

# 國立交通大學

## 土木工程學系

### 碩士論文

使用小型沖蝕試驗探討

濁水對軟弱岩石磨蝕率的影響



Effect of sediment concentration on the abrasion rate of  
weak rocks by mini jet tests

研究生：林柏諭

指導教授：廖志中 博士

中華民國一〇二年七月

使用小型沖蝕試驗探討濁水對軟弱岩石磨蝕率的影響

Effect of sediment concentration on the abrasion rate of weak  
rocks by mini jet tests

研 究 生：林柏諭

Student：Bo-Yu Lin

指導教授：廖志中 博士

Advisor：Dr. Jyh-Jong Liao

國 立 交 通 大 學  
土 木 工 程 學 系  
碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年七月

# 使用小型沖蝕試驗探討濁水對軟弱岩石磨蝕率的影響

學生：林柏諭

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

台灣西部地區為本國人口主要集中區域，因此西部河川之河道上常建造許多人工構造物，以利民生需求。然而我國西部地區河川之河道護甲層下多為軟弱岩石，軟岩因固結作用不完全，具有膠結差，遇水軟化，及易受干擾等特性。當人工構造物如攔河堰興建後，使河道坡度改變，再當下游護甲層流失，及上游的礫石無法適時補充，則會造成原先覆蓋於護甲層之下的軟弱岩石出露，產生嚴重的沖蝕下切現象，而可能形成峽谷地形並經長期側蝕引致河岸邊坡不穩，而造成河道拓寬。

國內外過去對於軟弱岩石河道下切及側壁沖蝕的量測技術並不成熟，因此本論文將針對齊汝鴻(2012)，所改良適用於現地量測軟弱岩床及岸壁沖蝕量之小型沖蝕儀(Mini Jet)再進行改良，使之更適用於軟弱岩床的沖蝕量測，並進行一系列不同濃度濁水之室內及現地試驗，以探討濁水濃度對軟弱岩石磨石率的影響。

本研究，以 0.425-0.25mm, 0.25-0.150mm, 小於 0.15mm 等三種粒徑之細粒料，進行濃度 1000ppm(模擬常時水流濃度)、5000ppm(豪大雨時水流濃度)、10000ppm(颱風侵襲時水流濃度)的小型沖蝕儀室內濁水沖蝕試驗及清

水沖蝕試驗，探討顆粒粒徑及濁水濃度對於沖蝕率的影響，並於大漢溪、頭前溪、大安溪、大甲溪等流域尋找有岩盤出露的位置，施作現地原水試驗及濃度10000ppm試驗，並與室內試驗結果比較。本研究的試驗結果顯示，濁水濃度1000ppm的試驗平均沖蝕深度為0.24mm，與清水試驗的平均沖蝕深度為0.16mm，並沒有太大的差異。當濁水濃度提升至5000ppm及10000ppm時，平均沖蝕深度亦增加至0.34mm及0.46mm。由以上結果可推論，高濃度的濁水對於沖蝕量及沖蝕率的影響明顯，尤以模擬颱風侵襲時水流的高濃度試驗更是顯著。



關鍵字：軟岩河床、沖蝕率、濁水、泥沙粒徑、小型射流沖蝕試驗儀(Mini Jet)

Effect of sediment concentration on the abrasion rate of  
weak rocks by mini jet tests

Student :Bo-Yu Lin

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

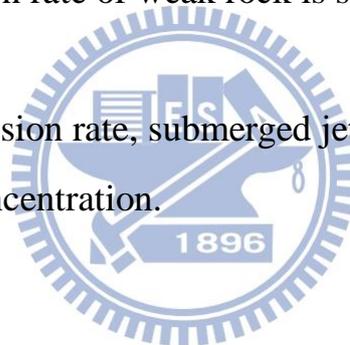
Western Taiwan is the mainly concentrated area of population. Hence, many artificial structures are built on the river to facilitate people's needs. However, the rivers in western Taiwan, are composed of weak rocks mostly under the armoring layer. Such rocks usually have poorly cemented characteristics, and can be easily weakened and vulnerable to erosion by water. After the artificial structures were built, such as weirs, changing the channel slope, losing the downstream armoring layer, and no gravel supplying from upstream occurred. The phenomena caused that the weak rocks beneath the armoring layer exposed and followed by serious incision and bank erosion. The occurrence may cause the damage of the river structures including bridges, weirs, embankment, etc.

In the past the measurement technology of river incision and bank erosion for weak rocks is not mature. Therefore this study aims to modify the Mini Jet (Ju-Hung Chi , 2012) to make it more suitable for weak bedrock erosion measurements.

To investigate the effect of sediment concentration on the abrasion rate of weak rocks by mini jet tests, a series of laboratory tests of mini jet is conducted in this thesis. Three types of particle size, 0.425-0.25mm, 0.25-0.150mm,

0.15mm less are used individually for preparing the testing turbidity water with concentration of 1000ppm), 5000ppm, 10000ppm Also, in situ mini jet tests were conducted at four different river using river water (1000ppm less) and 10000ppm turbidity water. The results of in situ test were compared with the laboratory test results. The results show that the average erosion depths for 1000ppm water and clean water are 0.24mm and 0.16mm, respectively. It indicates that the erodibility of river water with sediment concentration less than 1000ppm is low. However, When sediment concentration increases to 5000ppm and 10000ppm, the average erosion depth increases to 0.34mm and 0.46mm, respectively. The results can be inferred that the influence of sediment concentrations on the erosion rate of weak rock is strong.

Key words: weak rocks, erosion rate, submerged jet, Mini Jet, particle size, turbidity flow, sediment concentration.



## 誌謝

在撰寫這篇論文的期間，各種挑戰陪著我渡過了這段時光，雖然往往在夜裡難以成眠，但只要看到了成果的出現，就讓我像加滿油的車，再一次充滿動力。隨著論文的完成，我的學生生涯也暫且告一段落了。感謝廖志中 老師，在研究所的這兩年，對我的指導且時常提點我的不足，讓我能夠填補自己的缺點。感謝潘以文 老師，在我研究出現瓶頸時，總是給予我許多的建議，幫助我解決許許多多的問題。感謝兩位老師，能夠一次接受兩位老師的指導，這是多少同儕欣羨的，感謝老天讓我能夠進入潘廖這個大家庭。

感謝口試委員李德河 老師、黃燦輝 老師、吳建宏 老師、陳春宏 副所長花費寶貴的時間，提點我論文中的缺失，提共我修改的建議，讓我的論文能夠更加完善。

感謝學長姐明萬、慧蓉、國維、聰吉、偉欽、楚鈞、詩凰、耿豪、禹霆、汝鴻、志強、泓佑、前昱、潤翰、淵明，在學業上，在研究上，在人生道路上都給了我許多指導，謝謝你們！我愛潘廖！感謝我的同窗好友翊桓、伊婷、婉容、暉凱、靖哥、友誠、志峰，好多好多人，沒有你們，我不會這麼順利，此外感謝學弟建文、孝存、俊廷、浚偉、翊文、宥達，在我做實驗時助我一臂之力，及口試當天的協助，接下來就輪到你們表現了，祝福你們一切順利。

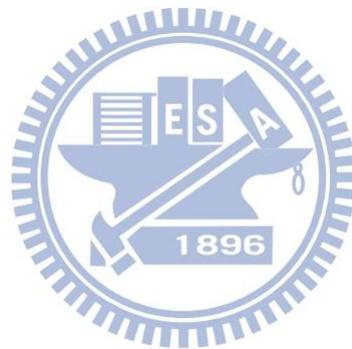
再來就是我的出遊天團：風雨無阻夾腳拖，我們一起作了好多永生難忘的事，為我的人生添加許多色彩！普攏共嘴砲團：土木黑幫，因為有你們，我嘴巴一刻不得閒，吵架永遠不會吵輸人，黑幫萬歲！！龍潭 MOMO 狗：從大學到研究所，每年我們都要一起到秘密基地爽玩一攤，說好了，

我們要一起玩一輩子！！板中棒球隊：一起在球場上揮灑汗水，這是我們與眾不同的友情！好多好多人，我真的謝不完了！

最後的感謝，我要留給我的家人，謝謝阿嬤、老爸、老媽、老哥、老姊，你們讓我能有一個健全、幸福的家庭成長，且在我求學期間，給了我許多的支持及鼓勵，讓我就算在疲累也有一個溫暖的家！感謝我的女友婷文，這些年來為我加油打氣，你的支持與鼓勵，給了我充沛的動力！

謝謝我的小黑狗，你的聰明淘氣，總能一掃我的焦慮！

很抱歉有許多人，我沒能一一述說我的感謝。請容許我在此獻上我最真心的感謝！謝謝大家！我愛你們！



# 目錄

摘要 .....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
誌謝 .....	V
圖目錄 .....	IX
表目錄 .....	XII
第一章、緒論 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
1.3 研究流程 .....	2
第二章、文獻回顧 .....	4
2.1 岩床河道沖蝕機制 .....	5
2.1.1 磨蝕沖蝕 .....	6
2.1.2 塊體抽離 .....	8
2.1.3 穴蝕沖蝕 .....	9
2.1.4 剝皮沖蝕 .....	10
2.1.5 懸浮載(suspended load)磨蝕底床行為 .....	11
2.1.6 岩盤沖蝕機制小結 .....	12
2.2 河道側壁沖蝕 .....	13
2.2.1 河道土質側壁破壞機制 .....	13
2.2.2 河道岩盤側壁破壞機制 .....	14
2.2.3 河岸沖蝕監測 .....	19
2.2.4 河道側壁沖蝕小結 .....	22
2.3 現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 試驗簡介 .....	23
2.3.1 Mini Jet 試驗功能與特性 .....	24
2.3.2 Mini Jet 儀器設備 .....	25
2.3.3 Mini Jet 基礎理論 .....	31
2.3.4 Mini Jet 試驗方法 .....	40
2.3.5 Mini Jet 沖刷深度量測方法 .....	42
2.3.6 Mini Jet 試驗簡介小結 .....	44
第三章、儀器設計改良與比較及試驗方法評估 .....	48
3.1 現有設備性用評估 .....	48
3.2 試驗儀器改良 .....	50
3.2.1 設計流程 .....	51
3.3 試驗方法改良 .....	52

3.3.1 粒徑大小及含泥量配置 .....	54
3.3.2 試驗粒料來源 .....	58
3.4 改良儀器組件與構造.....	60
3.4.1 Mini Jet 儀器構件設計.....	60
3.5 室內實驗試體製作 .....	79
第四章、改良 Mini Jet 之數據分析理論及其於濁水下軟岩沖蝕之試驗步驟	84
4.1 最大剪應力計算 .....	84
4.2 試驗規劃流程 .....	87
4.3 試驗儀器組裝及試驗步驟.....	93
第五章、實驗室及現地試驗結果與討論 .....	95
5.1 實驗室室內試驗 .....	95
5.1.1 室內試驗結果 .....	99
5.2 現地試驗 .....	110
5.2.1 大甲溪現地試驗.....	111
5.2.2 頭前溪現地試驗.....	116
5.2.3 大安溪現地試驗.....	121
5.2.4 大漢溪現地試驗.....	127
第六章、結論與建議 .....	132
6.1 結論.....	132
6.2 建議.....	133
參考文獻.....	i

## 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖 .....	3
圖 2-1 土石顆粒磨蝕岩床表面示意圖(Whipple, et al. , 2000) .....	6
圖 2-2 平溪四廣潭吊橋之壺穴 .....	7
圖 2-3 大安溪厚層砂岩受水流侵蝕所生成之流槽(flute) (經濟部水利署水利 規劃試驗所, 2008).....	7
圖 2-4 塊體抽離示意圖(Annandale, 1995).....	8
圖 2-5 節理延伸造成塊體抽離示意圖(Whipple, et al. , 2000) .....	8
圖 2-6 八掌溪水流衝擊或渦流造成的穴蝕.....	9
圖 2-7 剝皮法(peeling off)沖蝕示意圖(Bolleart, 2005).....	10
圖 2-8 剝皮法沖蝕發生於跌水沖刷示意圖(Bolleart, 2005).....	10
圖 2-9 各種數值模型模擬粒徑之沖蝕率分佈圖(Lamb, 2008) .....	11
圖 2-10 倒懸破壞之河岸邊坡(圖中白框處).....	15
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箭頭代表水流方向(有張力節理)(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 測量施作流程圖(林務局台東林區管理處, 2010).....	19
圖 2-16 沖刷釘量測示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2009).....	20
圖 2-1799/09/30 斷面 44 測量資料與 99/09/12LiDAR 掃描資料比較圖 .....	22
圖 2-18 Mini Jet 沖刷示意圖(Hanson et al.,2001).....	24
圖 2-19 土壤型 Mini Jet(USDA) .....	25
圖 2-20 軟岩型 Mini Jet(齊汝鴻, 2012).....	26
圖 2-21 加壓噴嘴 .....	26
圖 2-22 量測器(齊汝鴻, 2012) .....	27
圖 2-23 水壓計 .....	27
圖 2-24 壓克力水密盒(齊汝鴻, 2012).....	28
圖 2-25 金屬固定座(USDA) .....	28
圖 2-26 金屬固定座(齊汝鴻, 2012).....	28
圖 2-27 馬力 1/6HP 汙水泵浦(USDA).....	29
圖 2-28 馬力 1HP 汙水泵浦(齊汝鴻, 2012).....	29

圖 2-29 Mini Jet 側視示意圖(Hanson et al.,2001).....	30
圖 2-30 Mini Jet 俯視示意圖(Hanson et al.,2004).....	30
圖 2-31 Mini Jet 參數示意圖(Hanson et al.,2004).....	34
圖 2-32 由試驗數據所形成之雙曲線示意圖(Blaisdell et al.,1981).....	36
圖 2-33 現地實驗示意圖.....	41
圖 2-34 室內實驗示意圖.....	41
圖 2-35 噴嘴出水口為中心.....	43
圖 2-36 量測桿為中心.....	43
圖 2-37 量測桿伸出探頭.....	44
圖 2-38 試驗後所得之沖刷坑(齊汝鴻，2012).....	45
圖 2-39 現地試驗紀錄表格( Hanson et al.,2004).....	45
圖 2-40 Excel 巨集參數輸入頁面(Cook，1998).....	46
圖 2-41 試驗中沖刷坑深度與時間關係圖.....	46
圖 2-42 計算極限沖刷深度 $H_e$ 的 y-x 雙曲線關係圖.....	47
圖 2-43 Excel 巨集計算結果之頁面(Cook，1998).....	47
圖 3-1 岩盤因固定時的擾動產生裂縫(齊汝鴻，2012).....	49
圖 3-2 Mini Jet 土壤沖蝕之沖蝕坑.....	49
圖 3-3 Mini Jet 軟岩沖蝕之沖蝕坑.....	50
圖 3-4 室內試驗岩體剝離.....	51
圖 3-5 噴嘴類型(擷取至思沛雅噴霧器材有限公司網站).....	53
圖 3-6 噴霧角度(擷取至思沛雅噴霧器材有限公司網站).....	53
圖 3-7 台灣洪水期間河川泥沙粒徑分佈(經濟部水利署，2011).....	55
圖 3-8 頭前溪竹中大橋段河床底泥粒徑分佈曲線.....	57
圖 3-9 石門水庫淤泥.....	59
圖 3-10 過篩後之淤泥.....	59
圖 3-11 (1)固定底座上視及下視圖.....	61
圖 3-12 (1)固定底座側視圖.....	62
圖 3-13 (1)固定底座上部.....	62
圖 3-14 (1)固定底座下半部.....	63
圖 3-15 (2)可替針腳.....	63
圖 3-16 (3)可轉部側視圖.....	65
圖 3-17 (3)可轉部上視及下視圖.....	66
圖 3-18 (3)可轉部成品上部.....	67
圖 3-19 (3)可轉部成品下部.....	67
圖 3-20 (4)固定部設計圖(左為上視、中為側視、右為下視).....	68
圖 3-21 (5)弧形環片設計圖.....	68

圖 3-22 (4)固定部成品上部 .....	69
圖 3-23 (4)固定部成品下部 .....	69
圖 3-24 (3)可轉部、(4)固定部及(5)弧形環片成品組合 .....	70
圖 3-25 中空黃銅管設計圖(齊汝鴻，2012).....	71
圖 3-26 中空黃銅管(齊汝鴻，2012).....	71
圖 3-27 中空活動管及探測桿設計圖 .....	72
圖 3-28 中空活動管、探測桿及鐵尺組合(齊汝鴻，2012).....	72
圖 3-29(6)量測桿組合圖 .....	73
圖 3-30 (7)壓克力盒設計圖 .....	74
圖 3-31 (7)壓克力盒成品側視(箭頭指向處為螺牙) .....	74
圖 3-32 (7)壓克力盒成品底部 .....	75
圖 3-33 (8)室內用壓克力盒設計圖.....	76
圖 3-34 (8)室內用壓克力盒成品底部.....	76
圖 3-35 (8)室內用壓克力盒成品側視.....	77
圖 3-36 (9)反力架設計圖 .....	77
圖 3-37 (9)反力架成品 .....	78
圖 3-38 (9)反力架實際安裝狀況俯視.....	78
圖 3-39 (9)反力架實際安裝狀況側視.....	79
圖 3-40 試驗室體破壞.....	79
圖 3-41 原始岩塊 .....	81
圖 3-42 裁切完成試體.....	81
圖 3-43 裁切完成試體.....	82
圖 3-44 試體裝模及注入白蠟.....	82
圖 3-45 大型研磨機(吳禹霆，2012).....	83
圖 3-46 研磨完成之試體.....	83
圖 4-1 Moody Diagram( $R_e$ vs $C_f$ )(The Engineering ToolBox) .....	85
圖 4-2 螺桿、12 號螺帽.....	89
圖 4-3 12 號扳手 .....	89
圖 4-4 蓄水用水桶(齊汝鴻，2012).....	90
圖 4-5 Mini Jet 試驗系統(齊汝鴻，2012).....	90
圖 4-6 小型發電機(齊汝鴻，2012).....	91
圖 4-7 試驗用粒料 .....	91
圖 4-8 手持式電動鑽機(齊汝鴻，2012).....	92
圖 4-9 手持式電動砂輪機.....	92
圖 4-10 橡膠槌 .....	93
圖 4-11(室內試驗實際狀況) .....	94

圖 5-1 齊汝鴻(2012)岩心室內試驗(齊汝鴻，2012).....	96
圖 5-2 齊汝鴻(2012)岩心室內試驗.....	96
圖 5-3 齊汝鴻(2012)岩塊室內試驗(齊汝鴻，2012).....	97
圖 5-4 本研究室內試驗.....	97
圖 5-5 本研究室內試驗.....	98
圖 5-6 本研究室內試驗-試體表面全圖.....	98
圖 5-7 湖山水庫岩塊粒徑分析資料.....	99
圖 5-8 濃度與沖蝕率關係圖(過 40 號篩).....	102
圖 5-9 濃度與沖蝕率關係圖(過 60 號篩).....	104
圖 5-10 濃度與沖蝕率關係圖(過 100 號篩).....	106
圖 5-11 濃度與沖蝕率關係圖(Mix).....	108
圖 5-12 濃度與沖蝕率關係圖(綜合比較).....	109
圖 5-13 大甲溪現地試驗位置(google earth).....	111
圖 5-14 大甲溪現地試驗狀況.....	112
圖 5-15 頭前溪現地試驗位置(google map).....	116
圖 5-16 頭前溪現地試驗狀況.....	117
圖 5-17 大安溪大峽谷現地試驗位置(google map).....	121
圖 5-18 大安溪大峽谷現地試驗狀況.....	122
圖 5-19 大安溪現地側壁沖蝕試驗.....	126
圖 5-20 大安溪現地側壁沖蝕試驗.....	126
圖 5-21 大漢溪現地試驗位置(google map).....	127
圖 5-22 大漢溪現地試驗狀況.....	128
圖 6-1 齊汝鴻(2012)現地試驗結果(齊汝鴻，2012).....	133

## 表目錄

表 3-1 懸浮載粒徑分佈建議.....	55
表 3-2 Mini Jet 試驗濃度與粒徑配置.....	56
表 3-3 頭前溪竹中大橋段河床底泥粒徑分佈資料.....	57
表 3-4 試驗所需土重.....	58
表 3-5 Mini Jet 改良構建表.....	60
表 4-1 材料強度參數對照表(The Engineering ToolBox).....	86
表 5-1 未飽和試體試驗結果.....	100
表 5-2 清水試驗結果(飽和試體).....	101
表 5-3 通過 40 號篩各濃度試驗結果(飽和試體).....	102

表 5-4 通過 60 號篩各濃度試驗結果(飽和試體).....	104
表 5-5 通過 100 號篩各濃度試驗數據(飽和試體).....	106
表 5-6 模擬現地泥砂粒徑各濃度試驗數據(飽和試體).....	108
表 5-7 大甲溪石岡壩試驗結果.....	112
表 5-8 大甲溪石岡壩試驗照片.....	113
表 5-9 大甲溪石岡壩試驗沖蝕深度.....	114
表 5-10 頭前溪試驗結果.....	117
表 5-11 頭前溪現地試驗照片.....	118
表 5-12 頭前溪試驗沖蝕深度.....	119
表 5-13 大安溪大峽谷現地試驗結果.....	122
表 5-14 大安溪大峽谷現地試驗照片.....	123
表 5-15 大安溪大峽谷試驗沖刷深度.....	124
表 5-16 大漢溪現地試驗結果.....	128
表 5-17 大漢溪現地試驗照片.....	129
表 5-18 大漢溪試驗沖蝕深度.....	130



# 第一章、緒論

## 1.1 研究動機

我國西部地區為人口主要集中區域，因此西部河川之河道上常建造許多人工構造物，以利民生需求，這些人工構造物如攔河堰興建後，促使河道坡度改變，當下游護甲層流失時，上游的礫石無法適時補充，造成原先覆蓋於護甲層之下的軟弱岩石出露，此類岩石具有膠結不佳、遇水易軟化等特性，容易產生嚴重的沖蝕現象，因此台灣西部河川之岩質河床有部分因為河岸的側蝕造成河岸邊坡不穩，而造成河道拓寬。部分河道甚至出現嚴重之沖蝕下切現象，河床面快速降低形成峽谷地形，進而影響跨河構造物之穩定性，甚至危害到人民生命與財產之安全。此外河道的側壁岩盤亦受到水流劇烈沖蝕，引致岸壁破壞、退縮，影響堤防安全。

國內外過去對於河道下切及側壁沖蝕導致邊坡不穩的量測技術並不成熟，且多數無法求得邊坡破壞之臨界側蝕量，因此將針對齊汝鴻(2012)，所開發之軟岩型 Mini Jet 作改良，使其能更有效應用於軟弱岩石的沖蝕試驗。

## 1.2 研究目的

因災害頻傳，國內近年對於岩石河岸、河床的河道沖蝕治理更加重視，然而軟弱岩石、岩壁沖蝕相關研究並不多見。現階段的研究大多以多時期河床測量結果建立沖蝕率模式供河道變遷數值模擬採用，除了交通大學郭

炳宏(2010)建立了室內多功能軟岩沖蝕試驗儀，可以決定軟弱岩石的磨蝕數率及齊汝鴻(2012)改良小型沖蝕試驗儀可用於現地決定軟弱岩石的磨蝕阻抗及磨蝕率外，國內並不存在利用試驗儀器已決定前述磨蝕參數相關研究。齊汝鴻(2012)成功的將原本被應用於現地土壤沖蝕率量測的 Mini Jet，改良為可應用於軟岩河道沖蝕的現地量測，然而齊汝鴻(2012)對於考慮實際軟弱岩石河床磨蝕破壞條件並不週全，僅進行清水的試驗，忽略 Whipple, et al(2000)提及水流中的懸浮載，對於岩床磨蝕的影響，因此本研究將針對此點，發展符合軟弱岩石河床磨蝕破壞條件之試驗方法。

### 1.3 研究流程



本研究共分六章，第一章介紹研究動機、研究目的與研究流程如圖 1-1。第二章文獻回顧，彙整河道沖蝕破壞機制及 Mini Jet 基本理論及試驗方法。第三章針對現有之設備作可行性評估，及介紹參考齊汝鴻(2012)所提出之建議所改良的儀器。第四章介紹 Mini Jet 的試驗規劃、室內試驗方法、現地實驗方法。第五章說明試驗成果，並對室內實驗及現地實驗結果進行討論。第六章歸納本研究之結果並提出未來發展及改良之建議。

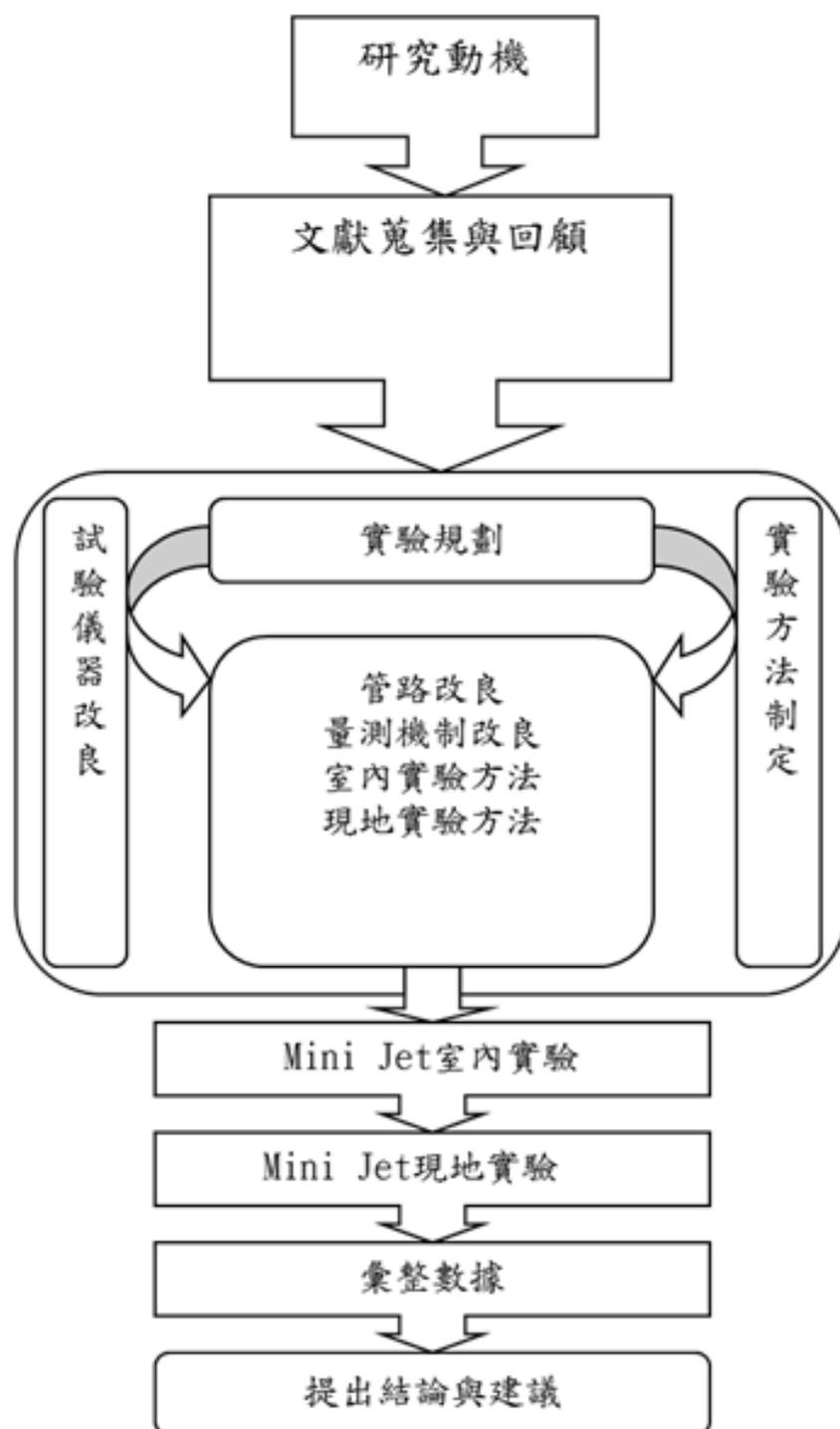


圖 1-1 研究流程圖

## 第二章、文獻回顧

台灣西部河道護甲層下多為軟弱岩石，軟岩因固結作用不完全，具有膠結差，遇水軟化，及易受干擾等特性，若護甲層流失(採砂或沖刷造成)，且因地形改變、或跨河構造物等因素改變了河道坡度，上游的礫石無法被攜帶至下游而使裸露的軟弱岩質河床產生嚴重的岩床沖蝕現象。因此台灣西部河川之岩質河床部分河道出現嚴重之沖蝕下切現象，促使河床面快速降低形成峽谷地形，進而影響跨河構造物的穩定性，此外河道的側壁岩盤亦受到水流劇烈沖蝕，引致岸壁破壞、退縮，影響堤防安全。而河床下切及側壁沖蝕可能引致橋墩基礎裸露破壞、堤防破壞、攔河堰破壞等，上述問題均為需要面對之問題。本論文主旨在參考齊汝鴻(2012)所提出之建議進一步改良美國農業部(USDA)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)，使之更適用於軟弱岩床磨蝕試驗。

本章將對沖蝕機制，沖蝕特性，及河道側壁沖蝕之國內外文獻進行文獻回顧，以及整理現地小型射流沖蝕試驗儀(Mini Jet)的基礎理論、實驗特性、現地實驗方法及儀器設備，探討提升其應用於軟弱岩石沖蝕試驗的能力的方法。

## 2.1 岩床河道沖蝕機制

岩床河道沖蝕是眾多複雜的條件交互作用下所造成的結果，包含地質、地形、塊體板塊運動、河道水文水理、河道輸沙、及氣候條件等等，國外目前對於河道沖蝕現象的分類及其對沖蝕速率的影響雖然已有甚多探討，但主要仍以從巨觀尺度的地形變遷作為出發點(Howard et al., 1994; Sklar and Dietrich, 2004; Whipple, et al., 2000; Wohl, 1998)。然而此類文獻甚少以工程觀點進行沖蝕機制的探討，尤其以軟弱岩床的資料更是缺乏。

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塊體抽離(plucking)、磨蝕(abrasion)、穴蝕(cavitation)及剝皮沖蝕(peeling off)等四類。而本研究中 Mini Jet 的理論基礎是依照磨蝕機制來作沖蝕量的估算。

Foley(1980)將磨蝕定義為水中的顆粒與岩床作用所形成，而磨蝕又可區分為河床載(bed load)磨蝕及懸浮載(suspended load)磨蝕兩類，其中河床載磨蝕可依照顆粒撞擊岩床時之角度作區分，分別為低角度之切削磨損(cutting wear)及高角度的變形磨損 (deformation wear)。本研究中將在試驗過程加入細粒料，磨蝕侵蝕的主要粒料為懸浮載，故本節將針對懸浮載磨蝕底床行為作回顧。

### 2.1.1 磨蝕沖蝕

大部分以磨蝕為主要侵蝕機制的河道常發展出明顯且穩定的不規則地形，這一類地形易使水流產生漩渦，加快磨蝕破壞及穴蝕作用的發展，而岩床上逐漸產生流槽(flute)與壺穴等沖蝕構造，且一旦流槽與壺穴形成，明顯的正向反饋機制起作用後，進而加強穩固水流中的漩渦，使得懸浮載顆粒對河床的磨蝕更加劇烈。

圖 2-1 為磨蝕沖蝕示意圖 Whipple, et al.(2000)所提出，示意圖的簡譯為河道中一凸起的岩床，其前緣受到河床質顆粒((bed load))撞擊造成侵蝕，而水流因受到岩床面凸起的擾動，於岩床的下游側產生紊流形成壺穴(potholing)，且凸起的表面亦會造成流槽(fluting)，如圖 2-2、圖 2-3。

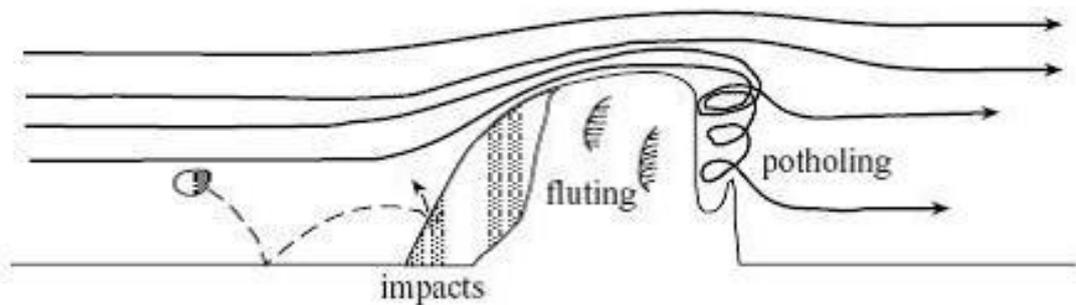


圖 2-1 土石顆粒磨蝕岩床表面示意圖(Whipple, et al. , 2000)



圖 2-2 平溪四廣潭吊橋之壺穴



圖 2-3 大安溪厚層砂岩受水流侵蝕所生成之流槽(flute) (經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)

### 2.1.2 塊體抽離

無論厚層或薄層之層狀岩石皆可能因解壓或侵蝕，促使節理發展進而造成岩石塊體鬆脫而發生抽離的現象。

Annandale(1995)以岩層與河流流向呈逆向的狀況說明塊體抽離之過程，如圖 2-4，岩塊抽離的過程可分為三個階段，依序為頂開、移出、脫離。

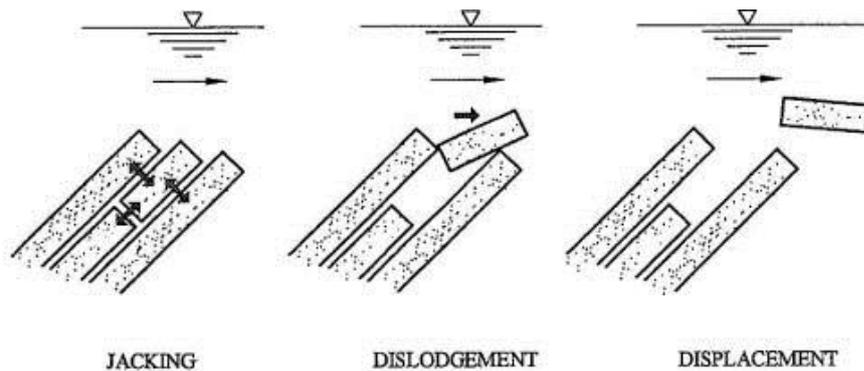


圖 2-4 塊體抽離示意圖(Annandale, 1995)

Whipple, et al.(2000)則以圖 2-4 說明岩塊抽離的現象。圖 2-5 顯示當岩盤遭受水流攻擊，使得原本就存在的微小裂縫因水流沖擊及顆粒撞擊令既有之節理延伸、擴張，當節理連貫時，造成塊體孤立，再由水流拖曳及裂縫中之水壓將塊體上舉脫離。

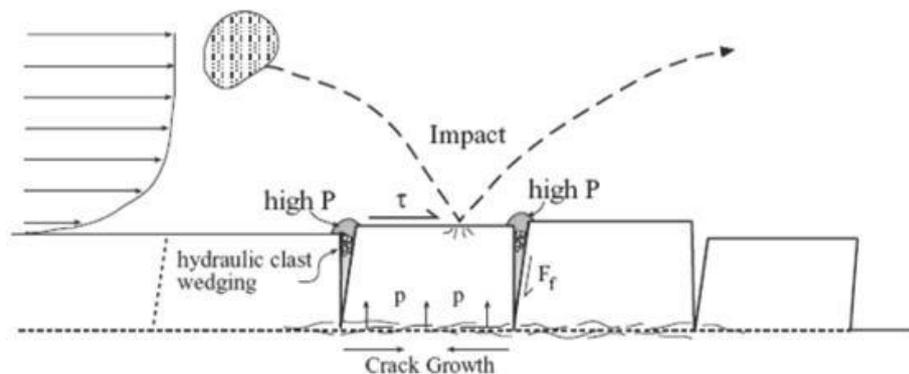


圖 2-5 節理延伸造成塊體抽離示意圖(Whipple, et al., 2000)

