

# 國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

岩質河床塊體抽離沖刷之微觀數值模擬與簡化  
分析

Numerical Simulation and Simplified Analysis of  
Bedrock Incision by Plucking

研究生：江前昱

指導教授：潘以文 教授

中華民國一〇一年七月

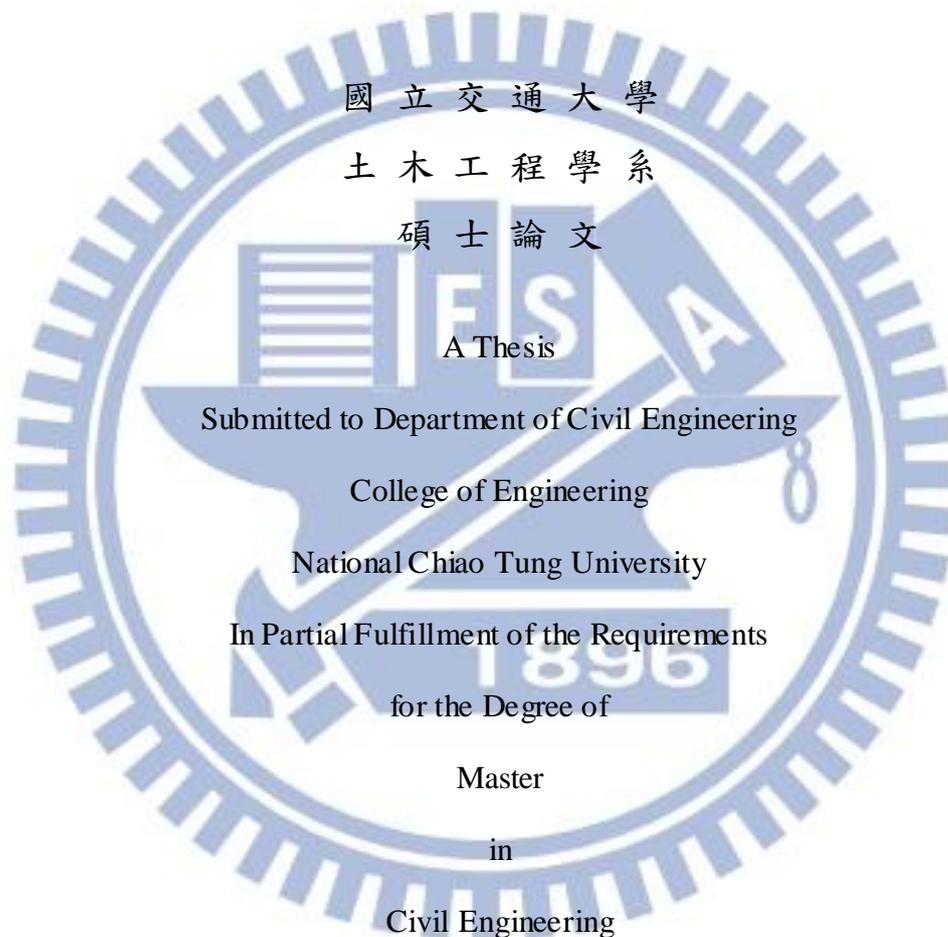
岩質河床塊體抽離沖刷之微觀數值模擬與簡化分析  
Numerical Simulation and Simplified Analysis of Bedrock  
Incision by Plucking

研究生：江前昱

Student : Chien-Yu Chiang

指導教授：潘以文 博士

Advisor : Dr. Yii-Wen Pan



July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

# 岩質河床塊體抽離沖刷之微觀數值模擬與簡化分析

學生：江前昱

指導教授：潘以文 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 中文摘要

於節理豐富之岩質河床，岩塊抽離機制最易成為主控之沖蝕機制。本研究以顆粒流數值模擬為方法，PFC<sup>3D</sup>軟體為工具，模擬節理發達岩體中岩塊抽離沖刷之行為與機制，檢視其微觀機制、探討影響岩塊抽離沖刷機制中塊體之運動條件及其受力行為之重要因子，進而提出簡化分析方法。為合理模擬節理面力學行為之要素，本研究先進行弱面直剪之模擬，結果顯示岩橋凝聚力及摩擦係數分別與最大摩擦阻抗及峰後摩擦阻抗呈正相關，而隨岩橋所占面積比越大，岩橋作用越為明顯。繼而模擬岩質河床表面岩塊之抽離行為，先模擬單岩塊虛擬試體之抽離行為，以探討影響塊體抽離之因子，整理虛擬試驗結果可知岩塊上舉速率隨岩橋面積比、岩橋鍵結強度、凝聚力以及節理勁度參數增加而下降；並隨著壓力波動平均差增高而上升。繼而模擬多岩塊岩床之同時受上舉力影響之抽離行為，探討塊體排列及岩橋分佈條件對岩塊抽離之影響，由模擬結果發現關鍵岩塊於塊體抽離中扮演重要角色。最後本研究基於虛擬沖刷試驗所整理之成果、以單岩塊抽離之模擬結果為基礎，提出一套簡化分析方法；關鍵岩塊之抽離行為則可

視為單岩塊之抽離行為，考量其控制節理發達河床之沖刷速率。本文最後並以一案例展示此簡化分析法之應用。

**關鍵字：**岩質河床、節理發達岩體、塊體抽離、顆粒流模擬、上舉速率



# Numerical Simulation and Simplified Analysis of Bedrock Incision by Plucking

Student : Chien-Yu Chiang

Advisor : Dr. Yii-Wen Pan

Department of Civil Engineering

National Chaio Tung University

## ABSTRACT

Plucking is often the dominant mechanism of bedrock erosion when the rock riverbed is composed of heavily jointed rock masses. This thesis made use of particle flow simulation to model the bedrock incision by plucking. Through numerical simulation, the thesis looked into the microscopic features of the plucking mechanism and explored the important factors that may affect the kinematics and the kinetics of rock-block plucking in block scale.

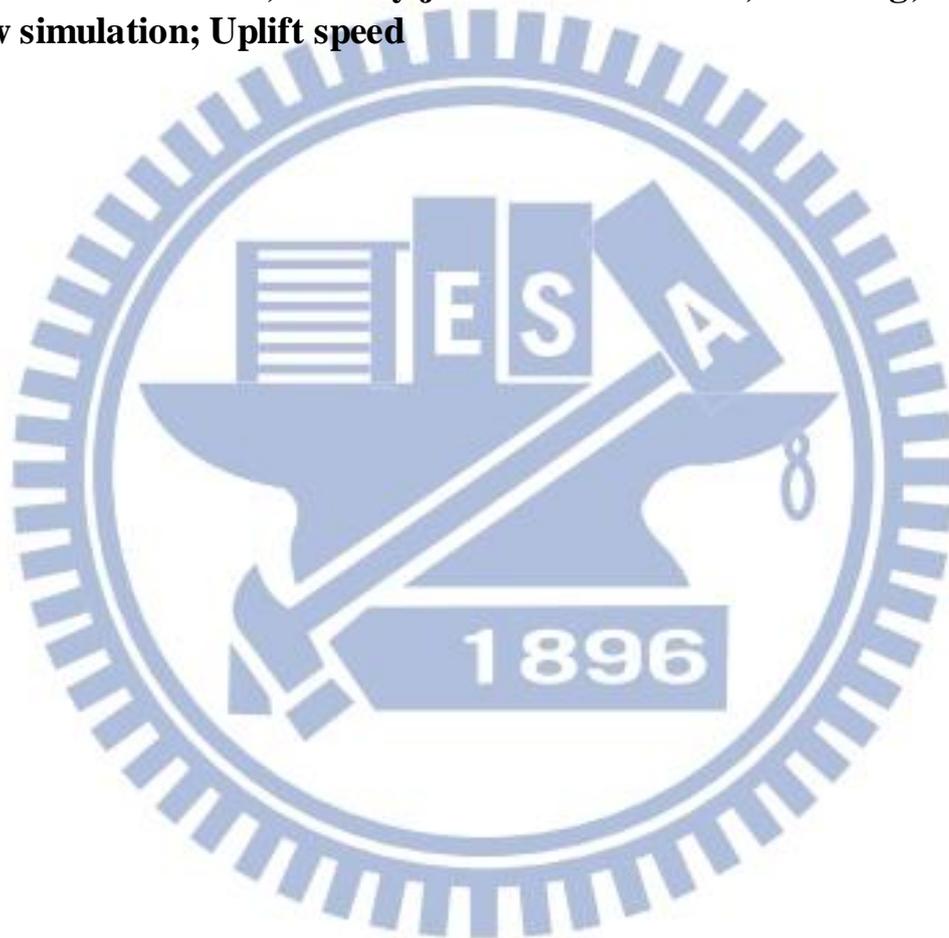
This study first simulated the direct shear on modeled weak plane to properly model the mechanical behavior on a discontinuity. Through simulation, it was validated that the peak strength increases with the increase in rock-bridge cohesion, whereas the post-peak frictional resistance increases with the rise in the frictional coefficient of the weak plane. The role of rock bridges tends to be more important as the area ratio of rock bridge increases.

Subsequently, the study simulated the plucking behavior of jointed rock masses with virtual specimens composed of arranged blocks. Plucking simulation of single block and multiple blocks, respectively, were conducted. From the simulation of single block, it appears the uplift speed is negatively correlated with the following weak-plane characteristics: the area ratio and bond strength of rock bridges as well as the cohesion and the shear stiffness of weak plane. For the influence of the uplift force, the uplift speed increases as the mean value of pressure fluctuation increases. The plucking simulation of multiple blocks allows concurrent movements of adjacent blocks. The effects of the distribution of rock bridges and the orientation of joints were examined through simulation. It is shown that, for multiple blocks, there is a key block on the top layer to control the plucking of the jointed rock masses. Once the key block is removed, the uplift speed of other blocks will

suddenly increase.

On the basis of the simulated results, this study further proposed a simplified approach for the estimation of scouring depth by plucking during a specific flood event. For conservative concern, plucking speed was estimated using the results of single block plucking simulation. An example for applying the proposed simplified approach was also presented.

**Keywords: Bedrock; Heavily jointed rock masses; Plucking; Particle flow simulation; Uplift speed**



## 誌謝

研究所畢業了，學生生涯也暫且告一段落了，心中留下只有滿滿的感謝，感謝潘以文 老師對我不只是學識論文的指導，更讓我看到學者該有的態度及風範，光這點就讓我覺得念研究所是值得的。感謝廖志中 老師總是很關心我的身體狀況，常常問我怎麼看起來沒睡飽，更提供許多寶貴的意見讓我研究少走了許多冤枉路。感謝口試委員王承德 老師、吳建宏 老師、吳博凱 老師、劉智超 老師願意花費寶貴的時間提點我論文上的缺失及需改進的地方，真的十分感謝。感謝系上教授方永壽 老師、黃安斌 老師、單信瑜 老師、林志平 老師在學識上的指導。感謝學長姐明萬、國維、聰吉、阿康、若瑜、大霆、楚鈞的幫忙及協助，尤其是貓脖學長不厭其煩地解答我許許多多的疑惑，真的太感謝了。感謝我的各位同窗好友，麵包、阿蒲、pipi、齊學長、強哥，室友幸聰、阿罡、智緯、翔哥，感謝這段時間的陪伴，相信將成為我美好的回憶，此外學弟妹婉容、阿村、暉凱、包包、芋頭、靖哥，感謝平常及口試期間的協助，祝你們順利畢業。感謝所有曾給予我幫助的人以及愛我的人，希望大家天天開心。感謝我的家人，雖然我不是會把肉麻話掛在嘴邊的人，但在如此重要的時刻，我想致上最深的感謝以及說一聲“我愛你們”，最後期望自己在未來能成為一個心懷感恩、充滿社會溫度，並能為社會多盡多一分力的人。感恩

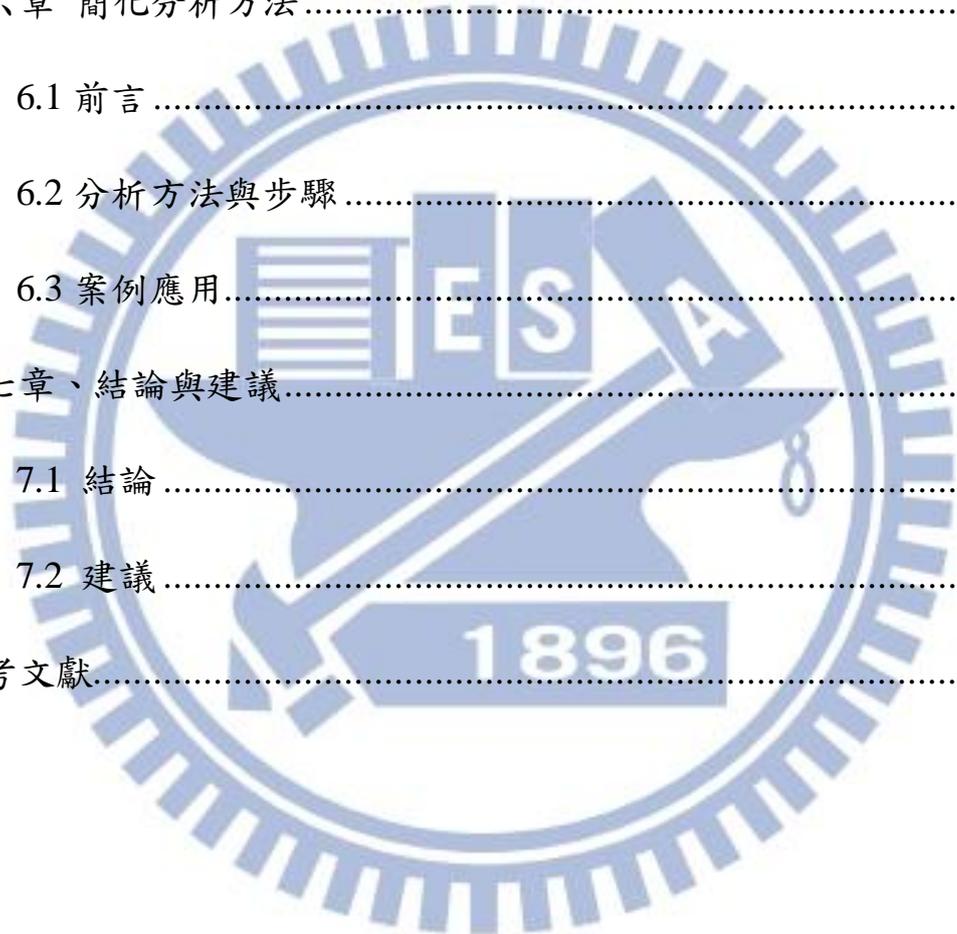
# 目錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
誌謝.....	V
圖目錄.....	X
表目錄.....	XV
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究內容與流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 岩質河床沖刷下切模型.....	5
2.2 岩質河床的沖刷機制.....	7
2.2.1 剪力磨蝕作用(abrasion).....	7
2.2.2 顆粒彈跳撞擊作用(saltation).....	8
2.2.3 岩塊抽離作用(plucking).....	10
2.2.4 穴蝕作用(cavitation).....	14
2.3 塊體抽離相關試驗.....	15
2.3.1 塊體抽離水槽試驗.....	15

2.3.2	人造節理水槽試驗.....	16
2.3.3	水流於裂隙中之壓力波動傳播試驗.....	19
2.4	Distinct Element Method(DEM)微觀模擬簡介及相關軟體應用	21
2.4.1	Distinct Element Method(DEM)微觀模擬簡介.....	21
2.4.2	Distinct Element Method(DEM)相關軟體及應用 ...	22
2.5	PFC <sup>3D</sup> 軟體概述 .....	26
2.5.1	PFC <sup>3D</sup> 運算原理.....	27
2.5.1.1	力-位移定律 .....	27
2.5.1.2	運動定律 .....	33
2.6	綜合討論.....	34
第三章	研究方法與規劃 .....	36
3.1	基本模型建立 .....	36
3.2	岩床塊體抽離之模擬.....	40
3.2.1	虛擬岩石.....	41
3.2.1.1	單岩塊虛擬試體之抽離模擬 .....	43
3.2.1.2	多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬.....	44
3.3.2	壓力波動的設定.....	46
3.3	研究試驗規劃 .....	48
第四章	節理設置及參數探討.....	51

4.1 節理設置方法 .....	51
4.2 虛擬直剪試驗模擬.....	54
4.2.1 虛擬直剪試驗設計.....	54
4.2.2 虛擬直剪試驗結果分析.....	58
4.3 岩橋的設置.....	63
4.3.1 岩橋的設置.....	64
4.3.2 岩橋影響參數之探討.....	66
4.3.3 岩橋強度之變異性.....	73
4.4 小結.....	74
第五章 虛擬沖刷實驗—結果與討論.....	75
5.1 單岩塊虛擬試體之抽離模擬.....	76
5.1.1 節理完全連通情況.....	76
5.1.1.1 壓力波動之影響.....	78
5.1.2 節理部分連通情況.....	82
5.1.2.1 節理面上之影響參數.....	82
5.2 岩塊抽離之微觀模擬流程建構.....	87
5.2.1. 經由現地量測數據獲得模擬所需資料.....	88
5.2.2. 前提假設.....	90
5.2.3. 建立分析流程.....	95

5.3 多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬 .....	98
5.3.1 影響因子探討：塊體排列及岩橋佈置.....	100
5.3.2 多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬之簡化分析方法	110
5.4. 小結 .....	111
第六章 簡化分析方法.....	112
6.1 前言 .....	112
6.2 分析方法與步驟.....	112
6.3 案例應用.....	116
第七章、結論與建議.....	124
7.1 結論.....	124
7.2 建議.....	127
參考文獻.....	129



# 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖 .....	4
圖 2-1 磨蝕過程示意圖(Whipple, et al. 2000) .....	8
圖 2-2 顆粒彈跳運動路線(Sklar & Dietrich 2004) .....	9
圖 2-3 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995) .....	10
圖 2-4 岩塊抽離機制(Whipple, et al. 2000) .....	11
圖 2-5 岩塊攜出作用力示意圖(Annandale, 2006b) .....	12
圖 2-6 動力脈衝係數( $C_f$ )對水柱厚及尾水深之關係圖(Bollaert, 2002) ..	13
圖 2-7 Bollaert 岩塊尺寸示意圖(Bollaert, 2002) .....	14
圖 2-8 試驗配置圖(Annandale & Wittler ,1998) .....	16
圖 2-9 塊體配置圖(Annandale & Wittler 1998) .....	16
圖 2-10 人造節理沖蝕試驗配置圖(Bollaert, 2002) .....	17
圖 2-11 不同形式裂隙模擬設施示意圖(Bollaert, 2002) .....	17
圖 2-12 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖(Bollaert, 2002) .....	18
圖 2-13 岩體表面壓力波動頻譜分析 .....	19
圖 2-14 drop test apparatus .....	20
圖 2-15 壓力波動之傳播速率與裂隙寬度之關係圖 .....	21
圖 2-16 PFC 計算流程圖 (羅若瑜, 2011) .....	27
圖 2-17 球與球接觸模型示意圖 .....	28

圖 2-18 球與牆接觸模型示意圖.....	28
圖 2-19 顆粒與鍵結的力與位移系統.....	30
圖 2-20 平行鍵結模型示意圖 .....	32
圖 3-1 顆粒集合體(a)俯視圖(b)側視圖 .....	37
圖 3-2 含有邊界顆粒集合體(a)俯視圖(b)側視圖 .....	38
圖 3-3 基本模型的建立(a)俯視圖(b)側視圖.....	39
圖 3-4 模擬試驗流程圖.....	41
圖 3-5 岩質河床材料之三軸試驗應力應變關係圖.....	43
圖 3-6 單一塊體抽離模擬試體俯視圖 .....	44
圖 3-7 多岩塊岩床虛擬試體之建立 (a)俯視圖(b)側視圖 .....	45
圖 3-8 多岩塊岩床虛擬試體模型.....	45
圖 3-9 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖(Bollaert, 2002) .....	47
圖 3-10 岩體表面及裂隙內部壓力波動差.....	47
圖 3-11 固定頻率之壓力波動差圖 .....	48
圖 4-1 smooth joint 上顆粒的運動行為.....	53
圖 4-2 試體 A (a)俯視圖(b)側視圖 .....	55
圖 4-3 直剪試驗中的直剪盒(a)俯視圖(b)側視圖 .....	56
圖 4-4 直剪試體 A 準備完成圖(a)俯視圖(b)側視圖.....	57
圖 4-5 直剪試體 B 準備完成圖(a)俯視圖(b)側視圖.....	58

圖 4-6 直剪試體 A 的剪力阻抗與位移關係圖 .....	59
圖 4-7 直剪試體 A 的正向力與最大剪力阻抗的關係圖 .....	60
圖 4-8 直剪試體 B 的剪力阻抗與位移關係圖 .....	61
圖 4-9 直剪試體 B 的正向力與最大剪力阻抗的關係圖.....	62
圖 4-10 岩橋之建立(a) 側視圖(b) 俯視圖.....	65
圖 4-11 岩橋之建立完成圖(a) 側視圖(b) 俯視圖 .....	66
圖 4-12 位移與剪力阻抗的關係圖 .....	68
圖 4-13 岩橋面積比與最大剪力阻抗之關係圖 .....	70
圖 4-14 位移與剪力阻抗的關係圖 .....	70
圖 4-15 岩橋摩擦係數與最大剪力阻抗之關係圖.....	71
圖 4-16 岩橋凝聚力(cohesion)與最大剪力阻抗之關係圖 .....	72
圖 4-17 位移與剪力阻抗的關係圖 .....	74
圖 5-1 塊體抬升高度與時間關係圖 .....	77
圖 5-2 塊體上舉速率與時間關係圖 .....	77
圖 5-3 不同壓力波動平均差下，塊體抬升高度與時間關係圖.....	79
圖 5-4 不同壓力波動之振幅(Pa)對頻率與塊體上舉速率關係圖 .....	80
圖 5-5 不同岩橋所占比例對塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖.....	84
圖 5-6 不同岩橋所占比例對塊體上舉速率(m/s)與時間(t)關係圖 .....	84
圖 5-7 不同凝聚力(cohesion)大小對塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖 .....	85

圖 5-8 不同凝聚力(cohesion)大小對塊體上舉速率(m/s)與時間關係圖.	86
圖 5-9 不同壓力波動差振幅(Pa)下，塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖	87
圖 5-10 岩體表面及裂隙內部壓力波動頻譜分析圖(Bollaert, 2002).....	88
圖 5-11 裂隙內壓力波動各頻率與所對應振幅比關係圖(Bollaert,2002)	89
圖 5-12 裂隙內壓力波動之各頻率與所對應振幅比之簡化關係圖 .....	90
圖 5-13 在低頻(8Hz)下，塊體上舉速率(m/s)與時間(t)之關係圖.....	91
圖 5-14 在高頻(500Hz)下 塊體上舉速率(m/s)與時間(t)之關係圖.....	91
圖 5-15 當直接施與一上舉力時，塊體抬升高度(m)與時間(t)之關係圖	92
圖 5-16 當直接施與一上舉力時，不平衡力(N)與時間(t)之關係圖 .....	92
圖 5-17 不同淨壓力波動平均差對時間(t)與塊體抬升高度(m)關係圖 ..	94
圖 5-18 不同淨壓力波動平均差所對應之塊體平均上舉速率關係圖....	95
圖 5-19 各頻率(Hz)與壓力波動平均差(Pa)之關係圖 .....	96
圖 5-20 各頻率(Hz)與淨壓力波動平均差(Pa)之關係圖 .....	96
圖 5-21 各頻率(Hz)與所對應平均上舉速率(m/s)之關係圖.....	97
圖 5-22 圖(a)：岩橋(紅色)之分布位置圖，圖(b)：與圖(a)相對應塊體於 第一秒抬升高度(m).....	99
圖 5-23 最快脫離塊體之抬升高度(m)與時間(t)關係圖.....	99
圖 5-24 當圓盤半徑(Radius)2.5(m)時，岩橋之設置位置.....	102
圖 5-25 節理傾角 90°時之岩塊分布位置俯視圖.....	103

圖 5-26 節理傾角 $75^\circ$ 時之岩塊分布位置俯視圖.....	105
圖 5-27 關鍵岩塊於不同節理條件下，抬升高度(m)與時間(t)關係圖	107
圖 5-28 節理傾角 $60^\circ$ 時之岩塊分布位置俯視圖 .....	107
圖 5-29 在關鍵岩塊脫離前後，塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖..	109
圖 5-30 在關鍵岩塊脫離前後，塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖....	109
圖 6-1 不同淨壓力波動平均差( $F'$ )與相對應之塊體上舉速率關係圖 .	114
圖 6-2 單岩塊抽離微觀數值模擬之分析流程圖 .....	115
圖 6-3 艾莉颱風洪程內之水文歷線圖 .....	120



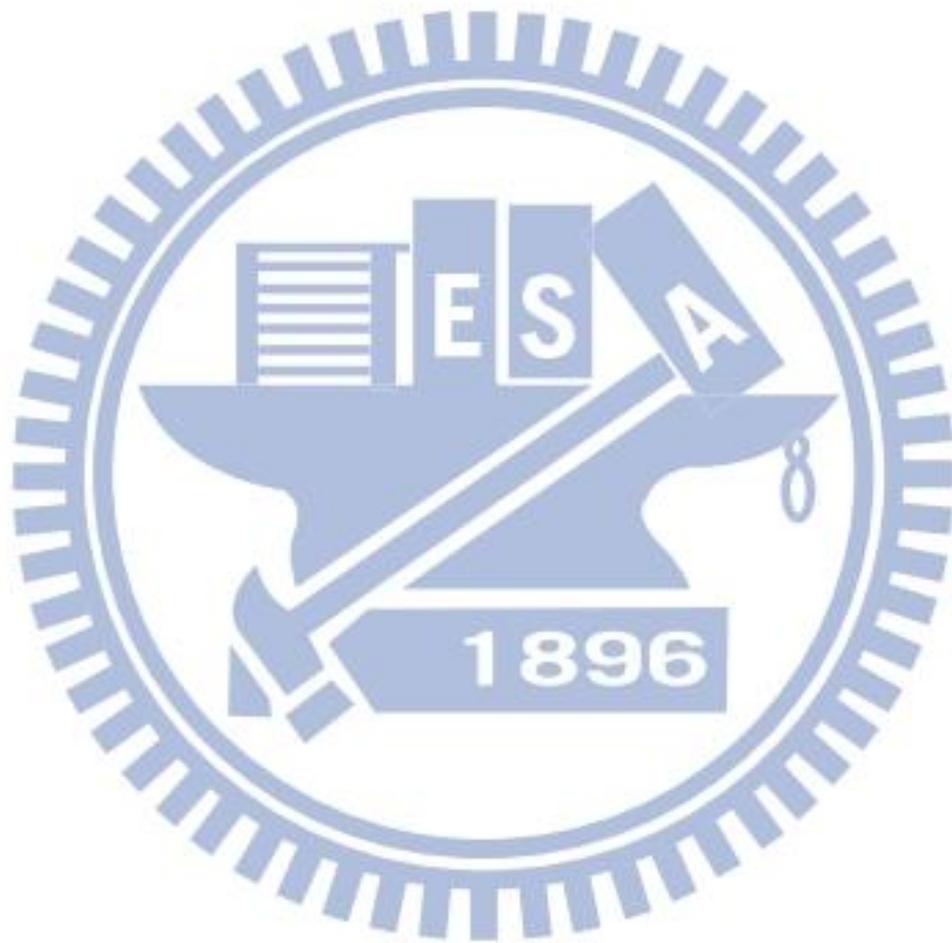
## 表目錄

表 3-1 岩質河床材料之力學參數行為 .....	42
表 4-1 最大剪力阻抗誤差 .....	63
表 4-2 圓盤半徑與岩橋放置的關係圖 .....	67
表 4-3 岩橋及節理面上的參數表 .....	68
表 5-1 壓力波動平均差與塊體平均上舉速率關係圖 .....	78
表 5-2 壓力波動頻率(Hz)及振幅(Pa)所對應塊體平均上舉速率(m/s)	80
表 5-3 勁度參數所對應塊體平均上舉速率(m/s) .....	81
表 5-4 岩橋上不同影響因子與塊體抬升高度之關係圖 .....	83
表 5-5 壓力波動差振幅(Pa)所對應之塊體抬升高度(m) .....	87
表 5-6 圓盤半徑 Radius(m)與塊體抬升高度(m)之關係圖 .....	101
表 5-7 不同節理面傾角之多岩塊岩床虛擬試體 .....	103
表 5-8 完全連通(傾角 $90^\circ$ 且岩橋所占比例為 0) .....	104
表 5-9 部分連通(傾角 $90^\circ$ 且岩橋所占比例為 0.5) .....	104
表 5-10 完全密合(傾角 $90^\circ$ 且岩橋所占比例為 1) .....	104
表 5-11 完全連通(傾角 $75^\circ$ 且岩橋所占比例為 0) .....	106
表 5-12 部分連通(傾角 $75^\circ$ 且岩橋所占比例為 0.5) .....	106
表 5-13 完全連通(傾角 $60^\circ$ 且岩橋所占比例為 0) .....	108
表 5-14 部分連通(傾角 $60^\circ$ 且岩橋所占比例為 0.5) .....	108

表 6-1 各重現期距流量與相對應水柱厚、尾水深及流速關係.....118

表 6-2 艾莉颱風洪程內之流量-時間關係圖.....119

表 6-3 岩床下刷深度試算表.....122



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

近年來由於氣候變遷以及台灣本身氣候與地質條件影響，導致河道流量及流速產生劇烈變化，加上砂石過度地開採以及跨河構造物之興建，都直接間接地造成河道上流況以及地質條件發生改變，進而產生河道岩床裸露的情形。

在以往研究上普遍認為岩床的強度高不易被水流沖蝕，因此過去在河川工程上對於沖蝕之問題多著重於橋樑橋墩底下沖積層之沖蝕以及跨河構造物本身的穩定性，而往往忽略了河道底面岩床以及河道側壁沖刷之可能性。且由於台灣地質條件較為年輕，出露岩層年代大多為上新世及更新世，此類岩層成岩時間較短，強度較差，其單壓強度介於 0.5 至 25MPa 之間，因此當洪水來臨時，岩床之沖蝕行為更為明顯，導致構造物基礎受水流沖蝕掏空，進而影響到各種取水設施以及跨河構造物之安全性

岩床沖蝕機制大致可分為岩塊抽離 (plucking)、顆粒磨蝕 (abrasion)、顆粒跳躍衝擊 (saltation) 及穴蝕 (cavitation) 等。而就現地調查資料顯示顆粒磨蝕及穴蝕所造成之沖蝕影響範圍通常較為局部且速度也較為緩慢，其磨損尺度大多為公分級。反觀岩塊抽離

所造成之磨損尺度往往達到數十公分甚至公尺級的單位，其主要原因在於岩質河床受地質構造運動影響，導致岩床面上節理發達，岩塊易受水流壓力波影響，被抬升脫離帶往下游，產生大規模的河道沖蝕行為，由此可知岩塊抽離（plucking）在岩床沖蝕上扮演著不可忽視的角色。

就現有的岩床沖蝕理論，多定性地探討大規模之沖蝕行為對地形地貌發展之影響，而局部性的研究如抗沖蝕能力指標評估，也並非以力學分析為基礎，探討河道之沖蝕過程，僅由一系列之經驗關係式進行岩床沖蝕行為之評估。也因如此許多學者進而嘗試採用室內試驗進行沖蝕行為之模擬，但因受限於試驗儀器條件之限制，以及試體難以取得、性質變異性過大等問題，目前成果較難反應現地之地質條件。基於上述原因，本研究採用微觀數值模擬分析進行岩塊抽離沖刷之模擬，將微觀數值模擬視為「虛擬沖刷試驗」，並期望與現地勘查結果以及室內試驗進行比較分析，探討岩床沖蝕之趨勢，繼而提出適當的模擬模型，且利用此模擬模型進行研究分析。

## 1.2 研究目的

本研究以數值模擬為方法，PFC<sup>3D</sup>軟體為工具，針對岩床沖刷機制中塊體抽離進行模擬，主要模擬之現地情形可分為三種，第一種為模擬在含有豐富節理的岩床上，任一岩塊周圍節理完全連通時，塊體

抬升上舉之行為；第二種為模擬當單一岩塊周圍節理部分連通時，其塊體抽離之行為；最後一種現地情形則為模擬當岩床面上多岩塊同時受到水流壓力波動作用陸續抬升時，其塊體彼此之間相互作用上舉之行為。

本研究依據上述現地情形建構出塊體抽離之微觀數值模擬模型，進行虛擬沖刷試驗，並經由虛擬沖刷試驗之結果以探討影響塊體抽離之重要因子，最後並提出可估計某一洪程下岩質河床發生塊體抽離沖刷量之簡化分析方法。

### 1.3 研究內容與流程

本論文分為七章，以不同層次探討岩質河床塊體抽離沖刷之微觀數值模擬。除本章介紹此研究之動機與目的，各章節簡述如下：

第二章為文獻回顧，整理及回顧前人所做與岩床沖刷機制相關之研究，並介紹本研究所採用的方法 Distinct element method (DEM) 之基本理論及應用範圍。第三章為研究方法與規劃，描述塊體抽離模擬試體之建立流程以及後續模擬試驗規劃。第四章為節理設置及參數探討，描述節理面與岩橋之設置流程，且經由虛擬直剪試驗探討節理面上各個影響因子。第五章為虛擬沖刷試驗之結果與討論。第六章提出可估計岩質河床發生塊體抽離沖刷量之簡化分析方法。最後，第七章提出本研究之結論與建議。

本研究之流程如圖 1-1 所示。



圖 1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

岩質河床沖蝕之行為及速率會受到不同水文因子、地質條件及地形環境之影響，因此本章一開始先就沖刷的過程及行為進行瞭解，並分別介紹不同岩質河床沖刷機制。本研究以數值模擬為方法，PFC<sup>3D</sup>為工具，針對岩床沖刷機制中的塊體抽離(plunking)進行模擬研究。

本章分為五節，整理及討論前人所做之相關文獻，2.1 節 岩質河床沖刷下切模型；2.2 節 岩質河床的沖刷機制；2.3 節 塊體抽離相關試驗；2.4 節 Distinct Element Method(DEM)微觀模擬簡介及相關軟體應用；2.5 節 PFC<sup>3D</sup>軟體概述；2.6 節綜合討論

### 2.1 岩質河床沖刷下切模型

岩床沖刷之演化過程與岩床沖刷下切率有很大相關性，許多文獻分別從不同角度對岩床下切速率進行討論，Howard & Kerby (1983)蒐集了河川歷年來縱剖面的變化，假設岩床之沖蝕下切速率與河川水流流速及水流所夾帶沉積料所造成之磨蝕剪應力( $\tau_b$ )有關，並以剪應力門檻值( $\tau_c$ )為切入點，提出合理化公式(式 2-1)：

$$E \propto (\tau_b - \tau_c)^a \quad (\text{式 2-1})$$

當床面所受之剪應力( $\tau_b$ )大於剪應力門檻值( $\tau_c$ )時，即產生岩床沖蝕下切速率( $E$ )。式中參數  $a$  為連結岩床下切速率與床面剪應力之冪函數。

此外岩床之沖蝕下切速率也與地形環境、河道條件相關，Howard & Kerby (1983)認為岩床沖蝕下切速率(E)與沉積料所造成之磨蝕剪應力相關，而沉積料輸送率與河川流量有關，流量則與集水區面積(A)及河川坡度(S)相關。依據以上各因子之相關性，提出了一合理化公式(如式 2-2)，且將其所蒐集歷年來河川的縱剖面加以變化迴歸即可得到式中 K、m、n 的參數值。

$$E = KA^m S^n \quad (\text{式 2-2})$$

其後 Seidl & Dietrich (1992)針對 Howard & Kerby (1983)提出的公式(式 2-2)進行檢視，蒐集不同的河川資料加以整理統整，歸納出許多流域之(m/n)比值，並發現(m/n)比值受到河床坡度的影響，當河床坡度小於 0.2 時，(m/n)值約為 1.0，河床坡度大於 0.2 時，(m/n)值接近 0.7，且隨著河床坡度的增加，河床坡度之影響程度相對於集水區面積也逐漸增大，進而影響岩床沖蝕下切速率。Whipple and Tucker (1999)則指出(m/n)值之變化不大，大約為 0.5，但參數 n 與 a 則與沖刷機制有直接關係， $n = (2/3)^a$ ，因此 Whipple(2000)認為(m/n)值對於岩床沖刷速率影響不大，岩床沖刷速率應取決於不同之沖刷機制，因此若想探討岩床的下切速率，須先討論主要沖刷機制，並瞭解沖刷機制行為及影響因子。

## 2.2 岩質河床的沖刷機制

隨著水文因子、地質條件、地形環境的改變，主要沖刷機制也會隨之不同。同樣在不同沖刷機制下主控之沖刷因子也會有所差異，因此若想探討不同的沖刷行為，則必須先對於不同機制下之沖刷過程及沖刷因子有所瞭解，當對單一沖刷機制有一定掌握後，進而才能探討及研究不同沖刷機制之間的交互影響作用。

近年來國內外學者對於沖刷機制的研究，大致歸納出四種主要沖刷機制，以下分為四章節，分別為 2.2.1 剪力磨蝕作用(abrasion)、2.2.2 顆粒彈跳撞擊作用(saltation)、2.2.3 岩塊抽離作用(plucking)、2.2.4 穴蝕作用(cavitation)，以下介紹不同沖刷機制之行為。

### 2.2.1 剪力磨蝕作用(abrasion)

Whipple, *et al.* (2000) 在針對阿拉斯加現地岩床沖蝕的觀測中發現當河床面上岩盤為節理間距大於 1m 的完整岩盤時，主要的沖刷機制為剪力磨蝕 (abrasion)，其剪應力則來自於水流中攜帶之懸浮載及河床載，此外當在水流能量較大的流況時，懸浮載對河床磨蝕所產生的影響會比河床載來的大。

