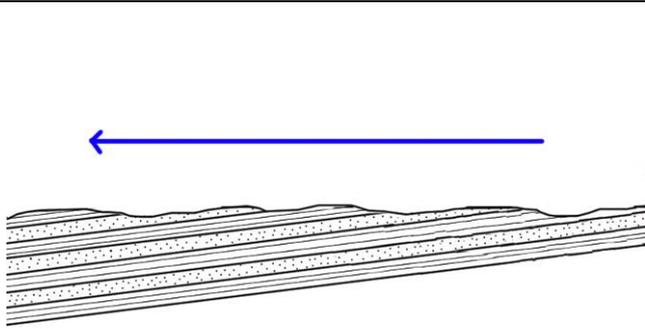
1. 沉積環境形成砂頁岩互層，每層厚約 30 公分，泥質含量較高、顆粒較細的頁岩薄層每層約 1-2 公分，砂質含料較高的厚層膠結力較弱。
2. 水流作用在岩床表面，顆粒材料被一粒一粒帶離的 abrasion 行為，因為厚層砂岩膠結力較弱，侵蝕速率大於薄層的頁岩而產生差異侵蝕，薄層

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。

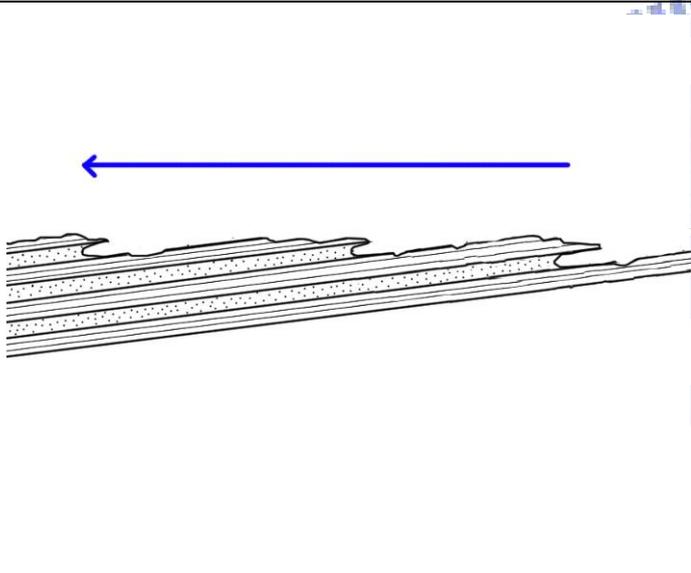


照片 4-7 砂頁岩互層的差異磨蝕(abrasion),薄層厚層互相牽動



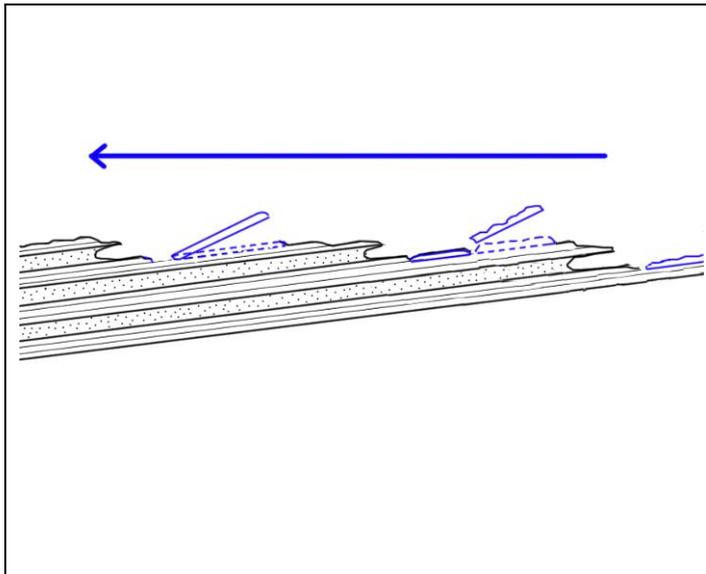
1.侵蝕前河道，河床為砂頁岩互層

照片 4-7(a)



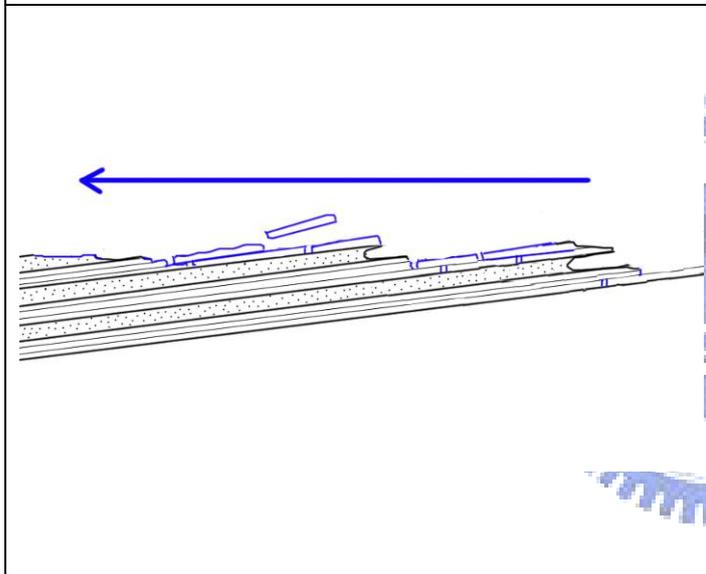
2.差異 abrasion,薄層失去束制

照片 4-7(b)



3. 薄層片狀撥離，Plucking 啟動

照片 4-7(c)



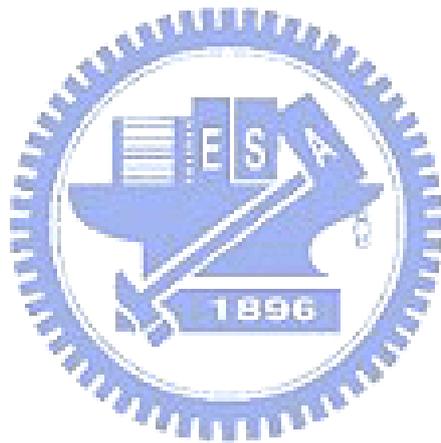
4. 片狀材料被帶離

照片 4-7(d)

4.3.4 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 (圖 4-15)，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，由照片 4-8 可以見到壺穴與滑槽等現象。



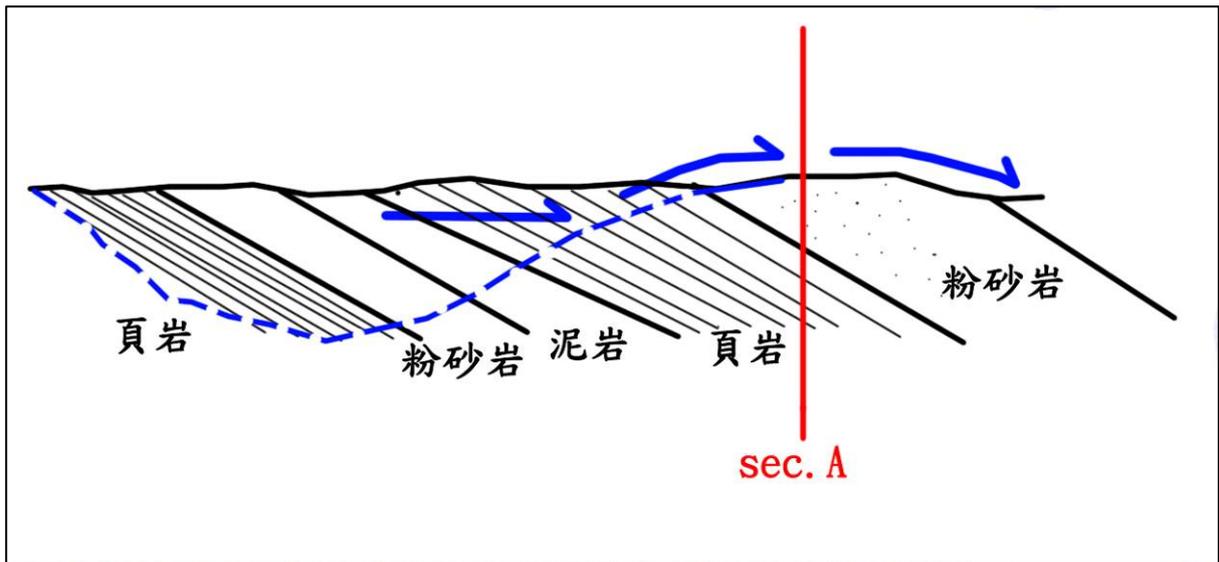


圖 4-15 粉砂岩侵蝕速率較慢形成障礙物



照片 4-8 壺穴 (pothole) 與滑槽 (flute) 的現象

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：

1. 圖 4-16 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。
2. 圖 4-16 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。

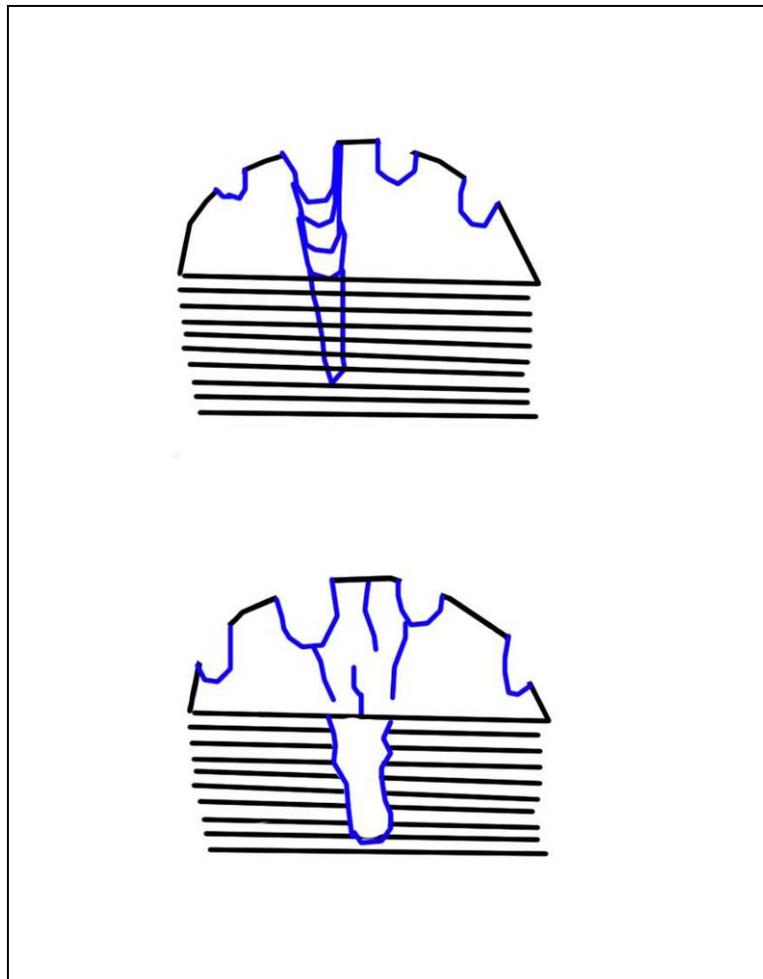


圖 4-16 圖 4-15-sec.A 橫剖面圖

4.3.5 現地沖蝕機制的沖蝕速率比較

上述四種機制，在研究區域內出現的位置如圖 4-17，數字表侵蝕機制 1.2.3.4。

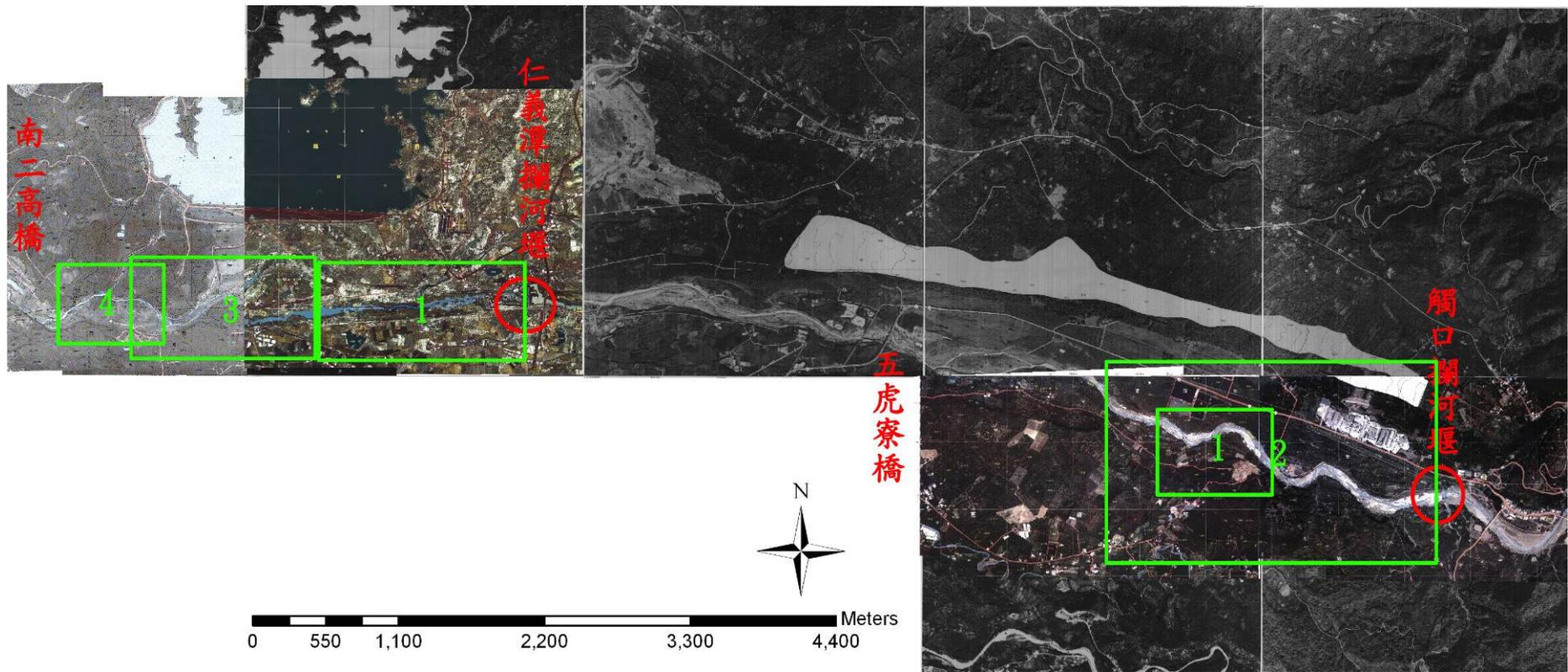
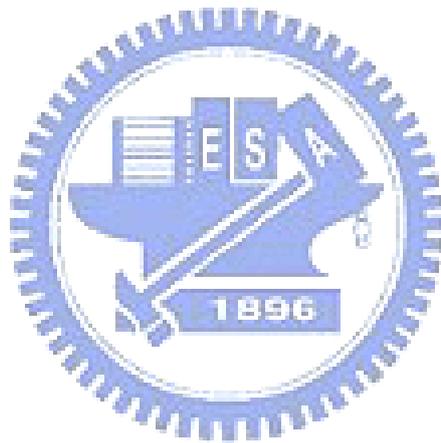


圖 4-17 各種現地侵蝕機制主要出現位置

依據各種機制出現地點的岩性進行分類歸納可得其特性如下：機制 1 為泥質頁岩或厚層泥岩、機制 2 為會乾裂的泥岩(觸口堰下游)、機制 3 為砂頁岩互層(98、97、96 斷面)、機制 4 為極厚層粉砂岩(95 斷面下游)；依 4.1.2 所得各種岩層沖蝕速率比較結果為：泥質頁岩層(1.4m)>泥岩(1m)>泥(砂)岩與泥(砂)質頁岩互層(0.8m~1m/年)>粉砂岩(0.75m)>泡水後表面會乾裂的泥岩(0.5m~1m/年)，進而能推估各種現地軟岩機制的沖蝕速率比較約為：機制 1>機制 3>機制 4>機制 2。



4.4 仁義潭攔河堰下方的侵蝕

由第三章研究區域縱剖面侵蝕高程連線(圖 3-6)發現，在八掌溪歷年斷面測量 101 號斷面與 100 號斷面間存在一個侵蝕不動點—仁義潭攔河堰，民國 78 年到 95 年間，仁義潭攔河堰下游 100 斷面至 95 斷面間快速下切呈 L 字型，但是侵蝕在民國 89 年至 95 年似乎有漸緩的趨勢。又由文獻知道，水流越過攔河堰時會在下方形成沖刷坑使侵蝕向下游發展(Bollaert and Schleiss, 2003);當一個河段下游河床表面護甲層消失時，河床的裸露造成侵蝕產生的突降點卻會使侵蝕向上游發展(Sdiel, 2002)，單看縱剖面侵蝕高程並不能區分此侵蝕劇烈區域是由上往下發展或由下往上發展。本節將由仁義潭攔河堰下游歷史照片比對與航空照片判釋提出仁義潭攔河堰下游侵蝕的發展演進。

4.4.1 仁義潭攔河堰下游的歷史照片比對

本研究搜集得的仁義潭攔河堰歷史照片，主要有民國 72 年施工時期、民國 81 年 9 月豐水期時期、民國 82 年枯水期與豐水期時期，以及民國 85 年 8 月等五個時期，主要拍攝的角度可以歸納為由攔河堰右側往河道拍攝、由攔河堰上方向下方拍攝與由攔河堰下方向上方拍攝等三個拍攝角度，本研究在民國 97 年 5 月 10 日調查時在相同的位置拍攝現況照片作比較，並把對照結果整理成照片 4-9 到照片 4-11，以下是歷史照片比對的討論：

