

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—

總計畫

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 98—2221—E—009—149—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系

計畫主持人：廖志中

共同主持人：壽克堅、潘以文、史天元、林志平

計畫參與人員：葉克家、廖仲達、黃明萬、李國維

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，另須繳交以下出國心得報告：

- 赴國外出差或研習心得報告
- 赴大陸地區出差或研習心得報告
- 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 31 日

摘要

河床快速下切可能造成河道的快速變遷、跨河構造物的不穩定、兩側邊坡的破壞(以中上游為甚)(河岸邊坡破壞可能形成堰塞湖)等，進而影響交通安全、影響取水功能、甚至造成大規模的洪水災害。近年來，國內產學界對於岩石質河床沖蝕或下切造成工程行為影響都有所體認，亦曾嘗試加以探討及處理，但成效並不明顯，其最大原因可能在於未能完全掌握岩石質河床沖蝕機制、沖蝕模式、沖蝕影響等等。

本整合性研究計畫針對於岩石河床的沖蝕特性及其對邊坡及河道穩定的相關問題加以深入探討，研究範圍涵蓋中下游軟弱岩石河床的沖蝕現象調查、沖蝕機制理論模式建立與數值分析、沖蝕試驗及沖刷監測、河床沖蝕分析模組建立及河道沖淤模擬分析，與中上游河床沖蝕現象調查、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。本研究團隊以三年時間以詳細、深入的調查、試驗、監測、模擬，提出創新學術成果並供未來河道治理、跨河構造物維護、及中上游邊坡穩定分析與管理參考、及建立未來進一步探討地貌變遷研究的基礎。

本報告為整合性計畫總計畫期末報告，除摘述各子計畫的主要結論外，並將詳細說明總計畫執行的軟岩河床河道沖蝕數值模式建立及河道變遷模擬(以八掌溪為例)。由研究結果顯示，各子計畫皆能達到預期目標，總計畫執行的數值模式已能模擬軟岩河床沖蝕的趨勢，未來若進一步針對遷急點、及局部三度空間效應等加以改善，則可更有效的估算軟弱岩石河床的輸砂運移。

關鍵詞： 沖蝕模式、沖蝕試驗、沖蝕試驗、邊坡破壞、軟岩河床、地形測計、沖刷監測

ABSTRACT

Severe hazards induced by river erosion usually occur in the world, such as slope failures at a river upstream area, and engineering structures over a river in a downstream area. Both hazards often occurred after attack by a typhoon in Taiwan. Some drastically eroded rivers, where the river-bed are usually composed of weak rocks, after flooding were observed in some Taiwan rivers. Engineers in Taiwan conducted several approaches for modeling the river erosion processes and stabilizing the engineering problems. However, the effects of the approaches were poor because the fundamental problems of bed-rock river erosion were not completely understood. The fundamental problems include erosion mechanism, rock erodibility, river erosion model for rock bed, etc. This integrated research project, including five sub-projects, aims to investigate the fundamental issues of bed-rock river erosion and its related engineering problems in three years.

The research topics of the project include field study for river erosion phenomena on rock bed, development of the erosion mechanism, modeling the erosion mechanism, laboratory erosion test for weak rocks, scouring monitoring, modeling weak rock bed river erosion, investigating the effect of rock-bed river erosion on slope stability and the slope failure potential, etc. Several major original academic research results are summarized in this final report, including erosion model for soft rock river bed, scouring monitoring system, laboratory experimental setup and results of soft-rock erosion, the effect of river erosion on slope failure and geomorphometric index. In addition to the literature review and the summary of the major research results for the sub-projects, the results of hydraulic computation with proposed erosion models for the research sections at the Pa-Chang River are presented.

Keywords: erosion processes, rivers erosion model for bed soft-rock, laboratory river erosion experiment, scouring monitoring, geomorphometric index, slope failure.

1、前言

因板塊擠壓致使台灣島的地體上升率大、風化侵蝕作用盛行及岩性脆弱引致河床下切快速，並造成地形、地貌的快速變遷，國內實有必要針對地貌變遷的研究加以重視。河道沖蝕(river erosion)、地體上升(tectonics uplift)、及氣候變化 (climate) 三者為大尺度地貌變遷的主要影響因素，其中河道沖蝕程度更直接反應地體上升率及氣候變化性 (降雨量及強度等) (Howard et al.,1994)。就地形、地質現象而言 (長時間、大範圍)，要探討地貌的形成及變化，非考慮三者的交互作用不可。河道為地貌的自然邊界，河道的下切可能引致地貌的改變，而河道的下切速率與地體上升率及氣候變化息息相關，因此河道下切行為 (包括機制、影響因素、及沖蝕模式等等) 為探討地貌變遷的最重要課題(Whipple, 2004)。就工程行為言，河床下切可能造成河道的變遷、兩側邊坡的破壞(以中上游為甚) (此類破壞可能形成堰塞湖)、跨河構造物的不穩定，進而影響交通安全、影響取水功能、甚至造成大規模的洪水災害。因此，無論就大尺度的地貌變遷、或局部性的工程穩定性，河道的沖蝕特性 (沖蝕現象、演繹等等)，及其影響 (河道及邊坡等) 皆有必要詳細加以探討。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、或因採砂使護甲層喪失，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。前述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 (Lai & Greimann, 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，但結果並不盡如人意。

因此，本整合性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，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，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。

2、研究目的

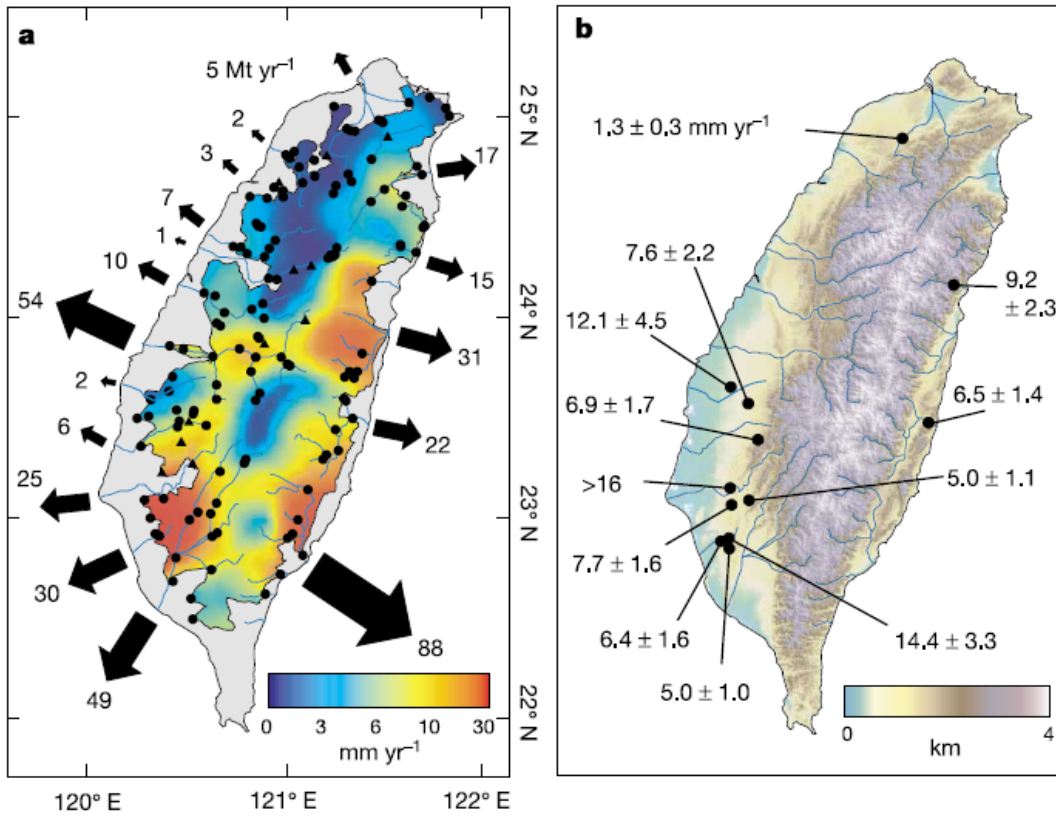
本整合性計畫『岩質河床沖蝕特性及其對邊坡及河道穩定的影響』的研究目的包括中下游軟弱岩石河床的沖蝕機制及演繹建立、沖蝕機制理論模式的建立與模擬分析、河道沖淤模擬分析、室內沖蝕試驗及現地沖刷監測的儀器建立與試驗及監測、中上游河床沖蝕機制建立、沖蝕對邊坡穩定的影響 (監測、分析、模擬)、河道沖蝕與地形測計的關係等等。

3、文獻探討

本總計畫期末報告針對各研究主題摘述文獻探討主要內容，其餘詳細內容可參考各子計畫期末報告。

(1) 台灣的地體抬升率與河床下切率

Ching et al, (2007)由台灣西南部 103 個 GPS 站的資料 (1995 年至 2005 年) 計算, 得到西部麓山帶及中央山脈區域地殼上升速率約為 10 to 20 mm/yr。Dadson et al. (2003) 由河川含砂量測的數據, 估計台灣北部區域河川下切率約為每年 1.5mm, 東部區域約為每年 9mm, 西部麓山帶活動斷層構造區則超過每年 15mm(圖一)。可見台地區的地體抬升率還稍大於河床下切率, 而劇烈沖蝕河段應屬局部性質, 亦極可能因跨河構造物、護甲層被挖除、或/及軟弱岩性的關係, 一般用於地貌變遷探討的沖蝕率模式, 可能不適用於局部或工程用途。



圖一、西部麓山帶及中央山脈區域地殼上升及河床下切率 (Dadson et al, 2003)

(2) 岩石河床的沖刷機制

近十數年來, 部分國外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。其中以 Whipple et al. (2000) 最具代表性, 他們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, 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。詳細內容可參閱子計畫二報告

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。本研究發現台灣西部劇烈沖蝕河段(如八掌溪、大甲溪、濁水溪等)磨蝕現象明顯, 亦存在抽離現象。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。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。

(3) 岩石河床的沖蝕率模式

早期國外對於岩石河床下切(incision) (沖蝕率) 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。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：

$$E=KA^mS^n \quad (1)$$

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，他們提出河床質彈跳磨蝕所產生的沖蝕率為：

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

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。

Lai & Greimann(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：

$$E = K_p U \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) + \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s} F_e \quad (3)$$

式中第一項為 Lai & Greimann 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。

Lai & Greimann 應經濟部水利署委託以工程觀點提出式(3)的沖蝕模式，並應用於集集攔河堰下游軟弱岩床沖刷計算，結果未盡如人易。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。

本節詳細內容請參考子計畫二報告。

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

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (4)$$

式(4)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，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。

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（雖然 Lai & Greimann, 2008 於其模式中將 τ_c 視為抗沖蝕指數 (K_h) 的函數，但亦未經完整驗證），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。

(4) 內涵理論與材料行為概念

內涵塑性理論可視為一種不具屈伏面之塑性力學模式，可藉由所謂「內涵時間指標」來隱涵考慮材料弱化、內部損傷、或疲勞效應，進而建構材料之組合律。本研究中，內涵時間指標可視為材料累積非彈性應變能之函數，也可間接表示成材料單位體積承受消散能量之函數。內涵塑性理論 (endochronic plasticity theory, 以下簡稱「內涵理論」) 乃藉由所謂之內涵時間量 (intrinsic time measure) ζ 以考慮材料內部性質之隱涵累積變化 (Valanis, 1975)，此內涵時間可視為材料內部應為應變歷史所造成之累積效應，內涵時間乃為一虛擬之時間指標，必然是單調增加，乃用來描述弱化、損傷、疲勞過程的量測指標。早期版本內涵理論中之內涵時間增量 $d\zeta$ 表示如下：

$$d\zeta^2 = P_{ijkl} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{kl} \quad (5)$$

P_{ijkl} 為與應變路徑 $d\varepsilon$ 相關之某一正定 (positive definite) 四階材料張量。然而無論是材料的弱化、內部損傷、或疲勞等效應之變化率與內涵時間變化率之間的關係必然具有其非線性，顯然會受應變位階 (或應力位階) 與應變歷史 (或應力歷史) 等因素之影響，因此可透過某一應變歷史之函數 f 將內涵時間增量正規化為內涵時間指標增量 (intrinsic time scale) dz ，如下所示：

$$dz = \frac{d\zeta}{f} \quad (6)$$

於基本之簡化模型中，若僅考慮材料受剪之非彈性力學行為，而忽略非彈性壓密，則軸差應力 s 與軸差應變 e 的關係可用下式表示：

$$s = \int_0^z \mu(z-z') \frac{\partial e}{\partial z'} dz' \quad (7)$$

$$\mu(z) = \lambda_\infty + \sum_{r=1}^n \lambda_r e^{-\rho_r z} \quad (8)$$

$\mu(z)$ 為剪力模數 (shear modulus)，隨著漸增之內涵時間指標 z 而遞減， λ_∞ 、 λ_r 、 ρ_r 為材料參數。

若有必要，上述模型可加以擴充，兼而考量材料受剪與受壓下之耦合非彈性力學行為。

早期版本之內涵理論(Valanis, 1975)中所定義內涵時間增量中所採之應變增量係考慮總應變增量(含可回復之彈性應變與不可回復之塑性應變)，因此其模擬材料反覆受載下之材料力學行為時，有些狀況下可能會出現不完全吻合既有理論或會與實際物理現象不符之事實。為改正此缺點，晚期之內涵理論中所定義之內涵時間增量中所採之應變增量改為不可回復之塑性應變增量，以上之問題即不復存在(Valanis, 1982)。若加適當之擴充，內涵理論可用來描述反覆應力路徑下之地質材料行為(Valanis, 1982; Lopez-Querol & Blazquez, 2007)。

當地質材料承受反覆載重，譬如反覆受剪，其剪應變量可能隨者反覆受剪循環增加而擴大，謂之「反覆受載潛變」(cyclic creep 或 ratchetting)。此種反覆受載潛變導致材料內部損傷或疲勞效應之累積(以下簡稱「內傷效應」)，內涵時間指標應可視為此種內傷效應之指標。類比於流通理論(percolation theory)之概念，一旦內涵時間指標(內傷效應指標)達到某門檻值時，材料即趨近崩潰狀態，將快速瓦解，當無法維持平衡，暴露於水部份即可能隨水流失。

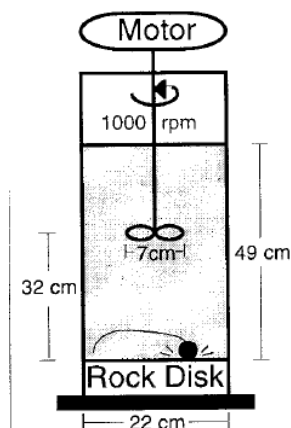
本節詳細內容請參閱子計畫一報告。

(5) 岩石河床沖蝕試驗

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, Nakato, 2002)。以下僅就與本計畫較為相關文獻(上述文獻後三者)重點說明如下：

1、Sklar & Dietrich (2001)

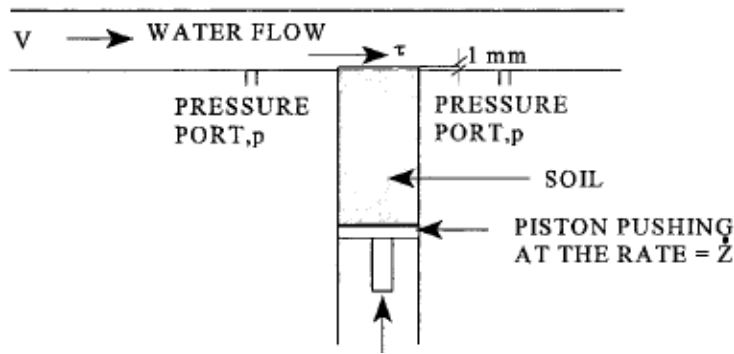
Sklar & Dietrich (2001) 認為河川提供沈積物之粒徑分佈與岩石河床下切速率有密切關係，但由於在現地進行岩床侵蝕與來砂量關係的量測相當困難，Sklar & Dietrich (2001)發展設計磨蝕試驗儀(圖二)進行室內的小尺度試驗。Gilbert (1877)最早指出河川提供的沈積物一方面有促進沖蝕之工具性效應(tool effect)，一方面卻具有防護沖蝕的覆蓋性效應(coverage effect)，相互抗衡。Sklar & Dietrich (2001)經由試驗推論河川提供沈積物之粒徑分佈會是主控河川下切速率之關鍵因素之一，試驗結果顯示，最大侵蝕率發生於粗粒料的供給量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。本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，但未來應可針對單一性質作評估



