

國立交通大學

土木工程系

碩士論文

室內軟弱岩石射流沖刷設備建立

Development of a Jet Erosion Equipment for Weak
Rocks

研究生：吳禹霆

指導教授：廖志中 博士

中華民國一〇一年七月

室內軟弱岩石射流沖刷設備建立

學生：吳禹霆

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

我國西部麓山帶出露甚廣的上新世與更新世地層沈積地層，此類地層的組成岩石普遍具有膠結不良、遇水極易軟化且極易受沖蝕之特性。河道上攔河堰之設置改變河川坡度，造成上游泥砂淤積，下游護甲層流失，喪失對岩盤之保護作用，而攔河堰下游沖刷坑形成後，隨著深度發展會造成被動土壓力之減少，可能使堰體因滑動或傾覆破壞。因水流流況不同，經攔河堰後水流沖擊下游岩床角度將有所不同，因此形成的沖刷坑之深度及形狀亦應當有所差異，其差異狀況值得加以探討。本研究旨在建立適用於軟弱岩石之室內射流沖刷設備，以模擬攔河堰下游沖蝕坑之形成。

本研究以郭炳宏(2010)建立之多功能室內沖蝕儀為基礎，增設可變角度射流沖刷設備，並建立試驗程序、試體準備方法及量測分析方法，最後以軟弱砂岩塊進行儀器測試。

本研究針對沖刷角度為 30° 、 50° 、 70° 進行三組試驗，一樣的沖刷時間下，作用在角度較小試體的總能量（總功）較大，而較大的總功也造成較多的沖蝕量。而射流角度較大的試體（ 70° ）表面產生大規模塊體脫落之時間較早(4hrs)，相對的，射流角度較小的試體（ 30° ），大規模塊體脫落需經過較長的沖蝕時間才會產生(24hrs)。

關鍵字：軟弱岩石、沖蝕坑深度、沖蝕坑形狀、射流沖蝕

Development of a Jet Erosion Equipment for Weak Rocks

Student : Yu-Ting Wu

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

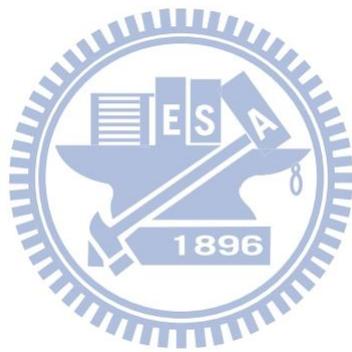
ABSTRACT

In the Western Taiwan, most of major rivers flow through the geological region of Western foothill which is composed of young sedimentary rocks. Their engineering behaviors are tended to be like weak rocks, e.g. poor cementation, high deformability, and low strength. Weirs were often built across rivers to elevate river water level for providing public water supply in the area. Due to low rock strength and the head difference caused by the weirs, rapid scour downstream of weirs is often observed. This type of scour may induce weir instability and make river-bed erosion. Since the water flow quantity passing over a weir is varied with time, the impinging points of jet flows on downstream rock bed are different for different flow events. The depth and shape of scouring hole may be affected by the inclination angle of jet flow. This thesis aims to develop a jet erosion equipment for simulating the formation of scour hole on weak rocks river-bed down stream weirs, and investigating the effect of jet impinging angle on the scouring depth and scouring rate of the holes.

Based on the multi-function erosion equipment for weak rocks developed by Kuo(2010), this thesis develops a jet erosion equipment with variable impinging inclination angles for weak rocks in laboratory. Testing procedure, sample preparation, and measurement of the surface topography of the specimen are introduced in the thesis. Also, three sets of jet erosion tests with varied jet inclination on sandstone specimen are conducted. The testing inclination angles include 30° , 50° , and 70° .

The testing results show that the eroded volume of the specimens increases with the decrease of the inclination angle, because the total applied energy on the specimen decreases with the increase of the inclination angle. The results of the pilot tests demonstrate that the equipment is suitable for performing the scouring tests on weak rocks in laboratory.

Key words : weak rocks, depth of scour hole, shape of scour hole, jet erosion



誌謝

可能是我沒天分，對我來說，寫本碩士論文跟生小孩一樣拼，論文完成也如生完小孩，一切的結果都很美好，但叫我回頭再來一次... 還是算了吧!在這難產的過程中需要感謝許多人協助，給予它豐富、熱情的力量。

感謝廖志中 老師與潘以文 老師的化雨春風，引領我走向真理的道路，從文獻導讀、儀器設計、實驗規劃、數據救援、膽識遠見到最後領悟出研究的真諦與做人處事正面積極的態度，每每在我日夜苦思、壓力倍增之時，給予我"更大的壓力"，最後終於激發出燦爛的花火，也要感謝葉克家 老師與林志平 老師對論文提出許多不一樣的觀點，讓我能更全面的修正論文內容。

感謝小鄭學長、明萬學長於論文上的挺立相助，於忙碌工作之餘還要幫我從垃圾堆裡拼湊出論文，感謝國維學長於夜間開啟的課後輔導，在壓力壓得喘不過氣時一同研究綠色玻璃罐裡的奧秘與被胃液腐化過的食物，感謝小驤學長專業卻不失幽默的指導，並詮釋如何當個新時代的好男人，感謝阿欽學長在我危急時刻幫我解決最棘手的問題，還有示範如何在 meeting 時帶墨鏡卻不會睡著，感謝忠吉學長像小叮噹般總是供應源源不絕的數據與資料，感謝彭桑學長總是於半夜約我打保，打到球館倒了都還在約，真的是要把畢身絕學都傳授於我，感

謝佩純學長對學弟的關心，在我最後一年研究生涯問了我 80 次"畢業了沒?"，感謝文惠學姐在 meeting 時讓老師卸下心防，讓接著簡報的人不會心慌慌，感謝秉宏與佳諺學長對魚缸的付出，裡面充滿了汗水、熱情與不人道的儀器設計，多功能沖蝕儀都快變成多功能健身房，感謝鍾學長為學弟樹立良好的酒後不行車典範，感謝孝欽學長雖然沒有面授機宜，但論文卻默默守護著我，感謝佳廷總是細心提醒我採購事宜，以及偶爾幾句鼓勵的話聽起來都特別窩心。

感謝楚鈞有如 google 般供我查詢，好多老師說的話都需要你幫我翻譯，並在我論文低潮時督促我前進，以及在手指競賽中故意大輸我，讓我真的以為自己很厲害，感謝康姐總是提供我最即時的協助，從作業到今晚吃什麼都能給最好的答案，感謝紹宇一肩扛起出差重擔，但您這次真的出差出太久了，希望一切平安，感謝王凱平時的鼓勵與打氣，感謝士輝、心宇、信忠、景宇、凱仁、韋甫、逸倫、冠宇、閩邑、若瑜、亭淵於課業上的觀摩與借鑑，有你們在作業都少了一半。感謝長潤、小昱、泓佑安撫我最後一年慌亂的心情，阿蒲總是能在我需要幫助時隨傳隨到，以及我最佩服的志強，總是擁有不可思議的耐心與耐力陪伴我走過最艱辛的旅程，很難想像沒有你們陪伴的生活，你們總是那麼容忍我、沒有偏見，與你們一同努力的日子連汗水都是甜的，感謝智偉、阿昇、正憲及其他學弟妹們提供我協助，讓研究生

活更加順利。

感謝汝鴻的關愛，我很喜歡與你在球場上一同打拚的感覺，但我們真的不適合，感謝柏宇、阿啾、便當、又瑜、志偉、瑋尊、小短、菜鳥、長暉、柏強伴我踏上追逐榮耀的道路，每支安打都是我投球的動力，每個 nice play 都是我最堅強的後盾，感謝其他隊友及經理的陪伴，與你們一同打球充滿歡笑，研究的壓力瞬間瓦解，也要感謝交大 STAR 和 XD 鋼鐵人對我的肯定，讓我在研究失意時還能在球場得意，感謝女性友人們讓我依靠，你們甜美的笑容讓我動力倍增。

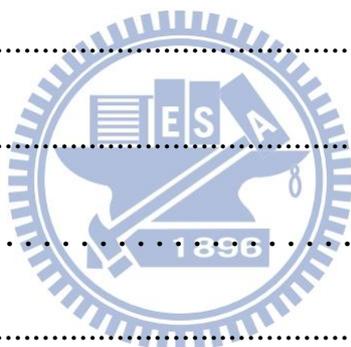
感謝建成學長，在我人生中幾個重要時刻都幫助的很及時，感謝振譽、佑詳、泰維、品盛、俊廷、贊文、阿廷、昭慶、阿澎、南宏、宗漢、偉庭、張老闆，每次想放棄時想起你們鼓勵的話語就會振作起來，並且不斷刺激我往前邁進。

最感謝還是我的家人，感謝父母對我總是無止盡的付出，每當我累了、倦了，你們的關心總讓我心裡充滿慰藉，在家充滿飽飽的電去學校奮鬥，感謝叔叔的協助，在工作忙碌之餘還要幫助我製做實驗儀器，完成論文最重要的一塊拼圖，感謝兩位姐姐聽我抒發心情，替我打打氣，感謝奶奶及外婆，你們的笑容時時刻刻都在我心中，看見天上的星星都覺得是妳們向我眨眼，叫我別害怕，勇敢走向前。

有你們的幫助，我真的很幸運，由衷感謝。

目錄

摘要.....	I
誌謝.....	IV
目錄.....	VII
圖目錄.....	XI
表目錄.....	XVII
一、前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程圖.....	3
二、文獻回顧.....	4
2.1 岩盤沖蝕機制.....	4
2.1.1 磨蝕沖蝕.....	5
2.1.2 塊體抽離沖蝕.....	6
2.1.3 穴蝕沖蝕.....	8
2.1.4 剝皮沖蝕(peeling off)	8
2.1.5 岩盤沖蝕機制小結.....	10
2.2 跌水沖刷特性.....	11
2.3 射流擴散.....	13



2.3.1 射流擴散效應.....	13
2.3.2 射流擴散消能.....	14
2.3.3 傾斜射流擴散之消能.....	18
2.4 室內水槽沖蝕試驗.....	20
2.4.1 現地取樣射流沖刷試驗.....	20
2.4.2 塊體抽離水槽試驗.....	22
2.4.3 人造節理水槽試驗.....	26
2.4.4 室內水槽沖蝕試驗小結.....	30
2.5 多功能軟岩沖蝕儀.....	34
2.5.1 水平向磨蝕試驗.....	34
2.5.2 可變角度直接沖刷試驗.....	36
2.5.3 小型渠道岩床沖刷試驗.....	38
三、試驗儀器、試體準備及試驗程序.....	40
3.1 實驗儀器設計.....	40
3.1.1 設計理念.....	40
3.1.2 設計流程.....	40
3.2 實驗儀器介紹.....	41
3.3 試驗組件選擇與設計.....	49
3.3.1 動力設備(郭炳宏, 2010).....	49

3.3.2 管路及噴嘴設備.....	49
3.3.3 管路固定設備：.....	52
3.3.4 沖蝕坑量測設備：.....	54
3.3.5 流量監測設備.....	56
3.4 試體選擇與評估.....	57
3.4.1 流功 SP.....	57
3.4.2 岩盤抗沖蝕指數 K_h	58
3.5 可變角度軟岩沖蝕試驗流程.....	59
3.5.1 試體製作.....	59
3.5.2 前置作業.....	63
3.5.3 沖蝕試驗.....	65
3.5.4 試驗數據分析.....	67
四、實驗成果與討論.....	70
4.1 試體來源.....	70
4.2 試體評估及試驗規劃.....	72
4.2.1 試體抗沖蝕能力 K_h 值估算.....	72
4.2.2 試驗流功計算(SP).....	75
4.3 可變角度直接沖刷試驗結果.....	78
4.3.1 射流角度 30°	80



4.3.2 射流角度 50°	84
4.3.3 射流角度 70°	88
4.4 射流沖刷試驗成果重複性討論	92
4.4.1 射流角度 50°(第二次試驗).....	92
4.4.2 重複性測試結果討論.....	96
4.5 實驗誤差.....	98
4.6 試驗成果討論.....	105
4.6.1 射流角度對作用於是體表面總功的影響	105
4.6.2 射流角度對於沖蝕量影響.....	106
4.6.3 射流角度對於沖蝕坑深度影響	106
4.6.4 射流角度對於沖蝕坑形狀影響	108
4.6.5 綜合討論.....	109
4.6 試驗問題與改善方法討論	112
五、結論與建議.....	116
5.1 結論.....	116
5.2 建議.....	117
參考文獻.....	119
附錄一.....	121

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 大安溪砂岩岩床磨蝕痕跡(2009).....	5
圖 2-3 岩塊抽離示意圖(Annandale, 1995)	6
圖 2-4 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖(Whipple et al., 2000) .	7
圖 2-5 岩塊攜出作用力示意圖(Annandale, 1995)	7
圖 2-6 八掌溪頁岩岩床穴蝕破壞(2008).....	8
圖 2-7 剝皮法(peeling off)沖蝕示意圖(Bolleart, 2005)	9
圖 2-8 剝皮法沖蝕發生於跌水沖蝕示意圖(Bolleart, 2005)	9
圖 2-9 水流沖擊引致之沖刷機制示意圖(Bollaert and Schleiss, 2003).....	11
圖 2-10 圓形射流擴散架構圖(Ervine et al., 1997)	14
圖 2-11 圓形射流平均壓力係數-尾水深/初始水注厚 (Bollaert, 2003).....	15
圖 2-12 射流平均壓力係數-尾水深/初始水注厚關係圖(Castillo, 2004).....	16
圖 2-13 射流波動壓力係數-尾水深/初始水注厚關係圖(Annandale, 2006).....	17
圖 2-14 P_w/P_{jet} -關係圖, Beltaos(1976).....	19
圖 2-15 b/L -角度關係圖(改自 Beltaos, 1976)	19

圖 2-16 試驗配置圖 Nakato T. (2002)	21
圖 2-17 試驗照片(Nakato T. ,2002).....	22
圖 2-18 試驗配置圖(Annandale & Wittler ,1998).....	23
圖 2-19 塊體配置圖(Annandale & Wittler ,1998).....	24
圖 2-20 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995) ..	26
圖 2-21 人造節理沖蝕試驗照片(Bollaert, 2002)	27
圖 2-22 人造節理沖蝕試驗配置圖(Bollaert, 2002)	27
圖 2-23 不同形式裂隙模擬設施示意圖(Bollaert, 2002)	28
圖 2-24 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖(Bollaert, 2002) .	29
圖 2-25 裂隙內部波動壓力放大係數圖(Bollaert, 2002)	30
圖 2-26 Nakato T. (2002)試驗後邊緣破壞示意圖.....	31
圖 2-27 觸口攔河堰堰底因岩床均勻下切掏空(2005).....	32
圖 2-28 莫拉克颱風後石岡壩洩洪(2009).....	32
圖 2-29 沖蝕試驗儀器配置圖(郭炳宏, 2010)	35
圖 2-30 可變角度直接沖刷試驗配置	37
圖 2-31 可變角度直接沖刷噴嘴	37
圖 2-32 小型渠道岩床沖刷試驗配	38
圖 2-33 試驗流況示意圖	39
圖 3-1 多功能沖蝕儀-可變角度射流沖刷試驗設備配置圖.....	42
圖 3-2 多功能沖蝕儀-可變角度射流沖刷試驗設備照片.....	42
圖 3-3 汙物泵浦.....	45

圖 3-4 球型三通閥	45
圖 3-5 PVC 纖維增強軟管	46
圖 3-6 升降固定器	46
圖 3-7 可變角度法蘭	47
圖 3-8 超音波流量計	47
圖 3-9 雷射位移計與雷射位移數據擷取放大器	48
圖 3-10 XYtable 線性滑軌組	48
圖 3-11 紊流擴散示意圖(Reynolds, 1883)	50
圖 3-12 升降固定器之架構造圖	52
圖 3-13 升降固定器滑塊構造圖	53
圖 3-14 可變角度法蘭片詳圖	54
圖 3-15 雷射位移計構造示意圖	55
圖 3-16 超音波流量計照片與原理示意圖	56
圖 3-17 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995) ..	59
圖 3-18 原始岩塊照片	60
圖 3-19 岩塊裁切過程照片	61
圖 3-20 岩塊裁切完成照片	61
圖 3-21 岩塊與模具照片	62
圖 3-22 大型研磨機照片	62
圖 3-23 小角度管路架設示意圖	63
圖 3-24 大角度管路架設示意圖	64

圖 3-25 超音波流量計安裝於噴嘴示意圖	65
圖 3-26 量測儀器安裝示意圖	66
圖 3-27 固定點 A、B、C 之照片	66
圖 3-28 試驗後停機紀錄照片	67
圖 4-1 (a)挑選過之岩塊 (b)取樣現場地質狀況.....	70
圖 4-2 岩塊裝箱示意圖	71
圖 4-3 (a)置入岩塊 (b)岩塊封蠟.....	71
(c)岩塊封蠟 (d)將岩塊裝箱密封	71
圖 4-4 b/L-角度關係圖(改自 Beltaos, 1976)	76
圖 4-5 與射流中心點距-流功圖.....	77
圖 4-6 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 30 分鐘後試體照片.....	82
圖 4-7 射流角度 30°沖蝕坑剖面圖.....	82
圖 4-8 射流角度 30°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖.....	83
圖 4-9 射流角度 30°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖.....	83
圖 4-10 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 30 分鐘後試體照片.....	86
圖 4-11 射流角度 50°沖蝕坑剖面圖	86
圖 4-12 射流角度 50°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖.....	87
圖 4-13 射流角度 50°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖.....	87
圖 4-14 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 10 分鐘後試體照片.....	90
圖 4-15 射流角度 70°沖蝕坑剖面圖	90
圖 4-16 射流角度 70°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖.....	91

圖 4-17 射流角度 70°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖.....	91
圖 4-18 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 30 分鐘後試體照片.....	94
圖 4-19 射流角度 50°沖蝕坑剖面圖.....	94
圖 4-20 射流角度 50°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖.....	95
圖 4-21 射流角度 50°重複性測試累計沖蝕量.....	97
圖 4-22 射流角度 50°重複性測試沖蝕坑剖面圖.....	97
圖 4-23 射流角度 30°每段試驗沖刷區圖.....	99
圖 4-24 射流角度 50°每段試驗沖刷區圖.....	100
圖 4-25 射流角度 70°每段試驗沖刷區圖.....	101
圖 4-26 射流角度 30°射流中心偏移示意圖.....	102
圖 4-27 射流角度 50°射流中心偏移示意圖.....	102
圖 4-28 射流角度 70°射流中心偏移示意圖.....	103
圖 4-29 時段-沖蝕量圖.....	103
圖 4-30 時間-累積沖蝕量圖.....	106
圖 4-31 時間-沖蝕坑深度圖.....	107
圖 4-32 30°時段-深度關係圖.....	107
圖 4-33 50°時段-深度關係圖.....	108
圖 4-34 70°時段-深度關係圖.....	108
圖 4-35 時間-沖蝕坑坡角.....	109
圖 4-36 時間-沖蝕率對數圖.....	110
圖 4-37 射流角度 30°平整度圖.....	111

圖 4-38 射流角度 50°平整度圖	112
圖 4-39 射流角度 70°平整度圖	112
圖 4-40 沖蝕坑遭試體邊界效應破壞照片.....	113
圖 4-41 沖蝕坑沿層面破壞.....	114
圖 4-42 (a)沖蝕坑沿層面破壞前 (b)沖蝕坑沿層面破壞後.....	114
圖 4-43 固定試體之白蠟熔化使試體變位.....	115
附圖 1-1 岩塊長度比值 y/x 示意圖(Annandale, 1995, 2006) ...	126



表目錄

表 2-1 射流破裂長度比參數(Castillo, 2004).....	16
表 2-2 波動壓力係數-射流長/射流破裂長關係表(Castillo, 2006)	18
表 2-3 室內水槽沖蝕試驗文獻比較	33
實驗儀器組件與功能說明於下表(表 3-1) :	42
表 3-1 射流沖刷試驗儀器介紹	43
表 4-1 試驗參數及試體基本性質.....	72
表 4-2 材料強度參數(M_s)計算	73
表 4-3 試體抗沖蝕指數	74
表 4-4 直接沖刷試驗流功計算與各試體 K_{th} 值比較表.....	75
表 4-5 沖蝕坑每段距離流功.....	77
表 4-6 射流角度 30° 試驗中各時段試體表面含水量表	79
表 4-7 射流角度 50° 試驗中各時段試體表面含水量表.....	79
表 4-8 射流角度 70° 試驗中各時段試體表面含水量表.....	79
表 4-9 射流角度 30° 沖蝕試驗數據	81
表 4-10 射流角度 50° 沖蝕試驗數據	85
表 4-11 射流角度 70° 沖蝕試驗數據	89
表 4-12 射流角度 50° (第二次試驗) 沖蝕試驗數據	93
表 4-13 射流角度 30° 沖刷時段成果表	99
表 4-14 射流角度 50° 沖刷時段成果表	100

表 4-15 射流角度 70°沖刷時段成果表	101
表 4-16 各角度總流功	105
附表 1-1 岩石材料強度評分表(Annandale, 1995, 2006)	121
附表 1-2 節理組數參數評分表(Annandale, 1995, 2006)	122
附表 1-3 節理面粗糙參數評分表(Annandale, 1995, 2006)	123
附表 1-4 節理面狀態參數評分表(Annandale, 1995, 2006)	124
附表 1-5 地盤構造條件參數評分表(Annandale, 1995, 2006) ...	125



一、前言

1.1 研究動機

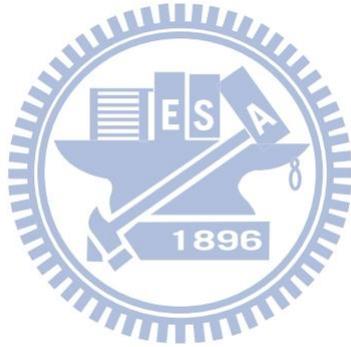
我國西部麓山帶出露範圍甚廣的地層以上新世與更新世地層為主，此類岩石普遍具有膠結不良、遇水極易軟化且極易受沖蝕之特性，因此河道岩床大多受水流沖蝕速度極快，而攔河堰之設置更改變河川坡度，造成上游泥砂淤積，下游護甲層流失，喪失對岩盤之保護作用。

攔河堰下游沖刷坑形成後，隨著深度發展造成被動土壓力之減少，可能使堰體因滑動或傾覆而破壞，一般攔河堰之設計理念為重力式，僅配置少量溫度鋼筋，較不能承受張應力作用，進而引起堰體斷裂破壞。

探討國外水工構造物下游沖蝕問題之文獻，僅在高壩及溢洪道沖蝕時予以討論，且適用於硬岩之沖蝕探討。我國屬海島型氣候，多雨的氣候造成水流流況相去甚大，而經攔河堰後水流沖擊下游岩床角度有所不同，故本研究欲建立一組儀器，針對我國軟岩在不同射流角度下之沖蝕坑進行研究。

1.2 研究目的

本研究欲建立一可變角度射流沖蝕設備，並使用現地採集之軟岩試體進行測試，本文共分為五章，除本章外，第二章回顧岩盤沖蝕破壞機制與國外施做室內水槽沖蝕試驗之文獻，參考其試驗設備與試驗方法。第三章針對本儀器之設計、規畫做介紹，並討論本儀器適用之軟岩強度範圍，最後介紹試體之製作與試驗流程。第四章則對於試驗成果做討論，使用岩性相似之試體探討射流角度對於沖蝕坑之關係。第五章提出本試驗之結論與未來建議方向。研究流程如圖 1-1 所示。



1.3 研究流程圖

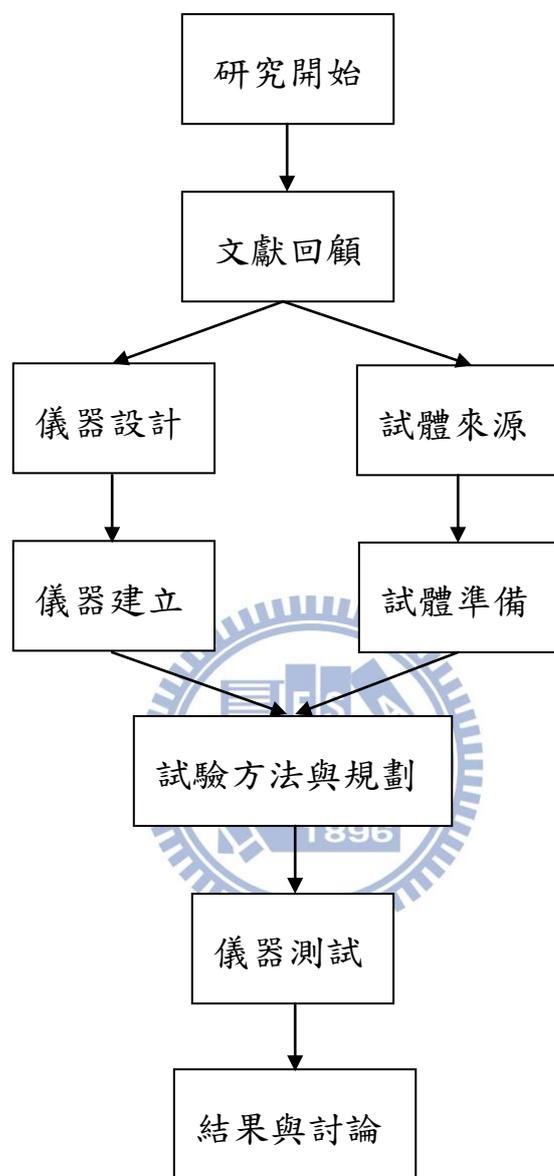


圖 1-1 研究流程圖

二、文獻回顧

台灣傳統攔河堰上、下游因為高差較小，所產生跌水能量有限，下游沖蝕行為較不被重視。一般國內外文獻常針對在高壩及溢洪道等能量較大的沖蝕行為、沖蝕坑形狀及深度進行研究。本章對於沖蝕機制、跌水沖蝕特性、室內水槽沖蝕試驗等進行文獻回顧，並針對其試驗方法、設備進行整理與討論。

2.1 岩盤沖蝕機制

綜觀台灣河道產生劇烈岩盤沖蝕處，主要位於山區河道、河道高程驟變(如地震抬昇處)或河床構造物下游處。山區河道坡降大，水流輸砂能力強，不易形成護甲層保護岩床；地震抬昇處或構造物之下游，可能由於河道坡降變陡、產生高程落差、或河寬束縮等因素，使得水流能量及輸砂能力增加，造成原本保護河床之沖蝕沉積物快速流失，底床岩盤裸露受到沖蝕。Martins (1973)、Bollaert&Schleiss(2003)等人將攔河堰局部沖蝕影響因素歸納包括水流流量、跌水高差、尾水高度、水流衝擊河床角度、河床岩性、河床載、及流體中含氣量等，其每項因素對於河床構造物下游皆會造成不等的沖蝕變化。

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)四種。

以下將各沖蝕行為詳細介紹。

2.1.1 磨蝕沖蝕

圖 2-1 為磨蝕沖蝕示意圖，凸起的岩床面前緣受到床質顆粒衝擊而發生侵蝕，水流受到岩床面凸起的擾動，於其後面產生紊流造成壺穴(Potholing)，凸起的表面也會造成滑槽(fluting)，如圖 2-2。

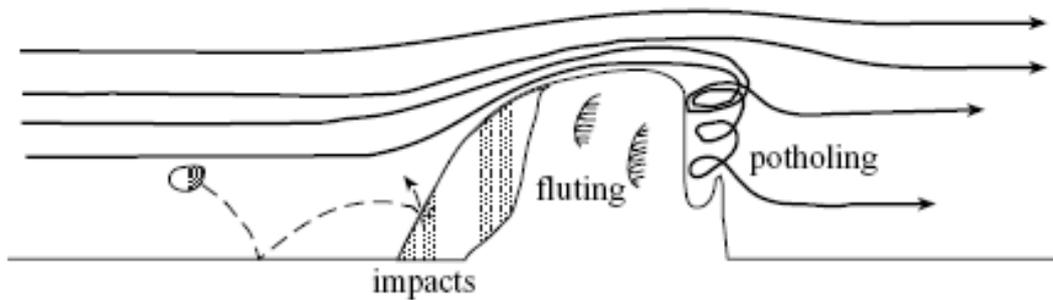


圖 2—1 岩體磨蝕機制示意圖 (Whipple et al., 2000)



圖 2—2 大安溪砂岩岩床磨蝕痕跡(2009)

2.1.2 塊體抽離沖蝕

圖 2-3 為塊體抽離沖蝕示意圖，Annandale(1995)以一河流流向與岩層呈逆向的岩塊抽離例子，岩塊抽離的過程分為頂開(wedging)、移出(dislodgement)、脫離(displacement)三個階段。

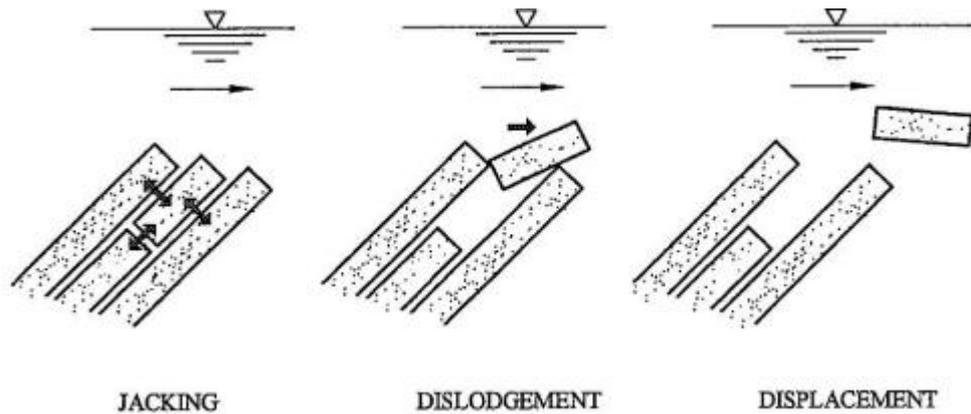


圖 2—3 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)

如圖 2-4 所示，岩盤遭受水流衝擊時，小裂縫經水力推張擴大為破裂面，接著河床載大顆粒撞擊河床並且連續彈跳，導致岩體連續撞擊後弱化，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形成獨立。圖 2—5 為塊體獨立後被攜出之過程，水流沖擊瞬間能量造成岩盤內部受力不勻的作用應力，使得垂直及水平向裂縫逐漸延伸發展，裂隙間因波動壓力作用，使得塊體上浮力大於自重及側邊摩擦力時，塊體即發生向上運動而脫離岩床。

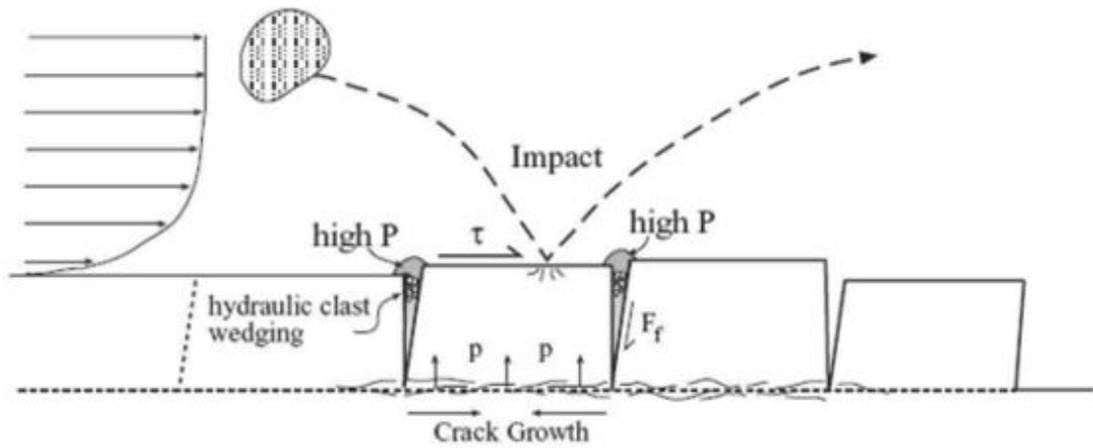


圖 2—4 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖(Whipple et al., 2000)

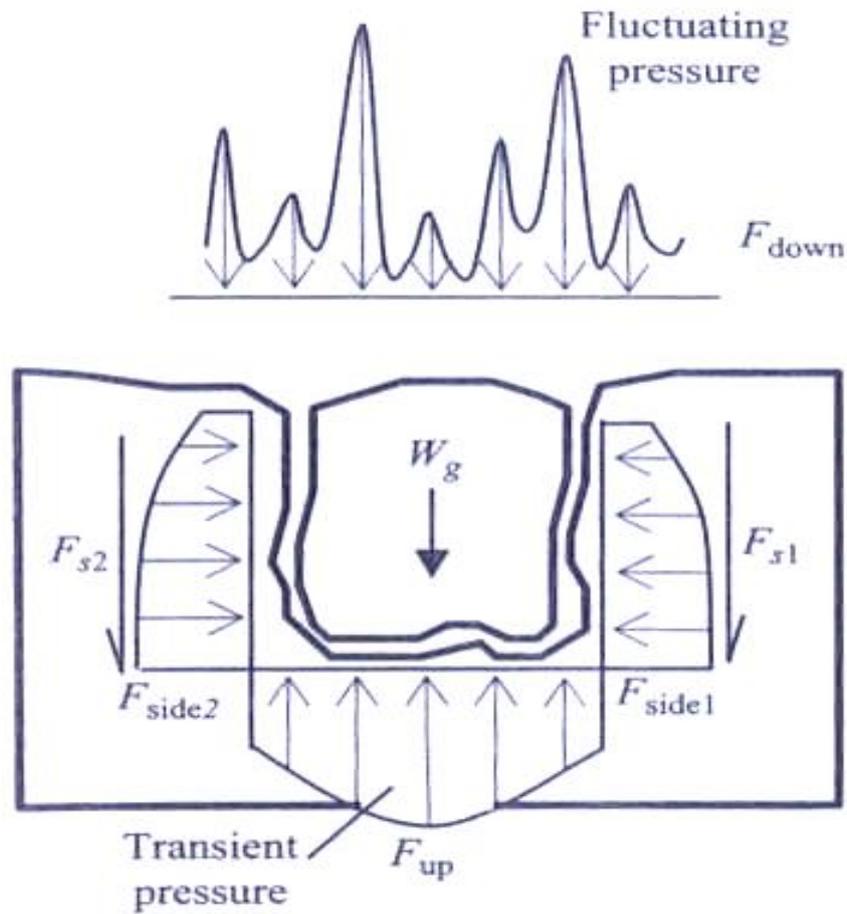


圖 2—5 岩塊攜出作用力示意圖(Annandale,1995)