1. 從仁義潭攔河堰右側往河道拍(照片 4-9)：

(1)照片 4-9(a)，顯示民國 72 年仁義潭攔河堰初竣工時，僅有在攔河堰體

與下方一階淨水池，在淨水池下游堆置混凝土消能塊，當時的河床表面為礫石覆蓋，河床高程與第一階淨水池相同，並沒有沖蝕的情形。

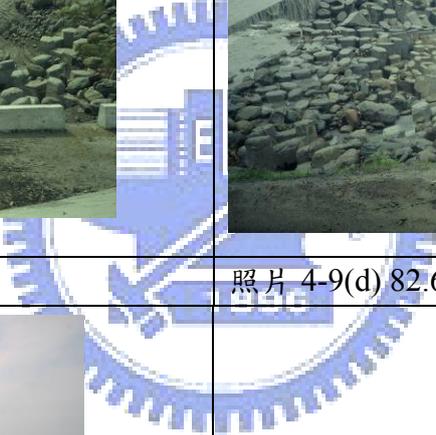
(2) 照片 4-9(b) 可看到於民國 80 年增設的第二與第三階淨水池，在洪水來的時候第三階淨水池下方水流劇烈，此時沖刷坑應該已經產生；另外值得注意的是河床高程相較於 72 年的位置，已下降了新的兩階淨水池高度，甚至更低。

(3) 照片 4-9(c)，第三階淨水池下方沖刷坑已形成，並可以清楚看到泥質頁岩岩盤裸露，且已向下游發展。

(4) 照片 4-9(d)(e)，82 年到 97 年間攔河堰與淨水池沒有改變，但下游裸露的岩盤已全部侵蝕消失。



照片 4-9 歷史照片比對-從仁義潭攔河堰右側往河道拍

	
<p>照片 4-9(a) 民國 72 年(自來水公司)</p>	<p>照片 4-9(b) 81.9.1 (自來水公司)</p>
	
<p>照片 4-9(c) 民國 82 年(自來水公司)</p>	<p>照片 4-9(d) 82.6.3 (自來水公司)</p>
	
<p>照片 4-9(e) 97.5.10</p>	

2. 從仁義潭攔河堰上方向下拍(照片 4-10)：

- (1) 照片 4-10(a)，顯示民國 72 年攔河堰下游河道寬闊，表面礫石覆蓋，無侵蝕的情形。
- (2) 由照片 4-10(b)，民國 82 年時下游的礫石層已消失，泥質頁岩裸露，約略可以看到沖刷坑以及沖刷坑下游狹長的河道深槽，這種 V 型的深槽應該是在很快的侵蝕下切速率下造成。
- (3) 照片 4-10(c) 中，民國 85 年除了沖刷坑下游侵蝕繼續向下發展，河床高程較 82 年低外，河谷拓寬的作用在 82 到 85 年間也快速的發展，攔河堰下游深槽漸漸變成 U 型。
- (4) 照片 4-10(d) 為河道受側向侵蝕的影響至 97 年已全面擴寬，河床高程雖然較 85 年低，但是在攔河堰下游陸續增設的多座固床工始河床高程穩定不變。
- (5) 照片 4-10(e) 跟 4-8(f) 的拍攝角度能更清楚地觀察民國 82 年與 97 年第三階淨水池尾水沖刷位置作比較。

照片 4-10 歷史照片比對-從仁義潭攔河堰上方向下拍



照片 4-10(a) 民國 72 年(自來水公司)



照片 4-10(b) 82.6.3 (自來水公司)



照片 4-10(c) 85.8.10 (自來水公司)



照片 4-10(d) 97.5.10



照片 4-10(e) 82.6.3 (自來水公司)



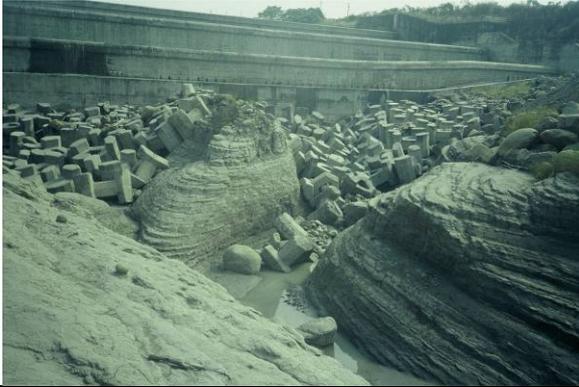
照片 4-10(f) 97.5.10

3. 從仁義潭攔河堰下方向上拍(照片 4-11)：

- (1) 照片 4-11(a)顯示民國 82 年時第三階淨水池下方沖刷坑的形成與裸露的岩盤以及狹長的侵蝕河道前緣。
- (2) 由照片 4-11(b)，現況(97 年)原沖刷坑已被多次整治的混凝土覆蓋，且侵蝕高程較 82 年低。
- (3) 照片 4-11(c)可明顯看到最初受侵蝕而形成 V 形深槽，在民國 82 年時河道甚窄，約 10 米左右。
- (4) 照片 4-11(d)可以看到現況(97 年)河道已完全擴展，且可以看出現在第三階淨水池下方的落差約為攔河堰頂部到第三階淨水池高程的兩倍。



照片 4-11 歷史照片比對-從仁義潭攔河堰下方向上拍



照片 4-11(a) 民國 82 年 (自來水公司)



照片 4-11(b) 97.5.10



照片 4-11(c) 82.6.3 (自來水公司)



照片 4-11(d) 97.5.10



照片 4-11(e) 97.5.10 拍攝地點:95 斷面下游

經過歷史照片比對可以得到幾個結論如下：

1. 民國 72 年攔河堰與第一階淨水池完工時河床表面護甲層完好，無侵蝕現象。
2. 民國 81 年照片顯示，位於攔河堰下方河床的高程已經降低至新設的第三階淨水池以下，且沖刷坑已經形成，沖刷坑下游的河道更因為護甲層消失，岩盤裸露而快速侵蝕成 V 字型，深槽寬度僅約 10 米。
3. 民國 81 年到 85 年間，沖刷坑加深發展，而沖刷坑下游的河道侵蝕包含下切與擴展的作用逐漸變成 U 字型，深槽寬度也由 10 米擴展為 30 到 50 米左右。
4. 民國 97 年進行現場調查時，原沖刷坑位置岩盤已被整治的水泥構造保護，落差約為攔河堰頂部至第三階攔河堰的兩倍高度，攔河堰下游河道寬度擴展約與堰寬齊。
5. 對於仁義潭攔河堰下游侵蝕的發展，主要的關鍵應該是民國 72 年到民國 81 年間護甲層的消失，才造成岩盤裸露後沖刷坑與河道的下切侵蝕迅速發展，所以針對民國 72 年到民國 80 年增設第二、第三階淨水池這段時間，蒐集航空照片觀察應可以得到更詳細的資訊。

4.4.2 航空照片判釋成果

上節推測仁義潭攔河堰下游的沖刷起始時間為民國 72 年至 80 年間，因此本研究蒐集民國 72、76、77、78、79 年五個年份的航空照片(各年份航照拍攝日期如表 4-3)。透過航空照片立體對判釋繪製在判釋圖上以藍色虛線標示河道高灘地界線、藍色實線標示航照拍攝當時水流路徑、綠色實線為植生沙洲、黑色表水工構

造物，另外用紅色圈定裸露的岩盤以及可能被侵蝕的河道，在某些年份的航照裡使用紅色虛線圈取河道上人為採砂採石的範圍，如圖 4-18 至圖 4-19，判釋結果說明如下：

1. 民國 72 年由航照可以觀察到仁義潭攔河堰初完工階段，第一階淨水池下游受跌水的影響約略有沖蝕坑的出現，不過沒有觀察到有岩盤裸露的情形。較下游處分兩股流路，主要河道為右股，在右股流路與心上橋相當的位置上正在進行人工填河的工程，將水的流路引導至右股流路的左側，在右股流路的下游轉彎處因為處於攻擊側，出現邊灘岩盤裸露的情形(圖 4-18)。
2. 圖 4-19 顯示，民國 76 年時第一階淨水池下游的沖刷坑較 72 年明顯，在攔河堰下游的河道上出現兩塊植生沙洲(植生沙洲 1 與 2)，原因是河道表面的礫石受搬運作用而流失，僅剩下兩塊沙洲處含有較厚的護甲層；左岸新設一道堤防，在圖的中段存在一採石場，採石場的附近可以觀察到礫石材料變稀疏，甚至部份河道可見岩盤裸露，在這個河段上也因為某些部份護甲層較薄而流路較為集中；下游右股流路在與心上橋相當的位置上有另一採石場存在，在它的上游處亦觀察到岩盤明顯裸露的情形，並約略可看出裸露岩層的走向約為 N20E。
3. 民國 77 年時沖刷坑進一步擴大(圖 4-20)，由於沖刷坑的發展使得民國 76 年時的植生沙洲 1 已消失，僅剩植生沙洲 2；原左岸堤防有部份損壞，右岸正在進行新建堤防工程，使得在這個河段原本約略分兩股的流路偏向河道中央；採石場已遷移至較下游處，原採石場位置岩盤裸露，在它的上游發現向源侵蝕的痕

跡，影響的距離約 300 公尺；在下游處的右股流路兩岸岩盤露出明顯增加，河道略形成深槽。

4. 民國 78 年(圖 4-21)時沖刷坑的發展已呈現類似歷史照片 82(照片 4-11(a))年所看到的形狀，成條狀分布於第一階淨水池下方，植生沙洲已完全消失，護甲層在這個河段已經非常薄；在左岸堤防修復與右岸堤防完工後，流路被限制於較狹窄的範圍內，這種集中的流路可能會使流速增加，加速水流侵蝕；在下游處右股流路一樣是可以看到裸露的岩盤與深槽河道。
5. 民國 79 年的航空照片可以看到沖刷坑的發展與原本 77 年觀察到的向源侵蝕部份完全連貫，流路集中於一股，兩側皆為岩盤裸露，侵蝕甚為明顯(圖 4-22)，可以解釋為沖刷坑對下游影響使侵蝕向下游發展約 200~300 公尺，與下游採石場遷移後岩盤裸露發生向源侵蝕發展約 500 公尺的串連。

由航照判釋可得，仁義潭攔河堰下游的侵蝕發展原因為：1.攔河堰使得上游礫石材料無法補注到下游護甲層，使下游河道上沙洲漸漸消失護甲層變薄。2.攔河堰產生抬水的作用使得下方沖刷坑發展，較大的侵蝕能量影響到下游河道，由照片推估影響範圍約為 200~300 公尺。3.河道上的採石採砂行為使護甲層加速消失，進而岩盤裸露產生突降點而發生向源侵蝕。

表 4-3 各年份航照拍攝日期

航空照片立體對編號	拍攝日期
72P33_177.179	72.07.21
76P37_187.188	76.04.26
77P115_132.133	77.11.23
78P93_66.67	78.11.06
79P113_5116.5117	79.12.07





圖 4-18 民國 72 年河道航拍與素描



圖 4-19 民國 76 年河道航拍與素描

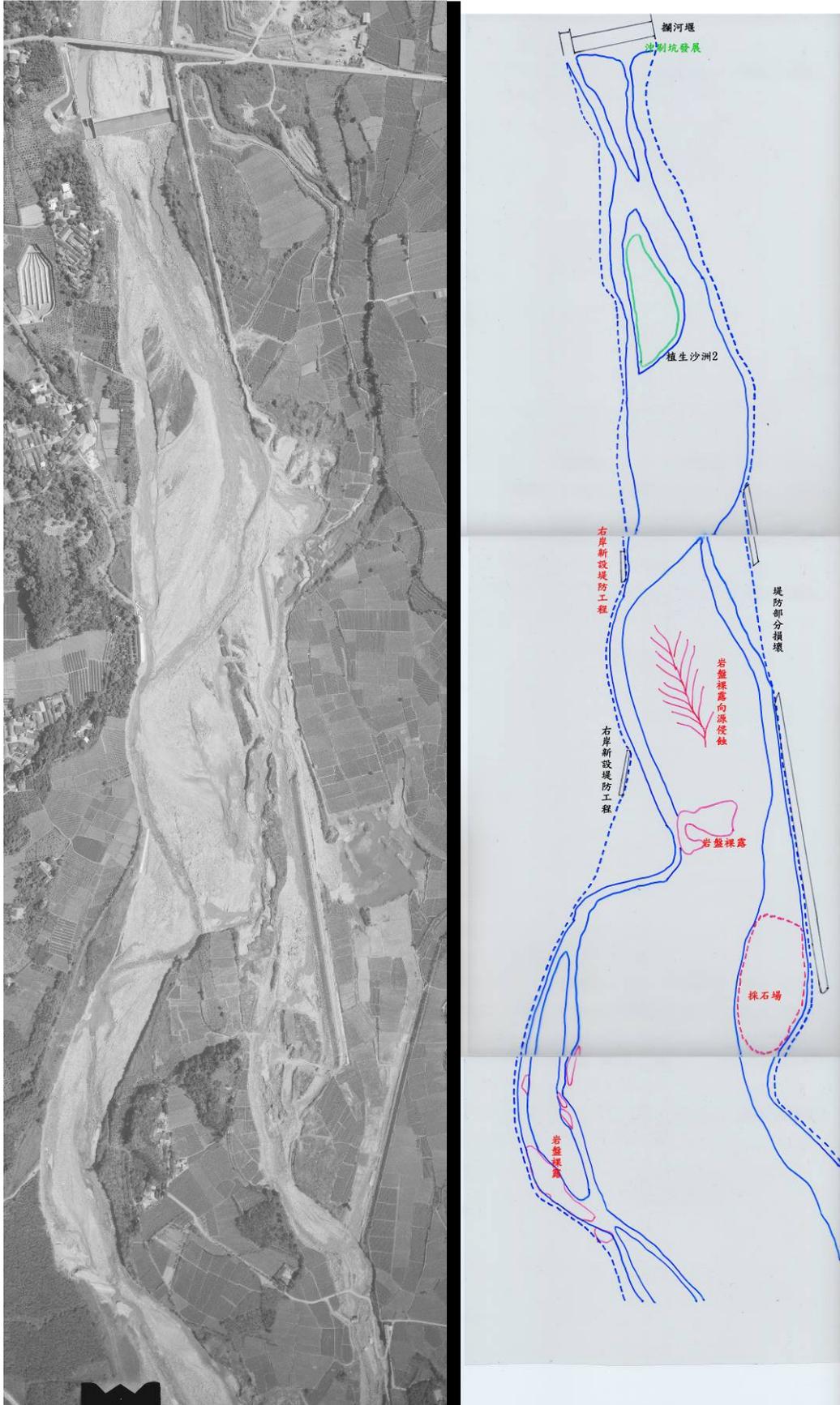


圖 4-20 民國 77 年河道航拍與素描



圖 4-21 民國 78 年河道航拍與素描

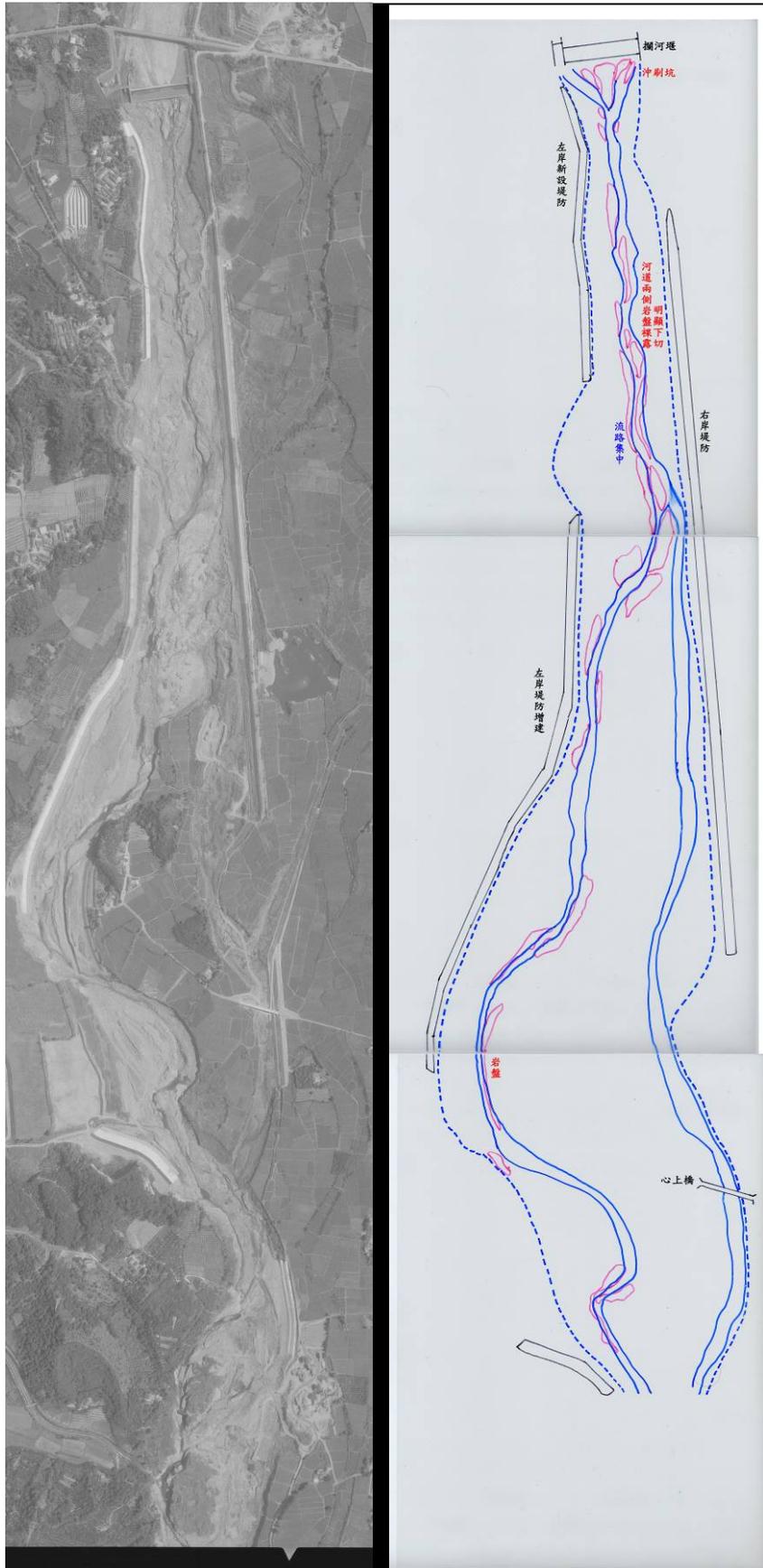


圖 4-22 民國 79 年河道航拍與素描

4.4.3 仁義潭攔河堰下方侵蝕的演化

由歷史照片及航空照片判釋結果，可見仁義潭攔河堰的侵蝕發生始於民國 72 年至民國 80 年間，對於攔河堰下方的侵蝕演化過程，本文提出示意圖加以解釋(圖 4-23)，並說明如下：