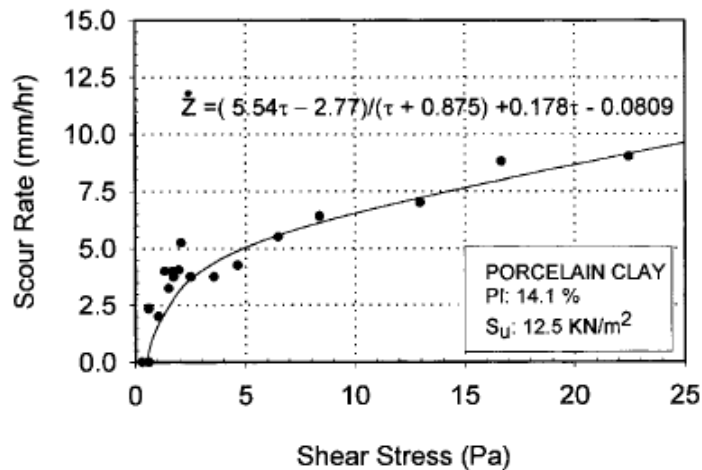
圖二 岩床磨蝕試驗儀示意圖(Sklar & Dietrich, 2001)

2、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三所示。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（圖四）。



圖三 EFA 抗沖蝕試驗儀器



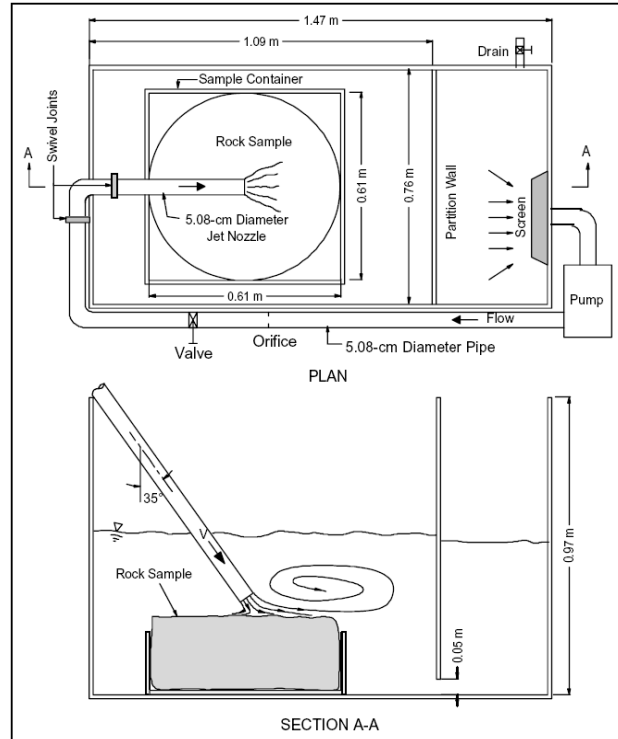
圖四 沖蝕速率對不同剪應力關係圖

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）。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。

3、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，IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research)設計一頁岩沖刷試驗設備(圖五)，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，其發展的適用性應再進一步加以評估



圖五 頁岩沖刷試驗示意圖

本節詳細內容請參考子計畫二報告。

(6) 軟岩質河川沖蝕分析模組及河道變遷模擬分析

國內外應用於河川輸砂計算之動床模式相當多，一般均採用數值模擬，河川沖淤數值模擬可以不同方式加以分類，吳建民(1991)將沖積河川模擬模式分為擬似定量流(steady flow)與變量流(unsteady flow)，目前較常被採用的一維河川動床模式包括 HEC-6、GSTARs、NETSTARs 等模式，但在軟弱岩床沖刷部分，由於國外河川並不常見，對於有關軟岩沖刷功能之模式亦相當少，本計畫以顯式有限解析法動床模式(explicit finite analytic, EFA)為河道水理及輸砂演算基礎，進行「軟岩沖蝕模組」程式化工作。關於顯式有限解析法動床模式之相關理論，可參考許至璉(2002)。

(7) 河床沖刷監測

沖刷監測可以提早識別潛在的沖刷問題，亦可以提供沖刷過程的量測，有助於掌握沖刷機制(特別是岩質河床的沖蝕行為)，目前需考量的幾大要點如下：(a)回淤監測：能否監測出回淤的深度。(b)惡劣河域環境工作性：在有流木、石塊或泥砂混濁的河域中，量測數據、訊號品質的好壞。(c)數據分析：得到的數據，需要經過簡單或困難的判讀程序才能得知沖刷深度。(d)電力供應：探測的感應器是否需要電力的驅動才能運作。

(8) 岩石河床沖蝕與中上游邊坡行為的關係

Stock et al. (2005)以美國及台灣之案例提出河谷中岩盤之風化侵蝕與季節性之乾濕循環有密切關係，此一發現於膠結不良之砂頁岩地層及富含黏土礦物之岩層又更加顯著。此一研究於美國太平洋西北區及台灣之西部山區選取水系並佈設調查點，並於調查點打設沖蝕釘進行長期監測，為進一步探討地質材料對河谷沖蝕之影響，也對不同岩石量測抗張強度(tensile strength)及耐磨蝕能力(slake durability)。Hartshorn et al. (2002)則以台灣立霧溪為案例，選取監測斷面打設沖蝕釘進行監測，探討降

兩對河谷沖蝕之影響，也對河谷之板岩及石英岩量測抗壓強度及抗張強度。而河床之高度之變化反應出侵蝕及堆積之事件過程，地形地貌的改變又可分為短期及長期之變化趨勢，如果要探討短期之變化趨勢就必須有頻率高或連續之量測，英國發展光電沖蝕釘之連續監測系統 Lawler (2008)，並成功使用於現地案例。Ben-Moshe et al. (2008)則以航空照片配合河階地高程、GPS 修正及死海水位驗證，來求取過去 110 年河道之變遷以及河谷之沖蝕。

數位影像相關係數法(Digital Image Correlation, DIC)根據物體在變化前、後兩張影像間的相關係數解析物體表面的位移場，進而推算出應變場、變形集中位置、裂縫位置等工程有用資訊(Chu et al., 1985, Vacher et al., 1999, Frauel et al., 2002, Lecompe et al., 2006)。它是一種非接觸式的全面量測(Total field measurement)技術，在不擾動受測物的情況下進行遠距觀測，得到快速而精確的量測結果，因此適合於結構物安全監測、大型結構系統識別、不確定位置之應變集中乃至裂縫的觀測或預測。數位影像解析度之提昇加上電腦處理器速度的提昇，允許進行更精細的分析程序，因此 DIC 解析精度持續提昇。本技術應用於材料科學研究以及航測技術領域已有多數年，而今因為其精度的提升，已可窺見其在結構力學以及防災領域的應用潛力。

Hartshorn et al. (2002)以台灣立霧溪為案例，選取監測斷面打設沖蝕釘進行監測，探討降雨對河谷沖蝕之影響，也對河谷之板岩及石英岩量測抗壓強度及抗張強度。而河床之高度之變化反應出侵蝕及堆積之事件過程，地形地貌的改變又可分為短期及長期之變化趨勢，如果要探討短期之變化趨勢就必須有頻率高或連續之量測，英國發展光電沖蝕釘之連續監測系統 Lawler (2008)，並成功使用於現地案例。

邊坡穩定之分析研究已經歷數十年，研究方法由早期的極限平衡分析發展到連體分析、靜態分析發展到動態分析；此外，新的研究方法如統計力學、模糊數學及非連體分析等也不斷被應用於坡地問題相關研究。近期之研究有 Nicholson et al. (1997)及 Maund & Eddleston (1998)對岩石邊坡破壞及對策之整體研究，Yang et al., (2001)等人配合監測結果以岩石力學分析方法研究邊坡破壞等。此外，考慮地質條件不確定性之統計力學方法也是近期研究廣泛被使用的，Eggers et al., (1999)考慮地質材料強度之變異性，Malkawi et al., (2001)以 Monte Carlo 法尋找不確定之滑動面，而 Baker & Leshchinsky (2001)則以安全係數之空間變異性來探討邊坡穩定性。

(9) 岩石河床沖蝕與地形測計及崩塌潛能的關係

崩塌潛能評估之研究主要領域包括災情評估與災害預測兩個領域。遙測技術雖然已廣泛應用，但是實務上，世界各國以及我國仍以精度與比例尺較高之航照或高解像力衛星影像之人工判釋為主(劉進金等人, 1998)。人工判釋所得之山崩為物件(objects)。這有異於一般影像自動分類方法，所獲得之一幅以像元為基礎的山崩自動分類圖(Idelsohn, 1970; Mantovani et al, 1996)。山崩自動分類圖像一幅圖畫(a painting-like picture)，難以進一步作後續潛在災害預測或危險度方面之探討。以往的研究甚少將河床沖蝕與地形測計及崩塌潛能評估的關係加以探討，但由台灣的調查結果顯示，其關係密切(林銘郎, 1997, 林銘郎等, 1996)。

Ehsani and Quiel(2008)利用 Wood (1996)所推導之地形測計參數，進行地形特徵描述，利用高程及平面座標二階導數計算獲得地形參數，使用 5*5 搜尋視窗進行計算，以公式求得坡度、最小曲率、最大曲率和截面曲率(Cross-sectional curvature)。計算之地形測計參數成果給定坡度和曲率門檻值，將地表進行分類，分類條件如圖所示，首先判定坡度門檻值，將地形分為平坦區域和陡峭區域，接著以曲率門檻值進行判定，分為點(peak、pit 和 pass)、線(ridge 和 channel)及面(plane)六類。Rüdiger, Z., R. et al. (2009)利用地形參數(坡度、坡向、Hypsometry 和集水面積)、河道縱剖面及標準化水平距離及高程分析進行集水區地形特徵的描述。平均坡度越陡，河川侵

蝕能力越強；Hypsometry 值越高，河川侵蝕能力越強。另外分辨標準化縱剖面凹度(concavity)，可分析河川侵蝕能力，凹度越大，侵蝕能力越強。

4、研究方法

以下僅就本總計畫（未含蓋於其他子計畫）主要分析方法說明如下（其他研究方法請參閱個子計畫）：

(1)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。本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。

(2)沖蝕監測場址選定、調查及試驗

為於現場瞭解洪水時期的沖蝕特性，本計畫利用相關的調查成果及考慮儀器裝置可行性、水流條件於八掌溪五虎寮橋河段進行監測場址調查及試驗。調查項目將包括地表地質調查、地質鑽探及取樣、現地指標性質試驗，鑽探岩心物理性質試驗（含單位重、含水量、超音波等）、單壓試驗、張力試驗、及沖蝕試驗等等。

(3)航照數位高程地形圖(DEM)製作

航空照片之優點是記錄地面完整資訊，而且可加以製作立體影像，提供空間上的高程變化資訊，且其在時間上有最多次之紀錄。航空照片使用上之限制在於拍攝時之像比例尺(農林航測所攝製空照約在 1/17,000-1/20,000)。立體影像製作過程可產出數位高程資料，在地面控制點精度良好的狀況下，高程精度約可達到 1 公尺（本研究選擇的研究河段每年的沖蝕量平均超過二公尺，因此其高程精度應可適用本研究），所以本計畫亦選擇合適控制點至現地進行檢測，以獲得最佳之高程精度。本將針對八掌溪、濁水溪、大甲溪等軟岩沖蝕河段以不同年代（至少四個年度）的航空照片進行數位高程地形圖製作。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。本項工作以交通大學立體工作站（軟體：GXP Explorer）執行。

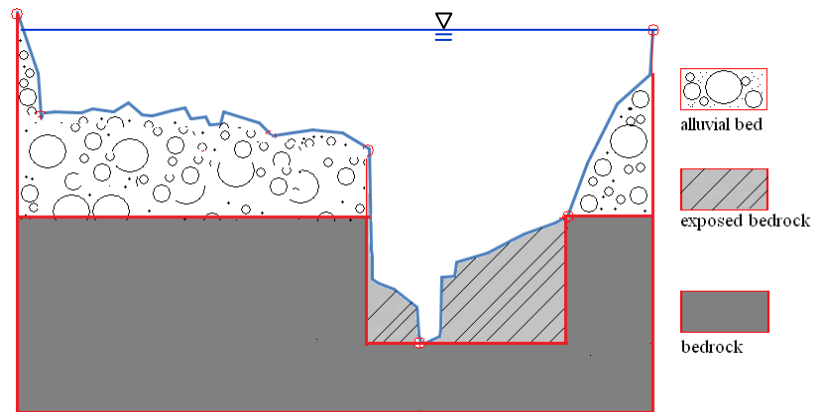
(4)軟岩河床數值模擬沖蝕模組建立、測試、與模擬

本研究採用前述之水力沖蝕、泥砂磨蝕與流功門檻機制，做為軟岩河床數值模式之「軟岩沖蝕模組」，以顯式有限解析法動床模式(explicit finite analytic, EFA)為河道水理及輸砂演算基礎，進行「軟岩沖蝕模組」程式化工作。

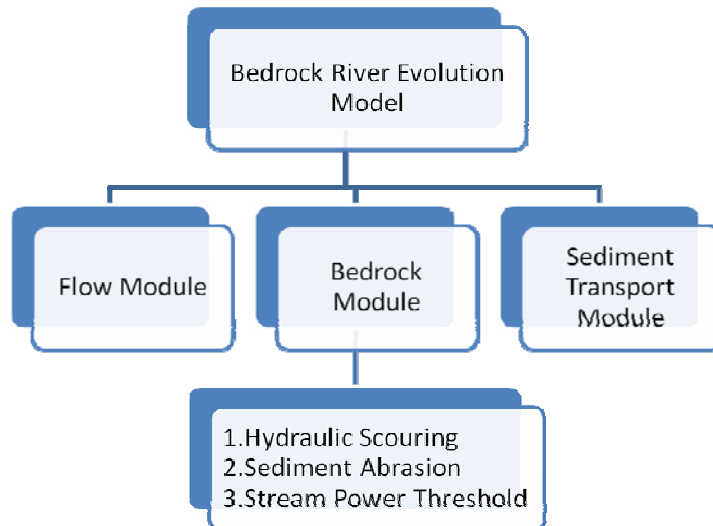
「軟岩沖蝕模組」河床分層處理概念，如圖六所示，模式可區分為沖積層河床(alluvial bed)、裸露軟岩(exposed bedrock)及底層軟岩(bedrock)三種類型。沖積層河床表示為一般河床質，可為砂質或卵礫石，採用「輸砂模組」進行底床變化與輸砂通量之演算；裸露軟岩表示裸露在河床表面之軟岩，採用「軟岩沖蝕模組」進行河床沖刷之演算，同時包括懸浮載與推移載之輸砂通量過程，以反映岩床面可能之淤積行為；底層軟岩則位於沖積層或裸露軟岩下，其岩體雖屬軟岩，但岩性強度較強，當表層之沖積層或裸露軟岩覆蓋深度受到沖刷消失時，則底層軟岩更新為裸露軟岩。EFA 模式可對不同分層、平面上之河床特性進行參數設定功能，如河床質 d_{50} 、分層深度、沖蝕指數 K_h 等，不同參數之平面與分層設定以接近現場真實狀況，而相關參數給定須透過試驗與現地調查決定。

本研究之岩質河床沖淤模式架構包含水理、輸砂與軟岩模組三部分，如圖所示。此三模組彼此為分離演算法。軟岩模組包括前述之水力沖蝕、泥砂磨蝕與流功門檻機制，水理、輸砂模組部分。模式具有變量流、非平衡輸砂、非均勻沈澱、河床質分層等功能，依序以水理條件、

