

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

適用於軟弱岩石沖蝕試驗之
現地小型射流沖蝕試驗儀改良

Development of a Modified Mini Jet for Measuring
In Situ Erosion Rate in Weak Rocks

研究生：齊汝鴻

指導教授：廖志中 教授

中華民國一〇一年七月

適用於軟弱岩石沖蝕試驗之現地小型射流沖蝕試驗儀改良

Development of a Modified Mini Jet for Measuring

In Situ Erosion Rate in Weak Rocks

研究生：齊汝鴻

Student : Ju-Hung Chi

指導教授：廖志中 博士

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao



July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

適用於軟弱岩石沖蝕試驗之現地小型射流沖蝕試驗儀改良

學生：齊汝鴻

指導教授：廖志中 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

台灣河川大多呈東向西流，中、下游河道則流經西部麓山帶地質區、平原區及台地。麓山帶河床原本上覆厚、薄不一的沖積層(護甲層)，但因採砂、斷層作用地層隆起、或跨河構造物(橋梁、攔河堰、固床工等)的存在引致的下游沖蝕作用等等，造成岩石河床的裸露。

台灣西部麓山帶出露甚廣之上新世與更新世地層，此類地層的組成岩石通常具有膠結不佳、遇水極易軟化且極易受沖蝕之特性。因此西部麓山帶河道中之岩床亦有部分河段出現嚴重之沖蝕下切現象，造成河床面快速降低與形成峽谷地形，進而危及跨河構造物的穩定性，相對的前述河道的側壁岩盤亦受水流劇烈沖蝕，引致岸壁破壞、及退縮，進而影響堤防的安全。因此，河床下切及側壁沖蝕對於河川管、治理有相當大的衝擊，諸如橋墩基礎裸露破壞、堤防破壞、取水功能喪失等，此均為未來所面對之問題。

國內、外近年來對於軟弱岩石河道沖蝕下切問題的探討已有著墨，但大多侷限於沖積層河道，缺少對於岩石河床、岩石河岸的研究，因此有加

以研究的必要。

本研究旨在改良原水壓約為 6psi、流功 12.6 kW/m^2 、最大剪應力 62Pa 使用於決定土壤的臨界剪應力及沖蝕係數之現地小型射流沖蝕試驗儀(Mini Jet)，本文改良水壓增加至 12psi、流功 77.5 kW/m^2 、最大剪應力 580Pa。經室內及現地測試結果顯示，本改良沖蝕儀可適用於沖蝕指數(K_h)小於 330、最大抗剪阻抗小於 580Pa 之岩石進行現地沖蝕試驗，以決定極限沖刷深度、臨界剪應力、沖蝕係數、及沖蝕率等。

關鍵字：軟岩、沖蝕率、潛沒式射流、現地小型射流沖蝕試驗儀(Mini Jet)



Development of a Modified Mini Jet for Measuring
In Situ Erosion Rate in Weak Rocks

Student :Ju-Hung Chi

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The western foothills are the major development area in Taiwan. River in the area mostly flow from east to west. The river sections in the area belong to the midstream and downstream of the rivers, which include foothills, plains and terraces. In the channels of foothills, bed rocks are overlain alluvium with varied thickness. Due to sand mining, fault uplift, or the structures built crossing the rivers, the erosion of rock bed occurs in downstream of sand hole or scour hole, caused by the events mentioned above.

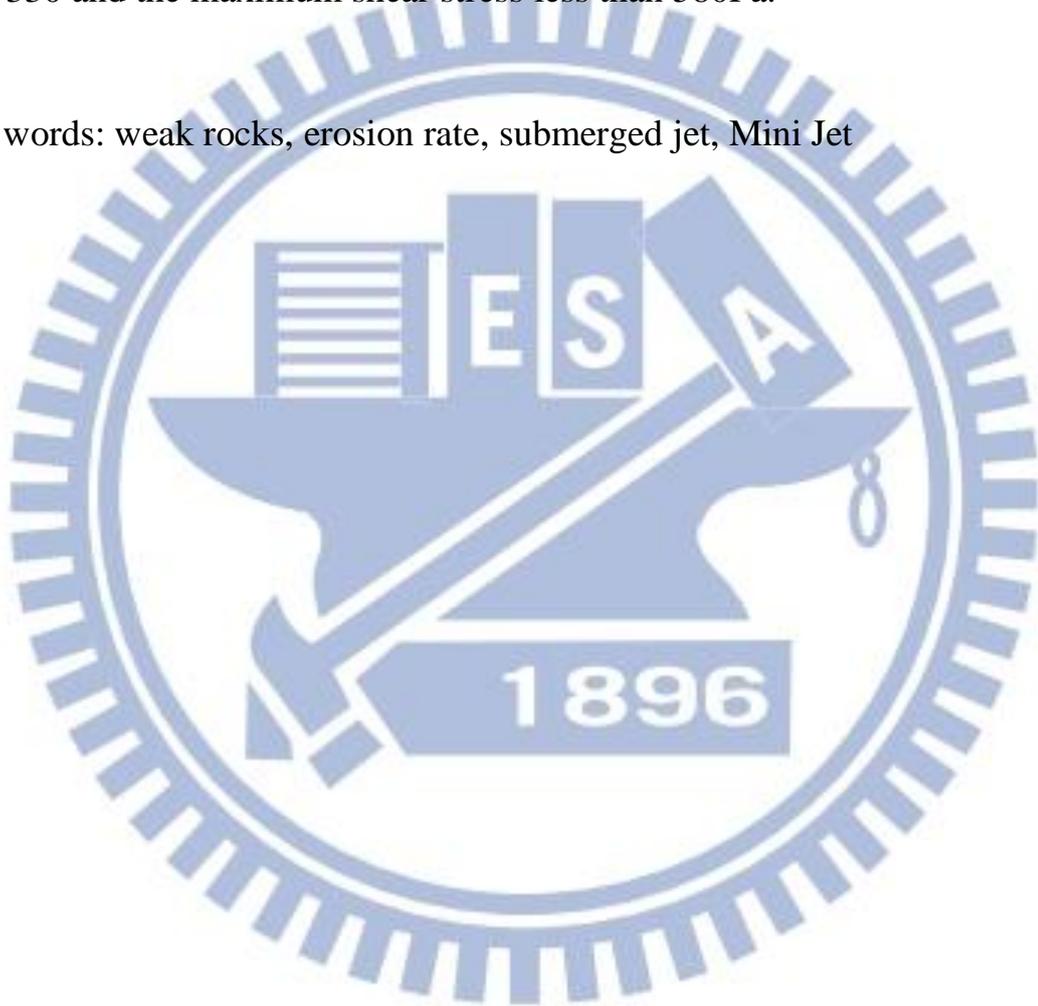
The rocks in the ages of Pliocene and Pleistocene sand outcrop in the western foothills of Taiwan. Such rocks usually have some characteristics like poor cemented and can be easily weakened and vulnerable to erosion by water. Rapid and serious problems of incision and bank erosion at some rock-bed river channels in the western foothills occur. The occurrence may cause the damage of the river structures including bridges, weirs, embankment, etc.

There are many studies for the river erosion in literature, but most of investigators work on the problem of the alluvial river. Hence, it is necessary to study the issues in rock-bed river channel, especially for the rivers with weak rock bed.

This study aims to modify the Mini Jet, which designed for determining

critical shear stress and erosion rate in soils, for measuring in situ erosion rate in weak rocks. Its original water pressure is about 6psi, streampower is 12.6 kW/m^2 , maximum shear stress is 62Pa. This thesis increased the water pressure, the streampower and maximum shear stress to 12psi, 77.5 kW/m^2 and 580Pa, respectively. The modified Mini Jet can be applied to weak rocks with K_h less than 330 and the maximum shear stress less than 580Pa.

Key words: weak rocks, erosion rate, submerged jet, Mini Jet



誌謝

這篇論文花費了我許多心力終於完成了，是我的嘔心瀝血之作。完成這樣一篇論文真的不是一件容易的事情，但是一切只要積極去做、遇到問題就想辦法解決、去體會做研究的方法，自然而然就能把它完成。

研究所的兩年，我非常幸運的能進入潘廖這個大家庭，一切都令我非常難忘，無論是一起吃飯、一起喝酒、一起出遊、一起做實驗、一起討論遇到的問題，還有每個禮拜的 meeting，從碩一坐在下面聽學長姐報告到碩二輪到我們報告，直到現在，已經輪到下一屆的學弟妹表現了，只覺得時間過得好快，令人有點不捨。

碩二的這一年，剛開始時自己遇到了一些狀況，令我非常的難受、非常的掙扎，但是幸好在廖老師、父親、母親、女友的幫助下，讓我度過這個難關，順利的將研究完成。

這一路上要感謝非常多人的幫助，首先就是我的指導教授廖志中 老師，除了在研究上不斷的 push 我前進、教導我作研究的正確方法，並且適時的給我建議與幫助，更是花了許多時間跟精力幫我把沒人看得懂的論文修正到可以搬的上檯面，最重要的是在我身心狀況都不佳時，給了我足夠的休息時間。還要感謝潘以文 老師，在每個禮拜的 meeting 上，給了我許多建議，也時常點出我的錯誤讓我能及時修正。另外還要感謝口試委員林炳森 老師、古志生 老師、黃燦輝 老師、陳春宏 課長的指導讓我的

論文更加完善。

接著要感謝在研究上不斷給予我各種幫助、解決困難的明萬學長，還有貓博、小鄭、聰吉、偉欽、佩錚學長不吝的給予我指導、提供豐富的資源及經驗，另外還要感謝阿康學姊、佳諺、里泉、楚鈞學長，還有我最愛的大霆學長。

再來就是潘廖的好同學們志強、麵包、泓佑、小昱、阿蒲以及林門的阿昇，我們一起修課、一起研究、一起玩耍，這都會是我們彼此最棒的回憶。除此之外，學弟妹們阿村、婉容、包包、柏諭、暉凱、王靖也幫了我許多忙。

當然不能忘記在系壘一起奮鬥多年的好戰友們，扣取、柏宇、小短、大霆、偉尊、柏溶、子揚、長暉、菜鳥、阿啾.....等族繁不及備載，還有兩位好經理糖糖跟怡茹。

更要感謝一路上不斷彼此扶持、經歷許多事情的室友團們，胡捨、柏強、郁雯、子慶、政哲、嘉義。

最後最後感謝我親愛的家人們，我的爸爸、媽媽，還有我的女友筱婷，在我最無助的時候給予我支持與鼓勵，做我最強力的後盾，我愛你們。

符號表

A=水流衝擊面積(m ²)	M _s =材料強度數值
A=半橫軸	m,n=射流破裂長度比參數
B=半共軛軸	P=單位面積流功(kW/m ²)
C _d =擴散係數(6.2)	P _C ,P _{crit} =臨界流功(kW/m ²),(W/m ²)
C _f =摩擦係數(0.00416,0.05)	P _i =外部水位造成靜水圍壓力(kN/m)
C _p =平均動態壓力係數	P _{jet} =射流的總流功(kW/m ²)
C _p '=波動動態壓力係數	Q=總流量(m ³ /s)
C _r = $g\gamma_s/(27*10^3)$	R=現地水力半徑(m)
c _i '=第 i 層的有效凝聚力(kPa)	R _e =雷諾數
D=顆粒直徑(m)	RQD=岩石品質指標
D _h =噴口直徑(m)	S=河岸自身斜率(m/m)
D _i =射流水柱厚(m)	S _i =吸力之不飽和力(kN/m)
D _j =射流水柱擴散厚度(m)	T _r = $H_e/k_d\tau_c$
D _p =jet 噴口直徑(m)	T _u =射流擾流強度(0.08)
d _o =噴嘴直徑(m)	T=無因次化之 t
E=侵蝕距離(cm)	T _i *=無因次化之 t _i
F=安全係數	T _p *=無因次化之 t _p
F _{down} =水壓	t=開始沖刷後的時間(s)
F _{S*} =側邊抗剪力	t _i =射流由噴嘴抵達初始表面的時間
F _r =福祿數	t _m =實驗中所量測的時間
F _{ri} =射流初始福祿數	t _p =射流由噴嘴至超越 H _p 的時間
F _{up} =上舉力	UCS=無圍壓縮強度(MPa)
g=地表加速度(9.81m/s ²)	U,V=流速(m/s)
H=跌水高度(m)	U _o =potential core 內流速(m/s)
H _e =從噴嘴到極限沖刷深度的長度	U _i =破壞面飽和的水壓抬升力(kN/m)
H _i =從噴嘴到初始面的長度	V _p =jet 噴口速度(m/s)
H _p =從噴嘴到 potential core 的長度	W _g =塊體質量
H*=無因次化之噴嘴至沖刷面距離	W _i =第 i 層的重量(kN)
H _i *=無因次化之 H _i	Z _m =從噴嘴到沖刷面的長度(m)
H _p *=無因次化之 H _p	α=河岸傾斜角(°)
h=尾水高度(m)	β=破壞面傾斜角(°)
I=層數	γ _s =材料單位重
J _a =節理風化參數	γ _w =水單位重(9.81 kN/m ³)
J _n =節理組數參數	ε=沖蝕率(m/s)
J _r =節理面粗糙參數	φ=抗剪與基質吸力造成角度增加(°)
J _s =地盤構造條件	φ'=內摩擦角(°)
K=噴口材料粗糙度參數	ρ _s =沉積物密度(kg/m ³)
K _b =顆粒或塊體尺寸	ρ,ρ _w =水密度(1000kg/m ³)
K _d =弱面或顆粒抗剪強度	τ=剪應力(Pa)
K _h =岩盤抗沖蝕指數	τ=儀器射流之最大剪應力(Pa)
K _s /R=粗糙度比值	τ _c =臨界剪應力(Pa)
k=侵蝕係數(cm ³ /N-s)	τ _e =有效剪應力(Pa)
k _d =沖蝕係數(m ³ /N-s)	τ _o =potential core 內剪應力(Pa)
L=水面上射流軌跡長度(m)	τ _{s,*} =試體最大剪應力(pa)
L _b =射流破裂長度(m)	τ _c =無因次臨界剪應力
L _i =第 i 層的破壞面長度(m)	Δt=侵蝕時間(s)

目錄

摘要	I
ABSTRACT	III
誌謝	V
符號表	VII
目錄	VIII
圖目錄	XII
表目錄	XX
一、前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究方法與流程	2
二、文獻回顧	4
2.1 岩盤沖蝕機制	5
2.1.1 磨蝕沖蝕	5
2.1.2 塊體抽離	7
2.1.3 穴蝕沖蝕	9
2.1.4 剝皮沖蝕	10
2.1.5 岩盤沖蝕機制小結	11

2.2	河道側壁沖蝕.....	12
2.2.1	河道土質側壁破壞機制.....	12
2.2.2	河道岩盤側壁破壞機制.....	14
2.2.3	岸壁穩定性與岸趾侵蝕模型.....	18
2.2.4	攝影監測量測河岸沖蝕.....	22
2.2.5	河道側壁沖蝕小結.....	26
2.3	現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 試驗簡介.....	27
2.3.1	Mini Jet 試驗功能與特性.....	27
2.3.2	Mini Jet 儀器設備.....	29
2.3.3	Mini Jet 基礎理論.....	34
2.3.4	Mini Jet 現地試驗方法.....	44
2.3.5	Mini Jet 試驗簡介小結.....	48
2.4	軟弱岩石沖蝕性能評估方法.....	52
2.4.1	流功 SP.....	52
2.4.2	岩盤抗沖蝕指數 K_h	59
2.4.3	最大剪應力.....	65
三、	現有設備適用性評估及儀器改良設計與建立.....	66
3.1	現有設備適用性評估.....	66
3.2	試驗儀器改良設計.....	68

3.2.1 設計理念	69
3.2.2 設計流程	69
3.3 改良後試驗儀器介紹	70
3.4 改良儀器組件與構造	80
3.4.1 泵浦選擇	80
3.4.2 噴嘴選擇	82
3.4.3 Mini Jet 儀器構件設計	85
3.4.4 管路設計	101
四、改良 Mini Jet 軟岩沖蝕試驗方法與流程	104
4.1 改良 Mini Jet 之流功 SP 及最大剪應力計算方式	104
4.2 現地試驗規劃流程	108
4.3 現地試驗儀器準備	109
4.4 試驗方法及步驟	113
4.5 室內測試及現地測試規劃	117
五、實驗室及現地測試試驗結果與討論	119
5.1 實驗室室內測試試驗	119
5.1.1 石岡壩岩心測試試驗	119
5.1.2 湖山水庫岩塊測試試驗	122
5.1.3 實驗室室內測試試驗小結	126

5.2 大甲溪現地測試試驗	126
5.2.1 石岡壩試驗可行性評估	127
5.2.2 石岡壩試驗成果	129
5.2.3 石岡壩成果討論	136
5.3 頭前溪現地測試試驗	138
5.3.1 頭前溪試驗可行性評估	139
5.3.2 頭前溪試驗成果	140
5.3.3 頭前溪成果討論	148
六、結論與建議	151
6.1 結論	151
6.2 建議	152
參考文獻	i
附錄	v

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 岩體磨蝕機制示意圖(Whipple et al.,2000).....	5
圖 2-2 大安溪河道之壺穴(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009).....	6
圖 2-3 大安溪厚層砂岩上水流侵蝕造成之流槽(fluting)(經濟部水利署水利 規劃試驗所，2008)	6
圖 2-4 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)	8
圖 2-5 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖(Whipple et al.,2000)	8
圖 2-6 岩塊攜出作用力示意圖(Annandale,1995).....	9
圖 2-7 大安溪水流衝擊或渦流造成的孔洞沖蝕痕跡(經濟部水利署水利規劃 試驗所，2009)	10
圖 2-8 剝皮法示意圖(Bolleart,2005).....	10
圖 2-9 於跌水沖刷下發生剝皮法示意圖(Bolleart,2005).....	11
圖 2-10 大安溪下游順向地層之倒懸破壞(圖中白框處)(經濟部水利署水利 規劃試驗所，2010)	14
圖 2-11 大安溪下游平面滑動後殘餘的河道邊坡(經濟部水利署水利規劃試 驗所，2010).....	15
圖 2-12 倒懸破壞機制示意圖箭頭代表水流方向(無張力節理)(經濟部水利 署水利規劃試驗所，2010).....	16

圖 2-13 倒懸破壞機制示意圖(邊坡受張力節理影響)(經濟部水利署水利規 劃試驗所，2010)	17
圖 2-14 趾部破壞機制示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)	18
圖 2-15 空載光達(LiDAR)測距掃瞄規劃範圍圖(底圖為 97/11/28 農航所正射 影像)(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)	24
圖 2-16 98/07/23 空載光達(LiDAR)測距掃瞄成果圖(經濟部水利署水利規劃 試驗所，2008)	25
圖 2-17 98/10/03 空載光達(LiDAR)測距掃瞄成果圖(經濟部水利署水利規劃 試驗所，2008)	25
圖 2-18 斷面 44 和斷面 44-1 歷年變化量測成果圖(經濟部水利署水利規劃試 驗所，2008)	26
圖 2-19 Mini Jet 沖刷示意圖(Hanson et al.,2001)	28
圖 2-20 Mini Jet 之底部噴口部分(箭號處為排水處)	29
圖 2-21 Mini Jet 量側儀(黑箭號處為可調整壓力閥、紅箭號處為輸水管裝置 處)	30
圖 2-22 Mini Jet 金屬底環俯視圖	31
圖 2-23 Mini Jet 金屬底環側視圖	31
圖 2-24 馬力 1/6HP 泵浦	32
圖 2-25 Mini Jet 側視示意圖(Hanson et al.,2001)	33

圖 2-26 Mini Jet 俯視示意圖(Hanson et al.,2004).....	34
圖 2-27 Mini Jet 各參數示意圖(修改 Hanson et al.,2004)	38
圖 2-28 由試驗數據所形成之雙曲線示意圖(Blaisdell et al.,1981).....	40
圖 2-29 Mini Jet 於現地試驗裝設完成圖	45
圖 2-30 噴口打開(圖中箭號處為噴口).....	46
圖 2-31 噴口關閉	46
圖 2-32 伸出標桿量測深度	47
圖 2-33 現地試驗紀錄表格(Hanson et al.,2004)	49
圖 2-34 將參數及試驗數據輸入計算表中	50
圖 2-35 試驗中沖刷深度隨時間變化圖	50
圖 2-36 計算極限沖刷深度 H_e 的 y-x 雙曲線關係圖	51
圖 2-37 計算結果分別有 τ_o 、 τ_e 、 τ_c 、 k_d 、 H_e (為圖中之 J_e)	51
圖 2-38 水流離開噴嘴之破裂長度示意圖(修改 Ervine et al, 1997)	54
圖 2-39 正規化消能池深度、平均動態壓力係數在不同射流破裂長度比之函 數關係圖(圖中 H 為水面上射流軌跡長度 L)(Castillo, 2004).....	56
圖 2-40 射流波動壓力係數與 h/D_j 關係圖(Bollaert, 2003)	58
圖 2-41 岩塊長度比值 y/x 示意圖(Annandale, 1995,2006)	64
圖 2-42 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995)	65
圖 3-1 以預鑽方式將銅製底座打入軟岩中.....	67

圖 3-2 底座打入軟岩後造成裂縫.....	67
圖 3-3 USDA 之 Mini Jet.....	68
圖 3-4 USDA 之 Mini Jet 金屬底座.....	69
圖 3-5 Mini Jet 軟岩型.....	73
圖 3-6 噴嘴.....	73
圖 3-7 馬力 1HP 污物泵浦.....	74
圖 3-8 水壓計.....	75
圖 3-9 2in 包砂軟管與 3/8in 包砂軟管.....	75
圖 3-10 2in 插心.....	76
圖 3-11 3/8in 插心.....	76
圖 3-12 3/8in*3/8in*3/8in 三內牙三通接頭.....	77
圖 3-13 3/8in*3/8in 雙內牙彎管接頭.....	77
圖 3-14 各式轉接頭.....	78
圖 3-15 1in*2in 雙內牙轉接頭.....	78
圖 3-16 各式管束.....	79
圖 3-17 各式 O-ring.....	79
圖 3-18 噴嘴類型(思沛雅噴霧器材有限公司網站).....	83
圖 3-19 噴霧角度(思沛雅噴霧器材有限公司網站).....	84
圖 3-20 JAA1490 噴嘴.....	85

圖 3-21 (1)底座設計圖(左為上視、右為下視)	87
圖 3-22 (1)底座設計圖(側視).....	87
圖 3-23 (1)底座成品(上半部).....	88
圖 3-24 (1)底座成品(下半部).....	88
圖 3-25 (2)可轉部設計圖(左為上視、中為側視、右為下視).....	89
圖 3-26 (2)可轉部成品(上半部).....	89
圖 3-27 (2)可轉部成品(下半部)(圖中有裝設噴嘴).....	90
圖 3-28 (3)固定部設計圖(左為上視、中為側視、右為下視).....	91
圖 3-29 (4)弧形環片設計圖	91
圖 3-30 (3)固定部與(4)弧形環片成品組合(上半部).....	92
圖 3-31 (3)固定部與(4)弧形環片成品組合(下半部).....	92
圖 3-32 (2)可轉部、(3)固定部及(4)弧形環片成品組合(側部).....	93
圖 3-33 (2)可轉部、(3)固定部及(4)弧形環片成品組合(下半部).....	93
圖 3-34 (5)管線設計圖	94
圖 3-35 (5)管線成品.....	95
圖 3-36 (6)量尺設計圖	95
圖 3-37 (6)量尺標桿設計圖	96
圖 3-38 (6)量尺成品.....	96
圖 3-39 (6)量尺與(5)管線組合.....	97

圖 3-40 (7)壓克力盒設計圖	98
圖 3-41 (7)壓克力盒(上半部).....	98
圖 3-42 (7)壓克力盒(下半部).....	99
圖 3-43 (8)搭扣.....	100
圖 3-44 構件(1)、(2)、(3)、(4)、(7)組合圖	100
圖 3-45 2in 縮至 3/8in 轉接過程(外部管路).....	102
圖 3-46 3/8in 縮至 1/8in 轉接過程(內部管路).....	103
圖 4-1 Moody Diagram(R_e vs C_f)(The Engineering ToolBox).....	107
圖 4-2 現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 系統.....	111
圖 4-3 枕木與鐵槌	111
圖 4-4 大型橘色水桶.....	112
圖 4-5 鑽機.....	112
圖 4-6 小型發電機	113
圖 4-7 現地試驗示意圖.....	115
圖 5-1 第一次室內測試試驗前	120
圖 5-2 第一次室內測試試驗後	120
圖 5-3 使用防水黏土止水.....	123
圖 5-4 將底座敲進岩塊中	123
圖 5-5 第二次室內測試試驗前	124

圖 5-6 第二次室內測試試驗後.....	124
圖 5-7 石岡壩下游試驗地點.....	127
圖 5-8 石岡壩第一組試驗前.....	131
圖 5-9 石岡壩第一組試驗沖刷深度.....	132
圖 5-10 石岡壩第一組試驗之雙曲線圖.....	132
圖 5-11 石岡壩第二組試驗前.....	134
圖 5-12 石岡壩第二組試驗後.....	134
圖 5-13 石岡壩第二組試驗沖刷深度.....	135
圖 5-14 石岡壩第二組試驗之雙曲線圖.....	136
圖 5-15 頭前溪試驗地點.....	138
圖 5-16 頭前溪第一組試驗前.....	142
圖 5-17 頭前溪第一組試驗後.....	142
圖 5-18 頭前溪第一組試驗沖刷深度.....	143
圖 5-19 頭前溪第一組試驗之雙曲線圖.....	144
圖 5-20 頭前溪第二組試驗前.....	146
圖 5-21 頭前溪第二組試驗後.....	146
圖 5-22 頭前溪第二組試驗沖刷深度.....	147
圖 5-23 頭前溪第二組試驗之雙曲線圖.....	148
圖 6-1 可轉部建議改良示意圖.....	152

附圖 1 K_h 與 $P(\text{kW/m}^2)$ 對應關係圖 vi

附圖 2 K_h 與 $\tau_{s,c\text{min}}(\text{Pa})$ 對應關係圖 viii

附圖 3 K_h 與 $\tau_{s,c\text{max}}(\text{Pa})$ 對應關係圖 x



表目錄

表 2-1 射流破裂長度比參數(Castillo, 2006).....	57
表 2-2 波動動態壓力係數與 H/L_b 比值關係表(Castillo, 2006)	58
表 2-3 岩石材料強度評分表(Annandale, 1995,2006)	59
表 2-4 節理組數評分表(Annandale, 1995,2006).....	60
表 2-5 節理粗糙參數評分表(Annandale, 1995,2006)	61
表 2-6 節理風化參數評分表(Annandale, 1995,2006)	62
表 2-7 地盤構造條件參數評分表(Annandale, 1995,2006).....	63
表 3-1 改良後 Mini Jet 軟岩沖蝕試驗儀器介紹	71
表 3-2 $K_h=100$ 時 $P=K_h^{0.1}$ 與 $P=K_h^{0.75}$ 之比較	81
表 3-3 $P=K_h^{0.1}$ 以大安溪軟岩為例	81
表 3-4 $P=K_h^{0.75}$ 以大安溪軟岩為例.....	82
表 3-5 1/6HP 與 1HP 之泵浦比較	82
表 3-6 Mini Jet 構件.....	86
表 4-1 流功 SP 計算	106
表 4-2 現地試驗儀器	110
表 4-3 Excel 試驗數據分析程序步驟	115
表 4-4 測試試驗規劃.....	118
表 5-1 第一次室內測試數據	121

表 5-2 第一次室內測試成果	121
表 5-3 第二次室內測試數據	125
表 5-4 第二次室內測試成果	125
表 5-5 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法一)	128
表 5-6 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法一)	128
表 5-7 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法二)	129
表 5-8 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法二)	129
表 5-9 石岡壩第一組試驗成果	130
表 5-10 石岡壩第一組試驗數據	131
表 5-11 石岡壩第二組試驗成果	133
表 5-12 石岡壩第二組試驗數據	135
表 5-13 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法一)	139
表 5-14 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法一)	139
表 5-15 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法二)	140
表 5-16 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法二)	140
表 5-17 頭前溪第一組試驗成果	141
表 5-18 頭前溪第一組試驗數據	143
表 5-19 頭前溪第二組試驗成果	145
表 5-20 頭前溪第二組試驗數據	147

附表 1 K_h 與 $P(\text{kW/m}^2)$ 對應關係表 v

附表 2 K_h 與 $\tau_{s,c\text{min}}(\text{Pa})$ 對應關係表 vii

附表 3 K_h 與 $\tau_{s,c\text{max}}(\text{Pa})$ 對應關係表 ix



一、前言

本文共有六章，第一章說明本研究的動機與目的，第二章回顧岩盤沖蝕破壞機制與 Mini Jet 的基礎理論、儀器設備、試驗方法、及岩石沖蝕性能評估方法。第三章針對原有設備的適用性評估、對改良後的儀器設計做介紹。第四章介紹本儀器的流功、試驗規劃、試驗流程、及試驗方法和步驟。第五章對實驗室測試試驗和現地測試試驗的結果進行討論。第六章提出本研究的結論及未來發展建議方向。

1.1 研究動機

我國西部麓山帶出露範圍甚廣的地層以上新世及更新世為主，此類岩石普遍具有膠結不佳且遇水極易軟化的現象，容易受到沖蝕的特性，因此河道岩床大多受水流沖蝕速度極快。

近年來不論是因為自然環境之變遷或是人為因素的影響，許多河川區域的河岸受到側刷，造成邊坡嚴重受影響，部分河段出現嚴重的沖蝕下切現象，形成河床面快速降低，河谷地形持續的變化。例如車籠埔斷層抬昇這種自然環境的因素，使大安溪、大甲溪部分河道產生嚴重之沖蝕下切現象，另外人為因素的部分像是八掌溪、濁水溪、頭前溪等部分河道上因水利設施、交通建設等，亦造成河道嚴重沖蝕下切現象。

這些影響對於河川的治理有相當大之衝擊，像是堤防及橋墩基礎之裸露破壞、取水工程功能喪失及對水中生物多樣性與棲地環境等生態上之影響，均是重要的課題。

在傳統上沖蝕下切及側壁沖蝕引致邊坡不穩定等皆不易量測及估算，尤其在推導邊坡破壞的臨界側蝕量，而實驗室的試驗耗功且費時，因此有建立現地快速量測設備之必要。

1.2 研究目的

過去國內對於河道沖蝕問題的探討及處理，大多侷限於沖積層河道，缺乏對於岩石河床、岩石河岸的研究，近年來雖然這方面的研究大幅增加，但是對於現地量測河道岩石沖蝕的方法仍然有限。

Mini Jet 是一項被用在現地量測土壤沖蝕率的儀器，其在土壤上的應用及理論於國外已算健全發展，但是國內尚無廣泛應用此項儀器，而此項儀器最大的優點就是能在現地進行試驗，並且可以立即知道結果。本研究就是將 Mini Jet 進行改良，發展到可以應用於軟弱岩石上。

1.3 研究方法與流程

本研究流程如圖 1-1 所示。首先對於國外之 Mini Jet 相關研究、應用發展、及理論公式進行回顧，並且蒐集國內關於河道軟岩沖蝕、河道側壁沖

蝕機制之文獻做為參考。再者設計、製作出適用於軟弱岩石沖蝕試驗之 Mini Jet 儀器，並進行實驗室測試及現地測試，再對結果做討論和建議。

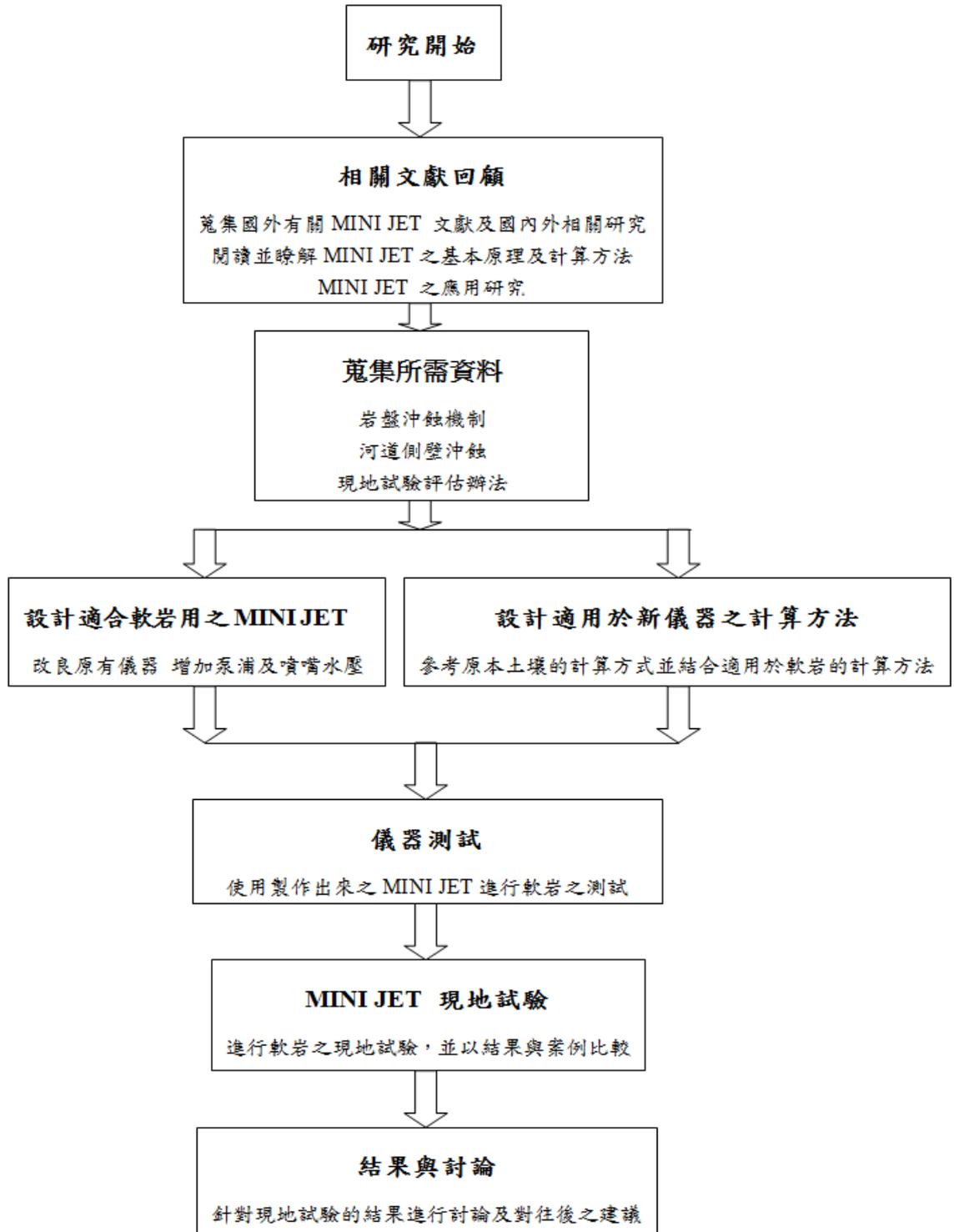


圖 1-1 研究流程圖

二、文獻回顧

台灣西部河川大多呈東向西流，中、下游河道則流經西部麓山帶地質區、平原區及台地，麓山帶河床原本上覆厚、薄不一的沖積層(護甲層)，但因採砂、斷層作用地層隆起、或跨河構造物(橋梁、攔河堰、固床工等)的存在及河水沖蝕作用，造成岩石河床的裸露。台灣西部麓山帶出露甚廣之上新世與更新世地層，此類岩石通常具有膠結不佳、遇水極易軟化且極易受沖蝕之特性。因此西部麓山帶河道中之岩床亦有部分河段出現嚴重之沖蝕下切現象，造成河床面快速降低與峽谷地形形成，進而危及跨河構造物的穩定性，相對的前述河道的側壁岩盤亦受水流劇烈沖蝕，引致岸壁破壞、及退縮，進而影響堤防的安全。因此，河床下切及側壁沖蝕對於河川管、治理有相當大的衝擊，諸如橋墩基礎裸露破壞、堤防破壞、取水功能喪失等，此均為未來所面對之問題。國內、外近年來對於軟弱河道沖蝕下切問題的探討已有著墨，但大多侷限於沖積層河道，缺少對於岩石河床下切、岩石河岸側蝕的研究，因此有加以研究的必要。本旨在評估、改良美國農業部(USDA)發展使用於決定現地土質河床及河岸沖蝕阻抗的現地小型射流沖蝕試驗儀(Mini Jet)，使之適用於軟弱岩床的沖蝕試驗。

本章將進行沖蝕機制、沖蝕特性、及河道側壁沖蝕進行文獻回顧，以及對於現地小型射流沖蝕試驗儀(Mini Jet)之試驗特性、儀器設備、基礎理論、及現地試驗方法進行整理，並且討論岩石沖蝕阻抗評估方法。

2.1 岩盤沖蝕機制

彙整國外對於河道沖蝕機制研究之文獻，可將 Whipple et al.(2000)與 Bolleart(2005)所提出之沖蝕機制分為磨蝕沖蝕(abrasion)、塊體抽離沖蝕(plucking)、穴蝕沖蝕(cavitation)及剝皮沖蝕(peeling off)等四種。其中，Mini Jet 主要針對磨蝕機制為主的沖蝕量進行試驗與推估。

2.1.1 磨蝕沖蝕

圖2-1為Whipple et al.(2000)提出的磨蝕沖蝕示意圖，圖中顯示凸起的岩床面前緣受到河床質顆粒衝擊而發生侵蝕，水流受到岩床面凸起的擾動，於其後面產生紊流而形成壺穴(potholing)(圖2-2)，凸起的表面也會造成流槽(fluting)(圖2-3)所示。

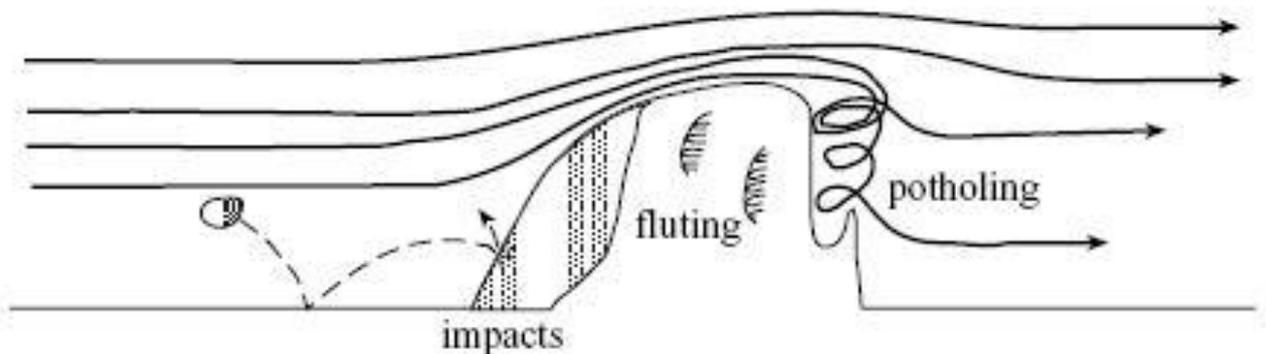


圖 2-1 岩體磨蝕機制示意圖(Whipple et al.,2000)



圖 2-2 大安溪河道之壺穴(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)



圖 2-3 大安溪厚層砂岩上水流侵蝕造成之流槽(fluting)(經濟部水利署水利
規劃試驗所，2008)