1. 攔河堰建造前河道穩定，表面覆蓋護甲層，河道寬闊(寬約 200 公尺)。
2. 民國 72 年攔河堰與第一階淨水池完工，施工時在第一階淨水池下方安置混凝土塊。
3. 混凝土塊遭沖失，使得第一階淨水池下方沖刷坑漸漸形成；下游採石造成護甲層薄弱甚至消失，岩床裸露。這個時期約為民國 72 年至 76 年間。
4. 5. 沖蝕坑影響到下游的侵蝕發展，漸漸向下游推進使下游河道侵蝕產生深槽河道；另一方面下游裸露的岩盤發生向源侵蝕。最終兩個方向的侵蝕連貫，整個河段下切。此時期約發生於民國 76 年至 79 年，如照片 4-9(e)位置。
6. 下游河床高程降低後，於民國 80 年增設第二階與第三階淨水池。

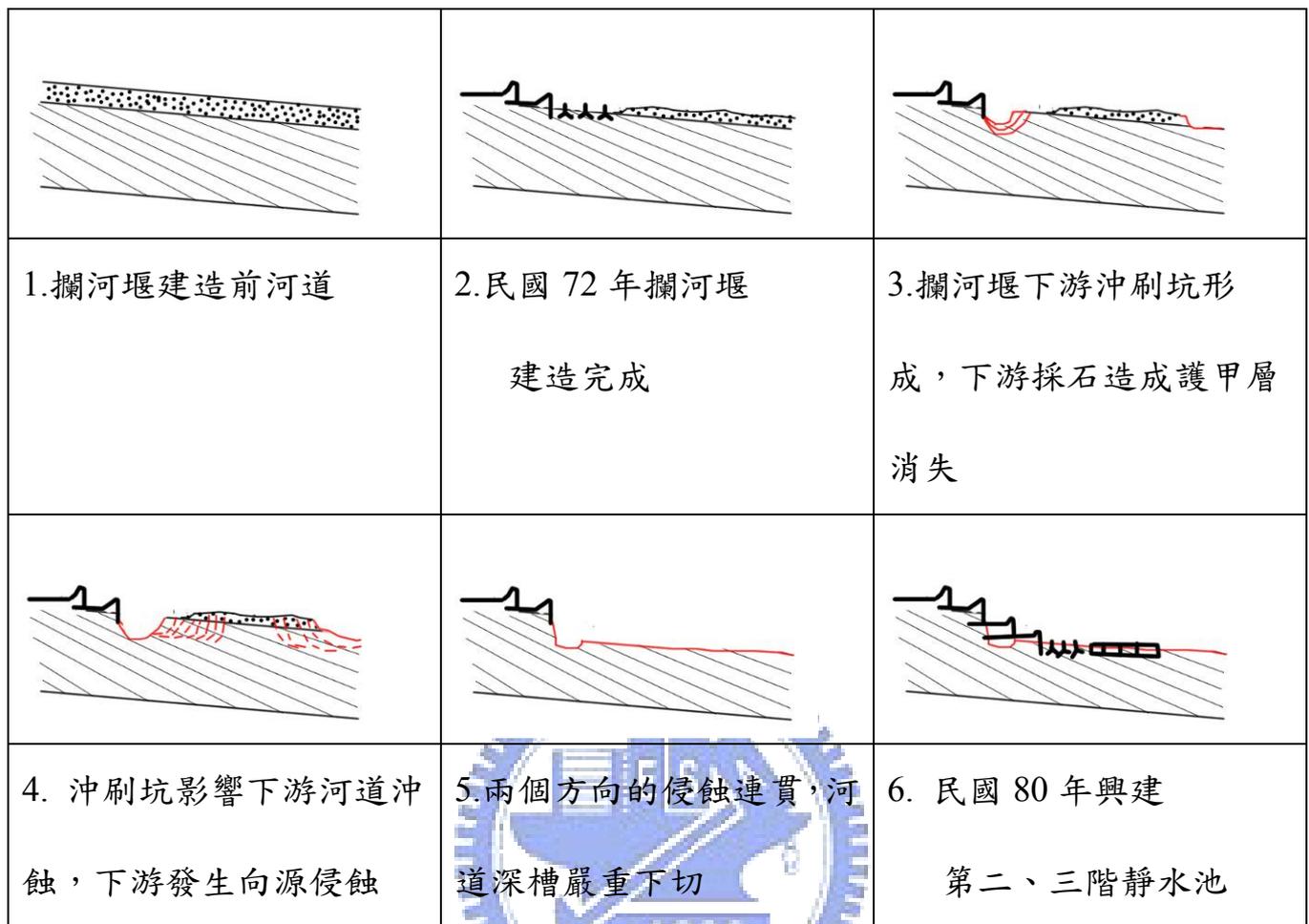


圖 4-23 仁義潭攔河堰下方侵蝕的演化示意圖

4.5 Erodibility Index 沖蝕指標適用性評估

由歷史照片比對與航空照片判釋的結果發現，仁義潭攔河堰下游於民國 76 年到民國 79 年間因為冲刷坑發展與下游護甲層消失產生向源侵蝕，造成民國 72 年完工時相當於第一階靜水池高度的河床高程在民國 76 年至 79 年三年間下降到民國 80 年新設的第三階靜水池尾部高程(圖 4-23)，因此本研究使用沖蝕指標評估方法，來評估攔河堰正下方在民國 76 年至民國 79 年所發生的沖蝕性。

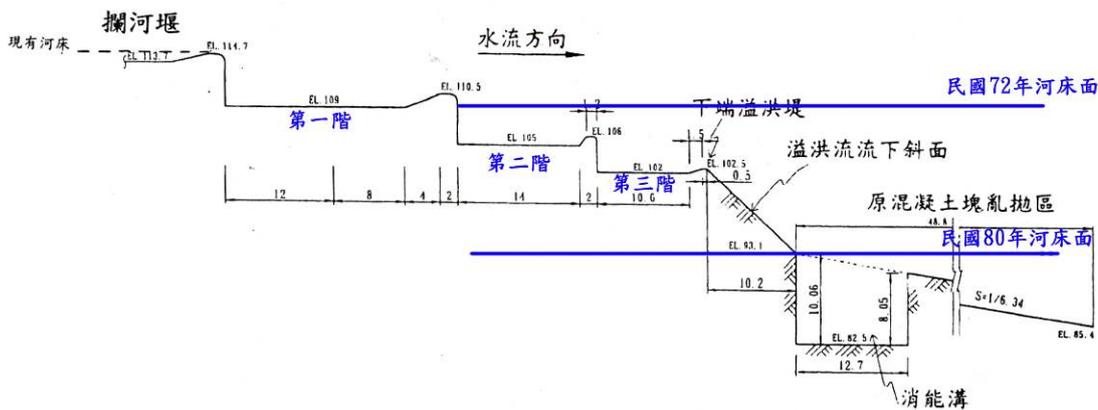


圖 4-24 仁義潭攔河堰下游河床高程變化(95 年八掌溪下游沖刷河段治理方案之研
析)

由文獻的兩個國外案例探討，要使用 erodibility index 沖蝕指標評估方法，必須先取得沖蝕指標評分的相關參數，包括強度、不連續面的間距、組數、粗糙度、位態等，這些參數可由現場調查或得，現場調查表格如表 3-1，本研究所有詳細調查記錄如附錄 III。依據這些參數可以由 Annandale(2006)建議的方法得到現地岩石河床的抗侵蝕指數(erodibility index)，進而由經驗公式(式 2.18)求得該岩石河床的容許侵蝕能量(Capacity of stream power)；另外必須要有水流的條件，如特定的歷史洪水事件下水流在某個區域造成的侵蝕能量，與前面求得的容許侵蝕能量比較之下，便可以得知是否發生沖蝕。

4.5.1 Erodibility Index K_h 值的估算

由現場調查所做地質圖與歷史照片比對的結果，仁義潭攔河堰正下方至 100 斷面間岩床都是屬於泥質的頁岩，岩層僅存在一組層理，侵蝕機制屬於 4.3.1 節所提水流沿材弱面侵蝕的行為。利用現場調查得參數及表 4-4 則可計算出 Erodibility

Index。本研究對每個參數就現場調查的結果求取最大值與最小值做為該區域岩床的抗侵蝕指數範圍。

表 4-4 仁義潭攔河堰下方泥質頁岩沖蝕指數評分

參數	最小值	最大值
M_s	0.87	0.87
$K_b=RQD/J_n$	100/1.5= 66.67	100/1.22= 81.96
$K_d=J_r/J_a$	1.0/1= 1	1.5/1= 1.5
J_s	0.67	0.9
K_h	38.86	96.26
$P_c(kW/m^2)$	15.56	30.73

以下就各參數給定的標準說明如下：

1. 材料強度參數(mass strength number, M_s)—依現場判斷，研究區域內的泥質頁岩都有泡水軟化的情形，在現地當這種材料在河床底部時使用強度試驗儀測定其強度小於 1MPa，用地質鎚鈍面可以輕易敲碎，因此岩性屬材料強度參數建議表(表 2-1)的軟弱岩石， M_s 值為 0.87。
2. 顆粒或塊體尺寸參數(Block or particle size number, K_b)— K_b 參數的包括 RQD 與 J_n 兩個部份，由現地觀察得到這種岩體未風化時相當完整，現有鑽孔資料顯示這種泥質岩在鑽心取樣時岩心取樣率接近 100，因此 RQD 建議給定 100；本區域內除了河岸偶爾出現解壓節理外，約略只有一組層理符合岩體本身不連續面的條件，因此 J_n 值由表 2-4 取一組節理或一組附加隨機出現節理兩種情況，即

1.22 或 1.5。

3. 弱面或顆粒間抗剪強度參數 (Discontinuity/interparticle bond shear strength number, K_d)— K_d 值由岩體的節理面粗糙參數 (Joint Roughness Number, J_r) 與節理改變參數 (Joint Alteration Number, J_a) 決定，泥質頁岩層面為連續且光滑的層面， J_r 參數由圖 2-9 與表 2-5 得應為 1 至 1.5；而 J_a 參數由於不連續面沒有分離的情形， J_a 應為 1。
4. 地盤構造條件參數 (Relative ground structure number, J_s)—此參數由節理間距比 r 值、水流方向與岩體在水流縱剖面上的傾角三個要素決定。本例只有一組層面，因此 $[1:y/x]$ 值為 $[1:\infty]$ ，依規則 r 值最大取到 $[1:8]$ ；研究區域內岩層與水流為順向 (In direction of stream flow)；岩體在水流方向上的傾角約為 10 度至 20 度。由以上三條件，查表 2.5 得 J_s 值為 0.67 (傾角 10 度) 或 0.9 (傾角 20 度)。
- 以上四個參數的乘積可得 K_h 值 (表 4-4)，仁義潭攔河堰下方泥質頁岩的抗沖蝕指數 (erodibility index, K_h) 範圍在 38.86~96.26 之間，依式 2.18 在 K_h 值大於 1 的條件下，可得容許沖蝕能量為 P_c 值 15.56~30.73 (kW/m²)。

除了仁義潭攔河堰下方泥質頁岩的抗沖蝕指數外，本研究尚進行觸口攔河堰下游泥質岩與 95 號斷面下游極厚層粉砂岩的抗沖蝕指數評分。

觸口堰下游岩床沖蝕指數：研究區域觸口攔河堰至五虎寮橋之間岩層多半為厚層泥質岩，這種泥質岩的侵蝕機制屬於 4.3.2 節所提乾溼循環的乾縮、乾裂行為，忽略表面受乾濕循環後乾裂的表層後，在床底的新鮮岩體抗沖蝕指數參數與指數計

算結果如表 4-5。

表 4-5 觸口堰下游厚層泥岩沖蝕指數

參數	最小值	最大值
M_s	2.5	3.25
$K_b=RQD/J_n$	100/2.24= 44.64	100/1.22= 81.96
$K_d=J_r/J_a$	1.0/1= 1	1.5/1= 1.5
J_s	0.67	0.9
K_h	74.77	359.60
$P_c(kW/m^2)$	25.43	82.58

與仁義潭攔河堰下游泥質頁岩評分的主要差異為強度參數 M_s 值、塊體尺寸參數 K_d 值與構造條件參數 J_s 三個部份。透過現地使用地質錘簡易判斷岩體強度，依照表 2.1 建議的簡易 M_s 值判斷， M_s 值最大與最小分別為 2.5 與 3.25；本區域某些岩層出現有兩組以上的節理，因此節理組數為 2 組附加散亂節理， J_n 值為 2.24；節理的出現也影響到構造條件的節理間距比， r 值， y/x 值不再是 ∞ 使 J_s 值變更為 0.67。研究區域內觸口堰下游至五虎寮橋間厚層泥質岩的抗沖蝕指數 K_h 值範圍為 74.77 到 359.60 之間(表 4-5)，依式 2.20 可得容許沖蝕能量 P_c 值為 25.43~82.58(kW/m²)，相對地較前面泥質頁岩高。

95 號斷面下游的極厚層粉砂岩的抗沖蝕指數：本處岩性屬極厚層砂岩，侵蝕機制屬於 4.3.4 節所提粉砂岩切穿，抗沖蝕指數參數與指數計算評分結果如表 4-6。

表 4-6 95 號斷面下游極厚層粉砂岩沖蝕指數評分

參數	最小值	最大值
M_s	1.86	3.95
$K_b=RQD/J_n$	100/1.5= 66.67	100/1.22= 81.96
$K_d=J_r/J_a$	1.0/1= 1	1.5/1= 1.5
J_s	0.67	0.9
K_h	83.08	437.05
$P_c(kW/m^2)$	27.52	95.59

現地由強度試驗儀量測粉砂岩的單壓強度約在 3~6MPa 之間，因此 M_s 值的範圍依表 2.1 建議最小與最大值分別為 1.86 至 3.95；除了隨機出現的解壓節理外只有一組層面，因此 J_n 值為 1.22 至 1.5。95 號斷面下游²出現的極厚層粉砂岩抗沖蝕指數 K_h 值範圍為 83.08 到 437.05 之間(表 4-6)，依式 2.20 可得容許沖蝕能量 P_c 值為 27.52~95.59(kW/m²)，相對地較前面泥質頁岩與厚層泥岩高。

4.5.2 Erodibility Index K_h 值與岩層侵蝕速率的比較

由 4.5.1 節對三種不同岩層的沖蝕指數(Erodibility Index, K_h)評分比較的結果為一仁義潭攔河堰下方泥質頁岩($K_h=38.86\sim96.26$)<觸口堰下游厚層泥岩($K_h=74.77\sim359.60$)<95 號斷面下游極厚層粉砂岩($K_h=83.08\sim437.05$)，而由 4.1.2 節所得岩層年平均沖蝕速率的結果為一泥質頁岩層(1.4m)>粉砂岩(0.75m)>觸口堰下游泡水後表面會乾裂的泥岩(0.5m~1m/年)，本文就兩者之關係說明如下：

1. 泥質頁岩層的抗沖蝕力評分($K_h=38.86\sim96.26$)最低，平均侵蝕速率也最快，約為

1.4m/年，符合抗沖蝕力越低越易受沖蝕的原則。

2. 粉砂岩的抗沖蝕力評分($K_h=83.08\sim437.05$)較高，平均侵蝕速率約為 0.75m/年。
3. 觸口堰下游的泥岩抗沖蝕力評分雖然較粉砂岩低，但是年平均沖蝕速率卻有可能出現比粉砂岩小(0.5m~1m/年)的情況，這可能是受水流條件所影響，在較劇烈的水流條件下，95 斷面下游的粉砂岩層必須承受較高的水流侵蝕能量，因而發生沖蝕速率較觸口堰下游泥質岩快的情況；另一方面也可能受沖蝕機制不同的影響，由 4.3 節所提出的軟岩現地沖蝕機制得知，95 斷面下游的粉砂岩沖蝕機制與觸口堰下游乾濕循環作用下發生乾裂的泥岩沖蝕機制有所不同，沖蝕速率也有可能是受到機制的影響。