Whipple, *et al.* (2000)對於懸浮載所造成之剪力磨蝕作用，以顆粒粒徑大小作區分，大粒徑的顆粒含有較大的慣性力，通常會直接撞擊河床凸起物的上游側，造成上游側河床表面顆粒脫離造成磨損，而中

小粒徑的顆粒容易隨著水流流線繞過河床凸起物的上游側，在下游側流況劇烈改變處，形成渦流對下游側河床造成磨蝕，進而形成滑槽(flute)跟壺穴(pothole)等現象，而藉由水工模型之驗證磨蝕現象通常集中發生於河床上凸起物的下游側(如圖 2-1 所示)。

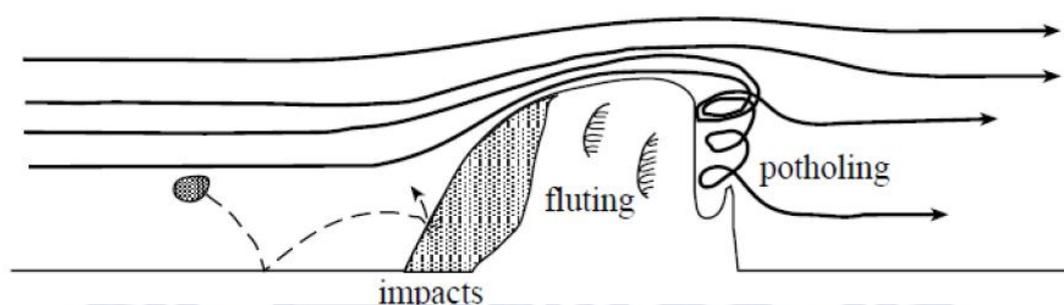


圖 2-1 磨蝕過程示意圖(Whipple, et al. 2000)

### 2.2.2 顆粒彈跳撞擊作用(saltation)

Gilbert(1877)認為河川沉積料在河床磨蝕作用中扮演兩種效用，一種是磨蝕岩床的工具性效應(tool effect)，另一種則是保護河床之覆蓋性效應(cover effect)。Sklar & Dietrich(2004)針對河床沉積物提出顆粒彈跳撞擊模型，其基本假設為岩床磨損率與河床載運動軌跡的垂直分量正相關，如下圖 2-2 所示，河床面上的顆粒受水流或壓力波之影響被帶起，之後受到顆粒本身重力及水流因素之影響落下並撞擊河床表面，造成河床表面的磨損。圖中  $H_s$  為顆粒被帶起之最高高度， $u_s$  為泥沙平均流速， $w_{sd}$  為平均垂直落下速度， $u_{si}$  及  $w_{si}$  為橫向及垂直向之平均撞擊速度， $L_{su}$  及  $L_{sd}$  分別為當顆粒上升和落下時所移動的水

平距離， $L_s$ 為總水平距離。圖 2-2 也表現出河床載顆粒在河床磨蝕及覆蓋保護兩種角色之間的轉換，同時也可與 Gilbert(1877)所提出的理論做呼應。

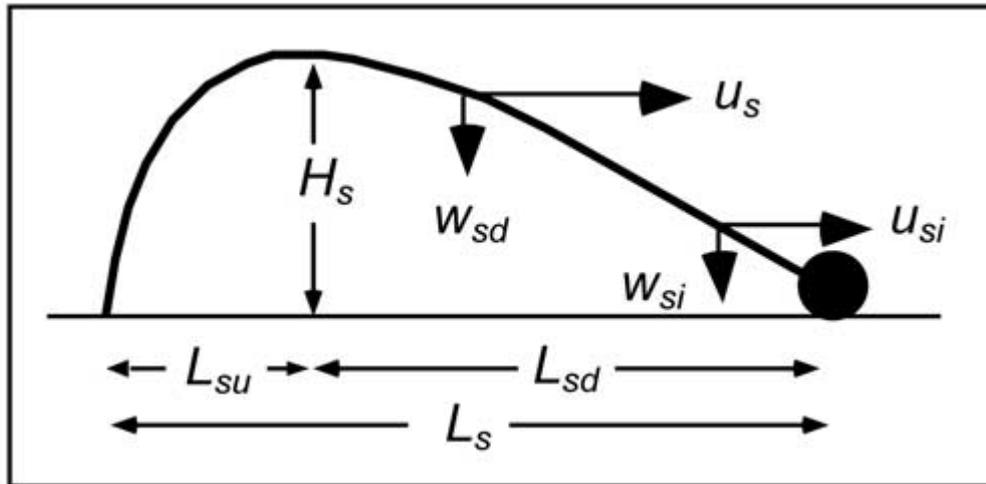


圖 2-2 顆粒彈跳運動路線(Sklar & Dietrich 2004)

根據此觀念 Sklar & Dietrich(2004)提出針對顆粒彈跳撞擊之河床磨蝕公式(如式 2-3)：

$$\text{岩床磨損率 } E = V_i \times I_r \times F_e \quad (\text{式 2-3})$$

式中 $V_i$ 為每次顆粒撞擊岩床時所損壞的岩石量， $I_r$ 為每單位面積每單位時間發生之顆粒撞擊率， $F_e$ 為岩石河床上未被沖積層覆蓋之比例。

此外也提到由於各因子相互影響的關係，最大岩床磨蝕率會在中等的沉積條件下發生。舉例來說隨著顆粒粒徑的增大，雖然每次撞擊岩床所損壞的岩石量也會提高，但顆粒本身所受重力也會變得比較大，導致顆粒不易被水流帶起，因此隨著被帶起的顆粒數減少，撞擊岩床

的撞擊頻率也會隨之降低，所以若想得到最大岩床磨蝕率則需在各冲刷因子之間找到平衡點。

Whipple & Tucker (1999)認為當顆粒彈跳撞擊 (saltation)作用在弱面間距較小、岩性強度不大或以岩塊抽離機制為主 (plucking) 的地形條件時，所造成的磨蝕量遠高於其對完整岩盤所造成的磨蝕量，因此除了大顆粒所造成之破壞效果較顯著外，顆粒彈跳撞擊 (saltation) 有一部分對河床冲刷的貢獻歸納在岩塊抽離機制 (plucking) 中。

### 2.2.3 岩塊抽離作用 (plucking)

Annandale(1995)提出了一個簡單的示意圖(圖 2-3)以說明岩塊抽離之作用，並針對岩塊抽離的過程做了完整的定性描述，首先由於水流壓力波動之影響將節理面或弱面逐漸頂開(jacking)，之後岩塊受水流作用逐漸被移出 (dislodgement)，最後被水流帶走脫離 (displacement)。

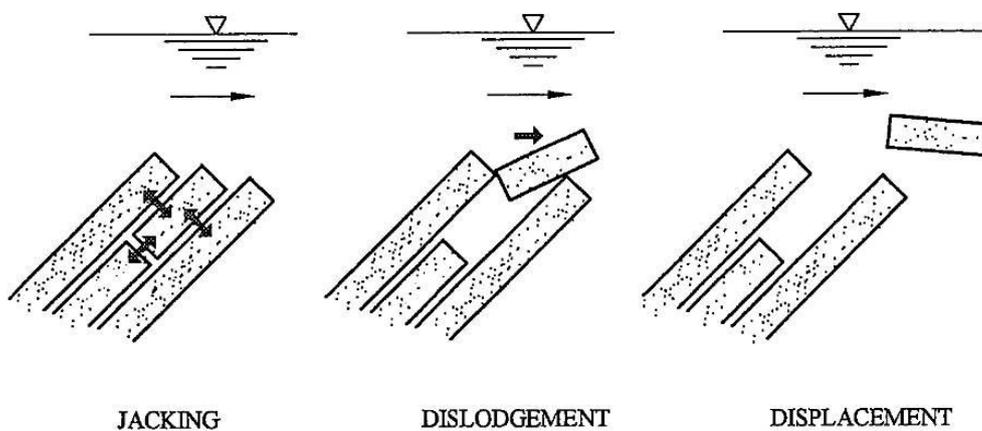


圖 2-3 岩塊抽離示意圖(Annandale,1995)

Whipple, *et al.* (2000)認為當河床面岩盤之節理間距在 1m 以下時，主要的沖刷機制將為岩塊抽離作用（plucking），他們亦針對岩塊抽離作用（plucking）的過程行為做了詳細的論述。一開始岩床由於受到節理面風化、顆粒彈跳衝擊以及水流壓力波的影響造成岩盤上的裂隙逐漸延展形成破裂面，之後隨著河床顆粒逐漸地透過磨蝕作用沖蝕弱面，以及物理及化學風化作用的影響使裂隙逐漸增大直至完全擴展連通，當裂隙連通、水流進入弱面之後，表面水流產生之拖曳力與底面弱面水流產生的壓力波動兩者之間形成向上之壓力差，當此壓力差能克服岩塊之重量及側邊之摩擦力時，將導致岩塊逐漸鬆動、抬升，最終被水流帶走脫離。如下圖 2-4 所示

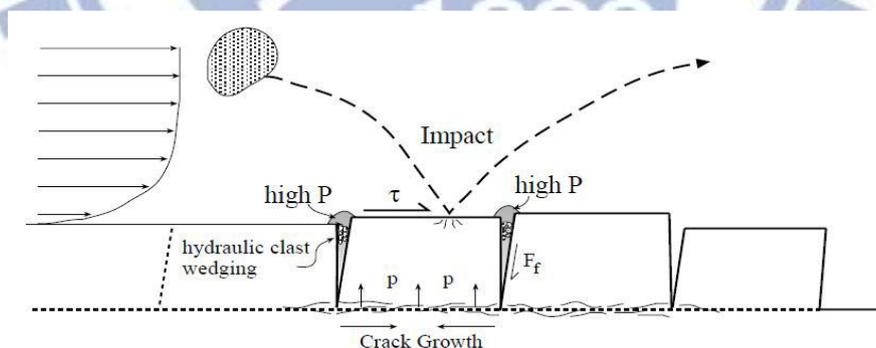


圖 2-4 岩塊抽離機制(Whipple, *et al.* 2000)

Annadale(2006b)對裂隙連通節理塊所受之作用力做分析，並提出了一示意圖(圖 2-5)，圖中 $F_{up}$ 為上舉力、 $F_{down}$ 為岩床表面水壓、 $W_g$ 為節理塊自重、 $F_{s1}$ 及  $F_{s2}$ 則是節理塊和周圍岩塊相互影響所造成的剪

力阻抗，當上舉力 $F_{up}$ 大於節理塊所受的向下抵抗力時，會產生一淨壓力，此淨壓力作用在節理塊上時會產生一初速度 $V_0$ ，經由式 2-4 轉換即可得到節理塊之抬升高度(h)，

$$h = \frac{V_0^2}{2g} \quad (\text{式 2-4})$$

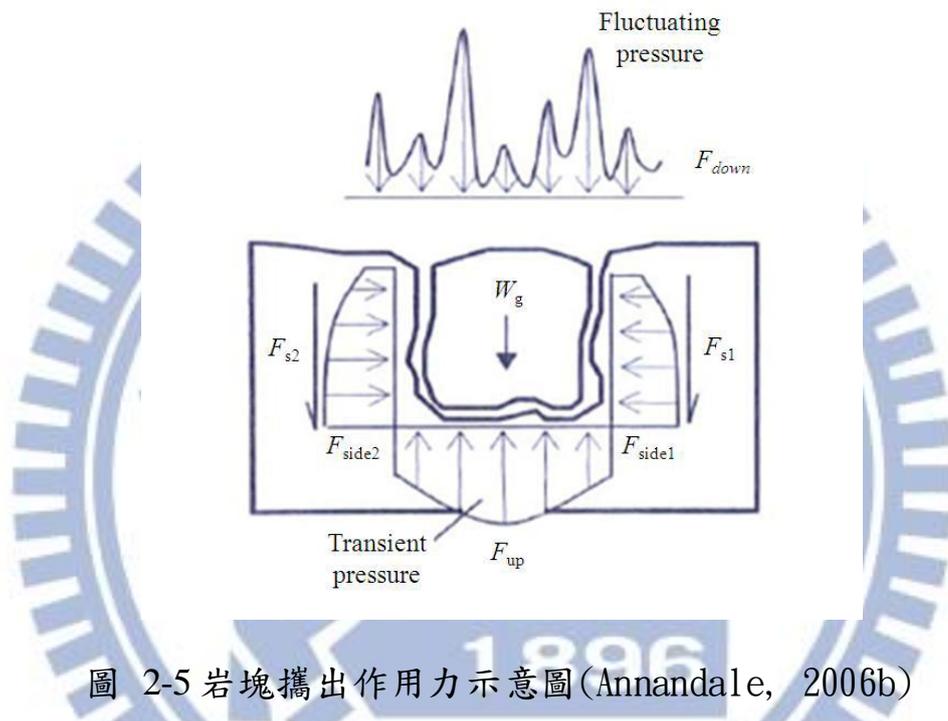


圖 2-5 岩塊攜出作用力示意圖(Annandale, 2006b)

Bollaert(2002)利用淨向上力之觀念，藉由理想化之邊界假設，假設塊體之形狀為立方體，如圖 2-7 所示，並根據力平衡計算的概念，推導出在單位時間  $\Delta t$  內塊體厚度與波動壓力之關係，如式 2-5：

$$h_{up} = \left[ 2 \frac{(x_b + 2z_b)}{c} \right]^2 \frac{1}{2g \cdot x_b^4 \cdot z_b^2 \cdot \gamma_s^2} \left[ C_1 \cdot g \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot x_b^2 - (\gamma_s - \gamma_w) \cdot x_b^2 \cdot z_b - F_{sh} \right]^2 \quad (\text{式 2-5})$$

上式中  $h_{up}$ =塊體可抬升高度； $x_b$ =x 方向塊體長度； $z_b$ =z 方向塊體

長度； $g$ =重力加速度； $\gamma_s$ =材料單位重； $C_I$ =動力脈衝係數； $\gamma_w$ =水單位重； $F_{sh}$ =作用於岩塊上之剪力； $c$ =壓力波動於含有氣體之水中傳遞波速

$$C_I = 0.0035 \cdot \left(\frac{Y}{D_j}\right)^2 - 0.119 \cdot \left(\frac{Y}{D_j}\right) + 1.2 \quad (\text{式 2-6})$$

上式中  $D_j$ =射流水柱厚； $Y$ =平衡尾水深

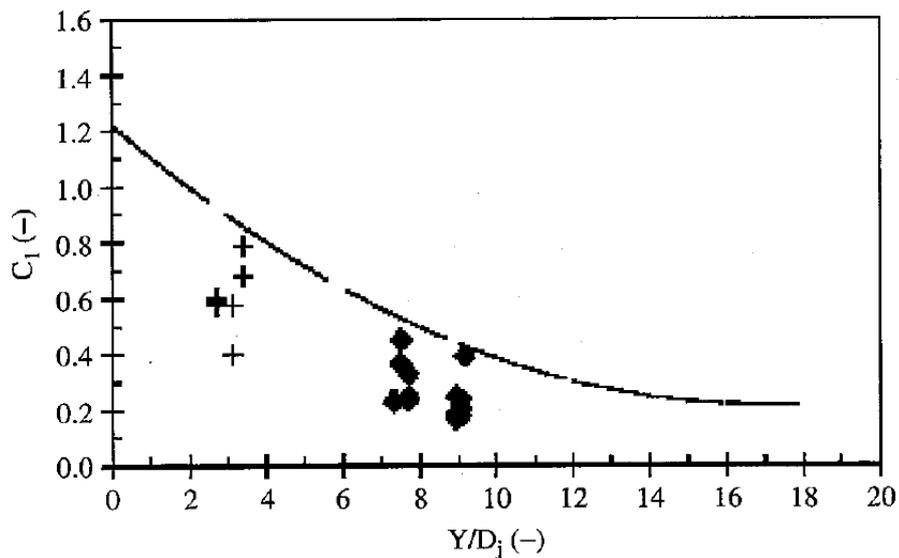


圖 2-6 動力脈衝係數( $C_I$ )對水柱厚及尾水深之關係圖(Bollaert, 2002)

圖 2-6 為 Bollaert(2002)經由試驗結果迴歸而得，由圖中可觀察到迴歸線之終點大約落在 $Y/D_j=18$ ，且其迴歸線公式(式 2-6)之曲線頂點約落在 $Y/D_j=17$ ，因此當沖刷深度持續刷深導致 $Y/D_j$ 大於 17 時， $C_I$ 值不降反增，進而產生上舉力隨沖刷深度增大而遞增此不合理現象。而台灣河川湍短流急，岩床下刷深度較深，因此當 $Y/D_j$ 大於 17 時，本研究即以迴歸線頂點之  $C_I$  值作為基準進行計算。

Bollaert(2002)提出，當塊體上舉高度( $h_{up}$ )超過塊體厚度( $z_b$ )之一半時( $0.5 \leq h_{up}/z_b < 1$ )，節理塊即有可能被帶走脫離。並以塊體細長比( $z_b/x_b$ )與塊體上舉比例( $h_{up}/z_b$ )作圖，發現在細長比不超過 1:2 時，塊體上舉比例較易達到抽離之可能範圍 0.5 以上。經由此概念，可求得岩塊穩定所需厚度之門檻值，當岩塊之厚度大於此穩定所需厚度之門檻值時，岩塊抽離不會發生。反之，當岩塊之厚度小於此門檻值時，則岩塊抽離沖蝕機制便會發生。

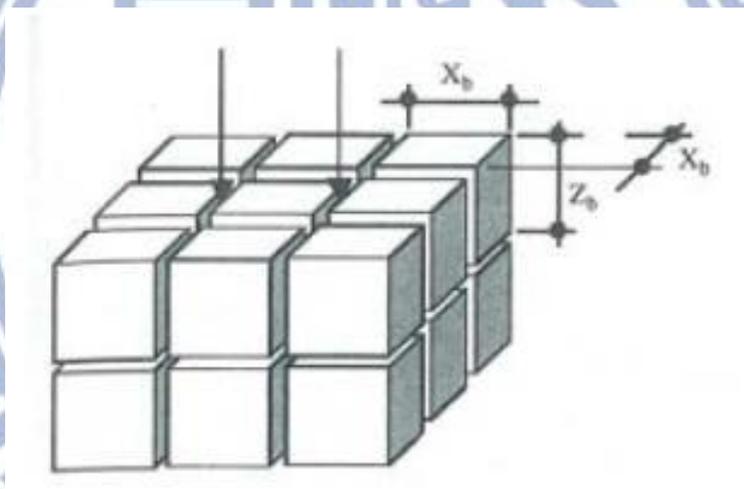


圖 2-7 Bollaert 岩塊尺寸示意圖(Bollaert, 2002)

#### 2.2.4 穴蝕作用(cavitation)

由於懸浮載容易受到地形環境之影響，所以當水流流經河床障礙物造成流況劇烈改變時，懸浮載容易於下游側對岩床產生磨蝕沖蝕，且當水流流經不規則地形時，容易產生渦流，強化懸浮載的磨蝕效應，

造成局部區域發生穴蝕作用同時對地形產生影響，繼而出現壺穴與滑槽等地質構造(Whipple, 2000)

## 2.3 塊體抽離相關試驗

上節中介紹沖刷之機制及行為。本研究之重點為塊體抽離的微觀模擬，塊體抽離的機制深受壓力波動作用之影響，為能合理考量壓力波動之特性，因此本節蒐集了與塊體抽離室內試驗相關之文獻。介紹前人曾做過的塊體抽離室內試驗並討論其結果。

### 2.3.1 塊體抽離水槽試驗

Annandale & Wittler (1998)曾建立了針對塊體抽離的水槽試驗，儀器配置如圖 2-8 所示。試驗的試體則係由長 0.394 m、寬 0.194 m、厚 0.064 m 的輕質混凝土塊體以 45 度角依序排列而成，如圖 2-9 所示。試驗時以強力水柱沖擊試體，模擬河道中塊體抽離之行為。

水槽沖蝕試驗的優點在於對試體的掌握度高，無論是試體的性質、塊體的大小、節理面的傾角間距，都容易加以控制，而缺點則在於只能針對單一沖刷機制塊體抽離進行試驗，無法考慮到顆粒撞擊、剪力磨蝕等作用影響，尤其當模擬之現地情形位於節理不發達或強度較弱的岩床上時，顆粒撞擊、剪力磨蝕往往為主控機制，影響甚大。因此此塊體抽離水槽試驗之缺點在於無法對岩床的沖刷機制做全盤性的考量。

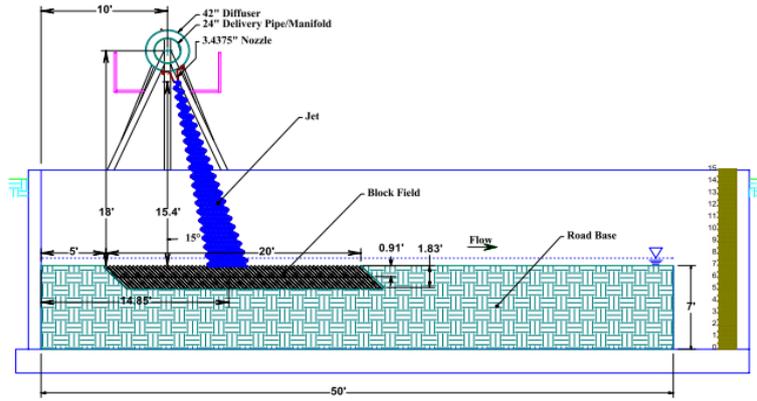


圖 2-8 試驗配置圖(Annandale & Wittler ,1998)

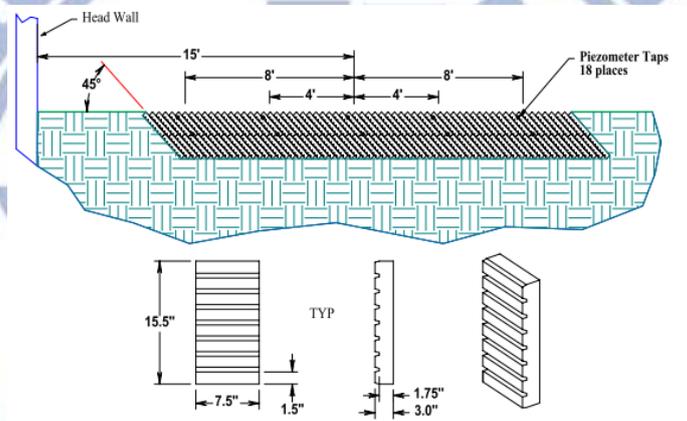


圖 2-9 塊體配置圖(Annandale & Wittler 1998)

### 2.3.2 人造節理水槽試驗

Bollaert(2002)為模擬跌水狀態下岩體裂隙內之壓力變化，建立了人造節理水槽試驗(圖 2-10)，該試驗係利用不同形式之金屬版來模擬各種岩體裂隙之形狀(圖 2-11)，同時於金屬版間各個區段裝設壓力計，藉由觀察各區段壓力計數值之變化，進而探討當水流壓力波動進入裂隙後所產生之放大效應。

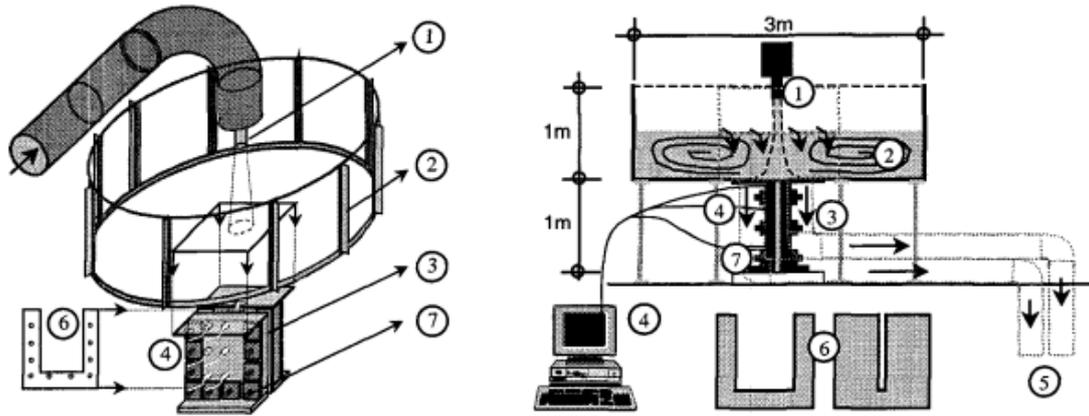


圖 2-10 人造節理沖蝕試驗配置圖 (Bollaert, 2002)

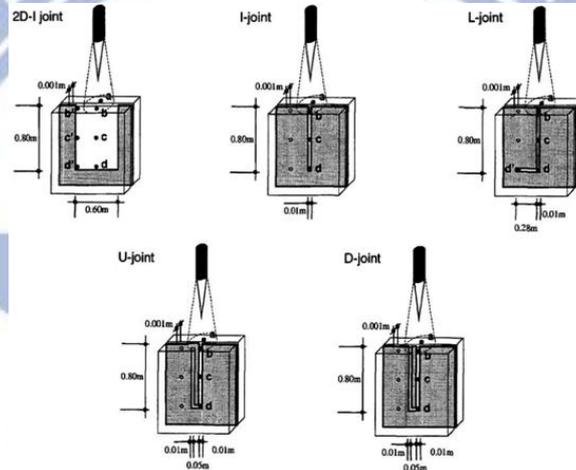


圖 2-11 不同形式裂隙模擬設施示意圖 (Bollaert, 2002)

其試驗成果顯示當水流進入裂隙後受到裂隙形狀及水體波傳速度的影響，於某特定頻率下會發生共振效應，進而產生作用力之放大效應，造成裂隙底部壓力大於岩體之表面壓力(如圖 2-12)；當塊體承受之壓力波動差為向上作用且大於岩塊自重時，即有機會導致岩塊脫離，進而被水流帶走。

當模擬之節理形狀越簡單時，其放大效應越明顯，像是人造節理中形狀最簡單的 I type (參見圖 2-11)，其放大係數約可達到 4 倍之

平均壓力(或 20 倍之絕對壓力)；相對於節理形狀較複雜的 D-type 及 2D-I type (參見圖 2-11)，由於水中氣泡易聚集於彎角處，影響裂隙之共振頻率，裂隙形狀愈複雜放大效果愈小，其放大係數僅約為 1~1.5 倍之平均壓力。

接著將岩體表面所量測到之壓力波動進行頻譜分析，由圖 2-13 中可看出岩體表面壓力波動之頻率範圍大約落在 2Hz 到 500Hz 之間，且頻譜能量密度隨頻率增大逐漸遞減，頻率 100Hz 之能量密度僅約為頻率 2Hz 的百分之一，由此可知在壓力波動中高頻部分之能量密度相對於整體能量密度所占比例非常小，甚至可忽略不計。因此本研究在之後的模擬分析僅以頻率 2Hz 至 100Hz 作為壓力波動之頻率考量範圍。

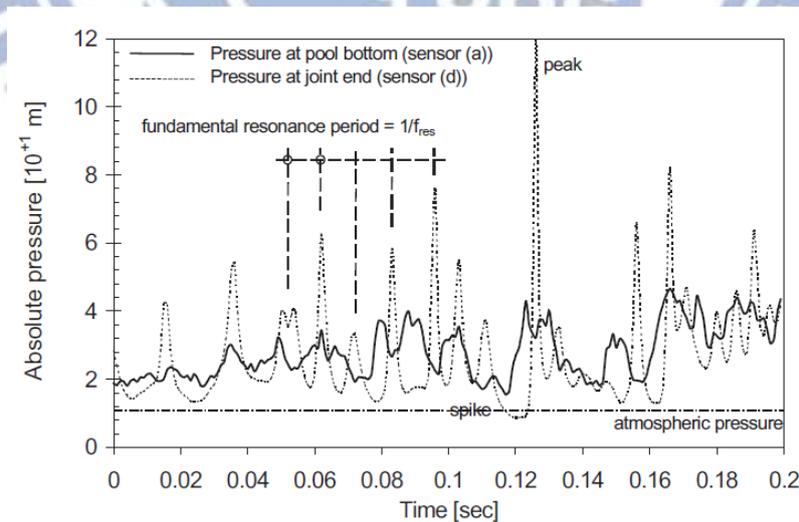


圖 2-12 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖(Bollaert, 2002)

(裂隙為 I type、水流為 developed-jet)

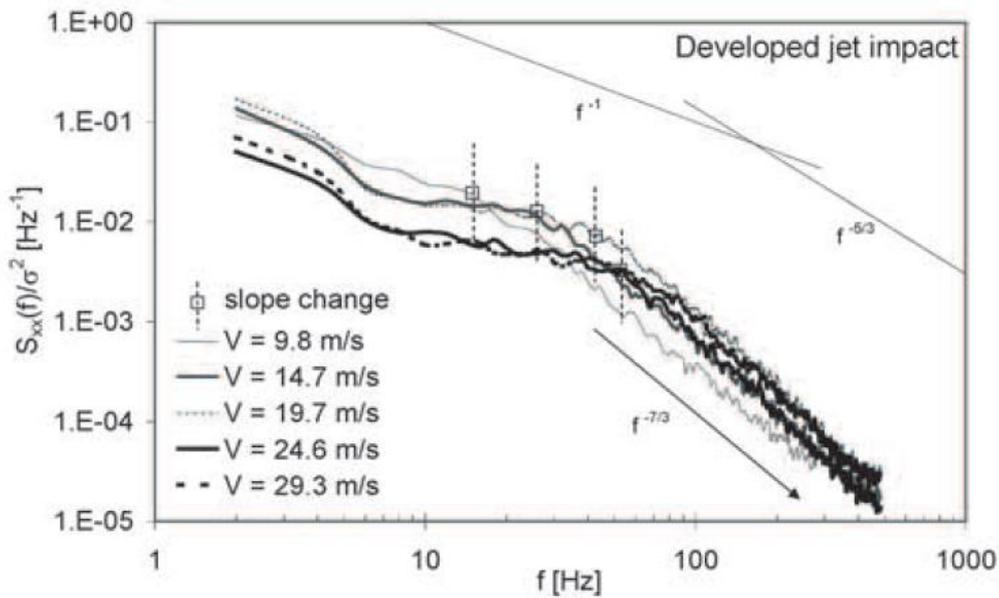


圖 2-13 岩體表面壓力波動頻譜分析  
(水流為 developed-jet)

### 2.3.3 水流於裂隙中之壓力波動傳播試驗

經由理論式 2-7、2-8 可得知壓力波動傳播速率與共振頻率之關係，為求節理裂隙中壓力波動之傳播速率，Müller et al.(2002)建立了水流於裂隙中之壓力波動傳播試驗，以下為試驗簡介：

$$f_{\text{res.close}} = c_{\text{close}} / (4 \times L_f) \cdots \cdots \text{close end} \quad (\text{式 2-7})$$

$$f_{\text{res.open}} = c_{\text{open}} / (2 \times L_f) \cdots \cdots \text{open end} \quad (\text{式 2-8})$$

式中  $f_{\text{res.close}}$ 、 $f_{\text{res.open}}$  分別為當裂隙另一端為閉口或開口時，壓力波動之共振頻率； $c_{\text{close}}$ 、 $c_{\text{open}}$  則分別為當裂隙另一端為閉口或開口時，壓力波動之波速； $L_f$  為節理之破裂長度。

Müller et al.(2003)為模擬水流於裂隙中之壓力傳播行為，建立了一組室內試驗(drop test)，試驗儀器如圖 2-14 所示，此組試驗係藉由活塞之向下運動產生裂隙入口處之水流壓力波動，並藉由量測裂隙中不同距離之壓力大小，可得知當壓力波動在裂隙中傳播時，其壓力波動的傳播速率以及其振幅能量隨傳播距離衰減之情形。此外藉由改變裂隙寬度之大小並進行試驗，即可得到壓力波動的傳播速率與裂隙寬度之相關性，如圖 2-15，當裂隙寬度增加時，壓力波動之傳播速率也隨之增加，其原因在於水流中的微小氣泡易吸附於裂隙四周之牆體上，因此當裂隙寬度較小時，此牆體上之微小氣泡會對水流之傳播速率產生影響，導致壓力波動傳播速率減慢，而隨著裂隙寬度逐漸增大，此影響也隨之逐漸減小，傳播速率也隨之遞增。

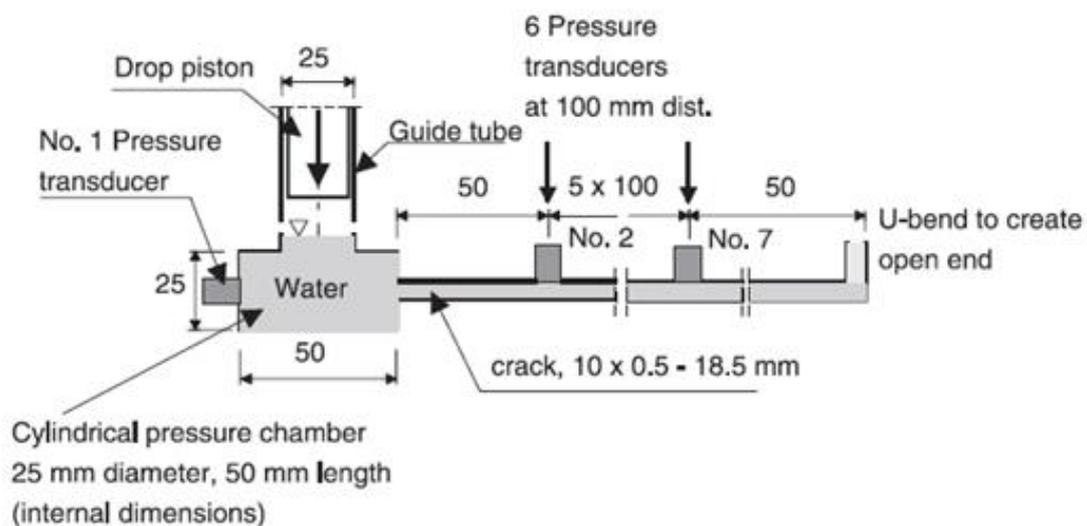


圖 2-14 drop test apparatus

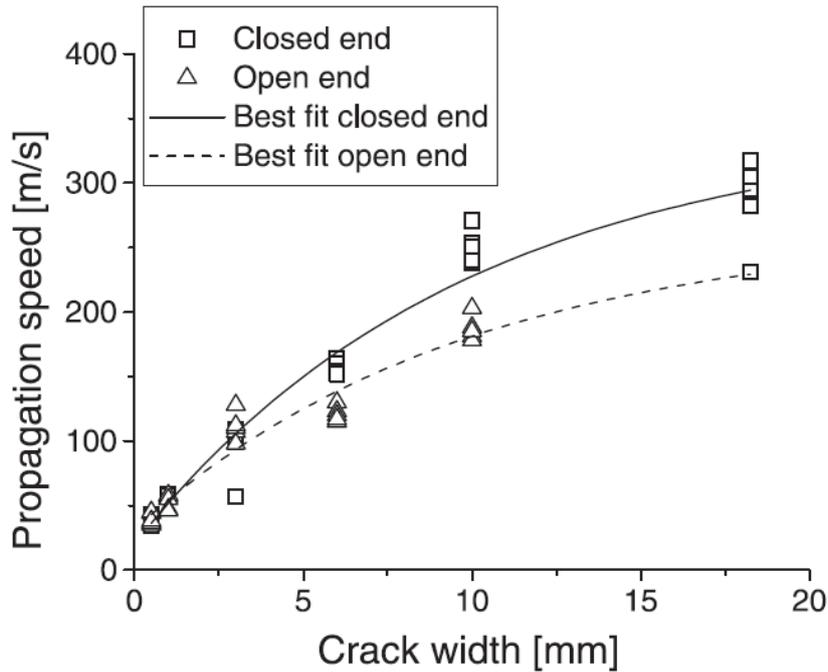


圖 2-15 壓力波動之傳播速率與裂隙寬度之關係圖

## 2.4 Distinct Element Method(DEM)微觀模擬簡介及相關軟體應用

### 2.4.1 Distinct Element Method(DEM)微觀模擬簡介

離散元素法(DEM)於 1971 年由 Cundall 所提出，其目的係為了建構出性質不連續或形狀不規則的試體並加以進行模擬。其理論計算方法係以外顯時間為基礎，並將外顯時間分割成許多細小時階，且假設在這細小時階內之力和運動速度保持不變，再分別去計算以及更新每個時階內各個元素的各種性質，如：位移、力、加速度……等，之後藉由反覆的計算及更新，直到能使模型達到穩定平衡。

此外離散元素法(DEM)最大的特色在於模型的組成是由各元素所聚合而成的，藉由調整各元素本身的性質及排列位置，即可模擬出

想要的模型形狀及材料性質，進而模擬出物體受力、位移、旋轉等運動行為。離散元素法最初主要是被用於解決邊坡滑動、山崩，等不連續面上產生大位移及旋轉之類的問題，而近年來在顆粒流體的問題上也被廣泛的應用。

本研究在模擬工具的選擇上有下列幾點考量，(1)可表現出顆粒材料模型之不連續性(2)允許顆粒材料產生大幅度的位移及旋轉，甚至完全脫離(3)能反應出節理塊與節理塊之間的交互影響(4)計算過程中能自動偵測新的接觸點，並且能消除分離後的接觸點(5)當時間改變時，能表現出塊體中各性質相對應的變化。由於本研究期望模擬出塊體脫離之過程以及節理塊之間的相互影響，因此在方法的選用上，離散元素法(DEM)為優先考量。

#### 2.4.2 Distinct Element Method(DEM)相關軟體及應用

在離散元素法中材料模型是由各元素所聚合而成，並藉由不連續面將材料模型切割成理想中的離散塊體。離散塊體之材料性質可簡單區分為可變形以及不可變形。不連續面上顆粒的接觸點則可分為軟性接觸點(Soft-contact)以及剛性接觸點(Hard-contact)，軟性接觸點可允許接觸點產生變形，且需考慮接觸點之正向勁度，而剛性接觸點則假設材料為剛性體不會產生任何變形；軟性接觸點一般在物體承受高應力、高摩擦力的狀態下使用，剛性接觸點則反之。而經由軟性及剛性

