

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

期中進度報告

期末報告

岩質河床沖蝕特性及其對邊坡及河道穩定的影響
子計畫二：軟岩質河床的沖蝕調查、試驗及沖蝕率模式建立

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 98-2221-E-009-152-MY3

執行期間：98年8月1日至101年7月31日

執行機構及系所：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：廖志中

共同主持人：

計畫參與人員：鄭孟雄、黃明萬、郭炳宏、吳佳諺、戴文蕙、李聰吉、
羅楚鈞、吳禹霆、陳志強

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告 完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 1 份：

移地研究心得報告

出席國際學術會議心得報告

國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開查詢

中華民國 101 年 10 月 30 日

目錄

中文摘要.....	II
Abstract.....	II
一、前言.....	1
二、研究目的.....	1
三、文獻探討.....	1
(一)岩石河床的冲刷機制.....	1
(二)岩床冲蝕個別機制之既有簡化模式及岩石河床的冲蝕模式.....	4
(三)岩石河床抗冲蝕能力.....	6
(四)岩石河床冲蝕試驗.....	8
四、研究方法.....	11
(一)文獻收集與整理.....	13
(二)航照數位高程地形圖(DEM)製作.....	13
(三)主要高冲蝕軟岩河床河段冲蝕調查.....	13
(四)冲蝕機制及冲蝕演繹建立.....	13
(五)抗冲蝕指數及能量消耗分析.....	13
(六)室內冲蝕試驗.....	14
(七)軟岩質岩質河床冲蝕模式(經驗式)建立.....	14
五、結果與討論.....	14
(一)文獻收集與整理.....	14
(二)航照數位高程地形圖(DEM)製作.....	21
(三)主要高冲蝕軟岩河床河段冲蝕調查.....	37
1、大甲溪.....	37
2、濁水溪.....	42
3、八掌溪.....	45
(四)冲蝕機制及冲蝕演繹建立.....	49
1、冲蝕機制.....	49
2、冲蝕演繹.....	51
(五)抗冲蝕指數及能量消耗分析.....	57
1、岩石抗冲蝕指數調查結果討論與整合.....	58
2、抗冲蝕能力評分修正.....	60
3、流功冲蝕門檻值檢討.....	61
(六)室內冲蝕試驗.....	62
1、水平磨蝕試驗.....	62
2、可變角度直接冲刷試驗.....	68
(七)軟岩質岩質河床冲蝕模式(經驗式)建立.....	79
1. 泥沙磨蝕模式.....	79
2. 水力冲蝕模式.....	80
3. 流功冲蝕模式.....	80
六、結論與建議.....	81
七、參考文獻.....	82
八、計畫成果自評.....	84

中文摘要

台灣西部地區甚多河川（大漢溪、大安溪、大甲溪、濁水溪、八掌溪等）的部分中、下游河段或因跨河構造物的存在、或因採砂使護甲層流失，河床大都為軟弱岩層出露，常於豪雨後產生劇烈沖蝕，此類河段岩床大多屬軟弱岩石，因此沖蝕率遠大於國外現有文獻所發表的沖蝕速率，部分河段於十數年的時間累積了數公尺至數十公尺的沖蝕量，對河川環境影響甚為重大。本研究計畫由國內現有劇烈沖蝕的河道之沖蝕現象調查出發，主要目的在於建立軟岩河床的沖蝕機制（沖蝕演繹）及軟弱岩石河床抗沖蝕能力指標、修正或建立軟弱岩石河床沖蝕經驗模式、建立試驗室沖蝕試驗，作為評估河川沖蝕規模，預測未來河川沖蝕發展的工具與方法。計畫中針對大甲溪、濁水溪、與八掌溪的高沖蝕河段進行調查，建立沖蝕機制與沖蝕演繹，回顧既有礫石彈跳、水力沖蝕模式、提出流功沖蝕模式，並設計建置多功能試驗沖蝕儀器，進行水平磨蝕、可變角度直接沖刷等兩種試驗，評估河道中各種岩石的沖蝕特性。

關鍵詞：軟岩、河床沖蝕、沖蝕試驗、沖蝕率模式

Abstract

Rapidly eroded river-bed after flooding was usually found in some Taiwan rivers, such as the Pa-Chang River, the Cho-Shuei River, the Da-Chia River, and the Ta-An River. The accumulated erosion quantity is several to tens of meters. The integrated project aims to study the weak rock-bed river erosion mechanisms and evolution in engineering scale. This sub-project plans to determine the erosion mechanism/evolution and the rock erodibility for various conditions of rock properties, loading types, flow conditions, and so on.

The major research results of this sub-project include (1) development of the erosion processes for weak rock river-bed (2) development of a multi-function experimental set for laboratory erosion test and conducting a series of abrasion tests for weak, (3) development of erosion rate model based on the stream power.

Keywords: weak rock-bed river, plucking, abrasion, erosion evolution, laboratory erosion test, erosion rate model.

一、前言

台灣西部地區甚多河川（八掌溪、濁水溪、大甲溪、大漢溪等）的部分中、下游河段或因跨河構造物的存在、或因採砂使護甲層流失，河床大都為軟弱岩層出露，常於豪雨後產生劇烈沖蝕，致使部分河段於十數年的時間累積了數公尺至數十公尺的沖蝕量。此類河段岩床大多屬軟弱岩石，因此沖蝕率遠大於國外現有文獻所發表的沖蝕速率。

國外對地貌變遷研究目前皆以合理化公式(rational formula)型態的沖蝕模式配合河道剖面進行參數標定以計算河道的沖蝕量，此方法應用探討於大範圍的地貌變遷趨勢及與地體上升及氣候的關係尚稱合理(Howard, 1994)。因上述既有的沖蝕模式大多未考慮沖蝕機制、行為、岩性等等，合理化公式沖蝕模式應用於軟弱岩床河道沖蝕量計算的結果均與河道斷面地形量測結果有甚大之差距。雖然國外少數學者（Foley, 1980, Sklar & Dietrich, 2004）曾以河床質跳躍磨蝕為考量提出沖蝕率模式，亦有國外工程師(Greimann & Lai, 2008)透過文獻收集合併磨蝕及水力沖蝕(hydraulic scour)提出沖蝕率模式，並模擬集集攔河堰下游河道的沖蝕，但結果並不盡理想。

因此，本整合性研究計畫擬由國內現有劇烈沖蝕的河道之沖蝕現象調查出發，進行沖蝕特性及機制、沖蝕模式建立等等，針對國內外學術領域於岩石河床的沖蝕及其對邊坡及河道穩定的影響尚有不足處加以深入探討，企盼提出創新性的學術研究成果，此成果亦可供未來河道治理、跨河構造物維護、及中上游邊坡穩定分析與管理參考。本整合性計畫『岩質河床沖蝕特性及其對邊坡及河道穩定的影響』的研究目的包括中下游軟弱岩石河床的沖蝕機制及演繹建立、沖蝕機制理論模式的建立與模擬分析、河道沖淤模擬分析、室內沖蝕試驗及現地沖刷監測的儀器建立與試驗及監測、中上游河床沖蝕機制建立、沖蝕對邊坡穩定的影響（監測、分析、模擬）、河道沖蝕與地形測計的關係等等。

本計畫屬『岩質河床沖蝕特性及其對邊坡及河道穩定的影響』之子計畫二『軟岩質河床的沖蝕調查、試驗及沖蝕率模式建立』。

二、研究目的

本子計畫主要目的包括下列三項：

- (一)由現場沖蝕現象調查結果，建立軟岩河床的沖蝕機制（沖蝕演繹）及軟弱岩石河床抗沖蝕能力指標。
- (二)結合斷面及航空測量河道沖蝕量測、抗沖蝕力指標、及河流沖蝕力修正或建立軟弱岩石河床沖蝕經驗模式。
- (三)建立試驗室沖蝕試驗（含磨蝕及抽離機制），並由沖蝕試驗結果觀察沖蝕機制、並建立、修正、或標定適合軟岩河床的沖蝕率模式。

三、文獻探討

以下就岩石河床的沖刷機制、岩床沖蝕個別機制之既有簡化模式、岩石河床的沖蝕模式、岩石河床抗沖蝕能力、及岩石河床沖蝕試驗等相關現有研究狀況及文獻說明如下：

(一)岩石河床的沖刷機制

國內至今未有詳細且有系統的探討岩石河床的沖蝕現象、機制、及模式，國外則在近十年來有部分地形地質學學者於探討地貌變遷時，討論岩石河床的沖蝕現象、機制、及模式。Whipple et al. (2000) 由調查一系列不同的地質條件、流域面積、河床坡度的河床沖蝕現象，提出岩石河床的沖蝕機制。他們將其區分為岩塊抽離(plucking)、磨蝕(abrasion)、穴蝕(cavitation)等三大類。Foley(1980)定義磨蝕為水中顆粒與岩床作用所形成，因此磨蝕又可區分為懸浮載磨蝕及河床載磨蝕，而河床載磨蝕又可依顆粒撞擊岩床角度區分為，低角度的切削磨損 (cutting wear)及高角度的變形磨損 (deformation wear)。Whipple, et al. (2000)認為岩性、

弱面間距、節理、層面等乃決定主控岩床沖蝕機制之因素。當節理之間距約在 1m 以下時，岩塊抽離 (plucking) 作用往往會成為主控之沖蝕機制。他們還定性探討影響與形成岩塊抽離之重要程序(圖 1)，認為抽離過程中可能先需小裂縫經水力推張擴大為破裂面、隨著河床顆粒逐漸地透過磨蝕作用沖蝕弱面、再加上物理或化學風化作用，讓弱面完全擴展連通，最後終於導致獨立岩塊之鬆動、脫離。

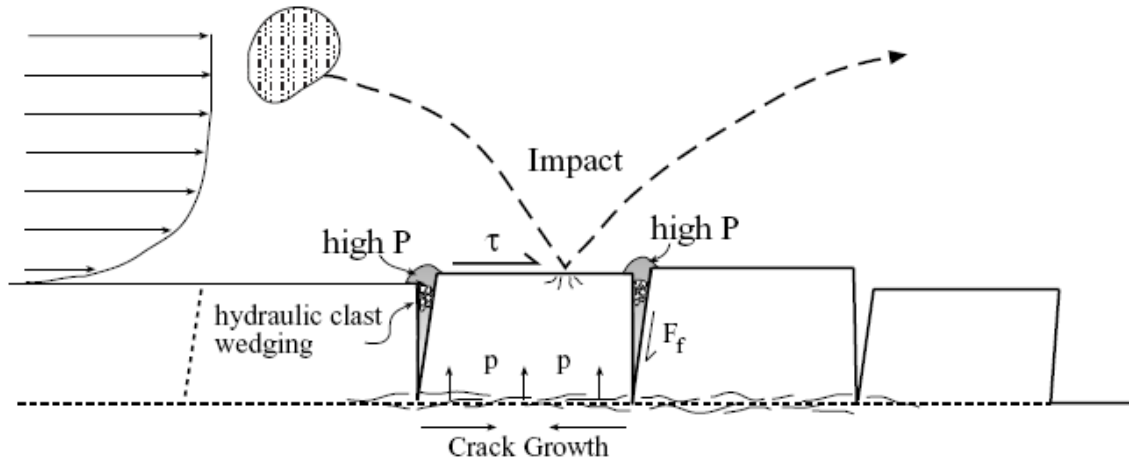


圖 1 岩床侵蝕的抽離機制示意圖(Whipple et al, 2000)

由岩塊抽離沖蝕需要先出現鬆動岩石弱面，接著岩塊脫離，再被水流帶走。儘管 Annandale(1995)曾試圖提出一個由岩塊脫離主控之定性沖蝕模式。然而岩塊脫離過程乃非常複雜之過程，可能經歷一系列材料風化、流入砂粒逐漸頂開弱面 (sand-wedging)、弱面經磨蝕、弱面裂口擴展、經強烈水流作用而帶離等過程之交互作用，岩塊也可能因懸浮載中大顆粒撞擊而脫離，其種種內涵非常複雜，欲做到完全定量預測之模型實在有其困難。除可由水流及不連續面條件判斷是否存在抽離沖蝕外，亦可由其下游側抽離後的角狀碎屑加以認定。

當岩床屬於完整岩盤，或弱面間距相當大時 (簡稱「完整岩盤條件」)，岩床沖蝕之主要機制比較可能透過懸浮載或河床載內之土石顆粒一再磨蝕沖蝕岩床表面所造成。完整岩盤條件下，岩塊脫離機制應該不易發生，強烈水流帶動之懸浮載砂質或礫石顆粒連同流水逐漸磨蝕岩床表面，一顆粒一顆粒地沿著岩石表面磨下碎屑而造成磨蝕沖蝕(abrasion)。懸浮載或河床載之砂質/礫石顆粒都有助於磨蝕沖蝕。在渦流中，由於砂質/礫石顆粒旋轉磨削，局部與集中性的磨蝕沖蝕更易於出現，往往因而形成如滑槽(flute)與壺穴(pothole)等特殊沖蝕現象。當磨蝕主控河段之沖蝕特性，懸浮載或河床載之內容就十分重要。

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(圖 2)。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。

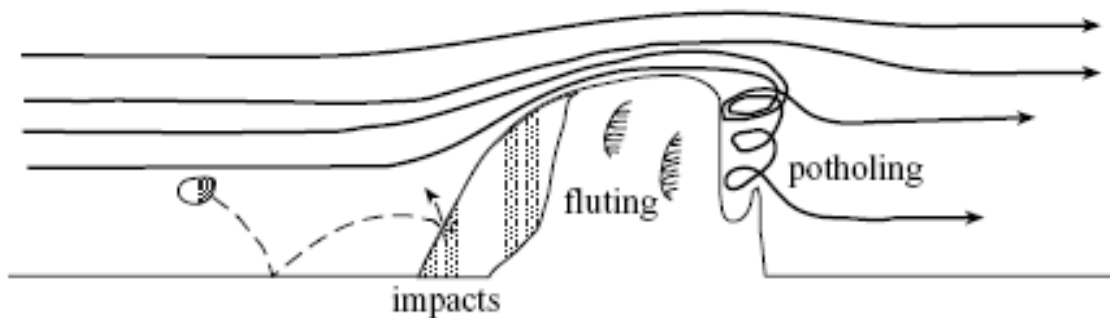


圖 2 岩床侵蝕的磨蝕機制示意圖(Whipple et al, 2000)

依地質學之定義，遷急點(knickpoint)意謂河床面地貌突現落差之陡降點。當沖蝕河床材料之門檻剪應力較高時，遷急點附近陡峭處之剪應力必然特別高，傾向於先發生沖蝕，因此遷急點可能逐漸後退(knickpoint migration)，其過程與速率則取決於岩床之岩性與力學性質(圖 3)。

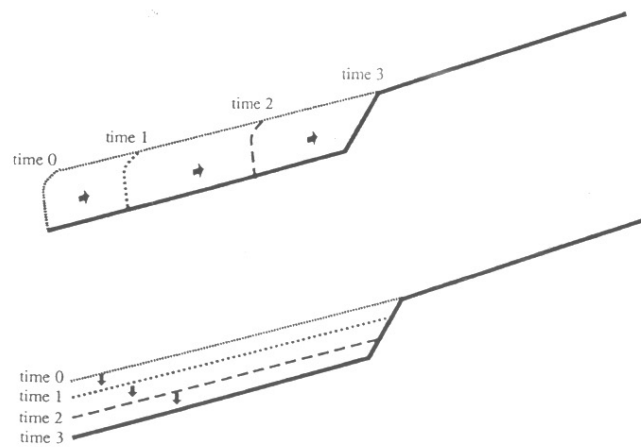


圖 3 河道縱向演變的兩種型態(Seidl & Dietrich, 1992)

沖蝕的發生常存在複合型態，或不同型態交互產生，Whipple et al. (2000)亦建議可由抽離的岩塊檢視磨損的比例加以決定。他們發現較大的局部沖蝕量大都來自抽離機制的貢獻。然而他們又發現較大流域(大於 20 平方公里)的主控沖蝕機制為懸浮載的磨蝕，而較小流域的主控沖蝕機制則為抽離或河床載的磨蝕。

上述沖蝕現象及機制大多針對硬岩河床加以探討，軟岩河床則較少有文獻專門討論。本研究團隊曾針對八掌溪軟岩河床劇烈沖蝕段進行勘查，勘查結果顯示磨蝕現象明顯(圖 4)，亦存在抽離現象(圖 5)。然而河床或河岸因乾濕風化現象形成龜裂，為抽離或磨損做準備的現象處處可見，亦有因差異侵蝕形成的沖蝕現象(圖 6)。由上述現象可知，軟岩河床的沖蝕機制部分不同於硬岩河床的沖蝕機制。另外，921 地震對中部主要河川造成數公尺不等的地體抬昇，抬昇區域為西部麓山帶的軟岩區域(頭嵛山層、卓蘭層、錦水頁岩等)，在河道上形成規模不一的遷急點，加速河道上軟岩的沖蝕速率。



圖 4 八掌溪河岸的磨蝕現象

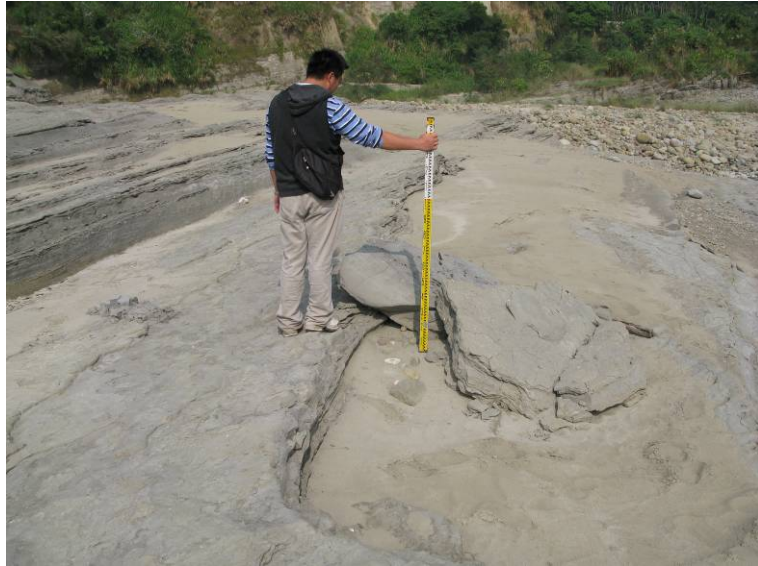


圖 5 八掌溪河床的抽離現象



圖 6 八掌溪河床的差異侵蝕現象

(二)岩床沖蝕個別機制之既有簡化模式及岩石河床的沖蝕模式

國外對於岩石河床下切(incision) (沖蝕) 模式皆基以大尺度地貌變遷研究需要所建立，因此都基於參數相關性的探討後，建立合理化公式，使用時則以數據將參數加以標定。合理化岩石河床下切考慮的因子以水流剪應力、流功(stream power)、流域面積、及河床坡度為主。Howard & Kerby (1983) 假設岩床下切速率 E 與床面剪應力有如下式之冪函數相關性。

$$E \propto \tau_b^a \quad (1)$$

若考量床面剪應力存在一個啟動沖蝕之門檻值，則可用超越床面剪應力門檻值 τ_c 之床面剪應力 $(\tau_b - \tau_c)$ 取代上式中的 τ_b ，即令

$$E \propto (\tau_b - \tau_c)^a \quad (2)$$

Howard & Kerby (1983) 考量岩床下切速率 E 與河川沈積料輸送率存在正相關。又因為河川沈積料輸送率與河川水流量與坡度正相關，因此岩床下切速率 E 應與上游集水區面積 A (供應下游河川沈積料與流量) 與坡度 S 有正相關之關係：

$$E = KA^m S^n \quad (3)$$

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)值約在 1.0，當河床坡度大於等於 0.2，(m/n)值大致接近 0.7。其差異可能因為坡度大時，不但流速高拖拽力大，有時也可能受土石流之影響。Seidl & Dietrich 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、與遷急點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, et al. (2000) 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。因此，他們認為不同河床主要沖蝕機制可能不盡相同，各種岩床沖蝕機制與行為也仍難以完全掌握，其定量之理論模型更是闕如。因此，他們提出不同的機制下式(3)n 值的範圍，岩塊抽離（plucking）為主控沖蝕機制，其 n 值應在 2/3 至 1 間，而懸浮載之磨蝕為主控沖蝕機制，n 值約為 5/3，兩者差異甚大。

Foley (1980) 引用磨損理論(wear theory)中 Bitter(1963a,b) 之噴砂磨損(sandblasting wear) 模式，考量當水中顆粒撞擊岩床面時，部分衝擊動能可引致岩床面破裂進而去除部分岩床面材料，磨蝕速率可假設與水中沖積顆粒之傳輸速率成正比。Bitter(1963a,b) 之磨損模式考慮了：1.垂直（岩床面）向之速度分量（高角度撞擊為主）對岩床面材料造成材料變形、疲勞破壞，可歸諸於材料之變形磨損(deformation wear)；2.切（岩床面）向之速度分量（低角度撞擊為主）則對岩床面材料造成材料之切削磨損(cutting wear)。Bitter 模式由撞擊速度計算撞擊能量（高角度撞擊之變形磨損與低角度撞擊之切削磨損並不相同），並需假設變形磨損或切削磨損移除每單位體積所需之能量為已知，進而可估計變形磨損或切削磨損之磨損速度。

Sklar & Dietrich (2004) 提出一個針對河床載彈跳撞擊(saltation)所造成之岩床磨損模式，此模式之基本假設為岩床磨損率會隨著河床流量與河床垂直之分量正相關：

$$E = (\text{每次顆粒撞擊岩床所損壞分離之岩石量, } V_i) \times (\text{每單位面積每單位時間發生之顆粒撞擊率, } I_r) \times (\text{岩石河床上未被沖積層覆蓋之比例, } F_e) \quad (4)$$

式(4)中 V_i 項可由每次顆粒撞擊所轉移之動能 D （扣除能量損失）與損壞單位體積岩石所需能量 v 之比例加以估計。依衝擊磨損理論(impact wear theory) (Engle, 1978)，損壞單位體積岩石所需能量 v 與材料韌性正相關。依現彈性破裂力學的理论，韌性可表示為張力強度與楊式模數的關係，Sklar & Dietrich (2004) 提出磨蝕單位體積岩石所需的總能量(ϵ_v)可表為：

$$\epsilon_v = k_v \frac{\sigma_T^2}{2Y} \quad (5)$$

其中 σ_T 為岩石張力強度， Y 為楊式模數， k_v 為岩床強度參數，須資料進行檢定(值介於 $10^{12} \sim 10^{13}$)。式(4)可改寫成：

$$V_i = (\pi \rho_s D_s^3 W_s^2 Y) / (6k_v \sigma_T^2) \quad (6)$$

其中 ρ_s 及 D_s 為撞擊顆粒的密度及直徑， W_s 為顆粒撞擊速率的垂直分量。

I_r 項乃由單一顆粒撞擊彈跳軌跡加以推估，定義該彈跳軌跡所需之幾何參數係整理他人實驗數據加以回歸成而估計之，該等彈跳軌跡幾何參數多表示為岩床面剪應力的經驗公式。 F_e 項則假設為河川沈積料供應與輸送能力之比值的線性函數。由理論推導、經驗式的應用及簡化，Sklar & Dietrich 提出河床質彈跳磨蝕所產生的沖蝕率為：

$$E = \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s} F_e \quad (7)$$

式中， E 為岩床沖蝕率(m/s)； q_s 為單位河寬之供砂量(kg/m/s)； w_s 為泥砂顆粒之衝擊速度(m/s)； L_s 為泥砂顆粒躍動長度(m)； $F_e = (1 - q_s/q_t)$ ； q_t 為總傳輸量； w_s 及 L_s 可由 Sklar & Dietrich (2004) 文中所提供的經驗式推估。

式(4)因為包含 Ir 項，岩石河床可涵蓋半沖積性岩石河床(即有部分之岩床被沖積層所覆蓋)，而岩床被沖積層覆蓋之比例又可視為河床載中粗顆粒比率之函數。Sklar & Dietrich 的模式可呼應 Gilbert (1877) 對河川沈積料供應所扮演角色之假說，主張河川沈積料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)又認為，岩床磨損與河床載顆粒彈跳之距離有關，最大岩床磨蝕率亦出現於中等程度之岩床面剪應力下。依式(4)及(6)，岩床下切速率深受到河川沈積料供應量與顆粒大小之影響。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，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。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，低剪應力下高估下切率，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高估下切率。

傳統的穴蝕發生性多採用 Barnes (1956)穴蝕起始指數(cavitation inception index)加以研判，小於 1.0 為發生的準則，Whipple, et al. (2000)發現其實穴蝕會發生之機會比過去的研判之機會高不少，特別在紊流發生，產生渦流，當雷諾數(Reynolds number)頗高時(10^5-10^6)即使穴蝕起始指數還高達 3~4，穴蝕的情況仍會出現。懸浮載沖蝕效應會受局部河床地形地貌影響甚大，也可以透過當河床面不規則時渦流易於發生來解釋，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。借用混凝土材料的研究結論，脆性岩石之穴蝕阻抗與材料之壓縮強度政相關，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)。

Greimann & Lai (2008)以工程觀點結合水力沖蝕(hydraulic scour, 即 plucking)及高角度磨蝕(deformation abrasion)提出岩床的沖蝕模式：

$$E = K_p U \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) + \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s} Fe \quad (8)$$

式中第一項為 Greimann & Lai 依據合理化模式概念，第二項則直皆採用 Sklar & Dietrich (2004) 的研究結果。式中 K_p 為無因次沖蝕係數，需要試驗及現場資料進行檢定； U 為水深平均之水流流速(m/s)； τ 為作用於河床之剪應力(N/m²)； τ_c 為臨界剪應力(N/m²)，為臨界流功之函數，Annandale (1995)亦建議可為抗沖蝕指數(K_h)的函數(K_h)將於下節說明。

以上合理化沖蝕模式或基於因次分析或定性分析所建立，大範圍大區域的定性分析運用或許有用，但恐不易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)。Greimann & Lai 應經濟部水利署委託以工程觀點提出式(8)的沖蝕模式，並應用於集集攔河堰下游軟弱岩床沖刷計算，結果仍未盡理想。其關鍵在於第一項岩塊抽離機制除沖蝕啟動剪應力考慮岩性外， K_p 乃需透過標定所得，無法反應現地真正條件(亦未有由調查得的合理 K_h)。至於第二項因國內未提供岩石參數，亦無法有效模擬。另外，準確模擬沖刷量除水流條件外，主控沖刷機制或不同機制的貢獻比例亦應加以研究釐清。因此，本研究擬透過詳細的調查、量測、理論探討、試驗、監測及數值模擬，建立適用於軟岩河床的沖蝕率模式。

(三)岩石河床抗沖蝕能力

由於岩石的複雜性及水流的型態因地而異，岩石抗沖蝕能力不易由簡單的試驗或評估方法加以決定。Annandale (1995)認為對於岩石侵蝕的判定應當在水力條件及工程地質兩方面作均衡的考量，採用如圖 7 岩塊受水流逐漸由弱面頂開(jacking)、帶出(dislodgement)、飄移(displacement)三階段的概念模式，基於合理化公式的方法，關連水流的能量消耗與現地觀察

或文獻上土工材料受侵蝕後顆粒塊體運動的啟動，提出抗沖蝕指數(erosibility index) 作為評估產生沖蝕的可能性，亦即當水的侵蝕能量(erosive power of water)大於岩石抗沖蝕指數會發生沖蝕。

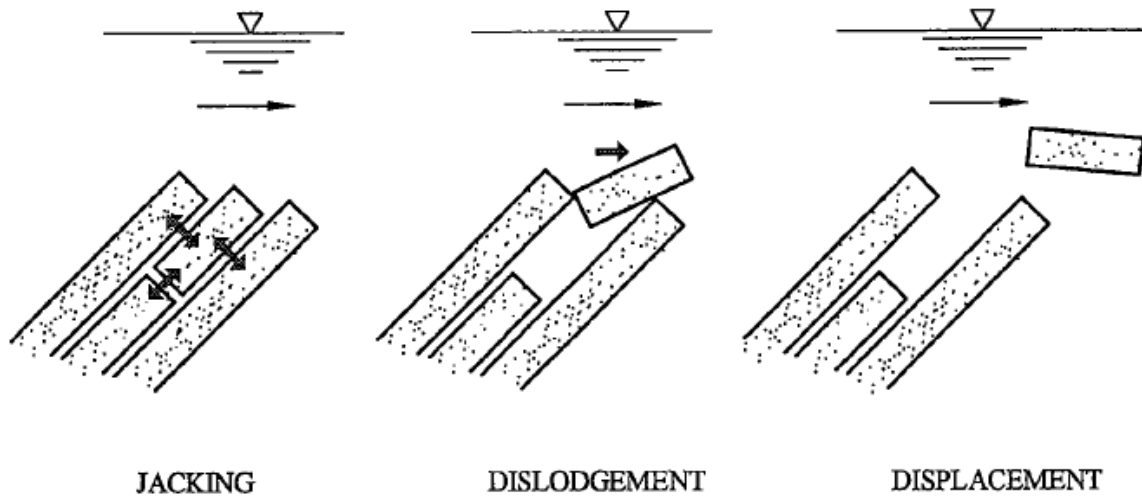


圖 7 Annandale (1995)評估岩石侵蝕的概念模式

Annandale (1995)定義抗沖蝕指數(erosibility index)為四項參數的乘積：

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (9)$$

式(9)中 M_s 為材料強度，決定方式分為三種，非凝聚性土壤由 SPT-N 值、凝聚性土壤由十字片剪強度、岩石由單軸抗壓強度來進行材料強度參數對算； K_d 及 K_b 與 NGI-Q 岩體分類法的前二個乘積相同， K_b 為顆粒/塊體尺寸，岩石由 RQD 除以節理數目計算，顆粒性材料則由 D_{50} 計算； K_d 為弱面/顆粒間抗剪強度，岩石由節理粗糙度、填充物以及風化程度來決定，對於顆粒性材料則是採用其摩擦角來計算； J_s 為地盤構造條件，岩石方面由傾向傾角與水流方向的關係，以及單位塊體大小來決定，顆粒材料的 J_s 值則一律為 1。

對於水流侵蝕能力的估計，Annandale 提出四種可能的流況：陡降 (headcuts)、水躍 (hydraulic jumps)、河床坡度突然改變 (change in bed slope)、明渠流 (open channel flow)，並由流體力學理論計算各種流況下河道之能量消耗理論公式。他並採用 150 溢洪道下方沖蝕案例 (地質條件、流況、是否發生沖蝕)，將能量消耗對抗沖蝕指數繪出雙對數圖關係 (圖 8)，進而推估對應特定抗沖蝕指數條件恰發生沖蝕時所需之能量消耗門檻值。

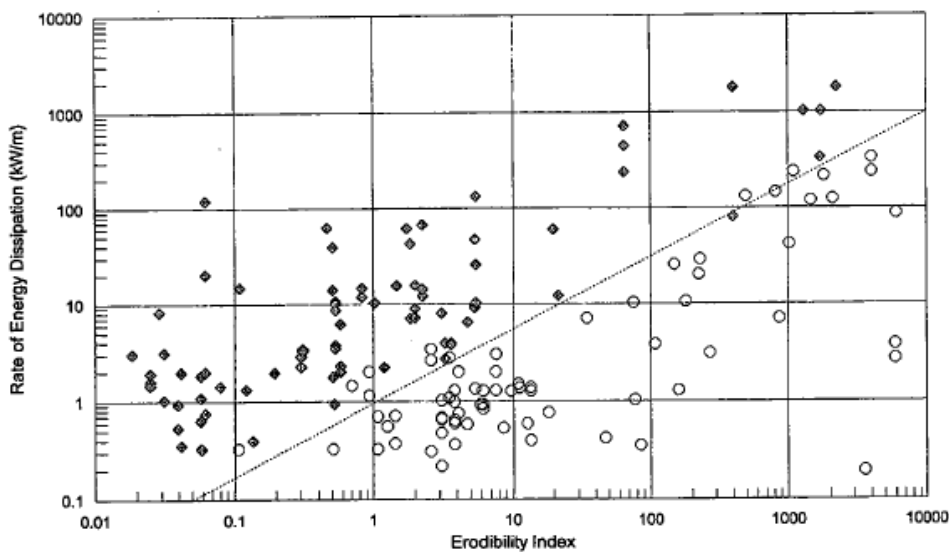


圖 8 能量消耗 vs. 抗沖蝕指數圖

Annandale 的方法為將沖蝕機制分離，若屬磨蝕機制則可能會低估抗沖蝕指數，且由於能量消耗對抗沖蝕指數乃由雙對數圖上經驗關係的區界線而來，此抗沖蝕指數之誤差極可能達十倍甚至數十倍範圍，因此其量化之可靠度值得進一步討論。本方法僅可評估沖蝕產生與否，無法推估其沖蝕率，若能將其改進，並有更多的實例或數值案例或可建立沖蝕速率與能量消耗及抗沖蝕指數的關係。

(四) 岩石河床沖蝕試驗

由於河道沖蝕岩石河床的行為包含相當複雜的動態侵蝕機制，所以在現地相當不容易進行完整的觀察與分析，所以許多學者均進行室內試驗來進行量測與研究。室內沖蝕試驗大多是透過水槽物理模型試驗來掌握特定控制條件下岩床沖蝕之定性、或定量行為。試驗大致可以區分為兩大類型，一是利用水槽及河道模型來模擬真實河道的侵蝕行為，另一種則是經由儀器設計來模擬特定的沖刷機制。試驗的結果，往往被用來觀察岩床之下切沖行為、地形發育變遷、驗證合理化公式之合理性，或用來得到一些經驗關係式 (Shepherd & Shumn, 1974, Wohl & Ikeda 1997, Robinson, et al., 2001, Sklar & Dietrich, 2001, Briaud, et al., 1999)。

1、Shepherd & Shumn (1974)

Shepherd & Shumn 採用 60 英尺長 4 英尺寬及 30 英寸深的直線傾斜水槽，以砂及高嶺土混合而成的人造岩石模擬河床之底床材料，控制水槽坡降、含砂量、流量等因素，共進行 2 個直線河道及 2 個蜿蜒河道到的模擬試驗，觀察水槽內之下切沖蝕與橫向沖蝕受含砂量與流量所控制，形成之河床橫斷面與縱斷面均為不均勻狀，試驗中發現侵蝕行為可分成 3 個主要階段(圖 9)，第一階段是在縱向上產生線性波紋(ripple)及壺穴，第二階段階段是線性波紋逐漸加大成為蝕溝(groove)，第三階段則是各個小蝕溝結合形成一個窄深的內部渠道(inner channel)。

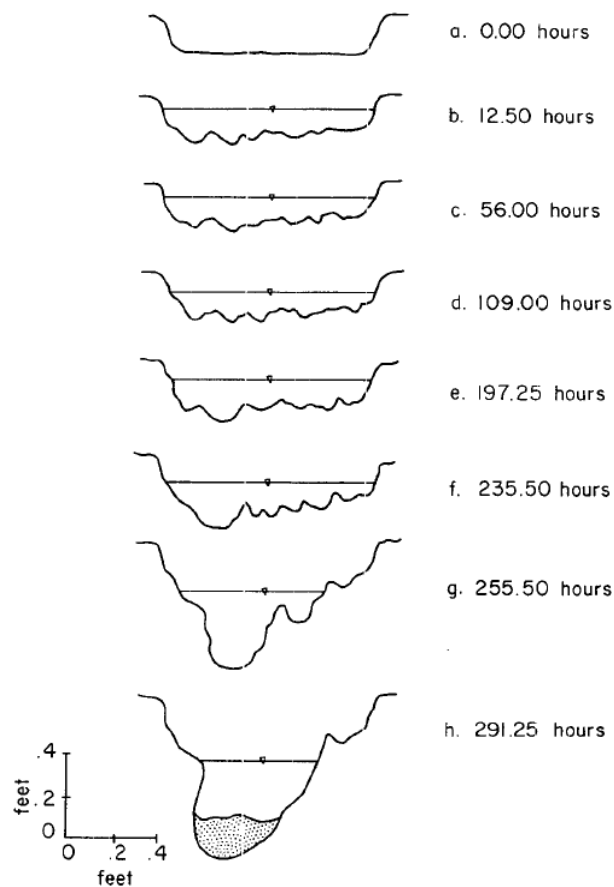


圖 9 水槽河道橫斷面的沖蝕變化(Shepherd & Shumn, 1974)

2、Wohl & Ikeda (1997)

Wohl & Ikeda (1997) 以 70% 砂土與 30% 皂土混和材料來模擬河床之凝聚性底床材料，改變不同水槽坡度(1%、2%、5%、10%、20%)，流量等其他因素均保持固定，於 4 公尺長 20 公分寬及 27 公分深的水槽進行沖蝕模型試驗。觀察河床經沖蝕出現之平行縱向溝槽傾向，試驗結果顯示，坡度小的時後(1%)，縱向溝槽大致平行而略有交織狀，隨著坡度增加至 2%，縱向溝槽變成寬而淺，扭曲較小，當坡度繼續增加時(5%-20%)，逐漸出現較深的槽溝，而且扭曲較高，溝槽中也出現壺穴、侵蝕階及深潭的現象。

3、Robinson, et al., (2001)

Robinson, et al. (2001) 認為河床地盤之天生弱面特性會影響其暴露於強勁水流下受到沖蝕之容易與否，典型之材料強度試驗常未將現地材料之弱面納入考慮。他們將 5 種不同尺寸的水泥塊體，變化其長軸方向，擺設在水槽中自由溢流的水柱衝擊下游測，並進行塊體下方間隙的水壓量測，試驗結果顯示含弱面岩體之抗沖蝕能力受岩塊尺寸與位態所影響，而且水壓在裂隙中的浮動變化通常會對塊體破壞有很大的影響。

4、Sklar & Dietrich (2001)

Sklar & Dietrich (2001) 認為河川提供沈積物之粒徑分佈與岩石河床下切速率有密切關係，但由於在現地進行岩床侵蝕與來砂量關係的量測相當困難，Sklar & Dietrich (2001) 發展設計磨蝕試驗儀(圖 10)進行室內的小尺度試驗。Gilbert (1877) 最早指出河川提供的沈積物一方面有促進沖蝕之工具性效應 (tool effect)，一方面卻具有防護沖蝕的覆蓋性效應(coverage effect)，相互抗衡。Sklar & Dietrich (2001) 經由試驗推論河川提供沈積物之粒徑分佈會是主控河川下切速率之關鍵因素之一，試驗結果顯示，最大侵蝕率發生於粗粒料的供給量僅能部分覆蓋岩床河道時，而河床載中之細料相對於粗料而言，其磨削效率較為有限。他們也提出下切速率與張力強度呈負相關，試驗數據顯示下切速率約與張力強度的平方成反比。Sklar & Dietrich 並分析岩石河床受沖蝕之機制，他們還注意到河床小尺度之不規則表面可能促發穴蝕 (cavitation)。此外，河床載卵礫石衝擊岩床，破壞岩體中弱面間岩橋，克服阻抗、也會造成岩體中岩塊之鬆動、脫離(plucking)，都可能是岩床受沖蝕之重要原因。

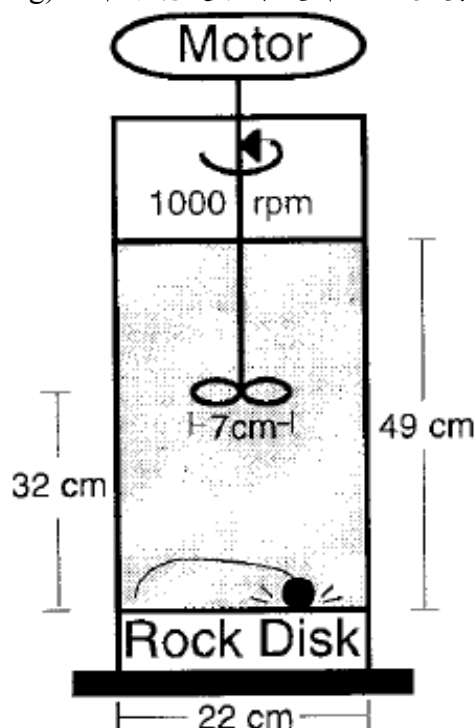


圖 10 岩床磨蝕試驗儀示意圖(Sklar & Dietrich, 2001)