4.5.3 水流流功(Stream power)的計算

由第三章流量觀測資料可知，在民國 76 年至 79 三年間，最大洪峰流量為民國 78 年 9 月 10 日莎拉颱風所造成接近 800cms 瞬時流量。因此本研究仁義潭下游水流侵蝕能量計算參考八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告裡所作水理分析(附錄 IV)，以該報告內所提民國 77 年軍輝橋最大瞬時流量 887cms 為計算所用流量，依 Annandale(2006)建議的水流越頂(Headcuts)模式(圖 4-25)進行水流侵蝕能量計算，詳細方法見 2.2.3 節。

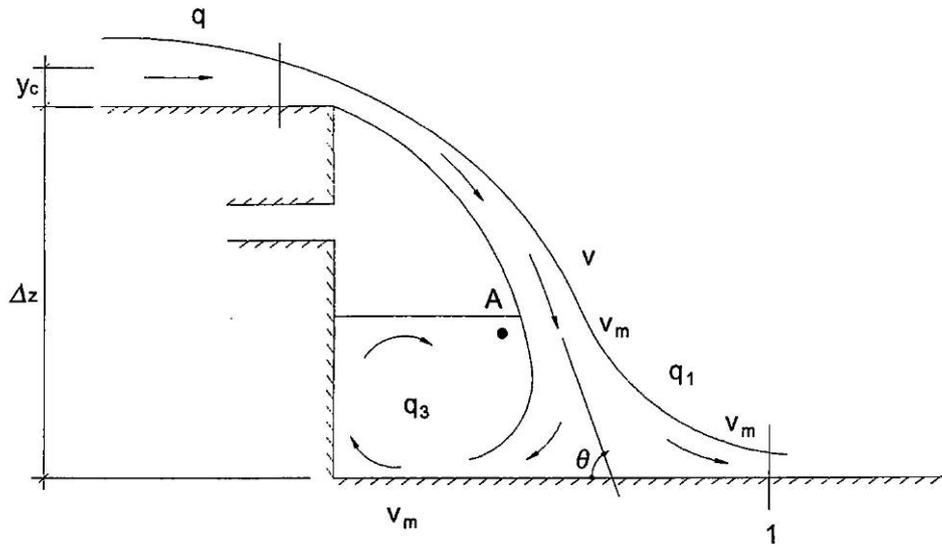


圖 4-25 Hearcut 下游水流的侵蝕(Annandale, 1995)

依 2.2.3 節流功(Stream Power)計算，所需的參數包括水流越頂的流速 v_c 與高度 y_c 、跌水高度 Δz 、尾水高度 y_1 與單寬流量 q ，其中水流越頂的流速 v_c 與高度 y_c 能由渠道水力學公式(式 4-1、式 4-2)求得：

$$Y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (式 4-1)$$

$$V_c = \frac{q}{y_c} \dots\dots\dots (式 4-2)$$

由圖 4-24 可知本研究要討論的侵蝕歷史事件為民國 76 年至 79 年間，位於第一階靜水池下方河床高程由 76 年下降到 79 年高程，在上述參數中，單寬流量 q 可以由總流量 Q 除以攔河堰的寬度 B 得到， Δz 5.5 公尺為假設仁義潭攔河堰剛完工時第一階淨水池下方的跌水高度，跌水後的下游尾水高 y_1 則假設為 3 公尺，水的密度為 10kN/m^3 ，以下將就各種參數的決定及其變化性對侵蝕能量計算結果作討論：

1. 由式 4-1、式 4-2 可得，在第一階淨水池處水流的越頂流速值為 4m/s、越頂水流

高度為 1.64m，所以後續分析取 $V_c=4\text{m/s}$ ，越頂水流高度 y_c 為 1.64m。

2.表 4-7 為越頂流速 $V_c=4\text{m/s}$ ，第一階淨水池下方的跌水高程由最初的 5.5m 發展到 19.5m 的情形下計算的流功。由表 4-7 可以看出侵蝕高程每增加 1 公尺跌水造成衝擊產生的侵蝕能量約增加 40 kW/m^2 ，由圖 4-24 可以知道民國 76 年到 79 年的侵蝕高程發展約使跌水深度增加至 17.5 公尺，即民國 79 年增設第二階與第三階淨水池前，在 887cms 流量的洪水下，第一階淨水池底部沖刷坑所受跌水衝擊產生的侵蝕能量能達到 556.94 kW/m^2 。

表 4-7 越頂流速 $V_c=4\text{m/s}$ ，侵蝕高程的改變

q(cms/m)	$\Delta z(\text{m})$	$v_c(\text{m/sec})$	$y_c(\text{m})$	$y_1(\text{m})$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	SP(kW/m^2)
6.57	5.50	4.00	1.64	3.00	10.00	39.07
6.57	6.50	4.00	1.64	3.00	10.00	80.67
6.57	7.50	4.00	1.64	3.00	10.00	122.69
6.57	8.50	4.00	1.64	3.00	10.00	165.07
6.57	9.50	4.00	1.64	3.00	10.00	207.76
6.57	10.50	4.00	1.64	3.00	10.00	250.71
6.57	11.50	4.00	1.64	3.00	10.00	293.91
6.57	12.50	4.00	1.64	3.00	10.00	337.32
6.57	13.50	4.00	1.64	3.00	10.00	380.92
6.57	14.50	4.00	1.64	3.00	10.00	424.70
6.57	15.50	4.00	1.64	3.00	10.00	468.63
6.57	16.50	4.00	1.64	3.00	10.00	512.72
6.57	17.50	4.00	1.64	3.00	10.00	556.94
6.57	18.50	4.00	1.64	3.00	10.00	601.28
6.57	19.50	4.00	1.64	3.00	10.00	645.74

4.5.4 八掌溪攔河堰下游的沖蝕性

要使用 Annandale(2006)提出的沖蝕指標評估方法必須要有岩體本身的抗侵蝕指數評分 K_h 值與衝擊水流的侵蝕能量 Stream power，依 4.5.1 節對仁義潭攔河堰

下游受水流衝擊泥質頁岩 K_h 值的評分為 38.86~96.26 之間，在 K_h 值大於 1 的條件下依式 2.18 可得容許沖蝕能量 P_c 值為 15.56~30.73(kW/m²)；由 4.4.2 節對仁義潭攔河堰下方以民國 76 年到 79 年間的河床條件、水流條件所做水流侵蝕能量計算可得表 4-7，侵蝕能量依照侵蝕高程的發展由 39.07 Kw/m² 發展到 556.94 Kw/m²。將上述 K_h 值所得容許沖蝕能量 P_c 值結果與水流侵蝕能量計算結果做比較可得圖 4-26，由圖可以知道仁義潭攔河堰在民國 76 年開始第一階淨水池下方在 887cms 順時流量下水流產生的侵蝕能量會大於裸露泥質頁岩岩盤的最大容許侵蝕能量 P_{c-max} ，當沖刷坑繼續發展，侵蝕高程持續增加，相同流量下的水流侵蝕能量將遠大於岩盤的容許侵蝕能量，依 Annandale(2006)的侵蝕指標評估方法概念，這個場址的侵蝕將會持續發生。

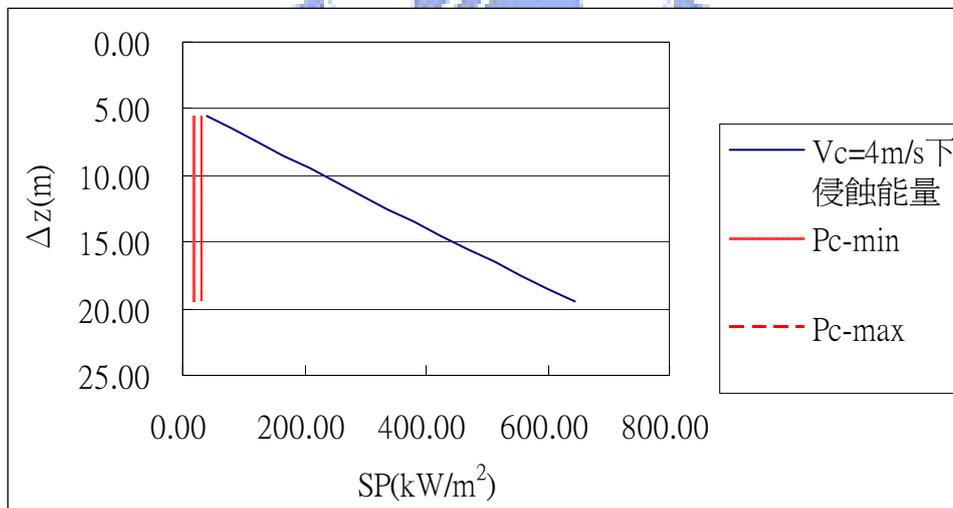


圖 4-26 水流流功與岩盤抗侵蝕能量比較

將這個場址的 K_h 值與水流侵蝕能量點在圖 2-14 上能得圖 4-27，可以知道現地 K_h 值與水流侵蝕能量位於 Annandale(2006)侵蝕評估方法的哪一個位置。由前面所算得的 K_h 值(表 4-4、表 4-5、表 4-6)可以知道研究區域內不論是泥質頁岩、厚層

泥岩、極厚層粉砂岩， K_h 值約略在 40 到 400 之間，配合水流侵蝕能量的計算結果 $40\sim 550\text{kW/m}^2$ 可以在圖 4-27 上劃定出八掌溪研究區域的沖蝕指標評估區塊，可以看出若岩體為抗侵蝕度較高的粉砂岩($K_h=400$)時，在最小的侵蝕能量(40kW/m^2)下不會發生侵蝕。

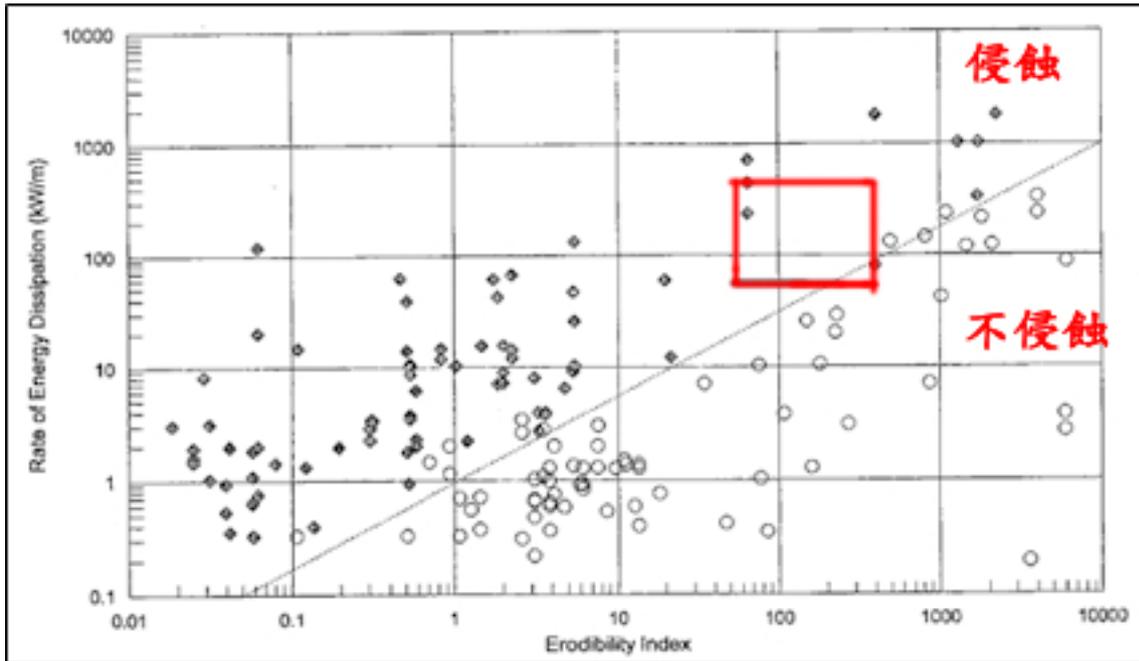


圖 4-27 八掌溪研究區域的沖蝕指標評估區塊

4.5.5 沖蝕指標方法的適用性討論

由 4.5.3 節圖 4-27 的結果，研究區域發生侵蝕的行為符合 Annandale(2006)沖蝕指標評估方法的預期，結果上看來本方法是合理的，但是在本研究使用沖蝕指標方法來對沖蝕進行評估時，主要的問題能分為兩個部份，一是沖蝕指標評分(K_h 值)的問題，另一是水流侵蝕能量(Stream Power)計算的問題，以下分別討論之：

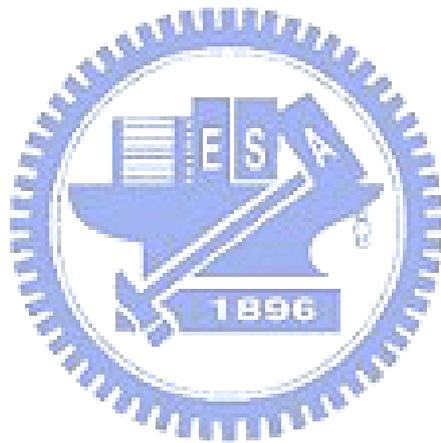
1. 沖蝕指標評分(K_h 值)的討論：在 4.5.1 小節的沖蝕指標評分裡，由於現場調查的紀錄要點是參考過文獻回顧後設計的，所以參數的給予，依 Annandale(2006)

提供的制式表格配合現場調查資料查表，使用上甚為簡便。但是在軟岩地區的岩層節理不發達，造成幾項與節理有關的參數沒有變異性，如岩體的節理面粗糙參數(Joint Roughness Number, J_r)與節理改變參數(Joint Alteration Number, J_a)通常只能定為 1，使得代表弱面或顆粒間抗剪強度參數 K_d 值無法發揮；另外 RQD 值也不能代表軟岩的某些特性，由現有鑽孔取樣資料顯示 RQD 值皆為 100，透過經驗公式的計算，由於節理不發達的之故，值也為 100，在 95 年八掌溪治理規劃報告甚至建議軟岩地區的 RQD 值不應採計。因此軟岩岩層在使用沖蝕指標評分時多半受強度參數 M_s 值影響，在研究區域內的 M_s 值為 0.87 至 3.95 左右，能使 K_h 值相差 4 倍，但是前面所提節理面粗糙參數 J_r 與節理改變參數 J_a 在節理發達的岩體條件下能使 K_h 值大小相差 $4 \times 18 = 72$ 倍，所以是否在軟岩地區要有一個相對應於 K_d 的參數加入沖蝕指標評估方法裡可能為另一值得探討的問題。

2. 水流侵蝕能量(Stream Power)計算：在 Annandale(2006)提出建議的水流侵蝕能量計算(如突降點的計算)，第二章提到需要有人為工程上的判斷轉移區的範圍，增加了公式使用上的不確定性；本研究使用水流越過一跌水構造物的計算方式計算仁義潭攔河堰下方沖蝕坑的侵蝕能量，在表 4-7 的表現上符合常理，即水流產生侵蝕的能量隨著跌水高度的增加而遞增。

總觀 4.5，Erodibility Index 沖蝕指標評估方法的使用上，配合現場的調查與水流資料的搜集能做到與文獻回顧案例探討相近的現地沖蝕評估，所做結果也如現

場觀察，河床會產生侵蝕，但是在軟岩地區的岩體特性會使得沖蝕指標評分在參數給定上少掉某些重要參數，所以在軟岩地區是否制定新的參數加入沖蝕指標方法可能為往後研究一重要的課題。



第五章、結論與建議

5.1 結論

本研究為探討軟弱岩層的沖蝕機制、抗沖蝕力及沖蝕速率，而以八掌溪劇烈沖蝕河段進行詳細的現地調查，調查內容包括河道地質及沖蝕現象，依據調查結果建立軟弱岩層之沖蝕機制與河道地質圖，最後以現有斷面測量資料及水文資料，提出其平均沖蝕速率及檢討 Annandale(2006)之抗沖蝕指標評估方法之適用性，所得結論如下：

1. 以研究區域具代表性地質橫剖面圖(斷面 95、斷面 96 與斷面 113)得到的岩層沖蝕速率比較，在研究區內的岩層沖蝕速率比較為—泥質頁岩層(1.4m)>泥質岩(1m)>泥(砂)岩與泥(砂)質頁岩互層(0.8m~1m/年)>粉砂岩(0.75m)>泡水後表面會乾裂的泥岩(0.5m~1m/年)。
2. 在研究區域除了觀察到與文獻相符的硬岩河床現地沖蝕機制，並觀察到四種在軟岩河床與典型硬岩河床有所不同的現地沖蝕現象，將這些現地沖蝕現象整理並提出軟岩河床的現地沖蝕機制分別為：機制一、水流沿材料弱面侵蝕後塊體脫離的情形；機制二、泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為；機制三、砂頁岩互層的差異磨蝕，薄層厚層互相牽動剝離；機制四、極厚層粉砂岩的切穿等；配合沖蝕機制出現的岩層特性可得沖蝕速率比較約為：機制一>機制三>機制四>機制二。
3. 透過歷史照片及航空照片判釋，提出仁義潭攔河堰的侵蝕發生始於民國 72 年

至民國 80 年間，對於攔河堰下方的侵蝕演化過程，主要為沖蝕坑的向下發展與下游岩床裸露的向源侵蝕兩個部份。

4. 對各岩層所做抗沖蝕指數評分為：仁義潭攔河堰下方泥質頁岩

($K_h=38.86\sim96.26$)<觸口堰下游厚層泥岩($K_h=74.77\sim359.60$)<95 號斷面下游極厚層粉砂岩($K_h=83.08\sim437.05$)，此結果與相對應的岩層平均侵蝕速率—泥質頁岩層(1.4m)>粉砂岩(0.75m)>觸口堰下游泡水後表面會乾裂的泥岩(0.5m~1m/年)稍有不同，在泥質頁岩與粉砂岩的比較上符合抗侵蝕指數越低侵蝕速率越快的原則，而會受乾濕循環作用乾裂的泥岩可能因為水流條件或是沖蝕機制的不同而影響沖蝕的速率。

