

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立

Development of a Multi-Function Erosion Equipment for Soft Rock



研究生：郭炳宏

指導教授：廖志中 博士

中華民國九十九年六月

多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立

Development of a Multi-Function Erosion Equipment for Soft Rock

研究生：郭炳宏

Student：Ping-Hong Kuo

指導教授：廖志中 博士

Advisor：Dr. Jyh-Jong Liao

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in 1896

Civil Engineering

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立

學生：郭炳宏

指導教授：廖志中 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

國內尚不存在探討岩床沖蝕的試驗設備，本研究以磨蝕沖蝕(abrasion)、塊體抽離沖蝕(plucking)為實驗對象，參考國外相關試驗設備的形式、量測方式、分析方式，整合以後進行沖蝕儀設計與建立。

本研究已完成清水及濁水的水平磨蝕、塊體抽離沖蝕、及高速水流沖擊等沖蝕機制試驗的基本設計及試驗水槽的組裝，本文目前在水平向磨蝕試驗方面，細部設計及儀器建立已經完成。水平向磨蝕試驗的設計主要參考 Briaud(1999)的 EFA 沖蝕試驗機及試驗程序，將其改良後並驗證計算試驗管內的水理情況。本試驗儀的流速範圍為 0.54~9.94m/s，試驗分析的解析度可達到 0.01mm。本研究並以建置完成的儀器以進行軟弱岩石的水平向磨蝕試驗。

本研究使用大安溪砂頁岩互層內之砂岩岩心以及人造砂岩來施作實驗，實驗結果顯示砂頁岩互層中的砂岩在流速 0.5~4.2m/s 之間的沖蝕率約為 0.0225~0.035mm/hr，砂頁岩互層中的頁岩在流速 4.23~9.94m/s 流速之間的沖蝕率約為 0.0033~0.0175mm/hr。

人造沙岩由於其材料顆粒大小不均，沖蝕率會由於較大的顆粒影響使得沖蝕率有數倍之誤差，在流速 0.54~0.71m/s 之間的沖蝕率約為 20~220mm/hr 之間

關鍵字：沖蝕速率、沖蝕試驗、軟岩、沖蝕機制

Development of a Multi-Function Erosion Equipment for Soft Rocks

Student : Ping-Hong Kuo

Advisor : Dr. Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

Since there is no erosion equipment for rock specimen in Taiwan, this thesis aims to develop a multi-function erosion equipment for rocks. The existing erosion apparatuses in the world are reviewed first. Then, the basic design of the equipment is finished and the frame of the equipment is also established. The equipment can be used to conduct the erosion test on soft rocks with various erosion types including abrasion, plucking, and scouring caused by high velocity water jet.

The abrasion apparatus for clean water is designed in detail and developed in this research. The EFA proposed by Briaud(1999) is referred to establish the apparatus. The developed apparatus can be used to run the abrasion test with the velocity of 0.54 to 9.94 m/s , and its erosion measured precision being 0.01mm.

A series of abrasion tests is conducted on core specimens drilled from the uplift section, Da-An river and the block of artificial poorly cemented sandstone. The rock types of specimens at Da-An river include Pliocene sandstone and shale. The experiment results show that erosion rate of sandstone and shale at Da-An river is 0.0225~0.035mm/hr for the water velocity of 0.5~4.2m/s and 0.0033~0.0175mm/hr for the water velocity of 4.23~9.94m/s, respectively. Due to the poor cementation, the erosion rate of the artificial sandstone, which is 20~220mm/hr for the velocity of 0.54~0.71m/s, is higher than the Pliocene rocks.

Key Words: erosion rate, erosion apparatus, soft rock

誌謝

研究所三年過去，打混摸魚了一年，也被大家念了一年，我也到了跟大家說再見的一天，說真的研究所雖然比大學還要困難，但是時間比大學短暫，可是友情卻是加倍。很謝謝家人以及老師的照顧，容忍我這一年的摸魚。

首先要謝謝廖老師以及潘老師的栽培，雖然至今還不敢單獨找老師，但是每周還是很期待老師的 meeting，以及久久一次的跟老師出差，因為每次都可以吸收到很多，也讓我思考的方向更多元，在交大的三年，真的謝謝老師的照顧以及包容。也謝謝廖老師，雖然我笨笨傻傻混混，老師還是有教無類，讓我一直很不好意思面對老師。

也謝謝家人在研究所期間讓我沒有後顧之憂的在新竹念書，在新竹這三年間自己一個住，也讓我漸漸的習慣以及注意到很多事情，也因為 20 多年來的第一次離家，也讓我在很多事情上改變了很多。也要謝謝舅舅以及日本的親戚們以及許多的長輩，很多很多做人處事的道理，以及思考的方向，在你們身上我也學到很多。

謝謝在上天的爺爺，如果沒有你，也不會有現在的郭炳宏。

謝謝研究所的學長們，民萬學長在這三年幫助我的比任何人都多，不僅在學業上，在很多做人處事的方面也得到學長的很多照顧，如我沒有學長就沒有現在的我，也謝謝許許多多的學長，潘廖的文凱、智仁、聰吉、永奇、小驤、國維、小鄭，林門的俊宏、志忠、謝玉……等諸位學長，黃門的全修，葉老師的博班學長，測量組的博班學長，法外人士的重錡，以及許多許多的學長們，在相處的這段時間內我都有記住大家說過的話，做過的事，也因為這樣使的我不同於其他同學，不僅僅只專精潘廖內的知識，也讓我學習到很多其他門的知識。也因為學長們的訓練，在交大這段時間我開發了許許多多技能，遠大過我五專和大學八年來的訓練。

同學方面，同門的彭鐸欽泉，林門的政動哲，方門江峰碩，黃門的朱琅魏蘇，單門的森，大學+研所同學的建成，結構組的五位不好意思忘記名字的同学，感謝在這段時間大家一起度過許多難忘的時光，在研究所這段時間，不僅是我第一次夜唱，第一次夜遊，很多很多的第一次都是在研究所跟你們達成，也謝謝大家不計報酬的幫我推魚缸。當然在學業上也要謝大家互相幫忙，才能順利的修完所有學分。而每個人所做的每一件事，我都有深深記在腦海，每一個回憶我都不會忘記。

魚缸方面，不僅同學和大地組學弟，許多不知名趙老師的結構組學弟，都謝謝你們在推魚缸上幫我出了許許多多的力，沒有這麼多人無私的幫助，我真的什麼都辦不到。也謝謝許多幫我做東西的老闆跟工人，跟你們討論和聊天也讓我得到很多土木以外的知識跟新的思考方向。當然也要謝謝會計佳廷在資金上的幫忙，讓我可以順利的採購魚缸的各組件。

學弟方面，除了下屆學弟，我多了一個下下屆學弟要感謝，在這段時間跟大家一起聊天吃飯玩遊戲聊八卦，如果要一個一個打出姓名能會寫到3頁，所以就很抱歉的就統稱學弟妹們了。這多出來的一年，發生了許許多多的事，也謝謝你們信任我這個學長，你們也是首次會幫我慶祝生日以及想要幫我送行的學弟妹們，你們也是我捨不得離開的原因之一。

也要謝謝許多的朋友，立珊、佩萱、瑞珊、禧慧……等，許許多多的朋友在各種不同的地方幫助我，並且也讓我學到很多不只是土木的知識，也謝謝你們在研究所期間陪我東南西北的聊天吐槽，讓我在忙碌的時候有一個壓力的宣洩。

最後要獻給在天上的爺爺以及 LUCKY，祝福你們一路好走~~~我永遠不會忘記與你們相處的每一個時光

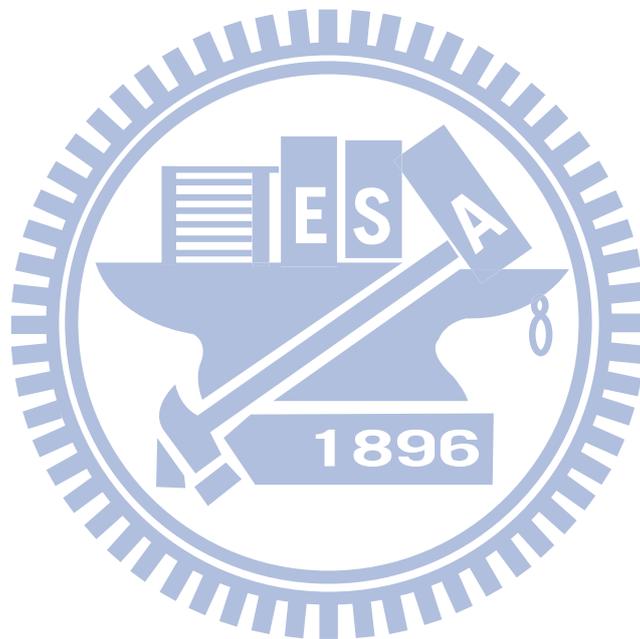


目錄

中文摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	v
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xi
第一章、前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章、文獻回顧.....	3
2.1 岩石河床沖蝕機制.....	3
2.1.1 磨蝕沖蝕(abrasion).....	3
2.1.2 塊體抽離沖蝕(plucking).....	4
2.1.3 穴蝕沖蝕(cavitation).....	5
2.1.4 顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation).....	6
2.2 沖蝕試驗.....	7
2.2.1 水平沖蝕試驗.....	7
2.2.2 磨蝕沖蝕試驗.....	15
2.2.3 人造節理沖蝕試驗.....	18
2.2.4 直接水柱衝擊試驗.....	23
2.2.5 河道沖蝕試驗.....	29
2.3 沖蝕試驗文獻小結與討論.....	35
第三章、多功能室內沖蝕試驗儀器建立.....	37
3.1 室內沖蝕試驗之功能.....	37
3.2 水平向磨蝕試驗.....	37
3.2.1 試驗儀組件功能.....	39
3.2.2 試驗組件選擇及設計.....	40
3.2.3 試驗管路之管流.....	42
3.2.3 試體表面流速與剪力.....	42
3.3 可變角度直接沖刷試驗.....	46
3.3.1 試驗組件介紹：.....	47
3.3.2 噴嘴之噴射流(Jet flow).....	47
3.3.3 非潛沒式射流之流場.....	48
3.3.4 潛沒式射流(Submerged jet)之流場.....	49

3.4 渠道岩床磨蝕或抽離試驗.....	50
3.4.1 試驗組件介紹：.....	51
3.4.2 試驗儀之流場.....	52
3.5 水平向磨蝕試驗數據擷取與分析.....	52
3.5.1 影像判釋方式.....	53
3.5.2 攝影分析方式.....	53
3.5.3 錄影分析方式.....	54
3.5.3 攝影輔助工具.....	55
3.6 影像分析的精度與誤差討論.....	57
第四章、水平向表面磨蝕試驗及試驗結果.....	58
4.1 試體準備及試驗規劃.....	58
4.1.1 試體來源.....	58
4.1.2 試驗數量.....	58
4.2 試驗流程.....	59
4.3 試體性質-大安溪軟岩及人造軟岩.....	59
4.3.1 一般物性試驗.....	59
4.3.2 消散耐久性試驗.....	60
4.3.3 單壓強度試驗.....	61
4.3.4 軟岩三軸試驗.....	62
4.4 試體性質-人造砂岩.....	62
4.4.1 一般物性試驗.....	62
4.4.1 單壓強度試.....	63
4.4.2 乾燥三軸試驗（人造砂岩）.....	64
4.5 沖蝕試驗結果.....	64
4.6 現地軟岩磨蝕沖蝕量測結果.....	67
4.6.1 沖刷釘型式.....	67
4.6.2 沖刷釘位置.....	67
4.6.3 沖刷結果.....	68
4.7 數值模擬結果.....	68
4.8 試驗結果討論.....	69
4.7.1 試驗結果比較.....	69
4.7.2 模擬結果比較與討論.....	69
4.7.3 影響沖蝕率討論.....	70
第五章、結論與建議.....	71
5.1 結論.....	71

5.2 建議.....	72
參考文獻.....	73
附錄 A 軟岩沖蝕試.....	76
附錄 B 儀器測試與改良.....	82
附錄 C 試驗注意事項.....	88

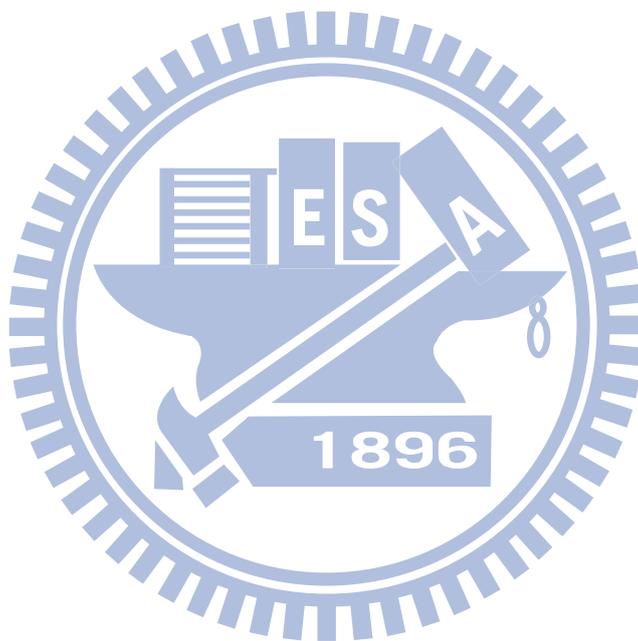


圖目錄

圖 2-1 現地磨蝕沖蝕後之岩盤外觀	4
圖 2-2 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)	4
圖 2-3 快體抽離沖蝕外觀	5
圖 2-4 穴蝕沖蝕外觀	6
圖 2-5 顆粒彈跳引起的沖蝕之示意圖(林文凱, 2008).....	7
圖 2-6 (a)EFA 試驗儀外觀(b)試驗段外觀(Briaud,1999)	8
圖 2-7 試驗段配置示意圖(Briaud, 1999).....	10
圖 2-8 試體凸起高度與剪應力關係圖(Briaud, 1999).....	10
圖 2-9 Moody chart (Moody, 1944).....	11
圖 2-10 EFA 計算範例 (Briaud, 2003).....	13
圖 2-11 沖蝕指數分類表 (Briaud, 2008).....	14
圖 2-12 磨蝕試驗機(Sklar, 2001).....	15
圖 2-13 不同岩性張力強度與沖蝕率關係圖(Sklar, 2001).....	16
圖 2-14 張力強度與沖蝕率關係圖(實線為石英顆粒, 虛線為礫石顆粒) (Sklar, 2001).....	16
圖 2-15 不同顆粒大小與沖蝕率關係圖(Sklar, 2001).....	17
圖 2-16 顆粒量與沖蝕率關係圖(Sklar, 2001).....	17
圖 2-17 塊體抽離(plucking)機制示意圖(Bollaert, 2001).....	18
圖 2-18 人造節理沖蝕試驗配置圖(Bollaert, 2001).....	18
圖 2-19 1D 與 2D 模擬節理示意圖(Bollaert, 2001).....	19
圖 2-20 含氣泡噴流示意圖(Bollaert, 2003).....	20
圖 2-21 (a)氣泡含量與流速關係圖, (b)壓力與壓力波速關係圖(Bollaert, 2003).....	21
圖 2-22 噴嘴距離示意圖(Bollaert, 2004).....	22
圖 2-23 沖刷坑示意圖(Bollaert, 2001).....	22
圖 2-24 應力與深度關係圖(Bollaert, 2001).....	23
圖 2-25 直接水柱衝擊試驗-塊體抽離實驗示意圖(Annandale, 1998).....	24
圖 2-26 質量塊配置與尺寸示意圖(Annandale, 1998).....	24
圖 2-27 沖蝕指數 K_h 與能量關係圖(Annandale, 1998).....	26
圖 2-28 直接水柱衝擊試驗-穴蝕沖蝕示意圖(Wittler, 1997).....	26
圖 2-29 能量與深度關係圖(Wittler, 1997).....	28
圖 2-30 預估沖刷深度與實際沖刷深度關係圖(Wittler, 1997).....	29
圖 2-31 河道沖蝕試驗配置圖(Balachandar and Kell, 1998).....	29

圖 2-32 排水閘門流場示意圖(Munson, 2005)	30
圖 2-33 沖刷坑之循環(Balachandar, 2000)	31
圖 2-34 階段 A(回填)之流速斷面圖與沖蝕斷面圖(Balachandar, 2000)	32
圖 2-35 階段 B(挖掘)之流速斷面圖與沖蝕斷面(Balachandar, 2000)	33
圖 2-36 挖掘與回填流速比較圖(Balachandar, 2000)	34
圖 3-1 沖蝕試驗儀配置圖	38
圖 3-2 試驗儀器外觀	39
圖 3-3 污物流浦外觀	41
圖 3-4 紊流擴散示意圖(Reynolds, 1883)	42
圖 3-5 管中流況分佈：(a)剪應力；(b)流速(Munson & Young & Okiishi, 2005)	43
圖 3-6 管內流線圖(改繪至朱佳仁，2003)	44
圖 3-7 縮管損失係數(Streeter, 1961)	44
圖 3-8 冪次定律速度曲線圖(朱佳仁，2003)	45
圖 3-9 壁剪應力與流速關係圖	45
圖 3-10 可變角度直接沖刷試驗配置	46
圖 3-11 可調整角度之噴嘴示意圖	47
圖 3-12 噴射流示意圖(朱佳仁，2003)	48
圖 3-13 圓管射流示意圖(朱佳仁，2003)	49
圖 3-14 渠道岩床磨蝕或抽離試驗配置圖	50
圖 3-15 試驗流況示意圖	51
圖 3-16 渠道流場示意圖(改繪至 Reynolds, 1883)	52
圖 3-17 渦流形成示意圖(改繪至 Reynolds, 1883)	52
圖 3-18 沖刷過程中試體表面形狀呈圓弧形	53
圖 3-19 沖刷過程中試體表面形狀不規則	53
圖 3-20 數化前	54
圖 3-21 數化後	54
圖 3-22 試驗中相機架設情形	55
圖 3-23 自製比例尺	56
圖 3-24 水準尺	56
圖 4-1 消散性耐久試驗示意圖 (ISRM, 1979)	60
圖 4-2 人造砂岩岩心沖蝕結果曲線圖	66
圖 4-3 沖刷釘	67
圖 4-4 大安溪沖刷釘設置位置圖	67

圖 4-5 數值模擬的沖蝕率(%)與剪應力關係圖70



表目錄

表 2 - 1 文獻試驗分類表.....	36
表 3-1 影像分析測試結果.....	57
表 4-1 一般物性試驗結果表.....	60
表 4-2 消散耐久性試驗結果.....	61
表 4-3 單壓強度結果.....	61
表 4-4 一般物性試驗結果表(張振成，2008).....	62
表 4-5 單壓強度試驗結果表(張振成，2008).....	63
表 4-6 乾燥三軸試驗結果(張振成，2008).....	64
表 4-7 砂頁岩互層之砂岩.....	64
表 4-8 砂頁岩互層之砂頁岩.....	64
表 4-9 現地沖刷釘結果.....	68
表 4-10 數值模擬結果.....	68
附錄 A-1 砂頁岩互層之砂岩試驗結果.....	77
附錄 A-2 砂頁岩互層之砂岩試驗結果.....	78
附錄 A-3 砂頁岩互層之砂岩試驗結果.....	79
附錄 A-4 砂頁岩互層之砂頁岩試驗結果.....	80
附錄 A-5 砂頁岩互層之砂頁岩試驗結果.....	81

第一章、前言

1.1 研究動機

我國西部麓山帶之地質年代極為年輕，包括上新世及更新世的地層，此類地層之岩石在強度上為介於岩石與過壓密土壤之間的「軟岩」。若此類岩石裸露於河床，在水流的作用下會產生嚴重的沖刷侵蝕，且其沖蝕行為與顆粒性材料有相當大之差異。

國內對於軟岩質河床沖刷侵蝕的速率與破壞的相關研究不多，雖然國外已有許多的文獻資料探討岩床沖蝕，但大都以硬岩為對象，其對於台灣的軟岩床的恐不適用。因此，瞭解台灣軟岩河床的沖蝕率是需要的。沖蝕率可由現地河床的長期測量加以推估，亦可藉由室內試驗獲得。國內外的室內渠道試驗，大多都以砂土為主，對於強度較高之軟岩的沖刷並無太多研究，於是本研究希望藉由建立一組實驗儀器，可以針對岩石河床各種不同沖蝕模式施作實驗，以探討軟岩沖蝕行為及決定其沖蝕率。

1.2 研究目的

本研究目的在建立一多功能沖蝕試驗機，本試驗儀可執行水平向磨蝕、可變角度直接沖刷、渠道岩床磨蝕或抽離試驗，決定軟岩在各種情況下的沖蝕率。本研究並以大安溪軟岩河床的軟弱岩石進行磨蝕沖蝕試驗，其結果並與大安溪現場量測結果比對，以驗證本實驗儀的可用性。

本文內容共分為 5 章，除本章外，第二章首先回顧軟岩沖蝕破壞機制，以及國外相關施作試驗之文獻，參考其試驗之量測、計算的方法，以建立本研究試驗設備與試驗方法等。

第三章說明本儀器的試驗規畫與建立，儀器可施作的實驗，並計算驗證其合理性，且對計算及分析方法做介紹。

第四章對試體來源、製造方式做介紹，並統整岩石力學試驗結果(一般物性、單壓強度、消散耐久、岩石三軸)，並與沖蝕試驗之結果做比較，討論其影響因素。

第五章提出本論文主要之結論與未來研究方向之建議。



第二章、文獻回顧

本章針對與本研究所需的沖蝕機制的相關國內外文獻進行收集，參考其試驗方式、設備型式、量測與分析方法，作為本研究的設計依據，最後並對於各種試驗所模擬的沖蝕機制作分類。

2.1 岩石河床沖蝕機制

依據 Annandale(1995)研究指出，岩石河床的主要沖蝕機制有：磨蝕沖蝕(abrasion)、塊體抽離沖蝕(plucking)、穴蝕沖蝕(cavitation)、顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)。本節將說明這些沖蝕機制如何形成，以及如何定義與辨認。

2.1.1 磨蝕沖蝕(abrasion)

Whipple, *et al.* (2000) 經由一系列現地之實例探討影響岩床沖蝕機制之影響因素。他們認為影響岩床沖蝕機制的幾個重要參數為岩性、弱面間距、節理方向、層面方向等。當岩床的弱面間距大於 1m 時，可以視為完整岩盤，此種岩床沖蝕主控機制為水流本身或是夾帶的懸浮載及河床載顆粒磨蝕岩床的表面，使岩體本身已膠結的顆粒一粒一粒逐漸脫離而造成磨蝕沖蝕(abrasion)的行為。在渦流情況下，水流流動複雜，會出現局部劇烈的磨蝕沖蝕，常常會伴隨著形成滑槽(flute)與壺穴(pothole)等現象。

圖 2-1 為八掌溪現地磨蝕沖蝕後之岩盤外觀，軟岩河床呈現外觀平滑，成流線，顯示軟岩河床存在明顯的磨蝕沖蝕現象。



圖 2-1 現地磨蝕沖蝕後之岩盤外觀

2.1.2 塊體抽離沖蝕(plucking)

Annandale(1995)提出了一個簡單的示意圖(圖 2-2)來解釋岩塊抽離的過程，圖 2-2 為顯示一河流流向與岩層呈逆向的岩塊抽離例子，岩塊抽離的過程為頂開(wedging)、移出(dislodgement)、脫離(displacement)三個階段。Whipple, et al. (2000)認為抽離過程中小裂縫經水力作用擴大為破裂面、隨著河床顆粒逐漸透過磨蝕作用沖蝕弱面、再加上物理或化學風化作用，讓弱面完全擴展連通，最後終於導致獨立岩塊之鬆動、脫離(圖 2-2 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995))。當岩體內弱面的間距小於約 1 米，岩塊脫離(plucking)就可能成為岩床河道下切之重要機制。塊體抽離沖蝕外觀如圖 2-3 所示，節理發達且邊緣有塊狀剝落情形。

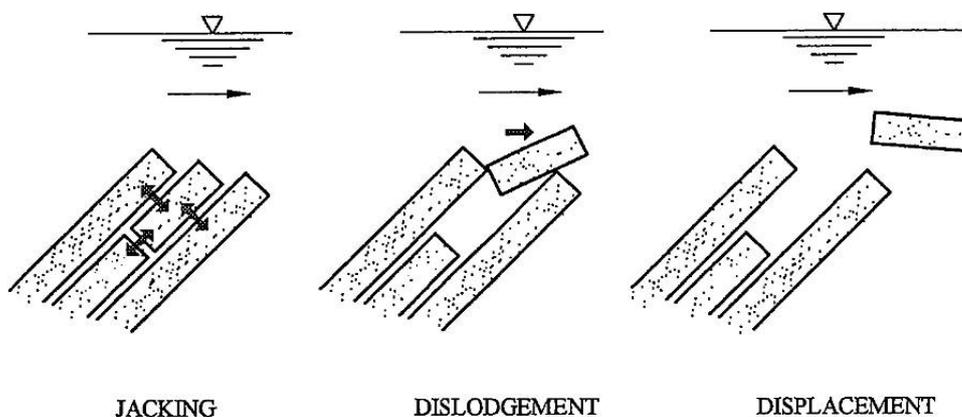


圖 2-2 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)



圖 2-3 快體抽離沖蝕外觀

2.1.3 穴蝕沖蝕(cavitation)

當水流遭遇到障礙物或階狀落差時，其下游側局部沖蝕特別顯著。河川中若有障礙物，其下游側較為顯著之岩床沖蝕，則多源自懸浮載之磨蝕沖蝕貢獻。除了磨蝕損耗，穴蝕(cavitation)之角色也不能忽視，壺穴與滑槽之構造常與渦流流況下出現之穴蝕沖蝕有關(Whipple, *et al.*, 2000)。

懸浮載沖蝕效應會受局部河床地形地貌影響甚大，其原因在於不規則地貌易於發生渦流，而當渦流加劇，穴蝕強化懸浮載沖蝕效應，局部沖蝕必然也更為顯著。由混凝土材料的研究結果顯示，脆性岩石之穴蝕阻抗與材料之壓縮強度正相關，當膠結破壞，材料中之顆粒就脫離，因此膠結力(cementation)甚具重要性，顆粒之硬度則無大的影響(Graham, 1987)。

穴蝕沖蝕外觀如圖 2-4 穴蝕沖蝕外觀所示，磨蝕沖蝕常伴隨穴石沖蝕，以至於磨石沖蝕所造成的平滑面上有大大小小的壺穴，壺穴的外觀如圖 2-4 穴蝕沖蝕外觀所示，會在岩床上有特別深之圓形凹槽，表面粗糙度如磨蝕沖蝕(abrasion)一樣平滑。



圖 2-4 穴蝕沖蝕外觀

2.1.4 顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)

Whipple & Tucker (1999)討論河床載大顆粒彈跳對沖蝕之貢獻，認為大顆粒彈跳可能對節理發達岩體的岩塊抽離機制之重要性遠高於對塊狀完整岩石(massive, unjointed rocks)之沖蝕程度與效應。然而當岩石十分軟弱時，即使岩石之弱面相當不發達，顆粒彈跳的破壞效果與程度可能仍顯著。

Gilbert (1877) 認為河川輸砂能力(sediment supply)一方面可扮演磨削岩床之工具性效應(tool effect)，一方面又可扮演覆蓋保護之覆蓋性效應(cover effect)，最大岩床磨蝕率會出現在相對中等程度之輸砂條件下。Sklar & Dietrich (2004) 認為所有河流都攜帶某個「量」的土、砂，相較於別的機制的形成，需有特殊的條件，例如 cavitation 要有高速水流、plucking 要存在節理岩體，顆粒撞擊(saltation)是最常出現且是消散能量最有效的方法。因此他們提出一個針對河床載彈跳撞擊(saltation)所造成之岩床磨損模式，他們的模式之基本假設為岩床磨損率與河床流量與河床載運動之垂直分量呈正相關。