### 2.1.3 穴蝕沖蝕

穴蝕沖蝕的主要成因是當河道存有障礙物或階梯狀落差時，不規則的地形造成局部區域的流況變化，容易產生渦流，當渦流加劇時即可能發生穴蝕(圖 2-6)。穴蝕現象常見於大壩溢洪道及輸水隧道，對於工程領域是熟悉的狀況，但穴蝕現象於自然界河道中所扮演的角色並不明確。目前初步認定當水流中有渦流的形成，穴蝕現象會強化懸浮載對河床的沖蝕效應。



圖 2-6 八掌溪水流衝擊或渦流造成的穴蝕

### 2.1.4 剝皮沖蝕

Bollaert(2005)以圖 2-7 首先提出剝皮沖蝕一詞。如圖 2-7 所示，水流流過水平節理發達的河床，會一層一層的將河床表面的小岩塊帶走，此作用稱作剝皮沖蝕。

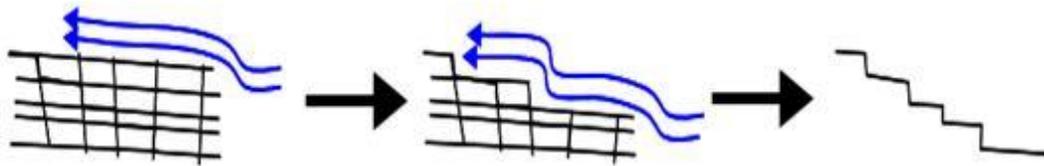


圖 2-7 剝皮法(peeling off)沖蝕示意圖(Bolleart, 2005)

Bolleart 認為跌水作用下會有剝皮沖蝕狀況發生，且跌水之上下游側皆有可能出現剝皮沖蝕，而跌水會造成周遭之水流不斷循環，加劇岩盤破壞，如圖 2-8 所示。Bolleart 將此沖蝕型態用於解釋前述地質條件溢洪道下游沖刷坑的形成。

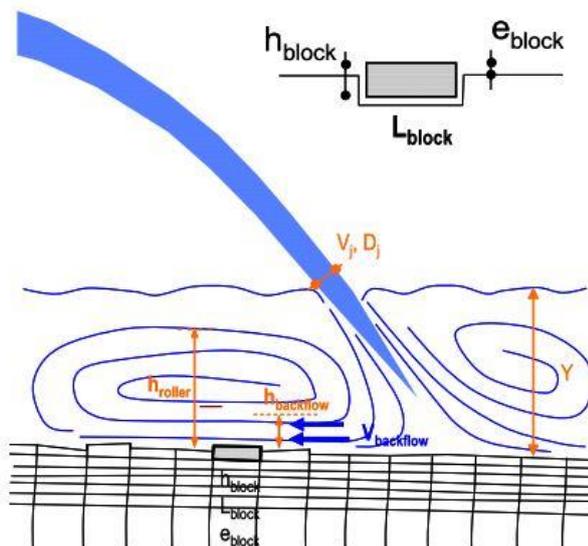


圖 2-8 剝皮法沖蝕發生於跌水沖刷示意圖(Bolleart, 2005)

### 2.1.5 懸浮載(suspended load)磨蝕底床行為

當河床底部流況不穩定時，常因床載沉積、底床地形等因素產生渦流，使原本沉積的床載再次被帶動形成懸浮載，且可能因流況的改變再一次沉積。因懸浮載的顆粒細小，因此 Sklar & Dietrich (2004)提出懸浮載磨蝕底床的模式為，在搬運過程中可長時間懸浮於水流中，但隨水流流動而下沉並磨蝕底床，而在此一動作反覆作用下，而造成底床磨蝕的現象。

Lamb(2008) 對於懸浮載於河床中的磨蝕行為與濃度分佈相關，並透過實驗數據證明當粒料粒徑小於 0.4mm 時，亦會有磨蝕現象產生。

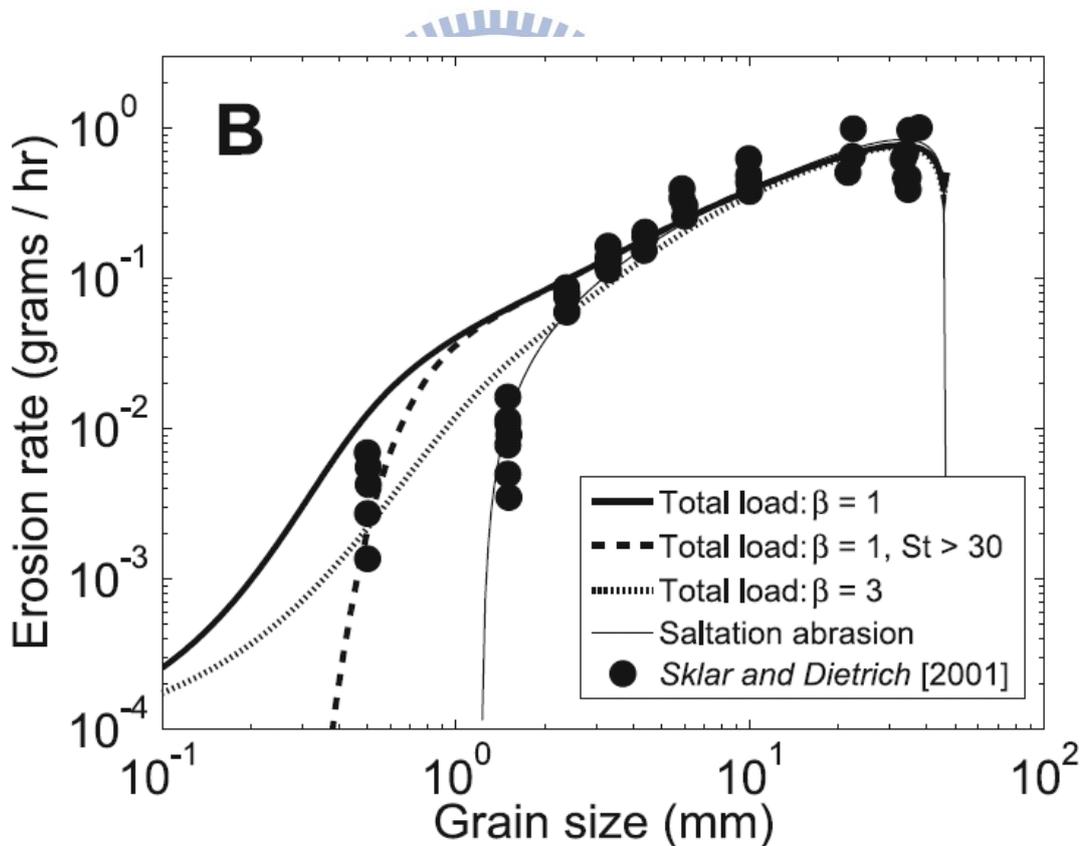


圖 2-9 各種數值模型模擬粒徑之沖蝕率分佈圖(Lamb, 2008)

### 2.1.6 岩盤沖蝕機制小結

Whipple et al. (2000) 由調查一系列不同的地質條件、流域面積、河床坡度的河床沖蝕現象，提出岩石河床的沖蝕機制，歸納出磨蝕沖蝕、塊體抽離、穴蝕沖蝕等三種機制，造成岩盤沖蝕的條件眾多，其中又以地質條件為控制岩盤沖蝕機制的眾多因素中最為重要的一環，地質條件包含岩性、弱面間距、節理、層面等。當岩床屬完整岩盤亦或是弱面間距大時，岩床沖蝕主要透過懸浮載及河床載與岩床作用，或是水流造成岩盤表面之剪應力提高，帶走岩石膠結之顆粒，此時磨蝕沖蝕為可能之沖蝕機制。當岩石強度，遠大於節理強度且節理間距在 1m 之內時，水流之作用主要集中在裂隙中，此時塊體抽離(plucking)常為主控沖蝕之機制。穴蝕現象在河道中所扮演的腳色尚不完全明確一般認為穴蝕在強烈的渦流產生時，加劇了懸浮載對沖蝕的影響，使局部沖蝕作用更加顯著。剝皮沖蝕則為水平節理發達之岩體受到水流衝擊後產生均勻的裂隙，而渦流帶走岩盤表面之岩石碎屑。

## 2.2 河道側壁沖蝕

河岸沖蝕是調整河道寬道、曲折及傾斜角度的重要機制，也是一種能夠將攜帶上游所產生的沉積物，將其帶往下游的行為，為天然地貌改變的過程，發生在所有的河道。雖然與河岸侵蝕相關的數值模擬及岸壁侵蝕模型的研究已有許多，但要能精確預估河道改變狀況仍然不易。

河岸受到侵蝕後所產生的沉積物為周圍的動植物創造了棲息空間提升了生態多樣性，然而在許多情況下，河岸侵蝕導致土地流失，產生了資源管理的問題，甚至沉積物的產生造成下游淤積，促成河川氾濫的問題。(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

河道側壁破壞嚴重影響到岸壁邊坡安全性，一般側壁破壞的因素有許多，如水力、風力、人為等。但本節主要探討的為 Watson et al., 2006 所提出的兩類：(1)岸壁下因水位上下移動使水壓變化而造成的側蝕(2)大規模的邊坡滑動、崩塌破壞。兩類的共通點在於，皆為水流作用力在岸壁坡趾進行作用，最終因自體重量而引起大規模破壞。

水壓力在此以剪應力的形式對岸壁坡趾，重覆掏刷，使其向內退縮，岸壁失去底部支撐的力量即形成崩落，造成河道拓寬。側壁破壞亦可從材料性質的觀點討論。Terzaghi & Peck(1967)指出，材料性質可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邊坡，對深度而言，

剪力增加比剪應增加量大，使得臨界破壞面多發生在淺層，相反的，具凝聚性材料的河岸邊坡，剪力增量較剪應力增量小，使得臨界破壞面常位於側壁深層處。

此外，表面坡度的陡峭程度才是影響破壞面形式的主控因素，當表面之坡度角小於 60 度時，邊坡破壞面為圓弧形滑動，若為極陡峭之邊坡則屬平面滑動。其穩定性可依破壞形式，藉由邊坡的抗滑力、阻抗及側向水壓計算抗滑力及下滑力來計算河岸邊坡破壞的可能性。(張恩源，2003)

### 2.2.2 河道岩盤側壁破壞機制

以國內軟弱岩石沖蝕狀況嚴重之溪流大安溪為例，根據交通大學執行水利署研究計畫成果報告(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)內容指出，大安溪下游河岸側壁的主要破壞機制為：(1)倒懸破壞(overhang)(圖 2-10)、(2)趾部破壞(undercutting)(圖 2-11)。

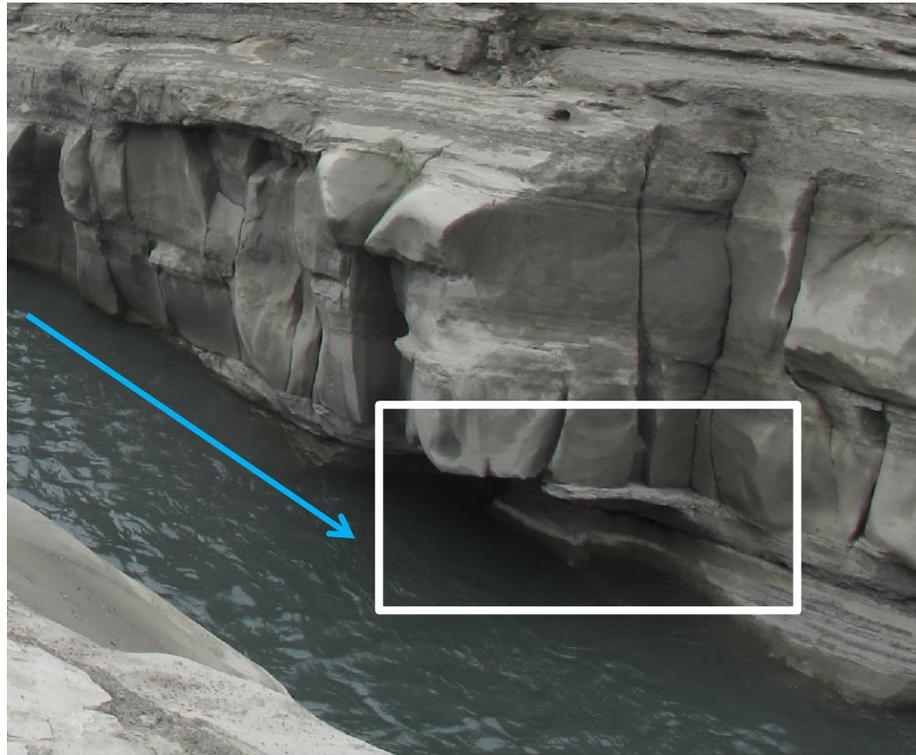


圖 2-10 倒懸破壞之河岸邊坡(圖中白框處)



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)

當邊坡受到側刷而倒懸的岩塊，可視為一懸臂樑構造，因此邊坡受到倒懸岩塊自重影響而產生的彎矩、剪力、以及內部應力而有不利的影響。

坡面無張力裂縫時其倒懸破壞機制如圖 2-12。

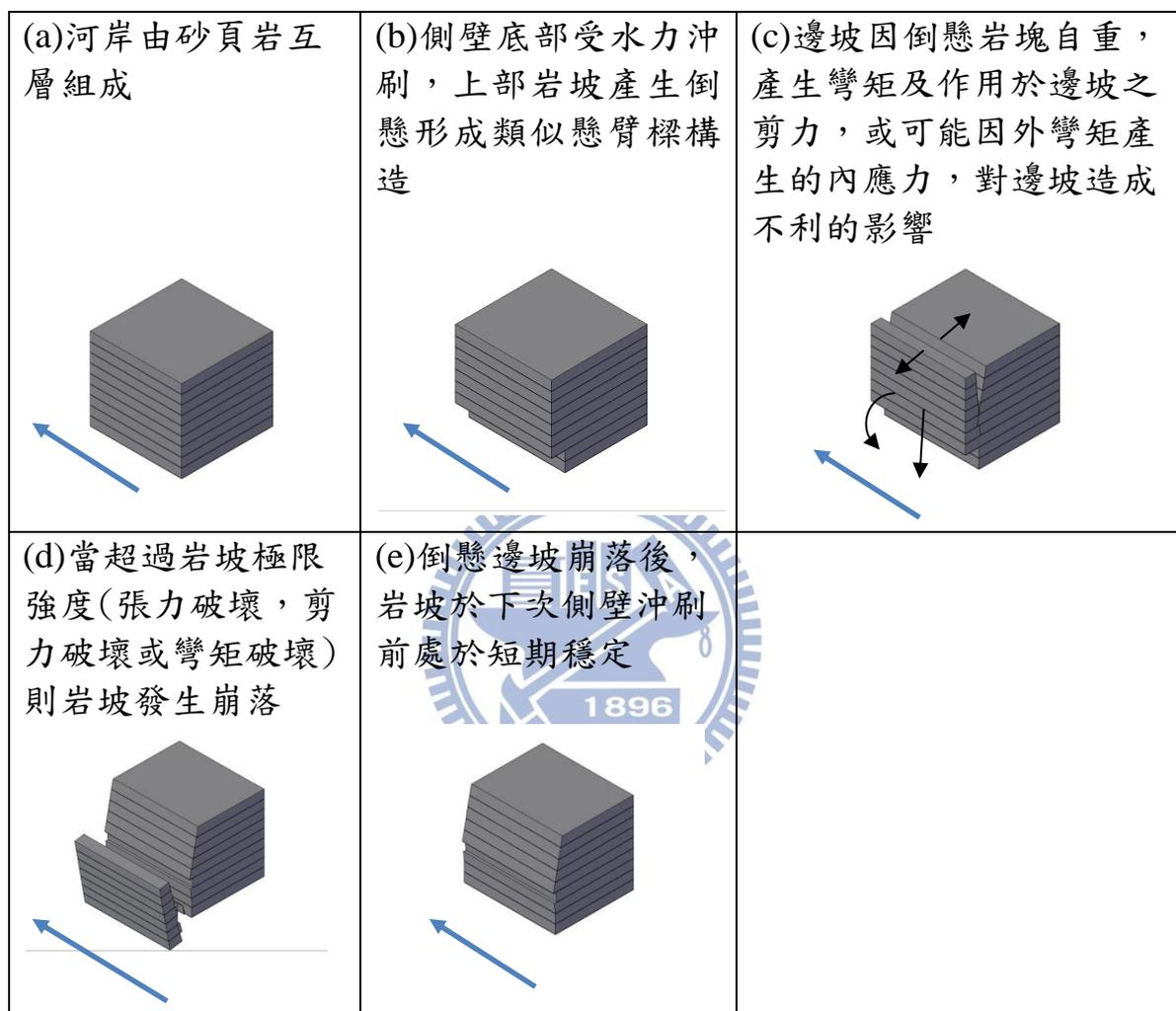


圖 2-12 倒懸破壞機制示意圖箭頭代表水流方向(無張力節理)(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

部分邊坡因解壓或收到 921 地震擠壓影響，出現平行河道之節理，岸壁受張力節理存在與否影響，河岸側壁受到側刷後產生不同類型的倒懸破壞行為，破壞機制如圖 2-13。

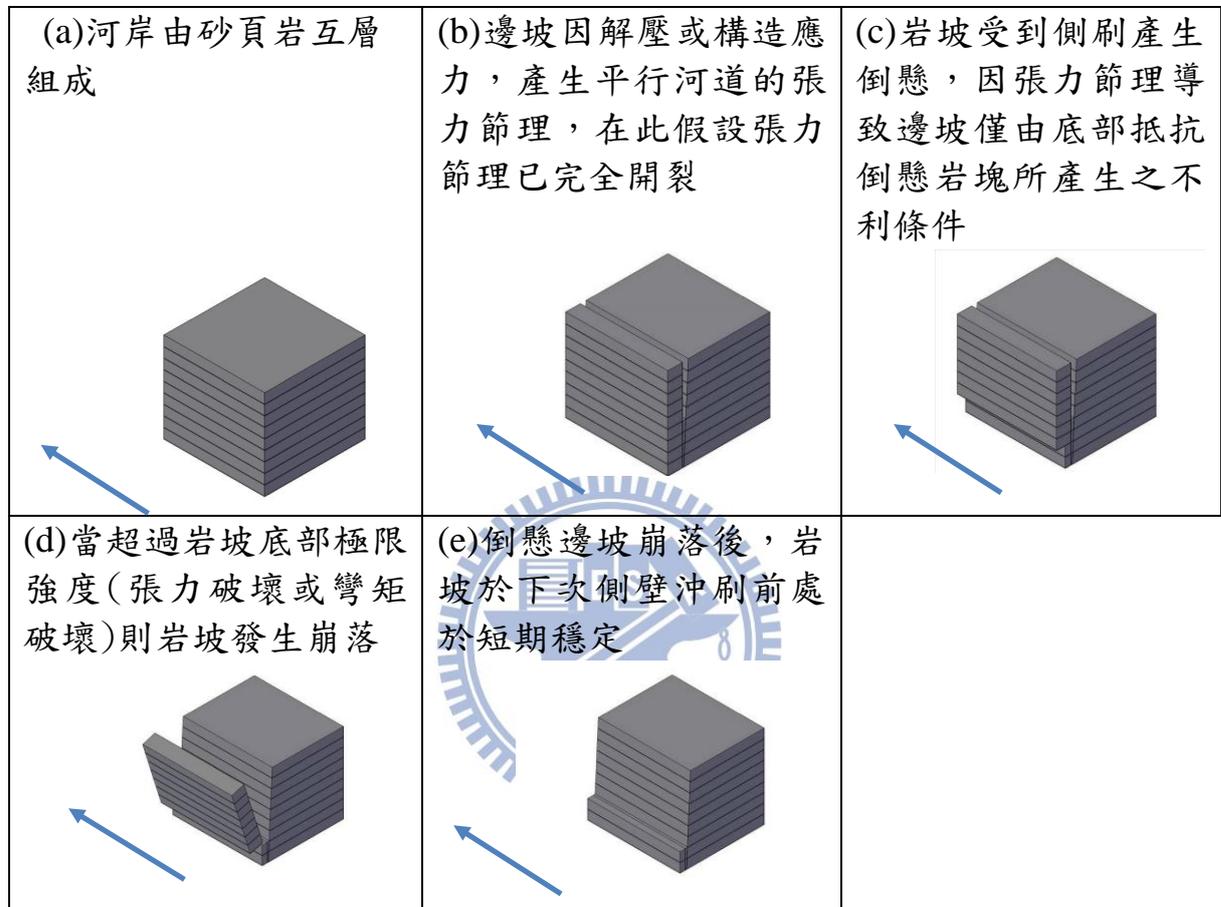


圖 2-13 倒懸破壞機制示意圖箭頭代表水流方向(有張力節理)(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

在水位面附近的岸壁因收到側向侵蝕作用後導致上部岩層出現倒懸破壞，當側向侵蝕規模持續增加，造成趾部切除，導致岩坡產生出露(daylight)，則可能有平面滑動之虞，圖 2-14 為趾部破壞導致平面滑動破壞之機制

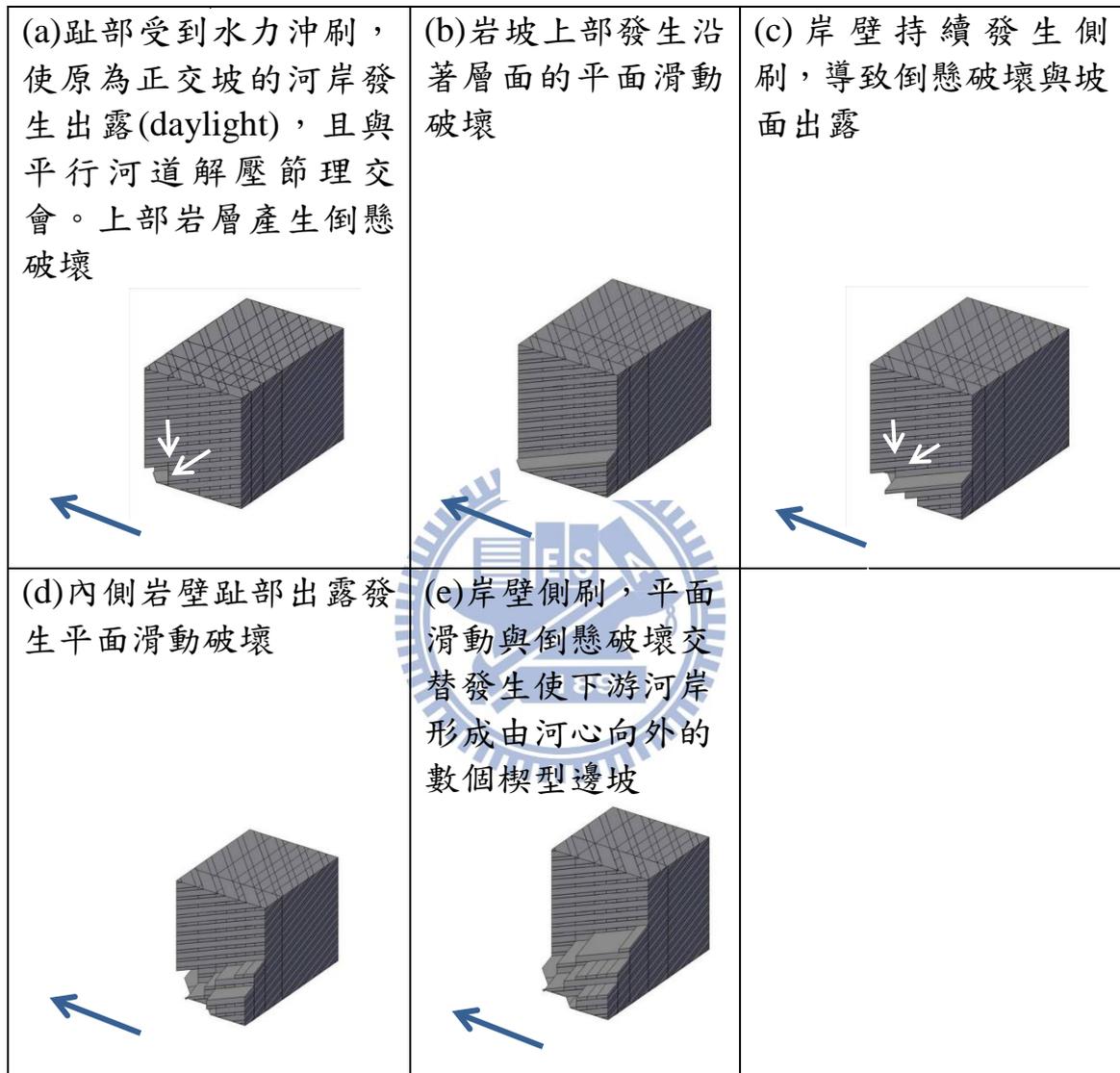


圖 2-14 趾部破壞機制示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2010)

以上的破壞行為，皆因河道側蝕所致，因此如要做出合理的河岸穩定性評估，必須對河岸邊坡作幾何、力學性質及臨界側蝕量的分析，因此若能求得準確度高的側蝕量，對於河岸穩定性評估有很大的幫助。

### 2.2.3 河岸沖蝕監測

傳統上，對河岸侵蝕的量測可分為地面量測及空中攝影兩種，地面監測通常使用的方法為斷面量測，斷面量測的施作流程如圖 2-15，其測量方法的選定可參考控制點之建立，除採用傳統測量工具進行控制點座標引測，亦可採用最新網路 RTK 作業方法(VRS)，增加控制點做為多餘觀測量，可作為座標轉換時之檢核驗證。在控制點不易取得或引測距離過長且地形複雜之地點，可選用全球衛星定位系統(GPS)之靜態定為量測方法進行控制點座標量測，短時間內即可獲得測量控制點之絕對座標，供地形測量工作推展之參考基準，解決因參考控制點引測作業費時而致使工作進度不易推展的問題，或採用全測站雷射測距儀(Total Station)，可依愈施測地點之便利性及安全選取合適之模式測量(林務局台東林區管理處，2010)。

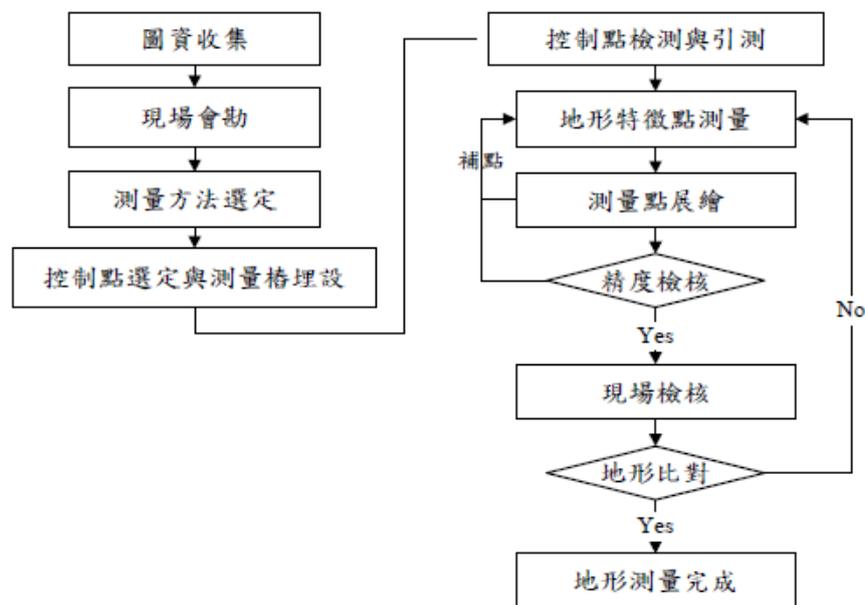


圖 2-15 測量施作流程圖(林務局台東林區管理處，2010)

交通大學防災工程研究中心於民國 98 年提出於河道上選取特定地點佈設沖刷釘數支，並定期量測，其施作方法為，於河道上選取表面較平滑、流速穩定的岩床，釘入深度 15 公分之沖刷釘，記錄隨著時間沖刷釘周圍岩盤高程的變化，量測方法如圖 2-16，得到岩床受水流磨蝕之沖蝕速率，此法可得到沖時速率並推估該區之沖刷量以估計河道沖刷狀況(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)。透過量測沖刷釘所取得的資料，得到過去難以取得的現地沖蝕資料，但礙於沖刷釘量測容易受到現地狀況侷限，且豐水期沖刷釘固定點容易破壞，或是退水後的淤積，都影響其數據的準確性。因此空中攝影亦被廣泛應用在河道沖蝕量測。

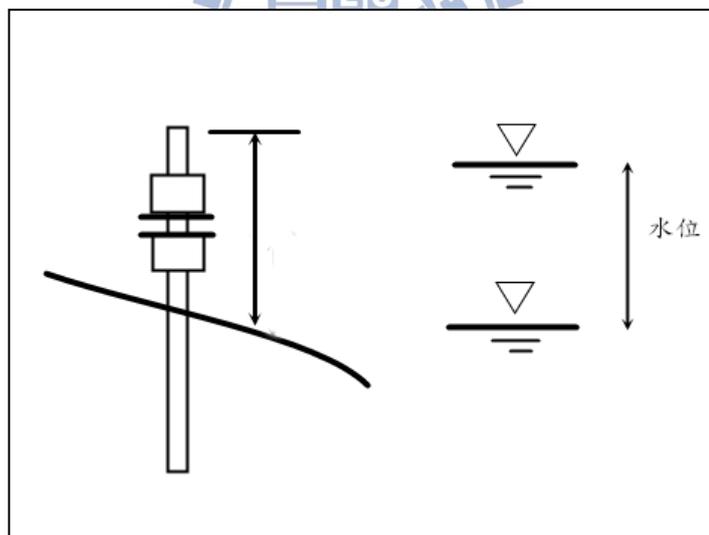


圖 2-16 沖刷釘量測示意圖(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)

空中攝影於河岸沖蝕監測最被廣泛應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)、測深光達(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)。因空載光達具備有高精度、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。並可產製高精度高解析度之數值地形模型，作為監測河道側壁變化之工具(徐偉城，2007)。

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使地形高程測量作業快又精確。

航空照片的優點是能夠記錄地面完整資訊，並可加以製作立體影像，提供空間上的高程變化，獲取河岸沖蝕的資料，並與斷面測量所獲得之資料比較提高河岸沖蝕監測的精確性如圖 2-17。

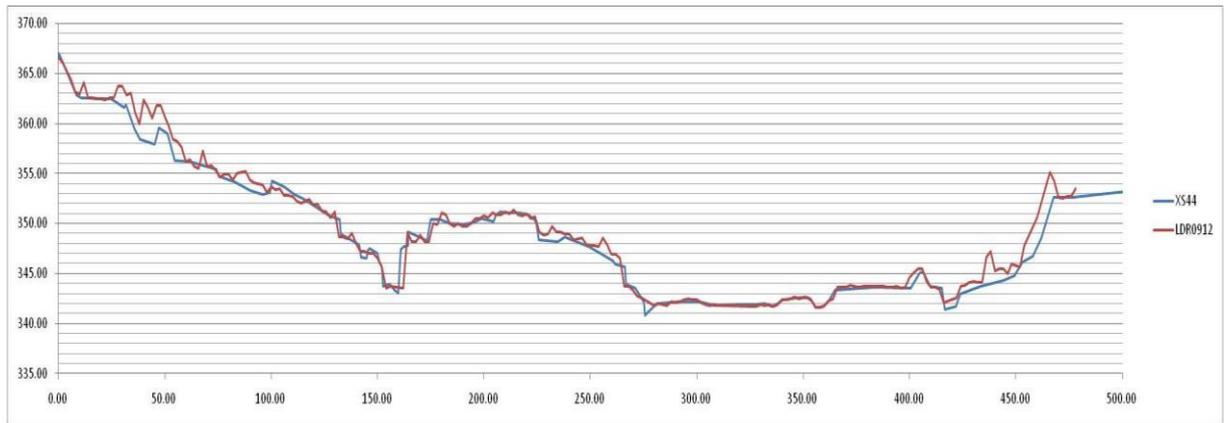


圖 2-17 99/09/30 斷面 44 測量資料與 99/09/12LiDAR 掃瞄資料比較圖

(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)

#### 2.2.4 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)。

要同時考慮以上所有因素作為影響參數已建立側蝕率或河道擴寬模式並不容易，故需要藉由各種不同的實驗室試驗及現地射流試驗等，利用實驗結果進行分析，並配合一維、二維的動床模式、輸沙模式及水理模式來建立沖蝕模型，搭配長期的影像監測，以斷面變化作分析，為目前對於河道側壁沖蝕的主要研究方向。

因此本研究參考國內外與河道沖蝕有關文獻，探討河道沖蝕所需之參數，配合實驗結果計算求得側蝕率，為本研究最終目的。

## 2.3 現地小型射流沖蝕試驗儀 Mini Jet 試驗簡介

潛沒式射流試驗在過去主要被運用於室內試驗，如 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，用於界定臨界剪應力，直至 90 年代才逐漸被發展應用在現地試驗，並由 Hanson(1990)發展出用於土壤現地的潛沒式射流試驗。藉由水壓力及臨界剪應力，估計極限沖刷深度的形成，及利用潛沒式圓形射流的擴散原則和相對應之沖刷量求取土壤的沖蝕係數(Stein et al.,1997)。

然而在過去 Mini Jet 只運用在土壤沖刷試驗上，於齊汝鴻(2012)將其改良為可運用於軟弱岩石之現地沖蝕試驗。

本節將針對 Mini Jet 的試驗特性、儀器設備、基礎理論、現地試驗之方法及 Mini Jet 土壤沖刷型及軟岩沖蝕型的比較，進行文獻回顧。

### 2.3.1 Mini Jet 試驗功能與特性

Hanson et al.(1997)提出 Mini Jet(圖 2-18)做為現地土壤沖蝕率量測之儀器。由圖 2-18 可看出 Mini Jet 之出水口位置於水位面以下，可知 Mini Jet 乃是以模擬潛沒式射流的方式進行沖蝕試驗。

圖 2-18 中之 head 為水頭高，即為外部水位面與管路內水位面等高時之壓力，用以計算出口流速。並以此計算核心流(potential core)內剪應力  $\tau_0$ 、有效剪應力  $\tau_e$ 、臨界剪應力(剪應力阻抗) $\tau_c$ 。

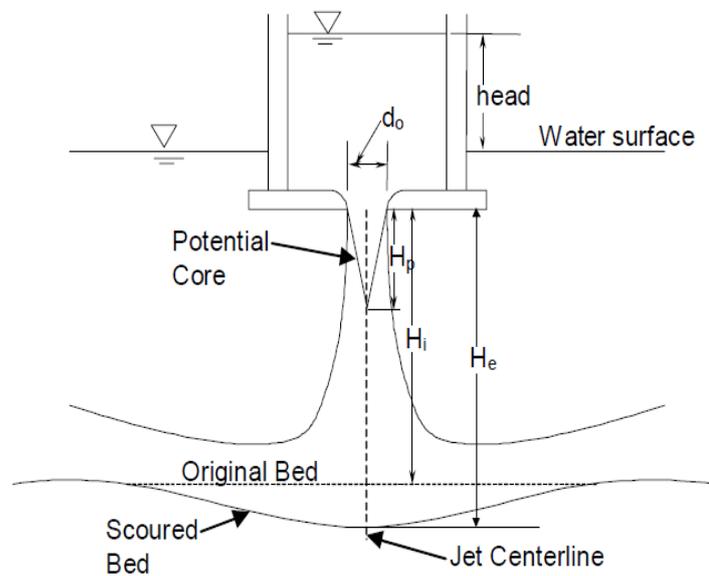


圖 2-18 Mini Jet 沖刷示意圖(Hanson et al.,2001)

Mini Jet 是以垂直射流的方式，對土壤進行長時間的沖蝕作用，使其達到極限沖刷深度。Blaisdell et al.(1981)針對凝聚性砂土的研究，欲使其達到極限沖刷深度所需時間為十四個月以上。若要利用 Mini Jet 於現地進行試驗使其達到極限沖刷深度，實屬不易。因此，透過適當的理論及合理的假設，

依 Mini Jet 在短時間內進行沖蝕試驗所得之結果估算沖蝕率及極限沖刷深度，詳細計算過程於 2.3.3 節詳談。

### 2.3.2 Mini Jet 儀器設備

本節中將會對兩款分別運用於不同狀況下之小型現地沖蝕儀進行介紹。Mini Jet，可分為土壤型(圖 2-19)由美國農業部(USDA)所提供及軟岩型(圖 2-20)由齊汝鴻(2012)參照美國農業部所提供之原型加以修改使其可運用於軟弱岩石之改良款。



