

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

軟岩沖蝕之微觀數值模擬

Virtual Erosion Test of Soft Rock by Using Particle Flow Simulation



研究生：李佩錚

指導教授：潘以文博士

中華民國九十八年七月

軟岩沖蝕之微觀數值模擬

Virtual Erosion Test of Soft Rock by Using Particle Flow Simulation

研究生：李佩錚

Student：PEI-CHUN LI

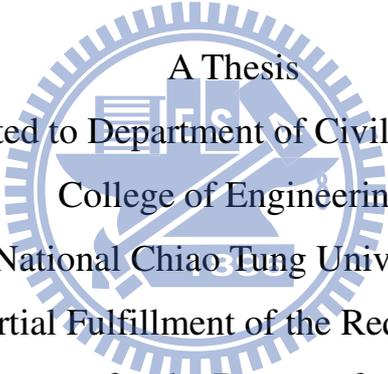
指導教授：潘以文 博士

Advisor：Dr. Yii-Wen Pan

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
Civil Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

軟岩沖蝕之微觀數值模擬

學生：李佩錚

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

台灣西部麓山帶常出露極年輕地層，岩層因成岩時間短故強度有限。此區域河川中下游段之軟弱岩床受過度沖蝕之作用，往往產生劇烈岩床沖蝕，不但造成河道不穩定，更威脅河道上人工構造物之結構安全。軟弱岩層河床的劇烈沖蝕行為已成為台灣西部麓山帶河川穩定的重要課題。

本研究首先經由現地勘查，探討軟弱岩層地區的沖蝕潛勢與影響因素。本研究首先以大安溪卓蘭附近的大峽谷段至蘭勢大橋段及嘉義八掌溪沖蝕劇烈河段的沖蝕現象為例，進行現地軟岩河床之沖蝕機制勘查、成因探討，並歸納不同岩性岩層中所產生相異型態之沖蝕機制。

以數值模擬為手段，搭配本研究繼而運用個別元素法程式為工具，針對軟弱岩層「虛擬試體」進行模擬分析以進行沖蝕數值模擬，虛擬試體由含鍵結顆粒集合體所構成。基本上此種模擬可視為利用「虛擬試體」來進行「虛擬沖蝕試驗」，用以探討軟弱岩床在不同的沖蝕機制下的沖蝕速率、破壞模式及影響範圍，並探討影響沖蝕速率之主要因子。虛擬沖蝕試驗所得之相關結果如下：

1. 就床面剪應力之沖蝕作用，當模擬水流所造成之床面剪應力越大時，受沖蝕脫離之顆粒會較多。若由小而大逐漸增高床面剪應力，可找出啟動沖蝕之臨界剪應力。床面剪應力所造成沖蝕破壞之作用皆係出現剪應力超過其剪力強度所產生之剪向鍵結破壞所致。

2. 砂、礫石顆粒於水中漂流、彈跳、撞擊岩床，便可造成岩石河床中之磨蝕作用。在撞擊速度大、高撞擊角度及大撞擊顆粒的作用條件下，受沖蝕脫離之顆粒數目最多，形成破壞之區域也會越大。高角度撞擊時主要造成「變形磨損」(deformation wear)。低角度撞擊時則主要造成較表層之破壞，或可稱「切削磨損」(cutting wear)。撞擊所生之鍵結破壞大多為剪向破壞。
3. 於相同之沖蝕作用力下進行模擬沖蝕試驗，於岩石材料具相對較高強度條件下，受沖蝕脫離之顆粒較少，反之亦然。因此可說明材料強度乃軟岩沖蝕速率的重要因子。於固定強度下當勁度較高時，顆粒間之鍵結於受顆粒撞擊作用產生較大程度之破壞範圍，可能係因撞擊後局部範圍之應力較高，因而導致較多之鍵結破壞。

關鍵字：軟弱岩石河床、沖蝕機制、沖蝕速率、沖蝕數值模擬、個別元

素法、顆粒流模擬

Virtual Erosion Test of Soft Rock by Using Particle Flow Simulation

Student : PEI-CHUN LI

Advisor : Dr. Yii-Wen Pan

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The outcrops in the northern and central regions of Western Taiwan often contain young and weakly cemented sedimentary rocks. Recently, intensive erosion cases have been found in front of several checkdams or bridges in Taiwan; the extent of river incision and widening had resulted in serious threat to the stability of river channel and cross-river structure.

This study started with a series of site investigation to examine the erosive potential of soft rock riverbed and the important factors affecting the erosion of soft rock. The investigated sites included a number of river sections (along the Da-An River and Ba-Chang River as exemplified cases) of which intensive erosion of soft rock riverbed had occurred. The site investigation aims to identify the erosion phenomena and their major causes, and to classify different erosive mechanisms in various conditions of soft rock.

Subsequently, this study made use of particle flow simulation to model the erosion of soft rock in microscopic scale. The numerical simulation can be regarded as a mean of “virtual erosion test” with a virtual rock specimen that contains a number of particles with inter-particle bonding. The virtual erosion tests can be carried out to investigate the erosion rate of soft rock due to various mechanisms, the failure mode, and affected zone of erosion. The major factors

that affected the erosion rate can also be examined through the virtual erosion tests. The following were found from a series of virtual erosion tests.

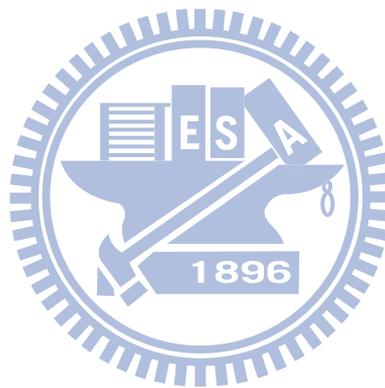
Shear stress acting on the top surface of virtual specimen may result in the de-bonding of grain particles; the evidence from virtual erosion tests reveals the mechanism of erosion by shear. The de-bonding of particles is a result of shear failure in the shear bonding between a pair of particles. Beyond a threshold level of shear stress (*i.e.*, the threshold shear stress), a higher shear stress tends to increase the number of de-bonding grain particles; consequently, the erosion rate increases.

Saltating erosion is a result of sand or gravel traveling along with water flow and striking on the riverbed. The striking impact results the local failure (which is a zone of de-bonding particles adjacent to the impact location) on riverbed rock and causes abrasion or wear. Larger area of local failure zone may occur for a condition with higher impact speed, higher impact angle, or larger gravel size. Gravel impact for a higher impact angle causes deformation wear. On the other hand, impact for a lower impact angle causes cutting (shallow) wear. Most bonding failure in both cases appears to be shear failure.

Under a same acting condition (either bed shear or impact) for virtual erosion tests, the number of de-bonding particles decreases with an increase in rock strength; and vice versa. Hence, material strength plays an important role affecting the erosion rate of soft rock. For a fixed rock strength, the size of failure zone (or the number of de-bonding particles) caused by a gravel impact is larger for a higher rock stiffness probably due to a higher local stress level in

this condition.

Keywords: soft rock riverbed; erosion mechanism; erosion rate; numerical simulation; distinct element method; particle flow simulation



誌謝

兩年碩士求學生涯飛逝般的過去了，終於完成了我的論文，而論文的完成最最感謝的是指導教授潘以文老師對學生的耐心指導及督促與關懷，使學生能在知識行囊滿滿下完成論文，在此致上最高的感謝及敬意，感謝恩師費心校閱學生論文並無時無刻提供學生最寶貴的意見，使學生在追求知識時不會迷失方向，進而完成了論文。此外也感謝廖志中老師於學生研究及撰寫論文時的建議，使我可以有多方面思考，使學生的論文進而更加完整及精彩。

另外也要感謝口試委員李德河老師、陳昭旭老師、吳建宏老師及王承德老師百忙之中抽空為學生指導，費心審核學生論文與提供寶貴的建議，特別致上最高謝意。

於碩士兩年求學生涯承蒙方永壽老師、黃安斌老師、單信瑜老師以及林志平老師在課堂學識上的指導，致上感恩的心。

另外再感謝在這兩年陪我一起打拼的潘廖門同學「愛靈靈」俊文、「禁止酒」里泉、「小開」炳宏、「不見人」偉欽、陪我一起熬夜趕論文的林門三傑永政、智棟、哲毅，及最早離校的方門奕蓁跟聖峯、柏碩，跟最佳熬夜加班團體黃門瑞陽、意婷、彥琅，希望大家無論是當兵或繼續在學校趕論文都可以一切順利，早日完成各自的目標。而也祝潘廖門學弟妹佳諺跟文蕙可以順利完成論文，也謝謝博班學長振成、明萬、俊宏及國維學長不

時給予我火力上的支援，也謝謝 94、95 級學長文驤、聰吉、永奇、文凱、智仁在我剛進交大時無論是在課業或生活上都給予相當的幫助，也謝謝防災中心的慧蓉學姐、珊瑚學姐、青瑩、佳廷、巧巧再趕論文期間的鼓勵，謝謝大家讓我兩年很快樂很充實(沖蝕)的學生生涯。

也感謝大學同學同鄉好妹子宛螢、姿達、莉婷、念婷及渝喬，及大學死黨俊瑋、俊瑋女友雅雲、元培、元培女友伊婷、俊威、宏賓、文杰、信傑、昱峯、聿聖、雨傑等同學不斷的給我鼓勵及加油，也謝謝搞不清我到底是念幾年級的國中死黨文瑞、侑霖、惠茹、惠如、碧雯、雅雯、美瑩、欣怡、敏菁、月岐、博育、俊杉，一直給我力量向前邁進，也感謝在我倒數半學期才認識的超級紅粉知己冬晴，在我沒動力寫論文的時候給我鼓勵，更給我完成論文的動力，也祝冬晴早點完成論文順利畢業找到一份好工作，我會在終點線等妳的。

最後感謝我最最最愛的家人，謝謝爸爸媽媽給我最大的溫暖及包容，讓我可以順著自己的計畫先服完兵役再念碩士，這兩年給予我精神及物質上的付出，也謝謝姐姐跟哥哥給予我最適時的幫助及解答，也謝謝小阿姨在我念書期間不斷的請我吃飯，最後就如畢業典禮當天爸爸說的那句話：「我小兒子畢業，我也畢業了。」，所以接下來的人生我更是要對自己負責，也要對父母親更加的孝順，不能辜負父母親的期望，努力經營好我的人生。

目錄

中文摘要	I
ABSTRACT	III
誌謝	VI
目錄	VIII
表目錄	XII
圖目錄	XIV
第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 論文架構	2
第二章 文獻回顧	4
2.1 軟弱岩層之特性	4
2.1.1 卓蘭層軟弱砂岩層之地質概述	7
2.1.2 軟弱岩層之力學特性	8
2.1.3 軟弱岩層常見工程問題	8
2.2 岩層河床受侵蝕的影響因子及條件	10

2.2.1 逕流條件對河床沖蝕的影響	10
2.2.2 河川流域之地形地貌條件	11
2.2.3 地質條件	11
2.3 岩層河床之沖蝕機制	11
2.3.1 磨蝕沖蝕(abrasion)	12
2.3.2 顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)	12
2.3.3 塊體抽離沖蝕(plucking)	15
2.3.4 穴蝕沖蝕(cavation)	16
2.3.5 風化造成的沖蝕(weathering)	16
2.4 室內沖蝕試驗	17
2.5 現地沖蝕型態與實例	21
2.6 DISTINCT ELEMENT METHOD(DEM)微觀模擬	23
2.6.1 DEM 微觀模擬方法簡介	24
2.6.2 DEM 微觀模擬之軟體工具	24
2.6.3 DEM 微觀模擬岩石之應用實例與潛在應用可能	25
2.7 文獻回顧總結	26
第三章 現地勘查及沖蝕模式判釋	27
3.1 現地勘查	27
3.2 現地沖蝕模式判釋	28

第四章 研究方法	36
4.1 岩石材料沖蝕模擬試驗之分析方法與工具.....	36
4.2 DEM 分析工具之模擬能力與限制	37
4.3 模擬試體之建立	39
4.3.1 邊界條件設定.....	40
4.3.2 顆粒集合體建立.....	41
4.3.3 相關材料參數之率定.....	42
4.3.4 沖蝕驅動力之作用方式.....	43
4.4 沖蝕模擬試驗之目標.....	44
4.5 沖蝕模擬試驗之規畫.....	44
4.5.1 沖蝕模擬試驗之流程.....	48
4.5.2 沖蝕模擬試驗之試驗規畫.....	50
4.6 材料參數對沖蝕行為之影響.....	53
第五章 參數率定	55
5.1 模擬岩石材料參數率定之標的.....	55
5.2 本研究之相關參數率定.....	61
第六章 沖蝕模擬試驗結果	71
6.1 模擬水流造成剪應力沖蝕的結果.....	71

6.1.1 驗證模擬水流造成剪應力沖蝕之影響結果	71
6.1.1.1 岩性強度之影響	71
6.1.2 結果與討論	75
6.2 模擬顆粒彈跳造成沖蝕(SALTATION)的結果	75
6.2.1 驗證模擬顆粒彈跳造成沖蝕之影響結果	76
6.2.1.1 岩性強度之影響結果	76
6.2.1.2 撞擊速度之影響結果	87
6.2.1.3 撞擊顆粒尺寸之影響結果	92
6.2.1.4 撞擊角度之影響結果	97
6.2.1.5 Sklar 模式改變楊氏係數Y值及張力強度 σ_T 值之影響結果	105
6.2.1.6 改變撞擊點之影響結果	108
6.2.2 結果與討論	111
6.3 材料參數對模擬沖蝕行為之探討	112
第七章 結論與建議	113
7.1 結論	113
7.2 建議	115
參考文獻	117

表目錄

表 2-1 地層比對(何春蓀, 1986).....	5
表 2-2 地層地質時間表(徐鐵良, 1993).....	6
表 4-1 微觀參數表.....	43
表 4-2 模擬水流所造成剪應力之磨蝕沖蝕試驗規劃表.....	50
表 4-3 模擬顆粒撞擊所造成之沖蝕試驗規劃表.....	51
表 4-4 模擬顆粒撞擊所造成之沖蝕試驗規劃表.....	52
表 4-5 模擬顆粒撞擊所造成之沖蝕試驗規劃表.....	53
表 5-1 卓蘭層軟弱砂岩之力學參數表(摘自陳賀瑞, 1996).....	55
表 5-2 各項微觀與巨觀參數關係表.....	59
表 5-3 模擬室內三軸試驗力學參數.....	64
表 5-4 各尖峰強度下之鍵結正向、剪向強度參數表.....	68
表 5-5 勁度及強度參數單位換算.....	70
表 6-1 以相對剪應力為變數之模擬結果.....	72
表 6-2 以岩性強度為變數之模擬結果.....	78
表 6-3 沖蝕作用力與強度組合作用產生鍵結破壞統計結果(高角度)....	79
表 6-4 沖蝕作用力與強度組合作用產生鍵結破壞統計結果(低角度)....	80
表 6-5 以撞擊速度為變數之模擬結果.....	88
表 6-6 以撞擊顆粒尺寸為變數之模擬結果.....	93

表 6-7 以撞擊角度為變數之模擬結果(高速條件)	98
表 6-8 以撞擊角度為變數之模擬結果(中速條件)	99
表 6-9 以撞擊角度為變數之模擬結果(低速條件)	100
表 6-10 以楊氏係數(Y)為變數之模擬結果	106
表 6-11 軟弱砂岩之單壓強度轉換為張力強度	107
表 6-12 以張力強度(MPa)為變數之模擬結果	107
表 6-13 改變撞擊點觀察沖蝕顆粒變異性	109



圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 土石顆粒磨蝕岩床表面示意圖(Whipple et al. , 2000).....	12
圖 2-2 河床載運動的水平與垂直分量(Sklar & Dietrich, 2004).....	13
圖 2-3 有效的侵蝕工具與床底沉積物的轉換(Sklar & Dietrich, 2004).	14
圖 2-4 河床載彈跳撞擊所造成之岩床磨損模式(Sklar & Dietrich, 2004)	14
圖 2-5 岩塊抽離示意圖(Annadale, 1995).....	15
圖 2-6 岩塊抽離機制(Whipple et al., 2000).....	16
圖 2-7 室內沖蝕模型試驗(Sklar & Dietrich, 2001).....	18
圖 2-8 岩床材料張力強度與沖蝕速率之關係(Sklar & Dietrich 2001)..	18
圖 2-9 河床載之粒徑與沖蝕速率之關係(Sklar & Dietrich 2001).....	19
圖 2-10 EFA 抗沖蝕試驗儀器(Briaud et al. 1999).....	20
圖 2-11 不同剪應力與沖蝕速率關係(Briaud et al. 1999).....	20
圖 2-12 表面呈現光滑及出現滑槽之磨蝕沖蝕機制(Whipple et al. 2000)	21
圖 2-13 岩床呈塊體沖蝕之塊體抽離沖蝕(Whipple et al. 2000).....	22
圖 2-14 河道中受到不同流況所形成之穴蝕沖蝕(Whipple et al. 2000).	22
圖 2-15(A)(B)河道沉積物多寡所形成之不同顆粒彈跳所造成沖蝕之機制	

(Sklar & Dietrich 2004).....	23
圖 3-1 河道礫石護甲層存在時河道狀態(攝於大安溪, 2008/11/17).....	29
圖 3-2 河道礫石護甲層消失或變薄時之河道狀態(攝於大安溪, 2008/11/17)	29
圖 3-3 岩層河床直接受到沖蝕作用之河道狀態(攝於大安溪, 2008/11/17)	30
圖 3-4 大安溪沖蝕河道段受地震抬升所形成之峽谷地形(攝於大安溪, 2008/11/17).....	31
圖 3-5(A)受沖蝕岩塊呈現平滑及有流痕, (B)砂岩經河水沖蝕作用形成滑槽	32
圖 3-6(A)(B)河水夾帶顆粒撞擊岩體之撞痕.....	32
圖 3-7(A)(B)節理發達而造成沖蝕形成塊體抽離.....	33
圖 3-8(A)(B)穴蝕沖蝕.....	33
圖 3-9(A)(B)岩體乾濕循環造成風化沖蝕.....	34
圖 3-10(A)(B)砂頁岩互層形成不同之沖蝕機制.....	35
圖 3-11(A)(B)砂頁岩互層形成不同之沖蝕機制.....	35
圖 4-1 PFC ^{3D} 之計算循環.....	37
圖 4-2 邊界牆示意圖(A)~(D).....	41
圖 4-3 沖蝕試體顆粒集合體示意圖.....	42

圖 4-4 各單壓強度之應力應變圖	45
圖 4-5 撞擊顆粒尺寸示意圖	46
圖 4-6 撞擊顆粒撞擊角度示意圖	47
圖 4-7 模擬試體建立流程圖	48
圖 4-8 沖蝕模擬試驗流程圖	49
圖 5-1 圍壓為 0.5MPa 之三軸試驗(摘自陳賀瑞，1996)	56
圖 5-2 圍壓為 3MPa 之三軸試驗(摘自陳賀瑞，1996).....	57
圖 5-3 圍壓為 6MPa 之三軸試驗(摘自陳賀瑞，1996).....	58
圖 5-4 微觀楊氏係數與巨觀楊氏係數之關係(摘自張家銓，2007).....	59
圖 5-5 微觀勁度參數與巨觀柏松比之關係(摘自張家銓，2007).....	60
圖 5-6 微觀鍵結強度參數與巨觀單壓強度之關係(摘自張家銓，2007)...	60
圖 5-7 圍觀摩擦係數與巨觀摩擦角之關係(摘自張家銓，2007).....	61
圖 5-8 模擬室內三軸試驗圓柱試體	62
圖 5-9 彈性階段應力應變關係圖	63
圖 5-10 彈性階段體積應變對軸應變關係圖	63
圖 5-11 摩擦係數對模擬結果之影響	65
圖 5-12 摩擦係數與摩擦角之關係	66
圖 5-13 模擬圍壓 0.5MPa 三軸試驗之應力應變圖.....	67
圖 5-14 模擬圍壓 3MPa 三軸試驗之應力應變圖	67

圖 5-15 模擬圍壓 6MPa 三軸試驗之應力應變圖	68
圖 6-1 固定岩性強度條件下，受沖蝕顆粒數目與剪應力之關係.....	73
圖 6-2(A)~(F)模擬水流造成床面剪應力沖蝕之步驟與結果例	75
圖 6-3 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（高速高角度）...	81
圖 6-4 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（中速高角度）...	81
圖 6-5 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（低速高角度）...	82
圖 6-6 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（高速低角度）...	82
圖 6-7 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（中速低角度）..	83
圖 6-8 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（低速低角度）...	83
圖 6-9 顆粒彈跳造成岩床沖蝕之模擬步驟及結果之示範例(A)~(E)	85
圖 6-10 大、小顆粒高角度高速撞擊岩床發生現象之比較：(A)小顆粒撞擊試體貫穿入試體，(B)中顆粒撞擊造成凹陷，不貫入試體。	86
圖 6-11 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度高岩性強度).....	89
圖 6-12 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度中岩性強度).....	89
圖 6-13 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度低岩性強度).....	90
圖 6-14 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(低角度高岩性強度)	

度).....	90
圖 6-15 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(低角度高岩性強度).....	91
圖 6-16 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度高岩性強度).....	91
圖 6-17 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(高速高角度).....	94
圖 6-18 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(中速高角度)	94
圖 6-19 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(低速高角度).....	95
圖 6-20 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(高速高角度).....	95
圖 6-21 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(中速高角度).....	96
圖 6-22 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(低速高角度).....	96
圖 6-23 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(高速大顆粒) ..	101
圖 6-24 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(高速中顆粒)...	101
圖 6-25 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(高速小顆粒)...	102

圖 6-26 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(中速大顆粒)...	102
圖 6-27 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(中速中顆粒) ..	103
圖 6-28 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(中速小顆粒)...	103
圖 6-29 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(低速大顆粒)...	104
圖 6-30 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(低速中顆粒)...	104
圖 6-31 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(低速小顆粒)...	105
圖 6-32 相同條件下受沖蝕顆粒數目與楊氏係數間關係(相同沖蝕作用力及 岩性強度).....	107
圖 6-33 相同條件下受沖蝕顆粒數目與張力強度間關係(中速高角度中顆粒)	108
圖 6-34 撞擊點改變對沖蝕顆粒數目之變異性	109
圖 6-35 撞擊點改變示意圖	110

第一章 前言

1.1 研究動機

西部麓山帶之地質條件常出現極年輕地層，大多為上新世及更新世的出露岩層，此類岩層強度因成岩時間較短，所以強度較差，其單壓強度介於 0.5~25MPa 之間的軟岩材料。位於西部麓山帶的河川中下游河段因為早期的過度砂石開採、跨河構造物興建及地殼抬昇等因素，不僅造成河況的改變也造成河床的礫石材料漸減，岩層河床上的沖積層(alluvium)變薄甚至消失，因而造成岩床部份或完全裸露，在豐水期的大流量及高流速往往造成大幅的沖蝕現象產生，除了造成河道的不穩定，也威脅各種取水或輸水設施以及跨河構造物的結構安全。因而軟弱岩層河床的沖蝕行為業已成為我國西部麓山帶河川穩定的重要課題。

以往考量河川岩床受沖蝕作用之影響時，往往都會將問題放在人工構造物的基礎夠穩固，避免其發生破壞，常忽略岩層河床受沖蝕的因素。然而若深入去觀察台灣西部麓山帶的河床沖蝕，並非只有護甲層被沖蝕帶走的問題而已，當護甲層流失，更進一步可能於岩石河床產生大量的沖蝕行為，進而影響河川的穩定，嚴重影響人工構造物安全性進而威脅人員的安全。如 2008 年辛樂克颱風造成嘉義八掌溪暴漲，使得八掌溪上之五虎寮橋不堪洪水沖刷而斷裂，其橋基並未產生破壞，而是橋基下之岩盤被洪水沖刷產生破壞而導致斷橋。

也因此岩層河床的沖蝕問題亟需要深入研究，尤其於西部麓山帶成岩時間較短的軟弱岩層地區問題更為嚴重。以往針對於岩層河床沖蝕行為的研究，大多是經由室內模型試驗的結果，進而去分析影響沖蝕的因子及條

件，然而其結果因受到試驗儀器的條件約束，常無法反應出受沖蝕的河床地質條件。本研究期望能以數值模擬為主，進而搭配現地勘查及適合之室內試驗方式，探討軟弱岩層地區的沖蝕潛勢與影響因素。

1.2 研究目的

本研究首先以卓蘭大安溪的大峽谷至蘭勢大橋段及嘉義八掌溪沖蝕劇烈河段的沖蝕現象為例，列舉闡釋軟弱岩層中可能出現之沖蝕機制；繼而運用個別元素法(Distinct element method,DEM)程式為工具，針對軟弱岩層試體進行模擬分析以進行沖蝕數值模擬，以了解軟弱岩床在不同的沖蝕機制下的沖蝕速率、破壞方式及影響範圍，並探討影響沖蝕速率之主要因子。

1.3 論文架構

本論文共分六章。除本章介紹本研究的動機與目的之外，第二章為本研究相關之文獻回顧，分別回顧軟弱岩層之特性，岩層河床受侵蝕的影響因子、條件及沖蝕機制，整理出相關室內沖蝕試驗及現地沖蝕型態以供本研究數值模擬加以比較，並介紹其他學者引用 Distinct element method(DEM)於相關之微觀模擬應用。第三章介紹現地勘查及沖蝕模式之判釋，以做為本研究之示例比對。第四章為研究方法，就岩石材料沖蝕模擬試驗及 DEM 分析工具做介紹，進而介紹模擬試體之建立流程、沖蝕模擬試驗之目標及規畫，最後分析探討材料參數對沖蝕行為之影響。第五章相關岩石材料參數標定。第六章為沖蝕模擬試驗結果，分別就層流造成剪應力沖蝕及顆粒彈跳造成沖蝕的結果做討論。第七章提出本研究之結論與建議。本研究流程圖如圖 1-1 所示。

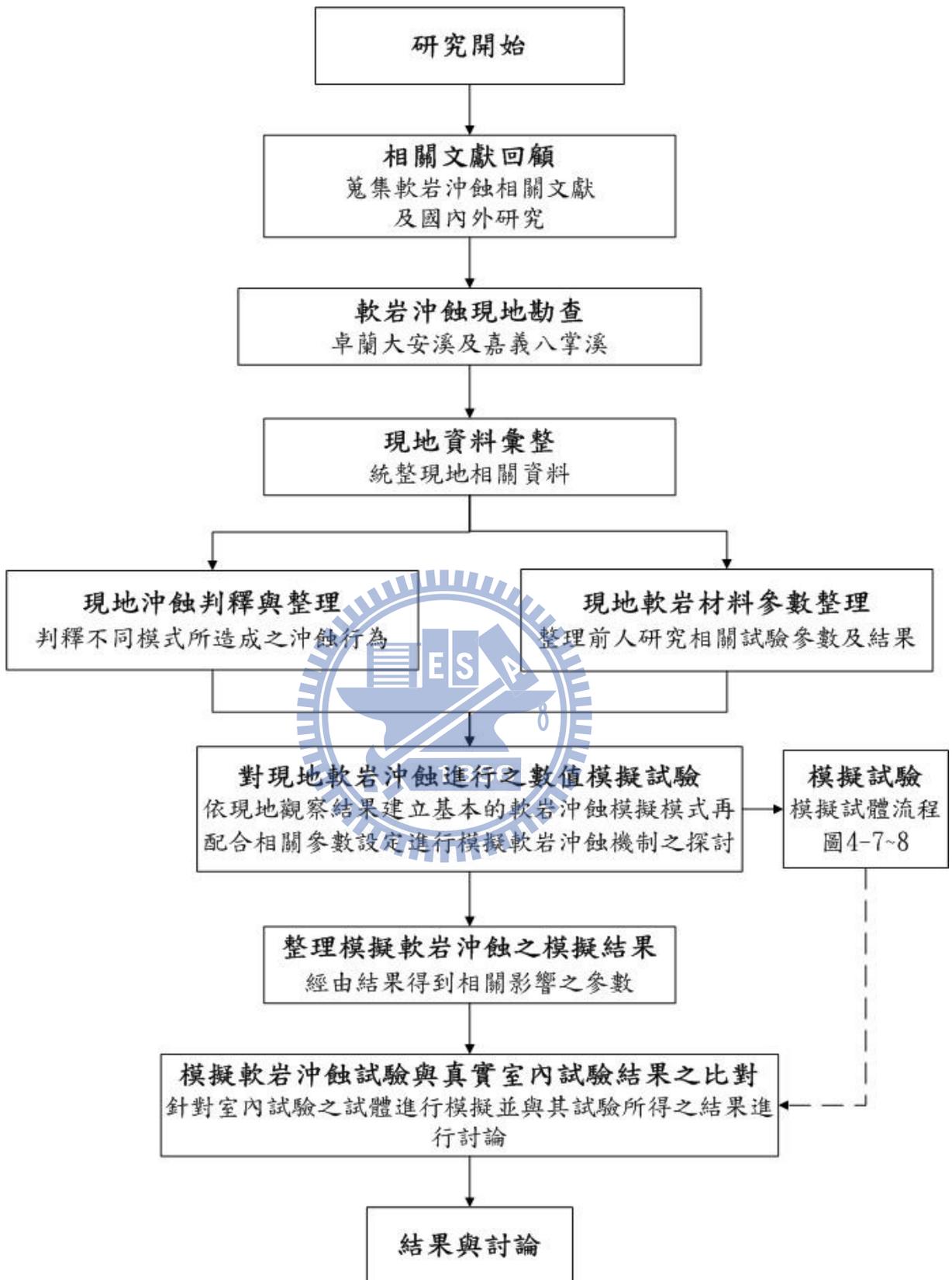


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

軟弱岩床之沖蝕與現地的地質條件、地形條件與水流條件等有關，意欲建立合理之岩床沖蝕模式也應考慮這些因素。對於土木與水利工程所關注的問題而言，針對軟弱岩床之沖蝕可能需掌握之重點包括沖蝕速率、沖蝕機制及影響範圍等。本研究嘗試以實地觀察軟弱岩床中劇烈沖蝕案例為基礎，討論軟弱岩床中常出現之沖蝕機制，並針對軟弱岩床在不同的沖蝕機制下進行沖蝕數值模擬，以了解影響沖蝕速率之主要因子。

本章整理與討論包含與本研究相關之文獻，內容包括：(一) 台灣軟弱岩層之特性、(二) 岩層河床受侵蝕的影響因子及條件、(三) 岩層河床之沖蝕機制、(四) 室內沖蝕試驗、(五) 現地沖蝕型態與實例、(六) Distinct element method (DEM) 微觀模擬。

2.1 軟弱岩層之特性

本研究所探討之劇烈岩床沖蝕問題乃出現於西部麓山帶的軟弱岩層。本研究所實地調查與模擬之軟弱砂岩對象以台灣西部麓山帶上新、上新-更新及更新世地層為主，因此本節以此等地層為例，說明此類岩層典型之特性與力學行為。

台灣地區上新、上新-更新及更新世地層，其地層比對如表 2-1(何春蓀，1986)所示，表 2-2 為上述地層之地質時間表(徐鐵良，1993)。而本研究主要模擬岩樣為卓蘭層中的軟弱砂岩層。以下分別介紹軟弱岩層之相關概述。

表 2-1 地層比對(何春蓀，1986)

區域 時代		台灣北部		台灣中北部		台灣中部	
		基隆、台北、桃園		新竹、苗栗		台中、彰化、南投	
更新世	頭料山層 (觀音山層)		通霄(楊梅)層		頭料山層		
	卓蘭層		卓蘭層		卓蘭層		
上新世	錦水頁岩		錦水頁岩		錦水頁岩		
	三峽群	二鬮層	桂竹林層		魚藤坪砂岩		
		大埔層			十六份頁岩		
		南莊(五堵)層	上福基砂岩		關刀山砂岩		
中新世	晚期	南莊(五堵)層		東坑層		南莊層	
	中期	南港砂岩	南港層	觀音山砂岩		水裡坑層	
		湊合層		打鹿頁岩			
	早期	石底層		北寮砂岩			大坑層
		野柳群	大寮層	出礦坑層			
野柳群	木山層	凝灰岩	碧靈頁岩		大坑層		
野柳群	木山層		汶水層				
漸新世	五指山層				粗坑層		
			蚊子坑層				

表 2-2 地層地質時間表(徐鐵良，1993)

代 (Era)	紀 (Period)	世 (Epoch)	累積年代 (百萬年)
新生代 Cenozoic	第四紀 Quaternary	全新世 Holocene	0.01
		更新世 Pleistocene	1.8
	第三紀 Tertiary	上新世 Pliocene	5
		中新世 Miocene	22.5
		漸新世 Oligocene	37.5
		始新世 Eocene	53.5
		曉新世 Paleocene	65

2.1.1 卓蘭層軟弱砂岩層之地質概述

由於調查場址主要出現之露頭為卓蘭層地層，因此本節就此地層做較為詳細之敘述。卓蘭層主要由厚層砂岩、粉砂岩、泥岩及頁岩的互層所組成，平均厚度為約 2000 公尺(大約在一千五百到二千五百之間)，此名為其主要露頭出露於苗栗縣卓蘭鎮而命名。卓蘭層覆於於上新世的錦水層之上及更新世的頭嵙山層之下，其分布為從北部的基隆至南部的台南高雄一帶的麓山地帶。本地層之地質年代經由現地的生物化石鑑定，屬於上新世晚期至更新世早期堆積成的沉積岩層(地質年代約一百五十萬年前)。卓蘭層的特色為具有交錯層與波痕，由此可知本層大多是淺水相的沈積物，而上部有淡灰色、塊狀細粒的泥質砂岩，其中含有炭化漂木的碎塊、炭質粗粒的碎岩層，並夾有凸鏡體及薄層礫岩；另一特色為富含化石群，如蟹、貝類及有孔蟲等(何春蓀, 1986)。

本地層由於地質年代較新，岩性膠結較差，由於組成之砂岩與頁岩抗蝕力具有相當顯著的差異性，因此在砂頁岩互層出露區域常呈單面山(cuesta)或豬背嶺(Hogback ridge)等地形，為本地層的重要地形特徵。本地層中的砂岩為混濁(雜)砂岩至亞混濁砂岩，少數白色正石英砂岩亦出現在本層內，砂岩常呈青灰色或淡灰色、細粒、略含雲母質，膠結疏鬆，岩體遇水則軟化，只有局部含石灰質者較硬，常呈厚層狀，層厚為數十分至兩公尺不等，較厚層的砂岩亦有達到五公尺以上的厚度。頁岩和泥岩呈現青灰色或暗灰色，一般層厚在 20~50 公分間，亦有較厚頁岩層出現。再者，本層岩相變化相當快，且缺乏指準層，因此很難將其細分成數個較明顯的岩段。本層之砂岩百分比在台北至嘉義之間，約 40%~60%，但至台南、高雄一帶突然減低至 10% 以下，並逐漸變為灰色泥岩及粉砂岩，而

形成台南、高雄地區下部及上部古亭坑層之惡地地形（陳培源，2006）。

綜合上述可知卓蘭層之岩性主要為砂頁岩互層、泥頁岩互層或砂岩，其砂顆粒多為細粒至極細粒(粉砂岩)，在台灣中北部之砂顆粒百分比由陳賀瑞整理得約為 40%~60%，越往南百分比越小（陳賀瑞,1997）。

2.1.2 軟弱岩層之力學特性

鄭富書、朱家德、黃燦輝(1994)蒐集台灣近 1600 筆岩石力學試驗資料，針對 ISRM 所訂定之軟弱岩石進行歸納分析所得以下台灣軟弱岩石之力學特性：

- (1)模數比(E/σ_c)：砂岩之模數比會隨單壓強度而改變，但變化趨勢不大，20MPa 以上模數比為 100~500，20MPa 以下為 50~300，頁岩的模數比約 10~100，泥岩約為 100~300，故根據資料台灣軟弱岩石之模數比大多介於 50~300 之間。
- (2)柏松比(ν)：砂岩之柏松比介於 0.1~0.5，頁岩介於 0.3~0.5，泥岩為 0.4~0.5，故根據資料台灣軟弱岩石之柏松比介於 0.2~0.5 之間。
- (3)破壞應變：砂岩之破壞應變隨單壓強度降低而上升，單壓強度在 20MPa 時破壞應變約在 1.4% 以下，當強度為 3MPa 時破壞應變達 5%，根據資料顯示軟弱岩石破壞應變約在 0.3~0.4%。
- (4)單位重(ρ)：砂岩之單位重亦受到單壓強度影響，範圍從 2.0~2.8t/m³，泥岩約為 2.2~2.6t/m³，頁岩分佈很廣，軟弱岩石單位重大多介於 2.0~2.6t/m³ 之間。

2.1.3 軟弱岩層常見工程問題

由於軟弱岩石之成岩時間較短，因此於常見許多特殊之工程行為，可

能衍生一些工程問題，討論如下。

李怡德(1986)指出軟弱岩石具有在低應力狀態下仍會產生潛變、變形性大、孔隙率較大及膠結不良幾項基本特性；軟弱岩石並不像一般岩石所受應力狀態接近尖峰強度時不會立即產生破壞，但會因材料之潛變行為而破壞，而軟弱岩石即時在低應力狀態下亦會產生明顯潛變現象。考慮軟弱岩床承受流場剪力作用，當應力狀態持續作用於岩床上，亦可能有潛變作用。

軟弱岩石經歷乾濕循環後，材料容易出現消散(slaking)現象(Oliveira, 1993；赤井浩一, 1993；林聖諭, 1998)。由此軟弱岩石特性可以理解，前次洪水退卻後出露之岩盤一旦經過乾濕循環，當下一次較大河水沖蝕作用下即容易產生較大量的岩床沖蝕破壞，亦會影響到座落於岩床上之人工構造物(如橋梁、水壩、攔河堰等)，嚴重甚至導致人工構造物破壞的工程問題。

軟弱岩石於應力狀態改變或含水量改變時所產生之變形量與強度變化較一般岩石明顯(李怡德, 1986)，會產生岩體壓縮、回脹及弱化等變形，此點所引伸出之工程問題，當軟弱岩床受到河水沖蝕作用時，其應力狀態及含水量皆會產生改變，故當岩床岩體產生壓縮、回脹及弱化時，更容易使岩床產生沖刷而造成破壞，當岩床沖蝕破壞產生亦會影響到河道平衡進而影響到河道周圍工程之安全性。

受風化及淋洗作用之軟弱岩石會產生較大之孔隙率亦會使岩體有劣質化現象及岩石材料強度降低，岩體內部產生新裂縫，而當岩體內之孔隙率較大時，當河水沖蝕作用於軟弱岩床上所引伸出的工程問題，主要為孔隙率大所引發的岩體劣質化及岩石材料強度降低，此兩點均會造成岩床受到沖蝕作用時就產生立即的沖刷現象產生，使河道平衡產生失衡進而影響工程安全。最後軟弱岩石之膠結不良此特性，經過風化、淋洗及沖蝕等作用

影響會產生岩體強度降低、變形性增大等弱化現象，此點所引發之工程問題為當岩床岩體之膠結不良所產生強度降低，於河水沖蝕後岩床之沖蝕量會因強度降低及含水量而大幅增加，進而影響到河道周圍之工程安全。

2.2 岩層河床受侵蝕的影響因子及條件

當軟弱岩層河床受到河水沖蝕作用而發生岩床侵蝕情形時，影響岩層河床受沖蝕作用形成過量侵蝕的因子及條件不外乎為岩層河床本身岩體之岩性、地質條件、地形地貌條件以及造成沖蝕作用的水文條件，而以上幾項因子及條件皆為影響岩層河床沖蝕的因素之一。以下三小節分別作探討岩層河床受侵蝕的因子及條件。

2.2.1 逕流條件對河床沖蝕的影響

Howard & Kerby(1983)根據岩床之沖蝕下切速率會跟河川流水流速及流水夾帶沉積料輸送所造成之磨蝕剪應力有關，進而假設岩床沖蝕下切速率(E)率與床面所受之剪應力(τ_b)的a次方呈現正相關之關係，其關係如 2-1 式，而因床面所受之剪應力受流速所影響，故剪應力造成沖蝕啟動會有一門檻值，故可以使用剪應力門檻值 τ_c 之床面剪應力($\tau_b - \tau_c$)取代 2-1 式中的 τ_b ，而轉換成 2-2 式。

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

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

Hartshom et al.(2002)透過精密量測花蓮立霧溪下切速率找出岩床沖蝕下切速率與河川流量之關連性，整理出沖蝕下切速率會與雨量相關，而主要影響沖蝕下切速率為常出現之中度流量所產生之河床載磨蝕，而河床之拓寬行為多是重現期較長之洪水期流量所造成。