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

交通大學執行水利署研究計畫(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)進一步說明岩床磨蝕分類及現象如下：「Foley(1980)定義磨蝕為水中顆粒與岩床作用而形成，因此磨蝕如上述可區分為懸浮載磨蝕及河床載磨蝕，而河床載磨蝕中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)。以磨蝕為主要侵蝕機制的河道常常發展出明顯並且穩定的不規則地形，這樣的地形能使水流產生強烈的漩渦，加劇磨蝕破壞及穴蝕作用，因而逐漸於岩床產生流槽與壺穴之沖蝕構造，一但流槽與壺穴形成，強烈的正向反饋機制開始起作用而加強穩固水流中的漩渦現象，因而更加劇懸移質顆粒對河床的磨蝕」。

2.1.2 塊體抽離

圖 2-4 為塊體抽離之示意圖，Annandale(1995)以一河流流向與岩層呈逆向的岩塊抽離為例子，岩塊抽離的過程分為三個階段，依序分別為頂開(wedging)、移出(dislodgement)、脫離(displacement)。

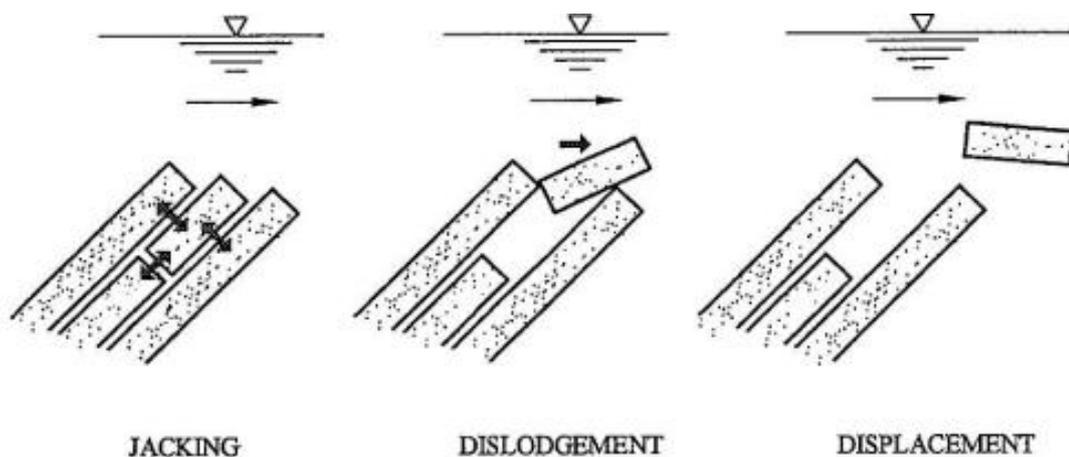


圖 2-4 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)

在岩盤遭受水流衝擊之下，小裂縫經水力作用擴大為破裂面，接著大顆粒河床載撞擊河床並且連續彈跳，導致岩體遭連續撞擊後弱化，加上其他化學風化作用讓弱面完全擴展連通造成塊體與周遭失去連結而獨立。圖 2-6 為塊體獨立後被攜出之過程，水流衝擊瞬間能量造成岩盤內部受力不均勻的作用應力，使得垂直及水平向裂縫逐漸延伸發展，裂隙間則因波動壓力作用，使塊體之上浮力大於自體重及側邊摩擦力時，塊體則發生向上運動而脫離岩床。

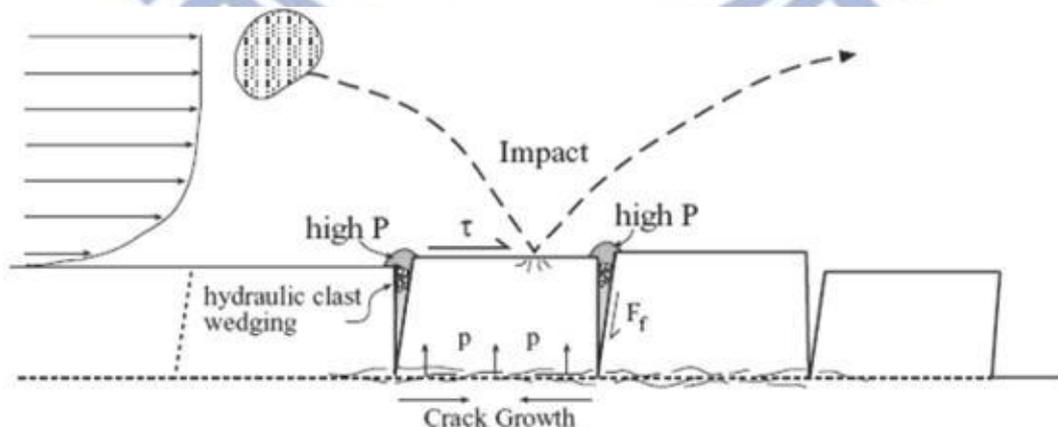


圖 2-5 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖(Whipple et al.,2000)

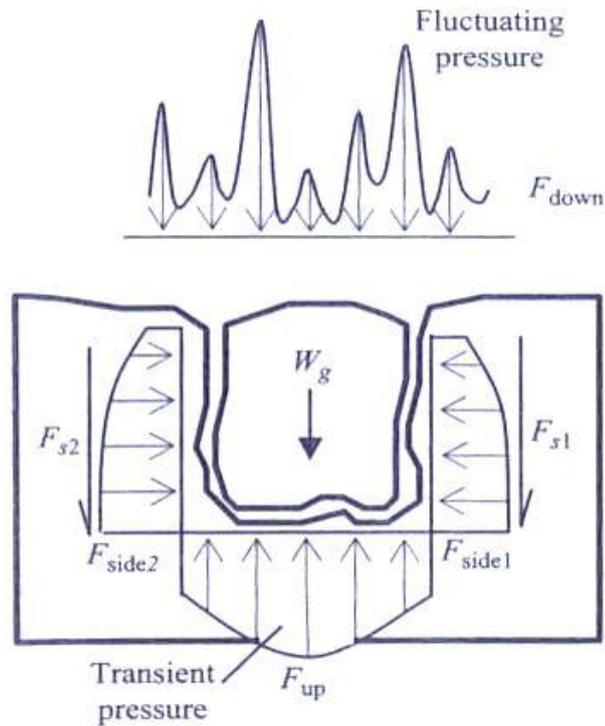


圖 2-6 岩塊攜出作用力示意圖(Annandale,1995)

F_{up} =上舉力

F_{down} =水壓

W_g =塊體質量

F_{s*} =側邊抗剪力

2.1.3 穴蝕沖蝕

當河床存在階梯狀落差或障礙物時，局部區域流況的變化造成水流衝擊或渦流引致河床掏刷的現象，圖 2-7 即為大安溪水流衝擊或渦流造成的孔洞沖蝕痕跡，流體中懸浮載的增加影響穴蝕甚大，因此加劇渦流對岩床的侵蝕。



圖 2-7 大安溪水流衝擊或渦流造成的孔洞沖蝕痕跡(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)

2.1.4 剝皮沖蝕

此種沖蝕機制是 Bolleart(2005)所提出，其過程如圖 2-8 所示，水流沿河床表面不斷的將一層一層的小岩塊帶往下游，因此其較常發生在具有地層為水平且節理發達之特徵的河床。

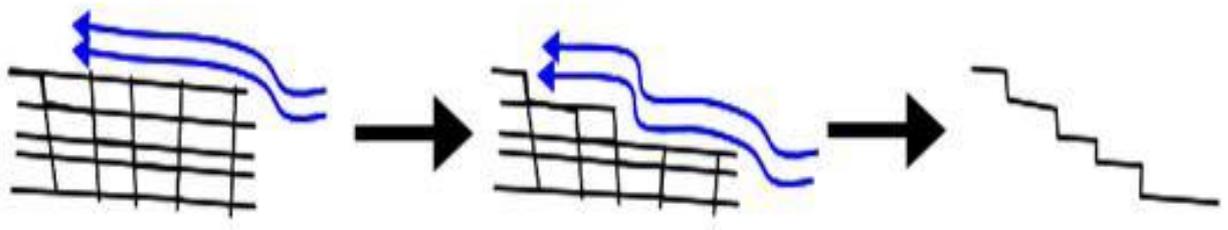


圖 2-8 剝皮法示意圖(Bolleart,2005)

在跌水沖蝕亦會發生剝皮沖蝕，跌水的上下游側皆會發生，且跌水造成周遭水流不斷循環，更加速岩盤的破壞，如圖 2-9 所示。

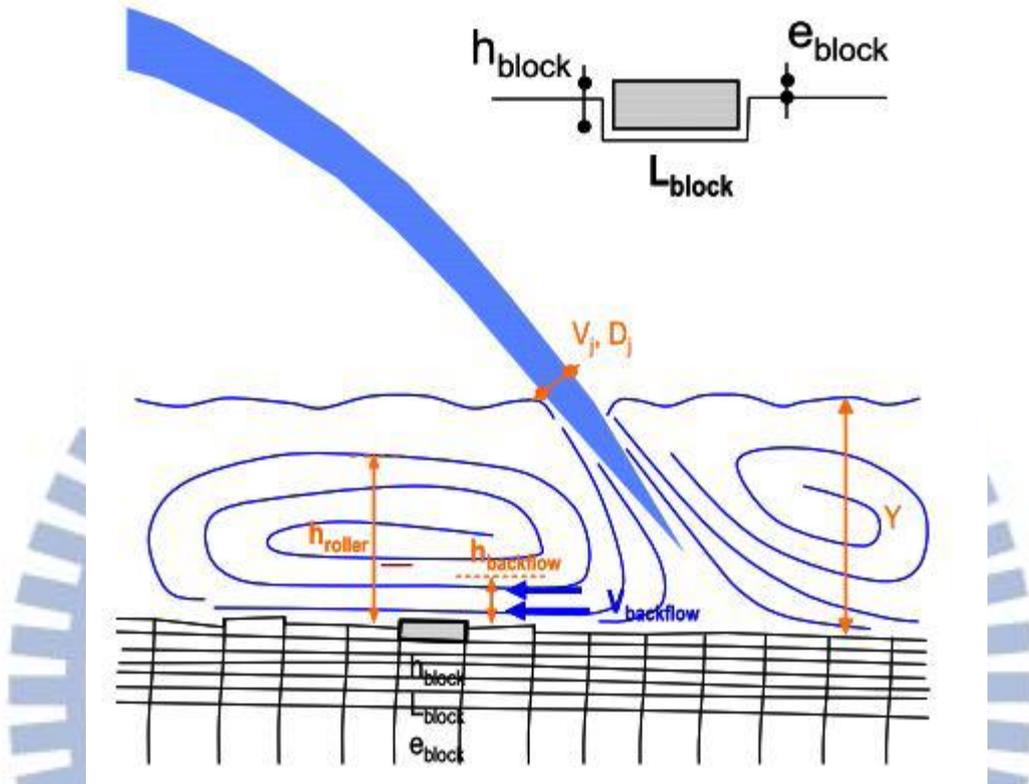


圖 2-9 於跌水沖刷下發生剝皮法示意圖(Bolleart,2005)

2.1.5 岩盤沖蝕機制小結

由上述四種沖蝕機制可以看出，影響岩盤沖蝕機制的眾多因素中，以地質條件為主要因素，地質條件包括岩性、弱面間距、節理及層面方位等。

Whipple et al.(2000)針對硬岩經過一系列的調查發現，當節理間距在 1m 以下時，塊體抽離(plucking)作用往往會成為主控的沖蝕機制。當岩床屬於完整岩盤，弱面間距相當大時，岩床沖蝕之主控機制比較可能為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。而穴蝕於大壩溢洪

道、輸水隧道及渦輪機的侵蝕為常見現象，可以導致混凝土鋪面的快速下切，但穴蝕現象於自然河道中所扮演的角色則尚未完全釐清，初步認為穴蝕現象於強烈渦流產生時可強化懸浮載沖蝕效應，使局部沖蝕作用更加顯著。若是岩盤強度較弱且節理不發達，及產生磨蝕與剝皮兩種破壞形式，水流造成岩盤表面剪應力增加，岩石膠結顆粒隨水流帶走為磨蝕破壞，而水流沖擊節理不發達之岩體造成裂隙的均勻產生，受到渦流影響岩盤表面將岩石碎屑帶往下游為剝皮法破壞。

2.2 河道側壁沖蝕

河岸侵蝕是一種會發生在任何河道的天然地貌演變過程，為一種河道大小、形狀及斜坡的調整重要機制之一，是一個接收上游流域排放的沉積物和將沉積物傳遞到下游的行為。目前關於這方面的數值模擬及岸壁侵蝕模型研究已有大幅進展，但要準確的預估河岸的地貌仍不容易。

河岸的侵蝕同時兼具利與弊，因為它可能是有益於河道上的生態，像是侵蝕後造成的沉積物可以讓各種動植物取得棲息地，達到生物的多樣性；但同時，在更多的情況下，它會導致土地流失，形成資源管理的問題(經濟部水利署水利規劃試驗所，2011)。

2.2.1 河道土質側壁破壞機制

河岸側壁的破壞影響著岸壁邊坡的穩定性，一般側壁破壞的因素有很

多，例如水力、風力、動物、植被、及人為。從廣義上來講可以分成兩類(Watson et al., 2006)：(1)水壓力在岸壁旁的水面之下產生變化(水位上下變動造成水壓變化所產生的側蝕)、(2)大規模破壞(邊坡下滑、崩坍)。這兩類的共通點在於，都是經由水力在岸壁坡趾進行的削弱作用，可能導致自身重力引起大規模破壞。

水壓力在岸壁坡趾上以剪應力的方式作用，不斷的進行掏刷，使其向內退縮，而水位面以上的部分仍維持原狀，因此當底部無法再承受上半部重量時，便會形成滑動，使河道拓寬。就材料性質而言，可以分為凝聚性材料及非凝聚性材料，若為非凝聚性材料的河岸，其剪力增加比剪應力增加的量還要大，因此臨界破壞面大都發生在淺層中，而凝聚性材料的河岸，剪力的增加較剪應力慢，所以臨界破壞面經常都位於深層處。另外，影響破壞面型式的主控因素為表面坡度的陡峭，當坡角小於 60 度時為圓弧型滑動，反之則為平面滑動，而其穩定性則可以此破壞形式為基礎，由邊坡的抗滑力、抵抗力、及側向水壓來計算抗滑力與下滑力，當下滑力增加到大於抗滑力時，河岸邊坡產生下滑(張思源，2003)。

而河道自身的沖蝕下切，包括不適當的砂石、礫石採取造成岩盤或土壤裸露，則會使岸趾不斷的受到侵蝕，若是情形較為快速且嚴重，像是大規模的暴雨事件，例如颱風的發生，便會使河道在短時間內沖蝕下切，而導致河岸邊坡下滑、崩坍，形成大規模破壞。

目前大部分的側壁破壞都是採用各種不同的模式方法(例如各種一維、二維的模式)來進行模擬預測，其主要的參數為動床模數、水理資料、及輸砂條件(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)等。

2.2.2 河道岩盤側壁破壞機制

以國內軟弱岩石劇烈沖蝕河流大安溪為例，其中下游河岸邊坡破壞機制主要有兩種：(1)倒懸(overhang)(圖 2-10)、(2)趾部破壞(undercutting)導致平面滑動(圖 2-11)。以下說明摘自交通大學執行水利署的研究報告(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)。



圖 2-10 大安溪下游順向地層之倒懸破壞(圖中白框處)(經濟部水利署水利
規劃試驗所，2010)



圖 2-11 大安溪下游平面滑動後殘餘的河道邊坡(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

倒懸依岸壁受張力節理存在與否影響，使河岸側刷產生兩種不同之倒懸破壞行為。當坡面無張力裂縫時(圖 2-12)，邊坡受到側刷而倒懸的岩塊，視為一懸臂樑構造，因此邊坡會因倒懸岩塊自重所產生的彎矩、剪力、以及內部應力而有不利的影響，此表現在無張力節理岩坡內中性軸位置及內應力分布。

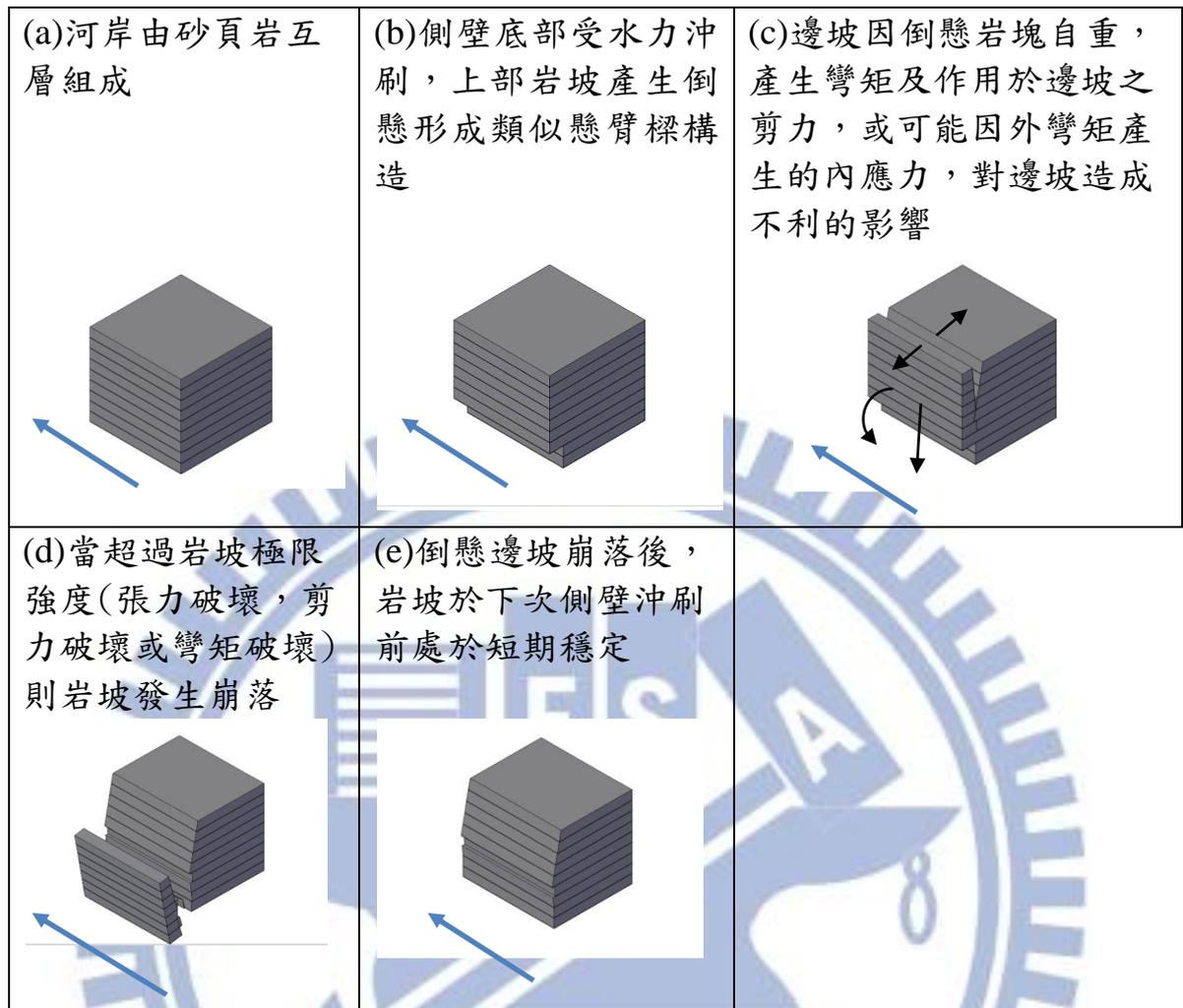


圖 2-12 倒懸破壞機制示意圖箭頭代表水流方向(無張力節理)(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

河道深槽邊坡因解壓或受構造應力影響，常見平行河道的張力節理，當張力節理受側刷完全發展後(圖 2-13)，僅由倒懸岩坡底部承受倒懸岩塊自重所產生的彎矩及內部應力，當達到最不利條件下的容許側刷量時，則可能發生崩落。

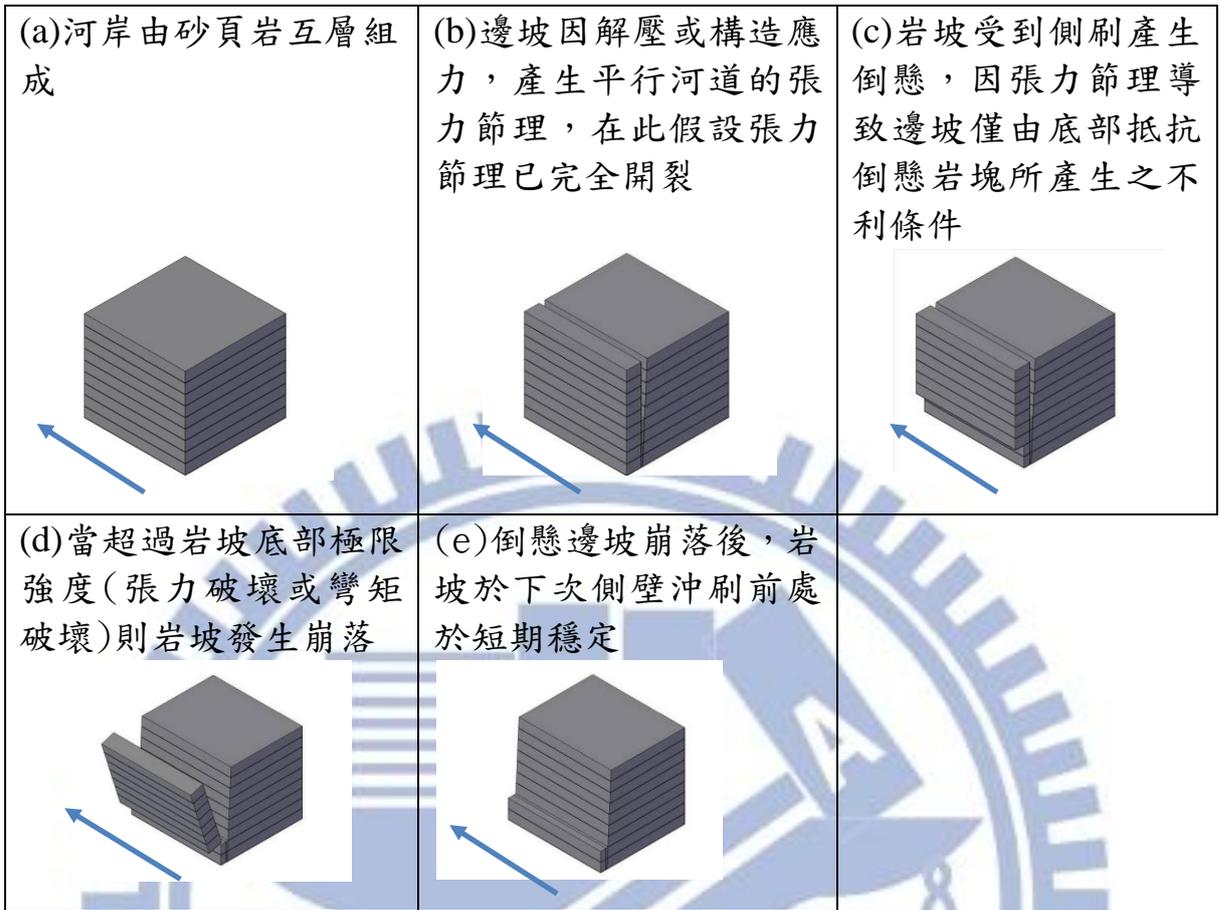


圖 2-13 倒懸破壞機制示意圖(邊坡受張力節理影響)(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

岸壁在底部受到側向侵蝕作用後將導致上部岩層發生倒懸破壞，而當側向侵蝕規模持續增加，造成趾部切除，順向地層坡面發生出露(daylight)後，當邊坡上部載重下滑驅動力大於潛在滑動面抗剪強度時將可能發生平面滑動，則平面破壞產生，此為趾部破壞(圖 2-14)導致平面滑動。

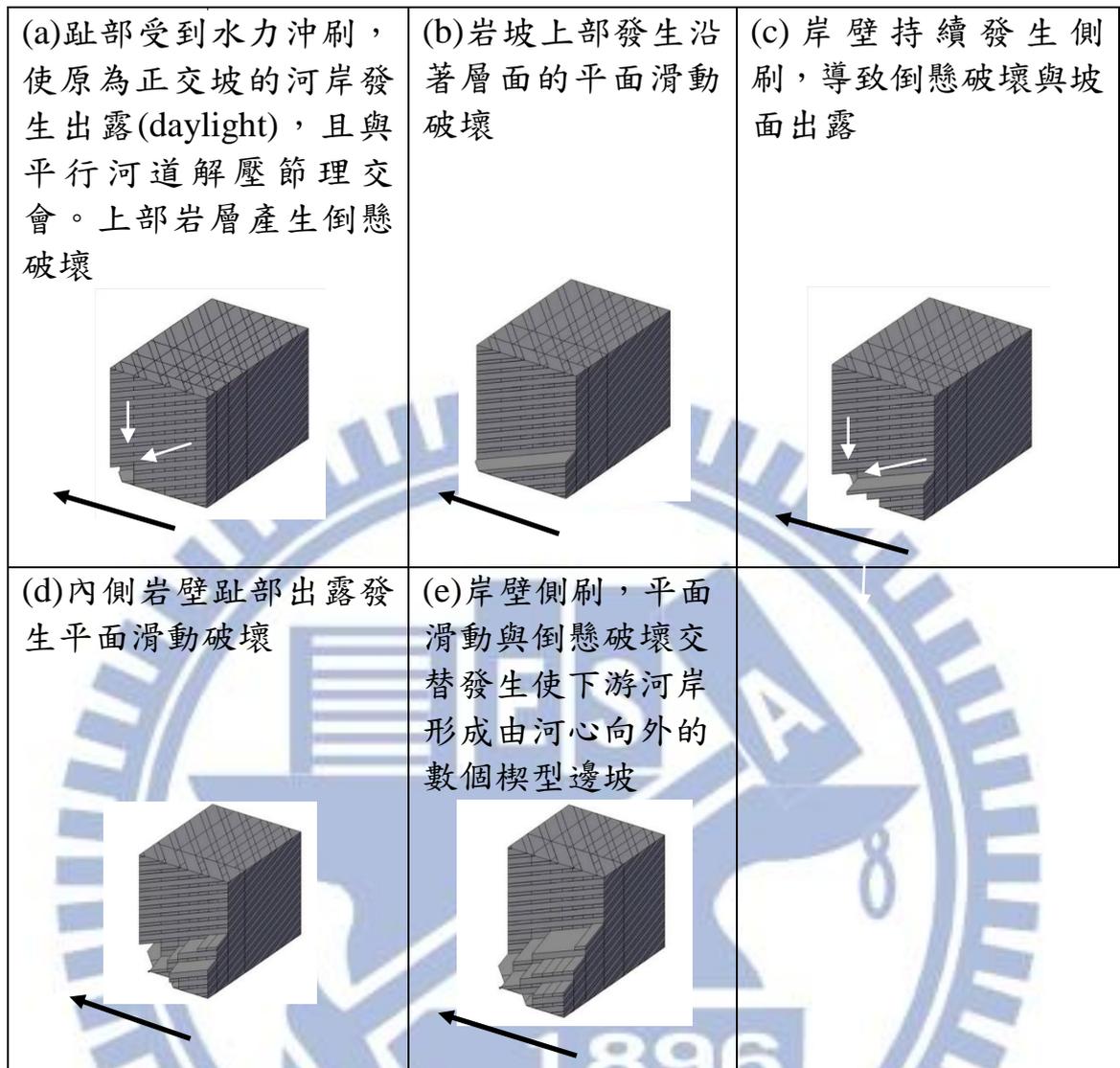


圖 2-14 趾部破壞機制示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

2.2.3 岸壁穩定性與岸趾侵蝕模型

岸壁的穩定性和岸趾侵蝕模型也就是簡稱 BSTEM，是其中一種的模擬方法，它是一個利用電子表格工具(Excel)來模擬河道的侵蝕。這個方法已經成功的運用在靜態模式下並且以沖積環境為岸壁的穩定條件，然後進行河道穩定的設計措施，反覆一系列的水文評估，包括水力侵蝕、岸壁破壞

頻率、特定時間內岸壁受侵蝕的泥沙量等。結合子模型的分析，可以量化河岸在植被下所受的影響。

Simon 等人提出的岸壁穩定性河岸趾侵蝕模型(BSTEM)(Simon et al., 1999,2000)主要用於分析礫石層、砂層、土層、及黏土層，它是一個利用電子表格工具(Excel)來模擬河道的侵蝕及侵蝕後堤岸邊坡的穩定性。本模型利用 Fredlund 等人(Fredlund et al.,1978)所建議的不飽和土壤組合律，因此可以計算不飽和堤岸的穩定性的一部分。「該模型所採用之複雜幾何形狀最多五個自訂義層，土壤單位重的變化取決於河水量與逕流產生的外部圍壓。目前使用的版本是利用三個部分的極限平衡法的模型計算多層河道岸壁的安全係數。極限平衡法的模型分別為水平層(Simon et al.,2000)、垂直切片的張力裂縫(Morgenstern et al., 1965)、懸臂破壞(Thorne et al., 1981)。此模型可以很容易的納入各類河道岸壁，計算出穩定性」(Simon et al.,2010)。

「BSTEM 河道岸趾侵蝕的子模型可經由水流作用下的剪應力估計材料受侵蝕的情況。該模型使用定義一個長方型歷水流深度及流量時間參數計算出河道幾何形狀和流動的平均邊界剪應力。該模型可以允許輸入不同材料、不同區域的岸壁及岸趾的臨界剪應力和抗蝕性。河床的高程則是固定的，因為此模型不納入模擬河床上的輸砂」(Simon et al.,2010)。使用岸趾水壓來計算超額剪應力，而岸壁上任一節點的平均邊界剪應力為：

$$\tau_o = \gamma_w R S \quad (2-1)$$

τ_o =平均邊界剪應力(Pa)

γ_w =水單位重(9.81 kN/m³)

R=現地水力半徑(m)

S=河岸自身斜率(m/m)

平均邊界剪應力施加在河流岸壁輪廓的每個節點上是以水流面積除以成段的橫截面來決定。

而平均侵蝕速率則是利用殘餘剪應力來計算(Partheniades, 1965)。這種方法類似於概念模型(Langendoen, 2000)，但是在這裡模擬侵蝕發生的角度是等同於現地的情況，而不是水平的(Simon et al.,2010)：

$$E=k\Delta t(\tau_o-\tau_c) \quad (2-2)$$

E=侵蝕距離(cm)

k=侵蝕係數(cm³/N-s)

Δt =侵蝕時間(s)

τ_o =平均邊界剪應力(Pa)

τ_c =臨界剪應力(Pa)

侵蝕係數 k 為(Simon et al.,2010)：

$$k=1.62\tau_c^{-0.838} \quad (2-3)$$

Shields 利用非黏性材料的粗糙度、顆粒大小、及顆粒重量表示出無因次化的臨界剪應力(Shields,1936)：

$$\tau_c^* = \tau_o / [(\rho_s - \rho_w)gD] \quad (2-4)$$

τ_c^* =無因次臨界剪應力

ρ_s =沉積物密度(kg/m³)

ρ_w =水密度(kg/m³)

g =地表加速度(m/s²)

D =顆粒直徑(m)

而前面提到結合三種極限平衡法的模型計算多層河道岸壁的安全係數

(Simon et al.,2010) :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + S_i \tan \phi'_i + [W_i \cos \beta - U_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \phi'_i)}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin [\alpha - \beta])} \quad (2-5)$$

c'_i =第 i 層的有效凝聚力(kPa)

L_i =第 i 層的破壞面長度(m)

S_i =吸力於破壞面上產生之不飽和力 (kN/m)

ϕ =抗剪強度與基質吸力的增加所造成的角度增加 (°)

W_i =第 i 層的重量 (kN)

U_i =對破壞面飽和部分的水壓抬升力 (kN/m)

P_i =由於外部水位所造成靜水圍壓力量(kN/m)

β =破壞面傾斜角(degrees from horizontal) (°)

α =河岸傾斜角 (degrees from horizontal) (°)

ϕ' =內摩擦角 (°)

I=層數

目前發現在河道側壁的破壞與穩定性中，植物的根部佔有著非常大的角色，因此近年來的研究所發展的模擬模式中，越來越多加入植被及生態因素等條件。

2.2.4 攝影監測量測河岸沖蝕

傳統上，河岸侵蝕變化使用的方法為沖刷釘或斷面量測。此二方法都是有空間局限性存在，因此攝影方法漸被採用。

目前能被最有效率使用的攝影技術為光達技術(Light Detection And Ranging,LiDAR)，「其定義是指以雷射光對目標進行量測的技術，對目標物進行高密度的掃描以獲取目標的三維形貌技術，目前可分為三種：空載光達(Airborne LiDAR)、測探光達(Bathymetric LiDAR)、及地面型光達(Terrestrial LiDAR)，其中發展最快、用途最廣的就是以飛機為載具進行地表之掃描測繪之空載光達技術」(徐偉城，2007)。

「其中空載光達以高精度、高解析度、高度自動化、及高效率等優勢，已成為世界各國進行大面積三維地表資料測製的主流與趨勢，其多重反射回波之特性，可同時獲取地面及其覆蓋物之精確三維座標」(徐偉城，2007)。其產製之高精度高解析度數值地型模型，可用以做為監測河道側壁之變化。

空載光達以航空器為載台，結合雷射系統(Laser scanner)、全球衛星定位系統(Global Position System,GPS)、與慣性導航系統(Inertial Navigation System,INS)，將此三部份技術整合。

其系統運用為「空載光達將雷射掃描儀固定於飛行載台上，由空中向地面以高頻率發射雷射光束，並由感測器接收反射訊號後，記錄發射脈衝到接收反射訊號之間的時間差，再配合在載台上裝置之GPS接收儀及GPS地面參考站，將兩者以動態差分方式實施GPS定位，輔以INS系統的姿態參數進行整合求解，最後求定地面掃描點的三維座標(x,y,z)」(陳威誠，2004)，使地形高程測量作業快速而準確。

本節以交通大學執行經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)之「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(1/3)」研究計畫做為範例，說明其使用空載光達對目標進行測距掃描工作，並且同步執行空拍工作(圖2-15)，除了對地形資料之掌握外，也對地貌之改變確切掌握，並且對不同時間所拍攝之影像(圖2-16、圖2-17)，繪製成斷面測量圖，進行變化比較(圖2-18)。

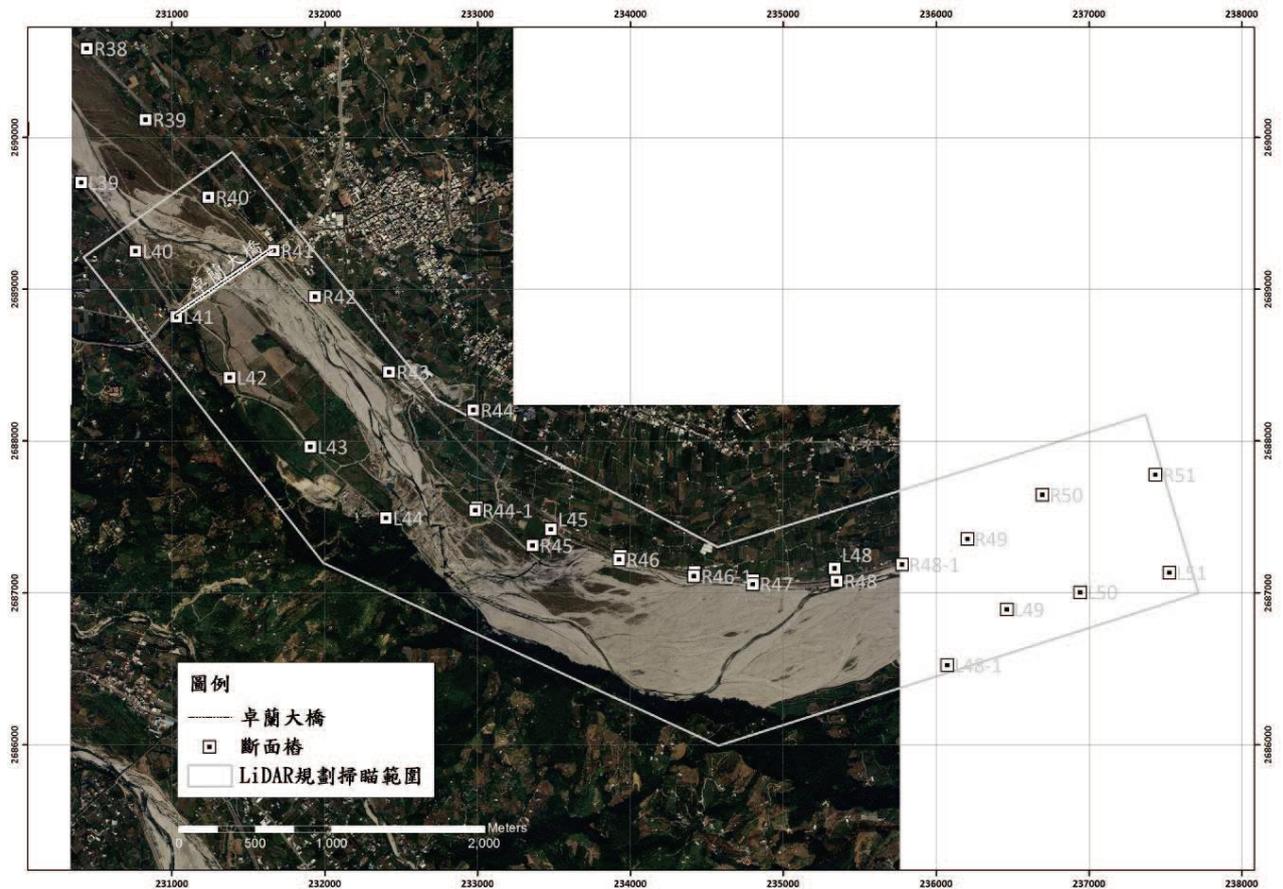


圖 2-15 空載光達(LiDAR)測距掃瞄規劃範圍圖(底圖為 97/11/28 農航所正射影像)(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)

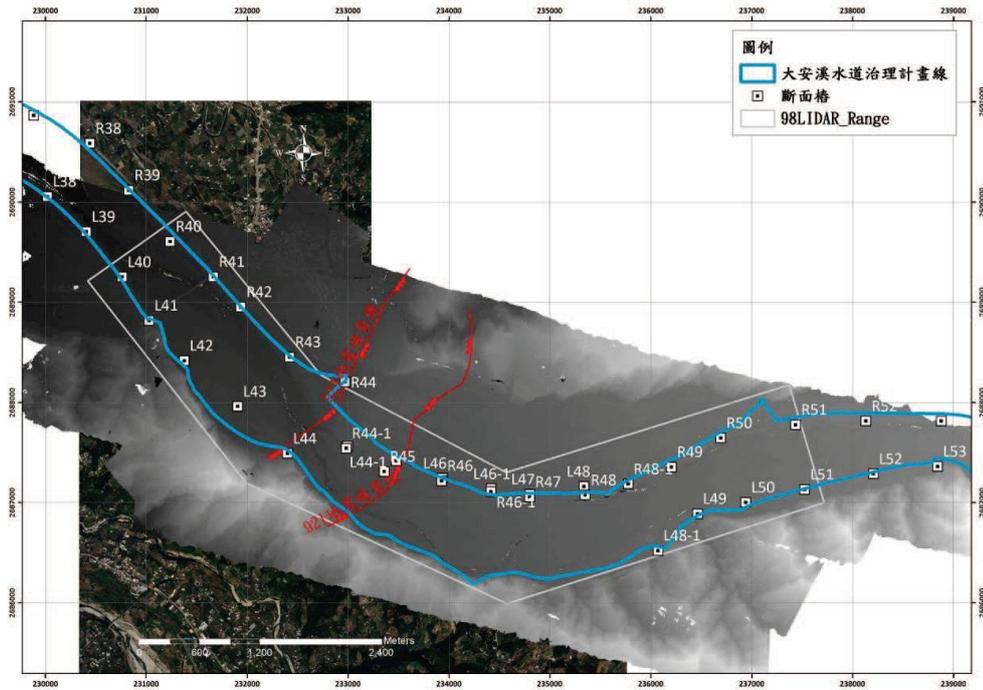


圖 2-16 98/07/23 空載光達(LiDAR)測距掃瞄成果圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)