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

水流受河床障礙物或階梯狀落差時，局部區域流況變化而造成水流衝擊或渦流的現象，圖 2—6 為大安溪中頁岩岩床穴蝕破壞，流體中懸浮載的增加影響穴蝕甚大，加劇渦流對於岩床的侵蝕。



圖 2—6 八掌溪頁岩岩床穴蝕破壞(2008)

2.1.4 剝皮沖蝕(peeling off)

Bolleart(2005)提出此種沖蝕形式，沖刷過程如圖 2-7 所示，水流

沿河床表面一層層將較小的岩塊帶往下游，較常發生在地層為水平且節理發達之河床。

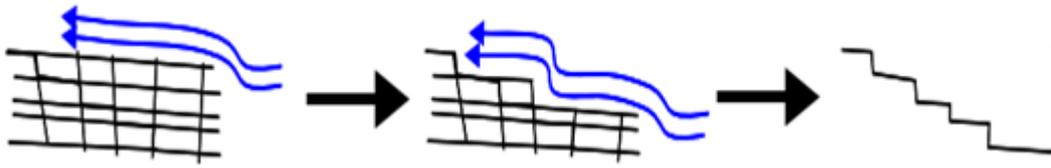


圖 2—7 剝皮法(peeling off)沖蝕示意圖(Bolleart, 2005)

如圖 2-8 於跌水沖蝕亦會發生剝皮沖蝕，跌水上游及下游側皆會發生，且跌水造成周遭水流不斷循環，更加速對於岩盤的破壞。

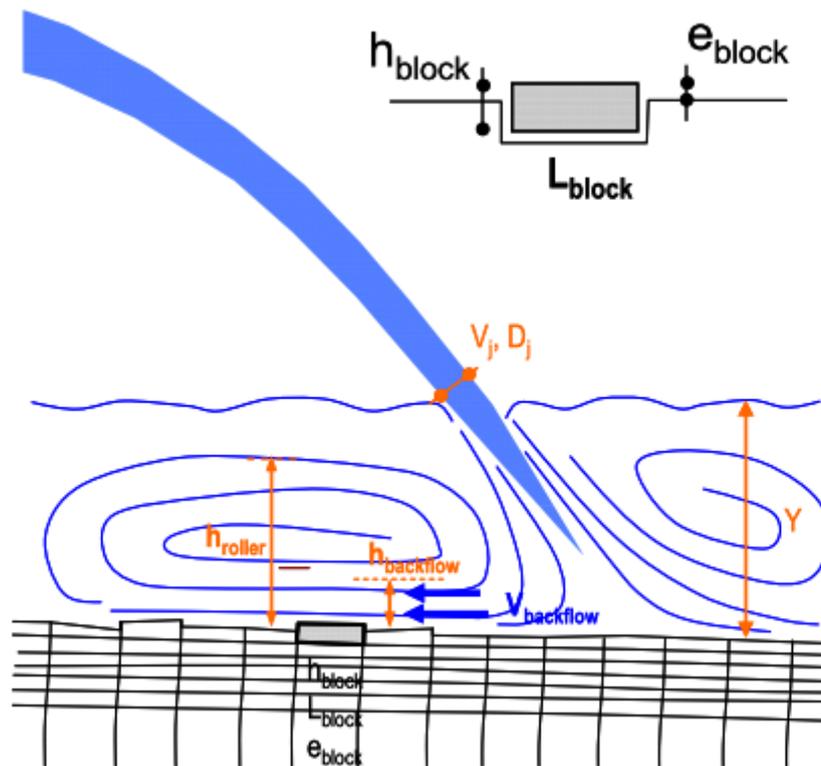


圖 2—8 剝皮法沖蝕發生於跌水沖蝕示意圖(Bolleart, 2005)

2.1.5 岩盤沖蝕機制小結

於攔河堰下游，控制岩盤之沖蝕機制的眾多因素中以地質條件為主要控制，包括岩性、節理、層面等，以義興壩下游沖蝕坑的形成為例，岩石強度較強，且遠大於節理面強度，水流作用力對岩盤本身材料的磨蝕侵蝕不易形成，並因節理發達而水流衝擊造成節理延伸及連通後，岩塊經水壓壓力放大效應向上脫離且被水流拖曳帶走，此塊體抽離破壞為義興壩下游的最主要機制；相對的以觸口攔河堰為例，下游岩盤強度較弱且節理不發達，即產生磨蝕與剝皮法兩種破壞形式，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，而水流衝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往下游帶走為剝皮法破壞。

瞭解河道沖蝕機制固然重要，但一般河床構造物下游沖蝕影響太複雜，往往複合多種沖蝕機制於一處，以上述之觸口攔河堰遭遇洪水為例，不僅只有原本之磨蝕、剝皮法破壞，更大宗的沖蝕破壞為水流強力衝擊岩床後造成岩塊的破裂產生節理，受到壓力波動之後節理內部壓力增大，岩塊形成碎小的獨立塊體再被水流帶往下游。複合型的破壞機制於現地調查後往往會高估岩體抗沖蝕能力，故若能將現地試體施做室內沖蝕試驗，使用已知參數(流速、流功、落距、尾水高等)與試驗成果(沖蝕量、沖蝕率、沖蝕坑形狀)做比較，即可更準確推估

現地岩盤之抗沖蝕能力。

2.2 跌水沖刷特性

攔河堰因跌水產生之能量及紊流之情形明顯大於一般河道條件，Bollaert and Schleiss(2003)利用圖 2-9 來描寫水庫及溢洪道下方在高速水流沖擊岩盤發生的沖蝕過程。可將岩盤沖蝕分成下列六個步驟：

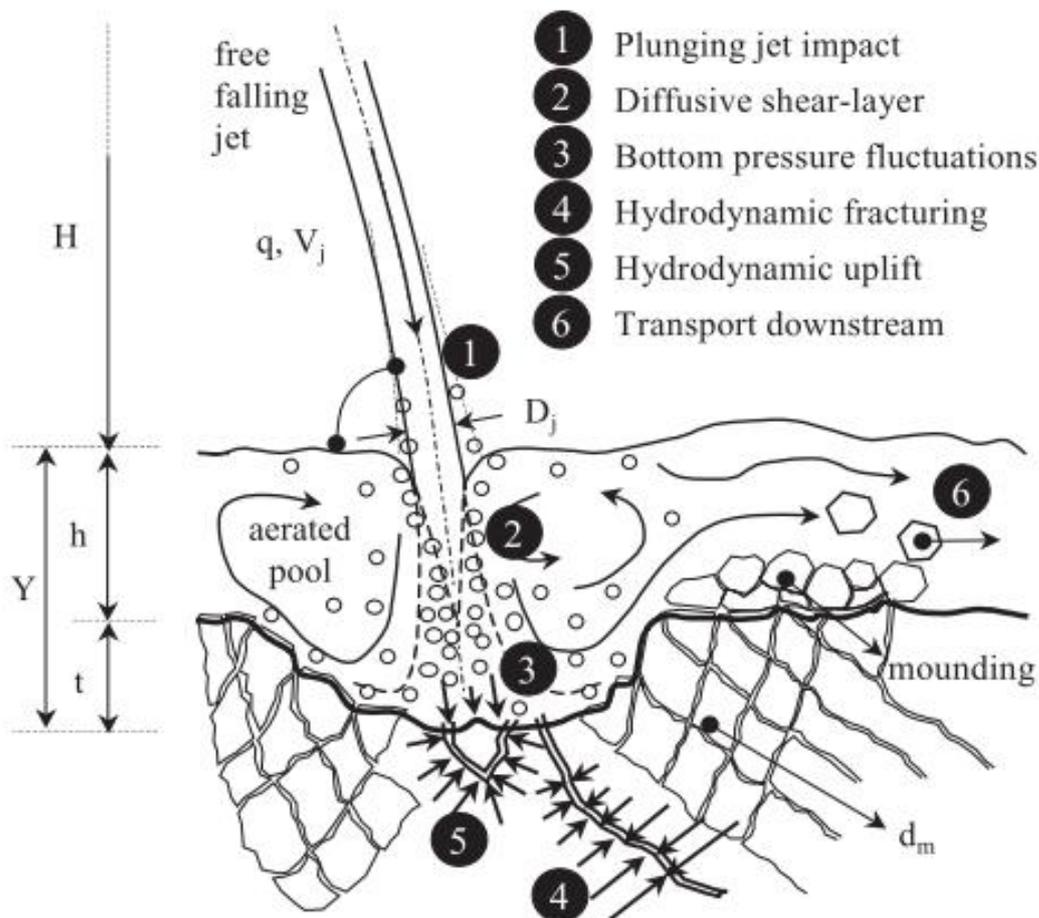


圖 2—9 水流沖擊引致之沖刷機制示意圖(Bollaert and Schleiss, 2003)

- (1) 水流離開原始束制邊界，以自由落體方式向下運動，除水流周圍因擴散及磨擦效應而使流速變慢外，水流中心大部份仍維持初始之流速。

- (2) 水流投射進入尾水，以 2D 擴散方式在尾水內形成渦流，並將周圍之空氣攜帶進入尾水中形成氣泡。
- (3) 水流衝擊力量作用在岩盤表面。
- (4) 力量傳遞至裂隙內部導致裂隙延伸連通，使部份岩塊脫離岩盤而形成獨立岩塊。
- (5) 裂隙內部之放大效應使得岩塊底部與上方形成壓力差，當向上作用力大於岩塊的水中重量時，岩塊向上運動脫離原有位置。
- (6) 岩塊向脫離原有位置後，堆積於沖蝕坑下游側或隨水流向下游移動。

上列步驟詳細敘述水流沖擊岩盤後沖蝕坑發展過程，以岩體裂隙壓力增加將塊體頂開後被水流帶走為主要破壞模式，與一般台灣河床構造物比較，如義興壩(壩高 25.5m)為具有較高落差的壩或堰體，一旦形成沖刷坑後較容易有此種破壞，其餘落差較小的堰體破壞形式則因地質不同而有不同的破壞模式，如渦流下切磨蝕等。

2.3 射流擴散

2.3.1 射流擴散效應

室內水槽沖蝕試驗，常利用圓管射流模擬水工構造物下游之跌水作用，而穩定的圓管射流能提供射流流量、流體斷面積等計算沖蝕能量所需參數。自由流體離開初始之限制邊界後，因流體與周遭介質間之壓力差，流體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，呈現微小波浪及渦流次現象，將部分之空氣以氣泡形式攜帶進入流體中。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)，若擴散長度過長，所有流體與空氣交互作用，導致以水滴形式向下墮落，此時長度稱為射流破裂長度(jet break length)，任一斷面之流速皆小於初始流速則稱為擴散射流(developed jet)。

Ervin et al. (1997)提出圓形射流(circular jets)擴散架構如圖 2-10 所示，並針對其擴散之相關參數建議如下：

$$L_b = \frac{1.05D_i F_{ri}^2}{(1.14T_u F_{ri}^2)^{0.82}} \quad (2-1)$$

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

L_b =射流破裂長度

D_i =射流初始斷面直徑

F_r =射流初始福祿數

T_u =射流擾流強度(turbulence intensity)=0.08(for valve)

D_j =射流任意斷面的直徑

L_j =射流軌跡長度

本試驗中 D_i 、 F_r 、 T_u 與 L_j 皆為已知參數，將其帶入式 2-1 與式 2-2 中可分別得到 L_b 與 D_j ，做為試驗中射流長度與衝擊面積之參考。

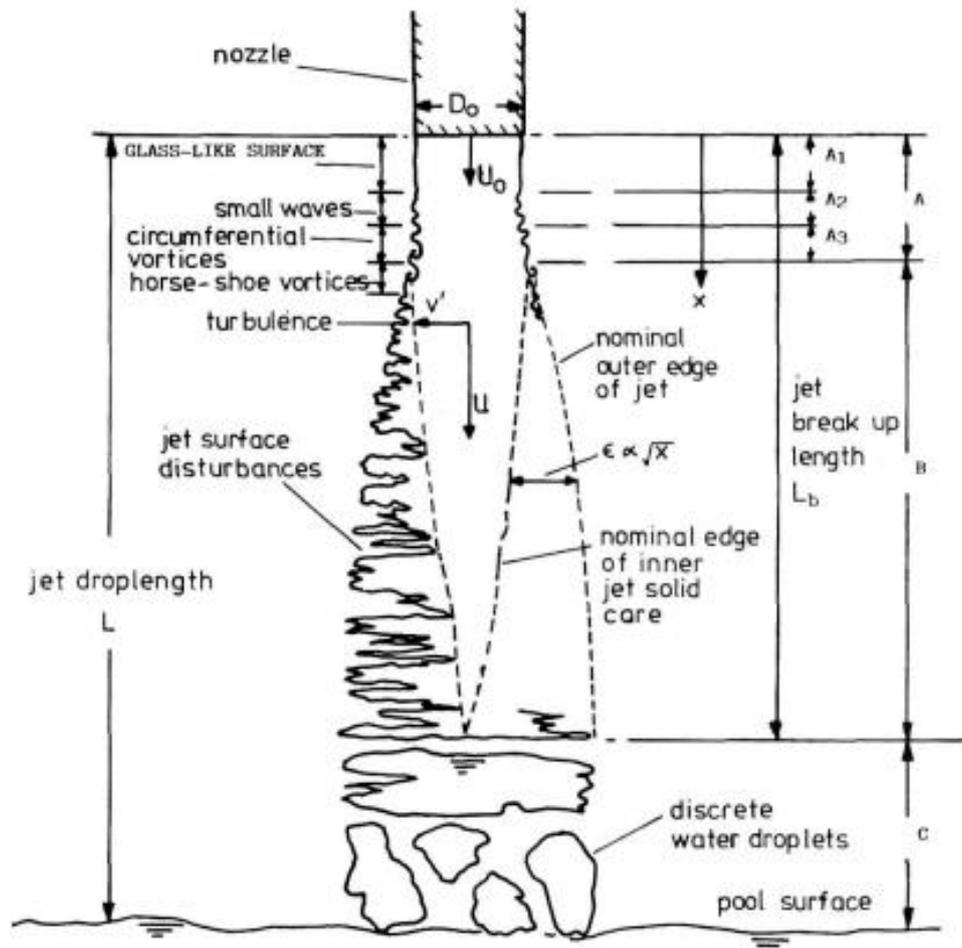


圖 2—10 圓形射流擴散架構圖(Ervine et al., 1997)

2.3.2 射流擴散消能

(a) 平均壓力

隨著射流擴散，水柱衝擊於表面的壓力也隨之降低，Ervine et al. (1998) 及 Melo (2006) 將壓力計裝置於水槽底部，利用不同的尾水深及初始水注厚進行試驗並量測壓力計的變化，將中心位置之壓力值與理論壓力值進行比較後可得到平均壓力係數(Mean pressure coefficient C_p)，得到成果如圖 2-11，尾水深跟初始水注厚之比小於 4

時，射流中心點仍可維持在核心射流(core jet)，當比值大於 4 時射流成為擴散射流(developed jet)，射流中心點壓力隨尾水深增加而減少，且當比值大於 20 時將無壓力傳至底部。而 Castillo(2004)使用不同的射流長度與射流破裂長度比值進行許多組試驗，並與 Ervine et al. (1998)等人之試驗成果進行整理如圖 2-12 及表 2-1，並提出經驗式如下。

$$C_p = m e^{-n\left(\frac{y}{D_j}\right)} \quad (2-3)$$

m, n = 射流破裂長度比參數

D_j = 矩型水柱厚度

H = 射流長度

h = 尾水深

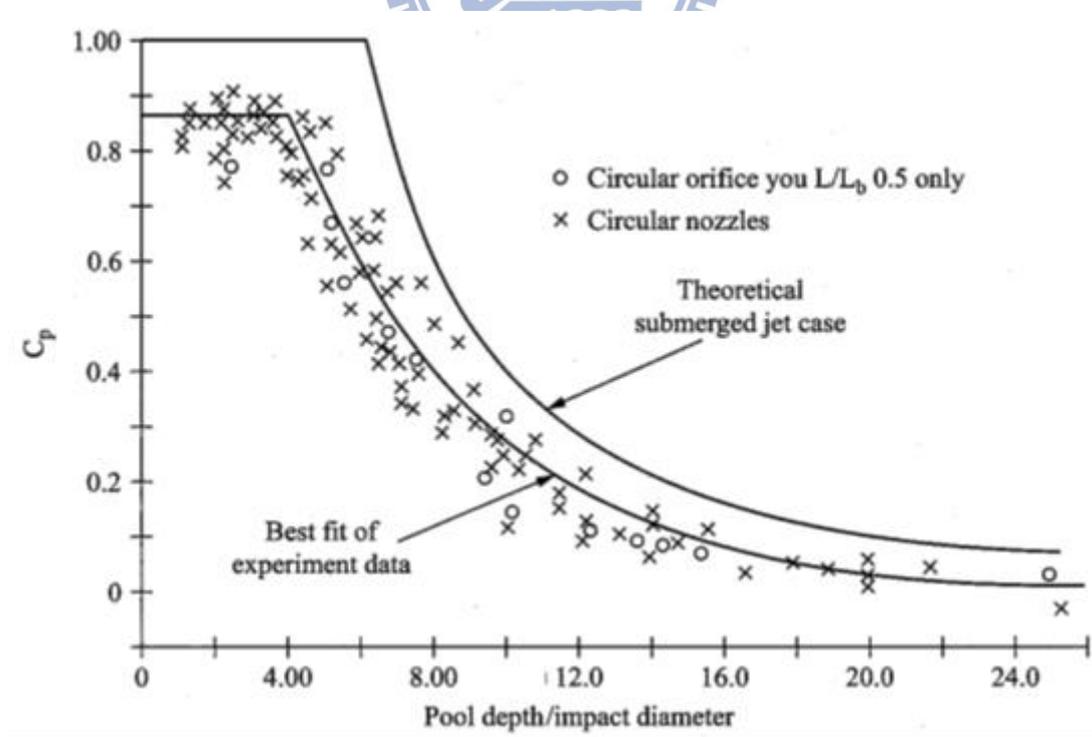


圖 2-11 圓形射流平均壓力係數-尾水深/初始水注厚 (Bollaert, 2003)

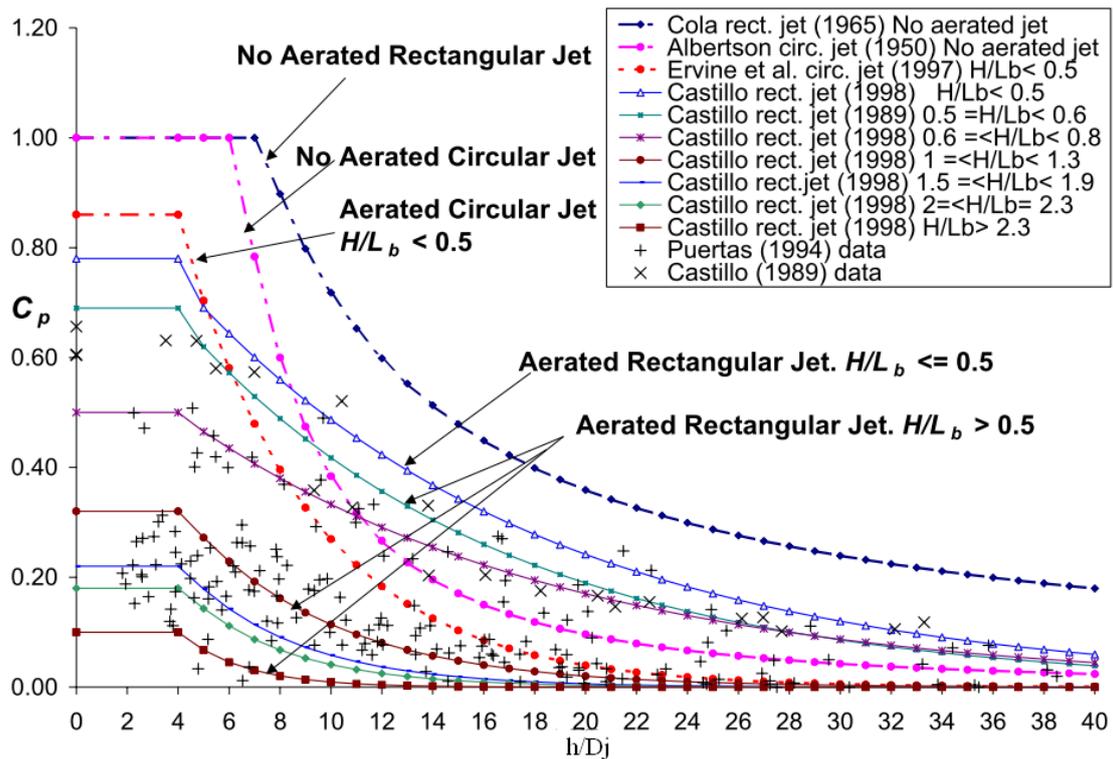


圖 2-12 射流平均壓力係數-尾水深/初始水注厚關係圖(Castillo, 2004)

表 2-1 射流破裂長度比參數(Castillo,2004)

H/L _b	m	n	C _p (h/D _j < 4)
0.4-0.5	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
1-1.1	0.65	0.163	0.33
1.1-1.3	0.65	0.185	0.31
1.5-1.6	0.55	0.200	0.24
1.8-1.9	0.55	0.250	0.20
2.2-2.3	0.50	0.250	0.18
2.3-3.0	0.50	0.400	0.10

(b)波動壓力

受到剪力層(Shear layer)及渦流(Eddy)產生之擾流現象影響，射流所產生壓力快速變動之情形稱為波動壓力(Fluctuating Dynamic pressure)，一般以均方根(root-mean-square)方式估算大小，其與理論

壓力值之比值稱為波動壓力係數(C_p')，May and Willoughby (1991), Ervine 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關係式，如下：

$$C_p' = a_1 \left(\frac{h}{D_j}\right)^3 + a_2 \left(\frac{h}{D_j}\right)^2 + a_3 \left(\frac{h}{D_j}\right) + a_4 \text{ for } h/D_j \leq 14 \quad (2-4)$$

$$C_p' = a \left(\frac{h}{D_j}\right)^b \text{ for } h/D_j > 14 \quad (2-5)$$

Castillo(2006)彙整 Castillo(1989), Puertas(1994), Bollaert(2002)資料如圖 2-13。並利用射流長度與破裂長度之比值(L/L_b)來進行分類，如表 2-2 所示。

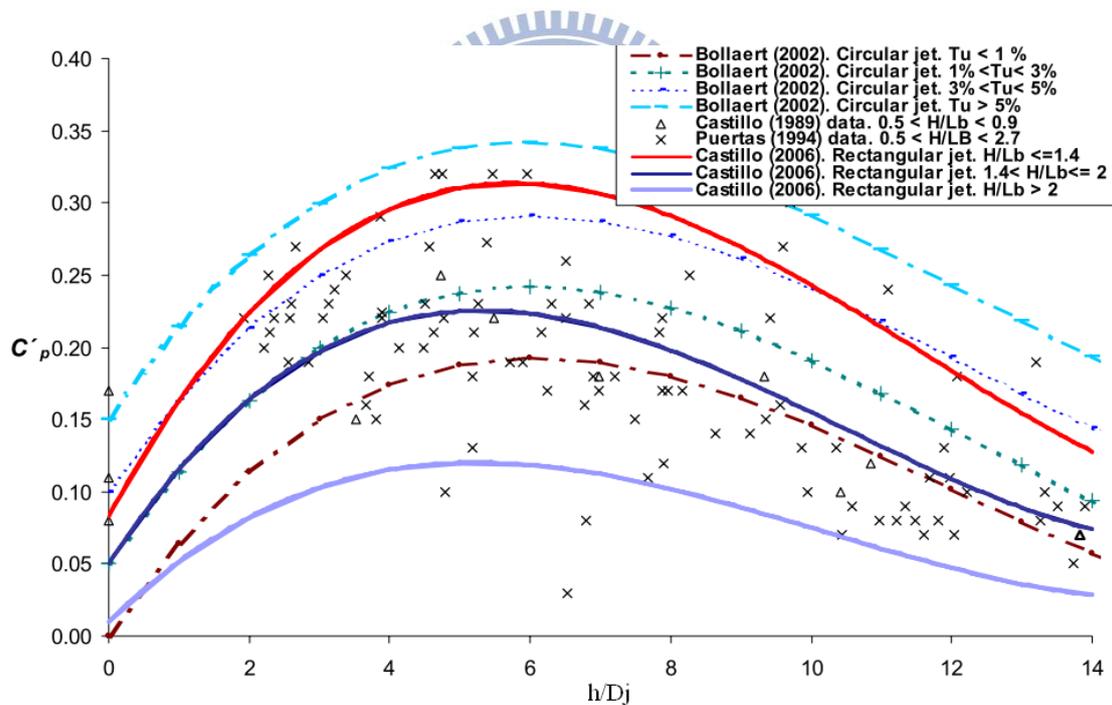


圖 2-13 射流波動壓力係數-尾水深/初始水注厚關係圖(Annandale, 2006)

表 2-2 波動壓力係數-射流長/射流破裂長關係表(Castillo, 2006)

h/D _i <14					
L/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 _i >14					
L/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

2.3.3 傾斜射流擴散之消能

Beltaos(1976)於水槽底部裝置數個壓力計，利用改變射流角度及射流長與初始水注厚之比值，觀察水流擴散範圍內壓力之變化繪出趨勢圖(圖 2- 14)，並將其試驗成果整理，提出建議公式如下：

$$\frac{P_w}{P_{jet}} = e^{-0.693\eta^2} \quad (2-6)$$

P_{jet} =單位面積流功(kW/m²)

P_w =擴散後之流功(kW/m²)

η =X₁(與射流中心點距)/b(射流角度參數)

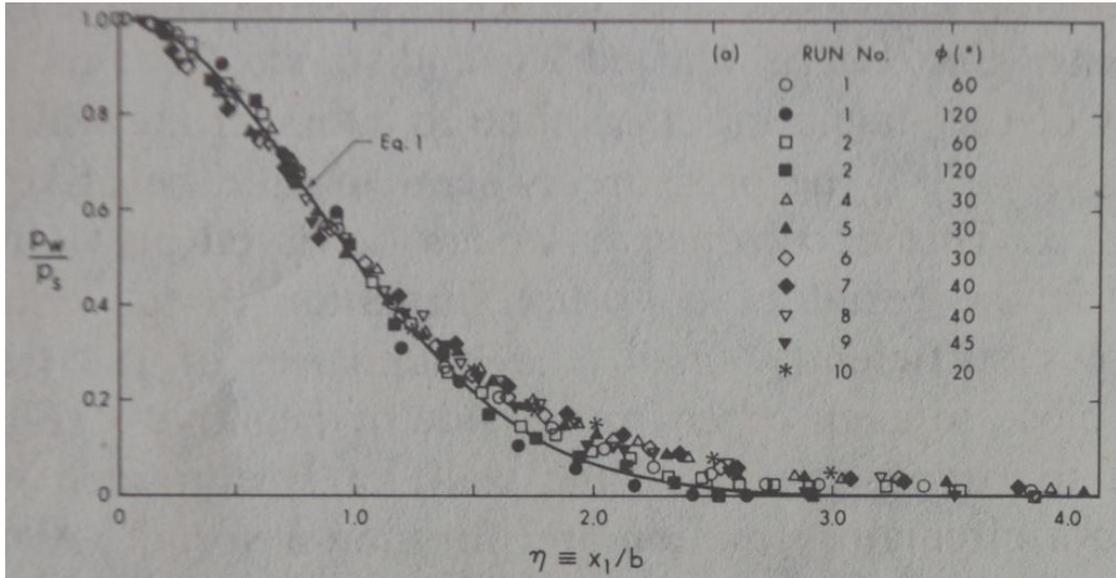


圖 2-14 P_w/P_{jet} -關係圖，Beltaos(1976)

其中 b 為射流角度參數，Beltaos(1976)利用試驗成果將 b/L (射流長)與 ϕ (射流角度)的關係作圖如下：

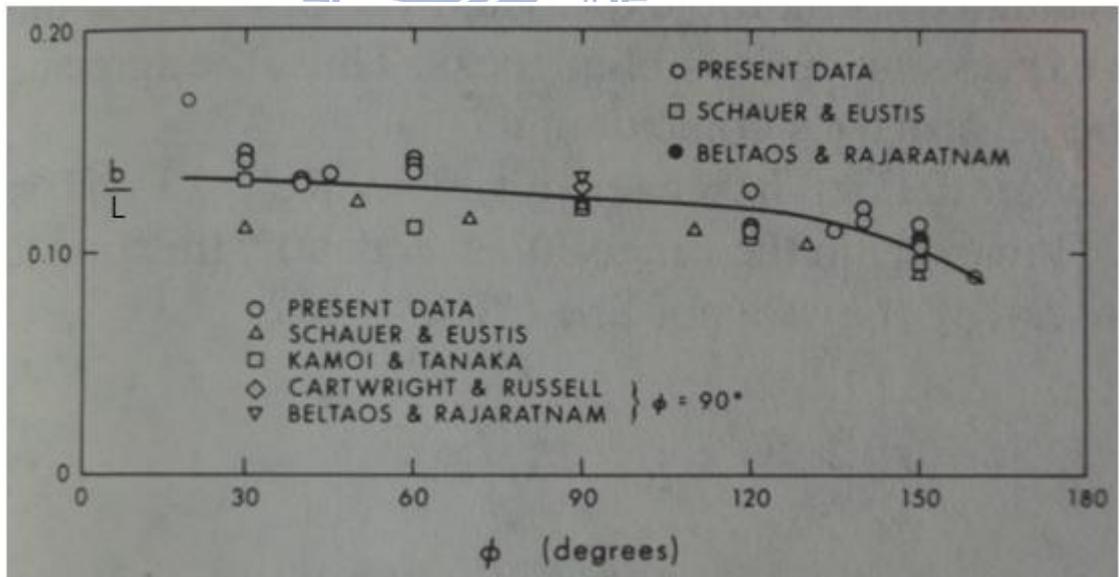


圖 2-15 b/L -角度關係圖(改自 Beltaos,1976)

2.4 室內水槽沖蝕試驗

射流沖蝕所控制的影響因子包括流量、跌水高差、尾水高度、岩石性質、河床載及流體中空氣含量，也因影響因子眾多，難由現地觀察、監測加以掌握，故採用室內試驗控制相關沖蝕因子，經觀察、分析以探討各影響因素對於岩石沖蝕之影響，為必要的方法。以下將國外室內水槽沖蝕試驗進行回顧，提供試驗儀器設計之參考。

2.4.1 現地取樣射流沖刷試驗

Nakato T. (2002)針對 Mississippi River 流域之頁岩進行室內沖蝕試驗，室內水槽長 1.47m、寬 0.76m、深 0.97m，管路及噴嘴內徑皆為 5.08cm，並於管路上裝設已標定過之調節閥控制試驗流速，噴嘴與水平下方夾角成 55° (圖 2—16)，與試體垂直距離約為 3cm，試體為 Mississippi River 流域地下 3.6 m 至 8.2m 的頁岩，每塊直徑 0.61m、厚 0.25m，從低流速約 1.52m/s 開始進行試驗，觀察沖蝕量後分段增加流速至 3m/s，實驗進行時間超過 21 小時。

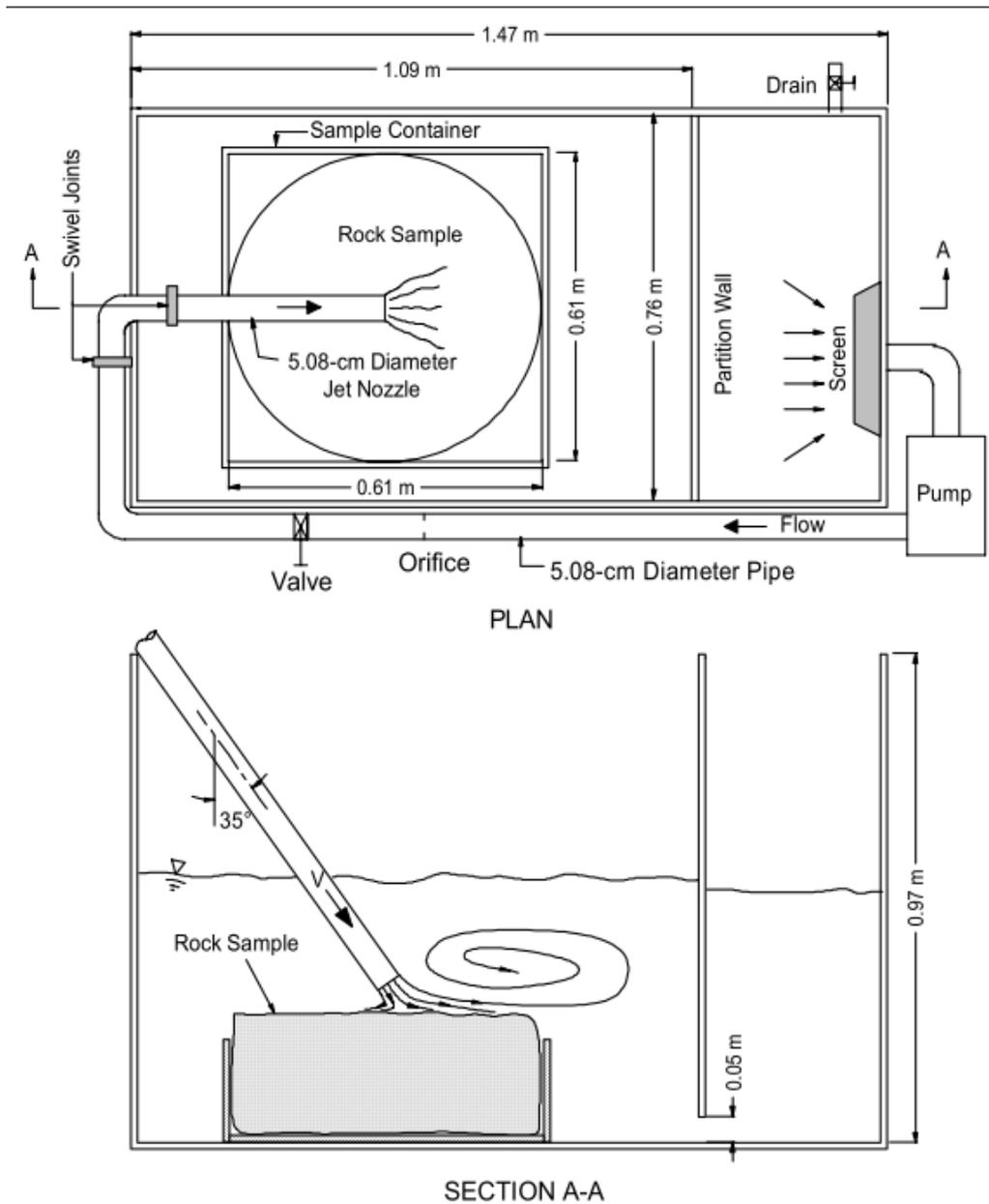


圖 2—16 試驗配置圖 Nakato T. (2002)