圖 2-19 土壤型 Mini Jet(USDA)



圖 2-20 軟岩型 Mini Jet(齊汝鴻，2012)

Mini Jet 的主要設備為輸水管(圖 2-19、圖 2-20，紅色箭頭處)、加壓噴嘴(圖 2-21)、溢流管、量測器(圖 2-22)、水壓計(圖 2-23)、壓克力水密盒(圖 2-24)、金屬固定座(圖 2-25、圖 2-26)、以及外接泵浦(圖 2-27、圖 2-28)。



圖 2-21 加壓噴嘴



圖 2-22 量測器(齊汝鴻，2012)



圖 2-23 水壓計



圖 2-24 壓克力水密盒(齊汝鴻，2012)



圖 2-25 金屬固定座(USDA)



圖 2-26 金屬固定座(齊汝鴻，2012)



圖 2-27 馬力 1/6HP 汗水泵浦(USDA)



圖 2-28 馬力 1HP 汗水泵浦(齊汝鴻，2012)

Mini Jet 並無特定規格，而齊汝鴻(2012)及本研究之 Mini Jet 改良款皆是以 Hanson 的設計(圖 2-29、圖 2-30)為雛形，加以修改使其可運用於軟弱岩石上。

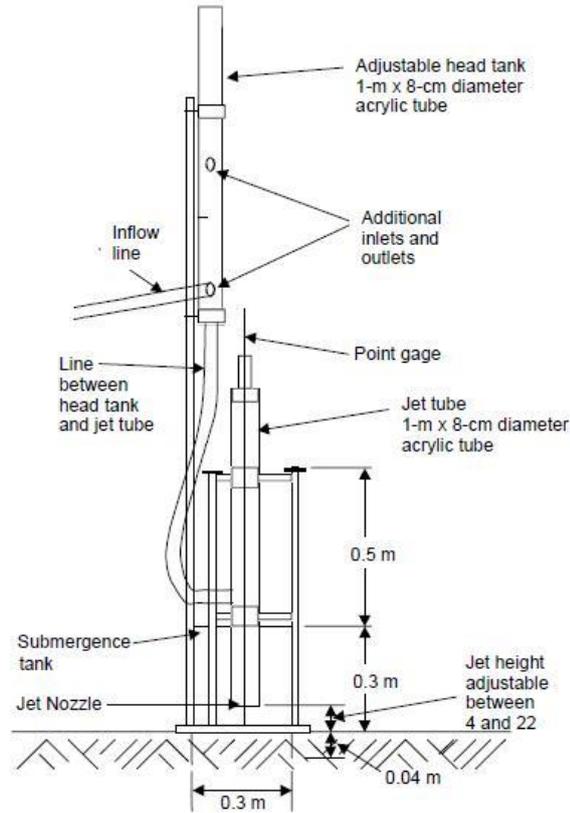


圖 2-29 Mini Jet 側視示意圖(Hanson et al.,2001)

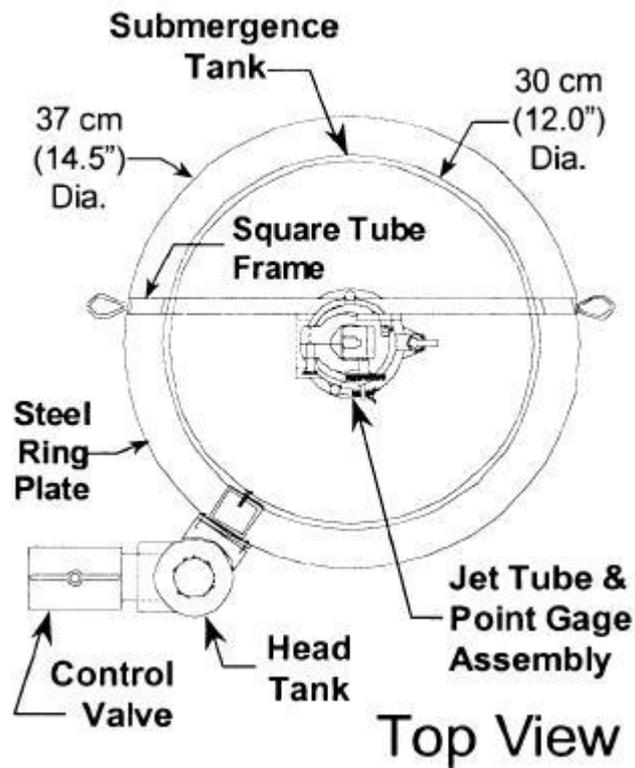


圖 2-30 Mini Jet 俯視示意圖(Hanson et al.,2004)

### 2.3.3 Mini Jet 基礎理論

Mini Jet 試驗的目的為藉由沖蝕試驗後所量測的沖蝕量及水壓，透過計算求得臨界剪應力  $\tau_c$ (critical shear stress in Pa)及沖蝕係數  $k_d$ (erodibility coefficient in  $m^3/N\cdot s$ )，最終得到沖蝕率  $\varepsilon$ (rate of erosion in m/s)沖蝕率之計算(Hanson et al.,2001)，以下之公式推導參考(齊汝鴻，2012)：

$$\varepsilon=k_d(\tau_e - \tau_c) \quad (2.1)$$

$\tau_e$ =有效剪應力(effective shear stress in Pa)

$\tau_c$ =臨界剪應力(剪應力阻抗)(critical shear stress in Pa)

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

$\varepsilon$ =沖蝕率(rate of erosion in m/s)

臨界剪應力( $\tau_c$ )及沖蝕係數( $k_d$ )，需藉由極限沖刷深度( $H_c$ )才可求得，而 Mini Jet 試驗後所得之參數(時間、沖刷深度、水壓)即為估算極限沖刷深度所需之參數。

依 Hanson et al.(1997)說明(圖 2-31)，當水流至噴嘴口垂直射出後，水柱中心線的初始流速為  $U_0$ (噴嘴出水口直徑  $d_0$ ，在壓力水頭  $h$  下)，而當水柱超越核心流(potential core)長度  $H_p$  (核心流長度為水柱自噴口射出後仍然維持初始流速  $U_0$  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。當射流長度超過核心流長度，即  $H>H_p$ ，一般計算射流中心線速度的方法為(Albertson et al.,1950)：

$$\frac{U}{U_0} = C_d \frac{d_0}{H} \quad (2.2)$$

式(2.2)中， $H$ 為自噴嘴出水口算起之射流中心線的長度， $C_d$ 為擴散係數，其值範圍為5.8-7.4(Beltaos et al.,1974)，取6.2(Albertson et al.,1950)。噴嘴出水口的擾流及非均速(turbulence and non-uniform velocity)會影響 $C_d$ 及 $H_p$ 的值。

依核心流之定義:核心流長度內，射流中心線流速不變及式(2.2)即可求得核心流長度得式(2.3)

$$H_p = C_d d_0 \quad (2.3)$$

圓形淹沒射流射入水中撞擊到平滑的邊界，共被區分為四區，第一區：水流建立區(zone of the flow establishment)、第二區：水流已建立區(zone of established flow)、第三區：偏斜區(deflection zone)、第四區：平流區(wall jet zone)。第一區即為核心流區，第三區為垂直射流撞擊致水平邊界後，垂直射流改變回水平流向，其沖擊點為遲滯點(stagnation point)，此點具有邊界最大水壓但剪應力為零，沿著水流中心點向兩側散開，且水壓降低造成周圍的水壓上升、剪應力漸提升至最大值(Hanson et al.,1997)。

由早期的試驗結果，歸納出，在以建立前段水流的情形下，偏斜區的水平邊界上之剪應力分佈半經驗式，式(2.9)，其中 $C_f$ 為摩擦係數。

$$\tau = C_f \rho U^2 \quad (2.4)$$

結合式(2.2)、(2.3)、(2.4)，因核心流內流速恆為 $U_0$ ，故核心流內之沖擊點，其最大剪應力亦恆為定值( $\tau = \tau_0$ )。

$$\begin{aligned} \tau_o &= C_f \rho U_o^2 & H \leq H_p \\ \tau &= C_f \rho (C_d U_o \frac{d_o}{H})^2 & H > H_p \end{aligned} \quad (2.5)$$

Albertson et al.(1950)與Hanson et al.(1990)經由試驗，分別得到 $C_d$ 為6.2及 $C_f$ 為0.00416。

當沖擊點深度( $H_i$ )超過核心流長度( $H_p$ )時，則此時的沖刷深度變化( $dH/dt$ )即為與最大剪應力( $\tau=\tau_o$ )相關之沖蝕率 $\epsilon$ (rate of erosion in m/s)。

結合式(2.6)、(2.8)、(2.10)求得：

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= k(\tau_o - \tau_c) & H \leq H_p \\ \frac{dH}{dt} &= k\left(\frac{\tau_o H_p^2}{H^2} - \tau_c\right) & H > H_p \end{aligned} \quad (2.6)$$

當水壓力即為臨界剪應力，此時之沖刷深度，即為極限沖刷深度( $H_e$ )，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：

$$\tau_c = \tau_o \left(\frac{H_p}{H_e}\right)^2 \quad (2.7)$$

$H_i$ =由噴嘴出水口至土壤初始面的長度

$H_p$ =由噴嘴出水口至 potential core 的長度=6.2\*d<sub>o</sub>

$H_e$ =由噴嘴出水口至到達平衡時極限沖刷深度的長度

$C_f$ =摩擦係數=0.00416

$\rho$ =液體密度

$U_o$ =水流從噴嘴噴出之初始流速( $\sqrt{2gh}$ )

$C_d$ =擴散係數=6.2

$d_o$ =噴嘴直徑

$\tau_c$ =臨界剪應力

$\tau_o$ =最大剪應力

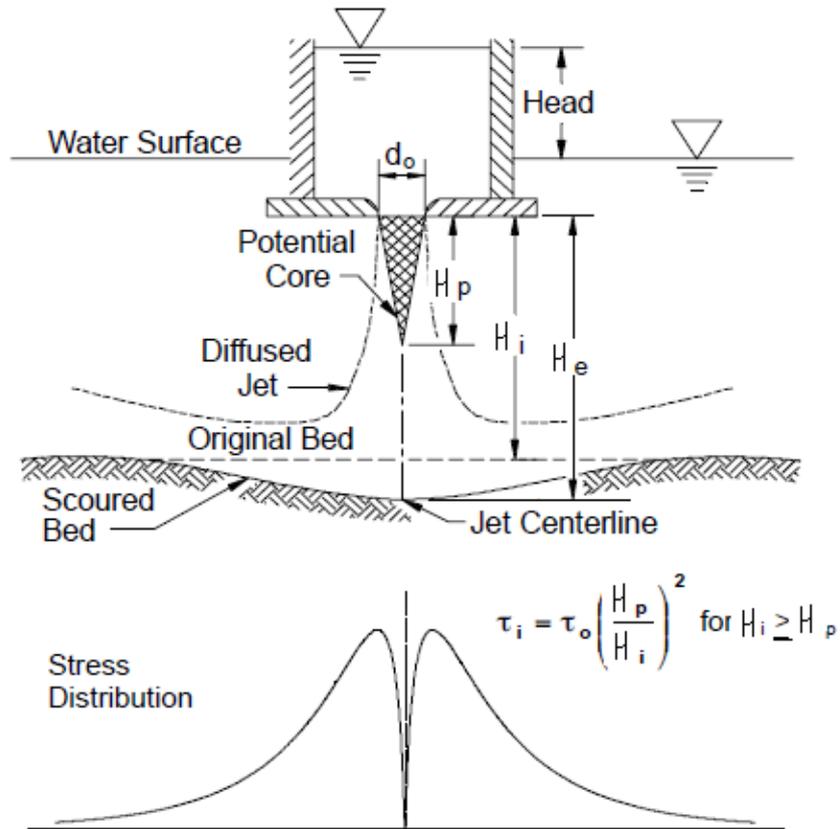


圖 2-31 Mini Jet 參數示意圖(Hanson et al.,2004)

利用沖蝕試驗所得之數據，進行非線性迴歸反覆求解，可求得  $k_d$  及  $\tau_c$  亦可由試驗數據以對數雙曲線函數法(Blaisdell et al.,1981)求解  $\tau_c$  或假設一個  $\tau_c$  值再反覆求解  $k_d$ 。但同時求解  $k_d$  及  $\tau_c$  的方法，Hanson et al.(1997)經測試後不佳。因此利用雙曲線法先求解  $\tau_c$ ，可行性較高。

式(2.7)中，除極限沖刷深度  $H_e$  外，其餘參數皆為已知，因此本研究將以 Mini Jet 的試驗所得之數據，利用雙曲線函數法求解取得  $H_e$ 。

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

$$\frac{(y-y_0)^2}{A^2} - \frac{x^2}{B^2} = 1 \quad (2.8)$$

A=半貫軸(the semitransverse axis)

B=半共軛軸(the semiconjugate axis)

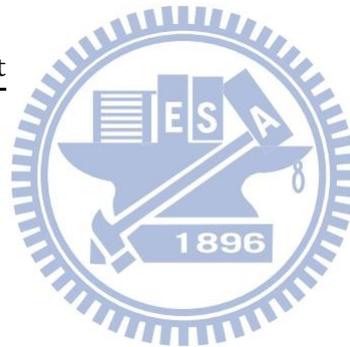
式(2.8)為一個上下開口的雙曲線，中心點為(0,y<sub>0</sub>)。Blaisdell 利用在涵洞網點及懸臂管溢洪道的沖刷研究數據，定義了無因次單位的 y 跟 x 式(2.9)、

(2.10)：

$$y = \log \frac{\frac{Z_m}{D_p}}{\frac{V_p t}{D_p}} = \log \frac{Z_m}{D_p} - \log \frac{V_p t}{D_p} \quad (2.9)$$

$$x = \log \frac{V_p t}{D_p} \quad (2.10)$$

$$y_0 = \log \frac{Z_m}{D_p}$$



Z<sub>m</sub>=從噴嘴出水口到沖刷面的長度(m)

V<sub>p</sub>=jet 噴口速度(m/s)

D<sub>p</sub>=jet 噴口直徑(m)

t=開始沖刷後的時間(s)

因其兩條漸進線之斜率相乘為-1，則兩漸進線垂直，可知此雙曲線為一等軸雙曲線，則式(2-8)中 A=B 方程式可改寫為：

$$\frac{(y-y_0)^2}{A^2} - \frac{x^2}{A^2} = 1 \quad (2.11)$$

式(2.11)經過移項整理後：

$$(y-y_0)^2-x^2=A^2 \quad (2.12)$$

$$x=[(y-y_0)^2-A^2]^{0.5} \quad (2.13)$$

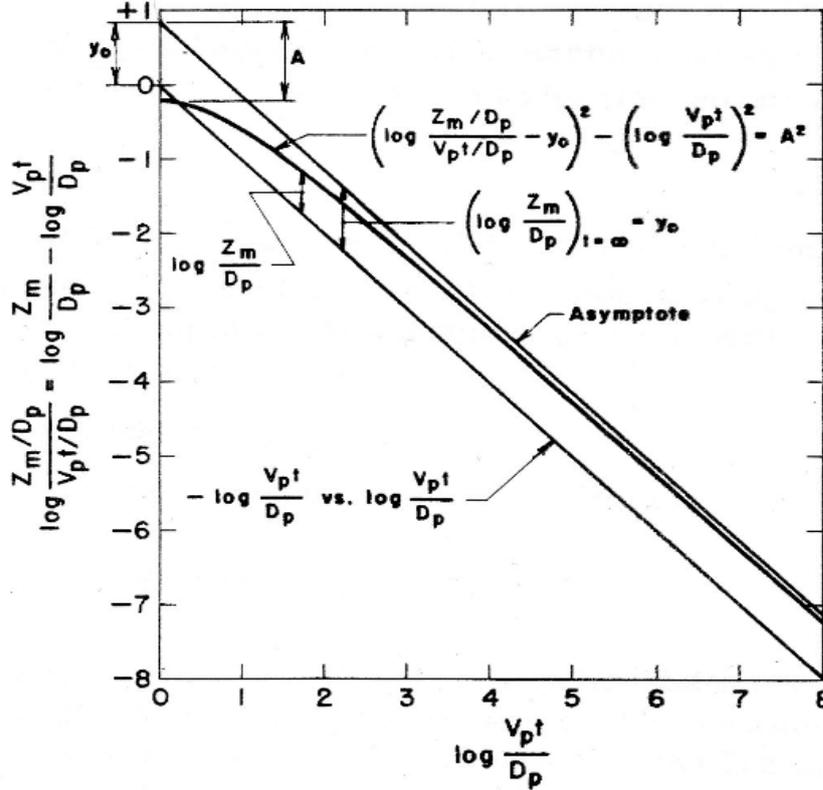


FIG. 3.—General Form of Hyperbola

圖 2-32 由試驗數據所形成之雙曲線示意圖(Blaisdell et al.,1981)

並將實驗中所量測之數據代入式(2.9)、(2.110)，則可得一雙曲線，A 為雙曲線之兩軸，雙曲線之中心點為(0,y<sub>0</sub>)，而 y<sub>0</sub> 也就是極限沖刷深度所在之處，並以迴歸方程式估計標準誤差，計算出最佳之 A 值及 y<sub>0</sub>，再由式(2-14)計算得到 H<sub>e</sub>。

$$y_0 = \log\left(\frac{H_e}{D_p}\right) \quad (2.14)$$

由式(2.14)求得 H<sub>e</sub> 後代回式(2.7)求得臨界剪應力(剪應力阻抗)τ<sub>c</sub>。

沖蝕係數(erodibility coefficient in  $m^3/N\cdot s$ ) $k_d$ 的計算方法(Hanson et al.,1997)。

重複式(2.6)：

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= k(\tau_o - \tau_c) & H \leq H_p \\ \frac{dH}{dt} &= k\left(\frac{\tau_o H_p^2}{H^2} - \tau_c\right) & H > H_p \end{aligned} \quad (2.15)$$

將式(2.5)、(2.7)代入式(2.15)中將長度及時間無因次化轉換後(Hanson et al.,1997)為：

$$\begin{aligned} \frac{dH^*}{dT^*} &= \frac{(1-H_p^{*2})}{H_p^{*2}} & H \leq H_p \\ \frac{dH^*}{dT^*} &= \frac{(1-H^{*2})}{H^{*2}} & H > H_p \end{aligned} \quad (2.16)$$

將式(2-16)經過移項積分後(Hanson et al.,1997)：

$$\begin{aligned} \int_0^{T_p^*} dT^* &= \int_0^{H_p^*} \frac{H_p^{*2}}{1-H_p^{*2}} dH^* & H^* \leq H_p^* \\ \int_{T_p^*}^{T^*} dT^* &= \int_{H_p^*}^{H^*} \frac{H^{*2}}{1-H^{*2}} dH^* & H^* > H_p^* \end{aligned} \quad (2.17)$$

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

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

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

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

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

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

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

Mini Jet 試驗中，時間、剪應力、沖刷深度，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，為維持在計算過程中的時間參數，所以與沖刷深度有關之參數必須除以  $H_e$ ，而時間的參數中都除以  $T_r$ 。且在計算之前，必須先透過實驗求得下列三項參數：

(1)  $H_p$ 、 $t_p$ 。

(2)  $H_i-H_p$ 、 $t_i-t_p$ 。

(3)  $H-H_i$ 、 $t_m=t-t_i$ 。

$H_i$ =由噴嘴出水口至土壤初始面的長度

$H_p$ =由噴嘴出水口至 potential core 的長度= $6.2*d_0$

$t_i$ =射流由噴嘴出水口噴射抵達土壤初始表面的時間

$t_p$ =射流由噴嘴出水口噴射至超越核心長度所需要的時間

$t_m$ =試驗中所量測的時間

試驗中所量測得到的水壓可經由換算後求得噴嘴口之初速，而  $H_i$  為試驗一開始所量測的初始深度、 $H_p$  的長度亦為已知( $6.2*d_0$ )，因此可以計算出  $t_i$  及  $t_p$ 。

基於沖刷試驗中之尾水深度極小，因此假設射流作用至土壤表面所需的時間為零，沖蝕開始時射流狀況為核心流，試驗則持續至沖蝕穩定為止 (Stein et al.,1993)。而 Mini Jet 試驗中沖擊點並不在核心流內，為維持與 Stein et al.(1993)中相同的時間尺度，因此增加了兩個虛擬時間  $T_p^*$ 、 $T_i^*$  於分析中，

其中  $t_m = t - t_i$  則為試驗時真正量測的時間。

時間  $t_p$  所對應的為射流通過  $H_p$  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)：

$$T_p^* = H_p^* \left[ \frac{H_p^{*2}}{(1-H_p^{*2})} \right] = \frac{H_p^{*3}}{(1-H_p^{*2})} \quad (2.18)$$

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

$$T^* = H^* \left[ \frac{H_p^{*2}}{(1-H_p^{*2})} \right] \quad H^* > H_p^* \quad (2.19)$$

時間  $t_i$  定義為經由噴嘴出水口噴出之射流抵達土壤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)：

$$T_i^* = 0.5 \ln \left( \frac{1+H_i^*}{1-H_i^*} \right) - H_i^* - 0.5 \ln \left( \frac{1+H_p^*}{1-H_p^*} \right) + H_p^* + T_p^* \quad (2.20)$$

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)：

$$T^* = 0.5 \ln \left( \frac{1+H^*}{1-H^*} \right) - H^* - 0.5 \ln \left( \frac{1+H_i^*}{1-H_i^*} \right) + H_i^* + T_i^* \quad (2.21)$$

將式(2.18)、(2.19)帶入式(2.20)可得到(Hanson et al.,1997)：

$$T^* = 0.5 \ln \left( \frac{1+H^*}{1-H^*} \right) - H^* - 0.5 \ln \left( \frac{1+H_p^*}{1-H_p^*} \right) + H_p^* + \frac{H_p^{*3}}{1-H_p^{*2}} \quad (2.22)$$

因  $t_m = t - t_i$ ，移項後  $t = t_m + t_i$ ，代入式(2.23)並且移項整理後得到最終的式

$$(2-24) \text{ (Hanson et al.,1997) :}$$

$$T^* = \frac{t_m + t_i}{T_r} = 0.5 \ln\left(\frac{1+H^*}{1-H^*}\right) - H^* - 0.5 \ln\left(\frac{1+H_p^*}{1-H_p^*}\right) + H_p^* + \frac{H_p^{*3}}{1-H_p^{*2}} \quad (2.23)$$

$$t_m = T_r \left[ 0.5 \ln\left(\frac{1+H^*}{1-H^*}\right) - H^* - 0.5 \ln\left(\frac{1+H_i^*}{1-H_i^*}\right) + H_i^* \right] \quad (2.24)$$

式(2.24)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(2.25)計算出  $k_d$ ，而試驗中每一次的量測皆可求得一組  $k_d$ ，將各組  $k_d$  進行線性迴歸，求得標準差來算出最佳值。最終可得式(2.25)，並由式(2.25)可看出並須要先有極限沖刷深度  $H_e$  才能算出沖蝕係數  $k_d$ 。

$$T_r = \frac{H_e}{k_d \tau_c} \quad (2.25)$$

### 2.3.4 Mini Jet 試驗方法

齊汝鴻(2012)所制定之 Mini Jet 現地實驗方法為參考 Hanson et al.(2001) 於美國中西部進行厚層崩積土的 Mini Jet 試驗方法及程序並加以改良。

首先於現地挑選適合試驗之地點，先將表面之風化層及其他雜物(碎石、雜草等)以地質槌刨除，當試驗點表面之風化層已完全去除，再以手持式砂輪機拋光表面，使試驗點表面能達到平整，即可將圖 2-26 之金屬底座，固定於岩盤表面，並以矽利康等不透水材料密封金屬底座與岩盤表面所有可能存在之縫隙，再將壓克力水密盒固定於金屬底座上，並將壓克力水密盒與污水泵浦連結，如圖 2-33 所，即可進行現地實驗。

室內實驗之試體制作參考(吳禹霆，2012)，選取適合之岩心後，以岩石試體切割機，將岩心切割為長度約為 10 公分之試體，將試體至於鋁模中，澆注已溶成液體之白蠟至試體上方 1 公分，待其冷卻後即可拆模取出。

將金屬底座固定於已封蠟之試體如圖 2-34 所示，並參照現地試驗之方法。



圖 2-33 現地實驗示意圖



圖 2-34 室內實驗示意圖

國外對於 Mini Jet 的試驗時間並沒有嚴格規定，但建議須符合以下二要項：

(1) 量測的時間必須由短至長，且最短不可低於 15 秒，最長不可超過 10 分鐘，但考慮軟弱岩石強度遠高於土壤，為求得有效的沖蝕數據，故將最長時間提升至 30 分鐘。

(2) 總沖刷時間不可超過 120 分鐘。

而齊汝鴻(2012)將軟岩沖蝕試驗的沖刷時間分配為 0min、0.25min、0.25min、0.5min、1min、3min、5min、10min、15min、20min、30min，總計 85 分鐘共 11 組數據。本研究中的沖刷時間分配將沿用齊汝鴻(2012)所訂定之方法。

### 2.3.5 Mini Jet 沖刷深度量測方法



Mini Jet 的量測方式為，依靠可轉部(Mini Jet 細部結構零件，於第三章作詳細介紹)的旋轉使噴嘴出水口與量測桿中心點皆為壓克力水密盒之圓心，如圖 2-35 圖 2-36 所示。為維持試驗過程中壓克力水密盒中完全水密且不受泵浦開機時水壓不穩定而影響實驗精確性，故試驗過程中泵浦完全不停機，為避免射流於量測過程中仍然攻擊試體表面，因此利用半圓形鐵片干擾水流使試體接觸面在量測磨蝕深度的過程中不會受到射流的直接攻擊，避免影響試驗沖刷時間的控制。此時再以圖 2-37 所示，以探頭輕觸試體表面，再讀取量測桿所示讀數，即為試驗所得之磨蝕深度。



圖 2-35 噴嘴出水口為中心



圖 2-36 量測桿為中心

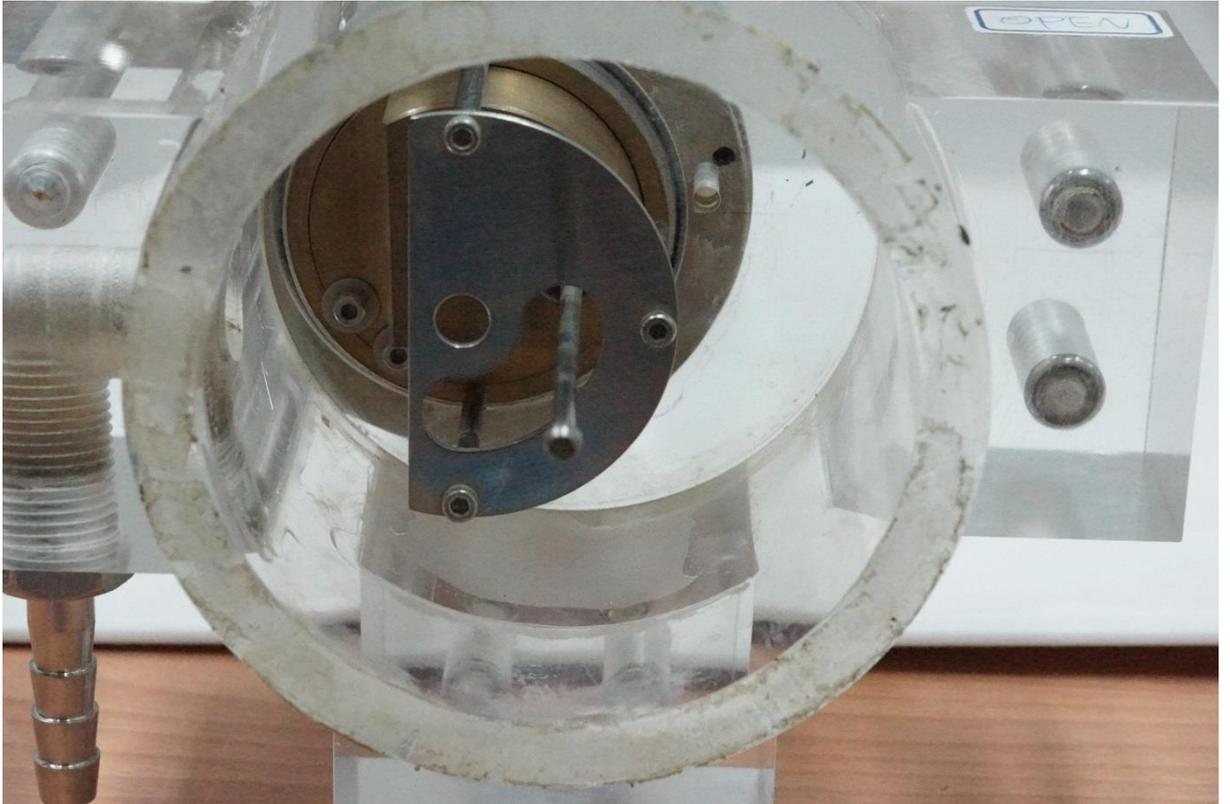


圖 2-37 量測桿伸出探頭

### 2.3.6 Mini Jet 試驗簡介小結

Mini Jet 的試驗目的為利用試驗過程中所得到的數據計算出沖蝕率，以利估計極限沖刷深度，因此必須記錄不同沖刷時間所得之沖刷深度。而齊汝鴻(2012)成功的證實 Mini Jet 即使應用於軟弱岩石上亦可以得到如圖 2-38 所示之沖刷坑，確定原本用於土壤沖蝕的 Mini Jet 理論，亦可應於在軟弱岩石。

試驗中必須記錄沖刷時間、水壓、量測桿讀數等三項數據(圖 2-39)，再利用由 Cook(1998)所撰寫之 Excel 巨集，計算出  $\tau_0$ 、 $\tau_e$ 、 $\tau_c$ 、 $H_e$ 、 $k_d$ 、 $\varepsilon$ 。如圖 2-40、圖 2-41、圖 2-42、圖 2-43 所示。



圖 2-38 試驗後所得之沖刷坑(齊汝鴻，2012)

JET DATA					
					DATE 10/9/97
JET TEST			OPERATOR: gjh		
LOCATION Station 53 in flume					
ZERO POINT GAGE READING 1.222			TEST # 2		
PRELIMINARY HEAD SETTING 87			PT GAGE RDG @ NOZZLE El. 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 2-39 現地試驗紀錄表格( Hanson et al.,2004)

2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
3															
4			JET TEST SITE	SITE NAME					DATE	/M/D/YYYY FORMAT					
5			JET LOCATION	WHERE WAS THE JET (L/R BANK, TOE OR BED)					OPERATOR	INITIALS					
6			ZERO POINT GAGE READING	0.770	mm	70			TEST #	EST NUMBER					
8			PRELIMINARY HEAD SETTING	8.7				PT GAGE RDG @ NOZZLE	1						
10			NOZZLE DIAMETER (IN)	0.125				NOZZLE HEIGHT (FT)	0.230						
14	SCOUR DEPTH READINGS						HEAD SETTING								
15	TIME	DIFF	PT GAGE	MAXIMUM	Maximum	Maximum	TIME	HEAD	NET HEAD						
16	(MIN)	TIME	READING	DEPTH OF	Depth of	Depth of	(MIN)	(IN)	(Psi)						
17		(MIN)	(FT)	SCOUR (FT)	scour (m)	scour (cm)									
18	0	1	0.770	0.000	0.0000	0.0000	0	241.08	8.7						
19	1	1	0.767	0.003	0.0010	0.1000	1	241.08	8.7			Mini Jet			
20	2	1	0.767	0.003	0.0010	0.1000	2	241.08	8.7			Scour dep ft		Difference	
21	3	1	0.765	0.005	0.0015	0.1500	3	241.08	8.7			70	0.229659	0.770	
22	4	5	0.765	0.006	0.0017	0.1700	4	241.08	8.7			71	0.23294	0.003281	0.76706
23	5.1	10	0.764	0.006	0.0018	0.1800	5.1	241.08	8.7			71.5	0.23458	0.00164	0.76542
24	7.1	10	0.764	0.007	0.0020	0.2000	7.1	241.08	8.7			71.7	0.235236	0.000656	0.764764
25	9.1	10	0.763	0.007	0.0021	0.2100	9.1	241.08	8.7			71.8	0.235564	0.000328	0.764436
26	14.1	10	0.763	0.008	0.0023	0.2300	14.1	241.08	8.7			72	0.23622	0.000656	0.76378
27	19.1	10	0.763	0.008	0.0023	0.2300	19.1	241.08	8.7			72.1	0.236549	0.000328	0.763451
28	29.1	11	0.763	0.008	0.0023	0.2300	29.1	241.08	8.7			72.3	0.237205	0.000656	0.762795
29												72.3	0.237205	0	0.762795

圖 2-40 Excel 巨集參數輸入頁面(Cook, 1998)

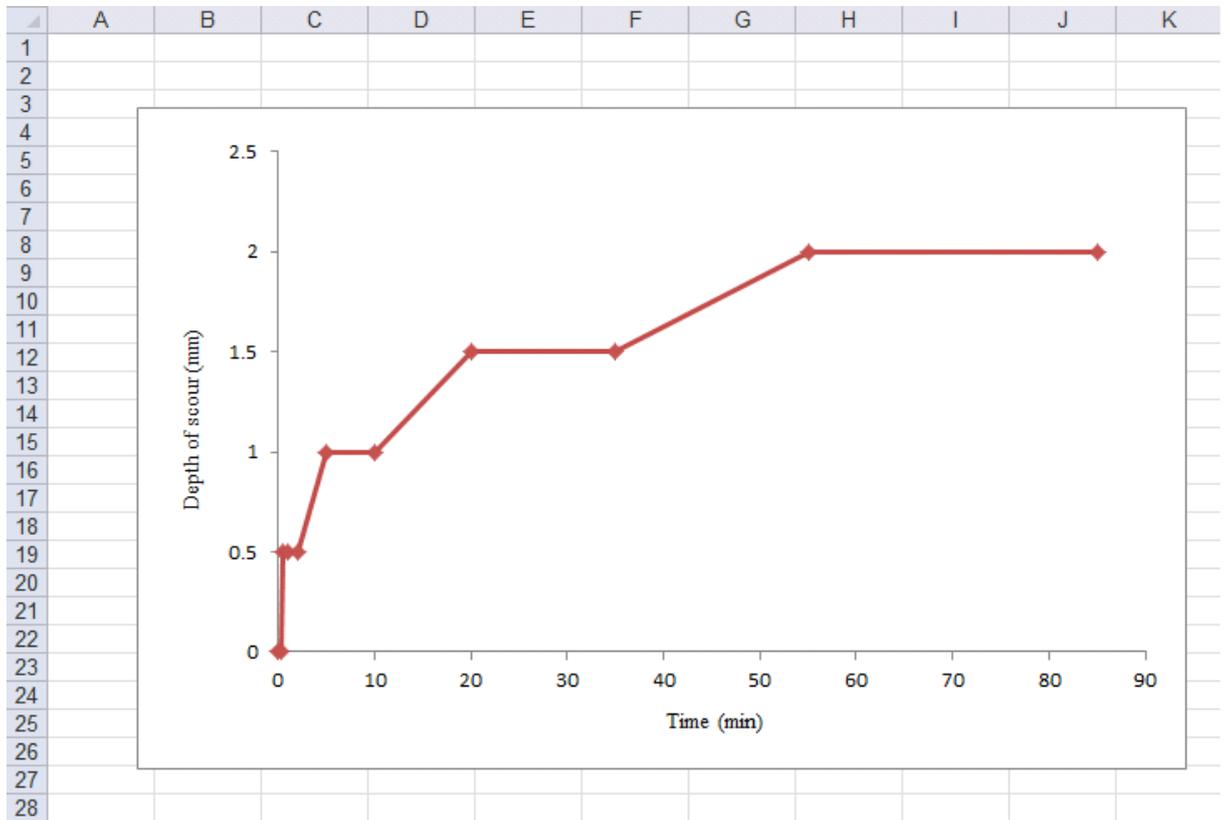


圖 2-41 試驗中沖刷坑深度與時間關係圖

Asymptote Plot

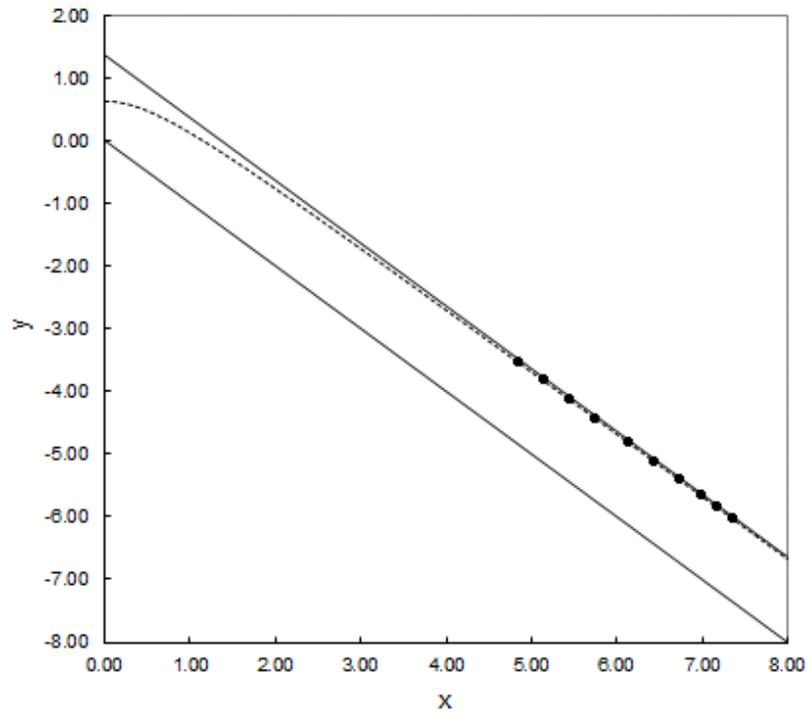


圖 2-42 計算極限沖刷深度  $H_c$  的  $y-x$  雙曲線關係圖

Run #	Elapsed Time (sec)	Head Reading (m)	H (m)	Uo (m/s)	He (m)	$\tau_c$ (Pa)	kd ( $m^2/N-s$ )	Tr	H*	HL*	Tm pre	Err*	Equation 6 Applied Shear Stress (Pa)	Equation 5 Available Shear Stress (Pa)
1	15	7.04	0.043	10.041	0.048	367.790	7.61E-09	17233.4358	0.881678	0.88168	0	225	473.130	5041.229
2	30	7.04	0.043	10.041			kd		0.892051		659.17665	395863.257	462.191	5041.229
3	60	7.04	0.043	10.041			$cm^2/N-s$		0.892051		659.17665	359012.658	462.191	5041.229
4	120	7.04	0.043	10.041			0.007605		0.892051		659.17665	290711.46	462.191	5041.229
5	300	7.04	0.044	10.041					0.902423		1398.0217	1205651.74	451.627	5041.229
6	600	7.04	0.044	10.041					0.902423		1398.0217	636838.695	451.627	5041.229
7	1200	7.04	0.044	10.041					0.912796		2234.5363	1070265.44	441.421	5041.229
8	2100	7.04	0.044	10.041					0.912796		2234.5363	18100.0266	441.421	5041.229
9	3300	7.04	0.045	10.041					0.923169		3193.5813	11324.9416	431.557	5041.229
10	5100	7.04	0.045	10.041					0.923169		3193.5813	3634432.29	431.557	5041.229