5、Briaud, et al. (1999)

Briaud, et al. (1999)提出了一套估計橋墩周圍凝聚性土壤（含軟弱岩石）局部沖蝕速率的程序，他們將這套方法簡稱為 SRICOS(Scour Rate In Cohesive Soils)。SRICOS 方法係先藉助一套特殊試驗儀器 EFA(Erosion Function Apparatus)抗沖蝕試驗估計凝聚性土壤之抗沖蝕能力。EFA 抗沖蝕試驗儀器如圖 11 所示。此儀器由水槽及可使試體深入水槽的試體管所組成。試驗中可控制流速、試體伸出率、及量測試體前後的水壓力。試驗開始先突出 1mm 之土樣，在控制流速下，分別量測沖蝕掉單位厚度土樣所需時間，厚度除以時間得到沖蝕速率 E 。改變不同之控制流速，對應作用在土樣前緣之不同剪應力，可得到不同之沖蝕速率 E ，便可以獲得沖蝕速率 E 對不同剪應力的關係圖（圖 12）。

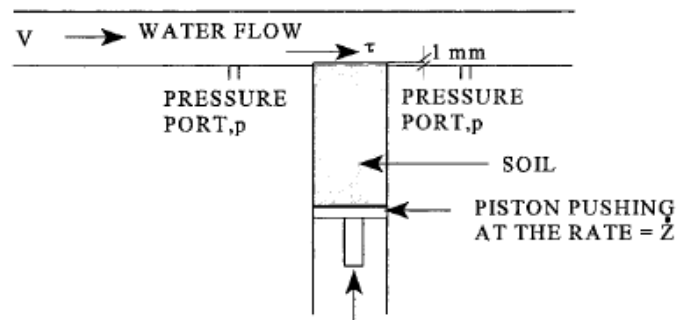


圖 11 EFA 抗沖蝕試驗儀器

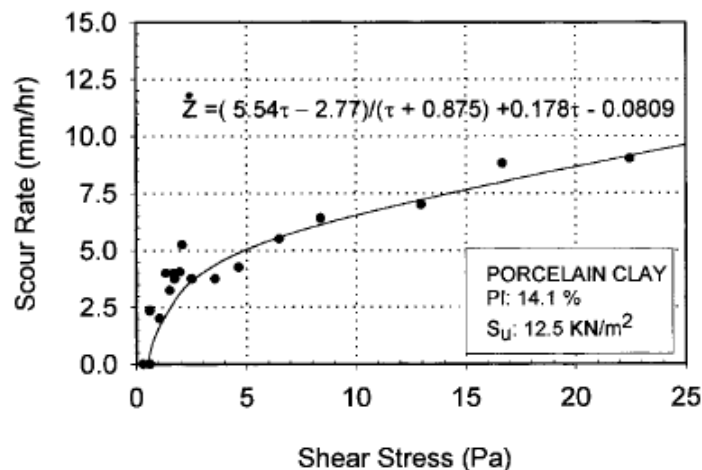


圖 12 沖蝕速率對不同剪應力關係圖

沖蝕速率 E 對不同剪應力的關係圖常會有一剪應力門檻值，當剪應力小於該門檻值，沖蝕速率 $E=0$ 。對無凝聚性的土壤（砂土、礫石），沖蝕速率 E 對不同剪應力的關係通常為線性關係，對凝聚性的土壤此關係通常為非線性。Briaud 團隊再透過剪應力大小與流速對應之雷諾數相關、剪應力與雷諾數關係之經驗公式，及經由水槽模型試驗數據整理得最大沖蝕深度與雷諾數關係之經驗公式，則可依雷諾數估算作用在橋墩附近之剪應力大小。接著便可由沖蝕速率 E 對不同剪應力的關係圖估計最大沖蝕速率。Briaud 團隊並將 SRICOS 方法擴大至可以處理層狀不均質之沖積土層並可考慮洪水流速隨時間之變化（Briaud, et al., 2001b）。

6、Nakato (2002)

為確保一處新建橋樑的基礎（頁岩上覆約 2.4 公尺厚的細砂層）的設計可以充分避免橋墩沖刷的危險，IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research)設計一頁岩沖刷試驗設備(圖 13)，採集直徑約 60 公分的頁岩試體，量測噴嘴流速及沖刷時間，進行實體尺寸的沖刷試驗。由於並未對試驗的其他相關影響因素作控制及量測，試驗結果僅以照相紀錄並觀察試體受沖刷破壞的狀況。

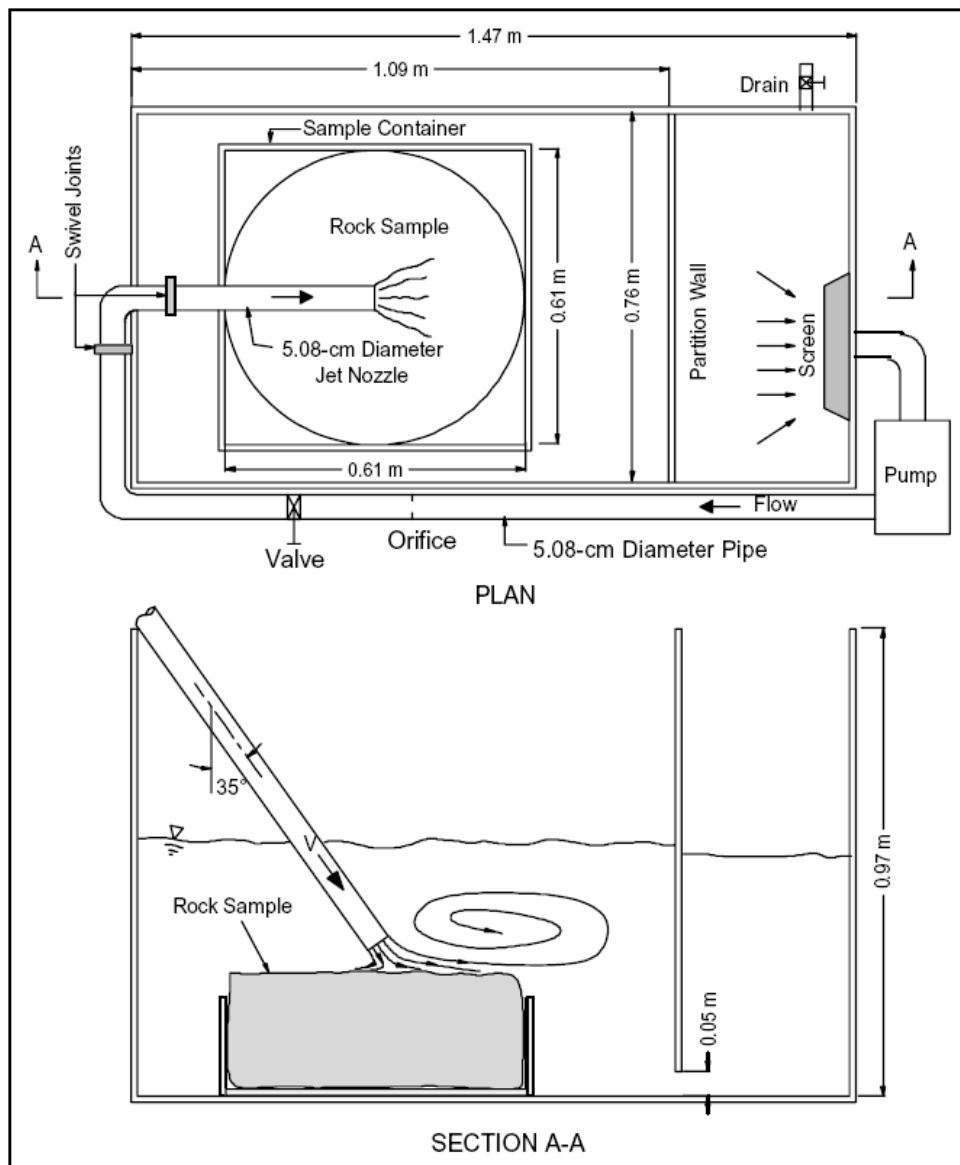


圖 13 頁岩沖刷試驗示意圖

7、岩石河床沖蝕試驗討論

室內沖蝕試驗大多是透過水槽物理模型試驗來掌握特定控制條件下岩床沖蝕之定性或定量行為，另一種則是經由儀器設計來模擬特定的沖刷機制。對於水槽試驗而言，岩石河床的沖刷機制尚有許多需要加以釐清的地方，且岩石河床的沖刷通常包含多種機制的複雜交互作用，在個別沖刷機制尚未充分瞭解之前，以水槽進行沖刷試驗可能難以釐清對個別的沖刷因素的影響，所以應先針對個別的沖刷機制進行探討，設計針對單一機制的試驗設備較為可行。

Sklar & Dietrich (2001)的磨蝕試驗僅針對砂石粒徑、砂石量、以及岩石強度之關係，適用性較為侷限，但應可針對單一性質作評估。Nakato (2002)設計的頁岩沖刷試驗目前無充分的沖刷因素分析考量，其發展的適用性應再進一步加以評估。SRICOS 方法雖然僅針對凝聚性土壤之抗沖蝕能力進行試驗，但由於採用一系列的經驗公式，並且侷限於考慮橋墩周圍凝聚性土壤之局部沖蝕速率，對於一般岩石河床、河岸之沖蝕問題之適用性應進一步評估。

四、研究方法

本子計畫旨在利用現場調查觀測沖蝕現象，以推估軟弱岩石河床質的沖蝕機制、建立岩石河床抗蝕性指數（檢討 Annandale, 1995 的方法，並加以修正）、建立試驗室的沖蝕試驗設備及試驗（含抽離機制及磨損機制）、軟岩質河床沖蝕速率經驗式建立，最終期能運用於評

估小區域岩床、岩岸之沖刷速率與抗沖刷能力，以利未來應用。研究流程如圖 14 本子計畫各年研究方法流程（部分項目將結合其他子計畫共同進行），各年度工作及研究方法概述如下。

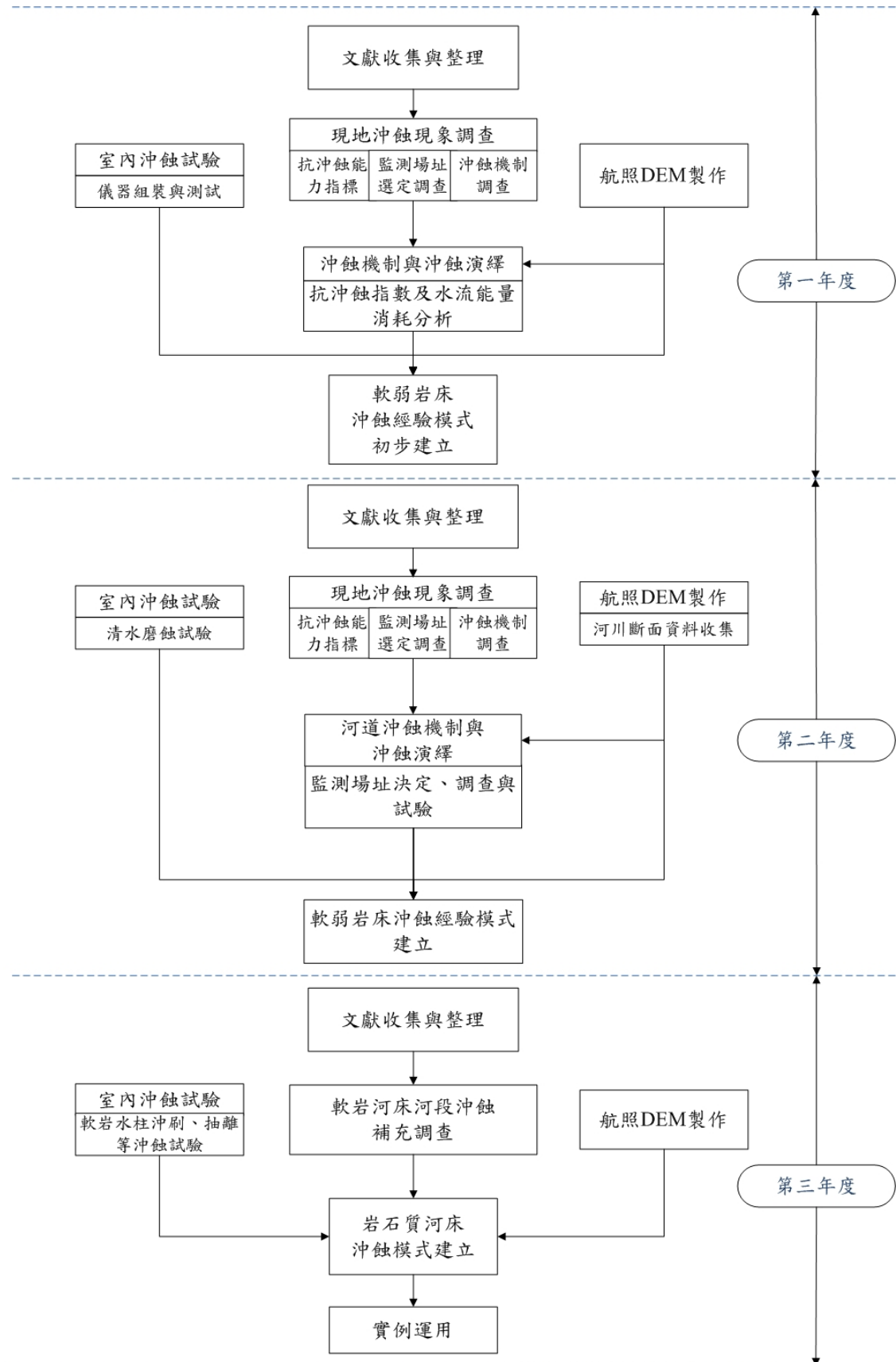


圖 14 本子計畫各年研究方法流程

(一)文獻收集與整理

本計畫將結合其他子計畫持續收集與岩石河床沖蝕機制、試驗等相關的國內外文獻，文獻及研究成果將上傳總計畫已建立的 FTP server 供各子計畫下載相關，以達資源共享，及交流的目的。文獻區分為一般、沖蝕模式、沖蝕試驗、壩沖蝕、橋沖蝕、沖蝕過程、案例等十二項。並將視需要收集研究河川河道歷年的斷面測量結果及購買不同年代的航空照片，航空照片將利用航空測量原理製作數位地形圖，斷面測量與數位地形圖，斷面測量與數位地形圖將用於計算岩床的沖蝕量。

(二)航照數位高程地形圖(DEM)製作

本計畫將購買歷年航空照片，利用商用軟體進行數位高程資料及正射影像圖製作。製作所得結果將以斷面(2D)及立體型態計算沖蝕深度及沖蝕面積或體積。製作範圍包含大甲溪梅子鐵橋至新山線鐵路橋河段、濁水溪集集攔河堰至名竹大橋河段、以及八掌溪觸口至國道3號橋河段。本計畫研究工作將由子計畫五主持人史天元教授指導進行，建置步驟概述如下：

1. 查詢航線資料，選取並購買航空照片數位檔案。
2. 套繪航空照片對重疊區域。
3. 選擇歷年皆能辨識的地面控制點。
4. 由大比例尺地形圖量取地面控制點坐標，必要時至現地進行檢測。
5. 收集整理航空影像相機參數、外方位參數、地面控制點、嵌合點等，利用專業立體製圖程式製作數位地形資料及正射影像。
6. 檢核數位地形資料及正射影像，匹配不佳時應進行重作。

(三)主要高沖蝕軟岩河床河段沖蝕調查

調查範圍包含大甲溪梅子鐵橋至新山線鐵路橋河段、濁水溪集集攔河堰至名竹大橋河段、以及八掌溪觸口至國道3號橋河段。調查工作包含地表地質調查、岩床沖蝕特性調查、以及岩石指標性質調查。

地表地質調查工作將以區域地質圖及相關調查文獻為參考依據，於現地實際進行岩床露頭調查，並依據岩性分佈進行地層之歸納與分層，繪製地表露頭地質圖以提供作為岩床沖蝕模擬之地質基礎資料。

現地沖蝕特性調查目的在於瞭解河道區域內裸露岩床的沖蝕狀況，紀錄不同地質條件的岩床沖蝕特性，量測岩石材料沖刷之必要參數，最後將調查結果歸納分類，作為研判河段沖蝕機制之參考。

岩石指標性質調查目的為現場調查評估岩石材料沖刷之必要參數(如 Annandale 之抗沖蝕指數評估方法)，作為探討沖蝕機制、建立侵蝕模式之參數使用，項目包括：

1. 以史密特錘量測 R 值後轉換成岩石強度。
2. 量測節理位態、節理間距並進行節理統計。
3. 調查節理狀況(開口、閉口、形狀)、節理風化程度、節理面粗糙程度及填充物狀況。
4. 岩層位態與水流流向關係。
5. 採集現地岩樣進行岩石物性試驗。

(四)沖蝕機制及沖蝕演繹建立

本項目將由現地沖蝕現象調查結果，依不同水流受力型態及不同地質條件探討岩床的可能沖蝕機制，提供子計畫一建構沖蝕機制理論模式。沖蝕演繹則依據河道歷年高程變化以及航空照片觀察，建構歷年河道地形沖蝕演變概況。

(五)抗沖蝕指數及能量消耗分析

本計畫將針對 Annandale 所提由抗沖蝕指數與發生沖蝕時所需之能量消耗門檻值決定

河床的沖蝕性經驗圖，以本計畫研究沖刷河段為例進行分析及計算，探討其在台灣西部麓山帶軟岩河床沖蝕可能性評估的適用性。本計畫亦將由沖蝕試驗或/及現地調查所得岩石材料的抗沖蝕力嘗試對 Annandale 的公式加以修正。

(六)室內沖蝕試驗

本研究團隊於 97 年度計畫已就室內沖蝕試驗儀器進行設計，室內沖蝕試驗儀器的設計參考其他研究文獻試驗設備的優缺點來進行，概念上最重要的部分是必須可針對不同沖刷機制進行多種不同試驗，受限於部分量測分析設備較為昂貴，量測設備將於本計畫分為兩年逐步添購。本多功能室內沖蝕試驗設備可進行(1)水平磨蝕試驗、(2)可變角度直接沖刷試驗，並逐步規劃(3)高速流場試驗、(4)岩塊抽離試驗等。

上述試驗所需的試體將於現地鑿取適宜的岩塊（或由大口徑鑽孔取樣得），再於試驗室裁修，若大尺寸於現地不易於現地取得（因其易碎），則將於試驗室製作人造試體，人造試體製作方式將依據本校以往製作人造軟岩試體（供試驗室承載試驗）的方法。

(七)軟岩質岩質河床沖蝕模式(經驗式)建立

如研究背景所述，Annandale 的方法僅可評估沖蝕產生與否，無法推估其沖蝕率，本研究將利用八掌溪及濁水溪的斷面及航空測量沖蝕計算結果、沖蝕機制、抗沖蝕指數、及由水理計算所得的流速或流功(stream power)，嘗試建立沖蝕速率模式經驗式。本項目的水理計算部分將由總計畫負責。

本計畫擬由沖蝕試驗、沖刷監測、沖蝕機制模擬分析、輸砂模組建構及分析的結果（子計畫一至四），依沖蝕主控機制建立不同機制下的沖蝕模式（理論、經驗或數值），亦由現地沖蝕現象調查結果歸納最有可能的複合沖蝕機制，利用輸砂模組結合個別機制建立複合機制的動床分析，透過數值計算建立不同條件下的沖蝕率公式（由計算數據標定合理化公式參數或直接由計算數據進行統計回歸分析）。

五、結果與討論

(一)文獻收集與整理

本計畫收集與岩石河床沖蝕機制、試驗等相關的國內外文獻，文獻及研究成果，建立 FTP server 提供各子計畫下載使用，已收錄與河床沖蝕相關的國際期刊及會議論文數百篇，約略分為一般、沖蝕模式、沖蝕試驗、壩沖蝕、橋沖蝕、沖蝕過程、案例等項目。第三節中已經針對相關文獻進行探討，於此不再贅述。

在各河川之歷年大斷面測量資料方面，八掌溪已收集民國 78、85、89、94、97、及 98 等 6 個年份大斷面測量資料；濁水溪已收集民國 87、90、93、96、及 98 等 5 個年份大斷面測量資料；大甲溪已收集民國 82、87、89、94、及 97 等 5 個年份大斷面測量資料。除上述主要工作標的之河川外，另亦收集國內其他河川軟岩河床顯著沖刷河段之斷面測量資料，包含大漢溪、頭前溪、大安溪、北港溪(大湖口溪)、曾文溪等，提供本計畫研究參考。以下針對本計畫研究之大甲溪、濁水溪、以及八掌溪進行簡介。

1、大甲溪

大甲溪之軟岩質河床沖蝕範圍位於東勢(梅子)鐵橋上游至新山線鐵路橋之間，河道長度約為 9 公里。本河段之主要跨河構造物包括東勢(梅子)鐵橋、長庚橋、石岡壩、埤豐橋、舊山線鐵路橋、及新山線鐵路橋等。

本河段出露之岩層包含中新世晚期之桂竹林層、上新世之錦水頁岩層及卓蘭層等，均屬極易沖蝕之軟弱岩層。主要構造包含石圍牆向斜，車籠埔斷層錯動伴生之破裂滑移小斷層、以及三義斷層等。

921 地震的地體錯動抬昇，以及石岡壩長期攔阻砂源為造成本河段軟岩河床侵蝕下切的

主要原因。圖 15 為本河段縱向平均河床高變化之比較圖，由 82 年、89 年(921 地震抬昇後)、至 97 年的總變化量觀察，梅子鐵橋下游(圖 16)最大有 15 公尺的局部沖刷，石岡壩下游(圖 17)至埤豐橋的局部沖刷造成高程差異為最大，埤豐橋下游(圖 18)至新山線鐵路橋則平均下降 5 公尺左右。97 至 99 年則有逐漸回淤的現象。

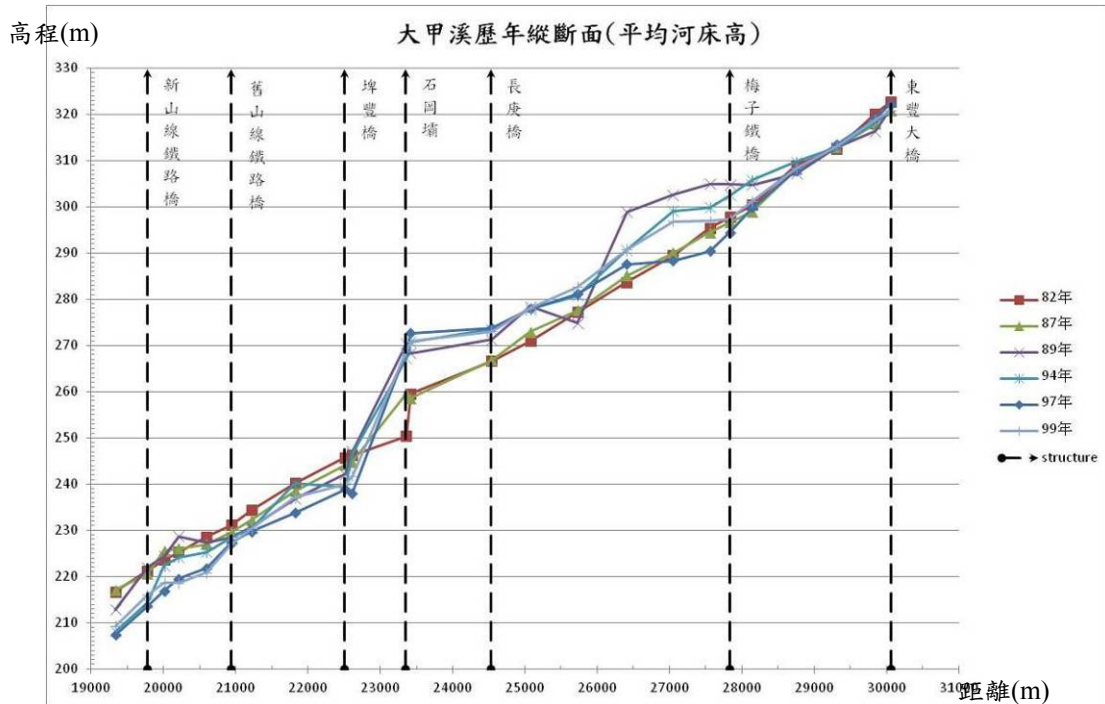


圖 15 大甲溪歷年縱向平均河床高比較圖(民國 82~99 年)



圖 16 大甲溪梅子鐵橋河道沖蝕狀況



圖 17 大甲溪石岡壩下游河道沖蝕狀況



圖 18 大甲溪埤豐橋下游河道沖蝕狀況

2、濁水溪

濁水溪之軟岩質河床沖蝕範圍位於集集堰至名竹大橋河段，全長約 7 公里，河段之主要跨河構造物為集集堰以及名竹大橋。

本河段出露之岩層為上新世之卓蘭層，以及上新-更新世之頭嵙山層，均為極易發生沖蝕之岩層。主要地質構造包括位於名竹大橋上游的車籠埔斷層，以及集集堰下游的初鄉斷層。

影響本河段軟岩河床沖蝕的原因主要有二個：一是車籠埔斷層造成的地體抬昇，改變沖蝕基準面；另一則是集集堰蓄水攔阻砂源向下游補充。圖 19 為本河段民國 87 至 98 年縱斷面之高程比較圖，由 87 至 98 年的總變化量觀察，集集堰下游之局部沖刷產生超過 10 公尺的高程下降，其他區域之高程變化量則約為 5 公尺或更小。圖 20 為集集堰下游河道沖刷狀況，圖 21 為名竹大橋上游河道沖刷狀況。

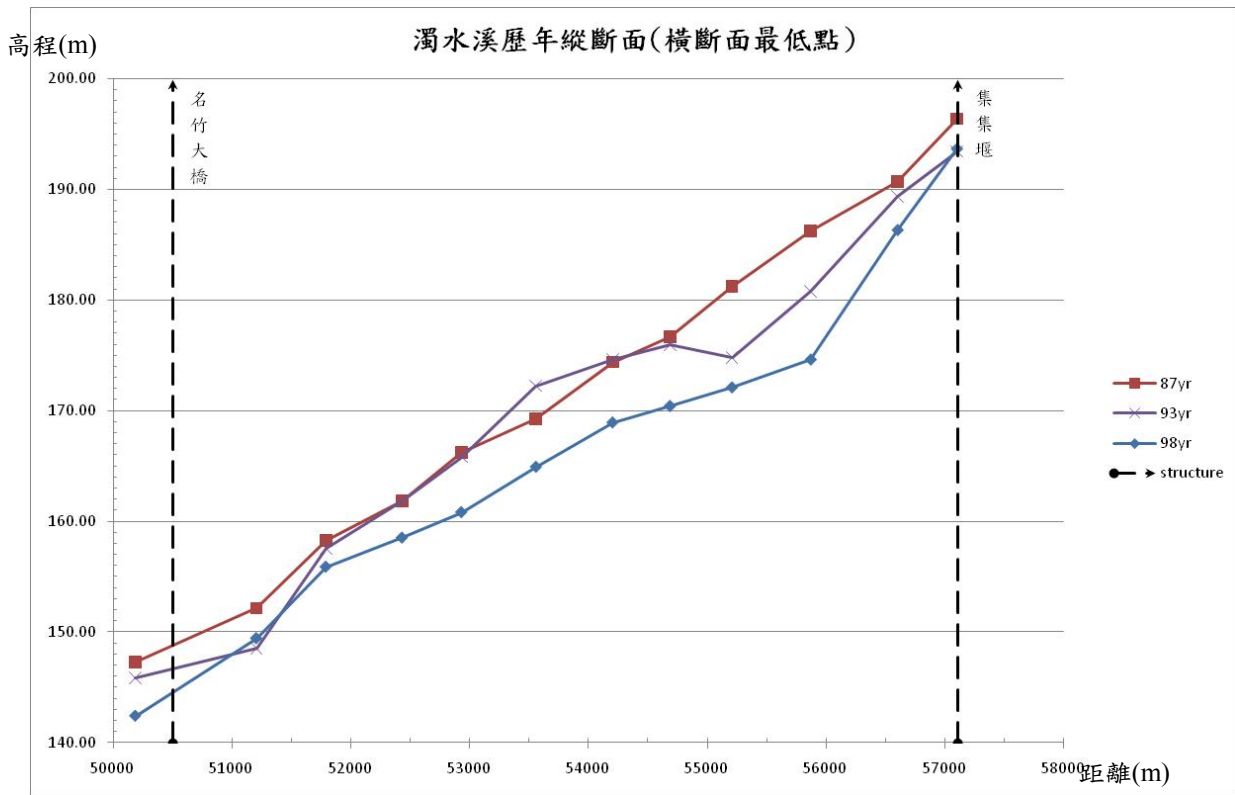


圖 19 濁水溪歷年縱向最低點比較圖(民國 87~98 年)



圖 20 濁水溪集集堰下游河道沖刷狀況



圖 21 濁水溪名竹大橋上游河道冲刷狀況

3、八掌溪

八掌溪軟岩質河床冲刷範圍位於觸口堰至國道三號橋上游(斷面 95, 河心距 48591 公尺), 河道長度約為 11 公里。主要跨河構造物包含觸口堰、五虎寮橋、吳鳳橋、仁義潭攔河堰(竹山堰)、仁義潭大橋、以及防制仁義潭攔河堰下游河道劇烈下切所設置之 7 道固床工。

本河段由觸口往下游岩層由東向西依次出露上新-更新世之六重溪層、更新世崁下寮層、二重溪層、及六雙層, 均為極易遭受侵蝕之岩性, 岩層大致呈南北走向, 向西傾斜約 10-20 度, 岩層呈現覆瓦狀疊置現象, 由地殼活動及地形發育之觀點看, 此河段為典型之順向河河谷, 河流之發育受東側地殼相對地快速抬升影響, 使岩層向西傾斜, 致使發育於山地地形之水流呈現直線型往西順流而下, 形成主河道為東西向之河谷。

影響本河段軟岩冲刷最重要之因素為仁義潭攔河堰下游局部冲刷之發展; 另由經濟部水利署水利規劃試驗所八掌溪治理規劃檢討報告(100 年)中提及, 本河段於民國 68 至 73 年縣政府核准河川砂石採取, 民國 69 至 76 年仁義潭水庫興建選擇本河段為填壩材料區, 造成護甲層大量喪失, 亦為造成軟岩冲刷之原因。

本河段之軟岩河床冲刷發展大致可由仁義潭攔河堰(不動點)區隔為兩個不同特性的河段(觸口堰下游河段、仁義潭攔河堰下游河段)。圖 22 為本河段民國 78 至 98 年的縱斷面最低點高程變化比較圖, 由民國 78 至 98 年之高程變化總量觀察, 觸口堰下游河段屬於均勻冲刷河段, 下切量約為 10 公尺; 仁義潭攔河堰下游局部冲刷之高程變化量 20.4 公尺為最大, 往下游逐漸縮減為 10 公尺左右。圖 23、圖 24、圖 25 分別為觸口堰、五虎寮橋、及仁義潭攔河堰附近河道冲刷狀況。

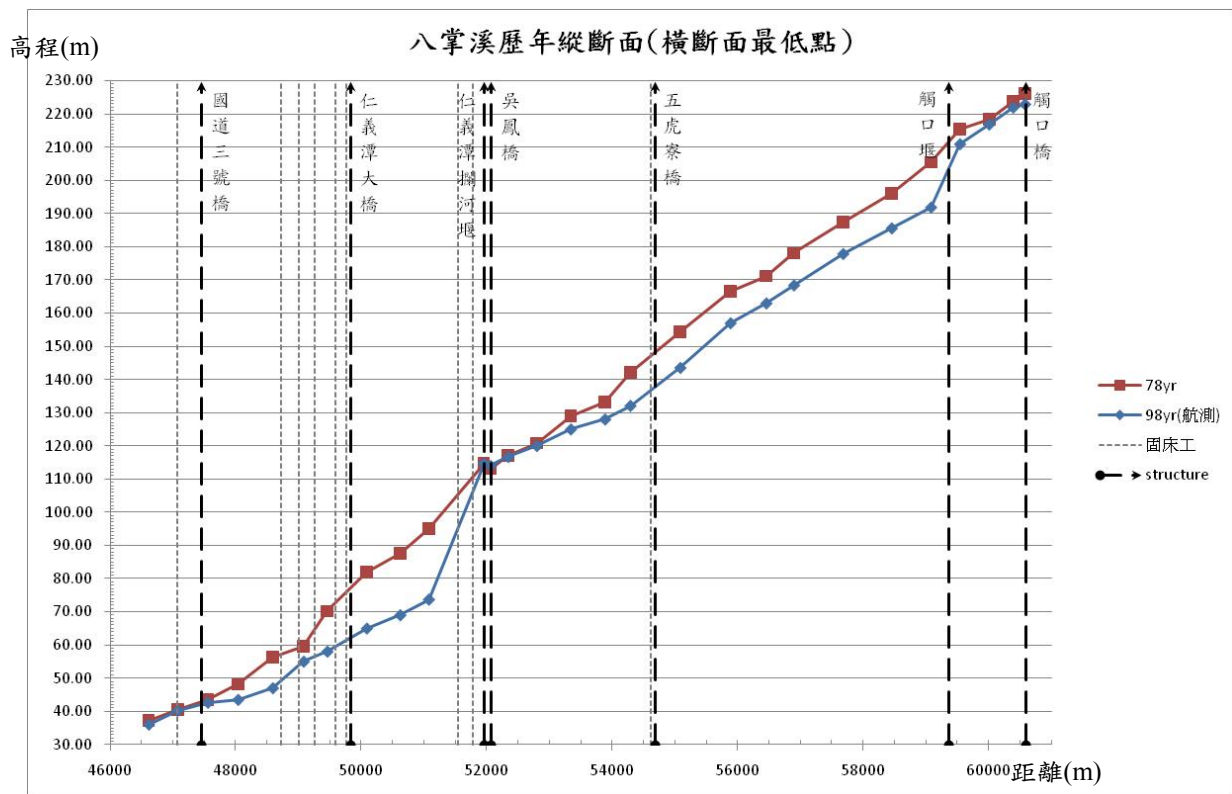


圖 22 八掌溪歷年縱向最低點比較圖(民國 78~98 年)



圖 23 八掌溪觸口堰河道侵蝕狀況



圖 24 八掌溪五虎寮橋下游河道侵蝕狀況



圖 25 八掌溪仁義潭攔河堰下游河道下切狀況

(二)航照數位高程地形圖(DEM)製作

航照數位高程地形(DEM)製作工作由子計畫五主持人史天元教授指導進行，八掌溪製作(含收集)民國 70、80、88、93、95 等 5 個年度 DEM 資料；濁水溪製作(含收集)80、88、93、96 等 4 個年度 DEM 資料；大甲溪製作(含收集)70、80、88、93、96 等 5 個年度 DEM 資料，各河川 DEM 資料製作收集情形彙整如表 1 所示。八掌溪、濁水溪、大甲溪各河段進行 DEM 製作範圍分別如圖 26、圖 27、圖 28 所示，大甲溪各年度的正射影像製作成果如圖 29~圖 33，DEM 製作成果如圖 34~圖 38，濁水溪各年度的正射影像製作成果如圖 39~圖 42，DEM 製作成果如圖 43~圖 46，八掌溪各年度的正射影像製作成果如圖 47~圖 51，DEM 製作成果如圖 52~圖 56。

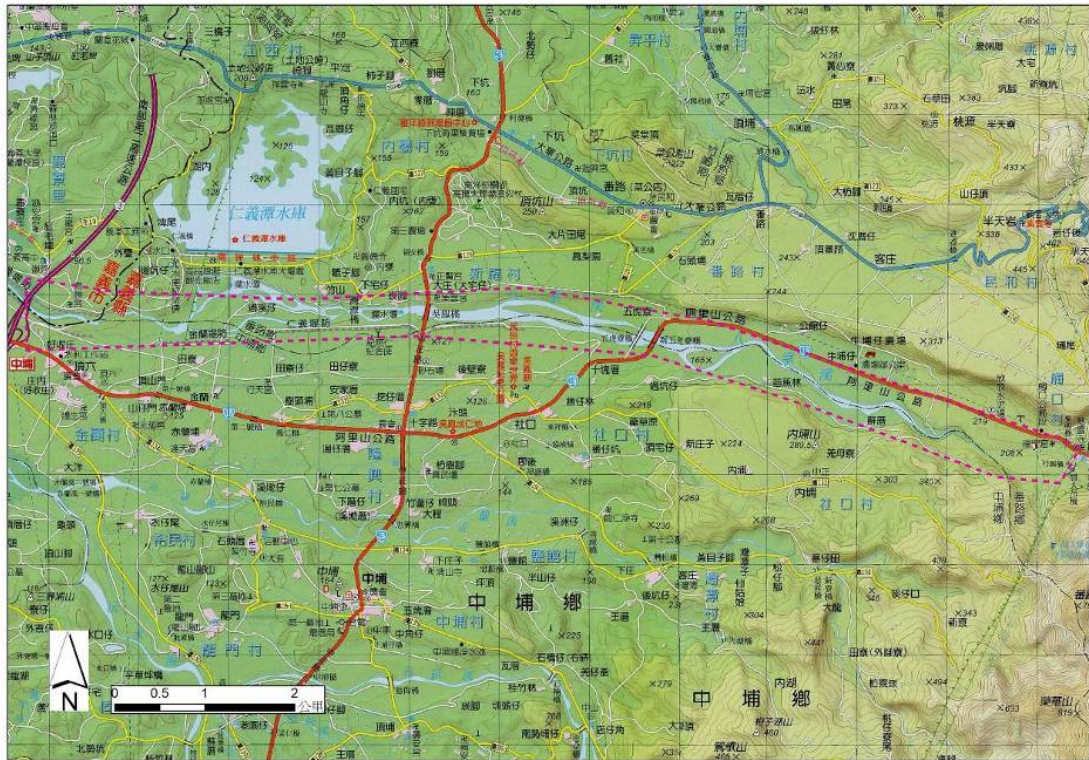


圖 26 八掌溪航照數位高程地形製作範圍(紅色虛線框)



圖 27 濁水溪航照數位高程地形製作範圍(紅色虛線框)



圖 28 大甲溪航照數位高程地形製作範圍(紅色虛線框)

表 1 各河川 DEM 資料製作收集情形

	70 年	80 年	88 年(921 後)	93 年	96 年
大甲溪	製作	製作	製作	收集	製作
濁水溪	-	製作	製作	收集	收集
八掌溪	製作	製作	製作	收集	製作(95 年)