5. 針對仁義潭攔河堰正下方在民國 76 年至民國 79 年所發生的沖蝕，以 Annandale(2006) 沖蝕指標評估方法進行抗沖蝕評估。現地的泥質頁岩 K_h 值的評分為 38.86~96.26 之間，由此 K_h 值可得容許沖蝕能量 P_c 值為 15.56~30.73(kW/m²)；另外依照民國 76 年到 79 年間的河床條件、水流條件可得水流侵蝕能量由 39.07 kW/m² 發展至 556.94 kW/m²，皆超過河床所能抵抗的侵蝕能量，現地河床沖蝕評估符合預期會產生沖蝕。

6. 軟岩地區的岩體特性會使得沖蝕指標評分無法反應岩體品質 RQD、節理面粗糙參數 J_r 與節理改變參數 J_a 等三個重要參數的影響。

5.2 建議

1. 本研究的資料搜集上存在許多不足的部份，如河道橫剖面的斷面測量資料每

隔數年才進行一次大斷面測量，因此河床的侵蝕速率估算數值極粗糙，若能透過拍攝頻率較頻繁的航空照片，用以建立數值模型(DEM)加入高程的測定在歷年間比較，能將沖蝕的量量化進行沖蝕速率準確地比較。

2. 提出的4種現地沖蝕機制可能僅符合八掌溪劇烈沖刷河段的情況，對於軟岩河床的沖蝕研究建議對更多河流進行調查以歸納整理更符合全部軟岩河床的沖蝕機制。
3. Annandale(2006) 沖蝕指標評估方法對於軟岩地區的岩體特性會使得沖蝕指標評分在參數給定上少掉某些重要參數的問題，建議能嘗試加入軟岩地區特有的參數進行方法的修正，如：消散耐久性試驗、泥岩乾濕循環試驗等，進而能提出符合軟岩地區的抗沖蝕評估方法。



參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所，1999，「沖降型河川之河道穩定試驗研究(88年度報告)」。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2000，「沖降型河川之河道穩定試驗研究(89年度報告)」。
3. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2000，「八掌溪河道平衡及改善方案研擬」。
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. Annandale, G.W., 1995. "Erodibility," *Journal of Hydraulic Research*, v33, pp471-493
6. Annandale, G.W., 2006. "Scour Technology," Mc Graw Hill.
7. Frizell, K.H., 2006. "Hydraulic Investigations of the Erosion Potential of Flows Overtopping Gibson Dam," *Hydraulic Laboratory Report HL-2006-02*.
8. Howard, A.D., Dietrich, W.E and Seidl, M.A, 1994. "Modeling fluvial erosion on orignal to continental scales," *Journal of Geophysical Research*, v99, pp13,971-13,986.
9. Kirsten, H.A.D., 1982. "A Classification System for Excavation in Natural Materials," *The Civil Engineering in South Africa*, pp. 292-308, July (discussion in Vol. 25, No.5, May, 1983).
10. Momber, A.W. and Kovacevic, R., 1994. "Fundamental investigations on concrete wear by high velocity water flow," *Wear*, v177, pp55-62.
11. Momber, A.W., 2003. "Cavitation damage to geomaterials in a flowing system," *Journal of materials science*, v30, pp747-757.

12. Momber, A.W., 2003. "Wear of rocks by water flow," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v41, pp51-68.
13. Seidl, M.A. and Dietrich, W.E., 1992. "The problem of channel erosion into bedrock," *Journal of Fluvial Geomorphology*, 1992, pp316-339.
14. Sklar, L.S. and Dietrich, W.E., 2004. "A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load," *Journal of Water Resources Research*, v40, W06301.
15. Stock, J.D. and Montgomery, D.R., 1999. "Geologic constraints on the bedrock river incision using the stream power law," *Journal of Geophysical Research*, v104, pp4983-4993.
16. 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.
17. Whipple, K.X. and Tucker, G.E., 1999. "Dynamics of the stream-power river incision model," *Journal of Geophysical Research*, v104, pp17,661-17,674.
18. Whipple, K.X., Hancock, G.S. and Anderson, R.S., 2000. "River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation," *Geological Society of America Bulletin*, v112, pp490-503.

附錄 I 既有室內試驗資料

表 1 土壤一般物理性試驗成果(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

孔號 Hole NO.	試驗編號 TEST NO.	試驗深度 Depth (m)	Grain size					土粒比重 Gs	土壤單位重 γ_t t/m ³	含水量 W _n %	孔隙比 e	土壤分類 Unified Classifi- cation
			礫石 Gravel %	砂 Sand %	粉土 Silt %	黏土 Clay %	粉土-黏土 Silt & Clay %					
DH-1	S-1	1.05-1.50	22.0	59.5	16.2	2.3	18.5	2.65	2.01	13.2	0.49	泥質砂岩
DH-1	S-2	2.55-3.00	36.2	45.8	14.6	3.4	18.0	2.65	2.34	7.7	0.22	泥質砂岩
DH-1	S-3	4.05-4.50	40.3	45.1	12.3	2.3	14.6	2.65	2.21	10.7	0.33	泥質砂岩
DH-1	S-4	6.80-7.00	55.2	36.2	--	--	8.6	2.64	2.11	8.3	0.36	不良級配泥質礫石
DH-1	S-6	9.15-9.44	0.0	35.4	49.2	15.4	64.6	2.70	2.27	12.5	0.34	低塑性沉泥
DH-1	S-7	15.00-15.28	0.0	39.3	49.8	10.9	60.7	2.70	2.04	11.2	0.47	低塑性沉泥
DH-2	S-1	1.20-1.65	0.0	61.1	34.6	4.3	38.9	2.67	2.06	19.0	0.54	泥質砂岩
DH-2	S-2	10.00-10.13	0.0	3.2	68.6	28.2	96.8	2.73	2.11	15.3	0.49	低塑性沉泥
DH-3	S-1	1.05-1.50	13.0	73.0	12.1	1.9	14.0	2.65	2.04	12.8	0.47	泥質砂岩
DH-3	S-2	2.60-3.05	36.2	50.0	11.9	1.9	13.8	2.65	2.13	11.6	0.39	泥質砂岩
DH-3	S-3	4.05-4.50	58.9	29.4	9.4	2.3	11.7	2.65	2.15	8.7	0.34	不良級配泥質礫石
DH-3	S-4	5.80-6.25	45.5	44.1	8.4	2.0	10.4	2.65	2.14	11.9	0.39	不良級配泥質礫石
DH-3	S-5	7.20-7.46	45.2	39.4	12.7	2.7	15.4	2.65	2.27	10.7	0.29	泥質礫石
DH-3	S-6	9.00-9.20	51.0	36.1	11.3	1.6	12.9	2.65	2.08	7.6	0.37	泥質礫石
DH-3	S-7	10.00-10.29	28.6	38.5	19.2	13.7	32.9	2.67	2.11	14.5	0.45	泥質砂岩
DH-3	S-8	11.75-12.20	0.0	40.3	48.8	10.9	59.7	2.69	2.05	13.7	0.49	低塑性沉泥
DH-3	S-9	14.55-15.00	9.4	48.5	31.2	10.9	42.1	2.68	2.18	14.9	0.41	泥質砂岩
DH-3	S-10	16.00-16.39	45.2	9.3	39.4	6.1	45.5	2.68	2.22	11.0	0.34	優良級配低塑性泥質礫石
DH-3	S-11	17.55-18.00	63.9	25.9	8.3	1.9	10.2	2.65	2.11	9.5	0.38	不良級配泥質礫石

表 2 岩石一般物理性試驗成果(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

孔號 Hole NO.	試驗 編號 TEST NO.	試驗深度 Depth (m)	土粒 比重 Gs	土壤單位重 γ_t t/m ³	含水量 Wn %	孔隙比 e	岩石分類 Rock Type
DH-1	RP-1	10.44-10.60	2.71	2.09	13.43	0.469	灰色泥質砂岩
DH-1	RP-2	12.80-13.00	2.67	2.23	13.22	0.354	灰色泥質砂岩
DH-1	RP-3	13.40-13.50	2.38	2.25	14.12	0.359	灰色泥質砂岩
DH-1	RP-4	14.81-15.00	2.66	2.22	13.93	0.366	灰色泥質砂岩
DH-2	RP-5	3.40-5.40	2.68	2.07	17.17	0.517	灰色泥質砂岩
DH-2	RP-6	4.00-4.12	2.69	2.19	15.12	0.414	灰色泥質砂岩
DH-2	RP-7	7.00-7.15	2.68	2.16	15.82	0.437	灰色泥質砂岩
DH-2	RP-8	7.70-7.88	2.69	2.11	17.78	0.499	灰色泥質砂岩



附錄 II 歷年斷面測量套繪

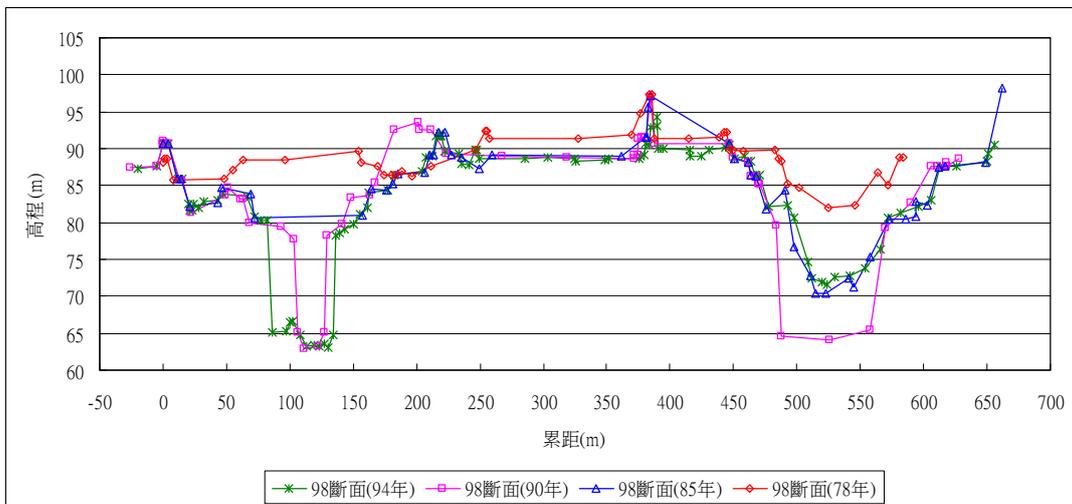
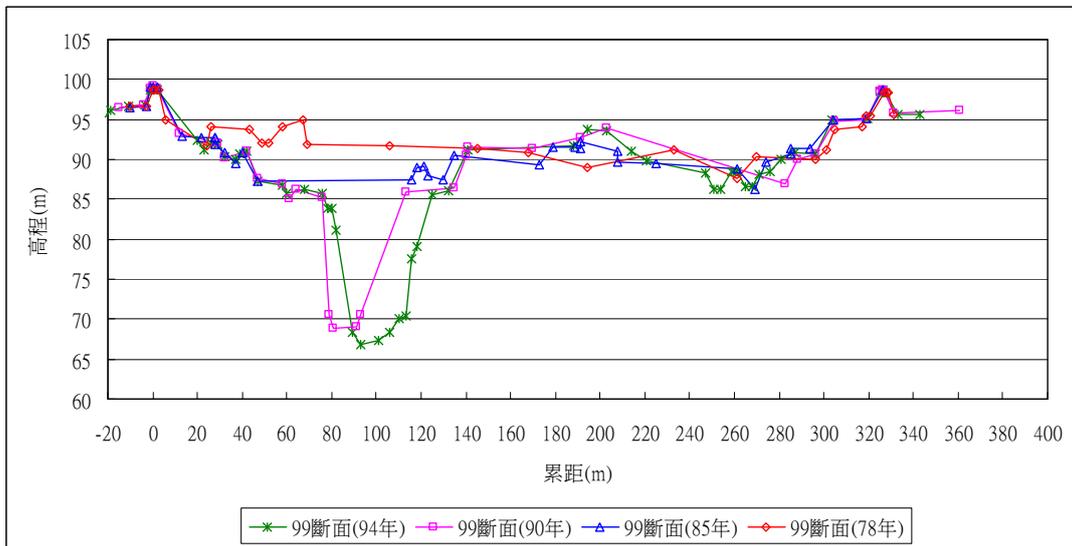
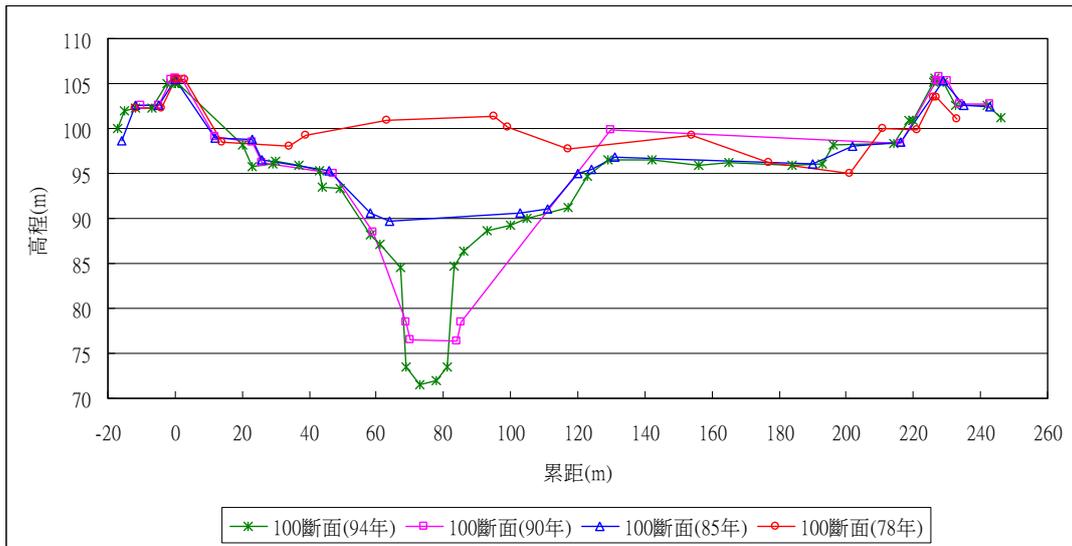


圖 1.100、99、98 歷年斷面測量資料

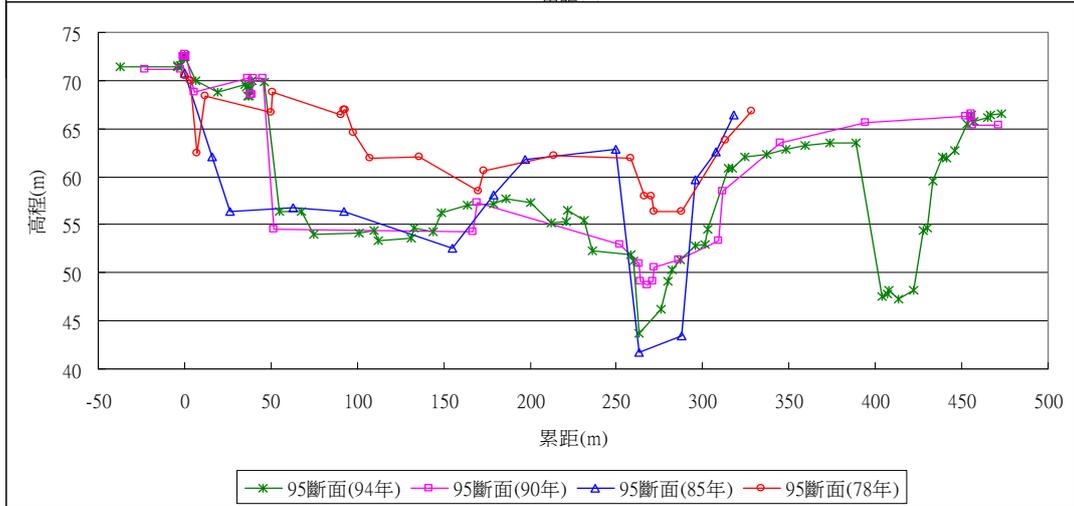
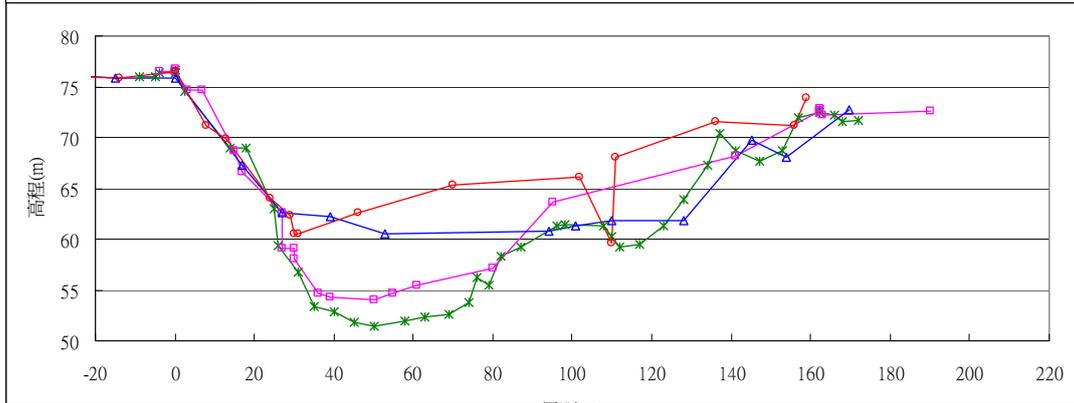
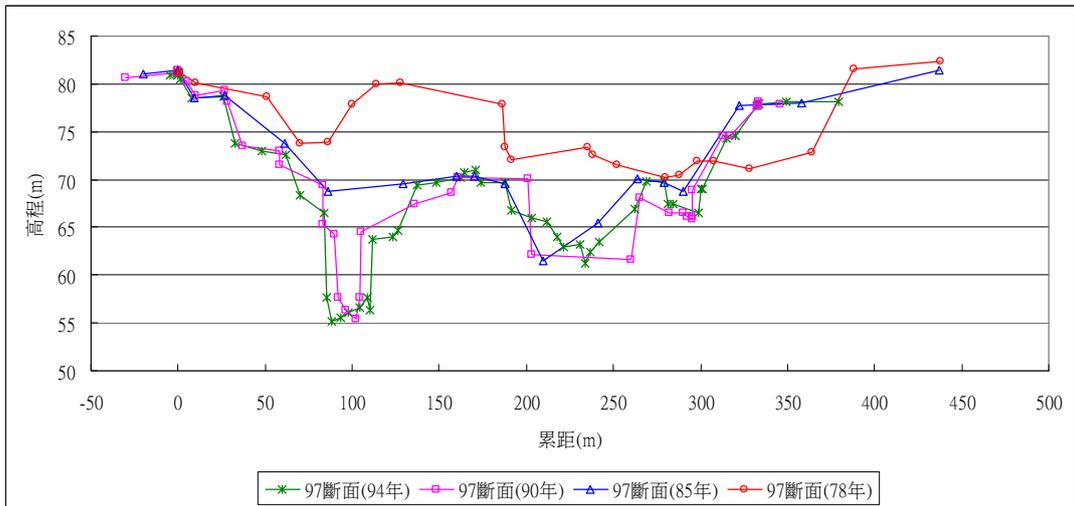


