

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

軟岩河床沖蝕行為及沖蝕能力 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-188-
執行期間：97年08月01日至98年07月31日
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：廖志中

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：彭俊文
碩士班研究生-兼任助理人員：郭炳宏
碩士班研究生-兼任助理人員：李佩錚
碩士班研究生-兼任助理人員：廖偉欽
碩士班研究生-兼任助理人員：鍾里泉
碩士班研究生-兼任助理人員：蔡建成
碩士班研究生-兼任助理人員：吳佳諺
博士班研究生-兼任助理人員：鄭孟雄

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 98 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

軟岩河床沖蝕行為及沖蝕能力

Soft rock-bed river erosion and erodibility

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2221-E-009-188

執行期間：97年8月1日至98年7月31日

計畫主持人：廖志中

共同主持人：

計畫參與人員：鄭孟雄、郭炳宏、彭俊文

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

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
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

執行單位：國立交通大學土木系

中 華 民 國 98 年 10 月 30 日

中、英文摘要

台灣西部地區甚多河川(八掌溪、頭前溪、大漢溪等)的部分河段，常於豪雨後產生劇烈沖蝕，長時間累積了數公尺至數十公尺的沖蝕量。此類河段，皆為不存在護甲礫石層的軟岩質河床，由於高洪峰水流的作用而形成峽谷式的河道。國內對於岩質河床的沖蝕行為一直未有系統性的探討研究，因此輸砂計算乃採用一般的顆粒材料沖蝕模式，而未能有效、合理計算河床的沖淤量。本研究將針對前述軟岩河床的沖蝕現象加以調查，並提出其沖蝕機制，及設計一套可於實驗室進行軟岩沖蝕的試驗設備。

本研究針對八掌溪、大安溪、濁水溪部分軟岩床河道進行沖蝕現象調查，結果顯示磨蝕現象明顯，亦存在抽離現象，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。其沖蝕機制可區分為四類，分別為：1. 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面的情形、2. 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為、3. 砂頁岩互層的差異 abrasion, 薄層厚層互相牽動、4. 粉砂岩的切穿等。本計畫亦以八掌溪為例利用 Annandale (1995, 2006)提出的沖蝕指數(erodibility index)評分方法，評估河床材料受沖蝕的可能性，探討該方法在軟岩河床的適用性。本研究亦由現場沖蝕行為，完成一部可供磨蝕沖蝕、抽離沖蝕室內沖蝕試驗的沖蝕試驗儀設計。

關鍵詞：軟岩河床、抽離、磨蝕、沖蝕機制、沖蝕試驗、抗沖蝕指數

Some intensively eroded reaches after flooding were found in rivers of west Taiwan, such as the Ba-Chang River, the Da-Han River, and the Tou-Chien River. The accumulated erosion quantity is from several to tens of meters. The river bed of the intensively eroded reaches is composed of soft rock. Since civil/hydraulic engineers do not pay much attention to rock-bed channel erosion/scouring, there are no suitable theoretical, analytical, or empirical methods for modeling these types of problems. In order to improve the understanding on this category of problems, this project aims to study the soft rock-bed river erosion mechanisms in engineering scale. This project plans to determine the dominant erosion mechanism and the rock erodibility for various conditions of rock properties, loading types, flow conditions, and so on. The major scopes of this project include (1) development of a conceptual model for individual erosion mechanisms based on investigation results at intensively eroded reaches; (2) Design a multi-function experimental set for laboratory erosion test (3) Study the suitability in Taiwan for the erodibility index proposed by Annandale (1995, 2006).

Based on the historical surveying data and the results of intensively field investigation at the Pa-Chang River, the erosion processes are proposed and used to compare different erosion rates. The erodibility index proposed by Annandale (1995, 2006) is evaluated for assessments of erosion possibility. Then, the design of a multipurpose erosion experiment facility has been finished.

Keywords: plucking, abrasion, erosion mechanism, laboratory erosion test, erodibility index.

一、前言與研究目的

台灣西部地區甚多河川（八掌溪、頭前溪、大漢溪等）的部分中、下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，此沖蝕率遠大於國外現有文獻所發表的沖蝕速率（岩性的關係），上游地區因板塊擠壓使地殼上升，加速河床的下切作用，亦引致上游地區邊坡不穩定、地貌變遷迅速。

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。

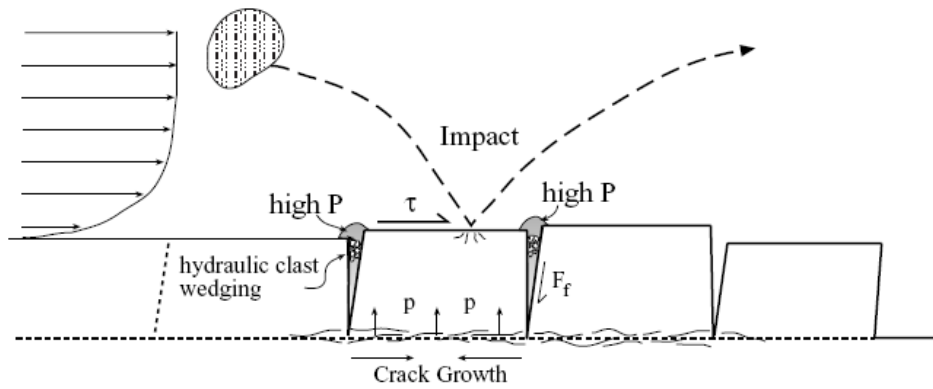
本計畫為國內首次探討軟岩河床的沖蝕行為的研究，因此研究目的首在釐清台灣西部軟岩河床的沖蝕機制、抗沖蝕能力，並設計一套可在實驗室瞭解其沖蝕行為及抗沖蝕能力的試驗設備，以供後續研究沖蝕欲模式、沖蝕行為等研究的依循。

二、文獻探討

以下就岩石河床的沖刷機制、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，國外則在近一、二十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(圖一)，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。

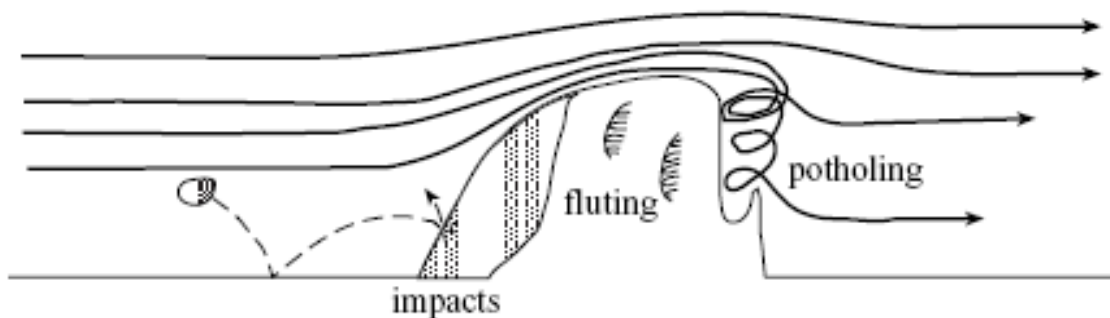


圖一 岩床侵蝕的抽離機制示意圖(Whipple et al, 2000)

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，亦可由其下游測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」），岩床沖蝕之主控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於發生，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。

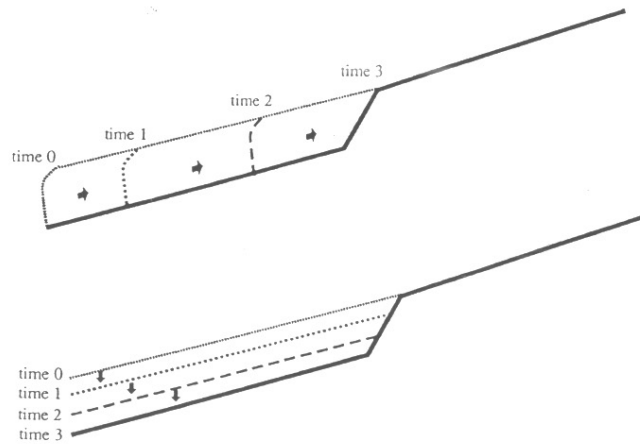
當水流受到障礙物或階狀落差時，其下游側局部沖蝕特別顯著(圖二)。河川中若有障礙物，其下游側較為顯著之岩床沖蝕，則多源自懸浮載之磨蝕沖蝕貢獻。除了磨蝕損耗，穴蝕(cavitation)之角色也不能忽視，壺穴與滑槽之構造常與渦流流況下出現之穴蝕沖蝕有關。