1、大甲溪各年度正射影像及數值高程模型

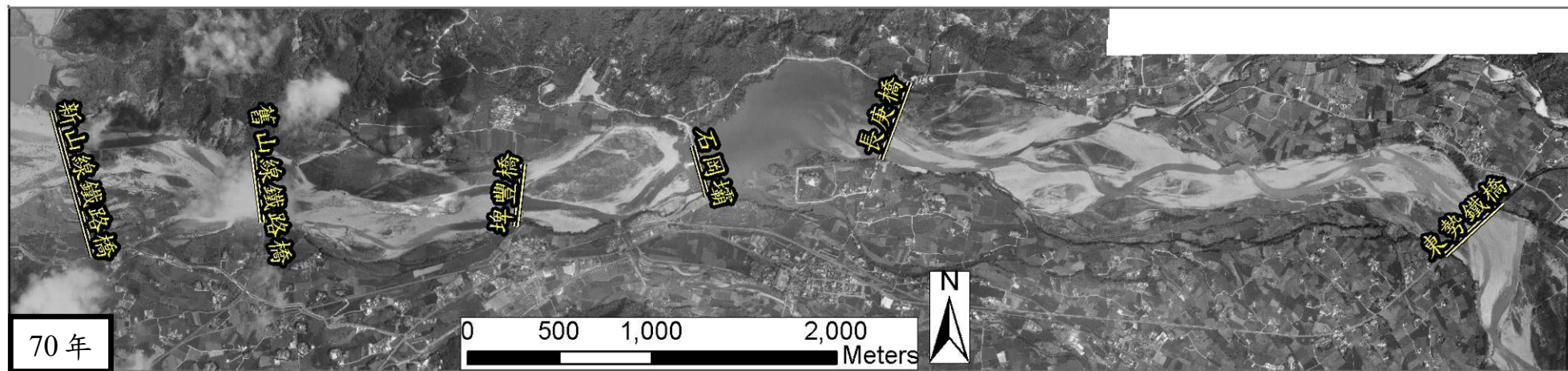


圖 29 大甲溪 70 年正射影像

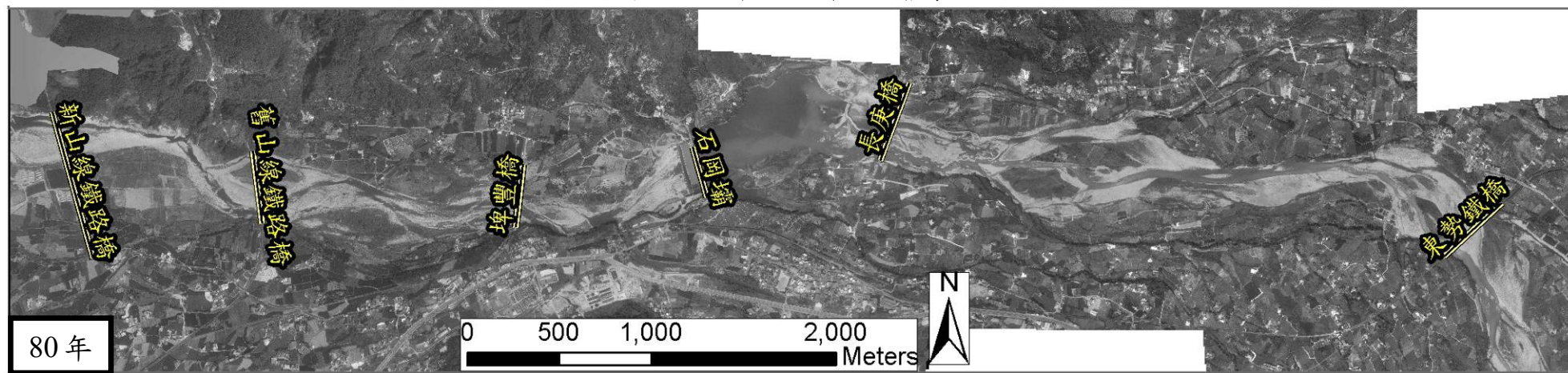


圖 30 大甲溪 80 年正射影像

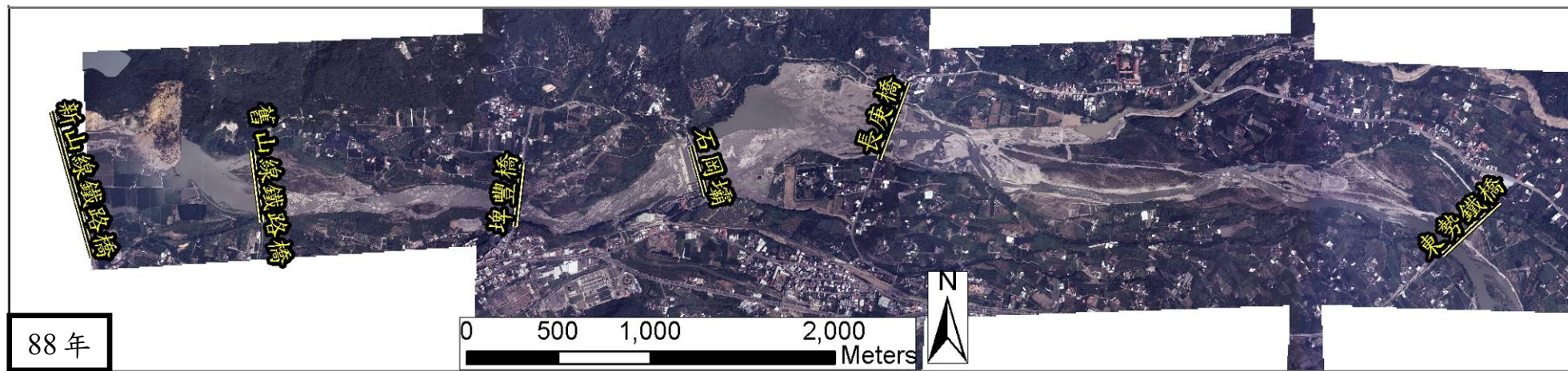


圖 31 大甲溪 88 年正射影像

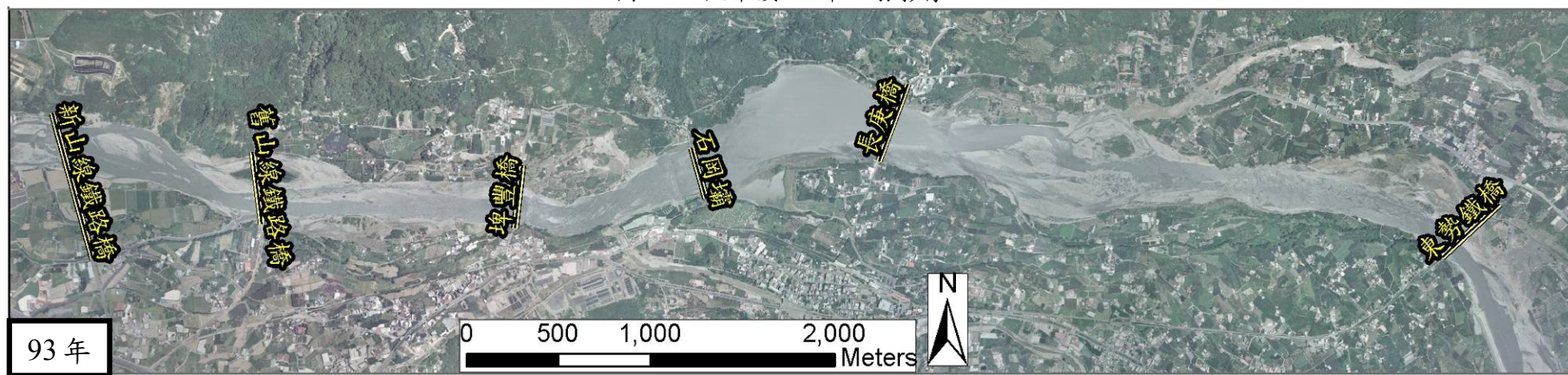


圖 32 大甲溪 93 年正射影像

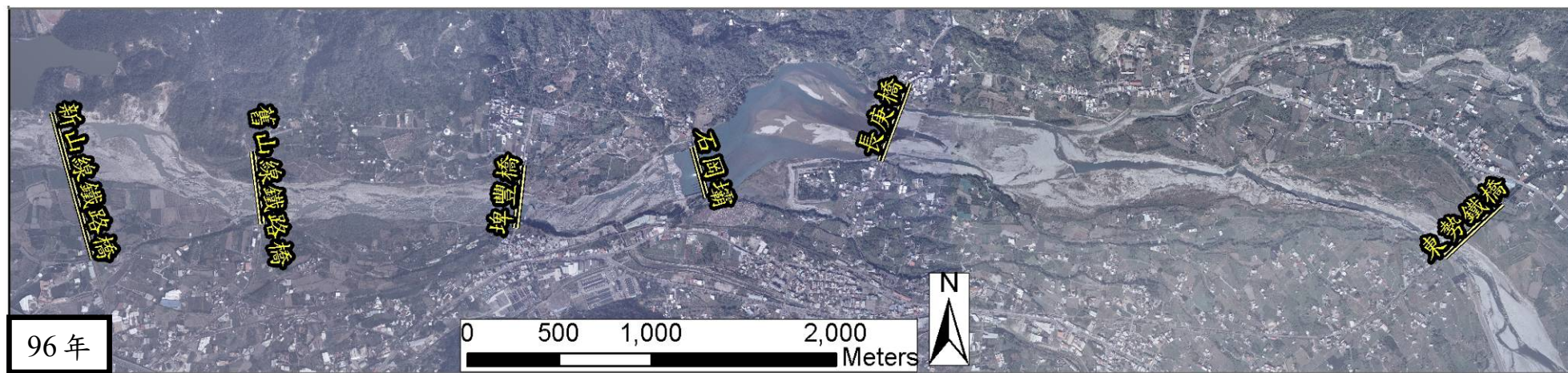


圖 33 大甲溪 96 年正射影像

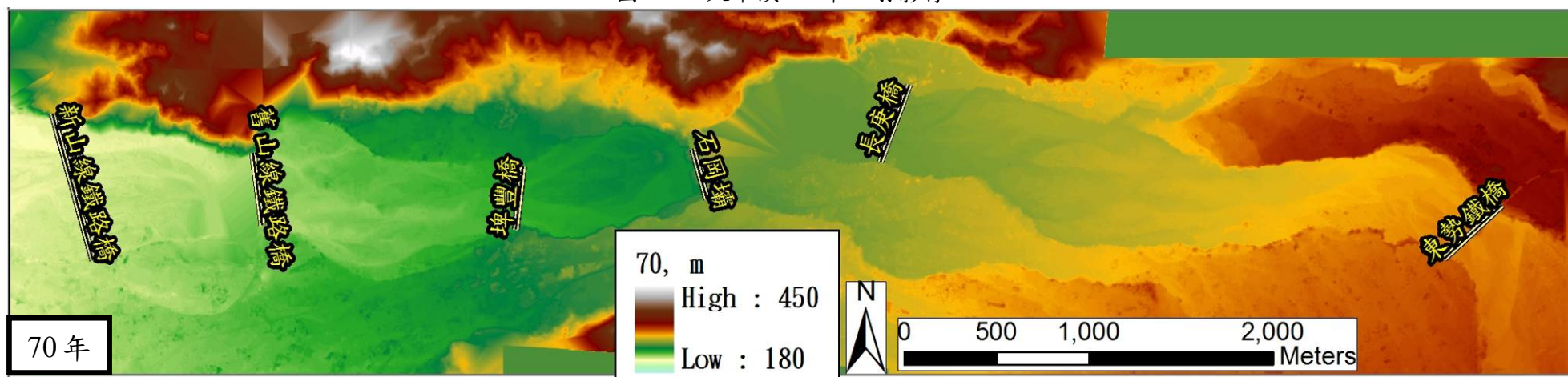


圖 34 大甲溪 70 年 DEM

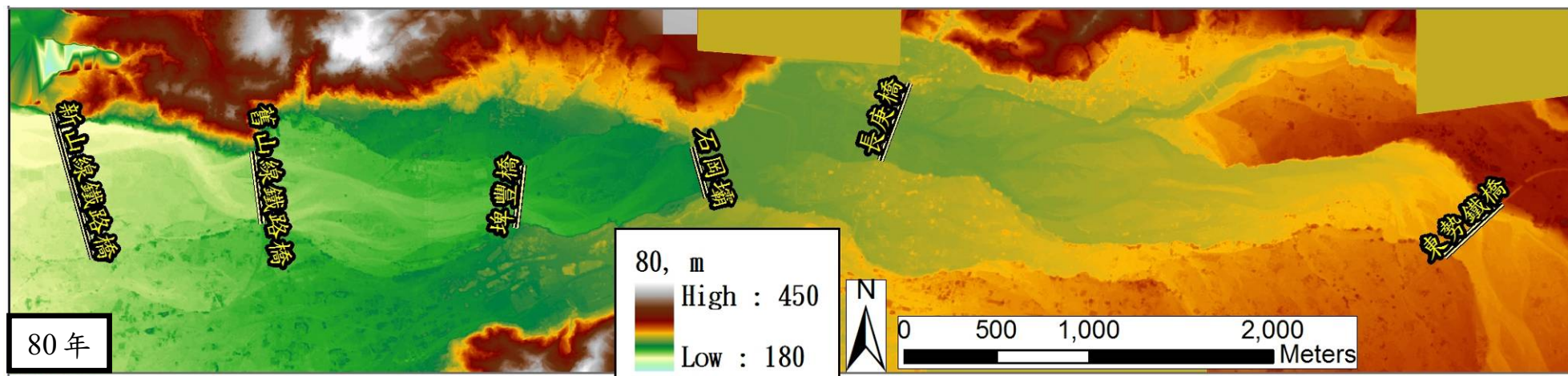


圖 35 大甲溪 80 年 DEM

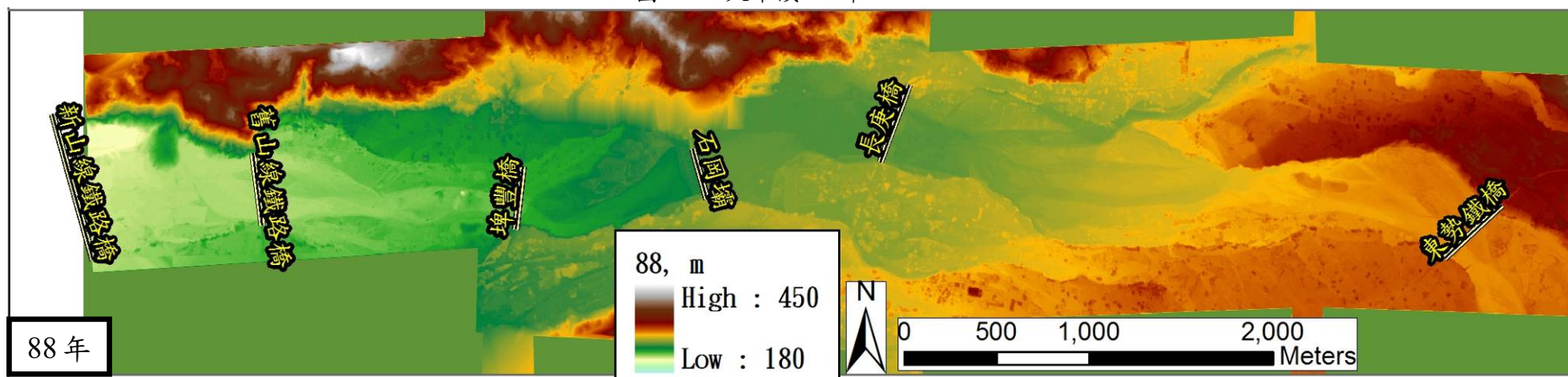


圖 36 大甲溪 88 年 DEM

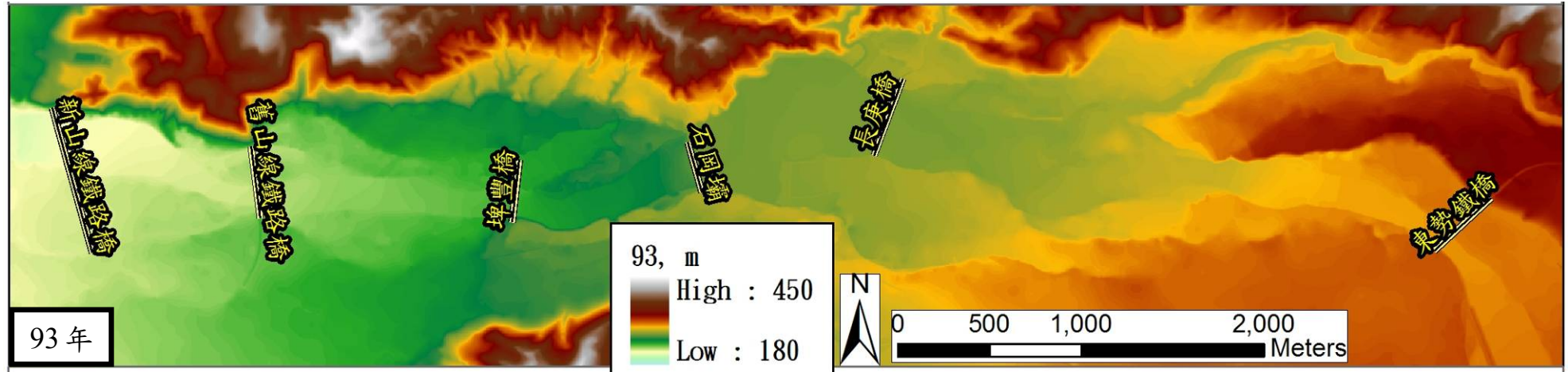


圖 37 大甲溪 93 年 DEM

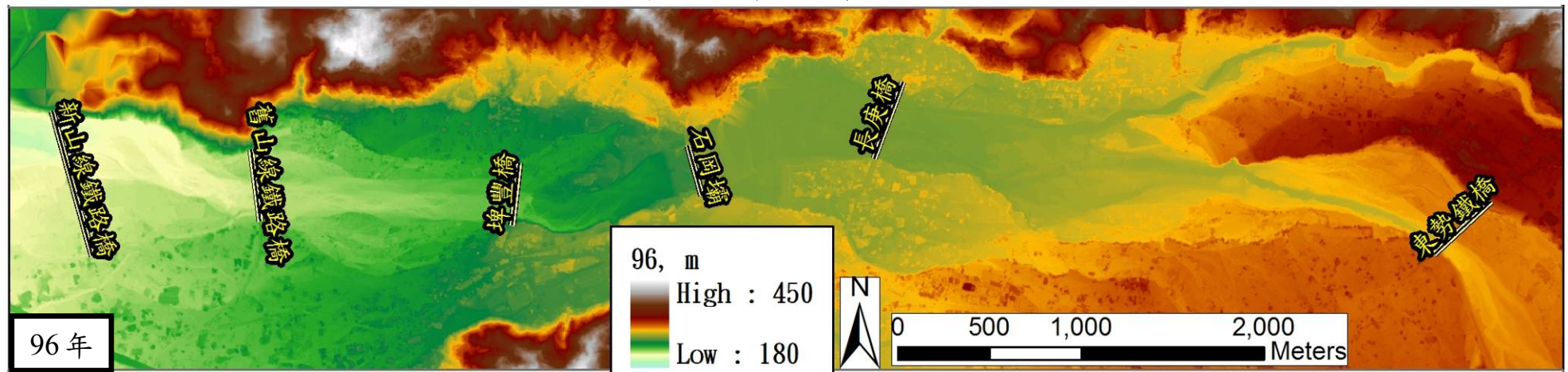


圖 38 大甲溪 96 年 DEM

2、濁水溪各年度正射影像及數值高程模型

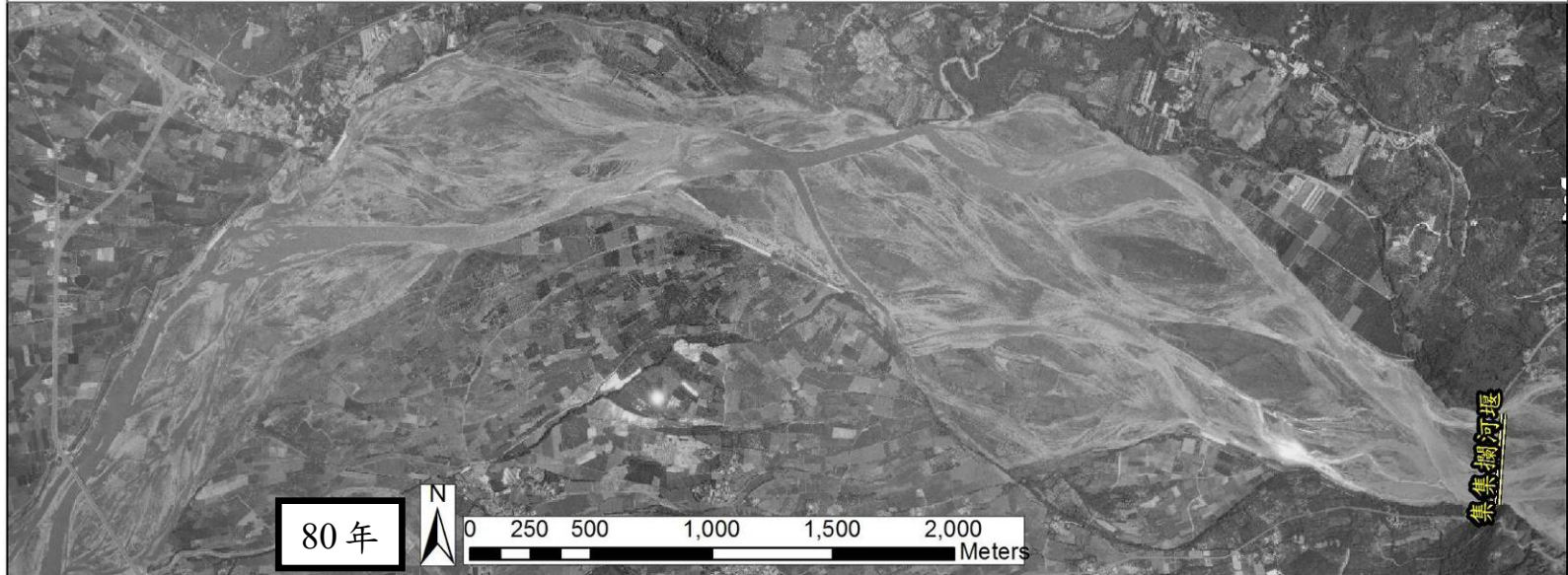


圖 39 濁水溪 80 年正射影像

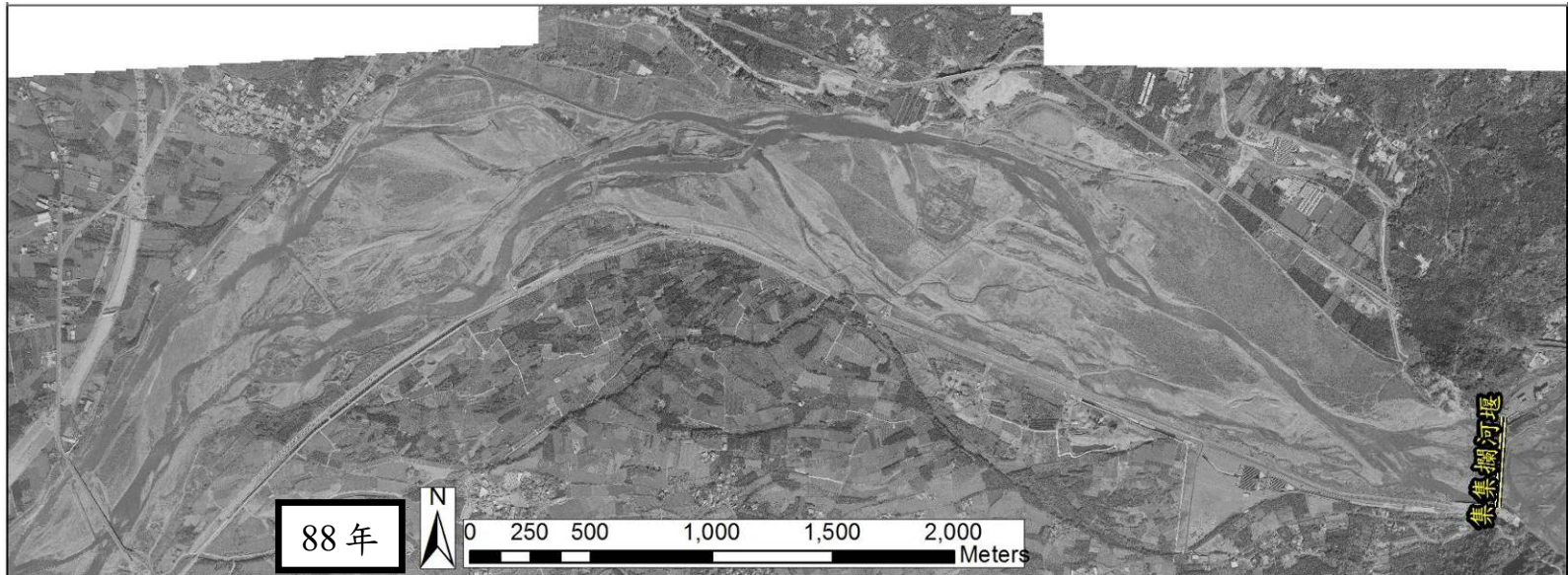


圖 40 濁水溪 88 年正射影像

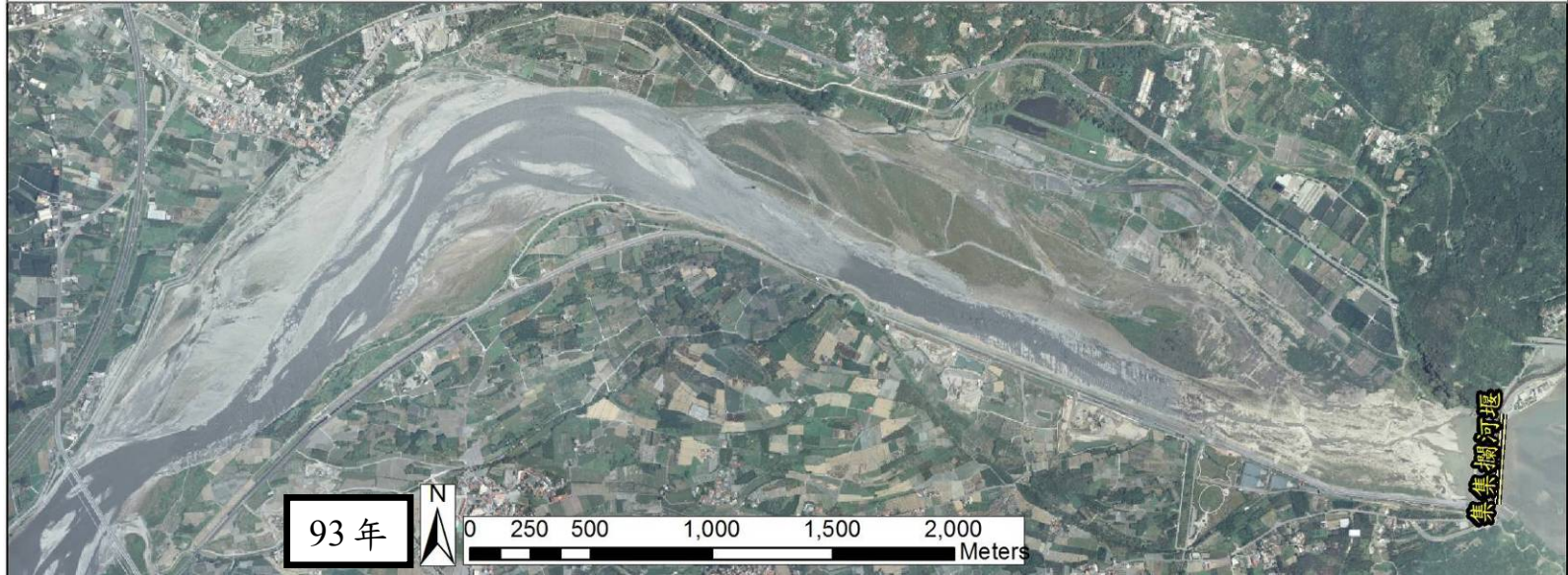


圖 41 濁水溪 93 年正射影像



圖 42 濁水溪 96 年正射影像

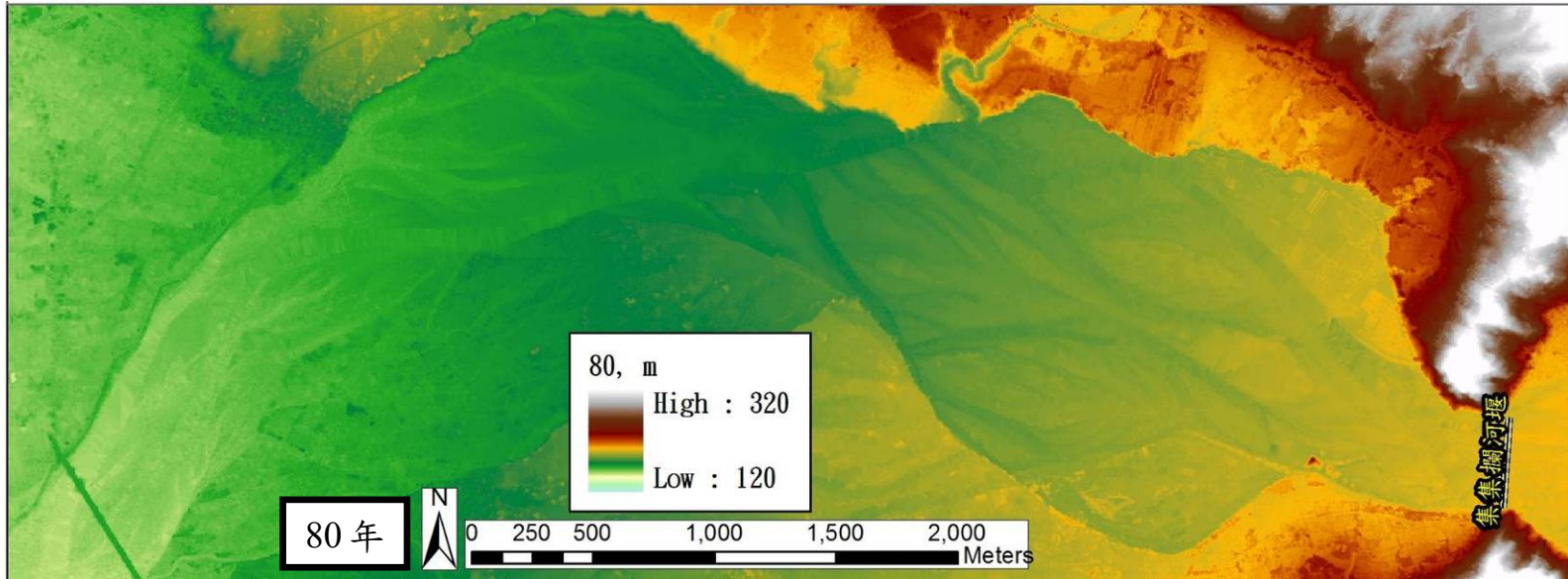


圖 43 濁水溪 80 年 DEM

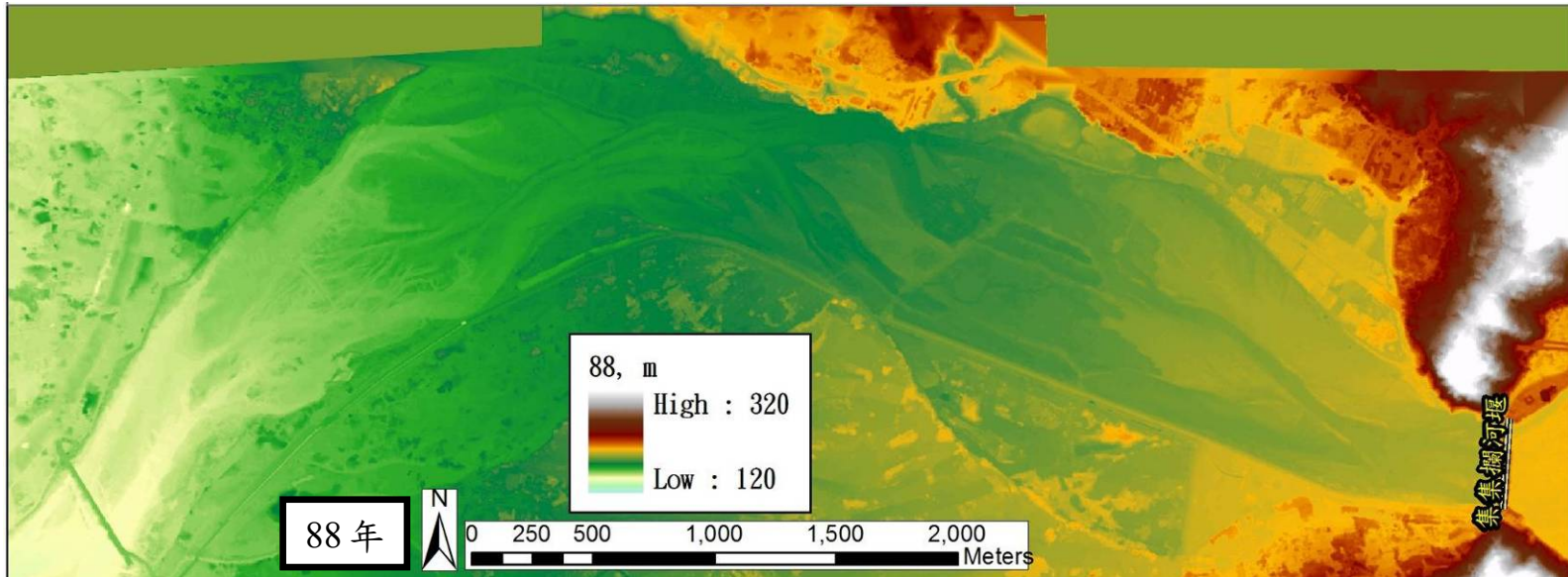


圖 44 濁水溪 88 年 DEM

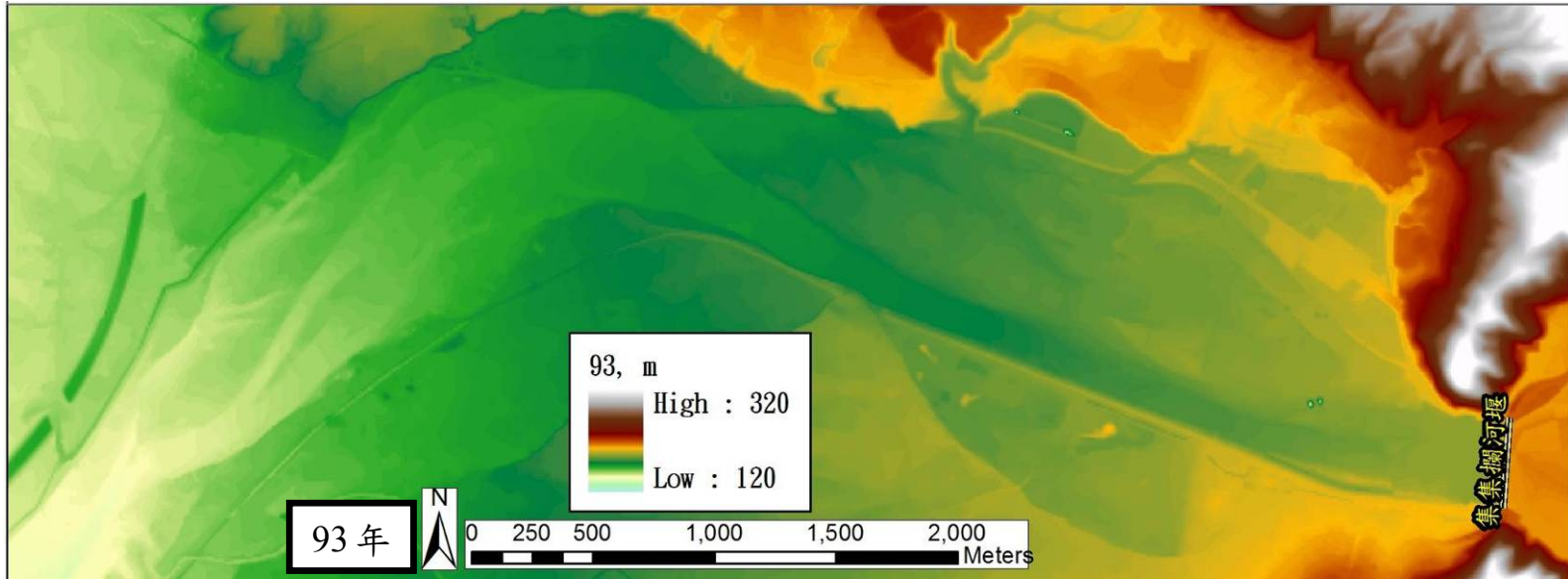


圖 45 濁水溪 93 年 DEM

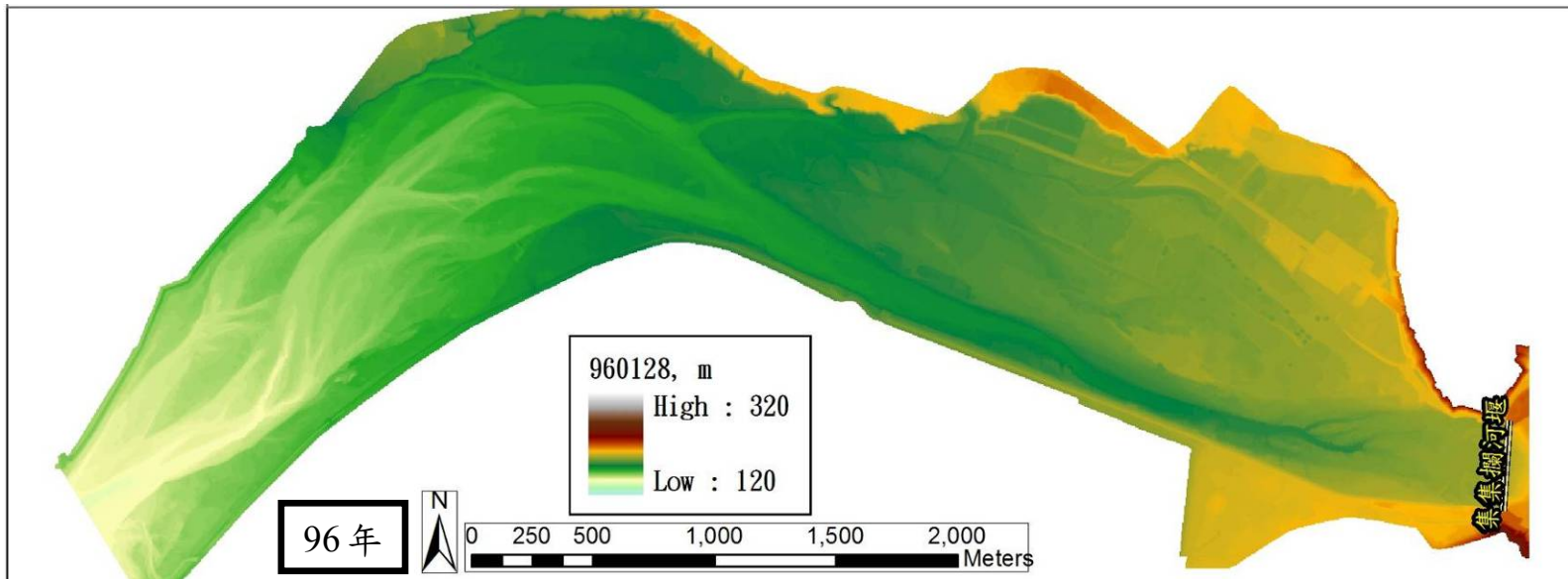


圖 46 濁水溪 96 年 DEM

3、八掌溪各年度正射影像及數值高程模型

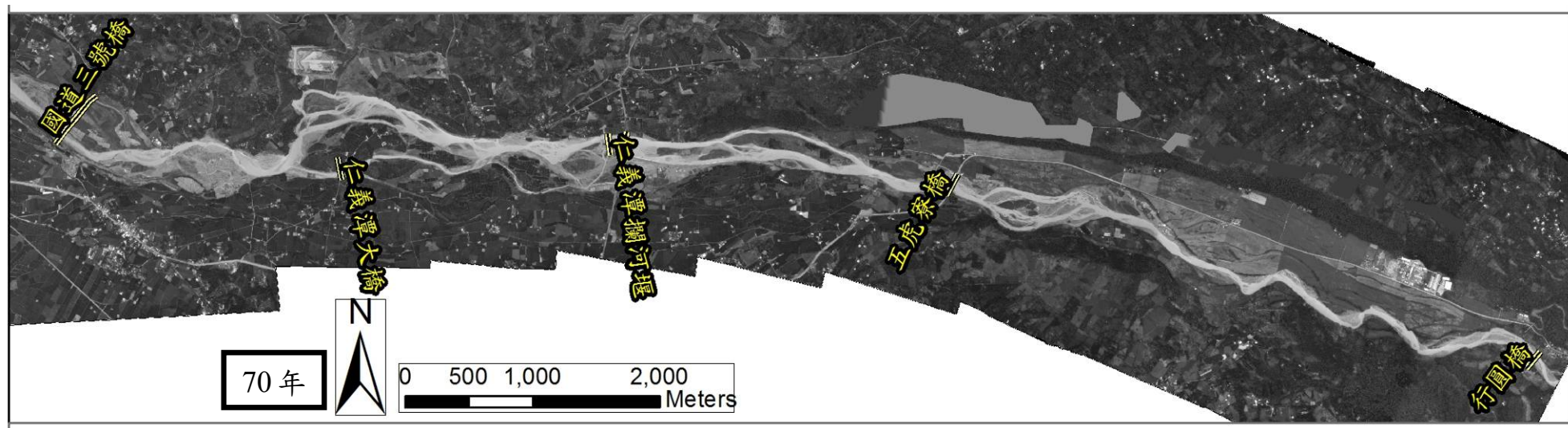


圖 47 八掌溪 70 年正射影像

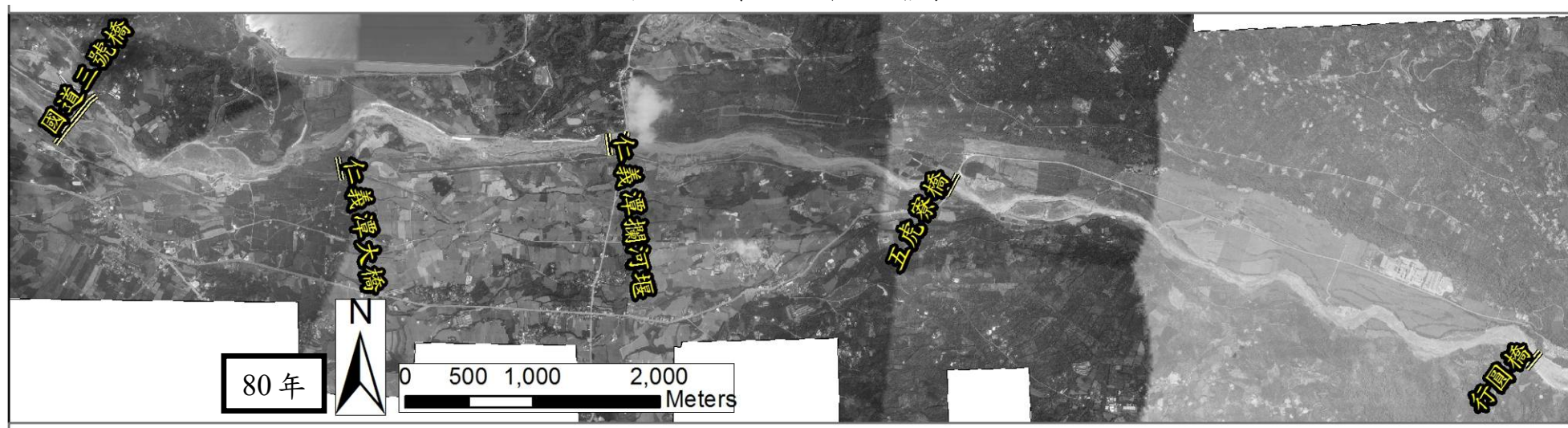


圖 48 八掌溪 80 年正射影像

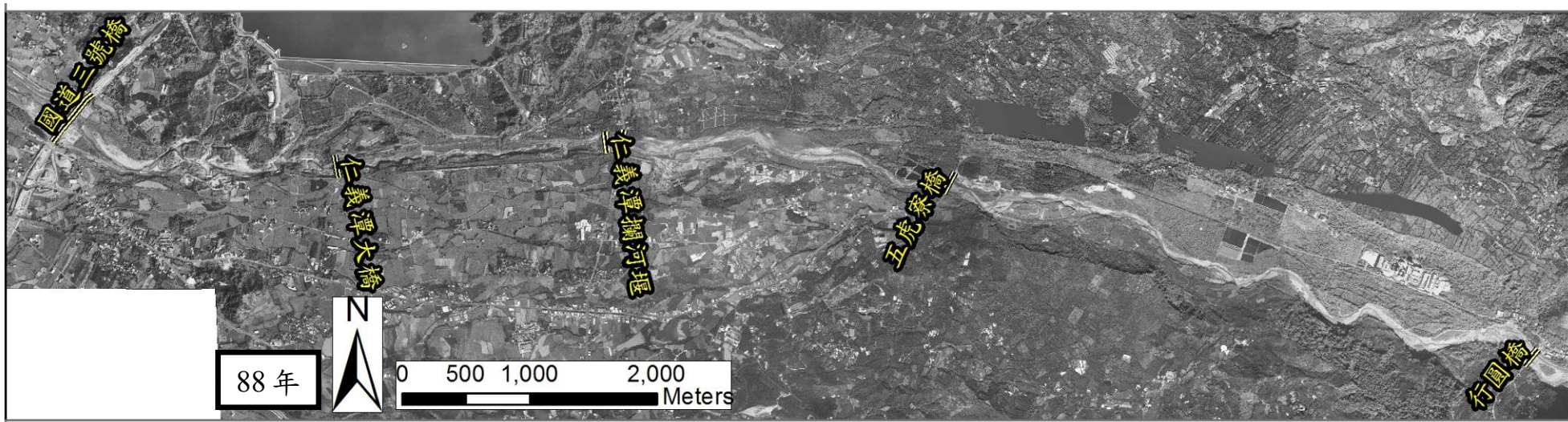


圖 49 八掌溪 88 年正射影像

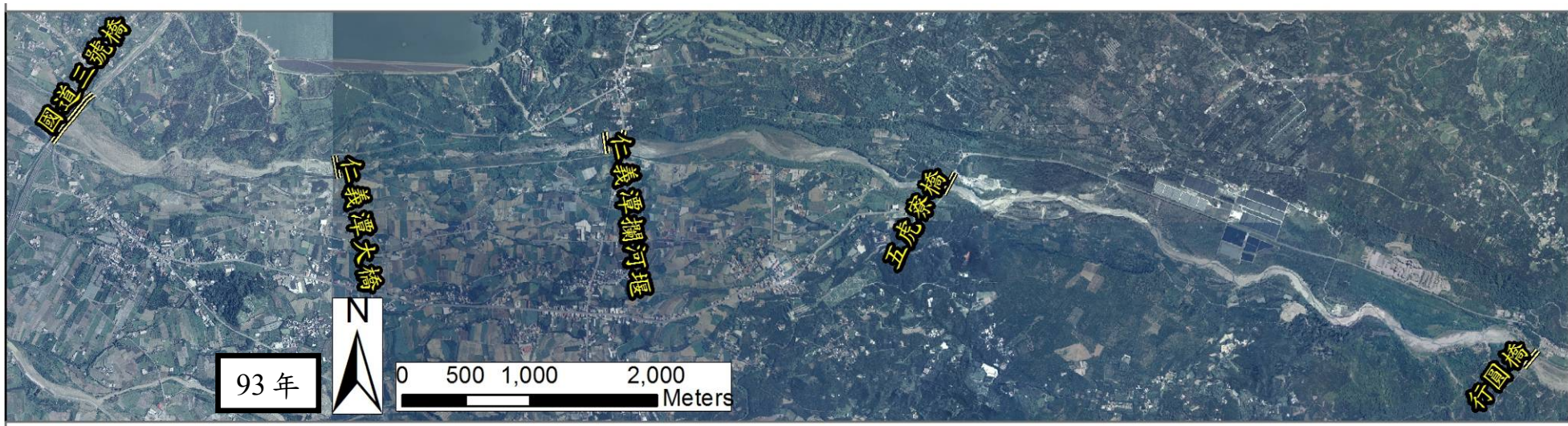


圖 50 八掌溪 93 年正射影像



圖 51 八掌溪 95 年正射影像

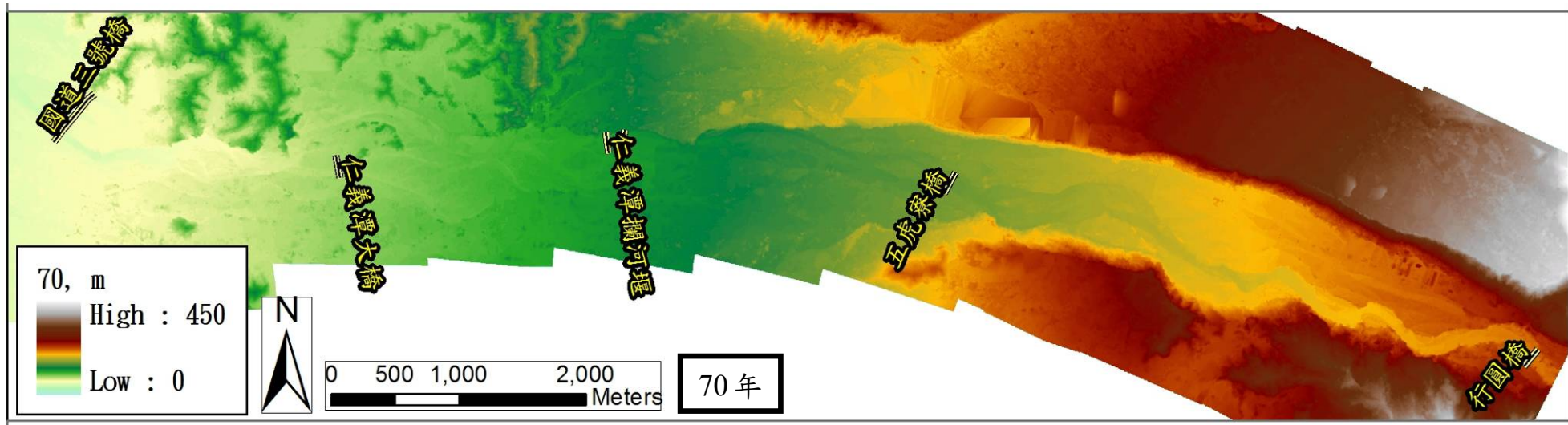


圖 52 八掌溪 70 年 DEM

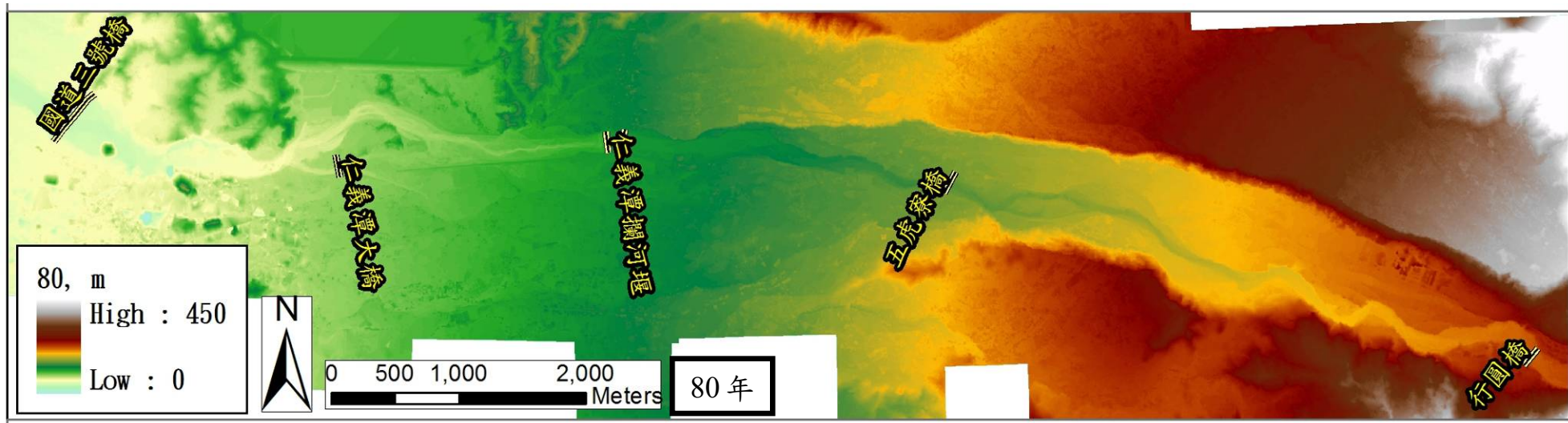


圖 53 八掌溪 80 年 DEM

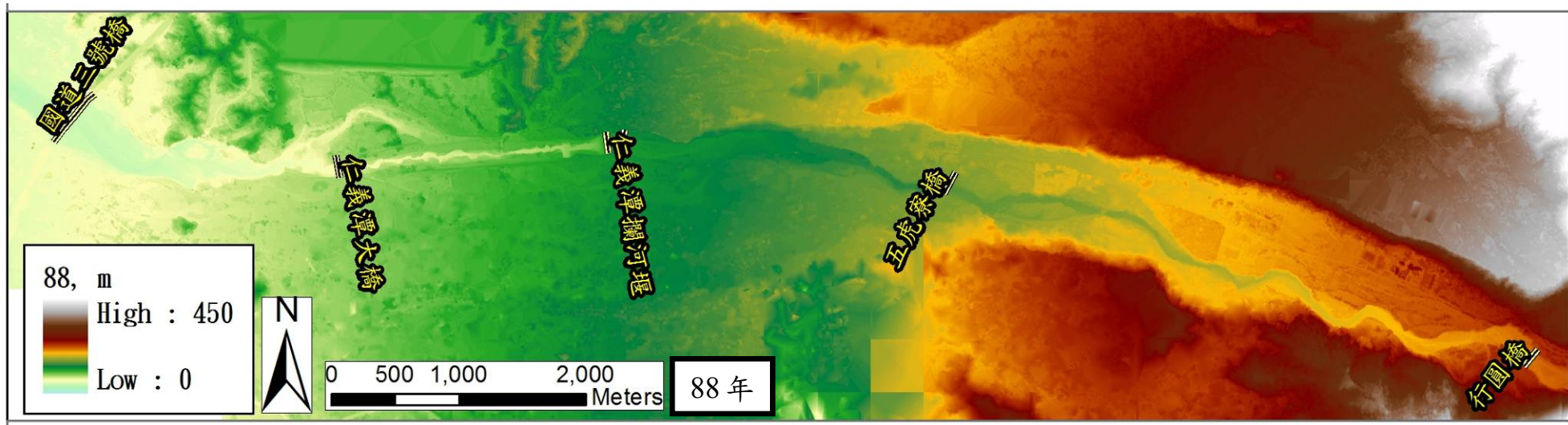


圖 54 八掌溪 88 年 DEM

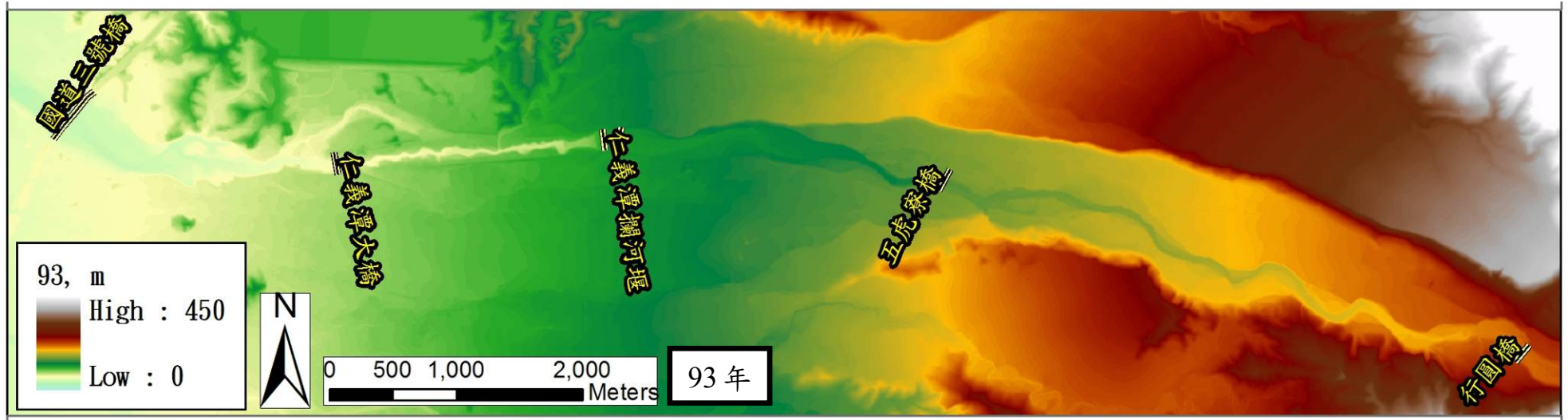


圖 55 八掌溪 93 年 DEM

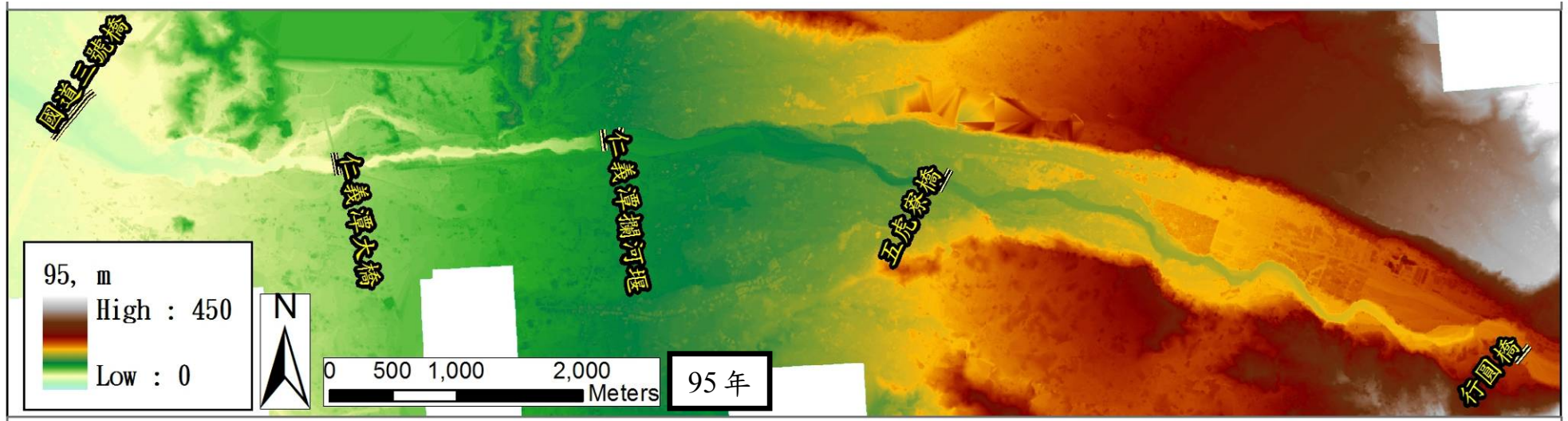


圖 56 八掌溪 95 年 DEM

(三)主要高沖蝕軟岩河床河段沖蝕調查

計畫三年期間，主要高沖蝕軟岩研究與調查河段為大甲溪、濁水溪與八掌溪等三條河川。各調查河段主要進行的現地調查工作包括有地表地質調查、河川軟岩抗沖蝕指標性質與沖蝕機制等。計畫三年期間內，各研究河川調查年份與河段位置，如表 2 所示。各河段調查成果如下：

表 2 計畫期間各河川調查年度規劃表

進行年度	河川	河段位置	河段長度 (km)
第一年度	濁水溪	集集堰~名竹大橋	6
第一年度	八掌溪	觸口堰~95 斷面	11
第二年度	大甲溪	石岡壩~新山線鐵路橋	4
第二年度	大甲溪	梅子鐵橋	2
第三年度	八掌溪 大甲溪	河段補充調查	6.5

註：1.本計畫三年度主要調查河段為大甲溪、濁水溪與八掌溪，河段長度共計 23km
2.第三年度進行補充調查

1、大甲溪

本河川調查河段選定位置計有二處，一為梅子鐵橋向下游延伸 1 公里之河段，擇定為調查段原因係為民國 88 年 921 地震，造成梅子鐵橋上游側斷層錯動，導致河道地層抬升，爾後歷經民國 90 年代颱風事件造成明顯岩盤裸露現象。二為起於石岡壩，止於新山線鐵路橋之河段，本河段係依據石岡壩建壩完成後，歷年航空照片判釋河川岩盤裸露，後因 921 地震致使地層明顯抬升與歷經幾次颱風洪水事件，造成本河段連年沖刷下切。

調查河段內之地層主要以上新世早期~更新世早期之桂竹林層、錦水頁岩層與卓蘭層為主。主要岩性為砂岩、頁岩與薄互層砂頁岩為主。河道岩層位態與河川流向關係：於梅子鐵橋調查段大致為北偏西 60 度，傾角以 18~20 度傾向南，與流向呈順層河。於石岡壩至新山線鐵路橋調查段約為北偏東 30 度，傾角以 20~40 度傾向東南，與流向大致呈逆向河段。各河段地質概況與岩性分別如圖 57、圖 58 與表 3、表 4 所示。

大甲溪兩處調查河段內岩盤沖刷調查，本研究採用 Annandale(1995)所提出之沉沖蝕能力指數(Kh)，作為岩盤沉沖蝕能力作為指標，進而探討軟岩河床的沖蝕機制與行為。大甲溪兩處軟岩沖刷段的抗沖蝕能力指數與岩性調查成果如表 5、表 6 所示。