試驗結果顯示頁岩在水流沖蝕後，沖蝕速率初期較小並且隨時間增加而增大，岩塊體積一般破裂成厚度約 2.5cm 左右之岩塊，且流速高低僅影響沖蝕速率，對岩塊大小之相關性並不明顯，沖蝕坑深度最深則為 0.15m，但因水流沖擊力與試體節理發達，導致試體邊界破壞

嚴重，無法形成完整沖蝕坑，也因此量測不出準確的沖蝕坑深度。(圖 2—17)



圖 2—17 試驗照片(Nakato T. ,2002)

2.4.2 塊體抽離水槽試驗

Annandale & Wittler (1998)所建立之水槽試驗，目的在於驗證現地資料所歸納出之破壞模式門檻值與沖蝕坑深度，如圖 2—18 所示，水槽寬 10 m、長 16.75 m、深 4.5 m，射流最大流量 $2.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ，射流角度有 15° 、 25° 及 35° ，落距為 2.91 m 至 4.37 m，試體為輕質混凝土製成之小塊體(Light weight concrete blocks)並進行射流水柱沖擊。

試驗之輕質混凝土小塊體如圖 2—19，長 0.394 m、寬 0.194 m、厚 0.064 m，組成材料為混凝土，每塊塊體上間距 3.81 cm 即切割寬 1.27 cm、深 2.54 cm 之槽溝，以 45° 依序排列成兩層，並於裡面埋設 18 組水壓計，以強力水柱衝擊質量塊，模擬河道中塊體抽離破壞。

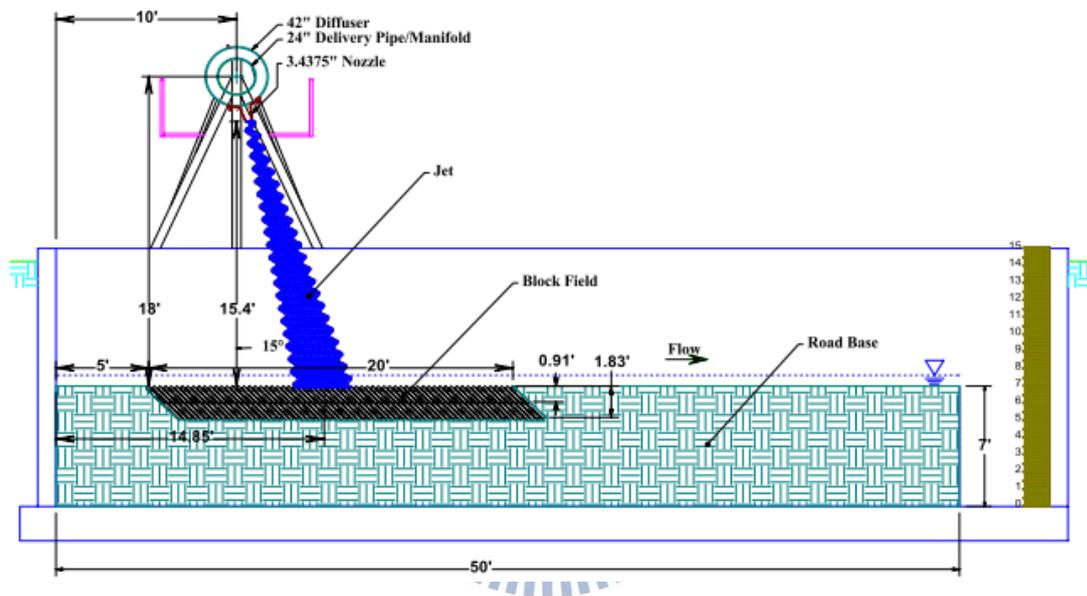


圖 2—18 試驗配置圖(Annandale & Wittler, 1998)

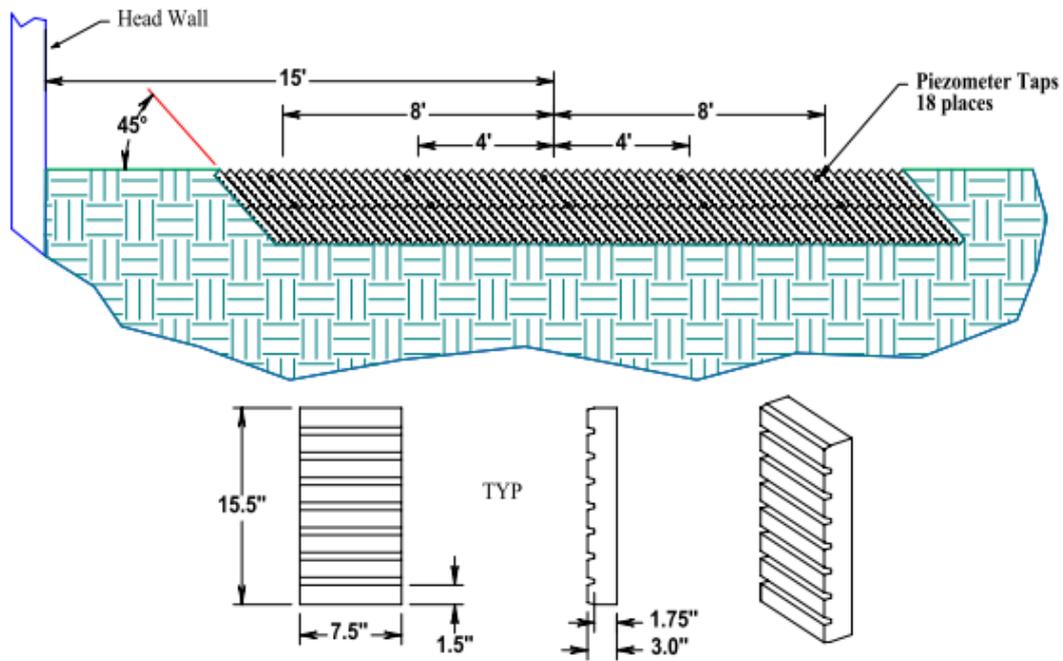


圖 2—19 塊體配置圖(Annandale & Wittler, 1998)

Annandale(1995,2006)依實驗成果及不同河道的沖蝕與否，所提出之建議公式：

$$P_{jet} = f(K_h) \quad (2-7)$$

P_{jet} 為水流射流之能量(stream power)， $f(K_h)$ (Erodibility index)為抗沖蝕指數， P_{jet} 小於 $f(K_h)$ 時沖蝕不會發生，而當 P_{jet} 大於 $f(K_h)$ 時即會產生沖蝕， P_{jet} 之計算式如下：

$$P_{jet} = \frac{\gamma QH}{A} \quad (2-8)$$

γ =水單位重

Q =單寬流量

H =跌水高度

A =水流衝擊面積

而 $f(K_h)$ 之計算式如下：

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (2-9)$$

$$M_s(\text{材料強度}) = C_r \times 0.78 \times \text{UCS}^{1.05} \quad \text{for } \text{UCS} \leq 10\text{MPa}$$

$$M_s(\text{材料強度}) = C_r \times \text{UCS} \quad \text{for } \text{UCS} > 10\text{MPa}$$

J_s =節理傾向（順向、逆向）、節理傾角（ $0^\circ \sim 90^\circ$ ）、節理間距比

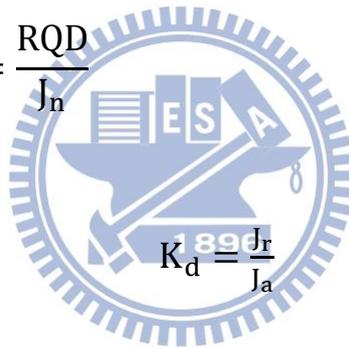
（1：1、1：2、1：4、1：8）

$$C_r = \frac{g\rho_r}{27 \times 10^3} \quad (2-10)$$

ρ_r =材料單位重

$$K_b(\text{顆粒或塊體尺寸}) = \frac{\text{RQD}}{J_n}$$

J_n =節理組數參數



$$K_d = \frac{J_r}{J_a}$$

(2-11)

J_r =節理面粗糙參數

J_a =節理改變參數

Annandale(1995,2006)將現地資料歸納出沖蝕破壞模式門檻值，並施做試驗加以驗證，最終將能量消耗對抗沖蝕指數繪出雙對數關係圖(圖 2—20)，推估沖蝕與否的門檻值。

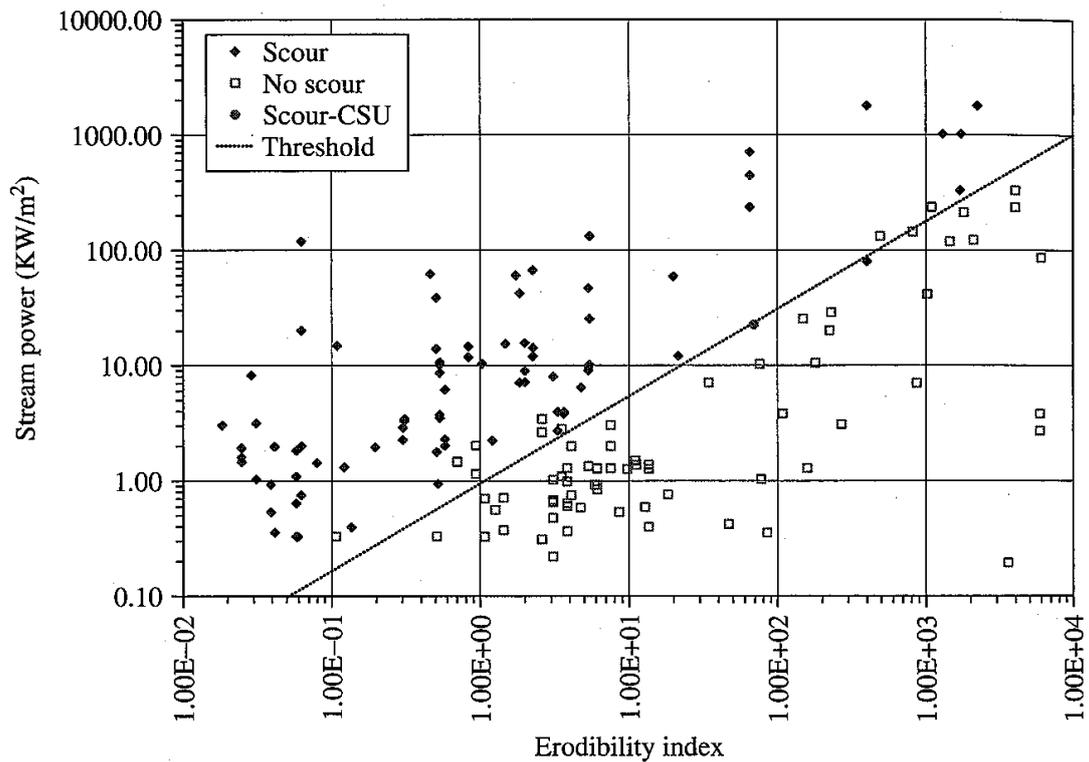


圖 2—20 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995)

2.4.3 人造節理水槽試驗

Bollaert(2002)建立水槽試驗(圖 2—21)模擬跌水下游岩體裂隙內部所受壓力變化；水流沖擊之壓力以波傳方式傳入岩體，此時岩體之壓力會因裂隙形狀及水體之波傳速度而產生在某特定頻率下發生共振效應，產生放大程度不一的應力，當內部應力上舉力大於岩塊自重，岩塊即脫離河床被水流帶走。Bollaert(2002)利用金屬版模擬岩體裂隙，並於金屬版間裝設壓力感應器，藉由不同形式之金屬版觀察各種裂隙所產生的壓力變化。

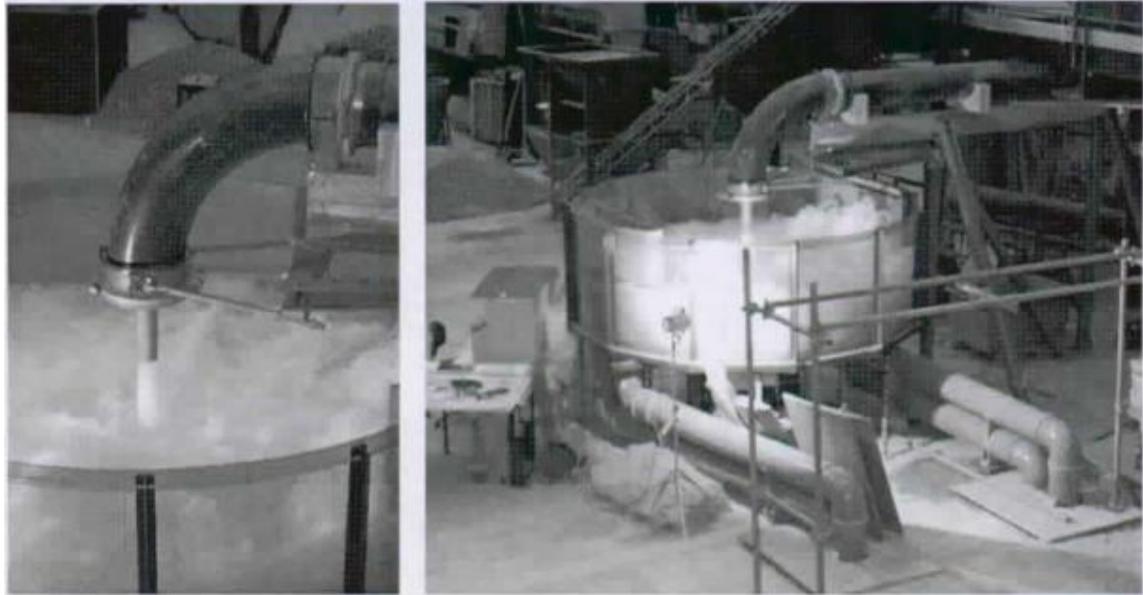


圖 2—21 人造節理沖蝕試驗照片(Bollaert, 2002)

圖 2—22 為人造節理沖蝕試驗配置圖，以下將詳細介紹之。

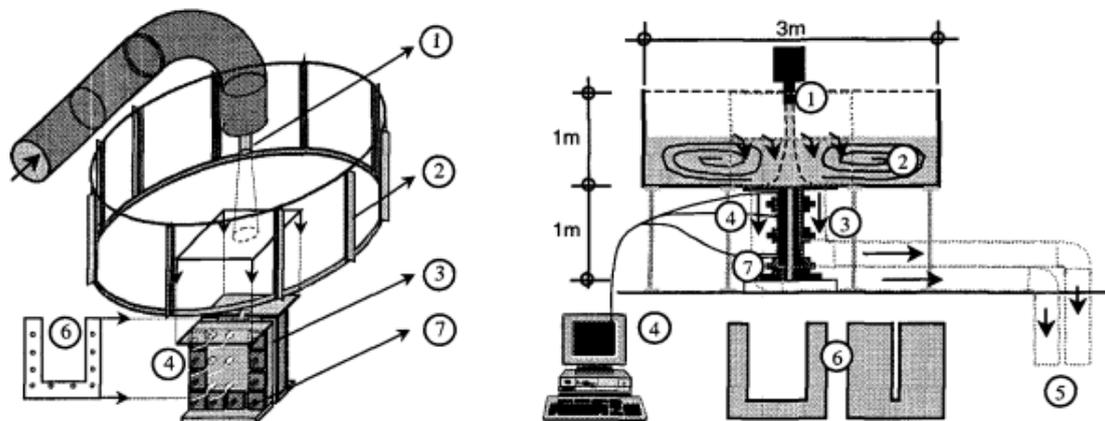


圖 2—22 人造節理沖蝕試驗配置圖(Bollaert, 2002)

- (1) 圓型噴嘴：最高流速為 35 m/s，有 5.7 cm 及 7.2 cm 兩種尺寸。
- (2) 水槽：直徑 3m 之水槽，周圍有拉條增加其強度。
- (3) 預力鋼構：夾緊模擬節理之構件。
- (4) 壓力感測器。

(5) 水循環系統。

(6) 薄鋼板：模擬節理之構件，夾在預力鋼構之間，又有 1D、2D、L 型、U 型及 D 型五種型式，圖 2-23 為模擬節理示意圖(Bollaert, 2002) 及鋼板尺寸及型式。

(7) 預力鋼棒：施加力量，使預力鋼構夾緊薄鋼板。

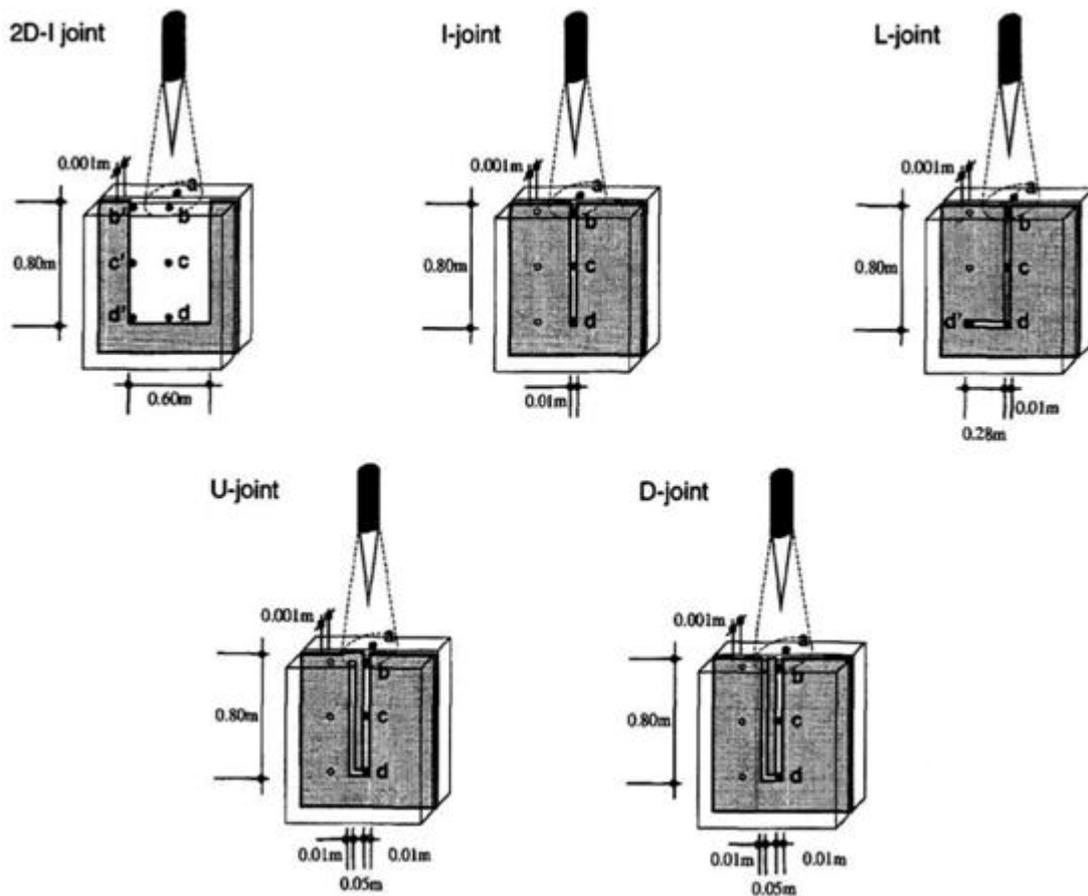


圖 2—23 不同形式裂隙模擬設施示意圖(Bollaert, 2002)

試驗成果顯示出裂隙底部相較於岩體表面壓力有明顯變化之情形，且尖峰值之出現呈現某一特定頻率(Δt)。在五種模擬節理之構件中，放大效應最簡單形狀之 I type 時可達到最大，其值約可 4 倍之平

均壓力(或 20 倍之表面波動壓力)，其成果示如圖 2-24。隨著裂隙形狀之變化，水中氣泡聚集於彎角處，影響裂隙之共振頻率，使得形狀愈複雜之裂隙放大效果愈小，在 1D- type 或 2D-I type 時，其放大係數僅約為 1~1.5 倍之平均壓力(圖 2—25)。

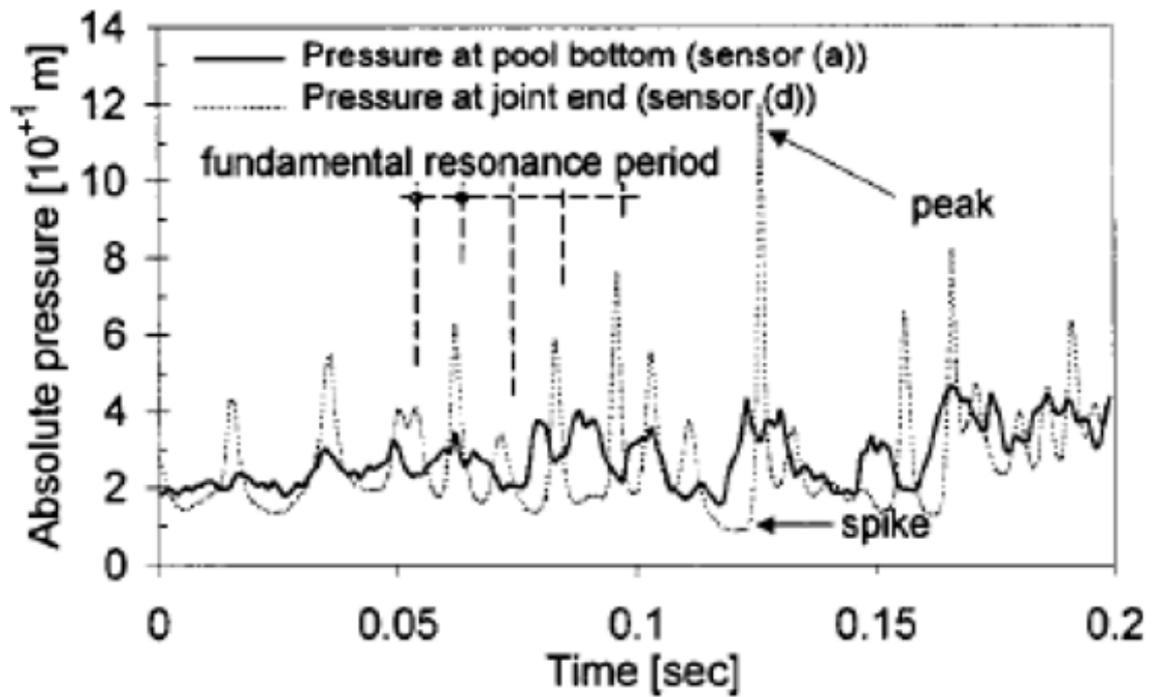


圖 2—24 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖(Bollaert, 2002)

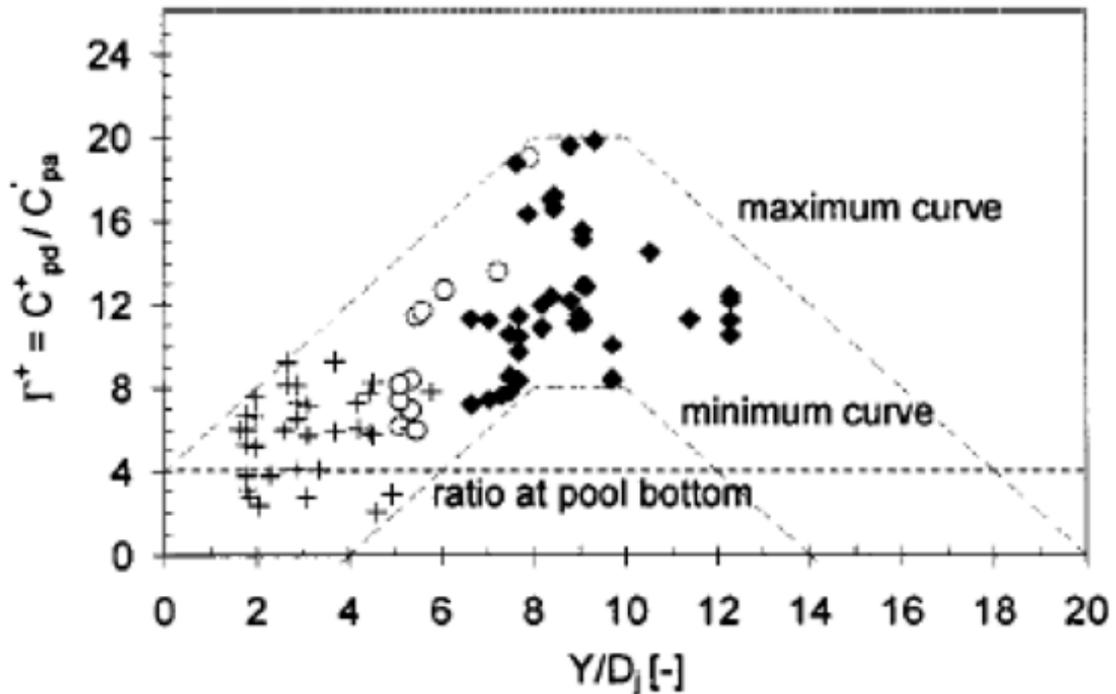


圖 2—25 裂隙內部波動壓力放大係數圖(Bollaert, 2002)

2.4.4 室內水槽沖蝕試驗小結

比較 Nakato T. (2002)、Annandale & Wittler (1998)及 Bollaert(2002)

三者所建立的室內沖蝕試驗儀，皆以大型水槽搭配管路及可帶動水流之動力設備為基礎，然而為了不同試驗目的，使用的試體亦有所不同(表 2-3)，Nakato T. (2002)使用現地岩塊施做試驗，所得到的成果及觀察出的沖蝕形態固然為最直接的試驗方式，對於特定研究區域沖蝕問題也最有幫助，但岩體的取得與保存是極大的問題，岩體表面及內部因保存不良而造成節理相連通，試驗時試體邊緣破壞嚴重無法得到準確的沖蝕率(圖 2—26)。

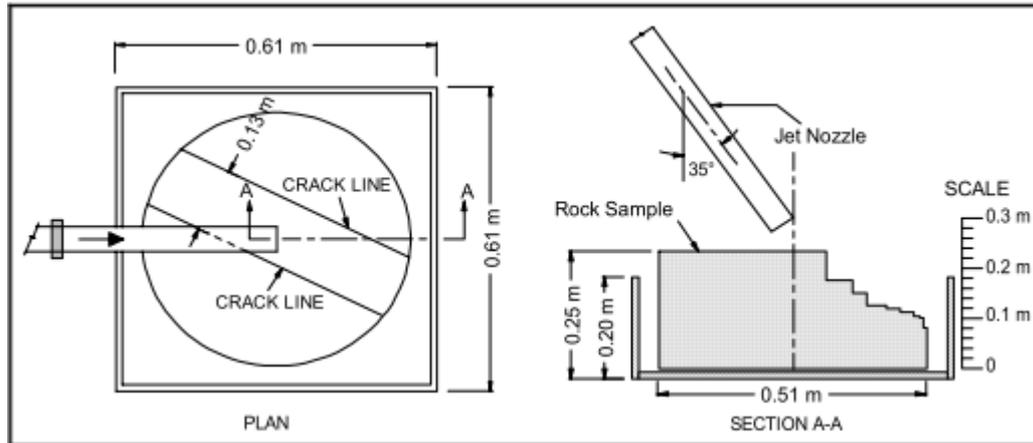


圖 2—26 Nakato T. (2002)試驗後邊緣破壞示意圖

Annandale & Wittler (1998)的水槽沖蝕試驗則將試體安排為許多整齊排列的混凝土塊體，並將破壞機制簡化成塊體抽離單一破壞模式，優點在於試體的性質好掌握，節理大小、方向及塊體大小皆能於試驗前得到，亦方便試驗後沖蝕率及沖蝕坑的測量；相反的無法測試其他沖蝕破壞機制，以台灣建於強度較弱砂岩層上的攔河堰為例(圖 2—27)，水流造成之床面剪應力對岩盤表層磨蝕的影響甚大，攔河堰下游與岩床交界的岩層磨蝕破壞即成沖蝕主因。Bollaert(2002)則將試體設定為岩體內之節理並用鋼體模擬之，主要為得到塊體抽離破壞模式下，岩體內部裂隙之延伸分析。此外，三者對於射流角度上並無特別著墨，除 Annandale & Wittler (1998)外其餘兩者皆無改變射流角度之功能，且 Annandale & Wittler (1998)角度變化範圍僅有 20° ，對於實驗成果無太大影響；台灣屬海島型亞熱帶氣候，洪水事件頻繁(圖 2—28)，攔河堰於一般時期與洪水時期下游跌水入射角度相異甚大，

而不同的入射角度對於岩石沖蝕影響目前並無文獻加以探討。



圖 2—27 觸口攔河堰堰底因岩床均勻下切掏空(2005)



圖 2—28 莫拉克颱風後石岡壩洩洪(2009)

本研究擬建立一套適應軟岩沖蝕坑觀察研究之射流沖蝕儀，並且噴嘴為可變角度式設計，探討射流角度對於沖蝕坑之影響，試驗試體為現地採樣即可使用，讓試驗成果更能真實反映出現地沖蝕現象。

表 2—3 室內水槽沖蝕試驗文獻比較

試驗文獻	Nakato T. (2002)	Annandale & Wittler (1998)	Bollaert(2002)
初始射流直徑 (m)	0.0508	0.0873	0.057-0.072
落距(m)	0.07	2.91-4.37	0.03-0.5
射流長/初始射流直徑	1.67	34.5-61.11	0.4-8.8
射流角度(水平面下°)	55	55-75	90
試驗試體	現地取樣	輕質混凝土人造塊體	鋼構人造結理
試驗目的	估算現地岩床沖蝕率	驗證跌水下游河床塊體抽離破壞情形	模擬跌水下岩體節理內部壓力

2.5 多功能軟岩沖蝕儀

郭炳宏(2010)以 Briaud(1999)水平向磨蝕試驗為主要參考，並整合河道常見沖蝕機制，建立室內多功能軟岩沖蝕儀，其規劃的試驗功能包含磨蝕沖蝕試驗、顆力彈跳沖蝕試驗及塊體抽離沖蝕試驗。儀器大致可分成三試驗區，分別為水平向磨蝕試驗、可變角度直接沖刷試驗、小型渠道岩床沖刷試驗區，目前已經完成水平向磨蝕試驗部分，本研究係接續多功能軟岩試驗儀繼續發展可變角度直接沖刷試驗功能。以下依序介紹試驗功能及試驗設計配置圖。

2.5.1 水平向磨蝕試驗

郭炳宏(2010)參考 Briaud(1999)的 EFA 沖蝕試驗機，並對於試驗設備、量測分析方式進行改良，讓試驗能更適用於台灣一般軟岩。(圖 2—29)



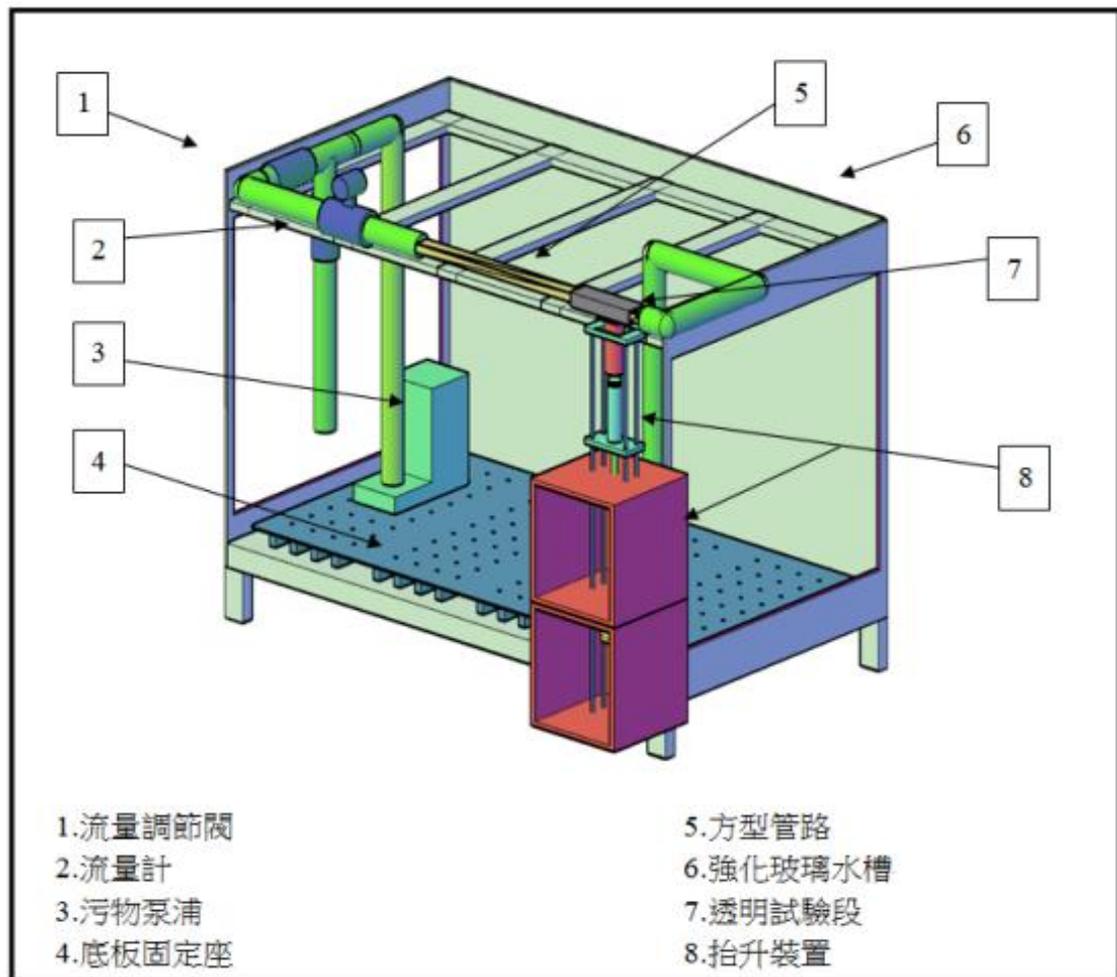


圖 2—29 沖蝕試驗儀器配置圖(郭炳宏，2010)

試驗方法為設計一水平向完全發展紊流段，在方形試驗段中可將岩心從下而上置入其中，計算岩心沖蝕 1mm 所需時間，再換算其沖蝕率。

水平向磨蝕試驗步驟：

1. 將岩心表面打磨整平
2. 將岩心置於透明試驗管內
3. 開啟污物泵浦並讀取流量計讀數，將流速調整為最小 0.54m/s，

並等待流況穩定。

4. 將岩心推入試驗段內，使其上升 1mm。
5. 紀錄每段時間內岩心沖刷的深度，得出沖蝕深度 Z 與時間 t 之關係。
6. 增加流速置並回到步驟 4，試驗流速之增加依照岩性不同而不同。
7. 繪製剪應力(N/m^2)與沖蝕率(mm/hr)關係圖。