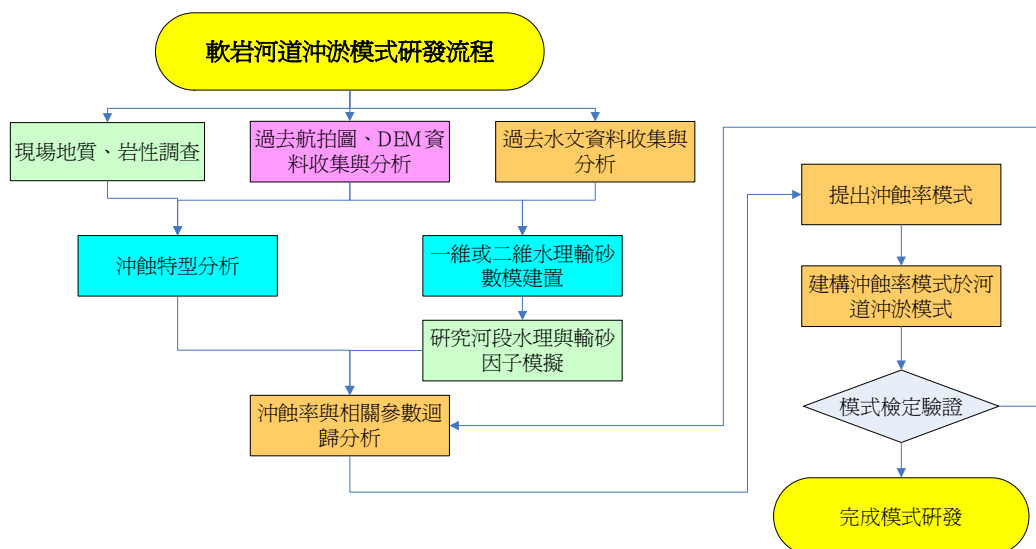
輸砂條件、軟岩沖刷量等進行計算。軟岩沖蝕模組與河床沖淤模式研發流程如圖所示，係主要根據歷史地形資料配合對應之洪水事件，將河床沖蝕深度與相對應之水理因子進行迴歸分析，並與實測沖蝕量比較，推得流功與河床沖蝕指數之門檻關係與經驗公式係數，再利用一般化經驗式形式獲得軟岩河床之沖蝕率公式。



圖六 河床特性與分層設定示意圖



圖七 岩質河床沖淤模式架構圖



圖八 軟岩沖蝕模式研發流程

5、研究成果與討論

本章除說明總計畫主體工作(如研究方法)之研究結果外,並摘述其他子計畫的主要研究結論(詳細研究成果請參閱各子計畫期末報告)。

(1)文獻蒐集與整理

本計畫已完整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,並由第一年度建立之 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。

本計畫亦已收集各河川之歷年大斷面測量資料,包括八掌溪民國 78、85、89、94、97、及 98 等 6 個年份大斷面測量資料;濁水溪民國 87、90、93、96、及 98 等 5 個年份大斷面測量資料;大甲溪民國 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。

(2)沖蝕監測場址選定

八掌溪五虎寮橋為本計畫的監測場址,各項調查皆已完成。五虎寮橋段地質概況與描述如下:五虎寮橋調查段以五虎寮橋為地質岩層分界,在橋之上游段仍屬泥質岩層為主;下游段則為泥質岩層夾薄砂岩層。岩層位態在此段已與觸口段有些差異位態呈 N20E、10NW,河流流向與岩層傾向約略一致,屬順向河段。

(3)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。製作完成的 DEM 請參閱子計畫二期末報告。

(4)子計畫一『岩石沖蝕力學模型之建構與運用』結論

彈跳磨蝕

彈跳磨蝕在節理不發達的岩體中是主控的沖蝕機制,在洪水中運移河床載會撞擊裸露的岩盤,造成材料沖蝕及弱化。過去學者少有討論弱化對岩體的影響,本研究針對隨著撞擊次數而累積的材料損傷行為進行探討。本研究以 PFC3D 進行一連串的虛擬顆粒彈跳試驗,記錄岩體材料在不同條件下的消散能量與鍵結斷裂行為,並提出一個概念試圖連結巨觀的數值分析模型,以下簡述關於彈跳磨蝕的研究成果。

- a. 低角度顆粒撞擊相較於高角度顆粒撞擊,轉移至岩盤的動能以摩擦功消散的比例較大,類似切削磨蝕的行為。但可能受限於撞擊顆粒過於圓滑,因此轉移動能較高角度小。
- b. 彈跳撞擊除了撞擊點會直接有體積沖蝕(鍵結斷裂 100%),附近區域材料也有弱化的跡象(鍵結斷裂<100%),這些弱化的區域內部已經有許多裂縫,若連通可能也會被沖蝕。
- c. 針對不同強度的材料,將顆粒撞擊消散能量對彈性應變能正規化,得到正規化消散能量與材料破壞比例之間的關係。微觀數值試驗的正規化消散能量,未來可以考慮用巨觀數值模型的塑性功來進行標定,建立兩者的關係。

- d. 本研究藉內涵時間指標的概念，以描述岩體受到顆粒撞擊所受的損傷。引用 PFC3D 三軸試驗的結果，來標定內涵時間指標的門檻值為何，根據結果顯示當鍵結破壞比達某門檻值時，試體已產生破壞面，剩下殘餘強度。將此概念引入至建構磨蝕作用下完整岩石之內涵力學模式，以描述岩石材料逐漸受損傷下之力學行為，當單位體積內的鍵結破壞比例累積至門檻值時，則可視為體積內裂縫連通，瓦解脫離。

塊體抽離

塊體抽離對於節理發達的岩體是主控的沖蝕機制，水流侵入裂縫，由波動動態壓力來主控節理連通。當節理連通後，由平均動態壓力來主控上舉速度，當上舉比例超過塊體厚度的 50%，則可視為塊體抽離。

本研究以 PFC3D 模擬塊體抽離行為，並探討塊體抽離機制的各項主控因子，包含平均動態壓力、波動動態壓力、水壓力頻率，節理面性質及岩橋性質，以下簡述關於塊體抽離機制的研究成果。

- a. 本研究用 smooth joint 作為節理面的接觸點力-位移模型，藉由這個模型可以消除不同尺寸的顆粒集合體可能造成之表面粗糙度影響，節理面性質可以由凝聚力、摩擦角、張力強度(tension cut off)來控制，惟其微觀與巨觀參數之轉換需要進行一連串的參數調整，頗為不便。
- b. 可以透過 area_ratio 指令決定不連續面上節理與岩橋的比例，並透過 large_strain 指令讓不連續面上新的顆粒接觸點為 smooth joint 性質。
- c. 根據研究結果顯示，平均動態壓力及波動動態壓力的上舉行為皆不受水壓力的震幅影響，因此可以將不同頻率的水壓力上舉量疊加求得塊體最終上舉量。但水壓力在裂縫中傳遞的放大效應，其實必然與共振頻率有關，可能是 PFC3D 目前所提供的阻尼模型有限，暫時無法模擬共振的水壓放大效應。
- d. 本研究提出簡化之分析方法可用於推估個別洪水條件下溢洪道或壩(堰)前沖刷坑之刷深發展量。當用於模擬義興壩於愛利颱風下之塊體抽離所造成沖刷坑之刷深增加量並比對現地測量資料，顯示可大致吻合。

(5)子計畫二『軟岩質河床的沖蝕調查、試驗及沖蝕率模式建立』結論

- a. 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。
- b. 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。

- c. 針對軟岩質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。

(6)子計畫三『傳輸線式自動化沖蝕監測技術研發』結論

- a. 沖刷之監測在沖刷研究與防災預警中扮演極重要的角色，本研究完整回顧既有之沖刷技術，雖然原理上可行，但於台灣河川惡劣的流況中長期運作，有其實務應用限制。時域反射 (Time domain reflectometry, TDR) 沖刷感測技術的概念雖已被提出，但許多實務問題仍待克服，例如訊號衰減引起之傳輸距離問題、考慮安裝實務的感測器設計及決定沖刷深度的訊號分析演算法等，因此本研究基於上述問題與需求，提出相關改良研發，企圖提昇沖刷觀測效能。
- b. 本研究首先於第一階段提出利用空心鋼管模擬鑽管，嘗試搭配不同之銅線配置與試驗驗證，開發出 TDR 沖刷鑽桿導波器。然而若使用桿式感測器在現場須結合鑽探施工，可能在進行鑽掘時便導致外部的硬塑鋼磨損，進而破壞外部導體。因此本研究於第二階段提出纜式桿測器之研發構想並完成配置測試，發展為結合地錨安裝概念與 TDR 導波感應鋼纜線之沖刷監測技術。配合實務安裝測試，發現纜線因固定方式限制，造成阻抗不連續而影響波形穩定，另外由於水面上的感測纜線受到降雨水潑作用，進而影響空氣段的走時，因此承接上述研究成果，第三階段研發則將原一大一小之鋼鍵感測器合併為一條鋼纜，並內嵌一同軸纜線，使得電磁波可由底部而上感應。如此施作方式預期可發揮鋼纜線本身的柔性與強度，使其能在險惡的環境下亦能有穩定的量測表現。
- c. 承接第二階段纜線感測器研發，在沖刷深度的訊號分析演算法，由於實務水土介面之反射訊號在有阻抗不連續面之多重反射作用下不易辨識，本研究參考相關文獻，建議避開水/土介面反射之決定，以空氣/水介面反射及末端反射之決定，因此本研究提出感測纜線於空氣、水及土中的速度率定程序，利用全走時分析提出同時決定水位及沖刷深度之可靠方法，配合室內試驗驗證其可行性。後續則配合第三階段電磁波由底部而上感應方式，

同時改良既有全走時分析程序，同樣取得室內驗證成果。

- d. 上述提出創新的感測器研發，以及全走時分析理論，均配合物理模型室內試驗來測試評估感測器的量測靈敏度。其中第二階段提出之纜式桿測器於第一年度完成室內評估後，第二年度於台中東勢大橋現地進行實際測試，本研究團隊一共安裝兩種包含懸吊式及固定式方法進行橋墩沖刷感測，因持續面臨實務量測問題（包含空氣段纜線降雨水潑影響等），因此配合第三階段感測器與演算法改良，在第三年度，本團隊於嘉義八掌溪新五虎寮橋以懸吊式進行河道沖刷監測系統安裝。惟於蘇拉颱風期間，上端纜線固定座鎖固強度不足，造成纜線遭洪水拉扯至河床，導致後續無法量測沖淤資料。目前已經提出上端纜線固定座改善設計。

(7)子計畫四『岩石河床沖蝕對上游邊坡工程行為的影響研究』結論

- a. 本研究使用崩壞比代入模式中進行對流量的修正，結果發現代入崩壞比後迴歸得到的 m/n 比與各測點上游集水區之河道縱剖面具有較佳一致性；換言之，河流藉由上游崩塌地所夾帶的泥沙對下游河道岩床造成的磨蝕沖刷有其相關性。
- b. 八掌溪河道斷面沖蝕量， m/n 比於 0.5 時，其相關性較佳，濁水溪河道斷面上游集水區面積過大，對於沖蝕行為較不明顯。
- c. 上游集水區之河相變化與抬昇率較無關聯，其原因可能為在小範圍裡的地殼抬昇率變化不大，河道上下游之沖刷主要由坡度以及流量所主導。

(8)子計畫五『以空載光達數值高程模型進行流域地形測計探討』結論

- a. 利用 PIV 技術應用於多時序影像，對於偵測河道擺盪量是可行的，可獲得河道水平方向之變化。接著納入高程分析，90 年至 98 年間，研究區河道中段大峽谷區域下切達 15m，且水平擺盪在 94 年後便趨於穩定，明顯看出地震隆起後，主要影響此區域河道之作用為河道下切，地體抬升影響不大，由此可以獲得震後三維之變化。本計畫所提之方法，對於了解河道變遷的確有所助益。
- b. DEM 自動萃取水系及集水區範圍，以此作為地形分區，探討八掌溪中上游不同集水區 88 年至 96 年變遷情況。研究成果顯示，不同集水區變遷情況不同，以地形測計參數和正規化縱剖面分析可區分其中差異。八掌溪最上游地區(子集水區 3)，河川下切作用最旺盛。子集水區 1 和 4 河道下切作用較強；子集水區 5 河道高程呈現些微上升。子集水區 6 為中游區域，高差較小，但人工構造物造成影響，河道下切作用旺盛。未來持續觀測研究

區集水區變化情況，了解變遷原因。

- c. 測高曲線參數對全台灣 26 條主要河川流域集水區進行分析，討論演育情形，並使用地形測計參數與集水區幾何型態因子對測高曲線積分作相關性分析。26 個流域集水區的測高曲線介於 S 形至凹形，符合 Ohmori(1993)以電腦模式模擬造山運動地區之測高曲線情況。測高曲線積分值偏低是因為以河流流域範圍當成實驗區域會使集水區面積過大，又因為台灣地形山高陡急，所以使得測高曲線積分值低估。測高曲線積分與集水區之坡度、高差、平均高度與河流坡度具有正相關性，與坡度、平均高度與河流坡度具有高相關性。集水區幾何型態因子可描述集水區之外觀，但各型態因子與測高曲線積分無相關性。SRTM 與農委會 DEM 的成果比較顯示兩者測高曲線積分趨勢相符，兩者差異量絕大部分介於-0.1~0.1，中央山脈地區之子集水區測高曲線積分值均介於 0.4~0.7 之間；西部丘陵以及花東縱谷地區測高曲線積分值小於 0.3；海岸山脈介於 0.3~0.4；西部海岸平原地區測高曲線積分則是介於 0.3~0.5。兩時期之測高曲線積分值可顯示演育成果，中央山脈差異量在正負 0.05 以內，變化較大之區域則出現在流域中下游以及西部麓山位置，變化量在正負 0.05 以上。子集水區出現偏度和峰度較大的地區為西部麓山帶、淡水河流域下游、蘭陽河流域下游以及花東縱谷地區，也與測高曲線積分值有變化之區域一致，顯示這些地區比起其他地區受侵蝕情況大。

(9) 軟弱岩石河床數值模擬沖蝕模組建立、與模擬

a. 軟弱岩石河床沖蝕模式建立

本計畫軟弱岩石河床沖蝕模式建立，彙整所有子計畫三年研究成果，循序進行模式之研發。藉由過去之岩質河床沖蝕模組研發與測試、目標河段水文、地質及岩盤形態之水力分析等，提出不同沖蝕主控機制之沖蝕模式，包含理論、經驗或數值等，並由現地沖蝕現象調查結果歸納最有可能之複合沖蝕機制，利用 EFA2D 水理輸砂模式，進行個別沖蝕模組與河道動床模式之整合、測試、檢定與驗證，以建立具有模擬複合機制之輸砂分析模組，透過數值計算建立不同條件下之沖蝕率公式，由實測與模擬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。相關成果彙整說明如下。

a.1 水理與輸砂模式架構

a.1.1 水理模式

國內外應用於河川之動床模式相當多，本研究以國立交通大學葉克家教授等研發之顯式有限解析法動床模式(explicit finite analytic, EFA2D)為河道水理及輸砂演算基礎，進行岩石質河床

沖蝕模式之建立。EFA2D 模式具有高精度之特性，且其數值方法為顯式法，具有易整合相關模組架構之特點，關於顯式有限解析法動床模式之詳細相關理論，可參考許至聰(2002)、Lin et al. (2006)等文獻，以下進行重點摘要說明。

對於不可壓縮流之控制方程式，其張量表示式如下：

連續方程式

$$V_{,i}^i = 0 \quad (9)$$

動量方程式

$$\frac{\partial V^i}{\partial t} + V^m V_{,m}^i = -g^{im} \frac{P_{,m}}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} g^{mn} V_{,mn}^i + F^i \quad (10)$$

對於不可壓縮流之控制方程式，其張量表示式如下：

式中， V^i 為速度向量 \vec{V} 在 ξ^i 座標方向之分量； t 為時間； g^{mn} 、 g_{mn} 為逆變(contravariant)和協變(covariant)之公制係數(metric coefficient)； ρ 為流體密度； P 為壓力； μ 為動力黏滯係數； F 為體力(body force)，變數上下標之值為 1~3，代表不同的座標方向。

對一般天然河川模式而言，可假設水深方向變化遠小於水平方向，並忽略風力、科氏力之影響，同時假設靜水壓分佈，將壓力轉換成水深形式等，可簡化原三維控制方程式之複雜性。

a.1.2 輸砂模式

EFA2D 模式採用之輸砂控制方程式，將河道輸砂通量分離為非均勻粒徑之懸浮載與河床載兩部份，同時求解某一粒徑之懸浮載、河床載質量守恆，及整體河床輸砂之質量守恆等三組控制方程式，控制方程式分別表示如下。

