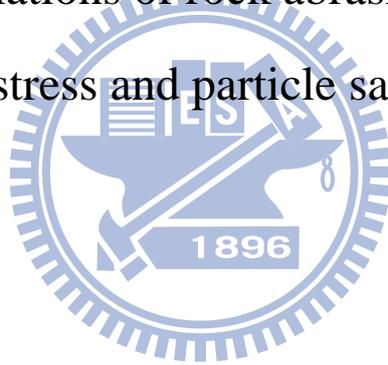


國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

床面剪應力及顆粒彈跳引致岩石磨蝕之微觀數值模擬
Microscopic simulations of rock abrasion induced by bed
shear stress and particle saltation



研究生：羅若瑜

指導教授：潘以文 博士

中華民國一〇〇年七月

床面剪應力及顆粒彈跳引致岩石磨蝕之微觀數值模擬

Microscopic simulations of rock abrasion induced by bed shear stress and
particle saltation

研究生：羅若瑜

Student : Ruo-Yu Lo

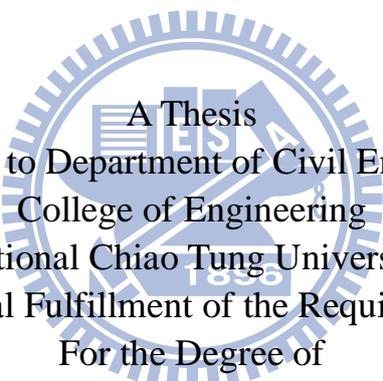
指導教授：潘以文 博士

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 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇〇年七月

床面剪應力及顆粒彈跳引致岩石磨蝕之微觀數值模擬

學生：羅若瑜

指導教授：潘以文 博士

國立交通大學土木工程學系

中文摘要

台灣豐、枯水期之水量變化非常大，造成河道的不穩定，也使得河床上之跨河結構物因沖刷而破壞，岩床沖蝕問題對於台灣來說是個不可忽視的問題。當岩床或岩岸屬於地質年代較為年輕之軟弱岩層時，岩石河床沖蝕尤其更為嚴重。數值模擬方法可任意控制變因、可大量進行分析，耗時較短之優點，又不受試體取樣與準備不易之困擾，本研究因而嘗試以數值模擬方法為工具，將數值模擬視為「虛擬沖蝕試驗」，代替實體試驗。本研究建立磨蝕沖蝕機制及顆粒彈跳撞擊兩種岩床沖蝕機制模型，進行虛擬岩床沖蝕試驗，以便透過模擬結果探討影響沖蝕機制與行為之重要因子，並探討沖蝕過程中材料中之消散能量變化與鍵結破壞狀況。

就岩床沖蝕模擬而言，當床面剪應力增加時（遭磨蝕）破壞顆粒數也會增加。岩床磨蝕試驗結果顯示對應新鮮岩盤材料的磨蝕啟動剪應力遠高於一般河道可能出現之床面剪應力尺度，顯示現地之岩床若未經乾溼循環或風化等因素強度大幅弱化，清水所造成之床面剪應力可能甚難以造成岩床之顯著磨蝕。

由顆粒彈跳撞擊之模擬結果，可發現（遭彈跳撞擊）破壞顆粒數會隨撞擊顆粒速度、角度及尺寸等撞擊因子增加而隨之增加。此外，就材料力學性質之影響而言，當楊氏係數增加時破壞顆粒數也增加，而試體張力強度增加時破壞顆粒數則降低。此外，比較破壞顆粒數與累積消散能量，可發現兩者間呈良好之相關性。

關鍵字：岩床沖蝕、磨蝕、彈跳撞擊、個別元素法、顆粒流模擬

Microscopic simulations of rock abrasion induced by bed shear stress and particle saltation

Student : Ruo-Yu Lo

Advisor : Dr. Yii-Wen Pan

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

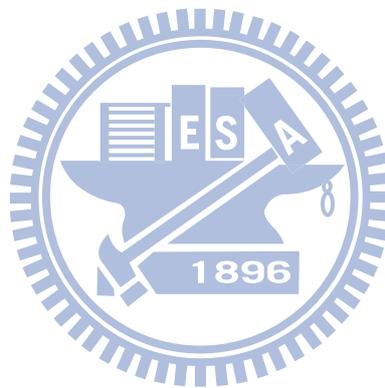
River discharge in Taiwan varies a lot during flooding season; this situation often results in unstable river channel. The intensive erosion of bedrock during flood may also endanger the stability of cross-river structures, especially for cases of river bed composed of soft rocks. This study makes use of numerical simulation as “virtual erosion test” to explore the mechanisms of rock erosion. In the simulation, rock material is modeled as a granular assemblage with inter-particle bonding; the erosion process is simulated as particles’ release due to de-bonding. Virtual rock specimen are subjected to boundary loads from either bed shear stress or saltating particle to simulates physical erosion experiments. The purpose of this thesis is to investigate the important factors that may control the erodibility of soft rock subjected to bed shear stress and particle saltation; also, the dissipated energy and bonding failure associated with the occurrence of rock erosion are studied.

For erosion due to bed shear stress, simulated results show that the number of de-bonded particles raises as the bed shear stress increases. It is found the shear stress required for the initiation of a de-bonded particle in fresh soft rock material is significantly higher than the typical in-situ bed shear stress that may occur in a flood. It appears clear water current alone may hardly erode a fresh rock material. However, it is common to see the degradation or weathering of soft rock exposed to the periodical variation of water level (i.e., subjected to drying-wetting cycles). These weakening processes are likely to cause the rock material become more erodible.

Saltating abrasion can be a consequence of impacts of gravels traveling along with water flow; the impact results in the local failure and causes abrasion of river-bed rock material. The major factors affecting the erodibility and erosion rate are examined through a series of virtual

erosion tests. Simulated results show that more de-bonded particles may occur for a condition with higher impact speed, higher impact angle, larger gravel size, higher Young's modulus, or lower rock strength. Besides, a good correlation relationship between the number of de-bonded particles and the accumulated dissipated energy is notable.

Key Words : rock erosion; abrasion; saltation; DEM; particle flow simulation



誌謝

在研究所的求學期間，最感謝的是擔任我的指導教的恩師 授潘以文博士對於學生的耐心指導及提供最寶貴的意見，並且費心校閱學生論文，使論文疏漏處得以改進，並如期完成。在研究所修業期間，受到恩師提攜與指教，使學生受益非淺，在此致上最高的感謝及敬意。此外也感謝廖志中老師在學生研究中提供許多寶貴的建議，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蔡光榮老師、陳昭旭老師、古志生老師及吳博凱老師於口試時給予細心的指導與建議並費心審核學生論文，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。

在這段期間感謝明萬、國維、偉欽、聰吉、理泉、佩錚等學長不厭倦地指教及幫忙，同時也感謝同窗及學弟妹的協助。

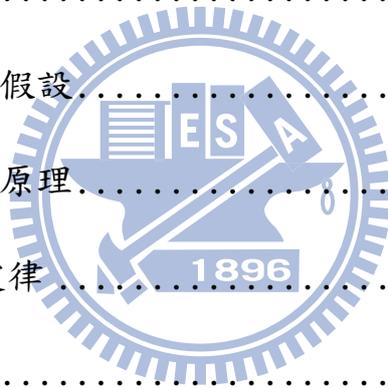
最後要感謝我的家人及好友，給我最親愛的媽媽及姐姐，謝謝你們給予我最大的空間讓我可以盡情發揮，以及朋友們的精神支援，若沒有你們各位的幫助，我無法順利完成學位，在此以本文獻給各位，以感謝所有人的幫忙與支持。

目錄

中文摘要	II
ABSTRACT	III
誌謝	V
目錄	VI
表目錄	X
圖目錄	XII
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究架構	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 岩床沖蝕下切模式	5
2.2 岩石河床的沖刷機制	7
2.2.1 磨蝕沖蝕(abrasion)	7
2.2.2 顆粒彈跳撞擊(saltation)	9
2.2.3 塊體抽離(plucking)	10

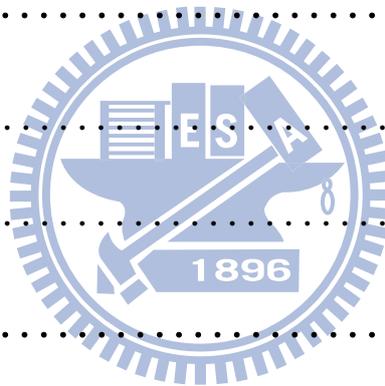


2.2.4 穴蝕(cavitation).....	12
2.3 室內沖蝕試驗.....	13
2.3.1 磨蝕沖蝕(abrasion)之室內模擬試驗.....	13
2.3.2 顆粒彈跳撞擊 (saltation)之室內模擬試驗.....	19
2.4 數值模擬之理論基礎.....	20
2.4.1 離散元素法.....	21
2.4.2 離散元素法之定義.....	21
2.5 PFC 軟體之概述.....	22
2.5.1 PFC 之基本假設.....	23
2.5.2 PFC 之運算原理.....	23
2.5.3 力—位移定律.....	24
2.5.4 運動定律.....	28
2.5.5 PFC 之接觸組合模式.....	29
2.5.6 微觀與巨觀參數之訂定.....	33
2.5.7 PFC 之相關應用.....	35
2.6 總結.....	37
第三章 研究方法.....	39
3.1 岩床試體建立.....	39
3.1.1 邊界設定.....	40



3.1.2 顆粒集合體之建立.....	41
3.1.3 刪除虛浮點.....	42
3.1.4 參數率定.....	43
3.1.5 小結.....	45
3.2 驅動沖蝕力之模型建立.....	46
3.2.1 磨蝕沖蝕機制之模型建立.....	47
3.2.2 顆粒彈跳撞擊之模型建立.....	52
3.3 模擬沖蝕機制之目標.....	53
3.3.1 磨蝕沖蝕機制之試驗目標.....	54
3.3.2 顆粒彈跳撞擊沖蝕之試驗目標.....	55
第四章 參數率定.....	59
4.1 參數率定之方法.....	59
4.2 材料參數率定之標的.....	60
4.3 三軸壓縮試驗之微觀模擬.....	63
4.3.1 軟岩材料 A 之三軸模擬試驗.....	65
4.3.2 軟岩材料 B 之模擬三軸試驗.....	72
4.4 討論.....	75
第五章 沖蝕機制模擬結果.....	79

5.1 磨蝕沖蝕機制模擬結果	79
5.1.1 結果討論	84
5.2 顆粒彈跳撞擊沖蝕之模擬結果	86
5.2.1 軟岩材料彈跳撞擊模擬試驗.....	86
5.2.2 顆粒彈跳撞擊影響因子探討	97
5.2.3 連續性隨機彈跳撞擊沖蝕機制	115
5.2.4 楊氏模數與張力強度對沖蝕速度影響	123
第六章 結論與建議	126
6.1 結論	126
6.2 建議	129
參考文獻	131



表目錄

表 3-1 微觀參數表.....	45
表 3-2 磨蝕沖蝕模擬探討之目標	55
表 3-3 顆粒彈跳撞擊因子探討範圍表	57
表 4-1 軟岩材料 A 之力學參數行為(國立交通大學防災與水環境研究中心, 2010)	61
表 4-2 軟岩材料 B 之力學參數行為(陳賀瑞, 1997).....	61
表 4-3 率定參數單位表	64
表 4-4 軟岩材料 A 之三軸試驗參數對照表	68
表 4-5 模擬軟岩材料 B 之三軸試驗參數對照表	74
表 4-6 改變顆粒勁度下影響之楊氏係數值	78
表 5-1 磨蝕試驗模擬結果	83
表 5-2 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例一	88
表 5-3 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例二	89
表 5-4 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例三	90
表 5-5 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例四	91
表 5-6 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例五	92
表 5-7 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例一	93

表 5-8 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例二	94
表 5-9 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例三	95
表 5-10 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例四	96
表 5-11 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例五	97
表 5-13 楊氏模數變化下之模擬結果	124
表 5-14 張力強度變化之模擬結果	125



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	4
圖 2.1 岩床遭流水中懸浮載顆粒磨蝕情況圖(攝於八掌溪)	8
圖 2.2 磨蝕沖蝕過程示意圖(Whipple et al. ,2000)	8
圖 2.3 水夾帶顆粒撞擊岩體之撞痕(攝於大安溪)	10
圖 2.4 岩塊抽離示意圖(Annadale, 1995)	11
圖 2.5 岩塊抽離機制(Whipple et al., 2000)	11
圖 2.6 現地塊體抽離情形(攝於大安溪)	12
圖 2.7 八掌溪觸口攔河堰沖蝕情況	13
圖 2.8 (a) EFA 試驗示意圖 (b)EFA 試驗儀器照片(Briaud, 2001)	15
圖 2.9 不同剪應力與沖蝕速率關係(Briaud et al. 1999)	16
圖 2.10 臨界剪應力門檻值與初始沖刷速率關係圖(Briaud, 2001)	16
圖 2.11 沖蝕指數分類表 (Briaud, 2008)	17
圖 2.12 多功能軟岩沖蝕試驗儀 (郭炳宏, 2009)	18
圖 2.13 不同岩性下之剪應力與岩樣沖蝕率關係圖 (郭炳宏, 2009)	18
圖 2.14 顆粒磨蝕試驗機(Sklar & Dietrich, 2001)	19

圖 2.15	岩床材料張力強度與沖蝕速率之關係 (Sklar , 2001) ...	20
圖 2.16	河床載之粒徑與沖蝕速率之關係	20
圖 2.17	PFC 運算之流程圖	24
圖 2.18	球與球接觸模式圖	25
圖 2.19	球與牆接觸模式圖	26
圖 2.20	球與牆接觸模式下，法向量判斷示意圖	26
圖 2.21	接觸力與顆粒相對位移關係圖	32
圖 2.22	平行鍵結模型圖	33
圖 3.1	岩床試體圖	41
圖 3.2	虛浮點檢驗判定流程圖	43
圖 3.3	岩床試體建立流程圖	46
圖 3.4	舊模型破壞情形(李佩鐸, 2009)	48
圖 3.5	磨蝕沖蝕機制模擬示意圖	52
圖 3.6	民國 98 年石岡壩之洪水剪力分佈 (單位: N/m^2)	54
圖 3.7	撞擊區域選取圖	58
圖 4.1	參數率定流程	60
圖 4.2	軟岩材料 A 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)	62
圖 4.3	軟岩材料 B 在圍壓為 3MPa 之三軸試驗(陳賀瑞, 1997)	62

圖 4.4 微觀模擬三軸試驗流程圖	65
圖 4.5 軟岩材料 A 之模擬室內三軸試體圖	66
圖 4.6 軟岩材料 A 彈性階段之模擬應力應變關係圖.....	67
圖 4.7 軟岩材料 A 彈性階段之模擬體積應變與軸應變關係圖	68
圖 4.8 摩擦係數與摩擦角之關係	69
圖 4.9 軟岩材料 A 於圍壓 0.5MPa 下之模擬應力應變關係圖	70
圖 4.10 軟岩材料 B 模擬之彈性階段應力應變關係圖	73
圖 4.11 軟岩材料 B 模擬之彈性階段體積應變與軸應變關係圖 ...	74
圖 4.12 軟岩材料 B 在圍壓 3MPa 下三軸試驗之模擬應力應變圖 .	75
圖 4.13 摩擦係數對模擬結果之影響(李佩錚, 2009)	77
圖 4.14 微觀鍵結強度參數與巨觀單壓強度之關係(張家銓, 2007)	77
圖 4.15 勁度與楊氏係數關係	78
圖 5.1 單壓強度 6.26MPa 下之剪應力與破壞數量.....	81
圖 5.2 單壓強度調整與鍵結破壞對應關係	82
圖 5.3 模擬牆面磨蝕之破壞情形	82
圖 5.4 鍵結破壞與破壞體積關係圖	84
圖 5.5 磨蝕沖蝕力施加後試體破壞剖面圖	85
圖 5.6 磨蝕沖蝕力施加後試體應力分布剖面圖	85

圖 5.7 試驗撞擊點示意圖	87
圖 5.8 模擬中撞擊角度變化情況	99
圖 5.9 軟岩材料 A 撞擊角度變化之影響情形	100
圖 5.10 軟岩材料 B 撞擊角度變化之影響情形	100
圖 5.11 不同角度的能量轉換及破壞體積關係圖(Sklar, 2004) ..	102
圖 5.12 模擬材料 A 在不同角度的能量轉換及破壞體積關係圖 ..	102
圖 5.13 撞擊角度垂直分量比率與沖蝕速率關係(Sklar, 2004) ..	103
圖 5.14 模擬之軟岩材料撞擊角度垂直分量比率與沖蝕速率關係	104
圖 5.15 不同角度變化於 $\Delta E=10$ 焦耳之破壞情況.....	106
圖 5.16 模擬中撞擊顆粒尺寸變化情形	108
圖 5.17 軟岩材料 A 撞擊顆粒尺寸變化影響	109
圖 5.18 軟岩材料 B 撞擊顆粒尺寸變化影響	109
圖 5.19 影響能量因子之撞擊顆粒粒徑的沖蝕速率方程式 (Sklar, 2004)	111
圖 5.20 模擬軟岩試體撞擊之顆粒粒影響沖蝕破壞程度關係圖 ..	111
圖 5.21 軟岩材料 A 撞擊顆粒速度變化影響	112
圖 5.22 軟岩材料 B 撞擊顆粒速度變化影響	113
圖 5.23 軟岩材料 A 顆粒撞擊能量消耗與鍵結破壞關係圖	114
圖 5.24 軟岩材料 B 顆粒撞擊能量消耗與鍵結破壞關係圖	114

圖 5.25 軟岩材料 A 連續撞擊鍵結破壞類型	115
圖 5.26 軟岩材料 B 連續撞擊鍵結破壞類型	116
圖 5.27 軟岩材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之鍵結破壞趨勢	117
圖 5.28 軟岩材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢	118
圖 5.29 軟岩材料 B 顆粒連續性隨機撞擊下之鍵結破壞趨勢 ...	119
圖 5.30 軟岩材料 B 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢 ...	119
圖 5.31 顆粒連續性隨機撞擊下軟岩材料鍵結破壞趨勢及變異程度	120
圖 5.32 顆粒連續性隨機撞擊下軟岩材料體積破壞趨勢及變異程度	121
圖 5.33 虛擬材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢	122
圖 5.34 虛擬材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢	122
圖 5.35 模擬之楊氏模數與破壞體積關係	124
圖 5.36 張力強度與破壞體積關係	125

第一章 緒論

1.1 研究動機

近年來國內不少河川因流況的改變及不穩定，特別於豐水期時，跨河構造物之下游經常發生河床、河岸大幅沖蝕，不但危及河床、河岸本身之穩定，甚而威脅構造物安全或危及公共用水。然而以往土木工程對於沖蝕的關心問題多只侷限於沖積層之橋樑橋墩沖蝕或跨河構造物之穩定性，卻往往忽略了岩床(rock-bed)、岩岸(rock-bank)也可能受到相當程度沖蝕之機會。

台灣豐水期與枯水期之水量變化非常之大，因溪水暴漲流速暴增造成岩床沖蝕，不但造成河道的不穩定，也往往造成河床上之跨河結構物破壞，岩石河床沖蝕的問題對於台灣來說是個不可忽視的問題。當岩床或岩岸屬於地質年代較為年輕之岩層(如台灣西部麓山帶之許多河川中游河床，常為上新世晚期至更新世之卓蘭層或更新世之頭嵛山層)或弱面較為發達之破碎岩體時，岩石河床沖蝕尤其更為嚴重。

現有絕大部分既有之岩床下切或沖蝕速率模式多屬於定性模式，將岩床下切率以簡化的方式表示成流功或平均河床面剪應力之比例關係。此類合理化公式主要屬於在大範圍之定性歸納地形之演變，然而岩床沖蝕機制各不相同，下切或磨損之模式也應隨之不同，所以此

類合理化公式不可適用於所有地區，對於小範圍岩石河床沖蝕之預測極有可能無法適用。國內對於岩床的沖蝕行為的相關研究更為有限，在河道沖蝕行為的研究上，僅侷限於沖積土壤之河床沖蝕。以往針對岩床下切或沖蝕之研究乃多侷限於流域尺度，地質學學者關心的問題多集中於大範圍之沖蝕趨勢對地形地貌發育之因果關係，幾乎都未曾由力學觀點研究岩床沖蝕行為的微觀特性，進而定量探討其重要之影響因子。

欲由力學觀點研究岩床沖蝕行為，理應盡可能透過材料沖蝕試驗來獲得豐富之試驗數據，然而一方面由於室內材料沖蝕試驗中深受試驗儀器的試驗能力所限制，另一方面想要取得大批完全一致、無擾動的岩床試體以供材料沖蝕試驗之用也往往難如願，因此欲藉由一系列之岩床材料沖蝕試驗來探討岩床沖蝕之力學行為其實並非很容易，資料仍相當有限。本研究因而透過微觀數值模擬，期望以個別元素法做微觀模擬發展出適當的模型，將微觀數值模擬視為虛擬材料沖蝕試驗，探討影響軟岩沖蝕之重要因子，並期利用此模型探討不同岩性之沖蝕行為。

1.2 研究目的

河川於岩床河道之下切沖蝕可歸諸於不同之形成機制，機制可

能有多種型態，本研究將針對磨蝕以及顆粒彈跳撞擊兩種沖蝕機制探討。本研究運用個別元素法之程式 PFC^{3D} 為工具，以虛擬軟岩試體進行沖蝕機制數值模擬，期望針對磨蝕及顆粒撞擊兩種沖蝕機制，建構數值之微觀模擬模型，並由分析結果了解影響沖蝕機制與行為之重要因子，以及沖蝕過程中之動能變化與破壞狀況，作為未來建立巨觀力學模型組合律之資料庫。

1.3 研究架構

本文共分六章探討軟岩沖刷機制及模擬沖刷機制方法，研究架構如圖 1.1 所示。除本章為緒論以外，其餘諸章將簡述如下。

- (1) 第二章：主要針對各種沖蝕機制加以介紹並整理前人相關研究之理論，並介紹 PFC3D 之基礎理論及其運算方式。
- (2) 第三章：為研究方法之介紹。主要介紹數值模擬之模型建立方法以及磨蝕沖蝕及顆粒彈跳撞擊沖蝕機制之模擬方法。
- (3) 第四章：針對沖蝕所使用的岩體建立機制作加以介紹，詳述與探討有關試體參數率定的過程。
- (4) 第五章：分別陳述及討論磨蝕沖蝕及顆粒彈跳撞擊沖蝕機制的模擬試驗結果。
- (5) 第六章：提出本研究的結論及建議。

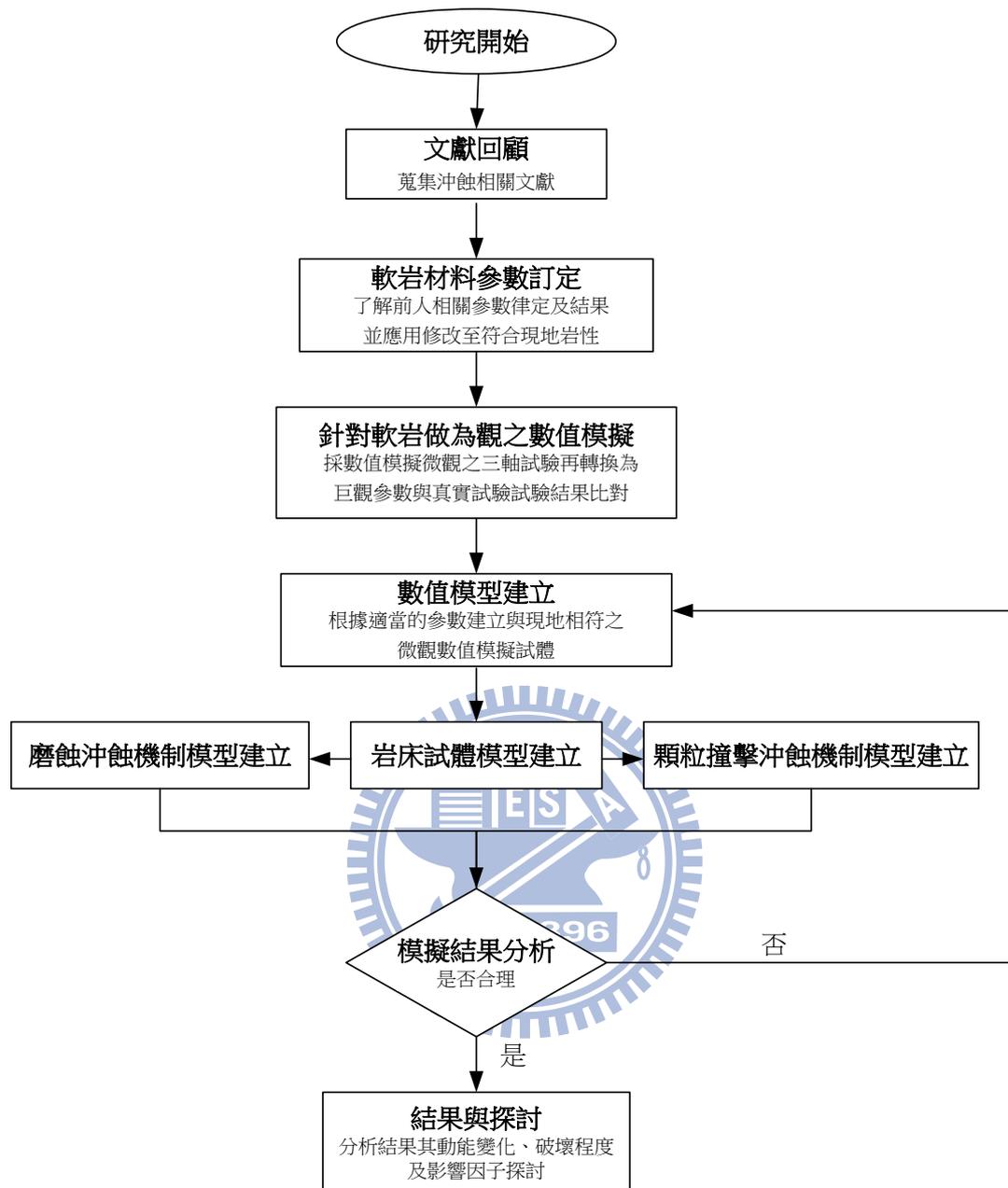


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章分別討論沖蝕機制、前人相關研究以及 PFC3D 理論及運算方式等之相關文獻。2.1 節介紹岩床沖蝕下切速率之一般模式。岩床之沖蝕機制主要分為磨蝕沖蝕機制、塊體抽離機制、穴蝕機制、顆粒彈跳撞擊等，2.2 節分別介紹該機制的理論。2.3 節說明前人曾做過之相關研究及試驗，2.4 至 2.5 節針對本研究所選用的程式 PFC3D 之基本建構的原理、其運算的方式、以及相關應用加以介紹。2.6 節為綜合討論。

2.1 岩床沖蝕下切模式

Howrad & kerby (1983) 蒐集了許多河川的縱剖面歷年變化情形，探討岩床之沖蝕下切速率會與河川之流水流速以及河川沉積料輸送對岩床所造成磨蝕剪應力相關，因此假設岩床沖蝕之下切速率 E 需與兩部分相關，一為河川沈積料輸送(河床載、懸浮載)對岩床面所造成之磨蝕剪應力 τ_b ，一為啟動岩床開始侵蝕之剪應力門檻值 τ_c 。(如式 2.1)

$$E \propto (\tau_b - \tau_c)^a \quad (2.1)$$

式中 a 為剪應力的的幂函數，用來建立床面剪應力與沖刷速率之間的關係。

若是針對河川流域之地形地貌條件來探討，Howrad & kerby (1983)則是更進一步針對成磨蝕剪應力的河川沈積料之來源來探討，將岩床沖蝕下切速率 E 與上游集水區面積 A 、縱剖面坡度 S 建立關係式如下：

$$E = KA^m S^n \quad (2.2)$$

式中 K 、 m 、 n 皆為模式中的參數，由其蒐集的河川的縱剖面歷年之變化迴歸而得到之參數。根據 Seidl & Dietrich (1992) 蒐集河川資料歸納許多流域之 (m/n) 比值，發現當河川坡度越大時，流速之拖曳力也隨之增大，岩床之沖蝕速率也隨之受到影響。另外也指出岩床下切也會受到由局部地形的影響。Whipple(2000)也同樣的提出當河道有階狀落差時，其下游流域之局部沖蝕情形會較為劇烈，並且在不同岩性之岩床下其 n 值也會有所差異。Wohl & Ikeda (1998) 針對日本三條河川進行調查，研究其岩床之沖蝕速度，發現河川岩床材料性質會影響驟降點(knickpoint)的形成、碎屑剝離、水流能量消散，進而影響了岩床下切的能力。因此可看出 (m/n) 值之影響性有限，應與現地之地形地貌及岩性相互考慮之。

根據前述之學者的研究，可知岩床沖蝕下切速率之影響因子不只為水流條件、岩床材料性質，現地岩床弱面的間距、節理之情況也會改變岩床沖蝕速率。

2.2 岩石河床的沖刷機制

由於岩床上之護甲層若遭過度沖蝕，緊接著河床裸露直接遭到水流之沖蝕作用，進而構成對河岸上之構造物造成威脅。而根據過去學者研究中，河川於岩床河道之下切沖蝕機制雖形成之原因有不同之機制，但大致可分類為下列型態。底床遭到純水流之剪力作用或是水流所攜帶之懸浮載(河床載)造成之剪力磨蝕作用(abrasion)，造成顆粒尺度逐漸磨損作用(wear)、岩床受岩石顆粒彈跳撞擊所造成之撞擊破壞的磨損作用(saltation)、岩塊抽離(plucking)作用、與穴蝕(cavitation)作用。以下章節會對於各種機制做相關的介紹。

2.2.1 磨蝕沖蝕(abrasion)

當岩床為完整岩盤，或是弱面間距相當大(弱面間距 $>1\text{m}$)的時候，此時岩盤沖蝕的主控機制為水流中攜帶懸浮載或河床載，不斷隨著水流流過磨蝕岩體表面，使得岩體表面膠結的顆粒脫離而造成磨蝕沖蝕(abrasion)的現象(如圖 2.1)。若是在流況突然改變的情況下，由於顆粒會隨著水流旋轉磨削，造成局部的磨蝕沖蝕情形有可能會更加劇烈，此時便容易形成滑槽(flute)與壺穴(pothole)等沖蝕現象。



圖 2.1 岩床遭流水中懸浮載顆粒磨蝕情況圖(攝於八掌溪)

Whipple et al. (2000)針對阿拉斯加現地岩床沖蝕情況探討中，認為完整岩盤或是弱面間距大於1公尺的岩盤所受之沖蝕現象主要以磨蝕(abrasion)現象為主，且並藉由水工模型驗證，主要之磨蝕現象集中於地形改變產生障礙之下游側，河床載磨損岩床表面使得岩盤表面較亮且光滑，產生了許多的渦流，並且有滑槽(flute)跟壺穴(pothole)的情況伴隨之。(如圖 2.2)

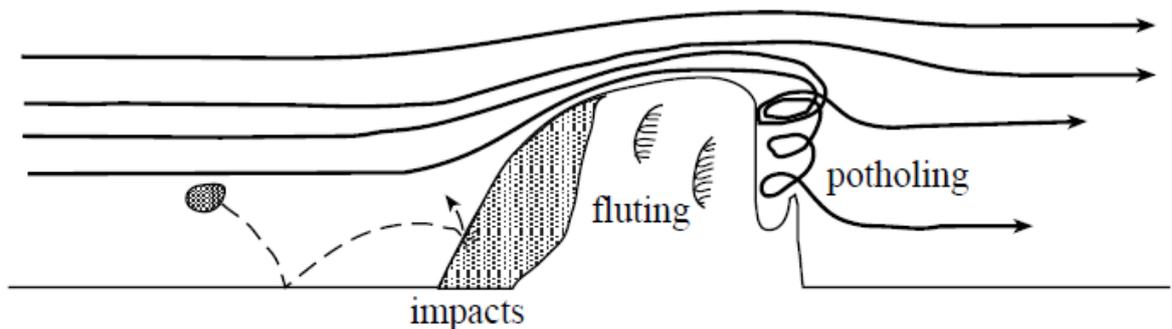


圖 2.2 磨蝕沖蝕過程示意圖(WHIPPLE ET AL. , 2000)

2.2.2 顆粒彈跳撞擊(saltation)

Gilbert(1877)主張在河川沉積料供應中一方面可扮演磨蝕岩床之工具性效應(tool effect)，另一方面又可扮演覆蓋保護之覆蓋性效應(cover effect)，河床載顆粒大小控制著河床受河床載撞擊的頻率以及水流帶動顆粒運動的軌跡，通常最大岩床磨蝕率也會出現在相對中等程度之河川沈積料供應條件下。

Whipple & Tucker(1999)探討河床載顆粒彈跳對於岩床沖蝕機制之影響中，認為大顆粒彈跳對於岩性較軟弱及節理發達岩體的岩塊之沖蝕程度應遠大於完整岩塊的沖蝕程度。

Sklar & Dietrich(2004)提出一個針對河床載彈跳撞擊(saltation)所造成的岩床沖蝕模式。其基本假設為岩床磨損率會隨著河床流量與河床垂直之分量正相關，此模式之基本概念為假設岩床磨損率 $E = V_i I_r F_e$ ，式中 V_i 為每次顆粒撞擊岩床所損壞分離之岩石量， 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。

在 Sklar & Dietrich (2004) 的文獻中也提到岩床磨損情況應與河床載之顆粒彈跳距離相關，最大岩床磨蝕率會出現於中等程度之岩床面剪應力條件下。相對應 Gilbert(1877) 提出河川中沉積料所扮演之角色，兩者相互呼應下可知，河川沈積料供應量與顆粒大小強烈影響著岩床下切的速率。

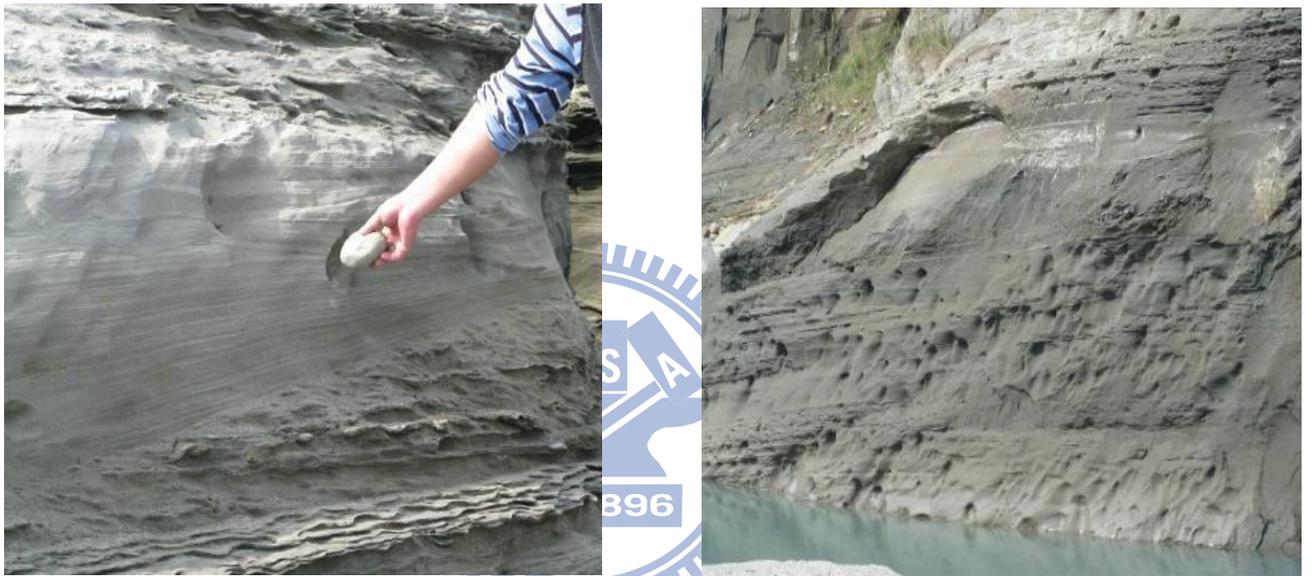


圖 2.3 水夾帶顆粒撞擊岩體之撞痕(攝於大安溪)

2.2.3 塊體抽離(plucking)

Annadale(1995) 提出岩塊抽離之過程是由岩塊由節理面或弱面逐漸頂開(wedging)，接著造成岩塊塊體離開岩床(dislodgement)，接著岩塊隨著水流被帶走(displacement)。如圖 2.4，此示意圖為一河流流向與岩床岩層呈逆向的範例來說明岩塊抽離的過程。

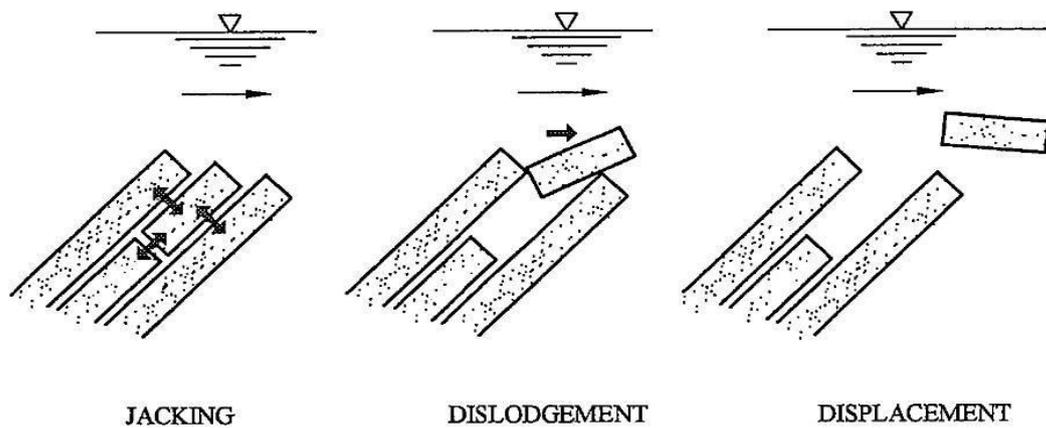


圖 2.4 岩塊抽離示意圖(ANNADALE, 1995)