圖 2-43 Excel 巨集計算結果之頁面(Cook, 1998)

## 第三章、儀器設計改良與比較及試驗方法評估

本章將說明本研究中，改良儀器的設計理念及方法，並討論美國農業部(USDA)、齊汝鴻(2012)及本研究改良後之 Mini Jet 的差異性。

### 3.1 現有設備性用評估

Mini Jet 原用於土壤沖刷量測，因此水流設計強度較低，而齊汝鴻(2012)為將 Mini Jet 改良為可用於軟弱岩石，必須增強水流強度，因此針對提高流速及增大水壓力部分以更換動力設備(泵浦)及出水口(噴嘴)的方式得到改善，但僅提高至最大抗剪阻抗為 580Pa(即最大剪應力  $\tau_0$ )的岩石，檢討結果發現儀器內部管路仍有改良空間。而 mini jet(USDA)的環形金屬固定座(圖 2-25)，在打入岩盤時會造成岩石擾動出現龜裂的現象(圖 3-1)亦以更改底座固定方式(圖 2-26)得到改善，然而底座之耐用性並不佳。齊汝鴻(2012)因忽略了土壤沖蝕與軟岩沖蝕的沖蝕坑深度上有極大差異(圖 3-2、圖 3-3)，並沒有對量測器(圖 2-22)部分做精度上的改良，造成量測時容易產生誤差。因此本研究特別針對內部管路設計，量測器及底座耐用性，進行改良。



圖 3-1 岩盤因固定時的擾動產生裂縫(齊汝鴻，2012)



圖 3-2 Mini Jet 土壤沖蝕之沖蝕坑



圖 3-3 Mini Jet 軟岩沖蝕之沖蝕坑

### 3.2 試驗儀器改良

本研究儀器的改良以齊汝鴻(2012)的 Mini Jet 軟岩型(圖 2-20)作為雛形，並依照 Hanson(1997)之設計原理，搭配前節的評估及齊汝鴻(2012)所提出之修改建議，保留適合之元件，針對不適用部分做進一步探討，並以設備之機動性及耐用性為設計理念，降低使用限制，尋求合理方式設計改良能更妥善應用於軟弱岩石之儀器。

齊汝鴻(2012)，不論是室內或現地試驗皆出現非沖蝕中心點亦有岩體表面剝離的現象如圖 3-3 圖 3-4，尤以室內試驗的狀況更加明顯(圖 3-4)(原因說明於 3.4 節)



圖 3-4 室內試驗岩體剝離

針對此問題，現地試驗以改良岩體沖刷表面的準備方法進行改良，室內實驗則開發新型室內專用儀器，避免岩體表面剝離的狀況發生。

### 3.2.1 設計流程

本研究中所採用之 Mini Jet 除了在內部管路、量測桿及耐用性做改良亦對實驗方法加以修改，尤其以室內試驗方法改變最甚。以下為本研究的設計步驟(參考齊汝鴻，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。
- (3) 儀器裝設與測試：組裝已製作完成之零件，並逐項測試各零件及其功能。

(4) 室內試驗：採用現地取回岩塊，製作成室內實驗用試體進行

Mini Jet 軟岩沖蝕測試試驗。

(5) 現地試驗：挑選已有河道下切、側壁沖刷或有可能出現上述兩

種狀況的河川，於其河道上進行 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：彙整室內試驗及現地試驗的結果，確認數據的合理性，且進一步探討試驗方法與實際河道沖蝕的相關性及後續的發展方向。

### 3.3 試驗方法改良



齊汝鴻(2012)最終提出藉由更換泵浦馬力或噴嘴的方式改變流速，用以取得相同岩性下不同流速的沖蝕率，分析流速與沖蝕率的關係，以此估計岩性、流速、沖蝕率，三者之間的關係。經由泵浦資料蒐集及各種噴嘴種類做過測試。如要提升泵浦馬力，則泵浦本身重量及發電機重量，皆有數十公斤以上的提升，考量到現地實驗的便利性及以及安全性(試驗過程、現地器材移動)，因此排除再提升泵浦馬力一途。噴嘴類型大致上可分為噴霧類型及噴霧角度兩種，如圖 3-5、圖 3-6 所示。

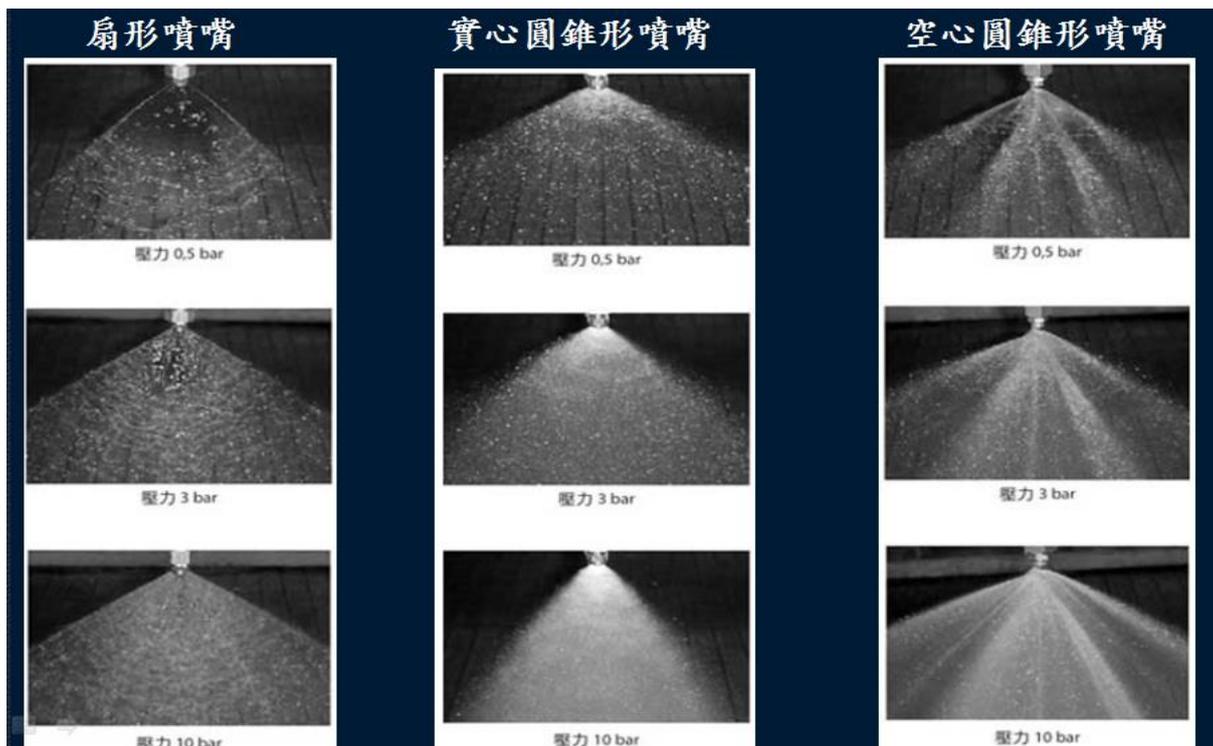


圖 3-5 噴嘴類型(擷取自思沛雅噴霧器材有限公司網站)

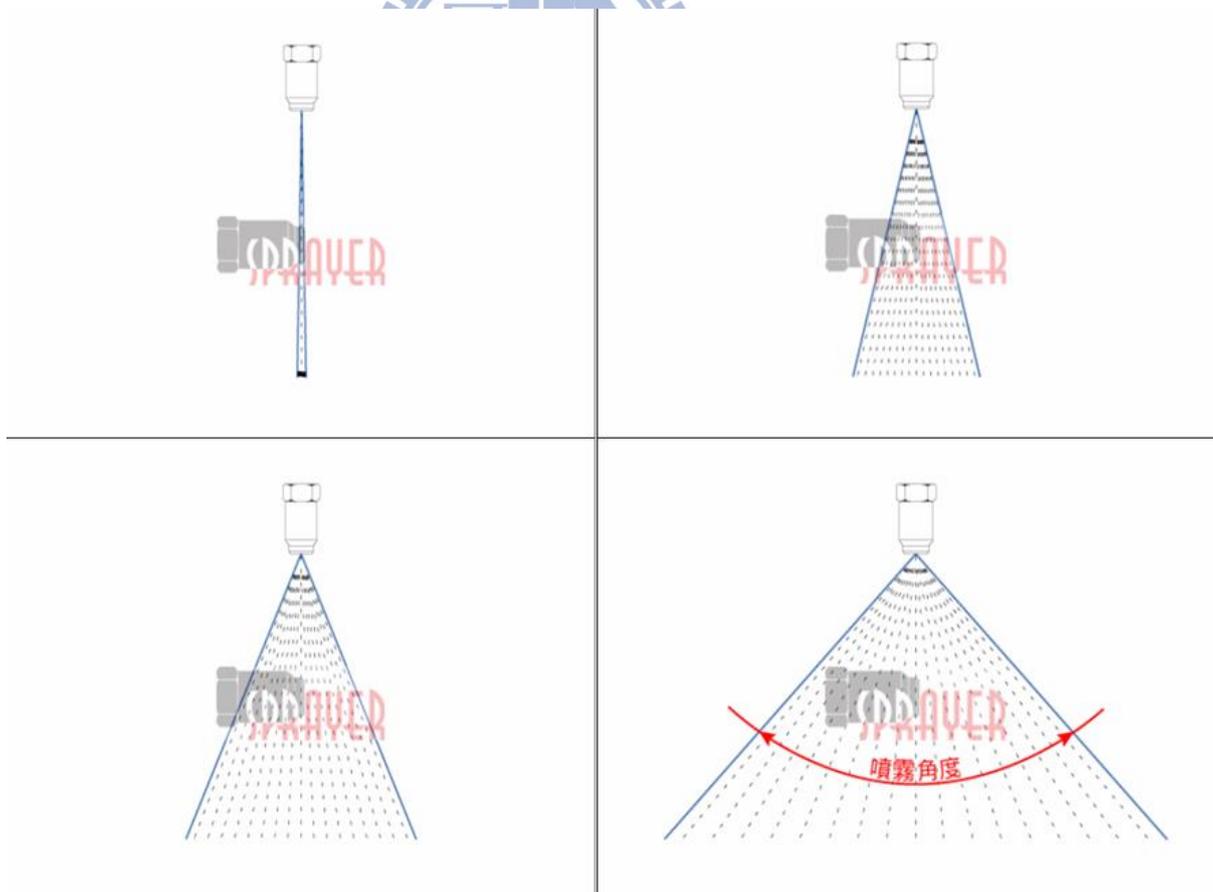


圖 3-6 噴霧角度(擷取自思沛雅噴霧器材有限公司網站)

考量到試驗需求，需要水柱集中及強度集中等需求，因此角度依然選擇噴霧角度最小(0度)之噴嘴並嘗試各型號之噴嘴，並無太大差異，最終選用品號 JCA1490 之噴嘴，J 代表 J 系列，C 代表螺牙的尺寸為 3/8in，A 代表噴霧角度 0 度，1490 為流量代碼，表示當壓力為 12psi 時流量為  $3.846 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ 、出口流速為 11.1m/s，等效噴口直徑為 2.1mm(0.083in)，材質為白鐵。

考量提高水壓及流速之可行性偏低，且參考，2009 年 8 月莫拉克颱風期間各個流量站所量測之流速不超過 11m/s(齊汝鴻，2012 改良後的儀器出口流速為 11.1m/s)(經濟部水利署，2010)。颱風期間，水中濁度高達 10000ppm，因此，應進行濁水下的沖蝕試驗。

因此本研究之試驗方法，以水中細粒料之粒徑及含泥量控制，作為試驗的控制條件，並彙整試驗所得之數據，探討粒料粒徑及含泥量對於沖蝕率的影響。

### 3.3.1 粒徑大小及含泥量配置

本研究試驗中所需之粒料粒徑大小的選擇參考 Rouse(1936)Sklar & Dietrich (2004)對懸浮載粒徑範圍的建議(表 3-1)及台灣洪水期間的懸浮載粒徑分佈資料(圖 3-7)，挑選通過篩號#40(0.425mm)、#60(0.250mm)、#100(0.150mm)、#200(0.075mm)的粒料，作為試驗的材料。

表 3-1 懸浮載粒徑分佈建議

懸浮載種類	顆粒於水流中行為	粒徑範圍(mm)
Bed Load	顆粒以滑移、彈跳、滾動方式於底床輸送	0.1 以上
50% Suspended Load	懸浮載於水流中顆粒下降接觸底床，又因水流上升懸浮	0.04~0.1
100% Suspended Load	完全懸浮於水流中，對底床影響很小	0.0015~0.04
Wash Load	對於底床影響相近於清水水流作用	0.0015 以下

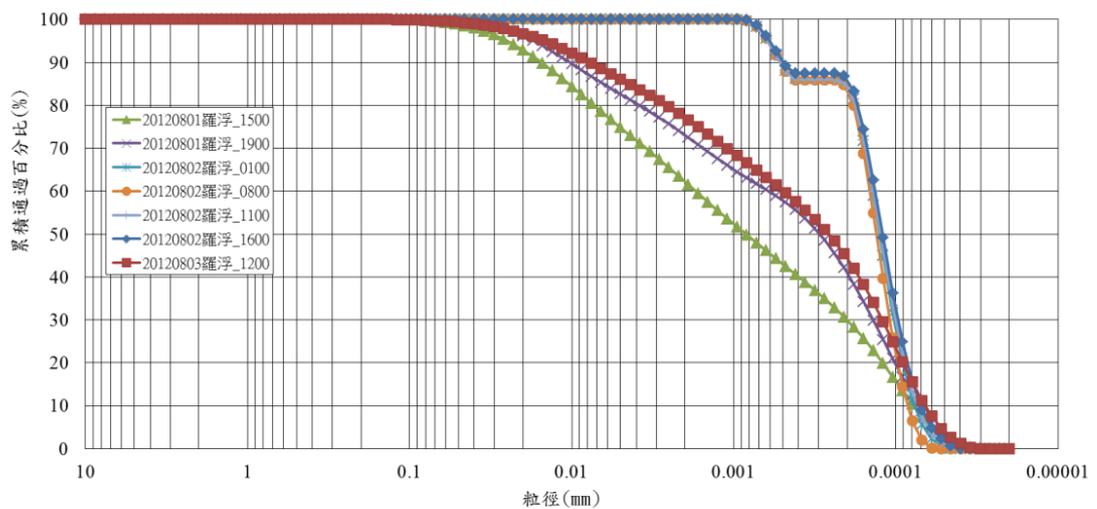


圖 3-7 台灣洪水期間河川泥沙粒徑分佈(經濟部水利署，2011)

為進行濁水濃度的影響探討，濃度配置則參考吳佳諺(2011)，以 1000ppm、5000ppm、10000ppm 三種濃度進行試驗以模擬常時水流、豪大雨、颱風侵襲時之河川含泥量。

並以各種不同粒徑大小進行三種濃度的試驗，詳細試驗規劃詳見表 3-2，表中之 MiX 欄位，為參照新竹市頭前溪竹中大橋段，現地取回之河床底泥經由篩分析試驗及比重計試驗取得之粒徑資料配製而成，其粒徑分佈詳見，表 3-3、圖 3-8 並參照粒徑分佈資料配置由通過：#40、#60、#100、#200 四種不同粒徑之土壤，依比例混合而成。

表 3-2 Mini Jet 試驗濃度與粒徑配置

粒徑\濃度	1000ppm	5000ppm	10000ppm
通過#40 (0.425mm)	單一粒徑 濃度 1000ppm	單一粒徑 濃度 5000ppm	單一粒徑 濃度 10000ppm
通過#60 (0.250mm)	單一粒徑 濃度 1000ppm	單一粒徑 濃度 5000ppm	單一粒徑 濃度 10000ppm
通過#100	單一粒徑 濃度 1000ppm	單一粒徑 濃度 5000ppm	單一粒徑 濃度 10000ppm
Mix	混合粒徑 濃度 1000ppm	混合粒徑 濃度 5000ppm	混合粒徑 濃度 10000ppm

表 3-3 頭前溪竹中大橋段河床底泥粒徑分佈資料

取土樣重 $W_{\text{soil}} = 1000 \text{ g}$						
Sieve number	Sieve opening (mm)	乾篩淨重 (g)	篩及殘留土重 (g)	Mass retained (g)	Mass passing (g)	Percent finer by weight (%)
#4	4.750	350.5	351	0.5	999.5	99.95
#10	2.000	326	360	34	965.5	96.55
#40	0.425	283	456	173	792.5	79.25
#60	0.250	276	486	210	582.5	58.25
#100	0.150	276.5	564.5	268	314.5	31.45
#200	0.075	259	403	144	170.5	17.05
底盤		272	422.5	170.5	0.00	0.00
總樣本重 $W_{\text{total}} = 1000 \text{ g}$						

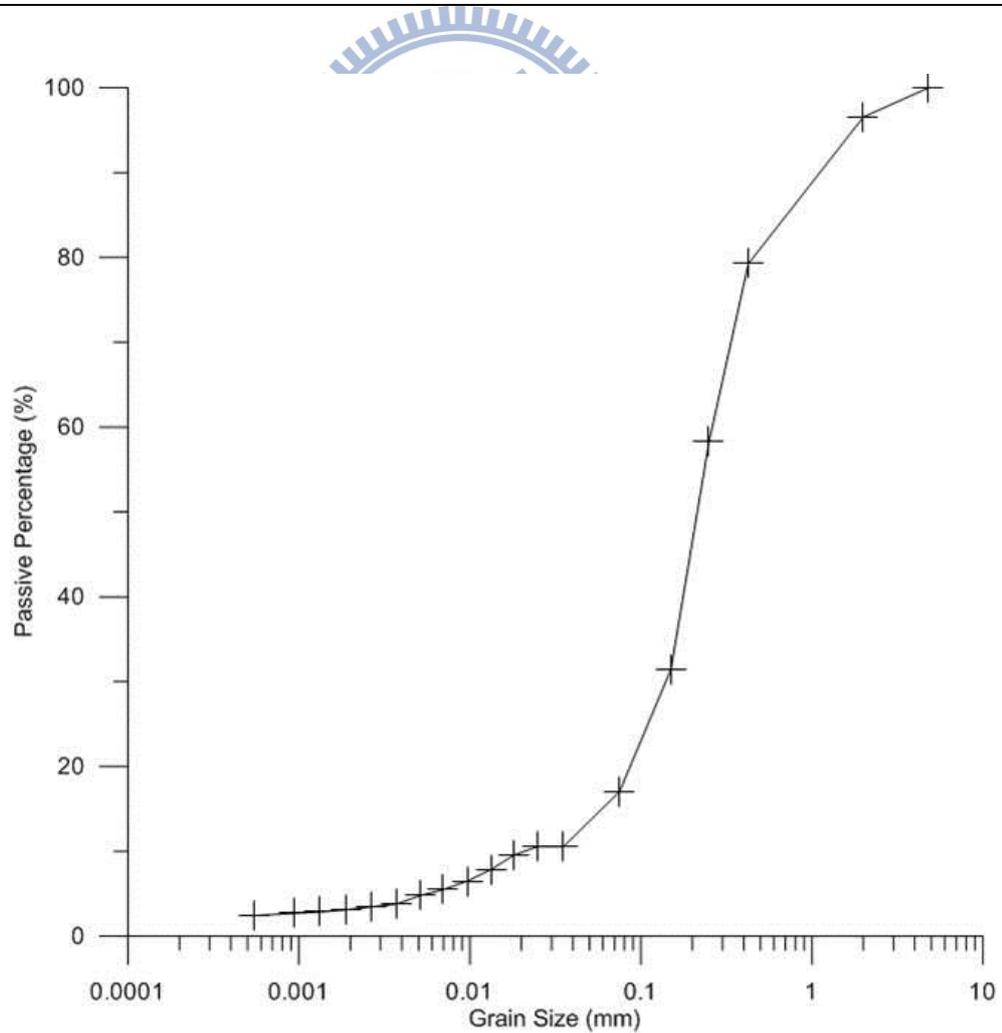


圖 3-8 頭前溪竹中大橋段河床底泥粒徑分佈曲線

### 3.3.2 試驗粒料來源

試驗過程中需要大量粒徑細小之粒料，以單一次試驗過程所需水量 150L 為例，三種不同濃度所需量如表 3-4。

表 3-4 試驗所需土重

試驗濃度	1000ppm	5000ppm	10000ppm
所需土重	150(g)	750(g)	1500(g)

試驗粒料選自石門水庫之淤泥如圖 3-9。淤泥處理步驟如下：

- (1) 雜物去除：將取回之淤泥混入水中均勻攪拌，再以 10 號篩(2mm) 過濾去除淤泥中之枯枝及碎礫。
- (2) 粒料烘乾：將以清理完畢之淤泥，再以清水攪拌過後裝盤烘乾。
- (3) 粒料製作：將烘乾 48 小時後，水份已完全去除之淤泥，以手持式 夯錘，將其搗碎。
- (4) 粒料過篩：將以烘乾、搗碎之淤泥，置入自動搖篩機，十分鐘後將 殘留於各篩號上之淤泥，裝箱封存待試驗所需。



圖 3-9 石門水庫淤泥

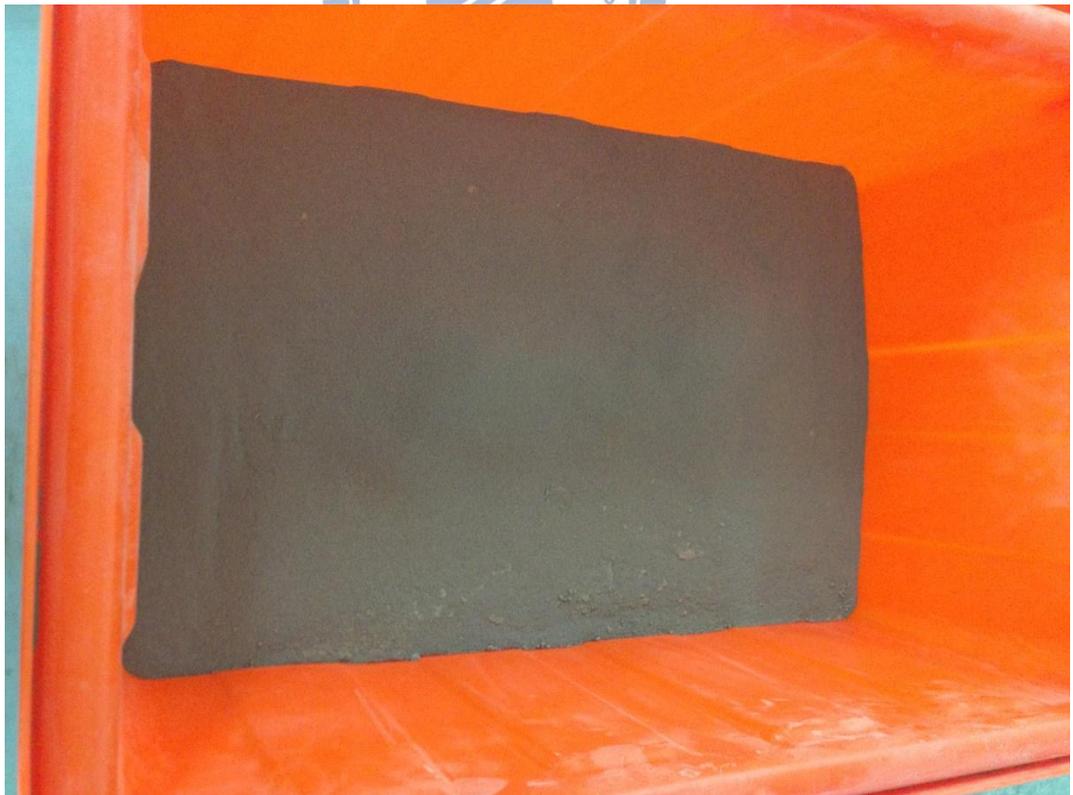


圖 3-10 過篩後之淤泥

### 3.4 改良儀器組件與構造

本儀器依照 3.1 節及 3.3 節所述進行進行改良，改良重點包括內部管路、底座、量測桿。並針對 3.2 節所提及之試體表面剝離問題如圖 3-3 圖 3-4，製作一反力架及室內用壓克力水密盒以穩定試驗時的水流避免產生紊流。

#### 3.4.1 Mini Jet 儀器構件設計

本節將針對本研究改良儀器之構件設計及製作完成的成品加以說明。總計有 9 樣構件詳見表 3-5，其中室內壓克力水密盒及 Mini Jet 試驗專用反力架為本研究所研製。其餘構件則以 Mini Jet 土壤型(USDA)及 Mini Jet 軟型(齊汝鴻，2012)作為製造參考範本。

表 3-5 Mini Jet 改良構建表

名稱	材質	承攬商
(1)固定底座	銅製	順群精密有限公司
(2)可替針腳	白鐵製	順群精密有限公司
(3)可轉部	銅製	順群精密有限公司
(4)固定部	銅製	順群精密有限公司
(5)弧形環片	不鏽鋼製	順群精密有限公司
(6)量測桿	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)室內用壓克力盒	壓克力製	奇華事業有限公司
(9)反力架	角鋼	自製

#### 底座的設計、改良與製作

底座的作用方為固定儀器於岩石表面，固定尾水深度及沖蝕中心點並維持試驗時之水密，但將底座嵌入岩石表面時常需以外力敲擊，造成固定

針腳歪曲變形，破壞實驗過程的穩定性。因此本研究針對底座下部壁厚、止水 O-ring 及固定針腳作強化，底座下部壁厚部分由原本之 5mm 增厚至 12mm，避免嵌入過程中造成底座變形或破裂，並將針腳改為可替式且將材質改為耐用性遠高於黃銅的白鐵。止水 O-ring 原本放置於底座上部內緣凹槽，止水效果雖然不錯，但影響壓克力盒的便利性，甚至可能在拆裝過程中造成壓克力水密盒損毀，因此更改 O-ring 放置位置，壓克力盒安裝方式則改為以螺牙固定而非過去的外力施壓固定。其設計圖及成品如圖 3-11、圖 3-12、圖 3-13、圖 3-14、圖 3-15 所示。

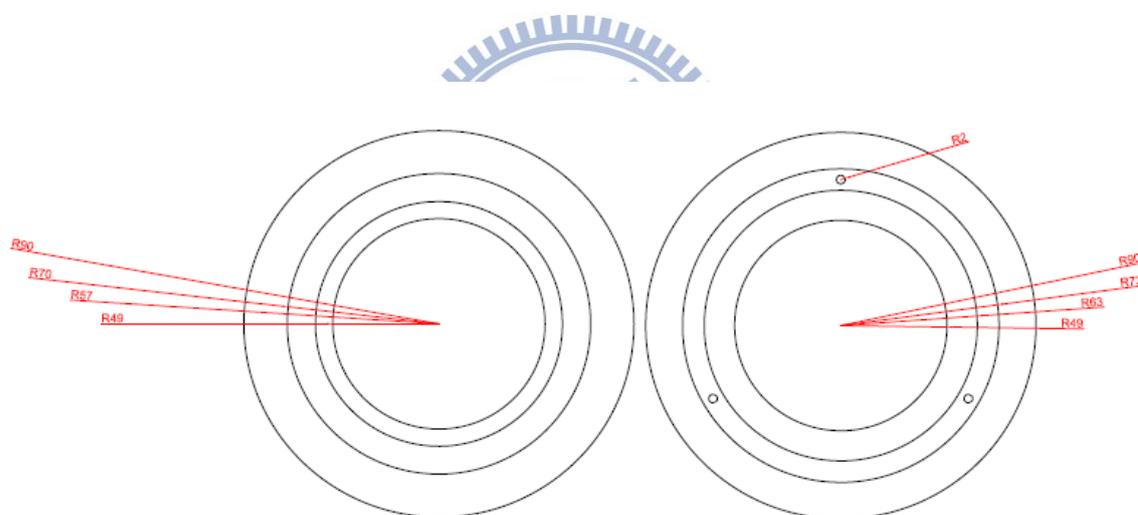


圖 3-11 (1)固定底座上視及下視圖

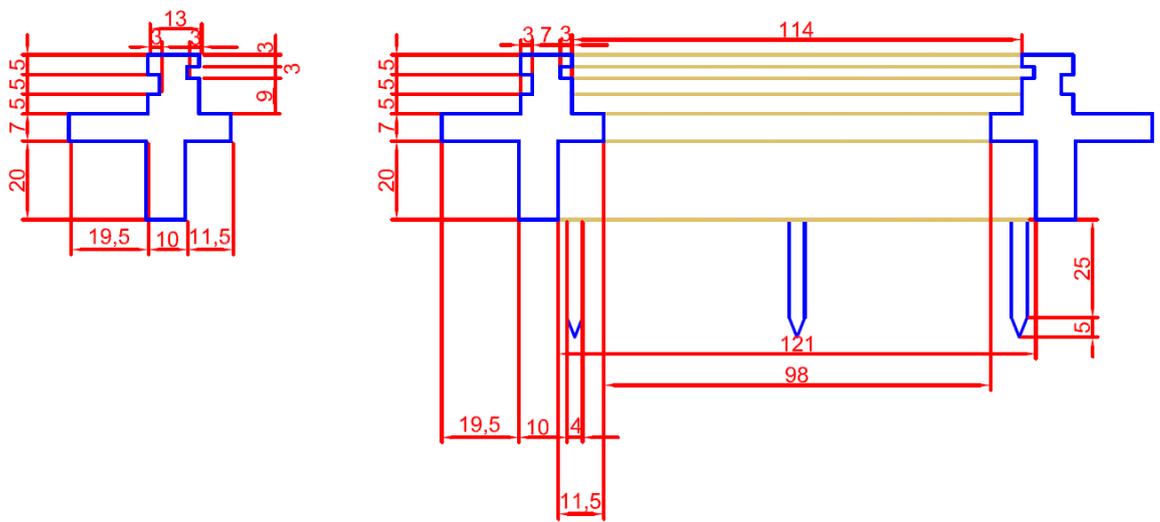


圖 3-12 (1)固定底座側視圖



圖 3-13 (1)固定底座上部



圖 3-14 (1)固定底座下半部



圖 3-15 (2)可替針腳

## 可轉部的設計、改良與製作

可轉部為控制噴嘴出水衝擊點及量測桿探測點位置的構件，透過 90 度的旋轉使衝擊點及探測點皆能位於壓克力水密盒圓心之構件。可轉部亦為裝設量測桿及水流管線的構件，上部螺孔一為裝設量測桿另一螺孔用以連接管線，下部只有一個螺孔為噴嘴裝設位置。由泵浦 2in 出口排出的強力水流透過線路轉接縮管至 3/8in，但齊汝鴻(2012)設計之可轉部，管線螺牙為 1/8in，因此必須再以轉接頭縮為 1/8in，此縮管造成水壓散失，因此本研究中將可轉部的內部管路修改為上部開口為 3/8in，下部開口為維持零件耐用性設計為 1/4in。設計圖及成品如圖 3-16、圖 3-17、圖 3-18、圖 3-19 所示。