2.5.2 可變角度直接沖刷試驗

試驗配置如圖 2-30 可變角度直接沖蝕試驗配置所示，藉著噴嘴噴出強力水流沖擊試體表面來進行模擬沖蝕試驗，噴嘴可選用不同型式(例：方管、圓管)，並且可用不同流速之水流沖擊試體，噴嘴角度可進行調整以模擬不同角度的水流沖擊(圖 2-31)，且污水式抽水汞還可加壓含砂水流。此試驗配置可模擬顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)、塊體抽離沖蝕(plucking)與穴蝕沖蝕(cavitation)。

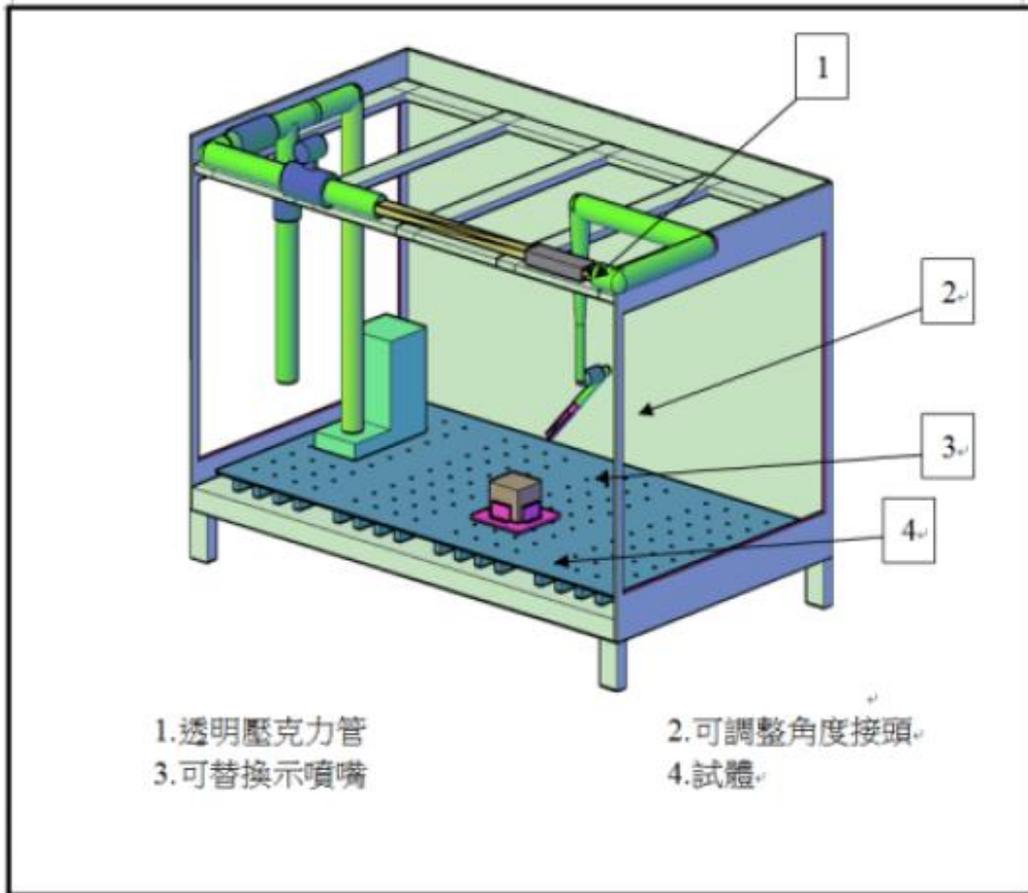


圖 2—30 可變角度直接沖刷試驗配置

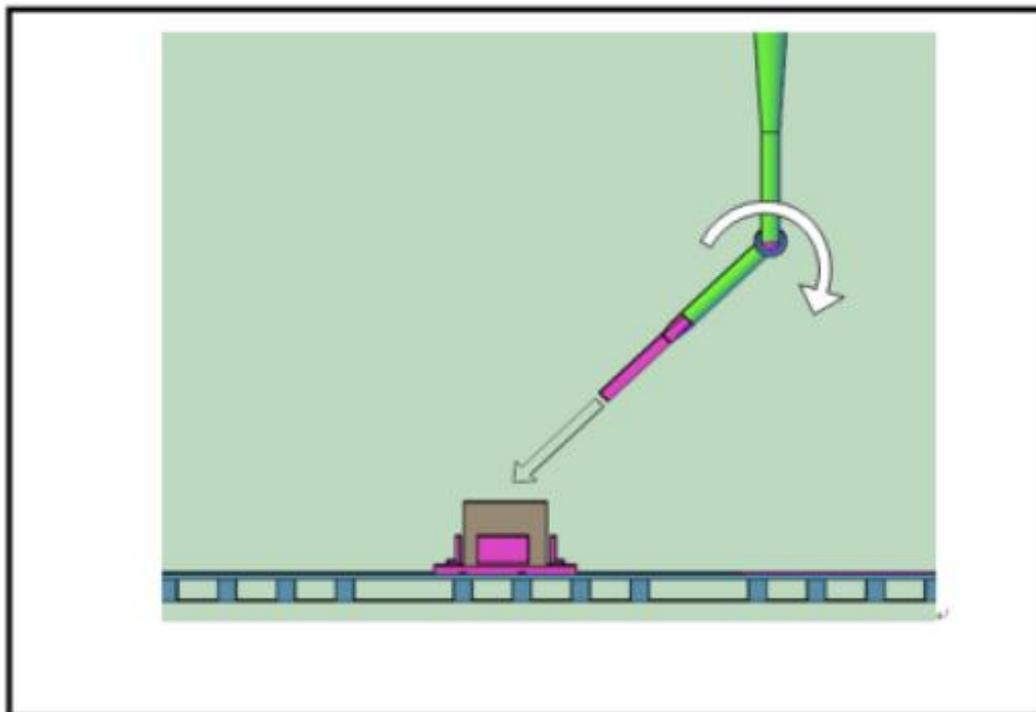


圖 2—31 可變角度直接沖刷噴嘴

2.5.3 小型渠道岩床沖刷試驗

小型渠道岩床沖刷試驗係本多功能試驗儀尚待發展之試驗功能。試驗構想配置如圖 2-32 所示，利用水平流沖蝕小型渠道之試體(圖 2-33)試驗流況，量測計算各流速下試體損耗量及破壞情形，主要模擬岩石河床的沖蝕機制之磨蝕沖蝕(abrasion)、塊體抽離沖蝕(plucking)。而此試驗配置之流場可依模擬需要改變流場型式(例：渠道、排水閘門)。

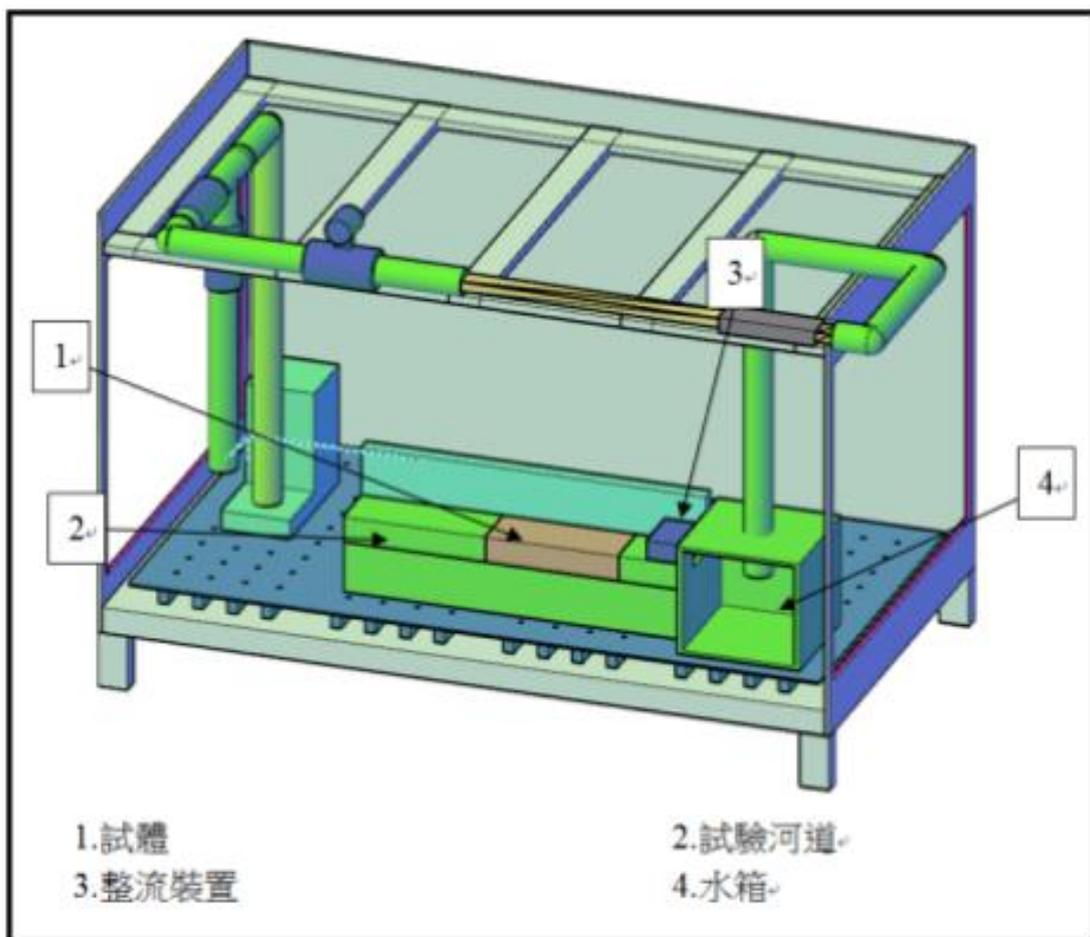


圖 2—32 小型渠道岩床沖刷試驗配

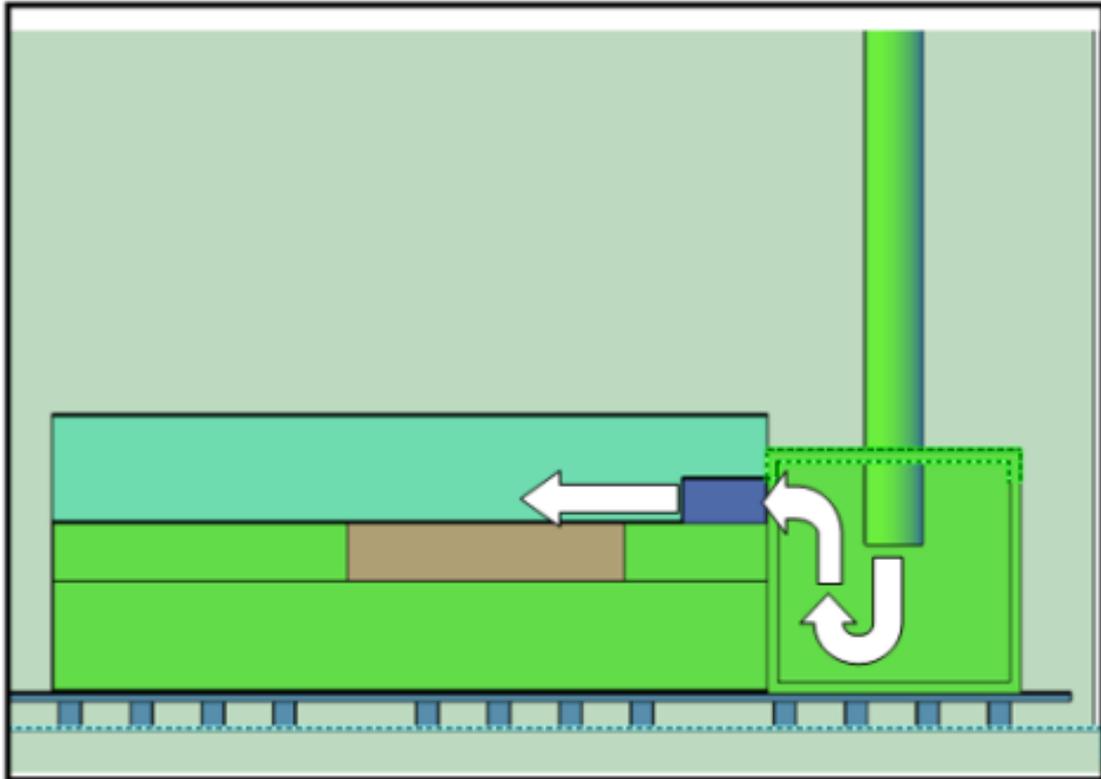


圖 2—33 試驗流況示意圖

郭炳宏(2010)已將上述三種試驗區中之水平向磨蝕試驗部分完成，本文將以多功能軟岩沖蝕儀為基礎，增設可變角度射流沖刷試驗功能。

三、試驗儀器、試體準備及試驗程序

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

3.1 實驗儀器設計

3.1.1 設計理念

綜觀室內實驗儀器，大多為一機一用，每套實驗儀器皆需專屬的周邊設備，若將多項實驗整合於一儀器，不僅能充分利用有限的實驗空間，在維修及保養上也相對容易。

3.1.2 設計流程

郭炳宏(2010)雖於設計多功能沖蝕儀時已將可變角度直接沖蝕系統初步設計完成，但可行性與設計細節仍需進一步評估，可變角度射流沖蝕試驗設計步驟如下(設計步驟參考曾孝欽,2003)：



- (1) 儀器設計目地探討：確認所需的試驗項目與功能。
- (2) 儀器系統修改與裝設：管路設計與修改、控制裝置修改。
- (3) 量測裝置設立：建立一套 3D 量測裝置。
- (4) 空機測試：測試實驗各項參數範圍，如流速及可變角度之極大極小值。
- (5) 實驗施作：現地取回岩塊進行可變角度射流沖蝕試驗。
- (6) 實驗結果分析與探討：確認實驗數據之合理性，並進一步探討角度對於沖蝕成果之影響。

3.2 實驗儀器介紹



本研究以郭炳宏(2010)架設之多功能室內沖蝕儀為基礎，沿用原本之動力設備(污物泵浦)、水槽及部分管路；於原管路段加裝一球型三通閥，可控制多功能沖蝕儀進行水平向磨蝕試驗或可變角度射流沖蝕試驗，亦可控制可變角度射流沖蝕試驗之射流流量，利用軟管接通球型三通閥與升降固定器之管路，管路及噴嘴選用內徑 1 吋之不銹鋼圓管，以確保水流沖擊範圍完全作用於試體表面內，並且避免試體邊界效應影響沖蝕結果。(圖 3-1)(圖 3-2)

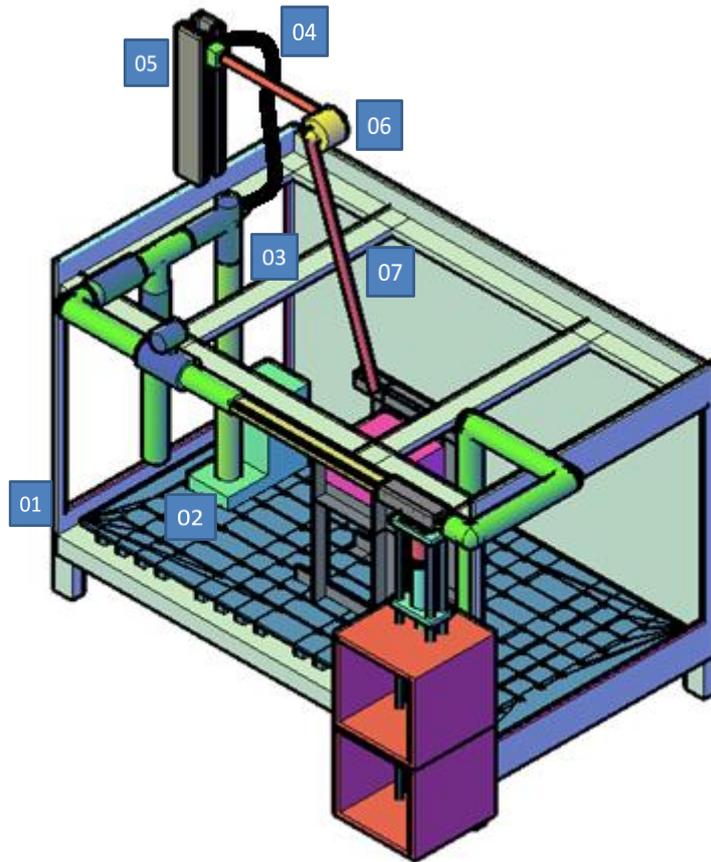


圖 3—1 多功能沖蝕儀-可變角度射流沖刷試驗設備配置圖



圖 3—2 多功能沖蝕儀-可變角度射流沖刷試驗設備照片

實驗儀器組件與功能說明於下表(表 3-1)：

表 3-1 射流沖刷試驗儀器介紹

分部	編號	試驗儀器名稱	儀器型號/尺寸	功能/目的
供水 循環 系統	01	強化玻璃水槽	210×120×120 cm ³	最高可容納 2 m ³ 之水量
	02	汙物泵浦 (圖 3-3)	河見電機 AF-35A	帶動水流循環
流量 控制 系統	03	三通不銹鋼球閥(圖 3-4)	通口內徑為 8cm	控制流經試驗 管內的流量大 小，達到調整試 驗段流速的目的
管路 系統	04	PVC 纖維增強軟管(圖 3-5)	內徑 2.5cm，長 150cm	連結三通閥及 升降固定器管 路，內部最大抗 壓 1 MPa
	05	升降固定器 (圖 3-6)	50×8×4cm ³ ，不 鏽鋼	調整噴嘴與試 體間之落距
	06	可變角度法蘭 (圖 3-7)	旋轉弧度 45°， 不鏽鋼	調整噴嘴角度
	07	噴嘴	內徑 2.5cm，長 100cm	穩定射流

量測系統	08	超音波流量計(圖 3-8)	UF820-S (FlowMaster)	量測通過流量 計時間單位內 水量(m ³ /hr)
	09	雷射位移計 (圖 3-9)	CD4A-85 (OPTEx)	利用雷射光束 反射取得是體 表面高程
	10	雷射位移數據擷取放大器 (圖 3-9)	CD4A (OPTEx)	設定雷射位移 計擷取速率
	11	XYtable 線性滑軌組(圖 3-10)	MGW (HIWIN)	精準定位量測 點的絕對位置
	12	單眼數位相機	α77(SONY)	拍攝試體



圖 3-3 污物泵浦



圖 3-4 球型三通閥



圖 3—5 PVC 纖維增強軟管



圖 3—6 升降固定器



圖 3-7 可變角度法蘭

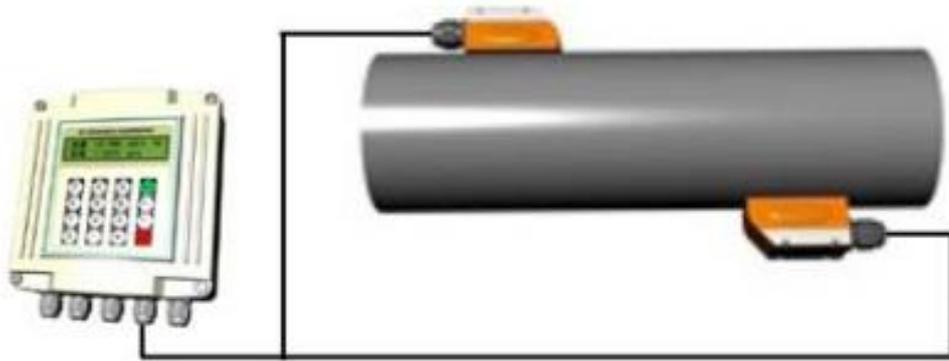


圖 3-8 超音波流量計



圖 3-9 雷射位移計與雷射位移數據擷取放大器



圖 3-10 XYtable 線性滑軌組

3.3 試驗組件選擇與設計

3.3.1 動力設備(郭炳宏, 2010)

AF-35A 型鑄鐵汙物泵浦，馬力 5HP，最高流量達 $1.2\text{m}^3/\text{min}$ ，管路開口直徑為 8cm，進行水平向磨蝕試驗流速最高可達 9m/s(郭炳宏, 2010)，進行直接沖蝕試驗流速最高則可達 10m/s，非接觸式葉面設計可讓馬達通過 56mm 以下之異物顆粒，使用添加顆粒之濁水進行試驗亦可正常運轉，運轉時至少沒入水中 50cm 以免泵浦過熱。

3.3.2 管路及噴嘴設備

管流及噴嘴設計主要建立讓流體在射流前成為完全發展之穩定紊流、射流擴散後能讓核心流速(core jet)坐落在試驗面上，及射流擴散後衝擊試體面積小於試驗面並避免邊界效應。

(1)管流完全發展紊流

管路總長約 200cm，內徑 2.54cm。沿用郭炳宏(2010)對於管流中完全發展紊流之概念進行射流前噴嘴長度設計，對於管流而言，層流的情況下雷諾數 Re 值小於約 2100，紊流大於 4000，本試驗儀最大設計流速為 10m/s，雷諾數 Re 值為 26000(Munson & Young & Okiishi, 2005)，故試驗之管流為紊流，而紊流在經過完全發展段 l_e 之後，

會形成較為穩定之紊流，為完全發展紊流，其流場穩定平均流速之結構較為均勻(圖 3-11)，而在紊流情況下所需之完全發展段 l_e 公式為下(Munson & Young & Okiishi, 2005)：

$$Le = 4.4D(Re)^{\frac{1}{6}} \quad (3-1)$$

D = 管流內徑

Re = 雷諾數

試驗中流速為 10 m/s，故發展段為 90 cm，噴嘴全長 100 cm 可讓管流成為完全發展紊流，流速的量測與射流流場穩定性也較高。



圖 3—11 紊流擴散示意圖(Reynolds, 1883)

(2) 射流核心長度

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

$$\frac{L_b}{D_i F_{ri}^2} = \frac{1.05}{(1.14 T_u F_{ri}^2)^{0.82}} \quad (3-2)$$

L_b =射流破裂長度

D_i =射流初始斷面直徑

F_{ri} =射流初始福祿數

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

本試驗之 D_i 為 0.025m、 F_{ri} 為 40.133，依式 3-2 得射流破裂長度為 0.718m，因此試驗之射流長度將不高於 0.718m，即可確保射流流體衝擊至試體面時流速仍保有原始初速。

(3)射流流體擴散範圍

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

$$D_j = D_i + 2 \times 0.38 T_u L_j \quad (3-3)$$

D_j =射流任意斷面的直徑

D_i =射流初始斷面直徑

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

L_j =射流軌跡長度

經公式計算得本試驗射流接觸試體時段面直徑不大於 58 cm²，而試體面積為 625cm²，前者與後者面積比為 1：10，不僅試驗面積涵蓋

射流沖及範圍，亦可避免試體邊界過於脆弱破壞而影響沖蝕坑發展。

3.3.3 管路固定設備：

(1) 升降固定器

全長 55cm，可做六段高度調節，每段間距 7.5cm，為一冂字形軌道(圖 3-12)與凸形滑塊(圖 3-13)所組成，滑塊前端與 L 型管連接，功能在於調整噴嘴與試體間之落距。

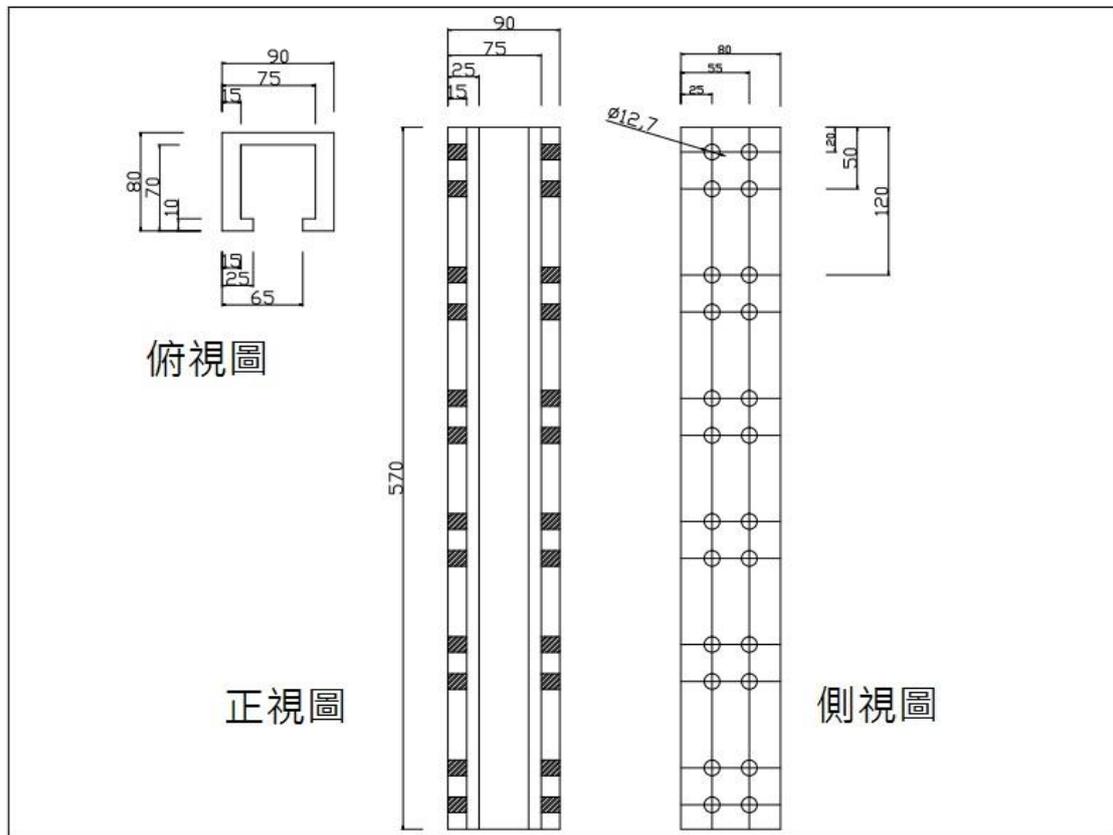


圖 3-12 升降固定器之架構造圖(單位：mm)

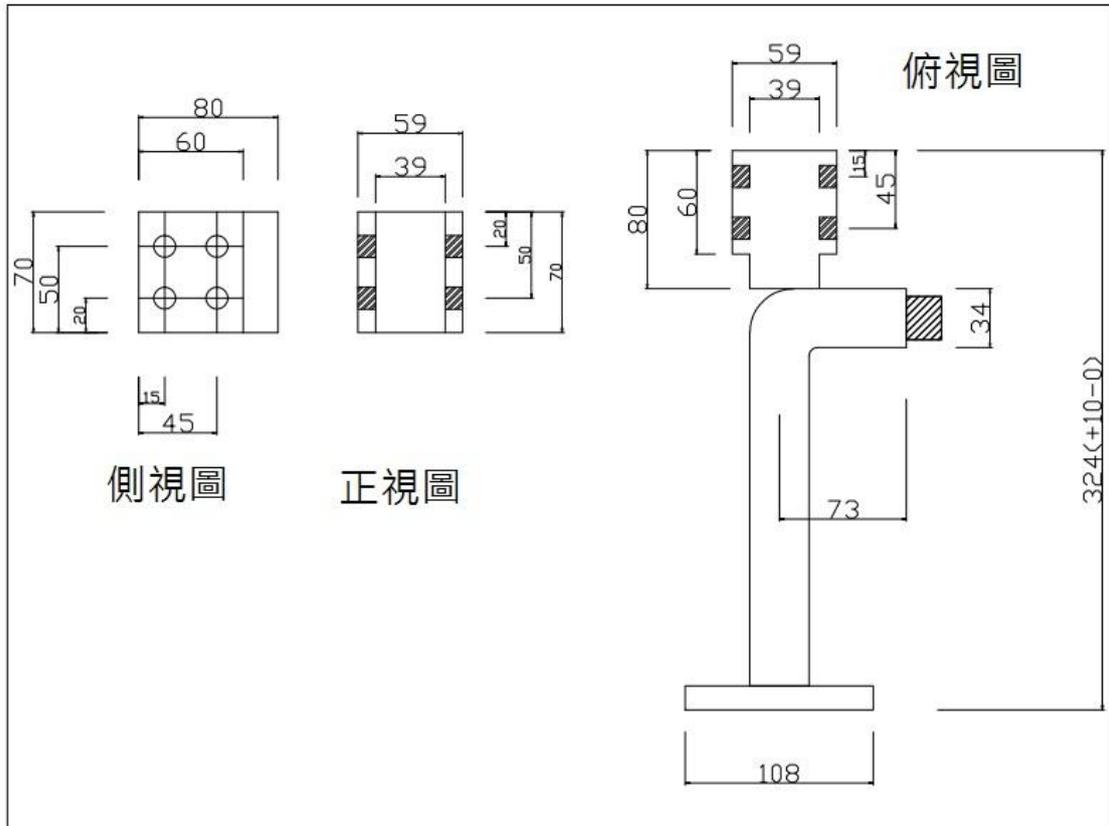


圖 3-13 升降固定器滑塊構造圖(單位：mm)

(2)可變角度法蘭：

加長法蘭片之螺栓孔，用意在於不用重新拆裝噴嘴，只需稍微鬆開螺栓即可調整噴嘴角度，確定角度後再將其螺栓固定。旋轉角度為 45° ，配合兩段式與三段式管路搭配可涵蓋垂直 90° 至水平下方 30° 之可變角度範圍。(圖 3-14)

光為一平行單色光束，當照射在工件表面之上，沿著其反射角方向的反射光強度，有二種表面反射模式，分別為鏡射式反射(Specular)與散射式反射(Scattering)。通常雷射位移計皆是利用散射式反射原理而設計，並採用雷射三角法原理(Triangulation) 做量測應用。雷射光束投射在任一表面產生光點，經過透鏡的聚焦後投影於光檢測器上，若待測表面作一上下的位移量，則光點沿著雷射光束的路徑方向移動，也造成檢測器上的光點沿檢測器作一段距離的位移。其中兩者位移量成正比。這種在檢測器上影像的位移就可以決定出表面的位移量，應用在高低起伏的自由曲面外形量測時，可以量測出表面上各點的位置。

(圖 3—15)

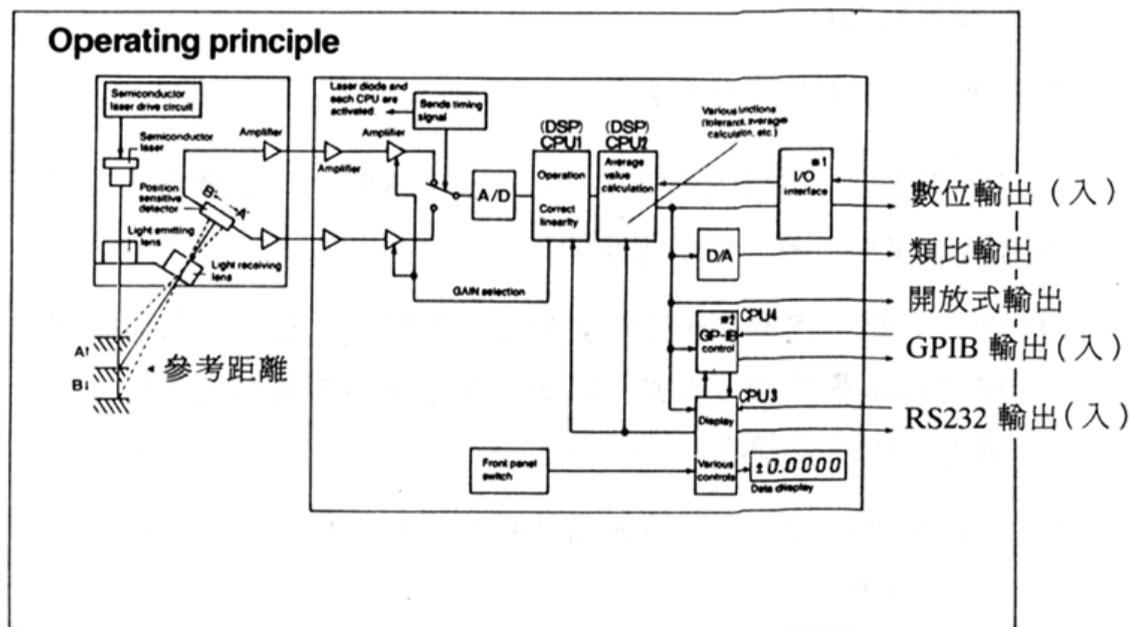


圖 3—15 雷射位移計構造示意圖

3.3.5 流量監測設備

本試驗選用超音波流量計(圖 3-16) 於管外量測水流量，精準度正負 1%、流速範圍 0~32m/s(本試驗最高流速 10m/s)，水中懸浮物體密度可達 10000ppm，適用管徑 1/2 吋至 4 吋有利於未來變換噴嘴直徑(本實驗為 1 吋)。

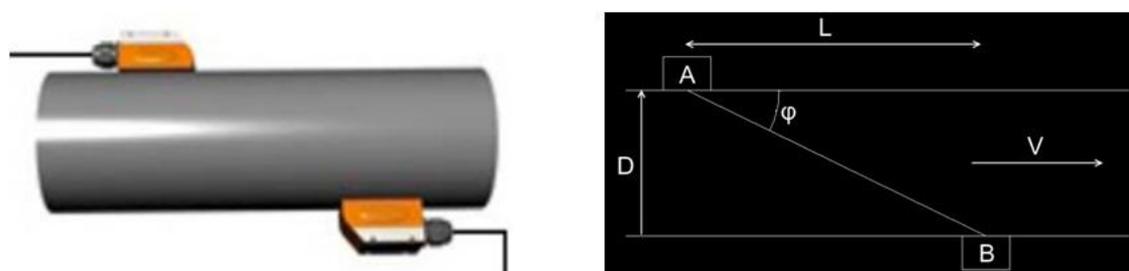


圖 3—16 超音波流量計照片與原理示意圖

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

順向傳播時間：

$$T_{AB} = \frac{L}{C+V\cos\varphi} \quad (3-4)$$

逆向傳播時間：

$$T_{BA} = \frac{L}{C-V\cos\varphi} \quad (3-5)$$

時間差：

$$\Delta T = T_{AB} - T_{BA} = \frac{L}{C+V\cos\varphi} - \frac{L}{C-V\cos\varphi} = \frac{2LV\cos\varphi}{C^2-(V\cos\varphi)^2} \quad (3-6)$$

音波速度 C 遠大於流體速度 V ，故：

$$C^2 - (V\cos\phi)^2 \approx C^2 \quad (3-7)$$

整合式 3-6、式 3-7 可得到：

$$V = \frac{\Delta T \times C^2}{2LV\cos\phi} \quad (3-8)$$

L ：檢知器 A 與 B 之距離

V ：流體流速

C ：音波速度

3.4 試體選擇與評估

本試驗之目的在利用現有試驗設備（試驗儀器流量有最大限制）進行沖蝕，因此試體的基本要求為可被沖蝕，岩石試體之抗沖蝕能力應小於儀器之提供的沖蝕力，本研究利用 Annandale(2006)的建議，即當岩盤所受的流功大於岩盤的抗沖蝕能力，則岩盤將產生沖蝕，若流功小於抗沖蝕能力則表示下游岩盤不會沖蝕，來做為岩塊是否可施做可變角度射流沖蝕試驗之初步評估。