Whipple et al. (2000)觀察到岩體弱為裂隙較多或是節理間距小於 1 公尺的岩體之沖蝕現象大多皆以岩塊抽離(plucking)的現象為主。在岩塊抽離的過程中，首先因河床載顆粒彈跳撞擊造成弱面的間距擴大並且水流中的小砂礫頂開了裂隙，使得裂縫受水力作用而逐漸擴大裂縫，造成裂隙逐漸擴張延伸至塊體底部，底部的上舉力與表面之拖曳力形成了壓力差，塊體便逐漸鬆動直至被帶離。(如圖 2.5)

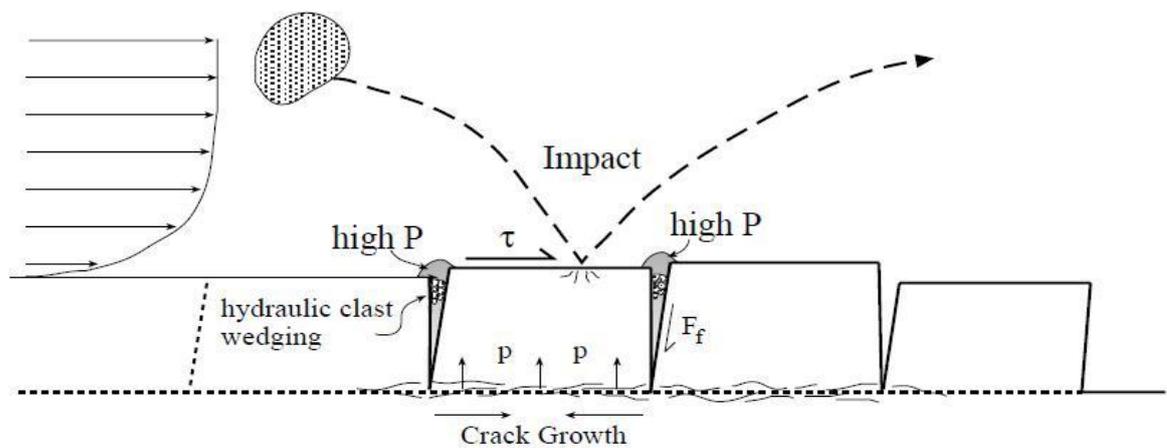


圖 2.5 岩塊抽離機制(WHIPPLE ET AL., 2000)

若水的侵蝕能量大於岩石抗沖蝕能力時，岩床就有可能產生塊體抽離的現象。



圖 2.6 現地塊體抽離情形(攝於大安溪)

2.2.4 穴蝕(cavitation)

當水流受到障礙物或階狀落差造成流況改變時，其下游側發生顯著之岩床沖蝕，大多是源自水流中夾帶懸浮載之磨蝕沖蝕貢獻。懸浮載沖蝕效應會受局部河床地形地貌影響很大，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，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, 2000)。



圖 2.7 八掌溪觸口攔河堰沖蝕情況

2.3 室內沖蝕試驗

前述皆為岩床之沖蝕機制以及估算之理論，然而學者也針對沖蝕機制做了許多試驗，現今之室內試驗大多以水槽試驗進行定量之分析在特定條件下來模擬岩床之沖蝕機制，再推導出經驗式。

以下針對磨蝕沖蝕(abrasion)以及顆粒彈跳撞擊(saltation)兩種沖蝕機制，介紹前人所做過之相關試驗。

2.3.1 磨蝕沖蝕(abrasion)之室內模擬試驗

Briaud, et al. (1999)提出了一套估計橋墩周圍凝聚性土壤局部沖蝕速率的程序，簡稱為SRICOS (Scour Rate In Cohesive Soils)。

SRICOS 係利用一套試驗儀器 EFA(Erosion Function Apparatus)，來評估凝聚性土壤之抗沖蝕能力。

試驗儀器如圖 2.8 所示，其試驗步驟為先於現地使用薄管取樣之方式，取出所需之不擾動土樣後置於 EFA 儀器內，將管路充滿水流，流速設定為定值(分別為 0.3m/s、1m/s、1.5m/s、2m/s、3m/s、4.5m/s、6m/s)，接著使用活塞將試體向薄管上方頂出 1mm，記錄耗時將突出之 1mm 土樣完全沖蝕掉，即可利用沖蝕走之厚度除以所需時間即可得其沖蝕速率 E，重複試驗於不同流速下沖蝕掉之單位厚度土樣的時間，

會對應到土樣前緣不同之剪應力，即可得不同之沖蝕速率 E。(如圖

2.9)

EFA 試驗所得之沖蝕率(mm/hr)為 1.896

$$\dot{z} = \frac{h}{t} \quad (2.3)$$

h : 沖刷之試體厚度

t : 沖蝕掉之單位厚度土樣的時間

Briaud (2001)係藉由EFA試驗儀提出初始抗沖蝕能力以啟動沖蝕所需剪應力 τ_c 與初始之沖刷速率 S_i 來表現其相關關係(如圖2.10)。並且藉由EFA試驗儀得到之試驗結果推估現地橋墩一定時間之沖刷深度,再藉由沖蝕率與流速之關係,將其分類為六種沖蝕指標,如圖2.11所示,各為非常高、高、中等、低、非常低。

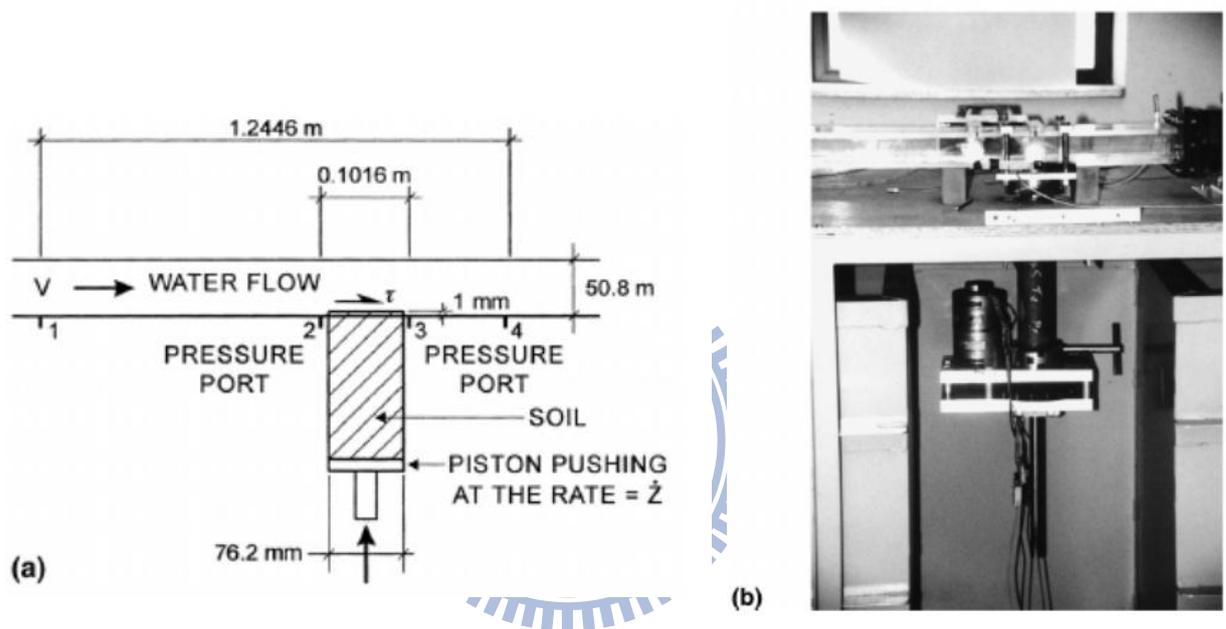


圖 2.8 (A) EFA 試驗示意圖 (B)EFA 試驗儀器照片(BRIAUD, 2001)

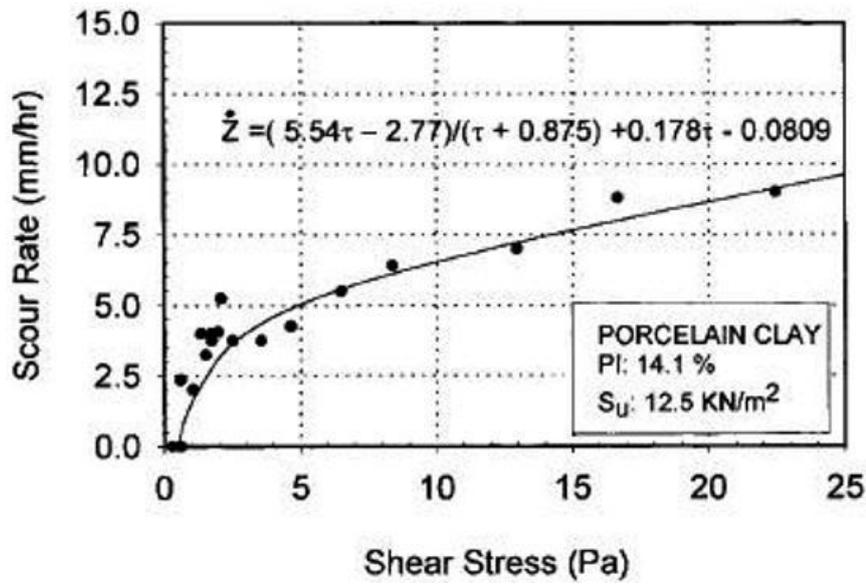


圖 2.9 不同剪應力與沖蝕速率關係(BRIAUD ET AL. 1999)

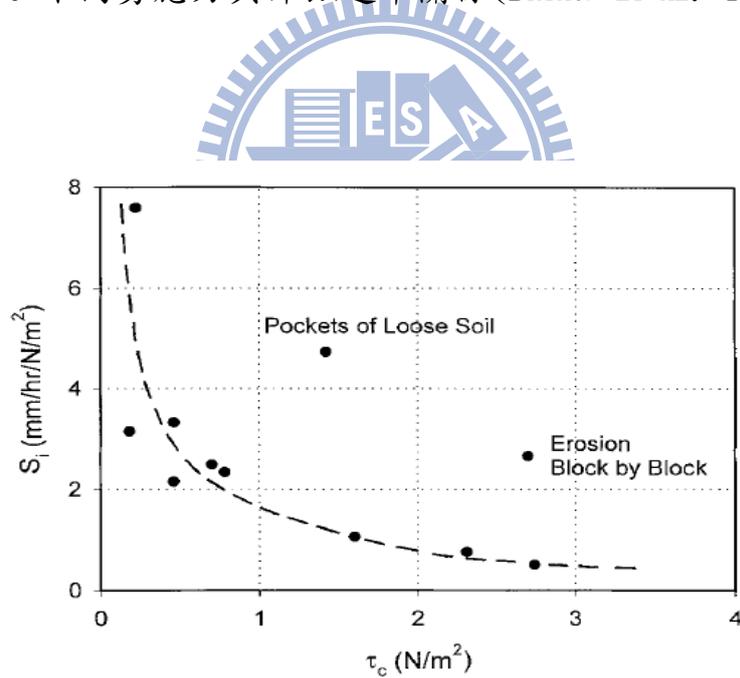


圖 2.10 臨界剪應力門檻值與初始沖刷速率關係圖(BRIAUD, 2001)

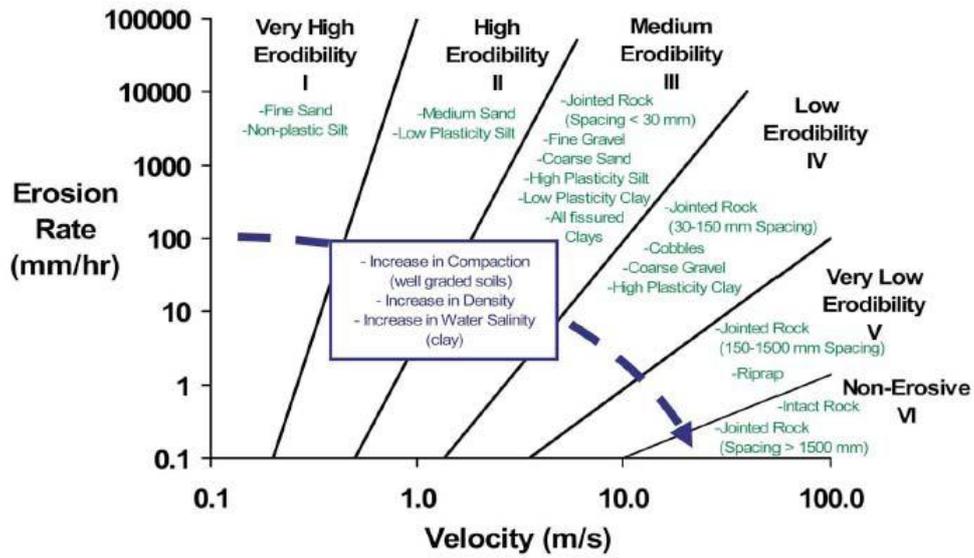


圖 2.11 沖蝕指數分類表 (BRIAUD, 2008)

郭炳宏(2009)以 Briaud 的 EFA 試驗為參考，建立多功能軟岩沖蝕試驗儀(如圖 2.12)，針對台灣麓山地區之軟岩，取得岩樣試體後，水流以定速通試驗段，並且量測沖蝕掉單位厚度土樣的時間，接著用沖蝕走之厚度除以所需時間即可得其沖蝕速率 E ，針對兩種岩性之軟岩得到岩樣試體表面沖蝕速率與水流剪應力關係，如圖 2.13 所示，兩者呈現線性遞增之關係。

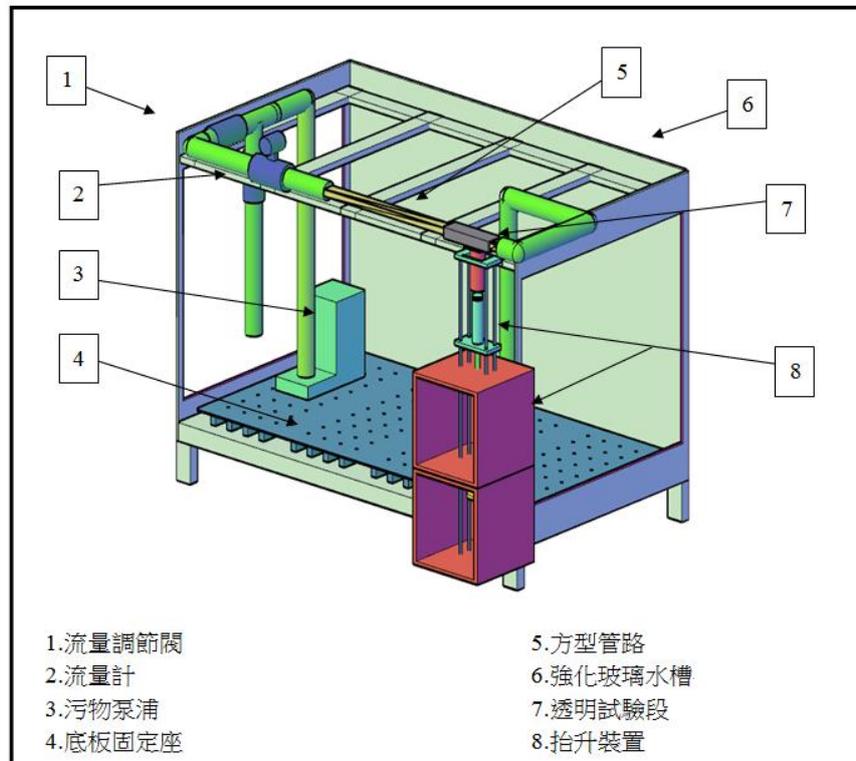


圖 2.12 多功能軟岩沖蝕試驗儀 (郭炳宏, 2009)

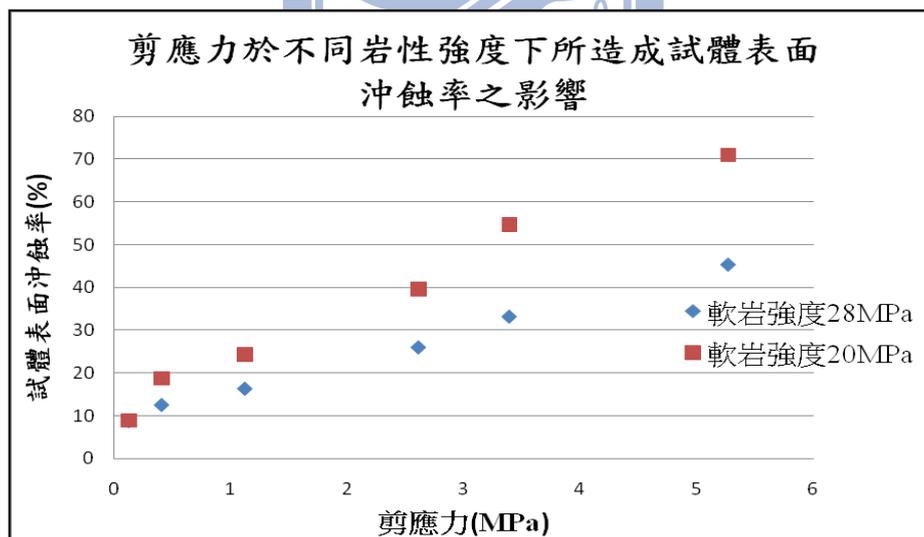


圖 2.13 不同岩性下之剪應力與岩樣沖蝕率關係圖 (郭炳宏, 2009)

2.3.2 顆粒彈跳撞擊 (saltation)之室內模擬試驗

Sklar & Dietrich (2001)為了模擬現地岩床受到顆粒彈跳磨蝕，建立了一小型的顆粒磨蝕試驗機(圖 2.14)。利用馬達帶動圓桶內的水，在水中加入顆粒對岩石試體進行模蝕。此試驗主要在模擬彈跳磨蝕沖蝕，量測不同岩層在各顆粒大小磨蝕下的沖蝕率，找出各情況下對於沖蝕率的影響。如圖 2.15，使用石英顆粒與礫石顆粒分別對相同的岩性磨蝕，得到沖蝕率與試體張力強度關係圖，所得張力強度與沖蝕率之關係式可得知，試體的張力強度越高沖蝕率越低。磨蝕過程中，固定流速下，顆粒越大造成之沖蝕率越高。(圖 2.16)

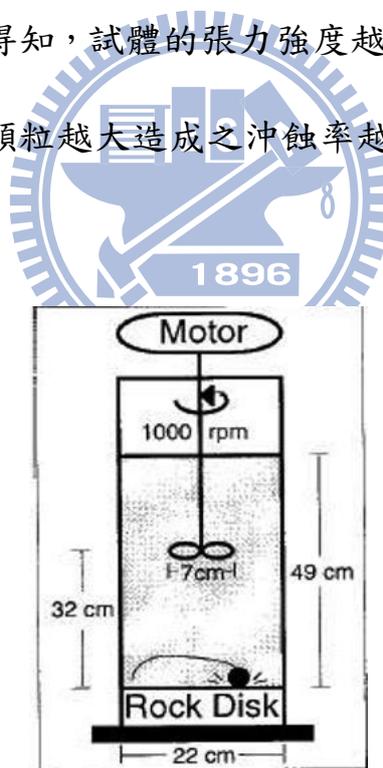


圖 2.14 顆粒磨蝕試驗機(SKLAR & DIETRICH, 2001)

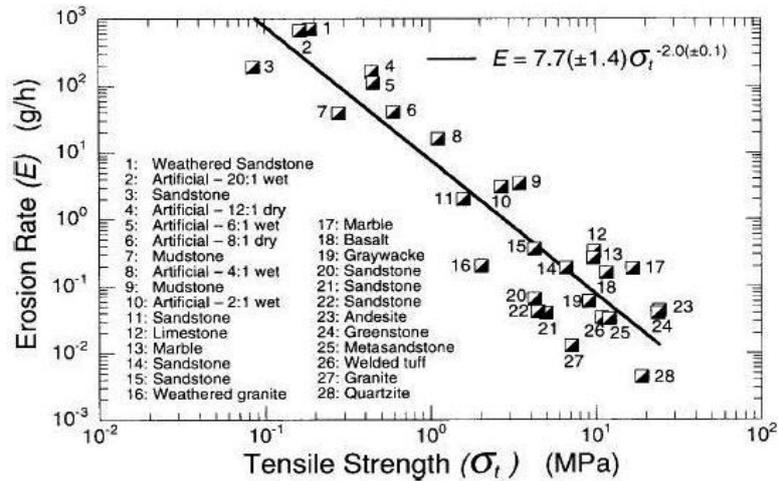


圖 2.15 岩床材料張力強度與沖蝕速率之關係 (SKLAR, 2001)

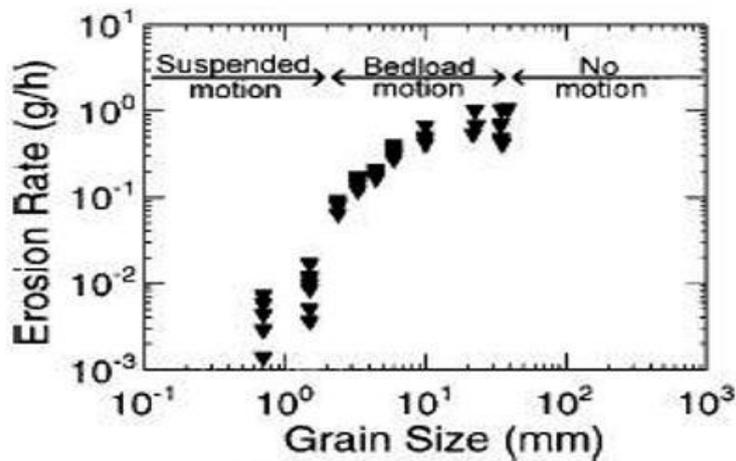


圖 2.16 河床載之粒徑與沖蝕速率之關係

2.4 數值模擬之理論基礎

有關顆粒材料力學之行為探討與模擬，早期大多採用離散元素法 (the discrete element method, **DEM**)來模擬，但也有部分學者使用有限元素法(the finite element method, **FEM**)來進行顆粒集合體之數值模擬，但後者之缺點為當接觸點消失或產生時，皆須重新計算其勁度，所以其計算較為耗時，此論文便採用離散元素法作為運算之方

法。

為探討軟岩材料於沖蝕機制下其宏觀力學之微觀機制，本研究使用採離散元素法為基本理論之顆粒流分析軟體(Particle flow code, PFC)，來進行微觀之數值模擬。本節將針對離散元素法之理論及背景來做介紹。

2.4.1 離散元素法

Cundall(1971)提出離散元素法(Discrete element method, DEM)，最初用以模擬分析岩塊破壞之問題。隨後 Cundall & Strack(1979)提出可適用於土壤之堆積的材料顆粒力學模式的探討，該理論為針對材料性質為顆粒材料或不連續形體的力學問題，以牛頓第二定理計算及力與位移量之分析法。

2.4.2 離散元素法之定義

在離散元素法中，需考慮不連續體之顆粒材料性質、接觸方式以及接觸之偵測與紀錄等三項性質。顆粒材料性質簡單區分為可變形體以及不可變形之剛性體。顆粒接觸方式分為軟性接觸(Soft contact)以及剛性接觸(Hard contact)，軟性接觸為允許顆粒接觸產生變形，能量在顆粒接觸之間傳遞並消耗；相對的，剛性接觸假設材料為剛性體，不會產生任何變形，運動過程中也不會產生任何的消耗。接

觸方式則為不連續材料於運動前確認材料之間之接觸方式，並且能夠確認接觸點分離時的紀錄。

根據 Cundall(1989)對離散元素法的定義，其必須具備下列功能：

- (1) 顆粒材料允許產生有限度的位移及旋轉，並可允許其完全分離。
- (2) 計算過程中能自動偵測新的接觸點，並且能消除分離的接觸點。

2.5 PFC 軟體之概述

PFC 軟體乃使用離散元素法為理論基礎，由顆粒堆積體以及牆面來構成模型之基礎，其每個顆粒體之間為獨立運作的，顆粒之間之相互關係由鍵結來控制，透過顆粒之間的運動以及接觸力的能量傳遞過程來描述其力學行為軟體的運算過程中遵循著離散元素法之原則，允許有限的位移以及轉動，並且能夠自動偵測新的接觸點，同時也能夠消除分離的接觸點。PFC 軟體也依據處理的對象分為 PFC^{2D} 之二維空間以及 PFC^{3D} 之三維空間等兩種維度不同的軟體。本研究針對沖蝕機制的微觀模擬，建立三維空間之模型，乃採用 PF^{C3D} 軟體處理。本節將針對分析軟體 PFC^{3D} 之理論及邏輯詳加敘述。

2.5.1 PFC 之基本假設

PFC 之基本假設為下：

- (1) 顆粒視為不可變形之剛性體。
- (2) 顆粒接觸之面積極小(如接觸於一點一般)，可忽略之。
- (3) 顆粒相互作用只會發生於彼此的接觸。
- (4) 顆粒之間的接觸允許極小區域的重疊(overlap)。
- (5) 顆粒之間可存在具勁度之鍵結(bond)，且此鍵結可因受力而引致破壞。
- (6) 全部的顆粒皆為球狀；但可利用 clump 指令連結顆粒創造出任意形狀的塊體。每個clump皆假設為剛體且具有可變形之邊界並包含已產生重疊的顆粒。

根據其基本假設，試體模型可由眾多的顆粒材料堆疊而成，顆粒亦可模擬為凝聚性材料。顆粒接觸透過鍵結方式，傳遞力與能量，其接觸運動過程適用力與位移法，藉由運動過程中接觸力傳遞與顆粒運動軌跡來探討其能量的消散及轉移。

2.5.2 PFC 之運算原理

PFC 之時階(time step)採運動定律(Law of motion)來計算顆粒

之間之運動。運動開始時，每個時階皆會利用顆粒與牆的相對位置得到每組接觸點，經由力與位移的關係式得到新的接觸點。接著，作用顆粒之接觸力產生的力及力矩，透過運動定律隨著運動過程，不斷的計算顆粒新的位置及速度。(如圖 2.17)

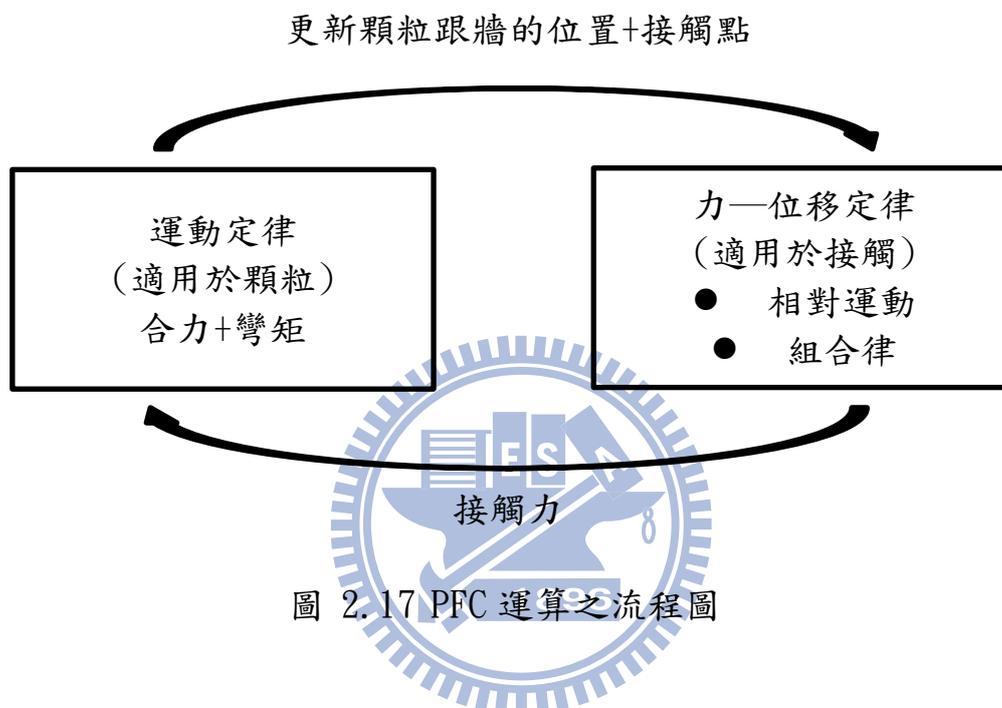


圖 2.17 PFC 運算之流程圖

2.5.3 力—位移定律

力—位移之關係式為兩接觸物體之相對位移以及作用在物體上之力與接觸力之間之關係。對於顆粒與顆粒之間抑或是顆粒與牆之間，接觸力形成為接觸點 $x_i^{[c]}$ 。其單位法向量為 n_i 。球與球接觸中，其單位法向量之方向為兩球心連線之方向；球與牆接觸中，其法向量則為球心與牆之最短距離之方向。

力—位移的關係式可以分為球與球接觸以及球與牆之接觸兩種

模式。球與球接觸模式如圖 2.18，其法向量 n_i 之定義為

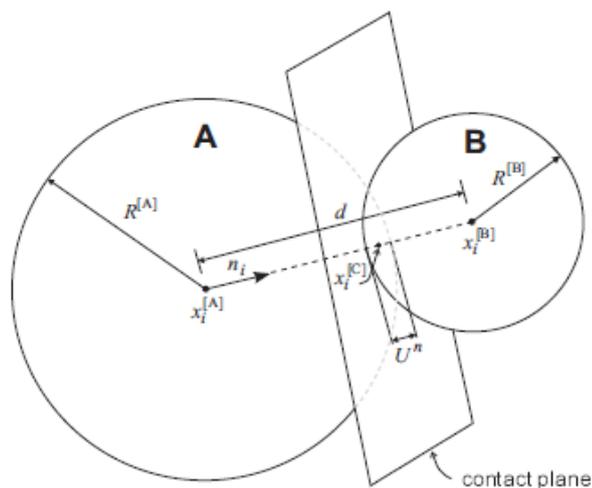


圖 2.18 球與球接觸模式圖

$$n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d} \quad (2-4 \text{ 式})$$

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

d ：兩球心之距離

$$d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})} \quad (2-5 \text{ 式})$$

球與牆接觸模式如圖 2.19，其法向量隨著球心位置不同其方向也會有所不同，如圖 2.20 所示，當球心位置若位於 2、4 區域時，其法向量將會垂直牆面；若位於其他區域時，其法向量則為球心與牆之端點連線之方向。

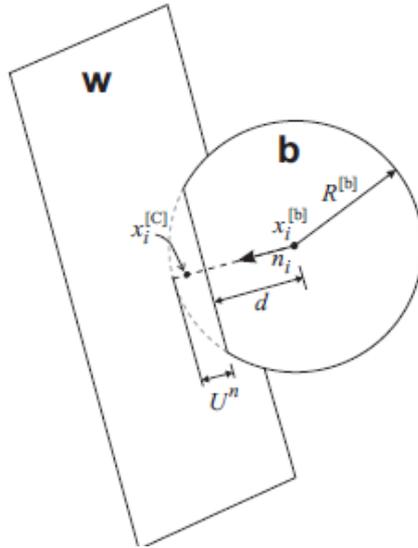


圖 2.19 球與牆接觸模式圖

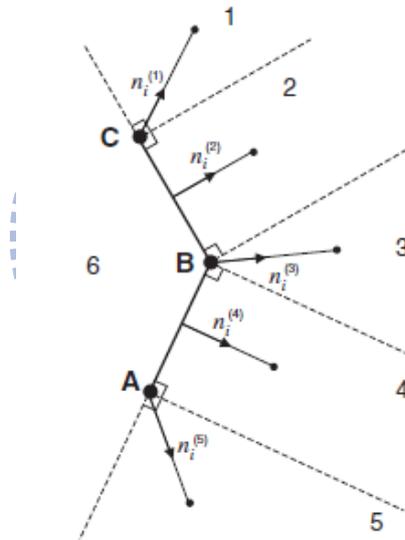


圖 2.20 球與牆接觸模式下，法向量判斷示意圖

接觸時之重疊量 U^n 其定義為法向量的相對接觸位移：

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} - R^{[B]} - d & (\text{ball} - \text{ball}) \\ R^{[b]} - d & (\text{ball} - \text{wall}) \end{cases} \quad (2.6)$$

$R^{[\emptyset]}$ ：球 \emptyset 之半徑

接觸點位置的定義如下：

$$x_i^{[c]} = \begin{cases} x_i^{[A]} + \left(R^{[A]} - \frac{1}{2} U^n \right) n_i & (\text{ball-ball}) \\ x_i^{[b]} + \left(R^{[b]} - \frac{1}{2} U^n \right) n_i & (\text{ball-wall}) \end{cases} \quad (2.7)$$

接觸力 F_i 可分為正向分力 F_i^n 及剪向之分力 F_i^s (在球與球接觸或球與牆接觸皆亦然如此)：

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (2.8)$$

正向分力計算如下：

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (2.9)$$

K^n ：接觸點之正向勁度

其接觸點之相對速度 V_i 在球與球接觸之間為球 B 與球 A 之相對速度，在球與牆接觸模式中為接觸點上牆相對球之速度。

$$V_i = (x_i^{[c]})_B - (x_i^{[c]})_A \quad (2.10)$$

接觸點之速度可分為正向速度分量 V_i^n 及剪向速度分量 V_i^s 。其剪向速度分量可描述如下：

$$V_i^s = V_i - V_i^n = V_i - V_j n_j n_i \quad (2.11)$$

剪向的位移增量在單位時階時計算如下：

$$\Delta U_i^s = V_i^s \Delta t \quad (2.12)$$

以及計算剪向彈性的接觸力增量計算如下：

$$\Delta F_i^s = -K^s \Delta U_i^s \quad (2.13)$$

K^s ：為剪向勁度

在剪向之新的接觸力即為原有的剪向接觸力加上剪向的位移增量，即可求得。正向之接觸力也亦然求之。

2.5.4 運動定律

一個剛性體顆粒受合力及彎矩作用，可表達為該顆粒的運動的平移以及轉動。質量中心的位移量為 x_i 、速度為 \dot{x}_i 、加速度為 \ddot{x}_i ，角速度為 ω_i 、角加速度為 $\dot{\omega}_i$ 。

運動方程式可表示為兩部分，一為合力與平移，另一為轉動與合力矩。

平移運動之方程式可寫為：

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (2.14)$$

F_i ：為合力

m ：顆粒之質量

g_i ：重力加速度

轉動之運動方程式可寫為：

$$M_i = \dot{H}_i \quad (2.15)$$

M_i ：顆粒上之合力矩

\dot{H}_i ：角動量

以上之關係式為局部系統為顆粒之質量中心，若將局部系統轉為顆粒之慣性主軸時，方程式將會減為 Euler' s 運動方程式：

$$\begin{aligned}
M_1 &= I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 \\
M_2 &= I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 \\
M_3 &= I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1
\end{aligned} \tag{2.16}$$

I_1 、 I_2 、 I_3 ：顆粒之主慣性矩

對三維之球體顆粒而言，任何通過質量中心之局部系統皆為主軸系統，且其三個方向的慣性矩皆相同，並可簡化為下式：

$$M_i = I \dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{5} m R^2\right) \dot{\omega}_i \tag{2.17}$$

利用有限差分法去處理運動方程式，在時間為 $(t \pm n\Delta t/2)$ 之期間下，其速度計算式如下：

$$\dot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \tag{2.18}$$

$$\dot{\omega}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left(\omega_i^{(t+\Delta t/2)} - \omega_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \tag{2.19}$$

帶入式2.14及式2.16，可達到時間於 $(t + \Delta t/2)$ 之速度如下：

$$\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \tag{2.20}$$

$$\dot{\omega}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{\omega}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{M_i^{(t)}}{I} \right) \Delta t \tag{2.21}$$

最後，在顆粒之質量中心之速度可得新的速度如下：

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \tag{2.22}$$

2.5.5 PFC 之接觸組合模式

PFC 藉由每一接觸點之組成模式模擬材料之力學行為，主要分為三種接觸組成模式：接觸之勁度模式、滑動模式、鍵結模式。以下將針對

三種接觸組成模式特性做介紹。

(1) 接觸之勁度模式：

重複上述力與位移關係式之在正向及剪向之接觸勁度相對接觸力與相對位移，正向勁度為割線勁度，其式與總正向力與總正向位移相關。

$$F_i^n = K^n U_i^n n_i \quad (2.23)$$

剪向勁度為切線勁度，

$$\Delta F_i^s = -K^s \Delta U_i^s \quad (2.24)$$

依不同之接觸模式，接觸勁度之計算方式也隨之不同。

在 PFC 中分為兩種接觸勁度模式：線性模式以及 Hertz 模式。

(a) 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，皆可用於球與球接觸、球與牆接觸兩種接觸模式。線性模式之接觸勁度計算由正向及剪向勁度串聯表示之，正向勁度及剪向勁度分別表示如下：

$$K^n = \frac{K_n^{[A]} K_n^{[B]}}{K_n^{[A]} + K_n^{[B]}} \quad (2.25)$$

$$K^s = \frac{K_s^{[A]} K_s^{[B]}}{K_s^{[A]} + K_s^{[B]}} \quad (2.26)$$

式中[A]、[B]表示兩接觸之物體。在線性模式中，正向割線勁度 K^n 與正向切線勁度，因此表示為

$$K^n \equiv \frac{dF^n}{dU^n} = \frac{dK^n U^n}{dU^n} = K^n \quad (2.27)$$

(b) Hertz 模式

當接觸勁度為非線性模式時，及使用 Hertz 模型，為根據 Mindlin(1949)提出之理論，並且簡化修改之。目前此模型主要適用於三維之球體之接觸行為中，其正向接觸勁度及剪向接觸勁度關係式如下：

$$K^n = \left[\frac{2(G)\sqrt{2R}}{3(1-\nu)} \right] \sqrt{U^n} \quad (2.28)$$

$$K^s = \left[\frac{2((G)^2 3(1-\nu)\bar{R})^{1/3}}{2-\nu} \right] |F_i^n|^{1/3} \quad (2.29)$$

