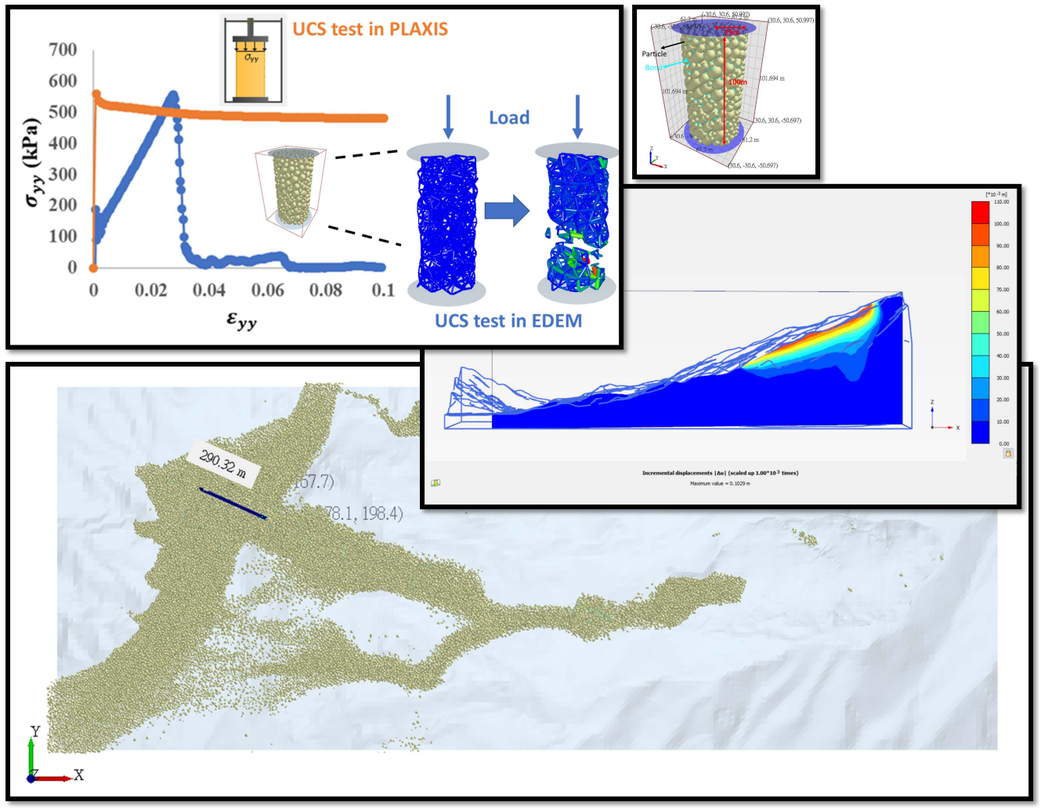
SWCB-110-029

110年創新研究計畫—應用分段式與整合型數值方法探討大規模崩塌衍生之天然壩災害潛勢區位

成果報告書



行政院農業委員會水土保持局

與您一起打拼

行政院農業委員會水土保持局
54044南投市中興新村光華路6號
https://www.swcb.gov.tw

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國110年12月

110年創新研究計畫—應用分段式與整合型數值方法探討大規模崩塌衍生之天然壩災害潛勢區位 成果報告書

110年度 行政院農業委員會水土保持局

SWCB-110-029

應用分段式與整合型數值方法探討大規模崩塌衍生之天然壩災害潛勢區位
Study on the potential area of large-scale landslide dam using integrated and two stage numerical methods
(成果報告書)

執 行 單 位：國立中興大學

執 行 期 間：110 年 01 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：張光宗 教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 110 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

應用分段式與整合型數值方法探討大規模崩塌衍生之天然壩災害潛勢區位

摘要

迄今雖有計畫對大規模崩塌潛在地進行現地調查與評估工作，探討大規模崩塌的發生度、保全度以及活動度等，但是倘若發生大規模崩塌，其所衍生出的複合型災害狀況 (包括大規模崩塌發生位置與崩塌量體、衍生天然壩的位置與尺寸等) 仍少有研究探討與評估。本研究利用小林村崩塌案例探討 (1) 分段式數值方法一：PLAXIS→RAMMS；(2) 分段式數值方法二：PLAXIS→EDEM；(3) 整合型數值方法：EDEM。其中 (1) 與 (2) 可探討連體力學法與分離元素法的差異，(3) 可探討整合型數值方法與分段式數值方法的差異。研究結果發現各項模擬方法均有其優缺點，分段式數值方法二 (PLAXIS 3D → EDEM) 的結果最符合實際狀況；整合型數值方法 (EDEM) 的結果則與實際狀況有些出入，堆積擴散程度較嚴重；而分段式數值方法一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 則在調整 RAMMS 流動參數後，結果雖可符合實際狀況，但是流動參數的調整往往沒有依據，且 RAMMS 中的流動參數較難結合材料的力學行為。我們認為若能利用數值力學試驗將有限元素的宏觀參數與分離元素的微觀參數架接對應，那麼分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 應是相對不錯的預測崩塌

堆積的模式，尤其 PLAXIS 強度異向性模式可考慮不同的弱面方位，在預測滑動面方面有著出色的表現。

小林村案例的成果歸納出了確立各項參數的決定程序，我們利用此程序來挑選適當的邊坡材料的宏觀、微觀或流動參數，應用模擬結果較好的分段式數值方法一、二於評估其他大規模崩塌潛勢地區之破壞及崩落全過程，包括九份二山邊坡、廬山聚落邊坡 D066 以及廬山北坡。本研究成果可預測崩塌位置、崩塌量體、堆積位置、堆積厚度或堆積形狀等，提供上述大規模崩塌衍生之天然壩災害資訊供相關單位參考。

關鍵詞：大規模崩塌、堰塞壩、分段式數值方法、整合型數值方法

Study on the potential area of large-scale landslide dam using integrated and two-stage numerical methods

Abstract

There are some research projects regarding the site investigation of potential area of large-scale landslide, but is less regarding the prediction of large-scale landslide dam. On the basis of the Xiaolin landslide case, the study discussed: (1) the two-stage numerical method one, PLAXIS→RAMMS; (2) the two-stage numerical method two, PLAXIS→EDEM; and (3) the integrated method, EDEM. Then we discussed the difference of continuum mechanics approach and distinct element method via (1) and (2), and the difference of two-stage numerical methods and integrated method via (3) and the others. The results show that the two-stage numerical method two, PLAXIS→EDEM has best simulated result. There is some discrepancy between the integrated method, EDEM and the situation of real deposit. Although the result of the two-stage numerical method one, PLAXIS→RAMMS can achieve the situation of real deposit by adjusting the RAMMS parameters, the adjustment usually has no basis. Besides, the RAMMS parameters are more difficult to be corresponded to the mechanical behavior of materials. In our opinion, the two-stage numerical method two, PLAXIS→EDEM could be the excellent procedure through numerical mechanical experiments corresponding to the finite element method and the distinct element method.

Especially, the good results of slip surface are predicted in the Iso-JRMC model of PLAXIS.

The decision procedure of parameters was established through the Xiaolin landslide case, and then we used the procedure to choose the parameters of PLAXIS, RAMMS, or EDEM. Furthermore, the two-stage numerical method one and two were applied to simulate other potential areas of large-scale landslide due to their better fitting results, including the Jiu-fen-er-shan slope, the Lushan D066 slope, and the Lushan northern slope. The result of this study can predict the landslide location, the landslide volume, the deposit location, and the deposit area, etc. The information could be some reference about the disaster prevention of large-scale landslide.

Keywords: large-scale landslide, landslide dam, two-stage numerical method, integrated method

目次

摘要.....**I**

Abstract.....**III**

目次.....**V**

表次.....**VII**

圖次.....**IX**

第一章　緒論.....**1**

第二章　研究方法.....**6**

第一節　節理異向性結合莫爾庫倫模式.....10

第二節　連體力學法.....12

第三節　分離元素法(EDEM)與數值力學試驗.....14

第三章　結果與討論.....**22**

第一節　分段式數值模擬一 (PLAXIS→RAMMS).....22

第二節　分段式數值模擬二 (PLAXIS→EDEM).....29

第三節　整合型數值模擬 (EDEM).....41

第四章　大規模崩塌潛在地之案例分析.....**52**

第一節　九份二山大規模崩塌潛在地.....52

第二節　廬山聚落大規模崩塌潛在地.....71

第三節　廬山北坡大規模崩塌潛在地.....82

第五章　結論.....**92**

參考文獻.....**94**

附錄：審查意見與回覆.....**100**

附錄一、提案審查.....100

附錄二、期初審查.....104

附錄三、期中審查 114
附錄四、期末審查 123

表次

表 1 糖恩山砂岩力學試驗之強度參數 24
表 2 小林村 PLAXIS 中設定之材料與弱面參數 24
表 3 宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定 32
表 4 宏觀力學參數 (強度尚未折減) 與對應的微觀參數設定 44
表 5 宏觀力學參數 (強度折減至原來的 1/3) 與對應的微觀參數設定 45
表 6 宏觀力學參數 (強度折減至原來的 1/5) 與對應的微觀參數設定 46
表 7 宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定 47
表 8 不同模擬方法的比較 50
表 9 九份二山岩石直接剪力試驗結果 54
表 10 九份二山 PLAXIS 中設定之材料與弱面參數 54
表 11 九份二山宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定 59
表 12 廬山地區材料參數 (參考板岩層) 72
表 13 廬山地區弱面直剪試驗成果 72
表 14 廬山聚落邊坡 PLAXIS 中設定之材料與弱面參數 73
表 15 廬山聚落邊坡宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定 76

表 16 廬山北坡宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度)
與對應的微觀參數設定 86

圖次

圖 1 大規模崩塌潛在地之 34 處較高風險地區 2
圖 2 高風險 34 處大規模崩塌潛在地所在之地質區 4
圖 3 研究流程 11
圖 4 HERTZ-MINDLIN (NO SLIP) 兩顆粒球型接觸模型的示意圖 15
圖 5 HERTZ-MINDLIN WITH BONDING 模型示意圖 19
圖 6 分離元素法的數值力學試驗示意圖 21
圖 7 本研究之小林村 PLAXIS 邊坡模型 23
圖 8 小林村區域地質圖與崩塌影響範圍 23
圖 9 小林村坡面與弱面位態 24
圖 10 小林村 PLAXIS 中不同模式下的邊坡滑動面 25
圖 11 小林村 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 26
圖 12 小林村實際崩塌量體的 3D 模型 27
圖 13 小林村 RAMMS 之分析成果 28
圖 14 小林村崩塌事件前後地形差 28
圖 15 糖恩山砂岩與鹽水坑頁岩之單壓試驗應力應變曲線圖 29
圖 16 有限元力學單壓試驗結果與分離元素單壓試驗結果 31
圖 17 邊坡的主應力分布狀態受地質弱面影響 33
圖 18 分離元素之大型單壓試驗模型 33
圖 19 PLAXIS 有限元數值三軸壓縮試驗 35
圖 20 依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分 36

圖 21 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.3、0.15) 之崩塌堆積情況 (滾動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 110 秒) 37
圖 22 考慮不同滾動摩擦係數 (A) 0.05 (B) 0.075 (靜摩擦係數皆為滑動開始之係數 0.1) (模擬時間均為 110 秒) 37
圖 23 小林村分段式模擬二的堆積結果 40
圖 24 依據更深的位置劃分集水區 42
圖 25 逐步折減強度之分離元素崩塌與堆積模擬 49
圖 26 本研究之九份二山 PLAXIS 邊坡模型 (921 崩塌前地形) 53
圖 27 九份二山區域地質圖與崩塌影響範圍 53
圖 28 九份二山坡面與弱面位態 55
圖 29 九份二山邊坡滑動面分析結果 (921 崩塌前地形) 55
圖 30 九份二山 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 56
圖 31 九份二山實際崩塌量體的 3D 模型 57
圖 32 九份二山 RAMMS 之分析成果 58
圖 33 九份二山崩塌事件前後地形差 58
圖 34 九份二山依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分 61
圖 35 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.4、0.3、0.25) 之崩塌堆積情況 (動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 120 秒) 61
圖 36 考慮不同滾動摩擦係數 (A) 0.05 (B) 0.025 (靜摩擦係數皆為滑動開始之係數 0.2) (模擬時間均為 120 秒) 62

圖 37 九份二山 EDEM 的堆積結果.....65
圖 38 本研究之九份二山 PLAXIS 邊坡模型 (921 崩塌後地形).....66
圖 39 九份二山邊坡滑動面分析結果 (921 崩塌後地形).....67
圖 40 九份二山 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型.....67
圖 41 九份二山 RAMMS 之分析成果比較.....68
圖 42 九份二山 EDEM 的堆積結果比較.....70
圖 43 廬山聚落區域地質分布圖.....71
圖 44 本研究之廬山聚落 PLAXIS 邊坡模型.....72
圖 45 廬山聚落邊坡坡面與弱面位態.....73
圖 46 廬山聚落邊坡滑動面分析結果.....73
圖 47 廬山聚落邊坡 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型.....74
圖 48 廬山聚落邊坡 RAMMS 之分析成果比較.....75
圖 49 廬山聚落邊坡依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分.....78
圖 50 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.4、0.3、0.2) 之崩塌堆積情況 (動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 120 秒).....79
圖 51 考慮靜摩擦係數逐漸降低的過程 (A) 0.15 (B) 0.1 (滾動摩擦係數皆為 0.05) (模擬時間為前段 60 秒、後段 60 秒).....80
圖 52 廬山聚落邊坡崩移堆積模擬之預測塔羅灣溪堰塞壩.....81
圖 53 本研究之廬山北坡 PLAXIS 邊坡模型.....82
圖 54 廬山北坡區域地質分布圖.....83

圖 55 廬山北坡坡面與弱面位態.....83
圖 56 廬山北坡滑動面分析結果.....83
圖 57 廬山北坡 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型.....84
圖 58 廬山北坡 RAMMS 之分析成果比較.....85
圖 59 廬山北坡依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分.....88
圖 60 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.4、0.35) 之崩塌堆積情況 (動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 120 秒).....89
圖 61 考慮靜摩擦係數逐漸降低的過程 (A) 0.3 (B) 0.2 (C) 0.1 (滾動摩擦係數皆為 0.05) (模擬時間為前段 40 秒、中段 40 秒、後段 40 秒).....90
圖 62 廬山北坡崩移堆積模擬之預測塔羅灣溪堰塞壩.....91

第一章 緒論

台灣山區地形受溪流下切的營力作用常有坡趾下切的現象，此外如中央山脈板岩帶的岩層常見延續性良好的劈理面，西部麓山帶與東部海岸山脈的沉積岩層則常見延續性良好的層面，上述地形或地質狀況對邊坡的穩定性不利，遇豪雨或地震等促崩因子影響後常有土石流、崩塌或地滑的發生，近年來受氣候變遷的影響豪雨事件頻率增加，上述土砂災害的發生頻率也隨之增加。近年來關注的議題莫過於大規模崩塌，大規模崩塌由於崩塌量體規模較大，常衍生天然堰塞壩與堰塞湖而造成複合型災害，如 1999 年 921 大地震觸發了南投九份二山的大規模崩塌，崩落的岩石與土壤阻塞澀仔坑溪與韭菜湖溪而衍生出兩座堰塞湖，此次地震也觸發雲林草嶺邊坡的大規模滑移，阻塞下游清水溪而形成草嶺堰塞湖。2009 年莫拉克颱風豪雨事件則觸發了小林村上邊坡的大規模崩塌，造成旗山溪阻塞而形成堰塞湖，除此之外也造成高雄桃源鄉之荖濃溪衍生出多處堰塞湖。堰塞壩若潰壩將對下游聚落產生莫大的危害，因此需要對大規模崩塌衍生之天然壩災害潛勢區位以及壩的尺寸等進一步評估。

因應 2009 年莫拉克颱風豪雨事件，經濟部中央地質調查所進行空載光達掃描計畫，近年來利用光達(LiDAR)技術產製高精度數值地形，並根據地形特徵篩選出可能發生大規模崩塌的潛在坡地。農委會

水土保持局、林務局等各權責單位也依據上述成果，結合各單位所轄範圍內的崩塌區域，共圈繪出多達 8000 多處具有大規模崩塌潛勢的地區，影響保全對象者共計有 186 處，而後又利用 InSAR 技術分析各潛在地之發生度、保全度以及活動度等，篩選出 34 處較高風險之大規模崩塌潛在地，並公布於水保局 BigGIS 當中提供政府相關單位、專業人士與民眾參考 (水保局，2020)(圖 1)。

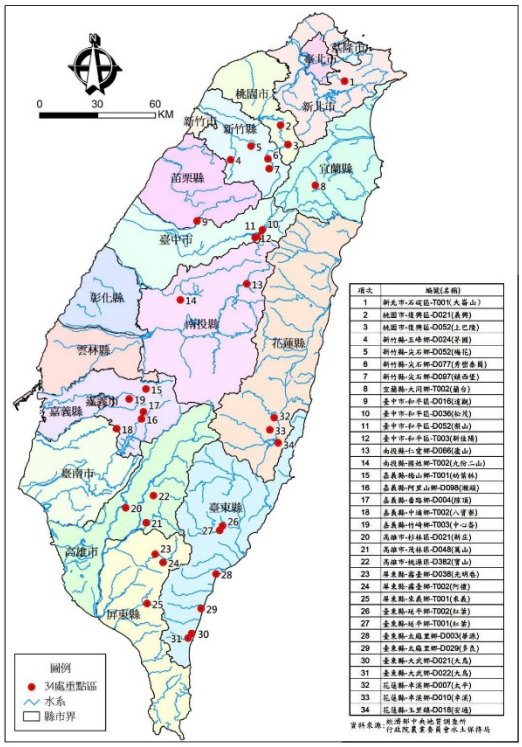


圖 1 大規模崩塌潛在地之 34 處較高風險地區 (水保局，2020)

迄今雖有計畫對大規模崩塌潛在地進行現地調查與評估工作，探討大規模崩塌的發生度、保全度以及活動度等，但是倘若發生大規模崩塌，其所衍生出的複合型災害狀況 (包括大規模崩塌發生位置與崩塌量體、衍生天然壩的位置與尺寸等) 仍少有研究探討與評估。一般

而言，當大規模崩塌發生時由於崩塌量體大往往可能衍生出堰塞壩，並且阻塞河道而形成堰塞湖，隨著堰塞湖的水位上升溢頂，造成堰塞壩潰壩將會釀成二次災害，因此必須針對崩塌位置、崩塌量體大小、堆積位置、堆積狀況等進行完整的評估。常用來評估邊坡崩塌與堆積過程的方法包括不連續變形分析 (DDA) 、分離元素法 (DEM)、光滑粒子流體動力學 (SPH)、材料質點法 (MPM) 等，許多研究利用上述方法探討了邊坡的破壞行為 (Tang et al., 2009; Lo et al., 2011; Wu and Chen, 2011; Bui et al., 2011; Bhandari et al., 2016)。高風險之大規模崩塌潛在地分布於弱面發達的地質區 (圖 2)，如中央山脈板岩帶的岩層常見延續性良好的劈理面，西部麓山帶與東部海岸山脈的沉積岩層則常見延續性良好的層面，Dong et al. (2006) 證明這種材料狀況與橫向等向性材料 (Transversely isotropic material) 的行為一致，而相較其他方法來說，分離元素法的優勢在可基於節理岩體粒子的接觸模型來反映出橫向等向性材料的行為 (Itasca Consulting Group Inc. 2014)。

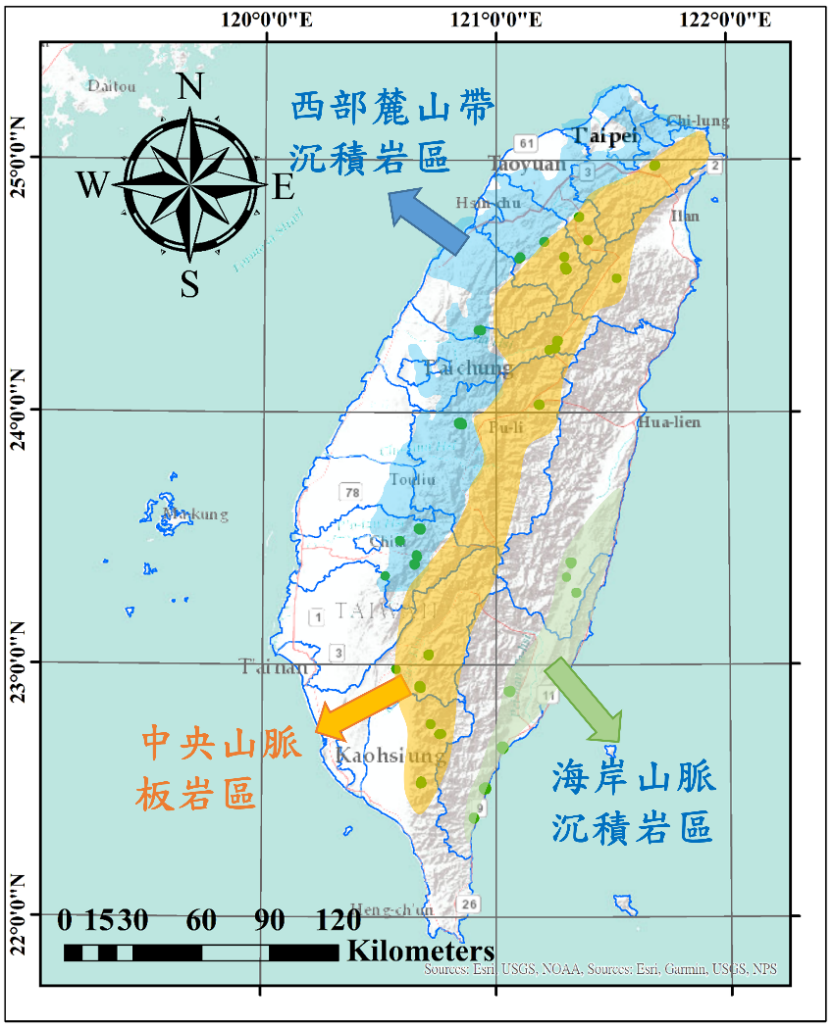


圖 2 高風險 34 處大規模崩塌潛在地所在之地質區

若已知邊坡破壞的滑動面，可能是已經發生崩塌的邊坡，或者曾經潛移過的邊坡經調查後發現該邊坡深處存在明顯的滑動面，常見利用分離元素法軟體 (PFC3D、3DEC 及 EDEM 等) 或連體力學法軟體 (如 FLOW-2D、SHALTOP2D、RAMMS 等) 模擬已知量體的運動與堆積狀況 (Lu et al., 2014; Kuo et al. 2009; Huang et al., 2017)，蕭靖平 (2017) 也利用 PFC3D 與 RAMMS 模擬嘉義及高雄 5 處已知滑動面與

堆積狀況的崩塌地，探討分離元素法與連體力學法之間的差異，其結果表示雖然 PFC3D 的結果更接近實際的堆積狀況，但其實 RAMMS 的結果之差異也不大，且由於 RAMMS 的控制參數少故效率較高，可快速評估堆積狀況。然而，對於尚未有明顯滑動面的邊坡，若要評估邊坡的破壞與崩積狀況，首先需要預測邊坡可能的滑動面，才能對崩落過程進一步模擬，倘若是以分離元素法進行，需要先建立邊坡粒子的接觸模型來模擬邊坡材料的狀況，包含材料強度、異向性等等，再進一步模擬得到邊坡可能的滑動面以及後續崩落過程 (Meng et al., 2018; Su et al., 2019)。另外，傳統的有限元 (FEM) 或有限差分 (FDM) 方法已善於模擬邊坡行為，搭配強度折減法 (*phi-c reduction*) 可計算出邊坡破壞時可能的滑動面與評估邊坡穩定性，加上有限元與有限差分方法中的宏觀力學參數相對分離元素法中的微觀參數容易決定，故有些研究先以有限元或有限差分方法搭配強度折減法 (*phi-c reduction*) 計算邊坡破壞時的滑動面，再緊接著利用分離元素法或連體力學法模擬崩落量體的運動與堆積狀況 (Li et al., 2010; Wang et al., 2020)。

本研究為了探討 (1) 分離元素法與連體力學法的差異，並且 (2) 比較不同邊坡崩塌、運動與堆積過程的模擬方法：a. 先以有限元素法搭配強度折減法評估邊坡破壞時的滑動面，再利用連體力學法或分離

元素法模擬崩落過程 (分別稱為分段式模擬一、二)；b. 崩塌、運動與堆積全程均利用分離元素法模擬 (稱為整合型模擬)。本研究以 PLAXIS 3D 三維有限元素分析軟體中岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式 (Iso-JRMC)，利用強度折減法計算邊坡可能滑動面，再分別結合連體力學軟體 RAMMS 中的 Debris Flow 模型或三維分離元素軟體 EDEM 中 Hertz-Mindlin with bonding 接觸模型進行後續崩落過程的模擬，探討連體力學法與分離元素法之間的差異。除此之外，利用 EDEM 中 Hertz-Mindlin with bonding 接觸模型模擬崩塌堆積的全過程，更進一步與前述邊坡失穩與崩落堆積採取分段式運作的方式比較 (即比較分段式模擬一、分段式模擬二以及整合型模擬)，探討不同模擬的結果之差異。本研究結果可預測崩塌位置、崩塌量體、堆積位置、堆積厚度或堆積形狀等，提供上述堰塞壩災害資訊供相關單位參考研擬防災、避災及減災策略。

第二章 研究方法

考量到不同模式或模型當中用到的宏觀或微觀參數不同：有限元素法用的是宏觀參數如楊氏模數 (E)、剪力模數 (G)、帕松比 (ν)、單壓強度 (q_u)、抗張強度 (σ_t)、凝聚力 (c) 與摩擦角 (φ) 等，分離元素法則用的是微觀參數如顆粒半徑 (R_P)、顆粒密度 (ρ_P)、法向勁度 (S_n)、剪切勁度 (S_t)、臨界法向應力 (σ_c)、臨界剪切應力 (τ_c) 等等，因此有必要使宏觀與微觀參數可相關聯，有關參數的細節將再下一段落詳細說明。加上不同的邊坡材料狀況對於崩塌、運動與堆積的過程將產生不同的影響，本研究將蒐集已知崩塌衍生堰塞湖的邊坡案例，接著將分別進行兩種分段式模擬與一種整合型模擬。首先需調查各邊坡材料的相關力學參數，但由於各個研究或計畫所調查或實驗出的力學參數通常只能代表該邊坡的部分強度，所以數值模擬往往需要根據邊坡的崩塌情形來對邊坡的整體強度進行調整，本研究將利用 PLAXIS 3D 中岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式 (Iso-JRMC) 模擬邊坡的滑動面來調整蒐集來的力學參數，以符合實際的邊坡破壞情形，調整後的力學參數即為該整體邊坡材料的宏觀參數。接著可進行二種分段模擬，其一為 PLAXIS 3D 模擬崩塌滑動面 → RAMMS-Debris Flow 連體力學法模擬崩落過程；其二為 PLAXIS 3D 模擬崩塌滑動面 → EDEM 分離元素法中 Hertz-Mindlin with bonding 接觸模型模擬崩

落過程；而最後一種整合型模擬則全程使用 EDEM。研究細節為調整 RAMMS-Debris Flow 所需的流動參數來擬合現場調查到的崩落過程，另外由於 EDEM 微觀參數多且複雜，需先利用分離元素法來進行如無圍單壓之數值力學試驗，調整各個數值力學試驗所需的微觀參數與宏觀參數相對應，同時也能反映出現場調查到的破壞及崩落過程，才能確立微觀參數，然後 EDEM 將會用於兩部分，一部分是用於接續 PLAXIS 3D 模擬出崩塌滑動面之後，另一部分則是使用 EDEM 來進行整合型模擬破壞及崩落的全過程。

本研究挑選過去的天然壩事件如小林村，由於現地取樣進行的力學試驗僅能代表該點位的強度，要能符合邊坡的整體情況或該岩層的情況還是需要利用宏觀的強度參數來代表，本研究先利用 PLAXIS 3D 中 Iso-JRMC 模式搭配現地所有獲得點位的平均強度，模擬數值邊坡的破壞面，然後調整強度參數來擬合現地邊坡的破壞面。接著可接續 RAMMS-Debris Flow 連體力學法模擬崩落過程，連體力學的參數也將選擇與邊坡崩落情況符合的流動參數，要使得流動堆積的結果符合現地情形才能確立流動參數，以上為分段式數值模擬一：PLAXIS 3D→ RAMMS-Debris Flow。另一方面，進行 EDEM 分離元素法的土壤或岩石力學數值試驗來獲得分離元素法中邊坡的微觀參數，一般來說，若針對邊坡某點位的力學性質，力學數值試驗所獲得的微觀參數

僅能代表該點位的力學性質，然而邊坡破壞是一整體運動的過程，故本研究將依據 PLAXIS 3D 中所獲得的宏觀參數來進行 EDEM 的力學數值試驗，得到的微觀參數將符合邊坡的宏觀力學行為，接著才進行邊坡崩落的模擬，要使得數值邊坡的破壞與崩積過程都能最接近現地邊坡破壞滑動面與崩積結果時才確立參數，若某一結果與現地情況不符則需要重新進行參數調整，直至數值模擬符合現地狀況，這是由於符合邊坡力學行為的參數可能有幾種組合所導致，以上為整合型數值模擬：全程 EDEM。而分段式模擬二：PLAXIS 3D→EDEM 則結合了分段式數值模擬一的 PLAXIS 3D 部分，模擬邊坡破壞，再銜接 EDEM 模擬崩積過程，此處的 EDEM 所使用的微觀參數將與整合型數值模擬中使用的相同，藉此來比較分段式模擬與整合型模擬的差異，流程如圖 3。

本研究過程可以歸納出確立各項參數的程序，後續將利用此程序來挑選最適合的邊坡材料的宏觀、微觀或流動參數，並應用結果較佳的模擬方法於評估其他大規模崩塌潛勢地區之破壞及崩落全過程。此處必須要加以說明的是，應用方面本研究將蒐集其他大規模崩塌潛勢地區的可能滑動面與力學性質資料，考慮不一定每一處都有完整的資料，本研究將率先考慮有調查出可能滑動面，且有力學性質之資料者，利用歸納出的確立參數之方法，進行數值邊坡的破壞與崩積過程模擬。

第一節 節理異向性結合莫爾庫倫模式 (PLAXIS 3D)

考量到大規模崩塌潛在地的地質狀況具有延續性良好的弱面，本研究選用 PLAXIS 3D 自定義模式當中的岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式 (The Jointed Rock model with overall Mohr-Coulomb failure criterion, Iso-JRMC)，Iso-JRMC 模式結合了岩體節理異向性模式 (Jointed rock model) 及莫爾庫倫破壞準則模式 (Mohr-Coulomb Model)，改善了傳統岩體節理異向性模式中非弱面材料方向上無法發展破壞面的缺點，以 Mohr-Coulomb 破壞準則定義非弱面材料方向的破壞。其彈性變形方面為等向性模式，使用剪力模數及帕松比定義之。而塑性變形方面包含了非弱面材料及弱面，弱面最多可設定三個平面方向，使用凝聚力 (Cohesion)、內摩擦角 (Friction angle)、剪脹角 (Dilation angle) 及各平面的抗張強度 (Tensile strength) 定義之 (Brinkgreve et al., 2016)。許多崩塌的現地調查發現，崩塌的岩體多半有切穿非弱面材料而破壞的情形，故這樣的模式也較能吻合真實的情況。另外，有限元素法通常搭配強度折減法 (*phi-c* reduction) 來計算邊坡的潛在滑動面與安全係數，並定義安全係數為實際強度參數與破壞時的強度參數的比值，而在 Iso-JRMC 模式中，由於需要分別設定非弱面、弱面的強度參數，因此強度折減法同時用於非弱面與弱面的強度參數中 (Azami et al., 2012)。

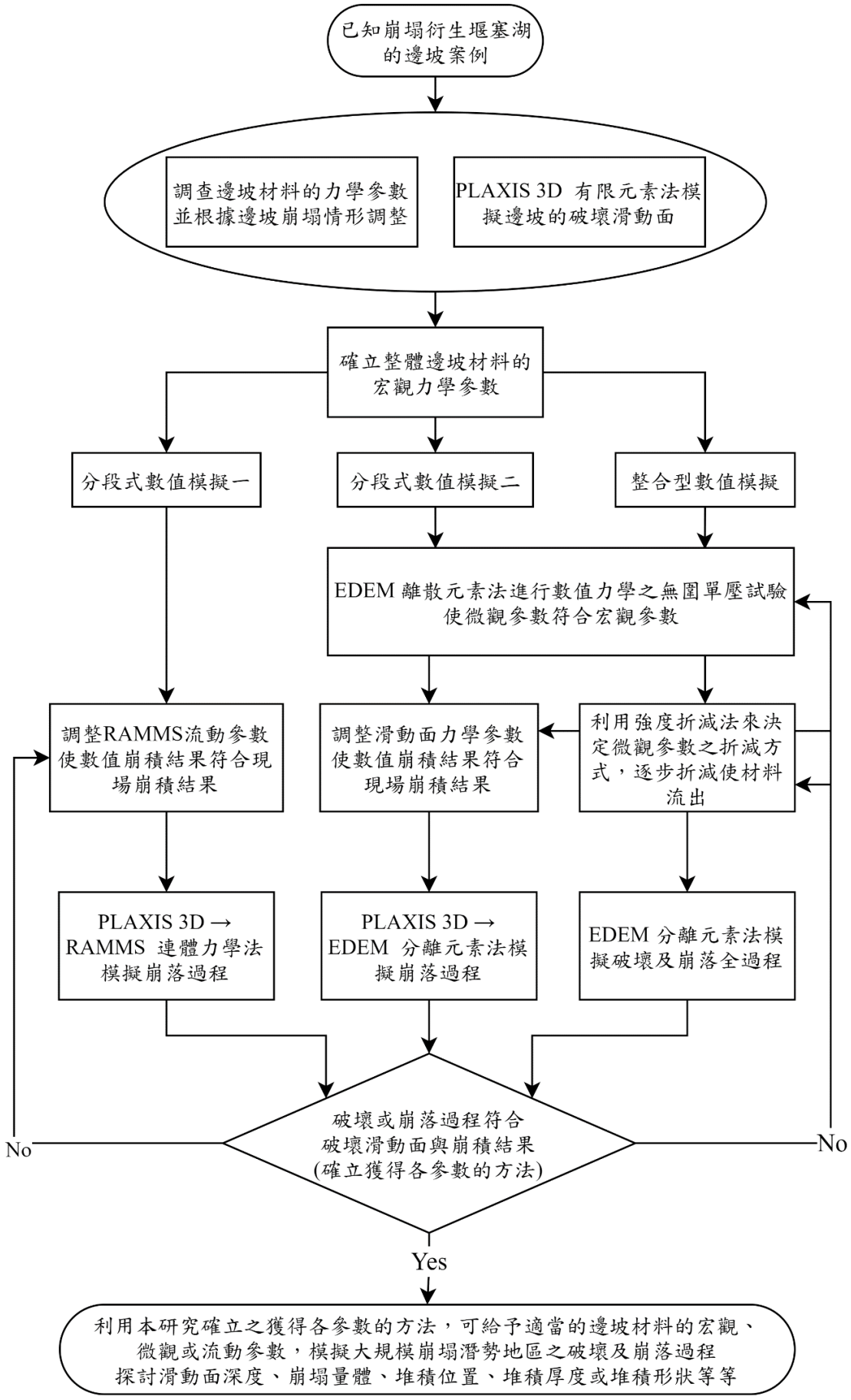

已知崩塌衍生堰塞湖的邊坡案例
調查邊坡材料的力學參數並根據邊坡崩塌情形調整
PLAXIS 3D 有限元素法模擬邊坡的破壞滑動面
確立整體邊坡材料的宏觀力學參數
分段式數值模擬一
分段式數值模擬二
整合型數值模擬
EDEM 離散元素法進行數值力學之無圍單壓試驗使微觀參數符合宏觀參數
調整RAMMS流動參數使數值崩積結果符合現場崩積結果
調整滑動面力學參數使數值崩積結果符合現場崩積結果
利用強度折減法來決定微觀參數之折減方式，逐步折減使材料流出
PLAXIS 3D → RAMMS 連體力學法模擬崩落過程
PLAXIS 3D → EDEM 分離元素法模擬崩落過程
EDEM 分離元素法模擬破壞及崩落全過程
破壞或崩落過程符合破壞滑動面與崩積結果(確立獲得各參數的方法)
No
No
Yes
利用本研究確立之獲得各參數的方法，可給予適當的邊坡材料的宏觀、微觀或流動參數，模擬大規模崩塌潛勢地區之破壞及崩落過程探討滑動面深度、崩塌量體、堆積位置、堆積厚度或堆積形狀等等

