

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

室內軟弱岩石河道沖刷坑試驗

Model Tests for Scouring Hole Formation Downstream

Weirs Built on Weak Rocks

1896

研究生：陳志強

指導教授：廖志中 博士

中華民國一〇二年二月

# 室內軟弱岩石河道沖刷坑試驗

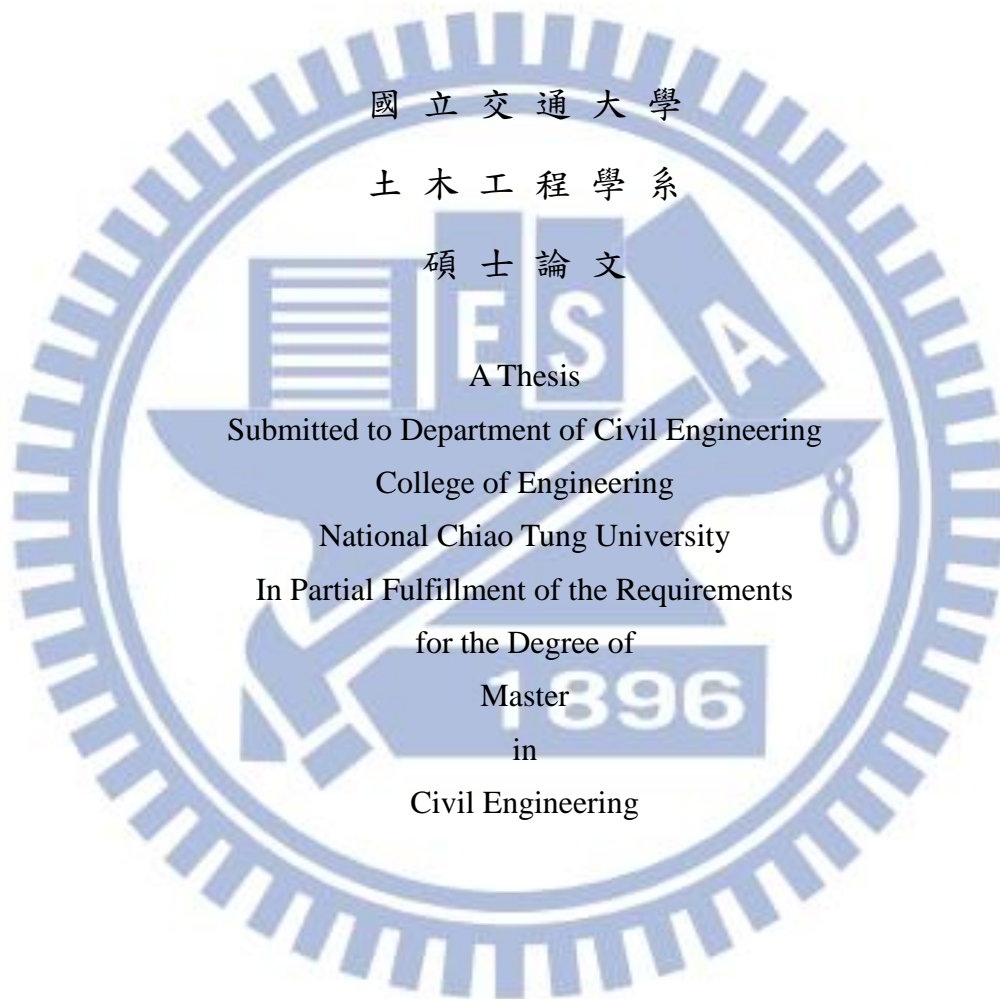
Model Tests for Scouring Hole Formation Downstream Weirs Built on Weak  
Rocks

研 究 生：陳志強

Student : Chih-Chiang Chen

指導教授：廖志中 博士

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao



February 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年二月

# 室內軟弱岩石河道沖刷坑試驗

學生：陳志強

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

我國西部中下游河道建造許多攔河堰，以供民生需求，但攔河堰興建後，河道坡度改變，使得上游的礫石無法穿越攔河堰，造成上游河道泥砂淤積，下游河道護甲層流失且岩盤出露。此類出露岩床屬上新世與更新世沈積地層，且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，故下游的岩盤在水流的衝擊下迅速的被沖刷。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，影響下游人民生命與財產的安全。因此，攔河堰下游軟岩河道之沖刷坑形成、深度及形狀，有必要加以詳細探討。

本研究以吳禹霆(2012)建立的可變角度射流沖刷設備、試驗程序、試體準備方法及量測分析方法等，進行一系列的沖刷坑形成之室內模型試驗，並以試驗結果探討沖刷坑的形成行為。

本研究以射流角度為 $30^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $70^\circ$ 進行三組尾水深為 $1D$ 、 $3D$ 、 $5D$  ( $D$ 為初始水柱厚)的試驗，試驗結果顯示，一樣的沖刷時間下(48小時)，角度較小和尾水深較小試體的總能量(總功)較大，沖蝕量也較多，反之亦然。

關鍵字：軟弱岩石、沖刷坑、流功、射流沖刷、抗沖蝕指數  $K_h$

# Model Tests for Scouring Hole Formation Downstream Weirs Built on Weak Rocks

Student : Chih-Chiang Chen

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

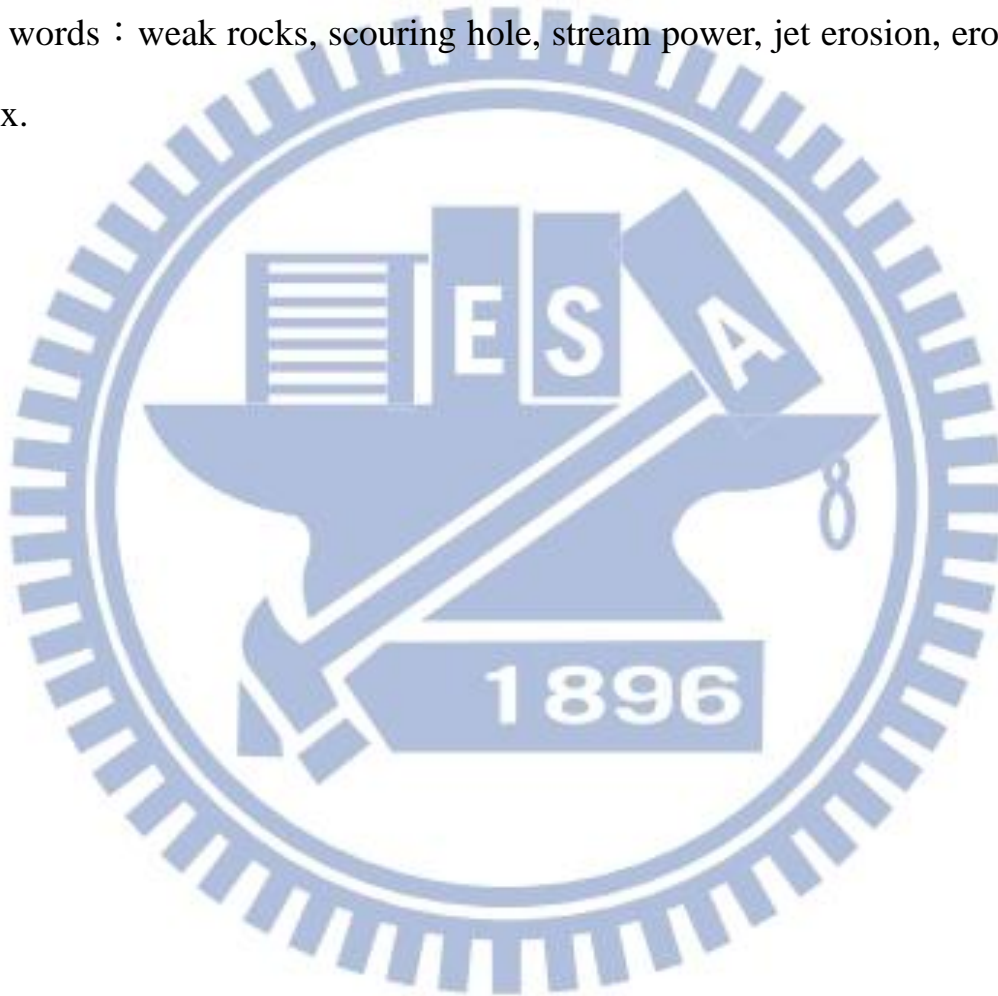
To elevate river water levels and thereby increase water supplies, lots of weirs were built on the midstream and downstream of rivers in western Taiwan. Most riverbeds in the western foothills of Taiwan are composed of weak sedimentary rocks, which belong to the strata of the Pliocene and Pleistocene, covered with an armor layer of varying thickness. Due to the low rock strength and head fall caused by weirs, rapid scouring downstream of the weir is often observed. When the downstream scour hole formed, the instability of weir might occur. The disaster of weir break may cause the lose of life and property of the people who live at downstream. Therefore, the formation of scouring hole downstream weirs built on weak rocks is needed to study.

This thesis aims to investigate the influence of the inclination angle of jet flow on the shape and depth of scouring hole. Following the experimental study by Wu(2012) including the testing procedure, sample preparation, and measurement of the surface topography of the specimen, this thesis conducted a series of model tests for the formation of scoring hole with different jet flow inclination angles and tail water depths.

The inclination angles include  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ , and  $70^\circ$  and 1D, 3D, and 5D

( $D$ =pipe diameter) tailwater depths are adopted. The test results show that, for the same scouring time (48 hours), the scouring depth increases with the increase of the inclination angle and the decrease of the tailwater depth due to the increase of the applied energy (total power) on the river bed.

Key words : weak rocks, scouring hole, stream power, jet erosion, erodibility index.



## 誌謝

兩年半啦！終於完成論文了，同學們都走光光了，還是有點孤單，不過碩士生涯學了很多東西，也遇到許許多多事，過的也很充實。

感謝廖志中 老師的教導，不只在學業和研究上的教誨，待人處事上對我這一生的都有很大的幫助和啟發，在我無助的時候給了我最有力的聲援，給我建議和方向。感謝潘以文 老師在學習的路上，給了很多想法，靈活我的思路。

感謝明萬、貓伯伯、小鄭學長、小驤、聰吉、大霆、楚鈞、阿康等學長姐的指導和幫忙，給了我很多建議，幫我解決很多問題，不論是研究或待人處事上都教會我許多東西。

感謝泓佑拜把的幫助，讓我領到入學門票，還陪我學習、打球到畢業。感謝小昱、阿蒲、麵包、齊學長、智緯、幸璉、阿罡，讓我有著很充實歡樂的碩士生活。

感謝包包陪我一起去魚缸健身房苦修，感謝歐阿陪我玩我的傳奇，感謝阿村陪我買午餐，感謝婉容大大的全方位協助！感謝阿忠、猴子、瓜瓜、軒軒稱職的同樂團，感謝施趴趴給了我不一樣的人生。

最感謝的還是我的家人，感謝爸媽給了我讀書的機會，從小教會我很多事，才能成就今天的我!!! 在我朝目標邁進時給了我溫暖的後盾，在你們最辛苦的時候，仍然讓我能豐衣足食，感謝你們的照顧與愛護，我會好好的走下去。感謝我可靠的大弟，在我求學時把家顧的穩穩當當，感謝我小弟，在遊戲上永遠給你罩，我愛你們!!!

# 目 錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
誌謝.....	IV
目 錄.....	V
表 目 錄.....	IX
圖 目 錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程圖.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 岩盤沖蝕機制.....	4
2.1.1 磨蝕沖蝕.....	4
2.1.2 塊體抽離沖蝕.....	5
2.1.3 穴蝕沖蝕.....	7
2.1.4 剝皮沖蝕.....	8
2.1.5 岩盤沖蝕機制小結.....	9
2.2 跌水沖刷特性.....	10

2.3	水工構造物因跌水所產生之沖刷行為描述及深度評估.....	12
2.3.2	流體的擴散效應.....	14
2.3.3	射流流功在尾水中的消能.....	17
2.3.4	岩盤抗沖蝕指數 $K_h$ .....	20
2.3.5	力平衡沖刷坑深度公式推導.....	23
2.4	水工模型相似度及無因次分析.....	33
2.4.1	模型相似性原理.....	34
2.4.2	模型相似律.....	36
2.5	室內水槽沖蝕試驗.....	40
2.5.1	現地取樣直接沖刷試驗.....	40
2.5.2	塊體抽離水槽試驗.....	42
2.5.3	人造節理水槽試驗.....	44
2.6	多功能軟岩沖蝕儀.....	47
2.6.1	水平向磨蝕試驗.....	48
2.6.2	可變角度直接沖刷試驗.....	50
第三章	試驗儀器及試驗規劃.....	55
3.1	試驗儀器.....	55
3.1.1	水槽內設備.....	57
3.1.2	射流設備.....	57



3.1.3 量測設備 .....	61
3.2 試驗流程 .....	63
3.3 沖刷坑測量及數據分析 .....	64
3.4 流功與岩盤抗沖蝕指數 .....	67
3.5 實驗規畫 .....	67
3.6 小結 .....	69
第四章 實驗成果與討論 .....	70
4.1 試體來源 .....	70
4.2 試體評估及試驗規畫 .....	71
4.2.1 試體抗沖蝕能力估算 .....	72
4.2.2 試驗流功計算 .....	74
4.3 實驗結果 .....	75
4.3.1 尾水深 1D (2.54 cm) .....	76
4.3.2 尾水深 3D (7.62 cm) .....	82
4.3.3 尾水深 5D (12.7 cm) .....	88
4.3.4 尾水深 1D (2.54 cm) .....	94
4.3.5 尾水深 3D (7.62 cm) .....	100
4.3.6 尾水深 5D (12.7 cm) .....	106
4.3.7 尾水深 1D (2.54 cm) .....	112

4.3.8 尾水深 3D (7.62 cm) .....	118
4.3.9 尾水深 5D (12.7 cm) .....	124
4.4 試驗結果討論 .....	130
4.4.1 尾水深度對沖刷深度的影響 .....	130
4.4.2 射流角度對沖刷深度的影響 .....	132
4.4.3 尾水深度和射流角度對沖蝕量的影響 .....	134
4.4.4 實驗值與理論值的比較 .....	137
第五章 結論與建議 .....	144
5.1 結論 .....	144
5.2 建議 .....	145
參考文獻 .....	146
附錄一 .....	148

# 表 目 錄

表 2-2 波動動態壓力係數與 $L/L_b$ 比值關係表 (Castillo, 2006) .....	20
表 2-3 岩盤沖蝕能力抵抗分類表 (Liu, 2005) .....	26
表 2-4 計算三峽大壩下游岩盤沖刷深度 (Liu, 2005) .....	26
表 2-5 在 $k_c=3.9$ 的情況下總沖刷深度與沖刷深度之間的差異(Liu, 2005) .....	27
表 2-6 沖刷參數與沖刷深度 (Liu) .....	29
表 2-7 沖刷參數與沖刷深度 (Annandale) .....	29
表 2-8 Annandale 與 Liu 沖刷深度比較.....	30
表 2-9 平均波動壓力與正規化值 $x/h$ 關係表 .....	32
表 2-10 無因次參數與表物理意義 .....	37
表 3-1 直接沖刷試驗儀器介紹 .....	56
表 3-2 實驗規畫.....	69
表 4-1 試驗規劃.....	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 直接沖刷試驗在不同角度、尾水深下的流功計算 .....	75
表 4-5 射流角度 $70^\circ$ 尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據.....	76
表 4-6 射流角度 $70^\circ$ 尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據.....	79

表 4-8 射流角度 70°尾水深 7.62cm 沖蝕試驗數據.....	85
表 4-9 射流角度 70°尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據.....	88
表 4-10 射流角度 70°尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據.....	91
表 4-11 射流角度 50°尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據.....	94
表 4-12 射流角度 50°尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據.....	97
表 4-13 射流角度 50°尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據.....	100
表 4-14 射流角度 50°尾水深 7.62cm 沖蝕試驗數據.....	103
表 4-15 射流角度 50°尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據.....	106
表 4-16 射流角度 50°尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據.....	109
表 4-17 射流角度 30°尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據.....	112
表 4-18 射流角度 30°尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據.....	115
表 4-19 射流角度 30°尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據.....	118
表 4-20 射流角度 30°尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據.....	121
表 4-21 射流角度 30°尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據.....	124
表 4-22 射流角度 30°尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據.....	127
表 4-23 3 種尾水深的流功分布及總功 .....	139

# 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 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖 (Whipple et al., 2000) .....	6
圖 2-3 岩塊抽離示意圖 (Annandale,1995) .....	6
圖 2-4 岩塊攜出作用力示意圖 (Annandale,1995) .....	7
圖 2-5 八掌溪頁岩岩床穴蝕破壞 (羅楚鈞,2011) .....	8
圖 2-6 剝皮法 (peeling off) 沖蝕示意圖 (Bolleart, 2005) .....	8
圖 2-7 剝皮法沖蝕發生於跌水沖刷示意圖 (Bolleart, 2005) .....	9
圖 2-8 水流衝擊引致之沖刷機制示意圖(Bollaert, 2003).....	11
圖 2-9 沖刷流程分析步驟 (羅楚鈞, 2012) .....	13
圖 2-10 圓形射流擴散架構圖 (Ervin et al., 1997) .....	15
圖 2-11 矩形射流擴散架構圖 (Castillo 2006) .....	16
圖 2-12 射流平均壓力係數與 $h/D_j$ 關係圖 (Castillo, 2004) .....	18
圖 2-13 正規化消能池深度與波動動態壓力係數之函數關係圖 (Bollaert, 2002) .....	19
圖 2-14 發展中沖刷坑水流示意圖 (Spurr, 1985) .....	21
圖 2-15 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖 (Annandale, 1995) .....	23
圖 2-16 沖刷坑示意圖 (Liu, 2005) .....	24

圖 2-18 $K_h$ - $k_c$ 關係圖， $K_h$ 以 log 表示 (羅楚鈞, 2011) .....	28
圖 2-19 圓形射流平均壓力係數與 $h/D_j$ 關係圖 (Bollaert, 2003) .....	31
圖 2-21 角度- $b/H$ 圖 ( $H$ 為射流長), Beltaos (1976) .....	33
圖 2-22 擴散流功/中心點流功- $\eta$ 圖 (Beltaos, 1976) .....	33
圖 2-23 試驗配置圖 Nakato T. (2002) .....	41
圖 2-24 試驗照片 (Nakato T., 2002) .....	42
圖 2-25 試驗配置圖 (Annandale & Wittler, 1998) .....	43
圖 2-26 塊體配置圖 (Annandale & Wittler, 1998) .....	43
圖 2-27 面積流功與抗沖蝕能力指數圖 (Annandale, 1995) .....	44
圖 2-28 人造節理沖蝕試驗照片 (Bollaert, 2002) .....	45
圖 2-29 人造節理沖蝕試驗配置圖 (Bollaert, 2002) .....	45
圖 2-30 不同形式裂隙模擬設施示意圖 (Bollaert, 2002) .....	46
圖 2-31 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖 (Bollaert, 2002) .....	47
圖 2-32 裂隙內部波動壓力放大係數圖 (Bollaert, 2002) .....	47
圖 2-33 沖蝕試驗儀器配置圖 (郭炳宏, 2010) .....	49
圖 2-34 多功能沖蝕儀-可變角度直接沖刷試驗配置圖 (吳禹霆, 2012) .....	51
圖 2-35 多功能沖蝕儀-可變角度直接沖刷試驗設備 (吳禹霆, 2012) ...	51
圖 3-1 室內軟弱岩石射流沖刷設備 (吳禹霆, 2012) .....	55
圖 3-2 汙物泵浦.....	57

圖 3-3 球型三通閥.....	58
圖 3-4 紊流擴散示意圖 (Reynolds, 1883) .....	59
圖 3-5 升降固定器.....	60
圖 3-6 可變角度法蘭.....	61
圖 3-7 超音波流量計.....	62
圖 3-8 雷射位移計與雷射位移數據擷取放大器 .....	62
圖 3-9 XYtable 線性滑軌組.....	63
圖 3-10 量測儀器安裝示意圖 .....	65
圖 3-11 固定點 A、B、C 之照片 .....	65
圖 3-12 試驗後停機紀錄照片 .....	66
圖 4-1 a.怪手開挖 b.挑選適用之岩塊.....	70
圖 4-2 將岩塊置入耐震橘桶以白蠟密封，再以 PVC 塑膠布密封 .....	71
圖 4-3 R3-70-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時.....	77
圖 4-4 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	77
圖 4-5 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	78
圖 4-6 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長 : 寬 : 高 = 1 : 1 : 0.2....	78
圖 4-7 Rock7 (上) 0 小時 (下) 48 小時.....	80
圖 4-8 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	80
圖 4-9 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	81

圖 4-10 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1..	81
圖 4-11 R3-70-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	83
圖 4-12 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	83
圖 4-13 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	84
圖 4-14 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1..	84
圖 4-15 R7-70-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	86
圖 4-16 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	86
圖 4-17 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	87
圖 4-18 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.05 .....	87
圖 4-19 R3-70-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	89
圖 4-20 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	89
圖 4-21 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	90
圖 4-22 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1..	90
圖 4-23 R7-70-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	92
圖 4-24 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	92
圖 4-25 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	93
圖 4-26 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1..	93
圖 4-27 R2-50-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	95
圖 4-28 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	95



圖 4-29 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	96
圖 4-30 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1..	96
圖 4-31 R5-50-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	98
圖 4-32 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	98
圖 4-33 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	99
圖 4-34 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.05	99
圖 4-35 R2-50-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	101
圖 4-36 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	101
圖 4-37 以 Surfer9 繪製沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	102
圖 4-38 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1	102
圖 4-39 R5-50-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	104
圖 4-40 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	104
圖 4-41 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	105
圖 4-42 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.05 .....	105
圖 4-43 R6-50-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	107
圖 4-44 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10) .....	107
圖 4-45 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	108
圖 4-46 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.05 .....	108

圖 4-47 R6-50-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	110
圖 4-48 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	110
圖 4-49 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	111
圖 4-50 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm), 長 : 寬 : 高 = 1 : 1 : 0.025 .....	111
圖 4-51 R1-30-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	113
圖 4-52 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	113
圖 4-53 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	114
圖 4-54 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長 : 寬 : 高 = 1 : 1 : 0.1	114
圖 4-55 R4-30-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	116
圖 4-56 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	116
圖 4-57 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	117
圖 4-58 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長 : 寬 : 高 = 1 : 1 : 0.1	117
圖 4-59 R1-30-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	119
圖 4-60 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	119
圖 4-61 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	120
圖 4-62 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長 : 寬 : 高 = 1 : 1 : 0.1	120
圖 4-63 R4-30-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時 .....	122
圖 4-64 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10) .....	122
圖 4-65 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm) .....	123

圖 4-66 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.1	123
圖 4-67 R1-30-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時	125
圖 4-68 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10)	125
圖 4-69 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)	126
圖 4-70 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.025	126
圖 4-71 R4-30-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時	128
圖 4-72 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10)	128
圖 4-73 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)	129
圖 4-74 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm), 長: 寬: 高=1:1:0.025	129
圖 4-75 70 度尾水深 1D、3D、5D 的沖刷深度	131
圖 4-76 50 度尾水深 1D、3D、5D 的沖刷深度	132
圖 4-77 30 度尾水深 1D、3D、5D 的沖刷深度	132
圖 4-78 尾水深 1D 射流角度 30、50、70 的沖刷深度	133
圖 4-79 尾水深 3D 射流角度 30、50、70 的沖刷深度	134
圖 4-80 尾水深 5D 射流角度 30、50、70 的沖刷深度	134
圖 4-81 射流角度 70 度下 1D、3D、5D 尾水深沖蝕量	135
圖 4-82 射流角度 50 度下 1D、3D、5D 尾水深沖蝕量	136
圖 4-83 射流角度 30 度下 1D、3D、5D 尾水深沖蝕量	136

圖 4-84 角度- $b/H$ 圖 ( $H$ 為射流長), Beltaos (1976) .....	137
圖 4-85 與射流中心點距-流功圖 .....	139
圖 4-86 理論之極限沖刷坑形狀及深度 (縱橫比為 1:0.2) .....	139
圖 4-87 時間-累積沖蝕量 .....	140
圖 4-88 70 度各尾水條件下平均沖蝕率 .....	141
圖 4-89 50 度各尾水條件下平均沖蝕率與時間關係圖 .....	142
圖 4-90 30 度各尾水條件下平均沖蝕率與時間關係圖 .....	142



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

我國西部麓山帶建造許多攔河堰，以供民生需求，但攔河堰興建後，河道坡度改變，使得上游的礫石無法穿越攔河堰，造成上游泥砂淤積，下游護甲層流失且岩盤出露，而大部分的岩盤為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，故下游的岩盤在水流的衝擊下迅速的被沖刷，容易造成堰體基礎的掏刷，進而造成堰體的不穩定；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，影響下游人民生命與財產的安全。

台灣的水工構造物因高差較小，產生的跌水能量有限，不足以對下游之岩石材料產生沖刷，而國內外文獻主要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，對於高差較小的水工構造物的下游沖蝕行為比較不重視，僅考慮無凝聚力之顆粒性材料，並以顆粒性材料之力平衡計算河道沖淤行為，所以本研究於室內進行軟弱岩石河道沖刷坑試驗，對河道軟岩的沖刷行為進行研究探討。

我國屬海島型氣候，多雨的天氣造成水流流況變化大，而使水流沖擊下游岩床角度有所不同，故本研究利用吳禹霆（2012）改良之室內軟弱岩石射流沖刷設備，對我國軟岩河道在不同射流角度和不同尾水深度

下，沖刷坑形成的形狀、深度、大小及時間進行研究，並與理論分析結果做比較。

## 1.2 研究目的

本研究欲利用吳禹霆（2012）可變角度射流沖刷設備，使用取自現地的軟弱岩石試體，於變角度射流及不同尾水深下進行射流沖刷實驗，以模擬現地攔河堰下游沖刷坑的形成，觀察室內實驗沖刷坑形成的深度、大小、形狀，並利用模型相似的方式，將現地條件依一定幾何比例縮小成室內模型，利用其進行多組試驗，用來模擬現地的沖刷情形，以微觀的方式在室內實驗以精密儀器量測沖刷坑深度，藉此預測未來現地沖刷坑形成的情形。

## 1.3 研究流程圖

本研究共分五章，本章介紹研究動機、目地與研究流程圖。第二章文獻回顧，整理評估沖刷坑深度的公式，並使用無因次分析，將室內沖刷模型與現地條件做整合。第三章試驗儀器與試驗規劃，介紹本研究所使用的室內軟弱岩石射流沖刷設備，以及實驗的規劃。第四章實驗成果與討論，展示試驗成果和分析，並預測現地在此條件下的沖刷坑發展情形。第五章結論與建議，歸納本研究之結果並指出研究過程遇到的問題，

提出可以更進一步改良的方向。下圖為研究流程圖：

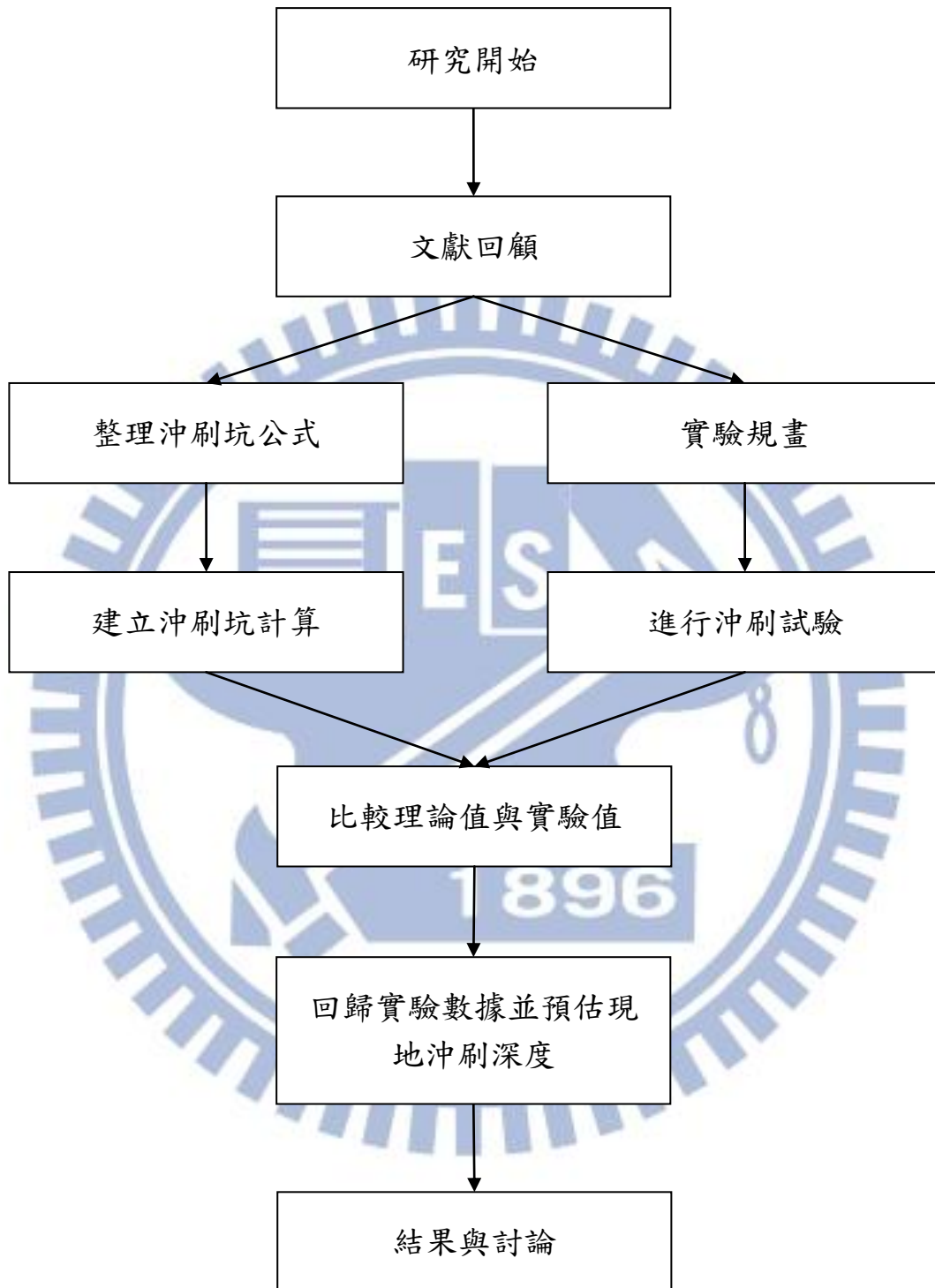


圖 1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

台灣的水工構造物因高差較小，產生的跌水能量有限，一般認為不足以對下游之岩石材料產生沖刷。而國內外文獻主要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，對於高差較小的水工構造物的下游沖蝕行為比較不重視，僅考慮無凝聚力之顆粒性材料，並以顆粒性材料之力平衡計算河道沖淤行為。

本章對於與岩床沖刷坑形成的相關研究文獻，包括岩盤沖蝕機制、跌水沖蝕特性、水工構造物因跌水所產生之沖刷行為描述及深度評估、室內水槽沖蝕試驗等進行回顧。

### 2.1 岩盤沖蝕機制

台灣山區的河道坡降大，湍急的水流使河床表面的沉積物快速帶至下游，不容易形成護甲層，使底床岩盤裸露造成沖蝕。在不同現地條件下，對岩盤造成的沖蝕機制亦不相同，彙整國外對於岩床河道沖蝕機制研究之文獻（Whipple et al., 2000與Bolleart, 2005），主要沖蝕機制可分為磨蝕沖蝕（abrasion）、塊體抽離沖蝕（plucking）、穴蝕沖蝕（cavitation）、及剝皮沖蝕（peeling off）等四種。以下將各沖蝕行為詳細介紹。

#### 2.1.1 磨蝕沖蝕



磨蝕沖蝕是因水或水中的泥、砂、石對河床的作用，使河床逐漸磨耗，磨蝕包括顆粒高角度的彈跳（deformation wear, saltation）及低角度的磨損（cutting wear）。強烈水流使懸浮載砂質或礫石顆粒被帶起、跳動，連同流水逐漸磨蝕岩床表面，一顆粒一顆粒沿著岩石表面磨下碎屑，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。

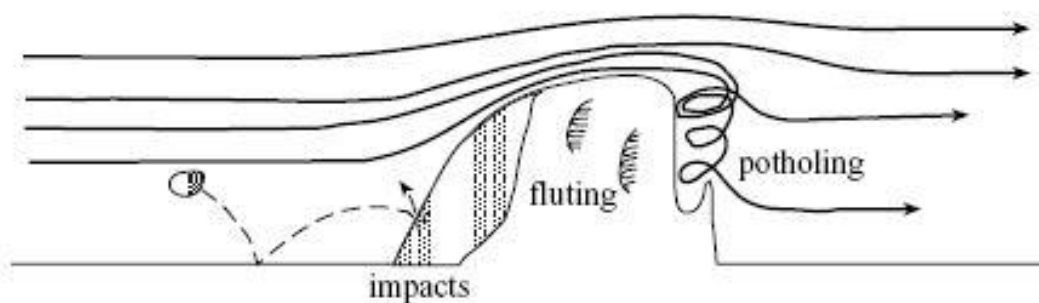


圖 2-1 岩體磨蝕機制示意圖（Whipple et al., 2000）

### 2.1.2 塊體抽離沖蝕

Whipple et al（2000）認為岩盤遭受水流衝擊時，小裂縫經由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，使岩體經過連續撞擊後弱化，再加上物理或化學的風化作用，讓弱面完全擴展連通，導致獨立岩塊最後鬆動、脫離（圖2-2）。圖2-4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，塊體則發生拉拔作用而脫離岩床（圖2-2、2-3）。

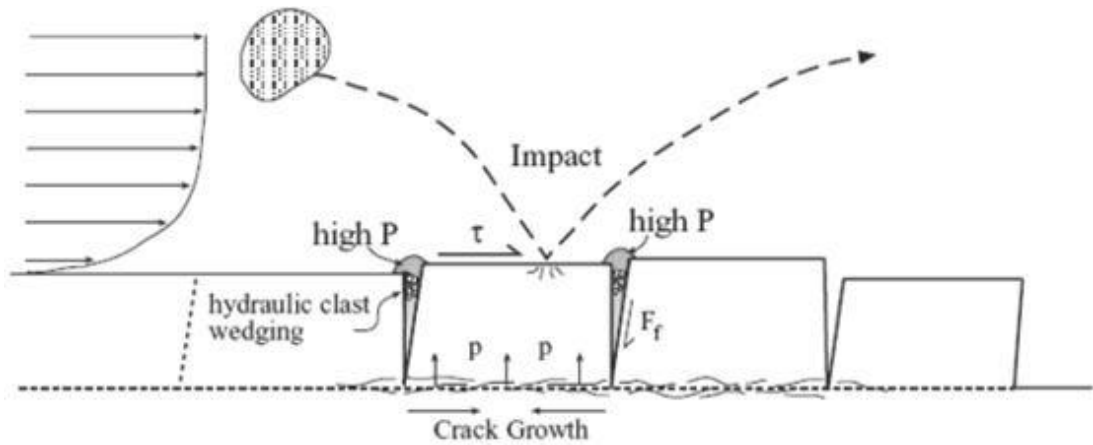


圖 2-2 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖（Whipple et al., 2000）

Annandale（1995）另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2-5）。

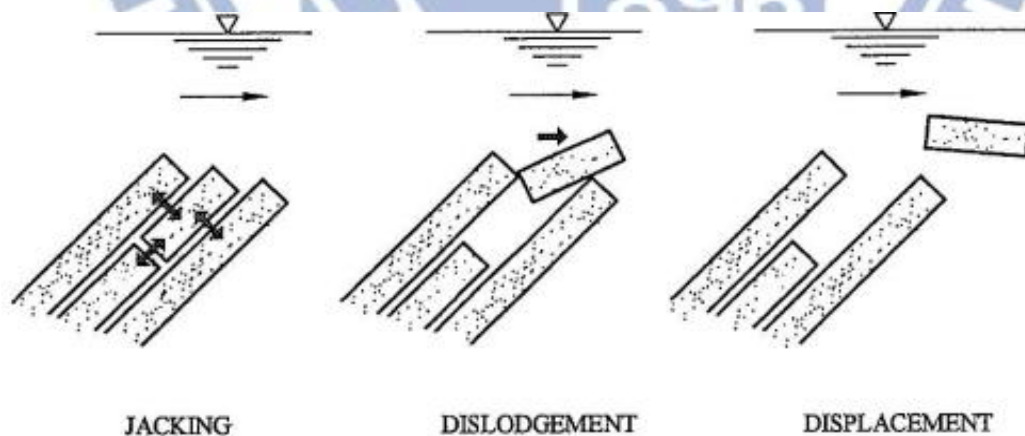


圖 2-3 岩塊抽離示意圖（Annandale,1995）

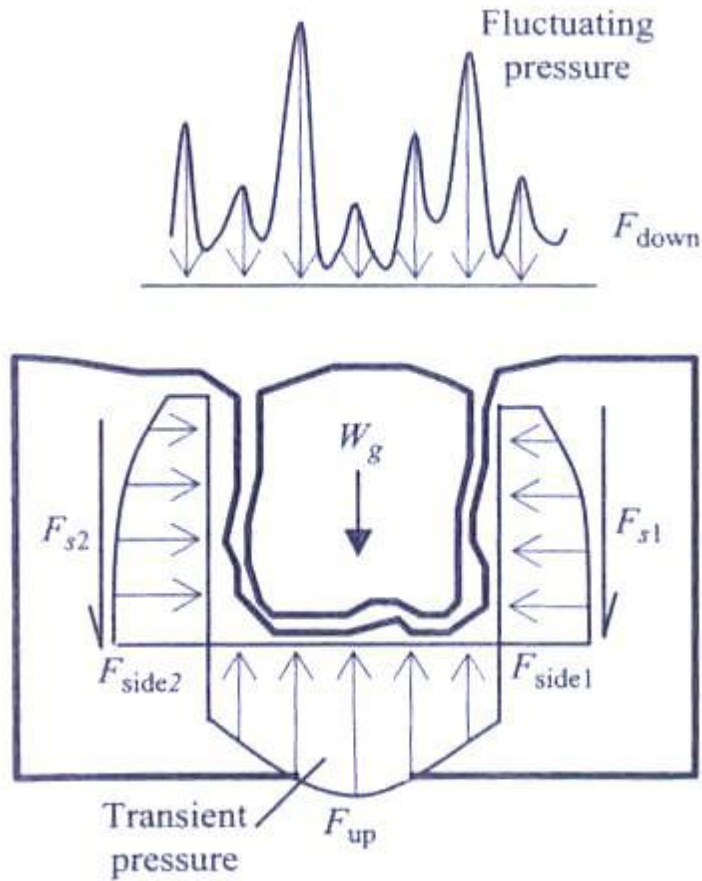


圖 2-4 岩塊攜出作用力示意圖 (Annandale,1995)

$F_{up}$ =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

穴蝕沖蝕主要是水流受到障礙物或階狀落差的影響，不規則的地形使下游側局部區域的流況產生變化，容易造成渦流的現象，而當渦流加劇，穴蝕強化懸浮載沖蝕效應，使局部沖蝕更加顯著，進而形成孔洞狀的沖蝕痕跡。圖2-5為大安溪中頁岩岩床穴蝕破壞，流體中懸浮載的增加

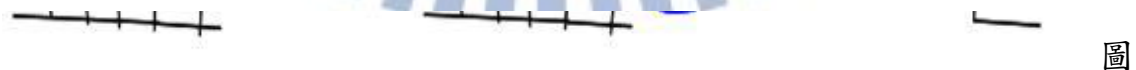
影響穴蝕甚大，加劇渦流對於岩床的侵蝕。



圖 2-5 八掌溪頁岩岩床穴蝕破壞 (羅楚鈞,2011)

#### 2.1.4 剝皮沖蝕

Bolleart (2005) 提出此種沖蝕形式，沖刷過程如圖2-6所示，若地層為水平且節理發達，水流沿河床表面一層層將較小的岩塊帶往下游，會呈現剝皮 (peeling off) 的現象。



2-6 剝皮法 (peeling off) 沖蝕示意圖 (Bolleart, 2005)

跌水沖蝕亦會發生剝皮沖蝕的情形 (圖2-7)，跌水的上游及下游側皆會發生沖蝕，而跌水會使周遭水流不斷循環，讓水平且節理發達的的

岩層，破壞的更加快速。

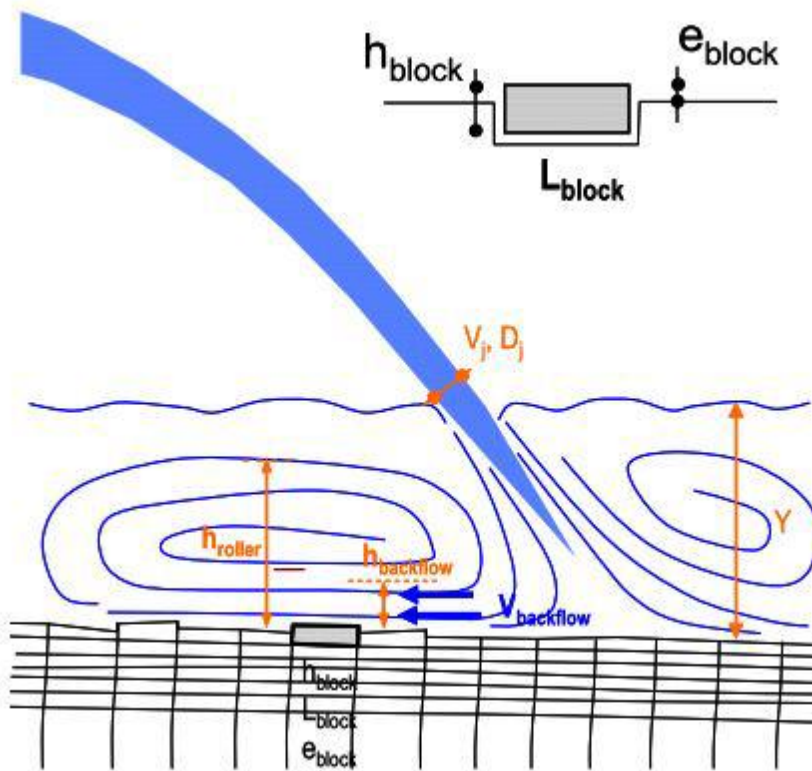


圖 2-7 剝皮法沖蝕發生於跌水沖刷示意圖 (Bolleart, 2005)

### 2.1.5 岩盤沖蝕機制小結

台灣攔河堰下游引致沖刷坑形成的沖蝕型態，根據交通大學（經濟部水利署水利規劃試驗所，2010，Cheng 等人，2010）研究結果認為，主要因地質條件（岩性、節理、層面等）而異。就該計畫的調查，將台灣主要的攔河堰的沖蝕行為分為三種，即磨石沖刷、塊體抽離型沖刷和槽溝下切型。磨蝕沖刷型的特徵為岩盤屬於節理不發達的厚層頁岩，或是強度較弱的砂岩及粉砂岩，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；塊體抽離型沖刷機

制的特徵為岩盤單壓強度強且遠大於節理面強度、岩體節理發達，以義興壩下游為例，河床之岩石強度較強，磨蝕侵蝕不易形成，但因節理發達經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，故塊體抽離破壞為下游沖蝕坑形成的主要機制；槽溝下切型的特徵為岩層的抗沖蝕能力有強有弱，此抗沖蝕能力之差異，使的抗沖蝕能力較弱的岩層，沖刷速率較快，造成如溝槽狀的河道，以後村堰為例，此區岩性主要以厚層砂岩、砂頁岩互層、夾煤層為主，砂岩的抗沖蝕能力較強，其餘岩層的抗沖蝕能力較弱，此抗沖蝕能力之差異，造成此區域產生差異侵蝕，形成如溝槽狀的河道。

本研究以射流形態對在尾水下的岩石進行沖刷試驗，沖蝕模式為磨蝕及剝皮沖刷，模擬現地的沖刷情形，所以瞭解河道沖蝕機制相當重要，若能將現地試體於室內施做沖蝕試驗，控制已知參數（流速、流功、落差、尾水高等）再與試驗成果（沖蝕量、沖蝕率、沖蝕坑形狀）做比較，即可更合理推估出現地岩盤之沖刷情形（沖刷坑形狀、大小、深度）。

## 2.2 跌水沖刷特性

Bollaert (2003) 利用圖2-8來描述水庫溢洪道下方在高速水流沖擊岩盤發生沖刷之過程。將岩盤沖刷分成下列六個步驟：

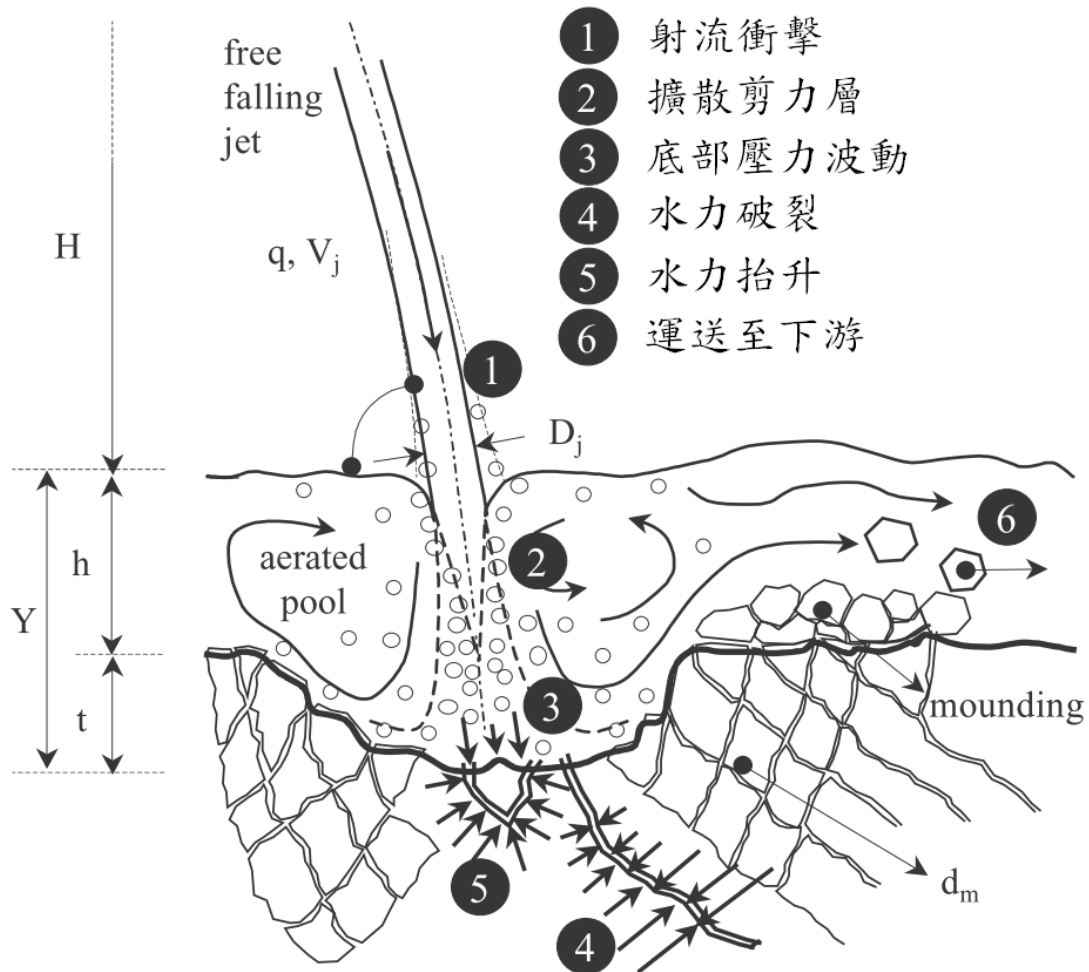


圖 2-8 水流衝擊引致之沖刷機制示意圖(Bollaert, 2003)