3.4.1 流功 SP

射流後水流經過一段跌水高度才會衝擊至試體表面，利用位能轉換為動能的觀念計算水流作用於試體之流功，射流流功計算方式依 hydropower potential 之計算公式計算(Annandale, 2006)：

$$P = \gamma_w QH \quad (3-9)$$

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

$$P_{\text{jet}} = \frac{\gamma_w QH}{A} \quad (3-10)$$

P = 射流的總流功

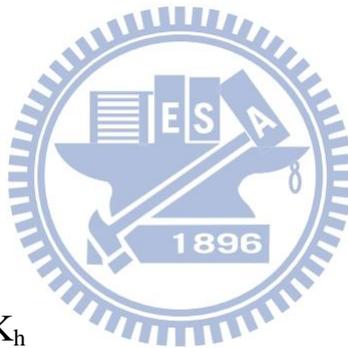
P_{jet} = 射流單位面積的流功

γ_w = 水流單位重

Q = 總流量

H = 跌水高度

A = 水流衝擊面積



3.4.2 岩盤抗沖蝕指數 K_h

Annandale 修正 Kirsten(1982)發展的抗沖蝕指數 K_h ，試圖建立一套仿照岩體品質評分系統(Q-system)之抗沖蝕指數(erodibility index) 抗沖蝕指數($K_h = M_s K_b K_d J_s$)為四項參數的乘積，這四項參數分別為 M_s (材料強度)、 K_b (顆粒/塊體尺寸)、 K_d (弱面抗剪強度)、與 J_s (地盤構造條件)，各參數依不同條件給予不同之指定值，其詳細計算方式如附錄一。

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 3—17，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：

$$\begin{aligned}
 P_c &= 0.48K_h^{0.44} \text{ for } K_h \leq 0.1 \\
 P_c &= K_h^{0.75} \text{ for } K_h > 0.1
 \end{aligned}
 \tag{3-11}$$

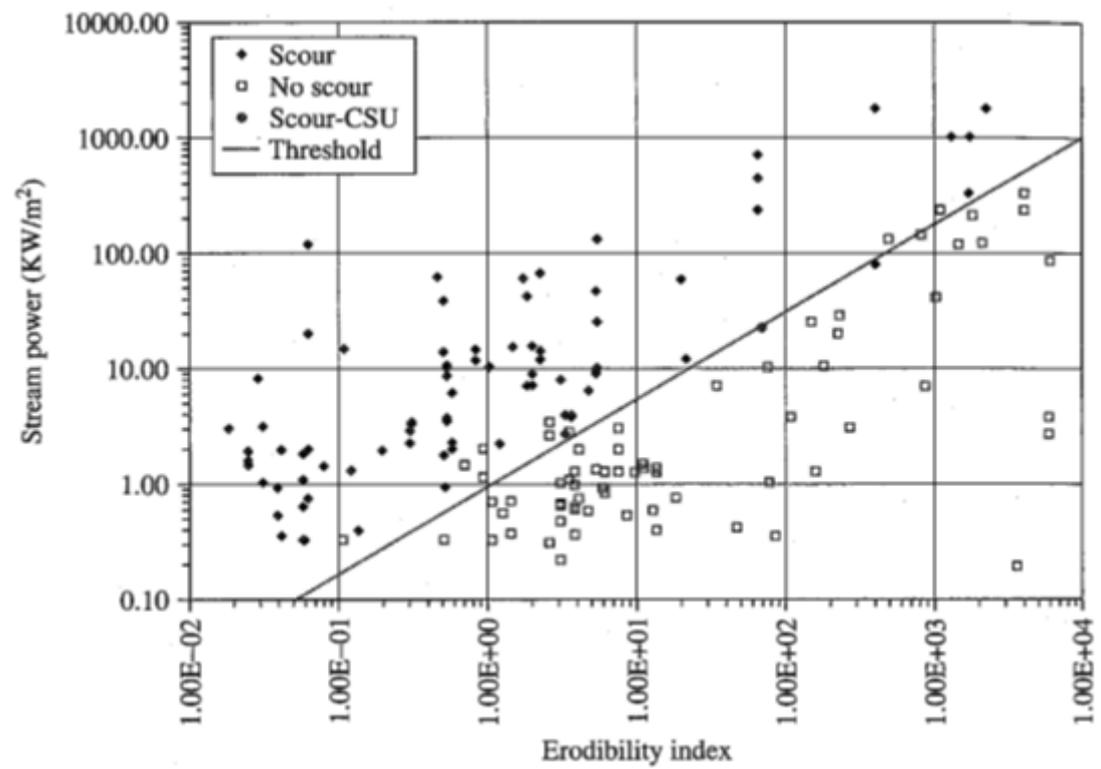


圖 3—17 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995)

3.5 可變角度軟岩沖蝕試驗流程

主要可分為試體製作、前置作業、試驗與數據分析四個部分，以下詳述各步驟之流程。

3.5.1 試體製作

使用章節 3.4 之方法評估岩塊是否可用於本試驗，若抗沖蝕能力

小於試驗最大流功即可進行試體製作。

(1)岩塊描述及物性試驗：包括岩體之完整性(有無結理、斷面)(圖 3—18)並取下部分岩塊施作基本物性試驗(單位重、含水量、比重、粒徑分析)。



圖 3—18 原始岩塊照片

(2)試體裁切：粉筆將試體欲裁切部份標示出，並使用手持式砂輪機(圖 3—19)將岩塊大致裁切成 $20 \times 20 \times 15 \text{cm}^3$ 長方體(圖 3—20)，裁切過程應使用排風機集塵，裁切完成後用軟毛刷將岩塊上之碎屑清除。



圖 3—19 岩塊裁切過程照片



圖 3—20 岩塊裁切完成照片

(3)試體固定：選擇試驗面朝上，將岩塊放入鋁模中($30\times 30\times 20\text{cm}^3$)(圖 3—21)，澆注已溶成液體之白蠟至試體頂面下方 1cm，等其冷卻後拆模取出。



圖 3-21 岩塊與模具照片

(4)研磨試驗面：使用大型研磨機(圖 3—22)將試體表面磨去 1cm，完成後使用氣泡水平儀驗證表面水平度。



圖 3-22 大型研磨機照片

3.5.2 前置作業

決定試驗參數，選定試驗射流角度(水平面以下 30° 、 50° 、 70°)，射流流線長皆為 30cm，流速亦控制為最大 10m/s，而後即可進行前置作業。

(1)固定角度：轉鬆可變角度法蘭，調整至試驗角度後轉緊螺絲固定。

可變角度法蘭調整弧度雖只有 45° ，但經兩種管路安排

(圖 3—23)(圖 3—24)可涵蓋水平以下 30° 至 90° 之範圍。

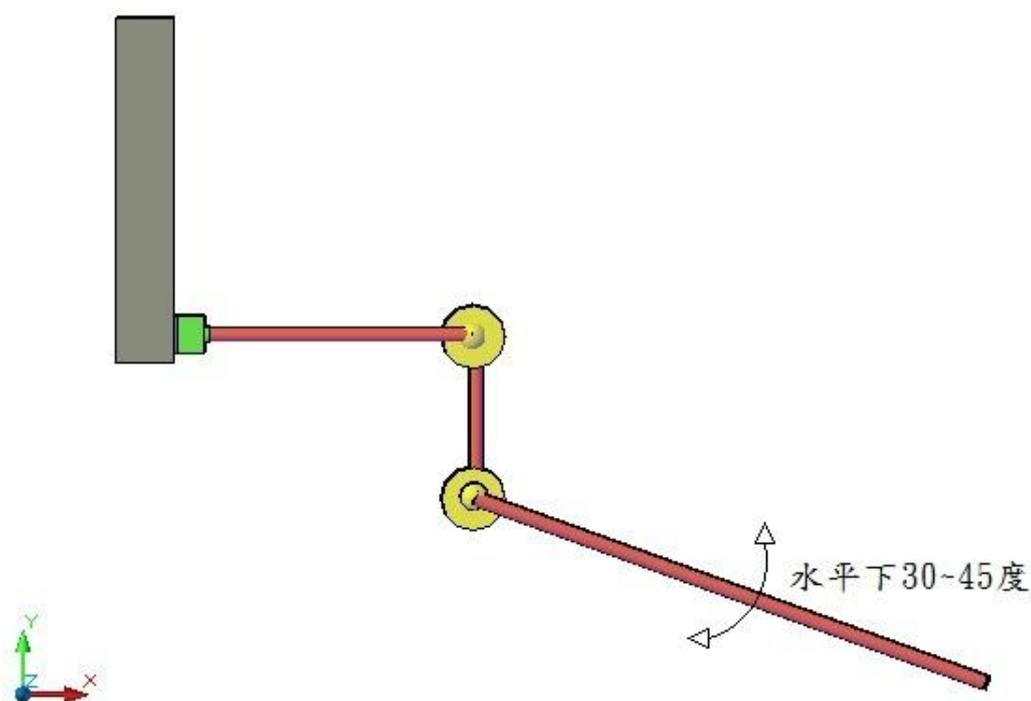


圖 3—23 小角度管路架設示意圖

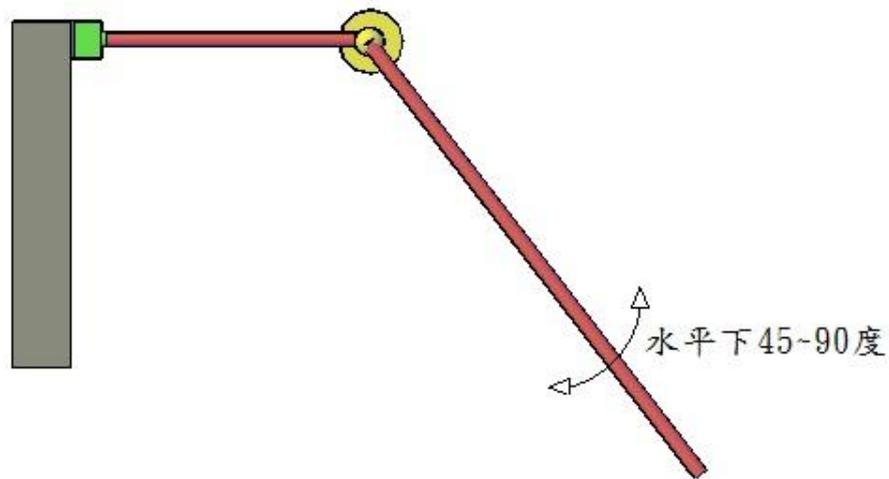


圖 3—24 大角度管路架設示意圖

(2)調整升降固定器：射流流線長、落距與角度成一直角三角型關係，固定角度後，選擇預設之射流流線長或落距，垂直移動升降固定器中之滑塊，選定高度後固定之。

(3)安裝流量計：夾式超音波流量計可安置於任何一段圓管上，但為求量測之流速接近射流之流速，將其安裝於管路噴嘴段，上游與下游長度比為 6：4(圖 3—25)，更能準確得到完全發展紊流流速。

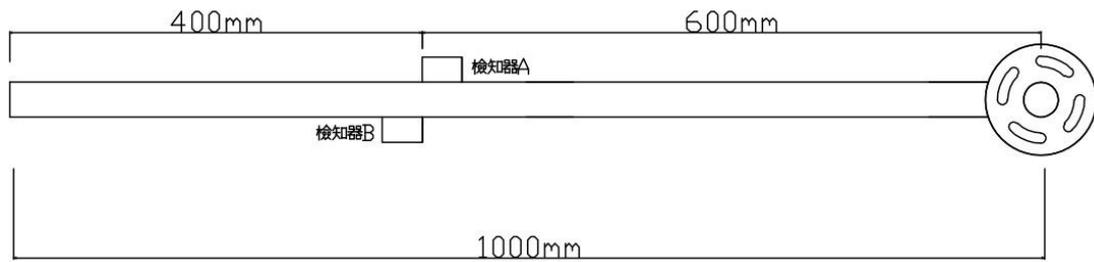


圖 3—25 超音波流量計安裝於噴嘴示意圖

(4)流量控制：將水槽蓄水並確認球型三通閥全開，開啟流量計及泵浦使水流順暢運轉，檢核流量計之回波率為 100%後即可依據流量計量得之流速調整球型三通閥已達到預設之實驗流速。

(5)試體安裝：將研磨完成之試體置入水槽中，並將其固定於試體架上。



3.5.3 沖蝕試驗

沖蝕試驗進行分為試體沖刷及試體沖蝕面高程量測兩部分，於實驗進行間不斷重複。

(1)試驗面量測：將量測儀器安裝(圖 3—26)完後即可進行原始面之測量，讀數分為 X 軸、Y 軸與高程 Z，將固定點 A 設定為 $X=0$ 、 $Y=0$ 後優先讀取固定點 A、B、C 之值(圖 3—27)，再將試驗面分為 $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ 之網格分別讀取每點高程，量完後卸除量測儀器。設置固定點之目的在於控制每次拆裝量測儀器後，X 軸、Y 軸之初始點皆一致，並於量

測完後進行仿射轉換(affine transformation)，將多次量測之數據於同一平面比較。

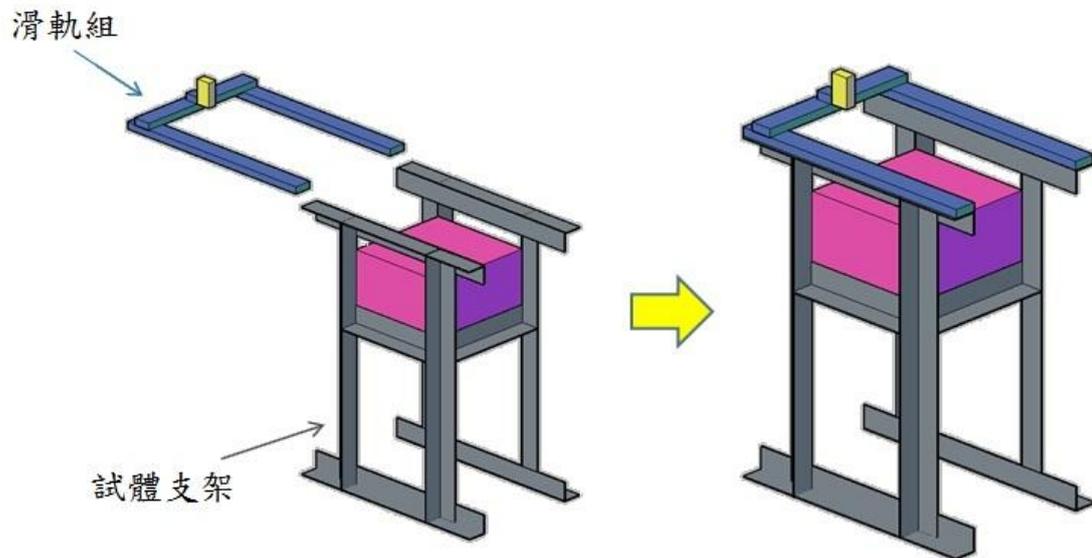


圖 3—26 量測儀器安裝示意圖

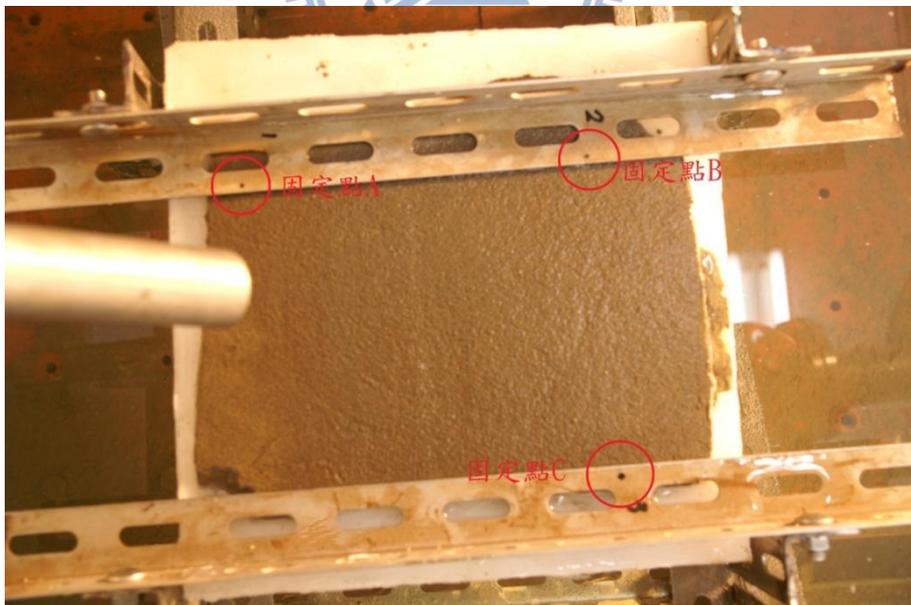


圖 3—27 固定點 A、B、C 之照片

(2) 試體拍攝：於試體上方架設單眼相機，拍照並記錄試體。(圖 3—28)



圖 3—28 試驗後停機紀錄照片

(3)試體沖刷：開啟泵浦進行沖刷，沖刷時間分別為 1、2、3、4、20、30、60、120、300、240、300、360 分鐘，於每段沖蝕結束時關閉泵浦進行步驟(1)、(2)量測每階段沖刷量。

3.5.4 試驗數據分析

本實驗使用 EXCEL 2007 進行實驗沖蝕量與沖蝕坑形狀之分析。

(1)將試驗數據輸入 EXCEL 2007 製成表格。

(2)利用仿射轉換(Affine Transformation)將每次拆裝量測儀器之誤差修正。其為空間數據座標變換的一種，主要可解決三維座標中兩個或以上不同系統之座標將其轉換成同一座標系。仿射轉換的過程中主要保持了原座標內線的平行性與點的共線性，轉換公式如下：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [F] \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

xyz=舊座標點

x'y'z'=新座標點

[F] = 3 × 3 矩陣，來源如下：

$$[F] = \begin{bmatrix} \overline{A} & \overline{B} & \overline{C} \\ |A| & |B| & |C| \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

\overline{ABC} =舊座標中三條共面線

求出轉換矩陣[F]後，即可將[F]⁻¹乘以舊座標得到新座標，公式如下：

$$[F]^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

舉例說明：

如圖 3-28 三固定點座標分別如下：

A(0,0,-78.618)

B(0,185,-78.479)

C(200,185,-79.871)

求其平面上三條共面線之向量：

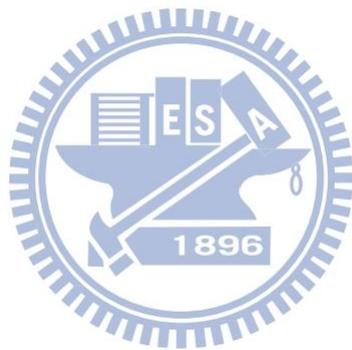
$$B - A = \overline{A}, \quad C - A = \overline{B}, \quad \overline{C} = \overline{A} \times \overline{B}, \quad \overline{D} = \overline{C} \times \overline{A}$$

可得到轉換矩陣[F]：

$$[F] = \left[\frac{\bar{D}}{|\bar{D}|}, \frac{\bar{A}}{|\bar{A}|}, \frac{\bar{C}}{|\bar{C}|} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.007 \\ 0 & 1 & 0.001 \\ 0.007 & -0.001 & 1 \end{bmatrix}$$

再用 $[F]^{-1}$ 乘以每個試體上量測到的點座標，即可得到修正後之新座標。

(3) 將轉換修正後之值與試驗初始值相減可得累積沖蝕量，除以試驗時間得沖蝕率 (mm/hr.)。



四、實驗成果與討論

本試驗將現地取得之岩塊密封保存後，於實驗室準備(修整、研磨)成實驗試體進行可變角度射流沖蝕試驗，並將試驗數據繪製沖蝕坑剖面圖、沖蝕坑立體圖，以探討射流角度對於岩塊沖蝕坑形狀、沖蝕率等影響。

4.1 試體來源

本試驗使用之岩塊來自雲林縣斗六鎮湖山水庫主壩區薄山脊之砂岩，現場經怪手開挖後挑選完整岩塊(圖 4—1)，將岩塊表面封蠟後置入木箱中，並將白蠟注入岩塊與木箱縫隙，約木箱 1/3 至 1/2 高度使岩塊固定(圖 4-2)，以保持岩塊新鮮度及降低運送擾動度(圖 4—3)，運送回交通大學土木結構大樓試驗室。



圖 4-1 (a)挑選過之岩塊 (b)取樣現場地質狀況

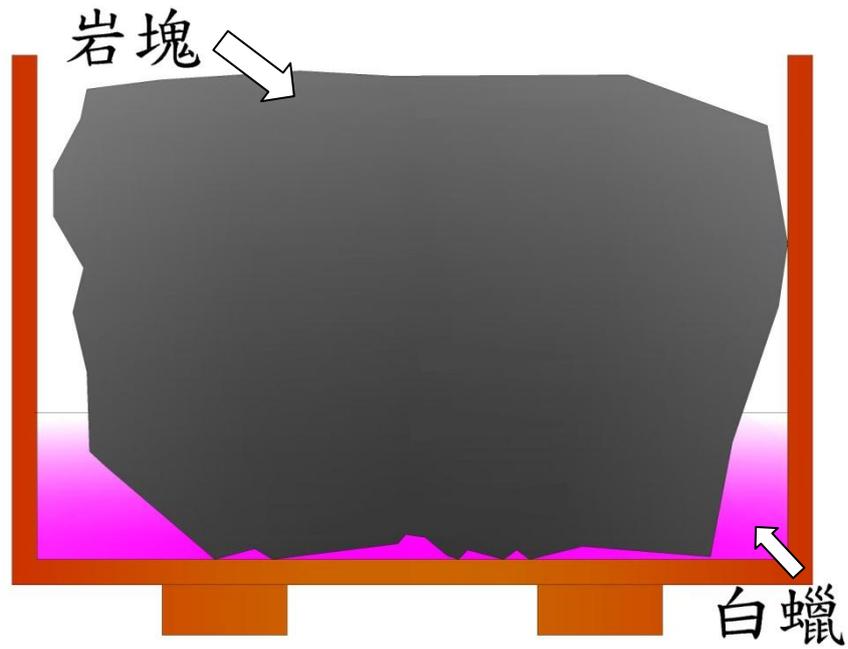


圖 4-2 岩塊裝箱示意圖



圖 4-3 (a)置入岩塊 (b)岩塊封蠟

(c)岩塊封蠟 (d)將岩塊裝箱密封

4.2 試體評估及試驗規劃

本研究使用湖山水庫軟弱砂岩塊進行流速為 10m/s 下三種不同射流角度沖蝕試驗，每種角度施做一組試驗，試驗時維持一定流速、射流距離及水注厚度如表 4-1。其中之跌水高=射流長×sin(射流角度)，射流角度為射流與水平面夾角。為確保試驗的進行，試體進行沖蝕試驗前需評估，其抗沖蝕能力如表 4-3。

表 4-1 試驗參數及試體基本性質

試體 編號	射流角 度(°)	流速 (m/s)	水注厚 (m)	射流 長(m)	跌水 高(m)	試體 性質	含水 量(%)	比重
A	30	10	0.0254	0.3	0.150	砂岩	3.0	2.66
B	50	10	0.0254	10.36	0.230	砂岩	2.2	2.67
C	70	10	0.0254	0.3	0.282	砂岩	1.8	2.67

4.2.1 試體抗沖蝕能力 K_h 值估算

抗沖蝕指數($K_h = M_s K_b K_d J_s$)為四項參數的乘積(Annandale, 1995)，試驗岩塊分別為試體 A、試體 B 與試體 C，進行 K_h 估算。

(1)材料強度參數(mass strength number, M_s)

使用史密特槌測試三岩塊可得各岩塊之 UCS(無圍壓縮強度)可得知皆小於 10MPa，故使用公式(4-1)，可得表 4-2，其中使用史密特槌時應注意避開試驗面，避免試驗面有龜裂或弱化現象。

$$M_s = C_r \times 0.78 \times UCS^{1.05} \quad (4-1)$$

表 4-2 材料強度參數(M_s)計算

試體	UCS(MPa)	C_r	M_s
A	3.5	0.726	2.11
B	3.5	0.726	2.11
C	3.0	0.726	1.79

(2) 顆粒或塊體尺寸參數(K_b)

K_b 由鑽探取得之岩心岩石品質指標(RQD)與節理組數參數 J_n 來定義，當沒有鑽孔取樣時，RQD 值可以用經驗公式推得，觀察三岩塊表面無明顯節理，視為為完整岩塊，故 K_b 皆為 100。

(3) 弱面抗剪強度參數(K_d)

K_d 值由岩體的節理面粗糙參數(joint roughness number, J_r)與節理改變參數(joint alteration number, J_a)來定義， J_r 為不連續面分離的兩個面間之粗糙度，受到不連續面的形狀影響， J_a 則與不連續面的空隙內填充材料有關：

$$K_d = \frac{J_r}{J_a} \quad (4-2)$$

無節理之完整岩塊應有最高 K_d 參數，即有較佳之抗沖蝕能力，觀察本試驗試體無明顯節理面，於理想狀況下視為完整岩塊，故選用附表 1-3、1-4 中 J_r 最大值 4.0 與 J_a 最小值 0.75，可用式(4-2)得到 K_d 皆為 5.3。

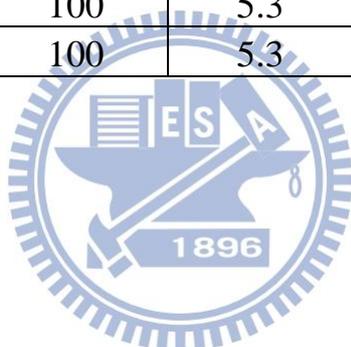
(4)地盤構造條件參數(J_s)

相對地盤構造參數 J_s 的影響因素包括：水流流向與岩床層面傾向、傾角的相對關係、以及岩塊形狀，三試體皆無明顯節理層面，故查表後 J_s 皆為 1.14。

綜合上列參數可得三岩體之抗沖蝕能力 K_h 如下表 4-3：

表 4-3 試體抗沖蝕指數

試體	M_s	K_b	K_d	J_s	K_h (kW/m^2)	$K_h^{0.75}$ (kW/m^2)
A	2.11	100	5.3	1.14	1275	213
B	2.11	100	5.3	1.14	1275	213
C	1.79	100	5.3	1.14	1082	189



4.2.2 試驗流功計算(SP)

本試驗之流功計算可分為射流中心流功與擴散後流功，而擴散後流功會隨著與中心線越遠而衰退越快，其計算如下。

(a)射流中心線流功

$$P_{jet} = (C_p + C_p') \frac{\gamma_w Q H}{A} \quad (4-3)$$

P_{jet} = 射流中心單位面積流功

γ_w = 水單位重

Q = 總流量

H = 射流初速等位水頭高+跌水高度

A = 初始射流水注厚

C_p = 平均動態壓力係數

C_p' = 波動動態壓力係數



三組試驗水流單位重皆為 9.81kgf/m^3 、單寬流量為 $0.25 \text{m}^2/\text{s}$ ，流速 10m/s 等同於 5.09m 之水頭高，初始射流水注厚為 0.254m ， C_p 查表 2-1 為 0.69 、 C_p' 經式(2-4)計算為 0.01 ，其流功計算與 K_h 值比較如下表 4-4：

表 4-4 直接沖刷試驗流功計算與各試體 K_h 值比較表

試體	角度 (°)	H (m)	單位面 積流功 (kW/m ²)	$K_h^{0.75}$ (kW/m ²)
A	30	5.09+0.150	444	213
B	50	5.09+0.230	451	213
C	70	5.09+0.282	455	189

依 Annandale(2006)建議將流功與 $K_h^{0.75}$ 相比，流功皆大於 $K_h^{0.75}$ ，可初步判斷湖山水庫之砂岩可於本試驗中產生沖蝕。

(b)射流擴散流功

射流擴散後之流功可參考 Beltaos(1976)，在不同射流角度下所產生之射流擴散衰減皆不同，可透過建議公式(4-4)計算射流中心點上下游每點距離之流功，其中 η 為 X_1 (射流中心距)與 b 之比值， b 為射流角度參數，可用圖 4-4 查詢而得，每個 ϕ (角度)皆有相對應之 b/L (射流長度)值， ϕ 與 L 皆為已知。



$$\frac{P_w}{P_{jet}} = e^{-0.693\eta^2} \quad (4-4)$$

P_w =擴散後之流功

$\eta=X_1$ (與射流中心點距)/ b (射流角度參數，需圖 4-4)

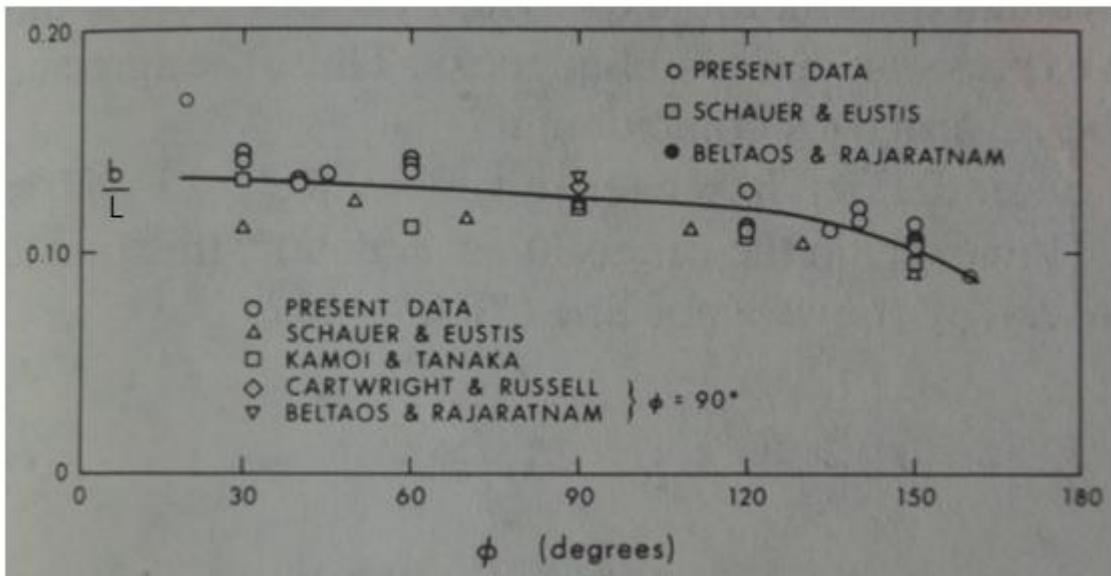


圖 4-4 b/L -角度關係圖(改自 Beltaos,1976)

計算結果如表 4-5，距離 0 為射流中心點，負值為上游側，正值為下游側，圖 4-5 可發現上游側流功衰退程度皆大於下游側，且角度越小差距越明顯。

表 4-5 沖蝕坑每段距離流功

與中心點距(m)	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
30°(kW/m ²)	65	130	222	326	411	444	425	373	300	221	150
50°(kW/m ²)	99	170	261	354	424	451	429	370	289	205	132
70°(kW/m ²)	109	182	272	362	430	455	432	368	281	194	120

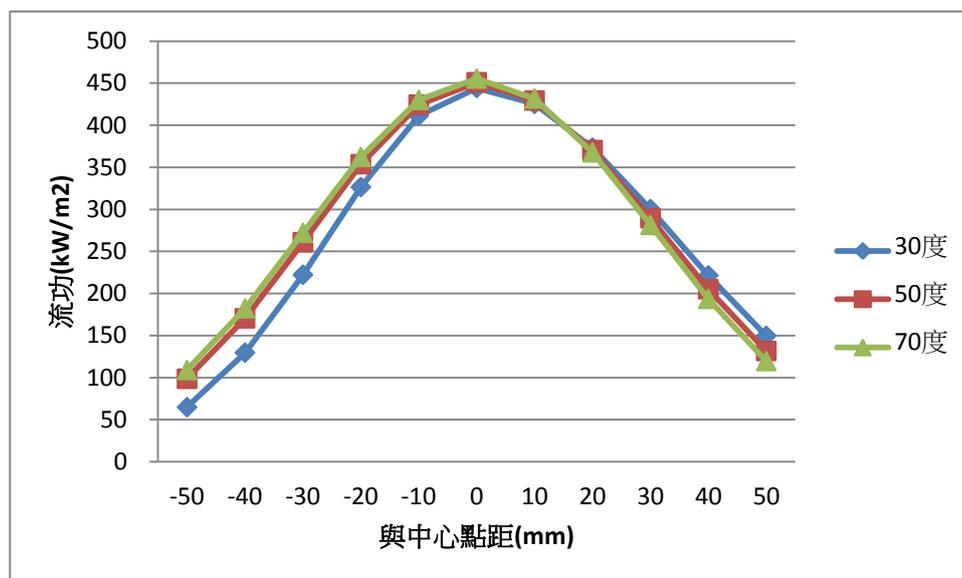


圖 4-5 與射流中心點距-流功圖

4.3 可變角度直接沖刷試驗結果

本研究依射流角度不同進行為三組沖刷試驗，然因落距皆過短，重力對水流垂直向流速的影響有限，故將流線長及流速固定，使三組試驗水流衝擊至試體時有較接近的射流破裂長度。每組沖蝕時間皆為 24 小時，除於試驗前進行試體表面高程量測與拍照，並於 0.167、0.5、1、2、5、9、13、18、24 小時停機，進行類似量測與拍照，以分析沖蝕坑的形成與變化。另外，並於試驗前及 0.0167、0.5、1、24 小時各取部分試體表面邊緣約 3 至 6 克之試體塊做含水量試驗(表 4-6 至 4-8)，觀察其含水量於試驗開始後皆維持在 15% 至 30%，故各試體於試驗進行間含水量條件可視為一致。本研究利用雷射位移計量測試體表面的高程變化，但為與現有沖蝕坑相關研究比較，各階段的變化僅就沖蝕坑中央之剖面圖加以詳細說明。

表 4-6 射流角度 30°試驗中各時段試體表面含水量表

取樣時間 (hr)	器皿重 (g)	烘乾前岩樣+器皿 重(g)	烘乾後岩樣+器皿 重(g)	含水量 (%)
0	77.5	83.1	82.9	3.57
0.0167	81.9	85.2	84.4	23.44
0.5	83.7	89.1	87.5	30
1	82.1	85.4	84.7	21
24	77.5	81.6	80.8	20.11

表 4-7 射流角度 50°試驗中各時段試體表面含水量表

取樣時間 (hr)	器皿重 (g)	烘乾前岩樣+器皿 重(g)	烘乾後岩樣+器皿 重(g)	含水量 (%)
0	77.5	81.1	81.0	2.78
0.0167	82.0	86.5	85.9	14.32
0.5	83.7	88.0	87.0	22.82
1	82.1	85.7	85.0	20.18
24	77.5	83.6	82.4	19.95

