
以離心模型試驗探討植生對
邊坡穩定的影響
**Effects of Vegetation on the Stability of
Sandy Slope by Centrifuge Modeling**

執行單位：國立中央大學土木工程學系

執行期間：108 年 02 月 20 日至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人：洪汶宜 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 108 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）

以離心模型試驗探討植生對邊坡穩定的影響

摘要

近年來全球暖化使環境保育及生態復育的問題越來越受到重視，台灣西部平原狹長，人口成長使山坡地的使用日漸增加，因此針對山坡地工程發展許多生態工法，以期能降低人為開發對環境和生態的影響並同時達到工程效果。本研究使用地工離心機暨振動台等設備進行離心模型試驗，探討邊坡植生在重力、基盤地震力輸入與強降雨等自然營力的作用下，對邊坡抗沖蝕性及邊坡穩定性的影響。試驗內容包含石英砂之基本力學性質、剪力強度、滲透係數、小麥草之基本生長特性與離心模型試驗。離心模型使用小麥草模擬植物根系在邊坡土壤中的加勁效果，並在試驗前後以雷射掃描紀錄坡面的變化，並以攝影機監測試驗中邊坡滑動破壞的情形。

試驗結果顯示：(1) 根據直剪試驗結果，具有根系加勁的砂土試體內摩擦角會增加約 6 度，對凝聚力則影響不大；(2) 由定水頭試驗結果顯示，根系對砂土滲透係數沒有明顯的影響；(3) 離心模型振動台試驗結果顯示，加入根系的邊坡試體在受振後之坡頂沉陷減少約 50%，且坡腳堆積區坡角增加 11 度，砂土堆積體積水平範圍減少 13 %。試驗後將植生與未植生邊坡模型剖面進行含水量試驗，結果顯示

試驗後邊坡含水量隨高度增加而遞減。(4) 模擬降雨作用試驗結果顯示，無根系加勁邊坡之滑動速率為根系加勁邊坡的 3.2 倍，植物根系能減緩淺層邊坡滑動發生，但發生滑動時破壞面較深且試體之地下水位上升速度加快約 2.5 倍。

關鍵詞：離心模型試驗、植生工法、邊坡穩定

Effects of Vegetation on the Stability of Sandy Slope by Centrifuge Modeling

Abstract

In recent years, global warming has made an important issue of environmental conservation and ecological restoration. The plain at western Taiwan occupies 1/3 of the area but has 90% population, leading to the requirement for hillside development. Therefore, many ecological engineering slope stabilization methods have been investigated and used in the mountain area. In this study, wheatgrass was adopted to simulate the roots reinforcement to the slope surface. The element tests of quartz sand also includes, such as shear strength, permeability, and growth characteristics of wheatgrass. Then, the geotechnical centrifuge modeling tests were conducted to evaluate the effects of vegetation at slope surface on the erosion resistance and slope stability under the changing gravity, base input earthquake and high intensity rainfall conditions. The ground surface before and after the centrifuge modeling tests was recorded by laser displacement transducer, and the slope failure process was captured by cameras during tests.

The test results show that (1) from the direct shear tests, the friction angle of the soil with roots increase 6 degrees, and the cohesion does not change significantly. (2) From the constant head permeability tests, it shows that the roots does not affect permeability significantly. (3) The centrifuge shaking table tests show that the settlement on the top of the

slope with surface vegetation is reduced 50% after the earthquake. The slope angle of the accumulation area increase 11 degrees, and the accumulation range decrease by 13%. The water content test were carried out after the centrifuge modeling test. It shows that the water content of the slope decrease with the increasing elevation. (4) Under rainfall condition, test results show that the slip velocity of shallow surface for the model without vegetation is 3.2 times that with vegetation. The roots can reduce the slip rate, however, the underground water level rise 2.5 times faster than the slope without vegetation and a deeper failure surface will occur. It indicates that the roots can protect the surface erosion effectively, but the infiltration of rainwater will cause deeper failure.

Keywords: centrifuge modeling, vegetation, slope stability

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	IX
第一章 緒論	1-1
第一節 研究背景	1-1
第二節 研究目的	1-4
第二章 文獻回顧	2-1
第一節 土壤剪力強度	2-1
第二節 土壤滲透係數	2-2
第三節 根-邊坡面積比	2-3
第四節 含根土壤之剪力強度	2-3
第五節 離心模型原理	2-4
第六節 離心模型降雨尺度之文獻探討	2-10
第七節 離心模型邊坡加勁試驗	2-18
第三章 試驗方法和實驗配置	3-1
第一節 試驗方法	3-1
第二節 試驗砂之基本力學性質	3-1
第三節 小麥草之基本性質	3-3
第四節 離心模型試驗設備	3-13
第五節 邊坡滑動之定量定義	3-21
第四章 試驗結果	4-1
第一節 試驗步驟	4-1

第二節	試驗組數	4-5
第三節	重力引致破壞	4-6
第四節	地震力引致破壞	4-17
第五節	降雨引致破壞	4-39
第五章	綜合討論	5-1
第一節	重力條件	5-1
第二節	地震力條件	5-6
第三節	降雨條件	5-11
第四節	重力、地震力及降雨之綜合比較	5-18
第六章	結論	6-1
參考文獻		參-1
附錄		附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-1
附錄二、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形		附錄-11
附錄三、期末報告會前審查意見暨回覆辦理情形		附錄-17
附錄四、成果發表會議紀錄意見暨回覆辦理情形		附錄-20

表次

表 2-1 各分類土壤之滲透係數(DAS AND SOBHAN, 2016).....	2-2
表 2-2 離心模型試驗之縮尺比.....	2-8
表 2-3 離心模型試驗降雨縮尺表.....	2-16
表 2-4 不同研究中離心模型降雨比尺之差異.....	2-18
表 2-5 不同研究中離心模型試驗條件.....	2-21
表 3-1 石英砂之基本物理性質.....	3-2
表 3-2 直剪試體之基本性質.....	3-5
表 3-3 定水頭試體之基本性質.....	3-6
表 3-4 DR = 50 %直剪試驗與對照組之比較.....	3-10
表 3-5 DR = 70 %直剪試驗與對照組之比較.....	3-10
表 4-1 試驗組數及條件.....	4-5
表 4-2 試驗 GE_80G 邊坡土壤流失與坡腳堆積.....	4-9
表 4-3 試驗 GE_80G 於不同條件下之破壞程度.....	4-10
表 4-4 試驗 VGE_80G 邊坡土壤滑動與坡腳堆積.....	4-14
表 4-5 試驗 VGE_80G 於不同條件之破壞程度.....	4-14
表 4-6 振動事件.....	4-19
表 4-7 試驗 VGE_65G 在不同條件的破壞程度.....	4-21
表 4-8 試驗 VGE_80G 邊坡土壤流失與坡腳堆積.....	4-21
表 4-9 振動事件.....	4-25
表 4-10 試驗 E_25G 於不同條件之破壞程度.....	4-25
表 4-11 E_25G 土壤流失與堆積體積計算表.....	4-27
表 4-12 試驗 E_25G 之 NEWMARK 降伏加速度.....	4-31
表 4-13 振動事件.....	4-33
表 4-14 VE_25G 之破壞程度.....	4-35

表 4-15 試驗 VE_25G 邊坡土壤流失與坡腳堆積	4-36
表 4-16 試驗 VE_25G 之 NEWMARK 降伏加速度	4-39
表 4-17 降雨事件	4-40
表 4-18 試驗 R_25G 之破壞程度	4-43
表 4-19 試驗 R_25G 邊坡土壤流失與坡腳堆積	4-44
表 4-20 試驗 R_25G 邊坡滑動行為	4-47
表 4-21 修改自崩塌地植生工程暨應用植物手冊 (α 為有害, β 為有益)	4-48
表 4-22 試驗 VR_25G 之破壞程度	4-51
表 4-23 試驗 VR_25G 邊坡土壤流失與坡腳堆積	4-54
表 4-24 試驗 VR_25G 邊坡滑動行為	4-56
表 5-1 重力引致邊坡分析比較	5-2
表 5-2 GEOSTUDIO 2012 數值模擬結果	5-5
表 5-3 試驗 VE_25G 和試驗 E_25G 邊坡破壞結果整理	5-7
表 5-4 試驗 VE_25G 和試驗 E_25G 邊坡破壞結果整理	5-10
表 5-5 試驗 R_25G 和試驗 VR_25G 邊坡破壞結果整理	5-15

圖次

圖 1-1 加州一號公路崩塌照	1-2
圖 1-2 國道三號崩塌圖	1-2
圖 1-3 南阿蘇村山崩	1-3
圖 1-4 車輛遭泥流淹沒	1-4
圖 2-1 根系模型 (GRAY AND LEISER, 1995)	2-4
圖 2-2 原型與 1 / N 縮尺模型在 1G 及 NG 離心力場之狀態	2-6
圖 2-3 1 / N 縮尺離心模型加速度分量圖	2-9
圖 2-4 局部元素在圓周運動座標系之加速度分量示意圖	2-10
圖 2-5 顆粒受科氏力加速度之效果 (TAYLOR, 1995)	2-10
圖 2-6 模型配置 (WANG, 2010)	2-11
圖 2-7 模型配置 (卓越人, 2012)	2-12
圖 2-8 離心模型試驗及監測示意圖 (田海, 2015)	2-13
圖 2-9 降雨類比離心模型試驗中之降雨系統示意圖 (張敏, 2007)	2-14
圖 2-10 離心邊坡模型 (LING, H. I., 2009)	2-15
圖 2-11 模型製作 (陳明景, 2017)	2-17
圖 2-12 燕麥於離心模型試驗中之生長情形 (ASKARINEJAD, A. AND SPRINGMAN, S.M., 2015)	2-19
圖 2-13 降雨試驗配置 (KRENG, 2015)	2-20
圖 2-14 土釘加勁模型邊坡之破壞情形 (WANG, 2014)	2-20
圖 3-1 石英砂顆粒	3-2
圖 3-2 石英砂粒徑分布曲線	3-2

圖 3-3 石英砂之抗剪強度曲線.....	3-3
圖 3-4 小麥草育苗完成.....	3-4
圖 3-5 試體生長環境.....	3-6
圖 3-6 栽種四天後之直剪試體.....	3-7
圖 3-7 直剪盒.....	3-8
圖 3-8 直剪試驗儀.....	3-8
圖 3-9 根沿破壞面拉出並未剪斷.....	3-9
圖 3-10 試體土壤含小麥草根之抗剪強度 (DR = 70 %)	3-9
圖 3-11 試體土壤含小麥草根之抗剪強度 (DR = 50 %)	3-9
圖 3-12 定水頭試體種植小麥草七天後之情形.....	3-11
圖 3-13 定水頭試驗容器	3-12
圖 3-14 定水頭試驗儀	3-12
圖 3-15 定水頭滲透係數	3-13
圖 3-16 鋁合金半透明試驗箱	3-14
圖 3-17 灑水噴頭.....	3-15
圖 3-18 降雨強度與氣壓之關係圖	3-15
圖 3-19 降雨系統.....	3-16
圖 3-20 降雨系統示意圖	3-16
圖 3-21 加速度計.....	3-17
圖 3-22 孔隙水壓力計	3-18
圖 3-23 數位攝相機.....	3-18
圖 3-24 3D 列印材料及印表機.....	3-20
圖 3-25 各組試驗剪力強度之比較.....	3-20
圖 3-26 各組試驗滲透係數之比較.....	3-21
圖 3-27 剖面楔形崩塌圖	3-22

圖 3-28 坡面崩塌程度示意圖	3-22
圖 4-1 培養小麥草	4-1
圖 4-2 邊坡配置圖（單位：公分）	4-3
圖 4-3 植生邊坡模型圖	4-4
圖 4-4 VGE_80G 及 GE_80G 之側視圖和上視圖	4-6
圖 4-5 試驗 GE_80G 試驗過程不同重力場下引致之坡面破壞情形	4-8
圖 4-6 試驗 GE_80G 邊坡破壞側視圖	4-9
圖 4-7 試驗 GE_80G 含水量分布圖	4-10
圖 4-8 試驗 GE_80G 高程變化圖	4-11
圖 4-9 試驗 VGE_80G 邊坡破壞側視圖	4-13
圖 4-10 試驗 VGE_80G 含水量分布圖	4-15
圖 4-11 試驗 VGE_80G 高程變化圖	4-16
圖 4-12 地震力引致之邊坡滑動破壞試驗	4-17
圖 4-13 試驗 VGE_65G 表面滑移距離	4-19
圖 4-14 試驗 VGE_65G 側視圖	4-20
圖 4-15 試驗 VGE_65G 含水量分布圖	4-22
圖 4-16 試驗 VGE_65G 高程變化圖	4-23
圖 4-17 試驗 E_25G 邊坡破壞上視與側視圖	4-26
圖 4-18 試驗 E_25G 含水量分布圖	4-27
圖 4-19 試驗 E_25G 高程變化圖	4-28
圖 4-20 試驗 E_25G 延土層深度之加速度反應	4-28
圖 4-21 加速度引致滑動示意圖	4-29
圖 4-22 加速度、速度、位移歷時計算示意圖	4-30
圖 4-23 試驗 E_25G 之 NEWMARK 降伏加速度曲線	4-31

圖 4-24 試驗 VE_25G 邊坡破壞上視圖	4-34
圖 4-25 試驗 VE_25G 邊坡破壞側視圖	4-34
圖 4-26 試驗 VE_25G 含水量分布圖	4-35
圖 4-27 試驗 VE_25G 高程變化圖	4-36
圖 4-28 試驗 VE_25G 於 M1 振動事件中各深度之加速度反應	4-37
圖 4-29 VE_25G 於 M2 振動事件中各深度之加速度反應	4-37
圖 4-30 VE_25G 於 M3 振動事件中各土層之加速度反應	4-38
圖 4-31 試驗 VE_25G 之 NEWMARK 降伏加速度曲線	4-38
圖 4-32 模型試體受降雨侵蝕之情形	4-40
圖 4-33 試驗 R_25G 邊坡破壞上視圖	4-42
圖 4-34 試驗 R_25G 邊坡破壞側視圖	4-43
圖 4-35 試驗 R_25G 含水量分布圖	4-44
圖 4-36 試驗 R_25G 高程變化圖	4-45
圖 4-37 試驗 R_25G 於降雨事件中各深度之水壓力變化	4-46
圖 4-38 試驗 R_25G 於降雨事件中之滑動次數	4-46
圖 4-39 試驗 R_25G 於降雨事件中之最大裂縫寬度變化	4-47
圖 4-40 試驗 VR_25G 邊坡破壞上視圖	4-50
圖 4-41 試驗 VR_25G 邊坡破壞側視圖	4-51
圖 4-42 試驗 VR_25G 含水量分布圖	4-52
圖 4-43 試驗 VR_25G 高程變化圖	4-53
圖 4-44 試驗 VR_25G 於降雨事件中各深度之水壓力變化	4-54
圖 4-45 試驗 VR_25G 於降雨事件中之滑動次數	4-55
圖 4-46 試驗 VR_25G 於降雨事件中之最大裂縫寬度變化	4-55
圖 5-1 試驗 VGE_80G 和試驗 GE_80G 坡度比較圖	5-3

圖 5-2 試驗 VGE_80G 和試驗 GE_80G 楔型破壞面積比比較圖.....	5-3
圖 5-3 試驗 VGE_80G 和試驗 GE_80G 滑動面積比率.....	5-4
圖 5-4 GEOSTUDIO 2012 邊坡數值模擬模型.....	5-4
圖 5-5 試驗 VGE_80G 和試驗 GE_80G 土壤含水量與剪力強度 關係圖	5-5
圖 5-6 邊坡側向變形圖	5-8
圖 5-7 坡面滑動範圍	5-9
圖 5-8 試驗 VE_25G 和試驗 E_25G 含水量與剪力強度關係圖.....	5-9
圖 5-9 試驗 VE_25G 和試驗 E_25G 破壞面比較圖	5-9
圖 5-10 試驗 VE_25G 和試驗 E_25G 之降伏加速度.....	5-10
圖 5-11 試驗 VR_25G 邊坡破壞歷程.....	5-13
圖 5-12 試驗 R_25G 和試驗 VR_25G 滑動事件時間圖	5-14
圖 5-13 SLIDE DISTANCE OF 試驗 R_25G 和試驗 VR_25G 側向變 形與時間關係圖	5-14
圖 5-14 試驗 VR_25G 和試驗 R_25G 土壤含水量與剪力強度關 係圖	5-15
圖 5-15 試驗 VR_25G 和試驗 R_25G 孔隙水壓反應比較圖	5-16
圖 5-16 試驗 VR_25G 和試驗 R_25G 孔隙水壓反應比較圖 (中間 土層).....	5-17
圖 5-17 試驗 VR_25G 和試驗 R_25G 孔隙水壓反應比較圖 (底層 土層).....	5-17
圖 5-18 試驗 R_25G 中間土層土壤之土壤水分特性曲線	5-18
圖 5-19 試驗 VR_25G 和試驗 VE_25G 邊坡破壞面比較圖	5-20
圖 5-20 試驗 VR_25G 和試驗 VE_25G 楔型破壞面積比比較.....	5-20
圖 5-21 試驗滑動面積比比較圖	5-21

圖 5-22 試驗滑動面積範圍上視圖	5-21
圖 5-23 試驗坡角比較圖	5-22

第一章 緒論

第一節 研究背景

近幾十年來，全球天然災害死亡人數超過 150 萬人，造成重大經濟損失。曾遭受過三種類型以上之天然災害的國家約有 35 個（僅占全球人口 5 %），然而臺灣遭受三種以上災害的可能衝擊地區則約有 90 % 的人口居住，其中以地震、土石流、豪大雨為臺灣常見的三種災害。

臺灣 70 % 為山地地形，山勢險峻坡度大，暴雨時河流湍急容易侵蝕山坡，此外臺灣身處歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊之交界處，故地震頻繁，以上不良條件使得台灣經常發生山坡地相關的災害。由於人口快速增加、經濟蓬勃發展，在臺灣西部平原面積有限的情況下，山坡地開發成為必然的趨勢。由於對山坡地利用的認知不足以及設計不當，在重力、地震及豪大雨等外在自然營力作用下，易發生山崩與土石流等山坡地災害，引致嚴重的生命財產損失。

關於重力引致邊坡的破壞，在台灣與國外均有過案例，例如 2017 年 5 月 20 日美國加州一號公路發生大規模土石坍方，估計約有 100 萬噸之土石從邊坡滑落，覆蓋了 500 公尺的長路段；臺灣在 2010 年則發生了福爾摩沙高速公路山崩事件，造成雙向車道遭到掩埋，大埔跨越橋也因山崩而造成毀壞。



圖 1-1 加州一號公路崩塌照

資料來源：法新社，2017 年 5 月 20 日



圖 1-2 國道三號崩塌圖

資料來源：聯合報，2010 年 4 月 25 日

位於環太平洋火山地震帶上的國家，經常發生地震引致的山坡地災害，例如日本在 2017 年 4 月 16 日發生熊本大地震，位於熊本縣的

南阿蘇村因地震導致大規模山崩，對外交通因而中斷；臺灣在 2013 年 6 月發生的南投地震，亦造成南投地區發生山崩。



圖 1-3 南阿蘇村山崩

資料來源:自由時報，2017 年 4 月 16 日

豪大雨引致的邊坡災害亦為臺灣災害傷亡及經濟損失的主因，在台灣有相當多大、小規模的土石流相關災情案例；國外案例中，2015 年 10 月 17 日南加州公路山區連續兩天的豪雨，造成鄰近南加州山區的 28 號公路發生土石流，造成車輛遭泥流淹沒。



圖 1-4 車輛遭泥流淹沒

資料來源:自由時報，2015 年 10 月 17 日

因此如何防範山坡地災害為很重要的課題，而水土保持的維護是非常有效的方法，其主要目的在保護土壤且有效控制水資源，減少土壤侵蝕、崩塌、土石流等災害，不僅有抗侵蝕的效果，且能增加邊坡的穩定性。而在水土保持方法之中包含植生加勁土壤工法，於邊坡中加入植生做為加勁材料，以增加邊坡土壤的剪力強度，邊坡之穩定性隨之提高，亦可以避免混凝土結構物對野生動物之棲息及活動範圍產生生態影響，造成環境破壞。因此，利用植生加勁邊坡是值得運用的工法之一，不只是加強邊坡穩定的效果，還可維持物種保育、生物多樣性及永續發展。

第二節 研究目的

隨著醫療及科技的進步，人口數相較於以前大幅成長，土地使用不再只是平地範圍，更進一步拓展至山坡地，但卻也造成了環境的破

壤。山坡地的土地開發影響了水土保持並降低了邊坡穩定性，加上台灣時常受到颱風的侵襲，大量豪雨對於邊坡的穩定性更是一大威脅。現今社會非常重視生態保護，因此對於邊坡穩定工程，除了傳統鋼筋混凝土擋土牆、地錨、噴凝土等擋土與固化工法以外，更期望多加使用生態工法能協助增加邊坡的穩定性及抗沖蝕效果。

生態工法中的植生工法則是最直接且有效的工法之一，其對於邊坡穩定性有兩個顯著的優點，一為對雨水及地表逕流沖蝕的控制，另一為對邊坡淺層土壤的加勁。在抗沖蝕方面，樹冠及樹枝可緩衝雨水的沖刷能量，防止雨水直接衝擊地面對土壤造成沖蝕；在土壤加勁方面，植物的根可抓住土壤，提高土壤與根的凝聚力並增加土體的內摩擦角以提高土壤剪力強度。

因此，本研究利用離心模型試驗，探討坡面植生於重力、地震力與降雨三種情況下對於邊坡穩定性的影響，瞭解邊坡在有無植生植情況下的抗沖蝕效能及對邊坡穩定性之貢獻。本報告包含彙整文獻、設計試驗流程及方法、土壤基本物理性質試驗、植生土壤滲透性及直剪試驗、離心模型試驗、結果分析與討論等，以供學術和工程界做為參考。

第二章 文獻回顧

本章節蒐集彙整相關文獻，包括探討植生工法對邊坡抗侵蝕及穩定性之貢獻、闡述石英砂剪力強度和土壤滲透性等特性、說明離心模型試驗理論、定義縮尺模型中降雨強度的縮尺律和邊坡加勁工法及邊坡穩定性之相關研究等。

第一節 土壤剪力強度

土壤剪力強度為當土壤受到外力作用而發生破壞時，土壤在破壞面上之剪應力。Terzaghi (1936) 認為土壤中只有土壤顆粒能夠承受剪力，水雖無法承受剪力，但在不排水的情況下會產生超額孔隙水壓，因此提出土壤總應力公式如下：

$$\sigma = \sigma' + u$$

σ 為總應力、 σ' 為有效應力、 u 為孔隙水壓，總應力等於有效應力加上孔隙水壓力。Coulomb (1776) 認為大多數的土壤力學機制都可以假設為在破壞面上剪應力與正向力為函數關係，Mohr (1900) 根據材料破壞理論認為一材料之破壞為正向力與剪應力以一定大小組合同時作用才形成，而非單獨一最大正向力或最大剪應力造成。因此土壤之剪力強度之公式可由摩爾－庫倫破壞準則表示為：

