

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

逆向斜交坡中不同節理組特性對

楔形岩體變形及破壞機制影響之探討

Characteristics of Joint Sets Affecting Wedges Deformation and

Failure in Obsequent and Oblique Slopes

林劭儒

Shao-Ru Lin

指導教授：林銘郎 博士

Advisor: Ming-Lang Lin, Ph.D.

中華民國 108 年 6 月

June, 2019



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書



逆向斜交坡中不同節理組特性對  
楔形岩體變形及破壞機制影響之探討

Characteristics of Joint Sets Affecting Wedges  
Deformation and Failure in Obsequent and Oblique Slopes

本論文係林劭儒君 (R06521105) 在國立臺灣大學土木工程學系  
完成之碩士學位論文，於民國一〇八年六月二十六日承下列考試委員  
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員

林 銘 郎

(指導教授)

林劭儒

(簽名)

王 泰 典

王泰典

李 宏 輝

李宏輝

羅 佳 明

羅佳明

系主任

謝 尚 賢

謝尚賢

## 致謝



時光飛逝，研究所時光真的一眨眼就過完了，兩年前剛從大學畢業時，雖然感覺學了很多知識，內心仍舊無法踏實地對自己說，我已經準備好成為一名土木工程師。兩年後的今天，隨著林銘郎老師的指導與協助、各位學長姊的帶領以及同學、學弟妹的陪伴，從現地的野外調查、自己研究方向的選定、物理實驗的設置、數值分析工具的摸索與應用，到最後完成自己的研究論文，各個面向都獲得了許多經驗與心得，甚至具備了能自己作戰的能力，感謝研究所這兩年，歷經的大小挑戰與收穫成果時的種種喜悅，使我更有信心面對畢業後接踵而來的試驗。

感謝科技部核定研究室計畫，並給予研究上的支持，更感謝指導老師林銘郎教授一路以來的指引與鼓勵，以及口試委員王泰典教授、李宏輝教授、羅佳明教授及黃文昭教授於口試當天的蒞臨，各位老師的建議是很重要的建議與指正，學生的論文也因此得以更加清楚及完整的表達研究目的與成果。感謝台大工程地質室的夥伴兩年來的指教與陪伴，謝謝健宏學長總是照顧及提攜著我們這些涉世未深的年輕人；謝謝當了兩年好鄰居的鈞元，解惑了無數我對地質的疑問，出野外的時候也是跟著你才能一起衝鋒陷陣；謝謝陸安、沛宸讓我有好的榜樣可以學習，希望我也有好好地傳承邊坡組的研究；謝謝千惠與育瑄帶給研究室許多歡樂跟輕鬆的時光，接下來就靠你們撐起工程地質室了。謝謝同屆的昕臻、俊廷及玟翰，每次約你們來一起打羽球都能快速且順利的約成，讓研究之餘也能揮灑我們剩下不多的青春汗水；還有同屆無法一一列舉的朋友們，感謝大家沒有忘記我跟鈞元，偶爾也會找我們一起吃飯、玩遊戲。謝謝你們的陪伴才能讓這兩年過得這麼充實及愉快。

最後由衷感謝父母在研究所的階段中，總是在我背後給予支持、鼓勵以及關心，讓我可以盡情的在這兩年專心修習課業與投入研究，用力的在讀書的最後階段，刻下許多深刻且美好的回憶。

台大土木所 工程地質室

林劭儒



## 摘要



以往在討論楔形破壞的機制時，常會將岩石邊坡簡化成被兩道節理面截切，楔形岩塊再沿著交線滑出的模式。但經過實際的現地野外調查，我們觀察到形成岩楔崩落的因素，常常不僅只有截切岩體的兩道弱面，而是連同解壓節理形成的後方邊界，再因楔形岩體下方的趾部侵蝕，多種因素的結合才造成岩體沿著不連續面之交線滑出，形成真正在岩石邊坡中觀察到的楔形岩體變形與破壞產狀。

本研究將透過在傾斜儀上堆疊擺放菱形柱體的研磨石，模擬受節理組截切之岩石邊坡，以研磨石與研磨石間的接觸面作為岩石邊坡中的層面及節理，並藉由將一定比例之間隙以白膠黏著及改變傾斜儀的傾斜角度，探討在不同節理延續性及不同交線傾伏角的狀況下，對楔形岩體變形與破壞發展機制的影響。

接著本研究將採用三維離散元素法模擬分析軟體 3DEC (Three-Dimensional Distinct Element Code)，在與物理模型試驗之結果進行校核及驗證後，試著於數值模型中改變不同節理延續性、節理面交角、交線傾伏角角度及兩弱面在空間中的不對稱性，比較初始階段中楔形岩體中各岩塊的速度以及崩落後之崩積材料堆積型態，觀察並探討楔形岩體的變形趨勢以及影響範圍，以了解不同節理組特性及傾角在楔形岩體變形機制中所扮演的角色。最後再以東北角南雅里台 2 線 82k 處之公路旁邊坡作為實際案例，將研究結果套用於現地邊坡中，進而驗證及探討實際存在於邊坡中之節理組對楔形破壞的破壞機制之影響。

關鍵字：逆向-斜交坡、楔形破壞、位態判釋、節理延續性、3DEC

## ABSTRACT



The mechanisms of wedge failures were often considered as a simplified rock slope cut through by two joints, followed by the sliding of the rock wedge along the intersection line. However, wedge failures were induced by more complicated factors according to field investigation. The rear boundary issued from the unloading of the joints and the toe erosion at the bottom of the wedges both led to the sliding of the rock mass along the intersection line, which eventually turned into the wedge deformation and the failure as observed.

This study carried out a series of model tests to evaluate the failure mechanism of rock wedges under different joint persistence and different plunge of the intersection line. Diamond-cylindrical blocks were piled to simulate a rock slope with bedding and joints. The interface between the blocks simulates the bedding and the joints. The persistence of the joints was controlled by gluing part of the blocks while the plunge of the intersection line was adjusted by tilting the inclined deck. The results of the model tests were used to verify the numerical model. A three-dimensional distinct element software 3DEC (Three-Dimensional Distinct Element Code) was used to investigate the effects of different joint properties and plunge of the intersection line on the failure mechanism of the rock wedges. The persistence and the plunge of the intersection line were varied in the numerical model, as was done in the physical model tests. Additionally, the effect of the unsymmetrical characteristic between two joints was also evaluated in the numerical model. Afterwards, the model was introduced to simulate a slope located at 82 km of the Provincial Highway No.2, Nanya village, Taiwan. The effect of the joints on the failure mechanism of rock wedges in a real slope was thus discussed and verified.

Keywords: obsequent-oblique slope, wedge failure, orientation analysis, Persistence,

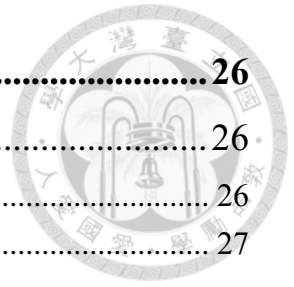
3DEC

# 目錄

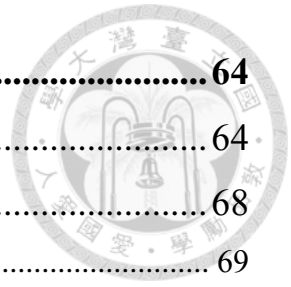


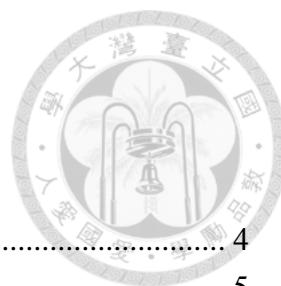
摘要 .....	iv
ABSTRACT .....	v
目錄 .....	vi
圖目錄 .....	ix
表目錄 .....	xii
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.1.1 研究動機 .....	1
1.1.2 研究目的 .....	2
1.2 研究流程及架構 .....	3
<b>第二章 文獻回顧 .....</b>	<b>5</b>
2.1 岩石邊坡破壞形式與分類 .....	5
2.2 岩石邊坡楔形破壞研究 .....	7
2.3 岩石邊坡節理性質調查 .....	11
2.4 攝影測量於岩坡調查之應用 .....	12
2.4.1 無人飛行載具 UAV 的應用 .....	12
2.4.2 點雲分析應用於不連續面判釋 .....	14
2.5 3DEC 軟體介紹 .....	18
2.5.1 基本介紹 .....	18
2.5.2 運算原理 .....	18
2.5.3 塊體接觸時之運算方法 .....	20
2.5.4 節理設置原理 .....	21
2.5.5 塊體組成律模式 .....	22
2.5.6 不連續面組成律模式 .....	23
2.6 3DEC 應用於邊坡破壞案例之模擬 .....	25

<b>第三章 研究方法</b> .....	<b>26</b>
3.1 高陡岩石邊坡現地調查方法.....	26
3.1.1 運用 UAV 及攝影測量進行邊坡調查.....	26
3.1.2 節理面位態分析.....	27
3.2 物理模型砂箱試驗設計.....	29
3.2.1 試驗儀器.....	29
3.2.2 試驗材料.....	30
3.2.3 試驗方法與步驟.....	31
3.3 以離散元素法軟體 (3DEC) 建置之數值模擬.....	32
3.3.1 數值模擬模型建置與試驗流程.....	34
3.3.2 數值模擬參數決定.....	38
3.3.3 數值模擬成果校核依據.....	38
3.3.4 數值模擬實驗規劃.....	40
3.4 現地案例全尺度模擬.....	41
<b>第四章 現地調查與攝影測量成果</b> .....	<b>43</b>
4.1 南雅案例.....	43
4.1.1 位置及地質地形.....	43
4.1.2 節理位態判釋.....	46
4.2 荖濃溪案例.....	50
4.2.1 位置及地質地形.....	50
4.2.2 節理位態判釋.....	52
4.3 玉穗溪案例.....	54
4.3.1 位置及地質地形.....	54
4.3.2 節理位態判釋.....	56
4.4 小結.....	58
<b>第五章 砂箱物理模型試驗</b> .....	<b>59</b>
5.1 試驗結果.....	59
5.2 小結.....	63



<b>第六章 數值模擬試驗</b> .....	<b>64</b>
6.1 砂箱物理模型試驗之驗證.....	64
6.2 數值模擬試驗成果.....	68
6.2.1 節理延續性之影響.....	69
6.2.2 不連續面交角之影響.....	70
6.2.3 偏移角度之影響.....	75
6.3 小結.....	88
<b>第七章 現地案例應用</b> .....	<b>89</b>
7.1 南雅案例邊坡數值模型建置成果.....	89
7.2 不同節理延續性之模擬結果.....	92
7.2.1 延續性 60%、Joint 1 (n=8) 之模擬結果.....	92
7.2.2 延續性 80%、Joint 1 (n=8) 之模擬結果.....	95
7.2.3 延續性 100%、Joint 1 (n=8) 之模擬結果.....	97
7.3 不考慮解壓節理之模擬結果.....	99
7.3.1 延續性 60%、Joint 1 (n=0) 之模擬結果.....	99
7.3.2 延續性 80%、Joint 1 (n=0) 之模擬結果.....	100
7.3.3 延續性 100%、Joint 1 (n=0) 之模擬結果.....	102
7.4 小結.....	104
<b>第八章 結論與建議</b> .....	<b>105</b>
8.1 結論.....	105
8.2 建議.....	107
<b>參考文獻</b> .....	<b>108</b>
<b>附錄 A 數值模型模擬結果</b> .....	<b>111</b>
<b>附錄 B 委員問答</b> .....	<b>138</b>
<b>附錄 C 原始程式碼</b> .....	<b>141</b>





## 圖目錄

圖 1.1	研究流程圖 .....	4
圖 2.1	Varnes 提出之山崩分類 .....	5
圖 2.2	岩石邊坡之破壞類型 .....	6
圖 2.3	岩坡楔形滑動之示意圖 .....	7
圖 2.4	以剛塊法解釋岩坡楔形滑動之力學運算 .....	8
圖 2.5	岩石邊坡楔形滑動之示意圖 .....	9
圖 2.6	考慮水壓力之楔形滑動力學計算 .....	9
圖 2.7	受節理組切割成無數塊體之岩石邊坡—Uttarakhand, India .....	10
圖 2.8	節理密度調查維度與裂隙維度之關係 .....	11
圖 2.9	立面地形圖之實際運用—基隆八斗子倒懸岩壁 .....	12
圖 2.10	傳統地形圖與立面地形圖示意圖 .....	13
圖 2.11	判斷不連續面之成果 .....	14
圖 2.12	八斗子地區之點雲模型判釋 .....	15
圖 2.13	利用點雲分析對邊坡露頭進行測線法調查節理位態 .....	17
圖 2.14	以不同顏色區分岩坡露頭中量測得之不同節理組 .....	17
圖 2.15	3DEC 運算流程圖 .....	19
圖 2.16	以共同平面簡化塊體接觸時之運算效率示意圖 .....	20
圖 2.17	節理參數設定之程式碼 .....	21
圖 2.18	節理參數給定標準差之示意圖 .....	21
圖 2.19	以 3DEC 模擬邊坡遇節理截切之平面型破壞 .....	25
圖 3.1	以不同角度之空中側拍照片進行點雲模型產製 .....	26
圖 3.2	三種類型之坡向中各弱面形成楔形岩體之示意圖 .....	27
圖 3.3	物理試驗砂箱設計圖 .....	29
圖 3.4	模擬節理岩體之研磨石外型及尺寸 .....	30
圖 3.5	物理模型試驗之配置 .....	30
圖 3.6	研磨石依據 3DEC 隨機產生之節理分布進行黏著 .....	31
圖 3.7	兩節理面之交角角度 ( $\xi$ ) 及偏移角度 ( $\alpha$ ) 示意圖 .....	32
圖 3.8	數值模型之模擬流程圖 .....	33
圖 3.9	改變交線傾伏角之數值模型建置及運動形式 .....	35
圖 3.10	固定交線傾伏角之數值模型建置 .....	37
圖 3.11	利用三角網格之空間座標建置三維地表模型 .....	42
圖 3.12	將 DSM 三角網格座標以柱體形式匯入 3DEC 中之示意圖 .....	42
圖 4.1	南雅案例區邊坡位置及 1/25000 地質圖 .....	43
圖 4.2	南雅案例區邊坡地形圖 .....	44
圖 4.3	南雅案例區邊坡空拍圖 .....	45

圖 4.4	(a) 1989 年台 2 線公路南雅段落石坍方 (中國時報); (b) 災後邊坡崩塌區描繪與分區 .....	45
圖 4.5	南雅岩石邊坡露頭之點雲: (a) 初步分區; (b) 點雲位態 Kd-tree 分析 .....	46
圖 4.6	南雅岩石邊坡露頭之點雲位態分布圖: (a) 整區範圍; (b) B 區範圍 .....	46
圖 4.7	B 區點雲展示及主要節理組面單元過濾 .....	47
圖 4.8	根據點雲分析結果將邊坡上之節理組及層面劃分 .....	47
圖 4.9	南雅案例主要節理及層面之詳細位態、赤平投影圖與出露坡面之交線 ..	49
圖 4.10	荖濃溪案例區邊坡位置及地形圖 .....	50
圖 4.11	台 20 線明霸克露橋旁岩石邊坡之點雲模型 .....	51
圖 4.12	荖濃溪案例之楔形破壞不連續面判釋, 坡面位態: $331^\circ/74^\circ$ .....	51
圖 4.13	荖濃溪邊坡進行位態分析產製之立體投影圖 .....	52
圖 4.14	荖濃溪邊坡進行位態分析產製之面單元與三組主要弱面 .....	52
圖 4.15	荖濃溪案例區主要節理及層面之赤平投影圖 .....	53
圖 4.16	玉穗溪案例區邊坡位置及地形圖 .....	54
圖 4.17	玉穗溪案例邊坡之點雲產製 .....	55
圖 4.18	玉穗溪案例之楔形破壞不連續面判釋, 坡面位態: $200^\circ/63^\circ$ .....	55
圖 4.19	玉穗溪邊坡進行位態分析產製之立體投影圖 .....	56
圖 4.20	荖濃溪邊坡進行位態分析產製之面單元與三組主要弱面 .....	56
圖 4.21	玉穗溪案例區主要節理及層面之赤平投影圖 .....	57
圖 5.1	楔形岩體中之翻覆型、滑動型破壞三維示意圖 .....	59
圖 5.2	沿交線方向垂直剖面中楔形岩體之翻覆型、滑動型破壞二維示意圖 .....	60
圖 5.3	延續性 80% 之物理模型於不同交線傾伏角下之崩落產狀 .....	61
圖 5.4	移除表層鬆動岩塊後之殘餘岩體產狀 .....	62
圖 6.1	數值模擬中節理面交線傾伏角為 $28^\circ$ 時之殘餘岩體產狀 .....	65
圖 6.2	物理模型節理面交線傾伏角 = $44^\circ$ 時與數值模擬結果之比對 .....	66
圖 6.3	物理模型節理面交線傾伏角 = $52^\circ$ 時與數值模擬結果之比對 .....	66
圖 6.4	數值模擬中節理面交線傾伏角為 $35^\circ$ 時之殘餘岩體產狀 .....	67
圖 6.5	移除物理模型中表層鬆動岩塊後與數值模擬結果之比對 .....	67
圖 6.6	初始階段中四種塊體之運動形式及其節點速率判斷標準 .....	68
圖 6.7	對稱模型中堆積區岩塊體積比例 .....	70
圖 6.8	$\xi=120^\circ$ 、Plunge = $30^\circ$ 、P = $60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較 .....	71
圖 6.9	$\xi=120^\circ$ 、Plunge = $40^\circ$ 、P = $60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較 .....	72
圖 6.10	$\xi=90^\circ$ 、Plunge = $30^\circ$ 、P = $60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較 .....	73
圖 6.11	$\xi=90^\circ$ 、Plunge = $40^\circ$ 、P = $60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較 .....	74
圖 6.12	$\xi=120^\circ$ 、Plunge = $30^\circ$ 、P = $80^\circ$ 、 $\alpha$ 分別為 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 之比較 .....	76
圖 6.13	$\xi=120^\circ$ 、Plunge = $40^\circ$ 、P = $80^\circ$ 、 $\alpha$ 分別為 $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 之比較 .....	77
圖 6.14	$\xi=90^\circ$ 、Plunge = $30^\circ$ 、P = $80^\circ$ 、 $\alpha$ 分別為 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 之比較 .....	78
圖 6.15	$\xi=90^\circ$ 、Plunge = $40^\circ$ 、P = $80^\circ$ 、 $\alpha$ 分別為 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 之比較 .....	79

圖 6.16	夾角 $120^\circ$ 模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例 .....	80
圖 6.17	夾角 $90^\circ$ 模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例 .....	80
圖 6.18	$\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 .....	81
圖 6.19	$\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 .....	81
圖 6.20	$\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=10^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 .....	82
圖 6.21	$\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=10^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 .....	82
圖 6.22	$\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=20^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度) ...	83
圖 6.23	$\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=20^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 .....	83
圖 6.24	$\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ ) .	84
圖 6.25	$\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ ) .	84
圖 6.26	$\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )	85
圖 6.27	$\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )	85
圖 6.28	$\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )	86
圖 6.29	$\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、P= $80^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )	86
圖 6.30	夾角 $120^\circ$ 模型中不同 $\alpha$ 角度下之堆積區夾角角度 ( $\delta$ ) .....	87
圖 6.31	夾角 $90^\circ$ 模型中不同 $\alpha$ 角度下之堆積區夾角角度 ( $\delta$ ) .....	87
圖 7.1	利用南雅地區產製之點雲於 3DEC 中建立倒懸邊坡之數值模型 .....	89
圖 7.2	南雅邊坡之不連續面配置圖 .....	90
圖 7.3	沿著形成楔形塊體之兩不連續面交線方向之剖面與邊坡之對應位置 .....	91
圖 7.4	A、B 剖面之不連續面配置圖 (節理延續性分別為 60%、80%、100%)	91
圖 7.5	節理延續性 60%、Joint 1 (n=8) 模型之位移分布圖 .....	93
圖 7.6	節理延續性 60%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	94
圖 7.7	節理延續性 60%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 B 位移分布圖 .....	94
圖 7.8	節理延續性 80%、Joint 1 (n=8) 模型之位移分布圖 .....	95
圖 7.9	節理延續性 80%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	96
圖 7.10	節理延續性 80%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 B 位移分布圖 .....	96
圖 7.11	節理延續性 100%、Joint 1 (n=8) 模型之位移分布圖 .....	97
圖 7.12	節理延續性 100%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	98
圖 7.13	節理延續性 100%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 B 位移分布圖 .....	98
圖 7.14	節理延續性 60%、Joint 1 (n=0) 之位移分布圖 .....	99
圖 7.15	節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	100
圖 7.16	節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	100
圖 7.17	節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 之位移分布圖 .....	101
圖 7.18	節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	101
圖 7.19	節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	101
圖 7.20	節理延續性 100%、Joint 1 (n=0) 之位移分布圖 .....	102
圖 7.21	節理延續性 100%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖 .....	103
圖 7.22	節理延續性 100%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 B 位移分布圖 .....	103



## 表目錄



表 2.1	八斗子 SS3 砂岩層之節理判釋成果.....	15
表 2.2	3DEC 塊體組成律整理 .....	24
表 2.3	3DEC 節理面組成律整理 .....	24
表 3.1	Cloudcompare 中所使用之相關參數.....	28
表 3.2	研磨石參數列表 .....	38
表 3.3	3DEC 之基本模擬單位表 .....	39
表 3.4	3DEC 中相關模擬參數 .....	39
表 3.5	數值模擬不同參數之模型，共計 36 組試驗結果.....	40
表 6.1	$\xi=120^\circ$ 、Plunge $=30^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計 ....	71
表 6.2	$\xi=120^\circ$ 、Plunge $=40^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計 ....	72
表 6.3	$\xi=90^\circ$ 、Plunge $=30^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計 .....	73
表 6.4	$\xi=90^\circ$ 、Plunge $=40^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計 .....	74
表 6.5	$\xi=120^\circ$ 、Plunge $=30^\circ$ 、P $=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計.	76
表 6.6	$\xi=120^\circ$ 、Plunge $=40^\circ$ 、P $=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計.	77
表 6.7	$\xi=90^\circ$ 、Plunge $=30^\circ$ 、P $=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計...	78
表 6.8	$\xi=90^\circ$ 、Plunge $=40^\circ$ 、P $=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計...	79

# 第一章 緒論



## 1.1 研究動機與目的

### 1.1.1 研究動機

在討論岩石邊坡工程的時候，常會依照岩層層面或是板劈理面與坡面之間的夾角與走向，進而區分為順向坡、逆向坡以及斜交坡等三類，其中順向坡已在國內引致多起大規模崩塌災害，不僅是岩石邊坡研究的主軸之一，更是坡地災害討論時的一大重點。然而在順向坡之外，逆向坡及斜交坡也在歷史災害中扮演舉足輕重的角色，因其容易沿著層面或板劈理面以外的不連續面發展出崩滑面，例如節理面等不連續面，且經常發生多組不連續面共同構成滑動塊體之破壞情形。

當單一不連續面主控滑動時易形成滑動破壞；當兩組不連續面主控時形成跳階型滑動破壞或楔形破壞；當三組不連續面或以上同時主控時，則形成更複雜的破壞機制。又因不連續面之位態、間距和延續性等特徵，往往必須藉由現地調查才能得知，因此如何有效利用現有知識技術取得節理資訊，進而掌握不連續面的成因、位態、連續性及其規律性與發展，實為邊坡穩定評估之重要課題。

過去研究在探討楔形破壞時，一般僅只探討兩道不連續面所形成的楔形岩體，而忽略了時常於楔形岩體後方形成頂部邊界的不連續面（詳 2.2 節），但根據現地野外勘查的結果，此類不連續面依據邊坡坡向的種類不同，時常會有破壞模式上的變化（詳 3.1.2 節）。若於逆向坡中，楔形岩體常由兩道共軛或是彼此垂直的高角度節理所截切，並因岩層本身之層面延續性較高，容易形成岩體頂部的張力裂隙，而產生較趨近矩形的楔形岩體，並沿著兩節理之交線滑出而產生楔形破壞；若於斜交坡中，則形成楔形岩體的兩道不連續面大部分是由層面以及另一道高角度節理所組成，兩組性質不同的不連續面於坡體中相交並形成一道傾角緩於坡面的交線，因出露坡

面而使截切出的楔形岩體容易因重力驅使，而滑出形成岩石邊坡楔形破壞。

再者，因台灣地區地層多屬於沉積環境形成之砂岩、頁岩及砂頁岩互層，許多地區常會有厚層砂岩出露於地表，而形成較為高陡之岩石邊坡，於現地量測不連續面位態時，時常因邊坡高度、植被等地形限制而不易取得所需之位態資料，故本研究以無人飛行載具 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)，對現地案例進行空拍攝影測量，藉由各個角度之空拍圖交叉運算產生三維點雲資料，並於點雲資料中量測各不連續面之位態，再以赤平投影法判釋坡面、岩層層面與不同節理面交角之關係，以作為後續建置數值模型及其相關參數之依據。

### 1.1.2 研究目的

爰此，本研究擬探討「高陡逆向、斜交坡岩體特性調查」及「漸進式楔形破壞機制探討」兩大主題。本研究之目的包含：

1. 提出應用無人飛行載具 (UAV) 及攝影測量方法，針對高陡岩石邊坡進行岩體特性調查，包含節理特性判斷、量測等。
2. 藉由觀察現地案例之破壞情形，提出逆向坡及斜交坡上的楔形破壞模式，並透過概念模型簡化，以縮尺砂箱物理試驗觀察並重現楔形破壞的發生及運動過程，並討論誘發此種破壞形式的可能影響因子。
3. 嘗試以離散元素法軟體 3DEC 之數值分析方法，探討不同因子對楔形岩體破壞機制以及岩塊破壞後堆積分布的影響，其中包含不連面之延續性、兩不連續面交角、交線傾伏角，以及不連續面的偏移角度等。
4. 進一步應用數值方法模擬現地尺度之楔形破壞案例。
5. 以研究結果推估岩石邊坡發生楔形破壞時，其岩石崩落之安全性評估及相對應之影響範圍，以利未來在評估橋梁墩柱等工程設施鄰近一楔形岩體邊坡時，其影響範圍或是落墩位置等之工程評估。



## 1.2 研究流程及架構

本研究以野外調查之現象觀察資料為基礎，先建立運用攝影測量原理及三維點雲資料分析，調查高陡岩石邊坡節理特性之方法，接著根據觀察到的楔形破壞案例，以調查結果之節理面特性如節理面位態 (orientation)、間距 (spacing)、兩組節理面交角 (dihedral angle)、節理面延續性 (persistence) 以及節理面交線傾伏角 (plunge) 等，建立概念模型並進行簡化的縮尺砂箱物理試驗，針對我們關心的節理特性如延續性及節理面交線傾伏角，於真實世界中進行觀察。

再以離散元素法軟體 3DEC 之數值分析方法模擬物理模型，分析不同變因對變形、破壞模式的影響，更甚者，從崩落後的堆積塊體中，分析出當不連續面以不對稱形式出露坡面時，其偏移角度是如何影響堆積區的分布情形。最後整合點雲調查方法與數值分析成果，於 3DEC 中建立岩石邊坡的真實地形，套用調查成果之節理面參數如組數、間距及空間分布等，並改變坡體中之節理面延續性，對現地案例進行模擬，以觀察在不同節理面特性下，對於具有楔形破壞趨勢之岩石邊坡的安全性影響。圖 1.1 為本研究之流程圖，以及對應本文之章節。

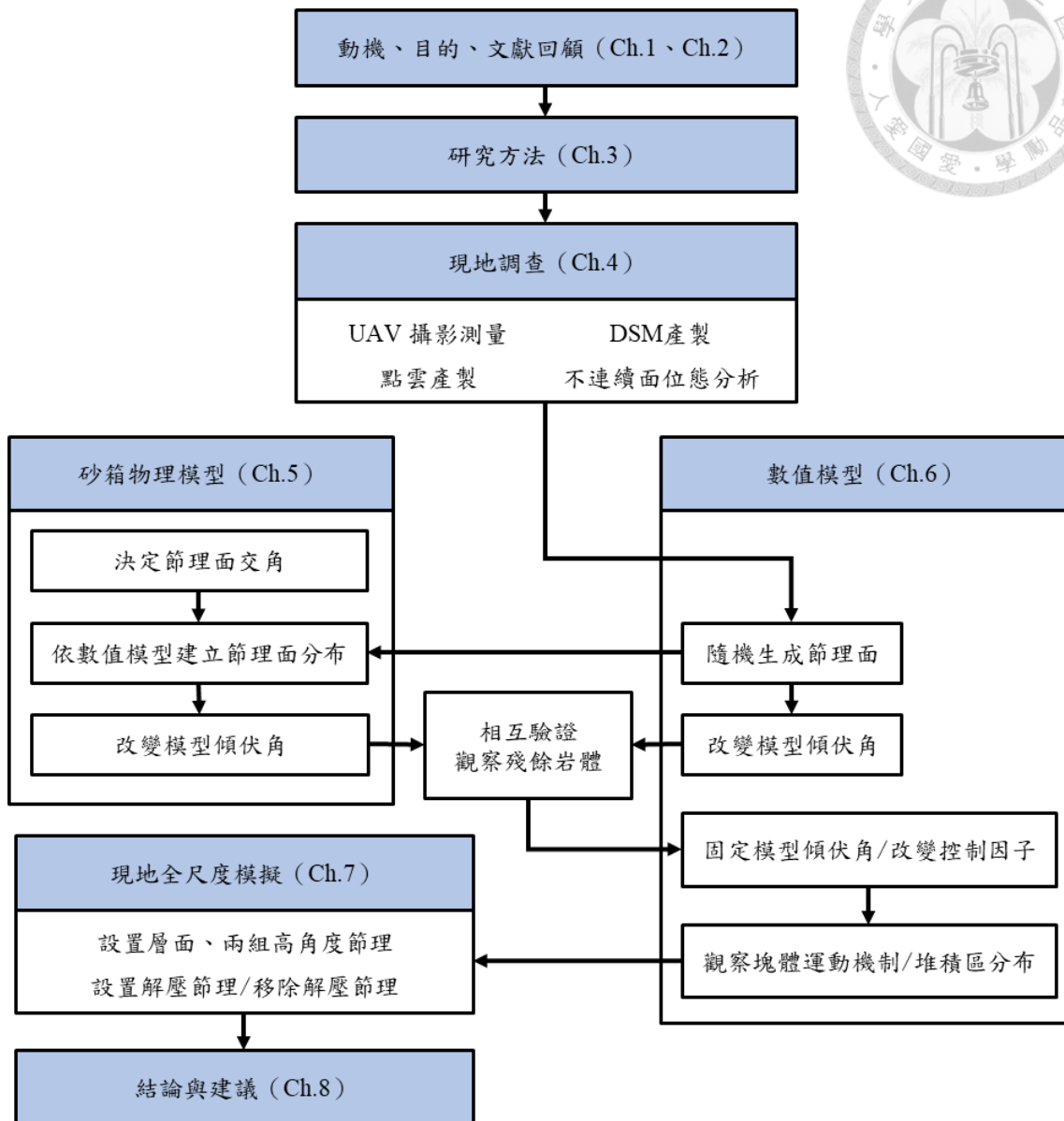


圖 1.1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧



### 2.1 岩石邊坡破壞形式與分類

自然界中當土體及岩體受到大地應力或是自然風化影響而產生變形之後，容易發生不同規模之破壞類型，而較常見之山崩分類，如 Varnes (1978) 所建議之分類法 (圖 2.1)。其中與本研究較相關者為岩石材料之破壞，共包含落石 (falls)、傾覆 (topples)、滑動 (slides)、複合型 (complexs) 等，但並未對楔形破壞機制加以描述及探討。

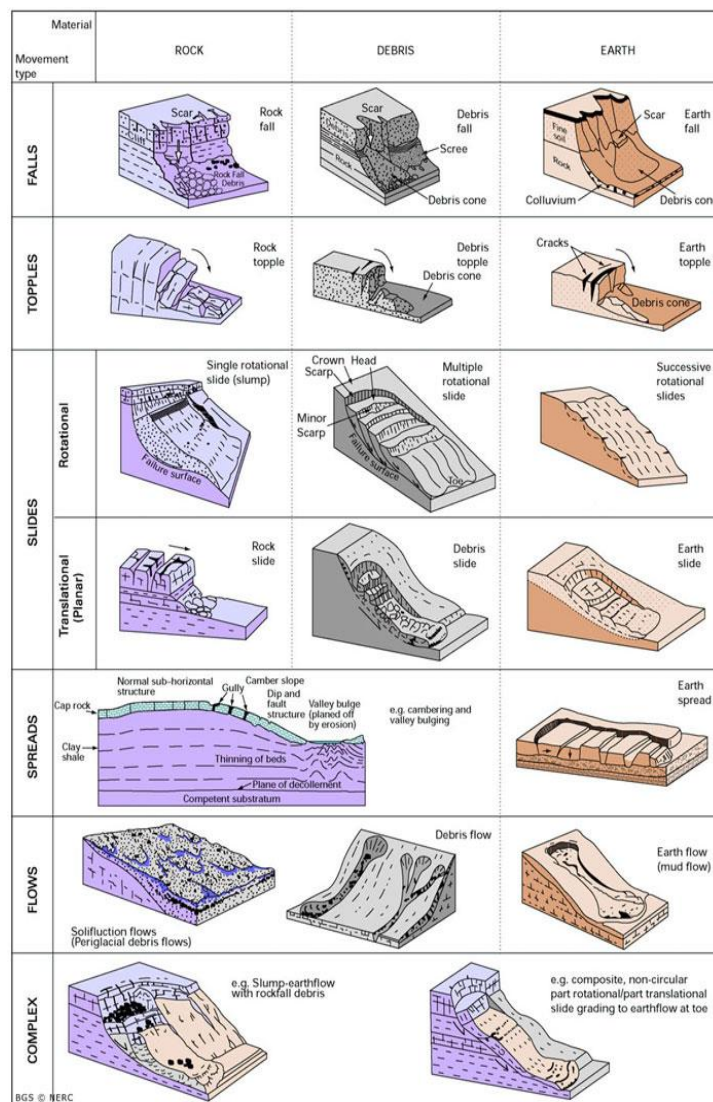


圖 2.1 Varnes 提出之山崩分類 (圖取自 British Geological Survey 網站)



而對於岩石邊坡的變形行為，因應不同的地質條件，有許多不同的分類方法，較常見者例如：[Aydan \(1989\)](#)、[Goodman and Kieffer \(2000\)](#)、[Poisel and Preh \(2004\)](#)等，於 Aydan 的分類中，可見他將岩石邊坡破壞類型主要分為三類：

- (1) 岩體自身強度主控之破壞
- (2) 不連續面強度主控之破壞
- (3) 岩體強度及不連續面強度之複合型破壞

其中關於本研究的重點—楔形破壞，是屬於第二類由不連續面所主控的破壞類型（圖 2.2），且因為楔形岩體必須要由兩組以上的不連續面依一定角度截切過岩石邊坡方能形成，故其破壞機制屬於三維空間中的問題，從圖中也可觀察到只有楔形破壞的示意圖為立體示意圖而非像其他機制一樣可用平面來解釋。

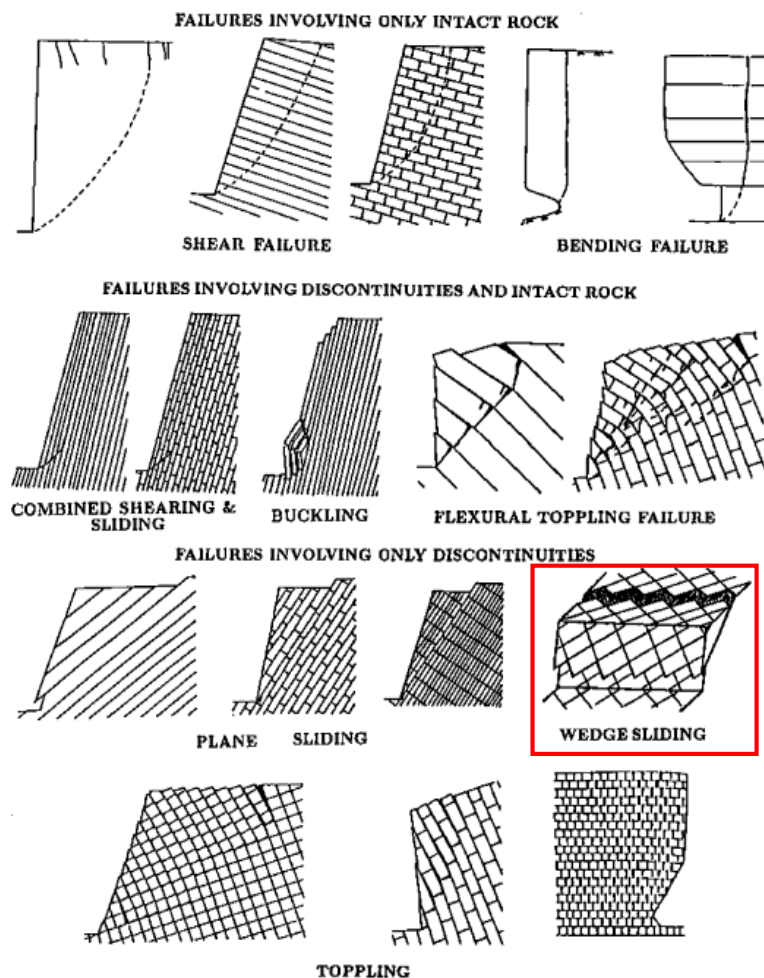


圖 2.2 岩石邊坡之破壞類型 (Aydan, 1989)



## 2.2 岩石邊坡楔形破壞研究

以往在探討楔形破壞的成因及機制時，常會將岩石邊坡簡化成被兩道節理面截切，楔形岩塊再沿著交線滑出的模式（圖 2.3、圖 2.4）。但經過實際的現地野外調查，我們觀察到形成岩楔崩落的因素，常常不僅只有截切岩體的兩道弱面，而是連同解壓節理形成的後方邊界（圖 2.5 b），再因楔形岩體下方的趾部侵蝕，多種因素的結合才造成岩體沿著不連續面之交線，產生翻倒及滑出等破壞型式，形成真正在岩石邊坡中觀察到的楔形岩體變形與破壞產狀。

上述於前人研究中所使用之符號，在此統一作說明，以利提升後續探討不同節理幾何性質時之效率與一致性：

- (1)  $\xi$  — 為兩不連續面於空間中所夾之最大角度
- (2)  $\beta$  — 不連續面交角之角平分線與水平面之夾角
- (3)  $\varphi$  — 不連續面的摩擦角
- (4)  $\varphi_i$  — 兩不連續面交線之傾伏角
- (5)  $\omega_1$  — 交線垂直剖面中，鉛質面與左側不連續面的夾角
- (6)  $\omega_2$  — 交線垂直剖面中，鉛質面與右側不連續面的夾角

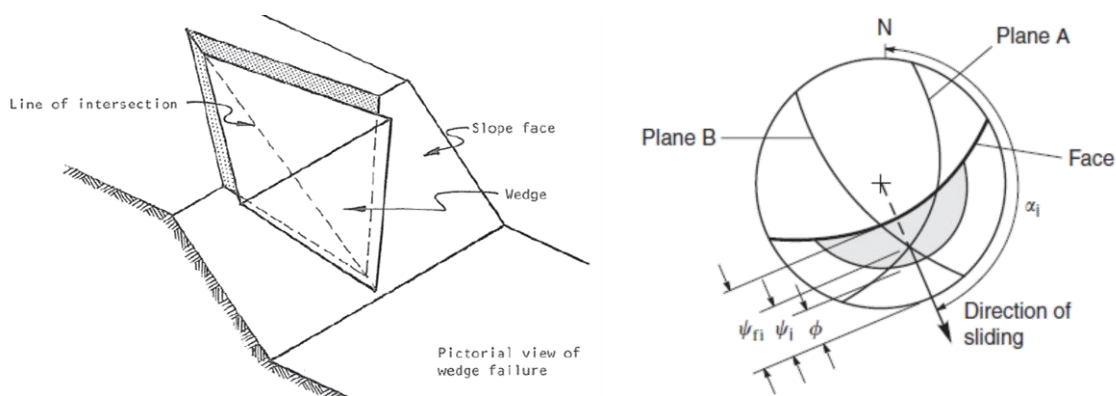


圖 2.3 岩坡楔形滑動之示意圖 (Hoek and Bray, 1981)



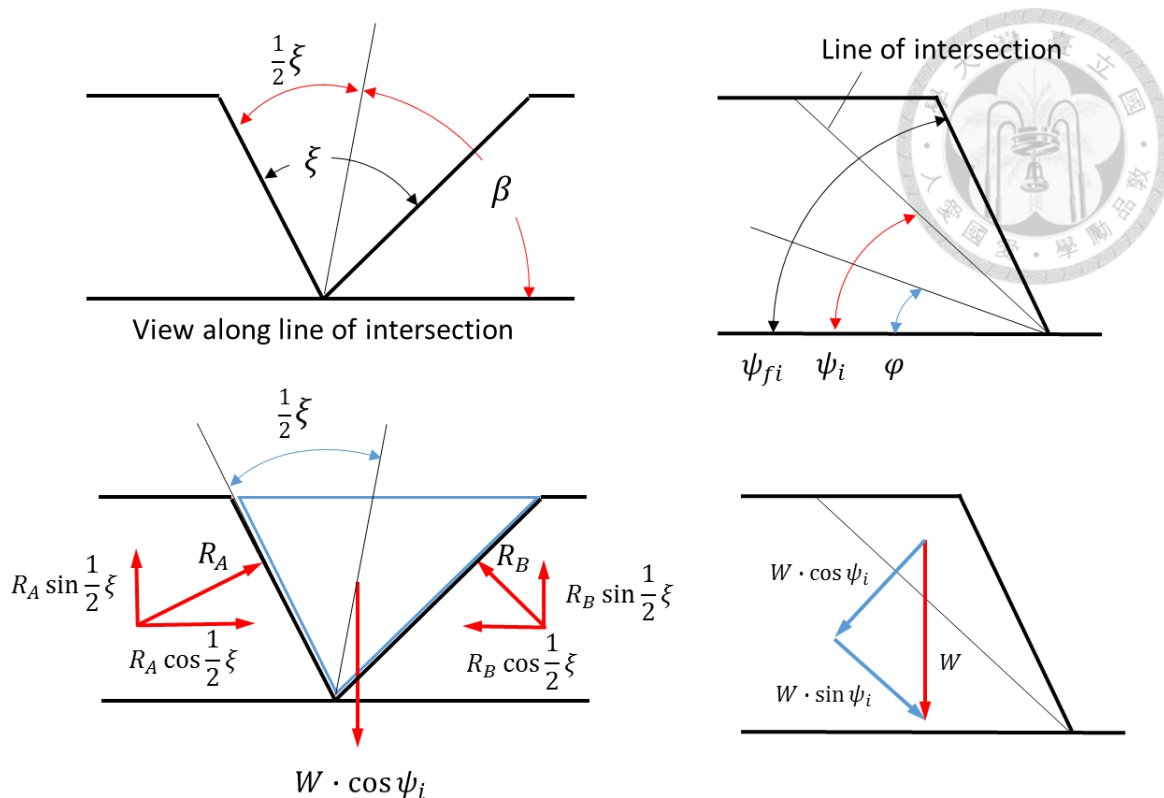


圖 2.4 以剛塊法解釋岩坡楔形滑動之力學運算 (Hoek and Bray, 1981)

$$R_A \cdot \sin \left( \beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \cdot \sin \left( \beta + \frac{1}{2} \xi \right) \quad (2.1)$$

$$R_A \cdot \cos \left( \beta - \frac{1}{2} \xi \right) - R_B \cdot \cos \left( \beta + \frac{1}{2} \xi \right) = W \cdot \cos \psi_i \quad (2.2)$$

$$(R_A + R_B) \cdot \sin \frac{1}{2} \xi = W \cdot \cos \psi_i \cdot \sin \beta \quad (2.3)$$

$$F = \frac{(R_A + R_B) \cdot \tan \varphi}{W \cdot \sin \psi_i} \quad (2.4)$$

$$F = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \xi} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \psi_i} \quad (2.5)$$

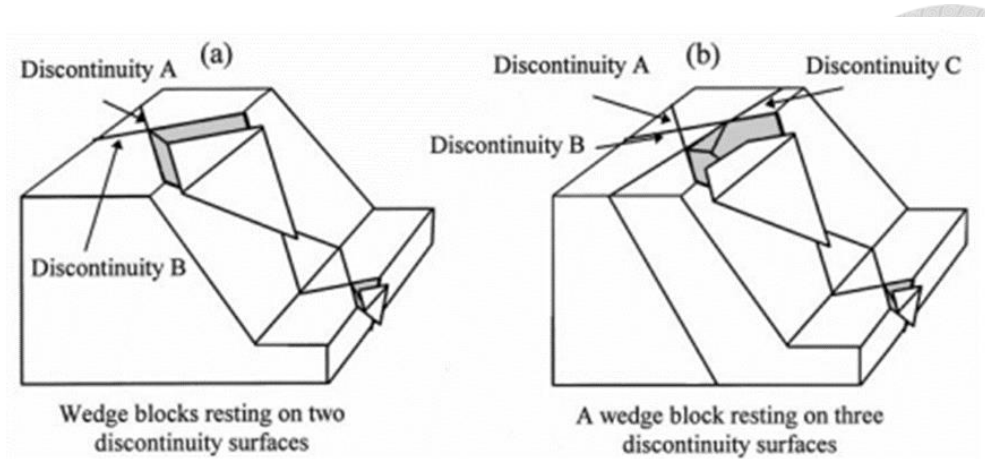


圖 2.5 岩石邊坡楔形滑動之示意圖 (Kumsar et al., 2000)

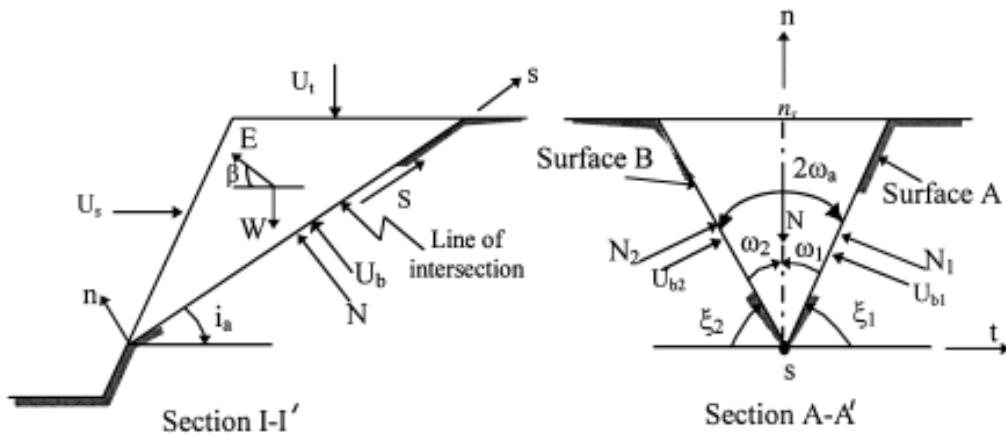


圖 2.6 考慮水壓力之楔形滑動力學計算 (Kumsar et al., 2000)

$$N_1 + N_2 = [W \cos i_a - E \sin(i_a + \beta) + U_s \sin i_a + U_t \cos i_a] \lambda - \alpha U_b \quad (2.6)$$

$$T = (N_1 + N_2) \tan \phi + c(A_1 + A_2) \quad (2.7)$$

$$E = \eta W \quad (2.8)$$

$$SF = \frac{T}{S} \quad (2.9)$$

$$\lambda = \frac{\cos \omega_1 + \cos \omega_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} \quad (2.10)$$

$$SF = \frac{[\lambda [W(\cos i_a - \eta \sin(i_a + \beta)) + U_s \sin i_a + U_t \cos i_a] - \alpha U_b] \tan \phi + c(A_1 + A_2)}{W(\sin i_a + \eta \cos(i_a + \beta)) - U_s \cos i_a + U_t \sin i_a} \quad (2.11)$$

從式 2.5 中可知，當不連續面交角角平分線與水平面之夾角 ( $\beta$ ) 角度下降時，其安全係數會隨之降低，換句話說當兩形塊體之不連續面交角幾何愈不對稱，楔形塊體便會愈具崩落的潛勢；而當不連續面交角 ( $\xi$ ) 角度下降時，楔形塊體的安全係數則會相對增加。從式 2.10 及式 2.11 則同樣可看出，當其他外力條件相同，且鉛質面與兩側不連續面的夾角合 ( $\omega_1 + \omega_2$  值) 不變的情況下，若  $\omega_1$  及  $\omega_2$  之差距愈大，即不連續面交角幾何愈不對稱，其  $\lambda$  值會隨之增加，故安全係數也會因此提升。

然上述兩種模式探討的楔形破壞機制皆只針對單一塊體，而並非我們於現地岩石邊坡中所觀察到之普遍現象。當一岩體受到節理組切割時，容易產生無數塊大小不一之岩塊，且許多節理面會以共軛或是正交的型態成對出現，若節理組間之交線從坡面出露而見光時，這些岩楔便有可能成群的崩落下來 (圖 2.7)，此種型式的楔形破壞機制在過去未被廣泛討論，故尚未有明確的準則可描述節理面特性對受數道節理組同時截切之楔形岩體的影響性，但為了先行預估此一形式之岩體破壞機制，仍舊可從上述的公式中各參數間之關係，推測出相對應的趨勢。



圖 2.7 受節理組切割成無數塊體之岩石邊坡—Uttarakhand, India  
(網路資源 — [https://www.youtube.com/watch?v=1NL\\_1enbu4](https://www.youtube.com/watch?v=1NL_1enbu4))



## 2.3 岩石邊坡節理性質調查

岩石邊坡的現地地質調查中，基本節理性質是不可忽略的，除了節理的位態之外，各個節理組的密度、延續性等也扮演了極其重要的角色。在具有厚層砂岩地質特徵的岩石邊坡，雖然岩性方面具有較高的岩體強度，但若是存有高密度及延續性佳的節理組，依然會有極高的災害潛勢。

一般在計算節理密度及延續性的時候，是以測線法或測窗法針對欲探討的節理岩體露頭進行量測，依不同維度的討論可分為以下數種節理密度調查種類 (Dershowitz et al., 1992) (圖 2.8)，上述兩種測量方法是屬於  $P_{11}$ 、 $P_{21}$  及  $P_{22}$ ，意即於露頭上統計節理的數量或是長度，但在真實的節理岩體中，其延續性是三維空間中的延伸性，應以  $P_{32}$  或是  $P_{33}$  為討論不連續面延續性時之依據，會更加貼近真實世界之節理分佈情形。

Dimension of Measurement Region →	1: Line measure (Borehole/scan line)	2: Area measure (Traceplane)	3: Volume (Rock mass)
Dimension of Fracture Measurement			
1: Number of fractures	$P_{11}$ : Number of fractures per unit length of borehole or scan line [ $L^{-1}$ ]	$P_{21}$ : Number of fractures per unit area of trace plane [ $L^{-2}$ ]	$P_{31}$ : Number of fractures per unit volume of rock [ $L^{-3}$ ]
2: Dimension one less than that of measurement region		$P_{22}$ : Length of fracture traces per unit area of trace plane [ $L^{-1}$ ]	$P_{32}$ : Area of fractures per unit volume of rock [ $L^{-1}$ ]
3: Dimension equal to that of measurement region			$P_{33}$ : Volume of fractures per unit volume of rock [-]

圖 2.8 節理密度調查維度與裂隙維度之關係 (Dershowitz et al., 1992)



## 2.4 攝影測量於岩坡調查之應用

### 2.4.1 無人飛行載具 UAV 的應用

傳統的地質調查方法在面對高陡的岩石邊坡時，通常只能以遠距離遙測的方式，或是根據判斷將位於高處的線型沿伸至地面，再進行層面及節理的位態調查，且對於露頭的描繪也因觀察者視角受到高度上的侷限，無法精準且真實的呈現，

隨著科技的進步，現今已可將無人飛行載具 UAV (Unmanned Airborne Vehicle) 技術應用於邊坡調查，可從高空中以各種視角對陡峭岩壁進行觀察及拍攝。再將多方視角之空拍照片，便能以攝影測量的技術於空間中建立目標邊坡的點雲模型，以及繪製邊坡的三維數值地表模型 DTM (Digital Terrain Model)。

更甚者，若將點雲模型之空間座標投影至垂直面，便能將原本倒懸的地形呈現為外禿的山丘，此方法能清楚地顯示倒懸地形的位置與量體，進而計算倒懸岩體的體積 (圖 2.9)，解決了過去傳統地形圖中，因在水平面上同一個座標只能有一個高程值，而無法明確表示陡峭邊坡的問題 (謝沛宸，2018) (圖 2.10)。

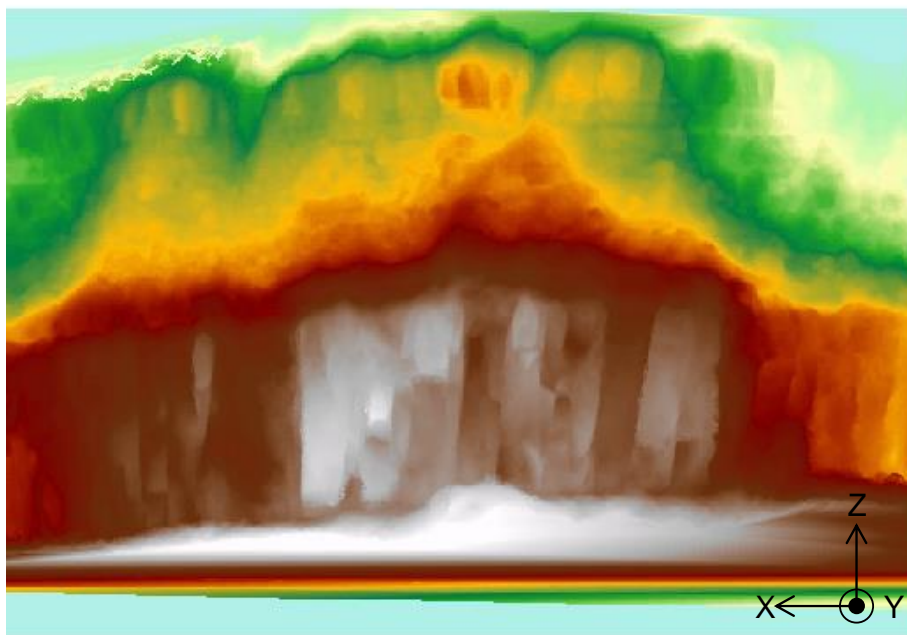


圖 2.9 立面地形圖之實際運用—基隆八斗子倒懸岩壁 (謝沛宸，2018)



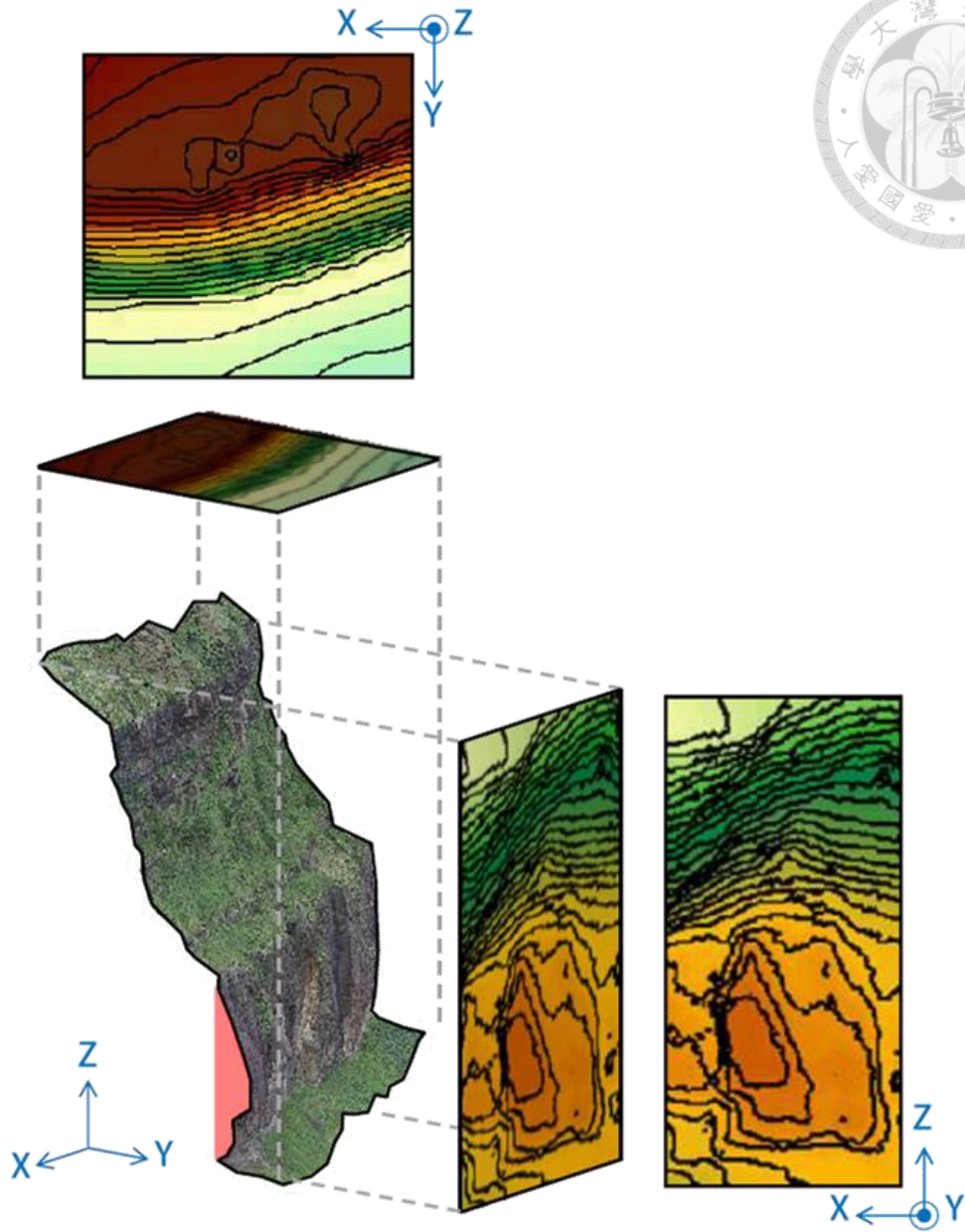


圖 2.10 傳統地形圖與立面地形圖示意圖 (謝沛宸, 2018)



## 2.4.2 點雲分析應用於不連續面判釋

在佈設較為精密之控制點及定位後，產製出來的點雲模型更利於岩石邊坡的相關調查，在整個節理岩體的露頭中，因為可以從各種視角進行觀察，能較清楚的描繪及量測到不連續面的線形及出露面，進而運用岩坡的 DSM 來描繪岩體中不連續面之延伸長度及間距等節理特性 (Tuckey et al., 2016) (圖 2.11)。

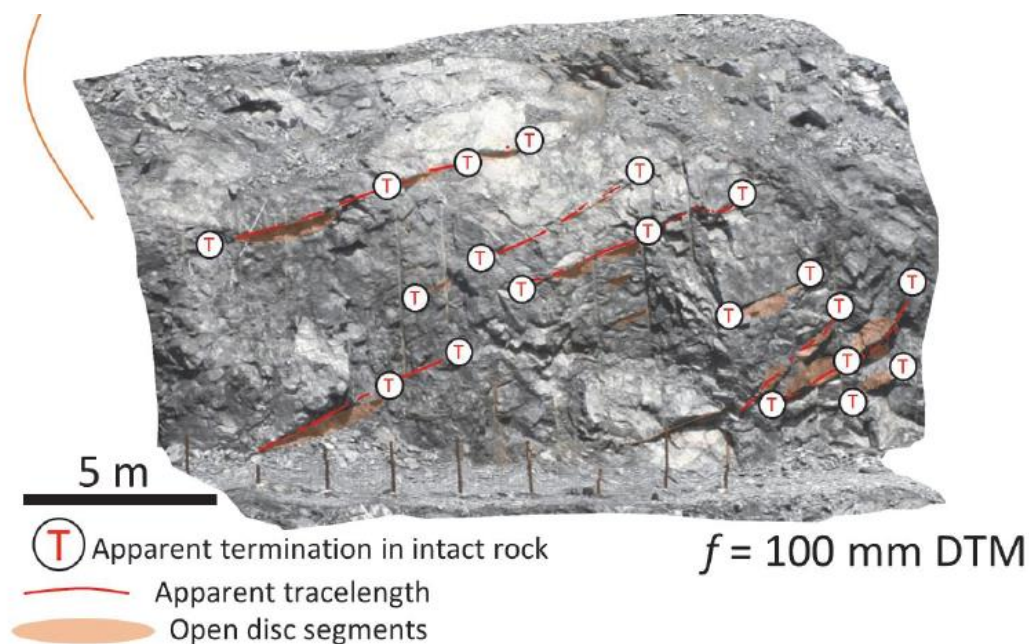


圖 2.11 判斷不連續面之成果 (Tuckey et al., 2016)