2.2.2 河川流域之地形地貌條件

岩床沖蝕下切速率亦受到河道之相關條件影響，Howard & Kerby(1983)提出岩床沖蝕下切速率 E 與河川沉積料輸送率有正相關之關係，而沉積料輸送率亦會跟河川水流流量有關，而水流流量亦會與河川坡度(S)及集水區面積(A)有正相關之關係如 2-3 式所示，

$$E = KA^m S^n \quad 2-3 \text{ 式}$$

其中之 K 、 m 、 n 為模式中之參數。Seidl & Dietrich(1992)蒐集許多河川之資料歸納出 m/n 之比值會受河床坡度影響，其差異為坡度大時，會造成流速增快拖拽力變大，進而影響岩床沖蝕下切速率。Whipple et al.(2000)指出當河道中有障礙物或階狀落差時，其下游側會產生局部沖蝕較明顯之部分。Wohl & Ikeda (1998)檢視日本幾個河川岩床斷面認為河床之岩層走向橫越河川條件下，會產生不同之沖蝕下切速率，而產生遷急點與階狀地形。

2.2.3 地質條件

Whipple et al.(2000)利用一系列之阿拉斯加現地觀測岩床沖蝕機制之影響因素，認為岩床之岩性、弱面間距、節理、層面不僅會影響沖蝕速率亦會改變沖蝕速率。Wohl & Achyuthan(2002)藉由印度南部現地觀察整理出河床底地層阻抗越高，河道沖蝕下切速率亦會受到影響而產生河道下切趨於更窄更深。Hartshorn et al.(2002)沖蝕下切速率受河床岩層之弱面間距影響。

2.3 岩層河床之沖蝕機制

當河床上之卵礫石堆積層(護甲層)遭河水過度沖刷，可能造成岩層河床裸露受到沖蝕。可能出現之沖蝕機制有多種，包含純水流之剪力作用、水流夾帶懸浮載/河床載對岩床造成之剪力磨蝕作用(abrasion) (造成顆粒尺度

之逐漸磨損作用(wear))、岩床受卵礫石/岩塊碎片彈跳所造成之撞擊磨蝕作用(saltation)、岩床岩塊抽離作用(plucking)、流況改變所造成之穴蝕作用(cavitation)、與物理、化學風化作用(weathering)等。以下五小節分別就各機制加以討論。

2.3.1 磨蝕沖蝕(abrasion)

Whipple et al. (2000) 進行一系列阿拉斯加現地岩床沖蝕案例之探討，指出影響岩床沖蝕機制之影響因子。他們認為影響岩床沖刷機制有關岩體本身的影響參數如岩體岩性、弱面間距、層面、節理等。當岩床岩體之弱面間距大於 1 公尺時，此岩體視為完整岩盤，而此種岩體所受之沖蝕主控機制為河水流水本身或流水夾帶懸浮載及河床載顆粒磨蝕岩床之表面，使岩床表面以膠結的顆粒逐漸脫離而造成磨蝕沖蝕(abrasion)之破壞行為。再流況改變(如渦流)下，河水流動複雜，會出現較劇烈的磨蝕沖蝕，會形成滑槽(flute)與壺穴(pothole)等沖蝕現象如圖 2-1 所示。

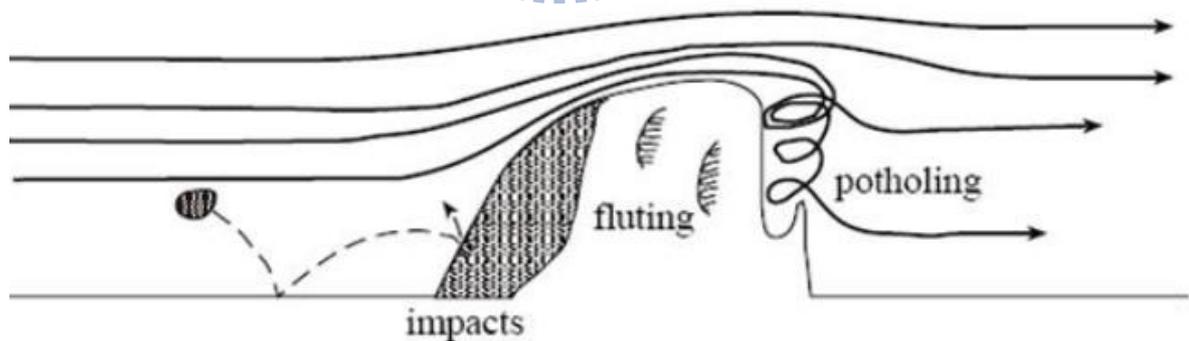


圖 2-1 土石顆粒磨蝕岩床表面示意圖(Whipple et al. , 2000)

2.3.2 顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)

根據 Whipple & Tucker (1999)討論河床載顆粒彈跳對於岩床沖蝕之影

響，認為較大顆粒彈跳所造成之影響於岩體之岩性十分軟弱或岩石之弱面相當不發達時，較大顆粒彈跳的破話效果與程度仍有顯著之跡象。

Sklar & Dietrich (2004)提出一針對河川沉積料所形成之河床載彈跳撞擊(saltation)所造成之岩床沖蝕模式。此模式基本假設為岩床磨損率隨河床流量與河床載運動之垂直分量正相關，如圖 2-2 所示，圖中 H_s 為彈跳高度， 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} 分別為向上彈及向下落之水平距離， L_s 為總彈跳水平距離。其基本概念為假設岩床磨損率 $E=($ 每次顆粒撞擊岩床所損壞分離之岩石量， $V_i) \times ($ 每單位面積每單位時間發生之顆粒撞擊率， $I_r) \times ($ 岩石河床上未被沖積層覆蓋之比例， $F_c)$ 。Foley(1980)定義磨蝕為河水夾帶顆粒作用於岩床上所形成之機制，因此磨蝕又可區分為懸浮載磨蝕及河床載磨蝕，而河床載磨蝕又可依顆粒撞擊岩床角度區分為，低角度的切削磨損 (cutting wear)及高角度的變形磨損 (deformation wear)。

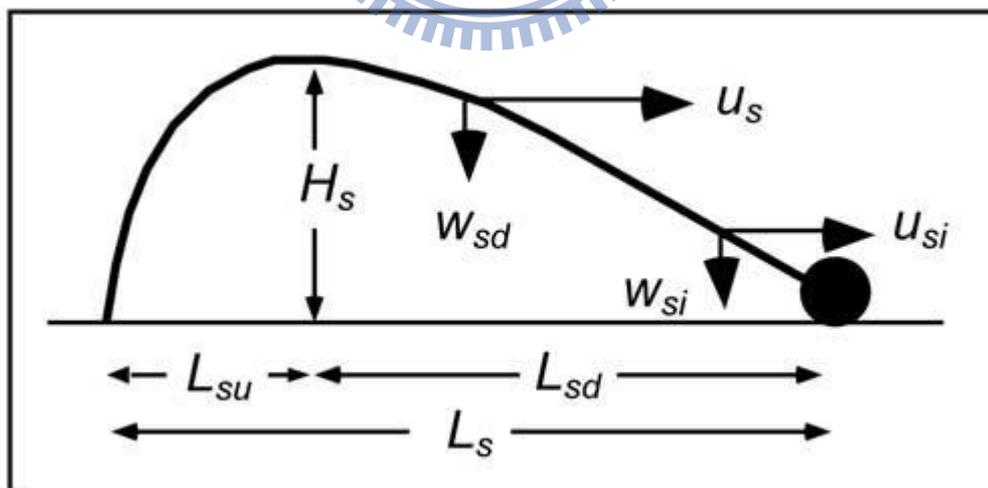


圖 2-2 河床載運動的水平與垂直分量(Sklar & Dietrich, 2004)

Gilbert (1877) 認為河川沈積料(Sediment)供應一方面可扮演磨蝕岩床

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河川沈積料供應條件下。河床受河床載磨蝕衝擊的頻率與帶動顆粒運動的能力受河床載顆粒大小所控制，河床載顆粒彈跳撞擊對床底的磨蝕行為，是河床載作為有效的侵蝕工具與成為床底沉積物的轉換關係(圖 2-3)， Q_s 為每秒所提供之總泥砂量 (kg/s) (Sklar & Dietrich, 2004)。該模型所作出的研究結果(圖 2-4)，圖中 Q_t 為總輸砂能力(kg/s)， τ^* 為無因次剪應力， τ_c^* 為無因次臨界剪應力，顯示了河床載顆粒的覆蓋與啟動之間轉換，對河床的磨蝕與保護之間的關係，由此模式可呼應 Gilbert (1877) 對河川沈積料供應所扮演角色之假說。

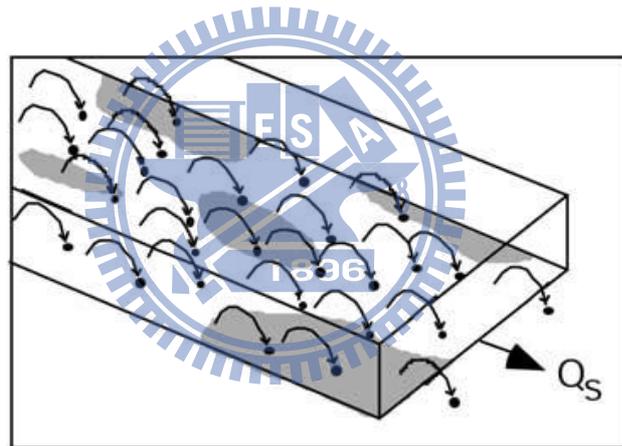


圖 2-3 有效的侵蝕工具與床底沉積物的轉換(Sklar & Dietrich, 2004)

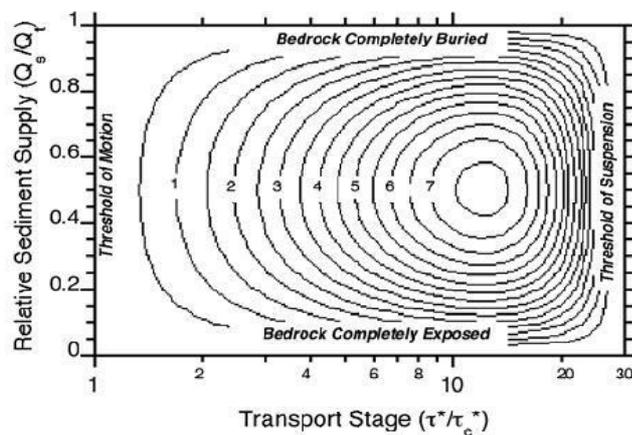


圖 2-4 河床載彈跳撞擊所造成之岩床磨損模式(Sklar & Dietrich, 2004)

2.3.3 塊體抽離沖蝕(plucking)

Annadale(1995)提出一示意圖(圖 2-5)來解釋岩塊抽離之過程，此示意圖為一河流流向與岩床岩層呈逆向的示例來顯示岩塊抽離的步驟是按照弱面或節理頂開(wedging)、岩塊塊體移出(dislodgement)、岩塊受水流帶出脫離(displacement)這三個階段。

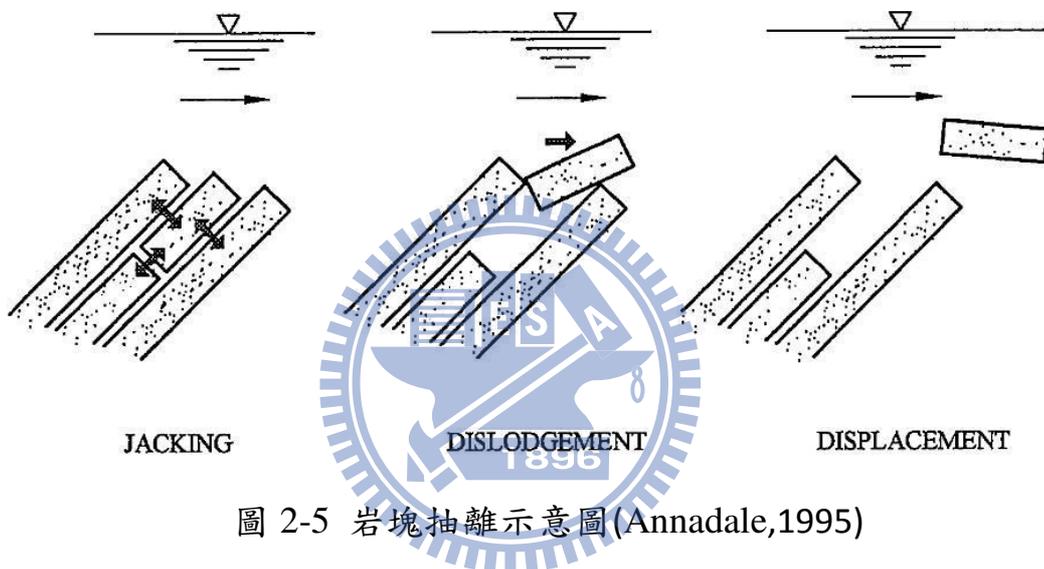


圖 2-5 岩塊抽離示意圖(Annadale,1995)

Whipple et al. (2000)認為岩塊抽離岩床的過程中先需小裂縫受水力作用擴大為破裂面、隨著河床顆粒逐漸地透過磨蝕作用沖蝕弱面及細顆粒填充弱面、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、脫離岩床本身(圖 2-6)。當岩體內弱面的間距小於約 1m，岩塊脫離 (plucking) 就可能成為岩床河道下切沖蝕之重要機制。

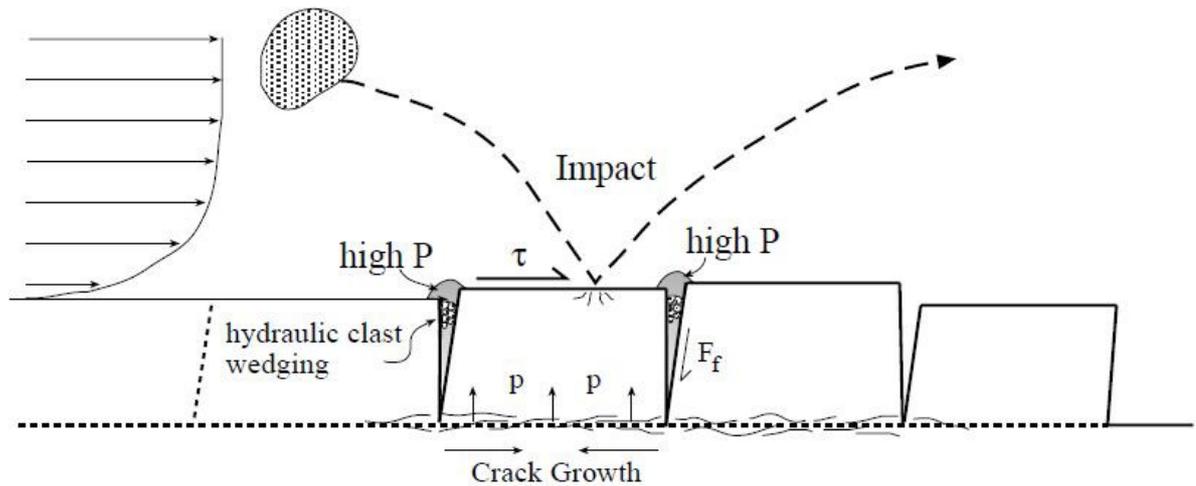


圖 2-6 岩塊抽離機制(Whipple et al., 2000)

2.3.4 穴蝕沖蝕(cavitation)

當水流受到障礙物或階狀落差造成流況改變時，其下游側受沖蝕特別顯著。河川中若有障礙物，其下游側較為顯著之岩床沖蝕，則多源自水流中夾帶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形而易於發生渦流，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 *et al.*, 1987)。

2.3.5 風化造成的沖蝕(weathering)

Stock *et al.* (2005)長期實際量測整理世界多處(包含華盛頓、奧勒岡州、

加州及台灣) 岩床河道之沖蝕速率資料。這些岩床河道受河床載磨蝕 (bed-load abrasion) 或抽離(plucking) 作用, 其底床岩石多少都傾向於受反覆乾濕循環而由完整岩石漸弱化成頁狀或碎片狀材料, 而易於被強大水流所帶走。Stock *et al.* (2005) 整理岩石張力強度與沖蝕速率之相對數據, 認為沖蝕速率與張力強度平方根成反比。若無沖積層作為護甲層, 此類易於因風化作用所致之易弱化岩床其下切速率甚至高於造山運動之地殼抬升速率。

2.4 室內沖蝕試驗

現今各學者所進行過之室內沖蝕模型試驗大都為透過水槽試驗進行特定條件下之模擬岩床沖蝕之試驗, 而其試驗結果通常為探討人造材料岩床之沖蝕行為之合理化公式之合理性, 及推導出經驗式。

Sklar & Dietrich (2001) 利用室內模型試驗(如圖 2-7 所示), 其試驗結果顯示岩床沖蝕速率與岩石材料之張力強度呈現負相關之關係, 沖蝕速率約跟岩石材料張力強度之平方成反比如圖 2-8 所示, 另一結果顯示河川中沉積物之粒徑分佈與沖蝕速率有關係, 河床載中之細粒料相對於粗粒料, 其作用之磨損效率較有限, 如圖 2-9 所示。

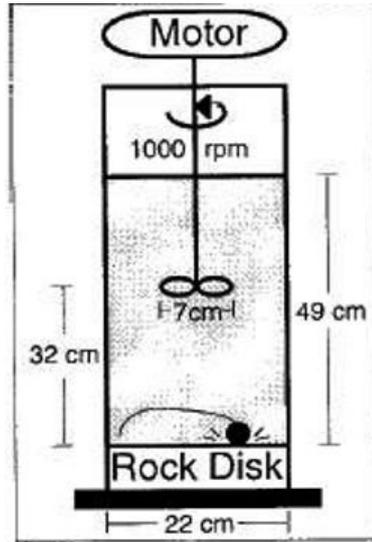


圖 2-7 室內沖蝕模型試驗(Sklar & Dietrich, 2001)

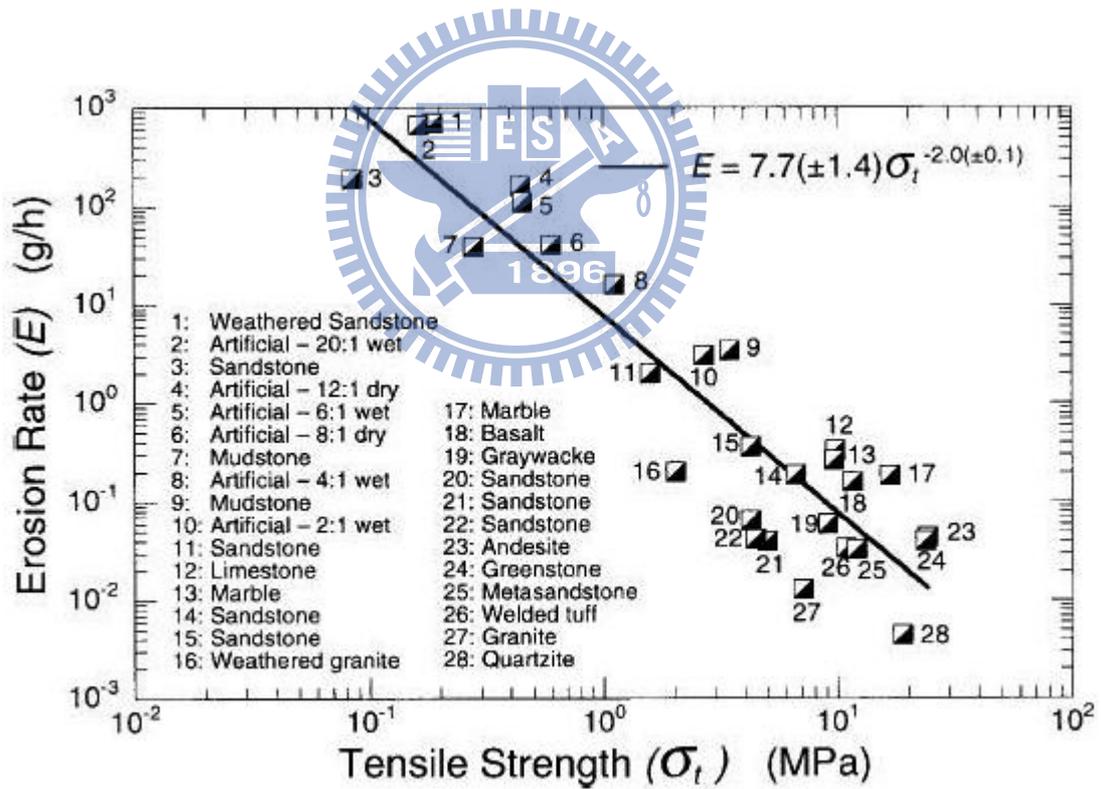


圖 2-8 岩床材料張力強度與沖蝕速率之關係(Sklar & Dietrich 2001)

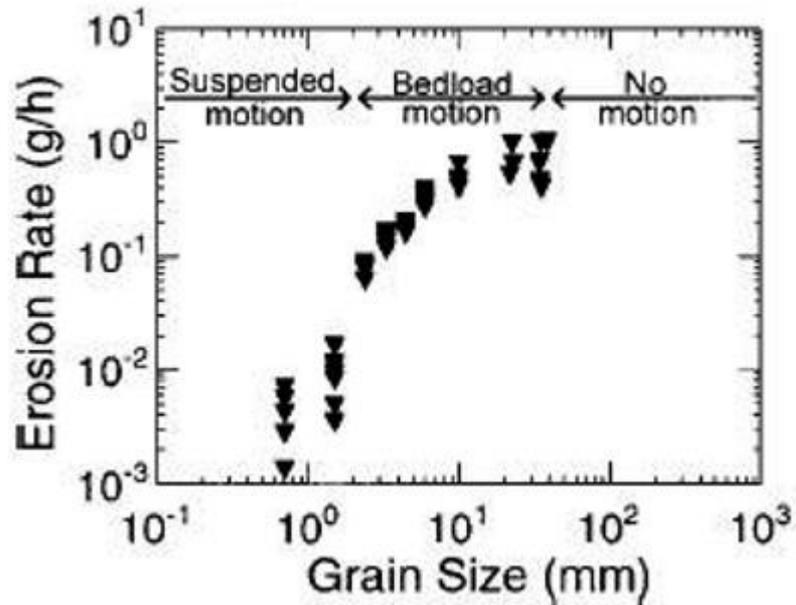


圖 2-9 河床載之粒徑與沖蝕速率之關係(Sklar & Dietrich 2001)

Briaud *et al.* (1999) 提出估計橋墩周圍凝聚性土壤沖蝕速率之程序，此套方法稱為 Scour Rate In Cohesive Soils (SRICOS)，此方法為利用一 Erosion Function Apparatus (EFA) 試驗儀器(如圖 2-10 所示)，其主要試驗過程為現地取得之不擾動土樣置於 EFA 之試驗管中，進行試驗前土樣向上頂出 1mm，在一定流速下，量測沖蝕調單位厚度土樣之時間，沖蝕走之厚度除以所需時間即可得其沖蝕速率 E ，而在不同流速下，會對應到土樣前緣不同之剪應力，即得不同之沖蝕速率 E ，其關係圖如圖 2-11 所示。

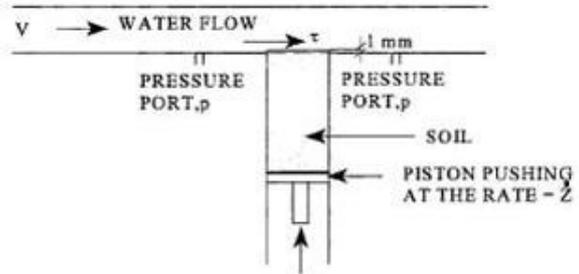
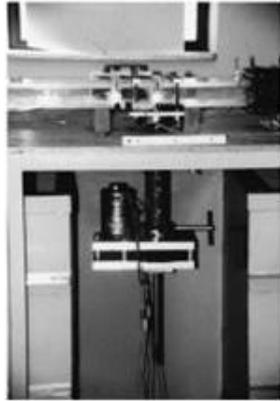


圖 2-10 EFA 抗沖蝕試驗儀器 (Briaud et al. 1999)

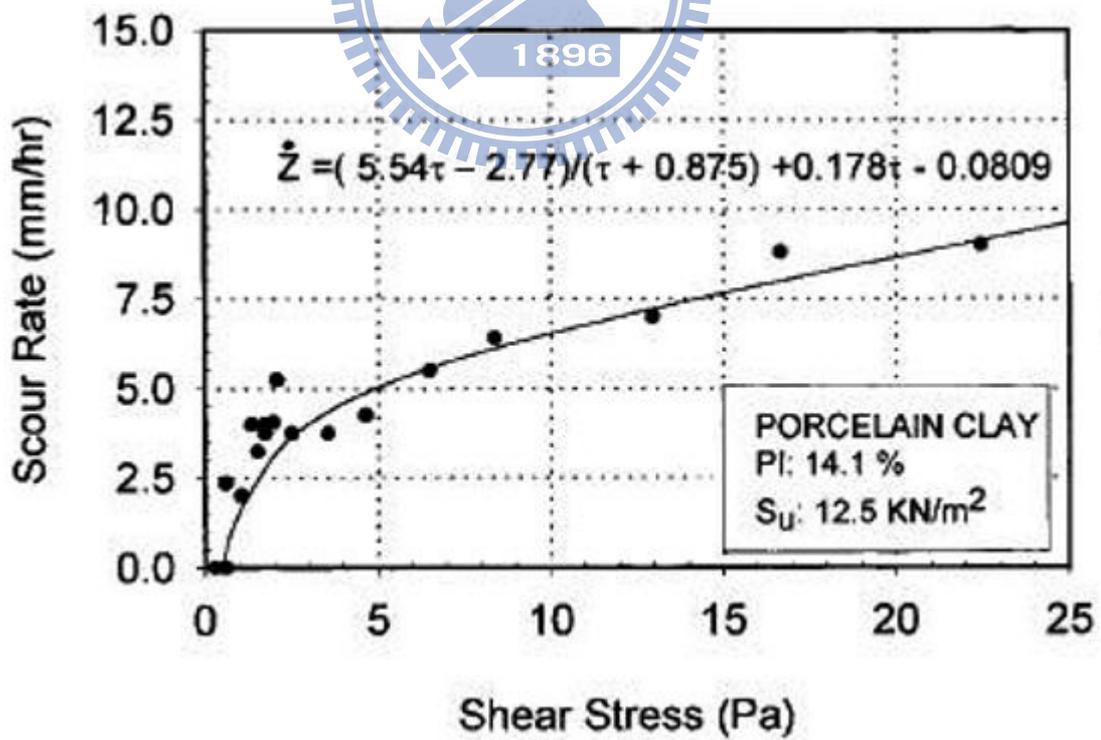


圖 2-11 不同剪應力與沖蝕速率關係 (Briaud et al. 1999)

2.5 現地沖蝕型態與實例

Whipple et al. (2000)針對一系列阿拉斯加現地沖蝕實際案例之探討，可顯示出磨蝕沖蝕(abrasion)包含顆粒彈跳所造成之沖蝕(saltation)、塊體抽離沖蝕(plucking)、穴蝕沖蝕(cavation)三種沖蝕形態，而主要影響岩床沖蝕機制的重要因素為岩床岩石材料性質、岩床節理(弱面)間距、岩床裂隙及岩床層面，而三種沖蝕型態之特徵如 2.3 節中所敘述，各現地沖蝕型態如圖 2-12~14 所示，以及 Sklar & Dietrich (2004)針對河水所夾帶之懸浮載或河床載對河床彈跳所造成之沖蝕型態受河床上所覆蓋之沉積料多寡會造成不同之沖蝕行為如圖 2-15(A)(B)所示，圖(A)中河道中無卵礫石護甲層，顆粒直接撞擊岩床，圖(B)有河道卵利十戶層，顆粒無直接撞擊岩床。



圖 2-12 表面呈現光滑及出現滑槽之磨蝕沖蝕機制(Whipple et al. 2000)



圖 2-13 岩床呈塊體沖蝕之塊體抽離沖蝕(Whipple et al. 2000)



圖 2-14 河道中受到不同流況所形成之穴蝕沖蝕(Whipple et al. 2000)



圖 2-15(A)(B)河道沉積物多寡所形成之不同顆粒彈跳所造成沖蝕之機制
(Sklar & Dietrich 2004)

2.6 Distinct Element Method(DEM)微觀模擬

本研究採用 PFC^{3D} 數值分析程式為工具，針對軟弱岩層試體進行模擬分析以進行模擬沖蝕試驗，PFC^{3D} 屬於離散元素法 (Discrete Element Method, DEM)之範疇的個別元素法(Distinct Element Method)。離散元素法最早由 Cundall(1971)提出，初期之運用目的主要用以模擬塊狀岩石邊坡破壞問題，隨著理論發展趨於成熟，利用 DEM 理論所模擬之行為及類別逐漸發展更多，而以 DEM 理論為基礎之程式亦發展漸多，如 PFC2D、PFC^{3D}、UDEC 及 EDEM 等相關程式，本研究所使用之 PFC^{3D} 程式主要以圓形或圓球顆粒的堆疊與組合建立所需要之數值模擬，而其破壞型式主要以顆粒間之鍵結破壞做代表，而其破壞面可隨鍵結破壞自由發展與延伸。以下三小節就 DEM

方法、軟體工具及應用做介紹。

2.6.1 DEM 微觀模擬方法簡介

Cundall(1971)提出以離散元素法(DEM)模擬塊狀岩石邊坡漸進式破壞問題，離散元素法屬非連續體分析模式。DEM之特色為允許顆粒間有限度旋轉及位移，包含當顆粒間鍵結破壞後顆粒間完全分離、可以偵測到顆粒間之接觸狀況、可以藉由鍵結連結顆粒模擬大變形之問題及可以觀察裂縫之產生及延伸。離散元素法(Discrete Element Method, DEM)之沿革，最初為 Cundall(1971)所提出，主要為模擬分析顆粒材料於大地力學之相關課題，Cundall & Strack(1979)應用 DEM 模擬砂性土壤行為之分析，Hart *et al.* (1988)應用運動定律(牛頓第二運動定律)及力與位移法之完整說明分離元素法理論；針對離散元素法在離散物體允許有限之位移及轉動下，可自動判別新接觸區域並進行計算，Itasca 公司(1999)以 DEM 為基礎理論發展出商業軟體 PFC (Particle Flow Code)，近年已受土木及機械工業之運用。

2.6.2 DEM 微觀模擬之軟體工具

目前以 Discrete Element Method(DEM)離散元素法理論為基礎架構之軟體工具，現今以 Cundall(Itasca 公司)陸續發展出之 UDEC 二維(1980)、3DEC(1983)、PFC2D(1994)、PFC^{3D}(1995)以上四種軟體工具為主，而這四種軟體皆屬非連續體分析模式，UDEC 及 3DEC 為多邊形塊體組合數值模型之方式，其破壞會發生於預設之破壞面；PFC2D 及 PFC^{3D}則為圓盤或圓球顆粒堆疊組合之數值模型，其破壞面可自由發展及延伸。

除了 Cundall(Itasca)所發展出之一系列以 DEM 原理發展之相關軟體工具外，以 DEM 為理論基礎之軟體工具還有 Hustrulid Technologies 公司的

Chute Maven MATERIAL FLOW MODELING、DEM Solutions 公司的 EDEM 等軟體工具等。

2.6.3 DEM 微觀模擬岩石之應用實例與潛在應用可能

以 PFC 微觀模擬岩石行為之文獻相當多。譬如 Kulatilake et al.(2001)以 PFC^{3D} 程式研究含節理岩塊之模型材料，當承受單軸載重時之實驗室試驗與數值模擬，其含節理岩塊的節理幾何參數對單軸壓縮強度之影響，其模擬結果與室內試驗結果之參數標定，此篇文獻之應用相關性可由結果得知 PFC^{3D} 可用以模擬含節理岩塊之強度行為。又如 Potyondy & Cundall(2004) 利用 PFC2D 及 PFC^{3D} 程式針對排列緊密粒徑分佈不均勻大小的圓盤型或圓球體於接觸點上之鍵結以及其力學行為之數值模型，而當載重施加時，當應力超過鍵結強度會造成鍵結破壞，其破壞行為可明確地以破壞鍵結所形成的破壞型式做表示，此篇文獻之應用，可了解 PFC 程式可用鍵結後的破壞型式代表巨觀行為中的破壞型式。

呂榮華（1999）以 PFC2D 模擬單壓試驗，其結果之正向勁度需提高 50 倍方可與真實試驗結果接近。唐昭榮（2005）以 PFC^{3D} 模擬集集地震之台灣草嶺山崩，藉由改變顆粒摩擦係數分析岩層在滑動後之情況，藉此結果可了解到在 PFC^{3D} 程式中，顆粒之摩擦係數亦會影響到模擬後之相關行為。張家銓（2007）利用 PFC^{3D} 模擬單壓、三軸、巴西試驗作為參數模型調準之檢核，可利用此文獻之結果，找出微觀參數與巨觀參數有相關性。其他以 PFC 微觀模擬岩石行為之文獻，不勝枚舉。

應用 PFC 微觀模擬各種土木、機械等專業研究，應用於土木方面之研究，如 Chareyre & Villard (2003) 利用 PFC 微觀模擬地工合成材料於室內試驗及現地邊坡內之巨觀性質，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。應用於機械方面之研究，如 Tijskens *et al.* (2003)利用 PFC 微觀模擬農業機械對於其輸送帶輸送農產品的行為，Ferellec *et al.* (2005)使用 PFC 微觀模擬散狀顆粒流於高爐進料系統中之行為，Saeki(2005)使用 PFC 微觀模擬震動碰撞系統中阻尼器之動態分析。以 PFC 微觀模擬從事研究之種類越來越多，其使用於各種研究模擬亦越來越可行。

2.7 文獻回顧總結

台灣西部麓山帶之軟弱岩層河床，因為其卵礫石護甲層受到沖刷消失變薄，因為軟弱岩層之相關特性(變形性大、孔隙率較大及膠結不良等)造成較大量的岩床沖蝕亦影響到河川之平衡。影響河床沖蝕速率及型態，受到河川之水文條件、河床之岩層地質條件及河川之地形地貌條件，亦知道河床沖蝕型態並非由單一型態造成，往往會結合兩種以上沖蝕型態產生。沖蝕機制由文獻歸類出水流或水流夾帶懸浮載及河床載對岩床造成之磨蝕沖蝕(abrasion)、卵礫石、岩塊碎片彈跳所造成之磨蝕作用(saltation)、岩塊抽離沖蝕(plucking)、流況改變所造成之穴蝕沖蝕(cavitation)與風化作用沖蝕(weathering)五種。根據室內試驗之試驗結果，探討合理化公式是否符合實際狀況，進而推導出更符合之公式。根據文獻中的現地沖蝕型態，可以更了解各沖蝕型態之特性。使用 DEM 理論為基礎之 PFC 程式有較佳運算效能，在理論及力學模式方面，適用於非連續體與連續體之分析，故本研究採用 PFC^{3D} 數值工具進行沖蝕相關問題之討論。

第三章 現地勘查及沖蝕模式判釋

3.1 現地勘查

本研究嘗試以實例闡釋軟弱岩層中可能出現之沖蝕機制，列舉不同條件下出現之沖蝕機制實例，並定性討論其可能造成之沖蝕速率。其目的在透過選定河段現場勘查蒐集之案例，觀察現軟弱岩層中所發生的侵蝕行為，並與文獻中所討論的岩石侵蝕行為與機制相佐證，以深入了解現地軟弱岩層河床沖蝕機制。此外，本研究亦擬經過現地勘查以掌握影響選定河段侵蝕的影響因子，這些因子包含岩體強度、岩體不連續面的組數、岩體塊體尺寸、岩體本身之狀態、岩體位態與河道流向之夾角等，以評估可能影響現地沖蝕行為之地質因子。

現地勘查除了觀察現地不同的侵蝕行為(如岩塊的抽離行為、懸浮載與河床載的磨蝕行為、沖蝕坑的發展等)，亦針對沖蝕影響因子之調查進行記錄及判釋，所記錄的現地沖蝕影響因子主要以岩體本身的強度、岩體之節理數及節理間距、岩體表面風化情況、及岩層河床的位態與河流流向之夾角等項目，現地勘查時除利用相機進行記錄，亦需要記錄現地狀況，並使用手持 GPS 定位記錄觀察點(座標)，以利日後可再至同樣位置進行地形變化之比較。

本研究選定之現地勘查地點為嘉義八掌溪(林文凱，2008)及苗栗卓蘭大安溪兩地。所選擇河段之地質條件皆為年輕之軟弱岩層，並出現劇烈沖刷現象。嘉義八掌溪之區域地質，其流域中上游地區之地層為更新世礫石、土、砂的臺地堆積及中新世砂岩、頁岩所構成。中新世地層是由白、灰色砂岩，深灰色頁岩和砂、頁岩互構而成。分佈於此區之地層為更新世地層

所組成，地層由老至新為與頭嵙山層(Tks)相當的崁下寮層、二重溪層、六雙層和沖積層四個地層為主。苗栗卓蘭大安溪之區域地質，河道表層原本有良好的卵礫石層覆蓋，沖積礫石層以下岩層主要是上新世—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，1986)。

3.2 現地沖蝕模式判釋

由現地勘查中可以觀察到兩個調查河段當地岩層河床之沖蝕皆有相似流程，簡述如下。當河道礫石護甲層仍然存在時，河道之沖蝕情況大致趨於穩定狀態。在此階段，當礫石被沖蝕帶往下游時，上游之礫石會隨河道流動進行補充，只要沖淤大致平衡，河床能夠穩定，如圖 3-1 所示。

河道之沖蝕基準面卻可能因為天然或人為原因發生變化，其上游段或因地震造成天然地層抬升，或因建造攔河構造物人為地抬升水位，致使上下游水頭落差顯著升高，沖淤平衡可能因此被破壞。一方面由上游源源不絕帶來補充之沖積料可能受到阻斷，另一方面下游原本之礫石護甲層又可能因為沖刷加劇或人為不當開採而入不敷出。此時，礫石護甲層漸消失或變薄，終於形成岩層河床的裸露，隨後河道河水或河水夾帶河床載及懸浮載對岩層河床直接沖蝕河道，受沖蝕後典型之河道狀態如圖 3-2 所示。



圖 3-1 河道礫石護甲層存在時河道狀態(攝於大安溪，2008/11/17)



圖 3-2 河道礫石護甲層消失或變薄時之河道狀態(攝於大安溪，2008/11/17)

豐水期的高流速大流量所形成之沖蝕作用，直接作用於無護甲層保護之岩層河床，往往會造成大量的沖蝕，持續下切，而漸形成階狀河道或 V 形河道，如圖 3-3 所示。尤其當沖蝕河道上游段或因地震造成天然地層抬升，或因建造攔河構造物人為地抬升水位，致使上下游水頭落差顯著升高，水流沖刷能量劇增，或有超過歷史洪峰事件之洪水作用，皆可能大幅增加軟弱岩層河床之沖蝕量，此時沖蝕河道段往往會出現更明顯之峽谷地形或 V 形河谷更為凸顯，如圖 3-4 所示。



圖 3-3 岩層河床直接受到沖蝕作用之河道狀態(攝於大安溪，2008/11/17)



圖 3-4 大安溪沖蝕河道段受地震抬升所形成之峽谷地形(攝於大安溪，

2008/11/17)

現地勘查中對於沖蝕機制形成原因的沖蝕型態判釋，乃依循第二章 2.3 節岩層河床所討論之沖蝕機制分類方式。主要之沖蝕機制分成以下幾種：

磨蝕(abrasion)：主要可區分為河水夾帶懸浮載以及河床載對岩床所造成的侵蝕。抗沖蝕較佳的岩石(如砂岩)表面常可見到光滑的磨蝕痕跡以及流槽(flute)如圖 3-5(A)(B)所示，也常見到礫石彈跳撞擊後對岩石表面留下的撞痕(saltation)如圖 3-6(A)(B)所示。

塊體抽離(plucking)：層狀岩層於厚層或薄層會因為節理之發展(如解壓或侵蝕等因素)，造成岩石塊體產生鬆動而形成岩塊抽離，如圖 3-7(A)(B)所示。

穴蝕(cavitation)：河道受到地形及岩性的影響，局部岩塊岩性較堅硬，形成沖蝕主要作用於岩性較弱的岩塊區域，所以造成流況變化產生渦流的現象所形成之沖蝕孔洞如圖 3-8(A)(B)所示。

風化沖蝕(erosion after weathering)：岩石塊體受反覆乾濕循環而由完整岩石漸弱化成頁狀或碎片狀材料，而易於被強大水流所帶走如圖 3-9(A)(B)所示。