圖 2-5 顆粒彈跳引起的沖蝕之為顆粒彈跳的示意圖，顆粒彈跳所產生的撞擊凹洞會產生渦流，進而引起穴蝕沖蝕，或者因為顆粒撞擊而加速塊體抽離沖蝕。

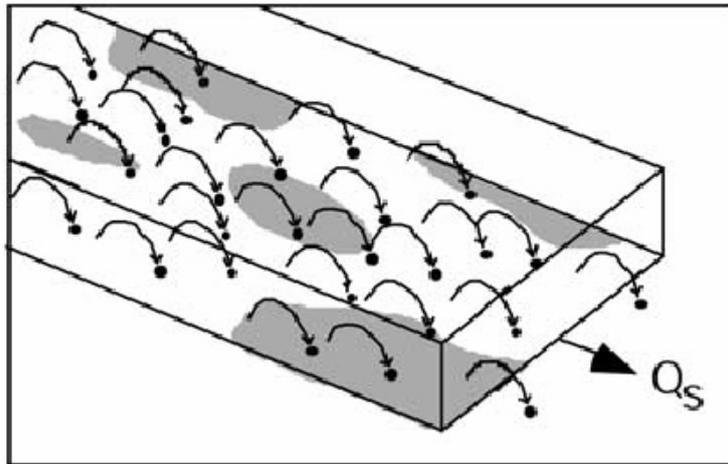


圖 2-5 顆粒彈跳引起的沖蝕之示意圖(林文凱，2008)

2.2 沖蝕試驗

國內尚不存在探討岩床沖蝕的試驗設備，近十年來，國外則有不同沖蝕模式而設計的沖蝕試驗儀，本研究以磨蝕沖蝕(abrasion)、塊體抽離沖蝕(plucking)為實驗對象進行沖蝕儀設計與建立，以下就國外現有的沖蝕試驗進行回顧，以供設計及建置參考。

2.2.1 水平沖蝕試驗

Briaud(1999)建立的沖蝕試驗機(圖 2-6a)，稱為 EFA(Erosion Function Apparatus)，其目的在求得凝聚性土壤與非凝聚性土壤的沖蝕率 \dot{z} (mm/hr)以推估橋樑下方圓形橋柱在穩定流場下隨時間變化的沖刷深度。EFA 主要模擬清水狀態下剪力沖蝕的影響，量測凝聚性的土壤(黏土或沙土)在清水下流速與沖蝕率的關係，而本研究將建立相似設備以推估軟岩河道的沖蝕速率，並評估其在軟岩橋基沖刷的適用性。

(a)



(b)

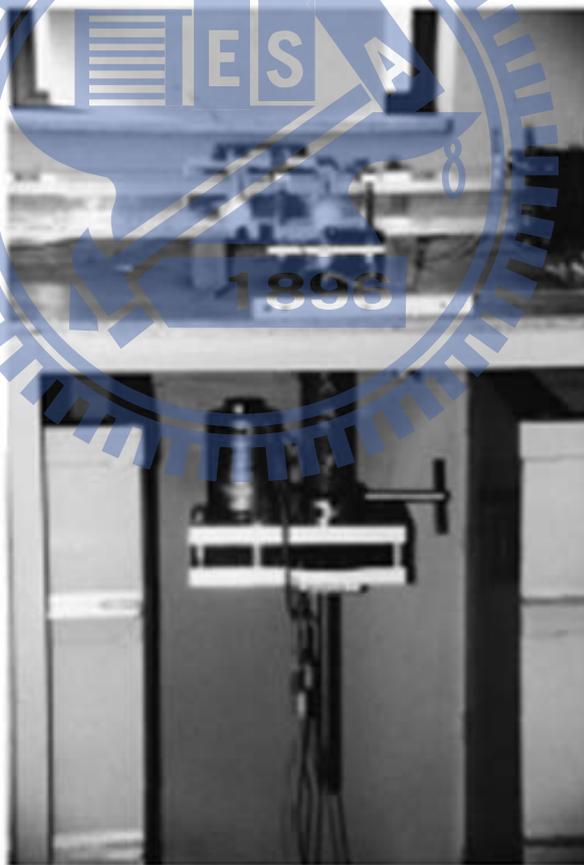


圖 2-6 (a)EFA 試驗儀外觀(b)試驗段外觀(Briaud,1999)

EFA 試驗儀之試體由外徑 76.2mm 的鑽管(ASTM 1999a)鑽掘取得，每段試體尺寸為高 101.6，直徑 50.8mm。水平向方型管路長為 1.22m，水流由泵浦驅動，試驗時為滿管，流速約 0.1~6 m/s。

EFA 試驗方法流程如下：

- (1) 將裝了試體之試管裝置於 EFA 試驗儀上(圖 2-6b)，並將試驗管注滿水，讓試體浸泡一小時以上，使其接近飽和狀態。
- (2) 設定流速為 0.3m/s
- (3) 將試體推出 1mm。
- (4) 紀錄 1mm 試體沖刷所需時間。
- (5) 如沖刷時間高於一小時，則將流速提升為 0.6m/s，重新由步驟二開始試驗。
- (6) 重步步驟四。
- (7) 重複步驟 5、步驟 6 並改變試驗流速，流速分別為 1.5m/s、2 m/s、3 m/s、4.5 m/s、6 m/s。

EFA 試驗所得之沖蝕率 \dot{z} (mm/hr)為：

$$\dot{z} = \frac{h}{t}$$

(2-1)

h 為試體在時間 t 所沖刷之深度

而水對於試體所造成之剪應力，會因試體所凸起之長度造成影響，Briaud(2001)在試驗段前後方裝設壓力計(圖 2-7)，使用鋁棒做為試體，量測沒有凸起與凸起 1.2mm 時，管壁剪應力在流速 0.2~5.6m/s 的變化。試驗結果如圖 2-8 所示，得知如果試驗之試體凸起越高，水流造成之剪應力也會升高，且流速越大影響越大，故試驗時試體所推出高度盡量小於 1mm。

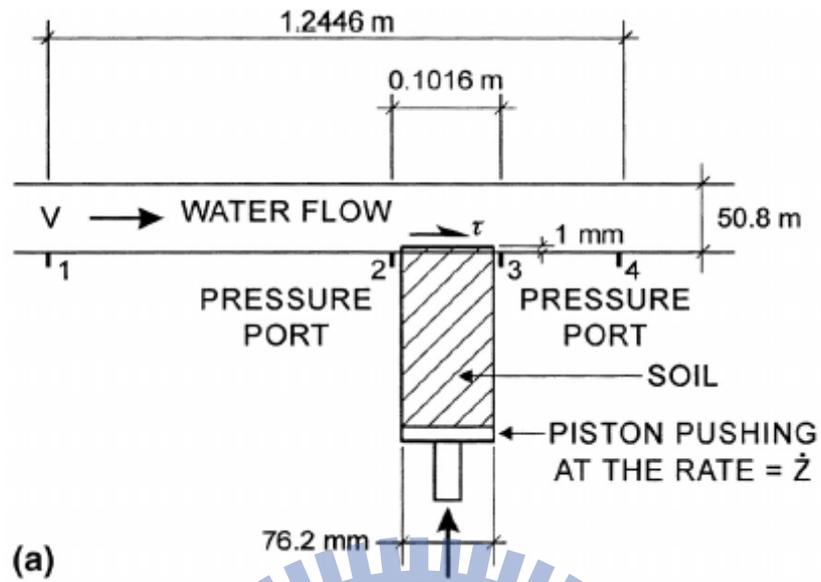


圖 2-7 試驗段配置示意圖(Briaud, 1999)

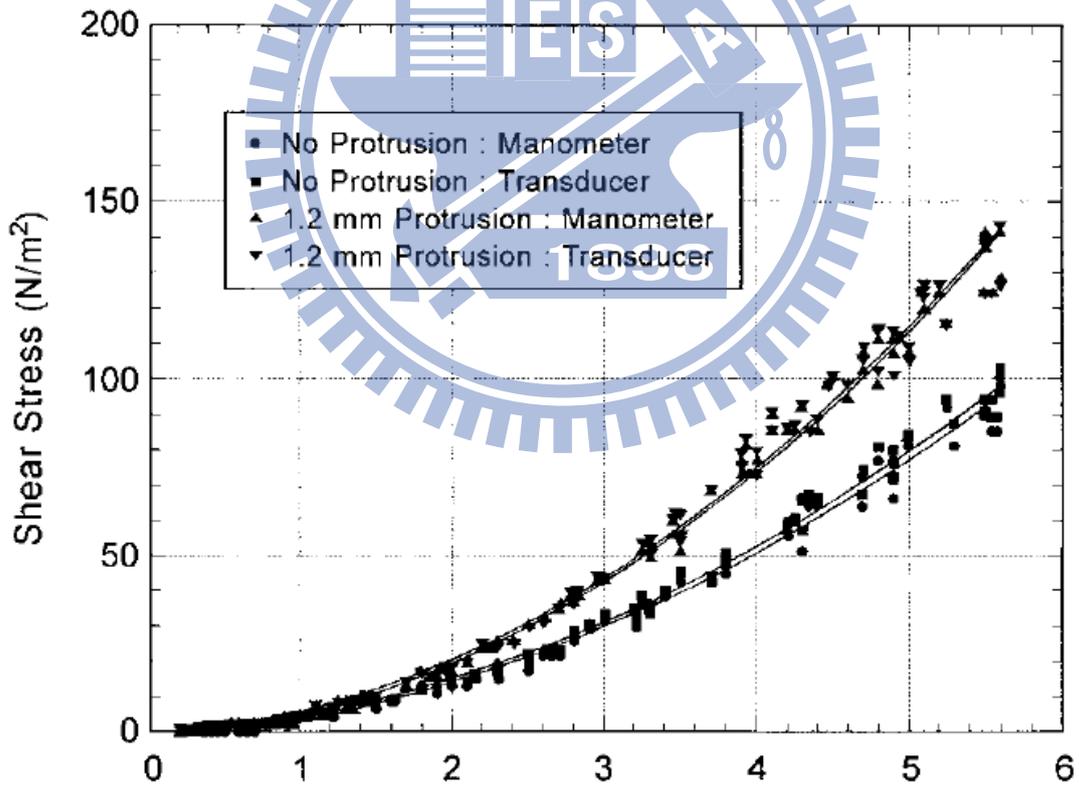


圖 2-8 試體凸起高度與剪應力關係圖(Briaud, 1999)

而除了使用壓力計，量測試體兩端壓力差計算剪力外，管壁剪應力也可使用 Moody chart 來計算(Moody 1994)，剪應力公式為：

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho v^2 \quad (2-2)$$

公式中 f 為達西磨擦因子(Darcy friction factor)，由 Moody chart (圖 2-9) 可得， ρ 為水之密度 (1000kg/m^3)， v 為平均流速

其中 Moody chart 中雷諾數 Re 為：

$$Re = \rho VD / \mu \quad (2-3)$$

公式中 V 為平均流速， μ 為水的黏度($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ at 20°C)， D 為圓管之內徑，EFA 試驗為方管， D 轉換成方管之公式如下：

$$D = 2ab / (a+b) \quad (2-4)$$

式中 a 為方管管內高， b 為方管管內寬

其中 Moody chart 中粗糙度係數 ϵ 對於試體表面為：

$$\epsilon = 0.5D_{50} \text{ (Briaud, 1999)}$$

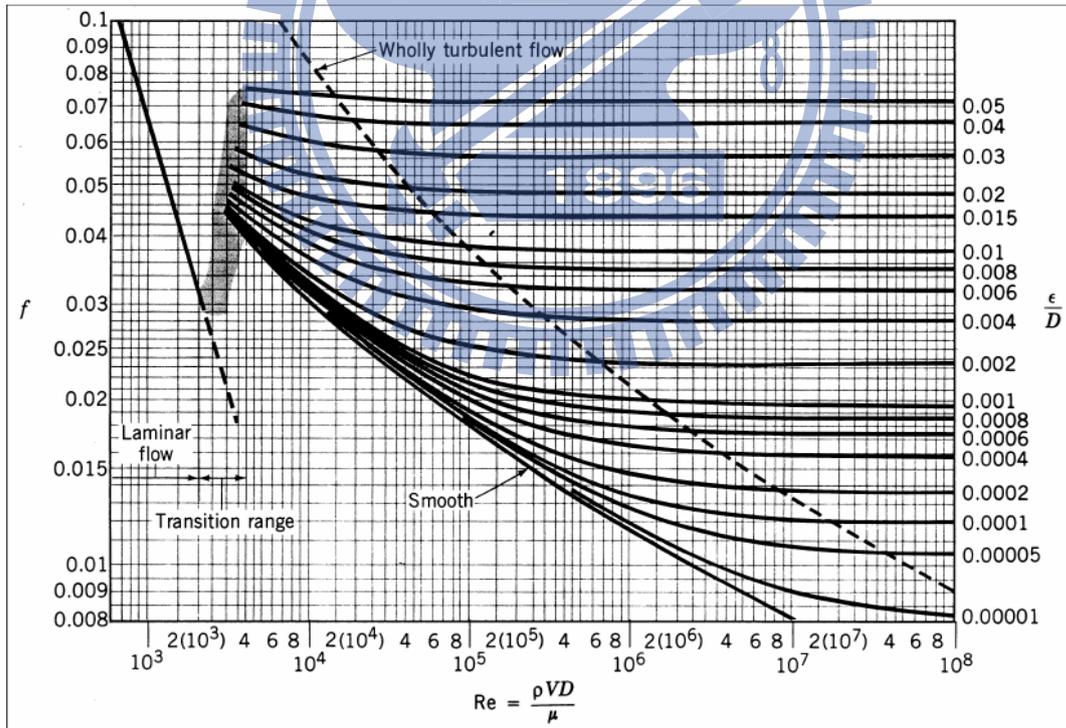


圖 2-9 Moody chart (Moody, 1944)

而 EFA 試驗所得之數據主要在推估橋柱之沖刷深度，而此種推估方式稱為 SRICOS(Scour Rate In COhesive Soils)，而 SRICOS 方法流程如下：

- (1) 取得橋墩附近之試體
- (2) 執行 EFA 試驗，並繪出沖蝕率 z_i 與剪力強度 τ 關係圖
- (3) 計算出開始沖刷的最大的剪力強度 τ_{max}
- (4) 求得對應對大剪力強度 τ_{max} 的最初沖蝕率 z_i
- (5) 計算最大沖蝕深度 Z_{max}
- (6) 得出沖蝕深度 z 與時間 t 之關係
- (7) 由得出的沖蝕深度 z 與時間 t 之關係圖來推估未來的沖刷深度

Briaud(1999)提出橋柱下所產生的最大剪力強度為：

$$\tau_{max} = 0.094\rho v^2 \left(\frac{1}{\log Re} - \frac{1}{10} \right) \quad (2-5)$$

Briaud(1999)由 42 組河道試驗之結果提出，橋柱下河床所產生之沖蝕坑，其最大相對深度 Z_{max} 在時間足夠久之後將會達到定值而不會再向下刷深

$$Z_{max} = 0.18Re^{0.685} \quad (2-6)$$

並由最大深度 Z_{max} 與試驗取得之沖蝕率 z_i 可以求得時間(t)橋柱下沖刷坑之沖刷深度 Z

$$Z = \frac{t}{\frac{1}{z_i} + \frac{t}{Z_{max}}} \quad (2-7)$$

由 EFA 試驗儀所得到的試驗結果可以用來推估現地橋墩某時間內之沖刷深度，圖 2-10 為其計算範例。而此公式試用於各種土壤性質(沙土、黏土)，並且 Briaud(1999)提出，無論各種土壤性質，在相同流速下，其最大沖刷深度 Z_{max} 為定值，沖刷時間無限大的狀況下，沖刷深度僅和流速相關。並且 Briaud(2008)由沖蝕率與流速的關係圖，將沖蝕分類為非常高、高、中等、低、非常低、無沖蝕六種沖蝕指數(圖 2-11 沖蝕指數分類表 (Briaud, 2008)沖蝕指數分類表，Briaud, 2008)。

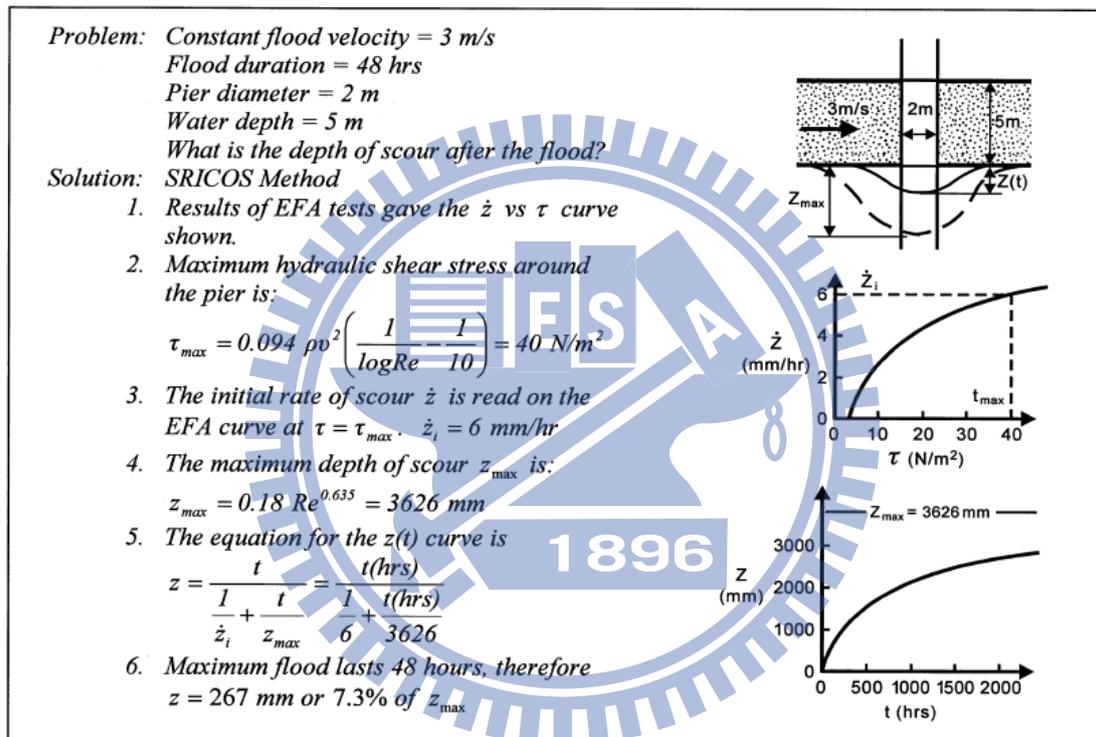


圖 2-10 EFA 計算範例 (Briaud, 2003)

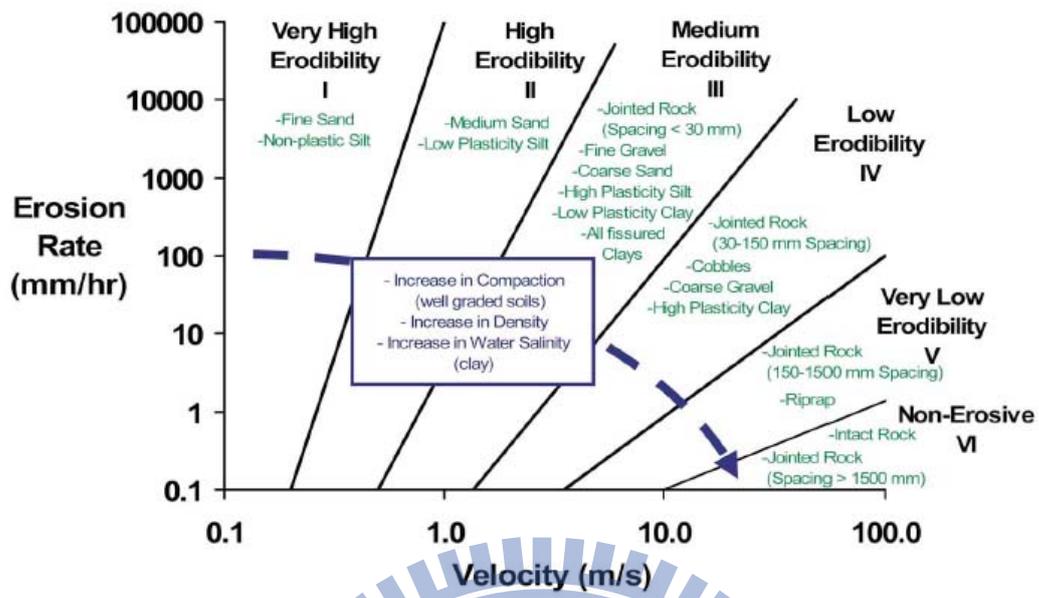


圖 2-11 沖蝕指數分類表 (Briaud, 2008)



2.2.2 磨蝕沖蝕試驗

Sklar (2001)為了模擬現地岩床受到顆粒彈跳磨蝕，建立了一小型的顆粒磨蝕試驗機，如圖 2-12 所示。利用馬達帶動圓桶內的水，在水中加入顆粒對岩石試體進行磨蝕。此試驗主要在模擬彈跳磨蝕沖蝕 (saltation)，量測不同岩層在各顆粒大小磨蝕下的沖蝕率 erosion rate (g/hr)，找出各情況下對於沖蝕率的影響。

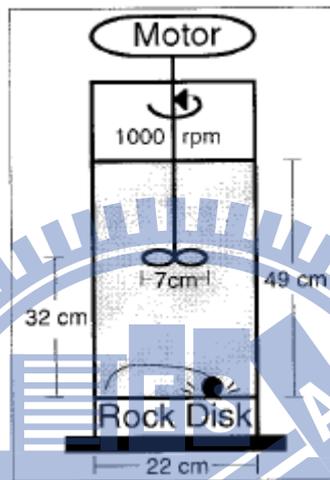


圖 2-12 磨蝕試驗機(Sklar, 2001)

控制流速與顆粒大小，Sklar (2001)的試驗結果如圖 2-13、圖 2-14 所示，圖 2-13 使用直徑 6mm 總重量 150g 的顆粒對各種不同岩性 (Weathered sandstone, Artificial, Sandstone, Mudstone, Limestone, Marble, Weathered granite, Basalt, Graywacke, Andesite, Greenstone, Granite, Metasandstone, Welded tuff, Quartzite)進行磨蝕試驗，圖 2-14 使用石英顆粒與礫石顆粒分別對相同的岩性 (Andesite, Limestone, Mudstone)磨蝕，得到沖蝕率與試體張力強度關係圖，所得張力強度與沖蝕率之關係式可得知，試體的張力強度越高沖蝕率越低。

磨蝕過程中，固定流速下，顆粒越大造成之沖蝕率(g/h)越高，如圖 2-15 所示。

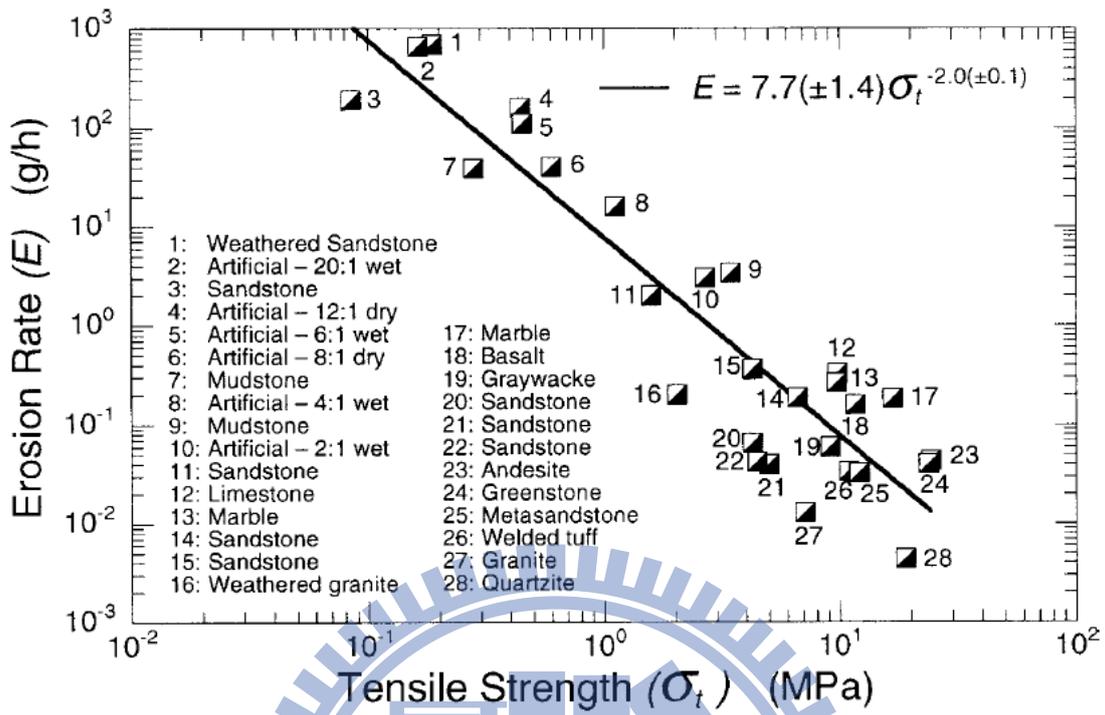


圖 2-13 不同岩性張力強度與沖蝕率關係圖(Sklar, 2001)

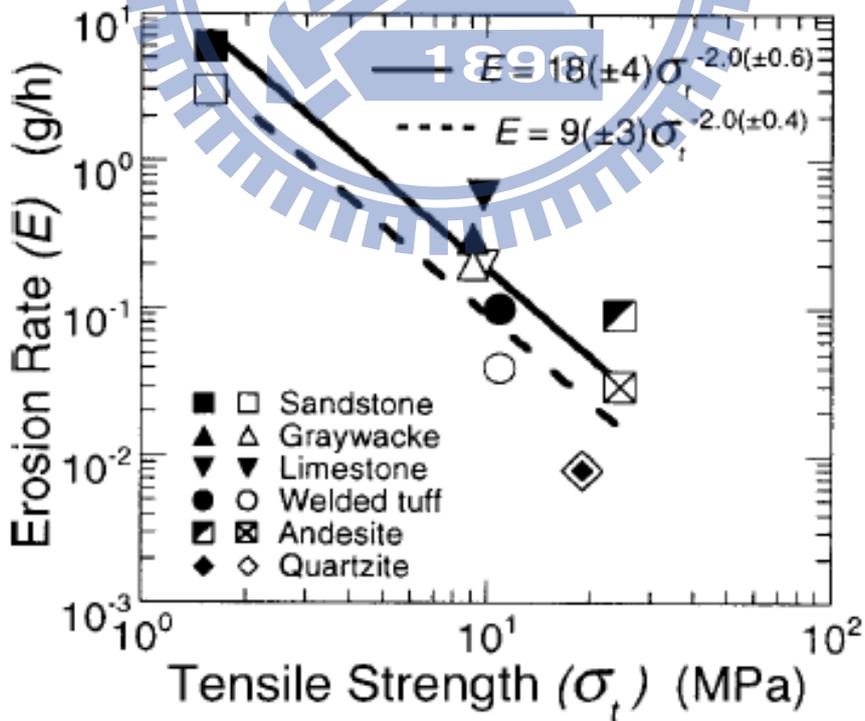


圖 2-14 張力強度與沖蝕率關係圖(實線為石英顆粒，虛線為礫石顆粒)

(Sklar, 2001)

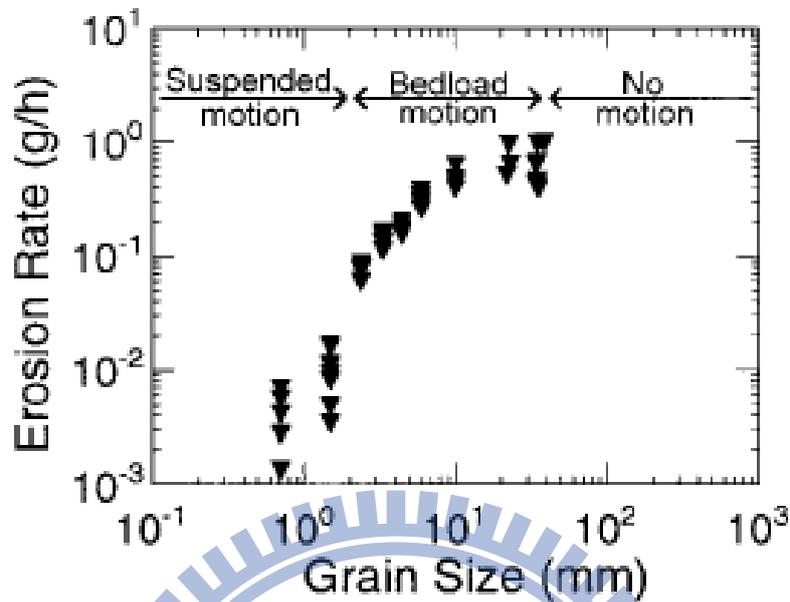


圖 2-15 不同顆粒大小與沖蝕率關係圖(Sklar, 2001)