接觸點的變換設定以及顆粒運動計算方法的不同，發展了許多以離散元素法為基礎理論的數值分析軟體，並應用在不同的工程問題上。以下分別針對幾個工程上的應用作介紹：

### (1) 邊坡穩定與山崩行為

岩坡之穩定性通常由岩層的位態、含水量以及地層性質等因素所決定，當岩坡不穩定產生連續地破壞及大尺度的位移時，就有可能會導致山崩以及地層滑動。滑動體的組成係以顆粒流或岩塊為主，而離散元素法對於不連續顆粒材料的建立以及連續破壞行為的模擬都有很高的掌握度，因此相當適合模擬這類相關問題。

Ishida et al.(1987)、Adachi et al.(1991)、Esaki et al.(1999a,b)利用 UDEC 程式模擬分析岩石邊坡的穩定性問題。Deluzarche et al(2003)利用 PFC 微觀模擬岩石邊坡靜態及動態穩定分析，張嘉興(2004)也採用 UDEC 進行岩石邊坡的穩定性分析，並實際去量測斷面及節理面資料，進而模擬現地的地質構造情況。顧承宇(2006)利用 DDA 分析方法進行山崩落石運動機制之模擬，並加入三維雷射掃描技術，使數值產生的地形與現地地形更為貼近，進而提升數值模擬的準確性。陳春華(2008)使用 DDA 分析方法模擬集集地震造成的草嶺邊坡崩塌以了解其破壞行為，發現摩擦角為影響較大之因子，且在低摩擦角時模擬結果與現地崩塌後之地形相當符合。唐昭榮(2010)使用 PFC 軟體來模擬

台灣幾個大型山崩事件，並針對顆粒流的傳送與滑行路徑、堆積區的堆積以及影響區域進行探討。

## (2)地震行為

離散元素法 (DEM) 可表現出當時間改變時，位移與應力的相對應變化，因此對於模擬一個岩體的動態破壞行為，像是斷層的破壞機制，離散元素法為一個不錯的方法，Lorig & Hobbs(1990)利用 DEM 模擬斷層摩擦滑動(frictional sliding)與黏滯滑移(stick-slip)行為，並建議周圍岩體可採用邊界元素法(Boundary Element Method)進行模擬。Victor(2003)以 PFC2D 模擬造山運動發生時，板塊互相碰撞後地表裸露的情況以及應力應變的分佈情況，探討大型破裂帶之應力及位移之狀態。張家偉(2007)利用 PFC 微觀模擬紅菜坪地區於 921 地震時之地滑演化。

## (3)地下開挖與礦場開採

地下開挖與礦場開採都需考慮到開挖面上之穩定性，而開挖面上不同的幾何條件及岩塊形狀都有可能造成大位移的破壞。因此為了模擬出岩塊形狀與性質之不連續性以及岩塊大尺度的位移，常選用離散元素法 (DEM) 作為模擬模型之基礎。Akky et al.(1994)、Barton et al.(1991, 1994)、Bhasin et al.(1996)等人使用 UDEC 模擬分析地下孔穴之設計，Zhu et al.(1996)與 Coulthard et al.(1997)利用 UDEC 與 3DEC 模

擬分析礦場邊坡之穩定性問題。Hadjigeorgiou et al. (2009)使用PFC模擬硬岩的垂直開挖面，並研究其各方向的穩定性及可能的滑動模式。

#### (4)岩床沖蝕

岩床之材料主要以顆粒及岩塊所組成，當顆粒及岩塊受力後，會造成破壞，產生大尺度的位移，因此在模擬岩床沖蝕時，離散元素法(DEM)為優先考慮的方法。李佩鐔(2009)針對嘉義八掌溪及苗栗卓蘭大安溪兩地進行現地勘查，使用軟體 PFC<sup>3D</sup> 針對沖刷機制中磨蝕與顆粒撞擊部分進行模型建立，並對各影響因子做初步的定性描述。羅若瑜(2011)延續李佩鐔(2009)之研究成果將磨蝕與顆粒撞擊模型進行改良，並與室內試驗結果進行對照，增加模型之可靠性以及真實性。鍾里泉(2011)使用 UDEC 軟體針對沖刷機制中塊體抽離的部分進行模型建立，並探討節理位態、節理間距、水流方向，等各影響因子間之相互關係。

#### (5)其他領域方面

由於離散元素法(DEM)本身限制小，可發展的範圍廣，因此近年來在其他領域的應用也越來越廣泛，像是在機械方面的研究，Ferellec et al. (2005)利用 PFC 針對高爐進料系統中散狀顆粒的行為進行微觀模擬。Bwalya 與 Moys(2003)利用 PFC 模擬當在磨粉機中加入媒介物時，其磨製的過程以及磨製速率的變化。此外還有許多，如：

Stephansson et al.(1996)與 Stephansson et al.(2004)以節理岩體與緩衝材料進行核廢料棄置系統的模擬，Yang et al. (2005)使用 PFC 針對壩體破裂的問題進行模擬.....等，應用在各式各樣的問題上，由此可見離散元素法(DEM)其優良的延伸性以及豐富的多樣性。

本研究係利用 PFC<sup>3D</sup> 軟體針對岩床沖蝕中之塊體抽離進行數值模擬，而在眾多 DEM 軟體中選擇 PFC<sup>3D</sup> 的原因有三：(1) PFC<sup>3D</sup> 可利用顆粒組合成各式理想中之形狀(2) PFC<sup>3D</sup> 可模擬出各種力的施加方式(3) PFC<sup>3D</sup> 可表現出裂縫形成的過程，進而表現出節理連通的過程。基於上述原因，本研究選擇 PFC<sup>3D</sup> 軟體做為研究工具。

## 2.5 PFC<sup>3D</sup> 軟體概述

PFC 軟體以離散元素法為基礎，模型係由顆粒與牆所組合而成，顆粒本身可視為剛性，但其接觸點可容許微小區域的重疊(overlap)，藉由接觸點的重疊量以及系統之勁度即可推算出顆粒所受的力及位移，計算流程如圖 2-16 所示。運動開始時，先計算每個時階內顆粒跟牆的位置以及之間重疊量，再經由力與位移的關係式得到接觸力。最後透過牛頓第二運動定律計算出顆粒新的位置及速度，如此不斷循環迭代，直到整個系統穩定收斂。

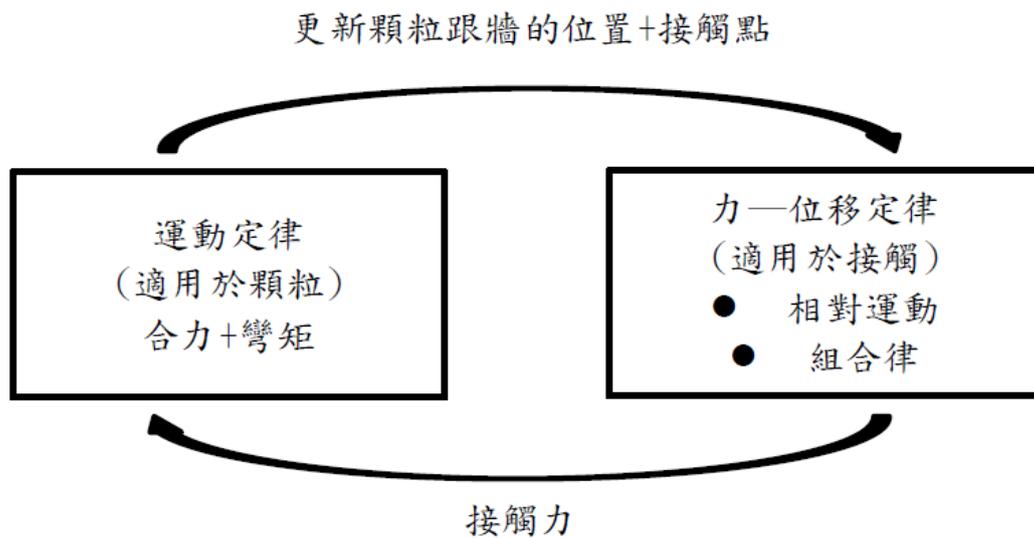


圖 2-16 PFC 計算流程圖 (羅若瑜, 2011)

### 2.5.1 PFC<sup>3D</sup> 運算原理

PFC<sup>3D</sup> 之計算流程係由力-位移定律以及運動定律所組成，以下進行簡單介紹

#### 2.5.1.1 力-位移定律

以力-位移定律為基礎，經由各顆粒之間之位置及重疊量，計算出顆粒彼此之間的接觸力，詳細步驟如下所示：

步驟 1：計算出球與球之間或球與牆之間接觸點的重疊量

(1)球與球接觸中，法向量之方向為兩球心連線之方向，如圖 2-17

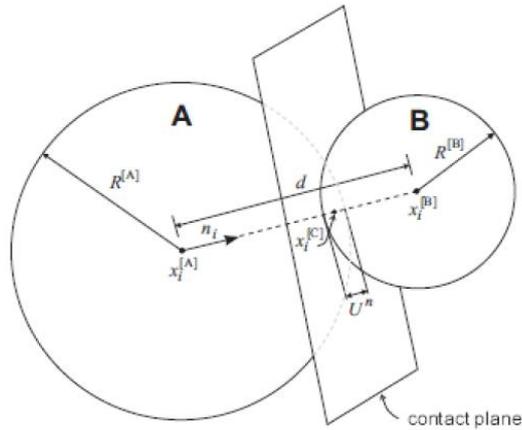


圖 2-17 球與球接觸模型示意圖

$R^{[A]}$ 、 $R^{[B]}$ ：球 A 與球 B 之半徑

$x_i^{[A]}$ 、 $x_i^{[B]}$ ：球 A 與球 B 之球心位置

$d$ ：兩球心之距離

$$d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})} \quad (2-9 \text{ 式})$$

(2)球與牆接觸中，其法向量則為球與牆的最短距離  $d$

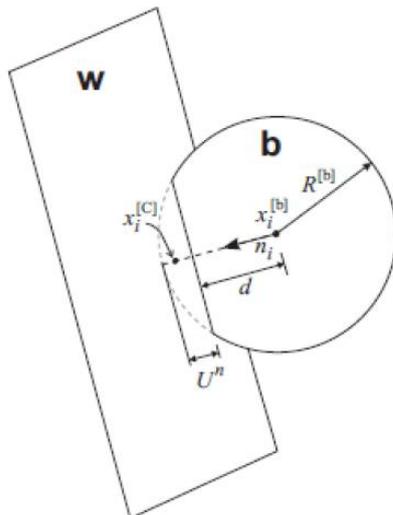


圖 2-18 球與牆接觸模型示意圖

接觸時之重疊量 $U^n$ 其定義為法向量的相對接觸位移：

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d(\text{ball} - \text{ball}) \\ R^{[b]} - d & (\text{ball} - \text{wall}) \end{cases}$$

步驟 2：設定接觸點的勁度模式

接觸點的勁度模式有兩種，可分為線性模式及 Hertz 模式。

(1)線性模式

接觸勁度由正向勁度 $K^n$ 及剪向勁度 $K^s$ 來定義，正向勁度 $K^n$ 及剪向勁度 $K^s$ 則分別由各物體本身的正向及剪向勁度並聯計算得到(如式 2-10、2-11 所示)

$$K^n = \frac{K_n^{[A]} K_n^{[B]}}{K_n^{[A]} + K_n^{[B]}} \quad (2-10\text{式})$$

$$K^s = \frac{K_s^{[A]} K_s^{[B]}}{K_s^{[A]} + K_s^{[B]}} \quad (2-11\text{式})$$

$K_n^{[A]}$ 、 $K_n^{[B]}$  分別為物體 A、物體 B 的正向勁度

$K_s^{[A]}$ 、 $K_s^{[B]}$  分別為物體 A、物體 B 的剪向勁度

(2)Hertz 模式

Hertz 模型為當接觸勁度為非線性模式時使用。此模型係根據 Mindlin(1949)提出之理論，並簡化修改之(如式 2-12、2-13 所示)

$$K^n = \left[ \frac{2G\sqrt{2R}}{3(1-\nu)} \right] \sqrt{U^n} \quad (2-12\text{式})$$

$$K^s = \left[ \frac{2(3G^2(1-\nu R))^{1/3}}{2-\nu} \right] |F_1^n|^{1/3} \quad (2-13\text{式})$$

其中， $G$  為球體之剪力模數； $|F_i^n|$  為正向接觸力之大小； $\nu$  為柏松比； $\bar{R}$  為球體半徑。

### 步驟 3：接觸力的計算

接觸力之行為可分為兩種，一種為顆粒接觸，另一種為鍵結接觸，此兩種行為的差別有兩點，(1)系統勁度的設定，(2)鍵結接觸中的平行鍵結可容許彎矩的發生，顆粒接觸則不行，以下介紹詳細的計算方式，參見圖 2-19。

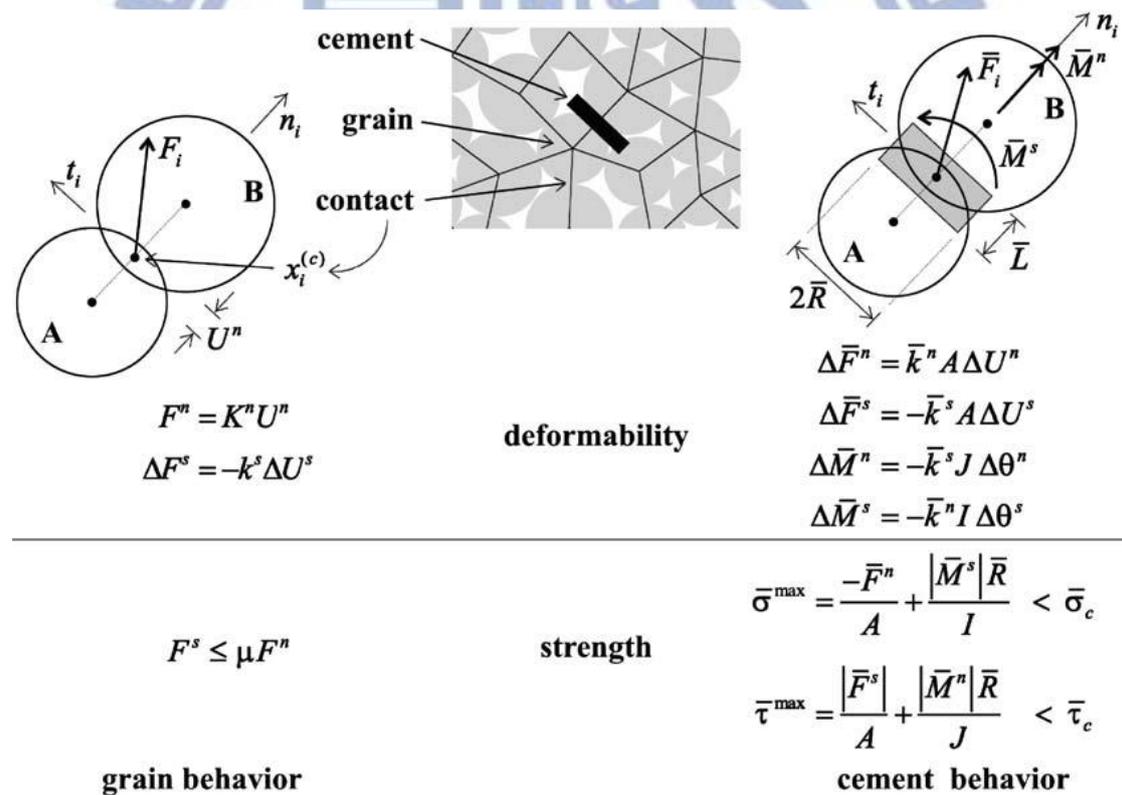


圖 2-19 顆粒與鍵結的力與位移系統  
(Potyondy and Cundall, 2004)

### (1) 顆粒接觸

其系統之正向勁度 $K^n$ 及剪向勁度 $K^s$ 係由各物體本身之勁度所計算而得，而正向接觸力 $F^n$ 則由虎克定律求得(如式 2-14 所示)

$$F^n = K^n U^n n_i \quad (2-14 \text{ 式})$$

$K^n$ 、 $K^s$ 分別為系統之正向及剪向勁度； $U^n$ 為顆粒法線方向的重疊量； $n_i$ 為單位法向量

當接觸點形成時，剪向重疊量 $U^s$ 被設為 0，之後隨著時階的改變會產生相對應的剪向位移 $\Delta U^s$ ，最終經由式 2-15 即可推得剪向接觸力 $\Delta F^s$

$$\Delta F^s = -K^s \Delta U^s \quad (2-15 \text{ 式})$$

### (2) 鍵結接觸

鍵結模式可分為兩種，一種為接觸鍵結(Contact bond)，另一種為平行鍵結(Parallel bond)，鍵結就像是顆粒與顆粒之間的黏膠(cement)，接觸鍵結就像是利用黏膠(cement)將顆粒間之細小接觸點黏住，平行鍵結則像是將顆粒與顆粒之間用圓柱型的黏膠(cement)加以接合。接觸鍵結為點接觸只能傳遞力，而平行鍵結則可以傳遞力及彎矩。圖 2-20 所示：

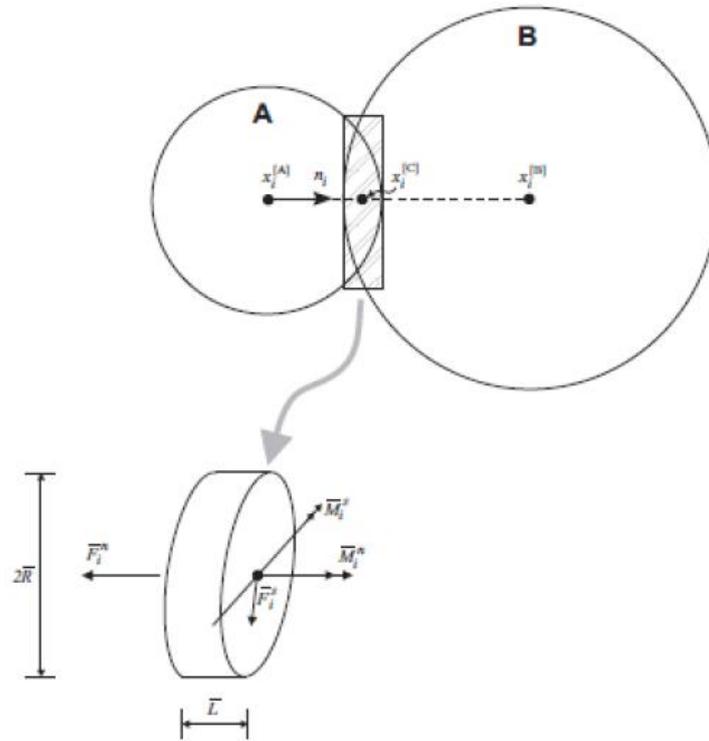


圖 2-20 平行鍵結模型示意圖

一般在設定平行鍵結時，需要給定五個參數，分別為平行鍵結的正向及剪向勁度 $\bar{k}^n$ 、 $\bar{k}^s$ ，平行鍵結的正向及剪向應力強度 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\tau}$ 以及與較小顆粒之間的半徑比 $\bar{\lambda}$ ，由半徑比 $\bar{\lambda}$ 可推得平行鍵結的半徑 $\bar{R}$ ，進而推得每一時階內接觸力和彎矩的增量，如式 2-16 至 2-19 所示：

$$\Delta \bar{F}^n = \bar{k}^n A \Delta U^n \quad (2-16 \text{ 式})$$

$$\Delta \bar{F}^s = -\bar{k}^s A \Delta U^s \quad (2-17 \text{ 式})$$

$$\Delta \bar{M}^n = -\bar{k}^s J \Delta \theta^n \quad (2-18 \text{ 式})$$

$$\Delta \bar{M}^s = -\bar{k}^n I \Delta \theta^s \quad (2-19 \text{ 式})$$

在上述式中其參數 A、I、J 分別代表平行鍵結的橫切斷面積、軸向慣性矩以及平行鍵結的極慣性矩，其計算如下：

$$A = \pi \bar{R}^2, I = \frac{1}{4} \pi \bar{R}^4, J = \frac{1}{2} \pi \bar{R}^4$$

將原本系統上所受到的內力加上在時階內所受到的內力增量即可得到新的接觸力及彎矩，進而代入牛頓第二運動定律，即可得到新的物體加速度、速度以及位移。

### 2.5.1.2 運動定律

當經由力-位移定律計算得到物體之接觸力 (Force) 及彎矩 (Moment) 之後，將其帶入運動方程式，即可得到新的位置及接觸點。運動方程式有兩種，分別係物體平移方程式以及物體轉動方程式，經由平移運動方程式 (如式 2-20、2-21) 可得到新的物體加速度，再將物體加速度帶入式 2-22 即可獲得物體在  $t + \frac{\Delta t}{2}$  時之速度，並藉由式 2-23 即可求得物體在時間  $t + \Delta t$  時的新位置及新接觸點。

$$F = m(\ddot{x} - g) \quad (2-20 \text{ 式})$$

$$\ddot{x} = \frac{F}{m} + g \quad (2-21 \text{ 式})$$

$$\dot{x}^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{x}^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left(\frac{F}{m} + g\right)\Delta t \quad (2-22 \text{ 式})$$

$$x^{(t+\Delta t)} = x^{(t)} + \dot{x}^{(t+\frac{\Delta t}{2})}\Delta t \quad (2-23 \text{ 式})$$

式中  $F$  為合力； $m$  為物體質量； $g$  為重力加速度； $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$  則分別為物體的速度及加速度

而物體的轉動運動方程式 (如式 2-24)

$$M = \dot{H} \quad (2-24 \text{ 式})$$

M：合力矩； $\dot{H}$ ：角動量

針對三維的球體，由於其三方向的慣性矩(I)都相同，因此可簡化為 2-25 式，並藉由 2-26 式、2-27 式，轉化並計算出物體的角速度 w

$$M = I\dot{w} = \left(\frac{2}{5}mR^2\right)\dot{w} \quad (2-25 \text{ 式})$$

$\dot{w}$ ：角加速度； w：角速度

$$w^{(t+\Delta t)} = w^{(t)} + \dot{w}^{(t+\frac{\Delta t}{2})}\Delta t \quad (2-26 \text{ 式})$$

$$w^{(t+\Delta t)} = w^{(t)} + \frac{M^{(t+\frac{\Delta t}{2})}}{I}\Delta t \quad (2-27 \text{ 式})$$

最終經由牛頓第二運動定律推得物體新的位移及接觸點後，再代入力-位移定律，如此不斷循環計算直至物體達到穩定平衡為止。

## 2.6 綜合討論

近年來由於全球氣候變遷，造成氣候不穩定，再加上台灣本身降雨強度就大，常出現豪大雨，導致底面河床被沖蝕掏空、進而威脅到跨河構造物的安全。有鑑於此，為解決岩床沖蝕的問題，眾多學者針對岩床沖蝕進行研究及整理並歸納出四種主要的機制，分別為：剪力磨蝕、顆粒彈跳撞擊、塊體抽離以及穴蝕作用。當河床面岩盤之節理間距在 1m 以下時，主要的沖刷機制將為岩塊抽離作用。為了解岩塊抽離沖蝕之微觀機制與影響因素，本研究因此嘗試採用顆粒流數值模

擬的方法進行研究，期望能克服實驗室試驗不容易以取得一致性（重複性）不擾動試體進行控制條件下之沖蝕試驗，藉由在數值模擬中虛擬試體能任意建置與控制之優點，運用顆粒流數值模擬的方法以執行「虛擬沖蝕試驗」，找出影響因子與沖蝕機制之間的相關性。

李佩錚(2009)以及羅若瑜(2011)利用 PFC<sup>3D</sup> 軟體針對剪力磨蝕、顆粒彈跳撞擊兩種沖蝕機制進行虛擬沖蝕試驗，並針對各種影響因子進行探討。鐘里泉(2011)曾利用 UDEC 模擬了沖蝕機制中的塊體抽離，並針對節理的間距、大小及傾角進行討論。本研究為克服 UDEC 在力的施加及岩橋建立等方面之限制，於是嘗試採用 PFC<sup>3D</sup> 軟體建立塊體抽離之數值模型，進行模擬分析，期望能瞭解塊體抽離機制中之影響因子，繼而提出岩質河床塊體抽離沖刷之微觀數值模擬與簡化分析。

## 第三章 研究方法與規劃

本研究以數值模擬為方法，PFC<sup>3D</sup>軟體為工具，針對岩床沖刷機制中塊體抽離的部分進行模擬。在進行塊體抽離機制之模擬前，必須先進行一些前置作業，因此本章分別針對試體的建立、節理面上的行為以及壓力波動的施加進行研究與討論，並根據岩床的現地情形建構出針對塊體抽離機制的模擬試體，進而開始模擬。

本章分為三節，3.1節介紹如何建立基本模型；3.2節介紹如何模擬塊體抽離；3.3節說明模擬內容之規劃。先就基本模型之組成方式作介紹及討論，且根據現地不同岩體性質及地質條件做調整，以完成塊體抽離模擬之前置作業，繼而進行後續承受壓力波動荷載之模擬。

### 3.1 基本模型建立

為模擬岩體中之塊體抽離，本研究需先建立一基本模型，此基本模型符合以下的幾個條件：(1)虛擬試體需由塊體所組成，(2)可針對每一塊體的大小及重量進行控制及調整，(3)能隨著模擬試體條件的不同加以改良，得到接近現地條件的虛擬試體。以下介紹基本模型的建立流程。

### 步驟 1. 顆粒集合體建立

首先建立一個顆粒半徑為 0.0625m，顆粒數為 28×28×16(行×列×高)的顆粒集合體；為能順利針對每一塊體的大小及重量進行控制，此顆粒集合體採用規則排列中的最密堆積排列法，最終所得到的實際模型尺寸為 3.562×3.12×1.656(m)(長×寬×高)，如圖 3-1 所示。

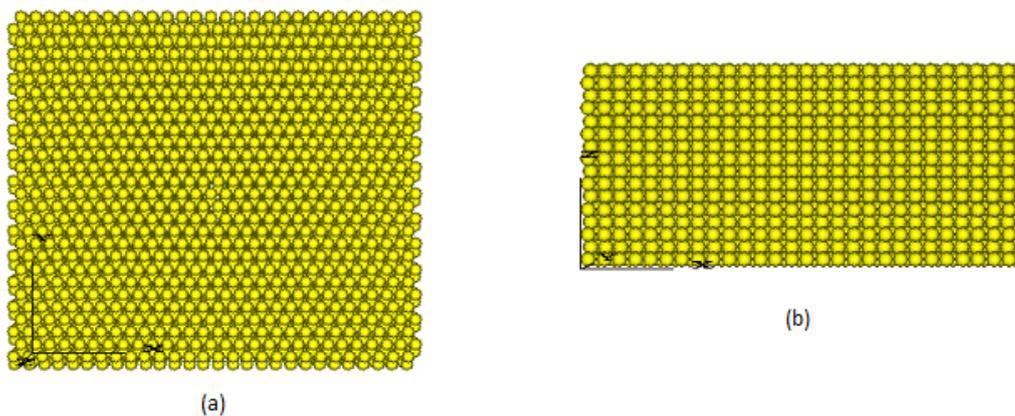


圖 3-1 顆粒集合體(a)俯視圖(b)側視圖

### 步驟 2. 邊界建立

由於 PFC<sup>3D</sup> 係以顆粒為單位，在規劃試體時，為能準確地控制試體的邊界以及每一塊體的實際質量，本研究以顆粒數作為選取範圍時之判斷標準。在邊界的建立上，為了減少塊體在抽離時所受到的邊界效應，本研究將顆粒集合體的外圈(寬度為顆粒數 2)膠結(clump)在一起，並加以固定(fix)，形成此顆粒集合體的邊界(如圖 3-2 所示，綠色區塊為膠結的部分)。

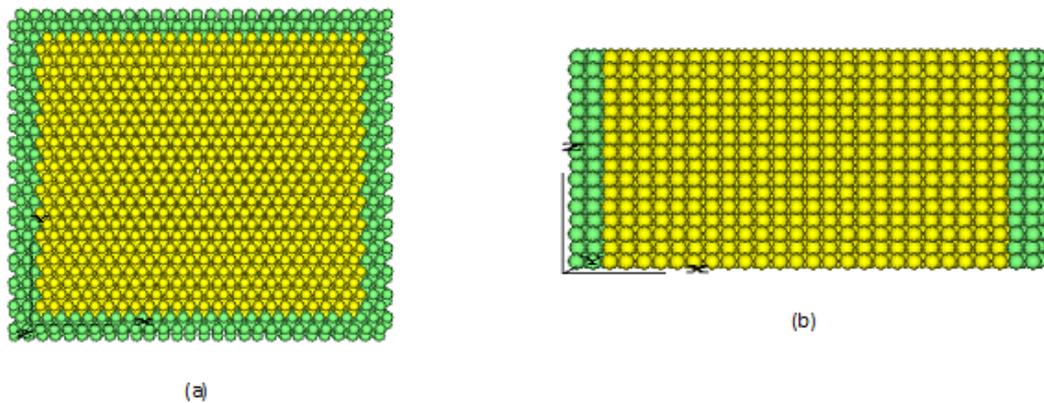


圖 3-2 含有邊界顆粒集合體(a)俯視圖(b)側視圖

### 步驟 3. 塊體建立

本研究模擬之對象為塊體抽離，因此先針對塊體建立之方法進行討論，建立塊體的方法有很多種，像是在顆粒間加入鍵結、提高摩擦係數……等，都可將顆粒膠結為塊體。本研究採用的方法係利用 PFC<sup>3D</sup> 中 clump 指令，將顆粒與顆粒之間膠結起來以形成塊體。以下將簡單的介紹 clump 之基本性質以及使用方法。

在使用 clump 時，須先指定一個範圍或指定顆粒的編號，當指定完成後，clump 會將範圍內顆粒與顆粒之間的距離固定(fix)住，形成塊體。塊體邊界上的顆粒可允許極小幅度位移的調整，但仍可視為剛性體，無論承受多大的應力都不會遭到破壞。而由於 clump 內部顆粒間的距離為固定，所以在運算時內部顆粒的計算都將被跳過，可節省

大量的運算時間。基於以上各個有利因素，本研究選擇 clump 做為塊體建立的方法。並藉由重複指定範圍並設定為 clump 之方式，建立了內含塊體（代表岩塊）數為  $3 \times 3 \times 2$  的虛擬岩體試體，每一塊體由顆粒數為  $8 \times 8 \times 8$  (長 $\times$ 寬 $\times$ 高)之顆粒集合體所構成，如圖 3-3，作為塊體抽離模擬的塊體基本模型。

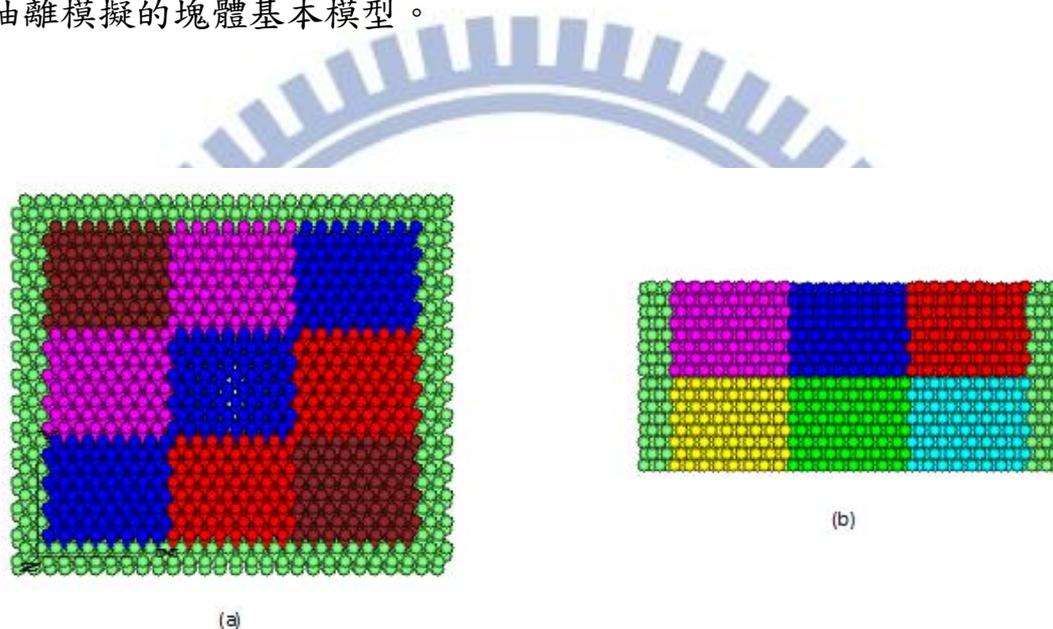


圖 3-3 基本模型的建立(a)俯視圖(b)側視圖

#### 步驟 4. 節理面設置

當基本模型建立完成後，下一步即為塊體與塊體之間節理面的設置，在設置方法上，採用 PFC<sup>3D</sup> 中的指令 smooth joint 進行節理面行為的模擬。而節理面設置的詳細過程以及節理面上岩橋的模擬方法，將於下一章討論之。

### 3.2 岩床塊體抽離之模擬

在完成基本模型之建構後，下一步即是對塊體抽離機制進行模擬，圖 3-4 為模擬試驗之流程圖。第一部分為基本模型之建立，後續並以此基本模型為基礎，分別就不同的現地條件進行調整，進而建立岩床塊體抽離之模擬試體，試體建立完畢後，再於塊體與塊體之間鋪上節理面及岩橋，至此塊體抽離機制模擬的前置作業告一段落。接著於預定的塊體質心上施加波動壓力，觀察並記錄其塊體抽離過程，探討不同因子的影響，並進行結果分析與討論。



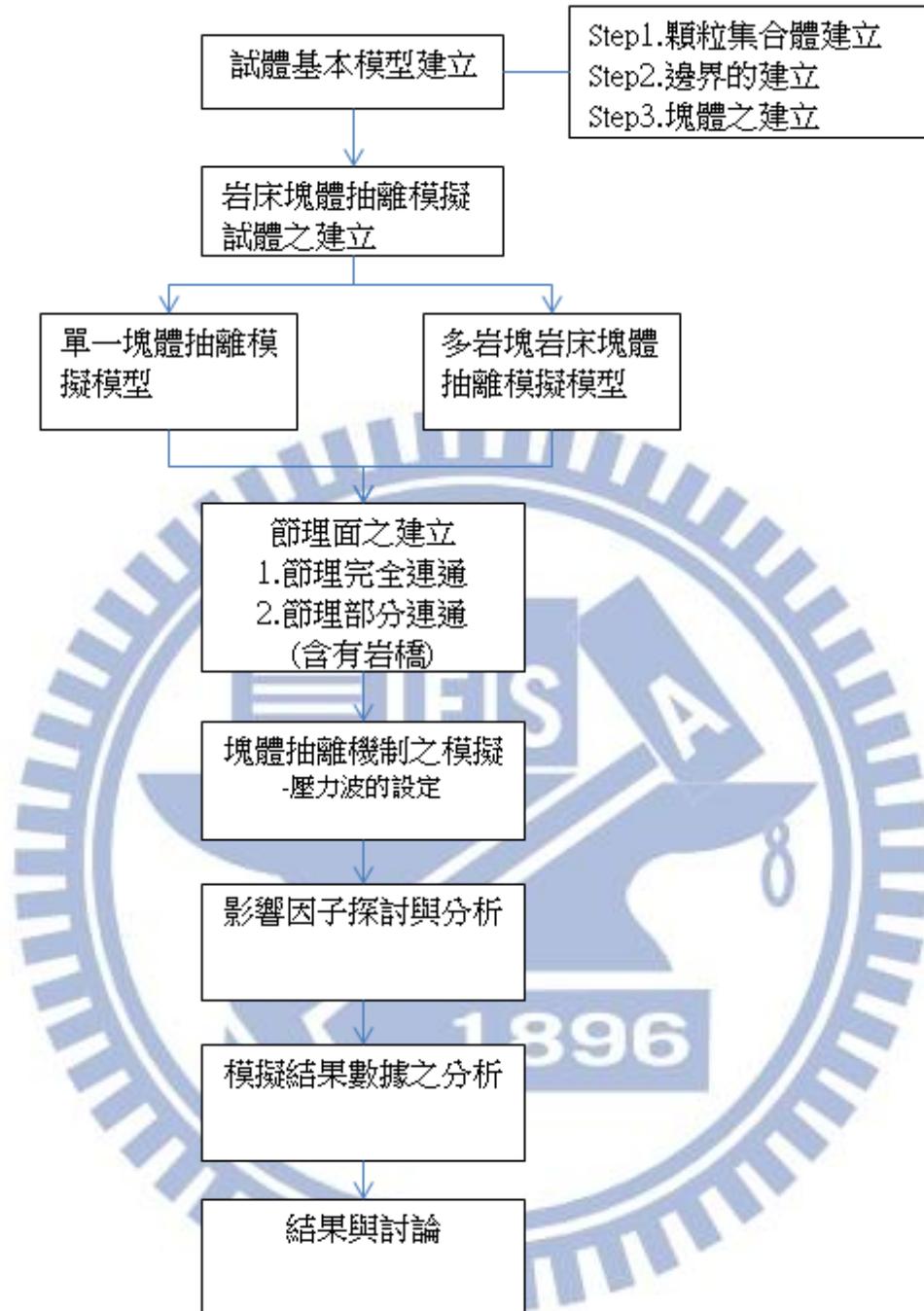


圖 3-4 模擬試驗流程圖

### 3.2.1 虛擬岩石

在採用 3.1 節的方法建構完基本試體模型後，下一步為根據現地岩石材料之巨觀力學參數，標定虛擬岩石試體對應之微觀力學參數。

就岩石材料之模擬對象，參考大安溪軟岩河床劇烈沖刷之案例（國立交通大學防災與水環境研究中心，2010），以大安溪河床卓蘭層之岩性為模擬對象。針對該劇烈沖刷河段實際軟岩岩心之室內試驗，可由其力學參數(如表 3-1)以及應力應變曲線(如圖 3-5)以標定虛擬岩石試體對應之微觀力學參數。羅若瑜(2011)曾運用 PFC<sup>3D</sup>，針對該劇烈沖刷河段岩層，模擬顆粒撞擊磨蝕及剪力磨蝕之行為，其研究作業已完成微觀數值模擬時所需之微觀參數標定。本研究引用羅若瑜標定得之微觀參數，用於岩床塊體抽離之微觀模擬。