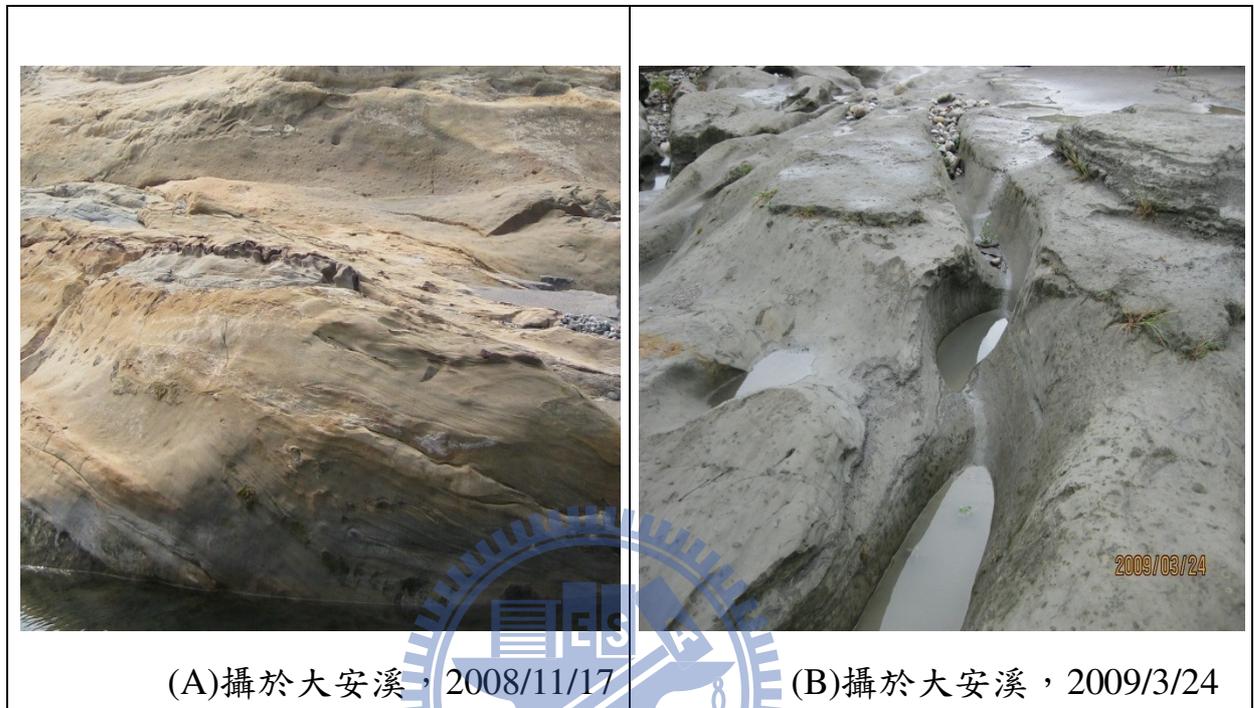


圖 3-5(A)受沖蝕岩塊呈現平滑及有流痕，(B)砂岩經河水沖蝕作用形成滑槽

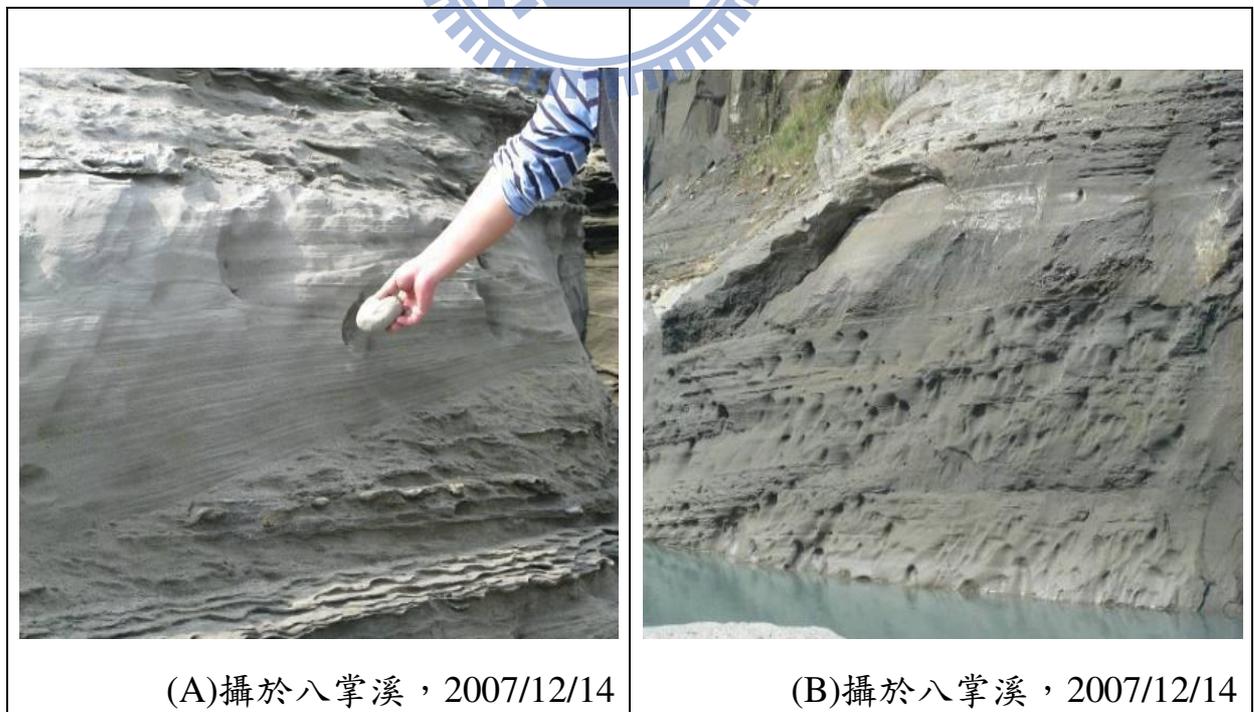


圖 3-6(A)(B)河水夾帶顆粒撞擊岩體之撞痕



圖 3-7(A)(B)節裡發達而造成沖蝕形成塊體抽離

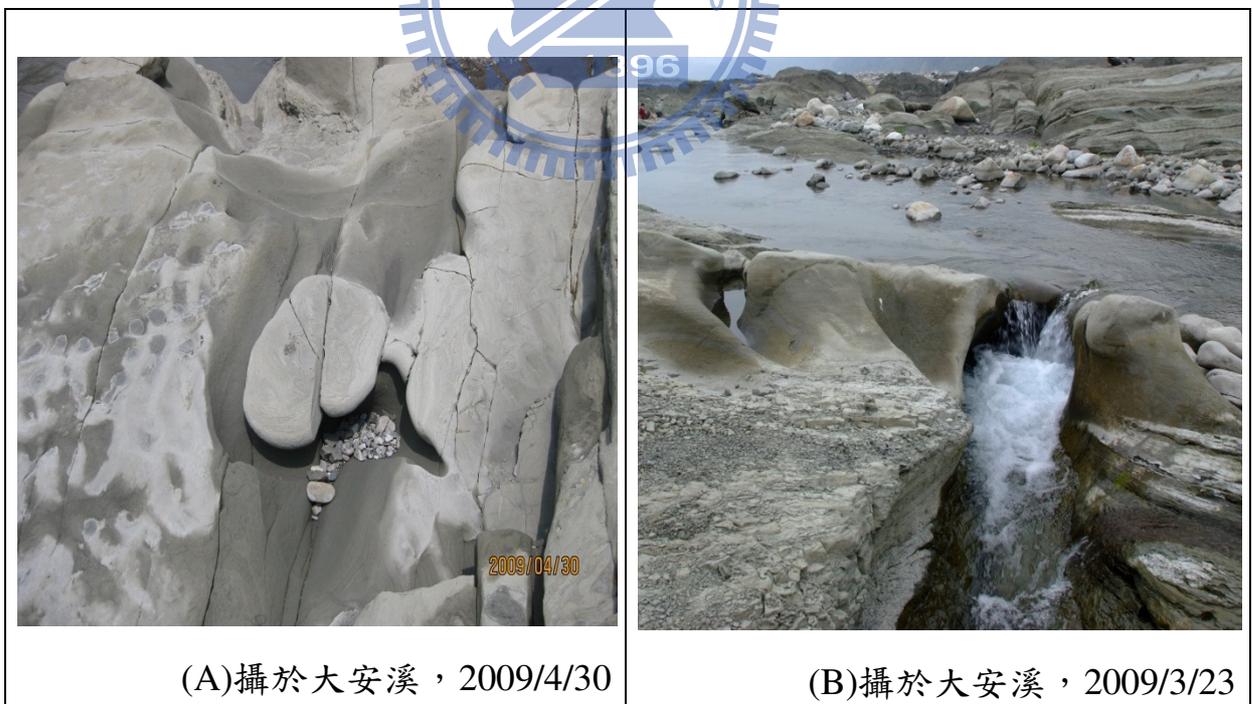


圖 3-8(A)(B)穴蝕沖蝕



圖 3-9(A)(B)岩體乾濕循環造成風化沖蝕

沖蝕型態深受岩體岩性、節理組數、以及節理間距之影響。受沖蝕之岩體純粹為厚層砂岩時，其節理組數較少及間距較大，故當河水沖蝕作用時往往會形成滑槽如圖 3-5(B)所示。當沖蝕岩體為砂頁岩互層時，其節理組數較多及間距較小，故當河水沖蝕作用時在互層中的薄層頁岩會產生小塊體抽離，而互層中的砂岩會產生滑槽如圖 3-10(A)(B)所示，而砂頁岩互層亦會產生薄層頁岩小塊體抽離後，造成上面的砂岩形成懸空，再經過河水沖蝕作用後，形成大塊體抽離或折斷如圖 3-11(A)(B)所示。而當沖蝕岩體為泥質頁岩時，當河水沖蝕作用時，因泥質頁岩質地較軟經河水浸泡後會產生乾溼循環的乾縮、乾裂行為，會形成風化沖蝕的型態如圖 3-9(A)(B)所示。



圖 3-10(A)(B)砂頁岩互層形成不同之沖蝕機制



圖 3-11(A)(B)砂頁岩互層形成不同之沖蝕機制

第四章 研究方法

4.1 岩石材料沖蝕模擬試驗之分析方法與工具

本研究採用 PFC^{3D} 數值分析程式為工具，針對軟弱岩層試體進行模擬分析以進行模擬沖蝕試驗。PFC^{3D} 為 PFC2D 分析軟體的三維延伸程式，為三維外顯個別元素法(DEM)程式。PFC^{3D} 與 PFC2D 二維分析程式以顆粒集合體的方式做比較，PFC^{3D} 是以圓形球體以及三度空間的顆粒集合體做為分析之範圍，而是以圓盤及二度空間的集合體做為分析之範圍。本研究主要電腦硬體設備為 Intel Core2 Quad CPU E8600 @3.16GHz，RAM 為 4GB。

PFC^{3D} 係基於非連體力學的分析模式，個別元素法的計算為一個時階與顯性的方法，亦可以用來模擬靜態與動態的問題；但完全動態的運動方程式僅能於靜態解達成後才能求得；為了更真實地達到破壞或材料的流動現象，以顯性的方法並不須要像隱性(implicit)法中許多非物理的演算法，以 PFC^{3D} 來模擬包括了幾千個時階的執行，於每個時階上，每個顆粒係根據牛頓第二運動定律(力=質量*加速度)積分兩次，以提供給定的顆粒之接觸力新的速度與位置，依據新的顆粒位置，接觸力即可由配對的顆粒之相對位移來求得，且線性/非線性之力/位移定律均能使用。

PFC^{3D} 分析中使用者可以用適當的顆粒集合體來代表被模擬的對象，並選定適當的材料參數及鍵結型式，將顆粒集合體膠結在一起，亦可模擬岩石材料的破壞以鍵結產生破壞的方式做呈現。圖 4-1 顯示為 PFC^{3D} 的計算循環圖，由此圖可以看出其時階演算法為重覆運用運動定律予每個顆粒，而力-位移定律則施加給每個接觸點進而產生新的新接觸力。

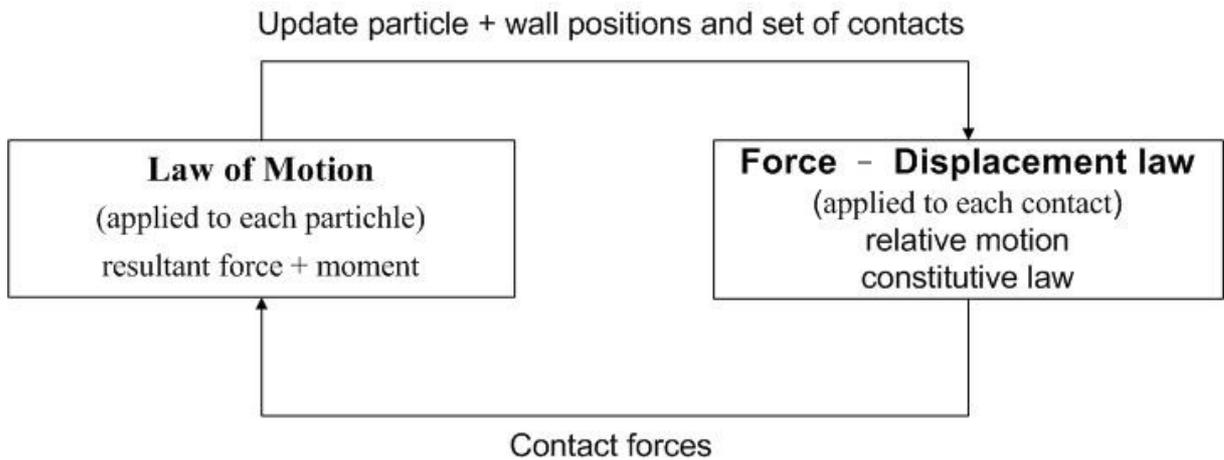


圖 4-1 PFC^{3D} 之計算循環

PFC^{3D} 允許顆粒在接觸點上互相連結，並提供兩種連結模式分別為接觸鍵結模式(contact-bond model)及平行鍵節模式(parallel-bond model)，兩種模式皆可使顆粒間存在膠結作用。接觸鍵結模式係假設顆粒接觸點上存在一組正向及剪向勁度之接觸彈簧作用於接觸點上，而此組彈簧亦可產生正向強度及剪向強度。平行鍵結模式係假設於顆粒間存在一圓盤或矩形斷面之彈性連結塊體，連結塊體之主要功用為連結兩個相互接觸之顆粒，以模擬顆粒間之膠結材料，此彈性連結塊體可傳遞力與彎矩，而當彈性連結塊體所受之應力達到鍵結強度時，將造成平行鍵結塊體的斷裂並喪失其連結效果。

4.2 DEM 分析工具之模擬能力與限制

PFC^{3D} 個別元素分析程式為透過顆粒(Ball)及牆(Wall)形成模擬之對象，而作用力的施加方式分為兩種，一者為使用 PFC^{3D} 的指令產生作用力(產生單壓、剪力等力學作用力)施加於邊界牆上，進而使邊界牆對顆粒集合體施力，產生使用者所需之試驗目標，另一者則透過 PFC^{3D} 內建之 FISH 程式進

行外力的施加，結果亦要達到使用者之試驗目標。

本研究之主要為模擬岩層河床之沖蝕，第一為岩層河床試體之產生，藉由顆粒及邊界牆的運用配合即可以產生所需要的試體，其限制為無法達到與現地岩層材料一樣之孔隙率(n)及粒徑分布，若要達到跟現地岩層材料一樣之孔隙率及粒徑分布，會造成產生模擬試體時間增長而不利於模擬現地沖蝕，為克服此點限制，本研究固定所有模擬試體之孔隙率及粒徑分布，使模擬結果符合現地情形即可，不僅減少模擬時間亦可達到所需結果。

第二為當顆粒間的鍵結破壞時，亦代表顆粒間的相對作用消失，所以在經過邊界頂牆加入剪向勁度(Wall-ks)及速度的作用下，利用頂牆與顆粒間相對位移形成一剪應力，而使鍵結破壞的顆粒就會隨著流場產生模擬沖蝕行為的作用形成，此項之限制為鍵結破壞之數目並不能代表破壞顆粒的數目，因為單一顆粒可能會跟數顆顆粒產生鍵結，其接觸點可能會有數個以上，所以要確實知道有多少顆粒破壞，要經過程式設定，顆粒脫離試體形成沖蝕的碎屑，即可確定它是破壞的顆粒。

第三為造成沖蝕的作用力，本研究第一種沖蝕作用力主要模擬流水(包含純流水、夾帶懸浮載或河床載)沖蝕岩層河床表面的沖蝕行為，此行為稱為水流所造成剪應力之沖蝕(abrasion)，第二種沖蝕作用力為顆粒撞擊模擬河床試體的撞擊力藉以模擬現地河床沖蝕中的顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)。

第一種沖蝕作用力為模擬流水施加於表面之床面剪應力作用，其作法是藉由控制模擬試體上方邊界頂牆之側向（水平方向）位移速度及邊界頂牆與球間之剪向接觸勁度，可令頂牆與顆粒間在相對移動下產生特定之剪應力，此剪應力乃為了模擬現地河水層流對岩床表面所造成之剪應力作用，

若再加入一流場系統，即可將鍵結有產生破壞之表面顆粒帶走，此項的限制主要為剪應力之施加是為了破壞表面顆粒間的鍵結，並無法將鍵結破壞的表面顆粒帶走，故仍需加入一流場，利用流場中壓力差所形成之流速才能將鍵結破壞之顆粒帶走，使模擬較符合實際狀況。

第二種沖蝕作用力為主要在單一顆粒上加諸速度，此速度為 X 方向及 Z 方向的組合，X 方向速度為模擬河流之流速，Z 方向速度為模擬顆粒之重力，當此顆粒撞擊到沖蝕試體時，就會產生撞擊點處的鍵結破壞，當流場系統開始運作，顆粒間鍵結有產生破壞者，顆粒即會產生沖蝕行為，其限制為此模擬無法跟現地情況一樣，在撞擊後破壞處的顆粒立即在河水流動下被帶走，為克服此點，所以在撞擊後加入流場系統的運作，就可以使模擬的結果較符合實際的情況。

4.3 模擬試體之建立

由現地求得岩層河床沖蝕率並不容易，即使可行，想得到實際現地的沖蝕量及沖蝕速率亦須要經過長時間的觀測。如果想探討主要影響沖蝕的因子及條件，亦難以從現地的情況控制單一影響因子。現地的岩層河床要取得完全相同的試驗區塊實際上是不可能的，即使能取得區塊的沖蝕量及速率，亦可能會因為實際的數量不足，一般不易完成一系列有用的歸納分析。即使試圖透過實驗室之模型試驗，也因為岩層河床的岩性或因不容易獲得具代表性試體，或因軟弱岩石或破碎岩體不容易取得未受擾動試體，或因試驗頗為耗時，不易進行大量的沖蝕試驗。

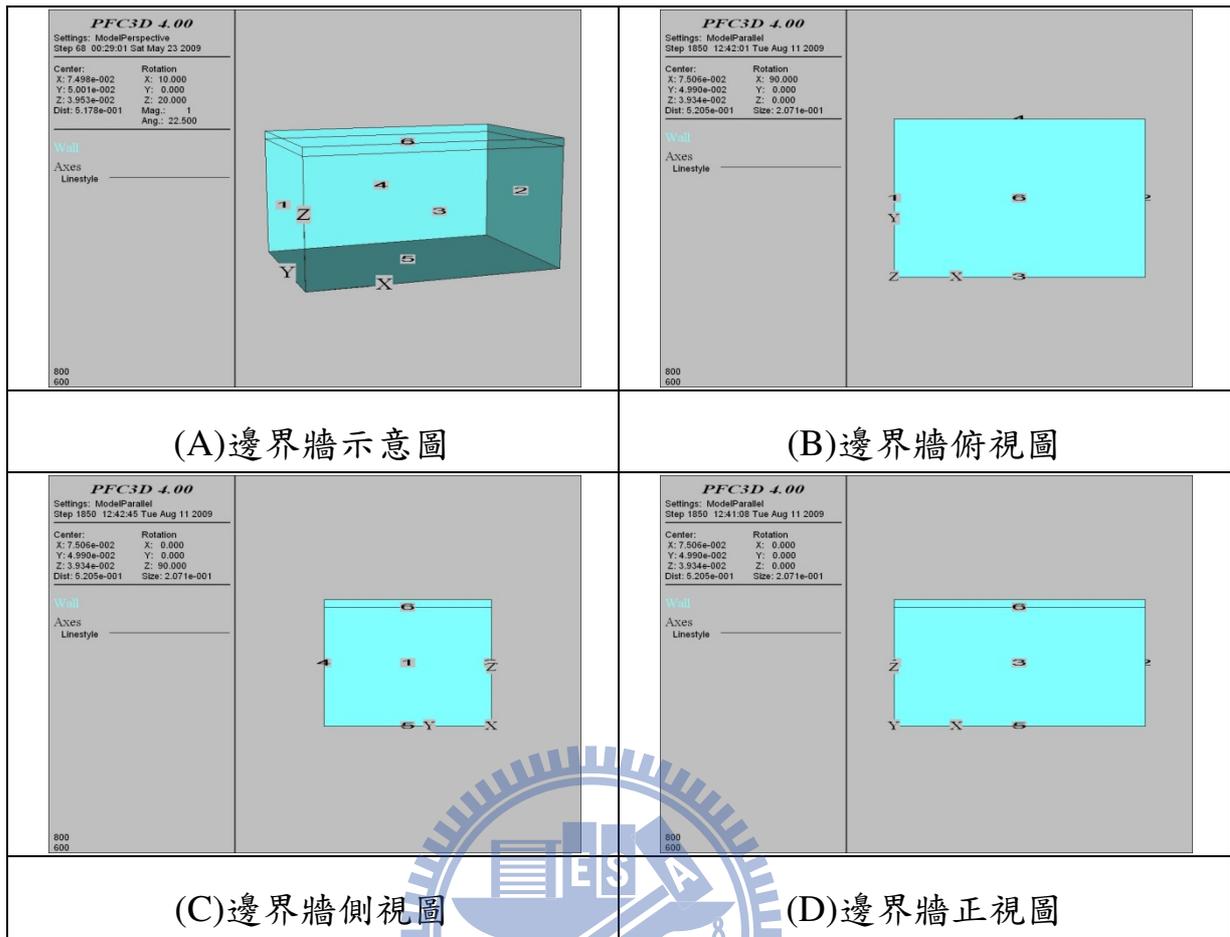
為了彌補適合沖蝕試驗試體不足與現地取樣之困難，本研究嘗試利用數值模擬的方式搭配實際的室內試驗，不僅能達到試體重覆性及均質性的

結果，更可以讓其結果更符合所需的要求，本研究因此選用 PFC^{3D} 個別元素法程式來進行虛擬軟弱岩石試體之沖刷數值模擬（以下簡稱「虛擬沖刷試驗」），以模擬各種岩性及沖蝕情況，希望將來可應用於室內試驗及現地沖蝕情形的結果比較，未來若可經過分析三者關係，評估軟弱岩石河床沖蝕速率、沖蝕量及影響沖蝕的因子。虛擬軟弱岩石試體（以下簡稱「虛擬試體」）係由球狀顆粒集合體所構成，相鄰球顆粒間具有特定鍵結。

4.3.1 邊界條件設定

本研究為控制固定條件，模擬岩層河床試體的大小及孔隙率(n)需具有一致性，並須固定虛擬試體尺寸，因此虛擬沖蝕試驗中採用固定邊界。而在 PFC^{3D} 個別元素分析程式中邊界之定義係使用牆(Wall)指令，本研究之虛擬試體尺寸為一長(X向)0.15m×寬(Y向)0.10m×厚(Z向)×0.075~0.08m 六面牆所構成之長方體(如下圖 4-2 邊界牆示意圖所示)。

接受沖蝕力作用的邊界牆(6 號牆)，在顆粒集合體達到一先設定好之固定孔隙率後，採取一固定速度上升之後，使顆粒集合體內的不平衡力趨近穩定，再進行刪除之動作，所有的沖蝕力作用方向為 1 號牆作用至 2 號牆的方向(X 向)。邊界牆亦可以看出沖蝕後的破壞是否達到邊界，若達到邊界則會產生邊界效應，造成超過預估的結果，就需要修正沖蝕作用力的大小。邊界牆 1 至 6 號牆皆有約束沖蝕試體的作用。



(A)邊界牆示意圖

(B)邊界牆俯視圖

(C)邊界牆側視圖

(D)邊界牆正視圖

圖 4-2 邊界牆示意圖(A)~(D)

4.3.2 顆粒集合體建立

本研究為採用 PFC^{3D} 進行岩層河床試體沖蝕模擬，其試體之形成為顆粒(Ball)組成一顆粒集合體做為代表(如下圖 4-3 沖蝕試體顆粒集合體示意圖所示)，本研究之顆粒集合體為 11000 顆顆粒組成，顆粒粒徑為半徑 0.002~0.003m，所有顆粒產生於邊界牆內形成顆粒集合體，而顆粒集合體的目标孔隙率為 0.36，目标孔隙率的達成為先將顆粒縮小放入邊界牆組成的長方體內，再使用一膨脹係數使顆粒膨脹而達到目标孔隙率。顆粒集合體尺寸為長(X向)0.15m×寬(Y向)0.10m×厚(Z向)×0.075~0.08m 六面牆所構成之長方體。

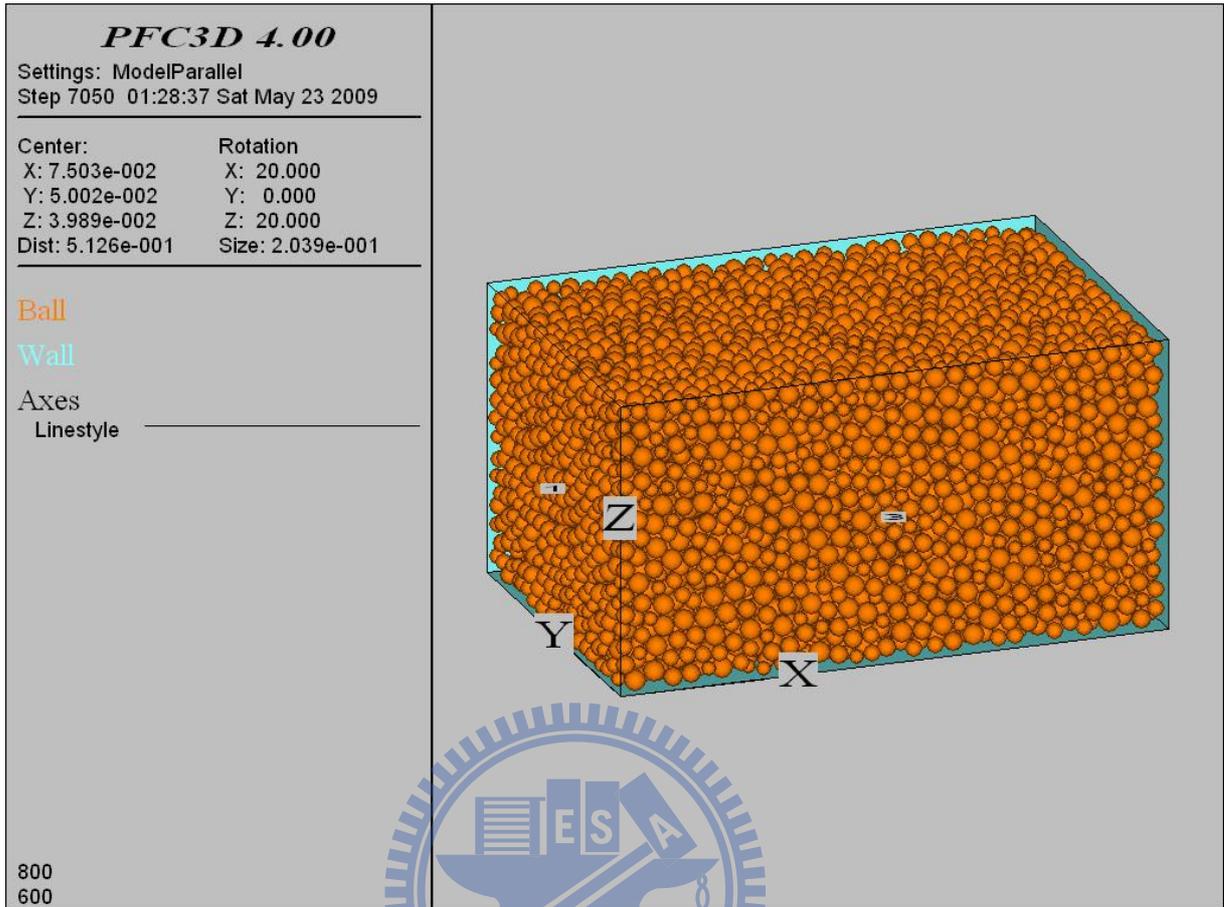


圖 4-3 沖蝕試體顆粒集合體示意圖

4.3.3 相關材料參數之率定

本研究所採用之 PFC^{3D} 個別元素程式之相關岩石材料參數，其相關之參數設定分別有邊界牆、顆粒集合體及介質(平行鍵結)三種，邊界牆參數主要有牆(Wall)之正向及剪向勁度參數(k_n 、 k_s)，顆粒集合體參數主要有顆粒(Ball)之密度(density)，正向及剪向勁度參數(k_n 、 k_s)，正向及剪向強度(n -bond 及 s -bond)及摩擦係數(μ)，介質(平行鍵結)參數主要有鍵結的半徑放大係數(λ ， pb_radius)係為取兩接觸之顆粒半徑最小值乘於一個放大倍數、正向及剪向勁度參數(pb_k_n 、 pb_k_s)及正向及剪向強度參數($pb_nstrength$ 、 $pb_sstrength$)，微觀參數表如表 4-1 所示，以上之參數率定經模擬卓蘭層中的軟弱砂岩層室

內三軸試驗，以找出最適當之參數作為本研究之參數探討，第五章中將討論參數之率定過程與結果，詳述虛擬試體所模擬岩石材料之參數標定。

表 4-1 微觀參數表

項目		符號
顆粒物理性質參數	顆粒單位重	ρ
	顆粒粒徑	R
顆粒接觸鍵結模式	強度參數	n_bond、s_bond
	勁度參數	kn、ks
滑動模式	摩擦係數	μ
平行鍵結模式	半徑放大係數	λ
	強度參數	pb_nbond、pbs_bond
	勁度參數	pb_nstr(pb_nstrength)、 pb_sstr(pb_sstrength)

4.3.4 沖蝕驅動力之作用方式

本研究之沖蝕驅動力之作用方式主要有兩種，第一種為模擬水流所造成剪應力之磨蝕沖蝕(abrasion)的系統，主要是利用邊界頂牆加入一剪向勁度及側向速度，而使得頂牆與表面顆粒形成相對位移所形成之剪應力，而造成對模擬試體之表面顆粒產生破壞而造成磨蝕。第二種為模擬顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)的單一顆粒撞擊模擬河床試體作沖蝕驅動力，主要是利用單一顆粒加入速度造成撞擊後對模擬河床試體之破壞，而造成彈跳撞擊磨蝕。

4.4 沖蝕模擬試驗之目標

模擬岩層河床試體沖蝕試驗目的是為了克服現地較難取的同一岩性的試體不易，及室內試驗所需試驗時間較長，所以希望藉由數值模擬的方式來模擬室內試驗之結果，來克服上述兩點的缺點，又使用三維模擬的模式來比對室內試驗的結果，使其結果可以直接做分析。模擬的岩石材料參數可由過去相關試驗所提供之參數作模擬之三軸試驗估計出，本研究之模擬岩石材料為苗栗卓蘭大安溪地層中卓蘭層之軟弱砂岩為例，陳賀瑞(1997)曾針對此部分之卓蘭層軟弱砂岩材料作室內三軸試驗，其所得之力學參數亦可做為本研究之參考。岩層河床試體沖蝕模擬時需考慮的因素較多，可分別考慮試體的岩性對沖蝕行為的影響，以及沖蝕作用力對沖蝕行為的影響，未來亦可以跟室內試驗比較所獲得的結果之差異性。

4.5 沖蝕模擬試驗之規畫

為探討特定單一因子（含岩性強度、沖蝕驅動力，頂牆側向位移的剪應力，顆粒撞擊系統中的顆粒大小、撞擊角度及撞擊速度等）對軟弱岩層河床沖蝕之影響，在模擬水流磨蝕沖刷(abrasion)及模擬顆粒彈跳造成的沖蝕(saltation)兩種沖蝕模擬時，都固定其他影響因子以探討岩性強度強弱對沖蝕的影響。舉例而言，為探討岩石強度強弱對河床沖蝕率之影響，模擬沖蝕時，沖蝕驅動力，頂牆側向移動所形成之剪應力，顆粒撞擊系統中的顆粒大小、撞擊角度及撞擊速度等因子加以固定，比較沖蝕量。所模擬之岩石強度依卓蘭層軟弱砂岩室內三軸試驗所得之尖峰強度區間，分成高、中、低三種強度做討論，其針對卓蘭層軟弱砂岩之單壓強度分別是 28、20 及 12MPa，主要係以改變平行鍵結正向及剪向強度來做單壓強度之改變，

此三種虛擬岩石之應力應變圖如圖 4-4 所示。

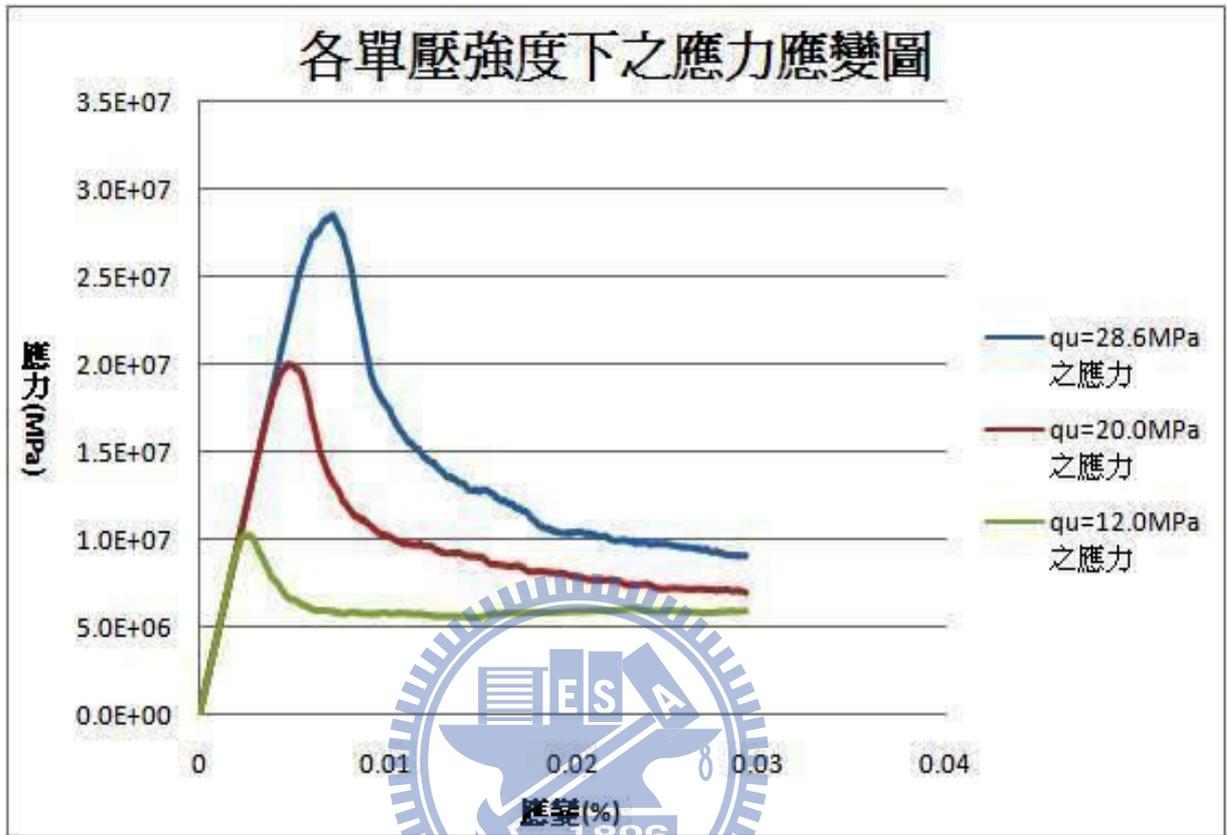


圖 4-4 各單壓強度之應力應變圖

沖蝕行為除了由岩性強度作掌控之外，亦受沖蝕驅動力作控制，而驅動力又可區分成剪應力因子及顆粒撞擊因子。當考慮該等因子之影響時，岩石強度予以固定不變。

模擬水流磨蝕沖刷時，為考量一般河川中流速所形成之剪應力因子之範圍，本研究將剪應力分為高至低六種做討論。

模擬顆粒彈跳造成的沖蝕時，所考量之顆粒撞擊因子包含撞擊顆粒尺寸、撞擊角度、撞擊速度三種，顆粒尺寸分為大、中、小三種尺寸，分別為直徑 4、2、1cm 由下圖 4-5 所示，撞擊角度由 Foley(1980)提到顆粒撞擊岩床角度區分為，低角度的切削磨損 (cutting wear)及高角度的變形磨損 (deformation wear)，故分成低、高兩種，為 30 及 60 度由下圖 4-6 所示，撞擊速度分成高、中、低三種，為 10、6、1m/s。以上各情況之模擬皆為取一影響因子做試驗，而固定其他影響因子，進而找出各項因子之影響沖蝕行為之主控因子。