而若將原始點雲模型進行分割，以一定厚度之範圍產製成等間距之切片圖形，並將各切片轉至正射方向，便能人工判釋節理的走向、間距及延續性等節理性質，大大提升了在大多由高角度節理所組成的厚層砂岩邊坡中之不連續面調查效率，此調查方法也曾運用於基隆八斗子地區之厚層砂岩邊坡節理調查，以一條 80 公尺長的測線沿著岩坡的水平方向切割點雲資料並進行節理判斷(謝沛宸，2018) (圖 2.12)，共計判釋出五組節理組，節理之走向及間距統計資料如表 2.1。

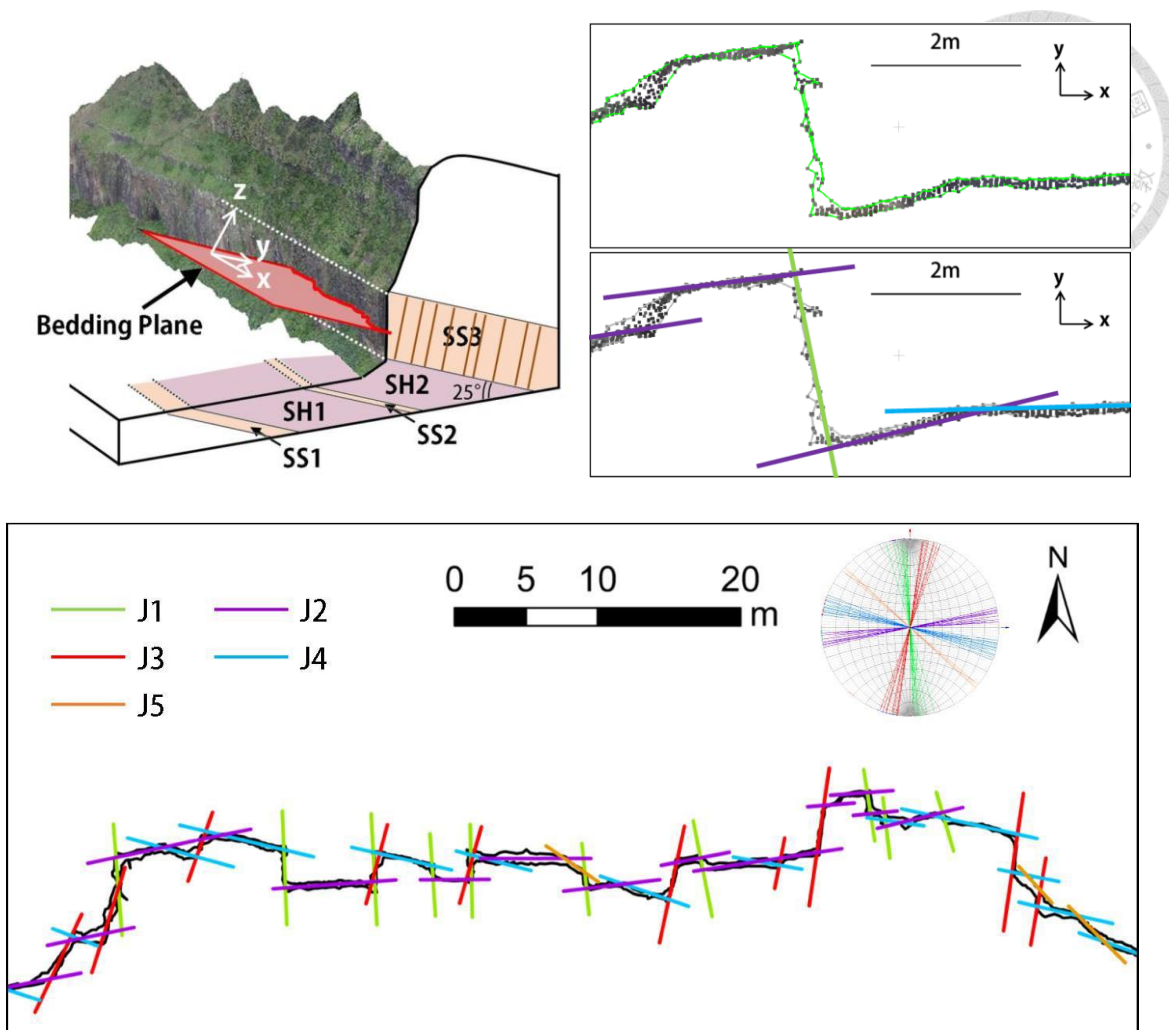


圖 2.12 八斗子地區之點雲模型判釋：(a) 地質剖面；(b) 以點雲切片之正射方向判斷節理；(c) 八斗子 SS3 砂岩層之節理判釋成果（謝沛宸，2018）

表 2.1 八斗子 SS3 砂岩層之節理判釋成果

位置	節理組	組數	走向		間距 (m)		延續性 (m)
			平均	標準差	平均	標準差	
砂岩	J1	22	N55W	3.04	0.42	0.16	14.31
	J2	38	N17E	2.86	0.22	0.04	10.32
	J3	19	N10W	1.48	0.50	0.19	9.48
	J4	14	N83E	3.35	0.46	0.15	12.33
	J5	13	N37E	5.22	0.93	0.67	12.27



有了三維空間的點雲資料，除了使調查者較方便於不同視角對邊坡露頭進行觀察外，亦能將點雲資料匯入點雲分析軟體（CloudCompare）中，量化分析如節理面等不連續面之位態相關資訊（圖 2.13），並且能將露頭中含有不同位態之節理組以不同顏色區分及單獨提取（圖 2.14），以利研究時之判斷以及後續如節理間距等計算。

在 CloudCompare 中有一稱為“Kd-tree”的工具，可將露頭之點雲資料匯入並計算不連續面出現之比例，其運算流程為先將點雲資料以遞歸方式分割為大小不等的單元格中，直到包含在單元格中的所有點都滿足給定的最大距離門檻值，或是最少 6 個點便停止分割，以計算最佳擬和平面並產出一小面單元，接著再回過頭來計算每個小面單元間的距離以及角度差異，將傾向及傾角差異小於最大角度參數之單元，以及垂直距離小於最大距離參數之小面單元重新合併。

- Kd-tree 單元合併之參數：
  - 最大角度（Max angle）：  
判斷相鄰小面單元角度差之最大度數（degrees）
  - 最大相對距離（Max relative distance）：  
判斷欲合併之小面單元與已合併之面單元中心間之最大距離
- 面單元架構 Facets frame:
  - 距離門檻值（Distance criterion）：  
估算面單元在合併下一個小面單元後是否足夠平整之相對距離與百分比
  - 最小點雲數（Min points per facet）：  
面單元中包含的點雲數若小於此值，則將其忽略
  - 最大邊長（Max edge length）：  
決定提取面單元時輪廓之參數（數值越小輪廓越接近點雲）

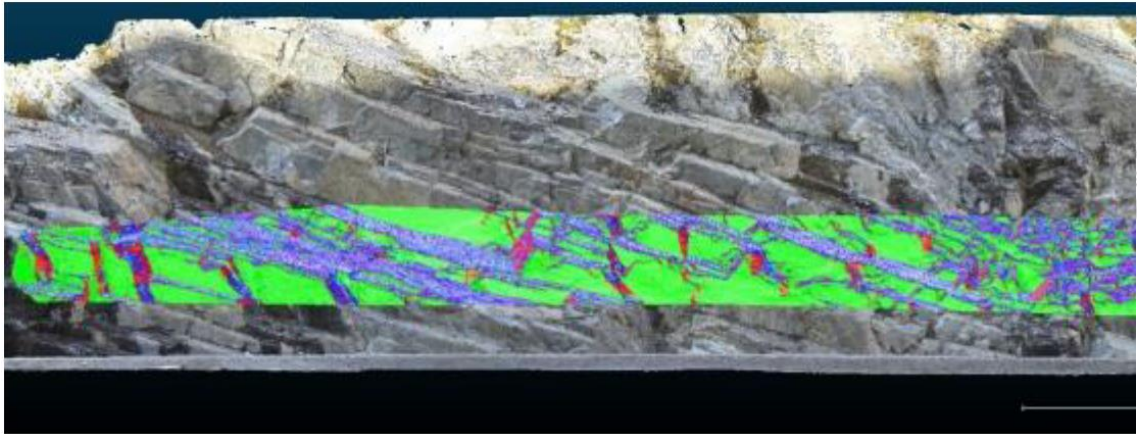


圖 2.13 利用點雲分析對邊坡露頭進行測線法調查節理位態 (Dewez, 2016)

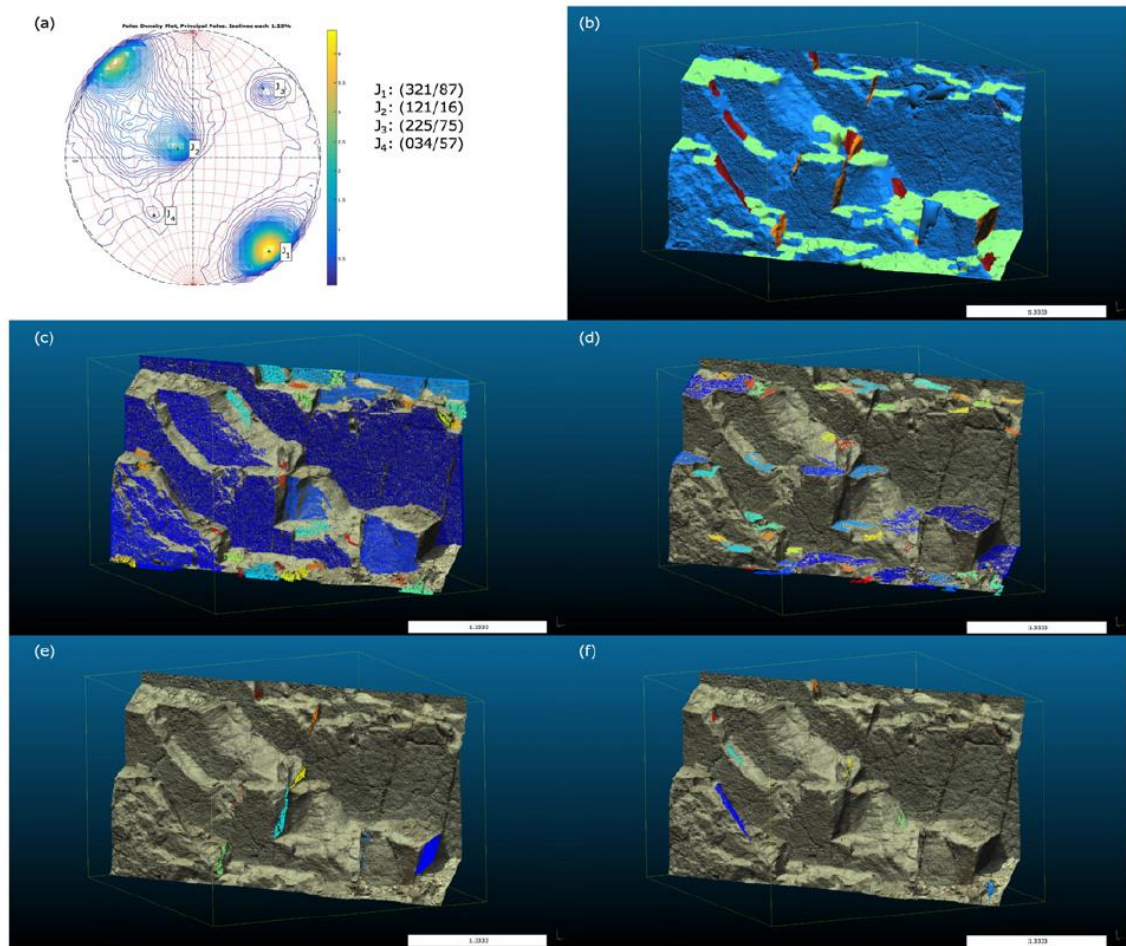


圖 2.14 以不同顏色區分岩坡露頭中量測得之不同節理組 (Riquelme *et al.*, 2015)



## 2.5 3DEC 軟體介紹

### 2.5.1 基本介紹

本研究之數值模擬工具採用美國 ITASCA Consulting Group Inc.，以分離元素法 (Distinct Element Method) 在二維數值分析軟體 UDEC (Universal Distinct Element Code) 的理論基礎下所開發之三維數值分析軟體 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code)。3DEC 分析模擬中，模型主要由岩石塊體與節理組成，並允許塊體沿著節理產生大變位與旋轉，有關大地工程領域之實際應用則主要包括：

1. 評估岩體中節理與斷層等不連續面對岩石邊坡之影響。
2. 水力耦合現象討論，水壓力與節理內寬的相互影響。
3. 模擬岩石中的開挖行為及岩石基礎工程。
4. 深層地下採礦工程、隧道工程及地下廠房工程。

當分析案例中需要考慮三維空間中的不連續面時，特別適用 3DEC 分析以模擬和探討分析案例之破壞機制與輔助對策。以下將就 3DEC 各項功能及理論架構簡單概述，並簡述 3DEC 手冊中之基本術語及塊體與節理組成律模式。

### 2.5.2 運算原理

基本運算方法為個別元素法，而個別元素法之使用條件為在時階足夠小的情況下，單一時階內，擾動無法在分離元素間傳送，此解法與連續體數值分析(如:FLAC)所使用之外顯有限差分模式 (Explicit Finite Difference Model)，為運算每一時階之系統變化，有類似概念。時階的限制對剛性與柔性塊體皆適用，對剛性塊體而言，塊體質量與塊體間接觸勁度會限制時階大小；對柔性塊體而言，塊體尺寸、塊體模數與塊體間接觸勁度皆會影響時階大小。其運算流程為由牛頓第二運動定律計算某一時階中塊體之加速度，以此可推算出塊體位移量，再配合節理之組成律，利用力-變位之關係計算新的接觸力，以作為下一時階中，塊體所受之外力。

如果塊體性質為剛體，則由塊體所受外力，計算剛體中心點之合力與合力矩，再根據牛頓第二運動定律求出剛體之加速度與角加速度，如此即可計算下一時階中剛體之運動行為。如果塊體性質為可變形體，則在塊體內部會生成三角形網格，形成有限差分區間 (zone)，由塊體所受外力配合塊體之組成律，即可求得下一時階之塊體應變量、應力與外力合力，透過牛頓第二運動定律，可求出下一時階之塊體加速度與角加速度，如此可計算出下一時階中可變形體之運動行為 (圖 2.15)。

綜合上述可知，每一個塊體之變形量及應力大小，皆是由上一時階塊體接觸形式決定，而塊體接觸形式依據三維空間可依序分為點對點接觸、點對邊接觸、點對面接觸、邊對邊接觸、邊對面接觸與面對面接觸等六種接觸型式，不同接觸形式對應不同之組成律模式。此外，塊體接觸之力平衡是個別元素法運算流程中最重要的核心概念之一。Cundall (1971) 認為在分析非連續體問題上，個別元素法能完善考慮塊體之變形量、應力、速度與合力。

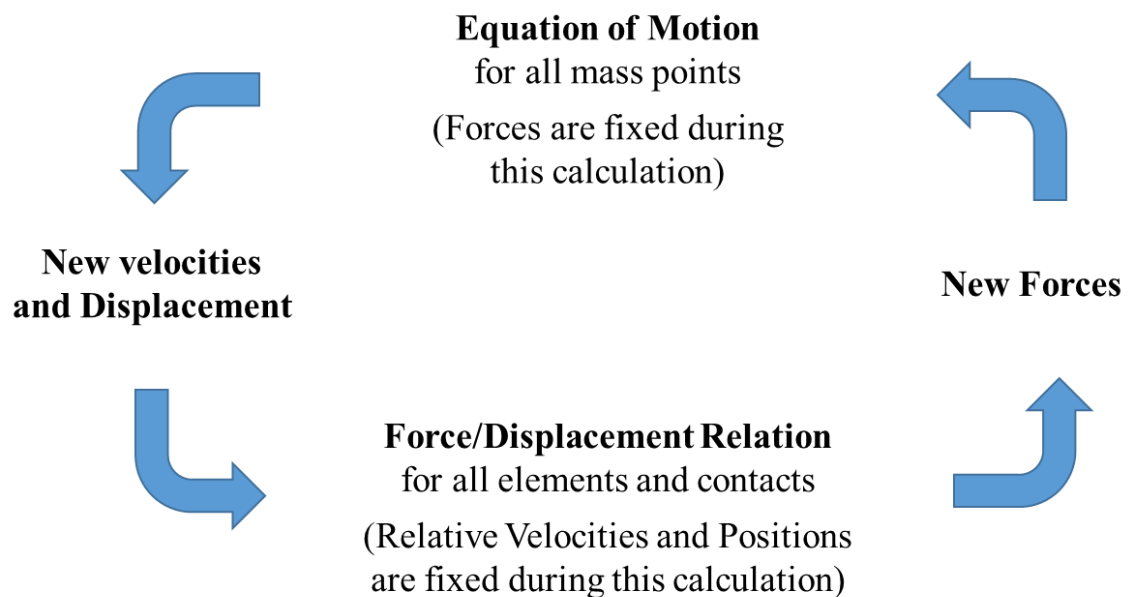


圖 2.15 3DEC 運算流程圖 (Cundall, 1971)



### 2.5.3 塊體接觸時之運算方法

因為 3DEC 為動態分析，計算過程中軟體可以考慮塊體間之接觸影響，因此可以模擬岩塊崩落到之運移模式與堆積狀況，然而為了解決三維空間中塊體間的相互接觸，需要快速且準確地判斷各個塊體間之接觸模式並且歸納其幾何與物理特性的方法，此方法稱為塊體接觸判別邏輯（Contact-Detection Logic）。

共同平面的概念源於若要直接測試一個任意多面體與另一個多面體，需考慮許多種類的接觸型態及消耗大量的運算效能。如果問題可分為以下兩個部分，許多困難便能得以解決：(1) 設立一個“共同平面”（Common Plane, C-P），將兩個塊體之間的空間一分為二、(2) 分別測試各塊體與共同平面的接觸型式。“共用平面”類似於在兩個塊體之間放入一片可旋轉的剛性平板（圖 2.16）。當塊體即將聚集在一起時，則平板將因接觸兩塊體而偏轉，並且當塊體最終接觸時，平板將被固定在一個特定之角度。無論塊體的形狀和方向如何（凸多面體的條件下），只要當塊體將要進行接觸時，平板將佔據塊體之間的中間位置，與兩者之間保持最大的距離，我們便可以很容易地找到塊體之間間隙，只需加總塊體到平板間之距離即可。

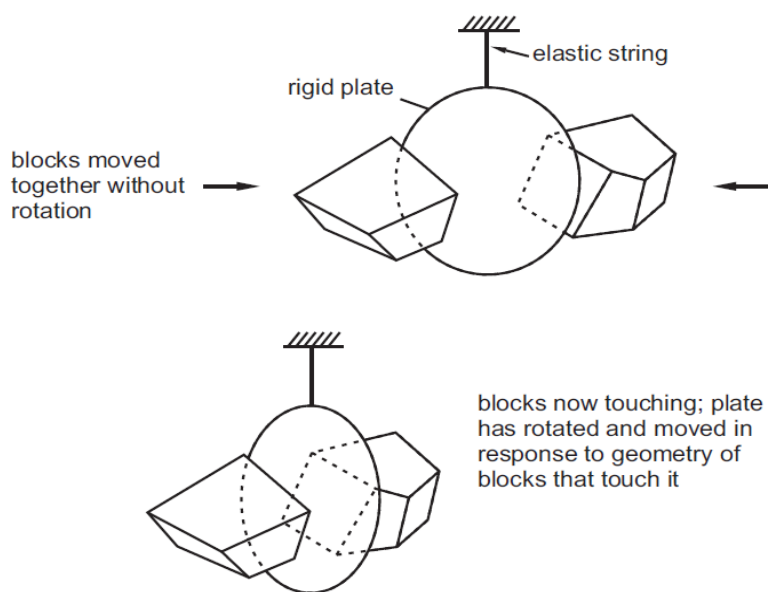


圖 2.16 以共同平面簡化塊體接觸時之運算效率示意圖（Cundall, 1998）





## 2.5.4 節理設置原理

在 3DEC 中，其節理的設定是依據不連續面的傾向以及傾角進行輸入，再給定該不連續面在空間中通過之一點座標，程式便會將該不連續面在空間中所通過的塊體進行切割，而在設定節理的幾何參數時，也可以更改節理相關參數如節理延續性、同一節理組中之節理數量以及節理間距等（圖 2.17）。

節理數量及節理間距的設定，則是由設置之節理為中心，同時往平面法向量方向及反方向平均設置給定數量的節理，切依照給定的節理間距作設置。而節理延續性的設置原理為將欲設置之不連續面在空間中所經過的所有塊體，依照所輸入的比例，將一定數量之塊體一分為二。例如：將一節理延續性給定 0.8，其所經過的塊體總數為 10 塊，則程式將會隨機將選擇其中 8 塊進行切割。

**JSET dip  $v1$  dd  $v2$  origin  $x y z$  persistence  $p$  num  $n$  spacing  $s$**

圖 2.17 節理參數設定之程式碼

更甚者，因為在真實的節理岩體中，其不連續面如層面或是節理面在空間中不會是完整的平面，而是具有一定程度的變異性，故 3DEC 程式中亦可以在設定傾角及傾向時給定度數的誤差範圍，而間距則可以給定一定標準差的誤差範圍（圖 2.18），進而在數值模型中設置節理時能更加貼近現實狀況，使模擬結果更具可信度。但於本研究中為收斂討論影響機制之控制變因，便不針對此一變異性之影像進行討論。

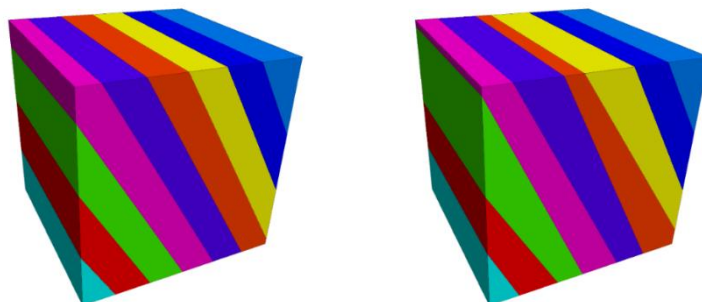


圖 2.18 節理參數給定標準差之示意圖



### 2.5.5 塊體組成律模式

3DEC 提供了四種塊體組成律模式，分述如下 (表 2.2)：

(1) 零效模式 (Null)：

此模式可以將特定區域之塊體設定為零效材料，即在此區域之材料應力為零，通常用於模擬開挖，此外，在開挖完成後，也可用其他指令模擬回填。

(2) 彈性均向模式 (Elastic isotropic) (default)：

此模式適用於均質均向之材料，其應力應變關係在加載與解壓過程中均為線彈性。

(3) Mohr-Coulomb 破壞模式 (Elastic/Plastic, Mohr-Coulomb failure)：

此模式為傳統土壤和岩石力學中最廣泛使用之模式，僅包含材料受剪降伏之行為。

(4) 彈性非均向模式 (Anisotropic elastic)：

此模式適用於均質但非均向之材料，不同方向上之彈性性質具有明顯差異時。

本研究於數值模擬分析中，可移動塊體之組成律模式選用 Mohr-Coulomb 破壞模式，以模擬在較均質之岩體材料中岩石塊體的運動機制；而固定塊體如底座及邊界等則選用彈性均向模式 (Elastic isotropic)，以簡化運算及提升運算效率。



## 2.5.6 不連續面組成律模式

在 3DEC 中提供了四種節理面組成律模式，可用於模擬節理面行為，以下將簡要介紹各組成律之特性與適用範圍

表 2.3)：

(1) 具殘餘強度之庫倫破壞準則 (Coulomb slip with weakening)：

發生剪力或張力破壞後，節理凝聚力、張力及摩擦角將衰減至殘餘強度，預設之凝聚力及張力殘餘強度為 0；而摩擦角若無給定殘餘強度則維持初始摩擦角。

(2) 完全塑性材料之庫倫破壞準則 (Perfectly plastic Coulomb slip)：

與前一模式相同，但凝聚力在破壞後維持給定之值，張力強度則會減至殘餘強度，預設值之張力殘餘強度為 0。

(3) 連續降伏模式 (Continuously yielding model)：

此模式可用於模擬節理面達到尖峰剪力強度後之連續軟化行為。

(4) 彈性模式 (Elastic joint)：

此模式不允許節理間產生滑動及張力破壞，用於模型建置時之假設節理。

本研究於數值模擬分析中，真實不連續面如層面及節理之組成律模式，選用第一種庫倫破壞準則 (Coulomb slip with weakening)，以模擬塊體間之滑動及張力作用；建置模型時之幾何邊界則選用彈性模式 (Elastic joint)，以防止非真實節理之相對位移或破壞產生。





表 2.2 3DEC 塊體組成律整理

模式	適用材料	應用範圍
零效模式	沒有材料存在時	模擬孔穴、掘洞、開挖，開挖後可重新回填。
彈性均向模式	均質均向連續體； 線性應力應變行為材料	節理岩體中，當塊體強度遠高於節理強度時。
Mohr-Coulomb 模式	一般土壤、岩石之行為	邊坡穩定分析或 地下開挖
彈性非均向模式	不同方向上之彈性性質 具有明顯差異的材料	節理岩體中，當塊體性質為非均向性時。

表 2.3 3DEC 節理面組成律整理

模式	適用材料	應用範圍
具殘餘強度之 庫倫破壞準則	具有明顯尖峰強度與殘餘強度 之節理面、斷層面及層面	一般岩石力學分析
完全塑性材料之 庫倫破壞準則	完全塑性材料之 節理面、斷層面及層面	一般岩石力學分析
連續降伏模式	節理面具有 逐漸破壞和遲滯行為	回復式載重及具有明顯 遲滯現象之岩石材料動 態分析
彈性模式	彈性，不產生滑動及 張力破壞之節理面	模型建置時之假設節理



## 2.6 3DEC 應用於邊坡破壞案例之模擬

不連續面之位態、間距、塊體大小和延續性等特徵，係研究邊坡節理岩體滑移時十分重要之變因。前人即以運動學分析節理岩體，運用 3DEC 軟體模擬不同背後、底面及側向不整合面之位態對邊坡崩滑的影響，探討的項目包括滑動機制、背後裂隙的擴張以及破壞順序等，在建置邊坡的模型時，也將其分為有側向束制及無側向束制二種邊坡，藉以符合現地案例，且加以探討側向束制對塊體平面滑動之影響 (Brideau and Stead, 2012) (圖 2.19)。

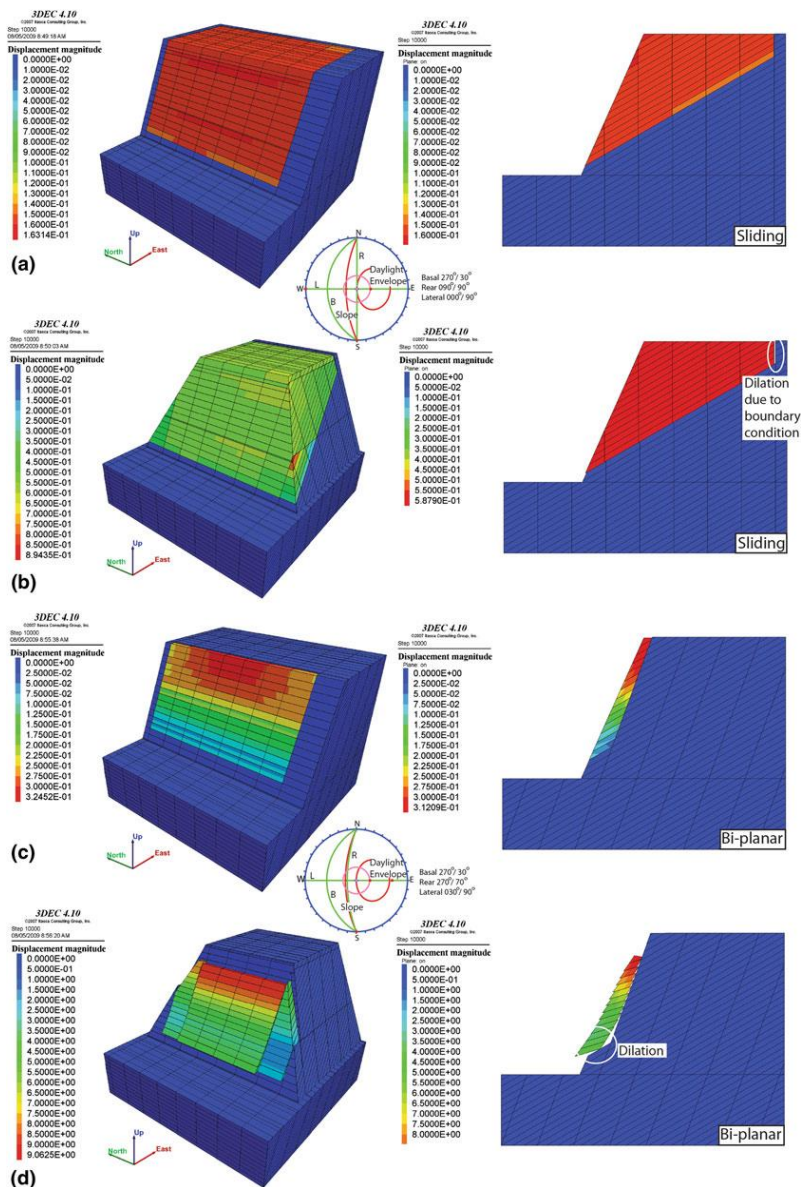


圖 2.19 以 3DEC 模擬邊坡遇節理截切之平面型破壞 (Brideau and Stead, 2012)

## 第三章 研究方法



### 3.1 高陡岩石邊坡現地調查方法

#### 3.1.1 運用 UAV 及攝影測量進行邊坡調查

為了解楔形破壞地質環境背景與崩塌潛勢及影響範圍等之關係，將透過現地調查方式以理解該地點之地質背景，並輔以無人空拍機對幾處判定具有楔形破壞的邊坡露頭進行空中拍攝，並以多種角度側拍較為陡峭甚至已有倒懸現象發生之部分，並產製三維空間中的點雲模型（圖 3.1），以解決過去只有航空俯拍照片時，無法於地形圖中清楚表達倒懸邊坡產狀的問題，也因取得了多種不同角度之側拍照片，能更加提升點雲模型在呈現岩石邊坡時之幾何精度及準確性。

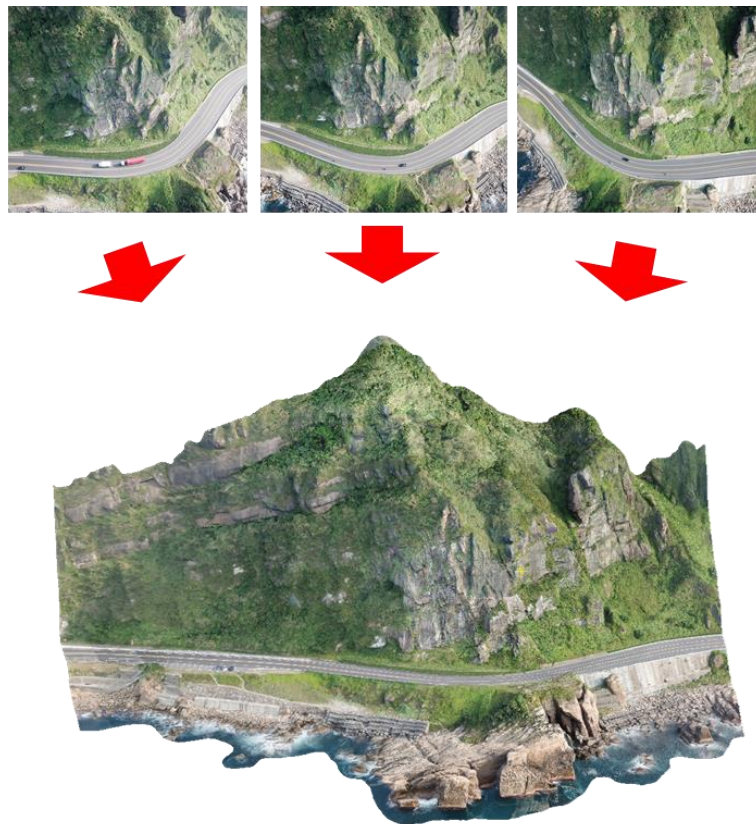


圖 3.1 以不同角度之空中側拍照片進行點雲模型產製（2018）



### 3.1.2 節理面位態分析

依照前一章描述之點雲模型建造方法，本研究將以東北角南雅里台 2 線公路 82K 處、高雄荖濃溪明霸克露橋旁以及其支流玉穗溪中游處，三個邊坡案例進行露頭的節理面位態調查與分析。此三處案例分別對應到公路邊坡中，容易具有楔形破壞潛勢之三種坡型：逆向坡、順向斜交坡以及逆向斜交坡（圖 3.2），三種坡型中易形成楔型破壞的主控弱面組成及對稱性會有所不同，其中逆向坡中較常見的是由兩組對稱的高角度節理截切坡體後，再由逆向的層面形成上方邊界，三組不連續面所形成的楔形塊體；若轉了個方向，當坡面走向與層面走向相差大於  $20^\circ$  後，本研究中將此坡型定義為逆向斜交坡，此時形成楔型破壞的三組弱面會開始具有不對稱性；當坡面走向與層面差異大於  $20^\circ$ ，但坡向偏向順向坡時，易形成楔型破壞的主控弱面，常會轉變成層面與走向節理，再由傾向節理形成上方邊界，進而形成楔型塊體。

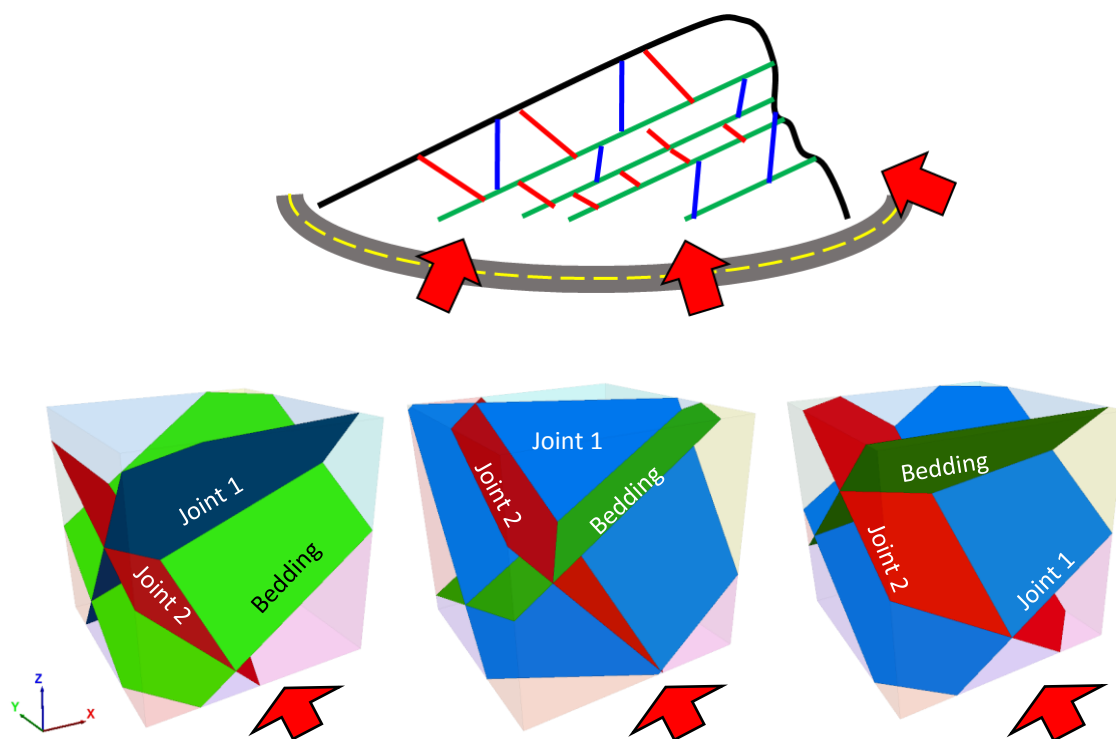


圖 3.2 三種類型之坡向中各弱面形成楔形岩體之示意圖  
(由左而右依序對應：順向斜交坡、逆向斜交坡、逆向坡)

針對三處岩石邊坡露頭進行 UAV 影像拍攝以及三維的點雲模型建置，產製完各個岩石邊坡案例之點雲模型後，便將其匯入 CloudCompare 軟體中進行節理面之位態分析，並利用前一章所介紹之“Kd-tree”演算法計算出於岩坡露頭上所出露的節理面位態，研究中所使用相關參數如表 3.1 所示，其中只有最大角度為求判釋精準度而調至 2°，其餘參數如距離門檻值與最小點雲資料數等，程式會自行依據點雲資料的密度及大小計算值最適當之值。若欲取得較好之分析成果，首先必須先將原始點雲資料進行整理，移除會干擾到計算之雜訊如植被、崖錐堆積或是水痕，針對裸露的坡面進行切割，接著再對其進行節理面位態之分析，分析結果詳見第四章之現地調查與攝影測量結果。

表 3.1 Cloudcompare 中所使用之相關參數

Fusion algorithm	
Kd-tree	
Kd-tree cells fusion parameters	
Max angle	2.00 deg.
Max relative distance	1.000
Facets	
Max distance @ 99%	0.200
Min points per facet	359
Max edge length	1.40





### 3.2 物理模型砂箱試驗設計

由於目前能在現地岩石邊坡觀察到的，大部分僅有已經發生楔形破壞後的產狀，但對於此種破壞的發展機制及運動過程尚無充分資料可供驗證。因此為了釐清影響楔形破壞發生之主控因素，本研究首先根據現地調查後所量測之節理面位態，製作一組縮尺砂箱試驗，以下將介紹試驗儀器、試驗材料及試驗方法。

#### 3.2.1 試驗儀器

物理砂箱試驗儀器採用黃紹宓(2015)設計之「滲流傾斜儀」作為基礎(圖 3.3)，於其面板上再加設一組本研究設計之壓克力製砂箱進行試驗。砂箱內部之長、寬、高分別為 60、30、30 公分，並由邊緣延伸四支基腳以勾住滲流傾斜儀之底板。其中一側短邊設置 2×8 公分之開口，供清理或排水之用。

原滲流傾斜儀由傾斜儀和定水頭供水塔組成，為具有壓克力板與三道出水口之設備套組。而本研究僅使用該滲流傾斜儀之調整角度功能，以利模擬不同不連續面交線傾伏角之逆向坡，但並未施加地下水及討論地下水對岩塊滑動的影響。

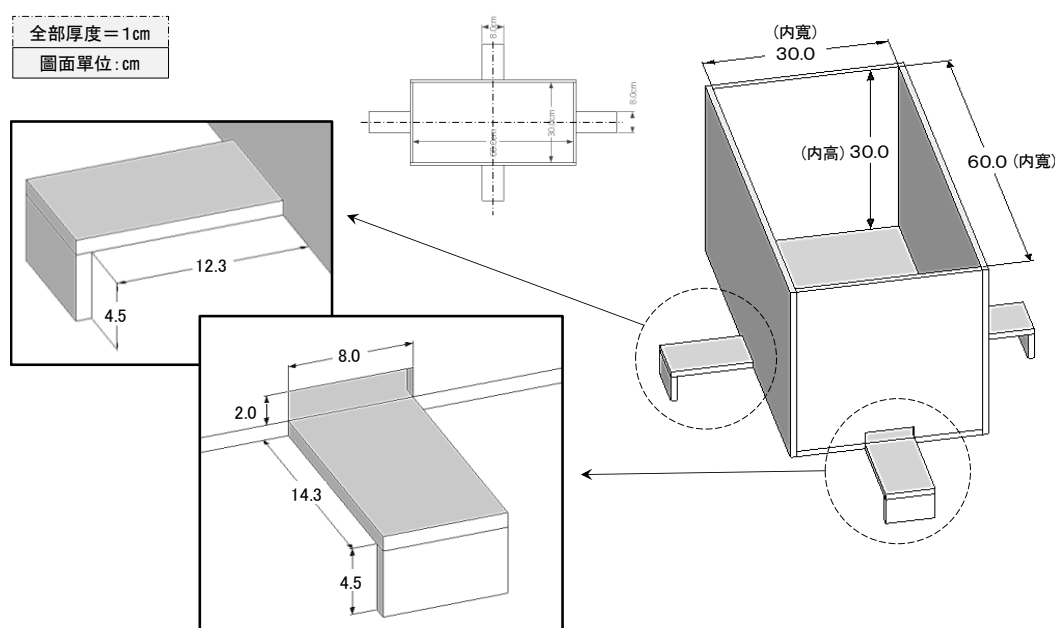


圖 3.3 物理試驗砂箱設計圖



### 3.2.2 試驗材料

經現地調查後所大多因正交節理及共軛節理為正交至 120 度，故本研究將尺寸為邊長 3 公分、厚度為 2 公分之菱形研磨石（圖 3.4），以不連續面交角 120 度之形式，排列並堆疊成十層，層與層之間在轉動過程中會形成逆向坡中的層面，而研磨石中菱形之四邊則相當於夾角 120°之兩節理面，從而模擬在逆向坡中，受到兩組共軛節理面所切割之楔形岩體在不同交線傾伏角下的產狀（圖 3.5）。

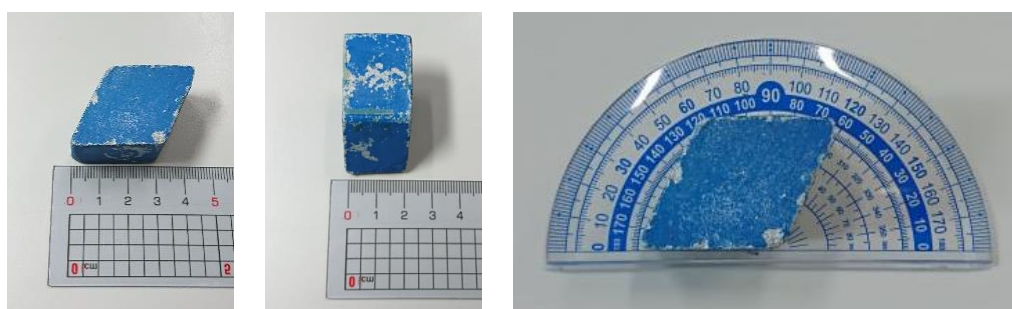


圖 3.4 模擬節理岩體之研磨石外型及尺寸（邊長 3 cm、厚度 2 cm）

因欲模擬楔形岩體中未受節理切割而受岩橋連接的部分，本研究於物理模型砂箱試驗中將部分研磨石間之間隙以白膠進行黏著，而岩橋的比例及分布則是比照後續數值模擬中給予特定節理延續性後所隨機生成之節理分布（圖 3.6）。

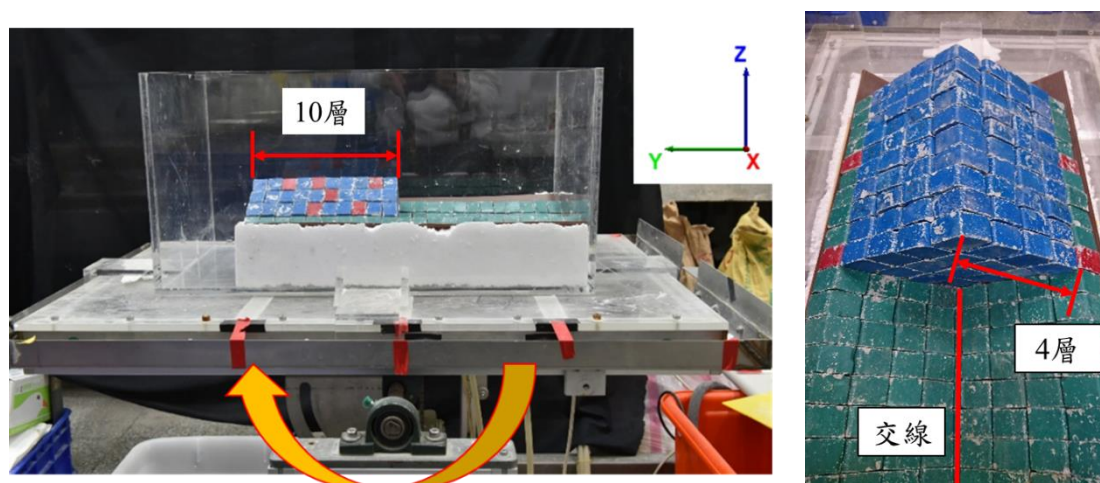


圖 3.5 物理模型試驗之配置



### 3.2.3 試驗方法與步驟

- (1) 先再壓克力製砂箱中，用切割後之保麗龍鋪設出兩組不連續面之底座，固定兩組不連續面之夾角角度為 120 度。
- (2) 將一層菱形研磨石鋪設在底座上方，並延伸至砂箱底部使其不會發生滑動，以維持楔形岩體與不連續面底部之摩擦特性仍為研磨石間之特性。
- (3) 在底層研磨石上，將菱形研磨石沿著 Y 軸作十層的排列與堆疊，每層分別以四塊研磨石作為楔形岩體之兩邊邊長，共計 160 塊。
- (4) 依據以 3DEC 產製用來校合物理模型試驗之數值模型中，其隨機產生不連續面延續性為 80%之節理分布，並將未被切割之塊體以白膠進行黏著。
- (5) 待研磨石間黏著之白膠風乾後，將傾斜儀緩慢的旋轉，一步一步提升兩組不連續面交線之傾角角度。
- (6) 錄影並在塊體鬆動的瞬間緩速播放，觀察研磨石翻落或滑動之破壞模式，同時記錄物理模型在不同交線傾伏角時之楔形塊體分布。且塊體變形運動過程中，並不會將白膠形成的膠結打開。

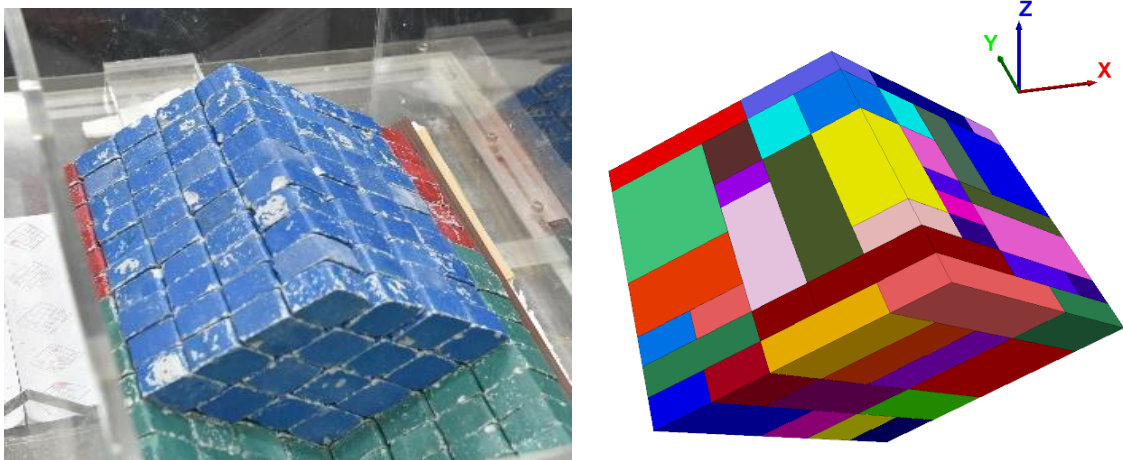


圖 3.6 研磨石依據 3DEC 隨機產生之節理分布進行黏著



### 3.3 以離散元素法軟體 (3DEC) 建置之數值模擬

由於影響岩石邊坡楔形破壞之參數甚多，但靠物理模型本研究進一步以數值模擬軟體來協助探討不同變因如節理面交角 ( $\xi$ )、節理延續性 (P) 以及節理面之偏移角度 ( $\alpha$ ) ... 等相關節理面參數 (圖 3.7)，在不同情況下楔形破壞是否會形成，以及觀察其多層塊體發展而導致岩體變形及破壞機制。

因此本研究採用三維離散元素法分析軟體 — 3DEC 作為數值模擬工具，以模擬楔形破壞的機制，並從兩方面探討上述不同弱面性質對岩體變形及破壞機制的影響，首先，利用 3DEC 讀取各個塊體在運算初期階段之節點，包含其速度及向量等資訊，藉以判斷在岩體變形至破壞之階段中，塊體因被弱面截切而鬆動，導致發生包括滑動及翻落等形式之破壞，在整個楔形岩體中佔有多少比例；第二，則是以連續影像擷取而製成之動畫，以各方向視角之影像判斷塊體滑動的過程，以及模型中殘餘坡體於各階段之產狀，加以對不連續面特性在楔形岩體中之影響性進行評估。更甚者，將崩落下來之楔形岩體質心進行計算，便能觀察及在不同偏移角度的條件下，對其岩體崩落下來而形成之堆積區分布的影響，進而從簡化模型中歸納出在現地案例中當人工構造物如公路、橋墩等，在鄰近一較發達之節理岩體時，其有可能受到影響的分布範圍推估 (圖 3.8)。

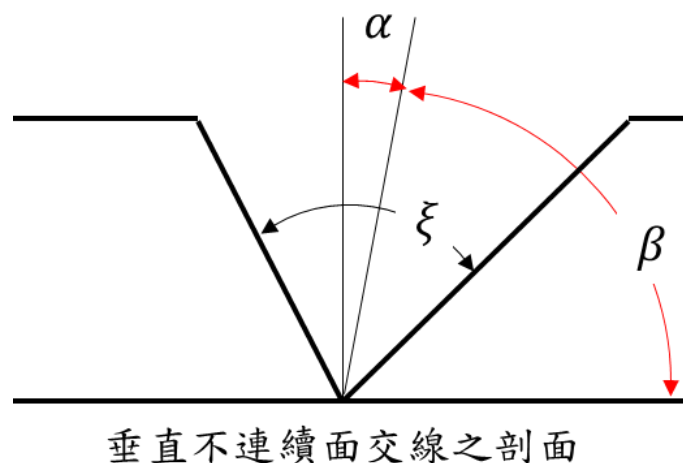


圖 3.7 兩節理面之交角角度 ( $\xi$ ) 及偏移角度 ( $\alpha$ ) 示意圖

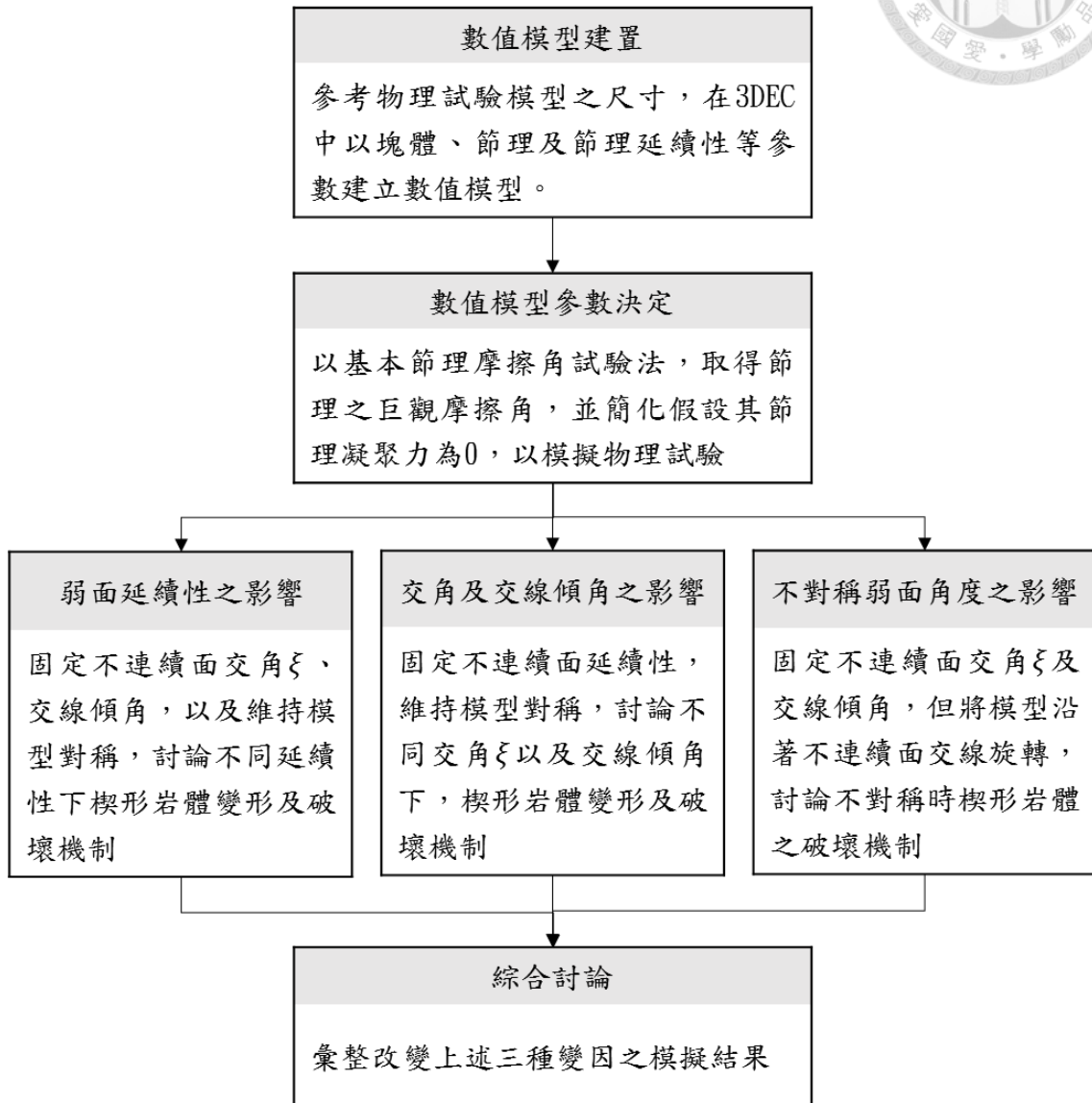


圖 3.8 數值模型之模擬流程圖



### 3.3.1 數值模擬模型建置與試驗流程

以數值模型模擬物理砂箱試驗主要分為兩個部分，第一部分是先以數值模型之模擬結果驗證物理模型砂箱試驗之結果，待兩結果經過驗證，具有相似機制且大致相符之後，第二部份便是以相同參數及條件，改變切割楔形岩體之弱面交角、交線傾伏角、弱面延續性及不對稱性等等之相關參數，觀察其不同之變化。

故數值模擬之模型之建置依據上述兩部分，分為以下兩種：

#### (A) 改變交線傾伏角之數值模型 (圖 3.9)

- (1) 因為欲完全模擬物理模型砂箱試驗之過程，依據物理模型之設置於 3DEC 中建立一個具有  $120^\circ$  弱面交角之容器 (綠)。
- (2) 建立一塊體並固定於容器下方，再建立一承載台 (藍) 將容器接著，防止整個容器滑落，同時作為升降台之用。
- (3) 於容器中則建立一尺寸與物理模型砂箱試驗相同之楔形岩體 (彩色)，並以 3DEC 軟體中之節理設置指令，將整個岩體以節理延續性 80% 進行切割，其中為了將楔形岩體能與底座同樣以延續性 80% 的條件設置，將模型中最底層之塊體固定，藉以模擬未被節理切割之塊體便不會產生滑動之情形。換言之，總塊體數量為砂箱試驗中的塊體數量加上底層的塊體數量，共計 250 塊 ( $160 + 90 = 250$ )。
- (4) 給定重力場，承載台以固定速度緩慢下降，並以兩階段下降至節理面交線傾伏角分別達  $28^\circ$  及  $35^\circ$ ，觀察楔形塊體落下之機制及殘餘岩體之產狀。
- (5) 改變偏移角度 ( $\alpha$ )，再進行一次步驟 (1) ~ 步驟 (4)。

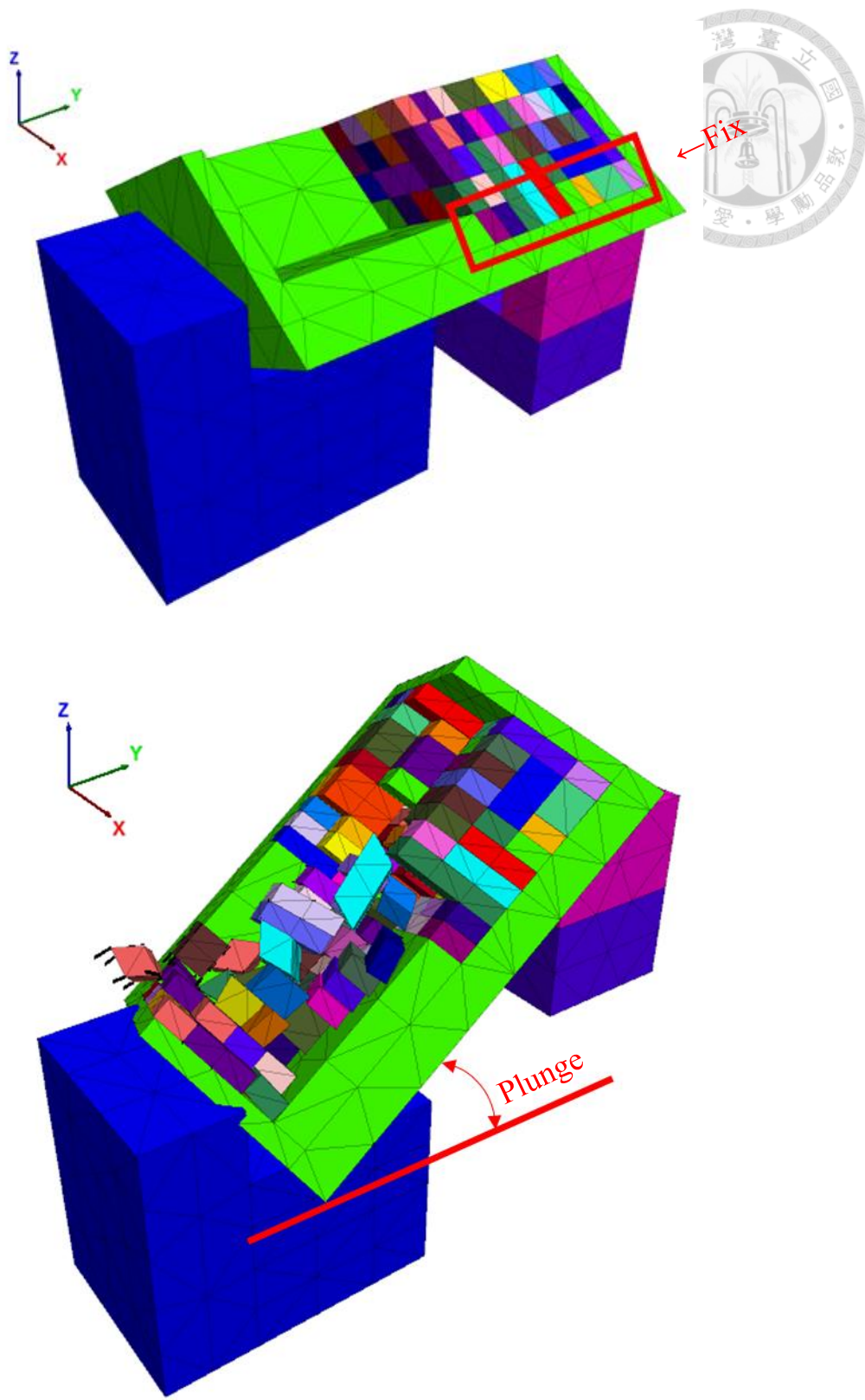


圖 3.9 改變交線傾伏角之數值模型建置及運動形式

(B) 固定交線傾伏角之數值模型 (圖 3.10)