圖 3 研究流程

第二節 連體力學法 (RAMMS-Debris Flow)

RAMMS (Rapid Mass Movement System) 最初由瑞士聯邦森林及雪崩研究所開發用於模擬雪崩 (Avalanche) 的數值軟體，後續則發展出 3 種模型分別為 Avalanche、Debris Flow 與 Rockfall 模型。其中 Debris Flow 模型適合應用於山崩 (Sosio et al., 2008; Huang et al., 2017)，其優點為參數較簡單、計算效率高也能反映出大規模量體運動的特徵。RAMMS 採用基於 Voellmy-Salm 連續體理論的流體摩擦模型 (Salm,1993; Voellmy, 1955)，透過有限體積方法 (FVM) 與全變差遞減方法 (total variation diminishing, TVD) 應用於三維地形當中，以相鄰單元的邊界通量來計算每個網格的平均值 (Christen et al., 2005; Graf and McArdell, 2008)，Voellmy 流體摩擦模型的特色在於將摩擦阻力 S(Pa)分為兩部分，乾燥庫倫摩擦係數 (μ; dry-Coulomb type friction) 與紊流摩擦係數 (ξ; viscous-turbulent friction)，μ 影響量體滑動的距離，ξ 影響崩移運動的時間，ξ 值越小(100~200m/s^2)，滑動方式較類似顆粒較大之礫石型土石流；ξ 值越大(200~1000m/s^2)，則滑動方式越接近泥流，且當流動狀態接近停止時 μ 占主導地位，μ 則可由滑動邊坡之角度之 tan 值所決定，通常建議介於 0.05~0.4，而當流動快速運行時 ξ 占主導地位。如式 1：

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi}, \qquad with\ N = \rho h g \cos(\phi) \tag{1}$$

其中ρ是密度、g是重力加速度、ϕ是傾斜角，h 是流動高度、u 是速度向量 (包含 x 和 y 方向，分別為u_x和u_y)，然後 N 為流動表面上的正向應力。考慮到許多材料不能僅用簡單的線性關係 (μ=定值) 來表示，從 1.6.20 版本開始基本的 Voellmy 方程式修改為包括降伏應力 C (Platzer et al., 2007a~2007b)，表示如式 2：

$$S = \mu N + (1-\mu)C - (1-\mu)C\exp\left(\frac{-N}{C}\right) + \frac{\rho g u^2}{\xi} \qquad (2)$$

其中 C 是流動材料的降伏應力，與標準 Mohr-Coulomb 形式的凝聚力不同，這個公式的優點在於可確保當 $N\to 0$ 與 $u\to 0$ 使得 $S\to 0$ 時，C 賦予的降伏應力可以讓運動量體提前停止。降伏應力 C 可以減少崩移過程中不合理的沉積擴散行為，使得沉積區的輪廓更為清晰。

第三節 分離元素法 (EDEM) 與數值力學試驗

EDEM 於 2006 年由 DEM Solutions Ltd.發展並推出，用來模擬和分析顆粒系統、顆粒處理流程、和顆粒相關生產或研發等等。此外 EDEM 已被全球 300 多家學術機構用於研究當中。EDEM 模擬運算的四大要素包括 Particle、Contact、 Equipment、Factory，可以用來模擬和分析顆粒行為，並為顆粒、流體和機械力學提供一個整合的平臺。EDEM 除了可以建立球形的固體顆粒，也可以匯入真實顆粒的 CAD 模型來準確描述它們的形狀，並通過添加力學性質、材料特性等等來迅速建立一個參數化的模型，並進行有關顆粒系統的分析。此外，EDEM 內部強大的顆粒接觸模型，使得 EDEM 能廣泛處理各個尺度與不同黏滯程度顆粒性質，接觸模型的物理碰撞或能量損耗行為發生於顆粒間以及顆粒與機械幾何之間。Hertz-Mindlin (no slip) 模型為 EDEM 接觸模型中的基本型，是基於 Hertz 接觸理論 (Hertz, 1882) 以及 Mindlin-Deresiewicz 的研究 (Mindlin, 1949; Mindlin and Deresiewicz, 1953)，分別定義出法向力與切向力的部分，法向力和切向力都具有阻尼分量且其中阻尼係數與恢復係數有關 (Tsuji et al., 1992)，此外，切向摩擦力遵循庫侖摩擦定律 (Cundall and Strack, 1979)，而滾動摩擦被視為有方向性的定轉矩模型，與接觸無關 (Sakaguchi et al., 1993)，其粒子接觸模型的示意圖如圖 4 所示，而 Hertz-Mindlin (no

slip) 模型所使用的函式被詳細定義在 EDEM 的理論手冊 (DEM Solutions Ltd., 2014)。

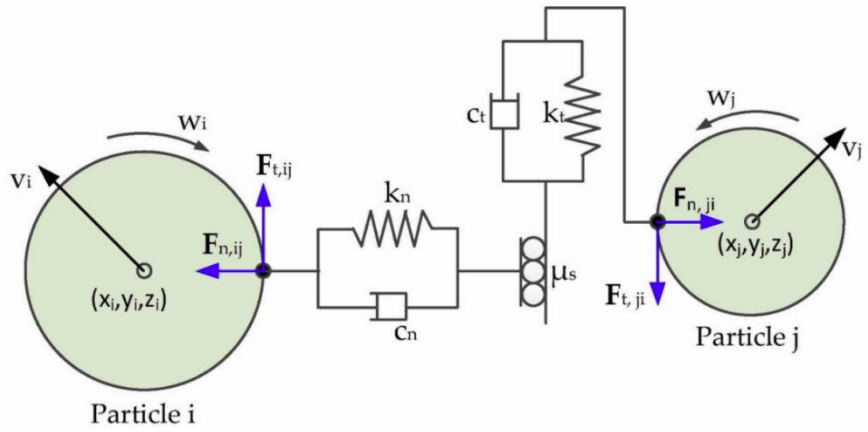


圖 4 Hertz-Mindlin (no slip) 兩顆粒球型接觸模型的示意圖 (Li et al., 2017)

兩顆接觸粒子的法向力 F_n 被定義為粒子法向上重疊量 (δ_n) 的函式，可表示如式 3：

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \tag{3}$$

其中R^*為兩顆接觸粒子 (i, j) 的等效半徑、E^*為等效楊氏模數，可表示如式 4 及式 5：

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{\left(1-\nu_i^2\right)}{E_j} \tag{4}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \tag{5}$$

其中E_i、E_j；ν_i、ν_j；R_i、R_j分別為兩顆接觸粒子的楊氏模數、帕松比及半徑，然後法向阻尼力被定義如式 6：

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\frac{\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2+\pi^2}}\sqrt{S_n m^*}\,\overrightarrow{v_n^{rel}} \tag{6}$$

其中 e 為恢復係數、$\overrightarrow{v_n^{rel}}$ 為法向上的相對速度、S_n 為法向勁度，而 m^* 為兩顆接觸粒子的等效質量，S_n 與 m^* 可分別表示如式 7 與式 8：

$$S_n = 2E^*\sqrt{R^*\delta_n} \tag{7}$$

$$m^* = \left(\frac{1}{m_i}+\frac{1}{m_j}\right)^{-1} \tag{8}$$

此外，兩顆接觸粒子的切向力 F_t 被定義為粒子切向上重疊量 (δ_t) 的函式，可表示如式 9：

$$F_t = -S_t\delta_t \tag{9}$$

其中 S_t 為切向勁度，並被定義如式 10：

$$S_t = 8G^*\sqrt{R^*\delta_n} \tag{10}$$

當中的 G^* 為等效的剪力模數，切向阻尼力被表示如式 11：

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\frac{\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2+\pi^2}}\sqrt{S_t m^*}\,\overrightarrow{v_t^{rel}} \tag{11}$$

$\overrightarrow{v_t^{rel}}$ 為切向上的相對速度，不過切向力 F_t 被定義受庫倫摩擦力 $(\mu_s F_n)$ 限制，μ_s 為靜摩擦係數。

另外，當粒子於滾動中時，加入滾動摩擦是一項很重要設定，這可以確保粒子的能量會被消耗，使其不會無限制的滾動，這個設定由粒子表面給予的力矩 $\tau_{(i,j)}$ 而定義（式 12）：

$$\tau_{(i,j)} = -\mu_r F_n R_{(i,j)}\omega_{(i,j)} \tag{12}$$

當中的μ_r為滾動摩擦係數、$R_{(i,j)}$為接觸點到粒子質心的距離，$\omega_{(i,j)}$為接觸點的單位角速度。EDEM 中的其他接觸模型多基於此基本型而發展，簡介如下：

1. Hertz-Mindlin (no slip) 模型：EDEM 中基本的顆粒接觸模型，用作一般的大尺寸顆粒的接觸作用。
2. Hertz-Mindlin (no slip) with RVD Rolling Friction 模型：在基本的 Herz-Mindlin 模型基礎上調整了滾動摩擦力的計算方式，可以進行強旋轉體的模擬
3. Hertz-Mindlin with Archard Wear 模型：結合 Archard Wear 模型的 Hertz-Mindlin 模型擴展了標準的 Herz-Mindlin 模型，可估算顆粒幾何表面的磨損深度。
4. Hertz-Mindlin with bonding 模型：具有鍵結力的 Hertz-Mindlin 基本接觸模型，用於模擬破碎、斷裂等問題，採用小顆粒黏結成大塊材料，外力作用下顆粒間黏結力會發生破壞，從而產生破碎及斷裂效果。
5. Hertz-Mindlin with Heat Conduction 模型：結合熱傳導理論的 Hertz-Mindlin 基本接觸模型，用於需要溫度分析的情況，顆粒接觸後會因溫度差而產生熱傳導。
6. Hertz-Mindlin with JKR 模型：又稱 JKR Cohesion 模型，適用於藥

粉等粉體顆粒或礦石、黏土等具有濕度的材料，顆粒間易發生明顯黏結和團聚。

7. Linear Spring 模型：基於線性理論的基本顆粒接觸模型，用於一般顆粒的快速計算及定性分析。
8. Linear Cohesion 模型：傳統的顆粒黏結模型，用於一般黏結顆粒的快速計算。
9. Hysteretic Spring 模型：此接觸模型允許將塑性變形行為包括在接觸力學方程式中，一但超過預先定義的應力，顆粒之間可以實現大的重疊而不會產生過多的接觸力，從而導致顆粒可用一種可壓縮的形式表現塑性行為。
10. Moving Plane 模型：用於模擬傳送帶等具有表面滑移速度的結構體。

由於大規模崩塌的破壞模式往往與邊坡岩體的破碎、斷裂等狀況有關，因此本研究選用 Hertz-Mindlin with bonding 模型來進行 EDEM 的建模。當兩顆粒子間具有 Bonding 可用於抵抗切向和法向運動，直到所設定的最大法向應力和最大切向應力為止，這時 Bonding 被打斷，然後粒子作為剛體進行運動，Potyondy and Cundall (2004) 提到此模型在混凝土和岩石結構中特別有用，示意圖如圖 5。

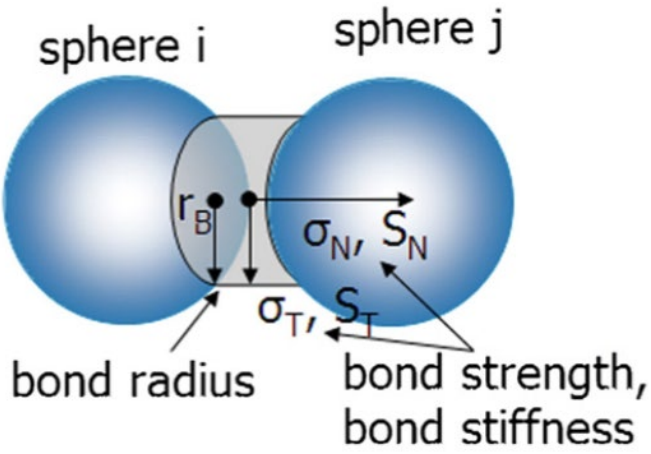


圖 5 Hertz-Mindlin with bonding 模型示意圖 (Schilde et al., 2014)

在 Hertz-Mindlin with bonding 模型中，兩顆粒子間的 bonding 作用力 $F_{(n,t)}$和力矩$M_{(n,t)}$初始值被設為 0，並定義為隨時間步長Δt而改變 (式 13~16)：

$$\Delta F_n = -v_n S_n A \Delta t \quad (13)$$

$$\Delta F_t = -v_t S_t A \Delta t \quad (14)$$

$$\Delta M_n = -\omega_n S_t J \Delta t \quad (15)$$

$$\Delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \Delta t \quad (16)$$

其中v_n、v_t分別為法向速度與切向速度，ω_n、ω_t分別為法向速度與切向速度，S_n、S_t分別為 bond 的法向勁度與切向勁度 (圖 5)，A 為 bond 的橫截面積，J 為極慣性矩，分別表示如式 17、式 18：

$$\mathrm{A} = \pi r_B^2 \quad (17)$$

$$\mathrm{J} = \frac{1}{2}\pi r_B^4 \quad (18)$$

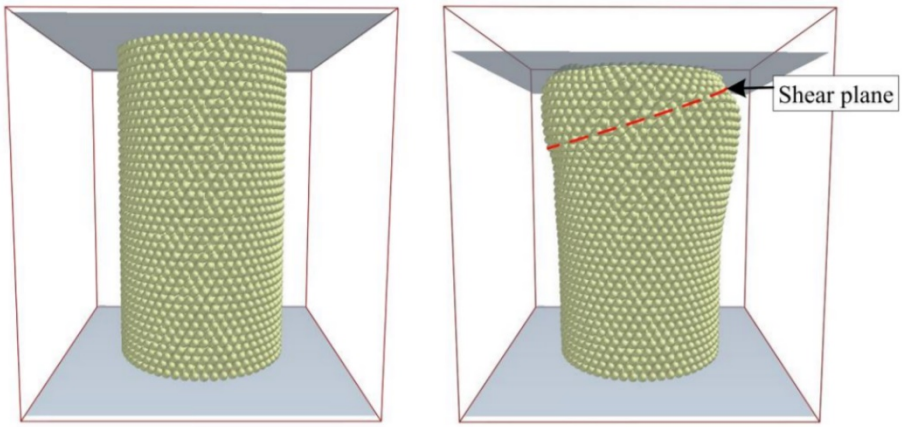
然後設定當法向應力或切向應力達到預定義的值時 bond 會斷裂，預定義的值可被定義如式 19~20：

$$\sigma_{n,max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} r_B \quad (19)$$

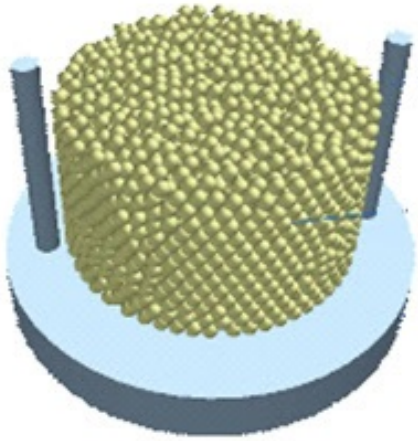
$$\sigma_{t,max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{2M_n}{J} r_B \quad (20)$$

另外，如圖 5 所示，此 Hertz-Mindlin with bonding 模型是基於 Hertz-Mindlin 基本型的擴展，為了讓兩顆粒子間在沒有物理接觸時才產生 bonding 作用力，因此應該設定 bond 的接觸半徑大於粒子的半徑。

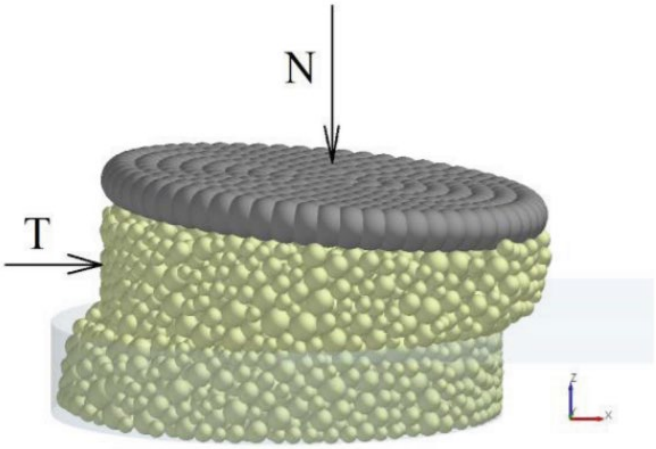
本研究預計使用 EDEM 的 Hertz-Mindlin with bonding 模型進行後續的建模，除了接續 PLAXIS 3D 之後，進行分段式模擬外，也另外進行破壞與崩落全過程的整合型模擬，可以比較分段式模擬與整合型模擬的差異。此外，Chang et al. (2012) 強調分離元素法模擬過程中，設定的微觀參數與整體邊坡材料的宏觀參數之間，利用數值方法擬合的重要性。本研究亦著重於 EDEM 微觀參數的合理選定，故如流程圖所示 (圖 3)，在參數選定步驟將會進行分離元素法的數值力學試驗，讓數值力學試驗的結果符合本研究的宏觀參數，相關數值力學試驗如圖 6 所示意。



(a)



(b)



(c)

圖 6 分離元素法的數值力學試驗示意圖 (a) 無圍單軸壓縮試驗 (Zhou et al., 2020) (b) 巴西測試 (畢秋實等，2018) (c) 直剪試驗 (Kotrocz and Kerényi, 2017)

第三章 結果與討論

本研究參考莫拉克颱風觸發小林村邊坡崩塌相關文獻 (Lo et al., 2011; Tsou et al., 2011；李鎮洋等；2011；陳建宏，2011；周立生，2014) 進行本研究三種模擬方法的建模、分析與比較探討，分別為：

第一節 分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS)

本研究利用崩塌前的 20m DEM 進行建模，由於集水區內包含不同邊坡，為了針對主滑動邊坡進行探討，本研究劃分邊坡單元進行後續分析並將其周圍地質設定為剛體 (圖 7)。參考陳建宏 (2011) 與周立生 (2014) 的相關小林村地質分布圖、崩塌影響範圍以及力學試驗結果 (圖 8、表 1)。小林村之地質以糖恩山砂岩與鹽水坑頁岩為主，為了簡化建模的地質狀況，本研究針對糖恩山砂岩並參考陳建宏 (2011) 力學試驗結果中的糖恩山砂岩部分 (表 1)，考慮高含水量情況下的殘餘強度參數與莫爾庫倫破壞準模式，利用 PLAXIS 3D 進行強度折減法來取得邊坡可能的滑動面，另一方面，考慮高含水量情況下之尖峰強度參數與殘餘強度參數，分別給定岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式 (Iso-JRMC) 中的非弱面材料與強度參數、弱面強度參數，本研究設定材料與弱面強度參數如表 2，坡面與弱面的立體投影圖則如圖 9 所示，必須說明的是由於沒有蒐集到相關弱面的強度參數資料，因此本研究這裡先以殘餘強度給定弱面強度參數，此外為了方便參數

給定假設楔形兩組弱面為相同強度。綜上，本研究比較了兩組模式下的滑動面分析結果，如圖 10 所示，可以發現莫爾庫倫模式下的邊坡滑動面較似圓弧形，而岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式下的滑動面可看出邊坡滑動受楔形弱面交線影響，周立生 (2014) 參考許多文獻並於其研究當中更加確認此觀點。考慮異向性的模式所得到的結果與實際崩塌體的形狀較接近，後續的 PLAXIS 3D 分析皆以此模式進行。

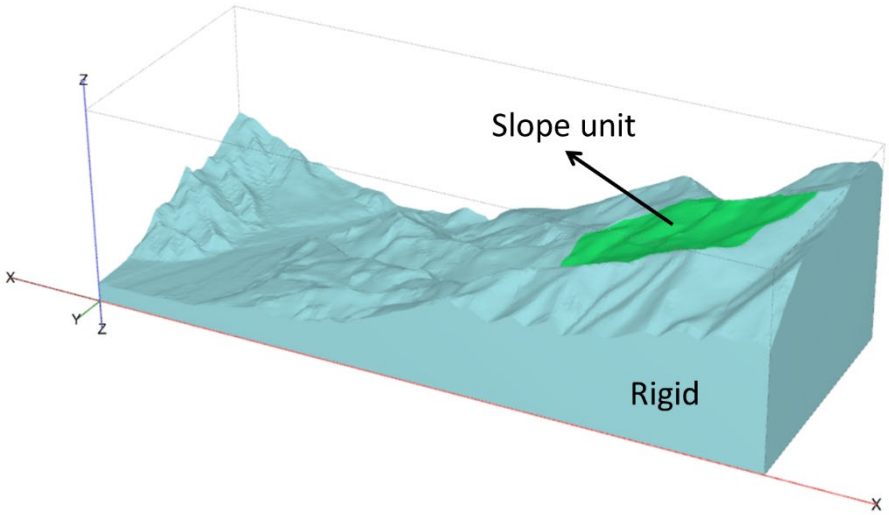


圖 7 本研究之小林村 PLAXIS 邊坡模型

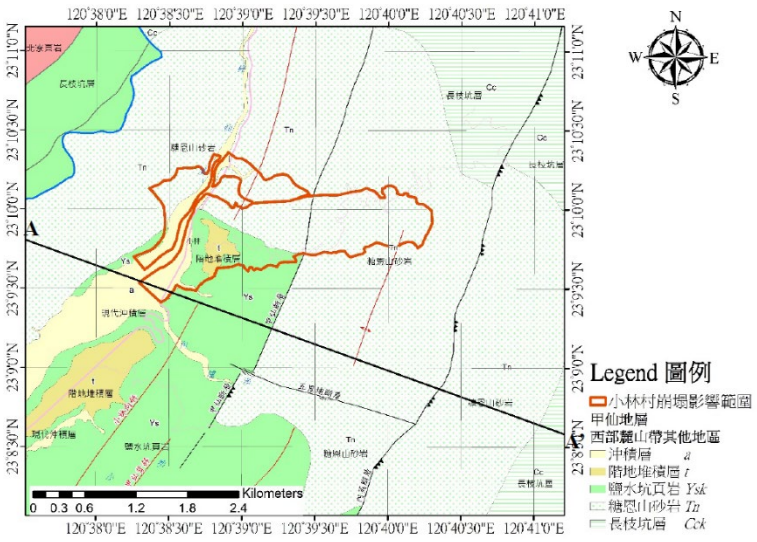


圖 8 小林村區域地質圖與崩塌影響範圍 (周立生，2014)

表 1 糖恩山砂岩力學試驗之強度參數 (陳建宏，2011)

試體狀態	尖峰強度參數		殘餘強度參數	
	凝聚力 (Mpa)	內摩擦角 (°)	凝聚力 (Mpa)	內摩擦角 (°)
氣乾 7 天	43.86	21.5	5.39	34.3
高含水量	22.45	10.8	3.61	6.9

表 2 小林村 PLAXIS 中設定之材料與弱面參數

	莫爾庫倫模式	岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式
單位重 (kN/m^3)	25	25
楊氏模數 (kPa)	4.7 x 10^6	4.7 x 10^6
柏松比	0.26	0.26
非弱面-凝聚力 (kPa)	3610	22450
非弱面摩擦角 (˚)	6.9	10.8
弱面-凝聚力 (kPa)	-	3610
弱面摩擦角 (˚)	-	6.9

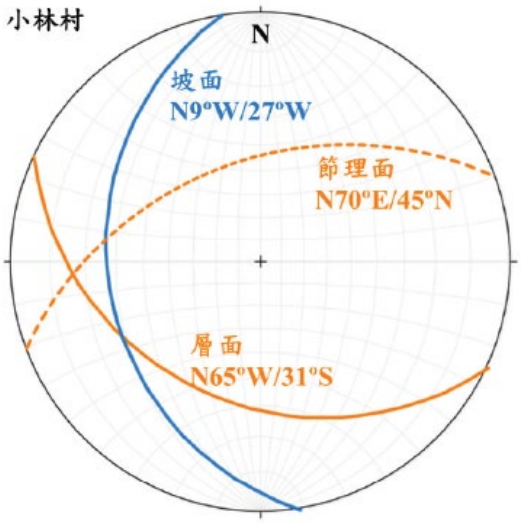
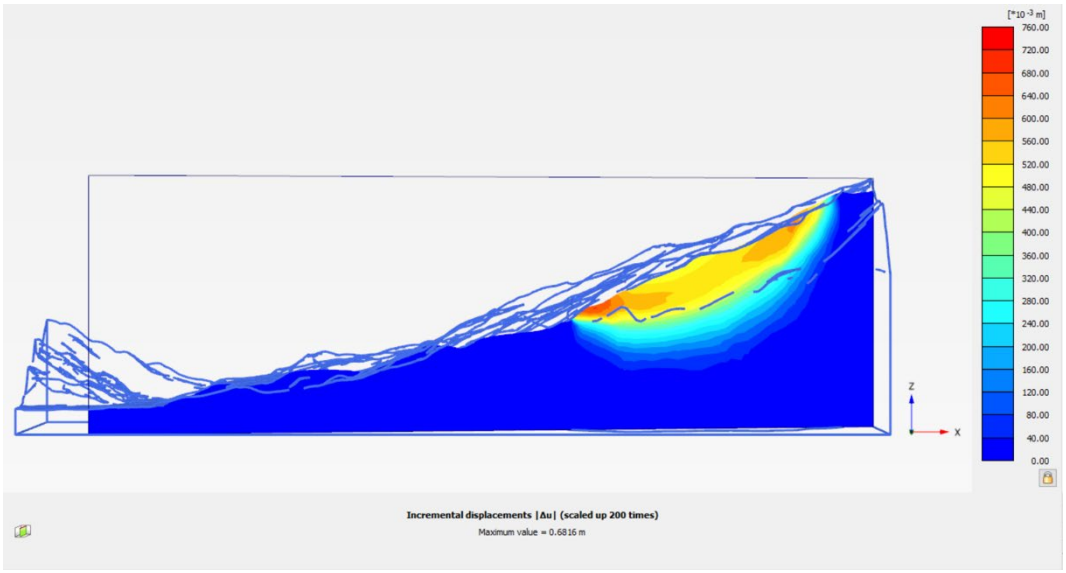
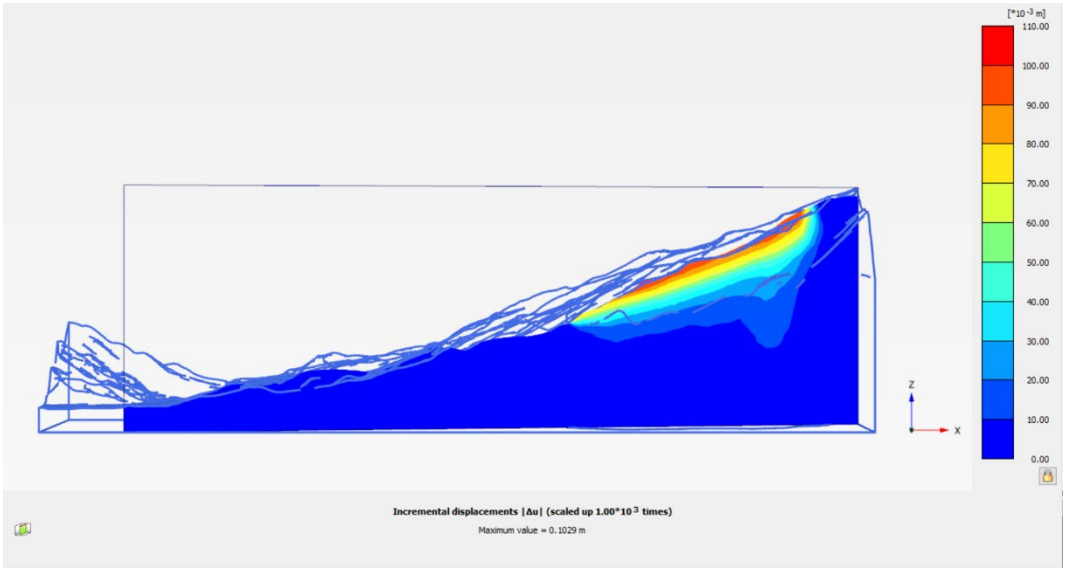


圖 9 小林村坡面與弱面位態



(a)

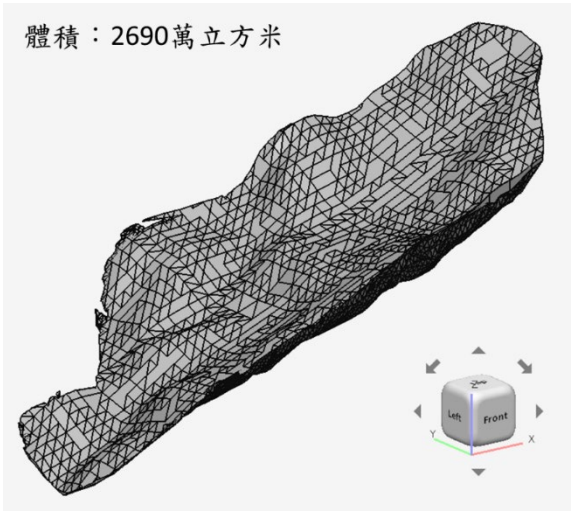


(b)

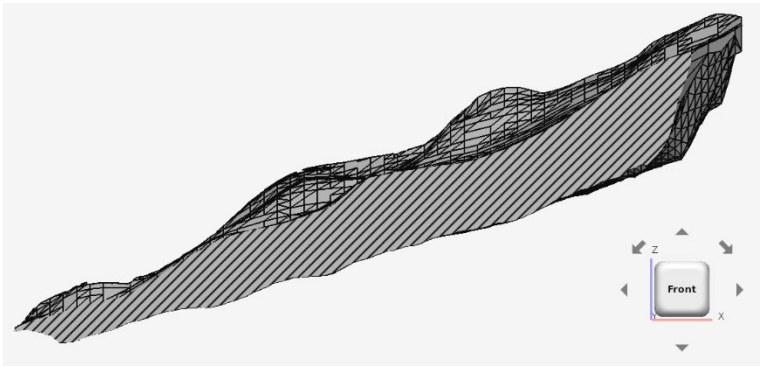
圖 10 小林村 PLAXIS 中不同模式下的邊坡滑動面 (a) 莫爾庫倫模式 (b) 岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式

由於後續 RAMMS 分析需要知道崩塌量體大小，因此本研究將 PLAXIS 的成果製成 3D 模型，並計算其崩塌量體，如圖 11 所示，並與實際崩塌的量體之 3D 模型進行比較，實際的崩塌量體由政府資料開放平台「內政部 20 公尺網格數值地形模型資料」獲取之莫拉克前

後的 20m DEM 進行建模，如圖 12 所示，可以發現雖然 PLAXIS 分析出的滑動面較深，不過崩塌範圍與剖面形狀與實際崩塌相似，且受弱面影響而有楔形破壞之趨勢。

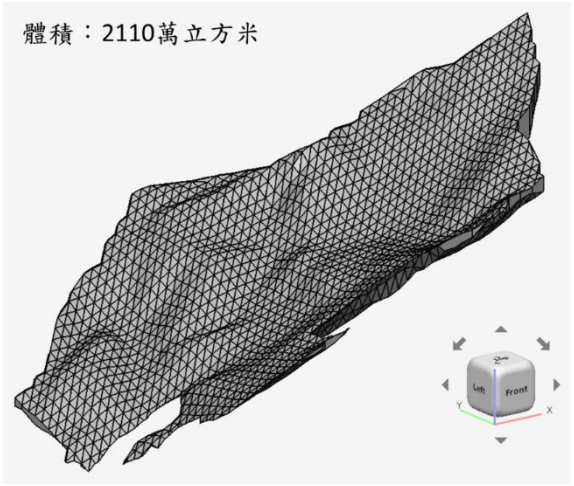


(a)



(b)

圖 11 小林村 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面



(a)

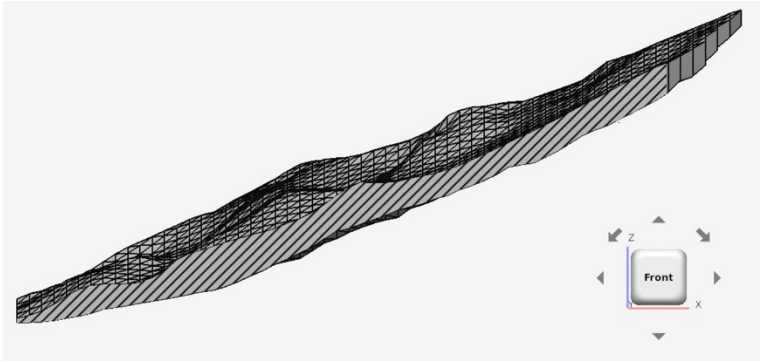
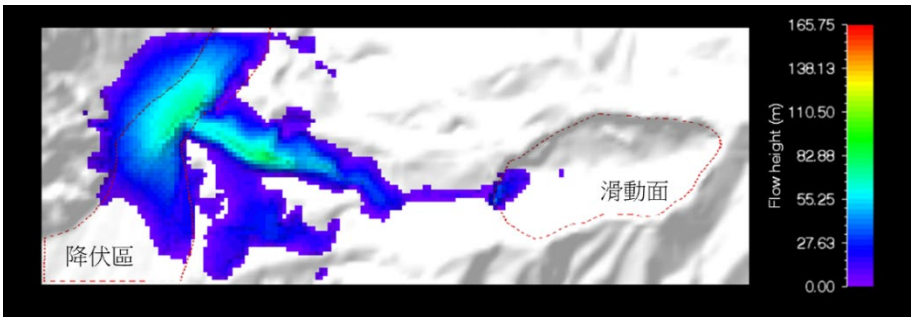
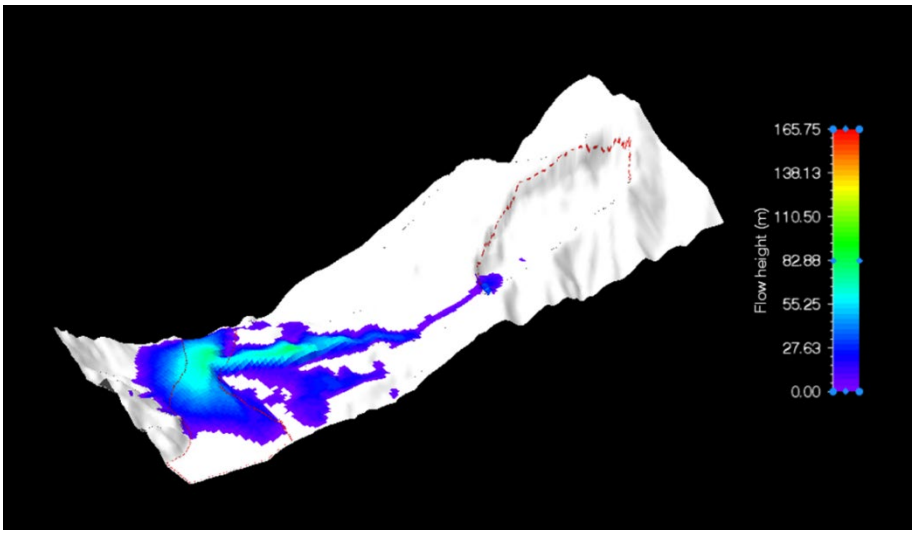