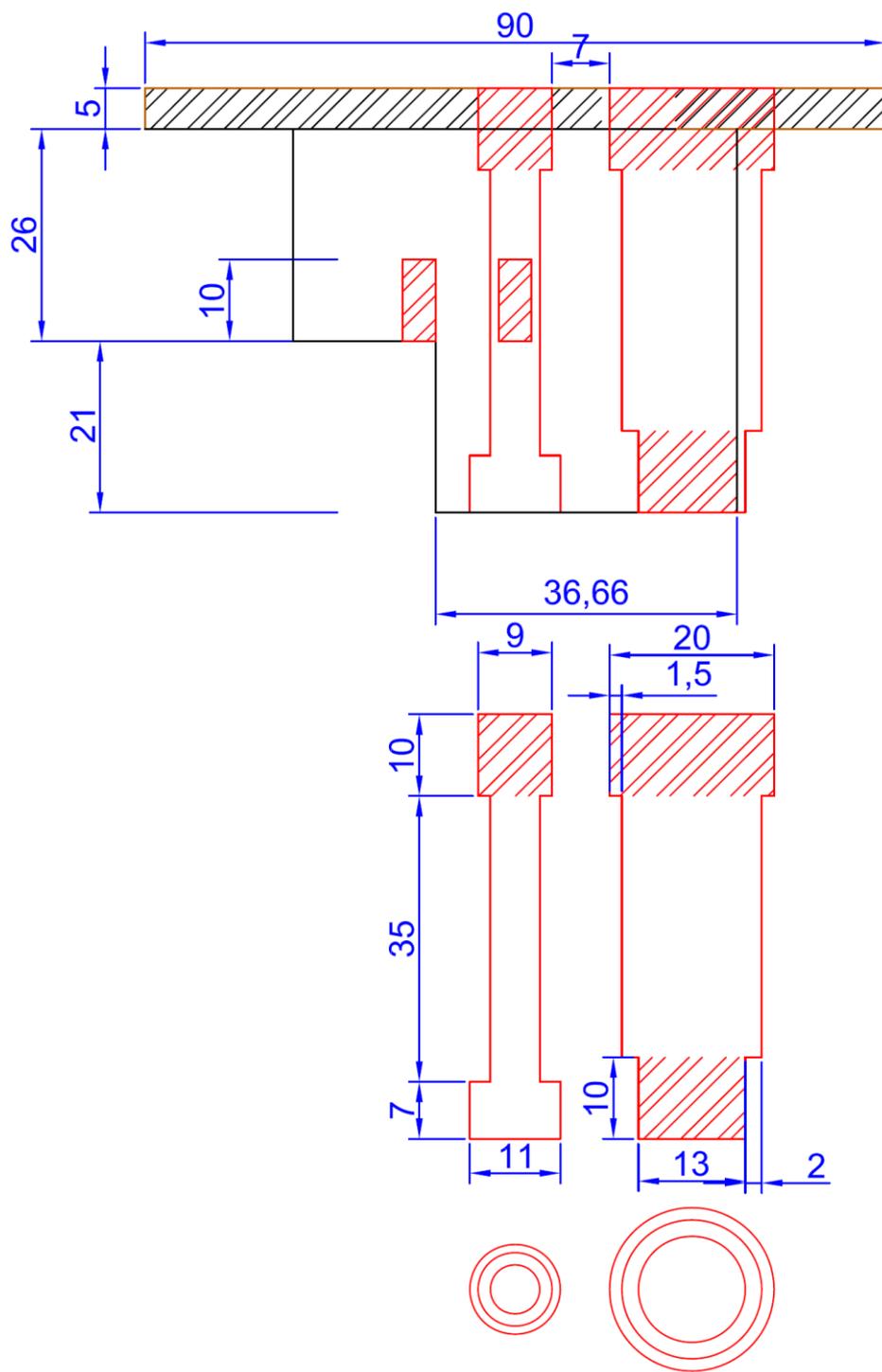


圖 3-16 (3)可轉部側視圖

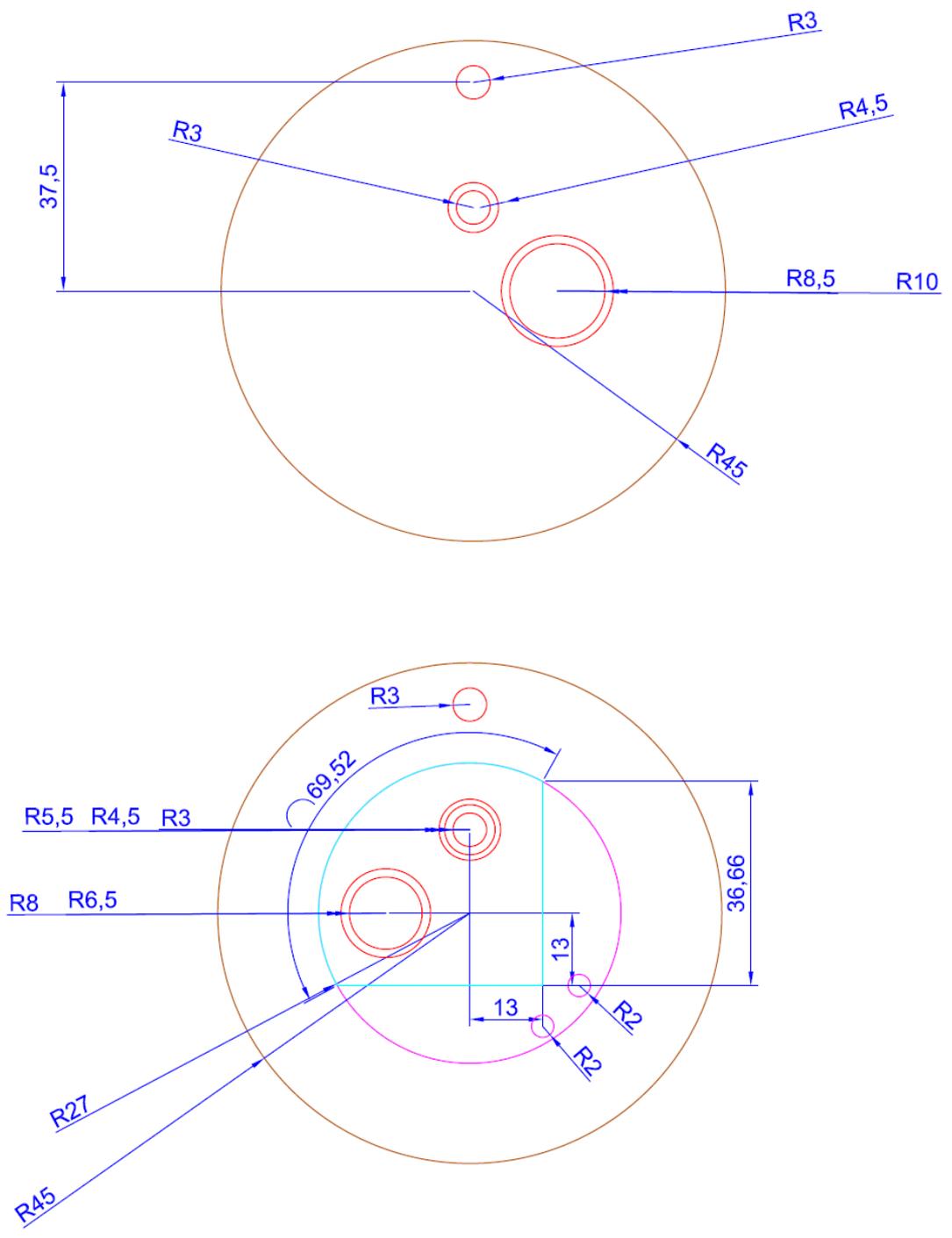


圖 3-17 (3)可轉部上視及下視圖



圖 3-18 (3)可轉部成品上部



圖 3-19 (3)可轉部成品下部

## 固定部的設計與製作

固定部為 Mini Jet 試驗儀所有零件中，唯一一個必須固定於壓克力水密盒上之構件。中間的空心部份與可轉部吻合，將可轉部穿過中間，使其可以在固定部上旋轉，而固定部上部凹槽其功能為，與可轉部下部螺絲接合，控制旋轉角度，並利用三根長度 64mm 之細銅柱與弧形環片連接，弧形環片功用為阻擋水流攻擊試體表面，使量測過程中噴射水流會先受到弧形環片阻擋，不會直接攻擊試體。其設計圖與成品如圖 3-20、圖 3-21、圖 3-22、圖 3-23、圖 3-24 所示。

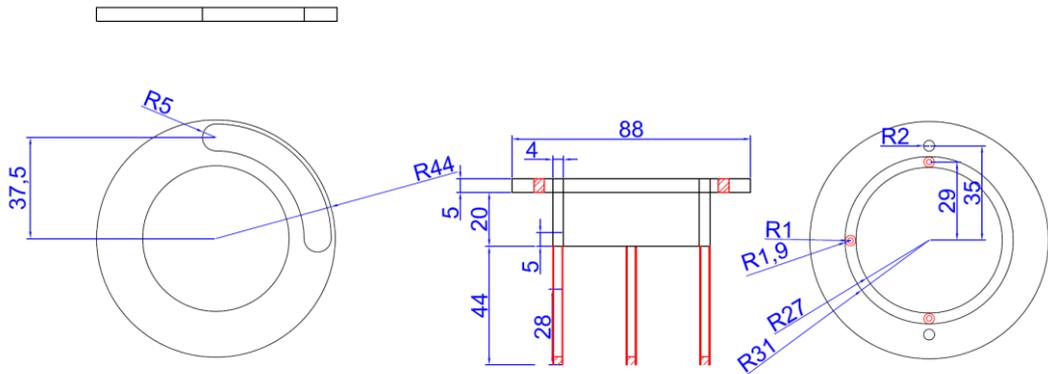


圖 3-20 (4)固定部設計圖(左為上視、中為側視、右為下視)

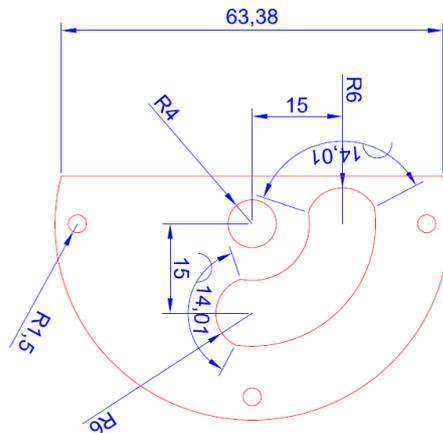


圖 3-21 (5)弧形環片設計圖



圖 3-22 (4)固定部成品上部



圖 3-23 (4)固定部成品下部



圖 3-24 (3)可轉部、(4)固定部及(5)弧形環片成品組合

### 量測桿的設計、改良與製作

量測桿是由四個零件結合而成，分別為中空黃銅管、中空活動管、探測桿、游標卡尺。其中，中空黃銅管用以增加量測桿高度，方便觀測時眼睛能與游標卡尺刻度平視，中空活動管提供探測桿上下移動時的活動空間，這兩個部分因為設計上並無不良，因此並無重新設計，考慮耐用性而重新製造新品並保留中空黃銅管及中空活動管作為備用。探測桿及游標卡尺部分為量測桿改良部分之重點，齊汝鴻(2012)所設計之探測桿底部為一個直徑5mm的圓柱，如此可能因沖蝕坑發展未完全下，寬度未超過5mm而造成量測上的困難，故改以直徑3mm的半圓球取定原為5mm的圓柱，並以量測精度0.02mm的游標卡尺取代USDA及齊汝鴻(2012)所用的量測精度為1mm的鐵尺，克服試驗中軟弱岩石的沖刷坑遠小於土壤時，量測精度的不足。以上四個零件的設計圖及成品和組裝如圖 3-25、圖 3-26、圖 3-27、圖 3-28、圖 3-29。

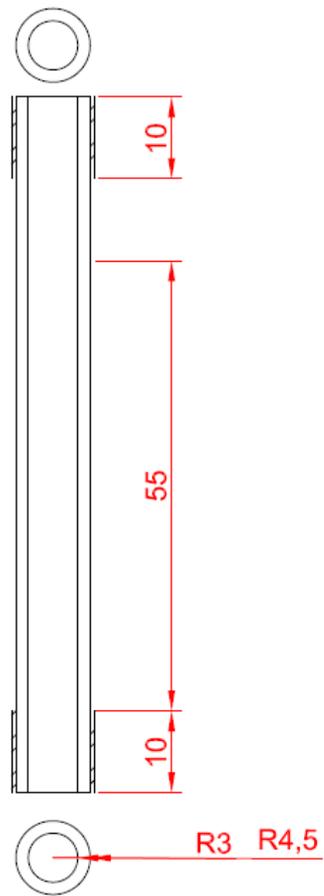


圖 3-25 中空黃銅管設計圖(齊汝鴻，2012)



圖 3-26 中空黃銅管(齊汝鴻，2012)



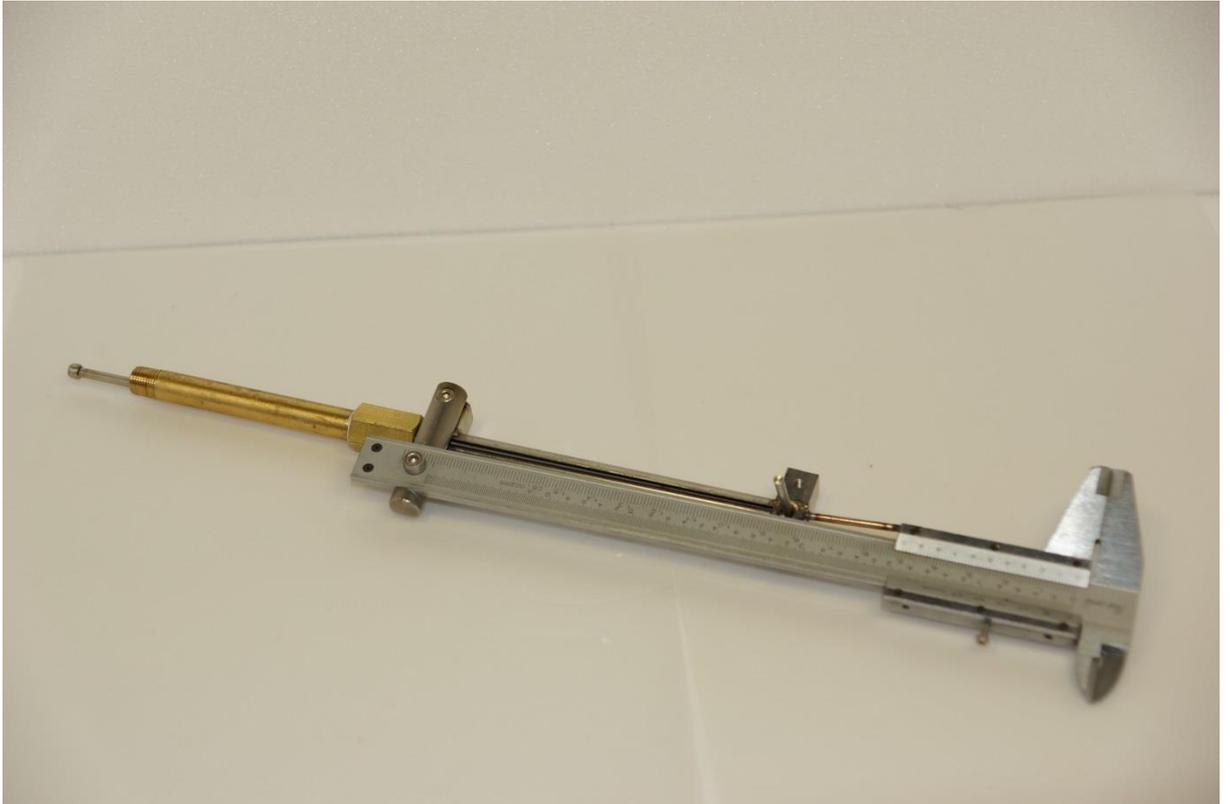


圖 3-29(6)量測桿組合圖

### 壓克力水密盒的設計、改良與製作

現地用壓克力水密盒中心為一個偏心的圓孔，作用是讓固定部與可轉部與壓克力盒作連接時讓噴嘴出水口與量測桿探測點皆在壓克力水密盒的圓心，偏心圓孔上亦有設置凹槽，用以裝設 O-ring，將固定部安裝上時，O-ring 能夠防止水從縫隙中冒出。而壓克力水密盒下方的螺牙是用來與固定底座上部的螺牙連接，此構建配合可轉部及固定部加大，因此偏心圓亦加大致半徑 31mm。為改良回水效果亦加大回水孔的螺牙。壓克力盒設計圖及成品如圖 3-30、圖 3-31、圖 3-32 所示。

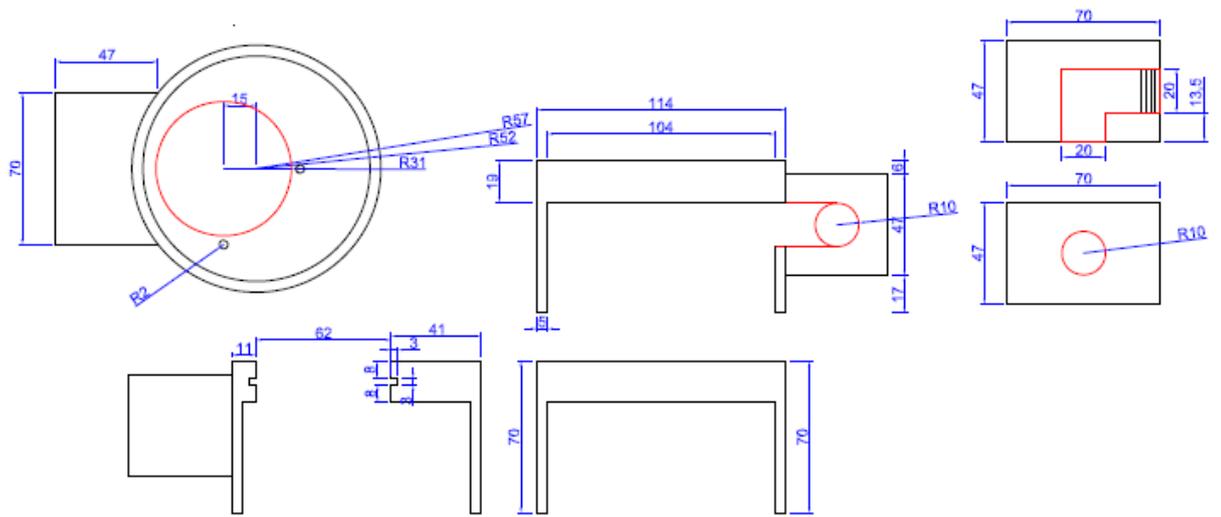


圖 3-30 (7)壓克力盒設計圖



圖 3-31 (7)壓克力盒成品側視(箭頭指向處為螺牙)



圖 3-32 (7)壓克力盒成品底部

室內用壓克力水密盒是因應本研究的試驗方法修改(3.3 節所提出)，而加以改良，於壓克力水密盒四周新增四個壓克力塊，並且各設置兩個半徑 10mm，深度 40mm 的圓孔，用以埋設內徑 8.5mm 的牙接，並於壓克力水密盒底部黏上矽膠軟墊，利用其柔軟的性質使壓克力盒底部能與試體表面緊密接合，再搭配反力架固定，成功克服齊汝鴻(2012)時，存有岩體表面嚴重剝離的問題。室內用壓克力水密盒的設計圖及成品如圖 3-33、圖 3-34、圖 3-35 所示。

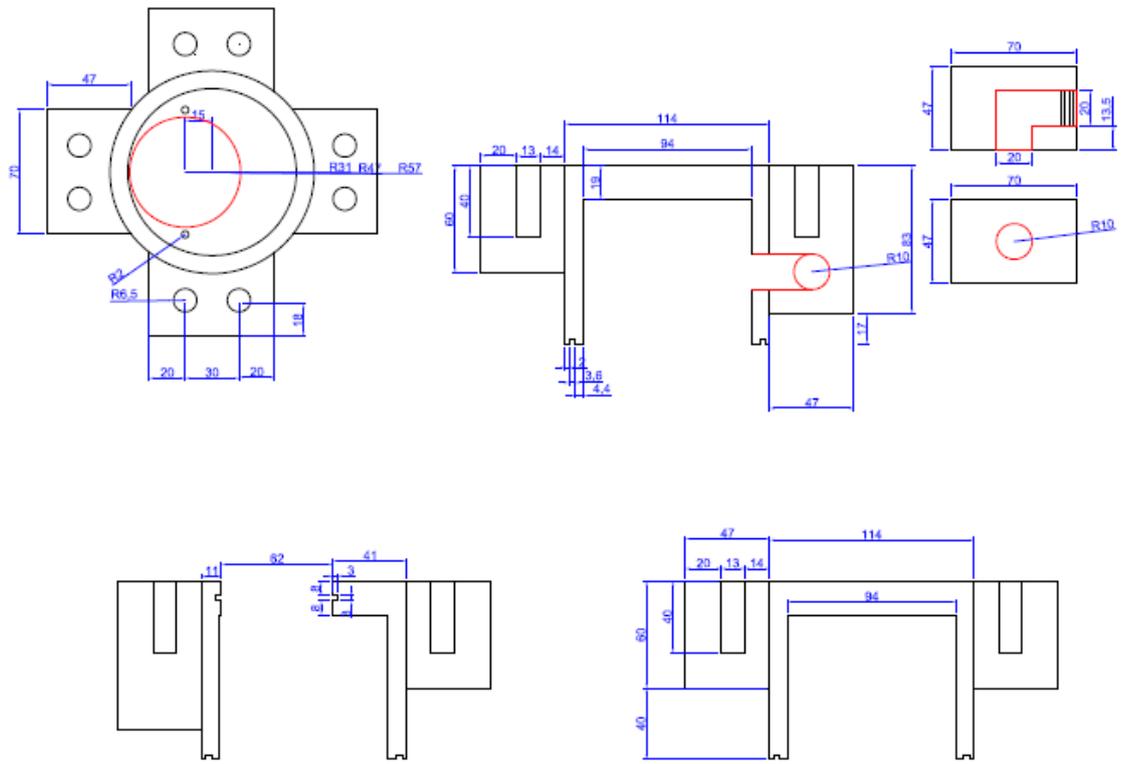


圖 3-33 (8)室內用壓克力盒設計圖

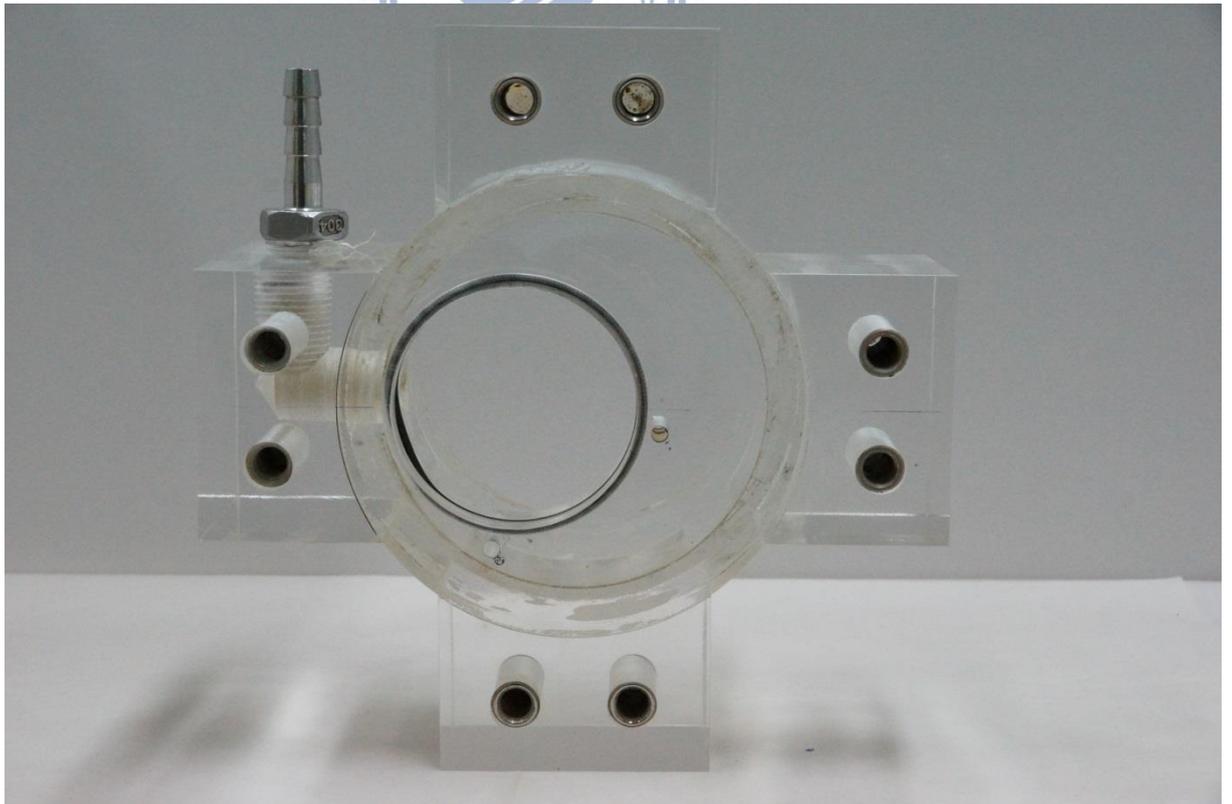


圖 3-34 (8)室內用壓克力盒成品底部

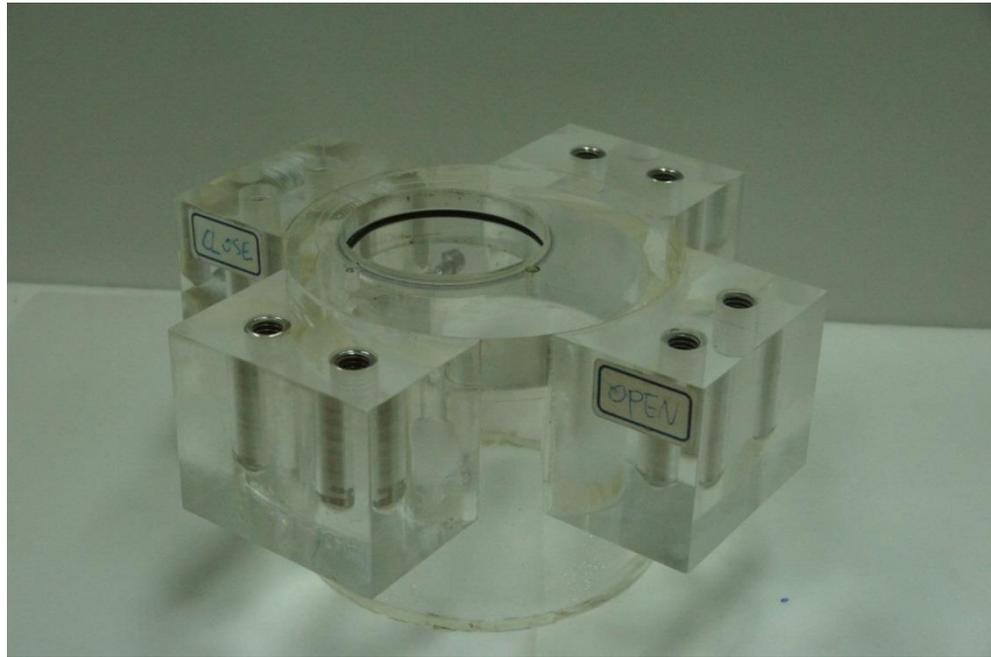
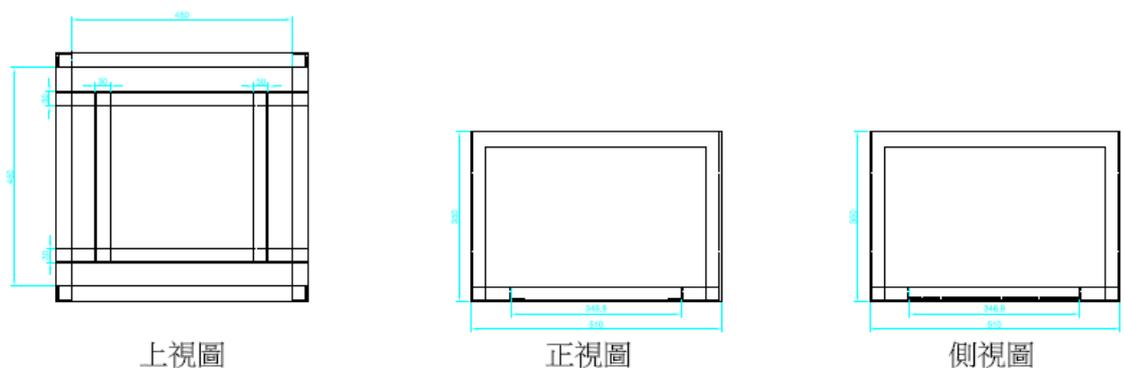


圖 3-35 (8)室內用壓克力盒成品側視

### 室內固定架的設計與製作

反力固定架作用為固定試體及壓克力水密盒，以角鋼製作而成的一個長450mm、寬450mm、高350mm的固定架，固定架底部另有一個長300mm、寬300mm的空間，用以固定試體。反力固定架的設計圖及成品和實際安裝狀況如所示圖 3-36、圖 3-37、圖 3-38、圖 3-39。



使用 厚度3mm 角長30mm之角鐵

圖 3-36 (9)反力架設計圖



圖 3-37 (9)反力架成品

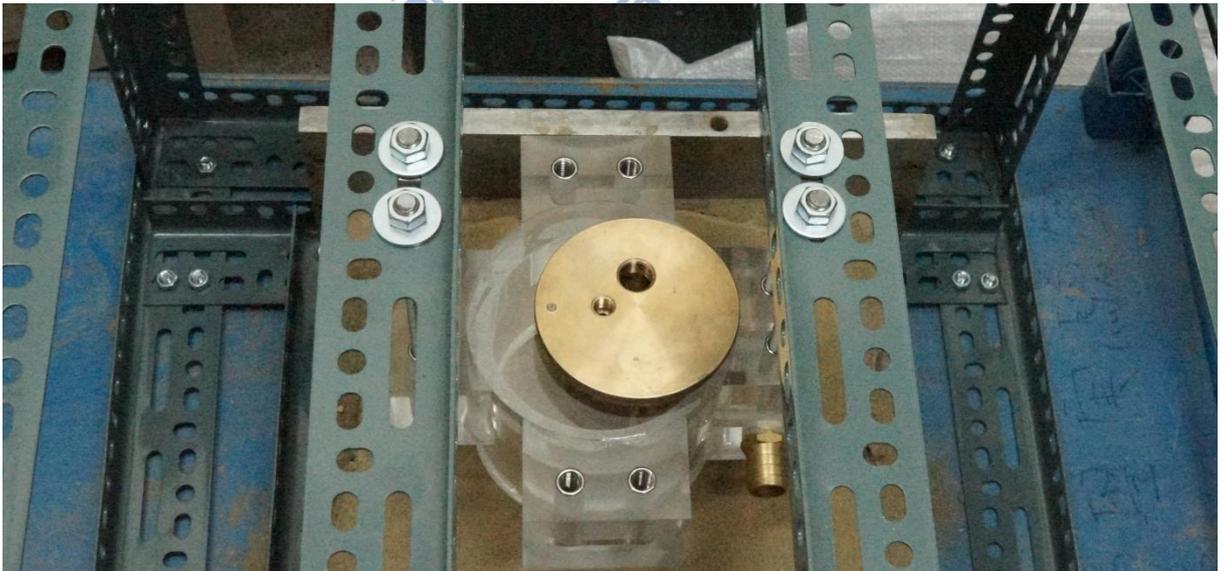


圖 3-38 (9)反力架實際安裝狀況俯視

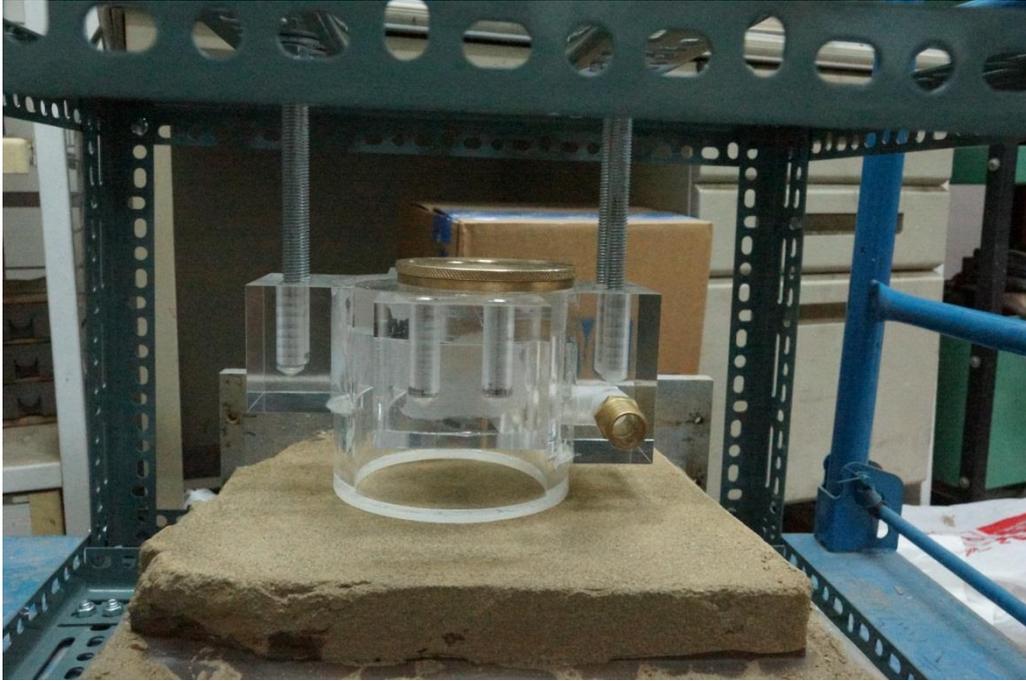


圖 3-39 (9)反力架實際安裝狀況側視

### 3.5 室內實驗試體製作

齊汝鴻(2012)室內試驗試體利用鑽探岩心，經由岩心切割機，裁切完成後再以白蠟固定，因蠟與岩心為兩種截然不同的物質，產生嚴重的差異侵蝕造成試體周圍的破壞非常明顯，如圖 3-40 所示。

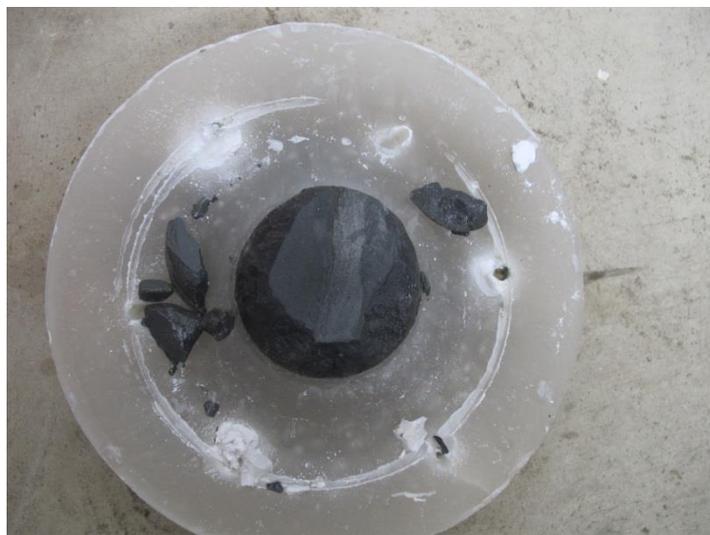


圖 3-40 試驗室體破壞

為克服差異侵蝕的問題，本研究以湖山水庫工址現地取得的岩塊加以製作，其地質條件為頭嵙山層之軟弱砂岩。試體製作流程參考吳禹霆(2012)，說明如下：

- (1) 岩塊描述及物性試驗：紀錄岩體之完整性(有無節理)，並保留切除下的岩塊施作粒徑分析。如圖 3-41所示。
- (2) 試體裁切：以粉筆於岩塊表面標示出欲切除部分，並以鋸子及手持式砂輪機，將岩塊裁切為長寬高約為25×25×20公分的長方體。如圖 3-42、圖 3-43所示。
- (3) 試體固定：將試體置入一30×30×20公分的鋁模，注入已溶成液體之白蠟，因白蠟具有乾縮特性，因此必須重複澆注，避免因白蠟乾縮，產生縫隙。待試體完全冷卻即可拆模取出。如圖 3-44所示。
- (4) 研磨試驗面：利用大型研磨機(圖 3-45)將試體表面磨去數公分，直至試驗面完全水平並利用氣泡水準儀驗證表面平整度。如圖 3-46所示。
- (5) 試體飽和：將研磨完成的試體，先以軟毛刷及氣槍清除試體表面殘留的碎屑及粉末，在靜置於清水中24小時，即可取出進行試驗。
- (6) 試體重複性使用：試體的長寬為25×25公分，可進行3至4組的試驗，試驗結束後，重複步驟(4)及步驟(5)，即可再次利用此試體，避免浪費珍貴的現地岩塊。