圖 2. 97、96、95 歷年斷面測量資料

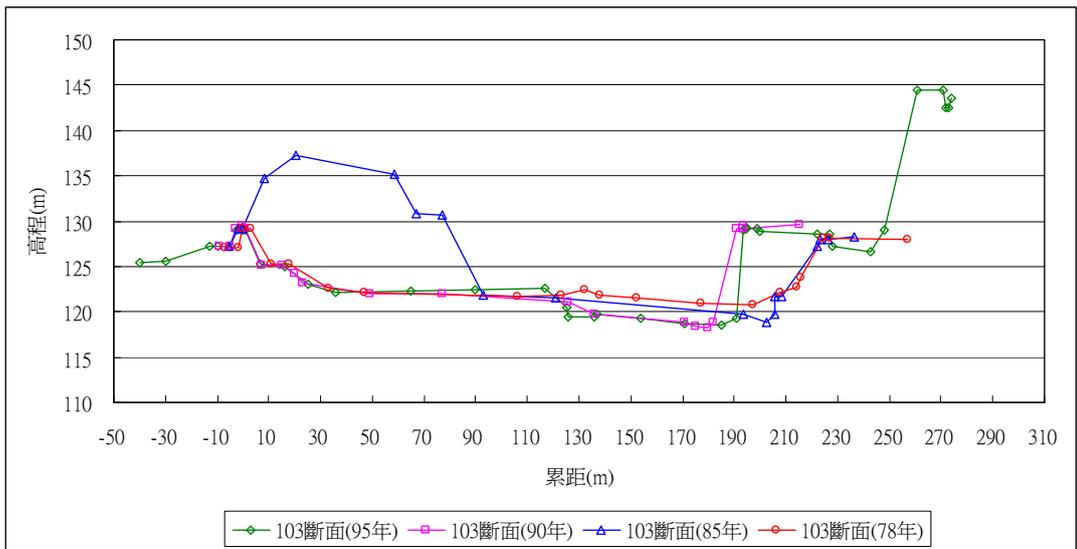
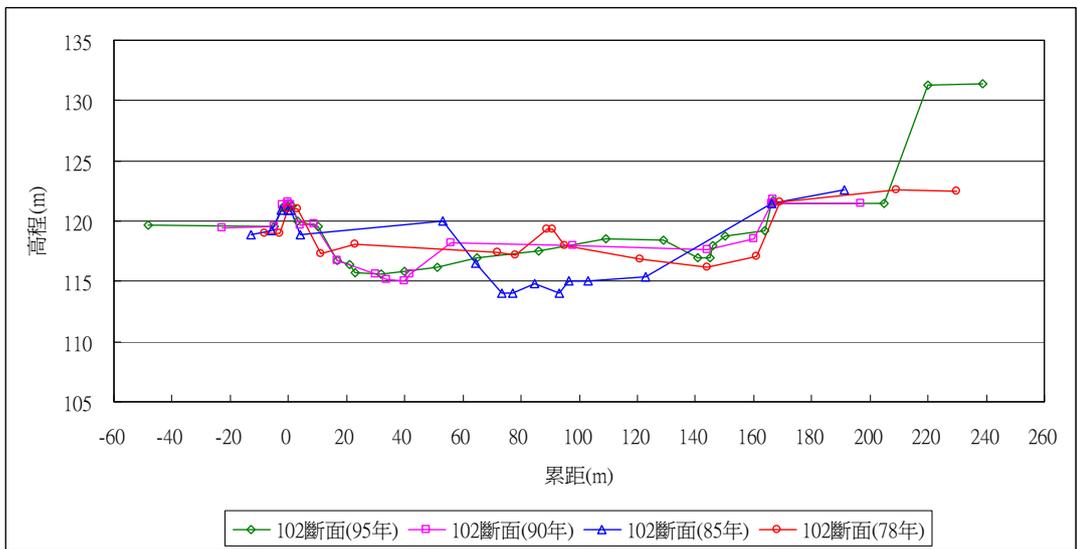
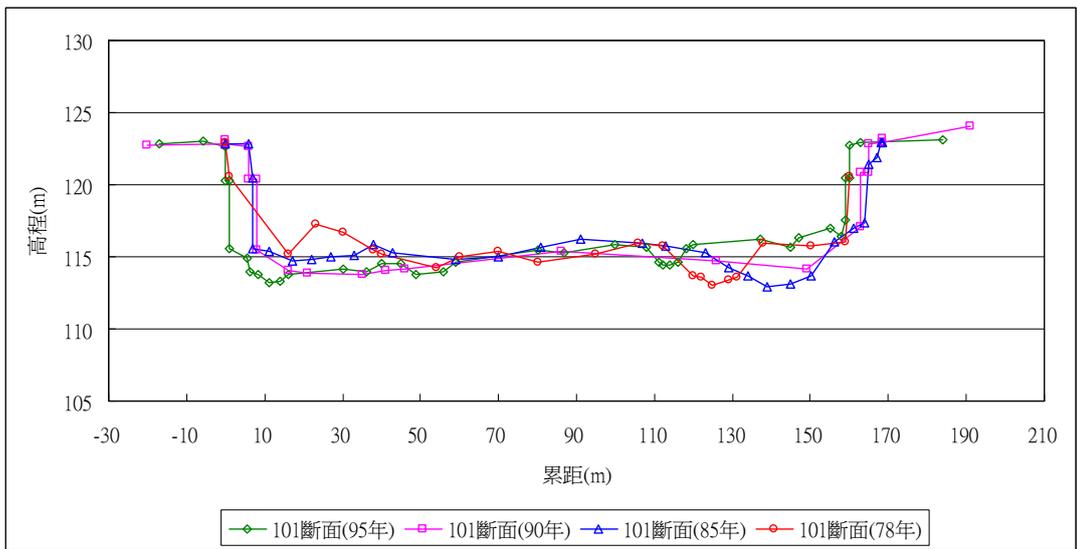


圖 3. 101、102、103 歷年断面測量資料

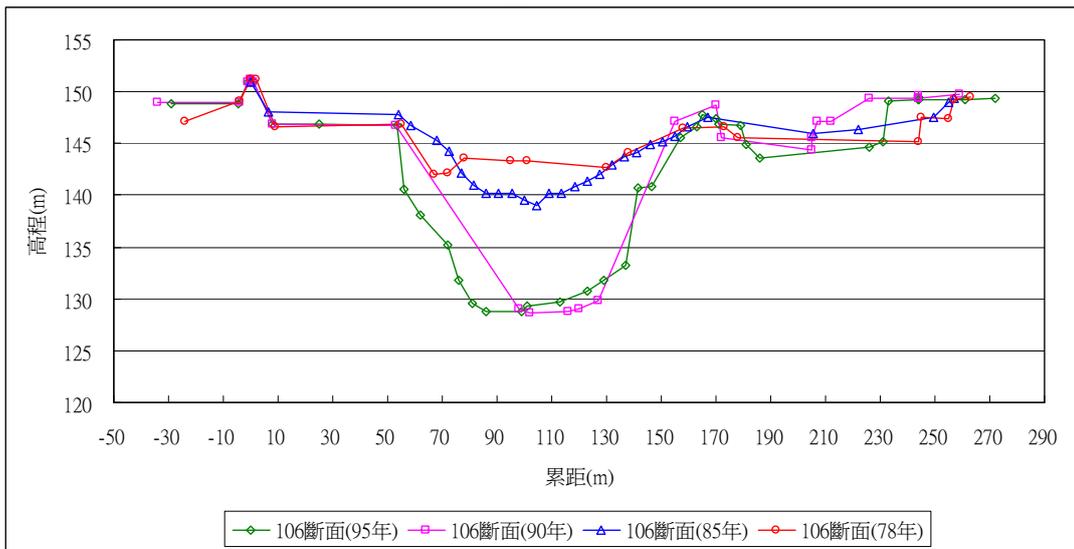
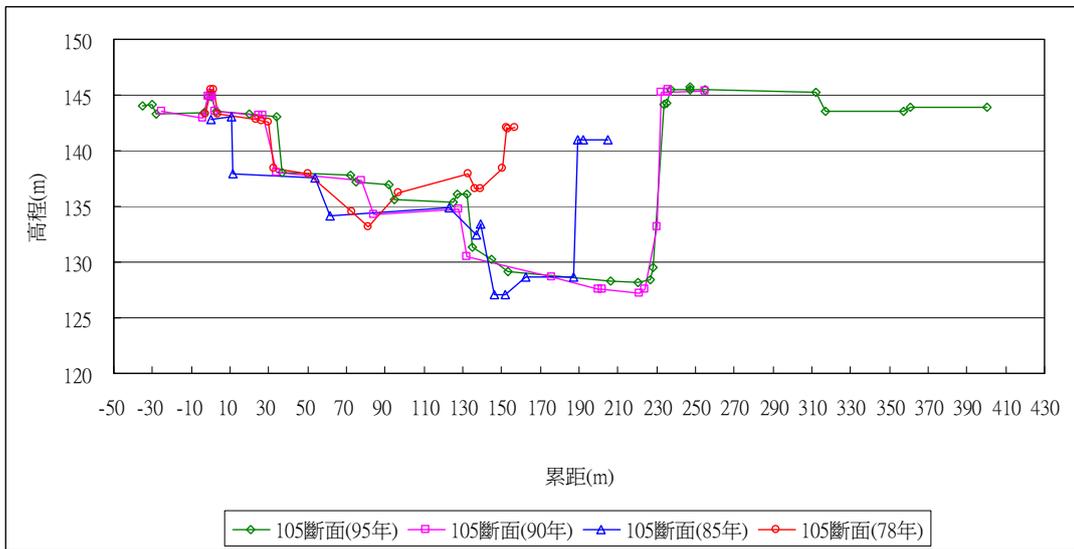
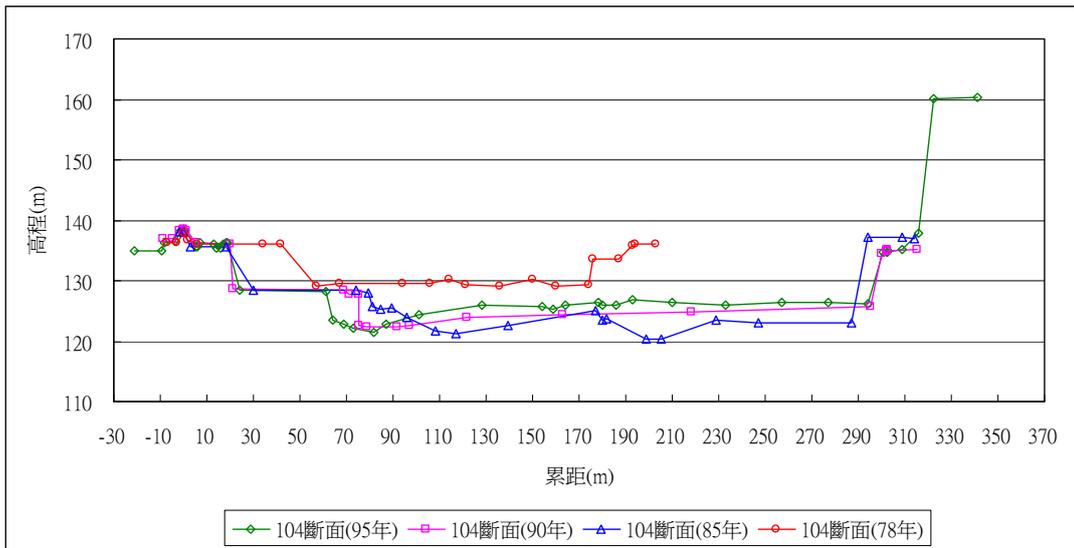


圖 4.104、105、106 歷年斷面測量資料

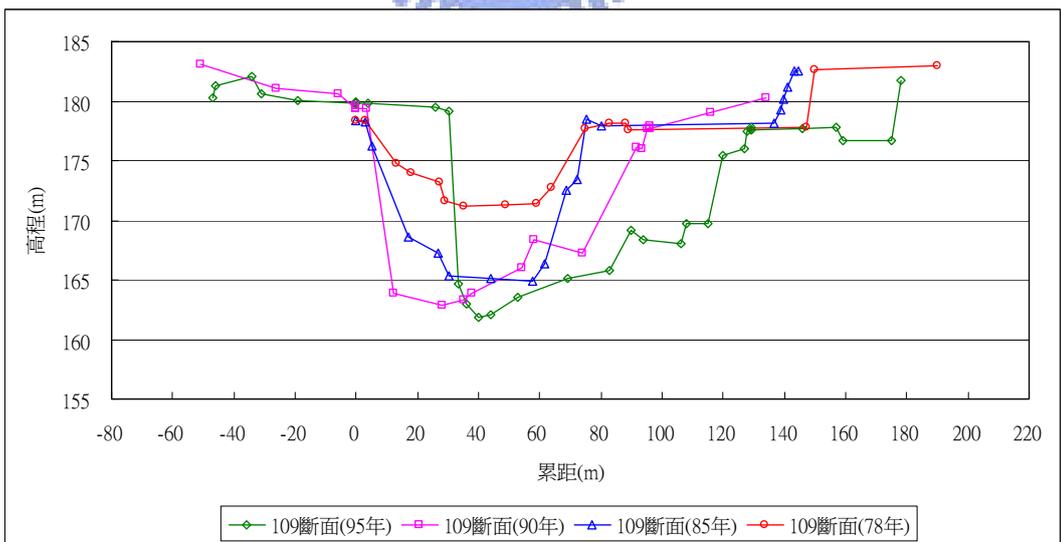
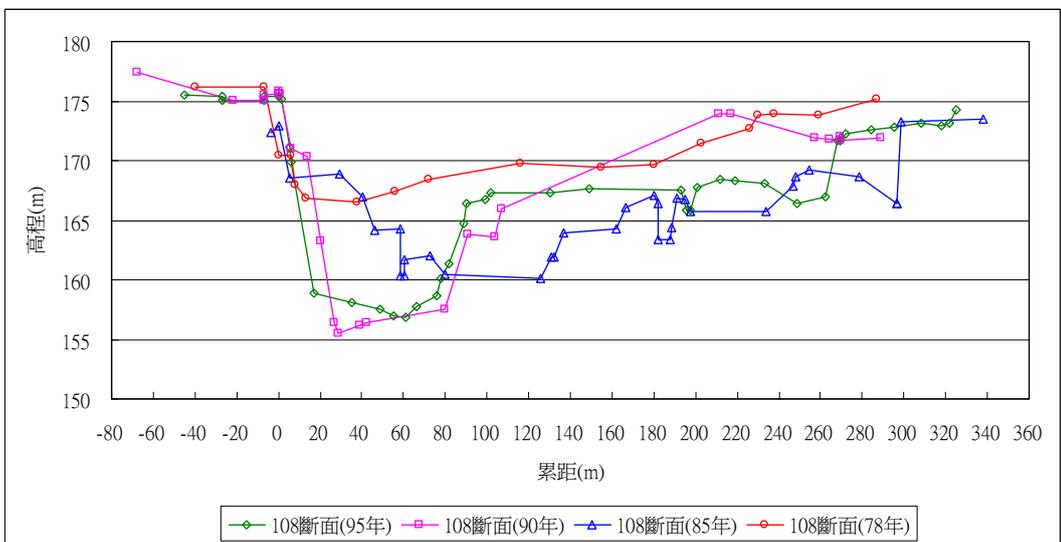
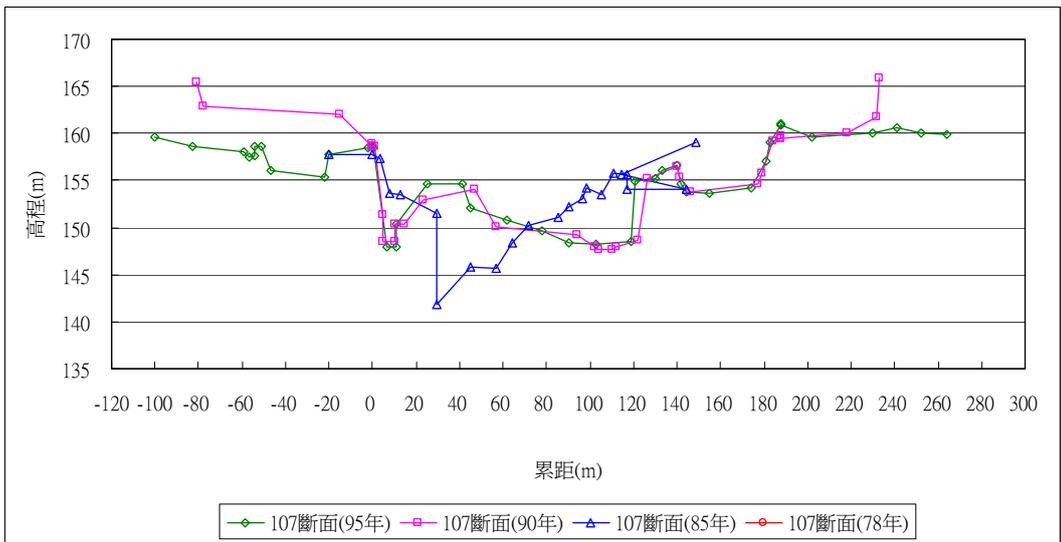