圖 12 小林村實際崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面

本研究根據 PLAXIS 分析初的崩塌量體大小來進行 RAMMS 的崩移模擬，RAMMS 中所需要設定之參數較簡單，只需設定 ξ (viscous-turbulent friction)、μ (dry-Coulomb type friction)以及 C (yield stress)，本研究調整以上 3 個參數，分別為 ξ：120 m/s^2；μ：0.2；C：100 kPa，如圖 13 所示，本研究在此分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 最終可達到與 Tsou et al. (2011) 利用崩塌事件前後高程相減之研究成果 (圖 14)，相似的堆積結果，堆積高度也相近。



(a)



(b)

圖 13 小林村 RAMMS 之分析成果 (a) 俯視圖 (b) 側視圖

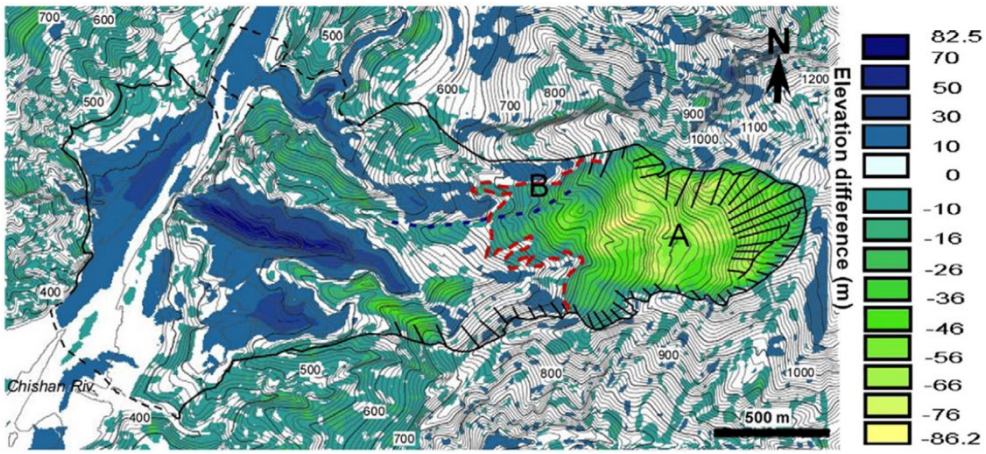


圖 14 小林村崩塌事件前後地形差 (Tsou et al. 2011)

第二節 分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM)

在分離元素法中，本研究有別於以往的研究，如 Lo et al. (2011) 的研究利用 PFC3D 來模擬單軸壓縮試驗，其擬合的試體為乾燥的岩體，因此在 PFC3D 的運動分析時，需逐步降低顆粒間鍵結勁度、鍵結強度、或摩擦係數等來使其滑動。這種作法產生一個問題是該如何同時改變各項微觀參數來反映整體邊坡材料強度遞減與材料變形的狀況，這是一個重大的課題，因此常見固定其他項只改變某一項來查看顆粒運動的情況，然而，若將調整後的微觀參數再次進行分離元素法的力學試驗，可能無法與真實材料強度折減或材料變形的情形相吻合。如圖 15 所示，陳建宏 (2011) 對糖恩山砂岩之單軸壓縮試驗結果顯示，隨著含水量的增加，砂岩楊氏模數與尖峰強度均降低。

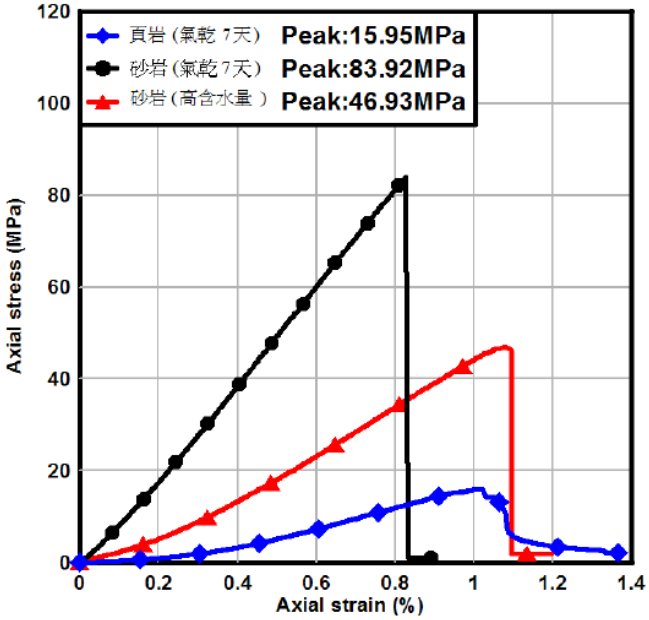


圖 15 糖恩山砂岩與鹽水坑頁岩之單壓試驗應力應變曲線圖 (陳建宏，2011)

本研究亦無法得知真實材料改變的情形，不過卻可藉由有限元素法 PLAXIS 3D 中的針對凝聚力與摩擦角的強度折減法，依據折減係數給定不同凝聚力與摩擦角在 PLAXIS 3D 中重新進行力學試驗來求得如單壓強度、楊氏模數等數值，再由分離元素法 EDEM 來擬合有限元素法 PLAXIS 的力學試驗結果。在此分段式數值模擬二中，因為已由 PLAXIS 折減強度至最後而得出滑動面的位置，因此可直接由分離元素法的力學試驗來擬合強度折減法之最後一步 (final step) 的有限元素力學試驗結果，然後運動分析中不調整材料的微觀參數，僅逐步降低滑動面的靜摩擦係數使其滑出，或調整滾動摩擦係數使其停止，最終運動與堆積的情況能擬合實際的情形。

不過，在整合型數值模擬中，由於整合型模擬法中無設定滑動面位置，均由顆粒組成，本研究將由分離元素法擬合自強度折減法的第一步 (first step) 至最後一步，分別擬合不同 step 強度下的有限元力學試驗結果，使得分離元素方法中能反映不同強度折減係數下宏觀的材料尖峰強度與楊氏模數。因此將依此來逐步同時調整各項微觀參數，並探討在哪一個強度折減係數下的邊坡破壞狀況較符合實際崩塌情況，另外，整合型的運動堆積分析方式將在下一節補述。

在分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 中，我們直接由分離元素法的力學試驗來擬合強度折減法之最後一步的有限元素力學

試驗結果 (last step in PLAXIS; 折減至崩塌時之強度，本研究利用此時的強度(凝聚力與摩擦角)，進行有限元素法的單壓試驗)，有限元力學單壓試驗結果與分離元素單壓試驗擬合結果如圖 16，盡可能使材料的尖峰強度與楊氏模數能一致，本研究經過許多嘗試，仍可以看出分離元素單壓試驗中彈性行為的斜率較緩，這是由於 PLAXIS 的有限元單壓試驗中雖然尖峰強度有受本研究設定弱面的影響，但彈性行為卻忽略了弱面的影響，係為軟體設計的限制，實際材料的楊氏模數應較趨近於分離元素單壓法做出的結果。依此情況下的宏觀力學參數與微觀參數設定如表 3，有限元素單壓試驗如圖 17 進行補充說明，分離元素之大型單壓試驗模型則如圖 18 所示並說明如下：

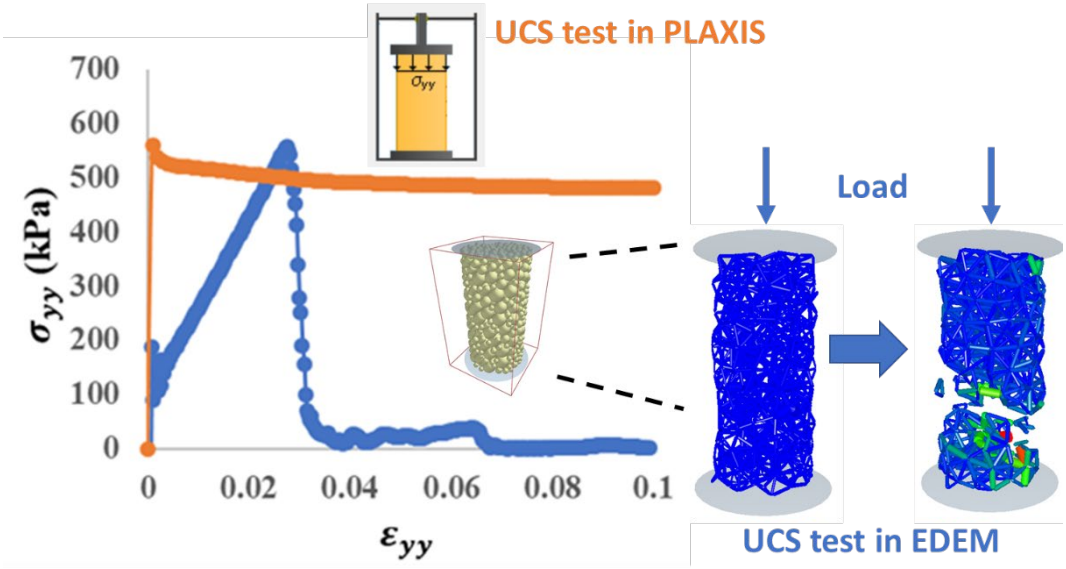
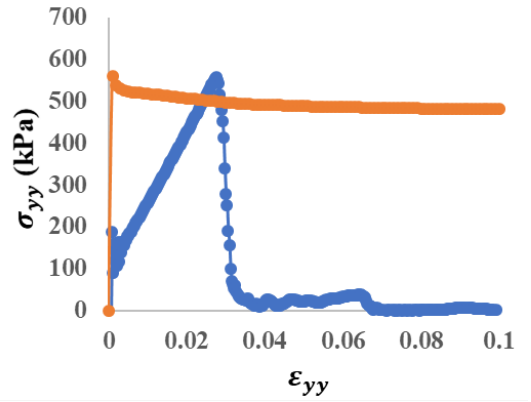


圖 16 有限元力學單壓試驗結果與分離元素單壓試驗結果 (以 last step in PLAXIS; 折減至崩塌時之強度為例)

表 3 宏觀力學參數 (last step in PLAXIS; 折減至崩塌時之強度)

與對應的微觀參數設定

有限元素法單壓試驗		分離元素法單壓試驗	
單位重 (kN/m^3)	25	球型顆粒直徑 (m)	4~12
楊氏模數 (kPa)	4.7 x 10^6	顆粒總數	376
柏松比	0.26	顆粒總體積 (m^3)	121849
非弱面-凝聚力 (kPa)	1574	孔隙率	0.38
非弱面摩擦角 (°)	0.8	顆粒密度 (kg/m^3)	4100
弱面-凝聚力 (kPa)	253	顆粒有效模數 (kPa)	4.7 x 10^6
弱面摩擦角 (°)	0.5	柏松比	0.26
		顆粒恢復係數	0.5
		顆粒靜摩擦係數	0.04
		顆粒滾動摩擦係數	0.01
		鍵結法向勁度 (N/m^3)	4 x 10^7
		鍵結切向勁度 (N/m^3)	4 x 10^7
		鍵結法向強度 (Pa)	9 x 10^6
		鍵結切向強度 (Pa)	9 x 10^6
		牆密度 (kg/m^3)	7000
		牆有效模數 (kPa)	1 x 10^{10}
		牆恢復係數	0.8
		牆靜摩擦係數	0.8
		牆滾動摩擦係數	0.1

此外值得一提的是，觀察邊坡的主應力分布狀態可以得知邊坡的應力大小與方向受地質弱面影響 (圖 17)，由於本研究加以考慮了材料的強度異向性，故數值力學單壓試驗的結果反映了地質弱面的影響，這與過去的研究不同。

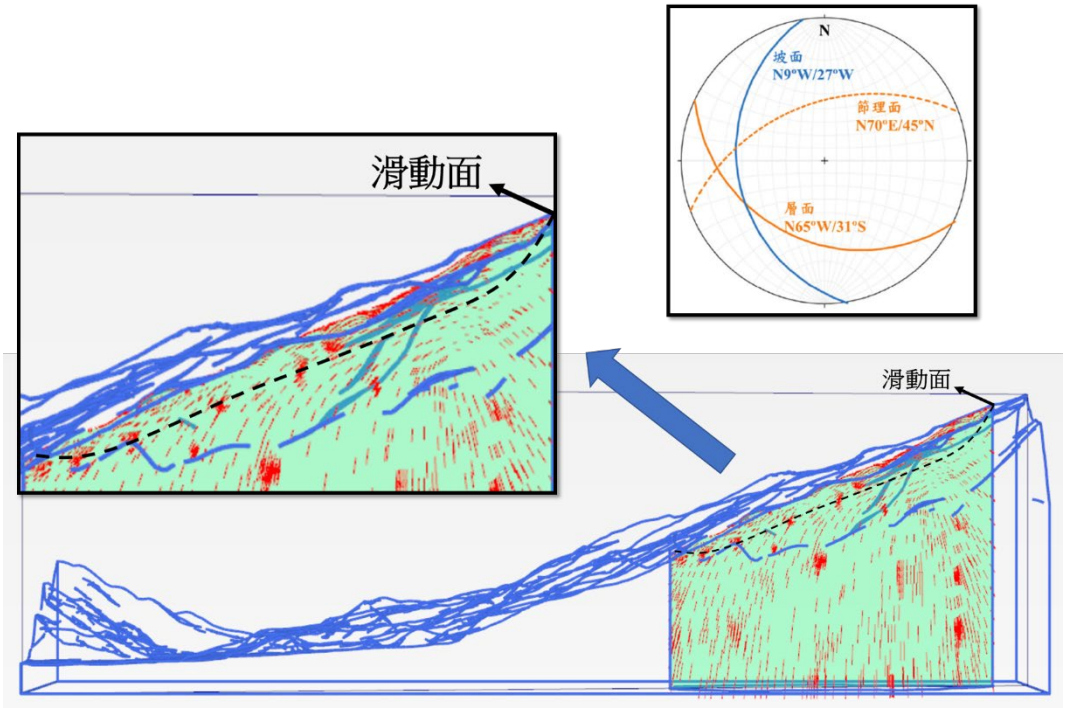


圖 17 邊坡的主應力分布狀態受地質弱面影響

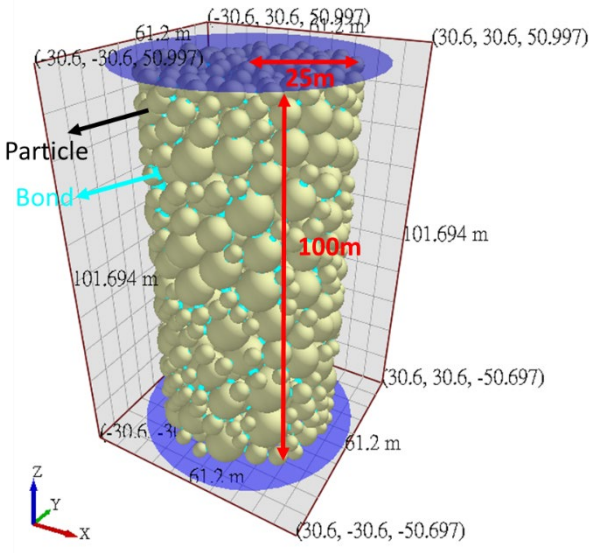


圖 18 分離元素之大型單壓試驗模型

首先必須說明的是，有別於其他進行分離元素法之研究常見力學試驗分析中的使用較小的顆粒，運動分析則因為計算機算力限制所以放大顆粒進行，但是微觀參數的確立是顆粒較小條件下的結果，若大

顆粒也使用同樣的微觀參數恐怕材料力學行為已不同。有鑑於此，本研究遂利用分離元素法進行大型單壓試驗，直接模擬實際邊坡尺寸該顆粒大小狀況下的應力—應變行為，這裡值得注意的是，為了避免單壓試驗尺寸過大而造成應力分布不均勻，單壓試驗中的重力設為 0 來模擬單壓試驗下的力學行為。另外，請參見表 3，此處需要加以說明的是，顆粒半徑係根據 Lo et al. (2011) 提及現地調查狀況崩塌的材料尺寸 (直徑) 介於 1~15m，本研究考量電腦硬體算力的限制，雖然可以在大型單壓試驗中完成運算，但仍必須考量階段式模擬二與整合型模擬中之顆粒總數，因此本研究控制顆粒直徑為 4~12m。考慮實際邊坡材料的孔隙率，本研究設定孔隙率為固定值 0.38，我們利用 EDEM 中隨機產生顆粒的功能來達到我們設定的孔隙率，此時的顆粒數為 376 顆。值得一提的是，本研究加以考慮材料的總體密度 2550 kg/m^3，實際的岩體材料由細顆粒壓密或膠結而組成，由於本研究的顆粒分布屬於大顆粒，故總體密度藉由調整顆粒密度來達到，因此顆粒密度設為 4100 kg/m^3。另外，利用 PLAXIS 有限元數值三軸壓縮試驗的結果來決定顆粒的靜摩擦係數 (圖 19)，考慮小林村崩塌滑動面深度位於 50~100m，本研究分別利用 50m 與 100m 深度圍壓下的摩擦角結果計算 tan 值來當作顆粒的靜摩擦係數，並設定顆粒靜摩擦係數與滾動摩

擦係數之比為 4:1，其他參數如壓縮模具參數等則參考 Yang et al. (2020) 利用分離元素法進行單壓試驗的研究參數。

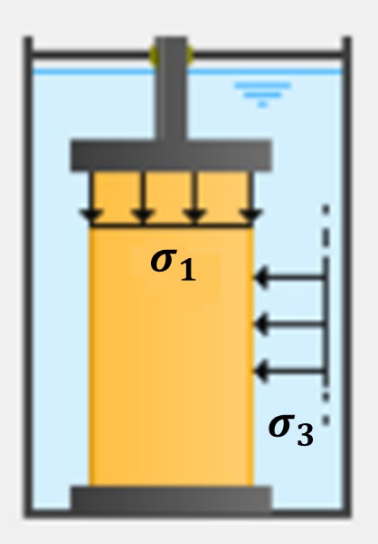
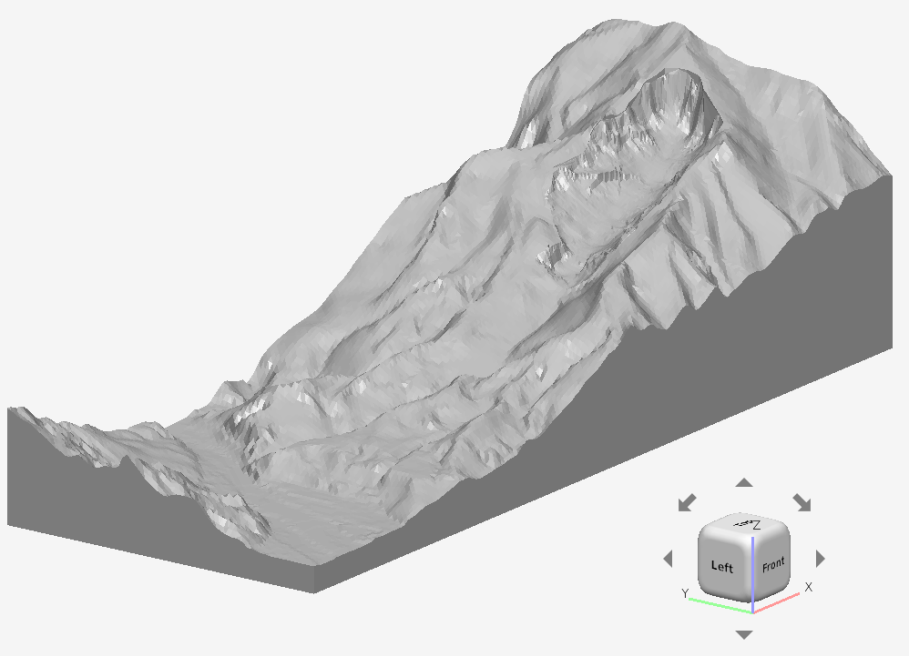


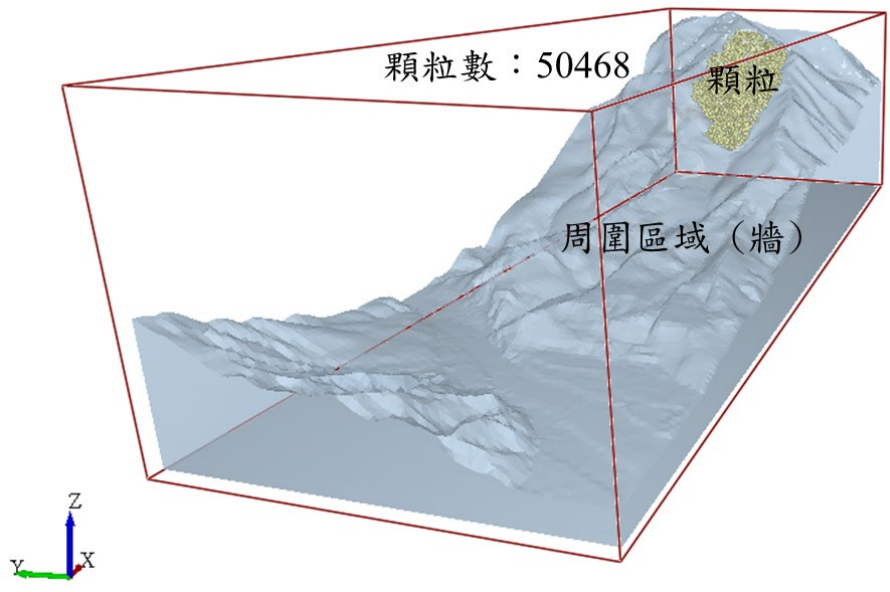
圖 19 PLAXIS 有限元數值三軸壓縮試驗

接著，我們依據此分離元素力學試驗反算出的參數來給定運動分析中所使用的微觀參數，逐步折減滑動面及周圍地區 (牆) 的靜摩擦係數或可能調整滾動摩擦係數來進行分段式數值模擬二中 EDEM 的顆粒運動與堆積模擬 (圖 20)，參考陳宏宇 (2010) 的國科會報告「獻肚山崩的關鍵 110 秒追蹤—莫拉克風災地質變化調查」，本研究考慮模擬秒數設定為 110 秒，兩項參數設定與對應的堆積狀況如圖 21~22 所示，圖 21 可看出靜摩擦係數由 0.5 逐步降至 0.15 且滾動摩擦係數均設為 0.05 時，各段模擬均於 110 秒期間內顯示沒有滑動跡象。當靜摩擦係數降至 0.1 時量體才開始滑動，圖 22a 與圖 22b 則表明不同滾動摩擦係數的堆積行為，較小的滾動摩擦係數使得堆積範圍將較大。

經由圖 22b 可看出靜摩擦係數為 0.1 且滾動摩擦係數為 0.075 時可於 110 秒達到與圖 14 較相似的結果。



(a)



(b)

圖 20 依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分 (a) 滑動區域以及周圍區域 (b) 建立顆粒的位置

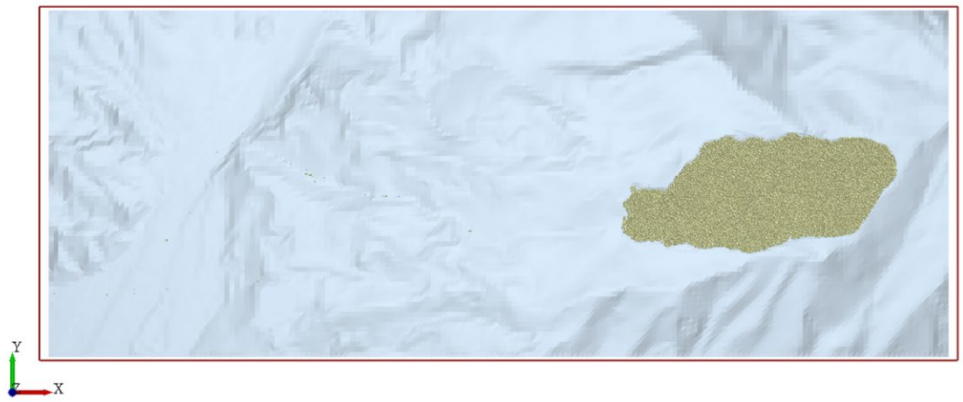
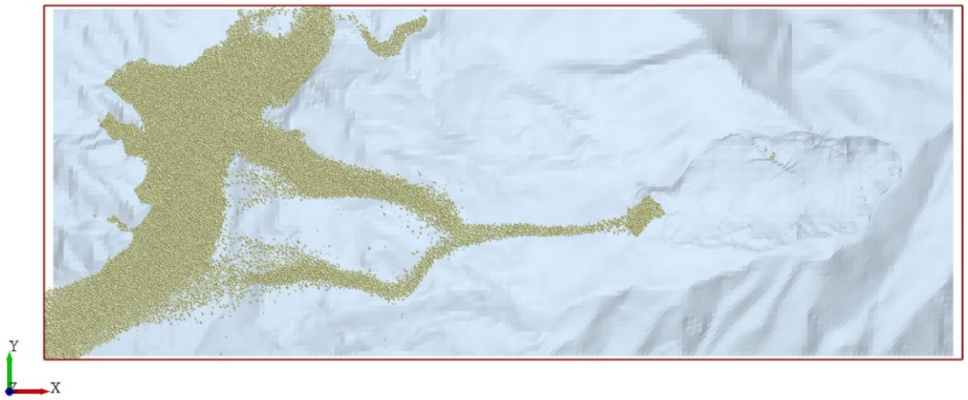


圖 21 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.3、0.15) 之崩塌堆積情況 (滾動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 110 秒)



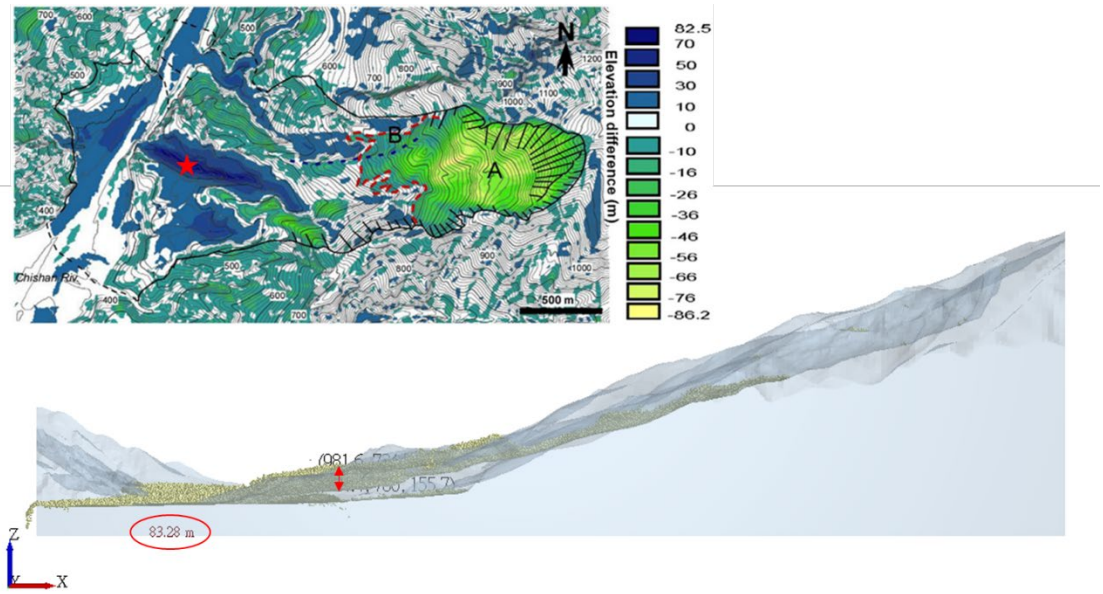
(a)



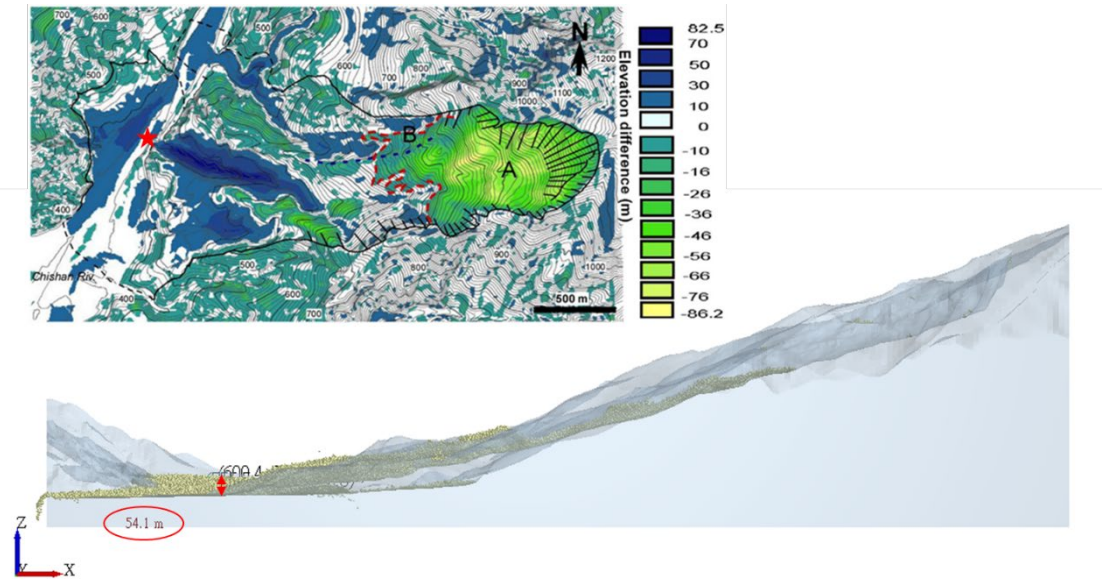
(b)

圖 22 考慮不同滾動摩擦係數 (a) 0.05 (b) 0.075 (靜摩擦係數皆為滑動開始之係數 0.1) (模擬時間均為 110 秒)

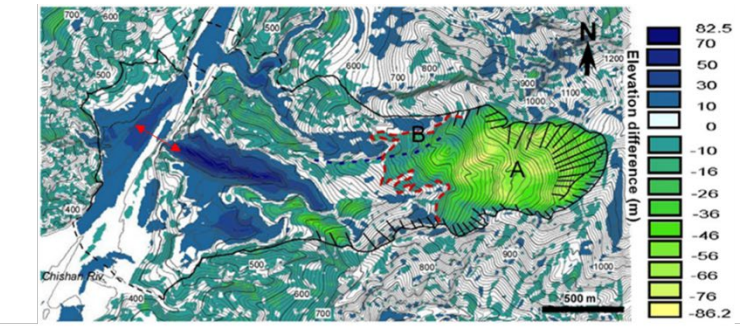
由分段式模擬二之結果，我們可以求得各個位置的崩塌堆積深度，與圖 14 之比較結果如圖 23 所示，整體上分段式模擬二的堆積結果與實際狀況相近，最高的堆積位置達到 83m (圖 23a)，旗山溪河道中央的堆積高度達 54m (圖 23b)，可推估小林村事件之堰塞壩高應約為 50~60m，與 Kuo et al. (2013) 對小林村事件進行有限差分數值模擬的結果一致，堰塞壩寬則約為 300m (圖 23c)。這裡需要注意的是，雖然分段式模擬一的堆積結果也可與實際結果相近，但分段式模擬一的結果反映出了流動參數的調整狀況，其中的參數 μ：0.2，由於邊坡坡度 (α) 為 27°，tanα值即為 μ 值，故本研究的 μ 值應為 0.5，但其 μ 之 RAMMS 手冊建議值為 $0.05 \leq \mu \leq 0.4$，因此本應將 μ 設為最大值 0.4，但此時的堆積結果較難吻合實際的堆積狀況，故本研究將 μ 值調整為 0.2 才得到圖 13 的結果。與分段式模擬一所使用的流動參數不同，分段式模擬二的參數雖較多，但其宏觀力學參數與微觀力學參數的擬合是以單壓力學試驗做基礎，可以反映出材料的力學行為。


N
B
A
Chishan Riv.
500 m
Elevation difference (m)
82.5
70
50
30
10
0
-10
-16
-26
-36
-46
-56
-66
-76
-86.2
83.28 m
Z
X

(a)


N
B
A
Chishan Riv.
500 m
Elevation difference (m)
82.5
70
50
30
10
0
-10
-16
-26
-36
-46
-56
-66
-76
-86.2
54.1 m
Z
X

(b)



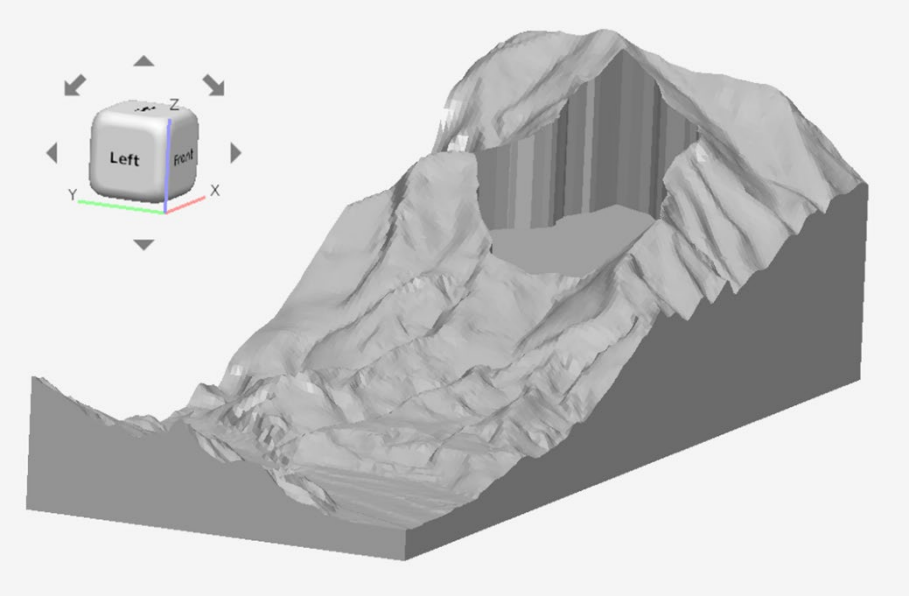


(c)