- (1) 為了探討各項節理面特性對岩體的影響，首先依據砂箱物理模型之設置，於 3DEC 中建立具有不同弱面交角  $\xi=120^\circ$ 、 $90^\circ$  之兩種底座 (藍)；而模型不對稱的情況，則以偏移角度  $\alpha=0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  建立  $\xi=120^\circ$  之三種模型，以及偏移角度  $\alpha=0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  建立  $\xi=90^\circ$  之三種模型；交線傾伏角方面則以 Plunge =  $30^\circ$ 、 $40^\circ$  兩種角度，總計 12 種底座進行模型建置。
- (2) 將底座固定於三維空間中，使其在運算的過程中不會產生速度及位移。
- (3) 於底座上方建立一個尺寸與砂箱物理模型試驗相同之楔形岩體，並以 3DEC 軟體中之節理設置指令，將整個楔形岩體依據不同節理延續性 (60%、80%、100%) 進行切割 (彩色)，其中為了將楔形岩體能與底座同樣以延續性 80% 的條件設置，將模型中最底層之塊體固定，藉以模擬未被節理切割之塊體便不回產生滑動之情形。
- (4) 於兩節理面交線底部水平切割並設立一固定平台，以模擬塊體崩落後之堆積情形。
- (5) 給定相關之節理參數，如凝聚力及摩擦角。
- (6) 給定重力場並開始運算。
- (7) 以固定時階間距進行截圖並產製動畫，以利後續對各個模型之破壞機制及運動狀態進行詳細觀察。
- (8) 將崩落後堆積塊體之體積及質心進行統計，得到堆積區之中心後，將兩節理面交線底部視為原點，計算堆積區與交線方向 (Y 軸) 之夾角角度 ( $\delta$ )。

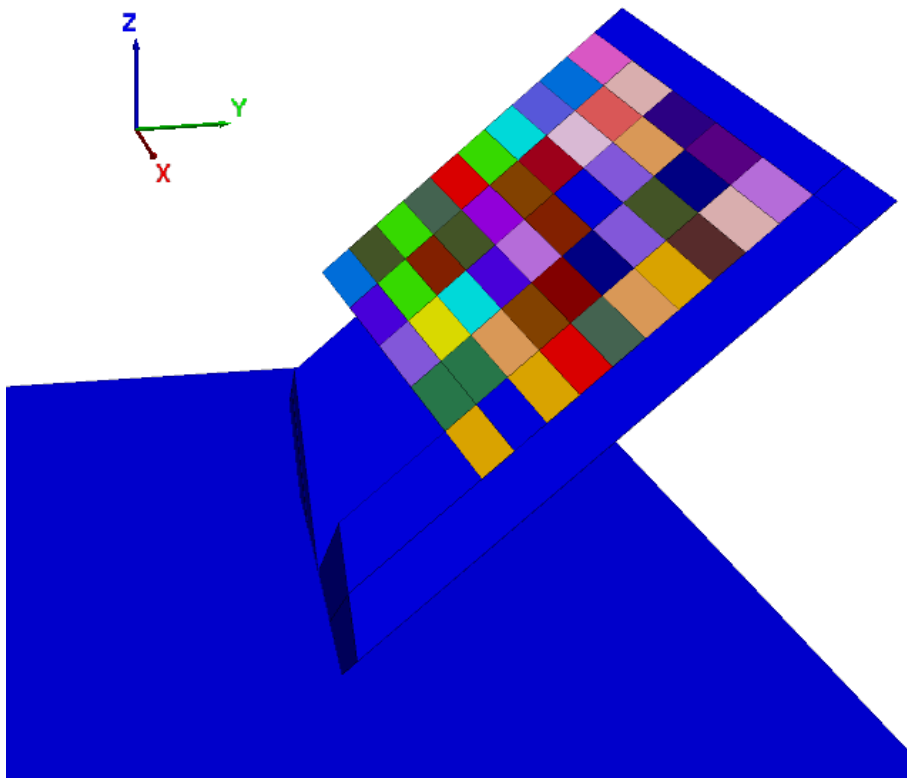
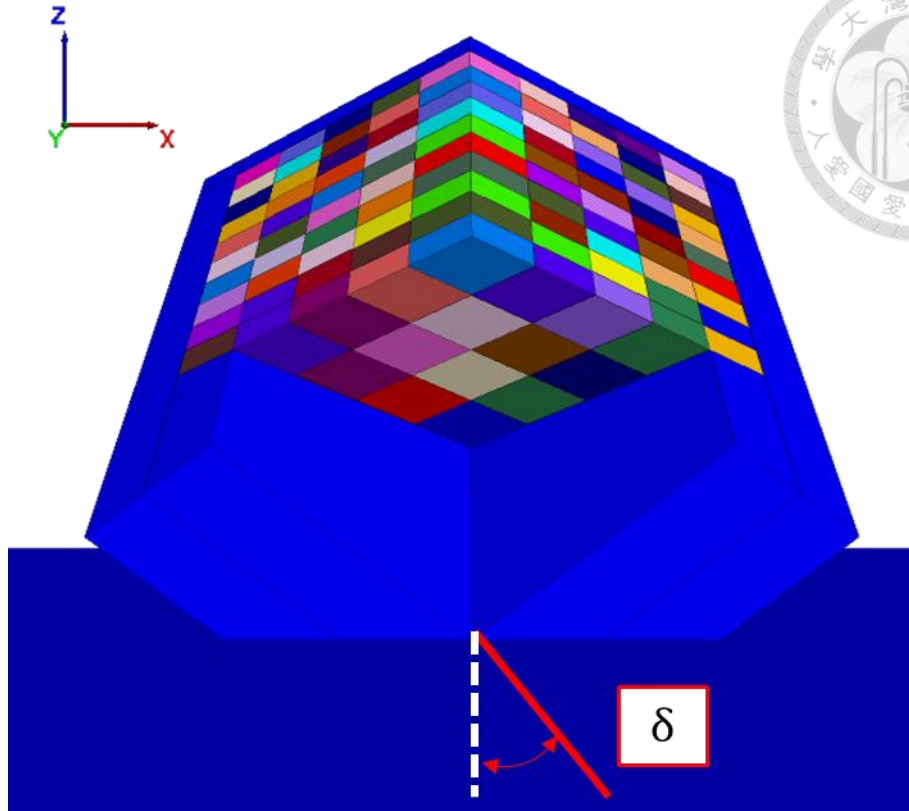


圖 3.10 固定交線傾伏角之數值模型建置





### 3.3.2 數值模擬參數決定

3DEC 數值模擬中所使用參數均為巨觀參數，表示可以直接利用物理模型中的力學參數，無須特別轉換。數值模擬中的觀察重點為研磨石塊體之滑動現象，且假設試體間與試體和壓克力板間的接觸界面均為平滑節理情況，故最重要之參數研磨石塊體與塊體間的界面摩擦角，可透過傾斜儀試驗得到摩擦角度參數，在一般情況下，研磨石塊體間的摩擦角為  $30^\circ$ ，其相關參數如表 3.2～表 3.4 所示。

### 3.3.3 數值模擬成果校核依據

經由物理模型初始狀態與最終狀態之影像比對，可以看出滑動塊體的分布範圍，而 3DEC 數值模擬成果將會以物理模型中的滑動塊體及殘餘岩體作為比對及校核依據。在 3DEC 數值模擬中，未被節理所切割到的塊體在運算過程中會保持相連，換言之，岩塊間相連的岩橋不會因整個岩體變形及破壞時所受到剪力或撞擊，而產生剪力破壞或是拉力斷裂。故在物理模型試驗中，為了盡量貼合數值模擬，亦將相連的研磨石以足量白膠黏著，使其不會因滑動之剪力或撞擊產生斷裂。

表 3.2 研磨石參數列表

物理性質	
密度	2600 (kg/m <sup>3</sup> )
摩擦角	30°
莫氏硬度	7
單壓強度	7.46 (Mpa)
彈性模數	3 (Gpa)



表 3.3 3DEC 之基本模擬單位表

SI	
Length	m
Density	kg/cm <sup>3</sup>
Force	N
Stress	Pa
Gravity	m/sec <sup>2</sup>

表 3.4 3DEC 中相關模擬參數

Blocks Properties		Joints Properties	
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2530	jkn (N/m)	1e9
Bulk Modulus, K (Pa)	70e9	jks (N/m)	1e8
Shear Modulus, G (Pa)	28e9	Cohesion (Pa)	0
Poisson ratio	0.3	Friction (°)	30
Cohesion (Pa)	2.5e4		
Friction (°)	30		





### 3.3.4 數值模擬實驗規劃

經過驗證的過程之後，本研究便希望能探討多項節理特性，對於楔形岩體的破壞機制的影響，因考慮了數項控制變因，數值模擬之成果數量較為眾多，為清楚彙整各項模擬結果，並逐一比較各控制變因之影響性，本研究試驗成果之討論，將依序分為下列三個部分作探討，且各部分皆會以交線傾伏角  $30^\circ$  及  $40^\circ$ ，兩種情況進行模擬（表 3.5）：

1. 節理面延續性 (Persistence, P)：

以節理面延續性 60%、80%、100%，三種模型之結果進行比較

2. 節理面交角 (Dihedral Angle,  $\xi$ )：

以節理面交角  $120^\circ$  及  $90^\circ$ ，二種模型之結果進行比較

3. 偏移角度 (Offset angle,  $\alpha$ )：

節理面交角  $120^\circ$  之模型，分別以  $\alpha=0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ ，三種模型進行比較

節理面交角  $90^\circ$  之模型，分別以  $\alpha=0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ ，三種模型進行比較

表 3.5 數值模擬不同參數之模型，共計 36 組試驗結果

交角角度		$120^\circ$				總體積: $5200 \text{ cm}^2$	
角度組合 ( $\alpha^\circ$ )		$60^\circ+60^\circ (0^\circ)$		$50^\circ+70^\circ (10^\circ)$		$40^\circ+80^\circ (20^\circ)$	
Plunge		$30^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$
延 續 性	60%	(1)	(4)	(13)	(16)	(25)	(28)
	80%	(2)	(5)	(14)	(17)	(26)	(29)
	100%	(3)	(6)	(15)	(18)	(27)	(30)

交角角度		$90^\circ$				總體積: $4500 \text{ cm}^2$	
角度組合 ( $\alpha^\circ$ )		$45^\circ+45^\circ (0^\circ)$		$30^\circ+60^\circ (15^\circ)$		$15^\circ+75^\circ (30^\circ)$	
Plunge		$30^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$
延 續 性	60%	(7)	(10)	(19)	(22)	(31)	(34)
	80%	(8)	(11)	(20)	(23)	(32)	(35)
	100%	(9)	(12)	(21)	(24)	(33)	(36)



### 3.4 現地案例全尺度模擬

為了能了解現地節理岩體潛在的破壞機制，在取得砂箱物理模型試驗以及 3DEC 數值簡化模型試驗之模擬結果後，我們將節理特性影響邊坡破壞之機制歸納出來，並試著套用於現地的數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM)，並給定節理不同延續性，嘗試探討在現地案例中之岩石邊坡，不同節理延續性的情況下，未來潛在發生的破壞機制、規模以及影響範圍。

本研究將以南雅里邊坡作為數值模擬案例區，模型建置流程如下：

- (1) 利用無人飛行載具 (UAV)，對岩石邊坡進行詳細拍攝，以取得包括各種從角度側拍及俯拍之空拍影像。
- (2) 於 PhotoScan 軟體中以攝影測量方式製作該邊坡地形之點雲模型。
- (3) 利用點雲模型之資料產製該邊坡之立面 DSM。
- (4) 將 DSM 中每個三角網格的點與面之空間座標，匯入 3DEC 中使其作為三角柱體的一端，另一端則給定相同的 Z 值，從而把原本只有表面的地形，建置成模擬中可加以給定地質條件之三維模型 (圖 3.11)。而本研究中則利用高陡岩石邊坡之立面 DSM，將其三角網格改投影至 Y 方向，便能以無數個水平之三角柱體拼接的方式，建立此倒懸邊坡之三維數值模型幾何邊界 (圖 3.12)。
- (5) 最後再將後續第四章之現地調查與攝影測量成果中，所測得之層面以及各節理位態設置進三維模型中，便完成該節理岩體現地數值模型的建置。
- (6) 調整節理面的延續性、凝聚力及摩擦角等節理面性質，進行現地全尺度之模擬，以利觀察現地邊坡在不同弱面特性下之崩塌機制、殘餘岩體產狀以及影響範圍等，作為評估現地節理岩體的安全性及具有崩塌潛勢的區域分布之依據。

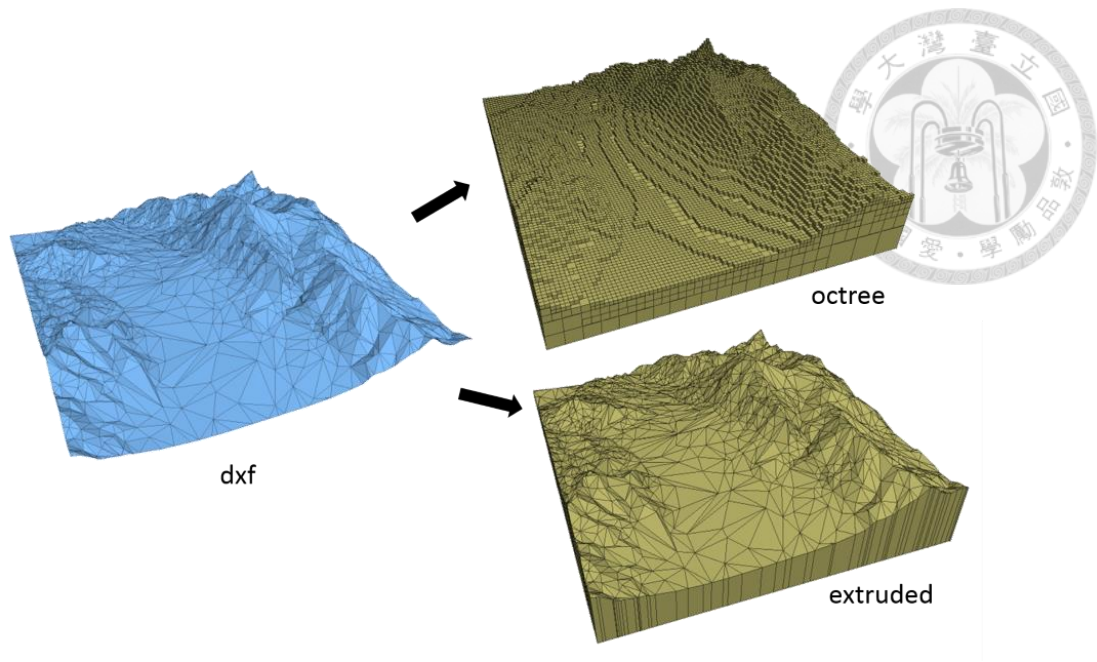


圖 3.11 利用三角網格之空間座標建置三維地表模型 (3DEC manual)

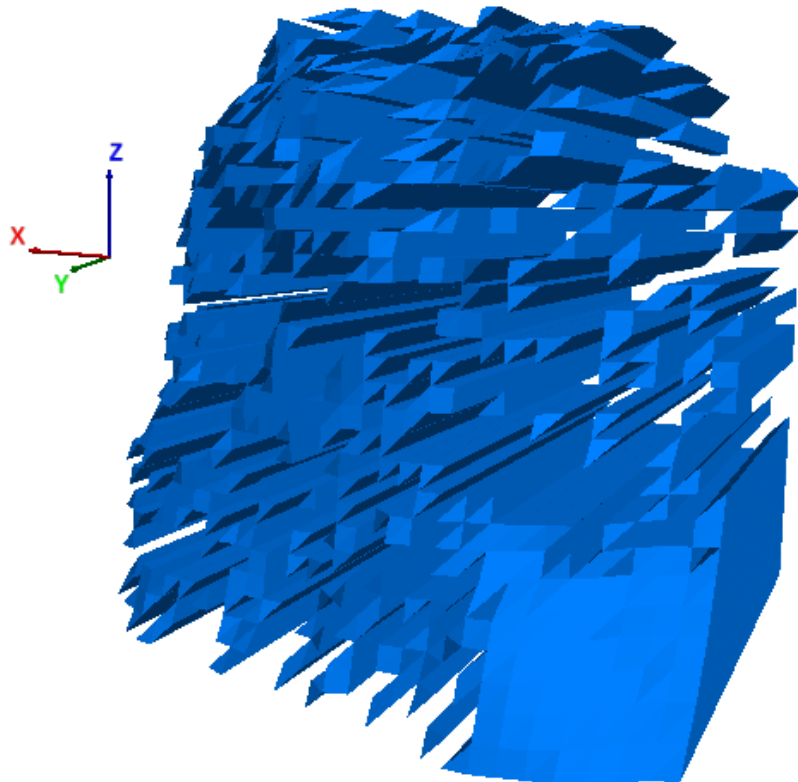


圖 3.12 將 DSM 三角網格座標以柱體形式匯入 3DEC 中之示意圖

## 第四章 現地調查與攝影測量成果



### 4.1 南雅案例

#### 4.1.1 位置及地質地形

此研究區域位於台灣東北角的瑞芳區南雅里台 2 線 82K 處 (圖 4.2)，當地之地層多屬於桂竹林層的大埔砂岩段，附近地層走向大致呈東北西南向且向南傾斜，此處也是著名的景點——南雅奇岩之所在地，其成因便是因為此處的岩性屬砂岩偶夾頁岩，加上岩層間的垂直節理發展較發達，各層岩石的抗侵蝕能力、風化速度有所不同，在受到東北季風所帶來的長年強風巨浪侵蝕後，岩石內部含鐵礦物因而逐漸氧化形成氧化鐵的深色帶狀花紋，便於海岸線上呈現各式各樣如針狀或柱狀的形貌變化，以及灣岬羅列、奇岩遍佈的豐富景色。

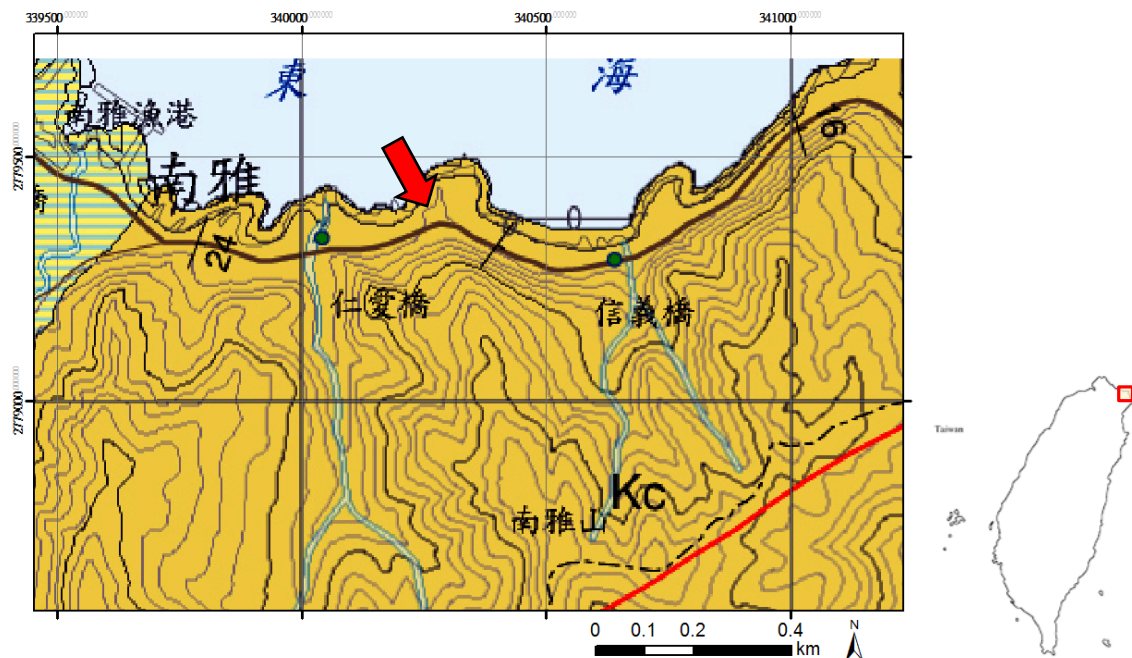


圖 4.1 南雅案例區邊坡位置及 1/25000 地質圖 (中央地質調查所)



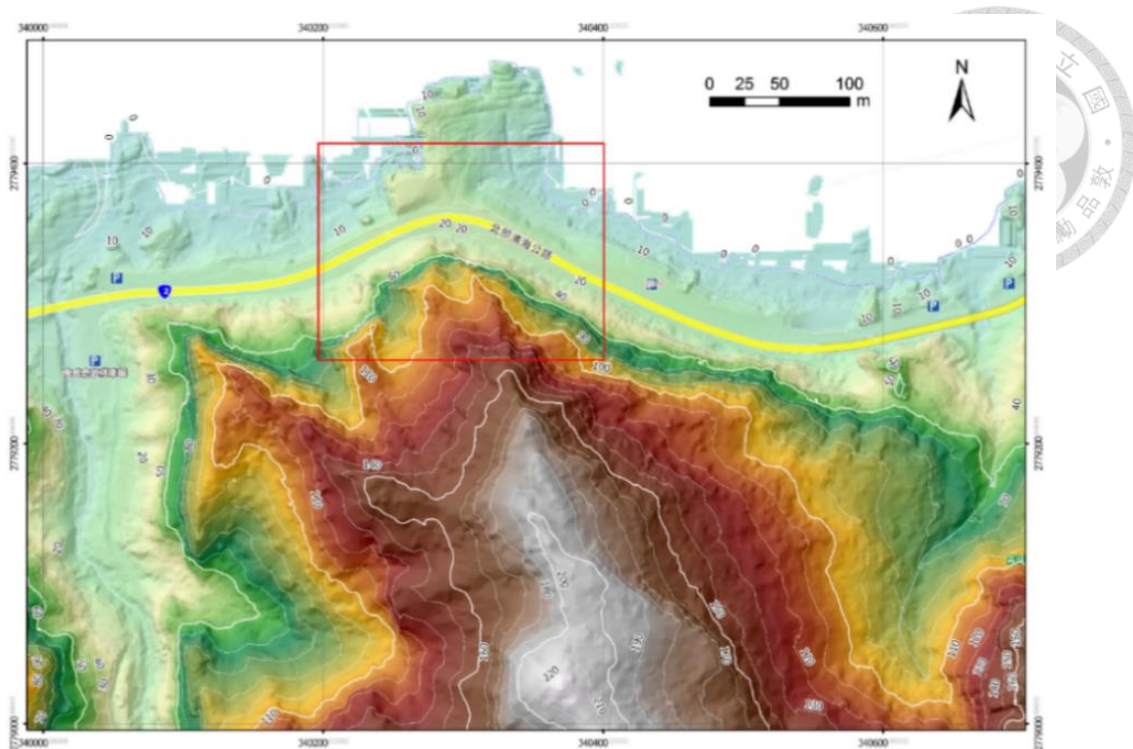


圖 4.2 南雅案例區邊坡地形圖

厚層砂岩的地層分布也造就了台灣東北地區常見的陡峭岩壁，而本研究的研究區域之一，便是位於省道台 2 線 82K 旁一處高聳且近乎倒懸的岩石邊坡（圖 4.3）。因垂質節理發達，於民國 78 年時便曾發生過重大的落石意外，當時巨大的岩塊掉落擊中兩部大卡車造成數人傷亡（圖 4.4 a）。但因其邊坡過於高聳，以當時的技術無從對其詳細調查，整治工法更是僅限掛設防落石網以攔截較小塊之落石。大部分的節理位態量測是利用人工遠距離遙測，或將岩壁上的不連續面線形延伸至接近地面之露頭，再依據相似角度之不連續面量測層面及節理的推測位態（黃鎮臺、夏龍源，1990）（圖 4.4 b）。



圖 4.3 南雅案例區邊坡航拍圖 (2018)

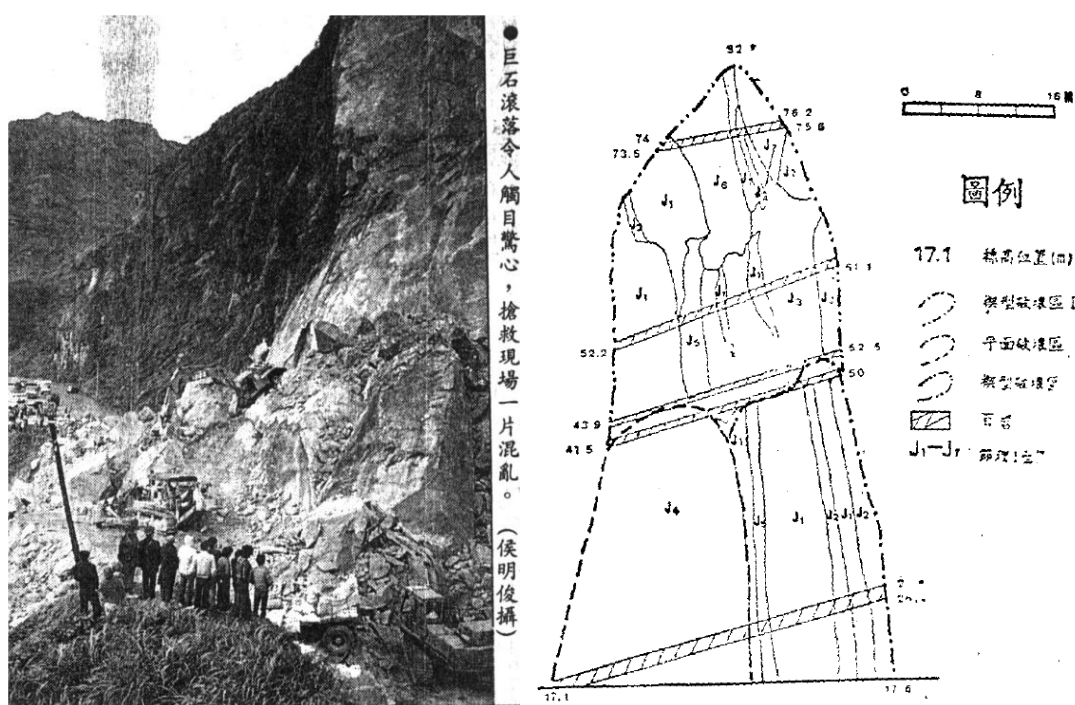


圖 4.4 (a) 1989 年台 2 線公路南雅段落石坍方 (中國時報)；(b) 災後邊坡崩塌區描繪與分區 (黃鎮臺、夏龍源，1990)





#### 4.1.2 節理位態判釋

首先便是以具有大面積露頭，且具有多組節理切割的南雅邊坡，作為第一個案例區進行分析。為了取得岩石邊坡露頭的節理位態，其第一個步驟為將整區的邊坡進行初步的分區(圖 4.5 a)，此步驟的目的是為了避免過大的露頭面積，使過多點雲資料同時被列入計算，導致軟體在統計各個面單元空間中的位態時，無法明顯在位態分布圖中顯示出邊坡中的多組優勢節理 (圖 4.5 b、圖 4.6 a)。

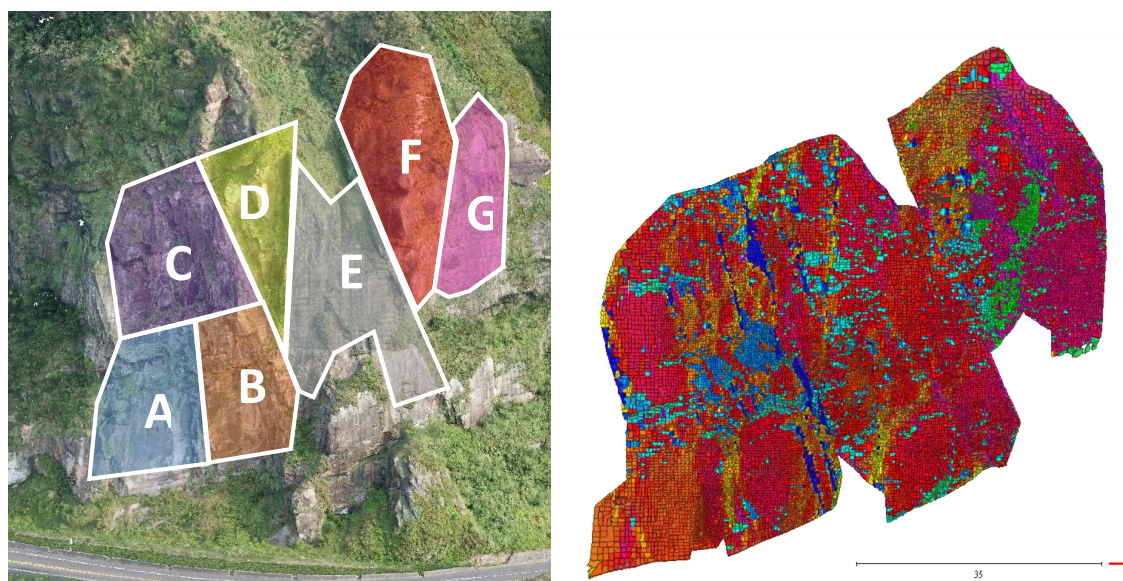


圖 4.5 南雅岩石邊坡露頭之點雲: (a) 初步分區; (b) 點雲位態 Kd-tree 分析

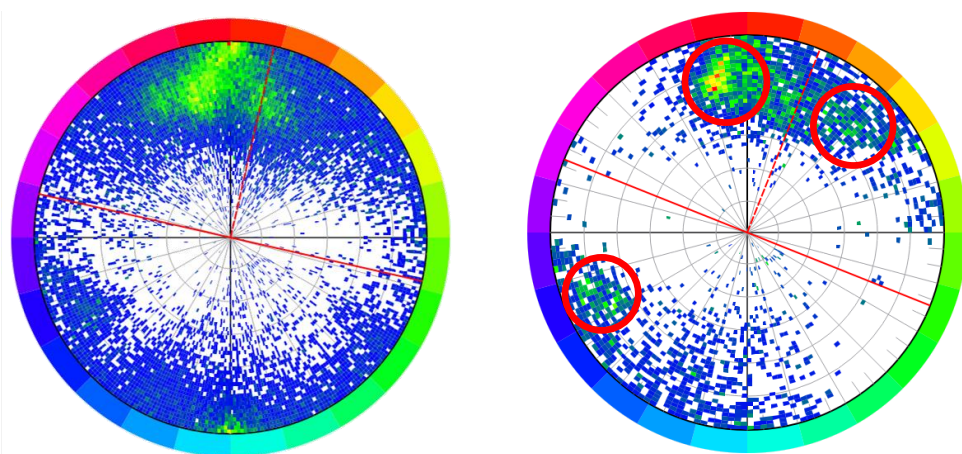


圖 4.6 南雅岩石邊坡露頭之點雲位態分布圖: (a) 整區範圍; (b) B 區範圍

經過初步分區的過程後，我們將其中具有主要節理的B區取出來做為代表區域，針對B區進行Kd-tree的位態分析，並從結果的位態立體投影圖中(圖4.6 b)，我們可以觀察到三組主要節理面：Joint 1 (紅)、Joint 2 (黃)、Joint 3 (藍)(圖4.7)。

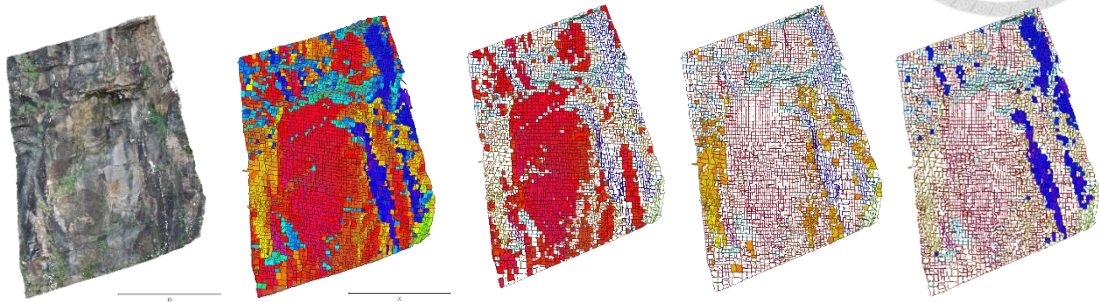


圖 4.7 B區點雲展示及主要節理組面單元過濾

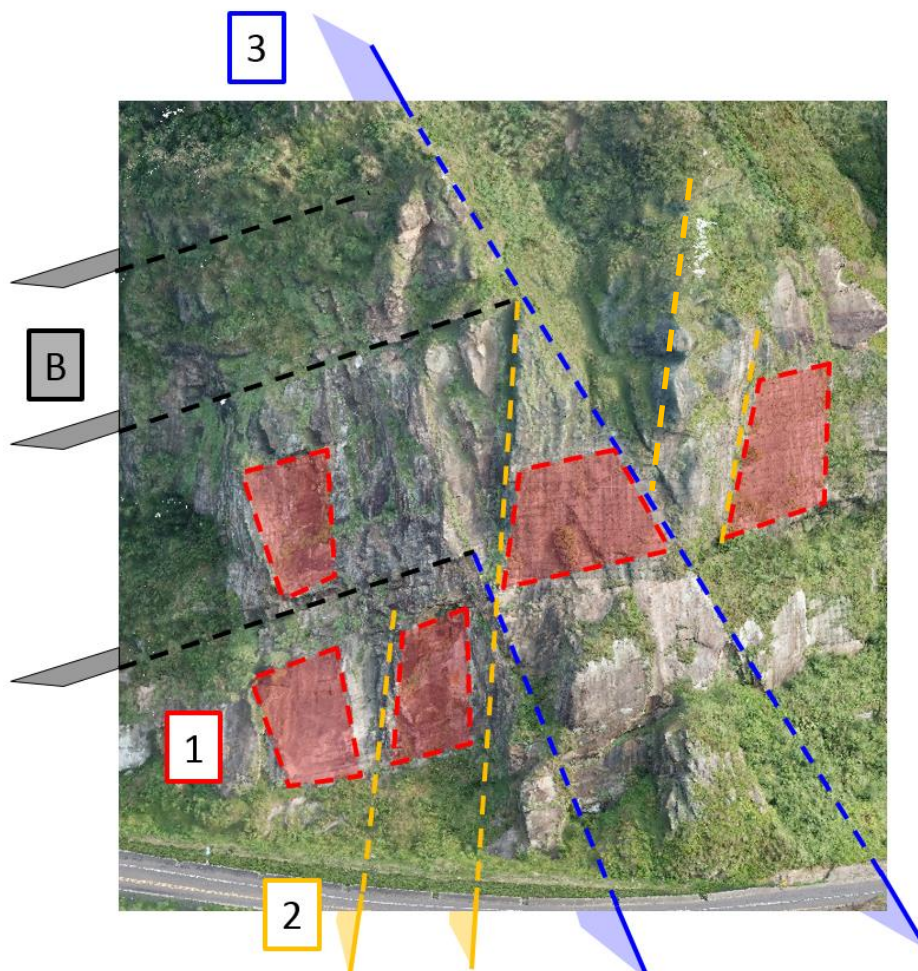


圖 4.8 根據點雲分析結果將邊坡上之節理組及層面劃分



所有分區的位態分析完畢後，可以發現雖然層面在此處因出露面積較小，無法順利在點雲模型中被量測，但在配合地質圖以及現地調查等方式所得知的層面或節理位態，依然可以將南雅案例的岩石邊坡中，最具影響力的三組節理面位態以及層面位態整理出來，將其比照空照圖及點雲模型的話，我們便可以在三維空間中更加體會各組節理組以及層面的空間關係（圖 4.8），也可以將原本無法直接量測得到的節理組數據繪製成赤平投影圖（圖 4.9），以利計算各弱面間的夾角角度及交線傾伏角。

依據上述之分析結果以及現地之調查，我們推斷 Joint 1 較偏向於解壓節理，與邊坡之坡向平行，造成部分岩體平面破壞，而 Joint 2 及 Joint 3 則為兩組夾角  $38^\circ$ 、交線傾伏角  $37^\circ$  之高角度節理，上述分區中的 D 區，有可能就是因這兩組節理截切坡體，後方的 Joint 1 及層面形成張力裂縫，最後岩體四周的支撐力不足便產生楔形破壞，沿著 Joint 2 及 Joint 3 之交線方向滑出而破壞，而殘餘岩體則形成了三角形且具有階梯狀的產狀。

從赤平投影圖中可得知，兩個弱面於空間中會有一條交線，若此交線之極點位於坡面弧線外測，便有可能形成楔形破壞。南雅邊坡中總共有 6 條交線，其中 4 條交線便是出露於坡面外（圖 4.9），具有形成楔形破壞的潛勢，其中  $i_{12}$  與  $i_{13}$  之交線傾伏角較陡，皆以  $\text{Plunge}=60^\circ\sim 65^\circ$  往邊坡西側出露。而  $i_{23}$  則是本研究所關心之重點，為 Joint 2 及 Joint 3 之交線，以  $\text{Plunge}=40^\circ$  往邊坡西側出露，其截切出之塊體便是上述分區中之 D 區，以及目前邊坡中所殘存且具有最大的倒懸體積的 F 區。另外， $i_{1B}$  則為解壓節理的 Joint 1 以及層面所交出之一條伏角較緩的交線，且其出露方向與另外三組交線不同，是以  $\text{Plunge}=10^\circ$  往邊坡東側出露。



	Orientation (dip direction / dip)
Slope	014°/ 82°
Bedding	130°/ 20°
Joint 1	345°/ 64°
Joint 2	047°/ 74°
Joint 3	250°/ 77°

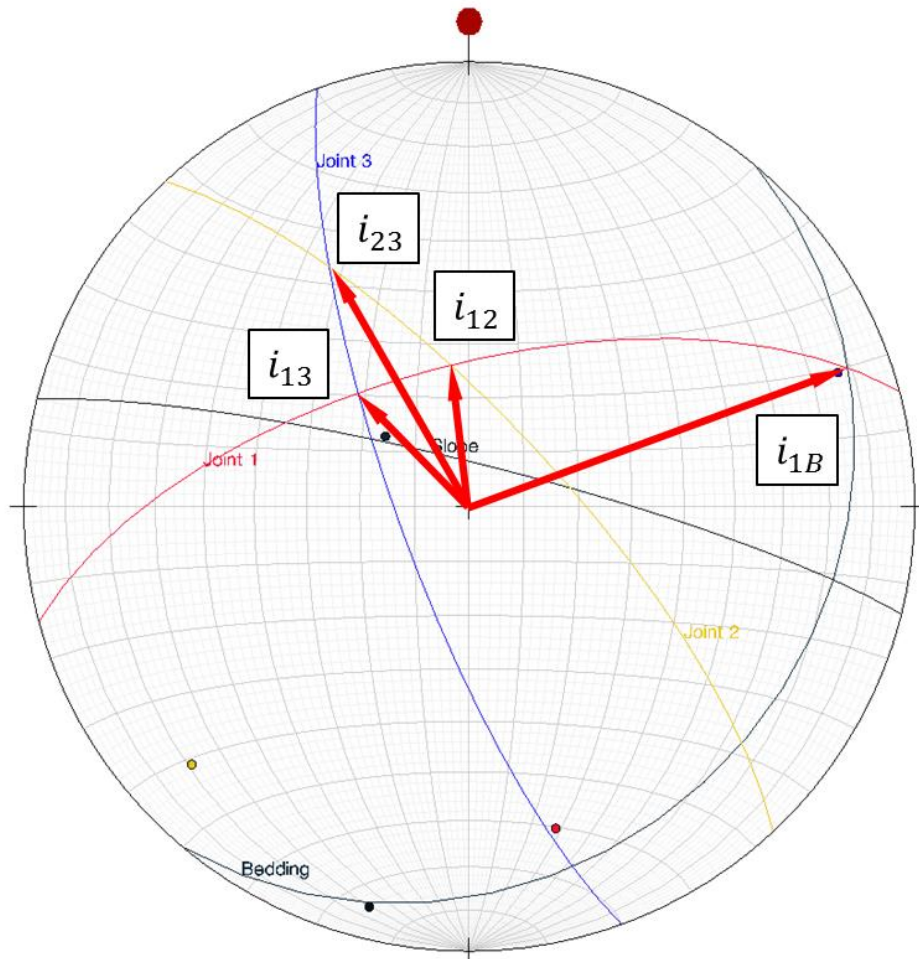


圖 4.9 南雅案例區主要節理及層面之詳細位態、赤平投影圖與出露坡面之交線



## 4.2 荖濃溪案例

### 4.2.1 位置及地質地形

此研究區域位於高雄市桃源區的台 20 線勤和至復興中間之路段（圖 4.10），由於民國 98 年莫拉克風災後新復建的削山便道在完工後不到兩年，又遇民國 101 年的 610 水災而慘遭毀損，故相關單位在考量溪底便道的搶通方式無法作為長久之計，決定以提升原削山便道高程的方式，採用鋼便橋的中期方案進行復健，於是座落於此研究區之鋼便橋—明霸克露橋便因此建成（圖 4.11）。

研究區緊鄰著的主要水系為東北-西南走向的荖濃溪河谷，因位於河道的左岸攻擊側，邊坡趾部容易受到河流的沖蝕，形成較為高聳且陡峭的岩石邊坡，且當地地層屬於潮州層，主要岩性為板岩及硬頁岩夾變質砂岩，又因土壟灣斷層於區域北部與荖濃溪流向平行通過，造成附近區域地質具有許多向東傾斜之斷層及褶皺，使得地層組構變得較為破碎及複雜，也因此對於台 20 線的道路及橋墩柱體的安全性具有十足的影響力。

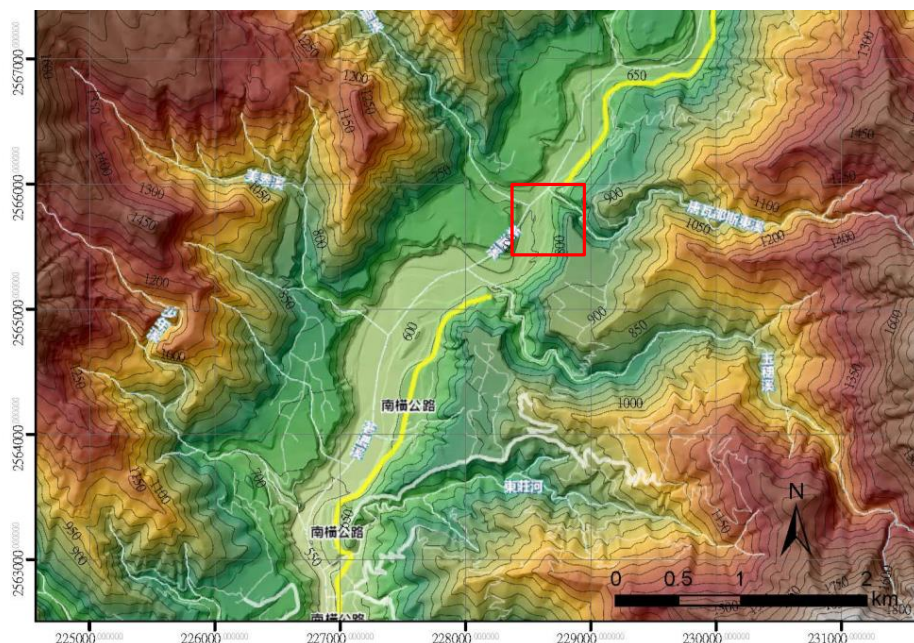


圖 4.10 荖濃溪案例區邊坡位置及地形圖





圖 4.11 台 20 線明霸克露橋旁岩石邊坡之點雲模型



圖 4.12 荖濃溪案例之楔形破壞不連續面判釋，坡面位態：331°/74° (2019)



## 4.2.2 節理位態判釋

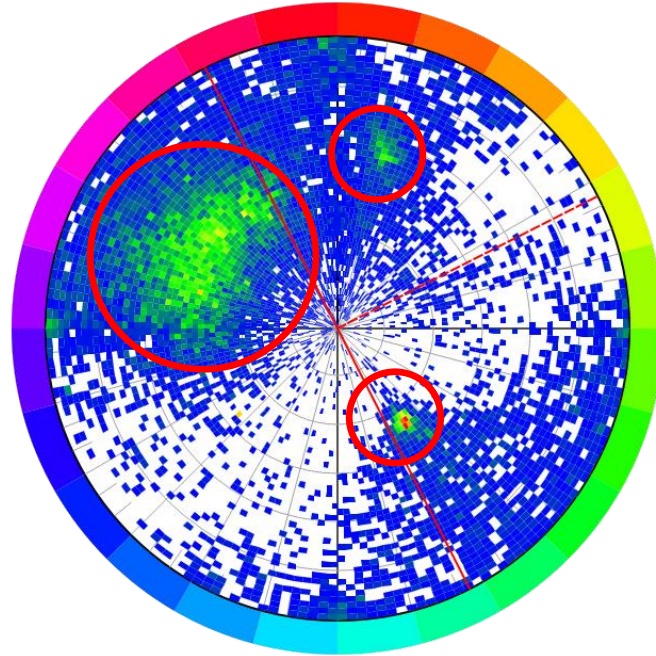


圖 4.13 荖濃溪邊坡進行位態分析產製之立體投影圖

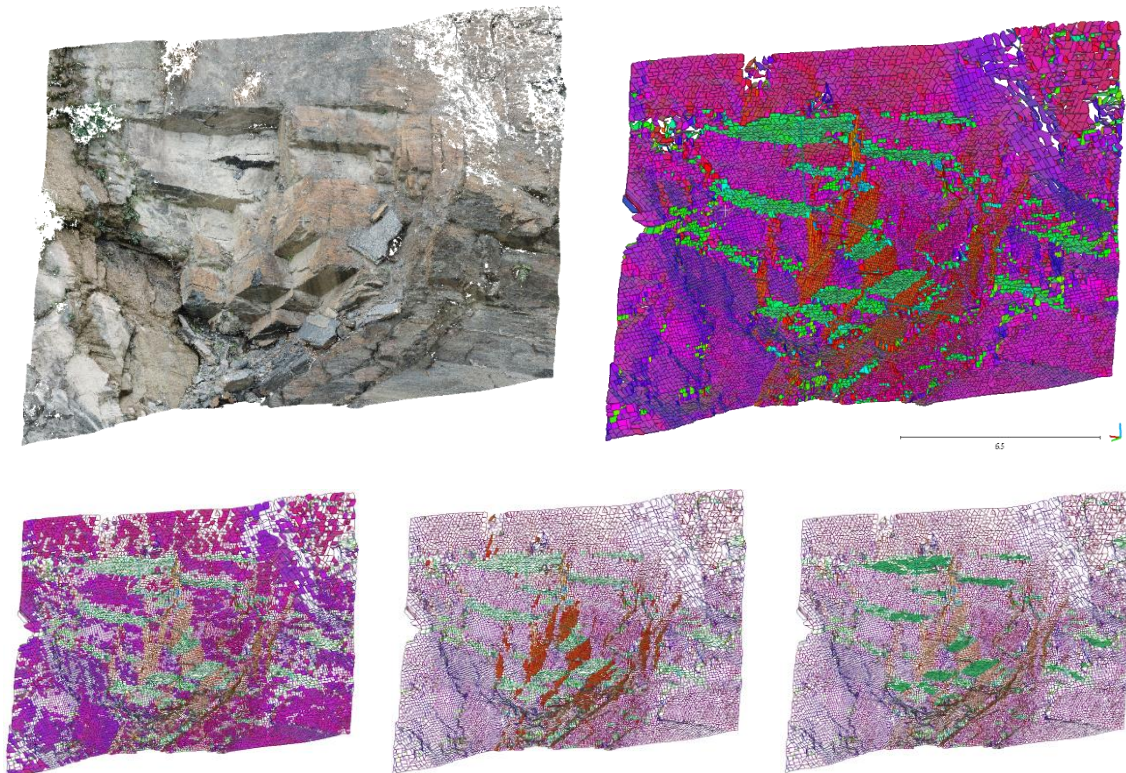


圖 4.14 荖濃溪邊坡進行位態分析產製之面單元與三組主要弱面

在大部分為變質砂岩的地質模型中，通常可以觀察到較為方正、形狀近似矩形的岩體產狀，配合地質圖資料、現地調查以及位態分析之結果進行判斷，此邊坡屬逆向坡，同樣受到兩組共軛的高角度節理組截切坡體，而發生楔形破壞並產生大小不一的矩形岩楔（圖 4.12）。

且因發生楔形破壞後，部分坡面產生倒懸的情形，使得層面得以較完整的姿態出露於邊坡中，在位態分析時可以直接觀察及量測層面之位態。兩組共軛之高角度節理相交形成交線 $i_{12}$ ，其夾角為 $122^\circ$ 、交線傾伏角為 $44^\circ$ （圖 4.13~圖 4.15），在陡峭岩壁上交線出露見光，被截切之楔形岩塊便沿著其交線方向滑出產生破壞，而殘餘岩體一樣形成了階梯狀的產狀。

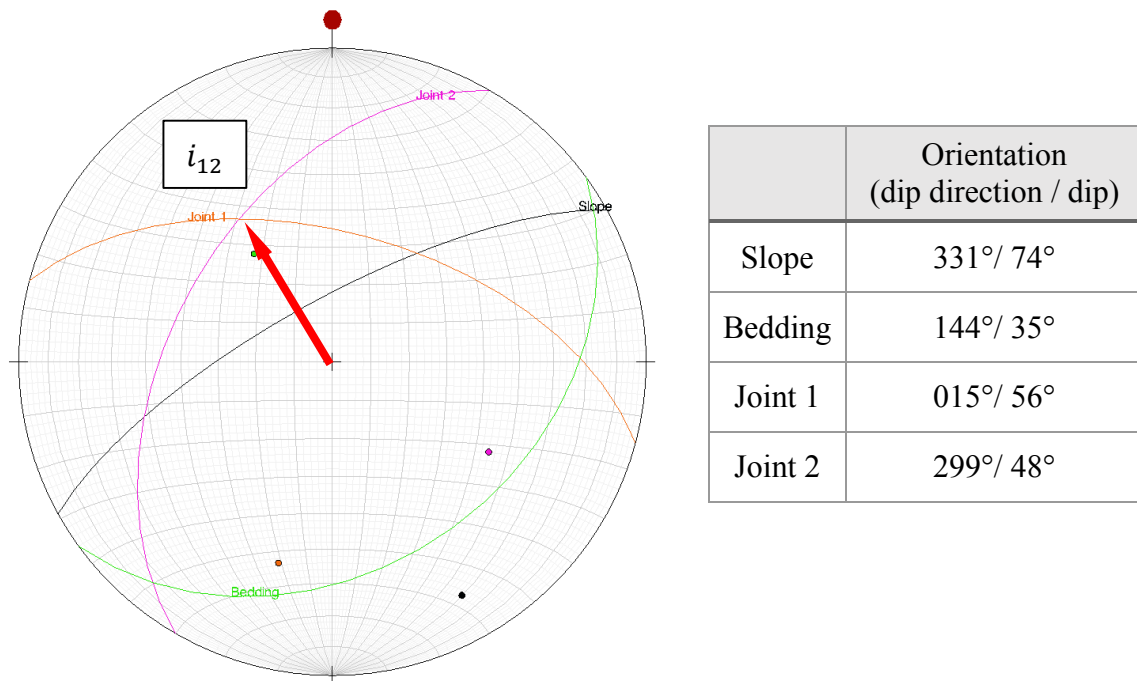


圖 4.15 荖濃溪案例區主要節理及層面之赤平投影圖





## 4.3 玉穗溪案例

### 4.3.1 位置及地質地形

此研究區域為高雄市桃源區荖濃溪支流—玉穗溪(圖 4.16)，該地區的地層屬於樟山層，其岩性大部分屬於輕度變質砂岩。沿著玉穗溪勘查時，於未擾動岩盤中，發現許多構造作用的小波長褶皺，並在原玉穗農路靠近溪床的路段周圍，觀察到一邊坡具有楔形破壞發生的現象(圖 4.17)，高度大約 9 米高，其底部堆積著風化後而崩落、具鉛筆狀構造之硬頁岩碎屑；坡面上可量測其層面資料，但另一組節理以及切出倒懸塊體之張力節理，便因高度限制而無法當場準確量測。

在對此邊坡進行節理調查之後，我們可整理出三組構成此一楔形破壞的主要不連續面(圖 4.18)，其中延續性最佳且最出露面較為平滑的，便是右方的地層層面，與層面在空間中相交並於坡面上出露的，則是平行於層面走向的高角度走向節理，而於楔形塊體後方形成岩體邊界，扮演著如張力節理的，則是垂直於層面走向的傾向節理。

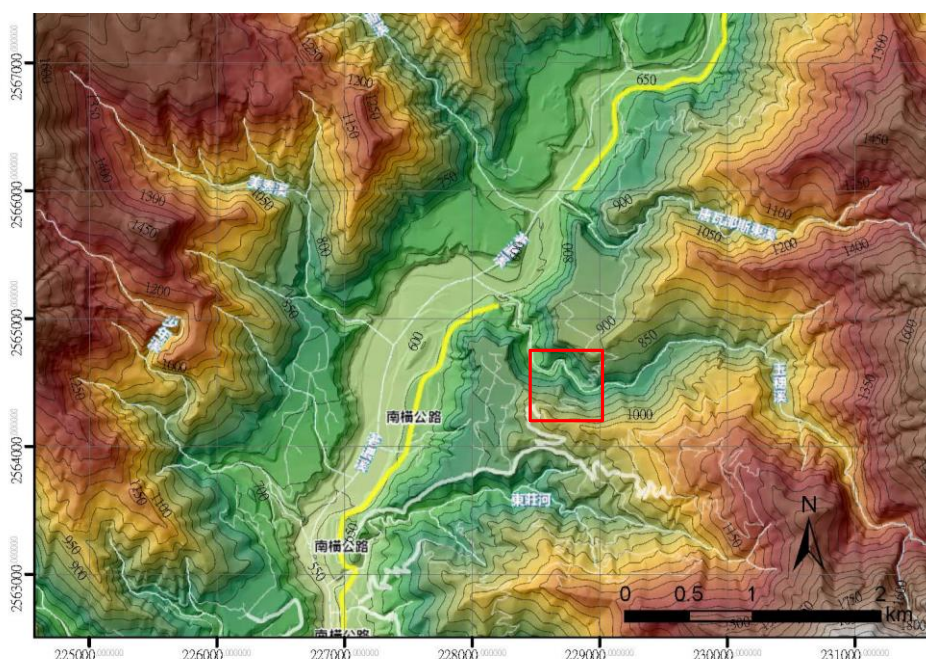


圖 4.16 玉穗溪案例區邊坡位置及地形圖





圖 4.17 玉穗溪案例邊坡之點雲產製

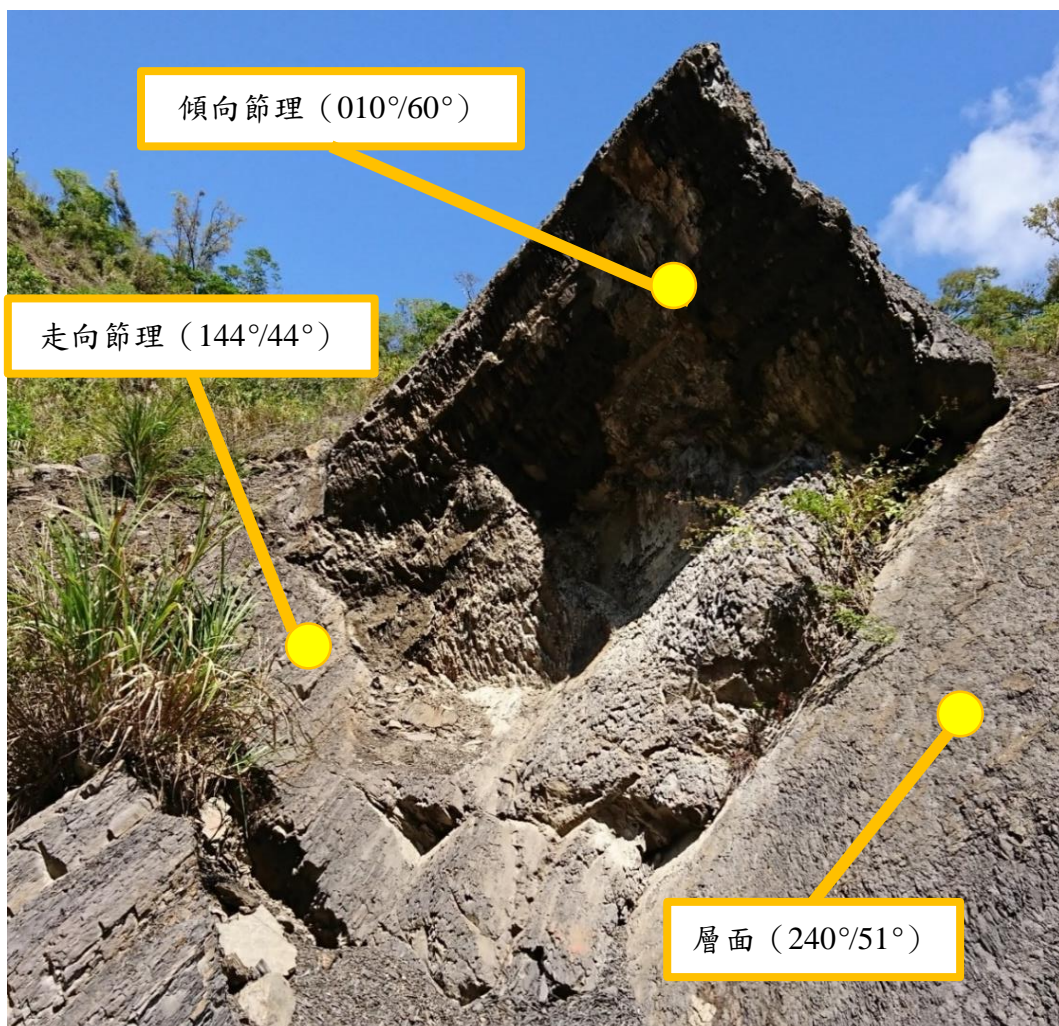


圖 4.18 玉穗溪案例之楔形破壞不連續面判釋，坡面位態：200°/63° (2018)