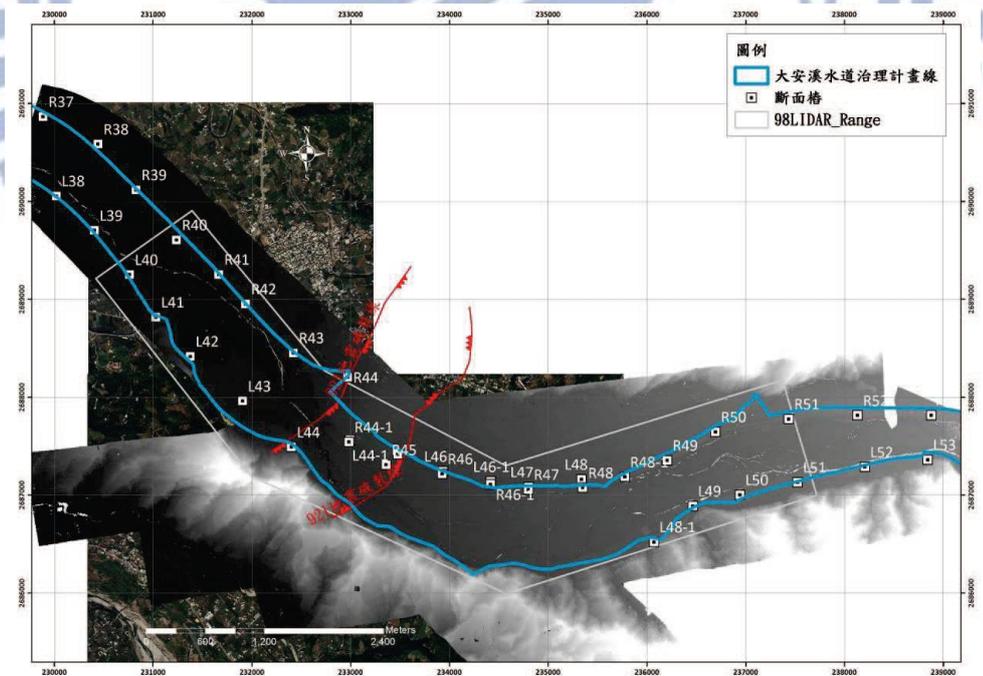
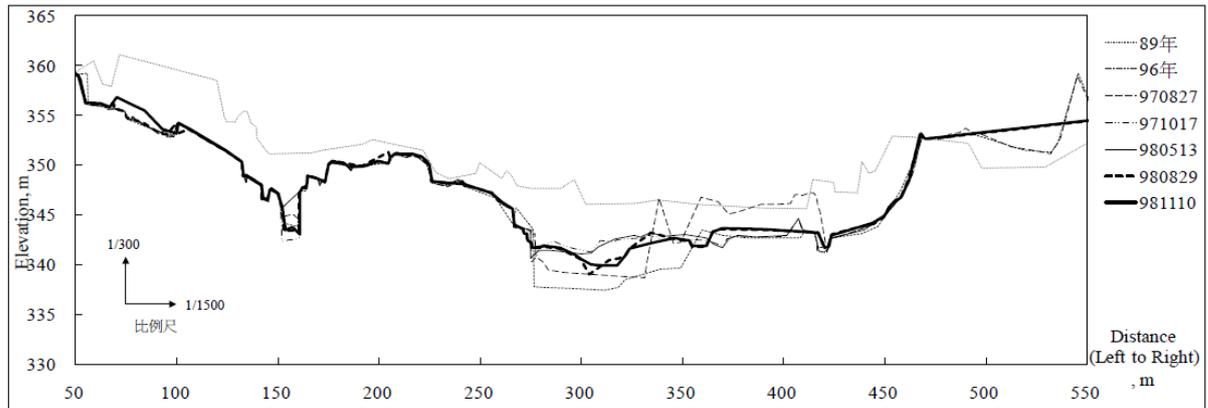
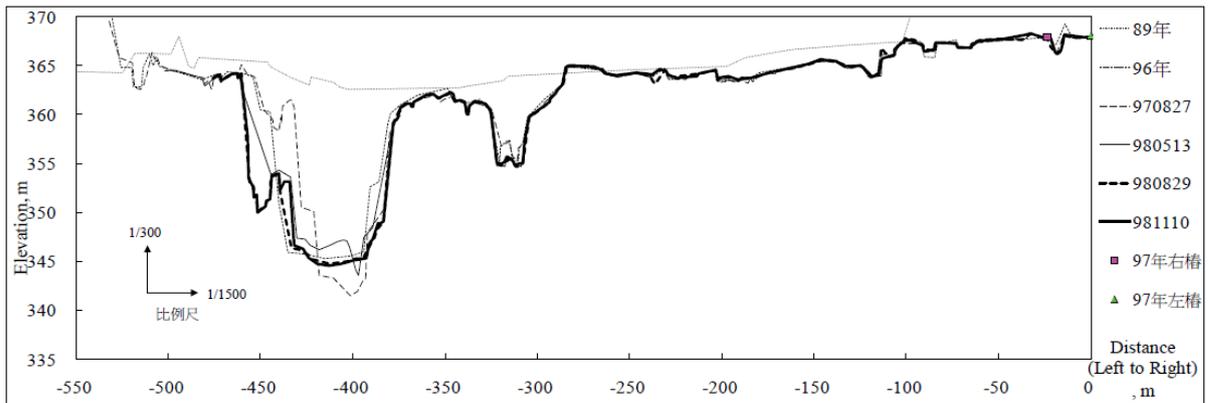


圖 2-17 98/10/03 空載光達(LiDAR)測距掃瞄成果圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)



斷面 44 歷年測量成果圖



斷面 44-1 歷年測量成果

圖 2-18 斷面 44 和斷面 44-1 歷年變化量測成果圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)

2.2.5 河道側壁沖蝕小結

水流特性、河道的形狀、岸壁的形狀、岸壁的材料、岸壁土壤的含水性、植被、暴雨頻率等為岸壁受侵蝕過程的重要影響因素，(Knighton, 1998)。

而要同時考慮上述所有因素做為研究參數並不是容易能達成的目標，而利用各種不同的實驗室試驗、射流現地試驗，直接將結果進行分析，或

是使用各種一維、二維的動床模式、水理模式、及輸砂模式來建立沖蝕模型，套用在其他河道進行估測，抑或是長期的影像監測，以斷面的變化做分析，為目前較為有效之方法。

2.3 現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 試驗簡介

潛沒式射流的現地試驗在 1990 年代逐漸發展及應用，在此之前潛沒式的射流被運用在實驗室內的試驗，像是 Dunn(1959)對於凝聚性河道的阻抗力的研究及 Moore et al.(1962)量測凝聚性沉積物沖刷阻力的研究中，用於確定臨界剪應力。往後 Hanson 進行一系列的研究，包括水壓力與臨界剪應力對於極限沖刷深度的形成、以及利用潛沒式圓形射流的擴散原則和相對應的沖刷量來取得土壤的沖蝕係數(Stein et al.,1997)。Hanson(1990)發展出用於土壤現地的潛沒式射流試驗。

本節將簡介 Mini Jet 的試驗特性、儀器設備、基礎理論、及現地試驗之方法。

2.3.1 Mini Jet 試驗功能與特性

Hanson et al.(1997)提出 Mini Jet(圖 2-19)做為現地土壤沖蝕率量測之儀器。

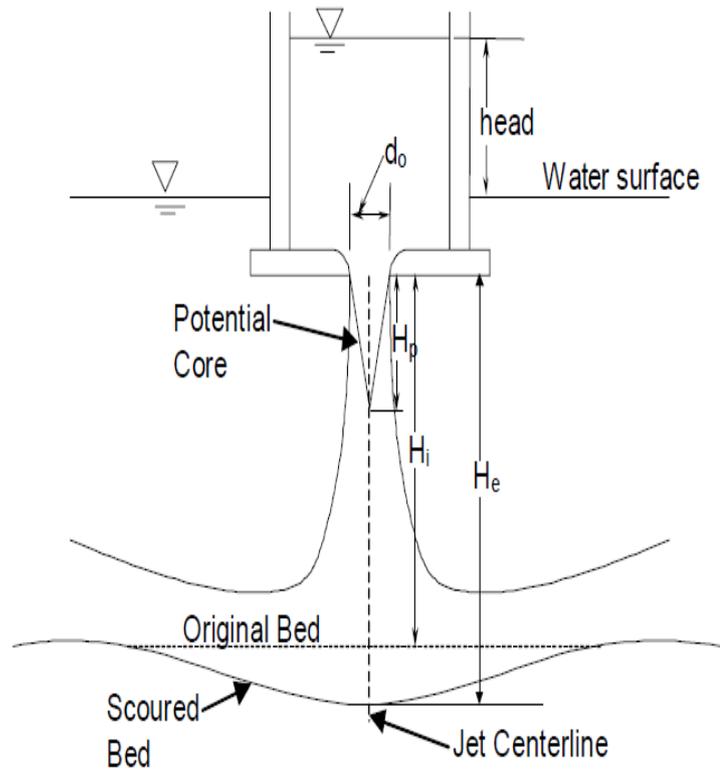


圖 2-19 Mini Jet 沖刷示意圖(Hanson et al.,2001)

小型現地沖蝕儀 Mini Jet 是以垂直射流的方式，將水流射在土壤上，經過長時間的作用後，使深度達到極限沖刷深度，一般而言，達到極限沖刷深度所需的時間經 Blaisdell et al.(1981)對凝聚性砂土的研究為十四個月以上(Hanson et al.,2001)。要由現地試驗達到前述的極限沖刷深度，實屬不可能。因此，透過合理的假設與理論，小型現地沖蝕儀能在短時間由試驗結果估算沖蝕率，詳細計算理論在 2.3.3 節進行討論。

由圖 2-19 可以看出，Mini Jet 的噴口是在水位面以下，因此 Mini Jet 這項試驗是模擬潛沒式射流的沖蝕。

圖中的 head 指的是水頭高，此為管路內與外部水位面相同高度位置下

之壓力，其用意為計算出口流速，並以此導出核心流內剪應力 τ_0 、有效剪應力 τ_e 、及臨界剪應力 τ_c 。

2.3.2 Mini Jet 儀器設備

Mini Jet 包括可調整的壓力閥(圖 2-21)、噴口(圖 2-20)、輸水管、排水管、量測儀(圖 2-21)、金屬底環(圖 2-22、圖 2-23)及泵浦(圖 2-24)。

量測儀的設置上，位於底部的部分是一個壓克力材質的圓盒(圖 2-20)，此目的是要讓試驗在水密性下進行。而壓克力圓盒的側邊有個孔洞可接排水管，量測儀上的插孔則是接輸水管。

金屬底環開口的直徑與壓克力圓盒的外直徑皆為 20cm。

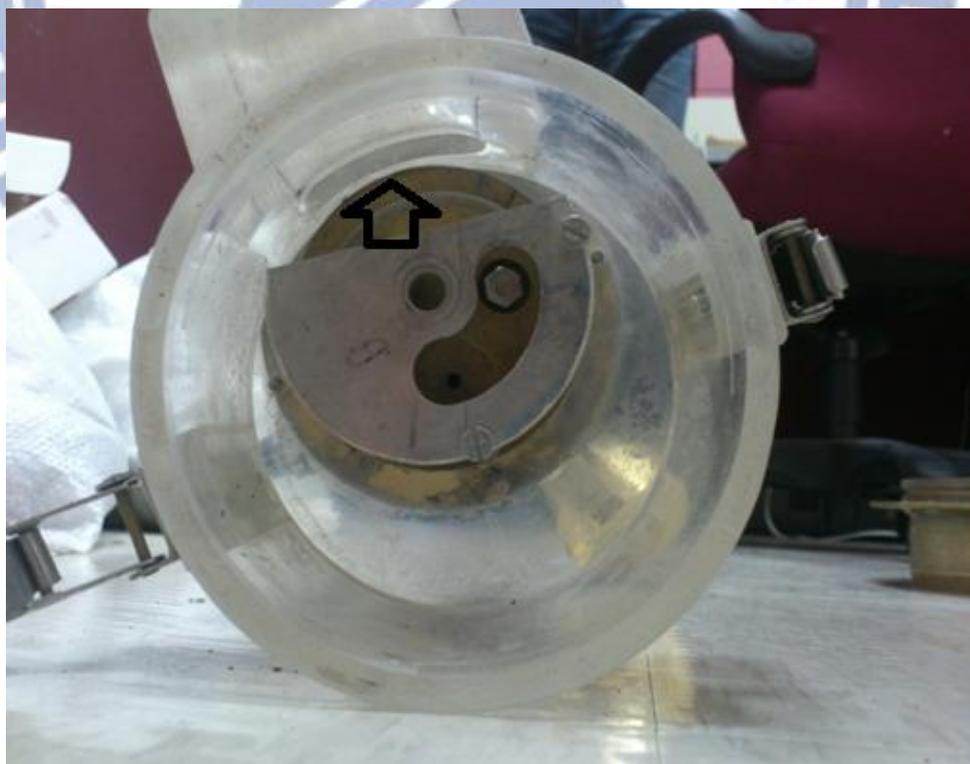


圖 2-20 Mini Jet 之底部噴口部分(箭號處為排水處)

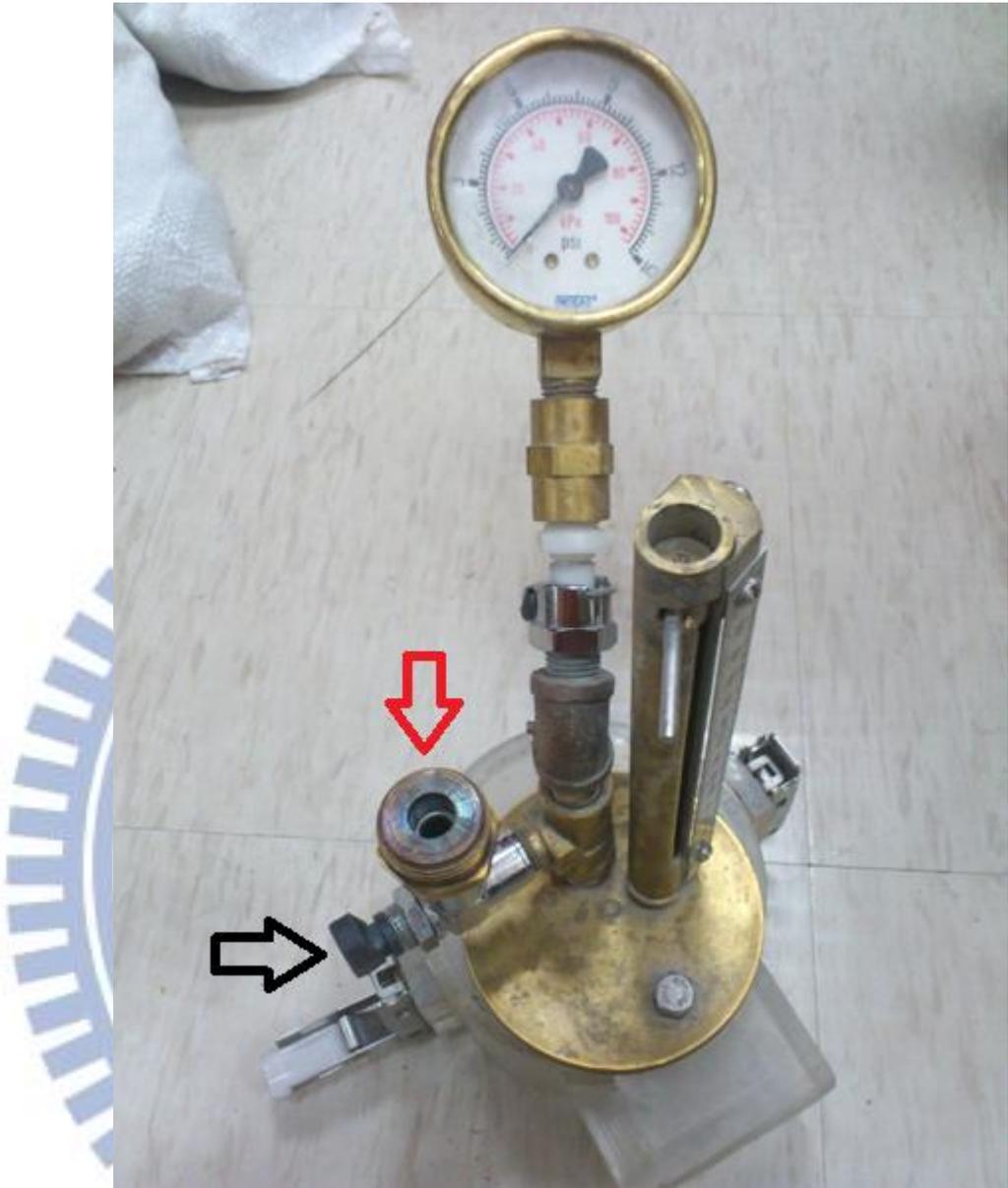


圖 2-21 Mini Jet 量側儀(黑箭號處為可調整壓力閥、紅箭號處為輸水管裝置處)



圖 2-22 Mini Jet 金屬底環俯視圖



圖 2-23 Mini Jet 金屬底環側視圖

水直接從河流、水坑或集水區經馬力為 1/6hp 之泵浦抽入可調整的壓力閥(可控制水流開起、關閉、及排氣)，然後可以讓操作者在可調整壓力閥至試驗水流的噴射速度。而本儀器可以承受的壓力範圍為 4Pa 到 1500Pa，如果要更大的壓力，必須從噴射管直接連接泵浦。射流是由一個圓形、直徑 3.175 mm 的噴嘴噴出。



圖 2-24 馬力 1/6HP 泵浦

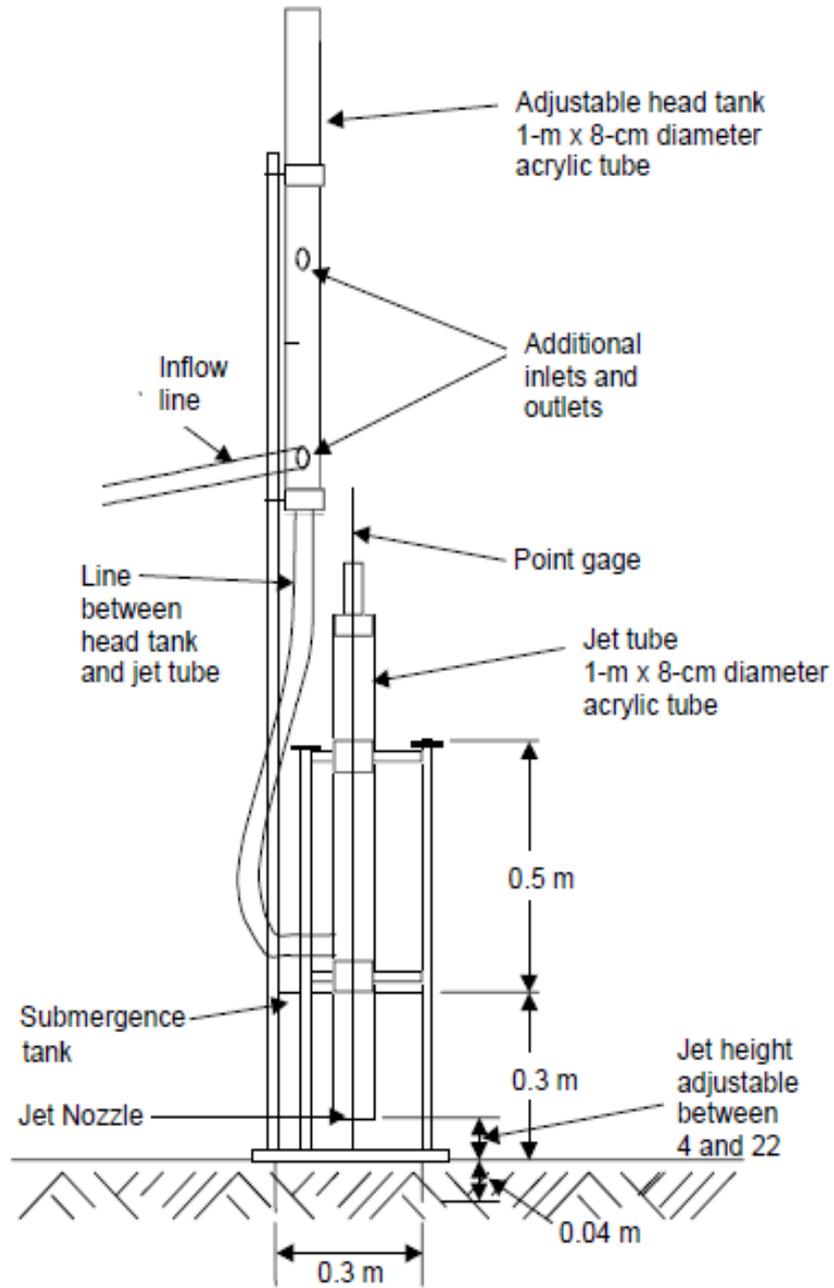


圖 2-25 Mini Jet 側視示意圖(Hanson et al.,2001)

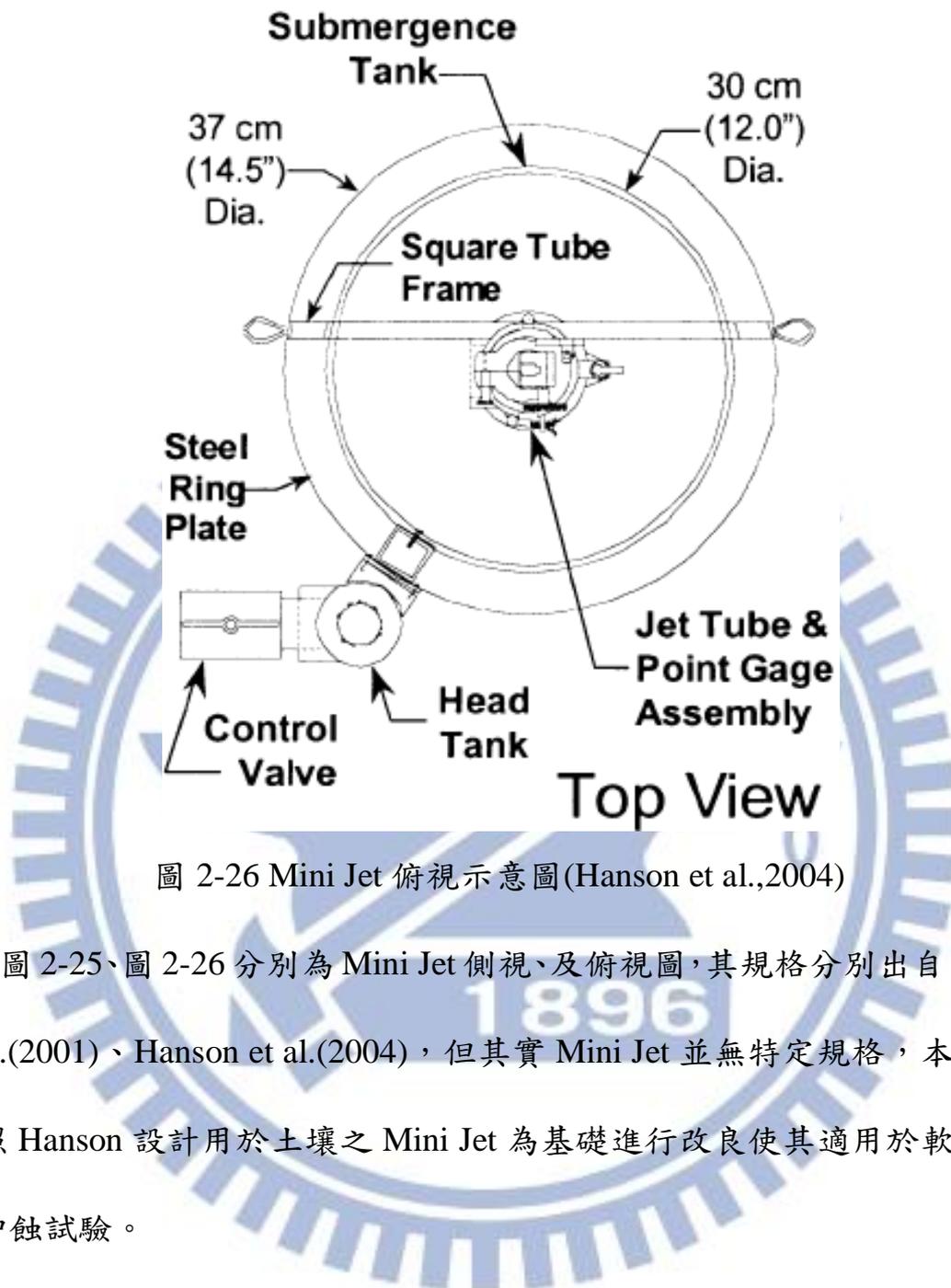


圖 2-26 Mini Jet 俯視示意圖(Hanson et al.,2004)

圖 2-25、圖 2-26 分別為 Mini Jet 側視、及俯視圖，其規格分別出自 Hanson et al.(2001)、Hanson et al.(2004)，但其實 Mini Jet 並無特定規格，本研究將依照 Hanson 設計用於土壤之 Mini Jet 為基礎進行改良使其適用於軟弱岩石的沖蝕試驗。

2.3.3 Mini Jet 基礎理論

Mini Jet 試驗可以經由現地量測的沖蝕量及壓力經計算，得到臨界剪應力 τ_c (critical shear stress in Pa) 及沖蝕係數 k_d (erodibility coefficient in $m^3/N\cdot s$)，

進而得到沖蝕率 ε (rate of erosion in m/s)(Hanson et al.,2001)：

$$\varepsilon=k_d(\tau_e - \tau_c) \quad (2-6)$$

τ_e =有效剪應力(effective shear stress in Pa)

τ_c =臨界剪應力(critical shear stress in Pa)

k_d =沖蝕係數(erodibility coefficient in $m^3/N\cdot s$)

ε =沖蝕率(rate of erosion in m/s)

Mini Jet試驗的目的主要是在決定臨界剪應力與沖蝕係數，而所需的參數為極限沖刷深度(H_c)。因此Mini Jet試驗所需量測的參數(時間、沖刷深度、及水壓)就是為了估算極限沖刷深度，在這過程中必須應用到統計上的方法(standard error of estimate)，因此必須要超過兩組數據才能進行有效的計算，而試驗的組數越多，則估算的結果越接近實際情況。

依前述，以下將先導出有效剪應力、臨界剪應力、及極限沖刷深度的關係式，再進行計算沖蝕係數。

依Hanson et al.(1997)說明，當射流從噴口垂直射出後，中心線的最初速度是 U_0 (噴口直徑 d_0 ，在壓力水頭 h 下)，而當其超越核心流potential core長度 H_p (圖2-27)(核心流長度為射流自噴口射出後仍然維持噴流速的射流長度)後，射流中心速度仍然維持最大流速，但因射流擴散作用使整個射流場的流速降低。當射流超過核心流，即 $H > H_p$ ，一般可接受的射流中心線速度為(Albertson et al.,1950)：

$$\frac{U}{U_0} = C_d \frac{d_0}{H} \quad (2-7)$$

其中H為自噴口算起，射流中心線的長度， C_d 為擴散係數，其值為5.8-7.4(Beltaos et al.,1974)，平均為6.2(Albertson et al.,1950)。噴口的擾流及非均速(turbulence and non-uniform velocity)會影響 C_d 及 H_p 的值。

依核心流的定義及式(2-7)則可計算出核心流長度，即式(2-7)代入 $U=U_0$ 及 $H=H_p$ ：

$$H_p = C_d d_0 \quad (2-8)$$

圓形射流射入水中並傳遞到平滑的邊界，可被區分為四個區，即第一區為水流建立區(zone of the flow establishment)，第二區為水流已建立區(zone of established flow)，第三區為偏斜區(deflection zone)，第四區為平流區(wall jet zone)。第一區為核心流。第三區射流沖擊至水平邊界，水流由垂直轉為水平。沖擊點為一遲滯點(stagnation point)，此點具有邊界最大水壓但零剪應力，隨著水流中心點向兩側散開，且水壓降低使周圍的水壓上升、剪應力漸升至最大值。

早期的研究人員透過試驗結果，已建立前段水流狀況下，第三區水平邊界上的剪應力分佈半經驗式。最大剪應力與流速的關係如下(C_f 為摩擦係數)：

$$\tau = C_f \rho U^2 \quad (2-9)$$

結合式(2-7)、(2-8)、(2-9)，因為核心流內($H \leq H_p$)流速皆為 U_0 ，因此若

沖擊點位於核心流內，其最大剪應力皆相同($\tau=\tau_o$)：

$$\begin{aligned}\tau_o &= C_f \rho U_o^2 & H \leq H_p \\ \tau &= C_f \rho (C_d U_o \frac{d_o}{H})^2 & H > H_p\end{aligned}\quad (2-10)$$

Albertson et al.(1950)與Hanson et al.(1990)經由試驗得到 C_d 及 C_f 分別為6.2及0.00416。

如果噴嘴的高度(H_i)遠超過核心長度(H_p)即沖刷深度的變化(dH/dt)被視為與最大剪應力相關的沖蝕率，結合式(2-6)、(2-8)、(2-10)得到：

$$\begin{aligned}\frac{dH}{dt} &= k(\tau_o - \tau_c) & H \leq H_p \\ \frac{dH}{dt} &= k\left(\frac{\tau_o H_p^2}{H^2} - \tau_c\right) & H \geq H_p\end{aligned}\quad (2-11)$$

在水壓力等於臨界剪應力時的沖刷深度稱為極限沖刷深度，因此承式(2-11)假設 $\tau_o > \tau_c$ 且 $\frac{dH}{dt}=0$ 沖刷深度達到平衡之 H_e ，此時：

$$\tau_c = \tau_o \left(\frac{H_p}{H_e}\right)^2 \quad (2-12)$$

H_i =從噴嘴到土壤初始面的長度

H_p =從噴嘴到 potential core 的長度=6.2*d_o

H_e =從噴嘴到到達平衡時極限沖刷深度的長度

C_f =摩擦係數=0.00416

ρ =液體密度

U_o =水流在噴嘴時的速度($\sqrt{2gh}$)

C_d =擴散係數=6.2

d_o =噴嘴直徑

τ_c =臨界剪應力

τ_o =最大剪應力

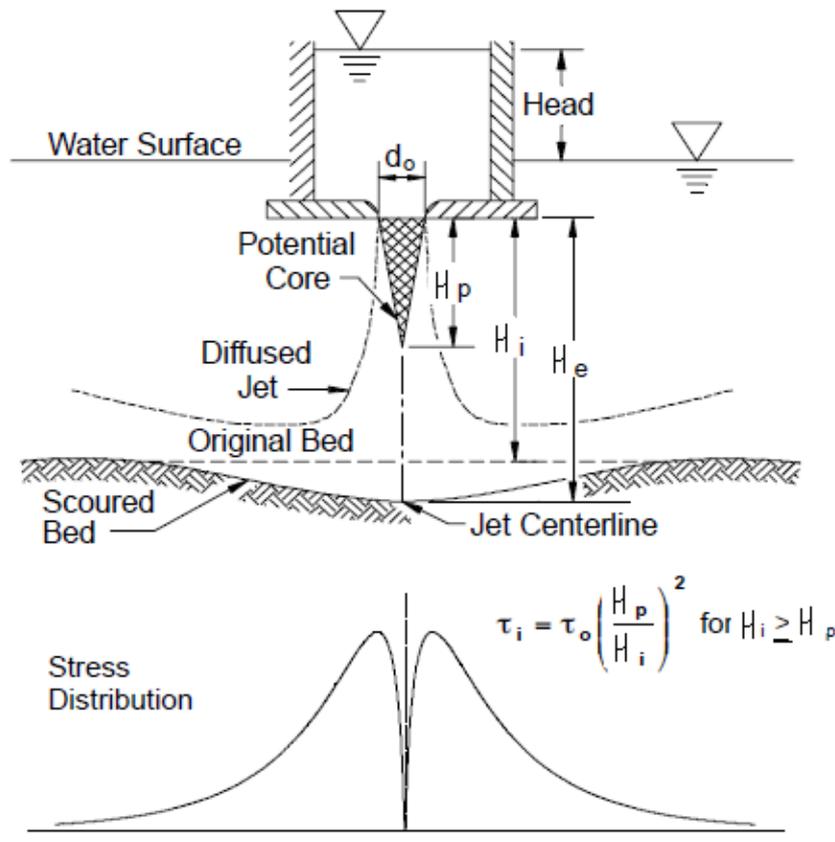


圖 2-27 Mini Jet 各參數示意圖(修改 Hanson et al.,2004)

k_d 及 τ_c 可由沖蝕試驗數據透過非線性迴歸反覆求解，亦可由試驗數據透過對數雙曲線函數法(Blaisdell et al.,1981)求解 τ_c 或假設一個 τ_c 值再反覆求解 k_d 。同時求解的方法，Hanson et al.(1997)經測試後不佳。因此利用雙曲線法先求解 τ_c ，應是較可行。

式(2-12)中，除了極限沖刷深度 H_e 外，其餘參數皆為已知，因此本研究將從 Mini Jet 的現地試驗數據中，先透過雙曲線函數法的求解法來得到

H_e 。

Blaisdell et al.(1981)提出利用 Hyperbolic logarithmic velocity-of-scour method，假設一個雙曲線為：

$$\frac{(y-y_0)^2}{A^2} - \frac{x^2}{B^2} = 1 \quad (2-13)$$

A=半橫軸(the semitransverse axis)

B=半共軛軸(the semiconjugate axis)

式(2-13)為一個南北向開口的雙曲線，中心點在 $(0, y_0)$ 。Blaisdell 利用在懸臂管溢洪道及涵洞網點的沖刷研究數據中，定義了無因次單位的 y 跟 x 式(2-14)、(2-15)：

$$y = \log \frac{\frac{Z_m}{D_p}}{\frac{V_p t}{D_p}} = \log \frac{Z_m}{D_p} - \log \frac{V_p t}{D_p} \quad (2-14)$$

$$x = \log \frac{V_p t}{D_p} \quad (2-15)$$

Z_m =從噴嘴到沖刷面的長度(m)

V_p =jet 噴口速度(m/s)

D_p =jet 噴口直徑(m)

t =開始沖刷後的時間(s)

由於 $\log \frac{V_p t}{D_p}$ 這項在 x 軸及 y 軸中都有出現，因此兩條漸進線之斜率相乘為-1，代表兩漸進線互相垂直，此為一個等軸雙曲線，則式(2-13)中 $A=B$ ，方程式可重新寫為：

$$\frac{(y-y_0)^2}{A^2} - \frac{x^2}{A^2} = 1 \quad (2-16)$$

式(2-16)經過移項整理後：

$$(y-y_0)^2 - x^2 = A^2 \quad (2-17)$$

$$x = [(y-y_0)^2 - A^2]^{0.5} \quad (2-18)$$

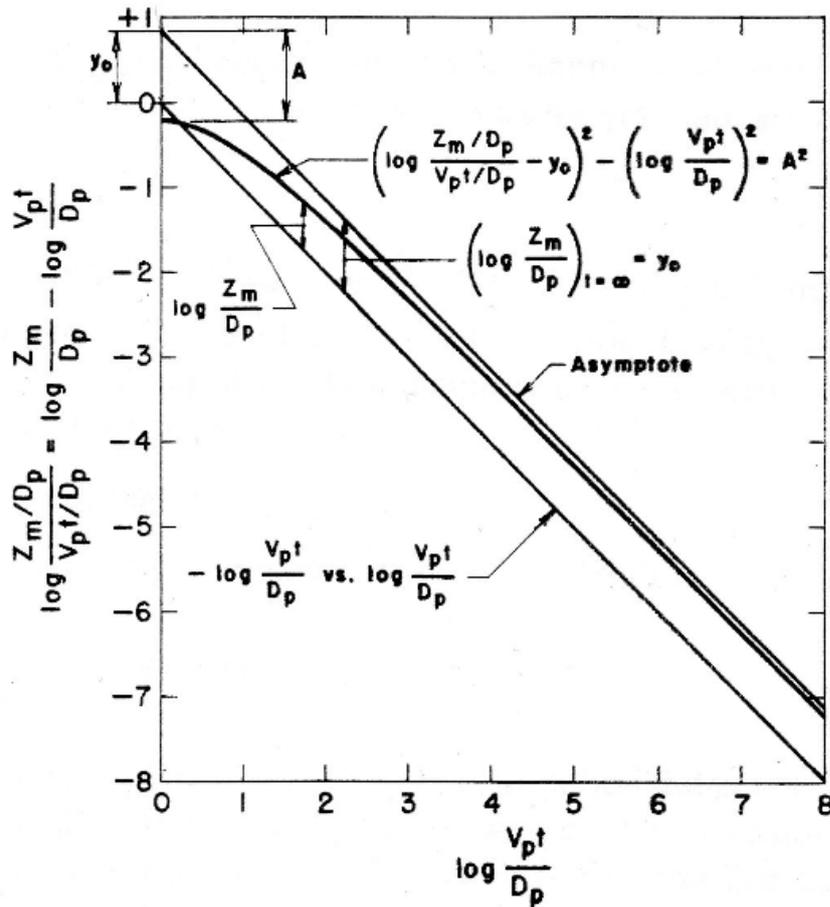


FIG. 3.—General Form of Hyperbola

圖 2-28 由試驗數據所形成之雙曲線示意圖(Blaisdell et al.,1981)

將試驗中所進行的各個時間的量測數據，代入 x 軸(式 2-14)與 y 軸(式 2-15)中，將可以創造出一個雙曲線，而 A 即是雙曲線的兩軸， y_0 則是雙曲線中心點的 y 座標，也是極限沖刷深度所在之處，使用 standard error of

estimate(以迴歸方程式估計標準誤差)算出最佳 A 及 y_0 ，再由式(2-19)計算得到 H_e 。

$$y_0 = \log\left(\frac{H_e}{D_p}\right) \quad (2-19)$$

由式(2-19)得到 H_e 後再帶入式(2-12)計算取得臨界剪應力 τ_c 。

沖蝕係數(erodibility coefficient in $m^3/N\cdot s$) k_d 的計算方法由 Hanson et al.(1997)提出。重複式(2-11)：

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= k(\tau_o - \tau_c) & H \leq H_p \\ \frac{dH}{dt} &= k\left(\frac{\tau_o H_p^2}{H^2} - \tau_c\right) & H \geq H_p \end{aligned} \quad (2-20)$$

將式(2-10)、(2-12)代入式(2-20)中將長度及時間無因次化轉換後(Hanson et al.,1997)為：

$$\begin{aligned} \frac{dH^*}{dT^*} &= \frac{(1-H_p^{*2})}{H_p^{*2}} & H \leq H_p \\ \frac{dH^*}{dT^*} &= \frac{(1-H^{*2})}{H^{*2}} & H > H_p \end{aligned} \quad (2-21)$$