隨著磨蝕慢慢加入 6mm 之顆粒作為河床載，馬達轉速固定為 1000rpm，時間越長河床載越多，河床載達到 200g 以前，河床載仍受到水流帶動，造成沖蝕上升，而隨者河床載的增加，水流漸漸難以帶動河床載，沖蝕率則會下降(圖 2-16)，顆粒的沉積會有保護底床的情形，故當河床載到一定的量之後，底床會因為顆粒的保護而不再刷蝕。

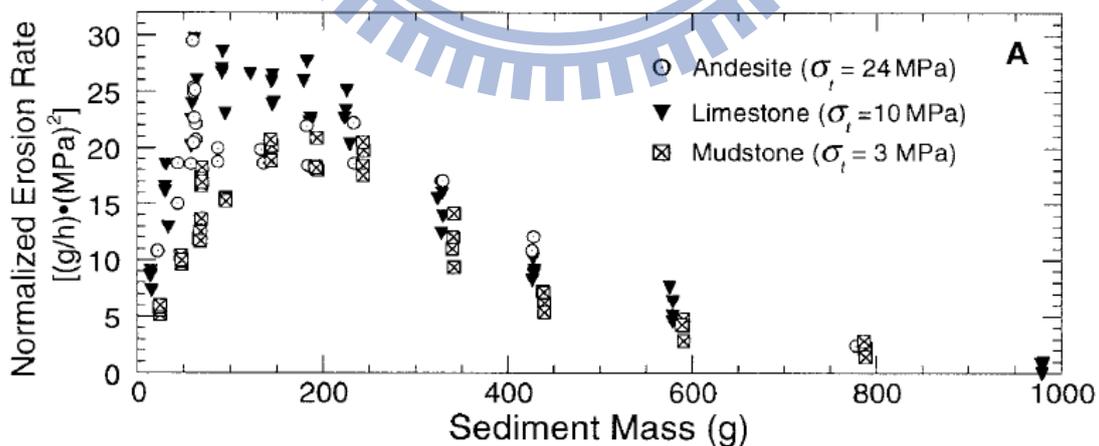


圖 2-16 顆粒量與沖蝕率關係圖(Sklar, 2001)

此試驗的結果可讓我們了解到岩石河床受到顆粒磨蝕動態行為，以及河床載的粒徑分佈對於河床下切的影響。

2.2.3 人造節理沖蝕試驗

溢洪道下塊體抽離(plucking)的機制，來自於節理裂縫因水力作用造成延伸，最後因水壓造成的上舉例造成抽離(圖 2-17)，而 Bollaert(2001)建立的水槽試驗(圖 2-18)，以強力水柱沖擊模擬節理，以感測器量測量測水力作用下模擬節理內部之壓力變化情形。

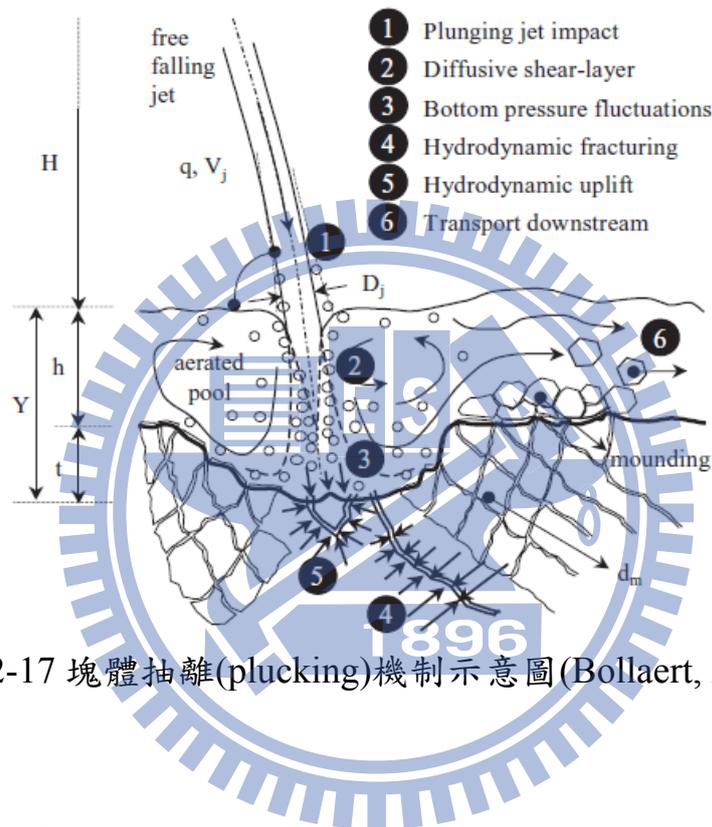


圖 2-17 塊體抽離(plucking)機制示意圖(Bollaert, 2001)

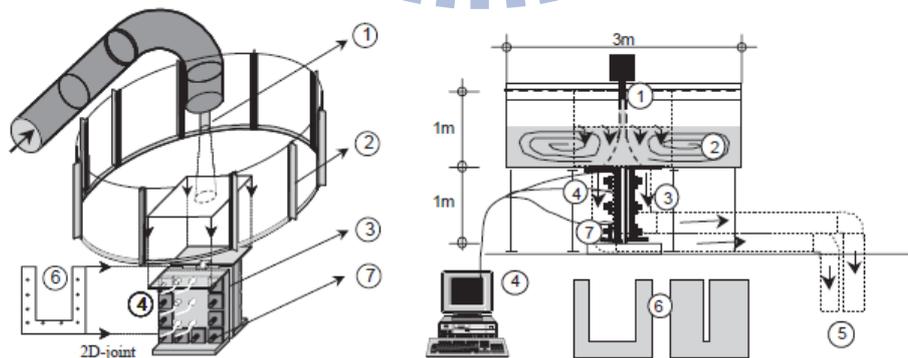


圖 2-18 人造節理沖蝕試驗配置圖(Bollaert, 2001)

圖 2-18 儀器各編號組件分別為：

- (1) 圓型噴嘴：最高流速為 35m/s，有 5.7cm 及 7.2cm 兩種尺寸。
- (2) 水槽：直徑 3m 之水槽，周為有骨架增加其強度。
- (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 及 2D 兩種型式，圖 2-19 1D 與 2D 模擬節理示意圖(Bollaert, 2001)為鋼板尺寸及型式。
- (7) 預力鋼棒：施加力量，使預力鋼構夾緊薄鋼板。

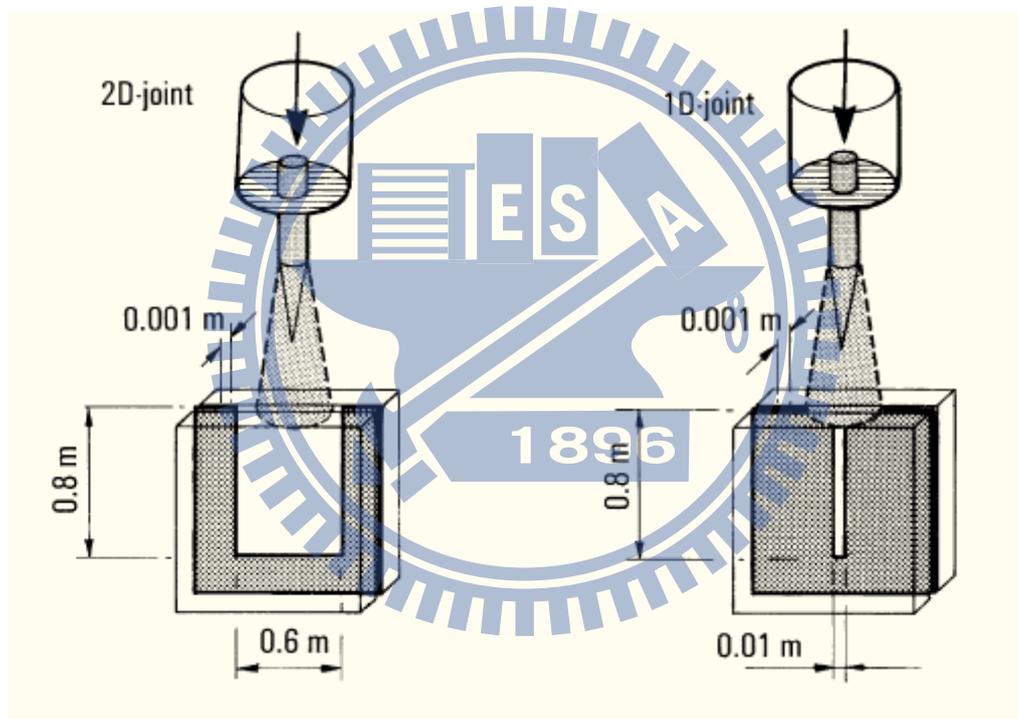


圖 2-19 1D 與 2D 模擬節理示意圖(Bollaert, 2001)

Bollaert(2003)指出，水柱噴流會將空器捲入噴流中，造成噴流內會包含許多小氣泡(圖 2-20)，而如圖 2-21a 所示，氣泡含量會隨流速增加而增加，氣泡會由於水力作用而被擠壓進入節理內部，如圖 2-21b 所示，氣泡含量在 0.5~1.0%時會造成節理內部的有較大的壓力，而增加量約 10~20%。圖 2-21b 中(□)為噴嘴沒入水中，(+)為圖 2-22a 噴嘴在水面上且距離人造節理較近，(●)為圖 2-22b 噴嘴在水面上且距離人造節理較遠

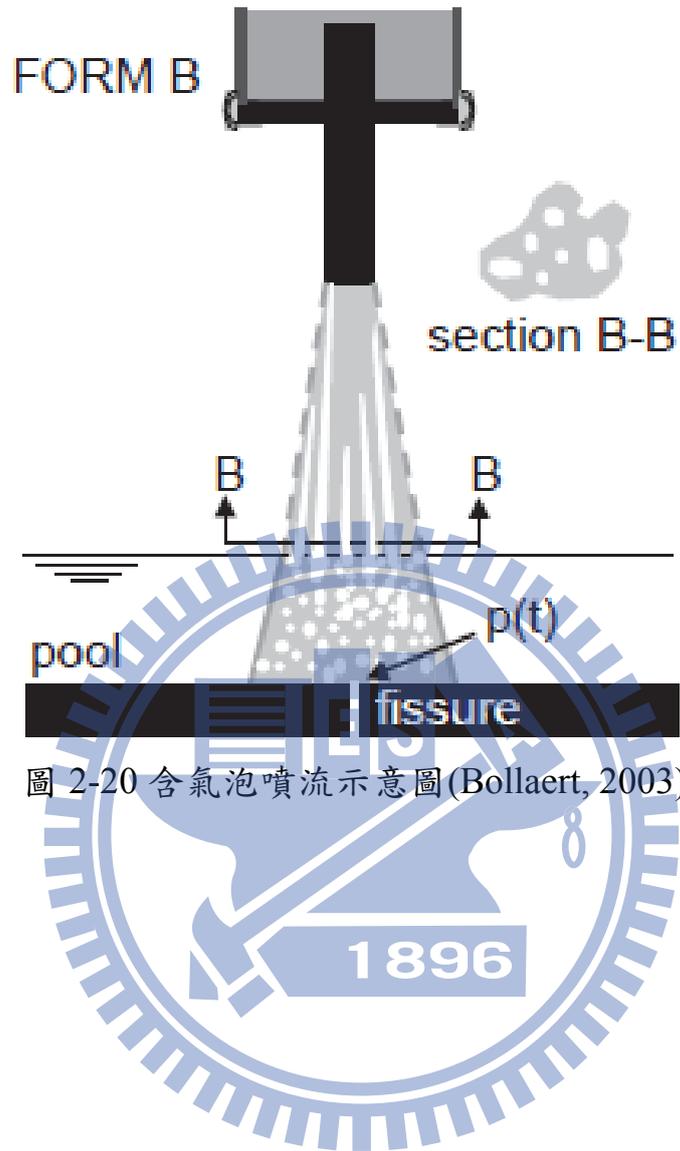


圖 2-20 含氣泡噴流示意圖(Bollaert, 2003)

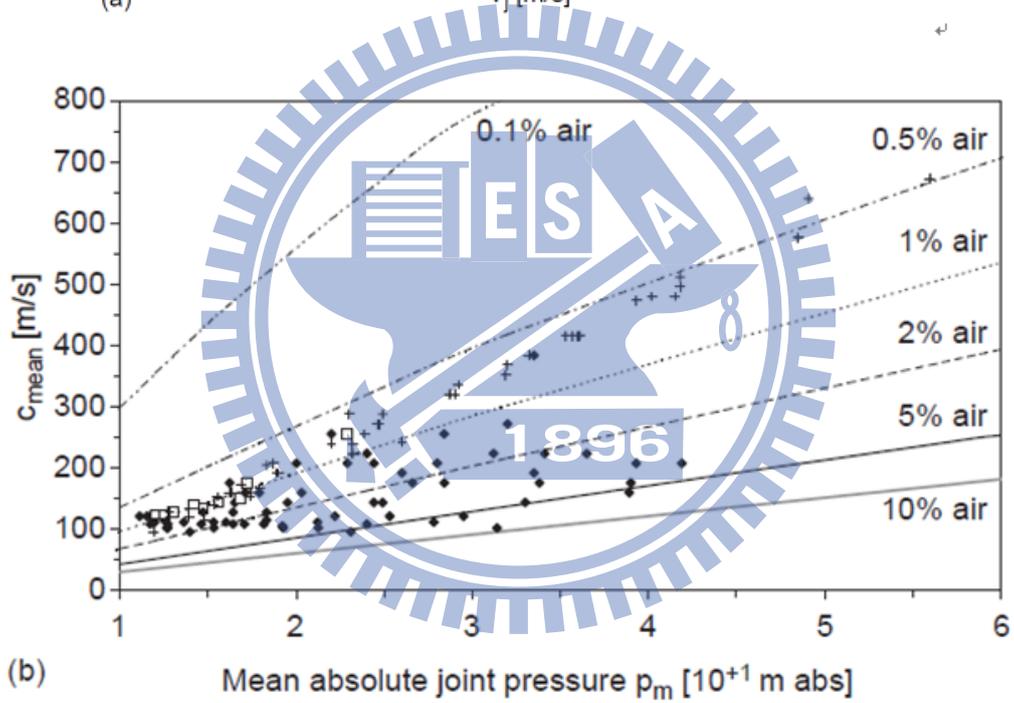
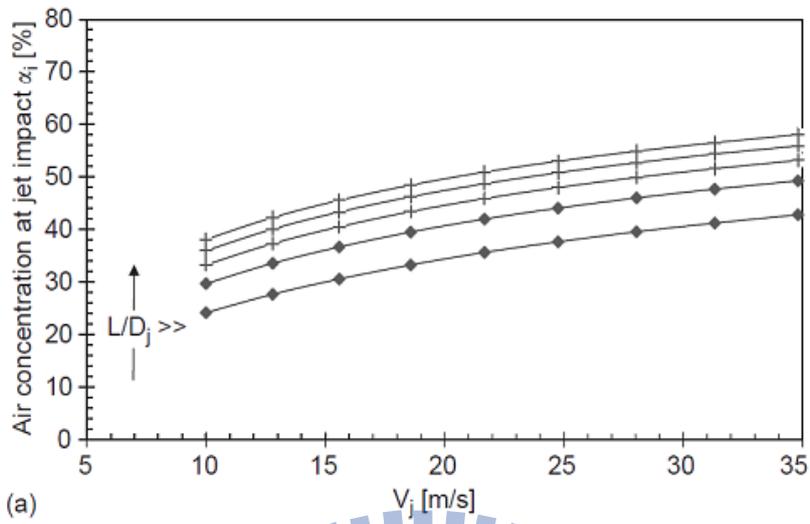


圖 2-21 (a)氣泡含量與流速關係圖，(b)壓力與壓力波速關係圖(Bollaert, 2003)

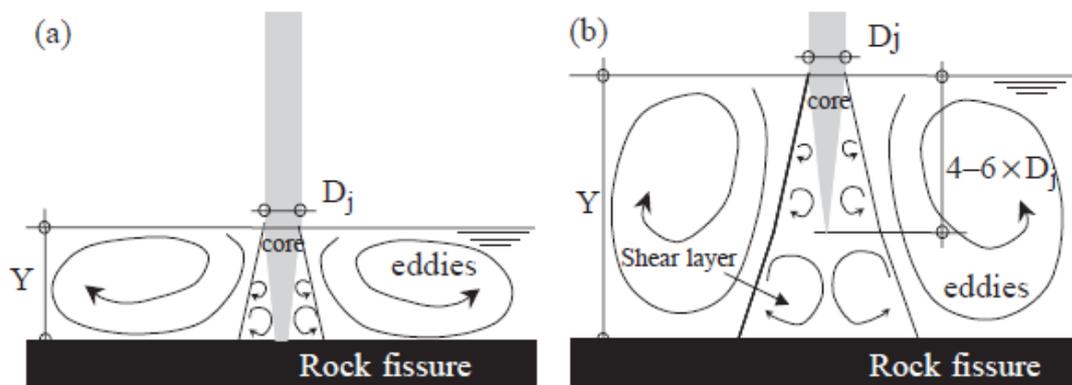


圖 2-22 噴嘴距離示意圖(Bollaert, 2004)

而在溢洪道下水力所造成的應力 σ_{max} 與侵入岩塊中的應力 σ_{adm} 可以用來推估塊體抽離機制可能沖刷的最大深度(圖 2-24)，且沖刷深度與沖刷水柱直徑 D_j 、主槽深度 Y 相關(圖 2-23)。而在同樣的水流衝擊下，塊體抽離造成的最大刷深深度會是固定的。

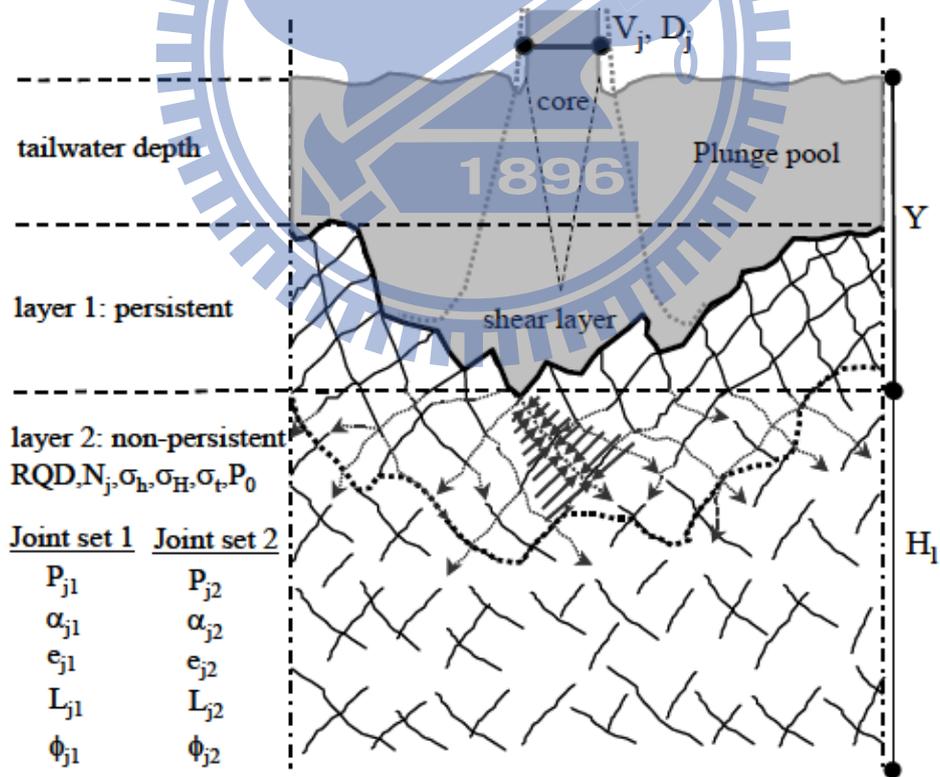


圖 2-23 沖刷坑示意圖(Bollaert, 2001)

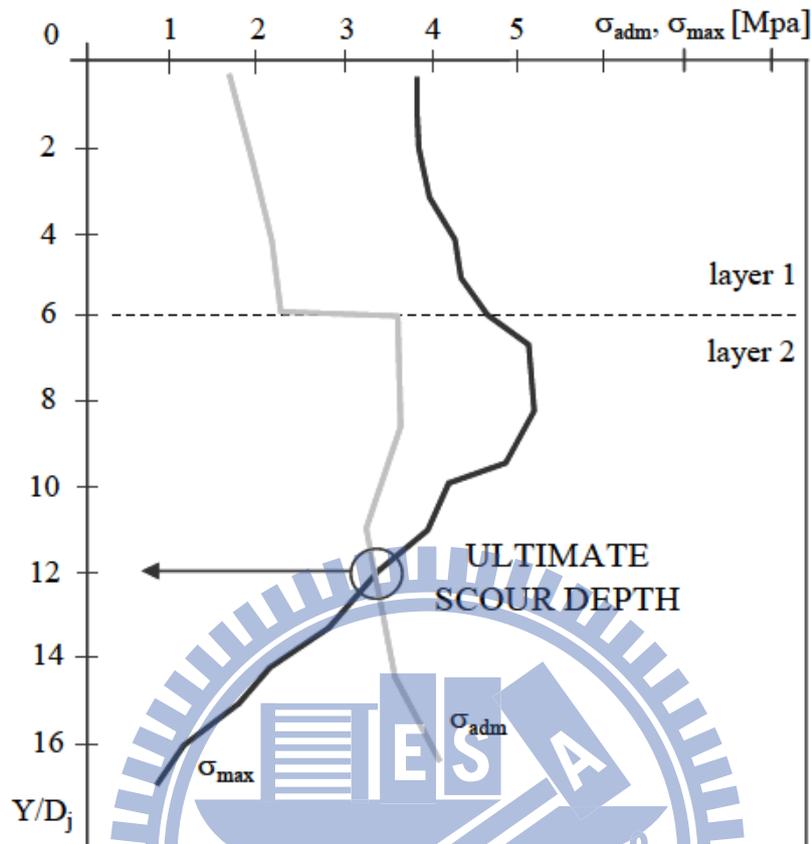


圖 2-24 應力與深度關係圖(Bollaert, 2001)

2.2.4 直接水柱衝擊試驗

Annandale & Wittler (1998)所建立之水槽試驗，主要在模擬溢洪道下的沖蝕情形。試驗分為塊體抽離(plucking)沖蝕與穴蝕沖蝕(cavation)兩種類，以下分別對兩種試驗加以說明。

(1)塊體抽離沖蝕(plucking)：

本試驗水槽寬 10m、長 16.75m、深 4.5m，噴射水流最大流量為 $3.4\text{m}^3/\text{s}$ ，噴射角度固定為 15° (圖 2-21)，試驗塊體為長 0.394m、寬 0.194m、厚 0.064m 之混凝土塊體，塊體上每 3.81cm 切割寬 1.27cm、深 2.54cm 的溝槽，試體以 45° 排列兩層，並且埋設 18 組水壓計(圖 2-25)。以強力水柱沖擊質量塊，利用水力作用使塊體因水柱沖擊而剝離。

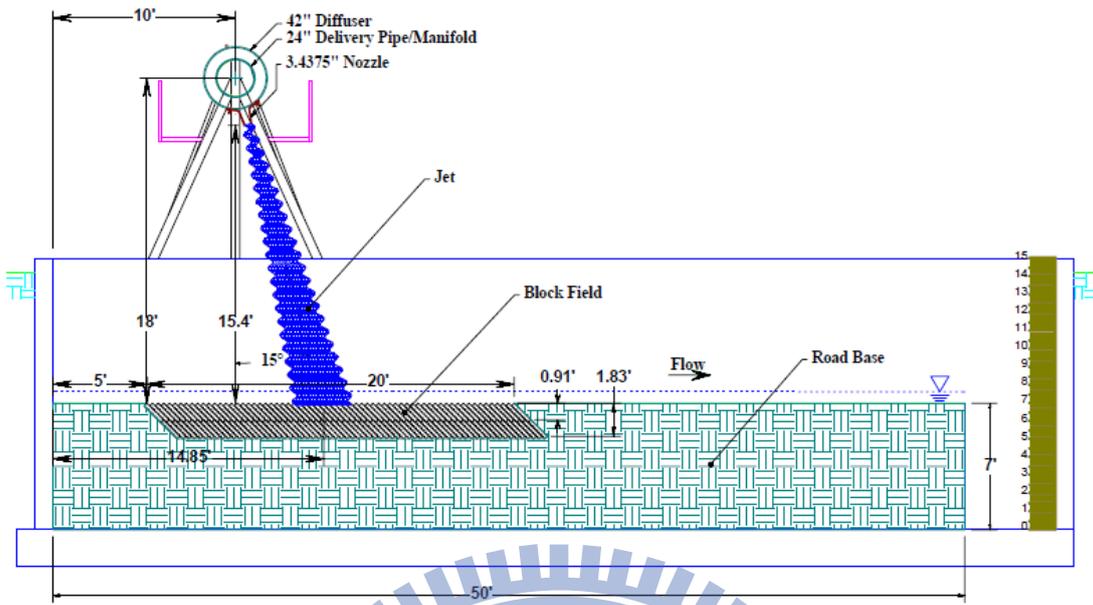


圖 2-25 直接水柱衝擊試驗-塊體抽離實驗示意圖(Annandale, 1998)

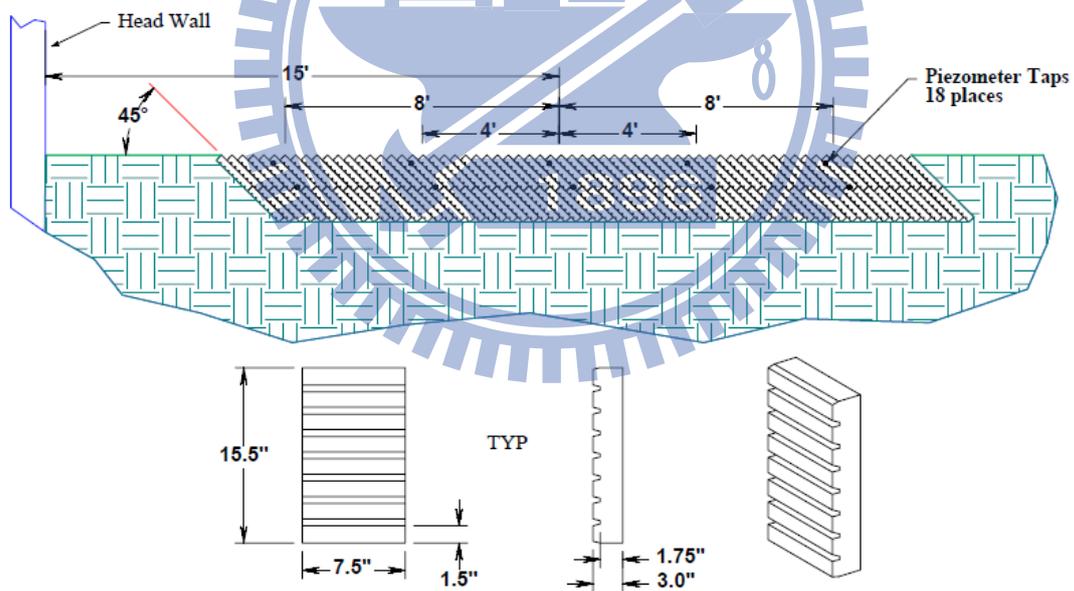


圖 2-26 質量塊配置與尺寸示意圖(Annandale, 1998)