對於某一粒徑懸浮載質量守恆方程式：

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \nabla \cdot (C\bar{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{q} \quad (11)$$

對於某一粒徑混合層質量守恆方程式：

$$\rho_s(1-p_e) \frac{\partial(\beta E_m)}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q}_b + S + S_f = 0 \quad (12)$$

對於整體河床輸砂質量守恆方程式：

$$\rho_s(1-p_e) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum (\nabla \cdot \bar{q}_b + S) = 0 \quad (13)$$

上三式中， C 為懸浮質濃度； $\nabla \cdot \bar{q}$ 為擴散通量及由重力作用下之通量； ρ_s 為泥砂密度； p_e 為孔隙率； β 為粒徑百分比； E_m 為混合層厚度； $\nabla \cdot \bar{q}_b$ 為某一粒徑之河床載通量； S 為懸浮載源； S_f 為混合層源； z_b 為底床高程。

為求解上述三式，尚需一些補助關係式，以決定 q_b 、 q_s 、 E_m 、 S 及 S_f 。若考慮凝聚性或黏性沉澱時，其運移行為不同於一般非黏性沉澱，而 EFA2D 模式兼具黏性沉澱與非黏性沉澱運移之機制。EFA2D 模式為可考慮變量流(unsteady flow)與紊流(turbulence)之水動力模式(Hydrodynamic model)，輸砂方面可考慮非均勻粒徑、懸浮載非平衡輸砂、凝聚與非凝聚粒徑等，雖其仍具有水平二維之水深平均假設，但相較一般模式而言，其考慮之水理演算機制較為完整，應更能詮釋複雜變化地形下之流場行為。表 1 為 EFA2D 與國外相關先進模式之功能比較。

表 1 EFA2D 模式與國外相關先進模式比較

		CCHE2D	EFA2D	SRH-2D
數值方法		Efficient element method	Explicit finite analytic method	Finite volume method
水理模組	超、亞、混合流	○	○	○
	定量流、變量流	○	○	○
	乾濕點處理	○	○	○
輸砂模組	懸浮載與推移載分離	○	○	○
	床質級配	○	○	○
	護甲作用	○	○	○
	非均勻沉澱	○	○	○
	非平衡輸砂	○	○	○
	凝聚性沉澱	○	○	○
	軟岩冲刷機制	1.泥砂磨蝕	1.泥砂磨蝕 2.水力沖蝕 3.流功門檻	1.泥砂磨蝕 2.水力沖蝕
軟岩河岸冲刷		○		

a.2 不同型態之沖蝕模式

本研究將河床沖蝕型態區別為均勻沖蝕、遷急點後退沖蝕、河岸沖蝕，以進行數值分析模式建立，其中均勻模式為岩床不受遷急點影響的均勻下切模式。分別說明如下：

a.2.1 均勻沖蝕模式

台灣河川具有坡陡流急、沖淤劇烈之特性，當河床之沖積層受到破壞時，常造成底部之軟岩裸露，進而出現嚴重之河床冲刷與下切現象。目前在河道沖淤之數模研究，多針對沖積層與一般輸砂行為之模擬，在岩質河床冲刷之應用上恐嫌不足。根據早期文獻對岩質河床之定義，普遍認為岩質河床為缺乏連續覆蓋河床之沖積層，且長期輸砂通量(sediment flux)小於輸砂能力(sediment capacity)之河道。岩質河床之冲刷過程本身為不可逆，而在沖積層範圍，泥砂運移須滿足質量守恆特性，因此軟岩河川之拓寬、底床降低與側向變遷本質上與沖積層河

川不同。

一般學理上認為水流下切速度為軟岩河床侵蝕之主要原因，主要作用為水流流動過程中對軟岩所造成之切割、沖擊或塊體抽離。國內外既有軟岩沖蝕模式，常見者包括 Sklar and Dietrich (2004)之泥砂磨蝕(sediment abrasion)、Annandale (1995, 2006)之水力沖蝕(hydraulic scour)機制等。前者以泥砂在岩體表面之滾動、跳動為沖蝕概念基礎，將沖蝕率以顆粒沖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，用以做為沖蝕率計算之代表物理機制；後者則以水流能量消耗為沖蝕概念基礎，利用水流能量消散率與河道材質之沖蝕指數(erodibility index, Kh)迴歸，進而推估發生沖蝕時所需之水流臨界能量門檻值，再利用一般化經驗式進行沖蝕率推估。而上述無論泥砂磨蝕或水力沖蝕機制，皆屬於針對河床單位面積或單點之沖刷行為探討，可歸類為均勻沖刷模式。

關於泥砂磨蝕機制，Sklar and Dietrich (2004)修正 Foley (1980)之河床載磨蝕公式，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：

$$E = \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s} \left(1 - \frac{q_s}{q_t} \right) \quad (14)$$

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 1012~1013)， 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。

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 Kh 值，提出水流能量消散率 P (rate of energy dissipation)與河道材質沖蝕指數 Kh (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：

$$P_{crit} = \begin{cases} 0.48K_h^{0.44} & , K_h \leq 0.1 \\ K_h^{0.75} & , K_h > 0.1 \end{cases} \quad (15)$$

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：

$$\tau_c = \left[\frac{P_{crit} \sqrt{\rho} \left(\frac{k_s}{R} \right)^{\frac{1}{6}}}{7.66} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (16)$$

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：

$$E = K_p U \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \quad (17)$$

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)。

均勻沖刷模式中，除了泥砂磨蝕與水力沖蝕機制外，本研究認為水流流功與其河床材質抵抗能力所換算之臨界流功，為更直覺且合乎物理特徵之沖蝕機制模式。因此本研究根據大安溪之現場調查資料，包括歷年地形變化、岩性調查、水理與輸砂因子等，以水流流功門檻與流速之函數關係，做為沖蝕率一般化公式之概念基礎，迴歸相關係數，提出之流功門檻沖蝕率經驗公式形式表示如下：

$$E = K_s U \left(\frac{P}{P_c} - 1 \right)^\alpha \quad (18)$$

式中，E 為河床沖蝕率(m/s)；K_s 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)；P 為水流流功；P_c 為岩盤河床之臨界流功，表示如 $P_c = K_h^\beta$ ；K_h 為沖蝕指數； α 與 β 為流功門檻權重指數，分別為 0.2 與 0.1。(本節詳見子計畫二期末報告)

a.2.2 遷急點後退沖蝕模式

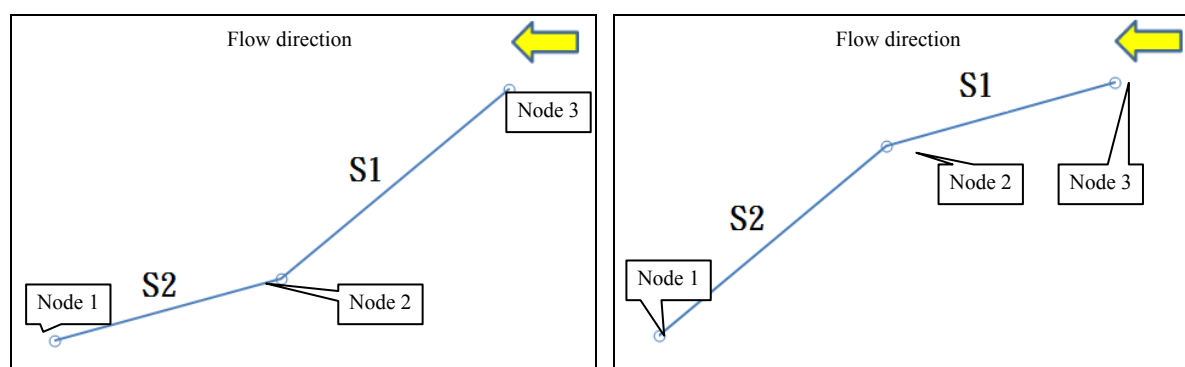
岩質河床除了單點或單位面積之均勻沖刷外，受到流速、地貌、岩性與地質條件影響，常發生遷急點後退行為，因此遷急點後退機制亦為本研究探討之沖蝕模式。針對一般岩質河床之遷急點後退過程，本研究提出兩種概念，其一為利用河床縱坡度判斷遷急點後退是否發生，再修正底床因遷急點後退增加之沖刷率。模式演算係根據各計算點上游段坡度(S1)與下游段坡度(S2)之關係，如圖九所示，當 $S1 > S2$ ，假設 Node 2 計算點不發生遷急點後退行為，其底床沖刷率 E 沿用過去研提之軟岩沖蝕率經驗式；當 $S1 < S2$ ，假設 Node 2 計算點會發生遷急點後退行為，其底床沖刷率為原沖蝕率經驗式之 T_s 倍數關係，遷急點後退機制相關方程式如下所示。

$$\begin{cases} E = E_u & S1 > S2 \\ E = E_u(1 + T_s) & S1 < S2 \end{cases} \quad (11)$$

$$E_u = K_s U \left(\frac{P}{P_{cm}} - 1 \right)^{0.2} \quad (12)$$

$$P_{cm} = K_h^{0.1} \quad (13)$$

式中， E 為底床沖刷率； $S1$ 為計算點上游段坡度； $S2$ 為計算點下游段坡度； T_s 為遷急點後退沖蝕係數； E_u 為流功門檻沖蝕率； K_s 為無因次沖蝕係數； U 為平均流速； P 為流功； P_{cm} 為臨界流功； K_h 為河床沖蝕指數。



圖九 遷急點後退機制 1 河床坡度判斷示意圖

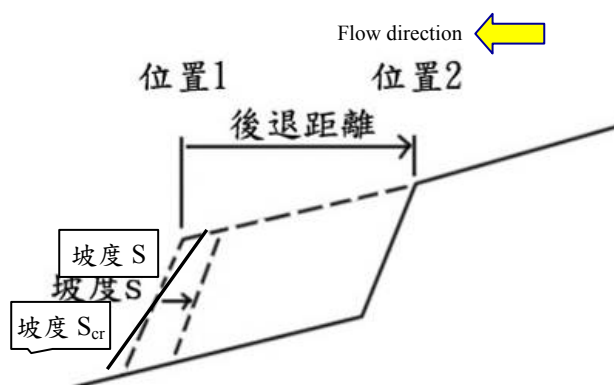
另一種判斷方式，概念上利用河床坡度與臨界坡度判斷遷急點後退是否發生，再修正底床因遷急點後退增加之沖刷率。模式演算係根據各計算點之縱坡度(S)與臨界坡度(S_{cr})之關係，如圖十所示，其中臨界坡度(S_{cr})須由現場調查決定。當 $S < S_{cr}$ ，假設計算點不發生遷急點後退

行為，其底床沖刷率 E 沿用過去研提之軟岩沖蝕率經驗式 E_u ；當 $S > S_{cr}$ ，假設計算點會發生遷急點後退行為，其底床沖刷率為原沖蝕率再加上遷急點後退之沖蝕率。此外，模式假設在微小時間間距內，滿足 $S > S_{cr}$ 條件者即進行遷急點後退沖刷之初步修正，待累積一定程度後，則將累積修正值還原河床，發生較大規模之遷急點後退沖刷。遷急點後退機制相關方程式如下所示。

$$\begin{cases} E = E_u & S < S_{cr} \\ E = E_u + E_k & S > S_{cr} \end{cases} \quad (14)$$

$$E_k = \frac{I}{I + e^{\alpha(S_{cr}-S)}} \times E_u \quad (15)$$

式中， E 為底床沖刷率； E_u 為均勻沖刷之流功門檻沖蝕率； E_k 為遷急點後退沖刷之流功門檻沖蝕率； S 為計算點之河床縱坡度； S_{cr} 為計算點之遷急點後退臨界坡度； K_s 為無因次沖蝕係數； U 為水流平均流速； P 為流功； P_{cr} 為臨界流功； α 為遷急點後退指數； K_h 為河床沖蝕指數。



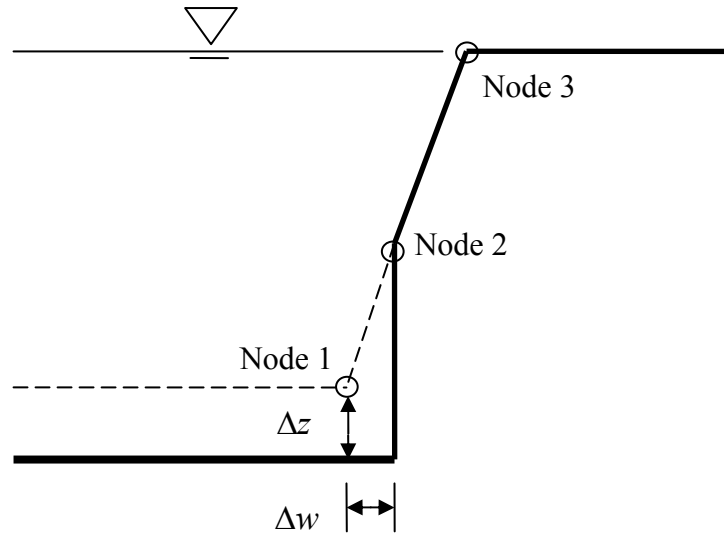
圖十 遷急點後退機制 2 河床坡度判斷示意圖

針對不同底床變化特性，EFA2D 模式可選擇不同遷急點後退機制進行模擬，前者較適合地形崎嶇變化明顯之河床，藉由各計算點前後坡度關係之判斷，修正其遷急點後退沖刷行為；後者則適合遷集點平行後退明顯之河床，利用臨界坡度 S_{cr} 與河床坡度關係之判斷，修正

a.2.3 河岸沖蝕模式

本研究之軟岩河岸沖蝕模式，藉由邊坡穩定分析河岸之臨界側向拓寬距離 W_{cr} ，再利用模擬之相關水理因子，計算垂向沖蝕量 Δz ，套入側向沖蝕率公式計算 Δw ($\Delta w = K \times \Delta z$ ， K 為小於 1 之係數)，判斷累積之河岸沖蝕量 Δw 是否大於臨界側向拓寬距離 W_{cr} ，以決定河岸是

否崩坍，並進行河岸之地形修正。河岸之地形修正方面，如圖十一所示，假設 Node 1 計算點滿足 $\Sigma \Delta w > W_{cr}$ 之條件，Node 2 將發生岸壁崩坍，其崩坍後底床假設與 Node 1 計算點之底床相同，在此演算法下河岸可呈現逐漸側向拓寬之趨勢。



圖十一 河岸沖蝕地形修正示意圖

a.3 相關沖蝕模式與河道輸砂模式整合

本研究整合前述之水力沖蝕、泥砂磨蝕與流功門檻機制，同時考慮遷急點後退與河岸沖蝕模式，做為岩質河床沖蝕模式之「岩床沖蝕模組」，相關機制彙整如表 2 所示。以國立交通大學葉克家教授等研發之顯式有限解析法動床模式(explicit finite analytic, EFA)為河道水理及輸砂演算基礎，進行「岩床沖蝕模組」程式化工作。關於顯式有限解析法動床模式之相關理論，可參考許至聰(2002)等文獻。