圖二 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(圖三)。



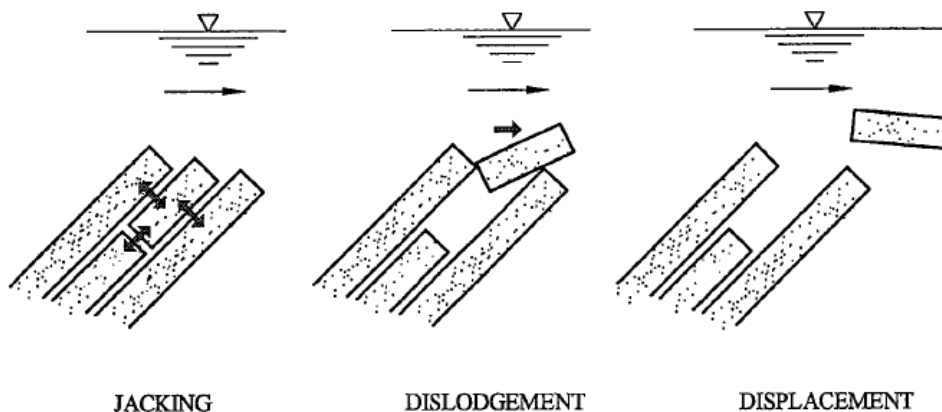
圖三 河道縱向演變的兩種型態(Seidl & Dietrich, 1992)

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。

(二) 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，採用如圖四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(erodibility 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。



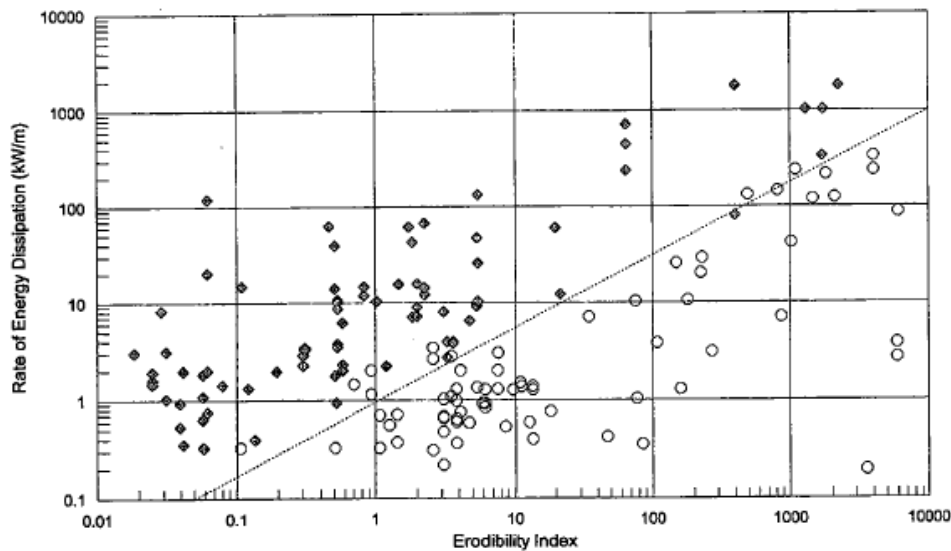
圖四 Annandale (1995)評估岩石侵蝕的概念模式

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

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (1)$$

式(1)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)、均勻明渠 (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 (圖五)，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。



圖五 能量消耗 vs. 抗沖蝕指數圖

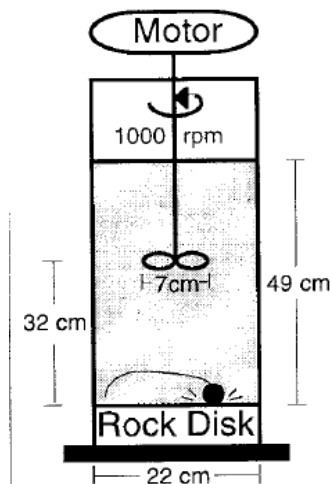
Annandale 的方法未將沖蝕機制分離，若屬磨蝕機制則可能會低估抗沖蝕指數，且由於能量消耗對抗沖蝕指數乃由雙對數圖上經驗關係的區界線而來，此抗沖蝕指數之誤差極可能達十倍甚至數十倍範圍，因此其量化之可靠度值得進一步討論。本方法僅可評估沖蝕產生與否，無法推估其沖蝕率，若能將其改進，並有更多的實例或數值案例或可建立沖蝕速率與能量消耗及抗沖蝕指數的關係。

(三) 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分析，所以許多學者均進行室內試驗來進行觀察與研究，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

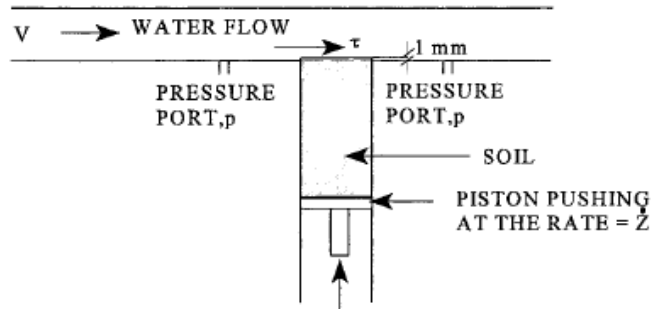
設計來模擬特定的沖刷機制。試驗的結果，往往被用來觀察人造材料岩床之下切、地形發育變遷、驗證合理化公式之合理性，或用來得到一些經驗關係式 (Shepherd & Shumn, 1974, Wohl & Ikeda 1997, Robinson, et al. ,2001, Sklar & Dietrich,2001, Briaud, et al., 1999, Nakato, 2002)。本報告僅就與本計畫擬建立較相關 (第二類儀器設計來模擬特定的沖刷機制) 之文獻說明如下：

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(圖六)進行室內的小尺度試驗。Sklar & Dietrich 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。

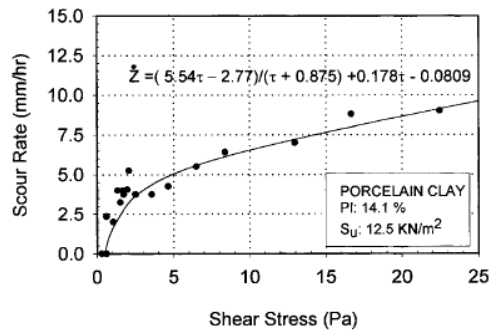


圖六 岩床磨蝕試驗儀示意圖(Sklar & Dietrich, 2001)

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七所示。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 (圖八)。



圖七 EFA 抗沖蝕試驗儀器

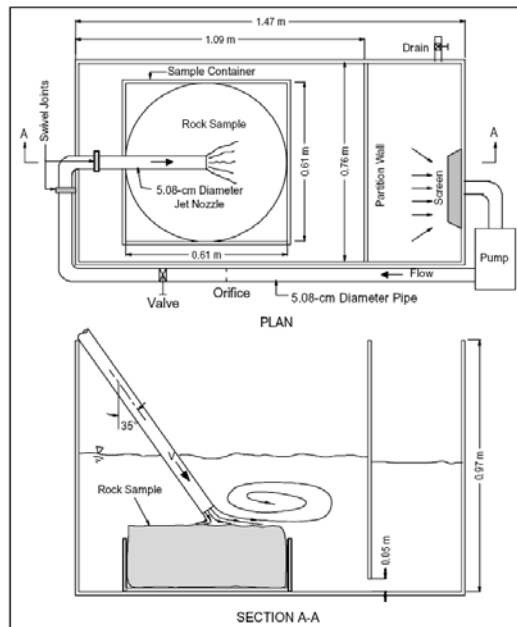


圖八 沖蝕速率對不同剪應力關係圖

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）。

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害，設計一頁岩沖刷試驗設備(圖九)，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。