而本試驗依據 Annandale (1995)所提出之公式

$$P = f(K_h) \quad (2-8)$$

式中 P =噴射水流造成的能量(stream power), $f(K_h)$ =沖蝕指數, 當 $P > f(K_h)$ 時會產生沖蝕, 當 $P < f(K_h)$ 則不會發生沖蝕。而 P 與塊體相關,

K_h 與水流衝擊相關。
而壓力 P 的公式如下：

$$P = \frac{\gamma Q \Delta E}{A_i} \quad (2-9)$$

式中 γ 為水單位重， Q 為衝擊之水量， ΔE 為水柱產生之能量， A_i 為水柱衝擊面積

K_h 為 Annandale(1995)所提出

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (2-10)$$

其中塊體強度指數 M_s ：

$$M_s = \frac{\gamma_b}{\gamma_s} \times UCS \quad (2-11)$$

式中 UCS 為無側限抗壓強度(Unconfined Compressive Strength)， γ_b 為完整質量快單位重， γ_s 為切削溝槽後質量塊單位重

塊體大小指數 K_b ：

$$K_b = RQD / J_n \quad (2-12)$$

$$RQD = [105 - 10 / (J_x J_y J_z)^{0.33}] \quad (2-13)$$

公式中 J_x 、 J_y 、 J_z ：為塊體 XYZ 向之尺寸

J_n 為 Annandale(1995)提出之指數，須查表而得

剪力強度指數 K_d ：

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

其中 J_r 、 J_a ：為 Annandale(1995)提出之指數，須查表而得。

相對地面結構指數 J_s ：

為 Annandale(1995)提出之指數，與塊體和地面交角相關，須查表而得。

Annandale & Wittler 整理試驗資料與蒐集實際案例之資料，找出沖蝕與不沖蝕之門檻值，結果如圖 2-27 所示。Annandale & Wittler(1998) 利用此方式應證了此計算方式可成功預測在溢洪道下是否會產生塊體抽離沖蝕。

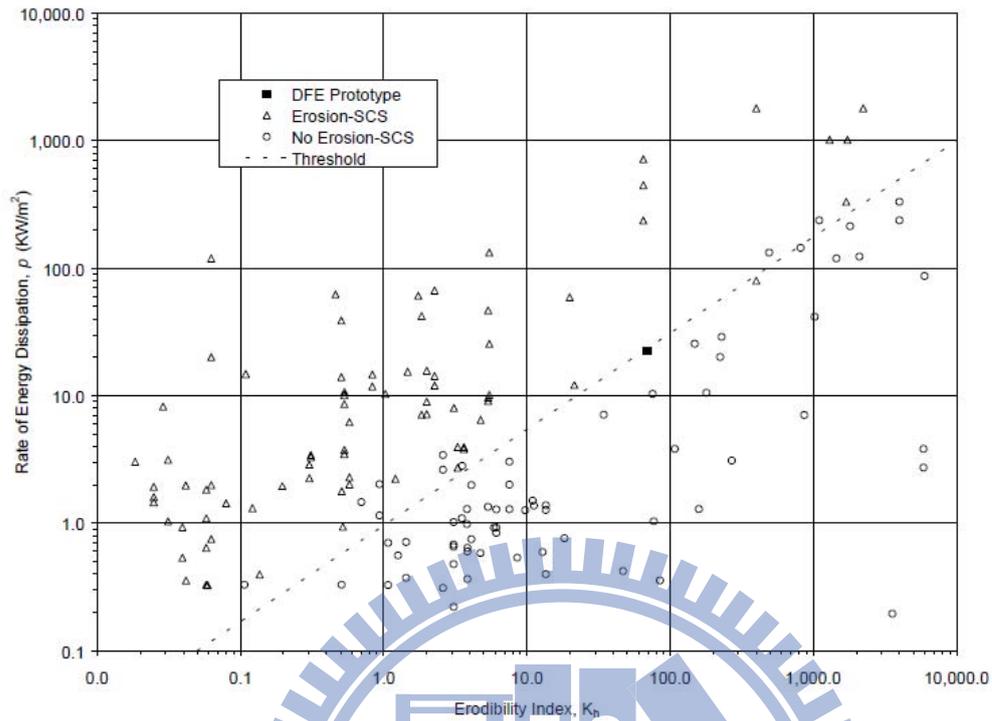


圖 2-27 沖蝕指數 K_e 與能量關係圖(Annandale, 1998)

(2) 穴蝕沖蝕 (cavation) :

Wittler & Annandale (1997)所建立之水槽試驗。試驗配置如圖 2-28 所示，以強力水柱沖擊沙土層，使其因水柱沖擊而產生沖刷坑。水槽配置與塊體抽離沖蝕相同。

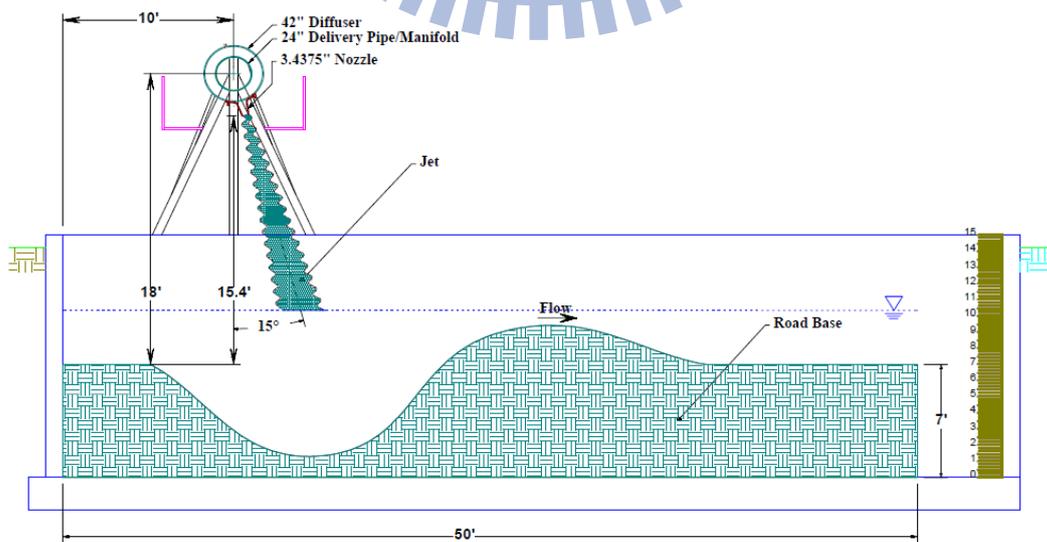


圖 2-28 直接水柱衝擊試驗-穴蝕沖蝕示意圖(Wittler, 1997)

Annandale (1995)提出，由砂土的 K_h 可以得到沖刷必需的能量 P_R (Required Power)，而噴射水柱的有效的能量為 P_A (Available Power) P_R 、 P_A 公式如下：

$$P_R = \frac{480}{1000} K_h^{0.44} \quad (2-15)$$

$$P_A = \frac{\gamma v_j \Delta E_j}{1000} \quad (2-16)$$

其中沖蝕指數 K_h 為：

$$K_h = M_s K_b K_d J_s \quad (2-17)$$

塊體強度指數 M_s ：

由於此試驗為沙土， M_s 為定值 0.07

塊體大小指數 K_b ：

$$K_b = 1000 D_{50}^3 \quad (2-18)$$

Annandale(1995)提出之指數，由 Annandale(1995)可查得此試驗 D_{50} 為定值 0.02

剪力強度指數 K_d ：

Annandale(1995)提出之指數，由 Annandale(1995)可查得此試驗 K_d 為定值 0.84

相對地面結構指數 J_s ：

Annandale(1995)提出之指數，由 Annandale(1995)可查得 J_s 為定值 1.0。

各深度水流之能量 ΔE_j ：

$$\Delta E_j = \frac{v_j^2}{2g} - \frac{v_{j+1}^2}{2g} + \frac{F_j}{\gamma} - \frac{F_{j+1}}{\gamma} + z_j - z_{j+1} \quad (2-19)$$

計算出 P_R 與 P_A 在各深度之值，繪出其關係圖， P_R 與 P_A 曲線之交點即為預估沖刷深度(圖 2-29)。繪出試驗深度與預估深度關係圖，如圖 2-30 所示。Wittler & Annandale (1997)利用此試驗證明此計算方式可成功預測溢洪道下穴蝕沖蝕之沖刷坑深度。

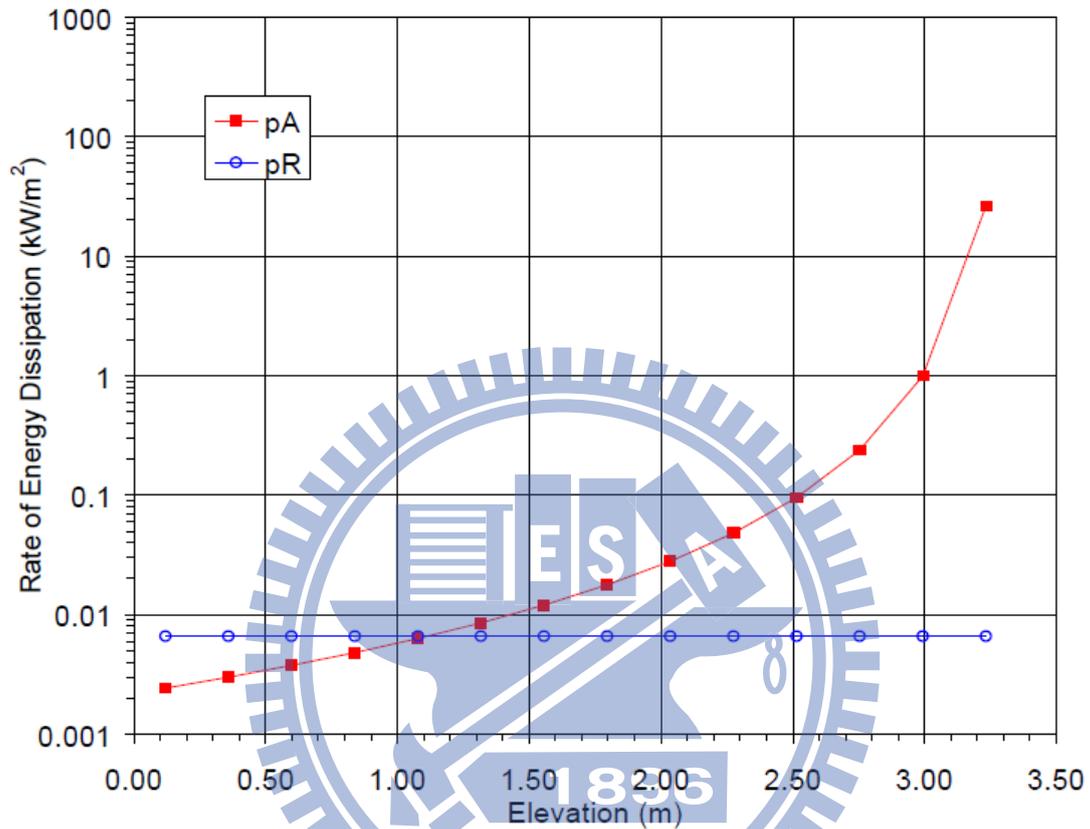


圖 2-29 能量與深度關係圖(Wittler, 1997)

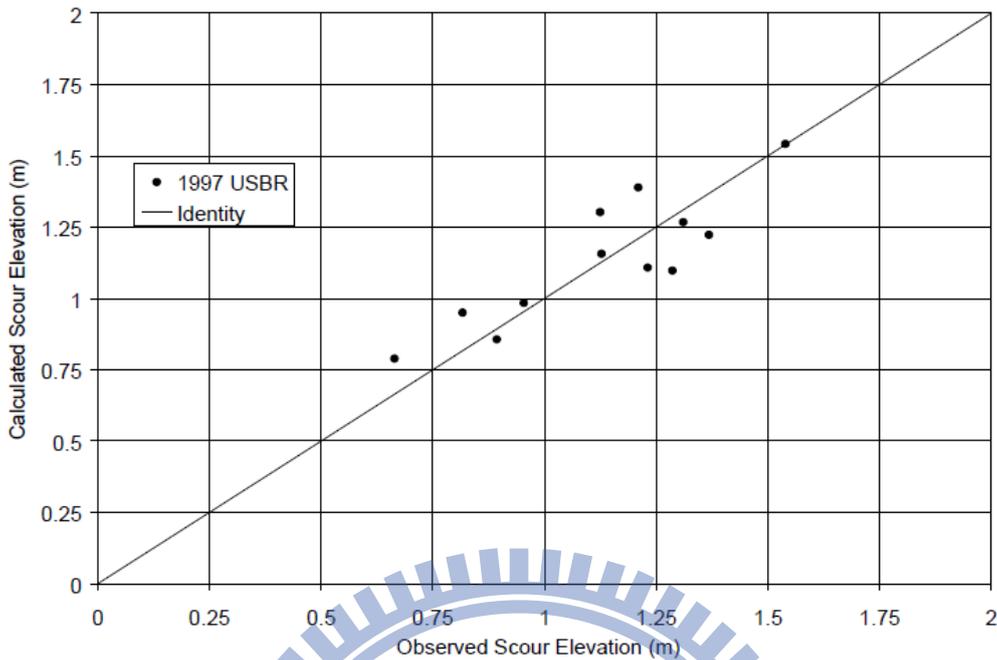


圖 2-30 預估沖刷深度與實際沖刷深度關係圖(Wittler, 1997)

2.2.5 河道沖蝕試驗

Balachandar & Kells (1998) 以水工模型進行河道沖蝕試驗，模擬排水閘門後之河道沖蝕，水流由排水閘門排出時，其流場如圖 2-32 所示，模擬的破壞型式為磨蝕沖蝕(abrasion)，試驗配置如圖 2-31 所示，儀器長 8m、寬 30.5cm，砂土試體長 2400mm、寬 305mm、高 200mm，試體顆粒大小介於 0.84~1.12mm。

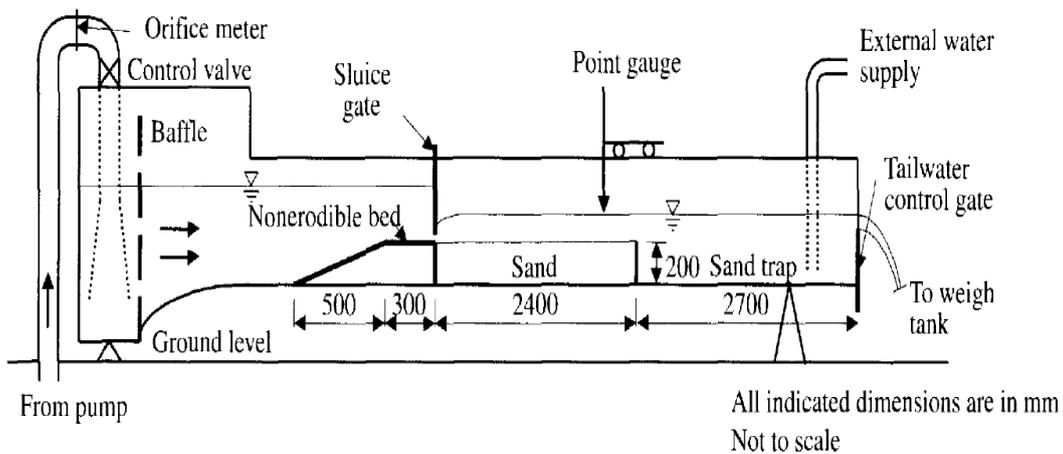


圖 2-31 河道沖蝕試驗配置圖(Balachandar and Kell, 1998)

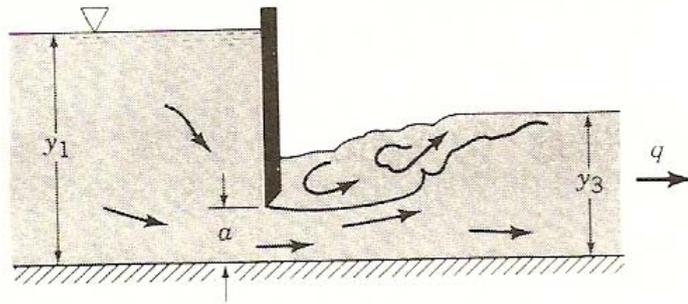


圖 2-32 排水閘門流場示意圖(Munson, 2005)

圖 2-31 各部位組件功能如下：

- (1) Orifice meter(流量計)：計算通過管內時間單位內水量 (m^3/hr)，通過 Sluice gate 段之流速由流量換算而得。
- (2) Control valve：控制流量之閘門。
- (3) Baffle：消除水流多餘之能量之孔洞擋版使水流較為穩定。
- (4) Nonerodible bed：不會沖刷之堅硬段，尺寸如圖 2-28 所示。
- (5) Sluice gate：可調開口大小之閘門。
- (6) Sand：任意均質砂土平鋪而成之試體。
- (7) Point gauge：可移動式單點流速計，可量測各點流速。
- (8) Sand trap：沖刷掉之砂土將會在此被過濾
- (9) Tail water control gate：控制試驗段水面高之閘門裝置

Balachandar & Kells 的試驗結果顯示沖刷坑並非固定不變的，沖刷坑在水力作用下會不停的在回填與挖掘之間循環，而循環的過程為(圖 2-33)：

- (a) 最大回填
- (b) 挖掘開始
- (c) 持續挖掘
- (d) 最大挖掘深度
- (e) 回填開始
- (f) 持續回填
- (g) 最大回填
- (h) 挖掘開始

最大回填稱為階段 A，最大沖刷深度稱為階段 B

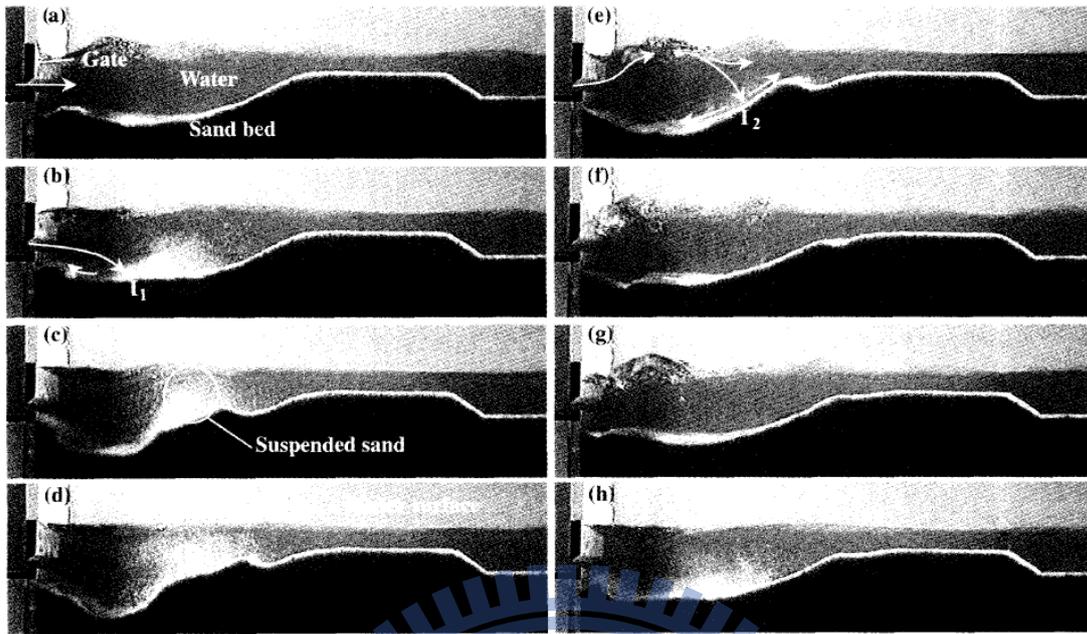


圖 2-33 沖刷坑之循環(Balachandar, 2000)



圖 2-34 為階段 A(回填)之流速斷面圖與沖蝕斷面圖， U_0 為平均流速、 U 為單點流速，圖(a) $X/b=0$ 、圖(b) $X/b=1$ 、圖(c) $X/b=6$ 、圖(d) $X/b=11$ 、圖(e) $X/b=16$ 。(b 為閘門開口高度， X 為距離閘門的長度)

可得知回填時，基準面以上的流速高於平均流速，基準面以下的流速低於平均流速。

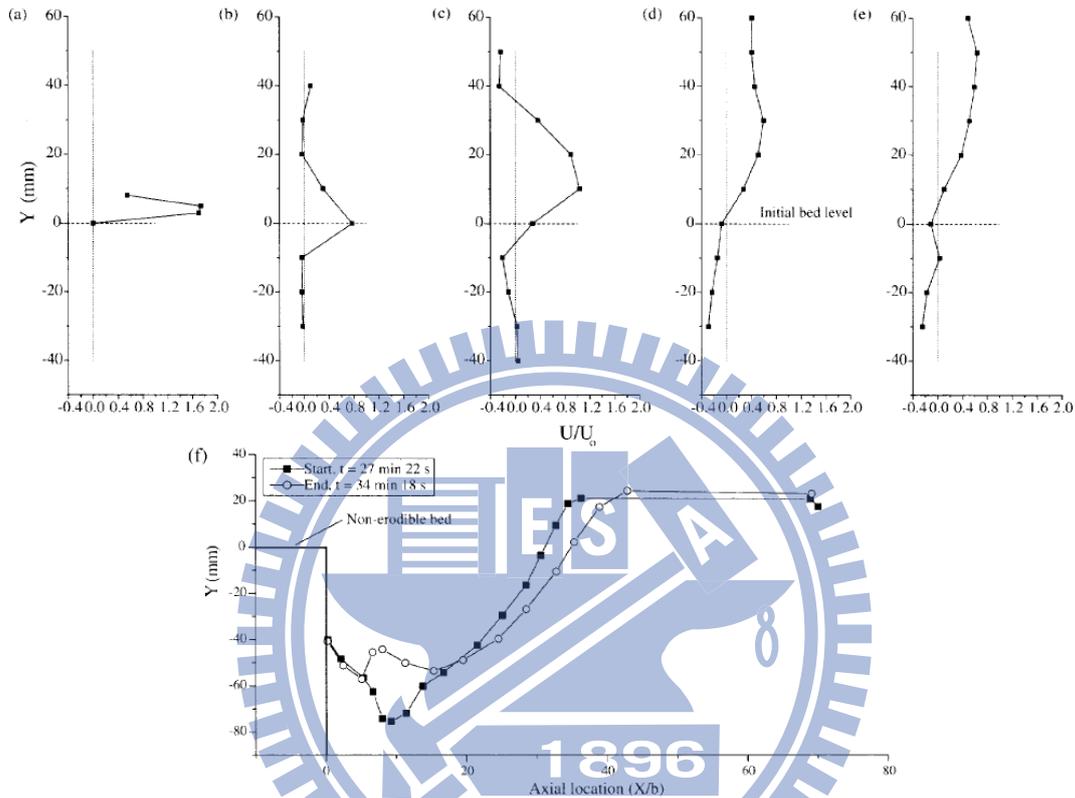


圖 2-34 階段 A(回填)之流速斷面圖與沖蝕斷面圖(Balachandar, 2000)

圖 2-35 為階段 B(挖掘)之流速斷面圖與沖蝕斷面圖，圖(a) $X/b=0$ 、圖(b) $X/b=1$ 、圖(c) $X/b=6$ 、圖(d) $X/b=11$ 、圖(e) $X/b=16$ 。

可得知在挖掘時，基準面以下的流速高於平均流速，基準面以上則低於平均流速。

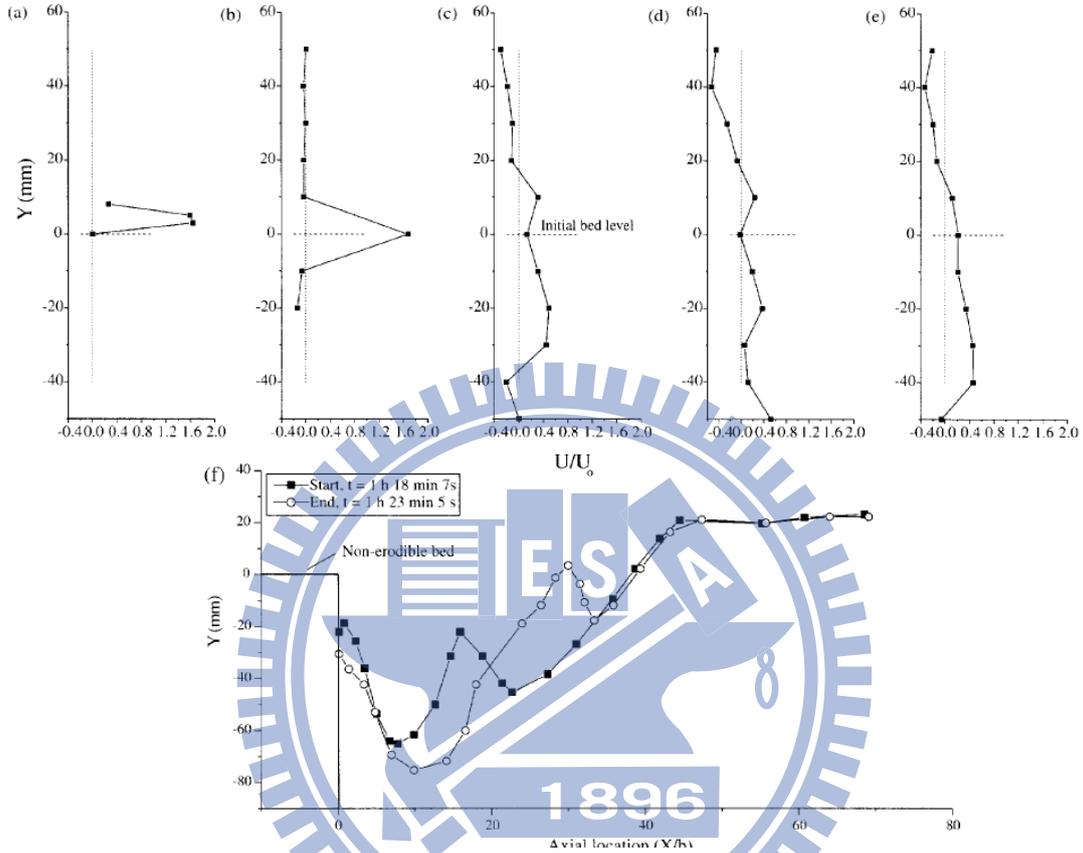


圖 2-35 階段 B(挖掘)之流速斷面圖與沖蝕斷面(Balachandar, 2000)

Balachandar & Kells 最後將 A(回填)與階段 B(挖掘)的流場流速做比較(圖 2-36)，發現在挖掘時沖刷坑位置的流速會比在回填時小，而在堆積層位置，挖掘時的流速會比回填的時候大。

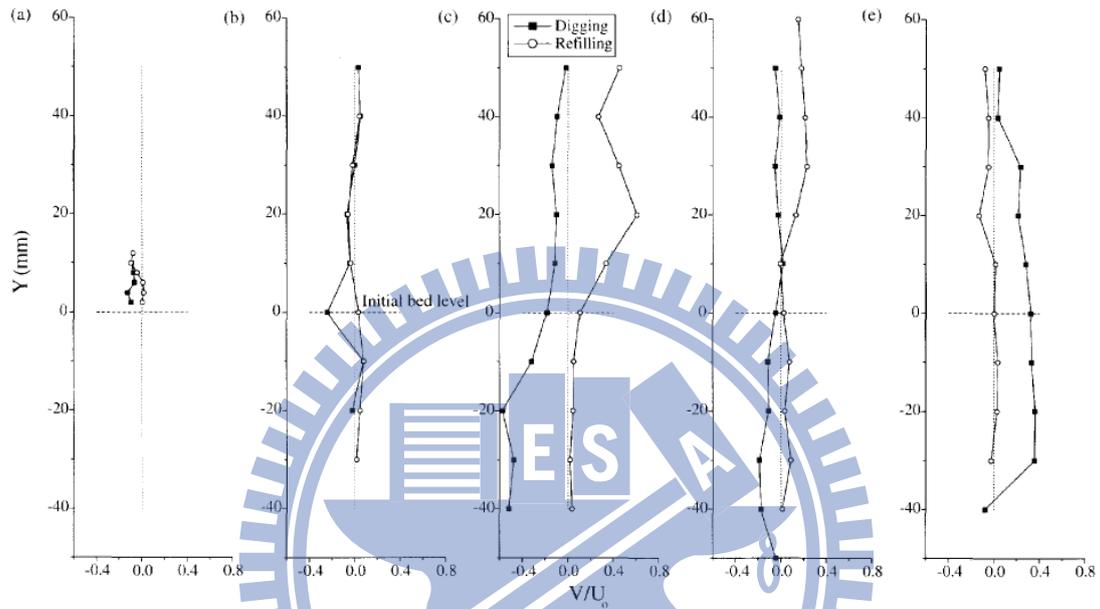


圖 2-36 挖掘與回填流速比較圖(Balachandar, 2000)