本河道流向雖形成逆向河、順層河兩種型態，然不同抗沖蝕能力岩性交替出現，所以河道下切常形成槽狀深槽的差異侵蝕。河道岩床之沖蝕特性方面，頁岩常風化成碎塊狀由水流帶走，侵蝕較為均勻(圖 59)；砂岩則主要沿著弱層下切而形成槽狀深槽，堅硬砂岩仍以磨蝕或塊狀抽離為主(圖 60)；在夾層或互層狀岩石部分，侵蝕作用主要沿弱層進行，造成砂岩的破壞掉落(圖 61)。

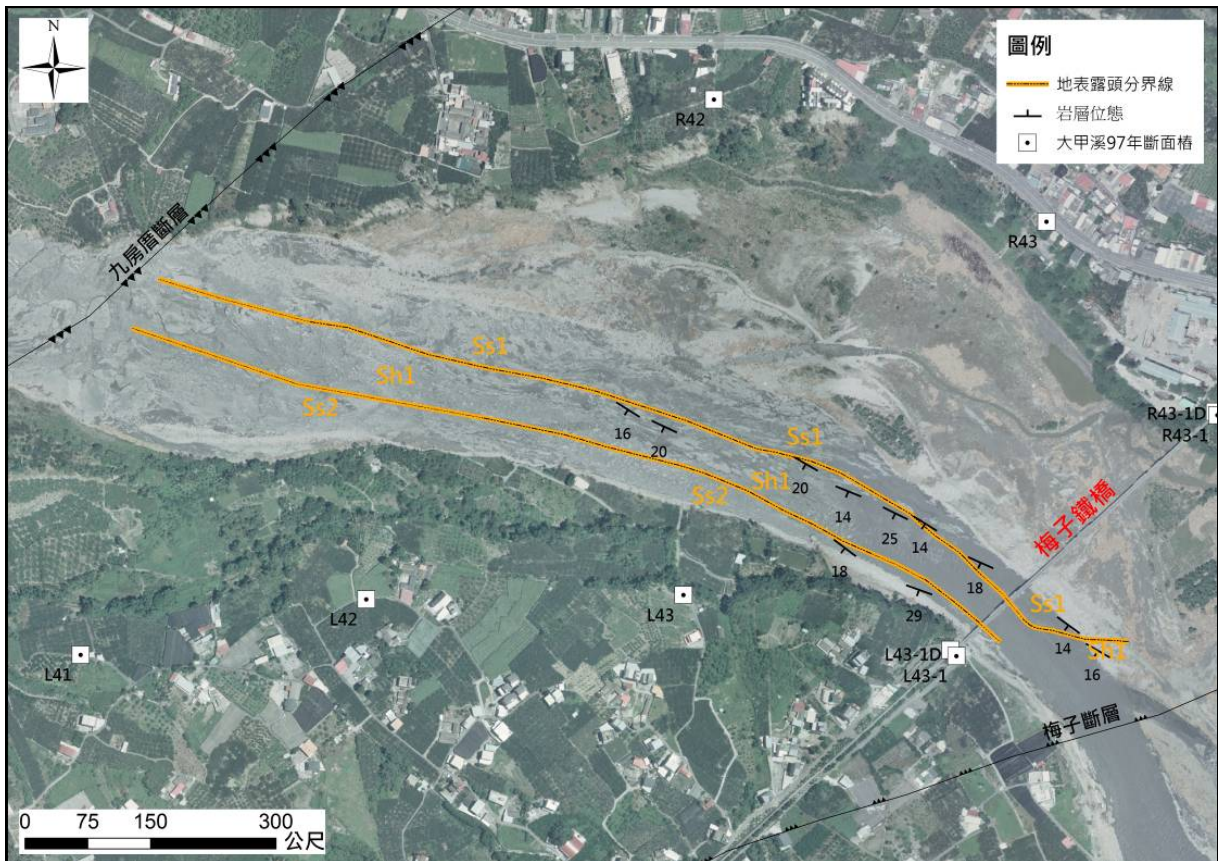


圖 57 大甲溪地表地質與沖蝕調查區域(梅子鐵橋延伸下游一公里)

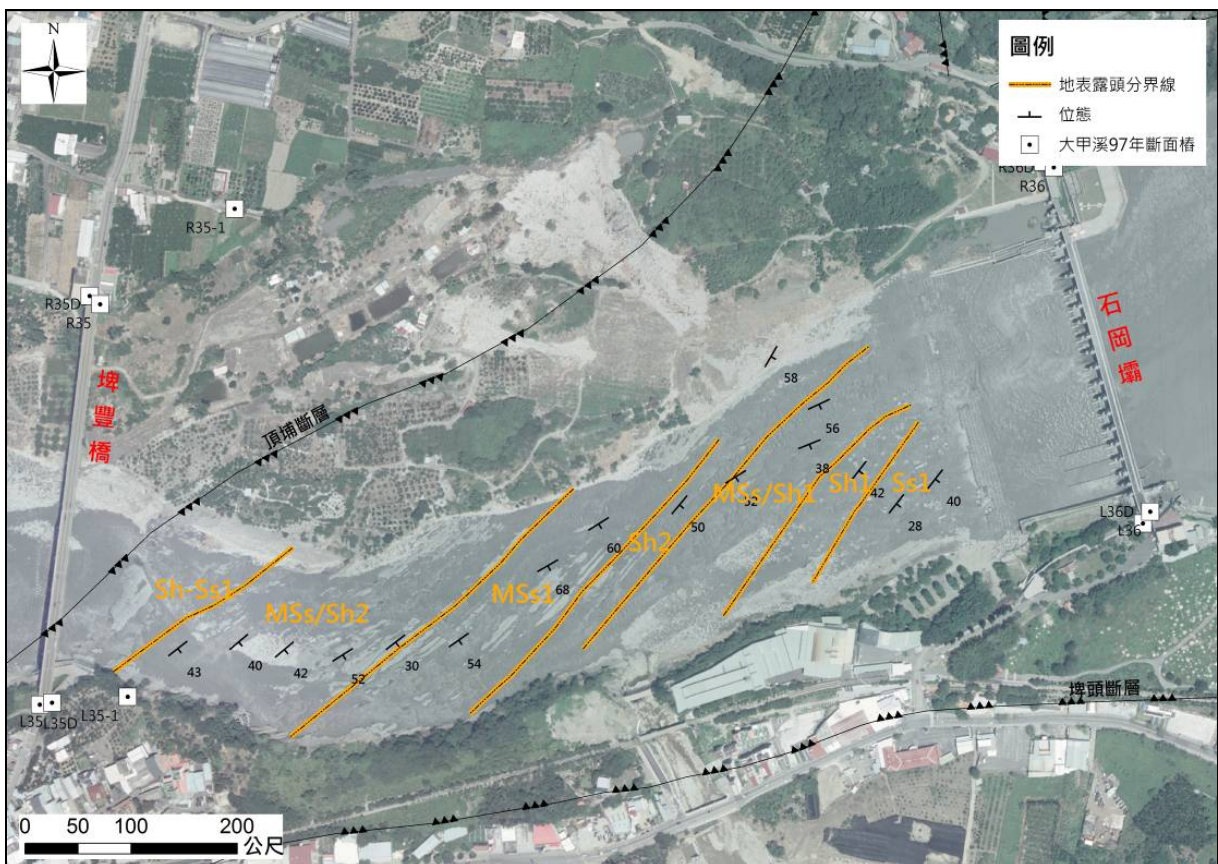


圖 58 大甲溪地表地質與沖蝕調查區域(石岡壩至埤豐橋)

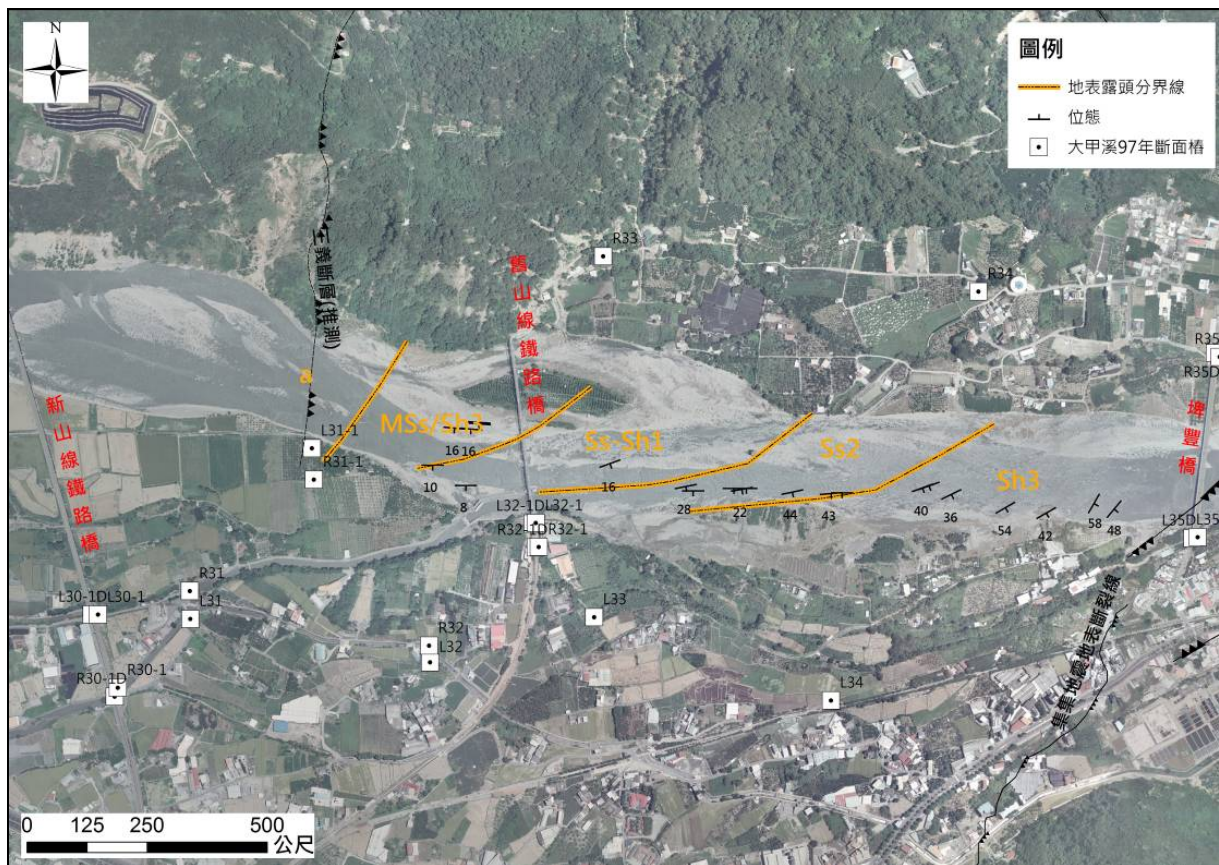


圖 58(續) 大甲溪地表地質與沖蝕調查區域(埤豐橋至新山線鐵路橋)

表 3 大甲溪梅子鐵橋調查河段岩性分類表

分層岩性	岩性分類	備註
Ss1	厚層砂岩間夾薄層頁岩	
Sh1	厚層灰黑色頁岩	
Ss2	中厚度至極厚層砂岩與極厚層頁岩互層	

表 4 大甲溪石岡壩~新山線鐵路橋調查河段岩性分類表

分層岩性	岩性分類	備註
Ss1	厚層砂岩間夾薄層頁岩	上游-石岡壩
Sh1	厚層灰黑色頁岩	
MSs/Sh1	中厚度至極厚層砂岩與極厚層頁岩互層	
Sh2	極厚層頁岩	
MSs1	極厚層塊狀砂岩	
MSs/Sh2	極厚層塊狀砂岩與極厚層灰黑色頁岩互層，砂岩層節理發達，頁岩層表面風化程度較高	
Sh-Ss1	厚層頁岩偶夾砂岩	埤豐橋
Sh3	極厚層灰黑色頁岩	
Ss2	極厚層砂岩	
Ss-Sh1	極厚砂岩間夾厚層頁岩	
MSs/Sh3	厚層塊狀砂岩與厚層頁岩互層	
a	沖積層	下游-新山線鐵路橋

表 5 大甲溪梅子鐵橋調查河段抗沖蝕指數

主要岩性	抗沖蝕指數(Kh)變化範圍	平均值	組數	備註
極厚層砂岩	30~200	104	12	
極厚層頁岩	20~75	53	9	

表 6 大甲溪石岡壩~新山線鐵路橋調查河段抗沖蝕指數

主要岩性	抗沖蝕指數(Kh)變化範圍	平均值	組數	備註
極厚層砂岩(含塊狀砂岩)	45~530	220	20	
中厚度砂岩	15~125	63	20	
極厚層頁岩	15~100	48	23	
砂頁岩薄互層	20~30	25	2	



圖 59 大甲溪—河道頁岩冲刷狀況



圖 60 大甲溪—河道砂岩侵蝕狀況



圖 61 大甲溪—塊狀砂岩常沿所夾頁岩破壞

2、濁水溪

濁水溪調查河段為集集攔河堰至其下游名竹大橋為止。河段內岩盤沖刷劇烈從集集堰下游起算計有約 6 公里。本軟岩河段，受到集集堰建堰影響，攔阻上游料源導致堰體下游河道逐年岩盤裸露。另，921 地震造成鄰近名竹大橋上游側地盤抬升，歷經幾次颱風事件，河段內上游沖刷下切，下游抬升岩盤上溯侵蝕，導致整體河道沖刷而深槽化。

調查河段內之地層主要以上新世晚期~更新世中期之卓蘭層與頭嵙山層為主。主要岩性為極厚之砂岩、頁岩與薄互層砂頁岩為主。河道岩層位態與河川流向關係：大致呈南北走向，地層傾向約為 30 度與流向相反，屬於逆向河；初鄉斷層附近約有 300 公尺長河道之岩層位態受到斷層影響而變化。河段地質概況與岩性分別如圖 62 與表 7 所示。

本調查河段抗沖蝕能力指數與岩性調查成果如表 8 所示。河段內整體雖已呈現深槽河道，且流向雖形成逆向河型態，唯因不同抗沖蝕能力岩性交替出現，所以河道下切常形成槽狀深槽的差異侵蝕。

河道上之岩床沖蝕特徵方面，斷層擾動帶附近多為沿弱層下切之差異侵蝕形成的槽狀深槽型態，在斷層擾動帶以外河段，則以傾向上游之岩層為主，形成沿深槽均勻侵蝕的下切型態(圖 63)；在名竹大橋上游的 921 斷層錯動處，有落差不大的遷急點形成(圖 64)；而在斷層帶上常見節理發達之岩層，侵蝕型態以塊狀抽離為主(圖 65)。

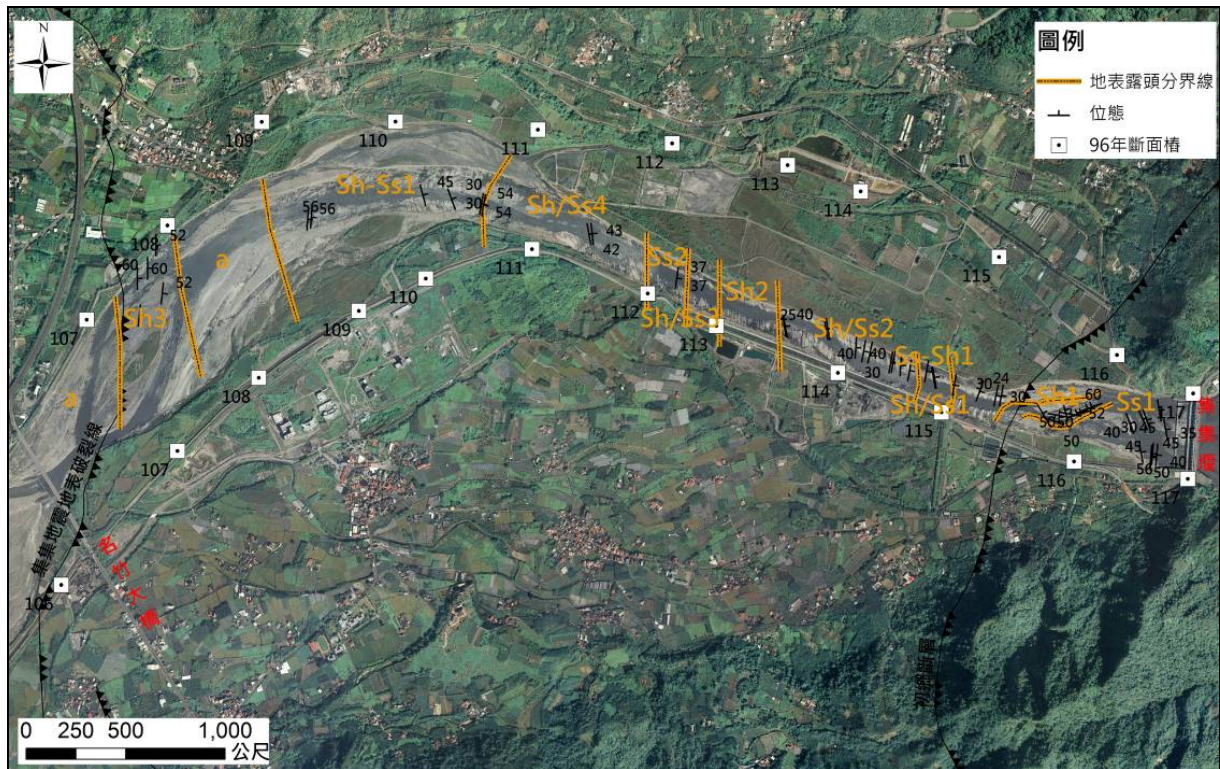


圖 62 濁水溪地表地質與沖蝕調查區域(集集堰至名竹大橋)

表 7 濁水溪集集堰~名竹大橋調查河段岩性分類表

分層岩性	岩性分類	備註
Ss1	層狀砂岩~極厚層砂岩為主	上游-集集堰
Sh1	極厚層黑色頁岩	
Sh/Ss1	極厚層砂岩與極厚層頁岩互層，以頁岩為主	
Ss-Sh1	厚層砂岩夾頁岩	
Sh/Ss2	極厚層砂岩與極厚層頁岩互層，以頁岩為主	
Sh2	極厚層頁岩為主	
Sh/Ss3	極厚層頁岩與極厚層砂岩互層	
Ss2	極厚層砂岩為主	
Sh/Ss4	極厚層砂岩與極厚層頁岩互層	
Sh-Ss1	極厚層頁岩偶夾薄砂岩層	
a	沖積層(淤積)	
Sh3	極厚層頁岩為主，921 抬升段，抬升長度約 200 公尺	
a	沖積層(淤積)至名竹大橋淤積段	下游-名竹大橋

表 8 濁水溪集集堰~名竹大橋調查河段抗沖蝕指數

主要岩性	抗沖蝕指數(Kh)變化範圍	平均值	組數	備註
砂岩	120~880	330	19	
節理發達砂岩	30~210	100	8	
砂頁岩互層	10~90	40	10	
頁岩	30~180	60	16	



圖 63 濁水溪—傾向上游的砂頁岩互層，沿深槽均勻侵蝕



圖 64 濁水溪—名竹大橋上游斷層隆起帶



圖 65 濁水溪—斷層隆起處砂岩節理發達，成塊狀抽離

3、八掌溪

八掌溪調查河段為觸口攔河堰至其下游 95 斷面為止。河段內岩盤沖刷劇烈共計有約 11 公里。河段內主要沖刷段發生於觸口堰~五虎寮橋(約 6.5 公里長)與仁義潭攔河堰~95 斷面(約 3.5 公里長)為主。本軟岩河段內，從早期河道採砂、跨河構造物(固床工、攔河堰)與颱風事件等影響下，逐漸從民國 70 年代開始沖刷下切，時至今已使整體河道下切深槽化與擴寬。

調查河段內之地層主要以上新世晚期~更新世中期之六重溪層、崁下寮層與二重溪層為主。主要岩性為極厚之塊狀砂岩、粉砂岩與泥岩為主，頁岩次之。河道岩層位態與河川流向關係：大致呈北偏東 20 度，地層傾向為低角度 10 度傾向西北與流向呈順向，屬於順向河。河段地質概況與岩性分別如圖 66~圖 70 與表 9 所示。