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

(2) 滑動模式

滑動模式除了在使用接觸鍵結模式以外，皆為有效存在於模型中。在平行鍵結模式中也為同時並行存在的狀態。滑動行為是由接觸點之摩擦係數 μ 來定義，在此 μ 是指兩接觸物體間之最小摩擦係數。接觸之滑動行為，是由計算最大允許剪向接觸力來判斷顆粒是否發生滑動，如下式：

$$F_{max}^s = \mu |F_i^n| \quad (2.30)$$

若 $|F_i^n| > F_{max}^s$ ，在下一時階時必會發生滑動現象且 $F_i^s = F_{max}^s$ ：

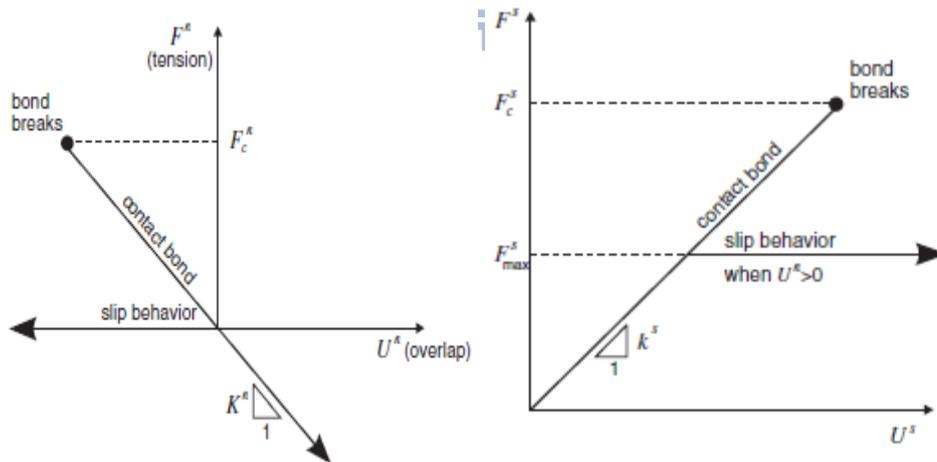
$$F_i^s \leftarrow F_i^s \left(\frac{F_{max}^s}{|F_i^s|} \right) \quad (2.31)$$

(3) 鍵結模式

PFC^{3D} 允許顆粒接觸使用鍵結互相連結。兩種標準鍵結模式分別為接觸鍵結以及平行鍵結。兩種鍵結皆可以想像為一種顆粒間之膠結作用。以下分別針對兩種鍵結特性做介紹：

(a) 接觸鍵結

接觸鍵結可以想像為在接觸點有一定值之正向及剪向勁度的一對彈性彈簧。這兩個彈簧可以描述為一個是正向強度，一是剪向強度。接觸鍵結可抵抗顆粒之滑動，所以此時不考慮滑動行為，即是由接觸之鍵結強度來判斷。接觸鍵結由正向鍵結強度 F_c^n 及剪向鍵結強度 F_c^s 來定義。其正向其剪向強度與顆粒之相對位移關係如圖 2.21。 F^n 、 F^s 為正向及剪向接觸力， U^n 、 U^s 為重疊量之正向分量及剪向分量，若 $U > 0$ 代表產生重疊。



(a) 正向分量之接觸力

(b) 剪向分量之接觸力

圖 2.21 接觸力與顆粒相對位移關係圖

(b) 平行鍵結

平行鍵結為假設顆粒間存在一圓形或矩形斷面之彈性連結之塊體，如圖 2.22。平行鍵結用以模擬膠結性顆粒材料之連結，與前者接觸鍵結之最大差異為此彈性連結之塊體不僅可傳遞力並可傳遞彎矩，同時與滑動模式為同時存在。當顆粒所受之應力超過了鍵結強度，顆粒連結之平行鍵結破壞，顆粒失去連結成為獨立之顆粒。

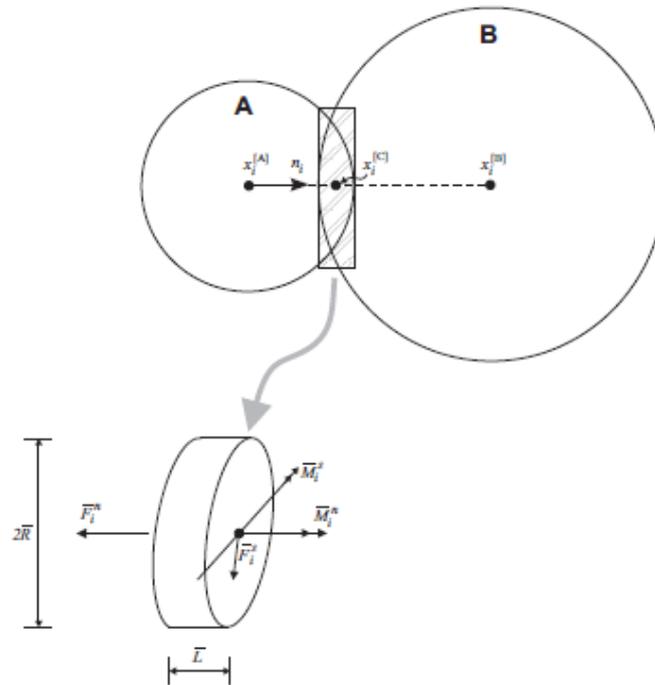


圖 2.22 平行鍵結模型圖

2.5.6 微觀與巨觀參數之訂定

本小節將對於 PFC 之參數分為三個部分來介紹：(1)顆粒元素之參數(2)鍵結參數(3)牆面參數

(1) 顆粒元素之參數

PFC 之顆粒球心的質點中心與彈簧為線性接觸模式，如前 3.4 小節所示。可藉由勁度與顆粒元素之半徑推估彈性模數 E_c 。

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.32)$$

其中 $\Delta\sigma$ 為應力增量，顆粒元素受應力下支應力增量可表示為：

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{(2R)^2} \quad (2.33)$$

其中 R 為顆粒之半徑，而應變增量為：

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta u}{2R} \quad (2.34)$$

其中 Δu 為顆粒間之相對位移，又根據虎克定律：

$$\Delta F = \frac{1}{2} k_n \Delta u = \frac{1}{2} k_n (2R \Delta\varepsilon) = k_n R \Delta\varepsilon \quad (2.35)$$

可將上述式改寫：

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{k_n}{4R} \quad (2.36)$$

此外，微觀參數與柏松比之關係雖在 PFC 中無提出建議，但可知與正向勁度及剪向勁度有關，如下式：

$$K_s/K_n = 1/4(1 + \nu) \quad (2.37)$$

(2) 鍵結參數

PFC 中顆粒的連結是藉由鍵結來模擬顆粒膠結之材料性質，鍵結模式可分為兩種，接觸鍵結及平行鍵結，如前 3.4 節之鍵結模式所述。

其鍵結也具有正向及剪向勁度，正向勁度參數 $\overline{k_n}$ 表示如下：

$$\overline{k_n} = \frac{\overline{E_c}}{(R^{[A]}+R^{[B]})} \quad (2.38)$$

(3) 牆面參數

在 PFC 中，我們通常建立牆面當為邊界，牆面的形式可分為兩種無限邊界牆面及有限牆面，無限邊界牆面可視為邊界為無限延伸之牆面，有限牆面為指定之有限尺寸構成之牆面，牆面可分為兩面，只有一面為可作用之牆面，有限牆面有三種型式，平面、螺旋、圓柱狀等三種型式可選擇並組合為模型所需之牆面。

牆面本身無法直接施力，但可利用給予速度來模擬所需之情況，來探討牆面與球體之間之相互作用。

2.5.7 PFC 之相關應用

以下便針對近幾年來各領域使用 PFC 來做模擬之文獻來做介紹。於岩盤為材料做的探討有下列：

Kulatilake et al. (2001) 探討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，其節理幾何參數對單軸壓縮強度之影響，其模擬之結果再與室內試驗結果之參數標定。

陳賀瑞(1997)針對卓蘭層軟弱砂岩材料作室內三軸試驗來做‘力學性質之初步探討。

Cundall & Potyondy (2004)透過 PFC 軟體之施加鍵結方式，建

立花崗岩之數值模型，以進行花崗岩力學行為之數值模擬。

李宏輝(2008)以 PFC^{2D} 模擬砂岩於單壓試驗下，其裂隙發展及延伸的力學行為，探討其組成材料與層間界面的影響。

李佩錚(2009)使用 PFC PFC^{3D} 模擬由軟岩沖蝕之微觀數值模擬，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。

各種使用 PFC 程式於岩石力學上之模擬之案例不勝枚舉，然而亦有許多學者應用 PFC 於其他領域之研究，像土壤力學，加工產業，以及非金屬材料科學中，以下章分別針對幾種領域中前人曾使用 PFC 程式做出之研究稍加介紹。

(1) 壩體破裂：Yang, *et al.* (2005) 使用 PFC 模擬表面為混凝土整修之土石壩在震動桌(shaking table)試驗下之模式，試驗結果指出表面為混凝土整修之土石壩在壩體表面為顆粒性滑動(*particle sliding*)以及混凝土表面可有效的減少滑動位移與壩體表面的沉陷。

(2) 地下開挖：Hadjigeorgiou, *et al.* (2009) 發表使用 PFC 模型模擬硬岩的垂直開挖面研究其穩定性分析及破壞系統，分析出各方向的穩定性及可能的滑動模式。

(3) 礦石工業：Bwalya & Moys(2003) 使用 PFC^{2D} 模擬礦工業使用磨粉

機時加入媒介物(如鋼桿、鋼球、礦石)滾動來磨製粉末，目標為預測其磨製速率。

(4)岩石破裂及斷層：Victor (2003)以 PFC^{2D} 來模擬造山運動碰撞後地表裸露的情況、應變的分佈情況以及顆粒發展的路徑。Hardy & Finch (2006) 進行箱砂物理實驗模擬，探討地盤抬升對斷層發展之影響。

Schormair & Thuro (2007)探討等向性岩石在岩石的鑽孔及切割中裂縫發展模式及岩石破裂模式。因主要目標為模擬鑽孔及切割過程中檢驗裂縫模式，觀察裂縫發展與層理之間之關係。Henseler, *et al.* (2011)

探討混凝土整修表面之土石壩在設計的地震危害載重下的形狀和地震引起的行為。

(5)其他：Shen & Lei(2009)使用 PFC2D 模擬製陶業雷射切割磨製矽製氮化物製陶物，模擬結果顯示切割力與裂縫形成與發展有強烈相關，這特殊切割能量會隨著切割溫度增加而減少。

由於 PFC 程式之多樣性，使得可使用 PFC 軟體來做微觀模擬之研究領域越來越廣，所以 PFC 軟體之案例也越來越多樣化。

2.6 總結

由於台灣近年來經常豪雨成災，短時間降雨量過大，造成河川流量暴增，不只是岩盤上跨河結構物有可能被破壞，若河床岩盤上之護

甲層逐漸消失，岩床一旦被大量沖蝕，造成結構物底盤河床被掏空，一樣會危及結構物之安全。特別是西部麓山帶大多為軟岩材料，材料性質更為脆弱，所以更須了解其可能之沖刷機制。然而機制之探討必須結合現地之水文條件、地形地貌、岩層性質、岩床之弱面間距及節理面等多方面加以觀察再做探討。

本研究所模擬之岩石材料參數探討以以大安溪軟岩(以下將以軟岩材料 A 簡稱)之室內三軸試驗以及陳賀瑞(1997)針對卓蘭曾軟弱砂岩材料(以下將以軟岩材料 B 簡稱)做室內三軸試驗所得之力學參數所得之力學參數作為率定之標的。

本研究係延續李佩鐸(2009)針對磨蝕沖蝕及顆粒彈跳撞擊兩種沖蝕機制做模擬，改善原有之模型並更加深入探討其現象，將模擬之結果對照室內試驗之結果，增加可靠性以及真實性。主要了解軟弱岩床在不同的沖蝕機制下其影響因子變化以及能量與沖蝕速率、破壞方式、及影響範圍之關係。

第三章 研究方法

本研究採 DEM 微觀模擬方法來模擬軟弱岩床受水流沖蝕之兩種機制，分別為磨蝕沖蝕機制以及顆粒彈跳撞擊沖蝕機制，並選用 PFC^{3D} 為分析工具。PFC^{3D} 為以圓形顆粒為基本單位之三維建構模型，首先建立牆面邊界設定將岩床試體尺寸固定，再將球體填入牆面所建造的模型內，並且再給予顆粒適切的連結模式及鍵結，此為初始建立試體之基本方法。再分別針對兩種沖蝕機制分別對牆體或球體施加速度或施加應力，藉以達到所需模擬之真實沖蝕情況。以下將針對模擬沖蝕機制之模型建立之設定及規劃之流程作詳細介紹。



3.1 岩床試體建立

由於真實之現地試驗測量易受地形地貌所限，亦無法準確固定量測之基準點，所以使得現地試驗不僅施作困難且數據精準度亦無法降低。然而室內試驗之試體取得不易，易受儀器控制所影響，要生產多筆試驗數據做為參考資料庫極為不易，所以冀以利用微觀之數值模擬程式來產生試驗結果，做為未來巨觀經驗因子探討之依據。

在 PFC^{3D} 中，主要以顆粒集合體及牆面來做試體之模型，在岩床試體建立時首先須先設定牆面邊界值，將牆面建立完成後，再將球體

顆粒集合放入牆面中，接著再調整顆粒之中接觸過少之顆粒，使得顆粒之間的接觸數目達到一定值，確保顆粒之間接觸力之傳遞。接著加入顆粒之間的鍵結模式，使得顆粒之間就如存在著阻尼一般，最後使試體平衡後，再刪除頂牆邊界，使得表面顆粒裸露無邊界牆保護，如同岩床表面直接受河流沖蝕一般。下列小節將會針對岩床建立之過程加以介紹並詳述。

3.1.1 邊界設定

在本研究中岩床試體牆面採用有限牆面，即在試體在試驗中為固定邊界值，試體尺寸大小即為牆面所建構之六邊形體積大小。在此，試體採長 0.15m，寬 0.15m，厚 0.09m(即 x, y, z 方向)。(圖 3.1(a))

因模擬之沖蝕機制乃針對岩床表面作用，所以必須使得岩床試體表面為裸露，以模擬水流於岩床表面之沖蝕機制。針對此特性，必須將岩床試體之表面牆面刪除，刪除是為了模擬岩床表面直接受水流沖蝕，所以將頂牆刪除以符合現場岩床表面受沖蝕之情況。刪除後仍可平衡並且無顆粒破壞且脫離試體之情況即可。

3.1.2 顆粒集合體之建立

為模擬岩床表面沖蝕機制，首先岩床試體之建立為首要條件。首先必須先建立牆面，使用有限牆面，將牆面之邊界值設定為所需之定值，透過排列牆面成為六面體後，再將球體顆粒放入牆面所排列而成之六面體內，此研究中球體顆粒在限定之半徑中，顆粒排列模式採高斯隨機分布，並且透過縮小初始顆粒半徑再讓其慢慢膨脹，直到達到指定之孔隙率的方式，使得顆粒可以隨機分布並且達到所需的孔隙率，即可達到所需的六面體之岩床試體，在此試體中共有 17776 顆球體集合。(圖 3.1(b))

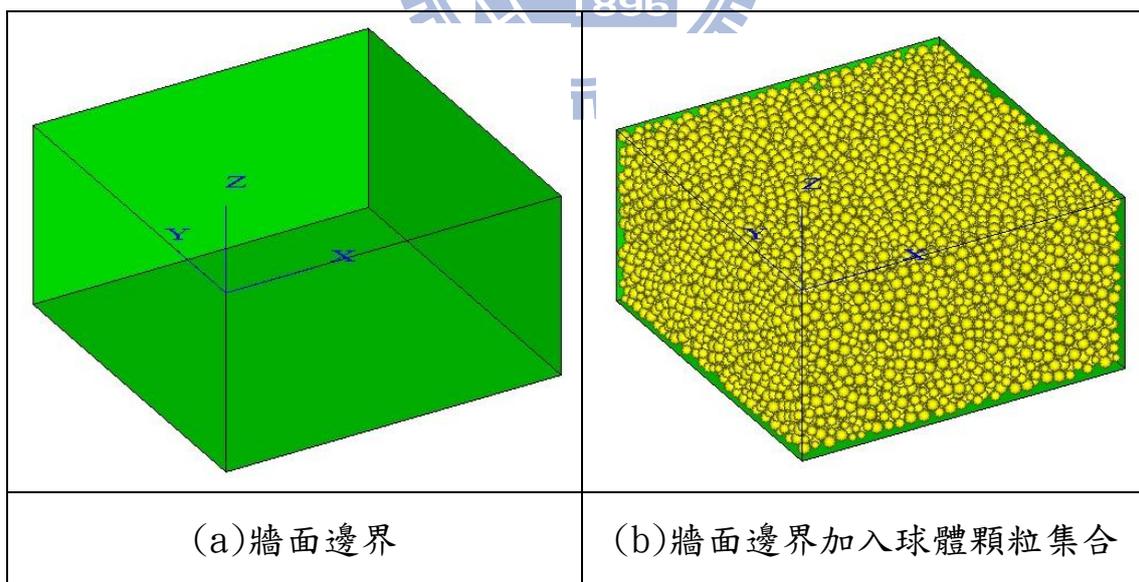


圖 3.1 岩床試體圖

3.1.3 刪除虛浮點

由於試體產生乃採用先縮小再慢慢膨脹至指定之孔隙率之方法，試體中顆粒集合體仍有顆粒為鍵結數過少甚至無鍵結之顆粒，有此情形之產生是因試體產生的過程中，仍有部分顆粒膨脹後與鄰近之其他顆粒之接觸過少甚至毫無接觸，再加入平行鍵結之過程便會在無接觸之部分也無平行鍵結之產生。PFC^{3D} 手冊中建議，鍵結數 $n > 3$ 為佳，若有鍵結數小於 3 之顆粒，即認定此顆粒為虛浮點。

刪除虛浮點之方法及參數設定為(1)顆粒鍵結數至少需 ≥ 3 ，若顆粒鍵結數 < 3 則認定為虛浮點。(2)設定虛浮點容許百分比，在此設定虛浮點總和/岩床試體總顆粒數 = 0%，冀能把顆粒虛浮點之存在降到最低。(3)設定膨脹率與縮小比例，針對前述判定為虛浮點之顆粒將其依膨脹率膨脹至與其他顆粒有觸碰。依此判定方式，若顆粒鍵結數 < 3 ，則認定其為虛浮點，膨脹虛浮點，再回到鍵結數判定之步驟，若顆粒之鍵結滿足單一顆粒有三個鍵結以上之條件，並且虛浮點容許百分比為 0%，此虛浮點刪除檢驗之步驟即完成。

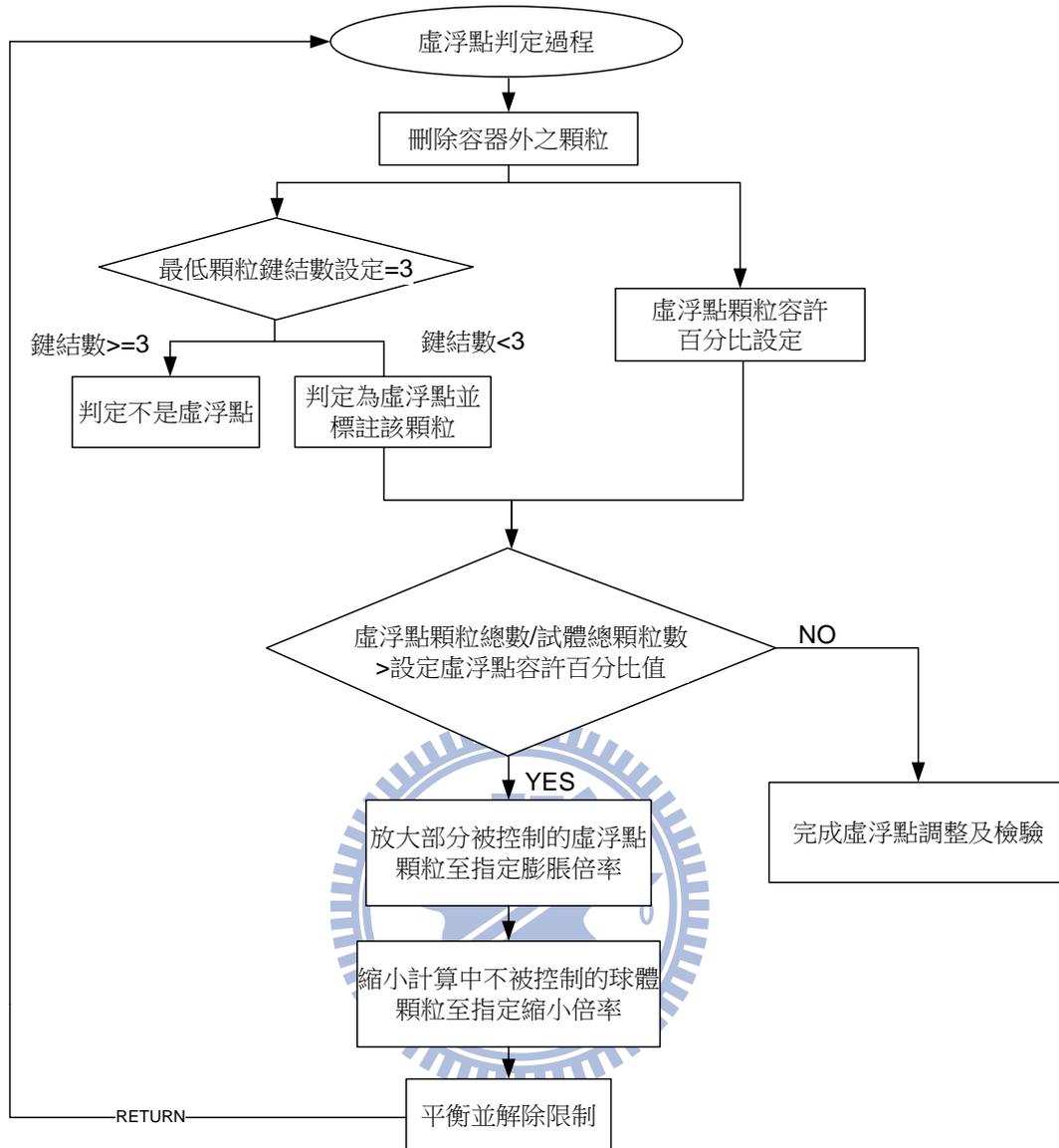


圖 3.2 虛浮點檢驗判定流程圖

3.1.4 參數率定

本研究採 PFC^{3D} 程式於分析時，其相關之參數設定可依參數性質分為顆粒物質性質(顆粒單位重 ρ)、顆粒摩擦性質(摩擦係數 μ)、接觸勁度參數(正向勁度 k_n 、剪向勁度 k_s)、平行鍵結模式所需之參數(鍵

結半徑放大係數 λ 、鍵結勁度參數 pbkn、pbks、鍵結強度參數 pb_nstrength、pb_sstrength)，如表 3-1 所列。

- (1) 顆粒單位重 ρ ：在本研究中顆粒單位重採軟弱岩層之密度 2700kg/m^3 。
- (2) 摩擦係數 μ ：當相鄰接觸之顆粒產生相對錯移時，顆粒間之切向摩擦力依顆粒摩擦係數來決定。當顆粒沿著破裂面產生明顯的錯動時，此時摩擦係數之影響才較為顯著。
- (3) 勁度參數：在正向勁度 kn 保持固定時，模擬之強度與楊氏模數兩者均與勁度比 kn/ks 呈現正相關。
- (4) 鍵結參數：當鍵結強度比 $pb_nstrength/pb_sstrength$ 增加時，模擬之強度也隨之增高，故整體強度是由鍵結強度所主控。

參數率定仍需參考真實室內試驗數據來做標定之依據，詳細參數率定之方法以及標定將於第四章作詳細介紹。

表 3-1 微觀參數表

參數性質	參數名稱	符號
顆粒物理性質參數	顆粒單位重	ρ
	顆粒粒徑	R
顆粒摩擦性質	摩擦係數	μ
變形參數	勁度參數	kn、ks
平行鍵結模式	鍵結半徑放大係數	λ
	勁度參數	pbkn、pbks
	強度參數	pb_nstrength、 pb_sstrength

3.1.5 小結

岩床試體建立之方法如上述之小結，其流程概況可視圖 3.3 岩床建立流程圖。

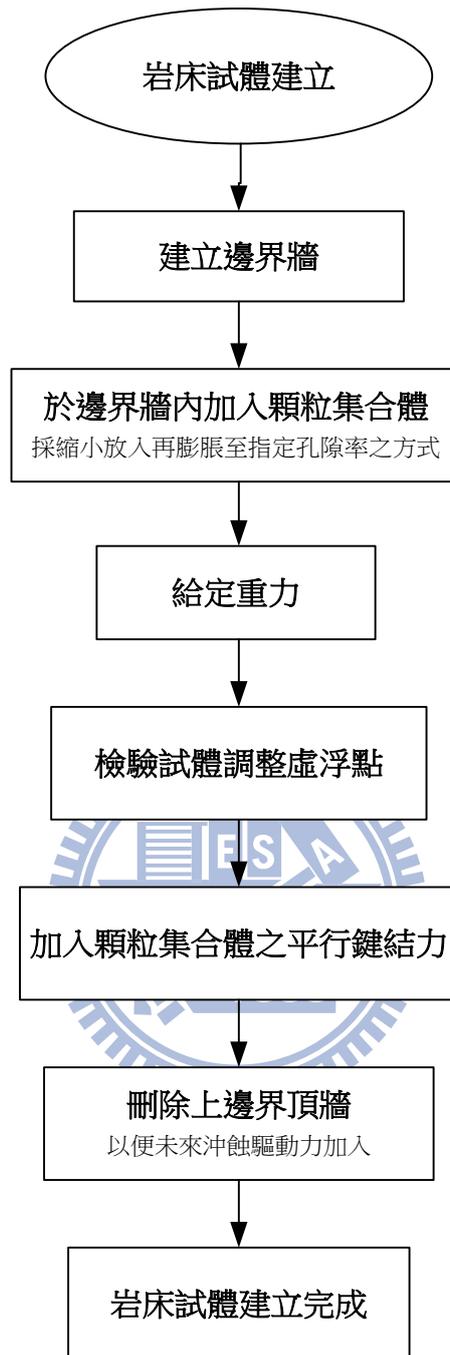


圖 3.3 岩床試體建立流程圖

3.2 驅動沖蝕力之模型建立

本研究中主要模擬之沖蝕機制為磨蝕沖蝕機制以及顆粒彈跳撞擊之沖蝕機制，在試體建立完成以後，便分別欲對此兩種磨蝕機制做

出符合其機制之模型。第一為磨蝕沖蝕機制，磨蝕沖蝕為完整岩盤受到水流或流水夾帶懸浮仔顆粒磨蝕岩床表面，使岩床表面膠結顆粒逐漸脫離。本研究令顆粒之相對位移所形成的剪應力，作用於岩床表面以模擬磨蝕沖蝕。第二為顆粒彈跳撞擊之沖蝕機制，顆粒彈跳撞擊乃河床載中較大之顆粒彈跳撞擊岩床試體，導致部分的衝擊動能會造成岩床表面產生疲勞破壞或切削磨損。模型建立中，本研究使用較岩床組成之顆粒尺度大之顆粒作為彈跳撞擊之顆粒，利用此顆粒加入速度撞擊岩床，以觀察其破壞情形。

3.2.1 磨蝕沖蝕機制之模型建立

在岩床磨蝕機制中，本研究改善李珮錚(2009)所採之磨蝕模擬機制，因其模型所造成之邊界效應過大，將使得鍵結破壞區域傾向集中於兩側。為改善此情況，本研究概念主要為在模擬過程中必免磨蝕區域破壞集中邊界，以牆面剪力磨蝕板之概念作模型建立。

李珮錚(2009)在牆面剪力磨蝕之模擬中，其牆面磨蝕之概念為應用牆面之正向力與摩擦係數，使得牆面與顆粒之間於移動過程中產生的摩擦力所造成岩床試體表面的應力，並且舊有之模型在破壞區域不只是破壞大多位於牆面兩側，此種方式亦會造成顆粒向前滾動，造成試體前方之應力遠大於中間區域甚至於後段(靠近原點處)。(如圖

3.4)

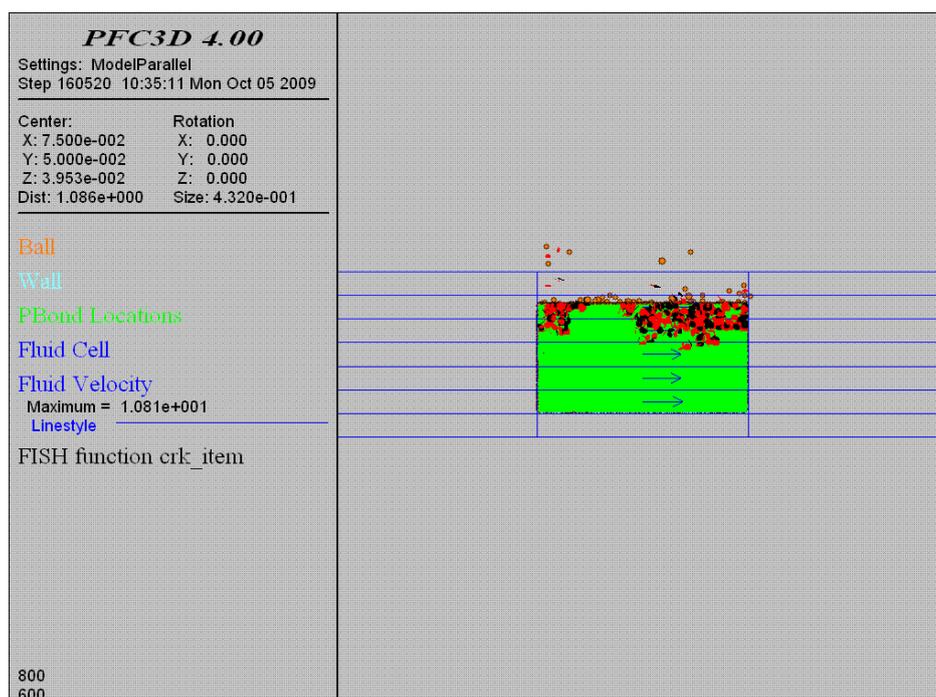


圖 3.4 舊模型破壞情形(李佩鐸, 2009)

因上述因素，在本研究中改良該模型，同樣採取在僅貼岩床試體的牆面設定摩擦係數後在使牆面向前(x 向)移動，以磨擦方式增加剪應力，其計算方法如式 3.1 及式 3.2，式 3.1 為每次移動牆面所產生之剪應力，式 3.2 為剪應力累算之方式。

本研究改良之處有三，第一為李佩鐸(2009)的研究中在試體在產生時採頂牆慢慢向上移動以達試體內部顆粒平衡，此方法為因原試體在產生過程中應力較大，所以才必須用此方式。然在本研究中試體產生的過程中並不會有此原因，因此在試體產生過程中本研究並不移動頂牆就讓其試體平衡，此方法之用意乃希望使頂牆接觸的試體表面顆

粒排列較為整齊，避免李佩淳(2009)的研究中試體在頂牆移動磨蝕過程中應力傳遞不均勻的現象。第二為頂牆磨蝕前先施以正向力，正向力施加方式為移動頂牆向上或向下(z向)之速率，採應力量測元(measurement spheres)回饋控制量測之應力值，以達所需之正向應力。第三為在控制剪應力之過程中同樣採應力量測元回饋控制剪應力之施加，使得在增加剪應力過程中以穩定的方式緩慢增加，改良李佩淳(2009)的研究中牆面使用定速前進，造成試體在極短的過程內即達啟動剪應力卻造成試體應力分布不均，另一方面在本研究試體中的摩擦力設定較小，設定摩擦角為30度，對應之新試體之摩擦係數為0.577，有別於李佩淳(2009)的研究中摩擦係數設定為1，因降低摩擦係數同時也使得施加剪應力的過程中剪應力以較緩慢且穩定的增加以保持試體應力傳遞較為平均。剪應力之最大值與摩擦係數有關，遵循下列關係(PFC^{3D} 4.0 manual)。

$$F_{max}^s = \mu |F_i^n| \quad (3.1)$$

$$F_i^s \leftarrow F_i^s (F_{max}^s / |F_i^s|) \quad (3.2)$$

F_{max}^s ：允許之最大接觸剪應力

F_i^n ：正向應力

μ ：摩擦係數

F_i^s ：剪應力

在磨蝕模擬開始前本研究將岩床試體模型尺寸稍加改變，目前採長 0.25m，寬 0.15m，厚 0.05m(即 x, y, z 方向)，如圖 3.5(a)。此目的有二，第一，在 x 方向加長之目的為因需在岩床試體上增加磨蝕板，為不使磨蝕板之磨蝕過程中造成邊界效應，所以加長 x 向方向，使磨蝕板不會碰到顆粒集合體與牆面接觸之邊界。第二，於 z 方向之厚度將之減少，因磨蝕主要為岩床表面顆粒的剪應力施加行為，所需之試體厚度不須如此多，同時也可以減少顆粒集合體之顆粒數，減少程式計算時間。

在模型建立方式同樣設置一頂牆面於岩床試體上，但牆面設定為無限牆面，此無限牆面可視為長度無限延伸，採回饋控制方式增減牆面運動速度使得試體表面達到(或保持)目標之剪力值，將試體內部設置應力量測元，此應力量測元可偵測並記錄運動時試體內部之應力狀態，以此應力量測元做為施加應力之回饋控制，控制牆面速度大小以達所需之應力大小，應力量測元放置如圖 3.5(b)。應力量測元之應力計算方式為計算應力測量元所含體積中之所有材料之平均應力張量(如式 3.3)，顆粒集合體本身之計算方式如式 3.4，累計顆粒所有接觸點上所受之應力在除上顆粒本身之體積即為顆粒體所受之應力。另外在應力量測元計算上必須再修正孔隙率，顆粒之間的重疊(overlap)處須修正刪除，因此式 3.5 至 3.8 式為修正孔隙率的過程，

修正以後所得 3.9 式即為應力量測元所採用之計算方式 (PFC^{3D} 4.0 manual)。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{N_p} \bar{\sigma}_{ij}^{(p)} V^{(p)} \quad (3-3)$$

$$\bar{\sigma}_{ij}^{(p)} = -\frac{1}{V^{(p)}} \sum_{N_c} |x_i^{(c)} - x_i^{(p)}| n_i^{(c,p)} F_j^{(c)} \quad (3.4)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V_m} \sum \bar{\sigma}^{(p)} V^{(p)} = \frac{1}{V} \bar{\sigma}^{(p)} \sum V^{(p)} = \sigma_0 \left(\frac{\sum V^{(p)}}{V_m} \right) = \sigma_0 (1 - n) \quad (3.5)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{V_m} \sum \bar{\sigma}^{(p)} V^{(p)} = \sigma_0 \left(\frac{\sum_{N_p} V^{(p)}}{V_m} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\bar{\sigma}}{\tilde{\sigma}} = \left(\frac{1-n}{\sum_{N_p} V^{(p)}} \right) V_m \quad (3.7)$$

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{1-n}{\sum_{N_p} V^{(p)}} \right) \sum_{N_p} \bar{\sigma}^{(p)} V^{(p)} \quad (3.8)$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = -\left(\frac{1-n}{\sum_{N_p} V^{(p)}} \right) \sum_{N_p} \sum_{N_c} |x_i^{(c)} - x_i^{(p)}| n_i^{(c,p)} F_j^{(c)} \quad (3.9)$$