- (1) 水流離開原始束制邊界，以自由落體方式向下運動，水流周圍因擴散及磨擦效應而使流速變慢，而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，具有較高落差的壩或堰體，形成沖刷坑後較容易有此種破壞，而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 水工構造物因跌水所產生之沖刷行為描述及深度評估

羅楚鈞（2012）以Annandale（2006）計算流功的方式為主體，再經過修改後所計算的流功表示水流能量，接著計算岩盤的抗沖蝕能力（可由Annandale的公式代入 $K_h$ 計算得到），利用流功的大小與岩盤的抗沖蝕能力兩者的關係，建立計算攔河堰下游沖刷坑的深度與形狀的演算法。當流功大於岩盤抗沖蝕能力表示水流可讓下游岩盤產生沖刷，反之則否，最後因力平衡的關係而穩定，此時的沖刷深度即為極限沖刷深度。羅楚鈞（2012）沖刷坑的深度與形狀的演算程序，如圖2-9所示。



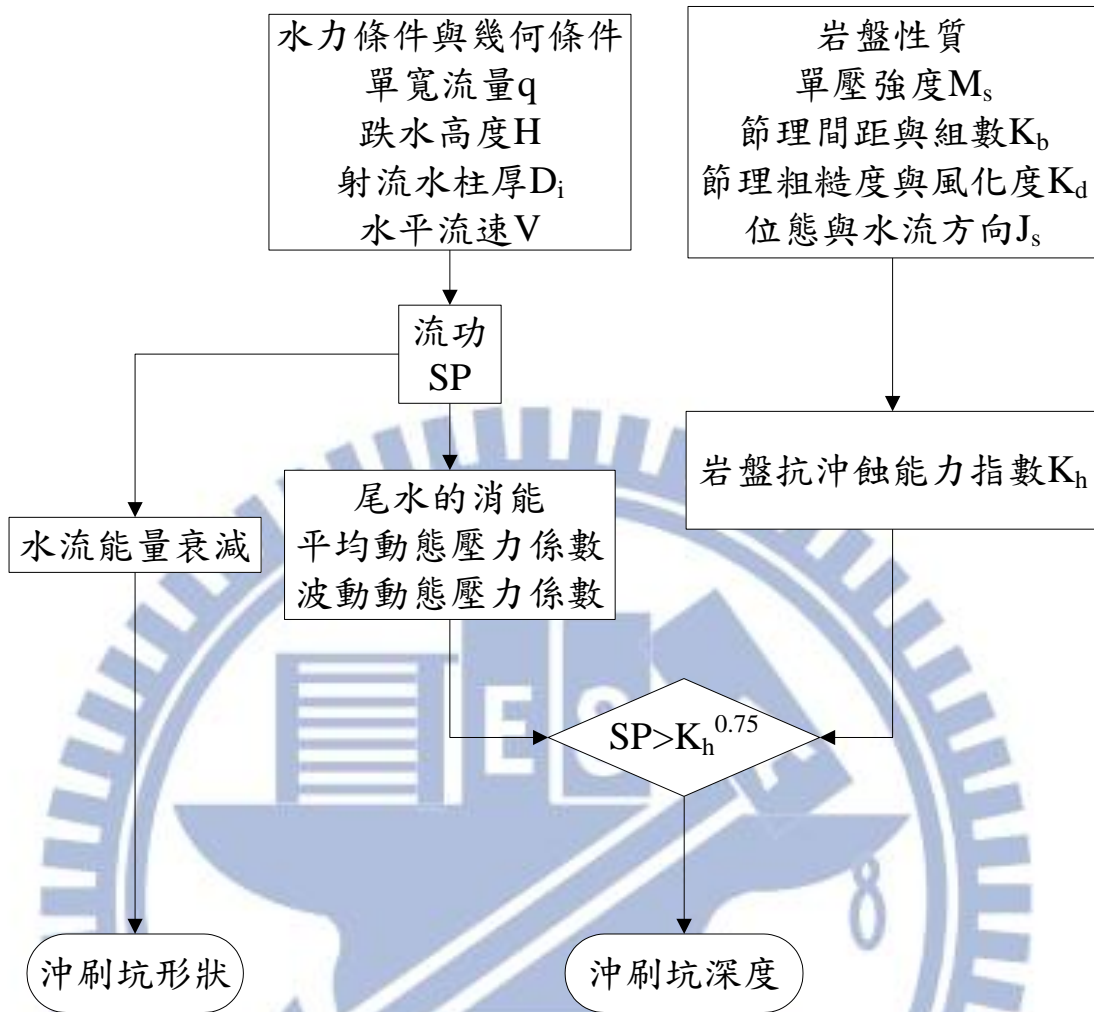


圖 2-9 沖刷流程分析步驟 (羅楚鈞, 2012)

### 2.3.1 射流至水面上之流功計算

水流離開束制邊界，經過跌水距離 $H$ 到達尾水面 (圖2-8)，接著利用位能轉換為動能的觀念，計算水流作用於尾水面的流功，以Annandale (2006) 的hydropower potential之計算公式計算：

$$P_{\text{jet}} = \gamma_w QH \quad (2-1)$$

作用於表面的能量可用流功除以衝擊面積，即為單位面積的流功

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

$P_{\text{jet}}$  = 射流的總流功

$\gamma_w$  = 水流單位重

$Q$  = 總流量

$H$  = 跌水高度

$A$  = 水流衝擊面積

### 2.3.2 流體的擴散效應

Ervine et al. (1997) 提出圓形射流 (circular jets) 擴散架構如圖2-10 所示，自由流體離開了初始之限制邊界後，因流體與周遭介質之間的壓力差，因此流體會向外擴散，導致邊的緣流速變慢，同時因與空氣之摩擦，呈現微小波浪及渦流現象，將部分空氣以氣泡形式帶入流體中，前段中心位置仍部分保持原有之流速稱為核心射流 (core jet)，若擴散長度過長，則使流體與空氣之交互作用，導致水柱邊緣開始以水滴形式向下墜落，此時之長度稱為射流破裂長度 (jet break length)，而任一斷面之流速皆小於初始流速則稱為擴散射流 (developed jet)。

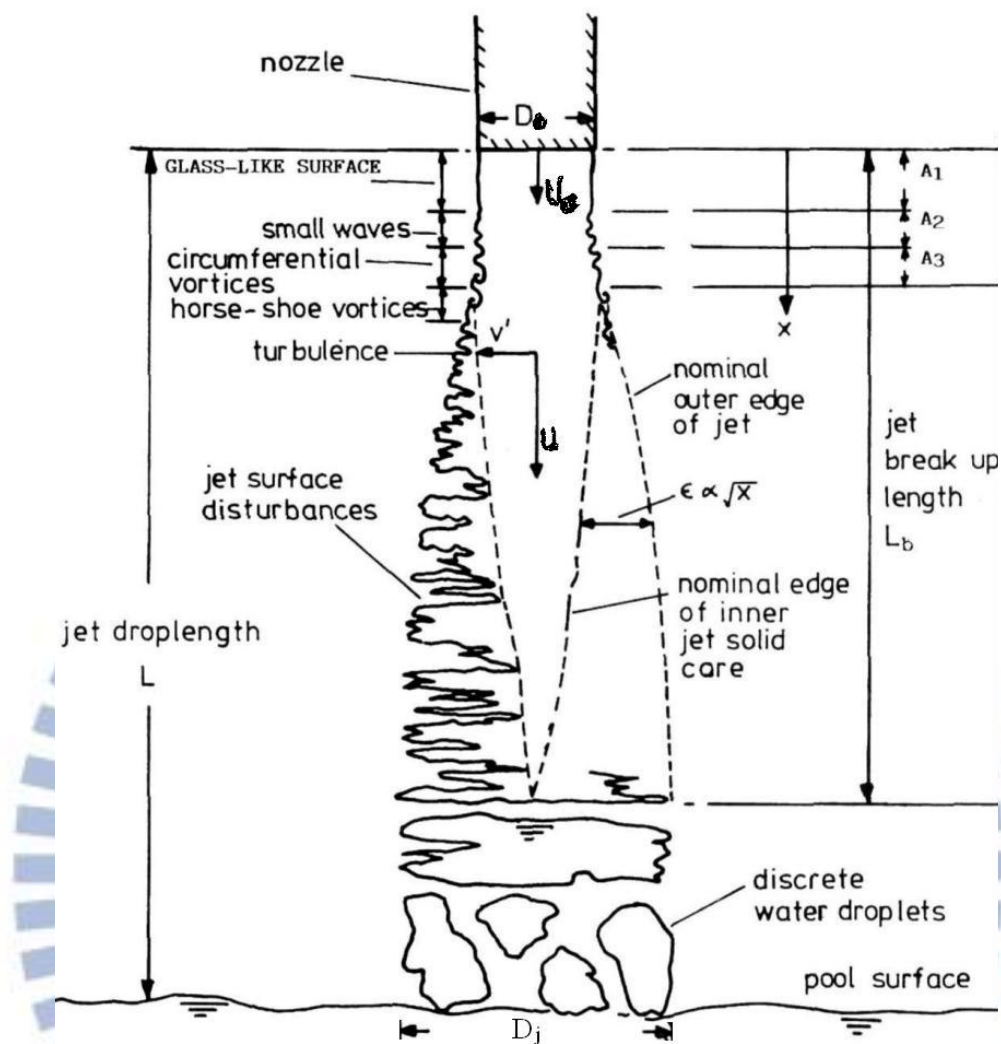


圖2-10 圓形射流擴散架構圖 (Ervin et al., 1997)

圖 2-10 中的擴散相關參數如下：

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

$$D_j = D_i + 2 \times 0.38 T_u L_j \quad (2-4)$$

$L_b$ =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

Castillo (1998) 沿用Ervine之圓形射流成果，考慮溢洪道之束縮效應進行矩形 (Rectangular) 及水舌 (Nappe) 形式應用上之擴充，其擴散架構如圖2-18所示：

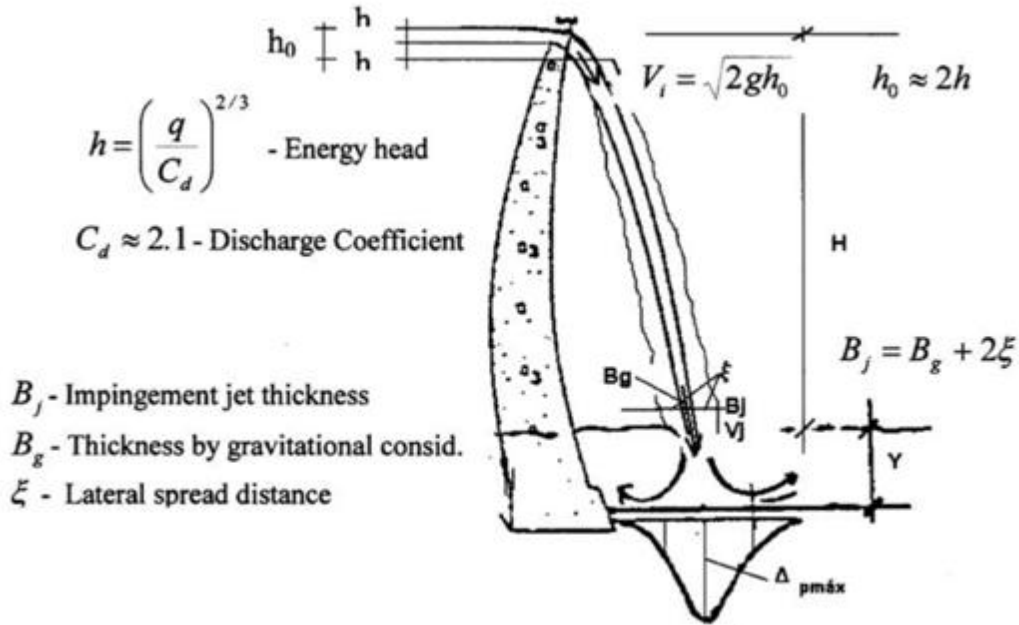


圖 2-11 矩形射流擴散架構圖 (Castillo 2006)

$$L_b = 6q^{0.32} \quad (2-5)$$

將此破裂長度 $L_b$ 代入式中，以求得矩形跌水條件下之任一斷面之跌水寬度 $D_j$ 。

$$D_j = 2 \times \left(\frac{q}{C_d}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2-6)$$

$$D_j = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\phi\sqrt{D_i}(\sqrt{H} - \sqrt{D_i}) \quad (2-7)$$

$D_j$ =水柱厚

$q$ =單寬流量

$C_d$ =流量係數(Discharge Coefficient) $\approx 2.1$

$g$ =重力加速度

$H$ =跌水高度

$\varphi$ =紊流參數 $\doteq 1.07T_u$ ， $T_u=0.03$  (for free over fall)

$D_i$ =射流初始斷面直徑

### 2.3.3 射流流功在尾水中的消能

當射流經過空氣自水面進入靜止之流體後，因貫入速度的影響，使原本的流體向外推移，導致流體的作用面積擴散，邊緣的流速變慢，此時因能量的傳遞引發剪力層 (Shear layer) 和渦流 (Eddy) 的產生，使流功能量逐漸衰減。Castillo (2004) 考慮不同的矩型射流破裂長度比，進行一連串正規化消能池深度與矩型水柱之平均動態壓力係數的試驗，以改變射流軌跡長/射流破裂長度 ( $L/L_b$ ) 比值的方式，觀測壓力計在不同之尾水高度及圓形射流直徑之量測數值，進而得到平均壓力係數 (Mean pressure coefficient  $C_p$ )，結果如圖2-12、表2-1，並提出以下經驗式：

$$C_p = m e^{-n\left(\frac{h}{D_j}\right)} \quad (2-8)$$

$m, n$ =射流破裂長度比參數

$D_j$ =矩型水柱厚度

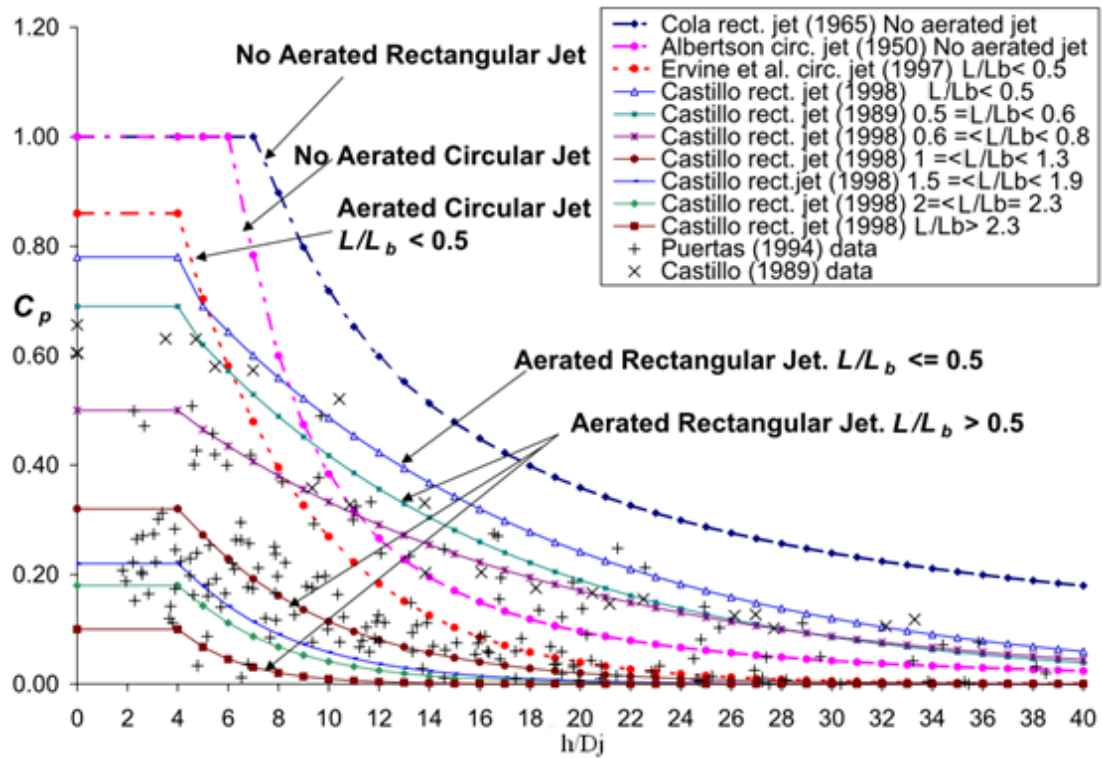


圖2-12 射流平均壓力係數與 $h/D_j$ 關係圖 (Castillo, 2004)

表2-1 射流破裂長度比參數 (Castillo, 2004)

$L/L_b$	m	n	$C_p(h/D_j < 4)$
0.4-0.5	0.98	0.07	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	0.2	0.24
1.8-1.9	0.55	0.25	0.2
2.2-2.3	0.5	0.25	0.18
2.3-3.0	0.5	0.4	0.1

受到剪力層 (Shear layer) 及渦流 (Eddy) 產生之擾流現象影響，使射流所產生之壓力快速變動的情形，稱為波動壓力 (Fluctuating dynamic

pressure)，一般以均方根（RMS）方式估算，波動壓力與理論壓力值（射流中心）的比值稱為波動壓力係數（ $C'_p$ ）。

以下為Bollaert (2002) 評估波動動態壓力與正規化消能池深度的關係式：

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

$$C'_p = a \left(\frac{h}{D_j}\right)^b \quad \text{for } h/D_j > 14 \quad (2-9)$$

Castillo(2006)整理 Castillo(1989)、Puertas(1994)和 Bollaert(2002) 資料成圖 2-13。其中以改變射流長度/射流破裂長度( $L/L_b$ )的比值觀察波動動態壓力係數的變化，如表 2-2 所示。

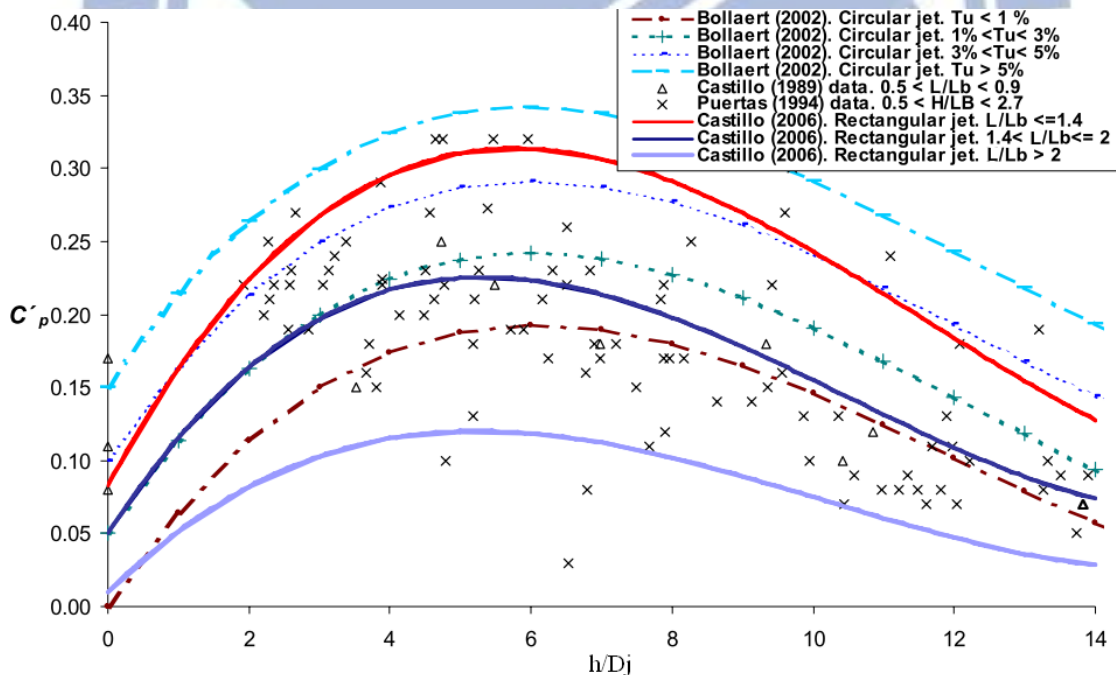


圖 2-13 正規化消能池深度與波動動態壓力係數之函數關係圖 (Bollaert, 2002)

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

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

將式2-2結合平均壓力係數 ( $C_p$ ) 和波動壓力係數 ( $C'_p$ )，在尾水中動態壓力作用於岩盤表面的單位面積流功表示如下式：

$$P_{jet} = (C_p + C'_p) \frac{\gamma_w QH}{A} \quad (2-10)$$

式2-10即為本研究計算流功作用在水面下岩石表面上的單位面積流功，藉由此式可與岩盤抗沖蝕指數  $K_h$  (在2.3.4節做介紹) 比較，評估出軟岩的啟動沖刷門檻流功，並對軟岩沖蝕坑發展情形做各種計算並預測其未來發展模式。

### 2.3.4 岩盤抗沖蝕指數 $K_h$

岩石材料因具有凝聚力及弱面之影響，則使得問題複雜許多，部份學者藉由地質評分之觀念，提出岩盤沖刷之評估經驗方法。Spurr (1985) 由能量之觀點提出估計沖刷坑深度的方法，如圖2-14，他認為任一時間  $t$  時的沖刷深度  $d(t)$ ，乃作用於岩石表面的能量  $E_a$ 、岩石能吸收的阻抗能



量 $E_{TH}$ 、以及岩床反射的能量 $E_x$ 等三種能量參數的函數，可表示如式

(2-11) :

$$d(t) = f(E_a - E_{TH} - E_x) \quad (2-11)$$

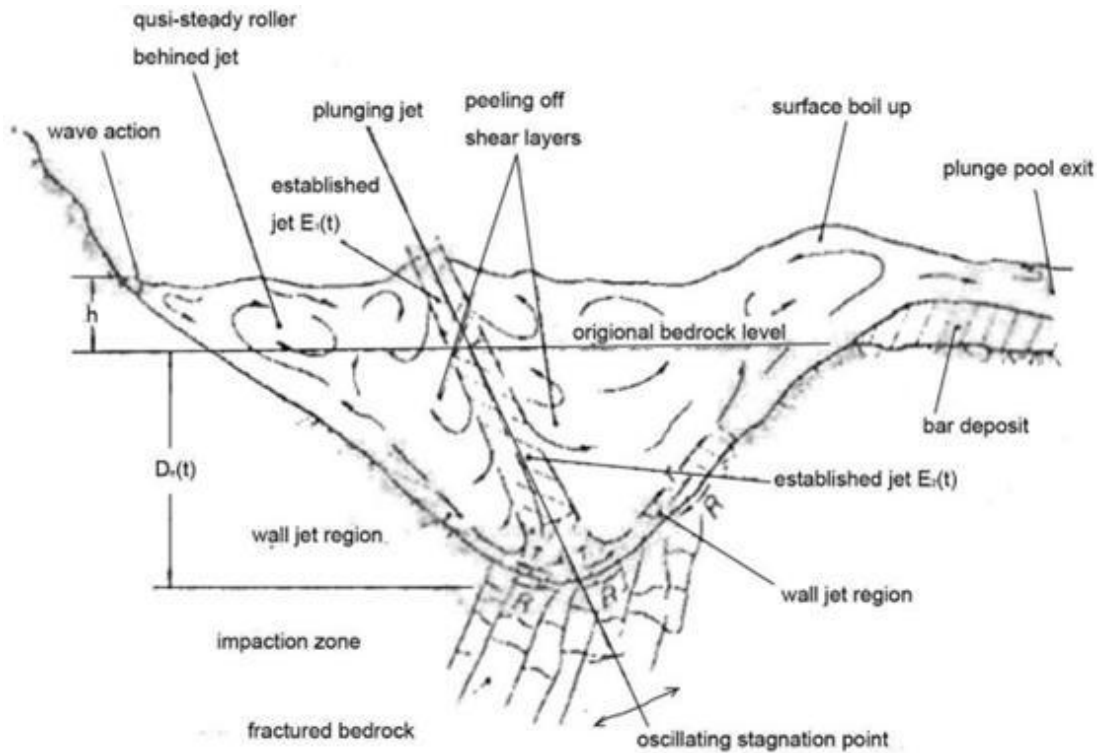


圖 2-14 發展中沖刷坑水流示意圖 (Spurr, 1985)

Annandale(1995, 2006)提出與 Spurr(1985)類似的概念，修正 Kirsten (1982)發展的抗沖蝕指數  $K_h$ ，比較岩石的抗沖蝕能力及水流能量之間的關係，建立一套仿照岩體品質評分系統 (Q-system) 之抗沖蝕指數 (erodibility index)。

$K_h$  包含了主要的岩體力學性質 (無圍壓縮強度，相對密度，塊體大小，剪力強度，岩體形狀以及不連續面方位)，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 (附錄一)。 $K_h$  計算如下 (式 2-12)：

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (2-12)$$

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

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

$$C_r = \frac{8\gamma_s}{27 \times 10^3}$$

$\gamma_s$ =材料單位重

$$K_b = \frac{RQD}{J_n} \quad (2-13)$$

$J_n$ =節理組數參數

$$K_d = \frac{J_r}{J_a} \quad (2-14)$$

$J_r$ =節理面粗糙參數

$J_a$ =節理改變參數

$J_s$ =節理傾向 (順向、逆向)、節理傾角 (0~90)、節理間距比 (1:1、1:2、1:4、1:8)

Annandale (2006) 計算了一、兩百處不同河道之抗沖蝕指數，又依不同河道流況 (如陡降、水躍、河床坡度突然改變、均勻明渠) 依明渠流體力學理論計算各處河道之能量消耗，並記錄現場是否發生沖蝕，將單位面積流功與抗沖蝕能力指數繪出雙對數圖關係，如圖 2-15，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 (式 2-15)：

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

$$P_c = K_h^{0.75} \text{ for } K_h > 0.1 \quad (2-15)$$

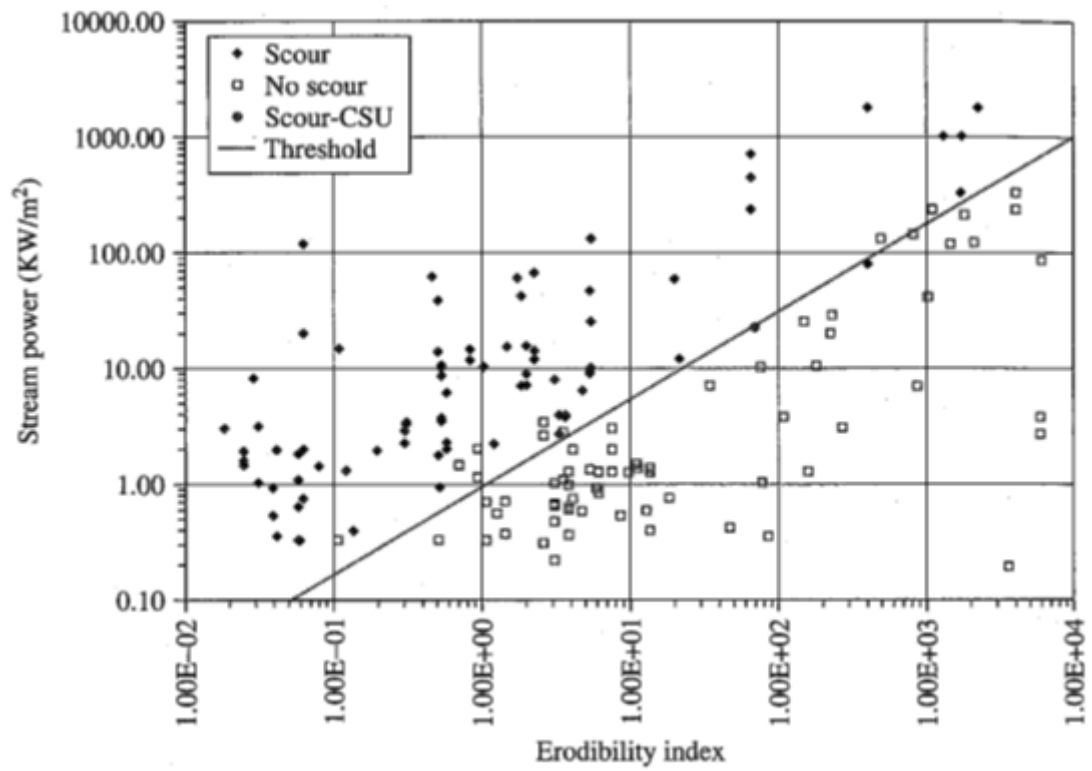


圖 2-15 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖 (Annandale, 1995)

本研究藉尾水中動態壓力作用於岩盤表面的單位面積流功 $P_{jet}$  (式 2-10) 以及抗沖蝕指數 $K_h$ 換算 (式 2-15), 在由圖 2-9 沖刷流程分析步驟 (羅楚鈞, 2012), 及可求出試驗中軟岩極限沖刷深度, 由這些數據下去進行合理的參數設定 (流速、尾水深、跌水高)。

### 2.3.5 力平衡沖刷坑深度公式推導

Liu (2005) 認為可將沖刷坑之發展, 視為水躍發生在逆坡之行為, 利用動量方程式來計算能量損失之影響, 該研究將沖刷坑簡化為圖 2-16, 並以動量平衡的觀念推導沖刷坑深度。因射流壓力分佈的不同, 在沖刷坑下游側會形成一逆坡, Liu (2005) 採用沖刷坑最大深度及原始岩盤面

為邊界，邊界之水壓力為靜態分佈，當射流到達沖刷坑底部後，會隨著逆坡往下游流動，因此在逆坡的入口與出口分別假設斷面 1 與斷面 2，而沿著逆坡方向的動量方程式表示如下：

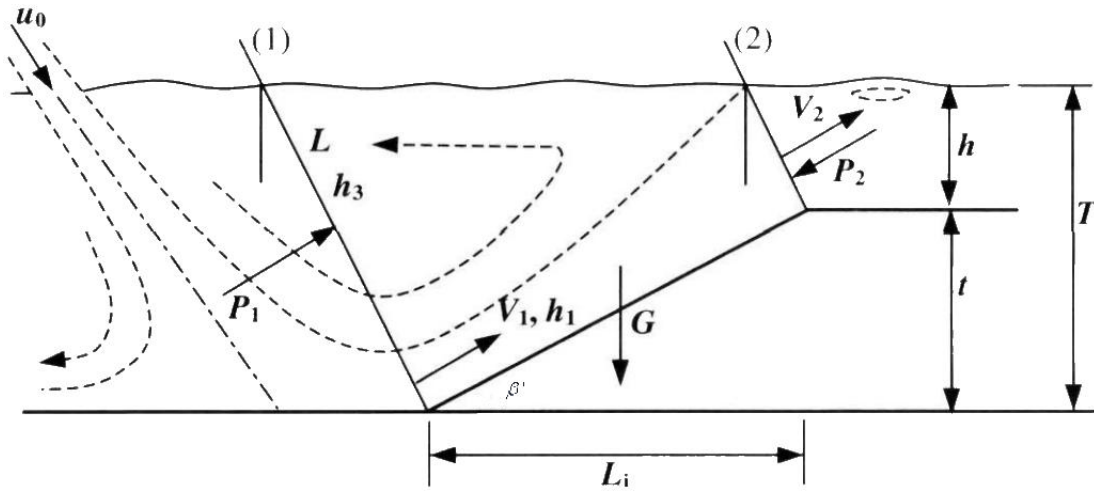


圖 2-16 沖刷坑示意圖 (Liu, 2005)

動量方程式

$$P_1 - P_2 - G \sin \beta' = \frac{\gamma q}{g} (V_2 - V_1) \quad (2-16)$$

$P_1, P_2$  = 分別為斷面 1, 2 的靜水壓力

$G$  = 選取斷面內單位寬度體積之水重

$\beta'$  = 沖刷坑下游測逆坡角度

$V_1, V_2$  = 斷面 1, 2 的平均流速

$h_1, h_2$  = 斷面 1, 2 的水深

$q$  = 單寬流量

$$P_1 = \eta_{P1} \frac{\gamma}{2} h_3^2 \cos \beta' \quad (2-17)$$

$$P_2 = \eta_{P2} \frac{\gamma}{2} h^2 \cos \beta' \quad (2-18)$$

$$G = \gamma A \quad (2-19)$$

$$A = \frac{1}{2} (h_3 + h) \frac{L_j}{\cos \beta'} \quad (2-20)$$

$$L_j = \frac{(\cos \beta')^2}{\sin \beta'} (h_3 - h_2) \quad (2-21)$$

$\eta_{P1}, \eta_{P2}$ =壓力修正因子

A=斷面 1,2 中間的面積

$L_i$ =逆坡的水平距離

$h_3$ =潛沒水深

將靜水壓力的分布與重力代入動能方程式中推導計算後可得下式

$$Y = \sqrt{h^2 + k_t^2 \frac{q\sqrt{H}}{\sqrt{g}}} \quad (2-22)$$

Y=極限沖刷深度

h=尾水高

$k_t$ =受水流的衝擊與底床的抗沖蝕行為影響的水力因子

H=跌水高度

q=單寬流量

g=重力加速度

由上式可知唯一之未定數為  $k_t^2$ ，由其定義可知其為在此特定形狀下之水流能量折減函數。將水流能量折減之部份視為力量由水體傳遞至岩盤之作用外力，其能量折減之比率受到流體擴散程度影響，同時隨著沖刷深度之增加而增大。沖刷深度之增加速度則受岩盤條件影響，以  $k_e$  代表岩盤的沖刷係數，數值愈大則代表岩體抵抗能力愈差， $k_e$  之值藉由三峽大壩之現地觀測資料迴歸而得，其值示如表 2-3，再將所得之  $k_t^2$  代回上式則可據以計算不同流量及跌水高度之沖刷深度。

$$k_t^2 = k_e^2 \left( \frac{T}{h_0 \sin \alpha} \right)^{-m} \quad (2-23)$$

$k_e$ =岩床的沖刷係數

$$m = 0.5 \left( 1 + \frac{h - 5.5D_j \sin \alpha}{8.3D_j \sin \alpha - 5.5D_j \sin \alpha} \right) \quad (2-24)$$

$D_j$ =水柱厚  
 $\alpha$ =入射角

表 2-3 岩盤沖蝕能力抵抗分類表 (Liu, 2005)

分類	岩盤性質	$k_e$	
		範圍	平均值
第一類：高抗沖蝕能力	巨大塊體，無節理，裂隙閉合，無斷層	0.8-2.0	1.4
第二類：中抗沖蝕能力	大塊體，有節理，裂隙開放，有少量填充物	2.0-3.2	2.6
第三類：低抗沖蝕能力	破碎結構，節理發達，裂隙開放，有填充物，有斷層	3.2-4.5	3.9
第四類：極低抗沖蝕能力	破碎結構，節理發達，裂隙開放，有黏土填充物，有斷層	4.5-6.4	5.6

Liu (2005) 以三峽大壩作為計算案例，下列表 2-4、表 2-5、圖 2-17 為其計算結果，結果顯示，當尾水深度越深時總沖刷深度 (T) 也越深，相對的尾水越深消能越大，使沖刷深度 (t) 隨尾水深度增加而減少，最終達到收斂。

表 2-4 計算三峽大壩下游岩盤沖刷深度 (Liu, 2005)

水力參數	$k_e$	總沖刷深度	沖刷深度
$q=174.0 \text{ m}^2/\text{s}$ , $H=97.95 \text{ m}$ , $h=37.05 \text{ m}$ , $D_j=10.93 \text{ m}$ , $\beta'=36.96$	3.2	56.77	19.72
	3.9	63.05	26.00
	4.5	68.50	31.45

表 2-5 在  $k_e=3.9$  的情況下總沖刷深度與沖刷深度之間的差異(Liu, 2005)

尾水深(m)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
總沖刷深度(m)	57.01	60.54	61.68	60.97	66.57	75.08	84.02	93.24	102.66
沖刷深度(m)	37.01	30.54	21.68	10.97	6.57	5.08	4.02	3.24	2.66

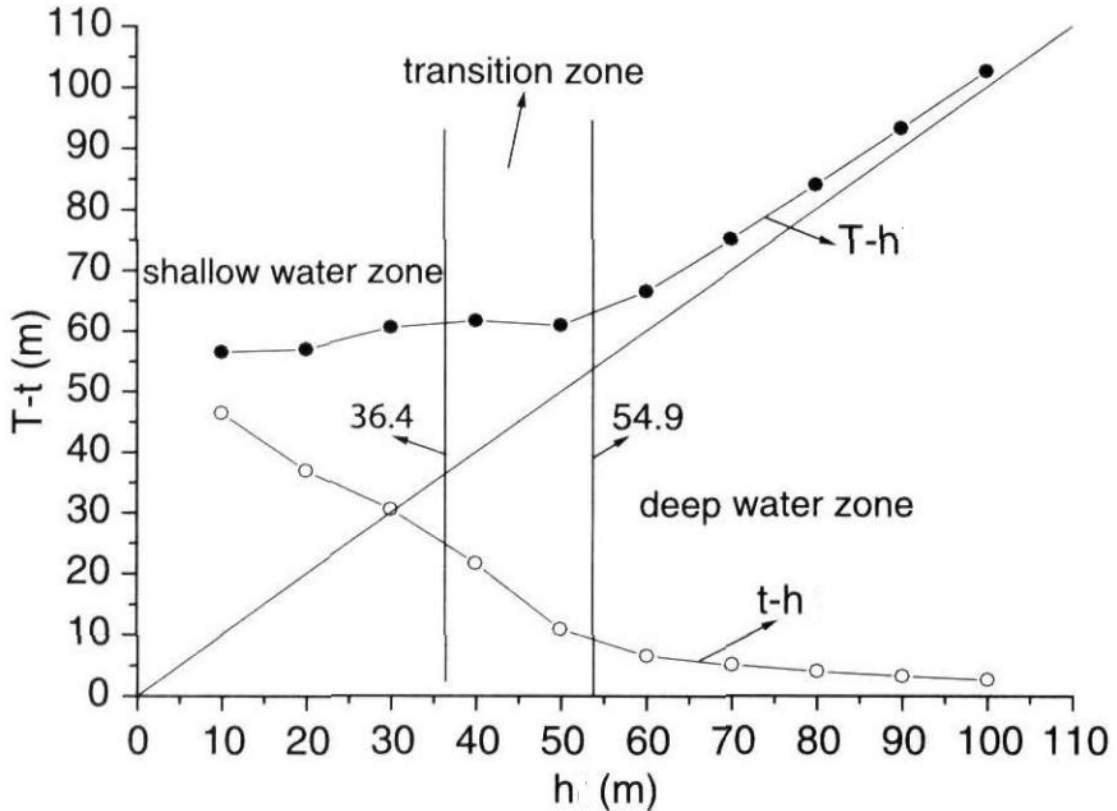


圖 2-17 沖刷深度與尾水深之間的關係 (Liu, 2005)

$k_e$  為 Liu (2005) 用案例所歸納出來，其中的案例皆以硬岩為主，並不適用於本研究的軟岩上，由敘述性的岩體描述決定  $k_e$ ，其值將因人而異，羅楚鈞 (2011) 採用可客觀決定的  $K_h$  函數  $f(K_h)$  取代  $k_e$ ，如下式

$$k_e^2 = f(K_h) \quad (2-25)$$

$$Y = \sqrt{h + f(K_h) \left( \frac{Y}{D_j \sin \alpha} \right)^{-0.5} \frac{q\sqrt{H}}{\sqrt{g}}} \quad (2-26)$$

當  $K_h$  越大表示岩體越不易被沖刷，因此  $f(K_h)$  越小才反映出沖刷量

越少；相對的，當  $K_h$  越小表示岩體越容易被沖刷，因此  $f(K_h)$  越大才能反映出沖刷量越大。根據此趨勢， $f(K_h)$  的通式可表示為：

$$k_e^2 = f(K_h) = a(K_h)^{-b} \quad (2-27)$$

$a$ ， $b$  皆為常數，可由案例標定得到。

羅楚鈞（2011）根據表2-3的分類描述，將四種岩性以  $K_h$  表示，每一類型的岩性分別代表某一區間的  $K_h$ ，接著回歸出  $K_h$  與  $k_e$  之間的關係（圖 2-18、式2-28）：

$$k_e^2 = f(K_h) = 70000(K_h)^{-2} \quad (4-1)$$

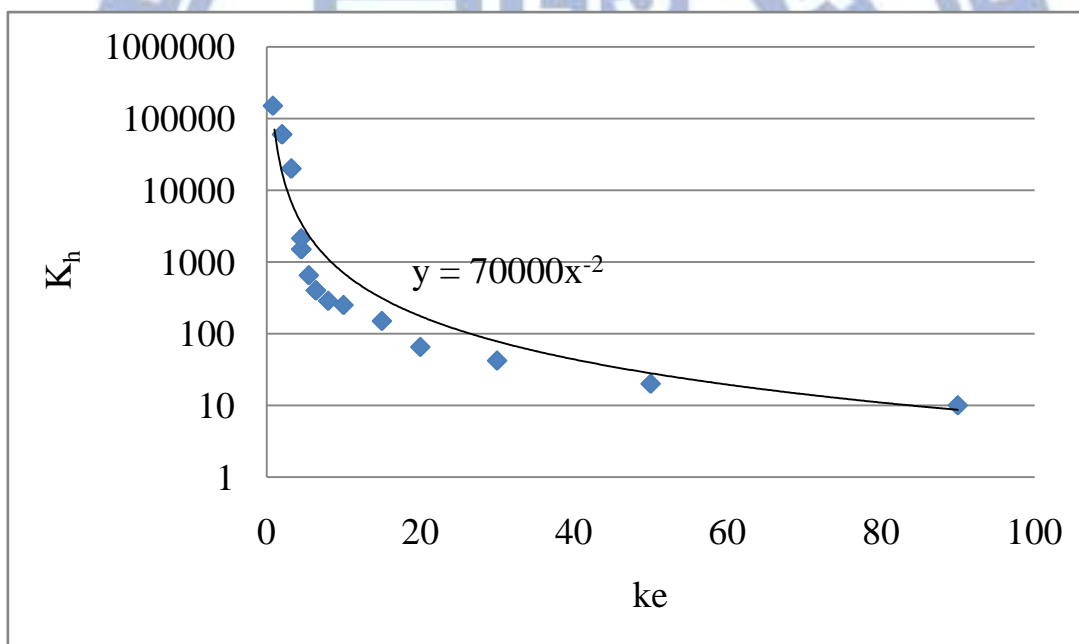


圖 2-18  $K_h$ - $k_e$  關係圖， $K_h$  以 log 表示（羅楚鈞, 2011）

羅楚鈞（2011）得到  $K_h$  與  $k_e$  之間的關係後，將 7 個攔河堰下游岩盤的  $K_h$  轉換成  $k_e$ ，接著代入 Liu(2005) 的公式中計算沖刷深度，如表 2-6，並與前一節使用 Annandale (2006) 方法計算的沖刷深度進行比較，如表



2-7。

表 2-6 沖刷參數與沖刷深度 (Liu)

位置	$K_h$	$k_e$	h (m)	$D_j$ (m)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	q ( $m^2/s$ )	H (m)	T (m)	t (m)
後村堰	20	40.29	1.5	1	37.6	10	0.5	24	22.5
	400	10.32	1.5	1	37.6	10	0.5	8	6.5
義興壩	2130	4.83	10	3	48.5	56.7	8	22	12
石岡壩	42	28.76	3	1	83.2	1	4	13	10
	65	23.58	3	1	83.2	1	4	11	8
觸口堰	286	12.02	4	2	34.4	34.8	1	20	16

表 2-7 沖刷參數與沖刷深度 (Annandale)

位置	T (m)	t (m)	h (m)	$D_j$ (m)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	q ( $m^2/s$ )	H (m)	$K_h$	f( $K_h$ )
後村堰	20	18.5	1.5	1	37.6	10	0.5	20	2697.74
	0	0	1.5	1	37.6	10	0.5	400	26.73
義興壩	30	20	10	3	48.5	56.7	8	2130	64.23
石岡壩	12	9	3	1	83.2	1	4	42	783.95
	9	6	3	1	83.2	1	4	65	381.89
觸口堰	18	14	4	2	34.4	34.8	1	286	277.24

由表 2-8 的比較結果發現，兩者之間評估的攔河堰下游岩盤沖刷深度皆相當接近。因此透過  $K_h$  與  $k_e$  的轉換是可計算沖刷坑深度。

表 2-8 Annandale 與 Liu 沖刷深度比較

位置	岩性	t (m)		實際
		Annandale	Liu	
後村堰	砂頁岩互層	18.5	22.5	<10
	厚層砂岩	0	6.5	
義興壩	極厚層砂岩	20	12	17
石岡壩	層狀砂岩	9	10	5
	厚層頁岩	6	8	
觸口堰	泥質粉砂岩	14	16	<10