根據現地情況以及模擬條件的不同，本研究分別考慮兩種虛擬試體，分別為單岩塊虛擬試體以及多岩塊岩床虛擬試體，以下進行詳細介紹。

表 3-1 軟岩材料之力學參數行為

(國立交通大學防災與水環境研究中心, 2010)

參數 岩體	圍壓 MPa	楊氏係數 Y(MPa)	尖峰強度 P(MPa)	應變%	強度參數	
					c (MPa)	Φ (度)
軟岩 材料 A	0.03	13.49	4.70	0.455-	1.8	50
	0.5	27.65	14.29	0.663		
	1	40.95	20.51	0.475		

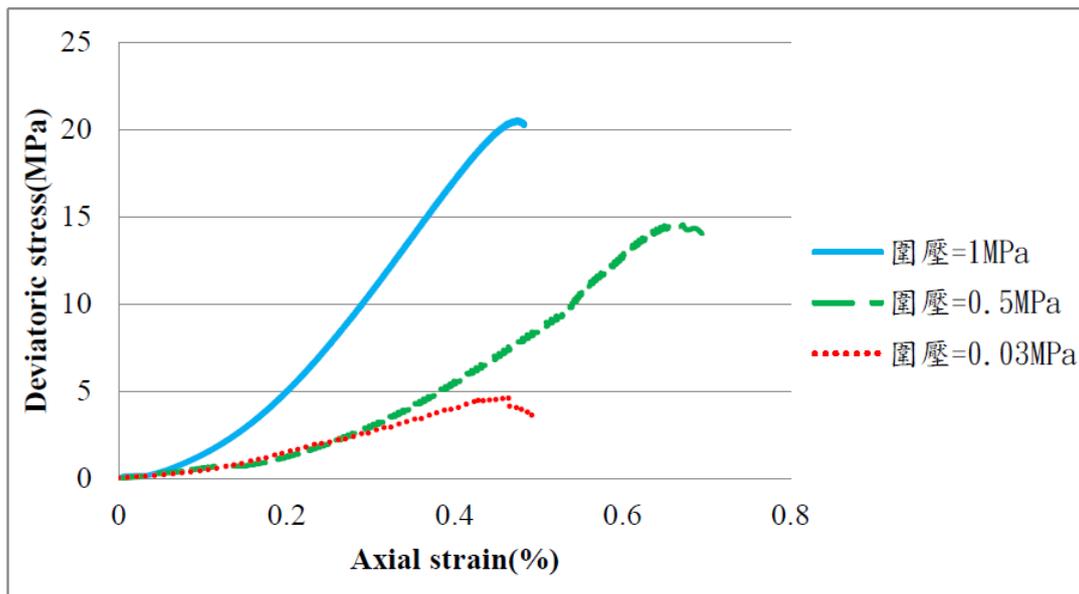


圖 3-5 軟岩材料之三軸試驗應力應變關係圖

(國立交通大學防災與水環境研究中心, 2010)

### 3.2.1.1 單岩塊虛擬試體之抽離模擬

單岩塊虛擬試體為模擬在一個富有豐富節理的地質條件下，當其中任一岩塊周圍開口不連續面完全貫通時，受到水流的壓力差影響，岩塊是否能夠脫離？岩塊抽離的過程又會是如何？然而若在類似地質條件下，岩塊周圍的不連續面並未完全貫通（只有部分連通，中間仍存在岩橋）時，塊體抽離的行為又會如何？受到波動壓力作用過程是否能夠上舉力作用而逐步抬升？岩橋將有如何變化？為了模擬上述行為，因此在模擬單塊虛擬試體抽離時本研究在節理的設置上分成節理完全連通以及部分節理連通兩種情形分別討論。

針對單岩塊塊體抽離之模擬，本研究採用 3.1 節所建立的基本模

型，繼而在塊體周圍設置節理面(如圖 3-6，紅色部分為節理面)，隨後施加壓力差於正中央塊體之質心上，並記錄其各項資料，進行討論分析。

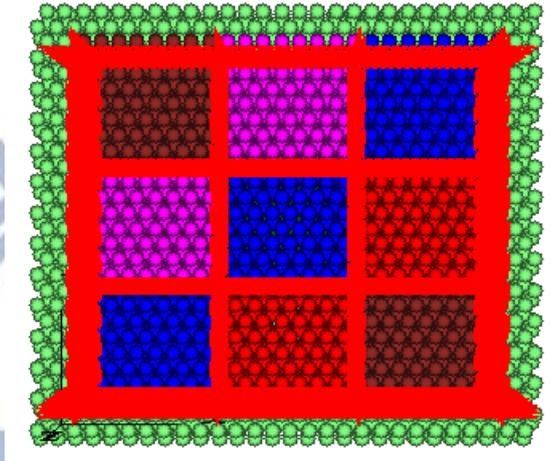


圖 3-6 單一塊體抽離模擬試體俯視圖

### 3.2.1.2 多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬

多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬乃為探討在節理發達的地質條件下，當所有的塊體都受到水流作用時，塊體被陸續抽離的過程。而在塊體被陸續抽離的過程中，塊體之間的交互作用以及節理面上的岩橋也扮演著不可忽略角色，因此在模擬時除了岩塊本身的特性外，節理面上岩橋的特性也相當重要。

首先考量虛擬試體之建構，虛擬試體的建立步驟與基本模型之建立方法雷同，步驟 1. 先建立半徑為 0.0625m，顆粒數 52×28×16(行×列×高)的顆粒集合體，採最密堆積。步驟 2. 建立周圍邊界。步驟 3. 建

構塊體數為  $6 \times 3 \times 2$  (行 $\times$ 列 $\times$ 高)的試體(如圖 3-7)，步驟 4.在塊體與塊體之間設置節理面(如圖 3-8)，步驟 5.施加壓力差於岩床表面塊體之質心上，並觀察塊體抽離的情形。

待虛擬試體建立完成後，下一步即為施加波動壓力於塊體上，以進行塊體抽離的模擬，波動壓力的施加方式將在下一小節中討論。

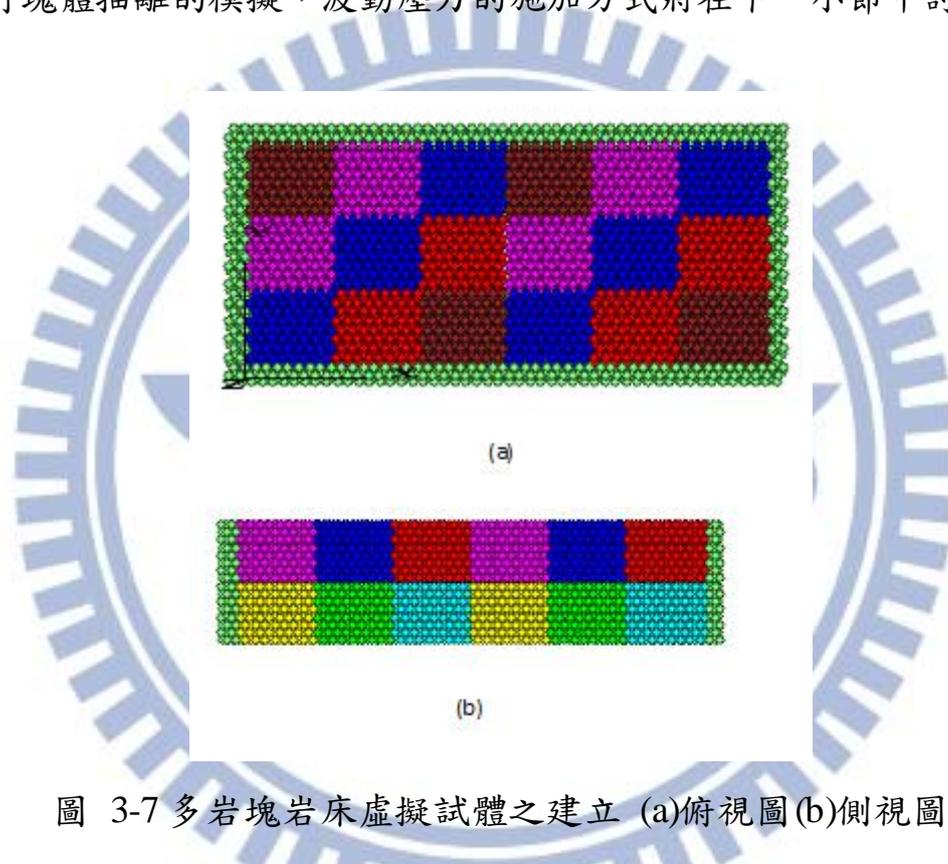


圖 3-7 多岩塊岩床虛擬試體之建立 (a)俯視圖(b)側視圖

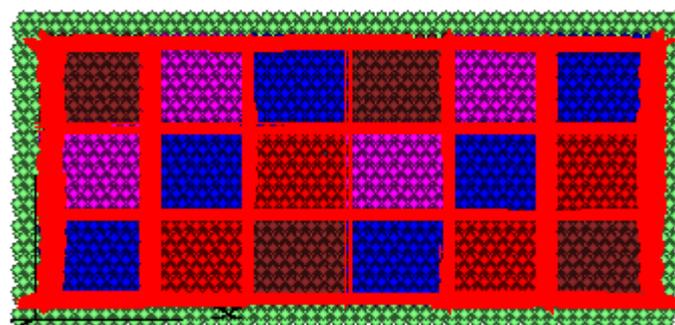


圖 3-8 多岩塊岩床虛擬試體模型

### 3.3.2 壓力波動的設定

本研究壓力波動的假設條件係參考 Bollaert(2002)針對人造節理沖蝕試驗之實際量測結果，由試驗中可得到岩體表面及裂隙底部波動壓力的比較圖(如圖 3-9 所示)。下一步將兩者相減即可得到裂隙底部與岩體表面之間的壓力波動差(如圖 3-10 所示)，當壓力波動差為正時，代表裂隙底部壓力大於岩體表面之壓力，產生向上作用力，容易造成塊體抽離的發生，反之當壓力波動差為負時，則代表裂隙底部壓力小於岩體表面之壓力，產生向下的作用力，阻止塊體的抬升。

由圖 3-10 中可發現當時間座落於 0.1(s)~0.16(s)之間時，壓力差波動振幅之中間值大於零，由此可推測出當時間座落於這段區間時，容易造成塊體抽離的發生。為模擬塊體抽離的行為，本研究將此段的壓力差波動加以簡化並延伸，形成具有固定頻率之壓力差波動(如圖 3-11)，同時將此固定頻率之壓力差波動施加於塊體上，且針對塊體抽離的行為進行模擬。

本研究在此將壓力波動差振幅的中間值定義為壓力波動平均差。在後面的章節將針對此壓力波動差的頻率及壓力波動平均差的變化進行更深入的討論。

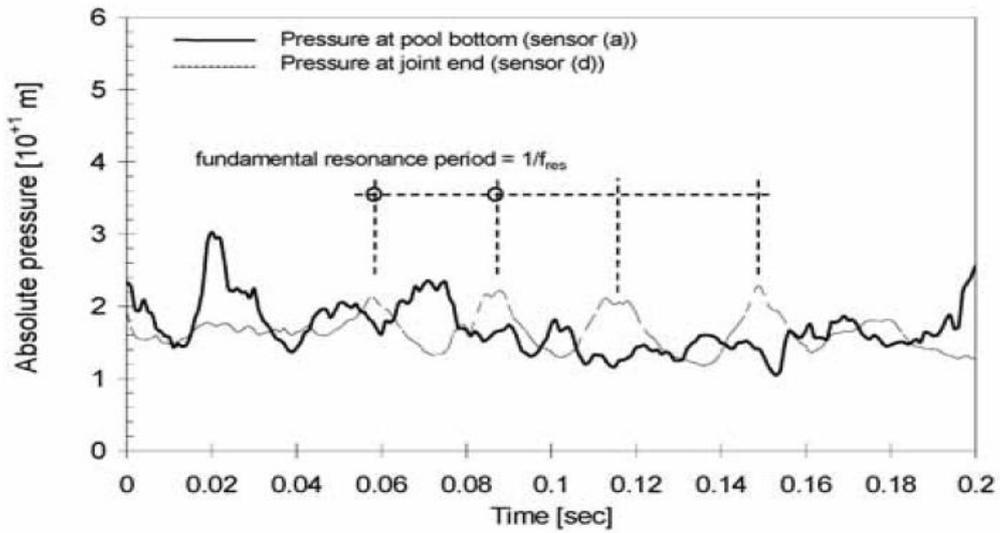


圖 3-9 岩體表面及裂隙內部波動壓力比較圖(Bollaert, 2002)

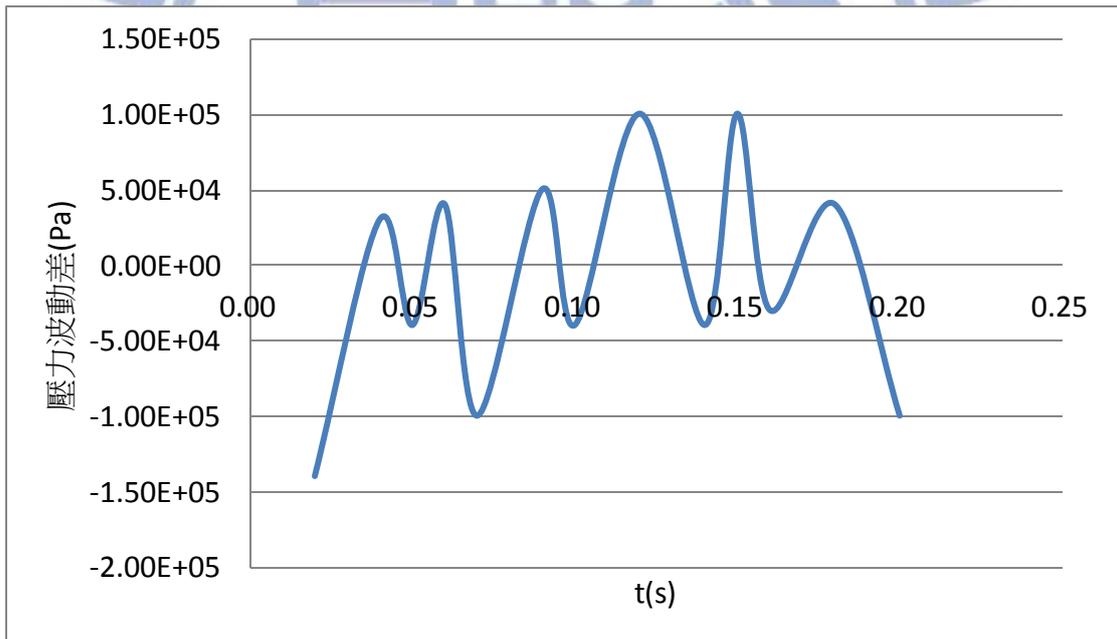


圖 3-10 岩體表面及裂隙內部壓力波動差

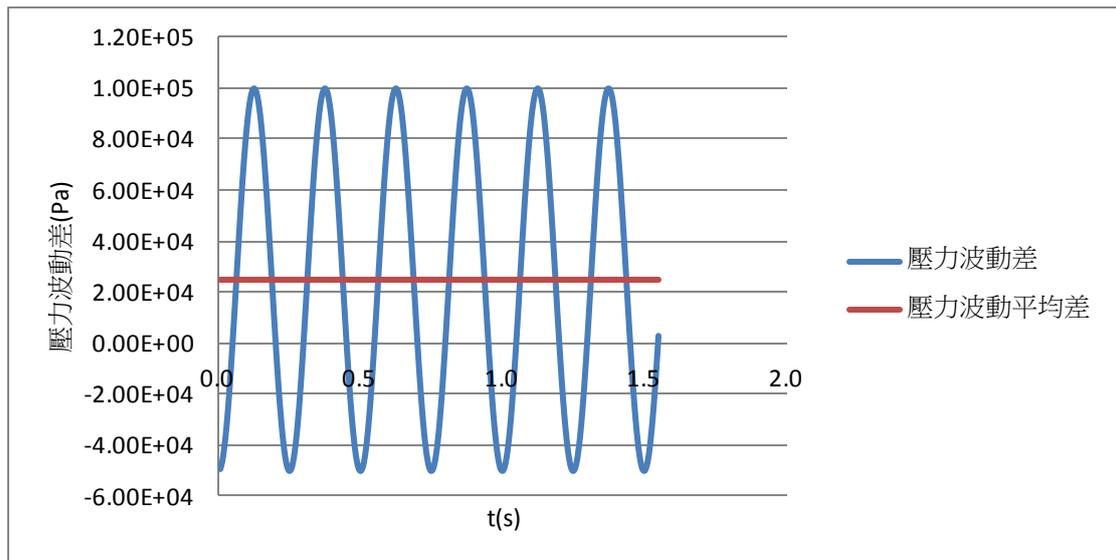


圖 3-11 固定頻率之壓力波動差圖

### 3.3 研究試驗規劃

本節先分別就基本模型建立、節理面行為以及壓力波動之施加進行模擬分析及討論，並將其整合在一起，進而完成塊體抽離機制模擬的前置作業。後續本研究將以單岩塊及多岩塊岩床虛擬試體為基礎，針對三種不同試驗情況進行模擬及分析。第一種情況為當單岩塊虛擬試體周圍節理面為連通時，施加壓力波動荷載於正中央塊體之質心上，記錄此受力塊體之運動行為。第二種情況則假設此單岩塊虛擬試體周圍節理不為完全連通而呈部分連通時，探討節理面上岩橋對塊體之抽離行為產生之影響，最後一種情況假定多岩塊岩床虛擬試體同時受到壓力波動作用陸續抬升，此時塊體間之相互作用在抽離過程中扮演著什麼樣的角色，針對上述的情形，本研究進行模擬及分析，以下為模

擬試驗規劃，詳細分析結果參見下一章。

第一種情況為模擬當塊體周圍節理完全連通時塊體抽離之行為及過程，並對影響因子加以探討。在此先討論壓力波動之影響因子，分別就不同的節理面勁度參數、壓力波動平均差、壓力波動差的振幅及頻率進行試驗模擬。

在影響因子探討部分，先將壓力波動平均差分為 25000(Pa)、20000(Pa)、10000(Pa)，3 組試驗進行模擬。壓力波動差振幅則分為 75000(Pa)、100000(Pa)、125000(Pa)、150000(Pa)。4 組試驗，並將此 4 組試驗分別就不同的頻率 2、4、8、12、24、32、40、80、120、160、200、500(Hz) 進行模擬分析，可得到塊體平均上舉速率，繼而探討上述影響因子與塊體平均上舉速率之間的相關性。提出一組岩質河床塊體抽離沖刷之微觀數值模擬模型，經此模擬模型判斷出當塊體受到壓力波動時塊體是否會抽離，且估算出塊體抽離的上舉速率以及所需的時間。

在第二種模擬情況中，單岩塊虛擬試體周圍節理為部分連通(含有岩橋)。因此先就節理面上岩橋之各個影響因子進行模擬及探討，在影響因子的探討上，先將岩橋在節理面上所占的比例(Area\_ratio)分為 0、0.3、0.5、0.8、1，等 5 種條件進行分析，接著改變岩橋上凝聚力(cohesion)之大小 1000(N)、20000(N)、30000(N)，以及接觸鍵結

強度 1000(N)、10000(N)、20000(N)、30000(N)、40000(N)、100000(N) ，  
並就不同壓力波動平均差之振幅 25000(Pa)、50000(Pa)、75000(Pa) 、  
100000 (Pa)進行試驗模擬，經由試驗結果分析可得知各影響因子在岩  
橋中所扮演的角色以及對塊體上舉速率所造成的影響。

在第三種模擬情況中，對多塊體抽離進行模擬，探討岩橋設置之  
變異性以及節理面傾角之影響，岩橋位置之變異性是藉由改變鋪設圓  
盤 (disk)半徑的大小來加以控制。因此本研究將圓盤半徑(radius)的大  
小分為 0.005m、1m、1.5m，等 3 組進行試驗；節理面之傾角則分為  
90°、75°、60°，等 3 種角度進行模擬。探討當上述影響因子改變時，  
會對塊體的抽離速率造成之影響，繼而定出塊體上舉速率之門檻值，  
詳細試驗結果參見下一章。

## 第四章 節理設置及參數探討

在塊體抽離機制(plunking)的行為中，當塊體承受之作用力來源包括上舉力（向上作用），塊體本身重力（向下作用）以及塊體周圍節理面之摩擦阻抗。於數值模擬中，塊體本身重力受密度大小或塊體尺寸所控制，節理面上之摩擦阻抗則與節理岩橋以及周圍塊體的相對移動關係有關，本章中針對塊體周圍之節理面加以討論。

本章分為四節，先描述 PFC<sup>3D</sup> 軟體中節理面之設置方法，並藉虛擬直剪試驗進行模擬，繼而將岩橋設置於節理面上，討論及分析岩橋有關參數之影響。

### 4.1 節理設置方法

影響節理面行為之因素除了節理面本身之性質，如：摩擦係數(friction)、正(剪)向勁度、凝聚力(cohesion)等外。其他外在因素像是塊體顆粒大小、周圍塊體之性質等，都會對節理面上之行為產生影響。

PFC<sup>3D</sup> 軟體中可採用兩種方法來模擬節理行為：第一種為 JSET，設定方式為指定一個平面或是範圍，程式會搜尋指定平面上所有的接觸鍵結(contact bond)，並重新給定鍵結新的性質，隨著鍵結上參數設定的不同，可將接觸鍵結(contact bond)上之強度調弱形成節理，如有

需要，也可再將局部之接觸鍵結強度調高作為節理面上之岩橋(rock bridge)，隨著設定參數之強弱，接觸鍵結(contact bond)於節理面之力學行為上也扮演不同的角色。

第二種模擬節理行為的方法為採用 smooth joint，其設定方式同樣為先指定一個平面，並判斷相鄰兩顆球中心點之連線是否通過此平面，若有則將兩顆球標註起來，進一步判斷被標註的兩顆球之間是否存在接觸點，是的話可重訂給定此接觸點一個新的性質，繼而模擬不同的節理面情形。

本研究針對節理面之設置係採用 smooth joint，原因與 smooth joint 上顆粒之運動行為以及 smooth joint 上力的計算方式有關，以下就 smooth joint 節理面之設定方式及行為進行更進一步的討論及比較。

當接觸點經由設定轉變為 smooth joint 後，可假定為一個和 smooth joint 平行的剖面 (cross-section)，如下圖 4-1 所示，藉由該剖面與 smooth joint 之間之相對位移增量，並搭配 smooth joint 正向與剪向之勁度，則可求出節理面上之正向力與剪向力，其詳細計算方式如下所示：

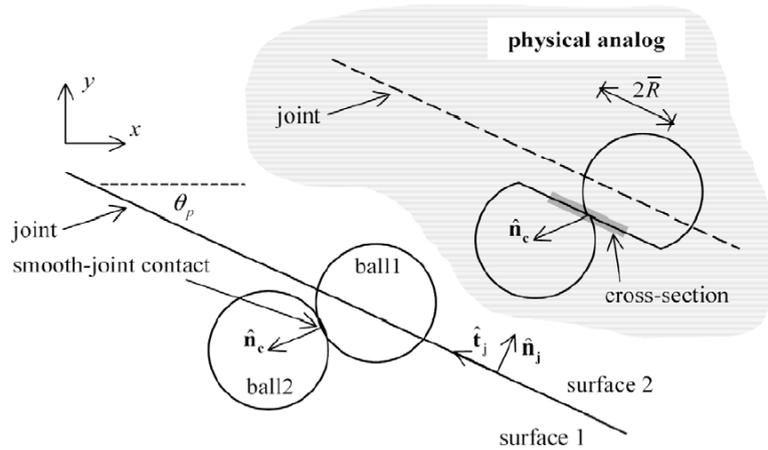


圖 4-1 smooth joint 上顆粒的運動行為

$$A = \pi \bar{R}^2$$

$A$  = 剖面的面積

$\bar{R} = \lambda \min(R^{(A)}, R^{(B)})$ ,  $R^{(A)}, R^{(B)}$  為相鄰兩顆球的半徑,  $\lambda$  為預設係數。

$$F'_n = F_n + \bar{k}_n A \Delta U_n^e \quad (\text{式 4-1})$$

$$F'_s = F_s - \bar{k}_s A \Delta U_s^e \quad (\text{式 4-2})$$

$\Delta U_n^e$ 、 $\Delta U_s^e$  為顆粒在彈性模式下時，剖面相對於 smooth joint 在正向及剪向的位移增量

$F'_n$ 、 $F'_s$  為節理面上的正向力以及剪向力

$\bar{k}_n$ 、 $\bar{k}_s$  為節理面上的正向勁度以及剪向勁度

在顆粒之間沒有任何鍵結作用情況下，當  $|F'_s| < (F_s^* = \mu F_n)$  時：

$$|F_s| = F'_s,$$

當顆粒之間產生滑動後：

$$|F_s| = F_s^*$$
$$F_n = F_n + [\Delta U_s^* \tan \Psi] \bar{k}_n A = F_n + \left( \frac{|F_s'| - F_s^*}{\bar{k}_s} \right) \bar{k}_n A \quad (\text{式 4-3})$$

$\Psi$ ：膨脹角 (dilation angle)

由此推論正向力  $F_n$  及剪向力  $F_s$  之力量變化，係受到 cross-section 與 joint 之間相對位移變化的影響，與顆粒大小無關，因此在模擬塊體抽離時可不考慮顆粒大小的影響。而為證明此推論為真，本研究建立虛擬直剪試驗進行模擬。

## 4.2 虛擬直剪試驗模擬

前節經由 smooth joint 的計算邏輯推論出正向力與剪應力的大小並不會隨著節理面上顆粒大小的不同而有所改變，為印證此推論，本研究設計了一組虛擬直剪試驗做檢核

### 4.2.1 虛擬直剪試驗設計

#### 步驟 1. 顆粒集合體建立

本試體採最密堆積，建立顆粒半徑為 0.01m、上層顆粒數  $20 \times 10 \times 2$ ，下層顆粒數  $30 \times 10 \times 2$  之試體 A(如圖 4-2)。同時為避免在直剪試驗之後期，試體產生較大位移時，上層塊體的尾端會有往下掉之情形發生，所以將下層 x 方向之長度加長，使上層塊體能做較大尺度之位移變化。

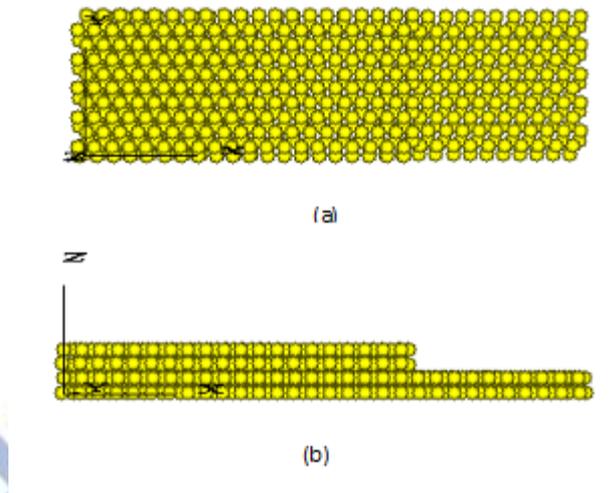


圖 4-2 試體 A (a)俯視圖(b)側視圖

## 步驟 2. 建立直剪盒

本研究利用 PFC<sup>3D</sup> 指令 wall 在試體周圍做成類似於直剪盒的罩子(如圖 4-3)，並在往後試驗中藉由移動上層牆面，對塊體施力，使塊體產生位移。當上層塊體產生位移後，同時量測節理面上所產生的剪力阻抗，繼而繪製應力應變曲線圖。且為避免上層牆面在推的過程中會碰到下層之顆粒，導致應力量測產生誤差，本研究在上下牆面之間留有適當空隙。



(a)



(b)

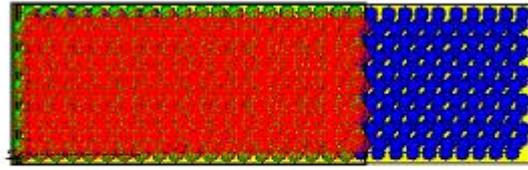
圖 4-3 直剪試驗中的直剪盒(a)俯視圖(b)側視圖

### 步驟 3. 建立節理面

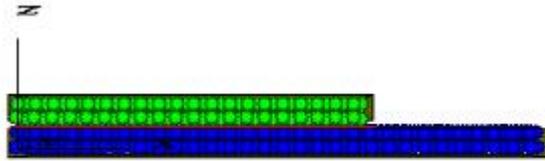
利用 smooth joint，建立一組摩擦係數 0.5 之節理面，圖 4-4 中紅色部分即為試體的節理面

### 步驟 4. 將顆粒 clump 形成塊體

利用 PFC<sup>3D</sup> 中指令 clump，分別將上層顆粒及下層顆粒膠結在一起形成塊體，如圖 4-4 所示，上層與下層塊體分別表示為綠色及藍色



(a)



(b)

圖 4-4 直剪試體 A 準備完成圖(a)俯視圖(b)側視圖

至此試體已準備完成，下一步即進行直剪試驗，首先往下施加一固定大小之正向力於上層塊體之質心上，此正向力會間接作用於節理面上。接著將上層牆面緩慢的向  $x$  之正方向移動，在移動的過程中牆面會與上層塊體產生接觸，並給予塊體  $x$  正方向之作用力，使塊體產生位移，當塊體產生位移的同時節理面上之摩擦係數也會發生作用，產生與塊體運動方向相反之摩擦阻抗，此摩擦阻抗作用在試體上並反應於直剪盒上層的左牆面上，而藉由紀錄左牆面所承受之力量大小即可得知塊體所受到的剪力阻抗，且位移量為已知，即可繪出塊體所承受剪力阻抗與位移量之間的關係圖。再分別施加不同大小之正向力於節理面上，求出在不同正向力作用下塊體所承受之最大剪力阻抗，繼而繪出正向力與剪力阻抗的關係圖。

為證明在 smooth joint 上，剪力阻抗的大小並不會隨顆粒大小改變而有所不同，依同一步驟流程，建立顆粒半徑為 0.005m、上層顆粒數 40×20×8，下層顆粒數 50×20×4 之試體 B，如圖 4-5 所示，並進行直剪試驗模擬，試驗結果於下節討論。

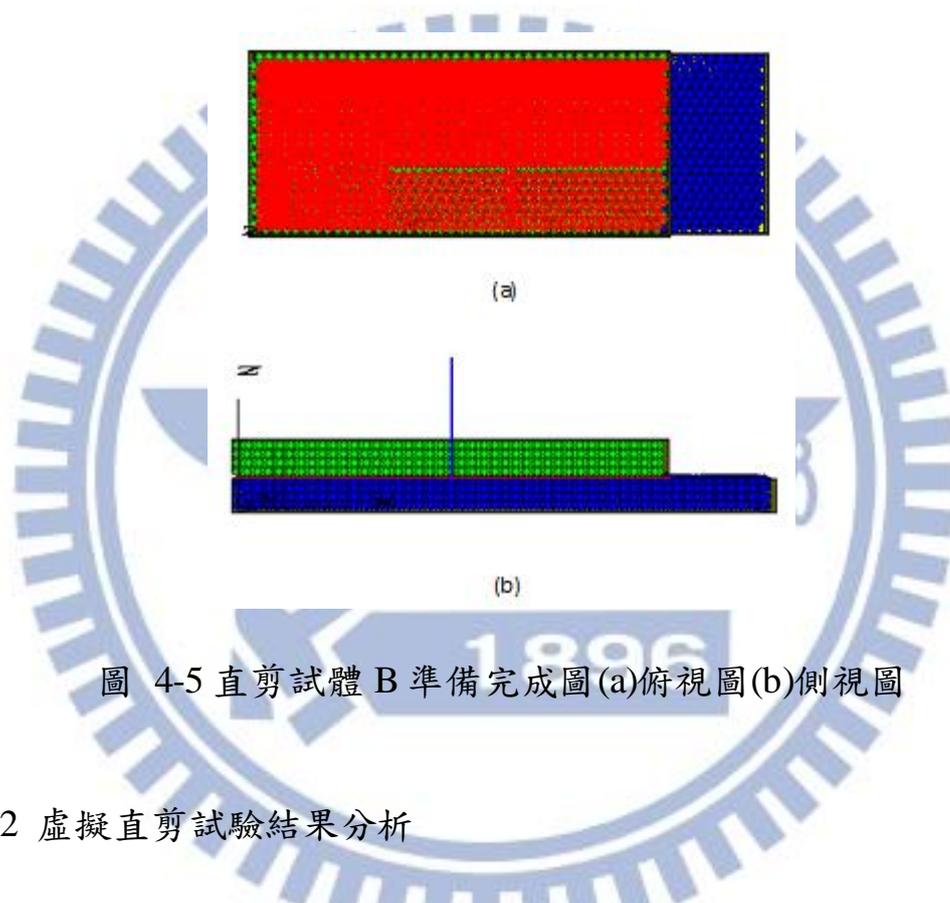


圖 4-5 直剪試體 B 準備完成圖(a)俯視圖(b)側視圖

#### 4.2.2 虛擬直剪試驗結果分析

為模擬出節理面上之行為，本研究設計顆粒半徑為 0.01m 之直剪試體 A(如圖 4-4 所示)，且將節理面上之摩擦係數( $\mu$ )設為 0.5，並利用上層塊體對節理面持續施加向下之作用力，同時將上部牆面緩慢地往 x 正方向移動，並經由紀錄牆面所受之應力即可得到節理面上剪力阻抗與位移之關係圖，而藉由改變正向力大小，可得到多組對應之剪

力阻抗，繼而繪出正向力與剪力阻抗之關係圖。

當直剪試體 A 承受 $F_n = 3 \times 10^5$ (N)之正向力時，所得之剪力阻抗與位移關係圖(如圖 4-6 所示)

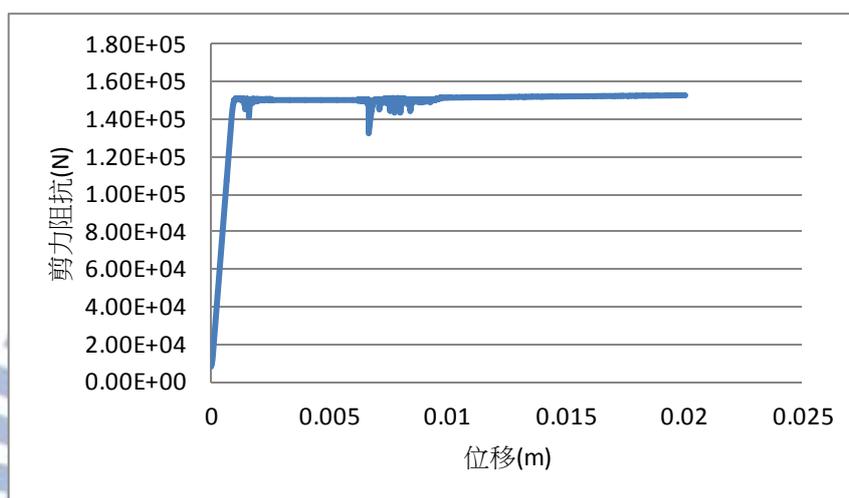


圖 4-6 直剪試體 A 的剪力阻抗與位移關係圖

經由公式 $F_s = \mu F_n$ ，可得知當節理面上承受一大小為 $3 \times 10^5$ (N)之正向力時，最大剪力阻抗之理論值為 $F_s = 0.5 \times 3 \times 10^5 = 1.5 \times 10^5$ (N)。當採虛擬直剪試驗進行模擬時，其試驗所得之最大剪力阻抗 $F_s = 150470$ (N)，與理論值大致符合，同時藉由改變不同正向力 $F_n$ 之大小可得到相對應最大剪力阻抗值 $F_s$ ，繼而繪出正向力與最大剪力阻抗之關係圖(如圖 4-7)

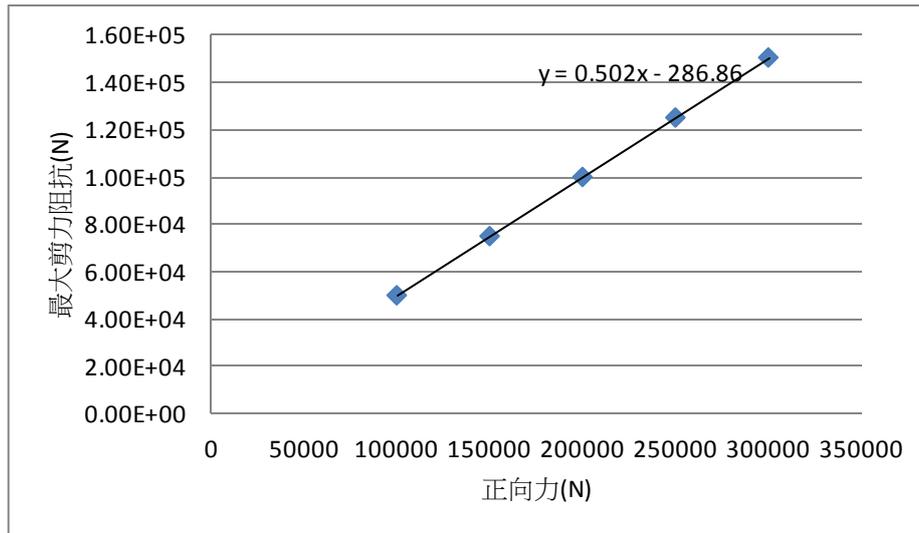


圖 4-7 直剪試體 A 的正向力與最大剪力阻抗的關係圖

在節理面上預設之摩擦係數( $\mu$ )為 0.5，而經由虛擬直剪試驗所得到的摩擦係數( $\mu$ )大約為 0.502，誤差大約為 0.4%，換算為摩擦角誤差不到 1 度，在可接受範圍內。