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \theta$$

τ 為破壞時的剪力強度、 c 為土壤的有效凝聚力、 θ 為有效內摩擦角。

第二節 土壤滲透係數

土壤滲透係數又稱水力傳導係數，用以計算水在土壤中的滲流速率。Darcy（1895）發表通過飽和土壤之水流速的公式如下：

$$v = ki$$

v 為一定體積的水量通過垂直於流向之特定橫斷面之速度、 k 為滲透係數、 i 為水力坡降，其中 $i = h/L$ ， h 為水頭差、 L 為兩水頭點之最短距離。因此在相同的水力坡降下，高滲透係數代表土壤中水之滲流速度較快，由達西定率可知流量為：

$$Q = Av = Ak \frac{h}{L} = kiA$$

Q 為流量、 A 為有效斷面積、 h 為水頭差、 L 為滲流路徑、 i 為水力坡降。各土層之滲透係數會因其土壤孔隙而有明顯的差異，如表 2-1 所示，砂土跟黏土之滲透係數差了一千倍以上。

表 2-1 各分類土壤之滲透係數(Das and Sobhan, 2016)

Soil type	k	
	cm/sec	ft/min
Clean gravel	100–1.0	200–2.0
Coarse sand	1.0–0.01	2.0–0.02
Fine sand	0.01–0.001	0.02–0.002
Silty clay	0.001–0.00001	0.002–0.00002
Clay	<0.000001	<0.000002

第三節 根-邊坡面積比

根-邊坡面積比為植物的根截面積總和與坡面總面積的比值，Kreng (2013) 在邊坡根加勁的研究中提出根-邊坡面積比通常和含根土壤之剪力強度呈正相關。本研究亦將以根-邊坡面積比說明模型中根系加勁之密度。根-邊坡面積比之公式如下：

$$a_r = A_R / A_S$$

A_R 為植物之根截面積、 A_S 為單位土壤與根垂直之截面積。

第四節 含根土壤之剪力強度

根系植物可以增加土壤中的剪力強度，有助於邊坡的穩定性，Wu (1979) 提出了根系土壤所提供之剪力強度增加量， ΔS 為根貢獻之凝聚力，含根土壤增強土壤凝聚力之公式如下：

$$\Delta S = a_r \times Tr(\sin \theta + \cos \theta \times \tan \phi')$$

ΔS 為根貢獻之凝聚力、 a_r 為根面積比、 Tr 為根的平均剪力度、 θ 為根與垂直破壞面線段之夾角。根據 Gary 和 Leiser (1985) 所建立之根系模型描述，根系生長發展方向，不太可能完全垂直於破壞面，如圖 2-1 所示。

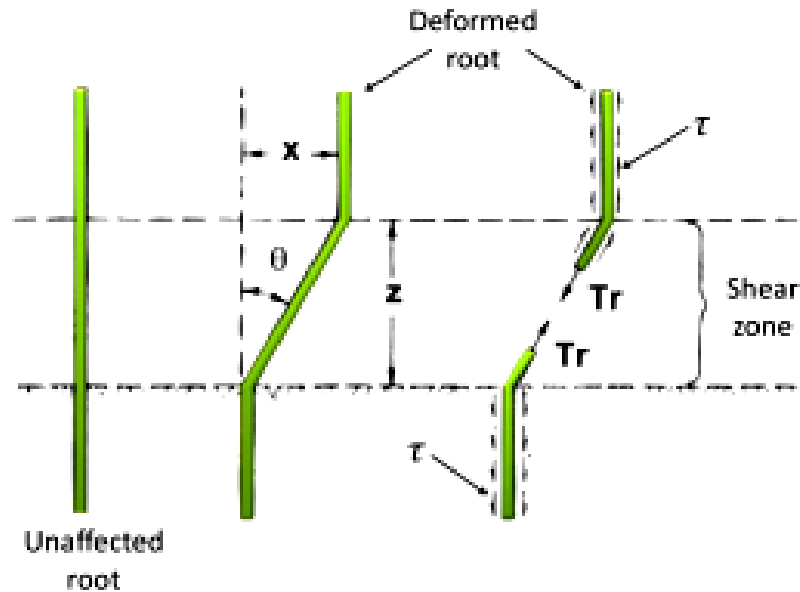


圖 2-1 根系模型 (Gray and Leiser, 1995)

Kreng (2013) 利用香根草於砂質土壤上做了一系列的剪力強度試驗，與沒有含根之土壤做比較，有含根之土壤平均內摩擦角增加 8 度，凝聚力增加 6 kPa，實驗結果顯示，植根根系對土壤之剪力強度有顯著的貢獻。

第五節 離心模型原理

離心模型試驗係利用離心力創造人工重力場，使模型試體的應力應變行為與原型狀態相同，以達到相同的應力應變行為。離心模型原理之正確性是基於以下兩個物理原理：(1)根據相對論闡述牛頓的重力與慣性力是等效的，故原型模型受地球之重力與砂土模型於離心機上受離心慣性力，兩者物理效應一致。(2)材料力學性質主要與電子雲內之電磁力有關，離心力與電磁力相比之下影響極小，因此在離心

力場內土壤之材料性質不至於改變。

一、離心模型之縮尺相似律

離心模型試驗是將現地之原型以 $1/N$ 縮尺成離心模型，並利用 N 倍於地球重力場(g)的離心重力場來模擬現地真實的應力應變狀態，本節內容將以下標 m 代表模型(model)、下標 p 代表原型(prototype)。於離心模型試驗中，試驗土壤與現地土壤之材料性質與孔隙比相同，因此現地土壤密度(ρ_p)會與模型土壤密度(ρ_m)相同，即 $\rho_m = \rho_p$ ，進而推導離心模型之縮尺律。若現地某一深度 d_p 之垂直覆土應力表示為：

$$\sigma_{vp} = \rho_p g d_p$$

g 為重力加速度，則在 N 倍離心重力場中，模型所對應深度之土體應力為：

$$\sigma_{vm} = \rho_m N g d_m$$

σ_{vm} 為原型之垂直覆土應力。而現地應力與離心模型試驗之模型應力須相等($\sigma_{vp} = \sigma_{vm}$)，因此可推得原型長度(d_p)為 N 倍模型長度(d_m)，即：

$$d_p = N d_m$$

離心模型試驗的基本縮尺定律可由此推導而來，離心模型試驗最大之優點為可利用 $1/N$ 縮尺模型模擬現地之地中應力及結構物之應力

應變狀態與行為，如圖 2-2 所示。

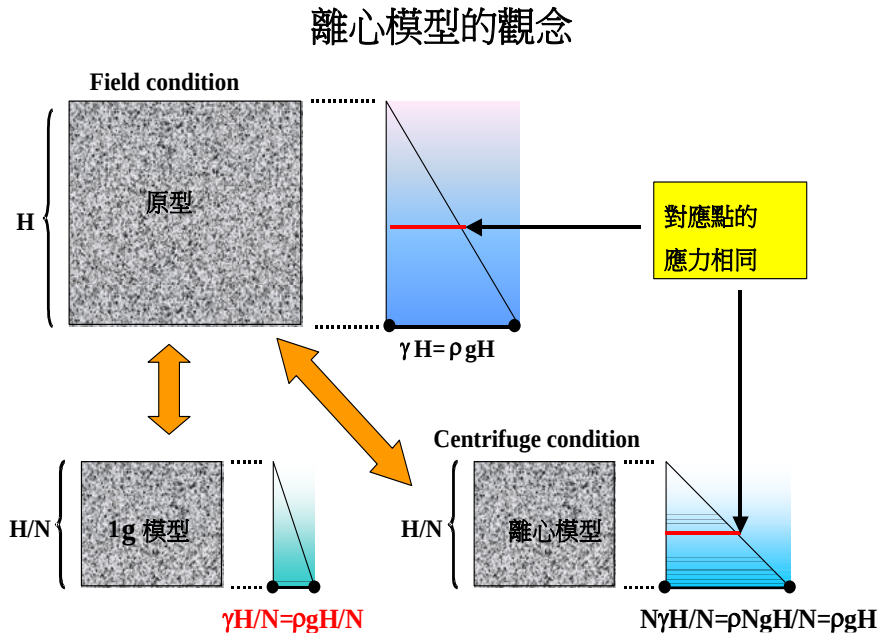


圖 2-2 原型與 $1/N$ 縮尺模型在 $1g$ 及 Ng 離心力場之狀態

動態離心模型加速度與時間縮尺律，是藉由運動方程式以因次分析進行推導，由前段敘述已知原型加速度(a_p)與模型加速度(a_m)差了 N 倍($a_m = Na_p$)，根據運動方程式並已因次分析進行推導：

$$L_m = \frac{1}{2} a_m t_m^2$$

$$L_p = \frac{1}{2} a_p t_p^2$$

將上式相除：

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{\frac{1}{2} a_m t_m^2}{\frac{1}{2} a_p t_p^2}$$

將 $a_m = Na_p$ 與 $L_p = NL_m$ 及一維長度之縮尺律代入公式：

$$\left(\frac{t_m}{t_p}\right)^2 = \frac{1}{N^2} \rightarrow t_m = \frac{1}{N} t_p$$

由以上推導結果可得動態行為時間之縮尺律，並以此縮尺律在試驗中進行地震模擬。

壓密行為之縮尺律可利用 Terzaghi 單向度壓密理論以因次分析進行推導。若原型與模型之壓密時間因素(T_v)與壓密係數(C_v)相同，其公式推導如下：

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$$

若原型與模型為相同土壤材料，因此 $\frac{(C_v)_m}{(C_v)_p} = 1$ ，故：

$$\frac{C_v t_p}{H_p^2} = \frac{C_v t_m}{H_m^2} \rightarrow \frac{t_m}{t_p} = \left(\frac{H_m}{H_p}\right)^2$$

再將 $H_p = NH_m$ 代入上式可得：

$$t_m = \frac{1}{N^2} t_p$$

由上式推導可知模型的孔隙水壓消散時間較現地原型的消散時間快上 N^2 倍，故離心模型試驗可大幅縮短土壤壓密所需時間。

本節所描述之應力、加速度、振動頻率、動態時間與壓密時間等模型縮尺律皆為本研究常用之縮尺比，其餘離心模型試驗之縮尺比如表 2-1 所示。另外，針對降雨縮尺比的部分，因為各國的研究對降雨強度和降雨歷時的尺度看法不同，因此本研究會做進一步的探討。

表 2-1 離心模型試驗之縮尺比

物理量	單位	因次比 (離心模型/原型)
加速度 (acceleration)	m/sec ²	N
長度 (linear dimension)	m	1/N
應力 (stress)	kPa	1
應變 (strain)	-	1
密度 (density)	kg/cm ³	1
質量或體積 (Mass or volume)	kg or m ³	1/N ³
單位重 (unit weight)	N/m ³	N
力 (force)	N	1/N ²
彎矩 (Bending moment)	N·m	1/N ³
Bending moment/unit width	N·m/m	1/N ²
Flexural stiffness/unit width (EI/m)	N·m ² /m	1/N ³
壓密時間 (time : diffusion)	sec	1/N ²
時間 (time : dynamic)	sec	1/N
頻率 (frequency)	1/sec	N

二、科氏力加速度之影響

圖 2-3 為 1/N 縮尺離心模型旋轉時加速度分量圖，圖 2-4 代表 A' 局部元素在圓周運動座標系中之加速度分量示意圖，徑向加速度與切

線加速度分別為 $(-d^2r/dt^2 + r(d\theta/dt)^2)$ 與 $2(dr/dt)(d\theta/dt) + r(d\theta^2/dt^2)$ 。切線加速度項中之 $2(dr/dt)(d\theta/dt)$ 項稱為科氏加速度(Coriolis acceleration)。如圖 2-5 所示，當離心機等速度旋轉時，砂顆粒或水滴沿離心機徑向運動時的運動軌跡，會表現出科氏加速度之效果。進行模型試驗時，離心機通常是以定角速度旋轉($d\theta/dt = \text{定值}$ ，因此 $d\theta^2/dt^2 = 0$)，如果模型內質點沿徑向運動(dr/dt 不為零(例如水之流動、模擬物體撞擊地表面、爆炸或邊坡產生滑動破壞等))，科氏加速度不為零，則該質點之運動軌跡會與原型不同。一般在進行離模型試驗時通常都認定當科氏加速度與離心加速度的比值 $[2(dr/dt)/(d\theta/dt)/r(d\theta/dt)^2] < 0.1$ 時，該誤差可予以忽略。另外當物體在極快的運動速度下，其運動軌跡之曲率半徑大於離心機旋轉半徑時，亦可忽略科氏加速度的影響。

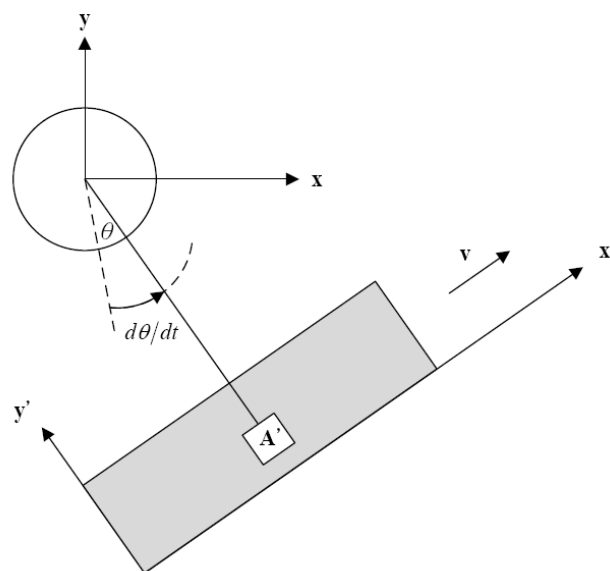


圖 2-3 1/N 縮尺離心模型加速度分量圖

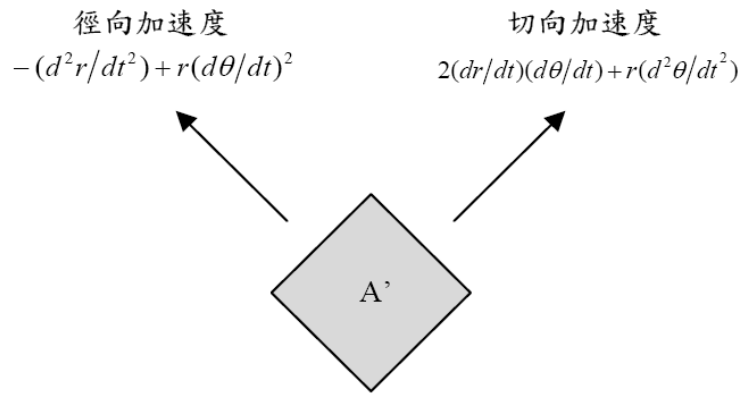


圖 2-4 局部元素在圓周運動座標系之加速度分量示意圖

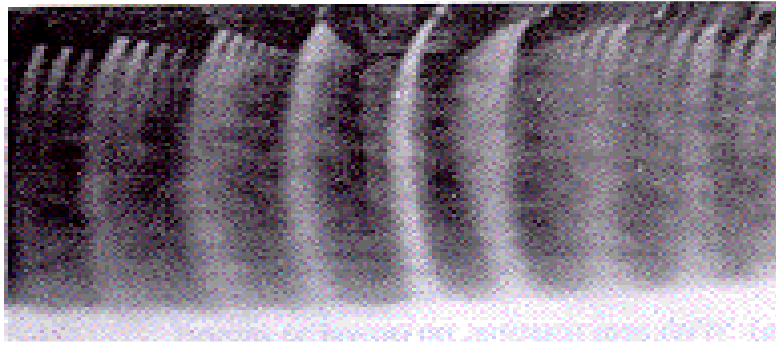


圖 2-5 顆粒受科氏力加速度之效果 (Taylor, 1995)

第六節 離心模型降雨尺度之文獻探討

本節將就多篇研究文獻進行整理並探討降雨強度於離心模型試驗中之縮尺律的使用。

Wang 等人 (2010) 在降雨條件下以離心模型試驗模擬邊坡中軟弱蒙脫土夾層之研究提及降雨強度之尺度，其模型和原型的比值為 $1/N$ ，降雨歷時模型和原型之比值為 $1/N^2$ ，其試驗之模擬重力場為 $50g$ 、坡度 45 度，試驗配置如圖 2-6 所示。實驗結果顯示，在降雨條件下有軟弱土夾層之模型，其剪力帶為不連續的，且軟弱土夾層增加了整體邊坡的變形。

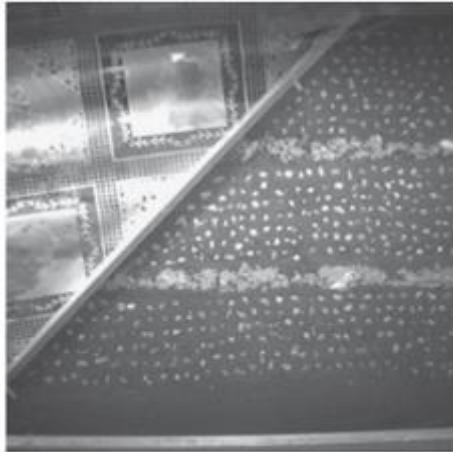


圖 2-6 模型配置 (Wang, 2010)

卓越人(2012)於離心機模擬水文因子導致滑坡的研究當中提及降雨強度之尺度其模型和原型的比值為 N ，降雨歷時之模型和原型的比值為 $1/N^2$ ，模擬重力場 $75g$ ，坡度 60° ，試驗配置如圖 2-7 所示。土壤在不飽和狀態下會產生土壤吸力，土壤吸力為兩種吸力之總和，一為基質吸力，另一為滲透吸力。基質吸力主要因土壤之毛細現象而引發，滲透吸力則是含有溶質之純水由高濃度溶質處擴散之現象。此文獻指出，邊坡崩塌所需時間隨著降雨強度的提高而降低，崩塌所需之降雨延時會隨黏土比例增加而縮短。

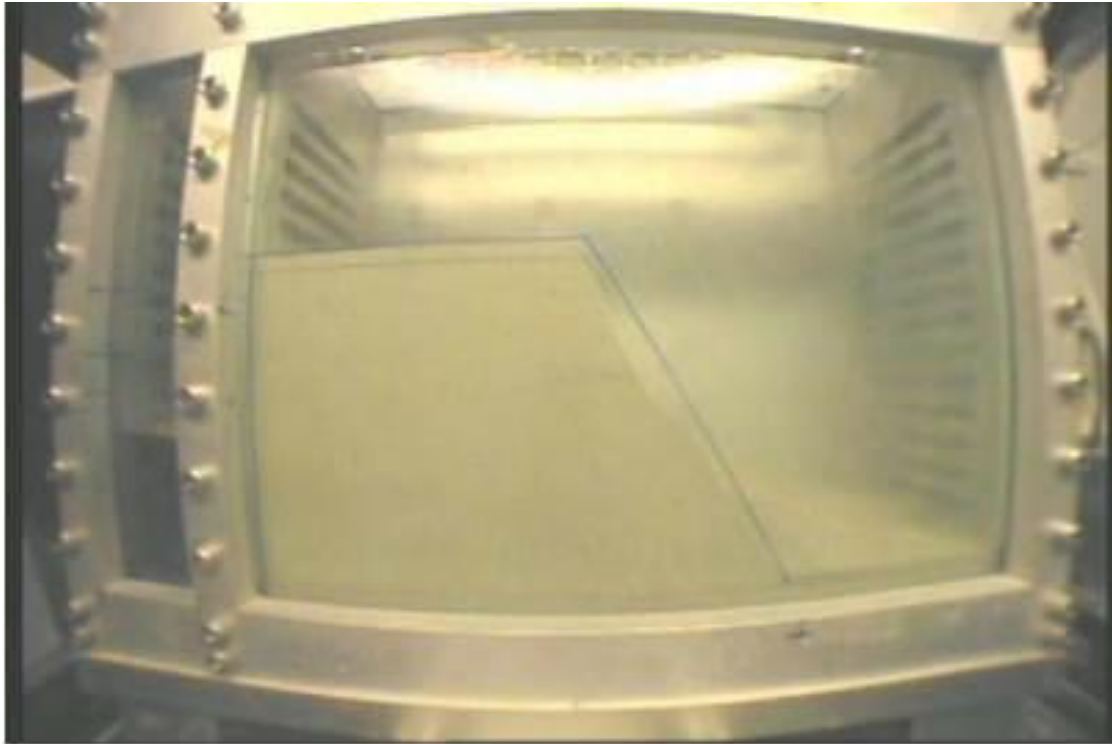


圖 2-7 模型配置（卓越人，2012）

田海（2015）在降雨條件下，進行鬆散堆積邊坡的穩定性之離心模型試驗，文中說明降雨強度模型和原型的比值為 N ，降雨歷時原型和模型的比率為 $1/N^2$ ，模擬重力場 $80g$ ，坡度 60° ，試驗配置如圖 2-8 所示。研究中顯示堆積體邊坡的變形滑移主因為強降雨條件引致，而採用防護格柵措施可有效遏制邊坡的位移變形，試驗結果為鬆散堆積體發育地區之邊坡地質災害防治提供重要的技術支援。

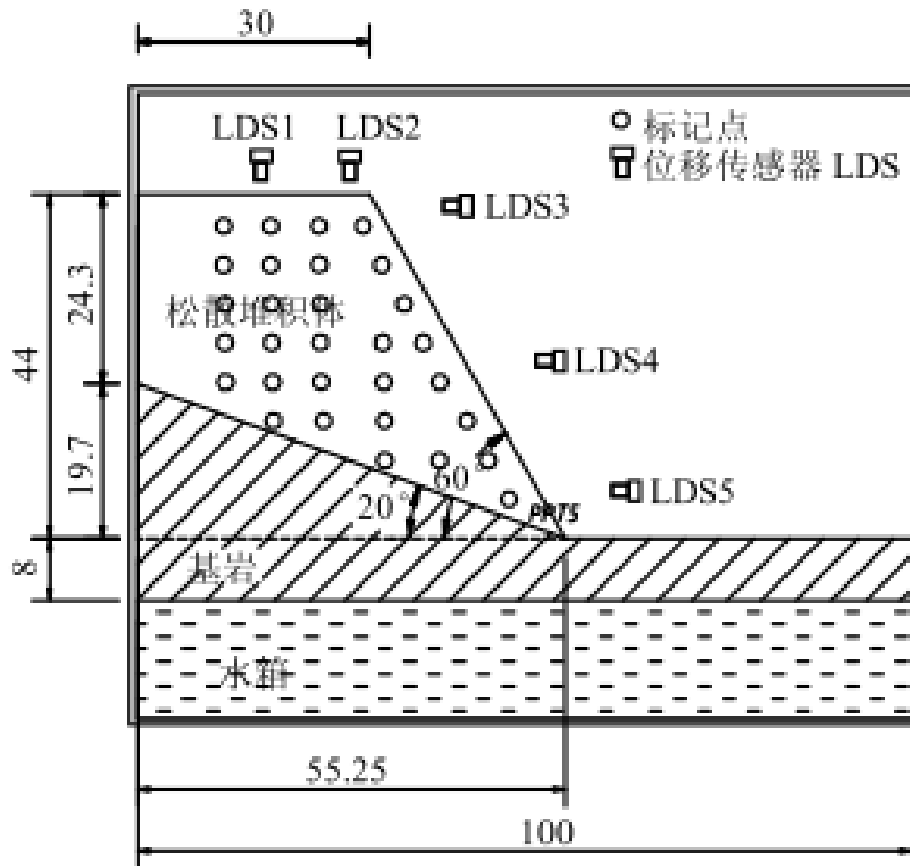


圖 2-8 離心模型試驗及監測示意圖（田海，2015）

張敏（2007）在邊坡離心模型試驗中的降雨模擬研究中，模型和原型亦使用比值為 N 的降雨強度縮尺，降雨歷時模型和原型的比值為 $1/N^2$ ，並將降雨設定為由坡頂滲流，因此降雨和滲流之縮尺律將保持一致，試驗配置如圖 2-9 所示。由實驗觀察而知，降雨模擬中雨滴會受科氏力影響，降落路徑並非垂直落下，將降雨裝置安裝於離坡頂最近之位置，雨滴受科氏力之影響將會大幅降低。