本調查河段抗沖蝕能力指數與岩性調查成果如表 10 所示。河段內多為單一極厚層岩層，岩層傾項與流向形成順向河型態，雖不同岩層抗沖蝕能力表現不一，但河道之沖蝕機制多以單一岩層的塊體抽離(plucking)或磨蝕(abrasion)為主。

在沖蝕特性方面，由於本河段主要岩性為泥岩，其表層受到風化侵蝕之影響相當大，深度可厚達 30 公分，如圖 71 所示。風化之泥岩主要成小塊狀被水流帶走，新鮮之泥岩則主要以磨蝕之沖蝕方式進行。層狀泥岩或其他互層、夾層之岩性，則常可見到岩層面塊體抽離之現象。粉砂岩與塊狀砂岩較為類似，表層均可見平滑之磨蝕痕跡，或形成滑槽及小流槽，主要之沖蝕大都以塊體抽離方式進行。本河段岩岸邊坡的破壞拓寬方式以趾部沖刷造成之塊體崩落破壞為主，如圖 72 所示，另也可見到少數順向滑動破壞之殘坡，如圖 73 所示。另外，同樣受到泥岩風化作用發達的影響，泥岩邊坡上常可見風化後掉落之坡趾堆積物。

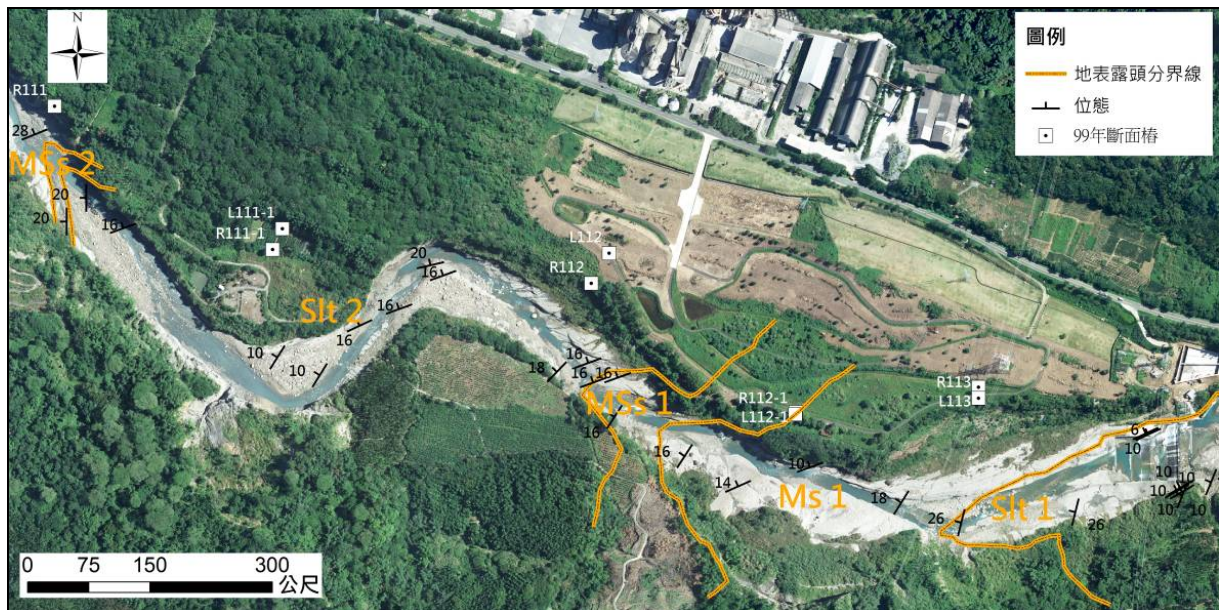


圖 66 八掌溪地表地質與沖蝕調查區域(觸口堰至 111 斷面)



圖 67 八掌溪地表地質與沖蝕調查區域(111 斷面至 108 斷面)

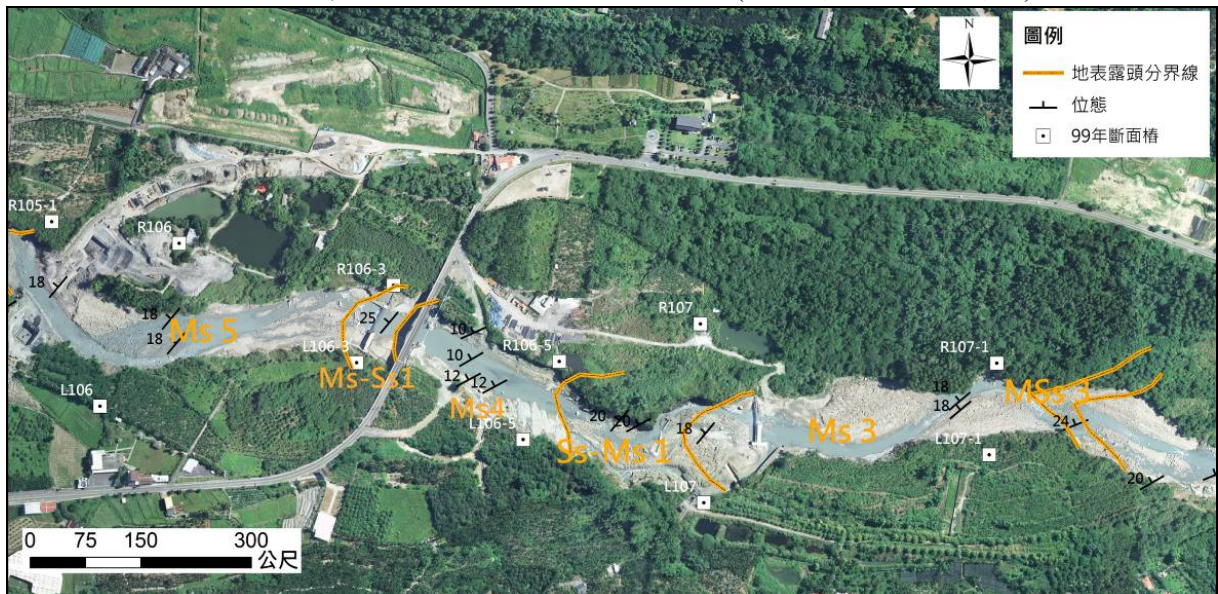


圖 68 八掌溪地表地質與沖蝕調查區域(108 斷面至新五虎寮橋)



圖 69 八掌溪地表地質與沖蝕調查區域(新五虎寮橋至仁義潭攔河堰)



圖 70 八掌溪地表地質與沖蝕調查區域(仁義潭攔河堰至 95 斷面)

表 9 八掌溪觸口堰~95 斷面調查河段岩性分類表

分層岩性	岩性分類	備註
Slt1	泥質粉砂岩	上游-觸口堰
Ms1	層狀或塊狀泥岩	
MSs1	塊狀砂岩	
Slt2	泥質粉砂岩	
MSs2	塊狀砂岩	
Ms2	層狀或塊狀泥岩	
MSs3	棕黃色砂岩	
Ms3	層狀或塊狀泥岩	
Ss-Ms1	砂岩偶夾泥岩	
Ms4	層狀或塊狀泥岩	五虎寮橋
Ms-Ss1	泥岩偶夾砂岩	
Ms5	層狀或塊狀泥岩	
Slt-Ms1	粉砂岩偶夾泥岩	新五虎寮橋
a	上部為沖積層覆蓋	
Ms/Mh1	泥岩與泥質頁岩互層	仁義潭攔河堰
Ss-Ms2	黃色砂岩夾灰色泥岩	
Ms/Mh2	泥岩與泥質頁岩	
Ss/Sh1	黃色砂岩與黃色頁岩互層	
Slt/Mh1	黃色粉砂岩與灰色泥質頁岩互層	下游-95 斷面

表 10 八掌溪觸口堰~95 斷面調查河段抗沖蝕指數

主要岩性	抗沖蝕指數(Kh)變化範圍	平均值	組數	備註
砂岩(塊狀砂岩)	70~340	170	17	
粉砂岩	90~390	226	25	
頁岩(泥質頁岩)	60~150	92	14	
泥岩	40~180	90	45	



圖 71 八掌溪—泥岩表層受風化影響大



圖 72 八掌溪—坡趾沖刷造成邊坡的崩落破壞



圖 73 八掌溪—順向滑動破壞後的殘坡

(四)沖蝕機制及沖蝕演繹建立

1、沖蝕機制

回顧歷年文獻，岩床之沖刷機制大致有五種類型，分別為：(1)磨蝕沖蝕(Abrasion)、(2)塊體抽離(Plucking)、(3)穴蝕沖蝕(Cavitation)、(4)顆粒彈跳造成之沖蝕(Saltation)、(5)風化所造成之沖蝕(Weathering)等五種為主要機制。

計畫三年期間，根據現地岩床況沖蝕指數配合地質調查結果，分別對大甲溪、濁水溪與八掌溪提出數種不同沖蝕機制，而本計畫於第二(100)年度時亦將這三條軟岩河床沖刷段沖刷機制簡化歸納為單一沖蝕機制與複合型沖刷機制等兩個類別。

單一沖刷機制即為前述五種主要機制中的機制個別發生時稱之；複合型沖刷機制則為結合兩種以上之單一沖蝕機制，即稱之。單一沖刷機制易發生於單調之地質岩性存在或岩性抗沖蝕能力差異不大時，易由單一沖蝕機制所主控，反之不同地質岩性交互頻繁出現(如砂岩、頁岩交互出現)且抗沖蝕能力差異較明顯時，則易構成複合型沖刷機制。

綜觀本計畫三條河川沖刷段，大甲溪與濁水溪，因地層沉積特性屬抗沖蝕能力強弱岩性交替出現之特性(例如砂岩、頁岩)，所以屬複合沖刷機制類型的好發河段。八掌溪則因單一地層存在情況較多，以單一沖刷機制之情形為主(例如泥岩的塊體抽離沖蝕機制、粉砂岩切穿的穴蝕機制等)。

由八掌溪、濁水溪與大甲溪三條調查河段結果顯示，河道之沖刷機制歸納為三類，由本(101)年度補充調查八掌溪與大甲溪河段(埤豐橋至新山線鐵路橋河段)用以驗證，符合目前所提之沖刷機制。八掌溪、濁水溪與大甲溪三條劇烈沖刷河段之沖刷機制示意如圖 74~圖 76 所示。

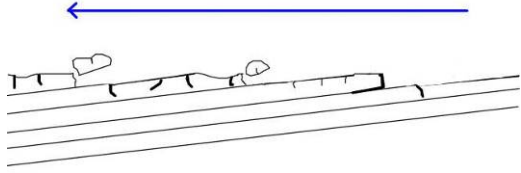
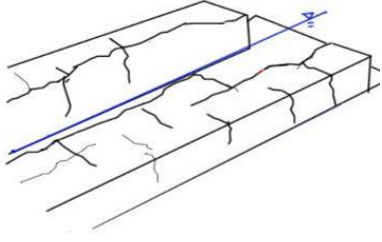
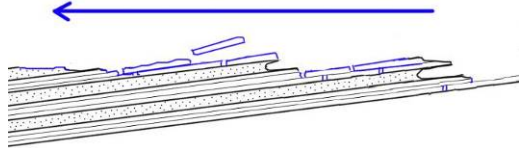
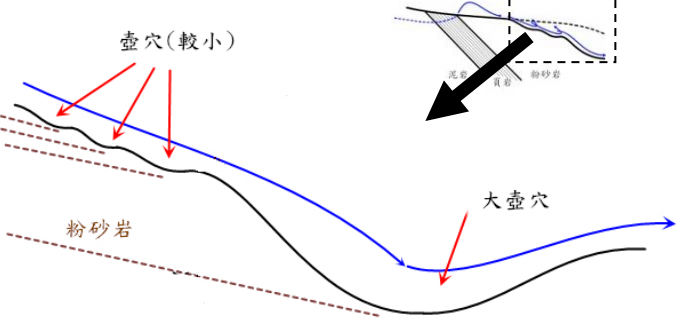
	
<p>1. 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形，屬磨蝕(abrasion)附加顆粒撞擊(saltation)兩種複合機制為主。</p>	<p>2. 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為，屬塊體抽離(plucking)機制為主。</p>
	
<p>3. 砂頁岩互層的差異，薄層厚層互相牽動，屬磨蝕(abrasion)機制為主。</p>	<p>4. 粉砂岩的切穿(伴隨壺穴與滑槽)等，屬穴蝕沖蝕(cavitation)機制為主。</p>

圖 74 八掌溪劇烈沖刷河段四種單一沖刷機制

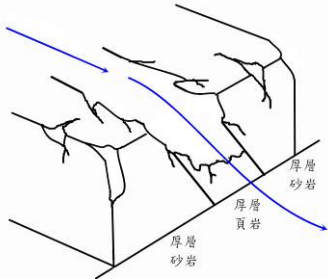
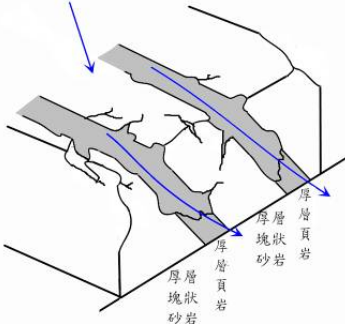
	
<p>1. 砂頁岩互層沖蝕(abrasion)後，造成層狀砂岩孤立失去束制而形成張力節理，最後形成塊體沖蝕(plucking)，兩種複合機制為主。</p>	<p>2. 頁岩層在沖蝕(abrasion+plucking)後，厚層塊狀砂岩形成孤立狀態，可能因張力節理產生而塊體抽離(plucking)。</p>

圖 75 大甲溪劇烈沖刷河段兩種複合沖刷機制

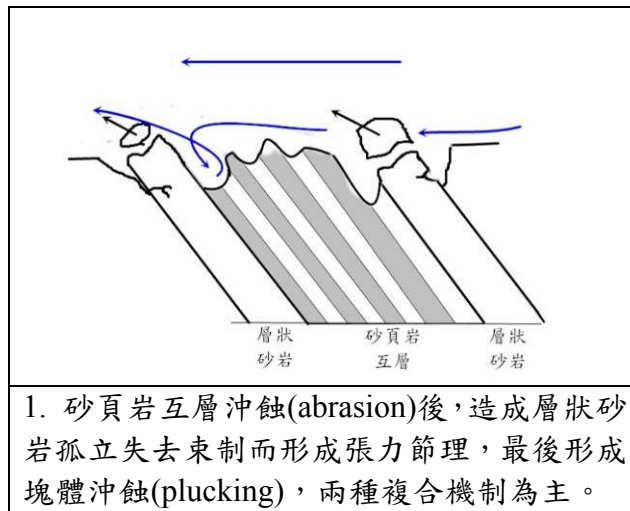


圖 76 濁水溪初鄉斷層下游河道複合沖刷機制

2、沖蝕演繹

(1)大甲溪

本節以石岡壩下游河道為例說明大甲溪劇烈沖刷河段之沖蝕演繹。此段劇烈沖刷調查段起於石岡壩，止於埤豐橋間之 1 公里河道距離。依民國 97 年大甲溪河川大斷面測量介於斷面樁號 36~35 之間。本研究收集 66、82、87、88、91、94、96、97 與 98 等九個年度之航空照片(圖 77)，透過立體對判釋並依此段調查段受 921 地震、歷年洪水事件等之影響，提出大甲溪此段劇烈沖刷段之沖蝕演繹，其結果說明如下：

- (a) 民國 66 年，石岡壩初竣工，其下游河道寬闊並有大片植生沙洲。河道流心偏向左岸。
- (b) 民國 82 年，距石岡壩建造已經過十餘年，壩址下游河道已束縮，此時期之河道已開始有明顯之岩盤裸露。
- (c) 民國 87 年，壩址下游河道岩盤出露為止多集中於河道中央，裸露範圍已達 300~400 公尺遠，石岡壩堰前亦開始出現明顯之沖刷坑。由航空照片(圖 77(c))約略可看出岩層之走向為 N50E，河心已逐漸順著岩層走向發展。
- (d) 民國 88 年，石岡壩下游河道南側(左岸)明顯地盤抬升，岩盤裸露面積因 921 地震錯動明顯增加。下游地表破裂線通過埤豐橋，並抬升其上游側地盤，形成明顯的河道遷急點(knickpoint)。
- (e) 民國 91 年，歷經前一年之桃芝颱風，石岡壩下游河道幾已全面岩盤裸露。埤豐橋上游遷急點已開始溯源侵蝕達約 100 公尺遠，且河道左岸已開始深槽化。
- (f) 民國 94 年，其前一年(93 年)敏督利颱風對中部造成七二水災，石岡壩歷經建壩後最大洪水事件，石岡壩堰前出現明顯之沖刷坑，河道劇烈沖刷，已在石岡壩下游右岸形成河道深槽。下游近埤豐橋開始之溯源沖刷達 250 公尺遠，河道深槽化趨於明顯。
- (g) 民國 96 年，石岡壩堰前沖刷嚴重，堰前所形成之沖刷坑已與下游右岸主深槽相連。
- (h) 民國 97 年，石岡壩下游河段主深槽已發展至約 300 公尺遠，下游埤豐橋因 921 地震所形成之遷急點因連年溯源沖刷而消失，河道上溯距離已達約 300 公尺。
- (i) 民國 98 年，石岡壩下游右岸主深槽與埤豐橋上游左岸之主深槽已有開始相連貫通趨勢。經 100 年 3 月現地調查，河道下刷與上溯交會之區段亦已深槽化，河道岩盤出露與深槽之高低落差可達 5 公尺以上。

由歷史航照判釋可得：(1) 因石岡壩建壩攔阻之因，其上游粒料遭受長年阻斷無法補充至下游河段，而使得建壩完成後十餘年河道即開始沖刷而出露岩盤。(2) 921 地震不僅造成石岡壩右壩受損，連帶使得南側河道地體錯動抬升，加速岩盤裸露而於短短幾年間配合幾次颱風洪事件而快速下刷且沿岩層走向深槽化。(3) 埤豐橋上游側亦為 921 造成岩盤錯動抬升，產生之突降條件有利於溯源侵蝕之迅速發展。

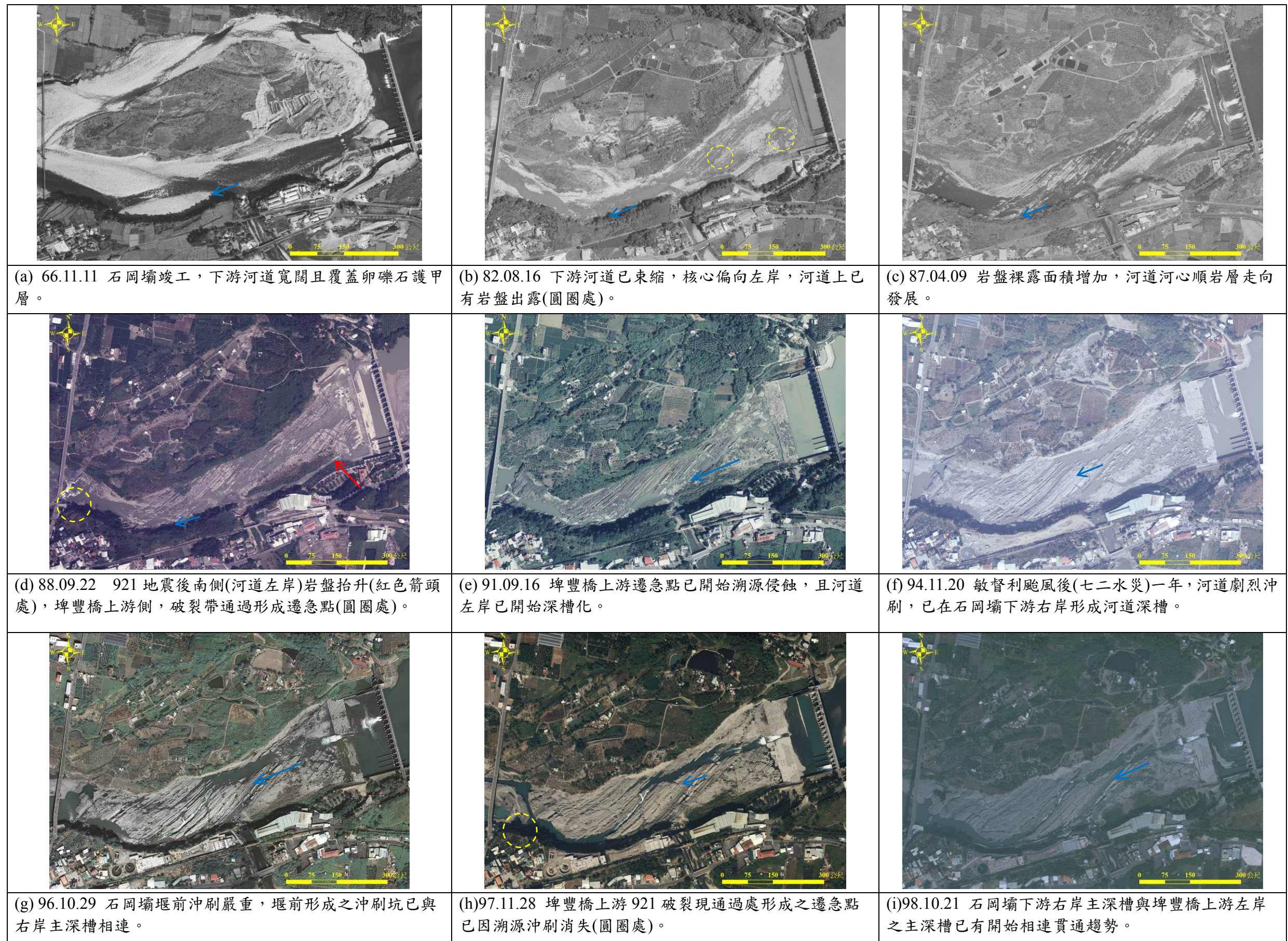


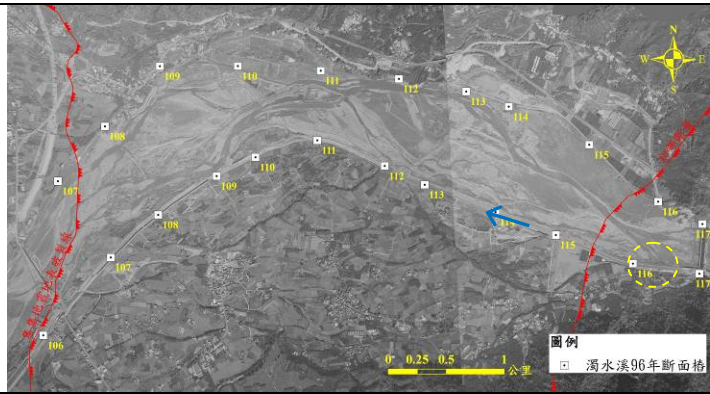
圖 77 石岡壩至埤豐橋河道沖蝕變化

(2)濁水溪

濁水溪河道劇烈沖刷調查段起於集集攔河堰，止於名竹大橋，沖刷段距離約達 7 公里。依民國 96 年濁水溪河川大斷面測量介於斷面樁號 117~106 之間。本研究收集 88、91、93、96、97 與 98 等六個年度之航空照片，透過航照立體對判釋並配合濁水溪歷年大斷面測量資料，提出濁水溪此段劇烈沖刷段之沖蝕演繹，其結果說明如下：

- (a) **河道下刷**：民國 88 年 11 月 8 日，集集攔河堰主體工程已完工，其下游河道整體調查河段為沙洲、礫石護甲層覆蓋，未有觀察到岩盤裸露之情形。主要河道為右股流路，未有明顯之主深槽出現，如**錯誤！找不到參照來源**。(a)圓圈處。**溯源沖刷**：航照時間點為 921 地震過後一個半月，依據地調所(88 年)調查報告指出，車籠埔斷層逆衝錯動破裂帶約通過名竹大橋，並約略呈現南北向貫穿名竹大橋上游約五百公尺之河道，破裂線通過處使河道上游側為地盤抬升側，經由後續河道地表地質調查，地表破裂線於河道上出露之位置即為**錯誤！找不到參照來源**。(a)上 107 斷面附近(紅線位置)，雖有河道地盤抬升但河道上仍為沙洲、卵礫石等護甲層覆蓋未有岩盤出露。**錯誤！找不到參照來源**。(a)。
- (b) **河道下刷**：歷經民國 90 年桃芝颱風過後，年民國 91 年 10 月，集集堰堰址下游已開始有岩盤出露，距集集堰堰址 1 公里河道範圍內陸續有局部河道岩盤出露。**溯源沖刷**：名竹大橋上游約 500 公尺，921 地表破裂線通過之上游側河道已有明顯之岩盤出露，於此處明顯形成遷急點(knickpoint)，由此遷急點往上游延伸有岩盤明顯出露。主要河心於此段開始由右岸偏向左岸而集中於岩盤出露段之河道。**錯誤！找不到參照來源**。(b)。
- (c) **河道下刷**：民國 93 年敏督利颱風過後，集集攔河堰下游岩盤已逐漸裸露達兩公里之河道範圍(由集集堰至 113 斷面)且河道已明顯束縮集中於岩盤出露段。與 90 年航照比較後已開始產生深槽化之現象，查歷年大斷面測量資料(水利規劃試驗所，97 年)岩盤河道底床高差最大達 10 公尺以上。顯示河道逐年因岩盤遭沖蝕而有束縮、下刷深槽化之趨勢。**錯誤！找不到參照來源**。(c)。
- (d) **河道下刷**：96 年河道繼續往下游沖刷延伸一公里至 111 斷面(總共 3 公里)，查 93~96 年斷面測量資料顯示河道持續下刷，下刷量達 2~5 公尺。**溯源沖刷**：名竹大橋上游原偏左岸之主河道深槽岩盤裸露段逐漸淤積，河心偏往右岸，沖刷河道遂使此段河道之岩盤出露。**錯誤！找不到參照來源**。(d)。
- (e) **河道下刷**：97 年劇烈沖刷調查段，河道岩盤出露以集集堰為起點，其下游河道沖刷岩盤裸露已延伸達 4 公里(至 109 斷面樁位置)。**錯誤！找不到參照來源**。(e)。
- (f) **河道下刷**：98 年，河道由集集堰為起點河道下切，而名竹大橋上游 921 地表破裂帶通過處所形成之遷急點則形成溯源沖刷，兩者河道深槽部分尚未相連。**溯源沖刷**：99 年現地調查時溯源沖刷段已由遷急點上溯達約 500 公尺，其河道深槽最大沖刷量已下刷達 4 公尺。**錯誤！找不到參照來源**。(f)。

綜觀歷史航照判釋可得：(1)受集集攔河堰攔阻之因，其上游粒料無法補充至下游河段，而使得河道原本之礫石護甲層遭受沖刷，進而岩盤裸露並逐年刷深、刷遠。(2)名竹大橋上游 921 地表破裂線通過，造成河道抬升，產生河道高低落差形成新的溯源沖刷基準點。整體濁水溪劇烈沖刷段之河道下刷與溯源沖刷正持續進行中。



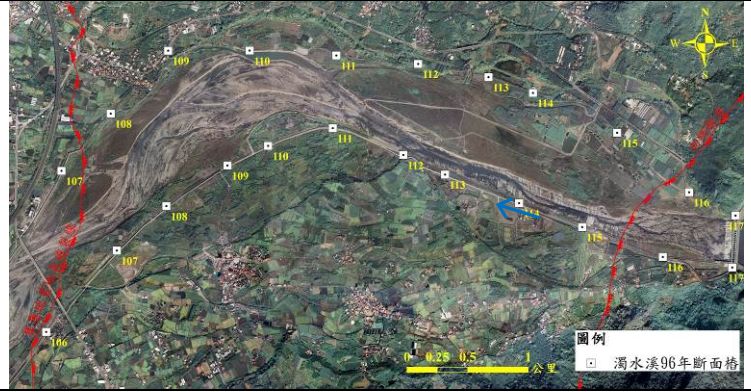
(a) 88.11.18 集集堰主體完工，下游河道整體為沙洲、卵礫石護甲層覆蓋，未有明顯之岩盤出露。921 地震過後名竹大橋上游約 500 公尺處為地表破裂帶通過處，河道上形成遷急點(knickpoint)。



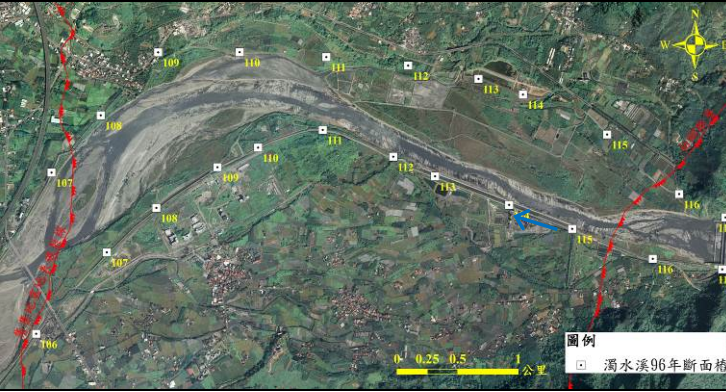
(b) 91.10.04 歷經 90 年桃芝颱風過後一年，於集集堰堰址下游側已有岩盤出露。名竹大橋上游 921 地表破裂帶通過處(近 107 斷面處)，其上游側河道已有明顯岩盤出露。



(c) 93.10 集集堰下游岩盤已逐漸裸露達兩公里距離，河道已明顯束縮。與 91 年航照對比，河道已開始產生深槽化現象。



(d) 96.01.28 921 河道持續往下游沖刷，岩盤出露距集集堰達 3 公里遠。名竹大橋上游河道原左岸岩盤出露因逐漸淤積，河心偏右後岩盤出露於右岸。



(e) 97.10.30 河道持續下刷，岩盤出露達 4 公里遠(近 109 斷面)。



(f) 98 年，河道由集集堰為起點持續向下游沖刷且刷深，名竹大橋上游側 921 地震造成之遷急點則形成溯源沖刷達 500 公尺。

圖 78 集集堰至名竹大橋河道沖蝕變化

(3)八掌溪

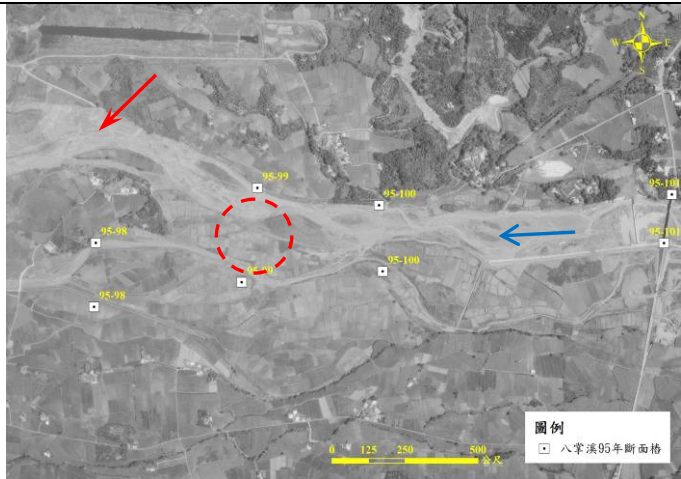
林文凱(2008)即已針對仁義潭攔河堰下游河道的沖刷做出其演繹之過程。其係根據歷年河道現地照片，初判此段八掌溪河道之劇烈沖刷，起始時間為民國 72 年至 80 年間，爾後蒐集民國 72、76、77、78、79 年等五個年份的航空照片，透過航空照片立體對判釋提出仁義潭下游河道約兩公里範圍內之沖蝕演繹，判釋結果說明如下：

- (a) 民國 72 年由航照(圖 79(a))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，但未有岩盤裸露的情形。較下游處分兩股流路，主要河道為右股，在右股流路與跨河橋樑(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 79(a)紅色箭頭處)。
- (b) 圖(b)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，應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 79(b)(圓圈處)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圖 79(b)(紅色箭頭處下游側)，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。
- (c) 民國 77 年時攔河堰堰前沖刷坑進一步擴大(圖 79(c))，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。
- (d) 民國 78 年(圖 79(d))時，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。
- (e) 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 79(e))，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。
- (f) 民國 98 年河道已完全發展成現今束縮、下切之河道。

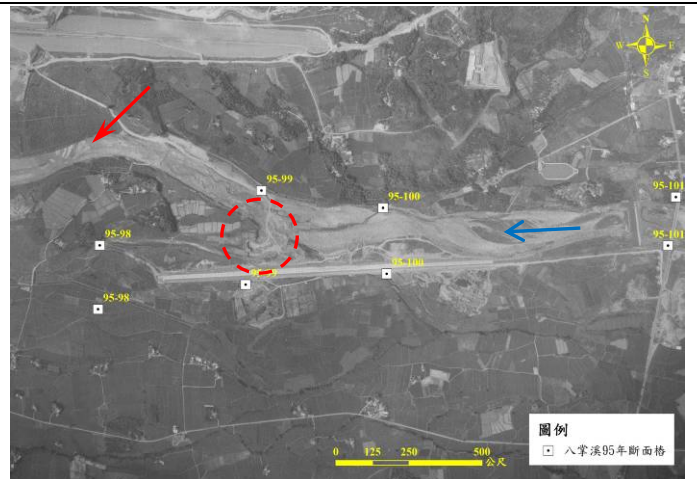
由歷史航照判釋可得，仁義潭攔河堰下游的侵蝕發展原因為：(1)攔河堰使得上游礫石材料無法補注到下游護甲層，使下游河道上沙洲漸漸消失護甲層變薄。(2)攔河堰產生抬水的作用使得下方沖刷坑發展，較大的侵蝕能量影響到下游河道，由航照推估影響範圍約為 200~300 公尺。(3)河道上的採石採砂行為使護甲層加速消失，進而岩盤裸露產生遷急點而發生向源侵蝕。

茲依據八掌溪軟岩沖蝕河段沖淤量變化及航照觀察結果，繪製沖蝕演繹及沖蝕機制示意圖如圖 80 所示，並說明如下：

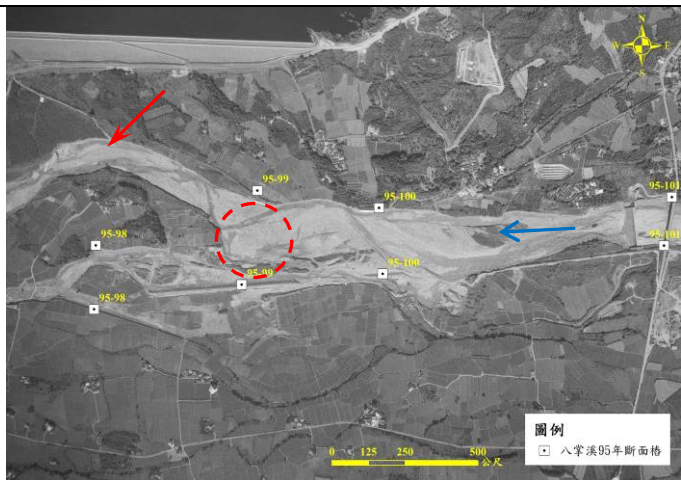
- (a) 仁義潭攔河堰設置造成堰前局部沖刷；河道採砂造成護甲層逐漸流失；河道築堤束縮增加輸砂能力。
- (b) 堰前沖蝕擴大且逐漸向下游延伸；河道溯源採砂範圍加大；護甲層流失後，軟弱岩床快速沖蝕。
- (c) 仁義潭攔河堰局部沖刷向下游延伸，逐漸與下游溯源侵蝕連接；五虎寮橋下游的局部沖刷亦逐漸向上游溯源侵蝕。
- (d) 河道護甲層消失，岩床嚴重下切形成峽谷深槽，危及橋梁及攔河堰，固床工及固床設施於多處陸續設置；觸口堰堰前沖刷發展。



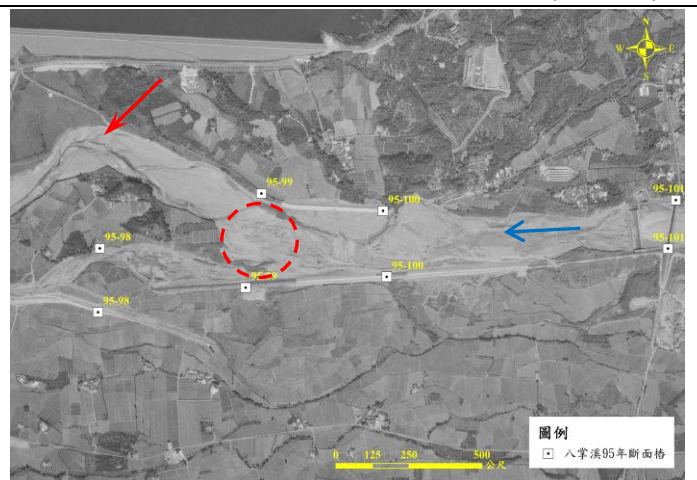
(a) 72.07.21 仁義潭攔河堰初完工，下游靠近堰前河道略有沖刷。較下游流心分為兩股，河道未有明顯岩盤裸露。



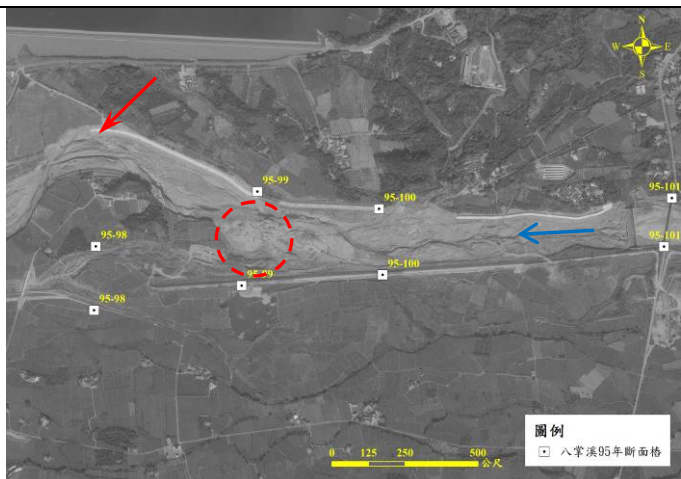
(b) 76.04.26 攔河堰下游河道礫石護甲層流失而出現沙洲。下游河道存在採砂場(圓圈處)，其附近河道出現岩盤裸露。更下游河道亦出現明顯岩盤裸露(箭頭處)。



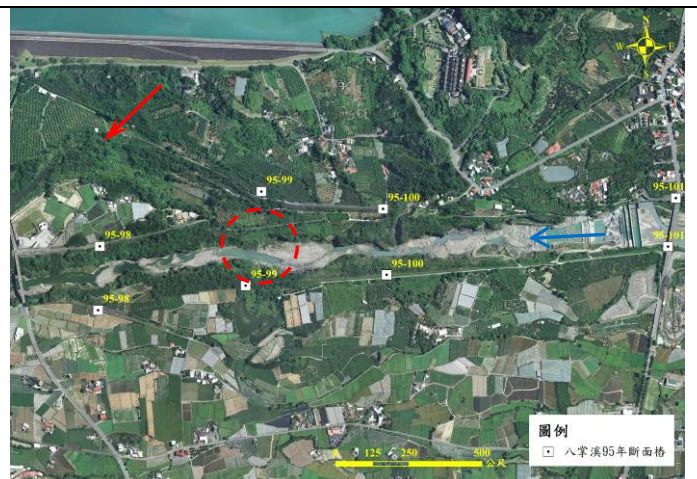
(c) 77.11.23 堰前沖刷坑趨於明顯。原 76 年採石場位置(圓圈處)岩盤裸露，並於其上游發現約有 300 公尺之向源侵蝕痕跡。