#### 2.4 沖刷坑形狀評估

水流衝擊到岩盤後會向四周擴散，隨著水流的擴散，作用在岩盤表面的壓力也隨之降低。一般認為，影響射流作用面積擴散及能量消滅之主要控制因素為尾水高度與射流原始直徑或厚度之比值 ( $h/D_j$ )，Ervin et al. (1998) 及 Melo (2006) 藉由壓力計量測在不同之尾水高度及圓形射流直徑之試驗成果，利用中心位置之壓力值與理論壓力值進行比較，而得到平均壓力係數 (Mean pressure coefficient  $C_p$ )，其結果如圖 2-19 所示。當  $h/D_j$  小於 4 時，則中心點仍可維持核心射流狀態。當  $h/D_j$  大於 4~6 時，則射流全部呈現擴散射流狀態，且中心點之壓力值隨水深增加而減少，當比值大於 20 時大部份之能量並未傳遞至底部。

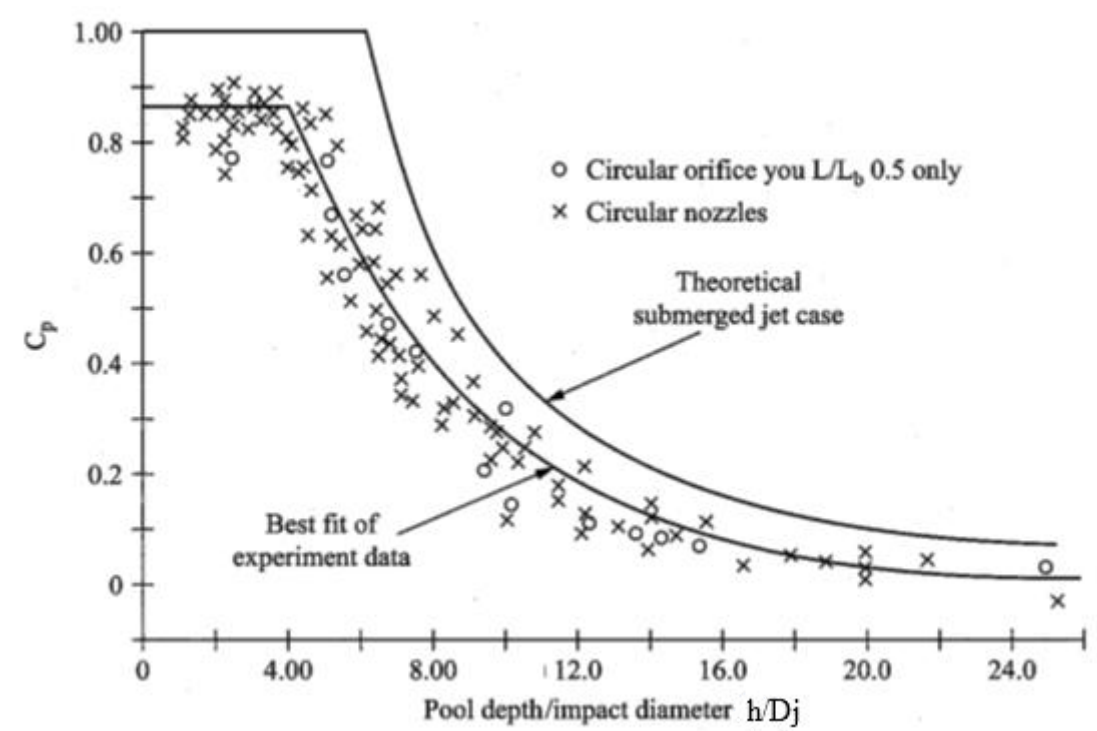


圖 2-19 圓形射流平均壓力係數與  $h/D_j$  關係圖 (Bollaert, 2003)

Melo (2006) 建立一水槽試驗，量測水流擴散後作用於平板上壓力的變化（實驗範圍侷限於，尾水深/水柱厚=8.42~18.5 之間），研究結果顯示  $x/h$ （衝擊點距離/尾水深）達到 0.4 即無動態水壓作用於平板表面，如圖 2-19，由此判斷水流影響範圍為 0.4 倍的尾水深。評估方式首先是利用作用於岩盤面的射流流功，接觸岩盤後流功隨著圖 2-19 的衰減曲線衰減，藉由各點的  $C_p$  值（表 2-9），如此可得到擴散後各點的流功，接著與岩盤沖刷啟動門檻比較，得到各點深度，即為沖刷坑形狀。

表 2-9 平均波動壓力與正規化值 x/h 關係表

x/h	-0.4	-0.35	-0.3	-0.25	-0.2	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
C <sub>p</sub>	0	0.01	0.04	0.09	0.18	0.36	0.62	0.9	1	0.9	0.62	0.36	0.18	0.09	0.04	0.01	0

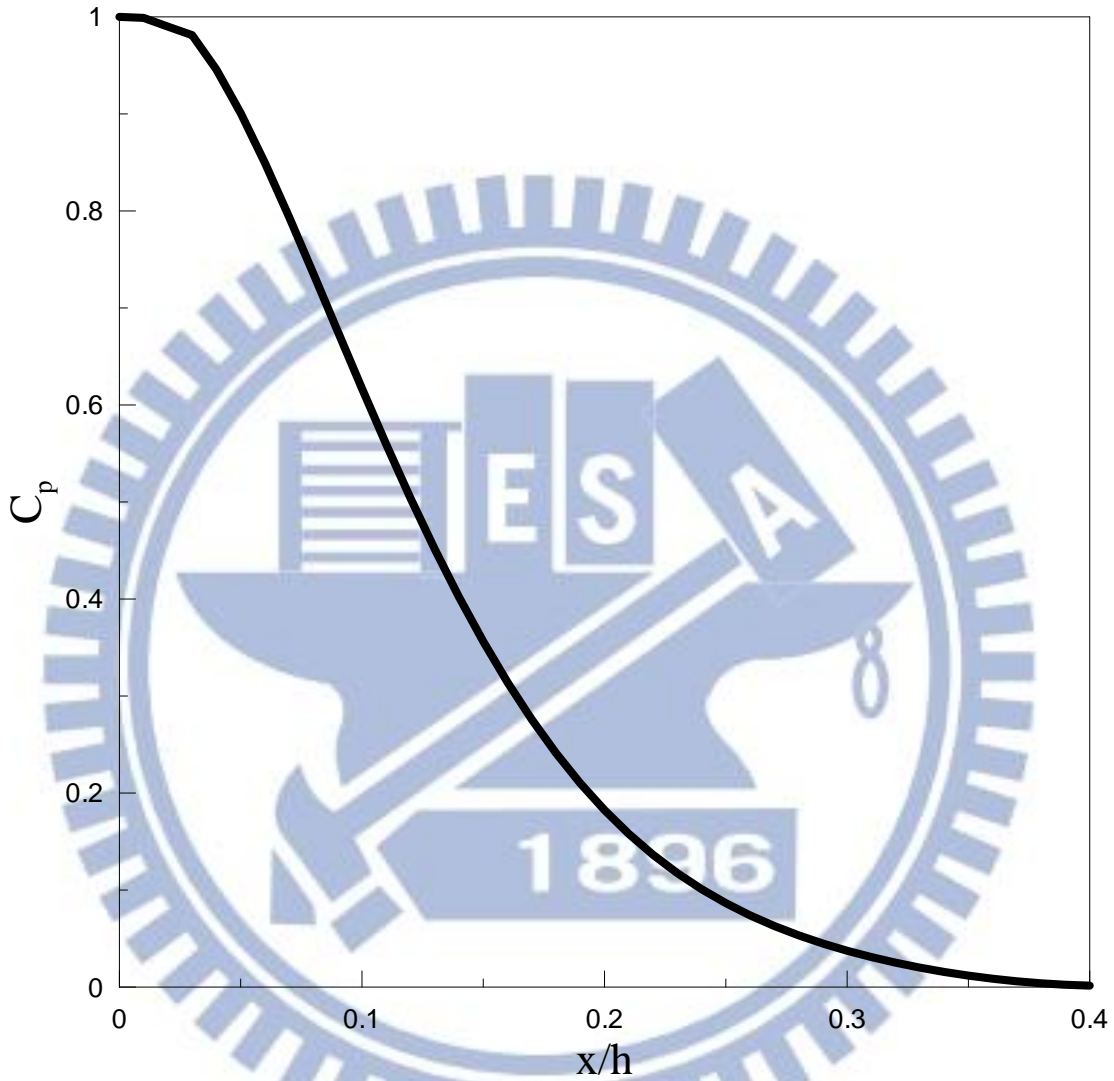


圖 2-20 無因次動態壓力 (修改自 Melo, 2006)

Beltaos (1976) 利用尾水高度、流體寬度及水流射入角度之關係，計算跌水之能量損失，從式2-28、圖2-21和圖2-22，即可計算出在不同角度下，距離射流中心點各個位置的流功大小。

$$\frac{P_w}{P_{jet}} = e^{-0.693\eta^2} \quad (2-28)$$

$P_w$ =擴散後之流功

$\eta = X_1/b$  (與射流中心點距/射流角度參數, 圖 2-21 )

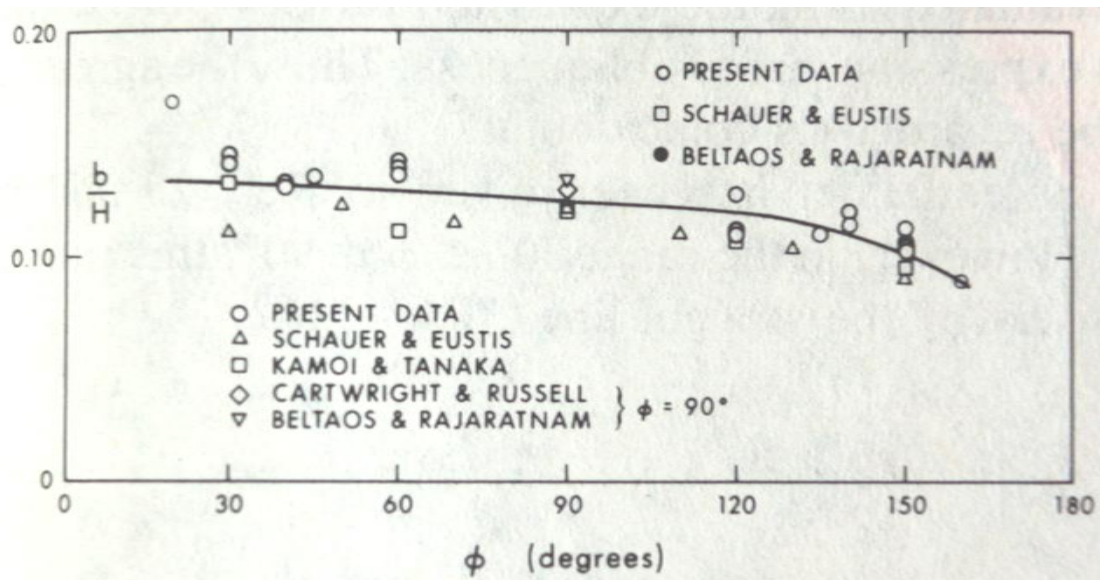


圖 2-21 角度-  $b/H$  圖 ( $H$  為射流長), Beltaos (1976)

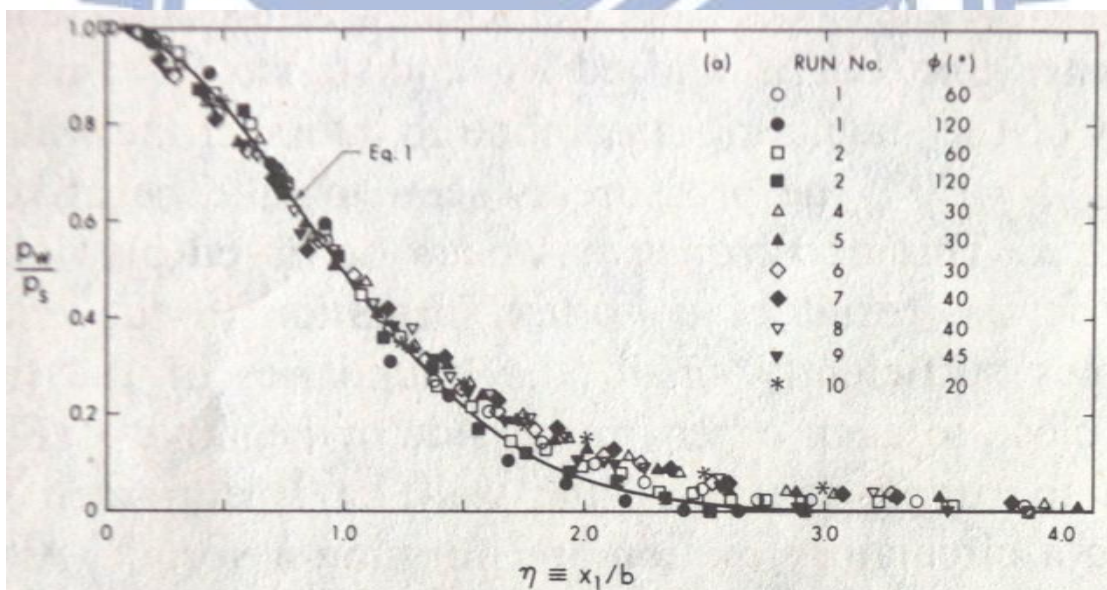


圖 2-22 擴散流功/中心點流功- $\eta$  圖 (Beltaos, 1976)

## 2.4 水工模型相似度及無因次分析

根據水工模型試驗參考手冊（經濟部水利署水利規劃試驗所, 2011）

所述，水工模型試驗因場地設備等條件的限制，設計製作時必須縮小原型，且必須能反應原型中各種因素影響下發生的物理力學現象，故產生模型和原型的相似性問題；相似性主要分為幾何相似、運動相似和動力相似。但是由於流體力學、河流動力學等理論的適用性及實際工程問題的複雜性，水工模型試驗必須建立在相似原理的模型試驗方法上，才能有應用與推廣的基礎。然而模型往往無法獲得完全的相似，還需要採用近似模擬的方法以符合工程應用上的需求。以下針對模型相似律基本原理與推導進行說明。

#### 2.4.1 模型相似性原理

在原型與模型的兩個力學系統相似時，則能用相同的數學物理方程來進行描述，並同時滿足以下三個相似條件，即幾何相似、運動相似和動力相似，以下分別說明。

##### 2.4.1.1 幾何相似

原型與模型各對應部份之長度比值均相等，稱為幾何性相似，例如長度之相似表示如下（模型及原型之值量各以 $m$ 及 $p$ 作為下標符號代表之，而比尺則以 $\lambda$ 符號代表之）：

$$\text{長度比尺} = \lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (2-29)$$

式中， $\lambda_L$  為模型與原型之長度比尺； $L_p$  為原型之長度； $L_m$  為模型之長度。面積與體積比尺分別表示如下：

$$\text{面積比尺} = \lambda_A = \frac{L_m^2}{L_p^2} = \lambda_L^2 \quad (2-30)$$

$$\text{體積比尺} = \lambda_V = \frac{L_m^3}{L_p^3} = \lambda_L^3 \quad (2-31)$$

#### 2.4.1.2 運動相似

考量模型與原型運動情形之相似時，在幾何相似之原型及模型中，其各相對應點同一方向速度之比值需相等，並且流體各相對應點之運動路徑相似時，則此兩運動即符合運動性相似。在運動性相似中，時間及長度之觀念為控制之因素，在模型試驗中運動性相似所包括之項目為線速度、線加速度、流量，角速度及角加速度。加入時間比尺考量，運動相似在模型及原型之比尺可以下列各式表示之。

$$\text{時間比尺} = \lambda_T = \frac{T_m}{T_p} \quad (2-32)$$

$$\text{線速度比尺} = \lambda_v = \frac{V_m}{V_p} \quad (2-33)$$

$$\text{線加速度比尺} = \lambda_a = \frac{a_m}{a_p} \quad (2-34)$$

$$\text{流量比尺} = \lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} \quad (2-35)$$

角速度可以每單位時間之弧度表之，並且等於切線速度除以切點曲線之半徑， $r_p$  為原型之半徑； $r_m$  為模型之半徑，故可表示如次：

$$\text{角速度比尺} = \lambda_{\omega} = \frac{\omega_m}{\omega_p} = \frac{v_m/r_m}{v_p/r_p} = \frac{\lambda_L/\lambda_T}{\lambda_L} = \frac{1}{\lambda_T} \quad (2-36)$$

轉速以每分若干轉計，所以  $N$  可以角速度量之，其比值表示如下：

$$\text{轉速比尺} = \lambda_N = \frac{N_m}{N_p} = \frac{1}{\lambda_T} \quad (2-37)$$

角加速度  $\alpha$  以每單位時間平方之弧度表示之如下：

$$\text{角加速度比尺} = \lambda_\alpha = \frac{\alpha_m}{\alpha_p} = \frac{1}{\lambda_T^2} \quad (2-38)$$

### 2.4.1.3 動力相似

動力相似即為質量動力及受外力之間的相似力學行為，在幾何性相似及運動性相似條件下之模型與原型，動力性相似為流體各相對應點之應力與慣性力之比值均相等，此比值可由牛頓運動第二定律推演之。

$$F_i = Ma \quad (2-39)$$

式中， $F_i$  為慣性力（對應力之向量總和 =  $F_p + F_G + F_V + F_T + F_E$ ）， $M$  為質量， $a$  為加速度， $F_p$  為與運動有關或因運動而產生之壓力， $F_G$  為重力作用於液體之力， $F_V$  為液體黏滯力， $F_T$  為液體表面張力； $F_E$  液體因彈性而產生之力。

### 2.4.2 模型相似律

水工模型試驗如要使模型中各種參數均與原型相等殊為困難，試驗時應選最重要之參數的來決定模型的相似，其他不重要者可以忽略不計。如水工試驗探討以重力主導之水理現象時，除重力外，其他各項均略去，則可以用福祿定律來作為模型之相似律。同理，在黏滯力、表面張力、彈性力或壓力主導水理時，可分別以雷諾定律、韋伯定律、馬赫定律及歐拉定律作為模型之相似律，下表2-10簡介各定律。



表 2-10 無因次參數與表物理意義

參數	物理意義
福祿數( $N_F$ )	慣性力/重力
雷諾數( $N_R$ )	慣性力/黏滯力
韋伯數( $N_W$ )	慣性力/表面張力
馬赫數( $N_M$ )	慣性力/壓縮力
歐拉數( $N_E$ )	慣性力/壓力
理查生數( $N_{Ri}$ )	慣性力/浮力

無因次分析主要為能客觀反映關係式，避免了由於所選擇單位的不同而引起的數量變化，本節針對因次及無因次分析進行說明，並舉例說明無因次分析之應用。

因次和單位是表徵物理量性質的兩個相關的概念，因次可以分為兩類：基本因次與導出因次。基本因次具有獨立性，即任何一個基本因次都不能由其他的基本因次推導得到；而導出的因次則可以由其他基本因次推導出來，一旦基本因次確定後，其他因次都可以用基本因次的冪指數乘積形式表達出來。

對於自然界中的一切物理現象，原則上都可以採用一定的物理方程式表達，該物理方程式可以是單項式或多項式，且同一方程式各項可以

由不同物理量組成，不同因次的項顯然不能進行加減等代數運算。因此，任一物理方程中的各個項的因次必須相同。如果一個物理方程經過變化後，方程式中各項都變為無因次數，則該物理方程稱為無因次方程。顯然，無因次方程也是齊次方程，且無因次方程所表達的物理含義與原方程相同。由於無因次量與所用單位制無關，所以無因次方程也與所選用的單位制無關，這在實際問題的運算中甚為簡便。

白金漢 (E. Buckingham, 1915) 提出的因次分析方法，即著名的白金漢定理是當前最為常用的分析方法。由於白金漢定理採用一系列常數  $\pi$  來表示方程中的這些無因次數，因此亦稱為  $\pi$  定理。 $\pi$  定理可以表述如下：如果任意一個物理過程涉及到  $m$  個物理量，若取此  $m$  個物理量中的  $m_0$  個作為基本因次，則此物理過程可由這  $m$  個物理量組成的  $m-m_0$  個無因次量的函數關係式來描述，這  $m-m_0$  個無因次量用  $\pi_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, m-m_0$ ) 來表達。

假設某個物理過程中含有  $m$  個物理量，在這  $m$  個物理量中有一個因變量、 $m-1$  個自變量，假設  $N_1$  為因變量，其他物理量為自變量。由於在此物理過程中  $m$  個物理量所組成的函數關係式尚且不知道，但可以用一個簡單的函數關係表達式來代替。如：

$$N_1 = f(N_2, N_3, N_4, \dots, N_m) \quad (2-40)$$

若取  $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  這三個基本物理量的因次為基本因次，則各物理量

均可由這三個基本物理量的因次表示出來：

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \pi_1 N_2^{x_1} N_3^{y_1} N_4^{z_1} \\ N_2 &= \pi_2 N_2^{x_2} N_3^{y_2} N_4^{z_2} \\ N_3 &= \pi_3 N_2^{x_3} N_3^{y_3} N_4^{z_3} \\ N_4 &= \pi_4 N_2^{x_4} N_3^{y_4} N_4^{z_4} \\ &\vdots \\ N_m &= \pi_m N_2^{x_m} N_3^{y_m} N_4^{z_m} \end{aligned} \right\} \quad (2-41)$$

根據因次和諧原理，上式中的 $x_2=1$ 、 $y_2=0$ 、 $z_2=0$ ，所以無因次數 $\pi_2=1$ ；

同理 $\pi_3=1$ 、 $\pi_4=1$ 。由以上分析可知，所選定基本物理量的無因次常數 $\pi_2$ 、 $\pi_3$ 、 $\pi_4$ 均為1。

同樣，根據因次和諧原理，即等式兩邊的基本因次的係數對應相等，所有指數 $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$ ，從而可確定 $\pi_i$ 即：

$$\pi_1 = \frac{N_i}{N_2^{x_i} N_3^{y_i} N_4^{z_i}}$$

則方程式(2.2-1)用無因次方程表達為：

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_m)$$

由於 $\pi_2$ 、 $\pi_3$ 、 $\pi_4$ 均為1，故上式又可表示為：

$$\pi_1 = f(1, 1, 1, \pi_5, \dots, N_m)$$

由於常數1不需寫入方程式中，如此原來由m個物理量組成的物理方程式，轉化為僅含有m-3個無因次量的無因次方程式，即：

$$\pi_1 = f(\pi_5, \pi_6, \pi_7, \dots, N_m) \quad (2-42)$$

利用  $\pi$  定理，可以推求出一些物理過程的函數關係式。但需要注意的是，並非所有的物理過程都能利用  $\pi$  定理來確定物理過程的函數表達式。使用者只有在理論分析或試驗的基礎上，對所要研究的物理過程有所了解，方能適當的決定出影響該物理過程的主要物理量，才能得到正確的結果。

## 2.5 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。

### 2.5.1 現地取樣直接沖刷試驗

Nakato T. (2002) 針對Mississippi River 流域的頁岩進行室內沖蝕試驗，室內水槽長1.47 m、寬0.76 m、深0.97 m，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 $55^\circ$ （圖2-23），與試體垂直距離約為3 cm，試體為Mississippi River 流域地下3.6 m 至8.2 m 的頁岩，每塊直徑0.61 m、厚0.25 m，從低流速約1.52 m/s 開始進行試驗，觀察沖蝕量後分段增加流速至3 m/s，實驗進行

時間超過21小時。

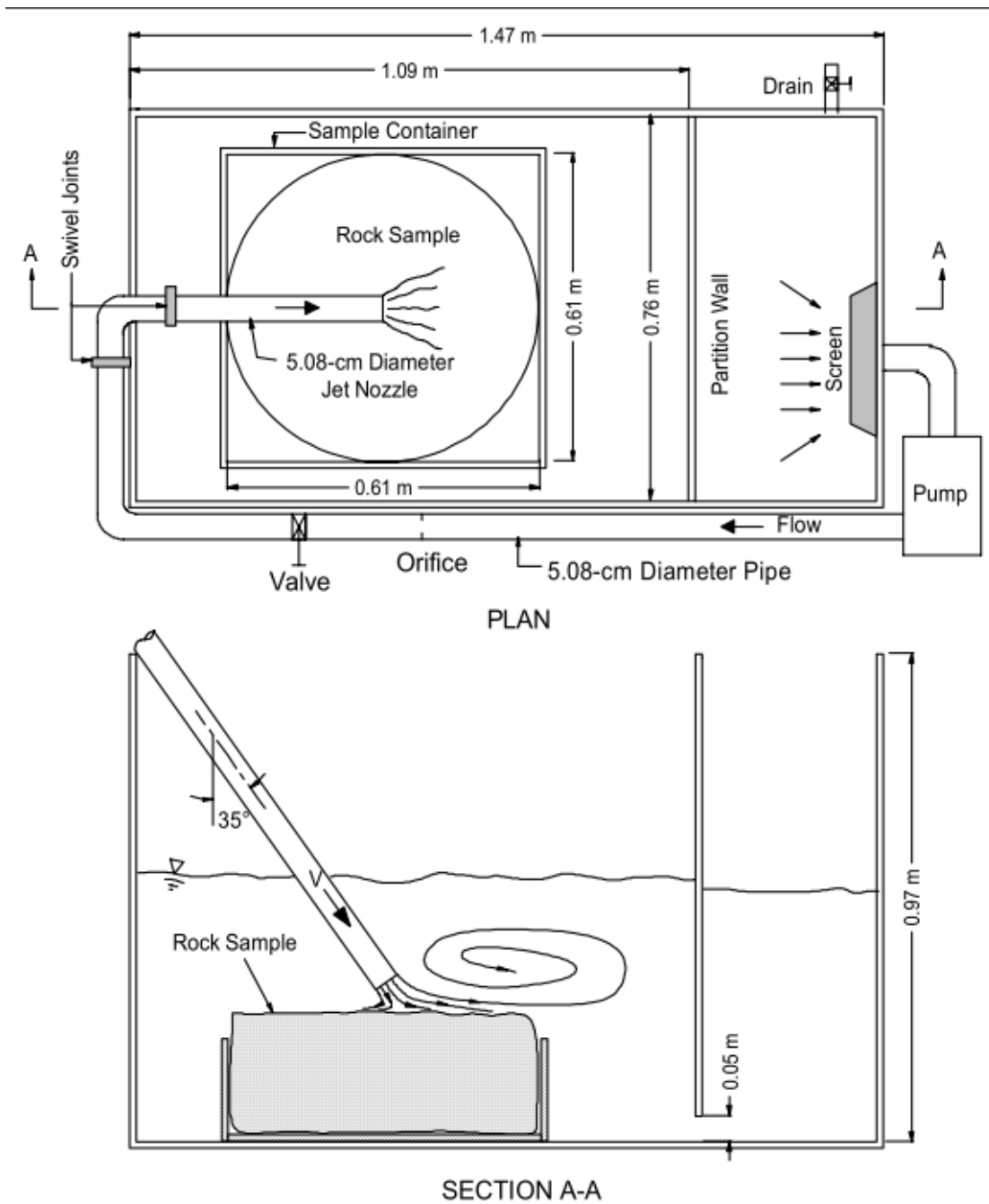


圖 2-23 試驗配置圖 Nakato T. (2002)

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2.5 cm 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

0.15 m，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2-24）。



圖 2-24 試驗照片 (Nakato T., 2002)

### 2.5.2 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2-25所示，水槽寬10 m、長16.75 m、深4.5 m，噴射水流最大流量 $2.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ，射流角度有 $15^\circ$ 、 $25^\circ$  及 $35^\circ$ ，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) 並進行直接水柱沖擊。

試驗之輕質混凝土小塊體如圖2-26長0.394 m、寬0.194 m、厚0.064 m 材料組成為混凝土，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 $45^\circ$ 依序排列成兩層，並於內設置18組水壓計，以強力水柱沖擊質量塊，模擬河道中塊體抽離破壞。

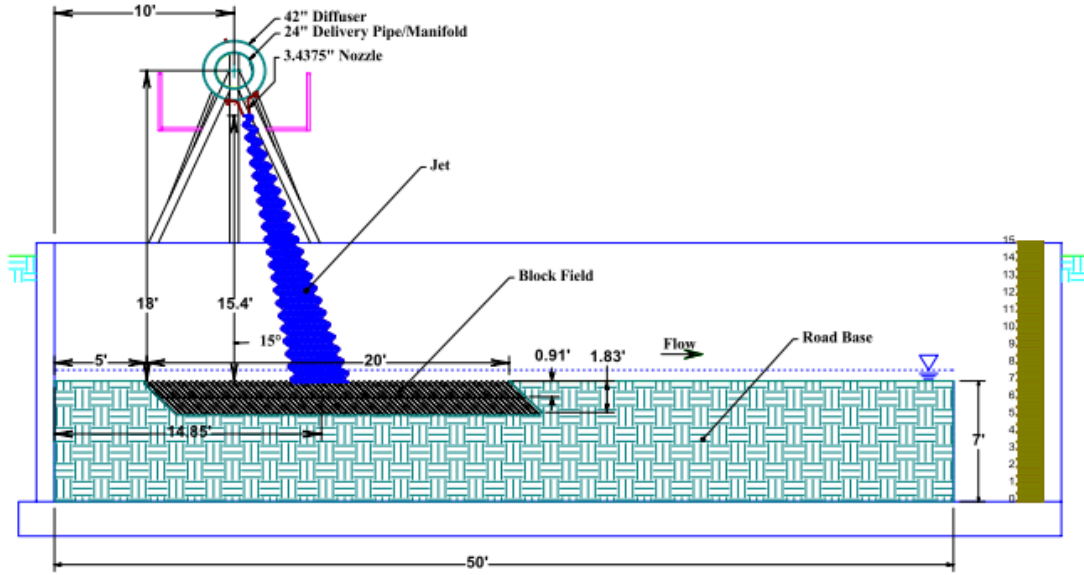


圖 2-25 試驗配置圖 (Annandale & Wittler, 1998)

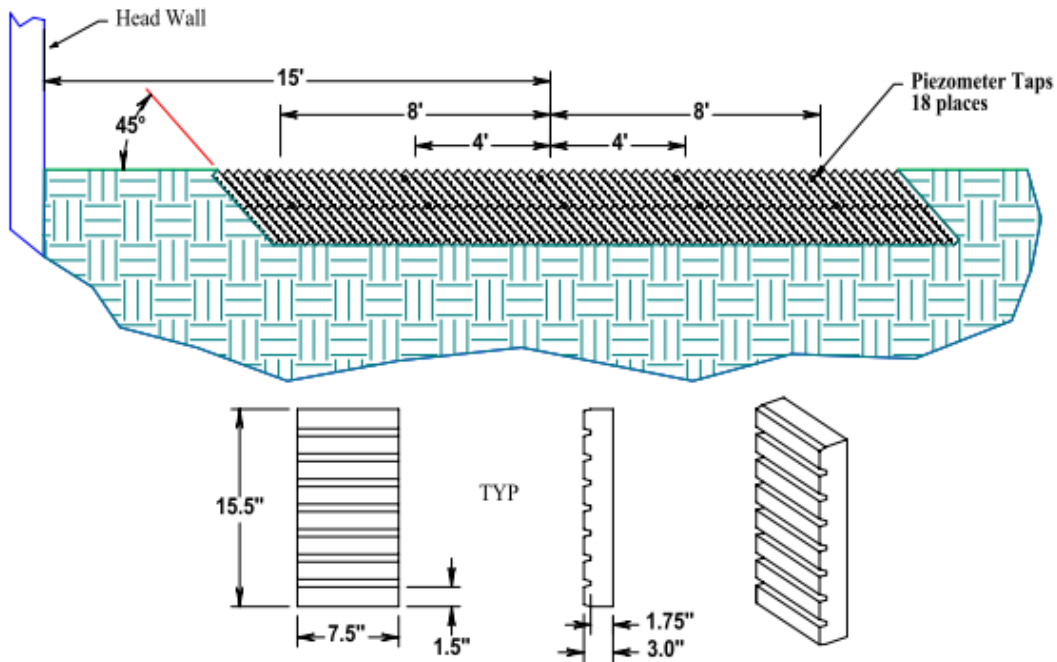


圖 2-26 塊體配置圖 (Annandale & Wittler, 1998)

Annandale (1995, 2006) 將現地資料歸納出沖蝕破壞模式門檻值，並施做試驗家以驗證，最終將能量消耗對抗沖蝕指數繪出雙對數關係圖(圖

2-27) , 推估沖蝕與否的門檻值。

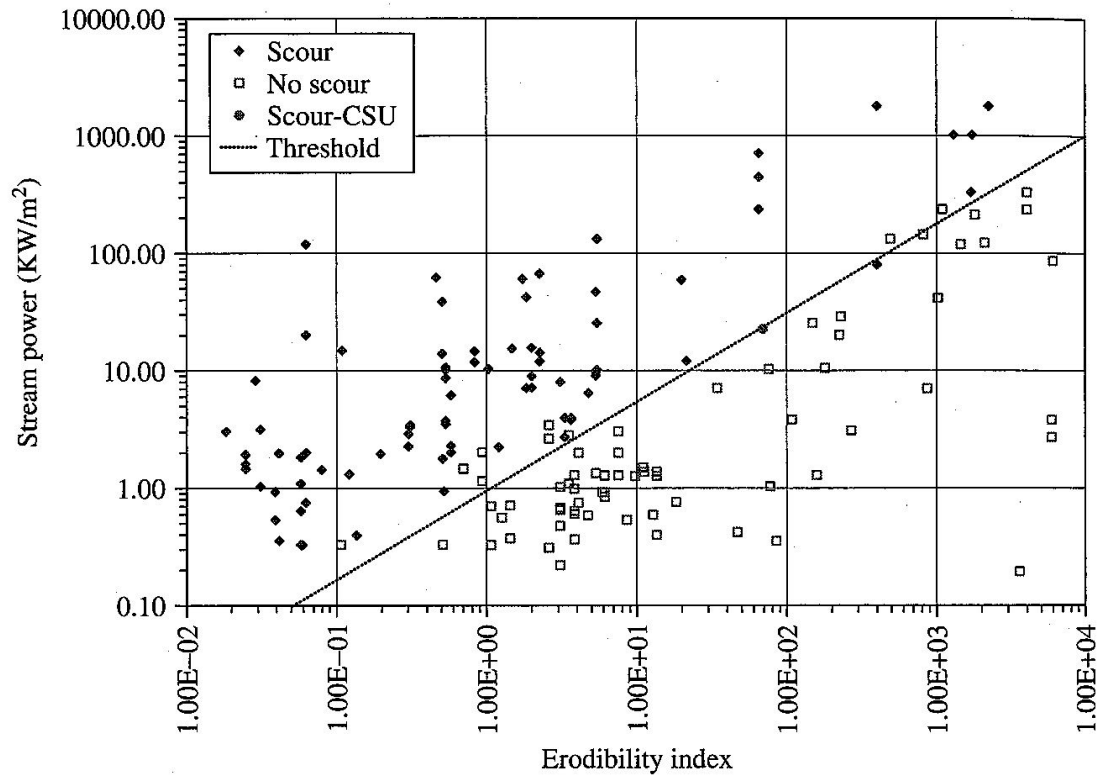


圖 2-27 面積流功與抗沖蝕能力指數圖 (Annandale, 1995)

### 2.5.3 人造節理水槽試驗

Bollaert (2002) 建立水槽試驗 (圖2-28) 模擬跌水下游岩體裂隙內部所受壓力之變化；水流之沖擊壓力以波傳之方式傳入岩體，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 2-28 人造節理沖蝕試驗照片 (Bollaert, 2002)

圖2-29為人造節理沖蝕試驗配置圖，以下將詳細介紹之。

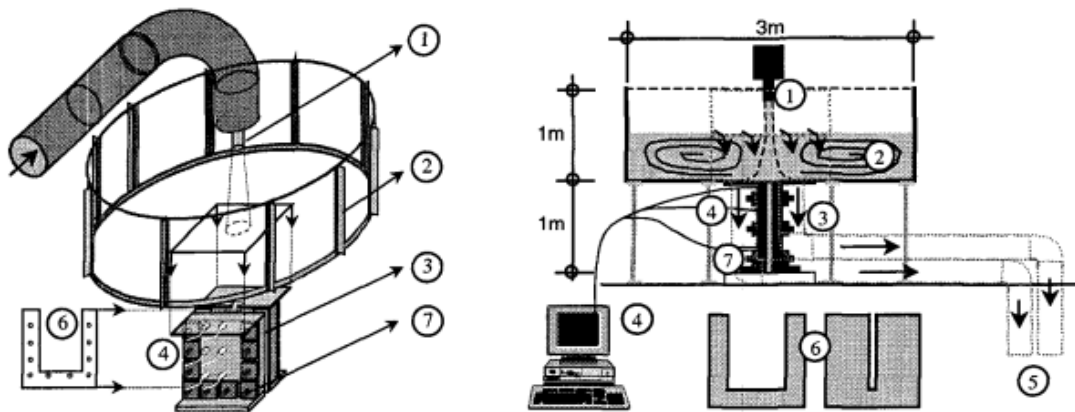


圖 2-29 人造節理沖蝕試驗配置圖 (Bollaert, 2002)

- (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2-30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。

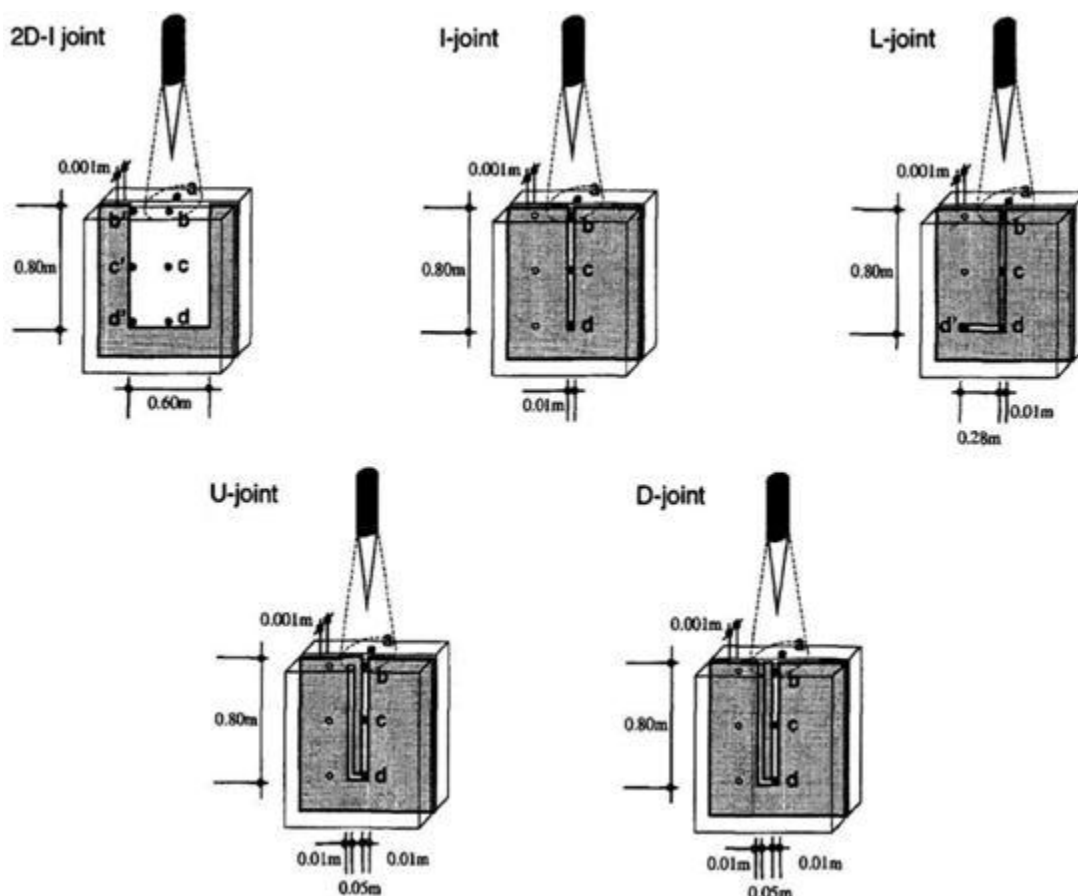


圖 2-30 不同形式裂隙模擬設施示意圖（Bollaert, 2002）

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（ $\Delta t$ ）。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2-31。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2-32）。

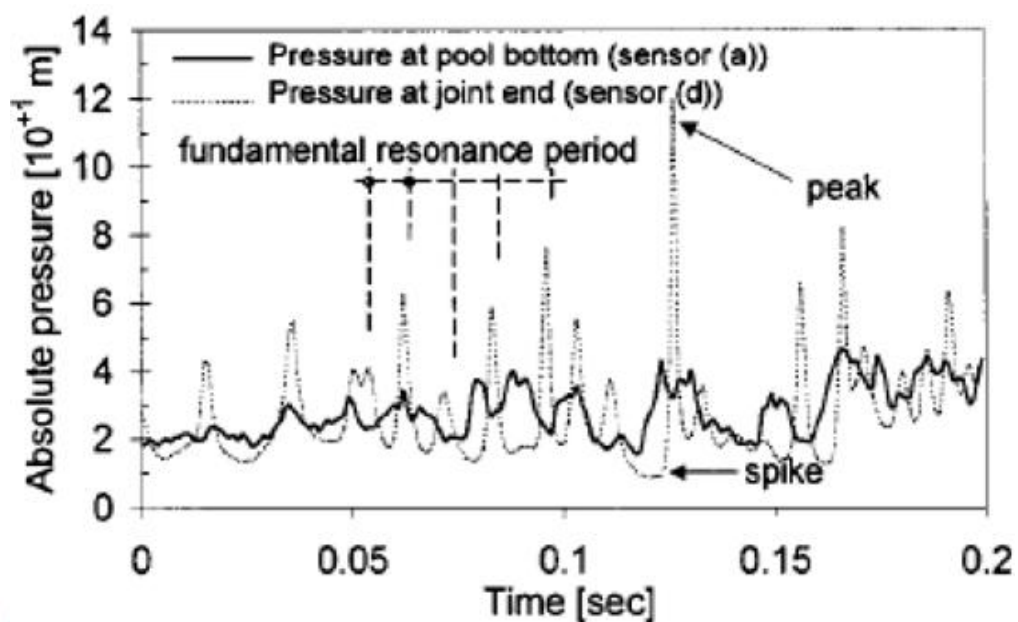


圖 2-31 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖 (Bollaert, 2002)

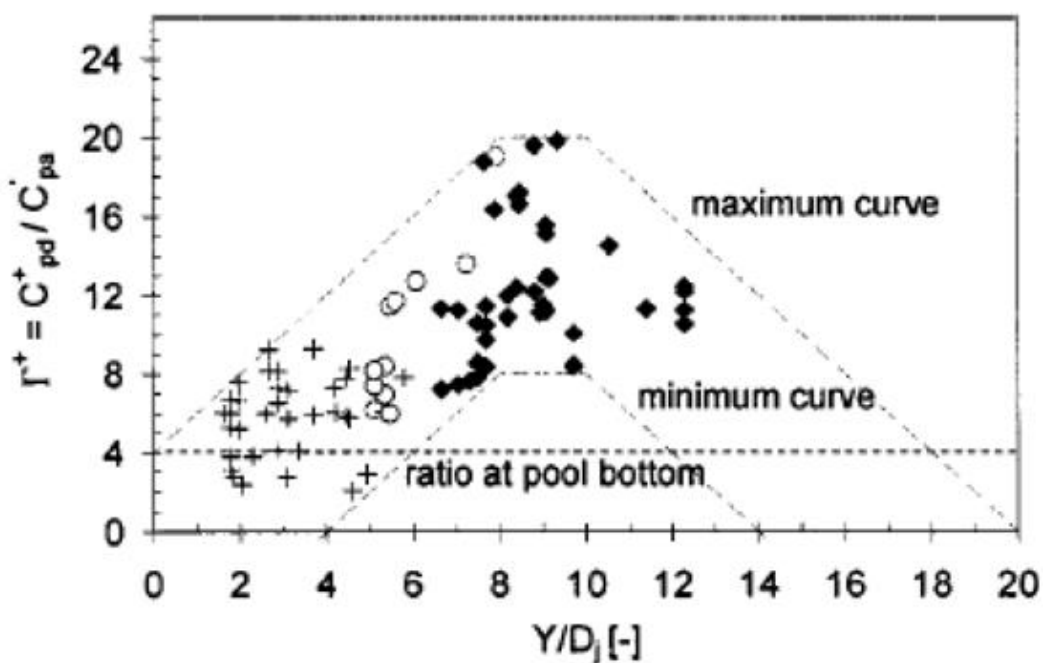


圖 2-32 裂隙內部波動壓力放大係數圖 (Bollaert, 2002)