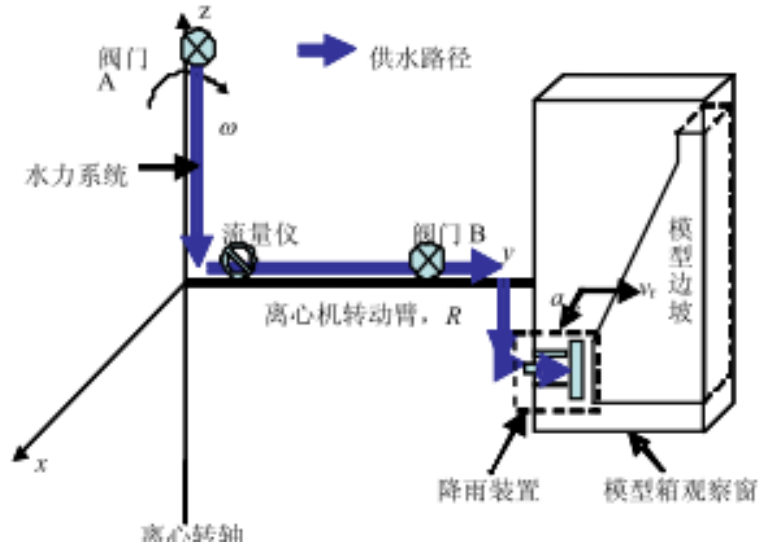


圖 2-9 降雨類比離心模型試驗中之降雨系統示意圖（張敏，2007）

Ling, H. I (2009) 以離心模型試驗模擬邊坡穩定性之研究中提及降雨強度尺度原型和模型的比值為 1，降雨歷時模型和原型的比值為 $1/N$ ，模擬重力場 $60g$ ，坡度分別為 60 度、75 度、90 度，試驗配置如圖 2-10 所示。實驗結果顯示，不飽和土體邊坡受到降雨時，土壤基質吸力降低使邊坡之凝聚力降低，導致邊坡穩定性降低。

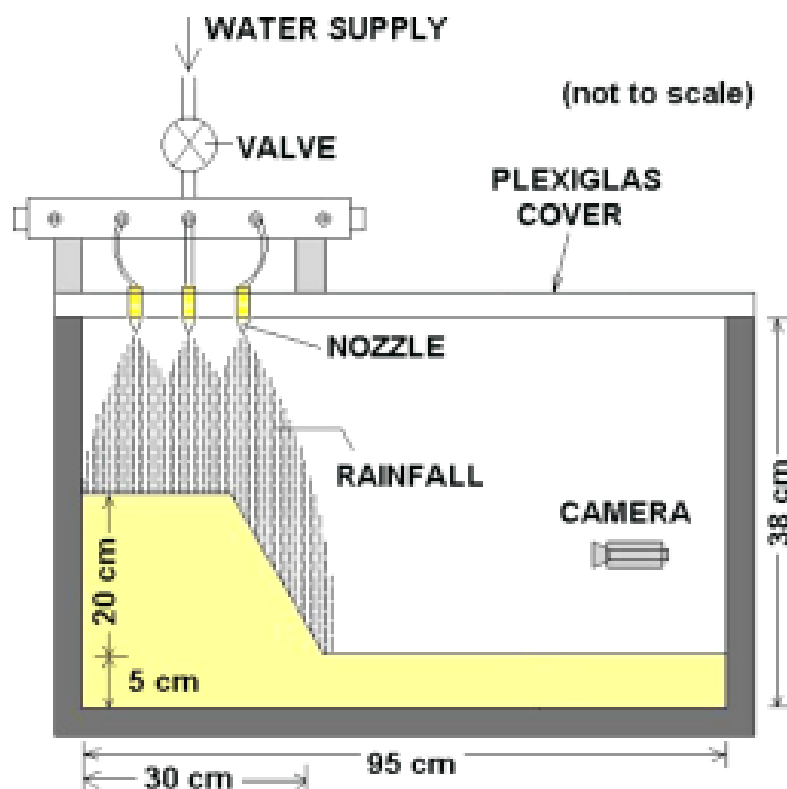


圖 2-10 離心邊坡模型 (Ling, H. I., 2009)

Askarinejad, A.等人（2012）以靜態土壤液化(Static liquefaction)的機制分析邊坡因受到降雨而產生滑動破壞而提出離心模型降雨之縮尺比表格，如表 2-2 所示。但根據模型試驗，模型降雨強度會比原型降雨強度大 N 倍並不符合實際情形。該表格之縮尺律依據土壤滲透行為制訂，降雨強度及降雨歷時之因次雖與滲流速率及滲流時間一致，但降雨強度與雨滴顆粒大小、落下速率、降雨動能有關，故不可單用因次來決定其縮尺比率。

表 2-2 離心模型試驗降雨縮尺表

(Askarinejad, A., Beck, A. and Springman, S.M., 2012)

Parameter	Dimension	Model	Prototype
Length (macroscopic)	L	1	N
Seepage velocity (soil permeability)	L/T	1	N^{-1}
Seepage time (macroscopic)	T	1	N^2
Total rain	L	1	N
Rainfall duration	T	1	N^2
Rainfall intensity	L/T	1	N^{-1}
Seepage time (microscopic)	T	1	N
Hydraulic gradient (macroscopic)	L/L	1	N^{-1}
Hydraulic gradient (microscopic)	L/L	1	N^{-1}

陳明景（2017）利用離心模型試驗探討降雨對邊坡穩定之影響，試體配置如圖 2-11 所示，提出模型和原型的降雨強度需一致，由降雨動能之觀點來看可得：

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{\rho CA}}$$

$$\text{將上式帶入 } E = \frac{1}{2}mv^2$$

可得

$$E = \frac{1}{2}\rho_w\left(\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\right)v^2$$

v 為雨滴終端速度、 d 為雨滴直徑、 m 為雨滴質量、 c 為常數 0.5、 ρ_w 為水之密度、 ρ 為空氣密度、 A 為雨滴截面積

由推導公式得知，模型與降雨的雨滴終端速度、降雨截面積、雨滴直徑、雨滴重量相同，故降雨動能亦相同，降雨動能相同則模型和原型之降雨強度也相同。而本篇研究主要探討植生工法對邊坡侵蝕及穩定性之影響，並無探討入滲時間速率的情況，故採用原型降雨強度跟模型降雨強度相同的離心模型試驗縮尺比。

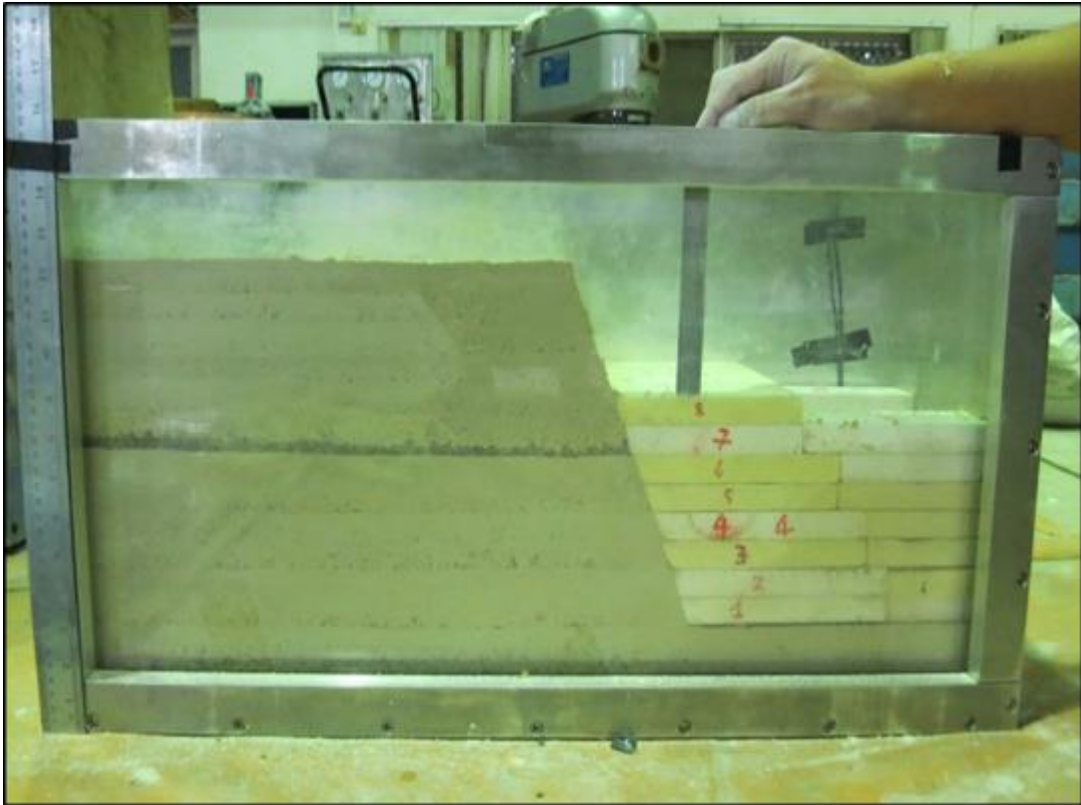


圖 2-11 模型製作（陳明景，2017）

表 2-3 不同研究中離心模型降雨比尺之差異

作者	研究內容	降雨強度比尺 (模型/原型)	降雨歷時比尺 (模型/原型)
張敏 (2007)	邊坡離心模型之 降雨模擬	N	$1/N^2$
Hoe I. Ling (2009)	離心模型試驗模 擬邊坡之穩定性	1	$1/N$
Rui Wang (2010)	離心模型試驗模 擬降雨條件下邊 坡中軟弱蒙脫土 夾層之行為	N	$1/N^2$
卓越人 (2012)	離心機模擬水文 因子	N	$1/N^2$
田海 (2015)	以離心試驗模型 研究降雨條件下 鬆散堆積邊坡之 穩定性	N	$1/N^2$
陳明景 (2017)	含礫石層之砂土 邊坡於不同條件 下之行為	1	$1/N$

第七節 離心模型邊坡加勁試驗

Askarinejad, A. and Springman, S.M. (2015) 以離心模型試驗模擬降雨條件下之植生對邊坡穩定性之影響，其中提及降雨強度縮尺其模型和原型之比值為 N，降雨歷時模型和原型之比值為 $1/N^2$ ，模擬重力場 50 g，試體配置如圖 2-12 所示。植生邊坡之降雨引致變形位移較

無植生邊坡小，然而當植生邊坡破壞時，因根系抓住土壤而導致有更大的土壤體積滑落。



圖 2-12 燕麥於離心模型試驗中之生長情形 (Askarinejad, A. and Springman, S.M., 2015)

Kreng (2015) 於土壤根加勁離心模型試驗研究中，利用魚線纖維和聚酯纖維模擬根系於土壤中之情形，並以滲流和降雨兩個條件進行比較，模擬重力場 50 g，坡度 30 度，試體配置如圖 2-13 所示。前置作業採二進制影像分析法求得香根草土樣之根面積比，依據根面積比配置人造纖維於土壤中之含量，以模擬土壤中植物根系之力學性質。前置試驗結果顯示其力學性質與含香根草之力學性質相似，故可利用人造纖維模擬土壤中之植物根系。試驗結果顯示，根系能有效減緩降雨時地下水位之上升速率，且具有增加土壤剪力強度之效果。

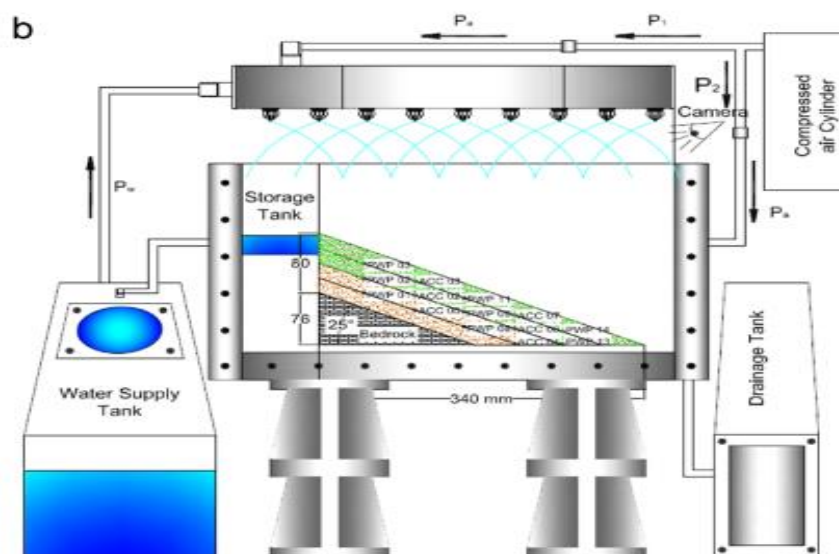


圖 2-13 降雨試驗配置 (Kreng, 2015)

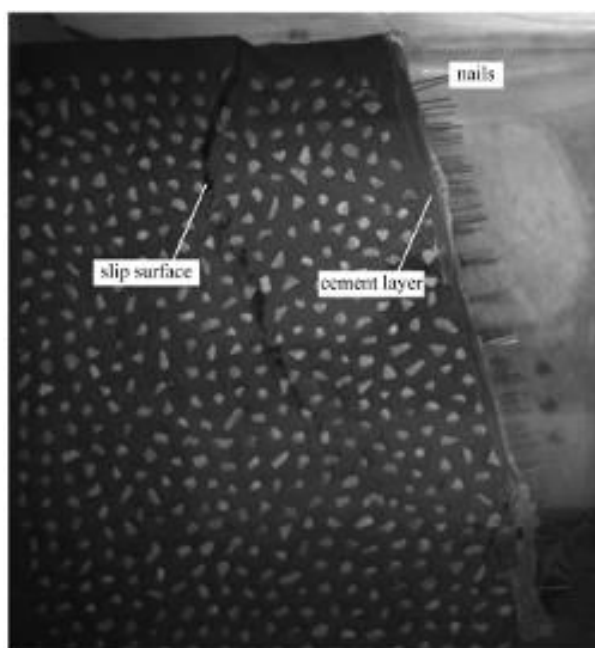


圖 2-14 土釘加勁模型邊坡之破壞情形 (Wang, 2014)

Wang (2014) 之離心模型試驗模擬土釘加勁於邊坡且坡頂為載重狀態之研究，模擬重力場 50g，試體配置如圖 2-14 所示。研究結

果顯示，土釘能有效地提高邊坡穩定性，並防止邊坡上產生張力裂縫。於邊坡加載過程中，土釘能減少邊坡滑動，減緩局部破壞的發生。土釘的主要破壞來自彎曲變形和拉出破壞，然而離心模型試驗只使用單一黏土，土層性質單純，在現地可能受孔隙水壓影響、飽和邊坡可能在破壞面附近等更複雜的因素，故現地使用土釘設計時，需針對各種條件進行考量。

本報告中除非有特別註明，否則所有物理量、單位皆是以原型尺度和比例呈現。

表 2-4 不同研究中離心模型試驗條件

作者	研究題目	工法	材料	重力場	坡度	設定條件	降雨強度 (原型尺度)
Askarinejad (2015)	在降雨條件下以離心模型試驗模擬植物行為	植生	燕麥草	50 倍	38 度	降雨	1.27 mm/hr
Kreng (2015)	根加勁離心模型試驗研究	植生	人造纖維模擬	50 倍	30 度	降雨和滲流	20 mm/hr
Liping Wang (2014)	離心模型試驗模擬土釘加勁於邊坡並在坡頂有載重狀態下之情形	土釘	鐵釘	50 倍	78 和 70 度	坡頂加載	無

第三章 試驗方法和實驗配置

第一節 試驗方法

本研究使用小麥草（學名:Wheatgrass）模擬植生工法於邊坡之運用，前置作業為探討試驗用石英砂之基本力學性質，並測定小麥草之基本生長特性。實驗量測含小麥草之土壤其剪力強度及滲透係數，以檢驗植生小麥草對土壤是否具影響力。而離心模型試驗前後會掃描試體坡面以比較其位移變化、測定含水量，並於試驗中以攝影機監測其破壞情形，最後進行資料分析及成果報告。本研究中係以縮尺模型探討單一根系對於土壤加勁之行為，期望透過模型試驗驗證植物根系對於土壤加勁的效果，而非模擬現地使用小麥草加勁之行為。

第二節 試驗砂之基本力學性質

一般在進行實驗室試驗時為了試體模型準備的可行性、降低試驗與分析之複雜性和研究結果之可比較性並標準化試驗結果，通常都選用均質且粒徑單一的石英砂或重模試體進行試驗。

本實驗採用 306 號石英砂作為土樣，存放於密封橡膠桶中以保持土樣乾燥，並進行比重、篩分析、直剪試驗及定水頭試驗，其微觀影像如圖 3-1 所示。



圖 3-1 石英砂顆粒

由篩分析結果顯示該石英砂根據統一土壤分類法可分類為不良級配砂(SP)，粒徑分布曲線如圖 3-2 所示，其比重為 2.65，平均粒徑 D_{50} 為 0.19 mm。石英砂之基本物理性質彙整於表 3-1 石英砂之基本物理性質，直剪試驗結果如圖 3-3 所示。

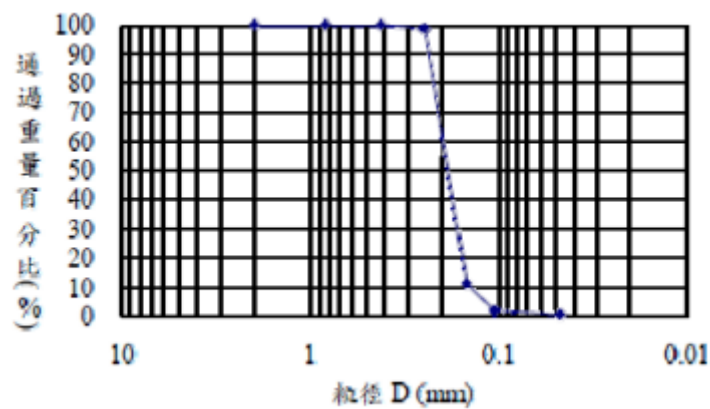


圖 3-2 石英砂粒徑分布曲線

表 3-1 石英砂之基本物理性質

物理性質	石英細砂
比重 G_s	2.65

D ₅₀ (mm)	0.193
D ₁₀ (mm)	0.147
內摩擦角 (Dr = 50 %)	34.5°
最大乾密度 $\rho_{d_{\max}}$ (g/cm ³)	1.63
最小乾密度 $\rho_{d_{\min}}$ (g/cm ³)	1.38
統一土壤分類	SP
滲透係數 (cm/s)	9.31×10^{-3}

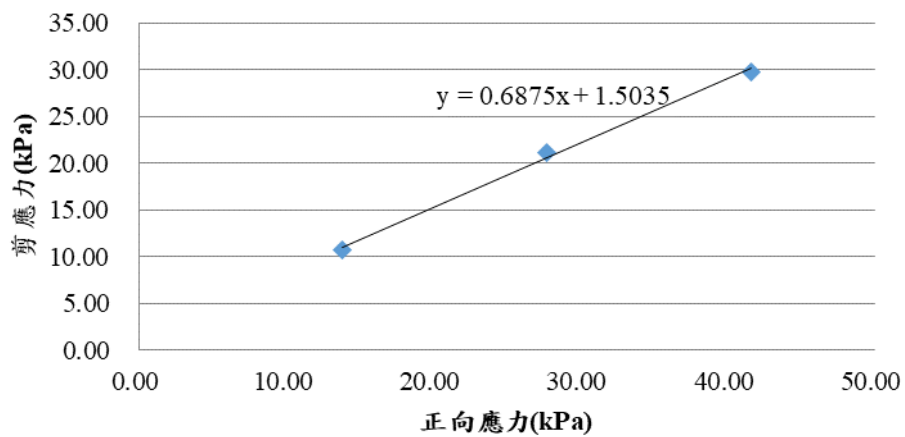


圖 3-3 石英砂之抗剪強度曲線

第三節 小麥草之基本性質

本研究使用之小麥草為鵝觀草屬 (Agropyron)，其根非常發達，可至地下 20 公分，且生長極為迅速，稍有一絲光源即可茂盛生長。小麥草具耐旱性，即使土壤貧瘠，亦可正常生長。由於根系發達且葉片生長迅速，且根能有效地抓住土壤，葉片能有效地緩衝降雨動能，故適用於離心模型試驗邊坡植生工法之模擬。

本研究施行一系列直接剪力試驗及定水頭試驗，以檢測小麥草對邊坡穩定及抗沖蝕之基本能力。試驗土樣分別為 $Dr = 70\%$ 及 $Dr = 50\%$ 之石英砂。

一、小麥草之培育

將小麥草種子泡水 4 小時後取出並遮蓋 12 小時（期間種子不可見光過久）以達到種子軟化和催芽之目的，如圖 3-4 所示。



圖 3-4 小麥草育苗完成

二、試體之製備及栽種

將試驗砂填入與直剪試體、定水頭試體相同體積之透明壓克力模內，底部放置濾紙和透水石，每 1.3 cm^2 面積種植一顆小麥草種子，

周邊 14 顆種子緊貼透明壓克力模壁上以便觀察其生長情形。因小麥草根無法短時間生長至模型底部，故定水頭試體使用分層計算其滲透係數。直剪與定水頭試體之基本性質如表 3-2、表 3-3 所示。

試體之栽種配置完成後，以大型透明透氣之壓克力箱罩住，並於箱壁上安裝溫濕度計以便量測其環境變化。直剪試體之栽種時間為 4 天、定水頭試體為 7 天，此乃因直剪試體較小，小麥草根已穿越破壞面可進行直剪試驗。試驗環境如圖 3-5 所示。