### 4.3.2 節理位態判釋

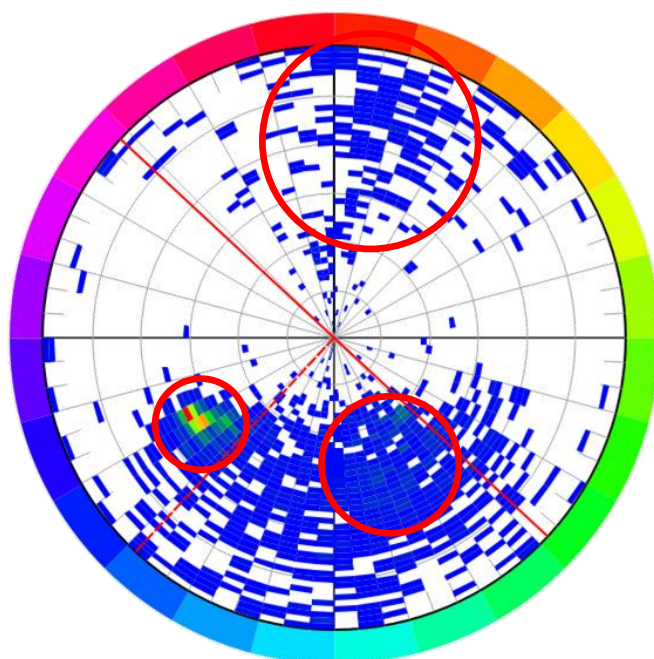


圖 4.19 玉穗溪邊坡進行位態分析產製之立體投影圖

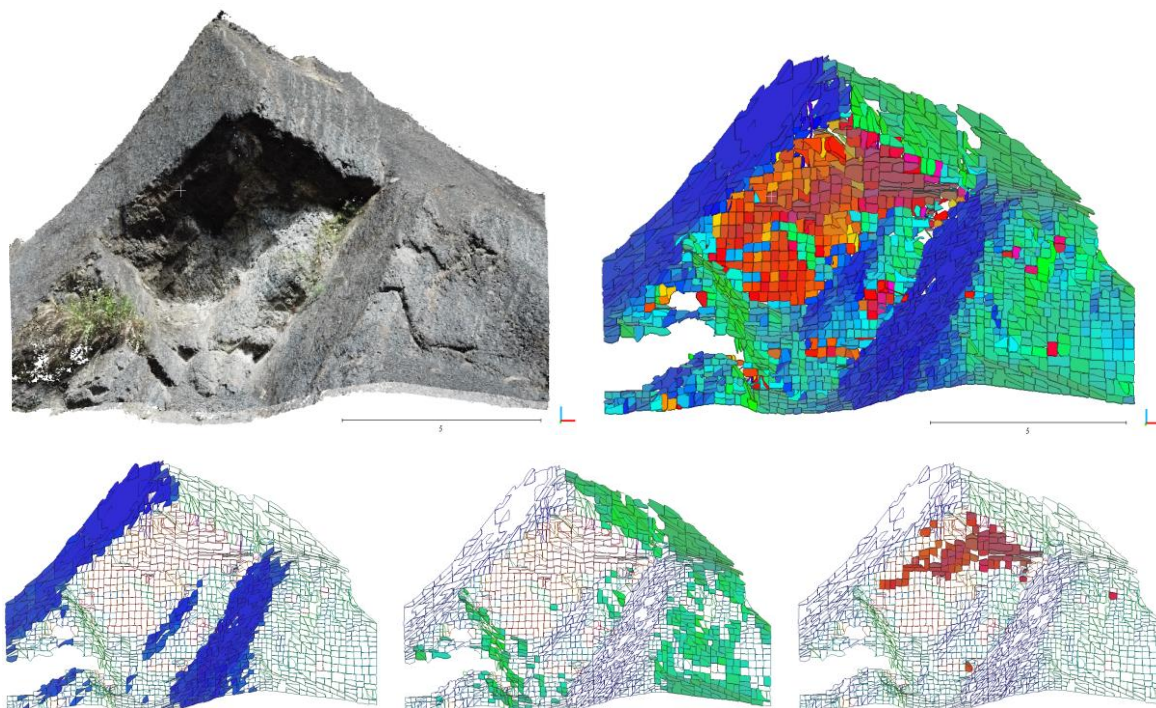


圖 4.20 荖濃溪邊坡進行位態分析產製之面單元與三組主要弱面

配合地質圖資料、現地調查以及位態分析之結果進行判斷，因此地區之層面位態與邊坡坡向大致平行，但走向上以  $40^\circ$  斜交，因此邊坡屬於順向斜交坡。在順向斜交坡中，層面與其走向節理易於坡體中相交形成交線  $i_{1B}$  出露於坡面，而產生楔形破壞，在此案例中我們亦可發現層面與 Joint 1 以  $65^\circ$  相交，交線傾伏角  $35^\circ$  出露於坡面的情形發生，故可驗證順向斜交坡中之楔形破壞的形成機制（圖 4.19 ~ 圖 4.21）。

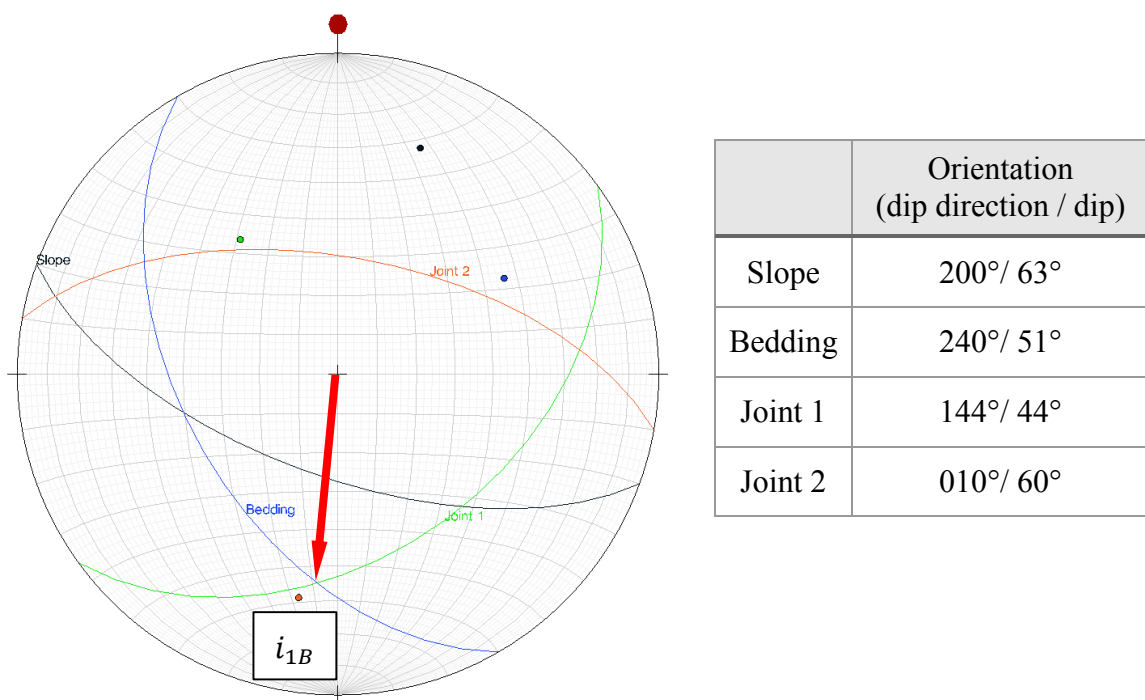


圖 4.21 玉穗溪案例區主要節理及層面之赤平投影圖



## 4.4 小結

1. 利用 Cloudcompare 將點雲模型切割成無數個面單元，並將所有面單元的位態資料加以統計後，便能快速分析一出露面積較大之岩石邊坡露頭。
2. 過大的面積容易覆蓋過多組節理，導致同一張位態立體投影圖同時呈現過多資訊，而使主要節理無法從顯現於投影圖中。
3. 在逆向斜交坡中，以南雅里邊坡為例，截切邊坡形成楔形破壞的兩道弱面為兩組夾角約  $40^\circ$  的高角度節理，但形成後方邊界的變成了是另一組與坡向約略平行、類似於解壓節理的主控弱面，層面在此案例中則形成了上方的邊界，在四組弱面的同時作用下，使得楔形岩體的幾何形狀趨向於三角平面狀，才會在殘餘岩體中觀察到如 D 區的產狀。
4. 在逆向坡中，以荖濃溪邊坡為例，截切邊坡形成楔形破壞的兩道弱面為兩組夾角約  $120^\circ$  的高角度共軛節理，層面扮演的角色則為楔形岩體後方的邊界，三組弱面合起來便使得楔形岩體形成多層的塊體滑出。
5. 在順向斜交坡中，以玉穗溪邊坡為例，截切邊坡形成楔形破壞的兩道弱面變成了具有高延續性的層面以及一道較高角度之走向節理，傾向節理則在此案例中形成了楔形岩體後方的邊界，受到兩組節理組以及層面等三組弱面截切的情況下，該邊坡才形成了一個具有楔形破壞產狀之倒懸岩體。

## 第五章 砂箱物理模型試驗



### 5.1 試驗結果

砂箱物理模型試驗成果顯示，隨著傾斜儀的旋轉，縮尺試驗中用以模擬逆向坡之楔形岩體中，兩節理面交線傾伏角角度隨之增加，本研究便於整個砂箱物理模型的旋轉過程中，拍攝不同階段菱形研磨石崩落後之殘餘岩體產狀。並於試驗結果中觀察到兩種破壞形式，分別為翻覆破壞 (Topping) 以及滑動破壞 (Sliding) (圖 5.1、圖 5.2)。

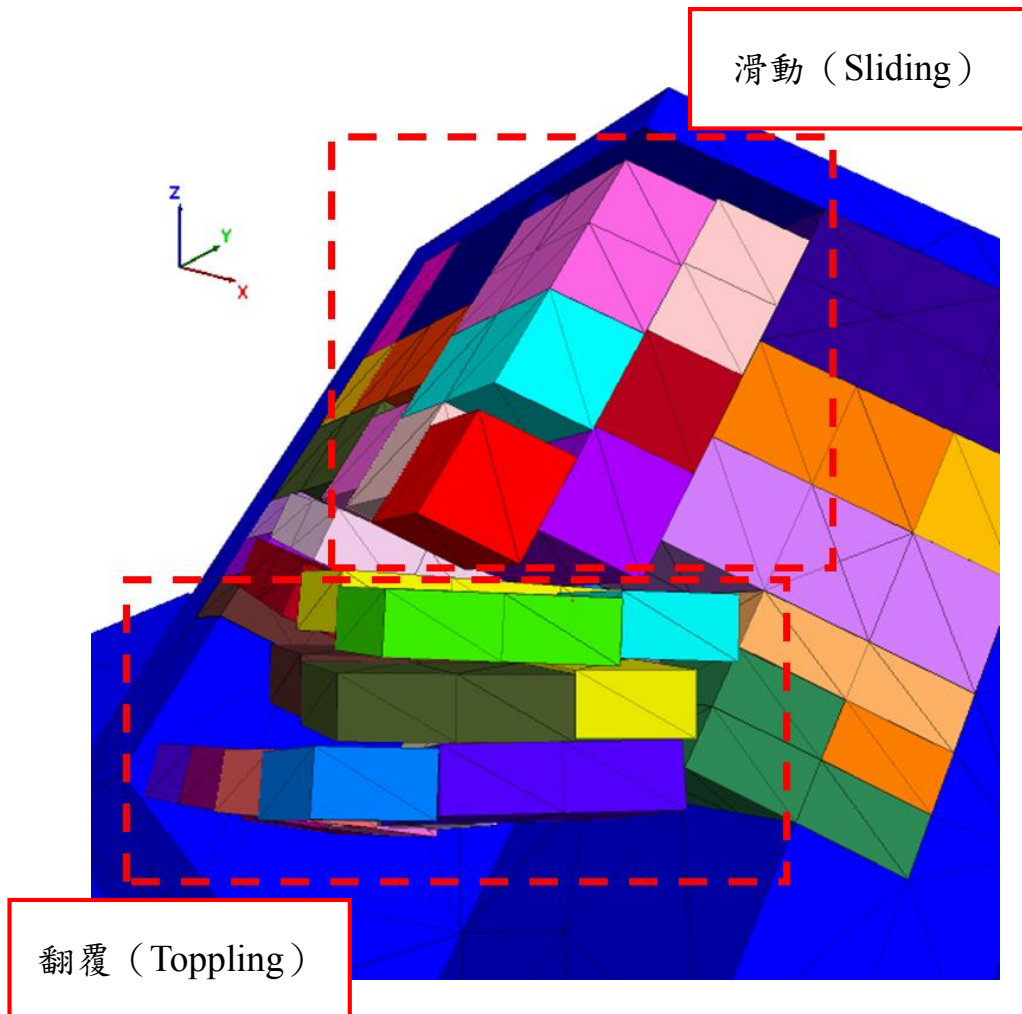


圖 5.1 楔形岩體中之翻覆型、滑動型破壞三維示意圖



翻覆破壞

滑動破壞

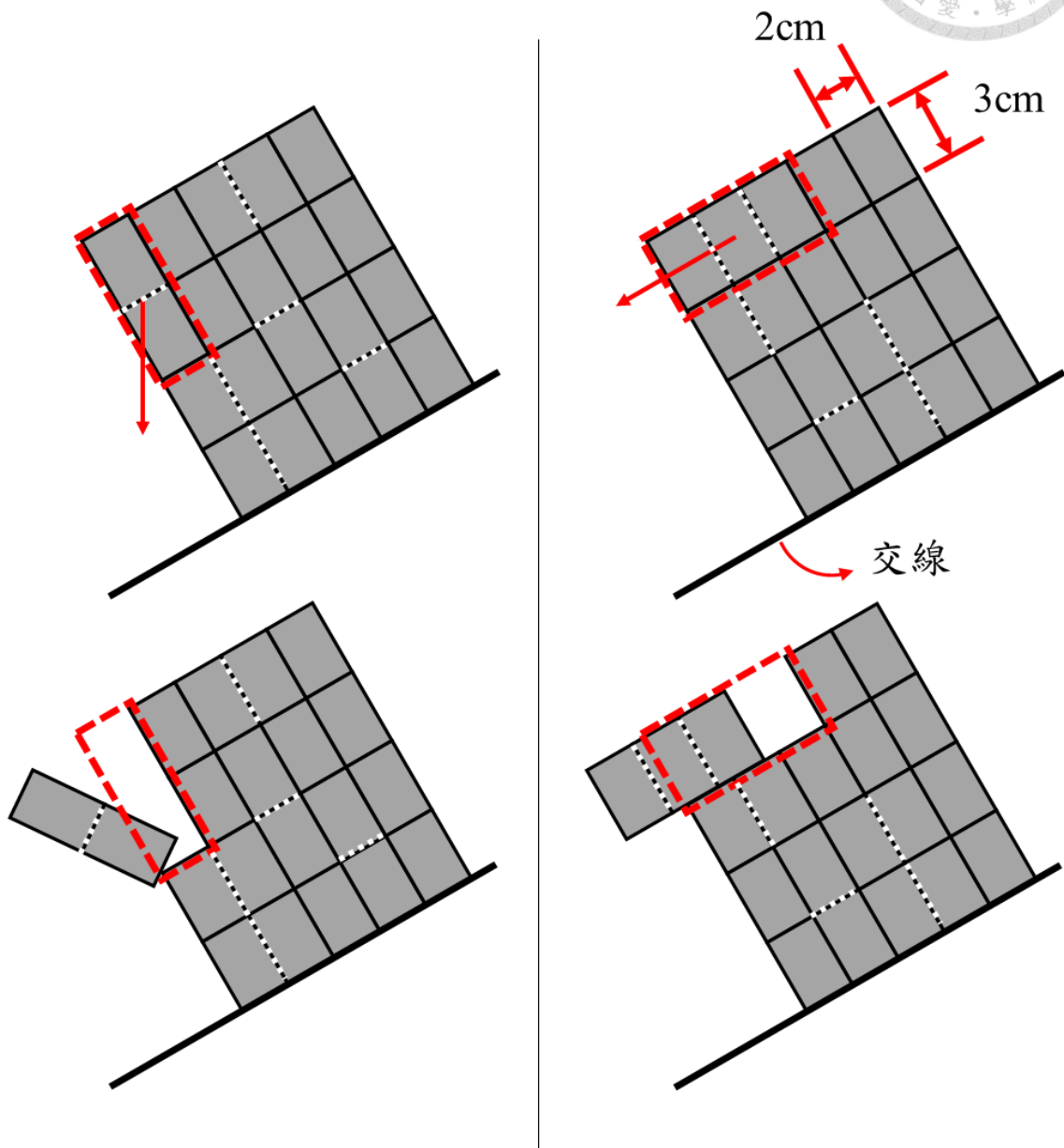
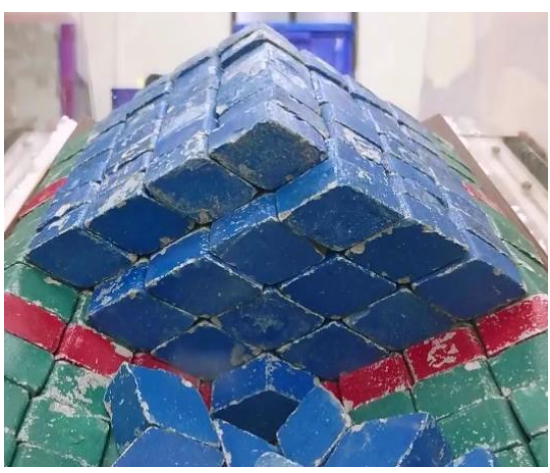


圖 5.2 沿交線方向垂直剖面中楔形岩體之翻覆型、滑動型破壞二維示意圖  
(虛線為已膠結面)





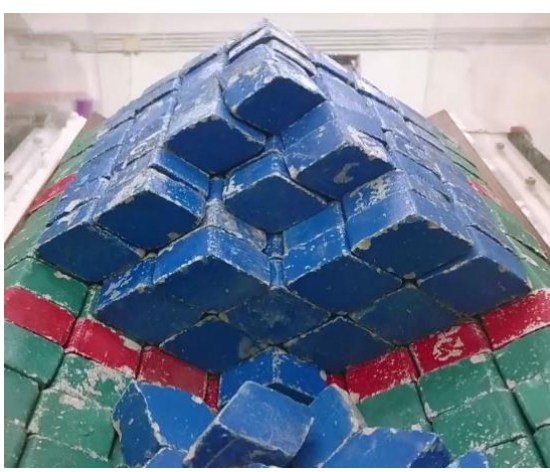
Plunge = 28°



Plunge = 30°



Plunge = 34°



Plunge = 44°



Plunge = 52°



Plunge = 60°



圖 5.3 延續性 80%之物理模型於不同交線傾伏角下之崩落產狀

我們於試驗中發現，前排部分塊體在較低傾角的階段時中，容易先以翻倒的機制落，因前排在逆向坡中屬於倒懸岩體的部分，且若在節理具有延續性的情況下時，部分塊體為數塊研磨石相連形成而呈長柱狀，若整個塊體之重心在水平方向上的位置，超過了塊體底部的最外端點，便會產生向外翻轉的彎矩，導致翻覆破壞的發生；而當塊體之長軸方向是往後方延伸時，其重心則大多落於坡體中，但在兩道節理面所提供之摩擦力，不足以抵抗塊體之下滑力，且塊體四周又被節理切穿時，塊體便較容易以滑落機制破壞（圖 5.3）。

從砂箱物理試驗結果來看，楔形岩體在節理面交線傾伏角大於  $44^\circ$  後，開始發生較大量的傾覆破壞，隨著傾伏角提升陸續有塊體掉落，直到傾斜儀達到最大的傾角  $60^\circ$  試驗才中斷。而在這個過程中也有部分表層塊開始產生鬆動與位移，但因為研磨石本身之形狀誤差因素，在堆疊及試驗過程中，容易發生部分塊體的邊角互相阻擋，產生類似顆粒間互鎖的效應，因此提升了整體的穩定性。為了後續與數值模擬做比對，本研究便試著將發生較大鬆動現象的研磨石手動移除（圖 5.4）。

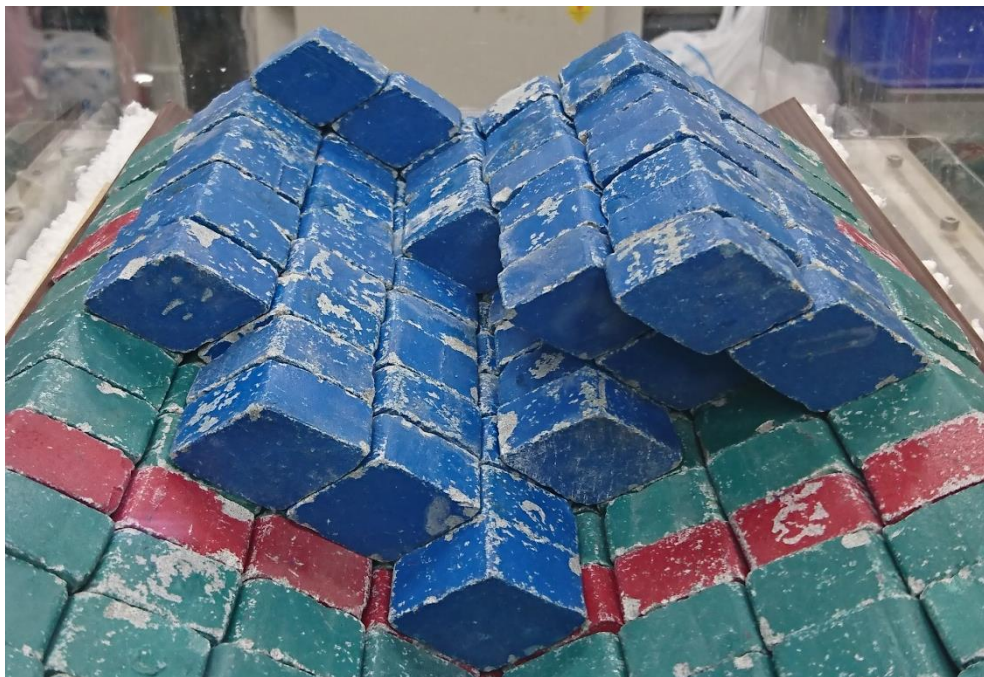


圖 5.4 移除表層鬆動岩塊後之殘餘岩體產狀





## 5.2 小結

1. 逆向坡中受節理等不連續面切割後所形成之楔形岩體，當塊體周圍岩橋皆被不連續面完全截切，形成自由塊體時，便可能以兩中不同型態的破壞機制產生崩落，分別為翻覆破壞及滑動破壞，
2. 經由砂箱物理試驗之結果判斷，在不連續面延續性固定的條件底下，上述兩種破壞機制中最主要的差異，為楔形塊體的幾何形狀因素，若被截切出來之塊體呈長柱狀，其長軸方向又平行逆向坡中的層面，便容易因塊體重心產生的彎矩而導致塊體向外翻落。
3. 楔形岩體趾部崩落後，隨著節理面交線傾伏角角度提升，後方之殘餘岩體所受到的摩擦力會逐漸降低，直到其抵抗能力低於下滑的驅動力，周遭已經被不連續面截切的自由塊體，便會開始產生下滑機制。
4. 砂箱物理試驗中，因菱形研磨石的幾何形狀具有一定程度的差異率，導致在堆疊排列以及試驗中產生位移的過程中，研磨石間的邊邊角角易產生塊體間的互鎖機制，因此提升了模型的整體安全性，導致模型在較高之節理面交線傾伏角情況下，才開始發生大量滑動。

## 第六章 數值模擬試驗



### 6.1 砂箱物理模型試驗之驗證

為了以砂箱物理模型試驗之結果驗證數值模型之合理性，於三維離散元素分析軟體 3DEC 中，建置一受層面及節理面以延續性 80% 切割之楔形岩體，使用之材料及相關參數列表詳表 3.4，並仿照傾斜儀之試驗過程，將試驗過程分為兩階段：模擬塊體隨著底部容器傾斜，逐步提高節理面交線傾伏角角度，於傾伏角  $\text{Plunge}=28^\circ$  時停止傾斜，進行第一次觀察（圖 6.1），待塊體崩落完成回復穩定後，再繼續緩慢傾斜模型直到  $\text{Plunge}$  提升至  $35^\circ$ ，進行第二階段的觀察（圖 6.4）。

依據數值模擬結果與砂箱物理模型試驗之結果，可以觀察到在數值模擬第一階段之殘餘岩體產狀，與物理模型在交線傾伏角  $\text{Plunge}=44^\circ$  與  $52^\circ$  時之殘餘研磨石塊體產狀相似（圖 6.2、圖 6.3），交叉比對兩者相差的塊體數量，並除以擺放的塊體總數 160 塊， $\text{Plunge}=44^\circ$  之物理模型結果與數值模擬結果相差 8 塊，其中有 7 塊是尚存於坡面但數值模擬中已經發生崩落，另 1 塊則是已發生崩落但數值模擬中未崩落，所得之比較差異率為  $8/160=5\%$ ；而  $\text{Plunge}=52^\circ$  之物理模型結果與數值模擬結果相差 6 塊，其中有 4 塊是尚存於坡面但數值模擬中已經發生崩落，另外 2 塊則是已發生崩落但數值模擬中未崩落，所得之比較差異率為  $6/160=3.75\%$ 。而若以第二階段之殘餘岩體產狀進行比對（圖 6.5），可觀察出與物理模型中移除表層鬆動岩塊後之殘餘岩體產狀相比，其相差的塊體數量為 7 塊，且 7 塊皆屬於砂箱試驗中已發生崩落但數值模擬中未崩落，所得之比較差異率為  $7/160=4.4\%$ 。其原因可推測為，因砂箱試驗是於交線傾伏角提升至較陡之角度後，最後才將鬆動岩體移除，故其整個岩體可能已經受到較大的下滑力，故部分已經被節理完全切割但在低傾伏角時較不易滑動之塊體，便開始產生鬆動甚至崩落，才會使結果產生些許差異。

因為實際在砂箱物理模型試驗中，菱形研磨石的幾何形狀具有一定的差異率，導致在堆疊排列以及試驗中產生位移的過程中，研磨石間的邊角易互相阻擋，進而提升了模型的整體安全性，導致模型在較高之節理面交線傾伏角情況下，才開始發生大量崩落，在此條件下數值模擬仍舊能接近完整的呈現出，現實世界中塊體的運動行為及最後岩體的產狀，故證實了以 3DEC 進行後續分析的可行性。

➤ 第一階段 (Plunge = 30°)

➤

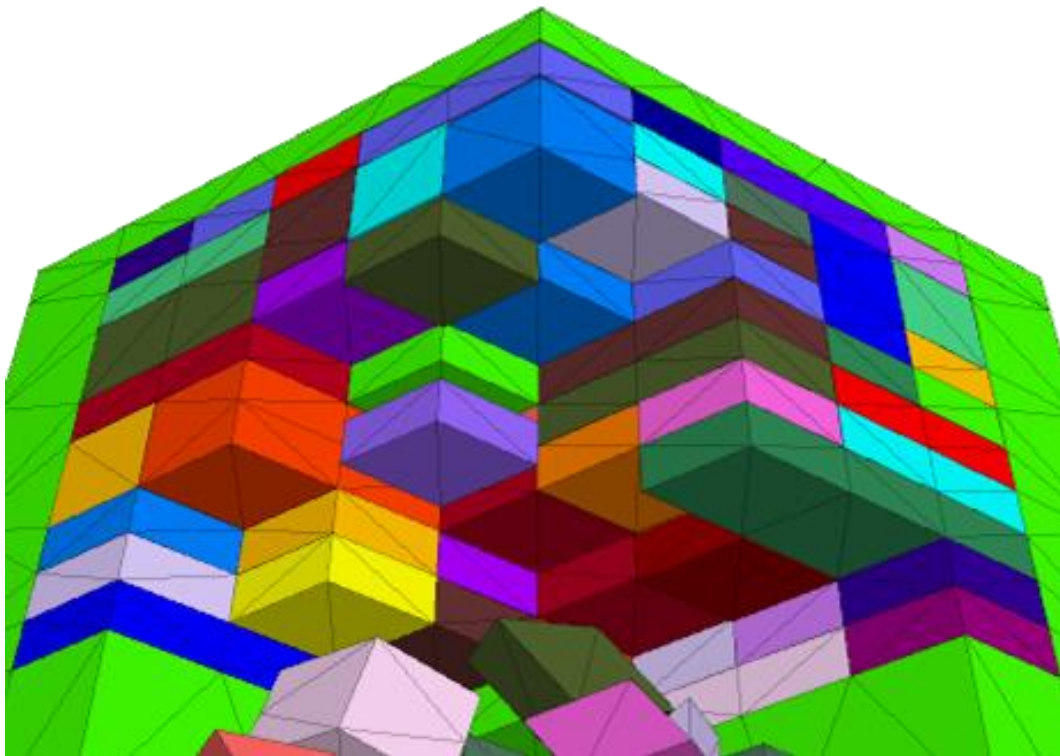


圖 6.1 數值模擬中節理面交線傾伏角為 28° 時之殘餘岩體產狀

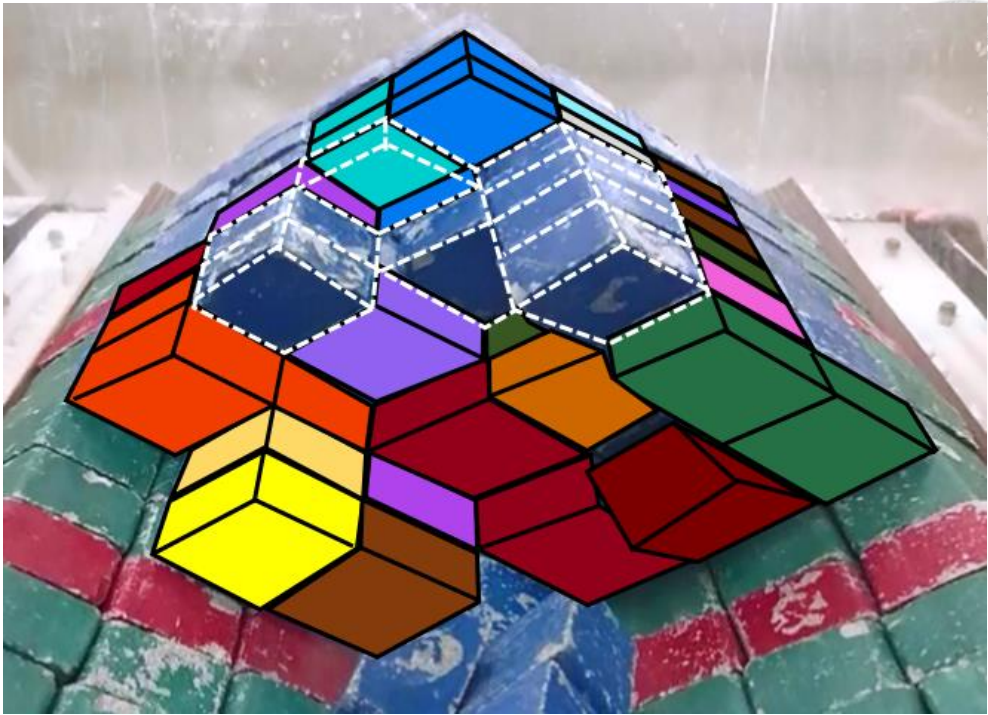


圖 6.2 物理模型節理面交線傾伏角 $=44^\circ$ 時與數值模擬結果之比對（虛線部分為物理模型結果與數值模型結果之差異）

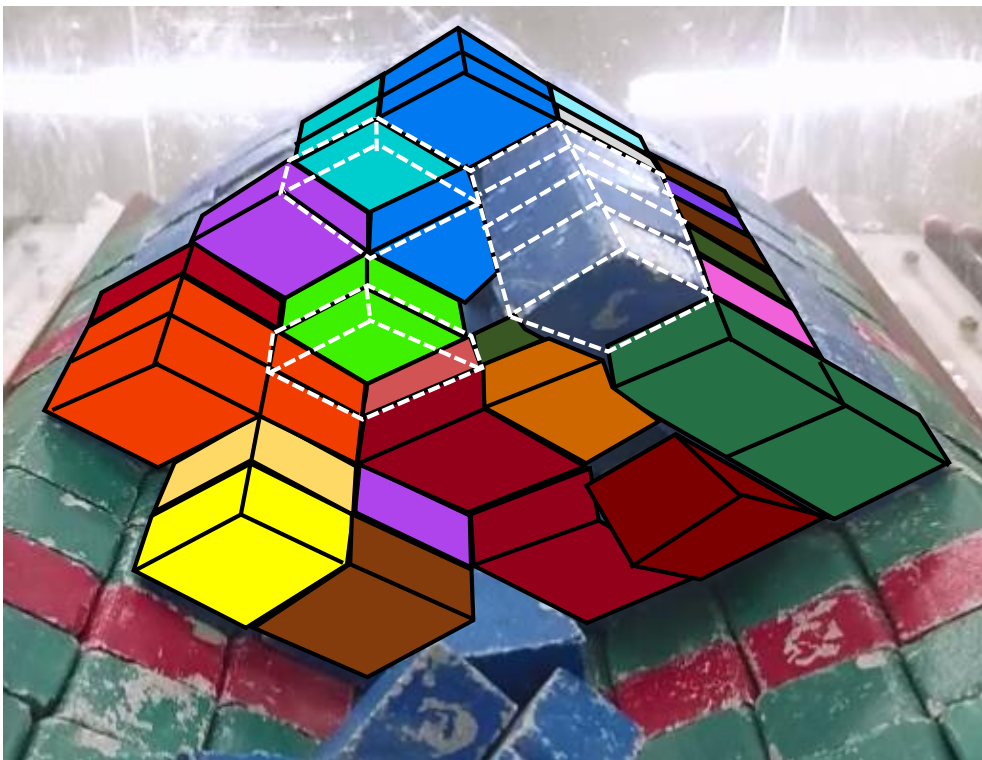


圖 6.3 物理模型節理面交線傾伏角 $=52^\circ$ 時與數值模擬結果之比對（虛線部分為物理模型結果與數值模型結果之差異）





➤ 第二階段 (Plunge = 35°)

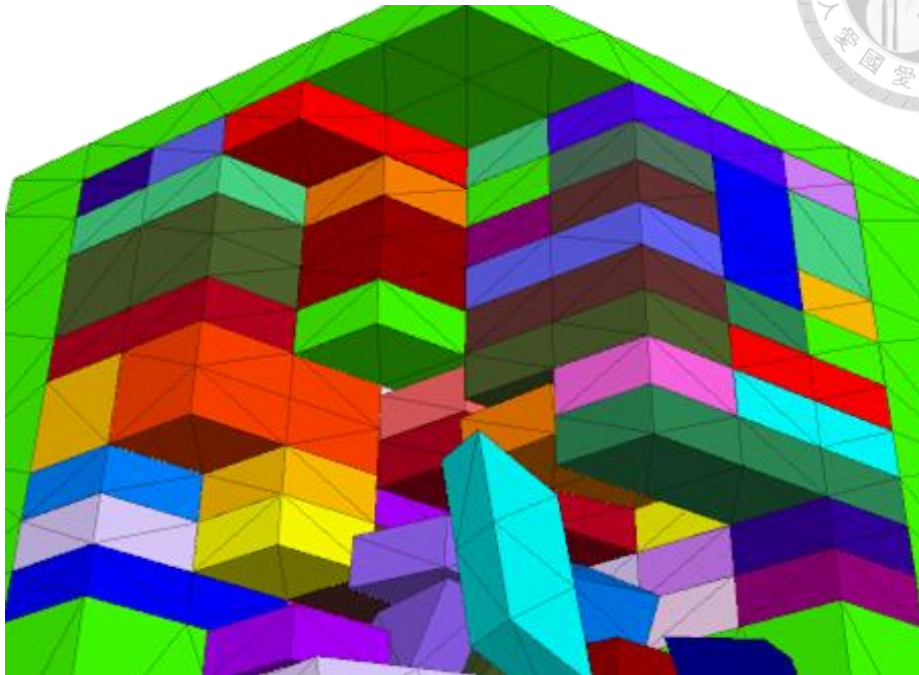


圖 6.4 數值模擬中節理面交線傾伏角為 35° 時之殘餘岩體產狀

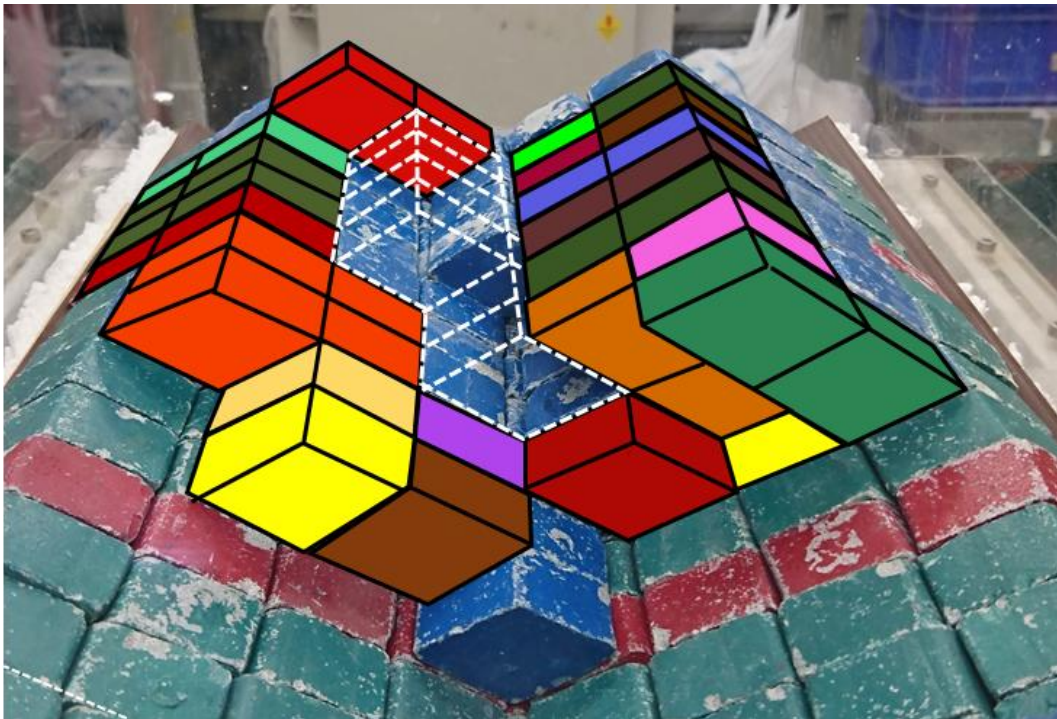


圖 6.5 移除物理模型中表層鬆動岩塊後與數值模擬結果之比對 (虛線部分為物理模型結果與數值模型結果之差異)



## 6.2 數值模擬試驗成果

為了量化塊體的破壞機制，本研究將塊體在運動初始階段之節點速度彙整，並在同一時階中，讀取模型中所有塊體之最高點速率及最低點速率，依據下面所列舉之判斷標準，將塊體的運動機制分為三種（圖 6.6）：

1. 滑動 (Sliding)：最高點速率約等於最低點速率，塊體正處於平移旋轉狀態。
2. 翻覆 (Toppling)：最高點速率大於最低點速率，塊體正處於旋轉狀態；或是最高點及最低點速率垂直分量遠大於水平分量，因最高點及最低點速率在翻覆後轉為垂直墜落時會大致相同，用以與滑動機制作區分。
3. 停止 (Stop)：最高點及最低點速率皆趨近於 0，塊體近乎停止狀態。

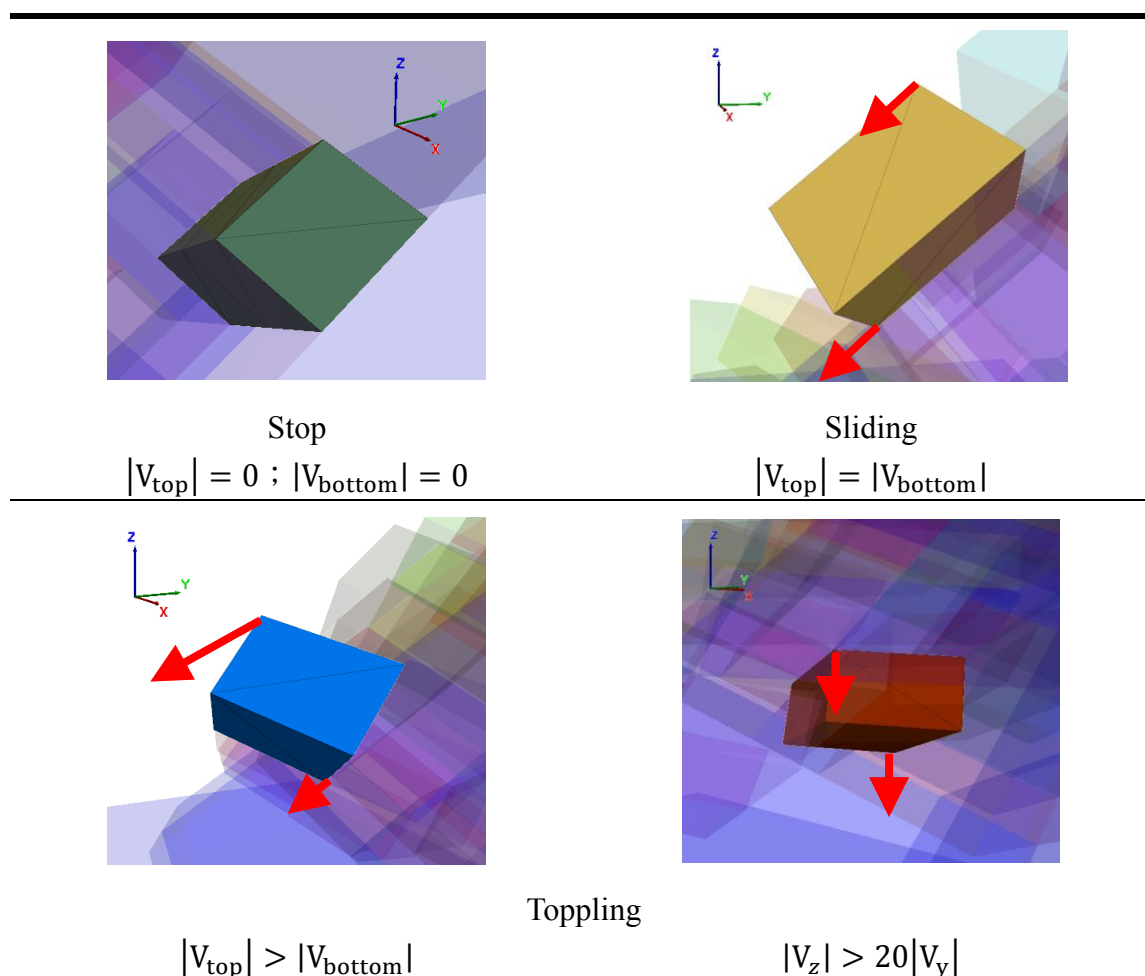


圖 6.6 初始階段中四種塊體之運動形式及其節點速率判斷標準



### 6.2.1 節理延續性之影響

在兩不連續面交角 (Dihedral Angle,  $\xi$ ) 為  $120^\circ$  及  $90^\circ$  之兩種模型中，固定兩不連續面交線傾伏角角度 (Plunge, PL) 為  $30^\circ$  及  $40^\circ$ ，以及在對稱模型 ( $\alpha=0^\circ$ ) 之條件下，改變節理的整體延續性，分別以 60%、80% 以及 100% 之模型進行比較，從而探討節理延續性對楔型岩體破壞機制之影響，其相對應之數值模擬結果，以四階段相同時階間距之正視圖及側視圖展示，請詳見附錄 A-2 至 A-13 所示。

若以最後崩落而形成堆積區之岩塊體積來比較可發現，隨著模型之延續性提升，因鬆動而落下的塊體數量也顯著提升，但同時也會使楔形塊體之單一體積普遍下降，大小不一的塊體間之互鎖機制也會減少，直到模型之延續性升至 100%，楔形岩體的破壞機制便會趨向於均等且連續的整體崩落。若以崩落後的堆積岩塊與總岩塊體積之比例進行比較 (圖 6.7)，可以發現崩落塊體之體積會隨著延續性提升而增加。若以兩種交線傾伏角角度來區分，則可觀察到傾伏角為  $30^\circ$  時，其崩落岩塊之體積百分比隨延續性提高之上升速率較慢，而傾伏角為  $40^\circ$  時，則於延續性 80% 時就已大幅提升。

而若從塊體運動初始階段的節點速率來分析 (表 6.1~表 6.4)，在傾伏角  $30^\circ$  的情況下，塊體還無法在只有重力驅使下產生滑動，只會以翻落的形式產生破壞，故可觀察到延續性 60% 及 80% 之模型，翻覆機制的比例相較滑動機制為高，只有前三排因坡體倒懸，且被節理切穿周圍的塊體有翻落的情形，延續性達 100% 時兩機制之比例則趨於相同；而在傾伏角  $40^\circ$  時，則在所有延續性之初始階段中，塊體之運動皆以傾覆機制為主。另外在延續性 60% 與 80% 之模型中殘餘岩體的部分也可以觀察到如荖濃溪現地案例中所見之階層狀分布 (圖 4.12、圖 6.8~圖 6.11)。



## 6.2.2 不連續面交角之影響

在固定兩不連續面交線傾伏角角度 (Plunge) 為  $30^\circ$  及  $40^\circ$ ，以及在對稱模型 ( $\alpha = 0^\circ$ ) 之條件下，改變節理的整體延續性，分別以 60%、80% 以及 100% 之模型進行展示，但是重點改為以  $\xi = 120^\circ$  及  $90^\circ$  之模型進行比較，從而探討兩節理面交角 (Dihedral Angle) 對楔型岩體破壞機制之影響 (圖 6.8~圖 6.11)。

於模擬結果中可明顯發現，在節理面交線傾伏角  $30^\circ$  的模型中， $\xi = 120^\circ$  及  $90^\circ$  模型在延續性為 60% 及 80% 時，發生崩滑的塊體大多相同；唯延續性達到 100% 時， $\xi = 90^\circ$  模型中後方大量的塊體在向下翻覆的過程中互相牽制，雖有層面間的滑移產生，但卻使較多的岩塊仍停滯於坡體中 (圖 6.10)；而在交線傾伏角  $40^\circ$  的模型中， $\xi = 90^\circ$  之模型其節理面給予塊體的圍束力愈大，造成了整體的安全性因此升高，故其崩落岩塊的體積比例會較  $\xi = 120^\circ$  之模型小 (圖 6.7)。

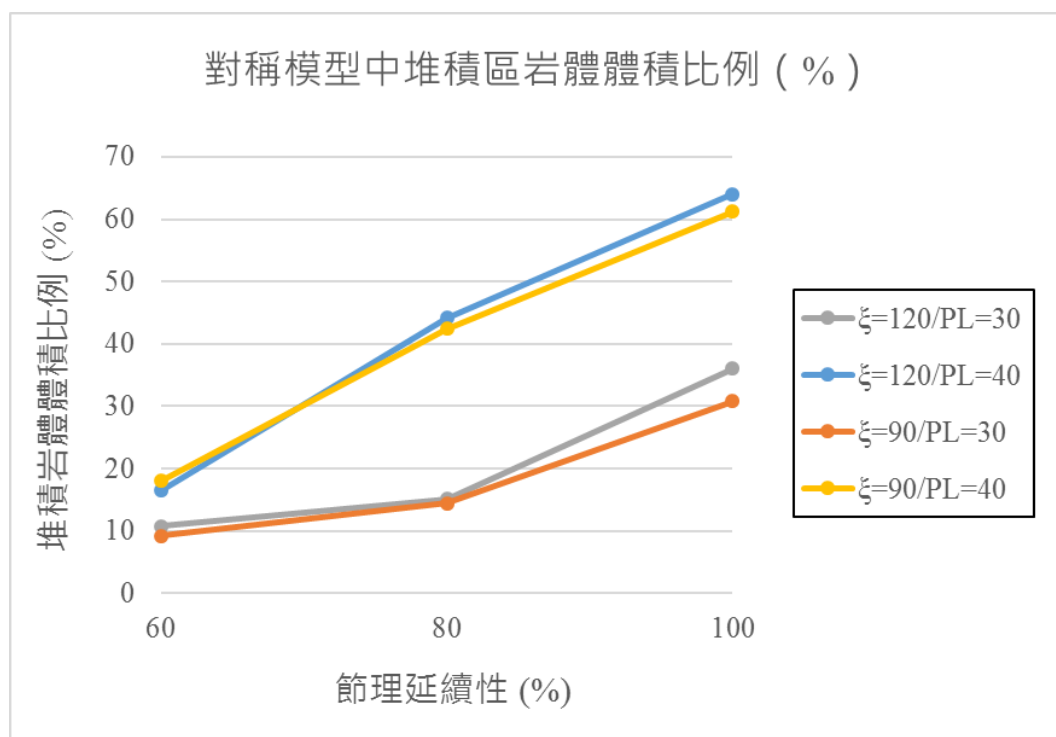


圖 6.7 對稱模型中堆積區岩塊體積比例



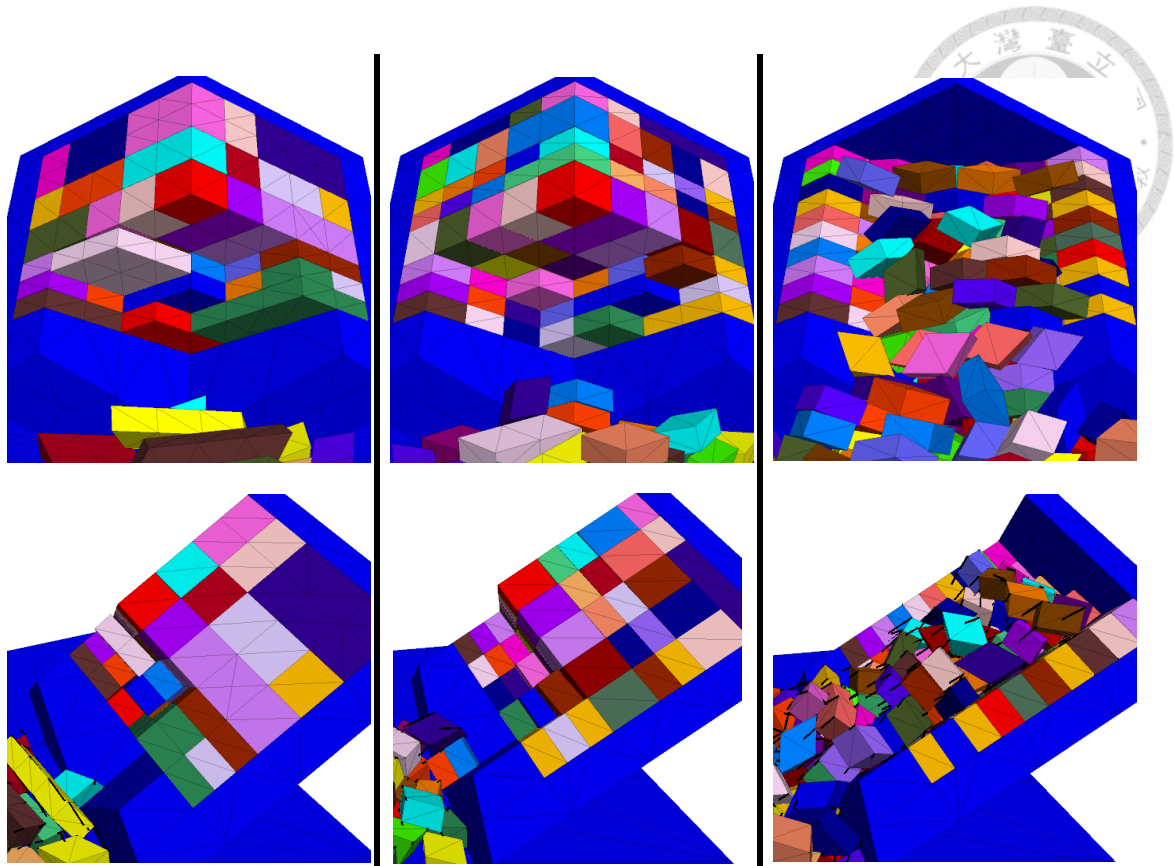


圖 6.8  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ ， $P=60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較

表 6.1  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計

Persistence	Sliding	Toppling	Stop	Total
60%	6 (9%)	11 (17%)	47 (73%)	64
80%	12 (9%)	19 (14%)	107 (78%)	138
100%	47 (19%)	45 (18%)	158 (63%)	250

單位：塊（佔總塊數百分比）



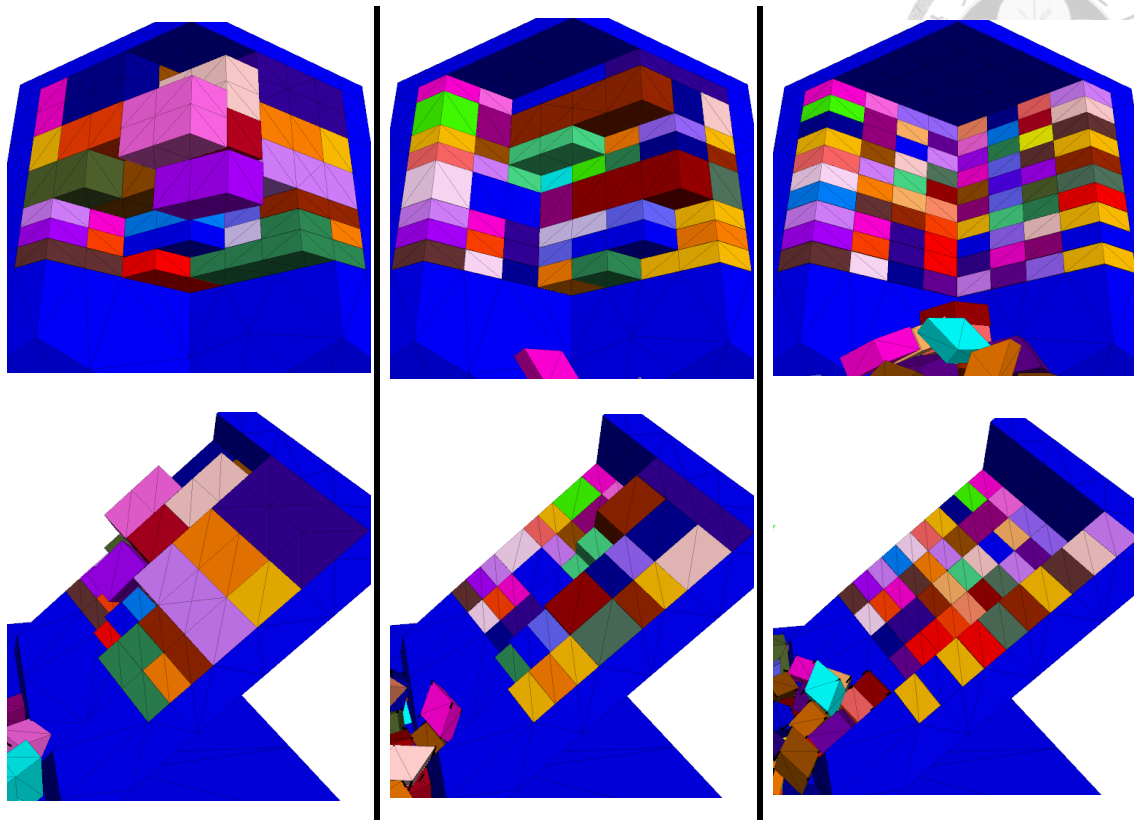


圖 6.9  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ ， $P=60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較

表 6.2  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計

Persistence	Sliding	Toppling	Stop	Total
60%	12 (19%)	14 (22%)	38 (59%)	64
80%	30 (22%)	42 (30%)	66 (48%)	138
100%	41 (16%)	122 (49%)	87 (35%)	250

單位：塊（佔總塊數百分比）

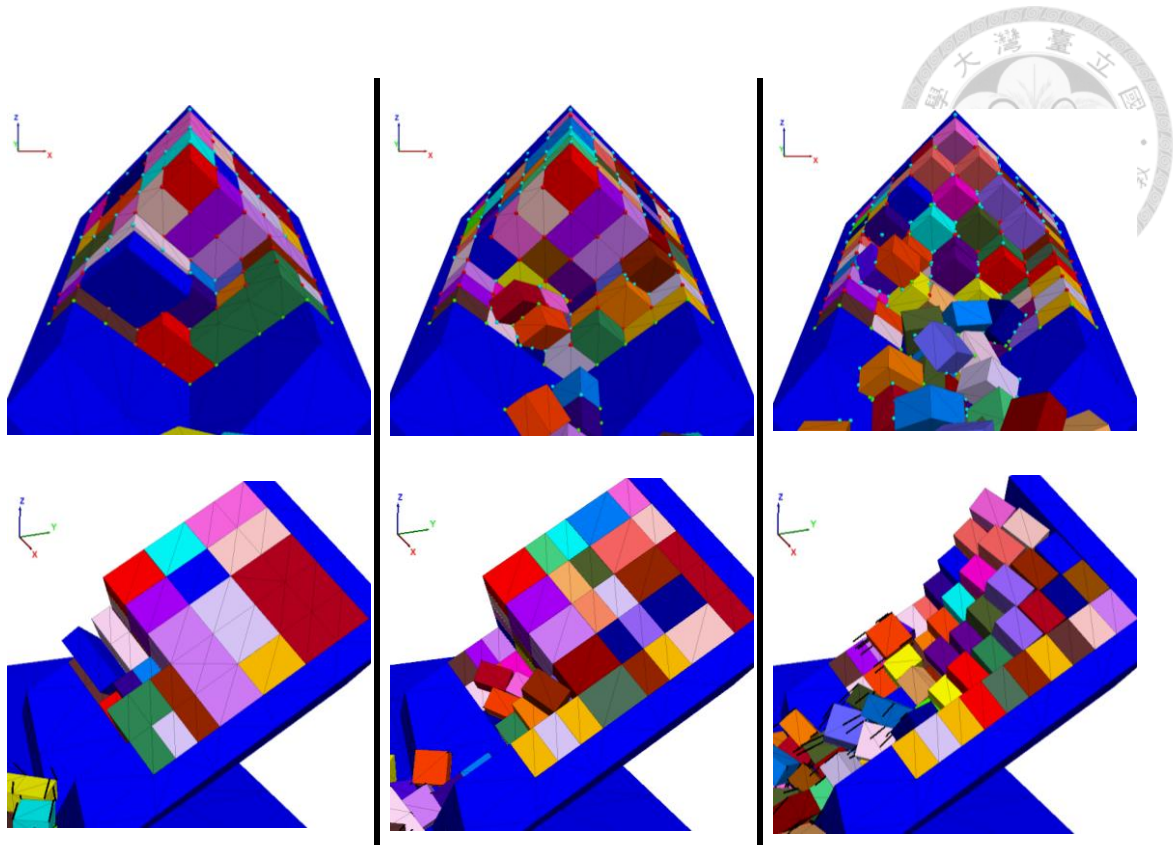


圖 6.10  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ ， $P=60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較

表 6.3  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計

Persistence	Sliding	Toppling	Stop	Total
60%	4 (6%)	12 (19%)	48 (75%)	64
80%	5 (4%)	24 (17%)	109 (79%)	138
100%	26 (10%)	27 (11%)	197 (79%)	250

單位：塊（佔總塊數百分比）

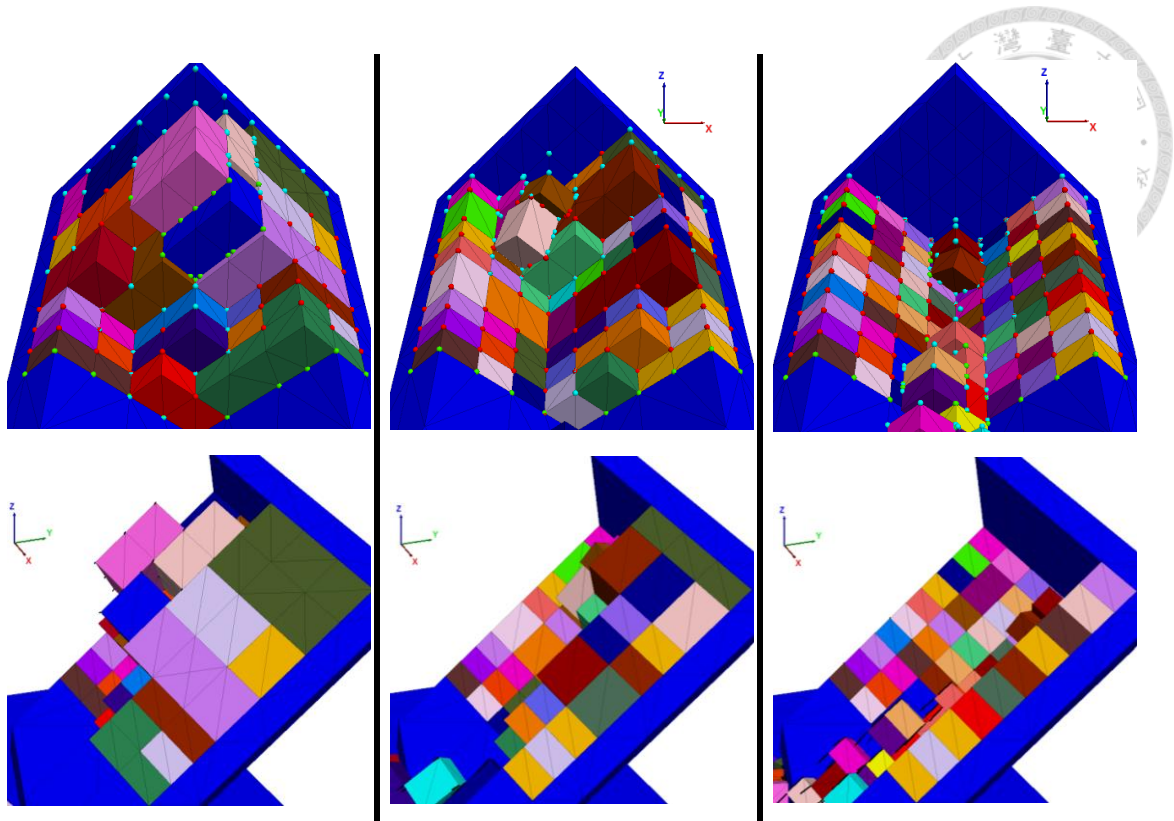


圖 6.11  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ ， $P=60^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $100^\circ$ 之模擬結果比較