前述，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。



圖九 頁岩沖刷試驗示意圖

三、研究方法

(一) 沖蝕機制探討

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主控機制。河床受到水流、懸浮載、與河床載傳遞至岩床面之作用力型態在不同流況下，可能具有甚大之差異。而影響岩床沖蝕之岩床面作用力型態大致區分為剪應力、(渦流所生之)壓力波動、與衝擊力等作用力。材料因素考量岩性與弱面重要特性(岩塊尺寸、弱面強度、弱面間距、弱面位態、弱面延續性....等)

(二) 室內沖蝕試驗儀器設計

室內沖蝕試驗儀器的設計將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，包括磨蝕、抽離、及顆粒彈跳、及高速水流沖擊等。

(三) 抗沖蝕指數分析

本年度將針對 Annandale 所提由抗沖蝕指數以八掌溪劇烈沖刷段河床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。Annandale 的抗沖蝕指數的第一個因子為岩石材料的單軸向抗壓強度，岩石河床不存在不連續面或不連續面間距甚大不足以影響沖蝕作用，則其抗沖蝕指數將僅與單壓強度有關，對所有地質材料(具凝聚力或不具凝聚力)單壓強度是否與抗沖蝕能力呈正相關有待驗證，若如能有沖蝕試驗或現地資料獲得岩石材料的抗沖蝕力則可對 Annandale 的公式加以修正。

四、研究結果與討論

(一) 軟岩河床的沖蝕現象及沖蝕機制

本計畫針對八掌溪、頭前溪、大漢溪等軟岩河段進行沖蝕現象調查，及沖蝕機制初步建立，本報告以八掌溪為例加以說明。經現地調查結果顯示，八掌溪軟岩沖蝕河段介於觸口攔河堰到南二高橋的河段。河道地層以頭嵙山層(Tks)相當的崁下寮層、二重溪層、六雙層和沖積層四個地層為主，其地層走向約成南北走向，傾向與河道流向相同，傾角約為 10° 向西傾，出露之岩層以膠結不良的軟弱砂岩、頁岩、及其互層所組成。

八掌溪研究區域內觀察到某些現地沖蝕的現象與文獻所提的硬岩河床的沖蝕現象雷同，主要沖蝕現象說明如下：

塊體脫離現象：圖十(a)顯示岩石塊體脫離原本的位置掉落至照片下方；圖十(b)岩床的邊緣呈現規則的塊體形狀證明沖蝕的方式是以塊體為單位。這兩張照片符合岩塊抽離(plucking)作用，發生此種現象的岩性為厚層泥岩。

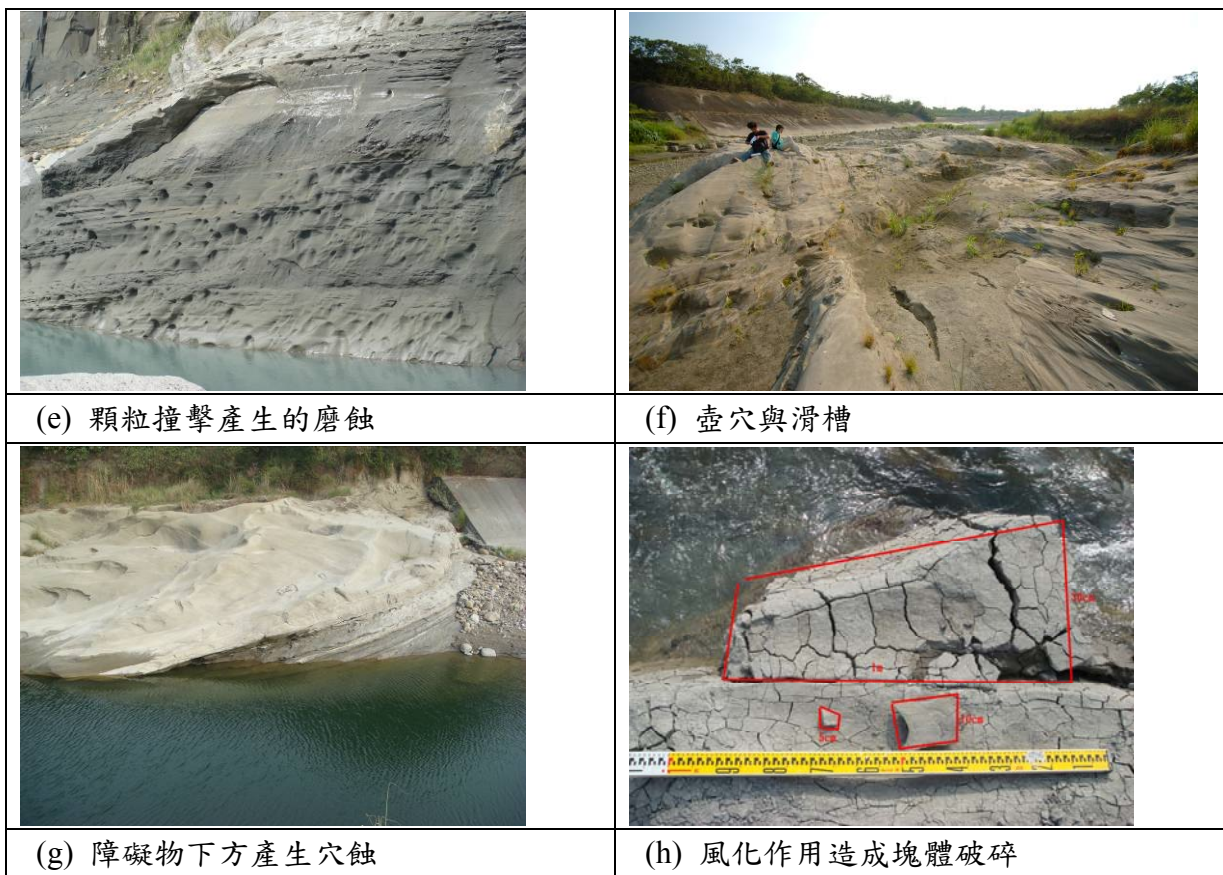
河床面光滑的磨蝕現象：圖十(c)位於 95 斷面下游，河床表面光滑，應為粉砂岩受水流、懸浮載或河床載等磨損(wear)所造成的磨蝕(abrasion)作用。

岩床表面凹陷粗糙的現象：圖十(d)與 (e)岩性為厚層泥岩，表面的凹洞為顆粒材料撞擊造成，為底床上因卵礫石彈跳引起之磨蝕作用 (abrasion with saltation) 之作用。

壺穴與滑槽現象：圖十(f)與照片 (g)為粉砂岩表面的穴蝕 (cavitation) 痕跡，觀察到壺穴與滑槽現象。

乾裂現象：圖十(h)屬泥岩表面受乾溼循環作用而乾裂，材料風化後易被水流帶走，屬於物理與化學風化(weathering) 作用產生的沖蝕，此現象於硬岩河床較不明顯。





圖十 研究區軟岩河道沖蝕現象

依據前述調查所得沖蝕現象，本研究提出軟岩河床四種沖蝕機制，分別為：1. 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面、2. 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為、3. 砂頁岩互層的差異 abrasion, 薄層厚層互相牽動、4. 粉砂岩的切穿等，以下就就它們出現的條件以及發展的步驟，透過簡單的示意圖配合現地照片佐證進行說明。