表 3-2 直剪試體之基本性質

	Dr = 50 %	Dr = 70 %
直徑 (cm)	6	6
面積 (cm ²)	28.27	28.27
高度 (cm)	3.4	3.4
體積 (cm ³)	96.13	96.13
試體質量 (g)	143.7	148.6
最大乾密度 (g/cm ³)	1.63	1.63
最小乾密度 (g/cm ³)	1.38	1.38
相對密度 Dr (%)	50	70

表 3-3 定水頭試體之基本性質

	Dr = 50 %	Dr = 70 %
直徑 D (cm)	10.14	10.14
高度 L (cm)	11.65	11.65
面積 A (cm ²)	80.67	80.67
體積 V (cm ³)	940.10	940.10
空模重 (kg)	4.850	4.850
模+乾砂重 (kg)	6.303	6.255
乾砂重 (kg)	1.453	1.405
孔隙比	0.773	0.714



圖 3-5 試體生長環境

三、直剪試驗結果

試體栽種四天後之情形如圖 3-6 所示，將其放入直剪盒內如圖 3-7 所示、直剪試驗儀如圖 3-8 所示，並根據 ASTM D-3080-04 規範，進行直接剪力試驗，試體之根面積比約為 0.01~0.014，試驗結果彙整於表 3-4 與表 3-5。試驗結果顯示，小麥草使土壤的內摩擦角平均增加 6~7 度，凝聚力增加 2 kPa 左右。而凝聚力的增加與試體含水量有關，因種植小麥草時必須適當的澆水，砂土含水量上升會影響砂中基質吸力，因此使砂土凝聚力上升。在試驗後檢視試體發現大部分根系都未剪斷，而是隨著土壤試體剪切面而抽出，如圖 3-9 所示。



圖 3-6 栽種四天後之直剪試體



圖 3-7 直剪盒



圖 3-8 直剪試驗儀



圖 3-9 根沿破壞面拉出並未剪斷

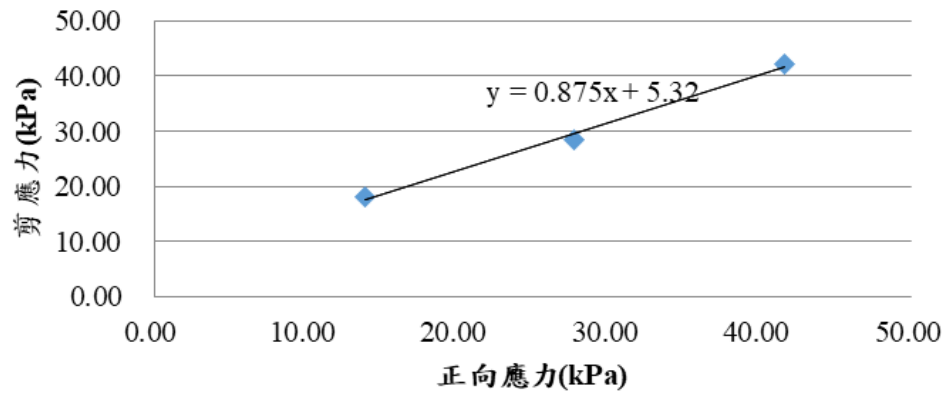


圖 3-10 試體土壤含小麥草根之抗剪強度 ($D_r = 70\%$)

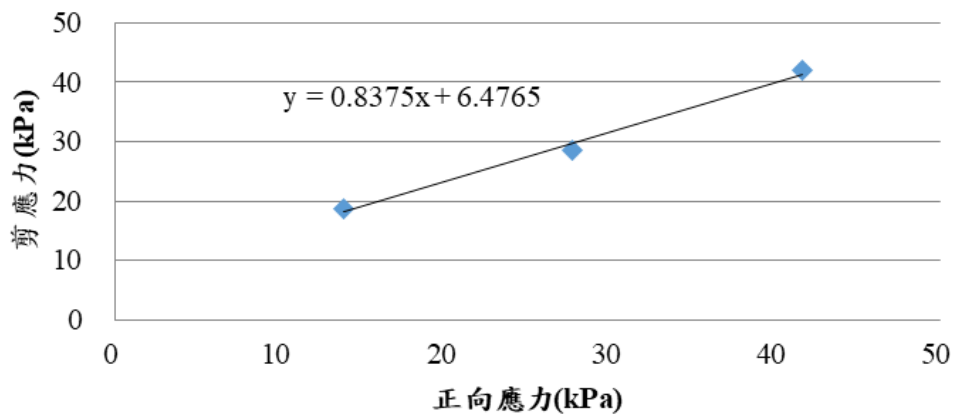


圖 3-11 試體土壤含小麥草根之抗剪強度 ($D_r = 50\%$)

表 3-4 $Dr = 50\%$ 直剪試驗與對照組之比較

	小麥草(有根)	對照組(無根)
內摩擦角 (度)	39.95	35.94
凝聚力 (kPa)	6.48	4.74

表 3-5 $Dr = 70\%$ 直剪試驗與對照組之比較

	小麥草(有根)	對照組(無根)
內摩擦角 (度)	41.19	35.94
凝聚力 (kPa)	6.1	4.74

四、定水頭試驗結果

試體種植小麥草七天後之情形如圖 3-12 所示，定水頭試體容器與試驗儀如圖 3-13 和圖 3-14 所示。因試體中小麥草的根並未長滿整個試體，故將試體分為兩種土層，一為含有小麥草根之土層，另一為未含有小麥草根之土層，並藉由下列公式求得含有小麥草根土層之滲透係數，其中 k_z 為試體滲透係數， z_1, z_2 為不同土層之厚度， k_1, k_2 為不同土層之滲透係數。

$$k_z = \left[\frac{z_1 + z_2}{z_1/k_1 + z_2/k_2} \right]$$

實驗結果顯示，種植小麥草試體之滲透係數會略為下降，此乃因小麥草根遇水會使體積微量膨脹而降低土壤孔隙體積所致。然而，現地之根系與土壤間有空隙，因此植物根系會增加地表水入滲淺層地表之速率，但若根系長期浸泡於飽和土壤中，則有些品種植物之根系會膨脹而降低地表水入滲之速率。而定水頭試驗顯示，植物根系對土壤滲透係數並沒有顯著的改變，因此有無植生對壓密或土壤內滲流行為並無影響。



圖 3-12 定水頭試體種植小麥草七天後之情形



圖 3-13 定水頭試驗容器



圖 3-14 定水頭試驗儀

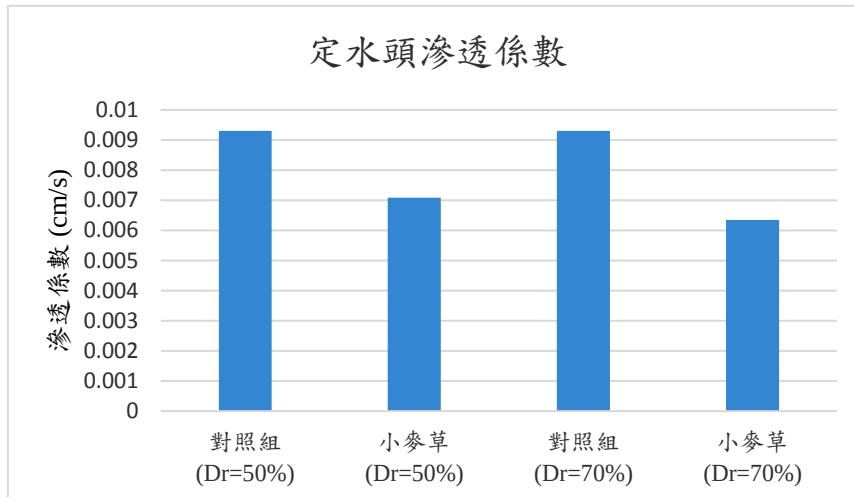


圖 3-15 定水頭滲透係數

第四節 離心模型試驗設備

一、鋁合金半透明試驗箱

本研究使用之離心模型試驗箱尺寸為 736 mm × 385 mm × 200 mm（長 × 寬 × 高），如圖 3-16 所示，為鋁合金材質，箱壁厚度 15 mm，一側為透明壓克力面板可觀測邊坡在試驗時之破壞行為。試體製備過程中，將透明塑膠膜黏貼於試驗箱壁上，減少容器和土壤間之摩擦力。

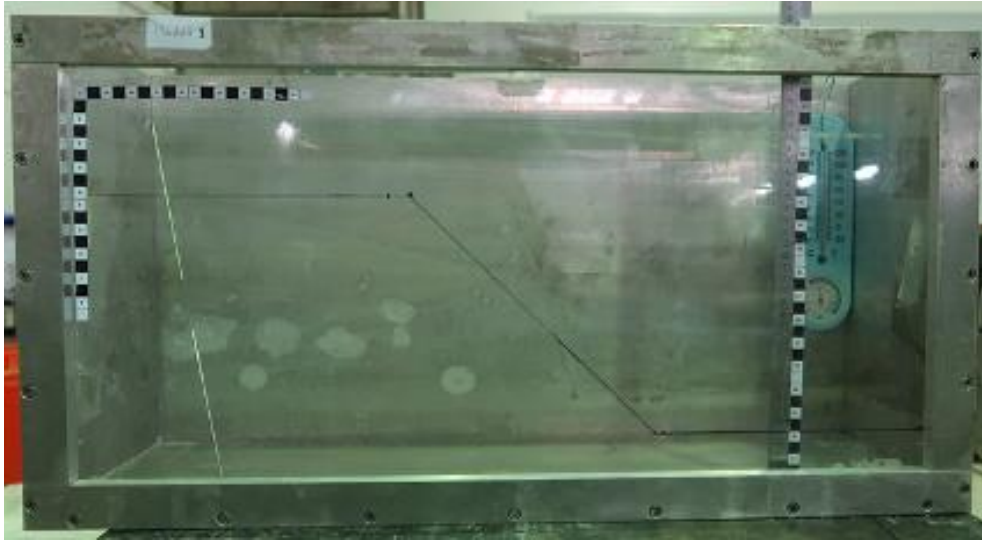


圖 3-16 鋁合金半透明試驗箱

二、降雨系統

本研究中降雨系統是利用灑水噴頭裝置來模擬降雨，噴頭孔徑為 0.3 mm、流量為 48~110 cc/min，如圖 3-17 所示。降雨強度係藉由噴頭數量和氣壓變化控制，圖 3-18 顯示降雨強度與氣壓之關係。降雨系統如圖 3-19 所示安裝於壓克力透明蓋板下方，降雨系統與外部水箱連接，水箱藉由氣壓系統驅，使水由噴頭噴出進行降雨模擬，如圖 3-20 所示。

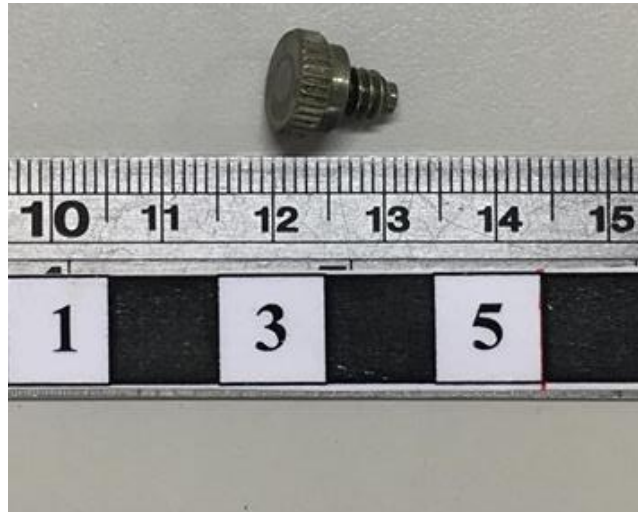


圖 3-17 灑水噴頭

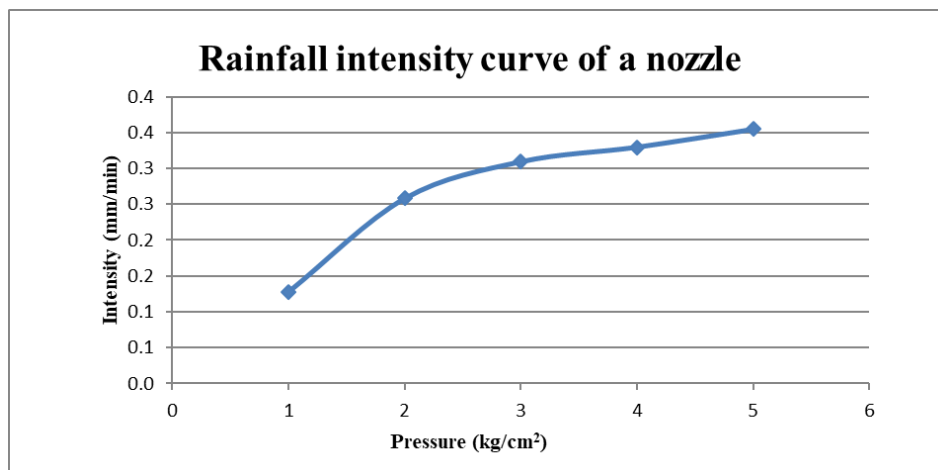


圖 3-18 降雨強度與氣壓之關係圖



圖 3-19 降雨系統

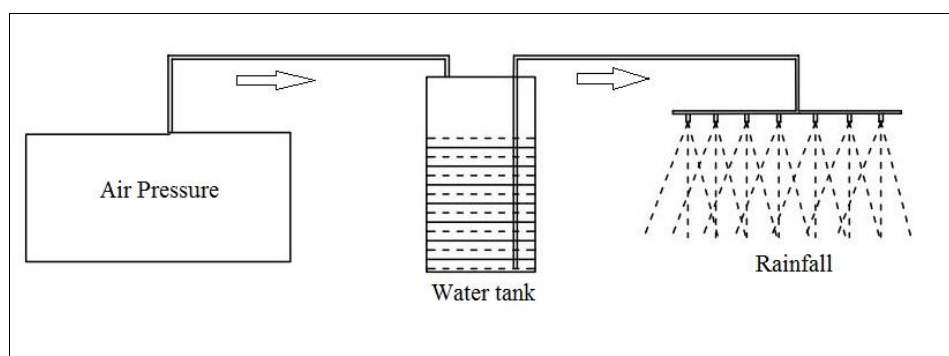


圖 3-20 降雨系統示意圖

三、加速度計

本研究使用型號 PCB Piezotronics-353B17 之加速度計，如圖 3-21 所示，量測範圍為 1~10000 Hz，對於重力場為 80 g 之離心模型試驗相當於 0.0125~125 Hz 的量測範圍。



圖 3-21 加速度計

四、孔隙水壓力計

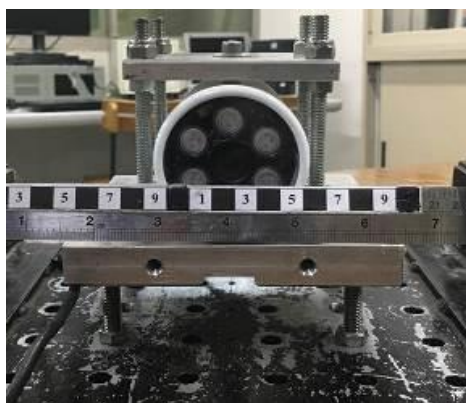
本研究使用 Druck-PDCR81 型之孔隙水壓計，如圖 3-22 為電阻式孔隙水壓計，較小的體積對試體的擾動程度相對較低。水壓計經電話線頭轉接後插入接線盒放大器中，以 5 伏特電壓供電並將訊號以 50 倍放大，放大器輸出訊號至 NI SCXI 1300 及 1102C 進行多通道之電壓訊號量測。



圖 3-22 孔隙水壓力計

五、數位攝相機

試驗過程中利用數位攝相機觀測實驗中的現象，並在試驗後以影像分析將觀測影像數據化，例如利用數位攝相機可得知邊坡崩塌體積、堆積體積、崩塌後的坡角、有效崩塌範圍和有效堆積範圍等。數位攝相機安裝於坡面上方、坡頂上方、坡面前方、試驗箱側視和試驗箱斜側視等位置，圖 3-23 為部分用於離心模型試驗的數位攝相機。



(a) 側視攝影機



(b) Wi-fi 上視攝影機

圖 3-23 數位攝相機

六、3D 列印機

本研究亦以 3D 印表機(如圖 3-24 所示)列印出小麥草根系模型，此法可期望減少種植小麥草根系之時間成本提高實驗效率。3D 列印技術為融絲積層製造，列印解析度為 0.02~0.4 mm，可支援多種材質。模擬小麥草根系使用之材質為聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA)，主要原料來自於玉米、甘薯等澱粉或糖份並合成製作，為無毒性環保材質。本研究對該材質加勁後之土壤進行定水頭試驗和直剪試驗以評估其對邊坡土壤穩定之效能。試驗結果顯示，內摩擦角及凝聚力並無顯著提升，如圖 3-25 所示，且含有 3D 列印材料之試體其滲透係數反而有提高的跡象，如圖 3-26 所示，故利用 3D 列印材料模擬小麥草根系之可行性有待評估。

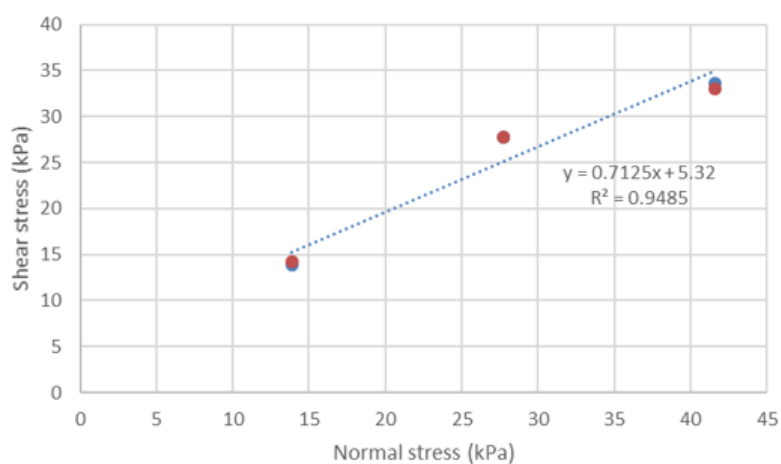


(a) 線材



(b) 3D 印表機

圖 3-24 3D 列印材料及印表機



	Wheatgrass	Control	3D printer root
Friction angle	41.9°	34.5°	35.5°
cohesion (kPa)	6.10	4.74	5.32

圖 3-25 各組試驗剪力強度之比較

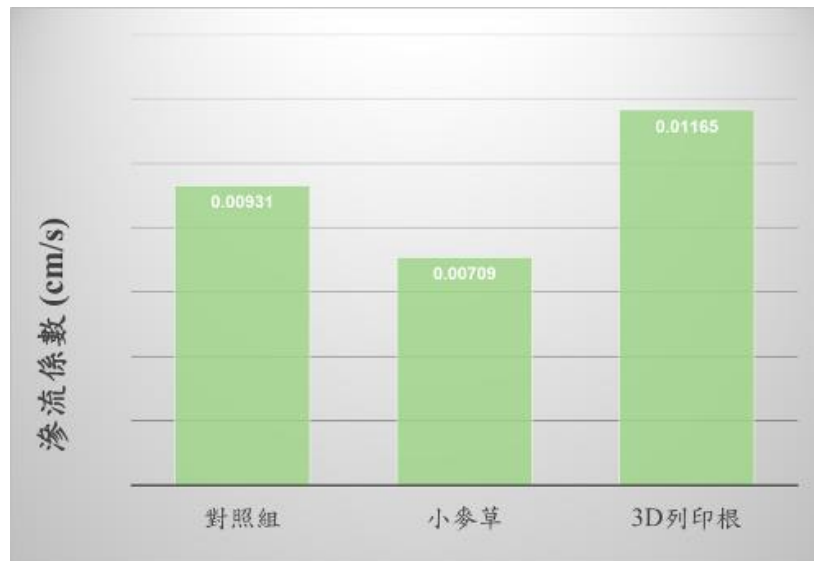


圖 3-26 各組試驗滲透係數之比較

第五節 邊坡滑動之定量定義

本研究為定量並正規化描述側向及坡面之破壞程度，故定義下列兩公式定性定量描述離心模型試驗試體結果。由公式(3-1)定義滑動體積比，為砂土的實際崩塌體積（綠色面積範圍）與理論楔形崩塌面積（紅色三角形面積範圍）之比值。

$$\text{Failure wedge ratio} = \frac{\text{Failure volume}}{\text{General failure volume}} \quad (3-1)$$

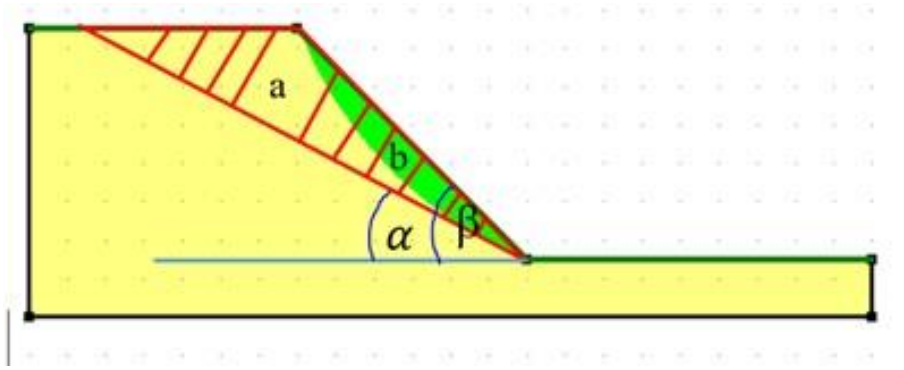


圖 3-27 剖面楔形崩塌圖

本研究另一方面著重於邊坡淺層的滑動行為，故定義滑動面積比為實際滑動面積（紅色需現範圍面積）與坡面（模型坡面矩形面積）之百分比，如公式(3-2)，以定量描述坡面滑動範圍，如圖 3-28 所示。

$$\text{Slide area ratio} = \frac{\text{Failure area}}{\text{Slope area}} \times 100\% \quad (3-2)$$