圖 5. 107、108、109 歷年斷面測量資料

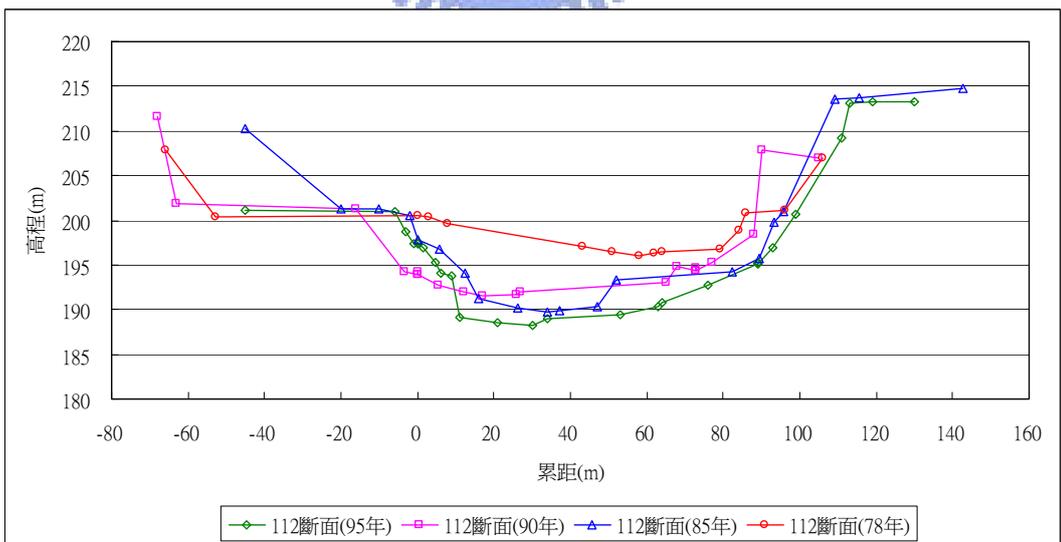
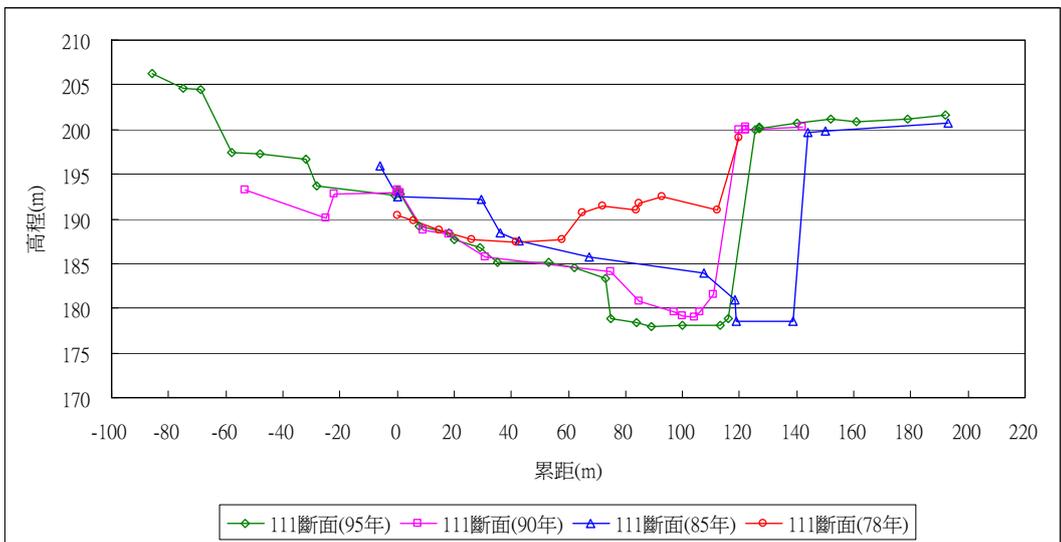
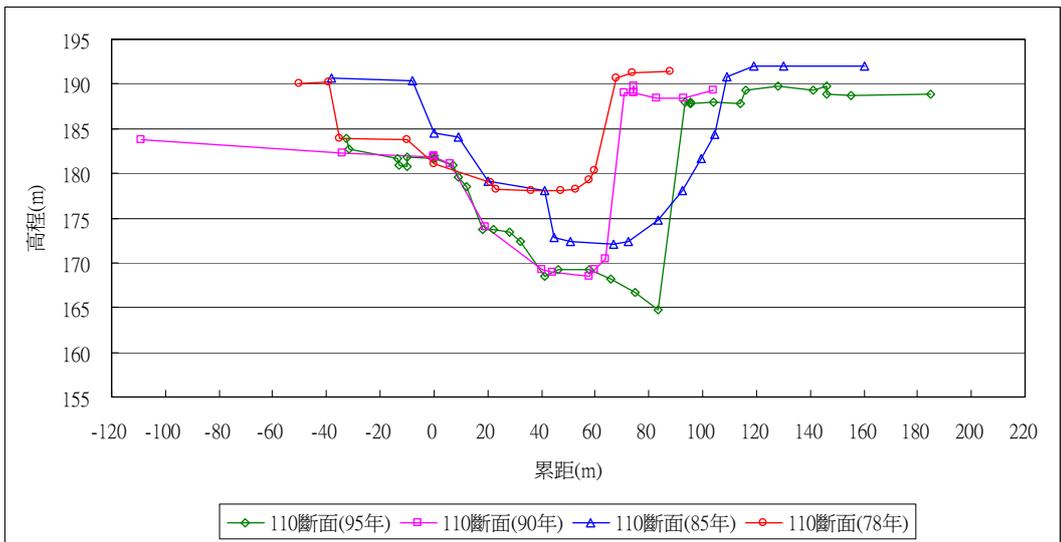


圖 6. 110、111、112 歷年斷面測量資料

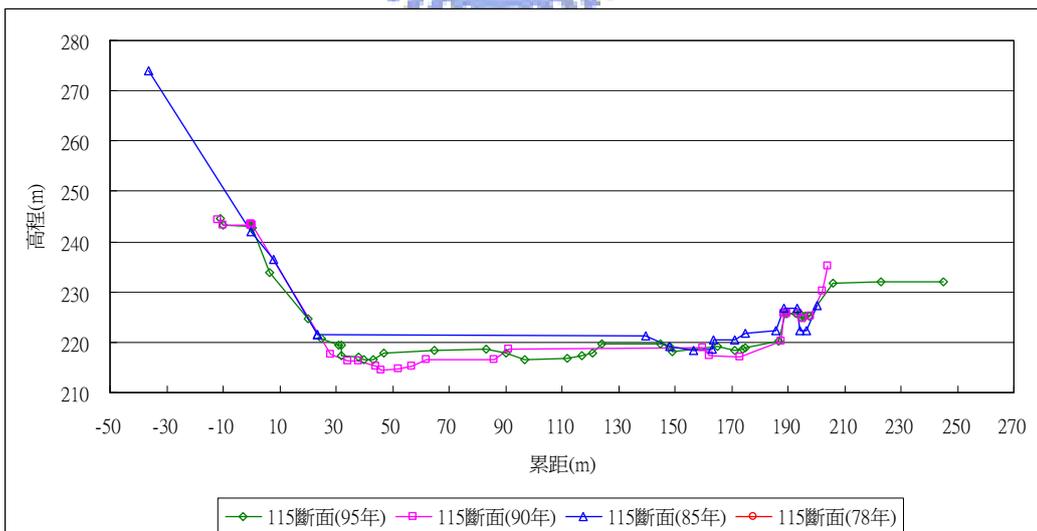
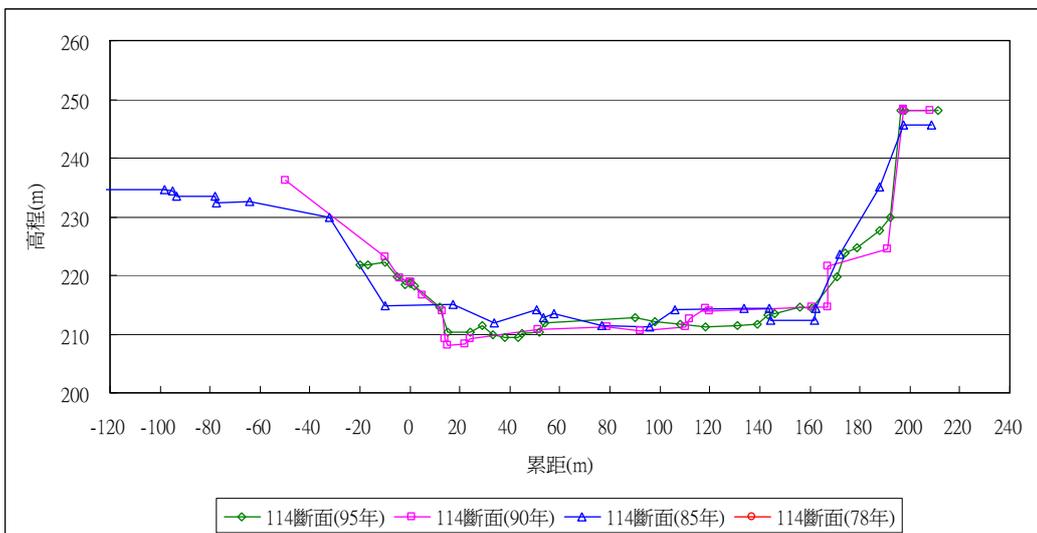
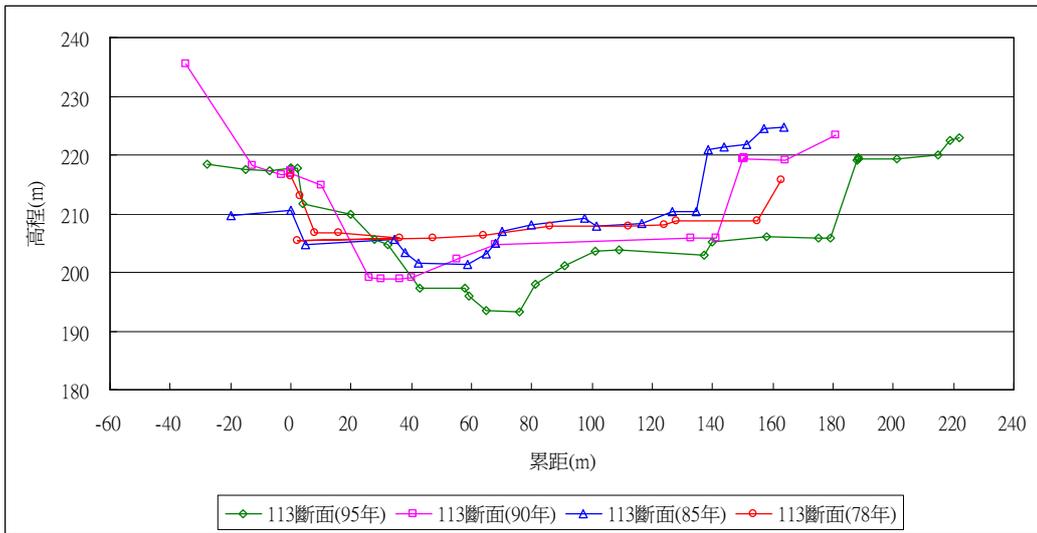


圖 7. 113、114、115 歷年斷面測量資料

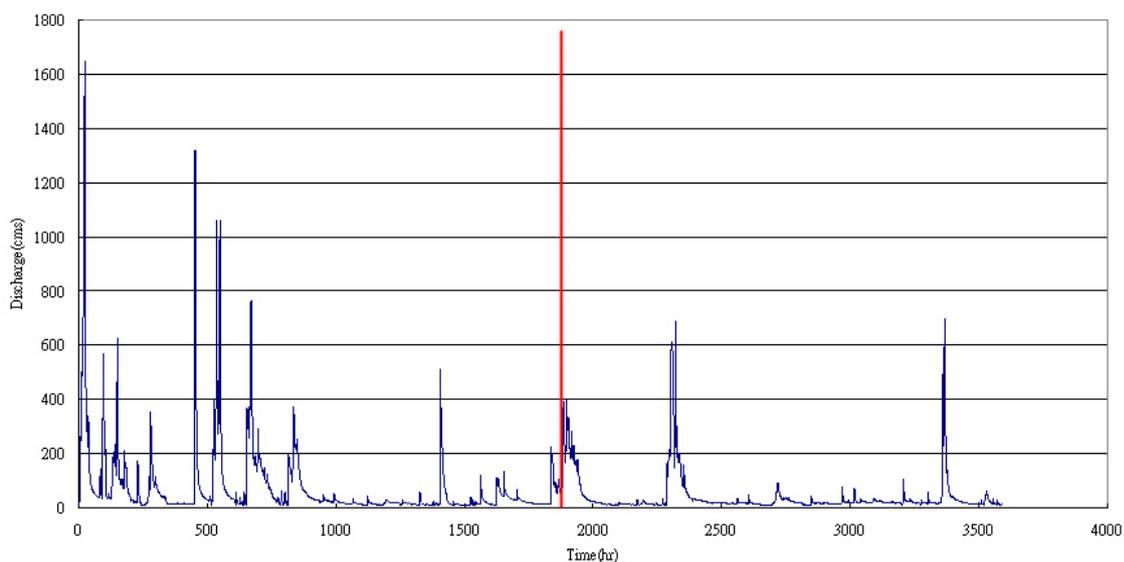
附錄 III 水理演算結果

斷面 樁號	單距	累距	流量	最低渠底 高程	Q50=1770cms 洪水位	能量高程	福祿數	通水 面積	水面寬	平均 流速	能量坡降	Q2	Q5	Q10	Q100	Q=1650cms	備註
97	172	49460	1770	55.10	64.75	67.60	1.01	236.67	76.50	7.48	0.008890	59.79	61.14	62.05	65.49	64.46	
97.11	45	49505	1770	56.84	67.70	67.90	0.20	959.45	154.73	2.01	0.000242	61.63	63.65	64.99	68.69	67.31	
97.12	0.1	49505	1770	58.46	67.65	67.92	0.26	812.64	154.50	2.39	0.000436	60.00	63.55	64.91	68.65	67.25	號固床工
97.21	22	49527	1770	60.33	67.50	68.01	0.38	566.06	110.32	3.10	0.001009	62.25	63.17	64.72	68.49	67.11	
97.22	0.1	49527	1770	60.28	67.52	68.01	0.37	576.56	110.64	3.10	0.000931	62.60	63.36	64.77	68.51	67.13	
97.31	135	49662	1770	60.16	67.61	68.18	0.43	531.41	88.38	3.33	0.001310	61.20	61.66	61.99	68.58	67.23	
97.32	0.1	49662	1770	60.79	67.55	68.21	0.49	490.83	88.20	3.61	0.001688	61.78	62.26	62.61	68.52	63.30	號固床工
97.41	37	49699	1770	64.69	68.28	70.11	1.04	295.36	86.50	5.99	0.008133	66.39	66.96	67.36	68.68	68.12	
97.42	0.1	49699	1770	64.62	68.36	70.12	1.01	300.86	86.28	5.88	0.007653	66.38	67.00	67.42	68.77	68.19	
97.51	45	49744	1770	61.30	69.70	70.55	0.56	433.78	78.90	4.08	0.002013	67.23	68.05	68.57	70.19	69.51	心上橋
97.515			Bridge														
97.52	15	49759	1770	60.77	70.64	71.27	0.45	502.66	82.36	3.52	0.001335	67.43	68.43	69.10	71.30	70.37	
98	264	50023	1770	63.10	70.34	72.29	0.83	286.61	50.23	6.18	0.005178	67.67	68.56	69.12	70.84	70.13	
99	535	50558	1770	66.77	73.54	81.49	1.78	141.67	28.17	12.49	0.025571	70.81	71.69	72.27	73.76	73.33	
100	453	51011	1770	71.50	84.73	90.10	1.00	172.49	16.47	10.26	0.013927	78.05	80.19	81.60	86.99	84.18	
100.1	461	51472	1770	75.70	90.73	90.98	0.20	799.78	66.98	2.21	0.000256	81.67	84.47	86.41	92.37	89.99	
100.15	92	51564	1770	82.40	90.65	91.06	0.33	624.60	81.41	2.83	0.000662	83.55	84.02	84.29	92.32	89.89	號固床工
100.18	150	51714	1770	88.50	90.51	98.07	2.79	145.29	74.91	12.18	0.068668	89.65	89.86	90.05	90.72	90.42	第一固床工
100.2	20	51734	1770	87.19	90.28	100.30	3.04	126.22	58.05	14.02	0.081824	88.93	89.34	89.63	90.57	90.17	
100.31	96	51830	1770	97.92	100.59	108.19	2.91	144.89	80.68	12.22	0.077713	99.36	99.84	99.98	100.86	100.49	
100.32	0.1	51830	1770	102.30	104.15	108.52	2.38	190.96	123.81	9.27	0.052788	103.78	104.32	103.72	104.33	104.08	
100.41	13	51843	1770	100.96	102.40	110.75	3.68	138.29	112.40	12.80	0.135708	104.43	105.11	102.00	102.59	102.33	
100.42	0.1	51844	1770	105.90	107.62	111.23	2.29	210.24	152.42	8.42	0.050840	107.31	107.73	107.28	107.79	107.56	仁義潭
100.51	16	51860	1770	103.94	105.82	113.94	3.95	140.18	134.77	12.63	0.168018	107.85	108.43	105.46	105.97	105.76	攔河堰
100.52	0.1	51860	1770	109.34	112.01	114.51	1.75	254.39	159.12	7.02	0.028821	111.45	111.45	111.62	112.19	111.95	
100.61	27	51887	1770	108.82	110.33	117.22	3.39	154.41	138.46	11.69	0.116615	111.97	109.73	109.92	110.51	110.26	
100.62	0.1	51887	1770	114.56	116.62	117.78	1.02	373.80	151.59	4.53	0.009043	115.44	115.82	116.07	116.90	116.52	
101.1	111	51998	1770	113.18	117.03	118.68	1.29	310.93	157.43	5.69	0.01464	116.26	116.75	116.49	117.43	116.94	
101.15			Bridge														吳鳳橋
101.2	18	52016	1770	113.70	118.32	118.94	0.63	504.41	157.50	3.51	0.002997	116.69	117.22	117.56	118.66	118.19	