2.3 沖蝕試驗文獻小結與討論

本節將回顧之文獻依照不同沖蝕模式做分類，並簡單整理其類型、量測方式、試驗目的、試體來源、試體類型整理如表 2-1 所示。而從表 2-1 可以發現大部分水工模型河道實驗，試體均採用人造試體，現地採集之試體大都只能施作小型試驗。

小型試驗容易施做，但改良空間小，無法改良成其他破壞模式之試驗。河道型試驗改良空間大，同一試驗河道可改裝作各種破壞模式之試驗，水流模式也可改變為直接衝擊或水平流。

而本研究藉由參考文獻的試驗方式，整合並建立一組多功能設備，以達到文獻內試驗設備的相似功能及目的。

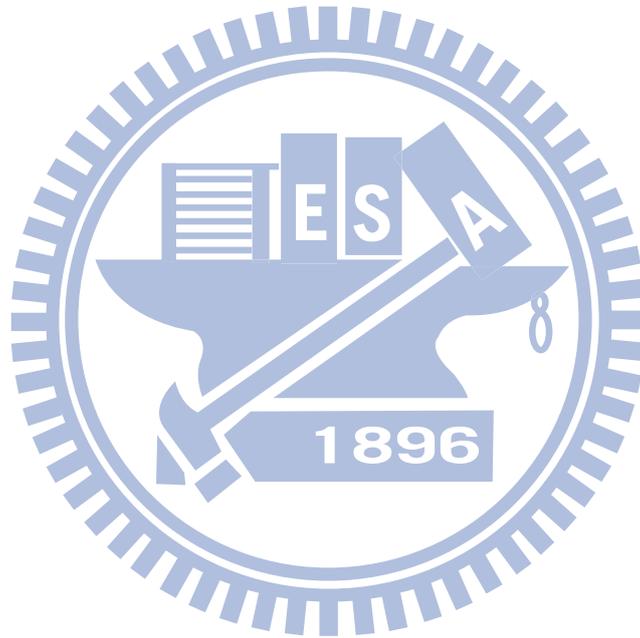


表 2 - 1 文獻試驗分類表

模擬之破壞模式	回顧之試驗	類型	試體來源	試體類型	文獻
磨蝕沖蝕 (abrasion)	水平沖蝕試驗	管路試驗	現地採集、人工製作	沙土、軟岩均可	Briaud, J.-L., Ting, F. C. K., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., and Wei, G. _1999_. "SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers."
	磨蝕沖蝕試驗	小型試驗槽	現地採集	軟岩	Leonard S. Sklar , William E. Dietrich _2001_ "Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock"
穴蝕沖蝕 (cavation)	直接水柱衝擊試驗 (穴蝕)	大型試驗槽	人工製作	砂土	Wittler, R.J., Annandale, G.W., Ruff, J.F., Kuroiwa, J. _1998_ , "Prototype Validation of Erodibility Index for Scour in Granular Media."
	河道沖蝕試驗	大型試驗槽	人工製作	砂土	R.Balachander, J.A.Kells, R.J.Thiessen _2000_ "The effect of tailwater depth on the dynamics of local "scour
	人造節理沖蝕試驗	大型試驗槽	人工製作	人造結構	Bollaert, E. _2002_ . "Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact."
塊體抽離沖蝕 (plucking)	直接水柱衝擊試驗 (塊體抽離)	大型試驗槽	人工製作	人造塊體	G.W. Annandale, R.J. Wittler, J.F. Ruff, T.M. Lewis _1998_ Prototype Validation of Erodibility Index for Scour in Fractured Rock Media

第三章、多功能室內沖蝕試驗儀器建立

本章節將對多功能沖蝕試驗儀器的各種功能之設計、組件功能、流場計算做介紹，也提出本研究如何擷取與分析數據，並在最後對於儀器的測試與改良做介紹。

3.1 室內沖蝕試驗之功能

本試驗設備預期可進行下列試驗：

1. 磨蝕：主要模擬現地之磨蝕沖蝕 (abrasion)，磨蝕沖蝕主控機制為水流本身，或水流所夾帶的懸浮載及河床載顆力所造成。本試驗可由水平流、渦流或噴射流來對試體進行磨蝕，並控制水流所含之懸浮載及河床載顆力。
2. 顆粒跳動沖蝕：主要模擬現地之顆粒彈跳造成的沖蝕 (saltation)，利用大顆粒對岩體撞擊，而撞擊後之凹洞會產生渦流使的沖蝕率增加，或者因顆粒撞擊之影響而加速塊體抽離沖蝕 (plucking)。
3. 岩塊抽離：主要模擬塊體抽離沖蝕 (plucking)，在清水或含顆粒之情況下，利用水平流或噴射流之水力作用使試體弱面或小裂縫擴大形成破裂面，進而產生抽離現象。

而根據以上所述，本研究將本設備擬可進行之試驗區分水平向磨蝕試驗、可變角度直接沖刷、渠道岩床磨蝕或抽離試驗，其中平向磨蝕試驗已完成組裝及測試，其餘二項已完成設計，其詳細內容說明如下：

3.2 水平向磨蝕試驗

本試驗的目的在於以水平流沖刷試體，量測岩心磨蝕損耗量，以決定岩石試體的磨蝕沖蝕率 (mm/hr)。本研究建立的沖蝕試驗儀示意圖如圖 3-1 所示，除清水沖蝕試驗外，還可加入細砂顆粒施做含顆粒之磨蝕。圖 3-2 試驗儀器外觀之照片。本節也將探討試體對於管內水流產生之影響，及試體所受到之流速與剪力該如何決定。

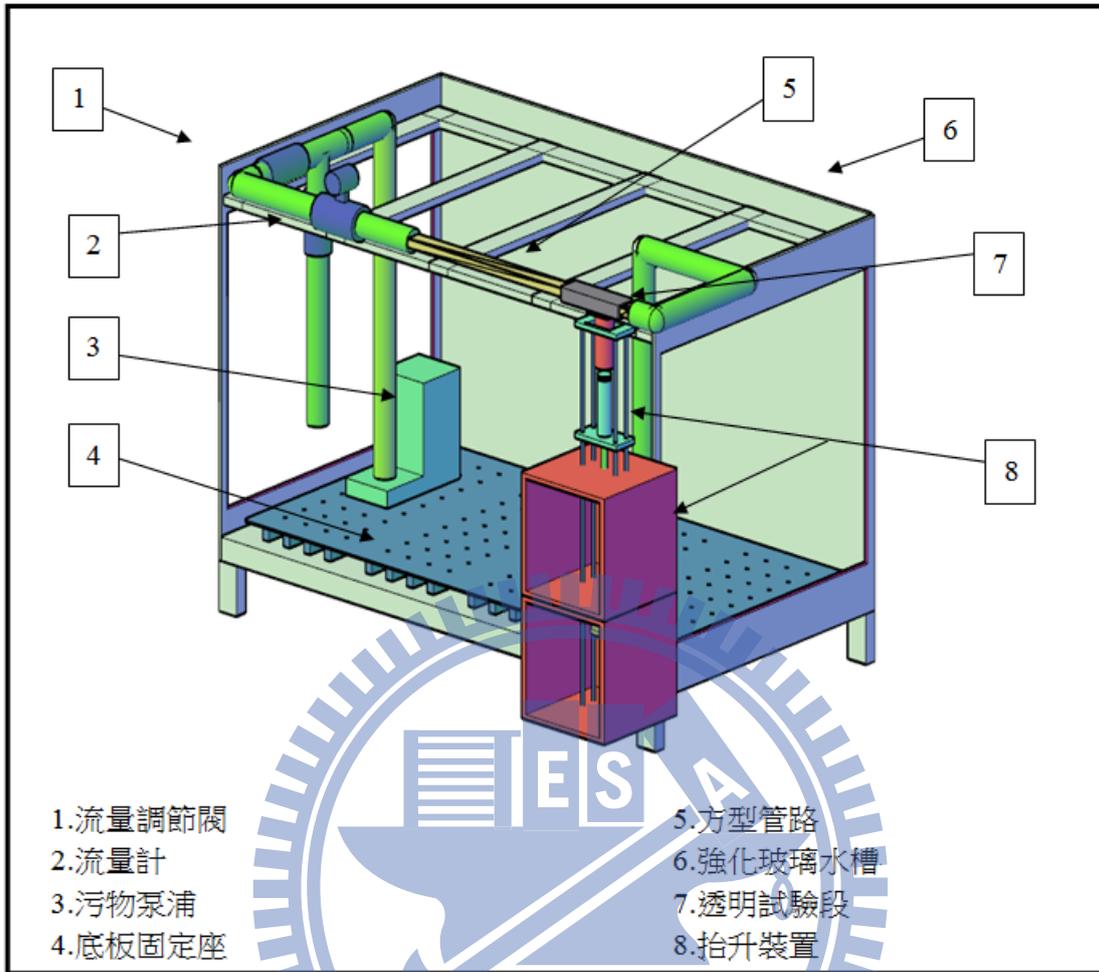


圖 3-1 沖蝕試驗儀配置圖



圖 3-2 試驗儀器外觀

3.2.1 試驗儀組件功能

試驗組件編號如圖 3-1 沖蝕試驗儀配置圖所示，各組件功能說明如下：

1. **流量調節閥**：手動調節閥，可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。
2. **流量計**：FlowMaster 的 EMF10 電磁式流量計，量測通過流量計時間單位內水量 (m^3/hr) 及通過流量計之流速 (m/s)，試驗段方管之流速可由流量換算而得。
3. **污物泵浦(圖 3-3)**：河見電機的 AF-35A 型鑄鐵污物泵浦，可連續運轉時間為 5000hr，溫度達 120°C 即自動停機，冷卻後自動開啟底板固定座：可依照不同需求裝設所需支架及固定。

4. **方型管路**：高 27mm 寬 54mm 的方型管路，方型管路長度經過計算，在試驗段將會發展成均勻之流場。
5. **強化玻璃水槽**：長 210cm、高 120cm、寬 120 cm 強化玻璃製成之水槽，可容許之水量為 2 m³。
6. **透明試驗段**：透明壓克力製成之高 27mm、寬 54mm 方型管路。
7. **抬升裝置**：將試體抬升堆進透明試驗段之裝置。

3.2.2 試驗組件選擇及設計

本小節將介紹此試驗機的各部分組件規格的選定與設計的依據與考量。

1. **方型管路**：本試驗機所使用的試體為直徑 54mm 的圓柱岩心試體，考慮市面上現有方管尺寸，故選用外徑高 30mm、寬 60mm 之方管做為管路，而方管内徑高 27mm、寬 54mm，而試體在試驗前會研磨使直徑約為 50mm。
2. **污物泵浦(圖 3-3)**：考慮本試驗可在水中添加顆粒，故選用污物型泵浦，而模擬流速須達到 9m/s，本試驗機管路高 27mm、寬 54mm，如需達到試驗流速，流量須達到 0.8m³/min，故選用 AF-35A 型鑄鐵污物泵浦，其流量最高可達 1.2m³/min，且容許通過異物顆粒大小為 5.6cm，而管路開口直徑為 80mm，詳細規格如表 3-1 所示。
3. **流量計**：考慮本試驗可在水中添加顆粒，則無法使用機械式流量計，故選用電磁式，電磁式流量計的內襯材質與電擊材料可依照使用性替換，本試驗機內襯材質選用耐磨的 PU 聚氨酯橡膠，電極材料選用一般水質用的碳化鎢，流量計內徑與污物泵浦相同為 80mm，詳細規格如表 3-2 所示。



AF-35A

圖 3-3 污物流浦外觀

表 3-1 污物泵浦規格

型式	馬力 HP	口徑 mm	相數	啟動方式	標準揚程 m	標準水量 m ³ /min
AF-35A	5	80	3	直流	15	0.5
最高揚程 m	最大水量 m ³ /min	重量 kg	異物通過徑 mm	長 mm	寬 mm	高 mm
22.5	1.2	58	56	478	220	588

表 3-2 電磁式流量計規格

型式	管徑 mm	內襯材質	最高工作溫度	電極材料	流速範圍 m/s	精確度%
EMF-10	80	PU 聚氨酯橡膠	60	碳化鎢	0.3~12	0.5

3.2.3 試驗管路之管流

對於管流而言，層流的情況下 Re 值小於約 2100，紊流則大於 4000，本試驗最小流速 0.5m/s， Re 值為 18000，故本試驗之管流必為紊流(Munson & Young & Okiishi, 2005)。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，稱為完全發展紊流，完全發展紊流之流場，其剪應力及平均流速之結構較為穩定與均勻，而在紊流情況下所需之完全發展段 l_e 為(Munson & Young & Okiishi, 2005)：

$$l_e = 4.4D(Re)^{1/6} \quad (3-20)$$

$$D = 2ab/(a+b) \quad (3-21)$$

其中 Re 為雷諾數， a 為管徑高， b 為管徑寬

本試驗流速為 0.5m/s~9.94m/s，所需發展長度約為 80~120cm，本試驗儀器之管路長度約為 140cm 大於所需發展長度，所以試驗段之流場為完全發展紊流(圖 3-4)。



圖 3-4 紊流擴散示意圖(Reynolds, 1883)

3.2.4 試體表面流速與剪力

在試驗管內之試體對於流線之行為如圖 3-5 所示，滿管狀況下紊流之流速並非均值，在管壁邊緣之黏性次層流速遠小於平均流速，而紊流邊界之黏性次層 δ_s 之厚度為(Munson & Young & Okiishi, 2005)：

$$\delta_s = \frac{5\nu}{u^*} \quad (3-22)$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3-23)$$

$$\tau_w = \frac{D\Delta p}{4f} \quad (3-24)$$

$$\Delta p = \frac{128\mu l Q}{\pi D^4} \quad (3-25)$$

公式中 v 為流速

a 為方管管內高

b 為方管管內寬

D 為圓管之內徑，由於試驗為方管，則 $D=2ab/(a+b)=0.036$

Q 為流量，本儀器之 Q 約為 $3\sim 56\text{m}^3/\text{hr}$

l 為降壓長度，本研究降壓長度為試體的直徑，則 $l=0.05\text{m}$

μ 為水動力黏度， $\mu=1.002\times 10^{-3}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$

Δp 為壓力差

計算可得本試驗管路流速由 $0.5\text{m/s}\sim 9\text{m/s}$ 則邊界之黏性次層 δ_s 約為 $1.78\times 10^{-6}\sim 7.71\times 10^{-6}\text{mm}$ ，故黏性次層對試體之影響極小，故可不考慮黏性次層對試驗之影響。

而重疊層約略介於 $\frac{5\delta_s u^*}{V} \sim \frac{150\delta_s u^*}{V}$ 之間(Munson & Young & Okiishi, 2005)，則重疊層厚度約為 $1.089\times 10^{-5}\sim 4.71\times 10^{-5}\text{mm}$ ，故可不考慮重疊層之影響。

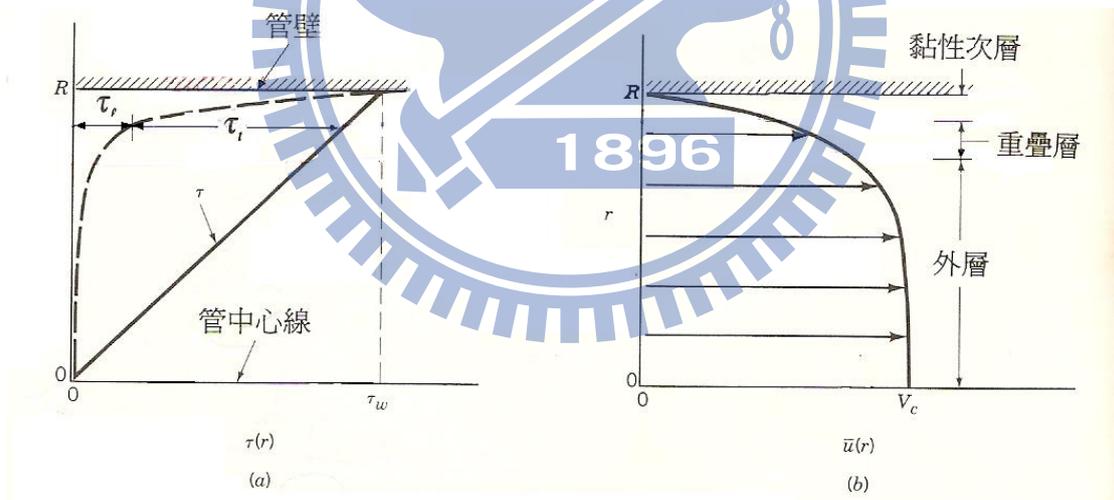


圖 3-5 管中流況分佈：(a)剪應力；(b)流速(Munson & Young & Okiishi, 2005)

本研究進行的水平向磨蝕試驗，為每次將試體凸出於管壁 1mm ，試體表面承受之流場為外紊流層(Munson & Young & Okiishi, 2005)。而由冪次定律速度曲線(power law velocity profile)可得試體表面所承受之流速 V_c 為(Munson & Young & Okiishi, 2005)：

$$V_c=U / [(1-r/R)^{1/n}] \quad (3-26)$$

其中 $U=Q/A$ (3-27)

R 為管壁與方管中心距離，本試驗管路高為 27mm 故 $R=0.0135m$

r 為管路中心線至試體之距離

U 為平均流速

Q 為流量，本儀器之 Q 約為 $3\sim 56m^3/hr$

A 為斷面積

n 為幕次定律速度曲線指數 (圖 3-8 幕次定律速度曲線圖)

滿管狀態下管內流線圖如圖 3-5 所示，平均流速為 $0.57\sim 9.91m/s$ 時，由公式 3-7 計算試體表面(距離管壁 1mm 處)所受之流速約為 $0.51\sim 8.93m/s$ 相差約 0.89~0.90 倍，與平均流速差異不大。

而管內之水頭能量會因試體而有所損失，損失係數與面積比相關，損失係數 K_L 可查圖 3-7 縮管損失係數(Streeter, 1961)得之。而本試驗之 AR 約為 0.97，在縮口與擴口區之損失係數為 $K_L\approx 0$ ，故本試驗可不考慮試體對於流場能量損失之影響。

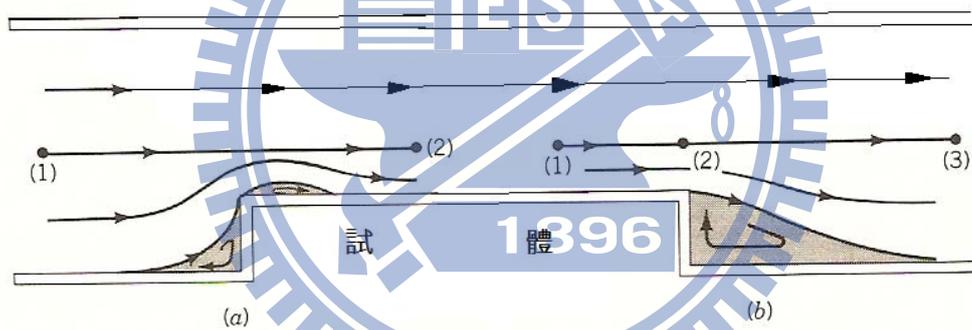


圖 3-6 管內流線圖(改繪至朱佳仁，2003)

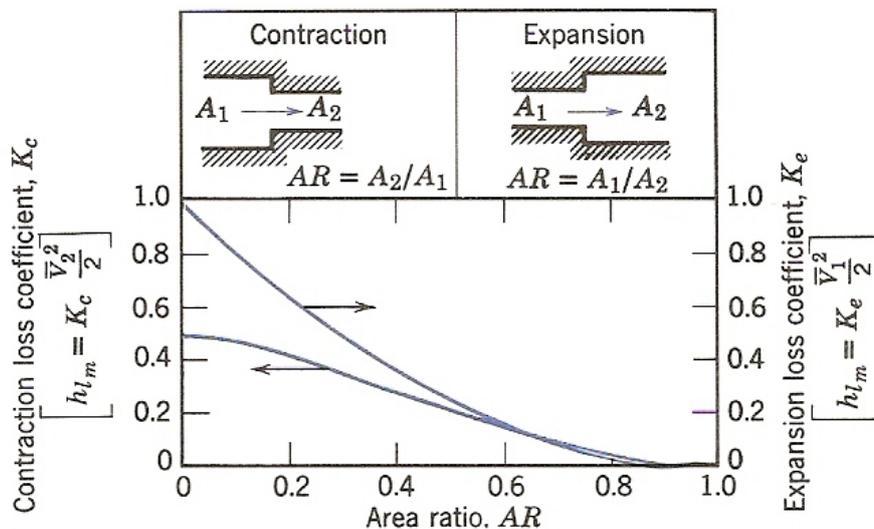


圖 3-7 縮管損失係數(Streeter, 1961)

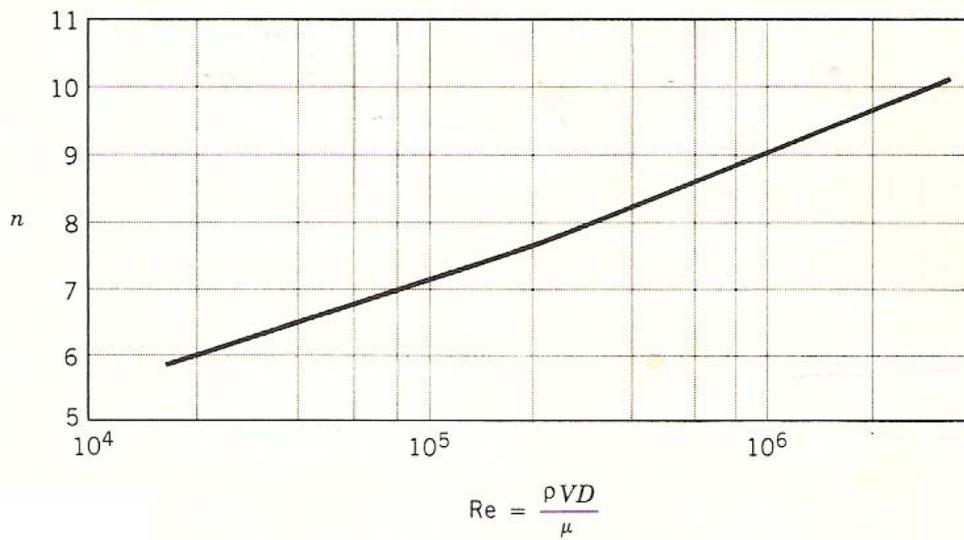


圖 3-8 冪次定律速度曲線圖(朱佳仁，2003)

流速對試體表面造成的剪應力，本試驗使用 Moody(1944)壁剪應力公式：

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho v^2 \quad (3-28)$$

可得本試驗管壁剪應力與流速之關係(圖 3-9 壁剪應力與流速關係圖)

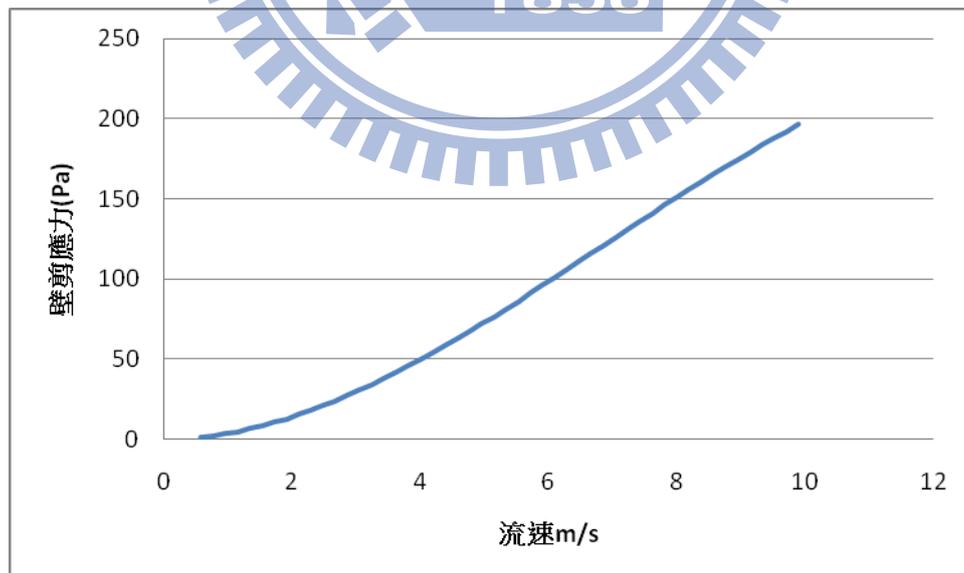


圖 3-9 壁剪應力與流速關係圖

3.3 可變角度直接沖刷試驗

試驗配置如圖圖 3-10 可變角度直接沖刷試驗配置 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 3-11)，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)