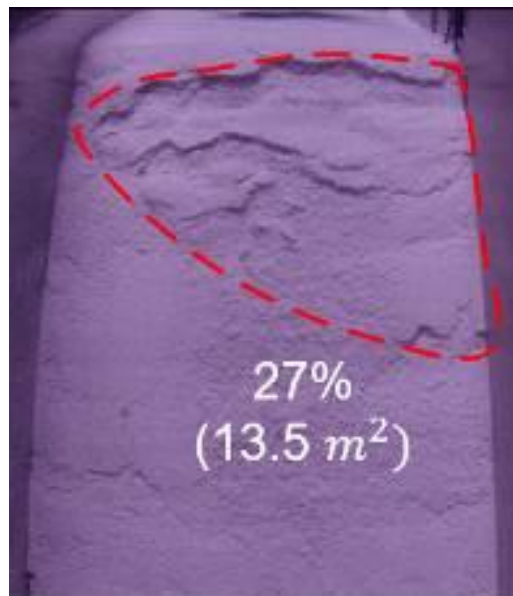


圖 3-28 坡面崩塌程度示意圖

第四章 試驗結果

第一節 試驗步驟

一、植生材料:小麥草之培養

本報告之試驗選用小麥草模擬植生工法施作在砂土邊坡探討根系對邊坡之加勁效果。小麥草為鵝觀草屬（*Agropyron*），生長迅速，只需要些許光源便能生長，故在試驗中選用小麥草施行植生工法。將小麥草種子泡水 4 小時後取出並遮蓋 12 小時，期間種子不可見光過久以達種子軟化和催芽之目的，小麥草培養如圖 4-1 所示。

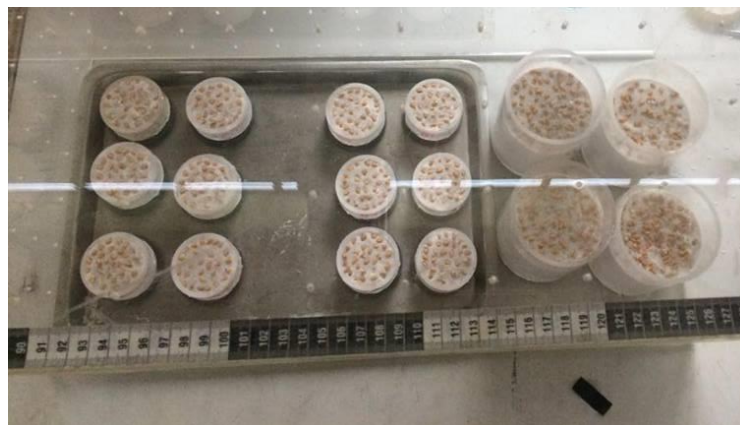


圖 4-1 培養小麥草

二、土壤力學試驗：直接剪力試驗和定水頭試驗

本研究以直接剪力試驗和定水頭試驗，檢測小麥草對邊坡之穩定性及抗沖蝕能力，試驗設備如圖 3-5、圖 3-6、圖 3-7、圖 3-8 所示。

本報告之試驗土樣為相對密度 50 %的石英砂，將石英砂填入與直剪

試體、定水頭試體相同體積之透明壓克力模內，模具底部設置濾紙和透水石，並以每 1.3 cm^2 範圍種植一顆小麥草種子，模具邊界以 14 顆種子緊貼透明壓克力模壁上以便觀察其生長情形。因小麥草根無法在短時間內生長至模具底部，故定水頭試體使用分層計算其滲透係數。

三、邊坡砂土模型：試體之製備

將透明防水紙貼於試驗箱觀測視窗內壁，以減少試體與試驗箱間之摩擦力並保護觀測視窗。將石英砂加入純水並以夯錘夯實成含水量 10%、坡角 45 度、基底土層厚度 5 公分、坡高 20 公分、最大高度 25 公分之模型試體，如圖 4-2 所示。夯實過程中以保麗龍塊支撐邊坡的傾斜面且每間隔兩公分貫入地中位移計。夯實試體完成後，根據公共工程委員會施工綱要規範第 02920 章中植草間距之尺度與模型試驗考量，以 20 mm 之間距植入小麥草種子，並進行灑水培養，待根系垂直深入地表下 30 mm 後（坡高之 15%），即完成邊坡試體之準備。

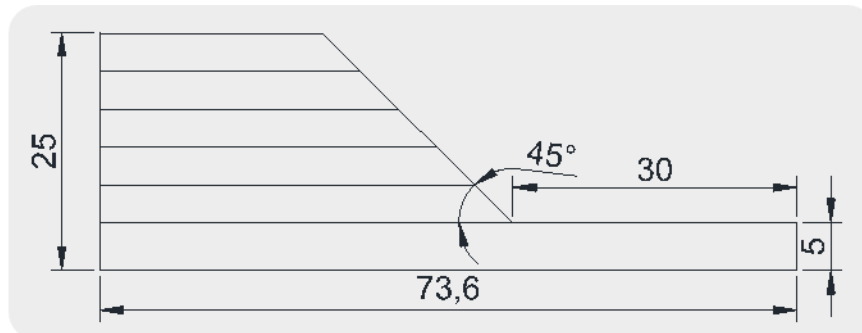


圖 4-2 邊坡配置圖（單位：公分）

四、試體感測器安裝:數位攝相機、加速度計及光纖水壓力計

試驗過程中利用數位攝相機觀測試驗進行中的行為並可在試驗後進行影像分析將觀測影像數據化，如利用數位攝相機可量化和計算邊坡崩塌體積、堆積體積、崩塌後的坡角、有效崩塌範圍和有效堆積範圍等。本研究使用之加速度計量測頻率範圍為 1~10000 Hz，對重力場為 80 g 之離心模型試驗相當於 0.0125~125 Hz 的量測範圍，可有效量測試體受振之動態行為。而光纖水壓計可量測的範圍為 -90~600 kPa，除土壤的超額孔隙水壓外亦可量測不飽和土體中之基質吸力。

五、離心模型試驗

圖 4-3 為製作完成之離心模型試體，試驗開始時先將試體安裝於離心機掛台上，啟動離心機後逐步增加離心機旋轉速度以提高施加於模型試體上之重力場，直至試體破壞為止。地震力及降雨等自然營力

對離心模型試體之影響則是在 25 倍地球重力場下進行試驗。地震力對邊坡的影響將以輸入等振幅正弦波之振動事件進行模擬，降雨則使用灑水噴頭進行模擬，探討不同自然營力下植生邊坡之破壞情形，並與無植生邊坡組比較。



圖 4-3 植生邊坡模型圖

第二節 試驗組數

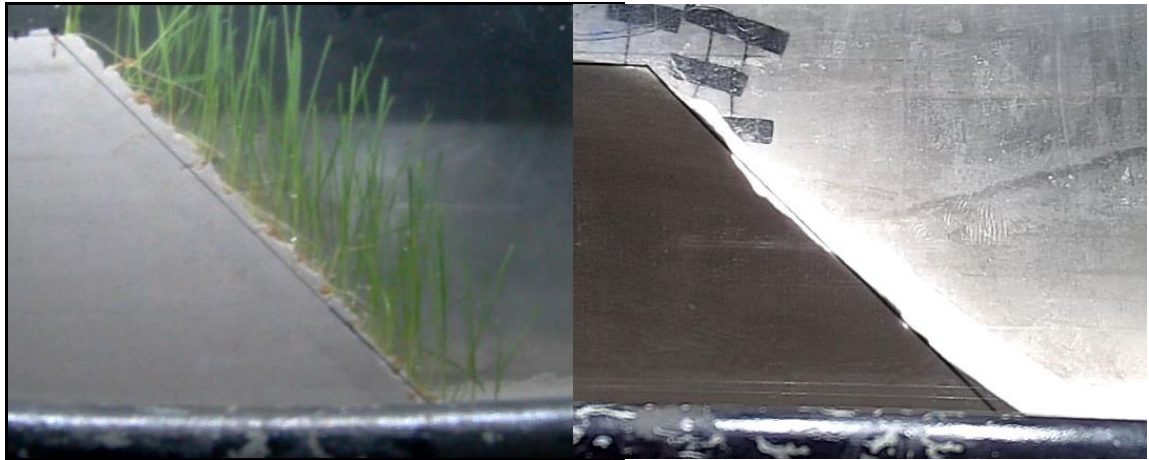
本研究共進行七組實驗，試驗代號 G 表示重力、E 表示基盤輸入等振幅加速度歷時、V 表示坡面植生、R 表示降雨降雨事件。前導試驗 GE_80g 先以該試驗瞭解無植生邊坡重力場由 1 g 至 80 g 過程中的淺層滑動行為，再由基盤輸入等振幅振動歷時；VGE_80g、VGE_65g 探討有植生邊坡在 80g 及 65g 人造重力場中，遭受等振幅基盤加速度之破壞情況；E_25g、VE_25g 則探討有無植生邊坡在 25g 重力場環境中，遭受等振幅基盤加速度之破壞情況；R_25g、VR_25g 則探討有無植生邊坡在 25g 重力場環境中，受到 197 mm/h 降雨事件之侵蝕情況。所有試驗之條件彙整於表 4-1 中。

表 4-2 試驗組數及條件

試驗編號	試體高度 (mm)	單位重 (kN/m ³)	含水量 (%)	邊坡 植生	人造重力場加 速度 (g)	自然營力
GE_80g	200	14.67	10	無	80	重力 地震力
VGE_80g	200	14.67	10	有	80	重力 地震力
VGE_65g	200	14.67	10	有	65	重力 地震力
E_25g	200	14.67	10	無	25	地震力
VE_25g	200	14.67	10	有	25	地震力
R_25g	200	14.67	10	無	25	降雨
VR_25g	200	14.67	10	有	25	降雨

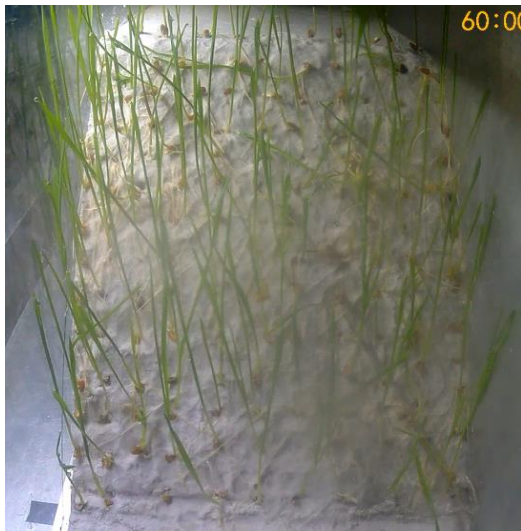
第三節 重力引致破壞

本節試驗利用逐步增加重力的方式使邊坡土體自重增加，進而比較有無小麥草加勁邊坡之破壞模式，試驗分別為 VGE_80g 及 GE_80g。因重力引致之破壞大部分屬於邊坡表面的土石滑動，故本研究先提升重力場至 80 g，再輸入基盤振動為 0.2 g 加速度之等振幅



(a) VGE_80g 模型試體側視圖

(b) GE_80g 模型試體側視圖



(c) VGE_80g 模型試體上視圖



(d) GE_80g 模型試體上視圖

圖 4-4 VGE_80g 及 GE_80g 之側視圖和上視圖

正弦波觀察其遭受地震力的破壞行為，進而觀察有無植生加勁之差異，試驗模型如圖 4-4 所示。

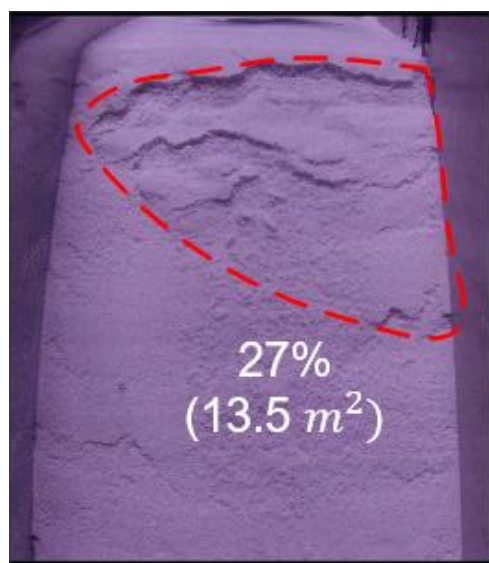
一、試驗GE_80g

編號 GE_80g 試驗為無植生加勁之邊坡試體，此試驗於重力場 30 g 時開始發生表面滑動，表面滑動破壞隨著重力場增加，滑動面積持續擴大。當重力場達到 80 g 時，整體坡面幾乎都有表面滑動破壞發生，但並無深層的剪切破壞發生，經重力引致破壞後的坡腳角度為 40 度，如圖 4-5 所示。

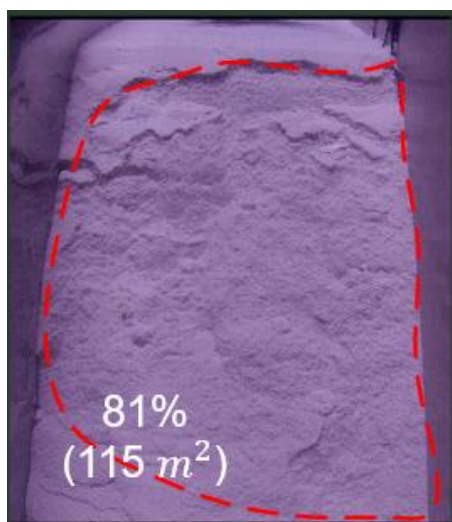
試驗 GE_80g 在重力場達到 80 g 後並呈穩定狀態時(即不再有破壞發生)輸入基盤加速度 0.2 g、15 個週期、總歷時 15 秒之等振幅正弦波為振動事件。受振後邊坡流失之土壤體積為 389.69 m³，邊坡坡度減緩為 29 度，且有較深層之剪切破壞行為發生，如圖 4-5、圖 4-6 所示。在重力場增加過程中與基盤輸入加速度情況下，邊坡坡度因坡面滑動而變緩，由 45 度變成 20 度，楔型破壞面積比依序由 0.406 變成 0.877，破壞程度之過程如圖 4-6 所示。離心模型試驗後對試體進行含水量試驗分析結果如圖 4-7 所示，坡頂位置因重力使雨水向下滲流，因此含水量較低。試驗後以雷射掃描試體表面結果如圖 4-8，試驗後試體之高程稍微較試驗前低，此因砂土顆粒受重力作用，土體相對密度些微增加所致。



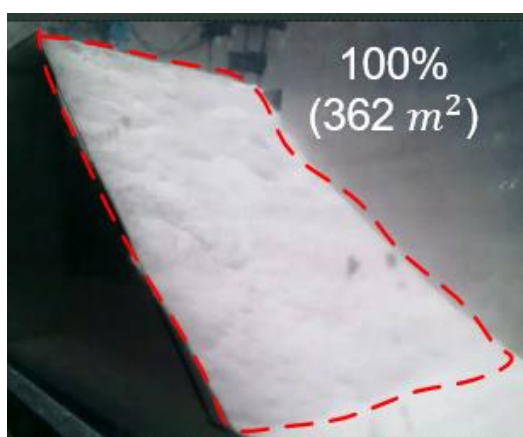
(a) 10 g



(b) 30 g



(c) 50 g



(d) 80 g

圖 4-5 試驗 GE_80g 試驗過程不同重力場下引致之坡面破壞情形



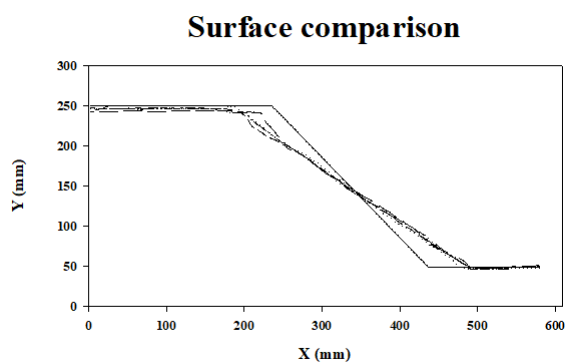
(a) 試驗前(1 g)



(b) 重力引致破壞(80 g)



(c) 地震力引致破壞(80 g)



(d) 試驗前後試體表面比較

圖 4-6 試驗 GE_80g 邊坡破壞側視圖

表 4-3 試驗 GE_80g 邊坡土壤流失與坡腳堆積

	最大堆積高度 (d/H)	最大垂直沉陷 (d/H)	坡腳堆積體積 (m ³)	土壤流失體積 (m ³)
GE_80g	0.18	0.20	301	390

表 4-4 試驗 GE_80g 於不同條件下之破壞程度

試驗條件	坡度 (degrees)	楔型破壞面積 比	滑動面積比率
重力引致破壞	40	0.406	於 30 g 為 27 % 於 50 g 為 81 % 於 80 g 為 100 %
地震力引致破壞	29	0.877	100 %

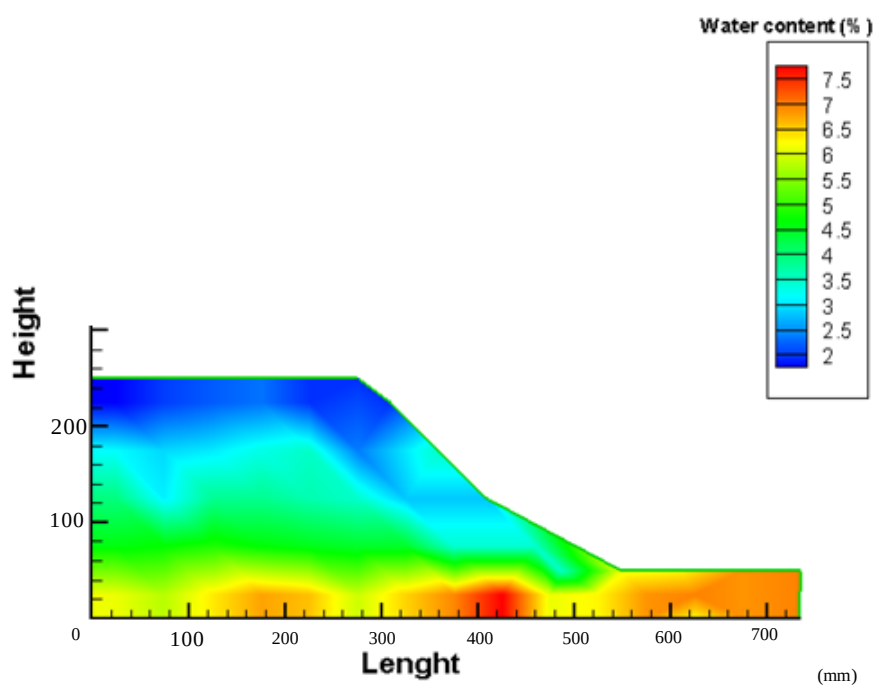
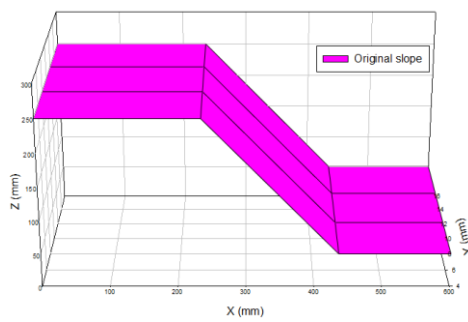
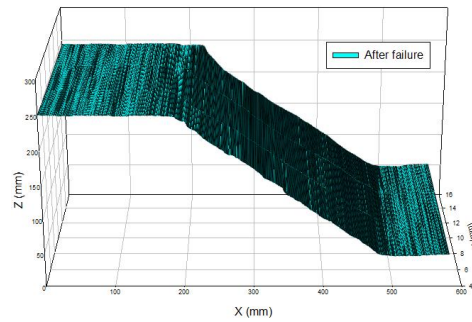


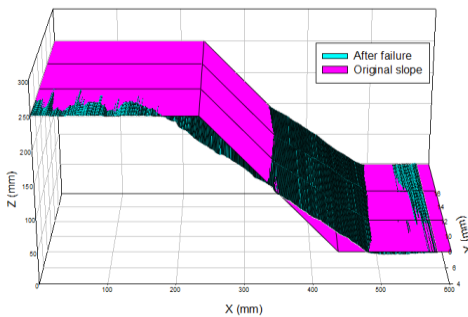
圖 4-7 試驗 GE_80g 含水量分布圖



(a) 試驗前

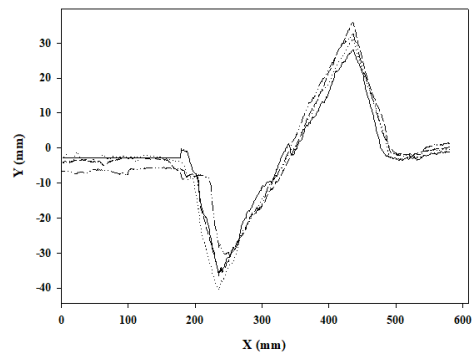


(b) 試驗後



(c) 試驗前後高程比較

The change of elevation



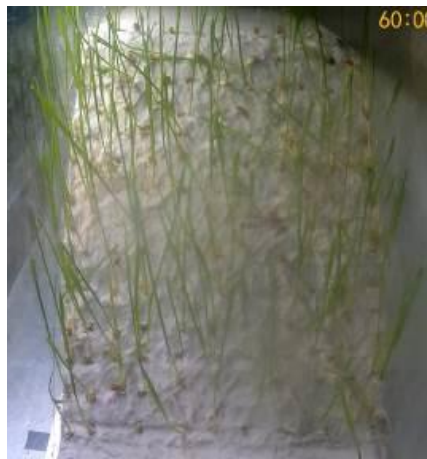
(d) 模型高程變化

圖 4-8 試驗 GE_80g 高程變化圖

二、試驗VGE_80g

試驗 VGE_80g 為植生加勁邊坡試體，此試驗於重力場 75 g 時發生坡面滑動，總滑動面積為 0.67 倍的坡面，尚未出現較深層的剪切破壞。增加重力場至 80 g 且邊坡達到平衡狀態時邊坡坡度為 43 度。但於 80 g 的重力場作用下，小麥草的莖斷面承受不住自重便彎曲伏地，如圖 4-9、圖 4-10 所示。試驗 VGE_80g 重力場達 80 g 穩定狀態

時（即不再有破壞發生）輸入基盤加速度 0.2 g、15 個週期、總歷時 15 秒之等振幅正弦波為振動事件。受振後邊坡土壤滑動與坡腳堆積情況如表 4-5 所示，邊坡土壤滑動體積為 270 m³。圖 3-24 所示，邊坡坡度減為 42 度，且並無較深層的剪切破壞，不同條件之破壞程度如表 4-6 所示。離心模型試驗後對試體進行含水量分析，結果顯示坡頂與土層中間位置因重力使雨水向下滲流，因此含水量較低，主要在坡指部分含水量最高，如圖 4-11 所示。試驗後檢視試體模型發現小麥草根系並無發生剪斷行為，根系皆為抽出破壞，因此判斷土壤與根的摩擦力大於土壤之間的摩擦力。圖 4-12 則為試驗 VGE_80g 試驗前後的高程變化圖。



(a) 0 g



(b) 30 g



(c) 50 g

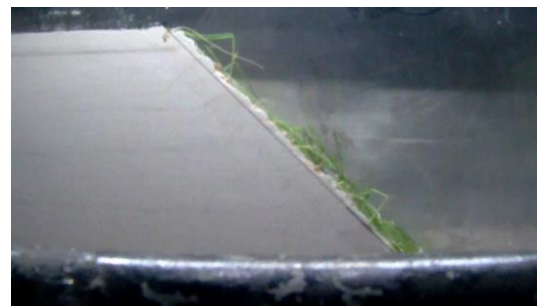


(d) 80 g

圖 4-9 試驗 VGE_80g 重力引致之坡面破壞情形



(a) 試驗前(1 g)