將式(2-21)經過移項積分後(Hanson et al.,1997)：

$$\begin{aligned} \int_0^{T_p^*} dT^* &= \int_0^{H_p^*} \frac{H_p^{*2}}{1-H_p^{*2}} dH^* & H^* \leq H_p^* \\ \int_{T_p^*}^{T^*} dT^* &= \int_{H_p^*}^{H^*} \frac{H^{*2}}{1-H^{*2}} dH^* & H^* > H_p^* \end{aligned} \quad (2-22)$$

$$H^* = \frac{H}{H_e}$$

$$H_p^* = \frac{H_p}{H_e}$$

$$H_i^* = \frac{H_i}{H_e}$$

$$T^* = \frac{t}{T_r}$$

$$T_p^* = \frac{t_p}{T_r}$$

$$T_i^* = \frac{t_i}{T_r}$$

$$T_r = \frac{H_e}{k_d \tau_c}$$

在本研究的時間、剪應力與長度中，都存在著未知的臨界值，當剪應力達到臨界剪應力時，此時的沖刷深度為極限沖刷深度，因此在計算時必須先將此參數消除，所以在深度的參數中都除以 H_e ，而時間的參數中都除以 T_r 。在此計算過程中，並須先由現地試驗得到下列三樣參數：

(1) H_p 、 t_p 。

(2) $H_i - H_p$ 、 $t_i - t_p$ 。

(3) $H - H_i$ 、 $t_m = t - t_i$ 。

H_i = 從噴嘴到初始表面的長度

H_p = 從噴嘴到 potential core 的長度

t_i = 噴射流由噴嘴抵達初始表面的時間

t_p = 噴射流由噴嘴至超越核心長度所需要的時間

t_m = 試驗中所量測的時間

由試驗的水壓可以換算成噴口的流速，而 H_i 為試驗一開始所量測的初始深度、 H_p 的長度也為已知 ($6.2 * d_0$)，因此可以計算出 t_i 及 t_p 。

Stein et al.(1993)基於很小的尾水高進行沖蝕試驗，因此當射流作用在土壤表面時時間為零，沖蝕開始時射流為核心流，試驗則持續到沖蝕穩定

為止。Mini Jet 試驗時沖擊點遠離核心流，為維持與 Stein 等人相似的時間尺度兩個虛擬時間 T_p^* 、 T_i^* 被考慮在分析中，而 $t_m=t-t_i$ 則為試驗時真正量測的時間。

時間 t_p 所對應的為噴射流經過 H_p 時所需要的時間，而在射流長度還未達到 H_p 的長度時，無因次化時間 $T_p^*=\frac{t_p}{T_r}$ 可以經由式(2-22)表示為(Hanson et al.,1997)：

$$T_p^*=H_p^* \left[\frac{H_p^{*2}}{(1-H_p^{*2})} \right] = \frac{H_p^{*3}}{(1-H_p^{*2})} \quad (2-23)$$

在射流長度超過 H_p 之後，無因次化時間 T^* 則為(Hanson et al.,1997)：

$$T^*=H^* \left[\frac{H_p^{*2}}{(1-H_p^{*2})} \right] \quad H^* > H_p^* \quad (2-24)$$

時間 t_i 定義為經由噴口噴出的射流到達初始面所需要的時間，在射流超過 potential core 之後達到初始面所需的時間為 t_i-t_p 。無因次化的時間 $T_i=\frac{t_i}{T_r}$ ，其定義可經由 $\tau_c=\tau_o\left(\frac{H_p}{H_e}\right)^2$ 導出(Hanson et al.,1997)：

$$T_i^*=0.5\ln\left(\frac{1+H_i^*}{1-H_i^*}\right)-H_i^*-0.5\ln\left(\frac{1+H_p^*}{1-H_p^*}\right)+H_p^*+T_p^* \quad (2-25)$$

現地試驗時實際量測之時間為所經的時間 t 扣除射流從噴嘴到達初始面的時間 $t_i(t_m=t-t_i)$ 。無因次化的時間 $T^*=\frac{t}{T_r}$ 可以定義為從初始面 H_i 到達沖蝕深度 H 所對應之時間(Hanson et al.,1997)：

$$T^*=0.5\ln\left(\frac{1+H^*}{1-H^*}\right)-H^*-0.5\ln\left(\frac{1+H_i^*}{1-H_i^*}\right)+H_i^*+T_i^* \quad (2-26)$$

將式(2-23)、(2-25)帶入式(2-26)可得到(Hanson et al.,1997)：

$$T^*=0.5\ln\left(\frac{1+H^*}{1-H^*}\right)-H^*-0.5\ln\left(\frac{1+H_p^*}{1-H_p^*}\right)+H_p^*+\frac{H_p^{*3}}{1-H_p^{*2}} \quad (2-27)$$

因為 $t_m=t-t_i$ ，移項後 $t=t_m+t_i$ ，導入式(2-28)並且移項整理後得到最終的式(2-29) (Hanson et al.,1997)：

$$T^* = \frac{t_m+t_i}{T_r} = 0.5\ln\left(\frac{1+H^*}{1-H^*}\right) - H^* - 0.5\ln\left(\frac{1+H_p^*}{1-H_p^*}\right) + H_p^* + \frac{H_p^{*3}}{1-H_p^{*2}} \quad (2-28)$$

$$t_m = T_r \left[0.5\ln\left(\frac{1+H^*}{1-H^*}\right) - H^* - 0.5\ln\left(\frac{1+H_i^*}{1-H_i^*}\right) + H_i^* \right] \quad (2-29)$$

式(2-29)中除 T_r 以外其餘皆可由試驗中所得之參數，因此可以計算出 T_r ，再由式(2-30)計算出 k_d ，然而每次量測都可以計算出一組 k_d ，將各組 k_d 進行線性迴歸，求得標準差來算出最佳值。而從式(2-30)得知並須要先有極限沖刷深度 H_e 才能算出沖蝕率 k_d ，此兩者間關係可由式中看出(Hanson et al.,1997)：

$$T_r = \frac{H_e}{k_d \tau_c} \quad (2-30)$$

2.3.4 Mini Jet 現地試驗方法

現地試驗方法引用 Hanson et al.(2001)於美國中西部進行厚層崩積土的 Mini Jet 試驗方法及程序。

首先選定試驗地點，將試驗處表面的雜物(碎石、雜草)去除清理乾淨，爾後將圖 2-22 金屬底環的一面打入土壤中，金屬底環必須完全嵌入土中。然後將量測儀裝置到金屬環上，把側邊的扣環扣起來，如此一來便能將量測儀完全固定在金屬底環上。接著將泵浦沒入水中，把連接著泵浦的輸水管接到量測儀上，並將排水管接到量測儀的壓克力盒上，如圖 2-29 所示，

到此試驗準備完成。



圖 2-29 Mini Jet 於現地試驗裝設完成圖

在說明試驗過程前，先介紹 Mini Jet 的量測方法，首先如圖 2-30 所示，圖中的小黑點就是噴口，此時稱為噴口打開，這個時候強力的射流會直接射向所要量測的土壤上；而當轉動壓克力盒上的金屬圓盤並且轉到底後，如圖 2-31 所示，此時稱為噴口關閉，噴口噴出的射流被圖上的半圓型鐵片給擋住，因此即使水流繼續噴射，也不會噴到試體，而會以散射的方式出水，所以壓克力盒內仍然繼續保持水密性，整個試驗過程中泵浦是完全不停機的；再來如圖 2-32 所示，將標桿輕輕伸出到碰到土壤，然後讀取標桿頂部所指的讀數，此即為試驗所要記錄的深度。



圖 2-30 噴口打開(圖中箭號處為噴口)



圖 2-31 噴口關閉



圖 2-32 伸出標桿量測深度

前面敘述當要把量測儀裝設到金屬底環上時，必須注意此時一定要是噴口關閉，這樣才不會一打開泵浦，就讓噴射流直接射在試驗體上。

等到壓克力盒內蓄滿水，並且沒有任何漏水保持在水密性之下時，記錄初始深度及水壓後，就可開始進行試驗。當開始計時時，將壓克力盒上的金屬圓盤轉到底，此時即為噴口打開，水流開始沖蝕試體，並且記錄水壓，達到欲量測的時間時，再度將壓克力盒上的金屬圓盤轉到底，噴口關閉，伸出標桿量測深度。

欲量測的時間最短為 15 秒最長為 10 分鐘，整個試驗總時間不得超過 120 分鐘，時間必須由短到長，而中間過程沒有一定的規範所遵循，可以依

照沖蝕的深度來決定下一回合要沖多久。但是軟弱岩石強度高過土壤許多，因此軟岩的最長沖蝕間隔時間應該提升至 30 分鐘，才能得到更有效的沖蝕數據。

2.3.5 Mini Jet 試驗簡介小結

此試驗最終是為了得到沖蝕率，也可以說是為了估計極限沖刷深度，因此需量測不同時間下的沖刷深度。而這整個理論是運用在土壤上，倘若移植到岩石上是否還適用，就必須瞭解 Mini Jet 這項儀器在岩石上做試驗能否沖出如圖 2-19 的沖刷坑，如果成功沖出標準的沖刷坑，那這整套理論、計算方式，將可適用於軟弱岩石的現地沖蝕試驗。

在試驗的過程中，所要記錄的數據有三項，沖刷時間、水壓及標桿讀數，將數據紀錄在圖 2-33 的表格上，也可以直接輸入在 Excel(Cook,1998 以 2.3.3 節理論寫出)計算表上，便可計算得到結果。

JET DATA						
					DATE	10/9/97
JET TEST						
LOCATION			Station 53 in flume	OPERATOR		gjh
ZERO POINT GAGE READING			1.222	TEST #		2
PRELIMINARY HEAD SETTING			87	PT GAGE RDG @ NOZZLE		1.263
NOZZLE DIAMETER (IN)			0.2505	NOZZLE HEIGHT (FT)		0.200
SCOUR DEPTH READINGS				HEAD SETTINGS		
TIME (MIN)	DIFF TIME (MIN)	PT GAGE READING (FT)	MAXIMUM DEPTH OF SCOUR (FT)	TIME (MIN)	HEAD (IN)	
0	0	1.063	0.000	0	87.00	
10	10	1.032	0.031	10	87.00	
20	10	1.023	0.040	20	87.00	
30	10	1.014	0.049	30	87.00	
40	10	0.999	0.064	40	87.00	
50	10	0.990	0.073	50	87.00	
60	10	0.977	0.086	60	87.00	
70	10	0.974	0.089	70	87.00	
80	10	0.973	0.090	80	87.00	

圖 2-33 現地試驗紀錄表格 (Hanson et al., 2004)

而此試驗計算方式將使用 Cook(1998)所寫之 Excel 計算程式，使用當中之巨集功能，即可計算出 τ_o 、 τ_e 、 τ_c 、 H_e 、 k_d 、 ϵ 。如圖 2-34、圖 2-35、圖 2-36、圖 2-37 所示。

TIME (MIN)	DIFF TIME (MIN)	PT GAGE READING (FT)	MAXIMUM DEPTH OF SCOUR (FT)	Maximum Depth of scour (m)	Maximum Depth of scour (cm)	TIME (MIN)	HEAD (IN)	NET HEAD (Psi)
0	1	0.770	0.000	0.0000	0.0000	0	241.08	8.7
1	1	0.767	0.003	0.0010	0.1000	1	241.08	8.7
2	1	0.767	0.003	0.0010	0.1000	2	241.08	8.7
3	1	0.765	0.005	0.0015	0.1500	3	241.08	8.7
4	5	0.765	0.006	0.0017	0.1700	4	241.08	8.7
5.1	10	0.764	0.006	0.0018	0.1800	5.1	241.08	8.7
7.1	10	0.764	0.007	0.0020	0.2000	7.1	241.08	8.7
9.1	10	0.763	0.007	0.0021	0.2100	9.1	241.08	8.7
14.1	10	0.763	0.008	0.0023	0.2300	14.1	241.08	8.7
19.1	10	0.763	0.008	0.0023	0.2300	19.1	241.08	8.7
29.1	11	0.763	0.008	0.0023	0.2300	29.1	241.08	8.7

TIME (MIN)	HEAD (IN)	NET HEAD (Psi)
0	241.08	8.7
1	241.08	8.7
2	241.08	8.7
3	241.08	8.7
4	241.08	8.7
5.1	241.08	8.7
7.1	241.08	8.7
9.1	241.08	8.7
14.1	241.08	8.7
19.1	241.08	8.7
29.1	241.08	8.7

TIME (MIN)	DIFF TIME (MIN)	PT GAGE READING (FT)	MAXIMUM DEPTH OF SCOUR (FT)	Maximum Depth of scour (m)	Maximum Depth of scour (cm)
0	1	0.770	0.000	0.0000	0.0000
1	1	0.767	0.003	0.0010	0.1000
2	1	0.767	0.003	0.0010	0.1000
3	1	0.765	0.005	0.0015	0.1500
4	5	0.765	0.006	0.0017	0.1700
5.1	10	0.764	0.006	0.0018	0.1800
7.1	10	0.764	0.007	0.0020	0.2000
9.1	10	0.763	0.007	0.0021	0.2100
14.1	10	0.763	0.008	0.0023	0.2300
19.1	10	0.763	0.008	0.0023	0.2300
29.1	11	0.763	0.008	0.0023	0.2300

圖 2-34 將參數及試驗數據輸入計算表中

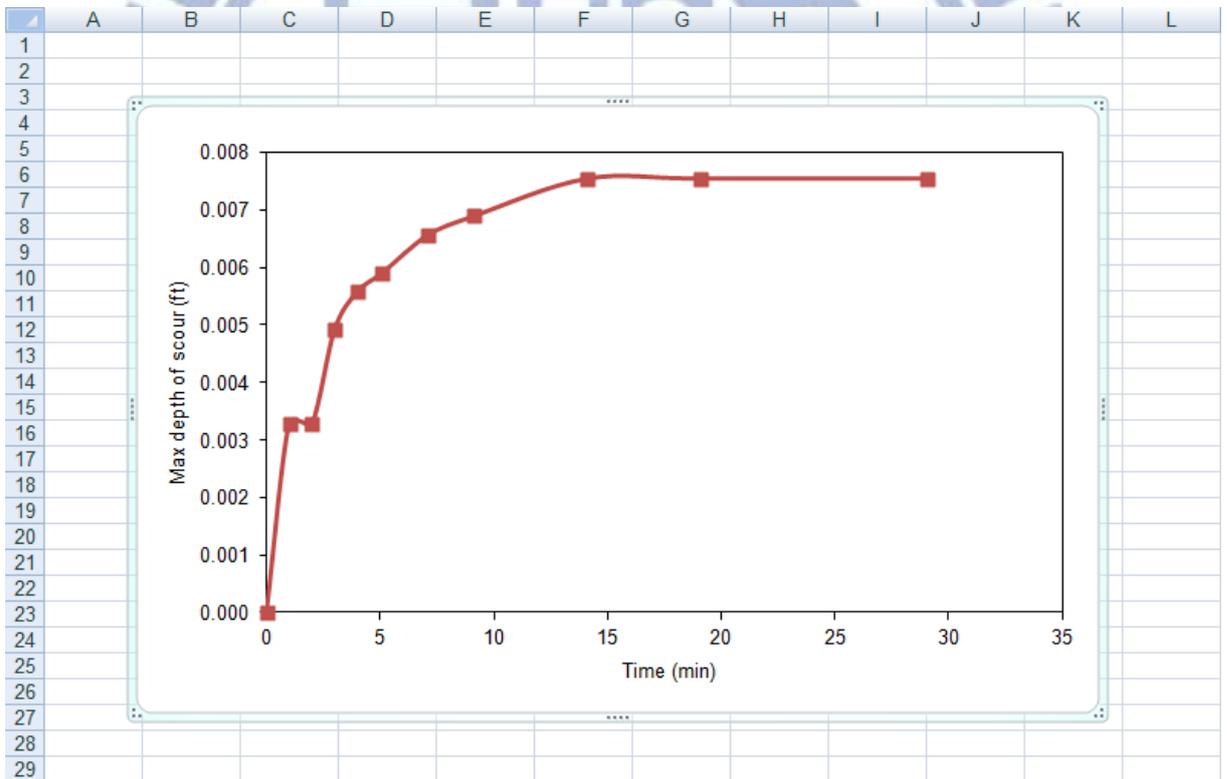


圖 2-35 試驗中沖刷深度隨時間變化圖

Asymptote Plot

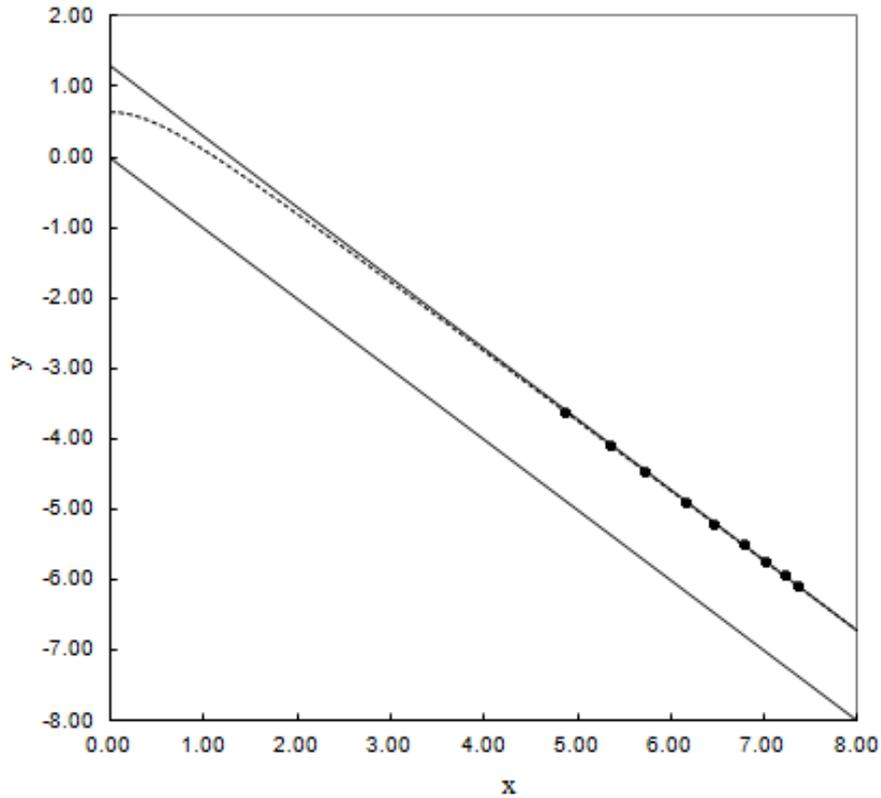


圖 2-36 計算極限沖刷深度 H_e 的 $y-x$ 雙曲線關係圖

Run #	Elapsed Time (sec)	Head Reading (m)	J (m)	U_o (m/s)	J_e (m)	τ_c (Pa)	K ($m^3/N\cdot s$)	Tr	J^*	JL^*	Tm pre	Err ²	Equation 6 Applied Shear Stress (Pa)	Equation 5 Available Shear Stress (Pa)
1	60	6.12	0.071	9.380	0.078	23.061	5.67E-07	6000.007	0.90529	0.89254	322.56	68940	28.138	366.047
2	120	6.12	0.071	9.380			K		0.90529		322.56	41032	28.138	366.047
3	180	6.12	0.072	9.380			$cm^3/N\cdot s$		0.91167		503.4	104587	27.746	366.047
4	240	6.12	0.072	9.380			0.566825		0.91422		579.98	115588	27.591	366.047
5	306	6.12	0.072	9.380					0.91549		619.26	98129	27.514	366.047
6	426	6.12	0.072	9.380					0.91804		699.87	75005	27.362	366.047
7	546	6.12	0.072	9.380					0.91932		741.25	38124	27.286	366.047
8	846	6.12	0.072	9.380					0.92187		826.29	388.55	27.135	366.047
9	1146	6.12	0.072	9.380					0.92187		826.29	102216	27.135	366.047
10	1746	6.12	0.072	9.380					0.92187		826.29	845870	27.135	366.047

圖 2-37 計算結果分別有 τ_o 、 τ_e 、 τ_c 、 k_d 、 H_e (為圖中之 J_e)

2.4 軟弱岩石沖蝕性能評估方法

本研究目的在評估 Mini Jet 於軟弱岩石的適用性，因此若能先行利用現有理論及經驗計算 Mini Jet 施加的最大剪應力及估計岩石的可能剪力阻抗，加以比較後就可推估瞭解其適用性。軟弱岩石的剪力阻抗可由 Annandale(2006)的建議，由岩石的性質將抗沖蝕指數加以評分，再利用其建議估算剪力阻抗 $K_h^{0.75}$ 與流功相比，試驗的流功若大於 $K_h^{0.75}$ ，則可初步判斷該岩石可在本試驗中產生沖蝕。

另外由 K_h 所計算出之岩石最大剪應力也可與本儀器之最大剪應力(式 2-10)做比較，若本儀器之最大剪應力大於 K_h 所計算出之岩石最大剪應力，則亦可初步判斷該岩石可在本試驗中產生沖蝕。

2.4.1 流功 SP

本文以 Annandale (2006) 計算流功的方式為主體，並引用羅楚鈞(2011)之流程計算水流能量。接著計算岩盤的抗沖蝕能力(可由 Annandale 的公式代入 K_h 計算得到)，如果流功大於岩盤抗沖蝕能力表示水流可讓岩盤產生沖刷，若流功小於抗沖蝕能力則表示岩盤不會沖刷。岩盤受水流沖刷之後，會因為力平衡的關係而收斂，最終收斂的結果即為極限沖刷深度。

水流離開出水處後，經過一跌水距離(H)才到達尾水面，接著利用位能轉換為動能的觀念計算水流作用於尾水面的流功。射流流功計算方式依

hydropower potential 之計算公式計算(Annandale, 2006)；

$$P_{\text{jet}} = \gamma_w QH \quad (2-31)$$

射流流功衝擊於岩體上，作用於表面的能量可用流功除以衝擊面積，即為單位面積的流功：

$$P_{\text{jet}} = \frac{\gamma_w QH}{A} \quad (2-32)$$

P_{jet} =射流的總流功(kW/m²)

γ_w =水流單位重=9.81kN/m³

Q =總流量(m³/s)

H =跌水高度(m)

A =水流衝擊面積(m²)

水流離開束制邊界後，因射流與周遭介質間之壓力差，射流周邊會因此向外擴散，導致邊緣流速變慢，同時因與空氣之摩擦，將部分空氣以氣泡形式攜入射流中。初期中心位置仍有部分保持原有之流速稱為核心射流(core jet)，若擴散長度夠長，則所有之流體與空氣之交互作用，導致射流以水滴形式向下墜落，此時之長度稱為射流破裂長度(L_b :jet break length)，任一斷面之流速皆小於初始流速則稱為擴散射流，如圖 2-38。

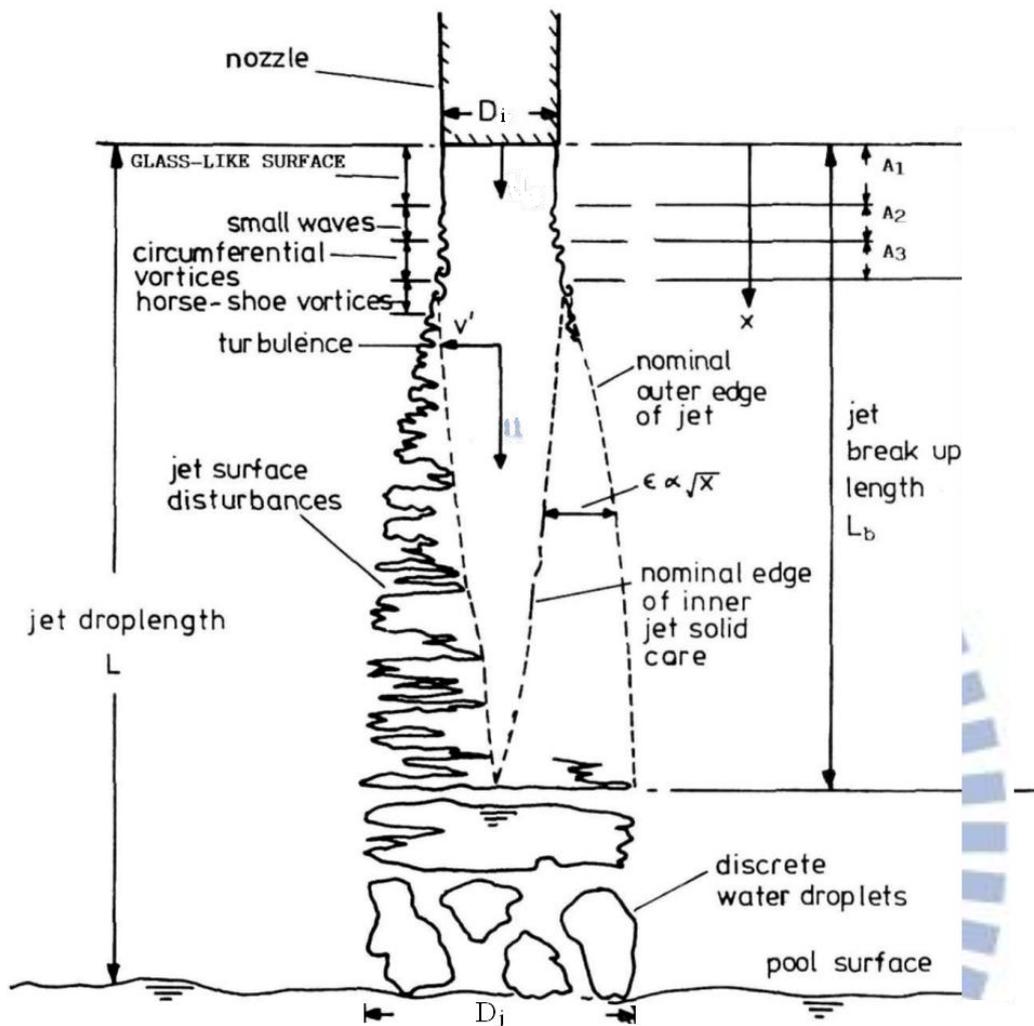


圖 2-38 水流離開噴嘴之破裂長度示意圖(修改 Ervine et al, 1997)

Ervine et al.(1997)提出圓形射流擴散架構，並針對其擴散之相關參數建議如下：

射流破裂長度(Ervine et al, 1997)：

$$L_b = \frac{1.05 \times D_i \times F_{ri}^2}{(1.14 \times T_u \times F_{ri}^2)^{0.82}} \quad (2-33)$$

射流水柱擴散厚度(Ervine et al, 1997)：

$$D_j = D_i + 2 \times 0.38 \times (T_u \times L) \quad (2-34)$$

L_b =射流破裂長度(m)

D_i =射流水柱厚(m)

F_{ri} =射流初始福祿數(式 2-35)

T_u =射流擾流強度=0.08

D_j =射流水柱擴散厚度(m)

L =水面上射流軌跡長度(m)

$$F_{ri} = \frac{V}{\sqrt{gD_i}} \quad (2-35)$$

射流自水面進入尾水之後，流功會隨著尾水的深度衰減，尾水的平均動態壓力可以利用平均動態壓力係數 C_p (Mean dynamic pressure coefficient) 加以估計，而波動動態壓力則可利用波動動態壓力係數 C_p' (Fluctuating dynamic pressure coefficient) 加以估計；在尾水中動態壓力作用於岩盤表面的單位面積流功如下式：

$$P_{jet} = (C_p + C_p') \frac{\gamma_w QH}{A} \quad (2-36)$$

C_p =平均動態壓力係數

C_p' =波動動態壓力係數

在水流進入尾水後直到碰觸到岩盤表面時，水流會產生擴散作用，一般擴散的程度用尾水深與水柱厚的比值來做界定，比值小於 4 時，中心點仍然可以保持核心射流狀態，比值大於 4 之後，則核心射流也會產生擴散，比值若是大於 20，則幾乎不再有壓力傳達至底部。Castillo(2004)考慮不同

的矩型射流破裂長度比，進行一連串正規化消能池深度(h/D_j)與矩型水柱之平均動態壓力係數(C_p)的試驗，結果如圖 2-39 及表 2-1，其中以改變水面上射流軌跡長度與射流破裂長度的比值(L/L_b)觀察平均動態壓力係數的變化，並提出以下經驗式：

$$C_p = m e^{-n\left(\frac{h}{D_j}\right)} \quad (2-37)$$

m, n =射流破裂長度比參數

h =尾水高度

D_j =矩形水柱厚度

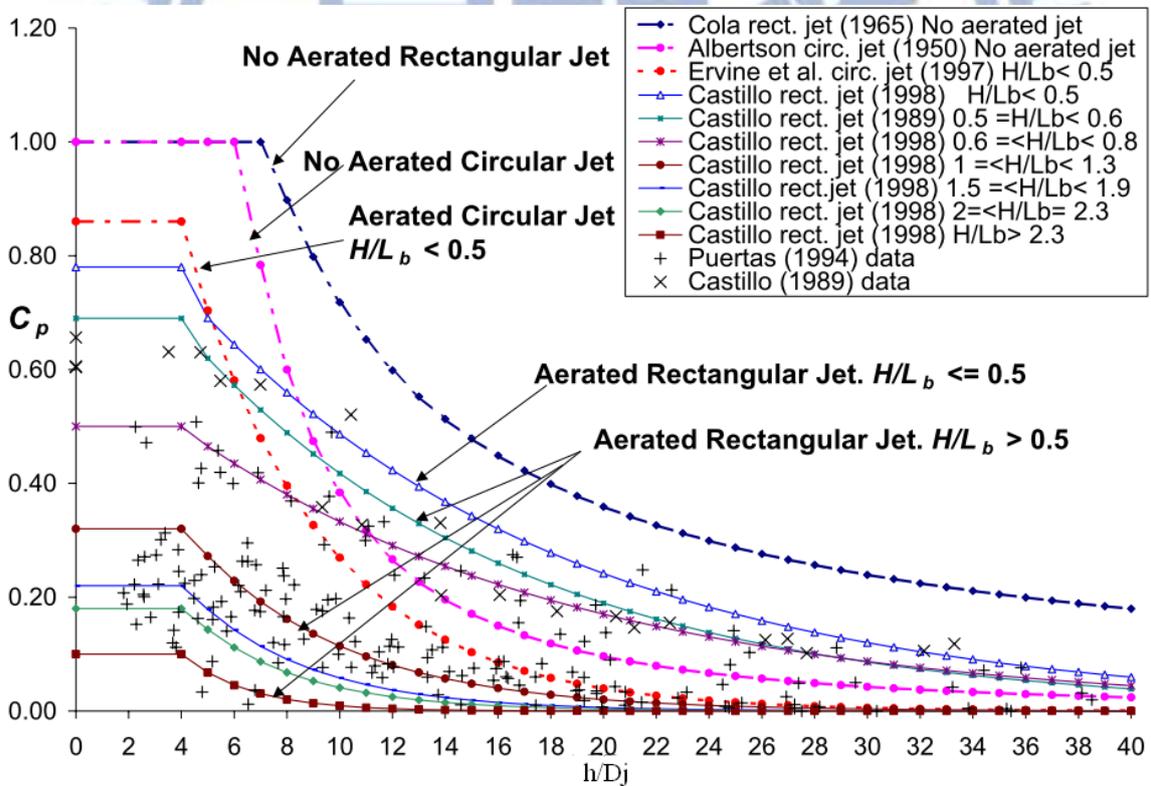


圖 2-39 正規化消能池深度、平均動態壓力係數在不同射流破裂長度比之函數關係圖(圖中 H 為水面上射流軌跡長度 L)(Castillo, 2004)

表 2 - 1 射流破裂長度比參數(Castillo, 2006)

L/L_b	m	n	$C_p(h/D_j < 4)$
<0.5	0.98	0.070	0.78
0.5-0.6	0.92	0.079	0.69
0.6-0.8	0.65	0.067	0.5
1.0-1.3	0.65	0.174	0.32
1.5-1.9	0.55	0.225	0.22
2.0-2.3	0.50	0.250	0.18
>2.3	0.50	0.400	0.10

水流在尾水的情況下受到剪力層與渦流所產生之擾動影響，使得壓力快速變動之情形稱為波動動態壓力(C_p')。May and Willoughby (1991)、Ervin et al. (1997)、Bollaert (2002)、Castillo (2004)等學者，發展了許多評估波動動態壓力與正規化消能池深度的方法，其中 Bollaert (2002)評估波動動態壓力與正規化消能池深度的關係式：

$$C_p' = a_1 \left(\frac{h}{D_j}\right)^3 + a_2 \left(\frac{h}{D_j}\right)^2 + a_3 \left(\frac{h}{D_j}\right) + a_4 \quad \text{for } h/D_j \leq 14$$

$$C_p' = a \left(\frac{h}{D_j}\right)^b \quad \text{for } h/D_j > 14 \quad (2-38)$$

Bollaert(2003)整理了 Ervin and Falvey(1987)、Castillo and Dolz (1989)及 May and Willoughby (1991)等相關之研究資料成圖 2-40。Castillo(2006)整理 Castillo(1989)、Puertas(1994)、Bollaert(2002)資料，其中以改變跌水高度與射流破裂長度的比值(H/L_b)觀察波動動態壓力係數的變化，如表 2 - 2 所示。

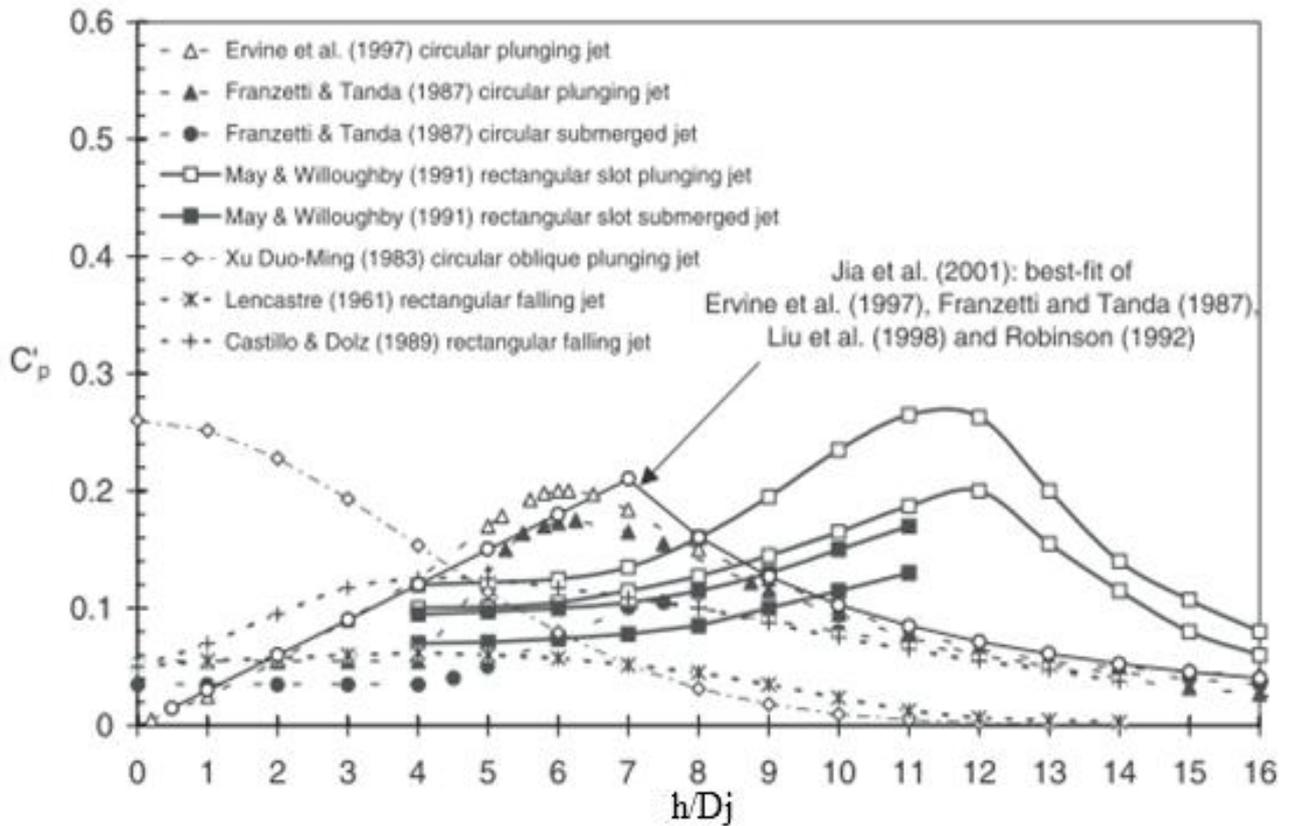


圖 2-40 射流波動壓力係數與 h/D_j 關係圖(Bollaert, 2003)

表 2-2 波動動態壓力係數與 H/L_b 比值關係表(Castillo, 2006)

$h/D_j < 14$					
H/L_b	a_1	a_2	a_3	a_4	Type of jet
≤ 1.4	0.0003	-0.0104	0.0900	0.083	Compact-Developed-Disintegrated
1.5-2	0.0003	-0.0094	0.0745	0.05	Developed-Disintegrated
> 2	0.0002	-0.0061	0.0475	0.01	Developed-Disintegrated
$h/D_j > 14$					
H/L_b	a		b		Type of jet
≤ 1.4	5.30		-1.045		Compact-Developed-Disintegrated
1.5-2	3.14		-1.422		Developed-Disintegrated
> 2	1.50		-1.500		Developed-Disintegrated

2.4.2 岩盤抗沖蝕指數 K_h

Annandale(1995,2006) 修正 Kirsten(1982) 發展的抗沖蝕指數 K_h (Erodibility index)，為建立出一套仿照岩體品質評分系統(Q-system)之抗沖蝕指數(材料強度 M_s 、顆粒或塊體尺寸 K_b 、弱面或顆粒抗剪強度 K_d 、地盤構造條件 J_s)：

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (2-39)$$

M_s =材料強度數值(表 2 - 3)

$$M_s = C_r \times 0.78 \times UCS^{1.05} \text{ for } UCS \leq 10\text{MPa}$$

$$M_s = C_r \times UCS \text{ for } UCS > 10\text{MPa}$$

UCS=無圍壓縮強度(MPa)

$$C_r = \frac{\gamma_s}{27 \times 10^3}$$

γ_s =材料單位重

表 2 - 3 岩石材料強度評分表(Annandale, 1995,2006)

岩石硬度	無圍壓縮強度 UCS(MPa)	材料強度數值(M_s)
極軟岩	<1.7	0.87
	1.7~3.3	1.86
軟岩	3.3~6.6	3.95
	6.6~13.2	8.39
硬岩	13.2~26.4	17.7
極硬岩	26.4~53.0	35.0
	53.0~106.6	70.0
極堅硬硬岩	>212.0	280.0

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \quad (2-40)$$

J_n =節理組數參數(表 2 - 4)

$$RQD = \text{岩石品質指標} = 105 - \frac{10}{(J_x * J_y * J_z)^{0.33}}$$

現地的 RQD 可利用經驗式求得， J_x 、 J_y 、 J_z 分別為 x、y、z 三個方向上每公尺所出現的節理數。

表 2 - 4 節理組數評分表(Annandale, 1995,2006)

節理組數	J_n
完整岩石或有少數裂隙	1.00
一組節理/裂隙	1.22
一組節理/裂隙，附加不規則節理	1.50
兩組節理/裂隙	1.83
兩組節理/裂隙，附加不規則節理	2.24
三組節理/裂隙	2.73
三組節理/裂隙，附加不規則節理	3.34
四組節理/裂隙	4.09
多組複合節理/裂隙	5.00

$$K_d = \frac{J_r}{J_a} \quad (2-41)$$

J_r =節理面粗糙參數(表 2 - 5)