$\bar{\sigma}_{ij}$ ：應力量測元所受之應力量

$\bar{\sigma}_{ij}^{(p)}$ ：顆粒所受之應力量

$\bar{\sigma}$ ：平均應力

σ_0 ：均勻應力場

$\tilde{\sigma}$ ：忽略顆粒重疊下所計算之錯誤的應力

$V(V_m)$ ：應力量測元之體積

$V^{(p)}$ ：顆粒之體積

N_c ：顆粒接觸點數

N_p ：應力量測元內所含之材料顆粒數

$x_i^{(c)}$ ：顆粒上接觸點之位置

$x_i^{(p)}$ ：顆粒之位置

$n_i^{(c,p)}$ ：顆粒與顆粒之接觸點之正向向量

$F_j^{(c)}$ ：顆粒接觸點上所受之應力

n：孔隙率

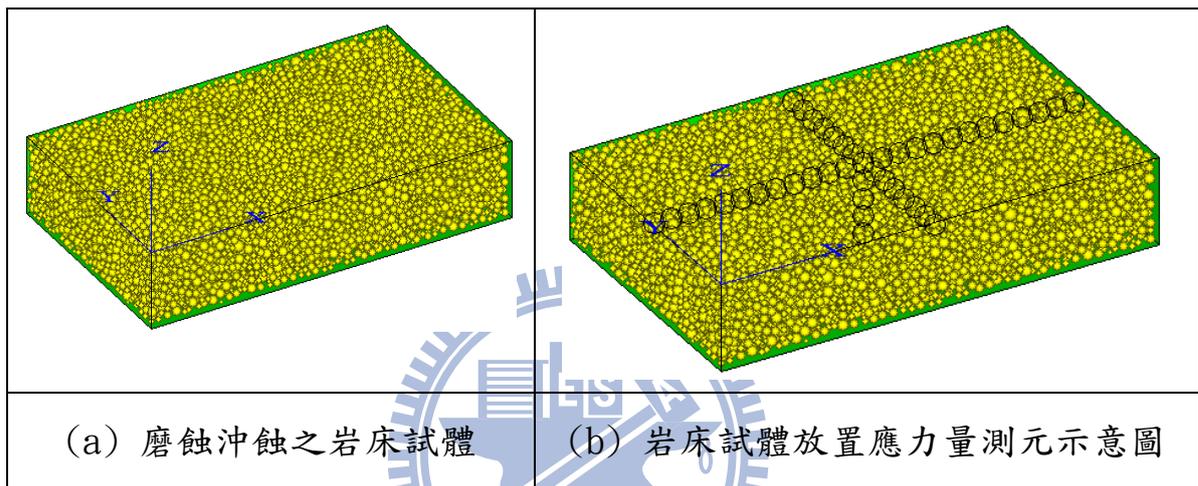


圖 3.5 磨蝕沖蝕機制模擬示意圖

3.2.2 顆粒彈跳撞擊之模型建立

顆粒跳撞擊乃採用一較組成岩床試體內之顆粒集合體尺寸為大之顆粒，使此撞擊之顆粒位於岩床試體表面上方，控制特定速度值，使之撞擊岩床試體以產生顆粒鍵結破壞。以模擬河床載中較大之顆粒彈跳撞擊岩床試體，導致部分的衝擊動能會造成岩床表面產生疲勞破壞或切削磨損的情況。

針對 Sklar&Dirtruch(2004)半經驗式 $E = V_i I_r F_e$ 中，李佩錚

(2009)在顆粒彈跳撞擊之沖蝕機制模擬中，主要為針對單次顆粒撞擊，探討其中之 V_i 值，即為每次顆粒撞擊岩床所損壞分離之岩石量，主要分為三個影響因子，撞擊顆粒尺寸大小、撞擊顆粒速度、撞擊角度等三種因子探討其變化關係及其鍵結破壞程度。

在本研究中顆粒彈跳撞擊之沖蝕機制模擬中共分為兩部分，一部分為單次顆粒撞擊試體，另一部分為連續性多次顆粒撞擊之試驗。前者為單次撞擊，可探討每次顆粒撞擊岩床所損壞分離之岩石量之撞擊因子與能量之間變化的影響。後者為隨機性在試體選定之區域內採連續性多次隨機撞擊，此法主要目的為模擬 Sklar & Dirtruch(2004) 半經驗式中 I_r 值，即為每單位面積每單位時間發生之顆粒撞擊率，水流顆粒濃度增加撞擊顆粒數目也會隨之增加，以模擬河道中現地長期顆粒彈跳撞擊之沖蝕。

3.3 模擬沖蝕機制之目標

模擬軟岩之沖蝕機制目的乃希望能夠克服現地試驗及室內試驗之難處，希望以數值模擬可模擬出室內試驗之結果，雖然初始之材料參數訂定仍需真實試體之參數作為微觀模擬參數率定之依據，但數值模型不需要試體就可製造多組試驗數據，可將模擬結果與真實之室內試驗數據比對，若大致相符，此微觀之試驗資料值即可作為未來建立

巨觀沖蝕因子探討的重要參考資料。

3.3.1 磨蝕沖蝕機制之試驗目標

本研究所探討的磨蝕機制主要模擬水流剪應力流過造成岩床表面的膠結顆粒破壞。根據國立交通大學防災與水環境研究中心(2010)之研究報告”設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究”中，以石岡壩為例經由水理分析之 20 年洪峰重現期(Q20)之剪應力分布情況如圖 3.6 所示，石岡壩沖刷坑對應位置與最大剪應力相符，因其中最大剪應力約為 1KPa，所以沖蝕試驗模擬中，為探討固定因子，在此試驗中固定所有參數，選定床面所受之剪應力為變數，剪應力控制在 10KPa 以下，期望找到落於現地沖蝕剪應力可能出現範圍的臨界剪應力，並探討剪應力與岩床破壞鍵結破壞、破壞體積之間之關係，所需紀錄之資料如表 3-2。

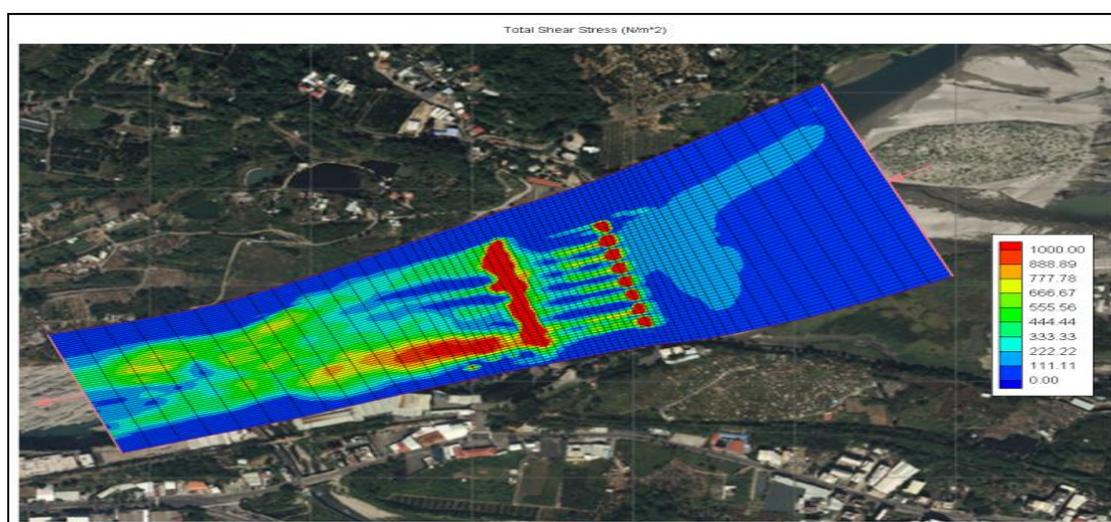


圖 3.6 民國 98 年石岡壩之洪水剪力分佈 (單位：N/M²)

化；顆粒撞擊速度則採 1m/s、5m/s、10m/s、15m/s、20m/s：在顆粒撞擊角度則分為 15°、30°、45°、60°、75°、90°。

如表 3-3。能量消耗量計算使用式 3.10，使用撞擊顆粒質量乘上速度改變量，撞擊顆粒會在撞擊後反彈，反彈後撞擊速度減少乃因顆粒撞擊速度能量轉換為試體受撞擊之能量累積，當撞擊能量達到臨界門檻時，試體之膠結顆粒受撞擊後即會產生破壞。

$$\Delta E = \frac{1}{2} \times m \times (V_0^2 - V_f^2) \quad (3.10)$$

ΔE ：撞擊轉換的動能

m ：撞擊顆粒質量

V_0 ：撞擊顆粒初速

V_f ：顆粒撞擊後速度



表 3-3 顆粒彈跳撞擊因子探討範圍表

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15						
	30						
	45						
	60						
	75						
	90						
撞擊速度 (m/s)	1						
	5						
	10						
	15						
	20						
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01						
	0.02						
	0.03						
	0.04						
	0.05						
	0.06						

(2) 連續性隨機顆粒彈跳撞擊探討長期沖刷破壞機制

在連續性多次顆粒彈跳撞擊的虛擬沖刷試驗中，令顆粒彈跳於所考慮區域內隨機撞擊，主要是模擬長期性岩床試體在顆粒彈跳撞擊之沖蝕機制中所產生的破壞情形，觀察其鍵結破壞量、破壞體積多少及長期的趨勢為何。在本研究中將採固定撞擊速度 5m/s、撞擊顆粒尺寸 2cm 及固定撞擊角度 30°，撞擊點為變異數，因在顆粒彈跳撞擊沖蝕機制中觀察到每顆撞擊顆粒其應力張

量影響之區域約為撞擊點前後各 2cm，等同於撞擊顆粒之半徑，所以採撞擊區域保留 1cm 以及 2cm 之影響區域，因故撞擊區域為 $x=0.03\text{m}\sim 0.12\text{m}$ 、 $y=0.03\text{m}\sim 0.12\text{m}$ (如圖 3.6)，以連續性區域隨機撞擊 50 顆顆粒，觀察其長期破壞趨勢。

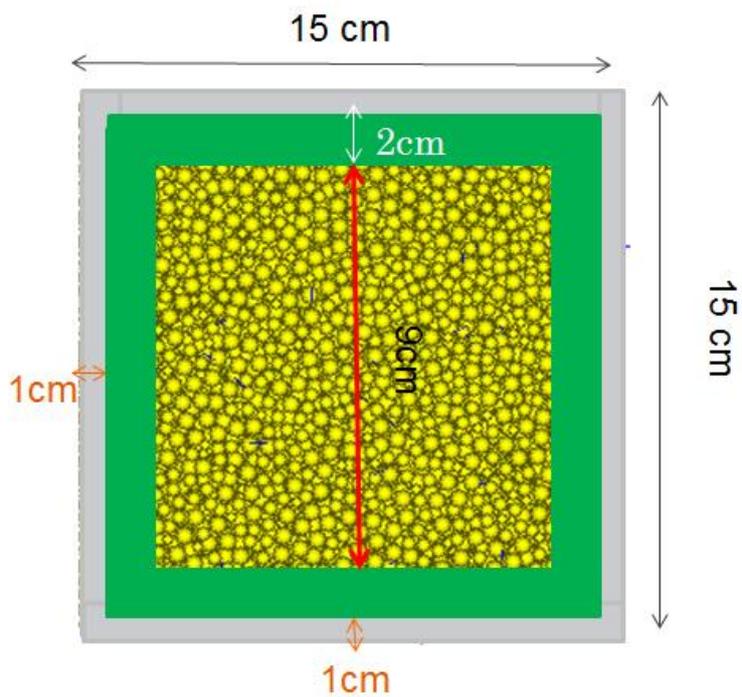


圖 3.7 撞擊區域選取圖

第四章 參數率定

在數值模擬分析中，為求合理的分析結果，首先在分析數據訂定時應盡量符合現地實際情況，另外則需有適當的應力應變行為模式以及合理的材料參數，才可模擬至所欲模擬之顆粒材料行為。但參數眾多，要如何使微觀參數訂定以達盡量減少與現地材料之間之差異，此章節將會對本論文模型之參數建立方法加以介紹。

4.1 參數率定之方法

參數率定方式乃利用建立微觀模擬三軸試驗，模擬出來之微觀數據轉換與室內三軸所量測之巨觀力學數據參照比較的方式(如圖 4.1)。



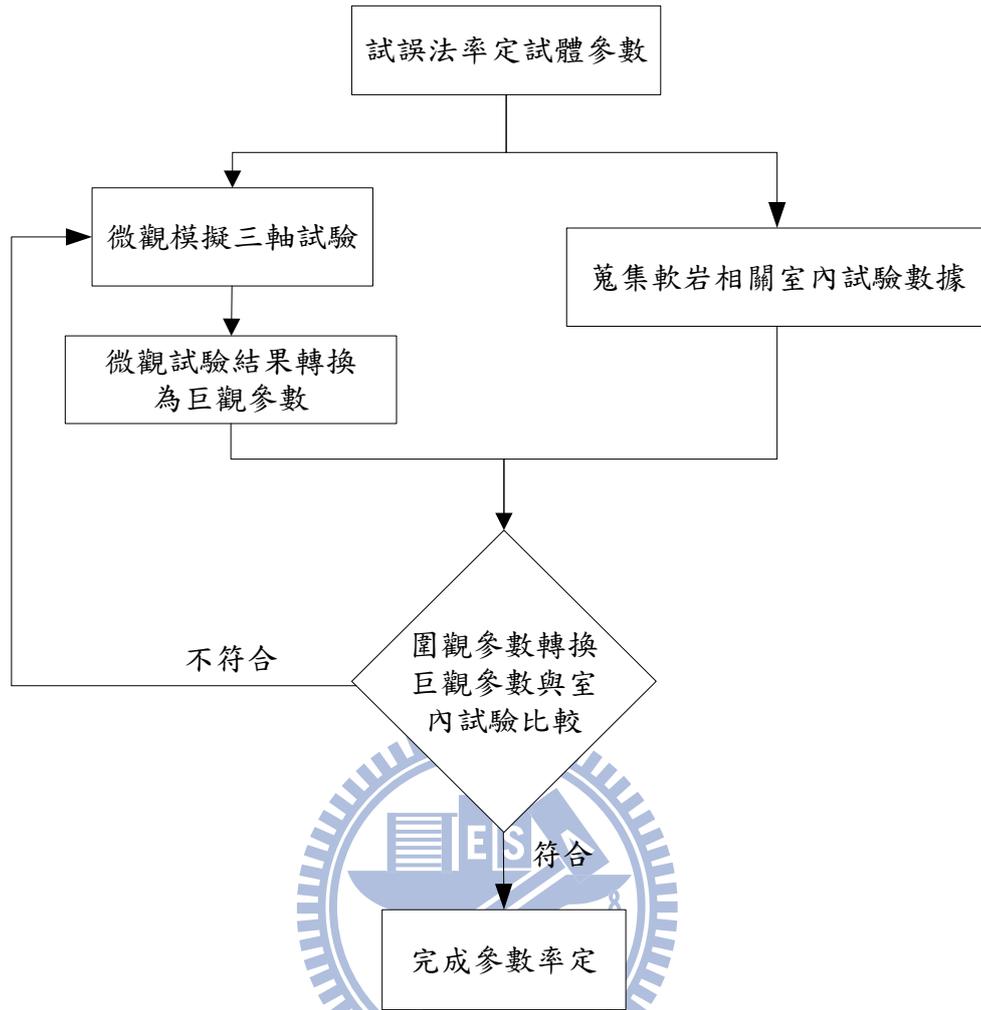


圖 4.1 參數率定流程

4.2 材料參數率定之標的

根據國立交通大學防災與水環境研究中心(2010)之軟弱岩床劇烈沖蝕河段沖蝕行為之探討—以大安溪為例之報告中以軟岩材料A室內試驗所得的力學參數如表4-1，其應力應變行為如圖4.2，在本研究中採取圍壓為0.5MPa模擬之。陳賀瑞(1997)年針對軟岩材料B做室內三軸試驗，其所得的力學參數如表4-2，本研究在此皆採用圍壓為3MPa，

圍壓為3MPa之應力應變行為如圖4.3。

表 4-1 軟岩材料 A 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		

表 4-2 軟岩材料 B 之力學參數行為(陳賀瑞, 1997)

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 B	0.5	17.8	17.15	-	3.02	42.2
	3	29.85	29.3	0.894		
	6	34.93	35.9	0.776		

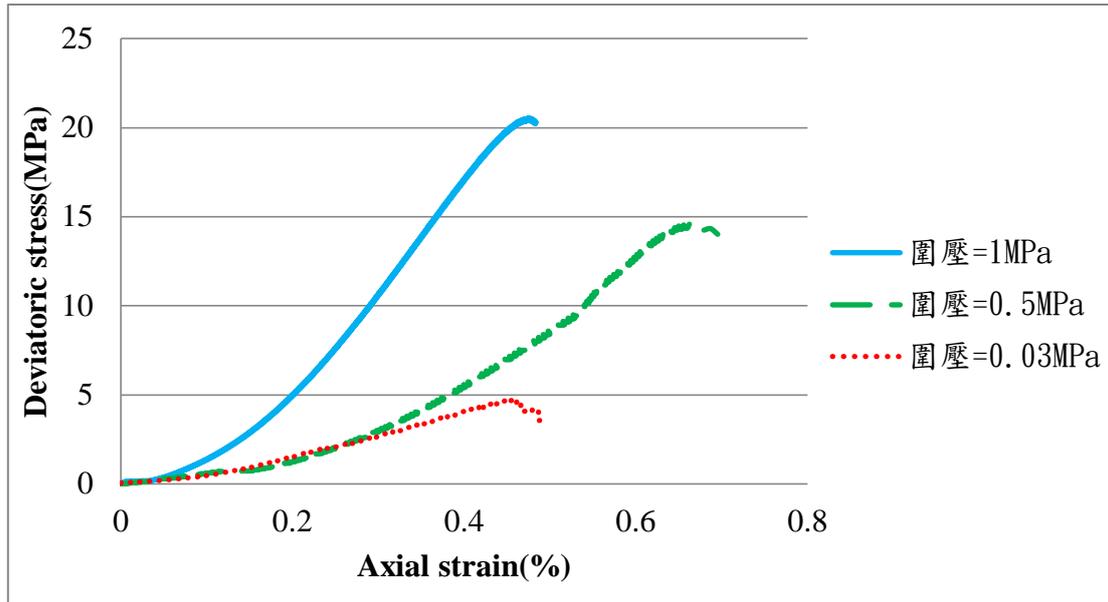


圖 4.2 軟岩材料 A 之三軸試驗應力應變關係圖(國立交通大學防災
與水環境研究中心, 2010)

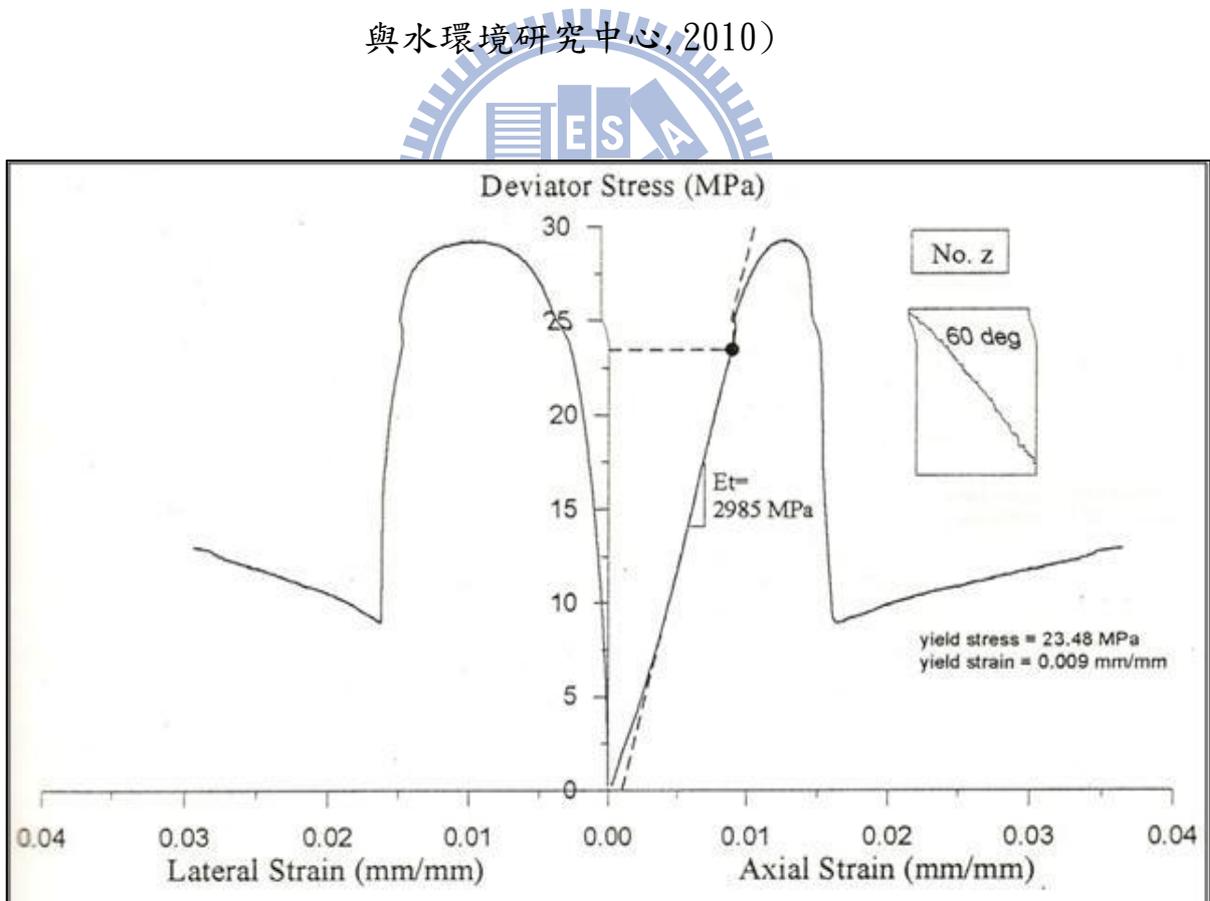


圖 4.3 軟岩材料 B 在圍壓為 3MPa 之三軸試驗(陳賀瑞, 1997)

4.3 三軸壓縮試驗之微觀模擬

本研究的參數率定為利用微觀模擬室內三軸試驗結果轉換後與巨觀力學參數比較，來探討參數的適用性。在 PFC^{3D} 中，參數設定可分為邊界牆、顆粒集合體以及介質等三大類。

邊界牆面之參數為正向勁度(kn)及剪向勁度(ks)，在此因顆粒集合體在模擬的過程中未必免與牆面產生剪應力，所以將剪向勁度設為零，正向勁度主要則為模擬室內三軸試驗的三軸室，所以設為 120(MN/m)。

顆粒集合體之參數主要有顆粒的密度、正向勁度(kn)、剪向勁度(ks)、正向強度(n_bond)、剪向強度(s_bond)及摩擦係數(μ)等參數，在本研究中，主要掌控為介質的破壞，所以在本論文中正向強度及剪向強度皆設為零。

介質中參數則為平行鍵結的正向勁度(pb_kn)、剪向勁度(pb_ks)、正向強度(pb_nstr)、剪向強度(pb_sstr)以及平行鍵結的放大係數(λ)。

表 4-3 率定參數單位表

類別	參數名稱	單位
顆粒集合體	密度	kg/m^3
	顆粒勁度	N/m
鍵結	平行鍵結勁度	N/m^3
	接觸鍵結強度	N
	平行鍵結強度	N/m^2

在模擬三軸試驗中，試體需先調整至所需應力，才可繼續加壓與解壓，在調整的過程中採回饋控制以保持應力的穩定，三軸試驗模擬的流程如圖 4.4 所示，在阻尼部分，不同於李佩錚(2009)模型使用 PFC 中設定之靜態分析中預設之局部性阻尼(local damping)，本研究在沖蝕力施加的過程中改採用動態分析所使用之黏滯性阻尼(viscous dapming)，阻尼之摩擦係數則採手冊建議值為 1。

以下分別將針對軟岩材料 A 及軟岩材料 B 之模擬室內三軸試驗作介紹。

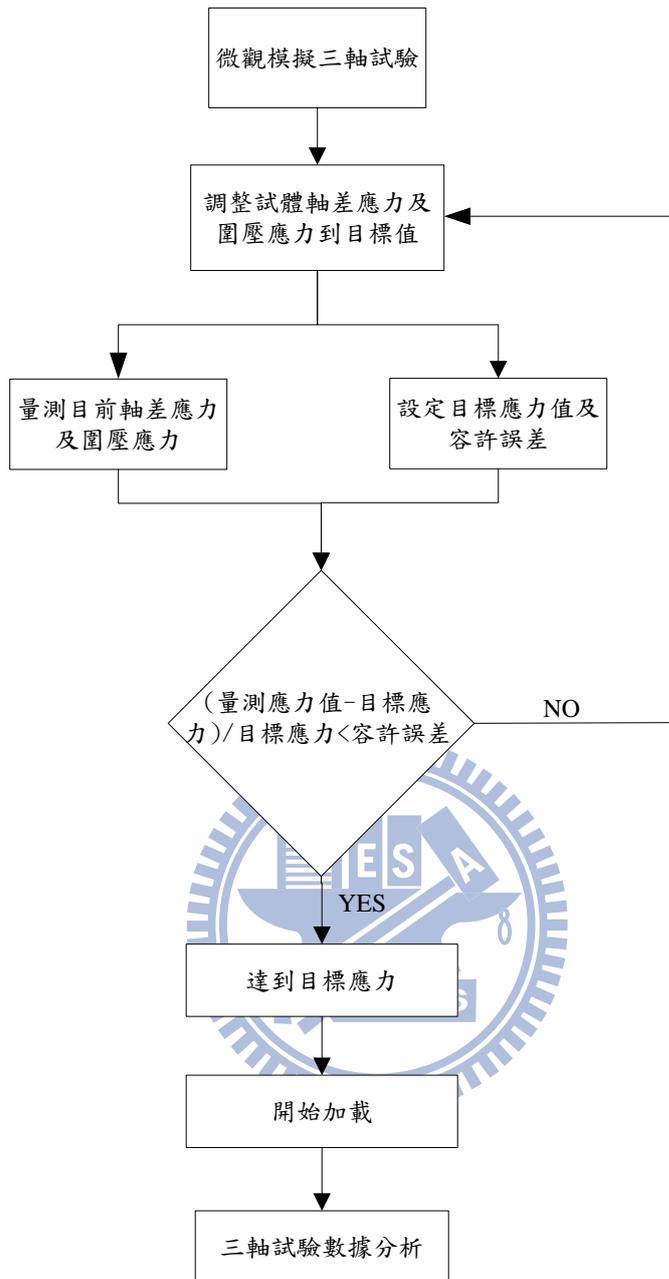


圖 4.4 微觀模擬三軸試驗流程圖

4.3.1 軟岩材料 A 之三軸模擬試驗

在模擬軟岩材料 A 之三軸試驗中，顆粒集合體之密度採用 2700kg/m^3 ，三軸試體的圓柱體尺寸為直徑 10cm × 高度 20cm (如圖 4.5

所示)，試體直徑與高度比例為 1:2。在本研究中為選取岩性強度較低之試體，在此採圍壓為 0.5MPa 之模擬試驗。首先必須先建立試體，設定顆粒集合體之尺寸及勁度參數，在此顆粒集合體尺寸 2mm~3mm 隨機生成分布，在勁度參數設定部分則是利用試誤法在試體試驗完成後，使用模擬試驗之數據比對巨觀之室內三軸所得力學參數中之楊氏係數(E)。

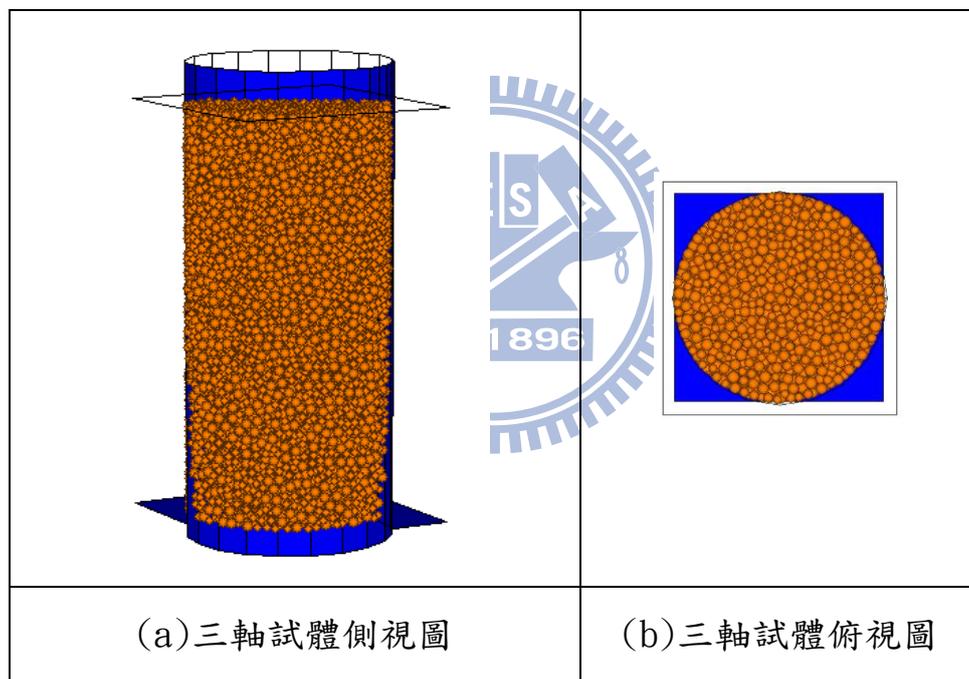


圖 4.5 軟岩材料 A 之模擬室內三軸試體圖

模擬試驗所得在彈性階段的應力應變關係見圖 4.6，體積應變與軸向應變關係如圖 4.7，並由此兩關係圖透過式 4.1 及式 4.2 計算出楊氏係數(E)及柏松比(ν)。所模擬出力學參數與室內三軸試驗之比

較可見表 4-4 一覽其結果，經過如此標定後之顆粒集合體勁度參數分別隨正向勁度參數 $k_n=50(\text{MN/m})$ 、剪向勁度參數 $k_s=20(\text{MN/m})$ 。

$$E = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a} \quad (4.1)$$

$\Delta\sigma_a$: 軸差應力

$\Delta\epsilon_a$: 軸差應變

$$\nu = -\frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta\epsilon_a} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta\epsilon_v}{\Delta\epsilon_a} \right) \quad (4.2)$$

$\Delta\epsilon_v$: 體積應變

$\Delta\epsilon_r$: 徑向應變

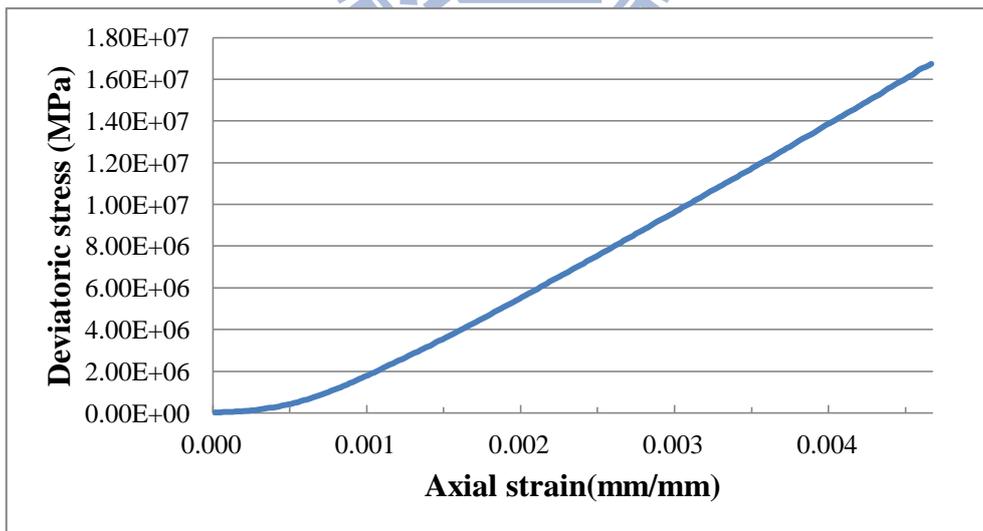


圖 4.6 軟岩材料 A 彈性階段之模擬應力應變關係圖

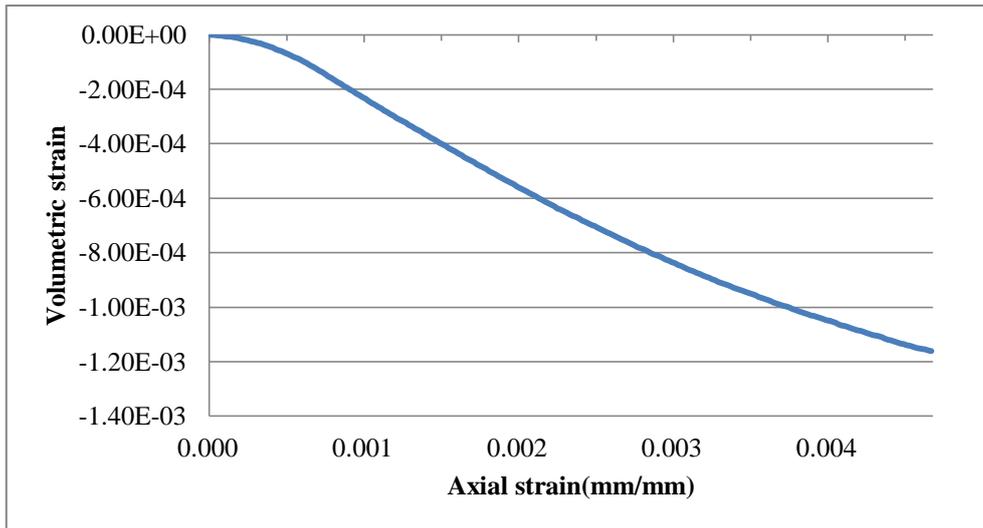


圖 4.7 軟岩材料 A 彈性階段之模擬體積應變與軸應變關係圖

表 4-4 軟岩材料 A 之三軸試驗參數對照表

參數 岩體	圍壓 (MPa)	楊氏係數 E(MPa)	尖峰強度 P(MPa)	應變%
室內試驗	0.5	27.65	14.29	0.663
模擬結果	0.5	21.83	12.92	0.640

在顆粒集合體中，在平行鍵結破壞後則是以顆粒之摩擦係數(μ)來掌控，摩擦係數會影響尖峰強度及峰後行為。根據 Hainbüchner *et al.* (2003) 使用 PFC^{3D} 進行模擬緊砂及鬆砂之直剪試驗，其微觀摩擦係數與巨觀摩擦角之關係，如圖 4-8，在緊砂之摩擦角上限約在 40° ，鬆砂約為 30° 。在本研究中摩擦角取 30° ，對應之微觀摩擦係數參數為 0.577。

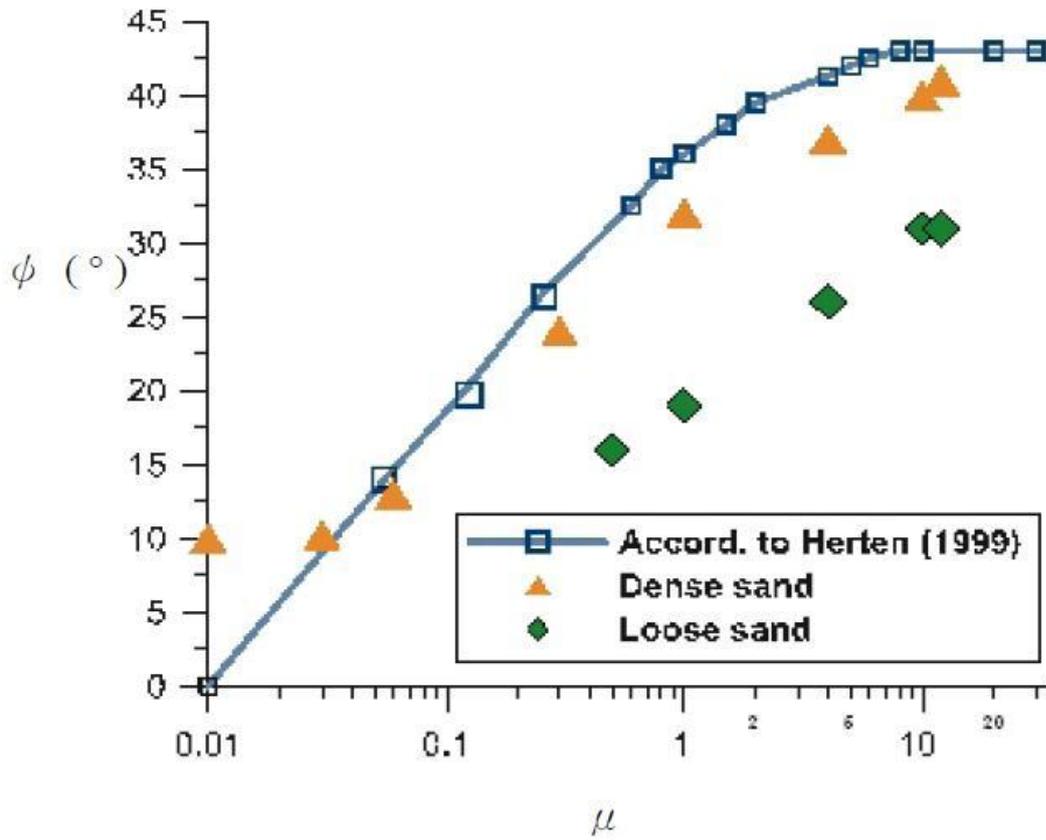


圖 4.8 摩擦係數與摩擦角之關係

在本研究中顆粒之介質為使用平行鍵結，平行鍵結主要的參數有鍵結半徑縮小因子(λ)、鍵結正向勁度(pb_kn)、鍵結剪向勁度(pn_ks)及鍵結正向強度(pb_nstr)、鍵結剪向強度(pb_sstr)。鍵結半徑取決於連結兩顆粒之最小半徑在乘上鍵結半徑縮小因子，在此將鍵結半徑縮小因子設為 1，即鍵結之圓盤半徑與相連之顆粒中最小半徑相同。鍵結正向強度與鍵結剪向強度透過 PFC3D 之計算公式(式 5-3)轉換，計算出鍵結正向勁度為 $5 \times 10^{11}(\text{N/m}^3)$ 、鍵結剪向勁度為 $2 \times 10^{11}(\text{N/m}^3)$ 。

$$k(pb) = \frac{\lambda \times k(p)}{\pi \times (\lambda \times r_{mean})} \quad (5.3)$$