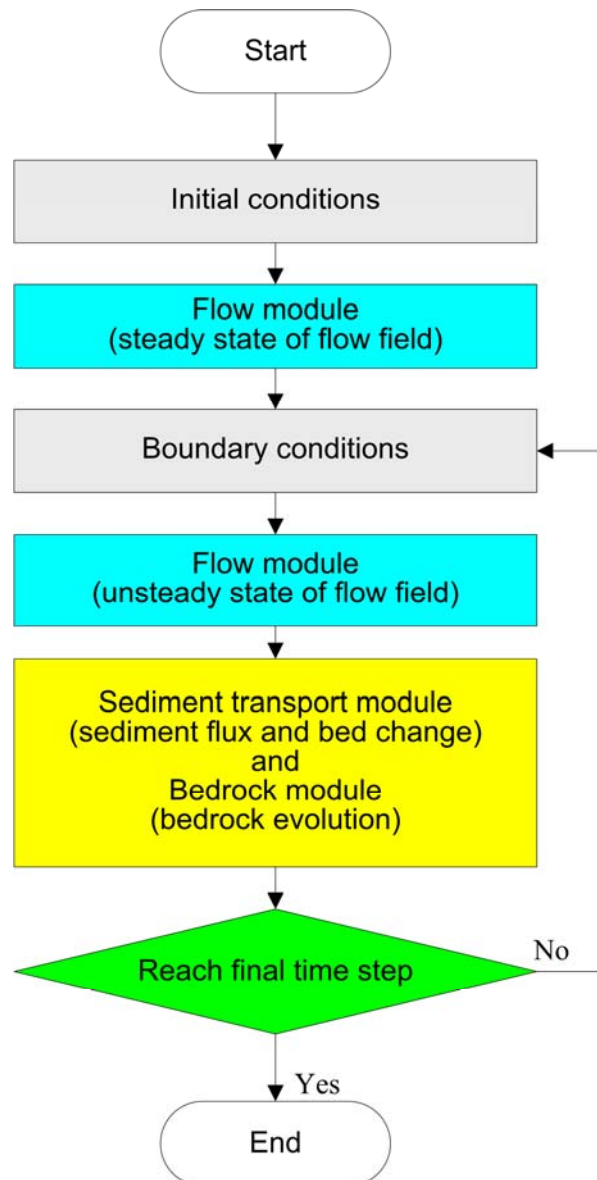
「岩床沖蝕模組」河床分層處理概念，如圖六所示，模式可區分為沖積層河床(alluvial bed)、裸露岩床(exposed bedrock)及底層岩盤(bedrock)三種類型。沖積層河床表示為一般河床質，可為砂質或卵礫石，採用「輸砂模組」進行底床變化與輸砂通量之演算；裸露岩床表示裸露在河床表面之岩盤，採用「岩床沖蝕模組」進行河床沖刷之演算，同時包括懸浮載之輸砂通量過程，以反映岩床面可能之淤積行為；底層岩盤則位於沖積層或裸露岩床下，其岩體雖屬岩盤，但岩性強度較強，當表層之沖積層或裸露岩床覆蓋深度受到沖刷消失時，則底層岩盤更新為裸露岩床。EFA 模式可對不同分層、平面上之河床特性進行參數設定功能，如河床質 d_{50} 、分層深度、沖蝕指數 Kh 等，不同參數之平面與分層設定以接近現場真實狀況，而相關參數給定須透過試驗與現地調查決定。

本研究之岩質河床沖蝕模式架構包含水理、輸砂與岩床沖蝕模組三部分，演算流程與模式架構如圖十二所示。此三模組彼此為分離演算法。岩床模組主要包括前述之水力沖蝕、泥砂磨蝕與流功門檻機制，水理、輸砂模組部分，另可選擇性考慮是否開啟遷急點後退或河岸沖蝕模式。模式具有變量流、非平衡輸砂、非均勻沈澱、河床質分層等功能，依序以水理條件、輸砂條件、岩床沖刷量等進行計算。岩床沖蝕模組與河床沖淤模式研發流程如圖八所示，係主要根據歷史地形資料配合對應之洪水事件，將河床沖蝕深度與相對應之水理因子進行迴歸分析，並與實測沖蝕量比較，推得流功與河床沖蝕指數之門檻關係與經驗公式係數，再利用一般化經驗式形式獲得岩床之沖蝕率公式。

表 2 岩質河床沖蝕模式相關機制彙整表

相關機制	沖蝕率公式	備註	建議
水力沖蝕	$E = K_p U \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)$	<p>E：沖蝕率(m/s) K_p：無因次沖蝕係數 U：流速(m/s) τ：底床剪應力(N/m²) τ_c：臨界剪應力(N/m²)</p>	具有均勻沖刷特性之岩質河床皆可適用。
泥砂磨蝕	$E = \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s}$	<p>E：沖蝕率(m/s) q_s：單位河寬供砂量(kg/m/s) w_s：泥砂顆粒衝擊速度(m/s) Y：岩床彈性模數(Pa) k_v：岩床強度參數 σ_T：岩床張力強度(Pa) L_s：泥砂顆粒躍動長度(m)</p>	所須調查或設定之參數較多，上游邊界泥砂濃度、粒徑級配條件明確者較適用。
流功門檻	$E = K_s U \left(\frac{P}{P_{cr}} - 1 \right)^\alpha$	<p>E：沖蝕率(m/s) K_s：無因次沖蝕係數(-) U：流速(m/s) P：單位面積流功(W/m²) P_{cr}：臨界流功(W/m²) α：冪次方係數(-)</p>	具有均勻沖刷特性之岩質河床皆可適用。
遷急點後退 1	$\begin{cases} E = E_u & S1 > S2 \\ E = E_u (1 + T_s) & S1 < S2 \end{cases}$	<p>E：沖蝕率(m/s) E_u：均勻沖刷沖蝕率(m/s) $S1$：計算點上游段坡度(-) $S2$：計算點下游段坡度(-) T_s：遷急點後退沖蝕係數(-)</p>	具有均勻沖刷與遷急點後退特性之岩質河床皆可適用，適合地形崎嶇變化明顯之河床。

遷急點後退 2	$\begin{cases} E = E_u & S < S_{cr} \\ E = E_u + E_k & S > S_{cr} \end{cases}$ $E_k = \frac{I}{1 + e^{\alpha(S_{cr} - S)}} \times E_u$	<p>E：沖蝕率(m/s) E_u：均勻沖刷沖蝕率(m/s) E_k：遷急點沖刷沖蝕率(m/s) S：河床縱段坡度(-) S_{cr}：遷急點臨界坡度(-) α：遷急點後退指數(-)</p>	具有均勻沖刷與遷急點後退特性之軟岩河道皆可適用，適合遷集點平行後退明顯之河床。
河岸沖蝕	$\Delta w = K \times \Delta z$ <p>If ($\Sigma \Delta w > W_{cr}$) 河岸崩坍</p>	Δw ：側向沖蝕量(m) Δz ：垂向沖蝕量(m) K：河岸拓寬沖蝕係數(-) W_{cr} ：臨界側向拓寬距離(m)	具有河岸拓寬特性之岩質河床可適用。



圖十二 岩質河床沖蝕模式演算流程與架構圖

b.八掌溪目標河段軟弱岩床及岩岸沖蝕模擬

b.1 背景說明與模擬條件

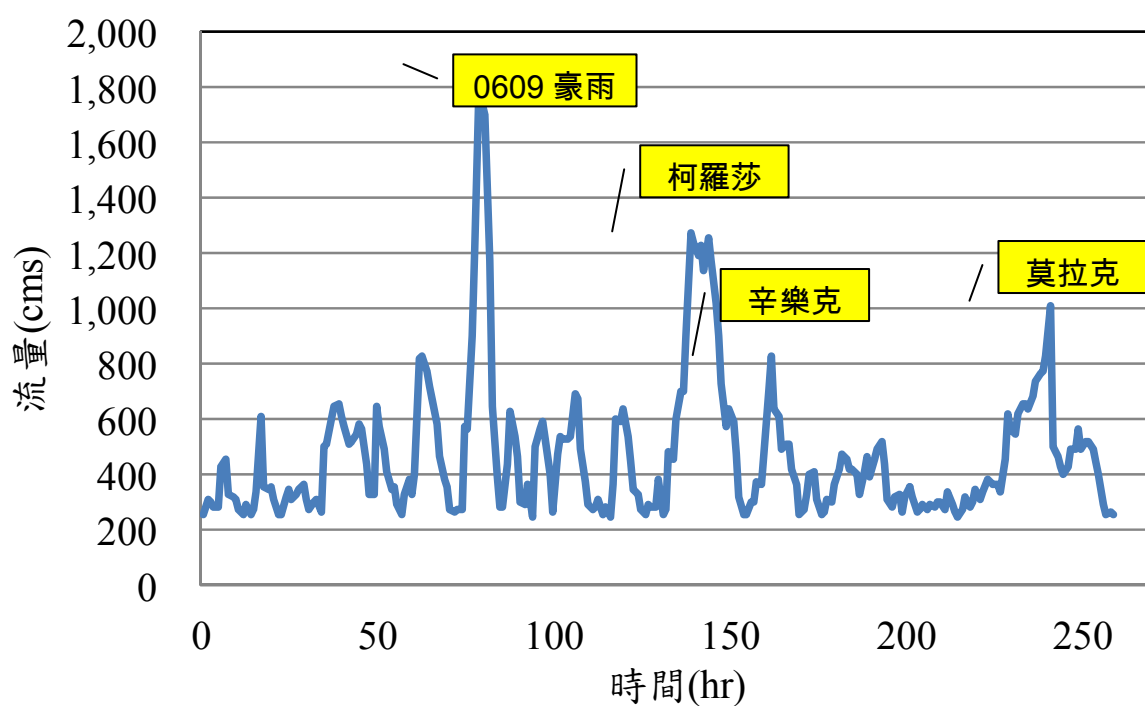
八掌溪位於台灣中南部，屬中央管河川，全長約 80.86 公里，流域面積約 474.74 平方公里，為台南縣與嘉義縣之縣界溪。八掌溪流域持續觀測之雨量站有小公田(2)、大湖山、龍美共 3 站、水位站有觸口、義竹(厚生橋)、軍輝橋、常盤橋、八掌溪橋共 5 站。依據水規所民國 100 年「八掌溪治理規劃檢討報告(稿)」之水理分析成果，八掌溪由河口至仁義潭攔河堰(斷面 100)為治理計畫公告河段，採用 50 年重現期距洪水為計畫流量，仁義潭攔河堰至觸口橋(斷面 117)原為縣管轄河川，現已納入中央管河川，訂定計畫流量為 50 年重現期距洪水。

彙整研究河段近年主要颱風事件之洪峰流量，其中較具代表性之洪水事件包括民國 85 年賀伯颱風、90 年桃芝颱風、95 年 0609 豪雨、96 年柯羅莎颱風、97 年卡玫基颱風、98 年莫拉克颱風等，根據實測斷面資料顯示，颱風事件過後，八掌溪河床常有明顯沖刷情形發生，近年以仁義潭攔河堰下游最為明顯，斷面 99 位置之落差達已達 21 公尺上下，其次沖刷明顯河段為觸口攔河堰下游之五虎寮橋河段。河床質粒徑方面，觸口橋(斷面 117)至軍輝橋(斷面 86)河段，河床質粒徑 d_{50} 約界於 29.19mm~149.05mm，斷面 94 以上則多為塊石、礫石次之，斷面 94 以下為卵礫石居多；軍輝橋至下游河口粒徑則有明顯細化趨勢，屬砂質粒徑， d_{50} 約界於 0.1mm~1.0mm。

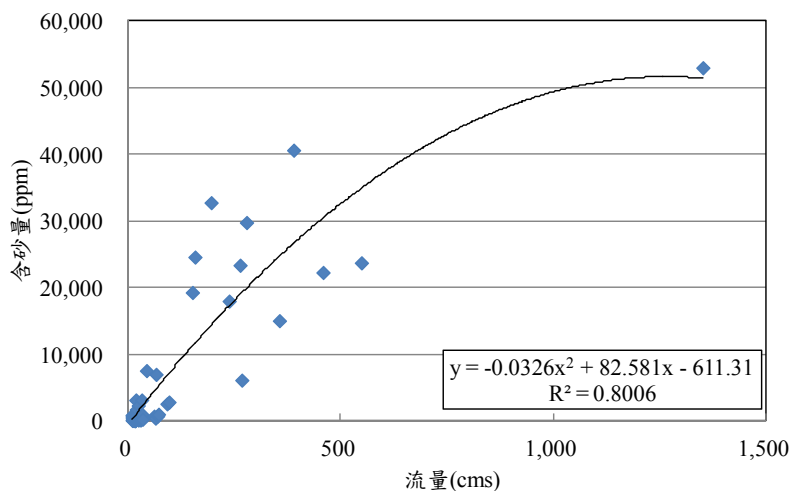
本研究針對八掌溪進行岩質河床沖蝕模式之應用模擬，挑選水力沖蝕(E1)、泥砂磨蝕(E2)與流功門檻沖蝕(E3)機制進行比較，並考慮遷急點後退型態進行模擬。模擬範圍自觸口攔河堰至吳鳳橋(仁義潭攔河堰上游)，長約 7.5 公里，如圖十三所示。初始地形採用 92 年 7 月 DEM 資料，藉由 98 年 10 月 DEM 資料進行比對。上游邊界入流量選用觸口站 92~98 年之主要洪水事件，約 260 小時，如圖十四所示；門檻流量方面，根據八掌溪水理分析結果，在流量約 250cms、河道平均水深約 2.5~3m、流速約 5m/s 之條件下，河道之水流剪力約為 300~400N/m²，而觸口攔河堰至吳鳳橋最小之沖蝕指數 Kh 值約為 30 以下，換算臨界流功與臨界啟動剪力後，其臨界啟動剪力約為 900N/m²，因此挑選 250cms 為門檻流量尚屬保守；下游邊界則根據治理規劃報告水理分析結果，採用吳鳳橋位置水位對應觸口站流量迴歸率定曲線；入砂條件則根據觸口站實測流量、懸浮載濃度率定曲線進行換算，如圖十五所示；河床質粒徑 d_{50} 根據過去資料，設定為 80mm，河床糙度設定為 0.042；其他參數如表 3 所示。



圖十三 八掌溪案例模擬範圍



圖十四 八掌溪觸口站 92~98 年主要洪水事件流量歷線



圖十五 八掌溪觸口站 80~99 年實測流量-含砂量率定曲線

表 3 八掌溪案例模式參數檢定表

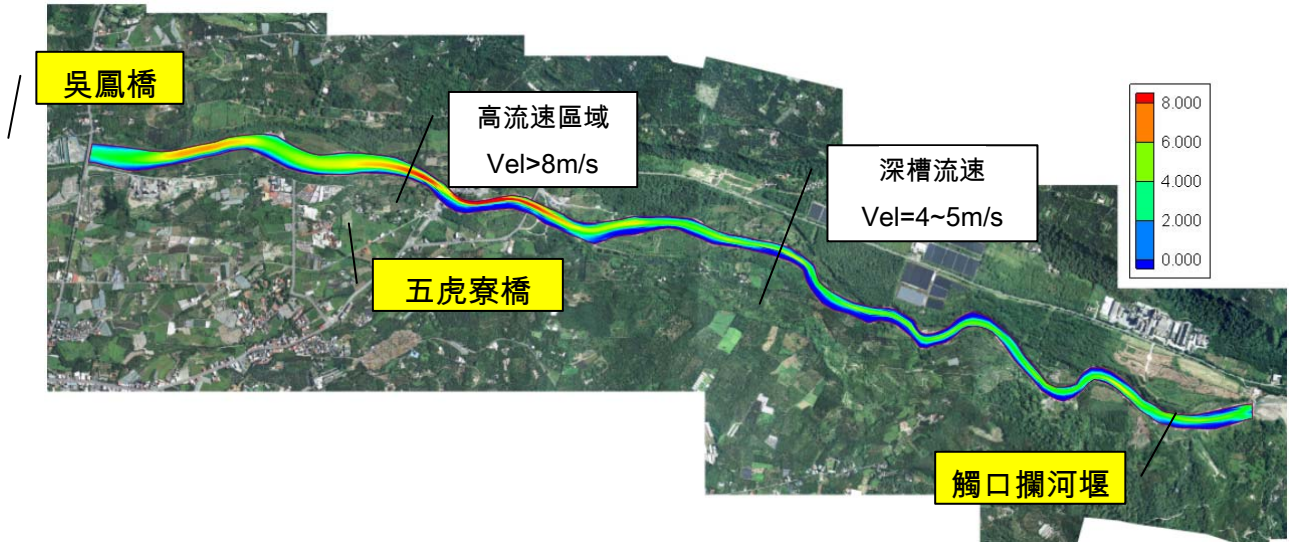
參數名稱	參數值	軟岩沖刷機制公式
無因次沖蝕係數 K_p	$0.5 \cdot 10^{-7}$	$E1 = K_p U \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)$ $\tau_c = \left[\frac{P_{crit} \sqrt{\rho}}{7.66} \left(\frac{k_s}{R} \right)^{\frac{1}{6}} \right]^{\frac{2}{3}}$ $P_{crit} = \begin{cases} 0.48 K_h^{0.44} & , K_h \leq 0.1 \\ K_h^{0.75} & , K_h > 0.1 \end{cases}$
沖蝕指數 K_h	現場資料	
粗糙高度 k_s (m)	$2 \cdot D_{50} = 2 \cdot 0.08$	
岩床強度參數 k_v	10^{12}	$E2 = \frac{q_s w_s^2 Y}{k_v \sigma_T^2 L_s} \left(1 - \frac{q_s}{q_t} \right)$
岩床彈性模數 Y (MPa)	385	
岩床張力強度 σ_T (MPa)	0.32	
無因次沖蝕係數 K_s	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$E3 = K_s U \left(\frac{p}{p_c} - 1 \right)^\alpha$ $p_c = K_h^\beta$
流功門檻權重指數 α	0.2	
臨界流功指數 β	0.1	
曼寧 n 值	0.042	-