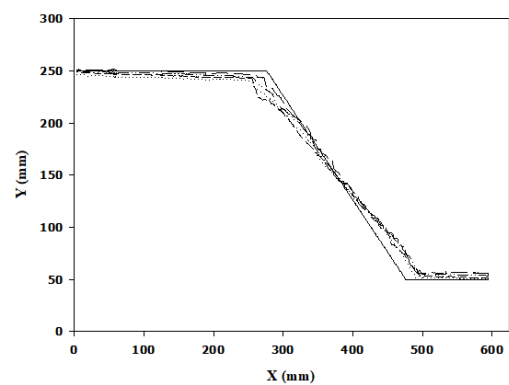


(b) 重力引致破壞(80 g)



(c) 地震力引致破壞(80 g)

Surface comparison



(d) 試驗前後試體表面高程比較

圖 4-10 試驗 VGE_80g 邊坡破壞側視圖

表 4-5 試驗 VGE_80g 邊坡土壤滑動與坡腳堆積

	最大堆積高度 (d/H)	最大垂直沉陷 (d/H)	坡腳堆積體積 (m ³)	土壤流失體積 (m ³)
VGE_80g	0.14	0.14	263	270

表 4-6 試驗 VGE_80g 於不同條件之破壞程度

試驗條件	坡度 (degrees)	楔型破壞面積比	滑動面積比率
重力引致破壞	43.3	-	於 80 g 時為 67 %
地震力引致破壞	42.4	0.468	100 %

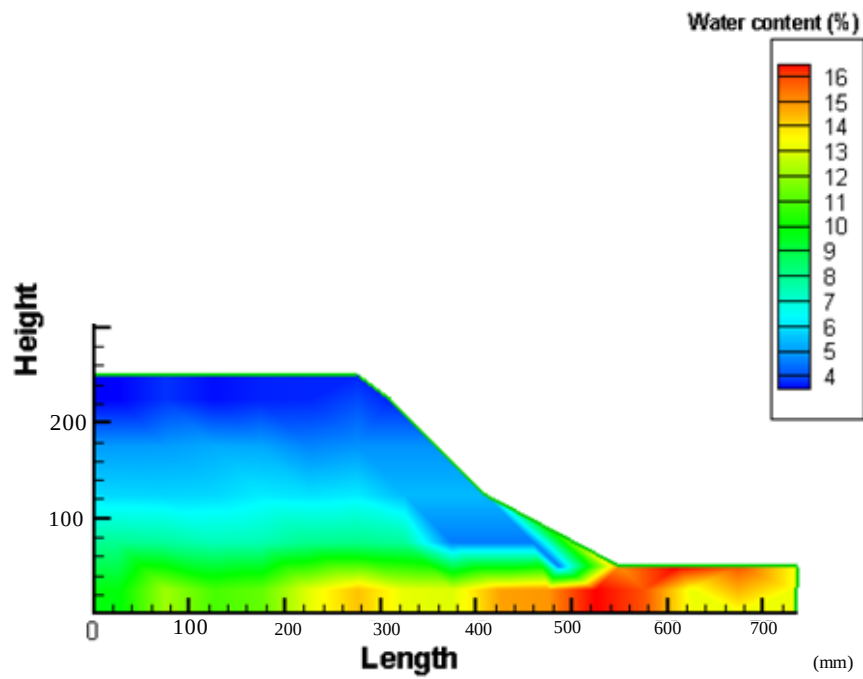
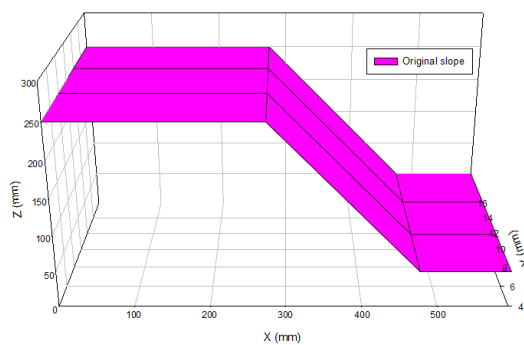
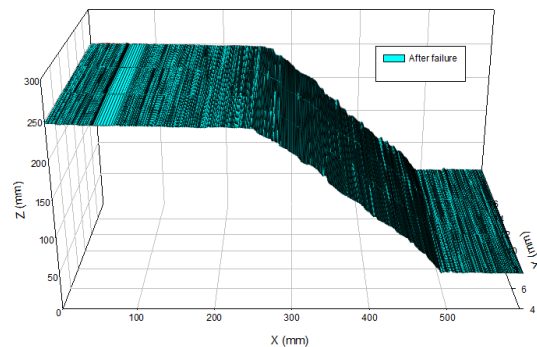


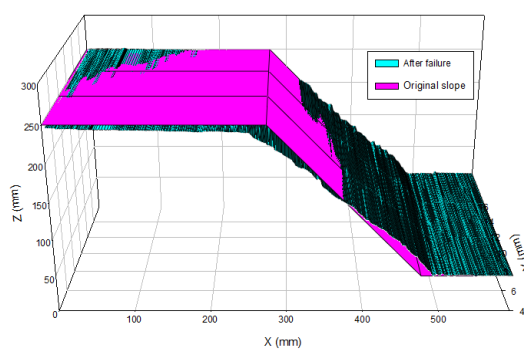
圖 4-11 試驗 VGE_80g 含水量分布圖



(a) 試驗前

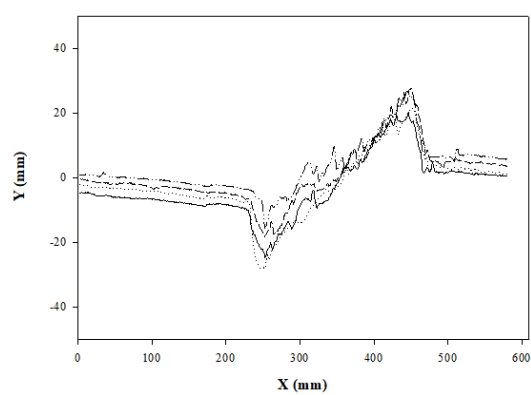


(b) 試驗後



(c) 試驗前後高程比較

The change of elevation

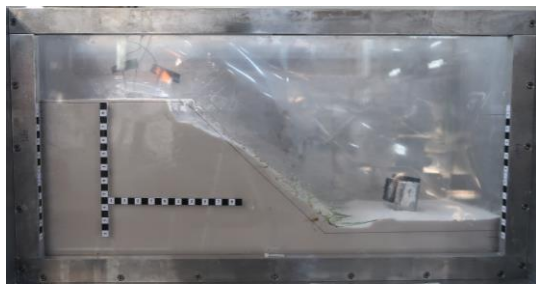


(d) 模型高程變化

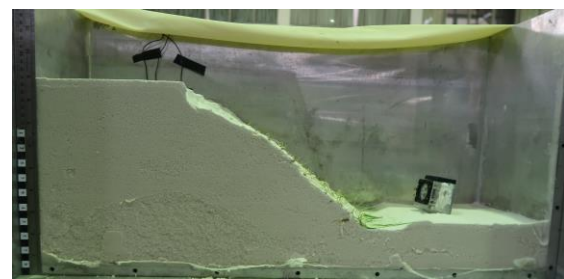
圖 4-12 試驗 VGE_80g 高程變化圖

第四節 地震力引致破壞

為進一步瞭解地震力引致之邊坡滑動破壞並探討植生加勁之效果，故於無加勁邊坡之試體模型在臨界重力引致破壞之重力場 25 g 下進行試驗 E_25g 和試驗 VE_25g 兩組試驗。而試驗 VGE_65g 為測試植生邊坡試體在重力引致破壞時之 g 數，但於增加重力場過程中已發生兩次邊坡滑動，顯示植物根系的表面加勁作用具不確定性。



(a) 試體模型側視圖



(b) 移除試驗箱側壁之側視圖



(c) 模型上視圖



(d) 模型上視近拍圖

圖 4-13 地震力引致之邊坡滑動破壞試驗

一、試驗VGE_65g

試驗 VGE_65g 之結果顯示，植生邊坡試體所能承受的最大重力場為 70 g 左右，故本次試驗選擇臨界崩塌 g 數 65 g 作為試驗時之重力場。但當增加重力場時，邊坡試體於 48 g 及 64 g 時發生表面滑動，表示植物根系的表面加勁作用具不確定性。於 48 g 及 64 g 時重力引致所造成的邊坡表面滑移距離分別為 0.06 H 和 0.07 H，而重力引致破壞後的邊坡坡度分別為 43.4 度及 42.6 度。

VGE_65g 重力場達 65 倍穩定狀態時（即不再有破壞發生）輸入兩次振動事件，振動條件為基盤加速度 0.14 g 和 0.18 g 之等振幅的正弦波、15 個週期、受振歷時 15 秒，如表 4-7 所示。兩次振動之邊坡表面滑移距離分別為 0.15 H 和 0.09 H，而邊坡坡度分別為 40.8 度及 32.8 度，如圖 4-14、圖 4-15、圖 4-17、表 4-8 所示。離心模型試驗後對試體作含水量分析，結果顯示坡頂位置因重力使雨水向下滲流，因此含水量較低，如圖 4-16 所示。

表 4-7 振動事件

振動事件	波形	頻率 (Hz)	受振歷時 (sec)	週期數	尖峰基盤 加速度 (g)
振動事件 1	正弦波	1	15	15	0.14 g
振動事件 2	正弦波	1	15	15	0.18 g



(a) 48 g



(b) 64 g



(c) Event 1



(d) Event 2

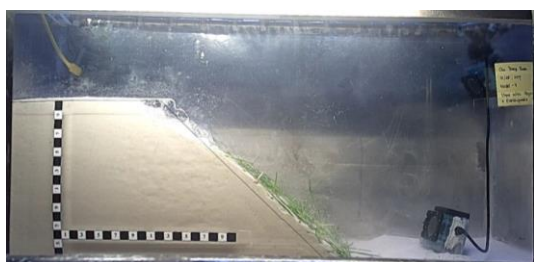
圖 4-14 試驗 VGE_65g 表面滑移距離



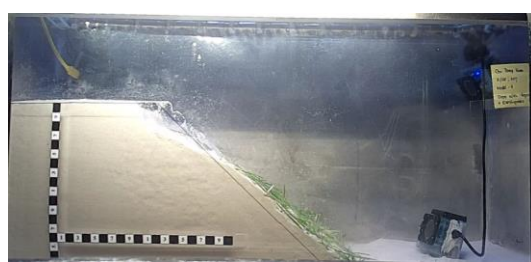
(a) 於 48 g 時之邊坡滑動



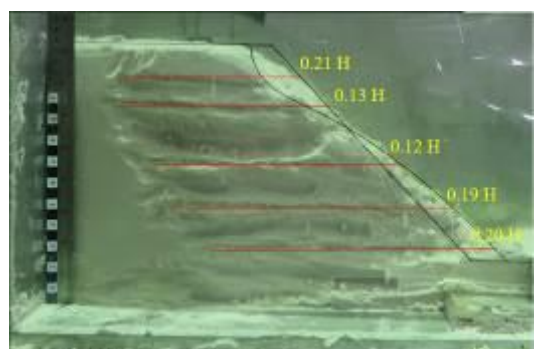
(b) 於 64 g 時之邊坡滑動



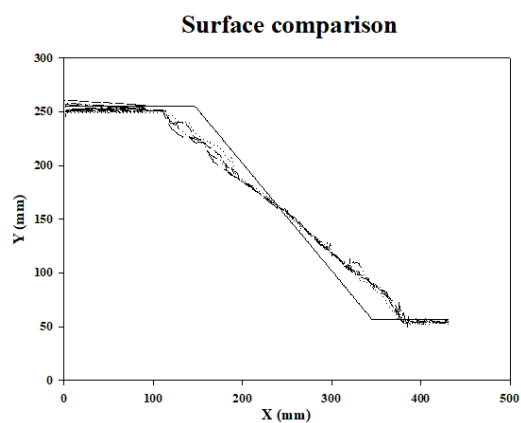
(c) 振動事件 1



(d) 振動事件 2



(e) 水平位移



(f) 試驗前後地表位置

圖 4-15 試驗 VGE_65g 側視圖

表 4-8 試驗 VGE_65g 在不同條件的破壞程度

	坡度 (degrees)	楔型破壞面積比	滑移距離 (d/H)
於 48 g 時之邊坡 滑動	43.4	0.26	0.08
於 64 g 時之邊坡 滑動	42.6	0.31	0.07
振動事件 1	40.8	0.56	0.15
振動事件 2	32.8	0.92	0.09

表 4-9 試驗 VGE_80g 邊坡土壤流失與坡腳堆積

	最大堆積 高度 (d/H)	最大垂直 沉陷 (m)	坡腳堆積體積 (m ³)	土壤流失體積 (m ³)
VGE_65g	0.14	0.14 H	165	182

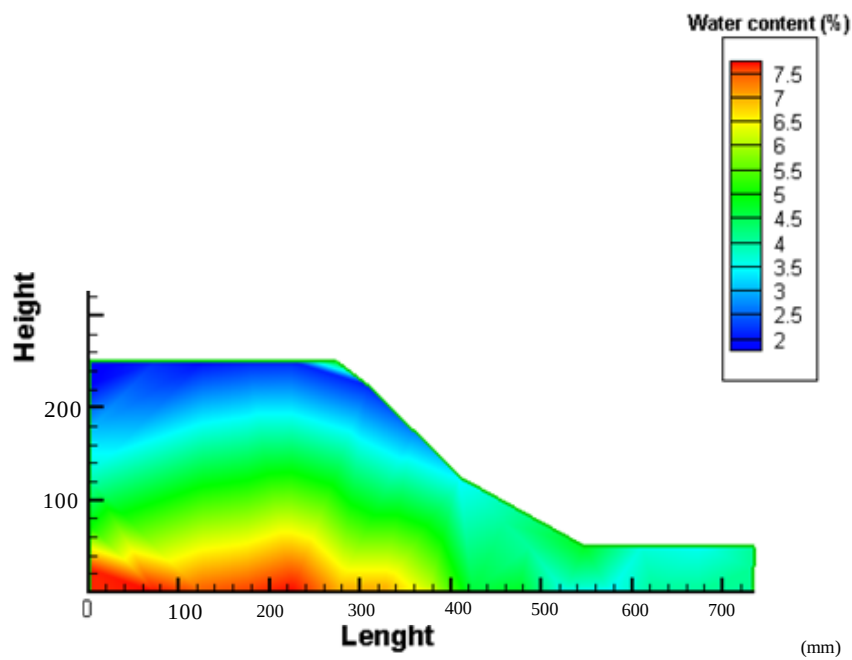
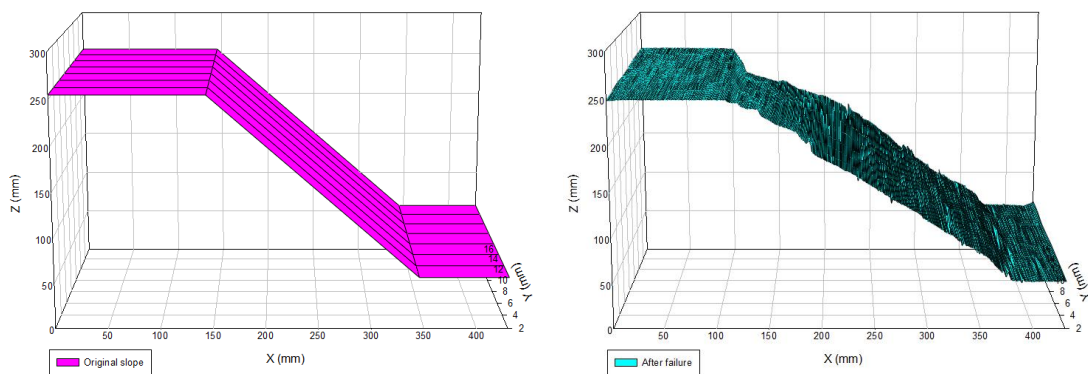
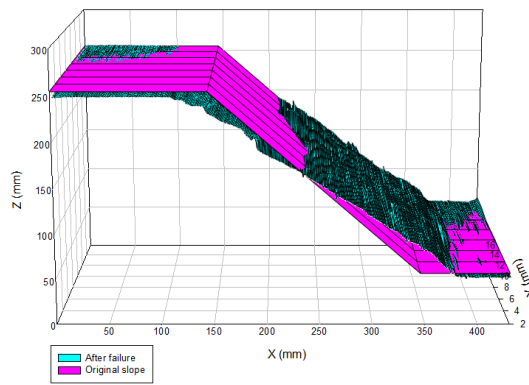


圖 4-16 試驗 VGE_65g 含水量分布圖

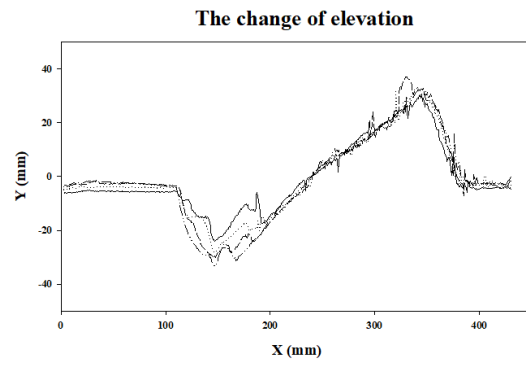


(a) 試驗前

(b) 試驗後



(c) 試驗前後高程比較



(d) 模型高程變化

圖 4-17 試驗 VGE_65g 高程變化圖

二、試驗E_25g

E_25g 為無植生邊坡於 25 g 時模擬地震力引致邊坡破壞之試驗。由試驗 GE_80g 可知無植生邊坡發生表面破壞之重力場為 30 g，故本試驗以臨界重力場 25 g 作為試驗重力場。當試驗 E_25g 達重力場 25 g 穩定狀態時（即不再有破壞發生）輸入基盤加速度 0.2 g、15 個週期、總歷時 15 秒之等振幅正弦波為振動事件，如表 4-10 所示。結果顯示受振後之邊坡表面滑移距離為 0.24 H，邊坡坡度為 32 度，如表 4-11 所示。垂直最大破壞沉陷和垂直最大破壞堆積高度分別為 0.17 H 和 0.18 H，如圖 4-20、表 4-12。試驗中將試體中心長軸剖面視為最主要行為觀察與破壞最嚴重之剖面，並以雷射位移計紀錄其坡面破壞情形，然而因試體破壞行為為三維之行為，為了簡化呈現之結果，多數行為都以二維呈現。而由數據上來看，雖然以二維計算會造成坡腳之土壤堆積體積略大於崩塌體積，然而由二維剖面可以較清楚呈現邊坡滑動與破壞之情形。而土層中量測到之加速度反應由下至上分別為 0.24 g、0.26 g 和 0.28 g，隨覆土深度減少有加速度放大效應，如圖 4-21 所示。藉由 Makdisi 和 Seed (1977, 1988) 試驗分析得知邊坡土壤主頻為 13.75 Hz，利用 Newmark 邊坡土塊滑動分析法找出臨界邊坡滑動時之地表加速度為 0.09 g（即降伏加速度）。Makdisi 和 Seed 法和 Newmark 邊坡土塊滑動分析法適用之土壤為剛性，但本試

驗之邊坡土壤為柔性，因此有關土壤主頻及降伏加速度需另行探討，如圖 4-24、表 4-13 所示。離心模型試驗後對試體作含水量分析，結果顯示因重力使雨水向下滲流，因此除坡趾外含水量都較低，如圖 4-19 所示。

表 4-10 振動事件

振動事件	波形	頻率 (Hz)	受振歷時 (sec)	週期	尖峰基盤加 速度 (g)
預振	正弦波	1	1	1	0.04 g
主要振動事件	正弦波	1	15	15	0.2 g
預振	正弦波	1	1	1	0.04 g

表 4-11 試驗 E_25g 於不同條件之破壞程度

試驗條件	坡度 (degrees)	楔型破壞面積比	滑動面積比率
地震力	32	0.781	83%



(a) 試驗前模型試體上視圖



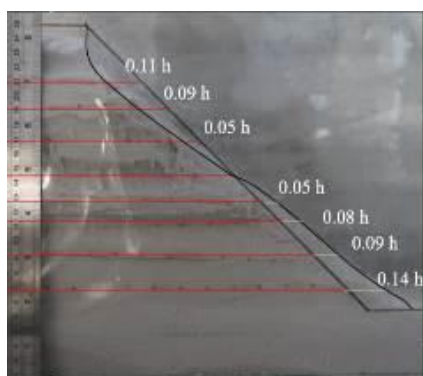
(b) 試驗後模型試體上視圖



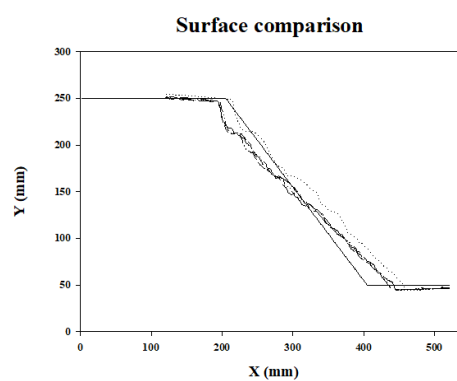
(c) 試驗前模型試體側視圖



(d) 試驗後模型試體側視圖



(e) 試驗後模型試體側向位移圖



(f) 試驗前後地表位置

圖 4-18 試驗 E_25g 邊坡破壞上視與側視圖

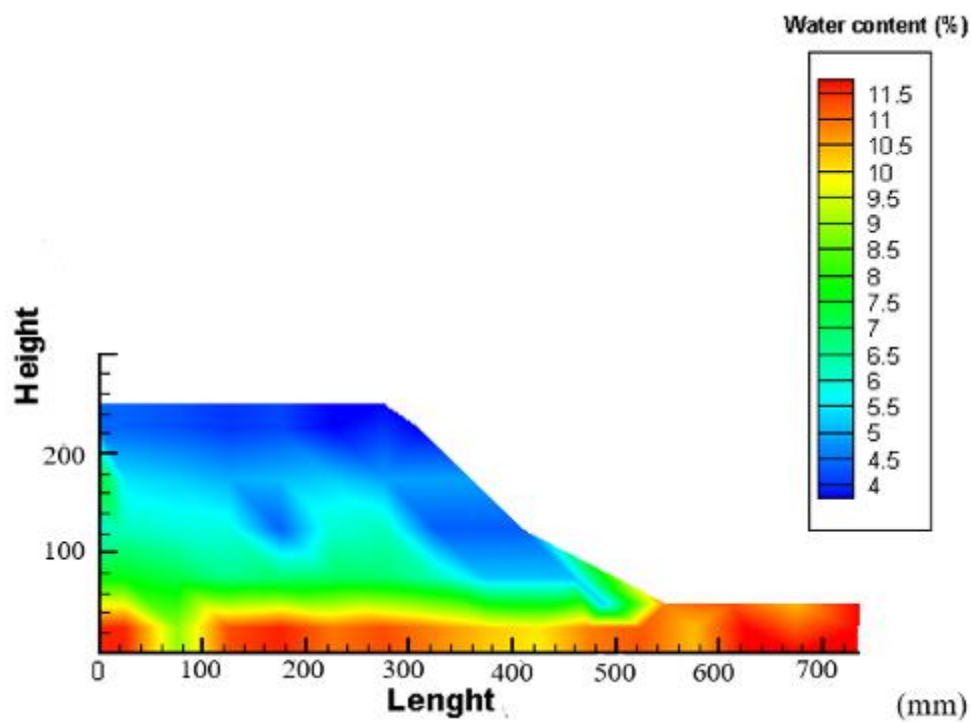
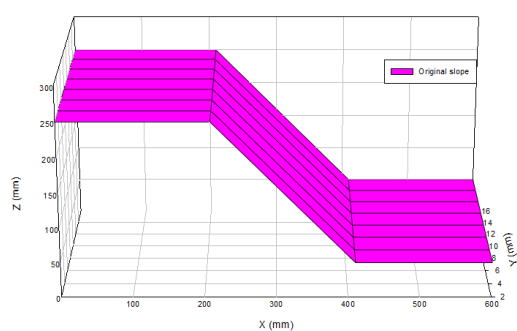