J_a =節理風化參數(表 2 - 6)

表 2 - 5 節理粗糙參數評分表(Annandale, 1995,2006)

節理分離程度	節理面狀態	J_r
挖掘過程中，節理/裂隙保持緊密狀態	階梯狀節理/裂隙	4.00
	粗糙或不規則，呈波浪狀	3.00
	平滑波浪狀	2.00
	摩擦過之平面，呈波浪狀	1.50
	粗糙或不規則，成平面狀	1.50
	平滑平面狀	1.00
	摩擦過之平面，成平面狀	0.50
挖掘過程中，節理/裂隙張開並保持其張開程度狀態	在挖掘後，節理/裂隙呈現張開狀或呈現相當程度之有效溝槽厚度使得節理/裂隙無法閉合	1.00
	有粉粹或細微粉粹黏土	1.00

表 2-6 節理風化參數評分表(Annandale, 1995,2006)

節理面間描述	不同節理開口程度之風化數值 J_a		
	1.0(mm)	1.0~5.0(mm)	5.0(mm)
緊密接合，堅硬，無軟弱填充物可侵入填充	0.75	--	--
節理面無風化，僅表面有汗跡	1.0	--	--
節理面輕微風化，無軟弱填充物、無凝聚性岩石礦物或是破碎岩石填充	2.0	2.0	4.0
無軟弱之輕微黏土質的無凝聚性材料填充	3.0	6.0	10.0
無軟弱過壓密黏土礦物，破碎岩石可能填充其中	3.0	3.0	10.0
軟弱或低磨擦性黏土礦物附著且有少量膨脹性黏土填充	4.0	8.0	13.0
有適量之軟弱過壓密黏土礦物填充，破碎岩石可能填充其中	4.0	8.0	13.0
有粉碎或細微粉碎(膨脹性)黏土填充，破碎岩石可能填充其中	5.0	10.0	18.0

J_s =地盤構造條件(順向、逆向)、節理傾角(0~90)、節理間距比(1:1、1:2、1:4、1:8)(表 2-7)

表 2-7 地盤構造條件參數評分表(Annandale, 1995,2006)

節理之傾向(度)	節理之傾角(度)	節理間距比 r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	90	1.14	1.20	1.24	1.26
順向	89	0.78	0.71	0.61	0.61
	85	0.73	0.66	0.61	0.57
	80	0.67	0.60	0.55	0.52
	70	0.56	0.50	0.46	0.43
	60	0.50	0.46	0.42	0.40
	50	0.49	0.46	0.43	0.41
	40	0.53	0.49	0.46	0.45
	30	0.63	0.59	0.55	0.53
	20	0.84	0.77	0.71	0.67
	10	1.25	1.10	0.98	0.90
	5	1.39	1.23	1.09	1.01
	1	1.50	1.33	1.19	1.10
	0/180	0	1.14	1.09	1.05
逆向	-1	0.78	0.85	0.90	0.94
	-5	0.73	0.79	0.84	0.88
	-10	0.67	0.72	0.78	0.81
	-20	0.56	0.62	0.66	0.69
	-30	0.50	0.55	0.58	0.60
	-40	0.49	0.52	0.55	0.57
	-50	0.53	0.56	0.59	0.61
	-60	0.63	0.68	0.71	0.73
	-70	0.84	0.91	0.97	1.01
	-80	1.26	1.41	1.53	1.61
	-85	1.39	1.55	1.69	1.77
	-89	1.50	1.68	1.82	1.91
	180/0	-90	1.14	1.20	1.24

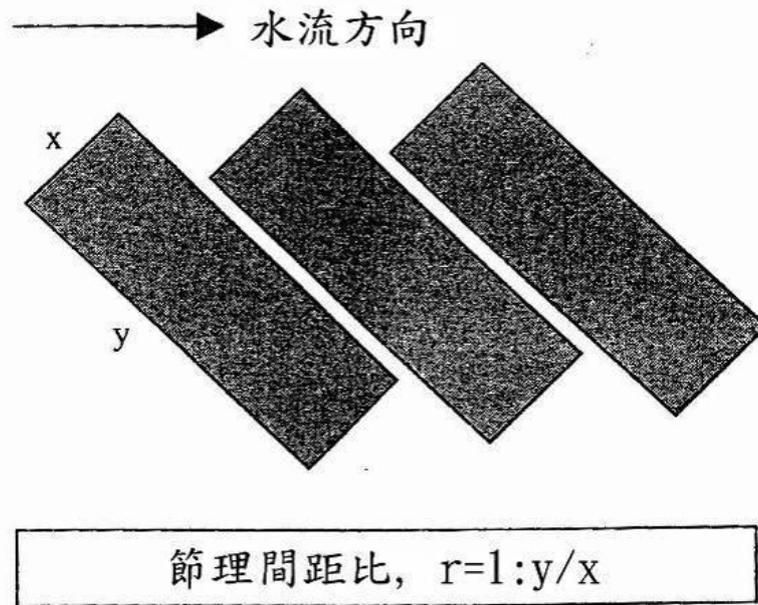


圖 2-41 岩塊長度比值 y/x 示意圖(Annandale, 1995,2006)

Annandale計算了一、兩百處不同河道之抗沖蝕指數，又依不同河道流況（如陡降、水躍、河床坡度突然改變、均勻明渠）依明渠流體力學理論計算各處河道之能量消耗，並記錄現場是否發生沖蝕，將單位面積流功與抗沖蝕能力指數繪出雙對數圖關係，如圖2-42，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：

$$P_c = 0.48K_h^{0.44} \text{ for } K_h \leq 0.1$$

$$P_c = K_h^{0.75} \text{ for } K_h > 0.1 \quad (2-42)$$

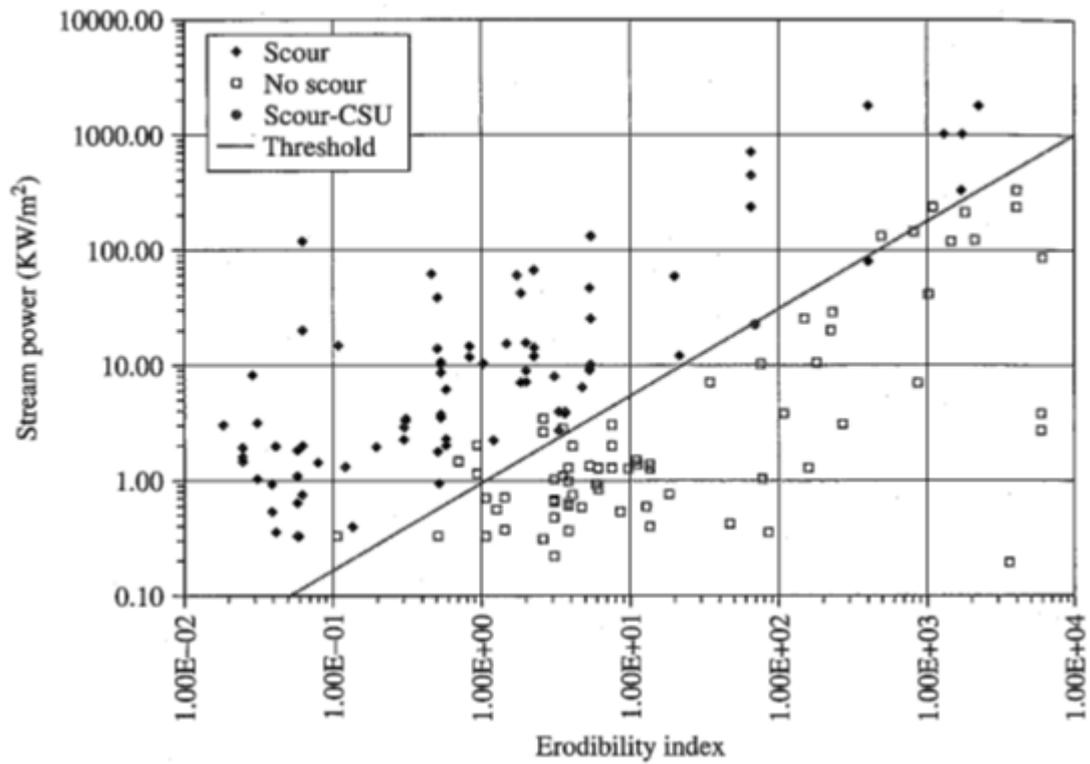


圖 2-42 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995)

2.4.3 最大剪應力

由岩體抗沖蝕指數 K_h 可計算出岩石試體的最大剪應力 $\tau_{s,c}$ ：

$$\tau_{s,c} = \left[\frac{P_{crit} \sqrt{\rho}}{7.66} \left(\frac{K_s}{R} \right)^{1/6} \right]^{2/3} \quad (2-43)$$

$\tau_{s,c}$ = 試體最大剪應力 (pa)

$P_{crit} = K_h^{0.75} * 1000 (W/m^2)$

K_s/R = 粗糙度比值

ρ = 水密度 = $1000 (kg/m^3)$

其中 $\left(\left(\frac{K_s}{R} \right)^{1/6} \right)^{2/3} = \left(\frac{K_s}{R} \right)^{1/9}$ ，由於 $\frac{K_s}{R}$ 這個比值的範圍取 1/9 次方後，變化並不

大，其值約在 0.6~0.9 之間，故計算時可同時計算兩者，使用 0.6 計算為 $\tau_{s,c}$

最小值，使用 0.9 計算為 $\tau_{s,c}$ 最大值，因此 $\tau_{s,c}$ 將是以一個範圍來表示。

三、現有設備適用性評估及儀器改良設計與建立

本章將評估原有設備的適用性，並且明定儀器的設計理念及流程，介紹改良後的試驗儀器、儀器組件的選擇及構件的設計

3.1 現有設備適用性評估

原本的 Mini Jet 用於土壤，因此其水流強度不足；另外原本的銅製底座是要將整個環的下半部打入土壤中，但是若是進行軟岩的試驗，這樣的方式並不適當，第一，並不容易將整個環的下半部打入岩石中，因此都必須以預鑽的方式將岩盤鑽出底座金屬環之環形(圖 3-1)，第二，縱使把環的下半部打入岩石中，幾乎都會造成試驗岩石的擾動(圖 3-2)。

水流強度的部分，必須提高水壓力、增大流速及流功，並且穩定水流，才能對岩盤造成足以形成沖蝕坑的剪應力。

因此現有的設備必須改變底座、動力設備(泵浦)、及出水口(噴嘴)，另外改變泵浦會使得出水孔徑也會改變，所以也必須改變管路的配置。



圖 3-1 以預鑽方式將銅製底座打入軟岩中



圖 3-2 底座打入軟岩後造成裂縫

3.2 試驗儀器改良設計

本研究儀器設備的建立，將以美國農業部(USDA)的 Mini Jet (圖 3-3、圖 3-4)為樣本、參考 Hanson 等文章及前節的評估，設計改良一初步適用於軟弱岩石現地沖蝕試驗的儀器。



圖 3-3 USDA 之 Mini Jet



圖 3-4 USDA 之 Mini Jet 金屬底座

儀器的設計上，將保留原 Mini Jet 適用於軟岩的部分，而針對不適用的部分，進行研究及分析，尋求合理並且可行的方式來改良。

3.2.1 設計理念

改變儀器原本的制式配置，提升周邊設備的靈活度及機動性，將可因應現地的不同情況選擇不同的週邊配備，此將對於現地試驗產生利多，可使所受之限制降到最低。

3.2.2 設計流程

在設計上雖然採用美國農業部 Mini Jet 之外形及相近尺寸，但是在細部設計和重點設計上有非常大之差別，本研究之 Mini Jet 軟岩沖蝕試驗儀設計步驟如下(設計步驟參考吳禹霆，2012)：

- (1) 儀器設計目的探討：確認所需的試驗項目與功能。
- (2) 儀器系統改良與建立：繪製儀器設計圖、配置管路。
- (3) 儀器裝設與測試：將完成製作之儀器進行組裝，並且對各項功能進行測試。
- (4) 室內試驗施做：使用現地取回之岩塊及鑽探之岩心進行 Mini Jet 軟岩沖蝕測試試驗。
- (5) 現地試驗施做：選擇適當之地點，進行 Mini Jet 現地河道軟岩平面及側壁沖蝕測試試驗。
- (6) 試驗結果分析與探討：對於現地試驗的結果，確認數據的合理性，且進一步探討本儀器的實用性及後續的發展方向。

3.3 改良後試驗儀器介紹

儀器上以 USDA 之 Mini Jet 系統為基礎，除了原先就具備的污物泵浦外，新增了噴嘴及不同的管路配置。

動力設備(污物泵浦)使用比原先更大馬力的泵浦；而原先的出水孔徑為 0.125 in，在此更換為孔徑 0.083 in 之噴嘴；本來管路上的氣閥予以取消，另外為配合污物泵浦的 2 in 孔徑也進行縮管，而縮管的配置目的是為了讓能量散失達到最低。表 3-1 為整組系統的儀器名稱、尺寸型號及功能目的之介紹。

表 3 - 1 改良後 Mini Jet 軟岩沖蝕試驗儀器介紹

試驗儀器名稱	儀器型號/尺寸	功能/目的
Mini Jet 本體 (圖 3-5)	Mini Jet 軟岩型	使用潛沒式垂直射流，對軟岩造成沖蝕坑，以此計算沖蝕率
噴嘴 (圖 3-6)	JAA1490 1/8 in 外牙 等效出水直徑 2.1mm	提升出水強度及水壓，穩定噴出水流
馬力 1HP 污物泵浦 (圖 3-7)	標準揚程 8m 標準出水量 200L/min 孔徑 2in	提供水壓及水流進入 Mini Jet 形成射流
水壓計 (圖 3-8)	協鋼 SKON121.21 1/8in 外牙 量測範圍 0~60psi	量測管路內水壓
2in 包砂軟管 (圖 3-9)	孔徑 2in 長度 0.7m	維持水流通路
3/8in 包砂軟管 (圖 3-9)	孔徑 3/8in 長度 2.5m	維持水流通路

插心 (圖 3-10、圖 3-11)	2in 插心 2in 外牙 3/8in 插心 3/8in 外牙*2 只	轉接軟管到金屬接頭
三通接頭 (圖 3-12)	3/8in*3/8in*3/8in 三內牙	水流進及出的管道和水壓計裝設處
彎管接頭 (圖 3-13)	3/8in*3/8in 雙內牙	設計上需要，避免管路與量尺在裝設上時衝突
各式轉接頭 (圖 3-14、圖 3-15)	1/8in*3/8in 雙外牙*2 只 1/8in*1/8in 雙內牙*2 只 3/8in*3/8in 雙內牙 3/8in*3/8in 雙外牙 3/8in*4/8in 雙外牙 4/8in*1in 內外牙 1in*2in 雙內牙	將管線各段連接，並且將泵浦出水孔的 2in 縮管到 Mini Jet 的 1/8in，且將壓力的損耗降到最低，各外牙接頭處使用止水帶防漏
管束 (圖 3-16)	直徑 3/8in*2 只 直徑 2in*2 只	將插心與水管密合
O-ring (圖 3-17)	外徑 120mm*厚度 3mm 外徑 50mm*厚度 3mm 外徑 3mm*厚度 3mm	裝置於 Mini Jet 需要止水之位置



圖 3-5 Mini Jet 軟岩型



圖 3-6 噴嘴



圖 3-7 馬力 1HP 污物泵浦



圖 3-8 水壓計



圖 3-9 2in 包砂軟管與 3/8in 包砂軟管



圖 3-10 2in 插心



圖 3-11 3/8in 插心



圖 3-12 3/8in*3/8in*3/8in 三內牙三通接頭



圖 3-13 3/8in*3/8in 雙內牙彎管接頭



圖 3-14 各式轉接頭



圖 3-15 1in*2in 雙內牙轉接頭



圖 3-16 各式管束



圖 3-17 各式 O-ring

3.4 改良儀器組件與構造

本 Mini Jet 依照 3.1 節所述之問題為核心，進行三項重點改良：噴嘴、泵浦、及底座。

噴嘴與泵浦的改良是為了增加水流強度，除此之外，原本的 Mini Jet 並沒有所謂的噴嘴，只是在底部開一個出水孔而已；其泵浦與管路也是配置好的，難以任意置換。而本研究之 Mini Jet 的改良也是要增加試驗的靈活度，因此上述的構件都可更換。

3.4.1 泵浦選擇

若以原 Mini Jet 所配置之泵浦來說，它具備 1/6HP 的馬力，其標準揚程為 2m，標準總出水量為 55L/min，其所搭配之原 Mini Jet 的單位面積流功經計算為 12.56kW/m^2 。若以軟岩 $K_h=100$ 為例來做計算，而其他幾何條件皆不變，且假設泵浦馬力正比於對岩石造成之單位面積流功 P 。

$$P=K_h^{0.75} \quad (3-1)$$

此式計算出 $K_h=100$ 時 $P=31.62\text{kW/m}^2$ ，對比原泵浦的 $P=12.56\text{kW/m}^2$ ，即須要有 2.52 倍馬力之泵浦。

但是從軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)中所做出的迴歸結果：

$$P=K_h^{0.1} \quad (3-2)$$

參照上述迴歸結果，以 $K_h=100$ 為例與 $P=K_h^{0.75}$ 做比較(表3-2)：

表 3 - 2 $K_h=100$ 時 $P=K_h^{0.1}$ 與 $P=K_h^{0.75}$ 之比較

$K_h=100$ 時	$P(\text{kW}/\text{m}^2)$	與 $P=12.56$ 之比值	HP
$P=K_h^{0.1}$	1.58	0.13	0.02HP
$P=K_h^{0.75}$	31.62	2.52	0.42HP

兩者之間有很大的差距，但是可以得知的是泵浦的馬力至少要是原先的2.52倍才夠。

另外從 K_h 值來探討，以軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)中，最大、最小及平均的 K_h 值與 $P=K_h^{0.1}$ 、 $P=K_h^{0.75}$ 進行交叉比較(表3-3、表3-4)。

表 3 - 3 $P=K_h^{0.1}$ 以大安溪軟岩為例

	K_h	$P=K_h^{0.1}(\text{kW}/\text{m}^2)$
最大	1529.44	2.08
最小	24.77	1.38
平均	319.37	1.78

表 3 - 4 $P=K_h^{0.75}$ 以大安溪軟岩為例

	K_h	$P=K_h^{0.75}$ (kW/m ²)
最大	1529.44	244.57
最小	24.77	11.10
平均	319.37	75.55

從交叉比較的結果得知，若是 $P=K_h^{0.1}$ 其 K_h 無論是最大或是最小所算出的 P 並不會有太大差別，而 $P=K_h^{0.75}$ 所得的結果需要非常大的馬力，甚至連平均之 K_h 值都需要原本的6倍馬力才足夠。

考量到現地試驗所需要的方便性，以及試驗的安全性(若使用馬力太大的泵浦，Mini Jet儀器本體未必能承受住，可能造成儀器爆裂)，選用馬力為1Hp(原泵浦的6倍)之泵浦(圖3-7)，其與原泵浦之相關性能數據比較如表3-5所示。

表 3 - 5 1/6HP 與 1HP 之泵浦比較

泵浦	標準揚程	標準總出水量	最大揚程	最大總出水量	孔徑
1HP	8m	200L/min	11.5m	300L/min	2in
1/6HP	2m	55L/min	7m	75L/min	3/8in

3.4.2 噴嘴選擇

噴嘴的用途在於提升出水強度及水壓，穩定噴出水流。噴嘴選用思沛

雅噴霧器材有限公司的產品，其在工業上的主要用途為精密機械的清洗或是化學藥液、消毒劑、潤滑液的噴灑。此類產品分類繁多，大致上可以分為三種，如圖 3-18 所示。

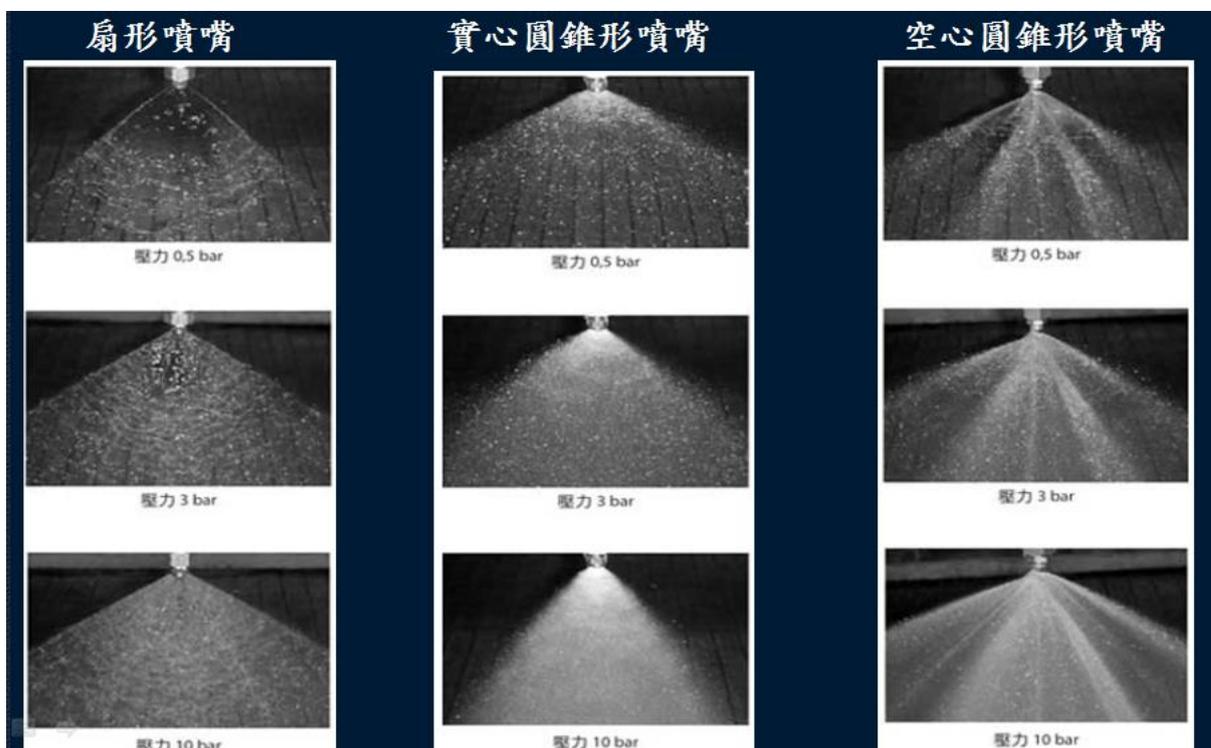


圖 3-18 噴嘴類型(思沛雅噴霧器材有限公司網站)

因為本研究需要以噴嘴的出水力量做為考量，也就是在相同孔徑下所形成之水壓越大而每單位時間的噴出水量越大，則噴水力量越強，而上圖三類最符合本研究需求的為扇形噴嘴(噴水力量：扇形噴嘴>實心圓錐形噴嘴>空心圓錐形噴嘴)。

扇形噴嘴其具有一個噴霧的角度(圖 3-19)，依照需求可以選擇不同的噴霧角度，噴霧角度越大則水流越分散，因此強度減弱，角度越小則水流越密集穩定，強度則越強。因此選擇噴霧角度最小(0 度)之噴嘴。另外，雖然

名為扇形噴嘴，是因為他本身是具有噴霧角度，而當噴霧角度為 0 度時，其即為圓形噴嘴。

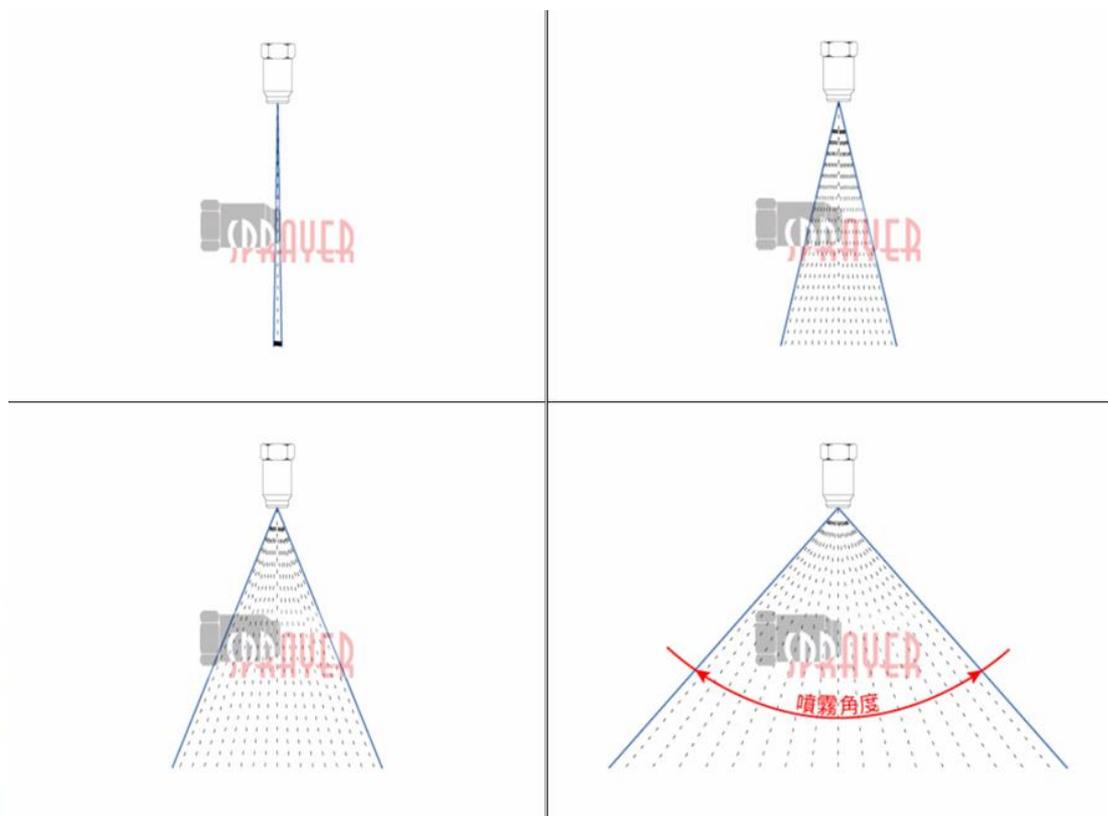


圖 3-19 噴霧角度(思沛雅噴霧器材有限公司網站)

義大利 PNR 原廠的扇形噴嘴分為幾種不同的型號，由英文字母來表示，本研究則是選用 J 系列的噴嘴，其特點在於有多樣化的噴霧角度、噴霧量、螺牙尺寸與材質可提供選擇。表 3-1 所述之 JAA1490 即為噴嘴型號，J 代表 J 系列，第一個 A 代表螺牙的尺寸為 1/8in，第二個 A 則代表噴霧角度為 0 度，後面的數字則為流量代碼，1490 則是在壓力為 12psi 時流量為 $3.846 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ 、出口流速為 11.1m/s，其等效噴口直徑為 2.1mm(0.083in)，材質則選用防鏽的白鐵。



圖 3-20 JAA1490 噴嘴

3.4.3 Mini Jet 儀器構件設計

本節為改良 Mini Jet 本體的構件設計，其以 USDA 之 Mini Jet 為參考，進行改良設計(設計圖中單位皆為 mm)，總計有 8 樣構件(表 3-6)，改良的重點在前三項底座、可轉部及固定部，而表中最後一項搭扣為現成購買，其餘皆為設計後由加工廠製作。

表 3 - 6 Mini Jet 構件

名稱	材質	承攬商
(1)底座	銅製	順群精密有限公司
(2)可轉部	銅製	順群精密有限公司
(3)固定部	銅製	順群精密有限公司
(4)弧形環片	不鏽鋼製	順群精密有限公司
(5)管線	銅製	順群精密有限公司
(6)量尺	白鐵製	順群精密有限公司
(7)壓克力盒	壓克力製	奇華事業有限公司
(8)搭扣	白鐵製	金石門有限公司

底座的作用在於固定儀器、固定尾水深、固定試驗點及保持試驗的水密性，原先設計不適用軟岩的原因在於難以將底座完全嵌入岩石中，且容易造成岩石擾動，所以在改良上將嵌入岩石中的部分變成三支長 30mm 直徑 4mm 之釘子，其水密性則是利用防水黏土在試驗時封住底座與岩石的交會處，底座上部內側的凹槽則是用於套用 O-ring，當壓克力盒裝上時，可避免縫隙漏水。其設計圖及成品如圖 3-21、圖 3-22、圖 3-23、圖 3-24 所示。

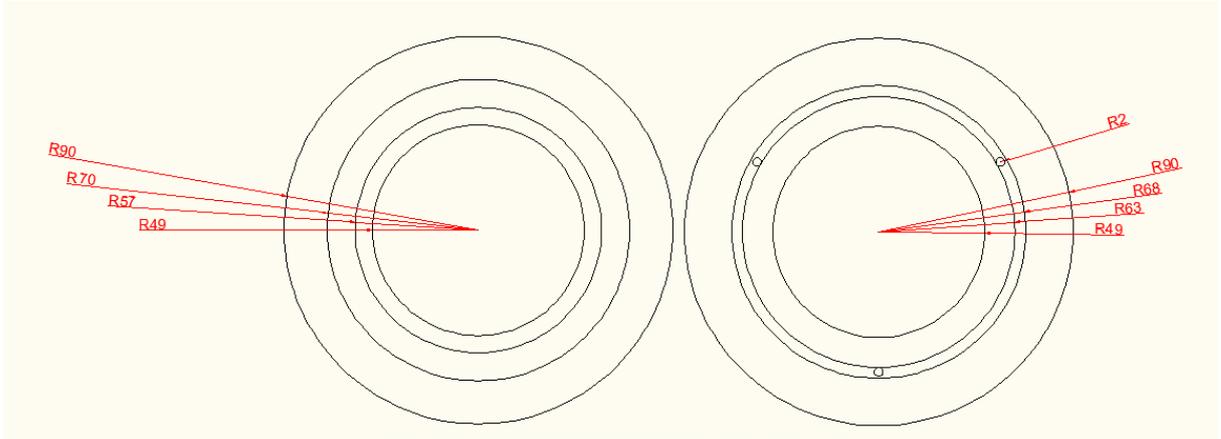


圖 3-21 (1)底座設計圖(左為上視、右為下視)

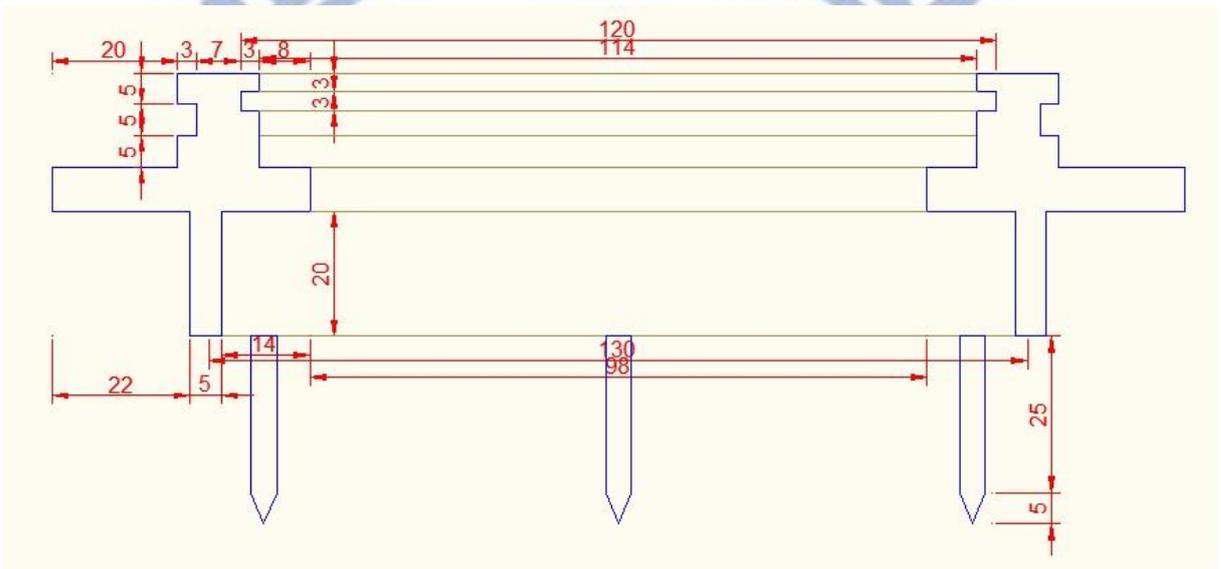


圖 3-22 (1)底座設計圖(側視)



圖 3-23 (1)底座成品(上半部)



圖 3-24 (1)底座成品(下半部)

可轉部為儀器中可旋轉 90 度之部分，也就是裝設噴嘴及量尺的地方，原本出水孔的部分，改良設計成 1/8in 的內螺牙，用來裝設噴嘴，上半部則是設置兩個 1/8in 內螺牙；其圓盤底部有個螺絲孔，用來裝設螺帽搭配固定部中的凹槽，控制旋轉 90 度；圓盤側邊則是做成壓花的形式，利於施力旋轉。其設計圖及成品如圖 3-25、圖 3-26、圖 3-27 所示。

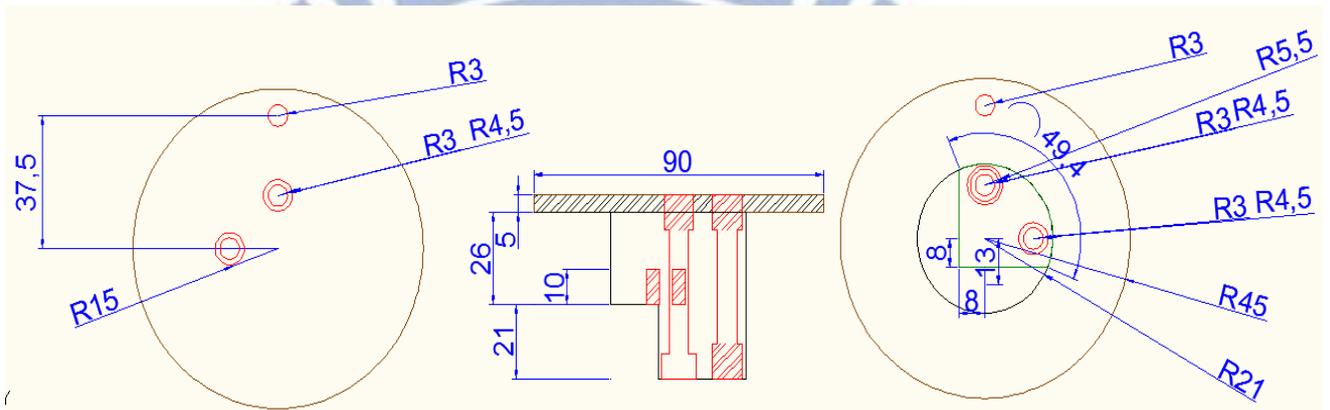


圖 3-25 (2)可轉部設計圖(左為上視、中為側視、右為下視)



圖 3-26 (2)可轉部成品(上半部)



圖 3-27 (2)可轉部成品(下半部)(圖中有裝設噴嘴)

固定部則是固定於壓克力盒上，其中間的空心就是將可轉部穿過，可令其旋轉，上半部的凹槽就是與可轉部螺帽接合處。而其下半部則是用三根細銅柱與弧形環片接合，利用弧形環片可以使轉動後噴嘴所噴出的水流被擋住，不會直接噴向試體，原本噴嘴所在的地方則被量尺的標桿所取代。固定部及弧形環片的設計圖及成品如圖 3-28、圖 3-29、圖 3-30、圖 3-31 所示；將可轉部、固定部及弧形環片的成品組合後如圖 3-32、圖 3-33 所示。

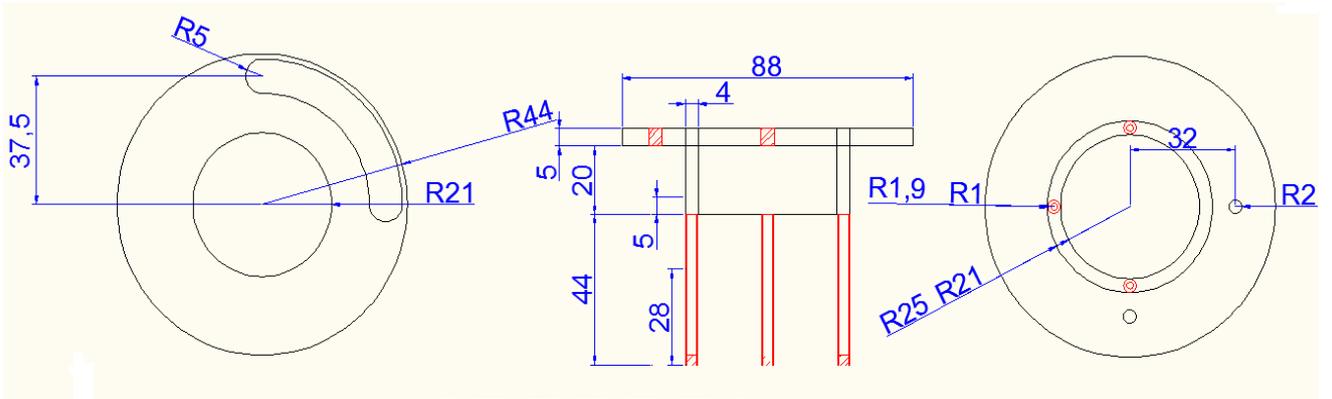


圖 3-28 (3)固定部設計圖(左為上視、中為側視、右為下視)