表 6.4  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ ，各延續性模型之初始階段塊體運動機制統計

Persistence	Sliding	Toppling	Stop	Total
60%	2 (3%)	22 (34%)	40 (63%)	64
80%	20 (14%)	40 (29%)	78 (57%)	138
100%	41 (16%)	85 (34%)	124 (50%)	250

單位：塊（佔總塊數百分比）



### 6.2.3 偏移角度之影響

在兩不連續面交角 (Dihedral Angle) 為  $120^\circ$  及  $90^\circ$  之兩種模型中，固定兩不連續面交線傾伏角角度 (Plunge) 為  $30^\circ$  及  $40^\circ$ ，節理的整體延續性為 80% 之條件下，改變節理的偏移角度 ( $\alpha$ )，分別以 <sup>(1)</sup> 交角  $120^\circ : 0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ ；<sup>(2)</sup> 交角  $90^\circ : 0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  之模型進行比較，從而探討當兩節理在不對稱的情況下，對楔型岩體破壞機制之影響 (圖 6.12~圖 6.15)。

當  $\alpha$  角角度愈大時，意謂著整個模型沿著交線旋轉角度愈大，其中一道節理會愈趨平緩，另一道節理則會愈陡。若以塊體運動初始階段進行比較(表 6.5~表 6.8)，在  $\xi = 120^\circ$  及  $90^\circ$ ，Plunge =  $30^\circ$  時之模型中，以翻覆機制運動的塊體數在  $\alpha$  角度提高至  $10^\circ$  及  $15^\circ$  時皆小幅度下降，繼續提升到  $20^\circ$  及  $30^\circ$  時，才会有大幅度提升；而在 Plunge =  $40^\circ$  時，以翻覆機制運動的塊體數，則隨著  $\alpha$  角度提高而隨之上升。

若以最後崩落而形成堆積區之岩塊體積來比較可發現 (圖 6.16、圖 6.17)，在  $\xi = 90^\circ$ 、Plunge =  $30^\circ$  的模型中，當  $\alpha$  角度提高到  $20^\circ$  時，其崩落下來的堆積岩塊體積會大幅提升；同樣地，在  $\xi = 120^\circ$ 、Plunge =  $30^\circ$  的模型中，當  $\alpha$  角度提高到  $30^\circ$  時之崩積量體亦發生大幅提升。而 Plunge =  $40^\circ$  的模型中，不管  $\xi = 120^\circ$  或  $90^\circ$  的模型在不同地  $\alpha$  角度時，其被切割的塊體皆盡數崩落，故其堆積區岩塊體積大致相同。若從第 2.2 章中，Hoek and Bray 所提出之安全係數公式來看， $\beta$  角角度愈小 (即此處  $\alpha$  角角度愈大)，其安全係數的確是會降低，也藉此印證了模型中  $\alpha$  角度對楔形岩體的影響。

同時於模擬結束後紀錄模型中崩落的塊體質心，從而計算堆積區的分布情形，將兩節理面交線底部視為原點，與堆積區的中心連線並計算堆積區與交線方向 (Y 軸) 之夾角角度 ( $\delta$ ) (圖 6.18~圖 6.29)。我們可以發現在同樣  $\xi$  及 Plunge 角度時，隨著  $\alpha$  角度提升，其堆積區之偏移角度 ( $\delta$ ) 亦會大幅度增加；而若以同樣  $\xi$  及  $\alpha$  角度之模型進行比較，當 Plunge 角度提升時，堆積區之偏移角度 ( $\delta$ ) 則普遍會相對下降 (圖 6.30、圖 6.31)。

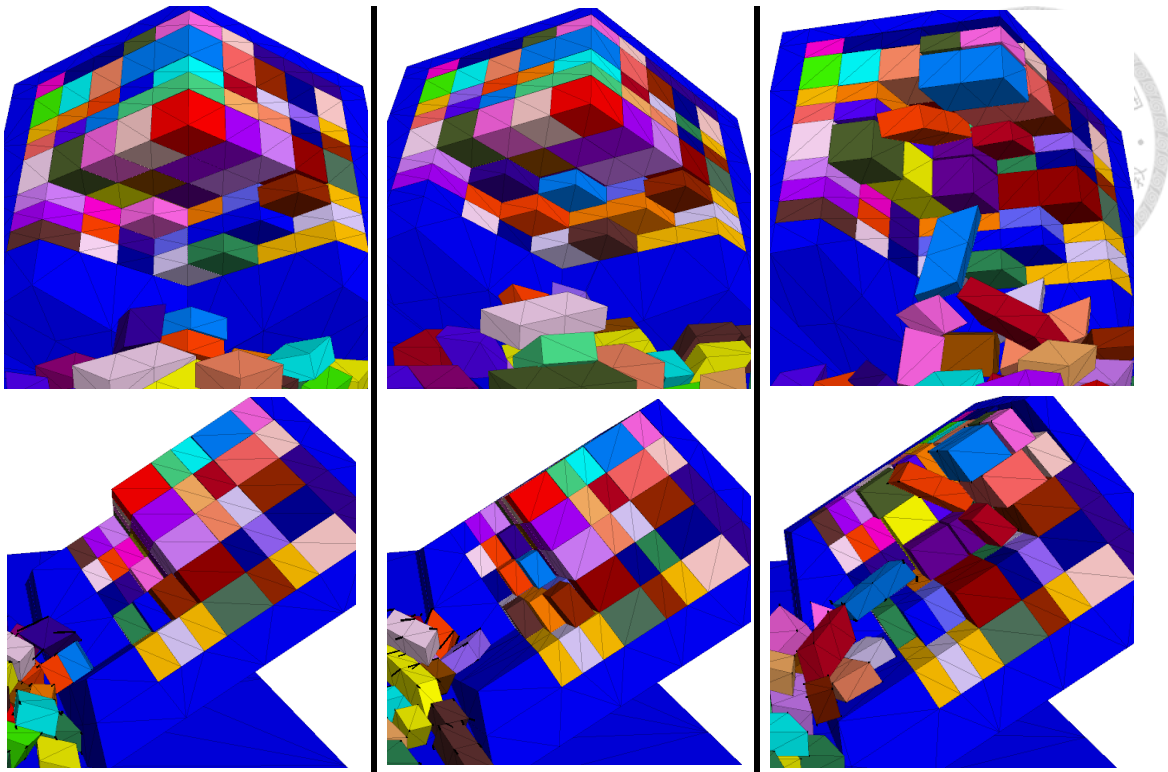


圖 6.12  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ， $\alpha$ 分別為  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 之比較

表 6.5  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計

$\alpha$	Sliding	Toppling	Stop	Total
$0^\circ$	12 (9%)	19 (14%)	107 (78%)	138
$10^\circ$	11 (8%)	14 (10%)	113 (82%)	138
$20^\circ$	15 (11%)	30 (22%)	93 (67%)	138

單位：塊（佔總塊數百分比）



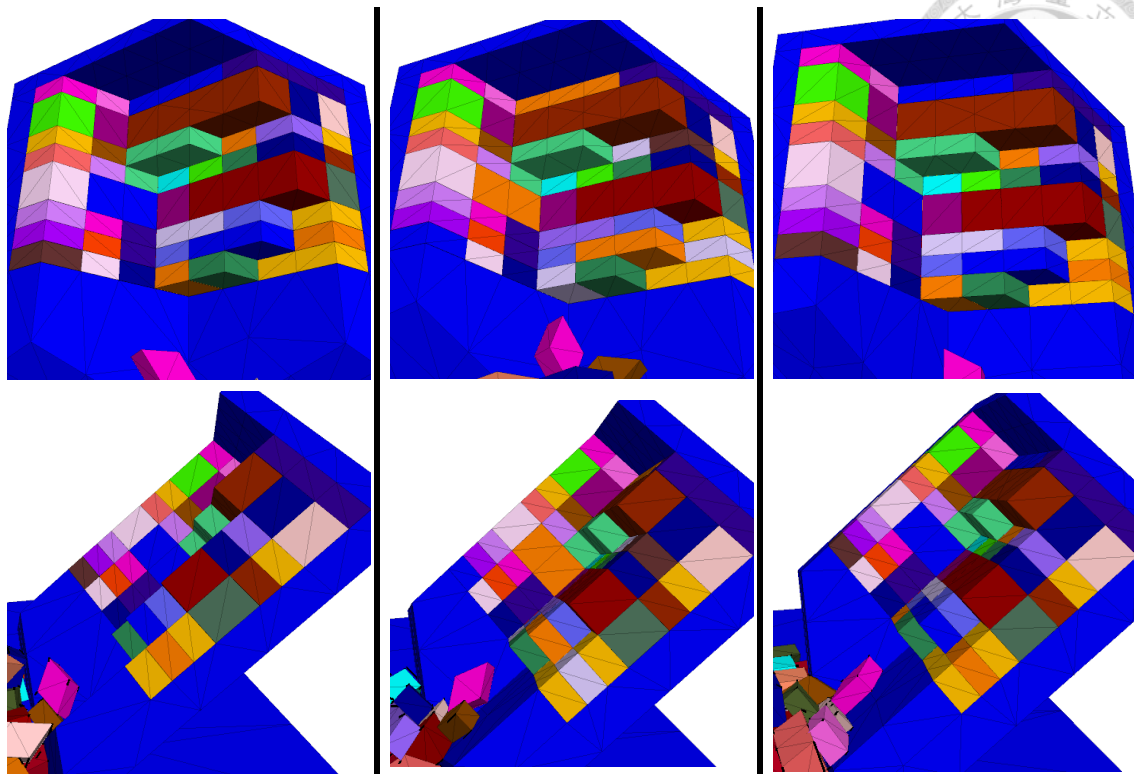


圖 6.13  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ， $\alpha$ 分別為  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 之比較

表 6.6  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計

$\alpha$	Sliding	Toppling	Stop	Total
$0^\circ$	30 (22%)	42 (30%)	66 (48%)	138
$10^\circ$	18 (13%)	51 (37%)	69 (50%)	138
$20^\circ$	9 (7%)	60 (43%)	69 (50%)	138

單位：塊（佔總塊數百分比）

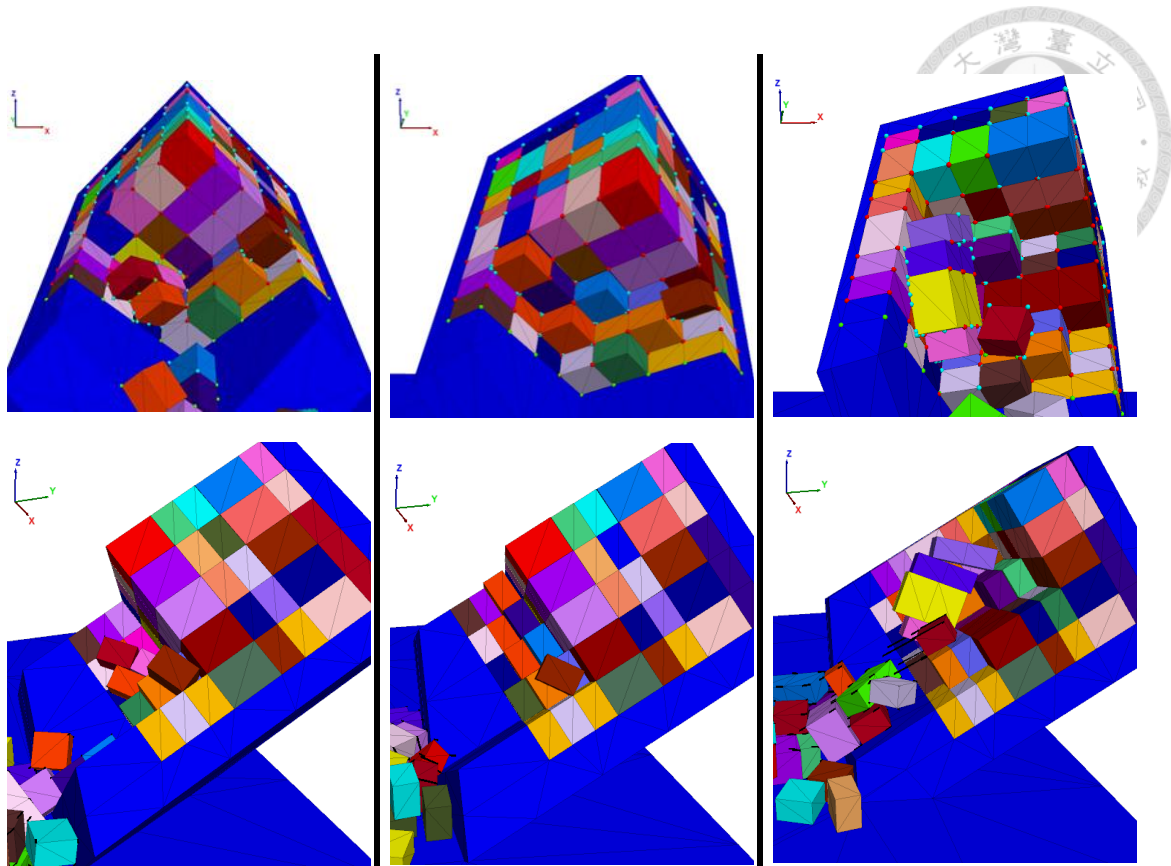


圖 6.14  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ， $\alpha$ 分別為  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 之比較

表 6.7  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計

$\alpha$	Sliding	Toppling	Stop	Total
$0^\circ$	5 (4%)	24 (17%)	109 (79%)	138
$15^\circ$	12 (9%)	16 (12%)	110 (80%)	138
$30^\circ$	9 (7%)	42 (30%)	87 (63%)	138

單位：塊（佔總塊數百分比）

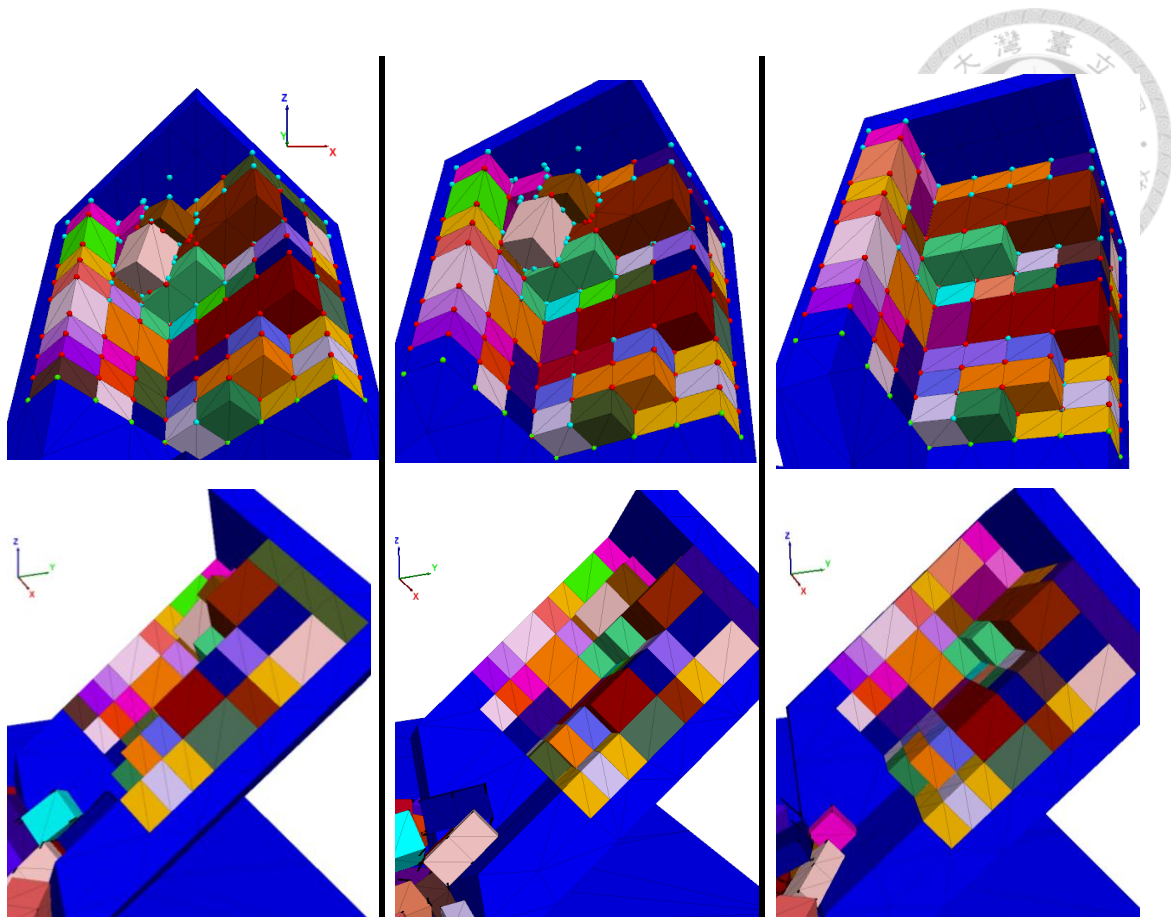


圖 6.15  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ， $\alpha$ 分別為  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 之比較

表 6.8  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ ，各模型之初始階段塊體運動機制統計

$\alpha$	Sliding	Toppling	Stop	Total
$0^\circ$	20 (14%)	40 (29%)	78 (57%)	138
$15^\circ$	23 (17%)	43 (31%)	72 (52%)	138
$30^\circ$	7 (5%)	62 (45%)	69 (50%)	138

單位：塊（佔總塊數百分比）

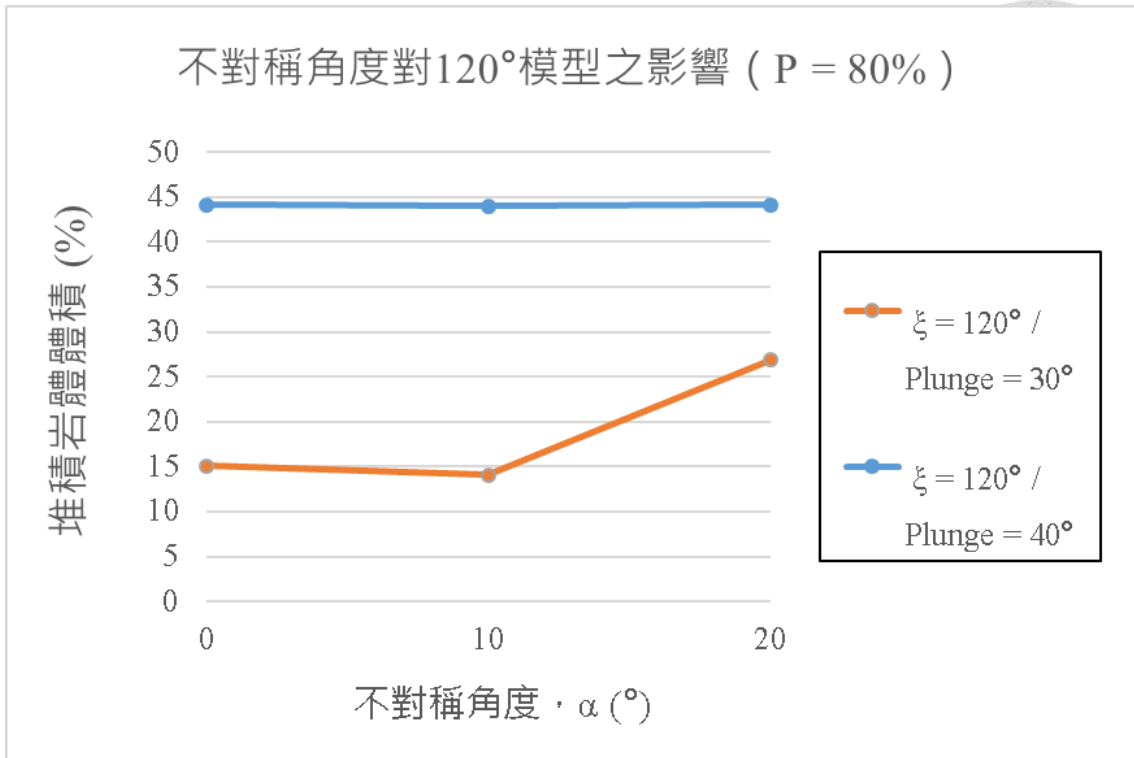


圖 6.16 夾角 120°模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例

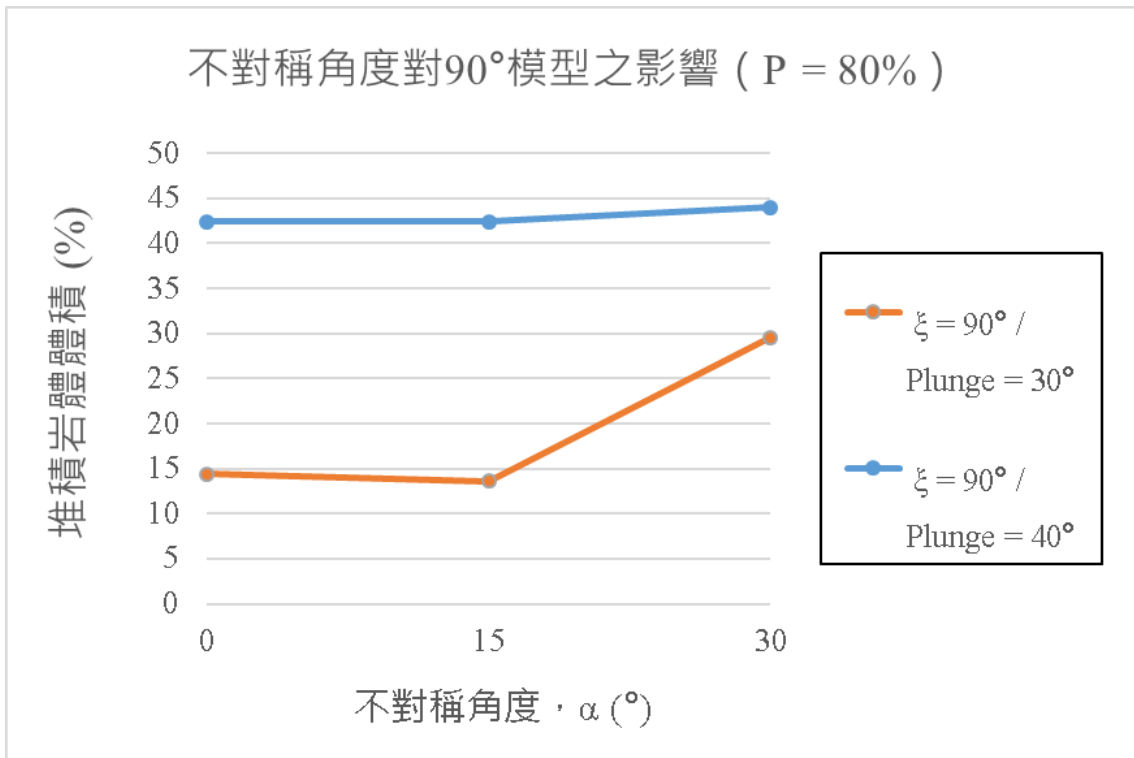


圖 6.17 夾角 90°模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例



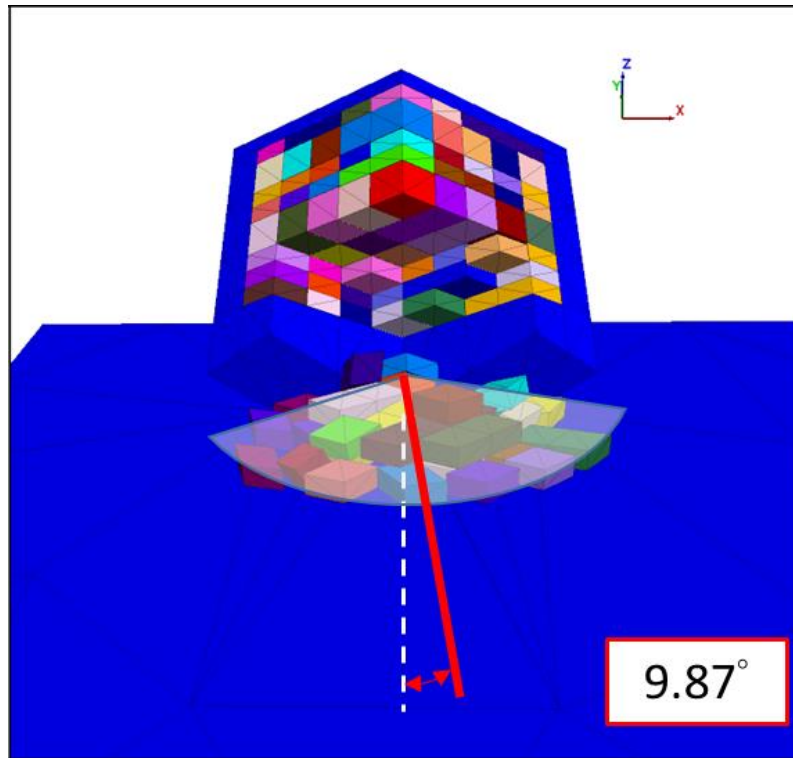


圖 6.18  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

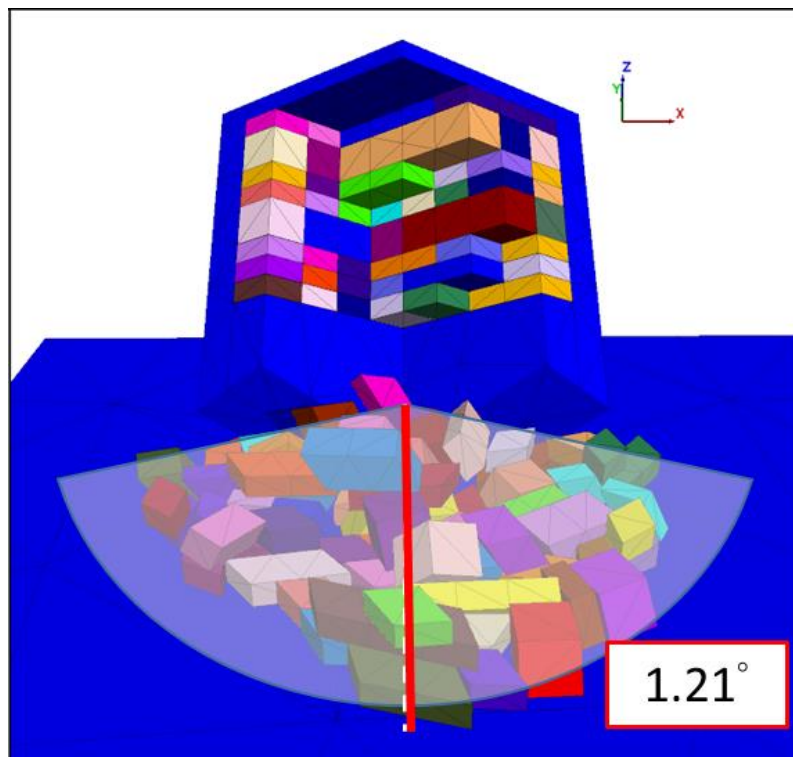


圖 6.19  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

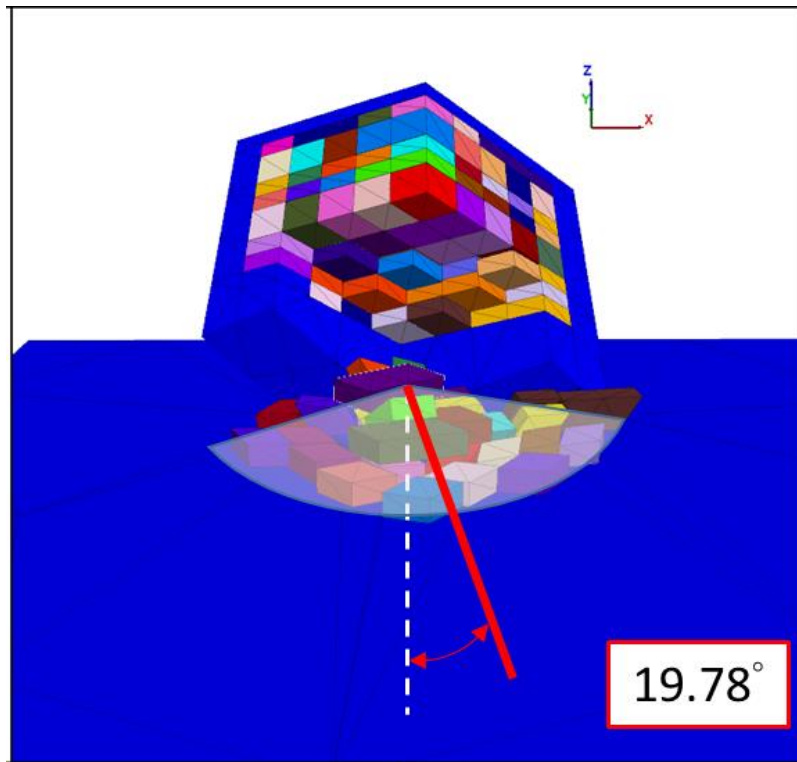


圖 6.20  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80\%$ 、 $\alpha=10^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

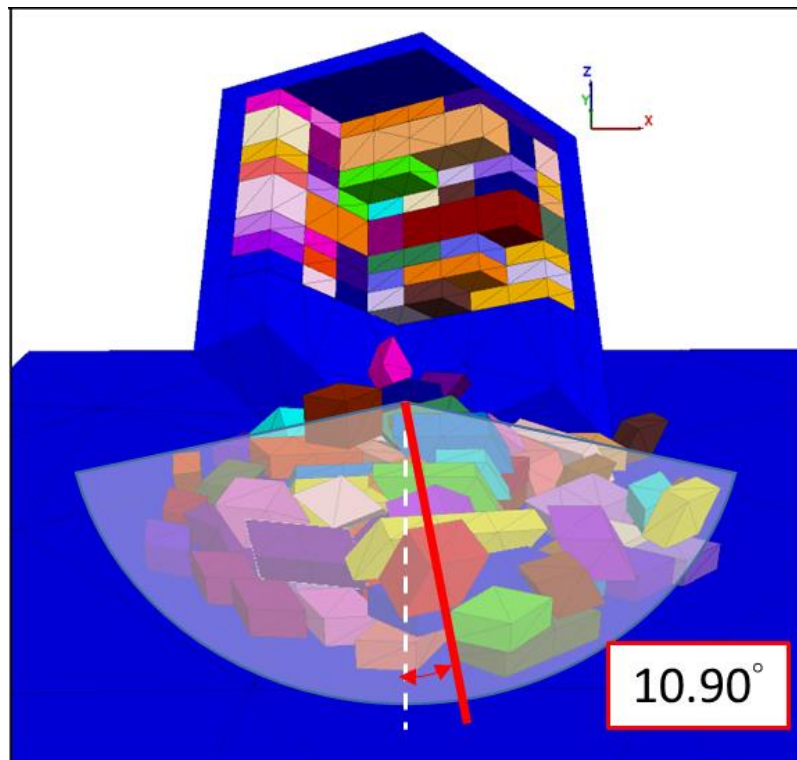


圖 6.21  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80\%$ 、 $\alpha=10^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

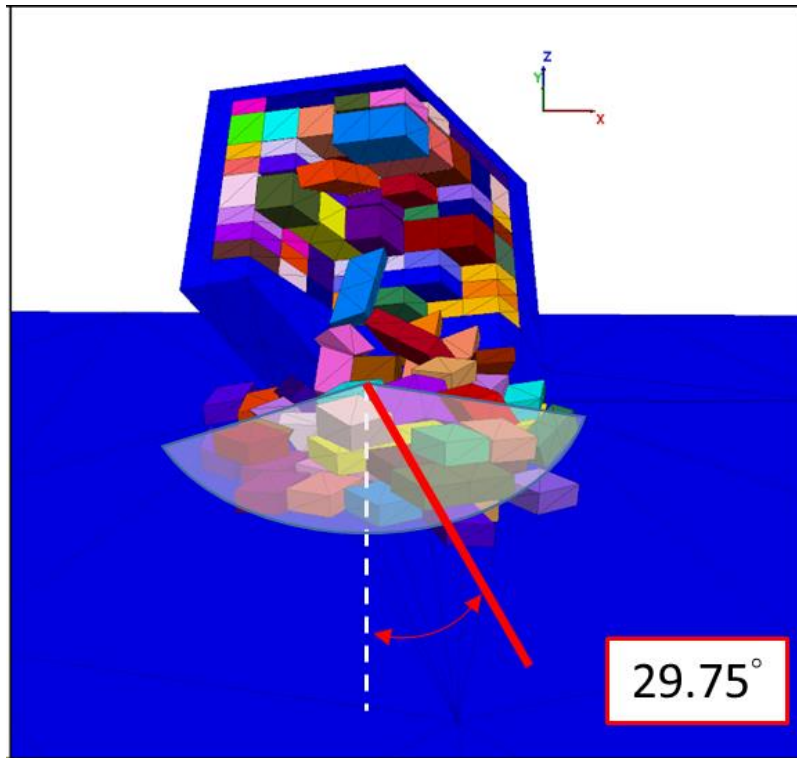


圖 6.22  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=20^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

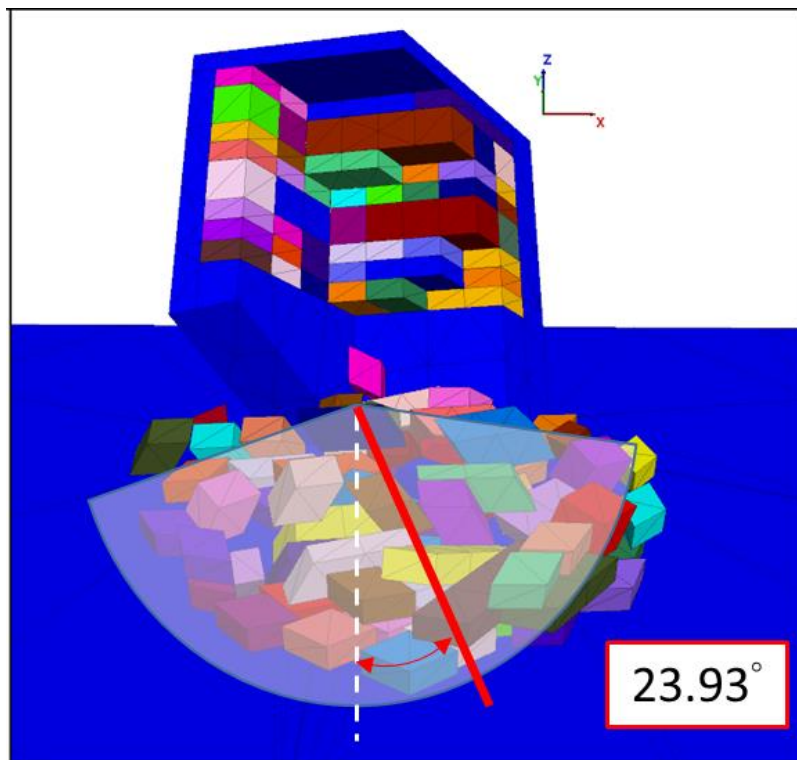


圖 6.23  $\xi=120^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=20^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

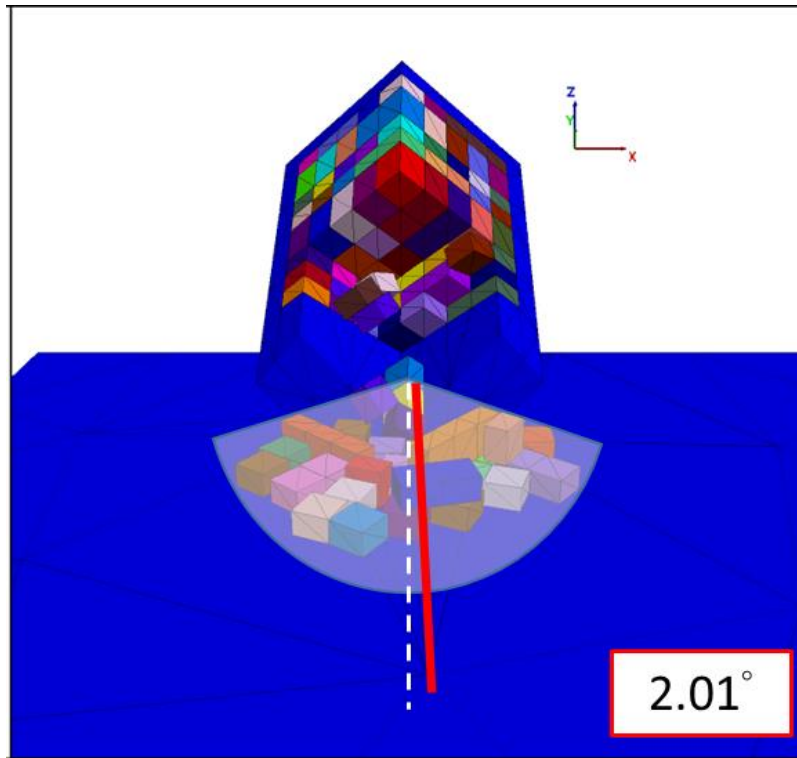


圖 6.24  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

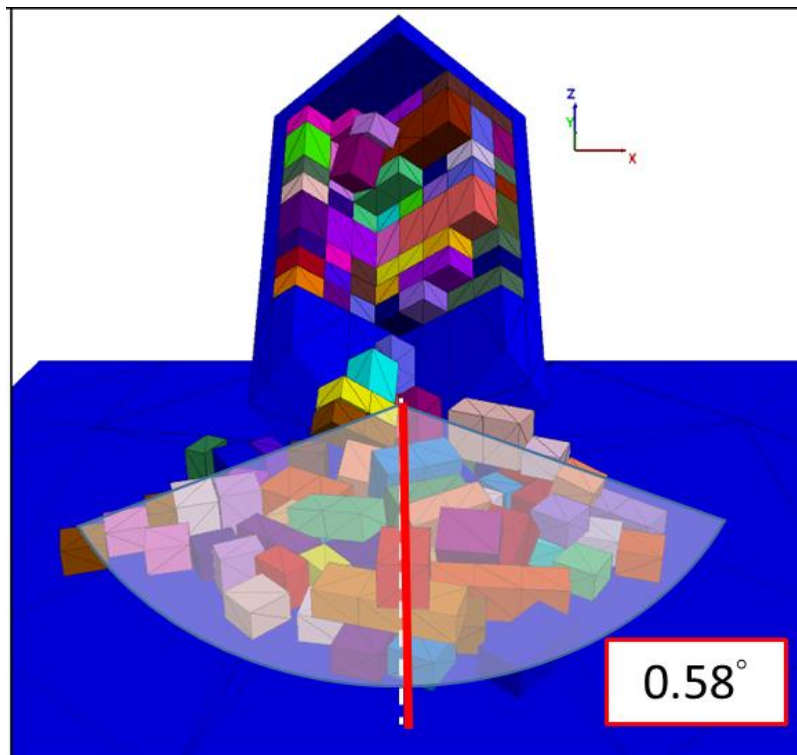


圖 6.25  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



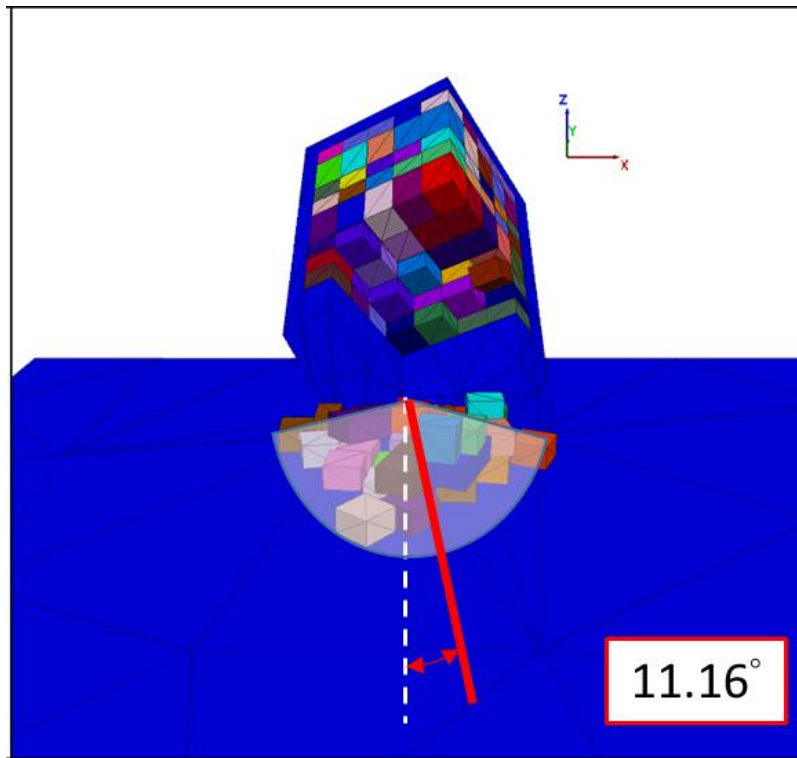


圖 6.26  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

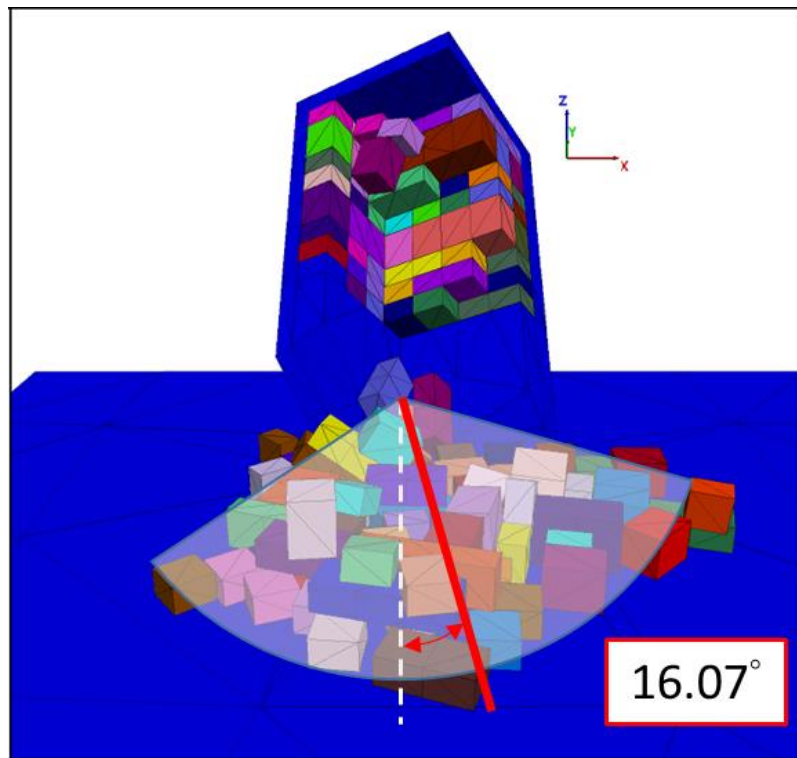


圖 6.27  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

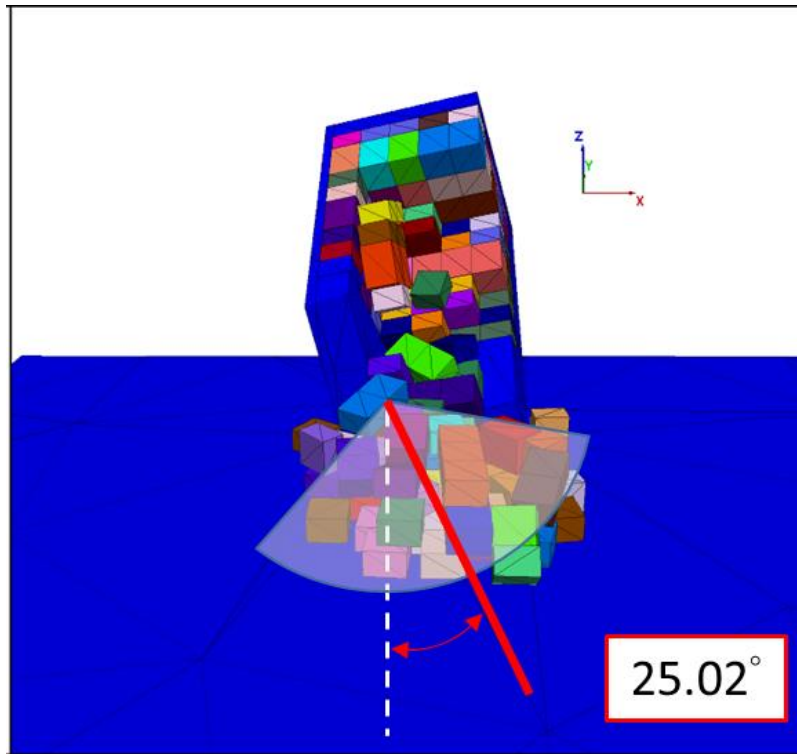


圖 6.28  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $30^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

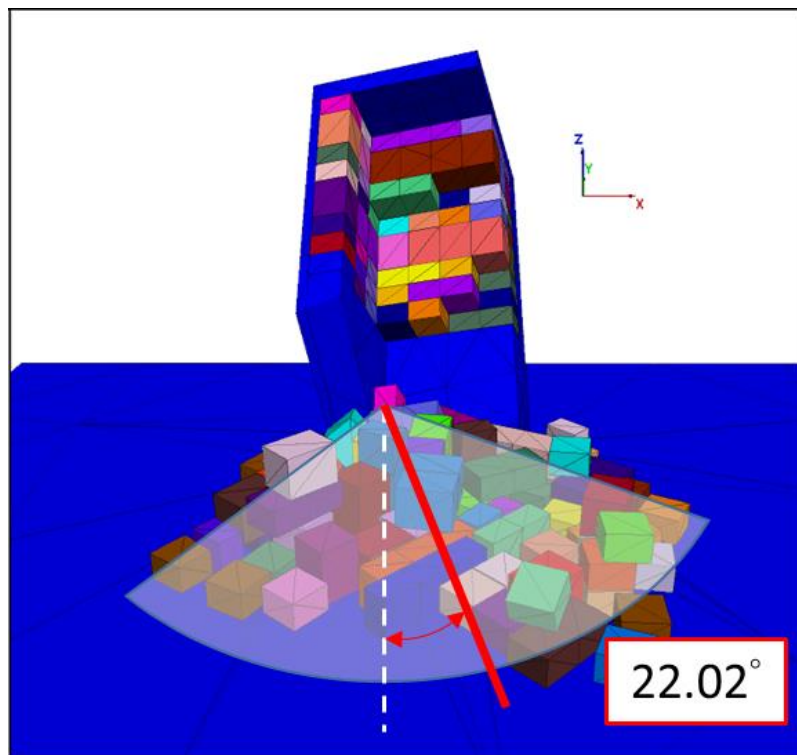


圖 6.29  $\xi=90^\circ$ 、Plunge= $40^\circ$ 、 $P=80^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

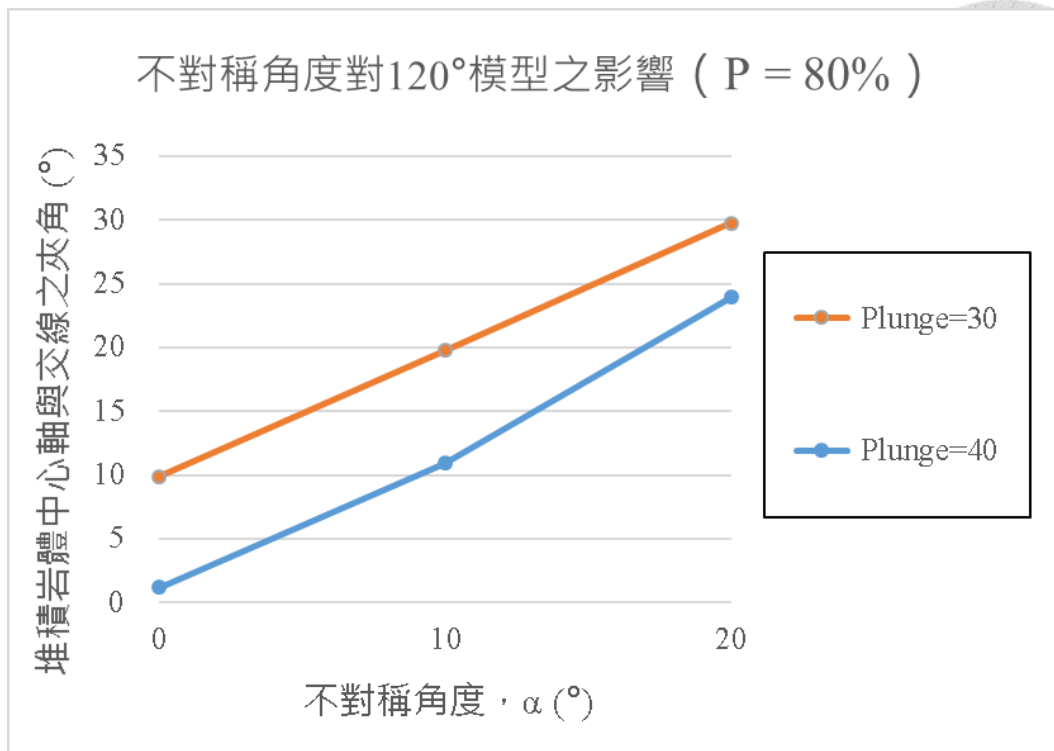


圖 6.30 夾角 120°模型中不同 $\alpha$ 角度下之堆積區夾角角度 ( $\delta$ )

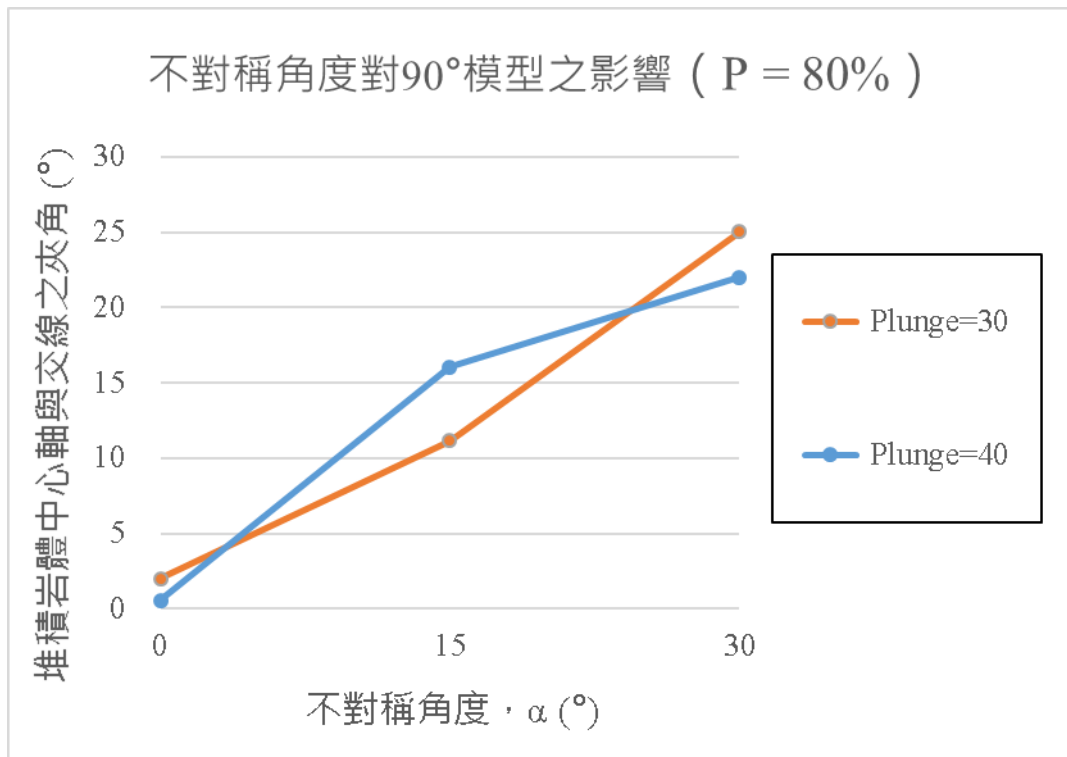


圖 6.31 夾角 90°模型中不同 $\alpha$ 角度下之堆積區夾角角度 ( $\delta$ )



## 6.3 小結

### ➤ 節理延續性 (Persistence)

6. 隨著模型之延續性提升，因鬆動而落下的塊體數量會提升，但同時會使單一楔形塊體之體積下降，且塊體間之互鎖機制也會減少。
7. 節理岩體之交線傾伏角較低的條件下，塊體尚無法順利產生滑動，只會以翻落的形式產生破壞，故延續性 60%及 80%之模型，只有前三排因坡體倒懸，且被節理切穿周圍的塊體有翻落的情形。
8. 當楔形岩體被節理組完全切割，延續性達到 100°時，即使在傾角只有 30°的條件下，全部的塊體仍都趨於以向下翻落的方式產生破壞。

### ➤ 兩不連續面交角 (Dihedral Angle)

9. 在交線傾伏角角度較低的條件下，120°及 90°模型在各個延續性的情況下，發生崩滑的塊體大多相同；在交線傾伏角角度達到 40°時，前排之塊體一旦翻落，後方的岩體會因摩擦力不足而開始下滑，但在節理面交角愈小時，其塊體受到之圍束力愈大，使整體的安全性因此升高。

### ➤ 偏移角度 ( $\alpha$ )

10. 當 $\alpha$ 角角度愈高時，意謂著整個模型沿著交線旋轉角度愈大，其中一道節理也會愈趨平緩，會使楔形岩體更容易發生破壞，且趨向於沿著較緩的一組節理產生翻覆機制，而非同時受兩組節理影響。
11. Plunge=40°時，以翻覆機制運動的塊體數，隨著 $\alpha$ 角度提高而明顯上升
12. 同樣 $\xi$ 及 Plunge 角度時，隨著 $\alpha$ 角度提升，其堆積區之偏移角度 ( $\delta$ ) 會大幅度增加；同樣 $\xi$ 及 $\alpha$ 角度時，當 Plunge 角度提升時，堆積區之偏移角度 ( $\delta$ ) 則相對下降



## 第七章 現地案例應用



本章將透過第四章之調查方法，利用攝影測量學建立現地倒懸邊坡之三維點雲模型，以及應用第六章之數值模擬成果歸納，以 3DEC 模擬南雅里台 2 線 82K 處邊坡案例，探討不同節理延續性下對楔形岩體形成範圍與塊體穩定性之影響，並試著了解節理岩體潛在的破壞機制。

### 7.1 南雅案例邊坡數值模型建置成果

利用第四章所建立的南雅案例邊坡之點雲模型，便可以於 3DEC 中建置案例區之 DSM，其中因該邊坡為一坡面面向北方、陡峭之倒懸邊坡，傳統以 XY 座標上之高程值製作模型的方式無法表達其崖壁上的地形，故本研究將點雲模型產製出之三角網格座標，轉換成投影至 XZ 平面，以各三角網格中之 Y 值作為立面之高程，進而順利建置該邊坡之數值模型（圖 7.1）。

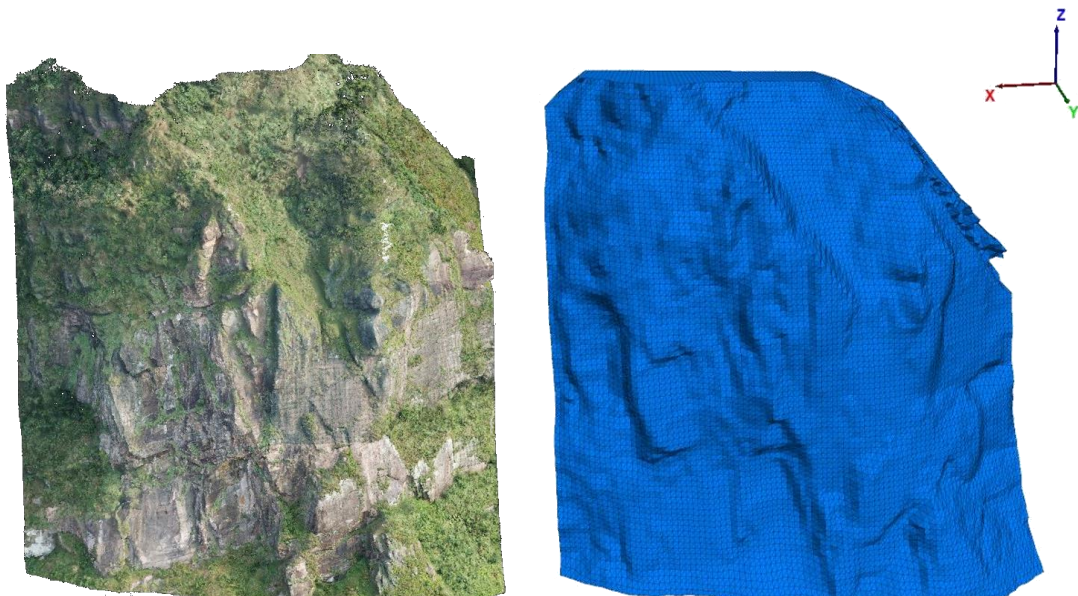


圖 7.1 利用南雅地區產製之點雲於 3DEC 中建立倒懸邊坡之數值模型

延續第四章之現地調查結果，依據圖 4.8 所整理出的層面以及三組節理之位態，於 3DEC 中設置相對應之不連續面。模擬結果的呈現，則會以三維的位移分布圖，以及縱切過圖 4.5 分區中之 D 區、F 區，沿著兩道主要節理的交線方向之剖面圖，以顯示楔形岩體的位移及速度向量（圖 7.3）。

不連續面建置方面，層面之性質設定為延續性 100%，並依照空拍照片及點雲模型中所觀察到之位置放入邊坡模型中，其中包含了兩層較密集的層面出露帶，以 2 公尺為間距、一組個數為 4 道之層面設置，最後再以平均 12 公尺之間距均勻截切整個坡體，如下圖中之黑色線型；節理面位態判釋之結果中，最具有優勢之節理組—Joint 1，經調查後判定其在邊坡中為類似解壓節理的角色，故影響範圍應只會觸及坡體較表層的部分，因此在設置時會以 2 公尺為間距、延續性 50%，平均分布在岩壁的表層，如下圖中之紅色線型。而會在空間中相交形成楔形破壞之兩組節理組—Joint 2 及 Joint 3，分別以兩道節理設置進模型中，其切割之位置則選定為 D 區及 F 區的左右邊界，其主要原因分別為，D 區是殘留岩體中最具代表性，具有過去發生楔形破壞證據的區域，而 F 區則是經由現地調查及後續影像觀察，目前最有崩落潛勢且具有較大體積之塊體，分別如下圖中之黃色及藍色線型（圖 7.2）。