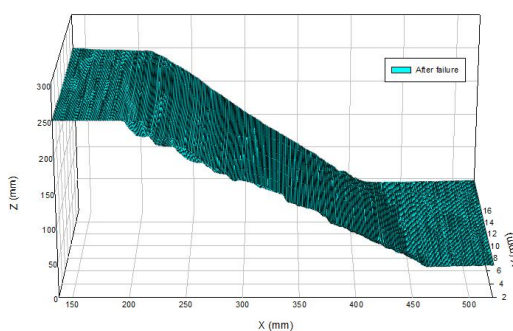
圖 4-19 試驗 E_25g 含水量分布圖

表 4-12 E_25g 土壤流失與堆積體積計算表

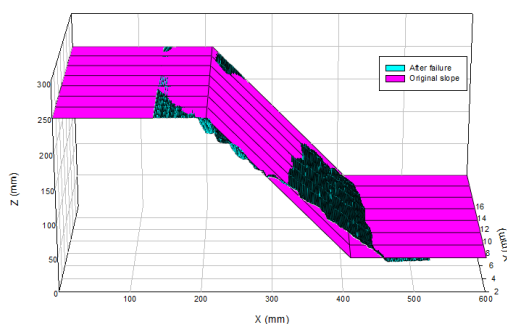
	最大堆積高度 (d/H)	最大垂直沉陷 (d/H)	坡腳堆積體積 (m ³)	土壤流失體積 (m ³)
E_25g	0.18	0.17	8.26	6.71



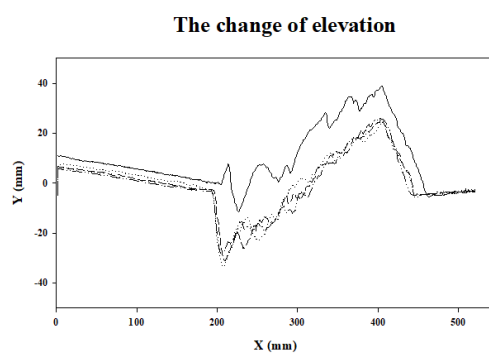
(a) 試驗前



(b) 試驗後



(c) 試驗前後高程比較



(d) 模型高程變化

圖 4-20 試驗 E_25g 高程變化圖

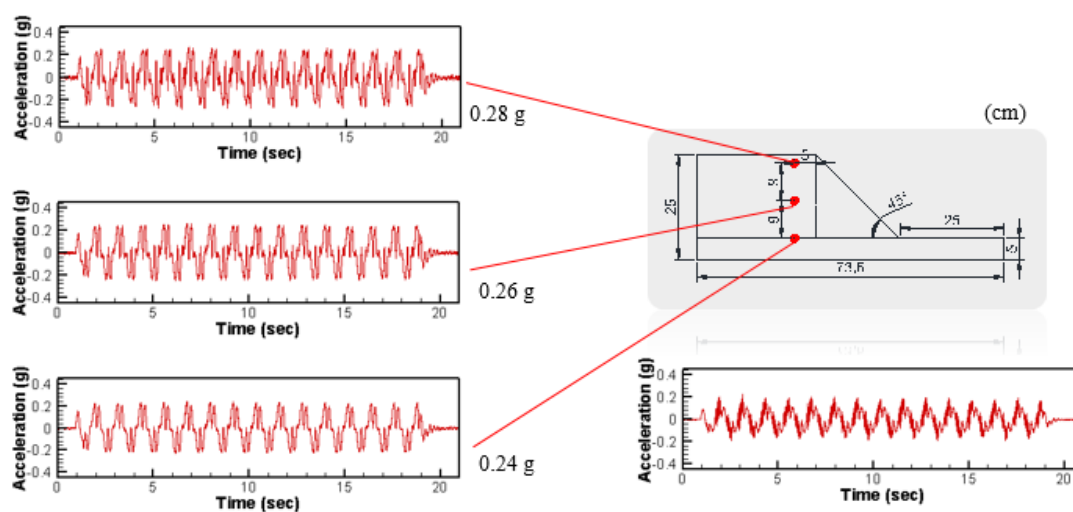


圖 4-21 試驗 E_25g 延土層深度之加速度反應

若以 Newmark 邊坡土塊滑動分析，如圖 4-22、圖 4-23 所示，Newmark method 以大於臨界加速度之加速度歷時，評估邊坡之變形量以預測邊坡之安全性，而非使用安全係數，此法有以下幾點假設：

- (一) 先行假設為邊坡滑動面位置，以邊坡 $FS=1$ 時之加速度為降伏加速度，並以超出此加速度值積分 2 次求出永久位移量。
- (二) 土壤邊坡為一剛塑性材料 (rigid-plastic material)。
- (三) 動態剪應力超過剪力阻抗時，邊坡會發生永久位移。
- (四) 整個邊坡上的加速度歷時為已知條件。

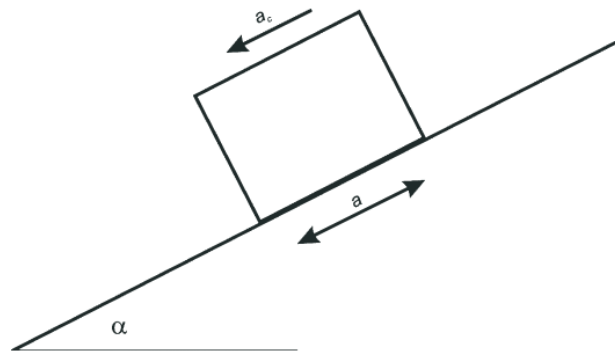


圖 4-22 加速度引致滑動示意圖

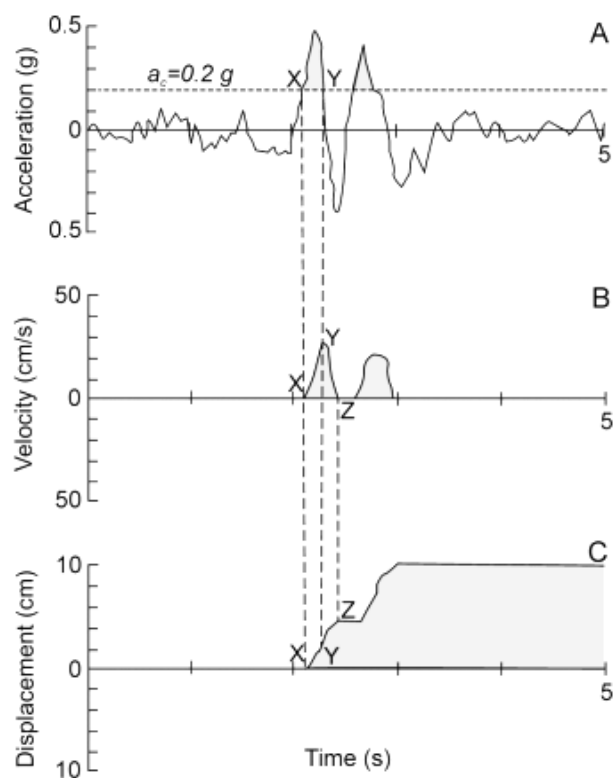


圖 4-23 加速度、速度、位移歷時計算示意圖

$$\log u = 1.460 \log I_a - 6.642 a_y + 1.546$$

- A. u is the distance of sliding block
- B. I_a is Arias Intensity. It is a measure of the strength of a ground motion.
- C. a_y is yield acceleration (g)

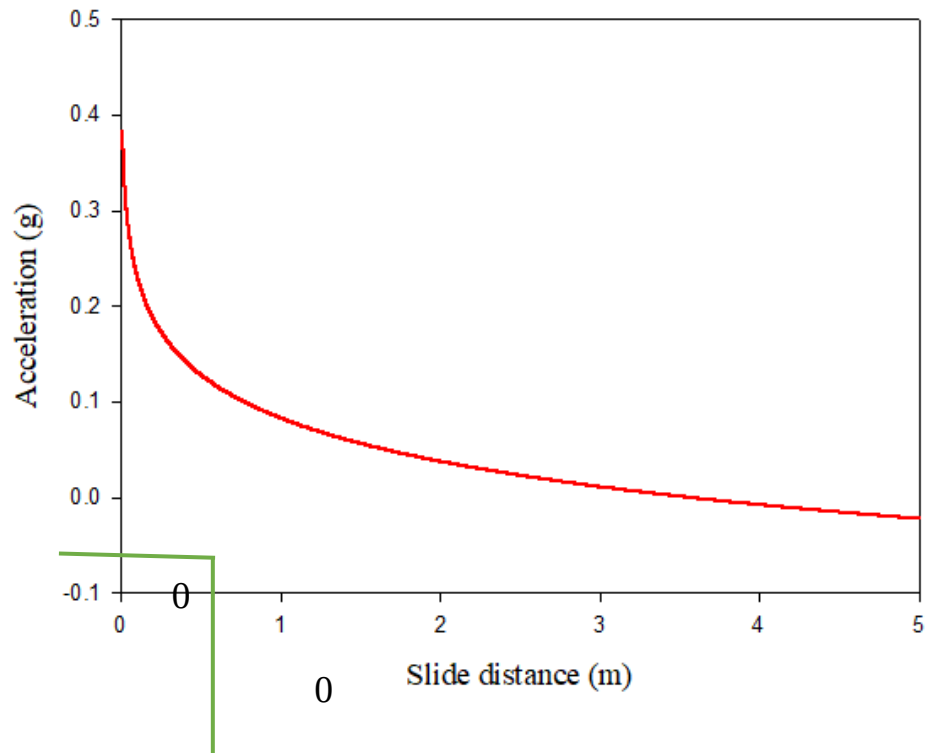


圖 4-24 試驗 E_25g 之 Newmark 降伏加速度曲線

表 4-13 試驗 E_25g 之 Newmark 降伏加速度

試驗	尖峰基盤加速度 (g)	尖峰地表加速度 (g)	降伏加速度 (g)
E_25g	0.20 g	0.28 g	0.09 g

三、試驗VE_25g

試驗 VE_25g 為植生邊坡於 25 g 時模擬地震力引致邊坡破壞之試驗。由 VGE_80g 可得出無植生邊坡發生表面破壞之重力場環境為 75 g。但因於 VE_65g 試驗中 48 g 及 64 g 時分別發生兩次重力引致破壞，顯示植生邊坡加勁有其不確定性，故本試驗以 GE_80g 之臨界破壞重力場 25 g 作為試驗原型之重力環境。

當 VE_25g 重力場達 25 倍穩定狀態後（即不再有破壞發生）輸入三次振動事件，為尖峰基盤加速度 0.18、0.20 及 0.23 g 之等振幅正弦波，15 個週期、振動歷時 15 秒，如表 4-14 所示，邊坡表面滑移距離為 0.24 H，邊坡坡度為 32 度。垂直最大破壞沉陷和垂直最大破壞堆積高度為 0.17 H 和 0.18 H，如圖 4-25、圖 4-26、圖 4-28、表 4-15、表 4-16 所示。土層加速度反應由下至上分別為 0.24 g、0.26 g 和 0.28 g，隨覆土深度不同有加速度放大效應，如圖 4-29、圖 4-30、圖 4-31 所示。藉由 Newmark 邊坡土塊滑動分析法求出臨界邊坡滑動時之地表加速度為 0.09 g（即降伏加速度）。Makdisi 和 Seed 法和 Newmark 邊坡土塊滑動分析法其適用於剛性土壤，但本試驗之邊坡土壤為柔性，故有關土壤主頻及降伏加速度需另行探討如，如圖 4-32、表 4-17 所示。離心模型試驗後對試體含水量分析，結果顯示其坡面含水量較 E_25g 多，如圖 4-27 所示，此試驗平均根長為 30 mm、根密度為 2.2

%。

表 4-14 振動事件

振動事件	波型	頻率 (Hz)	受振歷時 (sec)	週期	尖峰基盤加速度 (g)
預振 1	正弦波	1	1	1	0.09 g
M1	正弦波	1	15	15	0.18 g
預振 2	正弦波	1	1	1	0.09 g
M2	正弦波	1	15	15	0.21 g
預振 3	正弦波	1	1	1	0.09 g
M3	正弦波	1	15	15	0.23 g
預振 4	正弦波	1	1	1	0.09 g