鍵結的正向強度與剪向強度則是由模擬之三軸試驗結果與室內三軸試驗比對，在圍壓為 0.5MPa 作用下的尖峰強度訂定出本研究之鍵結強度參數分別為正向強度為 2.5×10^7 (N/m²)、剪向鍵結強度為 1×10^7 (N/m²)。本研究所模擬軟岩材料 A 之三軸試驗在圍壓為 0.5MPa 下之應力應變關係圖可見圖 4.9，為反覆加載過程下的應力應變關係圖，本研究中試體材料之顆粒間之鍵結係使用平行鍵結，在此情況下，尖峰後之反覆加載(加壓或解壓)時會令鍵結破壞數 (crack number) 累積增多，應變量也會隨之增加，代表材料內部損傷程度之提高。

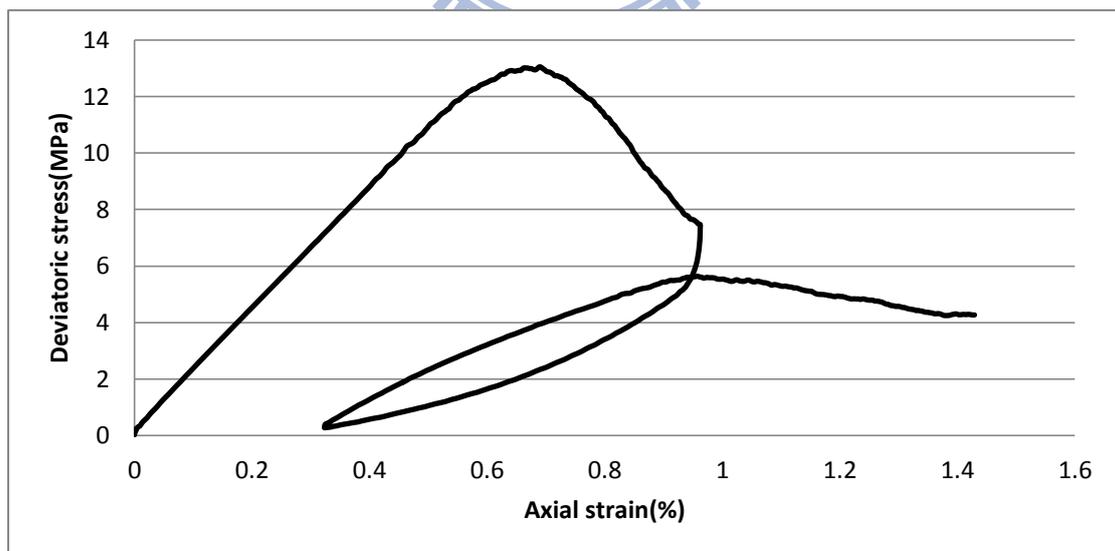


圖 4.9 軟岩材料 A 於圍壓 0.5MPa 下之模擬應力應變關係圖

在顆粒勁度與鍵結勁度參數的轉換部分，可見 5.4 式到 5.9 式為 PFC 中針對顆粒勁度做計算，5.10 式到 5.14 式則為鍵結勁度計算公式。一般岩石材料的勁度與強度比約差十倍，在此試體中因各項強度與勁度參數單位不同，所換算之勁度與強度相差倍數比則為 10^3 。

$$\tilde{R} = \frac{R_a + R_b}{2} \quad (\text{m}) \quad (5.4)$$

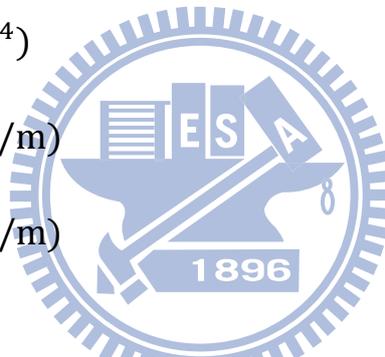
$$L = 2\tilde{R} = R_a + R_b \quad (\text{m}) \quad (5.5)$$

$$A = (2\tilde{R})^2 \quad (\text{m}^2) \quad (5.6)$$

$$I = \frac{1}{12} (2\tilde{R})^4 \quad (\text{m}^4) \quad (5.7)$$

$$kn = \frac{AE_c}{L} \quad (\text{N/m}) \quad (5.8)$$

$$ks = \frac{12IE_c}{L^3} \quad (\text{N/m}) \quad (5.9)$$



\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

$$\bar{R} = \lambda \min(R_a, R_b) \quad (\text{m}) \quad (5.10)$$

$$\bar{A} = \pi \bar{R}^2 \quad (\text{m}^2) \quad (5.11)$$

$$\bar{I} = \frac{3\pi \bar{R}^4}{12} \quad (\text{m}^4) \quad (5.12)$$

$$\bar{k}_n = \frac{\bar{E}_c}{L} \quad (\text{N/m}^3) \quad (5.13)$$

$$\bar{k}_s = \frac{12\bar{I} \bar{E}_c}{\bar{A}L^3} \quad (\text{N/m}^3) \quad (5.14)$$

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

4.3.2 軟岩材料 B 之模擬三軸試驗

由於上節已針對模擬三軸試驗的過程及率定方式詳加介紹，在此小節將簡單針對軟岩材料 B 之模擬室內三軸試驗參數及相關率定標的介紹。

在建立軟岩材料 B 模擬室內三軸試體中，將顆粒的密度採用軟弱砂岩密度 2700kg/m^3 ，試體尺寸為直徑 $7.5\text{cm} \times 15\text{cm}$ 之圓柱試體，以圍壓在 3MPa 下試驗，採試誤法求出本研究之勁度參數。軟岩材料 B 模擬之三軸試體在彈性階段之應力應變關係如圖 4-10 及體積應變對軸應變關係如圖 4.11。經過公式(4.1 式及 4.2 式)計算出楊氏係數 E 及柏松比 ν ，與陳賀瑞(1996)所作之室內三軸試驗結果比對(見表 4-5)，得到正向參數 $k_n=60(\text{MN/m})$ 及剪向參數 $k_s=30(\text{MN/m})$ 。在本研究中顆粒之摩擦係數採鬆砂 30 度角所對應之係數為 0.577 。

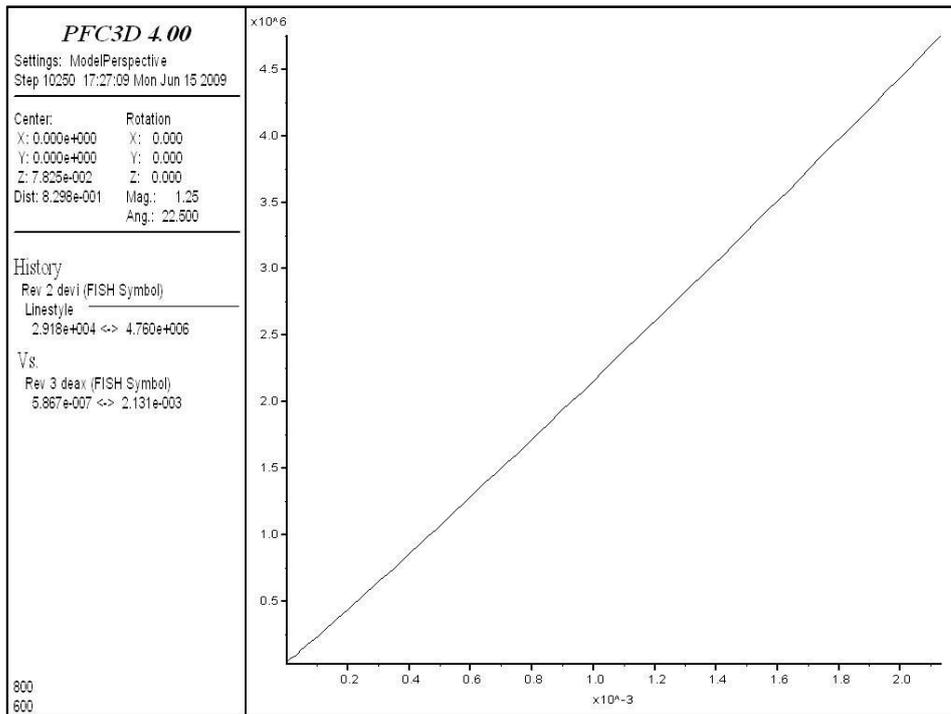


圖 4.10 軟岩材料 B 模擬之彈性階段應力應變關係圖



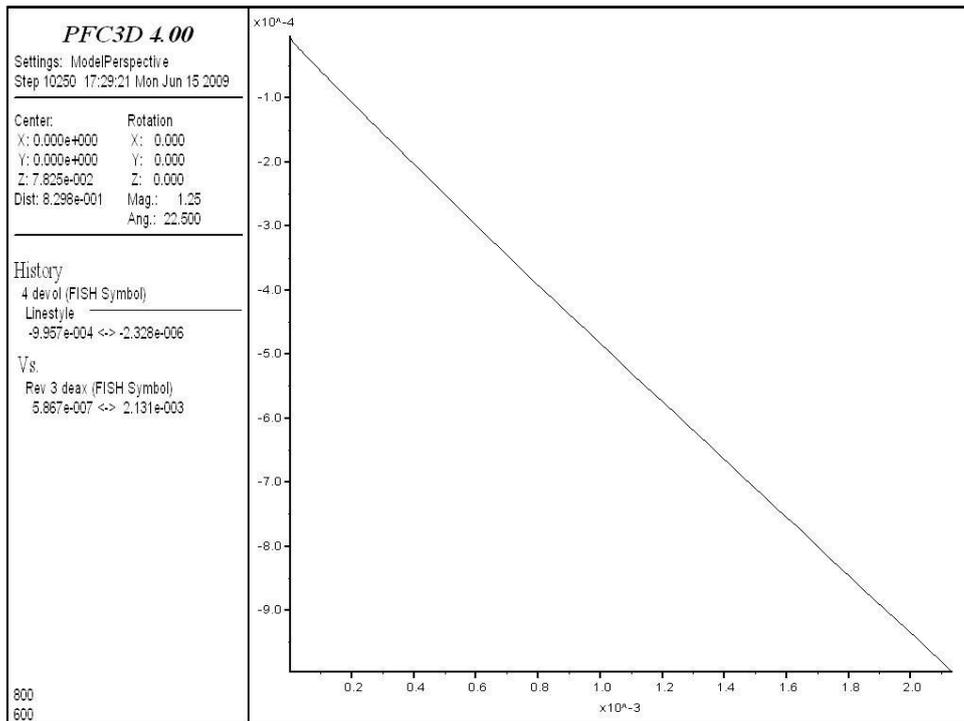


圖 4.11 軟岩材料 B 模擬之彈性階段體積應變與軸應變關係圖

表 4-5 模擬軟岩材料 B 之三軸試驗參數對照表

參數 岩體	圍壓 MPa	楊氏係數 E(MPa)	尖峰強度 P(MPa)	應變%	強度參數	
					c (MPa)	Φ (度)
室內試驗	3	29.85	29.3	0.894	3.02	42.2
模擬結果	3	22.3	28.59	0.714	4.28	44.6

在軟岩材料 B 之模擬三軸試驗中之平行鍵結，則將鍵結半徑放大因子(λ)設為 1，鍵結之正向及剪向勁度則是經公式(5.3 式)計算後得到鍵結正向勁度為 6×10^{12} (N/m³)、剪向勁度為 3×10^{12} (N/m³)。而鍵結之正向及剪向強度模擬之室內三軸試驗與陳賀瑞(1996)結果比對後，對圍壓於 3MPa 下之尖峰強度設定出鍵結正向強度為

1.3×10^8 (N/m²)及鍵結剪向強度為 0.65×10^8 (N/m²)，以軟岩材料 B 所模擬出三軸試驗應力應變關係如圖 4.12。其顆粒勁度參數與平行鍵結之勁度參數相差倍數則相差 10^4 。

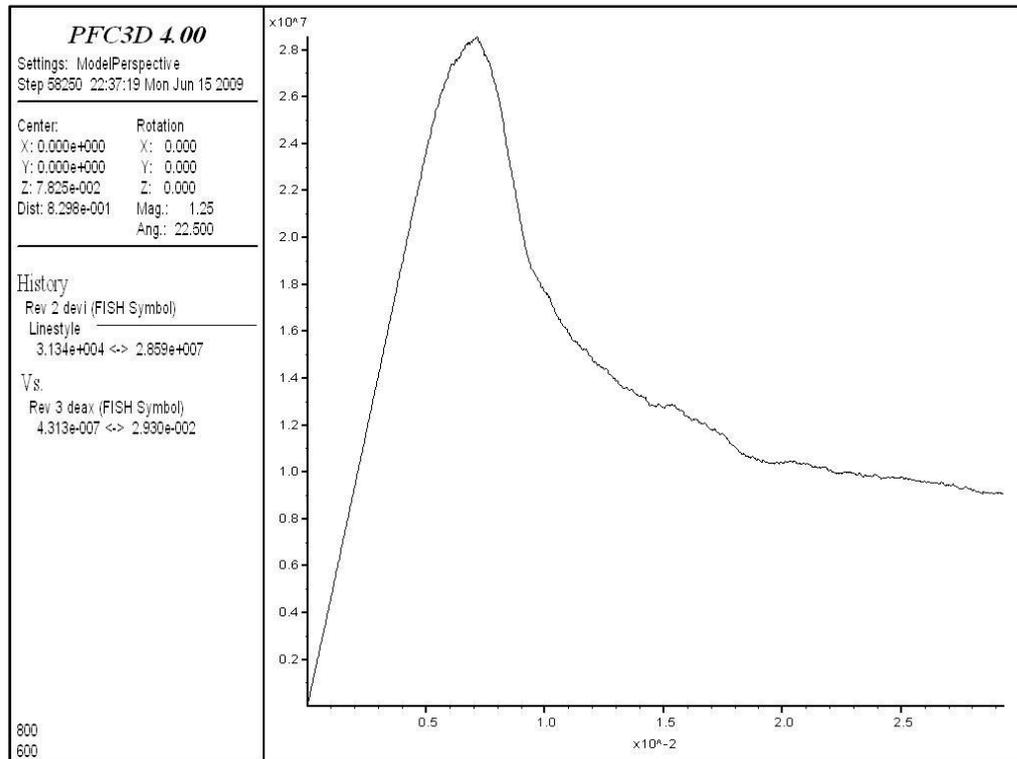


圖 4.12 軟岩材料 B 在圍壓 3MPa 下三軸試驗之模擬應力應變圖

4.4 討論

材料率定過程中，材料勁度與鍵結強度都以試誤法來率定。模擬試體（顆粒集合體）的微觀參數率定應令模擬所得之巨觀力學行為盡可能接近現地材料所對應之力學行為。微觀材料參數選定對於試體巨觀力學性質與行為有一定之影響，李佩鐸(2009)指出摩擦係數大小將

會影響試體在三軸試驗時的峰後行為(如圖 4.13);而鍵結強度主控試體的強度。張家銓(2007)指出鍵結強度與單壓強度呈現正比關係(如圖 4.14)。顆粒集合體中顆粒間之勁度參數影響材料的巨觀楊氏模數,以軟岩材料 A 為虛擬岩石之模擬對象,若將原有勁度分別降低至分別以 0.75、0.5、0.25 及 0.1 倍模擬三軸試驗,繼而以 4.1 式計算得楊氏模數(如表 4-6),可知材料集合體顆粒間之勁度與楊氏模數應呈正比關係(如圖 4.15),。

顆粒間之鍵結為平行鍵結時,三軸試驗達尖峰強度後之反覆加載會令鍵結破壞數(crack number)累積增多,應變量也會隨之增加,代表材料內部損傷程度之提高。

圍壓為 0.5MPa 時,模擬三軸試體尺寸為直徑 10cm、高 20cm,顆粒數已達 14400 顆,若圍壓僅 0.03MPa,試體橫向擴張,三軸試驗中之試體的細長比將無法維持 2:1 之比例,因此圍壓過低時可能會造成試體形狀異常。

摩擦係數影響之結果

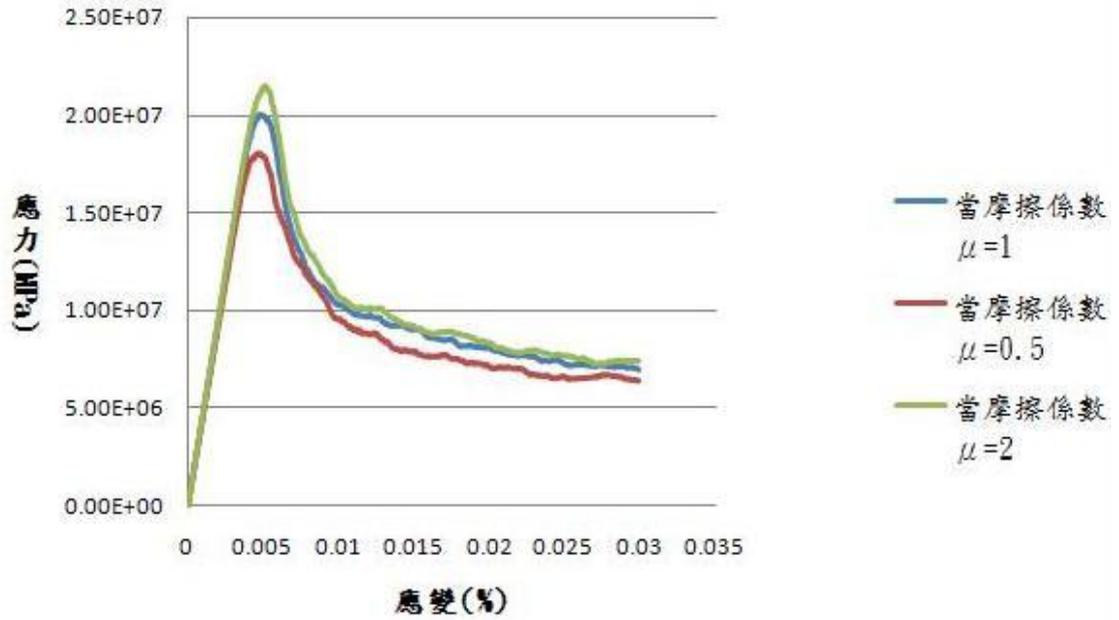


圖 4.13 摩擦係數對模擬結果之影響(李佩錚, 2009)

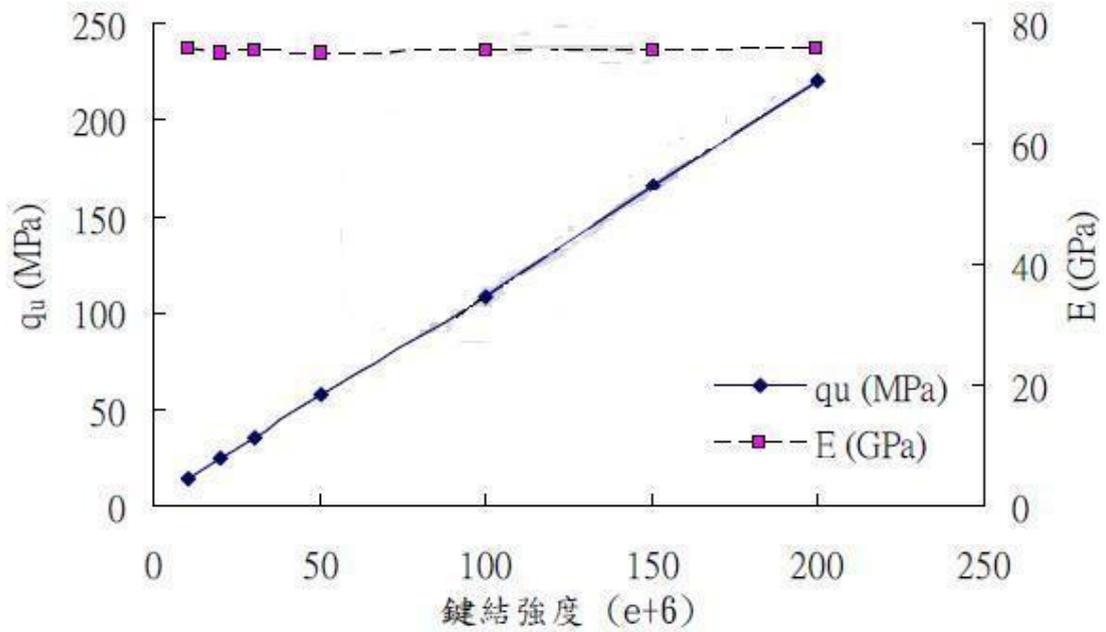


圖 4.14 微觀鍵結強度參數與巨觀單壓強度之關係(張家銓, 2007)

表 4-6 改變顆粒勁度下影響之楊氏係數值

顆粒間 勁度參數	正向勁度	5.00E+06	7.50E+07	2.50E+07	1.25E+07	5.00E+07
	剪向勁度	2.00E+06	5.00E+06	1.00E+06	1.50E+07	2.00E+07
楊氏係數(MPa)		3.38	6.9	10.84	18.75	21.83

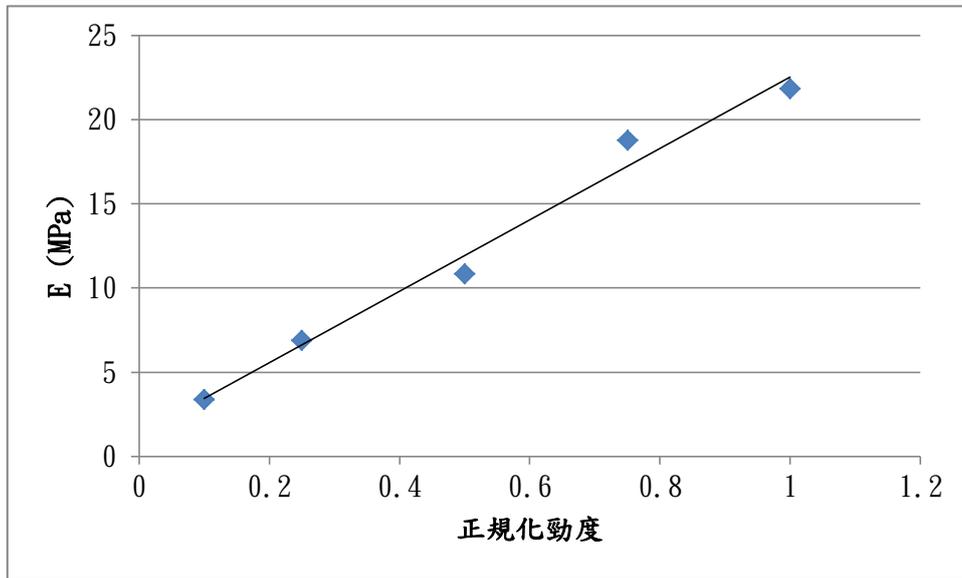


圖 4.15 勁度與楊氏係數關係

第五章 沖蝕機制模擬結果

本研究採前章所率定完成的試體分別做磨蝕沖蝕及顆粒彈跳撞擊兩種沖蝕機制之模擬，模擬方法如第四章研究方法所述，以下針對磨蝕沖蝕及顆粒彈跳撞擊沖蝕機制之模擬結果分別介紹及探討。

5.1 磨蝕沖蝕機制模擬結果

本節所探討的磨蝕機制主要模擬水流剪應力流過造成岩床表面的膠結顆粒破壞，在本研究中設定牆面之摩擦係數，以牆面摩擦試體表面造成剪應力的方法以達臨界剪應力，造成岩床試體表面膠結顆粒破壞，在本研究中藉由牆面相對岩床試體位移摩擦所致剪應力磨蝕試體表面。

以國立交通大學防災與水環境研究中心(2010) 針對攔河堰前岩盤沖刷之研究結果為參考，若考慮現地軟岩沖蝕情況，一般河床面上之床面剪應力鮮有超過 10kPa 者，因此本章所考慮之床面剪應力以不超過 10kPa 為原則，模擬接近現地剪應力之磨蝕沖蝕破壞情況。

在李佩錚(2009)針對軟岩材料 A 所模擬之軟岩試驗及郭炳宏(2009)的實驗室試驗發現軟岩材料 B 啟動剪應力皆須達 0.1MPa (100kPa) 以上，試體才會產生破壞。本研究以對應單壓強度 6.26MPa

虛擬試體進行虛擬磨蝕試驗，也發現至少需要 0.1MPa 以上之剪應力才能造成該虛擬試體破壞。圖 5.1 為該虛擬試體對應之剪應力與破壞數量，在此試體中啟動剪應力須達 0.106MPa 才開始產生鍵結破壞。然現地流況可能出現之床面剪應力極限與磨蝕模擬之啟動剪應力差距極大，除非將試體強度降低，否則磨蝕啟動剪應力不會接近現地流況可能出現之床面剪應力極限。

因此本研究採試誤法改變試體強度以降低試體所需之啟動剪應力，如圖 5.2 所示，在試體單壓強度為 3.13MPa 時，啟動剪應力為 22.9KPa，降低強度至 0.626MPa 時啟動剪應力則降至 9.27KPa，顯示將試體強度降低後該試體之啟動剪應力也隨之降低。使能在接近現地流況下可能出現之床面剪應力下，達到啟動剪應力，產生破壞。經由應力量測元回饋控制牆面速度，經此方法穩定的增加剪應力，經試誤法尋找後，將試體單壓強度降至 60KPa 時，在 22300 階時達到啟動剪應力為 1.68KPa，此時開始產生鍵結破壞，對應現地沖蝕情況為淨水池下方之沖刷坑之沖蝕情形。若剪應力持續增加若達 10KPa 時產生了 1853 個鍵結破壞，試體破壞情形如圖 5.3。鍵結破壞機制主要為剪向鍵結破壞，剪向鍵結破壞約占破壞的鍵結 3/4(如圖 5.4)，與本研究模擬機制主控為剪應力施加控制破壞程度為一致。若經檢核單位顆粒之全部平行鍵結破壞後，該顆粒即視同完全不受鍵結約束之（自由）

漂浮顆粒，隨即刪除該顆粒，再持續控制牆面速度摩擦試體表面以產生岩床表面拖曳力，並循環檢核岩床面是否有新產生之漂浮顆粒。刪除顆粒之累計數即為表 5-1 之破壞顆粒數，將破壞顆粒之體積累積即得沖蝕體積。由虛擬沖蝕試驗模擬所得的沖蝕結果可探討臨界剪應力及沖蝕率，在達到臨界剪應力時，剪應力與沖蝕體積約呈現線性增加的關係。

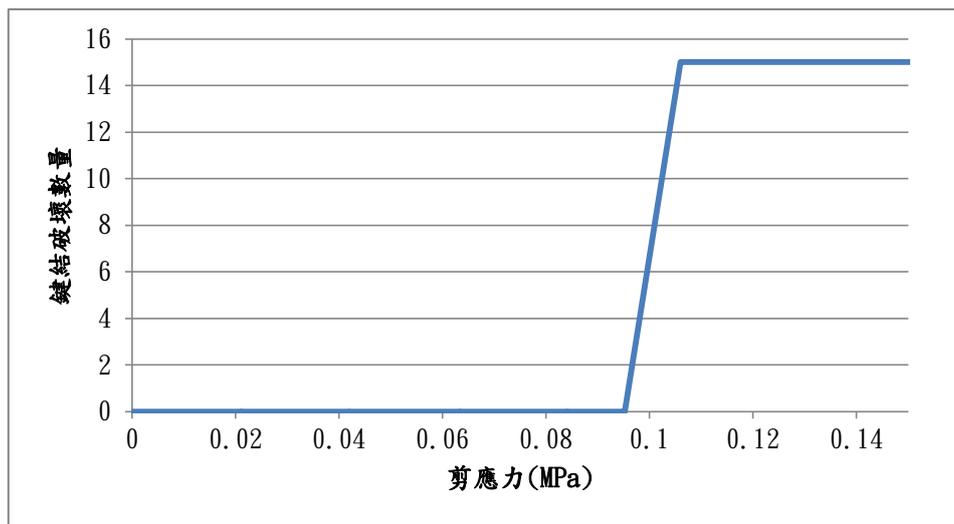


圖 5.1 單壓強度 6.26MPa 下之剪應力與破壞數量

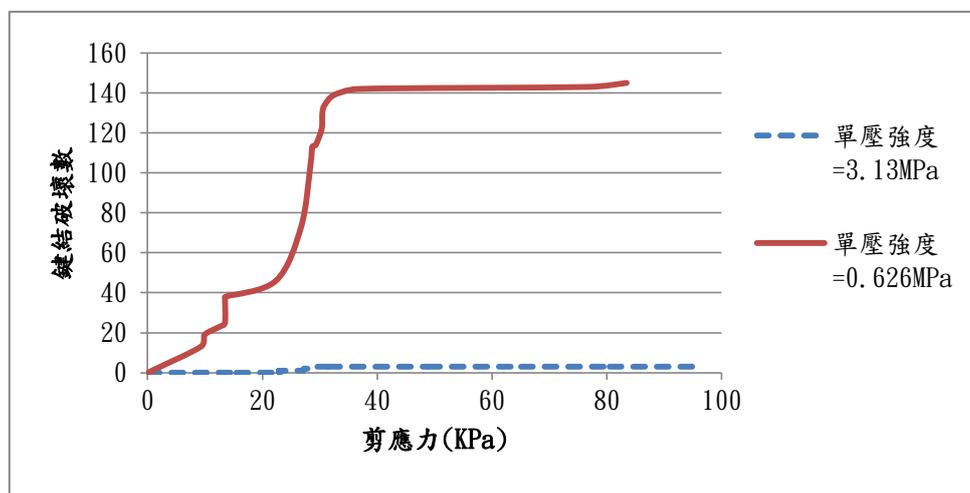


圖 5.2 單壓強度調整與鍵結破壞對應關係

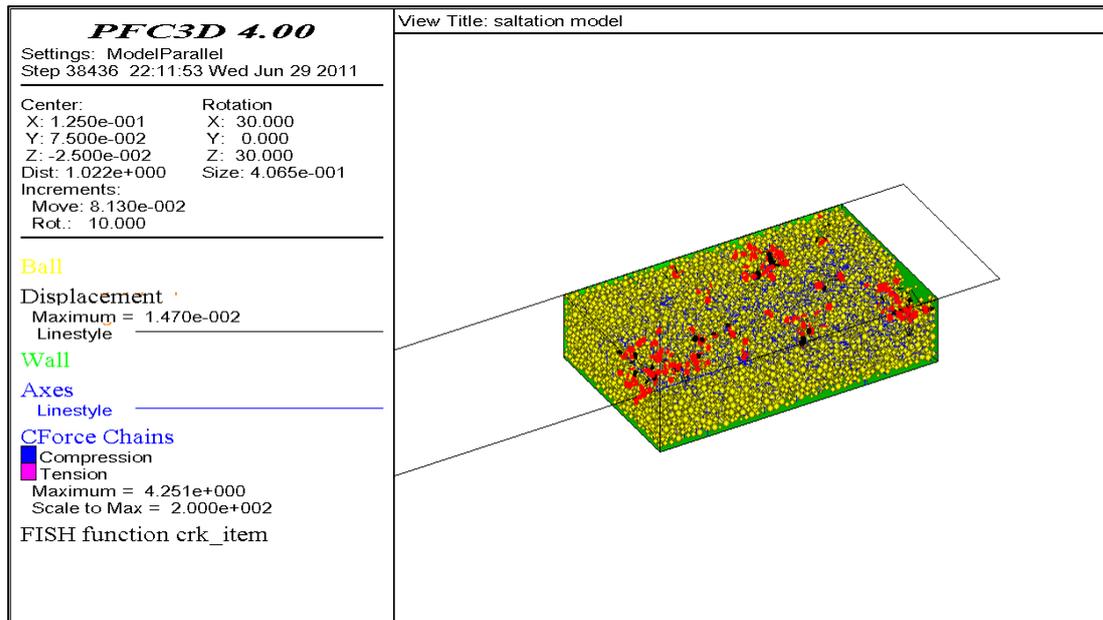


圖 5.3 模擬牆面磨蝕之破壞情形



表 5-1 磨蝕試驗模擬結果

Step	平均剪應力 (Pa)	總鍵結 破壞量	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	破壞 顆粒數	破壞體積 (cm ³)
19350	28.894	0	0	0		0
22300	1684.2	1	0	1	0	0
24250	2560.6	9	1	8	2	0.0916
24450	2827.7	15	2	13	3	0.118
24550	2659.9	187	42	145	41	1.878
24650	3199.2	197	46	151	51	2.4103
26350	3484.1	269	61	208	69	3.3097
27150	3820.5	561	142	419	144	6.8955
27250	4046.5	570	144	426	159	7.6108
27450	4322.9	580	146	434	163	7.7473
27550	4110.6	682	174	508	176	8.4781
28450	4518.9	851	219	632	230	11.0577
28550	4856.8	869	225	644	237	11.435
29250	4649.2	876	226	650	243	11.7205
30850	5655.3	1041	268	773	267	12.7612
30950	5942.4	1054	272	782	276	13.2208
31200	5904.8	1093	287	806	284	13.6214
31450	6047.6	1118	293	825	289	13.899
31950	6387.5	1258	336	922	320	15.4597
32050	6154.6	1276	339	937	332	16.151
34150	7467.5	1410	380	1030	335	16.3164
34250	7645.1	1463	396	1067	356	17.3791
37150	8895.4	1853	497	1356	388	18.7584
38400	9694.5	1853	497	1356	420	20.1377

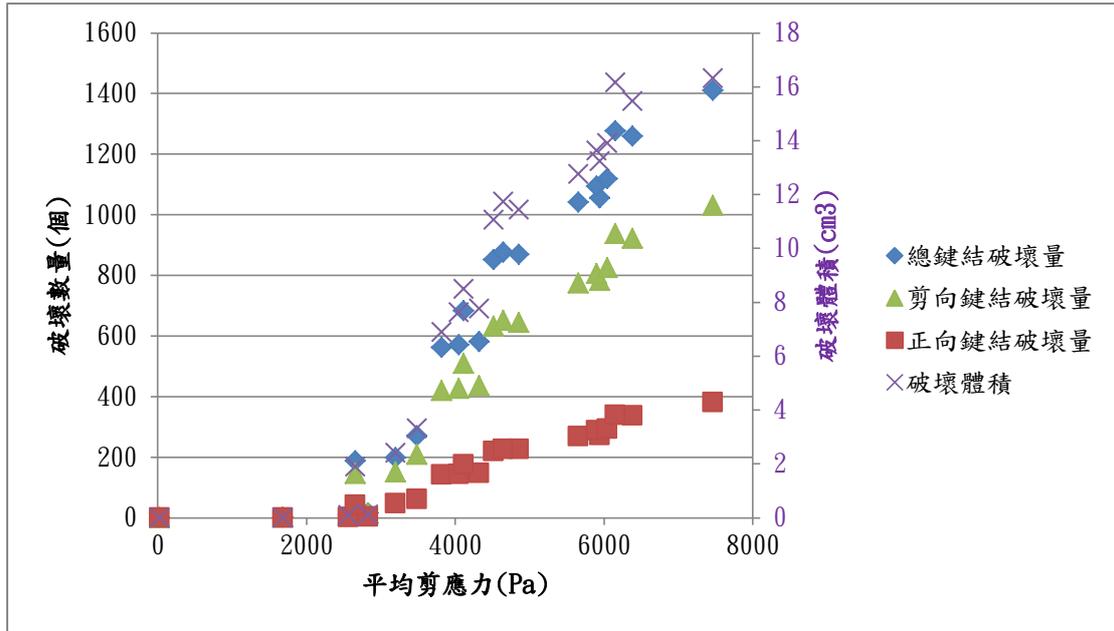


圖 5.4 鍵結破壞與破壞體積關係圖

5.1.1 結果討論



在郭炳宏(2009)的實驗室磨蝕試驗中，啟動剪應力必須達 0.1MPa 以上，試體才會產生破壞。與現地流況可能出現之床面剪應力極限差距極大，除非現地岩床表面經過乾溼循環以及風化等因素，造成了河床表面之岩床材料大幅弱化，方能令模擬之啟動剪應力接近現地情況則必須降低試體強度。本虛擬磨蝕試驗中因材料為等向均質材料，所以將試體整體強度降低才可降低至現地流況可能出現之床面剪應力極限。在虛擬磨蝕試驗中，可以明顯觀察破壞機制主要為剪向鍵結破壞，證明本模擬主控機制為床面剪向拖曳力增加達到材料破壞。破壞之剪應力與破壞體積線性遞增之關係，將可用來推估流速與床面

剪應力之經驗式。

另外在試驗結果中，由試體剖面（如圖 5.5）可觀察：施加沖蝕力後試體破壞之分布較為局部性，其破壞方式不如預期為表層顆粒一層層開始剝離至下一層顆粒之破壞方式，此外在模擬試驗中試體應力傳遞方式主要以正向力為主，並且若欲模擬現地岩盤沖蝕情形應為主要應力只在試體表面施加，相對底部之應力應極小，但本研究中之磨蝕沖蝕模擬結果中應力傳遞至試體底部之應力值相對於表層應力並不盡理想，如圖 5.6 所示。