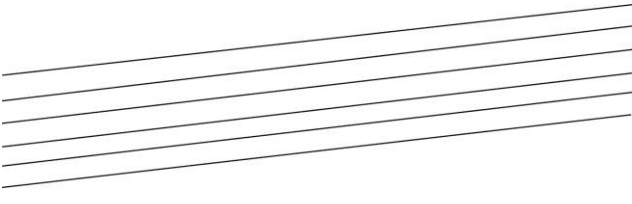

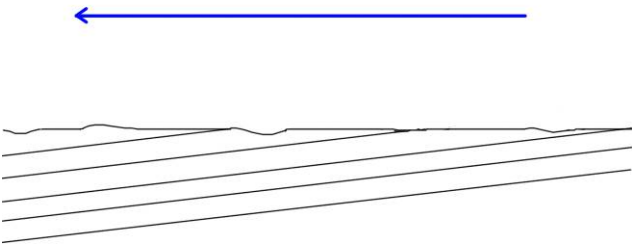

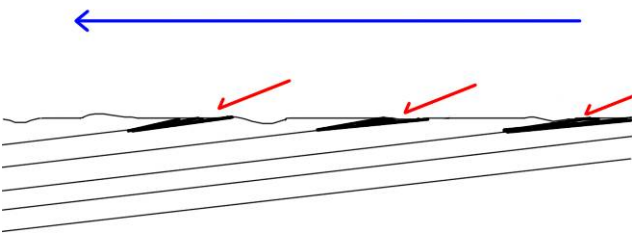

水流沿材料弱面侵蝕-一組層面

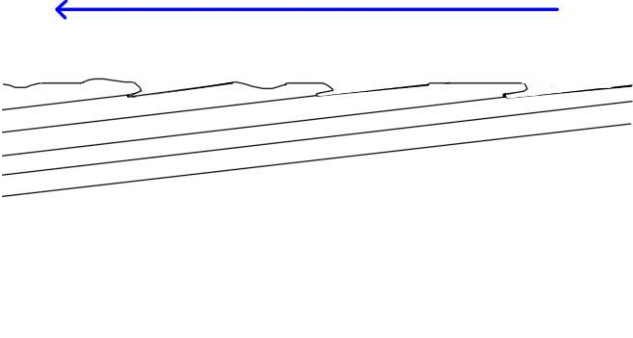

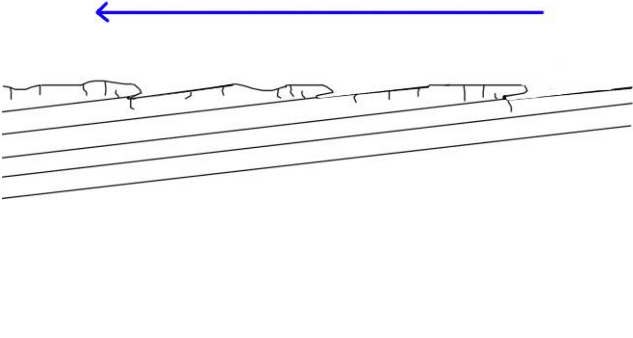

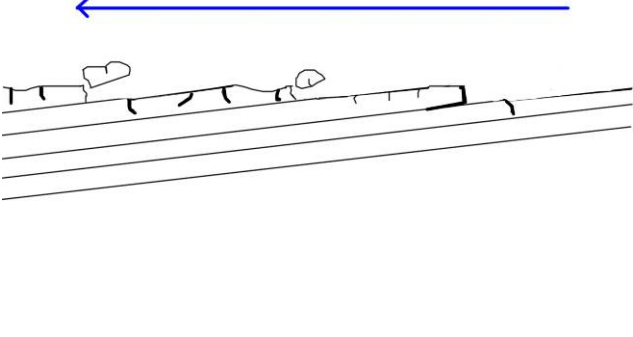

當岩床為完整岩石時，即岩體表面無明顯弱面，水流的侵蝕作用通常會是純水流、懸浮載或河床載等沖蝕(abrasion)作用所造成顆粒尺度之逐漸磨損(wear)行為，但若岩床有一組以上不連續面時，水流會沿著弱面侵蝕，將弱面擴展，而後由於各種外力的影響，如水流的剪力或自重會使岩體被分解成塊體，這種由岩體變成塊體而後被水流帶走的情況可以解釋為岩塊抽離(plucking)作用，在形成塊體的期間若底床上因卵礫石衝擊出碎片或岩塊(abrasion with saltation)之作用則會加速弱面的侵蝕而使沖蝕作用加速。

在研究區域裡觀察到，當岩床本身具有一組岩層傾向順著河流流向的順向河情況時，水流沿著岩體的弱面產生侵蝕的情形，可以用圖十一的六個步驟示意圖說明如下：

1. 沉積後的成岩作用使岩體本身含有一組原生的不連續面—層面。
2. 地層受擠壓作用後水流的方向與岩層的傾向相同而形成順向河。
3. 當護甲層被移除後，水流延著岩體的弱面，也就是層面侵蝕，使原本緊密接合的面產生縫隙。

4. 不連續面繼續侵蝕，被加深、加寬的作用而使岩體彼此不相接觸。
5. 不相接觸而懸空的岩體，因為水流作用方向在下緣產生張力裂縫，或因為重力的作用在上緣產生張力裂縫。
6. 張力裂縫繼續擴展，最後岩體變成塊體而完全脫離的 plucking 機制。

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

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

圖十一 水流沿材料弱面侵蝕-一組層面

泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為

這種泥岩受反覆乾溼循環的乾裂行為可以由圖十二的示意圖來說明：

1. 完整的岩層，新鮮強度 5-10MPa，水位面抬升後泡水軟化，岩層表面發生 abrasion 的行為。
2. 水位降低後泡水的岩體乾縮、乾裂成粉碎狀塊體，塊體尺寸由數公分到 1 米不等，乾裂的影響深度約 30 公分。
3. 乾裂後的粉碎狀塊體在下次水位面再升起的時候能輕易的被水流帶走，較大的塊體會