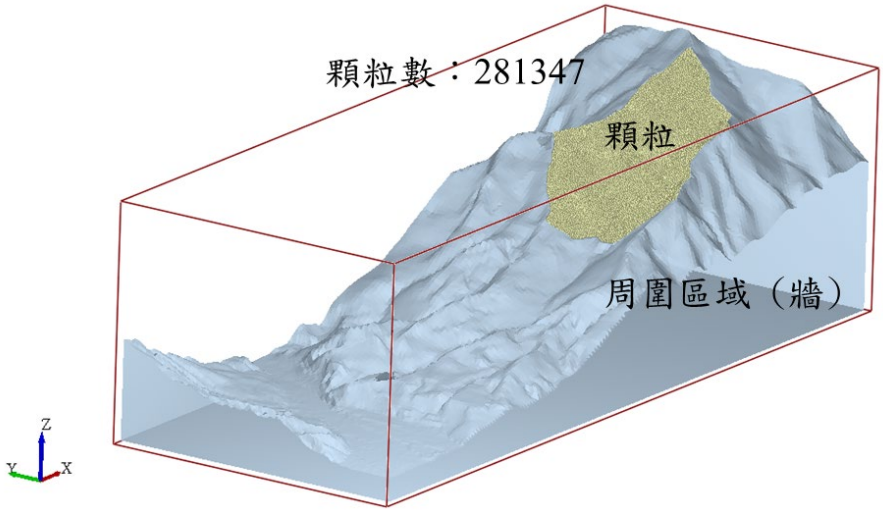
圖 23 小林村分段式模擬二的堆積結果 (a) 最高堆積位置 (b) 旗山溪河道中央的堆積高度 (堰塞壩高) (c) 旗山溪堰塞壩寬

第三節 整合型數值模擬 (EDEM)

如同前一節所說明的，由於整合型模擬法中無設定滑動面位置，均由顆粒組成，與分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 不同，加上考慮邊坡於崩塌前的穩定性應是逐漸降低而非一次性降至崩塌時的強度，因此無法直接使用強度折減法的最後一步 (折減至崩塌時之強度，請參見上一節所述) 之宏觀參數與微觀參數擬合結果。本研究將由分離元素法擬合自強度折減法的第一步 (first step) 至最後一步，分別擬合不同 step 強度下的有限元力學試驗結果，使得分離元素方法中能反映不同強度折減係數下宏觀的材料尖峰強度與楊氏模數。因此將依此來逐步調整各項微觀參數，並探討在哪一個強度折減係數下的邊坡破壞狀況較符合實際崩塌情況，另外關於運動堆積分析方式如圖 24 所解釋，本研究為了避免顆粒數量過於龐大難以計算而以邊坡單元為邊界來劃分模擬崩塌的區域 (如圖 24a 之開挖區域)，並在開挖區域建立顆粒 (圖 24b)，以及周圍區域，因此周圍區域為剛體 (牆)，本研究將在運動堆積部分遵循上一節的方式，且遵循上一節得出的結果：周圍區域 (牆) 的靜摩擦係數設為 0.1、滾摩擦係數設為 0.075。



(a)



(b)

圖 24 依據更深的位置劃分集水區 (a) 周圍區域 (b) 建立顆粒的位置

接著以強度折減第一步 (即強度折減前) 至最後一步 (折減至崩塌時之強度) 之宏觀力學參數，利用有限元單壓試驗與分離元素單壓試驗結果來反算微觀參數如表 4~8 所示。本研究利用表 4~7 的微觀參數結果逐步調整圖 24 之模型參數，每段模擬均設定模擬時間為 50 秒，於

最後一步則再增加 60 秒，使得模擬時間達到 110 秒。整合型的模擬結果如圖 25 所示，可以發現一開始強度尚未折減時 (表 4)，坡體沒有顆粒流出情形 (圖 25a)，當強度第一次折減時 (表 5)，有一點顆粒流出 (圖 25b)，這可能是當強度折減導致部分顆粒間鍵結被坡體內應力壓斷所致，而當強度再次折減 (表 6) 則有一些顆粒流出 (圖 25c)，最後當強度折減至崩塌時之強度時 (表 7)，大量顆粒傾瀉而下 (圖 25d)。然而，最後的堆積結果與實際狀況差異較大，這可能是由於逐步折減過程當中，鍵結被逐步打斷而導致顆粒逐步流出所致，先前流出的顆粒由於堆積到崩塌顆粒移動的路徑上，以致當強度折減至崩塌時之強度，崩塌發生而顆粒大量流出時，大量顆粒的原先路徑受到先前堆積的影響而改變路徑，因此出現堆積範圍擴大的結果，此外本研究設定顆粒大小為 4~12m，均屬於較大顆粒且為球體，若移動路徑受阻礙，也很可能使得顆粒路徑改變而讓堆積結果較擴散。不過整體而言，崩塌堆積的狀況也與圖 14 類似，但較分段式模擬二差。

表 4 宏觀力學參數 (first step in PLAXIS; 強度尚未折減)

與對應的微觀參數設定

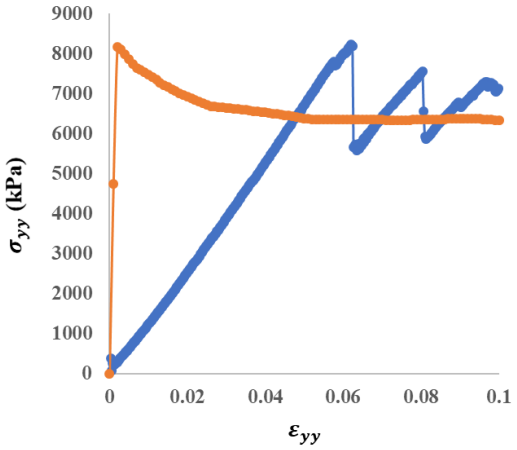
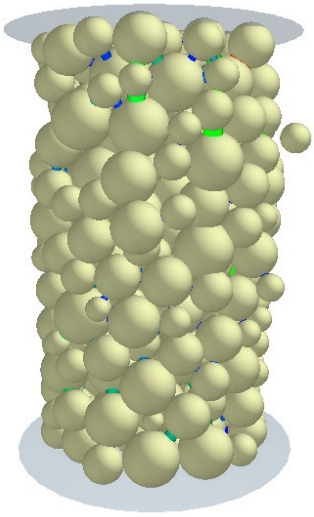
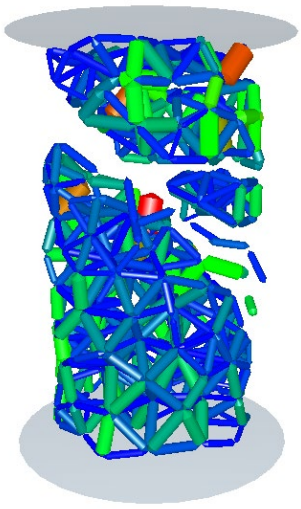
有限元素法單壓試驗		分離元素法單壓試驗	
單位重 (kN/m^3)	25	球型顆粒直徑 (m)	4~12
楊氏模數 (kPa)	4.7 x 10^6	顆粒總數	376
柏松比	0.26	顆粒總體積 (m^3)	121849
非弱面-凝聚力 (kPa)	22450	孔隙率	0.38
非弱面摩擦角 (˚)	10.8	顆粒密度 (kg/m^3)	4100
弱面-凝聚力 (kPa)	3610	顆粒有效模數 (kPa)	4.7 x 10^6
弱面摩擦角 (˚)	6.9	柏松比	0.26
		顆粒恢復係數	0.5
		顆粒靜摩擦係數	0.4
		顆粒滾動摩擦係數	0.1
		鍵結法向勁度 (N/m^3)	5 x 10^8
		鍵結切向勁度 (N/m^3)	5 x 10^8
		鍵結法向強度 (Pa)	2 x 10^8
		鍵結切向強度 (Pa)	2 x 10^8
		牆密度 (kg/m^3)	7000
		牆有效模數 (kPa)	1 x 10^{10}
		牆恢復係數	0.8
		牆靜摩擦係數	0.8
		牆滾動摩擦係數	0.1
			

表 5 宏觀力學參數 (middle step in PLAXIS; 強度折減至原來的 1/3)

與對應的微觀參數設定

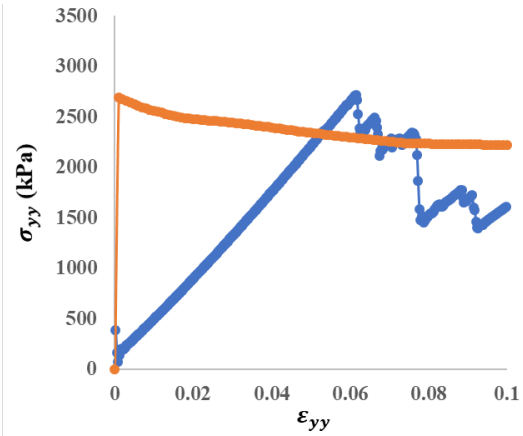
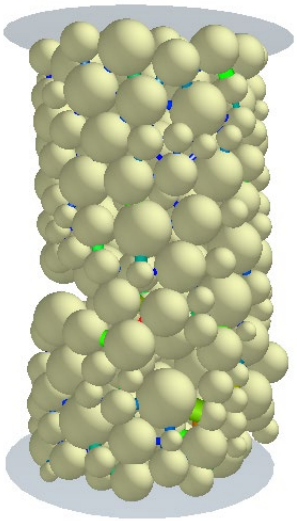
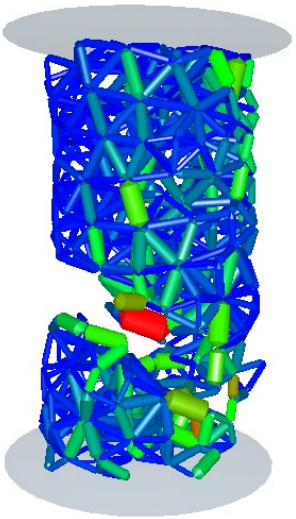
<table>
<tr><th colspan="2">有限元素法單壓試驗</th><th colspan="2">分離元素法單壓試驗</th></tr>
<tr><td>單位重 (kN/m^3)</td><td>25</td><td>球型顆粒直徑 (m)</td><td>4~12</td></tr>
<tr><td>楊氏模數 (kPa)</td><td>4.7 x 10^6</td><td>顆粒總數</td><td>376</td></tr>
<tr><td>柏松比</td><td>0.26</td><td>顆粒總體積 (m^3)</td><td>121849</td></tr>
<tr><td>非弱面-凝聚力 (kPa)</td><td>7872</td><td>孔隙率</td><td>0.38</td></tr>
<tr><td>非弱面摩擦角 (°)</td><td>3.8</td><td>顆粒密度 (kg/m^3)</td><td>4100</td></tr>
<tr><td>弱面-凝聚力 (kPa)</td><td>1266</td><td>顆粒有效模數 (kPa)</td><td>4.7 x 10^6</td></tr>
<tr><td>弱面摩擦角 (°)</td><td>2.4</td><td>柏松比</td><td>0.26</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="11"> 
</td><td>顆粒恢復係數</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>顆粒靜摩擦係數</td><td>0.16</td></tr>
<tr><td>顆粒滾動摩擦係數</td><td>0.04</td></tr>
<tr><td>鍵結法向勁度 (N/m^3)</td><td>8 x 10^7</td></tr>
<tr><td>鍵結切向勁度 (N/m^3)</td><td>8 x 10^7</td></tr>
<tr><td>鍵結法向強度 (Pa)</td><td>4.5 x 10^7</td></tr>
<tr><td>鍵結切向強度 (Pa)</td><td>4.5 x 10^7</td></tr>
<tr><td>牆密度 (kg/m^3)</td><td>7000</td></tr>
<tr><td>牆有效模數 (kPa)</td><td>1 x 10^{10}</td></tr>
<tr><td>牆恢復係數</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>牆靜摩擦係數</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>牆滾動摩擦係數</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2">  </td></tr>
</table>

表 6 宏觀力學參數 (middle step in PLAXIS; 強度折減至原來的 1/5)

與對應的微觀參數設定

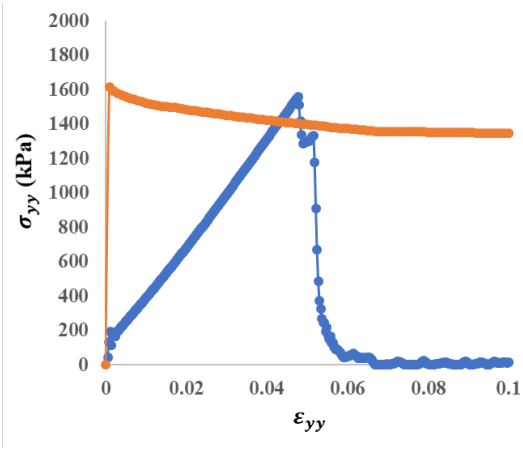
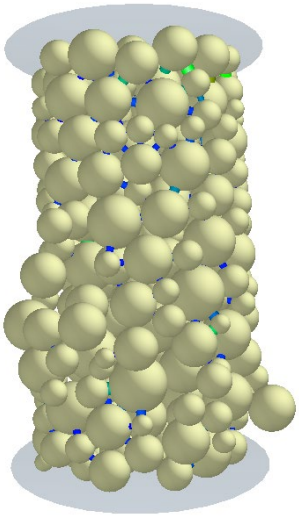
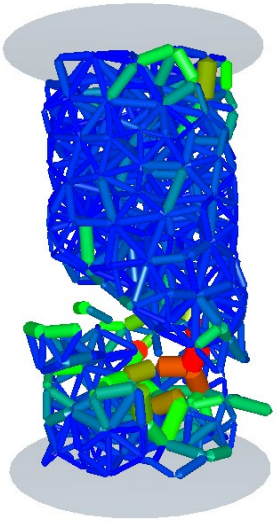
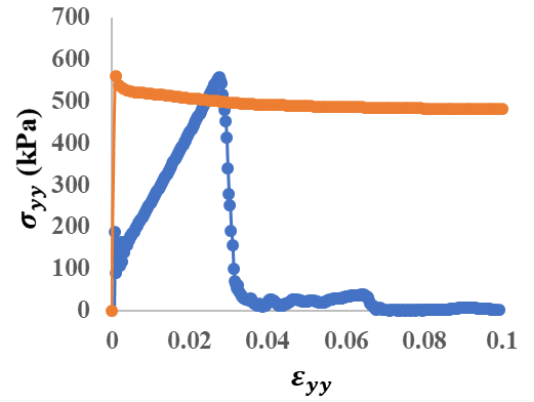
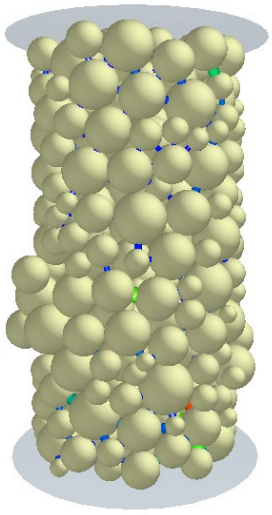
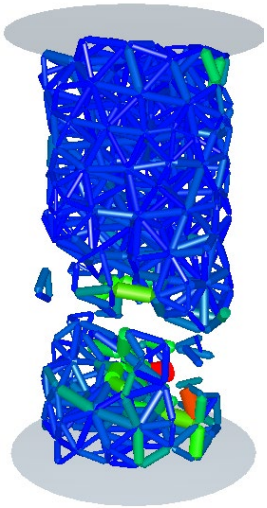
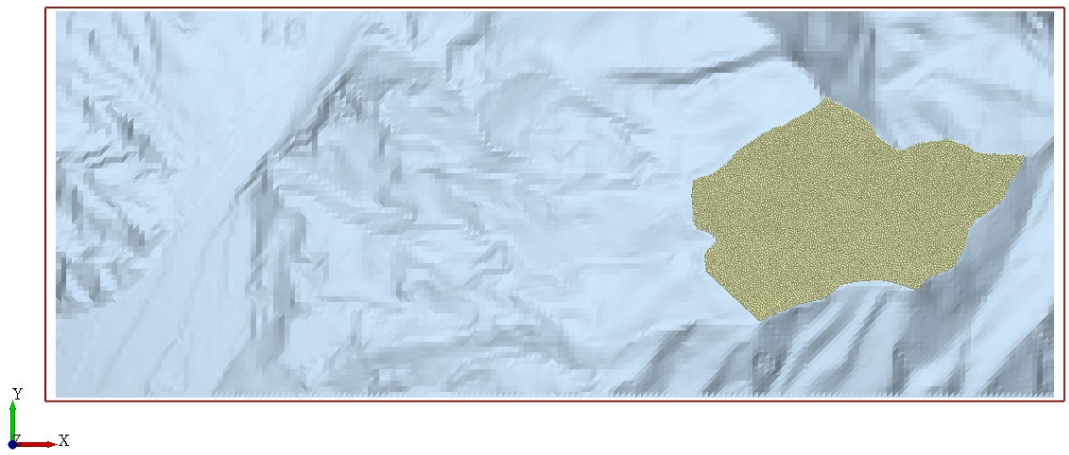
有限元素法單壓試驗		分離元素法單壓試驗	
單位重 (kN/m^3)	25	球型顆粒直徑 (m)	4~12
楊氏模數 (kPa)	4.7 x 10^6	顆粒總數	376
柏松比	0.26	顆粒總體積 (m^3)	121849
非弱面-凝聚力 (kPa)	4723	孔隙率	0.38
非弱面摩擦角 (˚)	2.3	顆粒密度 (kg/m^3)	4100
弱面-凝聚力 (kPa)	759	顆粒有效模數 (kPa)	4.7 x 10^6
弱面摩擦角 (˚)	1.5	柏松比	0.26
		顆粒恢復係數	0.5
		顆粒靜摩擦係數	0.08
		顆粒滾動摩擦係數	0.02
		鍵結法向勁度 (N/m^3)	5 x 10^7
		鍵結切向勁度 (N/m^3)	5 x 10^7
		鍵結法向強度 (Pa)	2.5 x 10^7
		鍵結切向強度 (Pa)	2.5 x 10^7
		牆密度 (kg/m^3)	7000
		牆有效模數 (kPa)	1 x 10^{10}
		牆恢復係數	0.8
		牆靜摩擦係數	0.8
		牆滾動摩擦係數	0.1
			

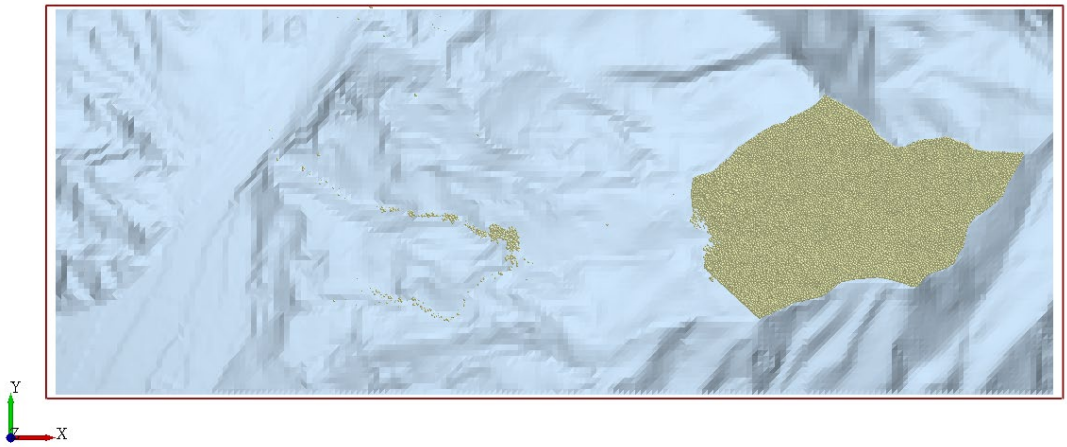
表 7 宏觀力學參數 (the last step in PLAXIS; 折減至崩塌時之強度)

與對應的微觀參數設定

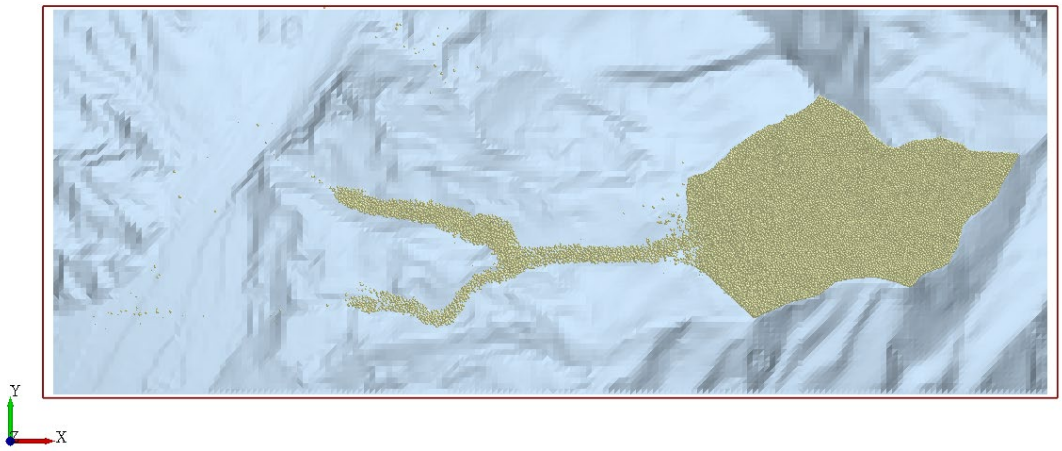
有限元素法單壓試驗		分離元素法單壓試驗	
單位重 (kN/m^3)	25	球型顆粒直徑 (m)	4~12
楊氏模數 (kPa)	4.7 x 10^6	顆粒總數	376
柏松比	0.26	顆粒總體積 (m^3)	121849
非弱面-凝聚力 (kPa)	1574	孔隙率	0.38
非弱面摩擦角 (˚)	0.8	顆粒密度 (kg/m^3)	4100
弱面-凝聚力 (kPa)	253	顆粒有效模數 (kPa)	4.7 x 10^6
弱面摩擦角 (˚)	0.5	柏松比	0.26
		顆粒恢復係數	0.5
		顆粒靜摩擦係數	0.04
		顆粒滾動摩擦係數	0.01
		鍵結法向勁度 (N/m^3)	4 x 10^7
		鍵結切向勁度 (N/m^3)	4 x 10^7
		鍵結法向強度 (Pa)	9 x 10^6
		鍵結切向強度 (Pa)	9 x 10^6
		牆密度 (kg/m^3)	7000
		牆有效模數 (kPa)	1 x 10^{10}
		牆恢復係數	0.8
		牆靜摩擦係數	0.8
		牆滾動摩擦係數	0.1
			



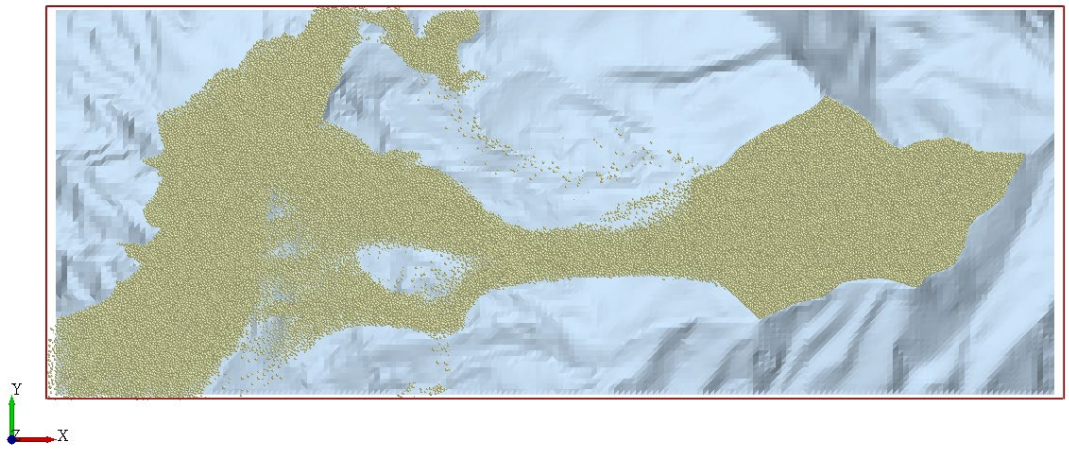
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 25 逐步折減強度之分離元素崩塌與堆積模擬

(a) 強度尚未折減 (0~50 秒，共 50 秒) (b) 強度折減至原來的 1/3 (51~100 秒，共 50 秒) (c) 強度折減至原來的 1/5 (101~150 秒，共 50 秒) (d) 折減至崩塌時之強度 (151~260 秒，共 110 秒)

本研究期中報告利用小林村獻肚山崩塌堆積衍生堰塞壩事件，進行分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS)、分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM)、整合型模擬 (EDEM)，研究結果發現各項模擬方法均有其優缺點，說明如表 8，發現分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 的結果最符合實際狀況；整合型模擬 (EDEM) 的結果則與實際狀況有些出入，堆積擴散程度較嚴重；而分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 則在調整參數後，結果雖可符合實際狀況，但是 RAMMS 中的流動參數較難結合材料的力學行為，較難直接使用 RAMMS 之手冊建議值而得到不錯的結果，故

在 RAMMS 模擬中往往需要不斷的調整流動參數，且往往沒有調整的依據。我們認為若能利用數值力學試驗將有限元素的宏觀參數與分離元素的微觀參數架接對應，那麼分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 應是相對不錯的預測崩塌堆積的模式，尤其 PLAXIS 在預測滑動面方面有著出色的表現，且 EDEM 中參數可符合材料力學行為。

表 8 不同模擬方法的比較

	分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS)	分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM)	整合型模擬 (EDEM)
優點	速度最快 操作簡單	參數可符合材料力學行為	參數可符合材料力學行為
缺點	流動參數較難結合材料力學行為	1. 速度稍慢 2. 需進行數值力學試驗擬合來得到材料參數 3. 操作稍繁雜	1. 顆粒最多速度最慢 2. 需進行數值力學試驗擬合來得到材料參數 3. 操作最繁雜
結果	調整參數後，結果可符合實際狀況	結果最符合實際狀況	結果與實際狀況有些出入，

			堆積擴散程度較嚴重

小林村案例的成果歸納出了確立各項參數的方法，可利用此方法來挑選適當的邊坡材料的宏觀、微觀或流動參數，應用於評估其他大規模崩塌潛勢地區之破壞及崩落全過程。而後續我們挑選結果較好的分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 與分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 來進行大規模崩塌潛在地的崩塌與堆積預測模擬。目前公布的大規模崩塌潛在地有 186 處，其中 34 處為優先辦理對象，12 處屬於第一類型，另 22 處屬於第二類型，本研究決定從中挑選九份二山大規模崩塌潛在地 (屬於 34 處之優先第一類型) 與廬山 D066 廬山聚落邊坡 (屬於 34 處之優先第二類型) 進行崩塌與堆積預測模擬，此外，由於鄰近廬山聚落邊坡之廬山北坡，同屬於大規模崩塌潛在地，遂也一併完成廬山北坡之預測模擬。

第四章 大規模崩塌潛在地之案例分析

第一節 九份二山大規模崩塌潛在地

考慮九份二山於 1999 年 921 大地震時崩塌過，加上有許多相關研究文獻可以參考，故可以先利用此次的崩塌資料進行預先模擬與驗證，如圖 26 所示，本研究先利用 921 崩塌前的 40m DEM 進行建模，本研究劃分邊坡單元進行後續分析並將其周圍地質設定為剛體。參考吳秋雅 (2007) 和曾俊偉 (2004) 的相關九份二山地質分布圖、崩塌影響範圍以及力學試驗結果 (圖 27、表 9)。九份二山之地質由樟湖坑頁岩之厚層頁岩夾砂岩組成，本研究參考曾俊偉 (2004) 之直接剪力試驗結果(表 9)，考慮尖峰強度參數與殘餘強度參數，分別給定岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式 (Iso-JRMC) 中的非弱面材料與強度參數、弱面強度參數，利用 PLAXIS 3D 進行強度折減法來取得邊坡可能的滑動面，本研究設定材料與弱面強度參數如表 10，坡面與弱面的立體投影圖則如圖 28 所示，必須說明的是由於沒有蒐集到相關弱面的強度參數資料，因此本研究這裡先以殘餘強度給定弱面強度參數。九份二山的滑動面分析結果，如圖 29 所示，可看出係一平面破壞。

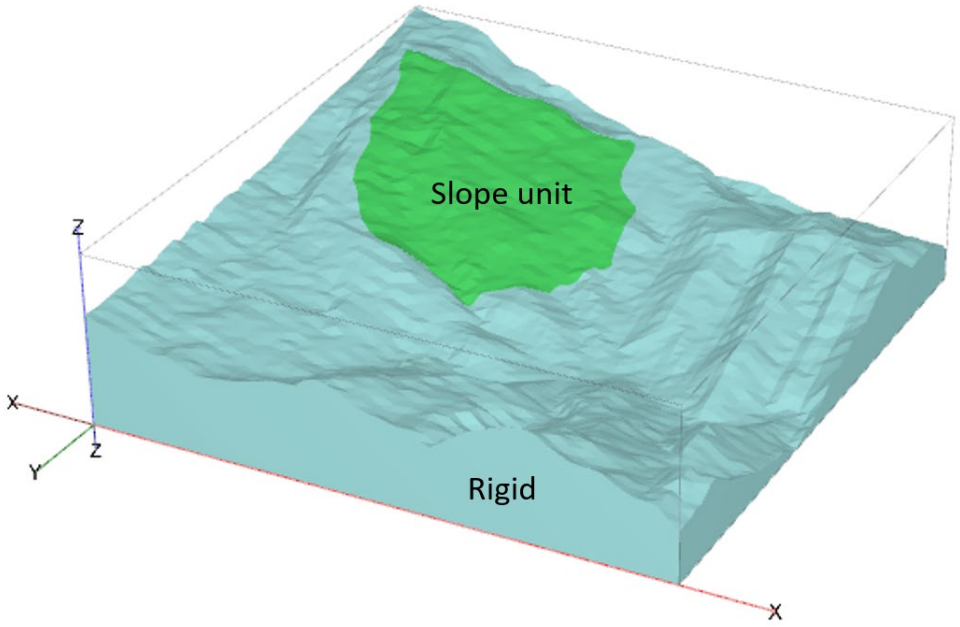


圖 26 本研究之九份二山 PLAXIS 邊坡模型 (921 崩塌前地形)

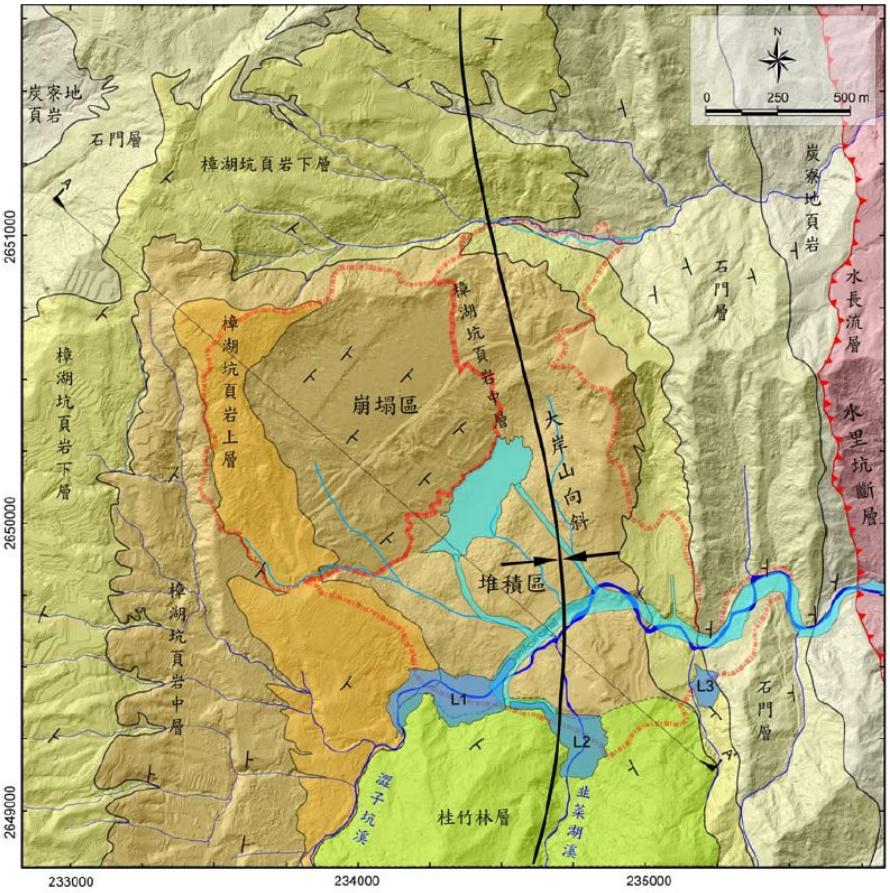


圖 27 九份二山區域地質圖與崩塌影響範圍 (吳秋雅, 2007)

表 9 九份二山岩石直接剪力試驗結果 (曾俊偉, 2004)

孔號	深度(m)	C_p (kg/cm2)	ϕ_p (deg)	C_r (kg/cm2)	ϕ_r (deg)
BH-1	10.05~10.45	9.6	36.1	0.4	33.2
BH-2	11.50~11.95	2.8	35.3	0.3	31.4
BH-3	12.40~12.65	6.6	35.3	0.3	33
BH-4	15.30~15.70	7.1	35.8	0.3	32.7
BH-5	34.10~34.40	0	22.9	0	20.2
BH-6	28.50~29.00	0	25.3	0	23.2
BH-6	39.40~39.60	0	24.4	0	22.6
BH-7	21.10~21.30	0	24.3	0	22.7
BH-7	36.70~37.00	0	24.6	0	22.6
BH-8	38.73~38.95	7.8	31.3	0.3	27.3
BH-9	14.80~14.95	9.1	33.5	0.3	29.1
BH-10	48.82~49.00	8.7	31.6	0.6	27.4
平均		4.308333	30.03333	0.208333	27.11667

表 10 九份二山 PLAXIS 中設定之材料與弱面參數

	岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式
單位重 (kN/m^3)	25
楊氏模數 (kPa)	7.6 x 10^6
柏松比	0.19
非弱面-凝聚力 (kPa)	422
非弱面摩擦角 (°)	30
弱面-凝聚力 (kPa)	20
弱面摩擦角 (°)	27