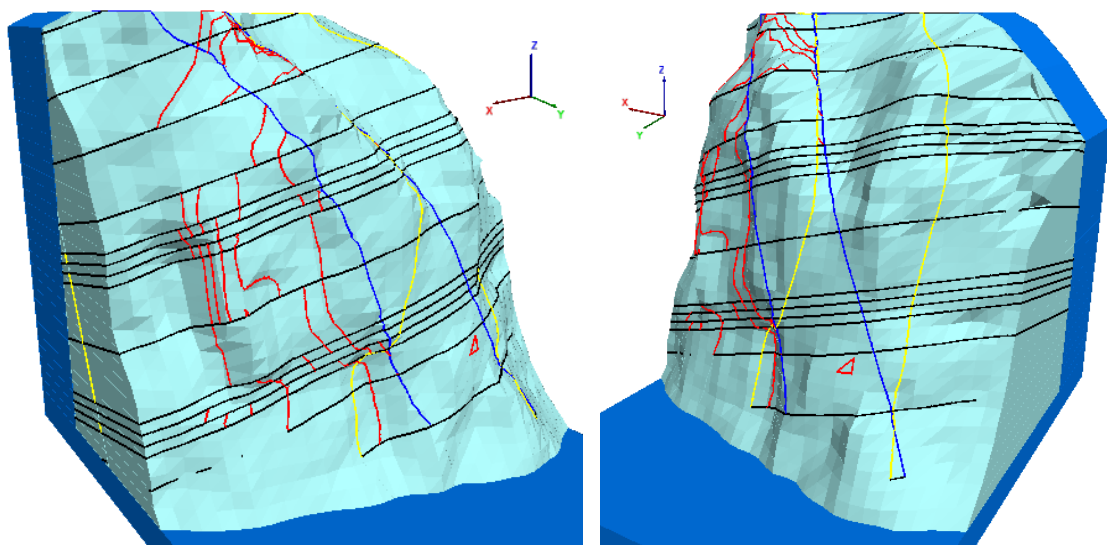


圖 7.2 南雅邊坡之不連續面配置圖：黑-層面、紅-Joint 1、黃-Joint 2、藍-Joint 3

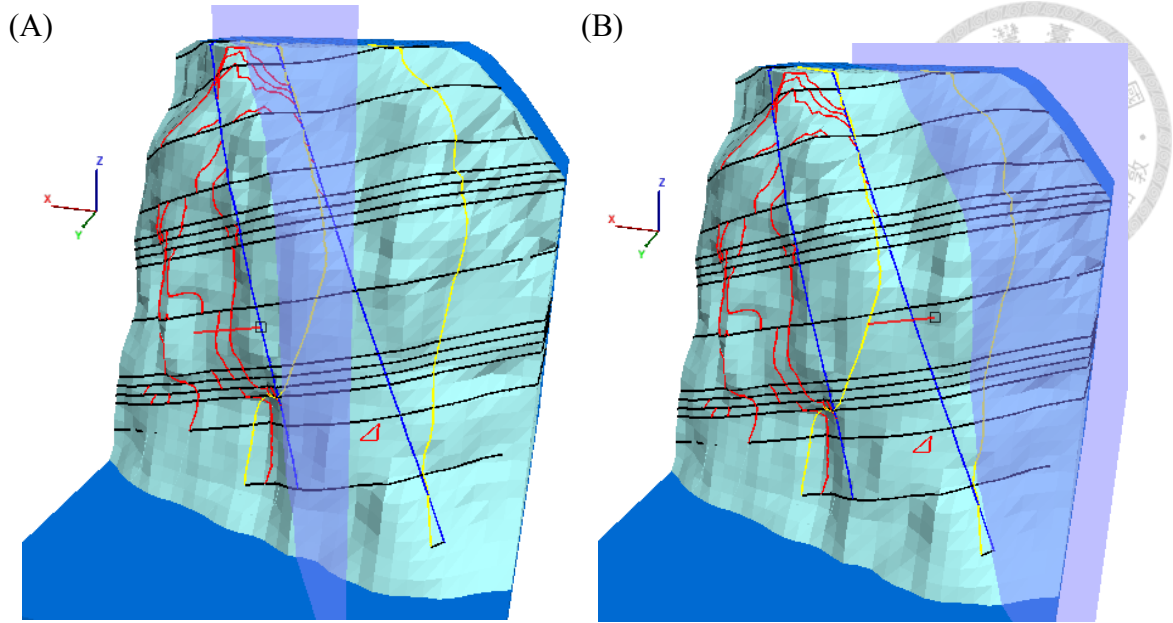


圖 7.3 沿著形成楔形塊體之兩不連續面交線方向之剖面與邊坡之對應位置

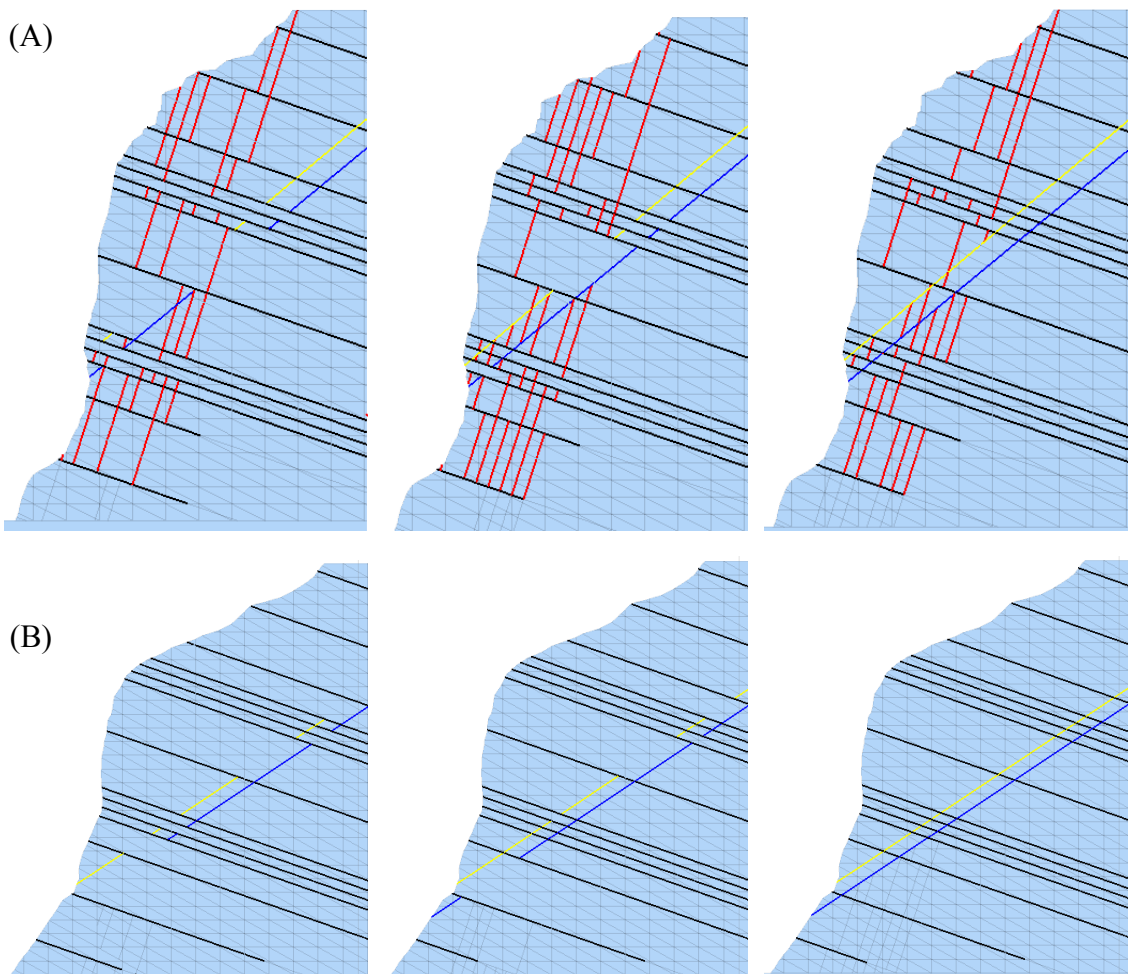


圖 7.4 A、B 剖面之不連續面配置圖（節理延續性分別為 60%、80%、100%）



## 7.2 不同節理延續性之模擬結果

為了詳加探討延續性對於節理岩體發生楔形破壞機制之影響性，故將針對 Joint 1、Joint 2 及 Joint 3 之延續性作變更，同樣以延續性 60%、80% 以及 100% 之模型進行模擬，進而觀察並記錄在不同節理延續性下之崩落面積、影響範圍以及破壞機制。

### 7.2.1 延續性 60%、Joint 1 (n=8) 之模擬結果

經過現地調查發現圖 4.5 中之分區 A、B 及 C 具有發達的 Joint 1 節理組，且對應到圖 4.4 之民國 78 年的歷史災害事件，當時經由調查後所歸納出來的破壞形式中，便具有著平面型破壞以及楔形破壞兩種複合機制，故於模型中左半部加入 Joint 1，並給定節理組數之變數 (n)，探討不同節理密度對此邊坡破壞機制之影響。

於模擬結果中可發現，60% 延續性之模型雖然在具解壓節理的條件下，岩壁整體較不穩定，但因形成楔形岩體之 Joint 2 及 Joint 3 延續性較小，尚未完全截切坡體本身，故只有 C 區大部分岩塊因同時受 Joint 1 截切，產生較多的片狀岩體沿著交線  $i_{12}$ 、 $i_{13}$  或是沿著 Joint 破壞，因此判定此模型中主控之破壞機制為平面型破壞以及高角度的楔形岩體崩落。



但於模型中我們可以發現，被 Joint 2 以及 Joint 3 所截切出來之塊體因節理具有延續性，有些四周已經被切穿的塊體，會在沿著原本交線滑動的過程中，因為底下尚有岩體仍未被弱面切割而遭受阻擋，進而轉向往交線  $i_{1B}$  的方向滑動。故可觀察到在邊坡模型上半部之部分塊體，在前期產生些許位移後，便轉而向邊坡之左側滑出。而剖面 B 中則因未受解壓節理直接影響，而未有岩楔產生大量滑動（圖 7.5 ~ 圖 7.7）。

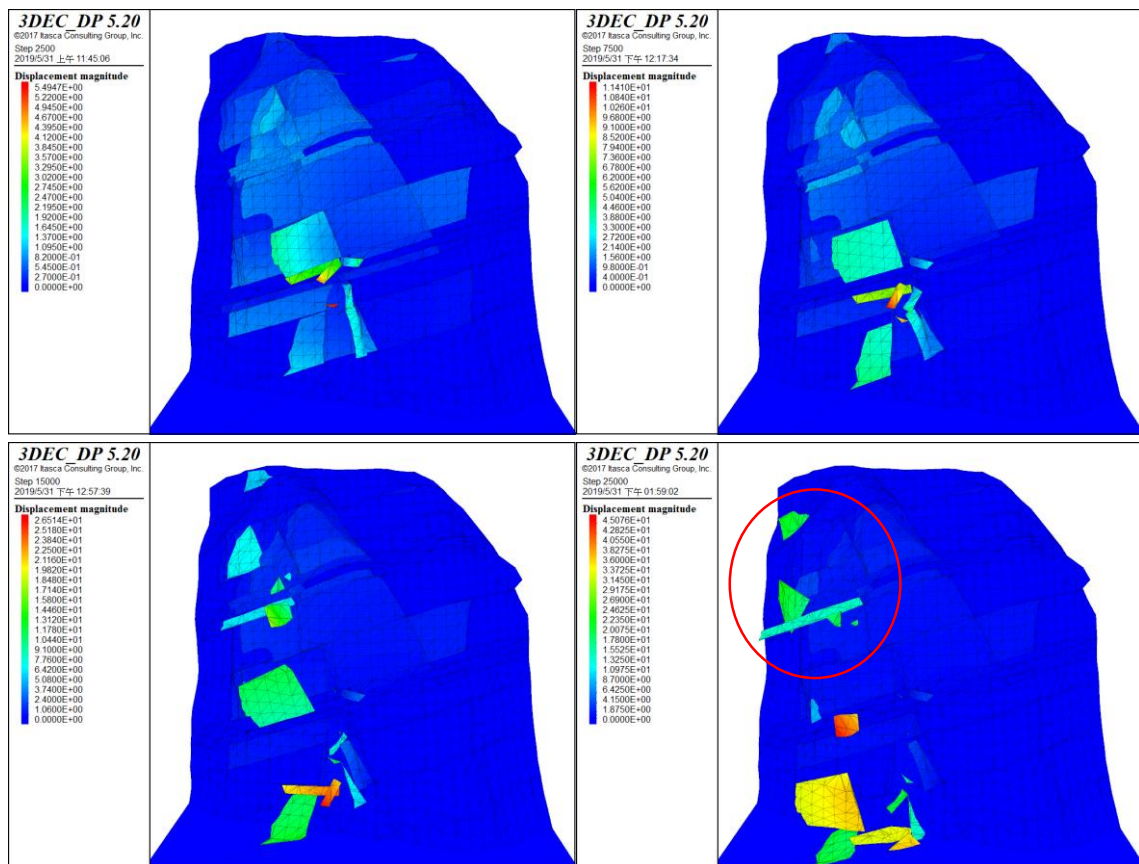


圖 7.5 節理延續性 60%、Joint 1 (n=8) 模型之位移分布圖

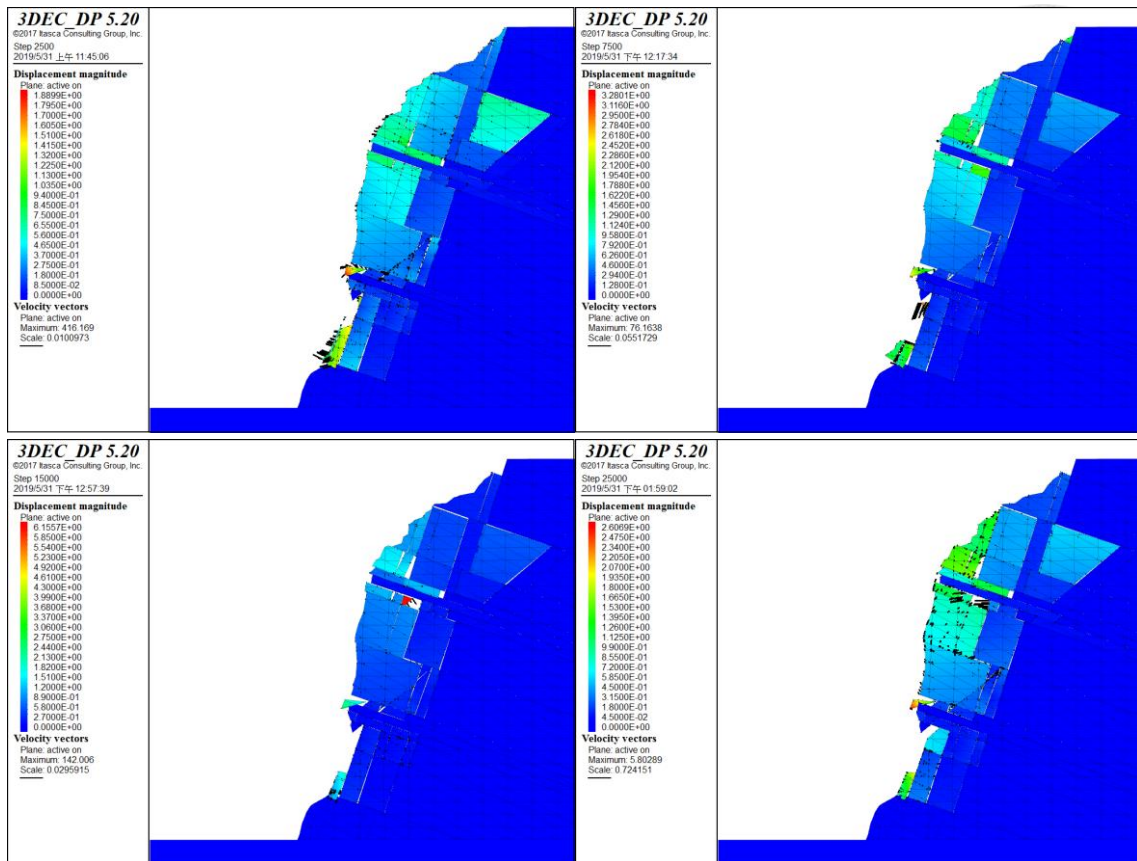


圖 7.6 節理延續性 60%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 A 位移分布圖

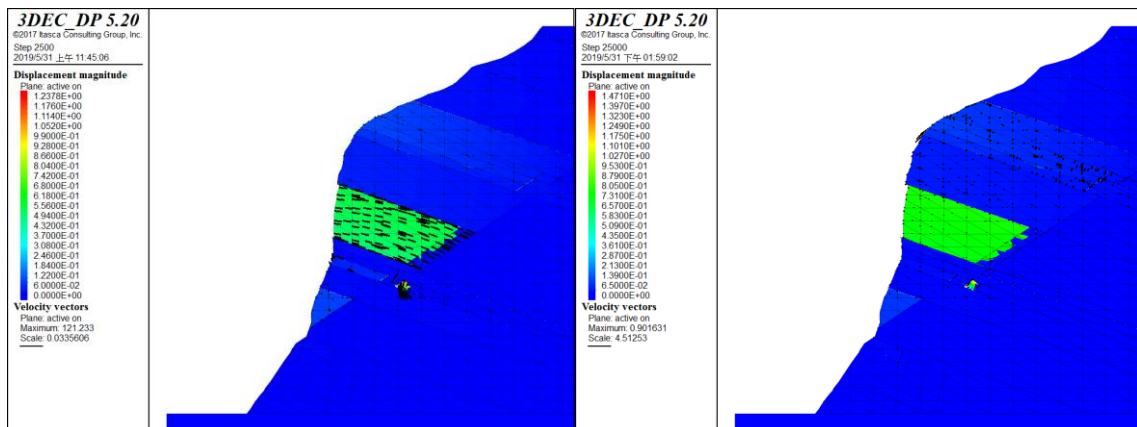


圖 7.7 節理延續性 60%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 B 位移分布圖



### 7.2.2 延續性 80%、Joint 1 (n=8) 之模擬結果

提升各節理之延續性至 80%，可以看到有更多的岩塊因被節理切穿，而形成落石崩落下來，以岩塊之運動路徑來看，同樣可以觀察到在沿著原本交線滑動的過程中，因為底下尚有岩體仍未被弱面切割而遭受阻擋，邊坡模型上半部之部分塊體便轉向交線  $i_{1B}$  的方向滑動，從邊坡之左側滑出 (圖 7.8)。

若觀察剖面 A 之位移分布圖則可發現，由 Joint 2、Joint 3 所截切形成之楔形岩體趾部發生較大位移。(圖 7.9)；而剖面 B 中則仍未有大量位移產生，但可發現其節理面交線上之楔形岩體趾部開始產生較大位移，且中間一段岩層因邊坡剖面 A 位置產生大量岩體崩落，失去左邊之邊界而沿著交線  $i_{1B}$  方向，往邊坡之左側產生些許位移 (圖 7.10)。

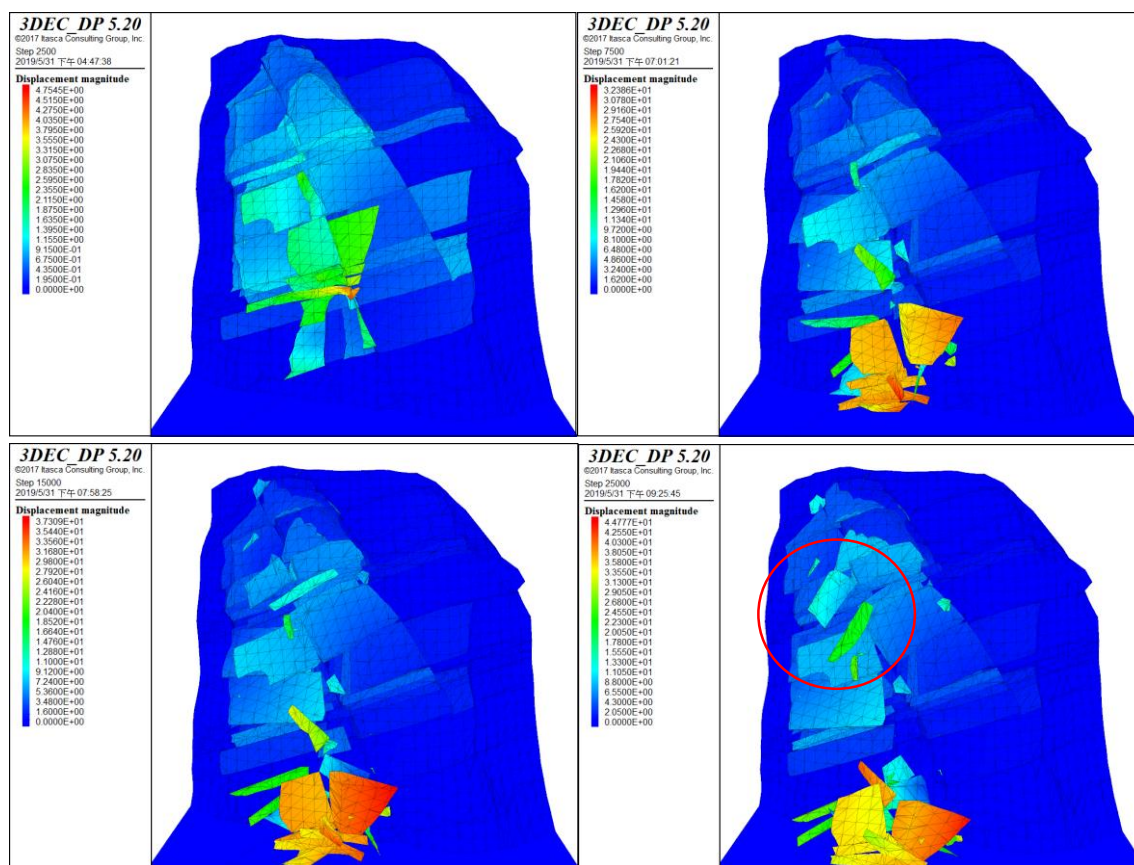


圖 7.8 節理延續性 80%、Joint 1 (n=8) 模型之位移分布圖



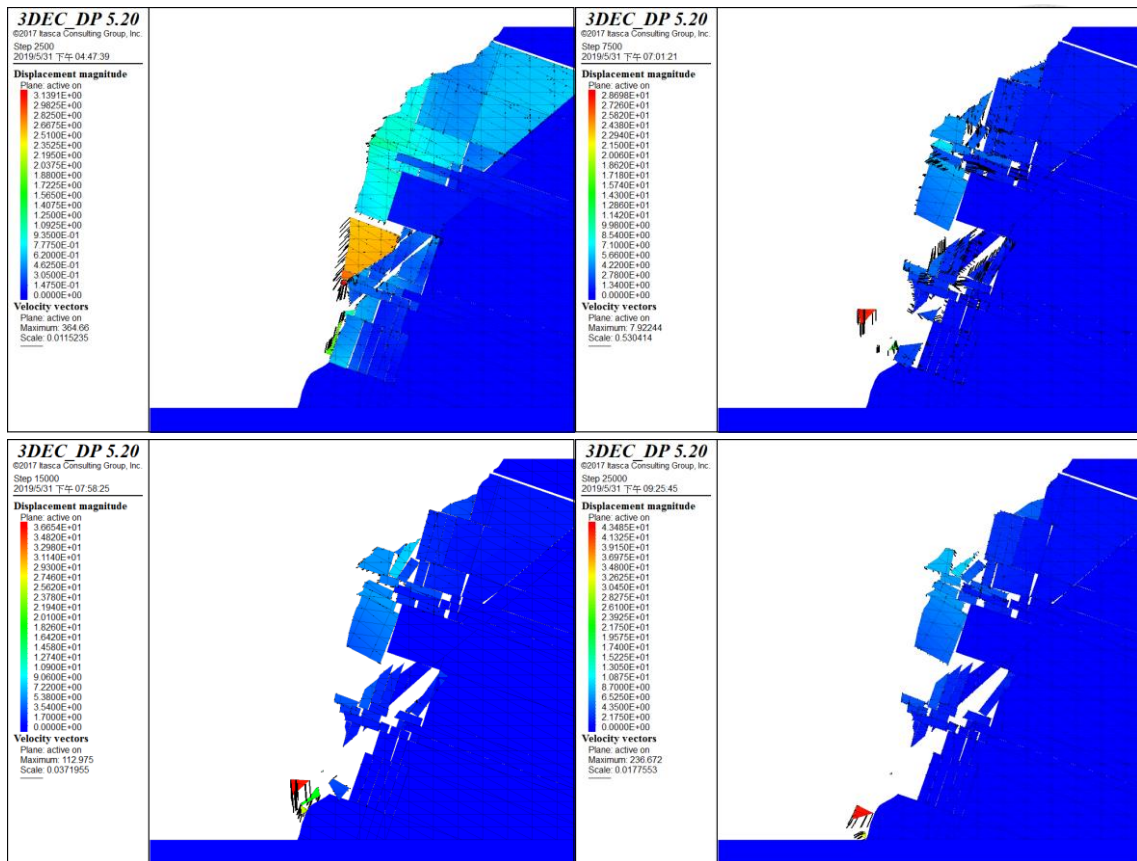


圖 7.9 節理延續性 80%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 A 位移分布圖

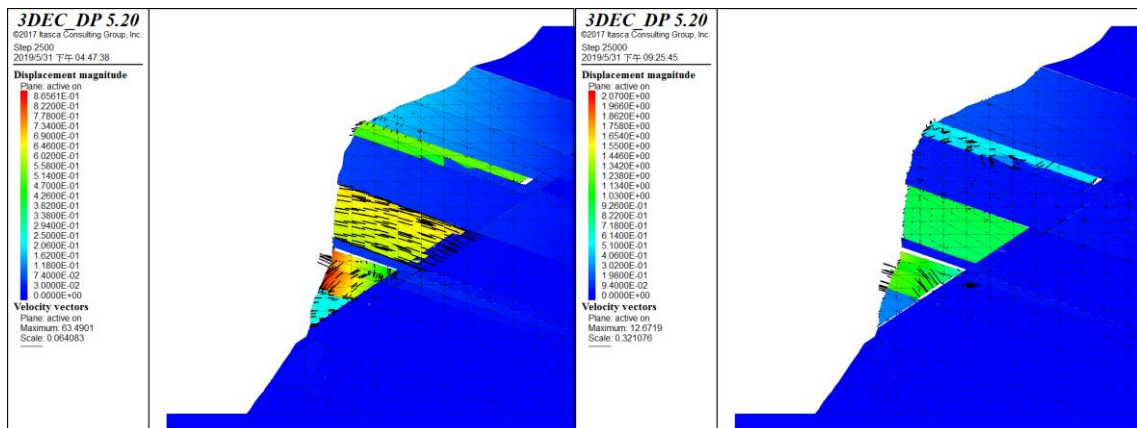


圖 7.10 節理延續性 80%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 B 位移分布圖





### 7.2.3 延續性 100%、Joint 1 (n=8) 之模擬結果

提升各節理之延續性至 100%，以模擬三組節理完全貫穿坡體時之情況，可以看到左半部的岩體因被三道節理切穿，形成大量之岩塊產生崩落。楔形岩體趾部先沿著 Joint 1 直接發生平面型破壞，或沿著交線  $i_{12}$  向下滑動以及向交線  $i_{23}$  方向翻落之複合型破壞，後方之殘餘楔形岩體也因趾部侵蝕後失去下方支撐，開始沿著交線  $i_{23}$  向下滑動 (圖 7.11)，觀察剖面 A 之位移分布圖便可發現，楔形塊體在下滑的過程中，慢慢向紙面內移動而消失於剖面中 (圖 7.12)；而剖面 B 所處之右半部岩壁，雖因兩節理面交線較緩、夾角角度較小，無大量之岩楔發生滑動，但趾部仍有塊體因高延續性之節理截切，而產生較大位移且發生破壞 (圖 7.13)。

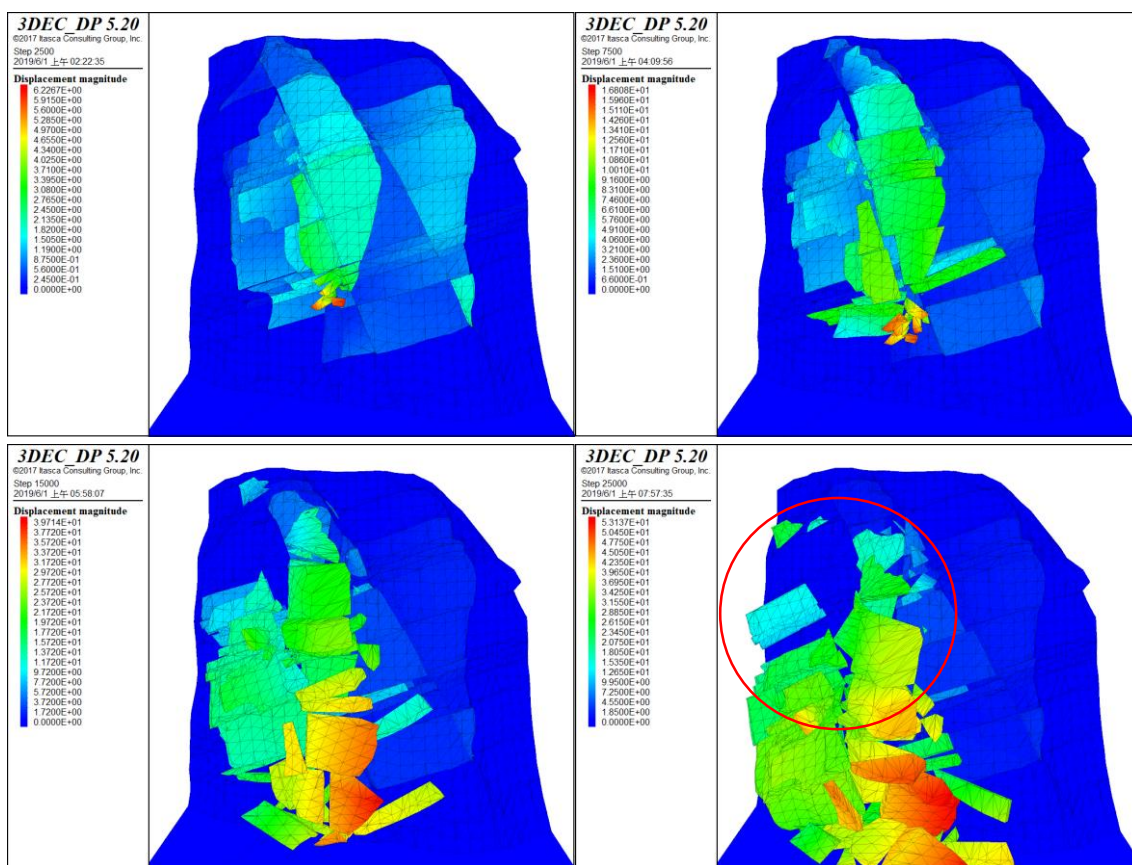


圖 7.11 節理延續性 100%、Joint 1 (n=8) 模型之位移分布圖

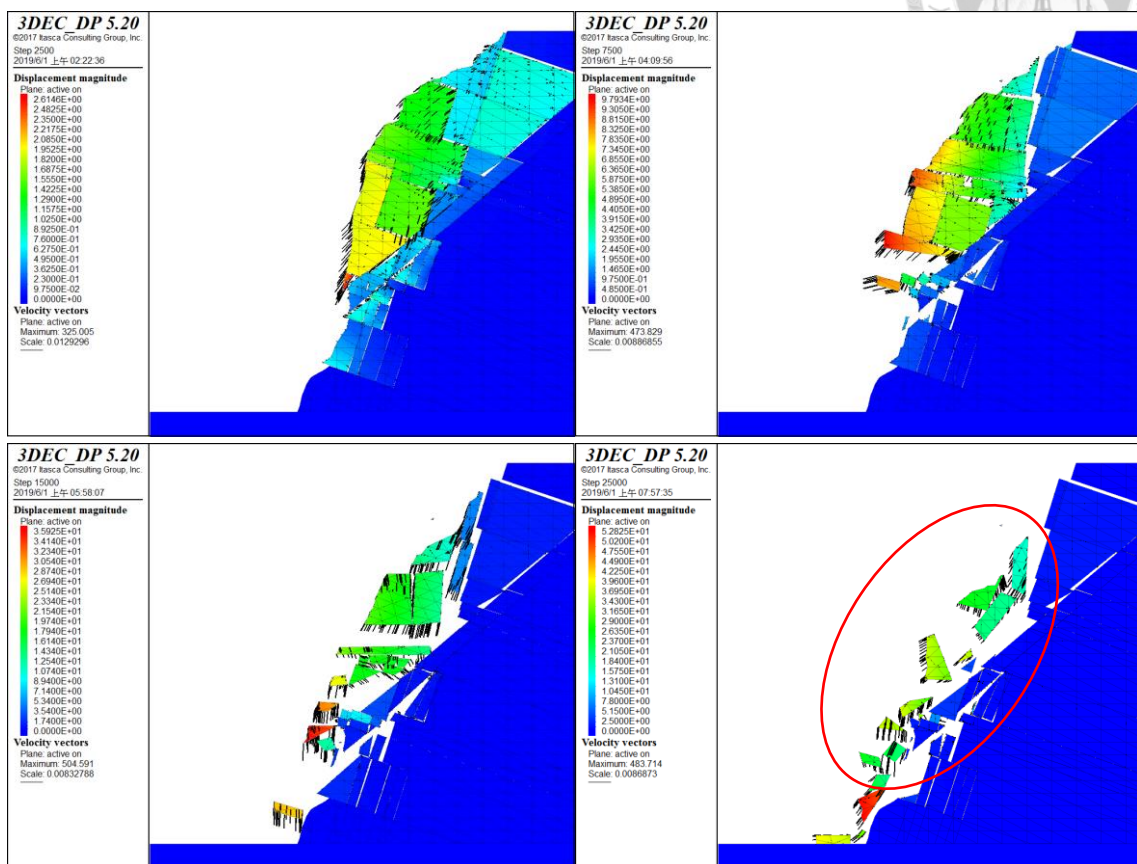


圖 7.12 節理延續性 100%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 A 位移分布圖

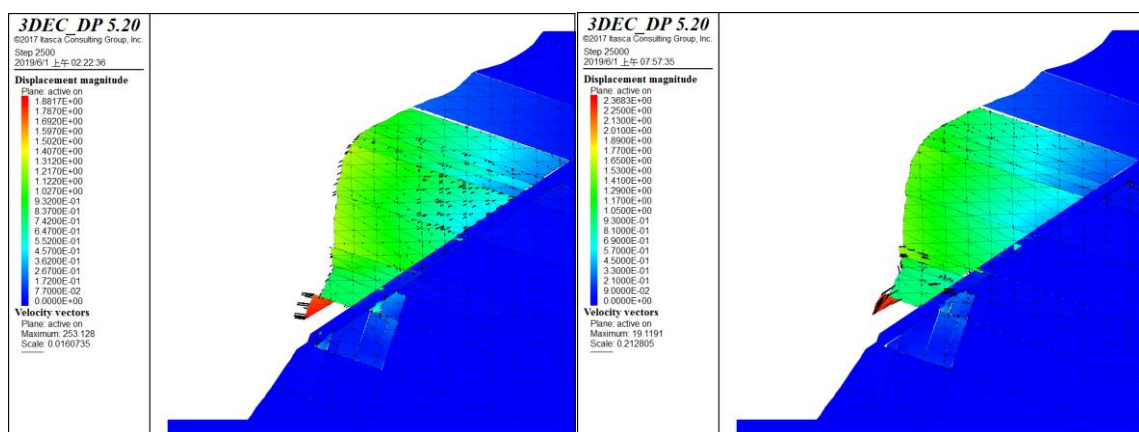


圖 7.13 節理延續性 100%、Joint 1 (n=8) 模型之剖面 B 位移分布圖



### 7.3 不考慮解壓節理之模擬結果

如前一節之模擬結果顯示，若具有較高密度之解壓節理，岩石邊坡之破壞機制大多由解壓節理所主控，但由於解壓節理於邊坡中，屬於較難掌握其延續性、間距等節理性質之弱面，故在本節中嘗試以不考慮 Joint 1 ( $n=0$ ) 的情況下，並同樣於節理延續性 60%、80%及 100%之模擬結果中進行觀察，探討此邊坡中之楔形岩體若不受 Joint 1 影響，其破壞機制與節理延續性之關係。

#### 7.3.1 延續性 60%、Joint 1 ( $n=0$ ) 之模擬結果

將 Joint 1 移出模型並調整 Joint 2、Joint 3 之節理延續性至 60%，於模擬結果中可發現，因節理延續性較低，又少了解壓節理的幫助，僅有剖面 A 中層面較密集之位置，有一小部分岩塊因受層面及節理同時截切，而產生些許集中位移，整個邊坡則處於穩定狀態（圖 7.14~圖 7.16）。

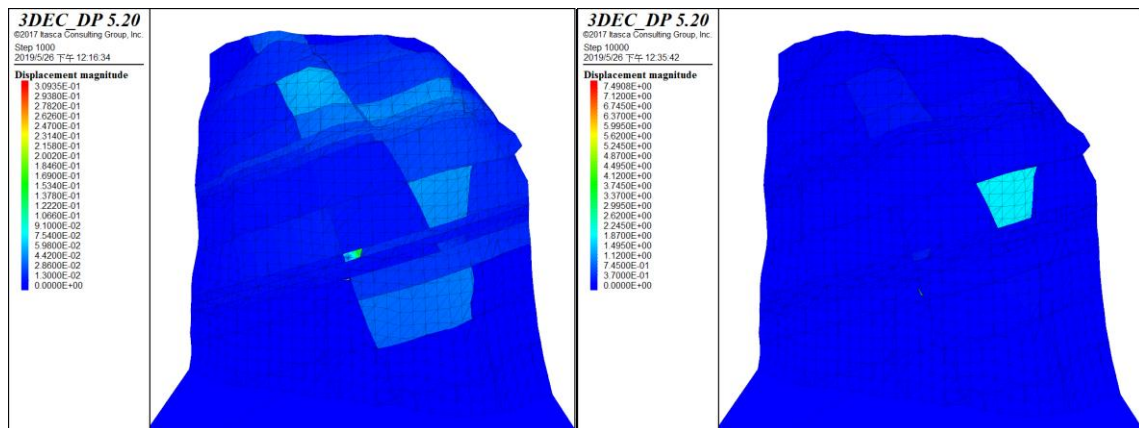


圖 7.14 節理延續性 60%、Joint 1 ( $n=0$ ) 之位移分布圖



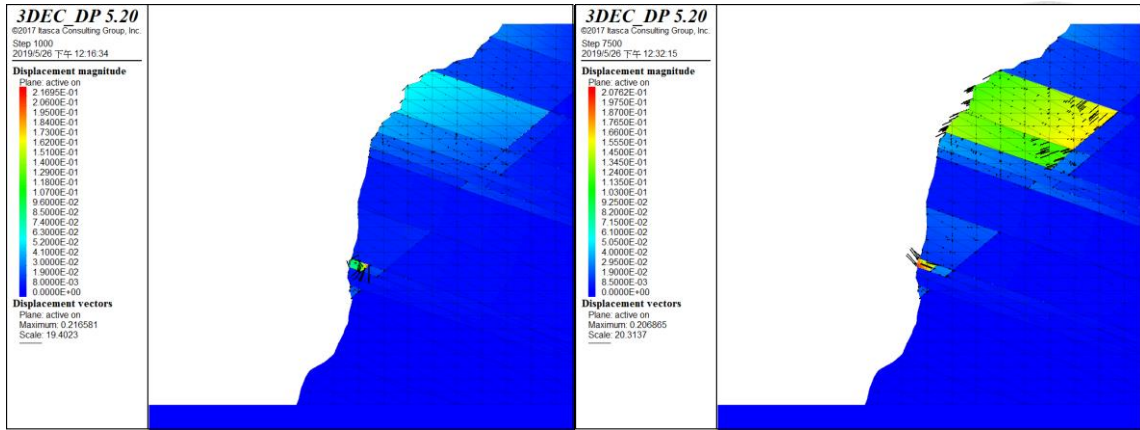


圖 7.15 節理延續性 80%、Joint 1 ( $n=0$ ) 模型之剖面 A 位移分布圖

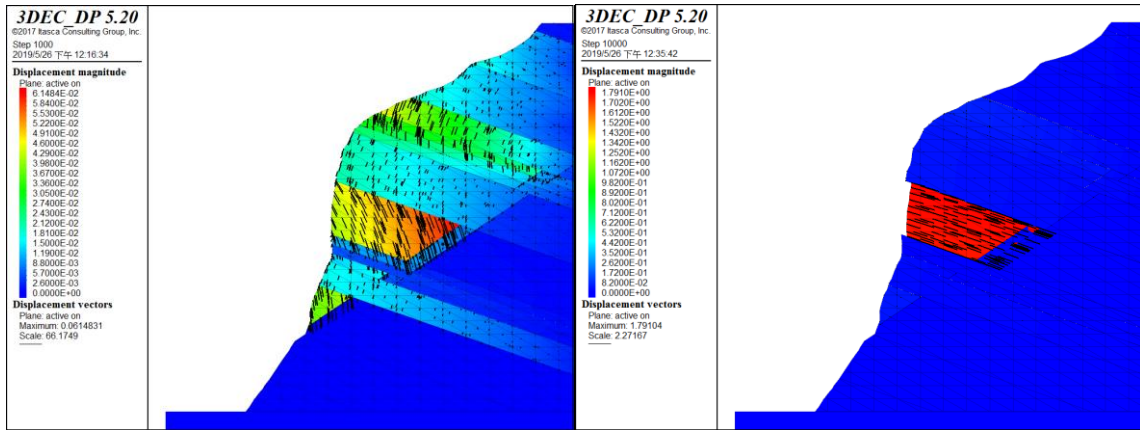


圖 7.16 節理延續性 80%、Joint 1 ( $n=0$ ) 模型之剖面 A 位移分布圖

### 7.3.2 延續性 80%、Joint 1 ( $n=0$ ) 之模擬結果

將節理延續性提高至 80% (圖 7.17)，剖面 A 處之楔形岩體趾部受節理及層面截切，而欲產生滑落，但因下方層面密集帶中尚存有岩體未被節理切割，節理面交線並沒有於坡面中見光，而使得楔形岩體在滑落途中就被限制住而未產生明顯破壞 (圖 7.18)；同時，剖面 B 處之楔形岩體亦開始產生些許位移，但也因節理尚未切穿邊坡，使得中段岩體只能順著層面產生向後之位移 (圖 7.19)。



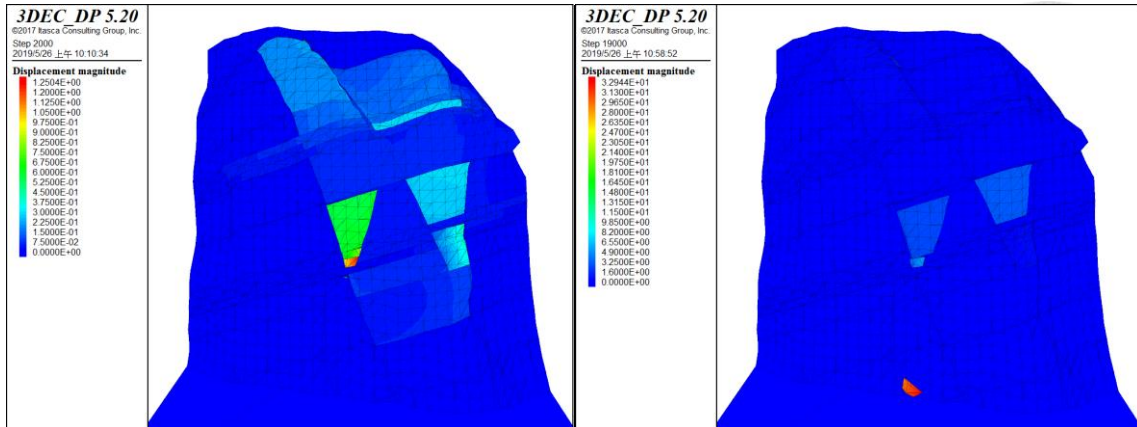


圖 7.17 節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 之位移分布圖

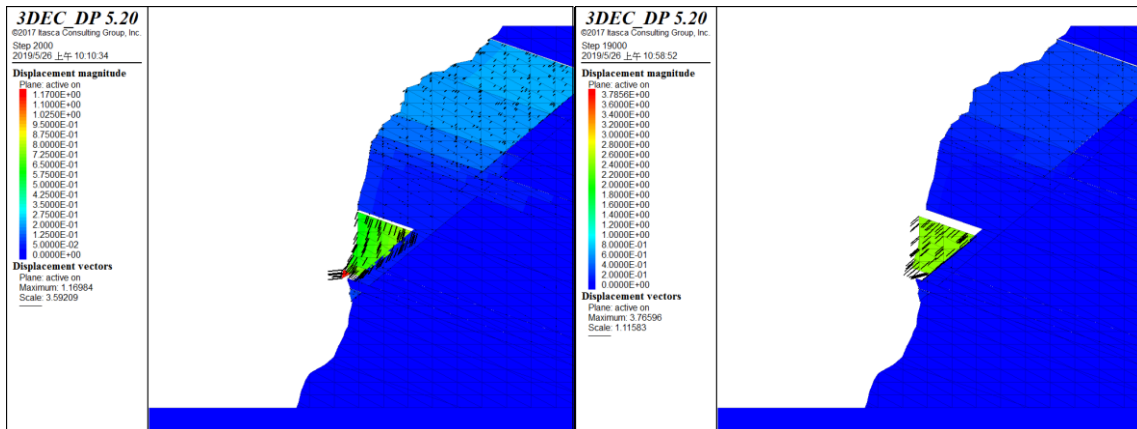


圖 7.18 節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖

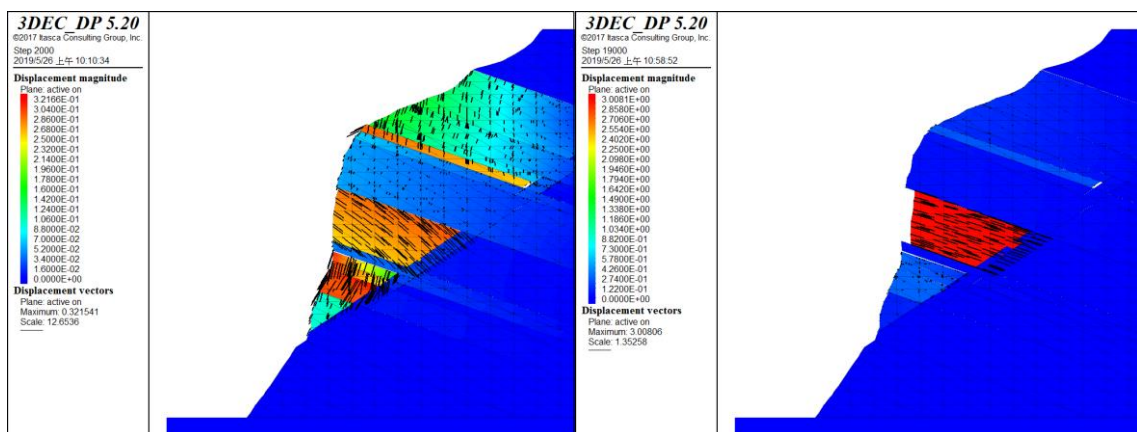


圖 7.19 節理延續性 80%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖



### 7.3.3 延續性 100%、Joint 1 (n=0) 之模擬結果

將節理延續性提高至 100%，以模擬在只有 Joint 2、Joint 3 完全截切坡體時，其楔形岩體之破壞機制 (圖 7.20)，由模擬結果中可發現，剖面 A 處之楔形岩體從趾部延伸至坡頂，被兩道節理縮切割出來之整個岩體，皆因節理面交線傾伏角較低而發生大規模的滑動位移，且因層面亦完全切割坡體，其落下之岩塊亦有層狀之產狀 (圖 7.21)；而剖面 B 處之楔形岩體反而未產生明顯的位移，推測原因為其節理面交線傾伏角較緩，又因少了 Joint 1 的影響，使其岩楔趾部左方邊界並未產生崩落，便在滑落的過程中就被兩側節理面給限制住 (圖 7.22)。

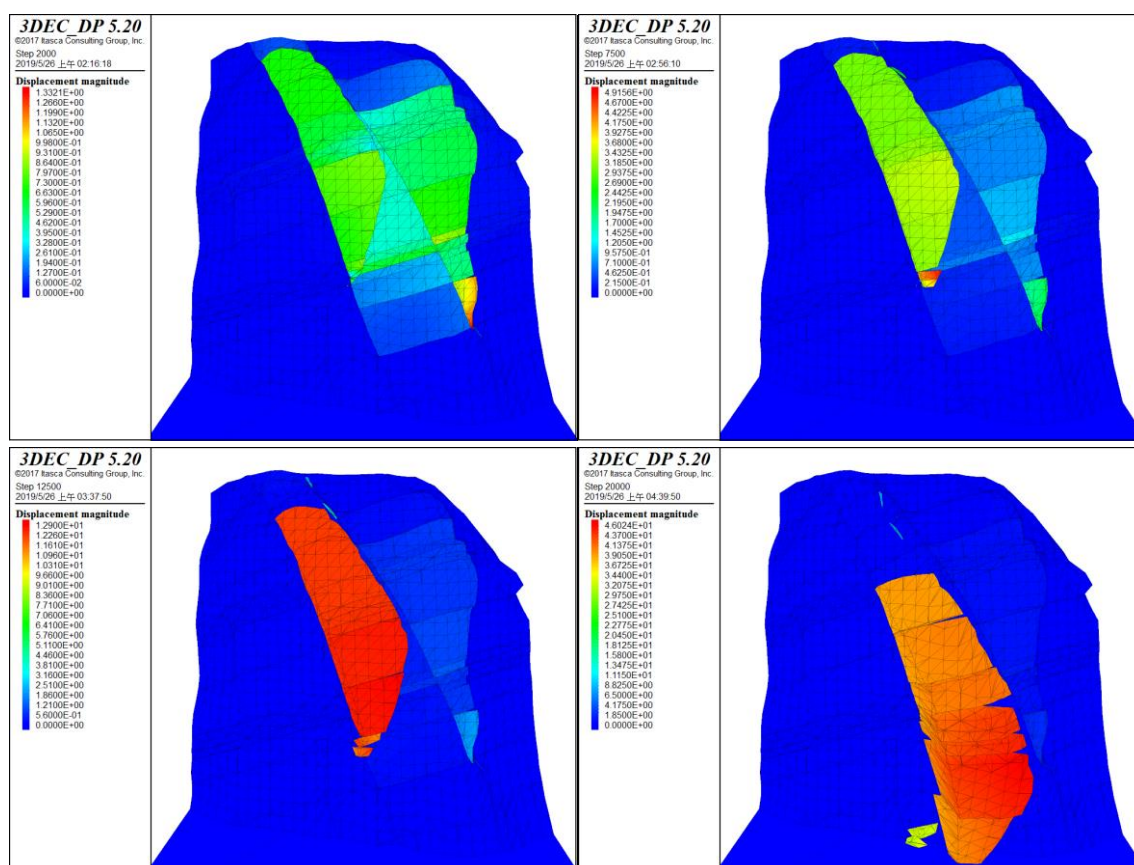


圖 7.20 節理延續性 100%、Joint 1 (n=0) 之位移分布圖

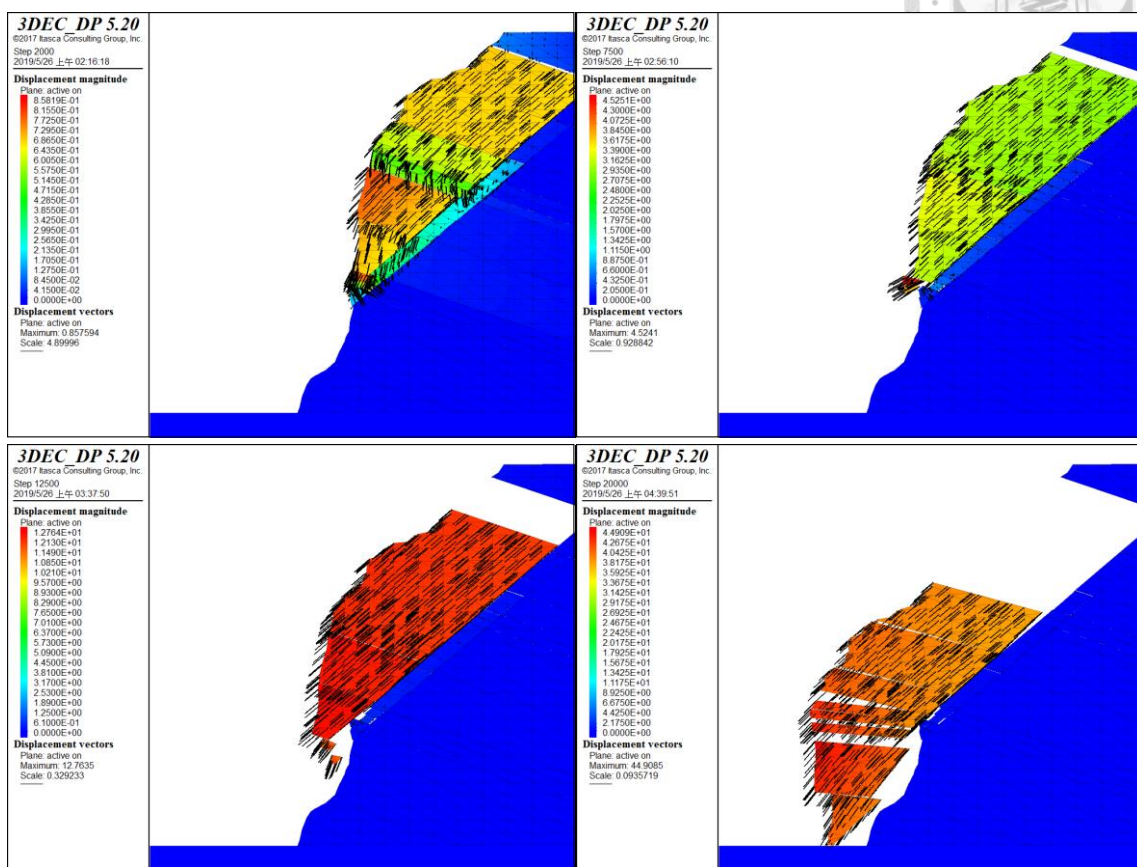
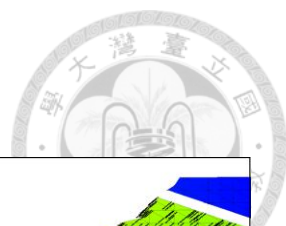


圖 7.21 節理延續性 100%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 A 位移分布圖

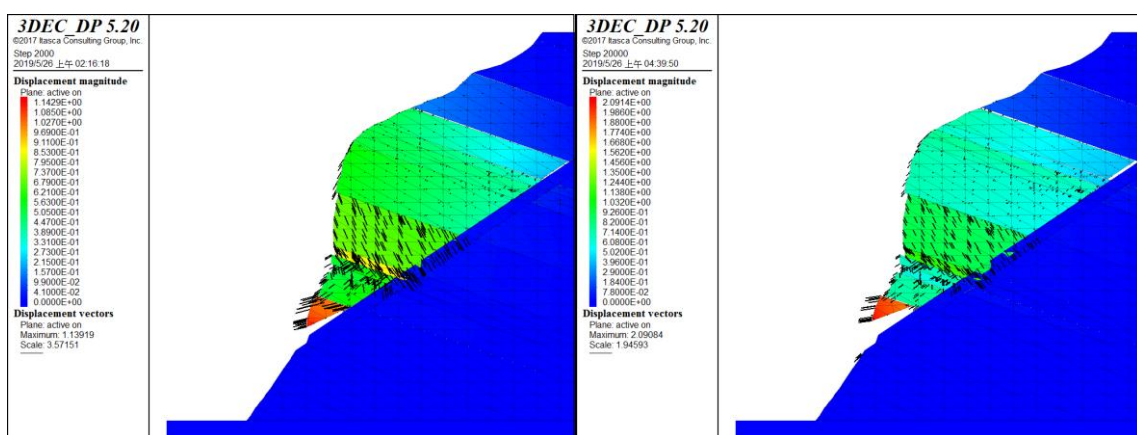


圖 7.22 節理延續性 100%、Joint 1 (n=0) 模型之剖面 B 位移分布圖



## 7.4 小結

1. 在解壓節理密度較高之條件下，其主控節理岩體崩落的破壞機制較偏向於平面型破壞，當背後的節理貫通後，其岩塊底部又沒有足夠之支撐力時，便即容易以片狀的岩塊向下崩落。
2. 一旦周遭之岩體因解壓節理發展而產生崩落，就算在節理延續性較低之條件下，原本尚未被兩組節理完全截切之楔形岩體，亦有機會因左右邊界消失而從兩側翻落，或是沿著層面傾斜方向滑動而產生位移，甚至引致岩塊產生崩落。
3. 南雅案例中截切邊坡形成楔形岩體之兩組節理，在空間中以夾角  $36^{\circ}\sim 39^{\circ}$  相交，且其交線之傾角亦僅有  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，若參照第六章之模擬結果，其安全性應高於夾角  $90^{\circ}$ 、交線傾伏角  $40^{\circ}$  之模型，意即在此種較緩傾角的條件下，需要更多的不穩定因素才可能引致破壞，如楔形岩體趾部受擾動而崩落、風化侵蝕等，導致岩體下方簍空、見光，而發生翻落等類型之破壞。




## 第八章 結論與建議



### 8.1 結論

1. 利用 Cloudcompare 將點雲模型切割成無數個面單元，並將所有面單元的位態資料加以統計後，便能快速分析岩石邊坡露頭。
2. 過大的面積容易覆蓋過多組節理，導致同一張位態立體投影圖同時呈現過多資訊，而使主要節理無法從顯現於投影圖中。
3. 隨著模型之延續性提升，因鬆動而落下的塊體數量會提升，但同時會使單一楔形塊體之體積下降，且塊體間之互鎖機制也會減少。
4. 節理岩體之交線傾伏角較低的條件下，塊體尚無法順利產生滑動，只會以翻落的形式產生破壞，故延續性 60%及 80%之模型，大多只有前三排因坡體倒懸，且被節理切穿周圍的塊體有翻落的情形。當延續性達到 100%時，即使在傾角只有 30°的條件下，便全部的塊體都趨於以向下翻落的方式產生破壞。
5. 在交線傾伏角角度達到 40°時，前排之塊體一旦翻落，後方的岩體會因摩擦力不足而開始具有下滑的趨勢。
6. 當 $\alpha$ 角角度愈高時，意謂著整個模型沿著交線旋轉角度愈大，會使楔形岩體更容易發生破壞，且趨向於沿著較緩的一組節理產生翻覆機制。
7. 同樣 $\xi$ 及 Plunge 角度時，隨著 $\alpha$ 角度提升，其堆積區之偏移角度 ( $\delta$ ) 會大幅度增加；同樣 $\xi$ 及 $\alpha$ 角度時，當 Plunge 角度提升時，堆積區之偏移角度 ( $\delta$ ) 則相對下降
8. 在解壓節理密度較高之條件下，當岩塊背後的節理貫通後，其底部又沒有足夠之支撐力時，其主控節理岩體崩落的破壞機制，較偏向於沿著解壓節理滑動之平面型破壞，或沿著與解壓節理相交之較陡交線產生楔形岩體的崩落。

- 
9. 一旦周遭之岩體因解壓節理發展而產生崩落，就算在節理延續性較低之條件下，原本尚未被兩組節理完全截切之楔形岩體，其上部塊體在下滑的過程中就算遭受阻擋，亦有機會因左右邊界消失而從兩側翻落，或是沿著另一條交線方向滑動而產生位移甚至崩落，而產生複合型的變形及甚至破壞之過程。
10. 南雅案例中截切邊坡形成楔形岩體之兩組節理，在空間中以夾角  $36^{\circ}\sim 39^{\circ}$  相交，且其交線之傾角亦僅有  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，若參照第六章之模擬結果，其安全性應高於夾角  $90^{\circ}$ 、交線傾伏角  $40^{\circ}$  之模型，意即在較緩傾角的條件下，需要更多的不穩定因素才可能引致破壞，如楔形岩體趾部受擾動而崩落、風化侵蝕等，才有機會發生翻落等類型之破壞。



## 8.2 建議

1. 點雲模型的不連續面分析，目前只針對位態及空間位置作探討，未來若可細分每組節理組各自的間距，甚至發展出一套流程，定義一露頭中節理組的延續性，將可更有效提升以攝影測量進行岩坡節理性質調查的成效。
2. 針對多組節理組形成之楔形破壞，本研究雖已探討節理延續性、節理面交角、不對稱性及傾伏角等控制因子，但岩石邊坡工程中所在意之節理幾何性質仍尚有節理間距、組數、跡長等因素，未來可針對上述特性作影響性評估。
3. 本研究目前只探討影響楔形岩體形成之節理幾何性質，尚未針對節理弱化或是節理延伸等因素影響，未來可嘗試在不同節理幾何性質下，一併探討降雨、地下水等水文影響，以在模擬中加入驅動塊體崩落之因素，以更接近現地之真實情況。
4. 有鑑於過去對楔形破壞產生落石群之機制研究甚少，當一岩石邊坡之節理組持續發展，其邊坡工程及周圍人工構造物之相關設計，該如何採取相對應的措施，亦應是未來探討的一大方向。

## 參考文獻



- 王文能 (2016)。崩塌的地質特性與防災。台南市：中華防災學會出版委員會。
- 王泰典、莊海岳、蘇威元、邱雅筑、羅百喬 (2017)。無人載具攝影產製數值地表模型在隧道洞口段及倒懸邊坡崩塌調查的應用。地質，36(3)，55-60。
- 黃紹宸 (2015)。地下水透過節理向上滲流對邊坡穩定的影響。國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- 黃鎮臺、夏龍源 (1990)。北部濱海公路南雅里路段邊坡崩塌個案之研究。礦冶，34(4)，89-94。
- 葉致翔 (2017)。應用光達地形進行沉積岩層繪製及順向坡自動化圈繪之研究。國立臺灣大學土木工程學研究所博士論文。
- 謝沛宸 (2018)。高陡逆向坡岩體特性調查及軟硬岩層形成承载力破壞機制探討。國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。
- Agisoft PhotoScan Professional (Version 1.2.5)(Software). (2016). Retrieved from <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Aydan, Ö. (1989). The stabilization of rock engineering structures by rockbolts. Doctorate Thesis, Nagoya University.
- Aydan, Ö. (2016). Large rock slope failures induced by recent earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 2503–2524.
- Brideau, M. A. and Stead, D. (2012). Evaluating kinematic controls on planar translational slope failure mechanisms using three-dimensional distinct element modelling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(4), 991-1011.
- British Geological Survey. “How does BGS classify landslides?”. Retrieved 2018, from: [https://www.bgs.ac.uk/research/engineeringGeology/images/landslip\\_types\\_large.jpg](https://www.bgs.ac.uk/research/engineeringGeology/images/landslip_types_large.jpg)



CloudCompare (Version 2.10.2)(Software). (2019) GPL software Retrieved from  
<http://www.cloudcompare.org/>



Cotton, C. A. (1942). *Geomorphology: An Introduction to the Study of Landforms* (3rd ed.). Christchurch, New Zealand: Whitcombe & Tombs.