表 4-8 射流角度 70°試驗中各時段試體表面含水量表

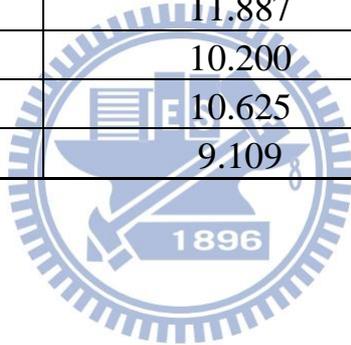
取樣時間 (hr)	器皿重 (g)	烘乾前岩樣+器皿 重(g)	烘乾後岩樣+器皿 重(g)	含水量 (%)
0	77.5	83.0	82.9	1.8
0.0167	82.0	86.9	85.9	20.11
0.5	83.7	88.8	87.7	20.71
1	82.1	86.5	85.5	22.65
24	77.5	83.4	82.1	22.37

4.3.1 射流角度 30°

試驗前含水量初始值 3.0%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 20%~30%(表 4-6)，沖蝕 3 分鐘後試體表面顆粒開始脫落，觀察表面可發現比未試驗前粗糙許多，30 分鐘後可觀察到明顯沖蝕坑形成(圖 4—6)，沖蝕坑最深深度 6.7mm，18 至 24 小時深度增加極小(0.091mm)，最大沖蝕坑深度可能已達成(圖 4—7)，圖 4-8 展示出試驗進行 24 小時後沖蝕坑表面相當平滑，可能為沖蝕坑內受水流剪力磨蝕範圍較平均，圖 4—9 可看出沖蝕坑順坡(水注上游側)坡角為 9°，沖蝕坑逆坡(水注下游側)坡角約 30°，射流水柱厚經式(2-2)計算擴散接觸至試體增加至 87mm，沖蝕坑長度量測得 118mm，水注厚及沖蝕坑範圍皆為三次實驗中最大者，表 4-9 為試驗數據，累計沖蝕量與沖蝕坑極深點皆隨時間增加而增多，平均沖蝕率則隨時間慢慢遞減，其中沖蝕量計算是利用沖蝕坑剖面圖相減而得，故單位為平方公厘。

表 4-9 射流角度 30°沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 (mm ²)	累計平均沖蝕率 (mm ² /hr)	沖蝕坑極深點 (mm)
0.0167	15.434	926.077	-0.426
0.05	15.464	309.292	-0.407
0.1	16.299	162.996	-0.498
0.167	19.734	118.407	-0.802
0.5	29.869	59.738	-0.921
1	39.524	39.524	-1.091
2	51.778	25.889	-2.068
4	74.858	18.714	-3.098
9	106.98	11.887	-4.321
13	132.611	10.200	-5.153
18	191.250	10.625	-6.610
24	218.639	9.109	-6.701



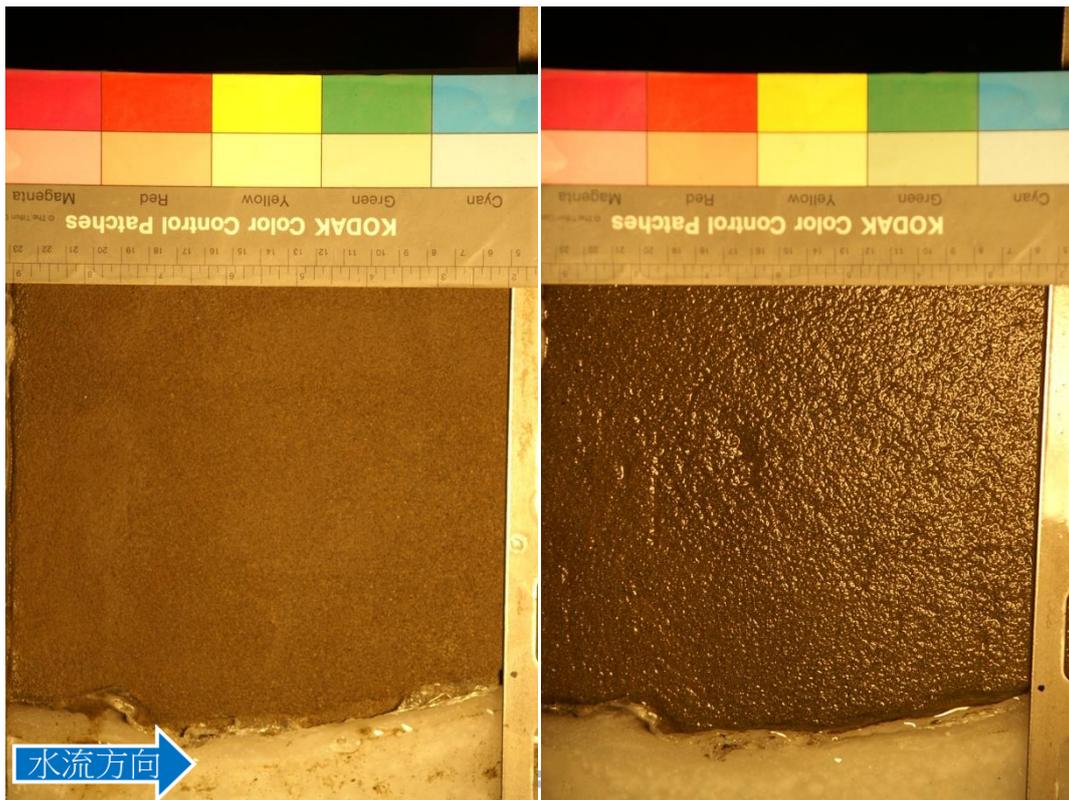


圖 4-6 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 30 分鐘後試體照片

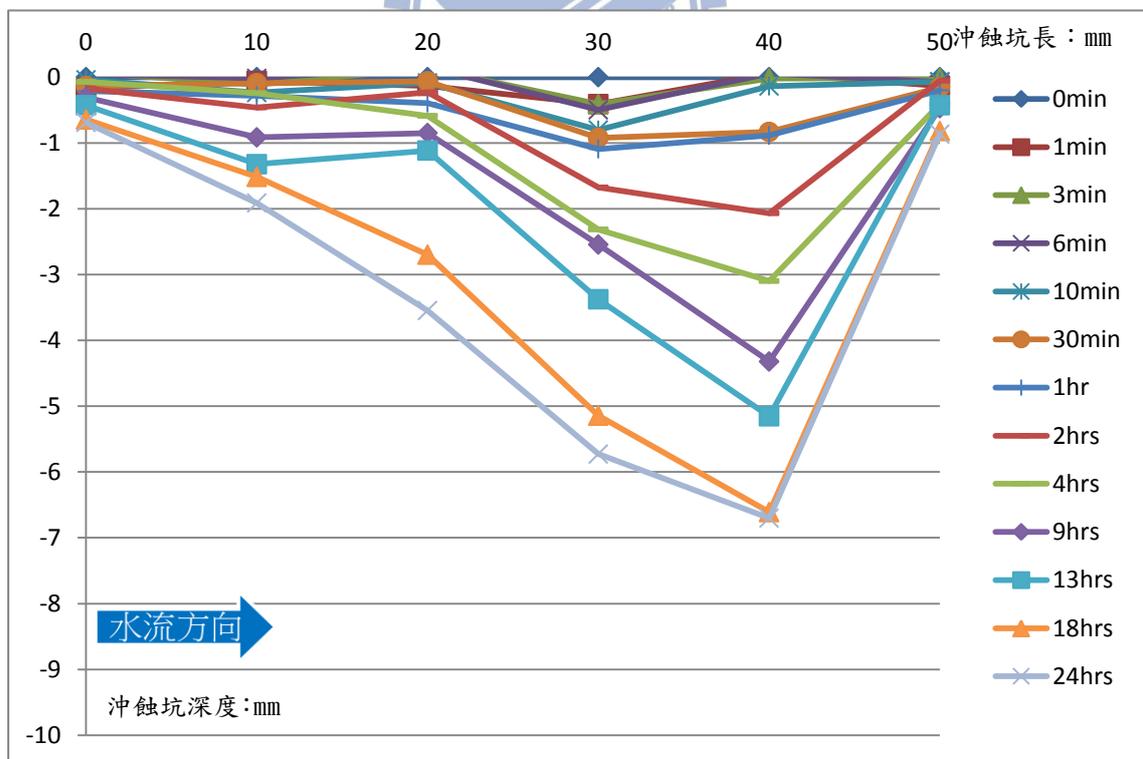


圖 4-7 射流角度 30°沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

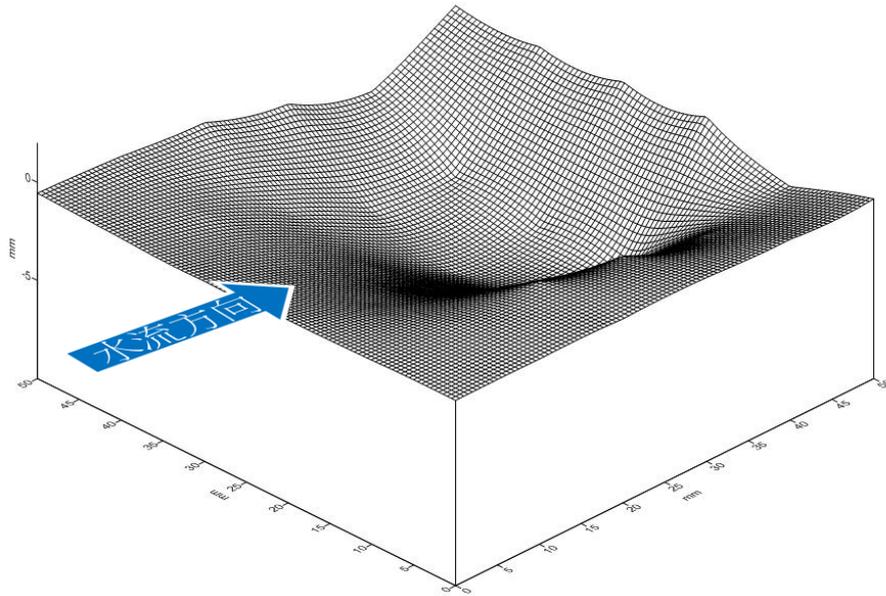


圖 4-8 射流角度 30°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖

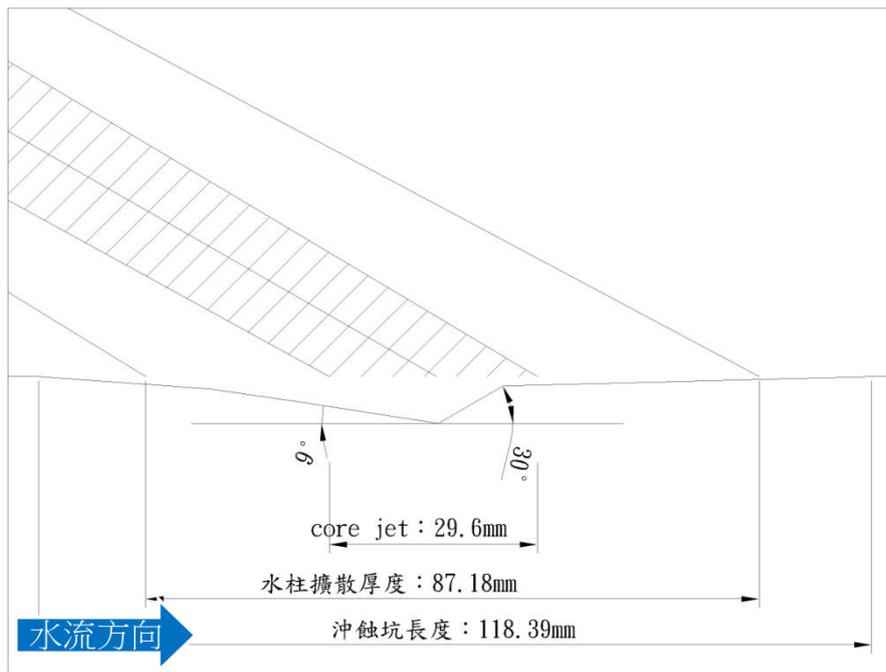


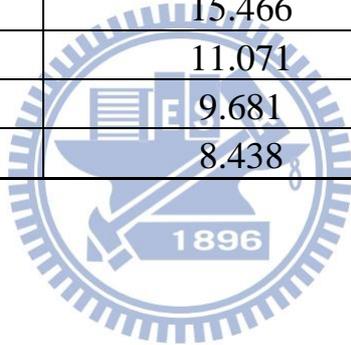
圖 4-9 射流角度 30°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖

4.3.2 射流角度 50°

試驗前含水量初始值 2.2%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 14%~22%(表 4—7)，沖蝕 30 分鐘後可觀察出沖蝕坑(圖 4—10)，表 4—10 中累計沖蝕量與沖蝕坑極深點皆隨時間增加，平均沖蝕量則隨時間減少，試驗 24 小時結束後沖蝕坑及最大深度可能未達到平衡，還有持續增加的狀況，圖 4—11 可看出 18 至 24 小時沖蝕坑底部仍不斷擴大且加深，沖蝕坑表面高低起伏較多(圖 4—12)，可能為試體遭受射流衝擊後岩體不規則碎裂，由圖 4—10 顯示射流水注經擴散後經式(2-2)計算接觸試體表面範圍為 57mm，沖蝕坑長度量測得 75mm，沖蝕坑順坡坡角為 19°，逆坡由 2°與 19°組成，對照圖 4—13，2°之坡角為橫軸 20mm 至 30mm 段，可能為每次停機量測，再次啟動時瞬間高速的水流造成噴嘴處有些微晃動，使得射流中心點在量測前後無法坐落於同一點，故沖蝕坑底部較為寬廣。

表 4-10 射流角度 50°沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 (mm ²)	累計平均沖蝕率 (mm ² /hr)	沖蝕坑極深點 (mm)
0.0167	9.708	582.480	-0.087
0.05	17.144	342.887	-0.088
0.1	22.717	227.177	-0.133
0.167	28.919	173.515	-0.337
0.5	32.101	64.203	-1.009
1	32.508	32.508	-1.170
2	70.604	23.535	-3.287
4	77.459	19.364	-3.774
9	139.202	15.466	-5.949
13	143.930	11.071	-6.097
18	174.266	9.681	-6.879
24	202.512	8.438	-7.459



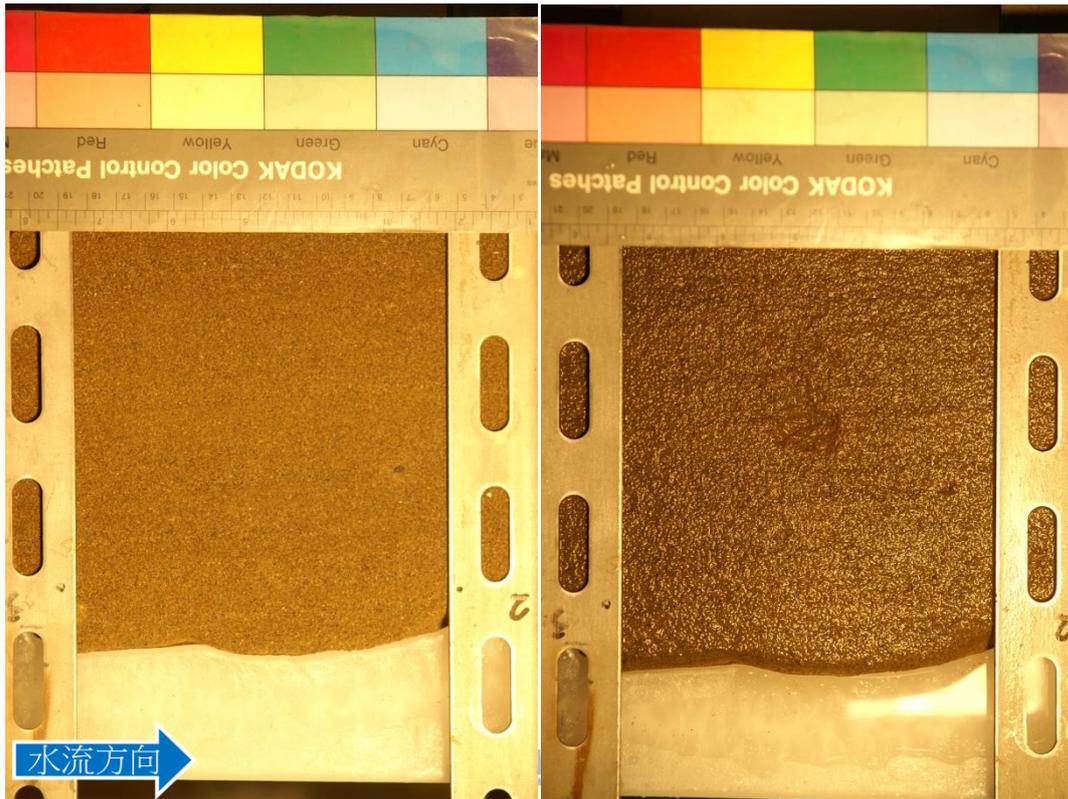


圖 4-10 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 30 分鐘後試體照片

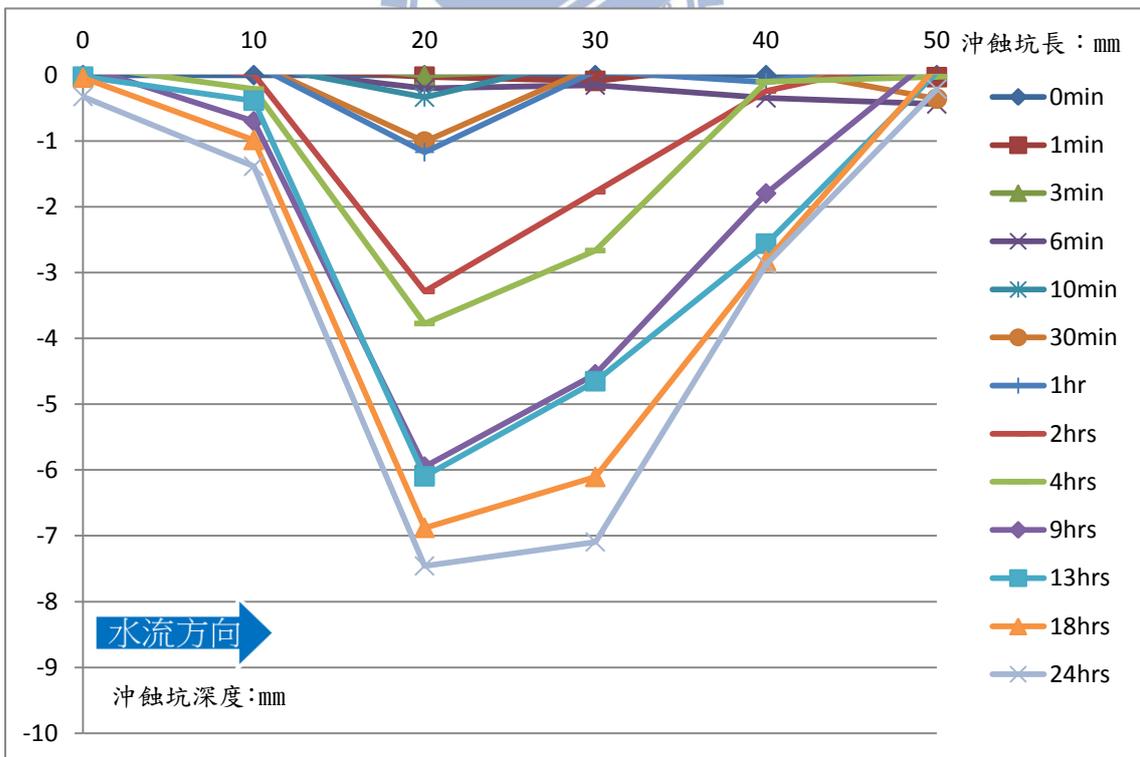


圖 4-11 射流角度 50°沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

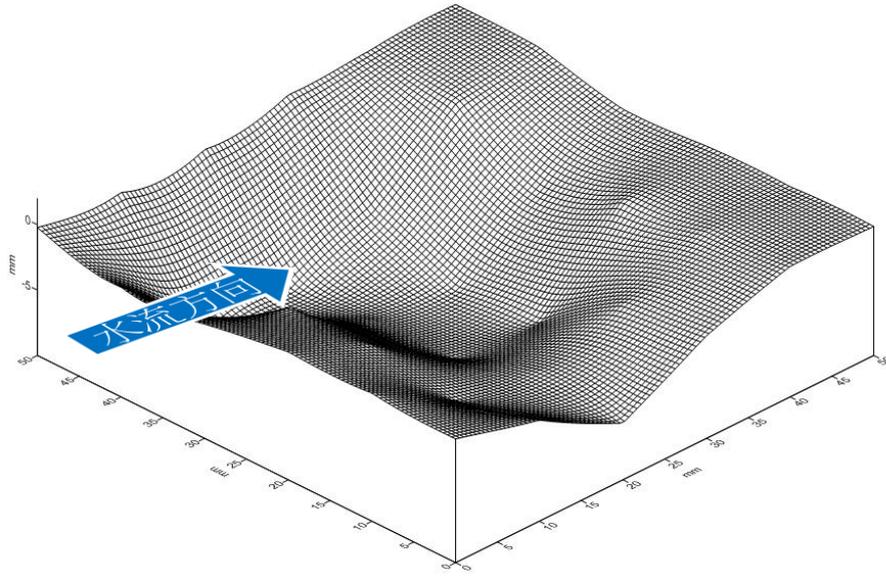


圖 4-12 射流角度 50°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖

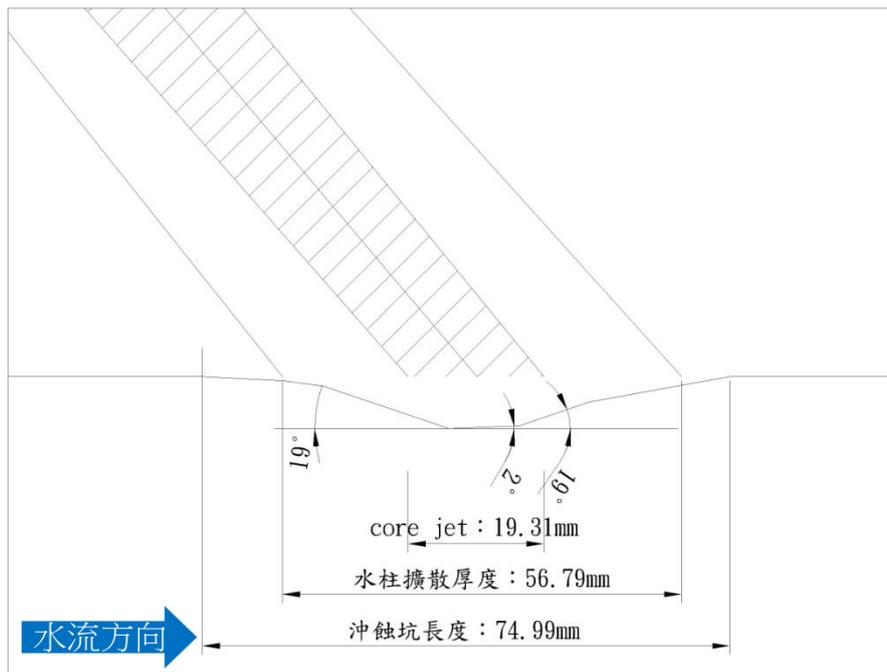


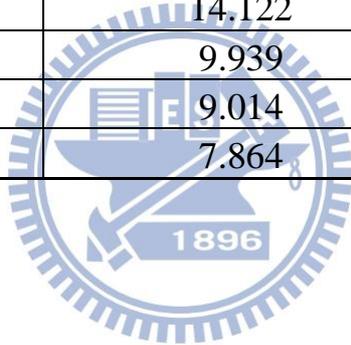
圖 4-13 射流角度 50°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖

4.3.3 射流角度 70°

試驗前含水量初始值 1.8%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 20%~23%(表 4—8)，沖蝕 10 分鐘後可觀察得沖蝕坑已形成(圖 4—14)，4 小時之前沖蝕量明顯比 30°與 50°多(表 4—11)，最大沖蝕坑深度於 18 至 24 小時仍增加 0.78mm，顯示沖蝕坑可能未到達平衡，由圖 4—16 沖蝕坑表面情形與射流角度 50°雷同，不規則起伏較多，可能亦為試體不規則的碎裂所留下之痕跡，射流水注厚接觸至試體為 46mm，沖蝕坑長度 55mm 皆為三次試驗中最小者，可大致看出沖蝕坑之長度與射流水注厚度成正比，故可初步判斷影響沖蝕坑長度最大因素可能為射流接觸至試體時的水注厚，但也因為本試驗於停機、開機時射流中心點有偏移之情形，角度對於沖蝕坑長度的影響本試驗無法討論，相關實驗誤差將於 4.5 節說明。

表 4—11 射流角度 70°沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 (mm ²)	累計平均沖蝕率 (mm ² /hr)	沖蝕坑極深點 (mm)
0.0167	12.309	738.570	-0.204
0.05	16.078	321.578	-0.209
0.1	12.045	120.453	-0.551
0.167	24.910	149.463	-1.050
0.5	55.551	111.102	-3.166
1	63.484	63.484	-3.195
2	82.643	41.321	-3.568
4	117.732	29.433	-3.633
9	127.103	14.122	-3.994
13	129.210	9.939	-4.067
18	162.262	9.014	-4.192
24	188.750	7.864	-4.974



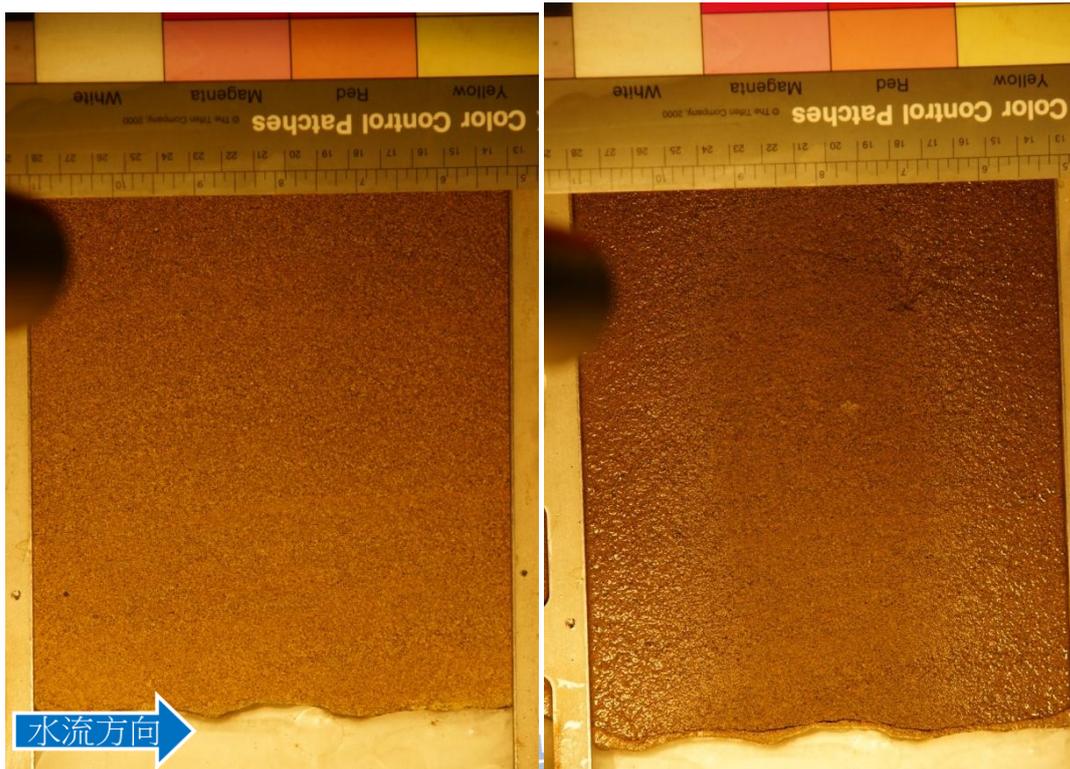


圖 4—14 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 10 分鐘後試體照片

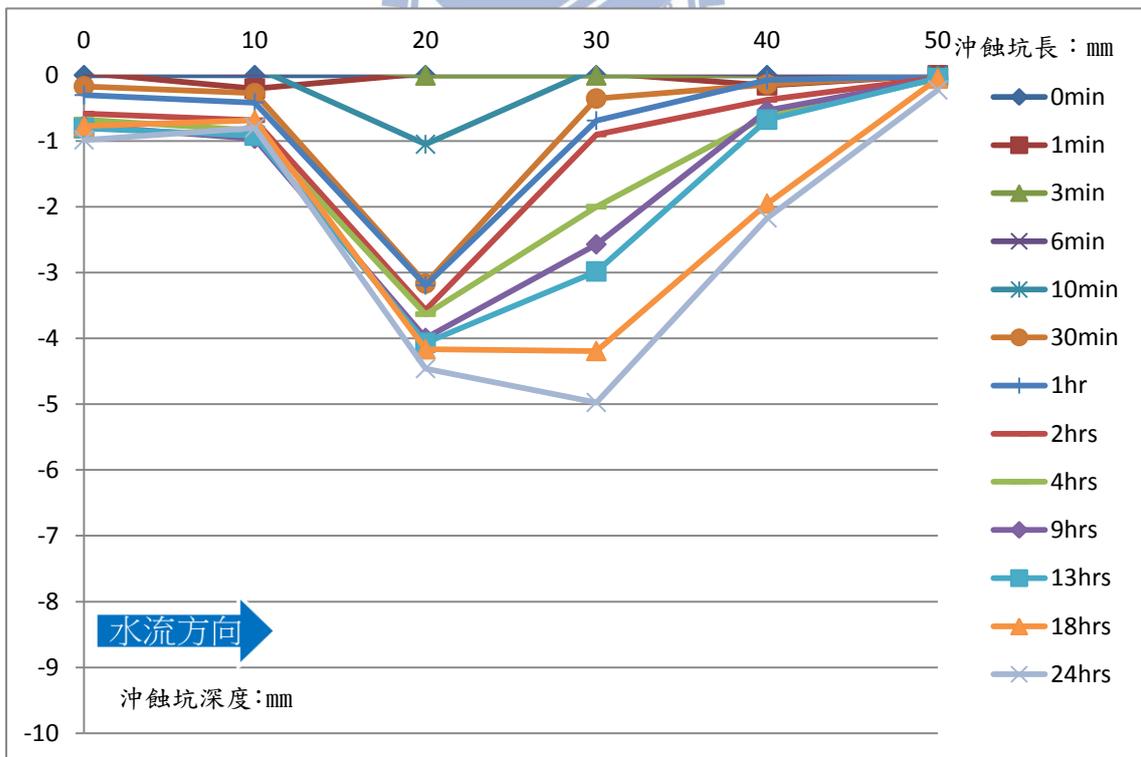


圖 4—15 射流角度 70°沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

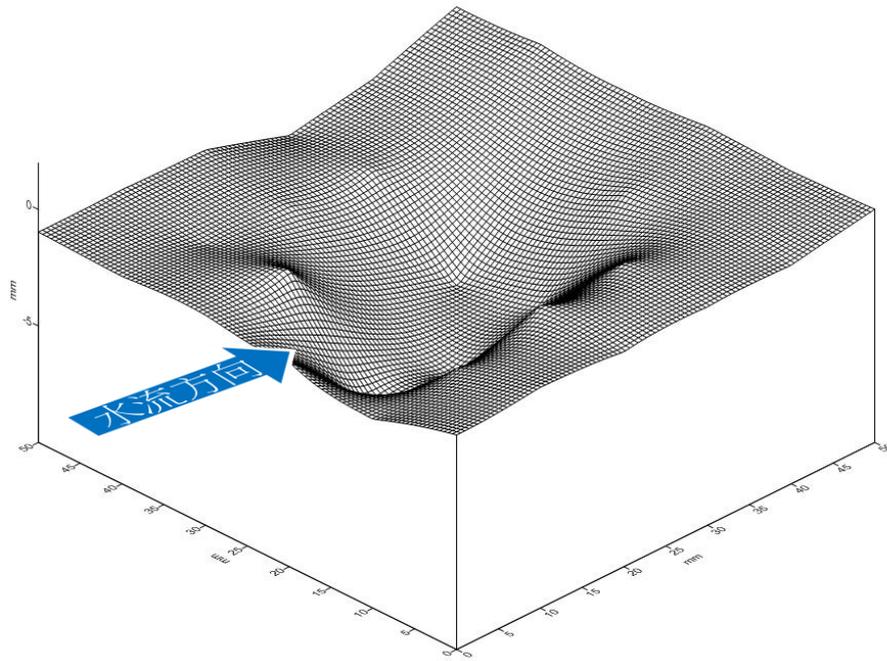


圖 4—16 射流角度 70°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑立體圖

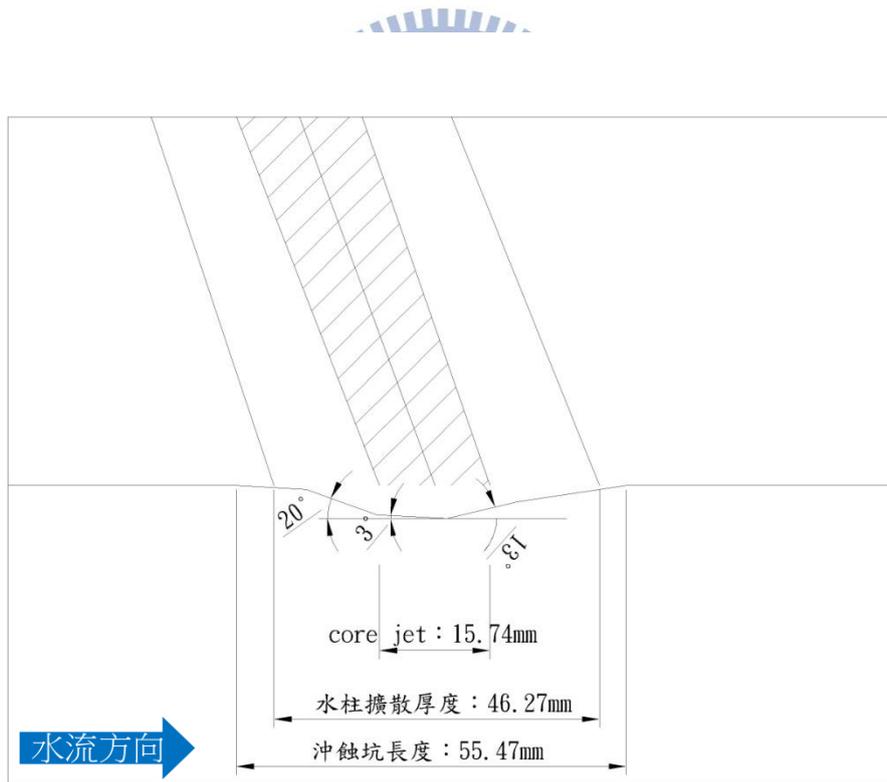


圖 4—17 射流角度 70°沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖

4.4 射流沖刷試驗成果重複性討論

為檢討本試驗之重複性，本研究另外進行一組射流角度 50° 之沖刷試驗施作重複性測試，目的為檢討本試驗成果之重複性，相關試驗參數皆與 4.3.2 之射流角度 50° 試驗相同，且使用相同來源之試體再次施作試驗。以下針對兩次試驗成果，探討試驗的重複性。