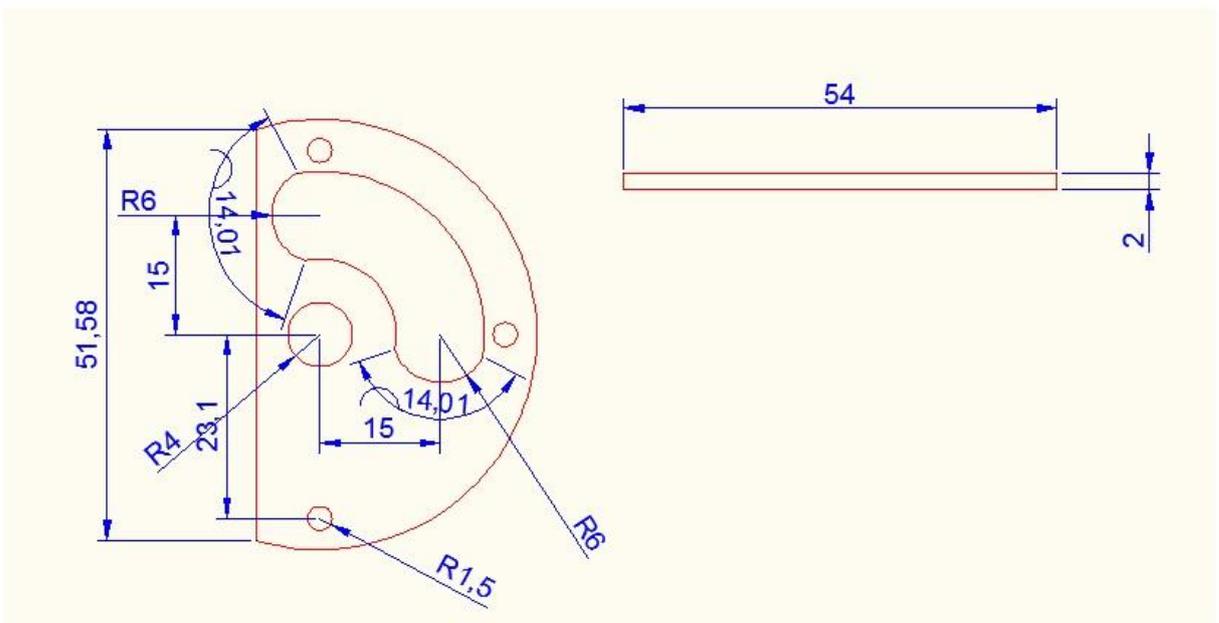


圖 3-29 (4)弧形環片設計圖

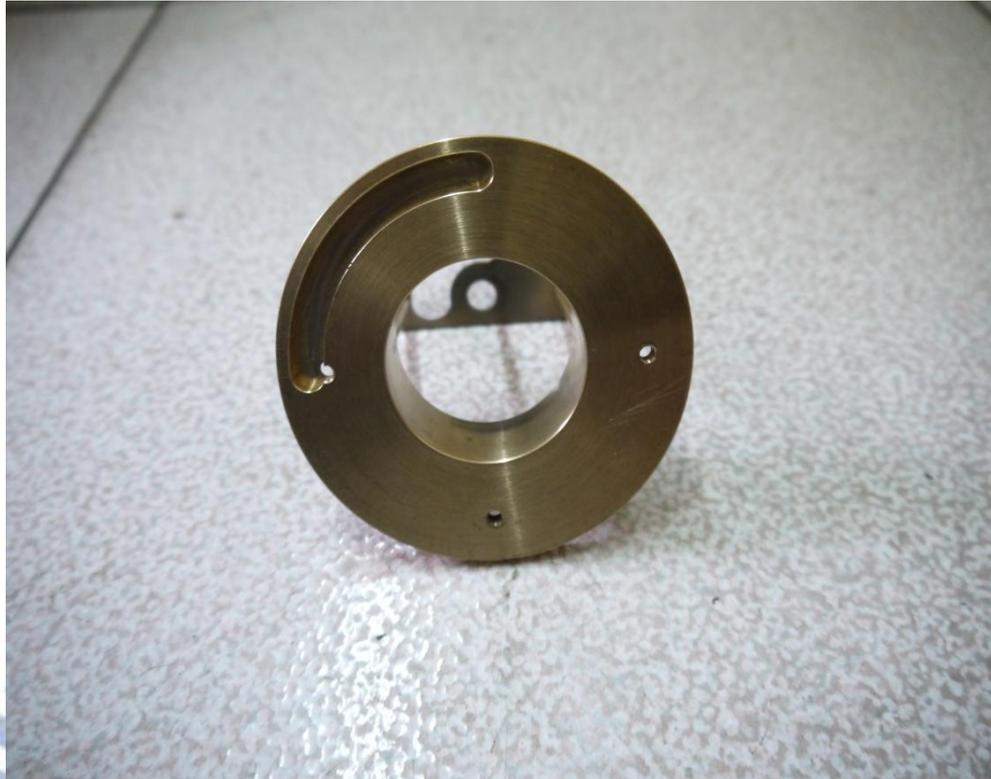


圖 3-30 (3)固定部與(4)弧形環片成品組合(上半部)



圖 3-31 (3)固定部與(4)弧形環片成品組合(下半部)



圖 3-32 (2)可轉部、(3)固定部及(4)弧形環片成品組合(側部)



圖 3-33 (2)可轉部、(3)固定部及(4)弧形環片成品組合(下半部)

管線是裝設在量尺上，增加量尺的高度，因為直接裝設量尺在可轉部上的話，會與旁邊的管線在裝設上互相衝突。量尺的設計並無做太大之改變，可以量測的範圍有 7 公分，標桿底部的量測點為一個直徑 5mm 的圓柱，此圓柱焊接在標桿上，圓柱上方套有一個 O-ring 用於止水。另外量尺上的尺則是依照設計的尺寸，將鐵尺在適當長度切斷，並且在上下方鑽設螺絲孔。量尺的兩端及管線的接合處都是設置 1/8in 的外螺牙。管線與量尺系列設計圖、成品及組裝如圖 3-34、圖 3-35、圖 3-36、圖 3-37、圖 3-38、圖 3-39 所示。

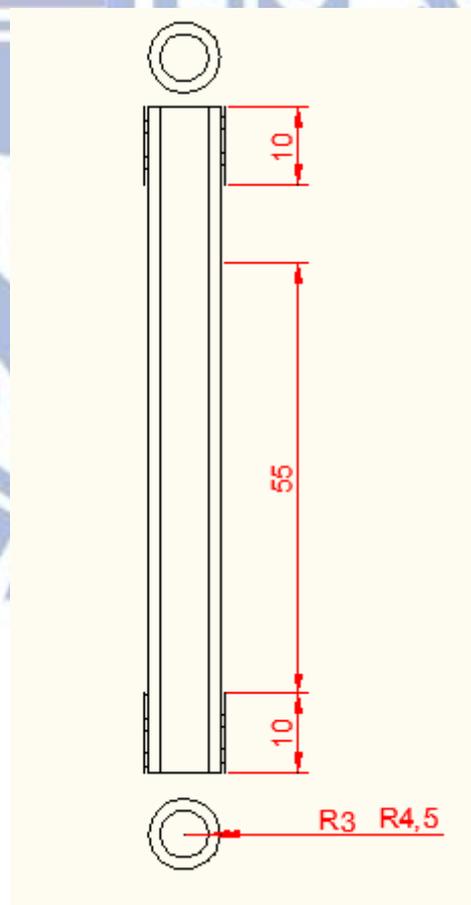


圖 3-34 (5)管線設計圖



圖 3-35 (5)管線成品

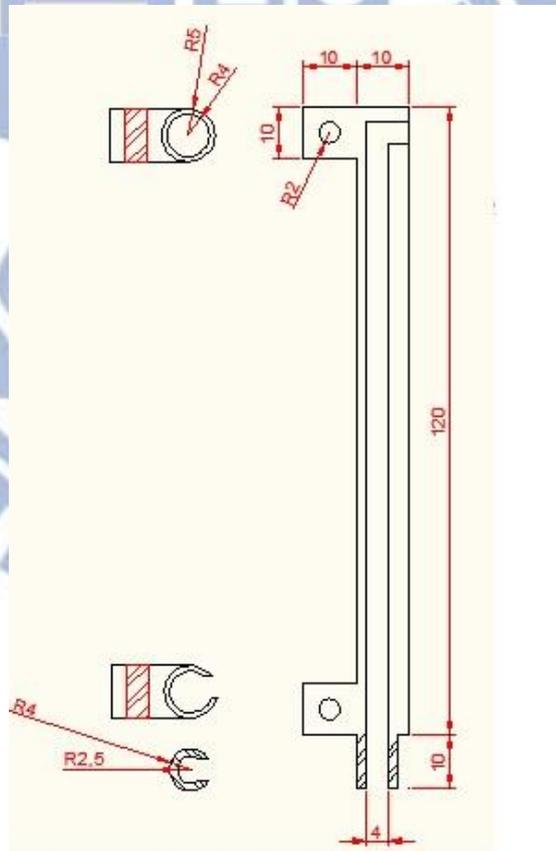


圖 3-36 (6)量尺設計圖

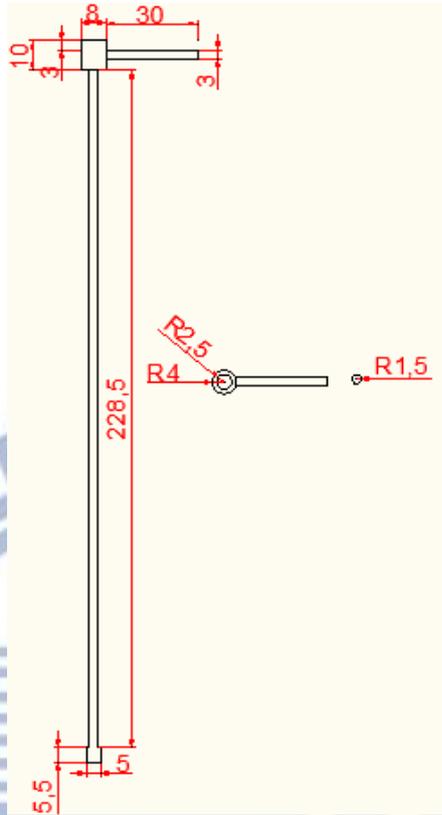


圖 3-37 (6)量尺標桿設計圖



圖 3-38 (6)量尺成品



圖 3-39 (6)量尺與(5)管線組合

壓克力盒中間的空心是一個偏心的圓，為的是要讓固定部與可動部穿過去後，可動部的噴嘴能在整個壓克力盒的中心，這個空心的邊也有設置凹槽，是裝設 O-ring 用。壓克力盒外部的兩端各有一個凸出的部分，上面則是有螺絲孔，這是裝設搭扣的地方，另外則設有一個排水孔，可以連接排水管，讓壓克力盒內的水自然溢流。壓克力盒設計圖與成品如圖 3-40、



圖 3-42 (7)壓克力盒(下半部)

搭扣(圖 3-43)裝設在壓克力盒外部的兩側，其作用是在試驗時，當壓克力盒裝置在底座上時，可以扣住底座，讓壓克力盒與底座固定住。另外搭扣是現成且規格化的構件，因此在選擇上與壓克力盒及底座的尺寸互相搭配。



圖 3-43 (8)搭扣

圖 3-44 為將 Mini Jet 的設計構件組裝完成的示意圖，本儀器試驗時噴嘴到試體的距離於設計圖上約為 36.5mm。

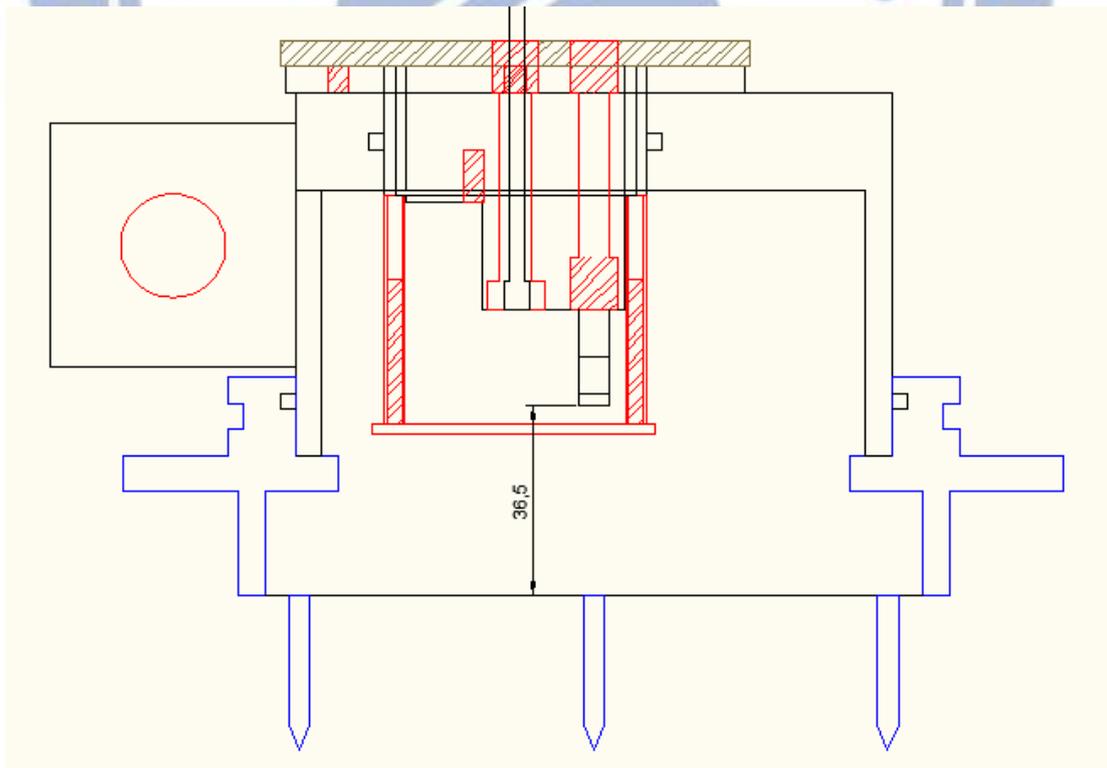


圖 3-44 構件(1)、(2)、(3)、(4)、(7)組合圖

3.4.4 管路設計

本研究與原本 Mini Jet 在管路設計上有很大的不同，主要原因在於所選泵浦的馬力較原先的泵浦大出不少，因此出水的孔徑自然就大出許多。將 2in 的出水孔徑縮管至 Mini Jet 儀器上的螺牙尺寸 1/8in 必須考慮許多因素，除了安全問題外，最重要的是如何減少在縮管時能量的散失。理論上在縮管後水流的壓力會大上許多，但是由於縮了 16 倍之多，再加上回壓影響泵浦的運作，反而會造成能量嚴重散失、壓力大幅減弱。

經過不同的測試後，得到了一個結論，若是縮管的位置越接近 Mini Jet，則越能減低能量的散失。所以最完美的方式就是從泵浦出來後就接 2in 的水管，直到要進 Mini Jet 前才從 2in 縮至 1/8in。但是這個方法在實際的運用上是有困難的，因此本研究採用漸進式的縮管。

漸進式的縮管就是分段縮管，先從 2in 縮至 3/8in，到達 Mini Jet 儀器前再從 3/8in 縮至 1/8in，以下詳細說明縮管過程(圖 3-45、圖 3-46)：

- (1) 泵浦接上孔徑同為 2in 長度為 0.7m 的包砂軟管。
- (2) 包砂軟管的另一頭接上附帶 2in 外螺牙的 2in 插心，管外則用管束封緊。
- (3) 2in 的外螺牙接上 2in 轉 1in 的雙內螺牙轉接頭，再接上 1in 轉 4/8in 的外內螺牙轉接頭，再接上 4/8in 轉 3/8in 雙外螺牙轉接頭與雙 3/8in 內螺牙轉接頭。

(4)接上 3/8in 的插心，然後接上孔徑為 3/8in 長度為 2.5m 的包砂軟管，管外同樣用管束封緊。

到以上步驟為止是外部管路的部份，接下來的部份是內部管路，也就是裝設在 Mini Jet 上的部份。



圖 3-45 2in 縮至 3/8in 轉接過程(外部管路)

(5)在 Mini Jet 儀器上的 1/8in 內螺牙接上 1/8in 轉 3/8in 的雙外螺牙轉接頭，然後再接上雙側 3/8in 內螺牙的彎管。

(6)將雙側 3/8in 外螺牙轉接頭接在彎管上，另一頭則接上 3/8in 內螺牙的三通接頭。

(7)在三通接頭垂直向的部分接上 3/8in 轉 1/8in 的雙外螺牙轉接頭，再接上雙 1/8in 內螺牙轉接頭，最後接上水壓計。

(8)三通接頭的另一側則是接上附帶 3/8in 外螺牙的 3/8in 插心。

試驗時就是將外部管路接到內部管路上，也就是將第(4)步中的包砂軟管接到第(8)步的插心中，並且鎖上管束。



圖 3-46 3/8in 縮至 1/8in 轉接過程(內部管路)

四、改良 Mini Jet 軟岩沖蝕試驗方法與流程

本章將介紹本改良之 Mini Jet 作用於試體的流功 SP 及最大剪應力計算方式、現地試驗流程規劃、現地試驗儀器準備、試驗方法及步驟、現地試驗地點選擇。

計算流功及最大剪應力的目的皆是為了評估沖蝕的可行性，評估的方式有兩種：(1)將 Mini Jet 之流功與 $K_h^{0.75}$ 做比較，若流功較大，則沖蝕可行。(2)將 K_h 所計算出之岩盤最大剪應力與式(2-10)計算結果做比較，若式(2-10)計算結果較大，則沖蝕可行。

4.1 改良 Mini Jet 之流功 SP 及最大剪應力計算方式

(1)流功 SP 計算

本研究之尾水深依照設計圖(圖 3-44)為 36.5mm，但是在實際試驗時由於底座與岩盤間有防水黏土存在，再加上現地高度不一，所以試驗中的尾水深經量測大約都在 42mm 上下，由於尾水深的些微差距對流功的估算並無太大影響，故本研究在流功的計算上統一用 42mm(0.042m)。

射流流功的計算方法利用式(2-31)，而單位面積的流功則是再除以面積(式 2-32)。另外當射流在水面下流動時，流功會隨著尾水的深度衰減，因此必須導入平均動態壓力係數 C_p 及波動動態壓力係數 C_p' 如式(4-1)：

$$P_{jet} = (C_p + C_p') \frac{\gamma_w Q H}{A} \quad (4-1)$$

其中水單位重 γ_w 的單位必須為 kN/m^3 ，這樣算出來的數值其單位才會是功(單位時間的能量 $\text{J/s}=\text{W}=\text{N}\cdot\text{m/s}$)； H 為跌水高，這裡利用 $V^2/2g$ 來求得。

在導入 C_p 及 C_p' 時有幾個參數必須先進行計算：福祿數 F_r (式 2-35)、破裂長度 L_b (式 2-33)、水面上射流軌跡長度 L 、射流水柱擴散厚 D_j (式 2-34)，其示意圖如圖 2-38 所示，由於本研究屬於潛沒式射流，因此並沒有圖中射流軌跡長度 L 這一段，所以 $L=0$ ，而 $D_j=D_i$ (噴嘴直徑)。

平均動態壓力係數，利用圖 2-39 中 No Aerated Circular Jet 求得，當中的 $h/D_j=20$ ，其所對應之 C_p 值約為 0.10。

波動動態壓力係數，利用表 2-2 中 $h/D_j>14$ 且 $H/L_b>2$ 的部分，得出 $a=1.50$ 、 $b=-1.50$ ，帶入式(2-38)求得 C_p' 為 0.017，與圖 2-40 中的 circular submerge jet 曲線外插相比，也印證這個結果。

因此計算結果為：

$$P_{\text{jet}} = \frac{9.81 \cdot 3.803 \cdot 10^{-5} \cdot 6.14}{3.4636 \cdot 10^{-6}} = 662.44 \text{ kW/m}^2 \quad (4-2)$$

式(4-2)的結果為水流射出噴嘴時的流功，而實際作用於岩盤的流功為：

$$P_{\text{jet}} = 662.44 \cdot (0.10 + 0.017) = 77.5 \text{ kW/m}^2 \quad (4-3)$$

從計算結果得知，岩盤在本試驗中要產生沖蝕，其 $K_h^{0.75}$ 必須小於 77.5，換算成 K_h 則為 330.42，因此若是現地的岩盤條件其 K_h 大於 330.42，則無法在本試驗中形成沖蝕。相關參數計算結果如表 4-1 所示。

表 4-1 流功 SP 計算

流速 $V(\text{m/s})$	10.98
流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	3.5088×10^{-5}
水單位重 $\gamma_w(\text{kN}/\text{m}^3)$	9.81
跌水高 $H(\text{m})$	6.14
尾水高 $h(\text{m})$	0.042
射流原始水柱厚 $D_i(\text{m})$	0.0021
出水面積 $A(\text{m}^2)$	3.4636×10^{-6}
福祿數 F_r	76.499
破裂長度 $L_b(\text{m})$	0.075
水面上射流軌跡長度 $L(\text{m})$	0
射流水柱擴散厚 $D_j(\text{m})$	0.0021
L/L_b	0
H/L_b	81.87
h/D_j	20
原始流功 $P_{\text{jet}}(\text{kW}/\text{m}^2)$	662.44
平均動態壓力係數 C_p	0.10
波動動態壓力係數 C_p'	0.017
實際作用流功 $P_{\text{jet}}(\text{kW}/\text{m}^2)$	77.5

(2)最大剪應力計算

最大剪應力由式(2-10)沖擊點在大於 potential core 長度時的計算方法：

$$\tau = C_f \rho (C_d U_o \frac{d_o}{H})^2 \quad (4-5)$$

其中 C_f 為摩擦係數，本研究之值利用 Moody Diagram(圖 4-1)來決定。

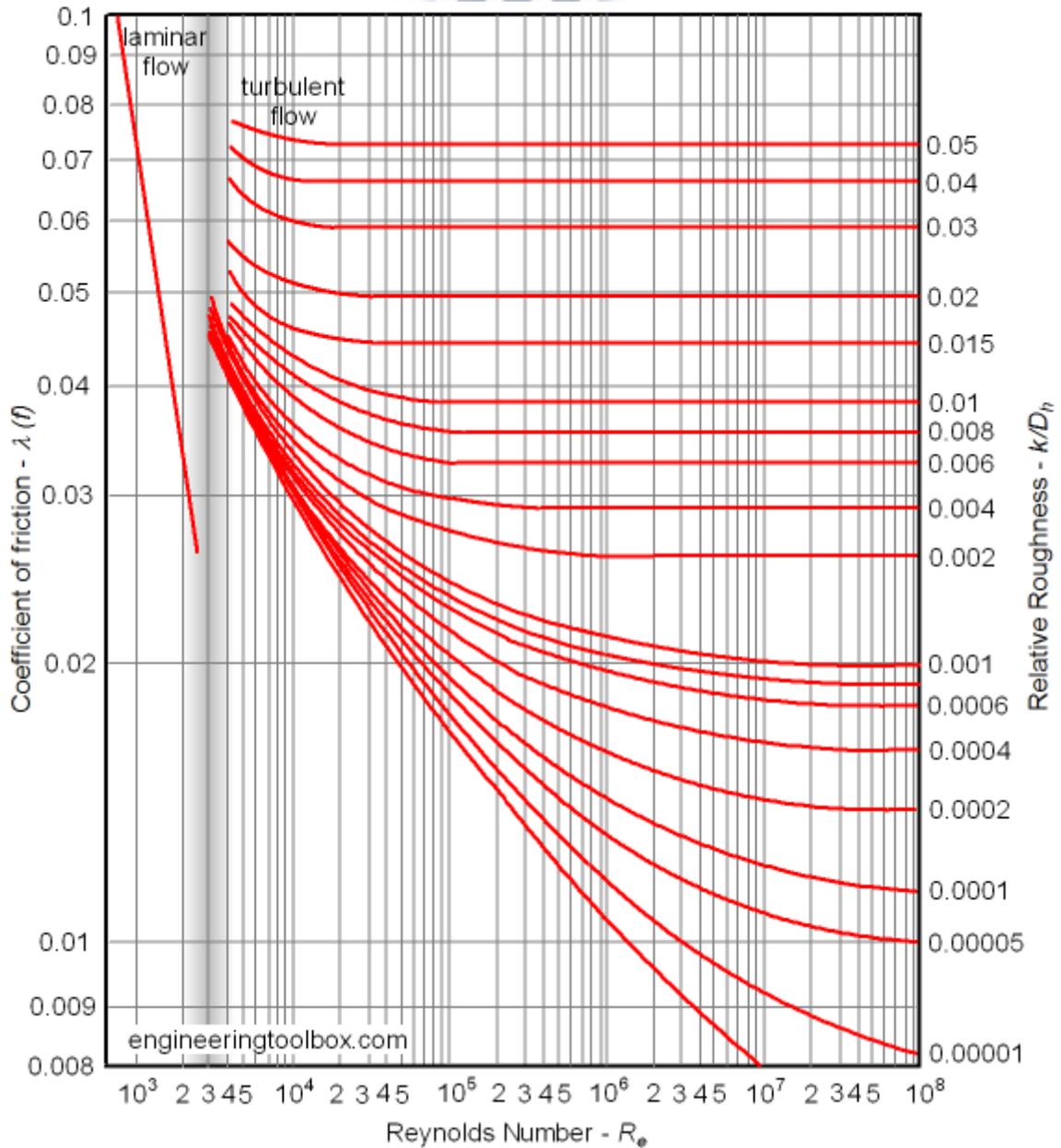


圖 4-1 Moody Diagram(R_e vs C_f)(The Engineering ToolBox)

本研究所計算出之雷諾數為：

$$R_e = \frac{10.98 * 0.0021}{10^{-6}} = 23058 \quad (4-6)$$

圖中 K 為噴口材料粗糙度參數，本研究為 0.046， D_h 為噴口直徑，因此 $K/D_h=0.022$ 。可由圖中查表得出 C_f 約為 0.05。

本儀器在試驗中所產生之最大剪應力為式(4-7)之計算結果(其中之尾水深亦統一使用 0.042m)：

$$\tau = 0.05 * 1000 * (6.2 * 10.98 * 0.0021 / 0.042)^2 = 579.29 \text{ Pa} \quad (4-7)$$

因此若岩體由 K_h 所算得之最大剪應力小於本儀器所產生之最大剪應力 579.29Pa，則通過試體阻抗條件，沖蝕預估將產生。

值得一提的問題在於做現地評估與此比較時，依 Ananndale(2006)的建議是 $K_h^{0.75}$ 與流功比較，而最大剪應力(式 2-43)中的參數 P_{crit} 亦是使用 $K_h^{0.75} * 1000$ ，然而依軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)中所做出的迴歸結果，是以 $K_h^{0.1}$ 來進行計算，故本論文在進行現地評估時皆同時以兩者分別計算，也以此來做比較(詳見附錄)。

4.2 現地試驗規劃流程

(1)選定欲進行試驗區域，例如河川流域、水庫、集水區、或邊坡等。

(2)利用航照圖或 google earth 等類似軟體尋找適合施做試驗的位置(需要有

水源及岩盤裸露，並且是可到達之處)。

(3)於現地進行試驗可行性評估，估算岩盤之抗沖蝕指數 K_h 及最大剪應力，並且與本試驗儀器的流功及式(4-7)計算結果做比較，若是 $K_h^{0.75}$ 小於流功、最大剪應力小於式(4-7)計算結果，則代表該岩盤可在本試驗中造成沖蝕。

(4)依照 4.4 節試驗方法及步驟進行現地試驗。

(5)對現地試驗的數據做計算並討論。

4.3 現地試驗儀器準備

依照改良後之 Mini Jet 於現地施作試驗時所需搭配的儀器，由表 4-2 列出。

其中包括提供現地電力來源的小型發電機(使用 92 無鉛汽油)、增加便利性及機動性的延長線、將底座敲入岩盤的鐵鎚與枕木，若岩盤較為堅硬，則利用鑽機預先鑽孔，以及將底座與岩盤縫隙填滿之紙黏土、陶土、及速利康，另外為增加供水處之水頭差，使用大型橘色水桶蓄水。

其餘視情況所需的用品例如螺絲起子、八角起子、扳手、排水管、工作手套、凡士林……等，皆不再做特別介紹。

表 4-2 現地試驗儀器

名稱	功能/目的
現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 系統(圖 4-2)	進行現地沖蝕試驗儀器與週邊設備
枕木(圖 4-3)	墊於底座之上，鐵槌敲擊處
鐵鎚(圖 4-3)	敲擊墊有枕木之底座，使底座嵌入岩盤中
大型橘色水桶(圖 4-4)	蓄水後，提供試驗用水
鑽機(圖 4-5)	在敲擊底座前，進行孔洞的預鑽
小型發電機(圖 4-6)	提供鑽機、泵浦的電力來源
延長線	接於發電機上，使發電機不必長途移動
紙黏土或陶土或速利康	將底座與岩盤縫隙密合



圖 4-2 現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 系統



圖 4-3 枕木與鐵槌



圖 4-4 大型橘色水桶



圖 4-5 鑽機



圖 4-6 小型發電機

4.4 試驗方法及步驟

因為儀器進行改良後與原本有些不同，因此在試驗的步驟上也會有些許不同，以下為 Mini Jet 於軟岩沖蝕現地試驗的建議步驟：

- (1)選定試驗地點，進行整地，將欲試驗區的岩石表面盡量整平。
- (2)將底座的底部黏上防水黏土，並且將底座敲入岩盤中(如現地岩盤較為堅硬，則會先使用鑽機進行三個釘子點位的預鑽)，直到釘子完全沒入岩盤中，在底座的內外側與岩盤交會處再用防水黏土補強縫隙。
- (3)泵浦接上管路再接上 Mini Jet(如前述外部管路接上內部管路)後，將 Mini

Jet 裝置在底座上(可塗抹些凡士林增加潤滑度)。

(4)裝置準備就緒，確定是在噴嘴關閉的情況下就可將泵浦開啟，並且等待壓克力盒內蓄滿水，此時的時間記錄為 0，然後紀錄水壓，並且用量尺的標桿伸至底部輕觸試體，讀取此時的讀數並記錄。

(5)將可轉部轉 90 度形成噴嘴打開，此時便開始沖刷，同時需計時並記錄水壓，達到欲沖刷的時間時，再將可轉部轉回 90 度，形成噴嘴關閉，量測深度並記錄。

(6)重複步驟(5)進行不同的沖刷時間，本研究現地試驗沖刷的時間是 0min、0.25min、0.25min、0.5min、1min、3min、5min、10min、15min、20min、30min，總計 85 分鐘共 11 組數據。

(7)將數據輸入至 Excel 中利用巨集功能計算出極限沖刷深度(H_c)、有效剪應力(τ_c)、臨界剪應力(τ_c)、沖蝕系數(k_d)、沖蝕率(ϵ)。

圖 4-7 為裝置準備就緒，於現地試驗過程中所拍攝之示意圖，小型發電機考量搬運因素，因此置於延長線可達之處即可。由於現地水源處與試驗點位相較大多位於低處，因此會有水頭差的產生，影響試驗的水壓強度，因此本研究都會將水先抽至大型橘色水桶內，試驗中則是將泵浦置入大型橘色水桶中，使用桶內的水做為水源進行試驗。



圖 4-7 現地試驗示意圖

Excel 試驗數據分析程序步驟(Cook,1998)如表 4-3 所示，其中 n 表示第 n 次量測，m 表示量測的次數， $C_f=0.05$ ， $C_d=6.2$ 。

表 4-3 Excel 試驗數據分析程序步驟

參數	引用公式	Excel 運算式
τ_o	式(2-10) $H \leq H_p$	$=IF(t_1 < "", \$C_f * 1000 * (AVERAGE(U_1:U_m))^2, 0)$
τ_e	式(2-10) $H > H_p$	$=IF(t_1 < "", \$C_f * 1000 * (AVERAGE(((d_o/H_1) * C_d * U_1) : ((d_o/H_m) * C_d * U_m)))^2, 0)$
以上計算出 potential core 內剪應力及作用於試體之有效剪應力		

Z_n		$=IF((H-H_i)*0.00328) < > "" , (1-H_i*0.00328) - (H-H_i)*0.00328 , "")$
x_n	式(2-15)	$=IF(Z_n < > "" , LOG(U_n*t_n / \$d_o \$) , "")$
y_n	式(2-14)	$=IF(x_n < > "" , LOG(H_n / \$d_o \$) - x_n , "")$
$x_n \text{ pre}$	式(2-18)	$=IF(x_n < > "" , ((x_n - \$y_o \$)^2 - \$A \$^2)^{(0.5)} , "")$
ΣE_{rr}^2		$=\Sigma_{n=1}^m (IF(x_n < > "" , (x_n - x_{n \text{ pre}})^2 , ""))$
Asymp		$=-0.00 + \$y_o \$ \text{ 、 } -0.01 + \$y_o \$ \text{ 、 } -0.02 + \$y_o \$ \text{ 、 } -0.03 + \$y_o \$ \text{ 、 } \dots = -8.00 + \$y_o \$$
f fun	式(2-17)	$= -((\$A \$^2 + 0.00^2)^{0.5}) + \$y_o \$ \text{ 、 } = -((\$A \$^2 + 0.01^2)^{0.5}) + \$y_o \$ \text{ 、 } \\ = -((\$A \$^2 + 0.02^2)^{0.5}) + \$y_o \$ \text{ 、 } = -((\$A \$^2 + 0.03^2)^{0.5}) + \$y_o \$ \dots \text{ 、 } \\ = -((\$A \$^2 + 8.00^2)^{0.5}) + \$y_o \$$
以上可繪出試驗之雙曲線圖，並且算得 A、 y_o		
H_e	式(2-19)	$=d_o * 10^{\$y_o \$}$
τ_c	式(2-12)	$=IF(H_e < > 0 , \tau_o * (C_d * d_o / H_e)^{2.0})$
以上計算出極限沖刷深度及臨界剪應力		
T_r	式(2-30)	$=IF(t_1 < > "" , H_e / (k_d * \tau_c) , "")$
$T_{m_n \text{ pre}}$	式(2-29)	$=IF(t_n < > "" , \$T_r \$ * (0.5 \ln((1 + H_n / H_e) / (1 - H_n / H_e)) - (H_n / H_e) - \\ 0.5 \ln((1 + H_i / H_e) / (1 - H_i / H_e)) + (H_i / H_e))$
$E_{rr \ n}^2$		$=IF(t_n < > "" , (t_n - T_{m_n \text{ pre}})^2 , "")$
ΣE_{rr}^2		$= (\Sigma_{n=1}^m (E_{rr \ n}^2)) / 1000000$
以上計算出沖蝕係數		
ϵ	式(2-6)	$= k_d * (\tau_e - \tau_c)$
以上計算出沖蝕率		

本研究分析方式利用 2.3.3 Mini Jet 基礎理論及 Cook(1998)所寫之 Excel 做為計算方式。此試驗最終目的為計算出岩盤之沖蝕率。其中試驗射流強度的改變(改變馬力或噴嘴孔徑)也就是改變流速，對於試驗結果的影響如果單從流速的觀點來看，並不會影響沖蝕率，由式(2-6)可以清楚的說明這點， τ_e 及 τ_c 兩參數內都含有 V^2 這項因子(式 2-10、2-12)，而 K_d 則含有 $1/V^2$ 這項因子(式 2-30)。但是流速的增加會使試驗的沖蝕深度增加，因此雙曲線法估算出來的極限沖刷深度 H_e 亦會增加， H_e 增加則 τ_c 會折減掉更多(式 2-12)也就是變小，而 K_d 會因此增加許多(式 2-30)，所以由式(2-6)所計算出的沖蝕率也會因此大幅增加。由上述可以得知改變試驗的流速(改變馬力或噴嘴孔徑)亦會造成不同的沖蝕率，流速越大沖蝕率越大，流速越小則沖蝕率越小，而本研究所進行之儀器的測試試驗皆是採用流速約在 10.98m/s 時所形成的岩盤沖蝕率。

4.5 室內測試及現地測試規劃

依據國際岩石力學協會(ISRM)將完整岩石的單軸抗壓強度以大地材料加以分類，單壓強度界於 0.5MPa~25MPa 之間的大地材料可歸類於軟岩。ISRM 定義之軟岩單壓強度範圍涵蓋了堅硬黏土(hard clay)、極軟弱岩石(extremely weak rock)、非常軟弱岩石(very weak rock)及軟弱岩石(weak rock)等部分。因此現地試驗將選擇台灣西部麓山帶之河川岸壁符合此標準的岩

石進行現地試驗。

本研究規劃於室內進行若干次不同種類試體之測試及大甲溪流域石岡壩下游右岸、頭前溪流域竹中大橋下游右岸的現地測試試驗(表 4-4)。

表 4-4 測試試驗規劃

室內/現地	流域	地點	組數	岩性
室內	大甲溪流域	石岡壩下游	一組	卓蘭層極厚層砂岩
室內	中坑溪流域	湖山水庫	一組	頭崙山層砂岩
現地	大甲溪流域	石岡壩下游	兩組	卓蘭層極厚層砂岩
現地	頭前溪流域	竹中大橋下游	兩組	卓蘭層泥質砂岩

五、實驗室及現地測試試驗結果與討論

本研究是先利用岩心及岩塊進行實驗室室內的測試試驗，測試完成後再進行現地測試試驗。

於室內的測試中，所使用之水源皆為清水，而實際上 Mini Jet 所模擬的沖蝕機制為磨蝕作用，此作用中泥沙扮演非常重要的角色，因此在現地試驗中是直接取用河道的濁水做為水源，一方面是清水與濁水對於沖蝕作用本來就有很大的差異，另一方面也是利用現地真實的條件來進行模擬(未量測濁度)。

5.1 實驗室室內測試試驗

在進行現地試驗前，為了測試儀器的相關性能及可用度，所以事先在實驗室內進行了兩組測試，一方面也是將可能在現地會遇到的問題先解決。

5.1.1 石岡壩岩心測試試驗

第一次的測試利用石岡壩的砂岩岩心，深度為 5m~6m，試驗時間共 17 分鐘 6 組數據(表 5-1)，此次試驗是利用封蠟的方式，將底座與岩心封在一起(圖 5-1)，計算結果如表 5-2 所示。



圖 5-1 第一次室內測試試驗前



圖 5-2 第一次室內測試試驗後

表 5-1 第一次室內測試數據

累積時間(min)	變化時間(min)	水頭(psi)	間距讀數(mm)
0	0	11	40
0.25	0.25	11	41
0.5	0.25	11	41
1	0.5	11	41
2	1	11	41
7	5	11	42
17	10	11	47.5

表 5-2 第一次室內測試成果

流速(V)	10.52m/s
噴嘴到試體的初始距離(H_i)	40mm
極限沖刷深度(H_e)	60mm
Potential core 內剪應力(τ_o)	5534.160Pa
有效剪應力(τ_e)	1227.421Pa
臨界剪應力(τ_c)	599.787Pa
沖蝕系數(k_d)	$1.42 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$
沖蝕率(ϵ)	0.00891mm/s
試驗前照片	圖 5-1
試驗後照片	圖 5-2

本次測試的目的只是為了測試儀器是否能對岩石產生沖蝕，故只進行了六組(因為已有明顯沖蝕產生)，在最後一組長達十分鐘的沖蝕過後，可能

遭遇到岩體中的弱面，故有大量碎屑被沖出，因此產生極大的沖蝕量，最終計算的沖蝕率為 32.08mm/hr，而極限沖刷深度為 60mm，此皆為極大的數值，但由於試驗僅經過 17 分鐘，產生這樣的結果還算合理，倘若本次試驗繼續進行下去，而沖蝕深度假設沒有再明顯變化，則沖蝕率將會降低許多，這也意味著試驗時間的長短將影響計算出的沖蝕率，如果試驗的總時間越短、量測組數越少，則算出的沖蝕率誤差越大。

5.1.2 湖山水庫岩塊測試試驗

第二次的室內測試是利用湖山水庫所挖取之深度約為 2m 之砂岩岩塊，進行仿照現地試驗的測試。此岩塊先利用手持式砂輪機裁切成大致 20*20*15 的長方體，裁切過程使用排風機集塵，裁切完後用軟毛刷將岩塊上碎屑清除，再使用大型研磨機將試體表面磨去 1cm 使其平坦，並且同樣也是利用封蠟固定試體，但是並沒有將底座封在一起，而是仿照現地的試驗情形，將底座敲進岩塊中(圖 5-4)，使用防水黏土止水(圖 5-3)。本次測試總共進行 74.75 分鐘 9 組數據(表 5-3)，計算結果如表 5-4 所示。