下一步為探討顆粒大小之影響，本研究建立顆粒半徑為 0.005m 的直剪試體 B(如圖 4-5 所示)，且同樣將節理面上之摩擦係數( $\mu$ )設為 0.5，並施加  $F_n = 3 \times 10^5$  (N) 之正向力於節理面上進行試驗，可得直剪試體 B 之剪力與位移關係圖(如圖 4-8 所示)

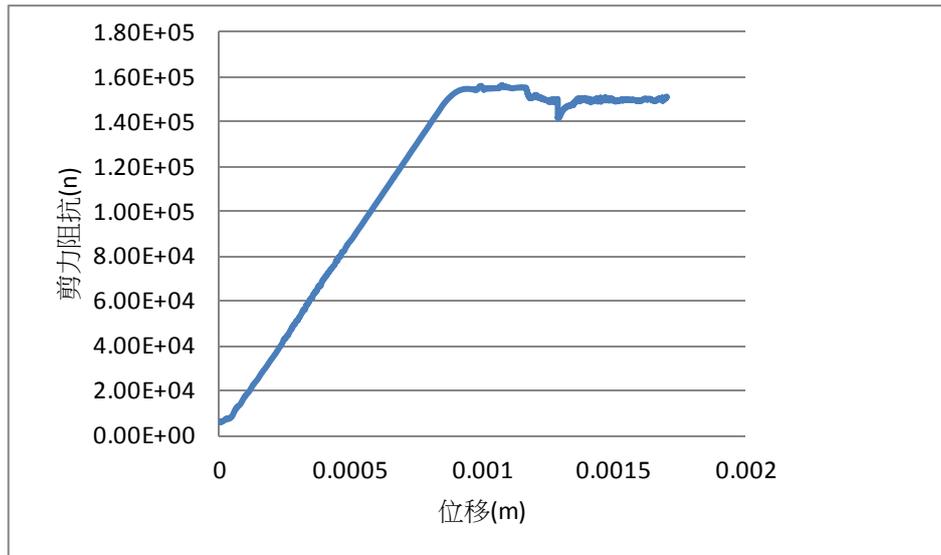


圖 4-8 直剪試體 B 的剪力阻抗與位移關係圖

經計算所得最大剪力阻抗之理論值  $F_s = 0.5 \times 3 \times 10^5 = 1.5 \times 10^5$  (N)，而經由直剪試驗所得之最大剪力阻抗  $F_s = 155040$  (N)，誤差約為 3%，尚在可接受的範圍內。而誤差之來源有二：

(1) 時階 (time-step) 設定過大，由於顆粒數增多，因此軟體在執行牆面移動的過程中所需耗費的時間過長，所以本研究在誤差的容許範圍內將時階 (time-step) 設定的比預設值大，以減少實際的運算時間，相對精度也會變低。

(2) 牆面移動速度的調整，當將牆面移動速度調慢時，可避免在塊體還沒平衡時即進行下一動作造成誤差，不過當牆面移動速度減慢，試驗時間則需拉長，即需在運算精度與運算時間中找尋平衡點

換言之，藉由調整時階的大小以及牆面移動的快慢可對誤差進行

有效之控制。而經由改變正向力 $F_n$ 的大小，得到相對應的最大剪力阻抗 $F_s$ ，繪製正向力與最大剪力阻抗的關係圖(如圖 4-9)

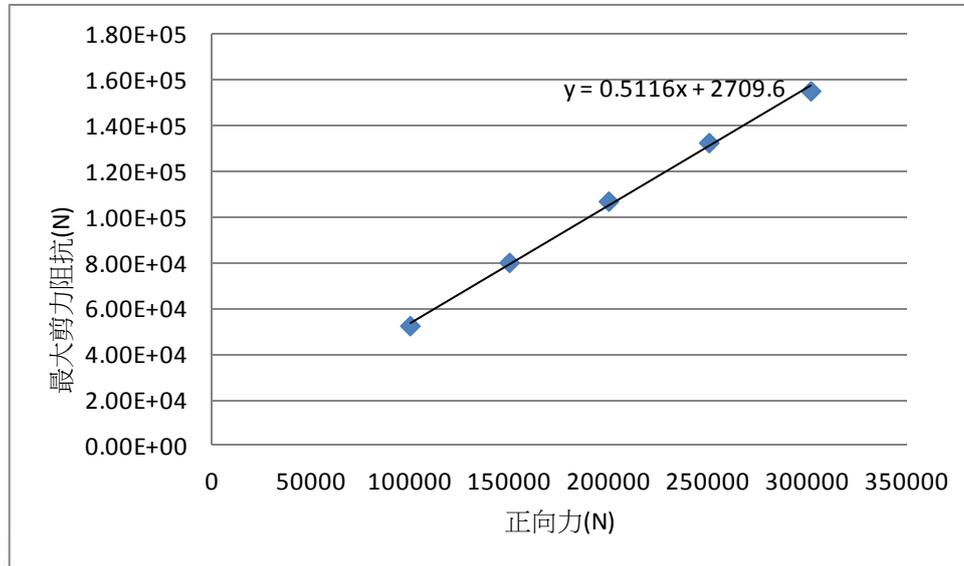


圖 4-9 直剪試體 B 的正向力與最大剪力阻抗的關係圖

節理面上所預設之摩擦係數( $\mu$ )為 0.5，經由直剪試驗所得到之摩擦係數( $\mu$ )為 0.5116，誤差約為 2.32%，換算為摩擦角差約為 1 度，而與試體 A 摩擦係數 0.502 之誤差則為 $(0.5116-0.502)/0.502=0.019$ ，約為 2%。

當直剪試體 A 與直剪試體 B 受到相同正向力時，其試體間之最大剪力阻抗差距如表 3-1 所示，可得知剪力差距之最大值約為 6.76(%)，不過由於此試驗本身之最大剪力阻抗值並非於最佳時階(程式本身預設值)設定下所獲得，因此實際之最大剪力阻抗差距值應會更小。

最大剪力阻抗誤差的計算方式為 $(F_s^{(B)} - F_s^{(A)}) / F_s^{(A)} \times 100$

$F_s^{(B)}$ 、 $F_s^{(A)}$  分別為當直剪試體 A 與直剪試體 B 受到相同的正向力時，所得到的最大剪力阻抗值

表 4-1 最大剪力阻抗誤差

正向力(N)	最大剪力阻抗差距(%)
$1.0 \times 10^5$	4.50
$1.5 \times 10^5$	6.57
$2.0 \times 10^5$	6.76
$2.5 \times 10^5$	5.82
$3.0 \times 10^5$	3.04

經虛擬直剪試驗測試過後，當顆粒之大小變為原本一半時，試體 A 與試體 B 之間之摩擦係數( $\mu$ ) 差距約為 2%，剪力阻抗所產生之最大差距則約為 6.76%，由此可證明當顆粒大小發生改變時，smooth joint 上的剪力阻抗值以及摩擦係數之變化量不大，往後在進行塊體抽離之模擬時，節理面上顆粒大小的影響加以忽略以降低計算需求。

### 4.3 岩橋的設置

前節的直剪試驗中假定塊體與塊體之間的節理面為完全連通，無任何岩橋作用，然現地所觀察到之節理面往往未必如此，多數呈現一部分連通、一部分不連通的情形，因此在針對節理面做模擬時，岩橋 (rock bridge) 的幾何分布以及岩橋(rock bridge)上的性質為非常重要之影響因素，以下進行節理面上岩橋之模擬及討論。

### 4.3.1 岩橋的設置

當塊體與塊體之間之節理面的上、下盤材料部分相連、部分分離，相連及相對強度較高的部分謂之岩橋。本研究於 PFC<sup>3D</sup> 分析中利用 JSET 及 smooth joint 兩種指令模擬節理面上岩橋之分佈。在 4.1 節中曾說明 JSET 及 smooth joint 之設定方法，藉由改變指定範圍內接觸點與接觸鍵結之性質，當把接觸點與接觸鍵結之強度調弱時，可當作節理面。反之，則可作為岩橋。

利用此觀念，先利用 JSET 中的指令 radius (設定圓盤半徑)及 area-ratio(設定岩橋面積比)，將岩橋以鋪設圓盤(disk)之方式隨機地分佈於預定的節理面上，直至累積鋪設圓盤面積達到節理面之預設岩橋面積比；再將接觸點的強度調高作為節理面上之岩橋。同時為避免岩橋受顆粒粗糙度之影響，須將 JSET 中之接觸點轉為 smooth joint，至此節理面上岩橋之設置已大致完成。又為避免岩橋外之顆粒在位移時受到顆粒粗糙度之影響，本研究於相同節理面上再鋪上一層 smooth joint，至此節理面設定完成。

為確保岩橋(rock bridge)之設置有效，因此在置入虛擬試體進行模擬之前，先於虛擬直剪試驗中測試之，並針對岩橋上之影響因子進行參數探討。以下說明岩橋設置步驟：

### 步驟 1.指定岩橋分佈範圍

第一步為設定 JSET 中鋪設之圓盤半徑(radius)以及節理面上岩橋所占的比例(area-ratio)，設定完畢後圓盤會一個個隨機地被放置於節理面上，同時搜尋圓盤範圍內之接觸鍵結及接觸點，直到當圓盤的總面積除以節理範圍的面積等於岩橋所占的比例(area-ratio)時為止，結果如圖 4-10 所示：黑色為接觸鍵結、紅色為接觸點

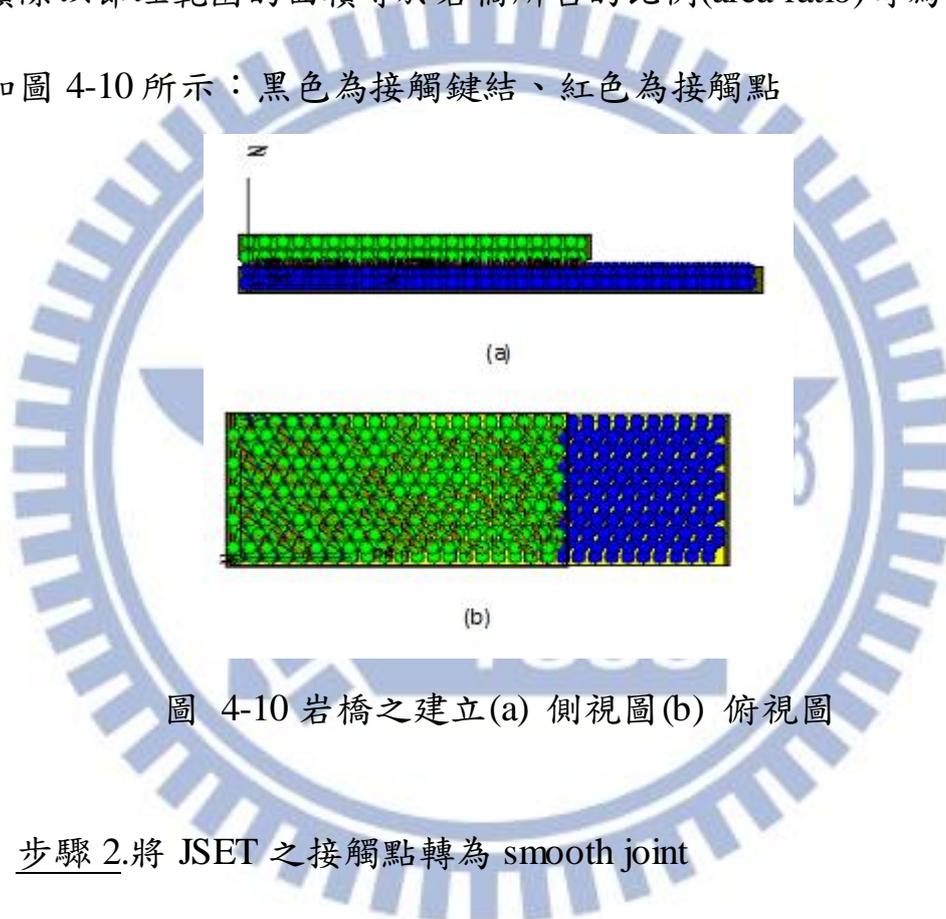


圖 4-10 岩橋之建立(a) 側視圖(b) 俯視圖

### 步驟 2.將 JSET 之接觸點轉為 smooth joint

### 步驟 3.於指定範圍內鋪上 smooth joint，如圖 4-11

在此需要注意當在設定岩橋的過程中順序係絕對的，不可隨意地顛倒，一定須先設定 JSET，再將其轉為 smooth joint，繼而鋪上節理面，原因在於每個接觸點上 smooth joint 不可重複設定，假設先設定了節理面，把節理面上之接觸點都轉變為 smooth joint，那之後在設

定岩橋 smooth joint 時，將發生找不到接觸點之情形，因此在設定岩橋的過程中順序為不可隨意更動的。

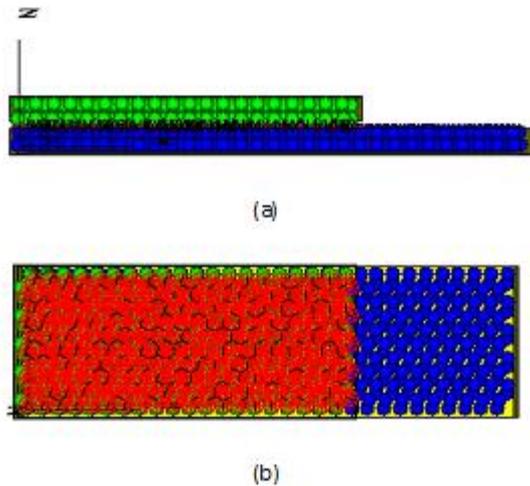


圖 4-11 岩橋之建立完成圖(a) 側視圖(b) 俯視圖

#### 4.3.2 岩橋影響參數之探討

此章節分別針對岩橋上之控制參數進行比較分析，從建立岩橋所需之參數：圓盤半徑(radius)、面積比(area-ratio)，到設定岩橋本身性質之控制參數，如：摩擦係數(friction)、凝聚力(cohesion)，進行完整地分析，並加以一一討論。

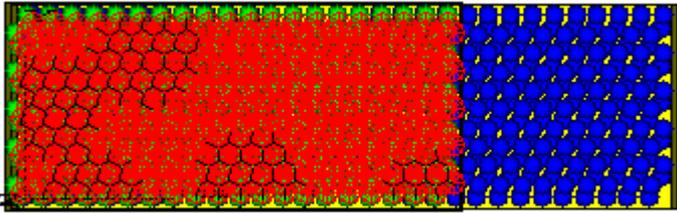
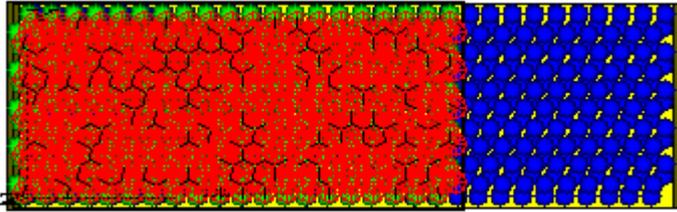
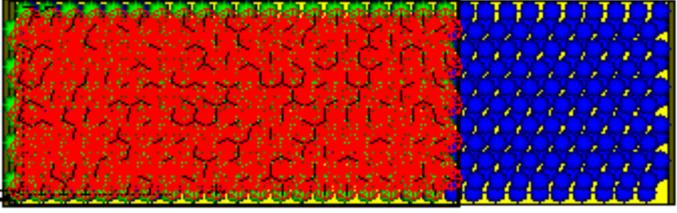
##### (1) 圓盤半徑

當岩橋所占面積比為固定時，隨著圓盤半徑越小，所需圓盤的數量也越多，採隨機分佈時岩橋放置的位置也較為均勻，不過計算所需時間也會相對提高。同樣當圓盤的半徑越大時，所需圓盤數量則越少，

計算時間也較短，不過岩橋擺放的位置也會相對集中，如表 4-2 所示。

而圓盤半徑大小的設定，則取決於模擬時之需求，再進行調整。

表 4-2 圓盤半徑與岩橋放置的關係圖

圓盤半徑為顆粒半 徑 5 倍時	
圓盤半徑與顆粒半 徑相同時	
圓盤半徑為顆粒半 徑 0.1 倍時	

## (2) 岩橋所占的面積比

在進行面積比的討論前，本研究須先進行一組節理面上含有岩橋之虛擬直剪試驗，作為往後試驗之對照組。岩橋及節理面上之參數預設值如表 4-3 所示。在參數設定完畢後，進行虛擬直剪試驗，由試驗結果可得到位移與剪力阻抗之關係圖(如圖 4-12)，並藉由改變不同的影響參數即可得到與不同影響因子之間的相互關係，並進行結果的分析及討論。

表 4-3 岩橋及節理面上的參數表

預設參數	數值
圓盤半徑(radius)	0.001(m)
岩橋所占的比例(area_ratio)	0.5
岩橋摩擦係數(friction)	0.5
岩橋凝聚力(cohesion)	1e5(N)
節理摩擦係數(friction)	0.5
直剪試驗時的正向力	10000(N)

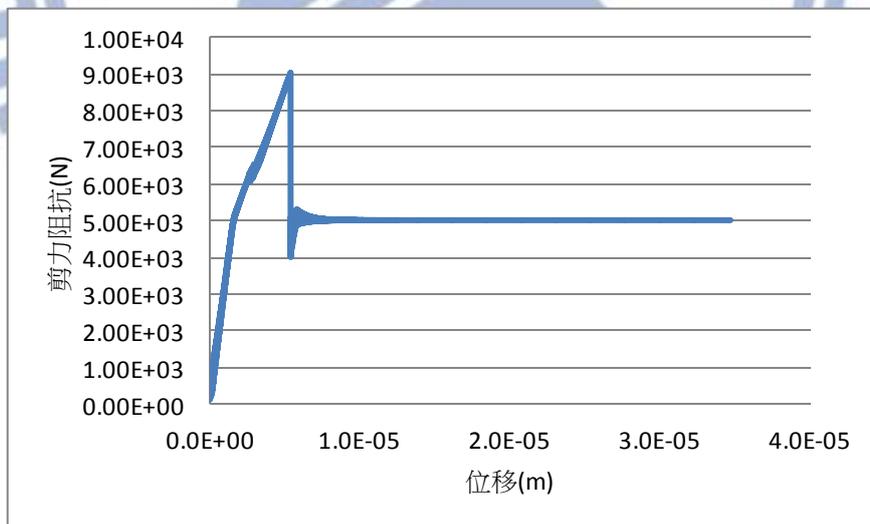


圖 4-12 位移與剪力阻抗的關係圖

由圖 4-12 中可觀察到隨著上部塊體緩慢的移動，塊體所受到的剪力阻抗也逐漸上升，當達到一個臨界值後，岩橋瞬間被完全打開，形成一組完整連通的節理面，此臨界值稱為最大剪力阻抗。

當節理完全連通後，塊體於峰後所受之剪力阻抗則係由節理上之參數所主導，由此試驗來說，節理面上所預設摩擦係數(friction)為 0.5，施加之正向力為 $1 \times 10^4$ (N)，當節理完全連通後可發現塊體所受剪力阻抗值約為 $5 \times 10^3$ (N)，為正向力與節理面摩擦係數之相乘值，也代表當岩橋被破壞後，節理面上之剪力阻抗係由節理上之摩擦係數所控制。

接著藉由改變岩橋面積比的大小，觀察節理面上剪力阻抗的變化。由圖 4-13 可得知不同岩橋面積比對應著不同的最大剪力阻抗，而隨著岩橋面積比增大時，塊體所受到的最大剪力阻抗也隨之增加，此代表當岩橋在節理面上所占比例越大時，將其破壞所需之作用力也隨之增大，反之亦然。

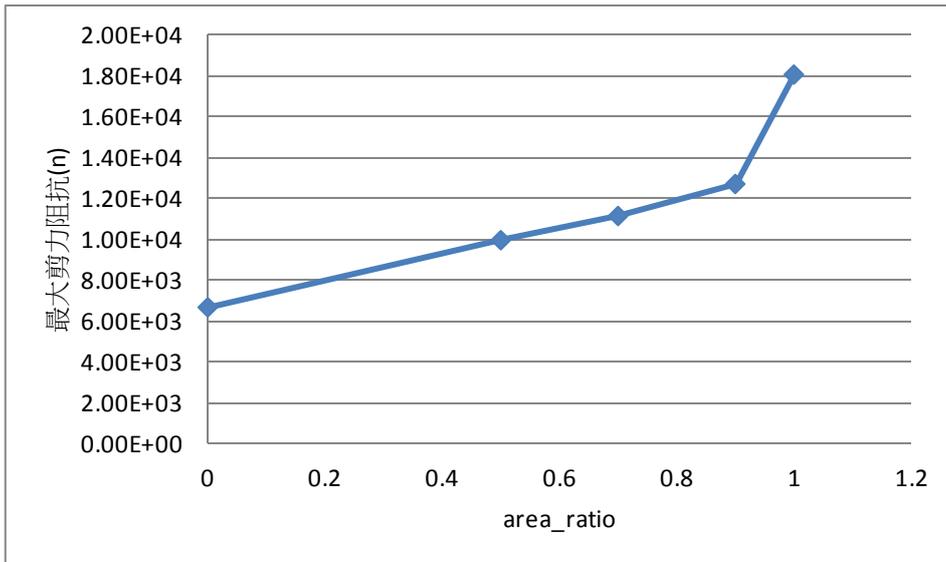


圖 4-13 岩橋面積比與最大剪力阻抗之關係圖

### (3) 摩擦係數

本研究先將岩橋面積比固定，改變岩橋上之摩擦係數，進行虛擬直剪試驗，得到位移與剪力阻抗的關係圖(如圖 4-14)。並紀錄在不同摩擦係數時，所對應的最大剪力阻抗，繪製成圖 4-15。

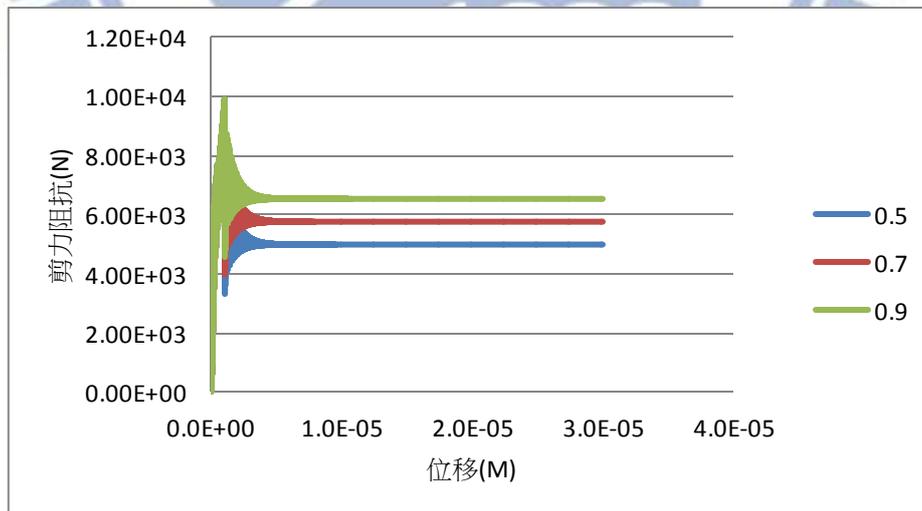


圖 4-14 位移與剪力阻抗的關係圖

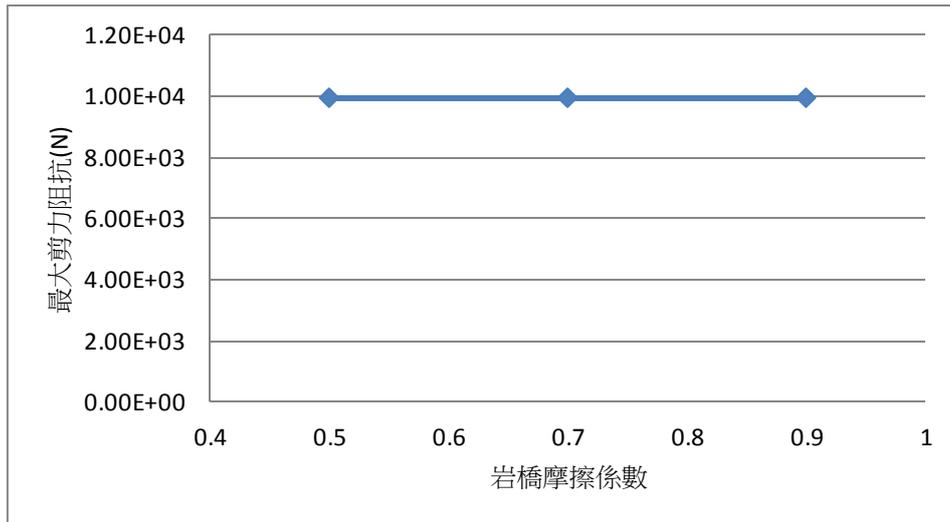


圖 4-15 岩橋摩擦係數與最大剪力阻抗之關係圖

在進行虛擬直剪試驗時，由於實際運算時間過長的關係，所以在設定時階(time-step)的過程中，並不是採用其本身之預設值，而是在容許範圍內將時階調整的比預設值要大，以節省實際計算所需耗費的時間。也因如此造成了位移—剪力阻抗關係圖中一開始的曲線呈現不穩定之情形(如圖 4-14)，但其主要數值像是最大剪力阻抗以及峰後剪力阻抗大致上還算穩定，整體來說仍在容許範圍內。

且由圖 4-15 中可得知當岩橋上摩擦係數(friction)改變時，並不會對最大剪力阻抗產生影響，只影響發生於峰後之行為上，由圖 4-14 中可看出當岩橋上摩擦係數(friction)越大時，峰後所產生之摩擦阻抗就越大。此現象與岩橋參數設定之位置有關，當參數設定於接觸鍵結上時，對尖峰強度(peak)之影響較大，而當參數設定於節理平面(disk)上時，則對於峰後之行為的影響較大。在此試驗中岩橋上之摩擦係數

(friction)設定於顆粒間之節理平面(disk)上，因此對於峰後行為的影響較為顯著。

#### (4)凝聚力(cohesion)

凝聚力之參數係設定於接觸鍵結上，因此對於尖峰強度，也就是最大摩擦阻抗有較為顯著的影響。接下來本研究分就不同凝聚力之大小進行試驗，得到在不同凝聚力之狀態下所對應的最大剪力阻抗，並繪製成圖 4-16

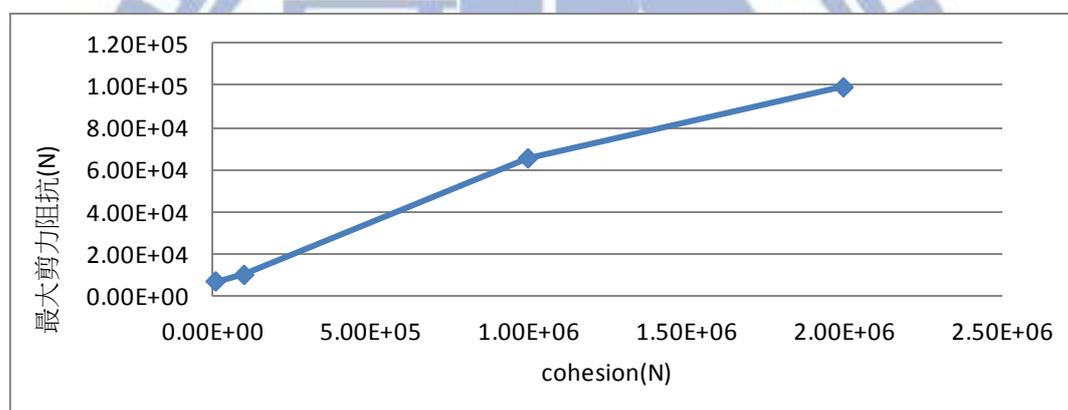


圖 4-16 岩橋凝聚力(cohesion)與最大剪力阻抗之關係圖

由圖 4-16，可得知當凝聚力(cohesion)越大時，塊體所能承受的最大摩擦阻抗也越大。綜合上述因子之探討可得到以下結論，岩橋凝聚力(cohesion)與最大摩擦阻抗成正相關，岩橋上的摩擦係數(friction)則與峰後的摩擦阻抗呈正相關，而岩橋所占的比例(area\_ratio)則扮演著將岩橋性質放大之角色，當 area\_ratio 越大，岩橋占的比例也越大，岩橋性質也越明顯，反之亦然。此外，針對岩橋位置之變異性，分別

對圓盤半徑進行調整，進而完成節理面上岩橋之模擬。

#### 4.3.3 岩橋強度之變異性

在前述章節中本研究先對節理完全連通之情形進行虛擬直剪試驗，並從試驗結果證明當顆粒大小改變時，並不會對節理面上的剪力阻抗造成影響。接著進一步在節理面上加上岩橋進行試驗，並針對岩橋上不同之參數因子進行討論及分析。至此本研究已展示利用上述方法將岩橋加入節理面進行模擬具有可行性。而為使模擬更能貼近實際岩橋之行為，本節針對岩橋上之強度變異性加以討論。

節理面上所包含之岩橋強度必具有變異性，並非每組岩橋強度都相同，因此當塊體在進行抽離時，可預期強度較弱的岩橋會先被破壞，其次為強度次弱的，而強度最強的岩橋則最後才被破壞。為模擬此岩橋破壞之漸進式過程，本研究嘗試在同一節理面上分別設置了五組強度不同之岩橋，每組岩橋分別佔節理面積之十分之一，在設置完成後，將其放入虛擬直剪試驗，可得到圖 4-17，由圖 4-17 中可看出當剪力阻抗通過最大值後，其岩橋會逐漸地被破壞，剪力阻抗也逐漸地遞減，直到岩橋被破壞殆盡時，剪力阻抗才變回由節理面上之摩擦係數所控制。

隨著岩橋強度變異性之不同，可以利用此方法設置多組不同強度

之岩橋進行模擬，以模擬出更符合現地情形之岩橋破壞行為，不過由於設置過程較費時，往後之岩橋設置上仍以單一強度之岩橋模擬為主。

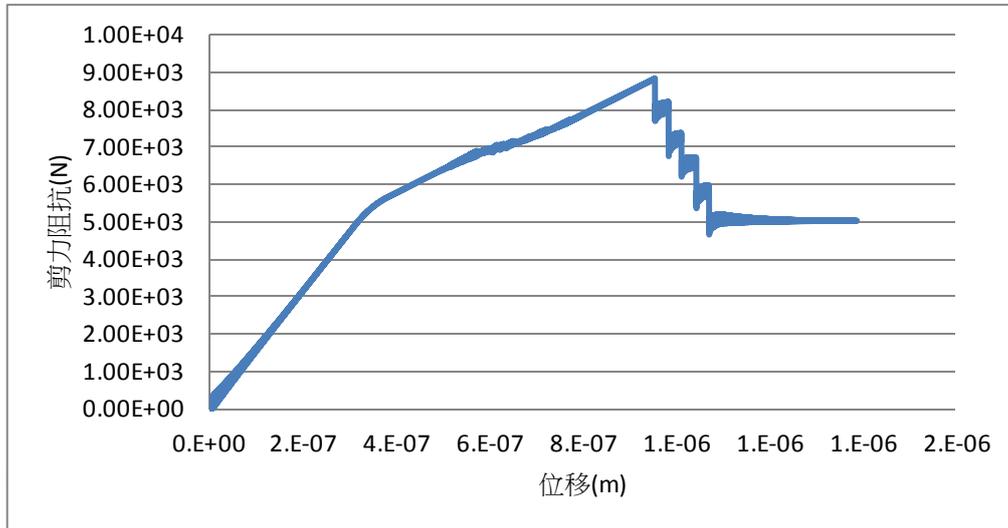


圖 4-17 位移與剪力阻抗的關係圖

#### 4.4 小結

此章中本研究建立了虛擬直剪試驗，並將節理面設置於虛擬試體上以進行模擬，其模擬試驗結果顯示節理面上之摩擦阻抗不受塊體顆粒大小之影響。此試驗更將岩橋設置於節理面上進行模擬，分析及討論岩橋上各個影響因子與節理面摩擦阻抗之關係。

在探討完節理面以及岩橋之行為後，將其放入實際塊體抽離模型進行模擬試驗，其模擬試驗結果參見下一章。

## 第五章 虛擬沖刷實驗—結果與討論

本研究於前幾章中已敘述塊體抽離之模擬試體建置方法，並完整地討論壓力波動之施加方法以及節理面之設置過程；本章討論三種不同現地情況之模擬結果及分析。

本章分為 4 節，5.1 節探討單岩塊虛擬試體之抽離模擬，分別探討當岩塊周圍節理為完全連通或部分連通時之塊體抽離過程與影響因子。5.2 節討論塊體抽離之微觀數值模擬。5.3 節說明多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬，探討多塊體陸續抽離之影響因子，並提出簡化模擬模型。5.4 節則為小結。

當淨上舉力大於塊體四周節理面垂直向抗剪總阻抗時，淨上舉力並無法被抗剪阻抗所抵銷，不平衡力導致塊體產生向上加速度，出現等加速運動之行為，塊體勢必迅速脫離，本研究將此條件下之塊體直接視為立刻脫離。反之當淨上舉力小於節理面垂直向總抗剪阻抗時，塊體呈等速運動上升。

估算不同深度下軸向應力( $\sigma_v$ )的大小，如式 5-1，垂直向應力隨深度增加而呈線性遞增，且將各深度之軸向應力平均並乘上側向壓力係數  $K$ ，可得側向應力 $\sigma_h$ 。

$$\sigma_h = K \cdot \gamma \cdot z \quad (\text{式 5-1})$$

上式中  $\gamma$  為塊體單位重； $z$  為深度。

將作用於岩塊之平均側向力，乘上節理面上之摩擦係數 $\mu$ ，得各節理面上之摩擦抗剪阻抗，當忽略節理面上凝聚力貢獻，加總四周節理面之抗剪阻抗，即可得總抗剪阻抗值 $F_s$ ，如式 5-2。

$$F_s = \mu \cdot K \cdot \gamma \cdot z \cdot Z_b \cdot (X_b + Y_b) \cdot \quad (\text{式 5-2})$$

上式中 $F_s$ 為總抗剪阻抗力；因塊體抽離發生於岩床表面，因為近岩床面之最大主應力應約與床面平行， $K$ 必大於 1，以保守計  $K$ 可假設為 1； $X_b$ 、 $Y_b$ 、及 $Z_b$ 分別為塊體  $x$  方向、 $y$  方向及  $z$  方向之尺寸。

當淨上舉力大於塊體四周節理面垂直向總抗剪阻抗力，本研究視塊體將瞬間脫離，並不考慮其塊體上舉速率及衍生之岩床沖刷速率問題。以下之討論中皆假設淨上舉力小於節理面垂直向總抗剪阻抗，不致於有塊體瞬間立刻脫離之情況出現。

## 5.1 單岩塊虛擬試體之抽離模擬

本小節分為兩部分，第一部分探討當岩塊周圍節理為完全連通情況下，塊體抽離之過程及其影響因子，第二部分討論當岩塊周圍節理未完全貫通而含有岩橋情況下，岩橋上之影響參數與塊體抽離抬升之相對關係。

### 5.1.1 節理完全連通情況

為探討單一塊體抽離的過程，本研究施加頻率 4Hz 之壓力波動

差(圖 3-11)於單岩塊虛擬試體模型中(圖 3-6)正中央的塊體上，且將其  
餘不受力塊體加以固定，並於模擬同時記錄正中央塊體之速度及位移  
變化，並加以繪製成圖 5-1、5-2。