## 2.6 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及吳禹霆（2012）年完成可變角度直接沖刷試驗。以下依序介紹試驗功能及試驗設計配置圖。

### 2.6.1 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2-33）

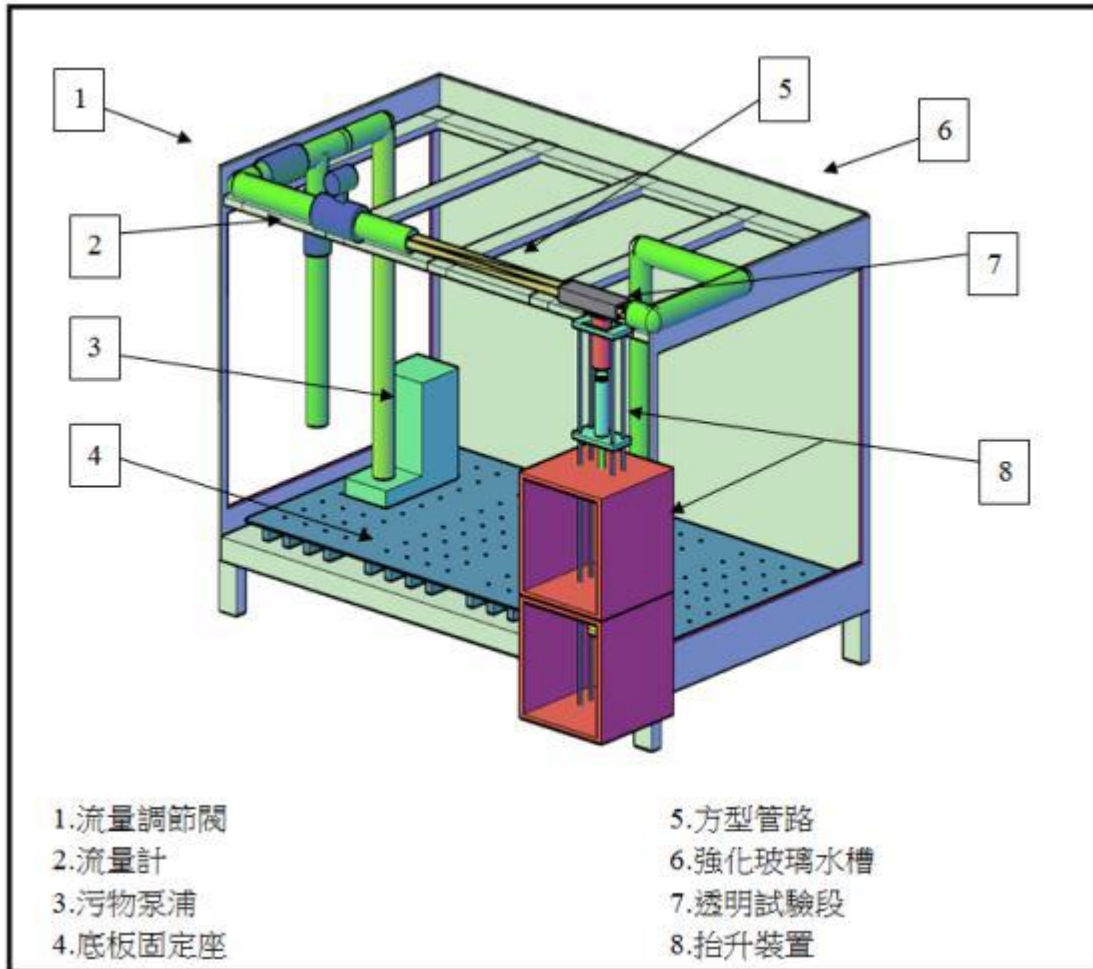


圖 2-33 沖蝕試驗儀器配置圖 (郭炳宏, 2010)

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。

郭炳宏 (2010) 完成多功能室內沖蝕試驗儀器設計及組裝，並改良 EFA 試驗儀，針對軟岩改良試驗流程以及量測方式 (影像分析)，提出沖蝕試驗沖蝕量分析方法。吳佳諺 (2011) 清水沖蝕試驗結果顯示，沖蝕率排序為人造砂岩 > 泥岩 > 砂岩 > 頁岩，與岩石消散、耐久性比較，沖蝕率為低耐久性 > 高耐久性，並且發現水平磨蝕與岩體膠結性有高度相關。含泥砂水流試驗結果顯示，以相同試體及水流條件下，沖蝕率為含泥砂水流 > 清水，相同濃度下沖蝕率為砂土 > 黏土，沖蝕率與粒徑為正相關。

### 2.6.2 可變角度直接沖刷試驗

吳禹霆 (2012) 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直接沖蝕試驗，亦可控制可變角度直接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2-34、圖2-35)

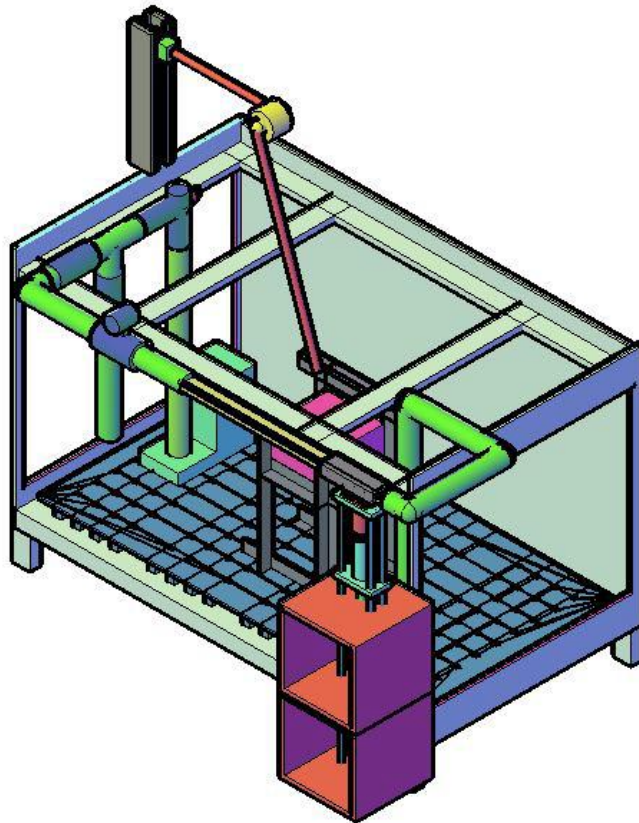


圖 2-34 多功能沖蝕儀-可變角度直接沖刷試驗配置圖 (吳禹霆, 2012)



圖 2-35 多功能沖蝕儀-可變角度直接沖刷試驗設備 (吳禹霆, 2012)

軟岩直接沖刷試驗步驟：

1. 岩塊描述及物性試驗：包括岩體之完整性（有無結理、斷面）並取下一部分岩塊施作基本物性試驗（單位重、含水量、比重、粒徑分析）。
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將岩塊大致裁切成 $20 \times 20 \times 15 \text{ cm}^3$  長方體，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。
3. 試體固定：選擇試驗面朝上，將岩塊放入鋁模中（ $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$ ），澆注已溶成液體之白蠟至試體頂面下方1 cm，等其冷卻後拆模取出。
4. 研磨試驗面：使用大型研磨機將試體表面磨去1 cm，完成後使用氣泡水平儀驗證表面水平度。
5. 前置作業：調整實驗所需之角度、升降固定器之高度、流量。
6. 試驗面量測：試驗前和試驗後分別用雷射測距儀量測試驗面之高程，記錄後分析數據。

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：



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

xyz=舊座標點

x'y'z'=新座標點

$$[A](3 \times 3 \text{ 矩陣}) = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} & \bar{C} \\ |A| & |B| & |C| \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$\overline{ABC}$ =舊座標中三條共面線

(3)將轉換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.）。

吳禹霆（2012）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。在多功能軟岩沖蝕儀中增設可變角度射流沖蝕儀，經過測試後，未來可用於軟弱岩床沖刷坑形成的實驗模擬、探討，於儀器操作之過程和實驗內容建議如下：

- (1) 實驗可針對水質含泥沙濃度與沖蝕之影響進行研究，進行在不同粒徑濃度下以相同流速、射流長度及試體條件的試驗。
- (2) 對尾水深與沖蝕量之影響進行研究，探討水尾造成射流流體消能及尾水內水流流況對於試體沖蝕之影響。
- (3) 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) 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。

吳禹霆（2012）的研究成果顯示，多次停機，使沖擊中心點位置改變，使計算沖刷坑的變化不易觀測，故本研究將停機次數縮短為2次，間格拉長為24小時。本研究主要以探討尾水深及射流角度變化影響，對沖刷坑的深度、形狀、大小及形成所需時間進行研究，研究方法將在下章節做討論。



## 第三章 試驗儀器及試驗規劃

本研究利用取自現地的軟弱岩石試體，於變角度射流及不同尾水深下進行射流沖刷實驗，以模擬現地攔河堰下游沖刷坑的形成，觀察室內實驗沖刷坑形成的深度、大小、形狀，並利用模型相似的方式，將現地條件依一定幾何比例縮小成室內模型，利用其進行多組試驗，用來模擬現地的沖刷情形，以微觀的方式在室內實驗以精密儀器量測沖刷坑深度，藉此預測未來現地沖刷坑形成的情形。

### 3.1 試驗儀器

本研究使用吳禹霆(2012)所改良的「室內軟弱岩石射流沖刷設備」進行室內實驗，參照圖 3-1、表 3-2。

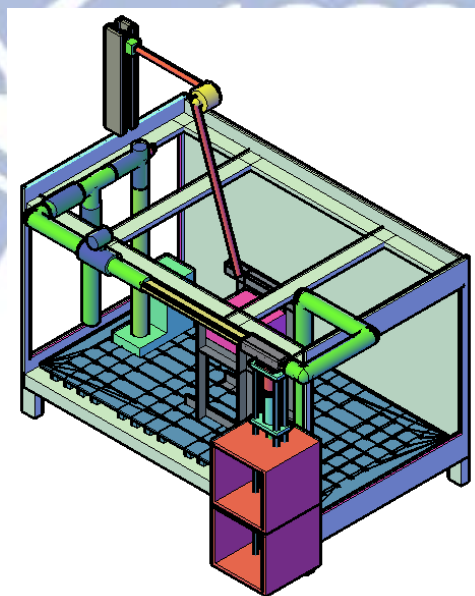


圖 3-1 室內軟弱岩石射流沖刷設備 (吳禹霆, 2012)

表 3-1 直接沖刷試驗儀器介紹

試驗儀器名稱	儀器型號/尺寸	功能/目的
強化玻璃水槽	210×120×120 cm <sup>3</sup>	最高可容納 2 m <sup>3</sup> 之水量
汙物泵浦 (圖 3-2)	河見電機 AF-35A	帶動水流循環
三通不銹鋼球閥 (圖 3-3)	通口為 8cm	控制管內的流量大小，達到調整試驗段流量的目的
PVC 纖維增強軟管	內徑 2.5cm，長 150 cm	連結三通閥及升降固定器管路，內部最大抗壓 1 MP
升降固定器 (圖 3-5)	50 cm×8 cm×4 cm，不鏽鋼	調整噴嘴與試體間之落距
可變角度法蘭 (圖 3-6)	旋轉弧度 45°，不鏽鋼	調整噴嘴角度
噴嘴	內徑 2.5cm，長 100cm	穩定射流 (如何知道穩定?)
超音波流量計 (圖 3-7)	UF820-S (FlowMaster)	量測通過流量計時間單位內水量(m <sup>3</sup> /hr)
雷射位移計 (圖 3-8)	CD4A-85 (OPTEX)	利用雷射光束反射取得試體表面高程
雷射位移數據擷取放大器 (圖 3-8)	CD4A(OPTEX)	設定雷射位移計擷取速率
XYtable 線性滑軌組 (圖 3-9)	MGW(HIWIN)	精準定位量測點的絕對位置
單眼數位相機	α77(sony)	拍攝試體

### 3.1.1 水槽內設備

AF-35A 型鑄鐵汙物泵浦(圖 3-2),馬力 5HP,最高流量達  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ , 管路開口直徑為 8 cm, 進行水平向磨蝕試驗流速最高可達 9 m/s (郭炳宏, 2010), 進行直接沖蝕試驗流速最高則可達 10 m/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, 最長運轉時間可達 5000 分鐘, 運轉時至少沒入水中 50cm 以免泵浦過熱。



圖 3-2 汙物泵浦

### 3.1.2 射流設備

球型三通閥可控制管內的流量大小, 藉由微調閥門, 控制自汙物泵浦流入管路的流量, 達到調整試驗段流量的目的。



圖 3-3 球型三通閥

噴嘴設備的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。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，雷諾數  $Re=26000$ （Munson & Young & Okiishi, 2005）為紊流，而紊流在經過完全發展段  $Le$  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 3-4），而在紊流情況下所需之完全發展段  $Le$  公式為下（Munson & Young & Okiishi, 2005）：

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

$D$ =管流內徑

$Re$ =雷諾數

$Le=90\text{ cm}$ ，噴嘴全長為  $100\text{ cm}$  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。

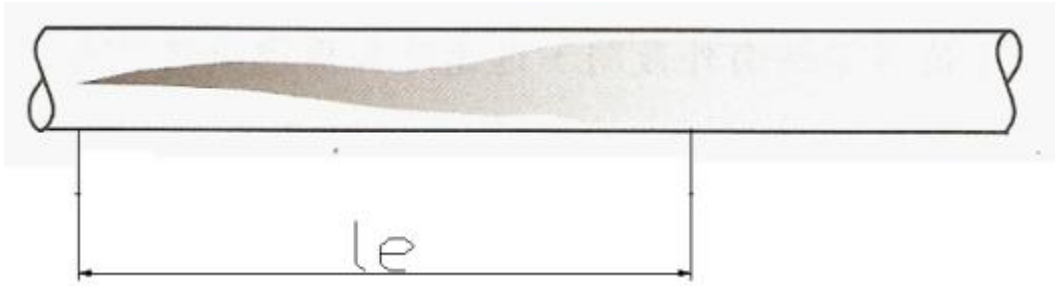


圖 3-4 紊流擴散示意圖 (Reynolds, 1883)

升降固定器 (圖 3-5) 全長  $55\text{ cm}$ ，可做六段高度調節，每段間距  $7.5\text{ cm}$ ，為一冂字形軌道與凸形滑塊所組成，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 3-5 升降固定器

可變角度法蘭是加長一般法蘭片之螺栓孔，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  $45^\circ$ ，配合兩段式與三段式管路搭配可涵蓋垂直  $90^\circ$  至水平下方  $30^\circ$  之可變角度範圍。





圖 3-6 可變角度法蘭

### 3.1.3 量測設備

本試驗使用超音波流量計（圖 3-7）於管外量測水流量，精準度正負 1 %、流速範圍 0~32 m/s（本試驗最高流速 10 m/s），水中懸浮物體密度可達 10000 ppm，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）。

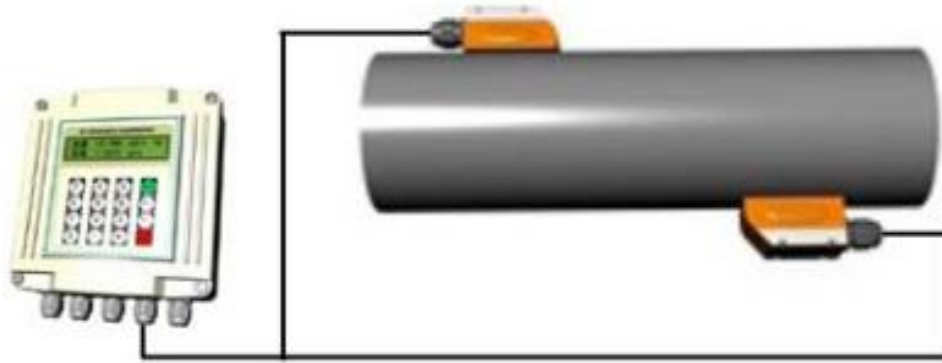


圖 3-7 超音波流量計

量測沖刷坑以雷射位移計、雷射位移數據擷取放大器與 XYtable 線性滑軌組所組成。雷射位移計原理為擴散式反射，量測精度 0.003 mm，量測範圍 65 mm 至 105 mm，雷射波長 650 nm，點直徑  $70 \times 290 \mu\text{m}$ ，經雷射位移數據擷取放大器讀取訊號後於 LCD 顯示讀數。雷射位移計藉由架設 XYtable 線性滑軌組上，及可精準定位量測點的絕對位置，使量測點的點位為精確度更高。



圖 3-8 雷射位移計與雷射位移數據擷取放大器



圖 3-9 XYtable 線性滑軌組

### 3.2 試驗流程

為完成可具重複性的試驗結果，本研究各組試驗皆採用下述流程進行沖刷試驗：

1. 岩塊描述及物性試驗：包括岩體之完整性（有無節理、裂面）並取下一部分岩塊施作基本物性試驗（單位重、含水量、比重、粒徑分析）。
2. 試體裁切：用粉筆將試體欲裁切部份標示出，並使用手持式砂輪機將岩塊大致裁切成 $20 \times 20 \times 15 \text{ cm}^3$  長方體，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。
3. 試體固定：選擇試驗面朝上，將岩塊放入鋁模中（ $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$ ），澆注已溶成液體之白蠟至試體頂面下方 $1 \text{ cm}$ ，等其冷卻後拆模取出。

4. 研磨試驗面：使用大型研磨機將試體表面磨去1 cm，完成後使用氣泡水平儀驗證表面水平度。
5. 試體飽和：將試體泡在水中24小時，使其達到飽和，符合在水面下的軟岩條件。
6. 前置作業：調整實驗儀器的控制參數，需要之角度、升降固定器之高度、射流流量，並以雷射測距儀量測試驗前試驗面之高程。
7. 沖刷試驗：試驗24小時後停機，進行試體表面高程記錄，記錄完後再次啟動，並於48小時停機記錄第二次的試體表面高程，整個實驗過程中不拆卸試體，使試體停機前後的射流中心點無改變。
8. 試驗面量測：試驗前和試驗後分別用雷射測距儀量測試驗面之高程，記錄後分析數據。

### 3.3 沖刷坑測量及數據分析

沖刷試驗完成後，將量測儀器安裝（圖 3-10）即可進行試體表面之測量，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 3-11），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，本研究於沖刷前及沖刷 24 小時和 48 小時後進行量測，並於試體上方架設單眼相機，拍照並記錄試體（圖 3-12），試體在試驗過程中不需拆卸。

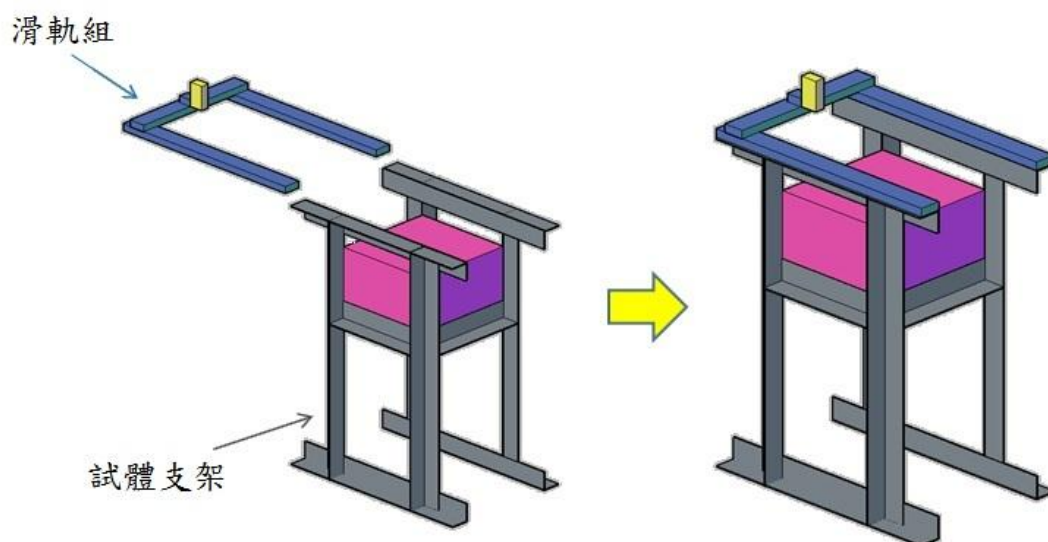


圖 3-10 量測儀器安裝示意圖

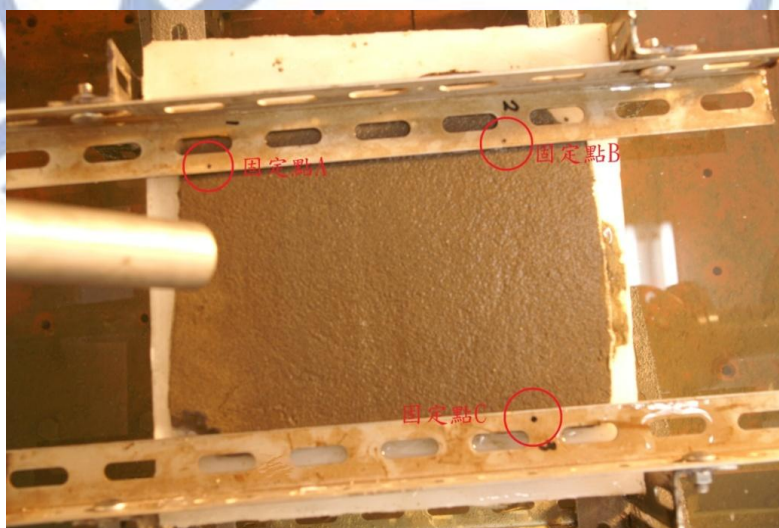


圖 3-11 固定點 A、B、C 之照片



圖 3-12 試驗後停機紀錄照片

本實驗使用 EXCEL 2007 和 Surfer9 進行實驗沖蝕量與沖蝕坑形狀之分析及繪圖：

- (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：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [F] \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$x, y, z$ =舊座標點

$x', y', z'$  =新座標點

$[F]$ =3×3 矩陣，

$$[F] = \left[ \frac{\bar{A}}{|A|}, \frac{\bar{B}}{|B|}, \frac{\bar{C}}{|C|} \right] \quad (3-3)$$

$\overline{ABC}$ =舊座標中三條共面線

(3)將轉換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.)。

(4)將 EXCEL 2007 製成的表格資料放入 Surfer9 中，繪製出等高線圖及立體圖，分析評估沖刷坑之大小、形狀、深度、沖蝕量及沖蝕率並與理論值做比較。

### 3.4 流功與岩盤抗沖蝕指數

使用式 3-4 計算單位面積的流功 ( $P_{jet}$ )，利用位能轉換為動能的觀念計算水流作用於試體之流功，並以岩盤抗沖蝕指數 ( $K_h$ ) 換算程啟動沖刷門檻值 (式 3-5)，藉由這兩者的數值比較，依圖 2-9 的流程計算出極限沖刷坑深度。

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

$$P_c = K_h^{0.75} \quad (3-5)$$

### 3.5 實驗規畫

羅楚鈞 (2011) 將影響沖刷坑深度之重要參數可歸納為：單寬流量 ( $q$ )、岩盤抗沖蝕指數 ( $K_h$ )、水柱厚 ( $D_j$ )、跌水高度 ( $H$ )、水流入射

角 ( $\alpha$ )、尾水深 ( $h$ )。本研究以湖山水庫的軟弱砂岩石為試體 ( $K_h$  視為定值) 於單寬流量、水柱厚、及跌水高為定值下，控制水流入射角 ( $\alpha$ ) 及尾水深 ( $h$ ) 進行實驗，實驗結果將進行入射角及尾水深對沖刷坑形成 (包括刷坑的深度、形狀、大小) 的影響探討。

本研究設備直接沖刷試驗段流速最大達 10 m/s，出口最大流功為 500 kW/m<sup>2</sup>，試驗時間為 48 小時，噴嘴的升降固定器因高度固定，以目前的裝置位置，出水口高最大約為 1 m。實驗中能控制的不變參數分別為：流速 ( $v$ )、射流長度 ( $L$ )、水柱厚 ( $D_j$ )。依式 2-3 可求得射流破裂長度  $L_b=0.559m$ ，為了讓實驗的流速能保持核心射流內，本研究將射流長度固定為 0.3m，跌水高  $H = (v^2/2g + L) \times \sin \alpha - h$  ( $v$ =流速,  $g$ =重力加速度,  $L$ =射流長度,  $\alpha$ =射流角度,  $h$ =尾水深)，隨射流角度而改變，流速則控制為最大流速 10m/s，藉由較高的流速來節省實驗操作時間，而水柱厚度則依據現有的儀器射流出口直徑固定為  $D=0.0254m$ 。下表 3-3 為實驗規劃：



表 3-2 實驗規畫

沖刷角度 (°)	各角度組數	h/D(尾水深/水柱厚)	實驗組數	總共組數
70	6	1	2	18
		3	2	
		5	2	
50	6	1	2	
		3	2	
		5	2	
30	6	1	2	
		3	2	
		5	2	

### 3.6 小結

吳禹霆 (2012) 將實驗量測時間分為 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量測每階段沖刷量，根據量測的結果，發現射流沖擊點非固定在同一位置，因每次停機再啟動時，噴嘴輕微震動，造成沖刷坑形成的位置不固定，故本研究進行實驗時，降低停機的次數，僅停機兩次，並拉長實驗時間，以間隔為 24 小時來進行試驗。在實驗前將噴嘴固定在連接牆壁的角鋼上，使其停機後再啟動時噴嘴不再晃動，固定其射流沖擊點位置，避免造成每次沖擊點都改變的情況，並在沖刷試驗進行時以側拍及俯拍方式，確定沖擊點的位置及沖刷範圍。

## 第四章 實驗成果與討論

本研究的實驗試體取自湖山水庫築壩材料借土區，此借土區以砂岩為主，依國際岩石力學學會的分類應屬軟弱岩石。現地由大型挖土機將岩塊取出，挑選大於 30 cm×30 cm×30 cm 的合適岩石密封後，帶回實驗室妥善保存，於準備試驗時，才將軟岩自箱中取出並修整、研磨成試驗所需之合適大小，進行在不同尾水深下變角度的直接沖刷試驗，並將試驗成果的數據繪製成沖刷坑剖面圖、沖刷坑立體圖、等高線圖，以探討射流角度及尾水深度對軟岩沖刷坑形狀、深度、沖刷率的影響。

### 4.1 試體來源

試驗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），將岩塊置入抗壓耐衝擊的橘色方形水桶內，並在外層以白蠟密封，使岩塊維持跟現地相同之基本條件並降低運送擾動度（圖 4-2），運送回交通大學土木結構大樓試驗室妥善保存。



圖 4-1 a.怪手開挖 b.挑選適用之岩塊



圖 4-2 將岩塊置入耐震橘桶以白蠟密封，再以 PVC 塑膠布密封

#### 4.2 試體評估及試驗規畫

本研究使用湖山水庫軟弱砂岩塊，以流速 10 m/s、射流距離 30 cm(吳禹霆, 2012)，並以三種不同射流角度及三種不同尾水深度進行沖刷試驗。本研究執行 9 類試驗，每類試驗皆施做 2 組(表 4-1)。為確保實驗之進行(可被沖刷)，在試體進行沖刷試驗前需進行抗沖蝕能力的評估，以便實驗順利進行。

表 4-1 試驗規劃

沖刷角度 (°)	各角度組數	h/D 尾水深/水柱厚	第一組	第二組
30	6	1	R1-30-1D	R4-30-1D
		3	R1-30-3D	R4-30-3D
		5	R1-30-5D	R4-30-5D
50	6	1	R2-50-1D	R5-50-1D
		3	R2-50-3D	R5-50-3D
		5	R6-50-5D	R6-50-5D
70	6	1	R3-70-1D	R7-70-1D
		3	R3-70-3D	R7-70-3D
		5	R3-70-5D	R7-70-5D

#### 4.2.1 試體抗沖蝕能力估算

本研究採用 Annandale, 1995 建議估算抗沖蝕能力方式，將主要的岩體力學性質以抗沖蝕指數  $K_h = M_s K_b K_d J_s$  表示，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（附錄一），四參數的乘積即為  $K_h$ 。

以抗沖蝕指數  $K_h = M_s K_b K_d J_s$ ，進行湖山水庫軟弱岩石的  $K_h$  值估算：

##### (1) 材料強度參數 ( $M_s$ )

使用史密垂試驗 (Rock1~Rock6，因皆來自於相同位置的岩塊，所以僅對前四組量測) 可估算得各岩塊之單軸抗壓強度，得知皆小於 10 MPa，

平均值為 3.5 MPa，故利用式 4-1，可得表 4-2

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

表 4-2 材料強度參數 ( $M_s$ ) 計算

試體	UCS (MPa)	$C_r$	$M_s$
湖山軟岩	3.5	0.726	2.11

### (2) 顆粒或塊體尺寸參數 ( $K_b$ )

$K_b$  可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。湖山水庫取的岩塊因表面無明顯節理，視為完整岩塊，故  $K_b$  為 100。

### (3) 弱面抗剪強度參 ( $K_d$ )

$K_d$  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。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，有較佳之抗沖蝕能力 ( $J_r$  取最大， $J_a$  取最小)：

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

$J_r=4.0$ 、 $J_a=0.75$ ，故  $K_d$  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，試體無明顯結理層面，故查表後  $J_s$  為 1.14。

綜合上列參數可得岩塊之平均抗沖蝕指數  $K_h$  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 <sup>2</sup> )	$K_h^{0.75}$ (kW/m <sup>2</sup> )
湖山軟岩	2.11	100	5.3	1.14	1275	213

計算出  $K_h$  值之後，再以式 4-3 將  $K_h$  值轉換成啟動沖刷門檻流功，與實驗所使用的流功值做比較，即可判斷此試體是否會被沖刷。

$$P_c = K_h^{0.75} \text{ for } K_h > 0.1 \quad (4-3)$$

$$P_c = 213 \text{ kW/m}^2$$

#### 4.2.2 試驗流功計算

依第三章第幾四節計算試驗之流功。試驗水流之流速於為實驗前，經過標定後流速穩定，維持在 10 m/s（因流速儀器無防水功能，並未在實驗中進行量測）。水流單位重為 9.81kgf/m<sup>3</sup>、單寬流量為 0.25m<sup>2</sup>/s（流量除以管壁直徑為圓形管之單寬流量），流速 10m/s 等同於 5.09m 之水頭高，經由表 2-1、表 2-2，查出  $C_p$  與  $C_p'$ ，其流功計算如式 4-4：

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

表 4-4 直接沖刷試驗在不同角度、尾水深下的流功計算

角度 ( $^{\circ}$ )	尾水深 (cm)	作用於水面流功 (kW/m <sup>2</sup> )	$C_p$	$C_p'$	試體面的初始流功 (kW/m <sup>2</sup> )
70	2.54	525	0.78	0.07	446
	7.62	520	0.78	0.14	478
	12.7	515	0.68	0.18	443
50	2.54	520	0.78	0.08	447
	7.62	515	0.78	0.17	489
	12.7	510	0.68	0.18	439
30	2.54	512	0.78	0.11	456
	7.62	507	0.64	0.19	421
	12.7	502	0.49	0.15	321

$C_p$  由式 2-3 求得， $C_p'$  由圖 2-13 Castillo (2002)  $Tu < 1\%$  曲線找出相對應之值，兩者之合較符合實際值。波動壓力於接近尾水深/水柱厚=5 時有最大值 (圖 2-13)，而本試驗取的尾水深值為 1、3、5 倍之水柱厚，故上表出現尾水深雖變大但功卻變也較大的情形 (70 度-7.62cm，50 度-7.62cm)，不過在尾水深大於 5 倍之後，波動壓力會越來越小，趨近於 0。經計算後流功皆大於啟動沖刷門檻流功 213 kW/m<sup>2</sup>，試體能夠沖刷。

### 4.3 實驗結果

分別於尾水深度 1D、3D、5D (D=初始水柱厚)，射流角度為 30°、50°、70° 下進行試驗，9 類試驗並各做 2 組共 18 組。本研究控制了三個固定參數：

1. 流速 ( $v=10\text{ m/s}$ )
2. 射流距離 30 cm (管口至試體)
3. 水柱厚 ( $D=2.54\text{ cm}$ )。

首先射流角度為 70 度，尾水深分別為 1D、3D、5D 的試驗結果。

#### 4.3.1 尾水深 1D (2.54 cm)

試體編號 R3-70-1D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面 (圖 4-3)。由沖蝕坑剖面圖 (圖 4-4)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-5 顯示本試驗 48 小時的平均沖蝕量速率為  $105\text{mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕深度速率為  $0.14\text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 24 小時後深度變化驟減，深度改變減少，到 48 小時後只增加  $0.05\text{mm}$ ，可能接近最大沖刷深度，而在高角度沖刷下，順坡坡角大於逆坡坡角，100 mm 處應為水躍後的沖擊點所形成。由圖 4-5、圖 4-6 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同。

表 4-5 射流角度  $70^\circ$  尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
24	4373	182	6.89	0.29
48	5062	105	6.94	0.14





圖 4-3 R3-70-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時

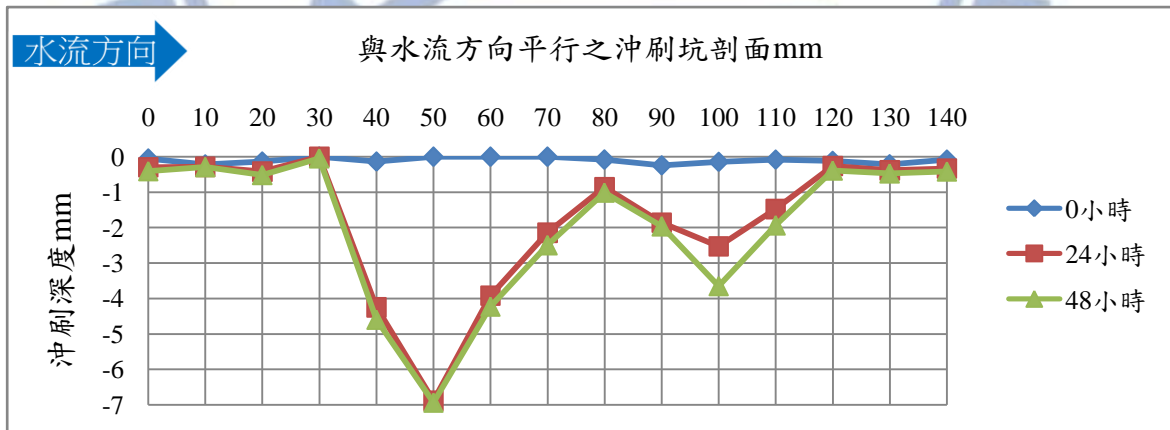


圖 4-4 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1:10)

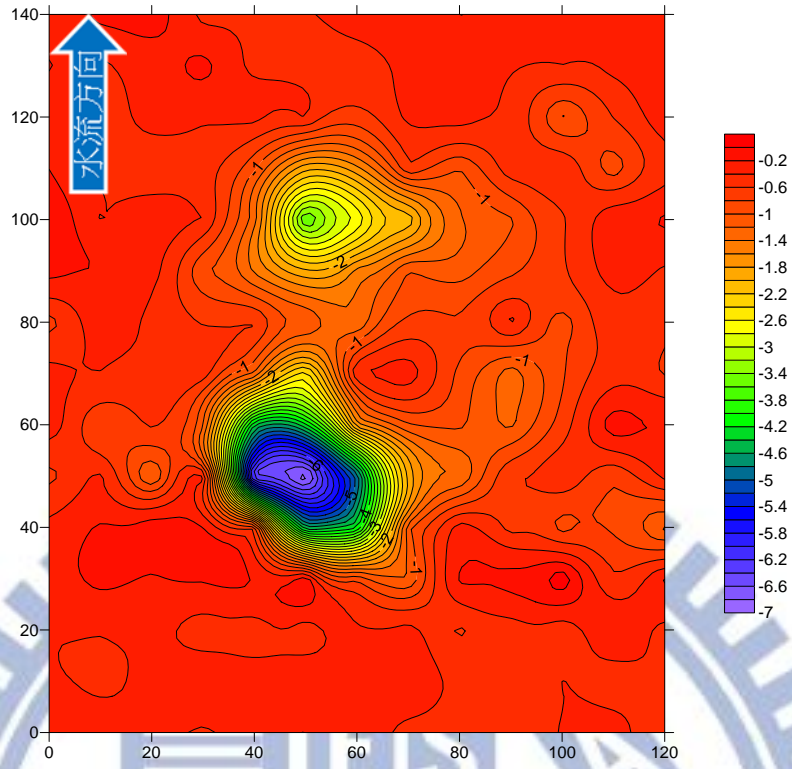


圖 4-5 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

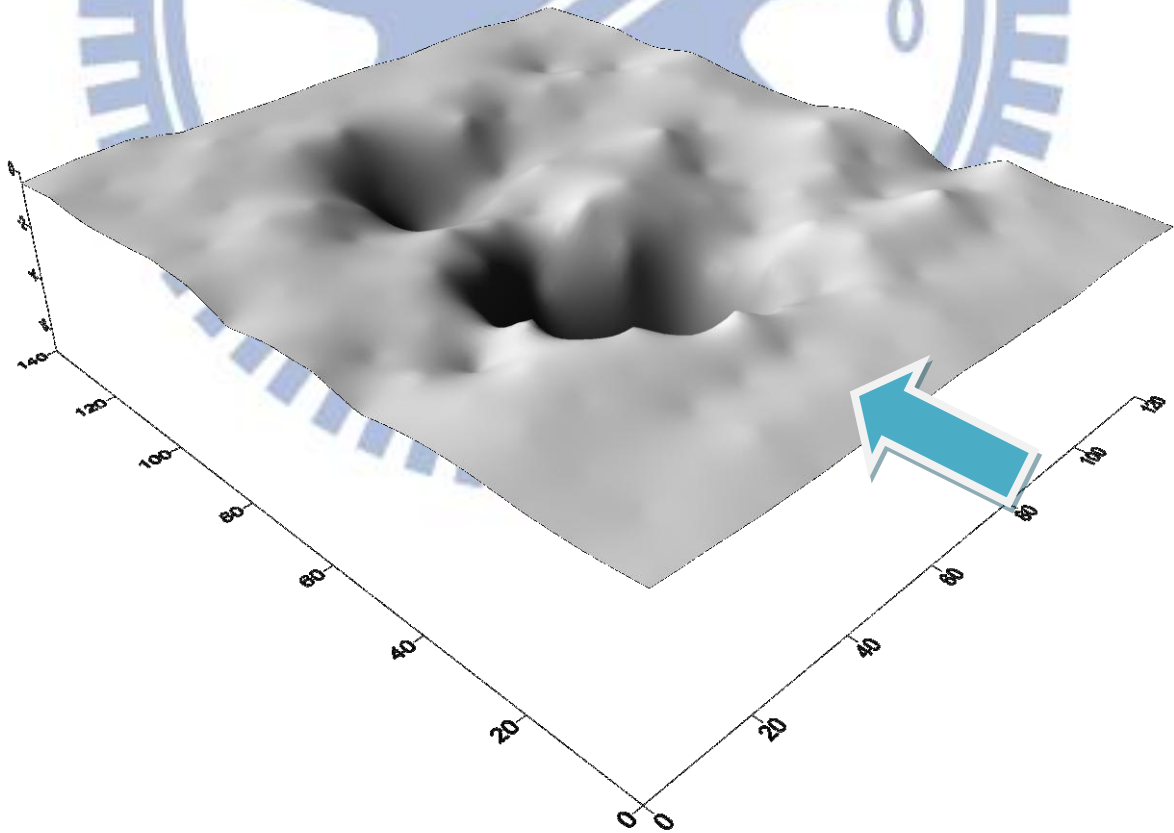


圖 4-6 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.2

試體編號 R7-70-1D 在沖刷 0、4、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-7)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-8)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-6 顯示本試驗平均沖蝕率為  $287\text{mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.12\text{mm}/\text{hr}$ ，五次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 10 小時前，沖刷速度略慢，24 小時至 48 小時沖刷深度增加 2.05mm，可能尚未達到極限沖刷深度，而在高角度沖刷下，順坡坡角大於逆坡坡角。由圖 4-9 及圖 4-10 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點更深。

表 4-6 射流角度  $70^\circ$  尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm}/\text{hr}$ )
0	0	0	0	0
4	2314	579	0.08	0.02
10	3163	316	1.14	0.11
24	4523	188	3.77	0.16
48	13818	287	5.82	0.12

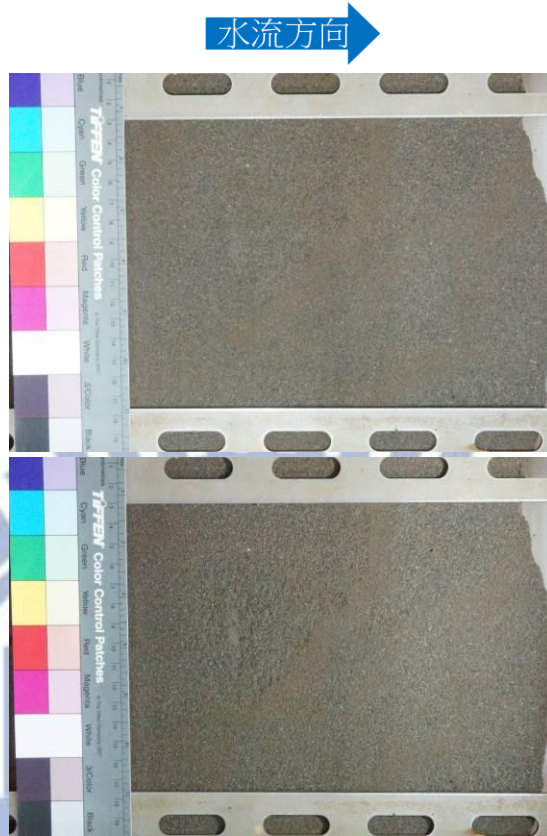


圖 4-7 Rock7 (上) 0 小時 (下) 48 小時

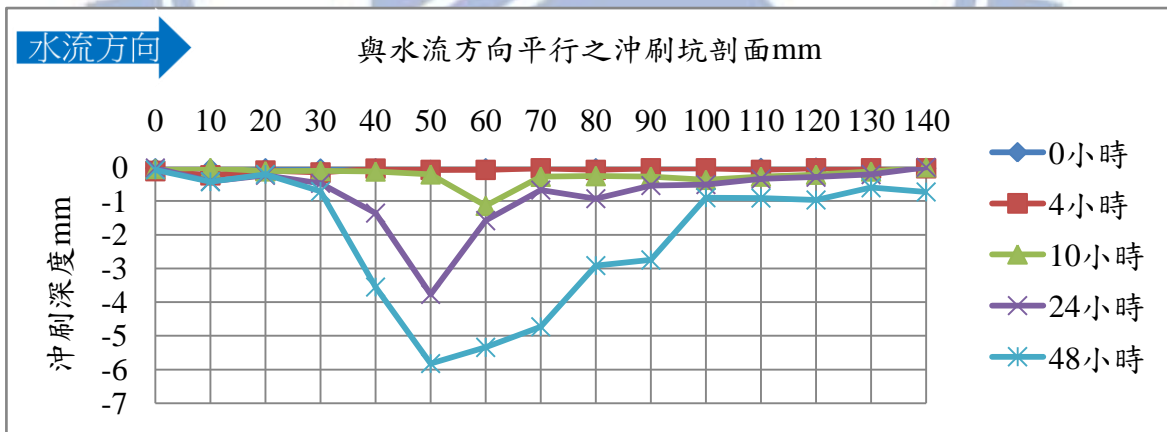


圖 4-8 尾水深 1D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

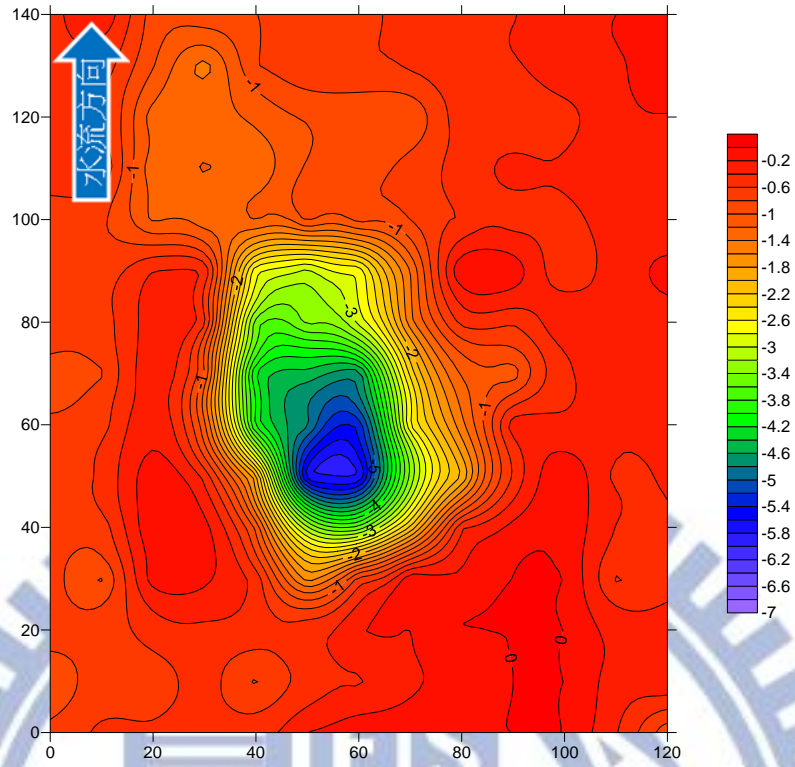


圖 4-9 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

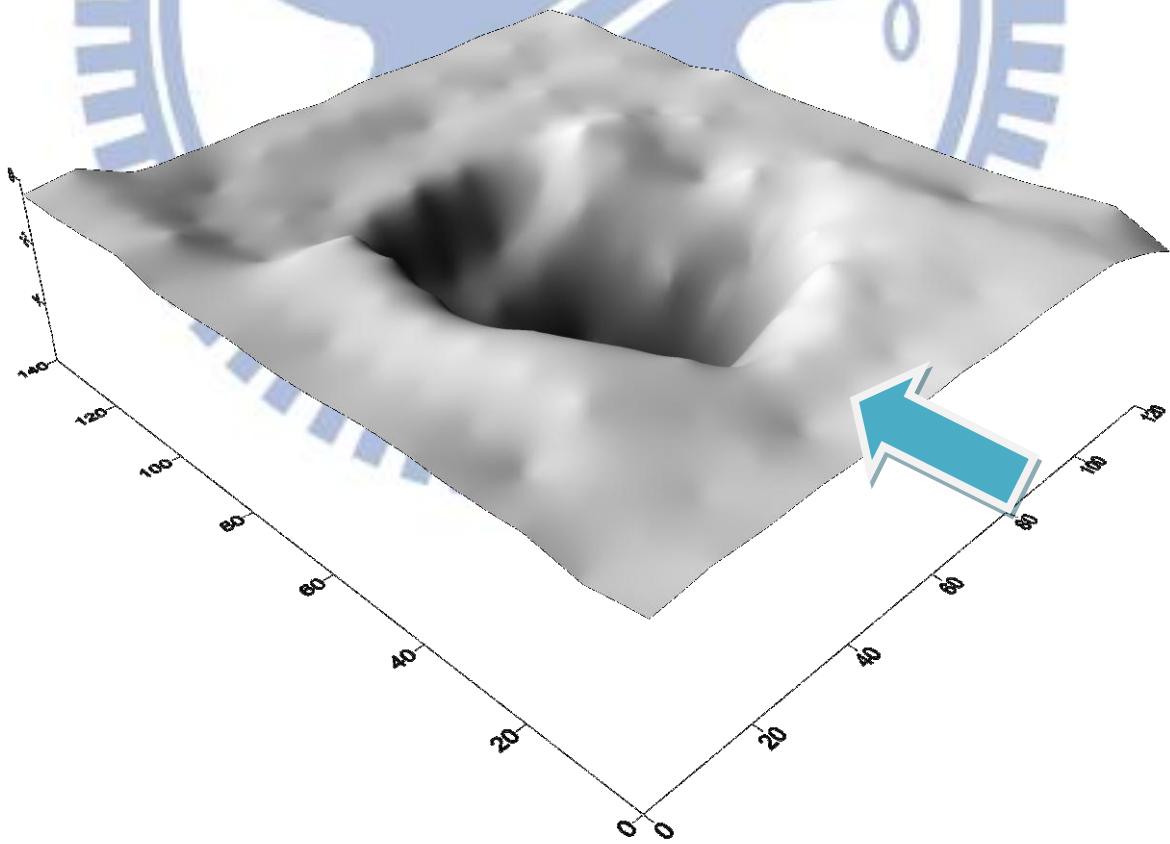


圖 4-10 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

### 4.3.2 尾水深 3D (7.62 cm)

試體編號 R3-70-3D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-11)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-12)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-7 顯示本試驗平均沖蝕率為  $76 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.06 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 24 小時至 48 小時沖刷深度增加 0.23 mm，可能接近最大沖刷深度，而在高角度沖刷下，順坡坡角大於逆坡坡角。由圖 4-13、圖 4-14 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度較 1D 尾水深的淺。