(d) 78.11.06 攔河堰堰前已發展出明顯沖刷坑，下游河道(箭頭處)已有明顯裸露之岩盤與河道深槽。



(e) 79.12.07 攔河堰堰前沖刷坑已與 77 年觀察到之向源侵蝕完全相連。



(f) 98 年，河道現況。

圖 79 八掌溪仁義潭攔河堰下游河道沖蝕變化

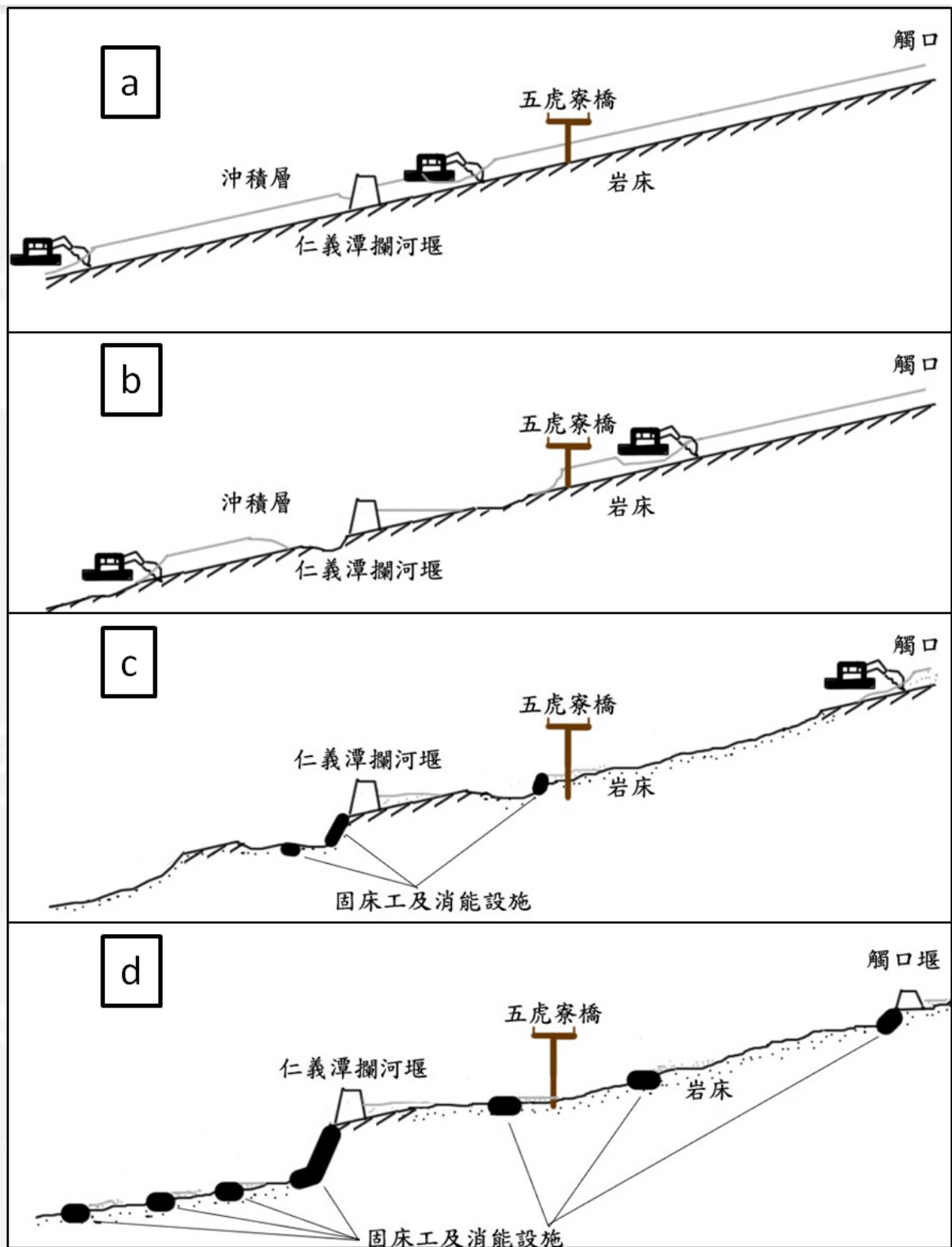


圖 80 八掌溪軟岩沖蝕河段沖蝕演繹與沖蝕機制示意圖

(五)抗沖蝕指數及能量消耗分析

本計畫將針對 Annandale 所提由抗沖蝕指數與發生沖蝕時所需之能量消耗門檻值決定河床的沖蝕性經驗圖，以本計畫研究沖刷河段為例進行分析及計算，探討其在台灣西部麓山帶軟岩河床沖蝕可能性評估的適用性。本計畫亦將由沖蝕試驗或/及現地調查所得岩石材料的抗沖蝕力嘗試對 Annandale 的公式加以修正。

本計畫軟岩侵蝕模型之發展在河道岩體性質方面係採用 Annandale(1995, 2006)所提出之

岩石抗沖蝕指數與發生沖蝕之流功門檻值為重要基礎，採用此概念模式之優點為可將不均質、異向之岩體材料性質，透過詳細的調查加以評分，簡化歸納為容易進入數模模擬之條件。由本計畫的相關調查工作經驗中發現，Annandale 之岩石抗沖蝕指數評分標準中，在塊體大小這一項目的評分無法充分反應軟岩河道現地材料狀況，所以在本節內容中將針對塊體尺寸參數的評分修正方式提出說明。

1、岩石抗沖蝕指數調查結果討論與整合

本計畫於劇烈沖蝕河段進行數百組抗沖蝕能力調查，針對抗沖蝕能力調查結果進行檢討，由現場調查經驗累積消除人為與主觀評分標準之誤差，並將抗沖蝕能力結果與現地沖蝕特性做歸納及簡化。最後由構造條件與岩性等特徵，將常見軟岩岩性分為以下二類：

(1)砂岩

由各河川劇烈沖蝕河段調查中歸納，砂岩屬於脆性岩石，局部區域受到構造應力影響，而有不同塊體特徵。本研究依據節理特性分為節理發達砂岩與塊狀砂岩，其特性說明如下：

塊狀砂岩：砂岩中節理較不發達，間距較寬，往往高於 0.6 m，有時平均塊體尺寸甚至可達 2 m 以上，此類砂岩稱為塊狀砂岩，如圖 81 所示。

節理發達砂岩：砂岩於部分河段區域受構造應力影響，節理發達且密集，經現場觀察應力集中帶岩盤節理間距往往在 0.6 m 以下，平均塊體尺寸多介於 0.2 ~ 0.5m。因此，將受到構造應力而破碎之砂岩定義為節理發達砂岩，如圖 82 所示。

(2)砂頁岩薄互層與頁岩

砂頁岩薄互層與頁岩因岩石特性較類似延性材料，節理不發達，但易受風化與乾溼循環影響，而風化為碎屑狀。如圖 83 圖中左側頁岩因乾濕循環而風化崩解為碎屑狀。圖右之頁岩相對較新鮮，本計畫用於河道沖刷模型則僅考慮新鮮岩層之抗沖蝕能力。由現地調查發現新鮮砂頁岩薄互層與頁岩塊體抽離之平均塊體尺寸約介於 0.1 m ~ 0.3 m。



圖 81 塊狀砂岩



圖 82 節理發達砂岩



圖 83 新鮮頁岩與風化頁岩

2、抗沖蝕能力評分修正

本研究依據 Annandale(1995, 2006)抗沖蝕指數評估方法，進行岩石抗沖蝕指標性質調查，作為建立侵蝕概念模式、探討沖蝕機制、及評估沖蝕速率等工作使用，Annandale 之岩石抗沖蝕指數(erodibility)為：

$$K_h = M_s K_b K_d J_s$$

$$M_s = C_r \cdot (0.78) \cdot (UCS)^{1.05} \quad \text{when } UCS \leq 10 \text{MPa}$$

$$M_s = C_r \cdot (UCS) \quad \text{when } UCS > 10 \text{MPa}$$

$$K_b = RQD / J_n$$

$$K_d = J_r / J_a$$

這四項參數分別為 M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件。各參數依不同條件給予不同之指定值，由四項值之乘積得到抗沖蝕指數。抗沖蝕能力指數中利用 RQD 代表塊體尺寸大小，Annandale(2006) 採用 Barton (1974) 經驗式依照現地調查的平均節理間距，換算為等值的 RQD，經驗式如下：

$$RQD = 115 - 3.3Jc$$

$$Jc = \left(\frac{3}{D}\right) + 3$$

Jc : the number of joint per m^3

D : Average block diameter (m)

RQD 應反映塊體大小，但 Annandale 所採用的經驗式存在著一個不足之處：以上述公式運算發現，當塊體尺寸大於 0.4m 以上，RQD 已大於 80 分(參見圖 84)，亦即若塊體平均尺寸大於 0.4 m 則 RQD 不敏感，但這並不代表平均塊體尺寸達 0.4 m 以上的岩塊已不易受沖蝕。因此，本計畫決定修正 RQD 評分方式，利用 Hudson and Priest(1976)提出的 RQD 公式：

$$RQD = (t\lambda + 1) \times (e^{-t\lambda})$$

λ : Joint Frequency (1/m)

t : threshold (m)

式中 λ 為節理頻率，而 t 為門檻計算量，即當大於 t 公尺時，才計算 RQD。經現場觀察，塊狀砂岩相較於節理發達砂岩與砂頁岩薄互層及頁岩，抗沖蝕特性有明顯優劣之分。因此將 t 門檻設為 0.6m，進行 RQD 計算，結果如圖 84 所示，修正後的 RQD 公式較能反映出塊體尺寸約 0.8 m 以下的分數，而 Annandale (2006) 所採計的 RQD 公式則僅顯示 0.4 m 以下塊體有明顯強弱之區別。經過 RQD 修正公式修正後的抗沖蝕能力結果，由調查結果顯示塊狀砂岩分數最高，其次為節理發達砂岩，砂頁岩薄互層與頁岩則較低。同時，由於修正了 RQD 計算標準，塊體尺寸評分普遍降低，因此修正後的抗沖蝕能力指數均低於 Annandale 原始評分法。後續原始與修正後抗沖蝕能力指數結果將作為河道侵蝕模型中岩盤抗沖蝕能力之依據。

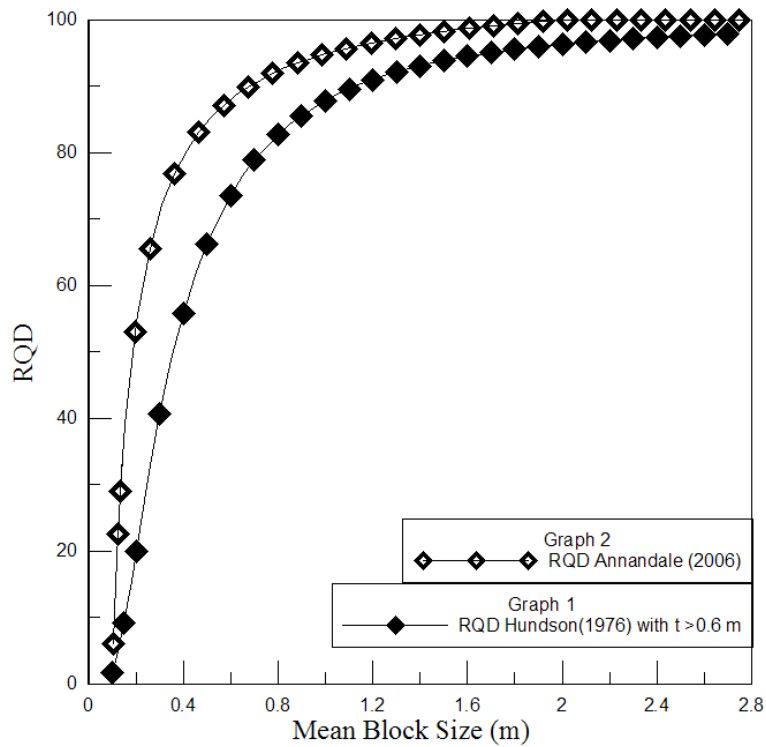


圖 84 平均塊體尺寸與等值 RQD 比較圖

3、流功沖蝕門檻值檢討

Annandale(1995)提出之沖蝕流功門檻值(K_w/m^2)在岩床範圍下係為 K_h 之 0.75 次方，此關係主要是由大壩溢洪道之觀測資料而來，且材料主要為硬岩。圖 85 為 K_h 與沖蝕流功門檻值之對應關係，當 K_h 為 10 時，沖蝕流功門檻即已達到 5.62 (K_w/m^2)，然一般河道中相當不易達到此流功沖蝕門檻。

因此，參考「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例」計畫利用大安溪之沖蝕資料對模式相關係數進行最佳化迴歸，率定流功沖蝕門檻為 K_h 之 0.1 次方，由圖 85 中可看出此關係在軟岩常見 K_h 範圍中(1~200)具有一定程度之鑑別能力，但此關係隨 K_h 增加而逐漸降低。

就流功沖蝕模式而言，沖蝕流功門檻值扮演相當重要之角色，未來應統整大安溪、八掌溪沖蝕資料、以及臨界流功沖蝕模式與遷急點倒退模式，重新檢討 K_h 與沖蝕流功門檻值之對應關係式。

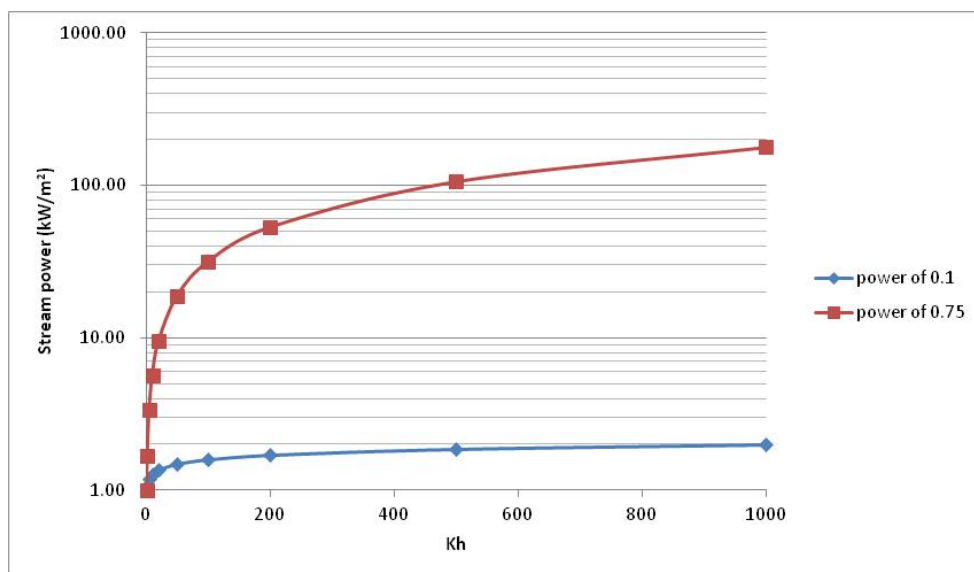


圖 85 K_h 與沖蝕流功門檻值比較

(六)室內沖蝕試驗

本計畫已就室內沖蝕試驗儀依照設計圖部分進行組裝及測試完畢，由於針對不同的沖刷機制所模擬的各項實驗運作，已添購一三方向通水截水閥，將管路分為磨蝕沖蝕試驗段及可變角度直接沖刷試驗段。量測儀器包含磨蝕沖蝕試驗段中電磁式流量計及直接沖刷試驗段的超音波流量計，利用雷射位移感測器量測試體表面沖蝕高程改變量，並將雷射位移計量測系統整合於高精度滑軌，以利試體表面高程掃描及數據分析。本試驗儀所使用污物泵浦為非接觸式泵浦，可加入細砂之含砂水流或不同粒徑之級配料，模擬河道流況中因顆粒磨蝕或彈跳撞擊造成的局部沖刷。本多功能室內沖蝕試驗設備已可進行水平磨蝕試驗及可變角度直接沖刷試驗，岩塊抽離渠道試驗則尚在進行規劃設計中，未來並將就含砂水流進行測試。

上述模擬試驗中所需試體包含水平向磨蝕試驗試體使用鑽心試體，而其他模擬試驗則需由現地鑿取岩塊，再於試驗室中進行修整磨平，並且建構支架於水槽底板中固定，目前取得岩體封存於方形密閉木箱中並封蠟處理以利保存。

1、水平磨蝕試驗

本計畫已就室內沖蝕試驗儀器進行組裝建構，以及清水水平向磨蝕試驗進行測試，建立完整的沖蝕量測方法，並且完成人造軟砂岩沖蝕率的探討。計畫中並針對不同岩性及流速大小做出實驗規畫，使用大安溪、集集、石岡壩鑽心所得之岩心試體進行實驗。茲說明水平向磨蝕試驗儀器如表 11 及圖 86、圖 87：

本試驗儀所使用水平沖蝕試驗裝置，係利用位於多功能試驗儀水槽內部之沉水式污物泵浦進行抽水，設計連接管路至水槽外試驗段進行試驗，流量可依據試驗條件進行調整，試驗後之水流導回試驗水槽中形成循環水流，以利長時間連續沖蝕試驗。

試驗水槽由強化玻璃製成，水槽長 2.1 m，寬 1.2 m，高 1.2 m，試驗管路由泵浦延伸至水槽外圍後銜接一水流調節閥，於試驗段前端外接一電磁式流量計控制管流流速，試驗岩心架設位置於水平試驗段中。

本試驗的目的為採用水平流沖刷岩心試體表面，量測岩心磨蝕損耗量，以決定岩石試體的磨蝕沖蝕率。每次試驗前試體必須對齊壓克力試驗段中比例尺，使試體在均勻流場中凸起高度為 1mm，避免擾動原本管內穩定流況。

本水平試驗段依照所需試驗條件進行試驗段設計，水流必須經過完全發展長度形成較為穩定之紊流，稱為完全發展紊流(圖 88)，完全發展紊流之流場，其剪應力及平均流速之結構較為穩定與均勻，而在紊流情況下所需之完全發展段 l_e 為(Munson & Young & Okiishi, 2005)：

$$l_e = 4.4D(Re)^{1/6} \quad (10)$$

$$D = 2ab/(a+b) \quad (11)$$

其中 Re 為雷諾數， a 為管徑高， b 為管徑寬。

水平向磨蝕試驗為每次將試體凸出於管壁 1 mm，試體表面承受之流場為外紊流層(Munson & Young & Okiishi, 2005)。由冪次定律速度曲線(power law velocity profile)可得試體表面所承受之流速 V_c 為(Munson & Young & Okiishi, 2005)：

$$V_c = U / [(1-r/R)^{1/n}] \quad (12)$$

$$U = Q/A \quad (13)$$

R 為管壁與方管中心距離， r 為管路中心線至試體之距離， U 為平均流速， Q 為流量， A 為斷面積， n 為冪次定律速度曲線指數(圖 89)。

由於試體凸起於管流造成流況改變，滿管狀態下管內流線圖如圖 90 所示，平均流速為 0.57~15.07 m/s 時，計算試體表面(距離管壁 1 mm 處)所受之流速約為 0.51~13.71 m/s 相差約 0.89~0.91 倍，故試體僅於管流中推進 1mm，是體表面流速與管內平均流速相當接近。

而管內之水頭能量會因試體而有所損失，損失係數與面積比相關，損失係數 K_L 可由圖 91

得之。而本試驗之 AR 約為 0.97，在縮口與擴口區之損失係數為 $K_L \approx 0$ ，故本試驗可不考慮試體對於流場能量損失之影響。

本研究模擬河道中軟岩表面沖蝕行為，考量方形管流能使水流均勻通過岩心試體，並處於穩定流況中進行試驗，故針對以上流速及流況條件進行試驗段設計。水平試驗段提供岩心試體施作沖刷試驗，在前端通入水流經管口束縮後為方型管路(內徑 27mm*54mm)，並通過完全發展長度 140cm 後，外接壓克力製試驗段(內徑為 27mm*54mm)透明管路。試驗段為壓克力組裝固定於兩端管路，並於底端打通直徑 56mm 之圓孔，符合現地岩心 NX 鑽頭之直徑，材質使用壓克力製成以便於觀察試體沖刷行為及量測，再將管流導入試驗水槽中。

本試驗所使用試體包含大安溪、石岡壩、集集攔河堰鑽心試體(表 12)，包含不同岩性，針對不同流速下作水平向沖刷試驗。水平向磨蝕沖蝕試驗規劃為對一段選定之岩心試體連續作兩組實驗，流速設定為 10m/s 以及 15m/s，試驗時間持續 8 小時。下表為試體介紹：茲說明水平向磨蝕沖蝕試驗流程如下：

1. 使用岩心切割機將試驗岩心切平並且將試體表面打磨整平。
2. 將岩心置於透明試驗管內，利用壓克力夾具固定岩心試體。
3. 開啟污物泵浦並讀取流量計讀數，將流速調整至較小值，並等待流況穩定。
4. 單眼相機架設於相對於試體的水平位置，並且拍攝試驗前試體情形。
5. 使用調節閥控制流速為實驗預定流速。
6. 每組試驗時間為八小時，在試驗經過 2、4、8 小時進行拍照(圖 92)。
7. 利用試驗時間內岩心試體的高程變化，繪製管流速度(m/s)與沖蝕率(mm/hr)關係圖。

試驗完成後將攝影的照片試體部分數化，並將試體中心線標出作為基準，計算出試驗時間內沖刷量。數化軟體使用 AUTOCAD。數化流程如下：

1. 首先將拍攝的試體相片貼上 CAD。
2. 將照片比例依照 CAD 軟體內 1 單位為照片上 1mm 的比例放大。
3. 將試體邊緣輪廓描繪出來。
4. 量測試體軸線中央高程的距離。
5. 量測出來的高程即為試體高，試驗前(紅色剖面線)與試驗後(綠色剖面線)的高程差即為沖蝕量(mm)(圖 93)。

表 11 磨蝕沖蝕試驗儀，儀器各部介紹

試驗儀器名稱	儀器型號或尺寸	功能或目的
流量計	FlowMaster(EMF10)電磁式	量測時間單位內通過水量 (m^3/hr)
污物泵浦	河見電機 AF-35A	帶動水流循環
強化玻璃水槽	210cm*120cm*120 cm	可容許之水量為 $2m^3$
透明試驗段	27mm*54mm	試驗段為均勻之流場
流量調節閥	手動調節閥	調整試驗段流速
單眼數位相機	SONY 相機搭配高倍率鏡頭	拍攝試體相片比較沖刷高程
雷射位移計	CD4-85(OPTEX) 量測範圍 $85 \pm 20mm$	利用雷射光束反射取得試體表面高程
雷射位移數據擷取器	CD4A(OPTEX)	設定雷射位移計擷取速率
TDR 感測器		濃度量測(ppm)









<p>流量計</p> 	<p>污物泵浦</p>  <p>AF-35A</p>	<p>流量調節閥</p> 
<p>單眼數位相機</p> 	<p>雷射位移計</p>  <p>CD33-120W CD33-60W</p> <p>長距離タイプ 測定長: 120+60mm 精度: 30μm</p> <p>中距離タイプ 測定長: 65+20mm 精度: 15μm</p>	<p>透明試験段</p> 
<p>岩心夾具</p> 	<p>TDR 濃度感測器</p> 	<p>雷射位移數據擷取器</p> 

圖 86 磨蝕沖蝕試驗儀器介紹圖示

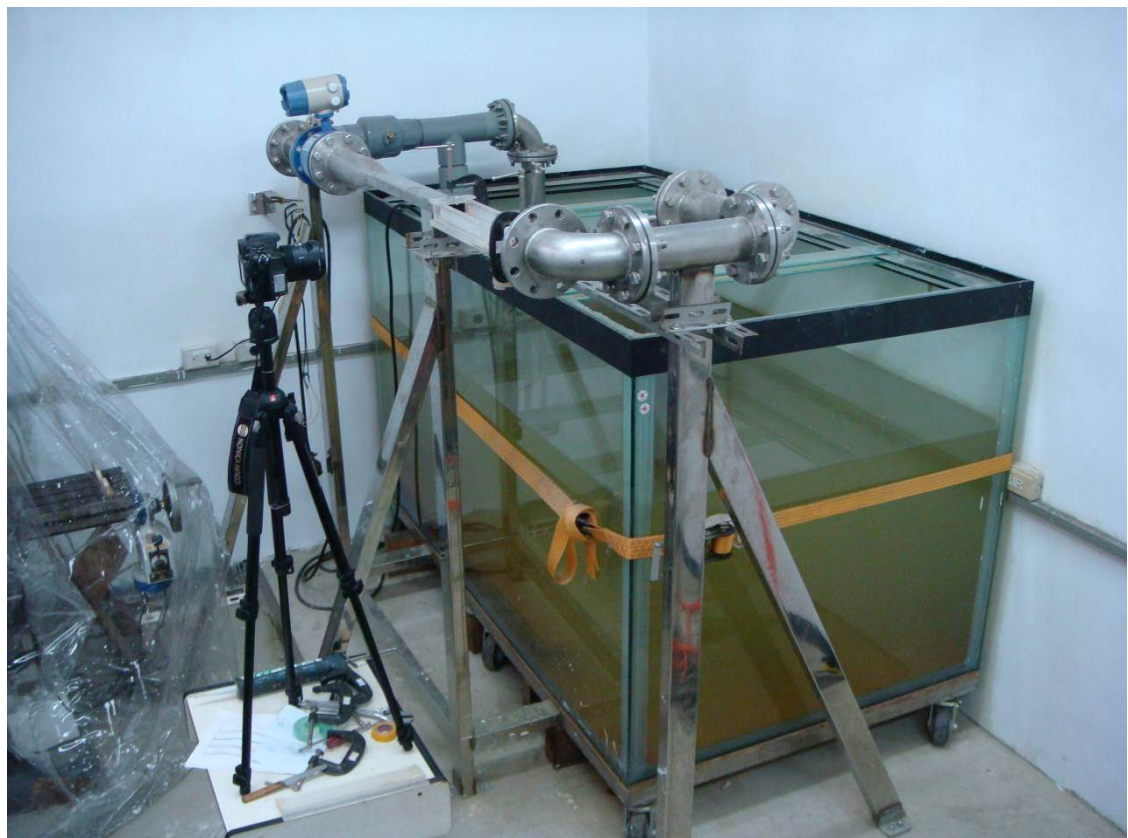


圖 87 沖蝕試驗儀配置圖



圖 88 紊流擴散示意圖(改繪自朱佳仁, 2003)

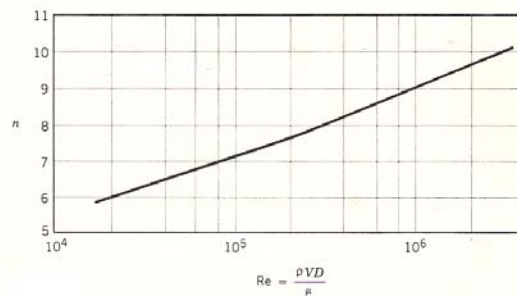


圖 89 幂次定律速度曲線圖(摘自朱佳仁, 2003)

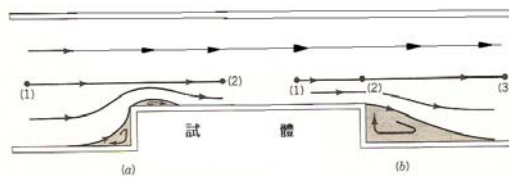


圖 90 管內流線圖(改繪自朱佳仁, 2003)

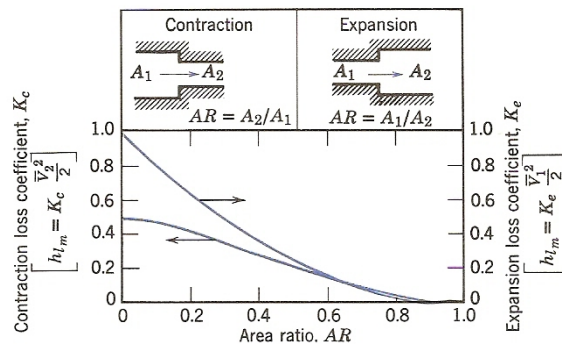


圖 91 縮管損失係數(Streeter, 1961)

表 12 磨蝕沖蝕試體材料

試體來源	實驗段(m)	岩性	單壓強度(MPa)	備註
集集(CO)	CO01 (12.4~12.6)	砂岩	23.09~33.7	頭嵙山層
大安溪(BH)	BH01 (24.1~24.3)	頁岩	3.20~3.26	卓蘭層
大安溪(BH)	BH03 (22.2~22.4)	砂岩	5.70~7.86	卓蘭層
大安溪(BH)	BH04 (9.4~9.6)	頁岩	1.63~3.26	卓蘭層
石岡壩(SS)	SS01 (10.5~10.7)	砂岩	1.52~1.82	卓蘭層

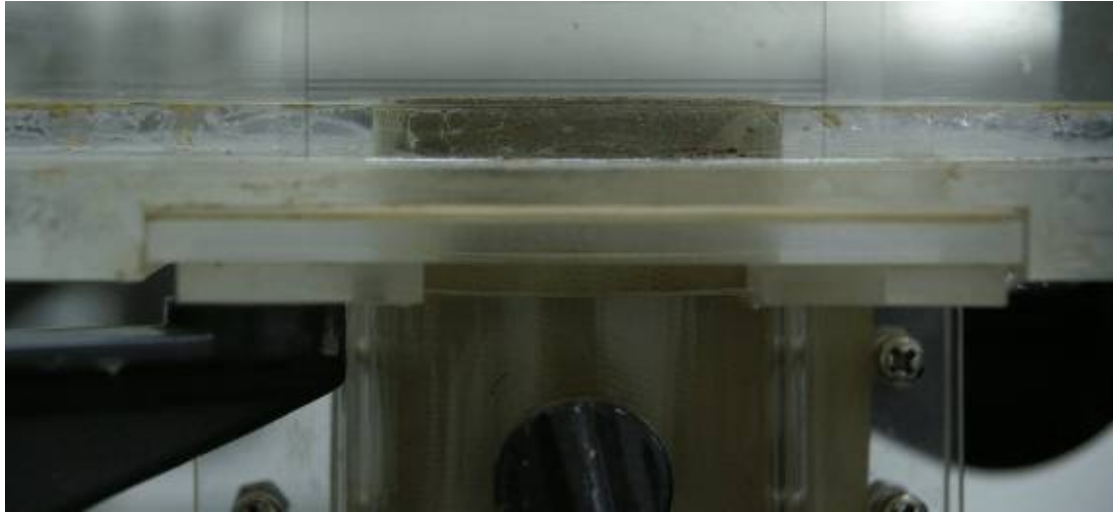


圖 92 沖刷過程中試體(大安溪 24.1m~24.3m(頁岩)，流速:10m/s)



圖 93 數化後的試驗岩心(紅色部分為沖刷實驗前，綠色為沖刷後)

參考表 13 及圖 94，現地鑽心試體的試驗結果顯示沖蝕率介於 0.0373(mm/hr)~0.0033(mm/hr)之間，相較人造岩塊所鑽之岩心(張振成，2008)沖蝕率 20(mm/hr)~220(mm/hr)明顯較低。而現地鑽心試體中頁岩沖蝕率又略小於砂岩試體沖蝕率，沖蝕率的排序為：人造砂岩>>砂岩>頁岩。

本試驗試體單壓強度大安溪砂岩介於 5.70~7.86MPa，頁岩介於 1.63~3.26MPa，集集攔河堰砂岩試體介於 23.09~33.7MPa，石岡壩砂岩試體介於 0.4~0.28MPa(沿層面破壞)，人造砂岩介於 1.61~3.31MPa，平均值為 2.24MPa。

砂岩試體單壓強度為集集攔河堰>大安溪>石岡壩，沖蝕率為集集攔河堰>大安溪>石岡壩。而以大安溪試體為例，單壓強度為砂岩>頁岩，岩心沖蝕率亦為砂岩>頁岩，得知試體單壓強度與磨蝕沖蝕的抵抗沖刷能力為正相關關係。以地質分層作比較，沖蝕率為頭嵙山層砂岩>卓蘭層砂岩，卓蘭層屬於上新世晚期至更新世早期堆積成的沉積岩層(地質年代約一百五十萬年前)，而頭嵙山層為更新世相對地質年代較為年輕，故推斷因岩石的岩化型態不同且地質年代久遠的岩石顆粒膠結能力較佳，而產生不同的沖蝕試驗結果。

試體岩性和岩石表面顆粒膠結力有關，抵抗水流沖刷能力也因岩性有差異，由於人造砂岩材料較不均值，所以試驗之結果會由於顆粒差異之影響會產生較高或較低之沖蝕率。水平向磨蝕沖蝕試驗在管流中試體表面的條件也相當重要，包含是否有裂隙或邊界剝落而改變局部的沖刷，皆會改變試體局部的沖刷流況。

本研究以重複試驗驗證試驗沖刷之穩定性，量測沖刷量結果精度達 0.001mm，證實本試驗儀於水平磨蝕沖蝕試驗之穩定度，及使用 AUTOCAD 軟體進行影像分析，可以將試體側向高程剖面標出，利於對是體表面的改變量做精確量測。然而，試驗時試體受水流衝擊面之流況並非於水平方向受沖刷，試體的後端也因流場的改變，兩端會有較高的沖蝕率，在沖蝕率較高的情況下，試體經常呈現凸狀曲面。試體拍照方向為垂直水流方向並與岩心試體呈水平進行拍照，對於整體岩心沖刷量可能有低估之疑慮，故應使用非接觸式的量測方式，得知試

體所接觸水流面之整體高程改變量，以求得更佳精確的沖蝕量，並對岩石沖蝕特性更進一步掌握。

表 13 水平磨蝕試驗結果

流速(m/s)	時間(hr)	岩性及岩心位置	沖蝕量(mm)	沖蝕率(mm/hr)
10.12	8	CO01 砂岩 12.4m~12.6m	0.257	0.0322
14.71	8	CO01 砂岩 12.4m~12.6m	0.298	0.0373
10.12	8	BH01 頁岩 24.1m~24.3m	0.044	0.0055
14.93	8	BH01 頁岩 24.1m~24.3m	0.053	0.0066
9.88	8	BH03 砂岩 22.2m~22.4m	0.182	0.0228
14.93	8	BH03 砂岩 22.2m~22.4m	0.171	0.02138
9.91	8	BH04 頁岩 9.4m~9.6m	0.0592	0.0074
15.07	8	BH04 頁岩 9.4m~9.6m	0.0768	0.0096
9.91	8	SS01 砂岩 10.5m~10.7m	0.1472	0.0184
14.77	8	SS01 砂岩 10.5m~10.7m	0.1192	0.0149
0.54	4	大安溪砂岩，郭炳宏(2010)	0.098	0.0225
3.14	4	大安溪砂岩，郭炳宏(2010)	0.140	0.0350
4.23	7	大安溪砂岩，郭炳宏(2010)	0.160	0.0229
4.23	4	大安溪砂岩，郭炳宏(2010)	0.013	0.0033
4.23	7	大安溪砂岩，郭炳宏(2010)	0.056	0.0080
9.94	4	大安溪砂岩，郭炳宏(2010)	0.070	0.0175

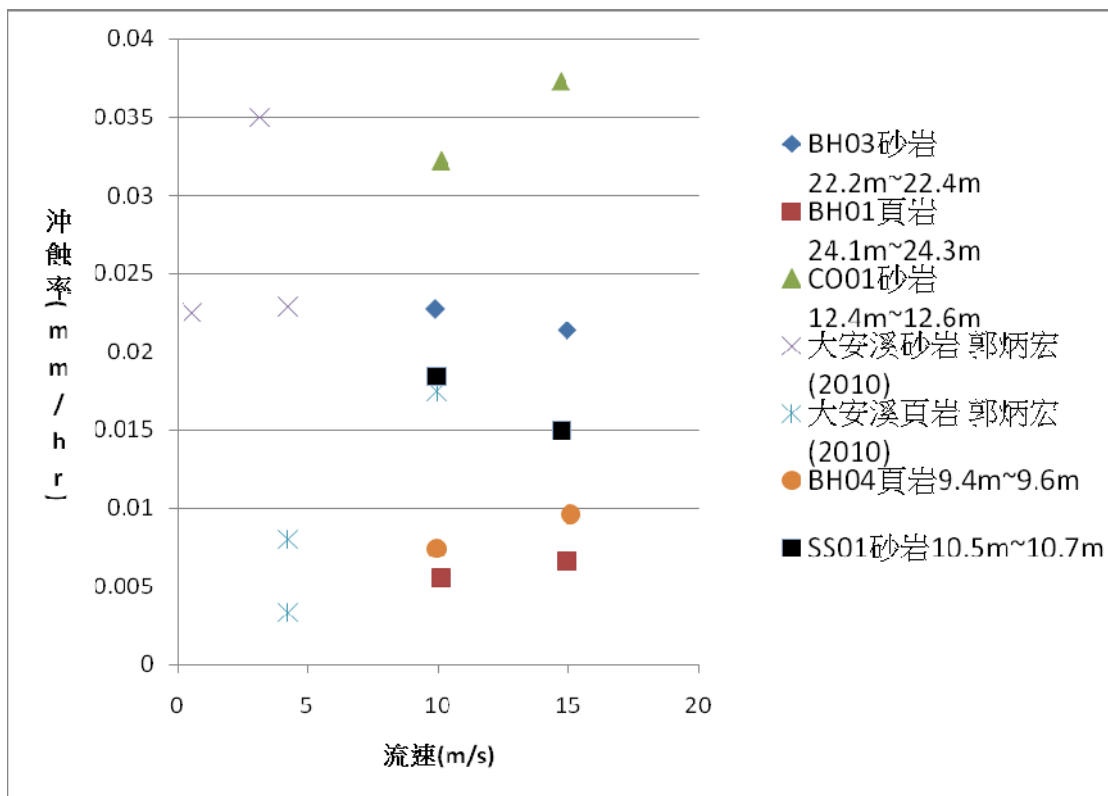


圖 94 磨蝕試驗各岩性試驗(沖刷率 vs. 流速)

2、可變角度直接沖刷試驗

河道水流越過攔河堰或溢洪道使射流進入河床，縱使下游有施做淨水池與消能設施以減少水流的衝擊，水工構造物與岩盤交界附近河床仍然常產生沖蝕坑，進而破壞水工構造物並喪失其功能。因此，本試驗於郭炳宏(2010)所建立之多功能室內沖蝕儀上增設可變角度射流沖刷設備，探討不同角度下軟弱砂岩沖蝕坑的形成。

試驗設備以郭炳宏(2010)架設之多功能室內沖蝕儀為基礎，沿用原本之動力設備(污物泵浦)、水槽及部分管路；於原管路段加裝一球型三通閥，可控制多功能沖蝕儀進行水平向磨蝕試驗或可變角度射流沖蝕試驗，亦可控制可變角度射流沖蝕試驗之射流流量，利用軟管接通球型三通閥與升降固定器之管路，管路及噴嘴選用內徑 1 吋之不銹鋼圓管，以確保水流沖擊範圍完全作用於試體表面內，並且避免試體邊界效應影響沖蝕結果(圖 95、圖 96)。實驗儀器組件與功能說明於表 14 及圖 97~圖 104：