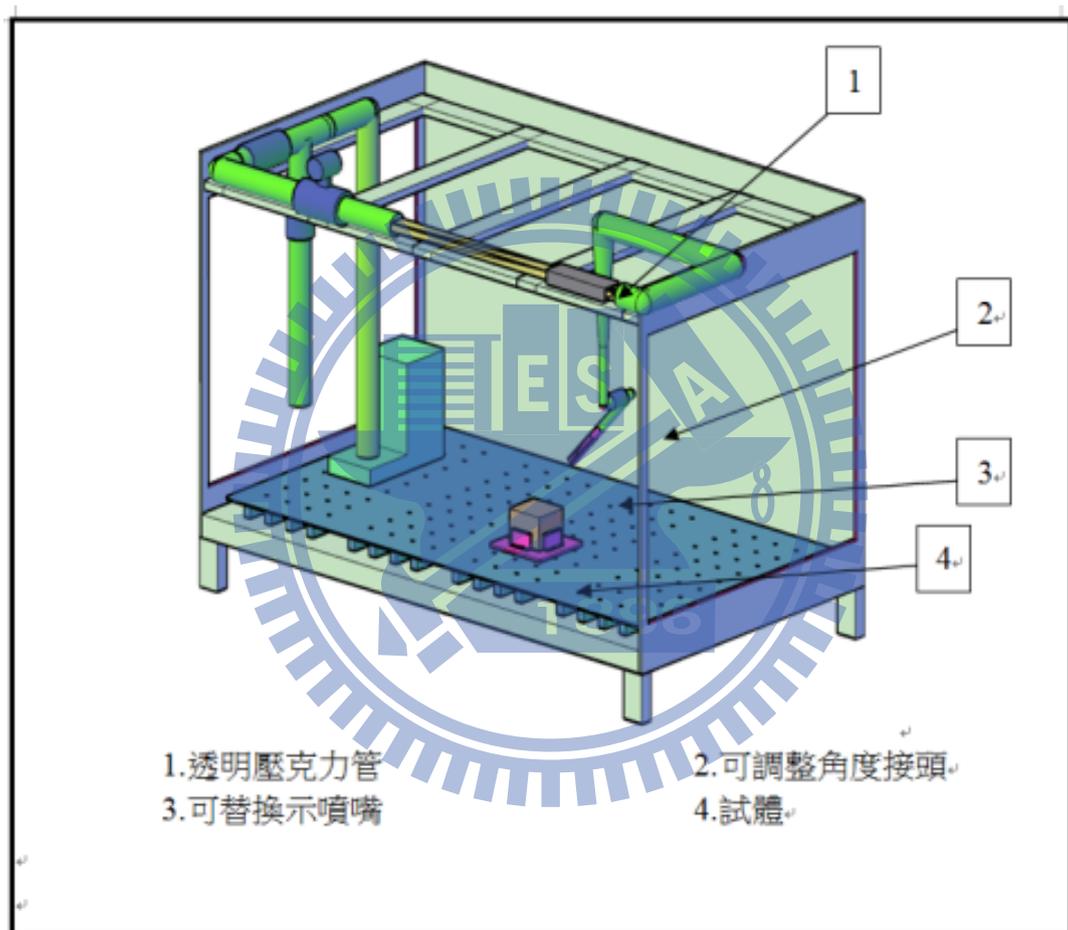


圖 3-10 可變角度直接沖刷試驗配置

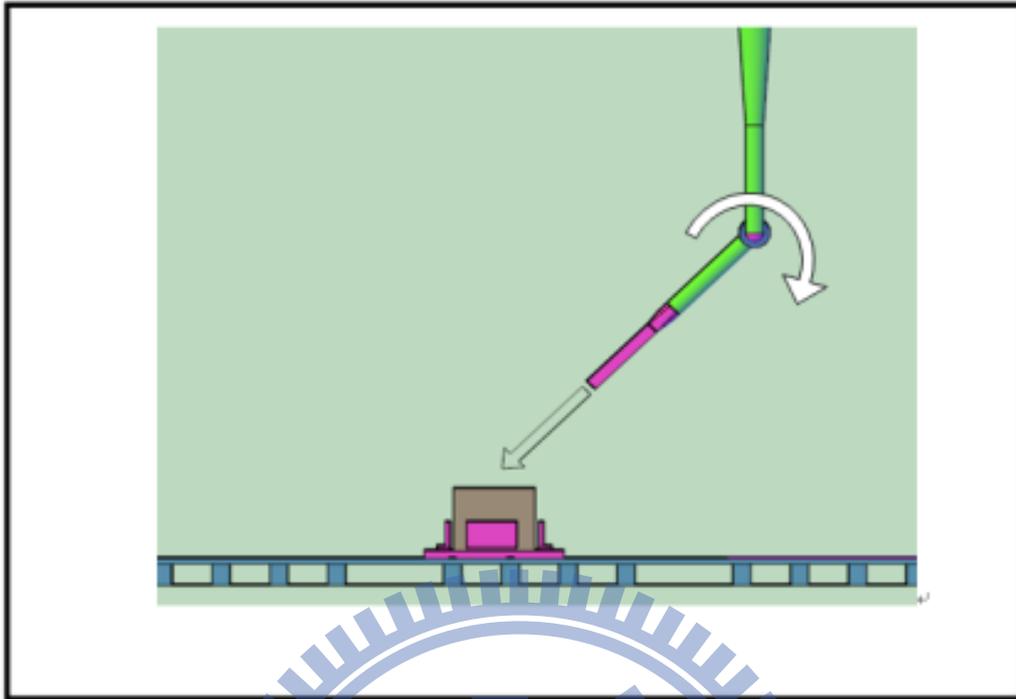


圖 3-11 可調整角度之噴嘴示意圖

3.3.1 試驗組件介紹：

試驗組件如圖 3-10 可變角度直接沖刷試驗配置 所示，各編號組件說明如下

1. 透明壓克力管：此試驗中，可由透明壓克力管加入顆粒對試體進行沖擊。
2. 可調整角度接頭：可依照不同需求調整角度之接頭。
3. 可替換式噴嘴：可依照需求替換不同形狀之噴嘴。
4. 試體：試體將於現地鑿取適宜的岩塊（或由大口徑鑽孔取樣得），再於試驗室裁修，若大尺寸於現地不易於現地取得（因其易碎），則將於試驗室製作人造試體，人造試體製作方式將依據文獻以往製作人造軟岩試體（供試驗室承載試驗）的方法。

3.3.2 噴嘴之噴射流(Jet flow)

當流體受壓力推擠自密閉的空間中噴射而出，所產生的流況便稱為射流(Jet flow)(圖 3-12)。

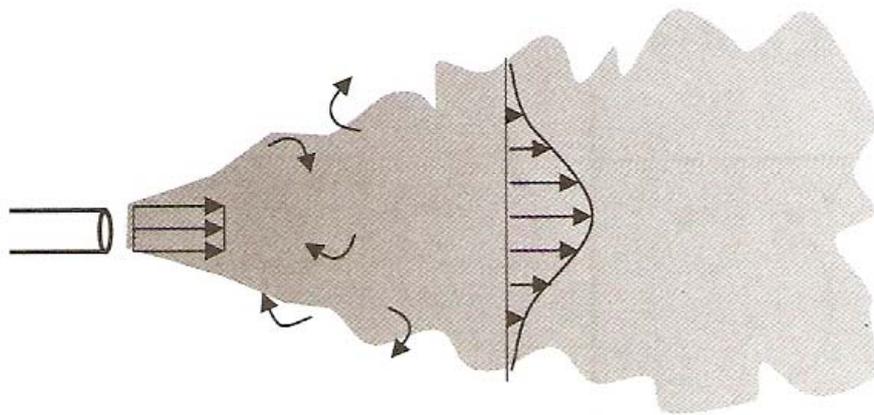


圖 3-12 噴射流示意圖(朱佳仁，2003)

依照排放口的幾何形狀射流分為(朱佳仁，2003)：

1. 圓管射流(Round jet)：自圓管中噴出，無橫向流影響下，射流會像圓管中心軸的四周散開，且會對稱中心軸。
2. 平面射流(Plane jet)：排放口為長條形狀之窄縫(Slot)，噴出後會向兩側散開，對稱於排放口的中心線，流況可視為二維流況。

而射流開口有無在水面下又分為：

1. 潛沒式射流(Submerged jet)
2. 非潛沒式射流

此試驗配置以圓管射流為主，而圓管射流為軸對稱的緣故，圓管射流屬於二維流場，分析時可採用圓柱坐標系統做分析。

3.3.3 非潛沒式射流之流場

非潛沒式射流應用之場合為出水口位於水面以上，當射流自排放口噴出後，距離 6~10 管徑處，流速剖面會類似高帽狀(Top-hat shape)，此區域稱為起始段(Establishing zone)，射流中心的流速最大，而邊緣處的流速會趨近周遭流體的流速，此區域稱為射流完全發展段(Fully-developed zone)(圖 3-13)，而射流之流速 U_c 為：

$$\frac{\pi D^2}{4} U_0^2 = \frac{\pi}{2} U_c^2 \delta^2 \quad (3-29)$$

其中 D 為管徑， U_0 為初始流速， δ 為擴散寬度

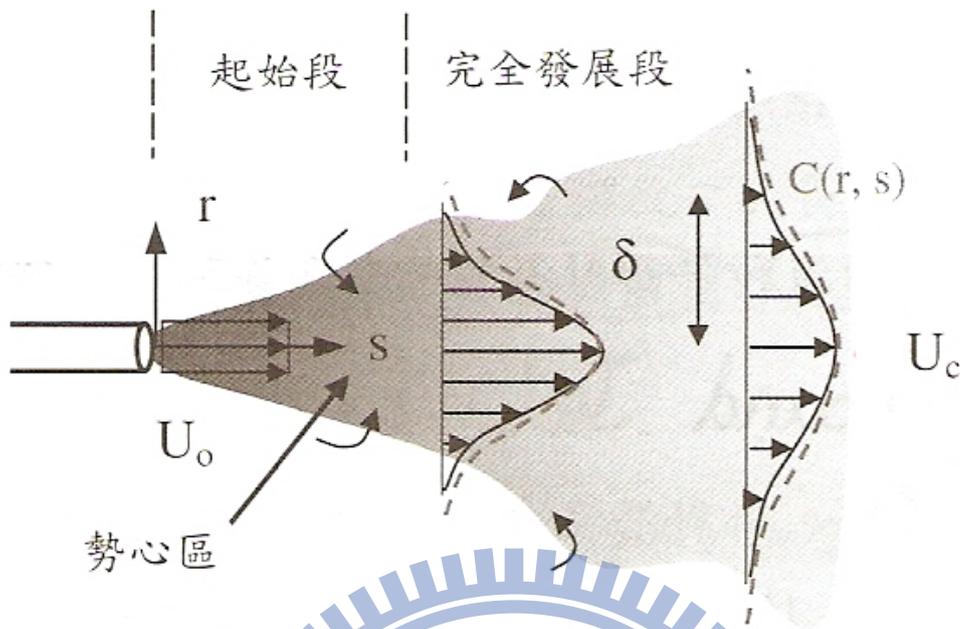


圖 3-13 圓管射流示意圖(朱佳仁，2003)

3.3.4 潛沒式射流(Submerged jet)之流場

潛沒式射流應用之場合為出水口位於水面以下，潛沒式射流會由於在勢心區(圖 3-13 圓管射流示意圖)的速度梯度的剪力作用下所產生的渦流，將周遭流體捲入，導致射流流量增加(朱佳仁，2003)，而增加之流量 Q 為：

$$\frac{Q(s)}{Q_0} = 2\sqrt{2}\beta \frac{s}{D} \quad (3-30)$$

其中 Q_0 為初始流速， D 為管徑， s 為噴流長度， β 為散佈係數(Spreading coefficient)，Albertson(1950)的試驗數據顯示 $\beta=0.114$

而潛沒式射流之流速為：

$$U_c(s) = \frac{U_0 D}{\sqrt{2}\beta s} \quad (3-31)$$

3.4 渠道岩床磨蝕或抽離試驗

試驗配置如圖 3-14 所示，利用水平流沖刷小型渠道之試體(圖 3-15 試驗流況示意圖)，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)。

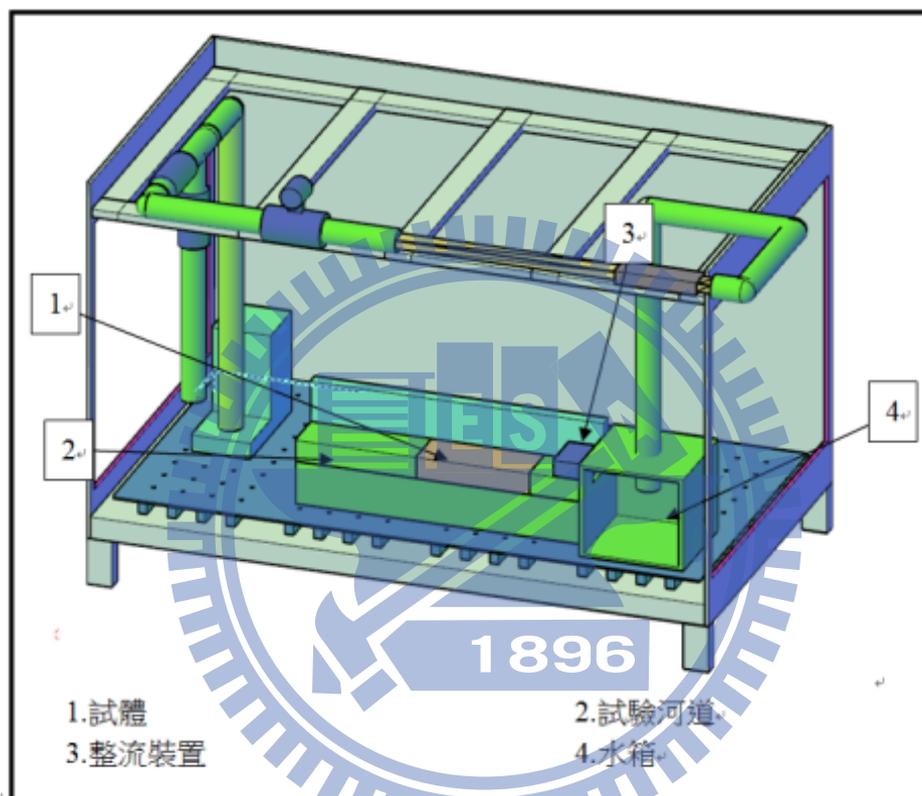


圖 3-14 渠道岩床磨蝕或抽離試驗配置圖

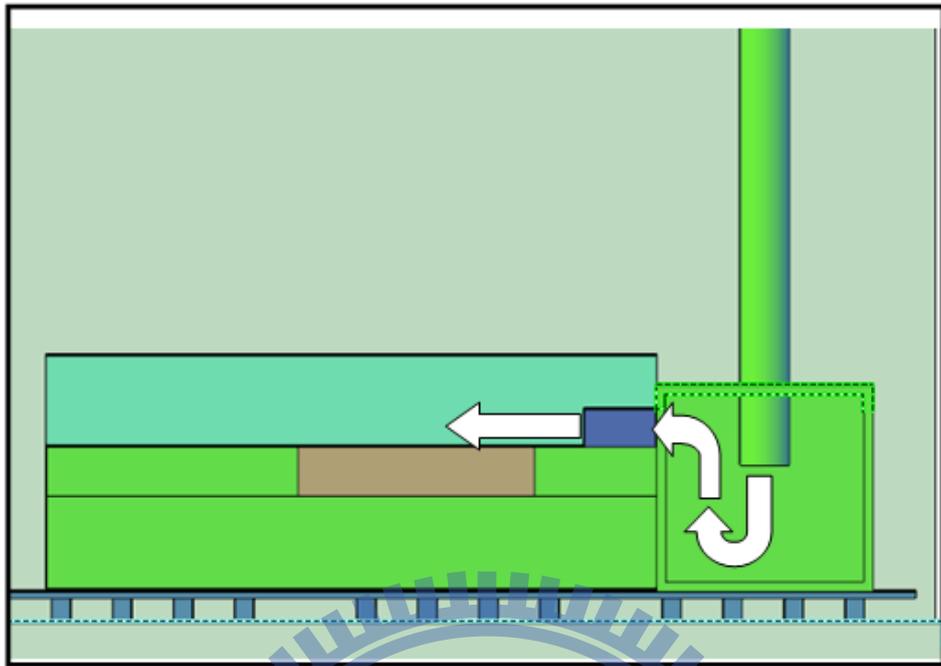


圖 3-15 試驗流況示意圖

3.4.1 試驗組件介紹：

試驗組件如圖 3-14 渠道岩床磨蝕或抽離試驗配置圖 所示，各編號組件說明如下

1. 試體：製作約 10×10×10 cm 人造試體，人造試體製作方式將依據文獻以往製作人造軟岩試體（供試驗室承載試驗）的方法。
2. 試驗河道：利用透明材質（壓克力 或 PVC）製作之透明渠道，方便量測及觀察沖刷情形。
3. 整流裝置：蜂渦狀之整流裝置，產生流線均勻之水平流。
4. 水箱：將強力水流間接轉換成橫向水平流，主要功能為消耗大部分能量，配合整流裝置以達到短距離產生較為穩定流場之目的。

3.4.2 試驗儀之流場

本試驗的渠流經過整流裝置，初始流場為均值的紊流(

圖 3-16 渠道流場示意圖)，試體表面所受之剪力會由於試體在試驗中慢慢刷深，流場中之渦流尺寸會隨時間逐漸增大(圖 3-17)，渦流的流速需配合量測儀器(例：流速計、影像分析)來得知。

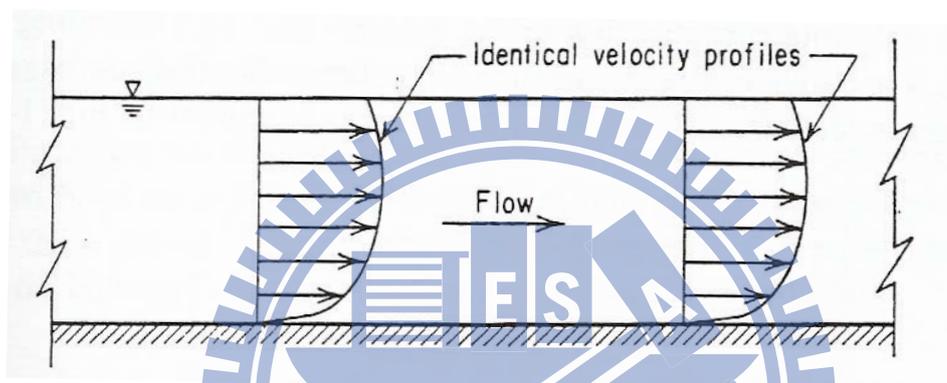


圖 3-16 渠道流場示意圖(改繪至 Reynolds, 1883)

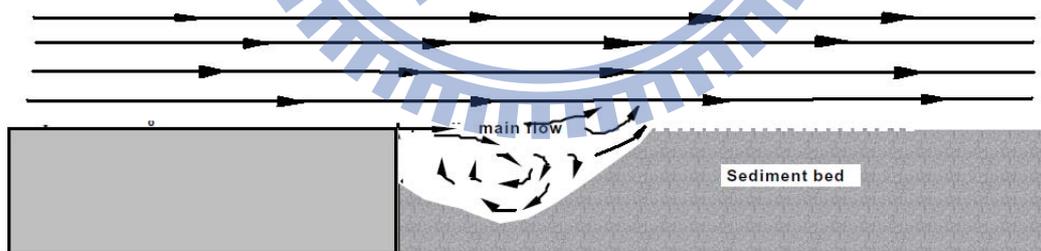


圖 3-17 渦流形成示意圖(改繪至 Reynolds, 1883)

3.5 水平向磨蝕試驗數據擷取與分析

本文僅完成水平向磨蝕試驗的測試及試驗，以下就試驗的沖蝕率如何量測與分析加以說明。本試驗依照沖蝕率大小將試驗方式分成兩種，而分析方式在沖蝕率高的條件下使用影像分析，沖蝕率低的條件

下使用攝影分析。

3.5.1 影像判釋方式

由於沖蝕並非均勻，沖蝕過程中試體表面並無固定的形狀。如圖 3-18 所示，沖刷過程中試體表面呈現圓弧形，圖 3-19 為試體表面不規則。所以大部分選擇在岩心中心軸線的位置做為沖蝕量的量測位置，而其他非常不均勻的情況，則選擇沖蝕形成的鞍點或較為水平的位置做為量測位置。



圖 3-18 沖刷過程中試體表面形狀呈圓弧形



圖 3-19 沖刷過程中試體表面形狀不規則

3.5.2 攝影分析方式

照相分析適用在沖蝕率較低之情況，以水平向磨蝕為例，如沖蝕率小於 1mm/hr 時適用攝影分析。試驗完成後將攝影的照片試體部分數化，圖 3-20 為數化前，圖 3-21 為數化後，數化軟體使用 AUTOCAD。數化流程為：

1. 首先將拍攝的試體相片貼上 CAD
2. 將照片比例依照 CAD 軟體內 1 單位為照片上 1mm 的比例放大
3. 將試體邊緣輪廓描繪出來
4. 量測試體軸線中央高程的距離

5. 量測出來的高程即為試體高，試驗前與試驗後的高程差即為沖蝕量(mm)



圖 3-20 數化前



圖 3-21 數化後

3.5.3 錄影分析方式

錄影分析適用在沖蝕率高的情況，以水平向磨蝕為例，如沖蝕率大於 1mm/hr 時適用錄影分析。以水平向磨蝕為例，錄影分析不需將影像數化，只需判讀每次試驗所需時間，其流程如下：

1. 將試體抬升至 1mm
2. 紀錄開始試驗的時間(t_1)
3. 判斷試驗結束的時間並記錄(t_2)
4. $t_2 - t_1$ 及為沖刷時間，1mm 為沖刷量，即可得沖蝕率(mm/hr)

3.5.3 攝影輔助工具

而攝影所使用的輔助工具為如下：

1. 角架：架設數位相機的腳架(圖 3-22 為試驗時相機架設情況)
2. 自製比例尺：使用投影片自製之比例尺(圖 3-23)，浮貼於試驗管外側，每個刻度為 1mm，是照片在 CAD 中放大倍率的基準。
3. 水準尺：校正角架，確保相機架設於角架上時為水平(圖 3-24)

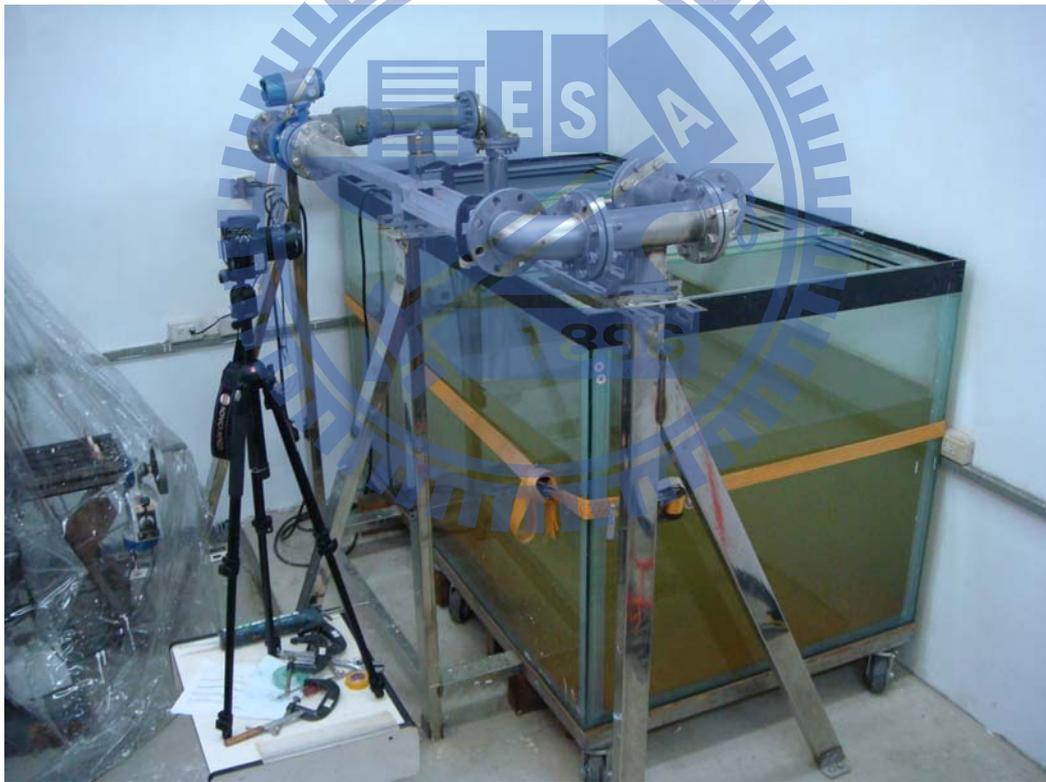


圖 3-22 試驗中相機架設情形



圖 3-23 自製比例尺

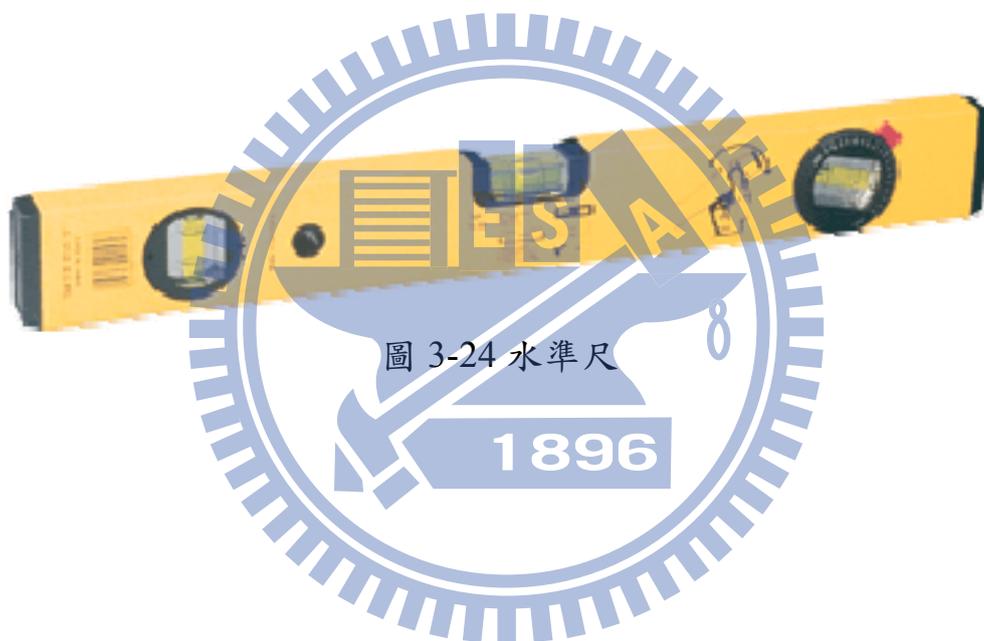


圖 3-24 水準尺

3.6 影像分析的精度與誤差討論

本試驗在試體上方架設測微儀，每次抬升 0.01~0.06mm 後並拍照，以影像分析來對照實際值與分析結果的差距，試驗結果如表 3-1 所示，誤差介於 0.03~0.0004mm 之間。

而以本試驗每次八小時的試驗的沖蝕量約為 0.3~0.1 mm 上下，故影像分析精度需要有 0.01mm，而如果以誤差 0.01mm 以下作為分界，誤差大於 0.01mm 與小於 0.01mm 的比率是 1：1，故本試驗每張照片的影像分析之結果準確率約為 50%，所以每次試驗需拍攝多組相片，分析並篩選出差異較大的結果，然後將差異較大的結果去除。

表 3-1 影像分析測試結果

影像分析結果(mm)	測微儀結果(mm)	誤差(mm)
0.03	0.01	0.02
0.0081	0.01	-0.0019
0.014	0.02	-0.006
0.0245	0.02	0.0045
0.0442	0.06	-0.0158
0.0201	0.05	-0.0299
0.0113	0.01	0.0013
0.0291	0.02	0.0091
0.0129	0.01	0.0029
0.0404	0.04	0.0004
-0.023	0.01	-0.033
-0.0006	0.01	-0.0106

本研究進行儀器組裝、測試、及實驗時遭遇甚多困難，本文將所遇到的問題以及解決方式置於附錄 B 以供未來研究參考。

第四章、水平向表面磨蝕試驗及試驗結果

本章將介紹大安溪軟岩與人造沙岩的基本物性、軟岩三軸、消散耐久試驗的結果，以及水平向沖蝕試驗的結果，並針對這些結果討論其影響沖蝕率之因素。

4.1 試體準備及試驗規劃

本試驗的試體來源自大安溪軟岩鑽探岩心以及人造砂岩(張振成，2008)，而試體來源、製作、試驗數量，將在本節一一介紹。

4.1.1 試體來源

大安溪的試體由鑽心而得，而大安溪地層性質主要是上新世—更新世的卓蘭層(厚度大約在 1,500 到 2,500 公尺之間)，由砂岩、粉砂岩、泥岩、和頁岩的互層組成。砂岩常呈淡青灰色或淡灰色，細粒，略含雲母質，層厚為數十公分到 2 公尺不等，有些較厚的砂岩可以達到 5 公尺以上的厚度。頁岩和泥岩呈現青灰色或暗灰色，一般層厚在 20 至 50 公分間，部分地方也出現有較厚的頁岩層(何春蓀，83 年)。

而人造砂岩材料來源取自張振成製造供基礎承載的大型人造岩塊所鑽心之岩心(張振成，2008)

4.1.2 試驗數量

本試驗規劃每組流速施做 3 組試驗來取平均，試驗流速規劃施作 0.5m/s~6 m/s 之間施作六種不同流速之試驗，並依照岩性調整每次試驗增加之流速。

4.2 試驗流程

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，將流速調整為最小值 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，如沖蝕率 $\ll 1\text{mm/hr}$ 則每次增加約 1m/s 流速(例：大安溪軟岩)，如沖蝕率 $\gg 1\text{mm/hr}$ 則每次增加約 0.1m/s 的流速(例：人造砂岩)
7. 繪製剪應力(N/m^2)與沖蝕率(mm/hr)關係圖。

4.3 試體性質-大安溪軟岩及人造軟岩

本節將介紹大安溪軟岩及人造砂岩的基本試驗性質(一般物性、消散耐久、單壓強度、軟岩三軸)，而本研究取用深度 27~28m 之砂頁岩互層做為試體。

4.3.1 一般物性試驗

一般物性試驗目的主要為得知岩石材料基本物理性質如單位重、比重，含水量、孔隙比。試驗方法參照 ISRM 與 ASTM D-2216 規範建議方法(Browm, 1981)。