b.2 模擬成果與討論

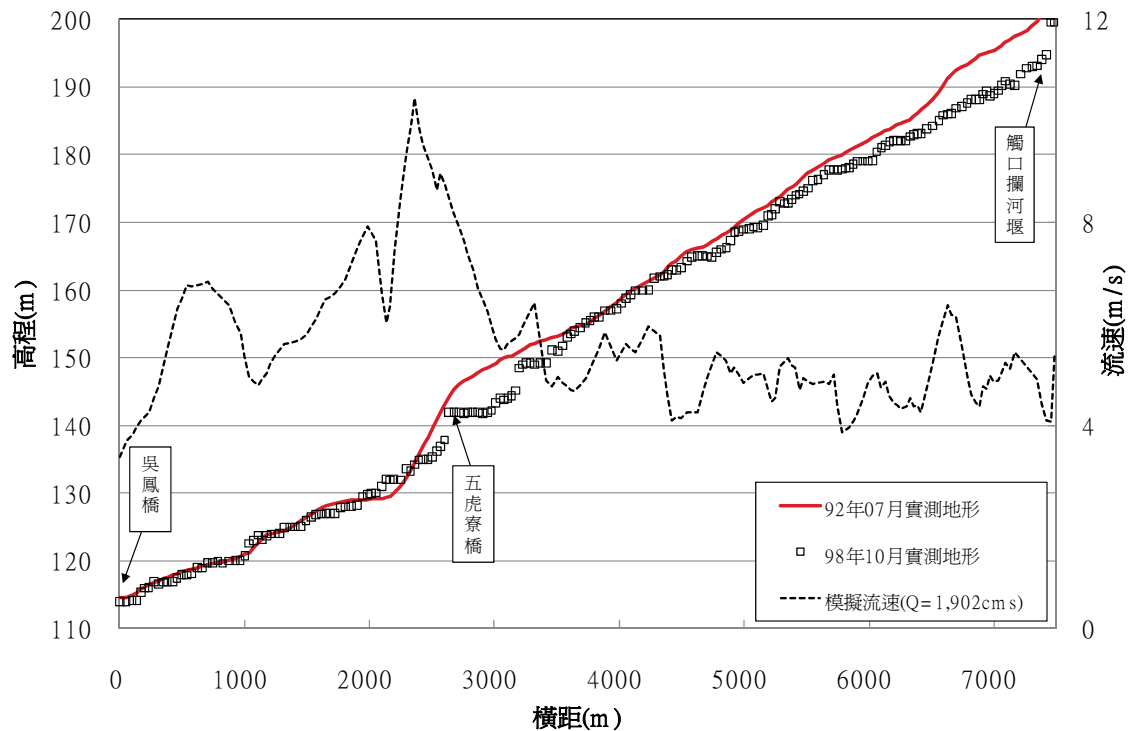
b.2.1 均勻沖蝕模式模擬成果

圖為 92~98 年間，研究河段模擬洪峰時刻(0609 豪雨)之流速分布，洪峰流量 Q_p 約為 1,900cms。觸口堰至五虎寮橋河段，洪峰時深槽平均流速約在 4m/s~6m/s 上下；五虎寮橋下游至吳鳳橋河段，因河道坡降變陡且受到洪水過程之沖刷影響，上下游底床產生劇烈高程差，至下游平均流速可達 8m/s 以上。圖為模擬洪峰時刻之流速縱剖面與底床縱剖面分布，挑選深槽位置之流速與底床作為代表，觸口堰至五虎寮橋河段，因坡度均勻，洪峰時流速變動範圍約維持在 4m/s~6m/s 上下；進入五虎寮橋下游，因上下游劇烈高程落差與坡度變陡，下游段整體流速有明顯增加情形。由平面流速與深槽縱剖面流速分布可知，兩者趨勢相近，

說明八掌溪自觸口攔河堰至吳鳳橋河段，河床深槽化已相當明顯。



圖十六 八掌溪觸口攔河堰至吳鳳橋模擬洪峰流速分布(觸口 $Q_p=1,900\text{cms}$)

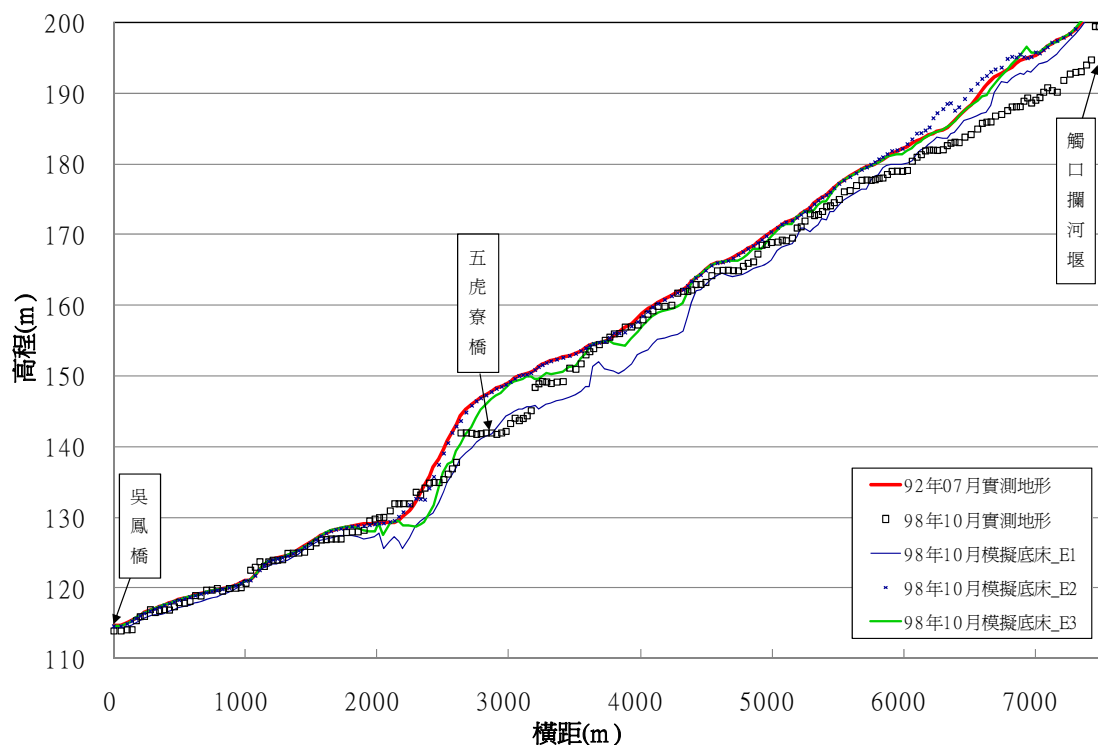


圖十七 八掌溪 92~98 年底床深槽縱剖面與模擬流速縱剖面圖

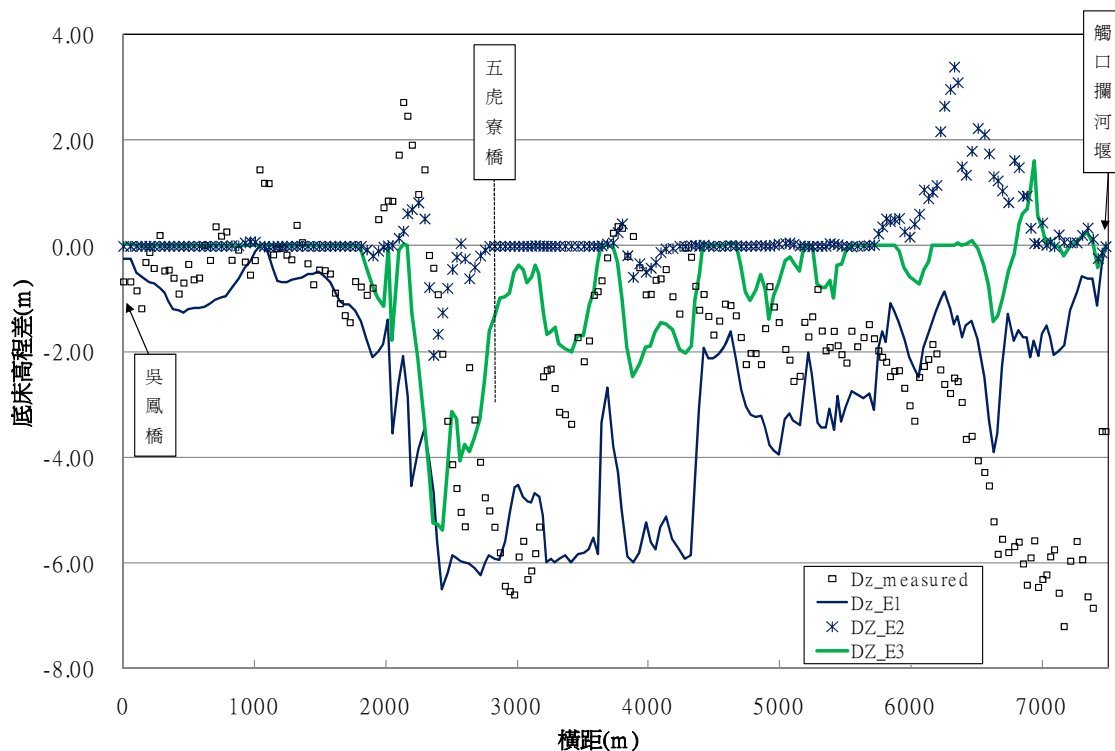
圖為水力沖蝕(E1)、泥砂磨蝕(E2)與流功沖蝕(E3)模式之模擬底床縱剖面(綫線高程)比較，為深槽最低點高程連線所繪製。模擬結果顯示，92~98 年實測地形中，經歷 0609 豪雨、柯羅莎與莫拉克颱風後，觸口堰下游、五虎寮橋段有明顯沖刷，吳鳳橋上游深槽由於具有沖積層，因此並無明顯岩床沖刷情形發生。

模擬底床沖淤深度縱剖面，如圖所示，縱剖面高程差正值為淤積、負值為沖刷。針對不同岩床沖蝕模式加以比較發現，觸口堰下游各機制之沖刷深度皆有低估情形，評估該河段應有攔

河堰下游局部冲刷之影響因素在內；五虎寮橋上游河段水力冲刷機制(E1)有明顯冲刷高估情形，泥砂磨蝕機制(E2)有低估情形，臨界流功機制(E3)模擬結果相對前二者較好；吳鳳橋河段上游深槽由於具有沖積層，在深槽同樣假設為沖積層情況下，模擬與實測底床比較結果良好。



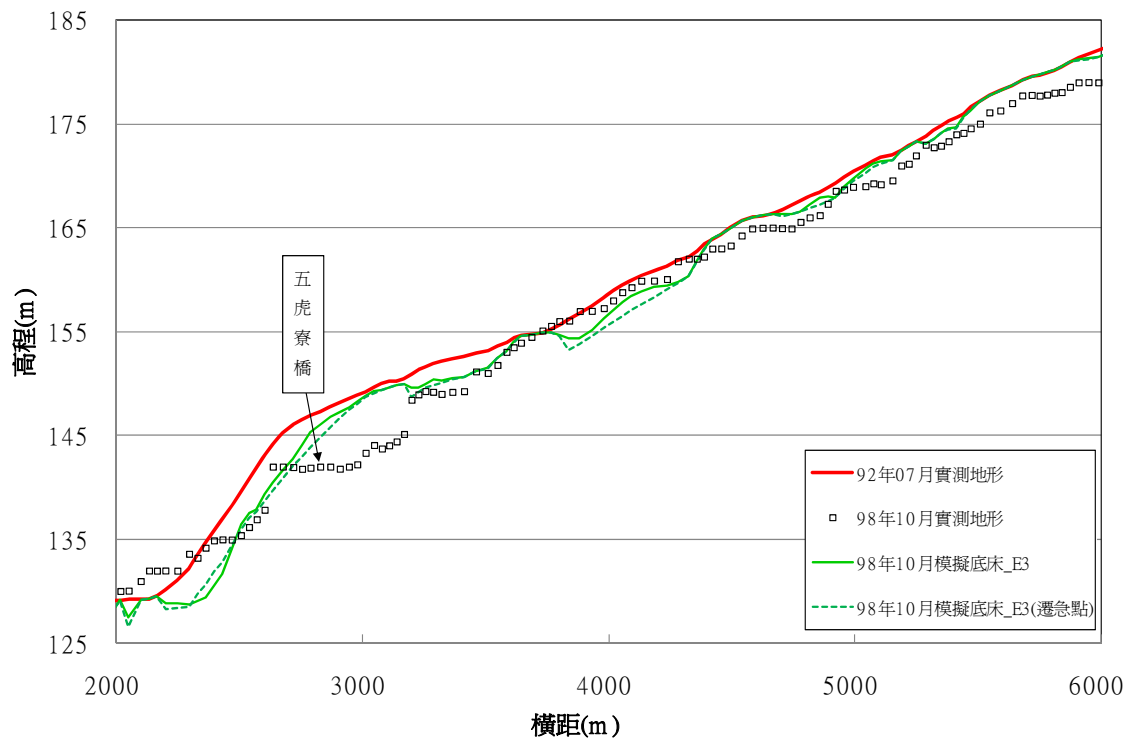
圖十八 八掌溪模擬底床縱剖面(鉛線高程)比較圖(92~98年)



圖十九 八掌溪模擬底床變化量縱剖面比較圖(92~98年)

b.2.2 遷急點後退沖蝕模式模擬成果

圖為比較八掌溪開啟遷急點後退機制之底床縱剖面圖，以臨界流功機制(E3)之模擬結果進行比較。由模擬結果可知，開啟遷急點後退機制後，五虎寮橋段之沖刷有增加之趨勢，可更接近實測值，而上游段底床若滿足遷急點後退之判斷機制，其底床沖刷皆有些許增加情形。但整體來說，由於八掌溪河道之沖刷行為並非由遷急點後退機制所主控，主要應以均勻沖刷及構造物下游局部沖刷影響居多，因此本研究提之遷急點後退沖蝕模式將再藉由其他河川進行模擬檢討與比較。



圖二十 八掌溪模擬底床縱剖面(綫線高程)與遷急點機制開啟比較圖(92~98年)

為突顯本報告於遷急點倒退及河岸沖蝕研發結果，本報告摘錄交通大學執行經濟部計畫(2012)於大安溪峽谷段的模擬結果如下：

c. 大安溪峽谷河段岩床及岩岸沖蝕模擬分析

c.1 背景說明與模擬條件

大安溪峽谷段為台灣典型之岩床沖刷案例，且其劇烈之地形變化相對無受到人工或跨河構造物等影響。於民國 93~98 年亦有遷急點後退沖刷情形發生，部分斷面亦有河岸拓寬情形，因此選用大安溪峽谷段進行模式檢定驗證模擬。檢定模擬採用 89 年地形作為初始底床、93 年地形進行檢定；再以 93 年地形為初始底床，98 年地形進行驗證，模擬範圍自斷面 51~斷面 40，如圖所示。