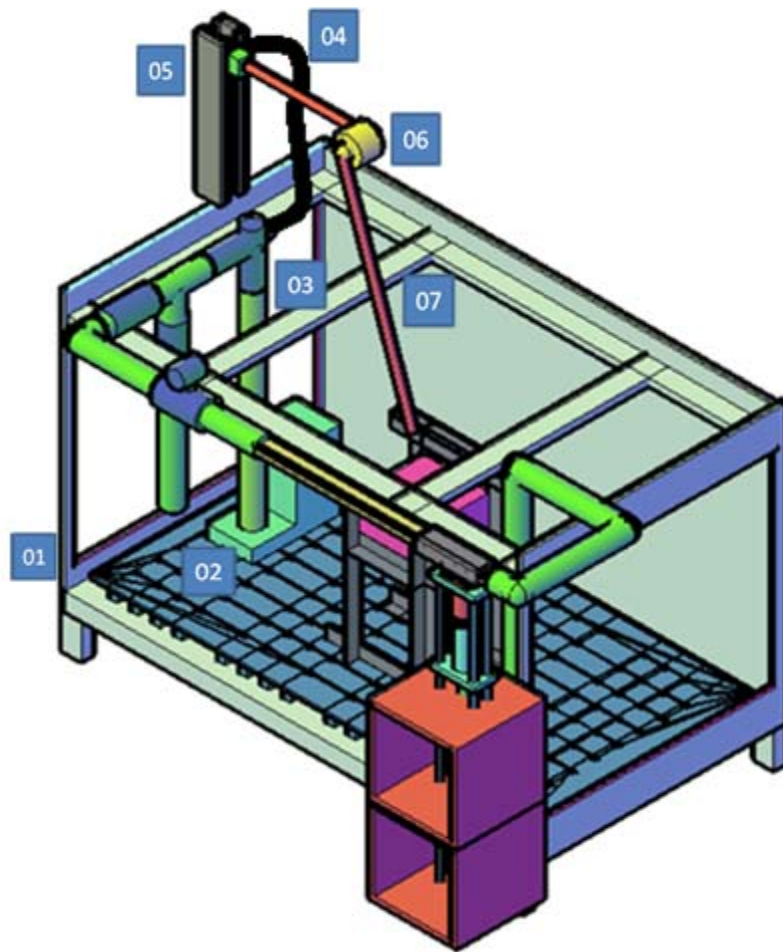


圖 95 多功能沖蝕儀-可變角度射流沖刷試驗設備配置圖



圖 96 多功能沖蝕儀-可變角度射流沖刷試驗設備照片

表 14 射流沖刷試驗儀器介紹

分部	編號	試驗儀器名稱	儀器型號/尺寸	功能/目的
供水循環系統	01	強化玻璃水槽	210×120×120 cm ³	最高可容納 2 m ³ 之水量
	02	汙物泵浦 (圖 97)	河見電機 AF-35A	帶動水流循環
流量控制系統	03	三通不銹鋼球閥(圖 98)	通口內徑為 8cm	控制流經試驗管內的流量大小，達到調整試驗段流速的目的
管路系統	04	PVC 纖維增強軟管(圖 99)	內徑 2.5cm，長 150cm	連結三通閥及升降固定器管路，內部最大抗壓 1 MPa
	05	升降固定器 (圖 100)	50×8×4cm ³ ，不鏽鋼	調整噴嘴與試體間之落距
	06	可變角度法蘭 (圖 101)	旋轉弧度 45°，不鏽鋼	調整噴嘴角度
	07	噴嘴	內徑 2.5cm，長 100cm	穩定射流
量測系統	08	超音波流量計(圖 102)	UF820-S (FlowMaster)	量測通過流量計時間單位內水量 (m ³ /hr)
	09	雷射位移計 (圖 103)	CD4A-85 (OPTEx)	利用雷射光束反射取得是體表面高程
	10	雷射位移數據擷取放大器 (圖 3-9)	CD4A (OPTEx)	設定雷射位移計擷取速率
	11	XYtable 線性滑軌組(圖 104)	MGW (HIWIN)	精準定位量測點的絕對位置
	12	單眼數位相機	α77(SONY)	拍攝試體



圖 97 汙物泵浦



圖 98 球型三通閥



圖 99 PVC 纖維增強軟管



圖 100 升降固定器



圖 101 可變角度法蘭

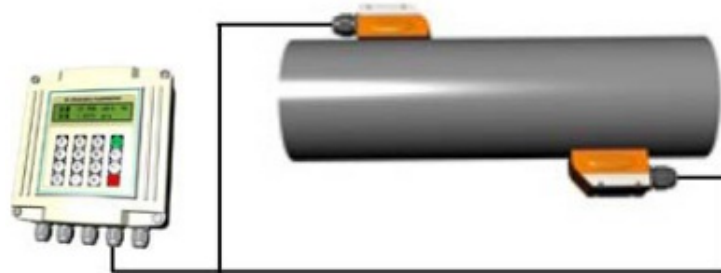


圖 102 超音波流量計



圖 103 雷射位移計與雷射位移數據擷取放大器



圖 104 XYtable 線性滑軌組

以下說明本試驗中幾項重要設計條件及儀器設備：

(1)射流核心長度

Ervine et al. (1997) 認為圓形射流(circular jets)後流體周遭因與空氣摩擦而將其速度減緩，當射流斷面上任一點之流速皆小於原始出速時則稱為擴散射流(developed jet)，然而在噴嘴口至射流完全發展段間部分流體還保持著核心流速(core jet)，其公式為：

$$\frac{L_b}{D_i F_{ri}^2} = \frac{1.05}{(1.14 + T_u F_{ri}^2)^{0.82}} \quad (14)$$

L_b =射流破裂長度

D_i =射流初始斷面直徑

F_{ri} =射流初始福祿數

T_u =射流紊流強度(turbulence intensity)=0.08(for valve)

本試驗之 D_i 為 0.025m、 F_{ri} 為 40.133，依式 14 得射流破裂長度為 0.718m，因此試驗之射流長度將不高於 0.718m，即可確保射流流體衝擊至試體面時流速仍保有原始初速。

(2)射流流體擴散範圍

利用 Ervine et al. (1997)所提出之擴散射流公式，可推估射流任何長度之流體斷面積。

$$D_j = D_i + 2 \times 0.38 T_u L_j \quad (15)$$

D_j =射流任意斷面的直徑

D_i =射流初始斷面直徑

T_u =射流紊流強度(turbulence intensity)=0.03(for free over fall)

L_j =射流軌跡長度

經公式計算得本試驗射流接觸試體時段面直徑不大於 58 cm²，而試體面積為 625cm²，前者與後者面積比為 1：10，不僅試驗面積涵蓋射流沖及範圍，亦可避免試體邊界過於脆弱破壞而影響沖蝕坑發展。

(3)沖蝕坑量測設備

沖蝕坑的量測設備由雷射位移計、雷射位移數據擷取放大器與 XYtable 線性滑軌組所組成。雷射位移計原理為擴散式反射，量測精度 0.003mm，量測範圍 65mm 至 105mm，雷射波長 650nm，點直徑 70×290μm，經雷射位移數據擷取放大器讀取訊號後於 LCD 顯示讀數。

相較於傳統接觸式量測方式，非接觸式量測能提供更好的測量精準度與誤差，亦可避免接觸岩體所造成的壓縮或顆粒位移。由於雷射光為一平行單色光束，當照射在工件表面之上，沿著其反射角方向的反射光強度，有二種表面反射模式，分別為鏡射式反射(Specular)與散射式反射(Scattering)。通常雷射位移計皆是利用散射式反射原理而設計，並採用雷射三角法原理(Triangulation) 做量測應用。雷射光束投射在任一表面產生光點，經過透鏡的聚焦後投影於光檢測器上，若待測表面作一上下的位移量，則光點沿著雷射光束的路徑方向移動，也造成檢測器上的光點沿檢測器作一段距離的位移。其中兩者位移量成正比。這種在檢測器上影像的位移就可以決定出表面的位移量，應用在高低起伏的自由曲面外形量測時，可以量測出表面上各點的位置。(圖 105)

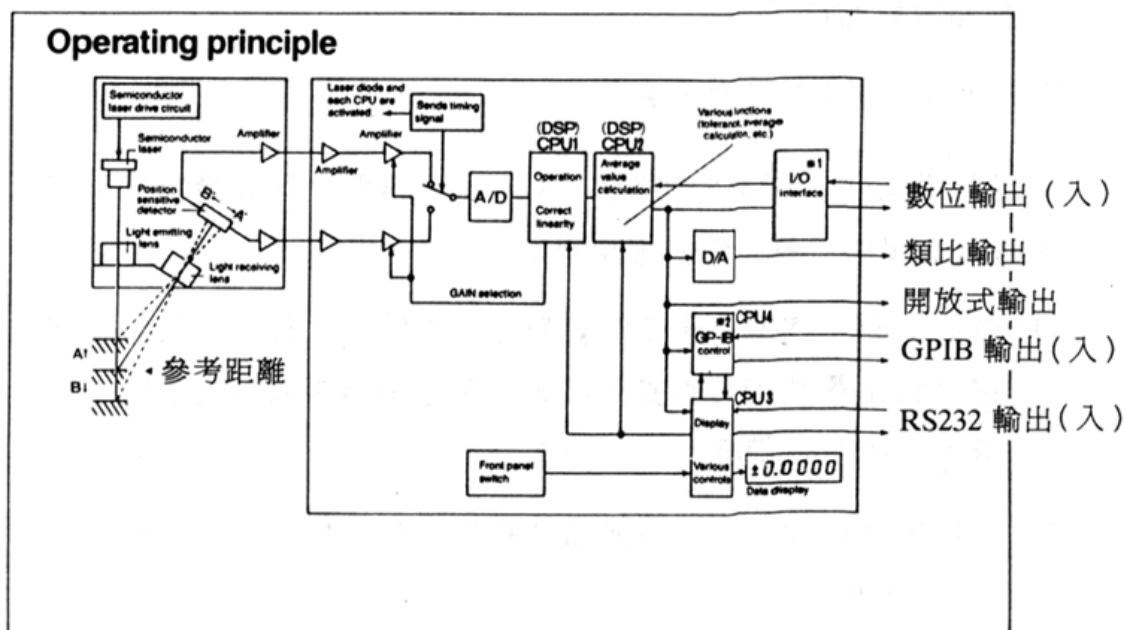


圖 105 雷射位移計構造示意圖

(4) 流量監測設備

本試驗選用超音波流量計(圖 106) 於管外量測水流量，精準度正負 1%、流速範圍 0~32m/s(本試驗最高流速 10m/s)，水中懸浮物體密度可達 10000ppm，適用管徑 1/2 吋至 4 吋有利於未來變換噴嘴直徑(本實驗為 1 吋)。

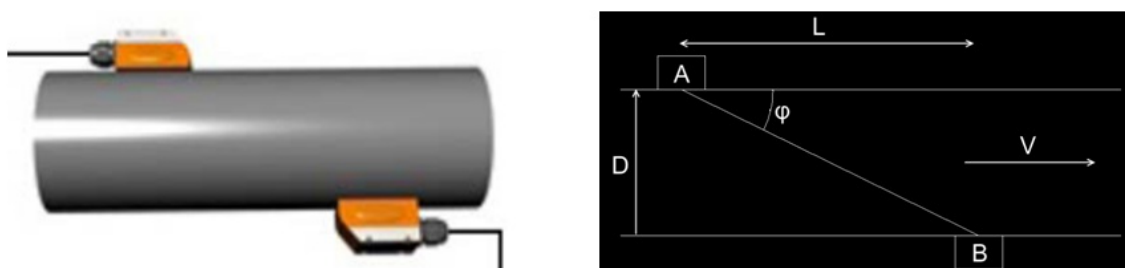


圖 106 超音波流量計照片與原理示意圖

利用音波在流體中傳播時，量測流體速度所造成的時間差，以決定流體的速度，進而計算出流體的流量，其分析原理計算如下：

順向傳播時間：

$$T_{AB} = \frac{L}{C + V \cos \phi} \tag{16}$$

逆向傳播時間：

$$T_{BA} = \frac{L}{C - V \cos \phi} \tag{17}$$

時間差：

$$\Delta T = T_{AB} - T_{BA} = \frac{L}{C + V \cos \phi} - \frac{L}{C - V \cos \phi} = \frac{2LV \cos \phi}{C^2 - (V \cos \phi)^2} \tag{18}$$

音波速度 C 遠大於流體速度 V，故：

$$C^2 - (V \cos \phi)^2 \approx C^2 \tag{19}$$

整合式 3-6、式 3-7 可得到：

$$V = \frac{\Delta T \times C^2}{2LV \cos \varphi} \quad (20)$$

L：檢知器 A 與 B 之距離

V：流體流速

C：音波速度

(5) 試驗結果

本試驗依射流角度不同進行為三組沖刷試驗，然因落距皆過短，重力對水流垂直向流速的影響有限，故將流線長及流速固定，使三組試驗水流衝擊至試體時有較接近的射流破裂長度。每組沖蝕時間皆為 24 小時，除於試驗前進行試體表面高程量測與拍照，並於 0.167、0.5、1、2、5、9、13、18、24 小時停機，進行類似量測與拍照，以分析沖蝕坑的形成與變化。另外，並於試驗前及 0.0167、0.5、1、24 小時各取部分試體表面邊緣約 3 至 6 克之試體塊做含水量試驗，觀察其含水量於試驗開始後皆維持在 15% 至 30%，故各試體於時驗進行間含水量條件可視為一致。本研究利用雷射位移計量測試體表面的高程變化，但為與現有沖蝕坑相關研究比較，各階段的變化僅就沖蝕坑中央之剖面圖加以詳細說明。

射流角度 30 度

試驗前含水量初始值 3.0%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 20%~30%，沖蝕 3 分鐘後試體表面顆粒開始脫落，觀察表面可發現比未試驗前粗糙許多，30 分鐘後可觀察到明顯沖蝕坑形成，沖蝕坑最深深度 6.7mm，18 至 24 小時深度增加極小(0.091mm)，最大沖蝕坑深度可能已達成(圖 107)，圖 108 展示出試驗進行 24 小時後沖蝕坑表面相當平滑，可能為沖蝕坑內受水流剪力磨蝕範圍較平均，沖蝕坑順坡(水注上游側)坡角為 9，沖蝕坑逆坡(水注下游側)坡角約 30，射流水柱厚經計算擴散接觸至試體增加至 87mm，沖蝕坑長度量測得 118mm，其中沖蝕量計算是利用沖蝕坑剖面圖相減而得，故單位為平方公厘。

射流角度 50 度

試驗前含水量初始值 2.2%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 14%~22%，沖蝕 30 分鐘後可觀察出沖蝕坑，累計沖蝕量與沖蝕坑極深點皆隨時間增加，平均沖蝕量則隨時間減少，試驗 24 小時結束後沖蝕坑及最大深度可能未達到平衡，還有持續增加的狀況，圖 109 可看出 18 至 24 小時沖蝕坑底部仍不斷擴大且加深，圖 110 顯示沖蝕坑表面高低起伏較多，可能為試體遭受射流衝擊後岩體不規則碎裂，射流水注經擴散後經計算接觸試體表面範圍為 57mm，沖蝕坑長度量測得 75mm，沖蝕坑順坡坡角為 19 度，逆坡由 2 度與 19 度組成。本試驗之坡角為橫軸 20mm 至 30mm 段，可能為每次停機量測，再次啟動時瞬間高速的水流造成噴嘴處有些微晃動，使得射流中心點在量測前後無法坐落於同一點，故沖蝕坑底部較為寬廣。

射流角度 70 度

試驗前含水量初始值 1.8%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 20%~23%，沖蝕 10 分鐘後可觀察得沖蝕坑已形成(圖 111)，4 小時之前沖蝕量明顯比 30 與 50 多，最大沖蝕坑深度於 18 至 24 小時仍增加 0.78mm，顯示沖蝕坑可能未到達平衡，由圖 112 沖蝕坑表面情形與射流角度 50 度雷同，不規則起伏較多，可能亦為試體不規則的碎裂所留下之痕跡，射流水注厚接觸至試體為 46mm，沖蝕坑長度 55mm 皆為三次試驗中最小者，可大致看出沖蝕坑之長度與射流水注厚度成正比，故可初步判斷影響沖蝕坑長度最大因素可能為射流接觸至試體時的水注厚，但也因為本試驗於停機、開機時射流中心點有偏移之情形。

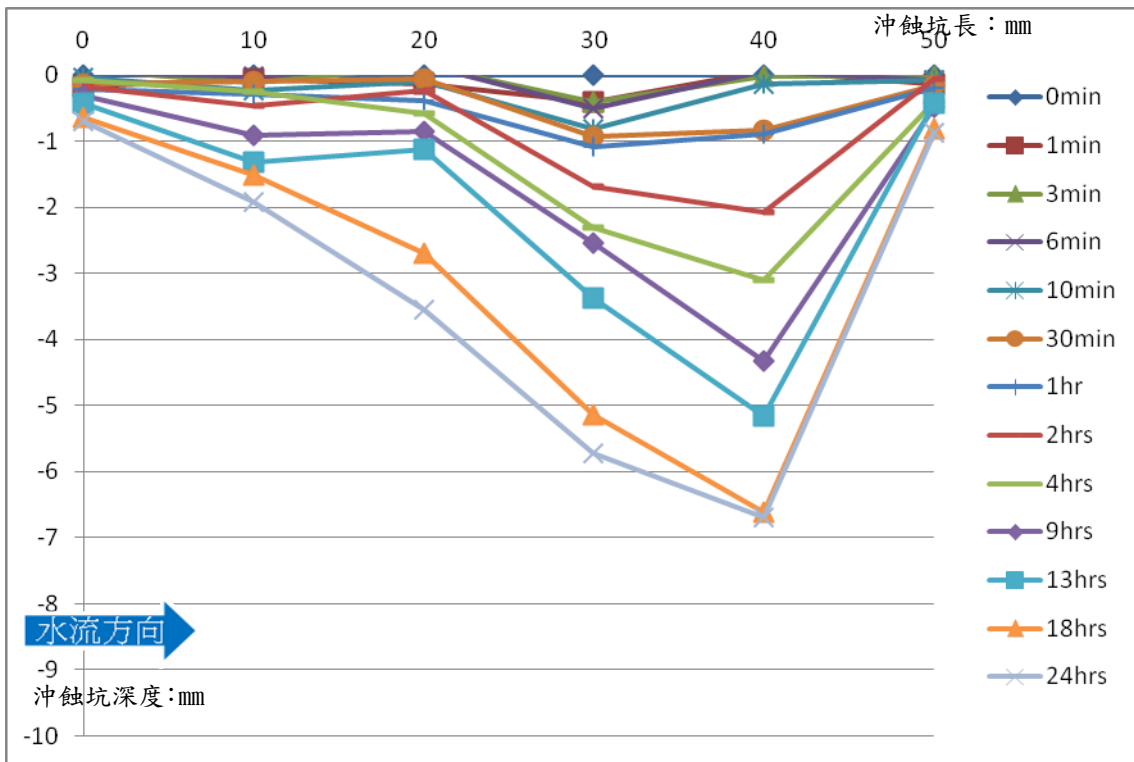


圖 107 射流角度 30 沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

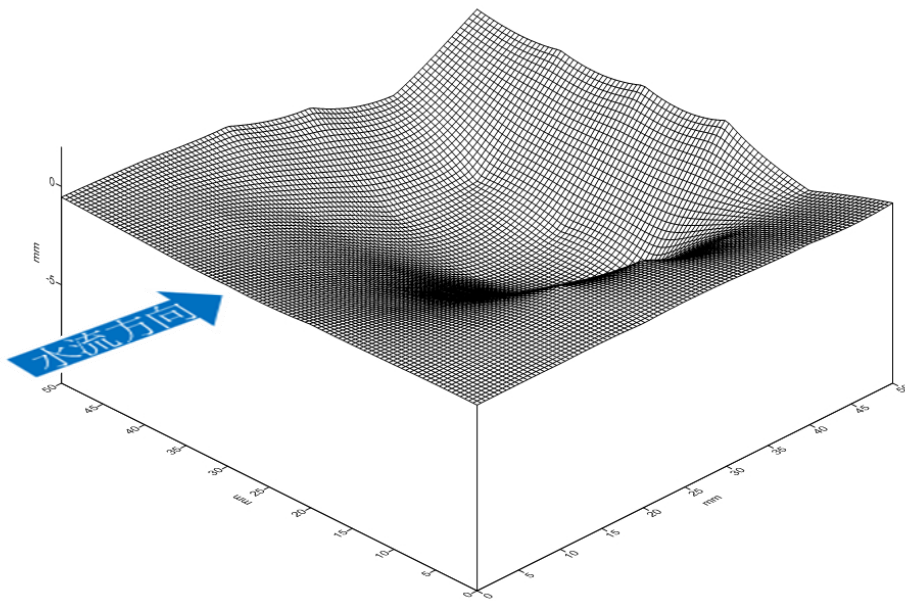


圖 108 射流角度 30 沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖

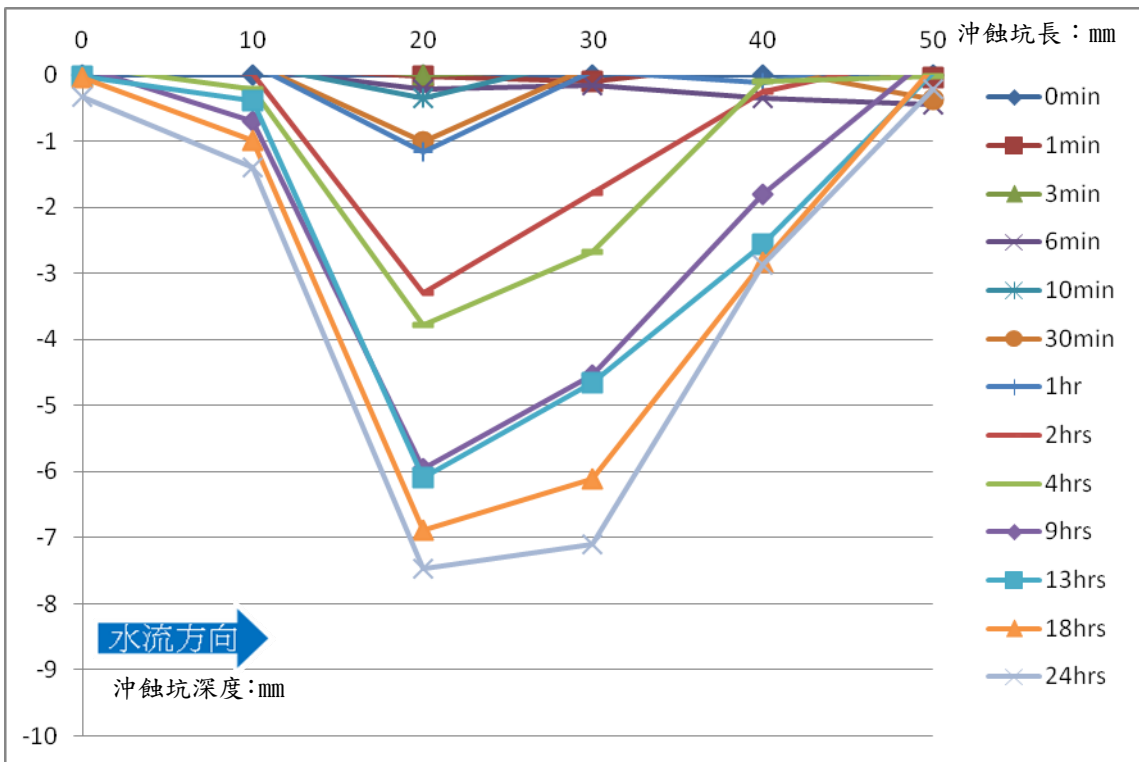


圖 109 射流角度 50 沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

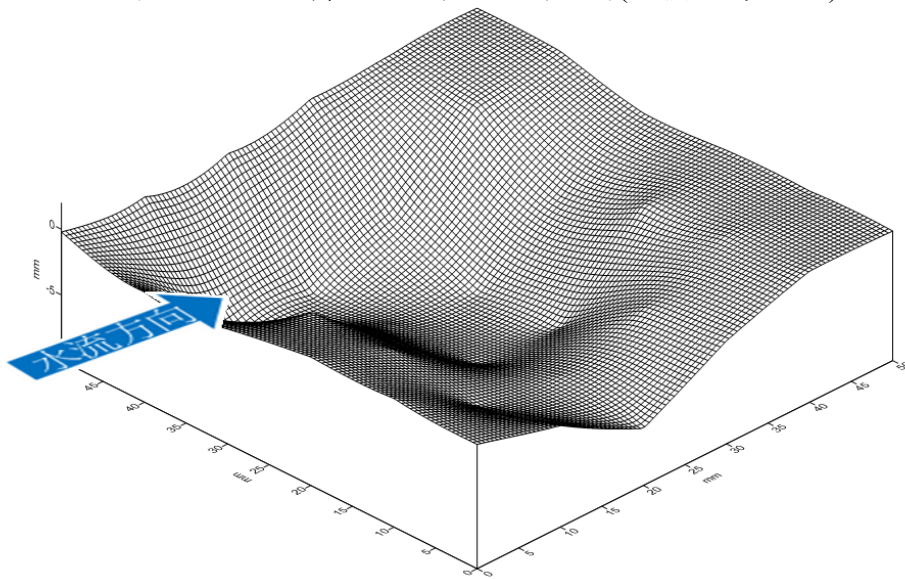


圖 110 射流角度 50 沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖

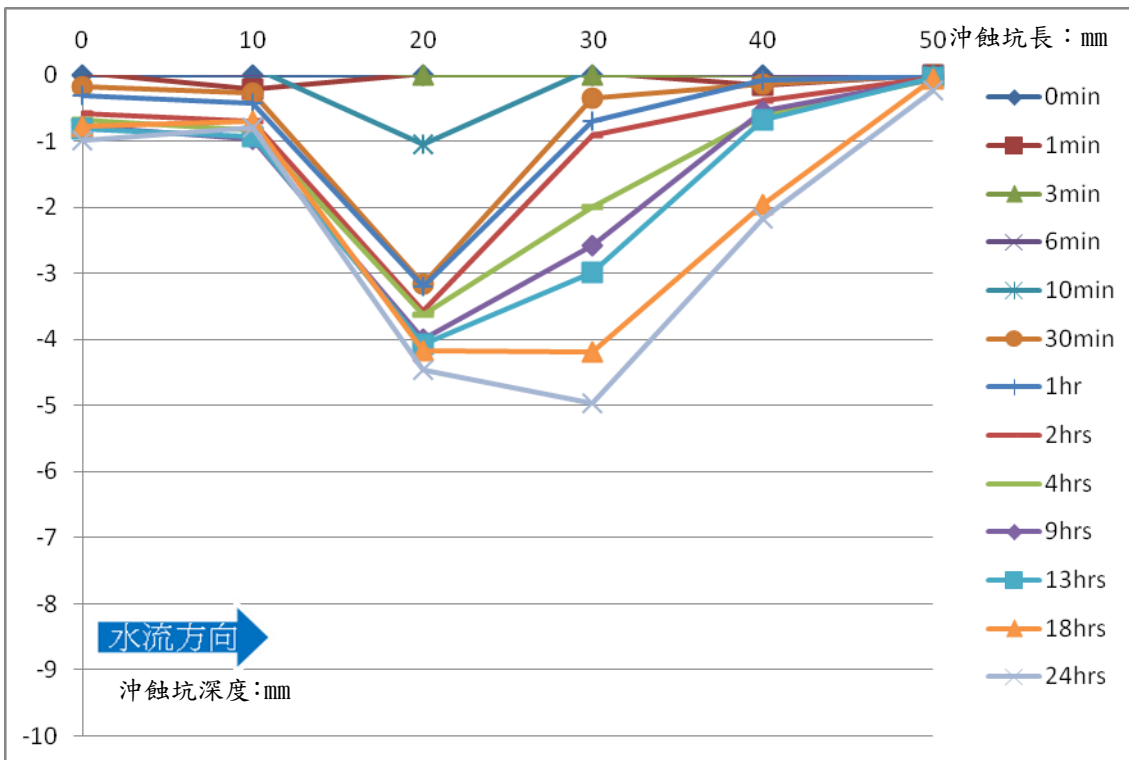


圖 111 射流角度 70 沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

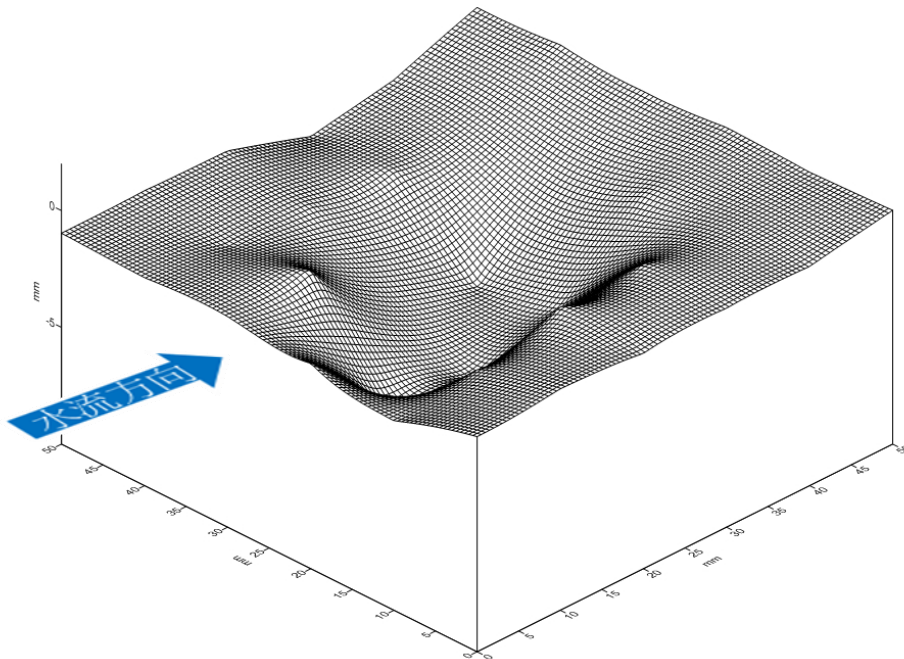


圖 112 射流角度 70 沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖

(6) 結果討論

如前節所述，每次實驗射流中心點存在不一致的問題，然每次射流擴散範圍差異不大，因此中心點不一致對累積沖蝕量影響不大。圖 113 為各角度試驗之總沖蝕量，可發現總流功較高者其沖蝕量較多，故可得知射流角度越小者所造成之沖蝕量也越多。

射流角度對於沖蝕坑深度影響，相較於沖蝕量，射流中心點偏移則直接影響了沖蝕坑深度變化。射流中心點單位面積流功最大者應有最深的沖蝕坑深度，圖 114 為沖蝕坑深度隨時間之變化，可觀察出射流角度 70 度雖有較大之射流中心點流功，卻無法形成最深沖蝕坑，即可能為射流中心點不固定而使能量無法在單一點做累積。

然而可將每個時段之沖刷坑假設為全新的平面，讓每個時段之射流中心點深度與前一個時段相減，可發現沖蝕時間越久沖蝕坑皆越深，但並沒有減緩或停止加深的趨勢，可能需更長的沖蝕時間才能使沖蝕坑穩定。

圖 115 為三組試驗沖蝕坑坡角隨時間變化圖，可觀察出角度較緩(30 度)的射流造成沖蝕坑兩邊坡角差異最大(21 度)，逆坡坡角遠大於順坡，射流角度 50 度則使兩邊坡角差距最小(0.65 度)，射流角度 70 度之順坡大於逆坡，兩坡度相差 6.74 度，然而，因為射流中心不集中所造成的誤差，沖蝕坑坡度難以辨認出明確的趨勢，需將射流點固定後再加以討論。

綜合以上結果，圖 116 為沖蝕率隨時間增加變化之對數圖，並將其回歸得 R^2 為 0.962 以上，可驗證不管任何角度下，時間增加與沖蝕率穩定遞減的趨勢有很大相關性。

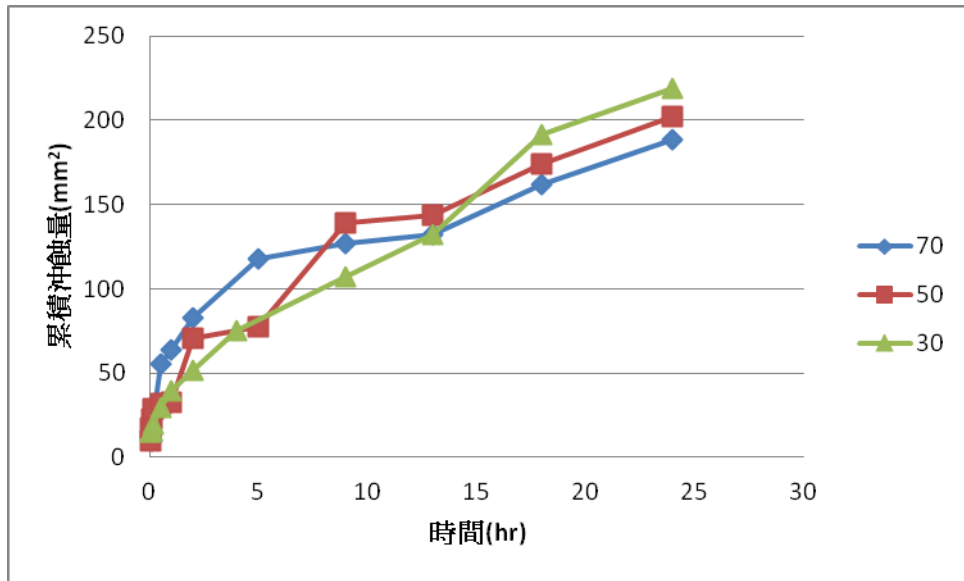


圖 113 時間-累積沖蝕量圖

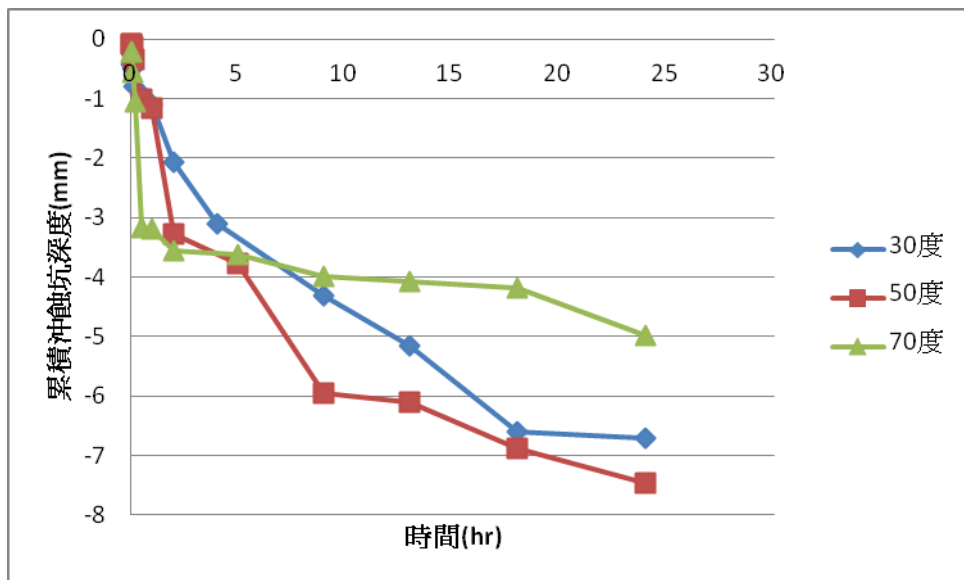


圖 114 時間-沖蝕坑深度圖

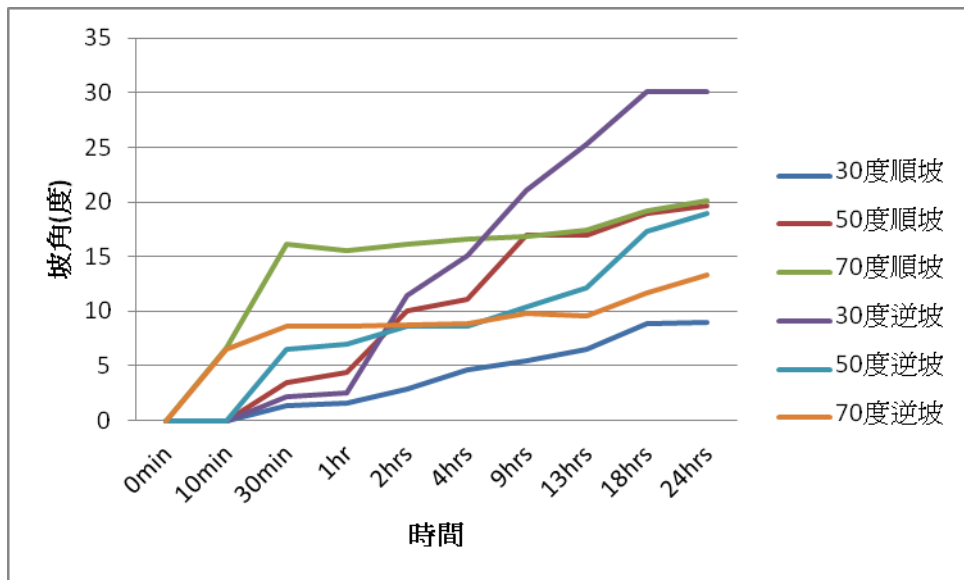


圖 115 時間-沖蝕坑坡角

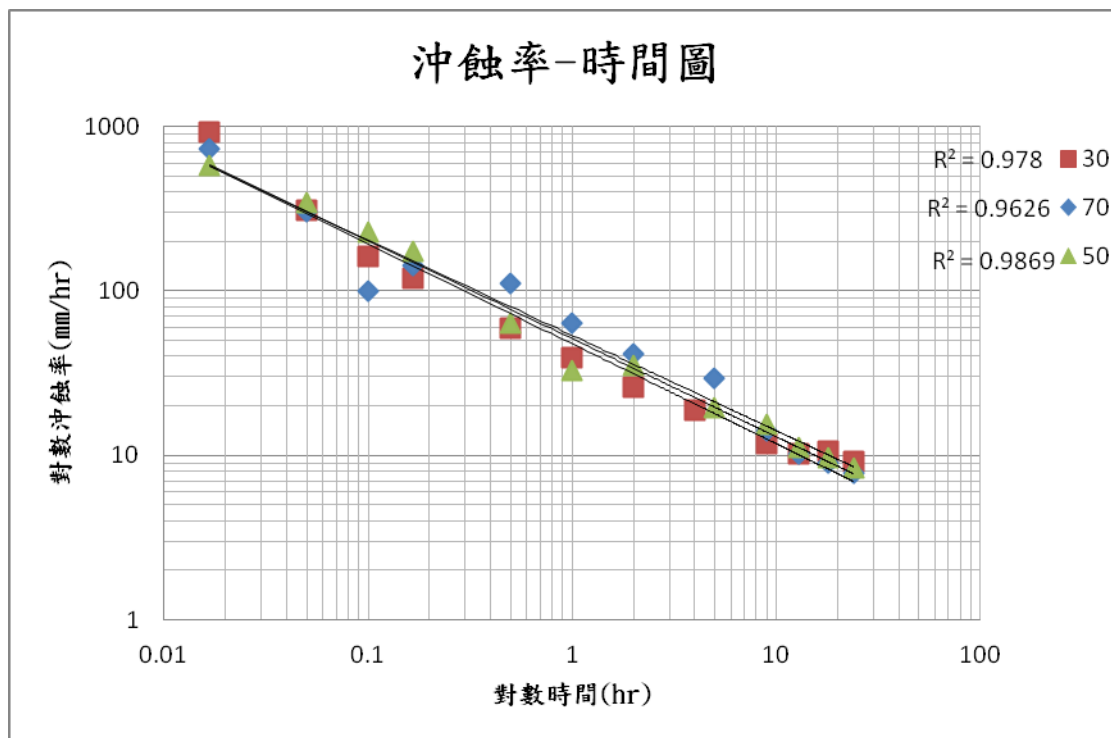


圖 116 時間-沖蝕率對數圖

(七)軟岩質岩質河床沖蝕模式（經驗式）建立

根據目前收集之國內外既有沖蝕文獻內容，大致以泥沙磨蝕(sediment abrasion)與水力沖蝕(hydraulic erosion)模式較具有沖蝕率定量上之適用性，但是否適合台灣軟岩沖蝕案例之應用性，仍須加以評估。茲將兩種沖蝕模式說明如下，最後並針對本計畫建立之流功門檻侵蝕模式進行說明。

1. 泥沙磨蝕模式

關於泥沙磨蝕概念，基本假設為軟岩表面之磨蝕為水流帶動之泥沙滾動、跳動所造成。Sklar and Dietrich (2004)修正 Foley (1980)之河床載磨蝕公式，將磨蝕率以顆粒衝擊影響之平均岩石體積、沖擊率及裸露區塊三種因子表示之，針對其磨蝕經驗公式進行敏感度分析，分

析供砂量(sediment supply)、無因次相對剪力、粒徑大小等與磨蝕率之變化趨勢，其泥砂磨蝕率公式如下：

$$E = \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s} \left(1 - \frac{q_s}{q_t} \right) \quad (21)$$

式中， E 為軟岩磨蝕率(m/s)， q_s 為單位河寬之供砂量(kg/m/s)， q_t 為單位河寬之輸砂能力(kg/m/s)， w_s 為泥砂顆粒之沖擊速度(m/s)， Y 為軟岩彈性模數(Pa)， k_v 為軟岩強度參數，須進行檢定(其值介於 $10^{12} \sim 10^{13}$)， σ_T 為軟岩張力強度(Pa)， L_s 為泥砂顆粒躍動長度(m)。

其中， $(1 - q_s/q_t)$ 項反映軟岩表面之覆蓋效應， q_s 、 q_t 為泥砂非平衡與平衡狀態下之輸砂量，前者為輸砂率(sediment transport rate)，後者為輸砂能力(sediment transport capacity)。若軟岩表面覆蓋泥砂顆粒，則由顆粒跳動所引起之磨蝕將減少；若輸砂量等於輸砂能力，則磨蝕停止。