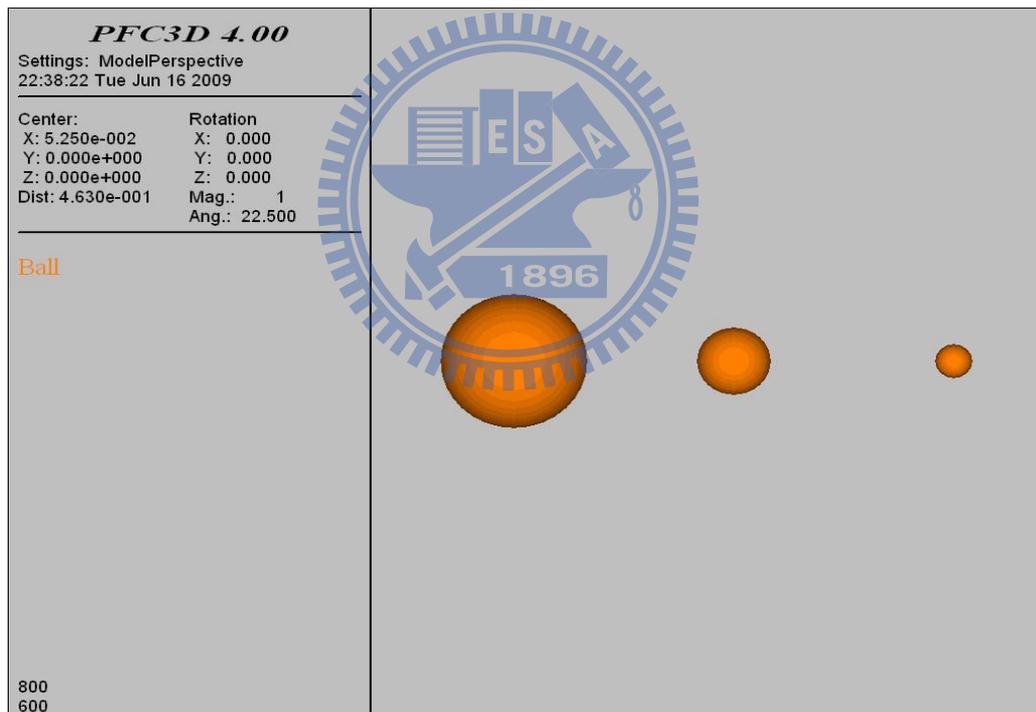
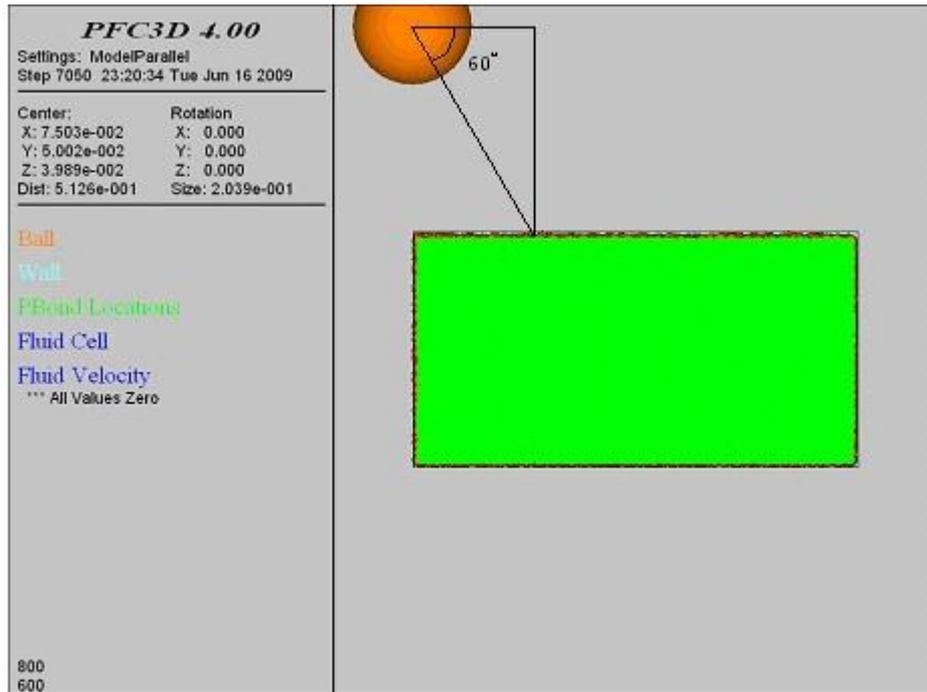
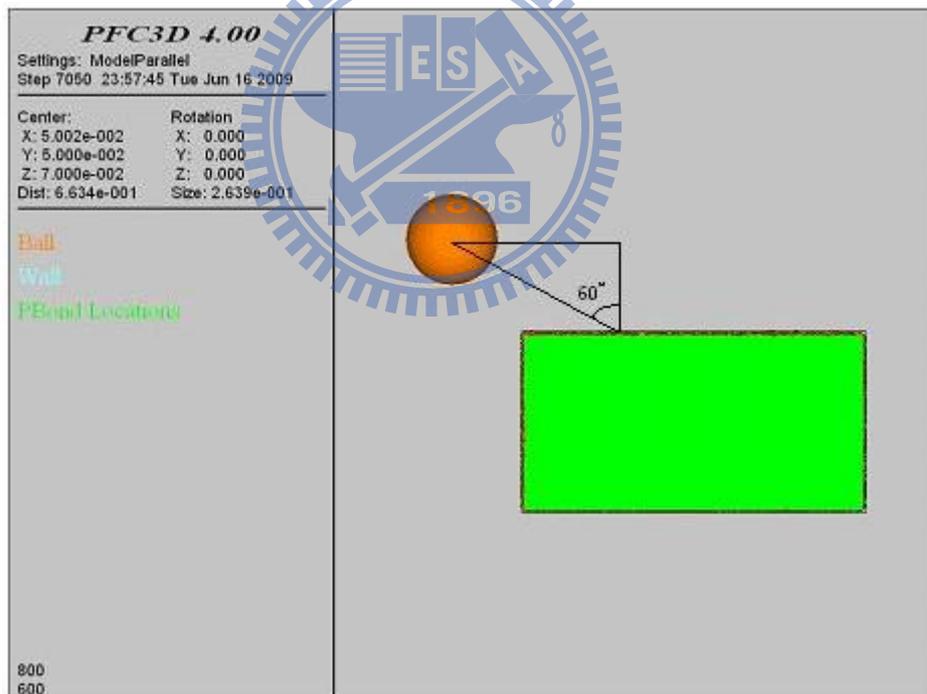


圖 4-5 撞擊顆粒尺寸示意圖



(A) 撞擊角度為 60 度



(B) 撞擊角度為 30 度

圖 4-6 撞擊顆粒撞擊角度示意圖

4.5.1 沖蝕模擬試驗之流程

模擬岩層河床試體沖蝕試驗主要分成兩個部分，一為模擬試體建立流程如下圖 4-7 所示，另一者為整個沖蝕模擬試驗流程如下圖 4-8 所示。

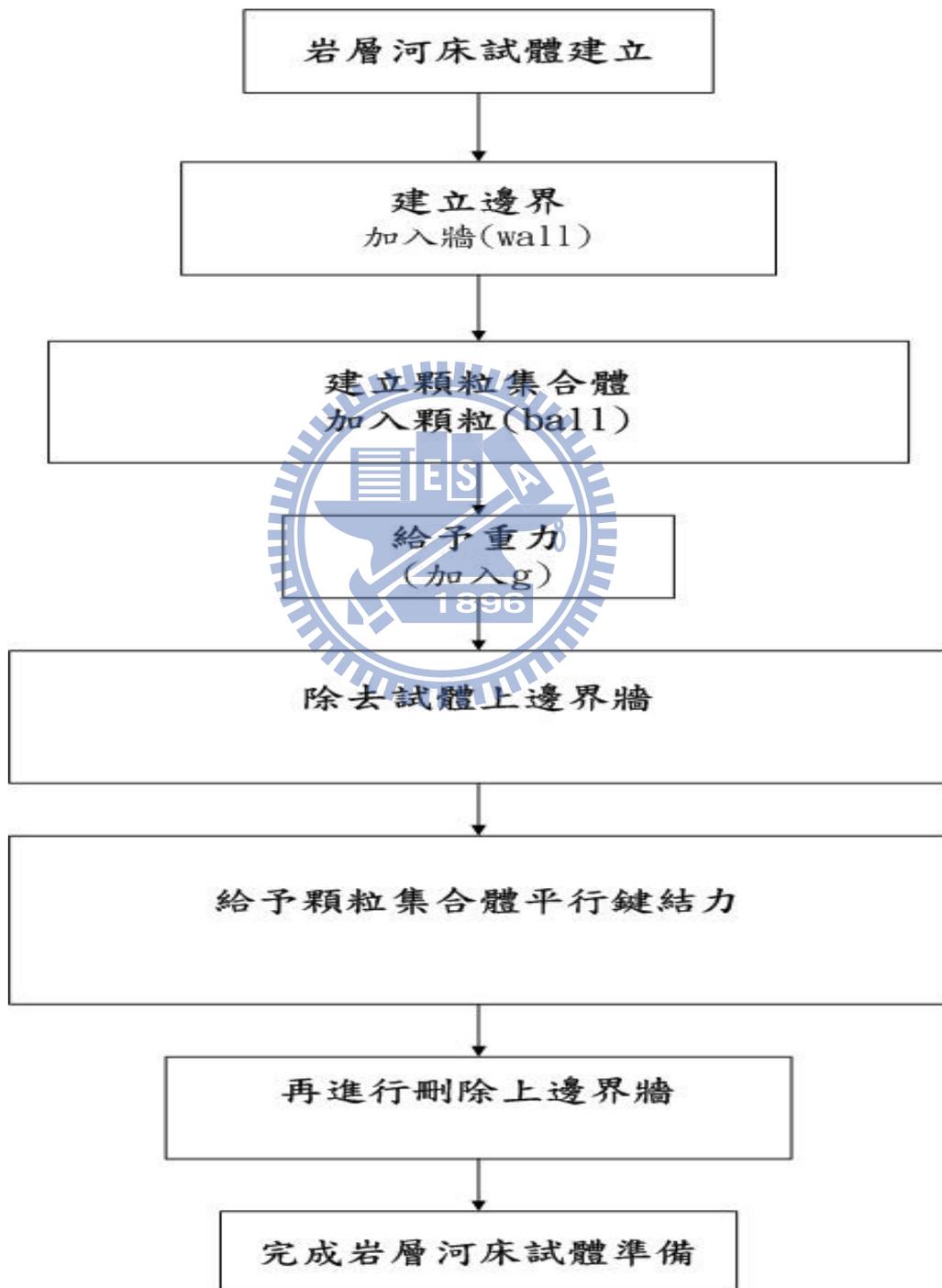


圖 4-7 模擬試體建立流程圖

模擬試體之組成主要為六面邊界牆(wall), 11000 顆顆粒(ball)以及 22812 個平行鍵結和 55977 個接觸點。

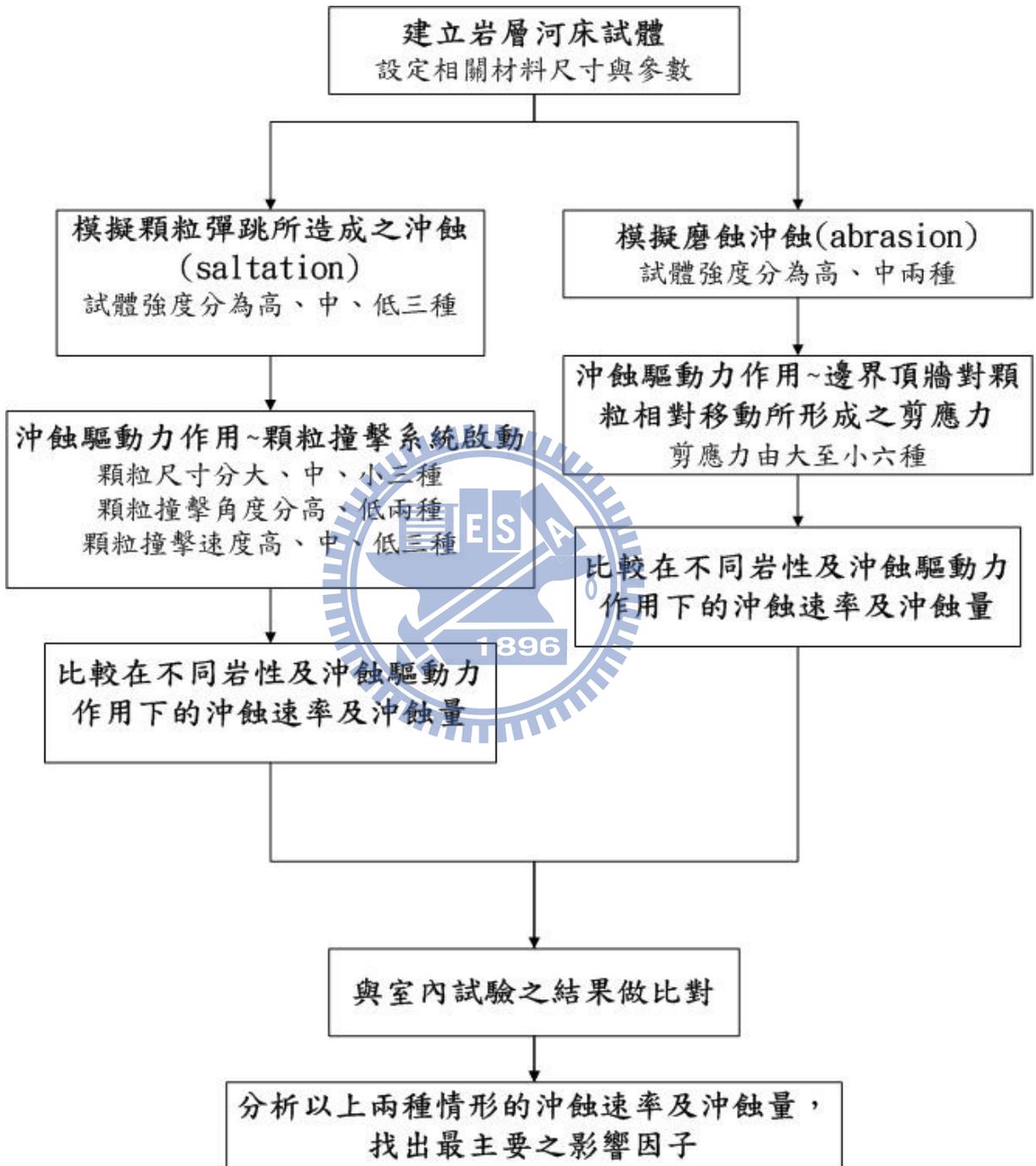


圖 4-8 沖蝕模擬試驗流程圖

4.5.2 沖蝕模擬試驗之試驗規畫

由於三維模擬試體進行模擬沖蝕試驗，完成一組模擬試驗所花費之時間需達一個小時半，而其試驗結果變異性不大，故每一組試驗採用三次模擬以供檢核變異性。

本研究之沖蝕模擬試驗主要分為兩種，模擬層流所造成剪應力之磨蝕沖刷以及模擬顆粒彈跳撞擊沖蝕，兩種模擬之影響因子分別依試體之岩性(單壓強度)及沖蝕驅動力作用評估各因子之影響性。

針對層流所造成剪應力之磨蝕沖蝕，所規畫之虛擬試驗係組合兩組單壓強度 28 及 20MPa、及水流所造成剪應力之磨蝕沖蝕驅動力的頂牆側向速度搭配頂牆剪向勁度所造成之剪應力。模擬沖蝕試驗是以單壓強度 28 及 20MPa 搭配剪應力高至低六種剪應力構成各種組合，比較不同組合之沖蝕量，進而探討影響沖蝕之主要因子。所規畫之虛擬試驗組合如表 4-2 所示。

表 4-2 模擬水流所造成剪應力之磨蝕沖蝕試驗規劃表

水流造成剪應力之磨蝕		
單壓強度(MPa)	28	20
剪應力(MPa)	沖蝕顆粒數目	
0.123		
0.405		
1.120		
2.610		
3.390		
5.270		

針對顆粒彈跳撞擊沖蝕模擬，規畫之虛擬試驗係組合不同單壓強度及顆粒彈跳系統中的各種沖蝕驅動力因子，模擬沖刷試驗規劃是以單壓強度 28、20、12MPa 三種強度搭配撞擊顆粒尺寸 4、2、1cm 直徑三種尺寸，撞擊速度高、中、低三種速度，撞擊角度高、低兩種角度，構成各種不同組合，比較不同組合下之沖蝕量，進而可探討影響彈跳撞擊沖蝕之主要因子。此部分所規畫之不同虛擬試驗組合如表 4-3~5 所示。

表 4-3 模擬顆粒撞擊所造成之沖蝕試驗規劃表

顆粒彈跳而造成沖蝕		撞擊速度、撞擊角度固定		
		28	20	12
強度(MPa)	顆粒尺寸(cm)	沖蝕顆粒數目		
4cm				
2cm				
1cm				

表 4-4 模擬顆粒撞擊所造成之沖蝕試驗規劃表

顆粒彈跳而造成沖蝕 強度(MPa)	撞擊顆粒尺寸、撞擊角度固定		
	28	20	12
顆粒速度(m/s)	沖蝕顆粒數目		
10			
6			
1			

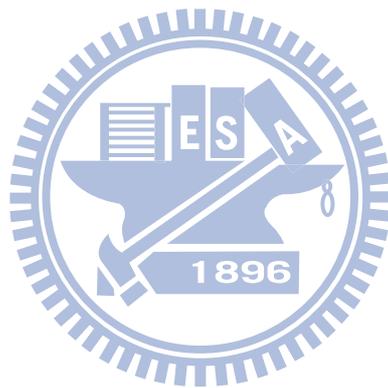
表 4-5 模擬顆粒撞擊所造成之沖蝕試驗規劃表

顆粒彈跳而造成沖蝕 強度(MPa)	撞擊顆粒尺寸、顆粒速度		
	28	20	12
撞擊角度	沖蝕顆粒數目		
60度			
30度			

4.6 材料參數對沖蝕行為之影響

岩層河床試體為卓蘭層軟弱砂岩，其組成主要成分為細粒至極細粒之砂顆粒及一些構成砂岩的基質，本研究之模擬分別以顆粒(Ball)代表整體岩體，平行鍵結代表基質，而影響此類材料之力學行為的因素頗為複雜，為簡化考量，僅就可能會影響模擬沖蝕試驗的試體強度及試體摩擦角等變化範圍加以探討，而在本研究中 PFC^{3D} 程式中試體強度由平行鍵結之鍵結強度作掌控，而試體摩擦角則由顆粒的摩擦係數作掌控。基質之強度參數受

其土壤分類、飽和度等條件影響，岩塊之強度參數受母岩之岩性及風化程度影響。借由模擬沖蝕試驗之方法，改變沖蝕試體之顆粒集合體及平行鍵結之強度參數，再檢視其沖蝕試驗結果之差異，得以探討試體之顆粒集合體及平行鍵結強度參數對沖蝕試驗之影響。



第五章 參數率定

5.1 模擬岩石材料參數率定之標的

本研究所模擬之岩石材料為卓蘭層的軟弱砂岩，其主要參數探討以陳賀瑞(1997)針對此部分卓蘭層軟弱砂岩材料作室內三軸試驗(如圖 4-1~3 所示)，其所得之力學參數(如表 5-1 所示)做為率定之標的。

表 5-1 卓蘭層軟弱砂岩之力學參數表(摘自陳賀瑞，1996)

試體種類	圍壓值 (MPa)	切線模數 (MPa)	降伏狀態		參數	
			應力 (MPa)	應變(%)	C (MPa)	ϕ
灰色細粒砂岩	0.5	1780	-	-	Mohr-Coulomb	
灰色細粒砂岩	3	2985	23.48	0.894		
灰色細粒砂岩	6	3493	25.844	0.776	3.02	42.2

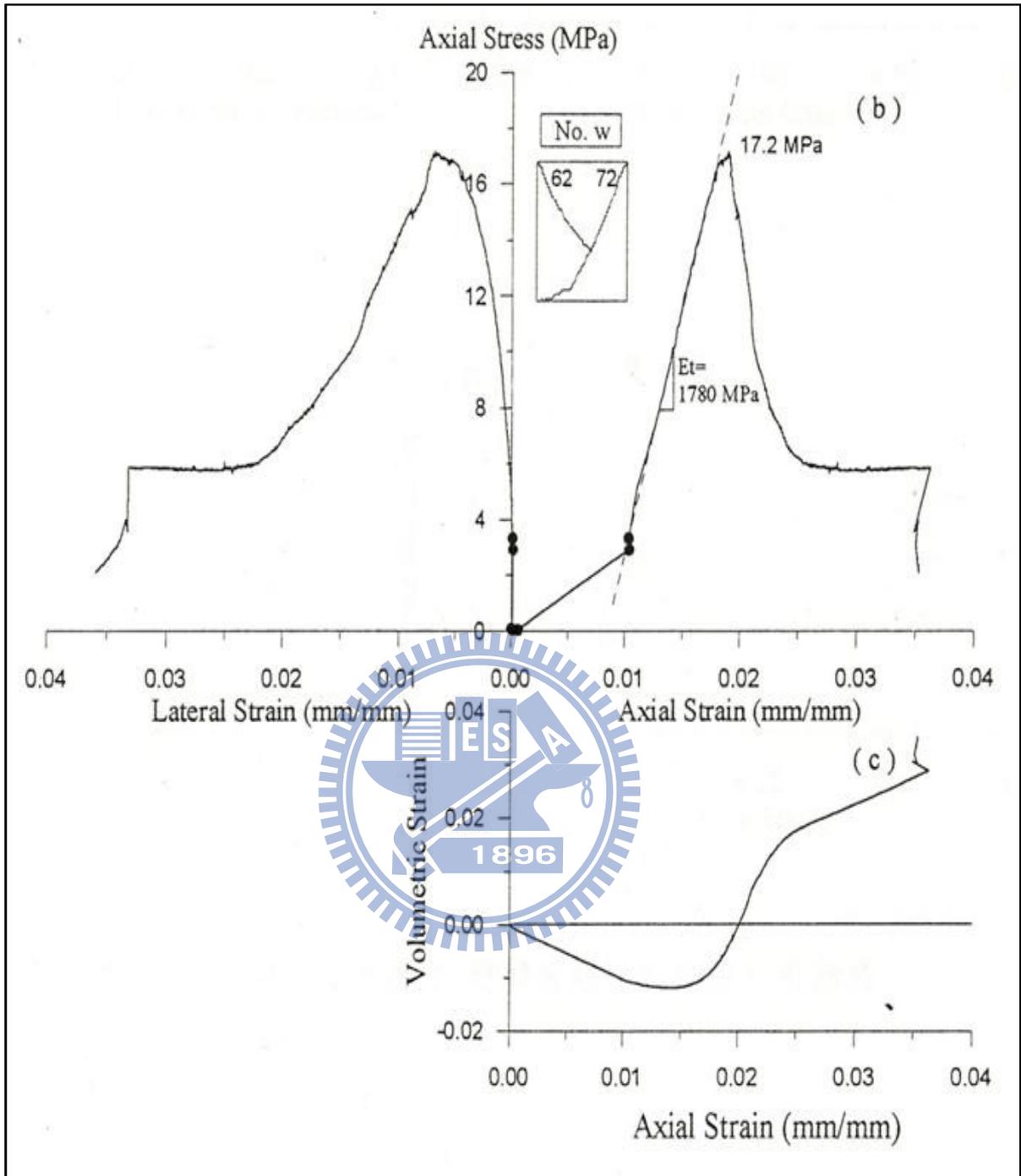


圖 5-1 圍壓為 0.5MPa 之三軸試驗(摘自陳賀瑞，1996)

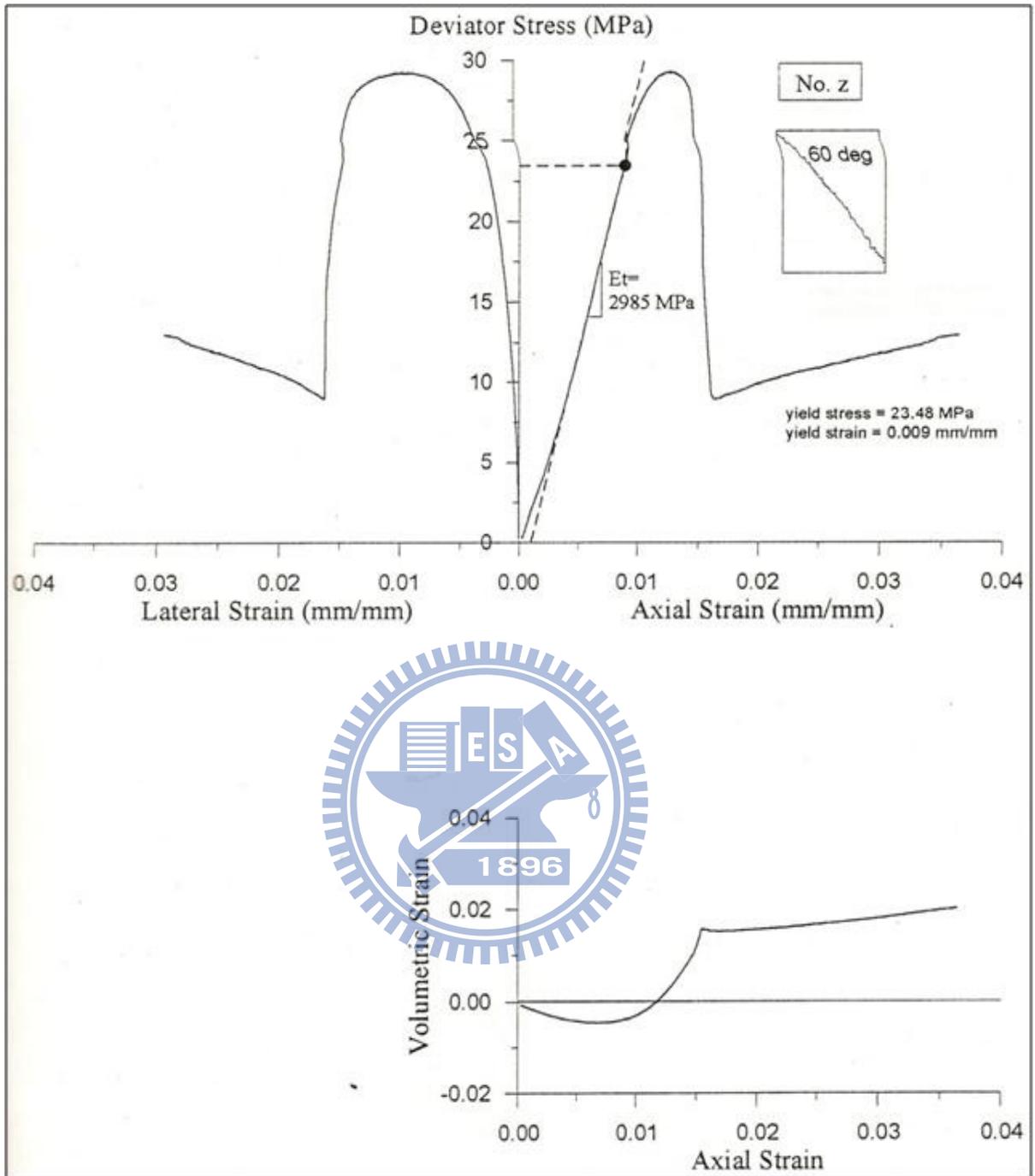


圖 5-2 圍壓為 3MPa 之三軸試驗(摘自陳賀瑞，1996)

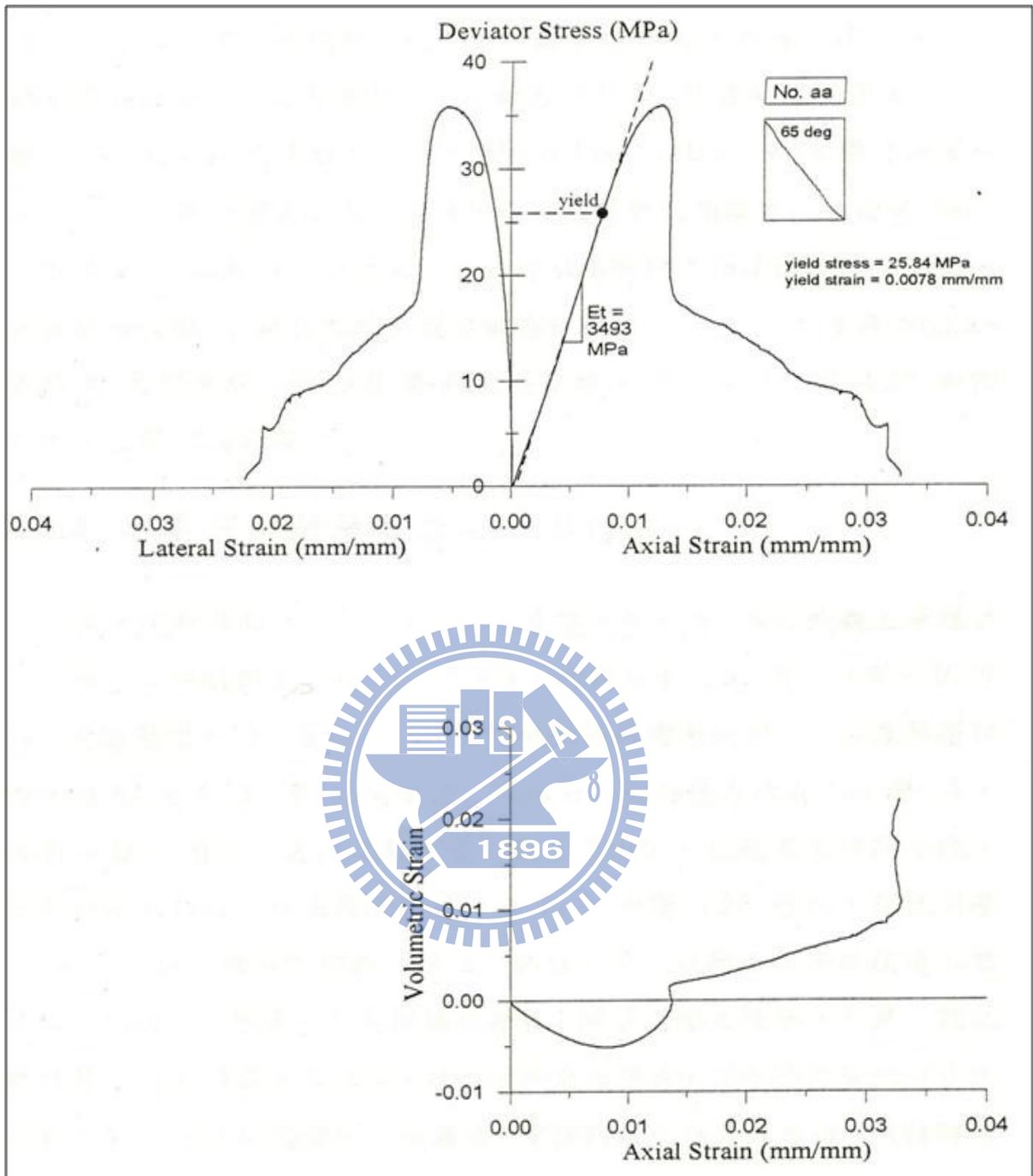


圖 5-3 圍壓為 6MPa 之三軸試驗(摘自陳賀瑞，1996)

為考量本文模擬所設定之微觀參數與實際巨觀參數之關係，可參考張家銓(2007)所提出之各項微觀與巨觀參數之關係，如表 5-2 所示，其關係圖如圖 5-4~7 所示。

表 5-2 各項微觀與巨觀參數關係表

微觀參數	巨觀參數	相對關係
楊氏係數(E_c)	楊氏係數(E)	呈線性關係
勁度參數(k_n 、 k_s)	柏松比(ν)	略呈線性關係
鍵結強度參數(n_{bond} 、 s_{bond})	單壓強度(q_u)	成線性關係
摩擦係數(μ)	摩擦角(ϕ)	略呈線性關係

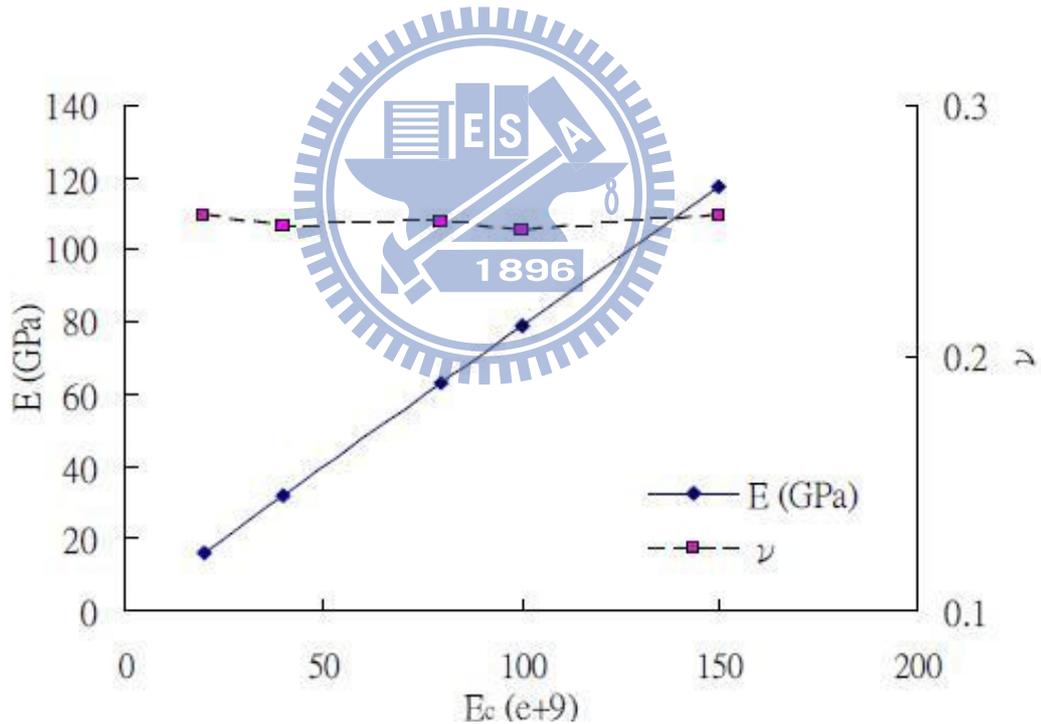


圖 5-4 微觀楊氏係數與巨觀楊氏係數之關係(摘自張家銓，2007)

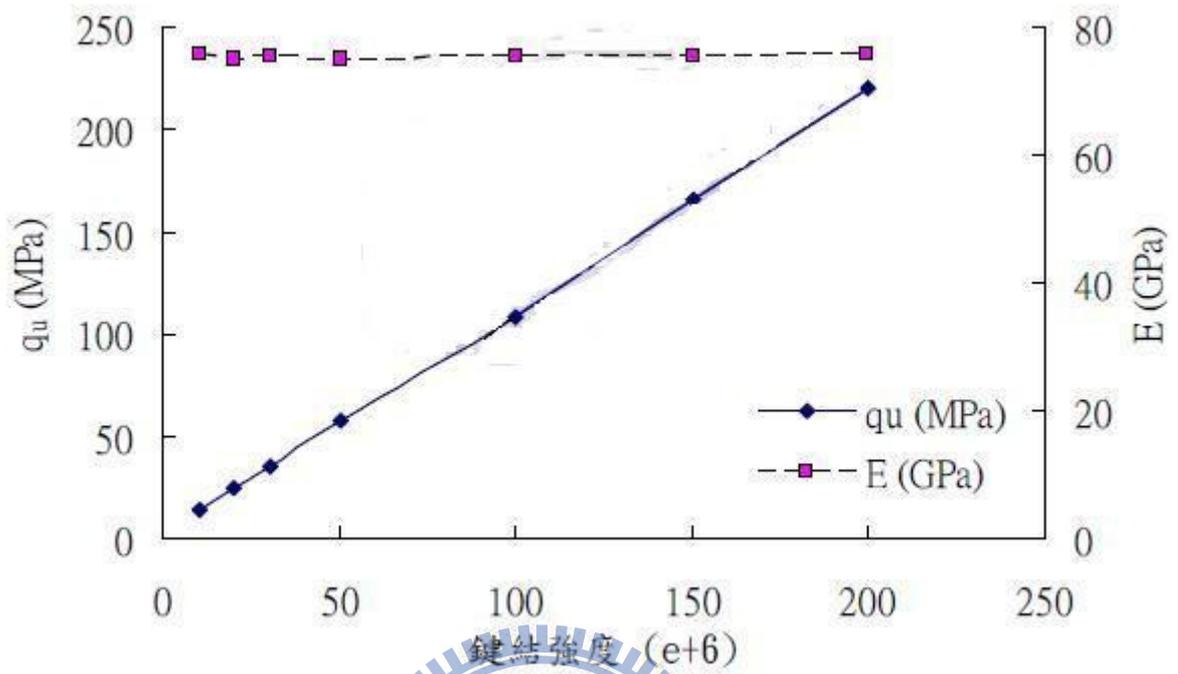


圖 5-5 微觀勁度參數與巨觀柏松比之關係(摘自張家銓，2007)

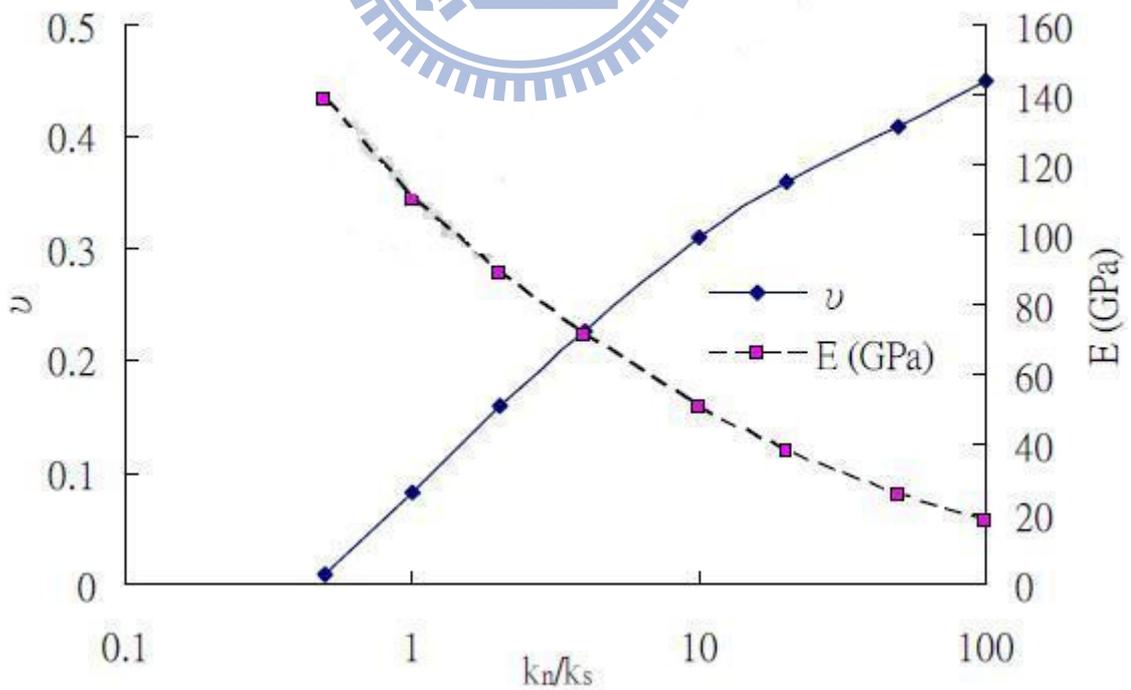


圖 5-6 微觀鍵結強度參數與巨觀單壓強度之關係(摘自張家銓，2007)

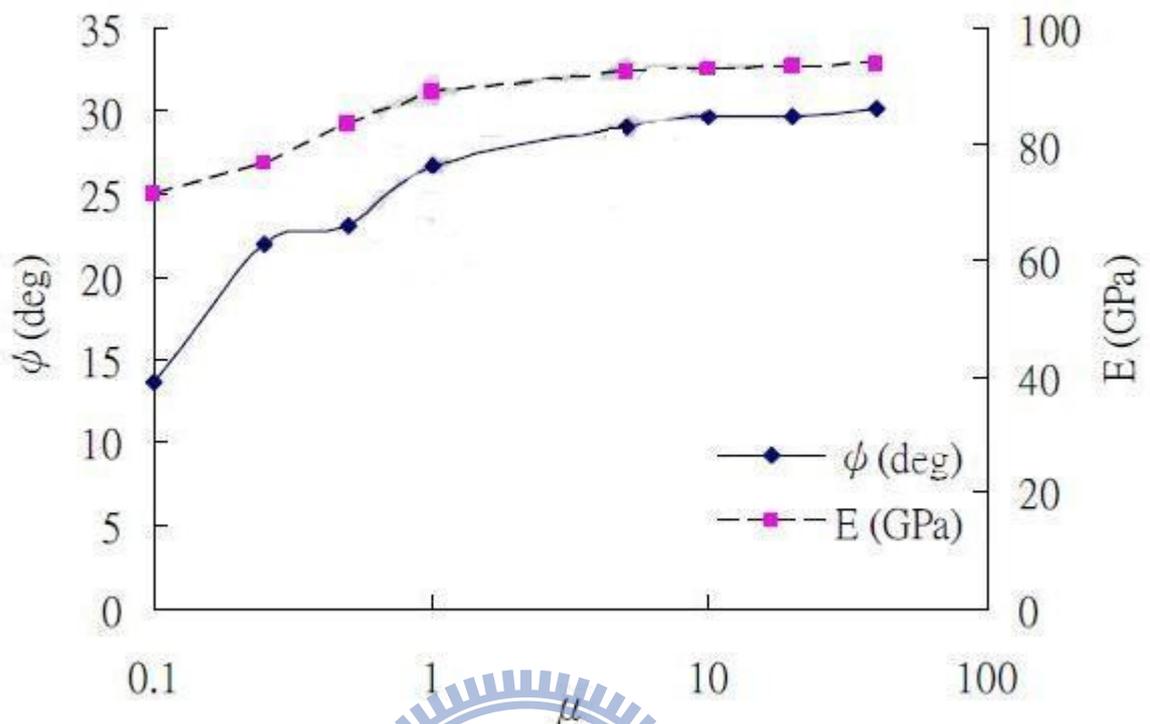


圖 5-7 圍觀摩擦係數與巨觀摩擦角之關係(摘自張家銓，2007)

5.2 本研究之相關參數率定

本文所採用之 PFC^{3D} 個別元素程式之相關岩石材料參數，其相關之參數設定分別有邊界牆、顆粒集合體及介質(平行鍵結)三種。本研究之參數亦先利用模擬室內三軸試驗做為探討參數的適用性。

邊界牆參數主要有牆之正向及剪向勁度參數(k_n 、 k_s)，牆之剪向勁度參數(k_s)因為不讓顆粒集合體對牆產生剪向力故將 k_s 設為零，而正向勁度參數(k_n)主要為模擬室內三軸試驗之三軸室故其正向勁度 k_n 設為顆粒集合體正向勁度 k_n 之兩倍， k_n 設為 120(MN/m)。

顆粒集合體參數主要有顆粒(Ball)之密度(density)，正向及剪向勁度參數(k_n 、 k_s)，正向及剪向強度(n-bond 及 s-bond)及摩擦係數(μ)等參數，顆粒之