有帶走的順序問題，這種行為可以解釋為 plucking 的侵蝕機制。

4. 水流帶走整層材料後繼續影響下層的岩體。

砂頁岩互層的差異磨蝕，薄層厚層互相牽動

砂頁岩互層的差異侵蝕行為，薄層與厚層侵蝕速率又互相牽連的關係，可以由圖十三的示意圖來說明：

1. 沉積環境形成砂頁岩互層，每層厚約 30 公分，泥質含量較高、顆粒較細的頁岩薄層每層約 1-2 公分，砂質含料較高的厚層膠結力較弱。

2. 水流作用在岩床表面，顆粒材料被一粒一粒帶離的 abrasion 行為，因為厚層砂岩膠結力較弱，侵蝕速率大於薄層的頁岩而產生差異侵蝕，薄層也因此失去束制。

3. 當薄層失去束制後材料受水流作用容易沿著弱面一片一片的撥離，此時這種行為為 plucking。

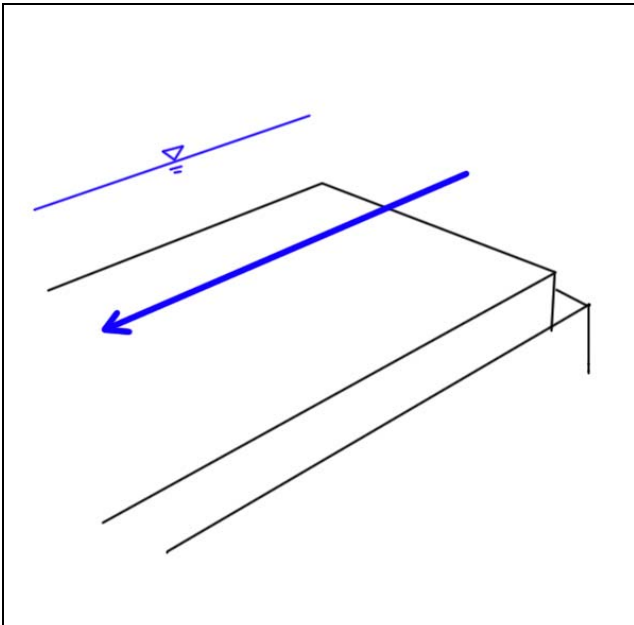
4. 片狀材料被帶離後薄層的侵蝕趕上厚層的侵蝕。

粉砂岩的切穿

粉砂岩的侵蝕切穿是由上向下與由下向上兩個方向的競賽：

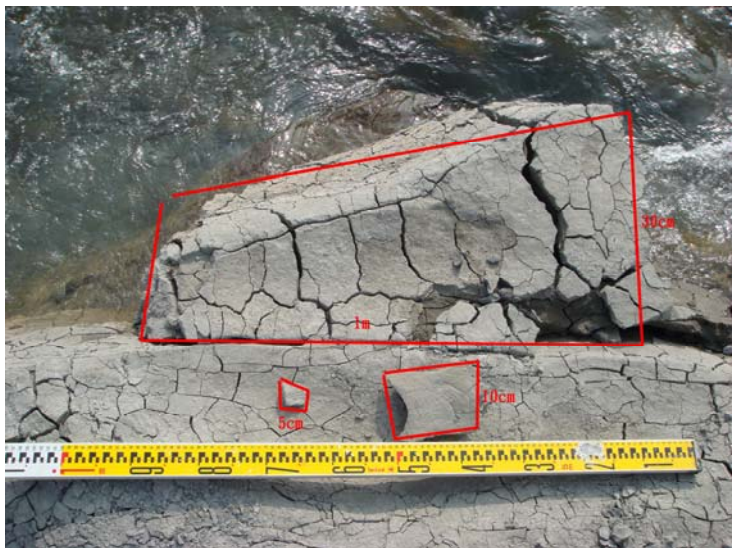
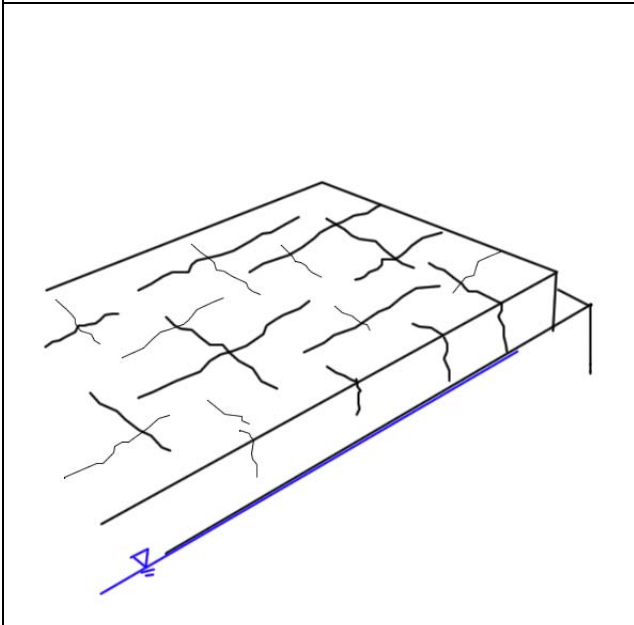
1. 圖十四的上部，當粉砂岩表面的壺穴與滑槽構造逐漸加深、加寬，彼此之間會串連形成紊亂的河道，這種串連的情形會使水流產生渦流的情形加劇，最後切穿整層粉砂岩來到下一層形成深槽主流路。

2. 圖十四的下部，可以看到粉砂岩的下層是較容易侵蝕的頁岩時，水流順著障礙物的前緣先侵蝕掉底部頁岩層，上部的粉砂岩則會因為失去底層受重力影響而產生張力裂縫崩落。



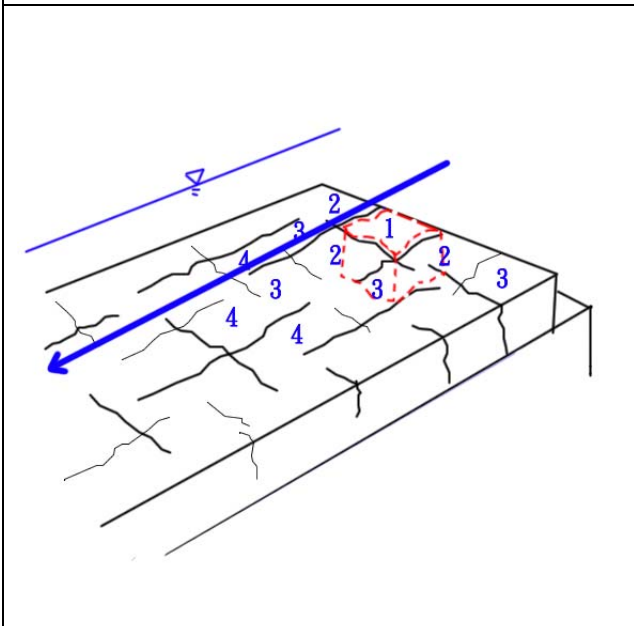
1. 完整的岩層新鮮強度約 5~10MPa，泡水後
軟化 abrasion

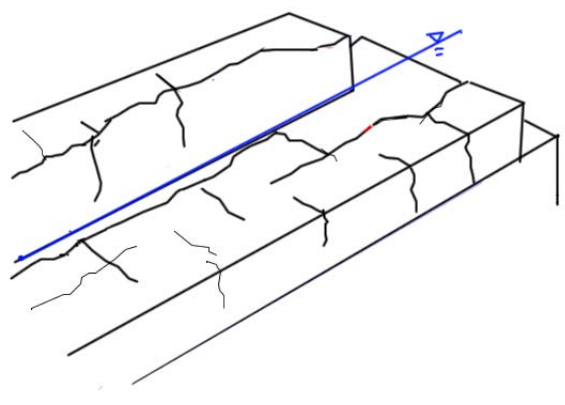

(a)



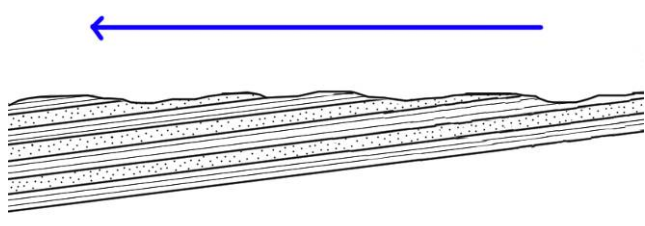

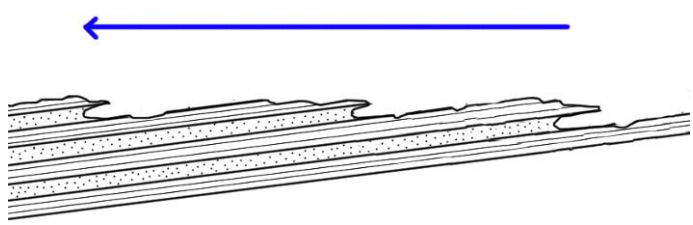

2. 水位降低後岩體乾縮、乾裂

(b)

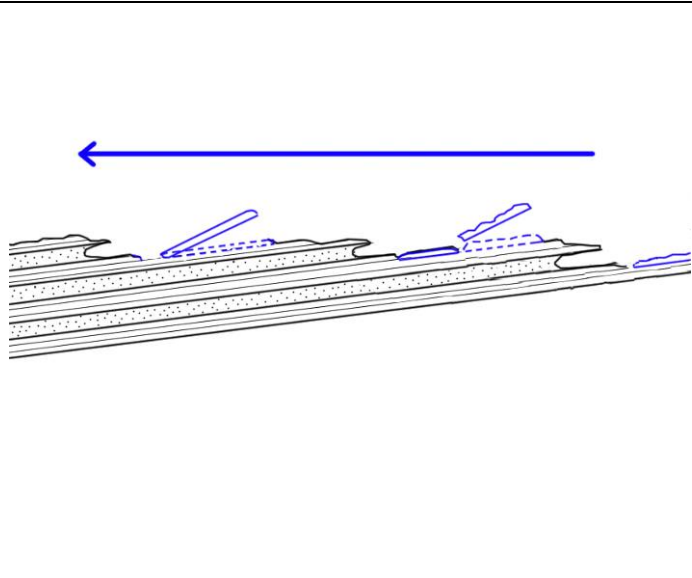


<p>3.岩體失去強度，水位漲高能輕易帶走(數字表帶走的順序)</p>	<p>(c)</p>
	
<p>4.水流帶走整層材料</p>	<p>(d)</p>

圖十二 泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為

	
<p>1.侵蝕前河道，河床為砂頁岩互層</p>	<p>(a)</p>
	

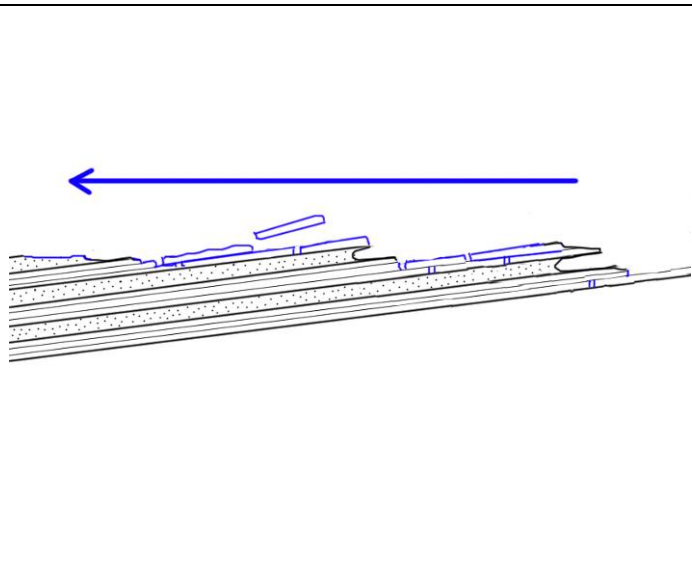
2. 差異 abrasion, 薄層失去束制



(b)