圖 5-3 使用防水黏土止水



圖 5-4 將底座敲進岩塊中



圖 5-5 第二次室內測試試驗前

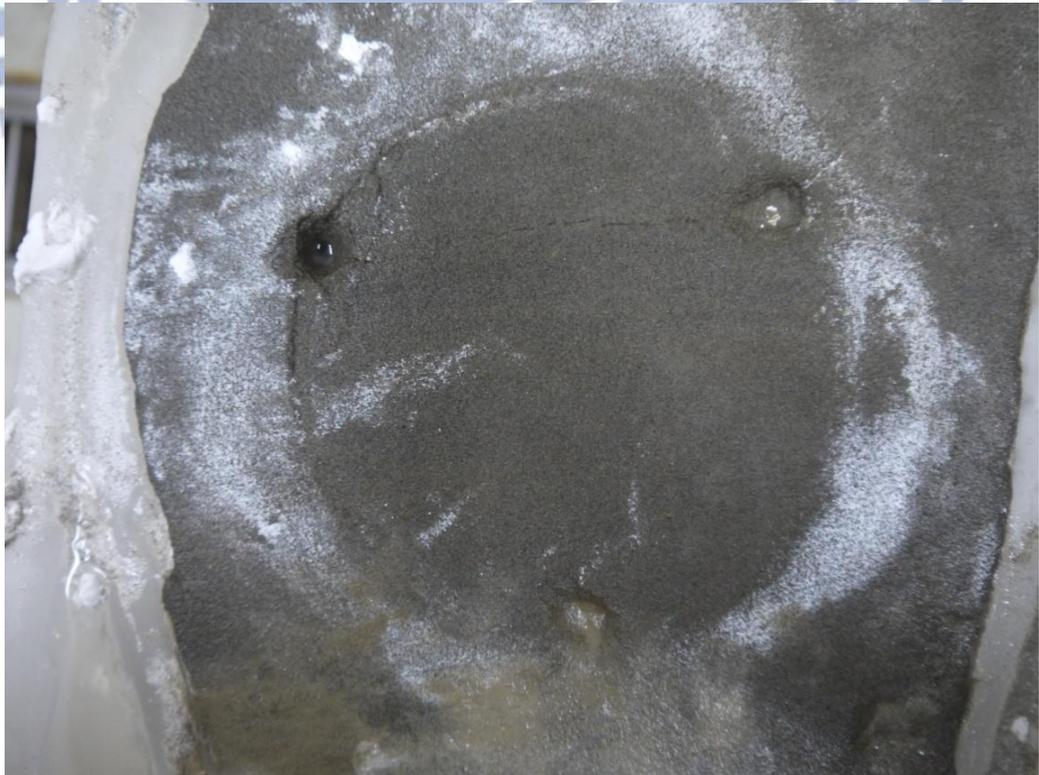


圖 5-6 第二次室內測試試驗後

表 5-3 第二次室內測試數據

累積時間(min)	變化時間(min)	水頭(psi)	間距讀數(mm)
0	0	12	40.5
0.25	0.25	12	41
0.75	0.5	12	41
1.75	1	12	41
4.75	3	12	41.3
9.75	5	12	41.7
19.75	10	12	42
34.75	15	12	42
54.75	20	12	42
74.75	20	12	42

表 5-4 第二次室內測試成果

流速(V)	10.98m/s
噴嘴到試體的初始距離(H _i)	40.5mm
極限沖刷深度(H _e)	45mm
Potential core 內剪應力(τ _o)	6026.627Pa
有效剪應力(τ _e)	591.751Pa
臨界剪應力(τ _c)	512.191Pa
沖蝕系數(k _d)	0.75*10 ⁻⁸ m ³ /N-s
沖蝕率(ε)	0.00059mm/s
試驗前照片	圖 5-5
試驗後照片	圖 5-6

本次測試一共進行九組時間，由於試驗前沒有將紙黏土封牢，最後紙黏土被沖開，使壓克力盒內無法再維持滿水位，故試驗終止。此次試驗僅有 1.5mm 的沖蝕深度，極限沖刷深度為 45mm，沖蝕率則是 2.14mm/hr。而沖蝕量在後 55 分鐘已經不再有變化，故此沖蝕率為合理結果，倘若試驗繼續做下去(沖蝕時間為 20 分鐘以上)但是沖蝕量不再有明顯增加(2mm 以下)，則計算出之沖蝕率也不會有太大變化。

5.1.3 實驗室室內測試試驗小結

此兩次的實驗室室內測試的觀察重點在於儀器是否能正常運作，包括對於軟岩能否形成 Mini Jet 的標準沖刷坑，以及整個系統的水密性。從試驗過程來看，水密性是良好的，並沒有會影響試驗結果的情形出現，而沖刷坑也都有形成，初步評估此儀器可以運用在特定剪力阻抗以下之軟弱岩石上，進行沖蝕係數、臨界剪應力、極限沖刷深度、及沖蝕率的估算。

5.2 大甲溪現地測試試驗

本次試驗地點選定為大甲河流域，石岡壩下游至埤豐橋間右岸處，利用 google earth(圖 5-7)選定試驗地點，為圖中紅圈處，地質為卓蘭層，岩性屬極厚層砂岩，岩體完整、節理發展還算普通，試驗選擇在該處有個水坑的附近進行。

至於點位的選擇，由於該處仍有些許節理，故試驗處盡量避開節理通過處，且選擇較為平坦光滑之處。本次試驗一共選擇兩個點位，進行兩組的試驗。



圖 5-7 石岡壩下游試驗地點

5.2.1 石岡壩試驗可行性評估

方法一：

本次試驗前進行的可行性評估如表 5-5，這個地方的極厚層砂岩其 K_h 約在 385~400 之間，且無圍壓縮强度高，本儀器並不容易達到其沖蝕門檻，

此數據是利用 GIS 資料庫系統查詢試驗的點位所得，其資料庫的數據是依照 Annandale(1995,2006)之方法評估而得(式 2-39)。本儀器所能造成的底床流功從 4.1 節計算所得為 77.5kW/m^2 ，並未達到可沖蝕的門檻值，故可得知此次試驗可行性不佳；但若以 $K_h^{0.1}$ 計算(表 5-6)則是小於流功非常多。

表 5-5 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法一)

組別	岩性	UCS(MPa)	K_h	$K_h^{0.75}(\text{kW/m}^2)$	流功(kW/m^2)
第一組	極厚層砂岩	13	385	86.915	77.5
第二組	極厚層砂岩	13	400	89.443	77.5

表 5-6 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法一)

組別	岩性	UCS(MPa)	K_h	$K_h^{0.1}(\text{kW/m}^2)$	流功(kW/m^2)
第一組	極厚層砂岩	13	385	1.81	77.5
第二組	極厚層砂岩	13	400	1.82	77.5

方法二：

將本次試驗之 K_h 值帶入式(2-43)可得試體之最大剪應力，相關參數及與 Mini Jet 之比較如表 5-7 所示。由此方法評估，試體最大剪應力的範圍遠大於 Mini Jet 之最大剪應力，但若以 $K_h^{0.1}$ 計算(表 5-8)則其範圍小於 Mini Jet 之最大剪應力。

表 5-7 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法二)

組別	岩性	K_h	$\tau_{s,c} \text{min(Pa)}$	$\tau_{s,c} \text{max(Pa)}$	Mini Jet 之 $\tau(\text{Pa})$
第一組	極厚層砂岩	385	3029.67	4544.51	579.29
第二組	極厚層砂岩	400	3088.13	4632.19	579.29

表 5-8 石岡壩試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法二)

組別	岩性	K_h	$\tau_{s,c} \text{min(Pa)}$	$\tau_{s,c} \text{max(Pa)}$	Mini Jet 之 $\tau(\text{Pa})$
第一組	極厚層砂岩	385	229.63	344.45	579.29
第二組	極厚層砂岩	400	230.22	345.32	579.29

以此四個表格的評估結果來總結可以得到的結論是，若以 $K_h^{0.75}$ 做評估則沖蝕無法達成，但若以 $K_h^{0.1}$ 做評估則沖蝕將可以達成，故評估方法仍有待討論。

5.2.2 石岡壩試驗成果

本次現地試驗總共有兩組，試驗的步驟及分析程序完全依照 4.4 節所寫，試驗的時間一組共為 85 分鐘。

第一組試驗尋找了一個水平且較為平坦的岩盤，其表面覆蓋些許風化後的砂土，因此在經過簡單的整地將覆蓋物清理後，才開始進行試驗。由於本地點是一個較為低窪的地區，所以在試驗結束後嚴重積水，無法拍下試驗後之照片，固本試驗往後應避免位於低窪處施作。

表 5-9 石岡壩第一組試驗成果

TWD97 橫座標	226053	試驗日期	101 年 6 月 18 日	
TWD97 縱座標	2686083	傾斜度	水平	
地 質	卓蘭層極厚層	τ_o (Pa)	5802.688	
	砂岩	τ_c (Pa)	504.491	
V(m/s)	10.98	τ_c (Pa)	481.237	
H_i (mm)	43	H_c (mm)	45	
k_d (m ³ /N-s)	2.2×10^{-8}	ε (mm/s)	0.00051	
位置圖	試驗前	試驗後	沖刷深度圖	雙曲線圖
圖 5-7	圖 5-8	--	圖 5-9	圖 5-10



圖 5-8 石岡壩第一組試驗前

表 5 - 10 石岡壩第一組試驗數據

累積時間(min)	變化時間(min)	水頭(psi)	間距讀數(mm)
0	0	12	43.0
0.25	0.25	12	44.0
0.5	0.25	12	44.0
1	0.5	12	44.0
2	1	11	44.0
5	3	12	44.1
10	5	11	44.1
20	10	11	44.3
35	15	11	44.3
55	20	11.5	44.4
85	30	11	44.4

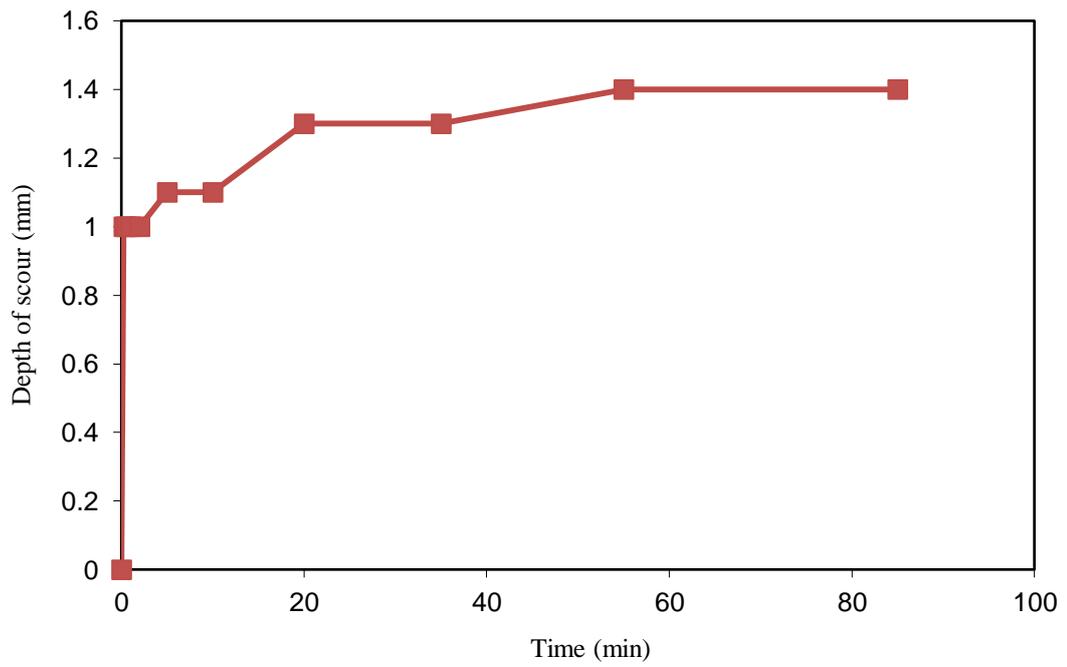


圖 5-9 石岡壩第一組試驗沖刷深度

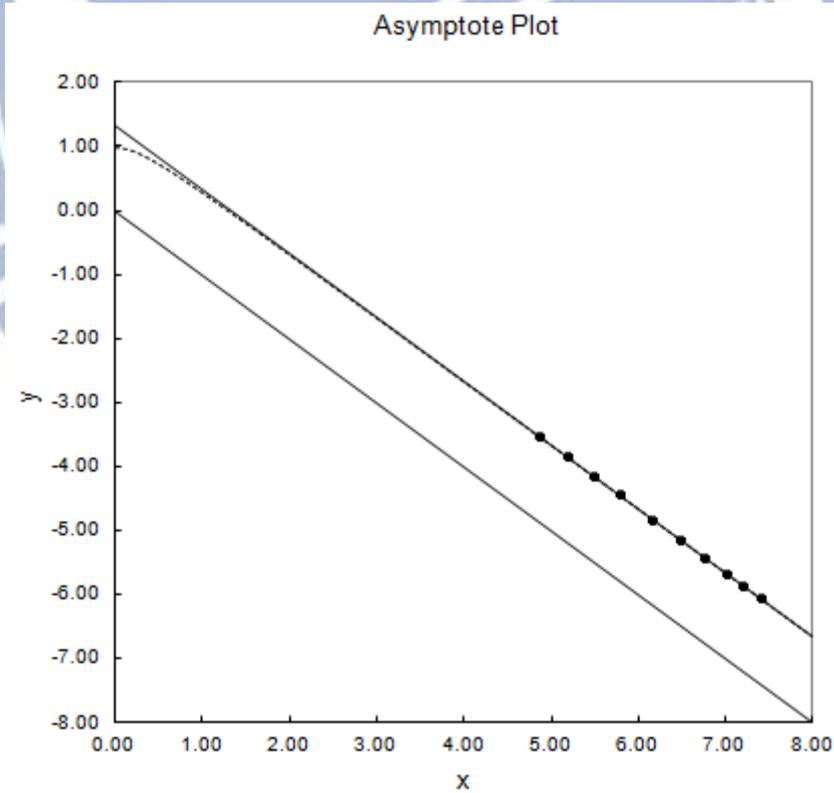


圖 5-10 石岡壩第一組試驗之雙曲線圖

第二組試驗為了要測試儀器在非水平面上是否也能進行，原本希望能在側壁上進行，但是因為附近尋找不到適宜的點位，因此找了一個傾斜約34度，表面還算平坦的岩盤進行。此岩盤並無像第一組一樣上覆清晰可見的風化砂土，而且表面狀況還算良好，因此並未整地便開始進行試驗。

表 5 - 11 石岡壩第二組試驗成果

TWD97 橫座標	226052	試驗日期	101 年 6 月 18 日	
TWD97 縱座標	2686082	傾斜度	34 度	
地 質	卓蘭層極厚層	$\tau_o(\text{Pa})$	6001.778	
	砂岩	$\tau_c(\text{Pa})$	579.294	
V(m/s)	10.98	$\tau_c(\text{Pa})$	540.118	
$H_i(\text{mm})$	41.3	$H_e(\text{mm})$	43	
$k_d(\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s})$	$0.91 \cdot 10^{-8}$	$\epsilon(\text{mm}/\text{s})$	0.00036	
位置圖	試驗前	試驗後	沖刷深度圖	雙曲線圖
圖 5-7	圖 5-11	圖 5-12	圖 5-13	圖 5-14



圖 5-11 石岡壩第二組試驗前



圖 5-12 石岡壩第二組試驗後

表 5 - 12 石岡壩第二組試驗數據

累積時間(min)	變化時間(min)	水頭(psi)	間距讀數(mm)
0	0	12	41.3
0.25	0.25	12	41.5
0.5	0.25	12	41.5
1	0.5	12	41.8
2	1	12	42.0
5	3	12	42.0
10	5	12	42.0
20	10	12	42.0
35	15	12	42.1
55	20	11.5	42.1
85	30	11.5	42.1

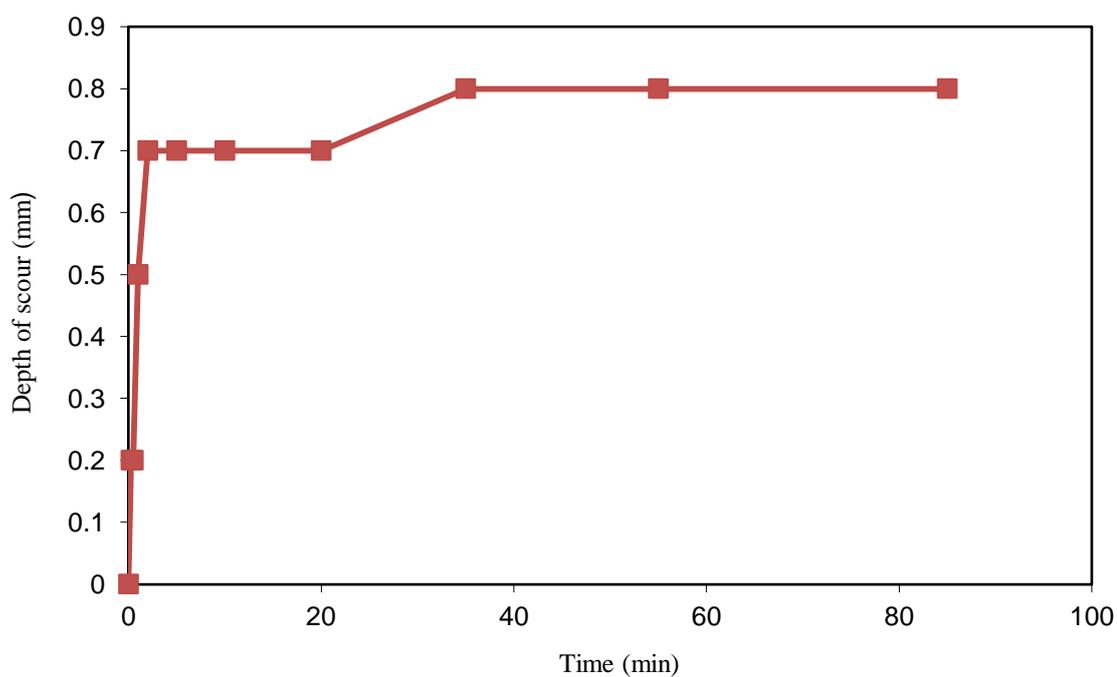


圖 5-13 石岡壩第二組試驗沖刷深度

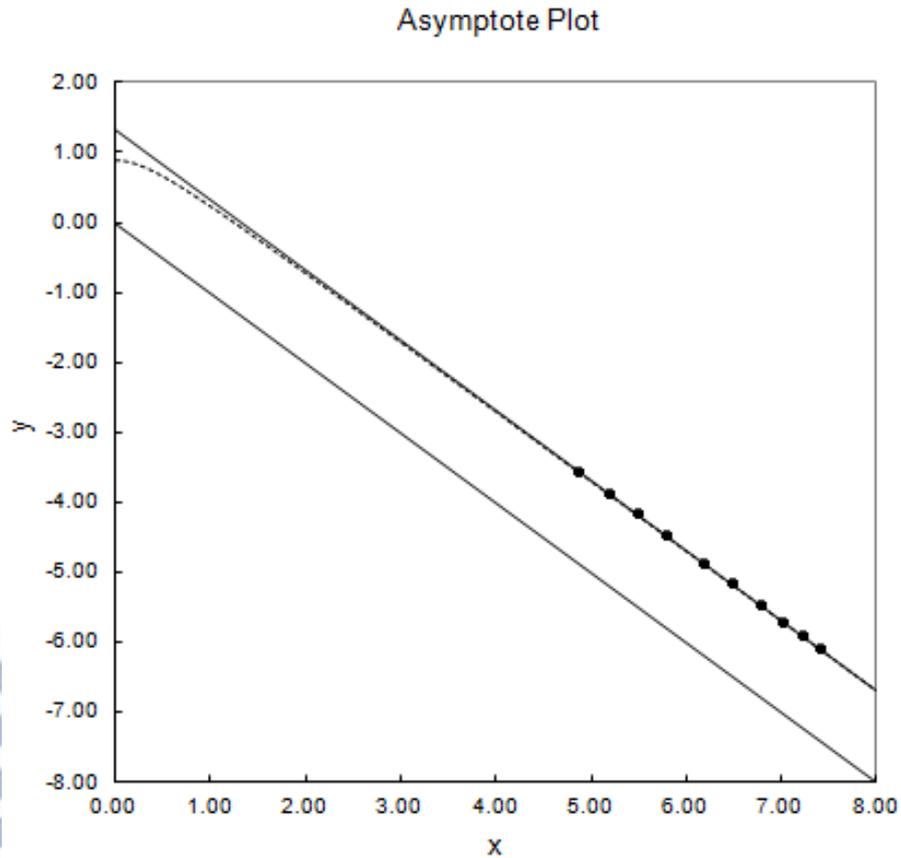


圖 5-14 石岡壩第二組試驗之雙曲線圖

5.2.3 石岡壩成果討論

本次現地試驗在試驗前的可行性評估就已得知難以在本 Mini Jet 系統下產生沖蝕，故其沖蝕量都非常小。但是仍然有量測到沖蝕量，甚至第一組在第一個十五秒時就有 1mm 的深度變化，這些都可以被認為是表層的風化層所造成的。

而第一組的後半段數據跟整個第二組的數據，都是量測到很些微的沖蝕量，但是因為量尺的精確度並沒有那麼高，單以肉眼來看的話，這些都

可能是讀數上的誤差。

第二組從整體來看沖蝕量雖然有 0.8mm，但是這部分仍然應該視為表層風化較為脆弱，一遇水就容易被沖蝕掉，也有可能是剛好把一兩顆沙粒給帶走所形成的結果。

兩組試驗作中所得的沖蝕率分別為 0.00051mm/s 與 0.00036mm/s，如果換算成每小時的沖蝕量則分別為 1.84mm/hr 與 1.29mm/hr，這樣的數值還算是合理，如果與過往經驗來相比仍然是太大了(與郭炳宏，2010 做比較，但其是以水平流來進行沖蝕)，原因在於一開始短時間的沖蝕(0.25min、0.5min、1min)所造成的沖蝕量越大，則越會影響整個最終結果，使沖蝕率大增，但是在這時所量測到的結果幾乎都是風化表層所受的沖蝕，因此，往後現地試驗要如何將這部分的數據做處理也還有待商榷。

從試驗結果來看，本次試驗可以說是並無法有效形成沖蝕，故按照試驗前的評估結果來做說明，則兩個評估方法皆以 $K_h^{0.75}$ 做計算較 $K_h^{0.1}$ 做計算更貼近事實。

若與實驗室內的石岡壩岩心試驗結果做比較，理論上岩心的強度應較現地的岩盤還高，且室內使用之清水的沖蝕效果也應比濁水的沖蝕效果還差，但是在這裡卻出現相反之結果(岩心產生大量沖蝕，現地岩盤卻只有些微沖蝕)，原因可能在於岩心鑽探時及試驗前的岩心切割皆會造成擾動，其中又以後者為甚，故使得弱面發展，在受沖蝕後造成較大之沖蝕量。

5.3 頭前溪現地測試試驗

本次試驗選擇地點為頭前溪流域竹中大橋下游右岸處，利用 google map(圖 5-15)選定試驗地點，為圖中紅圈處，地質為卓蘭層，岩性屬泥質砂岩。該處地表極為破碎，風化劇烈，無法明顯辨認出節理，層面發達，可以從裸露岩盤的側部清楚的看到分層。

本次一共進行兩組試驗，兩組點位相距不超過 50 公分，主要原則是選擇靠近水源處，且較為水平之處，並且可以利用兩者間同層同位置同岩性的性質，來將結果進行比較。

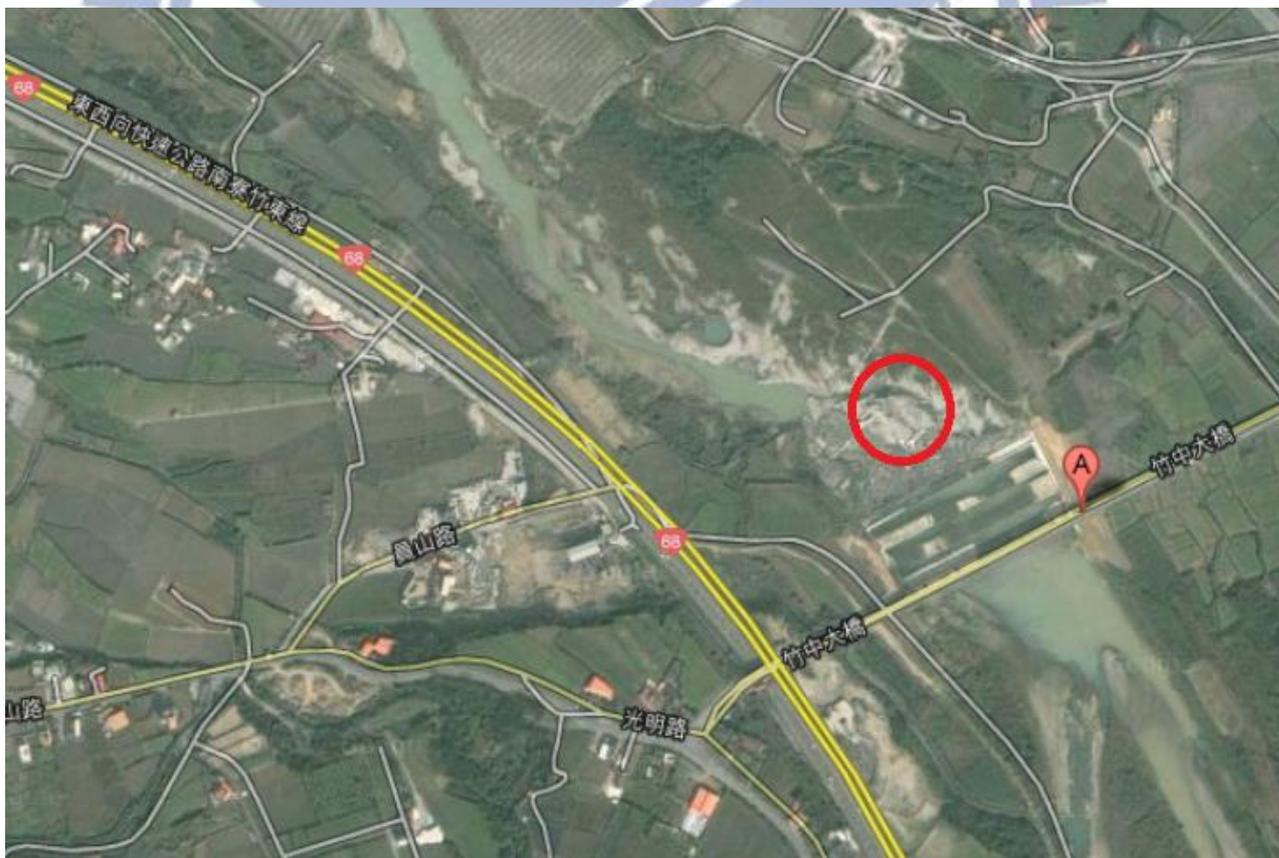


圖 5-15 頭前溪試驗地點

5.3.1 頭前溪試驗可行性評估

方法一：

本次試驗利用 Annanadale(1995,2006)的岩體抗沖蝕指數 K_h 的計算方法(式 2-39)，來計算現地的 K_h (在原始 UCS 小於 10 以下 M_s 會折減)與試驗流功進行比較，其中 UCS 利用史密特錘現地施打所得。岩層的走向為 N10°E 傾角為 5°N，詳細評估數據如表 5-13、表 5-14 所示。

表 5-13 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法一)

組別	UCS (MPa)	M_s	$K_b = \frac{RQD}{J_n}$	$K_d = \frac{J_r}{J_a}$	J_s	K_h	$K_h^{0.75}$ (kW/m ²)	流功 (kW/m ²)
第一組	3	2.47	63.3=95/1.5	1=1/1	1.26	197	52.63	77.5
第二組	3	2.47	63.3=95/1.5	1=1/1	1.26	197	52.63	77.5

表 5-14 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法一)

組別	UCS (MPa)	M_s	$K_b = \frac{RQD}{J_n}$	$K_d = \frac{J_r}{J_a}$	J_s	K_h	$K_h^{0.1}$ (kW/m ²)	流功 (kW/m ²)
第一組	3	2.47	63.3=95/1.5	1=1/1	1.26	197	1.70	77.5
第二組	3	2.47	63.3=95/1.5	1=1/1	1.26	197	1.70	77.5

方法二：

將本次試驗之 K_h 值帶入式(2-43)可得試體之最大剪應力，相關參數及與 Mini Jet 之比較如表 5-15、表 5-16 所示。

表 5-15 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.75}$)(方法二)

組別	岩性	K_h	$\tau_{s,c} \text{min(Pa)}$	$\tau_{s,c} \text{max(Pa)}$	Mini Jet 之 $\tau \text{(Pa)}$
第一組	泥質砂岩	197	2167.20	3250.80	579.29
第二組	泥質砂岩	197	2167.20	3250.80	579.29

表 5-16 頭前溪試驗可行性評估(以 $K_h^{0.1}$)(方法二)

組別	岩性	K_h	$\tau_{s,c} \text{min(Pa)}$	$\tau_{s,c} \text{max(Pa)}$	Mini Jet 之 $\tau \text{(Pa)}$
第一組	泥質砂岩	197	219.60	329.40	579.29
第二組	泥質砂岩	197	219.60	329.40	579.29

因為本試驗所選擇的兩個點位相鄰為同岩層，因此在數據上使用相同之評估結果，從結果來看，方法一無論以 $K_h^{0.75}$ 計算或以 $K_h^{0.1}$ 計算皆小於試驗流功，而方法二以 $K_h^{0.1}$ 計算則 $\tau_{s,c}$ 最大值亦小於 579.29 Pa，但若以 $K_h^{0.75}$ 計算則 $\tau_{s,c}$ 的範圍會大於 579.29 Pa。

5.3.2 頭前溪試驗成果

本試驗地點具有嚴重風化的痕跡，易碎且脆弱、裂隙極多，故在試驗前選定點位後，需要利用地質錘將表層清除，直到新鮮完整的岩盤露出，此舉是為了將風化所造成對試驗的影響降到最低。

第一組試驗採用新的阻水方式，在底座與岩盤間先用紙黏土做初步的阻隔後，於外側使用速利康圍繞一圈，此方法使試驗達到完全的水密性，效果卓越。

表 5 - 17 頭前溪第一組試驗成果

TWD97 橫座標	255538	試驗日期	101 年 7 月 2 日	
TWD97 縱座標	2742270	傾斜度	水平	
地 質	卓蘭層泥質	$\tau_o(\text{Pa})$	5976.980	
	砂岩	$\tau_c(\text{Pa})$	353.393	
V(m/s)	10.98	$\tau_c(\text{Pa})$	148.305	
$H_i(\text{mm})$	41.5	$H_c(\text{mm})$	83	
$k_d(\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s})$	2.68×10^{-8}	$\varepsilon(\text{mm}/\text{s})$	0.00550	
位置圖	試驗前	試驗後	沖刷深度圖	雙曲線圖
圖 5-15	圖 5-16	圖 5-17	圖 5-18	圖 5-19



圖 5-16 頭前溪第一組試驗前



圖 5-17 頭前溪第一組試驗後

表 5-18 頭前溪第一組試驗數據

累積時間(min)	變化時間(min)	水頭(psi)	間距讀數(mm)
0	0	12	41.5
0.25	0.25	12	49.5
0.5	0.25	12	50
1	0.5	11.5	50.5
2	1	12	51
5	3	12	53
10	5	12	54.5
20	10	11.5	55.5
35	15	12	56.5
55	20	12	57
85	30	12	60

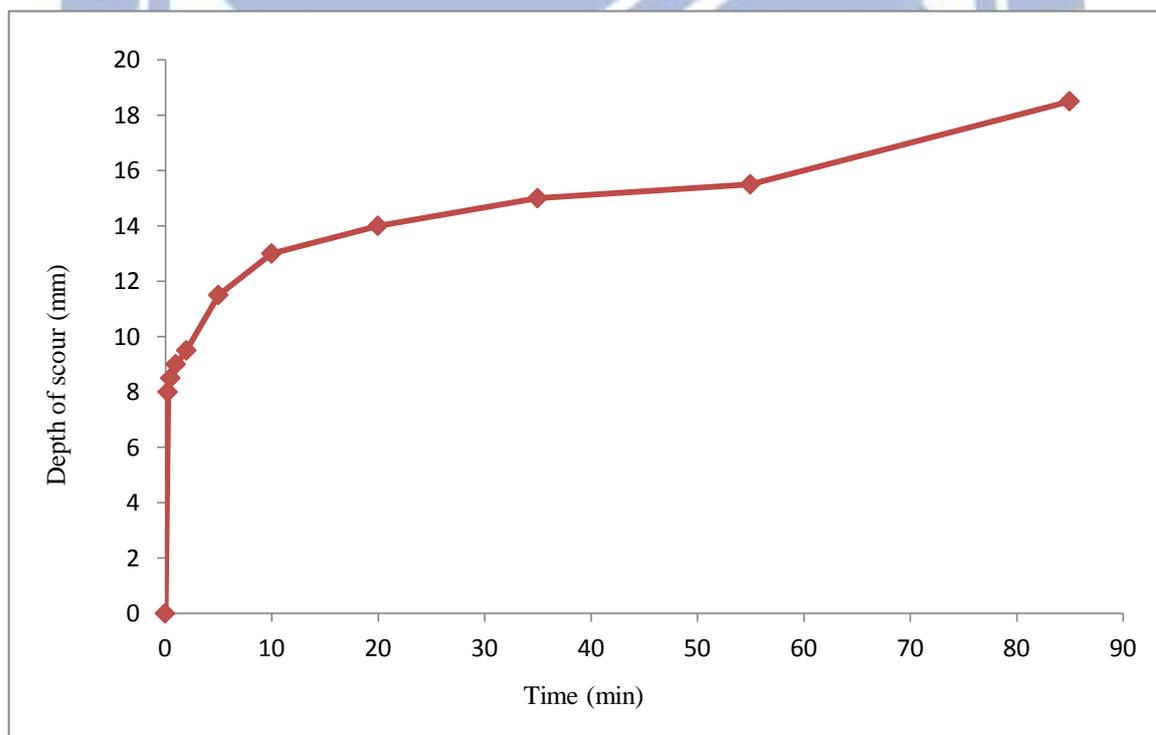


圖 5-18 頭前溪第一組試驗沖刷深度

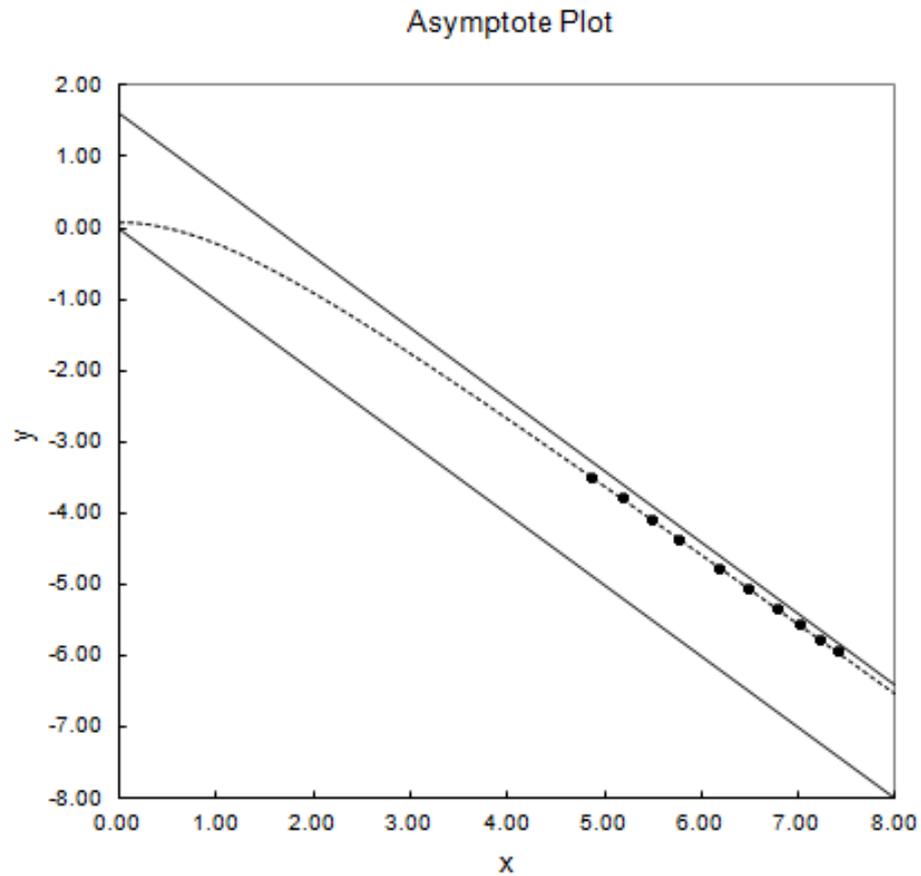


圖 5-19 頭前溪第一組試驗之雙曲線圖

如前所述，第二組試驗的位置就在第一組旁約 50 公分處，具有相同之地質條件，而試驗之底座與岩盤間的阻水方式雖然是完全只使用陶土，但是也與第一組相同，是在百分之百水密性的條件下進行試驗。

表 5 - 19 頭前溪第二組試驗成果

TWD97 橫座標	255538	試驗日期	101 年 7 月 2 日	
TWD97 縱座標	2742270	傾斜度	水平	
地 質	卓蘭層泥質	$\tau_o(\text{Pa})$	5976.980	
	砂岩	$\tau_e(\text{Pa})$	489.500	
V(m/s)	10.98	$\tau_c(\text{Pa})$	321.265	
$H_i(\text{mm})$	43	$H_e(\text{mm})$	56	
$k_d(\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s})$	$0.86 \cdot 10^{-8}$	$\epsilon(\text{mm}/\text{s})$	0.00145	
位置圖	試驗前	試驗後	沖刷深度圖	雙曲線圖
圖 5-15	圖 5-20	圖 5-21	圖 5-22	圖 5-23



圖 5-20 頭前溪第二組試驗前



圖 5-21 頭前溪第二組試驗後

表 5-20 頭前溪第二組試驗數據

累積時間(min)	變化時間(min)	水頭(psi)	間距讀數(mm)
0	0	12	43
0.25	0.25	12	44
0.5	0.25	12	44
1	0.5	12	44
2	1	12	44.5
5	3	12	45
10	5	12	45.5
20	10	12	46
35	15	11.5	47
55	20	11.5	47.5
85	30	11.5	48