密度採用卓蘭層軟弱砂岩之密度 2700kg/m^3 ，顆粒之正向及剪向勁度參數(k_n 、 k_s)為利用模擬室內三軸試驗，模擬出此岩石材料彈性階段之楊氏係數 E 及柏松比 ν 。其參數之標定過程，為先設定一模擬室內之三軸試驗，此模擬三軸試驗試體尺寸為直徑 7.5cm ×長度 15cm 之圓柱試體(如圖 5-8 所示)，其圍壓施加方式亦跟陳賀瑞(1996)一樣採用 0.5 、 3 、 6MPa ，此階段主要為設定顆粒之勁度參數(k_n 、 k_s)，利用顆粒強度參數(n -、 s -bond)設定為極大值，比對表 5-1 力學參數中之楊氏係數，採用示誤法求出本研究所需之勁度參數，圖 5-9~10 分別為各圍壓下之彈性階段應力應變關係圖及體積應變對軸應變關係圖，其計算方式為(5-1~2 式)分別計算出楊氏係數 E 及柏松比 ν ，各圍壓下之模擬力學參數與陳賀瑞之結果比對如表 5-3。本研究之顆粒正向及剪向勁度參數經過標定得出正向勁度參數 $k_n=60(\text{MN/m})$ 及剪向勁度參數 $k_s=30(\text{MN/m})$ 。

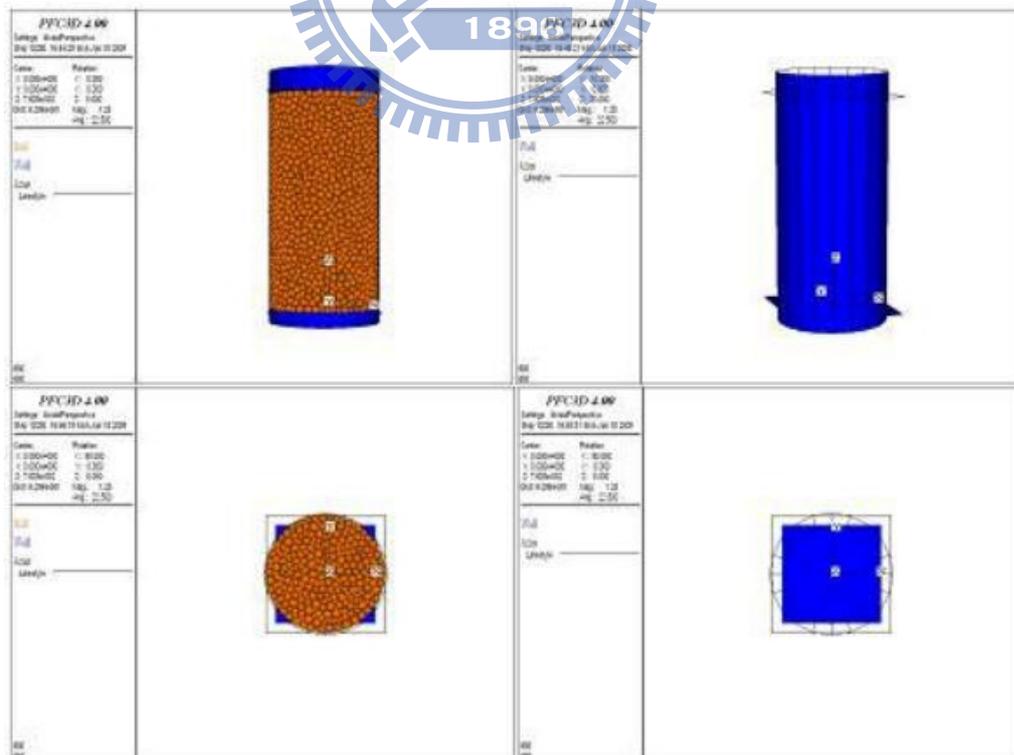


圖 5-8 模擬室內三軸試驗圓柱試體

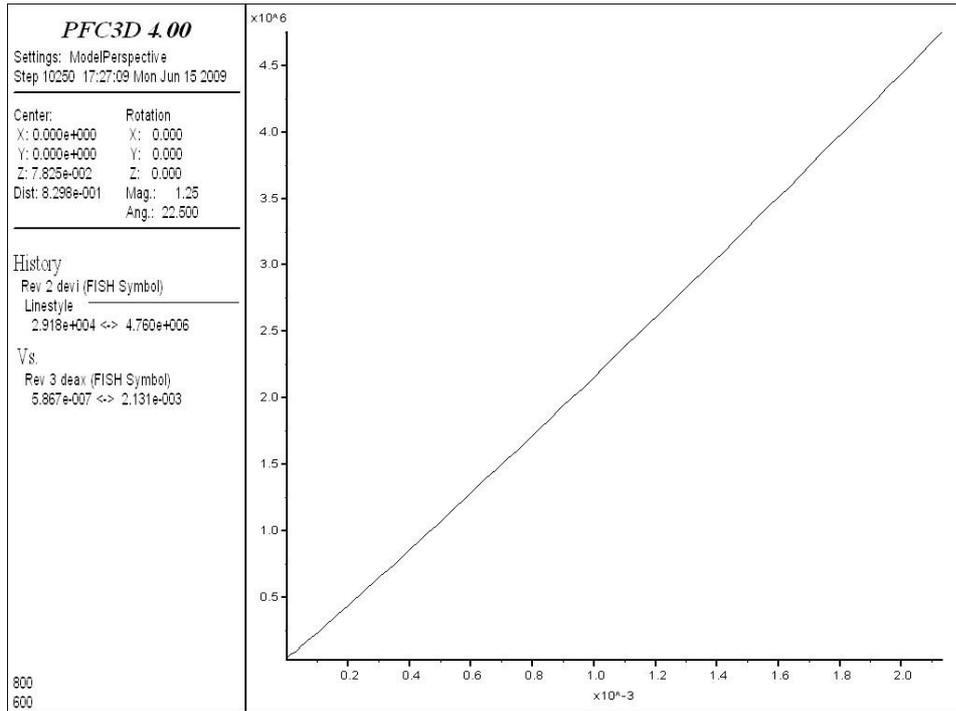


圖 5-9 彈性階段應力應變關係圖

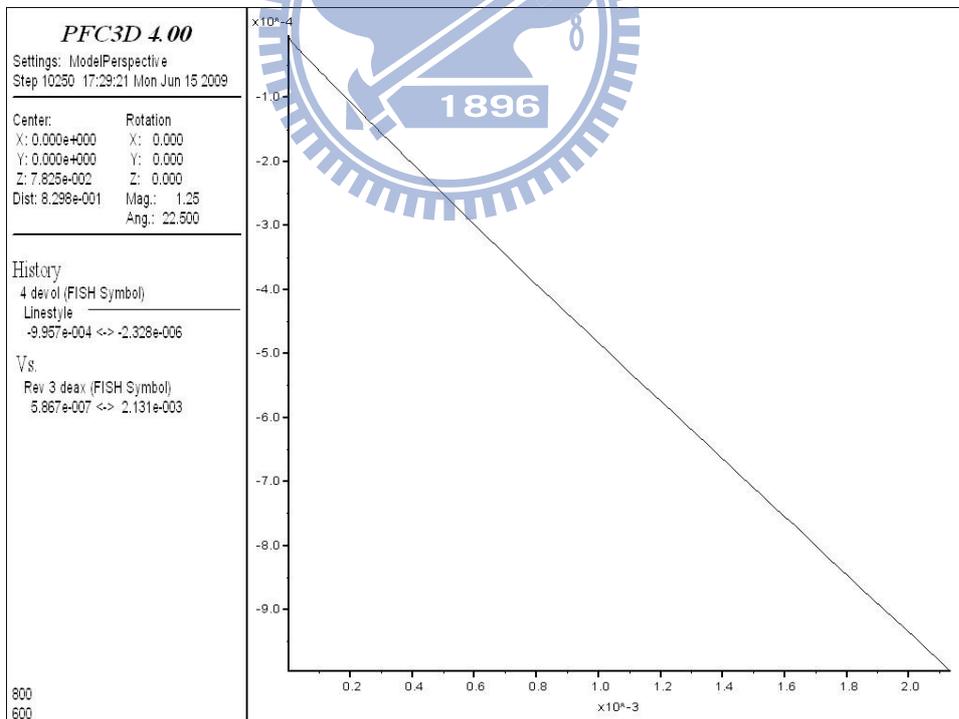


圖 5-10 彈性階段體積應變對軸應變關係圖

$$E = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a} \quad \text{式 5-1}$$

$$\nu = -\frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta\epsilon_a} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta\epsilon_v}{\Delta\epsilon_a} \right) \quad \text{式 5-2}$$

$\Delta\sigma_a$: 軸差應力

$\Delta\epsilon_a$: 軸差應變

$\Delta\epsilon_v$: 體積應變

$\Delta\epsilon_r$: 徑向應變

表 5-3 模擬室內三軸試驗力學參數

	圍壓 MPa	楊氏係數 E(MPa)	柏松比 ν	尖峰強度 P(MPa)	降伏狀態		強度參數	
					應力 MPa	應變%	c MPa	ϕ
陳賀瑞 1996	0.5	17.8	0.2~0.3	17.15	-	-	3.02	42.2
	3	29.85	0.2~0.3	29.3	23.48	0.894		
	6	34.93	0.2~0.3	35.9	25.84	0.776		
模擬結果	0.5	19.8	0.32	23.32		0.613	4.28	44.6
	3	22.3	0.27	28.59		0.714		
	6	23.6	0.25	32.78		0.769		

而顆粒之強度參數考量到現地材料之破壞情形，主要掌控為介質破壞，故顆粒之正向及剪向強度參數 n-及 s-bond 皆為零，顆粒於介質破壞後，由顆粒之摩擦係數(μ)掌控，而摩擦係數影響尖峰強度及峰後行為(由模擬之結果可得摩擦係數之影響如圖 5-11 所示)，摩擦係數主要是與巨觀參數之摩擦

角略呈線性關係，根據 Hainbüchner *et al.* (2003) 使用 PFC^{3D} 進行模擬緊砂 (n = 38%) 及鬆砂(n = 42%)之直剪試驗模擬之微觀摩擦係數與巨觀摩擦角之關係，如圖 5-12，在緊砂之摩擦角上限約在 40°；而鬆砂約為 30°，而 Potthoff 並參考 Herten (1999) 之研究亦發現摩擦角有其極限存在。本文之摩擦係數設為 1(可得巨觀力學參數約對應於卓蘭層軟弱砂岩之摩擦角 30 度)。

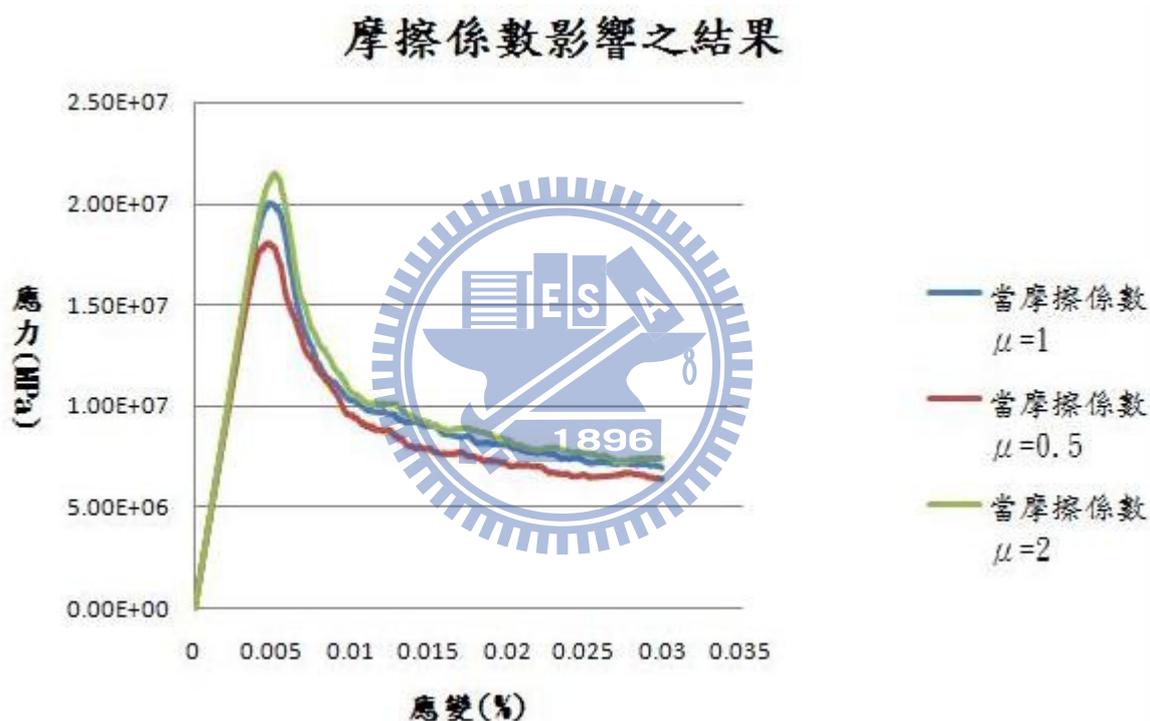


圖 5-11 摩擦係數對模擬結果之影響

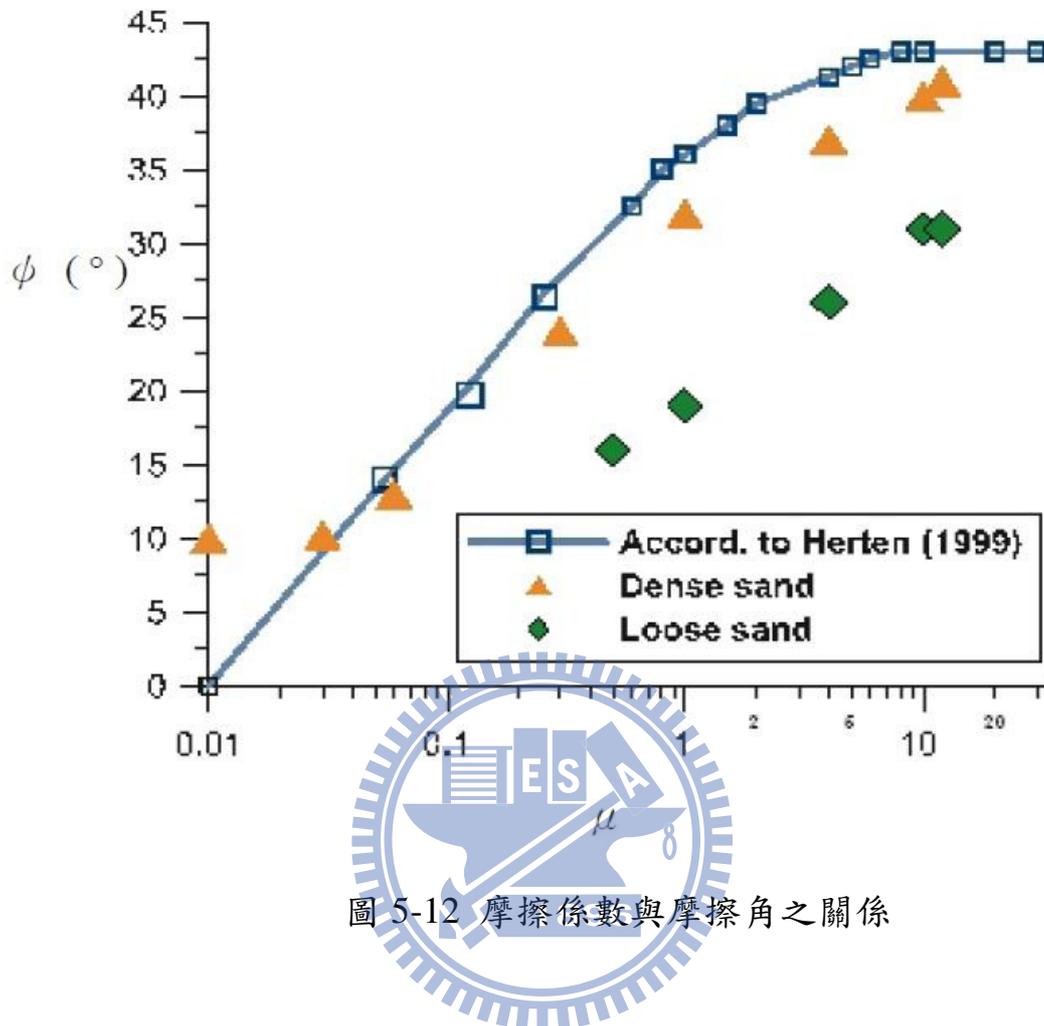


圖 5-12 摩擦係數與摩擦角之關係

介質(平行鍵結)參數主要有鍵結的半徑(λ , pb_radius)、正向及剪向勁度參數(pb_kn、pb_ks)及正向及剪向強度參數(pb_nstrength、pb_strength)，鍵結之半徑為簡化運算故設為 0.5，而鍵結之正向及剪向勁度參數與顆粒之勁度參數作一比對，由 PFC^{3D} 中之公式演算求得所需之鍵結勁度參數，鍵結正向勁度參數 pb_kn=6e12(N/m³)，剪向勁度參數 pb_ks=3e12(N/m³)，鍵結之正向、剪向強度參數由模擬室內三軸試驗之結果與陳賀瑞(1996)之結果比對，由各圍壓作用下的尖峰強度設定出本研究之鍵結強度參數，鍵結正向 pb_nstrength=1.9e8(N/m²)及剪向強度參數 pb_strength=0.95e8(N/m²)，本研究之模擬室內三軸試驗各圍壓之應力應變關係，如圖 5-13~15 所示。

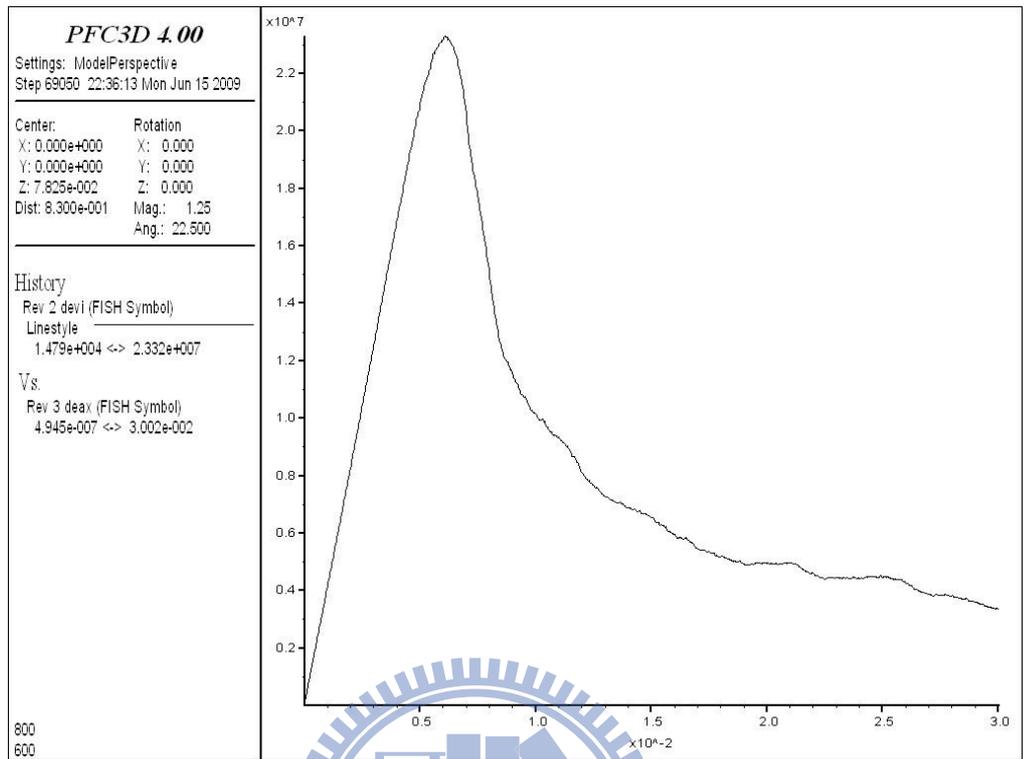


圖 5-13 模擬圍壓 0.5MPa 三軸試驗之應力應變圖

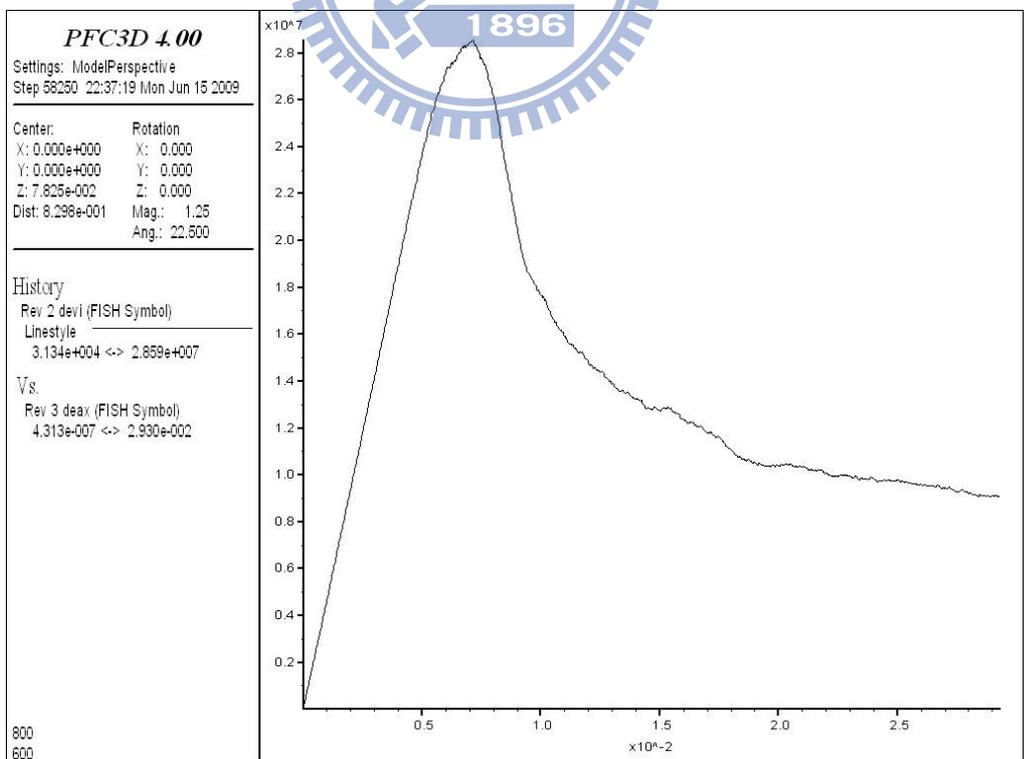


圖 5-14 模擬圍壓 3MPa 三軸試驗之應力應變圖

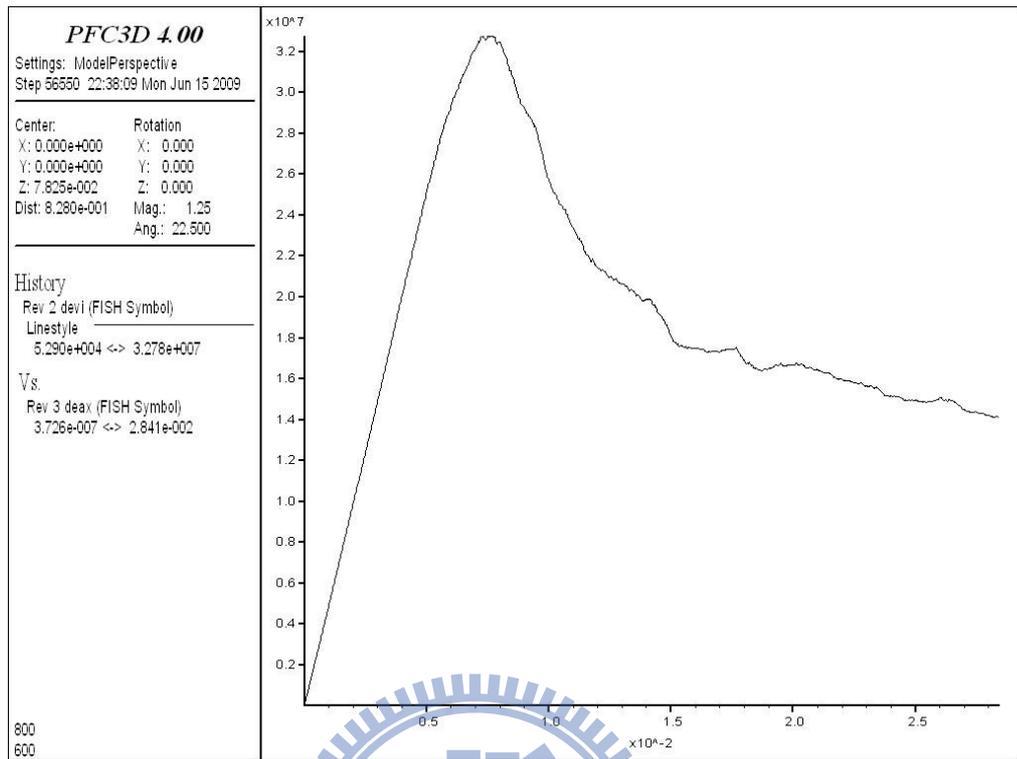


圖 5-15 模擬圍壓 6MPa 三軸試驗之應力應變圖

由於本研究模擬室內沖蝕試驗其試驗之試體分別有 28、20 及 12MPa 三種單壓強度，皆取圍壓 3MPa 之尖峰強度時之鍵結強度參數，所得之強度參數如表 5-4 所示

表 5-4 各尖峰強度下之鍵結正向、剪向強度參數表

鍵結強度(MPa) 尖峰強度(MPa)	平行鍵結強度參數	
	正向鍵結強度	剪向鍵結強度
28	1.9e8	0.95e8
20	1.3e8	0.65e8
12	0.6e8	0.3e8

顆粒之勁度參數亦可與平行鍵結之勁度參數作一轉換，其轉換為 PFC^{3D} 中之轉換公式如(5-3~11)式所。而本文中之強度參數跟勁度參數關係亦採用一般之岩石材料勁度與強度之比約相差十倍做區別。因為各項勁度及強度參數單位不同，故其換算結果及相差倍數如下表 5-5 所示。

顆粒勁度參數及平行鍵結勁度參數公式：

$$\tilde{R} = \frac{R_a + R_b}{2} \quad (\text{m}) \quad 5-3 \text{ 式}$$

$$L = 2\tilde{R} = R_a + R_b \quad (\text{m}) \quad 5-4 \text{ 式}$$

$$A = (2\tilde{R})^2 \quad (\text{m}^2) \quad 5-5 \text{ 式}$$

$$I = \frac{1}{12} (2\tilde{R})^4 \quad (\text{m}^4) \quad 5-6 \text{ 式}$$

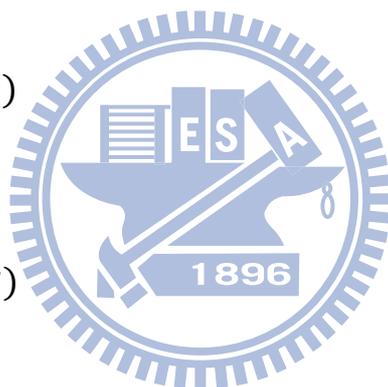
$$kn = \frac{AE_c}{L} \quad (\text{N/m}) \quad 5-7 \text{ 式}$$

$$ks = \frac{12IE_c}{L^3} \quad (\text{N/m}) \quad 5-8 \text{ 式}$$

\tilde{R} ：顆粒平均粒徑 R_a ：較大顆粒粒徑 R_b ：較小顆粒粒徑

L ：兩顆粒圓心至圓心長 A ：面積 I ：慣性距 E_c ：楊氏係數

$$\bar{R} = \lambda \min(R_a, R_b) \quad (\text{m}) \quad 5-9 \text{ 式}$$



$$\bar{A} = \pi\bar{R}^2 \quad (\text{m}^2) \quad 5-10 \text{ 式}$$

$$\bar{I} = \frac{3\pi\bar{R}^4}{12} \quad (\text{m}^4) \quad 5-11 \text{ 式}$$

$$\bar{k}_n = \frac{\bar{E}_c}{L} \quad (\text{N/m}^3) \quad 5-12 \text{ 式}$$

$$\bar{k}_s = \frac{12\bar{I} \bar{E}_c}{\bar{A}L^3} \quad (\text{N/m}^3) \quad 5-13 \text{ 式}$$

λ : 平行鍵結半徑放大係數 \bar{R} : 平行鍵結半徑 \bar{A} : 平行鍵結面積

\bar{I} : 平行鍵結慣性距 \bar{k}_n : 平行鍵結正向勁度 \bar{k}_s : 平行鍵結剪向勁度

表 5-5 勁度及強度參數單位換算

參數	Order	參數
平行鍵結勁度參數 (N/m ³)	1e4	接觸鍵結勁度參數 (N/m)
平行鍵結勁度參數 (N/m ³)	1e4	平行鍵結強度參數 (N/m ²)

第六章 沖蝕模擬試驗結果

6.1 模擬水流造成剪應力沖蝕的結果

本節所模擬之沖蝕機制為水流與底床間剪應力對河床之沖蝕現象。此系列沖蝕模擬中，分別就岩性強度及水流造成剪應力大小兩項影響因子進行模擬、分析，期能利用分析結果了解影響沖蝕之主控因子。

6.1.1 驗證模擬水流造成剪應力沖蝕之影響結果

本子節先由模擬結果之各種沖蝕影響因子進行分析，進而了解主控沖蝕產生之關鍵影響因子。

6.1.1.1 岩性強度之影響

本小節係以流速造成之床面剪應力為沖蝕變因，就相對剪應力由小到大六種剪應力分別進行模擬，探討此影響因子。於此系列模擬中，固定岩性強度 28 及 20MPa，分別就剪應力進行模擬，模擬所得之結果如表 6-1 所示。經資料統整歸納後如圖 6-1 所示，當剪應力愈大時，模擬試體產生沖蝕顆粒數即會愈多。由於本模擬為施加剪應力於試體表面，所以其破壞鍵結之形式較多為剪向破壞。本小節模擬床面剪應力作用及沖蝕方式如圖 6-2(A)~(F)所示，圖 6-2(A)為藉由頂牆移動模擬剪應力之施加，此時頂牆尚未移動，故無剪應力之施加，此時總階數為 7100 階。圖 6-2(B)為頂牆進行移動進而施加剪應力於表面，以模擬水流造成剪應力模蝕之形式，此時階數經過 500 階，總階數為 7600 階。圖 6-2(C)為施加剪應力結束，移走頂牆已進行沖蝕顆粒之模擬，此時經過 875 階，總階數 7975 階。圖 6-2(D)為加入一流場系統，流場系統之加入為加入一流場單元，主要為利用壓差產生一固定之流場速度，進而以一固定流場速度進行沖走試體受剪應力作用而

破壞顆粒之步驟，此時顆粒有少部分脫離，此時階數經過 2875 階，總階數為 9975 階。圖 6-2(E)為流場作用下經過7875階後，產生大量顆粒脫離，總階數為14975階。圖 6-2(F)經過15877階後，受破壞之顆粒完全脫離試體，此時總階數為22977階。

此系列模擬之目的係嘗試模擬得到啟動沖蝕行為之臨界剪應力值及沖蝕率，其概念乃由小到大逐步增大施加剪應力以利找出臨界剪應力值，找出頂強與床面間之（相對）剪應力值後，若運用牛頓黏性定律（即流場之黏滯摩擦剪應力 τ 與速度梯度 du/dt 彼此之間成正比關係），或運用其他流速與床面剪應力之經驗式推估，未來即可進而推估沖蝕速率與流速間關係。

表 6-1 以剪應力為變數之模擬結果

剪應力(MPa)	強度(MPa)	28	20
	沖蝕顆粒數目		
0.123		67	68
0.405		96	143
1.120		125	186
2.610		199	303
3.390		254	418
5.270		347	543

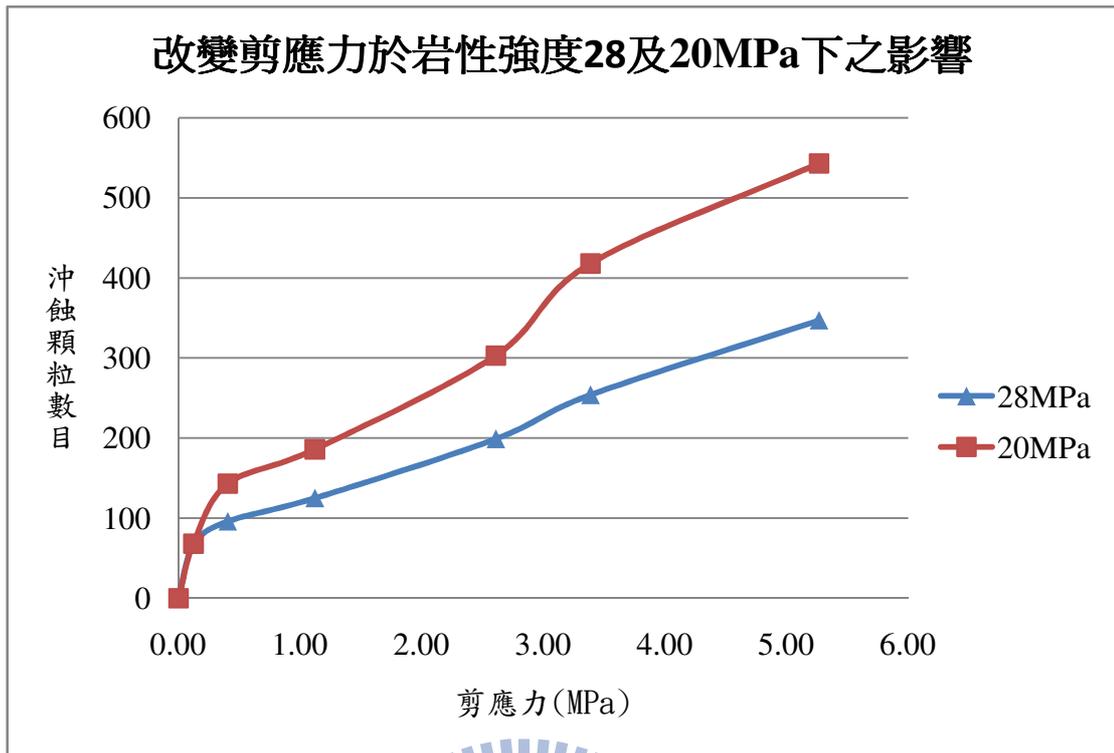
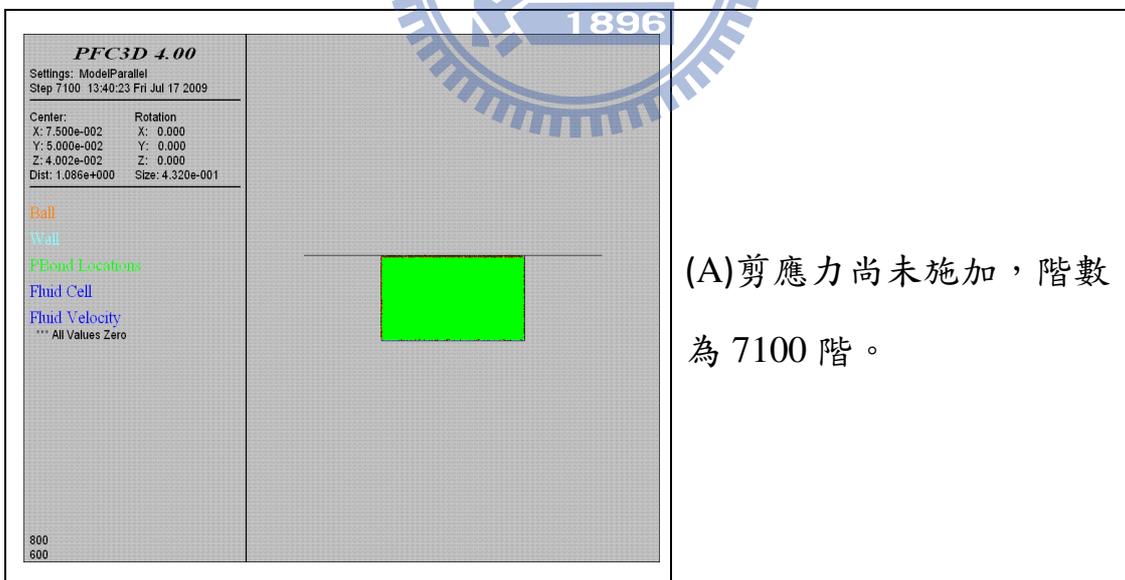
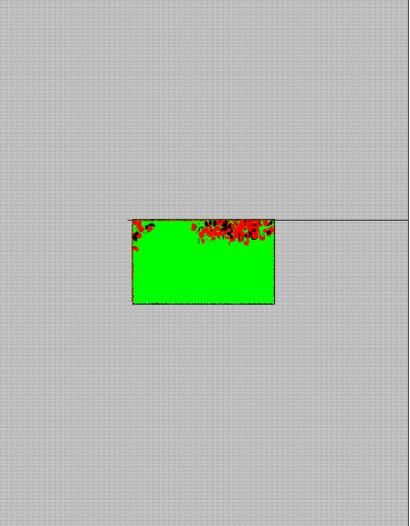
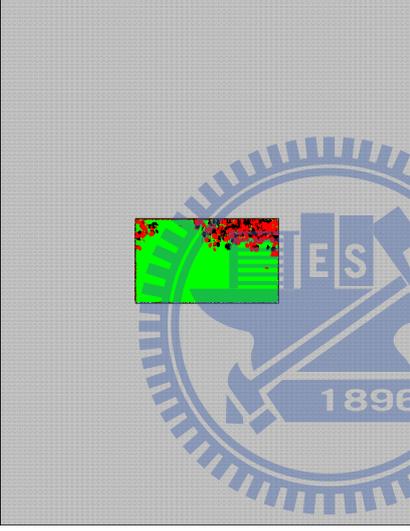
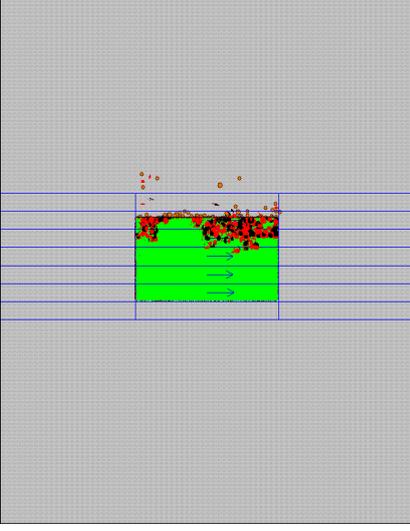


圖 6-1 固定岩性強度條件下，受沖蝕顆粒數目與剪應力之關係



<p>PFC3D 4.00</p> <p>Settings: ModelParallel Step 156800 10:11:14 Mon Oct 05 2009</p> <p>Center: Rotation X: 7.500e-002 X: 0.000 Y: 5.000e-002 Y: 0.000 Z: 3.953e-002 Z: 0.000 Dist: 1.086e+000 Size: 4.320e-001</p> <p>Ball Wall PBond Locations FISH function crk_item</p>  <p>800 600</p>	<p>(B)施加剪應力(頂牆移動)，階數經過 500 階。</p>
<p>PFC3D 4.00</p> <p>Settings: ModelParallel Step 156800 10:32:09 Mon Oct 05 2009</p> <p>Center: Rotation X: 7.500e-002 X: 0.000 Y: 5.000e-002 Y: 0.000 Z: 3.953e-002 Z: 0.000 Dist: 1.086e+000 Size: 4.320e-001</p> <p>Ball Wall PBond Locations FISH function crk_item</p>  <p>800 600</p>	<p>(C)施加剪應力結束(移去頂牆)，階數經過 875 階。</p>
<p>PFC3D 4.00</p> <p>Settings: ModelParallel Step 160520 10:35:11 Mon Oct 05 2009</p> <p>Center: Rotation X: 7.500e-002 X: 0.000 Y: 5.000e-002 Y: 0.000 Z: 3.953e-002 Z: 0.000 Dist: 1.086e+000 Size: 4.320e-001</p> <p>Ball Wall PBond Locations Fluid Cell Fluid Velocity Maximum = 1.081e+001 LineStyle</p> <p>FISH function crk_item</p>  <p>800 600</p>	<p>(D)施加流場，經過 2875 階有少數顆粒開始脫離。</p>