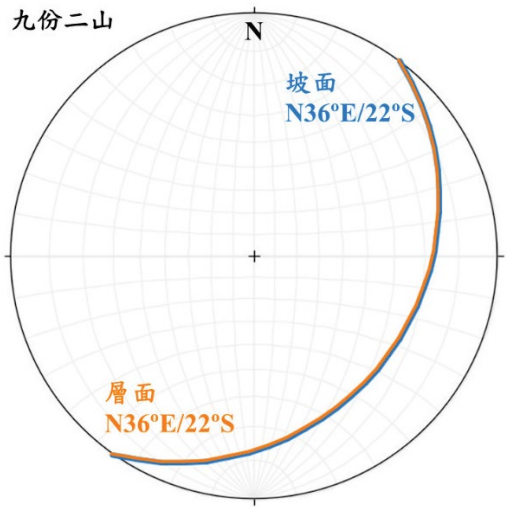


圖 28 九份二山坡面與弱面位態

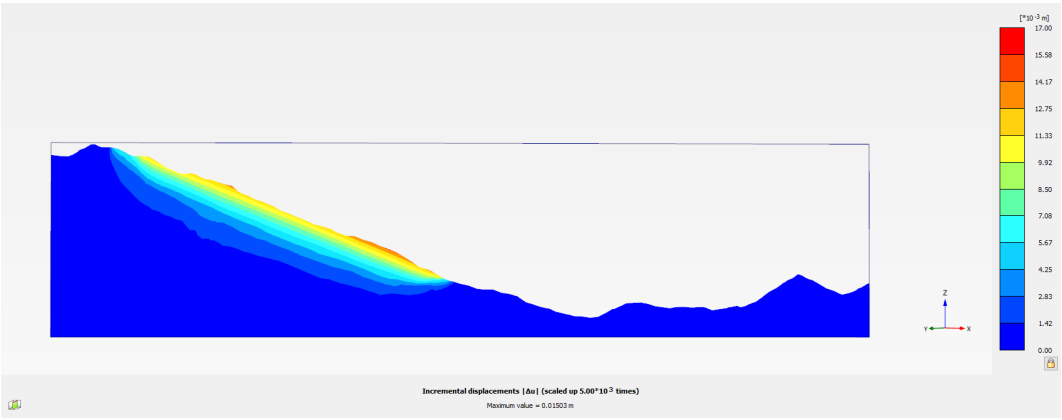
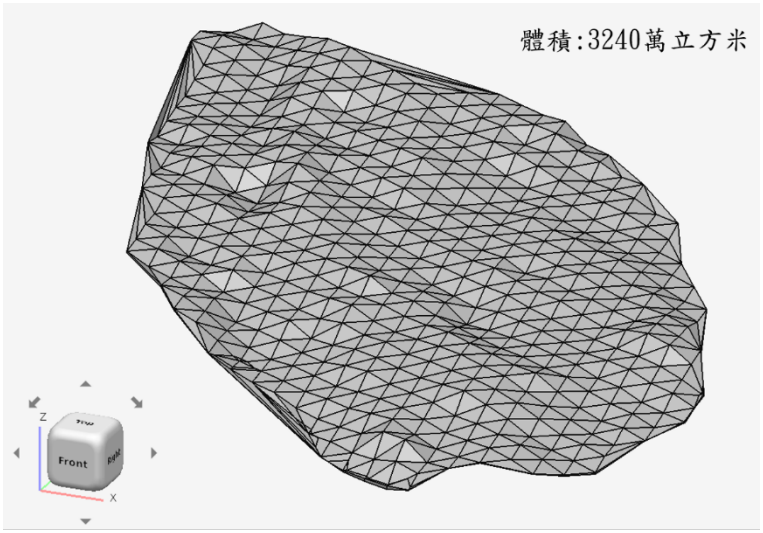
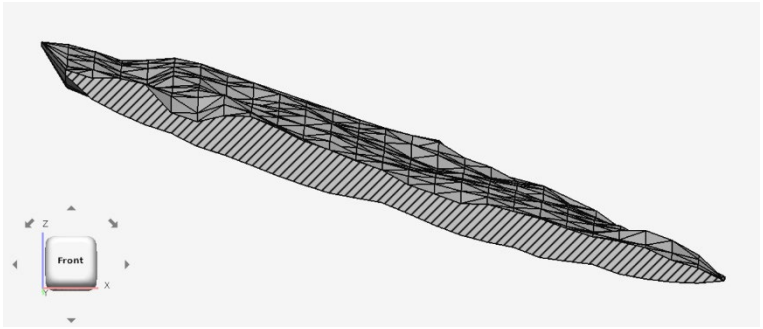


圖 29 九份二山邊坡滑動面分析結果 (921 崩塌前地形)

在 RAMMS 分析中需要知道崩塌量體大小，因此本研究將 PLAXIS 的成果製成 3D 模型，並計算其崩塌量體，如圖 30 所示，並與實際崩塌的量體之 3D 模型進行比較，實際的崩塌量體由政府資料開放平台「內政部 40 公尺網格數值地形模型資料」獲取之 921 前後的 40m DEM 進行建模，如圖 31 所示，PLAXIS 分析之滑動面結果與實際狀況差異甚小。

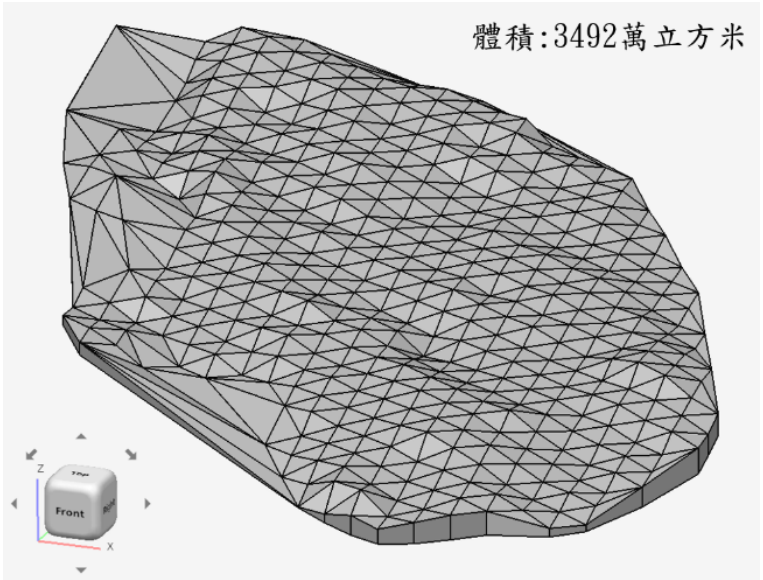


(a)



(b)

圖 30 九份二山 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面 (利用 921 崩塌前地形建模預測)



(a)

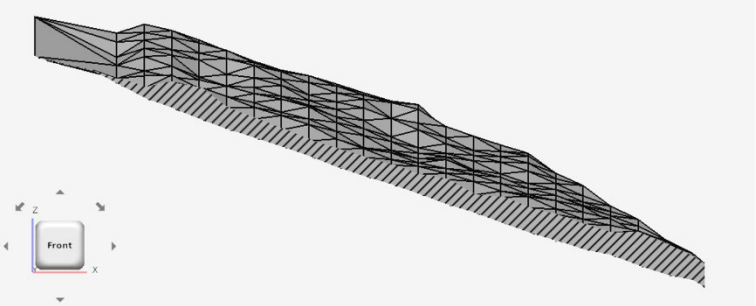
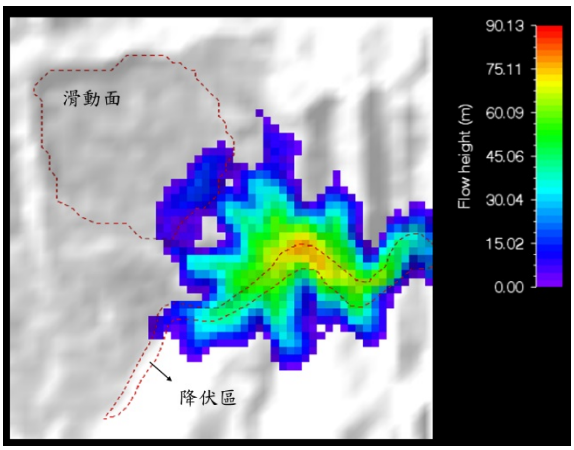


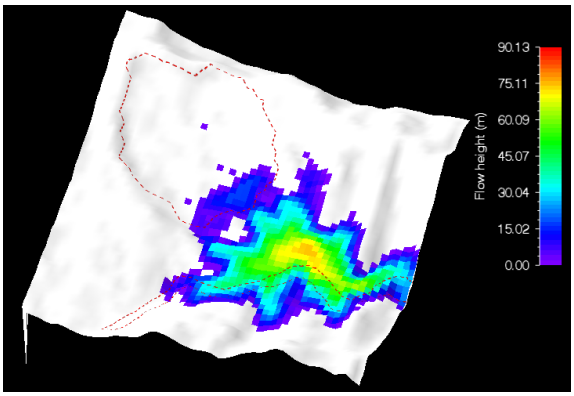
圖 31 九份二山實際崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面

本研究根據 PLAXIS 分析初的崩塌量體大小來進行 RAMMS 的崩移模擬，RAMMS 中所需要設定之參數較簡單，只需設定 ξ (viscous-turbulent friction)、μ (dry-Coulomb type friction)以及 C (yield stress)，本研究調整以上 3 個參數，分別為 ξ：180 m/s^2；μ：0.15；C：100 kPa，如圖 32 所示，本研究在此分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 最終可達到與吳秋雅 (2007) 利用崩塌事件前後高程相減之研究成果 (圖 33)，相似的堆積結果，堆積高度也相近。

這裡需要再次提及的是，雖然分段式模擬一的堆積結果最終可與實際結果相近，但分段式模擬一的結果僅反映出了流動參數的調整狀況，其中的參數 μ：0.15，由於邊坡坡度 (α) 為 22°，tanα值即為 μ 值，故本研究的 μ 值本應為 0.4，但此時的堆積結果較難吻合實際的堆積狀況，故本研究將 μ 值調整為 0.15 才得到圖 32 的結果。



(a)



(b)

圖 32 九份二山 RAMMS 之分析成果 (a) 俯視圖 (b) 側視圖 (921 崩塌事件)

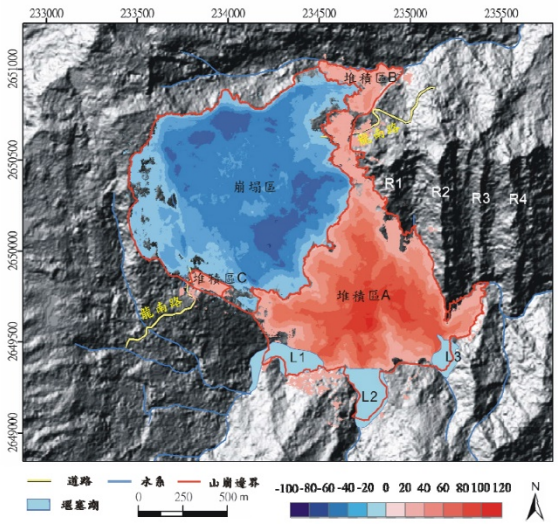
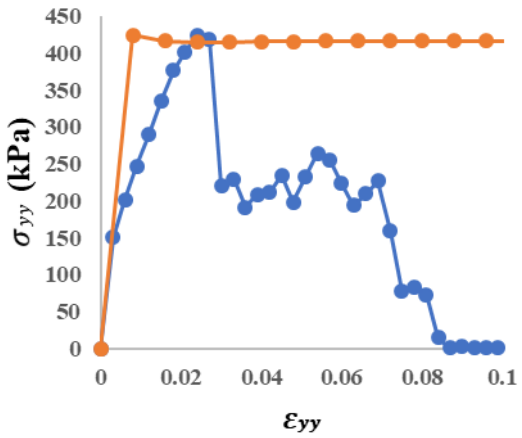
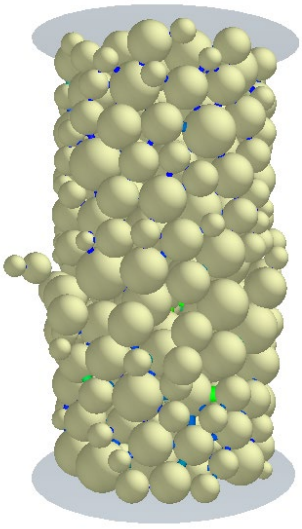
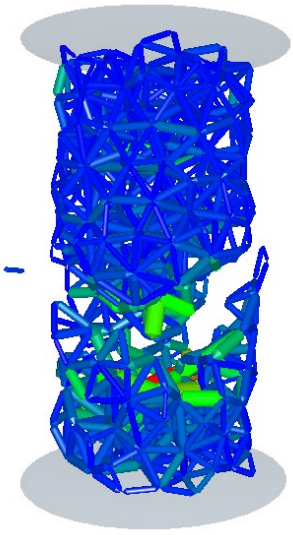


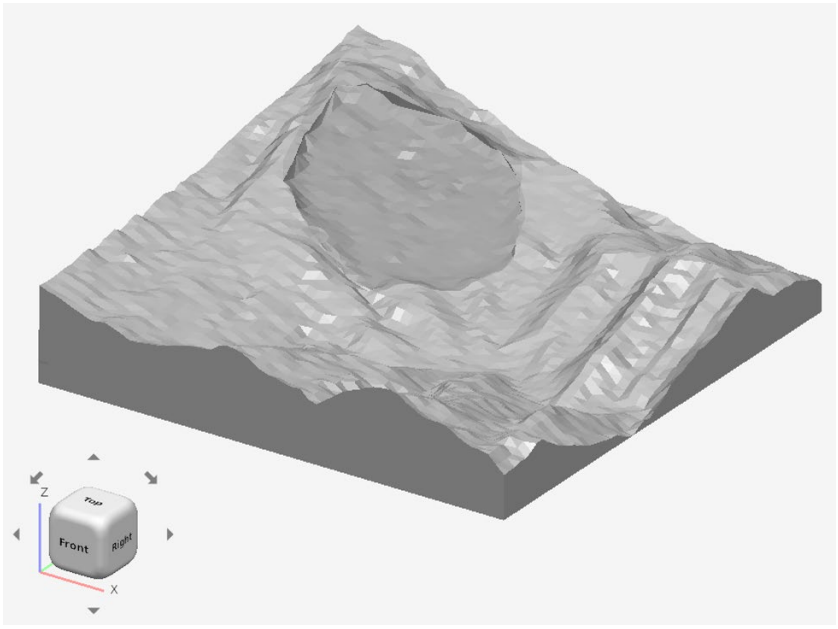
圖 33 九份二山崩塌事件前後地形差 (吳秋雅, 2007)

在 EDEM 分析中，宏觀力學參數與微觀參數設定如表 11。

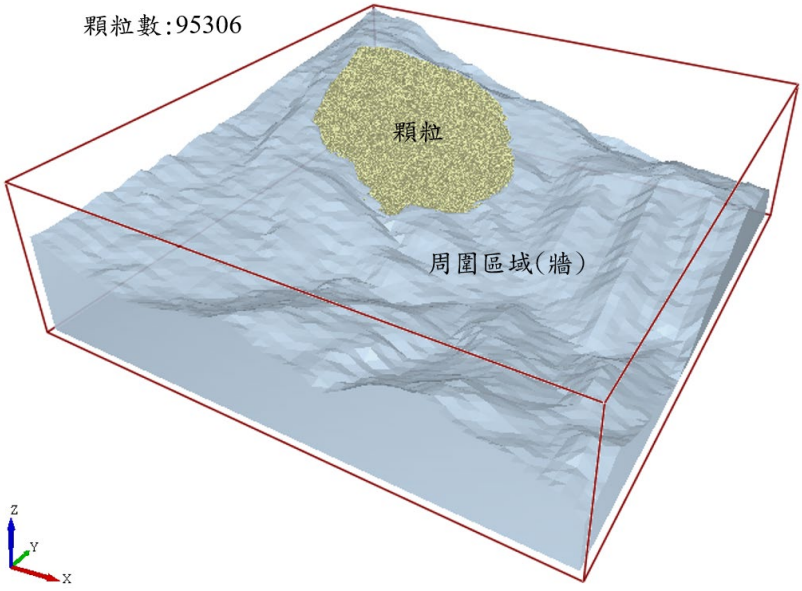
表 11 九份二山宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定

<table>
<tr><td colspan="2">有限元素法單壓試驗</td><td colspan="2">分離元素法單壓試驗</td></tr>
<tr><td>單位重 (kN/m^3)</td><td>25</td><td>球型顆粒直徑 (m)</td><td>4~12</td></tr>
<tr><td>楊氏模數 (kPa)</td><td>7.6 x 10^6</td><td>顆粒總數</td><td>376</td></tr>
<tr><td>柏松比</td><td>0.19</td><td>顆粒總體積 (m^3)</td><td>121849</td></tr>
<tr><td>非弱面-凝聚力 (kPa)</td><td>422</td><td>孔隙率</td><td>0.38</td></tr>
<tr><td>非弱面摩擦角 (˚)</td><td>30.0</td><td>顆粒密度 (kg/m^3)</td><td>4651</td></tr>
<tr><td>弱面-凝聚力 (kPa)</td><td>20</td><td>顆粒有效模數 (kPa)</td><td>7.6 x 10^6</td></tr>
<tr><td>弱面摩擦角 (˚)</td><td>27.1</td><td>柏松比</td><td>0.19</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="13"> 
</td><td>顆粒恢復係數</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>顆粒靜摩擦係數</td><td>0.28</td></tr>
<tr><td>顆粒滾動摩擦係數</td><td>0.07</td></tr>
<tr><td>鍵結法向勁度 (N/m^3)</td><td>8 x 10^6</td></tr>
<tr><td>鍵結切向勁度 (N/m^3)</td><td>8 x 10^6</td></tr>
<tr><td>鍵結法向強度 (Pa)</td><td>4.2 x 10^6</td></tr>
<tr><td>鍵結切向強度 (Pa)</td><td>4.2 x 10^6</td></tr>
<tr><td>牆密度 (kg/m^3)</td><td>7000</td></tr>
<tr><td>牆有效模數 (kPa)</td><td>1 x 10^{10}</td></tr>
<tr><td>牆恢復係數</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>牆靜摩擦係數</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>牆滾動摩擦係數</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2">  </td></tr>
</table>

接著，我們依據此分離元素力學試驗反算出的參數來給定運動分析中所使用的微觀參數，逐步折減滑動面及周圍地區 (牆) 的靜摩擦係數或可能調整滾動摩擦係數來進行分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 中 EDEM 的顆粒運動與堆積模擬 (圖 34)，由於搜尋不到九份二山崩塌時間的相關文獻，故本研究考慮模擬秒數為 120 秒來進行探討，靜摩擦係數、滾動摩擦係數設定與對應的堆積狀況如圖 35~36 所示，圖 35 可看出靜摩擦係數由 0.5 逐步降至 0.25 且滾動摩擦係數均設為 0.05 時，各段模擬均於 120 秒期間內顯示沒有滑動跡象。當靜摩擦係數降至 0.2 時量體才開始滑動，圖 36a 與圖 36b 則表明不同滾動摩擦係數的堆積行為，較小的滾動摩擦係數使得堆積範圍將較大。經由圖 36b 可看出靜摩擦係數為 0.2 且滾動摩擦係數為 0.025 時可於 120 秒達到與圖 33 較相似的結果。



(a)



(b)

圖 34 九份二山依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分 (a) 滑動區域以及周圍區域 (b) 建立顆粒的位置 (921 崩塌前)

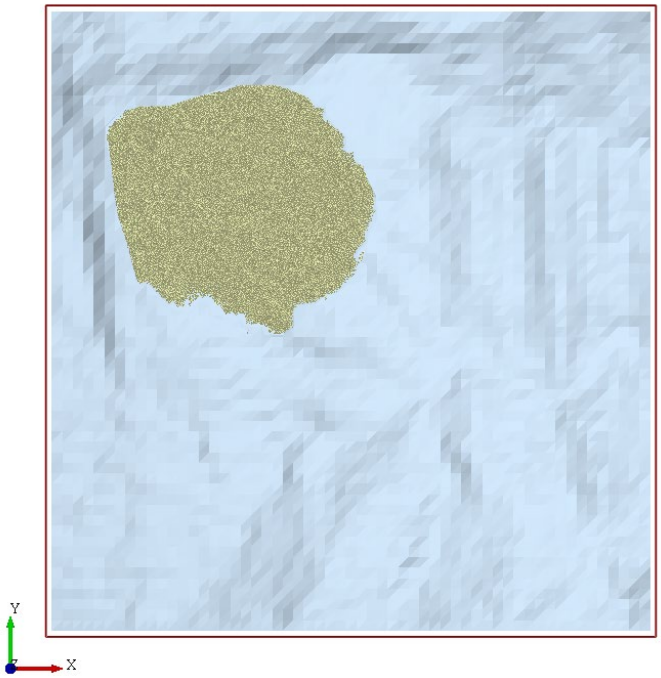
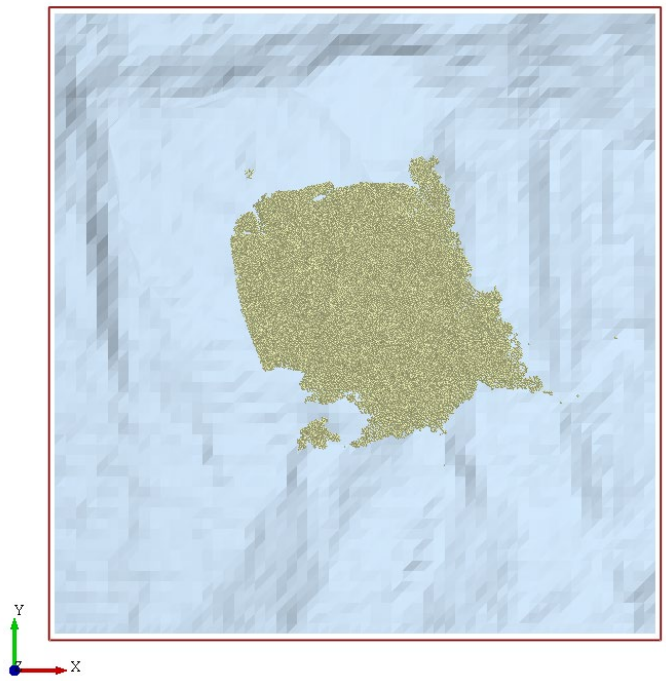
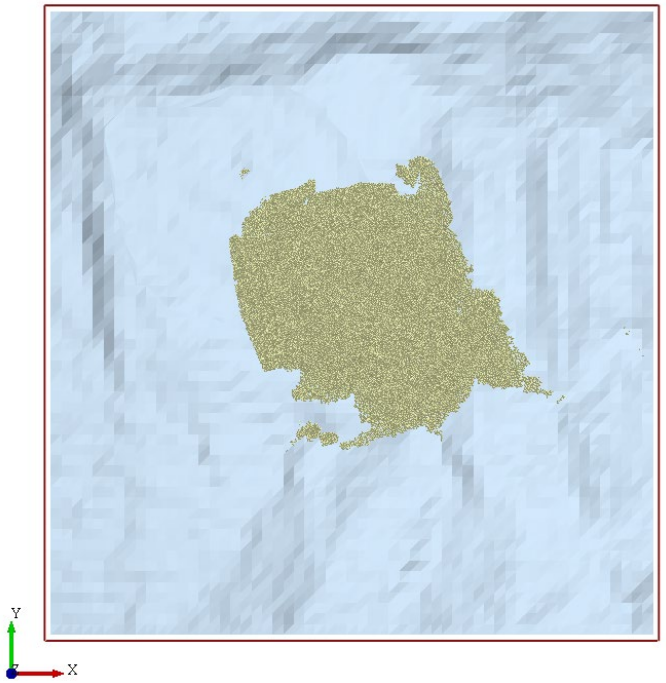


圖 35 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.4、0.3、0.25) 之崩塌堆積情況 (動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 120 秒)



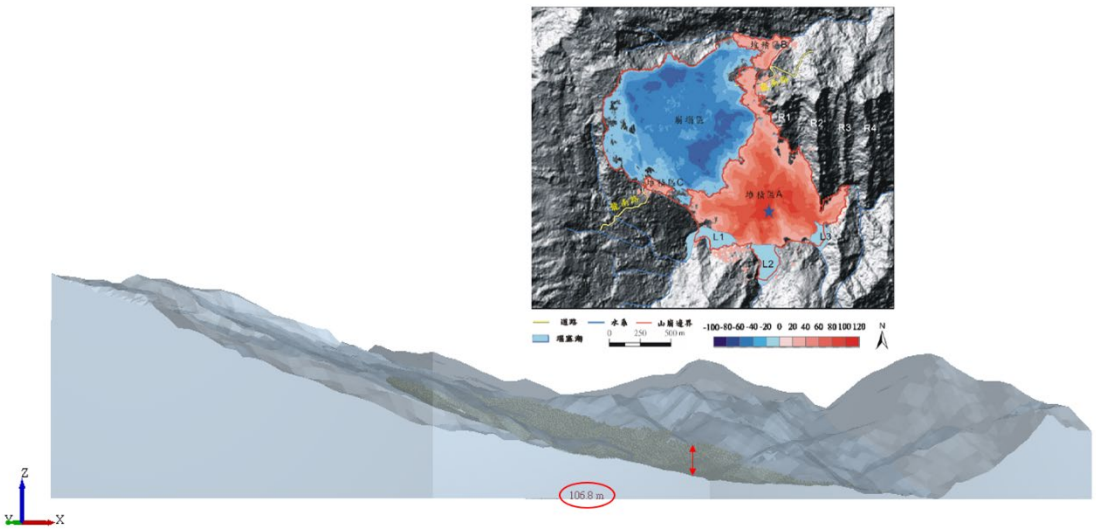
(a)



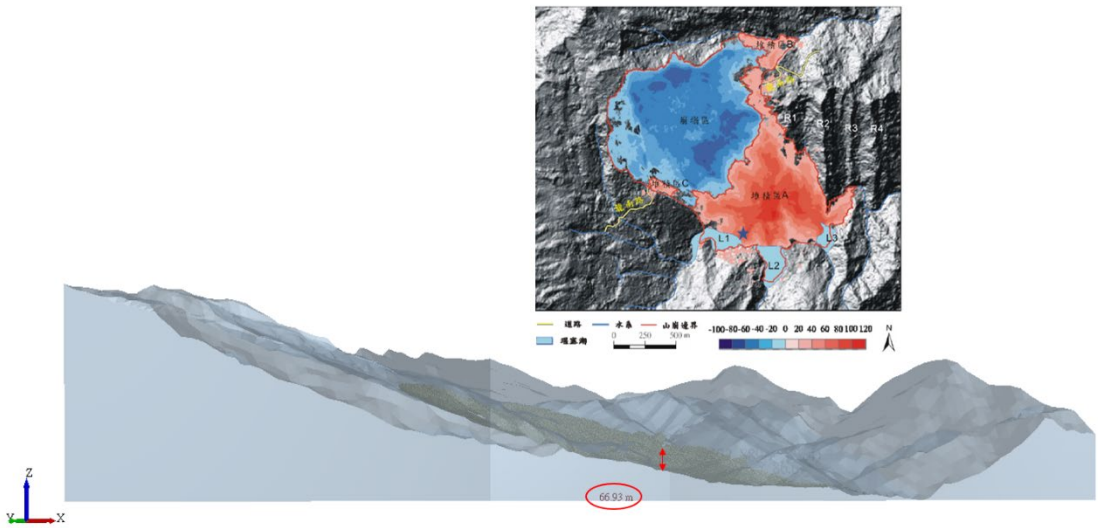
(b)

圖 36 考慮不同滾動摩擦係數 (a) 0.05 (b) 0.025 (靜摩擦係數皆為滑動開始之係數 0.2) (模擬時間均為 120 秒)

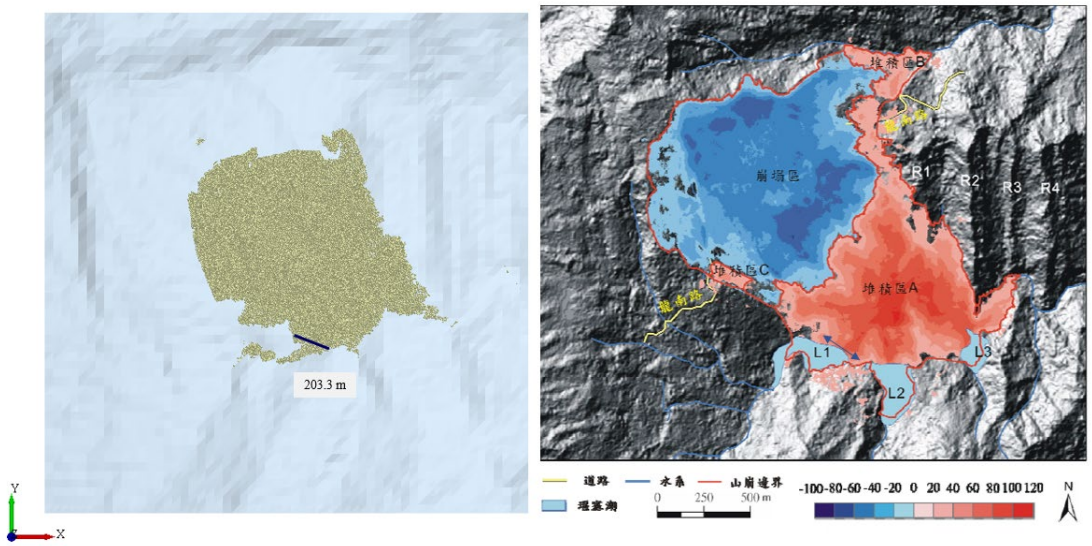
由 EDEM 之結果，我們可以求得各個位置的崩塌堆積深度，與圖 33 之比較結果如圖 37 所示，整體上分段式模擬二的堆積結果與實際狀況相近，最高的堆積位置達到 107m (圖 37a)，澀仔坑溪河道中央的堆積高度達 67m (圖 37b)，可推估九份二山 921 崩塌事件之澀仔坑溪堰塞壩高應約為 60~70m，澀仔坑溪堰塞壩寬則約為 200m (圖 37c)；此外，韭菜湖溪河道中央的堆積高度達 75m (圖 37d)，可推估九份二山 921 崩塌事件之韭菜湖溪堰塞壩高應約為 70~80m，韭菜湖溪堰塞壩寬則約為 220m (圖 37e)。



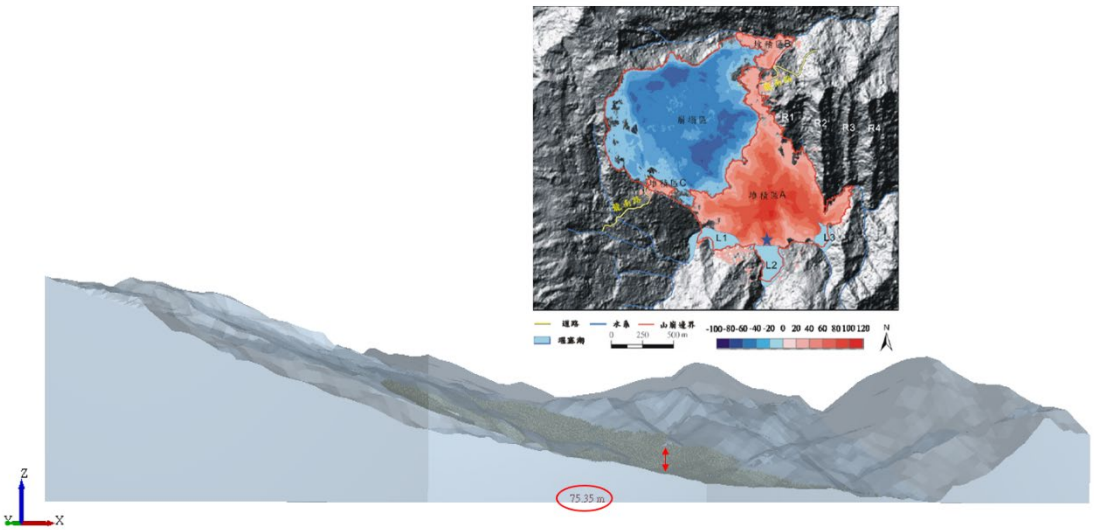
(a)


崩塌區
堆積區B
堆積區C
堆積區A
R1
R2
R3
R4
L1
L2
L3
道路
水系
山崩邊界
堰塞湖
-100-80-60-40-20 0 20 40 60 80 100 120
N
0 250 500 m
66.93 m
Z
Y
X

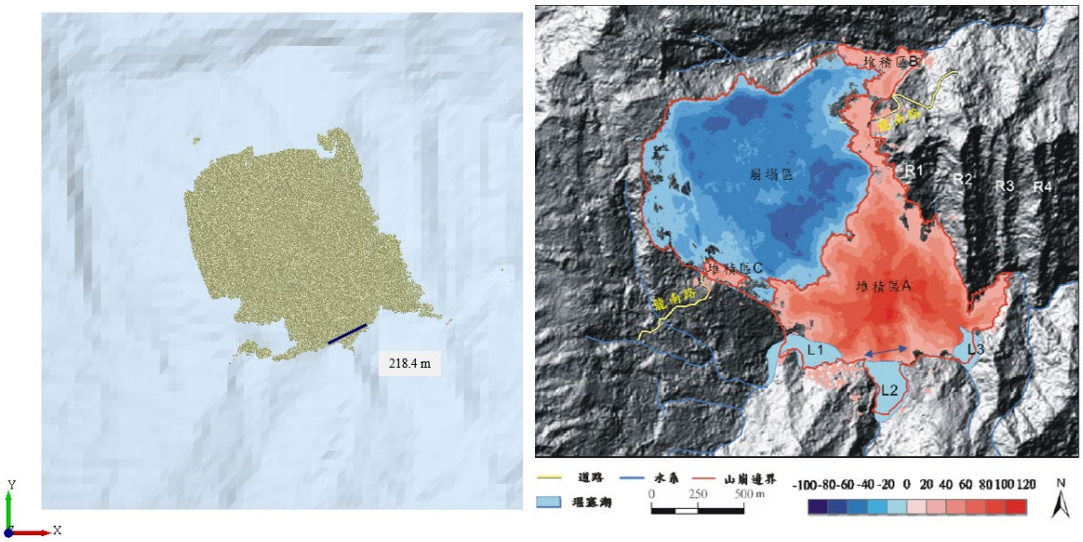
(b)


203.3 m
崩塌區
堆積區B
堆積區C
堆積區A
R1
R2
R3
R4
L1
L2
L3
道路
水系
山崩邊界
堰塞湖
-100-80-60-40-20 0 20 40 60 80 100 120
N
0 250 500 m
Y
X

(c)



(d)



(e)

圖 37 九份二山 EDEM 的堆積結果 (a) 最高堆積位置 (b) 澀仔坑溪河道中央的堆積高度 (堰塞壩高) (c) 澀仔坑溪堰塞壩寬 (d) 韭菜湖溪河道中央的堆積高度 (堰塞壩高) (e) 韭菜湖溪堰塞壩寬

九份二山大規模崩塌潛在地目前被歸類為優先 34 區之第一類型，為砂頁岩互層之典型順向坡 (弱面位態與坡面位態一致)，未來可能有再次發生崩塌的可能性，如草嶺。本研究先以 921 崩塌前的 DEM 進行 PLAXIS 建模分析滑動面，再分別以 RAMMS 與 EDEM 進行預測崩落堆積模擬，數值模擬出的堆積結果與實際堆積情形相近，確立了各項流動或微觀參數，可繼續利用這些參數應用於九份二山若再次崩塌之情形。

我們利用 921 崩塌後的 20m DEM 進行建模，劃分邊坡單元進行後續分析並將其周圍地質設定為剛體，邊坡單元的外型與 921 崩塌前所劃分出的差異不大 (圖 38)，此次的滑動面分析結果，如圖 39 所示，也可看出係一平面破壞，與 921 崩塌深度相比深度較淺。將 PLAXIS 的成果製成 3D 模型，並計算其崩塌量體，如圖 40 所示。

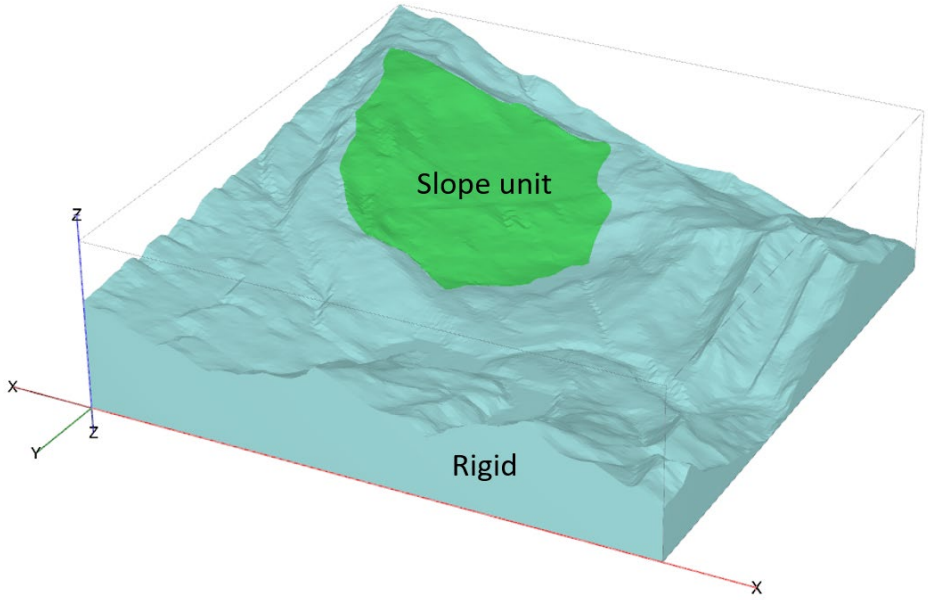


圖 38 本研究之九份二山 PLAXIS 邊坡模型 (921 崩塌後地形)