表 4-7 射流角度  $70^\circ$  尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
24	3126	130	2.52	0.11
48	3645	76	2.75	0.06

水流方向

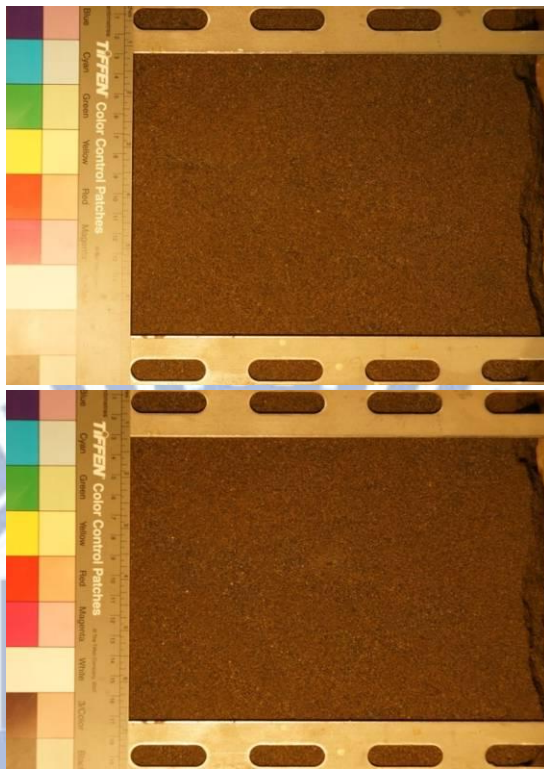


圖 4-11 R3-70-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時

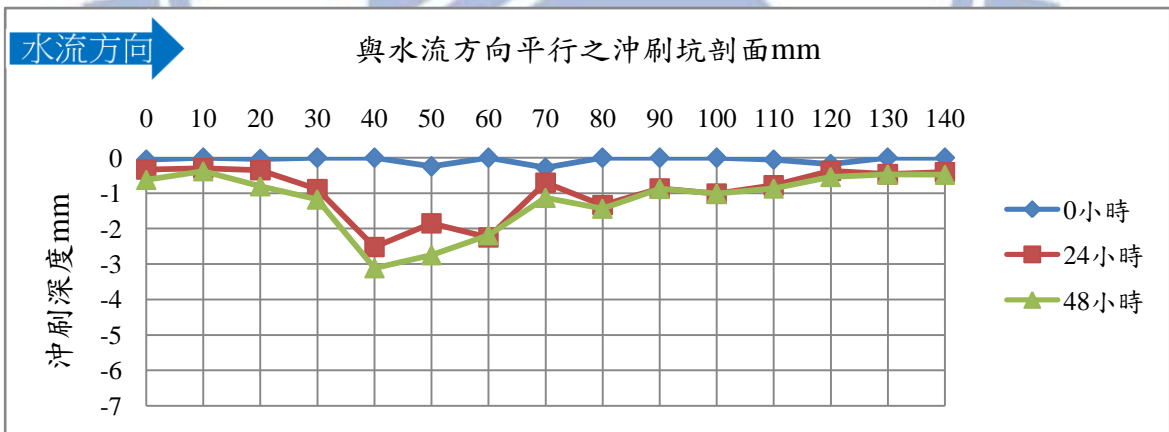


圖 4-12 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

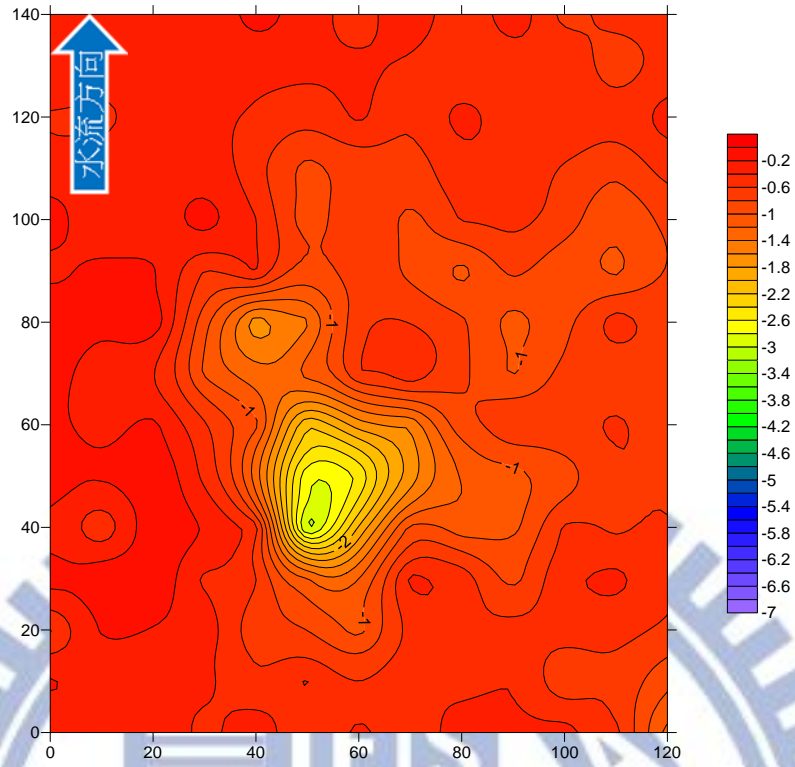


圖 4-13 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

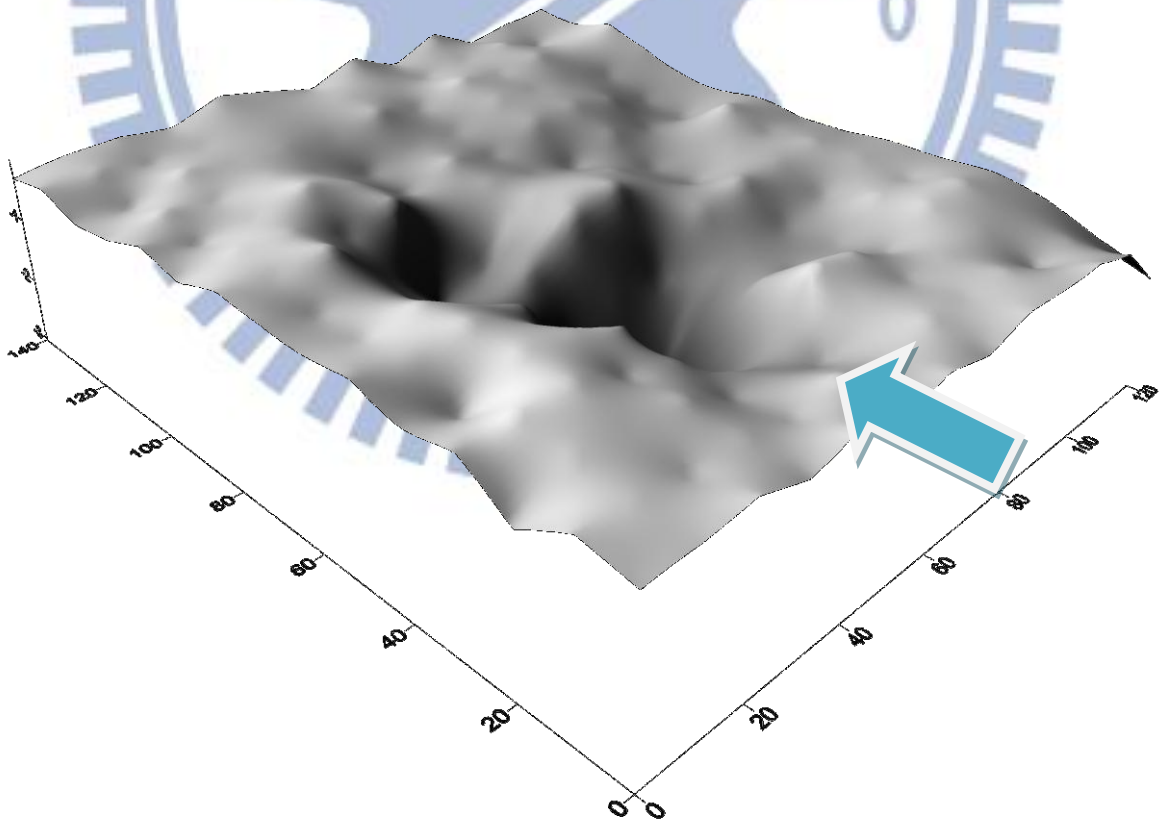


圖 4-14 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1



試體編號 R7-70-3D 在沖刷 0、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-15)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-16)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-8 顯示本試驗平均沖蝕率為  $127 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.06 \text{ mm/hr}$ ，四次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 24 小時後深度變化變小，48 小時後增加  $0.59 \text{ mm}$ ，可能接近極限沖刷深度，雖在高角度沖刷下，因尾水的增加，使的做功分散，順逆坡坡角的坡角大小比較不明顯。由圖 4-17、圖 4-18 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度較 1D 尾水深淺。

表 4-8 射流角度  $70^\circ$  尾水深  $7.62 \text{ cm}$  沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
10	5406	541	1.49	0.15
24	5500	229	2.24	0.09
48	6104	127	2.83	0.06



圖 4-15 R7-70-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時

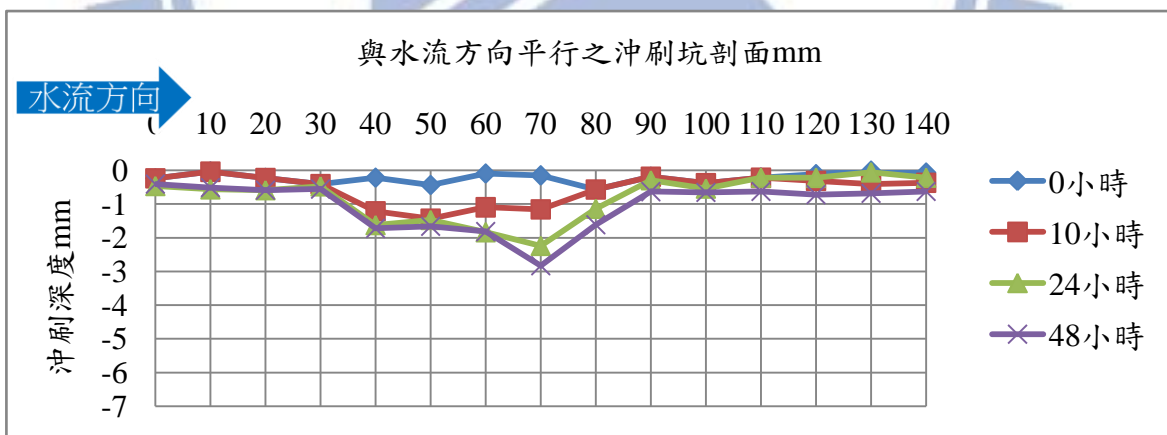


圖 4-16 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

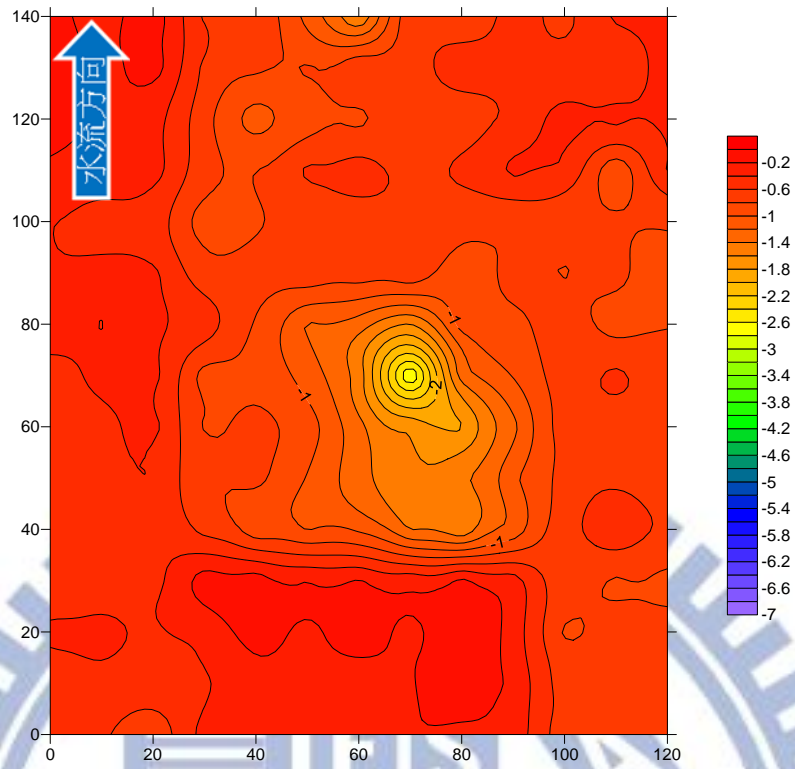


圖 4-17 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

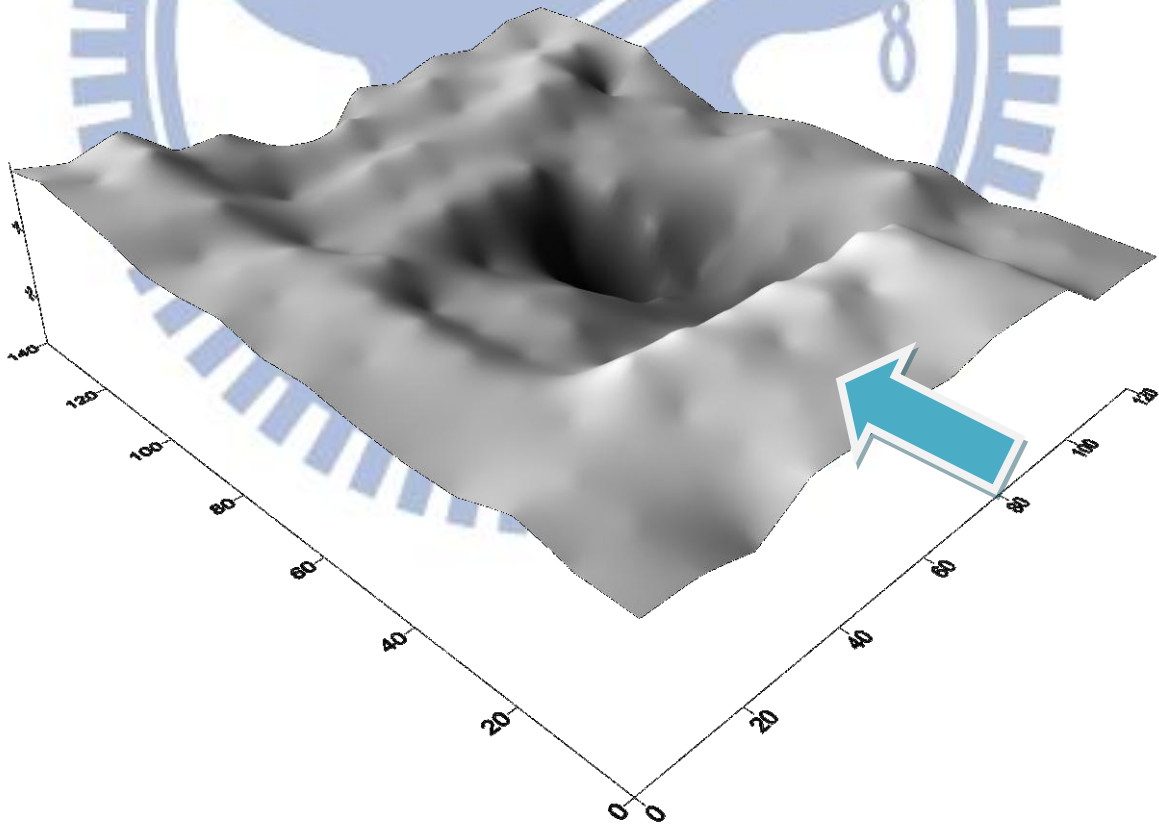


圖 4-18 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)，長：寬：高 = 1 : 1 : 0.05

### 4.3.3 尾水深 5D (12.7 cm)

試體編號 R3-70-5D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-19)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-20)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-9 顯示本試驗平均沖蝕率為  $127 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.06 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出雖然 24 小時後沖刷中心深度變大，但周圍的深度變化不明顯，可能接近極限沖刷深度，在高角度沖刷下，因尾水的增加，使的做功分散，順逆坡坡角的坡角大小比較不明顯。由圖 4-21、圖 4-22 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度較 3D 尾水深的淺。

表 4-9 射流角度  $70^\circ$  尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 (mm/hr)
0	0	0	0	0
24	1181	49	2.13	0.09
48	1799	37	2.46	0.05

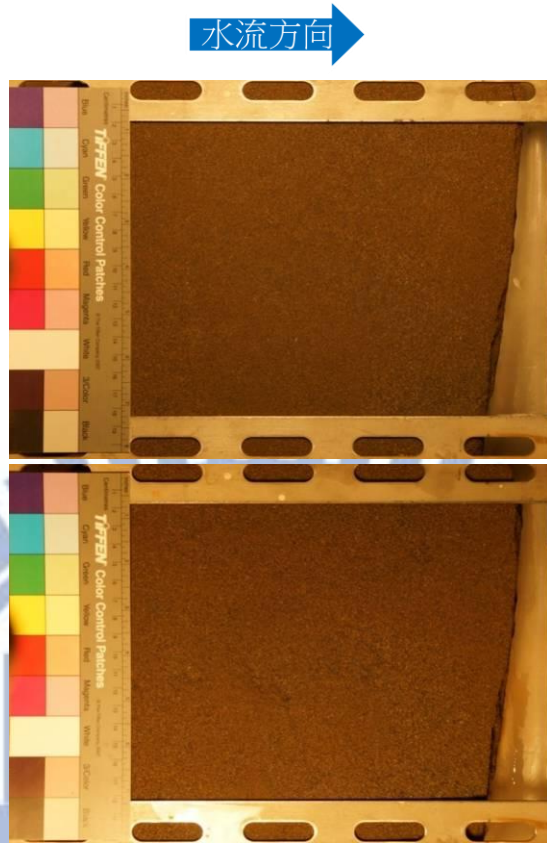


圖 4-19 R3-70-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時

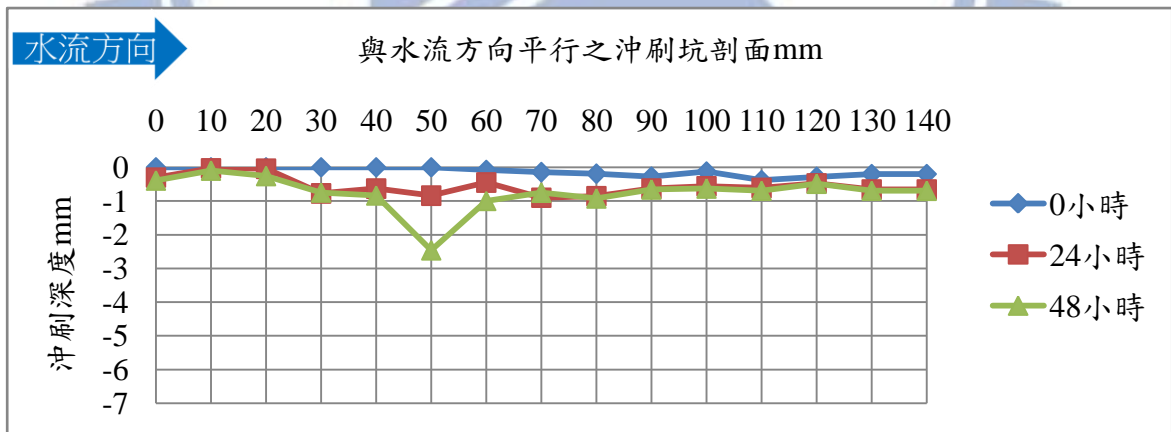


圖 4-20 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

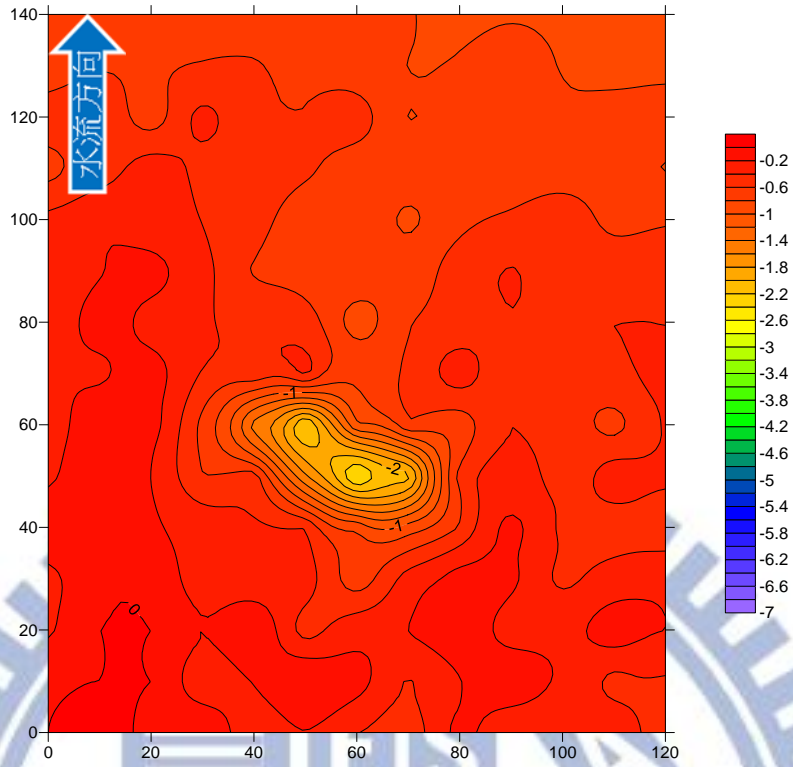


圖 4-21 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

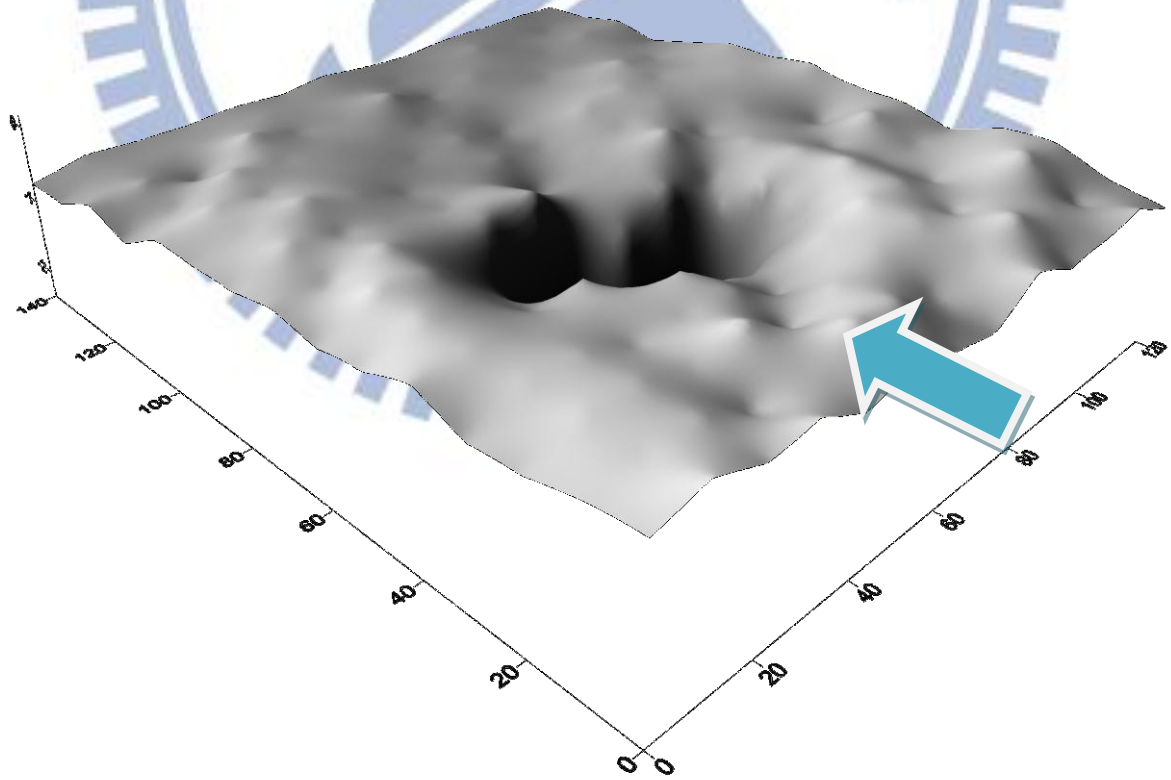


圖 4-22 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

試體編號 R7-70-5D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-23)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-24)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-10 顯示本試驗平均沖蝕率為  $66 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.04 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出雖然 24 小時後沖刷中心深度變化小，但周圍的深度慢慢刷深，尾水增加做功雖分散變小，但沖蝕範圍變大，雖在高角度沖刷下，但尾水的增加，順逆坡坡角的坡角大小比較不明顯。由圖 4-25、圖 4-26 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，使得雖然有向下沖刷但沖刷坑卻不明顯，沖刷中心點深度亦較 3D 尾水深淺。

表 4-10 射流角度  $70^\circ$  尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
24	2117	88	1.8	0.08
48	3164	66	1.98	0.04

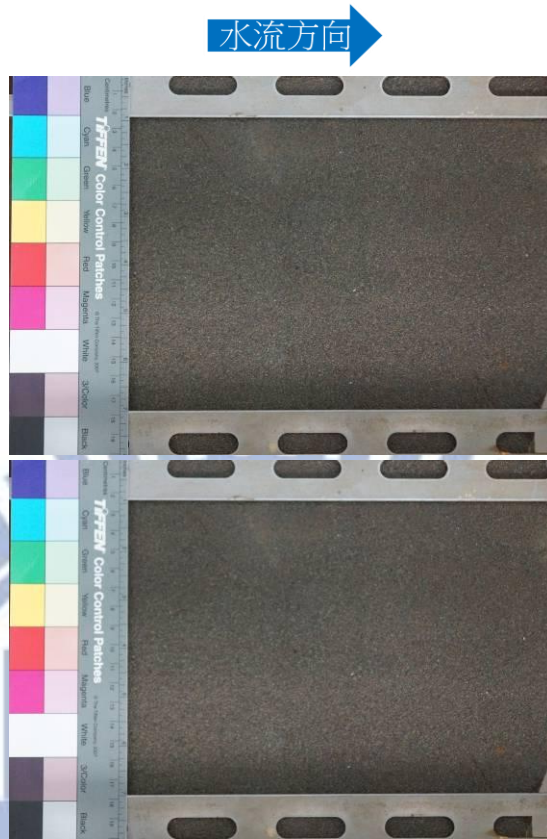


圖 4-23 R7-70-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時

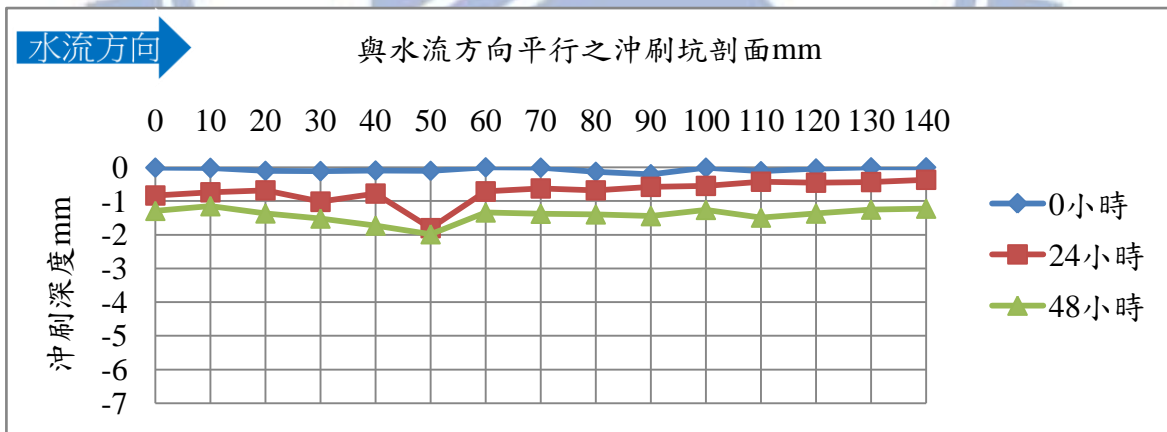


圖 4-24 尾水深 5D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)



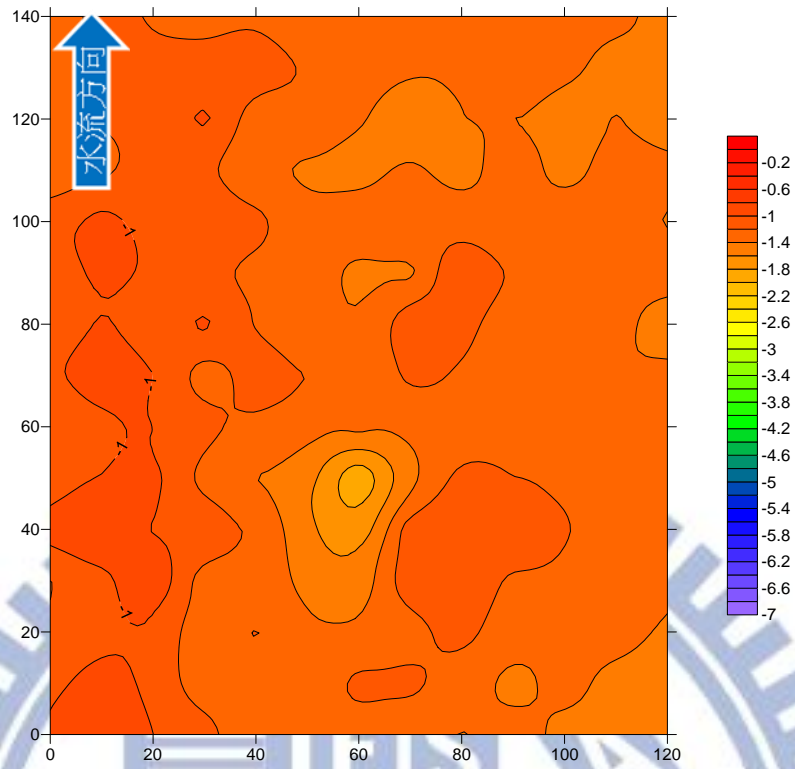


圖 4-25 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

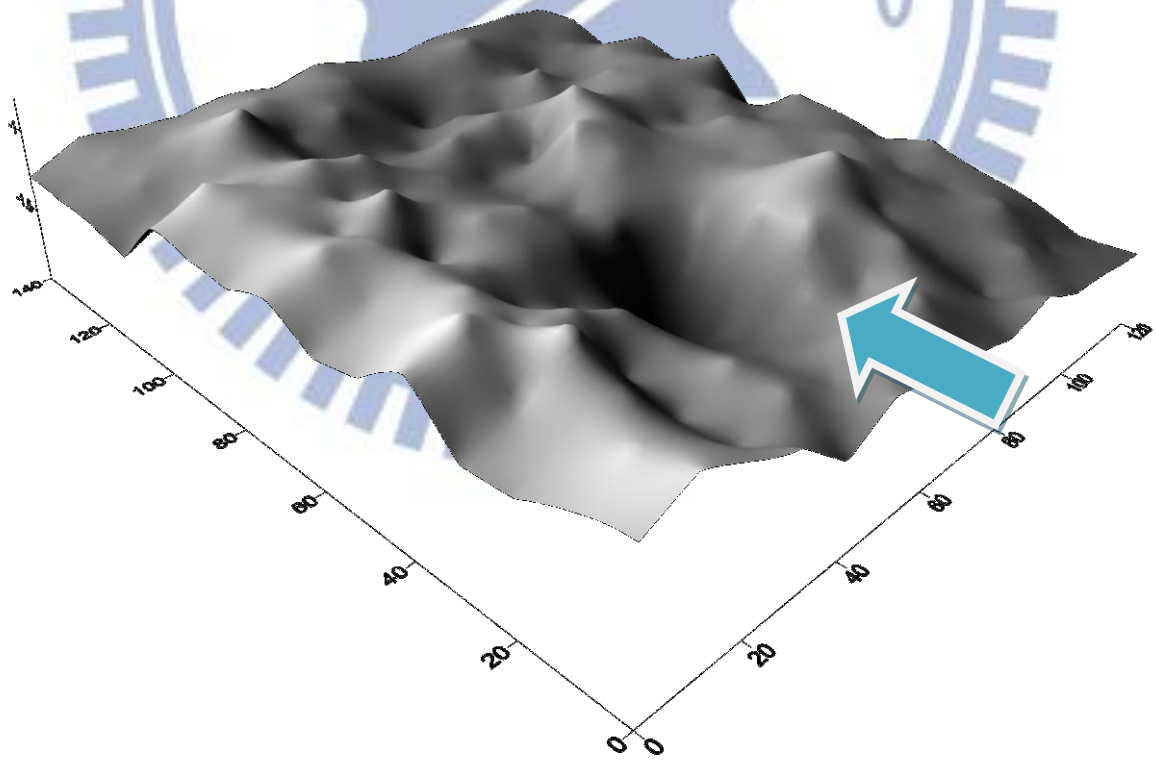


圖 4-26 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

射流角度為 50 度，尾水深分別為 1D、3D、5D 的試驗結果。

#### 4.3.4 尾水深 1D (2.54 cm)

試體編號 R2-50-1D 在沖刷 0、1、4、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面 (圖 4-27)。由沖蝕坑剖面圖 (圖 4-28)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-11 顯示本試驗平均沖蝕率為  $66 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.04 \text{ mm/hr}$ ，六次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出雖然 24 小時後沖刷中心深度變化小，但周圍的深度慢慢刷深，角度減少做功雖分散且變小，但沖蝕範圍變大，因沖刷角度變小，使得逆坡坡角變小，沖刷比高角度沖刷明顯。由圖 4-29、圖 4-30 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較 70 度角的淺。

表 4-11 射流角度  $50^\circ$  尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 (mm/hr)
0	0	0	0	0
1	743	743	1.12	1.12
4	1159	290	1.61	0.4
10	1693	169	2.26	0.23
24	4576	191	3.84	0.16
48	5213	109	4.96	0.1

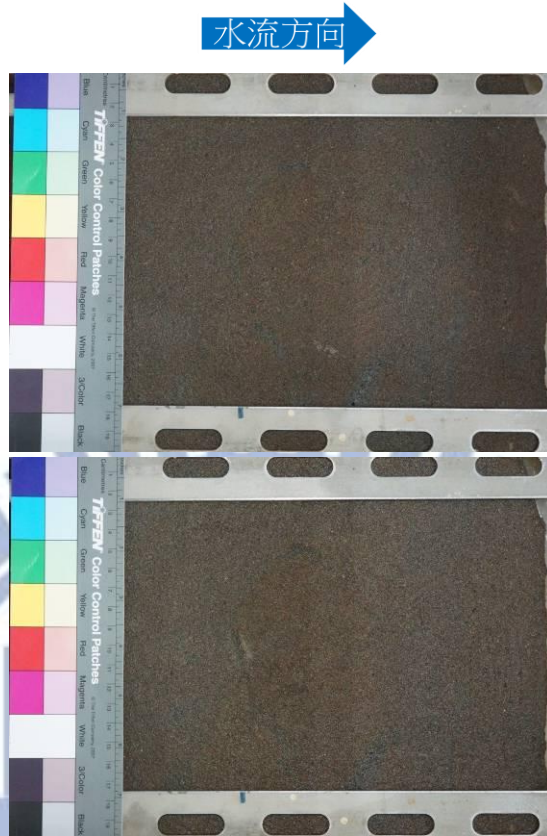


圖 4-27 R2-50-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時

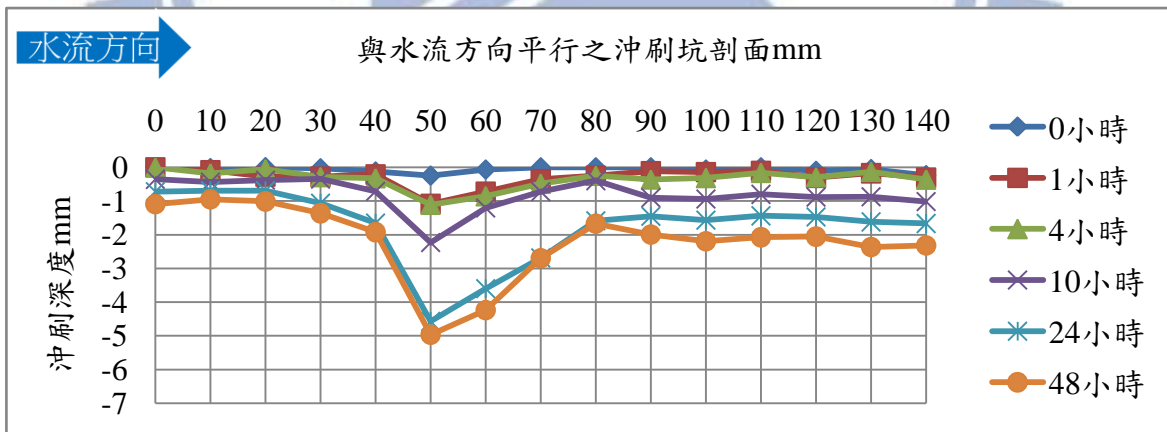


圖 4-28 尾水深 1D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

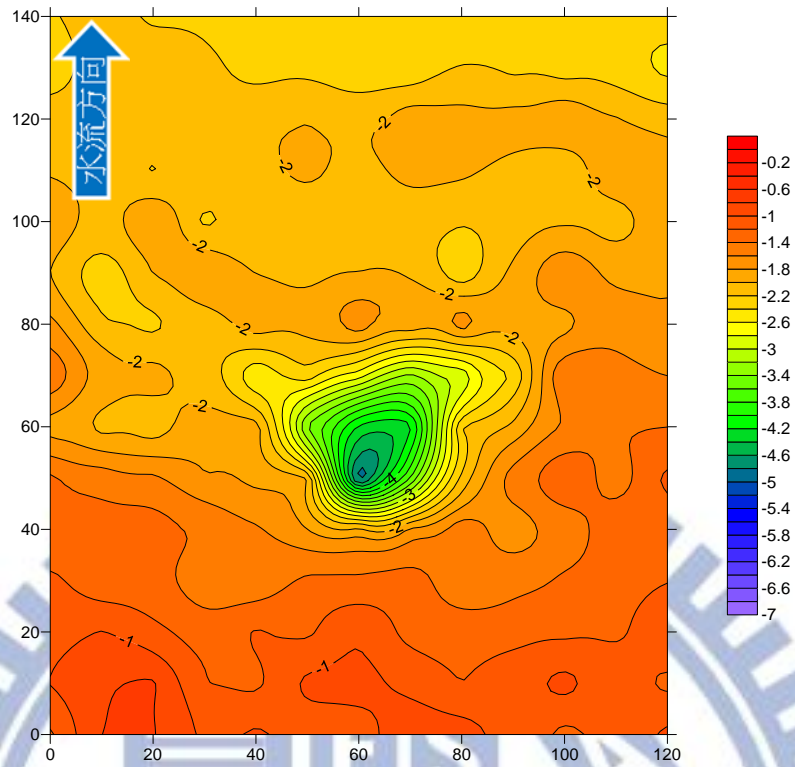


圖 4-29 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

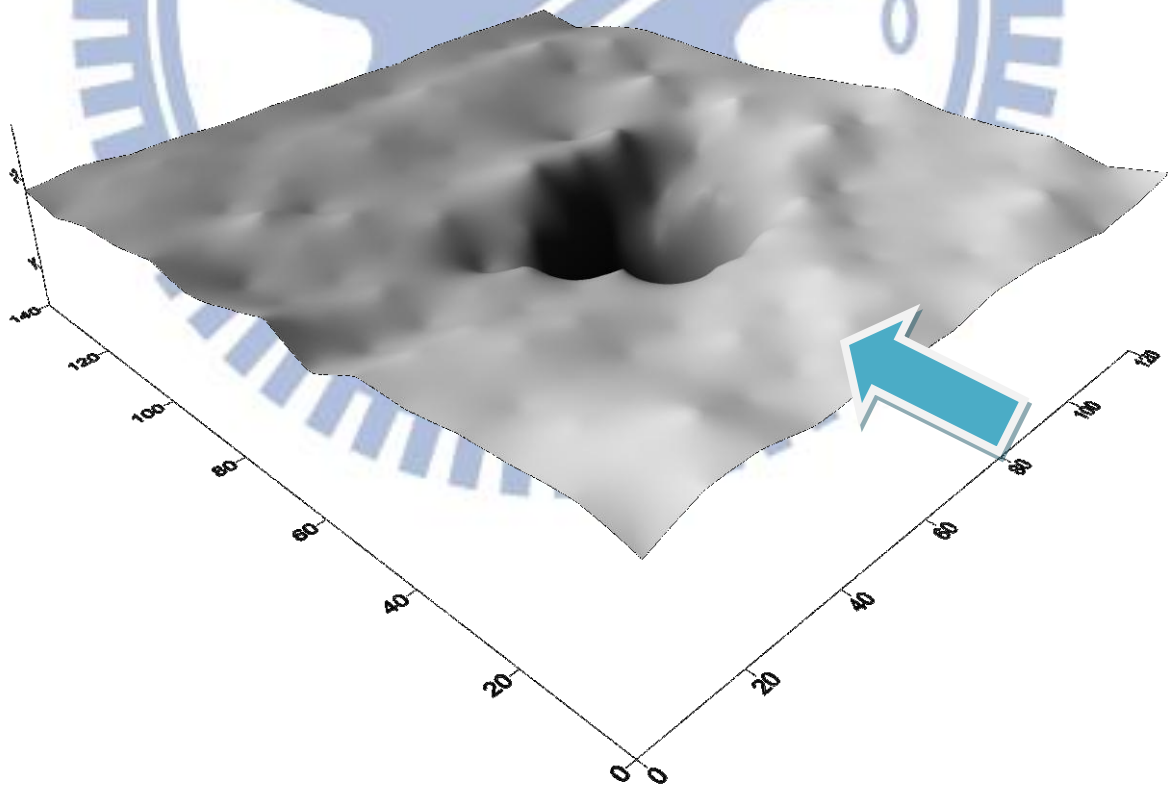


圖 4-30 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

試體編號 R5-50-1D 在沖刷 0、4、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-31)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-32)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-12 顯示本試驗平均沖蝕率為  $49 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.09 \text{ mm/hr}$ ，五次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出雖然 24 小時後沖刷中心深度變化小，但周圍的深度慢慢刷深，角度減少做功雖分散且變小，但沖蝕範圍變大，因沖刷角度變小，使得逆坡坡角變小，逆坡方向的沖刷比高角度沖刷明顯。由圖 4-33、圖 4-34 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較 70 度角的淺。

表 4-12 射流角度  $50^\circ$  尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
10	627	62	2.54	0.25
24	1974	82	3.45	0.14
48	2373	49	4.47	0.09