一般物性試驗結果如表 4-1 所示，本研究之材料比重約 2.64，孔隙率則介於 4.67~13.19 間

表 4-1 一般物性試驗結果表

深度(m)	岩性	比重	含水量 (%)	濕單位重 (t/m ³)	乾單位重 (t/m ³)	孔隙率 (%)
27.2-27.32	砂頁岩	2.64	6.04	2.669	2.517	4.67
27.35-27.48			6.74	2.447	2.292	13.19
27.8-27.92			6.89	2.493	2.332	11.66

4.3.2 消散耐久性試驗

散耐久性試驗將岩樣暴露於乾溼循環下，模擬受風化而崩解之情形。根據 ISRM 標準(Browm, 1981)，選取 10 塊 40-60 g 之岩塊，總重介於 450 - 550g 間；岩塊中最大單一晶體顆粒粒徑尺寸需小於 3 mm。且岩塊選擇需接近球體型狀，放入直徑 140 mm，高 100 mm；周圍有 2 mm 網孔之篩鼓(圖 4-1)。

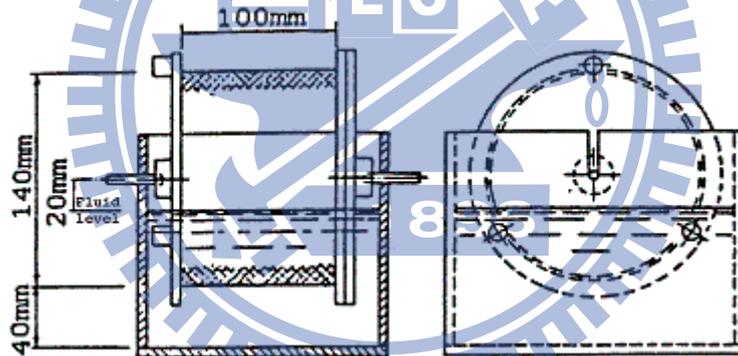


圖 4-1 消散性耐久試驗示意圖 (ISRM, 1979)

消散耐久試驗結果如表 4-2 所示，本研究取深度 27~28m 深度之砂頁岩互層之砂頁岩，材料第二次消散耐久性循環指數評分中等耐久性。

表 4-2 消散耐久性試驗結果

岩層性質：	試驗深度(m)：27~28
第一循環	
試驗前岩樣乾重 W_{s0}	445.81
試驗前岩樣和鼓輪之乾重 W_0	1435.08
岩樣+鼓輪之乾重(經第一循環作用後) W_1	1373.00
鼓輪乾重 W_d	989.27
岩樣乾重(岩樣經第一循環作用後) W_{s1}	383.73
第一循環指數 I_{d1}	86.07
第二循環	
岩樣+鼓輪之乾重(經第二循環作用後) W_2	1281.01
岩樣乾重(岩樣經第二循環作用後) W_{s2}	291.74
第二循環指數 I_{d2}	65.44

4.3.3 單壓強度試驗

本研究取深度 27~28m 深度砂頁岩互層之砂頁岩，強度介於 1.81~8.26MPa，平均值為 4.69MPa。試驗結果如表 4-3 所示(羅文驤，2009)

表 4-3 單壓強度結果

深度(m)	岩性	長(cm)	直徑 (cm)	長 徑 比	含水量 (%)	單壓 強度 q_u (MPa)	切線 模數 E_{50} (MPa)	E_{50}/q_u
27.2-27.32	砂頁岩	13.062	5.019	2.30	6.04	5.09	675.8	132.77
27.35-27.48		12.128	5.196	2.30	6.74	3.01	371	123.26
27.8-27.92		12.046	5.149	2.30	6.89	1.88	-	-

4.3.4 軟岩三軸試驗

現地鑽探知岩心施做軟岩三軸試驗，砂岩凝聚力 C 平均值為 0.57MPa，內摩擦角 ϕ 平均值為 57° 。砂頁岩互層凝聚力 C 平均值為 1.07MPa，內摩擦角 ϕ 平均值為 26° (羅文驤，2009)。

4.4 試體性質-人造砂岩

本節將介紹人造砂岩的一般物性、單壓強度、乾燥三軸試驗做介紹，而人造砂岩遇水即軟化，故不施做消散耐久試驗。

4.4.1 一般物性試驗

人造砂岩比重介於 2.61~2.67 之間，孔隙率則介於 24.81~29.21% 之間，試驗結果如表 4-4 所示(張振成，2008)

表 4-4 一般物性試驗結果表(張振成，2008)

試體編號	比重 G_s	濕密度(g/cm^3)	氣乾含水量(%)	乾密度(g/cm^3)	孔隙比 e	孔隙率(%)
1	2.52	2.03	2.79	1.97	0.27	21
2	2.51	2.54	2.98	2.09	0.2	16.87
3	2.52	2.12	2.75	1.63	0.55	32
4	2.56	2.44	2.44	2	0.28	21.59
5	2.36	2.1	2.69	1.63	0.36	26
6	2.36	2.42	2.52	1.91	0.24	19.3
7	2.5	2.17	2.85	2.09	0.21	16.9
平均	2.48	2.26	2.72	1.90	0.30	21.95

4.4.1 單壓強度試

人造砂岩施做單壓強度試驗，砂岩單壓強度介於 1.61~3.31MPa。平均值為 2.24MPa。試驗結果如下表所示(張振成，2008)

表 4-5 單壓強度試驗結果表(張振成，2008)

試體編號	單壓強度(MPa)	切線模數 E (MPa)	E/q
1	2.37	130	61
2	2.72	225	84
3	3.31	195	60
4	1.61	336	210
5	2.12	209	99
6	1.63	150	96
7	1.89	198	105
8	2.37	249	108
9	1.52	330	217
10	2.13	206	96
11	1.92	172	90
12	2	162	81
13	1.65	182	142
14	2.56	197	79
15	3.04	190	62
16	2.98	173	67
平均值	2.24	207	104

4.4.2 乾燥三軸試驗 (人造砂岩)

人造砂岩施做軟岩三軸試驗，由於此人造砂岩遇水即軟化，所以施做乾燥三軸試驗，砂岩凝聚力 C 介於 $0.29\sim 0.65\text{MPa}$ 平均值為 0.49MPa ，內摩擦角介於 $44\sim 49^\circ$ 平均值為 46° 。結果如表 4-6 所示(張振成，2008)。

表 4-6 乾燥三軸試驗結果(張振成，2008)

試體編號	凝聚力(MPa)	磨擦角
1	0.56	45
2	0.46	45
3	0.54	44
4	0.43	46
5	0.29	49
6	0.65	44
平均值	0.49	46

4.5 沖蝕試驗結果

本試驗使用之岩心為大安溪深度 $27\sim 28\text{m}$ 深度之砂頁岩互層以及人造砂岩，而砂頁岩互層又細分為砂岩段與砂頁岩段。試驗結果如表 4-7、表 4-8 所示，砂岩與砂頁岩的試體數量各一個，由於沖蝕率極低，故每次試驗完將表面整平即可重複使用施做下組試驗。

砂頁岩互層之砂岩段沖蝕率較高，而砂頁岩段之沖蝕率較低。試體影像分析結果詳見附錄。

表 4-7 砂頁岩互層之砂岩

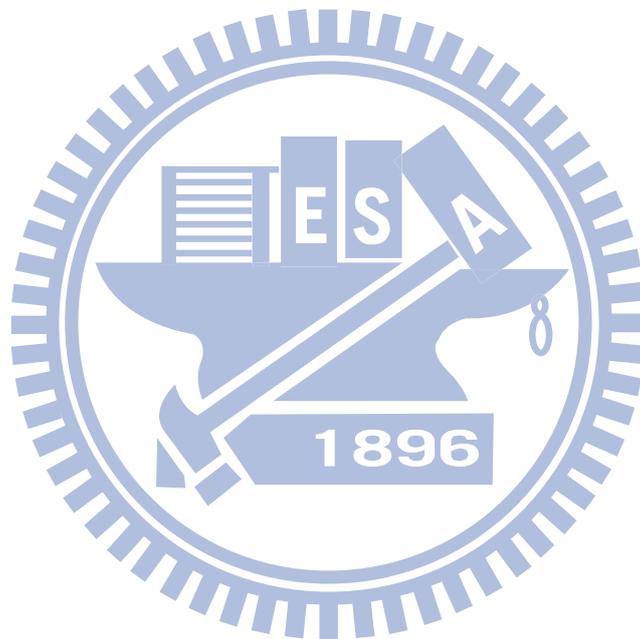
試驗流速(m/s)	試驗時間(min)	壁剪應力(N/m^2)	沖蝕量(mm)	沖蝕率(mm/hr)
0.54	240	1.1664	0.098	0.0225
3.14	240	32.0437	0.140	0.0350
4.23	420	58.151925	0.160	0.0229

表 4-8 砂頁岩互層之砂頁岩

試驗流速(m/s)	試驗時間(min)	壁剪應力(N/m^2)	沖蝕量(mm)	沖蝕率(mm/hr)
4.23	240	58.151925	0.013	0.0033
4.23	420	58.151925	0.056	0.0080
9.94	240	296.4108	0.070	0.0175

人造砂岩：

人造砂岩強度較低，沖蝕率遠大於 1mm/hr，故試驗方式採用記錄每 1mm 消失時間，試驗結果如圖 4-2 所示。由於人造砂岩材料較不均值，試驗之結果會由於顆粒差異之影響會產生較高或較低之沖蝕率。



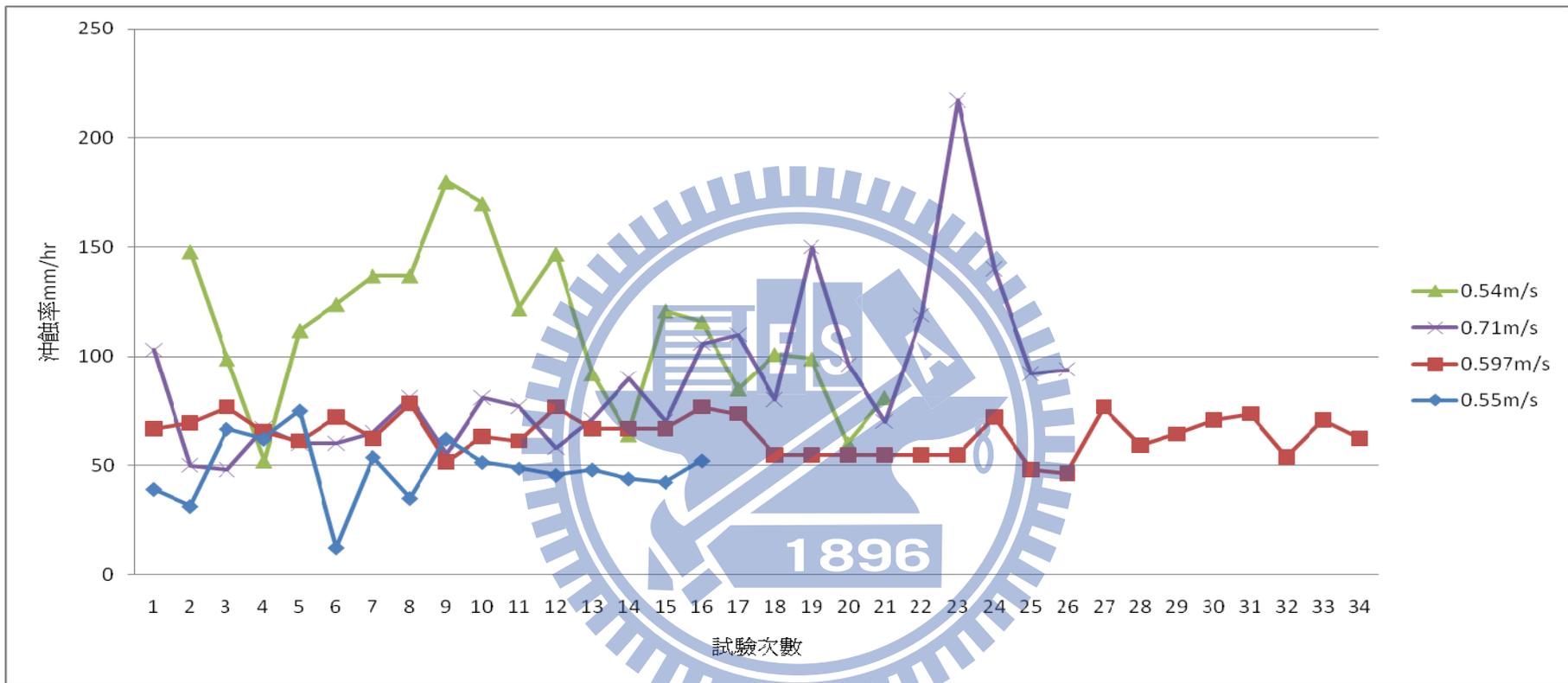


圖 4-2 人造砂岩岩心沖蝕結果曲線圖

4.6 現地軟岩磨蝕沖蝕量測結果

本研究在大安溪設置沖刷釘，而本節將對沖刷釘形式、尺寸、位置、流速量測儀器做介紹。

4.6.1 沖刷釘型式

本研究在大安溪設置三組沖刷釘，每組兩根共六根沖刷釘，沖刷釘長 130mm、直徑約 3mm，下方有長 80mm 之紋路增加釘子的磨擦力(圖 4-3)。



圖 4-3 沖刷釘

4.6.2 沖刷釘位置

本研究沖刷釘位置設於大安溪河谷，位置如圖 4-4 所示(中央紅點)，在此位置設置共六根沖刷釘

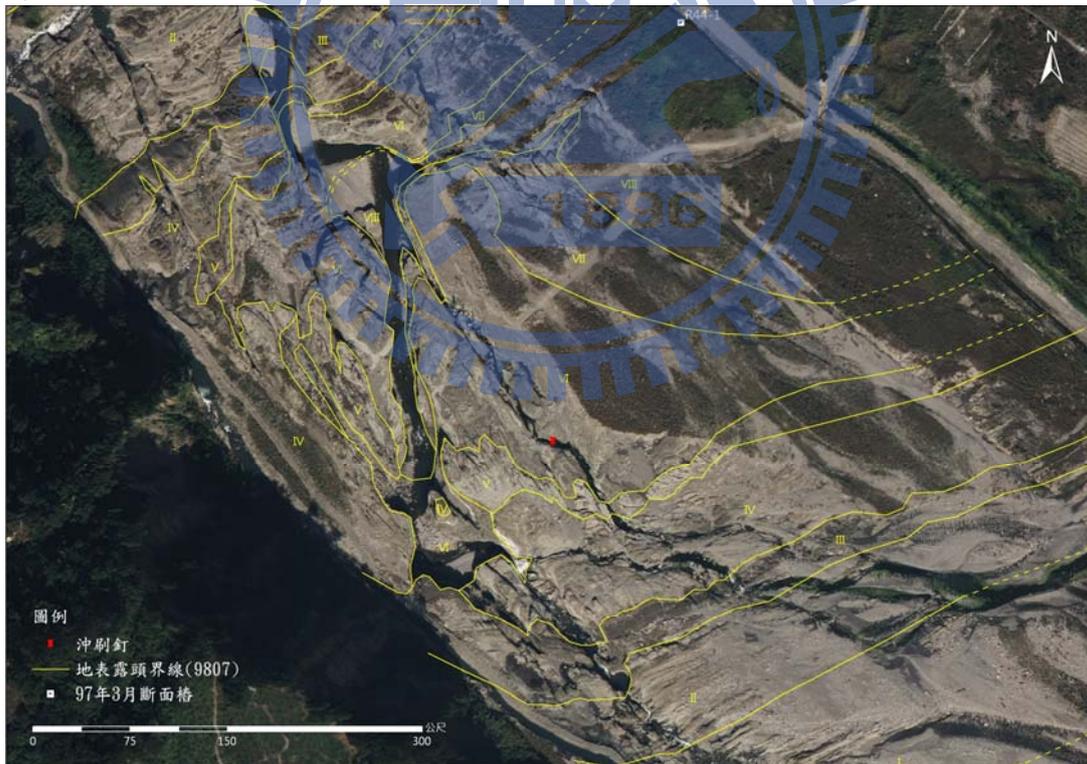


圖 4-4 大安溪沖刷釘設置位置圖

4.6.3 沖刷結果

沖刷施測結果如表 4-9 所示，沖蝕率約為 0.021 及 0.056mm/hr，施測時間為 4 天及 21 天，流速約為 1.3m/s

表 4-9 現地沖刷釘結果

編號	沖刷日期	天數	流速(m/s)	沖刷深度(mm)	沖蝕率(mm/hr)
沖刷釘 1-1	980608-980612	4	1.3	2	0.021
沖刷釘 1-1	980612-980616	4	1.3	2	0.021
沖刷釘 1-2	980612-980616	4	1.3	2	0.021
沖刷釘 1-2	980616-980707	21	1.3	28	0.056
沖刷釘 1-3	980608-980612	4	1.3	2	0.021
沖刷釘 1-3	980612-980616	4	1.3	2	0.021

4.7 數值模擬結果

李佩鏞(2009)使用 PFC3D 進行數值模擬，數值模擬的軟岩強度分別為 28MPa、20MPa，水流造成的剪應力分別為 0.123MPa、0.405 MPa、1.12 MPa、2.61 MPa、3.39 MPa、5.27 MPa，模擬結果如表 4-10 所示。

表 4-10 數值模擬結果

	軟岩強度 28MPa	軟岩強度 20MPa
剪應力(MPa)	試體表面沖蝕率 (%)	試體表面沖蝕率 (%)
0.123	8.758169935	8.888888889
0.405	12.54901961	18.69281046
1.12	16.33986928	24.31372549
2.61	26.0130719	39.60784314
3.39	33.20261438	54.64052288
5.27	45.35947712	70.98039216

4.8 試驗結果討論

由人造砂岩與現場取得之軟岩比較，由試驗之結果，本節將對於影響沖蝕之岩石性質做討論。

4.7.1 試驗結果比較

單壓強度方面：

現地鑽探之岩心，砂岩單壓強度平均值為 5.91MPa，砂頁岩互層平均值為 4.69MPa。人造砂岩施做單壓強度試驗，平均值為 2.24MPa。

三軸試驗方面：

現地鑽探之岩心，砂岩凝聚力 C 平均值為 0.57MPa，內摩擦角平均值為 57° 。砂頁岩互層凝聚力 C 平均值為 1.07MPa，內摩擦角平均值為 26° 。人造砂岩凝聚力 C 平均值為 0.49MPa，內摩擦角平均值為 46° 。

單壓強度方面：

人造砂岩與現地之岩心差距不大，而三軸試驗方面，由於人造砂岩採用乾燥三軸，故試體之凝聚力與磨擦角較大，而人造砂岩泡水及軟化，凝聚力大幅下降，凝聚力 C 降至 0.04MPa，摩擦角略降為 38.7° 。

4.7.2 模擬結果比較與討論

數值模擬結果如圖 4-5 所示岩石強度與沖蝕率也成正比。但由於李佩錚(2009)的數值模擬為現地河床，而本試驗受限於管流，最大剪應力僅可達 0.3 kPa Pa，故李佩錚(2009)的數值模型鎖模擬的結果與本試驗在沖蝕率上無法比較。

大安溪的砂岩與頁岩顆粒均小於 0.1mm，單壓強度小於 10MPa，而李佩錚(2009)數值模擬採用的顆粒大小為 5mm，單壓強度為 20 及 28MPa，建議未來數值模型的建立在顆粒大小與強度上做修正。

數值模擬所施加的剪應力，也應依照模擬的情況不同而使用不同的剪應力公式。如模擬的情況為現地河川，則需使用現地底床剪應力公式，而本試驗所使用的公式為管流壁剪應力公式。

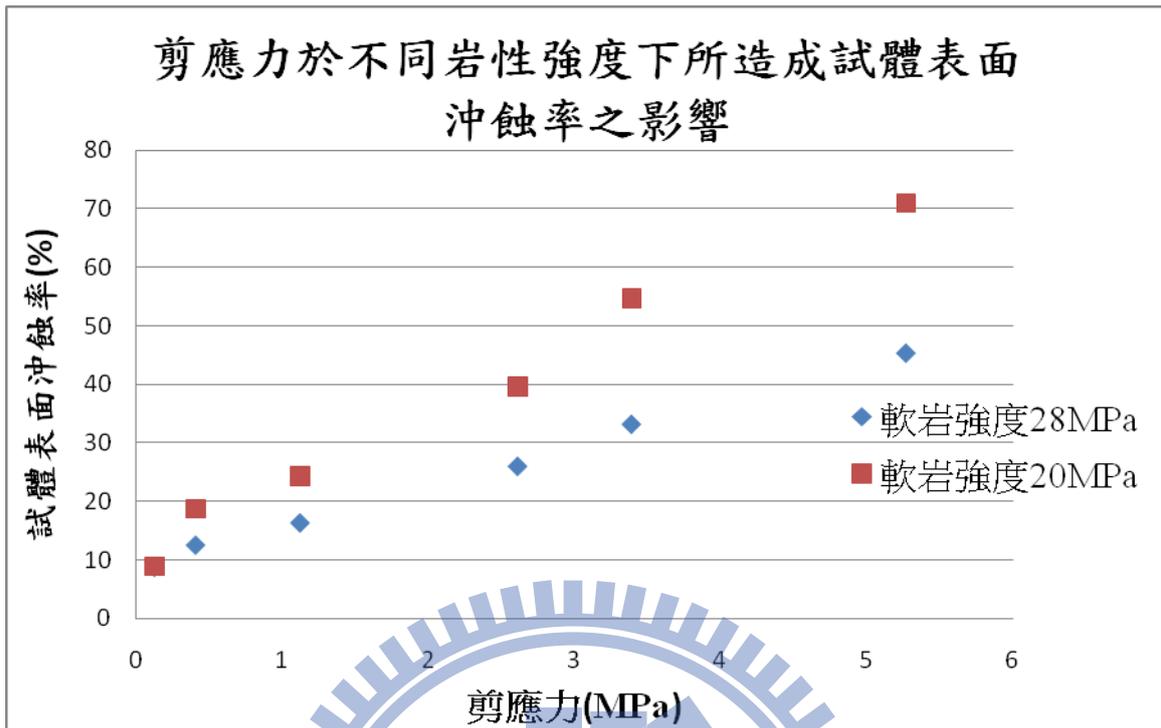


圖 4-5 數值模擬的沖蝕率(%)與剪應力關係圖

4.7.3 影響沖蝕率討論

砂頁岩互層之砂岩段及砂頁岩段，相同流速下沖蝕率約 5~10 倍，而人造砂岩沖蝕率則是砂頁岩互層的 500 倍以上，而由試驗結果可得砂頁岩互層與人造沙岩的磨擦角與單壓強度差異不大，差異都在一倍以內，而由於人造軟岩的凝聚力泡水後會驟降至 0.04MPa 與砂頁岩互層的 1.07MPa 差異約 25 倍。凝聚力大小為：砂頁岩 1.07MPa > 砂岩 0.57MPa >> 人造砂岩 0.04MPa，而沖蝕率大小為：砂頁岩 > 砂岩 >> 人造砂岩。故判斷影響沖蝕率最大的因素為凝聚力。

第五章、結論與建議

5.1 結論

本研究主要目的為建置一套可進行各種沖蝕試驗的室內沖蝕試驗儀，本文已完成各項試驗的設計，並以完成水平向沖蝕試驗的測試與試驗，探討在清水下軟岩受水力作用下的沖蝕行為以及其沖蝕率(mm/hr)。本研究主要結論依研究內容分述如下：

1. 完成多功能室內沖蝕試驗儀器設計及組裝：本研究參考各式實驗方式與型態，設計組裝可模擬預期破壞模式的試驗(磨蝕、顆粒跳動沖蝕、岩塊抽離)，未來也可依照所需試驗型式作改良。
2. 改良 EFA 試驗儀：由於 EFA 試驗程序裡不適用沖蝕率小於 1mm/hr 之岩性，而軟岩沖蝕率遠小於 1mm/hr，故針對軟岩改良試驗流程以及量測方式(影像分析)。
3. 提出判斷沖刷量方法：由於沖蝕並非均勻，沖蝕過程中試體表面並無固定的形狀，大部分選擇在選擇故通選擇岩中心軸線的位置做為沖蝕量的量測位置，而其他非常不均勻的情況，則選擇沖蝕形成的鞍點或較為水平的位置做量測位置。
4. 歸納影響軟岩沖蝕率因素：岩體本身物理性質方面，影響沖蝕率最大的原因為凝聚力。而水流方面流速對於沖刷的影響不大，主要影響為水流內泥砂濃度含量。
5. 提出沖蝕試驗沖蝕量分析方法：本研究採用 AUTOCAD 做為圖形分析軟體，此方式的缺點在於操作者的對於輪廓的判斷會造成些微的誤差，優點在於 AUTOCAD 的操作容易且精確度達到 0.01mm，對於微小變化量的圖形分析非常適用。
6. 設計與改良：詳列儀器設計的流程以及試驗需注意事項，並且找出遇到問題的改良方式。本研究的設計方向均以方便拆卸與改良及施作容易為基礎設計，未來相關儀器設計可作為參考依據。

5.2 建議

1. 未來可針對泥砂濃度對沖刷的影響做研究，同樣流速下不同粒徑分佈，以及不同流速同樣粒徑分佈對於沖蝕率的影響。
2. 本研究是假設軟岩為均質材料，對於實際的岩相問題，如：節理、層面、組成材料、顆粒、互層等岩石特性，也有待往後研究繼續探討。
3. 未來可增設不同量測儀器，如：壓力計、雷射掃描儀、單點式流速計。壓力計可更精確量測水流對於試體的剪應力，雷射掃描儀則可以進行 3D 的圖形分析。單點式流速計可量測及驗證渠道及水柱噴射試驗中之流速。
4. 未來也須計算及量測來驗證可變角度直接沖刷試驗、渠道岩床磨蝕或抽離試驗，計算驗證其流場的流線、流速、及所造成之壓力。

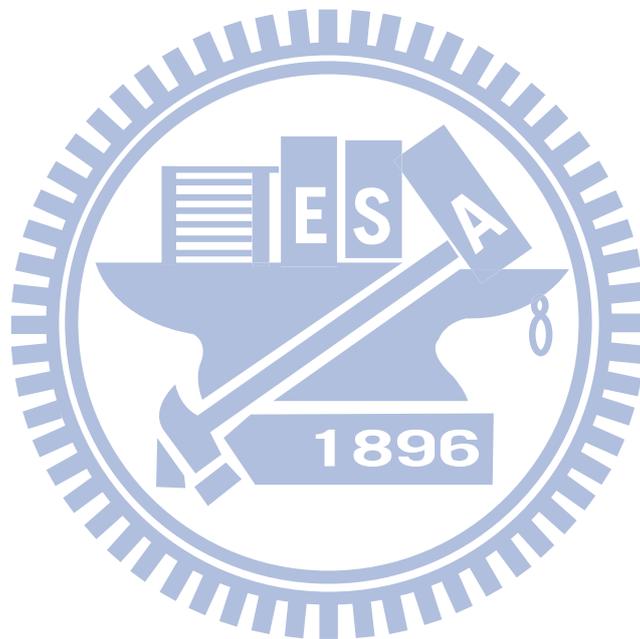


參考文獻

1. 鐘峻偉，2001，「人造沙岩之研製與性質」，國立交通大學木工程系，碩士論文。
2. 張振成，2008，「膠結不良砂岩的淺基礎承载力」，國立交通大學木工程系，博士論文。
3. 林文凱，2008，「軟弱岩床河道的沖蝕機制與抗沖蝕力評估—以八掌溪為例」國立交通大學木工程系，碩士論文。
4. 李佩錚，2009，「軟岩沖蝕之微觀數值模擬」，國立交通大學木工程系，碩士論文。
5. 朱佳仁，2003，「環境流體力學」，科技圖書股份有限公司出版，臺北。
6. 杜鳳棋 譯，1995，「流體力學」，高立圖書有限公司出版，臺北。
7. Annandale, G.W., Wittler, R.J., Ruff, J.F., Kuroiwa, J., 1998, "Prototype Validation of Erodibility Index for Scour in Fractured Rock Media." Proceedings of 1998 International Water Resources Engineering Conference and Mini-Symposia, ASCE, Memphis, TN, August, 1998.
8. Bollaert, E., and A. Schleiss, 2001, "A new approach for better assessment of rock scouring due to high velocity jets at dam spillways", Accepted for publication at ICOLD European Symposium, Geiranger, Norway, 25-27 June 2001.
9. Bollaert, E., 2002a, "The influence of plunge pool air entrainment on the presence of free air in rock joints.", *Proc., Int. Workshop on Rock Scour*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 137-149.
10. Bollaert, E., 2002b, "Transient water pressures in joints and formation of scour due to high-velocity jet impact.", *Communication 13*, Laboratory of Hydraulic Constructions, EPFL, Lausanne, Switzerland.
11. Bollaert, E., and Schleiss, A., 2003a, "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part I: A state-of-the-art review.", *J. Hydraul. Res.*, 41~5, 451-464.
12. Bollaert, E., and Schleiss, A., 2003b, "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. Hdraul. Res.*, 41~5, 465-480.
13. Bollaert, E., 2004a, "A comprehensive model to evaluate scour formation in plunge pools." *Int. J. Hydropow. Dams*, 2004 ,1, 94-101.
14. Briaud, J.-L., Ting, F. C. K., Chen, H. C., Gudavalli, R., Perugu, S., and Wei, G. 1999. "SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125_4_, 237-246.