圖 3-41 原始岩塊

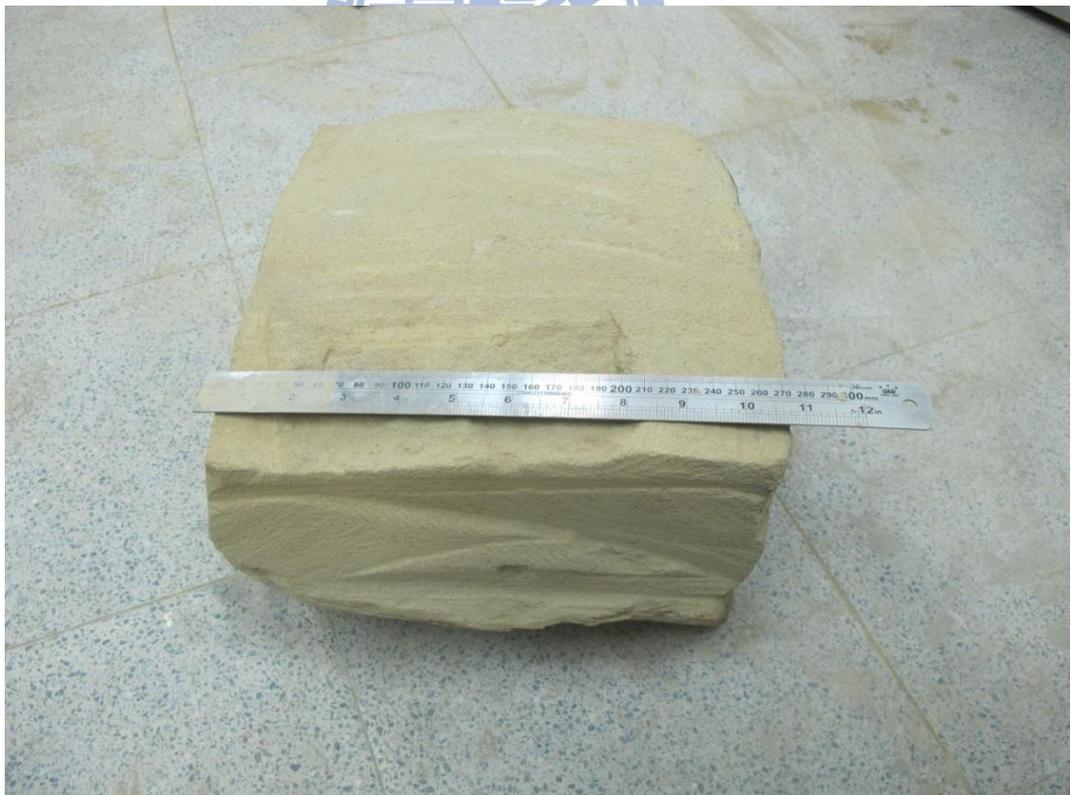


圖 3-42 裁切完成試體



圖 3-43 裁切完成試體

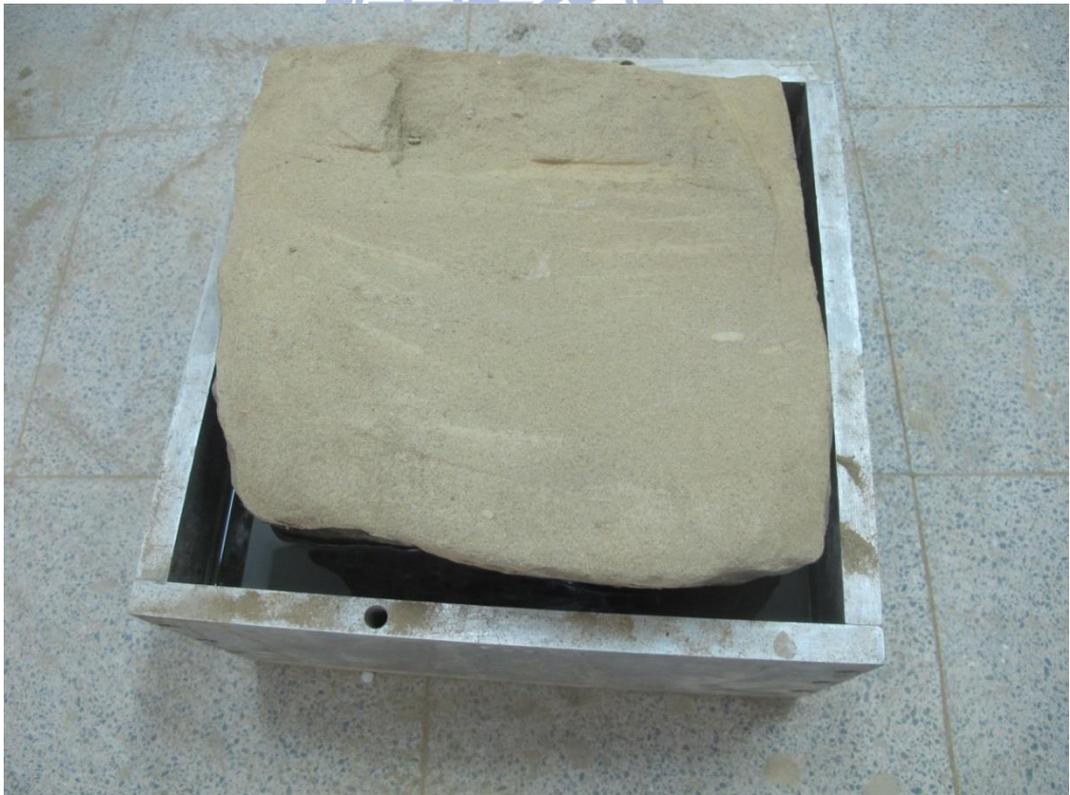


圖 3-44 試體裝模及注入白蠟



圖 3-45 大型研磨機(吳禹霆，2012)



圖 3-46 研磨完成之試體

## 第四章、改良 Mini Jet 之數據分析理論及其於濁水

### 下軟岩沖蝕之試驗步驟

本章將介紹試驗過程中儀器作用於試體上的最大剪應力計算方式、室內及現地試驗流程規劃、儀器準備、試驗步驟、現地試驗地點選擇。

#### 4.1 最大剪應力計算

本試驗採用潛沒式垂直射流於岩石表面產生剪應力，並沖蝕形成沖刷坑，再由試驗所得的沖蝕量及壓力計上所顯示之水壓，計算求得剪應力。本研究最大剪應力的計算方法沿用齊汝鴻(2012)，採用噴嘴出水口至沖擊點深度大於 potential core 長度的情況加以計算：

$$\tau = C_f \rho (C_d U_o \frac{d_o}{H})^2 \quad (4.1)$$

式中  $C_f$  為摩擦係數，其值利用 Moody Diagram(圖 4-1)決定， $\rho$  為液體密度， $C_d$  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)， $U_o$  為水流於 potential core 內的流速， $d_o$  為噴嘴直徑， $H$  為跌水高度。

圖中雷諾數為：

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4.2)$$

V=平均流速(m/s)

D=由噴嘴出水口直徑(m)

$\nu$ =運動黏度(m<sup>2</sup>/s)

$$\text{本研究中之 } R_e = \frac{11.42 \cdot 0.0021}{10^{-6}} = 23982$$

圖 4-1 中 K 值為噴嘴材料粗糙度參數， $D_h$  為噴嘴直徑，參考表 4-1，噴嘴材質為白鐵，K 值為 0.046， $K/D_h=0.022$ 。由圖 4-1 可求得摩擦係數  $C_f$  約為 0.05。

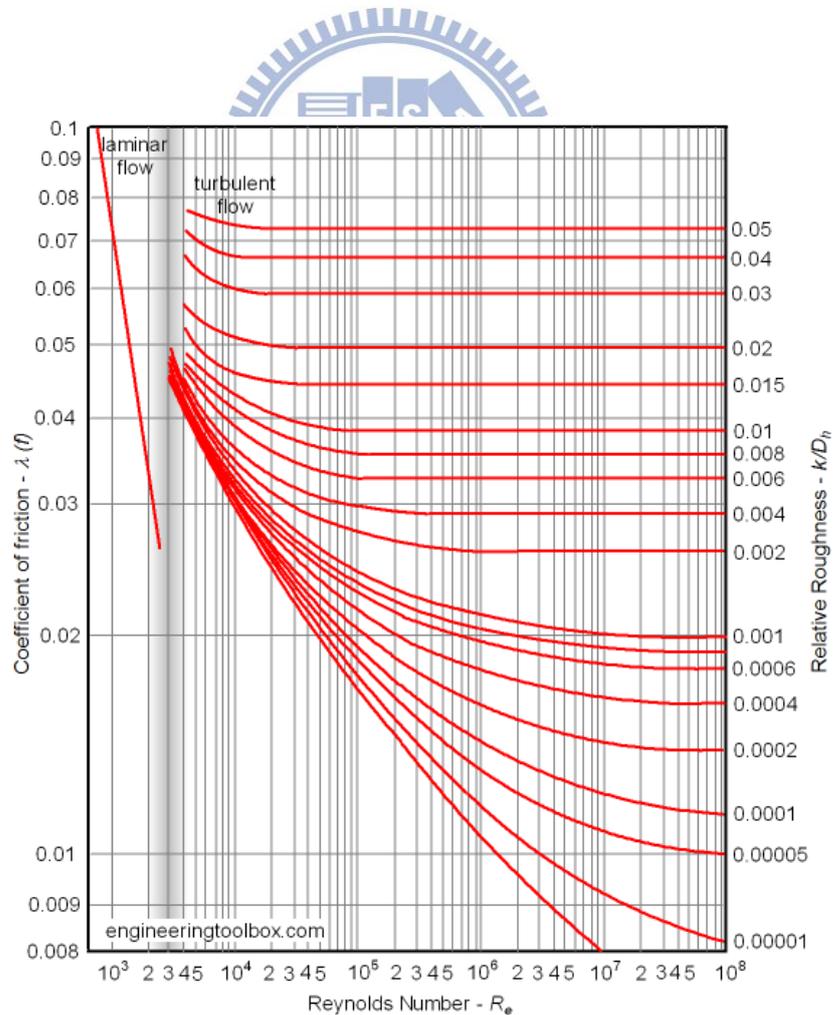


圖 4-1 Moody Diagram( $R_e$  vs  $C_f$ )(The Engineering ToolBox)

表 4-1 材料強度參數對照表(The Engineering ToolBox)

Surface	Absolute Roughness Coefficient - k -	
	(m) $10^{-3}$	(feet)
Copper, Lead, Brass, Aluminum (new)	0.001 - 0.002	$3.33 - 6.7 \cdot 10^{-6}$
PVC and Plastic Pipes	0.0015 - 0.007	$0.5 - 2.33 \cdot 10^{-5}$
Stainless steel	0.015	$5 \cdot 10^{-5}$
Steel commercial pipe	0.045 - 0.09	$1.5 - 3 \cdot 10^{-4}$
Stretched steel	0.015	$5 \cdot 10^{-5}$
Weld steel	0.045	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Galvanized steel	0.15	$5 \cdot 10^{-4}$
Rusted steel (corrosion)	0.15 - 4	$5 - 133 \cdot 10^{-4}$
New cast iron	0.25 - 0.8	$8 - 27 \cdot 10^{-4}$
Worn cast iron	0.8 - 1.5	$2.7 - 5 \cdot 10^{-3}$
Rusty cast iron	1.5 - 2.5	$5 - 8.3 \cdot 10^{-3}$
Sheet or asphalted cast iron	0.01 - 0.015	$3.33 - 5 \cdot 10^{-5}$
Smoothed cement	0.3	$1 \cdot 10^{-3}$
Ordinary concrete	0.3 - 1	$1 - 3.33 \cdot 10^{-3}$
Coarse concrete	0.3 - 5	$1 - 16.7 \cdot 10^{-3}$
Well planed wood	0.18 - 0.9	$6 - 30 \cdot 10^{-4}$
Ordinary wood	5	$16.7 \cdot 10^{-3}$

由式(4.1)計算求得本研究之最大剪應力為 626.65Pa(齊汝鴻，2012 為

579.29Pa)，增加的原因為流速由 10.98m/s 提升至 11.42m/s。

## 4.2 試驗規劃流程

本節將說明室內試驗、現地試驗之規劃、試驗流程及所需設備。

### 室內試驗流程

- (1) 試體及粒料的準備及製作(3.3.2 節、3.4 節)
- (2) 以不同濃度及不同粒徑的濁水進行試驗(表 3-2)，依照 4.4 節試驗方法及步驟進行。
- (3) 數據分析及討論。

### 現地試驗流程(參考齊汝鴻，2012)

- (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。  
必要條件：水源、岩盤裸露、交通便利性。
- (3) 依照 4.4 節試驗方法及步驟進行現地試驗。
- (4) 數據分析及討論。

## 試驗儀器準備

### 室內試驗所需之設備

- (1)反力架(圖 3-37)
- (2)螺桿、12 號螺帽、12 號扳手(圖 4-2、圖 4-3)。
- (3)蓄水用大型水桶(圖 4-4)。
- (4)Mini Jet 試驗系統(圖 4-5)

### 現地試驗

- (1)小型發電機(單相 110V、使用 95 無鉛汽油)(圖 4-6)
- (2)延長線(50 呎)。
- (3)蓄水用大型水桶。
- (4)手持式電動鑽機(圖 4-8)。
- (5)手持式電動砂輪機(圖 4-9)。
- (6)橡膠槌(圖 4-10)。
- (7)五金工具。

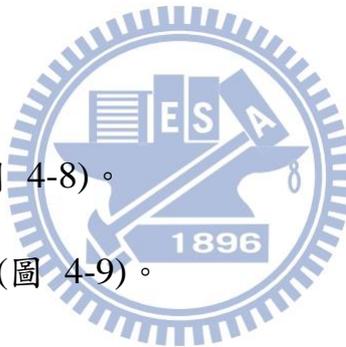




圖 4-2 螺桿、12 號螺帽



圖 4-3 12 號扳手



圖 4-4 蓄水用水桶(齊汝鴻，2012)



圖 4-5 Mini Jet 試驗系統(齊汝鴻，2012)



圖 4-6 小型發電機(齊汝鴻，2012)



圖 4-7 試驗用粒料



圖 4-8 手持式電動鑽機(齊汝鴻，2012)



圖 4-9 手持式電動砂輪機



圖 4-10 橡膠槌

### 4.3 試驗儀器組裝及試驗步驟

本節將介紹室內試驗的方法及步驟，現地試驗部分因與齊汝鴻(2012)並無太大差異，故不再贅述。以下為室內試驗步驟：

- (1)將製作完成之試體，置入反力架中，並以水平氣泡儀確定是否水平。
- (2)於試體表面選取試驗位置。
- (3)將室內用壓克力水密盒放置於試驗位置，並安裝上螺桿，並同步調整四根螺桿上的螺帽，調整至上部角鋼支架微微變形，再連接上述的 Mini Jet 管路系統(圖 4-11)。
- (4)裝置準備就緒，確定在噴嘴關閉的情況下就可將泵浦開啟，並待壓克力盒內蓄滿水，此時時間記錄為 0，然後紀錄水壓及試體初始深度。

(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( $\tau_e$ )、臨界剪應力( $\tau_c$ )、沖蝕系數( $k_d$ )、沖蝕率( $\varepsilon$ )。

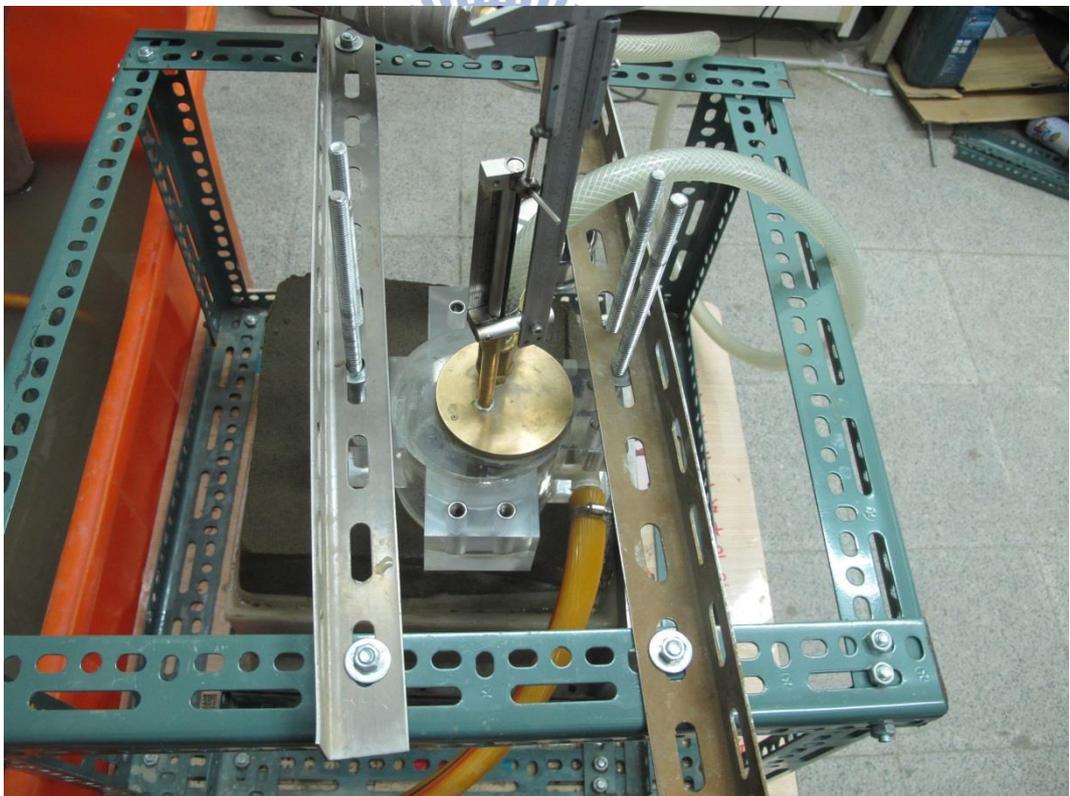


圖 4-11(室內試驗實際狀況)

## 第五章、實驗室及現地試驗結果與討論

本研究首先進行室內的濁水下沖蝕試驗，室內試驗所採用的試體皆為湖山水庫取回之砂岩岩塊，經磨平表面後。再以控制水中的泥沙濃度及泥沙粒徑，並比較清水試驗，探討兩者對於沖蝕率的影響。而現地試驗則以現地之水源及混入已經配置完成的泥沙(圖 4-7)，進行不同條件的試驗。以下分別提出室內及現地試驗的結果，並加以討論。

### 5.1 實驗室室內試驗

本研究針對室內試驗的方法，做了大幅度的修改，目的是為了克服齊汝鴻(2012)試體表面剝離的問題，本研究所製作的不需要將金屬底座嵌入試體之室內用壓克力水密盒及反力架成功的克服此問題，因此一個試體能進行多組試驗，可降低不同試體異質性所造成的誤差。齊汝鴻(2012)的試體如圖 5-1、圖 5-2、圖 5-3，以岩心作為試體時，因岩心與白蠟的材料性質不同，且岩心與白蠟的表面並非齊平，產生差異侵蝕使得岩心出現嚴重的剝離現象。而以岩塊作為試體時，因必須嵌入底座，造成試體表面龜裂且試體無法重複使用。本研究以室內用壓克力水密盒及反力架進行試驗即無出現上述的狀況。如圖 5-4、圖 5-5、圖 5-6 所示，證明本研究成功克服齊汝鴻(2012)室內試驗中出現的問題。



圖 5-1 齊汝鴻(2012)岩心室內試驗(齊汝鴻，2012)

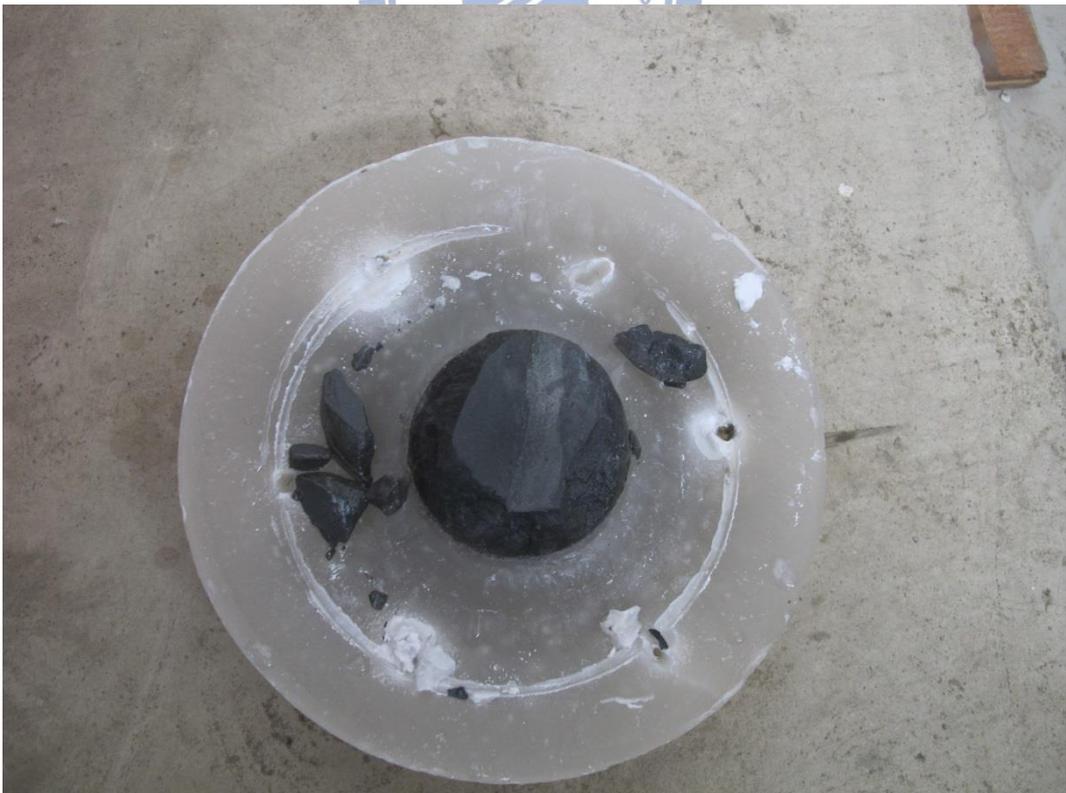


圖 5-2 齊汝鴻(2012)岩心室內試驗

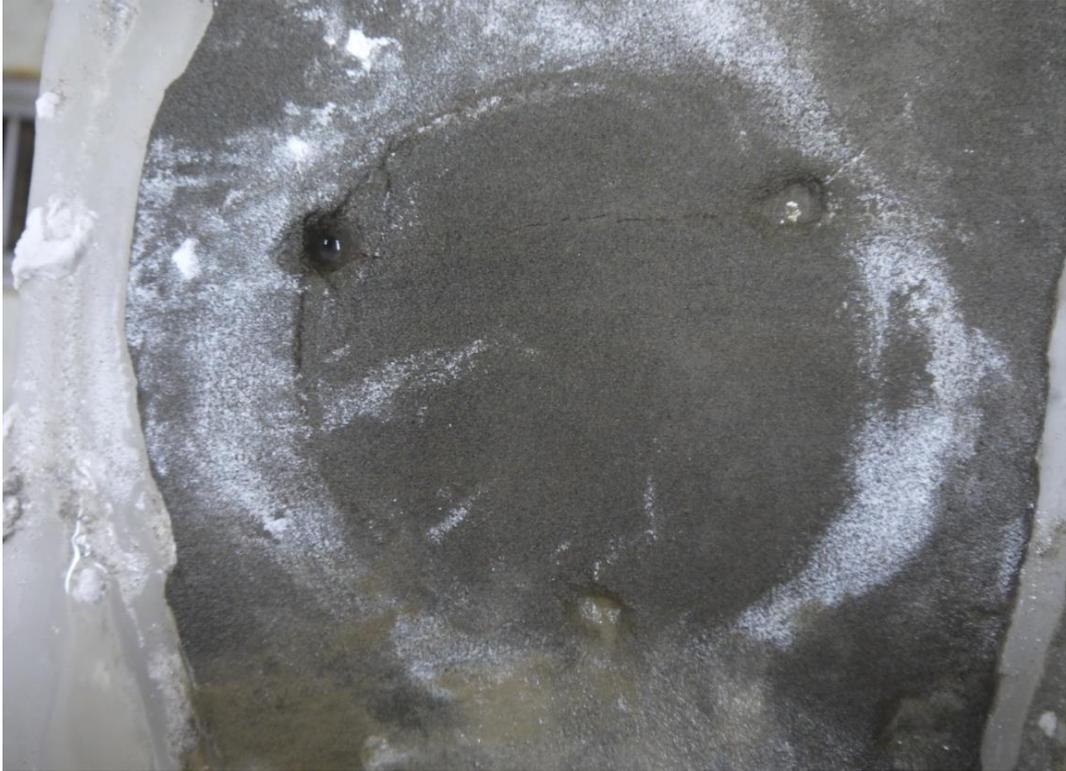


圖 5-3 齊汝鴻(2012)岩塊室內試驗(齊汝鴻，2012)

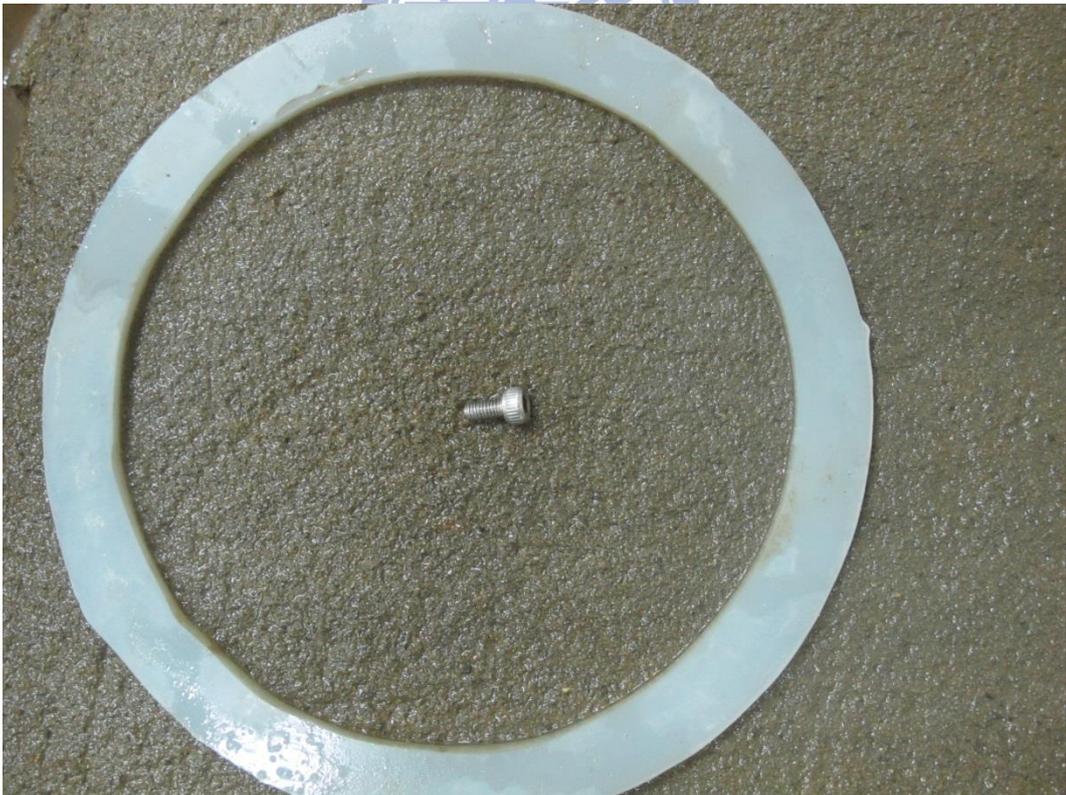


圖 5-4 本研究室內試驗

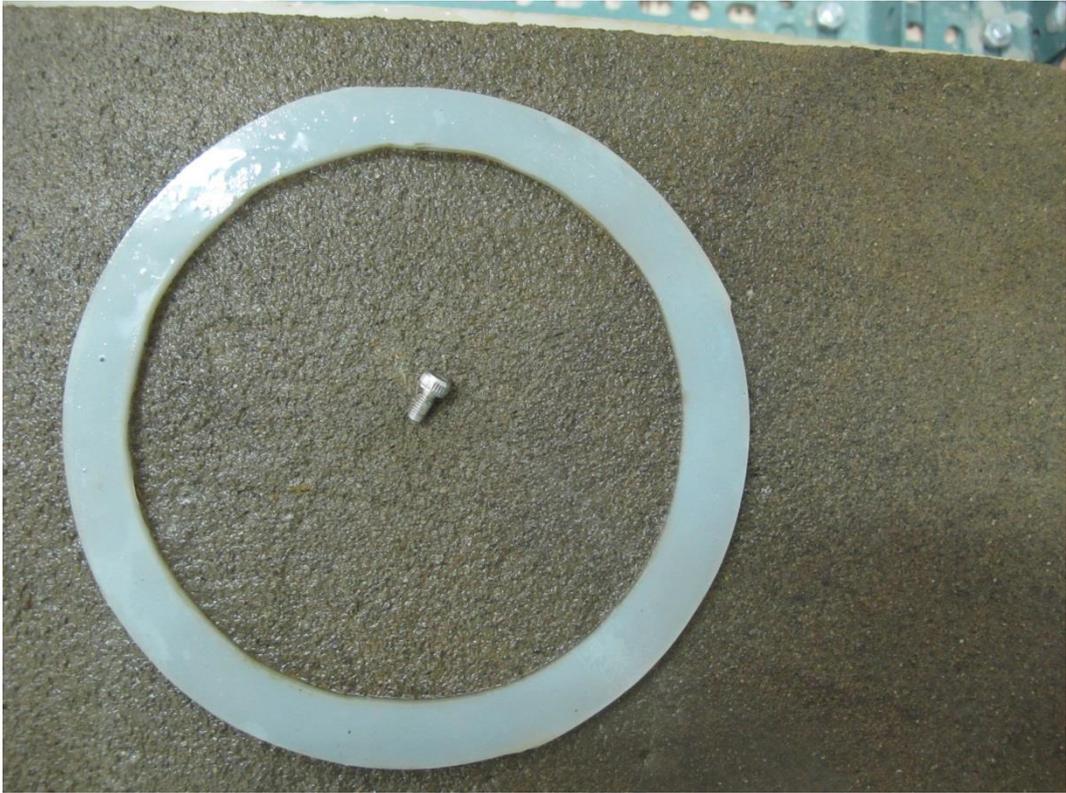


圖 5-5 本研究室內試驗



圖 5-6 本研究室內試驗-試體表面全圖

### 5.1.1 室內試驗結果

本研究針對清水、泥沙濃度及泥沙粒徑共進行了 36 組飽和試體的濁水沖蝕試驗，12 組未飽和試體的濁水下沖蝕試驗及 3 組清水沖蝕試驗，總共施作 51 組室內試驗。所採用之試體皆為湖山水庫岩塊，岩性為砂岩，其單壓強度於現地使用電子式史密特槌所得知單壓強度為 4MPa，粒徑分析資料如圖 5-7，其主要粒徑分佈範圍為 0.15mm~0.425mm。

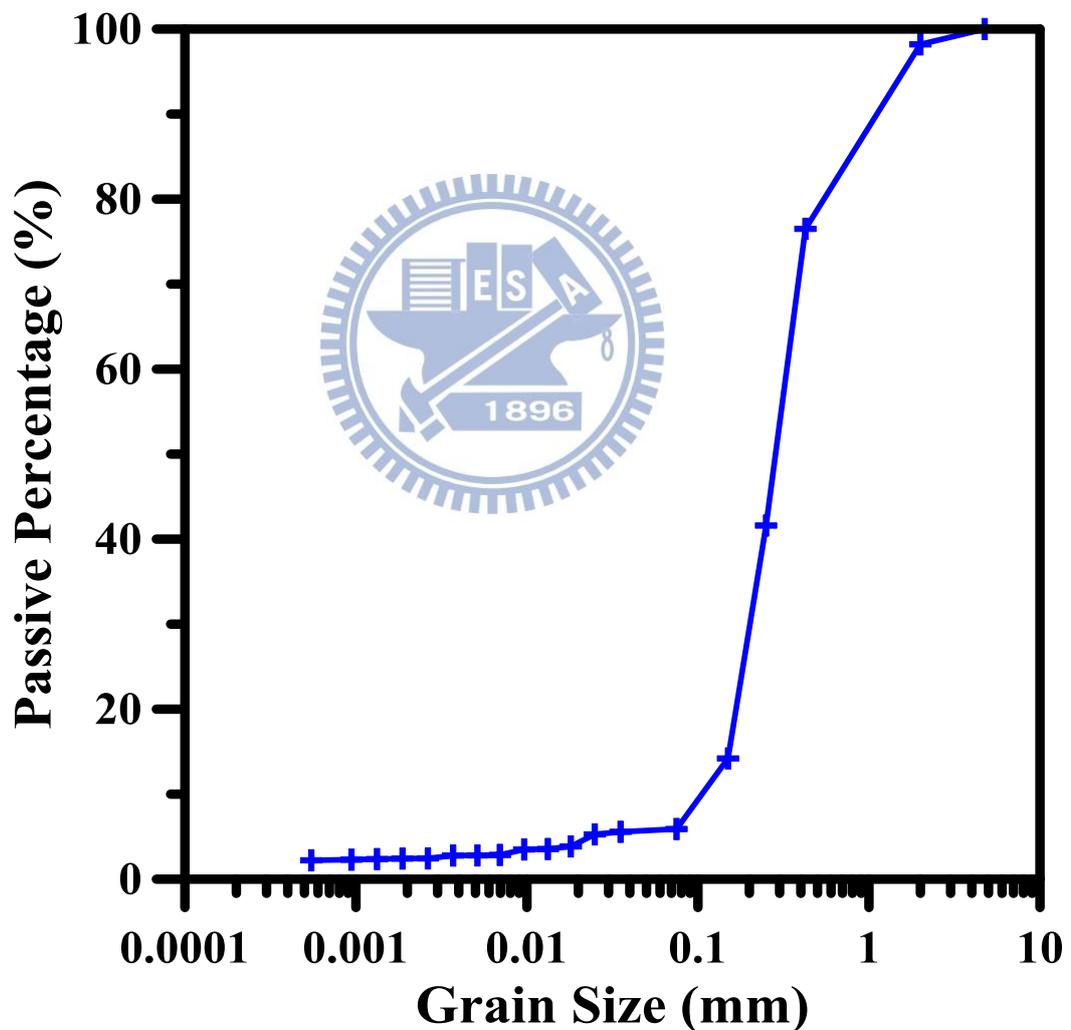


圖 5-7 湖山水庫岩塊粒徑分析資料

以下就提出各試驗結果並加以討論。

表 5.1 為未飽和試體的試驗結果，由結果顯示過通過相同篩號濁水試驗，濁水濃度增加，沖蝕深度並未呈現單調增加，例如過 60 號篩試體當濃度由 1000ppm, 5000ppm 增加至 10000ppm，其總沖蝕深度分別為 1.96mm, 0.98mm, 1.52mm，結果顯然與物理現象不符。其原因應是試體研磨的過程中，所殘留的碎屑並沒有完全清除，而導致試驗進行的過程中，殘留有碎屑的試體表面因水流的沖擊，而使這些碎屑剝離，造成短時間內就出現較大的沖蝕量。因此為避免此狀況再度發生，室內試驗的試體一律先研磨過後再以毛刷及氣槍清理過後，再靜置於清水中 24 小時，待其飽和再進行試驗。

表 5-1 未飽和試體試驗結果

實驗代號	總沖刷深度	沖蝕率( $\epsilon$ )	侵蝕系數( $k_d$ )
#40 1000ppm	2.02(mm)	2.2752 (mm/hr)	$7.61 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40 5000ppm	1.50(mm)	1.6968 (mm/hr)	$8.53 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40 10000ppm	2.48(mm)	2.5858 (mm/hr)	$7.88 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#60 1000ppm	1.96(mm)	2.0514 (mm/hr)	$8.51 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#60 5000ppm	0.98(mm)	1.1744 (mm/hr)	$7.01 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#60 10000ppm	1.52(mm)	1.5851 (mm/hr)	$7.79 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#100 1000ppm	1.58(mm)	2.0193 (mm/hr)	$8.42 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#100 5000ppm	1.50(mm)	1.5698 (mm/hr)	$6.10 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#100 10000ppm	2.02(mm)	2.6247 (mm/hr)	$7.76 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
Mix 1000ppm	1.04(mm)	1.0279 (mm/hr)	$9.21 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
Mix 5000ppm	0.48(mm)	0.5781 (mm/hr)	$9.01 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
Mix 10000ppm	1.30(mm)	1.3528 (mm/hr)	$7.55 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )

表 5-2 為飽和岩塊的清水室驗結果，由表顯示清水試驗的沖蝕深度介於 0.14-0.18 之間平均值為 0.16mm，沖蝕深度甚小，顯見清水沖刷對岩石影響並不大。

表 5-2 清水試驗結果(飽和試體)

實驗代號	總沖刷深度	沖蝕率( $\epsilon$ )	侵蝕系數( $k_d$ )
清水	0.16(mm)	0.1556 (mm/hr)	$1.10 \times 10^{-8}$ ( $m^3/N-s$ )
清水	0.18(mm)	0.1697 (mm/hr)	$9.24 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
清水	0.14(mm)	0.1425 (mm/hr)	$8.71 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )