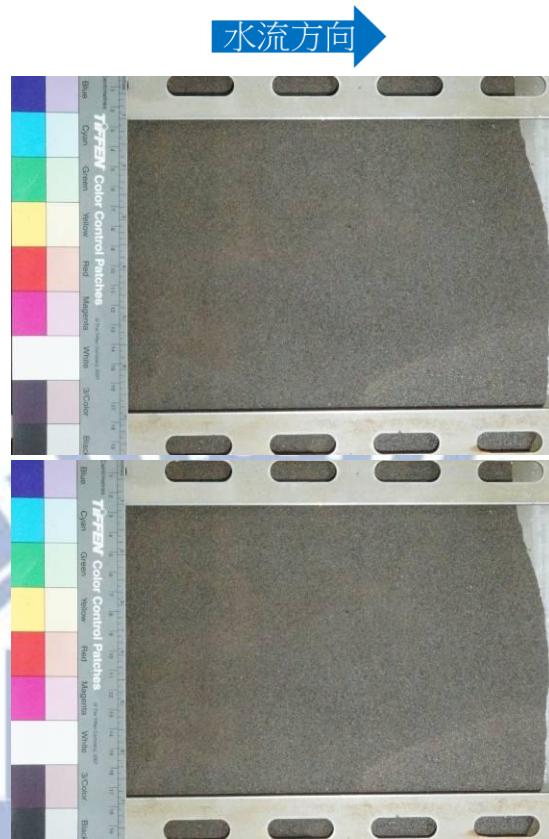


圖 4-31 R5-50-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時

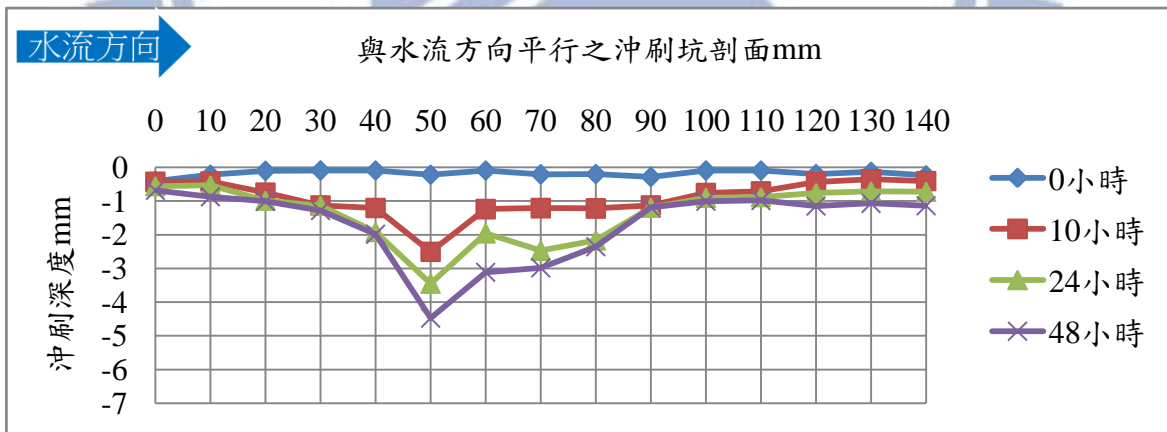


圖 4-32 尾水深 1D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

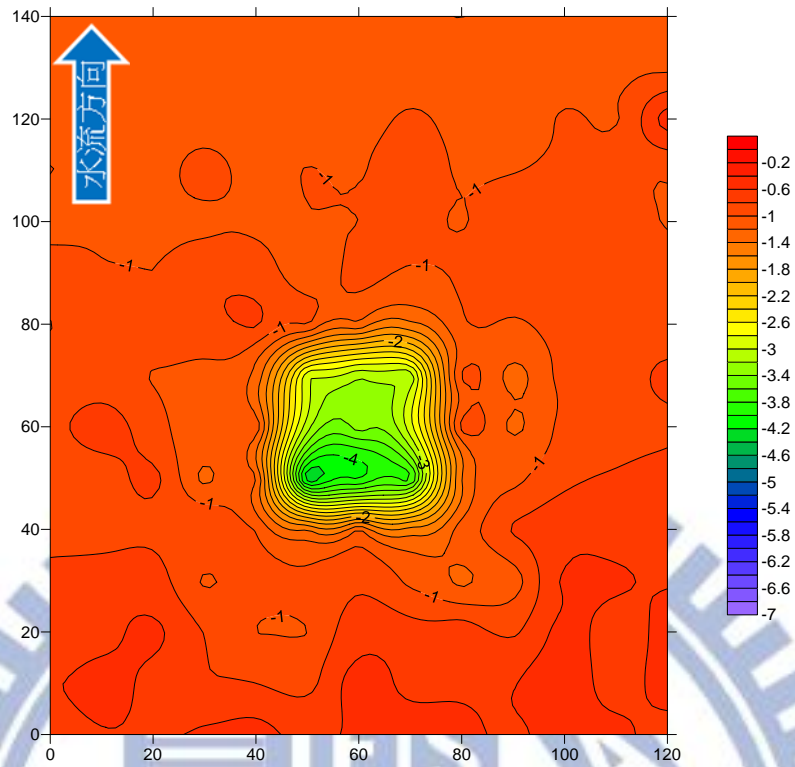


圖 4-33 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

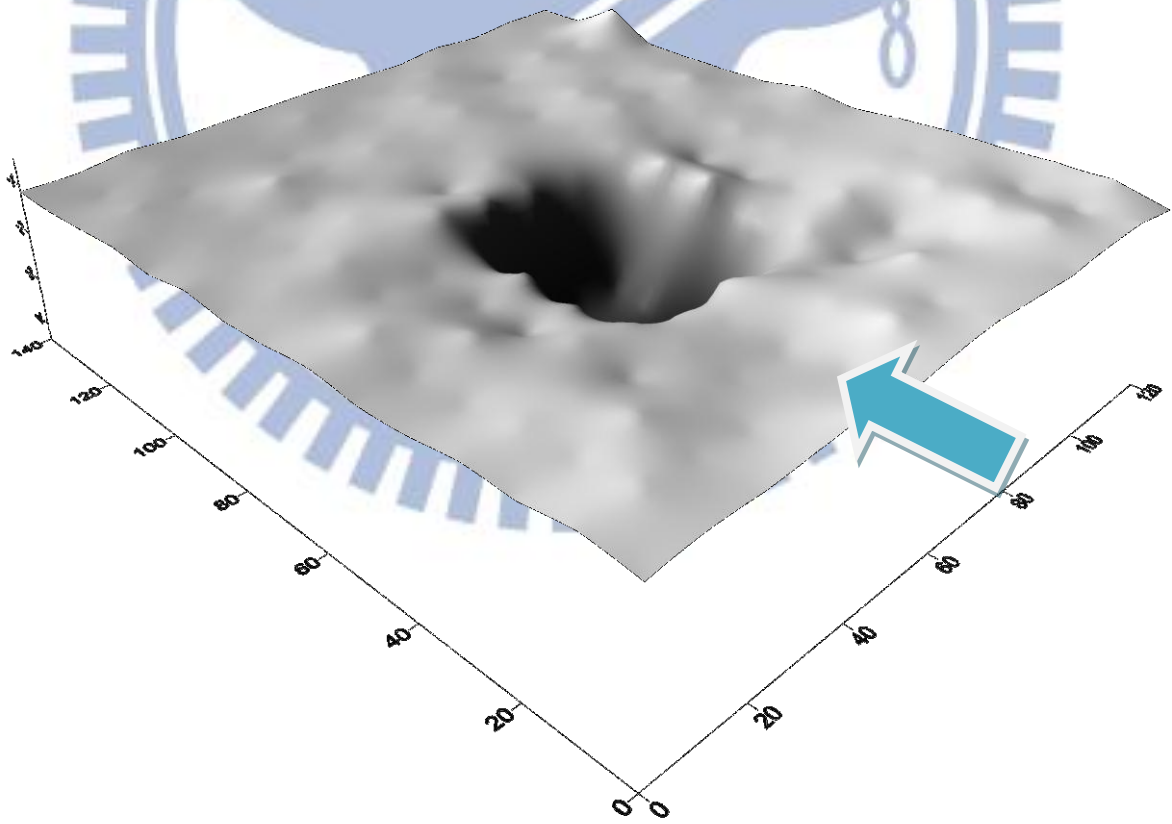


圖 4-34 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.05

#### 4.3.5 尾水深 3D (7.62 cm)

試體編號 R2-50-3D 在沖刷 0、4、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-35)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-36)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-13 顯示本試驗平均沖蝕率為  $49 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.09 \text{ mm/hr}$ ，五次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出雖然 24 小時後沖刷中心深度變大，但周圍的深度變化小，尾水增加使做功分散變小，並讓順逆坡坡角大小不明顯。由圖 4-37、圖 4-38 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較 1D 尾水深的淺。

表 4-13 射流角度  $50^\circ$  尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
4	649	162	1.7	0.43
10	792	79	1.74	0.17
24	2527	105	2.31	0.1
48	3656	76	3.61	0.08



水流方向



圖 4-35 R2-50-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時

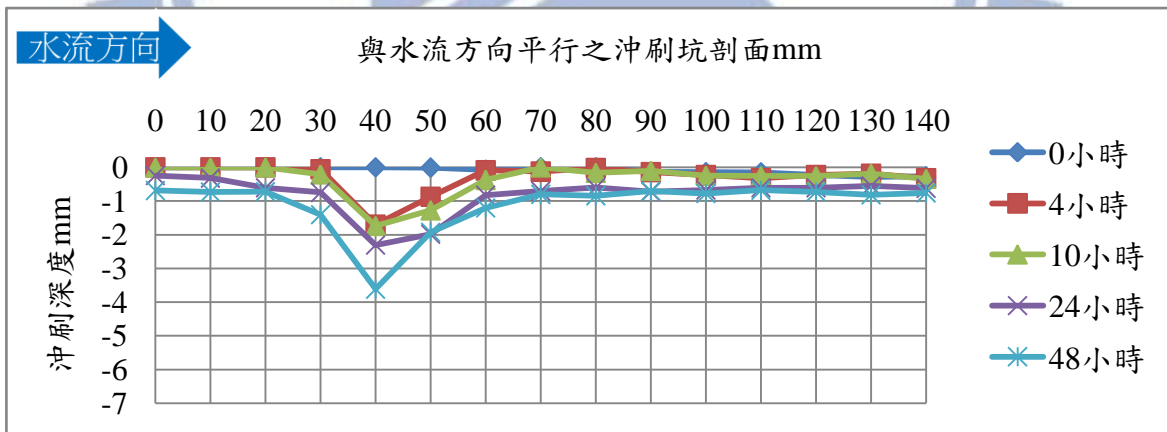


圖 4-36 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

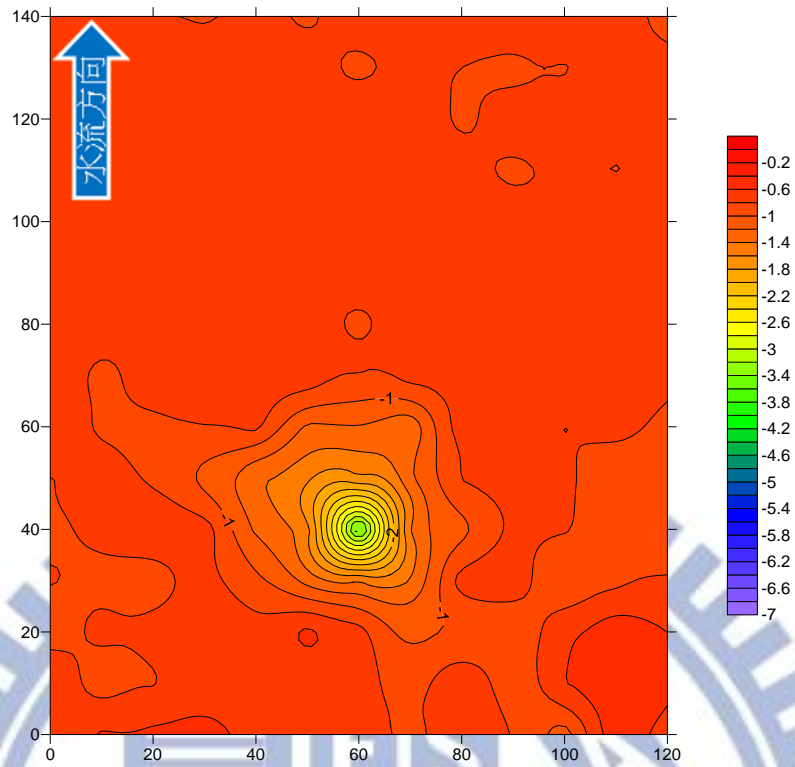


圖 4-37 以 Surfer9 繪製沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

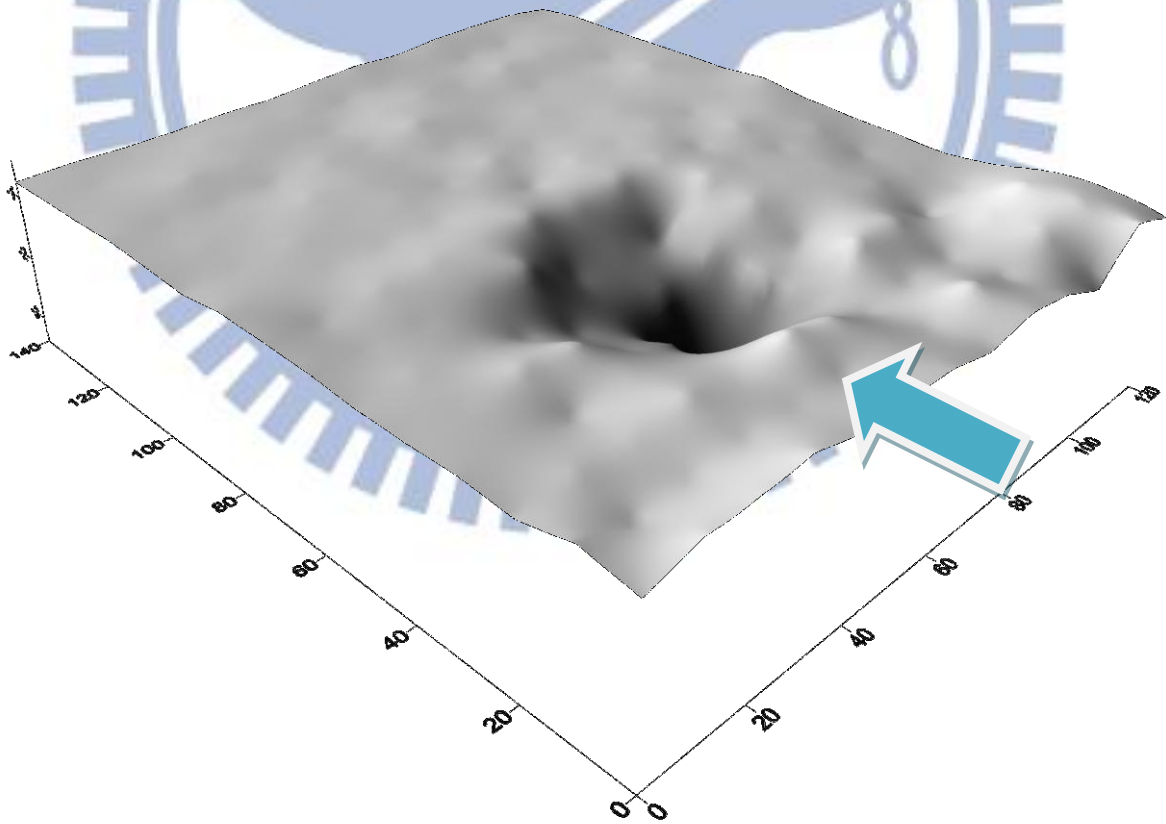


圖 4-38 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

試體 R5-50-3D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面（圖 4-39）。由沖蝕坑剖面圖（圖 4-40），可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-14 顯示本試驗平均沖蝕率為  $179 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.07 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 24 小時後沖刷中心深度變化小，而周圍的深度變化小，尾水增加使做功分散變小，並讓順逆坡坡角大小不明顯。由圖 4-41、圖 4-42 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較 1D 尾水深

的淺。

表 4-14 射流角度  $50^\circ$  尾水深 7.62cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
24	7595	316	2.77	0.12
48	8581	179	3.58	0.07



圖 4-39 R5-50-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時

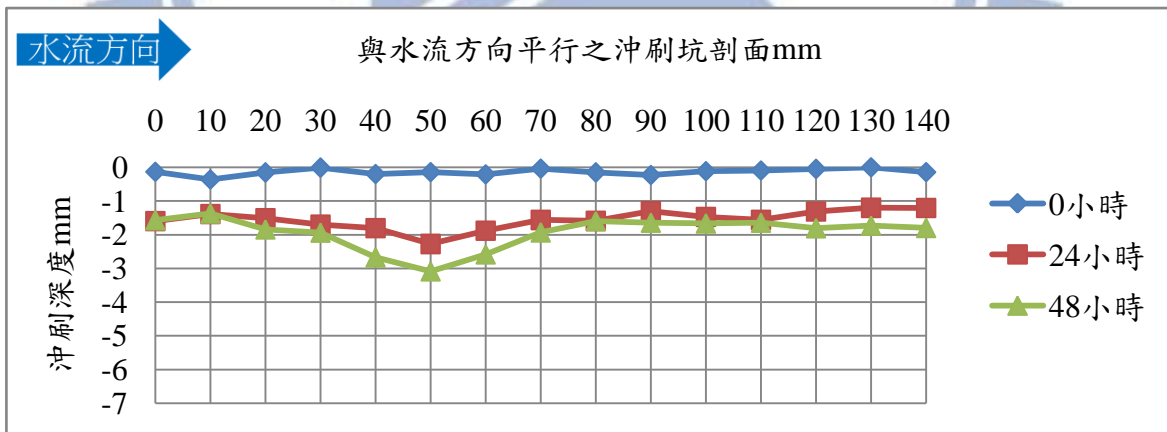


圖 4-40 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

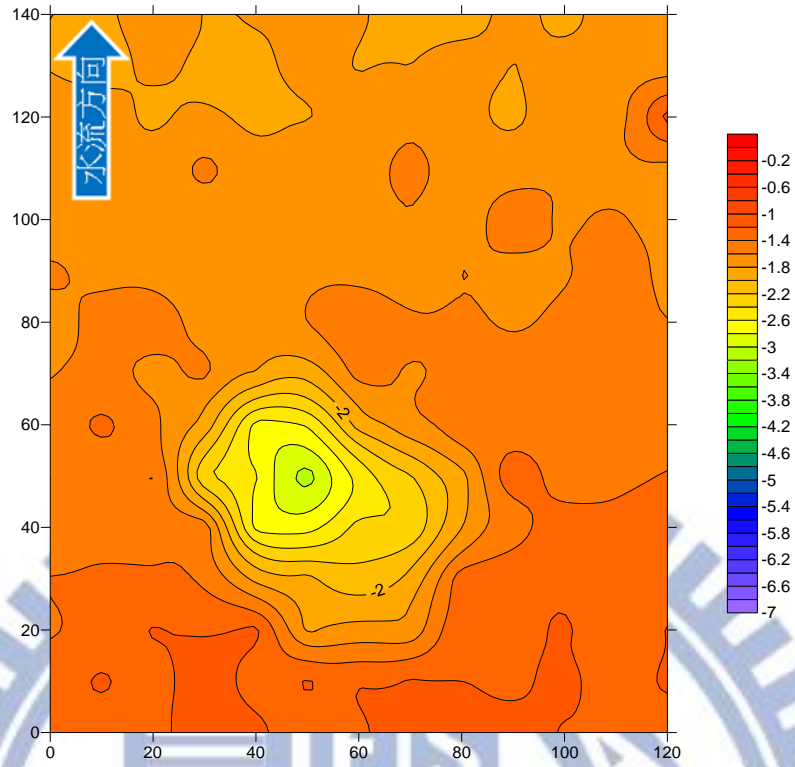


圖 4-41 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

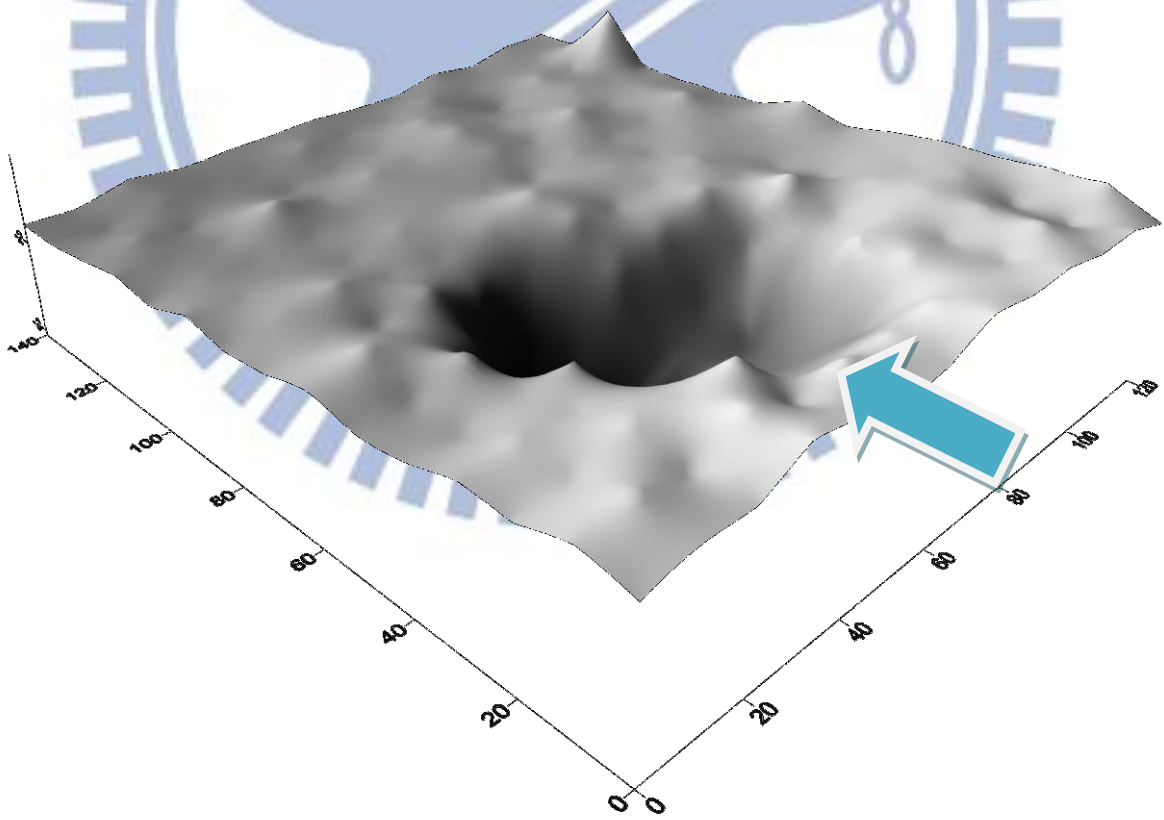


圖 4-42 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.05

#### 4.3.6 尾水深 5D (12.7 cm)

試體編號 R6-50-5D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-43)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-44)，可看出不同時段下沖擊點皆在 60 mm 處。表 4-15 顯示本試驗平均沖蝕率為  $36 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.05 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 24 小時後沖刷中心深度變化小，而周圍的深度變化小，尾水增加使做功分散變小，但沖蝕範圍變大，並讓順逆坡坡角大小不明顯。由圖 4-45、圖 4-46 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較 3D 尾水深的淺。

表 4-15 射流角度  $50^\circ$  尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
24	1291	54	1.78	0.07
48	1726	36	2.31	0.05



圖 4-43 R6-50-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時

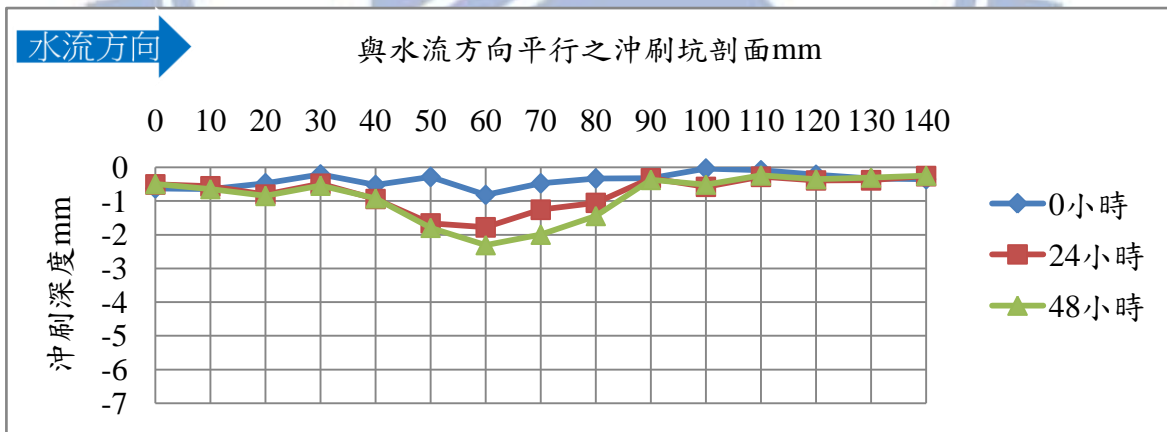


圖 4-44 尾水深 5D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

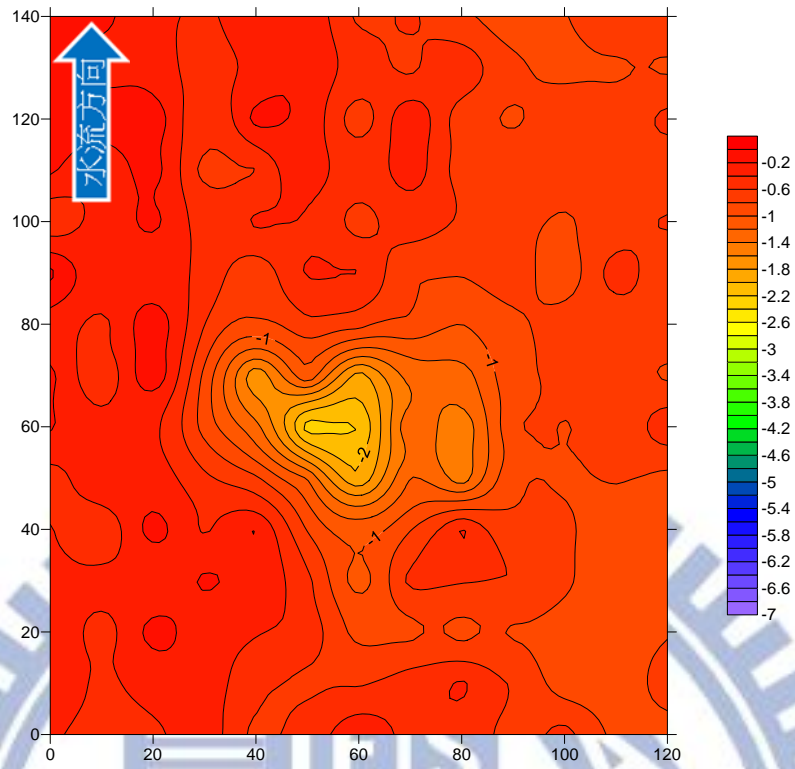


圖 4-45 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

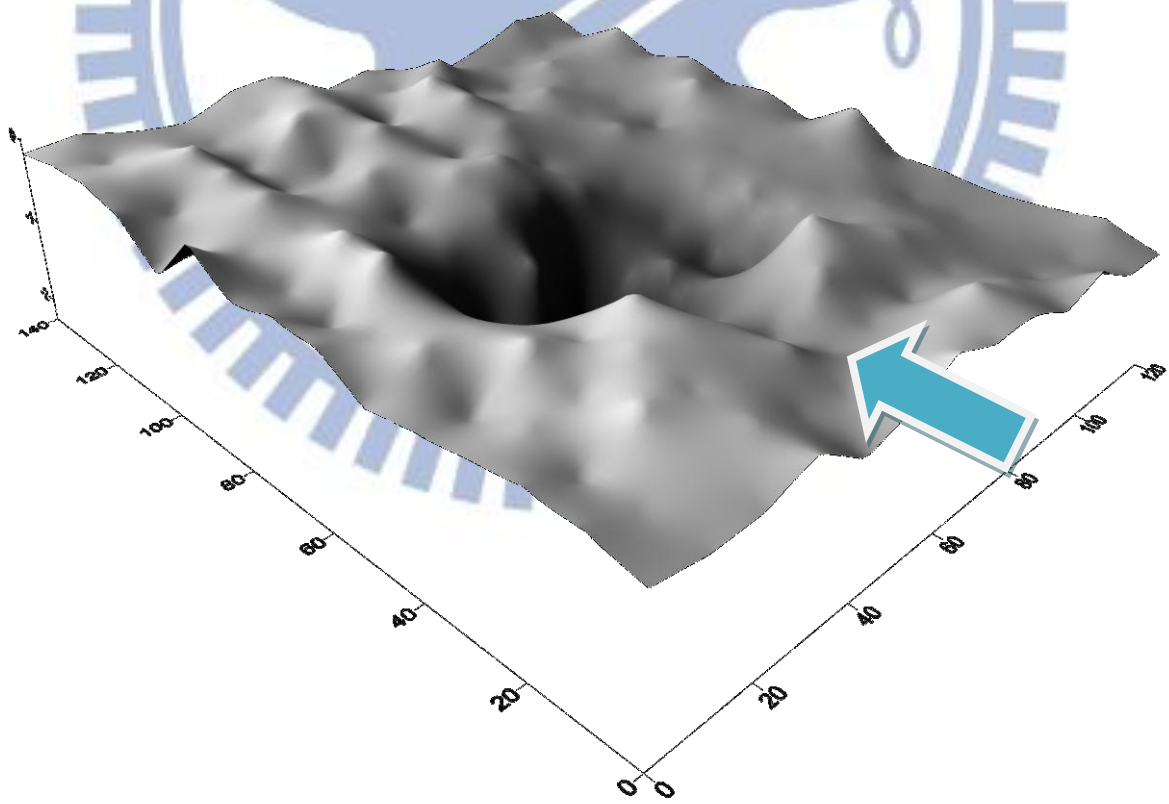


圖 4-46 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.05



試體編號 R6-50-5D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-47)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-48)，可看出不同時段下沖擊點皆在 90 mm 處，表 4-16 顯示本試驗平均沖蝕率為  $90 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.05 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出 24 小時後沖刷中心深度變化小，而周圍的深度變化小，尾水深的增加，使得做功不集中，造成沖刷範圍雖大但深度變化變小，沖刷坑也不明顯。由圖 4-49、圖 4-50) 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較 3D 尾水深的淺。

表 4-16 射流角度  $50^\circ$  尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
10	1851	185	1.35	0.14
24	2155	90	2.02	0.08
48	2234	47	2.24	0.05

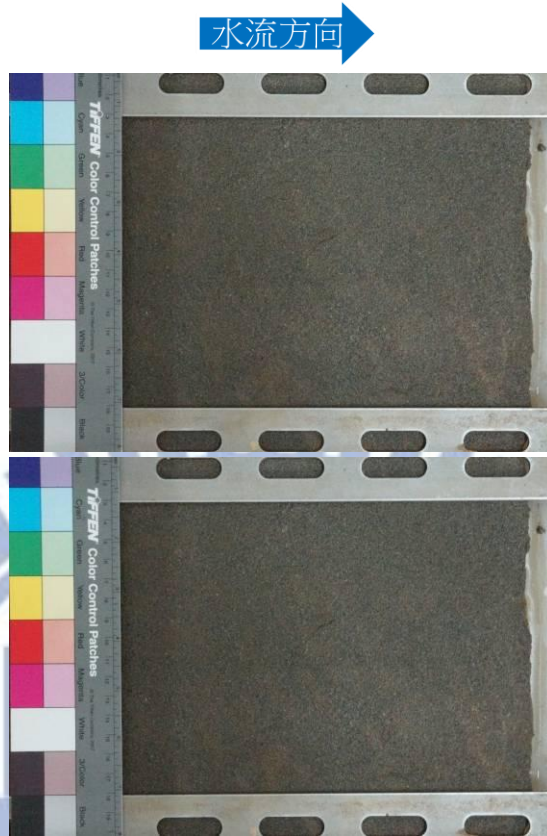


圖 4-47 R6-50-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時

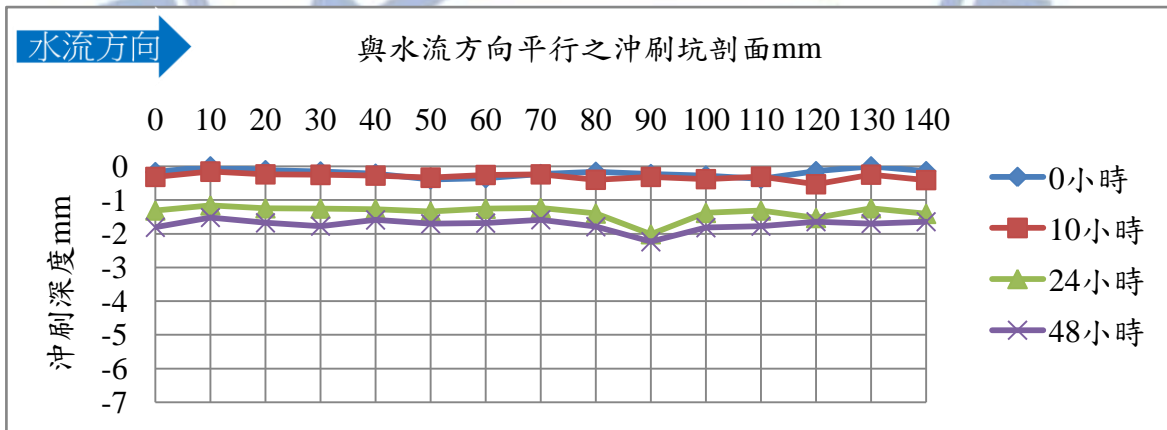


圖 4-48 尾水深 5D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

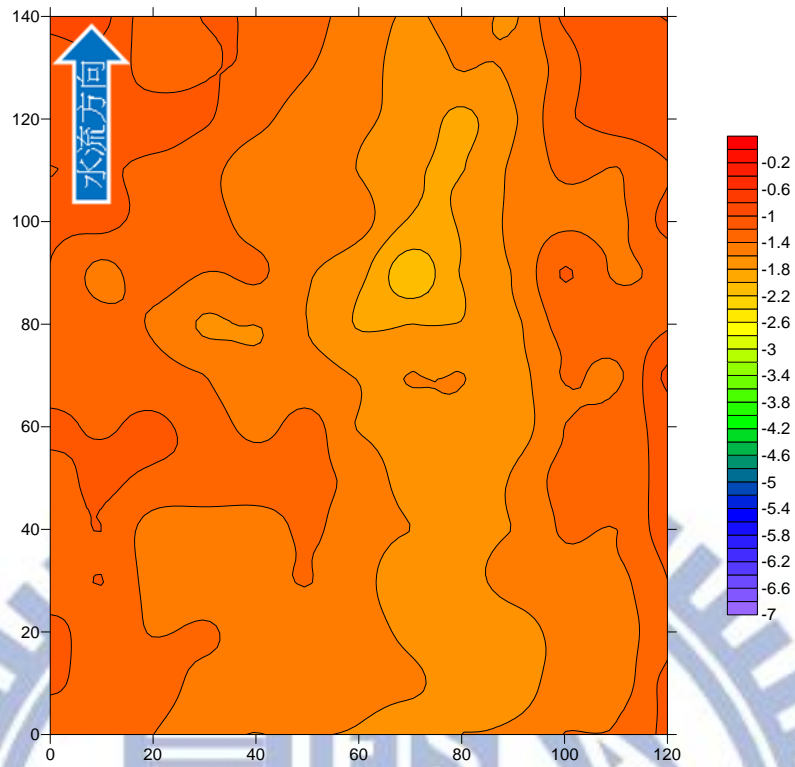


圖 4-49 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

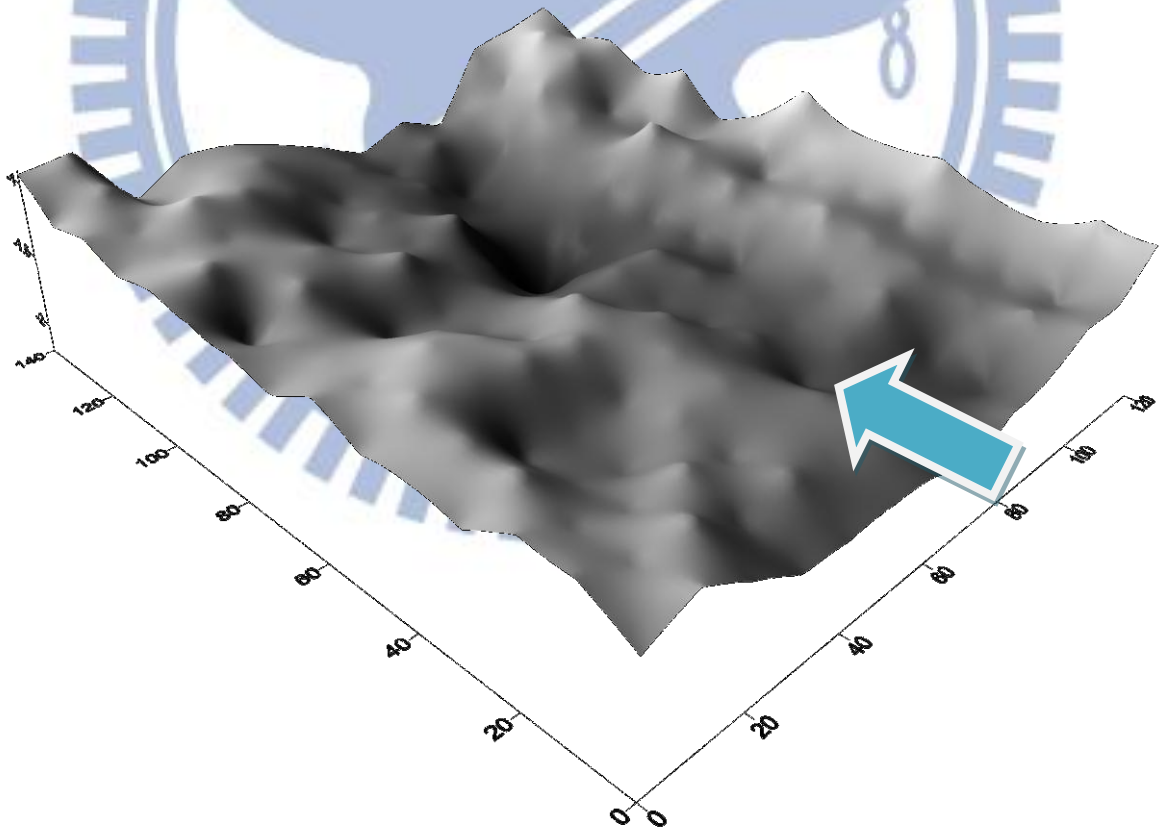


圖 4-50 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.025

射流角度為 30 度，尾水深分別為 1D、3D、5D 的試驗結果。

#### 4.3.7 尾水深 1D (2.54 cm)

試體編號 R1-30-1D 在沖刷 0、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面（圖 4-51）。由沖蝕坑剖面圖（圖 4-52），可看出不同時段下沖擊點皆在 80 mm 處，表 4-17 顯示本試驗平均沖蝕率為  $216 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.1 \text{ mm/hr}$ ，四次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出沖刷角度變小，使初始沖刷坑面較大，順逆坡的坡角角度較平緩。由圖 4-53、圖 4-54 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較高角度來的淺。

表 4-17 射流角度  $30^\circ$  尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
10	3623	362	3.66	0.37
24	5026	209	4.37	0.18
48	10372	216	4.99	0.1

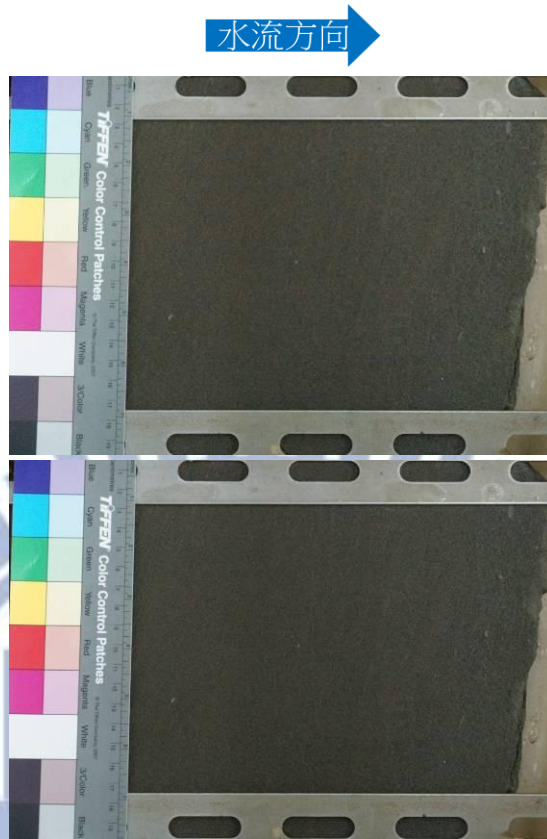


圖 4-51 R1-30-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時

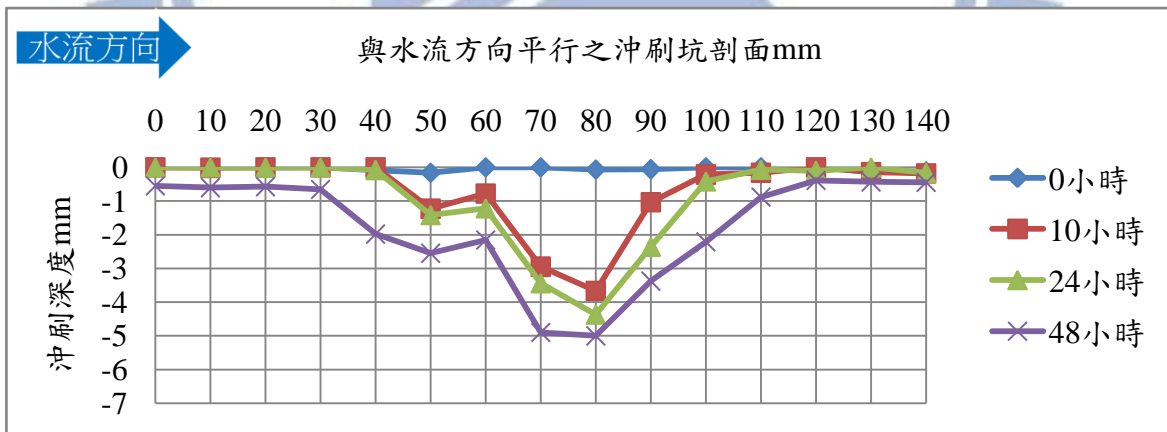


圖 4-52 尾水深 1D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

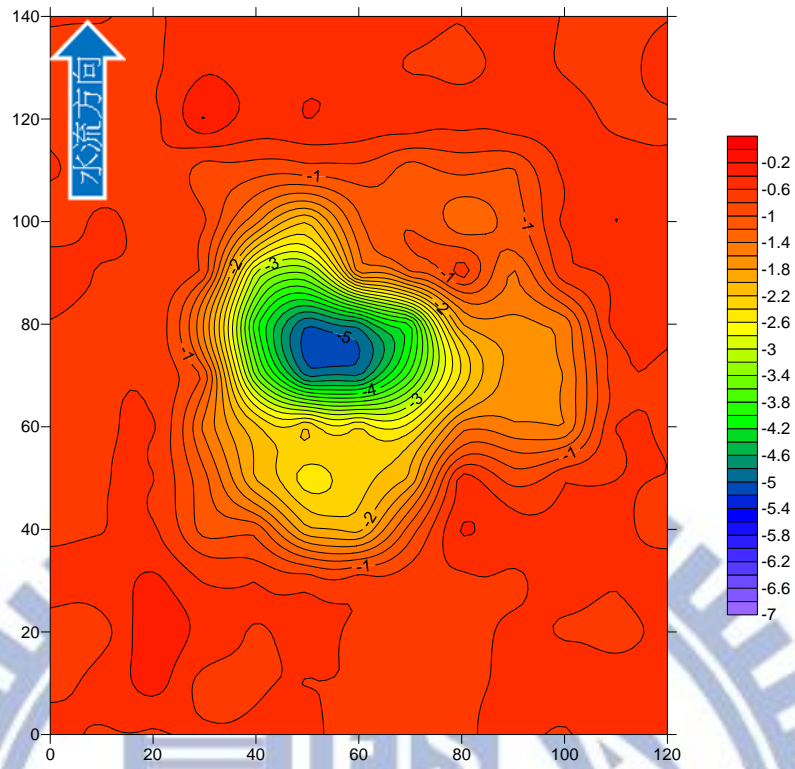


圖 4-53 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

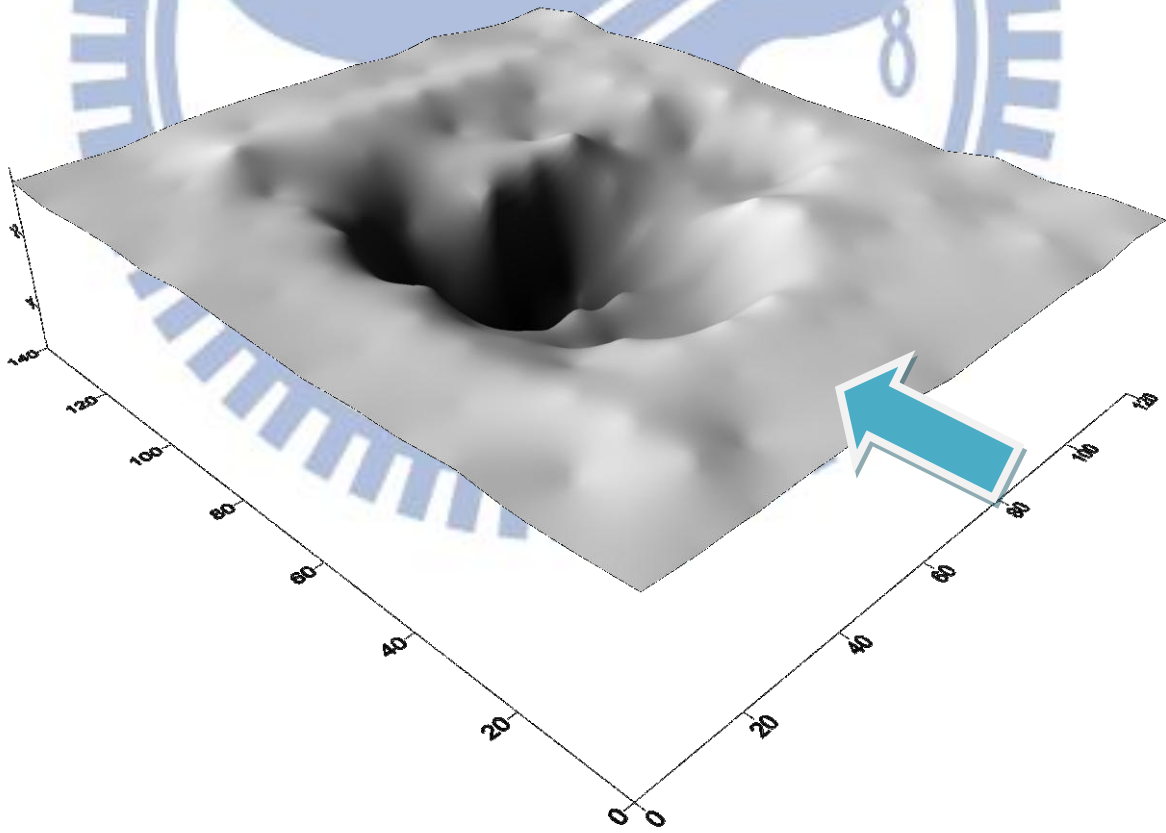


圖 4-54 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

試體編號 R4-30-1D 在沖刷 0、10、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面（圖 4-55）。由沖蝕坑剖面圖（圖 4-56），可看出不同時段下沖擊點皆在 40 mm 處，表 4-18 顯示本試驗平均沖蝕率為  $43 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.08 \text{ mm/hr}$ ，四次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出沖刷角度變小，使初始沖刷坑面較大但深度變化變小，順逆坡的坡角角度較平緩。由圖 4-57、圖 4-58 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度亦較高角度來的淺。

表 4-18 射流角度  $30^\circ$  尾水深 2.54 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
10	733	73	2.33	0.23
24	1690	70	3.55	0.15
48	2074	43	3.85	0.08