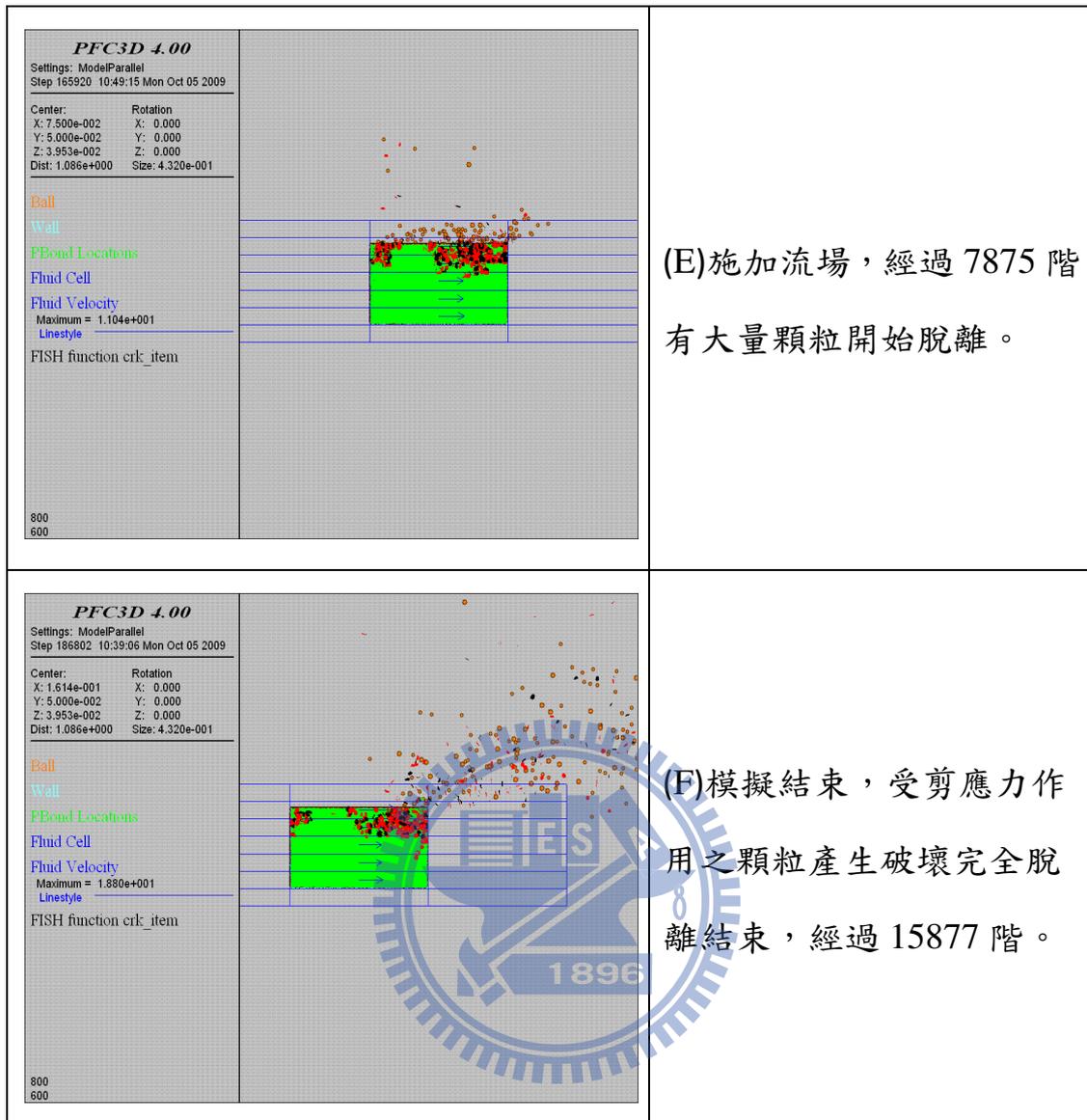


圖 6-2(A)~(F)模擬水流造成床面剪應力沖蝕之步驟與結果例

6.1.2 結果與討論

以施加剪應力大小為影響沖蝕顆粒數目之結果，由圖 6-1 顯示當剪應力越大時，所產生之沖蝕顆粒數目會遠大於剪應力小的時候。進而可以推估臨界剪應力，推估臨界流速，找出啟動沖蝕行為與流速之關係。

6.2 模擬顆粒彈跳造成沖蝕(saltation)的結果

本節所模擬之沖蝕機制之顆粒彈跳造成沖蝕的現象。此系列模擬中，

分別就岩性強度、顆粒撞擊系統中的顆粒大小、撞擊角度及撞擊速度四項影響因子進行模擬與分析，從而利用分析結果了解影響沖蝕之主控因子。亦針對第二章文獻回顧中 Sklar 之模式進行模擬，再與其結果比較，以及針對撞擊點之變化作變異性之探討。

6.2.1 驗證模擬顆粒彈跳造成沖蝕之影響結果

本子節就顆粒彈跳模擬結果之各種沖蝕影響因子進行分析，進而了解主控沖蝕產生之關鍵影響因子。

6.2.1.1 岩性強度之影響結果

本子節以岩性強度(單壓強度)為沖蝕變因，分別以單壓強度 28、20 及 12MPa 三種條件為模擬時之岩性強度，每次固定沖蝕驅動力之撞擊顆粒尺寸、撞擊速度及撞擊角度，分別作各種岩性強度與沖蝕驅動力之組合進行模擬，模擬所得之結果如表 6-2 所示。經資料統整歸納後整理如圖 6-3~8 所示。由此系列圖中之趨勢可見當岩性強度高時，模擬試體產生沖蝕顆粒數即會較少，反之亦然。而於顆粒撞擊試體後會產生鍵結破壞，鍵結破壞分為正向及剪向鍵結破壞兩種，而各種沖蝕作用力及岩性強度組合所造成之鍵結破壞數量結果如表 6-3~4 所示。本小節模擬顆粒彈跳之沖蝕分別就中撞擊速度、高撞擊角度配合中顆粒及小顆粒撞擊於中岩性強度做為示範例，如圖 6-9(A)~(E)所示，右欄圖所示為小顆粒撞擊岩床虛擬試體各步驟分析之範例結果，左欄圖所示則為中顆粒撞擊岩床虛擬試體各步驟分析之範例結果。圖 6-9(A)右圖為小顆粒撞擊試體前，左圖為中顆粒，此時總階數為 7055 階。圖 6-9(B)右圖小顆粒撞擊試體之瞬間，產生鍵結之破壞，此時鍵結破壞主要以剪向鍵結破壞為主(為紅色盤狀物)，左圖為中顆粒撞擊瞬間，因為中顆粒體積較大撞擊瞬間產生較多的正向鍵結破壞(黑色盤狀物)，而中顆粒

撞擊所造成之破壞範圍較大於小顆粒撞擊，此時階數經過 10 階，總階數為 7065 階。圖 6-9(C)小顆粒撞擊試體彈離後破壞繼續往下延伸破壞範圍亦較撞擊順間增大，剪向破壞為主要破壞，中顆粒撞擊亦然。圖 6-10(D)顆粒撞擊後動能轉換成位能，故試體受鍵結破壞之顆粒會產生向上爆發之情形，而中顆粒撞擊所造成向上爆發之高度會較小顆粒高。圖 6-10(E)受顆粒撞擊所產生之撞擊坑加入一流場系統後，即可將鍵結破壞之顆粒帶走。

原則上，顆粒大時撞擊動量較大，造成之破壞程度一般應較大，撞擊作用之沖蝕效應也會較明顯。但亦有例外之可能，於高撞擊速度、高撞擊角度下，比較中顆粒及小顆粒撞擊效應，小顆粒撞擊後，受沖蝕顆粒數目反較中顆粒者為多。經由撞擊瞬間顆粒集合體之變化顯示，小撞擊顆粒於高速度、高角度下貫穿入試體內部 (如圖 6-10 所示)，產生較深破壞區，故反而會造成較多沖蝕顆粒產生。

所模擬之組數本設定為一種模擬組合為三組，但於模擬過程中顯示其結果皆相同，故有些模擬組合只有一組組數，其結果皆同之原因經分析乃因撞擊點相同之故，另於 6.2.1.5 節再作撞擊點不同時之變異分析。

表 6-2 以岩性強度為變數之模擬結果

項目	岩性強度 (MPa)		28		20		12	
	顆粒數	組數	顆粒數	組數	顆粒數	組數	顆粒數	組數
高速高角度大顆粒	1065	3	1396	3	2555	3		
高速高角度中顆粒	662	3	819	3	1436	3		
高速高角度小顆粒	718	3	983	3	1479	3		
中速高角度大顆粒	428	3	533	3	827	3		
中速高角度中顆粒	185	3	235	3	496	3		
中速高角度小顆粒	159	3	198	3	318	3		
低速高角度大顆粒	90	3	117	3	147	3		
低速高角度中顆粒	52	3	70	3	99	3		
低速高角度小顆粒	31	3	42	3	57	3		
高速低角度大顆粒	172	3	223	3	351	3		
高速低角度中顆粒	109	3	130	3	241	3		
高速低角度小顆粒	59	3	75	3	155	3		
中速低角度大顆粒	80	3	101	1	175	1		
中速低角度中顆粒	62	1	86	1	164	1		
中速低角度小顆粒	21	1	35	1	98	1		
低速低角度大顆粒	5	1	7	1	6	1		
低速低角度中顆粒	4	1	6	1	16	1		
低速低角度小顆粒	3	1	6	1	10	1		

表 6-3 沖蝕作用力與強度組合作用產生鍵結破壞統計結果(高角度)

岩性強度(MPa) 項目	28		20		12	
	剪向	正向	剪向	正向	剪向	正向
高速高角度大顆粒	1864 (83.3%)	374 (16.7%)	2403 (81.9%)	530 (18.1%)	4241 (79.0%)	1125 (21.0%)
高速高角度中顆粒	1122 (80.7%)	268 (19.3%)	1408 (81.8%)	313 (18.2%)	2377 (78.8%)	640 (21.2%)
高速高角度小顆粒	1128 (74.8%)	381 (25.2%)	1545 (74.8%)	520 (25.2%)	2356 (75.8%)	751 (24.2%)
中速高角度大顆粒	769 (85.5%)	130 (14.5%)	926 (82.7%)	194 (17.3%)	1434 (82.5%)	304 (17.5%)
中速高角度中顆粒	307 (78.9%)	82 (21.1%)	392 (79.4%)	102 (20.6%)	833 (80.0%)	208 (20.0%)
中速高角度小顆粒	272 (81.4%)	62 (18.6%)	330 (79.3%)	86 (20.7%)	530 (79.3%)	138 (20.7%)
低速高角度大顆粒	155 (82.4%)	33 (17.6%)	199 (81.2%)	46 (18.8%)	249 (80.8%)	59 (19.2%)
低速高角度中顆粒	86 (78.2%)	24 (11.8%)	117 (80.1%)	29 (19.9%)	165 (78.9%)	44 (21.1%)
低速高角度小顆粒	53 (81.5%)	12 (18.5%)	70 (79.5%)	18 (20.5%)	91 (76.5%)	28 (23.5%)

表 6-4 沖蝕作用力與強度組合作用產生鍵結破壞統計結果(低角度)

項目 岩性強度 (MPa)	28		20		12	
	剪向	正向	剪向	正向	剪向	正向
高速低角度 大顆粒	290 (80.3%)	71 (19.7%)	373 (79.7%)	95 (20.3%)	598 (81.1%)	139 (18.9%)
高速低角度 中顆粒	180 (78.6%)	49 (21.4%)	215 (79.9%)	58 (20.1%)	408 (80.6%)	98 (19.4%)
高速低角度 小顆粒	97 (78.9%)	26 (21.1%)	122 (77.7%)	35 (22.3%)	250 (76.9%)	75 (23.1%)
中速低角度 大顆粒	138 (82.1%)	30 (17.9%)	178 (84.4%)	33 (15.6%)	286 (77.7%)	82 (22.3%)
中速低角度 中顆粒	104 (79.4%)	27 (20.6%)	145 (80.6%)	35 (19.4%)	280 (81.4%)	64 (18.6%)
中速低角度 小顆粒	29 (65.9%)	15 (34.1%)	53 (72.6%)	20 (17.4%)	166 (80.6%)	40 (19.4%)
低速低角度 大顆粒	10 (100%)	0 (0.0%)	12 (85.7%)	2 (14.3%)	13 (100%)	0 (0.0%)
低速低角度 中顆粒	8 (88.9%)	1 (11.1%)	11 (84.6%)	2 (15.4%)	5 (84.8%)	28 (15.2%)
低速低角度 小顆粒	7 (100%)	0 (0.0%)	11 (91.7%)	1 (8.3%)	4 (81.8%)	18 (18.2%)

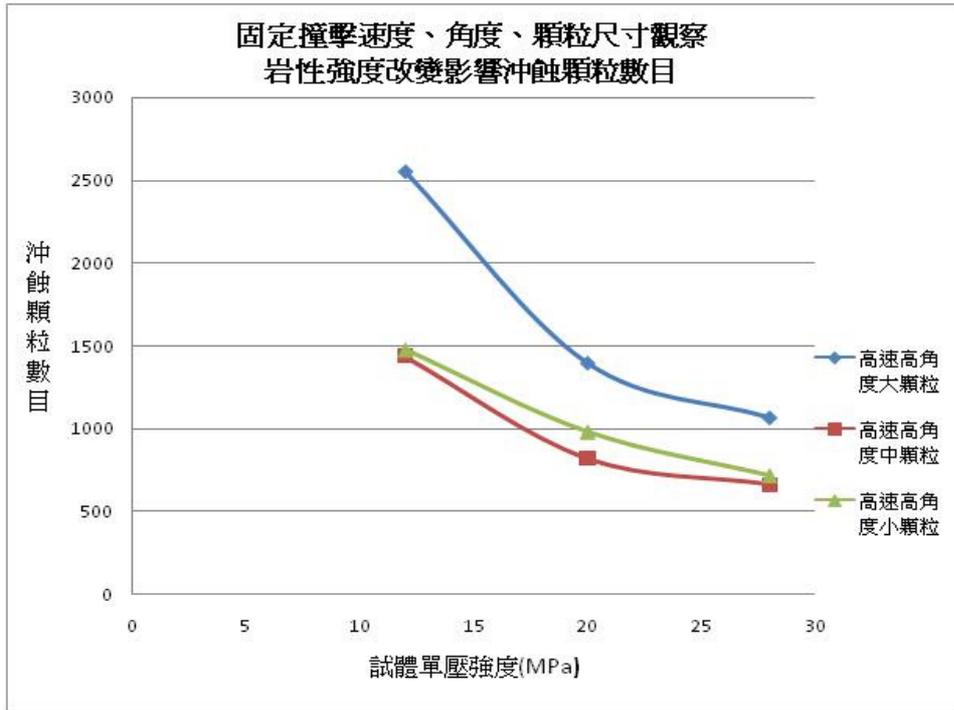


圖 6-3 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（高速高角度）

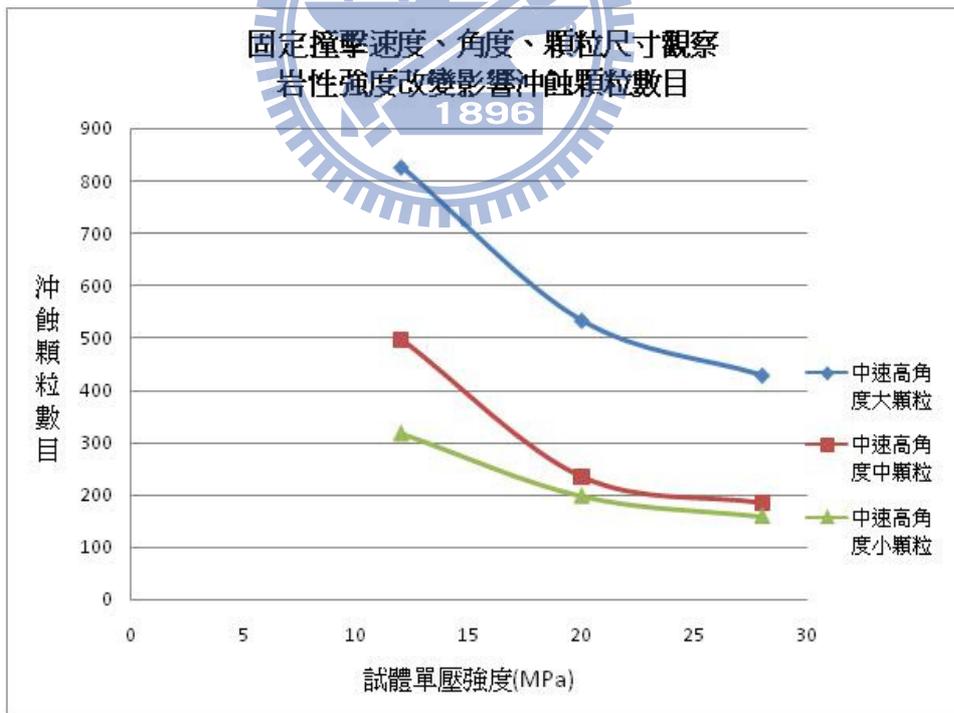


圖 6-4 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（中速高角度）

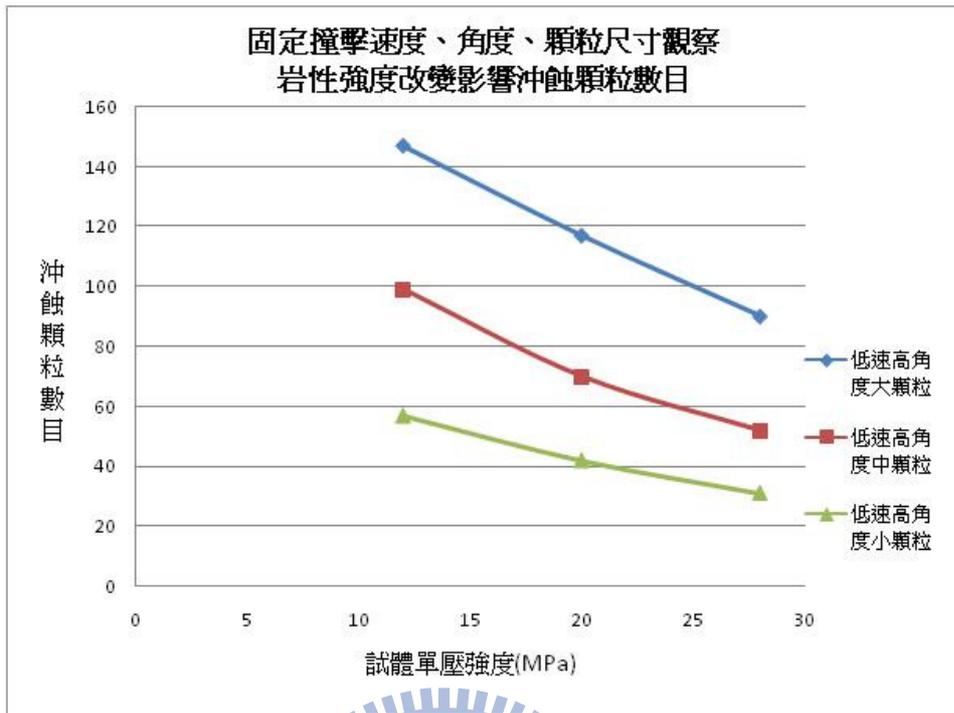


圖 6-5 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（低速高角度）

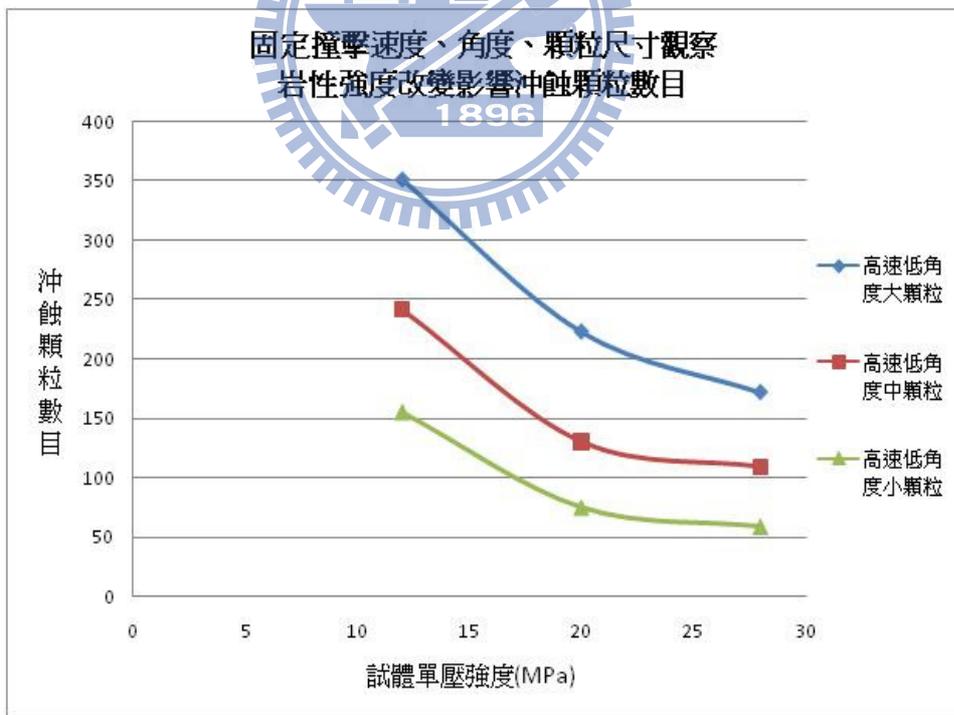


圖 6-6 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（高速低角度）

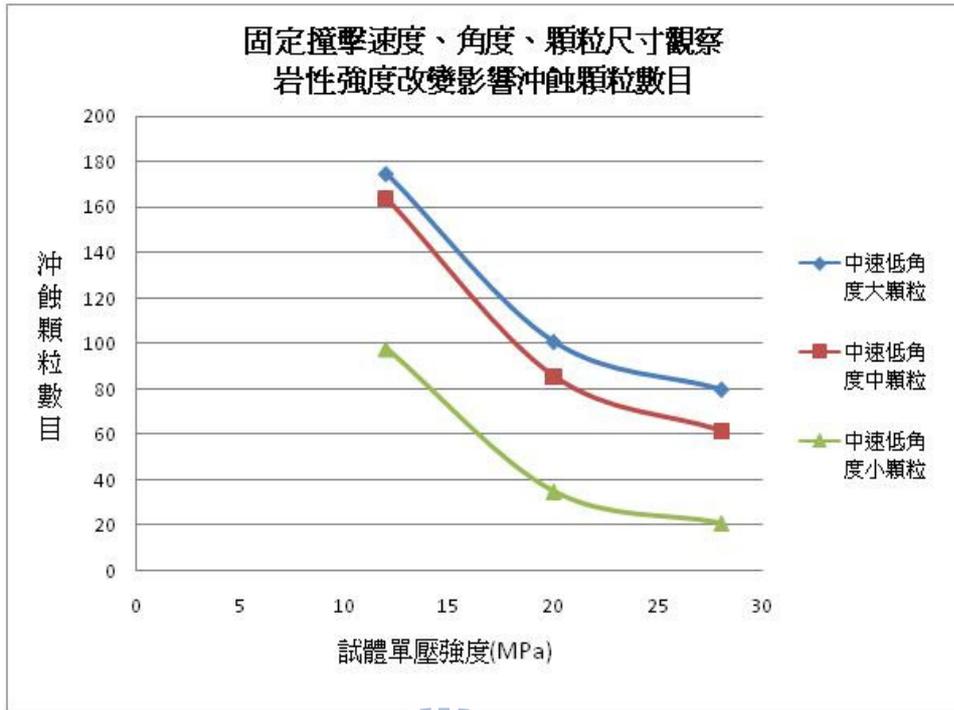


圖 6-7 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（中速低角度）

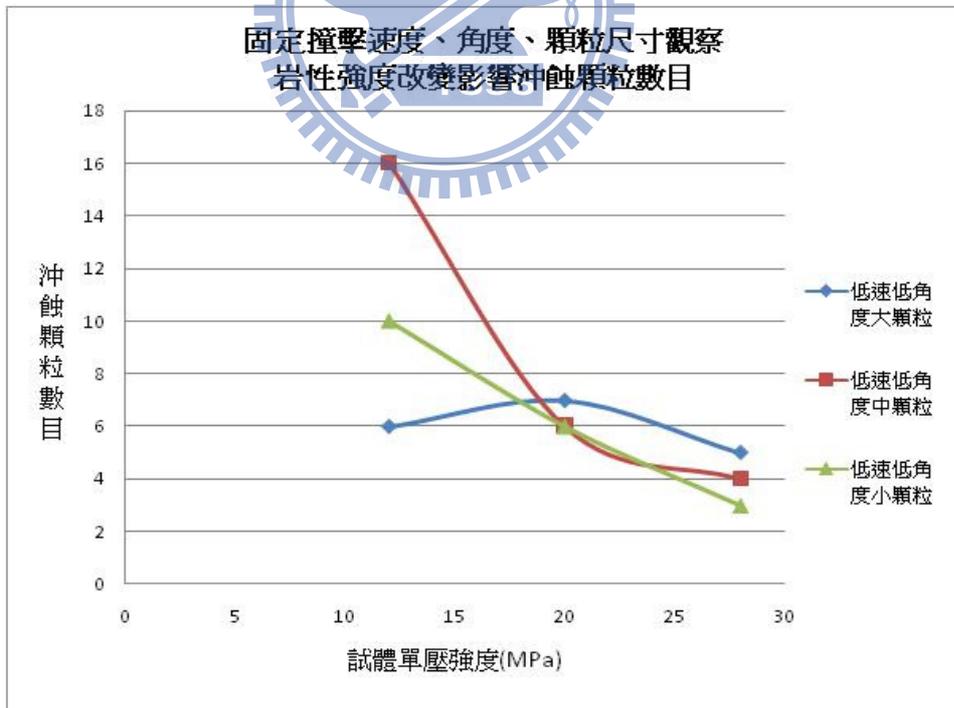
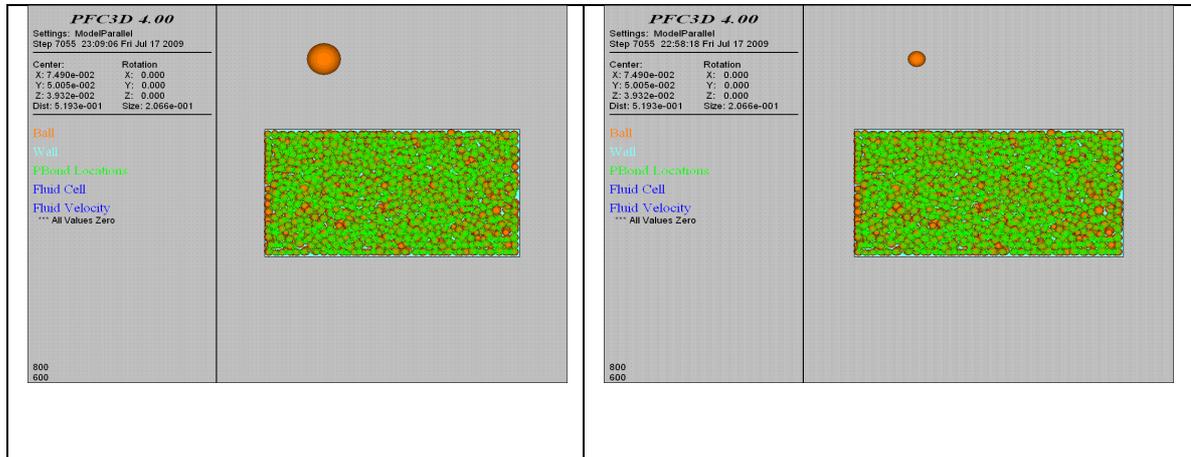
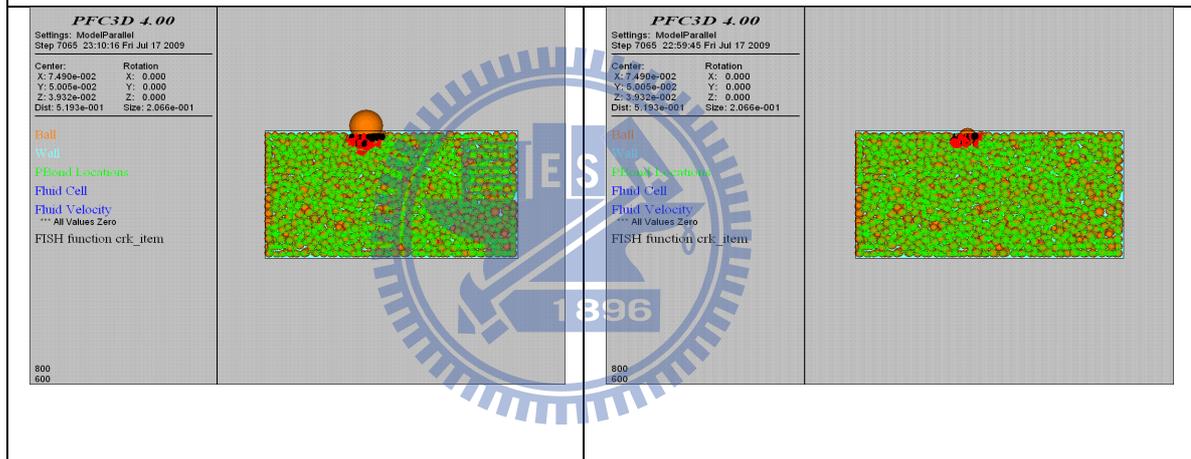


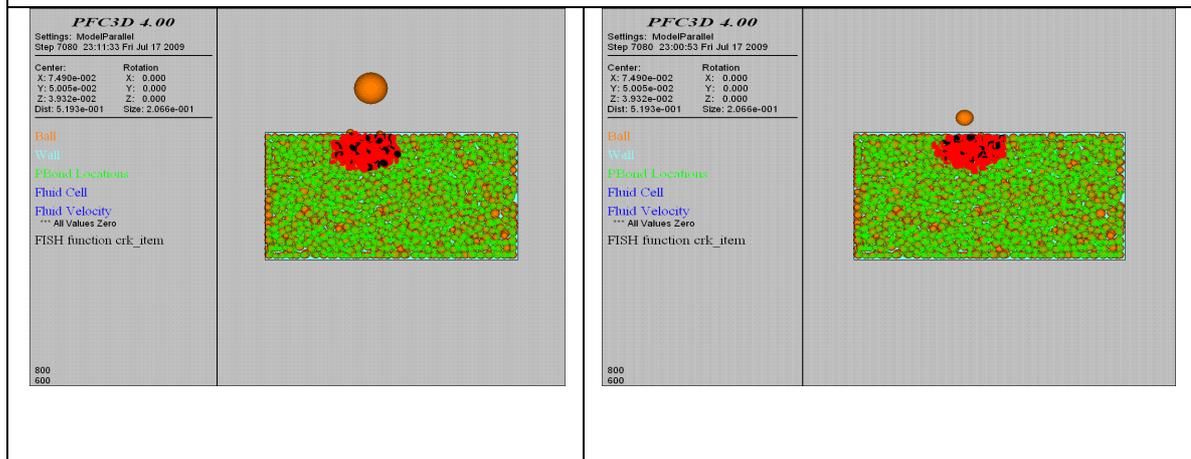
圖 6-8 不同條件下受沖蝕顆粒數目與岩性強度間關係（低速低角度）



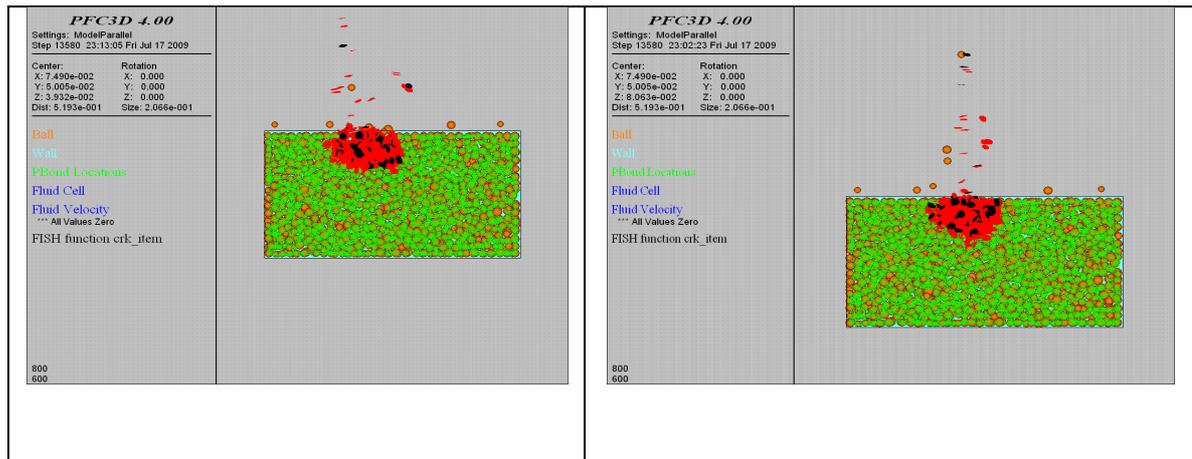
(A) 顆粒撞擊前之情形



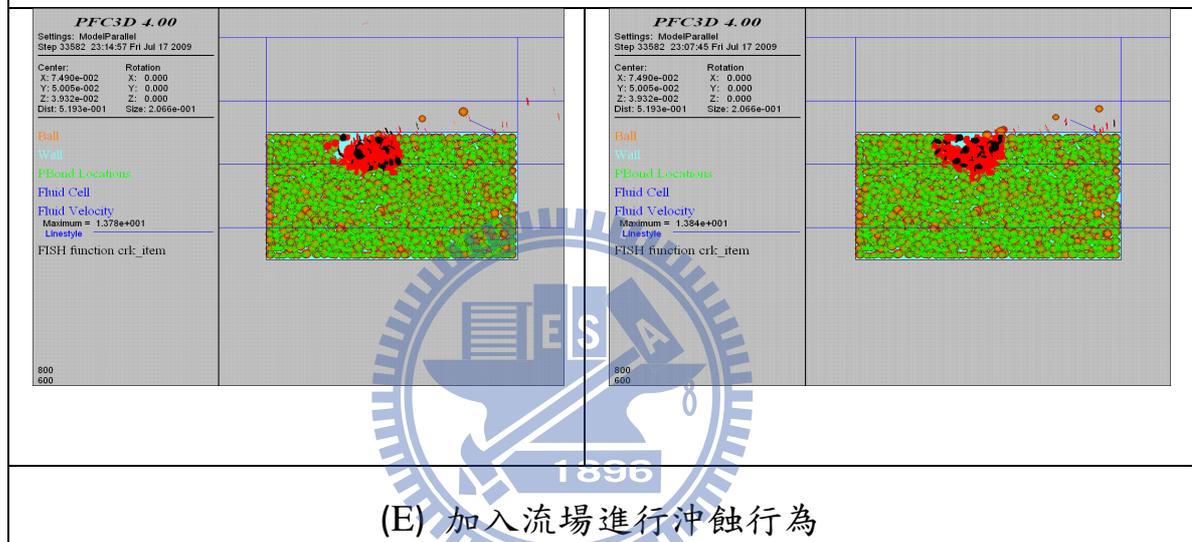
(B) 顆粒撞擊試體瞬間



(C) 顆粒撞擊後反彈情形



(D) 顆粒撞擊後，試體顆粒產生破壞而爆出試體



(E) 加入流場進行沖蝕行為

圖 6-9 顆粒彈跳造成岩床沖蝕之模擬步驟及結果之示範例(A)~(E)

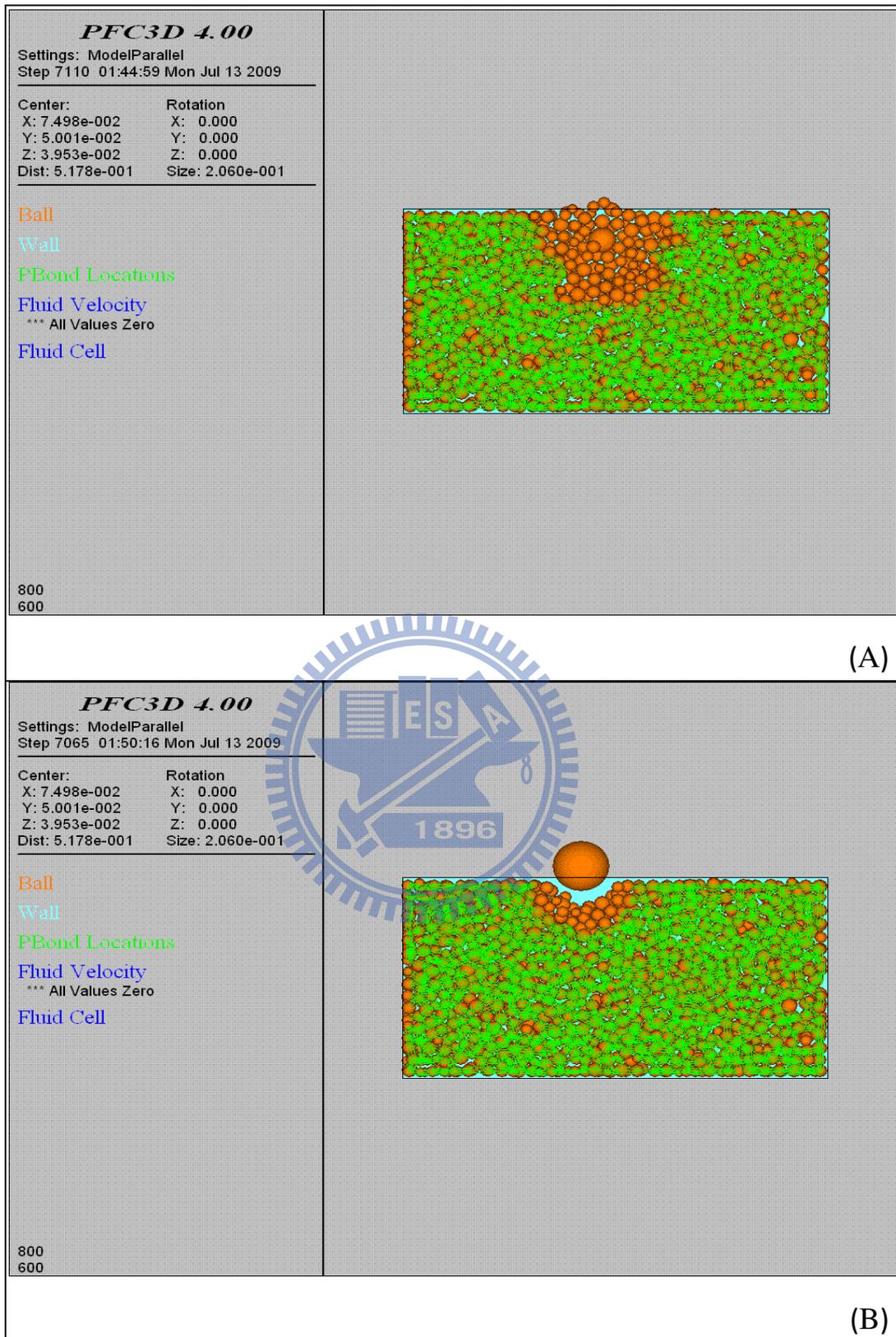


圖 6-10 大、小顆粒高角度高速撞擊岩床發生現象之比較：(A)小顆粒撞擊試體貫穿入試體，(B)中顆粒撞擊造成凹陷，不貫入試體。

6.2.1.2 撞擊速度之影響結果

本子節以沖蝕驅動力中之撞擊速度為沖蝕變因，分別就撞擊速度 10、6、1m/s 三種進行模擬時之可變影響因子，固定岩性強度及沖蝕驅動力中之撞擊顆粒尺寸及撞擊角度，分別就各種撞擊速度與岩性強度及撞擊角度、撞擊顆粒尺寸之組合進行模擬，模擬所得之結果如表 6-5 所示。經資料統整歸納後如圖 6-11~16 所示，當撞擊速度愈大時，模擬試體產生沖蝕顆粒數愈多，反之亦然。與上節文中相同會於高撞擊速度、高撞擊角度之沖蝕驅動力作用下及搭配各岩性強度，於中顆粒及小顆粒撞擊下，亦會產生小顆粒所產生沖蝕顆粒數比中顆粒所產生的顆粒多之情形。