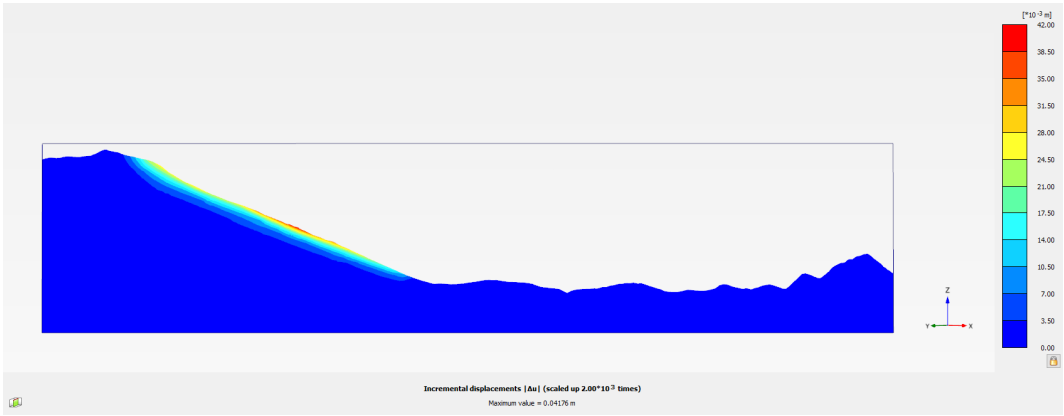
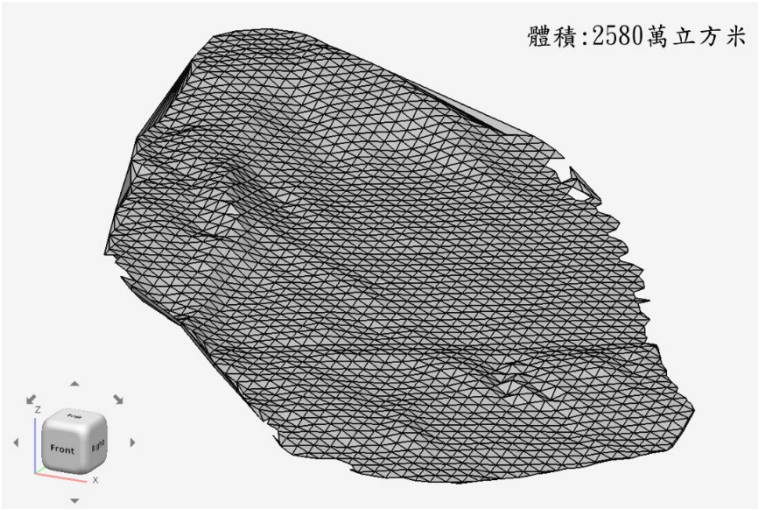
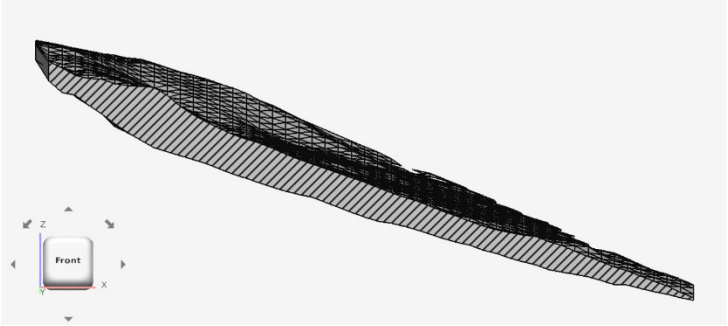


圖 39 九份二山邊坡滑動面分析結果 (921 崩塌後地形)



(a)



(b)

圖 40 九份二山 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面 (利用 921 崩塌後地形建模預測)

利用相同之 RAMMS 流動參數進行崩落堆積模擬，可看出此次崩塌的影響範圍與 921 崩塌時略有差異，但最明顯的是堆積區位的不同，921 崩塌時可看出堆積區位主要是在河道周圍，但是預測下一次崩塌之堆積區位則主要是在邊坡單元與河道的路徑上，堆積高度也不同，較少滑落至河道(圖 41)，這可能與崩塌量體有關，由於預測的崩塌量體較少，向下滑落之衝擊力也較小，導致滑動體較早停下來。

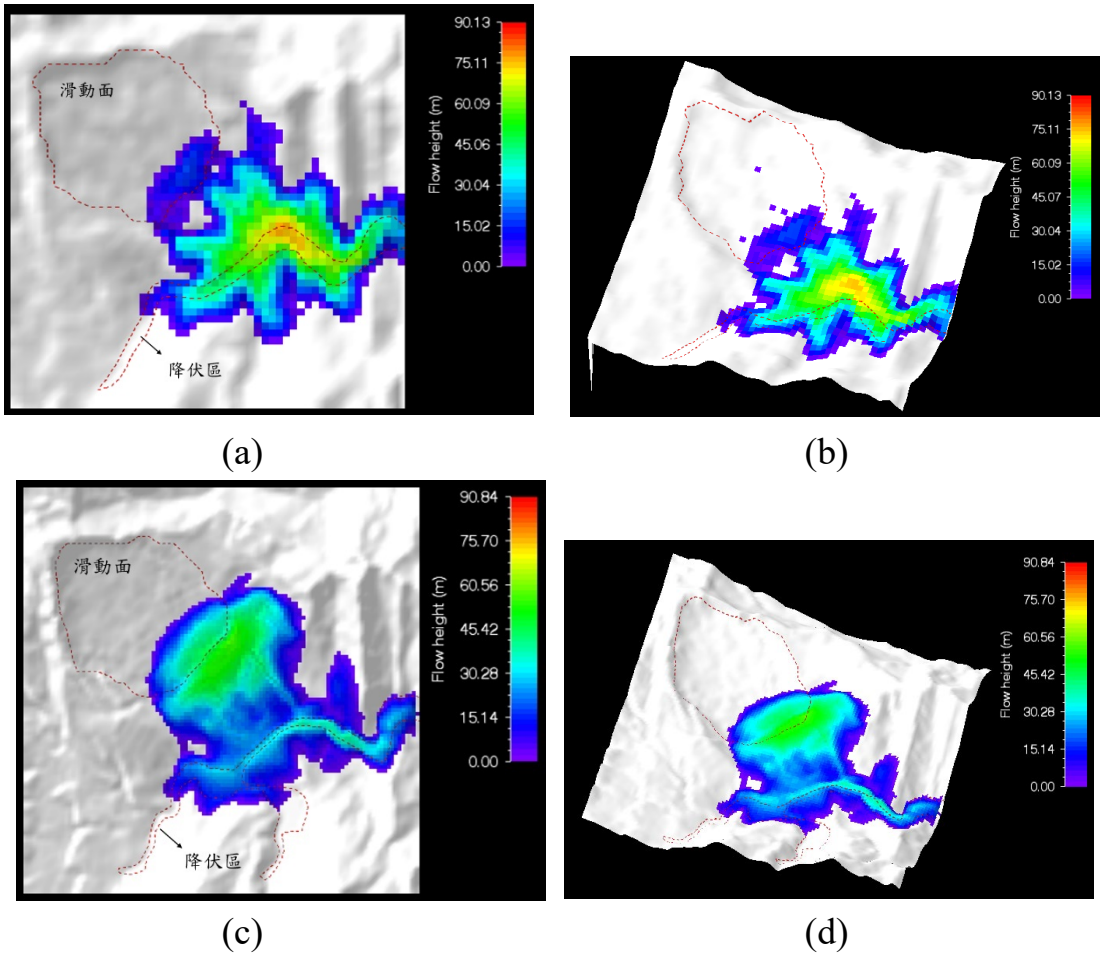
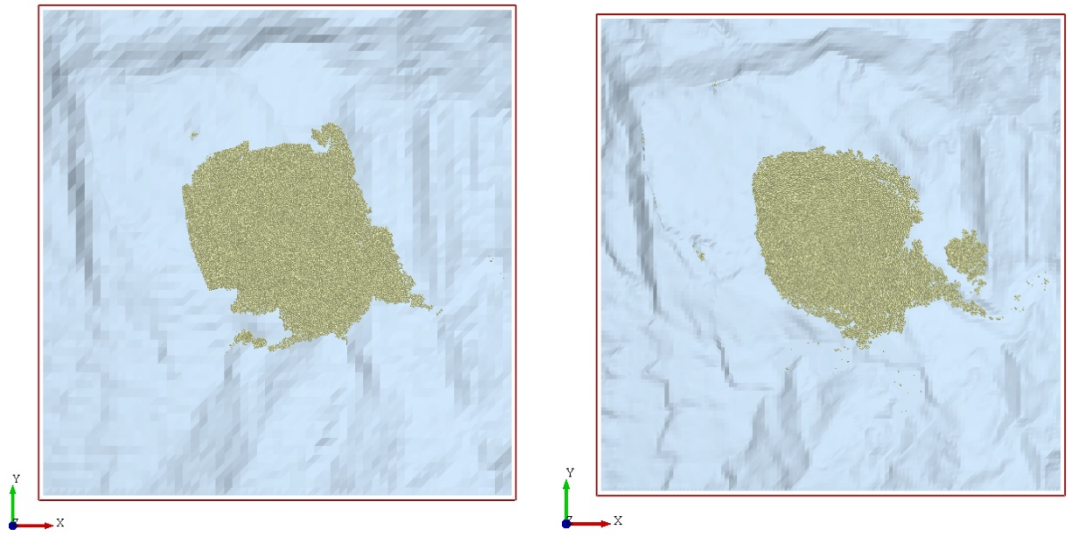
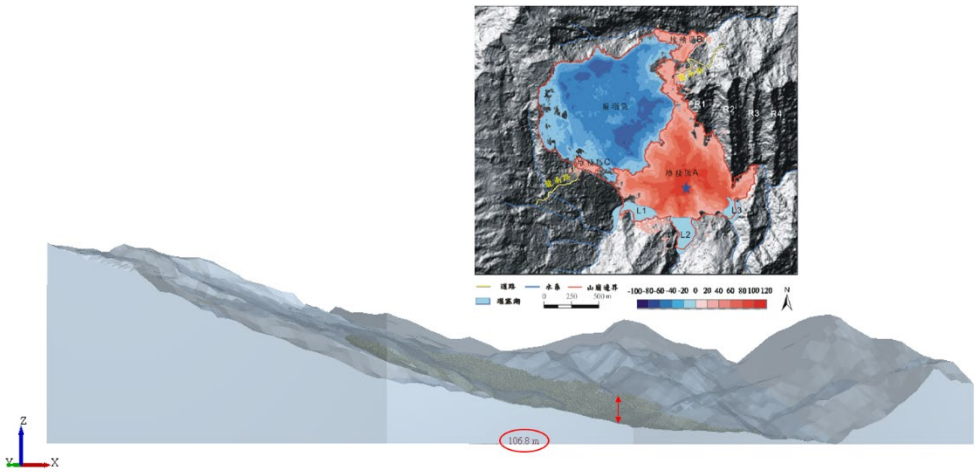


圖 41 九份二山 RAMMS 之分析成果比較 (a) 俯視圖 (b) 側視圖 (921 崩塌事件) (c) 俯視圖 (d) 側視圖 (預測下一次崩塌)

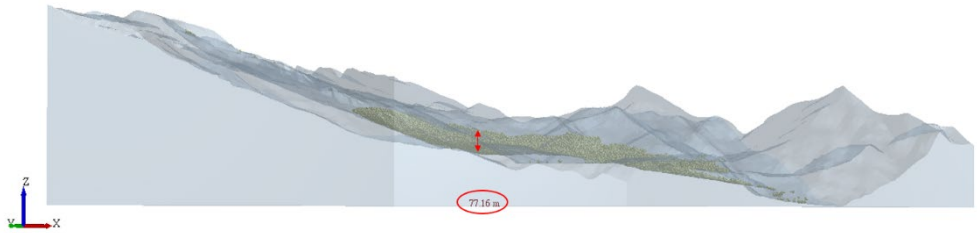
利用相同之 EDEM 微觀參數進行同樣假設 120 秒的崩落堆積模擬，也可看出此次崩塌的影響範圍與 921 崩塌時略有差異 (圖 42a~b)，但最明顯的是最高的堆積位置不同，921 崩塌時可看出最高的堆積位置是在近河道處，但是預測下一次崩塌之最高的堆積位置則是在邊坡單元與河道的路徑上 (圖 42c~d)，與 RAMMS 的結果一致，預測下一次崩塌之最高的堆積位置達到了 77m (圖 42d)，澀仔坑溪河道中央的堆積高度達 39m (圖 42e)，也就是下一次崩塌將可能造成澀仔坑溪堰塞壩高再增加。



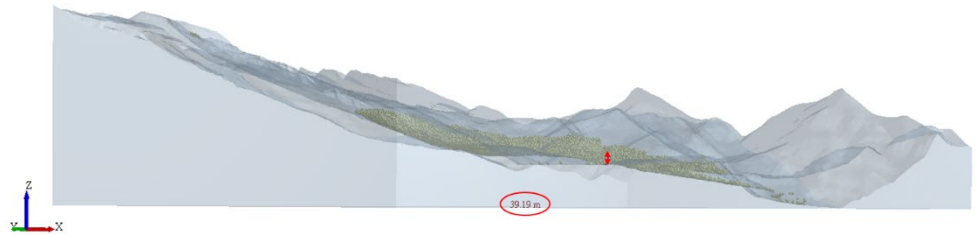
(a) (b)



(c)



(d)



(e)

圖 42 九份二山 EDEM 的堆積結果比較 (a) 堆積範圍 (921 崩塌事件) (b) 堆積範圍 (預測下一次崩塌) (c) 最高堆積位置與高度 (921 崩塌事件) (d) 最高堆積位置與高度 (預測下一次崩塌) (e) 澀仔坑溪河道中央的堆積高度 (現存堰塞壩將可能增加高度)

第二節 廬山聚落大規模崩塌潛在地

本研究利用 20m DEM 進行建模，先劃分邊坡單元並將其周圍地質設定為剛體，參考中央地調所 (2019) 的廬山聚落區域地質分布圖可以發現廬山聚落大規模潛勢地區包含不同坡向的邊坡 (圖 43)，本研究考慮主要潛在滑動塊體的邊坡，劃分該邊坡單元來進行後續的分析 (圖 44)。廬山之地質以板岩為主，本研究參考張光宗等 (2009) 對廬山地區進行研究時所使用之板岩層材料參數 (表 12)，以及參考中央地調所 (2019) 對廬山地區材料之弱面直剪成果 (表 13)，分別給定岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式 (Iso-JRMC) 中的非弱面材料參數與強度參數、弱面強度參數，利用 PLAXIS 3D 進行強度折減法來取得邊坡可能的滑動面，本研究設定材料與弱面強度參數如表 14，坡面與弱面的立體投影圖則如圖 45 所示。廬山聚落邊坡的滑動面分析結果，如圖 46 所示，可看出係一圓弧形破壞。

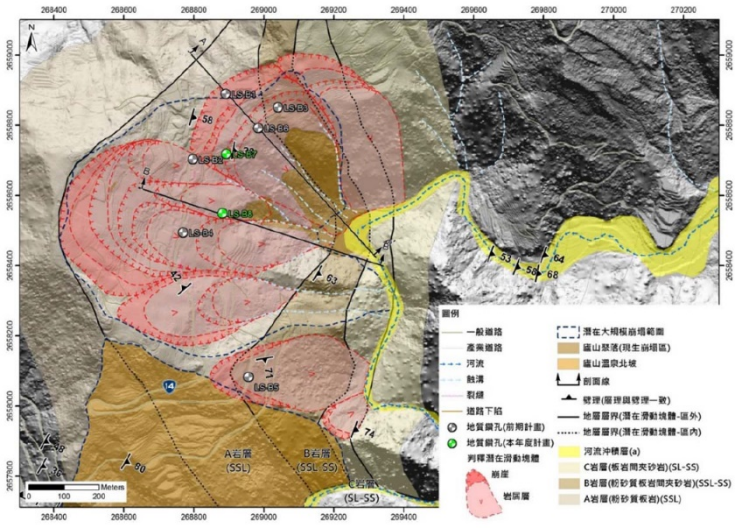


圖 43 廬山聚落區域地質分布圖 (中央地調所，2019)

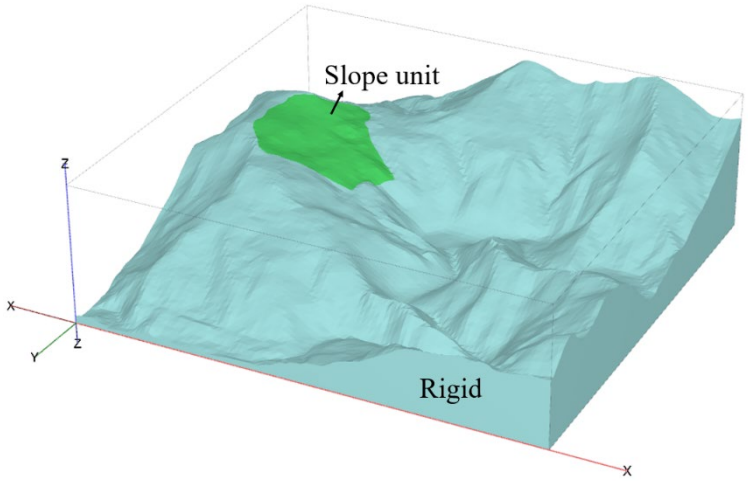


圖 44 本研究之廬山聚落 PLAXIS 邊坡模型

表 12 廬山地區材料參數 (參考板岩層)

	風化板岩層*	板岩層	砂質板岩層
楊氏模數 E (kPa)	6.85E5	1.7E6	3.4E6
柏松比 ν	0.3	0.3	0.3
凝聚力 C (kPa)	290	437	593
摩擦角 ϕ (°)	28	34	39
抗張強度 (kPa)	10	32	64
濕單位重 (kN/m³)	26.7	26.7	26.7
飽和單位重 (kN/m³)	27.0	27.0	27.0

*由地表往下，設定凝聚力的增量 1 kPa/m

國立中興大學

表 13 廬山地區弱面直剪試驗成果

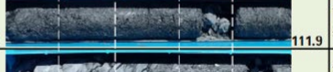
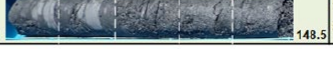
項次	調查區	孔號	試體編號	深度(m)	岩性描述	直剪試驗成果 C (kg/cm²)	直剪試驗成果 ϕ (度)	岩芯照片	試驗後試體剪動面描述
1	廬山聚落	LS-B7	LS-B7-1	15.0~15.7	風化層	0	22.3		黏質材料含量較高，試體剪動面具顆粒，剪動面觸感粗糙
2			LS-B7-2	49.4~49.6	剪裂泥	0.08	24.2		試體剪動面較為光滑，無明顯顆粒，黏性較高
3			LS-B7-3	53.15~53.25	剪裂帶夾角礫	0.48	23.27		試體剪動面含有粒徑大小不等顆粒，剪動面觸感較粗糙
4			LS-B7-4	85.6~85.8	剪裂帶夾角礫	0.21	29.68		試體剪動面含有粒徑大小不等顆粒，剪動面觸感較粗糙
5			LS-B7-5	86.35~86.5	剪裂泥	0.00	22.29		試體剪動面較為光滑，無明顯顆粒，黏性高
6		LS-B8	LS-B8-1	77.2~77.4	剪裂帶夾角礫	0.19	35.75		試體剪動面含有粒徑大小不等顆粒，剪動面觸感較粗糙
7			LS-B8-2	86.0~86.2	剪裂帶夾角礫	0.03	28.37		試體剪動面含有粒徑大小不等顆粒，剪動面觸感較粗糙
8			LS-B8-3	111.4~111.6	剪裂泥	0.31	36.87		試體剪動面較為光滑，無明顯顆粒，黏性高
9			LS-B8-4	131.25~131.4	剪裂帶夾角礫	0.26	30.96		試體剪動面含有粒徑大小不等顆粒，剪動面觸感較粗糙
10			LS-B8-5	148.3~148.5	剪裂帶夾角礫	0.12	29.25		試體剪動面含有粒徑大小不等顆粒，剪動面觸感較粗糙

表 14 盧山聚落邊坡 PLAXIS 中設定之材料與弱面參數

	岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式
單位重 (kN/m^3)	26.7
楊氏模數 (kPa)	1.7 x 10^6
柏松比	0.3
非弱面-凝聚力 (kPa)	437
非弱面摩擦角 (˚)	34
弱面-凝聚力 (kPa)	21
弱面摩擦角 (˚)	29.5

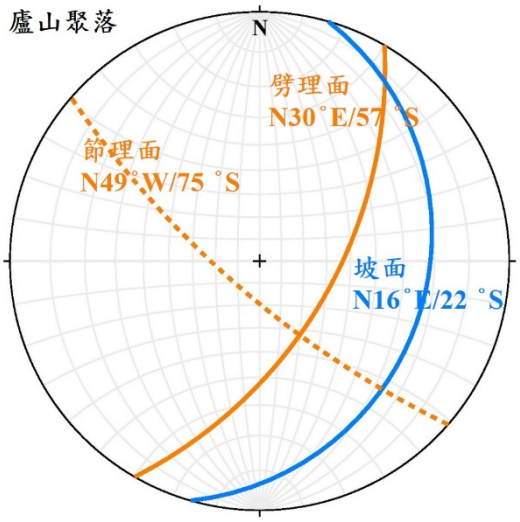


圖 45 盧山聚落邊坡坡面與弱面位態

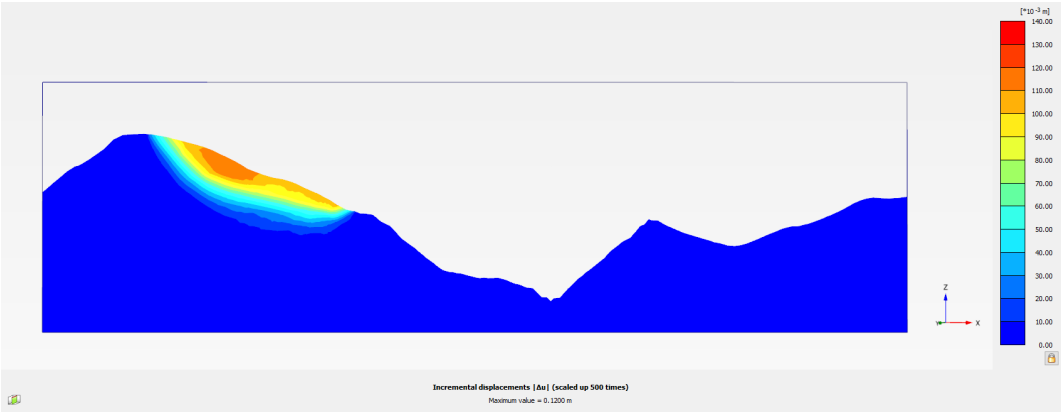
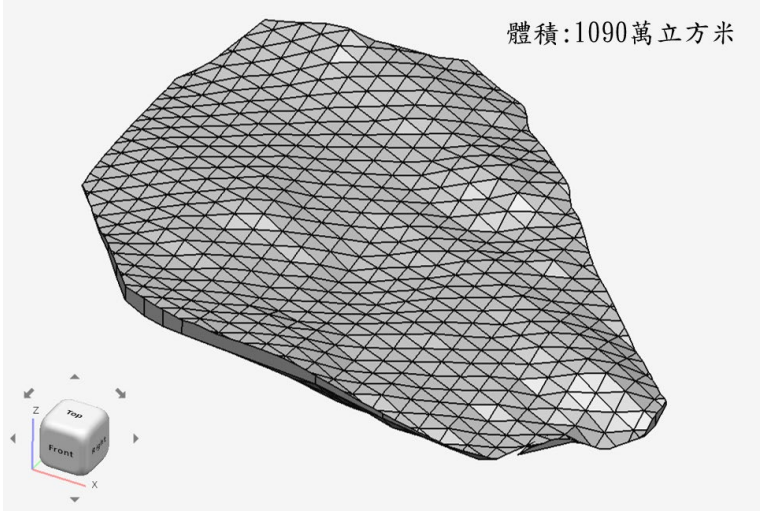
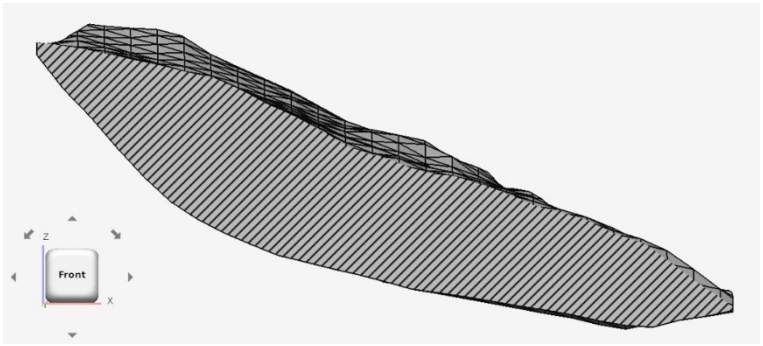


圖 46 盧山聚落邊坡滑動面分析結果

在 RAMMS 分析中需要知道崩塌量體大小，因此本研究將 PLAXIS 的成果製成 3D 模型，並計算其崩塌量體，如圖 47 所示。



(a)



(b)

圖 47 盧山聚落邊坡 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面

本研究根據 PLAXIS 分析初的崩塌量體大小來進行 RAMMS 的崩移模擬，RAMMS 中所需要設定之參數較簡單，只需設定 ξ (viscous-turbulent friction)、μ (dry-Coulomb type friction)以及 C (yield stress)，與先前的案例不同，盧山聚落邊坡由於沒有可參考崩塌堆積範圍，完全須預測進行，本研究設定以上 3 個參數，分別為 ξ：150 m/s^2；μ：

0.4；C：100 kPa，以及 ξ：150 m/s^2；μ：0.2；C：100 kPa，共兩組參數進行比較，其中 ξ 值參考 RAMMS 之手冊建議值之平均值而固定，此外邊坡坡度 (α) 為 22°，tanα值即為 μ 值，廬山聚落邊坡的 μ 值按照建議應設為 0.4，然而本研究額外改變 μ 值為 0.2，欲探討在不同 μ 值狀況下，堆積狀況有什麼差異。如圖 48 所示，可以發現當 μ 值越小，崩落堆積移動的距離越遠。

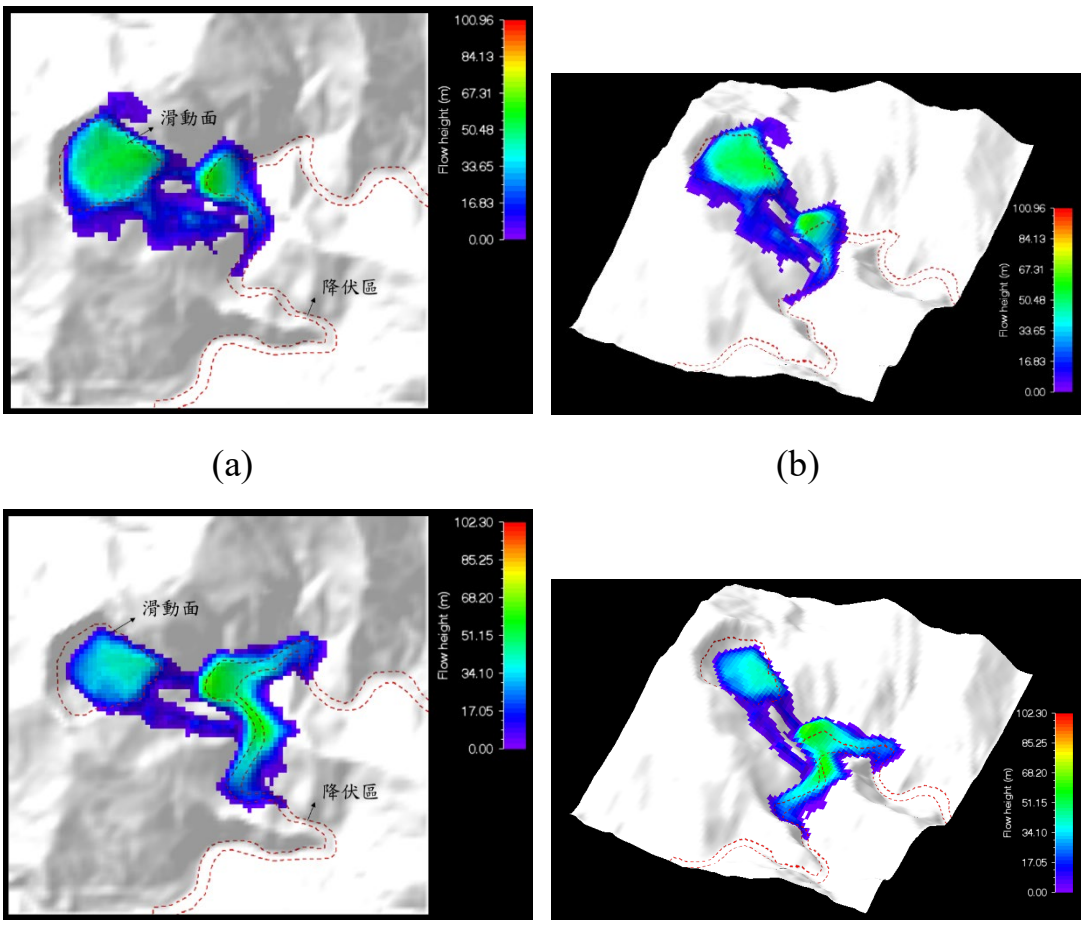
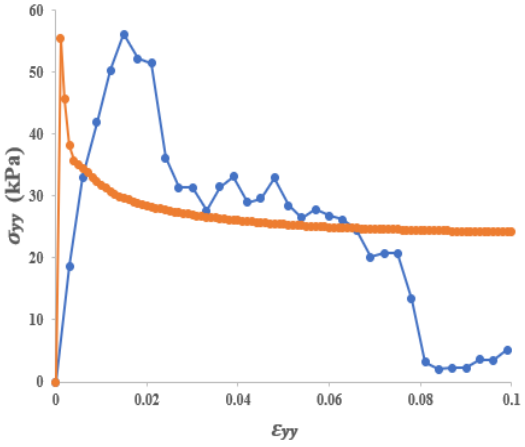
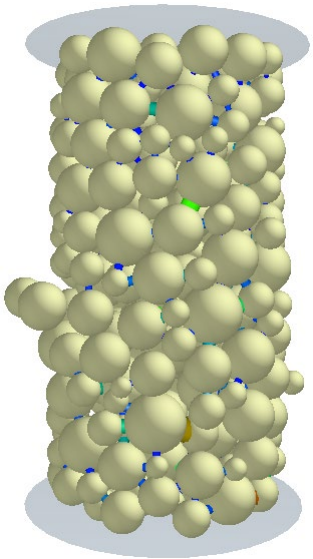
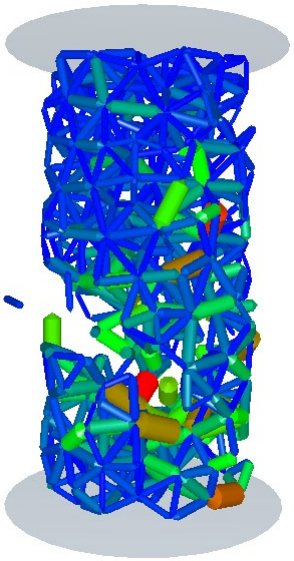


圖 48 廬山聚落邊坡 RAMMS 之分析成果比較 (a) 俯視圖 (b) 側視圖 (ξ：150 m/s^2；μ：0.4；C：100 kPa) (c) 俯視圖 (d) 側視圖 (ξ：150 m/s^2；μ：0.2；C：100 kPa)

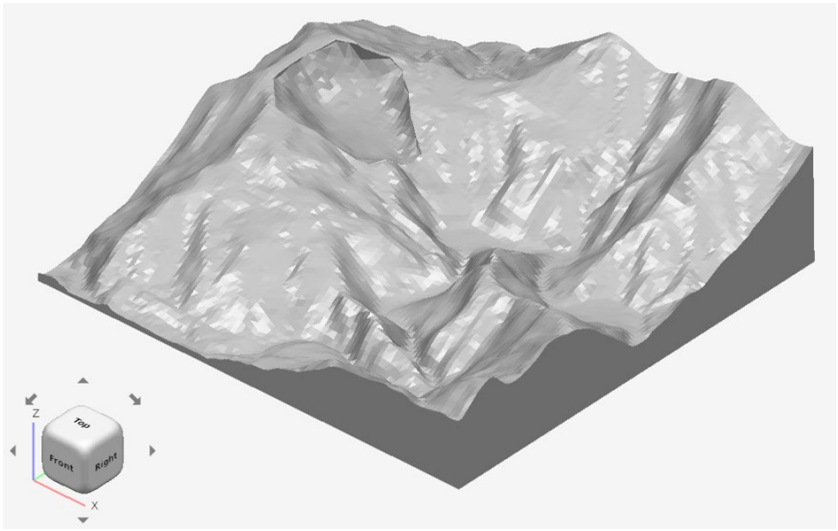
在 EDEM 分析中，宏觀力學參數與微觀參數設定如表 15。

表 15 廬山聚落邊坡宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定

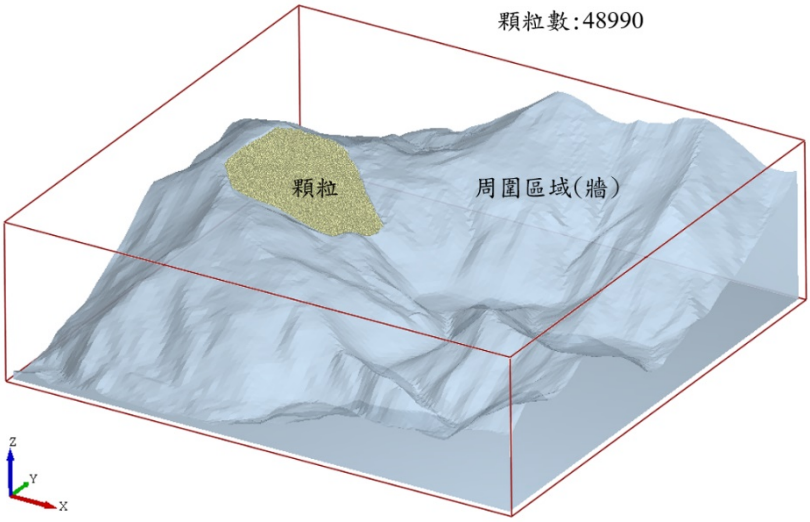
有限元素法單壓試驗		分離元素法單壓試驗	
單位重 (kN/m^3)	26.7	球型顆粒直徑 (m)	4~12
楊氏模數 (kPa)	1.7 x 10^6	顆粒總數	376
柏松比	0.3	顆粒總體積 (m^3)	121849
非弱面-凝聚力 (kPa)	437	孔隙率	0.38
非弱面摩擦角 (˚)	34.0	顆粒密度 (kg/m^3)	4708
弱面-凝聚力 (kPa)	21.1	顆粒有效模數 (kPa)	1.7 x 10^6
弱面摩擦角 (˚)	29.5	柏松比	0.3
		顆粒恢復係數	0.5
		顆粒靜摩擦係數	0.22
		顆粒滾動摩擦係數	0.06
		鍵結法向勁度 (N/m^3)	1.4 x 10^6
		鍵結切向勁度 (N/m^3)	1.4 x 10^6
		鍵結法向強度 (Pa)	7 x 10^5
		鍵結切向強度 (Pa)	7 x 10^5
		牆密度 (kg/m^3)	7000
		牆有效模數 (kPa)	1 x 10^{10}
		牆恢復係數	0.8
		牆靜摩擦係數	0.8
		牆滾動摩擦係數	0.1
			