表 5-3 為通過 40 號篩各濃度試驗結果，由表顯示濃度 1000ppm 之沖蝕深度介於 0.28-0.34mm，平均值為 0.31mm，濃度 5000ppm 之沖蝕深度介於 0.30-0.40mm，平均值為 0.35mm，濃度 10000ppm 之沖蝕深度介於 0.48-0.60mm，平均值為 0.53mm。前述結果顯示沖蝕深度及沖蝕率實驗一致性尚佳。圖 5-8 顯示濁水濃度 1000ppm 及 5000ppm 的總沖蝕深度及沖蝕率，雖然有上升，但是提高幅度並不算明顯，而濁水濃度 10000ppm 時的總沖蝕深度及沖蝕率則有較高幅度的上升，應為濁水濃度大幅提高後，水中的粒料，增加磨蝕沖蝕作用效率所導致。

表 5-3 通過 40 號篩各濃度試驗結果(飽和試體)

實驗代號	總沖刷深度	沖蝕率( $\epsilon$ )	侵蝕系數( $k_d$ )
#40+飽和 1000ppm	0.30(mm)	0.3495 (mm/hr)	$7.38 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 1000ppm	0.34(mm)	0.4317 (mm/hr)	$9.87 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 1000ppm	0.28(mm)	0.2862 (mm/hr)	$8.44 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 5000ppm	0.40(mm)	0.5176 (mm/hr)	$1.06 \times 10^{-8}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 5000ppm	0.30(mm)	0.3034 (mm/hr)	$9.05 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 5000ppm	0.36(mm)	0.3676 (mm/hr)	$9.59 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 10000ppm	0.60(mm)	0.6330 (mm/hr)	$6.95 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 10000ppm	0.48(mm)	0.5134 (mm/hr)	$9.97 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )
#40+飽和 10000ppm	0.52(mm)	0.5593 (mm/hr)	$9.69 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N \cdot s$ )

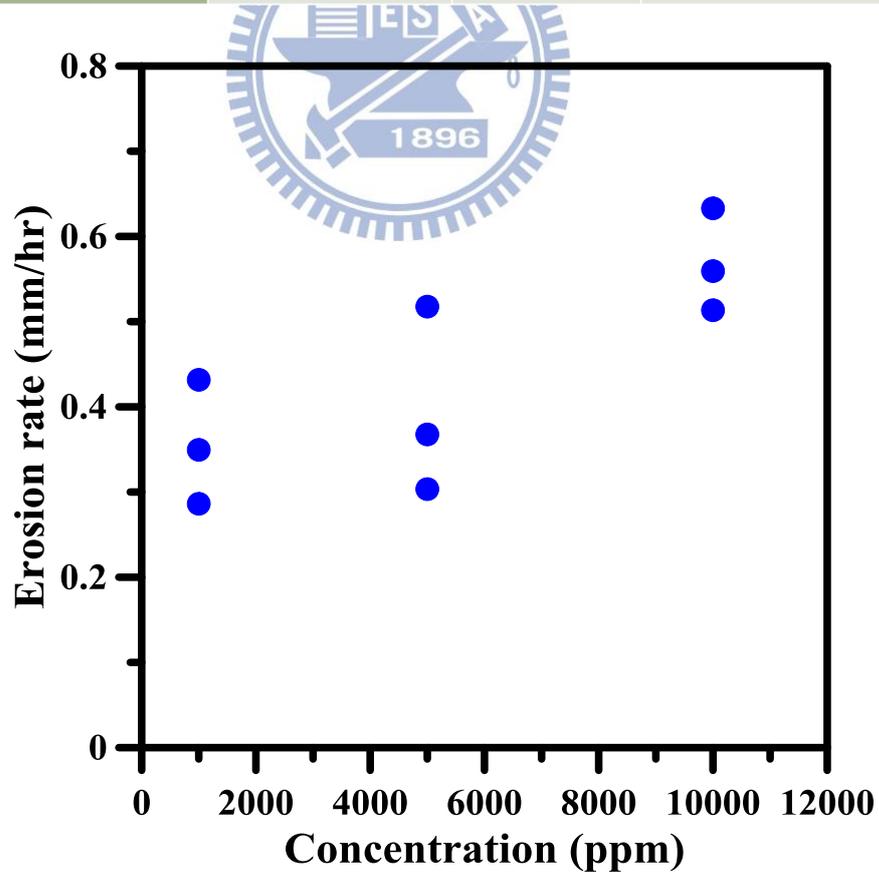


圖 5-8 濃度與沖蝕率關係圖(過 40 號篩)

表 5-4 為通過 60 號篩各濃度試驗結果，由表顯示濃度 1000ppm 之沖蝕深度介於 0.20-0.26mm，平均值為 0.22mm，濃度 5000ppm 之沖蝕深度介於 0.28-0.34mm，平均值為 0.31mm，濃度 10000ppm 之沖蝕深度介於 0.44-0.50mm，平均值為 0.46mm。前述結果顯示沖蝕深度及沖蝕率一致性佳。圖 5-9 顯示濁水濃度 1000ppm 及 5000ppm 的總沖蝕深度及沖蝕率，雖然有上升，但是幅度亦不如濁水濃度 10000ppm 明顯的提高，且與通過 40 號篩各濃度試驗結果比較後，可得到平均沖蝕深度大約都下降了 10 個百分點，因此可得到當粒徑大小改變時，亦會影響到沖蝕深度及沖蝕率，但影響程度並不及濃度的改變。

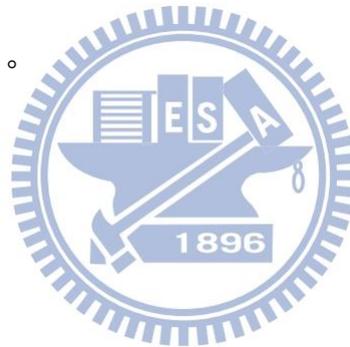


表 5-4 通過 60 號篩各濃度試驗結果(飽和試體)

實驗代號	總沖刷深度	沖蝕率( $\epsilon$ )	侵蝕係數( $k_d$ )
#60+飽和 1000ppm	0.26(mm)	0.2492 (mm/hr)	$6.48 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 1000ppm	0.20(mm)	0.2402 (mm/hr)	$7.74 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 1000ppm	0.20(mm)	0.2307 (mm/hr)	$9.78 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 5000ppm	0.34(mm)	0.4943 (mm/hr)	$1.23 \times 10^{-8}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 5000ppm	0.28(mm)	0.3578 (mm/hr)	$1.12 \times 10^{-8}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 5000ppm	0.30(mm)	0.2702 (mm/hr)	$9.13 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 10000ppm	0.46(mm)	0.5516 (mm/hr)	$9.80 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 10000ppm	0.50(mm)	0.6507 (mm/hr)	$1.03 \times 10^{-8}$ ( $m^3/N-s$ )
#60+飽和 10000ppm	0.44(mm)	0.4700 (mm/hr)	$9.16 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )

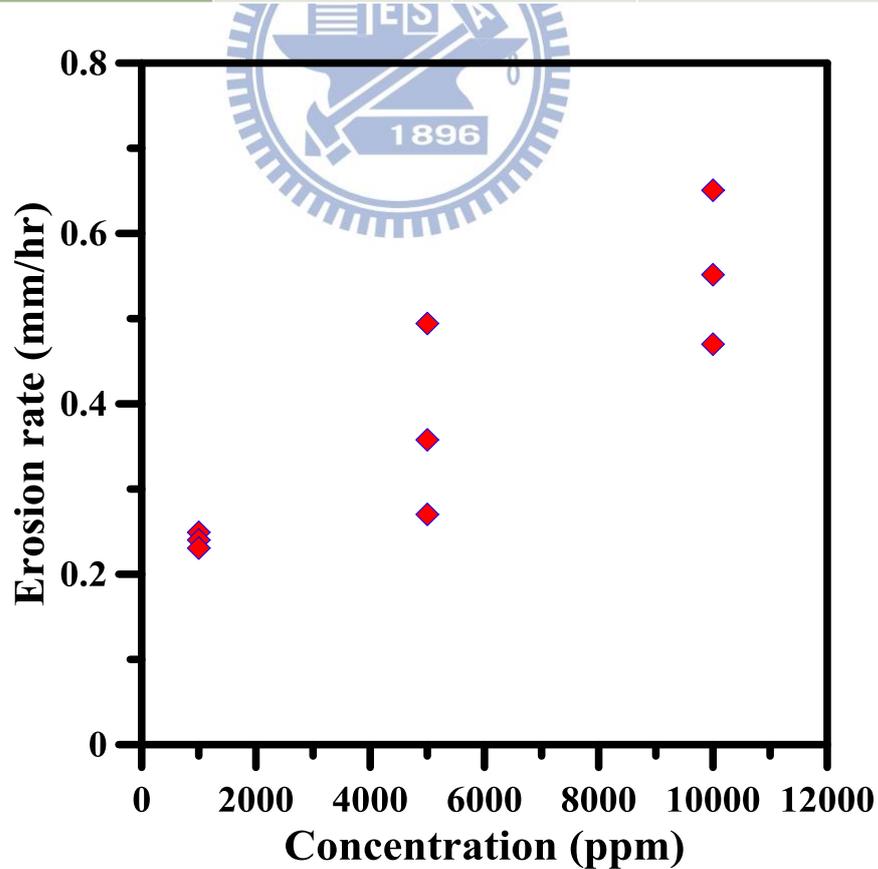


圖 5-9 濃度與沖蝕率關係圖(過 60 號篩)

表 5-5 為通過 100 號篩各濃度試驗結果，由表顯示濃度 1000ppm 之沖蝕深度介於 0.16-0.22mm，平均值為 0.18mm，濃度 5000ppm 之沖蝕深度介於 0.30-0.42mm，平均值為 0.37mm，濃度 10000ppm 之沖蝕深度介於 0.36-0.42mm，平均值為 0.38mm。圖 5-10 顯示濁水濃度 10000ppm 的總沖蝕深度及沖蝕率雖然高於 5000ppm 的總沖蝕深度及沖蝕率，但是幅度有限，可能是因為 5000ppm 第三組的試驗結果之沖刷深度為 0.42mm，此組試驗之後段出現單一次較大幅度的沖蝕使得沖蝕率高達 0.5567(mm/hr)，所導致。但由這一系列的試驗結果可以看到，當粒徑減小時，濃度 1000ppm 的試驗結果所得之沖蝕率趨近於清水試驗所得之沖蝕率。



表 5-5 通過 100 號篩各濃度試驗數據(飽和試體)

實驗代號	總沖刷深度	沖蝕率( $\epsilon$ )	侵蝕系數( $k_d$ )
#100+飽和 1000ppm	0.22(mm)	0.2494 (mm/hr)	$7.10 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 1000ppm	0.16(mm)	0.1756 (mm/hr)	$7.31 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 1000ppm	0.16(mm)	0.1357 (mm/hr)	$8.30 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 5000ppm	0.38(mm)	0.3975 (mm/hr)	$8.64 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 5000ppm	0.30(mm)	0.2930 (mm/hr)	$9.56 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 5000ppm	0.42(mm)	0.5567 (mm/hr)	$9.30 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 10000ppm	0.36(mm)	0.3876 (mm/hr)	$7.25 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 10000ppm	0.42(mm)	0.4824 (mm/hr)	$9.30 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#100+飽和 10000ppm	0.36(mm)	0.3514 (mm/hr)	$9.69 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )

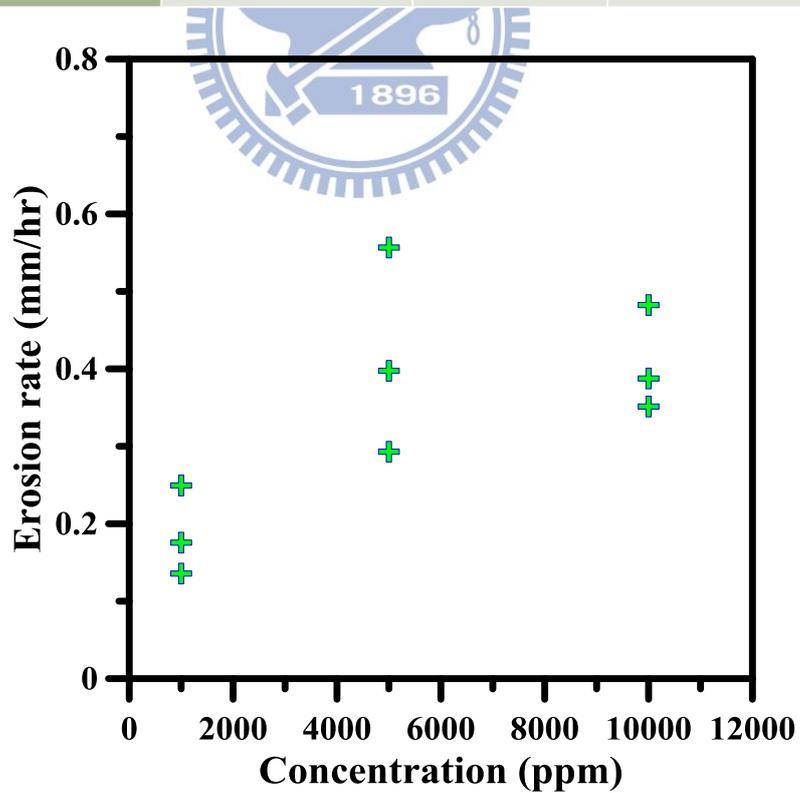


圖 5-10 濃度與沖蝕率關係圖(過 100 號篩)

表 5-6 為通過混合粒徑各濃度試驗結果，此一系列試驗所使用的粒料是依照頭前溪之河床淤砂之粒徑分佈所配製而成(表 3-3、圖 3-8)。由表 5-6 顯示濃度 1000ppm 之沖蝕深度介於 0.24-0.30mm，平均值為 0.27mm，濃度 5000ppm 之沖蝕深度介於 0.32-0.36mm，平均值為 0.35mm，濃度 10000ppm 之沖蝕深度介於 0.44-0.50mm，平均值為 0.47mm。圖 5-11 顯示各濃度的總沖蝕深度及沖蝕率皆有上升的趨勢，但 1000ppm 與 5000ppm 的差異並不大，10000ppm 的平均沖蝕深度比 5000ppm 的平均沖蝕深度高了 0.20mm，因混合粒徑試驗的粒徑主要分布範圍在 40 號篩及 60 號篩，比較其他粒徑的試驗可以發現混合粒徑的試驗結果就落在 40 號篩及 60 號篩之間，故此結果亦符合預期。



表 5-6 模擬現地泥砂粒徑各濃度試驗數據(飽和試體)

實驗代號	總沖刷深度	沖蝕率( $\epsilon$ )	侵蝕係數( $k_d$ )
#Mix+飽和 1000ppm	0.30(mm)	0.3562 (mm/hr)	$6.77 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 1000ppm	0.24(mm)	0.2457 (mm/hr)	$9.17 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 1000ppm	0.26(mm)	0.2373 (mm/hr)	$9.51 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 5000ppm	0.32(mm)	0.3141 (mm/hr)	$7.25 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 5000ppm	0.36(mm)	0.3841 (mm/hr)	$7.00 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 5000ppm	0.36(mm)	0.4060 (mm/hr)	$1.02 \times 10^{-8}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 10000ppm	0.46(mm)	0.5077 (mm/hr)	$7.78 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 10000ppm	0.50(mm)	0.5522 (mm/hr)	$8.44 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )
#Mix+飽和 10000ppm	0.44(mm)	0.4037 (mm/hr)	$9.68 \times 10^{-9}$ ( $m^3/N-s$ )

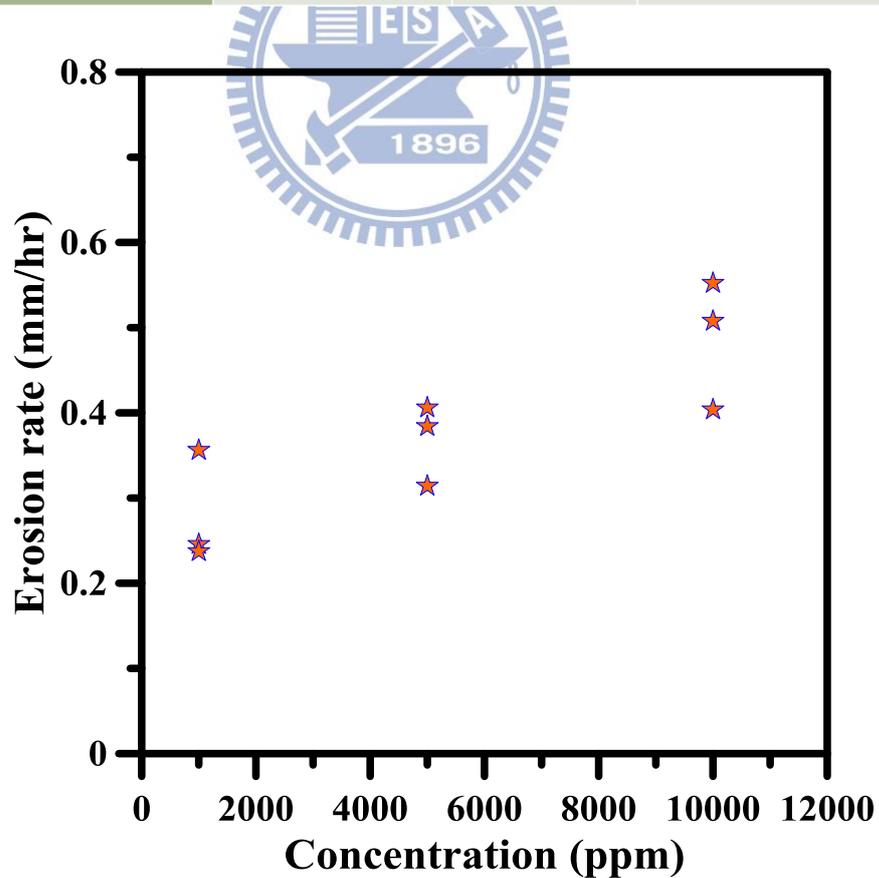


圖 5-11 濃度與沖蝕率關係圖(Mix)

### 說明相同濃度粒徑的影響

圖 5-12 為整理前述清水及不同濃度和粒徑的實驗結果平均值的綜合圖。圖中顯示粒徑大小的改變對於總沖刷深度及沖蝕率的影響，並不及濁水濃度的影響。因此推測，因本研究的試驗所使用的泥沙粒徑皆在 0.425mm 以下，因粒徑細小故對沖蝕深度及沖蝕率的影響並不大，影響沖蝕率及沖蝕深度的主要的因素為濁水濃度，尤其當濃度提高至 10000ppm 時，沖蝕的狀況更加顯著。室內試驗的結果呈現出，沖蝕的狀況在高濃度時有明顯的提升，與沖刷釘(經濟部水利署水利規劃試驗所,2011)量測所得的結果相符，顯見河道的沖蝕，主要發生在洪汛期間。

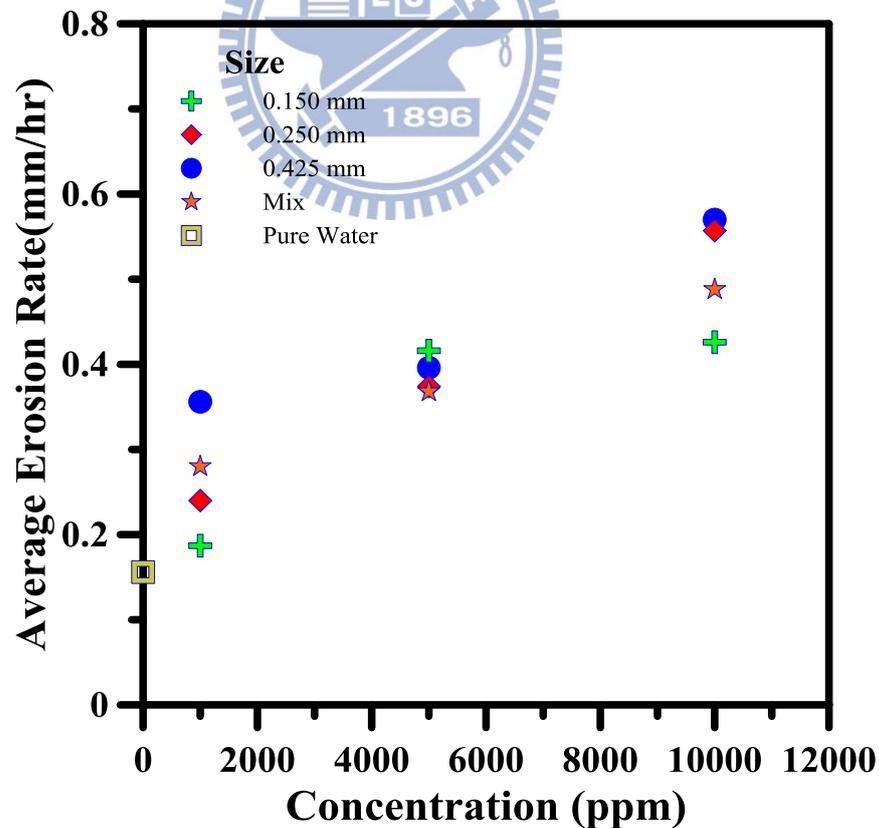


圖 5-12 濃度與沖蝕率關係圖(綜合比較)

由表 5-2、表 5-3、表 5-4、表 5-5、表 5-6 及圖 5-8、圖 5-9、圖 5-10、圖 5-11、圖 5-12 的數據結果可用來探討不同的濁水濃度及泥砂粒徑對於沖蝕率的影響，由數據中顯示，當泥沙粒徑為 0.425mm(通過 40 號篩)時，濁水濃度 1000ppm 及 5000ppm 的總沖刷深度及沖蝕率，雖然有上升，但幅度並不算明顯，而濁水濃度 10000ppm 時的總沖刷深度及沖蝕率則有較明顯的提高。泥沙粒徑 0.250mm(通過 60 號篩)的試驗中，濃度增加時，總沖刷深度及沖蝕率亦都有上升的趨勢，但當濃度增加至 10000ppm 時，兩項數據上升的幅度較為明顯。泥沙粒徑 0.150mm(通過 100 號篩)，此組試驗為本研究中所進行的所有單一粒徑試驗中，粒徑最小的一組，此組數據顯示當粒徑漸小時，影響總沖刷深度及沖蝕率的主控因素為濁水濃度。而綜合比較各粒徑不同濃度下的試驗結果(圖 5-12)，濃度為 1000ppm 時的平均沖蝕率與清水的沖蝕率差異不大，粒徑愈小的試驗結果愈接近清水試驗的結果，而當濃度提高時，粒徑大小對於沖蝕率的影響亦漸小。因此，未來若河岸之岩性與本研究試驗之試體岩性相似且瞭解河水含砂粒徑分佈，由本研究結果應可推估其磨蝕率。

## 5.2 現地試驗

本研究中共選擇 4 處不同位置施作現地試驗，試驗地點分別為，大甲溪流域石岡壩下游，頭前溪流域國道三號橋上游，大安溪大峽谷，大漢溪流域武嶺橋下游。每次試驗所需水量為 150 公升，以蓄水用水桶(圖 4-4)上

之刻度為標準。濁水試驗預設濃度為 10000ppm，即於 150 公升清水中加入 1500 克的細粒料，除記錄試驗所需之數據，亦須記錄試驗面之傾斜角度。

### 5.2.1 大甲溪現地試驗

試驗地點位於石岡壩下游右岸(圖 5-13 中紅圈處)。現地實驗施作如圖 5-14 所示。該區地質屬卓蘭層，為厚層頁岩。該區的河川水位面與可步行的施工便道，高差約五米，且考量安全的問題，認定此處並不適合進行側壁沖刷試驗。點位的選擇，則盡量避開節理發達處，該區共施作兩組試驗，一組為現地水源，一組為現地水源再加入以配置完成的泥砂粒料。試驗完畢之後，試驗用水需作比重瓶試驗求取濃度。試驗結果如表 5-7、表 5-8、表 5-9 所示。



圖 5-13 大甲溪現地試驗位置(google earth)



圖 5-14 大甲溪現地試驗狀

大甲溪試驗結果

表 5-7 大甲溪石岡壩試驗結果

TWD97 橫座標	225993	試驗日期	102 年 6 月 24 日
TWD97 縱座標	2686023	傾斜度	12 度
地 質	卓蘭層 厚層頁岩		
試驗類型	原溪水試驗	濁水試驗	
濃度(ppm)	842	10684	
沖蝕深度(mm)	0.44	2.94	
$k_d(m^3/N-s)$	$1.35 \cdot 10^{-8}$	$9.43 \cdot 10^{-9}$	
$\varepsilon(mm/hr)$	0.592	3.486	

表 5-8 大甲溪石岡壩試驗照片

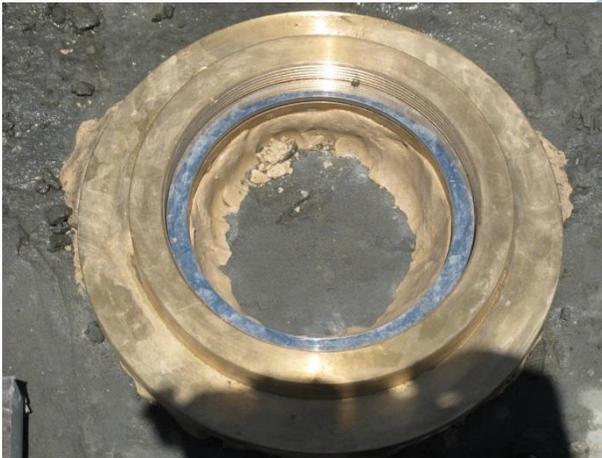
原溪水試驗前



濁水試驗前



原溪水試驗後



濁水試驗後

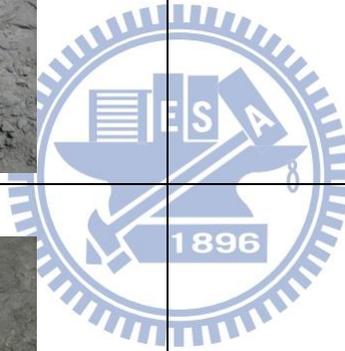
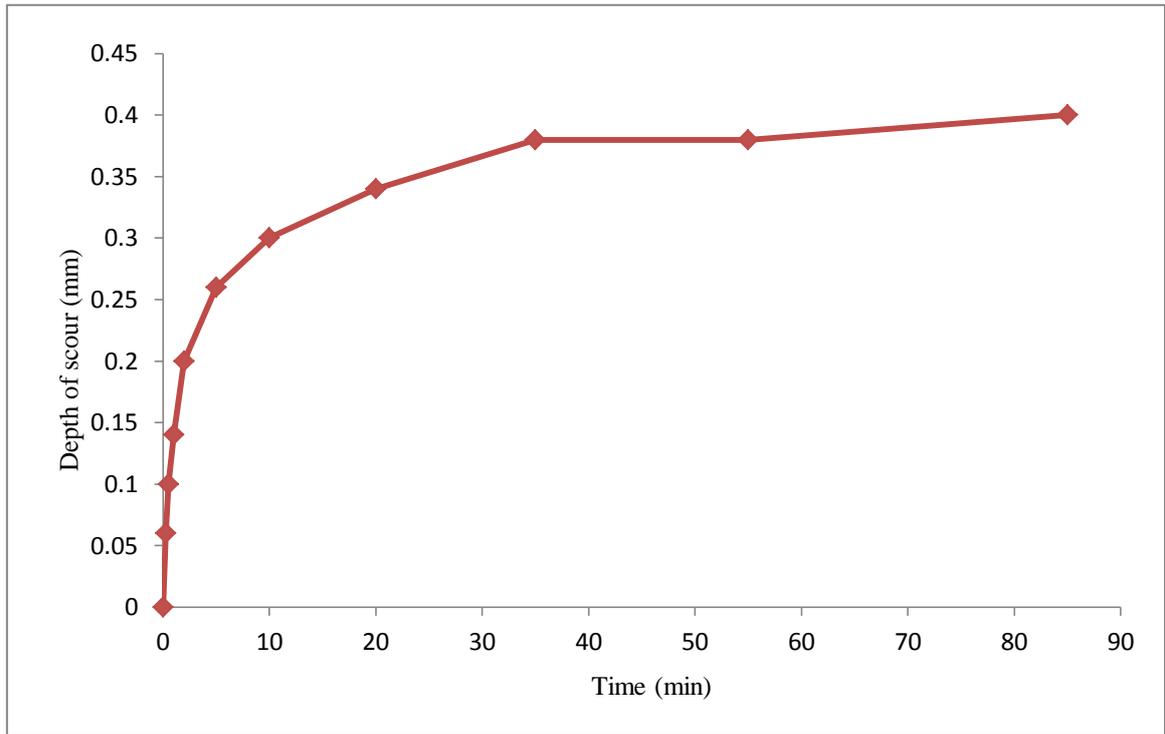
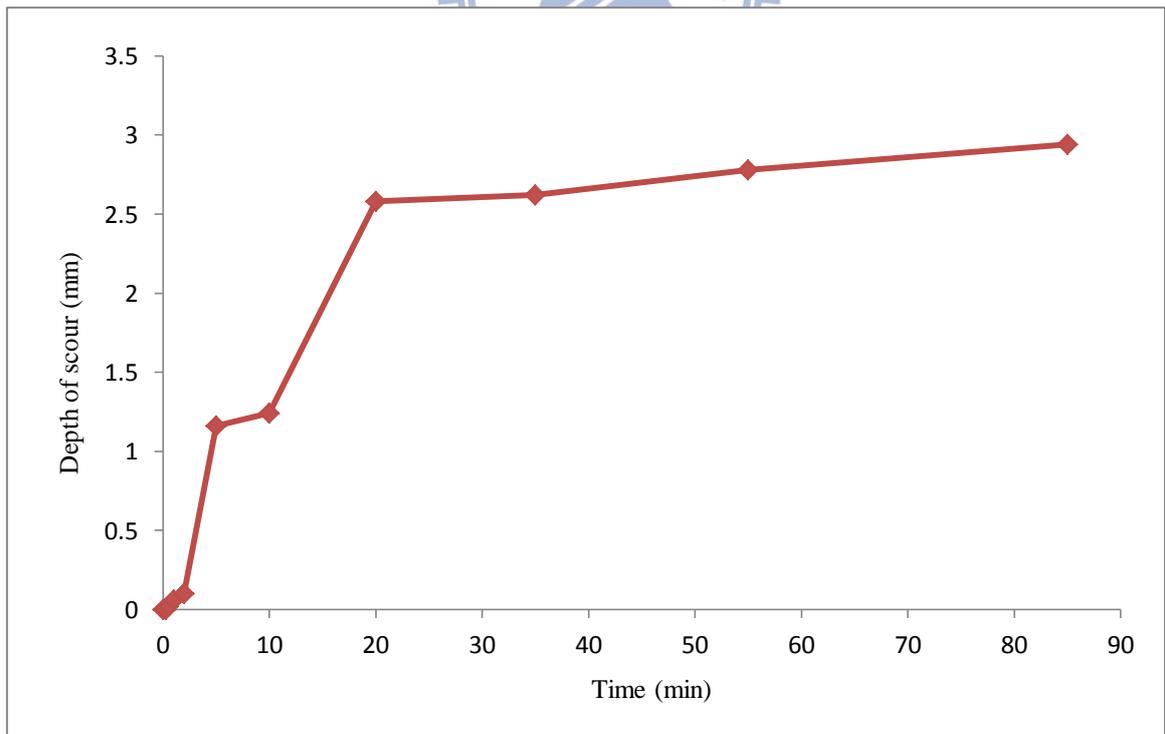


表 5-9 大甲溪石岡壩試驗沖蝕深度

原溪水試驗沖蝕深度



濁水試驗沖蝕深度



## 大甲溪現地試驗結果討論

本次現地試驗共進行兩組試驗，一組為現地水源，另一組為現地水源再混入泥沙粒料製成高濃度的濁水試驗。經比重瓶試驗所得現地水源之濃度為 842ppm，濁水試驗的濃度為 10684ppm，濃度並不符合預期為 10842ppm 的原因可能為粒料粒徑細小，受到風的影響，而有些飄散但落差並不大。整理過後的試驗面與水平面的傾斜角度為 12 度。

由表 5-7 所示，清水試驗的沖蝕深度為 0.44mm，濁水試驗的沖蝕深度為 2.94mm。結果亦如同室內試驗所得到的結果，近乎清水下所能造成的沖蝕量有限，但濁水下所造成的沖蝕量則遠高於室內實驗下的結果，研判原因有二。一：濁水試驗，於時間總和 5 分鐘及 20 分鐘時，各出現了一次大幅度的沖蝕，依照經驗推論其為岩體表面有較大的塊體脫離、二：本次的試驗岩體之岩性屬於頁岩，頁岩具有泡水之後容易軟化的性質，因此可能因表面長時間浸泡於水中開始軟化，且加上細粒料的摩擦，加劇沖刷坑的成長速度。本研究室內試驗所使用的試體皆為湖山水庫砂岩岩塊，因岩石性質不同，並未出現泡水軟化的現象，亦不會有短時間內產生大幅度的沖蝕量的狀況出現。但比較下述其他現地試驗結果，亦無 2.94mm 如此高之沖蝕量，故此組試驗僅供參考。

### 5.2.2 頭前溪現地試驗

試驗地點位於國道三號橋上游右岸(圖 5-15 中紅圈處)。現地實驗位置如圖 5-16 所示。該區地質屬卓蘭層，為泥質砂岩。該區岩盤因砂岩較為堅硬，無法順利將金屬固定座嵌入岩盤，因此未施作側壁沖蝕試驗。該區共施作兩組試驗，一組為現地水源，一組為現地水源再加入以配置完成的泥砂粒料。試驗結果如表 5-10、表 5-11、表 5-12 所示。

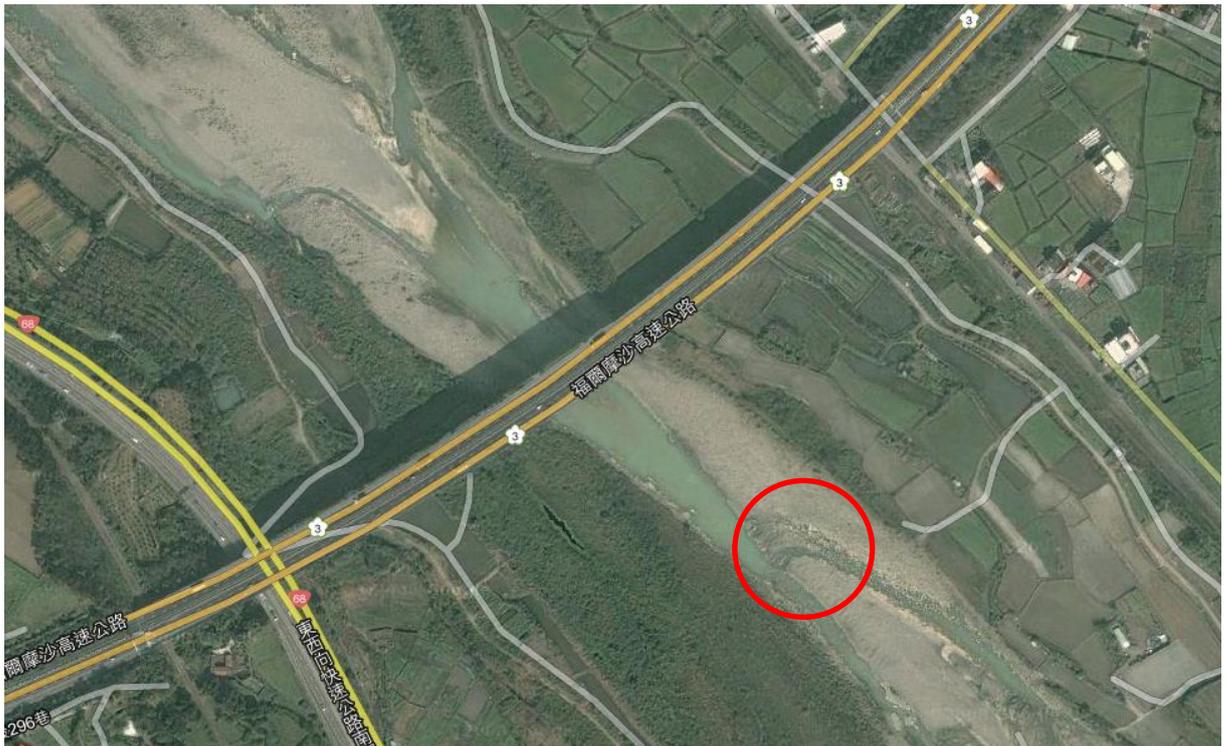


圖 5-15 頭前溪現地試驗位置(google map)