4.4.1 射流角度 50° (第二次試驗)

試驗前含水量初始值 2%，經沖蝕 1 分鐘至實驗結束含水量皆保持在 15%~25%，沖蝕 30 分鐘後可觀察出沖蝕坑(圖 4-18)，試驗 24 小時結束後沖蝕坑及最大深度可能已達到平衡(表 4-12)，圖 4-19 可看出 18 至 24 小時沖蝕坑底部已漸漸趨於穩定，由圖 4-20 顯示沖蝕坑順坡坡角為 22° ，逆坡則為 16° 。



表 4-12 射流角度 50°(第二次試驗)沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 (mm ²)	累計平均沖蝕率 (mm ² /hr)	沖蝕坑極深點 (mm)
0.1	13.883	138.835	-0.276
0.5	21.029	42.057	-0.603
1	18.319	18.319	-0.603
2	58.174	29.087	-2.685
4	76.078	15.216	-4.219
9	98.008	10.89	-4.621
13	134.973	10.383	-5.591
18	180.028	10.002	-7.06
24	213.17	8.882	-7.444

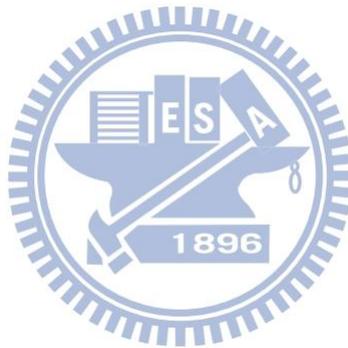




圖 4-18 (a)試驗前試體照片 (b)試驗 30 分鐘後試體照片

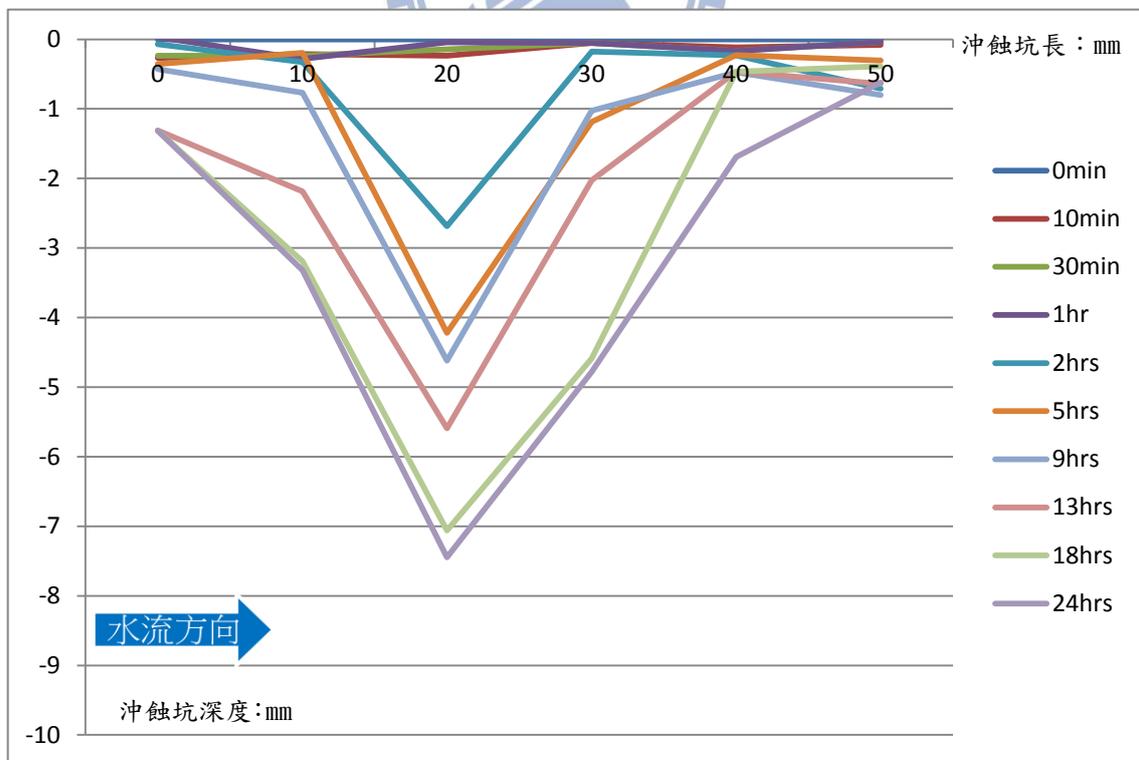


圖 4-19 射流角度 50° 沖蝕坑剖面圖(縱橫比為 1 : 3)

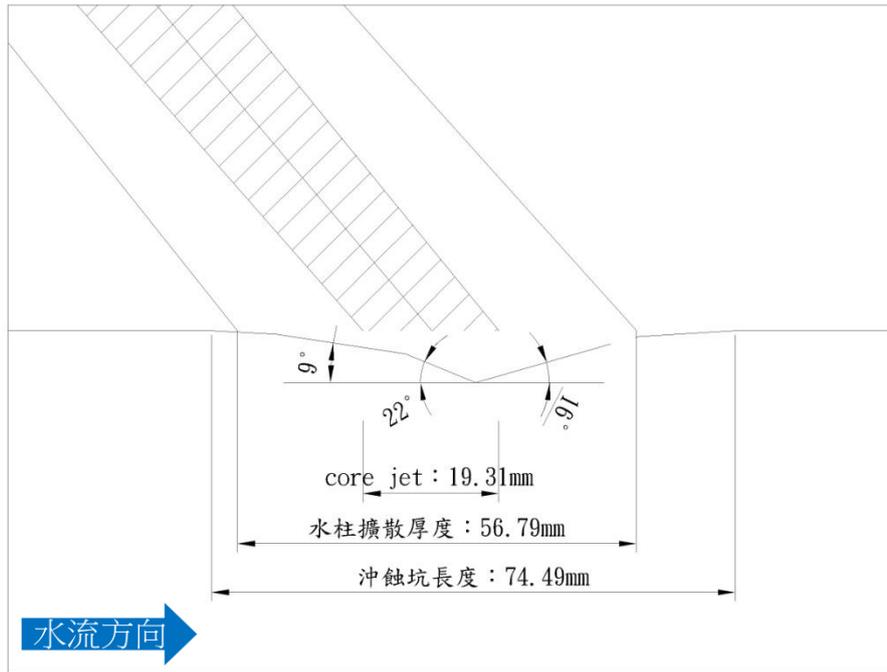


圖 4-20 射流角度 50° 沖刷時間 24 小時之沖蝕坑剖面圖



4.4.2 重複性測試結果討論

兩次射流角度 50° 之試驗，各項試驗參數(射流角度、跌水高、衝擊面積、流功)皆一致，如表 4-4，試體亦使用相同研究區之砂岩，經史密特槌測試單壓強度均為 3.5MPa，進行 24 小時之沖刷試驗，故可討論本試驗之重複性。

在兩次射流角度 50° 試驗中，累計沖蝕量相差 10.658mm(圖 4-21)，最終沖蝕坑極深點也僅相差極小的 0.015mm，可證明在同射流角度下，使用同樣的流功所造成試體沖蝕量幾乎相當，且水流能造成沖蝕坑之極深點也近乎一致，但在沖蝕坑之形狀則有明顯差異，圖 4-22 可觀察出第一次試驗沖蝕坑底部較第二次試驗寬廣。在詳細觀察本試驗進行的過程中，發現每次量測時馬達停止與初轉動之過程，易造成噴嘴處垂直方向稍微的搖晃，這可能使每次量測後射流中心無法與量測前相同，進而造成兩次試驗參數相同的試驗沖蝕坑形狀與順逆坡角有明顯的不同，未來應於噴嘴處架設至少兩個方向之固定裝置，有穩定的射流點才能沖刷出穩定的沖蝕坑。

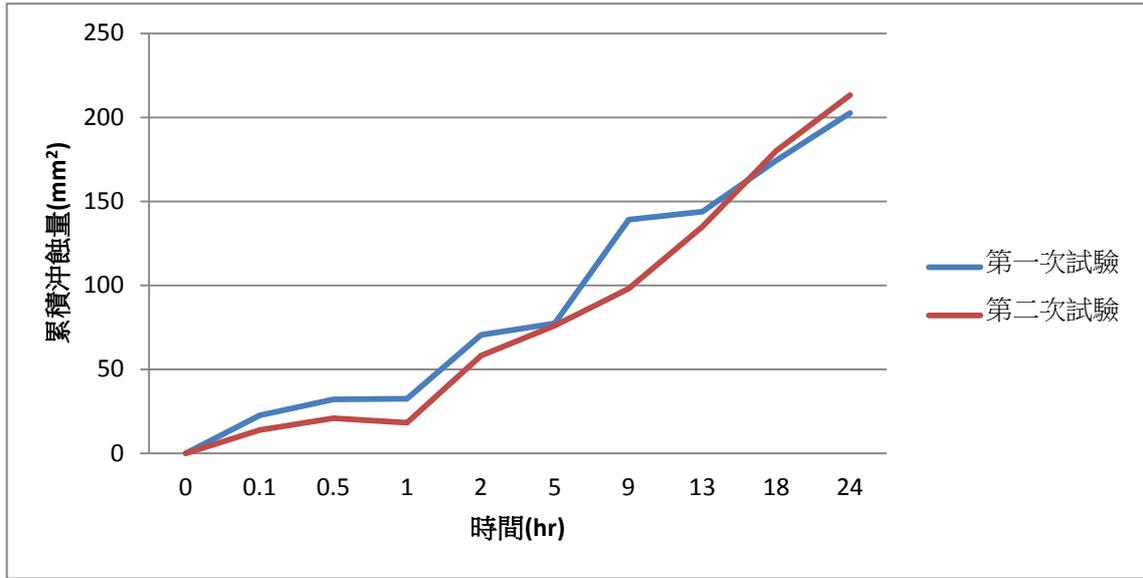


圖 4-21 射流角度 50°重複性測試累計沖蝕量

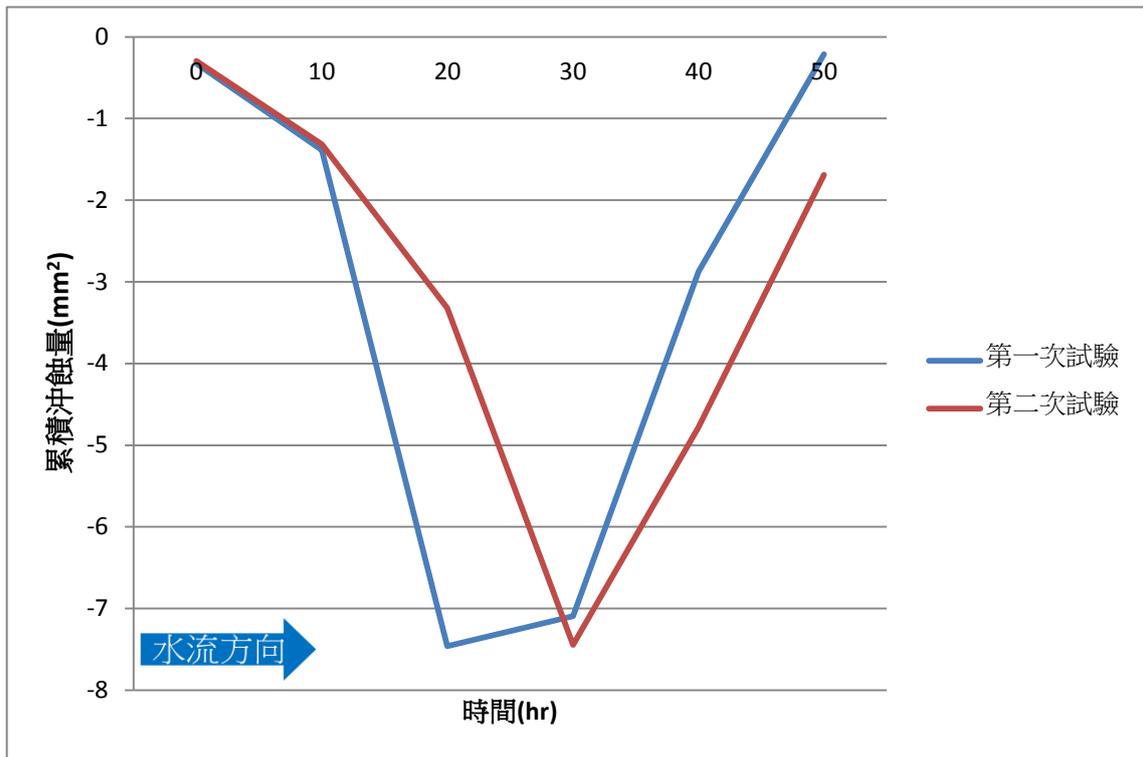


圖 4-22 射流角度 50°重複性測試沖蝕坑剖面圖

4.5 實驗誤差

本試驗仍有許多實驗誤差未改善，直接影響了實驗成果，其誤差歸納如下：

- (a) 量測前試體表面清理：本試驗之試體顆粒介於 0.15mm 至 0.425mm 間，量測前若未確實將表面殘留顆粒清除，可能造成量測的誤差，如射流角度 30° ，第 0.05hr 之沖蝕坑極深點高程較前一次高，即為表面未清除完全而造成。
- (b) 射流中心點偏移：每次停機量測後再開機，強勁的水流衝擊力造成噴嘴晃動而改變射流中心點位置，表 4-13 至 4-15 與圖 4-23 至 4-25 分別為三次實驗中，每個時段量測到的沖蝕量集中點，可判斷每次沖擊點皆有些許偏移，每個時段流功也無法全部累積於同一點，圖 4-26 至 4-28 為噴嘴晃動後射流擴散圖示意圖，圖中之射流水注厚度因噴嘴晃動而更寬，沖刷坑受水柱影響面積也更大，其中 50° 與 70° 可明顯觀察出沖蝕坑因射流點的晃動而造成沖蝕坑最深點位置的變化，也因此無法找出每段沖刷時間與沖蝕量的相關性(圖 4-29)，更對於沖蝕坑之形狀、沖蝕量及沖蝕坑極深點無法有更細膩的比較。

表 4-13 射流角度 30°沖刷時段成果表

編號	時段(hr)	沖蝕時間(hr)	沖蝕量(mm ²)	平均沖蝕率(mm ² /hr)
1	0~0.167	0.167	3.43	51.52
2	0.167~0.5	0.333	10.13	30.40
3	0.5~1	0.5	9.65	19.31
4	1~2	1	12.25	12.25
5	2~4	2	23.08	11.54
6	4~9	5	32.13	6.43
7	9~13	4	25.62	6.41
8	13~18	5	58.64	11.73
9	18~24	6	27.39	4.56

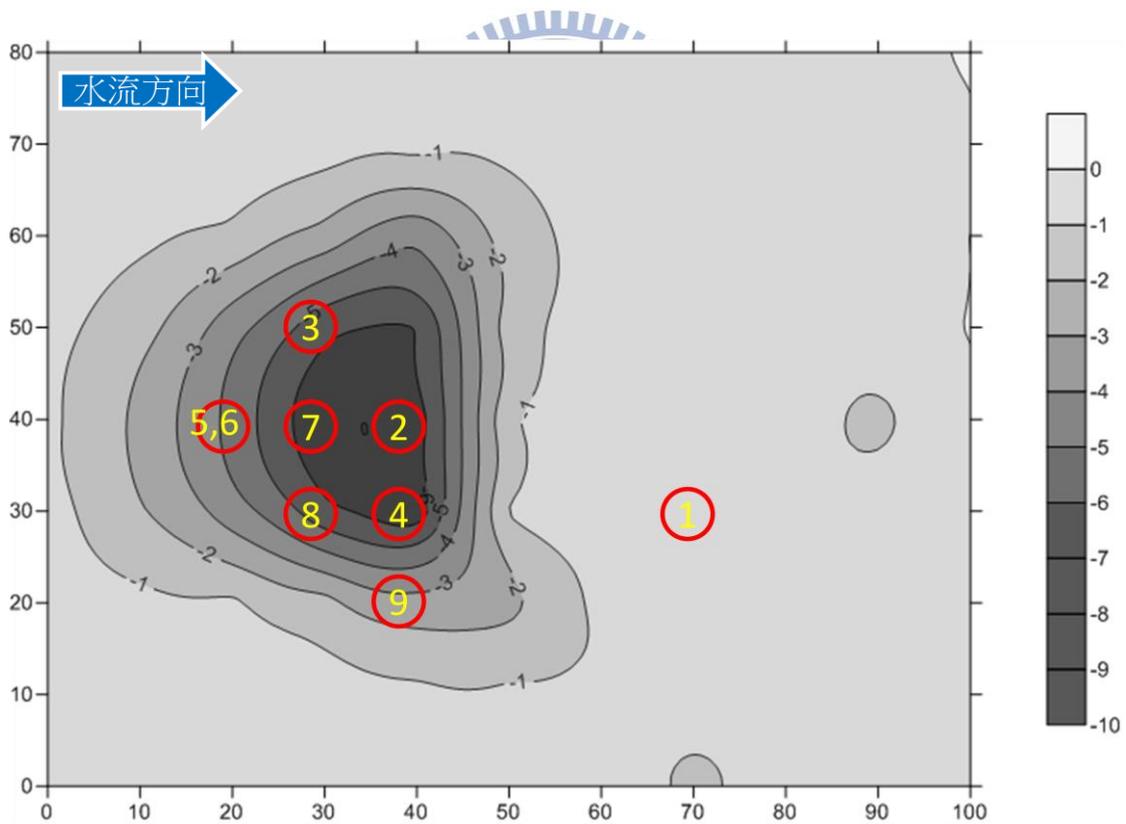


圖 4-23 射流角度 30°每段試驗沖刷區圖

表 4-14 射流角度 50°沖刷時段成果表

編號	時段(hr)	沖蝕時間(hr)	沖蝕量(mm ²)	平均沖蝕率(mm ² /hr)
1	0~0.167	0.167	4.04	24.21
2	0.167~0.5	0.333	5.74	17.23
3	0.5~1	0.5	7.84	15.68
4	1~2	1	31.47	31.47
5	2~4	2	20.22	10.11
6	4~9	5	33.80	6.76
7	9~13	4	32.74	8.18
8	13~18	5	27.86	5.57
9	18~24	6	5.09	0.85

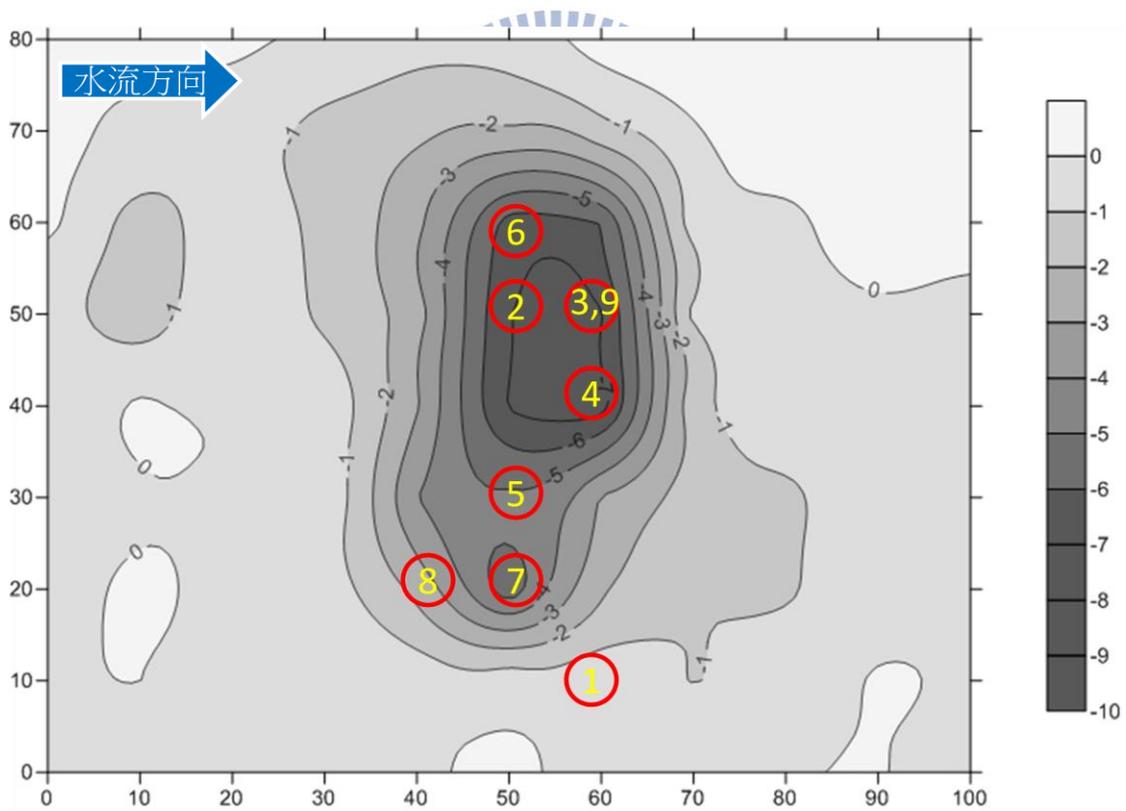


圖 4-24 射流角度 50°每段試驗沖刷區圖

表 4-15 射流角度 70°沖刷時段成果表

編號	時段(hr)	沖蝕時間(hr)	沖蝕量(mm ²)	平均沖蝕率(mm ² /hr)
1	0~0.167	0.167	21.29	127.48
2	0.167~0.5	0.333	61.56	184.85
3	0.5~1	0.5	33.16	66.31
4	1~2	1	22.65	22.65
5	2~4	2	37.48	18.74
6	4~9	5	15.10	3.02
7	9~13	4	11.35	2.84
8	13~18	5	56.44	11.29
9	18~24	6	20.96	3.49

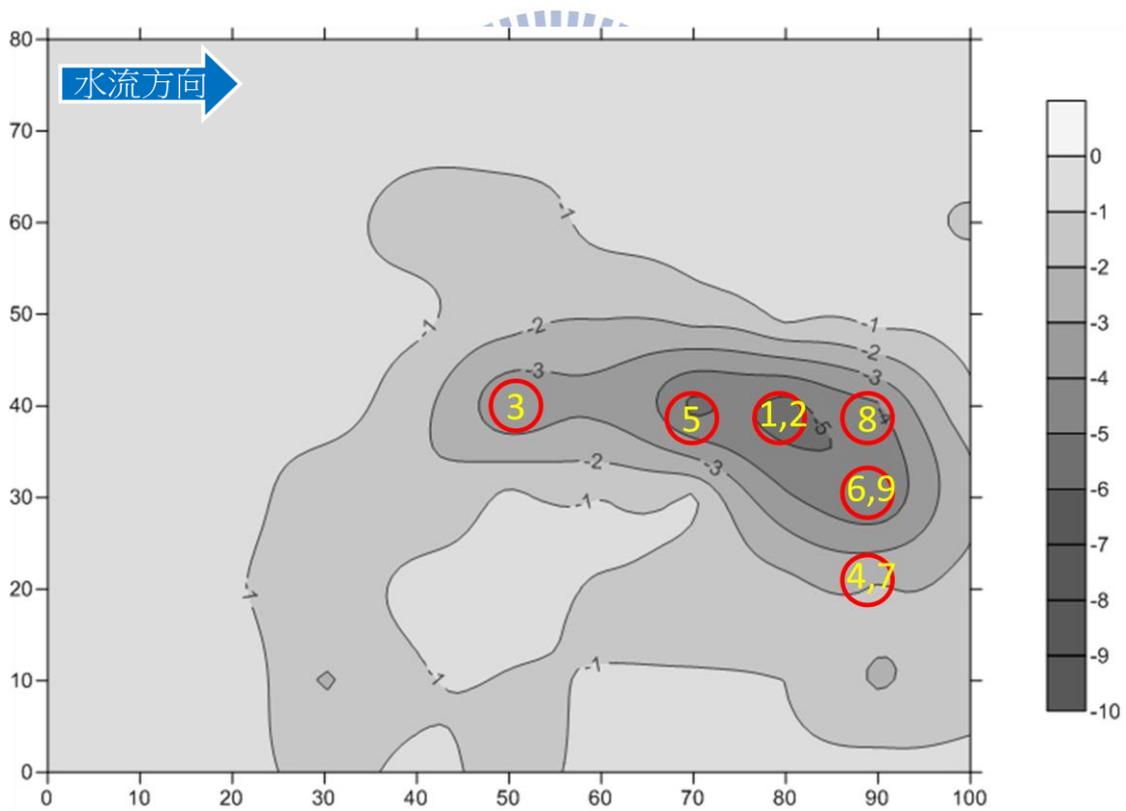


圖 4-25 射流角度 70°每段試驗沖刷區圖

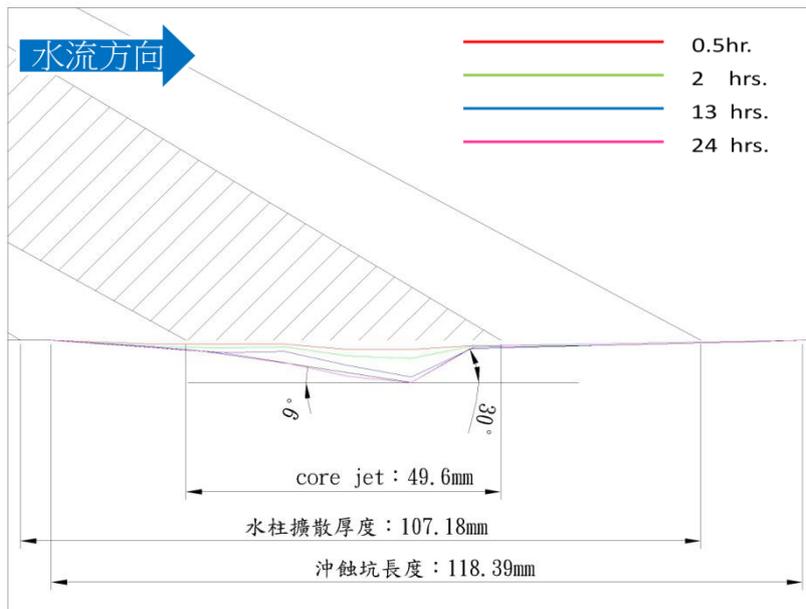


圖 4-26 射流角度 30°射流中心偏移示意圖

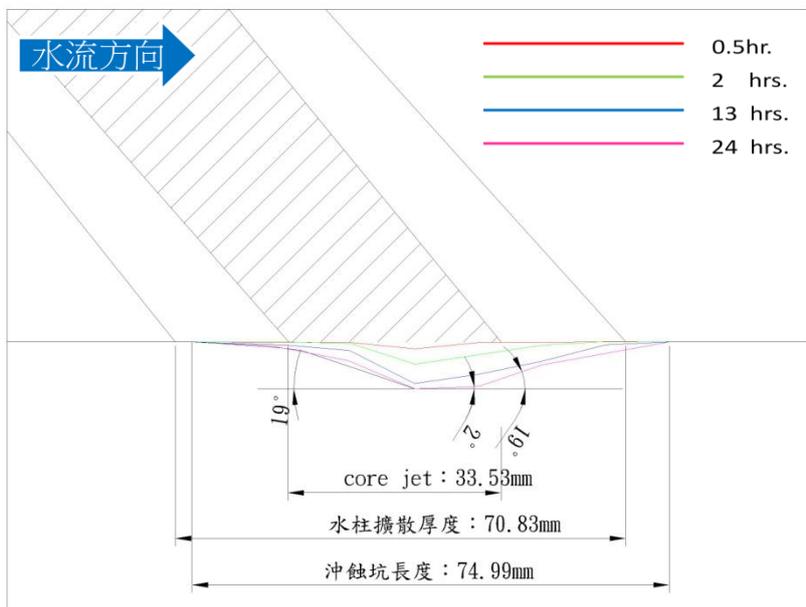


圖 4-27 射流角度 50°射流中心偏移示意圖

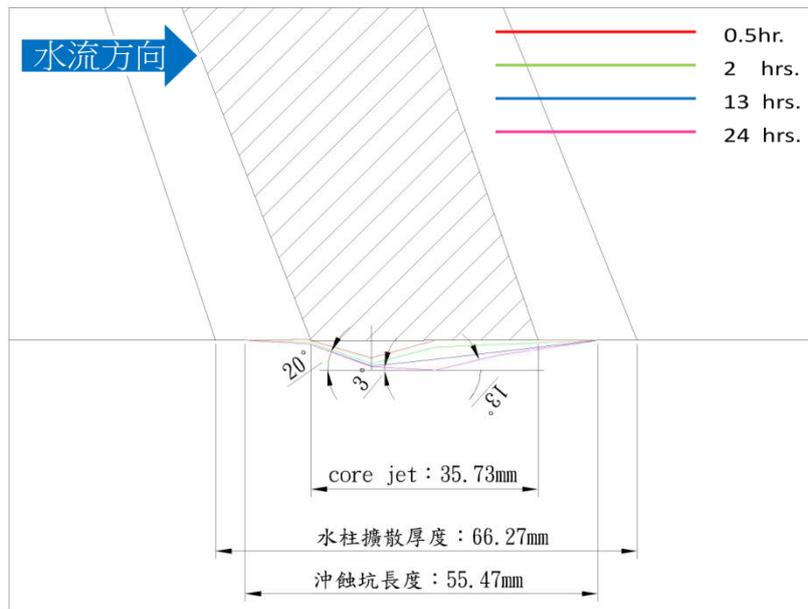


圖 4-28 射流角度 70°射流中心偏移示意圖

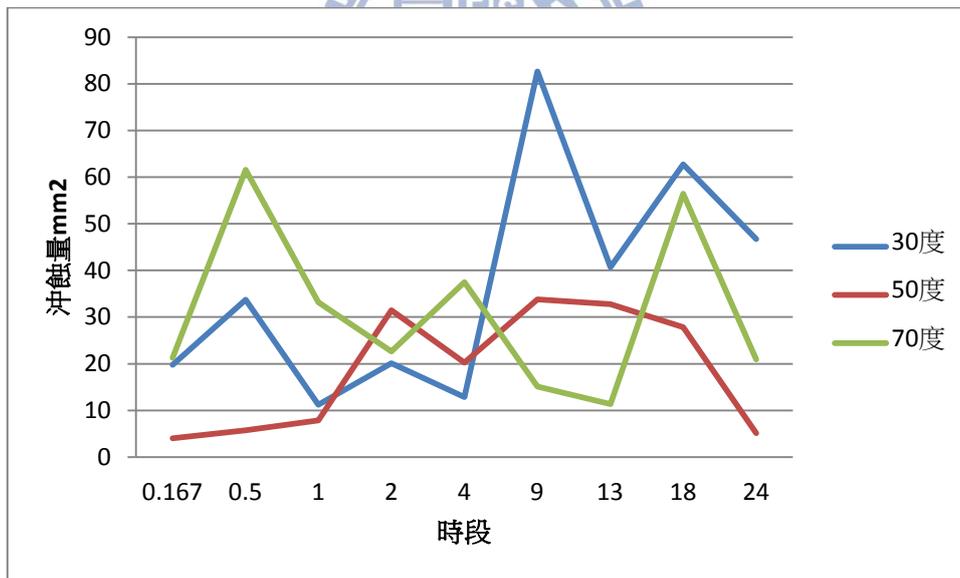


圖 4-29 時段-沖蝕量圖

- (c) 試體均質性：本實驗均先假設試體為均質試體，在製作試體時會詳細觀察每個面，避開層面與風化較嚴重之表面進行試驗，但仍有發生沖蝕坑延層面破壞之情形，進而造成對沖蝕坑有所

影響，故應於試體開採前，詳細記錄現地層面，選擇無明顯層面之試體進行試驗。



4.6 試驗成果討論

在三組不同射流角度試驗中，試體之單壓強度、粒徑分佈與實驗中試體含水量皆可視為一致，且在試驗儀器上包括流速、流線長皆固定，故本研究針對射流角度對沖刷試驗成果的影響加以討論。

4.6.1 射流角度對作用於是體表面總功的影響

表 4-17 為各角度之總功，其計算依照 Beltaos(1976)所建議公式(4-4)求得每點流功後，再以 Ervine(1997)所建議公式(2-2)計算水柱擴散厚度，將擴散厚度內之各點單位面積流功乘上代表面積後加總即為水流作用於試體的總能量（總功）。由表顯示射流角度越大，作用於試體的總功愈小。

表 4-16 各角度總流功

角 度	擴散水柱 厚(mm)	流功分佈(mm)&(kW/m ²)									總功 (kW)
		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	
30	87	130	222	326	411	444	425	373	300	221	27
50	57	-	-	354	424	451	429	370	289	-	20
70	46	-	-	362	430	455	432	368	-	-	17

4.6.2 射流角度對於沖蝕量影響

如前節所述，每次實驗射流中心點存在不一致的問題，然每次射流擴散範圍差異不大，因此中心點不一致對累積沖蝕量影響不大。圖 4-30 為各角度試驗之總沖蝕量，與表 4-16 相比可發現總流功較高者其沖蝕量較多，故可得知射流角度越小者所造成之沖蝕量也越多。