接著，我們依據此分離元素力學試驗反算出的參數來給定運動分析中所使用的微觀參數，逐步折減滑動面及周圍地區 (牆) 的靜摩擦係數或可能調整滾動摩擦係數來進行分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 中 EDEM 的顆粒運動與堆積模擬 (圖 49)，由於廬山聚落邊坡尚未崩塌，本研究假設模擬秒數為 120 秒來進行探討，靜摩擦係數、滾動摩擦係數設定與對應的堆積狀況如圖 50~51 所示，圖 50 可看出靜摩擦係數由 0.5 逐步降至 0.2 且滾動摩擦係數均設為 0.05 時，各段模擬均於 120 秒期間內顯示沒有滑動跡象。

此外這裡必須說明的是，與先前的案例不同，廬山聚落邊坡由於尚未崩塌故沒有可參考崩塌堆積範圍，完全須預測進行，所以當靜摩擦係數降至 0.15 時量體開始滑動時，本研究考慮一般邊坡在滑動時，滑動面上的摩擦角應是逐漸降低的情形，總結先前經驗之滾動摩擦係數的平均值 0.05，設定固定之滾動摩擦係數為 0.05，然後設定靜摩擦係數為 0.15 先模擬 60 秒，再降低靜摩擦係數為 0.1，模擬 60 秒，總計 120 秒，這與先前的模擬方式稍有差異，這是因為廬山聚落邊坡完全需要以預測的方式來進行的緣故，圖 51a~b 表明在靜摩擦係數逐漸降低的過程中，崩滑出的顆粒越來越多，於 120 秒時的堆積情況如圖 51b 所示，可以發現與 RAMMS 中 μ 值為 0.2 時的結果相似 (圖 48c~d)。



(a)



(b)

圖 49 盧山聚落邊坡依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分 (a) 滑動區域以及周圍區域 (b) 建立顆粒的位置



圖 50 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.4、0.3、0.2) 之崩塌堆積情況

(動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 120 秒)



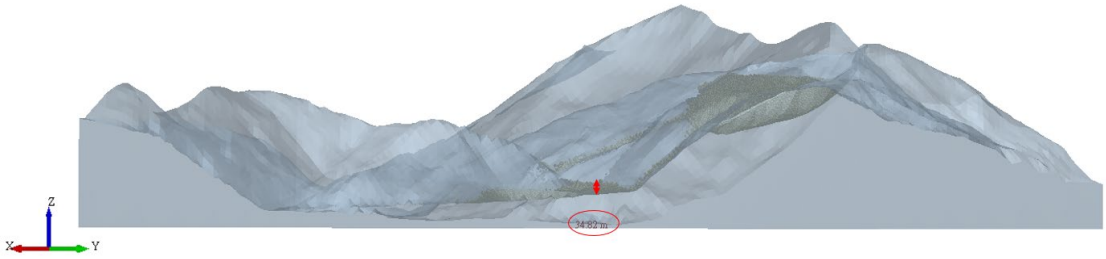
(a)



(b)

圖 51 考慮靜摩擦係數逐漸降低的過程 (a) 0.15 (b) 0.1 (滾動摩擦係數皆為 0.05) (模擬時間為前段 60 秒、後段 60 秒)

由 EDEM 之結果，我們可以預測各個位置的崩塌堆積深度，塔羅灣溪河道中央的堆積高度達 35m (圖 52a)，可預測若廬山聚落邊坡崩落將造成塔羅灣溪堰塞壩高應約為 30m，塔羅灣溪堰塞壩寬則約為 150m (圖 52b)。



(a)



(b)

圖 52 廬山聚落邊坡崩移堆積模擬之預測塔羅灣溪堰塞壩 (a) 預測壩高 (b) 預測壩寬

第三節 廬山北坡大規模崩塌潛在地

本研究利用 20m DEM 進行建模，先劃分邊坡單元並將其周圍地質設定為剛體 (圖 53)，參考張光宗等 (2009) 的廬山北坡區域地質分布圖 (圖 54)。廬山之地質以板岩為主，本研究參考張光宗等 (2009) 對廬山地區進行研究時所使用之板岩層材料參數 (表 12)，以及參考中央地調所 (2019) 對廬山地區材料之弱面直剪成果 (表 13)，分別給定岩體節理異向性結合莫爾庫倫模式 (Iso-JRMC) 中的非弱面材料參數與強度參數、弱面強度參數，利用 PLAXIS 3D 進行強度折減法來取得邊坡可能的滑動面，本研究設定材料與弱面強度參數如表 14，坡面與弱面的立體投影圖則如圖 55 所示。廬山北坡的滑動面分析結果，如圖 56 所示，可看出係一圓弧形破壞，滑動深度也與張光宗等 (2009) 的調查結果相近。

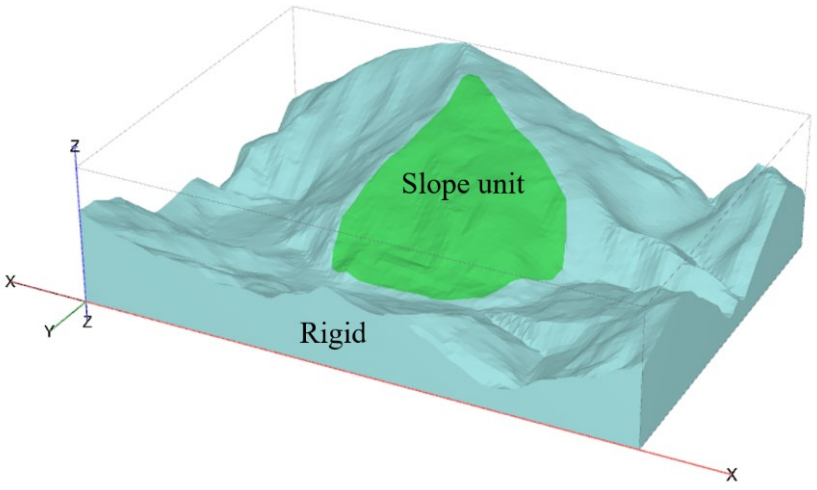


圖 53 本研究之廬山北坡 PLAXIS 邊坡模型

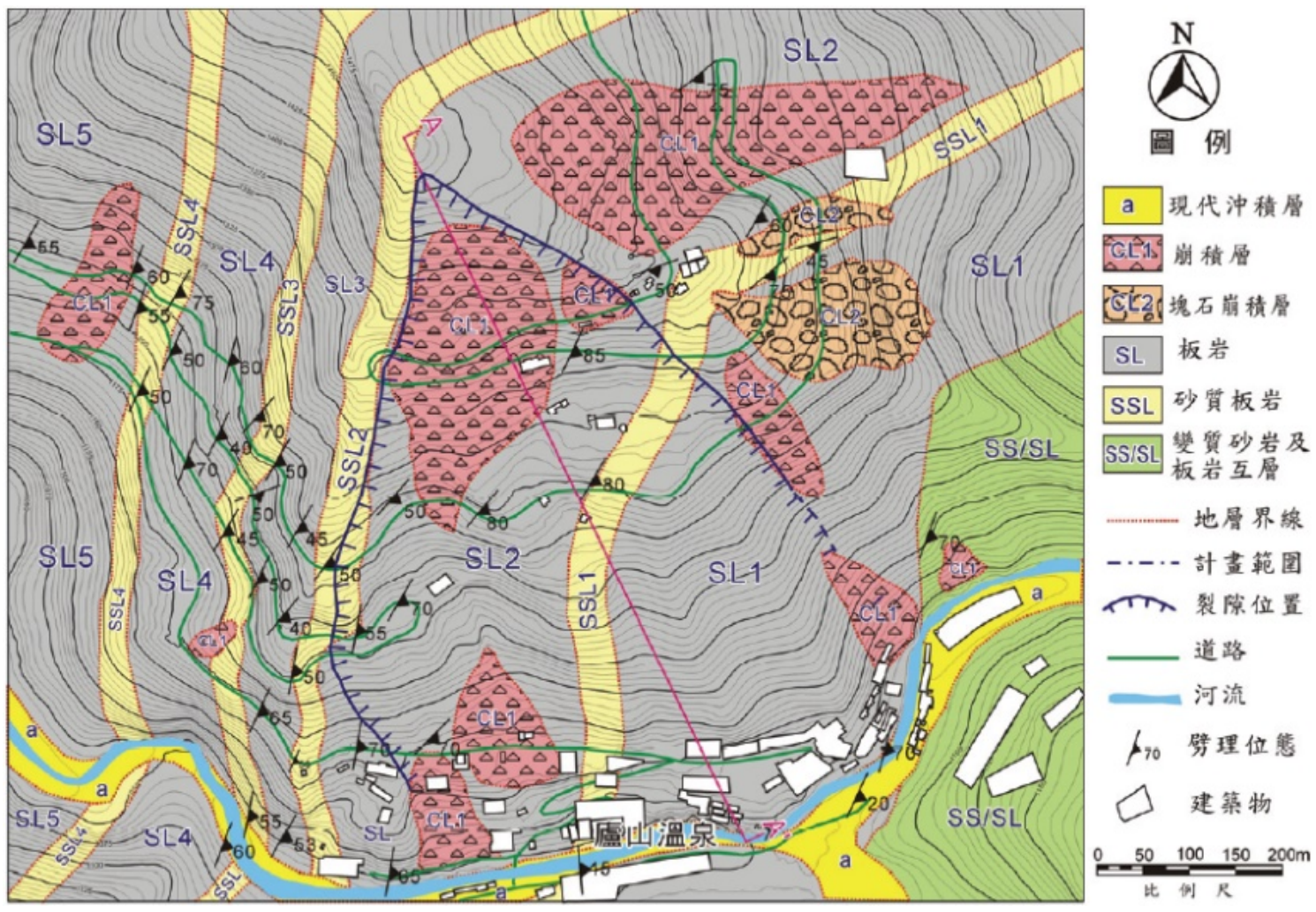


圖 54 廬山北坡區域地質分布圖 (張光宗，2009)

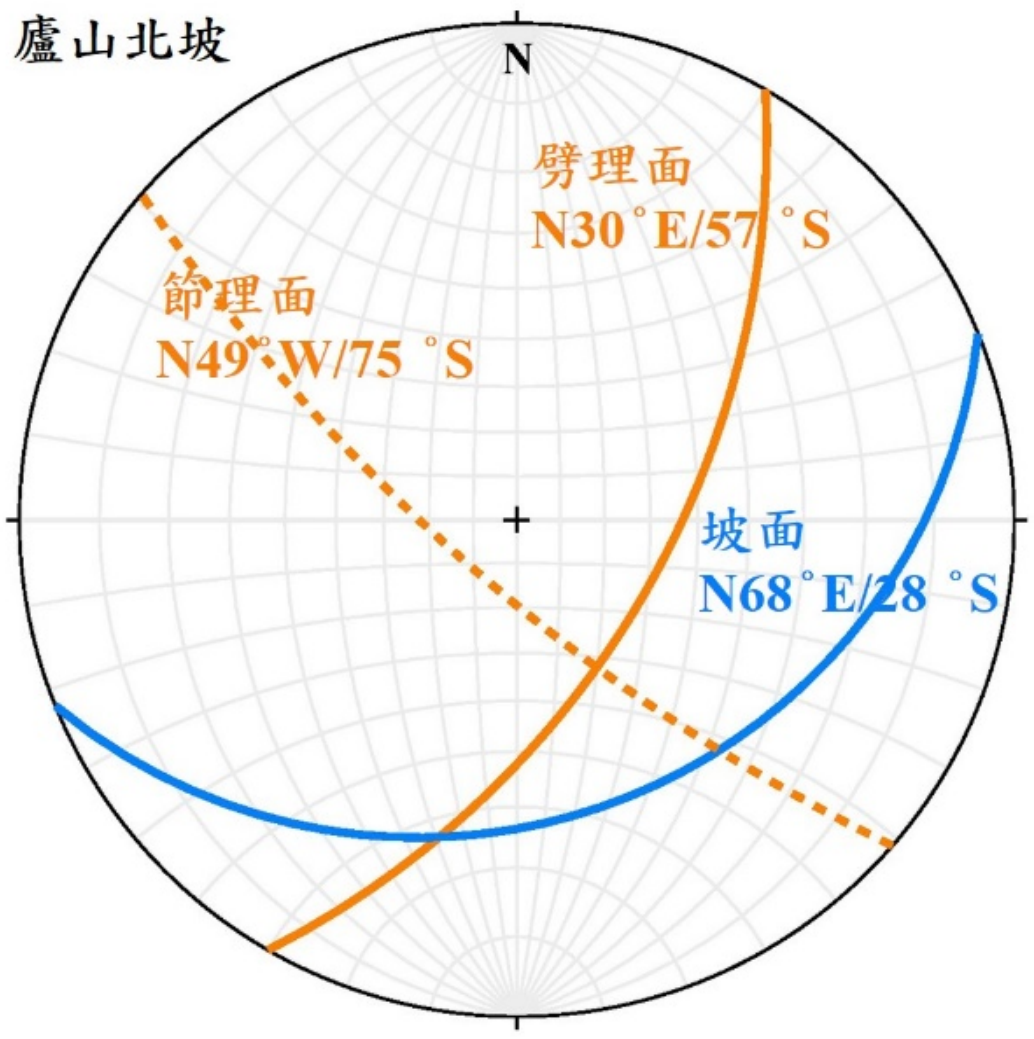


圖 55 廬山北坡坡面與弱面位態

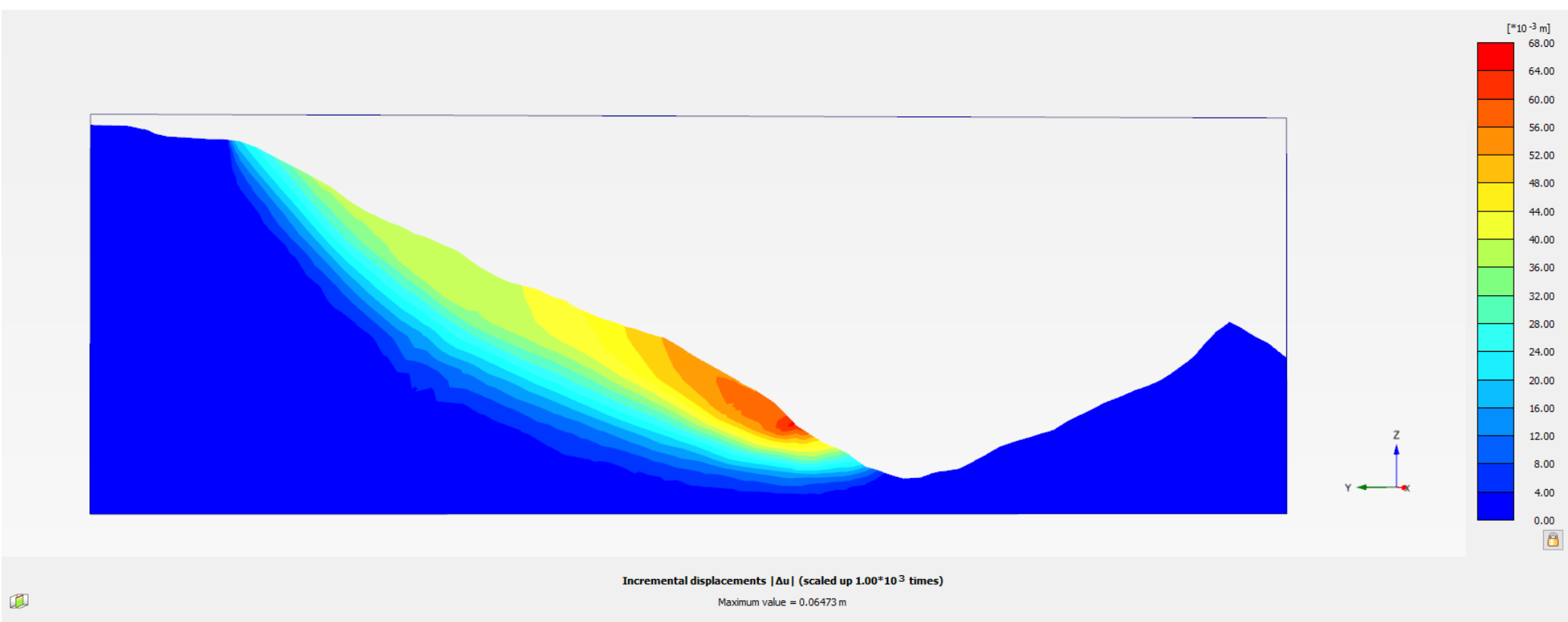
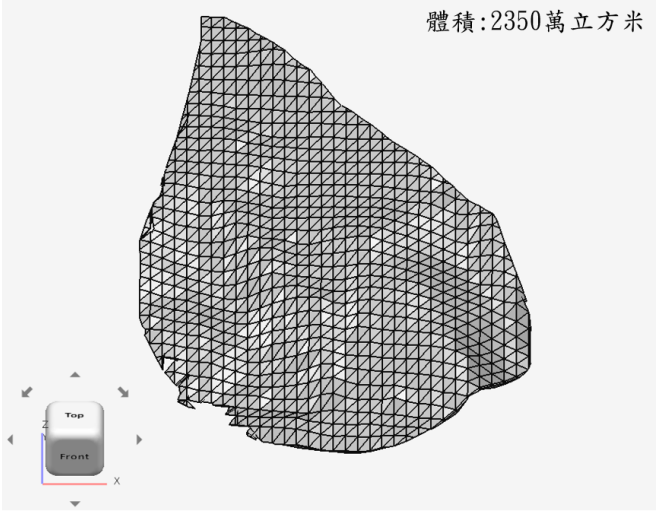
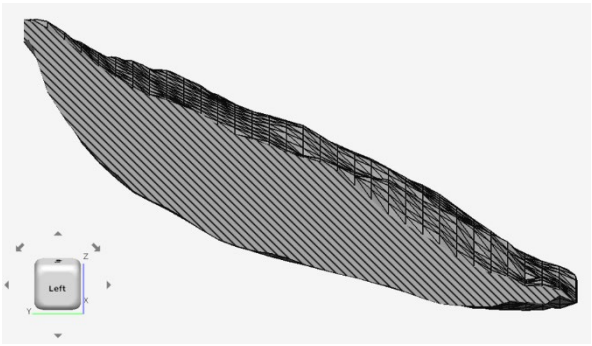


圖 56 廬山北坡滑動面分析結果

在 RAMMS 分析中需要知道崩塌量體大小，因此本研究將 PLAXIS 的成果製成 3D 模型，並計算其崩塌量體，如圖 57 所示。



(a)



(b)

圖 57 盧山北坡 PLAXIS 分析崩塌量體的 3D 模型 (a) 側視圖 (b) 中央縱剖面

本研究根據 PLAXIS 分析初的崩塌量體大小來進行 RAMMS 的崩移模擬，RAMMS 中所需要設定之參數較簡單，只需設定 ξ (viscous-turbulent friction)、μ (dry-Coulomb type friction)以及 C (yield stress)，與先前的案例不同，盧山北坡由於沒有可參考崩塌堆積範圍，完全須預測進行，本研究設定以上 3 個參數，分別為 ξ：150 m/s^2；μ：0.4；

C：100 kPa，以及 ξ：150 m/s^2；μ：0.2；C：100 kPa，共兩組參數進行比較，其中 ξ 值參考 RAMMS 之手冊建議值之平均值而固定，此外邊坡坡度 (α) 為 28°，tanα值即為 μ 值，廬山北坡的 μ 值按照建議應設為 0.53，但其 μ 之手冊建議值為 0.05≤μ≤0.4，因此應將 μ 設為最大值 0.4，然而本研究額外改變 μ 值為 0.2，欲探討在不同 μ 值狀況下，堆積狀況有什麼差異。如圖 58 所示，可以發現當 μ 值越小，崩落堆積移動的距離越遠。

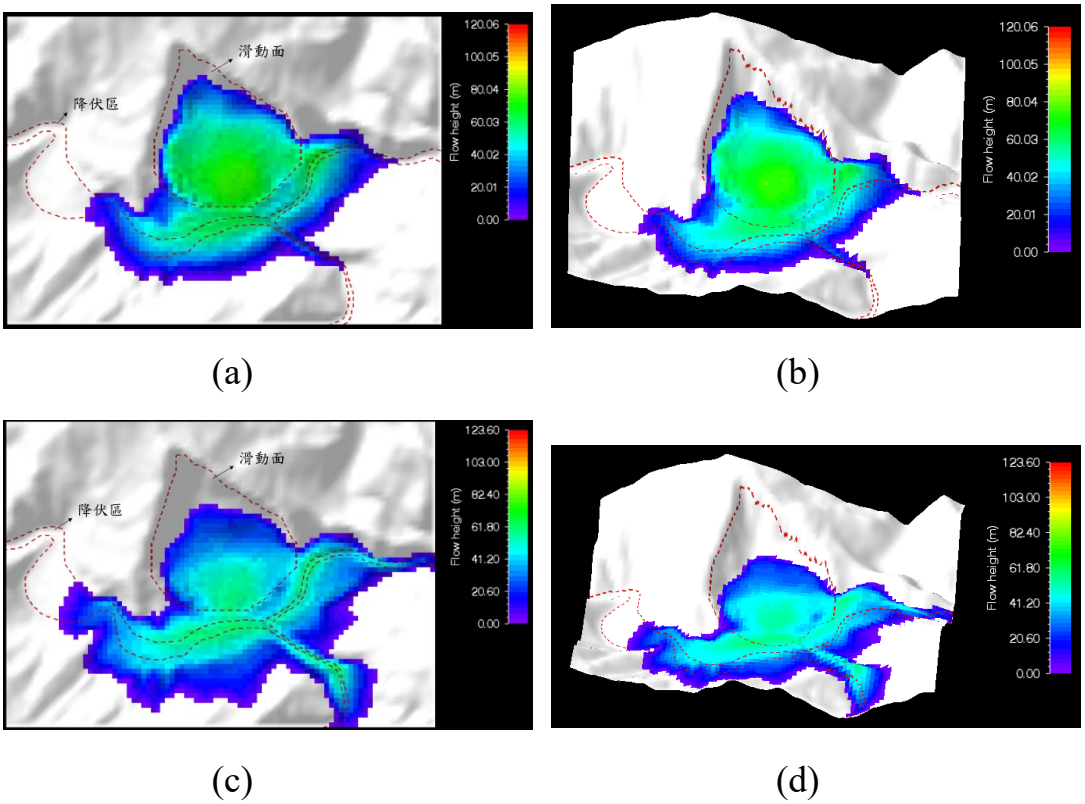
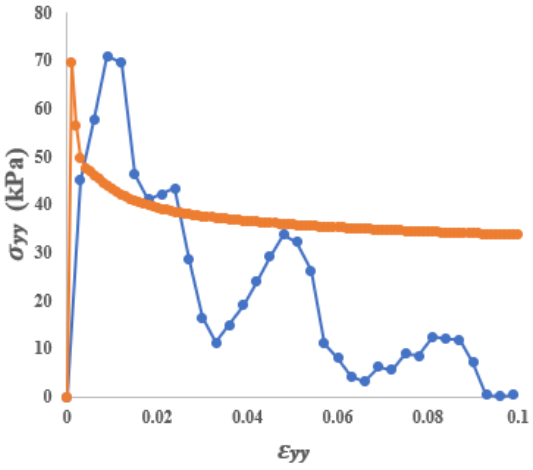
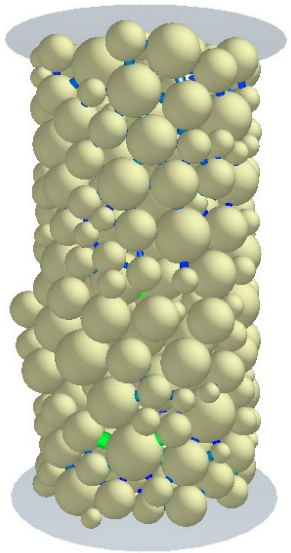
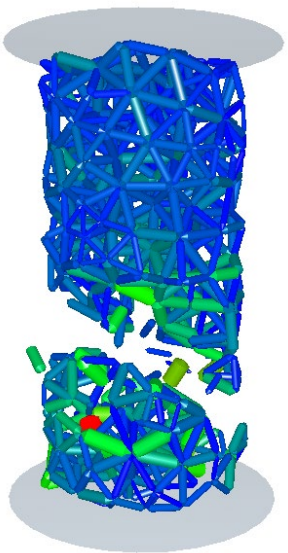


圖 58 廬山北坡 RAMMS 之分析成果比較 (a) 俯視圖 (b) 側視圖 (ξ：150 m/s^2；μ：0.4；C：100 kPa) (c) 俯視圖 (d) 側視圖 (ξ：150 m/s^2；μ：0.2；C：100 kPa)

在 EDEM 分析中，宏觀力學參數與微觀參數設定如表 16。

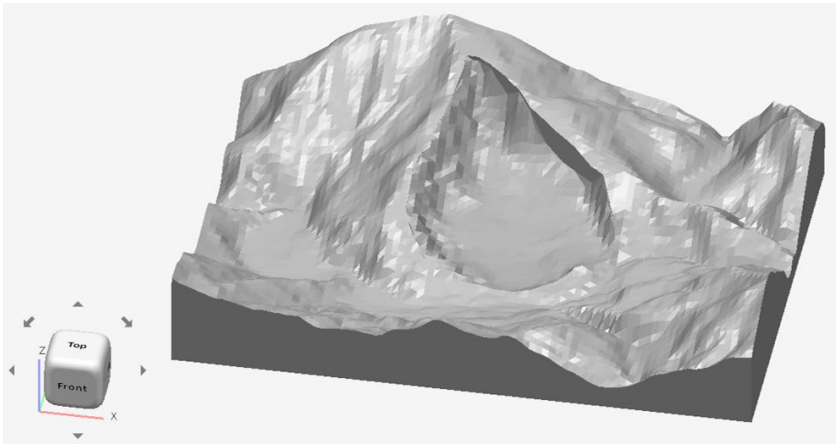
表 16 盧山北坡宏觀力學參數 (折減至崩塌時之強度) 與對應的微觀參數設定

<table>
<tr><td colspan="2">有限元素法單壓試驗</td><td colspan="2">分離元素法單壓試驗</td></tr>
<tr><td>單位重 (kN/m^3)</td><td>26.7</td><td>球型顆粒直徑 (m)</td><td>4~12</td></tr>
<tr><td>楊氏模數 (kPa)</td><td>1.7 x 10^6</td><td>顆粒總數</td><td>376</td></tr>
<tr><td>柏松比</td><td>0.3</td><td>顆粒總體積 (m^3)</td><td>121849</td></tr>
<tr><td>非弱面-凝聚力 (kPa)</td><td>437</td><td>孔隙率</td><td>0.38</td></tr>
<tr><td>非弱面摩擦角 (˚)</td><td>34.0</td><td>顆粒密度 (kg/m^3)</td><td>4591</td></tr>
<tr><td>弱面-凝聚力 (kPa)</td><td>21.1</td><td>顆粒有效模數 (kPa)</td><td>1.7 x 10^6</td></tr>
<tr><td>弱面摩擦角 (˚)</td><td>29.5</td><td>柏松比</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="13"> 
</td><td>顆粒恢復係數</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>顆粒靜摩擦係數</td><td>0.33</td></tr>
<tr><td>顆粒滾動摩擦係數</td><td>0.08</td></tr>
<tr><td>鍵結法向勁度 (N/m^3)</td><td>4 x 10^6</td></tr>
<tr><td>鍵結切向勁度 (N/m^3)</td><td>4 x 10^6</td></tr>
<tr><td>鍵結法向強度 (Pa)</td><td>9 x 10^5</td></tr>
<tr><td>鍵結切向強度 (Pa)</td><td>9 x 10^5</td></tr>
<tr><td>牆密度 (kg/m^3)</td><td>7000</td></tr>
<tr><td>牆有效模數 (kPa)</td><td>1 x 10^{10}</td></tr>
<tr><td>牆恢復係數</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>牆靜摩擦係數</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>牆滾動摩擦係數</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2">  </td></tr>
</table>

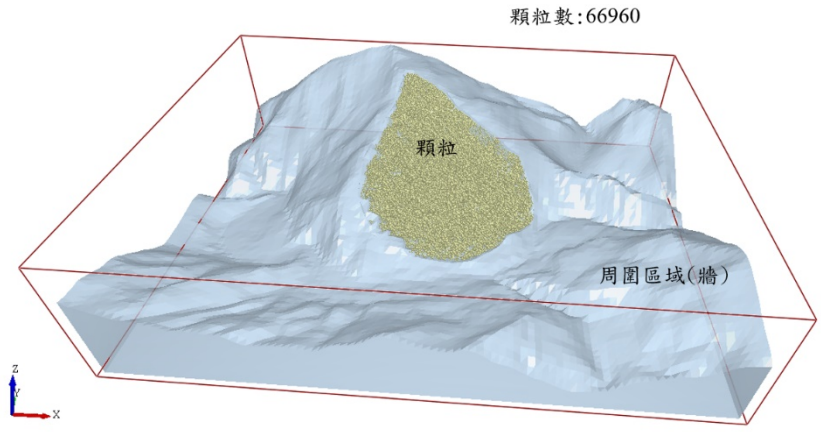
接著，我們依據此分離元素力學試驗反算出的參數來給定運動分析中所使用的微觀參數，逐步折減滑動面及周圍地區 (牆) 的靜摩擦係數或可能調整滾動摩擦係數來進行分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 中 EDEM 的顆粒運動與堆積模擬 (圖 59)，由於廬山北坡尚未崩塌，本研究假設模擬秒數為 120 秒來進行探討，靜摩擦係數、滾動摩擦係數設定與對應的堆積狀況如圖 60~61 所示，圖 60 可看出靜摩擦係數由 0.5 逐步降至 0.35 且滾動摩擦係數均設為 0.05 時，各段模擬均於 120 秒期間內顯示沒有滑動跡象。

此外這裡必須說明的是，與先前的案例不同，廬山北坡由於尚未崩塌故沒有可參考崩塌堆積範圍，完全須預測進行，所以當靜摩擦係數降至 0.3 時量體開始滑動時，本研究考慮一般邊坡在滑動時，滑動面上的摩擦角應是逐漸降低的情形，總結先前經驗之滾動摩擦係數的平均值 0.05，設定固定之滾動摩擦係數為 0.05，然後設定靜摩擦係數為 0.3 先模擬 40 秒，再降低靜摩擦係數為 0.2，模擬 40 秒，最後降低靜摩擦係數為 0.1，模擬 40 秒，總計 120 秒，這與先前的模擬方式稍有差異，這是因為廬山北坡完全需要以預測的方式來進行的緣故，圖 61a~c 表明在靜摩擦係數逐漸降低的過程中，崩滑出的顆粒越來越多，於 120 秒時的堆積情況如圖 61c 所示，可以發現與 RAMMS 中 μ 值為 0.4 時的結果相似 (圖 58a~b)。由廬山聚落邊坡案例與廬山北坡

案例可以得知，前者欲與 EDEM 模擬結果相似所使用之 μ 值為 0.2，後者則為 0.4，這是由於 RAMMS 中的流動參數較難結合材料的力學行為，所以導致較難直接使用 RAMMS 之手冊建議值而得到不錯的結果，故在 RAMMS 模擬中往往需要不斷的調整流動參數，且往往沒有調整的依據。



(a)



(b)

圖 59 盧山北坡依據 PLAXIS 分析之滑動面劃分 (a) 滑動區域以及周圍區域 (b) 建立顆粒的位置

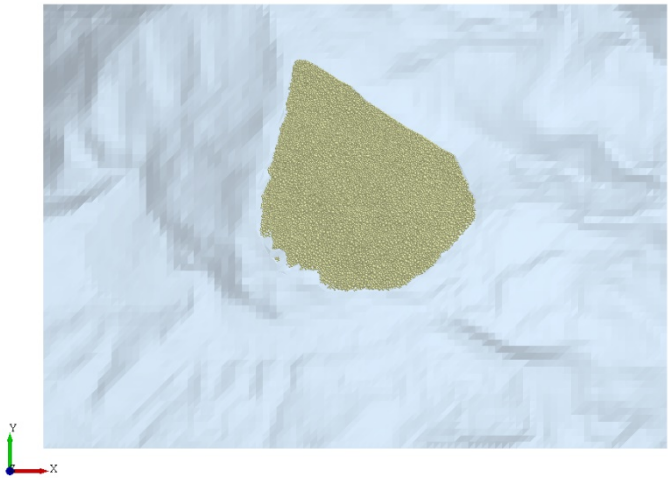
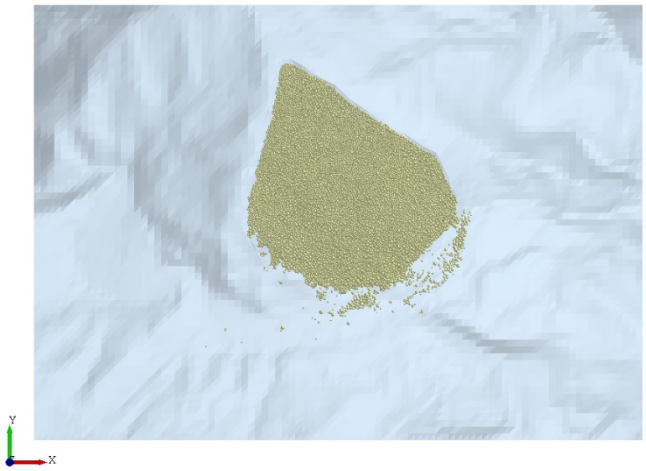
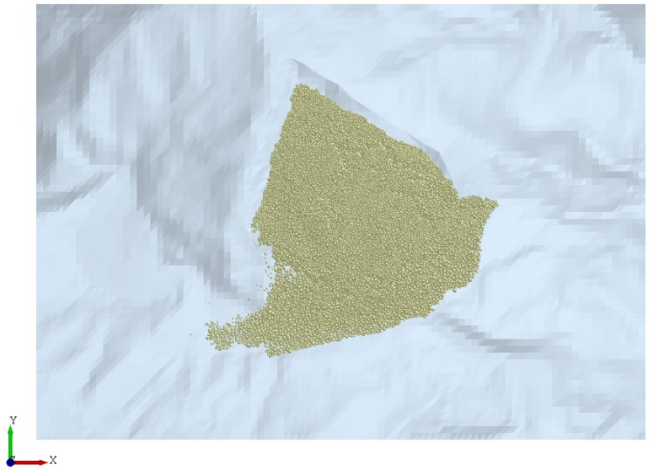


圖 60 考慮不同靜摩擦係數下 (0.5、0.4、0.35) 之崩塌堆積情況 (動摩擦係數皆為 0.05，模擬時間皆為 120 秒)



(a)