(八掌溪仁義潭攔河堰下游冲刷河段治理方案之研析報告(2006))

附錄 IV 歷年洪峰流量紀錄

圖 1. 民國 85 年至民國 95 年間最大瞬時流量紀錄(軍輝站)



(紅線時間點為民國 90 年)



表 4.2 義竹流量站歷年洪峰流量記錄表 (民國 39-87 年)

年份 (民國)	發生日期 (月/日)	最大瞬時流量 (cms)
39	7/26	140
40	6/15	233
41	7/18	446
42	8/17	158
43		156
44	9/1	347
45		1560
46		730
47	7/23	326
48	8/8	5980
49	8/1	3080
50	8/8	3160
51	8/6	1040
52	9/11	1620
53	6/3	237
54	8/19	2100
55	6/11	1080
56	7/12	2040
57	6/11	1200
58	9/27	1030
59	9/7	1120
60	9/19	830
61	6/6	662
62	8/24	428
63	6/2	884
64	8/17	1740
65	7/4	1160
66	7/26	1490
67	8/2	520
68	8/25	902
69	8/28	1440
70	9/3	1360
71	7/30	704
72	8/24	533
73	7/4	470
74		
75	8/22	681
76	7/28	610
77	8/14	1020
78	9/13	1750
79	8/20	848
80	7/31	662
81	8/31	1160
82	5/27	365
83	8/12	490
84	6/9	235
85	8/1	2040
86	8/7	682
87	6/9	685

(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

表 4.4 觸口流量站歷年洪峰流量記錄表 (民國 56-87 年)

年份 (民國)	發生日期 (月/日)	最大瞬時流量 (cms)
56	7/11	1450
57	6/10	198
58	9/27	965
59	9/7	851
60	9/23	678
61	6/14	908
62	5/18	256
63	6/18	564
64	8/3	844
65	7/5	490
66	8/22	583
67	8/2	431
68	8/24	395
69	8/28	760
70	9/3	700
71	7/30	570
72	8/30	244
73	7/3	567
74		
75	8/22	509
76		
77		
78	9/13	1200
79	8/20	2510
80	7/30	60
81	8/30	44
82		
83		
84		
85		
86		
87		

(八掌溪仁義潭攔河堰下游冲刷河段治理方案之研析報告(2006))

表 4.3 軍輝橋流量站歷年洪峰流量記錄表 (民國 59-87 年)

年份 (民國)	發生日期 (月/日)	最大瞬時流量 (cms)
59	9/7	772
60	9/23	499
61	6/14	842
62	5/18	252
63	6/18	593
64	8/3	1510
65	7/4	629
66	8/22	1070
67	8/2	440
68	8/24	695
69	8/28	949
70	9/3	890
71	7/30	777
72	6/3	304
73	7/3	263
74	8/23	563
75	8/22	734
76	7/27	847
77	8/14	887
78	9/12	790
79	8/20	379
80	7/30	550
81	8/31	966
82	6/9	213
83	8/8	676
84	6/8	310
85	8/1	1650
86	8/7	604
87	6/8	630

(八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告(2006))

附錄 V 現地調查資料

表 1. 20080127 調查記錄

照片 編號	GPS 點位	層厚	岩性	層/節理	位態	開口節理	不連續面 光滑	能輕易 粉碎	地質錘尖 端鑿痕	刀子無法 取片
1829	239	1m 以上	粉砂岩	層	N20W,10SW		●	◎		
				節	N70E,45SE	●				
1831	240	50cm	灰色泥岩	層	N5E,10NW		●	◎		
				解	N70W,10SW		●			
1834	241	1.5m	粉砂岩	層	N5E,10NW		●	◎		
				解	N70E,20SE		●			
1836	244		灰色泥岩(會乾裂)	層	N60W,20SW		●	◎		
				節	N50E		●			
				節	N60W		●			
1839	245	2m	砂頁岩互層	層	N10W,10SW		●	◎		
				解	N80E,20SE	●				
1850	246			節(植物 根)	N70E,10SE	●				
1852	247	10cm	砂岩(硬)	層	N10E,10NW				◎	
1854	248	1.5m,頁 0.8cm	泥質頁岩(會乾裂)	層	N10E,10NW		●	◎		
1856	249		粉砂-頁岩互層	層	N40E,10NW		●	◎		
				層	N20E,10NW		●			
				層	N60E,10NW		●			
				層	N50E,5NW		●			
				層	N40E,10NW		●			

1865	250		粉砂岩	層	N10E,10NW	●		◎	
1874	251		粉砂岩	層	N30E,10NW	●	◎		
1876	252		粉砂岩	層	N10E,10NW	●	◎		
1879	253	10cm	砂岩(硬)	層	N10E,10NW	●		◎	
		2m	砂、泥-頁岩互層	層	N10E,10NW		◎		
1885	254	至少 1m	泥-頁岩	層	N20E,10NW	●			
				層	N20E,10NW	●	◎		
1890	255		砂岩	?	N60E,20NW			◎	
1891	256		泥-頁岩	層	N20E,10NW		◎		
	257	至少 3m	泥-頁岩	層	N10E,10NW	●	◎		
				節	N10W,40SW	●			
				節	N70E,10SE	●			
				節	N80E,70SE				
	258	2m	砂岩(硬)	層	N20E,10NW			◎	
	259		砂頁岩	層	N20E,10NW	●	◎		
				節	N70E,80NW				
	260			層	N20E,10NW	●	◎		
	261			層	N5E,10NW		◎		
				節	N40E,45SE	●			
				節	N40E,55NW	●			
	262			層	N40E,20NW	●	◎		
				解	W-E,90				
2.3	263	極厚	砂岩(硬)	層	N20E,10NW			◎	
4	264	3m	土黃色泥岩(乾裂)	層			◎		
				節	N40W,90				
				節	N50E,50NW				

	265	4cm 一層,整層數 m	泥質頁岩	層	N20E,10NW			◎	
	266	3m	泥質頁岩	層	N20W,10SW			◎	
					N10E,10NW				
5	267	10cm	硬頁岩	層	N10W,10SW				◎
		3m	泥質頁岩	層	NS,10W	●		◎	
	268	3m	泥質頁岩	層	NS,10W	●		◎	
				解	N30E,90	●			
	269		泥質(頁)岩互層	層	N10E,10NW	●			
6	270		硬頁岩	層	N10E,10NW	●			◎
				層	NS,10W	●		◎	
				層	N10E,10NW	●		◎	
				層	NS,10W	●		◎	
7	271			層	N30E,10NW	●		◎	
7.1				解	N40W,90				
7.2	272			層	N20E,10NW			◎	
	273			層	N40E,10NW			◎	
8					N10E				
	274			層	NS,10W			◎	
	275								
	276		泥質(頁)岩互層	層	N10E,10NW	●		◎	
	277			層	N20E,5NW	●		◎	
	278			層	N20E,10NW			◎	
9	279			層	N10E,20NW			◎	
	280			層	N10E,10NW	●		◎	
	281			解	N50E,80NW				

	282		層	N10E,10NW		◎		
	283		層	N10W,10SW		◎		
			層	N5E,10NW		◎		
	284		層	N20E,10NW	●	◎		
			層	N30E,10NW		◎		
			層	N10E,10NW		◎		
			層	N20E,10NW		◎		
			層	N10E,10NW		◎		
			解	N80E,5NW				
	285		層	N5E,10NW		◎		
10	286		層	N20W,10SW		◎		
10.1	287		層	NS,10W		◎		
10.2	288		層	N20E,10NW		◎		

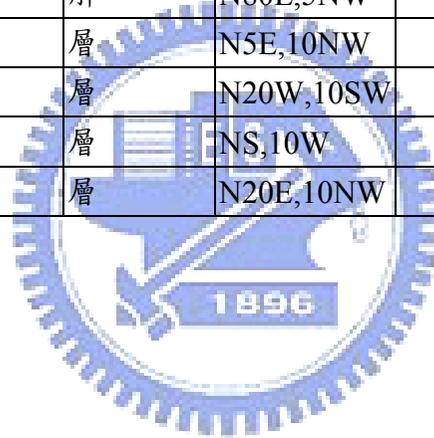


表 2. 20080128 調查記錄

照片編號	GPS 點位	層厚	岩性	層/節理	位態	開口節理	不連續面光滑	能輕易粉碎	地質鉋尖端鑿痕
1	51	3m 以上(厚層約 30cm)	泥岩(較硬、不易乾裂)	層	N60E,10NW				◎
				解	N70E,90	●			
2.3	52		泥岩(泡水軟化、極易乾裂)	層	N50E,15NW		●	◎	
4	53		泥岩(硬)	層	N50E,10NW		●		◎
				解	E-W	●			
5	54	20cm	黃色粉沙岩	層	N60E,10NW		●		◎
6	55		泥岩(硬)	層	N60E,10NW		●		◎
7	56		泥岩(硬)	層	N80E,5NW		●		◎
				解	N70E,90		●		
8	57	20cm	黃色粉沙岩	層	N80E,10NW		●		◎
10	58	30~50cm 一層, 至少 7m	軟泥岩(乾裂)	層	N60E,10NW		●	◎	
				解	N70E,90	●			
11	59	至少 3m	軟泥岩(乾裂)	層	N70E,40NW		●	◎	
12.1	60		泥質砂岩(硬)				●		◎
14	61								
15	62			層	N70E,10NW		●	◎	
16	63	30cm 一層、數層	泥岩	層	N70E,10NW		●	◎	
18	64		泥岩(軟)	層	N50E,20NW		●	◎	
19	65		泥岩	層	N20E,10NW		●	◎	
20	67		泥岩(乾裂)	層	N40E,10NW		●	◎	◎
				節	N60E				

21	68		泥岩(乾裂)	層	N80E,10NW		●	◎	◎
22	69		泥岩(硬)	層	N60E,10NW		●		◎
26	70	5m	泥岩(硬)	層	N50E,10NW		●		◎
		30cm	石灰質(硬)				●		◎
	71	兩組節理		節	N40E				
					N30W				
27	72	約 2m	粉砂-泥岩之間	層	N70E,10NW		●	◎	◎
				節	N30W				
				節	N70E				
28	73	2m	粉砂岩(硬)	層	N70E,10NW		●		◎
29	74			節	N50E	●			
				節	N10W	●			
31	75	2m	粉砂岩(較軟)	層	N40W,10SW		●	◎	◎
				節	N40W				



表 3. 20080128 調查記錄

調查點編號	調查紀錄	試體
1	會乾裂的泥岩塊，表面用手即可撥落、裡面用地質錘只能造成鑿痕	test1
2	表層泡水軟化、裡層硬的泥岩(含 CaCo3)，層厚 20~50cm 一層，有觀察到 pothole	test3
3	明顯分層，下層泥岩、上層黃色砂岩 or 粉砂岩(對岸沒有，表面紅土化)	test2
4	斷面 107 附近岩層露頭	
5	頁岩(砂質)，位態 N30E,10NW	
6	斷面 108 附近，30cm 一層的泥岩，乾裂的 plucking 行為(size 較上游小)，N40E,5NW	test4.test5
7	層面侵蝕造成塊體 plucking	
8	斷面 112 沒有乾裂的岩層，層厚 1~2m 一層	
9	砂質厚層+泥質頁岩的互層，砂質凝聚性較低抗 abrasion 弱，差異 abrasion	test7 厚層 test8 頁層
10	100 斷面上游 20m 處(舊河道入口)，頁岩與厚層在解壓的側壁上沒有水沖過很難分辨	
	100 斷面分層:從最頂端高灘地開始 5m 厚 5m 頁 5m 厚 5m 頁	
11	心上橋往上游拍 98 斷面	
	98 斷面分層:最頂端開始頁-厚-頁，現床底為礫石灘	
12	6 號固床工下游，舊河道匯流口前，斷面 97	test9，取層厚 10cm 一層的泥質頁岩
13	5 號固床工下游，整個斷面應該都是頁岩	
14	L96-2 斷面樁?	
15	泥質頁岩(判斷泥質的依據是"乾裂")	
16	96 斷面，位於 4 號 5 號固床工之間，N30E,10NW，整個都是砂頁岩互層	test10 黃色硬砂岩
	膠結度應該比較高，較硬、侵蝕為凹槽狀而非 V 狀	test11 灰色軟砂岩
17	3 號固床工上游右岸粉砂岩(95 斷面床底可能的那一層)，舊河道入口	test12
18	舊河道附近拍的照片	
19	舊河道出口	

表 3. 20080128 調查記錄

pic	拍攝方位	gps	描述
		#347	3 號固床工下游左岸粉砂岩強度 5~8MPa
		#348	3 號固床工下游左岸泥質岩，層厚 5m，新鮮強度 12MPa，會嚴重風化乾裂
200-204			從 3 號固床工下游左岸往右岸拍 岩層:[頁岩/泥岩/粉砂岩/頁岩/3 號固床工]
205.206			頁岩層中夾的硬頁岩，強度超過試驗鏈可量測強度
208			95 斷面下游左股河道左岸張力裂縫
210	E	#349	頁岩層的下切侵蝕
221	N60E	#350	使河道分兩股的粉砂岩，下層是頁岩層；下切至頁岩層刷深，產生中間河道
224	W	#351	粉砂岩很均質，產生紊亂的河道，某一河道切穿後留下許多小河道，共有紀錄六組
226.227	向下.上游	#352	
228	N30E	#353	
229	W	#354	
230	N60W	#355	
233	N45W	#356	
234	S60E	#357	頁岩層下方的泥岩，從下游往 3 號固床工下游拍
237.238	W	#358	頁岩層的下切侵蝕初始，床底強度 10MPa
255		#359	遠處看下切起點(knick point 後退現在的位置)
266-268		#360	觸口堰下游 100m 右岸，表面風化乾裂嚴重，裡面新鮮強度高-9MPa
269		#362	左岸 6MPa，表面無乾裂
271		#364	順層河 N60E，傾向 NW
282		#365	右岸順向侵略(順層河轉順向河)
287			順向河段左岸
X			觸口堰下游，水位變高了，可以與之前低水位照片比較
340		#367	112 斷面下游順層河段右岸，強度 4.5MPa

355		#368	順層河段右岸
364	E	#370	112 斷面往右岸拍
		#372	112 斷面左岸:節理間距 s ，層理間距 y 。 $S*y=plucking$ 最大的 size，
			當 StreamPower 不足以搬動 $s*y$ 時 abrasion 主控使 s 變小成 s' ，
			到 SP 足夠時帶走 $s'*y$ 的 block
372.373		#373	112 斷面上游左岸，6MPa
377		#374	112 斷面上游右岸，5MPa
382	S	#375	右岸向左岸拍順向河岸
383		#376	右岸岩層，6.5MPa
385.386	W30S	#377	順向河的形狀
388	W	#378	順層河右岸，8MPa
393-397	E30S	#379	順層河左岸的床底
409	N	#380	五虎寮下游左岸往右岸拍
		#381	位態 N20E,10NW，會乾裂的泥岩層，6.5MPa，順向河右岸
414		#381	順向河床的 erosion
417		#384	順向河右岸反 step
422		#385	上述點位挖開 5~10cm 測新鮮強度 3.5MPa
426	N60W	#386	向左岸拍，礫石層/粉砂岩(5m)/泥岩/五虎寮橋
430	N	#387	
439	NW	#388	五虎寮橋與吳鳳橋之間右岸泥岩，泥岩/礫石層
457		#404	順向河右岸，泥岩與泥質砂岩，泥岩(乾裂)/泥岩(砂質較高)/泥岩(乾裂)