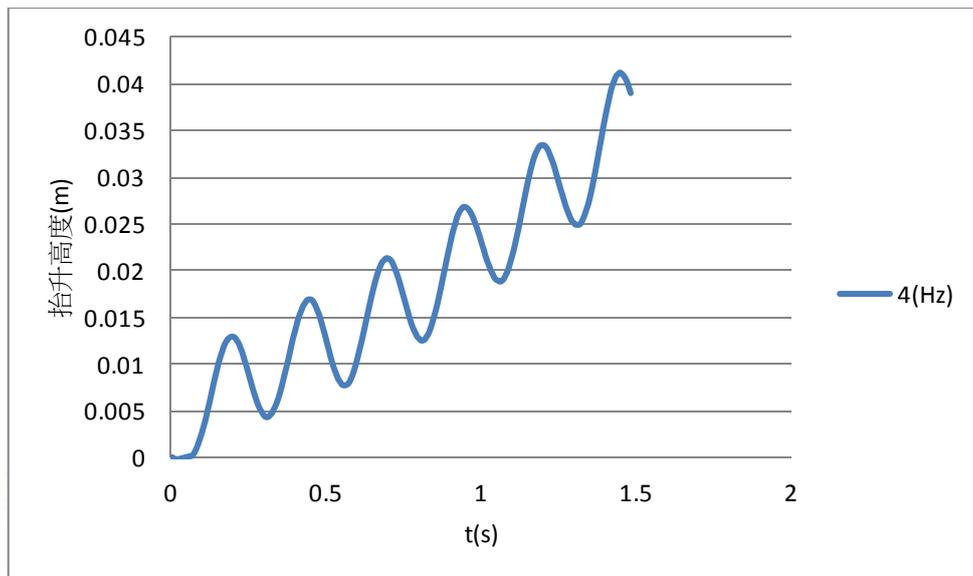


圖 5-1 塊體抬升高度與時間關係圖

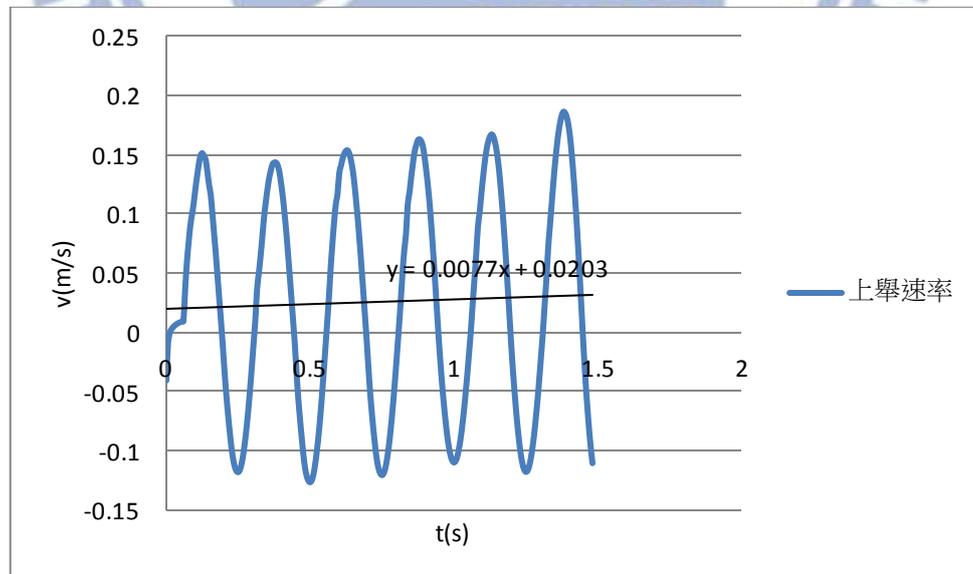


圖 5-2 塊體上舉速率與時間關係圖

由圖 5-1 可看出塊體上下抬升的高度受到壓力波動差增減的影響，當塊體所抬升高度大於塊體落下高度時，塊體會持續地向上抬升直至脫離。而塊體抬升高度受塊體重量、壓力波動平均差、作用時間，等因子影響，將於後續文中進行討論。

此外，由圖 5-2 中可觀察到塊體之平均上舉速度約呈定值，但受到塊體逐漸上升，周圍受力面積逐漸減少之影響，使得塊體之間作用力也隨之減低，導致塊體上舉速率之振幅有逐漸增加之趨勢。

#### 5.1.1.1 壓力波動之影響

本小節先討論壓力波動差之影響，而節理面及岩橋之相關影響參數則於下一小節探討。首先參照圖 3-11 固定壓力波動差之振幅 75000 Pa 及頻率 2Hz，改變其壓力波動平均差之大小進行模擬，可得到塊體之平均上舉速率(m/s)，並將模擬結果繪製成圖 5-3 與表 5-1

表 5-1 壓力波動平均差與塊體平均上舉速率關係圖

影響因子		平均上舉速率(m/s)
壓力波動平均差 (kPa)	25	0.02
	20	0.01
	10	0

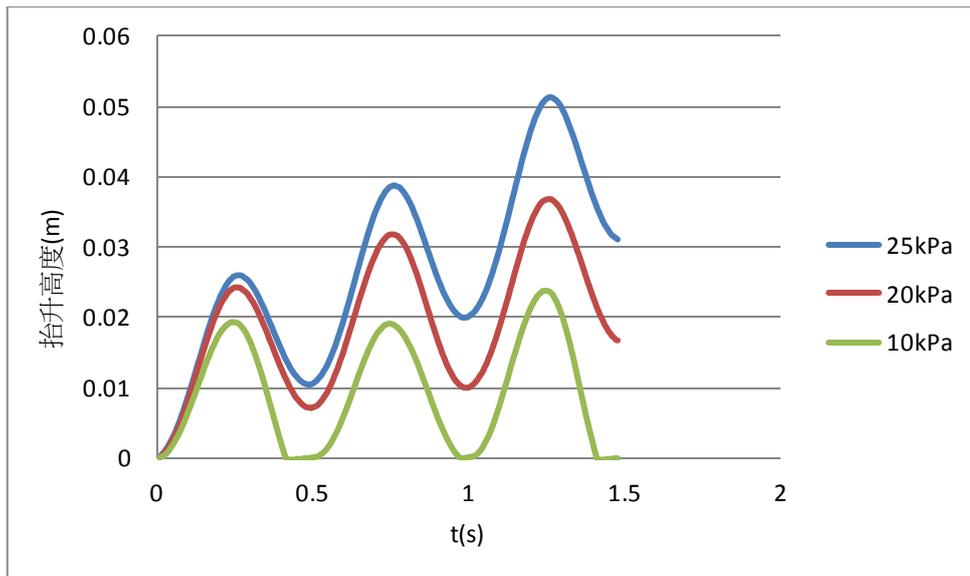


圖 5-3 不同壓力波動平均差下，塊體抬升高度與時間關係圖

模擬試體之塊體重為 13.87kN、底面積為  $1\text{m}^2$ ，由圖 5-3 可知當壓力波動平均差小於塊體重時，塊體抬升量為 0，於原地不斷地抬升及落下。隨著壓力波動平均差增高，一旦大於臨界值時，塊體即被抬升，平均上舉速率也隨之上升，此臨界值等於有效塊體重加上摩擦阻抗。

本研究接著固定壓力波動平均差 25000Pa，模擬在不同振幅及頻率下之塊體抽離行為，並記錄塊體平均上舉速率(m/s)，模擬結果歸納於表 5-2 與圖 5-4

表 5-2 壓力波動頻率(Hz)及振幅(Pa)所對應塊體平均上舉速率(m/s)

振幅(Pa) \ 頻率(Hz)	75000	100000	125000	150000
2	0.0188	0.0224	0.0266	0.0240
4	0.0188	0.0239	0.0259	0.0272
8	0.0202	0.0242	0.0197	0.0193
12	0.0215	0.0224	0.0230	0.0212
24	0.0213	0.0235	0.0229	0.0269
32	0.0208	0.0211	0.0219	0.0246
40	0.0194	0.0200	0.0199	0.0196
80	0.0196	0.0208	0.0199	0.0201
120	0.0197	0.0195	0.0195	0.0201
160	0.0190	0.0192	0.0197	0.0197
200	0.0194	0.0190	0.0196	0.0194
500	0.0193	0.0199	0.0194	0.0198

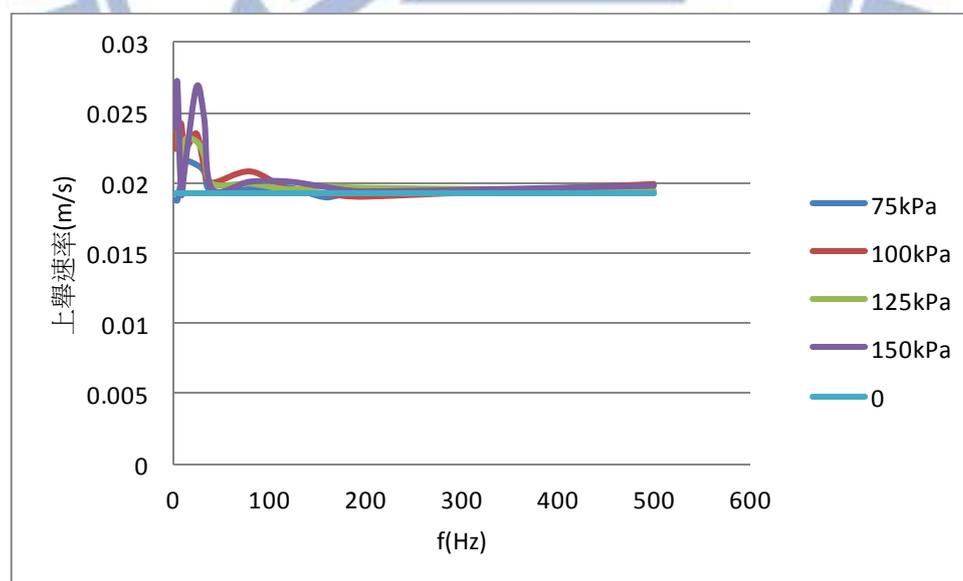


圖 5-4 不同壓力波動之振幅(Pa)對頻率與塊體上舉速率關係圖

圖 5-4 顯示塊體之上舉速率在高頻時受壓力波動頻率及振幅影響可以忽略。而在低頻時上舉速率則較不穩定，且當施加之壓力波動振幅越大越明顯。原因在於當頻率較低時，每一週期塊體受力時間也會拉長，導致塊體抬升高度之振幅增大，繼而改變岩塊周圍之受力面積，影響塊體之上舉速率。

本研究也模擬當壓力波動差振幅為 0 時之上舉速率，其值為 0.0193(m/s)，與在高頻時所模擬出之上舉速率相距有限，說明塊體之上舉速率其實並不受壓力波動差振幅之影響。在往後試驗中可不用考慮壓力波動振幅之影響。

此外本研究探討節理面之勁度參數影響，模擬當節理連通時，在不同剪向及正向勁度下，塊體之上舉速率關係，結果如表 5-3，平均上舉速率會隨勁度增大而減小，因此模擬前應先藉由直剪或三軸試驗取得岩石巨觀下之剪力阻抗，並搭配式 4-1、4-2 率定節理面上之參數，本研究於本章之參數探討假設為正向勁度(kn)=1e8(N/m)、剪向勁度(ks)= 3e7(N/m)。

表 5-3 勁度參數所對應塊體平均上舉速率(m/s)

正向勁度(kn)	剪向勁度(ks)	平均上舉速率(m/s)
1e8	3e7	0.0247
1e9	3e8	0.0076
1e10	3e9	0.0023

## 5.1.2 節理部分連通情況

就節理發達之岩盤，當一塊體周圍節理為部分連通含有岩橋時，模擬此單一塊體受壓力波動差作用，塊體脫離之行為及過程，同時討論及分析岩橋上之影響參數。

### 5.1.2.1 節理面上之影響參數

繼上節討論壓力波動差之影響後，本節探討節理面上岩橋之影響。同樣以圖 3-11 之壓力波動差為基準，壓力波動平均差為 25000Pa、振幅 75000Pa 以及頻率 2Hz。於其他 2 個因子固定下，分別模擬於不同岩橋鍵結強度、凝聚力(cohesion)以及岩橋所占的比例(area\_ratio)下塊體之抬升高度，並將其試驗結果製成圖表：

表 5-4 岩橋上不同影響因子與塊體抬升高度之關係圖

影響因子		第一秒抬升之高度(m)
岩橋所占的比例 (Area_ratio)	0	0.0234
	0.3	0.0209
	0.5	0.0153
	0.8	0
	1	0
凝聚力(N) (cohesion)	1000	0.0217
	20000	0.0151
	30000	0
鍵結強度(N)	1000	0.0259
	10000	0.0241
	40000	0.0178
	100000	0.0158

將摩擦係數 0.5、凝聚力 20kN 固定，改變岩橋所占的比例 (Area\_ratio)，可得圖 5-5，圖中顯示隨岩橋所占的比例越高，鍵結數量越多、強度越高，當強度高於壓力波動之最大值時，塊體不可能發生抽離。隨著岩橋鍵結強度逐漸增高，岩橋鍵結破壞所需時間也逐漸增長，塊體也需更長時間才能脫離，塊體抬升高度降低。一旦岩橋鍵結完全破壞後，則可視為節理完全連通之情形處理，且由圖 5-6 可看出當岩橋鍵結破壞後，其塊體之平均上舉速率即變為定值。

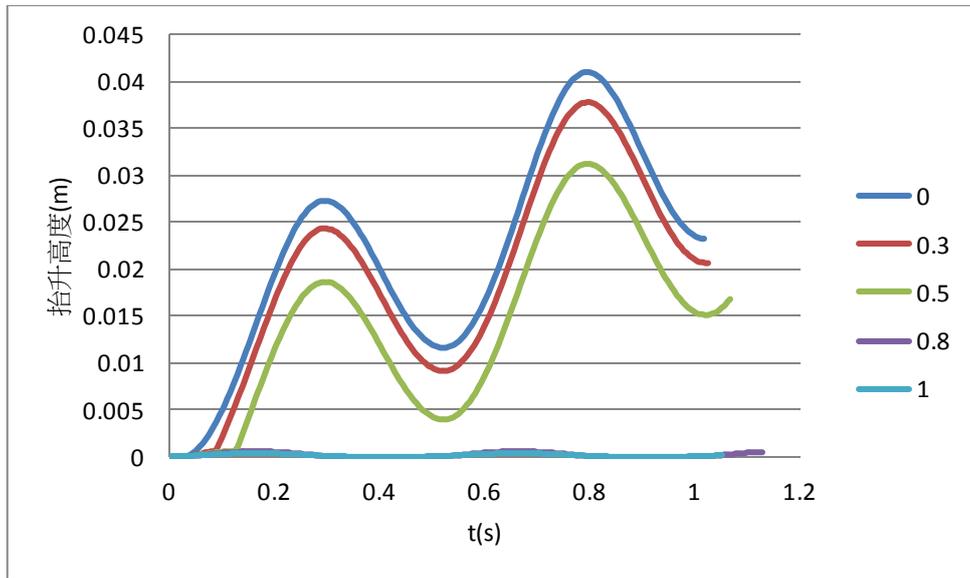


圖 5-5 不同岩橋所占比例對塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖

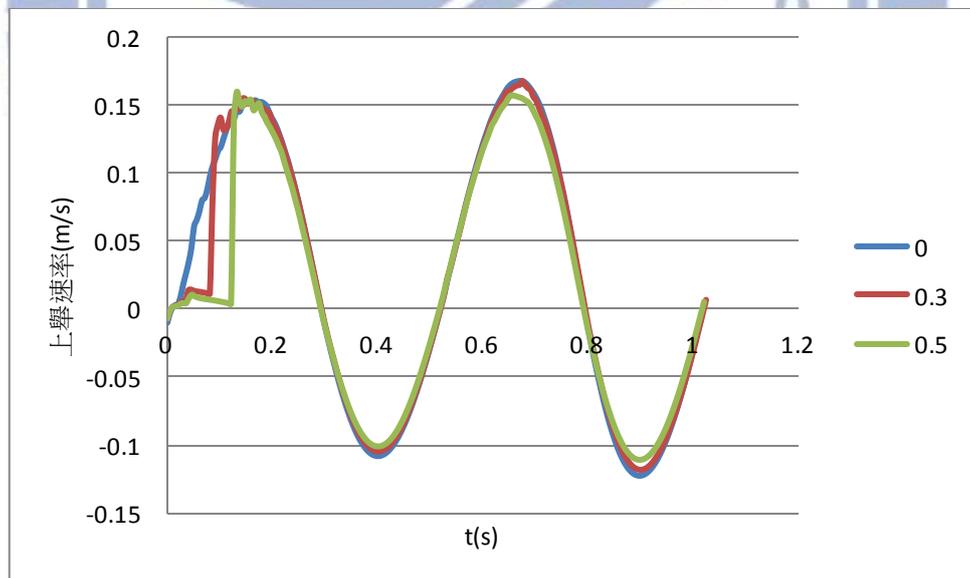


圖 5-6 不同岩橋所占比例對塊體上舉速率(m/s)與時間(t)關係圖

接著將岩橋所占比例 0.5 及摩擦係數 0.5 固定，模擬在不同凝聚力大小下之塊體抽離行為，得到圖 5-7，由圖可知當凝聚力越大，塊體抬升之高度也越低，但造成此抬升高度差別的原因在於塊體脫離所需時間不同，當凝聚力較低，鍵結先行破壞，塊體則先被抬升，反之凝聚力較高者，鍵結破壞所需時間較長，塊體則晚一步被抬升，使得抬升高度比前者低，且由圖 5-8，可觀察一旦鍵結破壞後，不同凝聚力塊體之上舉速率曲線趨於相近。

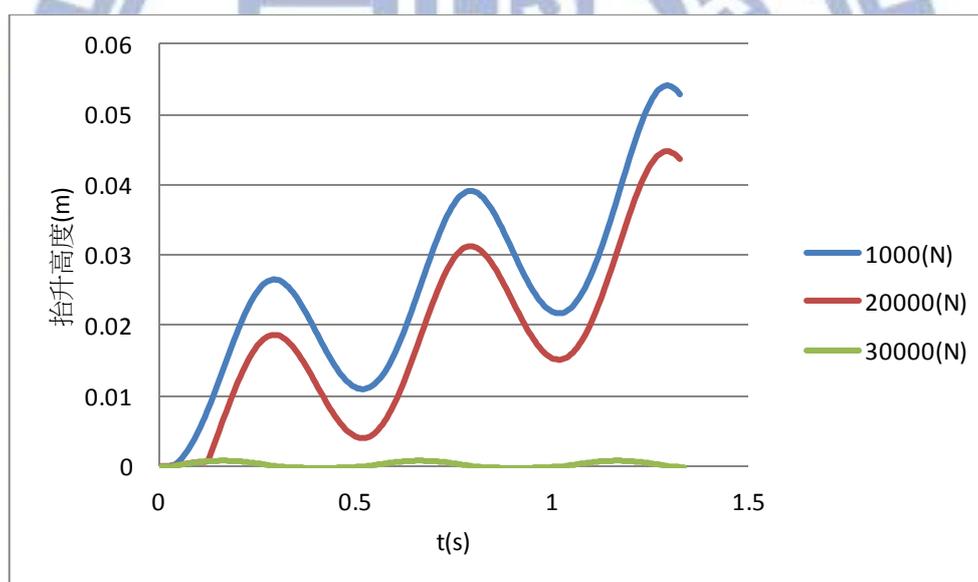


圖 5-7 不同凝聚力 (cohesion) 大小對塊體抬升高度 (m) 與時間 (t) 關係圖

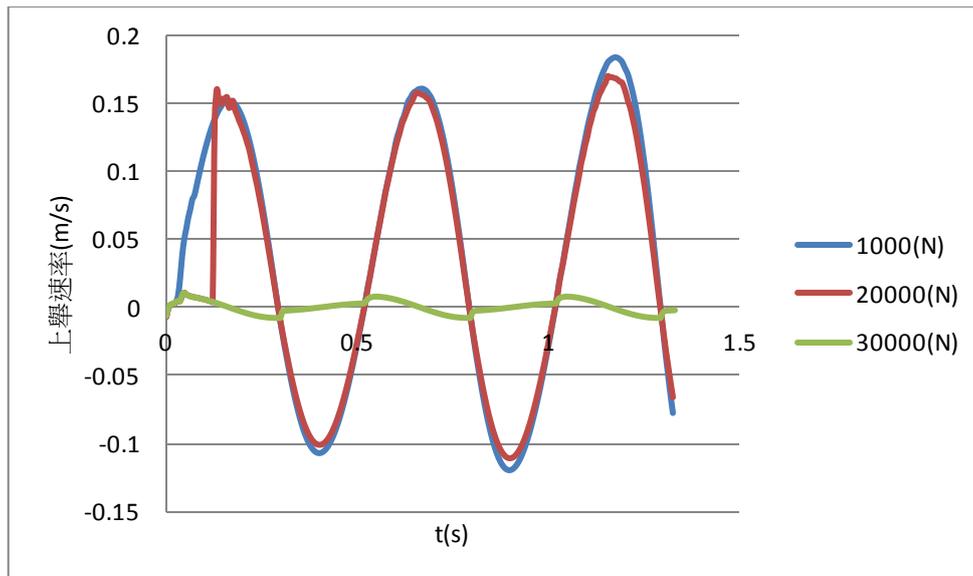


圖 5-8 不同凝聚力(cohesion)大小對塊體上舉速率(m/s)與時間關係圖

接著接著將岩橋所占比例 0.5 及摩擦係數 0.5 固定，探討不同鍵結強度之影響，將表 5-4 顯示當岩橋鍵結強度越強時，其抬升高度越低。本研究亦將岩橋所占比例(area\_ratio)及鍵結強度  $1 \times 10^5 (\text{N}/\text{m}^2)$  固定，改變壓力波動差之振幅進行模擬，得到圖 5-9 及表 5-5，由圖中可觀察到當振幅增大到一定值後，鍵結會被破壞，塊體即可被抬升。

此虛擬沖刷試驗顯示即使含有岩橋之塊體所受壓力波動平均差高於塊體重力及摩擦阻抗，只要其仍低於岩橋之鍵結強度時，此塊體還是無法脫離。若藉由增大壓力波動之振幅來提高壓力波動之最大值，一旦壓力波動之最大值大於鍵結強度時，可使岩橋鍵結破壞，塊體也隨之被抬升。由此可知雖然振幅對塊體的上舉速率沒有影響，但其對於裂隙延伸、節理貫通卻扮演著很重要的角色。因此判斷含有岩橋之

塊體是否會抽離，第一步為檢核壓力波動差之最大值是否高於岩橋之鍵結強度，當壓力波動差之最大值較高時，才有可能發生塊體抽離。

表 5-5 壓力波動差振幅(Pa)所對應之塊體抬升高度(m)

壓力波動平均差之振幅(kPa)	第一秒抬升之高度(m)
25	0
50	0
75	0.0081
100	0.0186

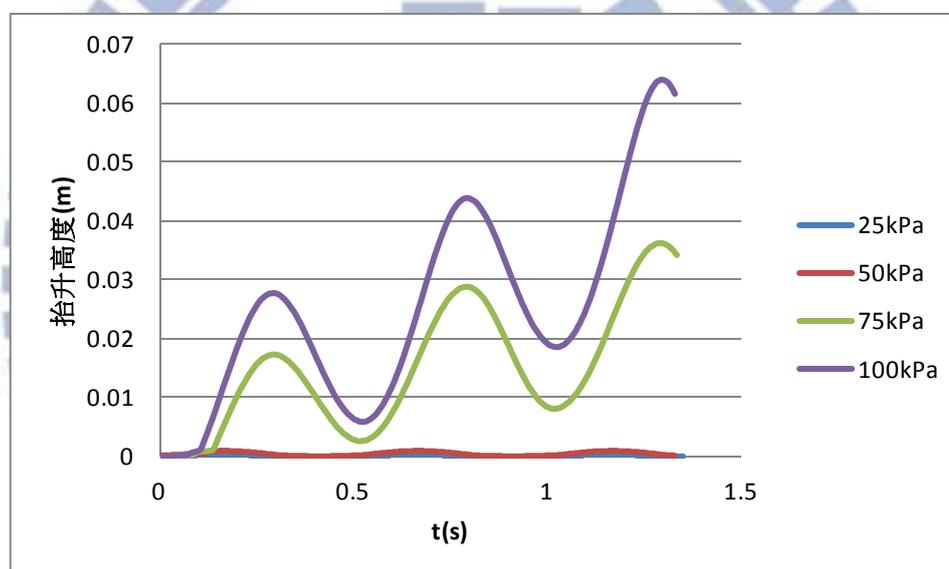


圖 5-9 不同壓力波動差振幅(Pa)下，塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖

## 5.2 岩塊抽離之微觀模擬流程建構

若能經由現地調查得到分析數據後，原則上即可用塊體抽離模型進行模擬試驗，即可判斷現地之岩塊是否會抽離，進而估算當岩塊發生抽離時其上舉速率以及脫離所需時間，以下為塊體抽離之微觀模擬之建構流程。

### 5.2.1. 經由現地量測數據獲得模擬所需資料

先藉 Bollaert(2002)人造節理沖蝕試驗之實際量測結果來解釋岩塊承受壓力波動可能呈現之特性，並做為後續模擬之壓力波動模型。經由圖 3-9，可得到裂隙底部共振頻率之振幅約為 $1 \times 10^5 \text{N}$ ，圖 2-13 顯示試驗中所量測到的頻率約介於 2Hz 至 500Hz 之間，且頻率 100Hz 的能量密度僅約為頻率 2Hz 的百分之一；且頻率越高，衰減越快。因此在往後的模擬分析中，頻率高於 100Hz 的訊號皆忽略之。

由裂隙中之壓力波動進行頻譜分析，並比較圖 2-13，即可得到岩體表面及裂隙內部壓力波動頻譜分析比較圖（圖 5-10），圖中最低頻率為 2Hz，推估裂隙底部之共振頻率約為 70 Hz，並可轉換成圖 5-11。

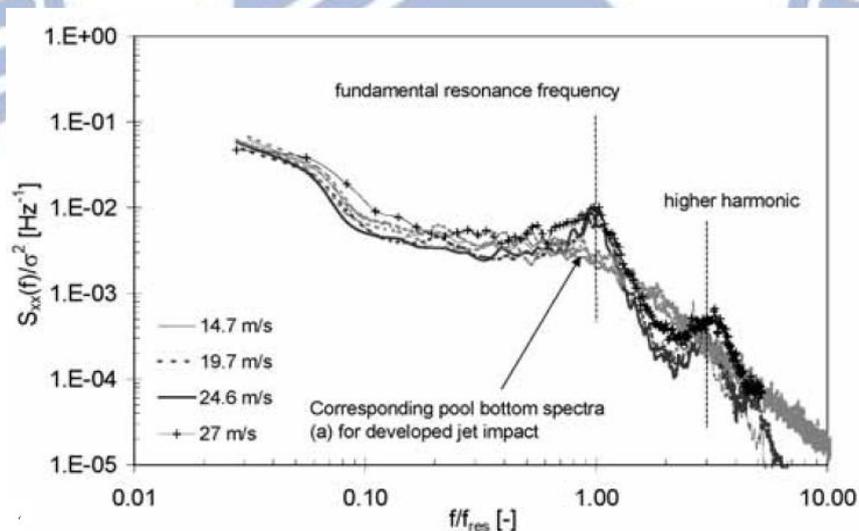


圖 5-10 岩體表面及裂隙內部壓力波動頻譜分析圖(Bollaert, 2002)

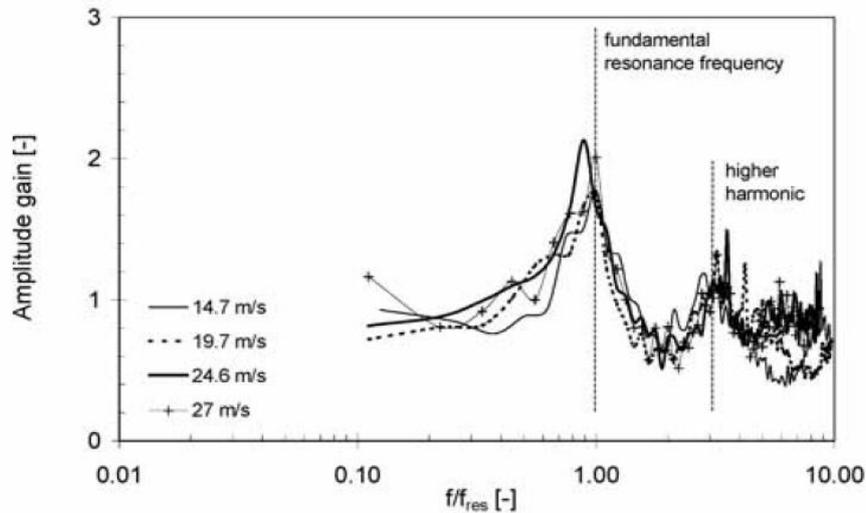


圖 5-11 裂隙內壓力波動各頻率與所對應振幅比關係圖 (Bollaert,2002)

圖 5-11 中振幅比之定義為每個特定頻率中裂隙底部的壓力除以岩體表面的壓力。當振幅比小於等於 1 時，代表在此頻率中裂隙底部的壓力小於等於岩體表面的壓力，無法對岩塊上舉產生影響。而由圖 3-9 得知裂隙底部壓力波動在共振頻率 70 Hz 時，其振幅約為  $1 \times 10^5$  (Pa)，此共振頻率下在圖 5-11 中所對應之振幅比約為 2，由此可推得岩體表面壓力為  $0.5 \times 10^5$  (Pa)，並藉由圖 5-10 即可推估出各頻率所對應之岩體表面壓力波動振幅之大小。若將圖 5-11 簡化，忽略頻率大於 100Hz 之訊號，並將橫軸座標改以頻率表示，得圖 5-12。

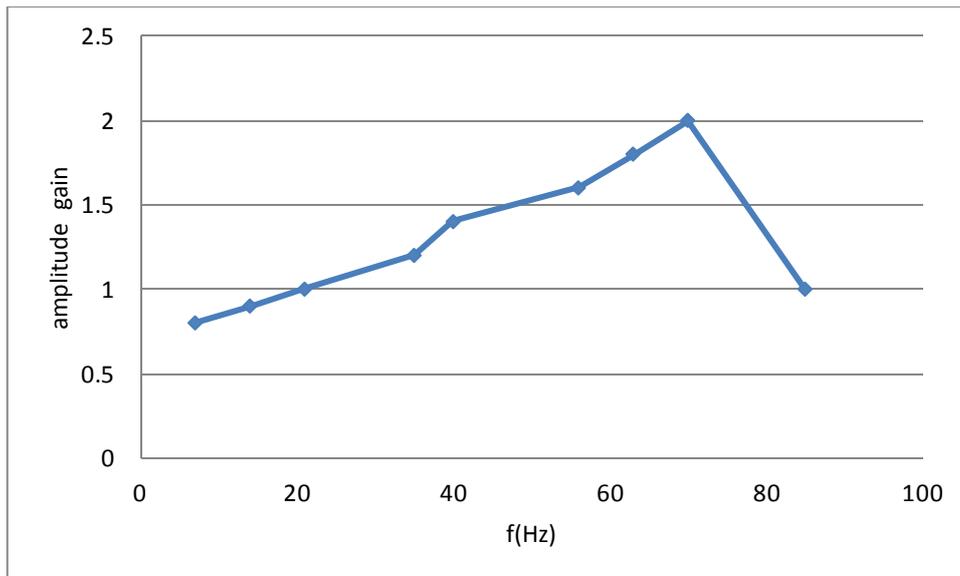


圖 5-12 裂隙內壓力波動之各頻率與所對應振幅比之簡化關係圖

### 5.2.2. 前提假設

就此模擬模型，本研究提出以下三點前提假設，並加以論證

#### (1) 塊體上舉速率趨近於定值

首先假設塊體在移動前後，其周圍之受力面積保持不變。接著施加圖 3-11 之壓力波動差，壓力波動平均差為 25000Pa、振幅 75000Pa 於塊體上，模擬不同頻率下之塊體抬升行為，繼而討論壓力波動於低頻及高頻時塊體之上舉速率。

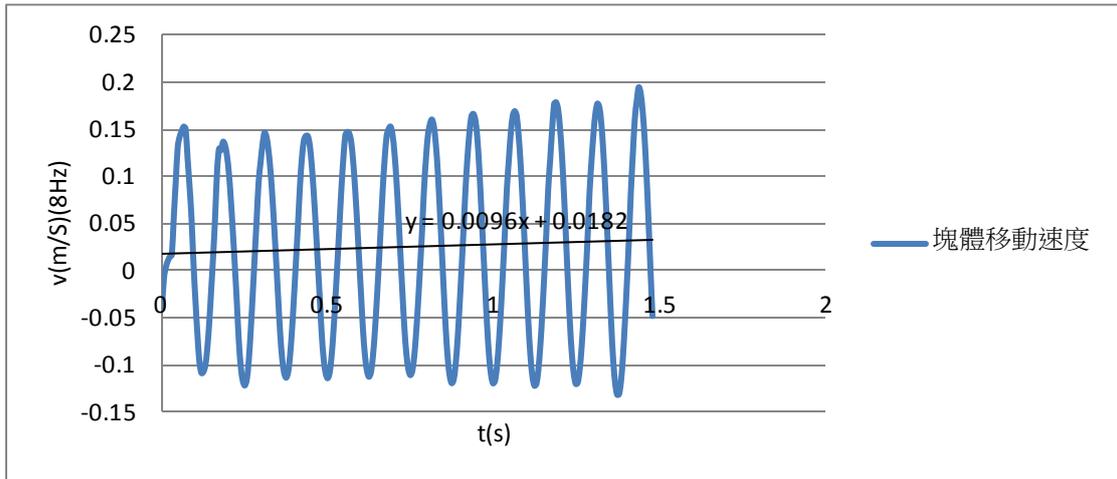


圖 5-13 在低頻(8Hz)下，塊體上舉速率(m/s)與時間(t)之關係圖

當壓力波動為低頻(8Hz)時(如圖 5-13)，塊體平均速度之斜率趨近於零，由此可得知塊體的上舉速率約為定值，塊體呈等速上升。

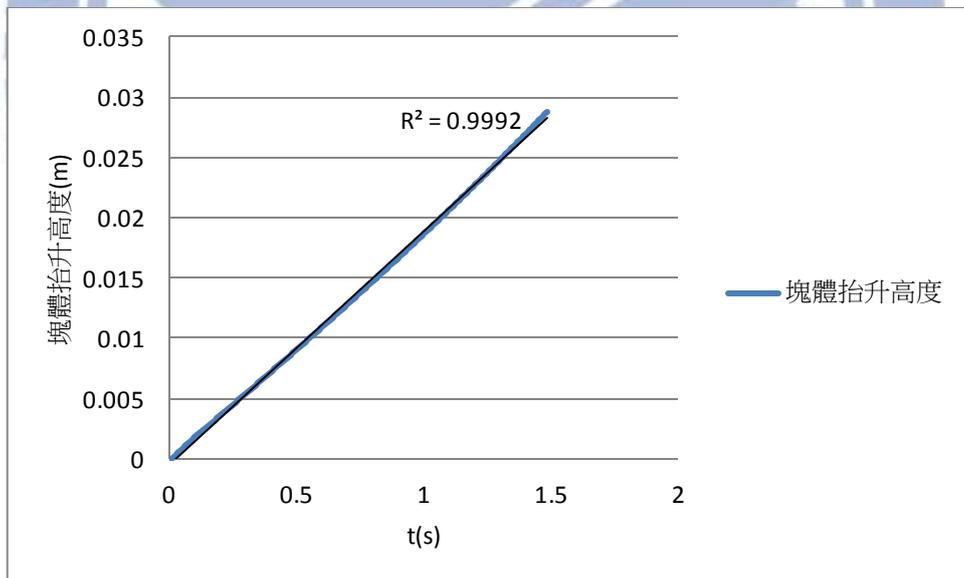


圖 5-14 在高頻(500Hz)下 塊體上舉速率(m/s)與時間(t)之關係圖

而當壓力波動為高頻(500Hz)時(如圖 5-14)，塊體的抬升高度隨時間呈線性增加，且線段中 $R^2$ 近於 1，代表此線段中各點點位變異性不大，代表塊體呈等速上升，其上舉速率約為定值。

此外本研究不考慮振幅及頻率，直接施予塊體壓力波動平均差 25000(Pa)，結果如下圖

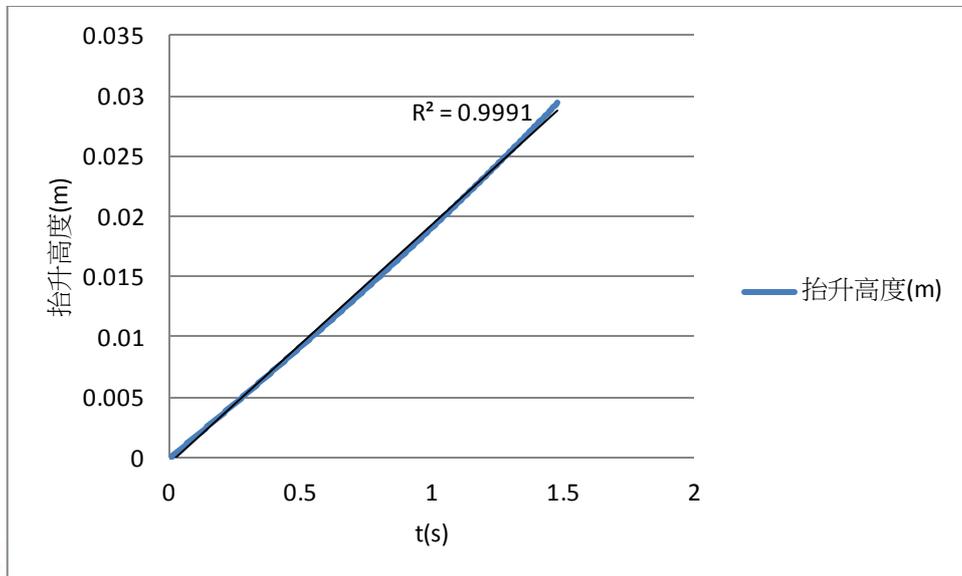


圖 5-15 當直接施與一上舉力時，塊體抬升高度(m)與時間(t)之關係圖

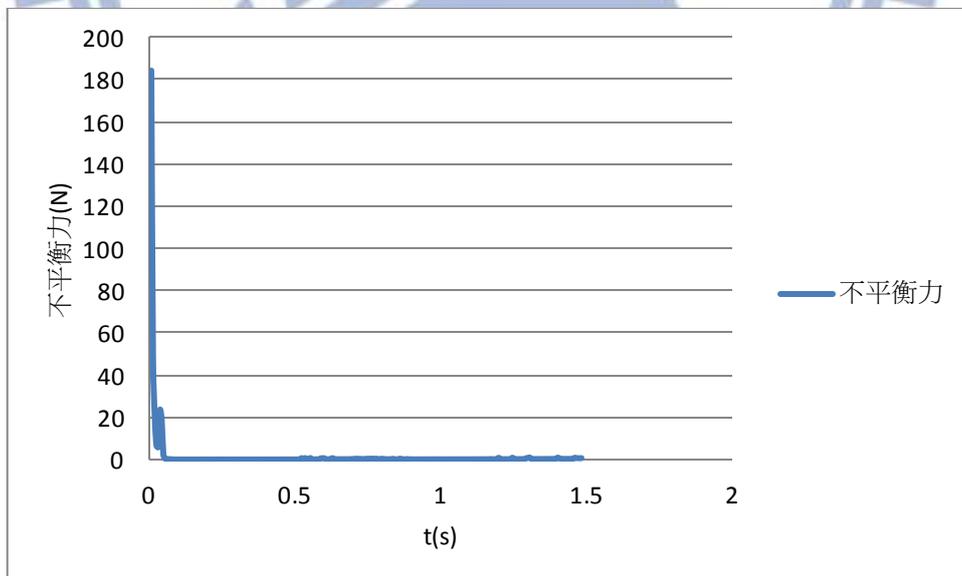


圖 5-16 當直接施與一上舉力時，不平衡力(N)與時間(t)之關係圖

由圖 5-15 顯示塊體隨時間之抬升高度呈線性遞增，且由圖 5-16 可觀察到塊體一開始受上舉力作用，產生加速度及初速，但隨後即被摩擦阻抗所抵銷，不平衡力為 0，塊體呈等速運動。