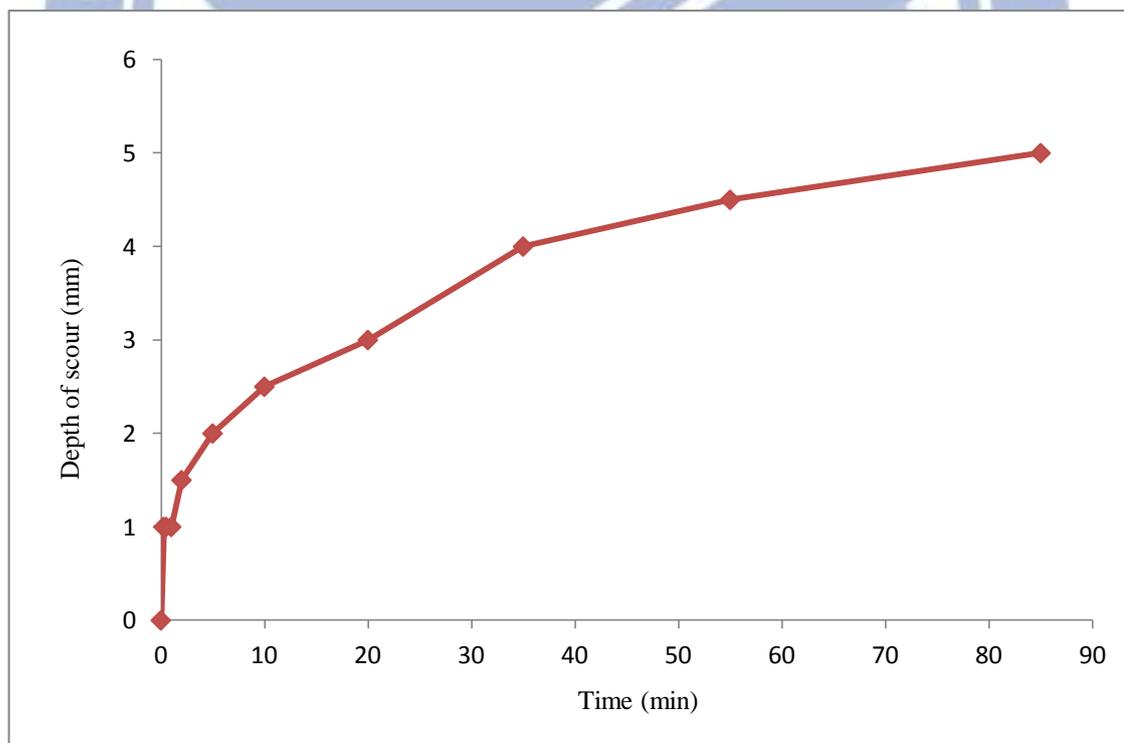


圖 5-22 頭前溪第二組試驗沖刷深度

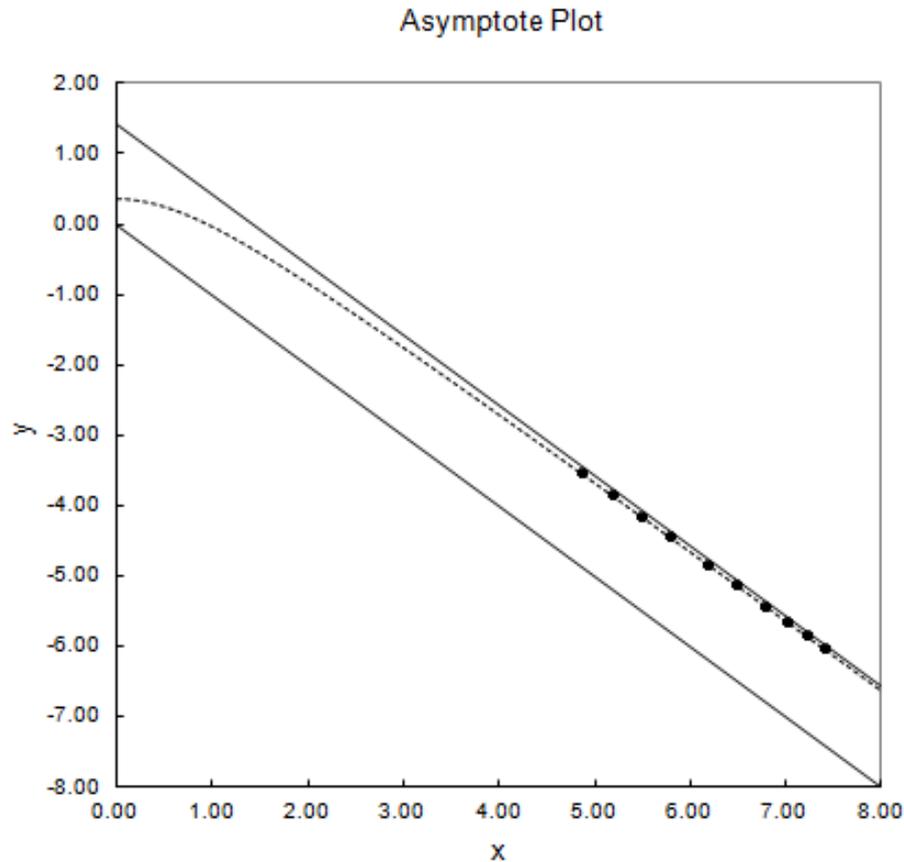


圖 5-23 頭前溪第二組試驗之雙曲線圖

5.3.3 頭前溪成果討論

首先在試驗可行性評估的部分，倘若使用標準的現地估測方法，來估算 K_h 值並非適當，原因在於本試驗是個小型的試驗，是在局部微小的點位施做，所以使用岩體的 K_h 估測將會有低估的情形，因此在 K_b 、 K_d 、 J_s 這三項的估算上，應該取用該項裡較大之值，而不用去對節理、層面走向等岩體的參數做詳細評估，使 K_h 的主控為 M_s 也就是材料的無圍壓縮強度，這樣才會使整個評估更貼近實際情形。

方法一的評估結果皆通過阻抗，預估可產生沖蝕，而方法二則產生兩個不同的評估結果。若從試驗結果來看，本次於頭前溪所做的兩組試驗，都可以於試驗後的照片上(圖 5-17、圖 5-21)看到明顯的沖蝕坑，代表沖蝕機制已啟動，所以此兩種評估方法、四個評估結果依然還有議論的空間。

第一組的沖蝕率 0.00550mm/s 可以說是大的非常可觀，換算成每小時的沖蝕率將達 19.79mm/hr ，第一個 0.25 分鐘即造成 8mm 的沖蝕量，而總時間的前 0.5 分鐘就已經造成 8.5mm 的沖蝕量，佔總沖蝕量的 46%，這是表面風化層所造成的影響，但此時對沖蝕率的影響卻是最敏感的時候。而後面仍有 10mm 的沖蝕量，這其中還有多少是受表層的影響是個未知數，雖然已經清除了約 5 公分的表面，但是風化層有一定的厚度，如果試驗的原始面不超過這個厚度，就會產生這樣的結果。

倘若將第一個 0.25 分鐘的數據予以剔除，直接將初始面變為 49.5mm，將此代入重新計算，將得到 9.96mm/hr 的沖蝕率；若是將總時間前 2 分鐘的數據予以剔除，將初始面及總時間 2 分鐘內的數據直接變為 53mm，將得到 5.83mm/hr 的沖蝕率，也就是說如果以人工的方式將明顯受表層風化的影響剔除，則會使沖蝕率大幅降低，如果以這樣的結果與第二組做比較，也會使雙方較為接近，使試驗結果更具實用性。

第二組的沖蝕率就比第一組小很多但是還是有 5.23mm/hr ，在總時間的前 5 分鐘，沖蝕量沒有那麼明顯，只有 2mm，也因此可以認為後面經較長

時間沖蝕所形成的沖蝕量就是實際的沖蝕量。

從這兩組的試驗後照片來看，都有形成明顯的沖蝕坑，不過沖蝕坑的範圍及形狀也是一個必須討論的要件，例如第一組的沖蝕坑明顯的在照片中的下半部，而第二組則是在照片中的左上半部，造成這樣的情形可以解釋為因為有弱面的經過，才會形成差異侵蝕。

另外從沖蝕量來說，第一組共造成 18.5mm 的沖蝕量，第二組則是有 5mm，因此可以確定的是本儀器的確能對軟弱岩石形成沖蝕。

本次所進行之兩組試驗分別採用不同的阻水方式(第一組為紙黏土加速利康，第二組為陶土)，兩者皆有達到百分之百水密性的效果，因此雖然使用不同的阻水方式，但是對於整體試驗並不會有任何影響。

六、結論與建議

6.1 結論

(1)經檢討原有 Mini Jet 的功能，及西部河床軟弱岩石的沖蝕阻抗，本研究儀器改良並經測試，測試結果顯示本改良儀器可適用於部分西部麓山帶岩石河床的磨蝕率及阻抗量測。本改良儀器之實際提供之流功為 77.5 kW/m^2 ，因此岩盤的抗沖蝕指數 K_h 必須要小於 330，亦即品質較差的砂岩、泥質砂岩或是一般的頁岩，其沖蝕才能在本試驗中啟動。若是利用本研究的評估方式將本儀器所能造成沖蝕的 K_h 值 330 反算回 M_s 後再進一步回推 UCS 將會得到的值為 5MPa，此數值為本試驗可造成沖蝕之岩石最大無圍壓縮強度。

(2)儀器本身在防漏水上並無太大的問題，而底座與岩盤的交會處，利用黏土及速利康將可達到完全水密性(無論採用何種阻水材料，甚至無法完全阻水，但是只要壓克力盒內在試驗中始終保持滿水位，則皆不會對試驗產生任何影響)。

(3)本儀器所模擬的沖蝕機制，預估是以磨蝕機制做為主控，但是在石岡壩的岩心實驗室室內測試試驗與頭前溪的現地測試試驗中，從試驗後的照片來看又具有剝皮法沖蝕機制特徵(圖 5-2、圖 5-17、圖 5-21)，由於本試驗在進行中時無法觀測到沖蝕的狀況，所以目前暫無定論，有待進行更多的試驗測試觀察才能有所斷定。

6.2 建議

(1)增加試驗之出水強度，亦即增加泵浦馬力(水壓、流速)、增加流功(加大出水孔徑)，才能對 K_h 值更高之岩盤施做試驗。

(2)將圖 6-1 可轉部中之入水處螺牙孔徑加大，並且將可轉部內之水流管路設計成倒三角錐的形狀，可大幅降低因縮管所造成之壓力損失。

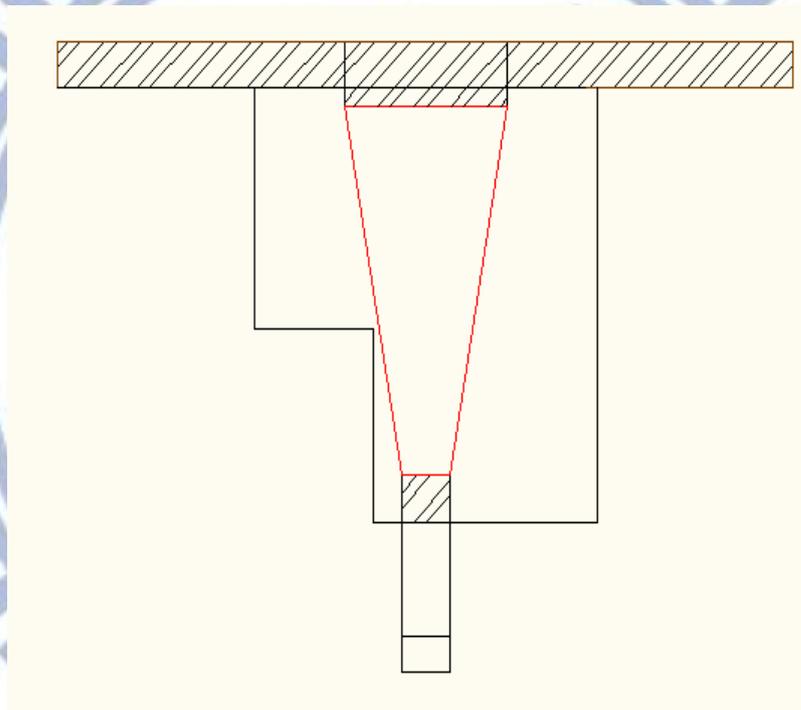


圖 6-1 可轉部建議改良示意圖

(3)原量尺量測的準度雖然還不算太差，但是以短時間岩石的沖蝕量來講，精度還需要再提升，建議未來設置類似液壓游標尺的儀器在 Mini Jet 上，將更能提升數據的可靠度。

(4)標桿底部本研究是製作出一個高 5.5mm 直徑 5mm 之圓柱體，以此圓柱

碰觸試驗體來進行量測，但是此設計會因為沖蝕坑的大小，而使量測的值出現不同的結果，例如，沖蝕坑在還沒完全發展下，如果其寬度小於 5mm，這樣就會量測不到，也就是無法量測到真正沖蝕坑的底部，如果要克服這個問題，縮小標桿底部是個可以考慮的方法，但是如果標桿底部太過尖銳，反而會破壞到試體，因此建議將其設計成一個直徑 1mm~2.5mm 的球體，將會是更理想的形式。

(5)增加底座之固定力，使儀器可於大角度傾斜之岩盤上施做。

(6)計算基礎理論運用在軟岩上並無太大問題，但是未來應將計算程式寫成能自動將短時間沖蝕所造成較大(大於 1mm)之沖蝕量自動剔除，也就是沖蝕深度圖中斜率極大之處。

(7)因試驗水流的濁度對沖蝕量有很大之影響，因此該對現地試驗用水進行採樣，並由室內實驗分析來確定水流的含泥砂量。

(8)4.4 節的試驗方法及步驟中說明本文所模擬的是在流速為 10.98m/s 時所造成之沖蝕率，因此建議可以藉由流速的改變(改變泵浦馬力或噴嘴)來進行試驗，取得在相同岩性下時不同流速的沖蝕率，由此分析出流速與沖蝕率之間的關係式(圖)，便可估測此種岩性受各流速沖蝕時所對應之沖蝕率。

參考文獻

1. Albertson, M. L., Y. B. Dai, R. A. Jensen and H. Rouse. (1950). "Diffusion of submerged jets." Transactions of ASCE Vol. 115. Paper no. 2409: 639-664.
2. Annandale, G.W. (1995). "Erodibility." Journal of Hydraulic Research, Vol.33, No.4: 471-494.
3. Annandale, G. W., (2006). "Scour technology." McGraw Hill, New York.
4. Blaisdell FW, Clayton LA, Hebaus GG. (1981). "Ultimate dimension of local scour." Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers 107(HY3): 327-337.
5. Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1974). "Impinging circular turbulent jets. " ASCE Journal of Hydraulic Engineering Vol. 100: 1313-1328.
6. Bollaert, E., and A. J. Schleiss, (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.
7. Bollaert, E., (2002). "Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." in Lausanne, EPFL.
8. Bollaert, E., and A. J. Schleiss, (2005). "Physically based model for evaluation of rock scour due to high-velocity jet impact." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 131(3): 155-167.
9. Castillo E. L. G., (2006). "Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools." Proceedings of the Seventh International Conference on Hydrosience and Engineering, Philadelphia, PA.
10. Collins, S. H. and Moon, G. C. 1979. 'Stereometric measurement of streambank erosion', Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 45: 183-190.
11. Dunn IS. 1959. "Tractive resistance of cohesive channels." Proceedings Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers 85(SM3): 1-24.
12. Ervine, D. A., Falvey, H. T., and Withers, W., (1997). "Pressure fluctuations on plunge pool floors." Journal of Hydraulic Research, 35(2): 257-279.
13. Franzetti, S. & Tanda, M.G. 1987. "Analysis of turbulent pressure fluctuation caused by a circular impinging jet." International Symposium on New Technology in Model Testing in Hydraulic Research. India:8591.
14. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils", Canadian Geotechnical Journal, 15: 313-321.

15. Foley, M.G. (1980), "Bedrock incision by streams." Geol. Soc. Am. Bull., Part II, 91: 2189-2213.
16. Hanson GJ., K. M. Robinson and D. M. Temple. (1990). "Pressure and stress distribution due to a submerged impinging jet. In Proc. of the 1990 National Conference, Hydraulic Engineering American Society of Civil Engineers, :525-530.
17. Hanson GJ, A. Simon. (2001). "Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA." Hydrological processes 15: 23-38.
18. Hanson GJ, Cook KR. (1997). "Development of excess shear stress parameters for circular jet testing." ASAE Paper No. 97-2227, American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MI.
19. Hanson GJ, Cook KR. (2004). "Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ." American Society of Agricultural Engineers 20(4): 455-462.
20. Kirsten, H. A. D., (1982). "Classification system for excavation in natural materials." Civil Engineer in South Africa, 24(7): 293-308.
21. Knighton, A.D. (1998), Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Arnold, London, UK. : 383.
22. Langendoen, E.J. (2000). "CONCEPTS: Conservational channel evolution and pollutant transport system software manual." USDA-ARS National Sedimentation Laboratory Research Report, 16.
23. Moore WL, Masch FD. 1962. "Experiments of the scour resistance of cohesive sediments. " Journal of Geophysical Research 67(4): 1437-1446.
24. Morgenstern, N. R. & Price, V. E. (1965). "The analysis of the stability of general slip surfaces", Geotechnique, 15(1): 79-93.
25. Painter, R. B. Blyth, K., Mosedale, J. C. and Kelly, M. 1974. 'The effect of afforestation on erosion processes and sediment yield', in Effects of Man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment, International Association of Hydrological Sciences, Publication 113: 62-68.
26. Partheniades E. (1965). "Erosion and deposition of cohesive soils." Journal of Hydraulic Engineering, 91(1): 105-139.
27. Shields, A. (1936). Anwendung der Aechlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung, Mitteilungen der Pruessischen Versuchsanstalt fuer Wasserbau and Schiffbau, Berlin.
28. Simon, A., Pollen-Bankhead, N., Thomas, R. E., (2010) . "Development and application of a deterministic bank-stability and toe-erosion model(BSTEM) for stream restoration." AGU book.
29. Simon, A., Curini, A., Darby, S., and Langendoen, E. (1999). "Stream-bank

- mechanics and the role of bank and near-bank processes in incised channels.” In: S. Darby and A. Simon, eds. *Incised River Channels*. John Wiley and Sons, New York: 123-152.
30. Simon, A., Curini, A., Darby, S.E., and Langendoen, E.J. (2000). “Bank and near-bank processes in an incised channel”, *Geomorphology*, 35: 193-217.
 31. Stein, O. R. , P. Y. Julien, and C. V. Alonso. (1993). “Mechanics of jet scour downstream of a headcut. ” *Journal of the Hydraulic Research of IAHR*31(6): 723-738.
 32. Thorne C.R, Tovey N.K. (1981). “Stability of composite river banks”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 6: 469- 484.
 33. Watson, A.J. and L.R. Basher, (2006). *Stream bank erosion: a review of processes of bank failure, measurement and assessment techniques, and modeling approaches*, Landcare ICM Report No. 2005-2006/01, Landcare Research, Lincoln, Private Bag 6, Nelson, NEW ZEALAND.
 34. 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.
 35. 經濟部水利署水利規劃試驗所，(2008)，「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(1/3)」。
 36. 經濟部水利署水利規劃試驗所，(2009)，「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(2/3)」。
 37. 經濟部水利署水利規劃試驗所，(2010)，「軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討-以大安溪為例(3/3)」。
 38. 經濟部水利署水利規劃試驗所，(2011)，「99年度台美水利技術合作計畫」。
 39. 徐偉城，(2007)，「LiDAR與環境調查／監測／災害防救運用」，*國土資訊系統通訊期刊*，第六十一期，第69-79頁。

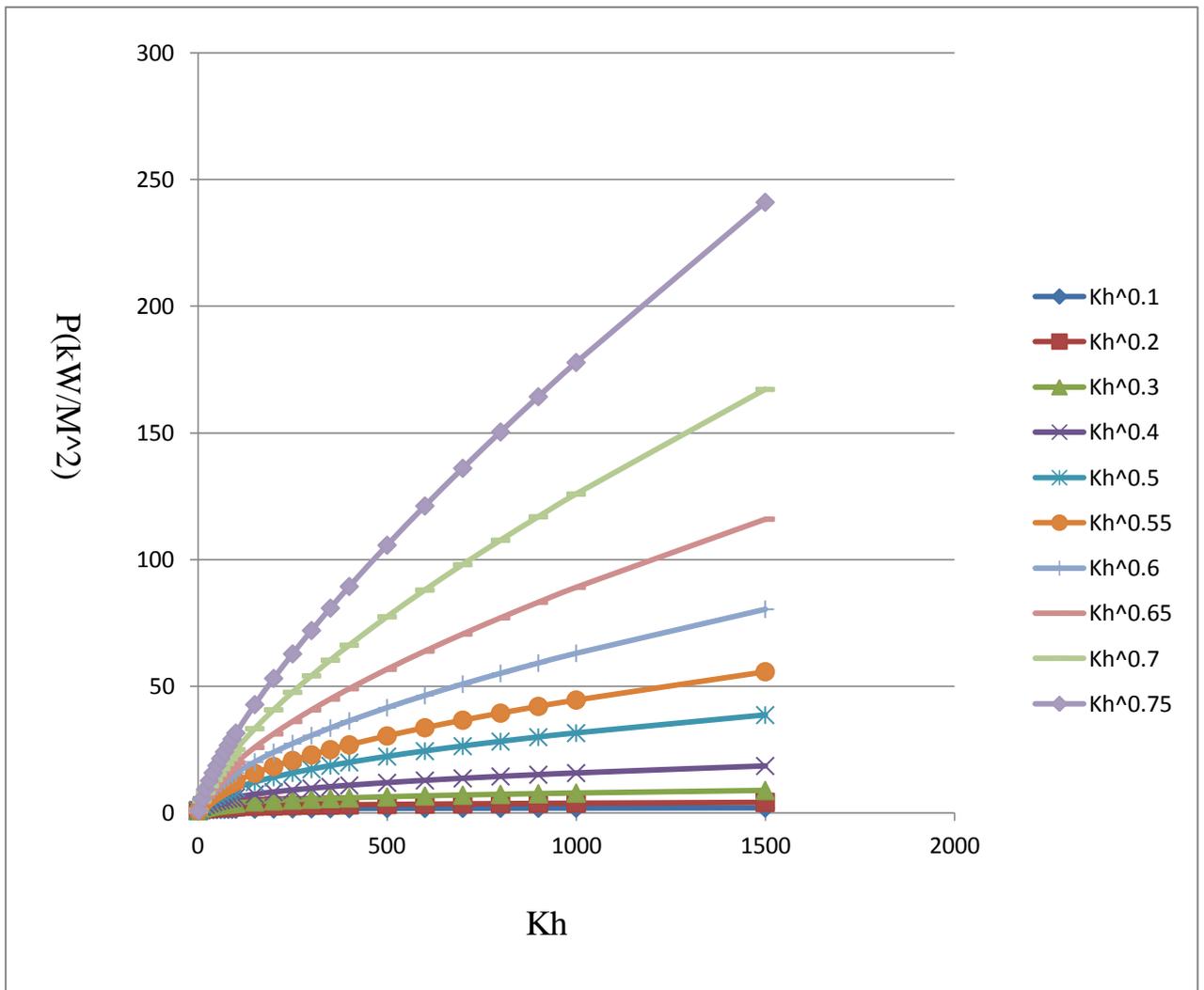
40. 張思源，(2003)，「堤岸邊坡破壞對河川寬度及深度之影響-以草嶺崩坍區河道為例」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
41. 陳威誠，(2004)，「由光達覆蓋模型萃取數值高程模型之研究」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
42. 郭炳宏，(2010)，「多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
43. 羅楚鈞，(2011)，「攔河堰下游軟弱岩石沖刷坑形狀與深度分析」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
44. 吳宇霆，(2012)，「室內軟弱岩石射流沖刷設備建立」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
45. 思沛雅噴霧器材有限公司網站，SPRAYER CO., LTD. ，
<http://www.sprayernozzle.com.tw/p1.htm>。
46. The Engineering ToolBox 網頁，<http://www.engineeringtoolbox.com/>。

附錄

本研究之試驗可行性評估方法中之 K_h 該以何種次方來做表達並沒有明確的結果，因此在此處以附表1、附表2、附表3及附圖1、附圖2、附圖3做為參考。

附表 1 K_h 與 $P(kW/m^2)$ 對應關係表

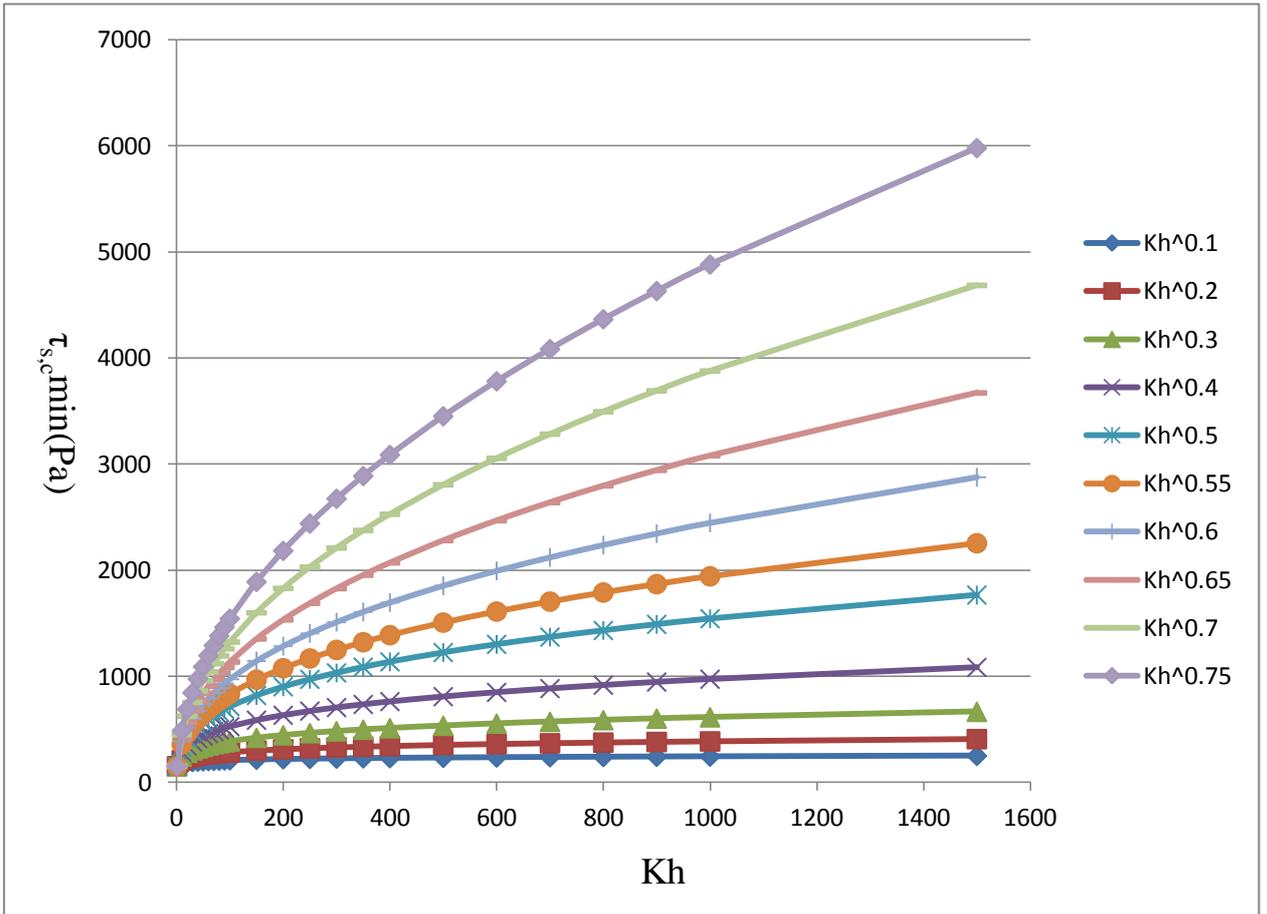
K_h	$K_h^{0.1}$	$K_h^{0.2}$	$K_h^{0.3}$	$K_h^{0.4}$	$K_h^{0.5}$	$K_h^{0.55}$	$K_h^{0.6}$	$K_h^{0.65}$	$K_h^{0.7}$	$K_h^{0.75}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1.258925	1.584893	1.995262	2.511886	3.162277	3.548134	3.981072	4.466836	5.011872	5.623413
20	1.349283	1.820564	2.45646	3.314454	4.472136	5.194772	6.034176	7.009217	8.14181	9.457416
30	1.405116	1.97435	2.774191	3.89806	5.477226	6.492571	7.696136	9.122814	10.81396	12.81861
40	1.446126	2.091279	3.024252	4.373448	6.324555	7.605591	9.146101	10.99864	13.22641	15.90541
50	1.478758	2.186724	3.233635	4.781762	7.071068	8.598714	10.4564	12.71541	15.46247	18.80302
60	1.505966	2.267933	3.41543	5.143521	7.745967	9.50568	11.66516	14.31523	17.56733	21.55825
70	1.52936	2.338943	3.577086	5.470654	8.3666	10.34675	12.79555	15.82391	19.569	24.20045
80	1.549919	2.402249	3.723291	5.7708	8.944272	11.13524	13.8629	17.25872	21.48637	26.74961
90	1.568282	2.459509	3.857205	6.049187	9.486833	11.88046	14.87803	18.63192	23.33296	29.22011
100	1.584893	2.511886	3.981072	6.309573	10	12.58925	15.84893	19.95262	25.11886	31.62278
150	1.650476	2.72407	4.496011	7.420557	12.24745	15.7344	20.21412	25.96924	33.36291	42.86161
200	1.698646	2.8854	4.901274	8.325532	14.14214	18.43175	24.02249	31.30902	40.80572	53.18296
250	1.736977	3.017088	5.240612	9.102821	15.81139	20.83853	27.46401	36.19604	47.70435	62.87167
300	1.768936	3.129135	5.535239	9.791484	17.32051	23.03651	30.63887	40.75011	54.1982	72.08434
350	1.796416	3.227109	5.797228	10.41423	18.70829	25.0748	33.60786	45.04475	60.37368	80.9191
400	1.820564	3.314454	6.034176	10.98561	20	26.98566	36.41128	49.12912	66.28908	89.44272
500	1.861646	3.465724	6.45195	12.01124	22.36068	30.50939	41.62766	56.79767	77.49595	105.7371
600	1.895899	3.594432	6.814679	12.91994	24.4949	33.72743	46.43984	63.94378	88.04524	121.2309
700	1.925351	3.706975	7.137225	13.74166	26.45751	36.71165	50.93999	70.6828	98.07733	136.0892
800	1.951232	3.807308	7.428942	14.49559	28.28427	39.50931	55.18919	77.09185	107.6869	150.4241
900	1.97435	3.89806	7.696136	15.19487	30	42.15347	59.23051	83.22573	116.9418	164.3168
1000	1.995262	3.981072	7.943282	15.84893	31.62278	44.66836	63.09573	89.12509	125.8925	177.8279
1500	2.077826	4.31736	8.970722	18.6396	38.72983	55.82776	80.47385	116.0004	167.2106	241.0285



附圖 1 K_h 與 $P(\text{kW}/\text{m}^2)$ 對應關係圖

附表 2 K_h 與 $\tau_{s,c}\min(\text{Pa})$ 對應關係表

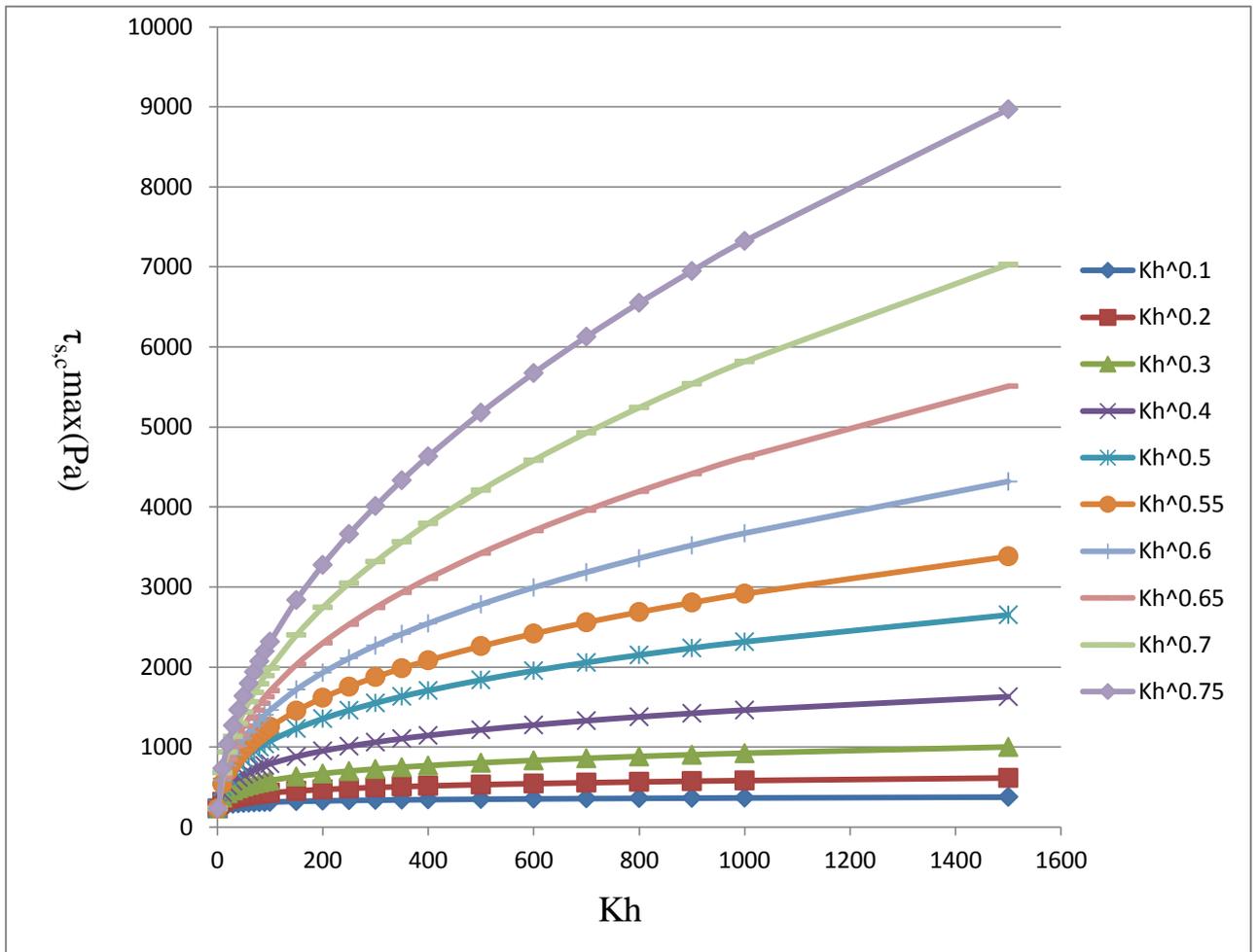
K_h	$K_h^{0.1}$	$K_h^{0.2}$	$K_h^{0.3}$	$K_h^{0.4}$	$K_h^{0.5}$	$K_h^{0.55}$	$K_h^{0.6}$	$K_h^{0.65}$	$K_h^{0.7}$	$K_h^{0.75}$
1	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064	154.4064
10	180.0247	209.8934	244.7177	285.3199	332.6586	359.1965	387.8514	418.7923	452.2016	488.276
20	188.5388	230.2163	281.1068	343.247	419.1236	463.1373	511.773	565.5162	624.9032	690.5266
30	193.7047	243.0048	304.8524	382.441	479.7767	537.3739	601.8855	674.1418	755.0725	845.7189
40	197.4556	252.507	322.907	412.9347	528.0626	597.1555	675.2886	763.6448	863.5618	976.5521
50	200.4149	260.1326	337.6443	438.2522	568.8382	648.0687	738.3349	841.1738	958.3366	1091.818
60	202.8658	266.5338	350.1835	460.0861	604.4808	692.8739	794.1927	910.3274	1043.444	1196.027
70	204.9613	272.0686	361.1478	479.3928	636.353	733.1644	844.7041	973.213	1121.272	1291.857
80	206.7941	276.956	370.9227	496.7708	665.3172	769.9545	891.0486	1031.188	1193.367	1381.053
90	208.4242	281.3397	379.7641	512.6214	691.9577	803.9351	934.0334	1085.185	1260.797	1464.828
100	209.8934	285.3199	387.8514	527.2283	716.6912	835.6006	974.2388	1135.879	1324.338	1544.064
150	215.6444	301.1694	420.6139	587.4304	820.4066	969.5396	1145.782	1354.061	1600.201	1891.085
200	219.8201	312.946	445.5243	634.2689	902.9743	1077.399	1285.516	1533.834	1830.119	2183.637
250	223.1146	322.3968	465.8578	673.1565	972.6996	1169.257	1405.534	1689.557	2030.973	2441.38
300	225.8431	330.3302	483.1585	706.6935	1033.648	1250.096	1511.868	1828.456	2211.339	2674.398
350	228.176	337.1898	498.2864	736.3487	1088.148	1322.788	1608.024	1954.767	2376.278	2888.68
400	230.2163	343.247	511.773	763.0413	1137.676	1389.166	1696.248	2071.213	2529.065	3088.129
500	233.6667	353.6129	535.1301	809.8242	1225.525	1507.606	1854.613	2281.493	2806.627	3452.633
600	236.5241	362.3144	555.0034	850.1699	1302.314	1611.836	1994.922	2469.056	3055.878	3782.17
700	238.9674	369.8382	572.3807	885.846	1370.981	1705.564	2121.801	2639.619	3283.808	4085.21
800	241.1042	376.4819	587.8728	917.9578	1433.382	1791.149	2238.213	2796.862	3494.948	4367.274
900	243.0048	382.441	601.8855	947.2474	1490.778	1870.198	2346.186	2943.318	3692.427	4632.193
1000	244.7177	387.8514	614.7031	974.2388	1544.064	1943.862	2447.177	3080.813	3878.514	4882.76
1500	251.4229	409.3966	666.6282	1085.483	1767.512	2255.445	2878.074	3672.583	4686.421	5980.136



附圖 2 K_h 與 $\tau_{s,c} \text{ min(Pa)}$ 對應關係圖

附表 3 K_h 與 $\tau_{s,c,max}(Pa)$ 對應關係表

K_h	$K_h^{0.1}$	$K_h^{0.2}$	$K_h^{0.3}$	$K_h^{0.4}$	$K_h^{0.5}$	$K_h^{0.55}$	$K_h^{0.6}$	$K_h^{0.65}$	$K_h^{0.7}$	$K_h^{0.75}$
1	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097	231.6097
10	270.037	314.8401	367.0766	427.9799	498.9879	538.7947	581.7772	628.1885	678.3024	732.414
20	282.8082	345.3245	421.6603	514.8705	628.6853	694.7059	767.6596	848.2743	937.3548	1035.79
30	290.557	364.5072	457.2786	573.6614	719.6651	806.0608	902.8283	1011.213	1132.609	1268.578
40	296.1834	378.7605	484.3604	619.4021	792.0939	895.7332	1012.933	1145.467	1295.343	1464.828
50	300.6224	390.1989	506.4664	657.3782	853.2573	972.1031	1107.502	1261.761	1437.505	1637.728
60	304.2987	399.8007	525.2752	690.1291	906.7212	1039.311	1191.289	1365.491	1565.167	1794.041
70	307.442	408.103	541.7217	719.0893	954.5295	1099.747	1267.056	1459.819	1681.909	1937.785
80	310.1911	415.434	556.384	745.1562	997.9758	1154.932	1336.573	1546.782	1790.051	2071.58
90	312.6364	422.0096	569.6461	768.9321	1037.937	1205.903	1401.05	1627.778	1891.196	2197.242
100	314.8401	427.9799	581.7772	790.8425	1075.037	1253.401	1461.358	1703.819	1986.507	2316.097
150	323.4666	451.7542	630.9209	881.1456	1230.61	1454.309	1718.673	2031.092	2400.302	2836.627
200	329.7302	469.419	668.2865	951.4033	1354.461	1616.098	1928.274	2300.751	2745.179	3275.455
250	334.672	483.5952	698.7868	1009.735	1459.049	1753.886	2108.301	2534.335	3046.459	3662.07
300	338.7646	495.4953	724.7378	1060.04	1550.471	1875.143	2267.802	2742.685	3317.008	4011.597
350	342.264	505.7848	747.4296	1104.523	1632.222	1984.182	2412.037	2932.15	3564.416	4333.02
400	345.3245	514.8705	767.6596	1144.562	1706.515	2083.749	2544.372	3106.819	3793.598	4632.193
500	350.5	530.4193	802.6952	1214.736	1838.287	2261.408	2781.92	3422.239	4209.941	5178.949
600	354.7862	543.4716	832.5051	1275.255	1953.472	2417.754	2992.383	3703.584	4583.817	5673.255
700	358.4511	554.7574	858.5711	1328.769	2056.471	2558.346	3182.701	3959.428	4925.713	6127.816
800	361.6563	564.7228	881.8093	1376.937	2150.074	2686.724	3357.319	4195.293	5242.422	6550.91
900	364.5072	573.6614	902.8283	1420.871	2236.167	2805.297	3519.279	4414.977	5538.64	6948.29
1000	367.0766	581.7772	922.0547	1461.358	2316.097	2915.793	3670.766	4621.22	5817.772	7324.14
1500	377.1343	614.0949	999.9422	1628.225	2651.269	3383.167	4317.111	5508.874	7029.632	8970.203



附圖 3 K_h 與 $\tau_{s,c,max}$ (Pa) 對應關係圖