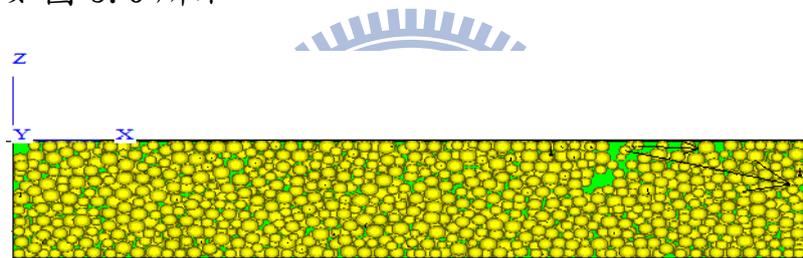


圖 5.5 磨蝕沖蝕力施加後試體破壞剖面圖

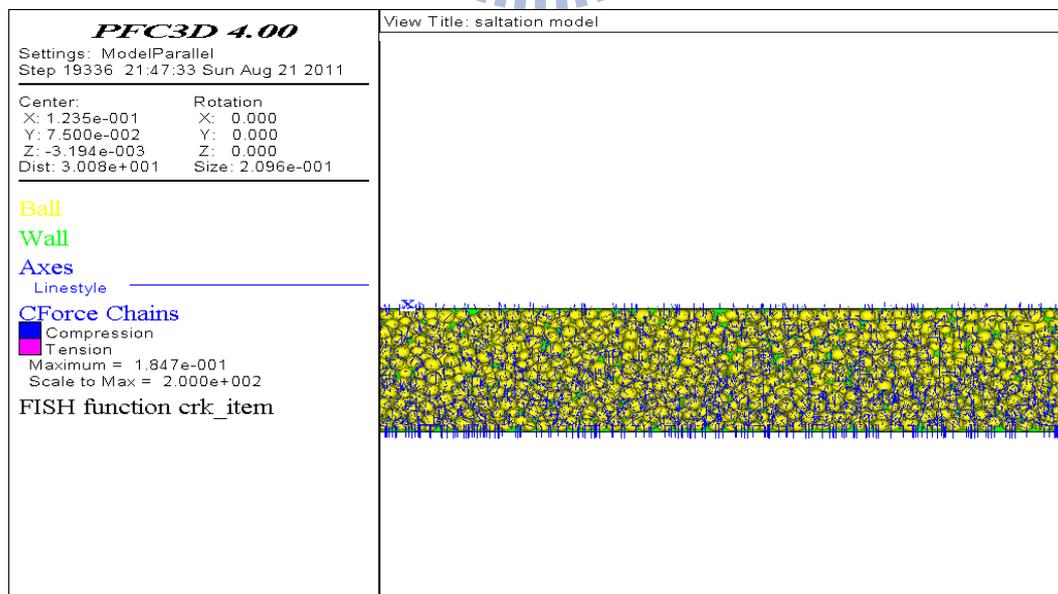


圖 5.6 磨蝕沖蝕力施加後試體應力分布剖面圖

5.2 顆粒彈跳撞擊沖蝕之模擬結果

本節共分為五個部分，以下將分別以試體材料 A 與材料 B 兩種虛擬試體進行試驗。5.2.1 節為模擬軟岩材料顆粒彈跳撞擊模擬之試驗結果，5.2.2 節則分別對兩種岩性試驗數據整理後，針對影響因子與能量之間的關係作探討，5.2.3 節則是就顆粒連續性隨機撞擊試驗探討長期沖蝕下之破壞趨勢，5.2.4 節則探討材料之楊氏模數及張力強度之影響。

5.2.1 軟岩材料彈跳撞擊模擬試驗

本小節分別對不同撞擊因子作探討，共分為撞擊角度、撞擊顆粒尺寸及撞擊速度等三種因子。撞擊角度分別探討 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° ，撞擊顆粒尺寸則分為 1cm、2cm、3cm、4cm、5cm、6cm 等六種尺寸，撞擊速度則分為 1m/s、5m/s、10m/s、15m/s、20m/s。試驗組數為五組，分別為撞擊點為 $(x, y)=(0.075, 0.075)$ 、 $(x, y)=(0.0375, 0.075)$ 、 $(x, y)=(0.1125, 0.075)$ 、 $(x, y)=(0.075, 0.0375)$ 、 $(x, y)=(0.075, 0.1125)$ 等五點，如圖 5.7 所示，試驗結果如表 5-2 至表 5-11。

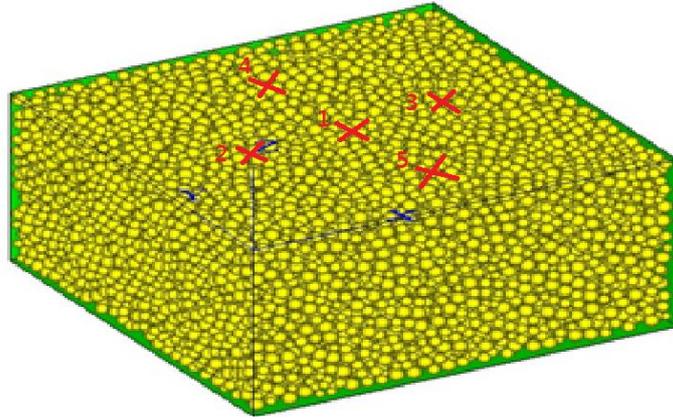


圖 5.7 試驗撞擊點示意圖

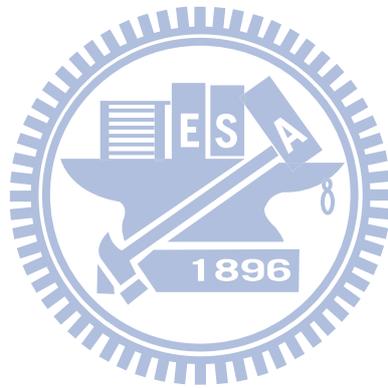


表 5-2 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例一

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.2122	0	0	0	0	0.0000
	30	0.3973	16	4	12	5	0.1961
	45	0.5916	18	5	13	5	0.1961
	60	0.9039	28	7	21	6	0.2717
	75	1.0270	30	6	24	9	0.3958
撞擊速度 (m/s)	1	0.0299	0	0	0	0	0.0000
	5	0.3973	16	4	12	5	0.1961
	10	1.3670	44	14	30	12	0.5743
	15	3.0931	98	32	66	26	1.1914
	20	6.4114	154	42	112	43	1.9755
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0929	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.3973	16	4	12	5	0.1961
	0.03	0.9705	20	5	15	5	0.1961
	0.04	2.3060	41	9	32	10	0.4993
	0.05	4.3139	70	20	50	13	0.6238
	0.06	7.4000	220	62	158	52	2.3674

表 5-3 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例二

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.1049	0	0	0	0	0.0000
	30	0.3110	3	0	3	0	0.0000
	45	0.5823	5	0	5	0	0.0000
	60	0.8263	7	0	7	1	0.0757
	75	0.9887	12	1	11	2	0.1028
撞擊速度 (m/s)	1	0.0225	0	0	0	0	0.0000
	5	0.3110	3	0	3	0	0.0000
	10	1.0696	11	1	10	2	0.1536
	15	2.3940	46	12	34	9	0.5190
	20	4.3821	104	30	74	25	1.2319
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0368	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.3110	3	0	3	0	0.0000
	0.03	0.8768	7	0	7	1	0.0757
	0.04	2.0146	27	5	22	6	0.3229
	0.05	4.0474	107	30	77	24	1.3500
	0.06	6.9746	169	46	123	37	1.8659

表 5-4 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例三

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0854	0	0	0	0	0.0000
	30	0.2730	0	0	0	0	0.0000
	45	0.5384	3	0	3	0	0.0000
	60	0.8066	8	1	7	2	0.0757
	75	0.9829	12	1	11	2	0.1028
撞擊速度 (m/s)	1	0.0204	0	0	0	0	0.0000
	5	0.2730	0	0	0	0	0.0000
	10	1.0422	11	1	10	2	0.1536
	15	2.4640	62	23	39	15	0.5190
	20	5.2531	121	31	90	28	1.2319
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0359	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.2730	0	0	0	0	0.0000
	0.03	0.8930	9	0	9	1	0.0757
	0.04	2.1036	38	4	34	6	0.3229
	0.05	4.4130	86	13	73	21	1.3500
	0.06	7.6292	175	31	144	39	1.8659

表 5-5 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例四

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0790	0	0	0	0	0.0000
	30	0.2767	8	2	6	2	0.0000
	45	0.5603	15	5	10	4	0.0000
	60	0.9055	28	8	20	7	0.0757
	75	1.0853	31	14	17	9	0.1028
撞擊速度 (m/s)	1	0.0191	0	0	0	0	0.0000
	5	0.2767	8	2	6	2	0.0000
	10	1.9023	35	8	27	10	0.1536
	15	3.7574	97	32	65	27	0.5190
	20	6.1456	153	38	115	42	1.2319
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0438	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.2767	8	2	6	2	0.0000
	0.03	1.5852	35	11	24	10	0.0757
	0.04	2.3874	77	19	58	18	0.3229
	0.05	4.1434	110	30	80	32	1.3500
	0.06	7.1226	202	55	147	52	1.8659

表 5-6 軟岩材料 A 彈跳撞擊模擬案例五

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0082	0	0	0	0	0.0000
	30	0.2848	0	0	0	0	0.0000
	45	0.5087	9	1	8	0	0.0000
	60	0.7728	19	3	16	4	0.0757
	75	0.9644	21	3	18	5	0.1028
	90	1.0291	19	3	16	4	0.1536
撞擊速度 (m/s)	1	0.0096	0	0	0	0	0.0000
	5	0.2848	0	0	0	0	0.0000
	10	1.2150	8	1	7	1	0.1536
	15	2.6389	38	8	3	8	0.5190
	20	5.1475	70	12	58	14	1.2319
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0441	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.2848	0	0	0	0	0.0000
	0.03	0.9421	9	0	9	0	0.0757
	0.04	2.0907	39	5	34	9	0.3229
	0.05	4.1144	59	9	50	12	1.3500
	0.06	6.8541	110	22	88	23	1.8659

表 5-7 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例一

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破 壞數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0675	0	0	0	0	0.0000
	30	0.2873	4	0	4	0	0.0000
	45	0.5916	6	0	6	0	0.0000
	60	0.8578	8	2	6	2	0.0628
	75	1.0022	9	3	6	2	0.0628
撞擊速度 (m/s)	1	0.0162	0	0	0	0	0.0000
	5	0.3019	4	0	4	0	0.0000
	10	1.2783	10	2	8	0	0.0000
	15	2.9460	72	21	51	17	0.6793
	20	5.4946	106	30	76	23	0.9944
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0494	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.2873	4	0	4	0	0.0000
	0.03	1.0189	11	2	9	0	0.0000
	0.04	2.4217	68	18	50	17	0.7216
	0.05	4.8839	98	32	78	22	0.8845
	0.06	8.7374	171	32	139	40	1.7956

表 5-8 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例二

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0637	0	0	0	0	0.0000
	30	0.2448	1	0	1	0	0.0000
	45	0.4920	2	0	2	0	0.0000
	60	0.7861	17	4	13	4	0.1175
	75	0.9855	23	9	14	8	0.3694
撞擊速度 (m/s)	1	0.0127	0	0	0	0	0.0000
	5	0.2448	1	0	1	0	0.0000
	10	1.0589	20	6	14	7	0.2984
	15	2.3573	50	10	40	16	0.7326
	20	5.2308	109	20	89	30	1.3973
撞擊顆粒 尺寸 (m)	0.01	0.0595	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.2448	1	0	1	0	0.0000
	0.03	0.8642	14	2	12	1	0.0277
	0.04	2.0558	42	9	33	10	0.4040
	0.05	4.3917	95	12	83	20	0.9319
	0.06	7.4956	166	23	143	35	1.6330

表 5-9 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例三

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0868	2	1	1	0	0.0000
	30	0.5722	2	1	1	1	0.0432
	45	0.6983	11	1	10	3	0.1324
	60	0.7818	15	1	14	4	0.1952
	75	0.9769	21	2	19	5	0.2618
	90	1.0517	23	3	20	5	0.2352
撞擊速度 (m/s)	1	0.0785	0	0	0	0	0.0000
	5	0.5722	2	1	1	1	0.0432
	10	2.4467	14	0	14	2	0.1083
	15	4.7058	62	12	50	15	0.7108
	20	7.0313	78	25	53	20	1.0156
撞擊顆粒 尺寸 (m)	0.01	0.0402	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.5722	2	1	1	1	0.0432
	0.03	1.5997	11	2	9	4	0.1952
	0.04	2.7574	43	8	35	11	0.5166
	0.05	4.5655	75	17	58	15	0.7770
	0.06	8.9254	129	26	103	28	1.4373

表 5-10 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例四

撞擊因子		ΔE (Joule)	鍵結破壞 總數	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破壞 數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.0713	0	0	0	0	0.0000
	30	0.5418	2	0	2	0	0.0000
	45	0.5906	2	1	1	0	0.0000
	60	0.7563	6	5	1	1	0.0653
	75	0.9811	23	6	17	3	0.1463
	90	1.0593	25	19	6	5	0.2714
撞擊速度 (m/s)	1	0.0097	0	0	0	0	0.0000
	5	0.5418	2	0	2	0	0.0000
	10	1.5299	35	6	29	8	0.3013
	15	3.1909	66	16	50	15	0.6545
	20	5.4264	118	24	94	30	1.4570
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.1953	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.5418	2	0	2	0	0.0000
	0.03	1.0910	14	4	10	2	0.0739
	0.04	2.4166	51	16	43	4	0.2359
	0.05	4.2427	81	18	63	12	0.5622
	0.06	7.1501	139	28	111	33	1.5381

表 5-11 軟岩材料 B 彈跳撞擊模擬案例五

撞擊因子		ΔE (Joule)	總鍵結 破壞量	正向鍵結 破壞量	剪向鍵結 破壞量	顆粒破 壞數量	破壞體積 (cm^3)
撞擊角度 (度)	15	0.1956	0	0	0	0	0.0000
	30	0.4061	0	0	0	0	0.0000
	45	0.5859	0	0	0	0	0.0000
	60	0.8396	8	0	8	2	0.0855
	75	0.9898	15	1	14	3	0.1426
	90	1.0324	17	1	16	3	0.1426
撞擊速度 (m/s)	1	0.0099	0	0	0	0	0.0000
	5	0.4061	0	0	0	0	0.0000
	10	1.3288	4	0	4	0	0.0000
	15	2.4829	38	6	32	8	0.3641
	20	4.7848	85	20	65	18	0.8555
撞擊顆粒 尺寸(m)	0.01	0.0432	0	0	0	0	0.0000
	0.02	0.4061	0	0	0	0	0.0000
	0.03	0.9474	4	0	4	0	0.0000
	0.04	2.1706	39	14	35	8	0.3458
	0.05	4.3638	81	16	65	14	0.6313
	0.06	7.7859	151	32	119	31	1.4315

5.2.2 顆粒彈跳撞擊影響因子探討

在顆粒彈跳撞擊模擬試驗中，本研究分別以軟岩材料 A 及材料 B 做撞擊因子與能量關係之間的探討，以 Sklar 之半經驗式

$E = V_i \times I_r \times F_e$ ，探討各個因子之影響性，觀察能量消耗多寡與鍵結破壞程度以及破壞體積量之關係。以下針對單位顆粒撞擊後岩床試體所脫離之體積(V_i)之影響因子顆粒撞擊角度、撞擊速度及撞擊顆粒尺

寸大小等三種因子探討。

5.2.2.1 撞擊角度因子探討

本節為針對模擬之五個案例之撞擊角度變異因子探討，探討撞擊角度案例中固定撞擊速度 5m/s、撞擊顆粒尺寸 2cm 下分別以 15°、30°、45°、60°、75° 等角度(如圖 5.8)探討高角度與低角度的撞擊下破壞情形。統整後五個案例之各角度平均值，以及計算標準偏差值，以平均值與標準偏差值畫出圖 5.9 圖 5.10 由於數據過於龐大，所以在此以圖 5.7 圖 5.8 現該種岩性在角度變異下之平均值以及其標準差。



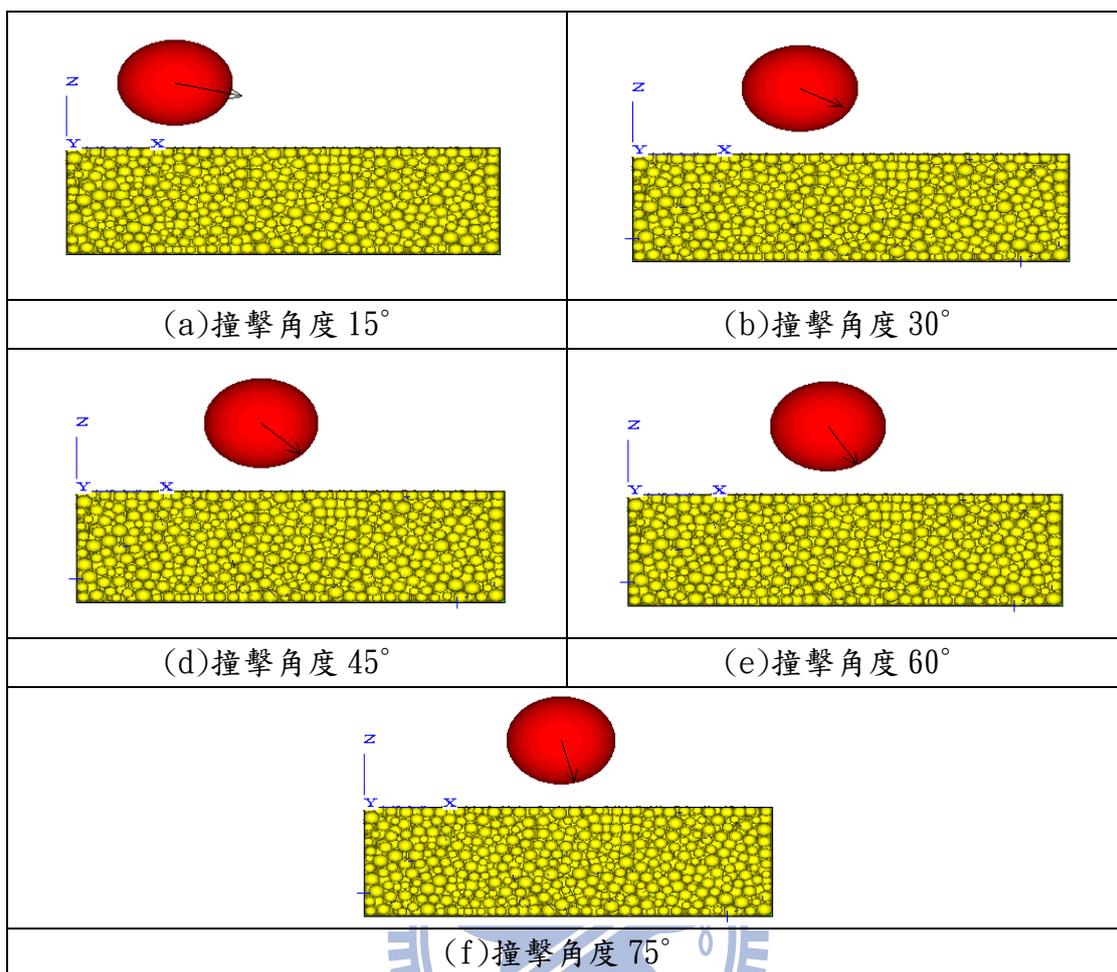


圖 5.8 模擬中撞擊角度變化情況

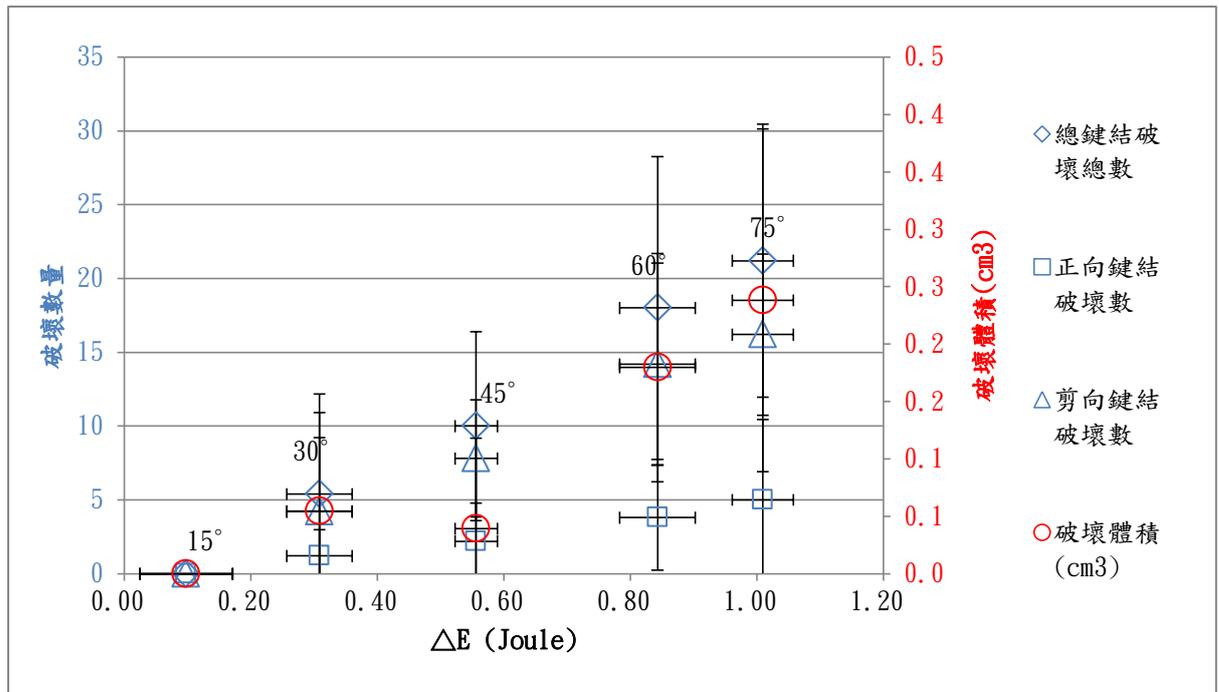


圖 5.9 軟岩材料 A 撞擊角度變化之影響情形

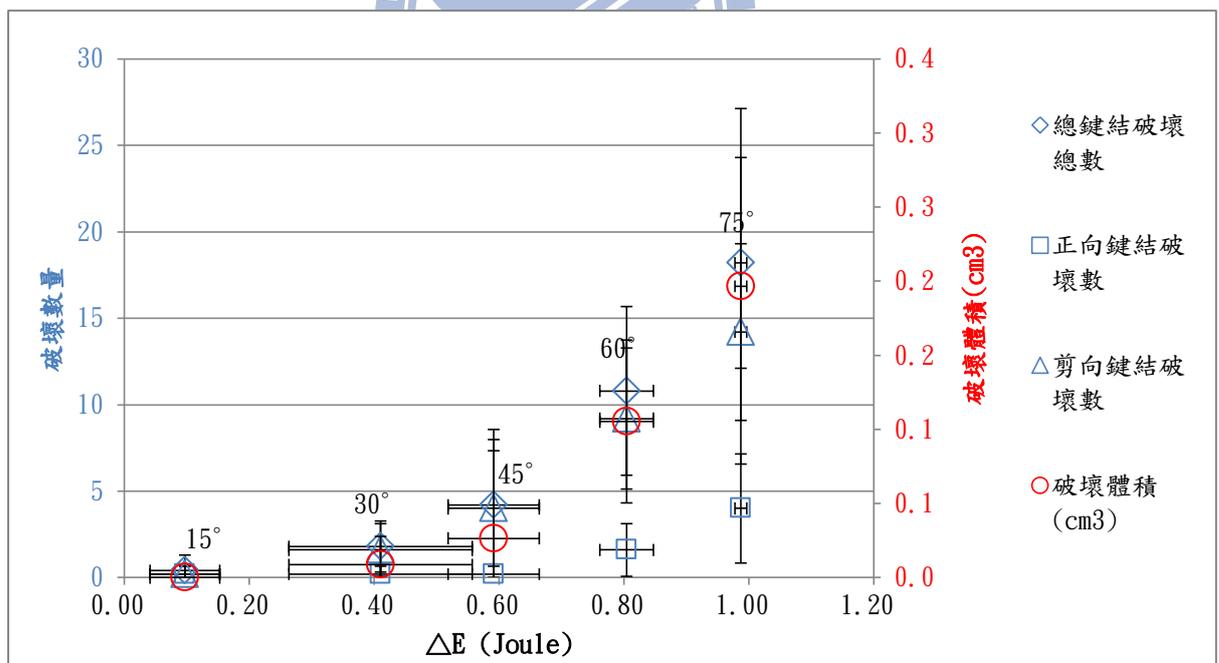


圖 5.10 軟岩材料 B 撞擊角度變化之影響情形

五種撞擊角度中，因其他影響因子採固定值，但角度增加時撞擊

所消耗的能量也隨之增加，顯示在高角度的沖蝕破壞比低角度的破壞量為多。由於撞擊點不同，各個撞擊點的顆粒排列情況不一，顆粒之鍵結數量也不相同，所以在圖中顯示數據的標準差值變異範圍較廣，但就各點撞擊後之曲線趨勢為雷同的。因高角度的變形磨損(Deformation Wear)其主要破壞影響範圍較深相對於低角度之切削破壞(Cutting Wear)破壞主要為表面破壞，影響面積相對較大。正向鍵結破壞比例也隨著角度增加而隨之增加，因在增加角度撞擊時，正向速度的增加也會造成破壞的機制轉為正向破壞量較多。



Sklar(2004)中針對角度變化之影響所做的比較如圖 5.11 及圖 5.12，圖 5.9 為 Sklar 採 Head and Harr (1970) 的試驗數據，Head and Harr (1970)為使用 0.3mm 的玻璃小球於玻璃板上 5 公尺撞擊玻璃板，分別以 15° 及 90° 兩種撞擊角度下之單位撞擊顆粒質量下之能量轉換及破壞體積關係。在本研究中模擬分別以 15° 及 90° 兩種撞擊角度下之單位撞擊顆粒質量下之能量轉換及破壞體積關係圖如圖 5.10，所模擬結果與 Sklar 之研究相似，當撞擊角度為低角度時遠低於高角度撞擊之能量消耗及破壞體積。在上述之圖 5.9 及 5.10 中也可印證，當變化因子皆為撞擊角度不同，在圖中顯示在低角度時破壞數量極少，當角度漸增時破壞數量也隨之遞增。

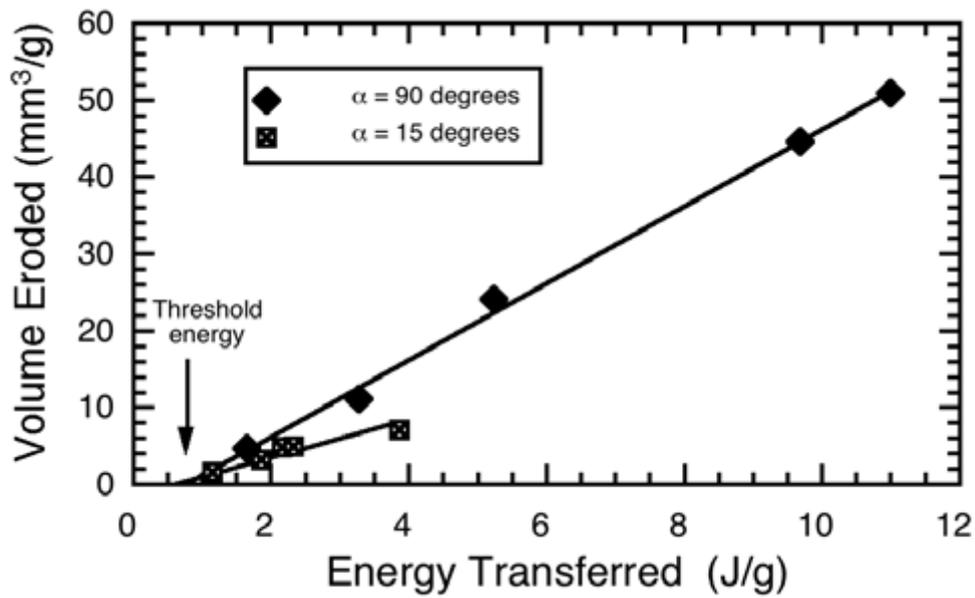


圖 5.11 不同角度的能量轉換及破壞體積關係圖(SKLAR, 2004)

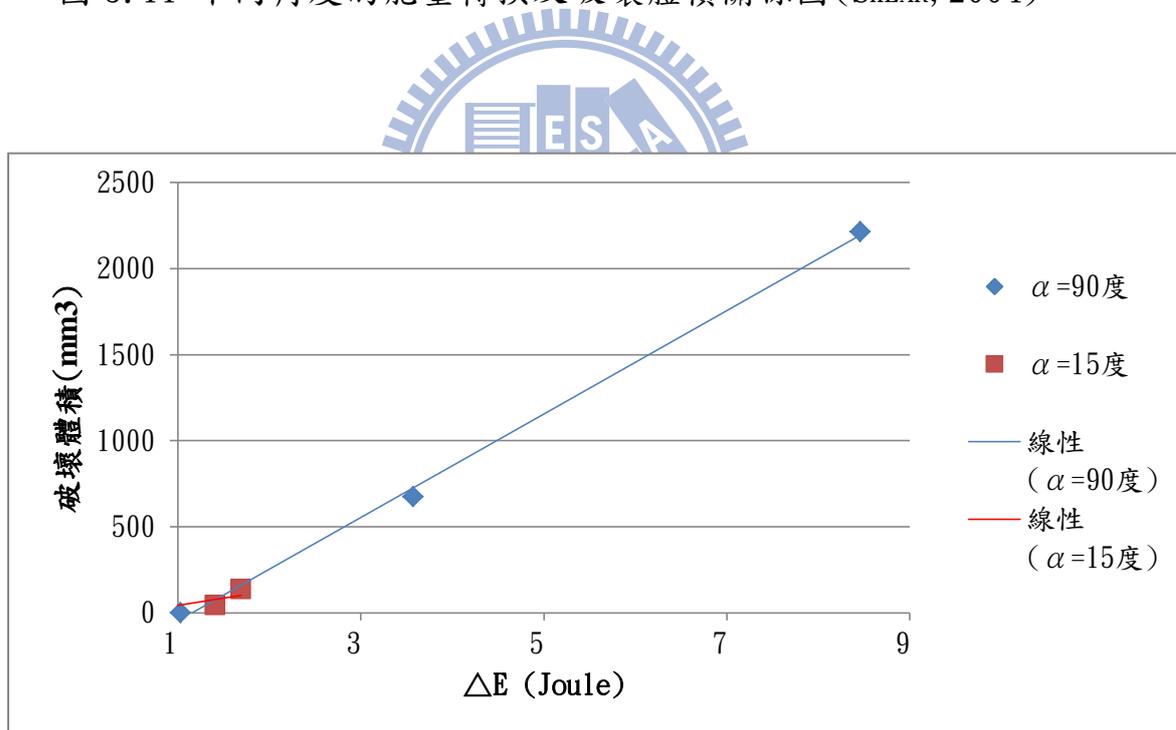


圖 5.12 模擬材料 A 在不同角度的能量轉換及破壞體積關係圖

此外 Sklar 利用 Head and Harr(1970)與 Bitter(1963a)之試驗

數據針對撞擊角度及磨蝕速率整理過後所得如圖 5.13，針對撞擊角

度之垂直分量比率下正規化該撞擊角度所得之破壞速率。本研究以試驗之材料 A 與材料 B 試驗所得之結果如圖 5.14，模擬試驗中撞擊角度之垂直分量比率下正規化該撞擊角度所得之破壞速率較接近指數增加，有別於 Sklar 所得之線性增加。在模擬試驗的材料中，材料中之顆粒集合體由平行鍵結之正向及剪向鍵結強度決定材料破壞強度，材料正向鍵結強度與剪向鍵結強度比(k_n/k_s)影響材料的行為，在軟岩材料 B 中之正向與剪向鍵結為 2.5 倍、軟岩材料 A 為 2 倍，在低角度撞擊時主控為剪向破壞，材料 B 因此呈現指數增加之趨勢。

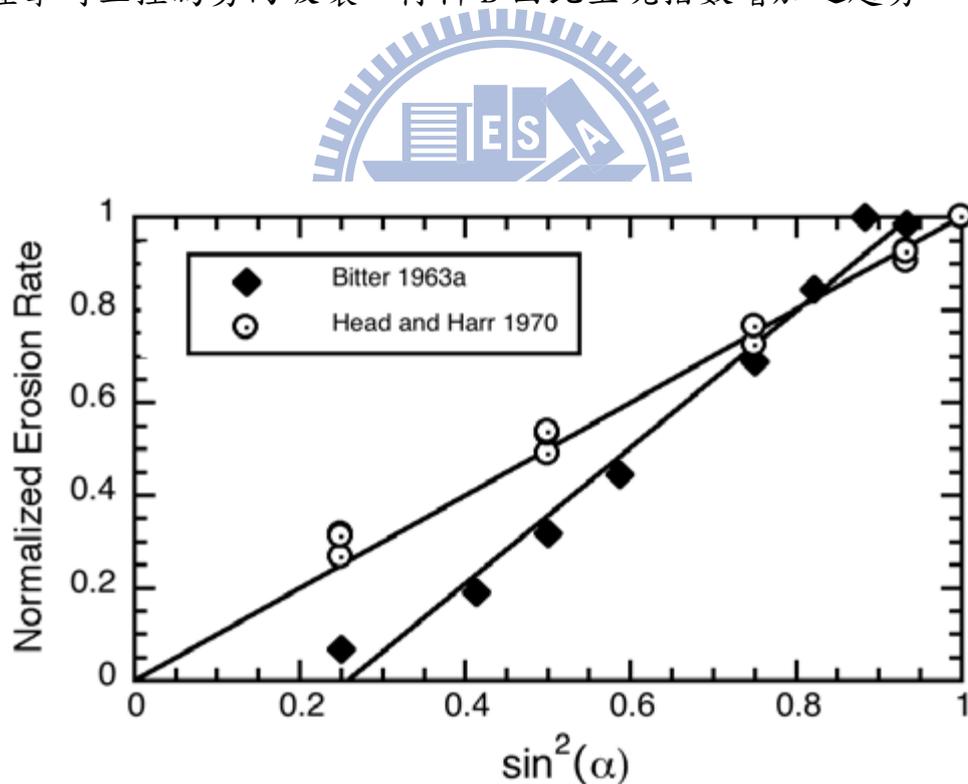


圖 5.13 撞擊角度垂直分量比率與沖蝕速率關係(SKLAR, 2004)

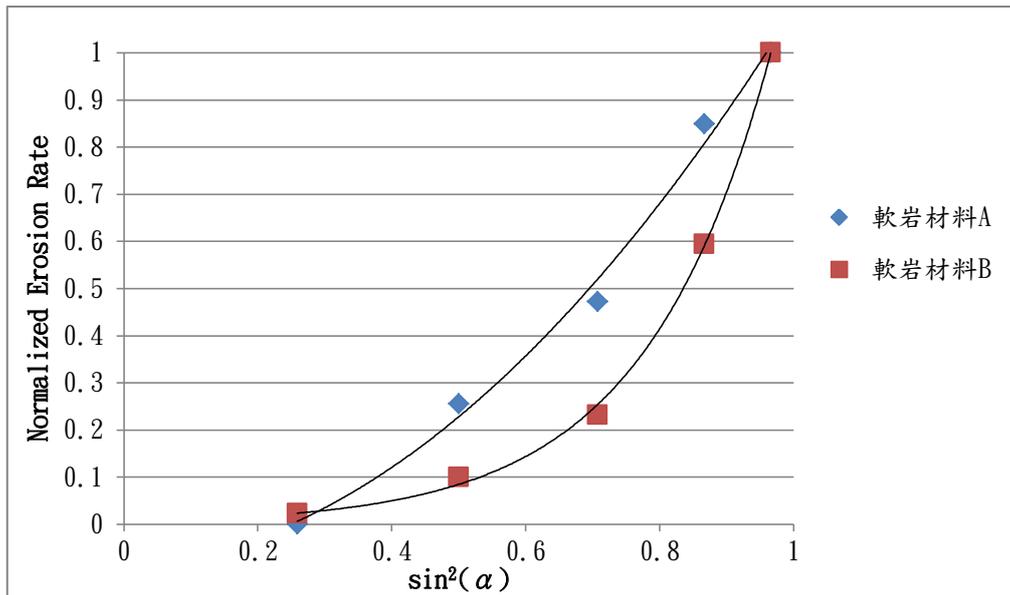


圖 5.14 模擬之軟岩材料撞擊角度垂直分量比率與沖蝕速率關係

以上皆為針對變異因子為單一之角度變化之情形，為探討高角度撞擊下所造成的切削磨損(cutting wear)以及低角度撞擊所造成的變形磨損(deformation wear)兩種磨損所造成的破壞情況差異，本研究分別以 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 等六個角度顆粒撞擊下，每次撞擊之轉換能量(ΔE)保持在 10 焦耳(Joule)且誤差值在 5%以內之情況下探討不同角度變異所造成的破壞情形。

本研究所模擬不同角度所造成的破壞情況如圖 5.15，圖 5.15 為不同角度在顆粒撞擊後將破壞顆粒刪除後之剖面側視圖。因低角度之切削磨損主要為較表面之顆粒破壞，所以可視圖中撞擊角度為 15° 相對於其他撞擊角度撞擊破壞範圍深度較淺，主要為表層顆粒破壞。撞擊後鍵結破壞的情形如表 5-12 所示，在撞擊轉移能量相同時，若