Cruden, D. M. and VARNES, D. J. (1996). Landslide types and processes, in: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, Washington D. C., 36-75.

Cundall, P. A. (1971). A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. In *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, 1971.

Cundall P. A. (1998). Formulation of a three-dimensional distinct element model- Part I. A scheme to detect and represent contact in a system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3), 107-116.

Dershowitz, W. S. and Herda, H. H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. In *The 33th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.

Dewez, T. J., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C. and Rohmer, J. (2016). Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41, 799-804.

Goodman, R. E. and Kieffer, D. S. (2000). Behavior of rock in slopes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(8), 675-684.

Hoek, E. and Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering*. Inst. Mining and metallurgy, London.

Itasca Consulting Group, Inc. (2003). 3DEC User's Manual. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group Inc.

Kumsar, H., Aydan, Ö. and Ulusay, R. (2000). Dynamic and static stability assessment of rock slopes against wedge failures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33(1), 31-51.

Poisel, R. and Preh, A. (2004). Rock slope initial failure mechanisms and their mechanical models. *Felsbau*, 22(2), 40-45.

Priest, S. D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. London: Chapman & Hall.

Riquelme, A. J., Abellán, A. and Tomás, R. (2015). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering geology*, 195, 185-195.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons.

Tuckey, Z., Paul, J. and Price, J. (2016). Discontinuity survey and brittle fracture characterisation in open pit slopes using photogrammetry, in PM Dight (ed.). *Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 587-600.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Special Report 176: *Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.



## 附錄A 數值模型模擬結果

交角角度			120°				總體積: 5200 cm <sup>2</sup>	
角度組合 (α°)			60°+60° (0°)		50°+70° (10°)		40°+80° (20°)	
Plunge			30°	40°	30°	40°	30°	40°
延續性	60%	總塊數	10.73	16.44	9.27	24.40	10.83	24.48
		64	26.56	34.38	25.00	40.63	26.56	40.63
		δ	-1.73	7.75	9.19	6.48	29.46	19.71
	80%	總塊數	15.10	44.13	14.10	44.00	26.87	44.13
		138	22.46	50.00	20.29	50.00	34.78	50.00
		δ	9.87	1.21	19.78	10.90	29.75	23.93
	100%	總塊數	36.13	64.19	30.60	60.00	31.67	64.00
		250	36.40	64.00	30.40	60.00	31.60	64.00
		δ	2.24	-3.10	16.01	12.73	26.58	15.12

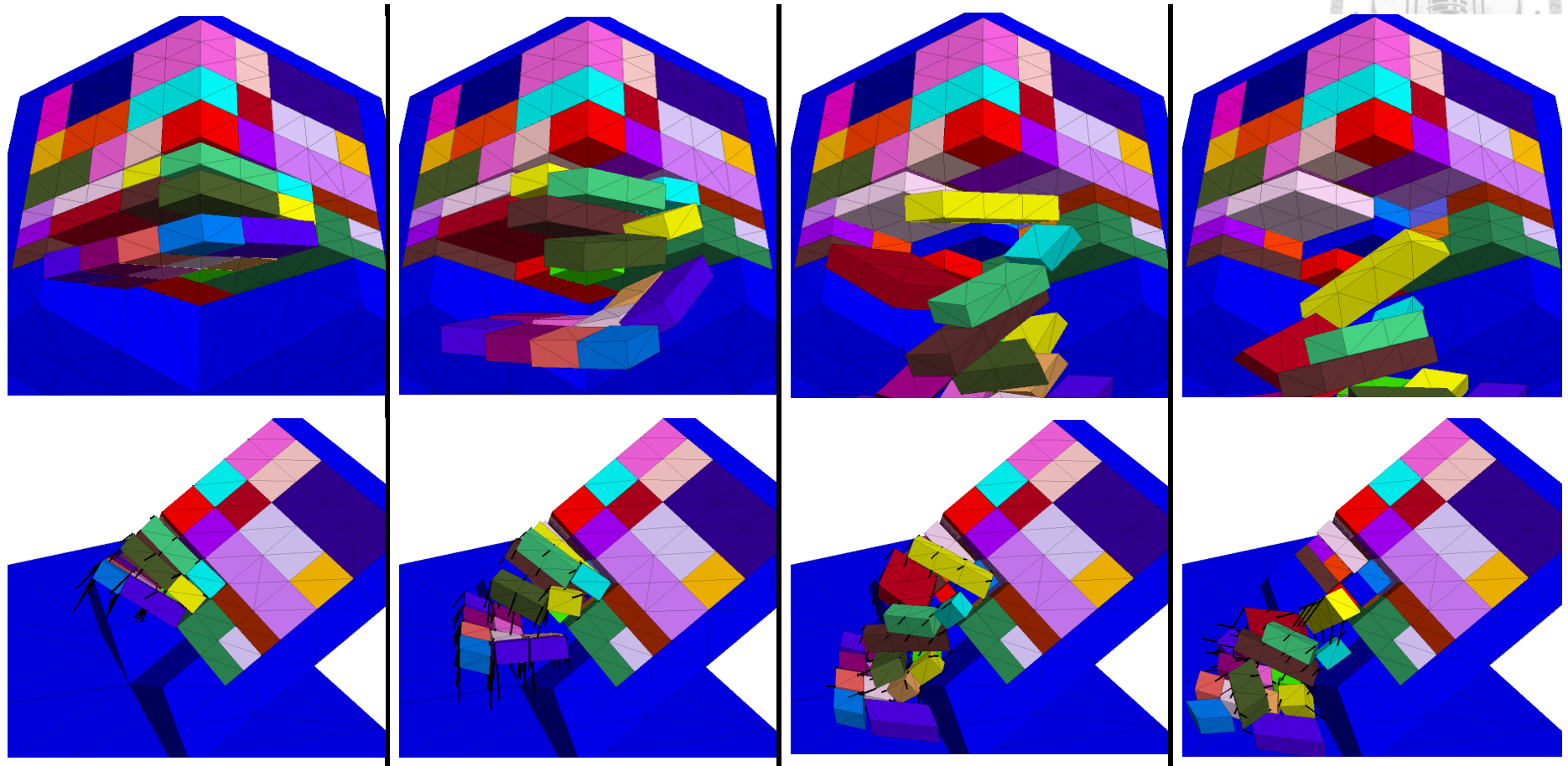
交角角度			90°				總體積: 4500 cm <sup>2</sup>	
角度組合 (α°)			45°+45° (0°)		30°+60° (15°)		15°+75° (30°)	
Plunge			30°	40°	30°	40°	30°	40°
延續性	60%	總塊數	9.20	18.00	9.20	22.00	10.80	24.40
		64	25.00	35.94	25.00	39.06	26.56	40.63
		δ	8.64	11.25	20.69	20.97	36.17	15.24
	80%	總塊數	14.40	42.40	13.60	42.40	29.60	44.00
		138	21.01	47.83	19.57	47.83	36.96	50.00
		δ	2.01	0.58	11.16	16.07	25.02	22.02
	100%	總塊數	30.80	61.20	36.80	63.20	44.00	64.00
		250	30.80	61.20	36.80	63.20	44.00	64.00
		δ	-2.52	-2.38	13.66	8.49	27.99	17.85

體積比(%)
塊數比(%)
δ (°)

A-1 堆積區塊體與總塊體百分比與偏移角度

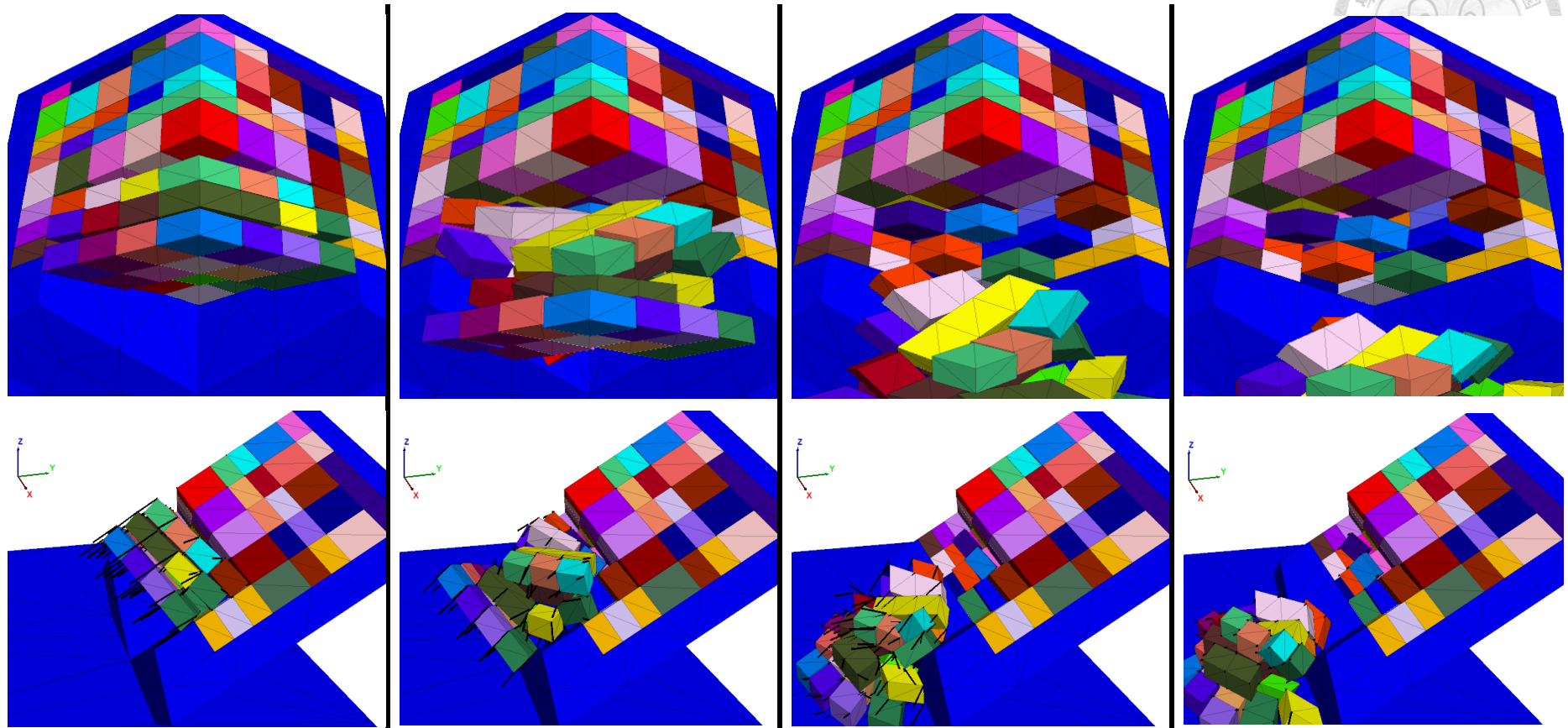


➤ Dihedral Angle :  $120^\circ$  / Plunge :  $30^\circ$  /  $\alpha : 0^\circ$

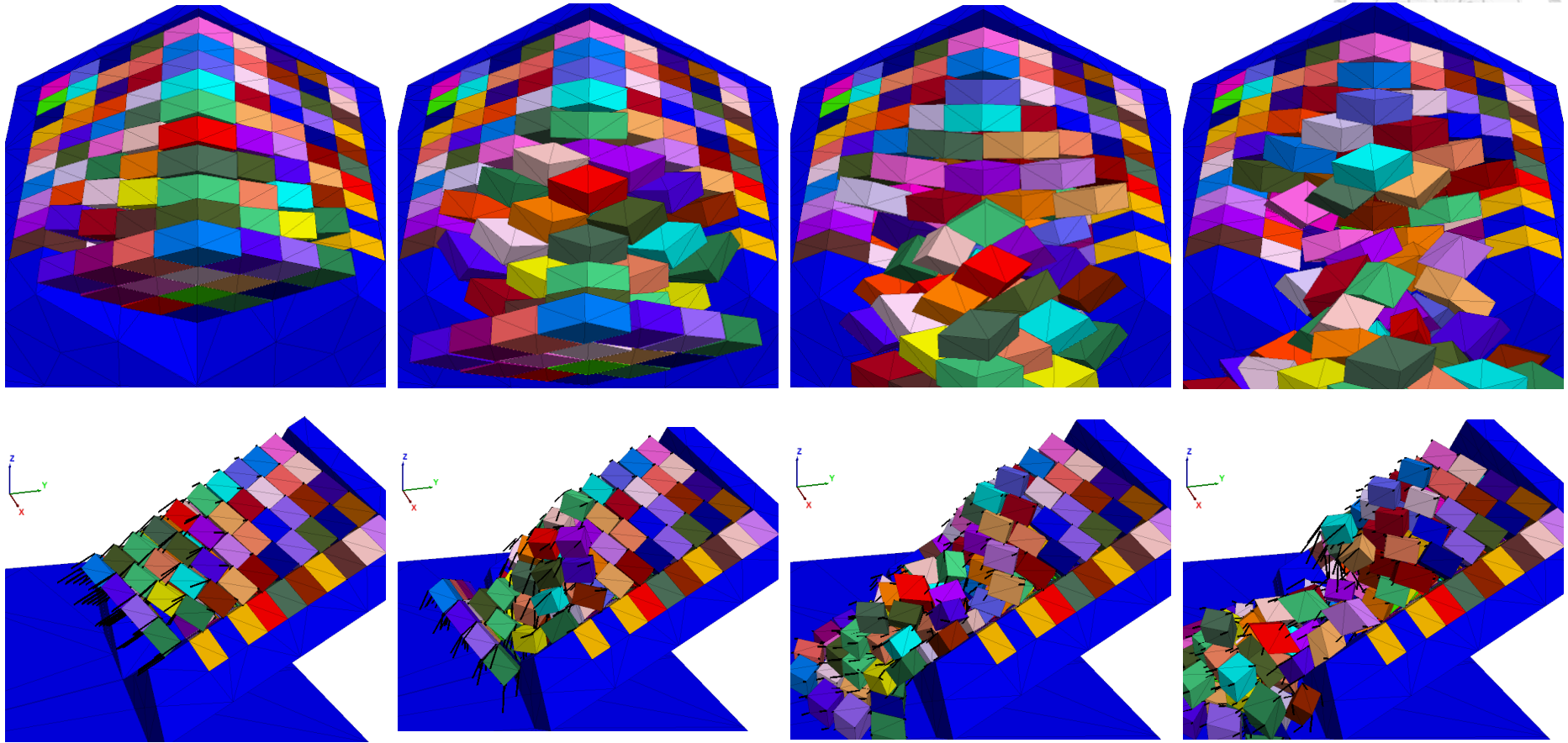


A-2 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 60%、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果





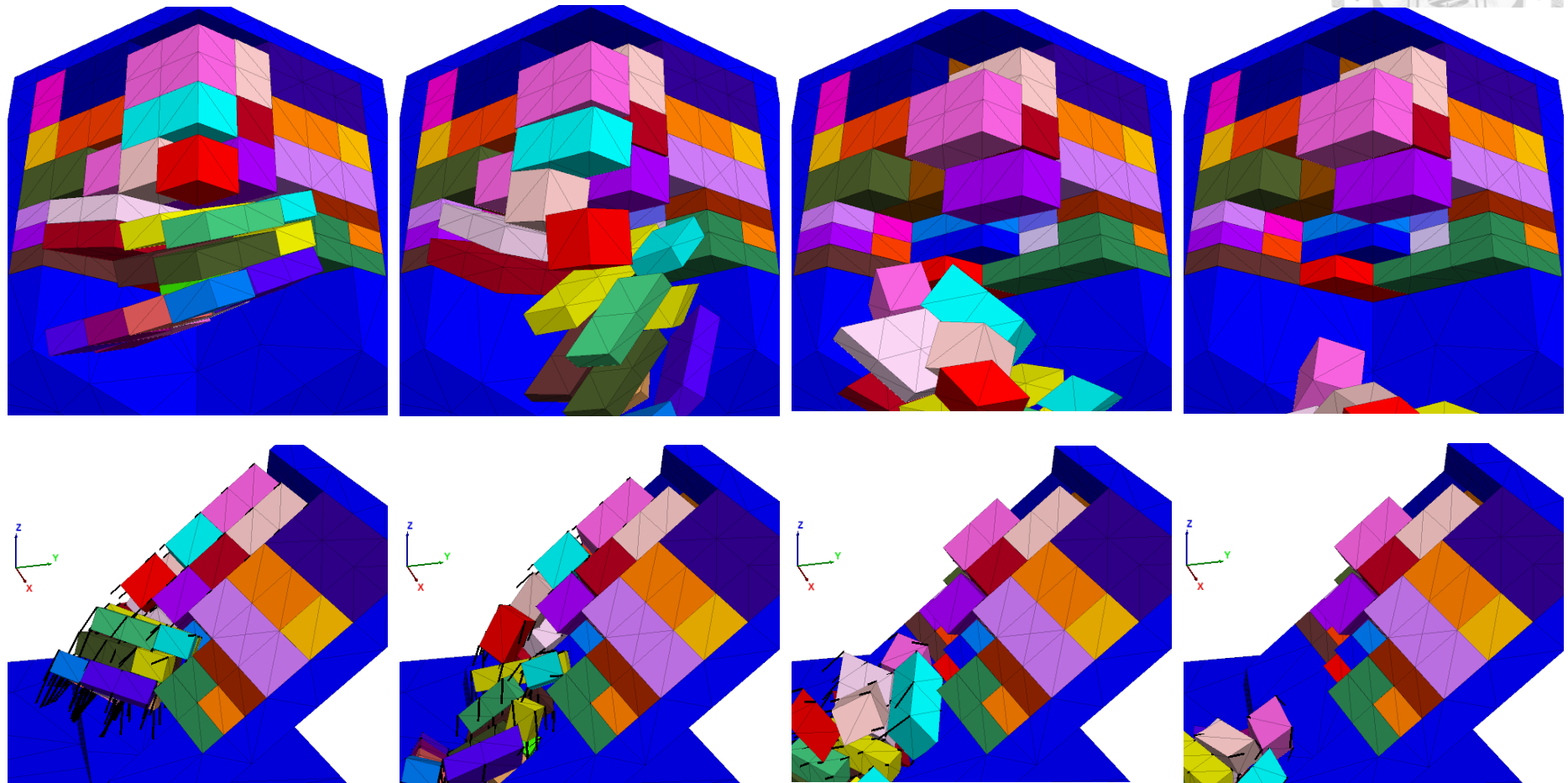
A-3 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性  $80\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



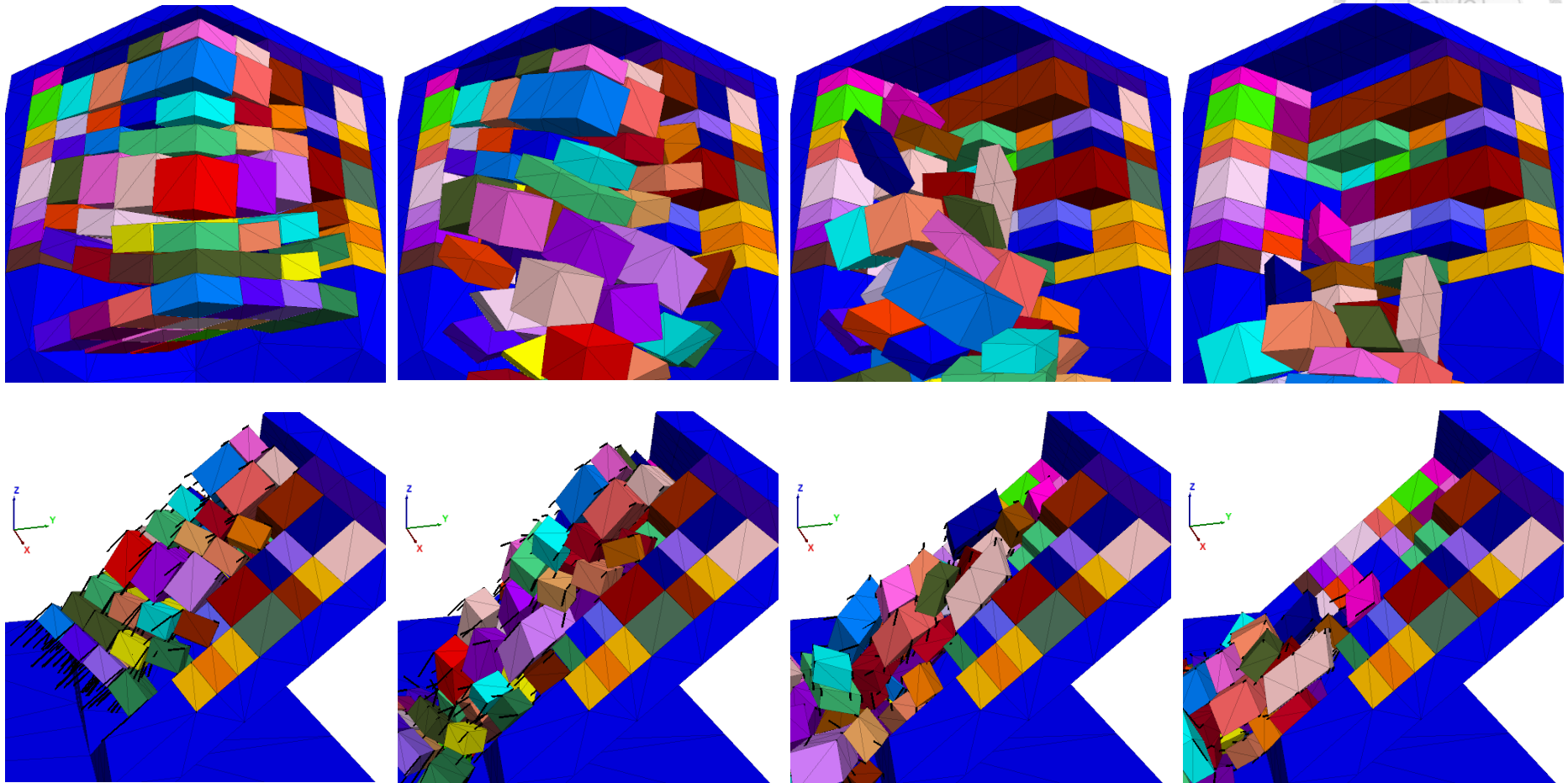
A-4 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 100%、 $\alpha=0^\circ$  之模擬結果



➤ Dihedral Angle :  $120^\circ$  / Plunge :  $40^\circ$  /  $\alpha : 0^\circ$

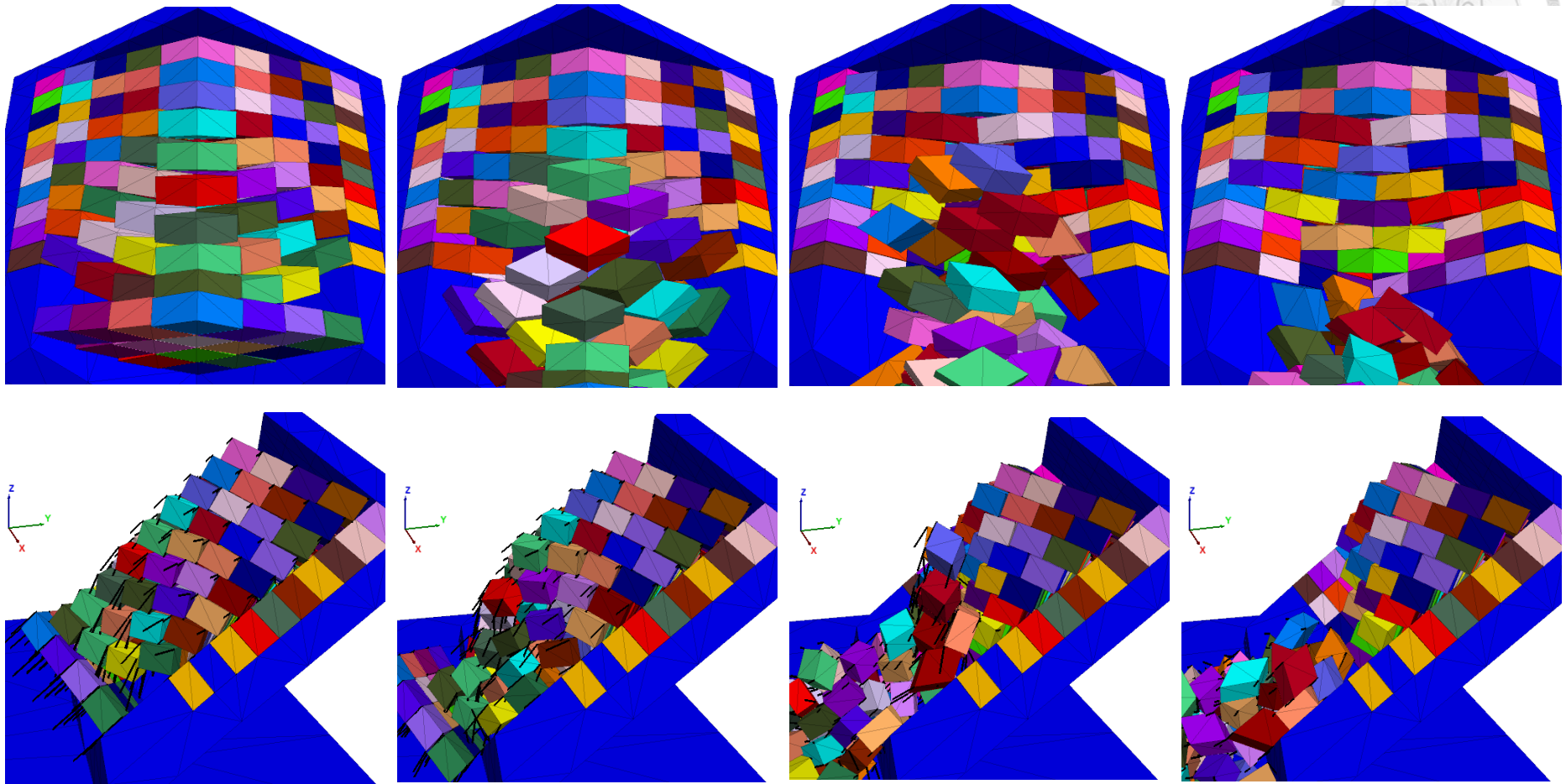


A-5 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 60%、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



A-6 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



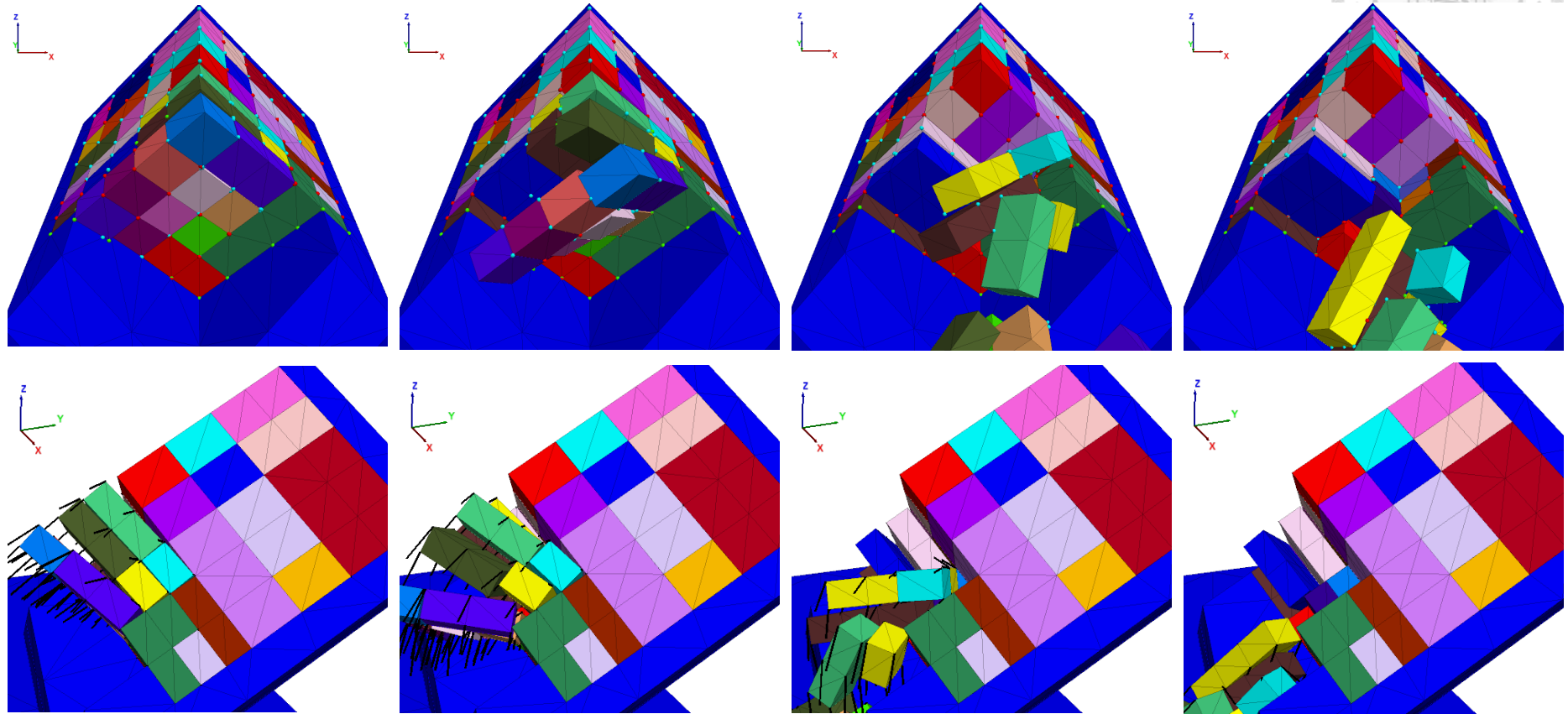


A-7 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 100%、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果

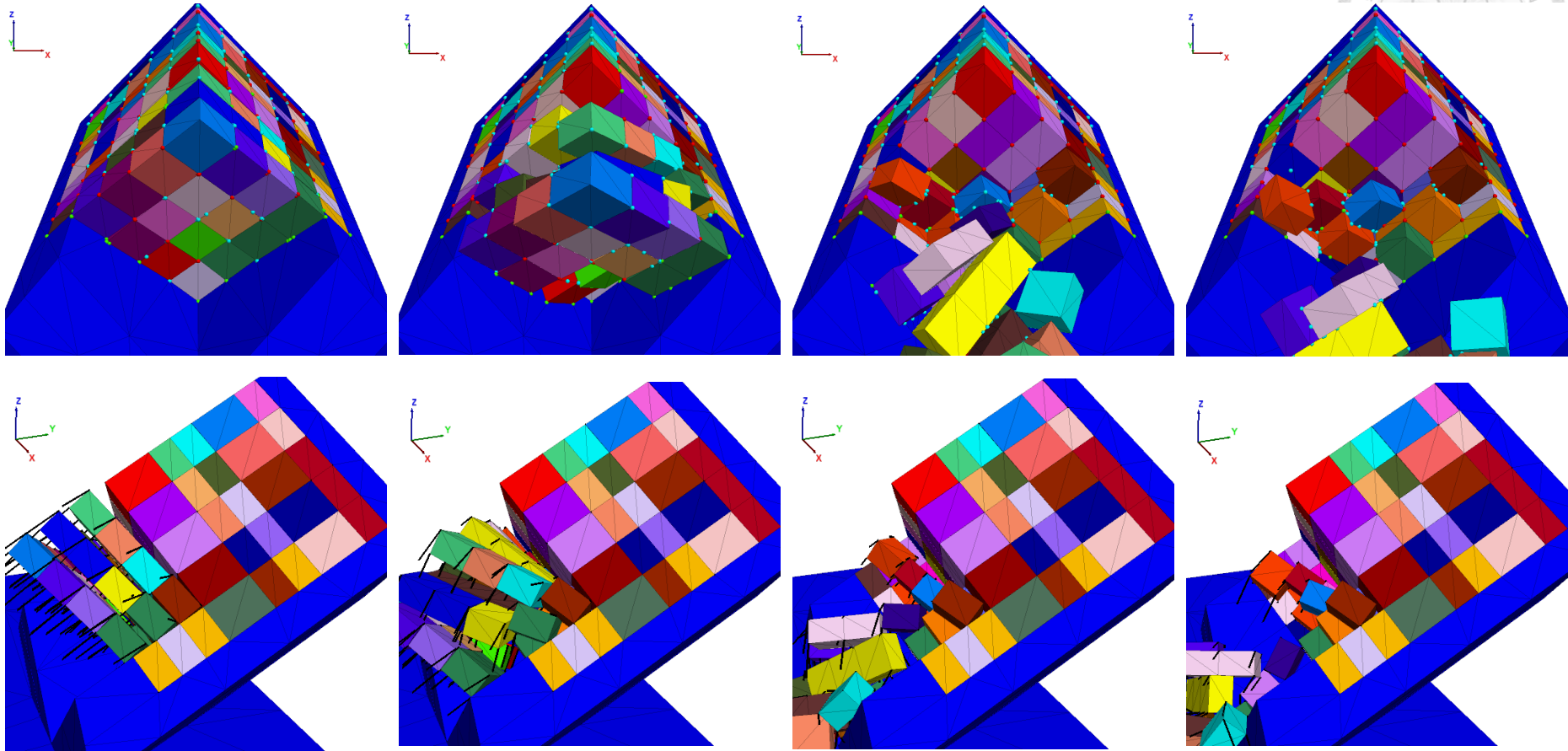




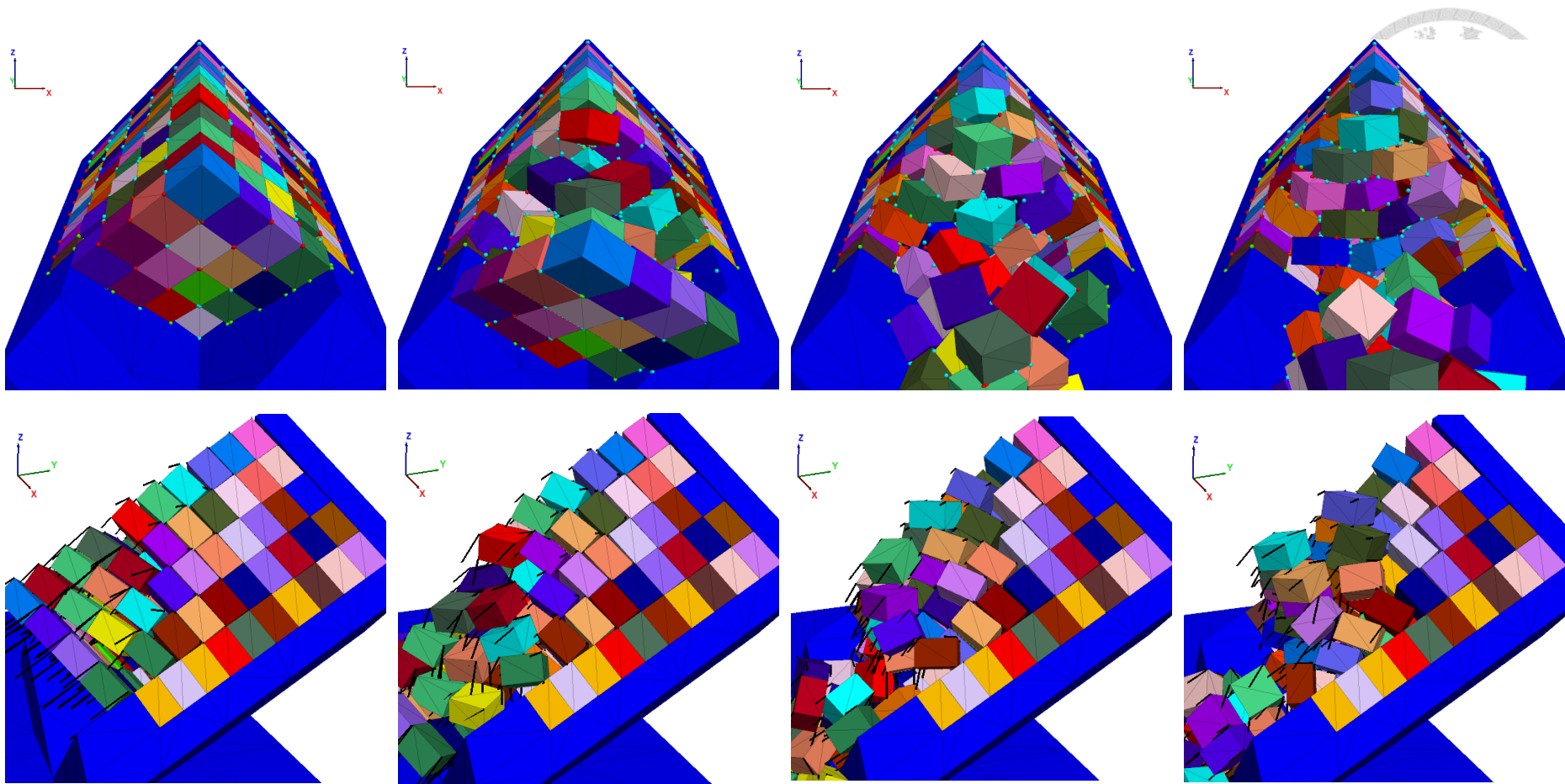
➤ Dihedral Angle :  $90^\circ$  / Plunge :  $30^\circ$  /  $\alpha$  :  $0^\circ$



A-8 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 60%、 $\alpha=0^\circ$  之模擬結果



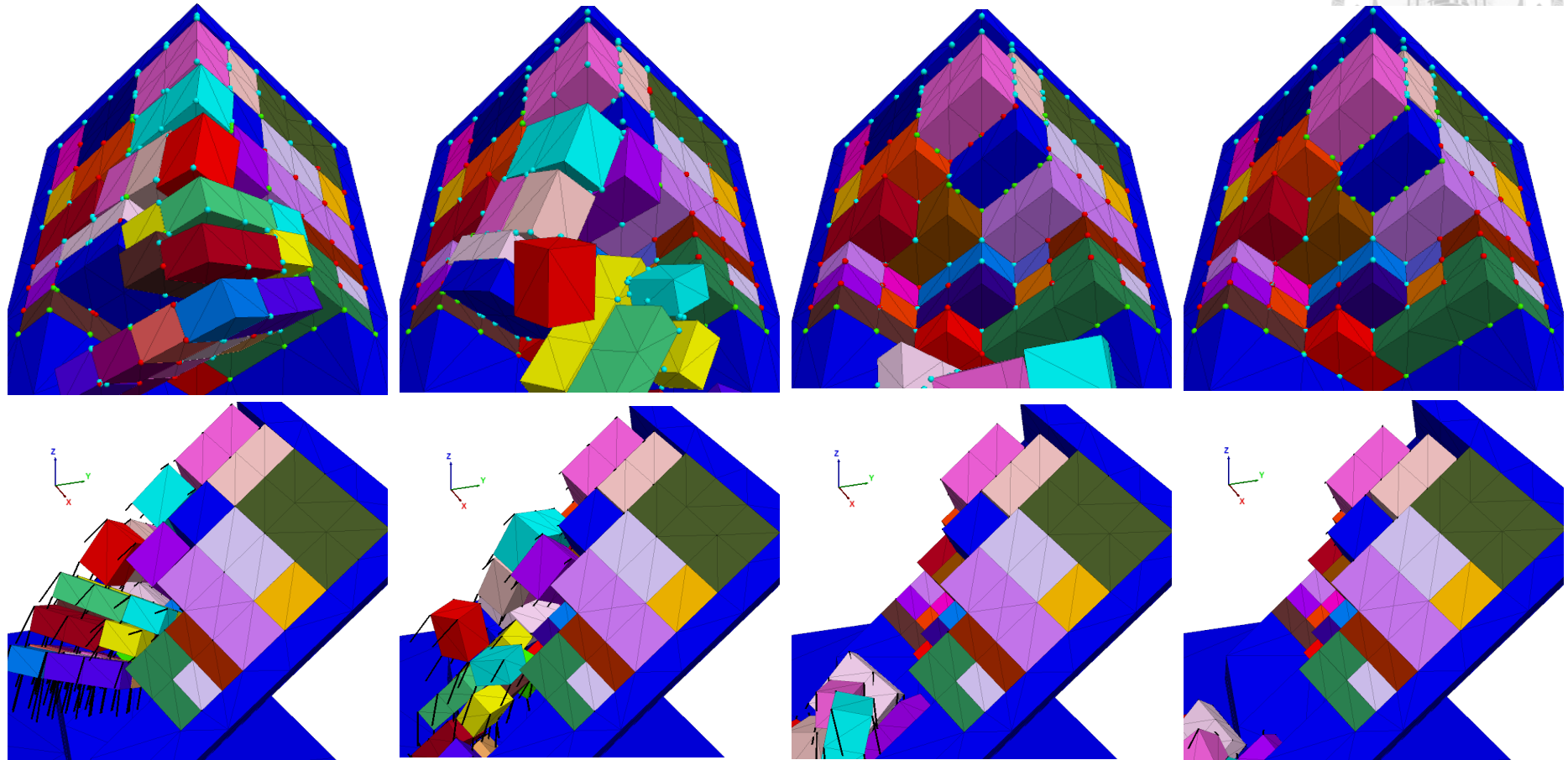
A-9 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性  $80\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



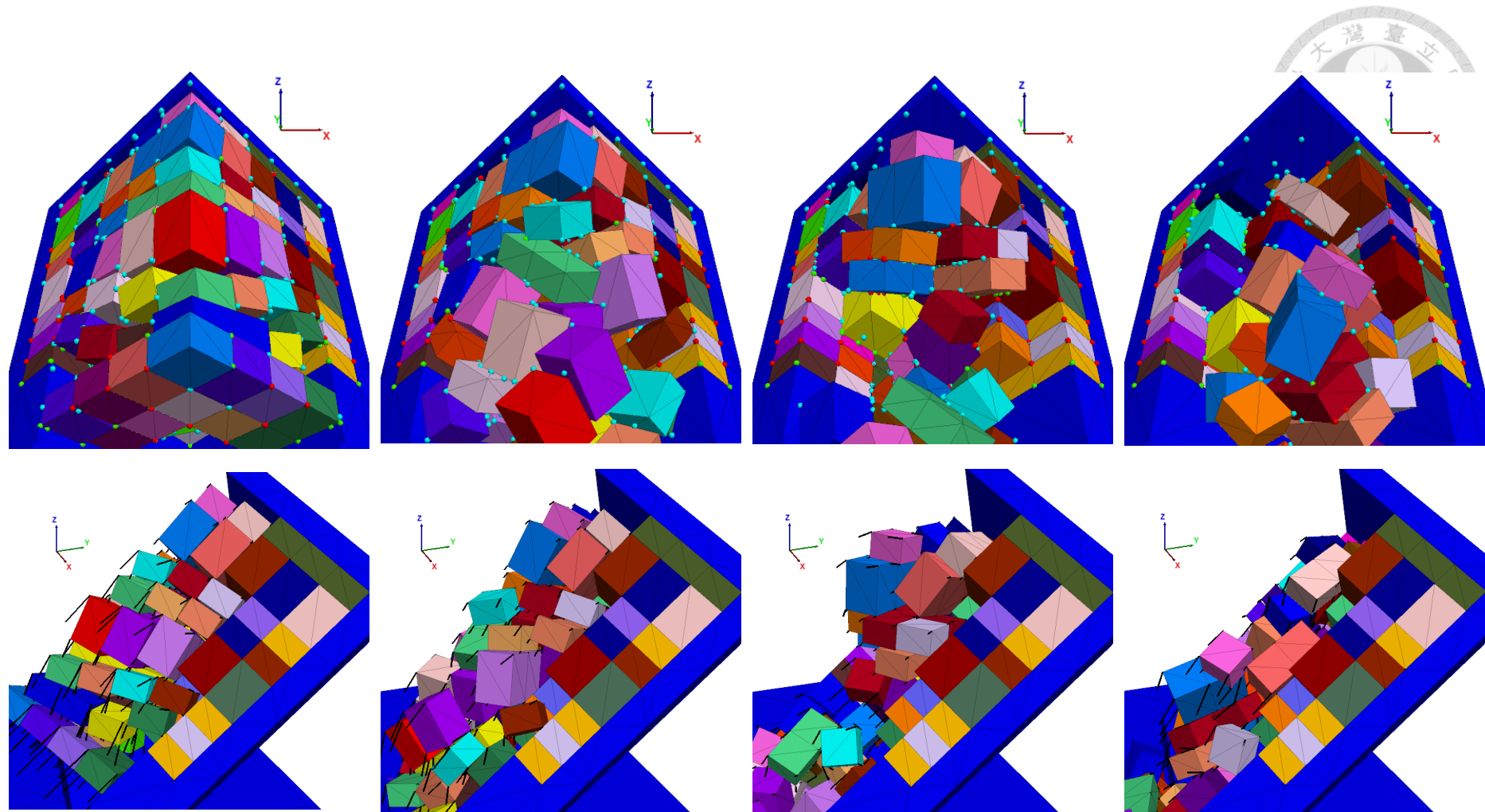
A-10 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性  $100\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



➤ Dihedral Angle :  $90^\circ$  / Plunge :  $40^\circ$  /  $\alpha$  :  $0^\circ$

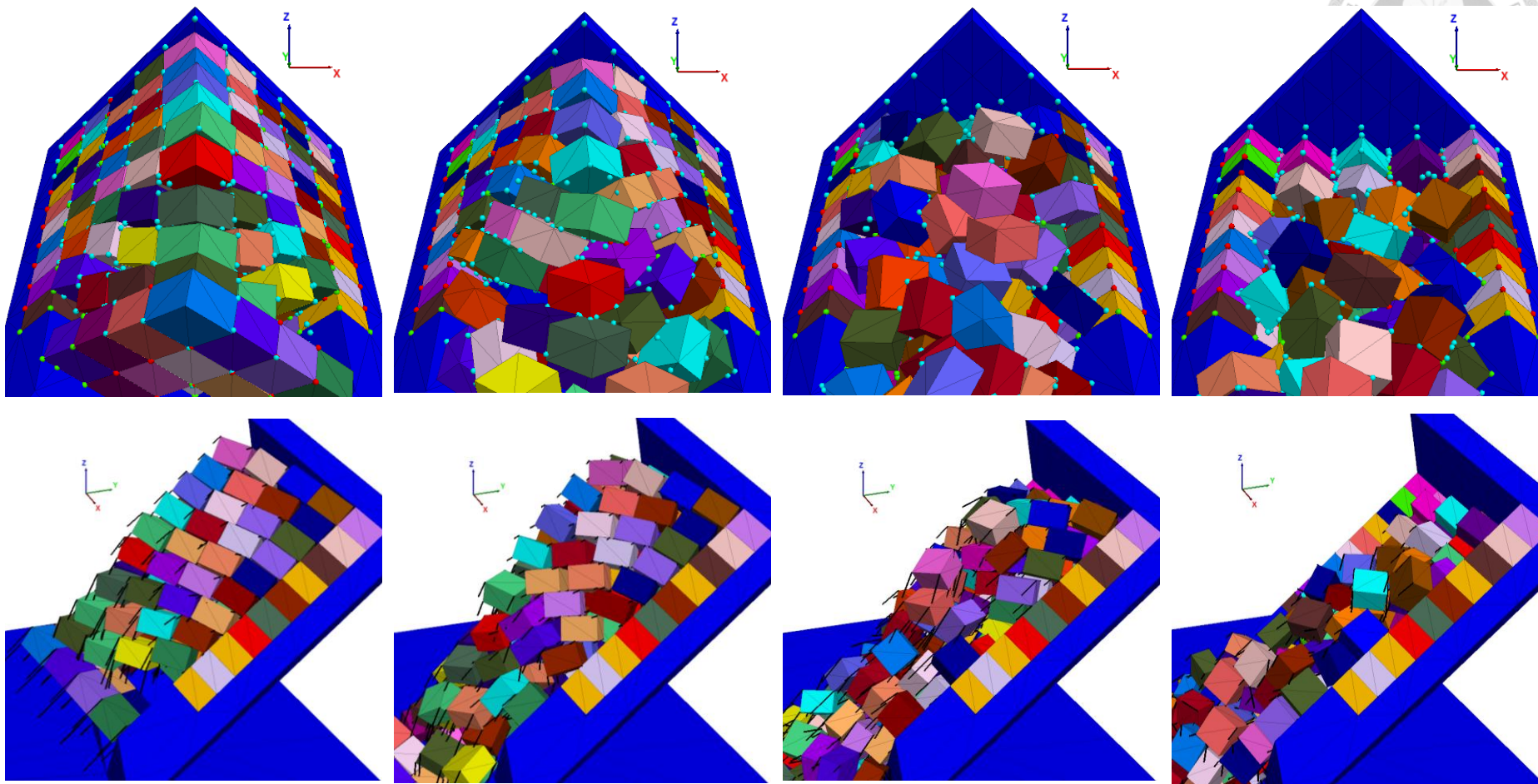


A-11 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 60%、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



A-12 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性  $80\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果

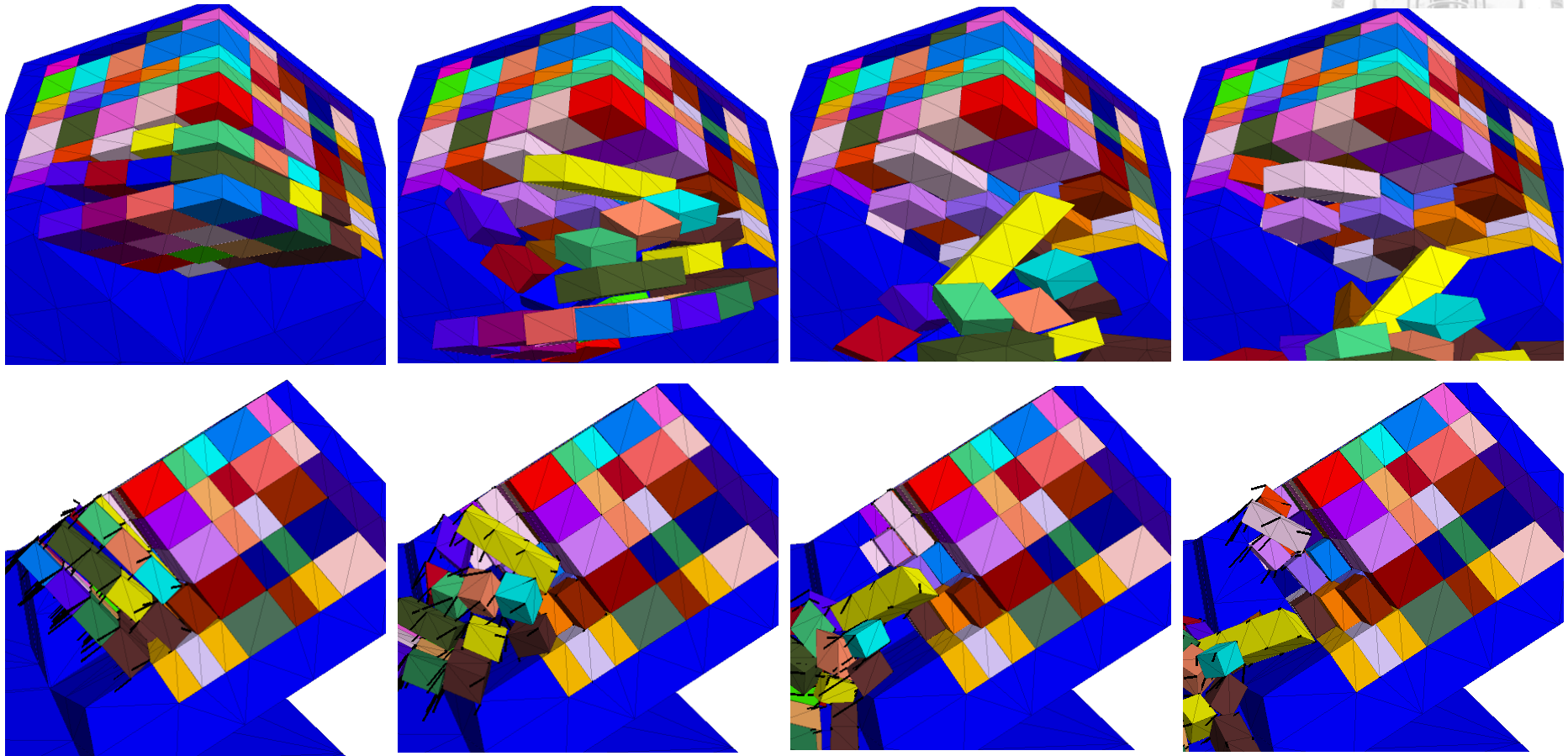




A-13 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性  $100\%$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之模擬結果



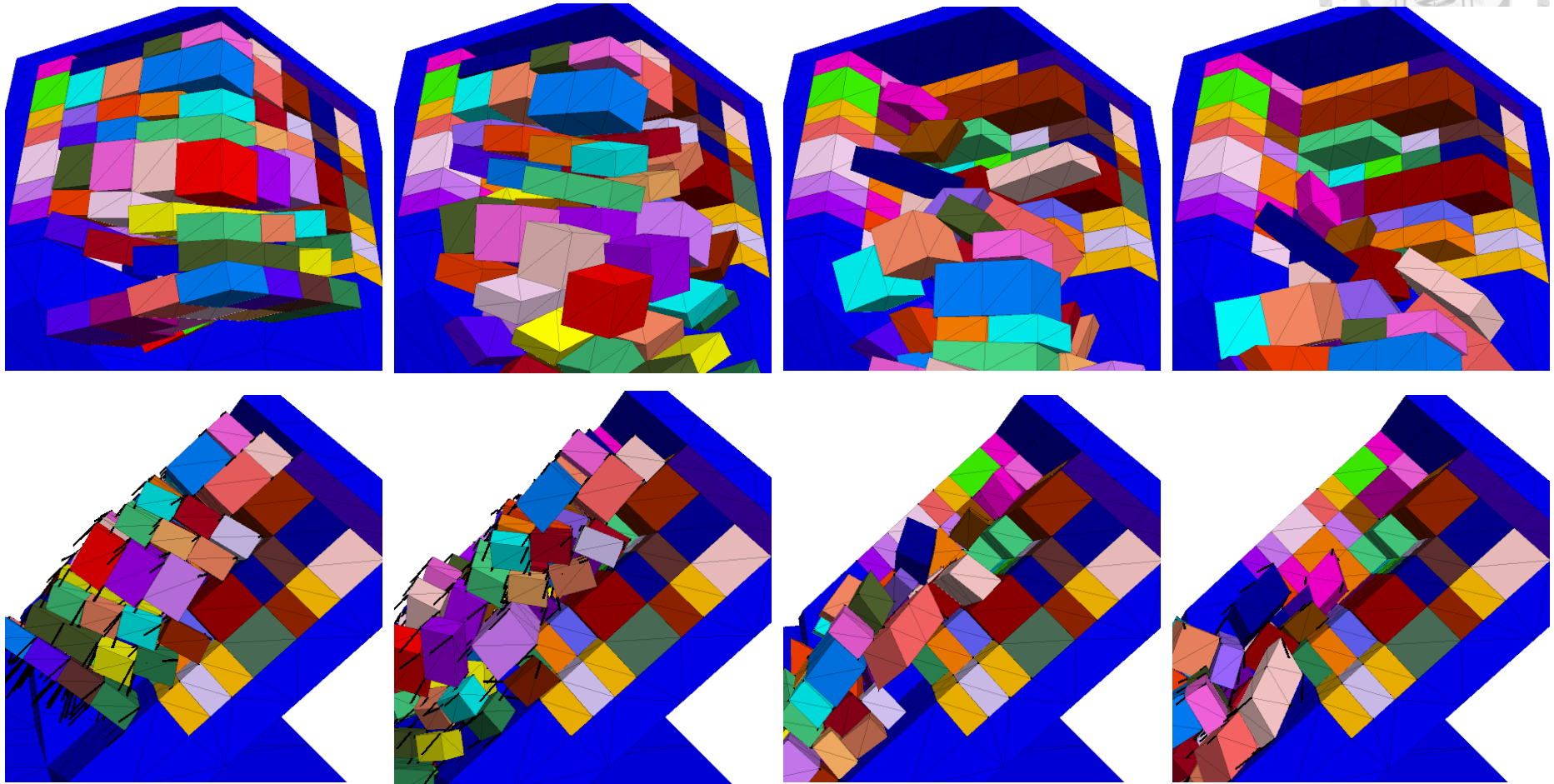
➤ Dihedral Angle :  $120^\circ$  / Plunge :  $30^\circ$  /  $\alpha$  :  $10^\circ$



A-14 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 80 %、 $\alpha=10^\circ$ 之模擬結果