3. 薄層片狀撥離, Plucking 啟動



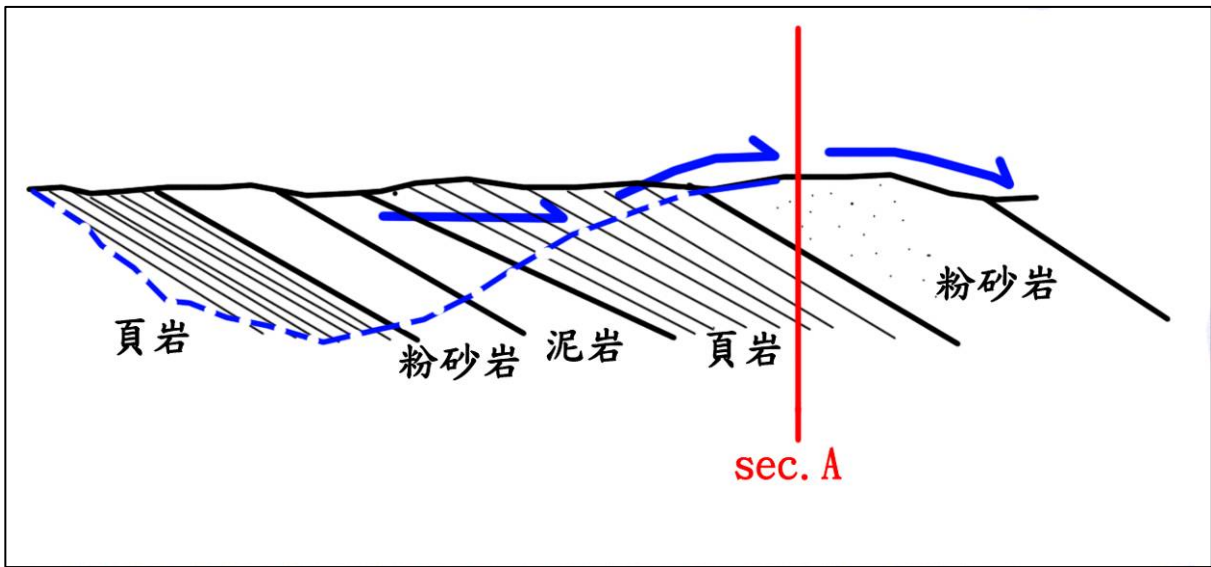
(c)



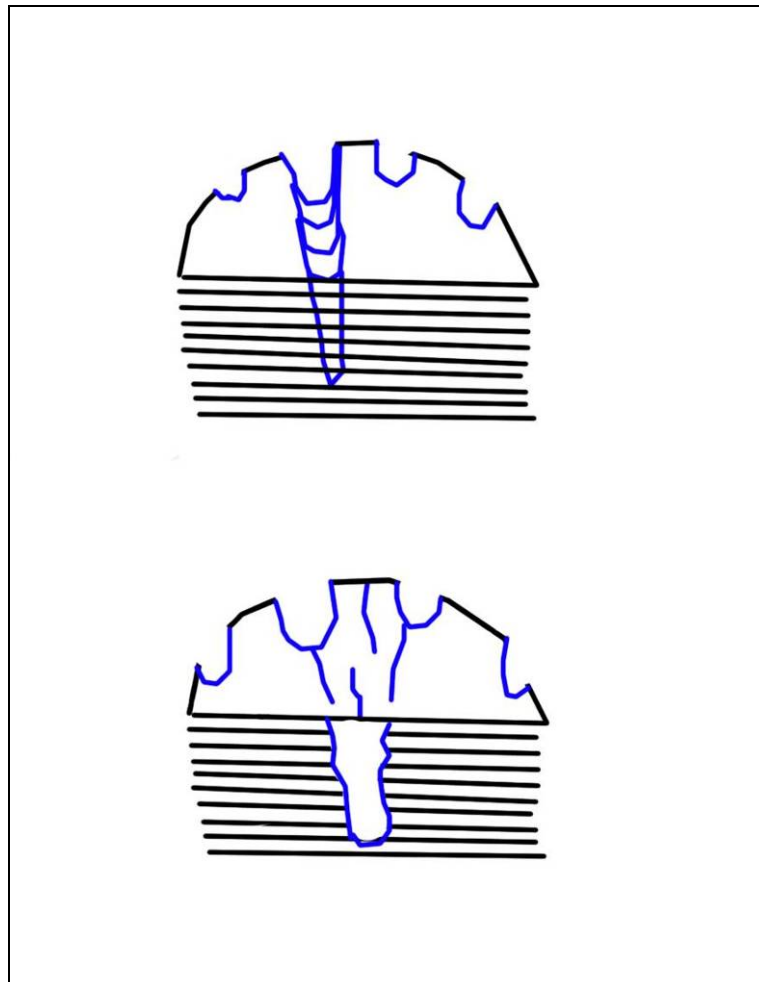
4. 片狀材料被帶離

(d)