角度增加時正向鍵結破壞數量所佔之比例會增加。此外，在固定撞擊能量轉移的情況下在撞擊角度為 45° 時破壞鍵結量為最多，其主要影響因素有二，一為顆粒在高角度撞擊時，其破壞形式主要為深度較深的變形磨損，相較於較低角度之切削磨損破壞主要為表面破壞，試體表面之顆粒鍵結數量較底層之顆粒少，因此深度較深之顆粒受到撞擊後有較多鍵結可傳遞應力，以致在同樣能量撞擊下，低角度之表面鍵結破壞量有可能高於高角度撞擊之破壞量。另一原因為有別於在撞擊角度增加時撞擊之力量傳遞主要為正向力傳遞而在本研究之正向鍵結強度為剪向鍵結強度之 2.5 倍，所以使得高角度撞擊時正向鍵結破壞數量較多之破壞行為所產生的總鍵結破壞量低於低角度之總鍵結破壞量。



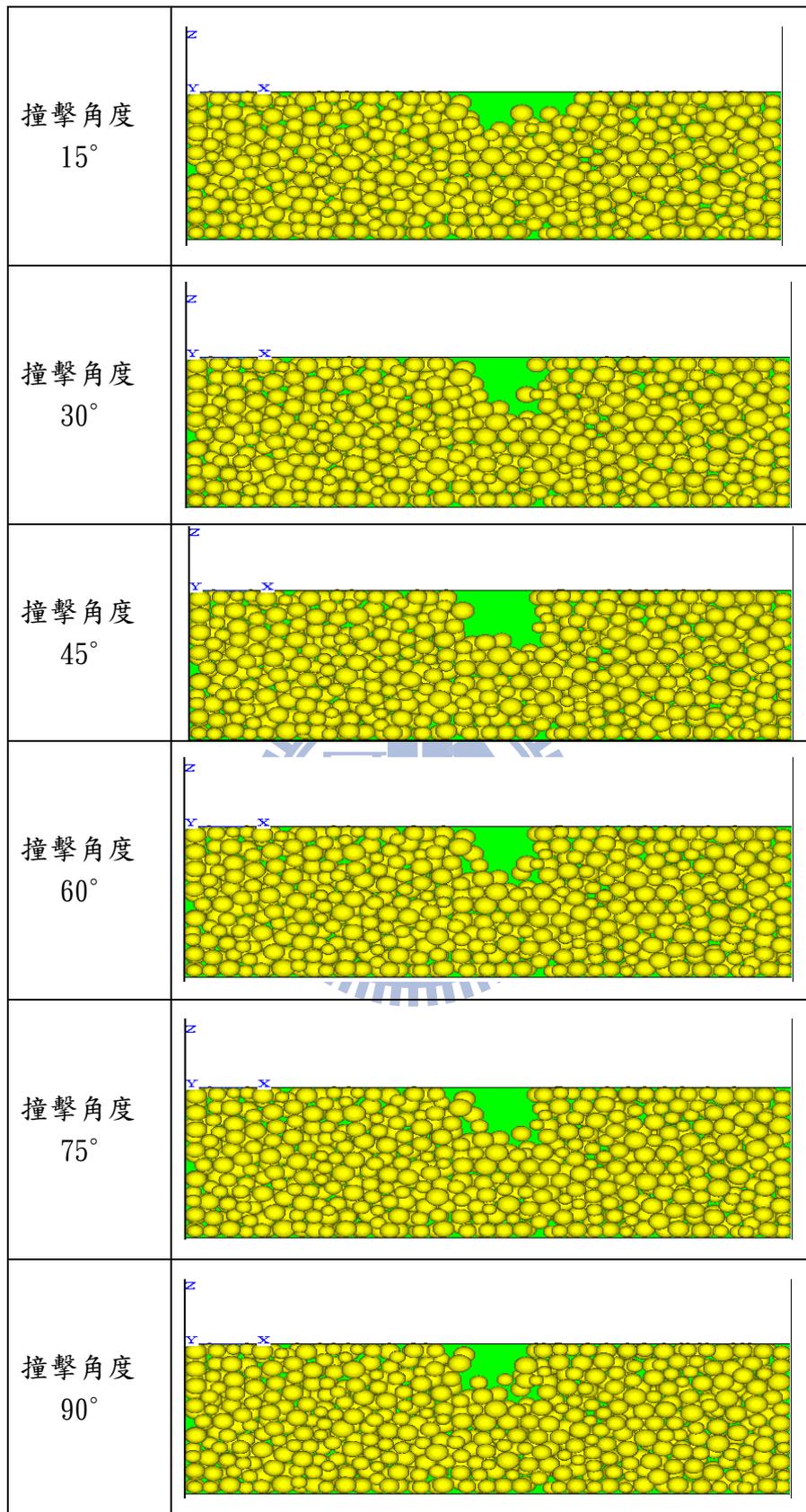


圖 5.15 不同角度變化於 $\Delta E=10$ 焦耳之破壞情況

表 5-12 不同角度變化於 $\Delta E=10$ 焦耳之鍵結破壞情形

撞擊角度	總鍵結破壞量	正向鍵結破壞量	剪向鍵結破壞量	$\frac{\text{正向鍵結破壞量}}{\text{剪向鍵結破壞量}}(\%)$
15°	149	32	117	27.35%
30°	179	39	140	27.86%
45°	201	43	158	27.22%
60°	196	41	155	26.45%
75°	194	44	150	29.33%
90°	197	45	152	29.61%

5.2.2.2 撞擊顆粒尺寸因子探討

顆粒尺寸的增加造成撞擊質量增加，所以撞擊能量也會隨之增加。原則上當撞擊能量增加後，撞擊破壞數量也會隨之增加。在本研究中分別探討撞擊尺寸 1cm、2cm、3cm、4cm、5cm 及 6cm 等六種尺寸(如圖 5.16)，固定撞擊顆粒速度為 5m/s，撞擊角度為 30°。以下為將不同撞擊點之五個案例整理後之平均值、標準差繪製出其對應的能量與破壞關係(圖 5.17 及圖 5.18)。在圖中很明顯可以看到其顆粒尺寸增加時，撞擊能量也隨之增加，相對破壞程度也呈線性增加的趨勢。

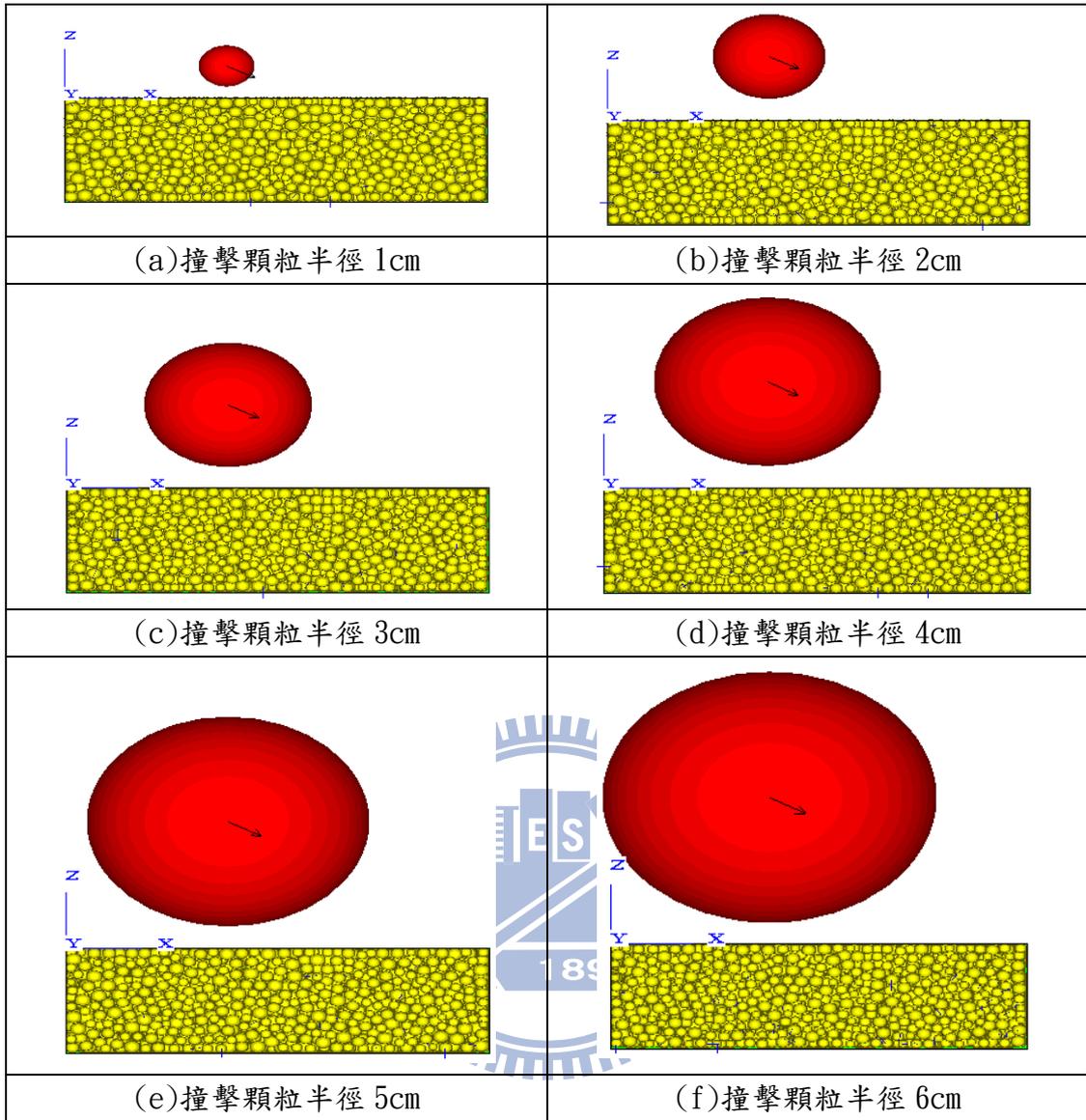


圖 5.16 模擬中撞擊顆粒尺寸變化情形

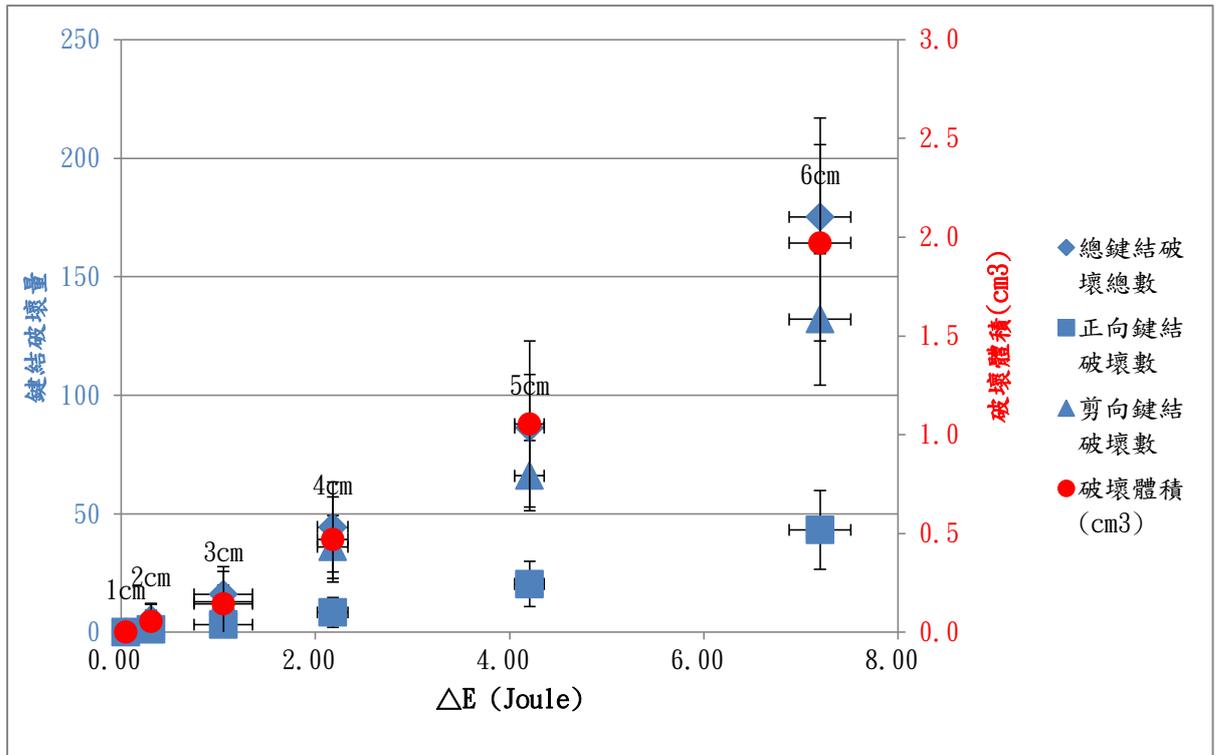


圖 5.17 軟岩材料 A 撞擊顆粒尺寸變化影響

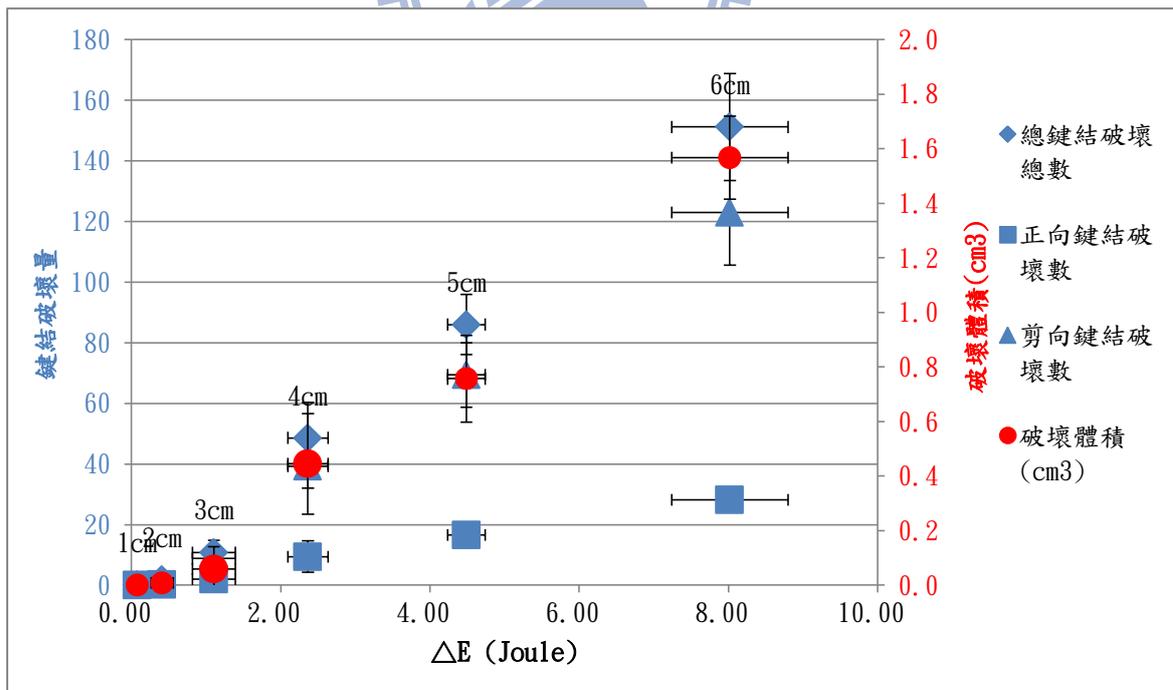


圖 5.18 軟岩材料 B 撞擊顆粒尺寸變化影響

在 Sklar(2004) 中針對撞擊顆粒尺寸大小之影響性探討為對轉換能量(E)之影響因子 V_i 、 I_r 、 F_e 做全面性沖蝕速率方程式之推估，如圖 5.19 所示。然在本研究中撞擊顆粒粒徑中視水流中懸浮載或河床載濃度(I_r)及岩床試體保護層比例(F_e)為固定因子，主要影響探討以撞擊顆粒尺寸對單位顆粒撞擊後岩床試體所脫離之體積(V_i)之影響，圖 5.20 為材料 A 及材料 B 在撞擊顆粒尺寸遞增下破壞的體積量，其顆粒尺寸增加時，單位顆粒撞擊後岩體所脫離的體積呈現線性增加，若與 Sklar 所推論之顆粒尺寸增加對於單位顆粒撞擊後岩床試體所脫離之體積(V_i)影響所呈現之對數曲線有些許差異，原因為在本研究模擬之試體模型中若撞擊顆粒尺寸小於 2cm 時，能量轉移尚未達到試體鍵結的破壞強度，並未造成任何顆粒脫離試體，所以在撞擊顆粒尺寸達兩公分時曲線呈現垂直上升的情況。

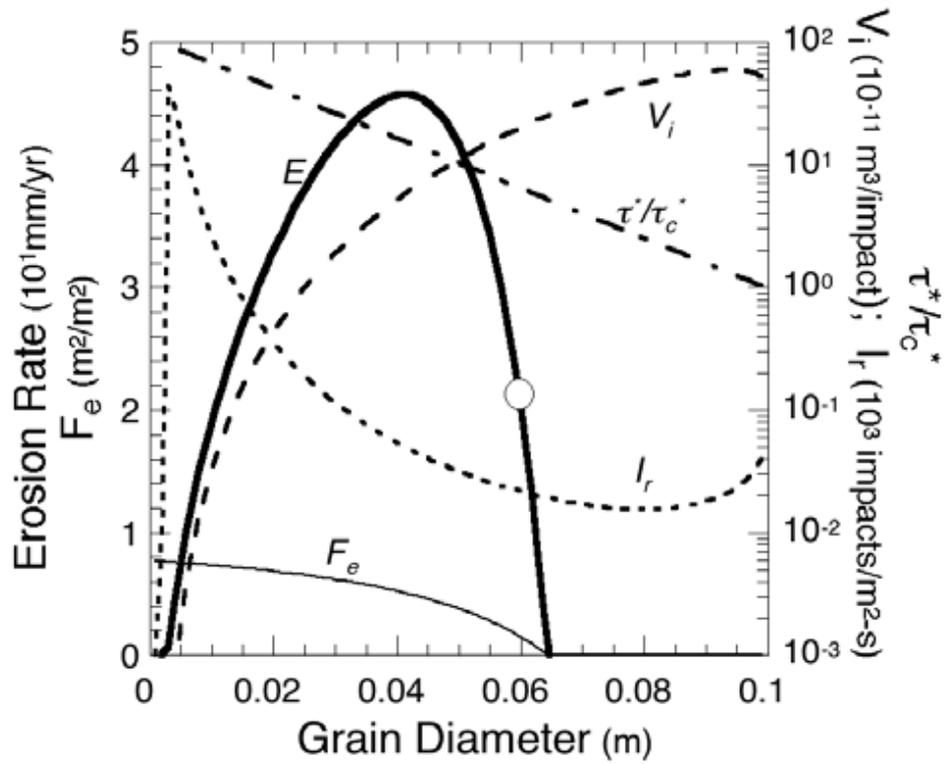


圖 5.19 影響能量因子之撞擊顆粒粒徑的沖蝕速率方程式

(SKLAR, 2004)

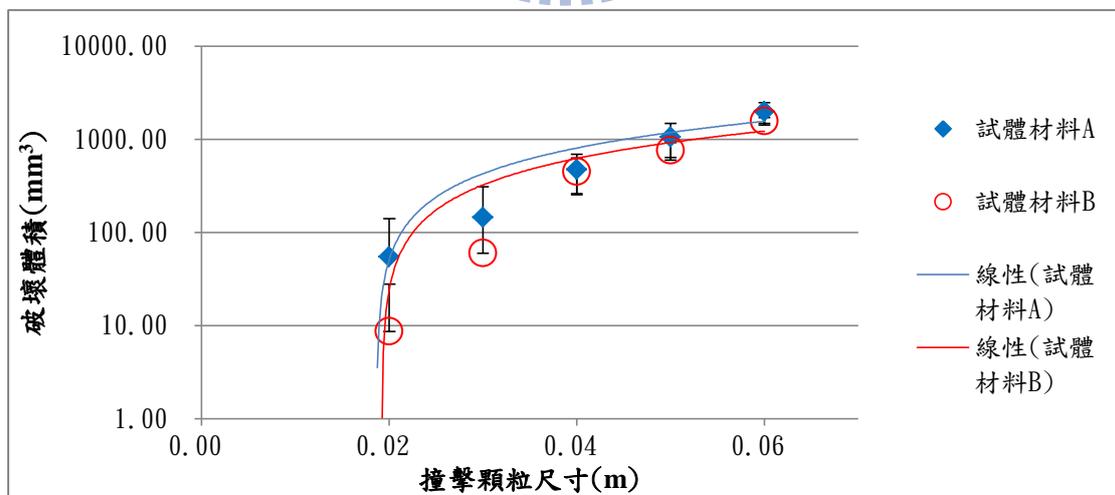


圖 5.20 模擬軟岩試體撞擊之顆粒粒影響沖蝕破壞程度關係圖

5.2.2.3 顆粒撞擊速度因子探討

本節就撞擊之顆粒速度為沖蝕變因，固定撞擊尺寸為 2cm，撞擊角度為 30°，分別就撞擊速度 1m/s、5m/s、10m/s、20m/s 等速度進行模擬。當顆粒撞擊速度增加時，撞擊能量也會隨之變大，所造成之沖蝕破壞也會增加。分別整理軟岩材料 A 及軟岩材料 B 模擬試驗之資料後，計算出平均值及標準差後繪出圖 5.21 及圖 5.22。兩種岩性之鍵結破壞與能量之變化趨勢皆呈現線性遞增。

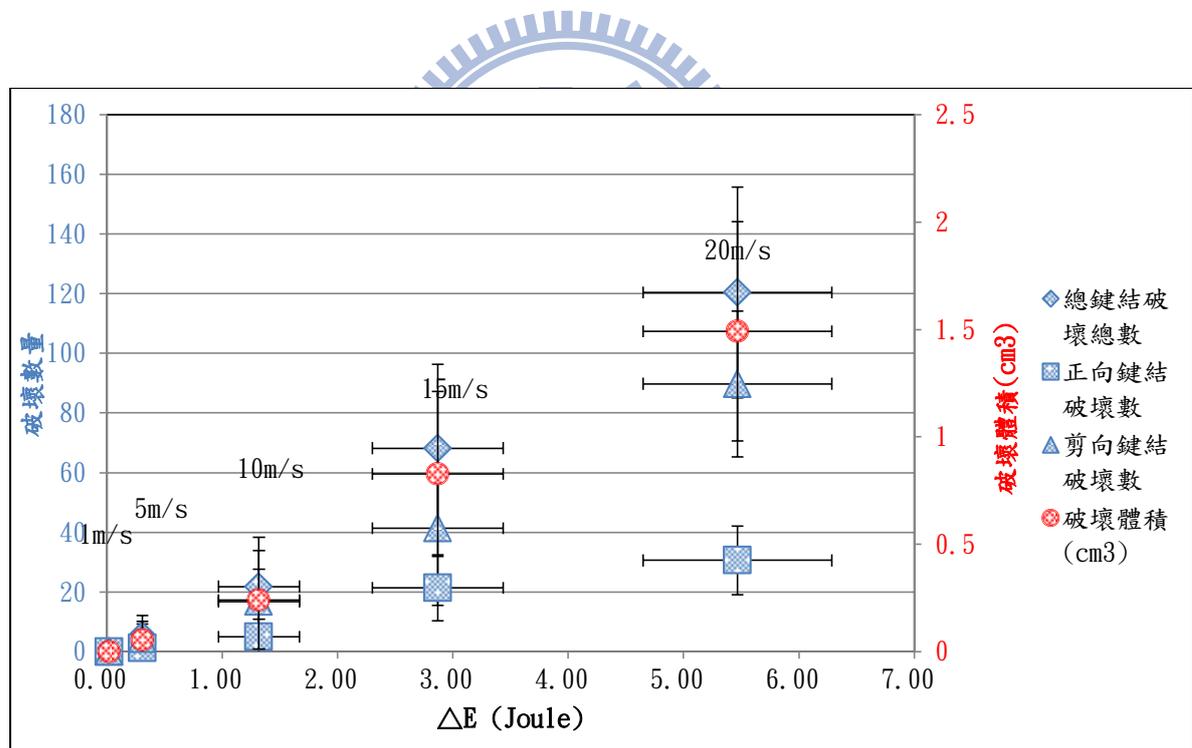


圖 5.21 軟岩材料 A 撞擊顆粒速度變化影響

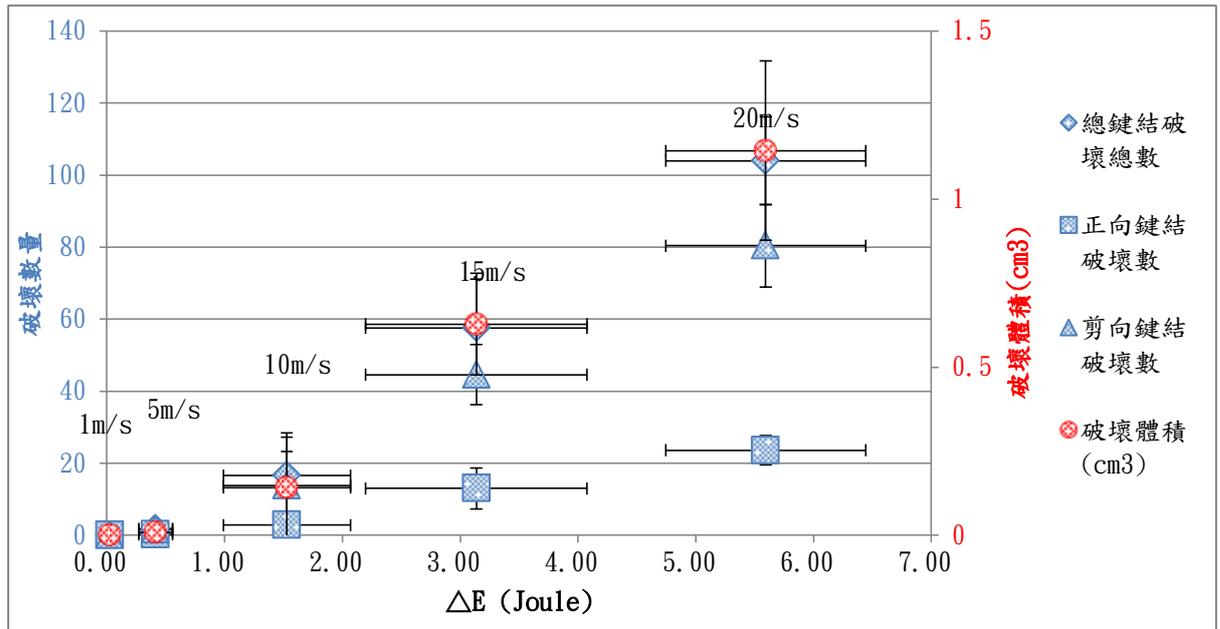


圖 5.22 軟岩材料 B 撞擊顆粒速度變化影響

5.2.2.4 撞擊因子結果及討論

經過以上各小節之撞擊因子探討下，發現能量與各個因子皆呈現線性增加之趨勢，因此將各種不同影響因子探討之數據統整後，如圖 5.23 及圖 5.24。兩種岩性整理出之數據點皆呈現能量與鍵結破壞為線性遞增之情況，加入趨勢線後之 R^2 值非常接近 1，代表此趨勢線與資料點差異程度極小，因此在該岩性下其破壞程度與能量之間的關係就可以此趨勢線代表之。在鍵結數量及破壞體積之標準差變異值部分因為在撞擊時撞擊點影響區域不同，若為為表面區域，因表面之顆粒接觸數少，故表面區域的鍵結量較試體內部為少，所以顆粒破壞的數

量亦會較小，反之亦然。

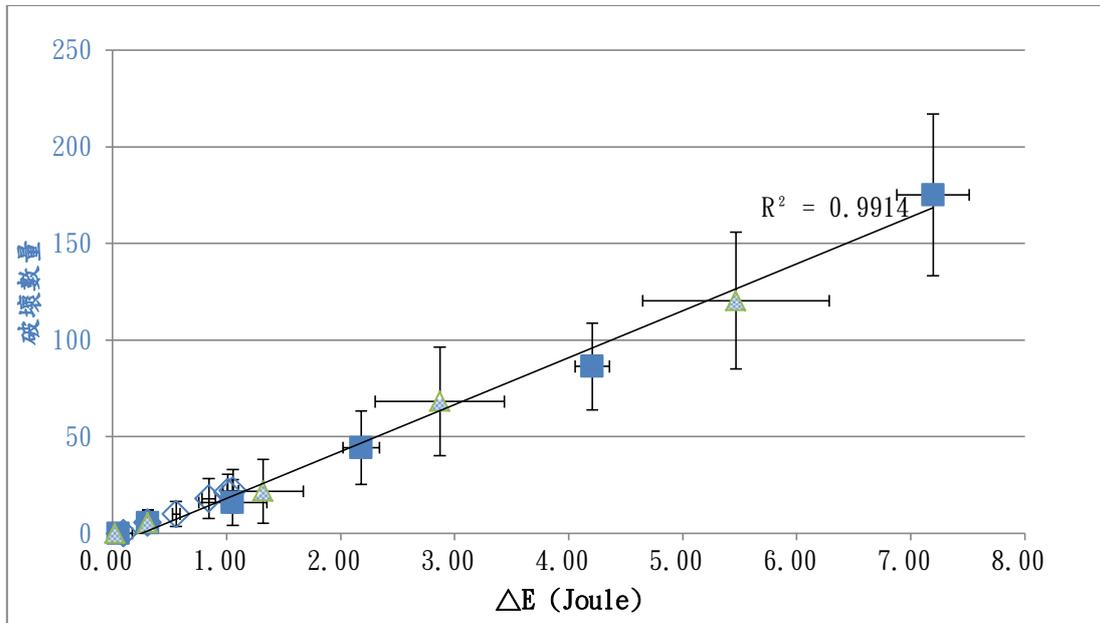


圖 5.23 軟岩材料 A 顆粒撞擊能量消耗與鍵結破壞關係圖

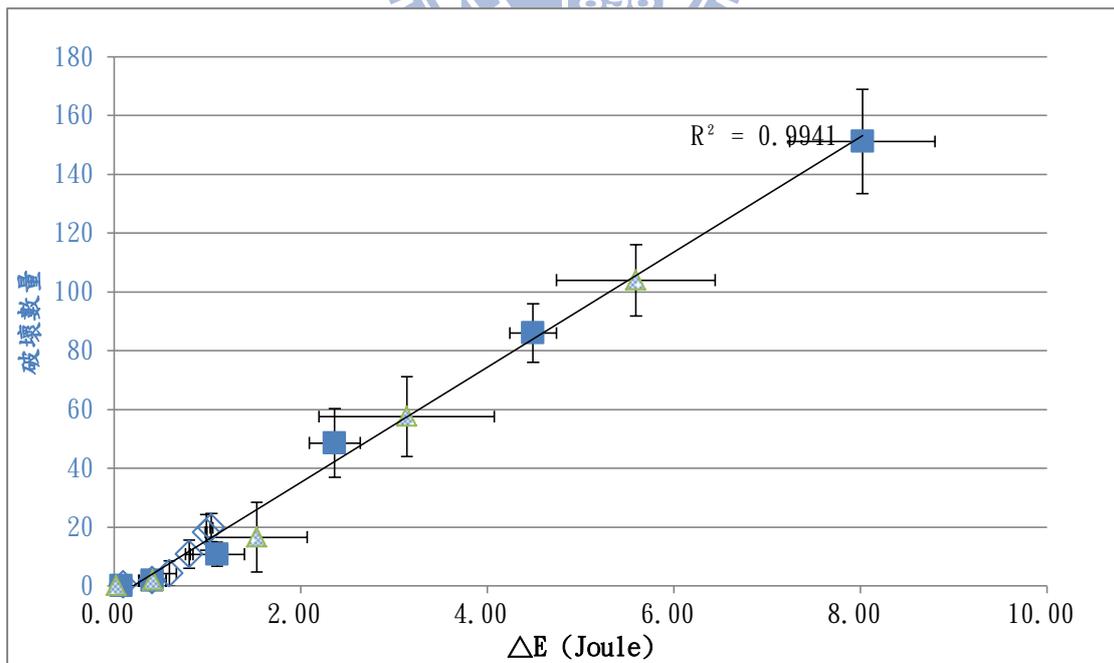


圖 5.24 軟岩材料 B 顆粒撞擊能量消耗與鍵結破壞關係圖

5.2.3 連續性隨機彈跳撞擊沖蝕機制

在顆粒連續性隨機撞擊的機制中，乃採固定顆粒速度 5m/s、角度 30° 以及撞擊顆粒尺寸 2cm 下在指定區域內隨機撞擊，觀察其長期破壞趨勢。此模擬分別針對軟岩材料 A 及 B 各做三組案例探討，每組案例撞擊顆粒數為 50 顆，由於試驗數據過於龐大，下文將針對鍵結破壞之種類以及三個案例資料彙整作介紹。

5.2.3.1 軟岩材料連續隨機彈跳撞擊結果

在軟岩材料中 A，鍵結破壞種類之情況大致相同，以剪向鍵結破壞為主要破壞形式，如圖 5.25，剪向鍵結破壞約占總鍵結破壞 3/4，在另外兩案例中破壞類別趨勢也雷同。

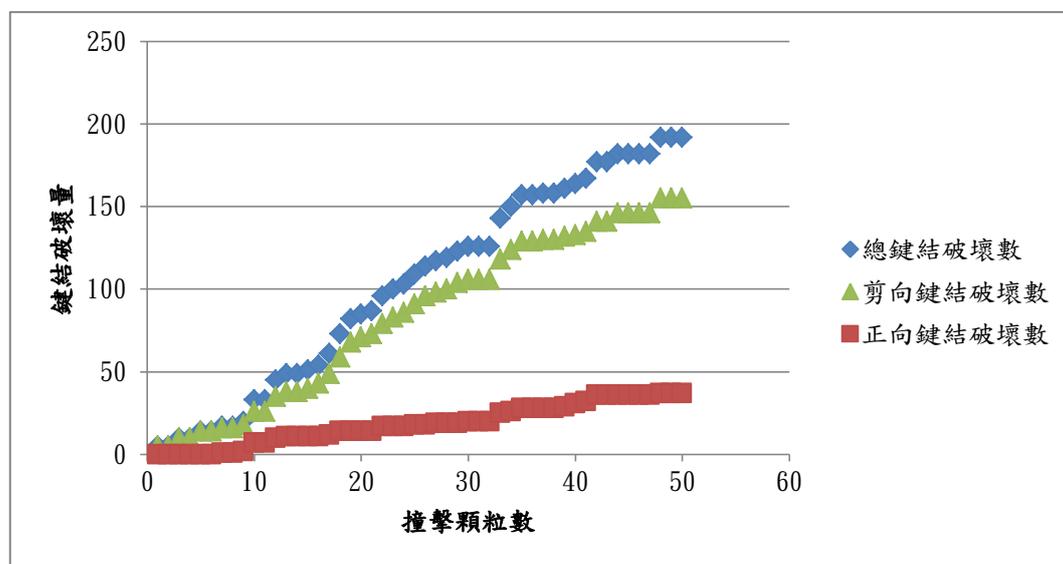


圖 5.25 軟岩材料 A 連續撞擊鍵結破壞類型

然而在軟岩材料 B 中，鍵結破壞種類中正向鍵結破壞量微乎其微，如圖 5.26 剪向破壞數量與總鍵結破壞量之曲線幾乎重合。在此模型中由於鍵結強度較軟岩材料 A 強度大約 4 倍之多，而正向鍵結強度與剪向鍵結強度之比例又為 2:1，欲達到正向鍵結破壞強度，應用尺寸較大之撞擊顆粒或採顆粒撞擊速度較快之情況，才會達到此岩性之臨界破壞應力。其他兩案例之破壞情況亦相同，以剪向鍵結破壞為主要破壞形式。