由上述分析可得知無論壓力波動為低頻或是高頻，塊體之上舉速率都趨於定值。因此往後在計算塊體之抬升高度時，可採線性疊加的方式。

### (2) 上舉速率與壓力波動之關係

在 5.1.1.1 節中，得知上舉速率並不會隨壓力波動差之振幅大小而變，因此若不考慮岩橋影響，可直接將振幅設為 0，考慮壓力波動壓力平均差值即可。

### (3) 上舉速率與淨壓力波動平均差之關係

本研究為證明塊體之平均上舉速率與淨壓力波動平均差呈線性正相關且具有疊加性。首先將壓力波動的振幅設為 0，並分別施加不同壓力波動平均差於塊體上，繼而可得到在不同的壓力波動平均差下，時間與塊體抬升高度的關係圖(圖 5-17)，線段之斜率即為塊體的平均上舉速率。

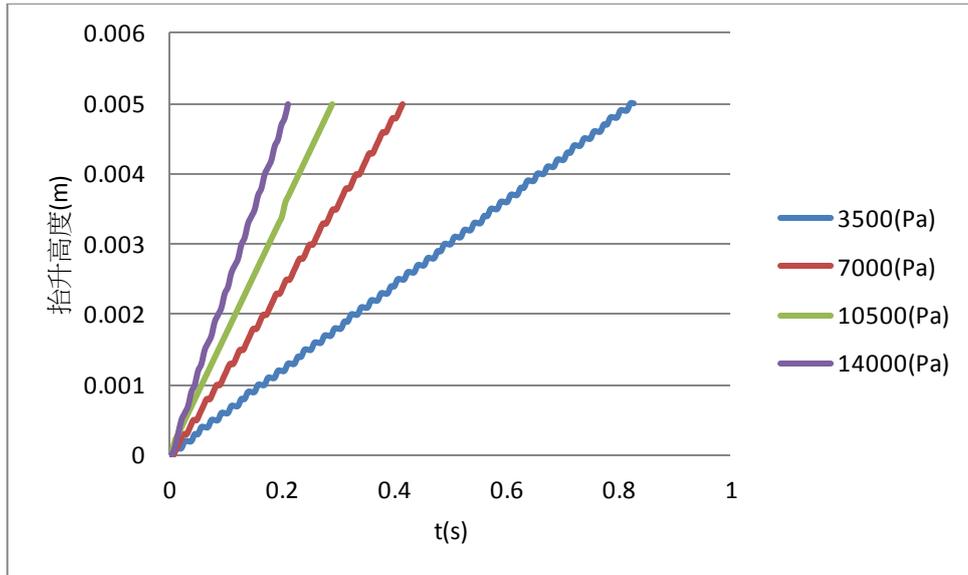


圖 5-17 不同淨壓力波動平均差對時間(t)與塊體抬升高度(m)關係圖

壓力波動平均差減去塊體重量(W)即為淨壓力波動平均差(F')。接著將計算所得淨壓力波動平均差分別與相對應的平均上舉速率作圖，並對塊體重量(W)進行正規化，可得到圖 5-18，由圖可得知淨平均壓力差與平均上舉速率呈正相關且具有疊加性，當淨平均壓力差增為 2 倍時，平均上舉速率也增為 2 倍。基於上述結論，往後若不考慮岩橋影響，在估算塊體上舉速率時，可直接計算淨壓力波動平均差之放大倍數即可。

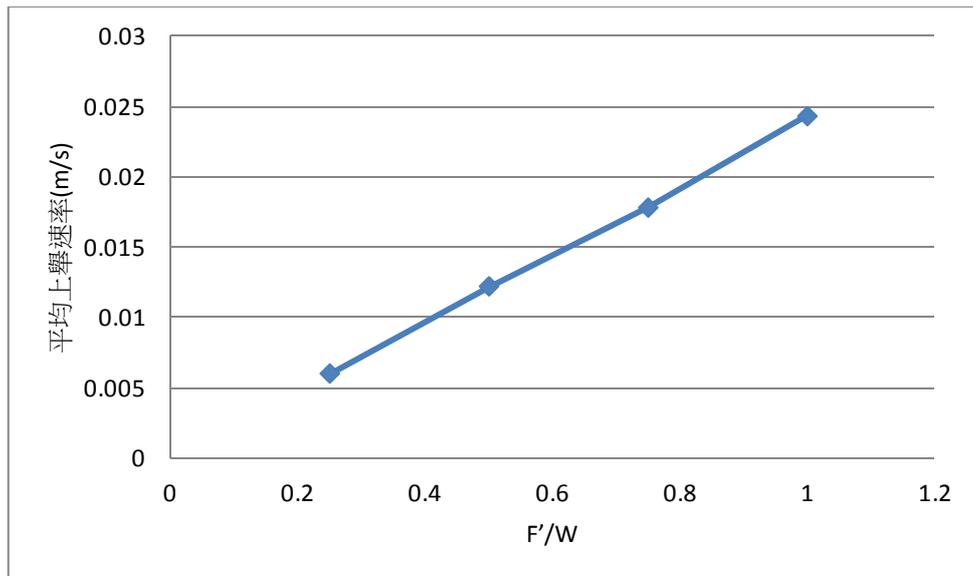


圖 5-18 不同淨壓力波動平均差所對應之塊體平均上舉速率關係圖

### 5.2.3. 建立分析流程

步驟一. 首先求得在各頻率中的壓力波動平均差，假設不受波動相位差影響。接著將圖 5-12 上之振幅比各減去 1 單位，其代表的物理意義為將裂隙底部的壓力波動減去岩體表面的壓力波動。再分別乘上各頻率於岩體表面上之相對應振幅大小，即可求得在各頻率中的壓力波動平均差，其轉換結果如圖 5-19 所示

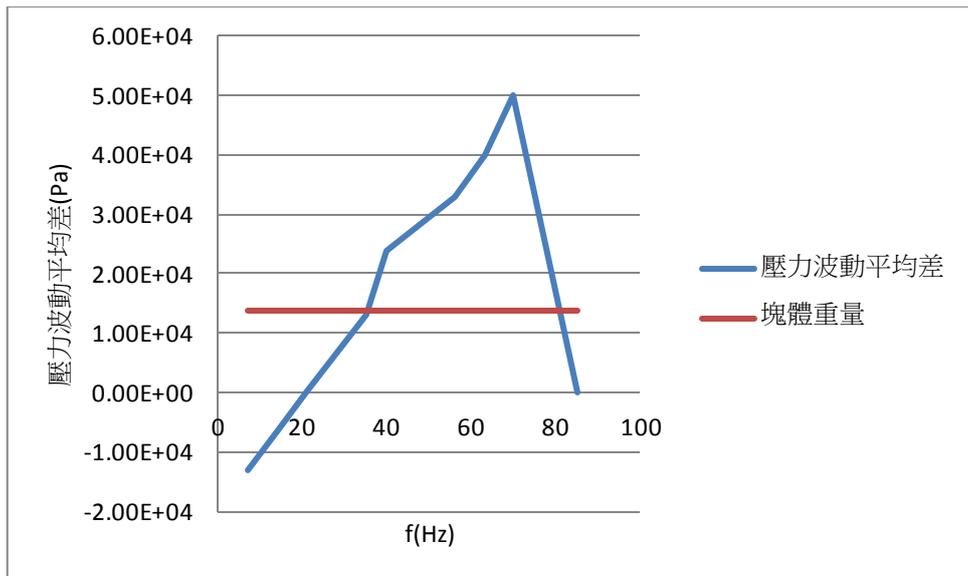


圖 5-19 各頻率(Hz)與壓力波動平均差(Pa)之關係圖

步驟二. 將壓力波動平均差減去塊體重量轉為淨壓力波動平均差，為求保守估計，淨壓力波動平均差為負值的部分本研究不納入考慮範圍，(如圖 5-20)。

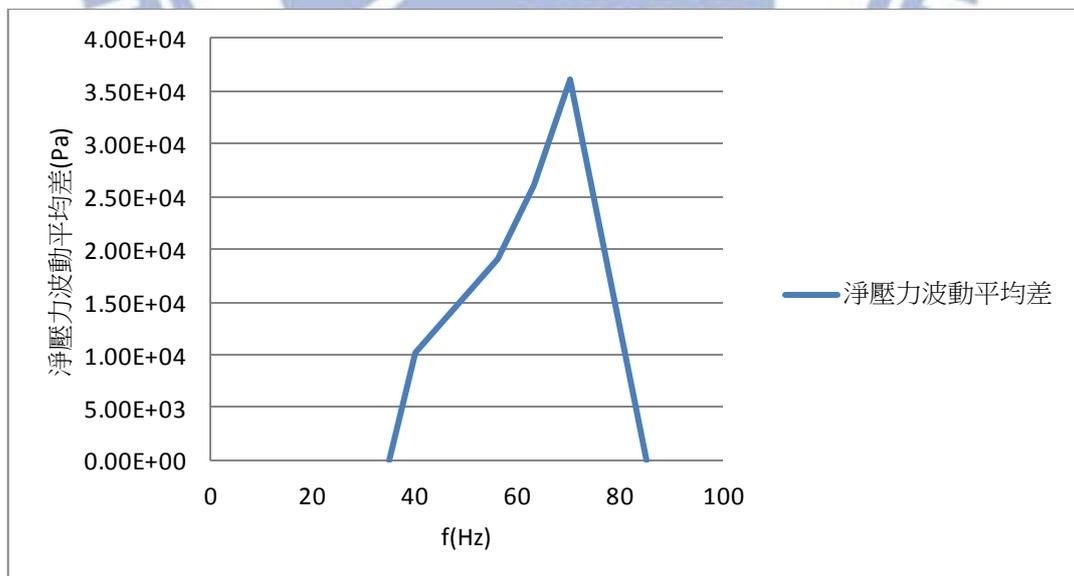


圖 5-20 各頻率(Hz)與淨壓力波動平均差(Pa)之關係圖

步驟三. 經由上述步驟得到淨壓力波動平均差後，帶入單岩塊虛擬試體之抽離模擬模型轉化為各頻率所對應之平均上舉速率，並加以積分即可得到塊體的總平均上舉速率。

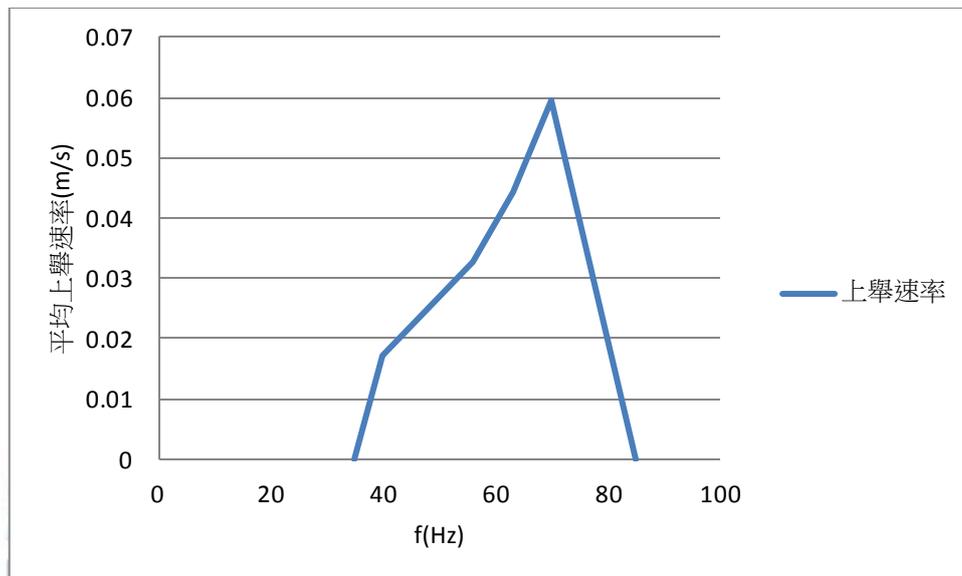


圖 5-21 各頻率(Hz)與所對應平均上舉速率(m/s)之關係圖

由於塊體平均上舉速度不受壓力波動振幅的影響，且與淨壓力平均差呈正相關且具有疊加性，因此不考慮振幅之影響直接帶入單岩塊虛擬試體之抽離模擬模型轉化得到塊體平均上舉速度(如圖 5-21)，並將其各頻率之平均上舉速度加總即可求得塊體之總平均上舉速度，經計算其值約為 1.5021 (m/s)。

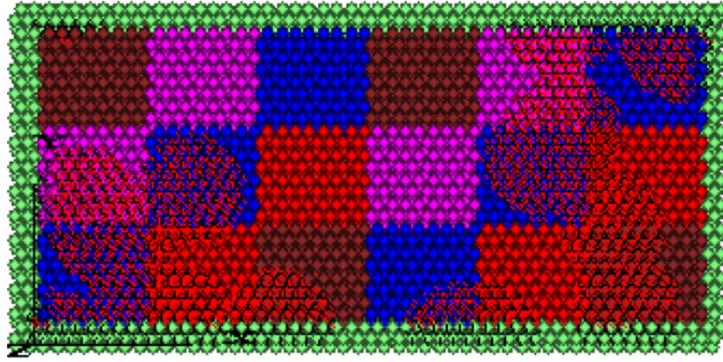
當塊體上舉高度超過塊體高度時，節理塊有可能被帶走脫離。基於此論點本研究可估算出塊體從受力到脫離所需的時間，換言之，當洪水來臨時，本研究可估算出此塊體是否會在此洪峰時間內發生抽離。

第六章將依據以上之概念發展一套可估計某一洪程下岩質河床發生塊體抽離沖刷量之簡化分析方法。

### 5.3 多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬

本研究模擬當岩盤上多塊塊體同時受到壓力波動作用時塊體逐漸脫離的過程，並探討當塊體排列及岩橋設置改變時，塊體上舉速率之變化。

進行實際模擬前先進行簡單的模擬測試，首先將塊體與塊體之間設為完全連通之節理面，只在塊體底面的節理面上設置強度非常高且圓盤半徑為 0.5(m)之岩橋(如圖 5-22(a))，並施加振幅為 75000(Pa)、平均差為 25000(Pa)、頻率 4Hz 的壓力波動於試體表面的塊體上，試驗結果如圖 5-22、圖 5-23。



(a)

0.04	0.04	0.16	0.12	0.00	0.00
0.00	0.00	0.19	0.12	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(b)

圖 5-22 圖(a)：岩橋(紅色)之分布位置圖，圖(b)：與圖(a)相對應塊體於第一秒抬升高度(m)

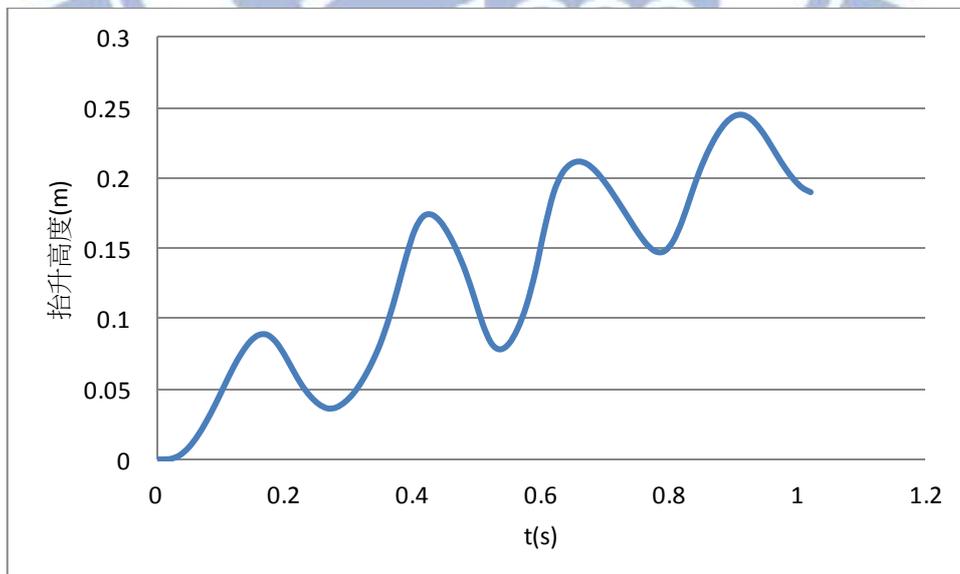


圖 5-23 最快脫離塊體之抬升高度(m)與時間(t)關係圖

由圖 5-22 可發現當塊體底面沒岩橋或是岩橋所占比例較低時塊體較容易被抬升。同時紀錄上舉速率最快之塊體其抬升高度隨時間的變化，從圖 5-23 中可看出塊體每一週期所抬升的高度都不同，推測為塊體上舉時受到周圍塊體的影響導致塊體抬升的過程並不穩定。

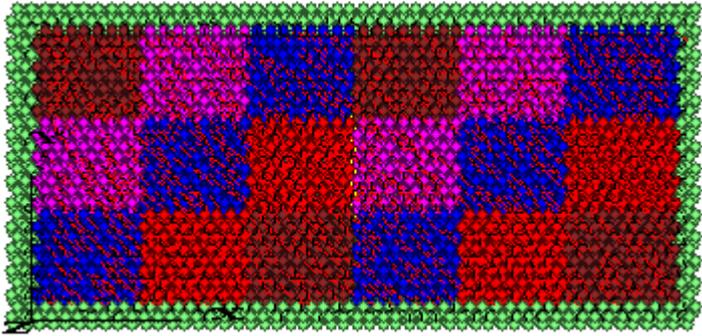
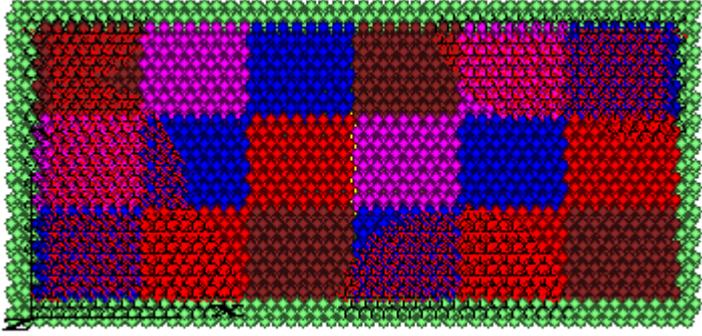
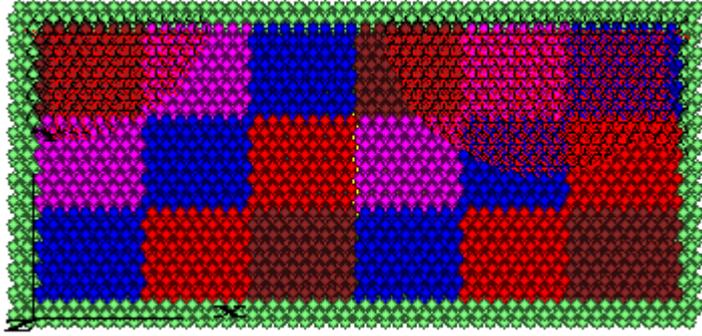
由此模擬測試結果證明此模擬模型為可行的。接著以下討論不同因子的影響。

### 5.3.1 影響因子探討：塊體排列及岩橋佈置

#### (1) 岩橋佈置

本模擬為探討岩橋設置密度與塊體脫離之關係，先將岩橋所占比例 0.5 固定，改變圓盤(disk)之半徑(Radius)進行模擬，並紀錄上舉速率最快的塊體隨時間變化之抬升高度。表 5-6 所記錄之抬升高度為塊體於第一秒內之抬升高度。

表 5-6 圓盤半徑 Radius(m)與塊體抬升高度(m)之關係圖

圓盤半徑 Radius(m)	岩橋設置位置	第一秒抬升 高度(m)
0.005		0.0282
1		0.1242
1.5		0.1793

由表 5-7 可觀察：隨圓盤(disk)半徑(Radius)增大，岩橋之設置位置也更集中，導致部分岩塊周圍節理不含有岩橋，呈完全連通，使塊體抬升速率加快，容易產生脫離。且由於岩橋所占比例(area-ratio)固定，可推估出此現象之極端狀況為節理面上一半有岩橋連接、一半則分離(如圖 5-24)，使圓盤半徑(Radius)對上舉速率之影響有一上限值。

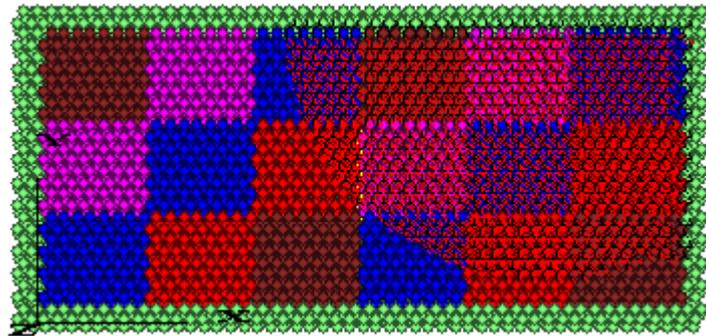
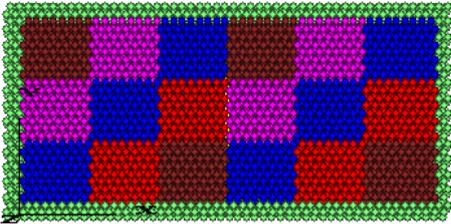
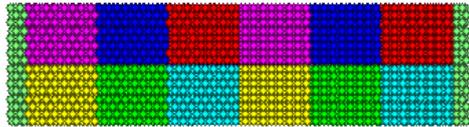
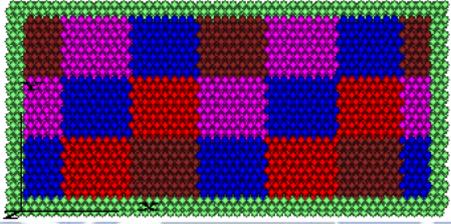
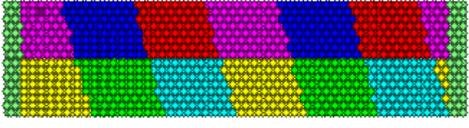
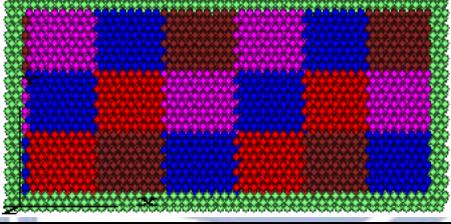
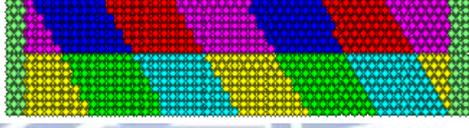


圖 5-24 當圓盤半徑(Radius)2.5(m)時，岩橋之設置位置

## (2)塊體排列

本研究先建立節理傾角  $90^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $60^\circ$  三種試體(如表 5-8)，並模擬當節理傾角  $90^\circ$  時，改變岩橋所占比例 0、0.5、1 對塊體抬升高度之影響。接著將三種試體分別模擬當節理完全連通以及部分連通(岩橋所占比例 0.5)兩種情形，探討塊體脫離之過程及行為。並施加如圖 3-11 之壓力波動於試體表面塊體上進行模擬，以下為模擬試驗結果。

表 5-7 不同節理面傾角之多岩塊岩床虛擬試體

傾角	俯視圖	側視圖
90°		
75°		
60°		

(1)節理傾角 90°：圖 5-25 為節理傾角 90°時之塊體排列俯視圖，表 5-8 至 5-10 為不同節理狀況下，與圖 5-25 相對應塊體於第一秒抬升高度(m)

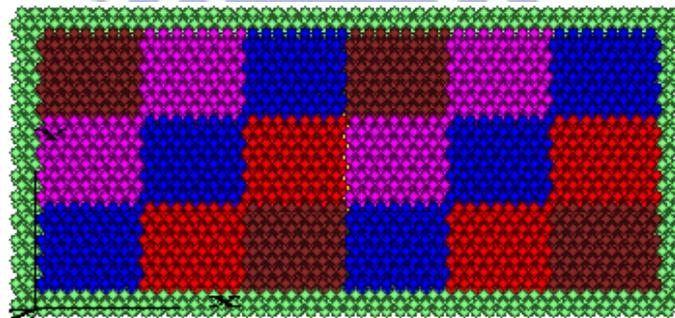


圖 5-25 節理傾角 90°時之岩塊分布位置俯視圖

表 5-8 完全連通(傾角 90°且岩橋所占比例為 0)

0.1770	0.2120	0.1550	0.1550	0.1230	0.0717
0.2970	0.3720	0.3300	0.2020	0.1590	0.0868
0.0914	0.0417	0.0505	0.0754	0.0814	0.0657

表 5-9 部分連通(傾角 90°且岩橋所占比例為 0.5)

0.1790	0.2080	0.2020	0.1260	0.1020	0.0667
0.3090	0.3610	0.3140	0.1840	0.1500	0.0799
0.1160	0.0454	0.0592	0.0904	0.0824	0.0651

表 5-10 完全密合(傾角 90°且岩橋所占比例為 1)

0.1770	0.2050	0.1860	0.0938	0.0819	0.0637
0.2930	0.3140	0.2390	0.1590	0.1250	0.0760
0.1180	0.0747	0.0570	0.0749	0.0657	0.0570

本研究假設節理傾角為向右傾斜，因此最右邊岩塊會先脫離，本研究即定義此最先脫離之岩塊為關鍵岩塊，多岩塊脫離之行為及抬升高度大致與下列幾點有關：(1)岩橋強度、(2)關鍵岩塊脫離與否、(3)塊體之間作用力、(4)塊體脫離移動之方向及距離

經表 5-8 至 5-10 得知當節理面含有岩橋時，岩塊整體抬升高度會降低，且隨著岩橋所占比例越高，岩塊整體抬升高度越低。本模擬因節理傾角為  $90^\circ$ ，所以不受關鍵岩塊之影響。而當岩塊被抬升產生位移時，周圍塊體會施予塊體與移動方向相反之摩擦阻抗，但因節理傾角為  $90^\circ$ ，所受合力垂直向上，岩塊會沿最短路徑垂直向上抬升。

(2)節理傾角  $75^\circ$ ：圖 5-26 為節理傾角  $75^\circ$ 時之塊體排列俯視圖，表 5-11、5-12 為不同節理狀況下，與圖 5-26 相對應塊體於第一秒抬升高度(m)

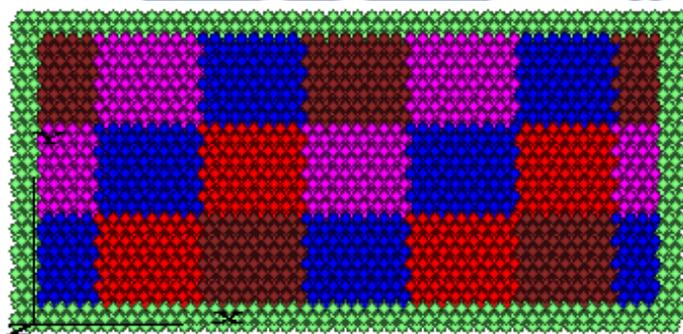


圖 5-26 節理傾角  $75^\circ$ 時之岩塊分布位置俯視圖

表 5-11 完全連通(傾角 75°且岩橋所占比例為 0)

0.160	0.160	0.180	0.169	0.168	0.198	2.280
0.183	0.183	0.202	0.214	0.219	0.254	1.970
0.144	0.139	0.161	0.121	0.122	0.152	0.398

表 5-12 部分連通(傾角 75°且岩橋所占比例為 0.5)

0.0065	0.0065	0.0264	0.0498	0.0485	0.0372	10.20
0.0365	0.0365	0.0640	0.0619	0.0553	0.0853	10.30
0.0239	0.0239	0.0531	0.0464	0.0358	0.0361	10.40

圖 5-26 顯示岩塊會先從關鍵岩塊開始由右向左依序抬升，含有岩橋時，岩塊整體抬升高度會降低。但比較表 5-11、5-12 可觀察到當試體含有岩橋時，關鍵岩塊之抬升高度反而比較高，其原因為節理連通時，塊體的平均抬升量較高，關鍵岩塊受周圍塊體之影響時間也較長，導致脫離所需時間較長，反之當塊體含有岩橋，試體平均抬升量低，關鍵岩塊受周圍塊體之影響時間短，脫離所需時間也較短(如圖 5-27)，但此前提為壓力波動之最大值須大於關鍵岩塊之岩橋強度，此關鍵塊體才會被抬升。此外，因節理傾角為 75°，且正向力與節理面垂直，會產生水平向分力，使岩塊往右上方移動。

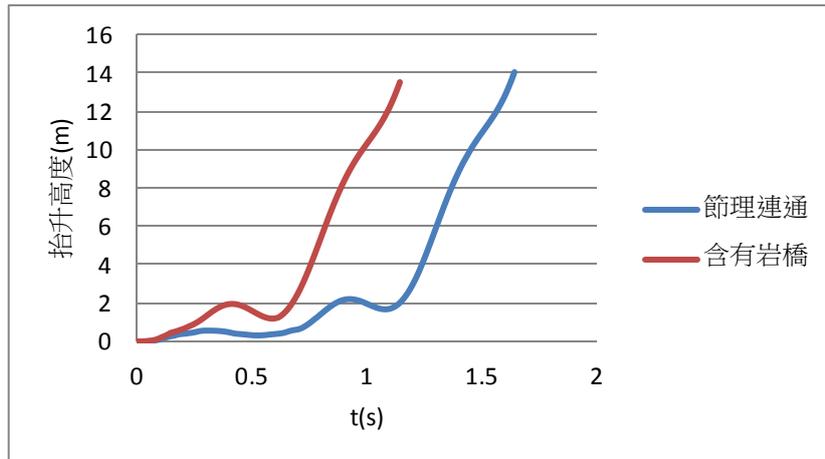


圖 5-27 關鍵岩塊於不同節理條件下，抬升高度(m)與時間(t)關係圖

(3) 節理傾角  $60^\circ$ ：圖 5-28 為節理傾角  $60^\circ$  時之塊體排列俯視圖，表 5-13、5-14 為不同節理狀況下，與圖 5-26 相對應塊體於第一秒抬升高度(m)

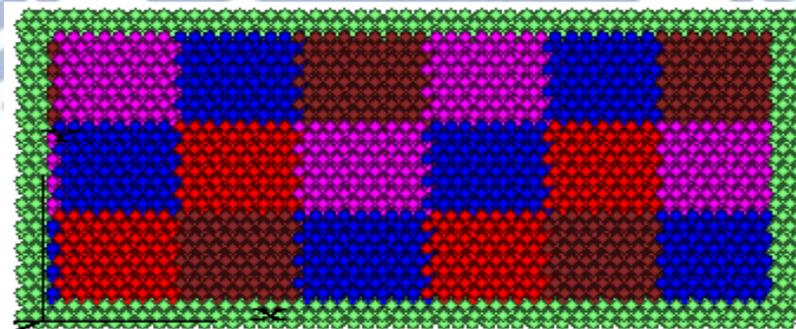


圖 5-28 節理傾角  $60^\circ$  時之岩塊分布位置俯視圖

表 5-13 完全連通(傾角 60°且岩橋所占比例為 0)

0.0207	0.0198	0.0249	0.0610	0.1560	0.1820	0.2220
0.0817	0.1350	0.1270	0.1920	0.2390	0.2580	0.3530
0.0019	0.0017	0.0115	0.1540	0.1840	0.2100	0.2250

表 5-14 部分連通(傾角 60°且岩橋所占比例為 0.5)

0.0000	0.0000	0.0000	0.0666	0.0565	0.0565	0.2410
0.0008	0.0008	0.0124	0.0401	0.0568	0.0831	0.3620
0.0004	0.0004	0.0035	0.0064	0.0415	0.0391	0.2200

當節理傾角為 60°時，岩塊同樣由關鍵岩塊開始向左依序抬升。含有岩橋之塊體抬升量也比節理連通之塊體低，且因塊體傾角為 60°會受水平方向作用力之影響，往右上方脫離，但與傾角 75°相比其水平方向分力較小，水平移動量也會較少，因此雖從表 5-12 及表 5-14 中觀察兩試體之最高抬升高度差不多(關鍵岩塊不列考慮範圍)，但實際上節理傾角為 75°之塊體移動距離較長，較快脫離。由上述試驗可得知關鍵岩塊在塊體之上舉速率中扮演重要的角色，而當節理傾角為 90°時，受關鍵岩塊影響小，塊體上舉速率最快。

### (3) 關鍵岩塊

由上述試驗得知關鍵岩塊於塊體抽離之重要性，以下分就節理傾角  $60^\circ$ 、 $75^\circ$  兩種試體，探討關鍵岩塊脫離前後，岩塊上舉速率之變化，並與一般情形作比較，以下為試驗結果。

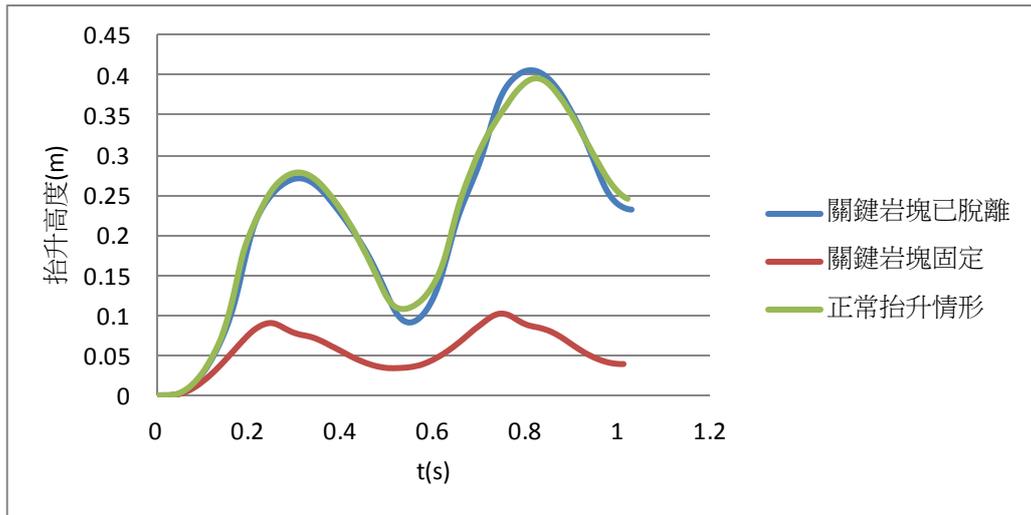


圖 5-29 在關鍵岩塊脫離前後，塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖  
(節理傾角  $75^\circ$  之虛擬試體)

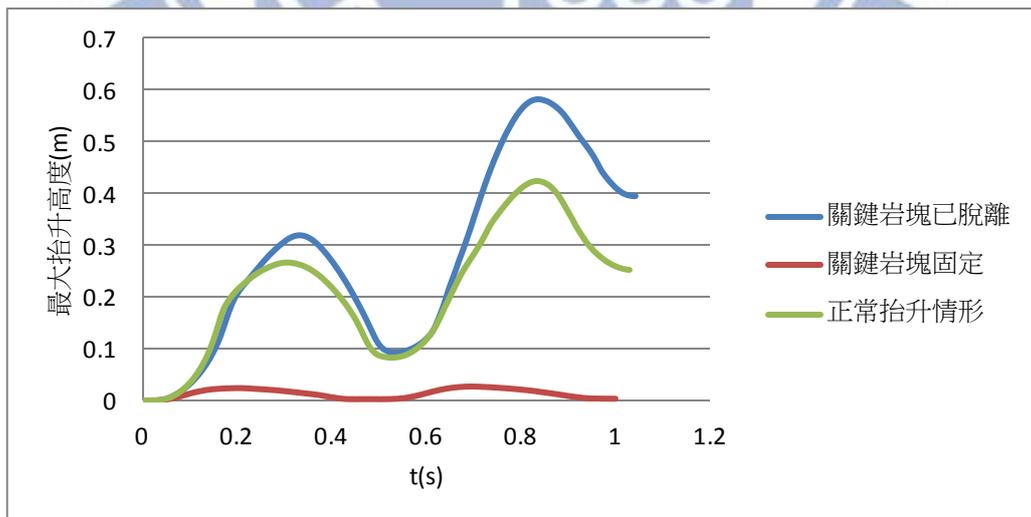


圖 5-30 在關鍵岩塊脫離前後，塊體抬升高度(m)與時間(t)關係圖  
(節理傾角  $60^\circ$  之虛擬試體)

由圖 5-30 可觀察關鍵岩塊脫離前，塊體抬升高度有限，須沿節理面緩慢向上抬升；關鍵岩塊一旦脫離後，其他塊體由右向左依序抬升。且比較圖 5-29 與圖 5-30，隨著節理面角度遞減，關鍵岩塊脫離前後之抬升高度變化也越大，甚至當關鍵岩塊脫離後，由於節理面傾角較小，受周圍塊體之摩擦阻抗減少，塊體之第一秒抬升高度 0.395(m) 比節理傾角  $90^\circ$  時之第一秒抬升高度 0.372(m) 還大，由此可知，在進行多塊體岩床抽離模擬前，可先研判關鍵岩塊是否易抽離，越易脫離，關鍵岩塊於岩床沖刷速率扮演之角色越形重要。