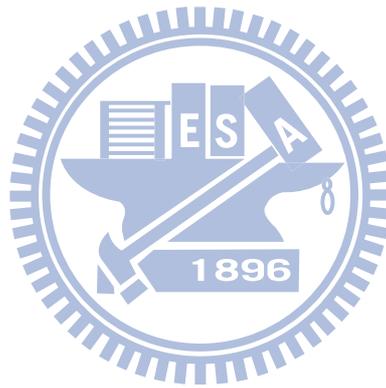


表 6-5 以撞擊速度為變數之模擬結果

項目 \ 撞擊速度(m/s)	10		6		1	
	顆粒數	組數	顆粒數	組數	顆粒數	組數
高角度大顆粒 28	1065	3	428	3	90	3
高角度中顆粒 28	662	3	185	3	52	3
高角度小顆粒 28	718	3	159	3	31	3
高角度大顆粒 20	1396	3	533	3	117	3
高角度中顆粒 20	819	3	235	3	70	3
高角度小顆粒 20	983	3	198	3	42	3
高角度大顆粒 12	2555	3	827	3	147	3
高角度中顆粒 12	1436	3	496	3	99	3
高角度小顆粒 12	1479	3	318	3	57	3
低角度大顆粒 28	172	3	80	3	5	1
低角度中顆粒 28	109	3	62	3	4	1
低角度小顆粒 28	59	3	21	3	3	1
低角度大顆粒 20	223	3	101	1	7	1
低角度中顆粒 20	130	3	86	1	6	1
低角度小顆粒 20	75	3	35	1	6	1
低角度大顆粒 12	351	3	175	1	6	1
低角度中顆粒 12	241	3	164	1	16	1
低角度小顆粒 12	155	3	98	1	10	1

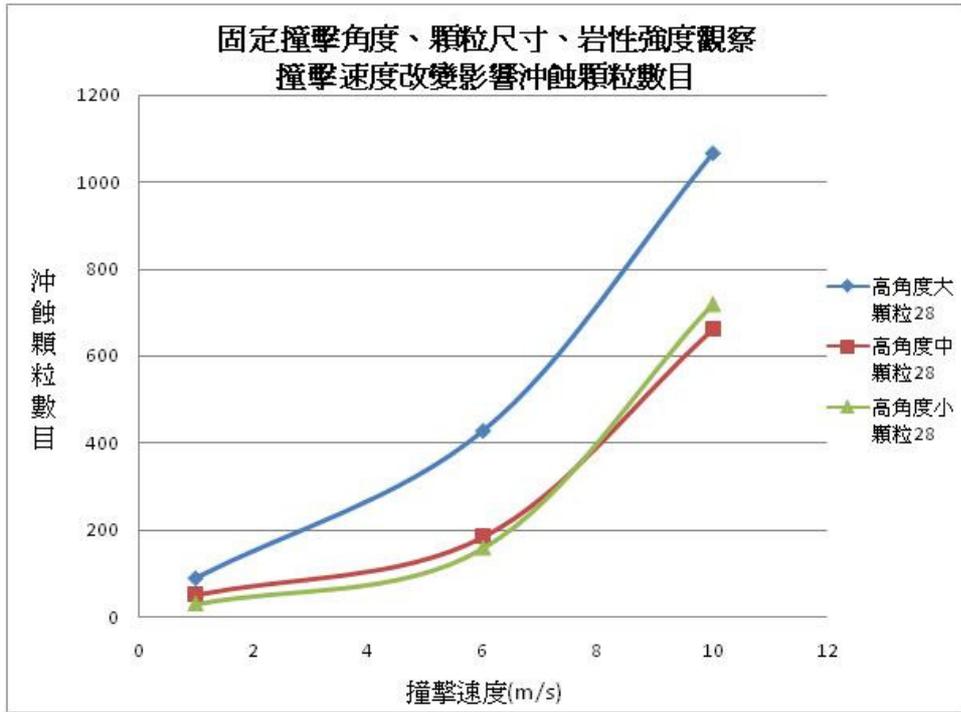


圖 6-11 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度高岩性強度)

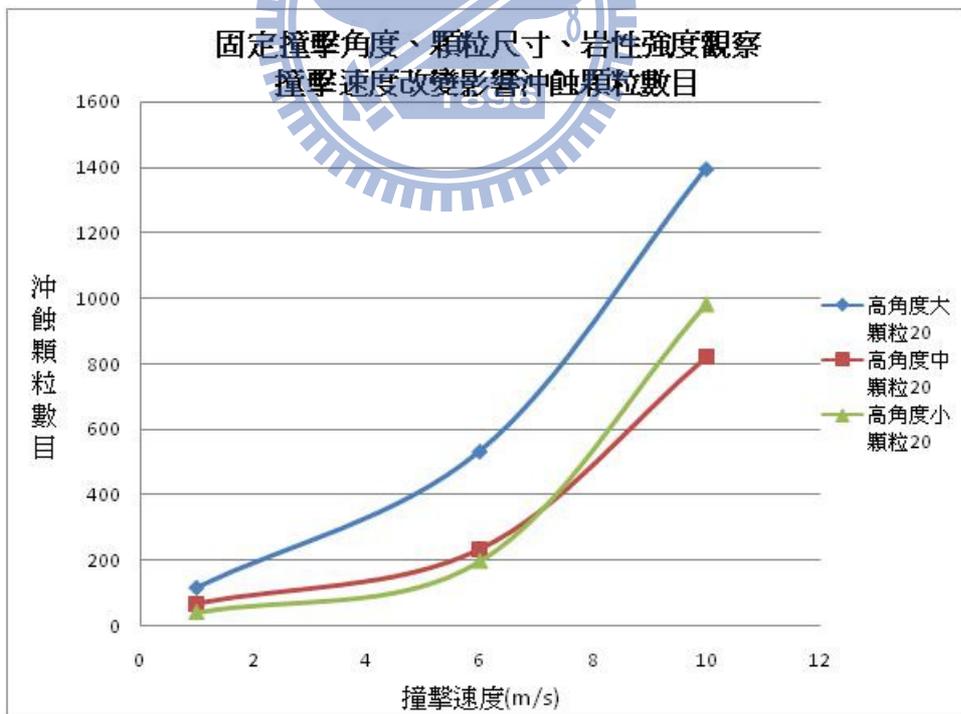


圖 6-12 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度中岩性強度)

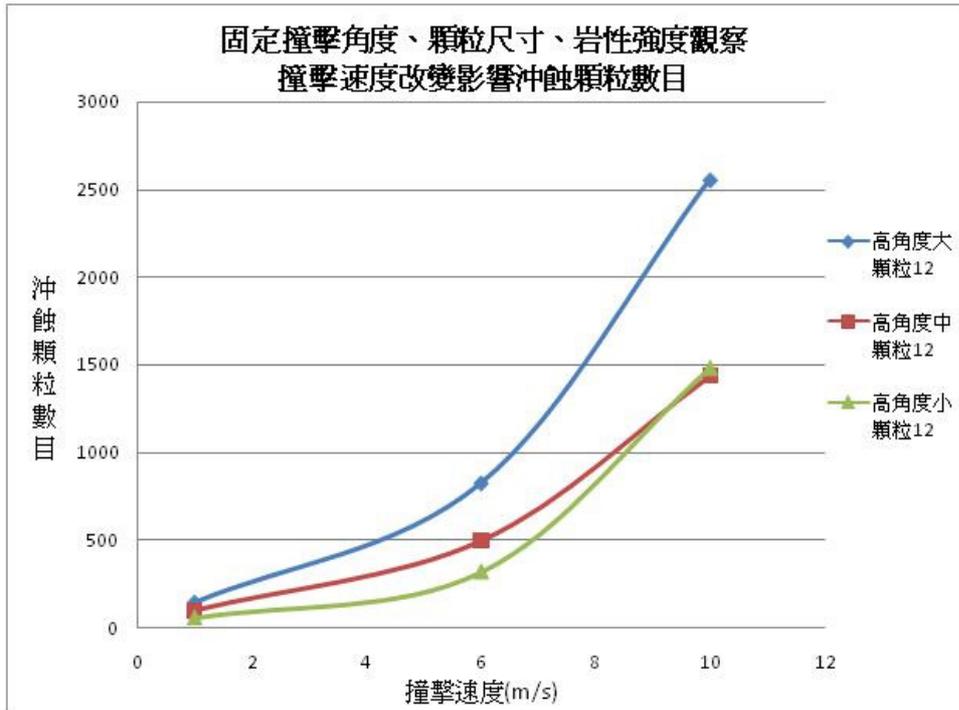


圖 6-13 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度低岩性強度)

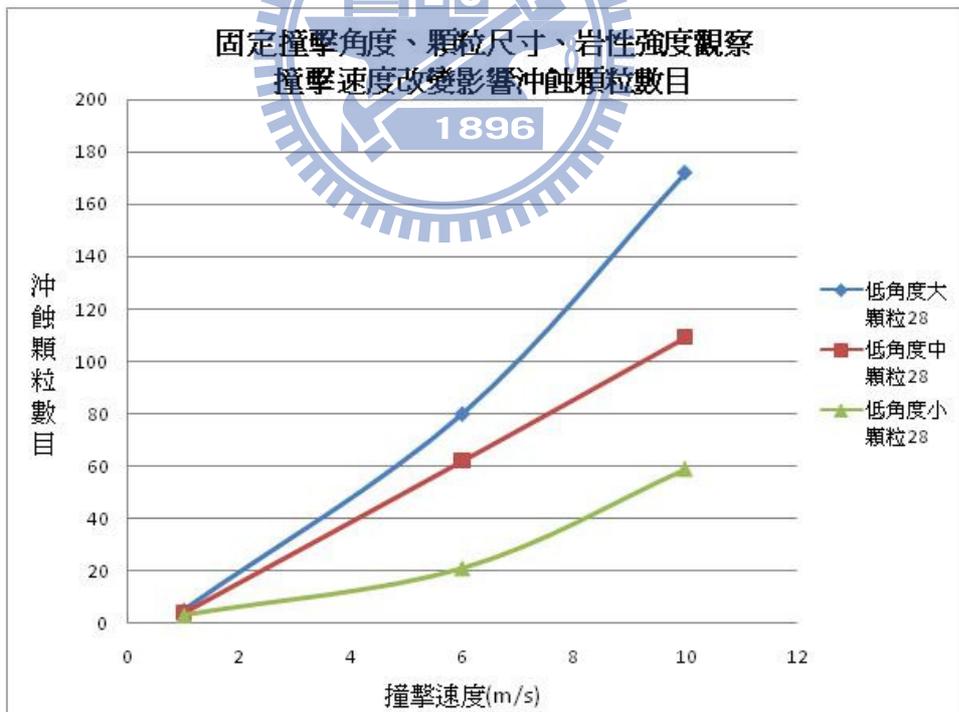


圖 6-14 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(低角度高岩性強度)

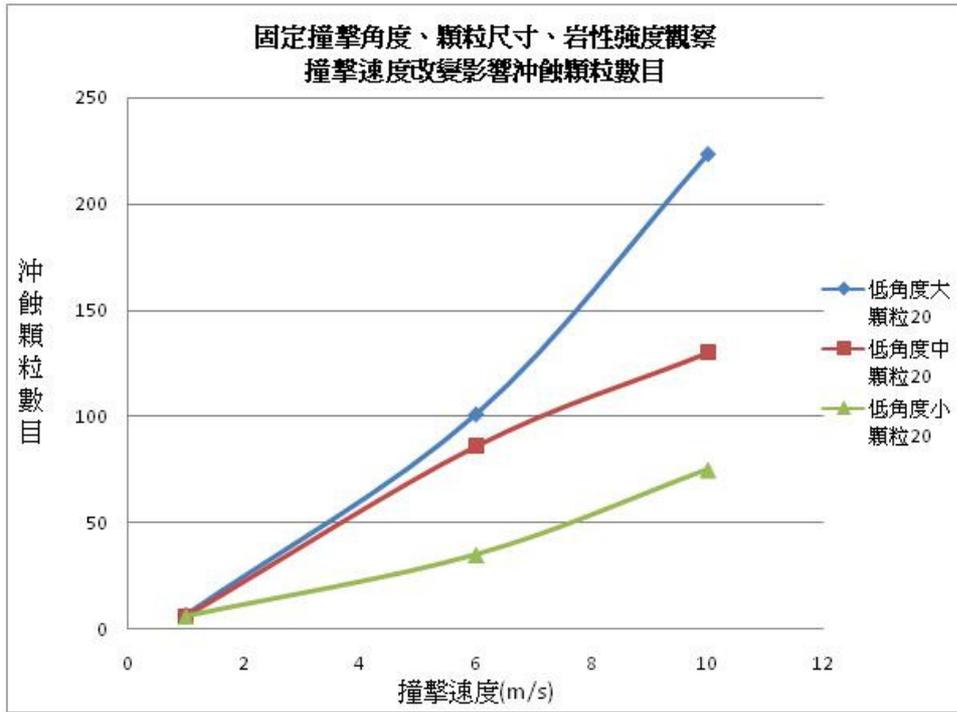


圖 6-15 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(低角度高岩性強度)

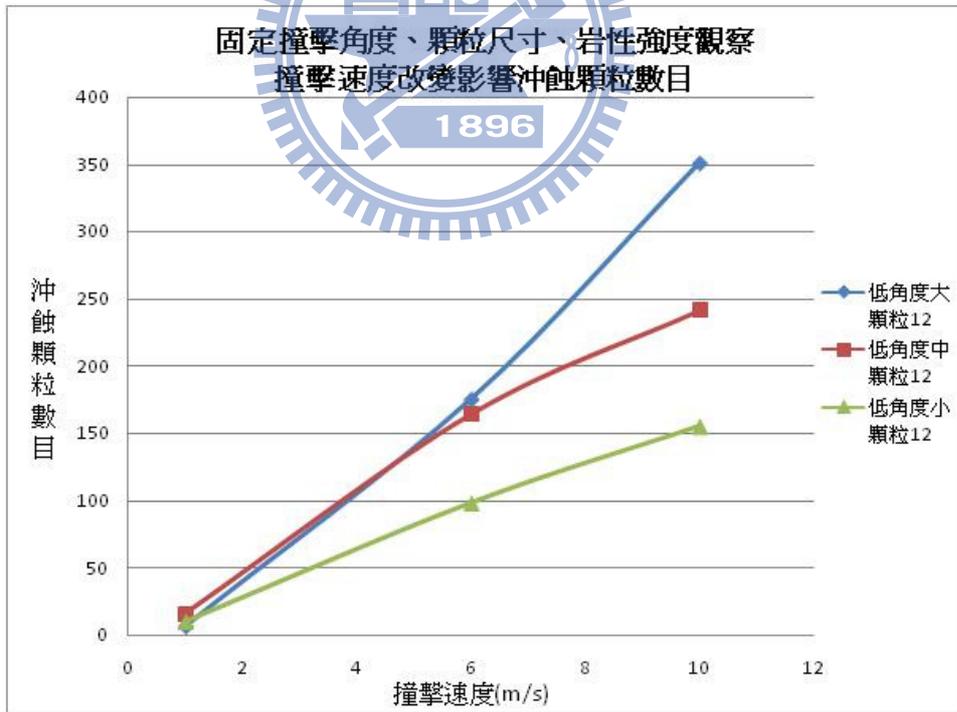


圖 6-16 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊速度間之關係(高角度高岩性強度)

6.2.1.3 撞擊顆粒尺寸之影響結果

本節係以撞擊顆粒尺寸為沖蝕變因，分別就撞擊顆粒尺寸 4、2 及 1cm 三種進行模擬時之可變影響因子，固定岩性強度及沖蝕驅動力之撞擊速度及撞擊角度，分別作各種撞擊顆粒尺寸與岩性強度、撞擊速度及角度之組合進行模擬，模擬所得之結果如表 6-6 所示。經資料統整歸納後如圖 6-17~22 所示，當撞擊顆粒大尺寸時所產生沖蝕顆粒數目相對會大於撞擊顆粒小尺寸時，但是於高撞擊速度、高撞擊角度之沖蝕驅動力作用下及搭配各岩性強度，於中顆粒及小顆粒撞擊下，沖蝕顆粒數目卻未必跟岩性強度減少而增加，其造成原因如 6.2.1.1 所述。

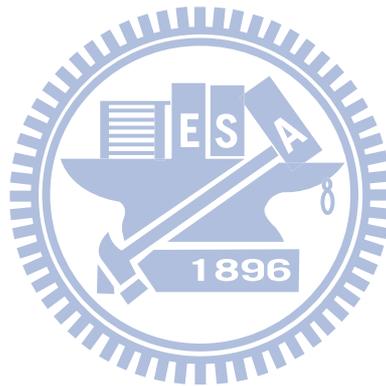


表 6-6 以撞擊顆粒尺寸為變數之模擬結果

項目 \ 顆粒尺寸(cm)	4		2		1	
	顆粒數	組數	顆粒數	組數	顆粒數	組數
高速高角度 28	1065	3	662	3	718	3
高速高角度 20	1396	3	819	3	983	3
高速高角度 12	2555	3	1436	3	1479	3
中速高角度 28	428	3	185	3	159	3
中速高角度 20	533	3	235	3	198	3
中速高角度 12	827	3	496	3	318	3
低速高角度 28	90	3	52	3	31	3
低速高角度 20	117	3	70	3	42	3
低速高角度 12	147	3	99	3	57	3
高速低角度 28	172	3	109	3	59	3
高速低角度 20	223	3	130	3	75	3
高速低角度 12	351	3	241	3	155	3
中速低角度 28	80	3	62	1	21	1
中速低角度 20	101	1	86	1	35	1
中速低角度 12	175	1	164	1	98	1
低速低角度 28	5	1	4	1	3	1
低速低角度 20	7	1	6	1	6	1
低速低角度 12	6	1	16	1	10	1

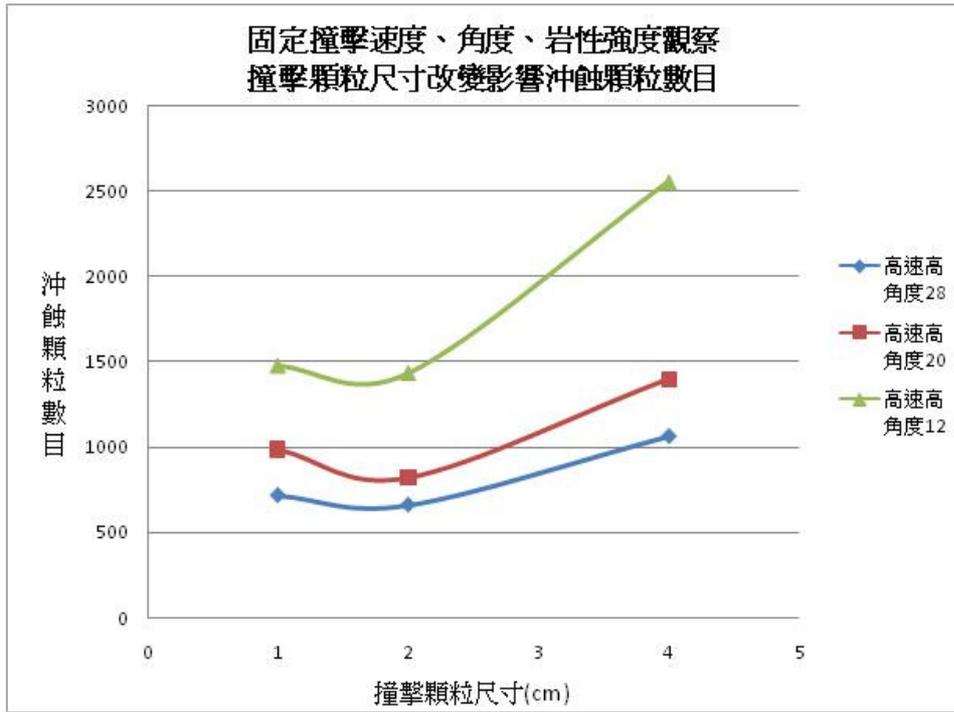


圖 6-17 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(高速高角度)

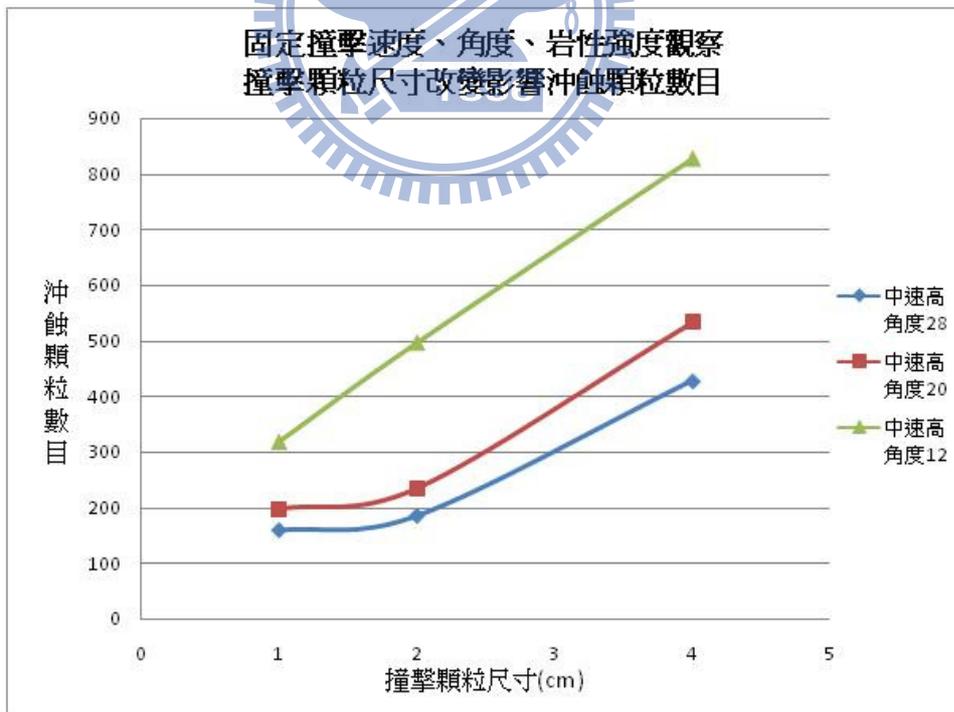


圖 6-18 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(中速高角度)

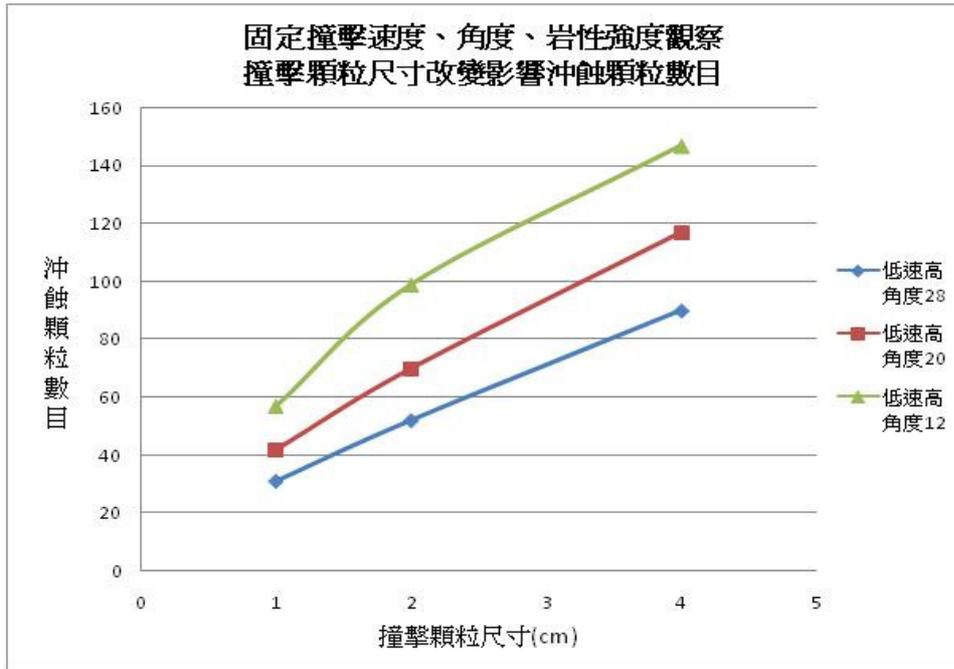


圖 6-19 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(低速高角度)

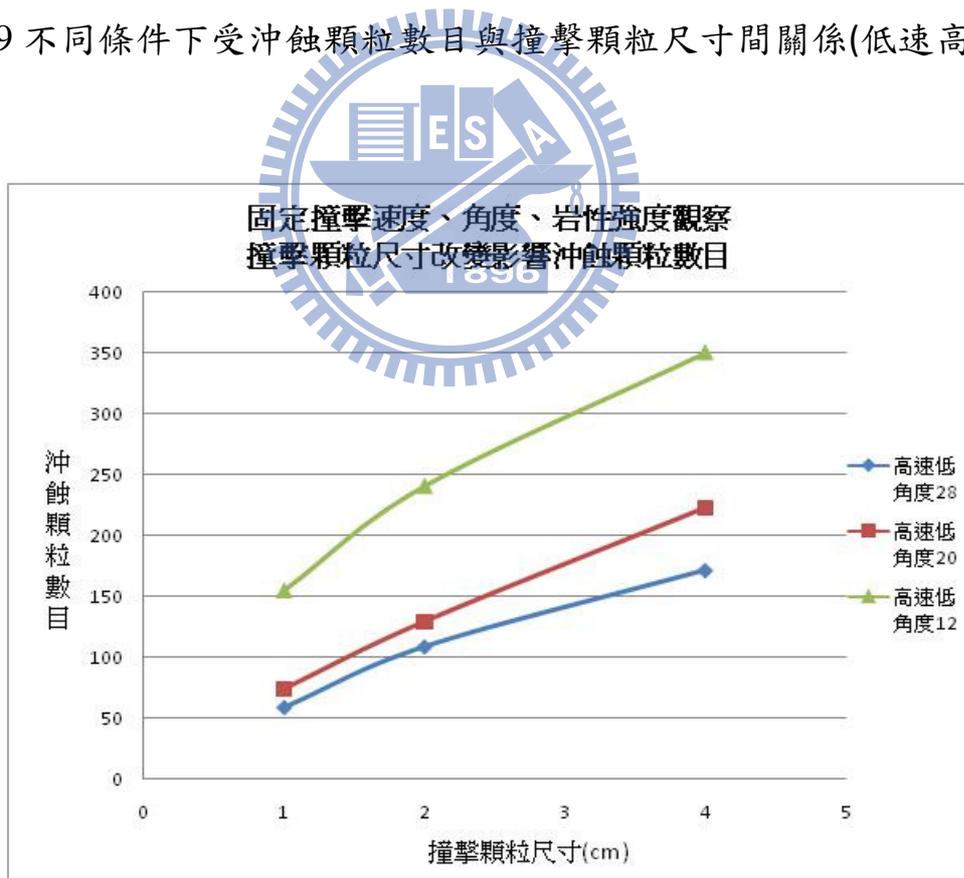


圖 6-20 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(高速高角度)

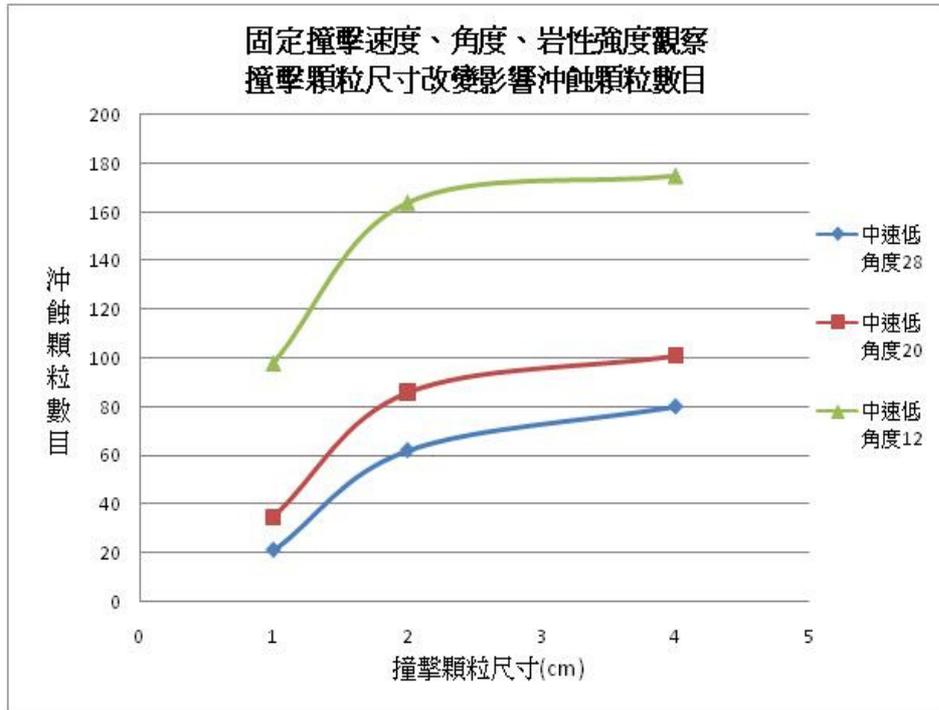


圖 6-21 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(中速高角度)

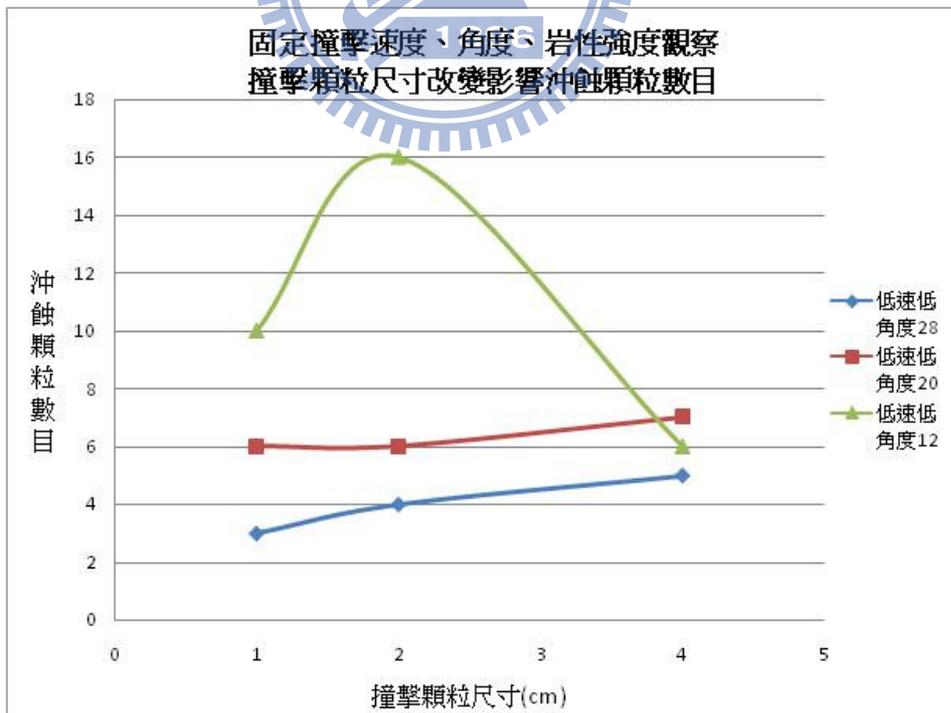


圖 6-22 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊顆粒尺寸間關係(低速高角度)

6.2.1.4 撞擊角度之影響結果

本節係以撞擊角度為沖蝕變因，主要為模擬文獻 2.3.2 Foley(1980)所提到顆粒撞擊岩床角度分為低角度的切削磨損 (cutting wear) 及高角度的變形磨損 (deformation wear)，分別以撞擊角度 60 度模擬高角度的變形磨損及 30 度模擬低角度的切削磨損，使用此兩種角度以進行模擬時之可變影響因子，固定岩性強度及沖蝕驅動力之撞擊速度及撞擊顆粒尺寸，分別就兩種撞擊角度與岩性強度、撞擊速度及顆粒尺寸之組合進行模擬，模擬所得之結果如表 6-7~9 所示。經資料統整歸納後如圖 6-23~30 所示，當撞擊角度大時所產生沖蝕顆粒數目相對會大於撞擊角度小時，其異常情形為高速高角度小顆粒撞擊時會造成較多沖蝕顆粒數目，而於高速低角度小顆粒即不會產生此種情況，顯示撞擊角度亦是一重要影響因子。而根據高角度 60 度的變形磨損從模擬結果顯示破壞之範圍深度會較深，面積會較大，而低角度 30 度的低角度切削磨損從模擬結果顯示破壞深度會較於表面破壞，破壞面積亦會較小於高角度變形磨損。

表 6-7 以撞擊角度為變數之模擬結果(高速條件)

項目 \ 撞擊角度	60		30	
	顆粒數	組數	顆粒數	組數
高速大顆粒 28	1065	3	172	3
高速大顆粒 20	1396	3	223	3
高速大顆粒 12	2555	3	351	3
高速中顆粒 28	662	3	109	3
高速中顆粒 20	819	3	130	3
高速中顆粒 12	1436	3	241	3
高速小顆粒 28	718	3	59	3
高速小顆粒 20	983	3	75	3
高速小顆粒 12	1479	3	155	3

表 6-8 以撞擊角度為變數之模擬結果(中速條件)

項目 \ 撞擊角度	60		30	
	顆粒數	組數	顆粒數	組數
中速大顆粒 28	428	3	80	3
中速大顆粒 20	533	3	101	1
中速大顆粒 12	827	3	175	1
中速中顆粒 28	185	3	62	1
中速中顆粒 20	235	3	86	1
中速中顆粒 12	496	3	164	1
中速小顆粒 28	159	3	21	1
中速小顆粒 20	198	3	35	1
中速大顆粒 28	428	3	80	3

表 6-9 以撞擊角度為變數之模擬結果(低速條件)

項目	撞擊角度		60		30	
	顆粒數	組數	顆粒數	組數	顆粒數	組數
低速大顆粒 28	90	3	5	1		
低速大顆粒 20	117	3	7	1		
低速大顆粒 12	147	3	6	1		
低速中顆粒 28	52	3	4	1		
低速中顆粒 20	70	3	6	1		
低速中顆粒 12	99	3	16	1		
低速小顆粒 28	31	3	3	1		
低速小顆粒 20	42	3	6	1		
低速小顆粒 12	57	3	10	1		

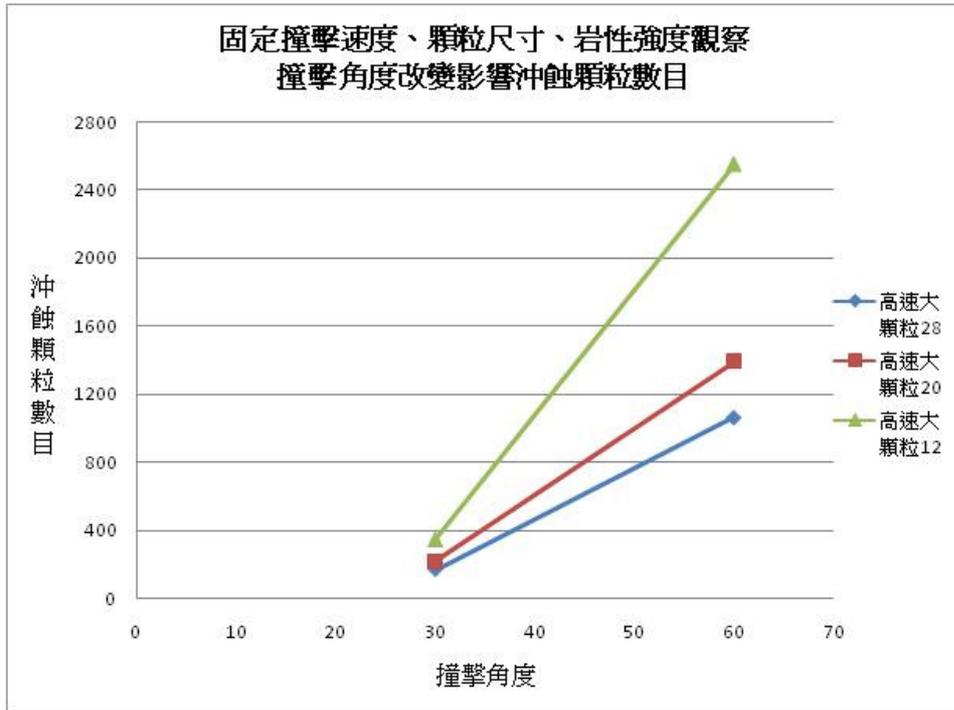


圖 6-23 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(高速大顆粒)

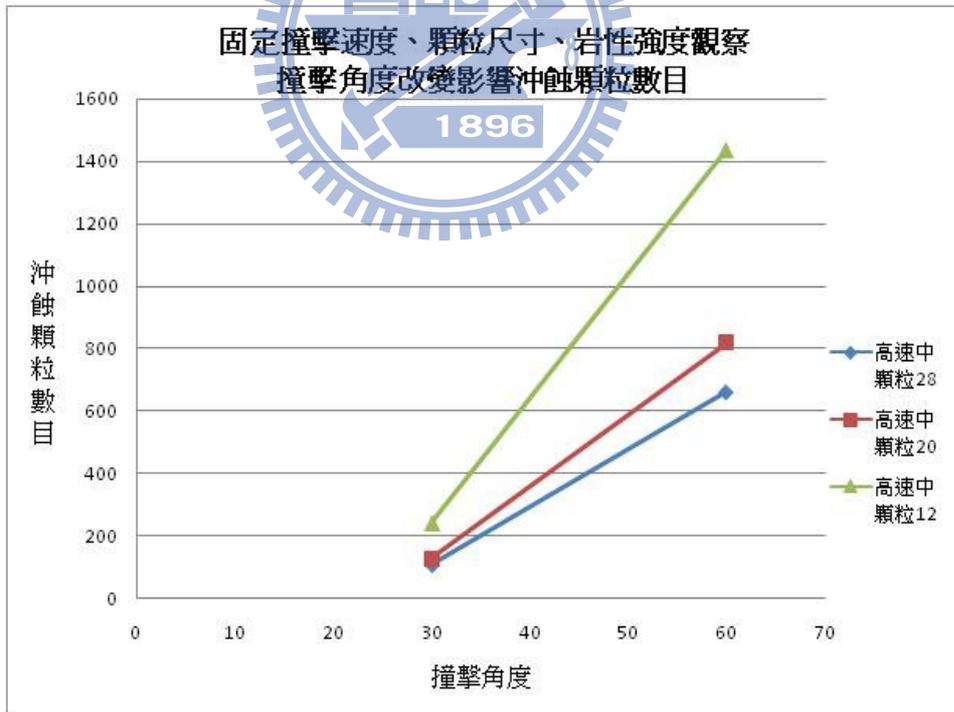


圖 6-24 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(高速中顆粒)

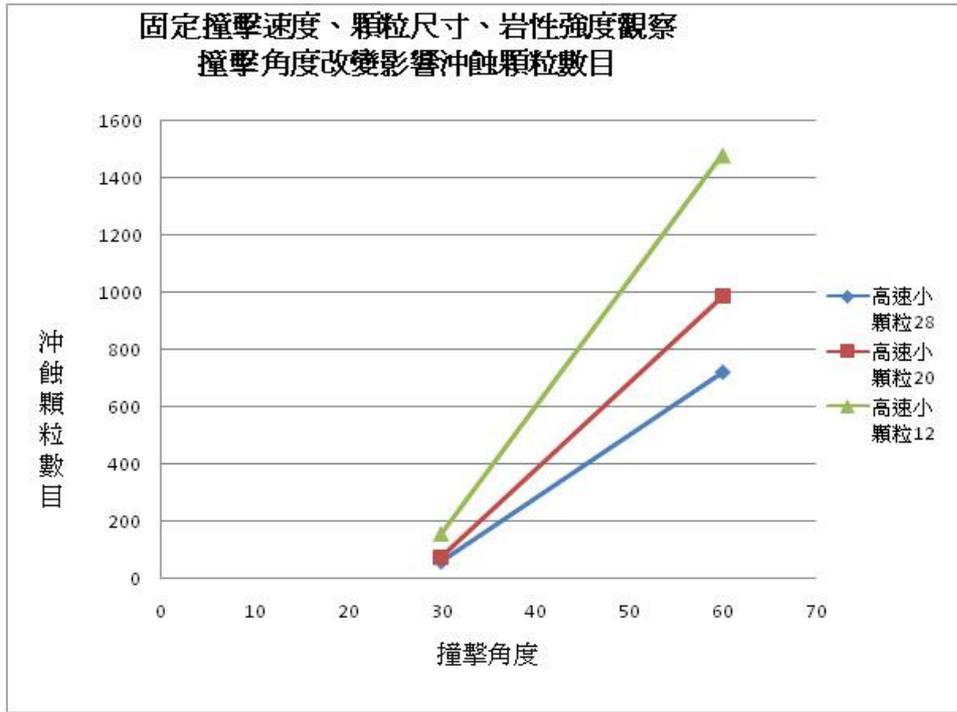


圖 6-25 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(高速小顆粒)