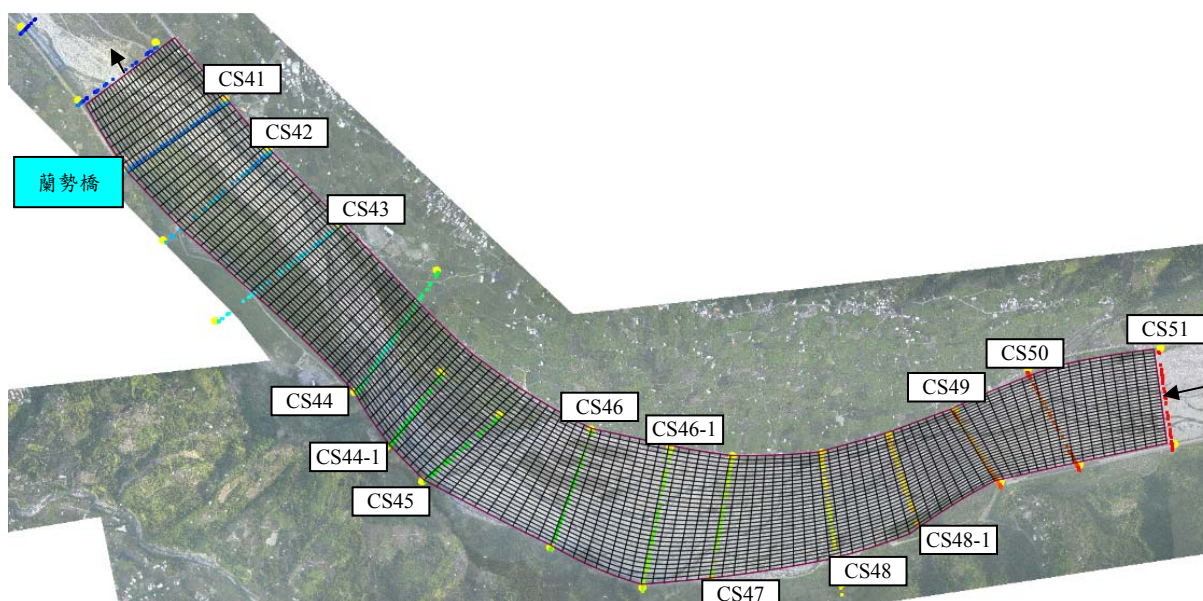
上游邊界採用實測雨量資料，配合國立台灣海洋大學李光敦教授研發之 KW-GIUH 模式，進

行斷面 51 位置之入流量推估，模擬 90~98 年之主要洪水事件(流量大於 300cms 時段)，共計約 500 小時；下游邊界採用卓蘭站實測水位資料，缺測時段則以 HEC-RAS 模式計算大安溪全河段水位後給定。邊界條件之推估過程與檢定驗證成果，可參考水規所 96~98 年之「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例」報告。模擬上游流量、懸浮載濃度、下游水位邊界條件，如圖、圖所示。

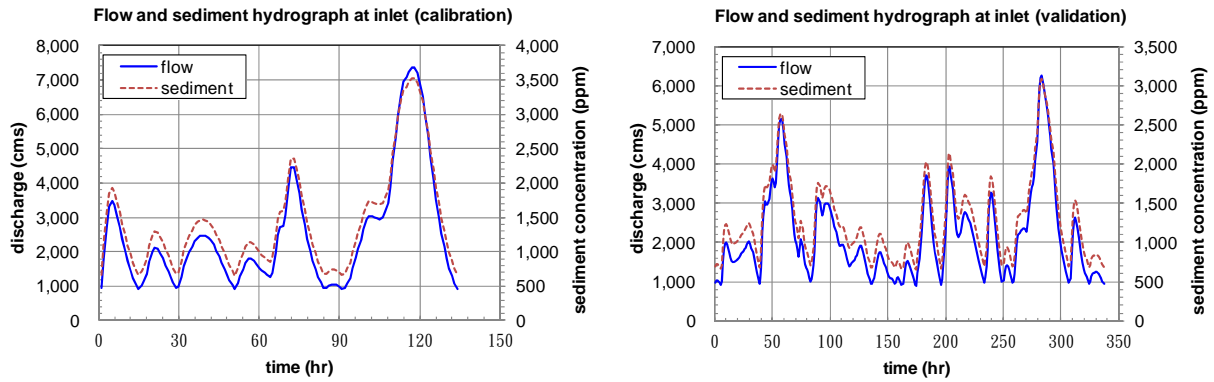
模擬岩床機制方面，採用臨界流功門檻機制，並開啟遷急點後退機制 1 與河岸拓寬模式進行比較；岩床參數 K_h 值部分，則根據現場調查成果給定，其中若河床不屬岩床區域，則給定為沖積層；河床質代表粒徑方面，根據過去調查成果，本河段之沖積層多為卵、礫石，因此採用三組代表粒徑，分別為 67.8mm、87.0mm、117.3mm；河道曼寧 n 值跟據治理規劃報告，給定為 0.042，相關參數設定如表 4 所示。

表 4 大安溪案例模式參數檢定表

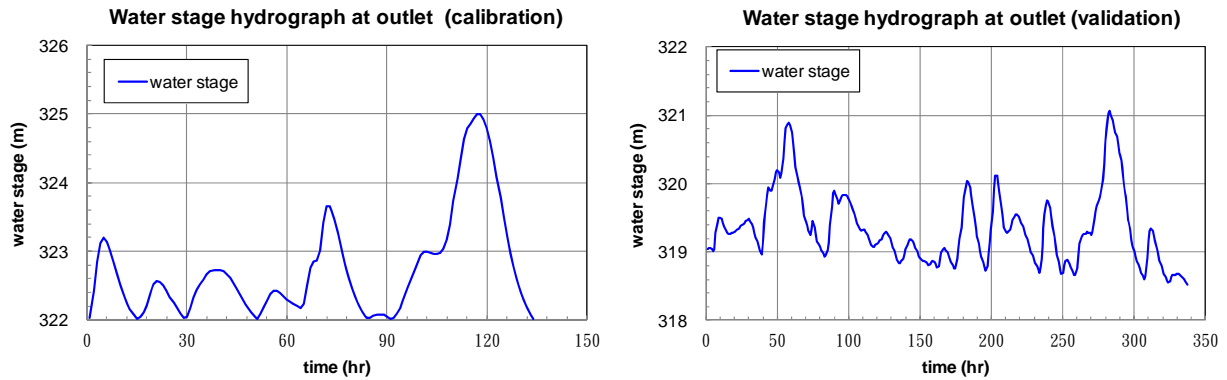
參數名稱	數值	相關機制公式
無因次沖蝕係數 K_s	1.0×10^{-6}	$E = K_s U \left(\frac{P}{P_{cr}} - 1 \right)^\alpha$ $P_{cr} = K_h^\beta$
流功門檻權重指數 α	0.2	
臨界流功指數 β	0.1	
岩床沖蝕指數 K_h	25~812	
曼寧 n 值	0.042	
河岸拓寬沖蝕係數 K	3.0	$\Delta w = K \times \Delta z$ If $(\sum \Delta w > W_{cr})$ 河岸崩坍
臨界側向拓寬距離 W_{cr} (m)	0.35~3.0	



圖二十一 大安溪案例模擬格網與範圍圖



圖二十二 大安溪案例模擬上游流量、濃度邊界條件圖



圖二十三 大安溪案例模擬下游水位邊界條件圖

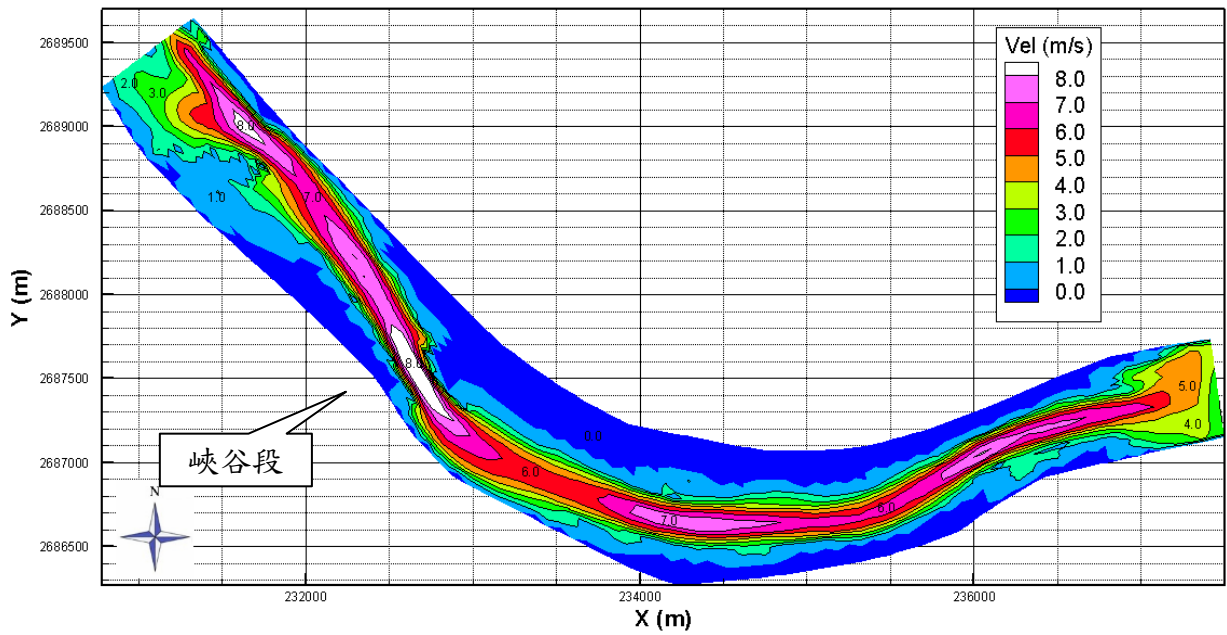
c.2 模擬成果與討論

c.2.1 均勻與遷急點後退沖蝕模式模擬成果

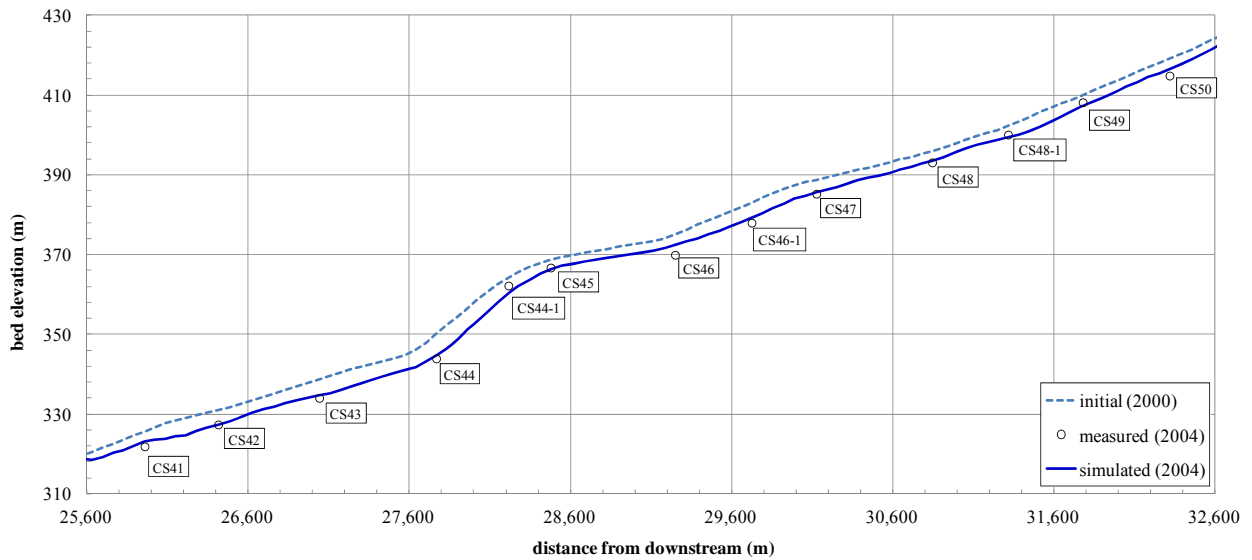
圖為 89~98 年期間洪峰時($Q_p=7,367\text{cms}$)之模擬流速分布結果，由流速分布可知，大安溪峽谷段有明顯高流速情形，最高流速約為 8.0m/s ，上下游深槽區域之流速約為 $5\sim 7\text{m/s}$ ，兩岸高灘地僅有些許漫淹情形產生。圖為檢定案例模擬之底床縱剖面圖(89~93 年)，由深槽最低點連線繪製而成，與 93 年之實測底床相比，模擬底床變化趨勢相近，全河段皆為沖刷趨勢，最大約為 6m ，發生於峽谷段之斷面 44 位置，而 89~93 年期間，大安溪模擬範圍上至下游大致為整體均勻沖刷趨勢。

圖為大安溪案例驗證模擬之底床縱剖面比較圖，93~98 年於峽谷段之斷面 44~46 有明顯沖刷產生，亦有遷急點後退之情形；斷面 46 至上游邊界斷面 51 則有些許淤積，峽谷段(斷面 44~46)因 921 地震產生之隆起河床有逐漸沖刷平緩情形，整體河床上下游有沖刷至平衡坡度之趨勢，至 98 年底床已趨於平衡。比較開啟遷急點後退機制之底床縱剖面模擬結果，斷面 44~45、斷面 46~46-1，於開啟遷急點後退機制後，底床有較明顯後退沖刷情形產生，沖刷量相對未開啟前增加，且河床縱剖面有平滑化之情形。整體來說，在考慮遷急點後退機制後，模擬底