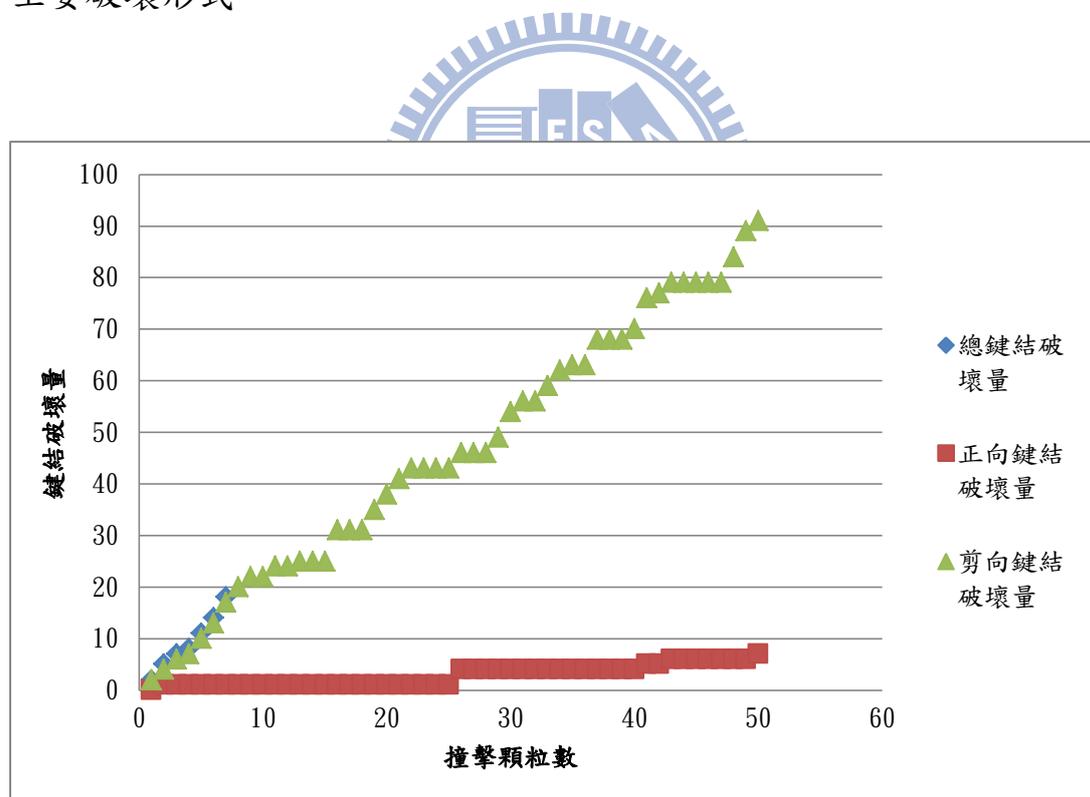


圖 5.26 軟岩材料 B 連續撞擊鍵結破壞類型

此研究中測試之三個案例撞擊顆粒數與總鍵結破壞數量趨勢如

圖，三種試驗在顆粒連續隨機撞擊後所顯示之趨勢會逐漸相近，尤其案例 2 與案例 3 中，兩者在曲線後半段破壞之鍵結數幾乎相同，另一方面在撞擊顆粒與破壞體積關係(如圖 5.27 及圖 5.28)，雖走勢仍還有些許差距，但應為產生破壞之區域不同，若撞擊點重複性小，影響區域主要為試體表面，其鍵結破壞數相當時，破壞體積會大於撞擊點重複性高導致影響區域深入試體內部之試驗。

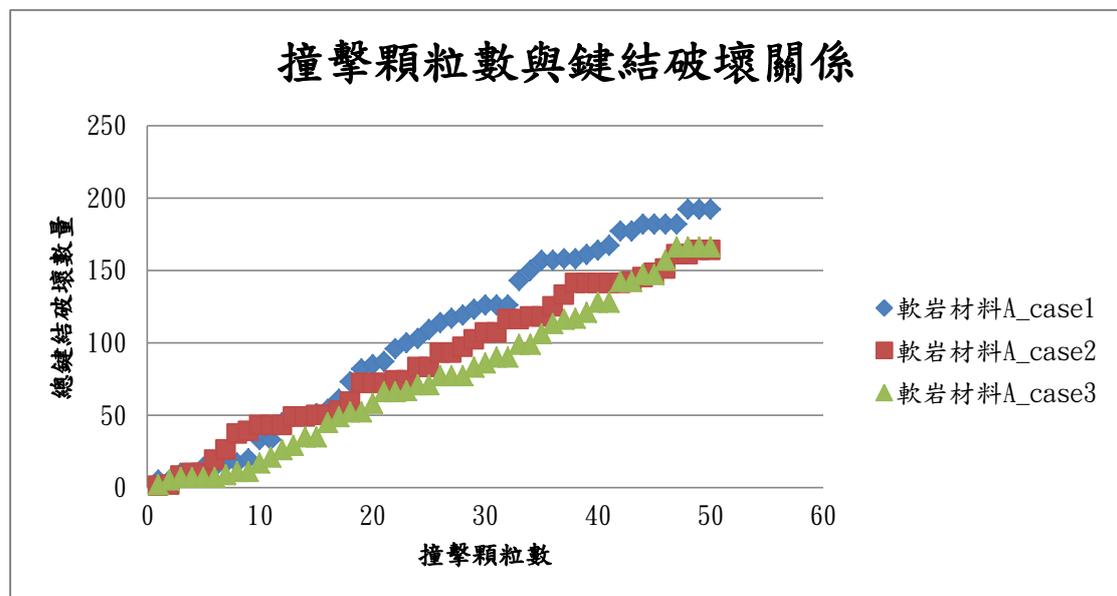


圖 5.27 軟岩材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之鍵結破壞趨勢

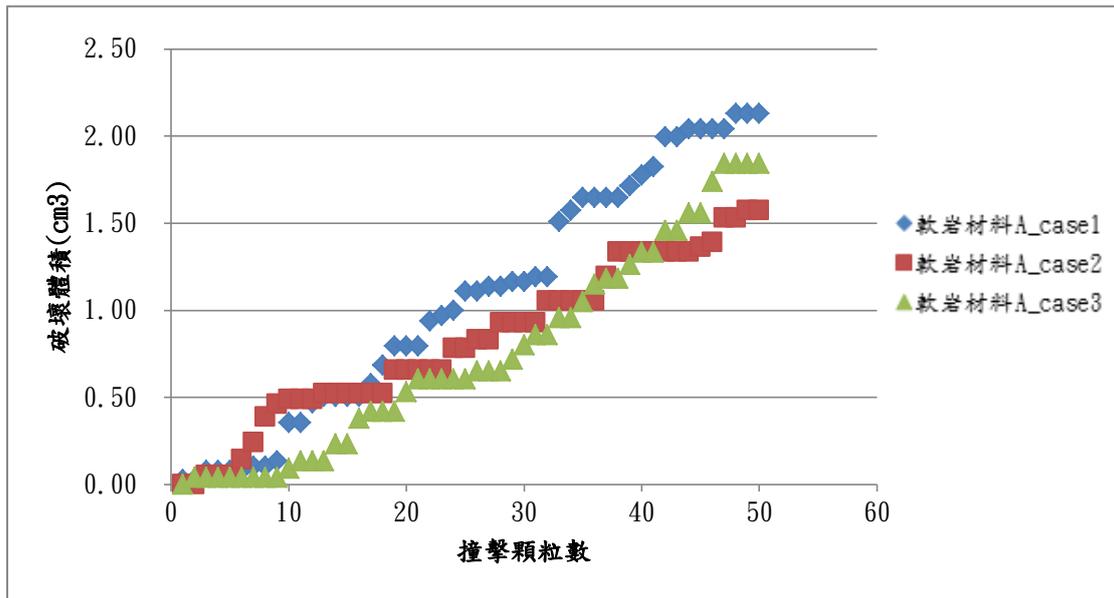


圖 5.28 軟岩材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢

在軟岩材料 B 連續性隨機撞擊的三個案例中，在連續撞擊 50 顆顆粒後，案例 1 與案例 2 分別為破壞鍵結有 98 與 93 個，案例 3 雖只有 73 個鍵結破壞，但案例 3 在撞擊顆粒為 30 顆到 50 顆之間其破壞鍵結數量以極緩的速度上升，在顆粒連續性隨機撞擊試驗中，經常會有破壞數量停滯或上升速度極緩，但此過程乃因撞擊點分布不同，若為撞擊點重複性高之試體破壞速率就會較快，尤其此試體之強度較高，應採撞擊能量較高之顆粒抑或是需再增加撞擊顆粒數，更接近現地長期沖蝕之情況。(如圖 5.29 及圖 5.30)

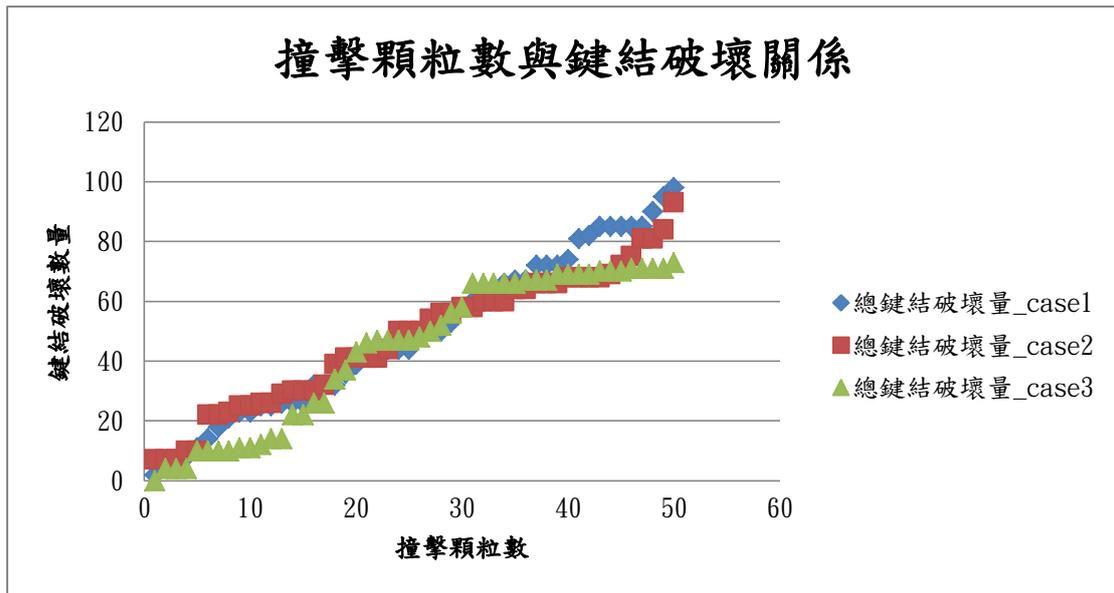


圖 5.29 軟岩材料 B 顆粒連續性隨機撞擊下之鍵結破壞趨勢

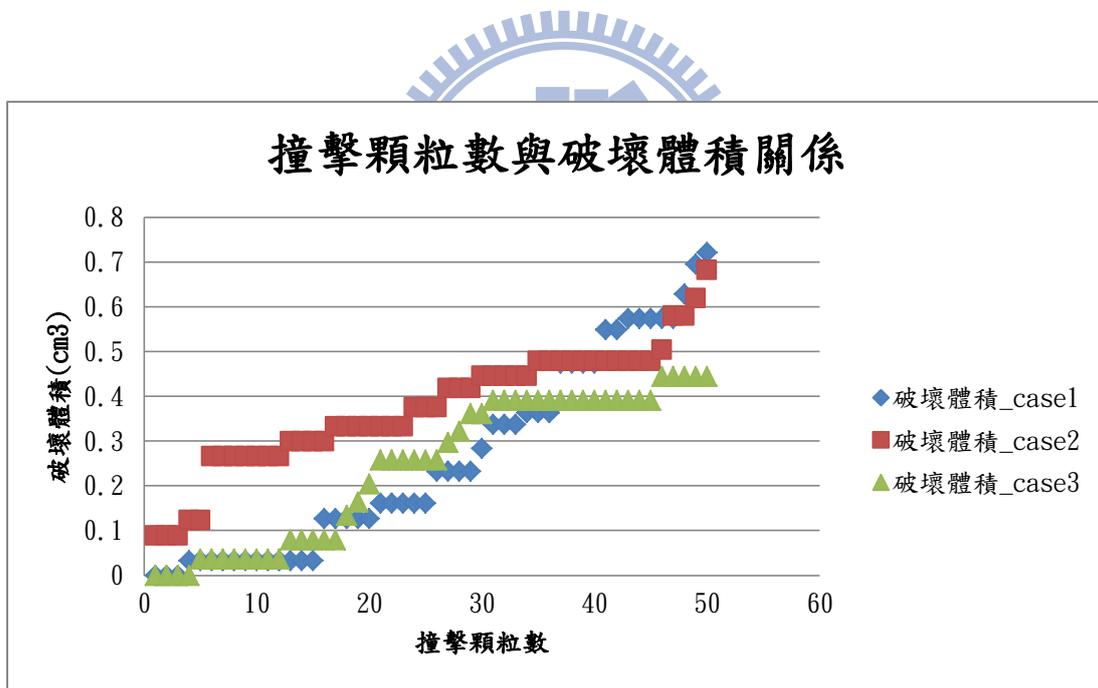


圖 5.30 軟岩材料 B 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢

5.2.3.2 結果與討論

在顆粒連續性隨機撞擊之試驗之目的主要是因在探討影響因子時當試體撞擊點不同時，模擬現地流況為水流中之懸浮載或河床載隨機撞擊岩床表面，長期撞擊造成岩床試體的破壞，若只侷限與一點撞擊，期產生之數據就會失去了變異性。在此試驗試驗中兩種岩性的鍵結破壞情況趨勢分別都會趨於一致，其鍵結破壞數量以及破壞體積之趨勢與偏差值如圖 5.31 與圖 5.32 所示。

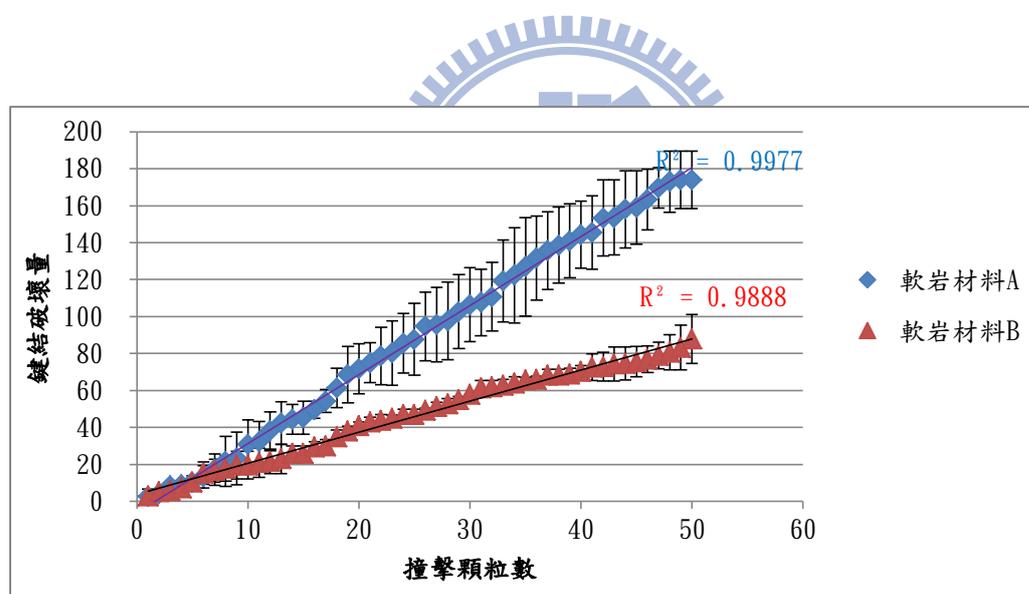


圖 5.31 顆粒連續性隨機撞擊下軟岩材料鍵結破壞趨勢及變異程度

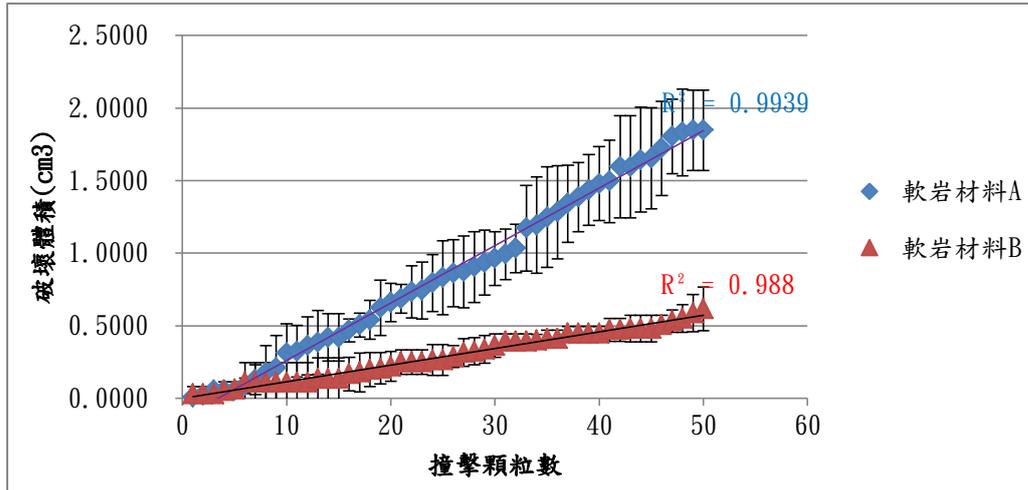


圖 5.32 顆粒連續性隨機撞擊下軟岩材料體積破壞趨勢及變異程度

若進而增加連續顆粒撞擊之數量以模擬長時間下現地岩盤受到彈跳撞擊之破壞情形（如下圖 5.33 及 5.34），兩虛擬材料在連續性隨機撞擊下皆呈現階段性出現撞擊破壞鍵結量短暫突增之情況，此現象顯示材料內部損傷會有累積性，當材料受到連續撞擊後消散能量累積至足以造成顆粒周圍所有鍵結都破壞之門檻值即產生顆粒脫離，類似材料內的疲勞破壞行為。觀察圖 5.33 及 5.34，長時間下之斜率比初始段之斜率略低，其原因乃因為初始撞擊顆粒主要造成原始之表層破壞，而表層顆粒鍵結數原來就較少，所以較快發生所有鍵結都破壞

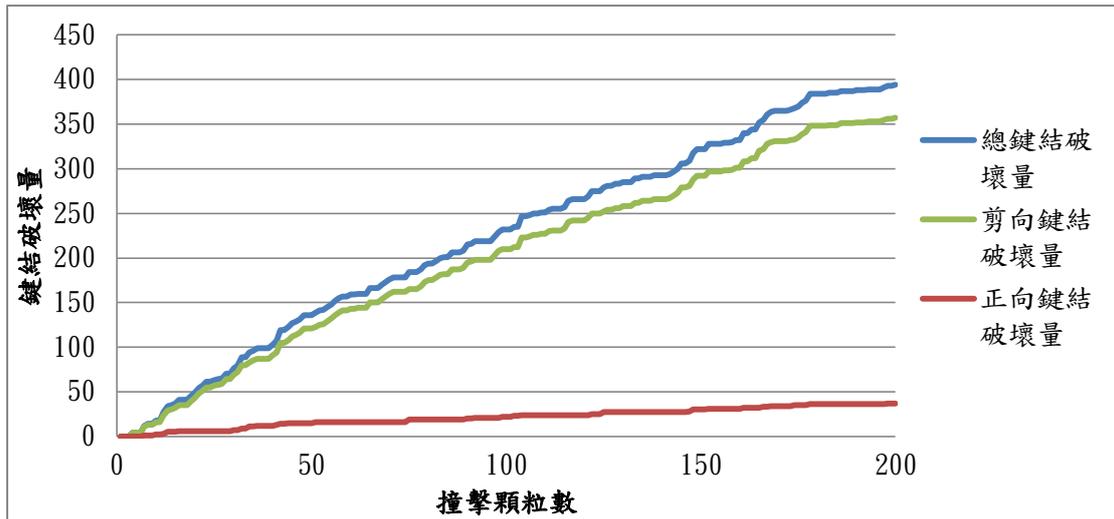


圖 5.33 虛擬材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢

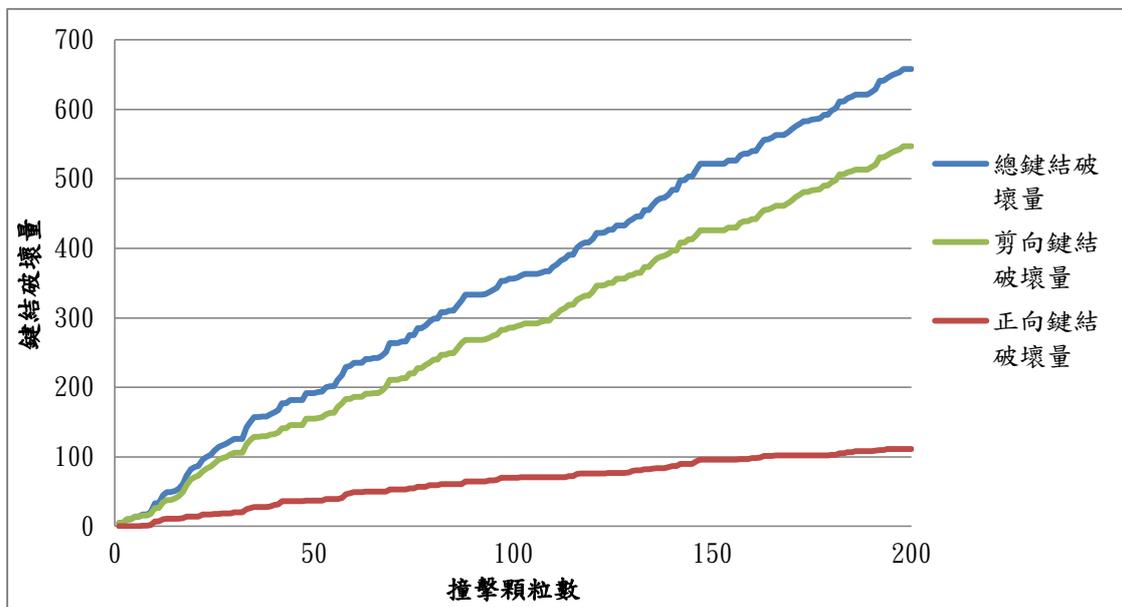


圖 5.34 虛擬材料 A 顆粒連續性隨機撞擊下之體積破壞趨勢

5.2.4 楊氏模數與張力強度對沖蝕速度影響

Sklar(2004)根據 Engle(1978)的研究中由撞擊顆粒磨蝕之岩石阻抗能力取決於材料所儲存的彈性應變能之理論，進而推論出材料彈性、堅硬度、應變能以及儲存彈性應變能之容量皆與張力強度(σ^T)有關，如 5.3 式。

$$\varepsilon_v = k_v \beta = k_v \frac{\sigma_T^2}{2Y} \quad (5.3)$$

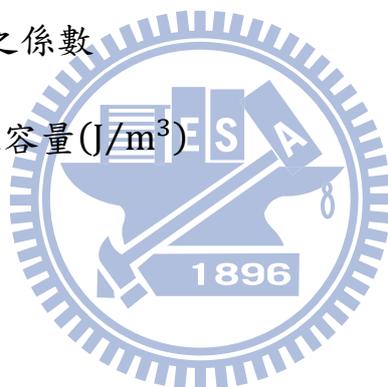
ε_v ：彈性能之儲存能力

k_v ：取決於材料性質之係數

β ：儲存彈性應變能之容量(J/m^3)

σ^T ：張力強度

Y ：楊氏模數



本研究中採模擬顆粒速度以 20m/s、顆粒尺寸為 2cm，撞擊角度為 30 度進行試驗，本試驗在固定撞擊因子下針對不同楊氏模數探討其轉換之能量大小與破壞程度如表 5-13。因楊式模數越大時，彈性能之儲存能力會越小，試驗結果顯示當楊氏係數(Y)值增加時，所消耗的能量也隨之增加，表示一樣的撞擊因子條件下楊氏係數較高時試體可儲存之彈性能降低，造成撞擊破壞量增加，如圖 5.35。

針對張力強度 σ_T 同樣以顆粒速度以 20m/s、顆粒尺寸為 2cm，撞擊角度為 30 度進行試驗，探討不同張力強度下之破壞程度。試驗結

果如表 5-14，在張力強度增加時，試體可儲存的彈性能增加使得破壞的體積降低，如圖 5.36。

表 5-13 楊氏模數變化下之模擬結果

楊氏係數 Y (MPa)	10.84	18.75	21.83
轉換之能量 E(Joule)	4.7826	5.3454	6.4114
總鍵結破壞量	3	48	154
正向鍵結破壞量	0	10	42
剪向鍵結破壞量	3	38	112
顆粒破壞數量	0	12	43
破壞體積 (cm ³)	0	0.5914	1.9755

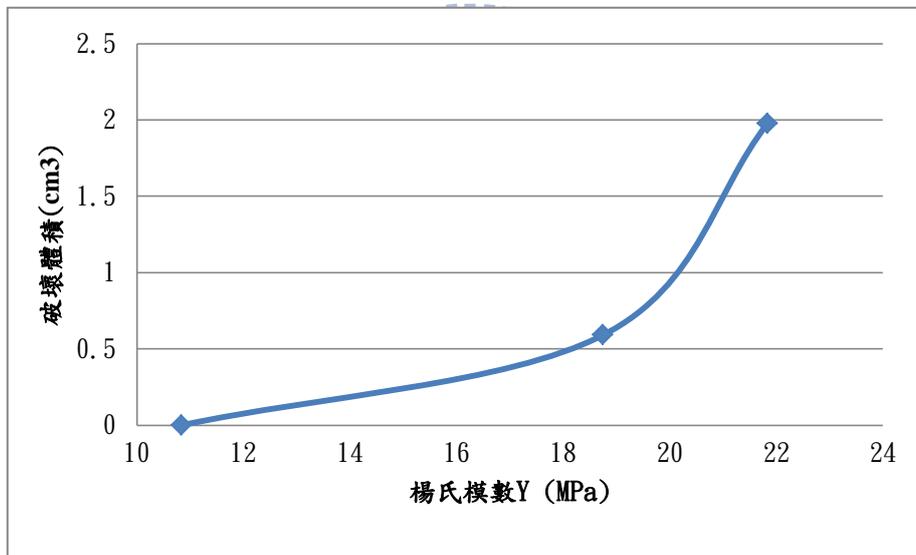


圖 5.35 模擬之楊氏模數與破壞體積關係

表 5-14 張力強度變化之模擬結果

張力強度 σ_T (Mpa)	9.39	46.95	93.9
轉換之能量 E(Joule)	11.8450	11.7607	6.4114
總鍵結破壞量	6421	3050	154
正向鍵結破壞量	1741	816	42
剪向鍵結破壞量	4680	2234	112
顆粒破壞數量	2045	932	43
破壞體積(cm^3)	99.1110	44.9470	1.9755

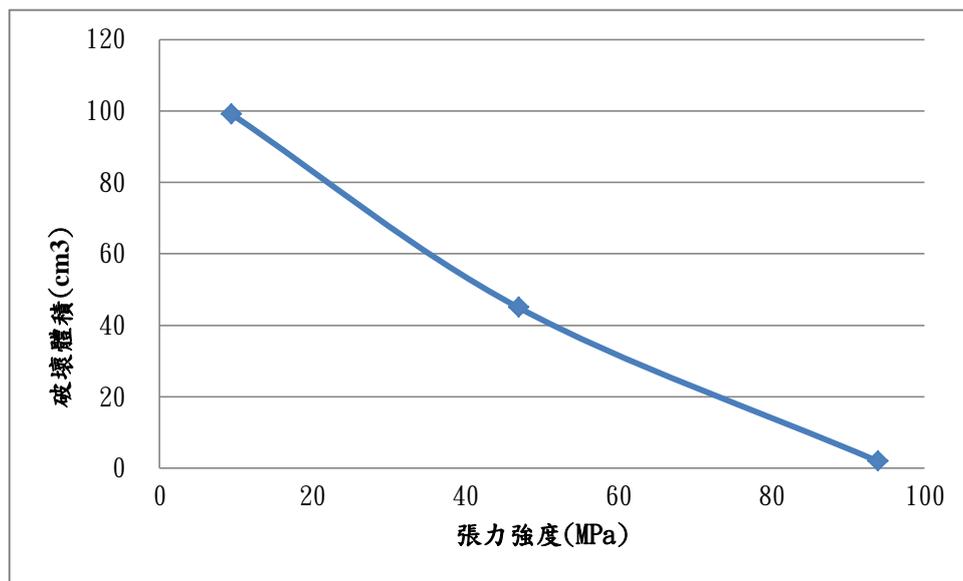


圖 5.36 張力強度與破壞體積關係

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究運用 PFC^{3D} 來模擬磨蝕沖蝕機制以及顆粒彈跳撞擊兩種岩床沖刷機制之破壞情形與能量消耗。分別就參數率定、磨蝕沖蝕、與顆粒彈跳撞擊等微觀模擬之結果，可獲得以下之結論：

一、參數率定：

對於試體之參數率定，應注意下列重點：

1. 為確保微觀試驗結果之可用性，模擬試體（顆粒集合體）的微觀參數率定應令模擬所得之巨觀力學行為盡可能接近現地材料所對應之力學行為。本研究對虛擬試體之率定因此以室內三軸試驗所得之巨觀力學參數作為率定目標。
2. 微觀材料參數中之鍵結強度會影響虛擬試體之巨觀強度，鍵結強度與虛擬試體強度約呈正比；材料之摩擦係數影響虛擬試體之峰後行為；接觸勁度與材料的初始楊氏模數相關，接觸勁度與楊氏模數約呈正比關係。
3. 若虛擬試體內之顆粒間存在平行鍵結，達尖峰強度後之加壓或解壓過程會令鍵結破壞數（crack number）累積增多，應變量也會隨之增加，代表材料內部損傷程度之提高。

二、磨蝕沖蝕試驗：

1. 若模擬一般新鮮岩石，所得之臨界剪應力皆遠遠高於現地流況可能出現之床面剪應力極限，意謂正常之新鮮岩石其實並不會因受一般尺度之床面剪應力而發生磨蝕。若要令模擬出之臨界剪應力符合現地流況可能出現之床面剪應力極限，則勢必降低試體強度，可能情境為現地岩床表面強度受到風化或乾溼循環等因素而弱化，在現地觀察到之岩床表面弱化的情形會造成岩體孔隙比增高或產生微裂隙，強度明顯降低，所以在受風化或乾溼循環後，岩床表面之強度應遠低於新鮮之岩石試體強度。
2. 虛擬磨蝕試驗所模擬之現象為床面剪應力拖曳試體表面造成所有鍵結破壞，使試體表面顆粒脫離母體所造成之破壞。在微觀模擬過程中，當試體所受之剪應力超過試體之剪力強度時，全部鍵結也將破壞，可解釋虛擬磨蝕試驗結果中，鍵結破壞形態係以剪向鍵結破壞為主。

三、顆粒彈跳撞擊機制：

1. 於撞擊因子探討中可觀察到轉移的能量會隨著撞擊顆粒角度、撞擊顆粒速度以及撞擊顆粒尺寸等因子增加而增加，因此因撞擊而

破壞的體積量也隨之增加，其能量增加與破壞體積關係略呈線性增加之關係。

2. 本研究中探討單一顆粒撞擊造虛擬試體破壞之撞擊因子包括顆粒撞擊角度、撞擊速度、撞擊顆粒尺寸。若撞擊角度增加時，撞擊後的轉換能量隨之增加，也造成破壞程度較多，撞擊速度及撞擊尺寸之影響亦然。
3. 在單一顆粒撞擊時，撞擊後能量轉移量相同時，當撞擊角度低時之破壞主要為表層之切削磨損(cutting wear)，當撞擊角度高時為影響範圍較深之變形磨損(deformation wear)，角度增加時其正向鍵結破壞比也隨之增加。
4. 在連續性顆粒彈跳撞擊部分，針對兩種虛擬試體之結果皆觀察到隨機撞擊顆粒數量增加，因撞擊而破壞的體積量於長期趨勢會趨向於一致關係。單一顆粒撞擊於不同撞擊點時，因撞擊而破壞的體積量有相當變異性，此現象乃因局部撞擊點試體表面顆粒堆積形狀不同或因試體表面顆粒鍵結數量不一所致。在連續性顆粒彈跳撞擊下，多顆粒撞擊數量之破壞體積量對於不同撞擊點產生之破壞體積量之變異性即大幅降低。
4. 在增加撞擊顆粒數時可發現試體材料撞擊數量增加時鍵結破壞量會有停滯期，其代表材料有疲勞破壞的能量累積性。另外，在撞

擊顆粒數量較多與初始撞擊數量相比時，可發現鍵結破壞增量降低，因初始撞擊主要撞擊破壞為表層的鍵結量較少之顆粒。

5. 就虛擬試體楊氏模數及張力強度所造成的影響而言，當楊氏係數增加時試體因撞擊而破壞的體積量也隨之增加；當相對張力強度增加時因撞擊而破壞的體積量卻隨之遞減。

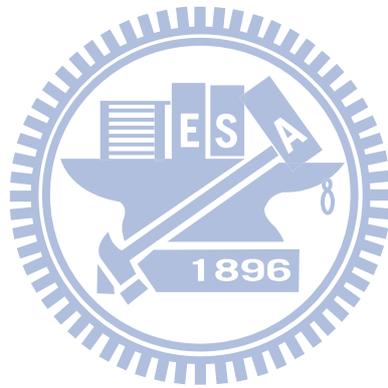
6.2 建議

本研究利用數值分析探討磨蝕沖蝕機制及顆粒彈跳撞擊之破壞行為及其能量變化。針對進一步可能研究方向，建議如下：

1. 本研究虛擬試體之孔隙率採 0.39 及 0.4，相對真實岩體之孔隙率雖偏大，真實岩石材料之孔隙率較小乃因顆粒間還存在膠結物，虛擬試體之孔隙率與真實岩石材料之孔隙率間之對應關係應可設法釐清。
2. 若能取得試體經過泡水軟化甚至經乾溼循環後之試體強度實驗數據，將可令模擬之數據有所根據。受到 PFC 程式所限，目前無法設定試體強度愈接近表面愈軟弱以模擬風化影響，只能模擬層狀之岩體，但不完全符合受風化影響之試體，未來若能改善此部分之模擬將會更合理。
3. 因實際水流中含有懸浮載或空氣產生壓力波動，本研究之磨蝕試驗

乃假設清水造成之床面剪應力。未來若能考量其他因子之影響，當能更貼近實際岩床河道中之沖蝕行為。

4. 在磨蝕沖蝕模擬中，頂部牆面造成之應力應模擬現地岩盤沖蝕情形，主要應力應只在試體表面施加，相對底部之應力應極小，但本研究中之磨蝕沖蝕模擬結果中應力傳遞至試體底部之應力值並不盡理想。未來不妨考量直接在表面之顆粒施力之方法，或可簡化施力方式並且達成所需模擬之目標。



參考文獻

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
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. Annandale, G.W. (1995), “Erodibility.”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.33, No.4, pp.471-494.
12. 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.
13. 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.
14. Cundall, P. A. and O. D. L. Strack(1979), “A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies”, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65,.
15. Cundall, P.A. and R.D.Hart(1989), ”Numerical Modeling of Discontinua” , Keynote Address, Proceeding of the 1st U.S.conference on discrete element methods (Golden , Colorado , October 1989) , pp.1-17,1989.Golden, Colorado : CSM Press , 1989; to be published in the *Journal of Engineering Computations*, 1992; to be published in

Comprehensive Rock Engineering, 1992.

16. 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 .
17. 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.
18. Foley, M.G. (1980), "Bedrock incision by streams.", Geological Society of America Bulletin., Part II, Vol.91, pp. 2189– 2213.
19. 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 .
20. Gilbert, G. K. (1877), "Report on the Geology of the Henry Mountains : Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region.", pp.160.
21. 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.

22. Howard ,A.D, G. Kerby (1983),“Channel changes in badlands.”,
Geological Society of America Bulletin, Vol.94, pp.739-752.
- 23.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 .
- 24.Herten M. , M. Pulsfort(1999),” Determination of spatial earth
pressure on circular shaft constructions.”, Granular Matter 2, pp.1-7.
- 25.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.
- 26.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 .
- 27.Hadjigeorgiou J., Esmaili K., Grenon M.(2009)., “Stability analysis
of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system
into a PFC model”, Tunnelling and Underground Space
Technology.,Vol. 24,No.3,pp.296-308.
- 28.Heekwang Lee, Seokwon Jeon(2011) ., “An experimental and
numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens

- under uniaxial compression”, International Journal of Solids and Structures. Vol.48, pp979-999
29. Jianming He , Xiao Li , Shouding Li , Yueping Yin , Haitao Qian (2010), “Study of seismic response of colluvium accumulation slope by particle flow code.”, Granular Matter, Vol.12, pp.483-390
30. 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 .296-308
31. Oliveira R. (1993), “Weak Rock Materials.”, The Engineering Geology of Weak Rock, pp. 5-15.
32. Potyondy D., P. Cundall (2004), “A bonded-particle model for rock.”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 41, pp.1329-1364.
33. Seidl, M.A. , W. E. Dietrich (1992), “The problem of channel erosion into bedrock. ” , Journal of Fluvial Geomorphology , pp316-339.
34. 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.
35. 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.

- 36.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.
- 37.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.
- 38.Snyder N.P., Whipple K.X., Tucker G.E., Merritts D.J.(2000),” Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California”, Geological Society of Americabulletin ,vol. 112,pp.1250-1263.
- 39.Schormair N., Thuro K.(2007), ”Fracture pattern of anisotropic rock by drilling or cutting using the PFC”, Rock Mechanics : Meeting Society’s Challenges and Demands,Vols 1 and 2- vol 1 : Fundamentals ,New Technologies & New Ideas;Vol 2 : Case Histories ,pp.527-534.
- 40.Tijskens 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.

41.Wohl, E.E. , H. Ikeda (1998), “Patterns of bedrock channel erosion on the Boso Peninsula Japan .”, Journal of Geology ,Vol.106, pp. 331-345.

42.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.

43.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.

44.Wohl,E.E. and Hema Achyuthan (2002), “Substrate Influences on Incised-Channel Morphology.”, The Journal of Geology, Vol. 110, pp. 115–120.

45.Xinwei Shen, Shuting Lei(2009), “Cutting simulation of laser assisted milling of silicon nitride ceramics using PFC^{2D}”, Proceedings of the ASME International Manufacturing Science & Engineering Conference,Vol. 1,pp.203-9

46. Yang, B., Jiao, Y. and Lei, S.(2006), “A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles. ”, International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, Vol. 23, No. 6, pp. 607–631.