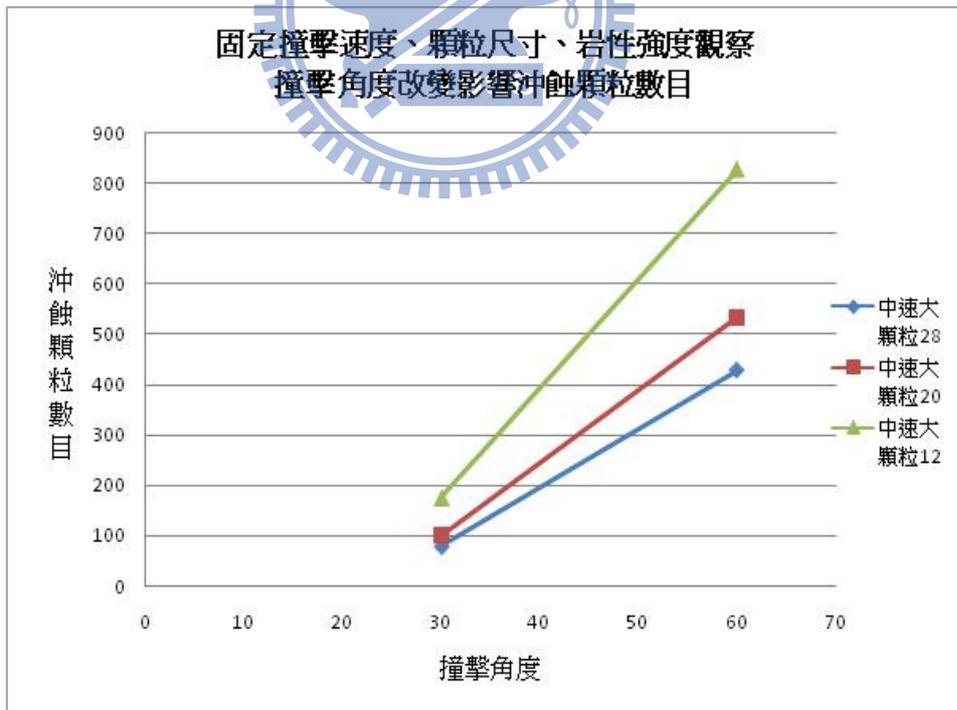


圖 6-26 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(中速大顆粒)

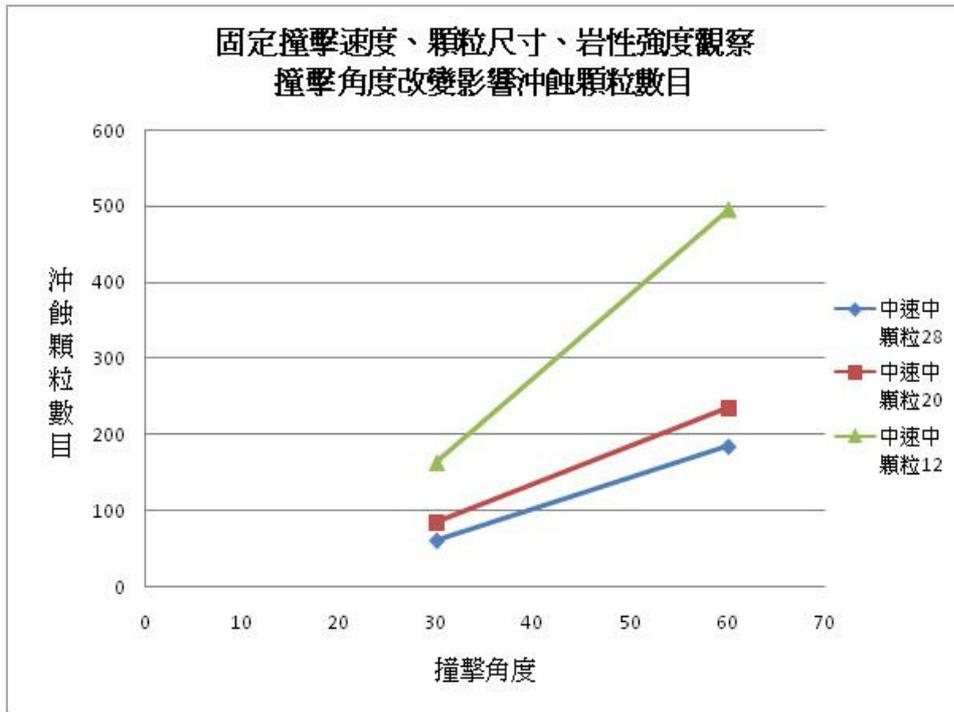


圖 6-27 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(中速中顆粒)

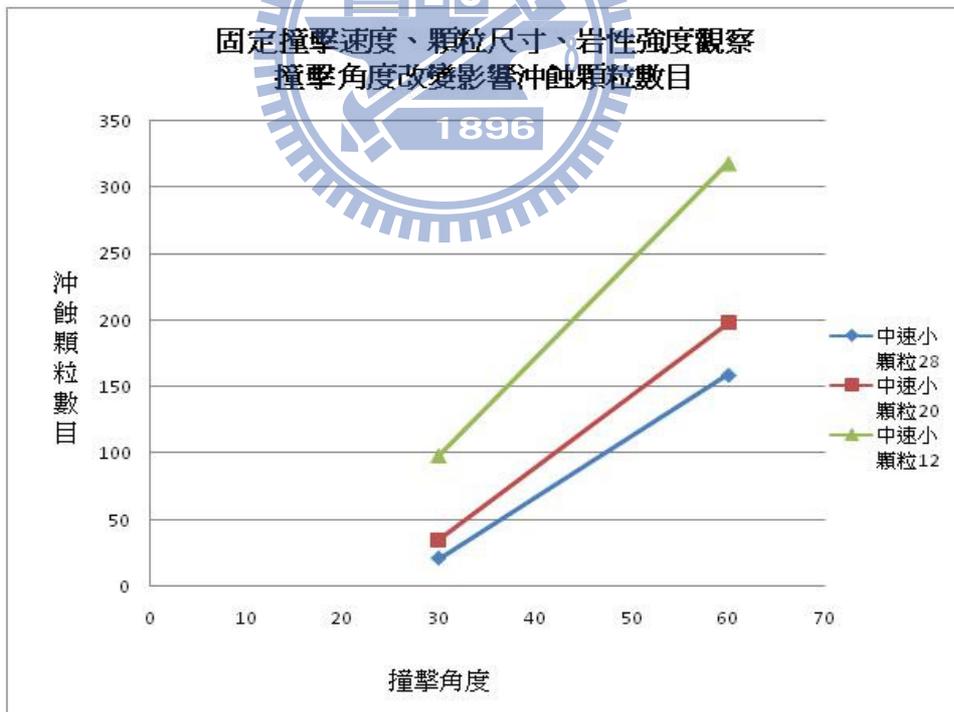


圖 6-28 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(中速小顆粒)

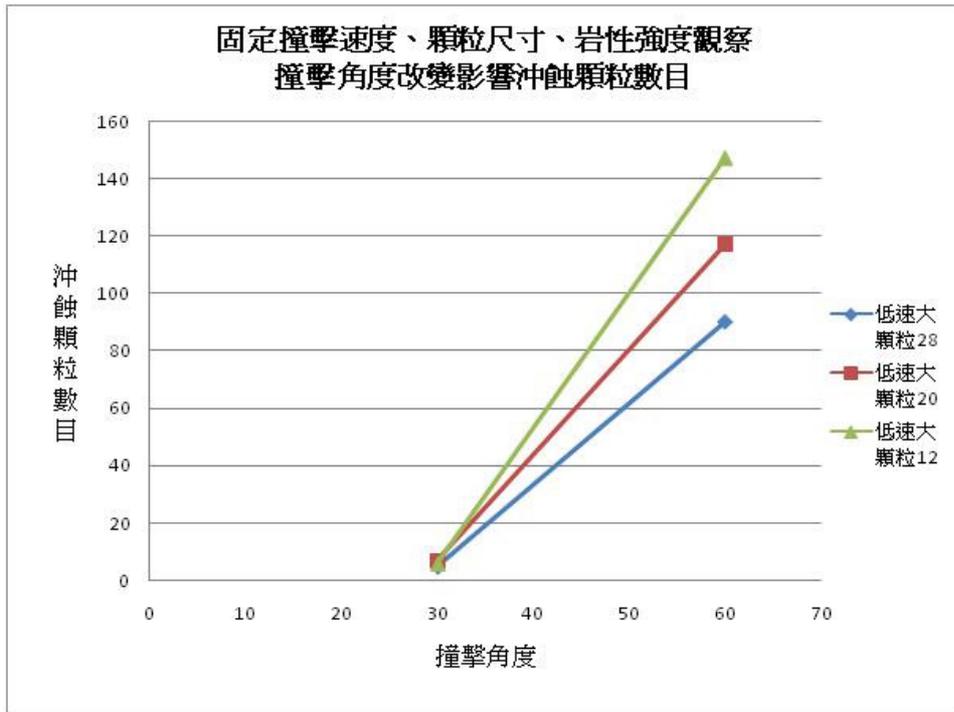


圖 6-29 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(低速大顆粒)

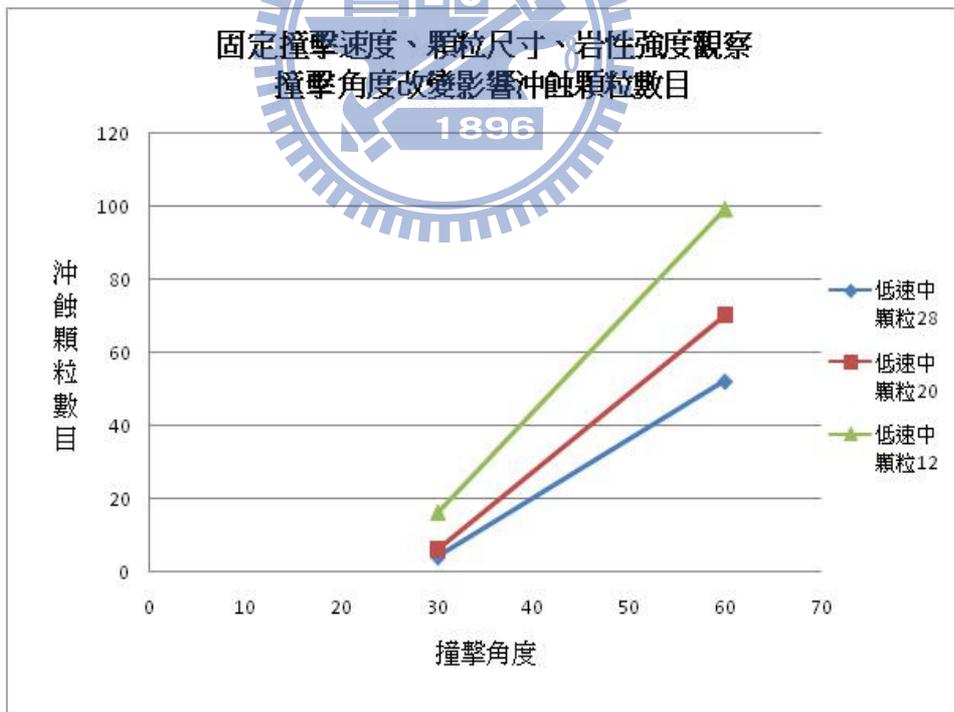


圖 6-30 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(低速中顆粒)

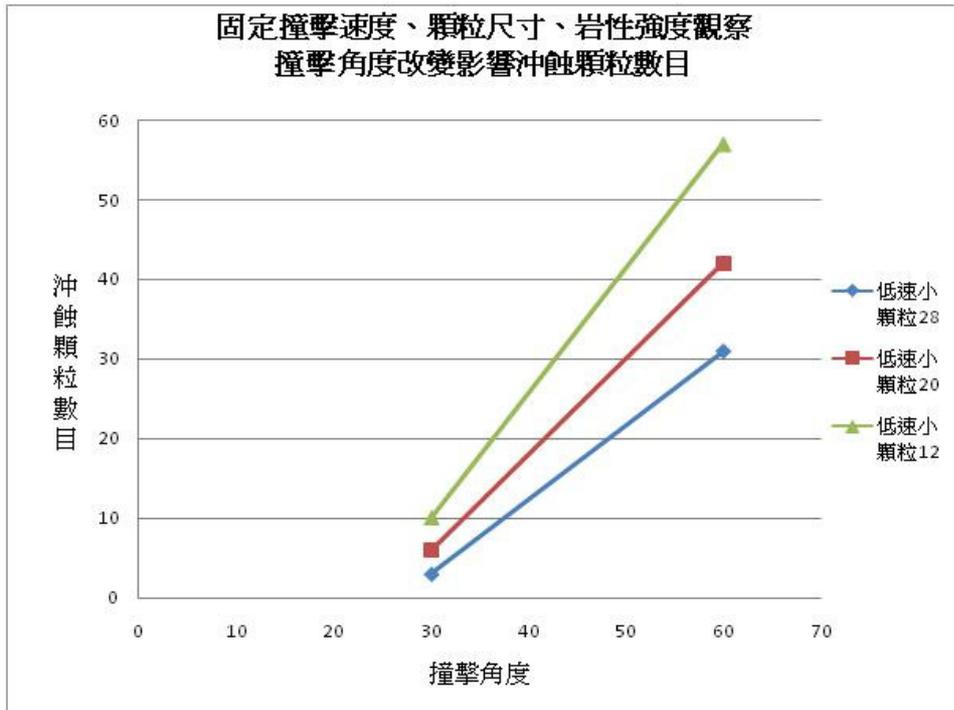


圖 6-31 不同條件下受沖蝕顆粒數目與撞擊角度間關係(低速小顆粒)

6.2.1.5 Sklar 模式改變楊氏係數Y值及張力強度 σ_T 值之影響結果

Sklar & Dietrich (2004)根據 Engle(1978)岩石對於撞擊顆粒的阻抗能力取決於材料的彈性能之儲存能力(depends on the capacity of the material to store energy elastically)，進而以單位體積可承受能量(ϵ_v)做為一界定值，而 ϵ_v 與岩石之楊氏係數Y及張力強度 σ_T 有關，其關係如 6-2 式所示。

$$\epsilon_v = k_v \beta = k_v \frac{\sigma_T^2}{2Y} \quad 6-2 \text{ 式}$$

k_v ：係數 β ：彈性應變能(J/m^3)。

先針對楊氏係數(Y)本節模擬主要採用中撞擊速度(6m/s)、高撞擊角度(60度)、中撞擊顆粒尺寸(2cm)及中岩性強度(20MPa)條件進行模擬，模擬組數為改變三個Y值觀察模擬所造成沖蝕顆粒數目之改變，每個Y值模擬三

組，其結果如表 6-10 所示，根據圖 6-32 顯示當 Y 值越大時，試體之 ε_v 越小，故在相同之沖蝕作用力下，當 ε_v 越小時，所產生沖蝕顆粒數會越多。

針對張力強度 σ_T 因無模擬相關張力試驗，故以張志勇(1998)以台中大坑之卓蘭層軟弱砂岩進行力學試驗得到軟弱砂岩之張力強度約為單壓強度之 15~40 倍，針對張力強度之模擬主要採中撞擊速度(6m/s)、高撞擊角度(60 度)、中撞擊顆粒尺寸(2cm)及搭配原有岩性強度=20MPa(單壓強度)，另增 39 及 11MPa 兩個單壓強度，進行張力強度 σ_T 改變後之分析，單壓強度轉換成張力強度值如表 6-11 所示，模擬結果如表 6-12 所示，根據圖 6-33 顯示當 σ_T 越大時，試體之 ε_v 越大，故在相同之沖蝕作用力下，當 ε_v 越大時，所產生沖蝕顆粒數會越少。

表 6-10 以楊氏係數(Y)為變數之模擬結果

條件	Y(MPa)	12.3	22.3	32.3
		沖蝕顆粒數	沖蝕顆粒數	沖蝕顆粒數
高速高角度中顆粒 20		207	235	375
高速高角度中顆粒 20		207	235	375
高速高角度中顆粒 20		207	235	375

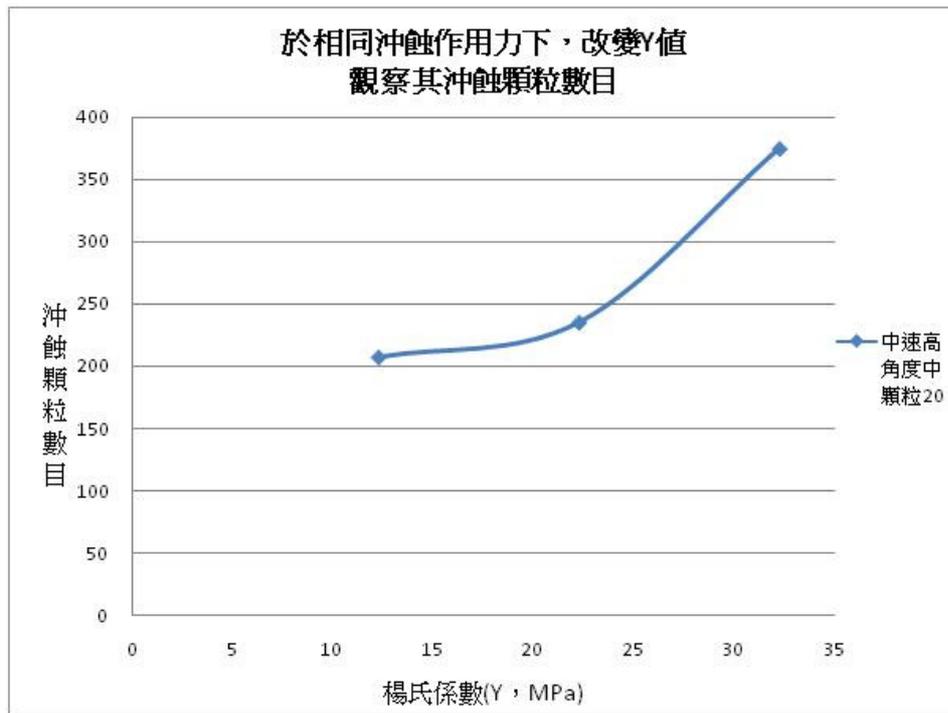


圖 6-32 相同條件下受沖蝕顆粒數目與楊氏係數間關係(相同沖蝕作用力及岩性強度)

表 6-11 軟弱砂岩之單壓強度轉換為張力強度

張力強度(MPa)	轉換	單壓強度(MPa)
2.6	1/15	39.1
1.3		20
0.73		11

表 6-12 以張力強度(MPa)為變數之模擬結果

張力強度(MPa)	條件	高速高角度中顆粒
		沖蝕顆粒數目
2.6		152
1.3		235
0.73		385

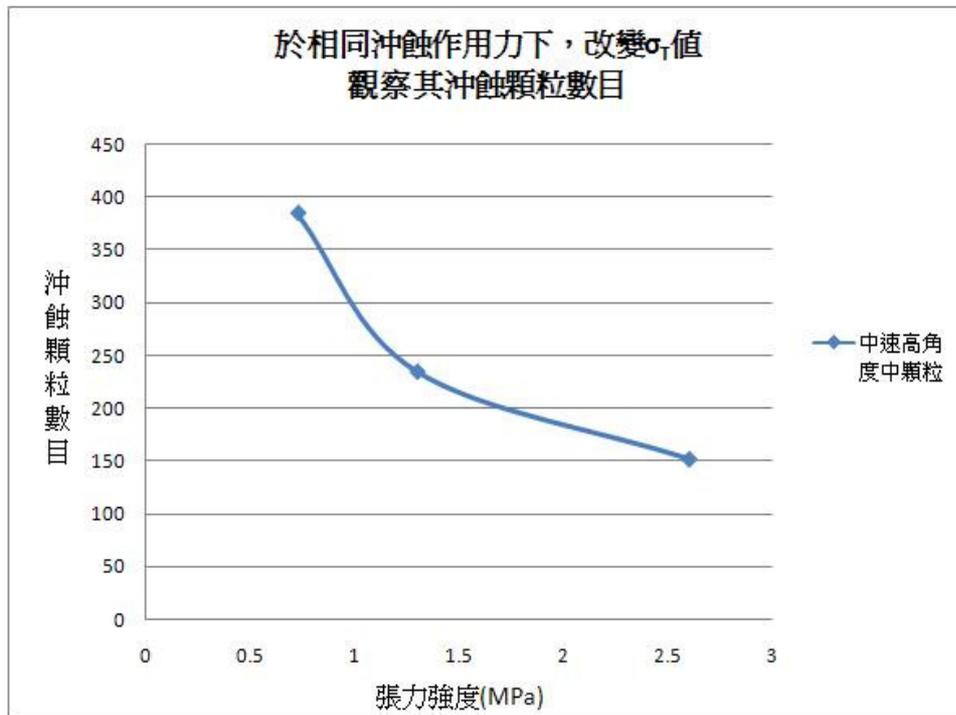


圖 6-33 相同條件下受沖蝕顆粒數目與張力強度間關係(中速高角度中顆粒)

6.2.1.6 改變撞擊點之影響結果

6.2.1.1~3 三個小節中結果中之各模擬皆取三組沖蝕顆粒集合體，但結果皆相同，乃因為三組之撞擊點其實並無不同，因此沖蝕顆粒數目結果都一樣，令探討結果之變異性失去了意義。此子節針對中撞擊速度(6m/s)、高角度(60度)、中撞擊顆粒(2cm)及中岩性強度(20MPa)做不同撞擊點之模擬，其撞擊位置顯示如圖 6-34 所示，進而找出本模擬亦是有變異性，其模擬結果如表 6-13 所示，其結果變異性如圖 6-35 所示。

表 6-13 改變撞擊點觀察沖蝕顆粒變異性

條件 撞擊點	中速高角度中顆粒
	沖蝕顆粒數目
原始點	235
向原始點後方移 2cm	273
向原始點前方移 2cm	320



圖 6-34 撞擊點改變對沖蝕顆粒數目之變異性

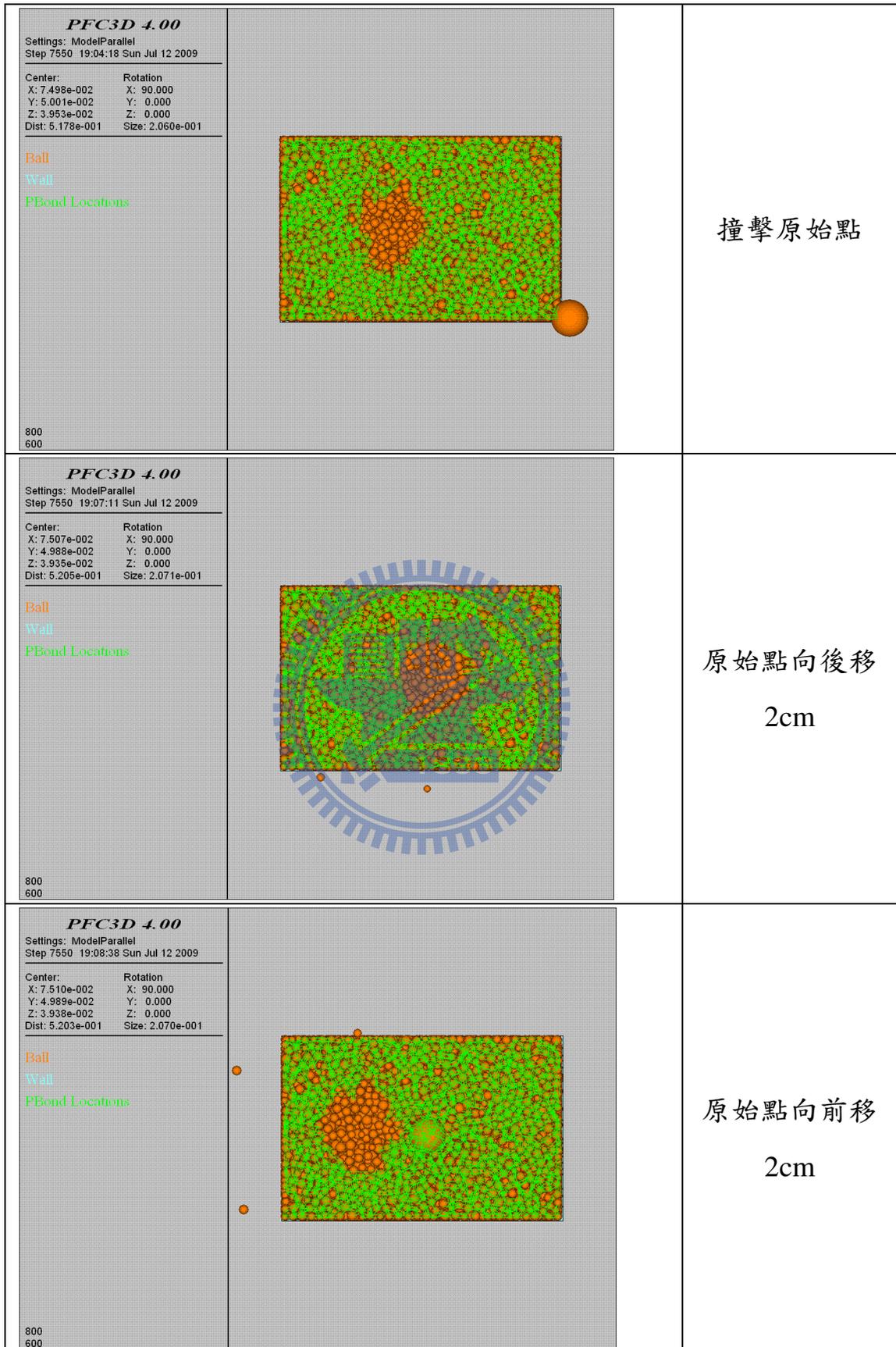


圖 6-35 撞擊點改變示意圖

6.2.2 結果與討論

針對岩性強度對沖蝕量之影響，由圖 6-3~8 顯示當岩性強度越大時其沖蝕顆粒數目越少，反之亦然。

就顆粒撞擊沖蝕現象之模擬，圖 6-10 顯示在高撞擊速度高撞擊角度及小撞擊顆粒情況下，會產生其沖蝕顆粒多於中撞擊顆粒撞擊的原因主要是小撞擊顆粒會產生往試體內掘進的情況，所以導致在同岩性強度小撞擊顆粒造成較多的沖蝕顆粒產生。

就撞擊速度對沖蝕量之影響，由圖 6-11~16 顯示當撞擊速度越大時其沖蝕顆粒數目會越多，反之亦然。有所異常之部分皆與小顆粒貫穿入試體產生較大量的沖蝕顆粒有關。

就撞擊顆粒尺寸對沖蝕量之影響，由圖 6-17~22 顯示當撞擊顆粒越大時所產生之沖蝕顆粒數目會越多，反之撞擊顆粒越小就會造成沖蝕顆粒數目越少，而異常處皆是小撞擊顆粒於高撞擊速度高撞擊角度會鑽進試體而造成大量的破壞。

就撞擊角度對沖蝕量之影響，由圖 6-23~30 顯示當撞擊角度高時，所產生之沖蝕顆粒數目會遠大於撞擊角度低的時候。而產生異常情形亦是產生於高撞擊角度撞擊。

根據 Sklar & Dietrich(2004)之模式了解當楊氏係數(Y)越大時，會產生越多沖蝕顆粒，而張力強度越大時，所產生之沖蝕顆力會越小，其因素皆是與單位體積可承受能量有關，楊氏係數與單位體積顆承受能量呈反比關係，而張力強度與單位體積承受能量成一平方正比關係。

本研究透過變動撞擊點位置檢討相同條件下撞擊沖蝕之變異性，可顯示當撞擊點不同時，沖蝕量有所不同，其原因推測係因為撞擊後被撞擊顆

粒集合體中遭到鍵結破壞之範圍與分佈將會因會撞擊接觸點之不同而會稍有隨機性之差異。

6.3 材料參數對模擬沖蝕行為之探討

對於模擬試驗中的試驗試體其相關材料參數分別有顆粒(ball)之勁度參數 k_n 及 k_s 、顆粒之摩擦係數 μ 、平行鍵結之強度參數 $pb_nstrength$ 、 $pb_sstrength$ 三項主要材料參數。而顆粒之勁度參數(k_n 、 k_s)主要掌控試體整體之楊氏係數(Y)值，而從 6.2.1.5 節之模擬結果即可了解到當主控 Y 值的顆粒勁度參數有所變動時，亦會影響到整體沖蝕行為，Y 值增大時亦會使沖蝕顆粒數目增多。顆粒之摩擦係數 μ 主要會影響到試體之強度，可從 5.2 節中之顆粒摩擦係數率定即可了解到會當 μ 值有所變動時，會影響到試體強度，故當 μ 有改變時亦會影響到整體之沖蝕行為， μ 增大時強度變高，受沖蝕顆粒數目就會減少。平行鍵結之強度參數($pb_nstrength$ 、 $pb_sstrength$)主要掌控試體整體之強度，而從 6.2.1.5 節之模擬結果即可了解到當主控試體強度之平行鍵結強度參數有所變動時，會影響到試體之強度就會影響到沖蝕行為，強度變高時受沖蝕顆粒數目亦會減少。

第七章 結論與建議

7.1 結論

本文以 DEM 模擬程式模擬軟弱砂岩層沖蝕岩床之行為，研究岩層為西部麓山帶上新-更新世地層的卓蘭層軟弱砂岩，主要模擬之沖蝕形式為水流造成剪應力之磨蝕沖蝕及顆粒彈跳所造成之沖蝕兩種沖蝕形式，藉著兩種模擬沖蝕行為之結果探討影響軟弱岩床沖蝕之影響因子，所獲結果如下：

- 一、 本研究於選擇之軟弱岩床試驗河段完成現地勘查，實地觀察軟弱岩床受到沖蝕作用之發展過程與沖蝕機制。經由現地觀察可歸納於不同岩性之岩層中會產生不同型態之沖蝕機制：厚層砂岩會產生滑槽等磨蝕現象，而砂頁岩互層中之薄頁岩會產生小塊體抽離的現象，砂岩則產生滑槽的情形，而泥質頁岩質則會產生乾溼循環的乾縮、乾裂行為，會形成風化沖蝕。
- 二、 現地軟弱岩床之變異性高，若欲經由現地取得相當數量及性質雷同之軟弱岩床試體完成一系列完整的室內沖蝕試驗往往相當困難，本研究因而利用數值模擬方式取代實際的試驗，可視為虛擬沖蝕試驗，因為可確保試體之重複性，便於探討影響軟弱岩床沖蝕行為之重要影響因子。
- 三、 確立微觀參數進行各種模擬沖蝕行為，方能得到正確之結果，與現地相同之沖蝕行為作比對，因此率定微觀參數十分重要。本研究之相關微觀參數率定為採用模擬三軸試驗結果做為率定標的，以陳賀瑞(1997)對卓蘭層軟弱砂岩層所作系列室內三軸試驗之結果進行模擬，以

率定卓蘭層軟弱砂岩層所對應之各微觀參數。其主要目的乃為找到一組適當之微觀參數以進行沖蝕行為之探討，令微觀參數能對應已知之巨觀參數。主要率定之參數分別有顆粒間之正向、剪向勁度參數及摩擦係數，平行鍵結之正向、剪向強度等。

1. 顆粒間之勁度參數影響岩體整體之楊氏係數，可由三軸試驗之楊氏係數率定之。
2. 摩擦係數影響試體之強度及峰後行為，可由卓蘭層軟弱砂岩之摩擦角標定之。
3. 平行鍵結之正向、剪向強度主控試體之強度，平行鍵結受力超過其強度極限試體才會產生破壞破壞，率定鍵結強度可比對卓蘭層軟弱砂岩之單壓強度。

四、 本研究模擬沖蝕試驗之沖蝕作用力包括就水流造成沖蝕之床面剪應力及顆粒彈跳造成撞擊沖蝕。就床面剪應力之沖蝕作用，控制變因為床面剪應力。就顆粒彈跳造成撞擊之沖蝕作用，控制變因為顆粒撞擊速度、撞擊角度及撞擊顆粒尺寸四項因子。

1. 就床面剪應力之沖蝕作用，作用於相同強度及勁度之模擬試體上時，模擬水流所造成之床面剪應力越大時，受沖蝕脫離之顆粒會較多。若由小而大逐漸增高床面剪應力，可找出啟動沖蝕之臨界剪應力。床面剪應力所造成沖蝕破壞之作用皆係出現剪應力超過其剪力

強度所產生之剪向鍵結破壞所致。

2. 就就顆粒彈跳造成撞擊之沖蝕作用，在撞擊速度大、高撞擊角度及大撞擊顆粒的作用條件下，受沖蝕脫離之顆粒數目最多，所形成破壞之區域也會越大。高角度撞擊時主要係形成「變形磨損」(deformation wear)。低角度撞擊時則主要形成較表層之破壞，或可稱「切削磨損」(cutting wear)。撞擊所生之鍵結破壞大多為剪向破壞。

五、 本研究藉由虛擬試體進行虛擬沖蝕試驗，於軟弱岩石強度範圍指定不同之強度及勁度參數條件以代表不同之岩性。於相同之沖蝕作用力下進行模擬沖蝕試驗，即可得到當模擬沖蝕試體於高強度條件下，所受到沖蝕脫離之顆粒會較少，反之亦然。由模擬結果可了解當試體强度高時，不僅受沖蝕所出現之破壞區域會較小，沖蝕脫離之顆粒亦會較少。於固定強度下當勁度較高時，顆粒間之鍵結於受顆粒撞擊作用產生較大程度之破壞範圍；反而在勁度較低時因材料所能吸收之動能較大，反而使破壞範圍減少。

7.2 建議

1. 本研究之虛擬沖蝕試驗是由定性觀點探討軟弱岩床沖蝕之問題，若能模擬大量之虛擬試驗結果，搭配真實室內沖蝕試驗結果及現地沖蝕資料，即可能經由統計分析與模擬分析以得到最符合現地之沖蝕情形。

2. 未來或有可能運用虛擬沖蝕試驗，配合相關之實驗室沖蝕試驗結果，經適當率定後，由虛擬沖蝕試驗所得之沖蝕行為與數據建立資料庫，用來建立適當之巨觀組合律以模擬實際河道或河岸之沖蝕行為。
3. 關於微觀參數之率定，採用模擬三軸試驗與室內三軸試驗的結果作率定，或有可能部分參數會與實際室內試驗之結果產生落差。故當微觀參數確定後，需觀察其模擬沖蝕行為，是否會與現地情況有落差，再進行下一階段之模擬。
4. 由於模擬沖蝕試驗的目的為使影響沖蝕因子單純化，以找出主控沖蝕影響因子，但現地沖蝕情況可能夾藏許多其他影響因子，單純以模擬程式模擬沖蝕行為或有可能令沖蝕量有所偏差，故亦需對照現地沖蝕資料，找出一定之沖蝕關係。
5. 為求虛擬試體均質及重複性高，本研究未考慮岩石中含有節理及裂隙等弱面，未來模擬試體可考慮加入節理及裂隙，可能更接近現地岩性。

參考文獻

1. 何春蓀(1986)，「台灣地質概論及台灣地質圖說明書」，經濟部中央地質調查所。第 99~100 頁。
2. 徐鐵良 (1993)，「地質與工程」，科技圖書出版社，第十一版。
3. 赤井浩一(1993)，「General aspects of soft rock」，土壤基礎，第 41 期，第 1~6 頁。(日文)
4. 鄭富書、朱家德、黃燦輝(1994)，「台灣一些軟弱砂岩的工程性質」，1994 岩盤工程研討會論文集。第 259~267 頁。
5. 李怡德(1996)，「軟弱砂岩弱化行為研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
6. 陳賀瑞(1997)，「中北部地區極軟弱砂岩之物理與力學性質之初步探討」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
7. 林聖諭(1998)，「軟砂岩之微觀組構及其對力學性質之影響」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
8. 張志勇(1998)，「軟弱岩石之張力行為」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
9. 呂榮華(1999)，「以單顆粒勁度探討卵礫石層之抗剪強度」，國立中興大學土木工程研究所碩士論文。

- 10.唐昭榮(2005),「利用 Distinct-Element Method (DEM) 探討集集地震所誘發之草嶺山崩」,中國地質學會九十四年年會學術研討會。
- 11.陳培源(2006),“台灣地質”,台灣省應用地質技師公會。第 11-5~6 頁
- 12.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。
- 13.張家偉(2007),“應用分離元素法探討紅葉坪地區地滑演化”,國立台灣大學工學院土木工程學系碩士論文。
- 14.李宏輝(2008),“砂岩力學行為之微觀機制-以個別元素法探討”,國立台灣大學工學院土木工程學系博士論。
- 15.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。
16. Annandale, G.W. (1995), “Erodibility.”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.33, No.4, pp.471-494.
17. Briaud, J.L., F.C.K. Ting, H.C. Chen; R. Gudavalli, S. Perugu, and G. Wei (1999), “SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers.”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.4, pp.237-246.
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., O. Strack (1979), “A discrete numerical model for granular assemblies.”, *Geotechnique* 29, pp. 47-65.
- 20.Chareyre, B., P. Villard (2003)“Discrete element modeling of curved geosynthetic anchorages with known macro-properties.”, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, Proceedings of the First International PFC Symposium, pp. 197–203 .
- 21.Deluzarche,R. , J. Cambou, J. J. Fry,(2003)“Modeling of rockfill behavior with crushable particles.”, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, Proceedings of the First International PFC Symposium, pp.219~224.
- 22.Foley, M.G. (1980), “Bedrock incision by streams.”, *Geological Society of America Bulletin*,Part II, Vol.91,pp. 2189– 2213.
- 23.Ferrellec, J-F., C. Mochizuki, A. Hirata(2005),“DEM simulation of bulk material flow In a feeding system of blast furnace.”, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, Proceedings of the First International PFC Symposium, pp. 103-110 .
- 24.Gilbert, G. K. (1877), “Report on the Geology of the Henry Mountains : Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region.”,pp.160.
- 25.Graham, J. R. , W. S. Hamilton, J. G. Hendrickson , R. A. Kaden, J. E. McDonald, G. E. Noble , E. K. Schrader (1987), “Erosion of concrete in

- hydraulic structure.”, *ACI Materials J.* 3/4, p 136-157.
- 26.Howard ,A.D, G. Kerby (1983),“Channel changes in badlands.”, *Geological Society of America Bulletin*, Vol.94, pp.739-752.
- 27.Hart R., P.A. Cundall , J. Lemos(1988),“Formulation of a three-dimensional distinct element model.”, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Vol. 25, No.3, pp. 117-125 .
- 28.Herten M. , M. Pulsfort(1999),” Determination of spatial earth pressure on circular shaft constructions.”, *Granular Matter* 2, pp.1-7.
- 29.Hartshorn , K. , N . Hovius , W . B . Dade , and R . L . Slingerland (2002) , “Climate-driven bedrock incision in an active mountain belt.”, *Science*, Vol.297, No. 5589, pp.2036-2038.
- 30.Hainbüchner, E. , S. Potthoff , H. Konietzky & L. te Kamp (2003),“Particle based modelling of shear box tests and stability problems for shallow foundations in sand.”, *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*, *Proceedings of the First International PFC Symposium*, pp. 151-156 .
- 31.Kulatilake P., B. Malama, J. Wang (2001), “Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading.”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Vol. 38,No. 5, pp.641-657 .
- 32.Oliveira R. (1993),“Weak Rock Materials.”, *The Engineering Geology of*

Weak Rock, pp. 5-15.

33. Potyondy D., P. Cundall (2004), "A bonded-particle model for rock.", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 41, pp.1329-1364.
34. Seidl, M.A., W. E. Dietrich (1992), "The problem of channel erosion into bedrock.", *Journal of Fluvial Geomorphology*, pp.316-339.
35. 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.
36. 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.
37. Saeki, M.(2005), "Discrete element modeling for dynamics of vibro-impact system.", *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Proceedings of the First International PFC Symposium*, pp.135-142.
38. Stock, J.D., D.R. Montgomery, B.D. Collins, and L. Sklar (2005), "Field measurements of the incision rates following bedrock exposure: Implications for process controls on the long profiles of valleys cut by rivers and debris flows", *Geological Society of American Bulletin*, Vol.117, No.11/12, p 174-194.
39. Tijssens E., M. Van Zeebroeck, H. Ramon, J. De Bardemaeker, T. Van Canneyt (2002), "DEM modeling of agricultural processes: an overview of

- recent projects.”, Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, Proceedings of the First International PFC Symposium, pp.87-92.
40. Wohl, E.E. , H. Ikeda (1998), “Patterns of bedrock channel erosion on the Boso Peninsula Japan .”, Journal of Geology ,Vol.106, pp. 331-345.
41. Whipple, K.X. and Tucker, G.E., (1999). “Dynamics of the stream-power river incision model.”, Journal of Geophysical Research, v104, pp.17,661-17,674.
42. 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.
43. Wohl,E.E. and Hema Achyuthan (2002), “Substrate Influences on Incised-Channel Morphology.”, The Journal of Geology, Vol. 110, pp. 115–120.