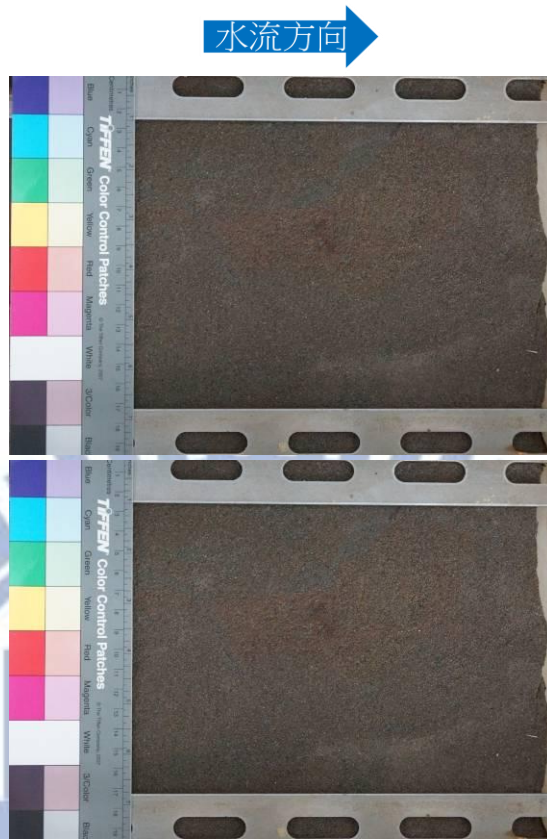


圖 4-55 R4-30-1D (上) 0 小時 (下) 48 小時

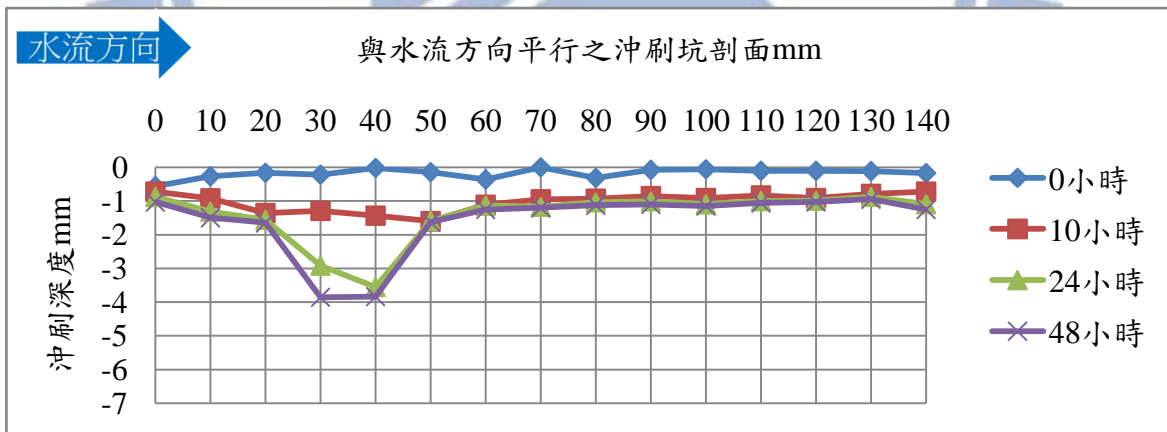


圖 4-56 尾水深 5D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)



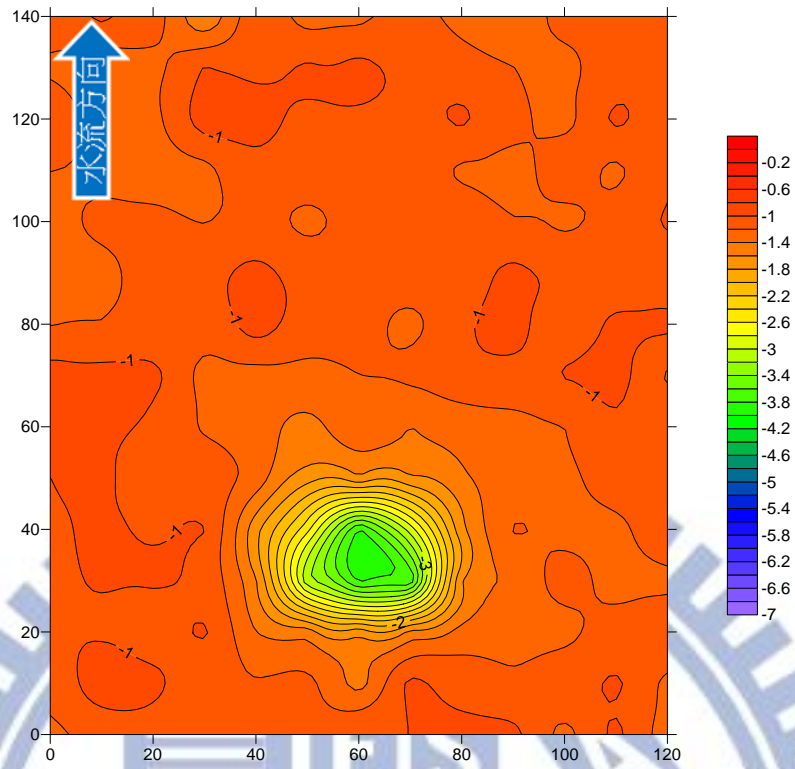


圖 4-57 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

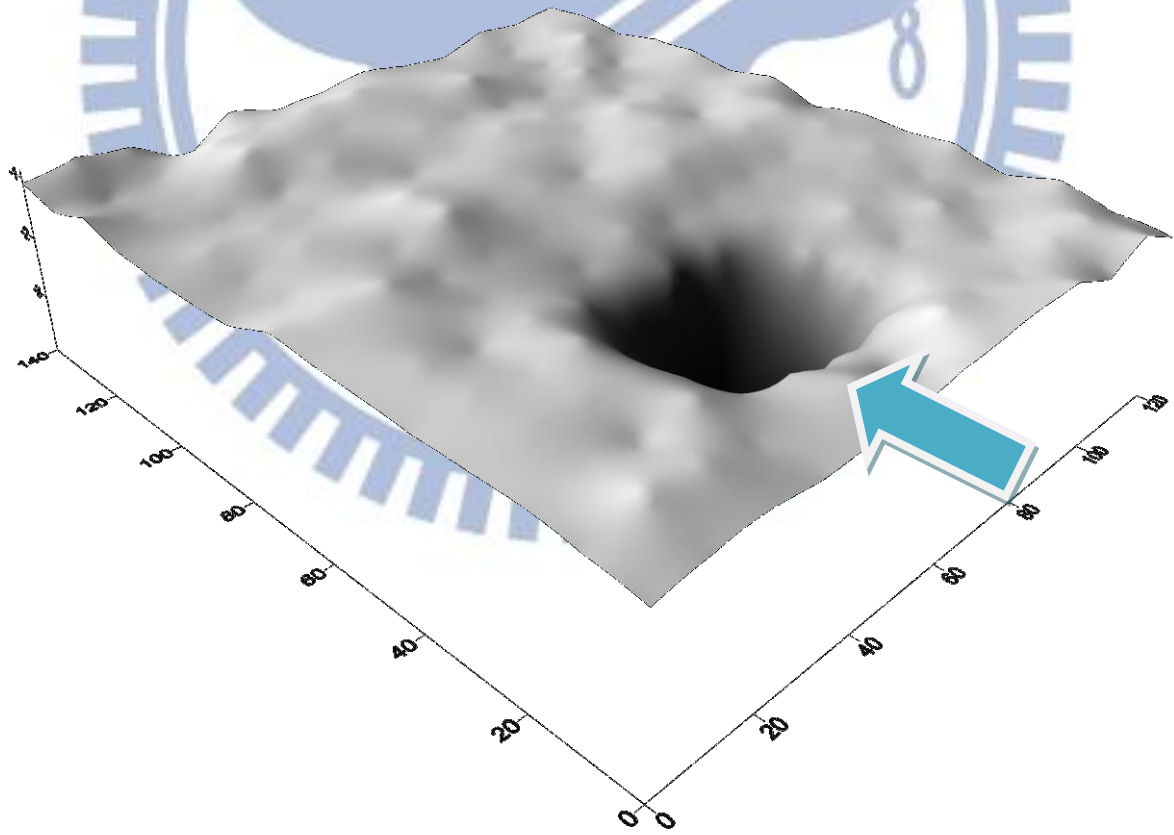


圖 4-58 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

#### 4.3.8 尾水深 3D (7.62 cm)

試體編號 R1-30-3D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-59)。

由沖蝕坑剖面圖(圖 4-60)，可看出不同時段下沖擊點皆在 60 mm 處。

表 4-19 顯示本試驗平均沖蝕率為  $126 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.06 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出沖刷角度變小，使初始沖刷坑面較大，在加上尾水的增加，使深度變化變小，沖刷坑的形成也不明顯。由圖 4-61、圖 4-62 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，沖刷範圍與位置雷同，沖刷中心點深度較 1D 尾水深來的淺。

表 4-19 射流角度  $30^\circ$  尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 (mm/hr)
0	0	0	0	0
4	755	189	0.93	0.23
10	1102	110	1.32	0.13
24	1884	79	1.8	0.08
48	6044	126	2.94	0.06

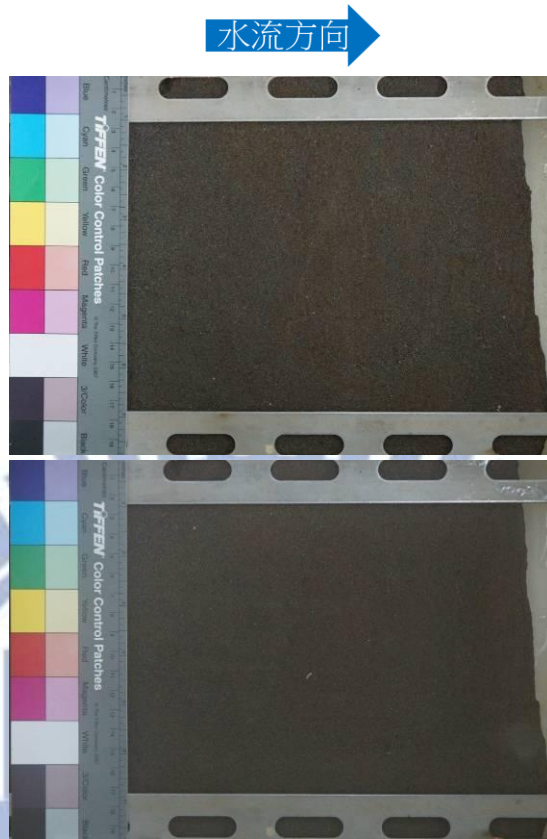


圖 4-59 R1-30-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時

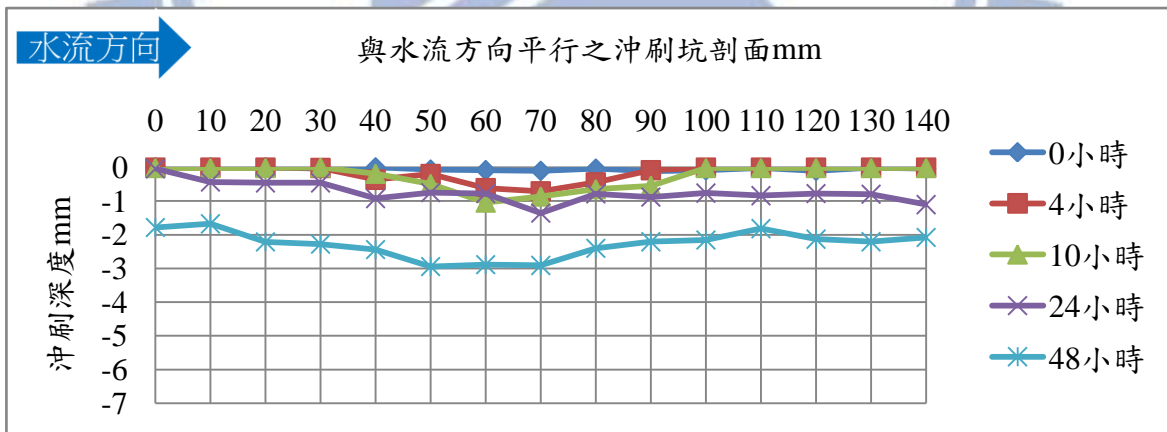


圖 4-60 尾水深 3D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

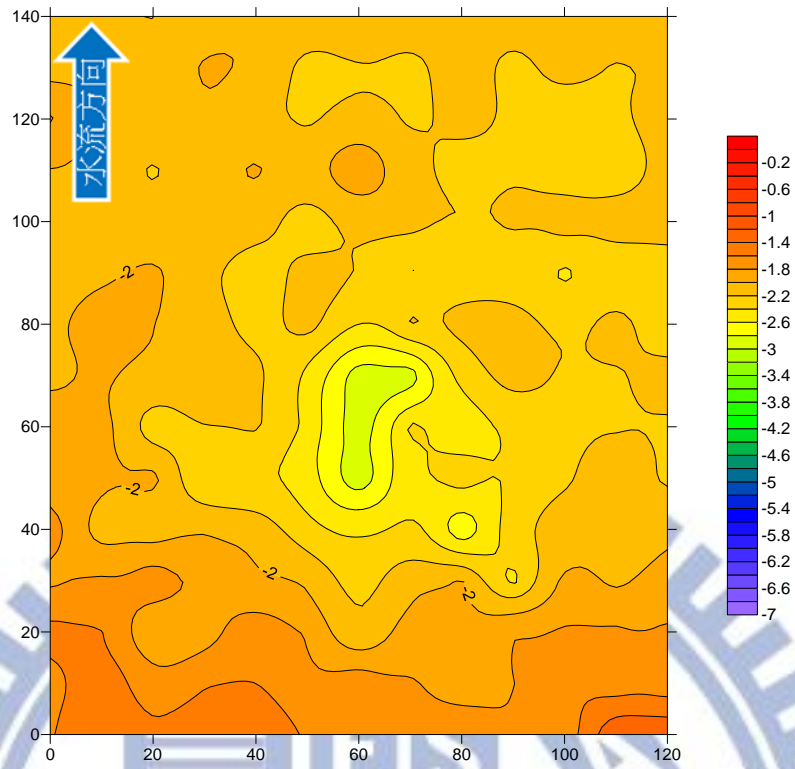


圖 4-61 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

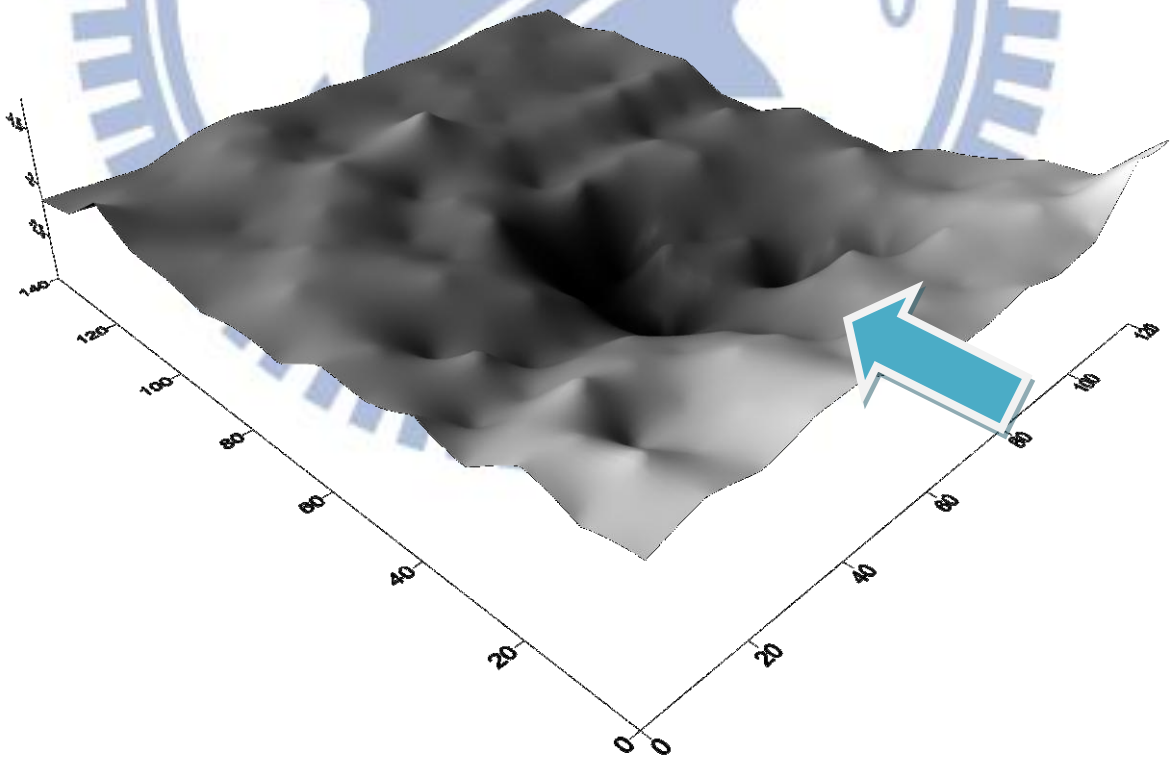


圖 4-62 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

試體編號 R4-30-3D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-63)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-64)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處，表 4-20 顯示本試驗平均沖蝕率為  $26 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.04 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出沖刷角度變小，使初始沖刷坑面較大，在加上尾水的增加，使深度變化變小，除了主要沖刷坑有沖刷情形外，沖刷坑後面也造成部分沖刷。由圖 4-65、圖 4-66 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，使得沖刷坑形狀變成長條形，沖刷中心點深度較 1D 尾水深來的淺。

表 4-20 射流角度  $30^\circ$  尾水深 7.62 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 (mm/hr)
0	0	0	0	0
24	640	27	1.18	0.05
48	1254	26	1.88	0.04



圖 4-63 R4-30-3D (上) 0 小時 (下) 48 小時

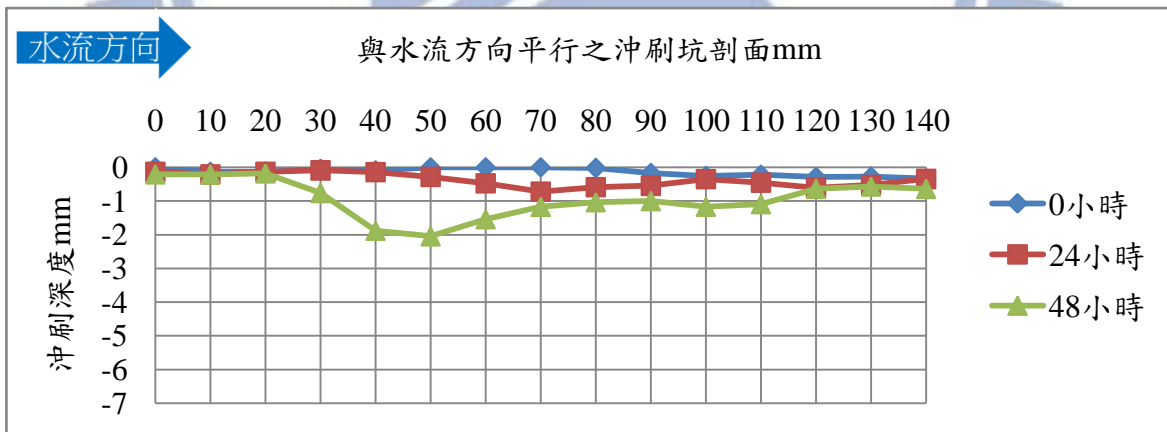


圖 4-64 尾水深 3D 的沖蝕坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

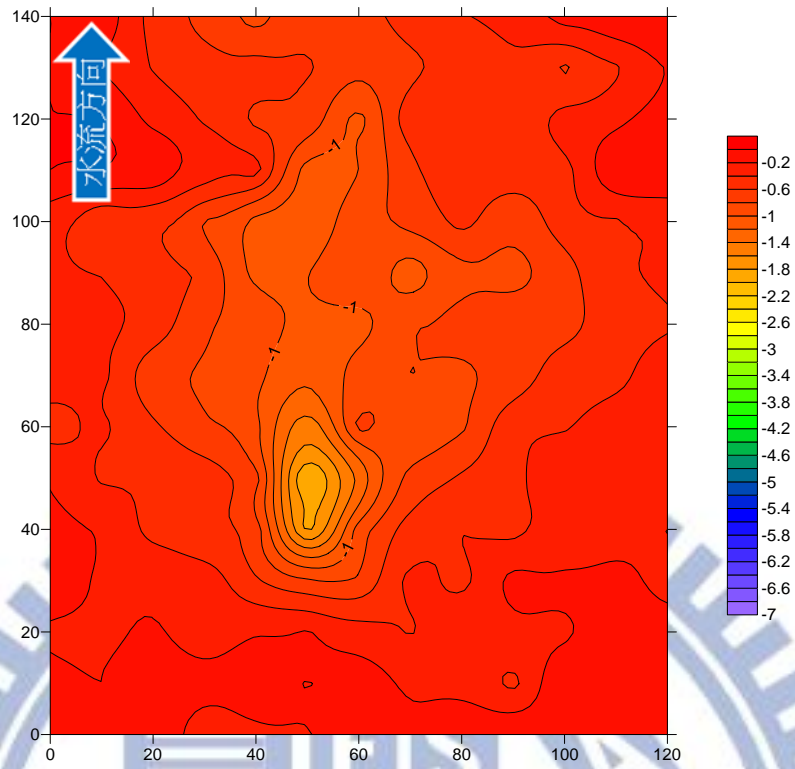


圖 4-65 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

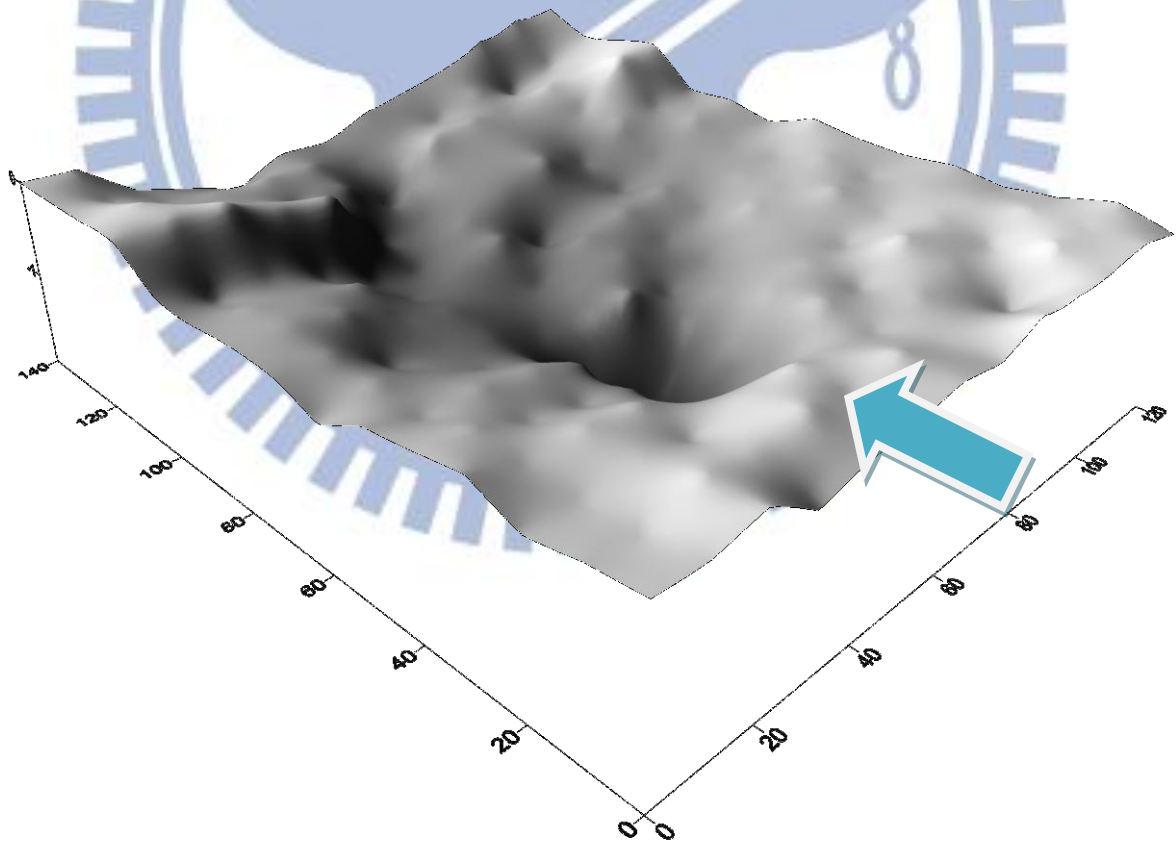


圖 4-66 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.1

#### 4.3.9 尾水深 5D (12.7 cm)

試體編號 R1-30-5D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-67)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-68)，可看出不同時段下沖擊點皆在 50 mm 處。表 4-21 顯示本試驗平均沖蝕率為  $54 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.04 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出沖刷角度變小，使初始沖刷坑面較大，在加上尾水的增加，使深度變化變小，使得做功不集中，造成沖刷範圍雖大，但沖刷坑的形成卻不明顯。由圖 4-69、圖 4-70 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大刷深，使得沖刷坑成傾斜向下沖蝕，沖刷中心點深度較 3D 尾水深來的淺。

表 4-21 射流角度  $30^\circ$  尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 (mm/hr)
0	0	0	0	0
24	1228	51	1.56	0.07
48	2587	54	1.99	0.04



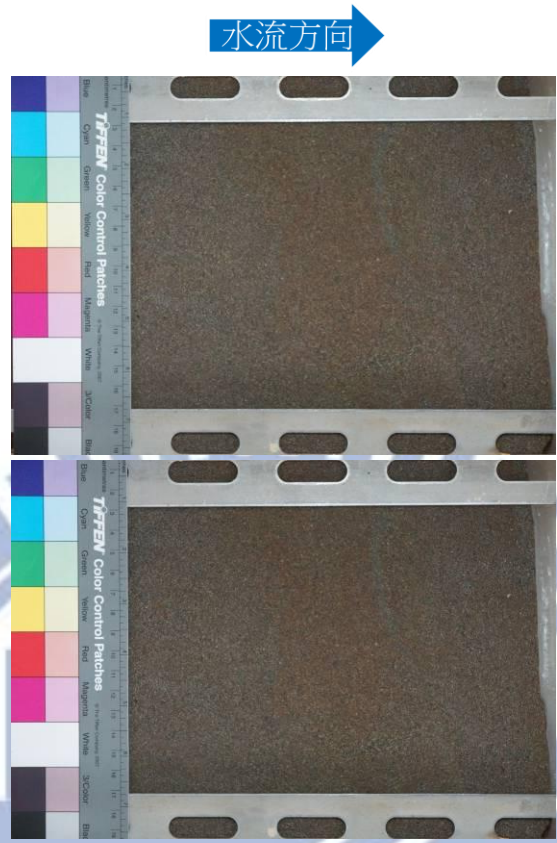


圖 4-67 R1-30-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時

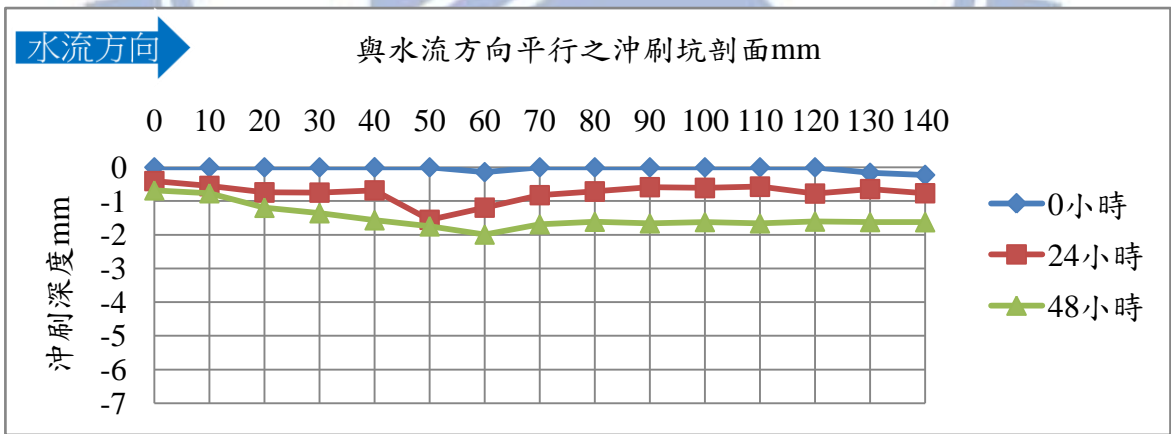


圖 4-68 尾水深 5D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

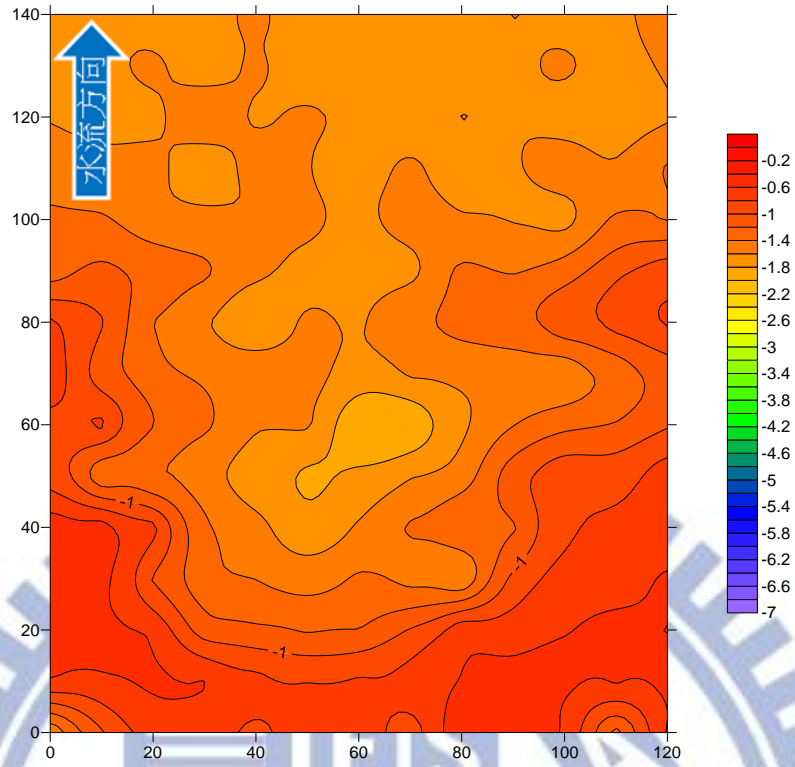


圖 4-69 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

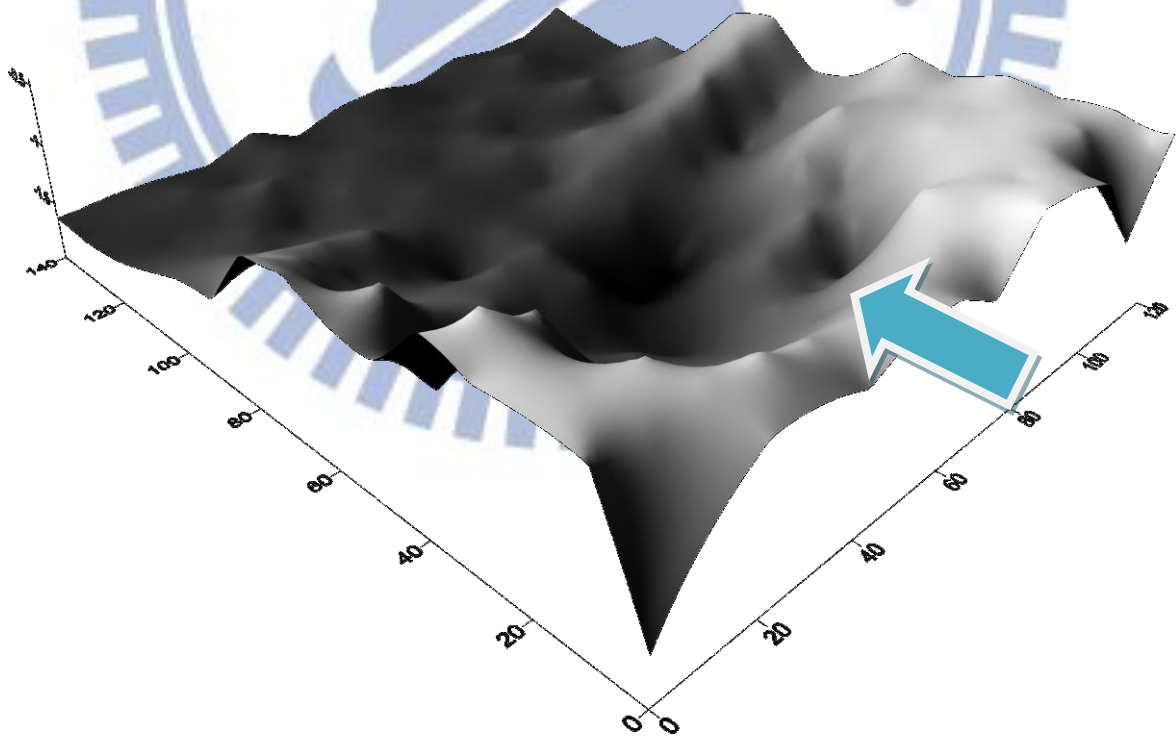


圖 4-70 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.025

試體編號 R4-30-5D 在沖刷 0、24、48 小時後，分別使用雷射測距儀量測試體表面高程，並拍攝試體 0 小時和 48 小時的試體表面(圖 4-71)。由沖蝕坑剖面圖(圖 4-72)，可看出不同時段下沖擊點皆在 70 mm 處。表 4-22 顯示本試驗平均沖蝕率為  $88 \text{ mm}^3/\text{hr}$ ，而平均沖蝕速度為  $0.03 \text{ mm/hr}$ ，三次量測記錄的沖刷中心點皆無改變。由剖面圖可看出沖刷角度變小，使初始沖刷坑面較大，在加上尾水的增加，使深度變化變小，使得做功不集中，造成沖刷範圍雖大，除了表面有沖蝕情形外，沖刷坑非常的平緩。由圖 4-73、圖 4-74 顯示沖刷坑由沖蝕中心點向外慢慢擴大加深，沖刷中心點深度較 3D 尾水深來的淺。

表 4-22 射流角度  $30^\circ$  尾水深 12.7 cm 沖蝕試驗數據

時間 (hr)	累計沖蝕量 ( $\text{mm}^3$ )	平均沖蝕率 ( $\text{mm}^3/\text{hr}$ )	累計沖蝕坑極深點 (mm)	平均沖蝕速度 ( $\text{mm/hr}$ )
0	0	0	0	0
24	1578	66	0.98	0.04
48	4241	88	1.6	0.03

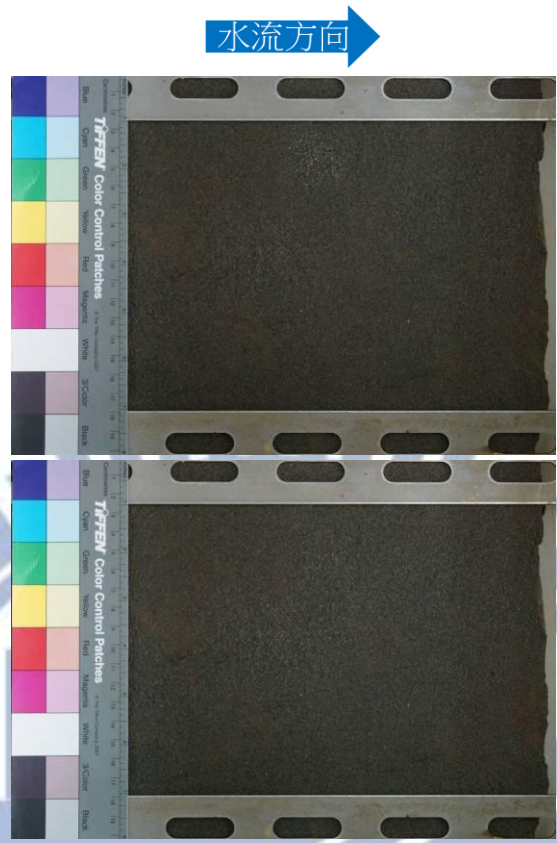


圖 4-71 R4-30-5D (上) 0 小時 (下) 48 小時

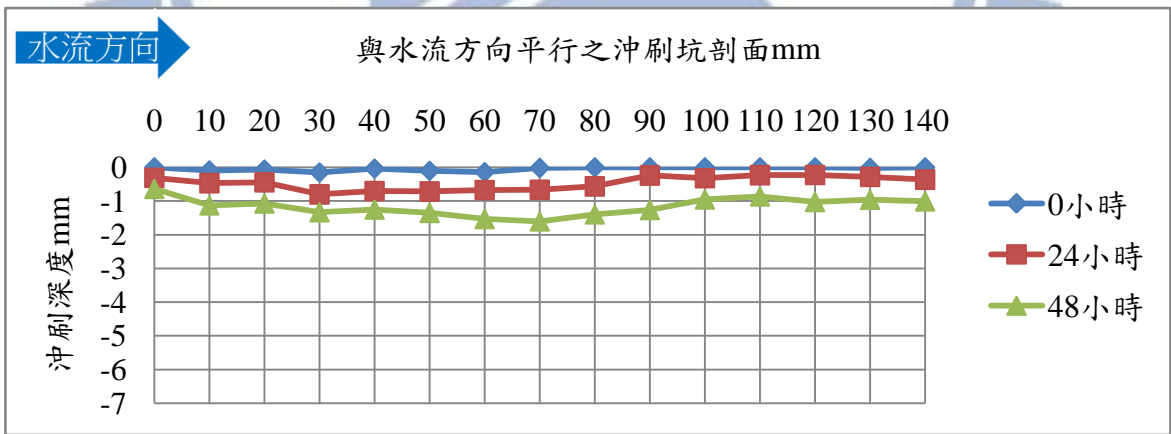


圖 4-72 尾水深 5D 的冲刷坑剖面圖 (縱橫比為 1 : 10)

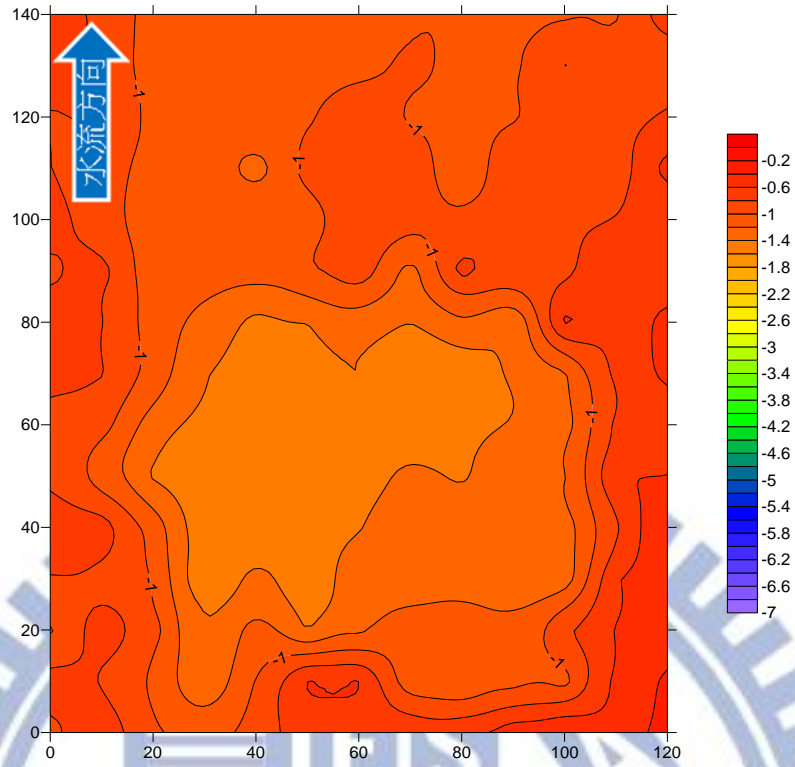


圖 4-73 沖刷 48 小時的等高線圖 (單位 mm)

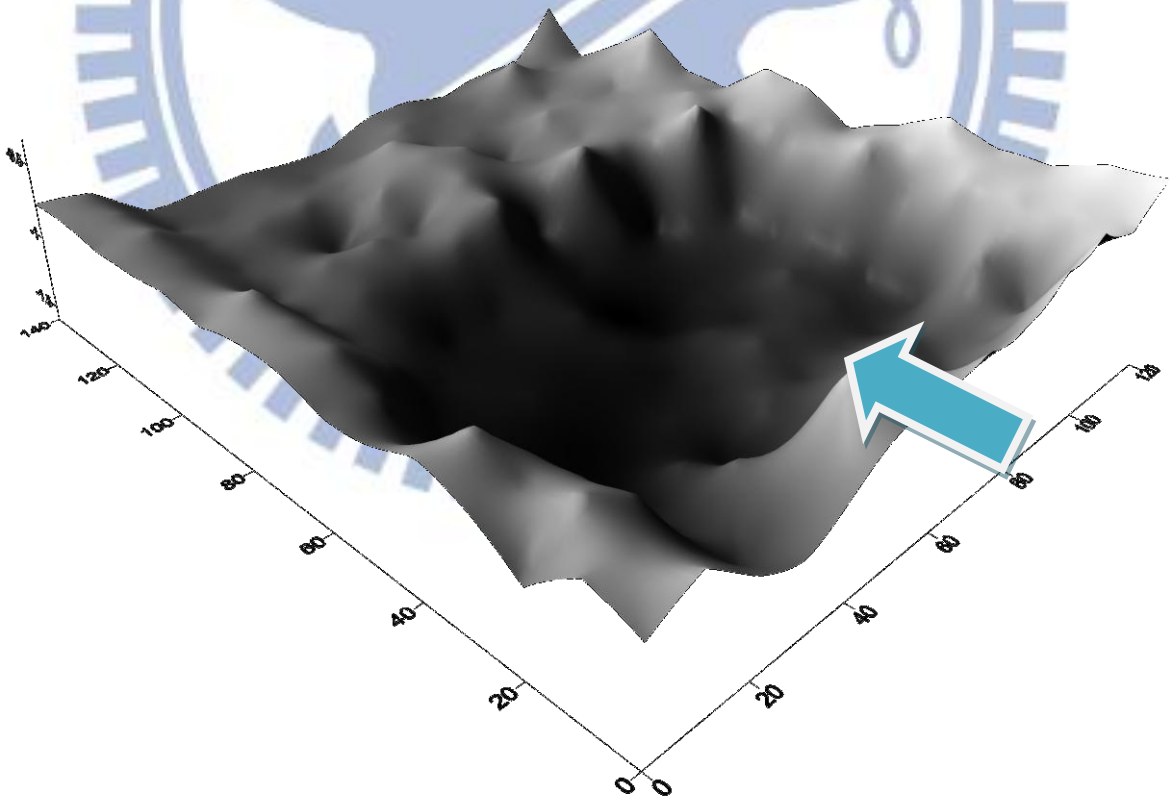


圖 4-74 沖刷 48 小時的立體圖 (單位 mm)，長：寬：高=1：1：0.025

#### 4.4 試驗結果討論

本節將實驗結果依下面五個主要方向進行分析、討論：

- (1) 尾水深度對沖刷深度的影響
- (2) 射流角度對沖刷深度的影響
- (3) 尾水深度和射流角度對沖蝕量和沖蝕率的影響
- (4) 實驗與理論值的比較
- (5) 由無因次分析估算現地相似條件的沖刷坑極限深度

##### 4.4.1 尾水深度對沖刷深度的影響

由於模型太小，尾水深 1D 於模型中僅 2.54 公分，而受到 10 m/s 的水柱沖刷時，幾乎把沖刷中心的水給推開，水花四濺，沖刷情況幾乎呈現無尾水深的情況（未來建議最淺從 3D 開始做起），所以作用於試體面的初始流功應大於有尾水的計算值（表 4-4），且更接近於作用於水面的流功，而 3D 尾水深雖然因壓力波動的影響，使最大作用流功大於 1D 尾水深，但由於平均壓力和波動壓力的造成的功並非一直維持不變，參數值是平均而得到的，沖擊點所承受的流功並非一值維持在最大流功的作用下，相較於 1D 尾水深，作用的流功相當穩定（幾乎是無尾水狀態，一直受到最初流功的作用），所以雖然理論上 3D 尾水深初始沖刷強度會較 1D 的條件大，不過上述的實驗情形使得試驗結果 1D 沖刷仍會較 3D

的尾水深明顯，並且也大於 5D 的沖刷情形。將尾水深 1D、3D、5D 下不同射流角度的情形做比較（圖 4-75、4-76、4-77），可看出尾水深越淺的，沖蝕深度較大，因為尾水的深淺，使的流功造成的消能有所差異，亦可從圖中發現，隨著沖刷坑下刷，使尾水的深度逐漸增加，而流功能量慢慢的衰減，導致隨時間增加，深度增加量變小，故尾水造成消能的影響不容忽視，是現地的影響沖刷的重要因素之一。沖刷坑的形狀因尾水越深，使得沖刷範圍變廣，讓沖刷坑的形狀由錐狀變的像碗狀，沖刷坑亦變得較平緩。