圖 5-16 頭前溪現地試驗狀況

頭前溪試驗結果

表 5-10 頭前溪試驗結果

TWD97 橫座標	225748	試驗日期	102 年 6 月 25 日
TWD97 縱座標	2739402	傾斜度	5 度
地 質	卓蘭層 泥質砂岩		
試驗類型	原溪水試驗	濁水試驗	
濃度(ppm)	354	10318	
沖蝕深度(mm)	0.54	0.74	
$k_d(m^3/N-s)$	$9.21 \times 10^{-9}$	$7.11 \times 10^{-9}$	
$\epsilon(mm/hr)$	0.463	0.743	

表 5-11 頭前溪現地試驗照片

原溪水試驗前



濁水試驗前



原溪水試驗後



濁水試驗後

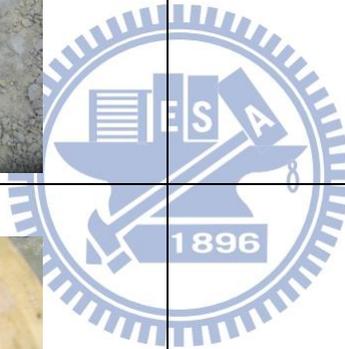
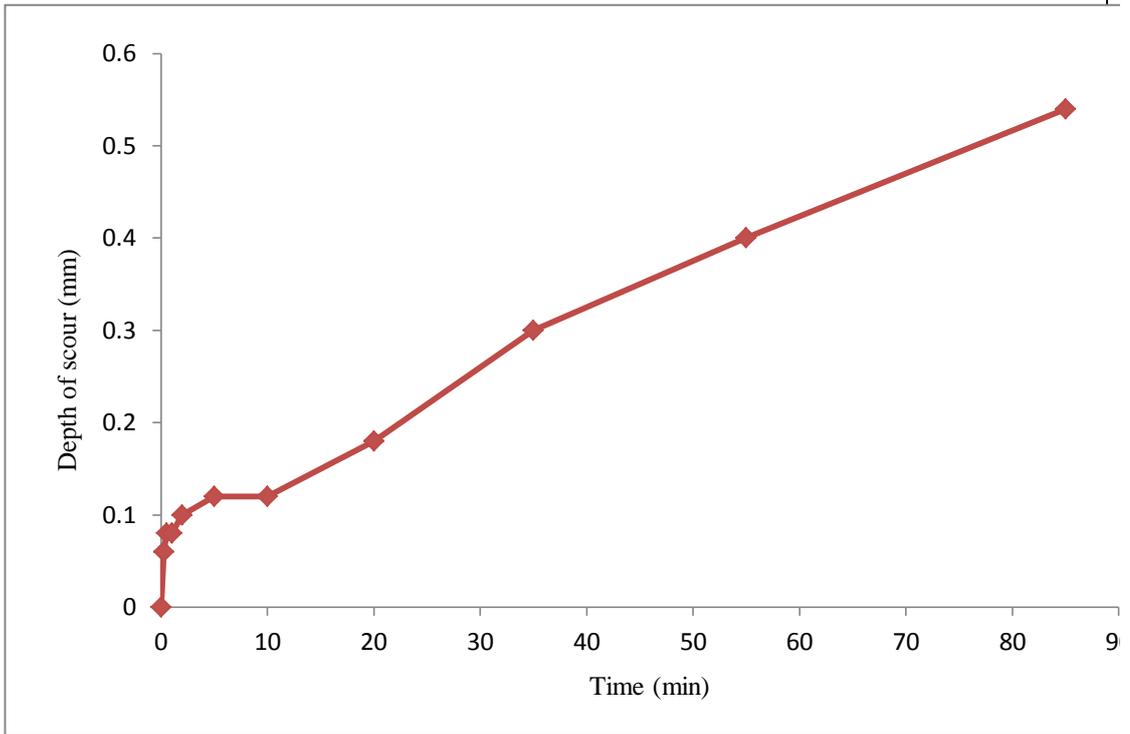
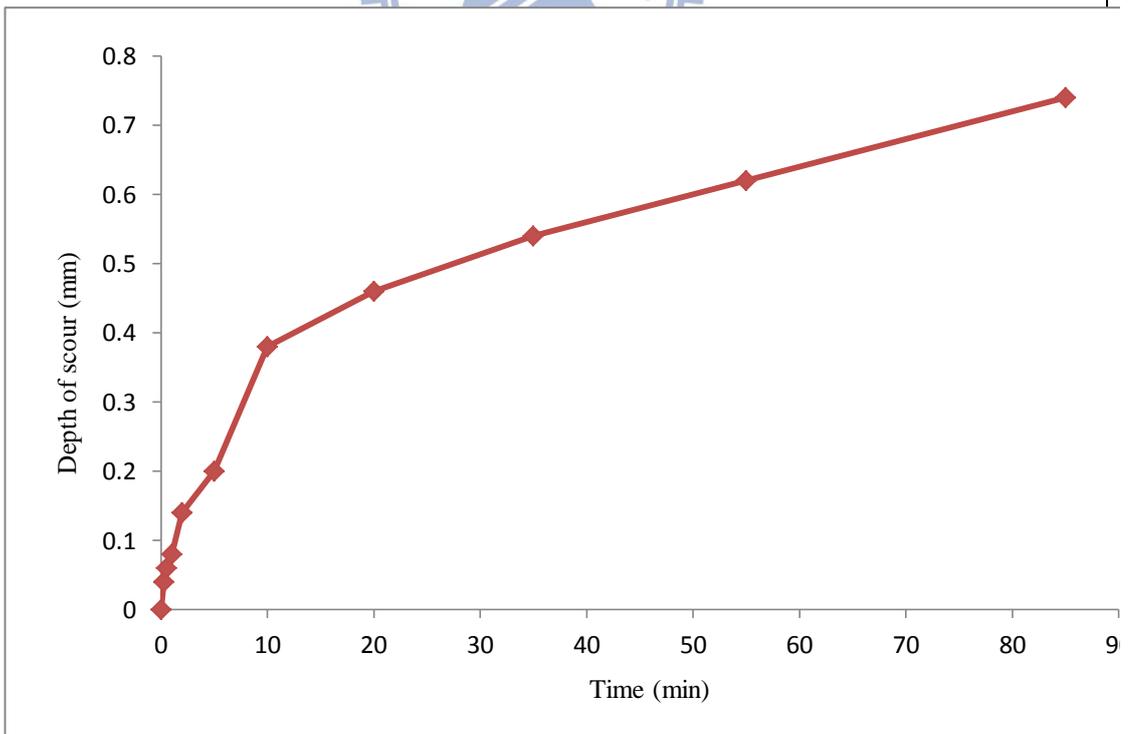


表 5-12 頭前溪試驗沖蝕深度

原溪水試驗沖蝕深度



濁水試驗沖蝕深度



## 頭前溪現地試驗結果討論

本次現地試驗共進行兩組試驗，一組為現地水源，另一組為現地水源再混入泥沙粒料製成高濃度的濁水試驗。經比重瓶試驗所得現地水源之濃度為 354ppm，濁水試驗的濃度為 10318ppm，濃度並不符合預期為 10354ppm 的原因應該與大甲溪的原因相同。整理過後的試驗面與水平面的傾斜角度為 5 度。

由表 5-10 所示，清水試驗的沖蝕深度為 0.54mm，濁水試驗的沖蝕深度為 0.74mm。頭前溪所施作的兩組現地試驗所得之沖蝕量雖然與大甲溪石岡壩相比之下顯得較小，但頭前溪的兩組數據所得的總沖蝕量都是緩緩地上升，且前五分鐘的沖蝕量，皆不明顯，主要沖蝕量都集中在後段長時間的沖刷，研判是因該區岩性為泥質砂岩，因此試體長時間泡水後，軟化速度較頁岩緩慢而不會出現短時間內有較大幅度的沖蝕量。

### 5.2.3 大安溪現地試驗

試驗地點位於大安溪大峽谷(圖 5-17 中紅圈處)。現地實驗如圖 5-18 所示。該區地質屬卓蘭層，為砂頁岩互層。大安溪大峽谷現為觀光景點，因此在選擇試驗的位置時，必須避免選在容易有遊客經過的地區，造成不必要的困擾。該區共進行三組試驗，其中一組為傾斜角度 90 度的側壁沖蝕試驗，但因儀器固定上的問題，最終並無法完成試驗。故此組試驗數據不納入本研究的試驗結果，而對側壁沖蝕試驗的建議於第六章中提出。試驗結果如表 5-13、表 5-14、表 5-15 所示。

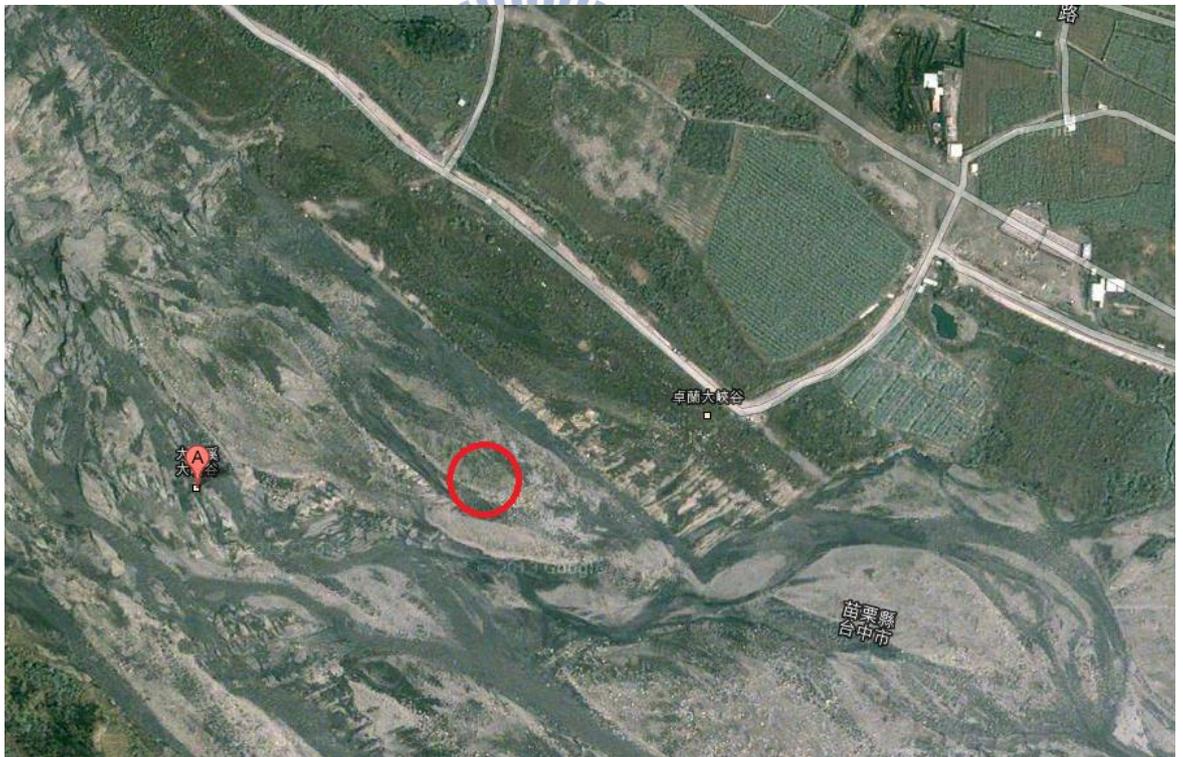


圖 5-17 大安溪大峽谷現地試驗位置(google map)



圖 5-18 大安溪大峽谷現地試驗狀況

大安溪試驗結果

表 5-13 大安溪大峽谷現地試驗結果

TWD97 橫座標	232898	試驗日期	102 年 7 月 1 日
TWD97 縱座標	2687222	傾斜度	18 度
地 質	卓蘭層 砂頁岩互層		
試驗類型	原溪水試驗	濁水試驗	
濃度(ppm)	366	10324	
沖蝕深度(mm)	0.34	0.98	
$k_d(m^3/N-s)$	$9.95 \cdot 10^{-9}$	$9.32 \cdot 10^{-9}$	
$\epsilon(mm/hr)$	0.423	0.825	

表 5-14 大安溪大峽谷現地試驗照片

原溪水試驗前



濁水試驗前



原溪水試驗後



濁水試驗後

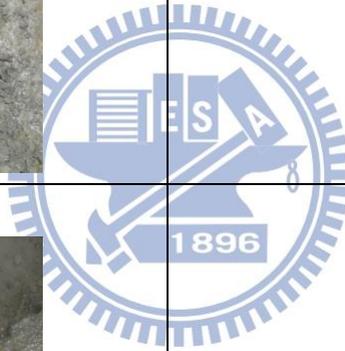
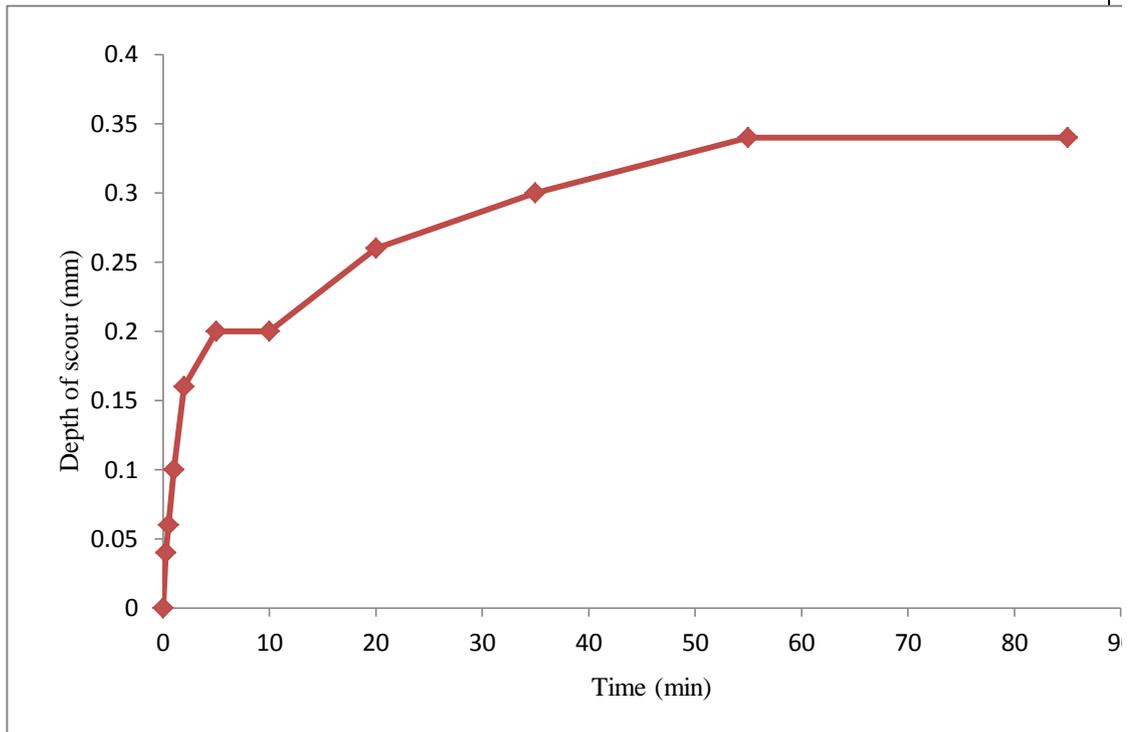
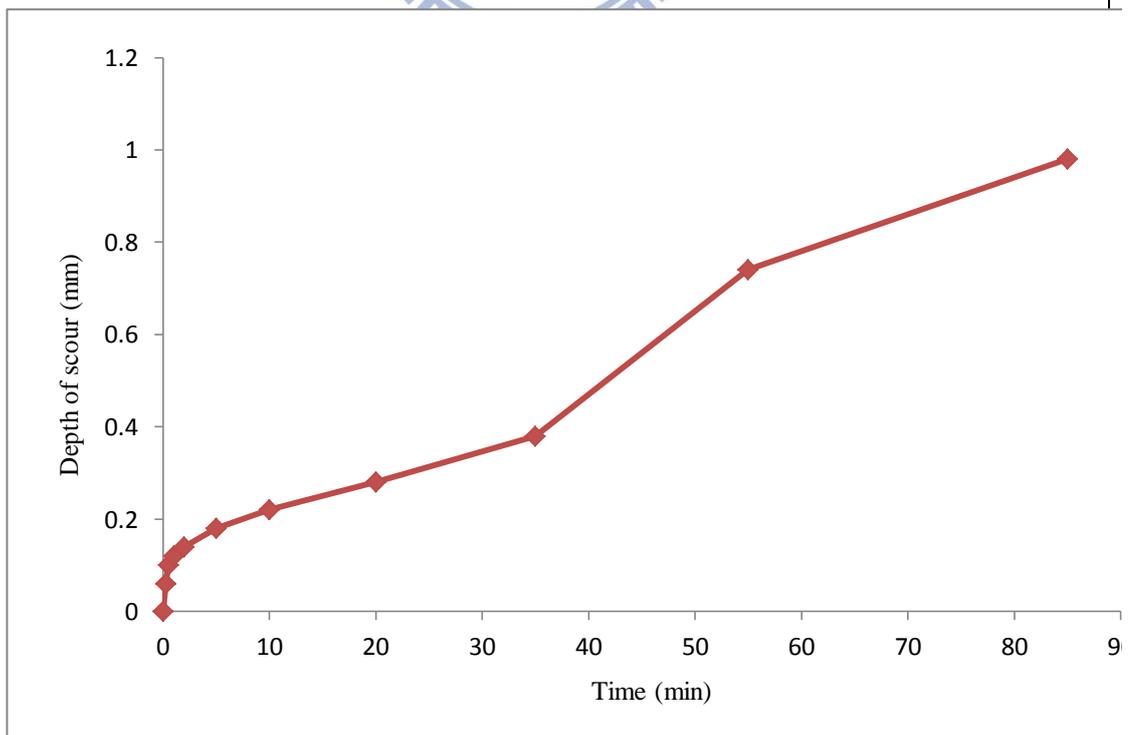


表 5-15 大安溪大峽谷試驗沖刷深度

原溪水試驗沖蝕深度



濁水試驗沖蝕深度



## 大安溪現地試驗結果討論

本次現地試驗，試驗位置為砂頁岩互層之頁岩層。共進行兩組試驗，一組為現地水源，另一組為現地水源再混入泥沙粒料製成高濃度的濁水試驗。經比重瓶試驗所得現地水源之濃度為 366ppm，濁水試驗的濃度為 10324ppm。整理過後的試驗面與水平面的傾斜角度為 18 度。

由表 5-13 所示，清水試驗的沖蝕深度為 0.34mm，濁水試驗的沖蝕深度為 0.98mm。第一組的試驗位置因為太過於接近水面，故當表面的風化層去除，並拋光後沒多久，表面就開始微微的滲水，這個現象可能就是造成第一組的前段有較大的沖蝕量產生的原因。而第二組的濁水試驗於總時間為 50 分鐘及 85 分鐘時都出現了較高的沖蝕量，可能原因為試體長時間受到水柱攻擊，而有較大塊體的剝離。但兩組試驗結果，仍然可以看出高濃度的濁水所造成的沖蝕量明顯高於清水。大安溪雖有許多適合施作側壁沖蝕試驗的點位，本研究於大安溪施作一組傾角 90 度的側壁試驗(圖 5-19、圖 5-20)時，因儀器本身的自重及水柱對側壁造成的反力，而使儀器傾倒、脫落，因此現階段本研究的儀器並不適合用於側壁沖蝕試驗。



圖 5-19 大安溪現地側壁沖蝕試驗



圖 5-20 大安溪現地側壁沖蝕試驗

#### 5.2.4 大漢溪現地試驗

試驗地點位於武嶺橋上游左岸。(圖 5-21 中紅圈處)。現地實驗狀況如圖 5-22 所示。該區地質屬桂竹林層，為砂頁岩互層。大漢溪流域，武嶺橋下有許多岩盤出露，但缺少車輛可以通行的道路，因此試驗所需之工具需仰賴人力搬運。此處之岩性為砂頁岩互層、走向近乎垂直，且差異侵蝕現象嚴重，因此難有立足之點，考量安全因素，該區並不適合的施作側壁沖蝕試驗。試驗結果如表 5-16、表 5-17、表 5-18 所示。



圖 5-21 大漢溪現地試驗位置(google map)



圖 5-22 大漢溪現地試驗狀況

大漢溪現地試驗結果

表 5-16 大漢溪現地試驗結果

TWD97 橫座標	279611	試驗日期	102 年 7 月 2 日
TWD97 縱座標	2754247	傾斜度	8 度
地 質	桂竹林層 砂頁岩互層		
試驗類型	原溪水試驗	濁水試驗	
濃度(ppm)	434	10396	
沖蝕深度(mm)	0.54	0.62	
$k_d(m^3/N-s)$	$8.59 \times 10^{-9}$	$1.08 \times 10^{-8}$	
$\epsilon(mm/hr)$	0.573	0.667	

表 5-17 大漢溪現地試驗照片

原溪水試驗前



濁水試驗前



原溪水試驗後

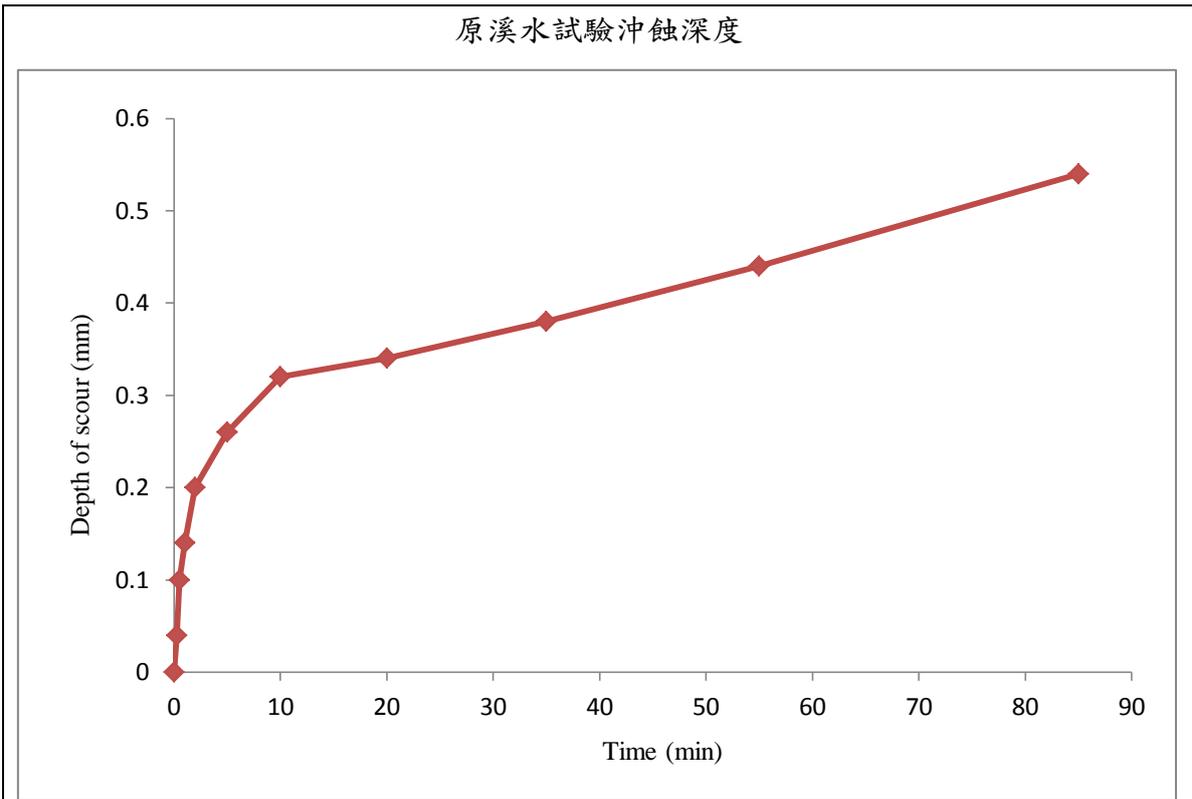


濁水試驗後

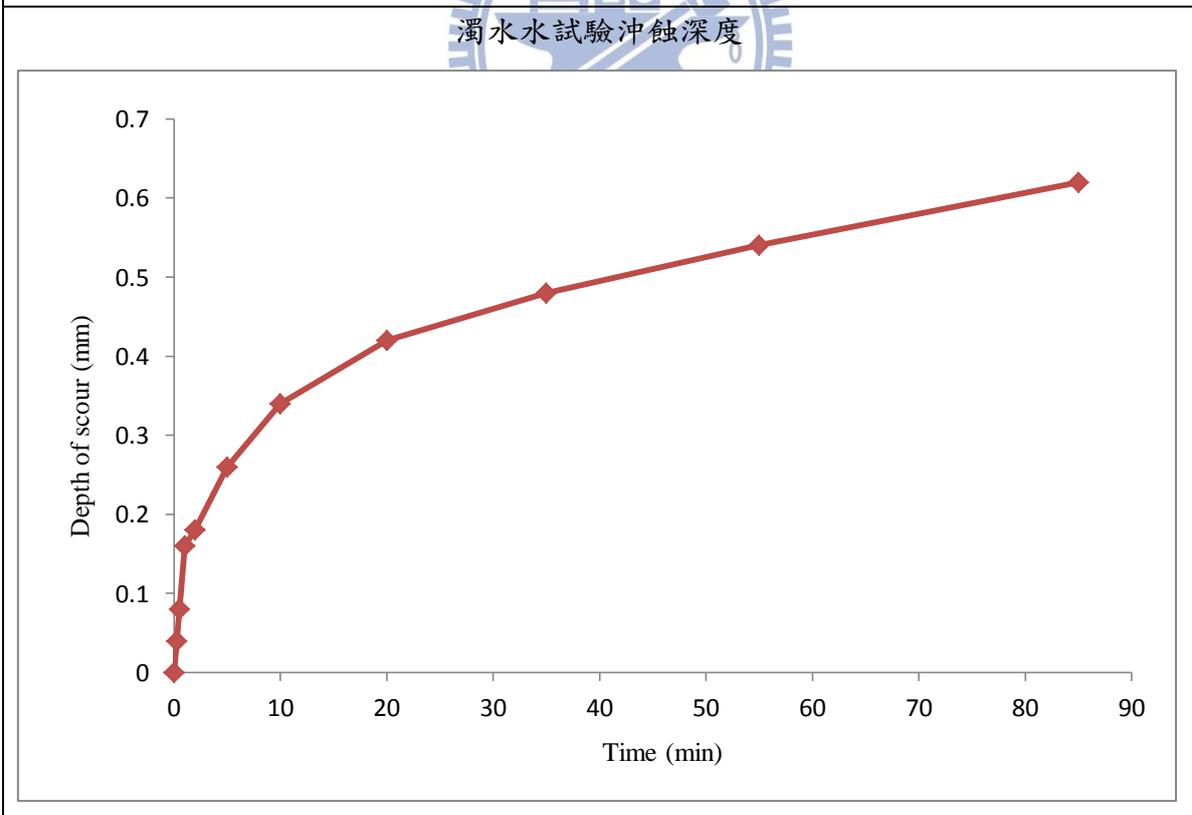


表 5-18 大漢溪試驗沖蝕深度

原溪水試驗沖蝕深度



濁水水試驗沖蝕深度



## 大漢溪現地試驗結果討論

本次現地試驗共進行兩組試驗，一組為現地水源，另一組為現地水源再混入泥沙粒料製成高濃度的濁水試驗。經比重瓶試驗所得現地水源之濃度為 434ppm，濁水試驗的濃度為 10396ppm。整理過後的試驗面與水平面的傾斜角度為 8 度。

由表 5-16 所示，清水試驗的沖蝕深度為 0.54mm，濁水試驗的沖蝕深度為 0.62mm。第一組的試驗結果於前 10 分鐘就快速累積了 0.30mm 以上的沖刷量，其可能原因為該區為砂頁岩薄互層，而在用砂輪機拋光表面的過程中，較堅硬的砂岩已使砂輪機無法再繼續拋光，但夾在砂岩中的頁岩，其風化層並未完全清除，殘留下的風化層使得試驗開始便快速累積了大半的沖蝕量。第二組的濁水試驗亦有相同的問題存在，但兩組試驗後段的沖蝕都很穩定，研判是因為風化層已被沖散。

## 現地試驗結果綜合討論

比較各組試驗的結果，濁水試驗的沖蝕深度及沖蝕率，皆高於原溪水試驗的結果，與室內試驗的結果相符，但現地試驗所使用之試體因現地條件的關係，含水量、粒徑等物理性質皆不相同，試驗結果並不如室內試驗結果規律，且室內試驗所用之試體為完整砂岩岩塊，而現地試驗之試體可能有肉眼無法辨識之裂隙，而裂隙因受到水柱及粒料的攻擊，造成沖蝕量大幅提高。因此本研究的計算方式較適用於完整岩塊的試驗。

## 第六章、結論與建議

### 6.1 結論

(1)比較齊汝鴻(2012)與本研究所改良之儀器，因考量到現地移動的問題，外部提供動力的機具並沒有更動，僅從儀器內部管路進行修改，提高少許流速，計算後本試驗能夠造成沖蝕之岩石最大單軸向壓縮強度為 5 MPa，與齊汝鴻(2012)比較並未大幅提高。

(2)本研究的試驗中所造成的沖刷坑深度，絕大多數小於 1mm，雖然沖蝕深度很小，但過去齊汝鴻(2012)的量測器精度只有 1mm 而本研究將量測器改良至精度為 0.02mm，減少了許多量測時，人為誤差的產生。

(3)Mini Jet 的沖蝕試驗的沖蝕機制為磨蝕，但齊汝鴻(2012)的試驗中不論室內試驗及現地試驗都有試體表面剝離的狀況出現(圖 5-1、圖 6-1)，本研究成功地修改現地試驗試體準備方式，試驗結果顯示皆為磨蝕沖蝕。試體準備方式的修正，也減少量測時間並提高量測之準確性。

(4)由本研究的試驗結果判斷，當泥沙粒徑分佈範圍皆在本研究試驗所選用的粒徑範圍內時，粒徑大小對於沖蝕量的影響有限，水中的含泥砂濃度提高時對於沖蝕量的影響較為明顯，尤其當濃度提高至 10000ppm 時影響更為顯著。

(5)由本研究的室內試驗試體皆為湖山水庫之砂岩岩塊，缺乏其他不同岩性的試驗結果可與現地試驗結果做比較，但泥岩及頁岩之岩塊不易保存，且是否能重複進行試驗亦有待測試。

(6)當現地受到水流沖蝕的岩塊為完整砂岩岩塊且岩性與湖山水庫之岩塊相似，並且求得現地水流的濁度及粒徑分佈，即可利用本研究的室內試驗結果，推估其沖蝕率，及沖蝕深度。並由兩項數據去評估河道整治及維護的可行性。



圖 6-1 齊汝鴻(2012)現地試驗結果(齊汝鴻，2012)

## 6.2 建議

(1)側壁 Mini Jet，應加裝一類似相機腳架的支撐架，並將固定座的針腳，改成有螺紋或是倒鉤的樣式，增加其吸附力。

- (2)本研究試驗中所需之泥砂粒料，取至石門水庫的淤泥，但淤泥中含有許多碎石及枯枝，清理過程煩複耗時，無法大量準備。若能改採用其他容易取得的粒徑細小之粒料，則可以提高研究效率。
- (3)室內試驗中反力架的調整，尚未量化，目前是依經驗去調整所需的反力，若能改以電動式扭力扳手調整，則可依照扳手上所顯示的扭力大小作為，固定所需的力量。
- (4)室內試驗用壓克力水密盒底部的矽膠膜，因業界目前並沒有能夠使矽膠與壓克力完全緊密接合的接著劑，因此需要定期補強其接著狀況，故若有能夠與壓克力接合且質地薄而柔軟的材料則可取代目前使用之矽膠薄膜。或是在壓克力盒底部銑出一凹槽，並置入尺寸適合之 O-ring，但若以此法改良，則必須注意壓克力的壁厚的強度是否足夠。



## 參考文獻

1. 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)」。
2. 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)」。
3. 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)」。
4. 37.經濟部水利署水利規劃試驗所，(2010)，「因應氣候變遷流量觀測技術研發及建置先期計畫」。
5. 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」。
6. 38.經濟部水利署水利規劃試驗所，(2012)，「石門水庫長期監測計畫與防淤操作模擬分析(1/2)」。
7. 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。
8. 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。

9. 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。
10. 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。
11. 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。
12. 吳佳諺，(2011)，「軟弱岩石水平磨蝕率及磨蝕行為」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
13. 齊汝鴻，(2012)，「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」，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。
14. 思沛雅噴霧器材有限公司網站，SPRAYER CO., LTD. ，  
<http://www.sprayernozzle.com.tw/p1.htm>。
15. The Engineering ToolBox 網頁，<http://www.engineeringtoolbox.com/>。
16. 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.
17. Annandale, G.W. (1995). "Erodibility." Journal of Hydraulic Research, Vol.33, No.4: 471-494.
18. Annandale, G. W., (2006). "Scour technology." McGraw Hill, New York.
19. 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.
20. Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1974). "Impinging circular turbulent jets. " ASCE Journal of Hydraulic Engineering Vol. 100: 1313-1328.

21. 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.
22. Bollaert, E., (2002). "Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." in Lausanne, EPFL.
23. 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.
24. Castillo E. L. G., (2006). "Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools." *Proceedings of the Seventh International Conference on Hydroscience and Engineering*, Philadelphia, PA.
25. Collins, S. H. and Moon, G. C. 1979. 'Stereometric measurement of streambank erosion', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45: 183-190.
26. 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.
27. Ervine, D. A., Falvey, H. T., and Withers, W., (1997). "Pressure fluctuations on plunge pool floors." *Journal of Hydraulic Research*, 35(2): 257-279.
28. 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.
29. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. (1978). "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 15: 313-321.
30. Foley, M.G. (1980), "Bedrock incision by streams." *Geol. Soc. Am. Bull., Part II*, 91: 2189-2213.
31. 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.
32. Hanson GJ, A. Simon. (2001). "Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA." *Hydrological processes* 15: 23-38.
33. 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.
34. 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.

35. Kirsten, H. A. D., (1982). "Classification system\_for\_excavation\_in natural materials." *Civil Engineer in South Africa*, 24(7): 293-308.
36. Knighton, A.D. (1998), *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*. Arnold, London, UK. : 383.
37. Lamb, M. P., W. E. Dietrich, and L. S. Sklar (2008) "A model for fluvial bedrock incision by impacting suspended and bedload sediment" *Journal of Geophysical Research*, VOL. 113, F03025,2-14.
38. Langendoen, E.J. (2000). "CONCEPTS: Conservational channel evolution and pollutant transport system software manual." USDA-ARS National Sedimentation Laboratory Research Report, 16.
39. Moore WL, Masch FD. 1962. "Experiments of the scour resistance of cohesive sediments. " *Journal of Geophysical Research* 67(4): 1437-1446.
40. Morgenstern, N. R. & Price, V. E. (1965). "The analysis of the stability of general slip surfaces", *Geotechnique*, 15(1): 79-93.
41. 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.
42. Partheniades E. (1965). "Erosion and deposition of cohesive soils." *Journal of Hydraulic Engineering*, 91(1): 105-139.
43. Shields, A. (1936). *Anwendung der Aechlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung*, Mitteilungen der Pruessischen Versuchsanstalt fuer Wasserbau and Schiffbau, Berlin.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. Sklar, L.S. , W. E. Dietrich (2001), "Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock.", *Geology*, Vol.29, No.12, pp.1087-1990.
48. Sklar, L. S., W. E. Dietrich (2004), "A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load.", *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 6, pp 063011-0630121

49. 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.
50. Thorne C.R, Tovey N.K. (1981). “Stability of composite river banks”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 6: 469- 484.
51. 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.
52. 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.