### 5.3.2 多岩塊岩床虛擬試體之抽離模擬之簡化分析方法

多岩塊岩床塊體抽離之微觀數值模擬分析流程與單岩塊模擬模型大致相同，以下討論當節理面傾角為  $90^\circ$  以及不為  $90^\circ$  時，塊體抽離簡化分析之建構方法。

本研究假設節理完全連通且節理面傾角為  $90^\circ$ ，同時施加圖 3-11 之壓力波動於單岩塊模型表面各塊體上，得到此試體中為 0.512(m/s)，比多岩塊岩床上塊體最快脫離塊體之上舉速率 0.372(m/s) 還快，依保守估計，可將多岩塊岩床虛擬試體改為單岩塊虛擬試體進行模擬，而施力方式需同時施加與塊體重量同等之淨壓力波動平均差於各塊體上。

當節理面傾角為不為  $90^\circ$  時，由圖 5-30 可發現關鍵岩塊之影響很大，甚至可說當關鍵岩塊一旦脫離，整層塊體也隨後脫離，因此，本研究建議可直接把關鍵岩塊帶入單岩塊模擬模型進行模擬，而施力方式則同樣施加與塊體重量同等之淨壓力波動平均差於各塊體上，進而得到關鍵岩塊之上舉速率，最後帶入單岩塊抽離微觀數值模擬之分析流程即可判斷在多岩塊岩床中，塊體抽離是否會發生以及脫離所需時間。

#### 5.4. 小結

本章第一部分探討影響單岩塊抽離模擬模型之重要因子，並建立塊體抽離之微觀模擬之建構流程。第二部分則探討在不同的岩橋設置、岩塊排列下，多岩塊岩床虛擬試體之塊體脫離過程以及上舉速率。本章虛擬沖刷試驗之結果可供為第六章建構簡化分析方法之基礎。

## 第六章 簡化分析方法

### 6.1 前言

由第五章之模擬可知若只考慮單岩塊抽離，因為忽略周圍岩塊與節理面上岩橋之影響，其抽離速率相對較快，因此考量若將弱面發達岩石河床之岩塊抽離沖刷簡化為單岩塊抽離作用之累積效果將相對保守。經由現地量測或室內實驗可得到模擬所需資料，再帶入單岩塊虛擬試體之抽離模擬模型進行分析，即可判斷現地塊體是否會發生抽離，並估算出其上舉速率及抽離所需時間。但在現地量測中，水流壓力波動較難量測，就算順利取得也必須帶回室內經由一系列之轉換獲得壓力波動之頻譜圖，再進行分析，不易於現場進行判斷，因此本研究嘗試提出簡化分析方法，目的在能夠保守地估計岩石河床於特定洪程下發生岩塊抽離之沖刷深度與歷程。

### 6.2 分析方法與步驟

簡化分析方法之建構原理與步驟說明如下。

步驟一：由公式 2-5 中擷取出上舉力公式，並將塊體所受之上舉力( $F_{up}$ )減去水流中之塊體重( $W'$ )，可得到塊體之淨上舉力，以此作為塊體上下之淨壓力波動平均差( $F'$ )。

$$F_{up} = C_I \cdot \gamma_w \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot x_b^2 \quad (\text{式 6-1})$$

$$W' = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot x_b^2 \cdot z_b \quad (\text{式 6-2})$$

上式中  $x_b=x$  方向塊體長度； $z_b=z$  方向塊體長度； $g$ =重力加速度；  
 $\gamma_s$ =材料單位重； $C_I$ =動力脈衝係數； $\gamma_w$ =水單位重

步驟二：為求保守估計，本分析模型忽略摩擦阻抗差異之影響且假設岩體周圍節理為完全連通。並以現地基本參數(密度、楊氏係數)建立  $1 \times 1 \times 1$ (m) (長×寬×高)之單岩塊虛擬試體，接著就現地岩塊之節理面進行參數率定，於此假設節理面之正向勁度(kn)= $1e10$ (N/m)、剪向勁度(ks)= $3e9$ (N/m)。並施以與塊體重量同等之淨壓力波動平均差，可得塊體上舉速率為  $0.0023$ (m/s)。

步驟三：由現地量測，塊體  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各方向之長度可推估出塊體質量(m)，河道水深及流速估算出塊體所受之淨壓力波動平均差。此外由於塊體平均上舉速率不受壓力波動之振幅大小影響且與淨壓力波動平均差呈線性正相關。因此可直接將現地塊體重量以及所受之淨上舉力與模擬模型中之虛擬試體重量及淨壓力波動平均差以牛頓第二運動公式(式 5-3)進行比較分析，得到現地塊體加速度與模擬試體加速度間之比值。

$$F = m \times a \quad (\text{式 6-3})$$

速度為加速度對時間之積分，當作用時間固定，速度與加速度呈正相關，經由轉換即可推得現地塊體之平均上舉速率。本研究將淨壓力波動平均差(F')對塊體重量(W)進行正規化，繪出對應之上舉速率關係圖（如圖 6-1）。

當塊體上舉高度超過塊體厚度時節理塊完全脫離。因此可推估出塊體脫離所需時間，也可判斷在此洪程歷時內，有幾層之岩塊會發生抽離沖刷。

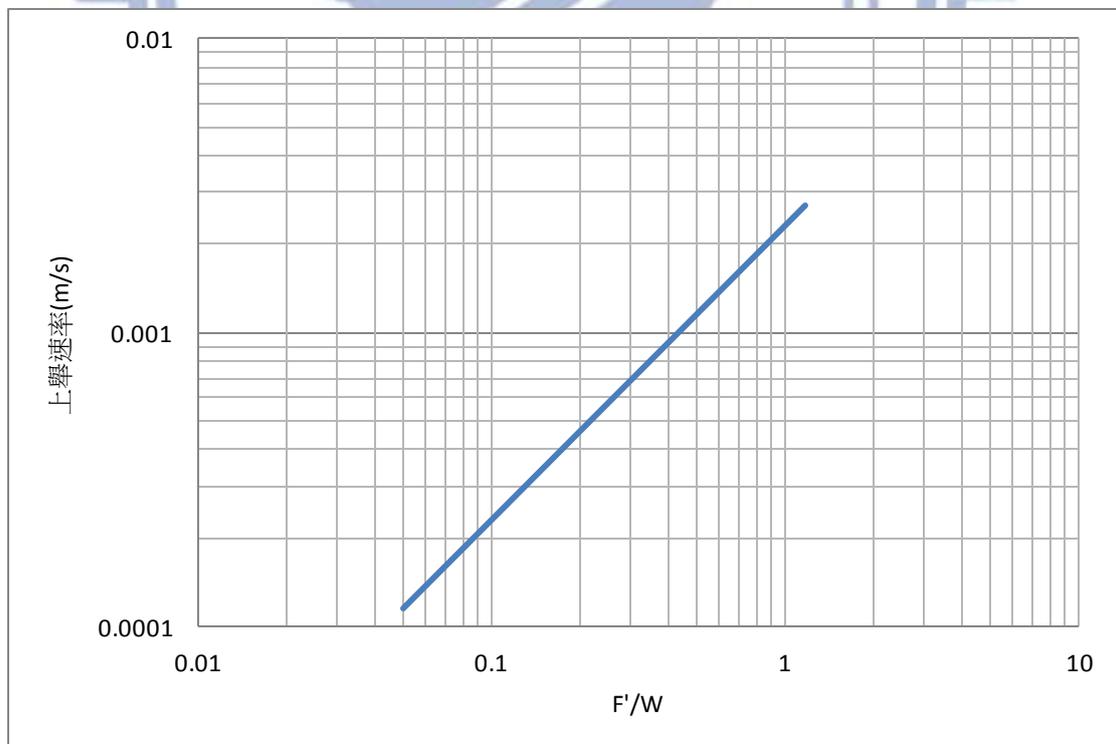


圖 6-1 不同淨壓力波動平均差(F')與相對應之塊體上舉速率關係圖

圖 6-2 為單岩塊抽離微觀數值模擬之分析流程。

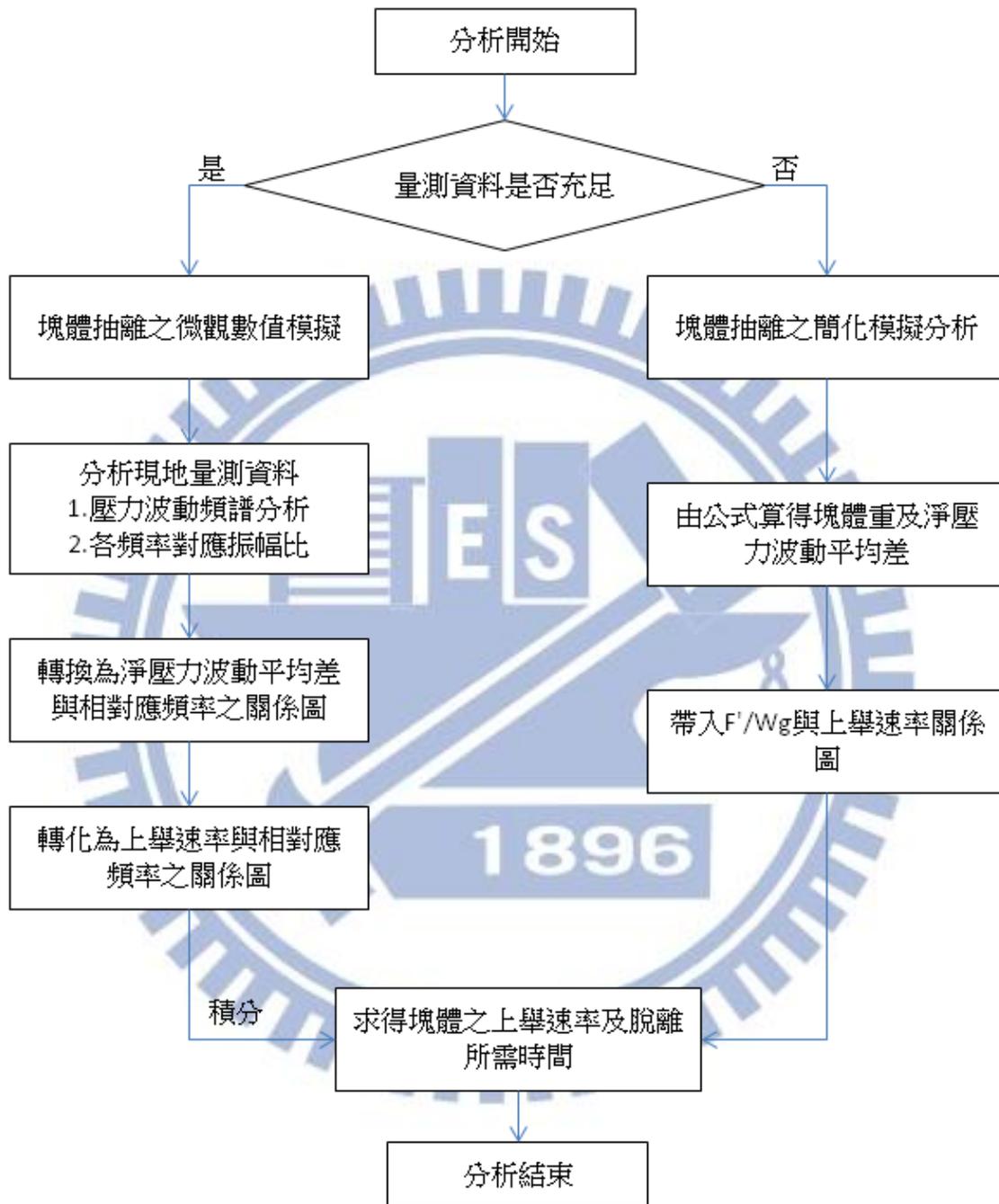


圖 6-2 單岩塊抽離微觀數值模擬之分析流程圖

### 6.3 案例應用

本節就一現地案例進行單岩塊抽離微觀數值模擬之簡化分析。研究案例為建造於大漢溪主流之義興壩，其現地量測資料取自設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究報告書(國立交通大學防災與水環境研究中心,2010)，以下先描述義興壩周圍地質條件、流況，等基本資料，繼而進行塊體抽離模擬之簡化分析。

#### (1) 義興壩之基本簡介

義興壩建造於大漢溪主流，位於石門水庫上游約 3 公里處。壩長 100 公尺，主要為一混凝土重力式格籠壩及混凝土重力式溢流壩所組成之防砂壩。義興壩址之基層岩盤為木山層，在壩基部分主要以厚層塊狀砂岩及砂頁岩互層為主。附近地層位態約為 N16E/8N，地層走向與水流流向大致平行。義興壩前形成一巨大的沖刷坑，其沖刷特徵在岩石成塊狀脫落，不論厚層塊狀砂岩或砂頁岩互層岩塊沿著節理面及層面脫落的現象均相當明顯。義興壩附近之粉砂岩單壓強度平均約為 80 MPa。由於此區砂岩多屬於正石英砂岩，強度高抗物理風化能力強，表面磨蝕沖刷行為較不明顯，現場現象觀察大部分呈現的沖蝕機制由塊體抽離所主控。(國立交通大學防災與水環境研究中心,2010)

## (2)現地量測資料

依據現地調查量測，義興壩附近下游左岸地層位態約為 N16E/8N，右岸及壩基附近位態約 N16E/16N，岩體單位重  $2.7\text{t/m}^3$ ，本區域砂岩節理發達，有 2 組垂直河道且互相正交的解壓節理，節理間距約 0.25~1.5 公尺，層面間距約 0.7~1.5 公尺，且本區域砂岩風化程度不高，節理面弱化程度不高，解壓節理間距約為 1~5 釐米，填充物多為岩石碎屑或無凝聚性土壤。

水理參數採分析期間最大洪水量為民國 93 年艾利颱風，流量為 8,527 cms，與 50 年重現期距之洪水量(8,222 cms)相近，故水理參數採用 CCHE 2D 於  $Q_{50}$  時的分析結果，水流流速 18.4(m/s)，跌水距離為 7.4(m)、尾水深為 31(m)，射流水柱厚為 3.1m。

## (3)岩床表面塊體脫離分析

經由節理間距以及層面間距可得到義興壩附近塊體大小約  $1.5 \times 1.5 \times 1.5\text{(m)}$ ，同時將現地量測資料岩體單位重  $2.7\text{t/m}^3$ ，水流流速 18.4(m/s)，沖刷坑深度 35.4(m)，射流水柱厚=3m 帶入公式即可推得淨壓力波動平均差( $F'$ )=51557(N)、塊體重  $W=89393.6\text{(N)}$ 。本研究假設節理面上摩擦係數為 0.5，藉由式 5-2 推得抗剪阻抗為 215055(N)，大於淨壓力波動平均差( $F'$ )，塊體只可能呈等速運動上升，最後經由

$F'/W = 0.57$  及圖 6-1，估得上舉速率約為  $0.0013(\text{m/s})$ ，塊體厚度一半為  $0.75(\text{m})$ ，則此塊體脫離所需時間為  $577(\text{s})$ 。且假設當岩塊上舉速率小於  $0.0001(\text{m/s})$  即無法被沖蝕脫離，以此範例當水流流速減至  $13.5(\text{m/s})$ ，塊體  $F'/W = 0.02$ ，上舉速率小於  $0.0001(\text{m/s})$  岩塊無法脫離。

#### (4) 探討岩盤下刷深度

本節續以艾利颱風為例，分析洪程內岩盤之沖刷深度

步驟一.: 艾利颱風之水理參數參考設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究報告書(國立交通大學防災與水環境研究中心,2010)，該報告書中採民國 90 年地形測量資料，經 CCHE 2D 程式進行定床水理分析後，可算得各重現期距之水流流量，進而求得相對應之水柱厚  $D(\text{m})$ 、尾水深  $Y(\text{m})$  及流速  $V(\text{m/s})$ (如表 6-1)。

表 6-1 各重現期距流量與相對應水柱厚、尾水深及流速關係

重現期距(年)	流量(cms)	水柱厚 $D(\text{m})$	尾水深 $Y(\text{m})$	流速 $V(\text{m/s})$
100	9624	3.935	30.96	18.37
50	8222	3.55	31.09	18.11
25	6789	2.69	28.95	17.26
20	6322	2.488	28.42	17.06
10	4868	1.952	27.72	16.25
5	3417	1.372	25.65	15.35
2	1537	0.768	22.53	12.6

步驟二：艾利颱風之流量資料來自雲霞水文測站，經由集水區比面積換算法求得義興壩之流量(如表 6-2)，繼而繪出義興壩於艾莉颱風洪程內之水文歷線圖(如圖 6-3)，且經由岩塊抽離簡化分析得知當水流流量為 10 年重現期之流量  $Q_{10}=4868(\text{cms})$ 時，其  $F'/W = 0.64$ ，查圖 6-1 得知塊體上舉速率為  $0.00015(\text{m/s})$ ，本研究假設當岩塊上舉速率小於  $0.0001(\text{m/s})$ 即無法被沖蝕脫離，因此本研究將 10 年重現期之流量  $Q_{10}$  作為判斷塊體是否抽離之臨界值，當流量小於  $Q_{10}$ ，則不需列入考慮，有效洪程 2004/08/24 12:00AM 至 2004/08/25 9:00AM。

表 6-2 艾莉颱風洪程內之流量-時間關係圖

2004/08/24	12:00PM	01:00 PM	02:00PM	03:00 PM	04:00 PM	05:00 PM	06:00 PM
流量(cms)	1582.33	1797.93	1970.62	1878.97	1846.30	1822.02	2126.29
07:00 PM	08:00 PM	09:00 PM	10:00 PM	11:00 PM	12:00AM	08/25	01:00AM
2135.15	2488.37	2949.46	3850.60	4542.60	4914.70		5397.09
02:00 AM	03:00 AM	04:00 AM	05:00 AM	06:00AM	07:00 AM	08:00 AM	09:00 AM
6122.02	6358.84	6813.11	7360.89	7249.29	6813.11	6393.12	5939.72
10:00AM	11:00AM	12:00 PM	01:00 PM	02:00PM	03:00PM	04:00 PM	05:00PM
4570.60	3639.16	3080.46	2576.83	2401.76	2073.61	1781.98	1612.12
06:00 PM	07:00 PM	08:00PM	09:00 PM	10:00 PM	11:00 PM	12:00 AM	
1389.93	1335.79	1187.27	1119.94	1049.17	1009.16	953.62	

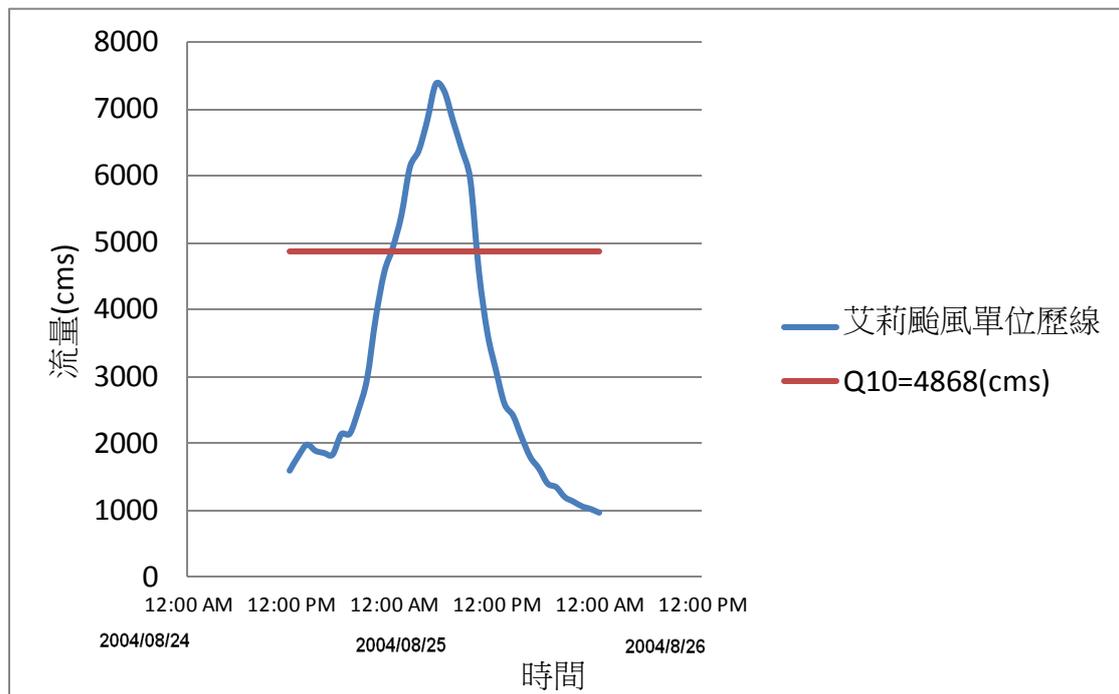


圖 6-3 艾莉颱風洪程內之水文歷線圖

步驟三.：擷取有效洪程內之流量，並分別對各重現期距之水流流量進行內差可得各流量之相對應參數水柱厚  $D(m)$ 、尾水深  $Y(m)$  及流速  $V(m/s)$ ，進行岩塊抽離之簡化分析，但分析前需先檢核其最大淨上舉力是否小於總抗剪阻抗，由式 (6-1) 與 (6-2) 可計算  $F'$  為 31290(N)，式 (5-2) 則可推得總抗剪阻抗為 233948(N)，由此可知總抗剪阻抗力大於淨壓力波動平均差( $F'$ )，塊體只可能呈等速運動上升。並藉由  $F'/W$  及圖 5-20 可求得塊體上舉速率(m/s)及每小時抬升高度(m/hr)，最後將其加總即可求得岩床下刷深度，以下為詳細計算流程。

表 6-3 中，第 1-4 欄為已知，第 5 欄須隨累積下刷深度作修正，並經由公式 2-6 求得  $C_t$ (第 6 欄)，再帶入公式 6-1、6-2 求得淨上舉力  $F'$ (第 7 欄)及  $F'/W$ (第 8 欄)，最後藉由查圖 6-1 即可求得塊體之上舉速率(第 9 欄)，進而換算為抬升高度(第 10 欄)及累積下刷深度(第 11 欄)

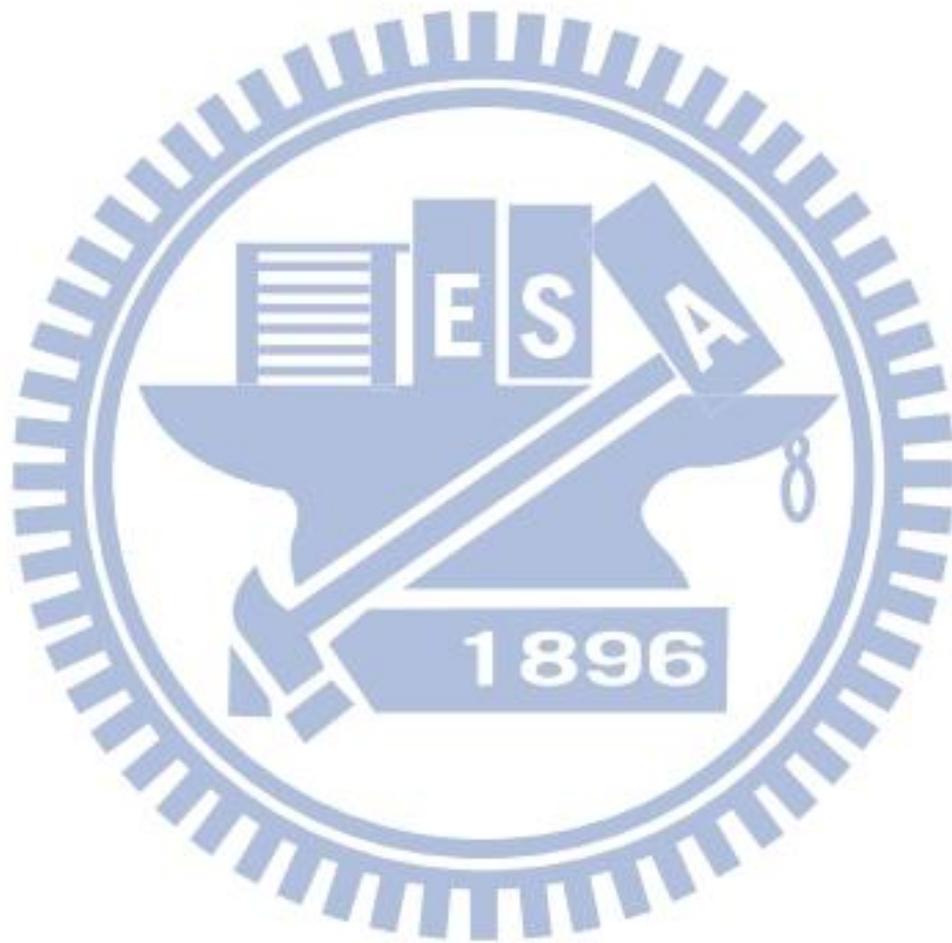


表 6-3 岩床下刷深度試算表

時段 (1)	流量 (cms) (2)	水柱厚 D(m) (3)	流速 V(m/s) (4)	尾水深 Y(m) (5)	$C_I$ (6)	$F'$ (kN) (7)	$F'/W$ (8)	上舉速率 (m/s) (9)	抬升高度 (m/hr) (10)	累積下刷深度 (m) (11)
12:00AM	4914.69	1.97	16.27	27.74	0.22	8.73	0.097	0.00022	0.79	0.79
1:00 AM	5397.09	2.14	16.54	28.53	0.23	16.09	0.18	0.0004	1.44	2.23
2:00 AM	6122.01	2.41	16.95	30.55	0.25	25.92	0.29	0.00065	2.34	4.57
3:00 AM	6358.84	2.5	17.08	33.03	0.24	22.35	0.25	0.00055	1.98	6.55
4:00 AM	6813.10	2.7	17.27	35.53	0.24	24.14	0.27	0.0006	2.16	8.71
5:00 AM	7360.88	3.03	17.59	38.51	0.25	31.29	0.35	0.0008	2.88	11.59
6:00 AM	7249.28	2.96	17.53	41.22	0.22	20.56	0.23	0.0005	1.8	13.39
7:00 AM	6813.10	2.7	17.27	42.37	0.19	8.94	0.1	0.00023	0.828	14.22
8:00 AM	6393.11	2.51	17.09	42.72	0.19	5.36	0.06	0.00014	0.504	14.72
9:00 AM	5939.72	2.34	16.85	43.14	0.19	4.02	0.045	0.00011	0.396	15.116

經結果分析有效洪程 10 小時，總抬升高度 15.116(m)，共 10 塊岩塊可脫離，下刷深度 15(m)。且由表 6-3 可觀察到當洪程介於 2:00 AM~3:00 AM 時，下刷深度較深，導致尾水深升高，使下一時階雖然流量增高，但流速反而減低，之後再隨流量遞增，流速逐漸增高。此外，將上述塊體尺寸 1.5x1.5x1.5(m)及相關地質條件帶入 Bollaert(2002)之模型進行分析，可得到當下刷深度達 16(m)時，塊體上舉高度( $h_{up}$ )為 0，已不會再發生塊體抽離。

經上述討論與分析，可知此區岩盤之沖刷機制以塊體抽離為主。本章經以義興壩前之沖刷坑承受艾利颱風洪程為例，確立此簡化分析方法應具可行性。

## 第七章、結論與建議

### 7.1 結論

當岩石強度高，水流作用力與顆粒懸浮載對岩盤沖蝕量影響較小。因此在岩石材料強度遠大於節理面強度且節理發達之區域，塊體抽離往往是主控沖蝕機制。藉由水流反覆作用、顆粒撞擊、渦流及風化作用影響皆會使既有節理延伸及連通。當節理連通造成塊體孤立後，受裂縫間之壓力波動放大效應將促使塊體上舉脫離。

本研究以 PFC<sup>3D</sup> 軟體為工具，建構單岩塊及多岩塊岩床之虛擬試體，並施加壓力波動於虛擬試體上，以模擬在節理發達岩床上之塊體抽離沖刷機制（plucking），並探討塊體抽離機制中各參數之影響，基於建構之塊體抽離之微觀數值模擬進而提出簡化之塊體抽離分析方法。由此論文分析結果可得以下結論：

1. 本研究為探討節理面行為，建立虛擬直剪試驗進行測試，若以 smooth 當 joint 模擬節理面之行為，當 clump 中之顆粒大小縮小一半時，節理面上的剪力阻抗值及摩擦係數變化量不大，即不受構成塊體顆粒大小變化之影響。可驗證節理面之剪力阻抗值係受到剖面與節理面之間相對位移變化的影響，在模擬塊體抽離時可不考慮顆粒大小的影響。繼而藉由虛擬直剪試驗探討岩橋上參數，得知岩橋凝聚力 (cohesion) 與最大摩擦阻抗正相關，岩橋上的摩擦係數

(friction)則與峰後摩擦阻抗呈正相關，而岩橋所占的比例(area\_ratio)則扮演將岩橋作用放大之角色，當岩橋所占的比例越大，岩橋作用也越明顯，反之亦然。

2.本研究確立基本模型建立流程及節理面上之影響參數後，將其整合進行單岩塊抽離之微觀數值模擬，經由模擬塊體抽離之影響參數探討，趨勢整理如下：

(1).塊體之上舉速率並不受壓力波動差振幅之影響，在節理連通之情形下可不用考慮壓力波動振幅之影響，但當節理面上含有岩橋時壓力波動之最大值則扮演著將裂隙延伸、節理連通的重要角色。

(2).塊體上舉速率隨岩橋所占的比例(area\_ratio)、岩橋鍵結強度、凝聚力(cohesion)以及節理面上之勁度參數增加而下降；隨著壓力波動平均差增高而上升。

3.本研究根據現地量測資料，提出單岩塊抽離之微觀數值模擬及簡化分析，並進行案例探討。此單岩塊抽離之微觀數值模擬可考慮共振頻率下壓力波動之放大效應，以及不同頻率下不同振幅之影響，並於最後採線性疊加的方式計算出塊體上舉速率，然此方法需要藉由量測或室內試驗來獲得河床壓力波動的資料，實務上不易運用。因此本研究提出塊體抽離沖刷量之簡化分析方法，藉由牛頓第二運動公式現地塊體之重量及淨上舉力與模擬試體之重量及淨壓力波動

平均差進行比較，推得現地塊體之平均上舉速率，並推估塊體脫離所需時間，繼而可判斷在此洪程歷時內，有幾層之塊體可發生抽離沖刷。

4.本研究將塊體抽離沖刷量之簡化分析方法試用於義興壩案例，模擬

艾利颱風之洪程歷時內岩床之下刷深度。模擬結果得洪程歷時內下刷深度可達 15m。由於此模擬假設之沖刷坑即為水流撞擊點且不考慮岩橋影響，同時只考慮單向度的刷深，沒有考慮周圍岩塊脫離所需時間，此外，隨沖刷深度越深現地塊體受風化影響愈低，節理面膠結性會越高，基於上述估算之下刷深度勢必偏保守。

5.本研究為模擬多岩塊同時受力陸續抬升之過程，建立多岩塊岩床之

虛擬試體，並探討塊體排列及岩橋設置對塊體抽離之影響。多岩塊脫離之行為及抬升高度大約與下列幾點有關：(1)岩橋強度、(2)關鍵岩塊脫離與否、(3)塊體之間作用力、(4)塊體脫離移動之方向及距離。模擬結果如下：

(1).隨圓盤(disk)半徑(Radius)增大，岩橋設置位置也更集中，導致部分岩塊周圍節理呈完全連通，使塊體抬升速率加快，容易脫離，且隨著岩橋所占比例越高，岩塊整體抬升高度越低。

(2).當節理傾角不為  $90^\circ$  時，岩塊由關鍵岩塊開始依序抬升。且因節理傾角不為  $90^\circ$ ，塊體會受水平方向作用力影響，往塊體斜上方

脫離，因此在判斷塊體脫離之先後順序時，須比較實際塊體移動距離。此外，經由試驗結果得知關鍵岩塊在塊體之上舉速率中扮演相當重要的角色。

6. 當節理面傾角為  $90^\circ$  時，同時施加壓力波動於單岩塊及多岩塊岩床試體模型表面各塊體上，可發現於單岩塊試體下最快脫離塊體之上舉速率較大，若為保守估計，可將多岩塊岩床試體帶入單岩塊抽離之簡化分析。當節理傾角不為  $90^\circ$  時，由於關鍵岩塊對塊體上舉速率之影響很大，關鍵岩塊一旦脫離，其餘塊體也陸續脫離，因此可帶入單岩塊抽離之微觀數值模擬模型探討關鍵岩塊之抽離速率，並以此代表整層岩塊之脫離情形。

## 7.2 建議

1. 本模擬模型僅對岩橋強度設立門檻值，並無探討岩橋強度之變異性，且本研究忽略當塊體位移量較大時，塊體周圍受力面積也會改變，使上舉速率產生影響，因此若能加以改善，將更能貼近實際岩體抬升行為。
2. 本研究於單岩塊抽離之微觀數值模擬及簡化分析中並無考慮岩橋鍵結及摩擦阻抗變異性之影響，且若加入岩橋鍵結，壓力波動之頻率及振幅也會對節理連通造成影響，因此若能於數值模擬模型中考

量上述因子，應更能貼近現地情形。

- 3.本研究於案例分析中所估算出洪程內岩盤之沖刷深度較為保守，其原因為本研究假設塊體位於水流撞擊點上，且不考慮岩橋以及周圍塊體的影響，此外隨著深度越深、圍壓越大，塊體間之膠結也會越強，因此若能考慮上述因子，或可更能準確估算出實際沖刷深度。
- 4.在探討關鍵岩塊之脫離情形時，建議可將塊體形狀納入考慮，譬如可將塊體之頂面積與底面積之比值作為判斷基準，像正三角形塊體上下面積比值很小，而倒三角形塊體之比值較高，直觀即可判斷若關鍵岩塊為倒三角形塊體其上舉速率較高，因此當頂面積與底面積比值較高時塊體上舉速率較高。而本研究假設塊體皆為正立方體，若能考慮關鍵岩塊之形狀影響，可能更符合實際之沖蝕行為。

## 參考文獻

1. 張嘉興(2004), “岩體邊坡之數值分析探討—以溪阿公路岩坡為例”, 國立台灣科技大學, 碩士論文。
2. 顧承宇(2006), “三維雷射掃描技術於岩坡落石分析之應用”, 95年岩盤工程研討會, 387~396頁。
3. 張家詮(2007), “分離元素法於擬脆性岩材微觀破裂機制之初探”, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文。
4. 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”, 國立交通大學土木工程研究所, 碩士論文。
5. 陳春華(2008), “非連續體變形分析法模擬集集地震引致草嶺邊坡崩塌模擬之研究”, 國立成功大學, 碩士論文。
6. 郭炳宏(2009), “多功能軟岩沖蝕試驗儀之建立”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文
7. 李佩錚(2009), “軟岩沖蝕之微觀數值模擬”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
8. 唐昭榮(2010), “臺灣遠變式山崩傳送與堆積之顆粒流離散元素模擬”, 臺灣大學地質科學研究所博士論文。
9. 國立交通大學防災與水環境研究中心(2010), “軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例”, 經濟部水利署水利規劃試驗所。
10. 國立交通大學防災與水環境研究中心(2010), “設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究”, 經濟部水利署水利規劃試驗所。
11. 鍾里泉(2011), “塊體抽離沖蝕行為數值模擬”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
12. 羅若瑜(2011), “床面剪應力及顆粒彈跳引致岩石磨蝕之微觀數值模擬”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
13. Annandale, G.W. (1995), “Erodibility.”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 471-494.
14. Annandale, G. W., (2006b). “Scour technology.” McGraw Hill, New York.
15. Bollaert, E., (2002). “Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact.” in Lausanne, EPFL.
16. 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.

17. Bollaert, E., and A. J. Schleiss, (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part II: Experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one- and two-dimensional closed end rock joints." *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), pp. 465-480 .
18. Cundall, P.A.(1971),"A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems" proceeding of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics 1, pp. 132-150.
19. Cundall, P. A. and O. D. L. Strack(1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65,.
20. Gilbert, G.K.(1877)."Geology of the Henry Mountains(Utah), in U.S.", *Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region*, pp. 160.
21. Howard ,A.D, G. Kerby (1983),"Channel changes in badlands.", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 94, pp. 739-752.
22. Jing, L., and Stephansson,O.(2007)."Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering -Theory and Applications", *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 85, pp. 447-538.
23. G. Müller et al.(2003) , "Characteristics of pressure pulses propagating through water-filled cracks. ", *Coastal Engineering*, 49, pp. 83–98
24. Seidl, M.A. , W. E. Dietrich (1992), "The problem of channel erosion into bedrock. ", *Journal of Fluvial Geomorphology* , pp. 316-339.
25. Sklar, L.S. , W. E. Dietrich (2001), "Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock.", *Geology*, Vol. 29, No. 12, pp. 1087-1990.
26. Sklar, L. S., W. E. Dietrich (2004), "A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load.", *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 063011-0630121.
27. Whipple, K.X. and Tucker, G.E., (1999). "Dynamics of the stream-power river incision model.", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 17,661-17,674.
28. Whipple, K.X., et al.(2000)."River Incision into Bedrock: Mechanics and Relative Efficacy of Plucking, Abrasion, and Cavitation", *GSA Bulletin*, Vol. 112, No. 3, pp. 490–503.

29. Whipple, K. X., G. S. Hancock, R. S. Anderson(2002), “River incision into bedrock : Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation.”, Geological Society of America Bulletin, Vol. 112, No. 3, pp. 490-503.