2. 水力沖蝕模式

在水力沖蝕方面，基本概念為軟岩沖蝕率與水流作用力、底床剪應力、能量消散等因子相關。Annandale (2006) 曾試圖提出可定性描述岩塊抽離與河道材質沖蝕成因之沖蝕門檻模式，而後以水流沖蝕能量(erosive power of water)概念，配合明渠水力學常見之四種流況，包含溯源沖刷(headcuts)、水躍(hydraulic jumps)、底床坡度變化(changes in bed slope)、明渠流(open channel flow)，計算不同流況下之能量損失，利用 150 組現地觀測資料(其河道材質範圍自凝聚性粒狀材料到巨大之岩塊不等)，計算河道材質之沖蝕指數(Kirsten, 1982)，提出水流能量消散率 P (rate of energy dissipation) 與河道材質沖蝕指數 K_h (erodibility index) 具有函數關係， $P = f(K_h)$ 。

河床材質特性可以沖蝕指數定義之，由 Annandale (2006) 不同流況下之流功與沖蝕指數關係研究得知，河床材質可再分為粒狀材質(granular material)與岩盤材質，而造成河床沖蝕之臨界流功 P_{crit} (kW/m²) 與河床材質沖蝕指數 K_h 之關係式表示如下：

$$P_{crit} = \begin{cases} 0.48 K_h^{0.44} & , K_h \leq 0.1 \\ K_h^{0.75} & , K_h > 0.1 \end{cases} \quad (22)$$

Huang and Greimann (2008) 將臨界剪應力 τ_c 轉換為臨界流功 P_{crit} 之函數，表示為：

$$\tau_c = \left[\frac{P_{crit} \sqrt{\rho} \left(\frac{k_s}{R} \right)^{\frac{1}{6}}}{7.66} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (23)$$

其中， ρ 為流體密度(kg/m³)； R 為水力半徑(m)； k_s 為粗糙高度(roughness height)； τ_c 為河床材質臨界剪應力(N/m²)。綜合上述，岩床沖蝕速率可結合水流臨界流功、平均流速、剪應力等物理參數，用一般沖蝕率經驗公式形式表示如下：

$$E = K_p U \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \quad (24)$$

式中， E 為河床沖蝕率(m/s)； K_p 為無因次沖蝕係數，需要配合試驗或現場資料進行檢定； U 為水深平均之水流流速(m/s)； τ 為作用於河床之剪應力(N/m²)。

3. 流功沖蝕模式

本計畫軟岩質河床沖蝕模式(經驗式)建立工作採用 Whipple(2004) 提出之理論作為發展基礎，Whipple(2004) 歸納以流功(stream power)為基礎的沖蝕率模式如以下之一般型式：

$$E = K_r K_c K_{\tau} f(q_s) A^m S^n \quad (25)$$

其中 E 為沖蝕率

K_r 為沖蝕阻抗(岩性、水力糙度、河川寬度等)

K_c 為氣候條件

$K_{\tau cr}$ 為一門檻值($0 \leq K_{\tau cr} \leq 1$)，為水文事件中超越臨界剪應力的部分

$f(q_s)$ 為河床載的影響(泥沙通量、粒徑分佈等)

A 為流域面積

S 為河道坡降

基於上述一般型式，本計畫模式發展上假設氣候條件(K_c)在大安溪 10 年左右的沖蝕過程中並無明顯變化，可加以忽略。侵蝕阻抗的部分(K_r)與沖蝕門檻值的部分($K_{\tau cr}$)採用 Annandale(1995, 2006)提出之岩石抗沖蝕指數(K_h)與發生沖蝕之流功門檻值(P_{cr})為基礎，採用此概念模式之優點為可將複雜不均質且異向性之岩體性質，透過詳細的調查加以評分，簡化歸納為容易進入數模模擬之條件。流域面積(A)部分則以與流域面積成正向關係之單寬流量(q)來代表，與河道坡降(S)及水單位重可轉化為單位流功之型式。本計畫考慮水力作用引致的塊體抽離機制及顆粒彈跳磨蝕機制，後者由 Sklar & Dietrich(2004)發展之模式(saltation-abrasion model)，基於物理模型的發展而來，雖未考慮懸浮載的效應，但整體言尚屬合理，本計畫將加以直接引用；前者則為本計畫模式建立重點，為避免模式初期發展上過於複雜，模式中暫不納入河床載的影響($f(q_s)$)。

綜合上述，本計畫以流功為基礎提出下式沖蝕率公式：

$$E = K_s U (P/P_{cr} - 1)^\alpha \quad (26)$$

其中 E 為沖蝕率(m/s)

K_s 為流功侵蝕係數，經由沖蝕資料率定而來(無因次)

U 為流速(m/s)

P 為單位面積流功(W/m^2)

P_{cr} 為岩床發生侵蝕的門檻值，由 Annandale(1995, 2006)提出之岩石抗沖蝕指數(K_h)與發生沖蝕之流功門檻值(P_{cr})關係而來，定義為 K_h^β (W/m^2)

α 為大於沖蝕門檻值能量之冪次方，由沖蝕資料率定而來(無因次)

上述三種沖蝕模式均已建置於河道數模中，並針對八掌溪河道為例進行模擬，模擬成果說明於總計畫內容中。

六、結論與建議

本計畫主要目的在於建立軟岩河床的沖蝕機制(沖蝕演繹)及軟弱岩石河床抗沖蝕能力指標、修正或建立軟弱岩石河床沖蝕經驗模式、建立實驗室沖蝕試驗，茲提出以下結論：

1. 利用歷史航照製作數值高程地形及正射影像，對瞭解各河川岩床沖蝕及演變有極大助益。計畫中彙整大甲溪、濁水溪與八掌溪之主要高沖蝕軟岩河段沖蝕調查成果，歸納各河段主要沖蝕機制；並配合各河川歷史資料之研判，綜合說明各河川之沖蝕演繹部
2. 本計畫針對軟岩質河床進行室內沖蝕試驗設計建置，本多功能室內沖蝕試驗設備已可進行水平磨蝕試驗及可變角度直接沖刷試驗，水平磨蝕試驗結果穩定良好，量測沖刷量結果精度達 0.001mm，經由試驗可獲得各場址軟岩磨蝕特性的差異；可變角度直接沖刷試驗之初步試驗雖遭遇停機量測後沖擊點變化之影響，但仍獲得良好的沖蝕坑發展與變化趨勢。
3. 針對軟岩質河床沖蝕模式建立，本研究回顧既有礫石彈跳模式及水力沖蝕模式，並提出流功沖蝕模式，將上述三種沖蝕模式提供建置於河道數模中，並針對八掌溪河道為例進行模擬。

提出兩點建議如下：

1. 多功能室內沖蝕試驗儀器已經設計建置完成，採用之設備可加入細砂之含砂水流或

不同粒徑之級配料，模擬河道流況中因顆粒磨蝕或彈跳撞擊造成的局部沖刷，未來並可就含砂水流進行測試；岩塊抽離機制為岩床沖蝕之重要機制，未來應持續進行設計發展，並就渠道試驗進行規劃。

2. 本計畫中已經完整建置礫石彈跳模式、水力沖蝕模式、流功沖蝕模式於河道數模中，並實際加以模擬驗證，成果趨勢良好；未來將針對遷急點倒退機制進行研發。

七、參考文獻

1. Annandale, G.W., 1995, "Erodibility", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.33, No.4, pp.471-494.
2. Barnes, H. L., 1956, "Cavitation as a geological agent," *American Journal of Science*, v. 254, p. 493-505.
3. Bitter, J.G.A., 1963a, "A study of erosion phenomenon, Part I", *Wear*, Vol.6, pp.5-21.
4. Bitter, J.G.A., 1963b, "A study of erosion phenomenon, Part II", *Wear*, Vol.6, pp.169-190.
5. Briaud, J.L., F.C.K. Ting, H.C. Chen; R. Gudavalli, S. Perugu, and G. Wei, 1999, "SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.4, pp.237-246.
6. Briaud, J.L., H.C. Chen, K.W. Kwak, S. W. Han, and F.C.K. Ting, 2001, "Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No.2, p.114-125.
7. Engle, P.A., 1978, "Impact Wear of Materials," Elsevier Sci., New York.
8. Foley, M.G., 1980, "Bed-rock incision by streams: Summary", *Geological Society of American Bulletin*, Part1, Vol.91, pp.577-578.
9. Gilbert, G.K., 1877, "Report on the geology of the Henry Mountains", *Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region*, 160p. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
10. Graham, J.R., Hamilton, W.S., Hendrickson, J.G., Kaden, R.A., McDonald, J.E., Noble, G.E., Schrader, E.K., 1987, "Erosion of concrete in hydraulic structure," *ACI Materials J.* 3/4, p 136-157.
11. Howard, A.D., and G. Kerby, 1983, "Channel changes in badlands", *Geological Society of American Bulletin*, Vol.94, pp.739-752.
12. Lai, T.G. and Greimann, B.P. 2008, "Rock Erosion Modeling on Selected Alluvium River in Taiwan," Technical Report No. SRE-2008-08, USBR.
13. Munson & Young & Okiishi. "Head Loss in Pipe Systems Laminar Flow and Introduction to Turbulent Flow ME 322 Lecture Slides", Winter 2007.
14. Nakato Tatsuaki, 2002, "Erodibility Tests of Shale-Rock Samples Taken from Bridge Pier Construction Site on the Mississippi River," *Scour of Foundations, Proceedings of ICSF-1*, p. 528-539, Nov. 17-20, 2002, Texas A&M University College Station, Texas, USA.
15. Robinson, K.M., G.J. Hanson, K.R. Cook, K.C. Kadavy, 2001, "Erosion of fractured materials," *American Society of Agricultural Engineers*, V.44, No.4, p.819-823.
16. Seidl, M.A., and W.E. Dietrich, 1992, "The Problem of Channel Erosion into Bedrock", in *Geomorphology: Critical Concept in Geography*, Vol.1, *Fluvial Geomorphology*, pp.316-339, edited by Olav Slaymaker, 2004, Routledge, London.
17. Shepherd, R.G., and S.A. Schumn, 1974, "Experimental study of river incision", *Geological Society of American Bulletin*, Vol.85, pp.257-268.
18. Sklar, L., and W.E. Dietrich, 2001, "Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock", *Geology*, Vol.29, No.12, pp.1087-1090.
19. Sklar, L., and W.E. Dietrich, 2004, "A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load", *Water Resources Research*, Vol.40, doi:10.1029/2003WR002496.
20. Sklar, L., and W.E. Dietrich, 2006, "The role of sediment in controlling steady-state bedrock channel slope: Implications of the salvation-abrasion incision model", *Geomorphology*, Vol. 82, pp.58-83.

21. Whipple, K.X., G.S. Hancock, R.S. Anderson, 2000, "River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation," GSA Bulletin; V. 112; No. 3; p.490-503.
22. Wohl, E.E. and H. Ikeda, 1997, "Experimental simulation of channel incision into a cohesive substrate at varying gradient", Vol.25, No.4, pp.295-298.
23. 林文凱(2008),「軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例」, 國立交通大學土木工程系碩士論文。
24. 朱佳仁, 2003,「環境流體力學」, 科技圖書股份有限公司出版, 臺北。
25. 郭炳宏(2010),「多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立」, 國立交通大學土木工程系碩士論文。
26. 吳佳諺(2011),「軟弱岩石水平磨蝕率及磨蝕行為」, 國立交通大學土木工程系碩士論文。
27. 吳禹霆(2012),「室內軟弱岩石射流沖刷設備建立」, 國立交通大學土木工程系碩士論文。
28. 經濟部中央地質調查所(1999),「九二一地震地質調查報告」。
29. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2008),「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制探討」。
30. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2009),「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」。
31. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2009),「設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究(1/2)」。
32. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2010),「設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究(2/2)」。
33. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2011),「軟岩質河床沖蝕模式之建立(1/3)」

八、計畫成果自評

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

本研究經三年的執行，除室內沖蝕試驗，因各項實驗時間甚長，且儀器尺寸限制較難進行塊體抽離試驗，而將之放棄外，皆依原計畫書內容執行，亦達預期目標。

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

本研究已撰寫”A case of rapid rock riverbed incision in a coseismic uplift reach and its implications”投稿至 Geomorphology, 並已完成修正稿，預期近期內將被接受及刊登。目前正進行多篇論文準備投稿至相關國際期刊，包括八掌溪的演變對工程的影響、沖蝕率模式、水平磨蝕試驗、直接射流試驗等，相信一、二年後將會有六篇以上的國際期刊論文產出。

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以500字為限）

軟弱岩石河道的沖蝕，過去一直未被國內工程界所正視，因為本計劃的執行及成果，水利工程界已正視此問題，以為規劃及管理參考。未來若能進一步由後續研究結果提出治理策略，將對軟弱岩石河道的沖蝕現象引致的工程破壞有所因應及預防。

國科會補助專題研究計畫項下出席國際學術會議心得報告

日期：100

年 5 月 26 日

計畫編號	NSC 982221E009152MY3		
計畫名稱	岩質河床沖蝕特性及其對邊坡及河道穩定的影響— 子計畫二：軟岩質河床的沖蝕調查、試驗及沖蝕率模式建立		
出國人員姓名	廖志中、鄭孟雄	服務機構及職稱	國立交通大學土木系
會議時間	99年11月7日 至 99年11月10日	會議地點	San Francisco, California
會議名稱	(中文)第五屆侵蝕與沖刷國際研討會 (英文) 5th International Conference on Scour and Erosion		
發表論文題目	(中文)攔河堰下游軟岩之沖刷機制 (英文) Soft-rock scouring processes downstream of weirs		

一、參加會議經過

第五屆侵蝕與沖刷國際研討會在舊金山舉行，本次議程共有四天。第一天(11/7)的議程早上七點半開始報到，接著有兩場短期課程(short course)，分別為「岩石沖刷」(scour of rock)、「HEC-23 的不同之處」(The new HEC-23: what's in it for you?)，本日的議程在下午三點半結束。

第二天(11/8)早上八點舉行正式的開幕式(Opening Plenary Session)，由 Dr. Michael Heibaum 及 Peter F. Lagasse 兩位學者共同主持，會議題目為「Partially Grouted Riprap-Translating German Technology into US Practice/NCHRP Report 593 and 2009 HEC-23」，主講者 Heibaum 是一位德國學者，主要講述一種創新工法「部分灌漿」應用於抑止河道沖刷的效果，以及實際上在美國施行之案例。接著是三場分場議程(Concurrent Sessions)，本次會議的主題包含橋墩沖刷(bridge scour)、土壤沖刷(erosion of soils)、壩與堤岸沖刷(scour and erosion of dams and levees)、近岸平台與水下管路沖刷(scour of offshore platforms and underwater pipelines)、數值模擬(numerical modeling)、物理模型試驗(physical

model test)、岩石沖刷(rock scour)、案例管理與探討(case histories, management, and field studies)、監測(monitoring)、河道穩定及岸壁沖刷的治理對策(countermeasures, stream stability erosion of slopes)、美國聯邦公路局設計標準(FHWA equations and design standards)。下午的議程主要是廠商博覽會，晚上是招待會。
博士生鄭孟雄於於第二天上午於岩石沖刷分場議程中簡報發表論文，題目為”Soft-rock scouring processes downstream of weirs”。



照片 1 發表論文之情形

第三天(11/9)早上八點半是全體會議(Plenary Session)，由 Bruce Melville 與 Richard Whitehouse 主持，講述有關評估橋墩局部沖刷(Estimation of Local Scour at Bridge Piers)以及近岸沖刷(Scour at Offshore Structures)的議題。下午是三場分場議程，講題如前所述。

第四天(11/10)早上八點半是全體會議(Plenary Session)，由 Jean-Louis Briaud 及 Erik Bollaert 主持，講題是利用觀測法評估橋樑或堤岸未來可能的沖刷深度(Observational Method for Estimating Future Scour Depth at Existing Bridges and Levees)、岩石沖刷物理學：氣泡的力量(Physics of Rock Scour: The Power of the Bubble)。下午是三場分場議程，接著舉行全體閉幕會議，宣告後年的舉辦地點為巴黎。

二、與會心得

本次會議讓筆者見識各國因為氣候、地質、環境等不同，所面臨的各種有關沖刷的議題，以及各國所採取的對策。其中有兩位學者的演講特別讓我注意，一是 Dr. Michael Heibaum 學者所提出的部分灌漿工法。德國專家 Heibaum 主張「部分灌漿拋石護層」(Partial Grouted Riprap, PGR) 新觀念，在岩盤表面鋪設拋石並點狀的灌漿，保留約 30~40% 的孔隙維持拋石護層的滲透性。從土壤力學的觀點，較高的滲透性可以快速消散水壓波動所引起的超額孔隙水壓，避免如同傳統護坦因為水流進入與岩盤介面，形成強大的上舉力無法消散，造成整片剝離的現象，且 PGR 相較於全面灌漿具柔性，容許變位。並藉由 PGR 的概念串連拋石，讓小塊拋石組合成拋石層，或許可以解決現有放淤護層容易被水流沖走的問題。

另外一位是 Erik Bollaert 學者目前正在研究的水柱沖刷引致向後方基礎底部的議題，目前台灣有很多攔河堰面臨這種災害，造成基礎不穩定有可能造成危險。國內亦有許多學者或政府機關探討此類議題，但是 Erik Bollaert 所考慮的作用力條件相對周全，值得學習。

三、建議

本次會議我看到很多國家年輕、資深的學者齊聚一堂，許多創新的工法、創新的量測設備，同時在一個場地做介紹。希望台灣也有這樣的機會可以讓政府研究機關、學校學術界、業界一同集思廣益，討論有關沖刷的議題。也希望國科會可以繼續補助出席國際會議的費用，畢竟很多資訊與資源國內仍處於萌芽的階段，如果可以將更多新的構思帶回台灣發揚光大也是相當大的貢獻。

四、攜回資料名稱及內容

研討會論文集(Proceedings of the Fifth International Conference on Scour and Erosion)，內有本次會議所有投稿的論文，論文集封面與筆者投稿論文如附錄 1。

附錄 1 投稿論文

GEOTECHNICAL SPECIAL PUBLICATION NO. 210

SCOUR AND EROSION

PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE
ON SCOUR AND EROSION (ICSE-5)

November 7–10, 2010
San Francisco, California, USA

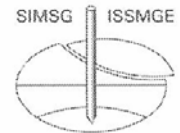
SPONSORED BY
The Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers

The Environmental and Water Resources Institute
of the American Society of Civil Engineers

International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

EDITED BY
Susan E. Burns
Shobha K. Bhatia
Catherine M. C. Avila
Beatrice E. Hunt

ASCE



Published by the American Society of Civil Engineers

Soft-Rock Scouring Processes Downstream of Weirs

Cheng, M.-H.^{1,2}, Liao, J.-J.¹, Pan, Y.-W.¹,
Li, G.-W.¹, Huang, M.-W.¹, Lo, W.-H.¹, Hsu, S.-T.²

¹Department of Civil Engineering, National Chiao-Tung University, 1001 Ta-Hsueh Rd., Hsinchu 30050, Taiwan; email: jjliao@mail.nctu.edu.tw

²Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 1340, Jhong-Jheng Rd., Wufong Township, Taichung County 413, Taiwan; email: chengms@wrap.gov.tw

ABSTRACT

Diversion weirs are typically constructed to elevate river water levels and thereby increase water supplies. Most riverbeds in the western foothills of Taiwan are composed of soft sedimentary rocks covered with an armor layer of varying thickness. Due to the low rock strength and head fall caused by weirs, rapid scouring downstream of the weir often occurs once the armor layer is worn away. To estimate scour depth and mitigate its damage to weir foundations, scouring processes must be identified correctly. Because of different mechanical behaviors and the water-jet conditions, scouring processes downstream of a weir on soft rock may not be that same as those assumed by existing models. Analytical results from a series of studies of scouring downstream of weirs on soft rock indicate that the shape of a scour hole on soft rock differs markedly from that of a scour hole on hard rock. This study identified three basic scouring processes downstream of weirs, namely, (1) plucking, (2) uniform incision, and (3) trenching incision. The suitability of existing approaches for calculating the depth of a scour hole on soft rock were also assessed.

Keywords: scouring processes; soft rock; weir; scour hole

INTRODUCTION

Diversion weirs were typically constructed across rivers in Taiwan to elevate the river level to increase water supply. These weirs alter the nearby river slope and result in loss of the armor layer; the rock mass downstream of the weirs is then exposed. Also, the extra flow energy due to the head fall enhances rock cracking or breakage, and a scour hole may then develop gradually. Eventually, scouring may reach an extent that weir stability is endangered.

The common erosion mechanisms in a rock bed can be classified as plucking, abrasion, and cavitation. The major mechanism depends on substrate lithology, joint spacing, fractures, and bedding planes. Plucking is the dominant scouring mechanism when rocks are well jointed on a sub-meter scale. Abrasion is the result of wearing by a suspended load or saltating bedload. Cavitation occurs when a water environment has a high-speed vortex (Whipple 2000).

Many empirical or semi-empirical formulae for estimating the depth of a scour hole in a granular riverbed were developed using experimental data in the laboratory or field (e.g., Schoklitsch, 1932). The parameters used in those formulae may include grain size, flow rate, flow velocity, flow impact angle, and fall height. Among these parameters, grain size is the only material parameter that characterizes the geo-material of a riverbed.

To estimate the depth of scour holes in rocks, many studies directly adopted approaches used for granular materials. The bed material is simply taken as a cohesionless granular material when estimating the depth of a scour hole in a rock bed. Such approaches assume the rock mass is broken and all rock blocks are fully separated. Similar to cases for granular materials, the shape of a scour hole downstream is a slope with a constant angle related to the friction angle of the material. The depth of a scour hole can be calculated using the critical incipient shear stress law or the principle of conservation (Fahlbusch, 1994; Bormann, 1991; Liu, 2005). However, such approaches cannot closely predict the scouring potential of rock materials or rock masses.

Evaluating the scouring process for a rock mass is more complex than that for granular materials. Annandale developed a geo-mechanical index method; an erodibility index was utilized to quantify relative rock resistance to scouring (Annandale 1995). The erodibility index accounts for such factors as unconfined compressive strength, block size, shear strength of discontinuity, and the orientation of the discontinuities relative to flow. With the correlation between threshold stream power and the erodibility index, one can evaluate scouring susceptibility for a specific site as long as stream power at that site can be calculated from unit flow rate and fall height. Annandale (Annandale 2006) also utilized this method to estimate ultimate scour depth. With height of the tail water as constant, erosive power decreases as water depth increases because of energy dissipation. The erodibility index may vary (often increases) as water depth increases. Consequently, at a certain

depth, erosive power cannot overcome rock resistance to erosion; thus, scour depth can be estimated accordingly.

The fluctuating dynamic jet pressure and its propagation into rock joints have been discussed since the 1960s. Bollaert and Schleiss (2003) summarized the physical-mechanical processes of scouring as the following modules: (1) aerated jet impact; (2) jet diffusion in a plunge pool; (3) fluctuating dynamic pressures at the water-rock interface; (4) propagation of these pressures into underlying rock joints and hydraulic fracturing of the rock; (5) dynamic uplift of single rock blocks; and, (6) downstream mounding of material. They adopted two-dimensional jet diffusion theory to estimate the fluctuating dynamic pressure on rock surfaces, and the ratio of pressure amplification in joints. Scour depth can be estimated based on the force equilibrium of rock blocks. They used this approach to estimate scour depth and apron concrete thickness in plunge pools, where bedrocks are hard and jointed (Bollaert 2003).

Generally, most approaches for estimating scour depth were developed for plunge pools downstream of dams. In this case, the magnitude of jet energy depends on dam height, and energy dissipation follows two-dimensional diffusion theory. However, a diversion weir is typically submerged during flooding because the fall height of weirs is limited. Compared with high dams, the jet impinges a relatively small angle incline relative to the horizontal plane. The energy dissipation mechanism in front of a diversion weir may differ from that in the case of a jet falling from a spillway. Lin (2001) conducted a series of flume tests and characterized the formation of a scour hole caused by a low hydraulic jump. The depth and shape of the developed scour hole depend on flow conditions and tail water depth.

Most riverbeds in the western foothills of Taiwan are composed of soft sedimentary rocks, such as sandstone, siltstone, and shale, and covered with an armor layer of varying thickness. Due to low rock strength and head fall caused by the weirs, rapid scouring downstream of weirs is often observed once the armor layer is worn away. To evaluate weir stability, the shape and depth of scour holes must be identified. The scouring process assumed by existing approaches for estimating the depth of scour holes may not be applicable to weirs in Taiwan. Thus, field geology and scour investigations were conducted at eight sites of diversion weirs located in the western foothills of Taiwan. Based on collected data, three typical categories of

the scouring process downstream of weirs were identified. The suitability of existing approaches for calculating scour-hole depth on soft rock was also evaluated.

SCOURING PROCESSES DOWNSTREAM OF WEIRS

Rivers in Taiwan are typically short and steep. The slope of a river channel generally exceeds 1% in mountainous areas and 0.2–0.5% on plains. Taiwan receives on average roughly 2,500 mm of rainfall annually. Heavy rainfall for more than 1000mm/hour can occur during typhoons in summer. The runoff amount is also very high due to steep slopes and high rainfall intensity. For example, the watershed of the Chi-Chi Weir is about 2,034 km², and maximum flow reaches 20,500 m³/sec for a 100-year return period. As flow passes the weir, unit flow rate can reach 160 m²/sec, and maximum flow velocity can be as high as 19 m/sec.

The western foothills of Taiwan contain relatively young rock formations, which have low resistance to weathering and erosion by water. Due to the high rainfall intensity, steep slope, and weak geology, the degree of weathering and erosion in watersheds in Taiwan is also very high. Moreover, landslides and debris flows caused by earthquakes and typhoons often occur, contributing to sedimentation of rivers. Monitoring data from the Water Resources Agency, Taiwan, show that the total sediment transport is 3.23 billion tons/year, and the unit sediment transport in many rivers can reach 10,600 tons/km², significantly higher than that of most rivers in other countries. These statistical data are also indicative of high river erosion potential in Taiwan.

To investigate scouring processes downstream of weirs, eight typical weirs in the western foothills of Taiwan were studied. Table 1 summarizes the basic data of these weirs. Except for the gravel armor at the Dong-Kou Weir, outcrop rocks at the other seven weir sites are sedimentary rocks. The armor layers at these weirs no longer exist, except for at the Dong-Kou Weir, where thick gravel deposits cover the underlying rock. At the Yi-Shing Weir, bedding planes and two sets of joints are well developed. All outcrops at other weir sites have clear bedding planes without clear joints. Based on the uniaxial compression strength of rock materials, the outcrop rock at the Yi-Shing Weir site can be classified as hard rock; all outcrop rocks at other weir sites are soft rocks. The strike of the rock strata with respect to the flow direction is roughly divided into the following two categories: (1) parallel, which is when the angle between the strike and flow is <45°; and, (2) perpendicular, which

when the angle between the strike and flow is $>45^\circ$. Flow conditions around scour holes observed in the field are similar to those observed by Lin (2001) in flume tests.

Based on field geology data, site investigations, and erosion patterns of the eight weirs, three categories of scouring processes downstream of weirs were identified, namely, (1) plucking, (2) uniform incision, and (3) trenching incision. These categories are described as follows.

Table 1. Basic data of the studied weirs

Weir Name	Starting time of operation	Height (m)	Length (m)	Geomaterial*	UCS** (MPa)	Orientation.
Yi-Sing	1973	25.5	100	Ss	70-100	parallel
Hou-Chun	1983	3	556.3	Ss, Sh	10-20	parallel
Shih-kang	1977	21.4	240	Ss, Sh	2-12	parallel
Chi-Chi	2001	15	352.5	Ss.&Sh	5-15	parallel
Long-Quan	1982	3	80	Sh	2-30	perpendicular
Chu-Kou	1999	1.5	72	St with sh	5-10	perpendicular
Gia-Sian	1999	7	120	Sh	10-25	perpendicular
Dong-Kou	1973	5	220.8	Gravel	-	-

*Ss = sandstone; Sh = shale; Ss.&Sh = alternating layers of sandstone and shale.;
St: Siltstone.

**UCS: Uniaxial compression strength

(1) Plucking:

The plucking scouring process was observed at the Yi-Sing Weir. This weir is constructed on meta-sandstone with uniaxial compression strength of 70–100 MPa. The outcrop rock has clear bedding planes and two sets of joints. Rock blocks formed by discontinuities exist at this site. Due to the high strength of the sandstone, the rock has high resistance to abrasion. Therefore, plucking of jointed rocks dominates scouring processes. A plunging pool formed due to falling water and blocky rock conditions (Figure 1(a)). Figure 1(b) presents the scouring processes and the shape of the scour hole. This process is similar to that discussed by Bollaert and Schleiss (2003). However, the scour hole appears asymmetrical; the slope in the upstream is gentler than that in the downstream. This differs markedly from that for dams built on hard rocks. Site inspection indicates that scouring depth under the weir foundation was about 7 m. Engineering countermeasures was initiated to mitigate this instability.

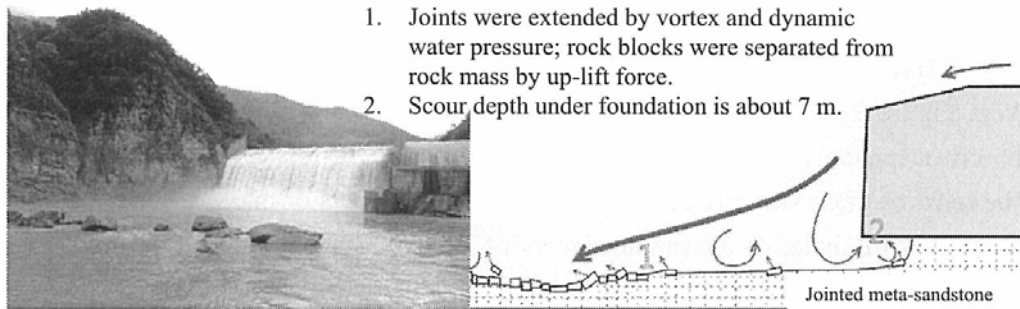


Figure 1. (a) Down-stream view of the Yi-Sing weir: with rock blocks mounding at Down-stream of scour hole. (b) Illustration of the plucking type of scouring processes.

(2) Uniform Incision:

The uniform incision scouring process exists at the Long-Quan Weir, Chu-Kou Weir, and Gia-Sian Weir. The rocks at these sites are composed of massive soft sandstone, massive shale, or massive siltstone with thin shale layers. The flow direction is perpendicular to the strike of beddings. Due to the low rock strength and very few joints, abrasion of massive rocks dominates the scouring process. The strength of the soft rock is isotropic; thus, rock abrasion by the flow vortex induced by a jet remains uniform and a circular scour hole is gradually formed. Since the jet impinges a relatively small incline angle relative to the horizontal plane, the slope of scour hole in the upstream is gentler than that in the downstream, which is similar to the case of category 1 (*i.e.*, plucking). If a flow contains large-grain sediments, the scouring rate downstream of weirs increases. Fractures may also develop on rock surfaces when granular sediment impacts rocks. Small-scale plucking scouring may then occur. Figure 2 shows a photograph of the area downstream of the Long-Quan Weir, illustrating the uniform incision scouring process.

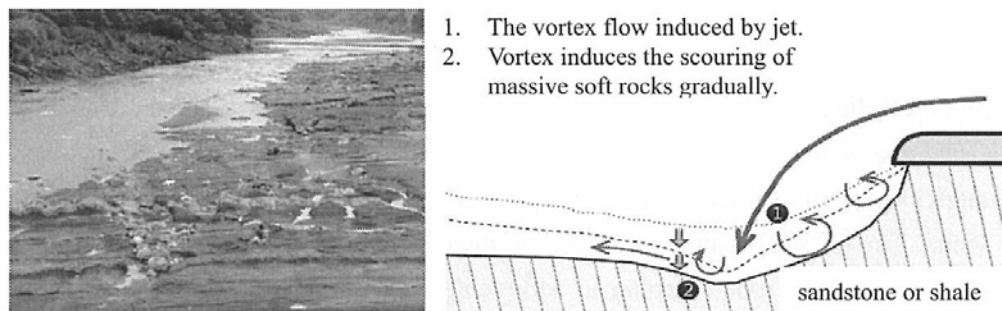


Figure 2. (a) Down-stream view to the Long-Quan weir: uniform scouring process. (b) Illustration of the uniform incision type of scouring process.

(3) Trenching Incision:

Trenching incision exists at the Hou-Chun Weir, Shih-kang Weir, and Chi-Chi Weir. Figure 3 shows a photograph downstream of the Hou-Chun Weir, illustrating the cross section perpendicular to flow of the trenching incision scouring process. The rocks at these sites are composed of alternating layers of massive sandstone and thin layers of shale, or alternating layers of massive shale and massive sandstone. The flow direction is parallel to the strike of beddings. Both sandstone and shale are soft rocks. Since the strength and erodibility of alternating thin layers of shale and sandstone is lower than that of massive sandstone, differential abrasion occurs at different layers. The alternating thin layers with low abrasion resistance are eroded faster and flutes at weak layers will develop along the flow direction. Subsequently, fractures developed in massive sandstone due to pressure relief. If rock blocks impact flutes via vortex or flow, the scouring rate increases. Over the long term, a trench along the strike developed.

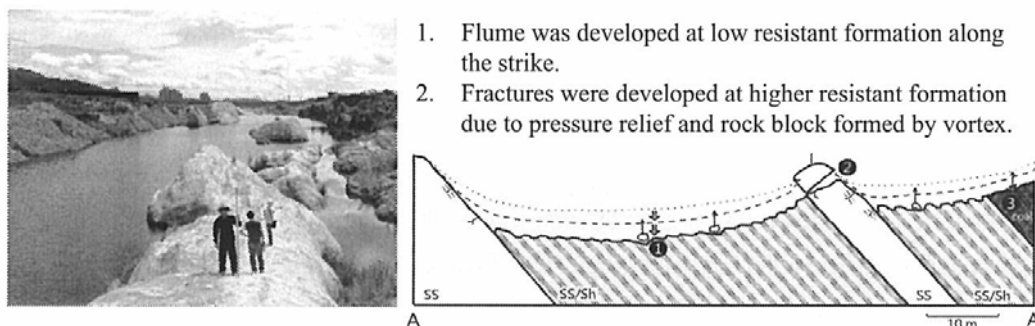


Figure 3. (a)Down-stream view of the Hou-Chun weir: trench was developed along the strike. (b) Illustration of the cross section perpendicular to flow: the Trenching incision type of scouring process.

EVALUATION OF SCOUR-HOLE DEPTH

The depths of scour holes evaluated by the methods developed by Annandale, *et al.* and Bollaert and Schleiss were compared with observed data for the Yi-Sin and Chi-Chi weirs to evaluate the suitability of these methods. The two-dimensional numerical program CCHE2D was utilized to calculate hydraulic conditions adjacent to weirs. The CCHE2D model is based on the efficient element method and used the implicit scheme by time stepping to solve continuity equations in each grid (WRA, 2009). Flow rates were chosen for different returning periods. Based on erodibility indices evaluated in field, scour depths at the Chi-Chi and Yi-Sin weirs were

calculated using the Annandale headcut model and the model developed by Bollaert and Schleiss (2003).

For a known erodibility index, erosion resistance in terms of stream power can be estimated using the Annandale headcut model. Compared with calculated erosive stream power for various elevations of rock beds, one can determine a scour depth at which erosive power is less than erosion resistance in terms of stream power. Using the model developed by Bollaert and Schleiss (2003), scour depth can be estimated based on force equilibrium of rock blocks; the size of a rock block that can be removed by an uplift force can be evaluated, such that scour-hole depth can be estimated. The erodibility index at the Chi-Chi Weir and Yi-Sing Weir was about 600 and 2000, respectively.

Based on field observations, notable rock scouring occurred at the Chi-Chi Weir during Typhoon Kalmaegi in 2008, which discharged $10,900 \text{ m}^3/\text{s}$ of water flow, corresponding to a return period exceeding 2 years. In this event, a 3-meter scour depth was observed downstream of the Chi-Chi Weir. The scour hole at the Yi-Sing Weir was 15 m deep and had not yet stabilized. During 2001–2008, this scour hole deepened to 6.2 m, resulted from a maximum discharge of up to $8,527 \text{ m}^3/\text{s}$.

Table 2 compares actual and estimated scour-hole depths downstream of the two weirs. The estimated depth of the scour hole at the Chi-Chi Weir by the Annandale model is close to the actual magnitude, but the estimated depth significantly underestimates the magnitude of the scour hole at the Yi-Sing Weir. Conversely, the Bollaert-Schleiss model predicted a similar scour-hole depth at the Yi-Sing Weir, but largely overestimated that at the Chi-Chi Weir. This large difference may be attributed to (1) different mechanical behaviors of soft rock compared to that of brittle rock, (2) different water-jet conditions, and (3) different scouring processes.

Both models were only partially successful and are not generally applicable. The applicability and limitations of both methods warrant further examination.

Table 2 The actual and estimated scouring depths.

Scouring Depth	Actual	Estimated by Annandale model	Estimated by Bollaert-Schleiss model
Chi-Chi weir	3 m	~3 m	23 m
Yi-Sing weir	15 m	1.5 m	>15 m

CONCLUSIONS

Based on data from field geology investigation, site investigations, and scouring pattern recognition for the eight weirs, this study identified three typical categories of scouring process downstream of weirs, namely, (1) plucking, (2) uniform incision, and (3) trenching incision. The plucking scouring process is the dominant process for weirs constructed on jointed hard rocks. The other two processes typical in areas with soft rock. Furthermore, the factors influencing the types of scouring processes were identified; these factors include the type and properties of geo-materials, attitude of discontinuities, density and spacing of discontinuities, and flow conditions. Due to differences in flow conditions, the observed shape of scour holes downstream of weirs, especially for weirs built on soft rocks, differs from that of scour holes downstream of high dams. The scour hole appears asymmetrical; the slope in the upstream is gentler than that in the downstream.

To evaluate the suitability of existing approaches for calculating scour-hole depth on soft rock, the approaches developed by Annandale *et al.* and Bollaert and Schleiss were used to calculate scour-hole depth at two sites. We conclude that both these methods are only partially successful and are not generally applicable to scouring downstream of a weir on a soft-rock riverbed. This may be attributed to (1) different mechanical behaviors of soft rock, (2) different water-jet conditions, and (3) different scouring processes. Based on the real scouring processes for soft rocks, appropriate methods for scouring evaluation of soft rock, especially for local scouring downstream of a weir, warrant further study.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Water Resources Agency and the National Science Council of the Republic of China, Taiwan, for financially supporting this research.

REFERENCES

- Annandale, G.W. (1995). "Erodibility" *Journal of Hydraulic Research*. 33(4): 471-494.
- Annandale, G.W. (2006). "Scour technology" McGraw-Hill, New York. 430p
- Bollaert, E. and Schleiss, A. (2003). "Scour of rock due to the impact of

- plunging high velocity jets Part I: A state-of-the art review” *Journal of Hydraulic Research*. 41(5): 451-464.
- Bormann, E and Julien, P.Y. (1991). “Scour downstream of grade-control structures” *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(5): 579-594.
- Fahlbusch, F. E. (1994), “scour on rock riverbeds downstream of large dams” , *Hydropower & Dams*, pp.30-32.
- Lin, C. (2001).“Prevention of scourng by overflow water or Hydraulic jump in bridge foundation“ *Proc. Of Conference of Hydraulic Engineering*. 202-231 (in Chinese).
- Liu ,P .Q. (2005). “A new method for calculating depth of scour pit caused by overflow water jets“ *Journal of Hydraulic Research*. 43(6); 696-701.
- Martins, R. (2006). “Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds” *Proc. the 11th Congress on Large Dams*, Madrid, 799-814.
- Schoklitsch, A. (1932).” Kolkbildung unter Überfallstrahlen. Die Wasserwirtschaft”, 341p.
- Water Resources Agency. (2009). “A study on the mechanisms and evaluation of rockbed erosion after weir installation (1/2)” (in Chinese).
- Whipple, K.X., Snyder, N.P. and Dollenmayer, K. (2000). “Rate and processes of bedrock incision by the upper Ukak river since the 1912 Novarupta ash flow in the valley of Ten Thousand Smokes, Alaska” *Geology*. 28(9): 835-838.