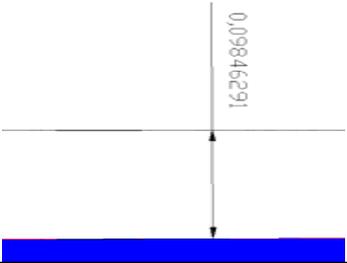
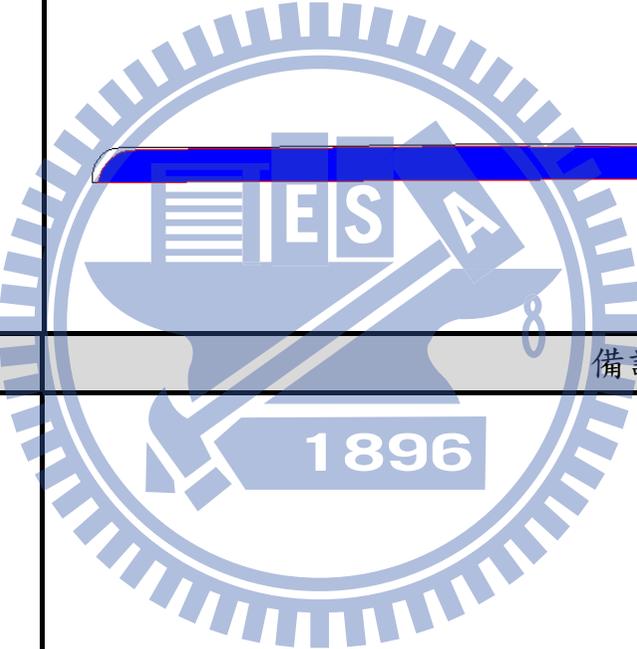
15. Briaud, J.-L., Chen, H. C., Kwak, K., Han, S.-W., and Ting, F. , 2001a, "Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127_2_, 105–113.
16. Briaud, J.-L., Chen, H. C., Kwak, K., Han, S.-W., and Ting, F., 2001b, "MULTIFLOOD AND MULTILAYER METHOD FOR SCOUR RATE PREDICTION AT BRIDGE PIERS." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127_2_, 113–125.
17. Briaud, J.-L., Chen, H.-C., Li, Y., Nurtjahyo, P., and Wang, J., 2005, "The SRICOS-EFA method for contraction scour in fine grained soils." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131_10_, 1283–1294.
18. Briaud, J.-L., H.-C. Chen, Y. Li, P. Nurtjahyo, J. Wang, 2003, " COMPLEX PIER SCOUR AND CONTRACTION SCOUR IN COHESIVE SOILS", National Cooperative Highway Research Program, NCHRP REPORT, 24-15.
19. Thompson C., E. L., , and Amos, C., L., 2002, "The Impact of Mobile Disarticulated Shells of *Cerastoderma edulis* on the Abrasion of a Cohesive Substrate", *Estuaries* Vol. 25, No. 2, p. 204–214 April 2002.
20. Robinson, K., M., Hanson, G., J., Cook, K., R., and Kadavy, K., C., 2001, "Erosion of Fractured Materials", American Society of Agricultural Engineers, ISSN 0001-2351, 819-823.
21. Leonard S. Sklar, William E. Dietrich, 2001, "Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock", Department of Earth and Planetary Science, University of California, 307 McCone Hall, Berkeley, California 94720-4767, USA.
22. Mikaël Attal, Jérôme Lavé, and Jean-Paul Masson, 2006, " New Facility to Study River Abrasion Processes", *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 10.1061_ASCE_0733-9429_2006_132:6_624
23. Robert, W., Fox, and Alan, T., McDonald, 1992, "Introduction to Fluid Mechanics", 4th.
24. Balachandar, R., and Kells, J., A., 1998, "Instantaneous water surface and bed scour profiles using video image analysis", *Canadian Journal of Civil Engineering*, pg. 662.
25. Wittler, R. J., Annandale, G. W. Abt, S. R. Ruff, J. F. 1998, "Prototype Validation of Erodibility Index for Scour in Granular Media" American Society of Civil Engineers, Proceedings of the 1998 International Water Resources Engineering Conference, Memphis, Tennessee, August, 1998.
26. Balachandar ,R. , and Kells, J., A., 2000, "The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27;138-150(2000).
27. Lim, Siow-Yong, and Yu, Guoliang , 2002, " Scouring Downstream of

- Sluice Gate”, First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1 Texas A&M University, College Station, Texas, USA November 17-20.
28. Tatsuaki, Nakato, 2002, “Erodibility Tests of Shale-Rock Samples Taken from Bridge Pier Construction Site on the Mississippi River”, Research Engineer, IIHR – Hydroscience & Engineering, Adjunct Prof., Civil & Environmental Engineering, The University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242.
29. Cao, Y., Wang ,J., Briaud ,J.L., Chen ,H.C., Li ,Y., and Nurtjahyo, P., 2002, ” Erosion Function Apparatus Overview and Discussion of Influence Factors on Cohesive Soil Erosion Rate in EFA Test”, First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1 Texas A&M University, College Station, Texas, USA November 17-20, 2002.

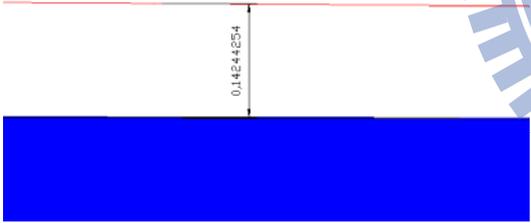
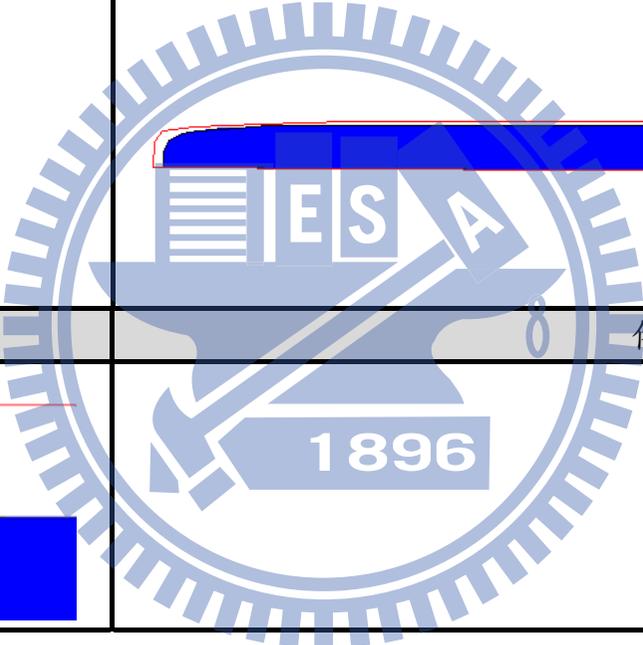


附錄 A 軟岩沖蝕試

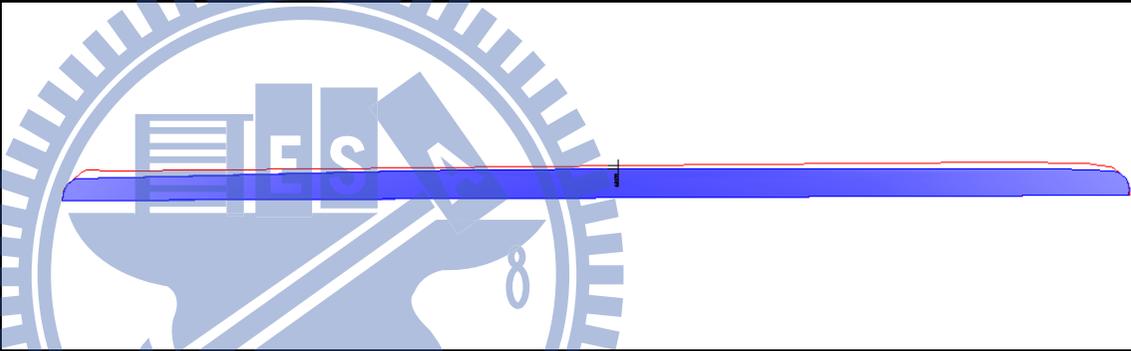
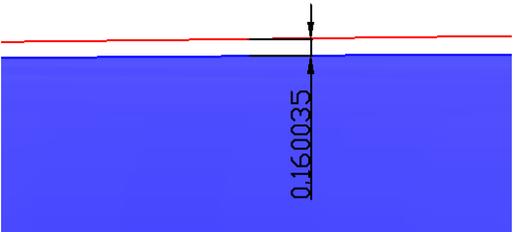


試體岩性	沖刷深度 mm	沖刷流速 m/s	試驗時間 min	沖蝕率 mm/hr
砂岩	0.098	0.54	240	0.0225
試驗前試體照片			數化結果	
				
試驗中斷放大			備註	
				

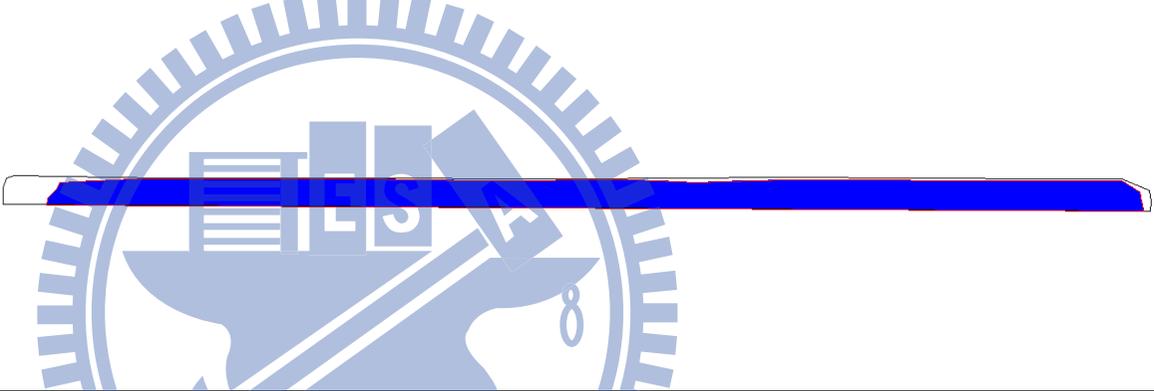
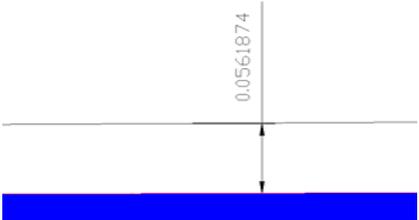
附錄 A-11 砂頁岩互層之砂岩試驗結果

試體岩性	沖刷深度 mm	沖刷流速 m/s	試驗時間 min	沖蝕率 mm/hr
砂岩	0.14	3.145	240	0.035
試驗前試體照片			數化結果	
				
試驗中斷放大			備註	
				

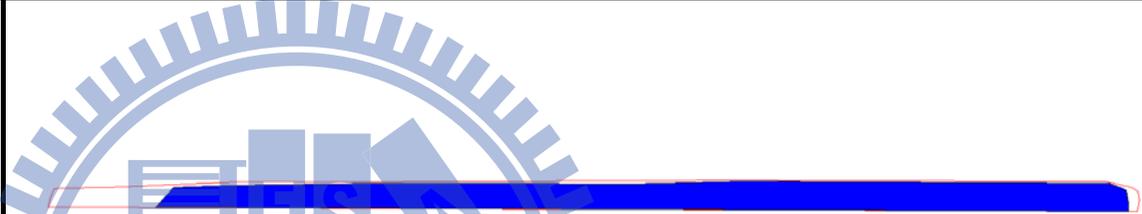
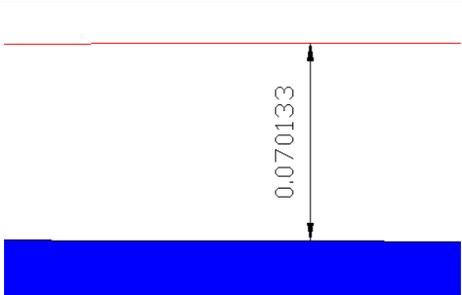
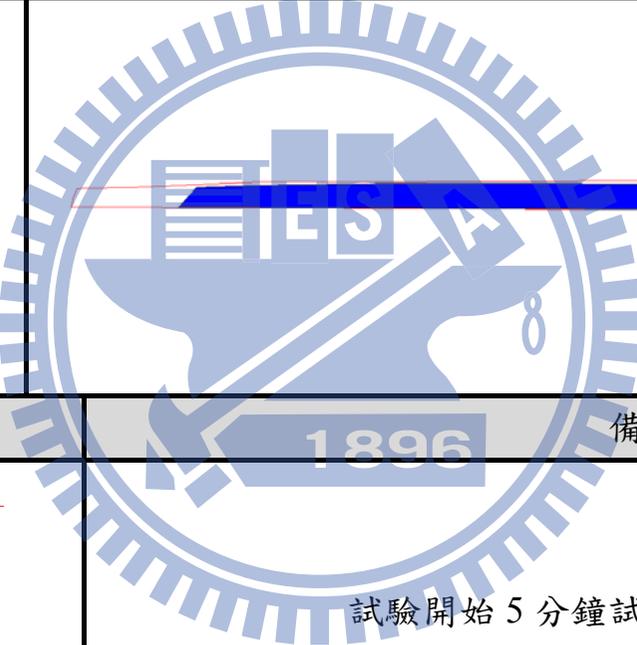
附錄 A-12 砂頁岩互層之砂岩試驗結果

試體岩性	沖刷深度 mm	沖刷 流速 m/s	試驗時間 min	沖蝕率 mm/hr
砂岩	0.0160	4.23	240	0.0229
試驗前試體照片		數化結果		
				
試驗中斷放大		備註		
				

附錄 A-13 砂頁岩互層之砂岩試驗結果

試體岩性	沖刷深度 mm	沖刷流速 m/s	試驗時間 min	沖蝕率 mm/hr
砂頁岩	0.056	4.23	420	0.008
試驗前試體照片			數化結果	
				
試驗中斷放大			備註	
			 <p>試驗結束發現試體邊緣延弱面破裂</p>	

附錄 A- 14 砂頁岩互層之砂頁岩試驗結果

試體岩性	沖刷深度 mm	沖刷流速 m/s	試驗時間 min	沖蝕率 mm/hr
砂頁岩	0.0701	9.94	240	0.0175
試驗前試體照片			數化結果	
				
試驗中斷放大			備註	
			 <p>試驗開始 5 分鐘試體邊緣延弱面破裂</p>	

附錄 A-15 砂頁岩互層之砂頁岩試驗結果

附錄 B 儀器測試與改良



附錄 B 儀器的測試與改良

本儀器研發過程中在試驗方面與分析方面遇到許多問題，本附錄將介紹過程中所遇到的問題以及解決方式。

儀器方面

試驗中漏氣問題：

在試驗過程中，在試體遇到漏水及漏氣問題，試體與試驗管之間會由於水力作用下，將外部空氣吸入管內，且流速越大，吸入的空氣量越大，不僅影響觀測也使的沖蝕率大大增加(圖 1)。

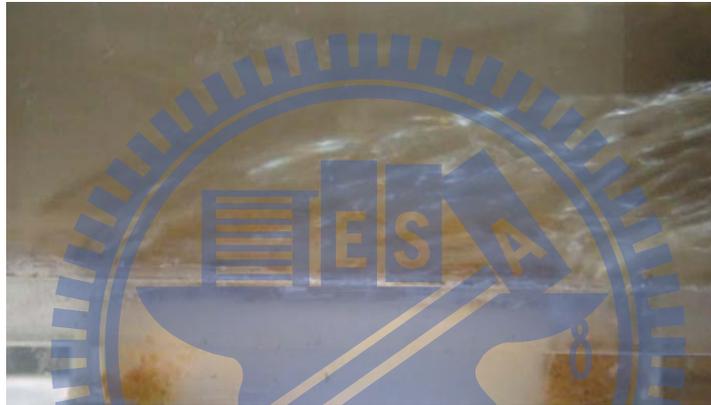


圖 1 試驗中漏氣情形

改良方式：

使用矽膠模，將其切割成長 10cm、寬 10cm 之方型，在將其中心切割出小於岩心直徑 5~10mm 之圓形(圖 2)，將其作為試驗段的防水層(圖 3)，不僅試體通過，也可防水及防漏氣，如設置一層矽膠還有漏氣情形，則可增加至二層、三層。

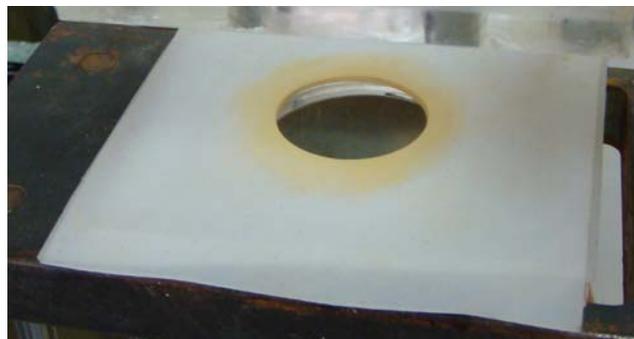


圖 2 矽膠模外觀

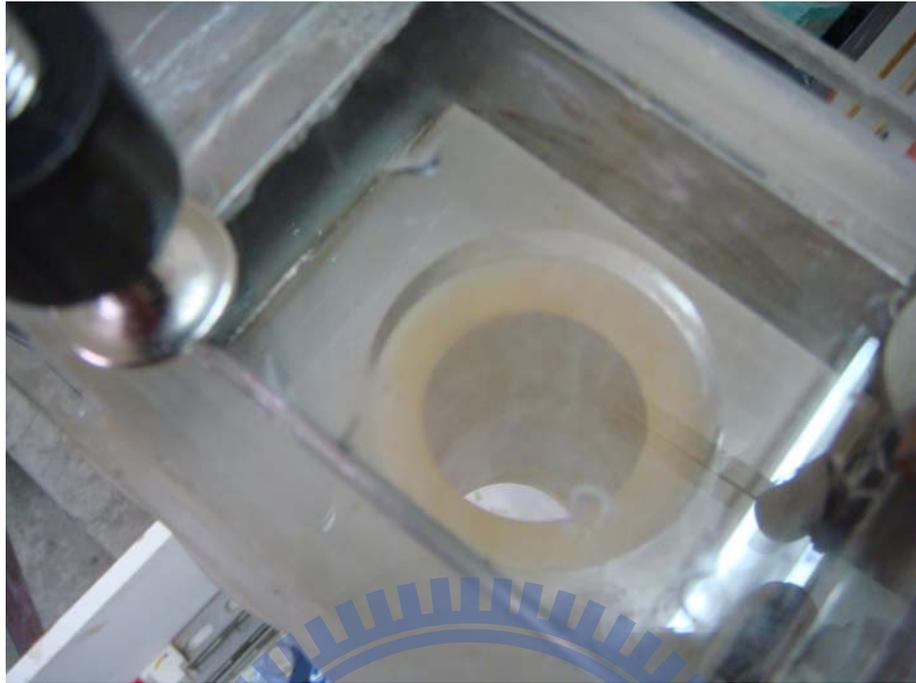


圖 3 試驗段防水層裝設

試驗中拉拔問題：

在軟岩試驗中，試體會因為水力作用下使得試體被拉拔上升，矽膠模本身之磨擦力雖可抵抗一部分拉拔力，但在高流速、長時間試驗後，試體還是會有微小拉拔情形，造成沖蝕率是負數。

改良方式：

在矽膠模下方增設夾具(圖 4)，增加抵抗拉拔力之磨擦力，使得岩心不會因為水力作用而被拔起。

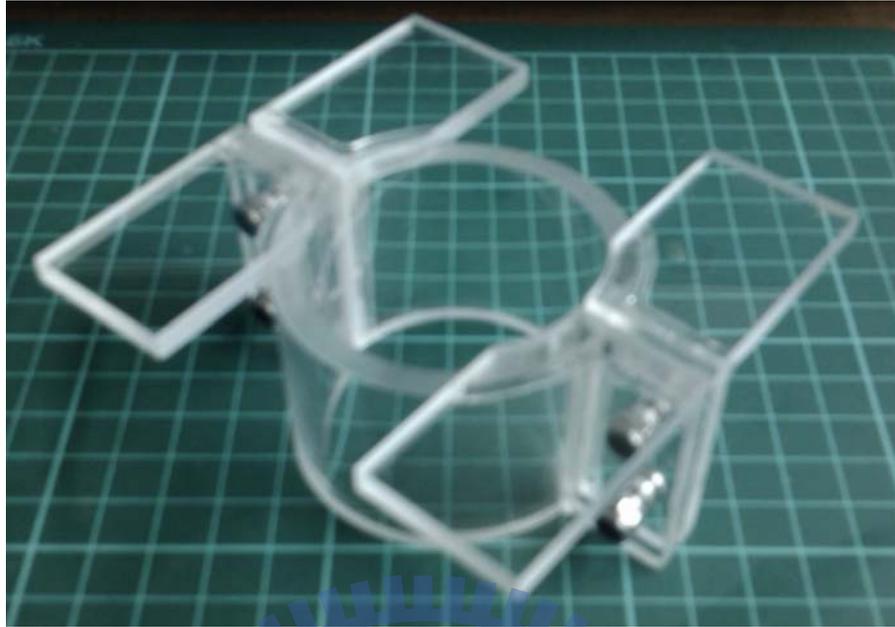


圖 4 改良之岩心夾具

試驗與影像分析方面

判斷試體抬升高度：

在試驗中，如何判斷試體上升以達到 1mm，一始採用之方式為使用捲尺做為輔助(圖 5)，捲尺精度差，且不易判試。

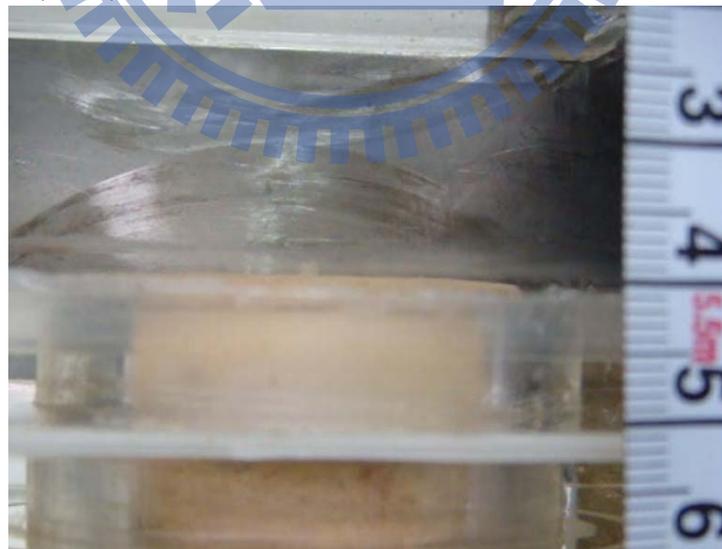


圖 5 捲尺判釋方式

改良方式：

使用投影片自製標線(圖 6)，不僅方便判釋，且可浮貼於試管上

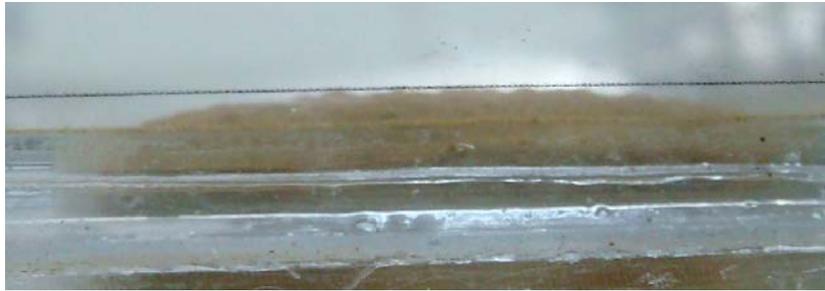


圖 6 投影片自製標線

標線型式：

在沖蝕率極低的情況下($\ll 1\text{mm/hr}$)，標線會遮住試體表面(圖 7)，使得判釋有困難，並且標線過於簡化，使的照片在 CAD 內不易決定放大比例。



圖 7 標線影響試體表面判釋

改良方式：

試體部分不使用標線，將標線設置在兩旁，並加上刻度(圖 8)



圖 8 改良標線

攝影方式：

初期試驗時，本研究使用之相機為新力 T200 數位相機(圖 9)，由於數位相機為自動變焦，故無法準確將焦距設定在試體上，故每張相片之焦距與倍率都不相同，使得圖形分析上非常困難。



圖 9 新力 T200 數位相機

改良方式：

改用單眼數位相機、高倍率鏡頭(圖 10)，固定放大倍率以及焦距，使的在圖形分析上，每張相片的放大倍率相同，並且試體邊緣輪廓更為清晰更容易判釋。



圖 10 單眼數位相機及高倍率鏡頭



附錄 C 試驗注意事項

試驗應注意事項

為維持試驗一致性，試驗過程中有許多注意事項，本節將對於試驗前，試驗中須注意之事項做介紹。並且岩性不同也需有不同因應方式。

試驗前

1. 每次試驗前須將岩心試體可能會產生塊體剝離之部分去除並將表面整平。
2. 試體直徑需稍加研磨使其小於試驗段之孔洞。
3. 須確定矽膠薄膜之防水與夾具的穩固。
4. 如試體本身存在明顯之裂隙、節理面，須拍照詳細記錄。

試驗中

1. 試驗剛開始時需先使機器運轉一段時間，等待流量計之讀數穩定之後才開始記錄，此時管內之流速較為穩定。
2. 試驗中必須保持管內水為滿管狀態。
3. 由於運轉過程中，水槽處水溫度會逐漸升高，試驗過程中需持續循環水槽內之儲水，使其維持在一定之溫度。
4. 觀測試體附近是否有漏氣、漏水情形發生，如此情形明顯，需停止試驗重新檢討問題並修正。

膠結差之岩性

膠結差之岩性(例：人造砂岩)，水流開始穩定前即產生大量沖刷，需在表面覆蓋保護層，水流穩定後再移開保護層，並且試驗不得中斷。而膠結差之岩性，沖蝕率高，判斷每次沖蝕完成之依據會依照操作者不同而有所差異，大部分選擇試體圓心附近做為主要判斷的地方，其次可選擇凸起之鞍點、較為平坦之表面。操作者判斷沖刷完成的方式不同，對於試驗結果的影響並不巨大。

膠結良好之岩性

膠結良好之軟岩試驗較為容易，不需覆蓋保護層，只需整平表面施作試驗即可。膠結良好之軟岩沖蝕率極低，每施作一次試驗可取下岩心，整平表面進行下次試驗。