圖十三 砂頁岩互層的差異磨蝕(abrasion), 薄層厚層互相牽動



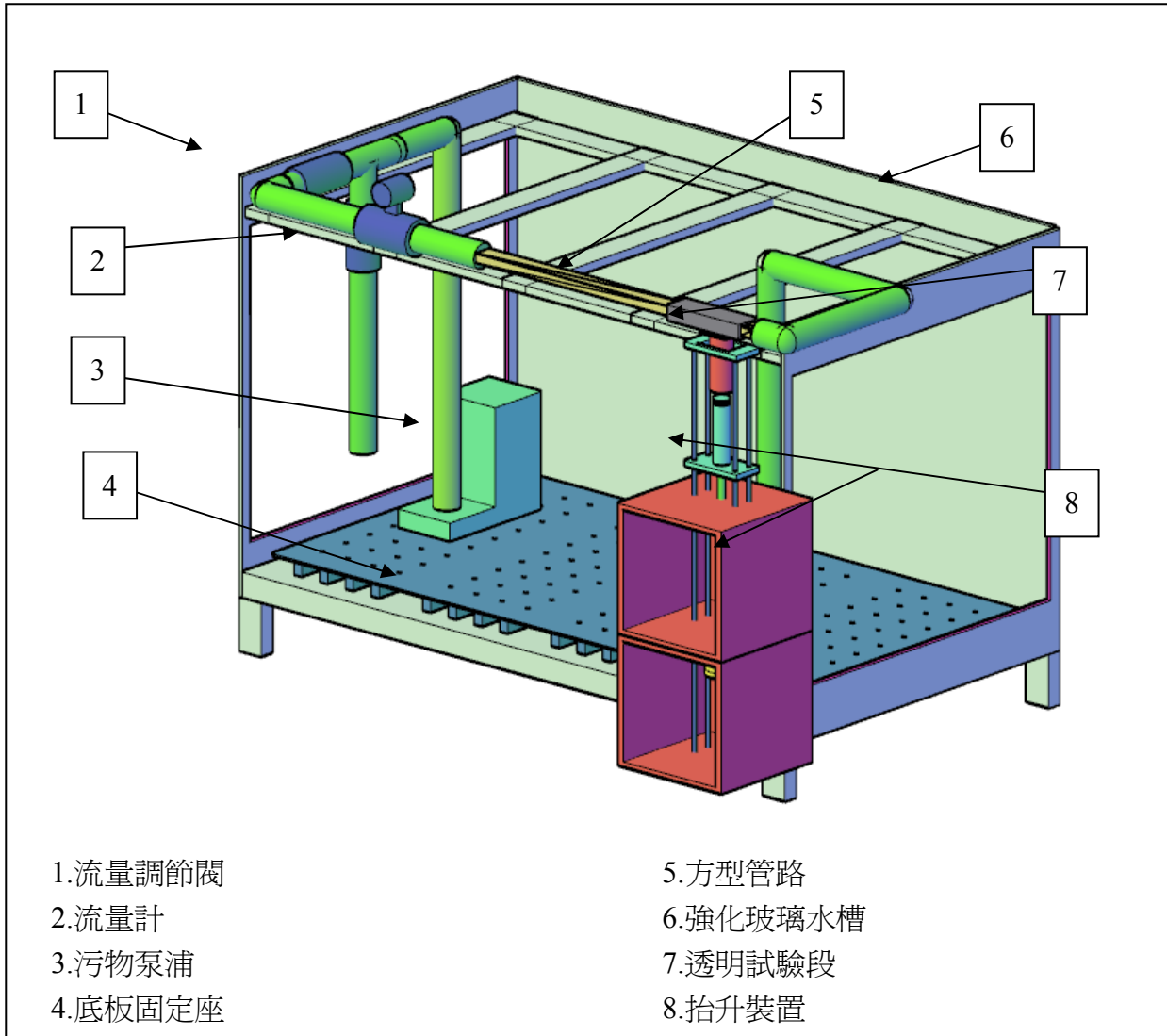
圖十四 粉砂岩侵蝕速率較慢形成障礙物（後續）



圖十四 粉砂岩侵蝕速率較慢形成障礙物(sec. A)

(二) 室內沖蝕試驗儀器設計

本研究設計完成的沖蝕試驗儀立體示意圖，如圖十五。各組件的功能分別說明如下：



圖十五沖蝕試驗儀立體示意

(1) 流量調節閥：用來調整泵浦通過試驗段之流量，達到調整試驗段流速的目的。

(2) 流量計：計算通過管內時間單位內水量 ($\frac{m^3}{hr}$) 及通過流量計之流速 ($\frac{m}{s}$)，試驗段之流速由流量換算而得。

(3) 污物泵浦：非接觸式泵浦，可讓異物通過而不損傷葉輪及異物，容許最大通過粒徑為 46mm，抽水量約為 1 $\frac{m^3}{hr}$ ，可連續運轉時間為 5000hr，溫度達 $120^{\circ}C$ 即自動停機，冷卻後自動開啟。

(4) 底板固定座：可依照不同需求裝設所需支架及固定。

(5) 方型管路：27×54mm 方型管路，方型管路長度經過計算，在試驗段將會發展成均勻之流場。

(6) 強化玻璃水槽：210 × 120 × 120 cm 強化玻璃製成之水槽，可容許之水量為 $2 m^3$ 。

(7) 透明試驗段：透明壓克力製成之 27×54mm 方型管路。

(8) 抬升裝置：將試體抬升堆進透明試驗段之裝置。

本試驗設備可進行之試驗有：

(1)磨蝕試驗：藉著噴嘴噴出強力水流沖擊試體表面來進行模擬，噴嘴可選用不同型式模擬不同水流沖擊，噴嘴角度可進行調整以模擬不同角度的水流沖擊，污水式抽水汞可加壓含砂水流，另外，藉著降低水槽水位可模擬試體的乾濕收縮及水滴的沖擊。

(2)顆粒跳動衝擊：污水式抽水汞最大異物通過粒徑 56mm，可吸入顆粒材料隨水柱噴出，模擬顆粒跳動衝擊的影響。

(3)高速流場：除採用噴嘴噴射水流外，本儀器亦規劃設置渠道試驗系統模擬高速流場，進行主控沖蝕機制的試驗。

(4) 岩塊抽離：岩塊是否發生抽離現象，主要影響因素在於岩塊本身是否含有弱面存在，進行試驗模擬時將以人為切割製造弱面的方式來進行並加以修正。

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取得（因其易碎），則將於試驗室製作人造試體。

（三）抗沖蝕指數分析

本研究以八掌溪仁義潭攔河堰及其下游 95 斷面附近為例進行 Annadale 抗沖蝕指數分析與評估其適用性。由現場調查結果顯示，仁義潭攔河堰正下方至 100 斷面間岩床都是屬於泥質的頁岩，岩層僅存在一組層理，侵蝕機制屬於水流沿材弱面侵蝕的行為。利用現場調查所得結果可計算出 Erodibility Index。本研究對每個參數就現場調查的結果求取最大值與最小值做為該區域岩床的抗侵蝕指數範圍，其結果如表一。仁義潭攔河堰下方泥質頁岩的抗沖蝕指數(erodibility index, Kh)範圍在 38.86~96.26 之間，依式圖五，可得容許沖蝕能量為 Pc 值 15.56~30.73(kW/m²)。

95 號斷面下游處岩性屬極厚層砂岩，侵蝕機制屬於前節所提粉砂岩切穿，抗沖蝕指數參數與指數計算評分結果如表二。表中顯示極厚層粉砂岩抗沖蝕指數 Kh 值範圍為 83.08 到 437.05 之間，依圖五可得容許沖蝕能量 Pc 值為 27.52~95.59(kW/m²)，相對地較前面泥質頁岩與厚層泥岩高。

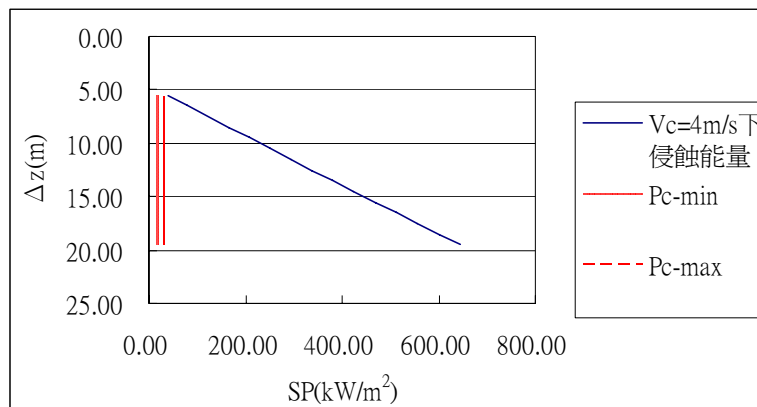
使用 Annadale(2006)提出的沖蝕指標評估方法必須要有岩體本身的抗侵蝕指數評分 Kh 值與沖擊水流的侵蝕能量（流功，Stream power），表一顯示仁義潭攔河堰下方泥質頁岩的抗沖蝕指數範圍在 38.86~96.26 之間。仁義潭攔河堰下方以民國 76 年到 79 年間的河床條件、水流條件依 Annadale（1995）建議計算所得的流功，依照侵蝕高程的發展由 39.07 Kw/m² 發展到 556.94 Kw/m²。將上述 Kh 值所得容許沖蝕能量 Pc 值結果與水流侵蝕能量（流功）計算結果做比較可得圖十六，由圖可以知道仁義潭攔河堰在民國 76 年開始第一階淨水池下方在 887cms 順時流量下水流產生的侵蝕能量會大於裸露泥質頁岩岩盤的最大容許侵蝕能量 Pc-max，當沖刷坑繼續發展，侵蝕高程持續增加，相同流量下的水流侵蝕能量將遠大於岩盤的容許侵蝕能量，依 Annadale(2006)的侵蝕指標評估方法概念，這個場址的侵蝕將會持續發生。