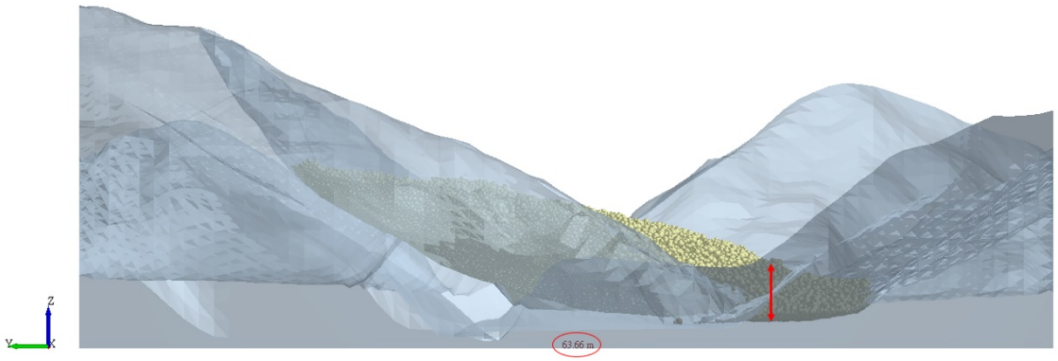
(b)



(c)

圖 61 考慮靜摩擦係數逐漸降低的過程 (a) 0.3 (b) 0.2 (c) 0.1 (滾動摩擦係數皆為 0.05) (模擬時間為前段 40 秒、中段 40 秒、後段 40 秒)

由 EDEM 之結果，我們可以預測各個位置的崩塌堆積深度，塔羅灣溪河道中央的堆積高度達 64m (圖 62a)，可預測若盧山北坡崩落將造成塔羅灣溪堰塞壩高應約為 60m，塔羅灣溪堰塞壩寬則約為 190m (圖 62b)。



(a)



(b)

圖 62 廬山北坡崩移堆積模擬之預測塔羅灣溪堰塞壩 (a) 預測壩高 (b) 預測壩寬

第五章 結論

迄今雖有計畫對大規模崩塌潛在地進行現地調查與評估工作，探討大規模崩塌的發生度、保全度以及活動度等，但是倘若發生大規模崩塌，其所衍生出的複合型災害狀況 (包括大規模崩塌發生位置與崩塌量體、衍生天然壩的位置與尺寸等) 仍少有研究探討與評估。

本研究利用小林村案例先比較探討 (1) 分離元素法與連體力學法的差異，並且 (2) 比較不同邊坡崩塌、運動與堆積過程的模擬方法：a. 先以有限元素法搭配強度折減法評估邊坡破壞時的滑動面，再利用分離元素法或連體力學法模擬崩落過程 (分別稱為分段式模擬一、二)；b. 崩塌、運動與堆積全程均利用分離元素法模擬 (稱為整合型模擬)。研究結果發現各項模擬方法均有其優缺點，分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 的結果最符合實際狀況；整合型模擬 (EDEM) 的結果則與實際狀況有些出入，堆積擴散程度較嚴重；而分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 則在調整 RAMMS 流動參數後，結果雖可符合實際狀況，但是流動參數的調整往往沒有依據，且 RAMMS 中的流動參數較難結合材料的力學行為。我們認為若能利用數值力學試驗將有限元素的宏觀參數與分離元素的微觀參數架接對應，那麼分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 應是相對不錯的預測崩塌堆積的模式，尤其 PLAXIS 強度異向性模式可考慮不

同的弱面方位，在預測滑動面方面有著出色的表現。

另外，小林村案例的成果歸納出了確立各項參數的方法，我們利用此方法來挑選適當的邊坡材料的宏觀、微觀或流動參數，應用於評估其他大規模崩塌潛勢地區之破壞及崩落全過程。然後挑選結果較好的分段式數值模擬二 (PLAXIS 3D → EDEM) 與分段式數值模擬一 (PLAXIS 3D → RAMMS) 來進行大規模崩塌潛在地的崩塌與堆積預測模擬。本研究決定從 34 處優先區中挑選九份二山大規模崩塌潛在地 (屬於 34 處之優先第一類型) 與廬山 D066 廬山聚落邊坡 (屬於 34 處之優先第二類型) 進行崩塌與堆積預測模擬，此外，由於鄰近廬山聚落邊坡之廬山北坡，同屬於大規模崩塌潛在地，遂也一併完成廬山北坡之預測模擬。

本研究結果可預測崩塌位置、崩塌量體、堆積位置、堆積厚度或堆積形狀等，提供上述大規模崩塌衍生之天然壩災害資訊供相關單位參考，並研擬防災、避災及減災策略。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局- 34 處大規模崩塌潛勢區查詢 (2020) https://246.swcb.gov.tw/Landslide/Landslide_statistics
2. 吳秋雅 (2007),「九份二山山崩前後構造地形特徵及坡體破壞機制探討」,國立臺灣大學碩士論文。
3. 周立生 (2014),「莫拉克颱風引致小林崩塌之力學機制研究」,國立台灣大學碩士論文。
4. 陳宏宇 (2010),「獻肚山崩的關鍵 110 秒追蹤—莫拉克風災地質變化調查」,國科會報告。
5. 陳建宏 (2011),「小林村獻肚山深層崩塌地質構造及地質材料特性之研究」,國立成功大學碩士論文。
6. 曾俊偉 (2004),「九份二山崩塌地穩定性觀測及地下水流動特性之研究」,國立臺灣大學碩士論文。
7. 張光宗、黃祥慶、林銘郎、張益通 (2009),「板岩地滑區的地質調查與分析-以廬山溫泉滑動邊坡為例」,中華水土保持學報,40(4),393-407。
8. 經濟部中央地質調查所 (2010),「廬山溫泉北坡調查與監測」,2010 年國際坡地災害技術交流會議資料。
9. 經濟部中央地質調查所 (2019),「山崩調查觀測技術精進與應用

(1/4)」，成果報告書。

10. 畢秋實、王國強、黃婷婷、毛瑞、魯艷鵬 (2018)，「基於 DEM-FEM 的雙齒輥破碎機輥齒強度分析」，吉林大學學報 (工學版)，48(6)，1770-1776。

11. 蕭靖平 (2019)，「崩塌運移之連體與非連體模型數值模擬比較 - 以 RAMMS 與 PFC3D 為例」，國立交通大學碩士論文。

12. Bhandari, T., Hamad, F., Moormann, C., Sharma, K. G., & Westrich, B. (2016). Numerical modelling of seismic slope failure using MPM. Computers and Geotechnics, 75, 126-134.

13. Bui, H. H., Fukagawa, R., Sako, K., & Wells, J. C. (2011). Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH). Géotechnique, 61(7), 565-574.

14. Chang, K. T., Lin, M. L., Dong, J. J., & Chien, C. H. (2012). The Hungtsaiping landslides: from ancient to recent. Landslides, 9(2), 205-214.

15. Chang, K. T., & Huang, H. C. (2015). Three-dimensional analysis of a deep-seated landslide in central Taiwan. Environmental Earth Sciences, 74(2), 1379-1390.

16. Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. geotechnique, 29(1), 47-65.

17. Dong, J. J., Tzeng, J. H., Wu, P. K., & Lin, M. L. (2006). Effects of anisotropic permeability on stabilization and pore water pressure distribution of poorly cemented stratified rock slopes. International

journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 30(15), 1579-1600.

18. DEM Solutions Ltd. (2014). *EDEM 2.6 theory manual*.

19. Hertz, H. (1882). On the contact of elastic solids. Z. Reine Angew. Mathematik, 92, 156-171.

20. Huang, T., Ding, M. T., She, T., Tian, S. J., & Yang, J. T. (2017). Numerical simulation of a high-speed landslide in Chenjiaba, Beichuan, China. Journal of Mountain Science, 14(11), 2137-2149.

21. Itasca Consulting Group Inc. (2014) PFC2D manual, version 5.0 Minneapolis, Minnesota.

22. Kotrocz, K., & Kerényi, G. (2017). Numerical Discrete Element Simulation Of Soil Direct Shear Test. In ECMS (pp. 510-515).

23. Kuo, C. Y., Tai, Y. C., Bouchut, F., Mangeney, A., Pelanti, M., Chen, R. F., & Chang, K. J. (2009). Simulation of Tsaoling landslide, Taiwan, based on Saint Venant equations over general topography. Engineering Geology, 104(3-4), 181-189.

24. Kuo, Y. S., Tsai, Y. J., Chen, Y. S., Shieh, C. L., Miyamoto, K., & Itoh, T. (2013). Movement of deep-seated rainfall-induced landslide at Hsiaolin Village during Typhoon Morakot. Landslides, 10(2), 191-202.

25. Li, Z., Huang, H., Nadim, F., & Xue, Y. (2010). Quantitative risk assessment of cut-slope projects under construction. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 136(12), 1644-1654.

26. Li, N., & Cheng, Y. M. (2015). Laboratory and 3-D distinct element analysis of the failure mechanism of a slope under external surcharge. Natural Hazards & Earth System Sciences, 15(1).

27. Li, T., Peng, Y., Zhu, Z., Zou, S., & Yin, Z. (2017). Discrete element

method simulations of the inter-particle contact parameters for the mono-sized iron ore particles. Materials, 10(5), 520.

28. Lo, C. M., Lin, M. L., Tang, C. L., & Hu, J. C. (2011). A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit. Engineering Geology, 123(1-2), 22-39.
29. Lu, C. Y., Tang, C. L., Chan, Y. C., Hu, J. C., & Chi, C. C. (2014). Forecasting landslide hazard by the 3D discrete element method: A case study of the unstable slope in the Lushan hot spring district, central Taiwan. Engineering Geology, 183, 14-30.
30. Meng, J. J., Wang, Y. X., Zhao, Y. L., Ruan, H., & Liu, Y. (2018). Stability analysis of earth slope using combined numerical analysis method based on DEM and LEM. Tehnički vjesnik, 25(5), 1265-1273.
31. Mindlin, R. D. (1949). Compliance of elastic bodies in contact. J. Appl. Mech., ASME, 16, 259-268.
32. Mindlin, R. D. & Deresiewicz, H. (1953). Elastic spheres in contact under varying oblique forces. ASME, 327-344.
33. Platzer, K., Bartelt, P., & Jaedicke, C. (2007a). Basal shear and normal stresses of dry and wet snow Debris Flows after a slope deviation. Cold regions science and technology, 49(1), 11-25.
34. Platzer, K., Bartelt, P., & Kern, M. (2007b). Measurements of dense snow Debris Flow basal shear to normal stress ratios (S/N). Geophysical research letters, 34(7).
35. Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. International journal of rock mechanics and mining sciences, 41(8), 1329-1364.
36. Sakaguchi, H., Ozaki, E., & Igarashi, T. (1993). Plugging of the flow of

granular materials during the discharge from a silo. International Journal of Modern Physics B, 7(09n10), 1949-1963.

37. Schilde, C., Burmeister, C. F., & Kwade, A. (2014). Measurement and simulation of micromechanical properties of nanostructured aggregates via nanoindentation and DEM-simulation. Powder technology, 259, 1-13.

38. Sosio, R., Crosta, G. B., & Hungr, O. (2008). Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock Debris Flow (Italian Central Alps). Engineering Geology, 100(1-2), 11-26.

39. Su, H., Fu, Z., Gao, A., & Wen, Z. (2019). Numerical simulation of soil levee slope instability using particle-flow code method. Natural Hazards Review, 20(2), 04019001.

40. Tang, C. L., Hu, J. C., Lin, M. L., Angelier, J., Lu, C. Y., Chan, Y. C., & Chu, H. T. (2009). The Tsaoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: insights from a discrete element simulation. Engineering Geology, 106(1-2), 1-19.

41. Tsou, C. Y., Feng, Z. Y., & Chigira, M. (2011). Catastrophic landslide induced by typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan. Geomorphology, 127(3-4), 166-178.

42. Tsuji, Y., Tanaka, T., & Ishida, T. (1992). Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder technology, 71(3), 239-250.

43. Wang, W., Yin, Y., Yang, L., Zhang, N., & Wei, Y. (2020). Investigation and dynamic analysis of the catastrophic rockslide Debris Flow at Xinmo, Maoxian, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79(1), 495-512.

44. Wu, J. H., & Chen, C. H. (2011). Application of DDA to simulate characteristics of the Tsaoling landslide. Computers and Geotechnics, 38(5), 741-750.
45. Yang, W., Wang, M., Zhou, Z., Li, L., Yang, G., & Ding, R. (2020). Research on the relationship between macroscopic and mesoscopic mechanical parameters of limestone based on Hertz Mindlin with bonding model. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 6(4), 1-15.
46. Zhou, L., Gao, J., Cheng, P., & Hu, C. (2020). Study on track–soil traction using discrete element method simulation and soil bin test. AIP Advances, 10(7), 075307.

附錄：審查意見與回覆

附錄一、提案審查

意見	回覆
1.本計畫擬以不同模式進行模擬，但對於模擬結果之差異評估，以何項標準為依據，目前亦無天然壩實例可供比對。	我們將利用過去的天然壩事件，如九份二山、小林村等來進行差異比對，因為連體力學與分離元素法的計算方式不同，即使調整各參數來符合最接近的崩積結果，也會存在天然壩體尺寸、堆積影響範圍等差異，故本研究試圖了解不同方法的所造成的差異。
2.連體力學與分離元素法之選用參數、物理意義不同，二者間難以比對。分離元素法之參數難以定義，物理意義不明。	我們將利用數值的力學試驗來進行分離元素法的參數調整，換言之，調整出的參數將符合邊坡的力學行為，接著才進行邊坡崩落的模擬，此外，連體力學的參數也將選擇與邊坡崩落情況符合的流動參數。本研究將比對二個方

	法模擬現地崩積結果所產生的差異。
3.本計畫擬於年度內以三種方法分析比對 34 處大崩，期程上恐難達成。	感謝委員的關心，期程上要完成確實比較趕，本研究最終目標是以三種方法分析比對 34 處大崩塌地，不過在此之前，將先利用如小林村、九份二山等天然壩事件來進行連體力學與分離元素法的比對，以及確立獲得各參數的方法，這也是本研究的亮點之一。最終若期程上較難完成全部 34 處，將挑選監測資料上位移較明顯的案例先行做分析。這方面會再納入後續執行評估參考與研議。
4.本計畫係用不同方式進行崩塌及堆積之模擬，惟參數之率定將會影響其結果，如何驗證？	我們挑選過去的天然壩事件，如九份二山、小林村等事件，利用數值的力學試驗來進行分離元素

	法的參數調整，換言之，調整出的參數將符合邊坡的力學行為，接著才進行邊坡崩落的模擬，要使得邊坡的破壞與崩落過程能最接近破壞滑動面與崩積結果時才確立參數。此外，連體力學的參數也將選擇與邊坡崩落情況符合的流動參數，也要使得邊坡的破壞與崩落過程能最接近破壞滑動面與崩積結果時才確立參數。然後進行崩落、堆積的差異比對，因為連體力學與分離元素法的計算方式不同，縱使調整各參數來符合最接近的崩積結果，也會存在天然壩體尺寸、堆積影響範圍等差異，故本研究試圖了解不同方法的所造成的差異。
5.不能理解如何取得適當之宏觀、微觀或流動參數，亦無法理	感謝委員的意見，如回覆 4 所說明的，可確立取得適當之宏觀、

解取得之參數如何適用或類推於34處大規模崩塌潛勢區。	微觀或流動參數的方法。而取得之參數如何適用或類推於34處大規模崩塌潛勢區，目前的研究規劃方向是以過去曾發生天然壩事件的邊坡強度做參考，如小林村與九份二山的岩體強度即不同，故34處會先參考強度相近的天然壩事件邊坡的各個參數，來取得初步的參數，34處若有現地力學試驗報告，再利用數值的力學試驗輔以調整，才進行崩落的模擬。這方面會再納入後續執行評估參考與研議。

附錄二、期初審查

意見	回覆
1.研究方法係在已知崩塌量為前提，惟既可知崩塌量表示崩塌已發生，其預測意義如何？	感謝委員意見，本研究預計利用已經崩塌案例之崩塌量來驗證數值建模的結果，然後才能合理的應用於預測其他尚未崩塌的大規模崩塌潛在地。
2.以兩種分析方法比較崩塌結果，其所採參數是否相同？相互比較是否妥適？	因為不同方法(PLAXIS、EDEM)有不同的參數，為了銜接不同的方法，我們利用數值力學試驗中如應力應變曲線等，來對接不同的方法，這樣材料的楊氏模數、尖峰強度等就可以有其一致性。然而，RAMMS 當中使用連體力學方法，與其他方法較不一致，目前無法使參數對接，僅能使崩塌量體保持一致，然後使其崩落。

3.報告書格式請參考本局範例	感謝委員意見，因為前期研究遇到了許多瓶頸，期中報告尚未有足夠時間將報告書格式改好，將在期末報告書中更改格式以符合保局的範例。
4.有關廬山模擬結果與中央地質調查所推估災害潛勢影響範圍有共同點，推估邊坡滑落之用詞，建議考量其妥適性(P.25)。	感謝委員意見，對於邊坡滑落之用詞會再斟酌評估。
5.本研究計畫若研究成功，其預期成果對防災業務將大有助益，建議強化說明本計畫之效益。	本研究的幫助在於可得知分段式模擬與整合型模擬的差異與優缺點，於後續可以對現地加以應用，另外，我們的最終結果除了崩塌位置與影響的範圍以外，還將包括堰塞壩的位置，壩寬、壩高等更詳細的資訊，以期能對大規模崩塌造成的堰塞壩更了解。

6.本研究模擬之崩塌形式是否區分為降雨或地震引致之崩塌？模擬方式之區隔為何？	謝謝委員的意見，本研究利用強度折減法來得知可能的滑動面，這個方法係根據材料的特性去抓出邊坡最有可能的滑動面，雖然降雨或地震造成的崩塌可能會有差異，但滑動面的位置應該會類似，因為材料的特性使然。
7.整合型及分段式模擬二者分析方式差異甚大，如何決定何時使用哪一種方式？是否有依循的參考準則？	目前的研究進度得知，分段式一 (PLAXIS→RAMMS) 最迅速可得知崩塌運動結果，也可以得到不錯的結果，但有限元素法與連體力學法的參數較難銜接，等於是各做各的事，只有預估崩塌量體是一致的。不過分段式二 (PLAXIS→EDEM) 可以利用力學試驗將有限元素法與分離元素法進行參數的對接，且得到的結果也很好，只是速度較慢一些。而整合型模擬 (EDEM) 雖沒有

	參數對接的問題，不過顆粒的微觀參數如何設定才能符合邊坡材料的力學行為，這需要大量的數值力學試驗來深入探討，才能得到合理的結果，然後整合型模擬因為顆粒數量較龐大，速度應是最慢的。
8.各個模式之參數使用，建議後續提供詳細內容。	感謝委員意見，期中報告已有一些心得與結果，將在後續提供詳細使用內容。
9.本研究預定各種數值模擬取得各主要參數，並應用在 34 處大規模崩塌之模擬，這是否妥當？	因為各個大規模崩塌潛在地的地質條件不同，本研究以數值方式(有限元素法、分離元素法) 進行力學試驗 (單軸壓縮試驗、直接剪力試驗等) 來得到力學參數，使其應力應變曲線圖能與現地材料的情況相吻合。
10.採用那些地區進行參數檢定	本研究先以小林村來進行，不過這裡必須說明且強調的是，本研

	究旨在確立數值的方法，亦或說是確立數值的流程，因為各個地區的地質條件不同，故參數應不同，不過本研究的數值進行方式如擬合數值力學試驗的應力應變曲線，可用此法對其他大規模崩塌潛在地選擇出適合的參數。
11.何以要採用 3 種數值方法進行模擬？是否有必要選取其中的一種來進行後續的驗證？(哪個參數為主)	本研究的幫助在於可得知分段式模擬與整合型模擬的差異與優缺點，於後續可以對現地加以應用。因為各個方法有其優缺點，後續將會進行統整，以期能在不同的場合使用。然而，考量分析結果的完整性，與分析時間上能達成的考量，本研究最後可能會選定一種進行其他大規模崩塌潛在地的分析。

12.九份二山屬於地震型崩塌，而小林村屬於暴雨型崩塌，這對3種數值方法是否適用？	感謝委員意見，本研究將採用強度折減法，其理由請參見意見6。暴雨型崩塌與地震型崩塌若要詳細比較應該還是其差異性，雖然以材料的特性來說，崩塌的滑動面應會類似。後續的研究展望可針對暴雨或地震部分，暴雨可給定滲流力，地震則需要給定地震參數來使分離元素顆粒崩落，以上述方式來分別適用於不同類型的崩塌。
13.EDEM可以模擬滑動面？	目前所知是可以模擬出滑動面的，惟參數的選定是其困難點，將利用數值力學試驗來選定合理的參數，後續將在整合型模擬中展現。
14.分段式模擬時，各段如何銜接？	請參見意見7，分段式一(PLAXIS→RAMMS) 可以得到不錯的結果，但有限元素法與連

	體力學法的參數較難銜接，等於是各做各的事，只有預估崩塌量體是一致的。不過分段式模擬二(PLAXIS→EDEM) 可以利用力學試驗將有限元素法與分離元素法進行參數的對接，且得到的結果也很好，只是速度較慢一些。而整合型模擬 (EDEM) 雖沒有參數對接的問題，不過顆粒的微觀參數如何設定才能符合邊坡材料的力學行為，這需要大量的數值力學試驗來深入探討，才能得到合理的結果，然後整合型模擬因為顆粒數量較龐大，速度應是最慢的。
15.本研究應以堆積厚度及其形狀為主，而崩塌量及堆積位置為已知。	若為已知崩塌案例，崩塌量及堆積位置、堆積厚度及其形狀等等可能為已知，但大規模崩塌潛在地尚未崩塌，目前研究多僅劃設

	可能崩塌區域及其影響範圍，對於崩塌量與堆積確切位置還不能完全掌握，本研究用已知案例驗證本研究方法與流程可行，然後才能應用於其他其它大規模潛在地，最後可提供許多資訊如預測的崩塌量、堆積位置、堰塞壩的壩寬、壩高等，均可得預測。
16.以分段式模擬，則在不同程式下之材料參數關聯性為何？	材料的關聯性以數值力學試驗的結果如應力應變曲線來對接。
17.滑移模擬之材料微觀參數，與現地材料之關係如何建立？	現地材料的力學行為多以如單軸壓縮試驗之應力應變曲線等方式來描述，若以分離元素法同樣來進行力學試驗，且能得到相同的應力應變曲線，可建立材料的關係。
18. Mohr Coulomb model 及 Jointed Rock model 在 PLAXIS 分析結果差異很大，如何評估？	這是期中報告的亮點之一，請參閱 PLAXIS 建模分析的部分，而且在數值試驗中我們發現，將兩

Jointed Rock model 部分在現地調查是否可比對？	者結合的岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式 (The Jointed Rock model with overall Mohr-Coulomb failure criterion, Iso-JRMC) 較好，考慮此模式所得到的結果與實際崩塌體的形狀較接近，後續的 PLAXIS 3D 分析將皆以此模式進行。
19.不同模式之範圍、量體及深度差異太大，影響第二段模擬之設定，故對於分析結果宜適當評估。	感謝委員意見，Mohr Coulomb model 及 Jointed Rock model 的差異的確不小，後來使用將兩者結合的岩體節理異向性結合莫爾庫倫破壞準則模式後，得到的結果是目前最好的，雖然與現地實際崩塌的深度還是有一些差異，因為現地的地質狀況有其複雜性，以簡單的模式來進行滑動面的分析也許無法臻完善，但若以預測的角度來看，較簡單的數值

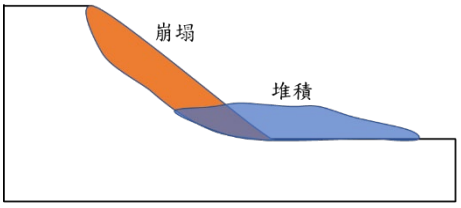
	模式的結果若能靠近實際的結果，其結果亦可參考。

附錄三、期中審查

意見	回覆
1.根據研究流程，本研究應收集34處大規模崩塌地之相關資料，進行崩塌量體、堆積位置、堆積厚度及堆積形狀等之模擬分析，惟目前進度僅以小林村為例，顯然進度有落後之虞,應加速辦理。	感謝委員意見，本研究於計畫提案審查意見3以及期初審查時均曾被提及完成 34 處大規模崩塌潛在地於年度計畫期程內難達成，期初審查時委員建議或可挑選某幾處用來進行。本研究花了許多時間來研究參數的決定，於本內文中也提到本研究其中一項重要工作，在於建立與歸納出確立分段式與整合型模擬中各項參數的方法，後續才可適當地加以應用到其他大規模崩塌潛在地。本研究決定後續將挑選某幾處大規模崩塌潛在地來進行模擬，請參見P40所述，惟研究流程內文以及流程圖上可能於期中報告書時有所遺漏修正，此次將補正。

2.從期中報告小林村的案例來看，相關參數收集困難而必須採用數值模式重新進行力學試驗獲得，此方式與實際狀況是否相符或足以在數值模擬中反映真實狀況?	本研究進行有限元的單壓試驗與分離元素的單壓試驗，擬合應力應變曲線來確立使用的參數。這與實際狀況不能說是完全相符，係由於實際於現地採樣進行力學試驗時，我們採取到的材料為細顆粒所組成，通常許多研究會再以分離元素法進行數值模擬，擬合實際力學試驗與數值試驗的曲線，這可能是較相符合的做法。然而，這類做法於崩塌與堆積模擬時，若以細顆粒建模將產生數以千萬計的顆粒，以致後續模擬窒礙難行，故這類研究往往將顆粒放大再進行崩塌與堆積模擬，而顆粒的放大將產生諸如放大的顆粒再次進行數值試驗時，還能不能擬合原先實際力學試驗曲線等問題。本研究考慮以上原因，

	遂直接利用崩塌與堆積模擬的顆粒大小，此外考慮重力為0，避免尺寸過大產生的重力效應使得應力分布不均勻，然後進行大尺寸的數值力學試驗。本研究的方法或許不能說與實際力學試驗相符，不過以整體材料而言力學行為應是類似的，且可避免顆粒因放大產所產生的問題，我們認為這個方法足以在數值模擬中反映真實狀況。
3.建議補充34處大規模崩塌地之相關資料收集進度。	感謝委員建議，回覆如期中審查意見1。
4.P33-34，圖23預測崩體積與圖24實測崩塌體積之誤差高達27.5%，此誤差不會影響後續的分析結果嗎?	感謝委員意見，本研究認為當崩塌發生時往往會有部分崩積量體堆積於坡趾，覆蓋住滑動面，如下圖所示：

	 因此若利用前後地形相減得到的崩塌量體可能小於實際的崩塌量體。本研究圖 12 即利用前後地形相減求得，而圖 11 則利用 PLAXIS 進行強度折減得出滑動面而求得，因此圖 11 量體大於圖 12 可以預期。此外，這裡必須加以說明的是，本研究的用意在於，倘若於獻肚山崩塌前進行預測，可以得到什麼樣結果，因此若在獻肚山崩塌前進行 PLAXIS 分析而得到可能的滑動面，即係得到這樣的崩塌量體，然後再進行後續堆積的模擬，整體而言本研究模擬的崩塌量體並不會差異甚大，也可反映出後續堆積的行為。

	另外，由於小林村已有堆積形狀可供依循，才可進行堆積移動參數的調整，若針對尚未崩塌的邊坡進行分析，則可能需要提供不同參數下的堆積狀況來當作參考。
5.P35，建議將「圖 26 崩事件前後地形差」以數量表達其差距，以圖示表示無法看出其差別。	感謝委員建議，圖 14 係引用 Tsou et al. (2011) 的研究，圖中高程即為事件前後高程相減的結果，若為 0 則高程無改變，＞0 為堆積，＜0 則為崩塌。
6.P38，表 5 中的凝聚力和摩擦角何以與表 3 或表 4 不同(均屬小林村)?	感謝委員提出的問題，表 3 (原表 5) 的宏觀力學參數是 PLAXIS 強度折減法當中的最後一步，即折減至崩塌時之強度，這是要為分段式模擬二中 EDEM 所用，表 1 (原表 3) 或表 2 (原表 4) 的宏觀力學參數則是屬於尚未折減時的強度，我們於內文已補充說明，

	表 3 (原表 5) 標題也加註清楚。
7.P40，土體運動過程中，靜摩擦數與動摩擦係數相同之情況，在真實狀況下存在與否?最大動摩擦數僅達 0.1 是否合理?	感謝委員意見,於後續探討過後,發現靜摩擦係數通常應大於動摩擦係數，動摩擦係數則通常應大於滾動摩擦係數，本研究需使用的是滾動摩擦係數而非動摩擦係數，這裡我們必須交代清楚。本研究進行修正如 P27 所描述，由於崩塌量體啟動滑落須將靜摩擦係數降至 0.1,且當滾動摩擦係數 0.05 時堆積狀況較擴散，因此最後將靜摩擦係數設為 0.1,滾動摩擦係數設為 0.075 得到的結果最佳。
8.P44,報告中多處提及強度折減法及其折減係數等，建議補充說明其內涵。另，強度折減法是否為模擬滑動面的主要方法?	感謝委員建議，已在內文加強補述。強度折減法的確為模擬或預測滑動面的萬用方法，另外雖還有重力增加法，但強度折減法較為人所用。

9.P45，整合型模擬乎尚未完成，表 6 有限元素法單壓試驗內容與表 4 相同，這是否合理?	小林村事件的整合型模擬已完成如內文所述，表 4 (原表 6) 由於擬合的強度為強度尚未折減的狀況，故應與表 2 (原表 4) 一致。
10.本研究何以要採用三種數值方法模擬大規模崩塌問題，應於執行模擬之前，列表說明其優缺點和適用條件。	本岩究旨在探討分段式與整合型模擬的差異，利用數值力學試驗擬合，使參數可以相互轉換。本研究得出的成果可在後續預測模擬大規模潛在地時，挑選符合效益的方式，因此本研究期中報告已列表說明各方法的優缺點和適用條件 (請參見 P39 表 8)，後續將挑選大規模崩塌潛在地來進行預測。
11.各期報告書為正式文件，宜有完整封面及裝訂，格式應參考水保局規定格式、目錄及圖表目錄等。	感謝委員意見，已修正。
12.P40 有關小林村大規模崩塌至	感謝委員意見，本研究期中修正

堆積之歷程時間，國內外已有許多研究論文，例如國科會發表之報告為 110 秒，建可補充參考。	報告已將模擬時間改設定為 110 秒，利用 110 秒的結果進行堆積移動參數的調整。
13.5.3 節整合型數值模擬(EDEM)應說明模擬條件及假設，如顆粒數如何決定?如何由分離元素法擬合強度折減法?且未見最終模擬結果?	感謝委員意見，已補充說明模擬條件與假設，如 3.3 節 (原 5.3 節)內文所述，本研究的顆粒數由設定的顆粒大小 4~12m 以及設定的孔隙率 0.38 而決定，已補述至內文，如何由分離元素法擬合強度折減法以及最終模擬結果也已增加至內文。
14.本期中報告之內容完整性不足，報告於 5.3 節草草結束，宜再補強相關探討及後續工作規劃等內容。	感謝委員意見，已補強於 3.3 節(原 5.3 節)。
15.請補充說明分段式數值模擬一、分段式數值模擬二和整合型數值模擬之優缺點及其使用條件或限制。	感謝委員意見，回覆如期中審查意見 10。

16.請補充本計畫甘特圖、下階段辦理事項。	感謝委員意見，已補充於 P40。
17.崩塌量體由政府資料開放平台獲得，請提供資料提供機關。	感謝委員意見，已修正於 P19。
18.報告書格式仍請依本局格式辦理。 (1)請補充計畫報告書之封面、目次、表次、圖次、預定工作進度與交付項目 (2)報告書封底、封面計畫編號 SWCB-110-029 請修正。本局官網網址 https://www.swcb.gov.tw/。	感謝委員意見，已修正。

附錄四、期末審查

意見	回覆
1.對於模擬參數之設定建議，為本研究重要產出，建議可強化說明。	感謝委員意見，本研究歸納出了確立各項參數的方法，提供決定模擬參數的建議程序，更詳盡的說明請參見第二章—研究方法，這裡簡單敘述如下：PLAXIS 有限元素數值邊坡之宏觀參數大多參考現地岩石力學試驗結果，接著利用 PLAXIS 有限元素數值力學單壓試驗，擬合 EDEM 分離元素數值力學單壓試驗，可確立 EDEM 分離元素數值邊坡使用之微觀參數。而 RAMMS 中的流動參數則因為較難結合材料力學行為，故較難給予參數設定之建議程序，可能不僅僅參考 RAMMS 手冊來設定參數，更需要不斷調整參數來達到較合理的結果。

2.報告沒有提供目錄，不利於閱讀。本研究屬於數值模擬，參數的設定與合理性是關鍵。	感謝委員意見，報告遺漏之處已提供，並針對參數的設定與合理性之部分，於內文提供更詳盡的說明。
3.建議後續可定出不同促崩條件下，相關參數之範圍與限制，與其合理性，以作為相關研究參考依據。	感謝委員意見，進一步考慮不同促崩條件下，探討相關參數之設定與合理性，是後續研究的不錯的研究方向。
4.組合一與組合二各利用 2 種模式進行模擬，其模式耦合之限制或困難為何。	感謝委員意見，綜整如下： 組合一：PLAXIS→RAMMS PLAXIS 中邊坡材料參數參考現地岩石力學試驗結果，利用異向性模式來預測滑動面以及崩塌量體，結果相當不錯。然而，崩塌量體的運動與堆積模擬中，參考 RAMMS 手冊給定流動參數也不一定能符合實際狀況，需要不斷的調整流動參數，在調整參數後結果雖可符合實際狀況，但是往

	往沒有調整的依據，且 RAMMS 中的流動參數較難結合材料的力學行為。 組合二：PLAXIS→EDEM 利用 PLAXIS 有限元素數值力學單壓試驗，擬合 EDEM 分離元素數值力學單壓試驗，可確立 EDEM 分離元素數值邊坡使用之微觀參數，讓 EDEM 中微觀參數可符合材料力學行為，其結果也是最符合邊坡實際堆積情況的，然而，速度稍慢、操作稍繁雜為其困難之處。
5.計畫結果似乎未完成。	感謝委員意見，如 p.51 所述，小林村案例的成果歸納出了確立各項參數的方法，可利用此方法來挑選適當的邊坡材料的宏觀、微觀或流動參數，應用於評估其他大規模崩塌潛勢地區之破壞及

	崩落全過程。而後續我們挑選結果較好的分段式數值模擬二(PLAXIS 3D → EDEM) 與分段式數值模擬一(PLAXIS 3D → RAMMS) 來進行大規模崩塌潛在地的崩塌與堆積預測模擬。整合型模擬結果之擴散程度較嚴重，故最後沒有應用此方法於其他大規模崩塌潛在地。本研究從已公布之大規模崩塌潛在地中挑選出 3 處(九份二山邊坡、廬山聚落邊坡 D066、廬山北坡)來進行應用之預測模擬。
6.模擬九份二山之再次滑動的結果為何？是否有其影響範圍可供參考？	感謝委員意見，請參見 p.66~p.70，為模擬九份二山之再次滑動的結果，結果包括其預測滑動面、崩塌量體、堆積位置、堆積深度以及堆積影響範圍等資訊。

7.該研究以探討九份二山以及廬山地區，未來如何將該研究應用於其他 34 處大規模崩塌處優先區？	感謝委員意見，未來可對其他大規模崩塌潛在地優先區蒐集現地力學試驗資料，或可能進行現地力學試驗，利用本研究歸納出之確立各項參數設定的建議程序，對有限元素數值邊坡與分離元素數值邊坡，給定適合的宏觀或微觀參數，可順利地預測邊坡崩塌滑動面、崩塌量體、堆積位置、堆積深度、堆積影響範圍、堰塞壩尺寸等資訊。