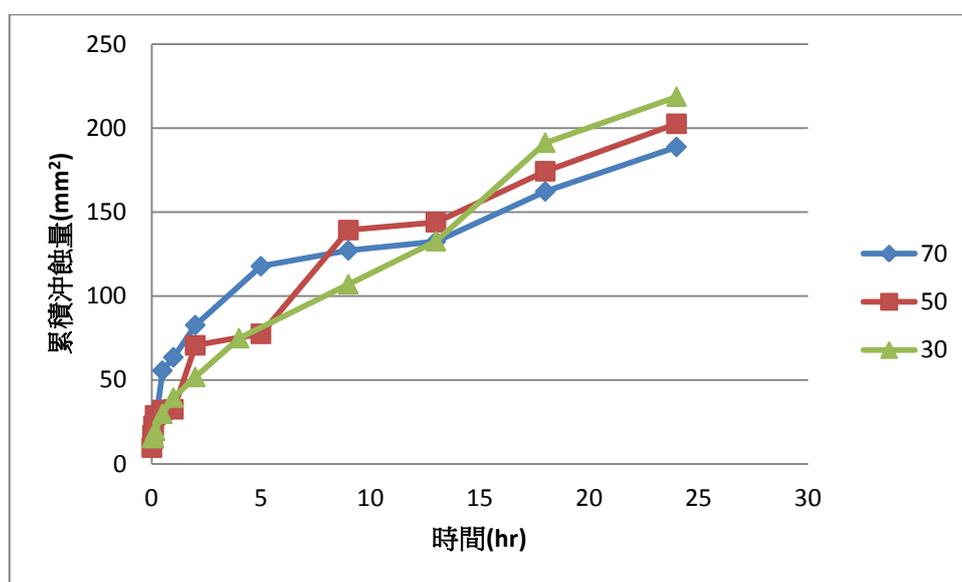


圖 4-30 時間-累積沖蝕量圖

4.6.3 射流角度對於沖蝕坑深度影響

相較於沖蝕量，射流中心點偏移則直接影響了沖蝕坑深度變化。射流中心點單位面積流功最大者應有最深的沖蝕坑深度，圖 4-31 為沖蝕坑深度隨時間之變化，可觀察出射流角度 70° 雖有較大之射流中心點流功，卻無法形成最深沖蝕坑，即可能為射流中心點不固定而使能量無法在單一點做累積。

然而可將每個時段之沖刷坑假設為全新的平面，讓每個時段之射

流中心點深度與前一個時段相減，可得到圖 4-31 至 4-33，可發現沖蝕時間越久沖蝕坑皆越深，但並沒有減緩或停止加深的趨勢，可能需更長的沖蝕時間才能使沖蝕坑穩定。

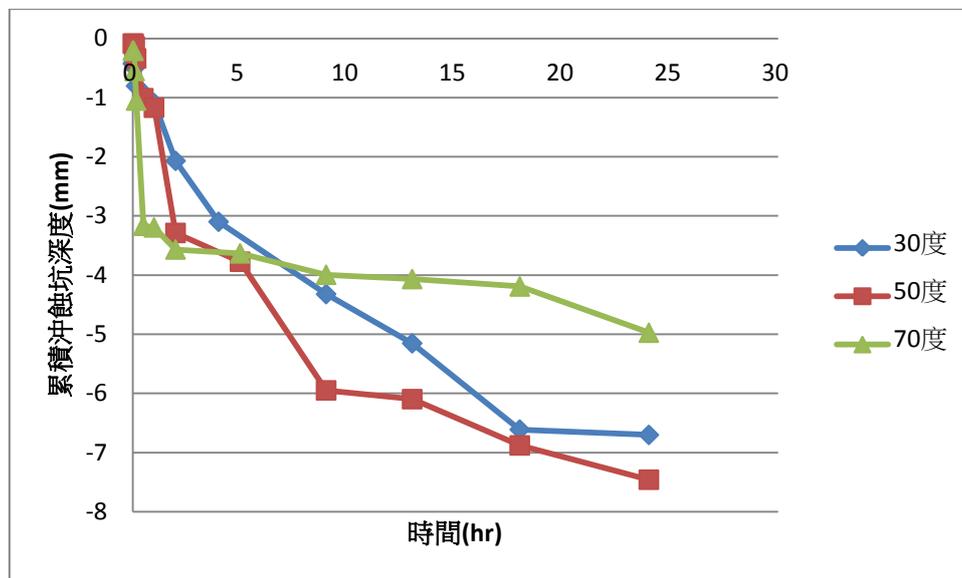


圖 4-31 時間-沖蝕坑深度圖

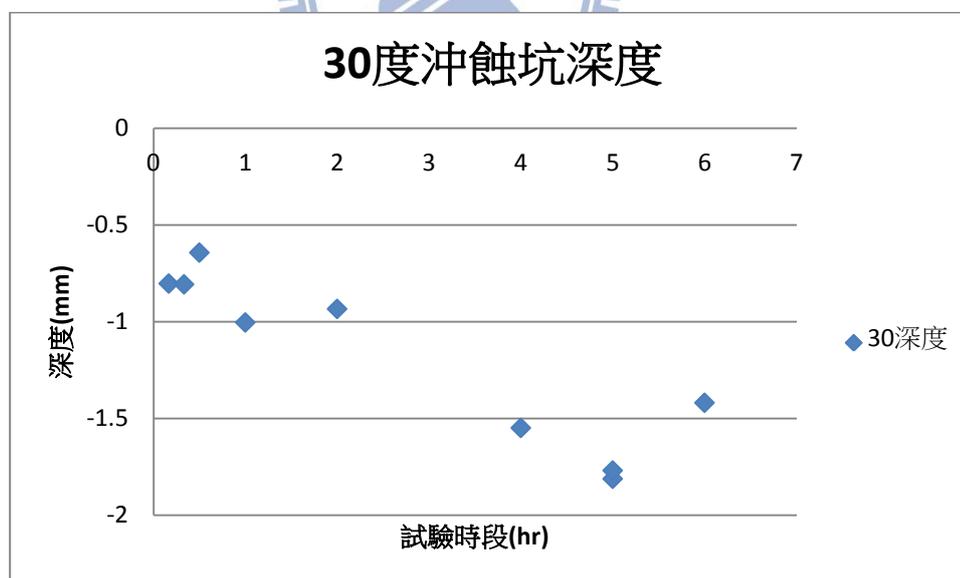


圖 4-32 30°時段-深度關係圖

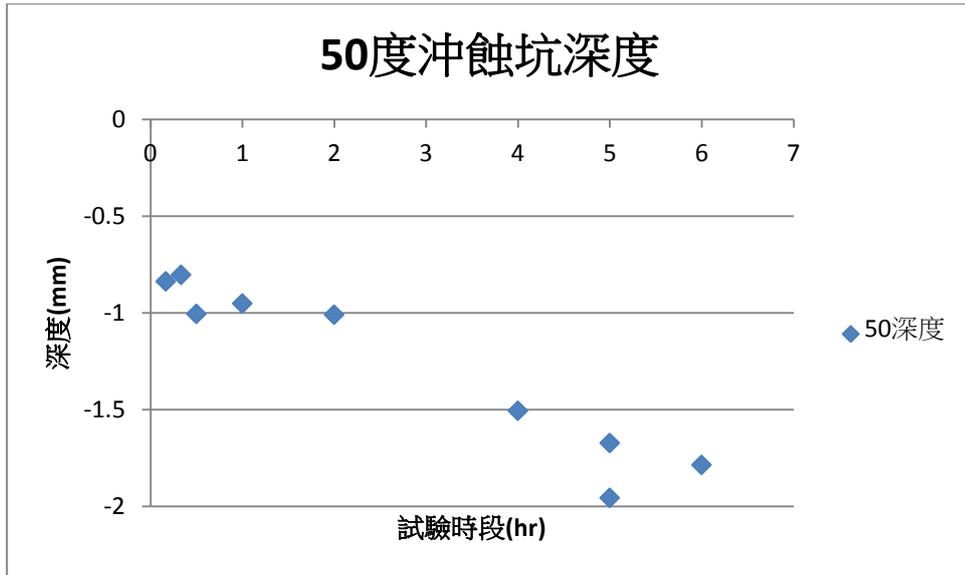


圖 4-33 50°時段-深度關係圖

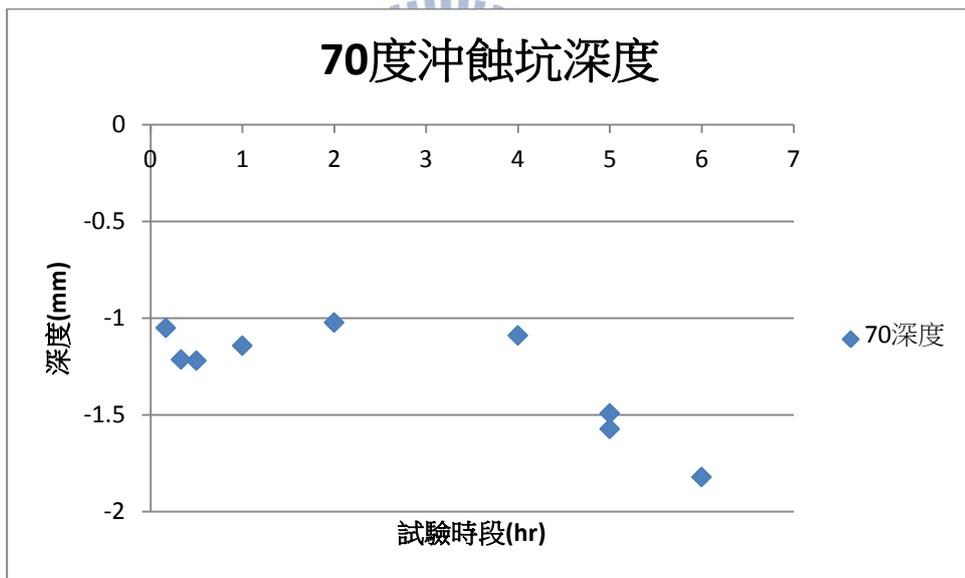


圖 4-34 70°時段-深度關係圖

4.6.4 射流角度對於沖蝕坑形狀影響

圖 4-35 為三組試驗沖蝕坑坡角隨時間變化圖，可觀察出角度較緩(30°)的射流造成沖蝕坑兩邊坡角差異最大(21°)，逆坡坡角遠大於順

坡，射流角度 50°則使兩邊坡角差距最小(0.65°)，射流角度 70°之順坡大於逆坡，兩坡度相差 6.74°，然而，因為射流中心不集中所造成的誤差，沖蝕坑坡度難以辨認出明確的趨勢，需將射流點固定後再加以討論。

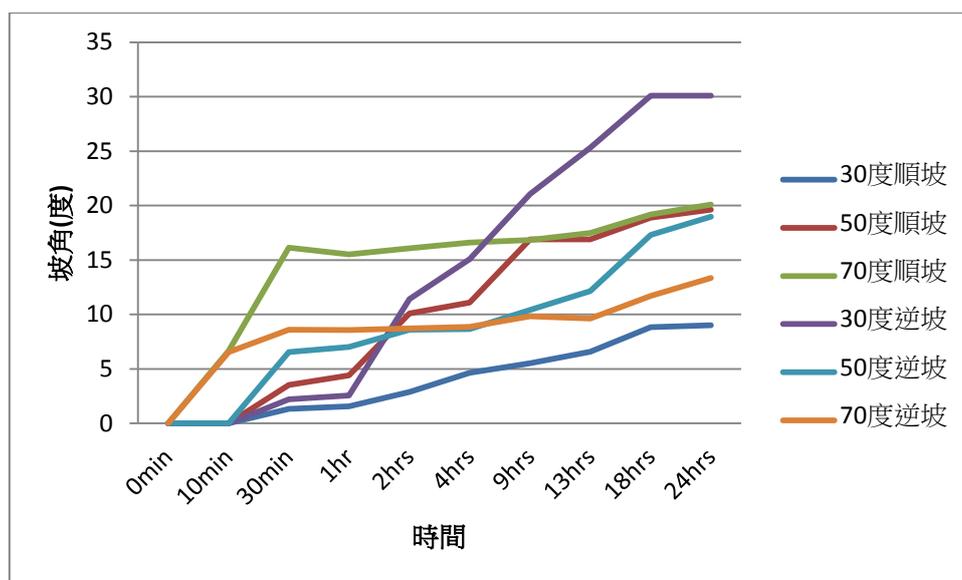


圖 4-35 時間-沖蝕坑坡角

4.6.5 綜合討論

圖 4—36 為沖蝕率隨時間增加變化之對數圖，並將其回歸得 R^2 為 0.962 以上，可驗證不管任何角度下，時間增加與沖蝕率穩定遞減的趨勢有很大相關性。

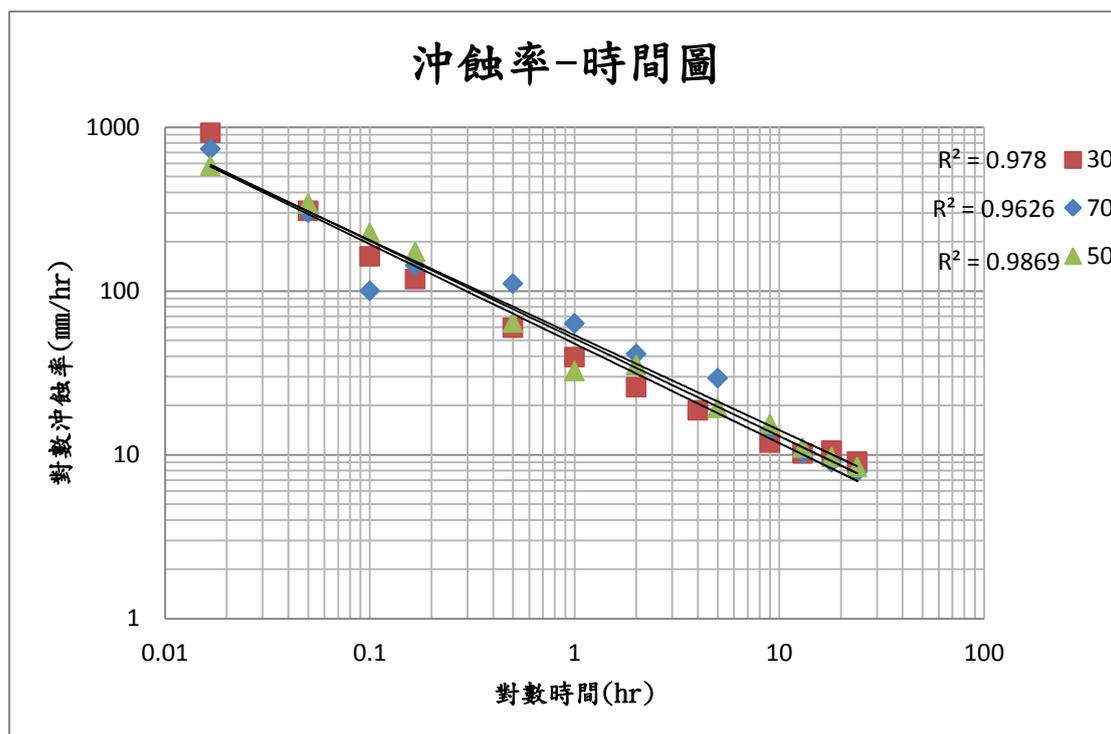


圖 4—36 時間-沖蝕率對數圖

圖 4—30 亦可發現在沖蝕時間、流速、射流長度相同的狀況下，不同角度沖蝕量急速增加的時間不同，排除試驗初始沖蝕掉試體表面之沖蝕量，射流角度 30° 在 13 至 18 小時沖蝕量增加最多，射流角度 50° 為 4 至 9 小時，射流角度 70° 則是 30 分鐘至 4 小時；沖蝕量快速增加的原因為大塊體的瞬間脫落，越接近垂直的射流所造成試體表面受壓越大，可在越短的時間內讓塊體破壞，反之則需隨時間增加累積更久的壓力才能使塊體破壞。沖蝕量緩慢增加的沖蝕模式較接近磨蝕與剝皮法破壞的形式，強力水流沿試體表面滑動，其造成之剪應力慢慢將表面較弱的膠結物帶走造成岩石顆粒與表面產生落差，顆粒再以

剝皮法破壞的形式被水流帶離試體，圖 4-37、4-38 與 4-39 為三組試驗沖蝕坑平整度圖，橫軸為將沖蝕坑拉平之距離，縱軸為沖蝕坑與水平夾角，其中 50°與 70°表面較 30°粗糙，即可能為大塊體的瞬間脫落所造成。

比較三組沖蝕坑剖面圖 18hr 至 24hr，除射流角度 30°之沖蝕坑極深點深度增加較小，另外兩組試驗沖蝕坑仍在加深，需更長的試驗時間才能使沖蝕坑穩定。此外，形成穩定的沖蝕坑，亦需讓射流進入尾水消能，隨著沖蝕坑形成、尾水深度加深，所能消散射流之能量越多，而當尾水之深度能完全消散射流能量時，沖蝕坑則趨於穩定，故建議往後可於沖刷試驗中加入尾水條件，探討尾水之厚度對水注消能的影響。

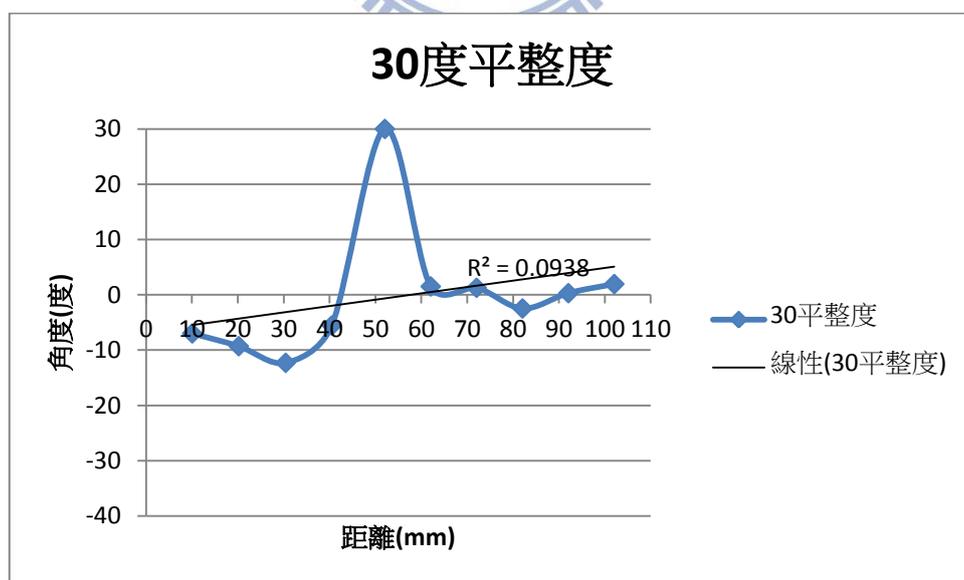


圖 4-37 射流角度 30°平整度圖

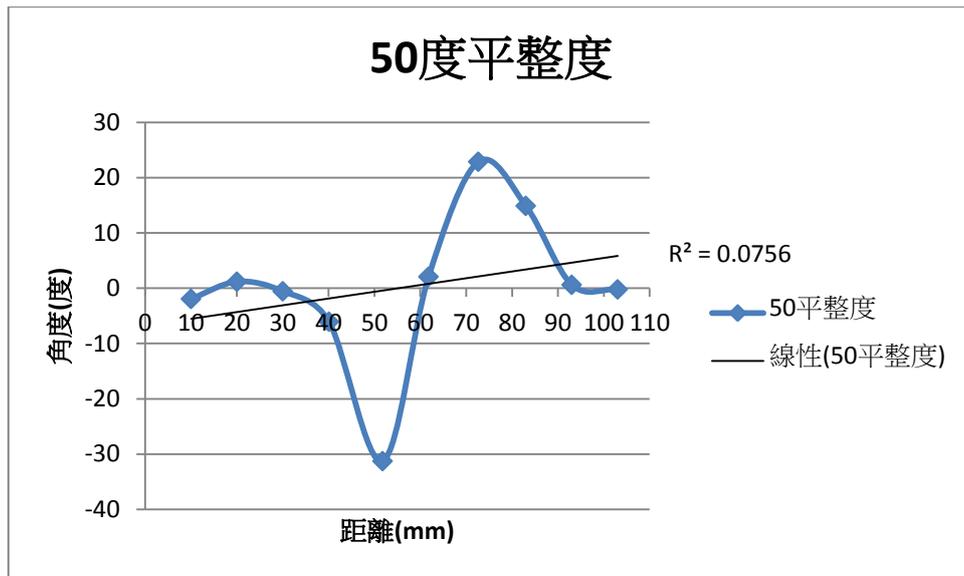


圖 4-38 射流角度 50°平整度圖

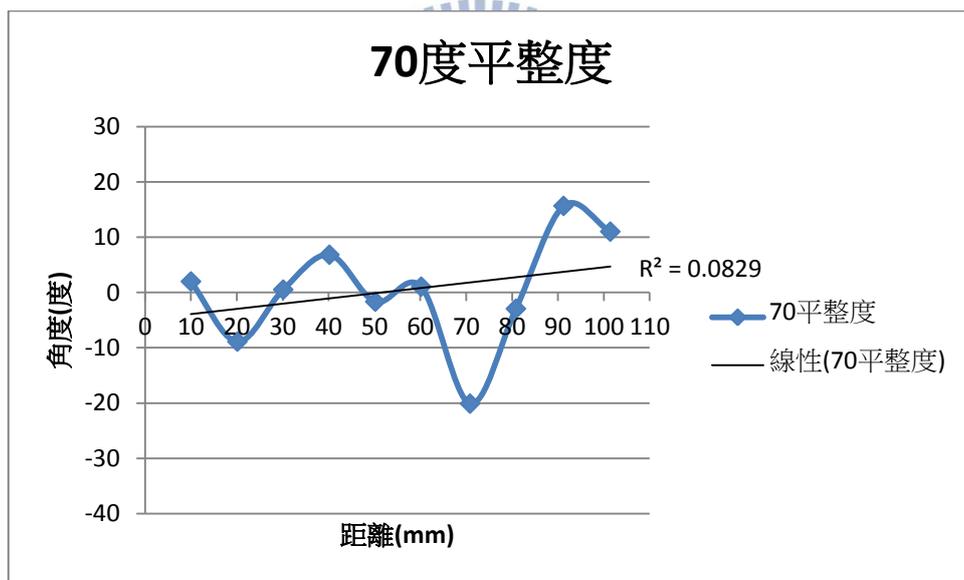


圖 4-39 射流角度 70°平整度圖

4.6 試驗問題與改善方法討論

本儀器測試過程中遭遇許多次失敗，以下將試驗失敗原因提出並討論。

(1)邊界效應：射流沖擊點過於接近試體邊界，而試體邊界破壞後造

成沖蝕坑形狀改變如圖 4—40，故試驗前應使用捲尺確定射流中心落於試體正中央。



圖 4-40 沖蝕坑遭試體邊界效應破壞照片

(2)沖蝕坑沿層面破壞：圖 4—41 與圖 4—42 為試驗後沖蝕坑沿試體層面破壞照片，試體製成後從表面觀察不出層面是否存在，故應於現地試體開採時記錄試體位置及層理方向，製做試體應避開或讓試驗面與層面水平。



圖 4—41 沖蝕坑沿層面破壞



圖 4—42 (a)沖蝕坑沿層面破壞前 (b)沖蝕坑沿層面破壞後

(3)水溫過熱：污物泵浦長時間的運轉會使水溫漸漸升高，本試驗時間長達 24 小時，水溫達 50 度以上即會把固定試體之白蠟熔化，造成試體移位(圖 4—43)，射流水注無法坐落於試體同一點，應於試驗進行間隔兩小時注入自來水於水槽，並將原水槽內之水排出，讓水溫維持在 20 度至 30 度間來避免水溫上升造成白蠟熔化之問題。



圖 4—43 固定試體之白蠟熔化使試體變位

(4)試體弱化：儀器測試的初期將試體重複施作試驗，隨著試驗次數增加，試體乾溼循環，造成岩體內部節理增加，使試體抗沖蝕力下降，此外，重複使用試體造成試體含水量不易控制，在不同角度之射流試驗中難以比較其成果，故每顆試體應以施做一次沖刷試驗為限。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究旨在建立一可變角度射流沖蝕儀，模擬攔河堰下游軟岩受沖蝕情形，研究內容包括試驗設備建立、量測設備建立、試體製作方法與試驗流程建立等。最後，並以軟弱砂岩塊在固定試驗流速(10m/s)、固定射流長度(0.3m)、固定試體含水量(1.8%至 3.0%)施做三種不同角度(與水平夾角 30°、50°、70°)的沖刷試驗，以測試本儀器之可用性，及探討射流角度對沖蝕坑沖刷行為影響。主要結論如下：

1. 本研究已於郭炳宏(2010)建立之多功能軟岩沖蝕儀中增設可變角度射流沖蝕儀，並經測試，未來可用於軟弱岩床沖刷坑形成的實驗模擬、探討。
2. 在試驗流速(10m/s)、射流長度(0.3m)、試體含水量(1.8%至 3.0%)下，施做水平面下 30°、50°、70°之沖蝕試驗 24 小時，得到之沖蝕量分別為 219mm²、203 mm²、189 mm²，其總功分別為 27kW、20kW、17kW，可得知總功較大時，對於性質相仿的試體能沖蝕出較多沖蝕量，而在射流長度固定的狀況下，射流角度越小能得到較多總功，進而而有較多的沖蝕量。
3. 因射流中心點偏移問題，試體表面的每個點無法做正確的射流能量累積，也使沖蝕坑深度與形狀無法做討論。

4.將每個時段之沖刷坑假設為全新的平面，讓每個時段之射流中心點深度與前一個時段相減，可得沖蝕時間越久沖蝕坑皆越深，且並無減緩或停止加深之趨勢，難以推估可能的沖刷坑深度。

5.三組試驗各有一段時間沖蝕量驟增之情況，可能為試體承受一定程度的能量後破裂瞬間產生大塊體脫落，並以射流角度越陡者越早發生這種情形。

5.2 建議

1.可針對水質含泥沙濃度與沖蝕之影響進行研究，在不同粒徑濃度下以相同流速、射流長度及試體條件進行試驗。

2.可針對尾水深與沖蝕量之影響進行研究，水尾造成射流流體消能之影響，以及尾水內水流流況對於試體沖蝕之影響都值得探討。

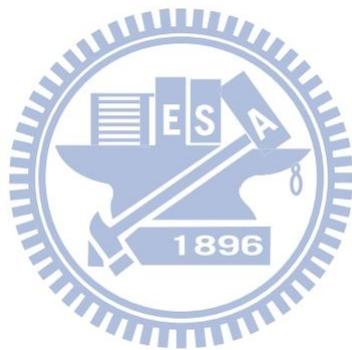
3.可將沖蝕坑隨時間變化之成果與現有攔河堰沖下游蝕坑形成之經驗式做整合，於經驗式中加入時間因素做討論。

4.未來可於滑軌上裝設線性馬達，以穩定的前進速度密集量測沖蝕坑高程，可得更精準之沖蝕量變化及沖蝕坑形狀。

5.可將量測儀器固定架設於水槽上方，減少試驗中每次量測皆須拆裝儀器之時間。

6.觀察本實驗因停機量測與重開機時，馬達瞬間運轉使噴嘴晃動，造成射流衝擊點於量測前後有不一致的情形，故對於沖蝕坑深度、形狀

無法做出最準確的判斷，可將噴嘴射至最少兩個方向之固定器，固定噴嘴不晃動後再討論沖蝕坑深度及形狀。觀察本實驗因停機量測與重開機時，馬達瞬間運轉使噴嘴晃動，造成射流衝擊點於量測前後有不一致的情形，故對於沖蝕坑深度、形狀無法做出最準確的判斷，可將噴嘴射至最少兩個方向之固定器，固定噴嘴不晃動後再討論沖蝕坑深度及形狀。



參考文獻

1. 曾孝欽，2003「軟岩用多功能剪力試驗系統之建立-直剪與單剪系統」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
2. 郭炳宏，2010「多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
3. 朱佳仁，2003「環境流體力學」，科技圖書股份有限公司出版，臺北。
4. 杜鳳棋 譯，1995「流體力學」，高立圖書有限公司出版，臺北。
5. 雷射位儀感測器用戶手冊，台灣基恩斯股份有限公司，2006，台灣，臺北。
6. Annandale, G.W., (1995). "ERODIBILITY." *Journal of Hydraulic Research*, 33(4): pp. 471-494.
7. Beltaos, S., (1976). "Oblique Impingement of Plane Turbulent Jets." *Journal of Hydraulics Division*, 102(9): pp. 1177-1192
8. Bollaert, E., (2002). "Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." in Lausanne, EPFL.
9. 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): pp. 451-464.
10. Bollaert, E., and Schleiss, A. (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part II: Experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one- and two-dimensional closed-end rock joints." *J. Hydraul. Res.*, 465-480.
11. Bollaert, E., (2004). "A comprehensive model to evaluate scour formation in plunge pools." *International Journal on Hydropower & Dams*. 11(1): pp. 94-101.
12. 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): pp. 155-167.
13. 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.

- 14.
15. Ervine, D. A., and Falvey, H. T., (1987). "Behavior of Turbulent Water Jets in the Atmosphere and in Plunge Pools." Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 83(2): pp. 295-314.
16. Ervine D. A.; Falvey, H.R. and Withers, W. (1997). “Pressure fluctuations on plunge pool floors”, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 35, N^o2, pp. 227-279.
17. Nakato, T. (2002) , “Erodibility test of shale-rock samples taken from pier construction site on Mississippi river”, 1ST international conference on scour of foundations ICSF-1, pp528-539.
18. 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): pp.835-838.



附錄一

抗沖蝕能力指數(K_h)估算依據

1、材料強度參數(mass strength number, M_s)

岩體材料評估強度的代表參數是無圍壓縮強度(UCS)， M_s 值計算

方式如下，也可採用附表 1-1：

$$M_s = C_r \times 0.78 \times UCS^{1.05} \text{ for } UCS \leq 10\text{MPa} \quad (1)$$

$$M_s = C_r \times UCS \text{ for } UCS > 10\text{MPa} \quad (2)$$

UCS：無圍壓縮強度(MPa)

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

g ：重力加速度(9.81 m/s^2)

ρ_r ：岩塊密度(kg/m^3)



附表 1-1 岩石材料強度評分表(Annandale, 1995,2006)

材料強度數值(M_s)		
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	17.70
極硬岩	26.4~53.0	35.0
	53.0~106.0	70.0
極堅硬硬岩	> 212.0	280.0

2、顆粒或塊體尺寸參數(K_b)

K_b 由鑽探取得之岩心岩石品質指標(RQD)與節理組數參數 J_n 來定義：

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \quad (3)$$

當沒有鑽孔取樣時，RQD 值可以用經驗公式推得：

$$RQD = 105 - \frac{10}{(J_x \cdot J_y \cdot J_z)^{0.33}} \quad (4)$$

J_x 、 J_y 、 J_z 分別為 x , y , z 三個方向上每公尺出現的節理組數。節理組數參數 J_n 非直接使用節理組數的值，必須查附表 1-2，當 RQD 越大、節理組數越少則 K_b 越大，即岩體越完整抗侵蝕能力越高。

附表 1-2 節理組數參數評分表(Annandale, 1995,2006)

節理組數值(J_n)	
節理組數	J_n
完整岩石或有少數節理與裂隙	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

3、弱面抗剪強度參數(K_d)

K_d 值由岩體的節理面粗糙參數(joint roughness number, J_r)與節理改變參數(joint alteration number, J_a)來定義：

$$K_d = \frac{J_r}{J_a} \quad (5)$$

節理面粗糙參數 J_r (附表 1-3)表示不連續面分離的兩個面間間的粗糙度，受到不連續面的形狀影響。判斷上依據節理的兩面是否分離，之後再考慮不同的接觸面形狀。

節理面狀態參數 J_a (附表 1-4)與不連續面的空隙內填充材料有關，如植生、鏽染、凝聚性或非凝聚性材料填充，會影響到不連續面的摩擦力。評分上先依據節理分離的程度，後再檢視空隙的填充材料性質。

附表 1-3 節理面粗糙參數評分表(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	4.0
	粗糙或不規則，成波浪狀	3.0
	平滑波浪狀	2.0
	摩擦過之平面，成波浪狀	1.5
	粗糙或不規則，成平面狀	1.5
	平滑平面狀	1.0
	摩擦過之平面，成平面狀	0.5
挖掘過程中，節理/裂隙保持張開狀態	挖掘後，節理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	1.0
	有粉碎或細微粉碎黏土	1.0

附表 1- 4 節理面狀態參數評分表(Annandale, 1995,2006)

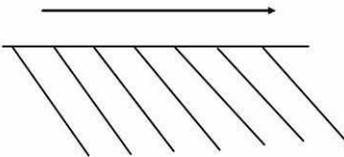
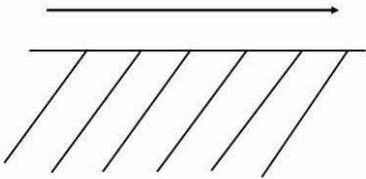
節理面間描述	不同節理開口程度之風化數值(J_a)		
	1.0 (mm)	1.0~5.0 (mm)	5.0 (mm)
緊密接合，堅硬，無軟弱填充物可侵入填充	0.75	--	--
節理面無風化，僅表面有污跡	1.0	--	--
節理面輕微風化，無軟弱填充物、無凝聚性岩石礦物或是破碎岩石填充	2.0	2.0	4.0
無軟弱之輕微黏土質的無凝聚性材料填充	3.0	6.0	10.0
無軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	3.0	3.0	10.0
軟弱或低摩差性黏土礦物附著且有少量膨脹性黏土填充	4.0	8.0	13.0
有適量之軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	4.0	8.0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

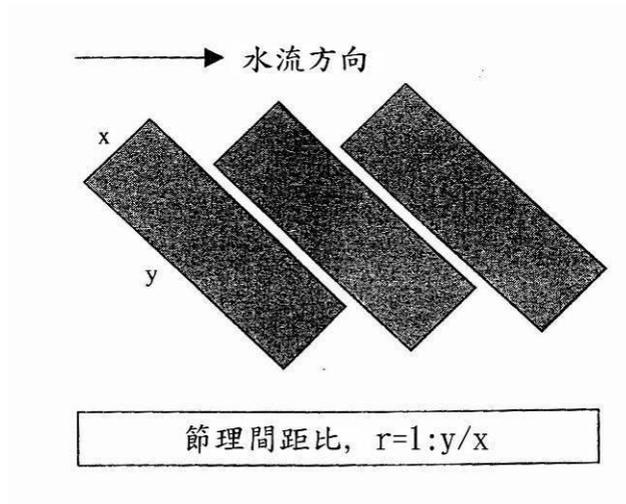
4、地盤構造條件參數(J_s)

相對地盤構造參數 J_s (附表 1-5)的影響因素包括：水流流向與岩床層面傾向、傾角的相對關係、以及岩塊形狀。

岩塊的形狀因素採用節理間距比(ratio of joint spacing, r)來代表，可由水流與岩層之縱剖面，如附圖 1-1，看兩個方向的岩塊長度比值 y/x 來作 r 的計算，其中 y/x 值最大取到 8。 r 參數能反應出岩石河床材料受到侵蝕時，瘦長的塊體較等邊的塊體抗侵蝕能力高的行為。

附表 1-5 地盤構造條件參數評分表(Annandale, 1995,2006)

地盤構造條件參數					
節理之傾向(單位：度)	層面之傾角(單位：度)	節理間距比，r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	垂直 90	1.14	1.20	1.24	1.26
順向 	89	0.78	0.71	0.65	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	水平 0	1.14	1.09	1.05	1.02
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	垂直-90	1.14	1.20	1.24	1.26



附圖 1— 1 岩塊長度比值 y/x 示意圖(Annandale, 1995,2006)