表一仁義潭攔河堰下方泥質頁岩沖蝕指數評分

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

表二 八掌溪 95 號斷面下游極厚層粉砂岩抗沖蝕指數

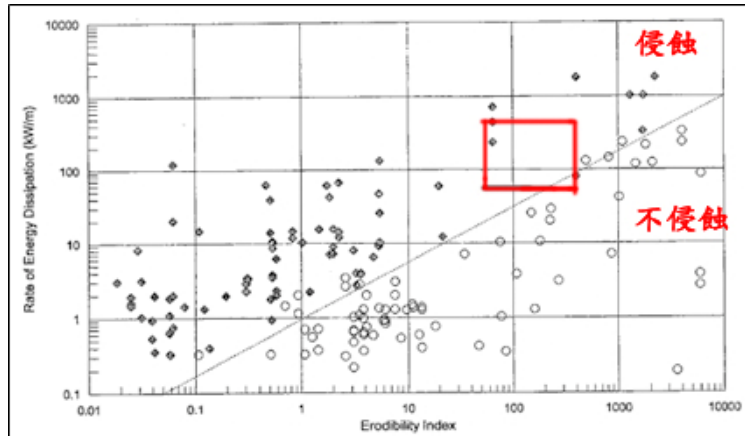
參數	最小值	最大值
M_s	1.86	3.95
$K_b=RQD/J_n$	$100/1.5=66.67$	$100/1.22=81.96$
$K_d=J_r/J_a$	$1.0/1=1$	$1.5/1=1.5$
J_s	0.67	0.9
K_h	83.08	437.05
$P_c(kW/m^2)$	27.52	95.59



圖十六 水流流功與岩盤抗侵蝕能量比較

將這個場址的 K_h 值與水流侵蝕能量點在圖五上可得圖十七，可以知道現地 K_h 值與水流侵

蝕能量位於 Annadale(2006)侵蝕評估方法的哪一個位置。由前面所算得的 Kh 值，可以知道八掌溪仁義潭及其下游劇烈沖蝕河段內，不論是泥質頁岩、厚層泥岩、極厚層粉砂岩，Kh 值約略在 40 到 400 之間，配合水流侵蝕能量的計算結果 40~550kW/m² 可以在圖十七上劃定出八掌溪研究區域的沖蝕指標評估區塊，可以看出若岩體為抗侵蝕度較高的粉砂岩 (Kh=400)時，在最小的侵蝕能量(40kW/m²)下不會發生侵蝕。



圖十七 八掌溪研究區域的沖蝕指標評估區塊

圖十七顯示八掌溪劇烈沖蝕河段的分析結果與 Annadale(2006)沖蝕指標評估方法基本上是合理的，但尚有討論之處：

1. 沖蝕指標評分(Kh 值)：依 Annadale(2006)提供的制式表格配合現場調查資料查表，使用上甚為簡便。但是在軟岩地區的岩層節理不發達，造成幾項與節理有關的參數沒有變異性，如岩體的節理面粗糙參數(Joint Roughness Number, Jr)與節理改變參數(Joint Alteration Number, Ja)通常只能定為 1，使得代表弱面或顆粒間抗剪強度參數 Kd 值無法反應其影響性。另外 RQD 值也不能代表軟岩的某些特性，由現有鑽孔取樣資料顯示 RQD 值皆為 100，透過經驗公式的計算，由於節理不發達之故，值也為 100，在 95 年八掌溪治理規劃報告甚至建議軟岩地區的 RQD 值不應採計。因此軟岩岩層在使用沖蝕指標評分時多半受強度參數 Ms 值影響，在研究區域內的 Ms 值為 0.87 至 3.95 左右，能使 Kh 值相差 4 倍，但是前面所提節理面粗糙參數 Jr 與節理改變參數 Ja 在節理發達的岩體條件下能使 Kh 值大小相差 $4 \times 18 = 72$ 倍，所以軟岩河床是否要考慮一個相對應於 Kd 的參數加入沖蝕指標評估方法裡可能為另一值得探討的問題。

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

五、 結論與建議

本研究旨在探討軟弱岩層的沖蝕機制、室內沖蝕試驗儀設計、及抗沖蝕力分析。研究內容包括劇烈沖蝕河段現地地質及沖蝕現象、依據調查結果建立軟弱岩層之沖蝕機制及檢討

Annadale(2006)之抗沖蝕指標評估方法之適用性、及室內沖蝕試驗儀設計，結論如下：

1. 在研究區域除了觀察到與文獻相符的硬岩河床現地沖蝕機制，如岩塊抽離 (plucking)、磨損(wear)、磨蝕(abrasion)、底床上因卵礫石彈跳引起之磨蝕作用 (abrasion with saltation)、穴蝕(cavitation)、與風化(weathering)外，並觀察到四種在軟岩河床與典型硬岩河床有所不同的現地沖蝕現象，將這些現地沖蝕現象整理並提出軟岩河床的現地沖蝕機制分別為：水流沿材料弱面侵蝕後塊體脫離的情形，泥質岩的乾溼循環的乾縮、乾裂行為，砂頁岩互層的差異磨蝕、薄層厚層互相牽動剝離，及極厚層粉砂岩的切穿等。
2. 針對仁義潭攔河堰正下方在民國 76 年至民國 79 年所發生的沖蝕，以 Annadale(2006) 沖蝕指標評估方法進行抗沖蝕評估。現地的泥質頁岩 Kh 值的評分為 38.86~96.26 之間，由此 Kh 值可得容許沖蝕能量 Pc 值為 15.56~30.73(kW/m²)；另外依照民國 76 年到 79 年間的河床條件、水流條件可得水流侵蝕能量由 39.07 kW/m² 發展至 556.94 kW/m²，皆超過河床所能抵抗的侵蝕能量，現地河床沖蝕評估符合預期會產生沖蝕。
3. 軟岩地區的岩體特性會使得沖蝕指標評分無法反應岩體品質 RQD、節理面粗糙參數 Jr 與節理改變參數 Ja 等三個重要參數的影響。
4. 完成設計的室內沖蝕儀將可進行磨蝕試驗(abrasion)、顆粒撞擊岩床(saltation)、岩塊抽離(plucking)、及高速水流沖擊等四種試驗。

建議

1. 室內沖蝕試驗儀應即進行製作及測試。
2. Annadale(2006) 沖蝕指標評估方法對於軟岩地區的岩體特性會使得沖蝕指標評分在參數給定上少掉某些重要參數的問題，建議能嘗試加入軟岩地區特有的參數進行方法的修正，如：消散耐久性試驗、泥岩乾濕循環試驗等，進而能提出符合軟岩地區的抗沖蝕評估方法。
3. 本研究以八掌溪劇烈沖刷河段為例，提出 4 種現地沖蝕機制，建議應對其他軟岩河床的沖蝕進行更多調查以歸納整理更符合全部軟岩河床的沖蝕機制，未來並應依沖蝕機制建立沖蝕率模式。

參考文獻

- Annadale, G.W., 1995. "Erodibility," *Journal of Hydraulic Research*, v33, pp471-493
- Annadale, G.W., 2006. "Scour Technology," Mc Graw Hill.
- 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.
- Foley, M.G., 1980, "Bed-rock incision by streams: Summary", *Geological Society of American Bulletin*, Part1, Vol.91, pp.577-578.
- Howard, A.D., and G. Kerby, 1983, "Channel changes in badlands", *Geological Society of American Bulletin*, Vol.94, pp.739-752.
- 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.
- 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.
- Shepherd, R.G., and S.A. Schumm, 1974, "Experimental study of river incision", *Geological Society of American Bulletin*, Vol.85, pp.257-268.
- 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.
- 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.
- Wohl, E.E. and H. Ikeda, 1997, "Experimental simulation of channel incision into a cohesive substrate at varying gradient", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.25, No.4, pp.295-298.

六、計畫成果自評

本計畫大多依原計畫書執行，預期成果亦皆能達成。本計畫大多依原計畫書執行，預期成果亦皆能達成。本計畫已於97年度的岩盤工程研討會發表一篇論文，並將於本98年底前完成三篇碩士論文（林文凱2008，彭俊文2009、郭炳宏2009），依據本研究結果，主持人亦已開始撰寫期刊及國際研討會論文。