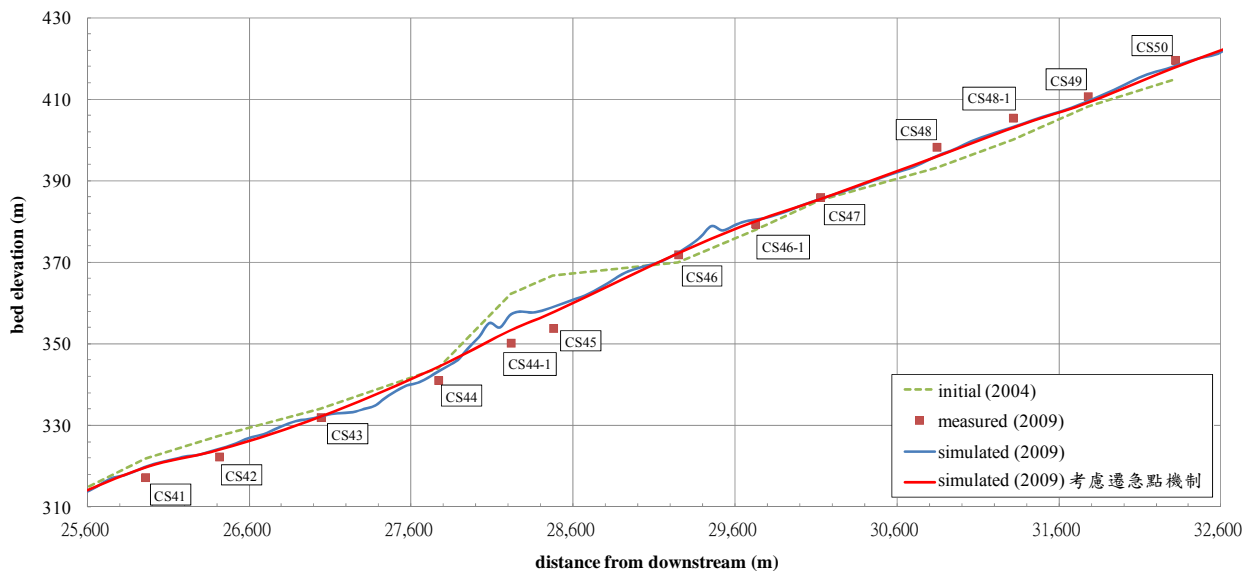
床與實測有更為相近之趨勢。



圖二十四 大安溪案例模擬洪峰($Q_p=7,367\text{cms}$)流速分布圖



圖二十五 大安溪案例檢定模擬底床縱剖面比較圖

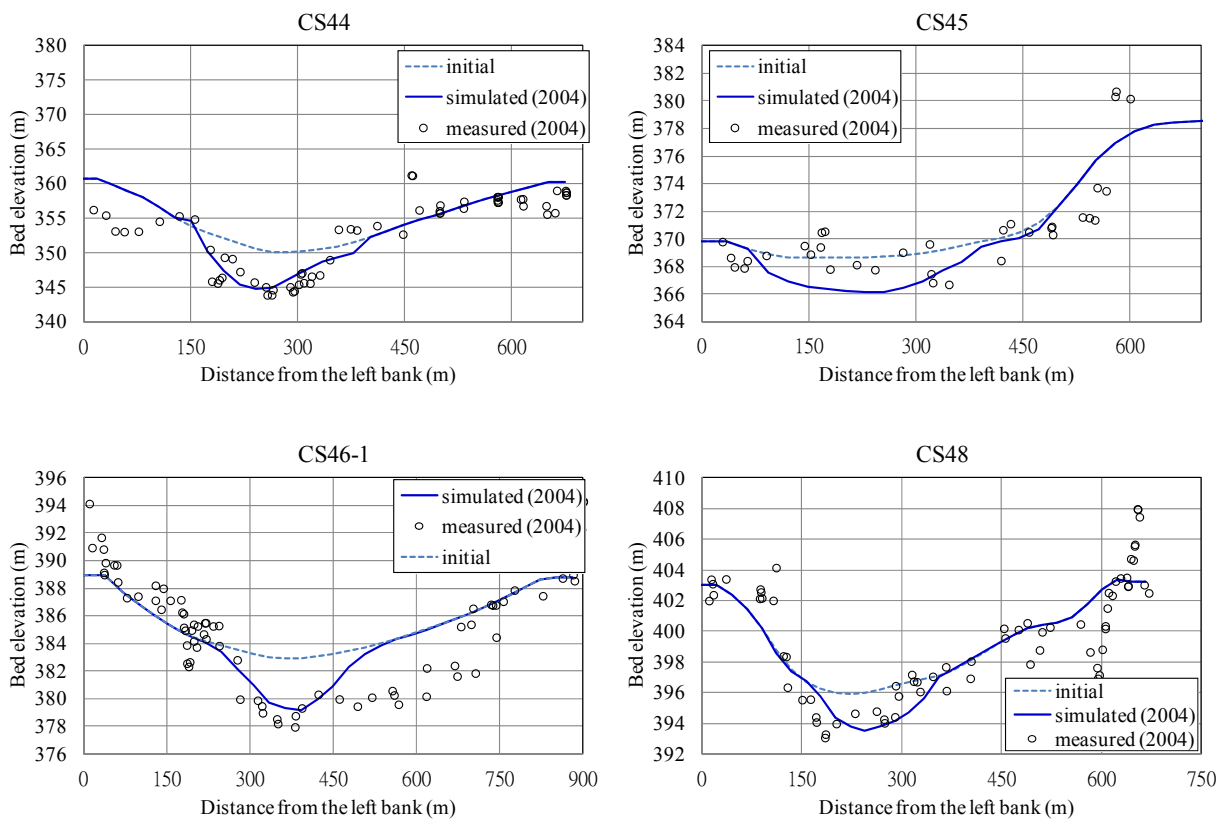


圖二十六 大安溪案例驗證模擬底床縱剖面比較圖

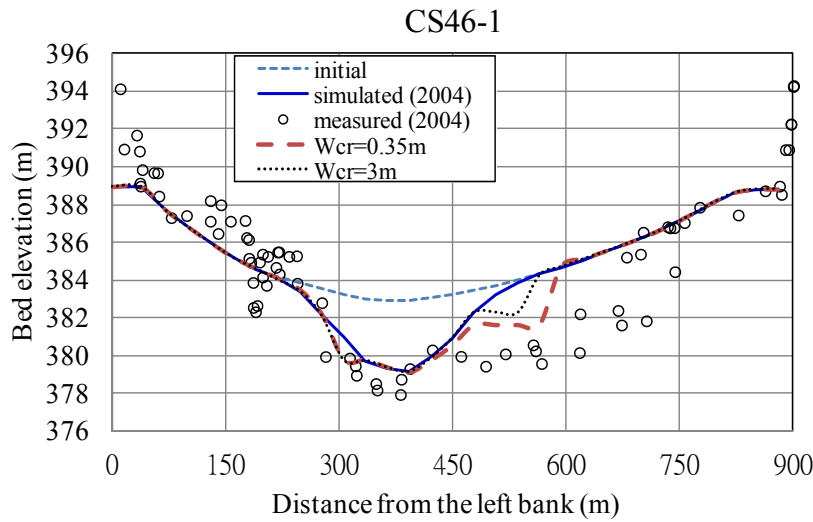
c.2.2 岩岸沖蝕模式模擬成果

挑選數個代表斷面進行岩岸沖蝕模式之模擬比較，斷面圖如圖所示。由模擬結果可知，模擬底床與實測變化相近，89~93 年之深槽底床有明顯下刷情形，深槽多為均勻整體下刷，部分河段有河岸拓寬情形，如斷面 46-1 在不考慮河岸拓寬機制情況下，右岸岸壁之沖刷將有低估情形。

圖為考慮河岸拓寬機制後之模擬斷面橫剖面圖，在考慮河岸拓寬機制後，模擬底床可更接近實測之變化，斷面 46-1 右岸岸壁之拓寬情形可模擬呈現，但 89~93 年由於河床變化仍以深槽下切為主，因此部分斷面之拓寬情形尚不明顯。比較不同臨界側向拓寬距離 W_{cr} 之差異， W_{cr} 值為根據現場岩岸調查資料，挑選臨界側向拓寬距離之最小與最大平均值進行敏感度測試，在大安溪中分別約為 0.35m、3.0m。當河岸之 W_{cr} 越大時，因岸壁崩坍之臨界門檻值較高，在相同水流作用條件下，河岸拓寬情形較小；反之若 W_{cr} 越小，則河岸拓寬越明顯，斷面 46-1 右岸模擬之最大側向拓寬距離約為 110m。



圖二十七 大安溪案例模擬底床橫剖面比較圖



圖二十八 岩岸拓寬機制模擬底床橫剖面比較圖

6、結論與建議

本整合性研究計畫（含各子計畫）皆依預定進度及目標，執行與達成，各子計畫的結論參見本報告第五章，各子計畫的建議詳見各子計畫期末報告，以下針對總計畫執行之數值模擬模式建立與模擬結果做以下結論及建議：

(1) 本研究研發之岩質河床沖蝕模式，整合水力沖蝕、泥砂磨蝕與流功門檻沖蝕機制，同時考慮不同類型遷急點後退與岩岸沖蝕模式，做為「岩床沖蝕模組」。模式具有模擬變量流、非平衡輸砂、非均勻沈澱、河床質分層等功能，同時可選擇性考慮是否開啟遷急點後退或河岸沖蝕模式，增加模式模擬不同沖蝕特性之功能性。

(2) 本研究提出之流功門檻沖蝕公式係根據八掌溪及大安溪（水利署計畫）與其他台灣岩質河川之現場調查資料，包括歷年地形變化、岩性調查、水理與輸砂因子等，以水流流功門檻與流速之函數關係，做為沖蝕率一般化公式之概念基礎，迴歸相關係數，提出之經驗公式。

(3) 岩質河床沖蝕模式應用於八掌溪與大安溪案例中，檢定驗證之模擬趨勢良好，惟各沖蝕機制中之參數，如遷急點後退型態之沖蝕係數 T_s 、遷急點後退型態之臨界坡度 S_{cr} 、岩岸沖蝕機制之沖蝕係數 K 與臨界側向拓寬距離 W_{cr} 等，受限於時間、人力與相關資料完整度，與實測資料之迴歸仍有檢定校正空間。而部分岩床河段之沖刷受到結構物影響者，如八掌溪觸口堰下游與五虎寮橋上游，後續建議可各別探討其沖蝕行為，再修正或建立其他型態模式。

表 5 岩石質河床沖蝕模式建立-各年度完成主要項目與相關效益彙整表

年度	完成項目與工作內容	相關效益
第一年度	1.國內外相關動床數值模式回顧與文獻收集	作為後續模式相關理論發展之基礎
	2.檢討既有軟岩沖蝕模式之適用性	作為後續模式相關理論發展之基礎
	3.沖蝕模式相關參數迴歸、調整與檢討	建立適用於台灣軟岩河川之沖蝕模式
	4.大安溪、八掌溪案例水理因子演算	提供其他子計畫應用
	5.八掌溪案例相關沖蝕模式初步模擬測試	測試研發模式之適用性
第二年度	1.流功門檻沖蝕機制研發與整合模式	建立適用於台灣軟岩河川之沖蝕模式
	2.遷急點後退理論收集與回顧	作為後續模式相關理論發展之基礎
	3.河岸拓寬理論收集與回顧	作為後續模式相關理論發展之基礎
	4.八掌溪現場案例模擬	測試研發模式之適用性
	5.大安溪現場案例模擬	測試研發模式之適用性

	6.提出相關評估與後續模式修正建議	作為後續模式相關理論發展之基礎
第三年度	1.開發與整合流功門檻沖蝕模式	建立適用於台灣軟岩河川之沖蝕模式
	2.開發與整合岩質河床遷急點後退模式	建立適用於台灣軟岩河川之沖蝕模式
	3.開發與整合岩質河床河岸拓寬模式	建立適用於台灣軟岩河川之沖蝕模式
	4.模式相關參數測試、檢定與驗證	測試研發模式之適用性
	5.八掌溪現場案例檢定驗證模擬	驗證研發模式之適用性
	6.大安溪現場案例檢定驗證模擬	驗證研發模式之適用性
	7.岩石質河床沖蝕模式適用性檢討評估	作為後續模式相關理論發展之基礎

7、參考文獻

1. Annandale, G.W., 1995, "Erodibility", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.33, No.4, pp.471-494.
2. Annandale, G.W., 2006. "Scour Technology," Mc Graw Hill.
3. Baker, R. and Leshchinsky, D., Spatial Distribution of Safety Factors, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.2, pp.135-145, 2001.
4. 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.
5. 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.
6. Chu, T., Ranson, W., Sutton, M. and Peters, W., 1985, Application of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics, *Experimental Mechanics*, Vol. 25, No. 3, pp. 232-244.
7. Dadson, S.J., Niels Hovius, Hongey Chen, W. Brian Dade, Meng-Long Hsieh, Sean D. Willett, Jyr-Ching Hu, Ming-Jame Horng, Meng-Chiang Chen, Colin P. Stark, Dimitri Lague, and Jiun-Chuan Lin, 2003, "Links between Erosion, Runoff Variability and Seismicity in the Taiwan Orogen," *Nature* Vol. 426, No.6967, p.648-651.
8. Eggers, M.J., Mostyn, G., and Sullivan, T.D., 1999, Probabilistic Stability Assessment of a High Slope in Variable Strength Rocks, *8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Hobart, pp. 91-98.
9. Foley, M.G., 1980, "Bed-rock incision by streams: Summary", *Geological Society of American Bulletin*, Part1, Vol.91, pp.577-578.
10. Frauel, Y. and Javidi, B., 2002, Digital Three-dimensional Image Correlation by Use of Computer-reconstructed Integral Imaging, *Applied Optics*, Vol. 41, No. 26, pp. 5488-5496.
11. Greimann, B.P., and Vendeberg, M., 2007, "Predicting Rock Scour," Technical Report SRH-2008-01, Technical Service Center, Bureau of Reclamation, Denver, CO.
12. 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.
13. Hartshorn K., Hovius, N., Dade, W.B., and Slingerland, R.L., 2002, "Climate-Driven Bedrock Incision in an Active Mountain Belt", *Science*, Vol. 297, pp. 2036-2038.
14. Howard, A.D., and G. Kerby, 1983, "Channel changes in badlands", *Geological Society of American*

- Bulletin, Vol.94, pp.739-752.
15. Howard, A.D., 1994, "A Detachment-Limited Model of Drainage-Basin Evolution," *Water Resources Research*, Vol.30, No.7, pp. 2261-2285.
 16. Howard, A.D., W.E. Dietrich, and M.A. Seidl., 1994, "Modeling Fluvial Erosion on Regional to Continental Scales," *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* Vol. 99, No. B7, p.13971-13986.
 17. Kirsten, H.A.D., 1982. "A Classification System for Excavation in Natural Materials," *The Civil Engineering in South Africa*, p.292-308, July.
 18. Lai, T.G and Greimann, B.P. 2008, "Rock Erosion Modeling on Selected Alluvium River in Taiwan," Technical Report No. SRE-2008-08, USBR.
 19. Lawler, D.M., 2008, "Advances in the Continuous Monitoring of Erosion and Deposition Dynamics: Developments and Applications of the new PEEP-3T System," *Geomorphology*, Vol. 93, p.17-39.
 20. Lecompe, D., Vantomme, J. and Sol, H., 2006, Crack Detection in a Concrete Beam Using Two Different Camera Techniques, *Structural Health Monitoring*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-68.
 21. Lopez-Querol, S and Blazquez, R., 2007, "Validation of a new endochronic liquefaction model for granular soil by using centrifuge test data," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, No 10, pp.920-937
 22. Lin, E.T., Hsu, C.T., and Yeh, K.C., 2006, Depth-integrated modeling for aggradating/degrading mobile channel I. model development, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 21, No.4, pp. 281–293..
 23. Malkawi, A.I.H., Hassan, W.F. and Sarma, S.K., 2001, Global Search Method for Locating General Slip Surface Using Monte Carlo Techniques, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.8, pp.688-698.
 24. Maund, J.G. and Eddleston, M., 1998, *Rock Slope Hazard Assessment: A New Approach Geohazards in Engineering Geology*, Geological Society Publishing House, pp. 177-183.
 25. 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.
 26. Nicholson, D.T. and Hencher, S., 1997, Assessing the Potential for Deterioration of Engineered Rockslopes, *Engineering Geology and the Environment Symp.*, Athens, pp.911-917.
 27. 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.
 28. Shepherd, R.G., and S.A. Schumm, 1974, "Experimental study of river incision", *Geological Society of American Bulletin*, Vol.85, pp.257-268.
 29. 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.
 30. 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.
 31. 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.
 32. Stock, J., Montgomery, D., Collins, B., Dietrich, W., and Sklar, L., 2005, "Field Measurements of Incision Rates Following Bedrock Exposure: Implication for Process Controls on the Long Profiles of Valleys Cut by Rivers and Debris Flows, *GSA Bulletin*", Vol. 117, No. 11/12, pp.174-194.
 33. Vacher, P., Dumoulin, S., Morestin, F. and Mguil-Touchal, S., 1999, Bidimensional Strain Measurement Using Digital Images, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 213, pp. 811-817.
 34. Valanis, K.C., 1975, "On the foundations of the endochronic theory of viscoplasticity," *Arch. of*

Mechanics, Vol.27, pp.857.

35. Valanis, K.C. and Read, H.E., 1982, "A new endochronic plastic model for soils," *Soil Mechanics – Transitional and Cyclic Loads*, Ed. Pande & Zienkiewicz, John Wiley & Sons, pp.375-417.
36. 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.
37. Whipple, K. X., 2004, "Bedrock Rivers and the Geomorphology of Active Orogens," *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* Vol. 32, p.151-185.
38. 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.
39. Yang, Z.F., Shang, Y.J., Wang, C.M., and Ke, T.H., 2001, Engineering Geomechanical Analysis and Monitoring-control in Design and Construction of the Wuqiangxi Ship Lock Slope, China, *Engineering Geology*, Vol.59, No.1-2, pp.59-72.
40. 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。
41. 林銘郎、鄭富書、吳俊傑(1996) 「新中橫沿線天然災害及成因分析」, 地工技術, 第 57 期, 第 31-44 頁。
42. 林銘郎 (1997),「由賀伯颱風談土石流地質災害」, 地球科學園地, 創刊號, 頁 8-17
43. 許至聰(2002),「二維有限解析法明渠水理與輸砂模式之研發與應用」, 國立交通大學土木工程學系博士論文。
44. 黃玉婷(2008), 「利用 TWVD2001 水準資料推估臺灣地區高程變動速度場之研究」, 國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
45. 張振成(2008),「膠結不良砂岩的淺基礎承载力」, 國立交通大學土木工程系博士論文。
46. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2012),「軟岩質河床沖蝕模式之建立(2/3)」

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：

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)

本總計畫執行之模式建立及模擬已發表一篇論文於國內期刊：

廖仲達、葉克家、陳春宏(2011)，「二維軟弱岩盤河道沖刷模式之研發與應用」，中國土木工程學刊，Vol.23, No.2, 237-244。

並已完成“Development and application of 2-D mobile-bed model with bedrock river evolution mechanism.”投稿至 Journal of Hydro-Environment Research(under review). 目前並已開始撰寫二篇論文“The numerical simulation of knickpoint migration in bedrock river.”及“The numerical simulation of lateral migration in bedrock river.”準備投稿至 Journal of Hydraulic Research

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)

本計畫大多依原計畫書執行，預期成果亦皆能達成。軟弱岩石河道的沖蝕，過去一直未被國內工程界所正視，因為本計畫的執行及成果，水利工程界已較能模擬此類河川的變遷，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。