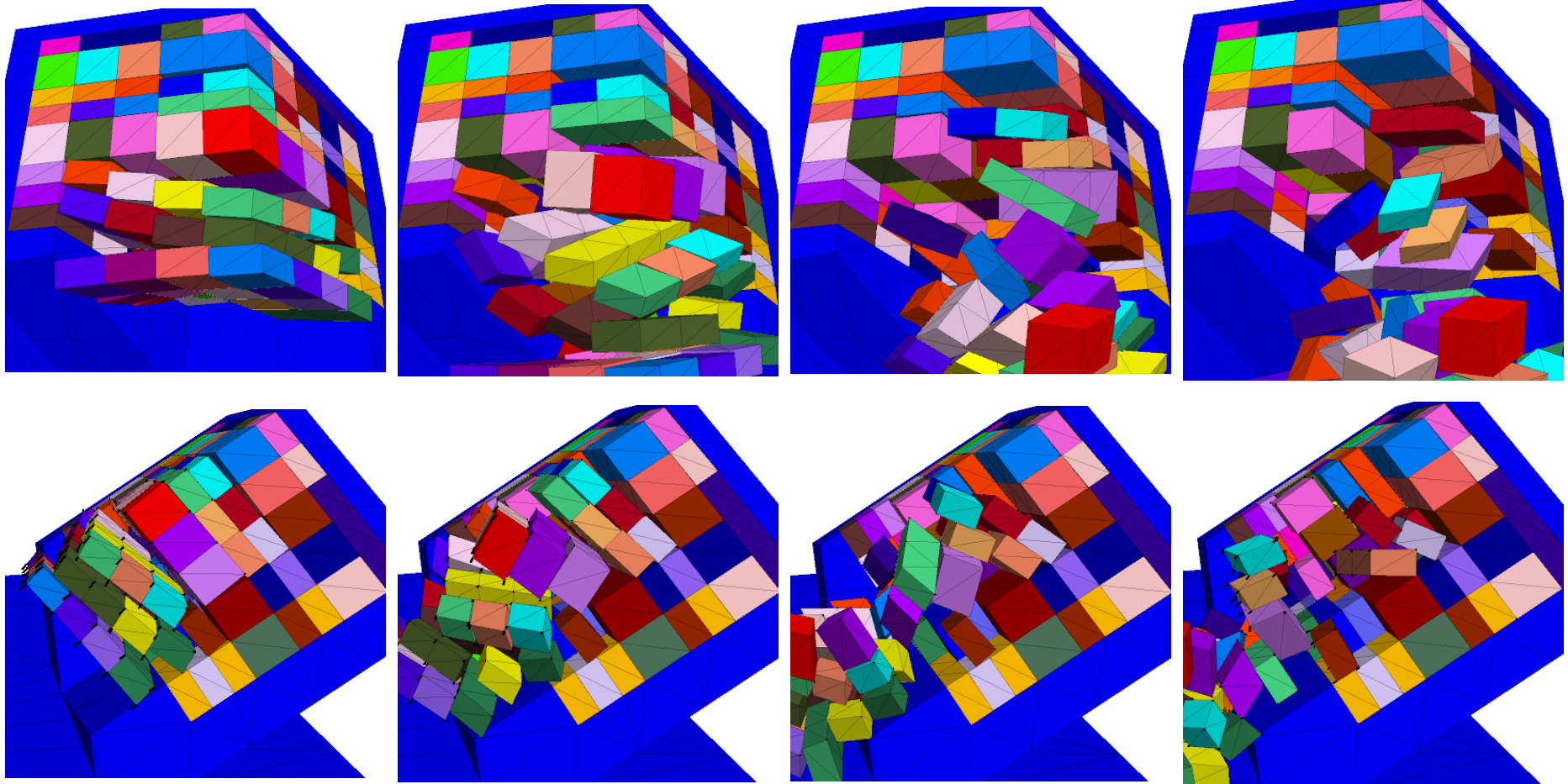
➤ Dihedral Angle :  $120^\circ$  / Plunge :  $40^\circ$  /  $\alpha$  :  $10^\circ$



A-15 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=10^\circ$ 之模擬結果



➤ Dihedral Angle :  $120^\circ$  / Plunge :  $30^\circ$  /  $\alpha$  :  $20^\circ$

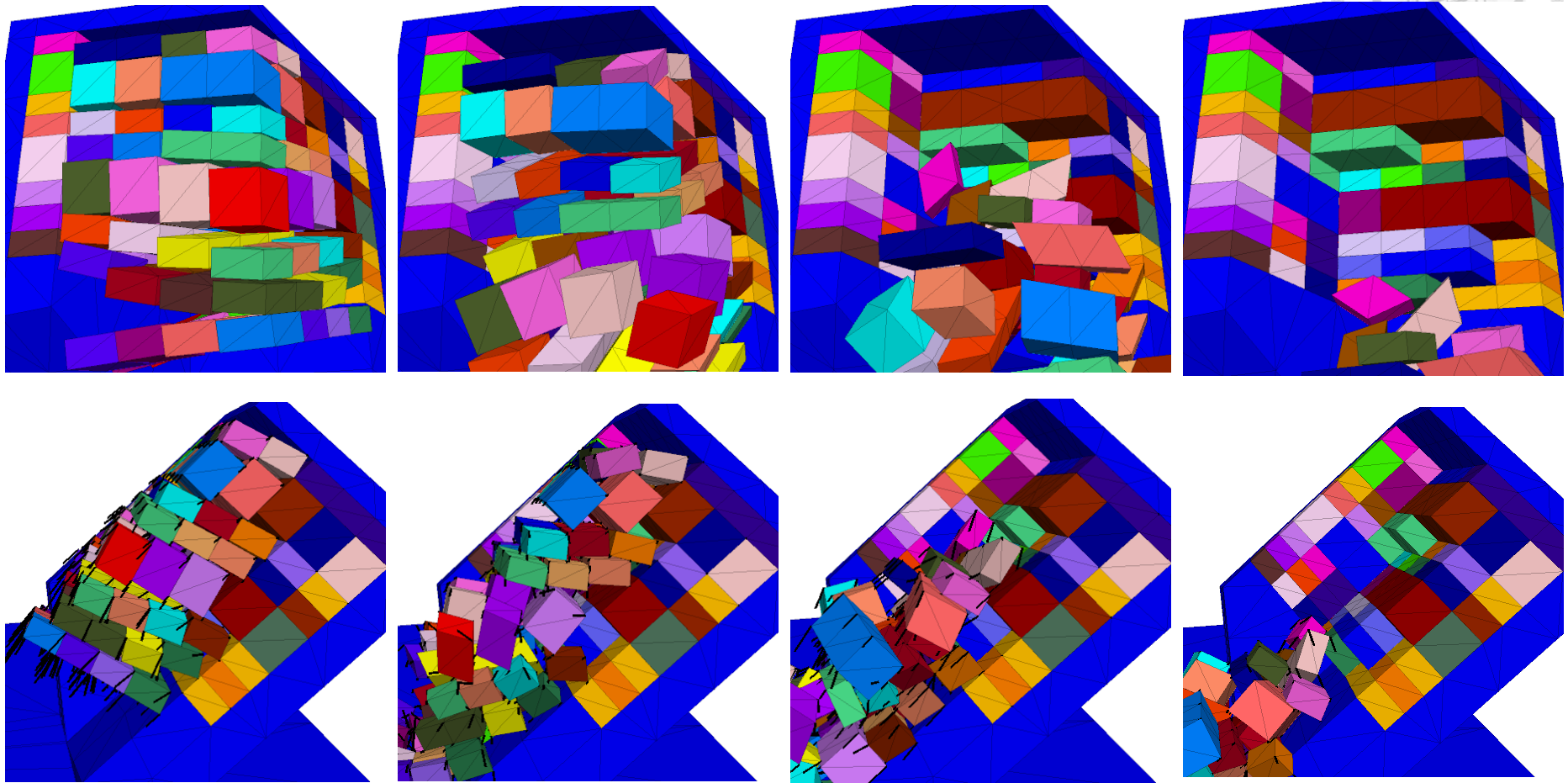


A-16 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 80 %、 $\alpha=20^\circ$ 之模擬結果





➤ Dihedral Angle :  $120^\circ$  / Plunge :  $40^\circ$  /  $\alpha$  :  $20^\circ$

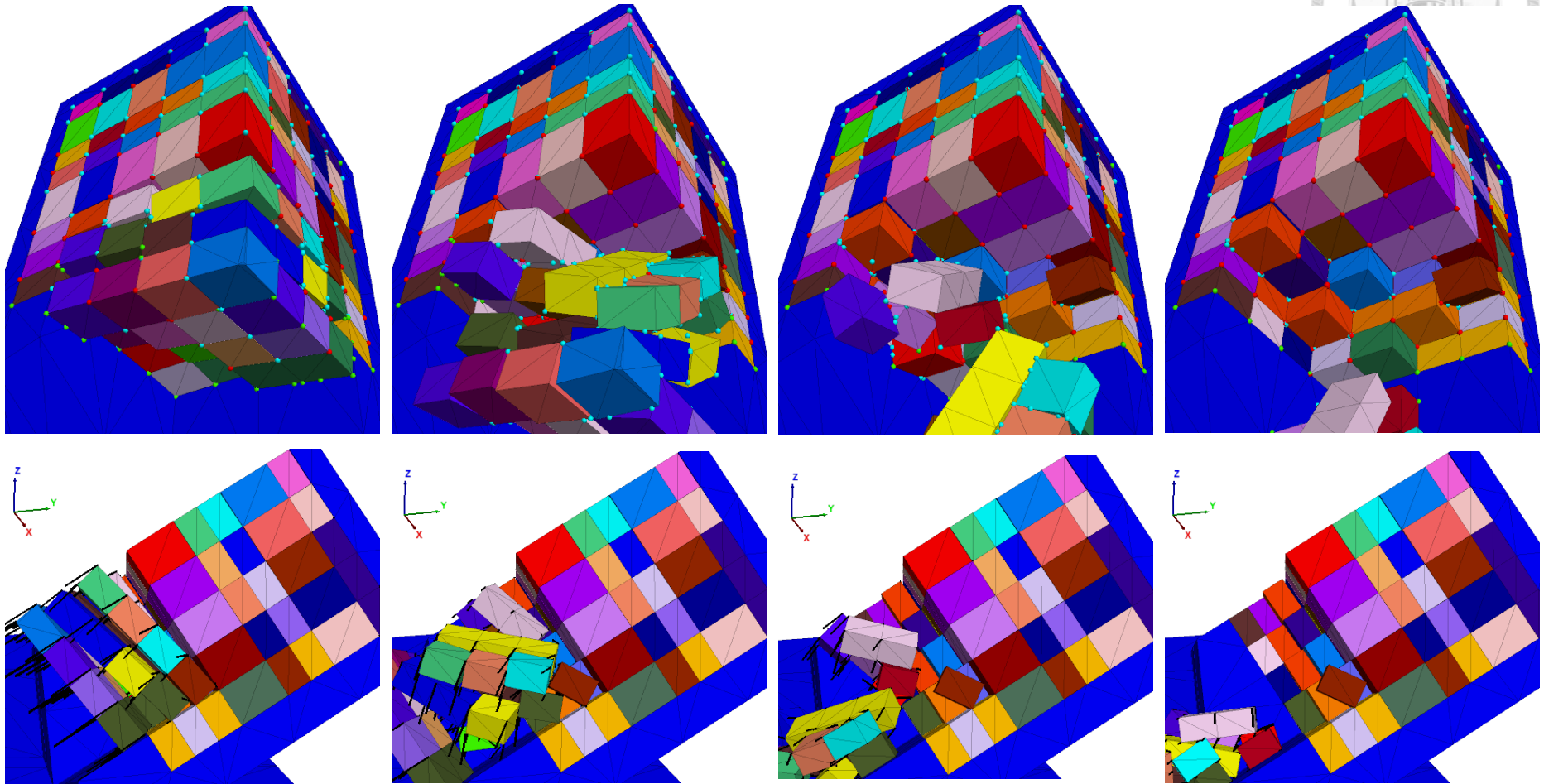


A-17 交角  $120^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=20^\circ$ 之模擬結果





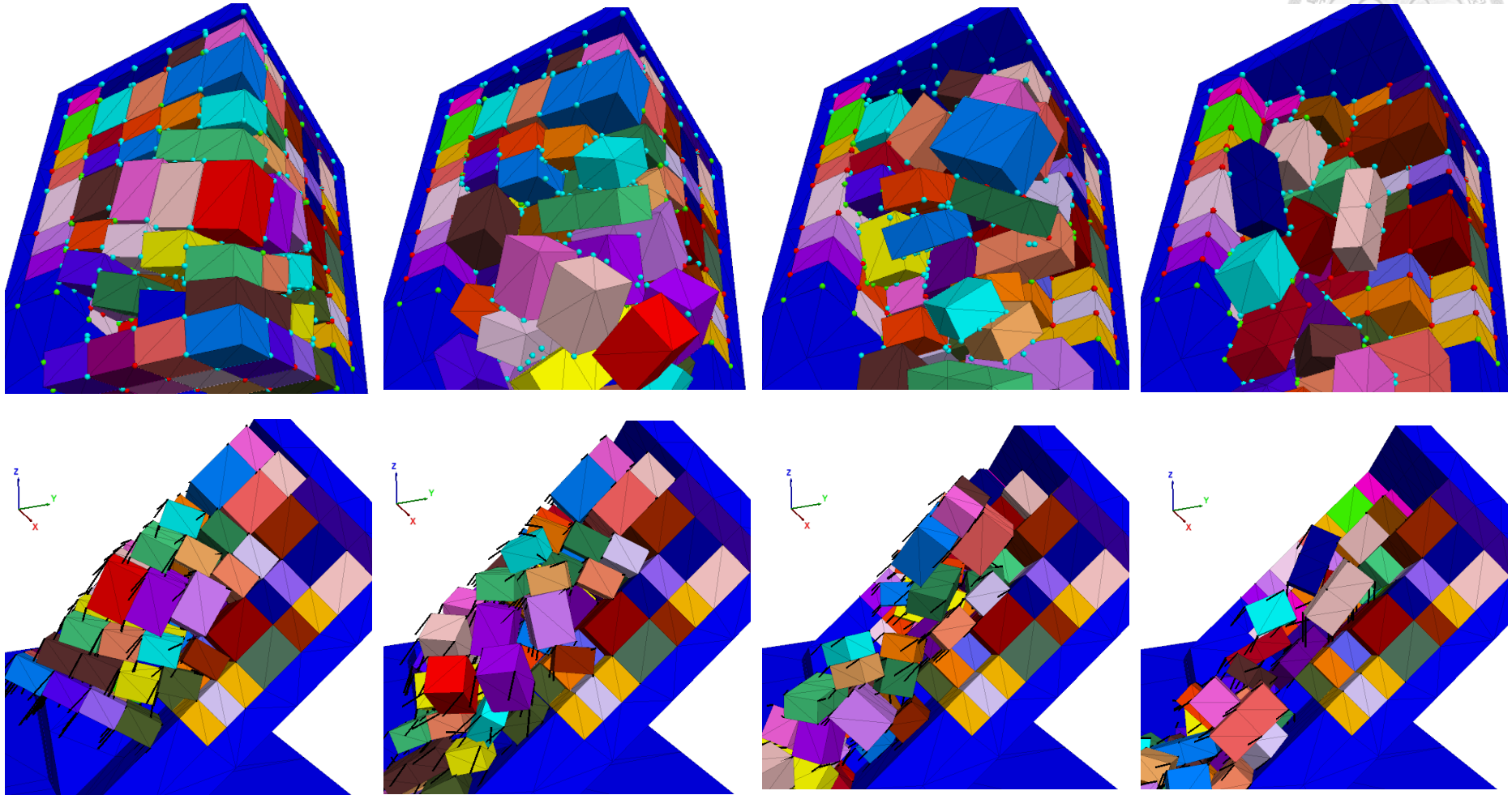
➤ Dihedral Angle :  $90^\circ$  / Plunge :  $30^\circ$  /  $\alpha$  :  $15^\circ$



A-18 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=15^\circ$ 之模擬結果



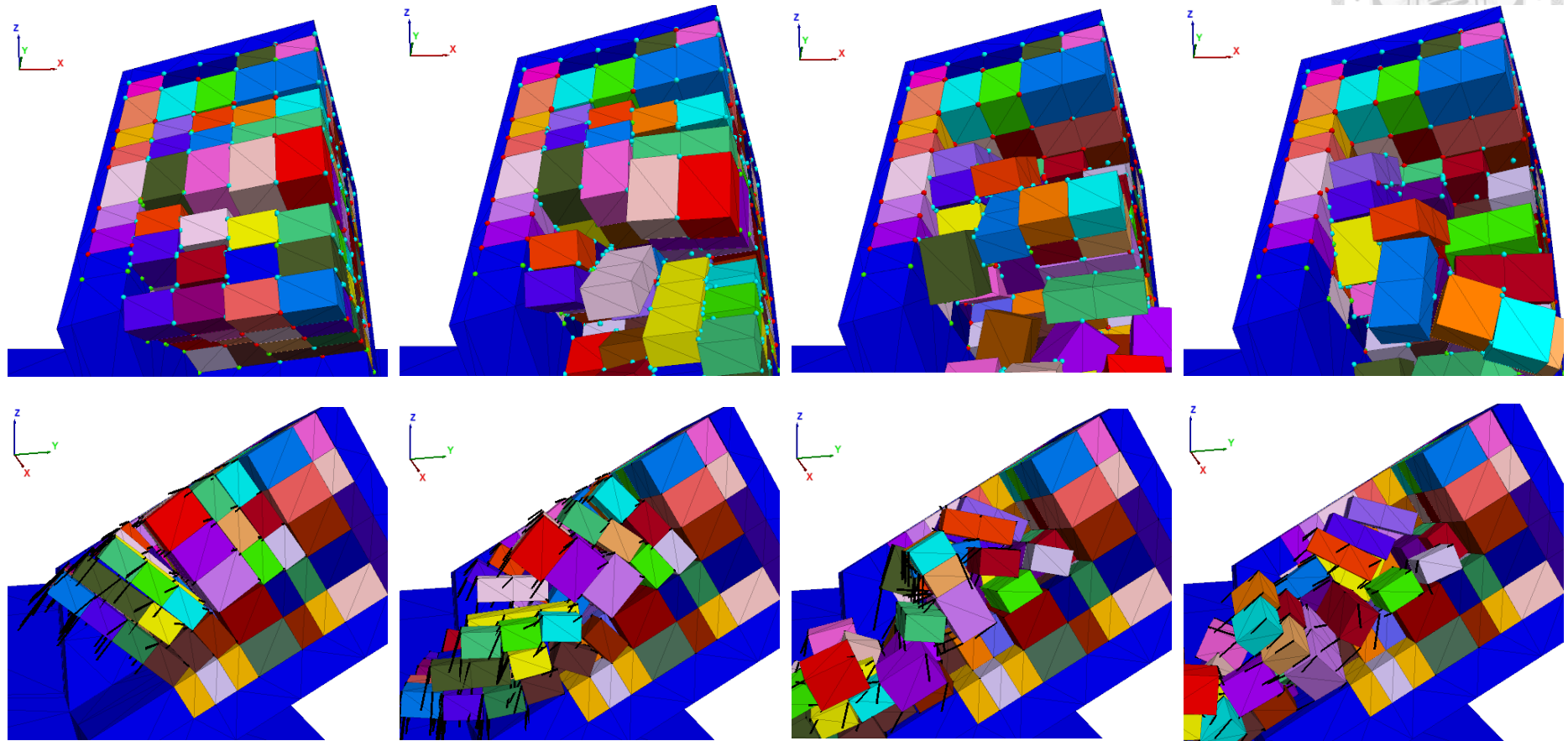
➤ Dihedral Angle :  $90^\circ$  / Plunge :  $40^\circ$  /  $\alpha$  :  $15^\circ$



A-19 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=15^\circ$ 之模擬結果



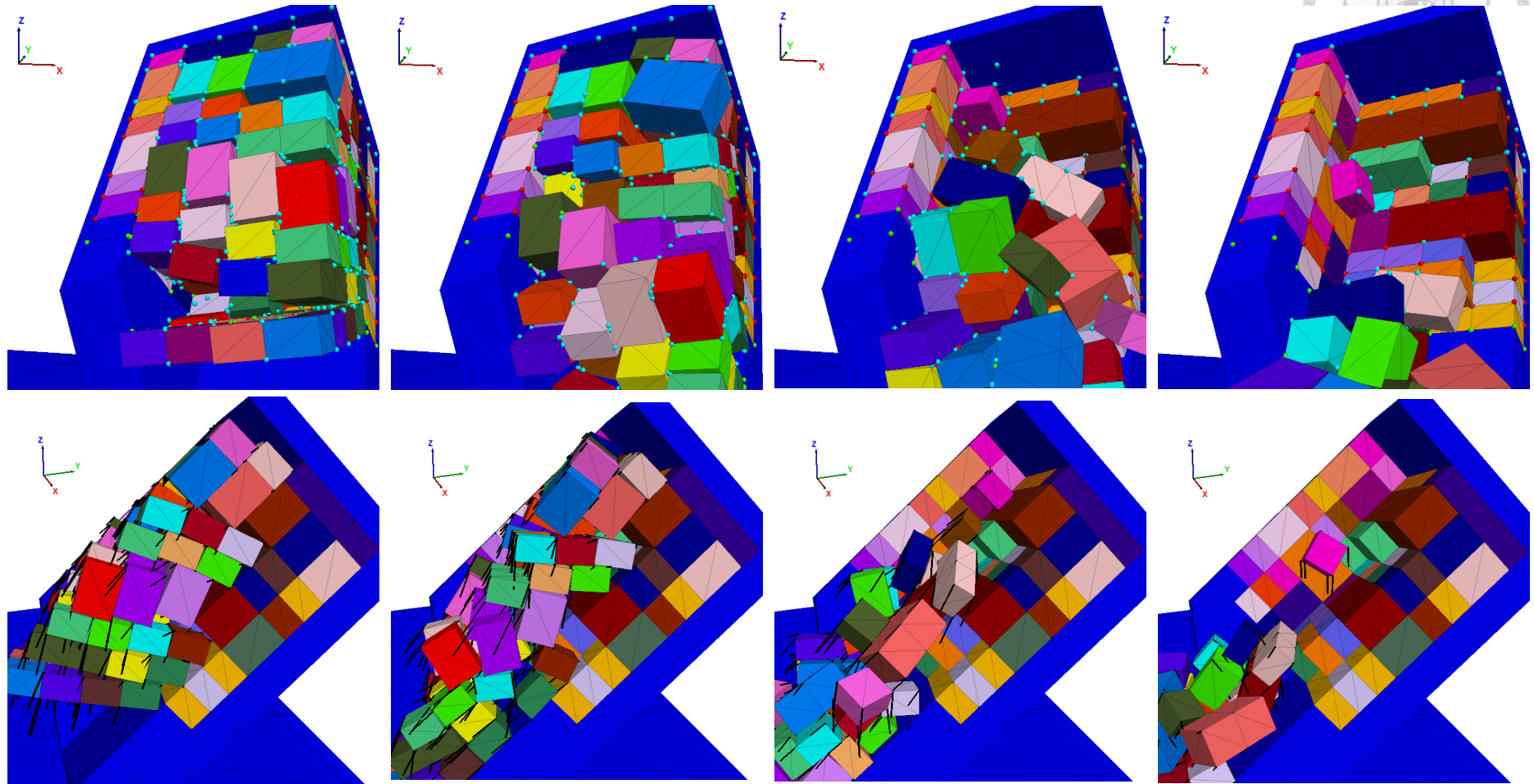
➤ Dihedral Angle :  $90^\circ$  / Plunge :  $30^\circ$  /  $\alpha$  :  $30^\circ$



A-20 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $30^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=30^\circ$ 之模擬結果

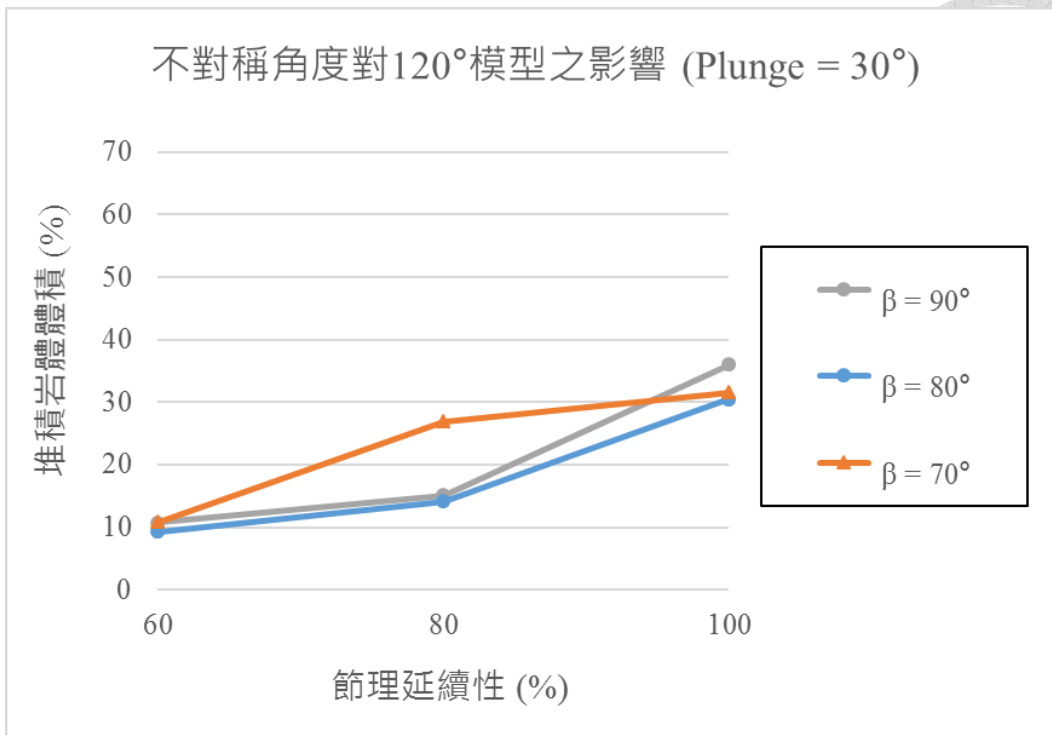


➤ Dihedral Angle :  $90^\circ$  / Plunge :  $40^\circ$  /  $\alpha$  :  $30^\circ$

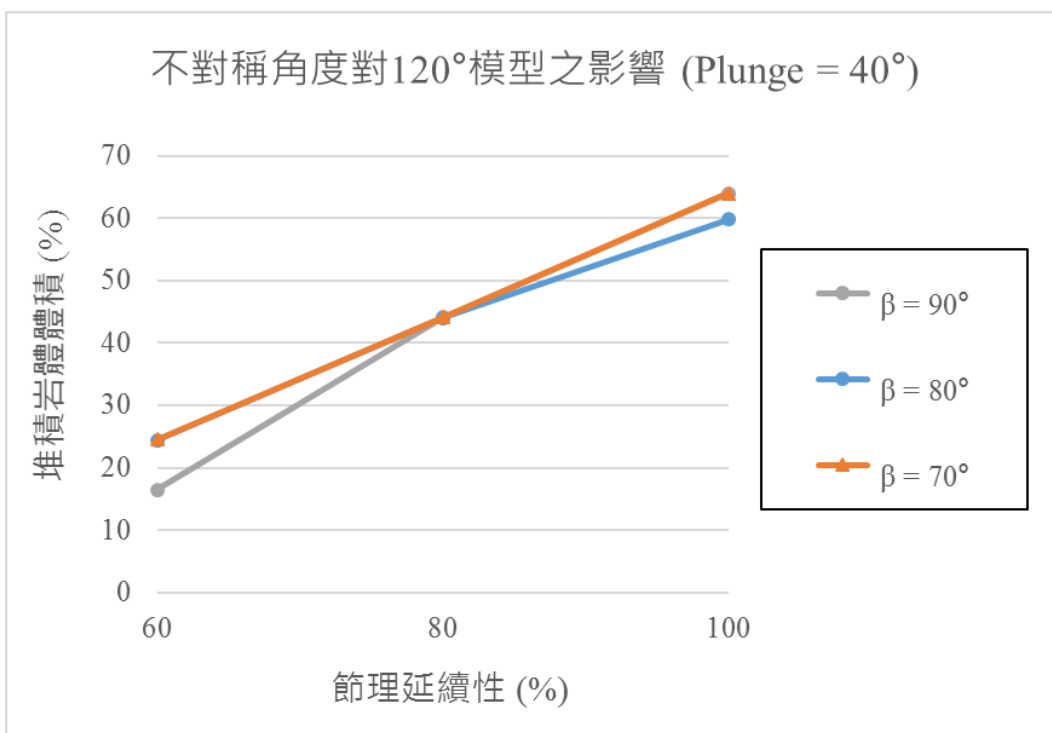


A-21 交角  $90^\circ$ 、交線傾伏角  $40^\circ$ 、延續性 80%、 $\alpha=30^\circ$ 之模擬結果

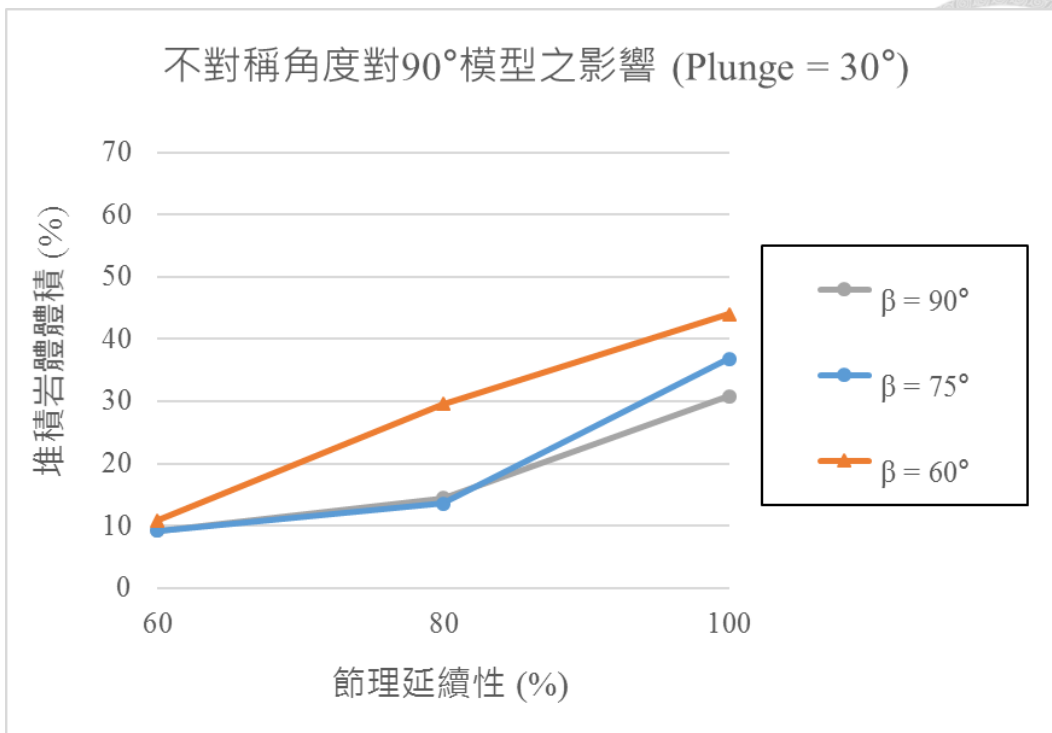




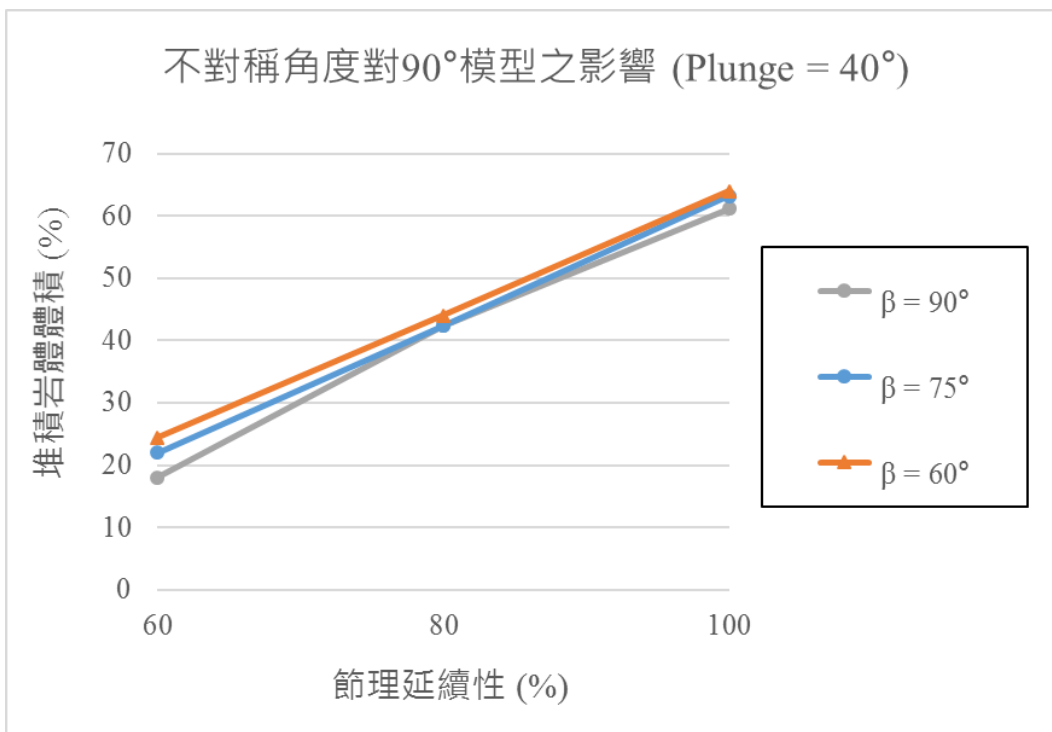
A-22 夾角 120°、交線傾伏角 30°模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例



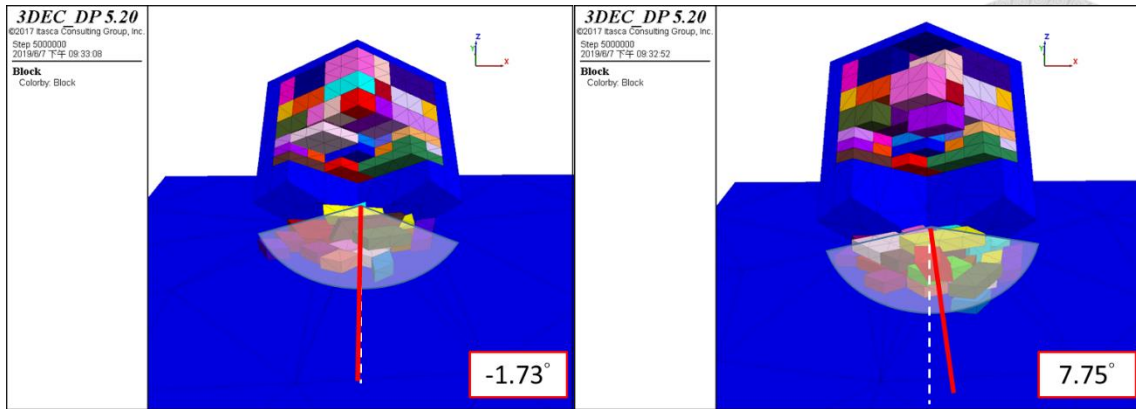
A-23 夾角 120°、交線傾伏角 40°模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例



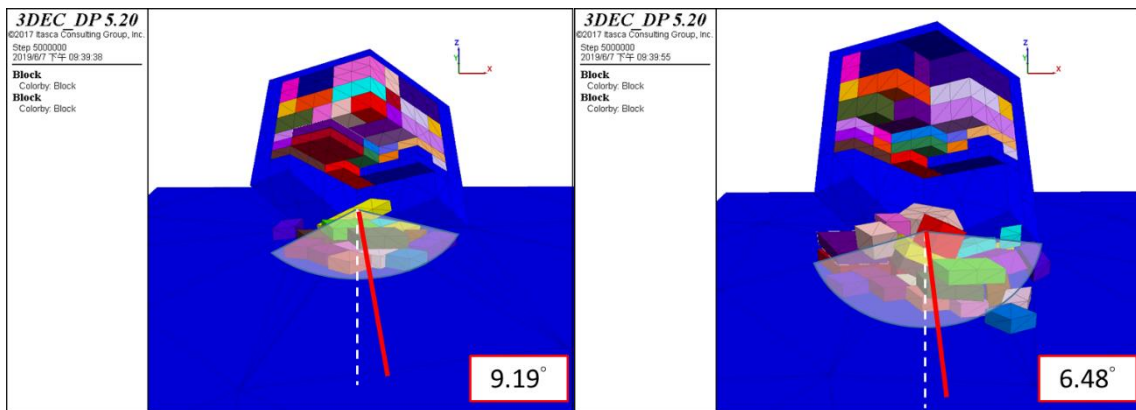
A-24 夾角 90°、交線傾伏角 30°模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例



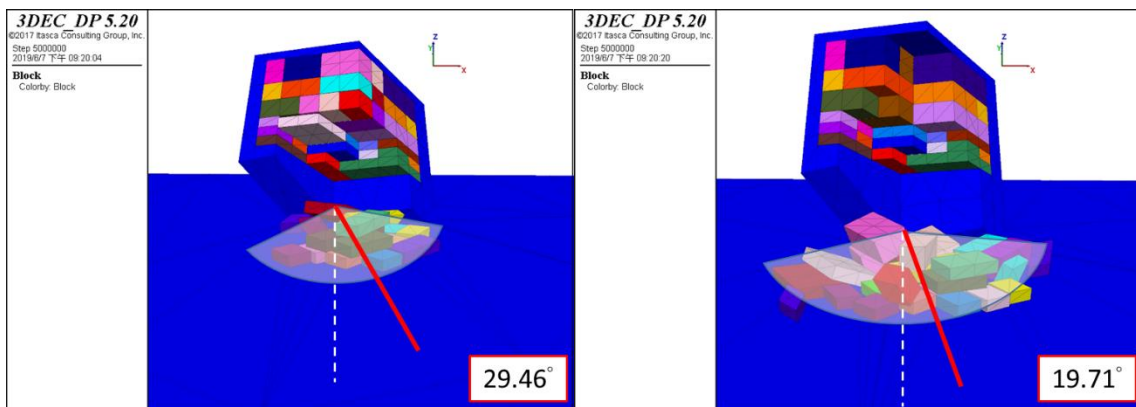
A-25 夾角 90°、交線傾伏角 40°模型中不同 $\alpha$ 角度下之滑動岩塊比例



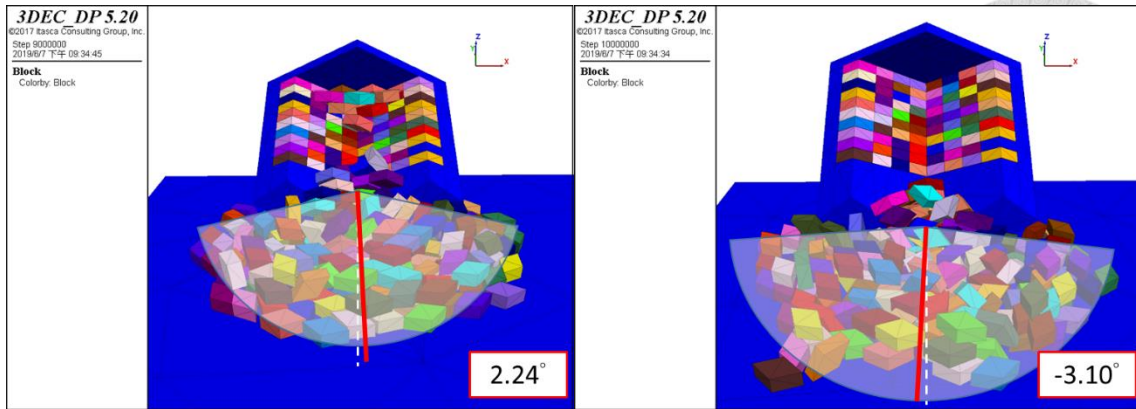
A-26  $\xi = 120^\circ$ 、 $PL = 30^\circ \& 40^\circ$ 、 $P = 60^\circ$ 、 $\alpha = 0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



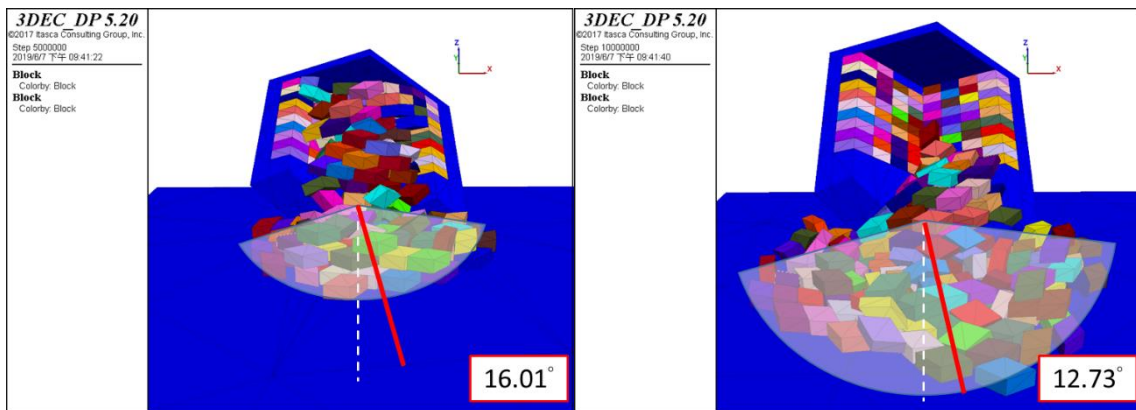
A-27  $\xi = 120^\circ$ 、 $PL = 30^\circ \& 40^\circ$ 、 $P = 60^\circ$ 、 $\alpha = 10^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



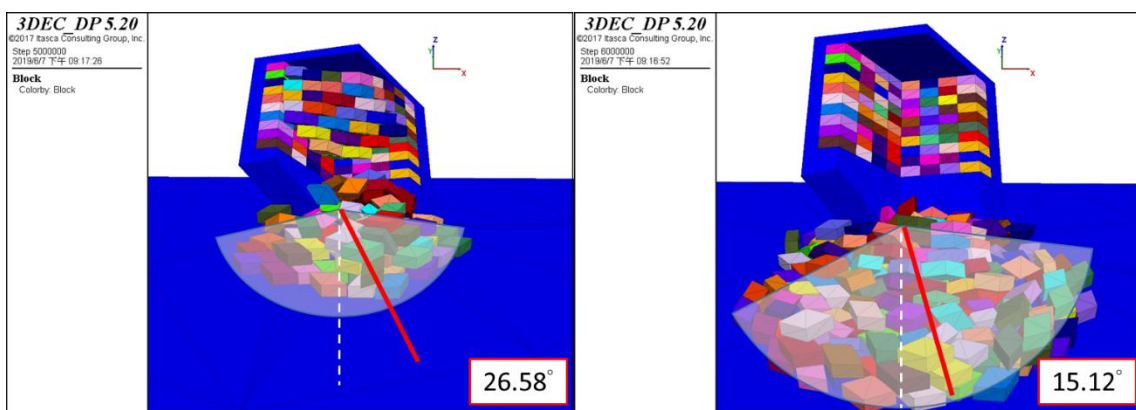
A-28  $\xi = 120^\circ$ 、 $PL = 30^\circ \& 40^\circ$ 、 $P = 60^\circ$ 、 $\alpha = 20^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



A-29  $\xi=120^\circ$ 、 $PL=30^\circ&40^\circ$ 、 $P=100^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

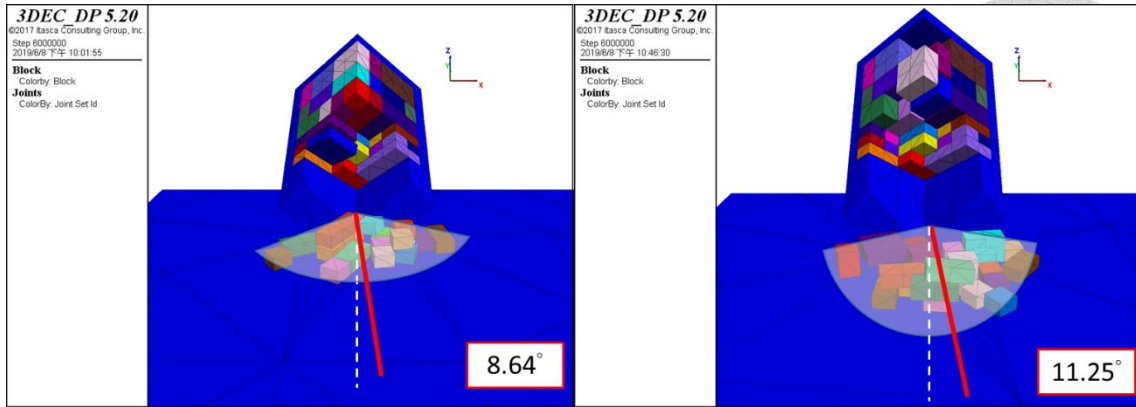


A-30  $\xi=120^\circ$ 、 $PL=30^\circ&40^\circ$ 、 $P=100^\circ$ 、 $\alpha=10^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

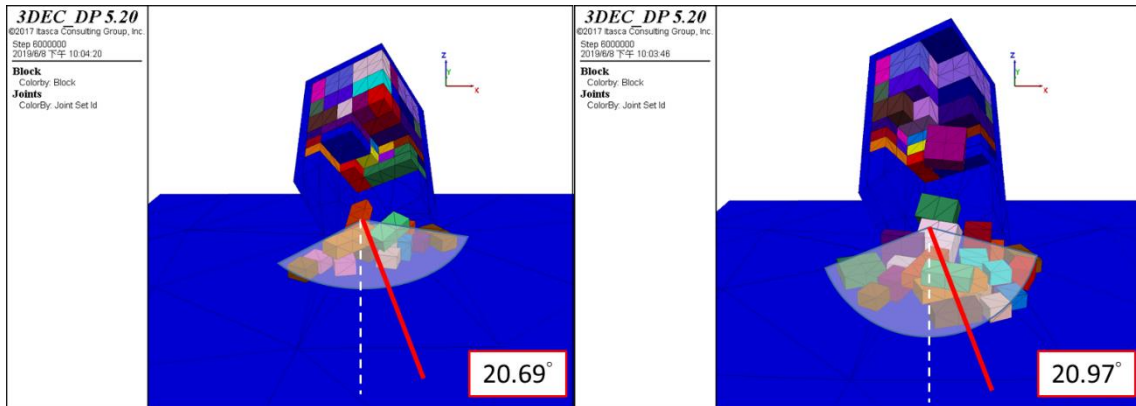


A-31  $\xi=120^\circ$ 、 $PL=30^\circ&40^\circ$ 、 $P=100^\circ$ 、 $\alpha=20^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

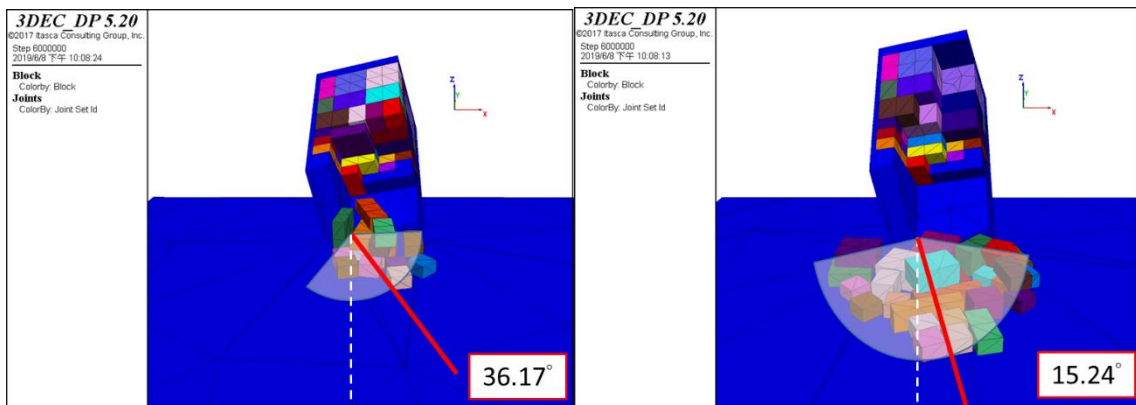




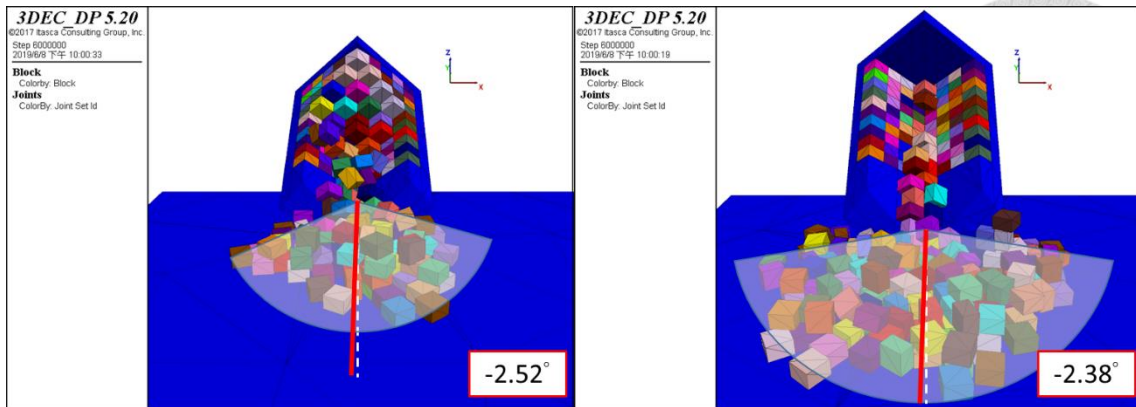
A-32  $\xi=90^\circ$ 、 $PL=30^\circ\&40^\circ$ 、 $P=60^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



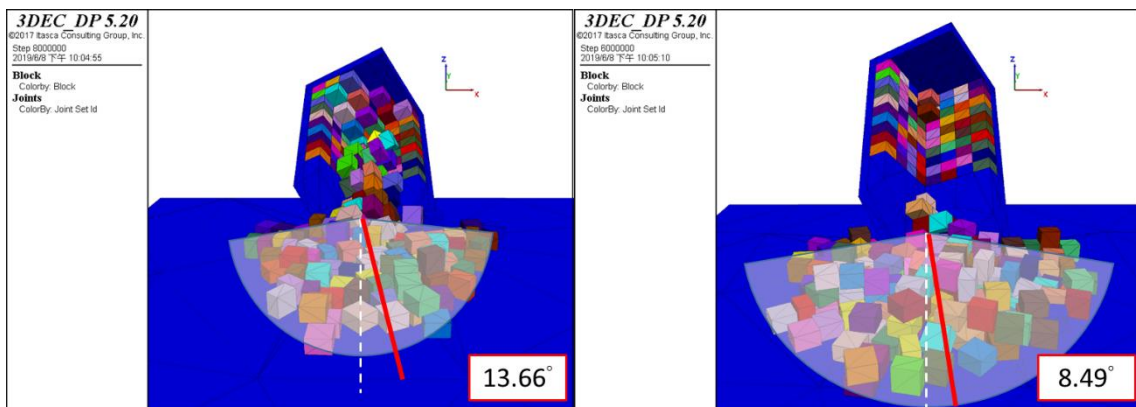
A-33  $\xi=90^\circ$ 、 $PL=30^\circ\&40^\circ$ 、 $P=60^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



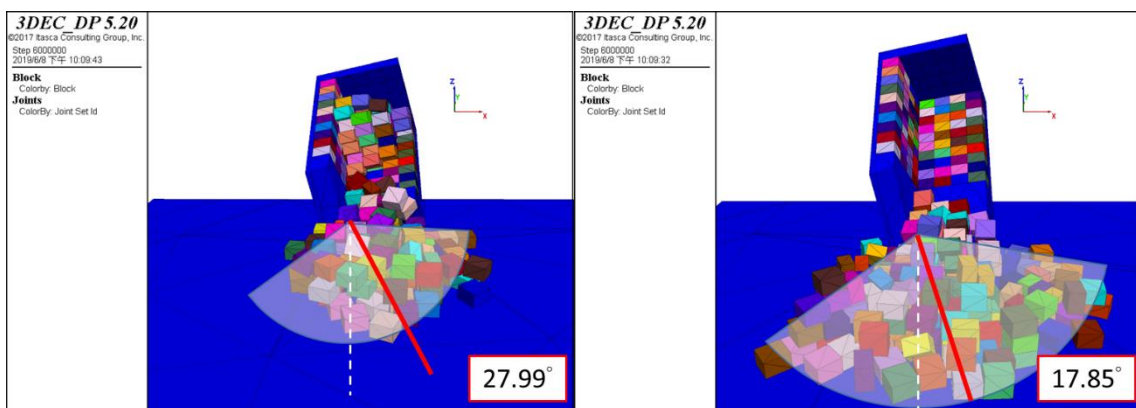
A-34  $\xi=90^\circ$ 、 $PL=30^\circ\&40^\circ$ 、 $P=60^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



A-35  $\xi=90^\circ$ 、 $PL=30^\circ&40^\circ$ 、 $P=100^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



A-36  $\xi=90^\circ$ 、 $PL=30^\circ&40^\circ$ 、 $P=100^\circ$ 、 $\alpha=15^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )



A-37  $\xi=90^\circ$ 、 $PL=30^\circ&40^\circ$ 、 $P=100^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 之堆積區分布與夾角角度 ( $\delta$ )

## 附錄B 委員問答



提問 委員	編號	問題	回覆情形
羅 佳 明 教 授	1	塊體運動機制不只滑動 (sliding) 及翻覆 (toppling) 兩種, 若前方塊體被後方撞擊會變快形成墜落 (falling), 後方撞擊完後速度會降低, 轉為 toppling, 以及若塊體開始運動後遭撞擊形成的滾動 (rolling)。應多比較不同階段的運動模式, 只有初始階段較不易清楚描述塊體的崩落過程。	感謝委員提醒, 的確塊體在開始運動以後會開始有如老師所講得更多更複雜的運動機制, 但本研究目前尚鎖定在探討塊體剛開始運動時之機制, 岩體發生多階段後退式的漸進破壞過程, 以及塊體運動完後堆積至趾部的堆積型態。未來團隊研究可詳加探討塊體運動過程的細節, 針對不同節理參數對楔形塊體的運動機制的作影響分析與評估。
	2	研磨石的參數及數值模擬 3DEC 中所使用的參數如何取得? 假設的部分要寫清楚, 哪裡是剛體或哪裡會破壞要寫清楚。	物理模型試驗中模擬岩石材料之物理性質是參考 2010 年羅佳明老師的博士論文中, 所列舉之數據, 唯材料之摩擦角是以傾斜儀對塊體作基本摩擦角試驗所取得之平均值。故後續數值模擬中之節理摩擦角皆訂定為 30°。
	3	物理試驗中節理面交線傾伏角 (plunge) 是慢慢抬升, 跟真實世界的如何比較? 持續抬升比較像褶皺作用	原先物理試驗之設置理念是希望能觀察在不同節理面交線傾伏角的條件下, 其岩體的崩落後的最後產狀, 以最後階段的岩塊分佈來比對數值模擬中的結果, 故直接以緩慢改變 plunge 的方式進行物理實驗。但若仔細探討不同 plunge 下, 整個岩體從開始運動、過程中互相碰撞之運動機制, 應該要改以固定 plunge 的形式, 以一面牆先擋住整個岩體, 實驗開始時在瞬間拿掉阻擋, 以模擬真實世界中的節理岩體, 受到趾部侵蝕後的塊體破壞及運動機制。

提問 委員	編號	問題	回覆情形
羅佳明 教授	4	第四章寫的三个案例容易讓人以為後續研究也會以三個案例去進行模擬。建議南雅里案例描述多一點，並加上地質圖。	感謝委員提醒，當初是期望將點雲模型之位態分析套用至不同坡向之邊坡，才以三個實際岩石邊坡案例之分析進行說明，後續數值模擬則選定其中屬逆向斜交坡之南雅邊坡案例。已遵照辦理將南雅里案例部分作補充描述及地質圖圖示。
	5	誤差應是將一方設為真值，研究中物理模型與數值模擬之比較，應改用比較差異率較佳。	感謝委員提醒，已遵照辦理將論文相關部分作審慎修改。
	6	崩落下來之岩塊應稱作崩積材料或岩屑。	感謝委員提醒，已遵照辦理將論文相關部分作審慎修改。
李宏輝 教授	7	是否會有同時發生 sliding 及 toppling 的複合機制?	在模擬的過程中許多塊體會交替發生 sliding 及 toppling 的複合機制，甚至在運動後期會開始互相撞擊產生 falling 或 rolling 的機制，但本研究目前只針對塊體初始運動之機制作分類，故只將具有旋轉趨勢的塊體判定為 toppling，而純粹往交線方向滑動的塊體則判定為 sliding。
	8	是否有在模型中區分哪些部位會先發生 toppling? 哪些部位會先發生 sliding?	本研究目前在分析運動機制上使用的方法是直接統計並比較所屬各運動機制塊體的總數量，但若要詳細探討每一塊各自的運動機制，在 3DEC 中是可以做到的，只是所需時間相對較長，故本研究中尚未以此作為探討依據。
	9	數值模擬中使用之參數是否有依據物理模型試驗之結果進行校正?	感謝委員提醒，因為簡化物理模型試驗較難得到定量的參數較依據，故於本研究中尚未將數值模擬所使用之相關參數依據物理模型試驗進行校正，只有在數值模擬中對各參數以試誤法作調整，使模擬結果盡量符合物理模型試驗結果中之運動行為及殘餘岩體產狀。

提問 委員	編號	問題	回覆情形
李宏輝 教授	10	塊體百分比應該改用體積比較佳，因為不同延續性下會造成切割的塊體體積會不一樣。	感謝委員提醒，確實因不同節理延續性下所切割之塊體數量不盡相同，所以較不適合以崩落塊體數來比較各模型間之崩落比例，應以塊體體積百分比，才能較準確表達崩落岩石材料所佔總岩體的比例。
王泰典 教授	11	有無考慮解壓節理對運動型態、崩塌開始發生時之影響？	就數值模擬的研究結果來看，解壓節理的存在對於節理岩體來說，雖然因為其本身具有一定的延續性分布，若沒有完全貫穿岩體的後方，除非持續受到風化作用才會使岩塊掉落，但多了一組高角度節理會讓邊坡中能夠形成楔形破壞的節理組合增加，且相交而出露於坡面中的交線傾伏角可能會非常陡，使岩塊具有極大潛勢向下產生形狀趨近於平面狀的楔形破壞。
	12	岩體都從底部破壞，其單塊跟整體的安全係數是否相同，會不會釘住關鍵岩塊就能使邊坡整體穩定？	若不考慮結理延續性，其切割的所有塊體的尺寸皆相同時，才較能說其單塊跟整體的安全性相同，但當岩體中之節理具有一定比例的延續性時，其岩塊之形狀及尺寸都會有所差異，每個塊體接觸面積或是中心位置也都不甚相同，故若要定量分析岩體中每個部位的安全係數，必須仔細地將每塊岩塊所受之外力作計算，定義出所有有可能先產生翻覆或滑動之關鍵岩塊，才有可能在整個岩體發生破壞前將關鍵岩塊固定進而穩定邊坡整體。



## 附錄C 原始程式碼



### C-1 計算塊體數量原始碼

```
def _bnum
    local bi = block_head
    loop while bi # 0
        num_sum = num_sum + 1
        bi = b_next(bi)
    end_loop
end
```

### C-2 計算質心位置原始碼

```
def _mean
    local bi = block_head
    loop while bi # 0
        local vol_bi = float(b_vol(bi))
        local x_bi = float(b_x(bi))
        local y_bi = float(b_y(bi))
        vol_sum2 = vol_sum2 + vol_bi
        x_multiply_vol = x_bi * vol_bi
        y_multiply_vol = y_bi * vol_bi
        x_vol_sum = x_vol_sum + x_multiply_vol
        y_vol_sum = y_vol_sum + y_multiply_vol
        bi = b_next(bi)
    end_loop
    x_cen = x_vol_sum / vol_sum2
    y_cen = y_vol_sum / vol_sum2
end
```

### C-3 計算塊體體積原始碼

```
def _bvol
    local bi = block_head
    loop while bi # 0
        local vol_bi = float(b_vol(bi))
        vol_sum = vol_sum + vol_bi
    end_loop
end
```

```

        bi = b_next(bi)
    endloop
end

```



#### C-4 倒懸邊坡三維模型建置原始碼

```

def extrude(geom_set, ycoord, filename)
; INPUT: geom_set - the name of the geometry set to be extruded (string)
;         zcoord   - z coordinate for the end of the extrusion (float)
;         filename - name of file to hold poly commands (string)
    status = open(filename,1,1)
    if status > 0
        local io = out(filename+'could not be opened for writing. Status =
'+string(status))
        exit
    end_if
    file_line = get_array(1)
    local gset = gset_find(geom_set)
    loop foreach local gpol gpol_list(gset)
;     if gpol_check(gpol) = 1
        file_line(1) = 'poly prism a '
        loop i (1,gpol_size(gpol))
            gn = gpol_node(gpol,i)
            gnpos = gn_pos(gn)
            file_line(1) = file_line(1) + string(gnpos)+' '
        end_loop
        file_line(1) = file_line(1) + '...'
        status = write(file_line,1)
        file_line(1) = ' b '
        loop i (1,gpol_size(gpol))
            gn = gpol_node(gpol,i)
            gnpos = gn_pos(gn)
            newpos = vector(xcomp(gnpos),ycoord,zcomp(gnpos))
            file_line(1) = file_line(1) + string(newpos)+' '
        end_loop
        status = write(file_line,1)
;     else ; invalid polygon
;         status = out('Invalid polygon: '+string(gpol_id(gpol)))
;     end_if
    end_loop
    status = close
end

```