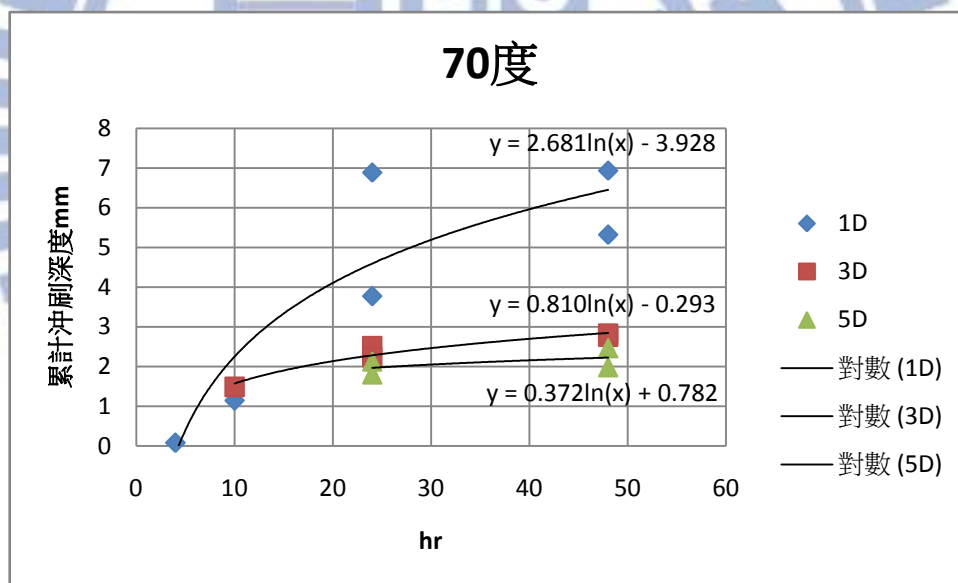


圖 4-75 70 度尾水深 1D、3D、5D 的沖刷深度

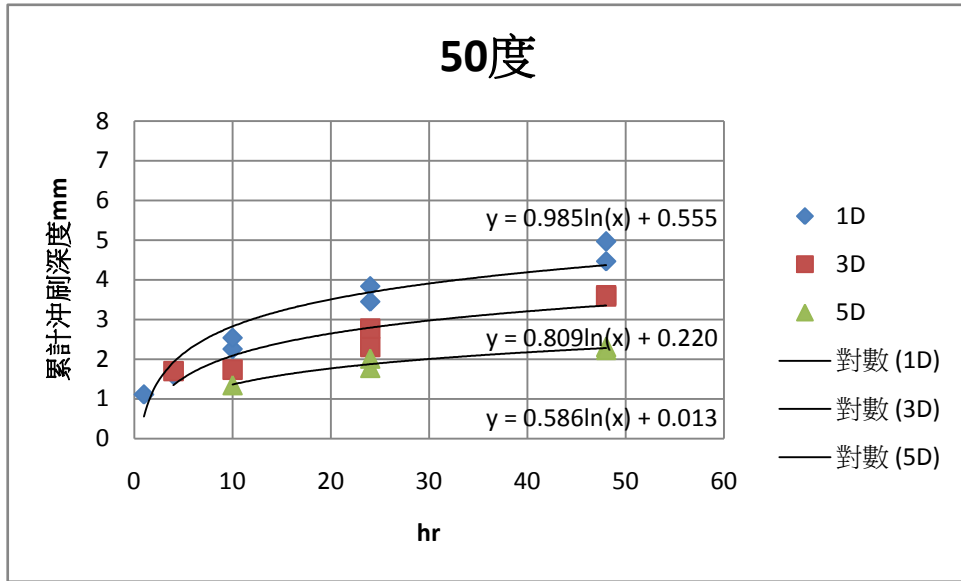


圖 4-76 50 度尾水深 1D、3D、5D 的冲刷深度

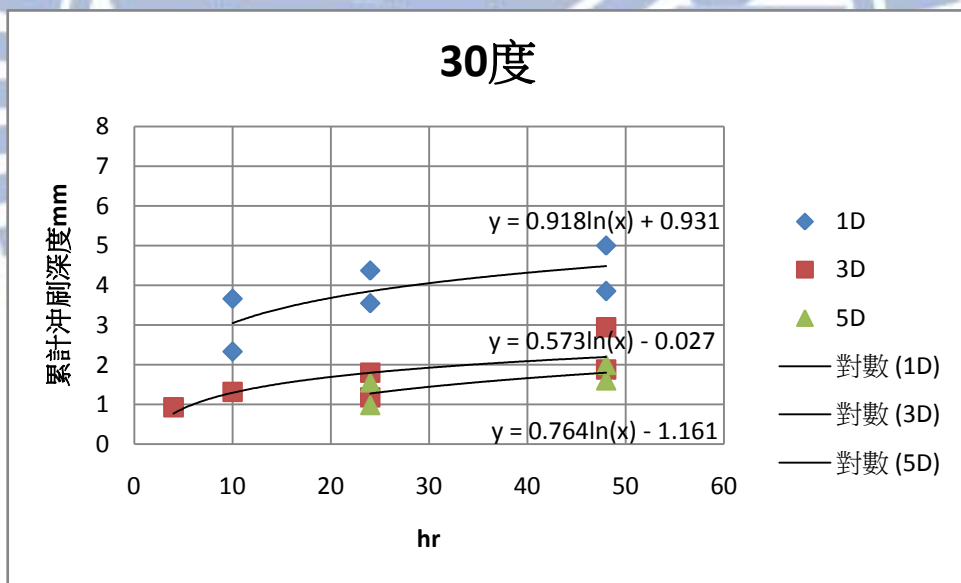


圖 4-77 30 度尾水深 1D、3D、5D 的冲刷深度

#### 4.4.2 射流角度對冲刷深度的影響

將射流角度 70、50、30 下不同尾水深的情形做比較，由圖 4-78 及圖 4-80 顯示尾水深 1D 及 5D，48 小時後角度大冲刷較深，角度小冲刷深度



較淺，因為射流角度的不同，作用在試體上的流功亦有所差異，角度越大流功越強。但尾水 3D 下，50 度射流之最大沖刷深度大於 70 度射流之沖刷深度，由表 4-4 可看出 50 度流功大於 70 度流功 ( $489 > 478$ )，尾水造成的波動壓力使得相同尾水深下，高角度射流產生的流功亦會有小於較低角度的情況（由於 1D 的尾水深太淺，實際流功應以初始流功為主，故不在此列），也有可能是岩石受剪力做功影響大於正向做功，在尾水不會太深消能未太多之下，使得出現雖然角度大所產生的流功雖強，沖刷仍然小於 50 度角。沖刷坑的形狀因射流角度越小，使得沖刷範圍拉長，讓沖刷坑的形狀變得較細長。

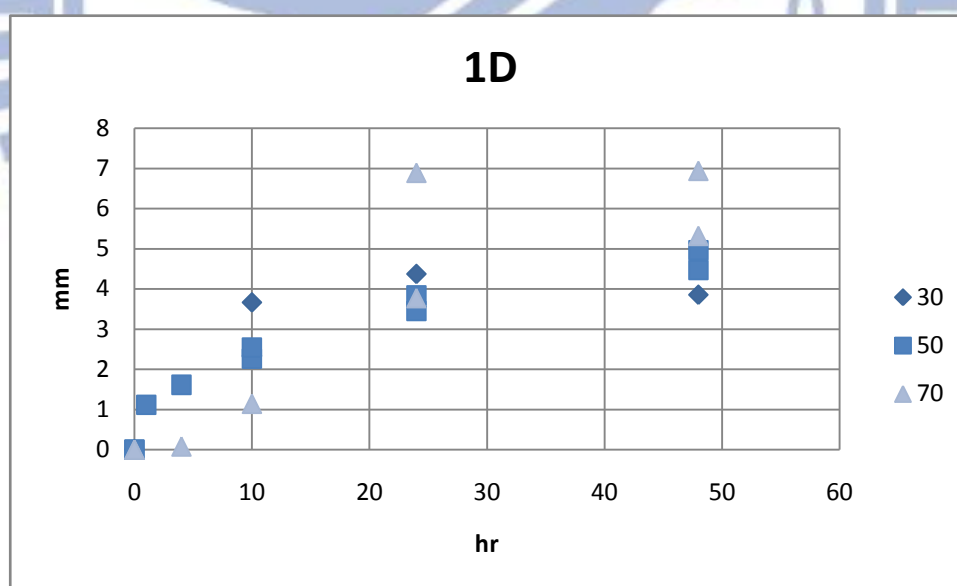


圖 4-78 尾水深 1D 射流角度 30、50、70 的沖刷深度

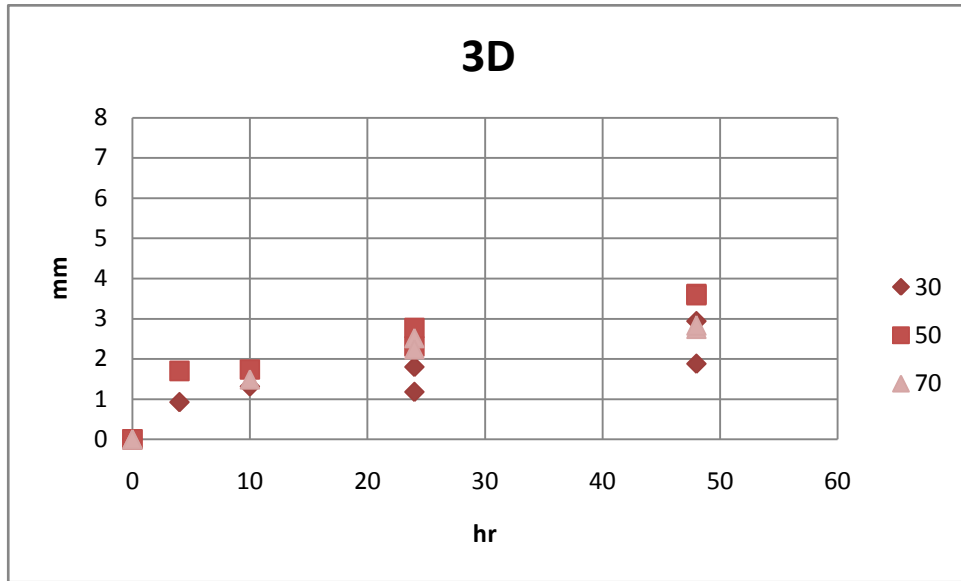


圖 4-79 尾水深 3D 射流角度 30、50、70 的冲刷深度

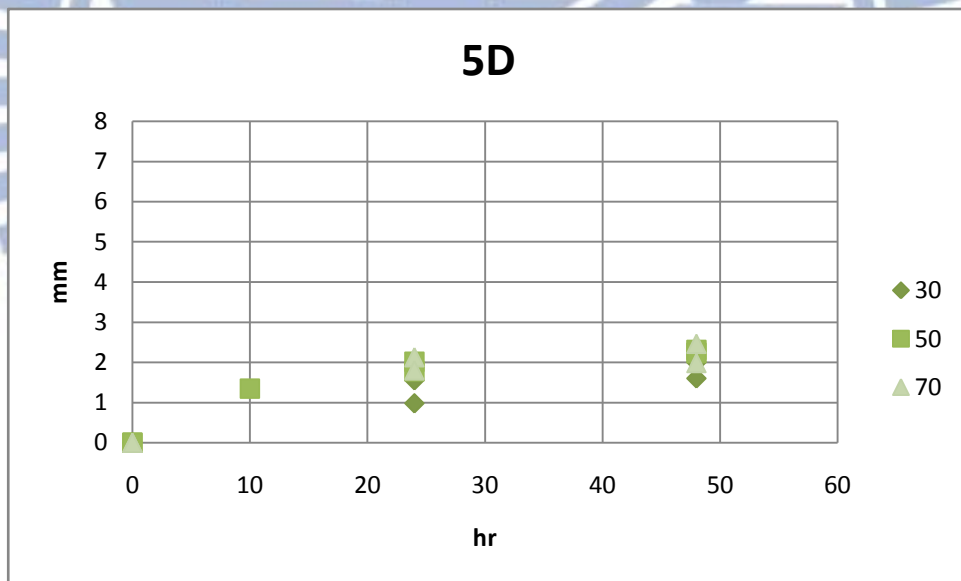


圖 4-80 尾水深 5D 射流角度 30、50、70 的冲刷深度

#### 4.4.3 尾水深度和射流角度對冲刷量的影響

圖 4-81 至 4-83 將冲刷量依 70、50、30 度分類比較，大部分到 24 小時後，冲刷量下降很多，24 小時到 48 小時的冲刷斜率都趨於平緩。由於

依據沖刷坑的大小對於沖蝕量的計算佔重大關係，而沖蝕量跟沖刷範圍的大小的關係更遠高於深度（因為深度的單位以 mm 計算，而範圍以 cm 計算），故在判斷沖蝕坑範圍時佔很重要的關係。建議範圍以實驗最後一組的沖刷等高線圖下去決定，以最清楚的沖刷坑形狀下去挑選範圍，較接近實際情形。

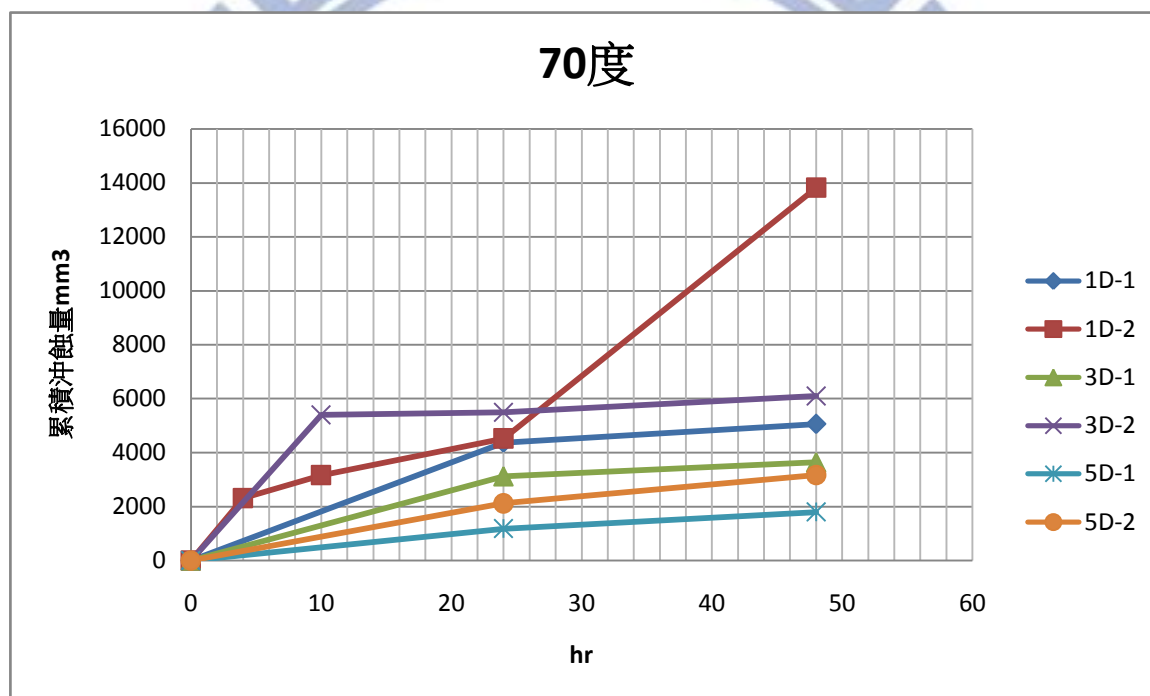


圖 4-81 射流角度 70 度下 1D、3D、5D 尾水深沖蝕量

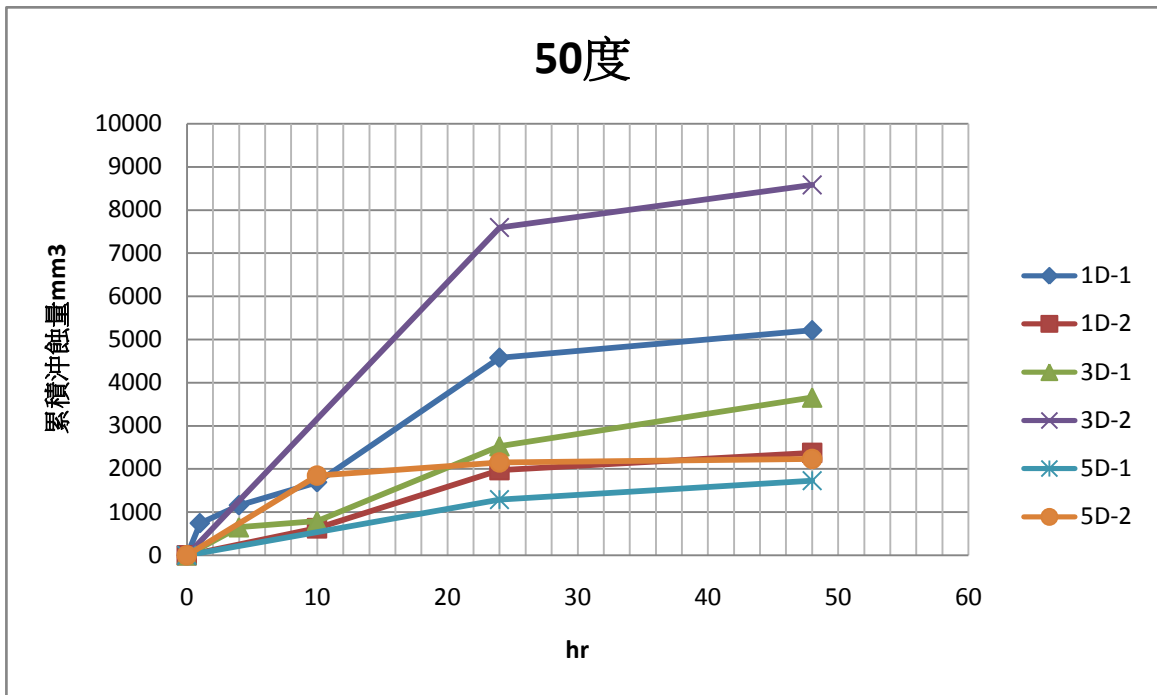


圖 4-82 射流角度 50 度下 1D、3D、5D 尾水深沖蝕量

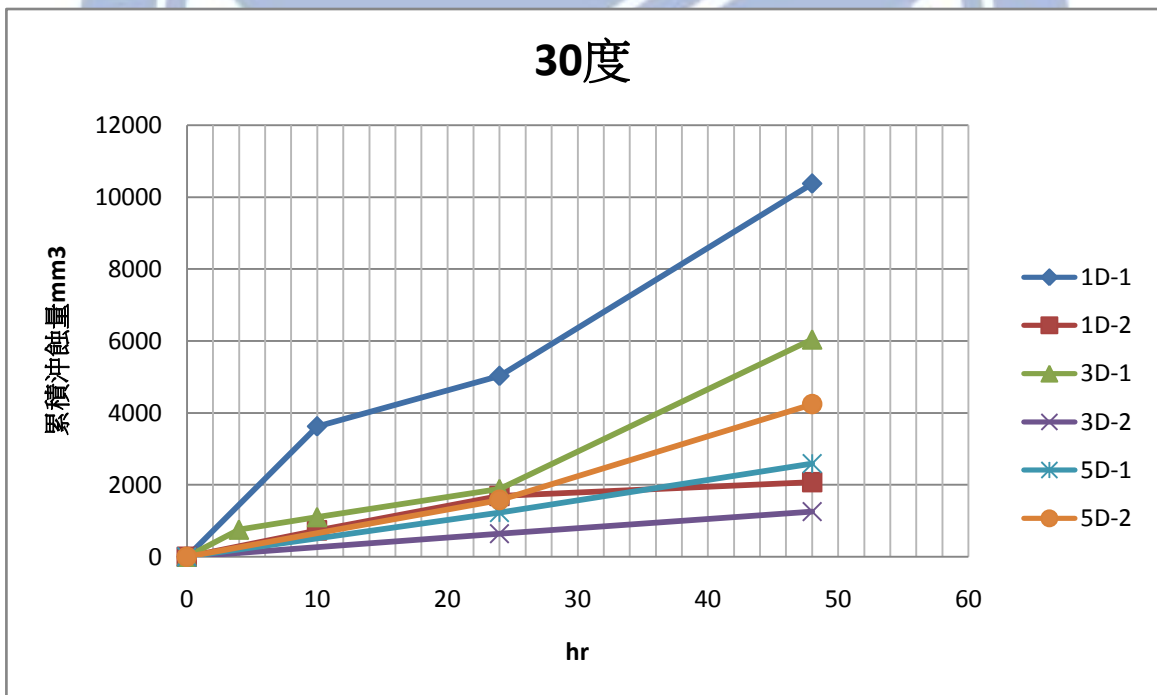


圖 4-83 射流角度 30 度下 1D、3D、5D 尾水深沖蝕量

#### 4.4.4 實驗值與理論值的比較

依照羅(2011)採用 annadale 的建議加以計算理論沖刷坑極限深度。

以式 3-4 的流功計算式，計算出最大流功後，因在不同射流角度下所產生之射流擴散衰減皆不同，參考 Beltaos (1976) 建議公式 4-5 計算射流中心點上下游每點距離之流功，其中  $\eta$  為射流中心距與  $b$  之比值， $b$  為射流角度參數（與  $\phi$  相關），可用圖 4-84 查詢而得，每個  $\phi$ （角度）皆有相對應之  $b/H$ （ $H$  為射流長度）值， $\phi$  與  $H$  皆為已知。

$$\frac{P_w}{P_{jet}} = e^{-0.693\eta^2} \quad (4-5)$$

$P_w$ =擴散後之流功

$\eta=X_1/b$ （與射流中心點距/射流角度參數，圖 4-18）

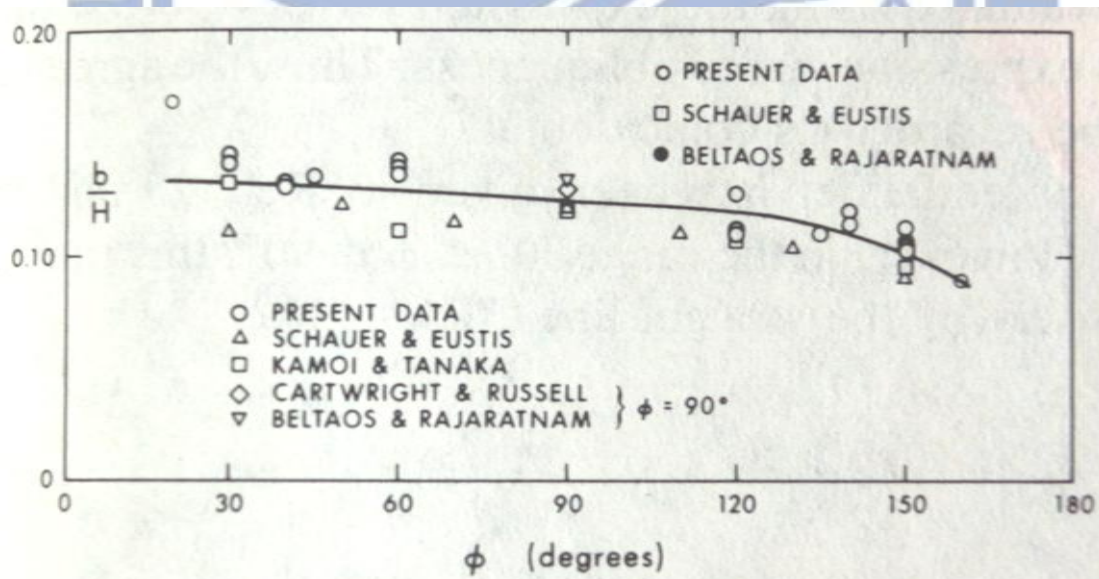


圖 4-84 角度-  $b/H$  圖（ $H$  為射流長），Beltaos (1976)

用式 4-5 計算出距離沖刷中心點位置的流功（圖 4-85），由圖顯示出理論計算的流功變化不大，主要是尾水深取太少，但為了能在短時間內

沖刷出沖蝕坑，尾水深度最大僅設定為 5 倍水柱厚。從圖 4-85 選出大於湖山軟岩抗沖蝕指數  $K_h^{0.75} = 213 \text{ kW/m}^2$  的流功（表 4-23），藉由試誤法，帶入不同尾水深下去計算各位置作用於岩盤表面的流功，直到計算出流功等於  $K_h^{0.75}$  時，此時的尾水深度即為極限沖刷深度。將各點的極限沖刷深度計算出後，把每點的位置連起來，即可繪出理論沖刷坑形狀以及沖刷坑的範圍大小（沖蝕中心的固定於 X 軸 5 cm 處，圖 4-86）。以 70 度為例，實驗條件分別為 1D、3D、5D 時，最大的沖刷坑直徑分別為 5cm、5cm、2cm，最大深度為 6.94 mm、2.83 mm、2.46 mm，理論值為 10 cm、10 cm、10 cm，最大深度 45 cm、50 cm、55 cm，實驗值的深度遠小於理論值，可能是室內的模型太小，無法完全複製現地相關條件，但沖刷 48 小時後，沖刷深度已趨於平衡，沖刷速率趨近於 0。將吳禹霆（2012）無尾水射流角度  $70^\circ$  之累積沖蝕量與本研究做比較（圖 4-87），該研究以沖刷坑剖面的面積來計算沖蝕量，雖然衝擊點因停機關係，使得每次的沖刷中心點改變，導致沖蝕量略小於本研究的沖蝕量，但依舊能看出實驗資料的趨勢，顯示時間越長，沖蝕量變化越小，可看出線段有趨近水平的趨勢，而本研究的資料能看出尾水深度的增加造成的消能影響越大。

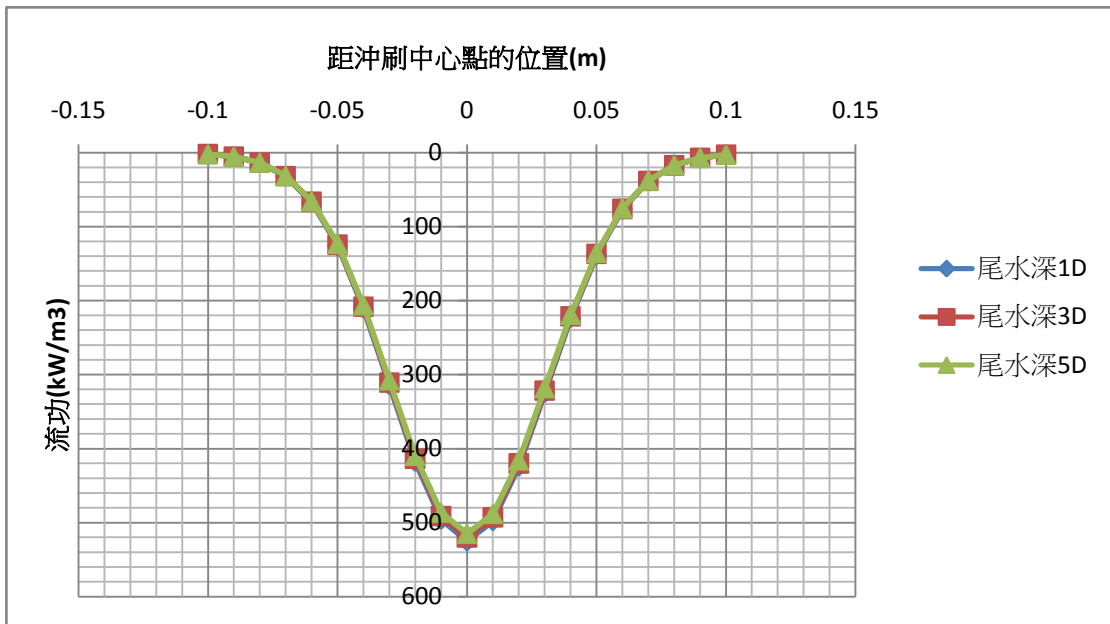


圖 4-85 與射流中心點距-流功圖

表 4-23 3 種尾水深的流功分布及總功

尾水深	流功分佈 (kW/m <sup>2</sup> )									總功 (kW)
	距沖刷中心點的位置(m)									
	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	
1D	210	314	418	496	525	498	424	324	223	32.1
3D	208	311	414	491	520	493	420	321	221	31.8
5D	206	308	410	486	515	488	416	318	219	31.5

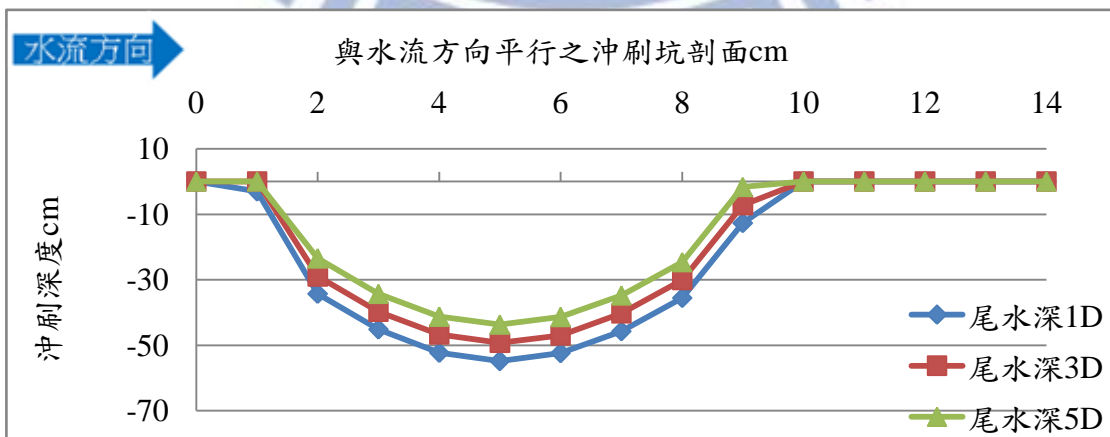


圖 4-86 理論之極限沖刷坑形狀及深度 (縱橫比為 1 : 0.2)

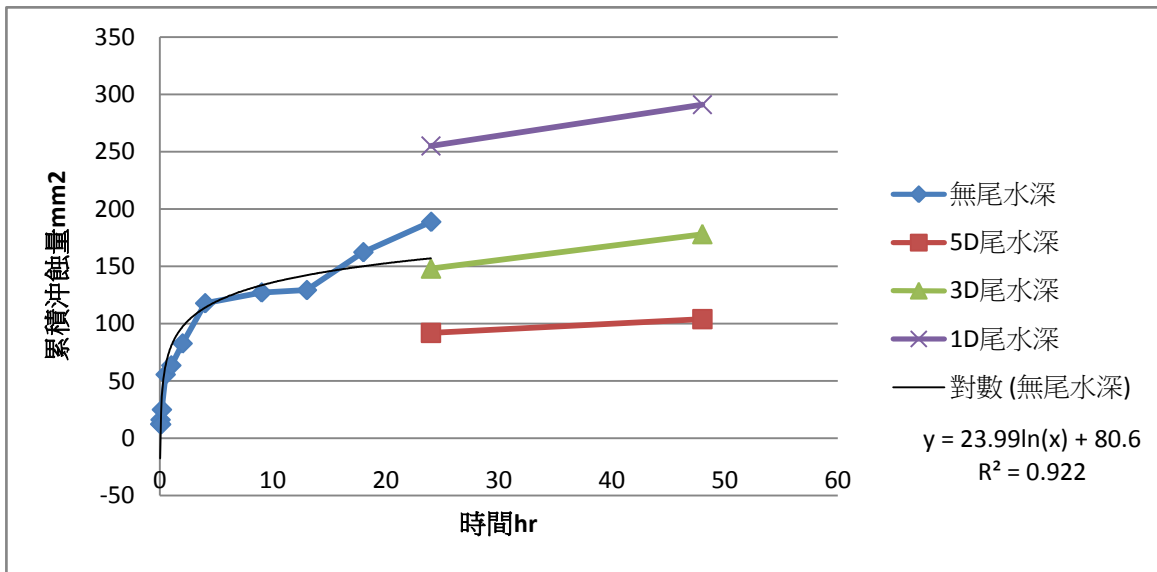


圖 4-87 時間-累積沖蝕量

本研究沖刷試驗得到的沖蝕坑深度雖未達到極限沖刷坑深度，但沖蝕速率已經明顯下降，已經接近極限沖刷深度，圖 4-88、4-89、4-90 中  $y$  是平均沖蝕率， $x$  是小時，當沖刷停止時，沖蝕量應為 0，此時  $x$  值及為所需之時間（表 4-24），由表上顯示，射流角度 70 度 5D 尾水深的需要達致平衡時間竟然比 1D 及 3D 要久，可能是沖刷的 data 太少，且前後兩次沖刷雖然總量相較其他少，但彼此間差異不大，使得變化量少，導致公式上計算所得的時間偏長（30 度花費時間較 70 度多亦是此原因）。其中圖 4-89 之 3D 尾水深資料以及圖 4-90 之 5D 尾水深資料，可能因沖刷時間不夠常或因資料量欠缺，使得沖刷趨勢線與理論不符。



表 4-24 預估達致平衡所需時間

角度	70			50			30		
尾水深	1D	3D	5D	1D	3D	5D	1D	3D	5D
平衡所需時間 hr	127	61	384	50	*	68	379	151	*

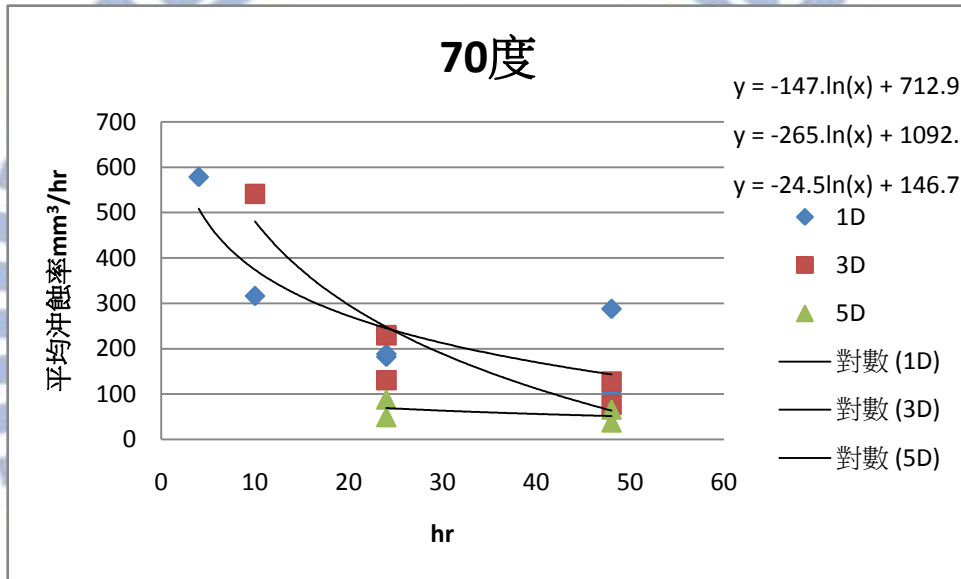


圖 4-88 70 度各尾水條件下平均沖蝕率

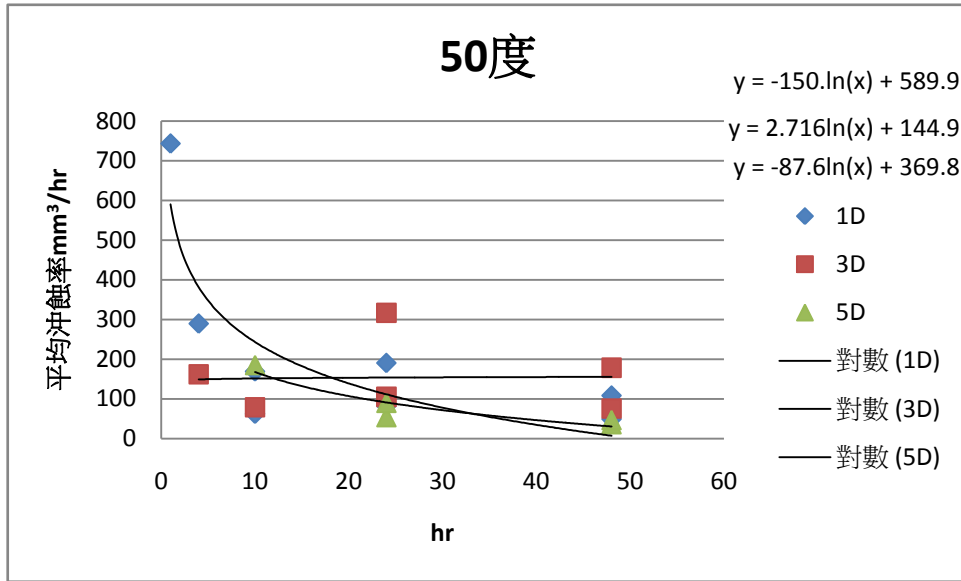


圖 4-89 50 度各尾水條件下平均沖蝕率與時間關係圖

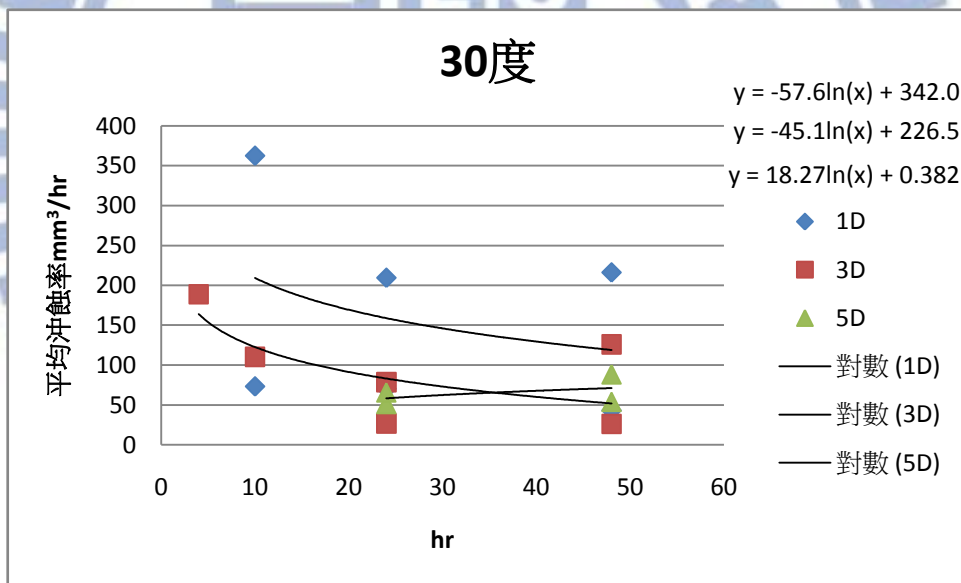


圖 4-90 30 度各尾水條件下平均沖蝕率與時間關係圖

#### 4.4.5 由無因次分析估現地相似條件的結果

本節假設現地流功與岩石的抗沖蝕指數皆與模型相同，嘗試計算該條件下現地的可能極限沖刷深度。計算採用水柱厚與尾水深成比例關係，

現地水流流速由模型流速 10 m/s 與射流角度之三角函數關係，求得水平之流速，並將垂直之速度轉換成落距，表 4-25 即為轉換後的數值。

表 4-25 各組實驗轉換為現地資料

射流角度	流速 m/s	落距 m	尾水深/水柱厚	48 小時沖刷深度 mm		理論極限 沖刷深度 cm
				第一組	第二組	
70	3.42	4.42	1	6.94	5.82	54.9
	3.42	4.42	3	2.75	2.83	49.3
	3.42	4.42	5	2.46	1.98	43.7
50	6.43	2.93	1	4.96	4.47	54.4
	6.43	2.93	3	3.61	3.58	48.9
	6.43	2.93	5	2.31	2.24	43.4
30	8.66	1.25	1	5.00	3.85	53.7
	8.66	1.25	3	2.94	1.88	48.3
	8.66	1.25	5	2.00	1.6	42.7

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究旨在藉由不同角度與不同尾水深度的實驗(角度為  $30^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $70^\circ$ ，尾水深為  $1D$ 、 $3D$ 、 $5D$ ， $D$  為水柱初始厚度  $2.54\text{ cm}$ )，控制流速  $v=10\text{ m/s}$ ，射流長度  $L=30\text{ cm}$ ，探討軟弱岩石的沖蝕形成的情形，將實驗所得的資料與理論上計算的沖刷坑比較(深度、形狀、範圍大小)，並將資料回歸推導出時間與沖刷深度和沖蝕率的關係，並利用無因次分析與模型相似度的原理，以室內實驗的沖刷條件與現地做比較，評估現地在這些條件下會形成的沖刷坑。

綜合試驗結果及討論成果，歸納以下結論：

1. 射流角度  $70^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $30^\circ$  之試驗，尾水深分別為  $1D$ 、 $3D$ 、 $5D$  ( $D=2.54\text{ cm}$ )，由試驗之沖刷結果顯示，沖刷深度  $1D > 3D > 5D$ ，可看出尾水深越深，流功消能越多，沖刷深度越淺。
2. 從作用於試體的總功大小分析，總作用能量(總功)越大，對於性質相仿的試體，沖蝕量和沖蝕率都較大。
3. 由等高線顯示沖刷坑形狀隨角度大、尾水越淺，等高線就越密集，沖刷坑就較明顯，反之亦然。沖蝕量的計算來自於等高線圖對於沖刷坑的判示，有些沖刷不深但面積廣的沖蝕量會比沖刷深的大，所以沖蝕

量的大小就比較沒有絕對性在，但每次判示應以相同的步驟下去決定冲刷坑的大小，較能避免失真的情況發生。

## 5.2 建議

1. 經由驗證結果顯示，試驗的冲刷坑仍未達到極限值，可加長時間讓冲刷坑能發展更完整，更加清楚冲刷坑形成的趨勢。
2. 觀察記錄的冲刷量，顯示每個時段的變化差異大，可以將時間分得更細，使間隔時間內的冲刷量量測值更準確且更接近真實。
3. 可針對水質含泥沙濃度與冲刷之影響進行研究，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。
4. 於滑軌上裝設線性馬達，以穩定的前進速度密集量測冲刷坑高程，使得更精準的量測冲刷量變化及冲刷坑形狀，並且縮短量測時間，讓試驗的進行更有效率。
5. 於水槽上方設置可放置量測儀器之固定架，減少試驗中每次量測皆須拆裝儀器之時間。

## 参考文献

1. Annandale, G.W., (1995). "ERODIBILITY." *Journal of Hydraulic Research*, 33(4): pp. 471-494.
2. Annandale, G. W., (2006). "Scour technology." McGraw Hill, New York.
3. Beltaos, S., (1976). "Oblique impingement\_of\_plane turbulent jets." *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9): pp. 1177-1192.
4. Bollaert, E., (2002). "Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." in Lausanne, EPFL.
5. 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.
6. 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.
7. 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.*
8. Ervine, D. A., Falvey, H. T., and Withers, W., (1997). "Pressure fluctuations on plunge pool floors." *Journal of Hydraulic Research*, 35(2): 257-279.
9. Kirsten, H. A. D., (1982). "Classification system\_for\_excavation\_in natural materials." *Civil Engineer in South Africa*, 24(7): pp. 293-308.
10. Liu, P.Q., (2005). "A new method for calculating depth of scour pit caused by overflow water jets." *Journal of Hydraulic Research*, 43(6): pp. 696-702.
11. Melo, J.F., Pinheiro, A.N., and Ramos, C.M., (2006). "Forces on Plunge

- Pool Slabs: Influence of Joints Location and Width.” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(1): pp. 49-60.
12. Nakato, T. (2002), “Erodibility test of shale-rock samples taken from pier construction site on Mississippi river”, 1<sup>ST</sup> international conference on scour of foundations ICSF-1, pp.528-539.
  13. Spurr, K.J.W., (1985). “Energy approach to estimating scour downstream of a large dam.” International Water Power and Dam Construction, 37(7): pp. 81-89.
  14. 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.
  15. 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。
  16. 羅楚鈞，2011，「攔河堰下游軟弱岩石沖刷坑形狀與深度分析」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
  17. 吳佳諺，2012，「軟弱岩石水平磨蝕率及磨蝕行為」，國立交通大學土木工程系，碩士論文。
  18. 吳禹霆，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系，碩士論文。
  19. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2009，「設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究(1/2)」。
  20. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2010，「設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究(2/2)」。
  21. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2011，「水工模型試驗參考手冊」。

# 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：

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

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

UCS：無圍壓縮強度(MPa)

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

$g$ ：重力加速度( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$\rho_r$ ：岩塊密度( $\text{kg/m}^3$ )

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磨擦力。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)

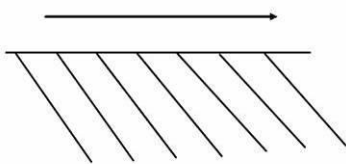
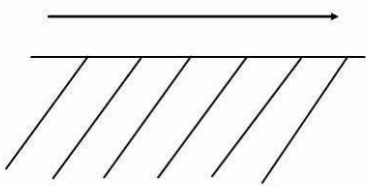
節理面間描述	不同節理開口程度 之風化數值( $J_a$ )		
	1.0 (mm)	1.0~5.0 (mm)	5.0 (mm)
緊密接合，堅硬，無軟弱填充物可侵入填充	0.75	--	--
節理面無風化，僅表面有污跡	1.0	--	--
節理面輕微風化，無軟弱填充物、無凝聚性岩石礦物或是破碎岩石填充	2.0	2.0	4.0
無軟弱之輕微黏土質的無凝聚性材料填充	3.0	6.0	10.0
無軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	3.0	3.0	10.0
軟弱或低摩差性黏土礦物附著且有少量膨脹性黏土填充	4.0	8.0	13.0
有適量之軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	4.0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

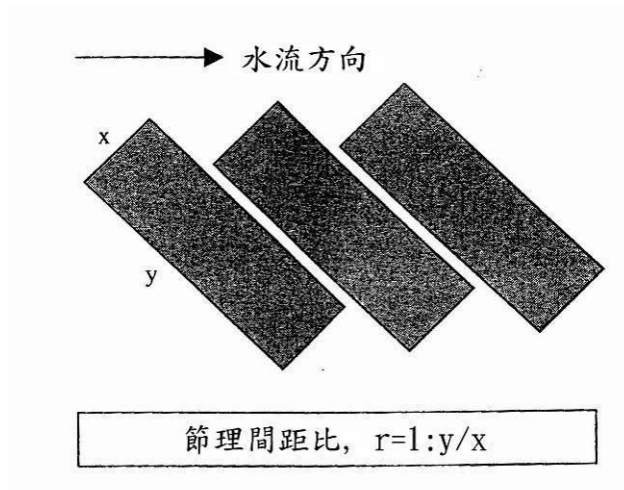
#### 4、地盤構造條件參數( $J_s$ )

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
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)

上述的流功以及  $K_h$  計算出來後，當水流流功的能量大於由  $K_h$  轉換得來的流功時即表示會沖刷，相反的，當水流流功的能量小於或等於  $K_h$  所轉換得到的流功時則不會沖刷。

由此以上觀念可計算出沖刷深度；由於尾水的關係，當下游沖刷坑深度越來越深時，尾水深度也會越來越深，當尾水深度增加的同時，尾水可消耗的能量也同時增加，因此當水流經過尾水的消能後所剩餘的流功小於或等於  $K_h$  即表示水流的能量不足以產生沖刷行為。