(a) 振動事件 M1 前



(b) 振動事件 M1 引致破壞後



(c) 振動事件 M2 前



(d) 振動事件 M2 引致破壞後

圖 4-25 試驗 VE_25g 邊坡破壞上視圖



振動事件 M3 前模型試體側視圖



振動事件 M3 後模型試體側視圖



試驗後模型試體側向滑移圖

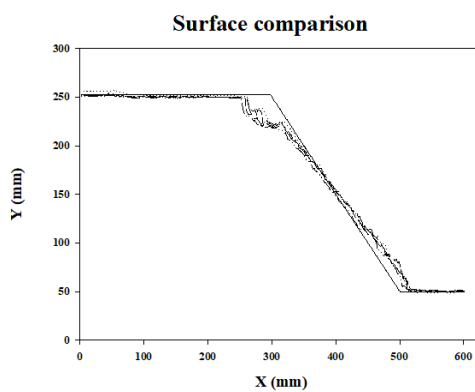


圖 4-26 試驗 VE_25g 邊坡破壞側視圖

表 4-15 VE_25g 之破壞程度

	坡度 (degrees)	楔型破壞面積比	滑動面積比率
振動事件 3	41	0.899	100 %

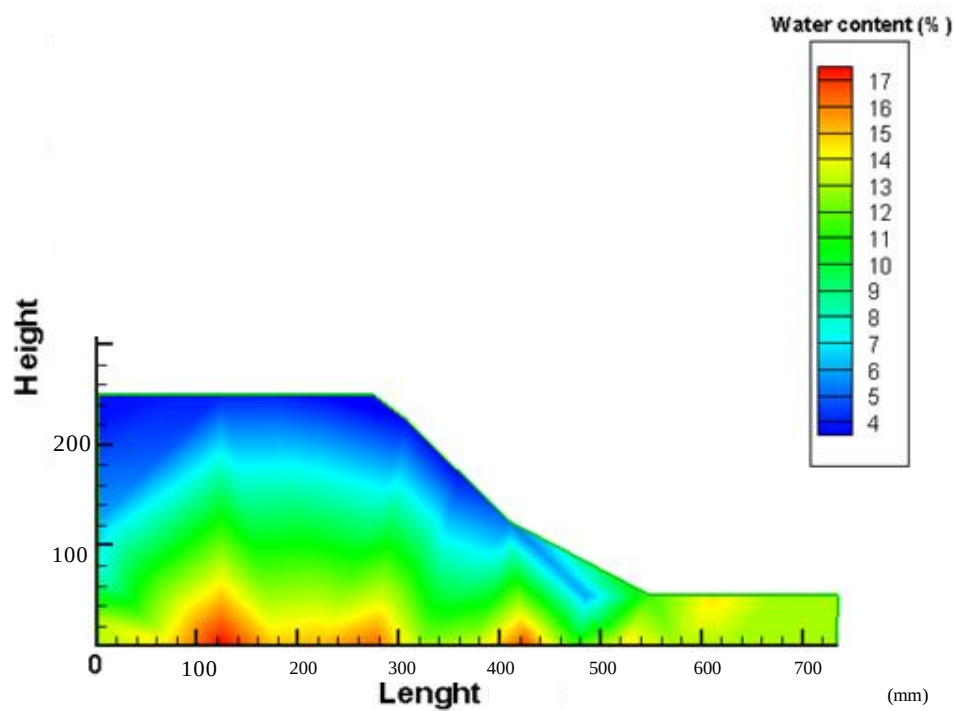


圖 4-27 試驗 VE_25g 含水量分布圖

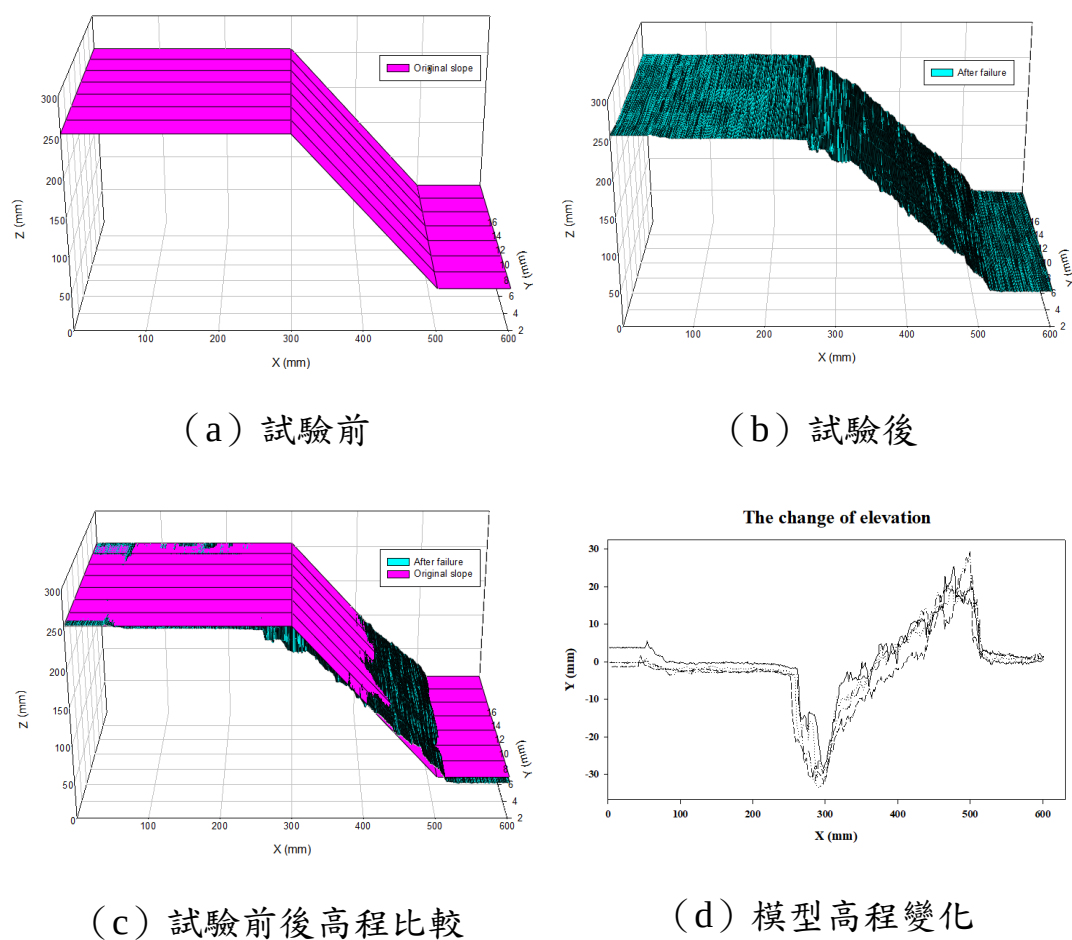


圖 4-28 試驗 VE_25g 高程變化圖

表 4-16 試驗 VE_25g 邊坡土壤流失與坡腳堆積

	最大堆積 高度 (d/H)	最大垂直 沉陷 (d/H)	坡腳堆積體積 (m ³)	土壤流失體積 (m ³)
VE_25g	0.15	0.18	6.23	7.60

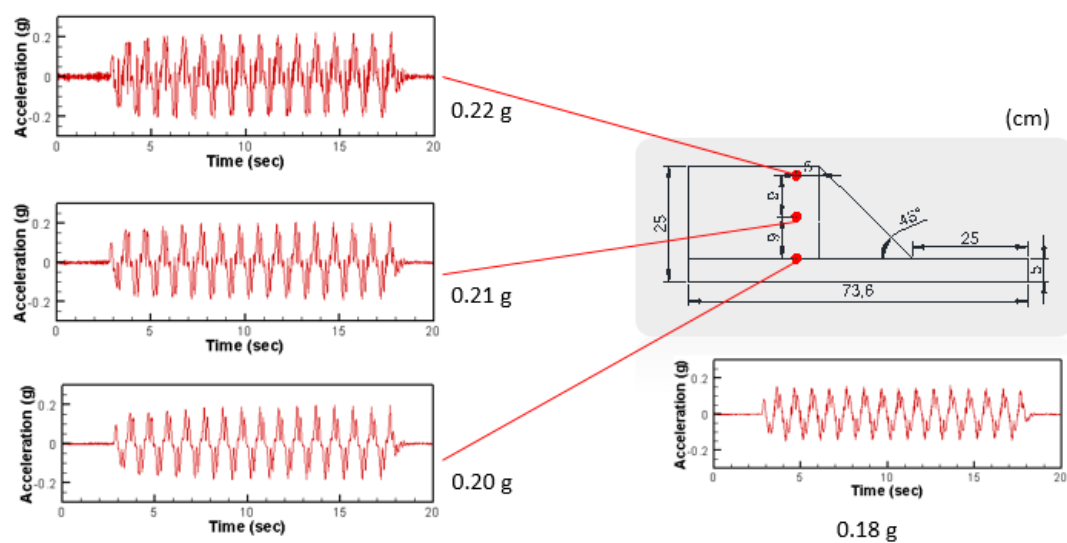


圖 4-29 試驗 VE_25g 於 M1 振動事件中各深度之加速度反應

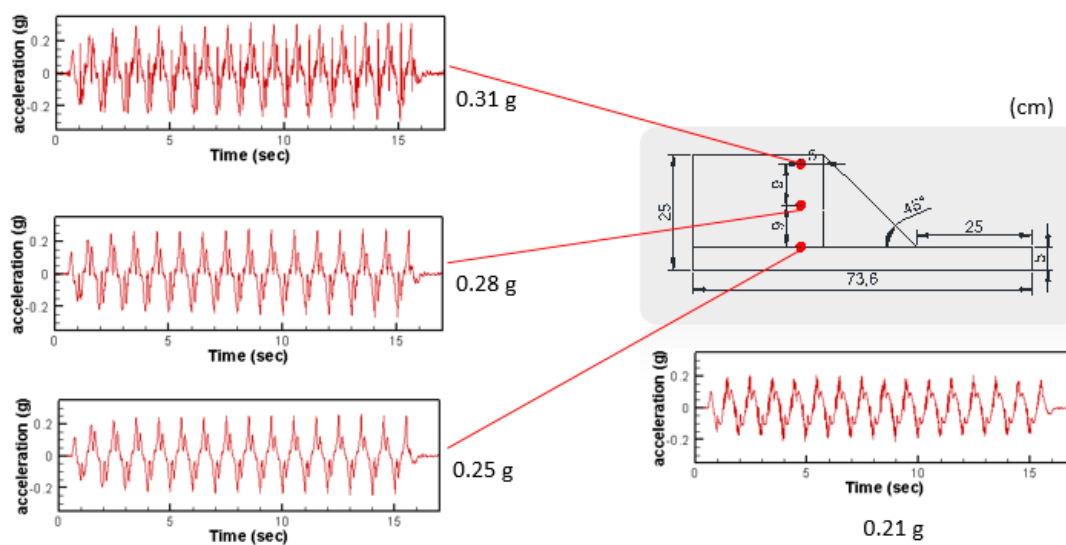


圖 4-30 VE_25g 於 M2 振動事件中各深度之加速度反應

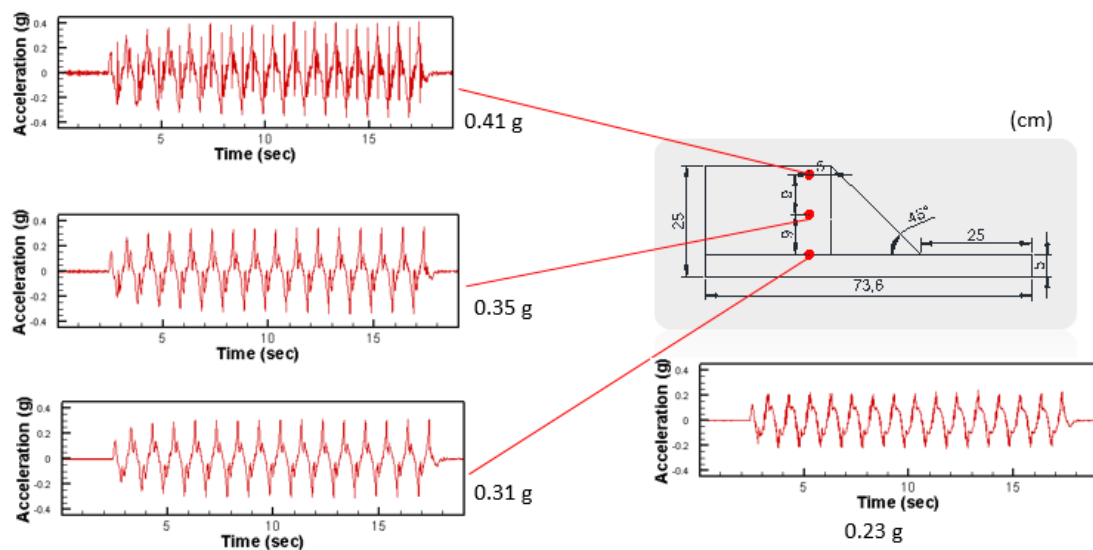


圖 4-31 VE_25g 於 M3 振動事件中各土層之加速度反應

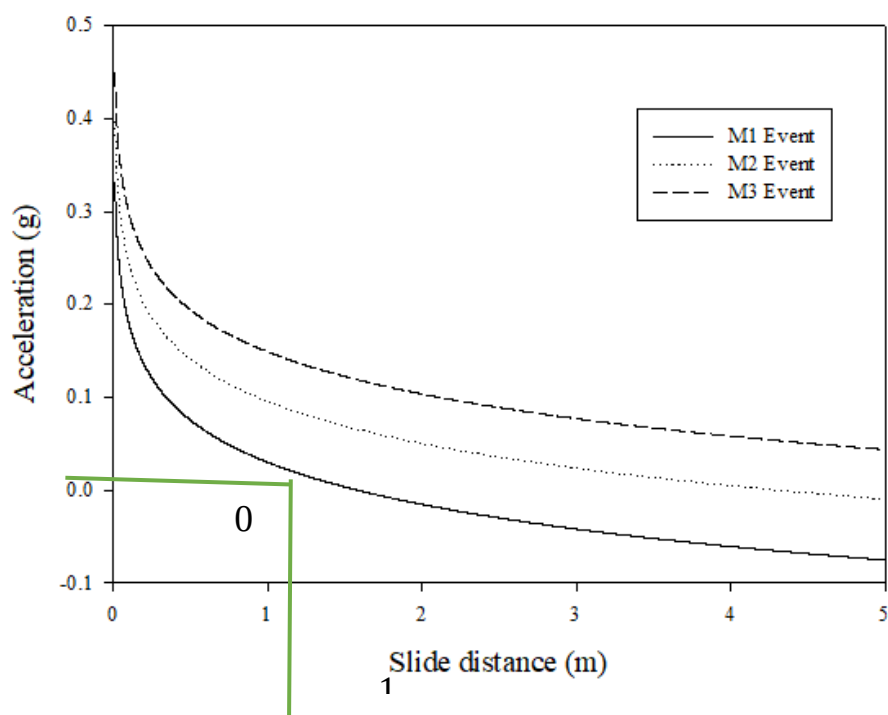


圖 4-32 試驗 VE_25g 之 Newmark 降伏加速度曲線

表 4-17 試驗 VE_25g 之 Newmark 降伏加速度

振動事件	尖峰基盤加速度 (g)	尖峰地表加速度 (g)	降伏加速度 (g)
M3	0.23 g	0.41 g	0.13 g

第五節 降雨引致破壞

台灣全年降雨量豐沛，故降雨為導致山坡地崩塌或侵蝕之重要因子。為瞭解降雨引致之邊坡侵蝕及滑動破壞並探討植生邊坡加勁之效果，本報告進行 VR_25g 和 R_25g 試驗，分別代表有植生邊坡及無植生邊坡探討降雨侵蝕之行為。在 25 g 重力場下進行試驗，如圖 4-38 所示、降雨強度為 197 mm/hr、降雨歷時 7.8 分鐘，以上降雨條件為模型尺度，如表 4-18 所示。



(a) 側視圖



(b) 移除試驗箱壁之模型側視圖



(c) 上視圖



(d) 上視圖

圖 4-33 模型試體受降雨侵蝕之情形

表 4-18 降雨事件

降雨參數	模型尺度	原型尺度
降雨強度 (mm/h)	197	197
降雨歷時 (min)	7.8	195
累積降雨量 (mm)	25.6	640

一、試驗R_25g

試驗 R_25g 之結果顯示當降雨水面淹過坡趾區域時，會導致砂土邊坡發生張力裂縫，如圖 4-34 所示。但由側視圖可知並無明顯的深層滑動，因此沒有楔型坡壞情形發生，如圖 4-35、表 4-19 所示，裂縫寬度隨時間快速增加，而坡趾因積水而有些微掏刷的現象。當降雨停止後，試體仍會發生滑動，顯示降雨引致之邊坡破壞分為兩種，一為降雨之沖刷引致侵蝕，另一為降雨滲流引致之邊坡滑動。降雨引

致之最大裂縫寬度為 $0.16 H$ ，第一次滑動時間為 136.3 分鐘，最後一次滑動時間為 199.3 分鐘，比總降雨歷時多 4 分鐘，滑動速率為 $24.76 \times 10^{-4} H/min$ ，如圖 4-39、圖 4-40、表 4-21 所示。

由側視圖及雷射位移計掃描可知並無發生深層邊坡滑動，顯示降雨引致之侵蝕行為對試驗 R_25g 的影響較大，如圖 4-37 所示。最深裂縫深度為 $0.02 H$ ，最高堆積高度為 $0.045 H$ ，土壤流失和堆積量幾乎不變，如表 4-20 所示。離心試驗後對試體作含水量分析，因重力影響而使坡頂含水量較低，如圖 4-36 所示。由孔隙水壓計量測結果可知，中間層邊坡試體因降雨水流入滲導致不飽和土體受基質吸力影響產生負的孔隙水壓力，如圖 4-38 所示。下層則因降雨雨水順地表逕流累積於坡趾區域，而水流入滲至試體中產生水壓力。



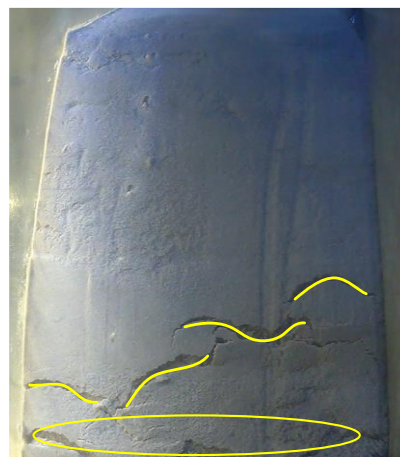
(a) 第 0 分鐘



(b) 第 136.25 分鐘



(c) 第 141.75 分鐘



(d) 第 168.75 分鐘



(e) 第 188.25 分鐘



(f) 第 199.25 分鐘

圖 4-34 試驗 R_25g 邊坡破壞上視圖



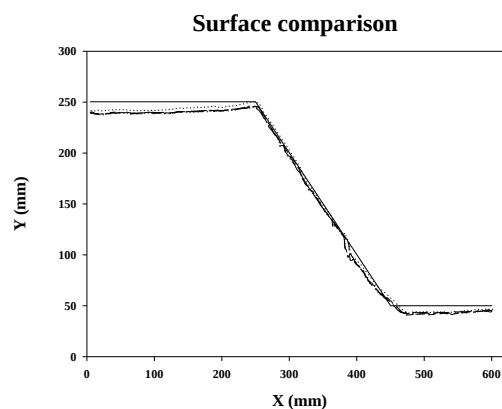
(a) 降雨前模型試體側視圖



(b) 降雨後模型試體側視圖



(c) 試驗後模型試體側視圖



(d) 試驗前後地表位置圖

圖 4-35 試驗 R_25g 邊坡破壞側視圖

表 4-19 試驗 R_25g 之破壞程度

	坡度 (degrees)	楔型破壞面積比	滑動面積比
R_25g	45	-	33 %

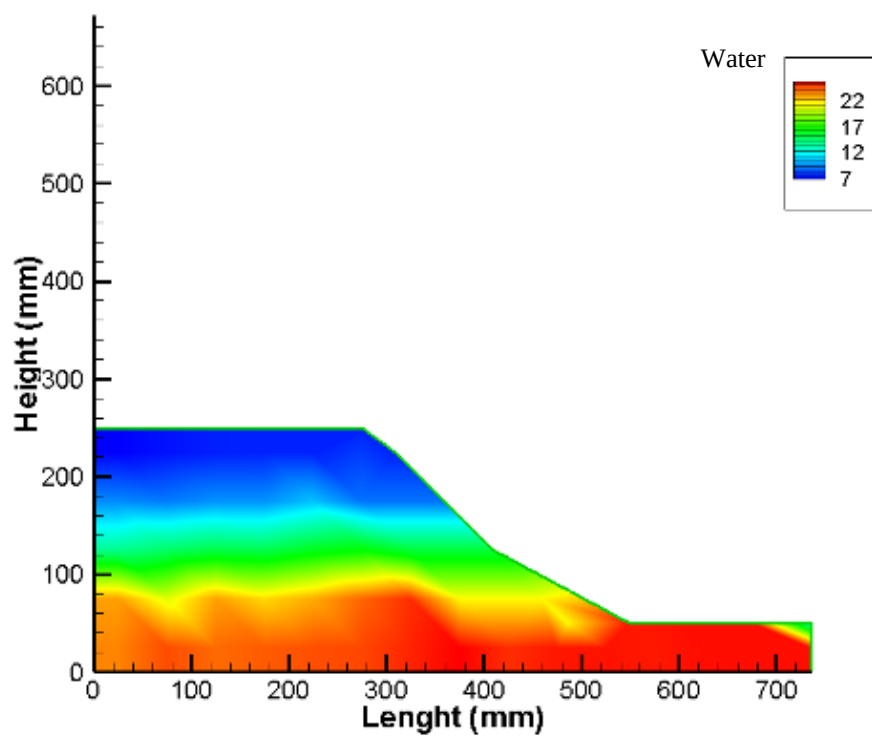
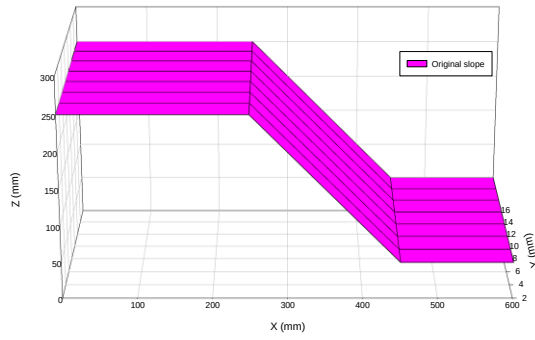


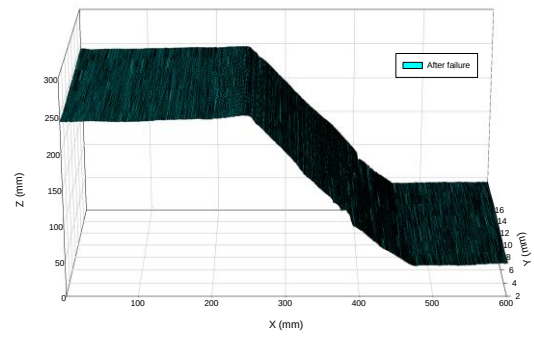
圖 4-36 試驗 R_25g 含水量分布圖

表 4-20 試驗 R_25g 邊坡土壤流失與坡腳堆積

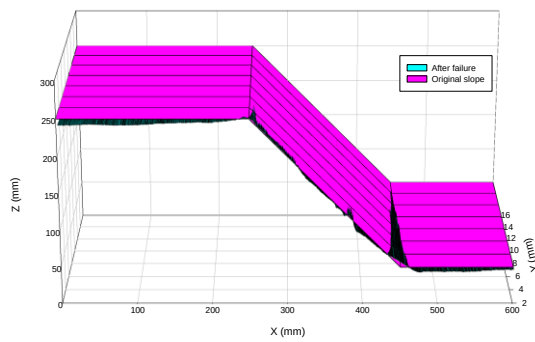
	最大垂直 沉陷 (d/H)	最大堆積高 度 (d/H)	土壤流失體積 (m ³)	坡腳堆積體積 (m ³)
R_25g	0.020	0.045	2.48	0.08



(a) 試驗前

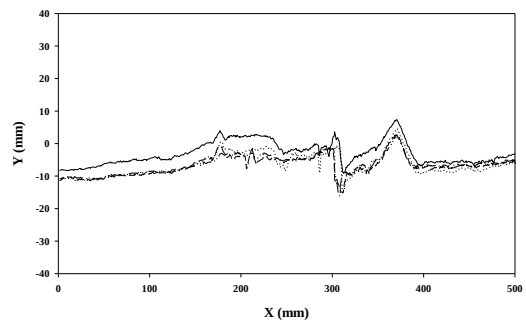


(b) 試驗後



(c) 試驗前後高程比較

The change of elevation



(d) 邊坡試驗前後高程變化

圖 4-37 試驗 R_25g 高程變化圖

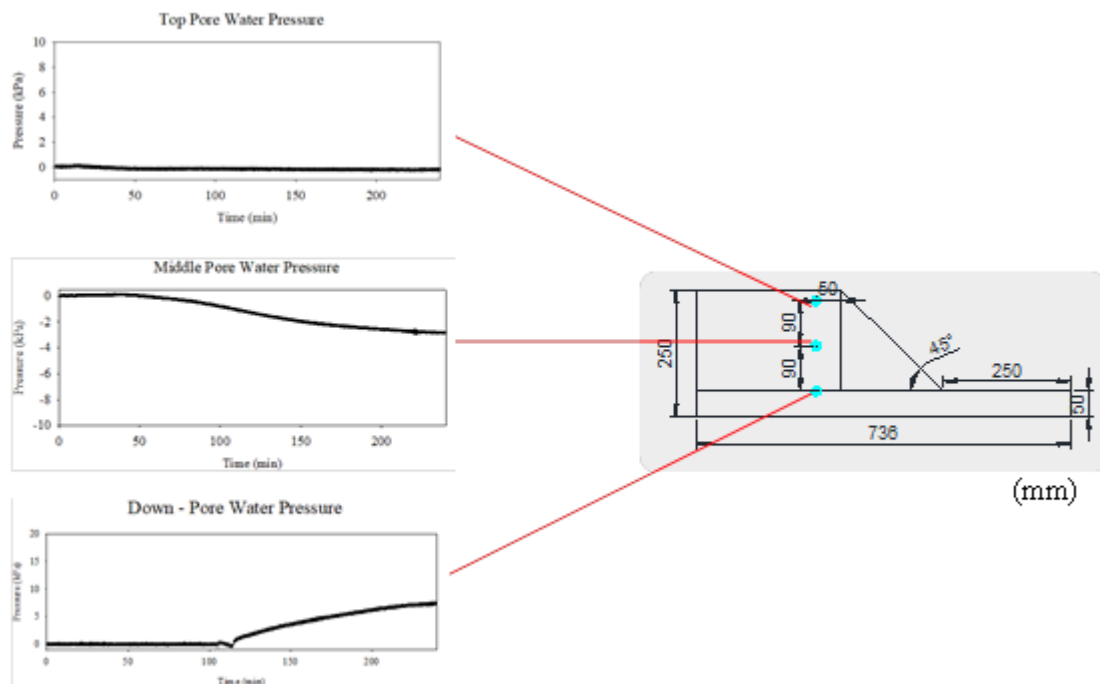


圖 4-38 試驗 R_25g 於降雨事件中各深度之水壓力變化

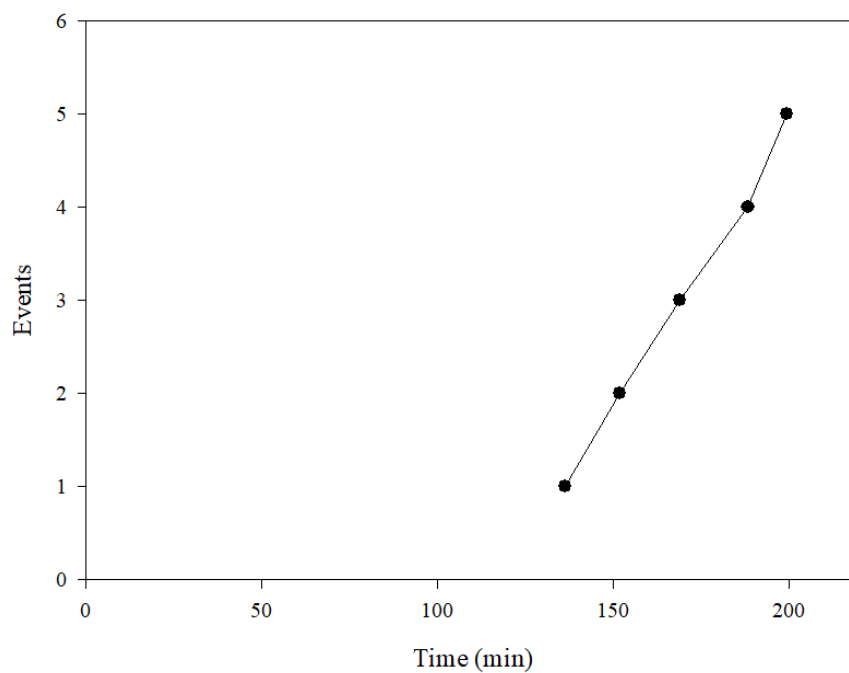


圖 4-39 試驗 R_25g 於降雨事件中之滑動次數

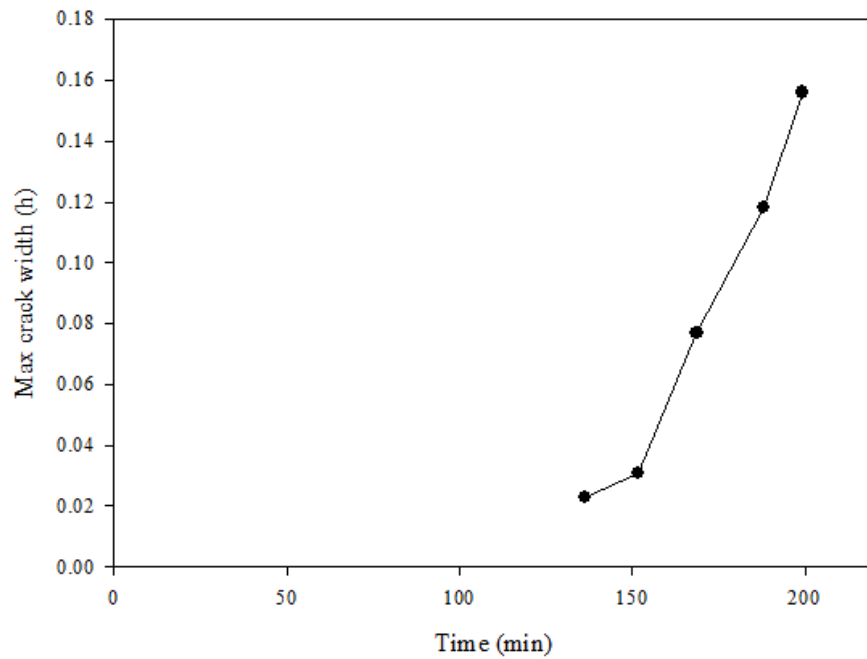


圖 4-40 試驗 R_25g 於降雨事件中之最大裂縫寬度變化

表 4-21 試驗 R_25g 邊坡滑動行為

	最大滑移 距離 (H)	初始滑動 時間 (min)	最後滑動 時間 (min)	正規化滑動速率 (H/min) *
R_25g	0.156	136.3	199.3	24.76×10^{-4}

*H 為邊坡高度

二、試驗VR_25g

試驗 VR_25g 之結果顯示，降雨過程中植披枝葉因增加重力場，植披斷面無法承受自重導致枝葉彎曲伏地，如圖 4-41 所示。植披枝

葉雖能消減降雨動能降低降雨沖蝕，但降雨所引致的地表逕流會經由根與土壤中的縫隙快速入滲至土體中，導致土體的自重增加，滑動面往邊坡延伸導致較深層的滑動破壞，如表 4-22 所示。

表 4-22 修改自崩塌地植生工程暨應用植物手冊 (α 為有害， β 為有益)

水文機構	效應	力學機制	效應
葉片攔截降雨，造成：		根系粘結土壤顆粒，造成：	
1. 水份減少，入滲量減少。	β	1. 限制土粒移動，減少沖蝕。	β
2. 減少雨滴動量，降低沖蝕量。	β	2. 根系增加剪力強度。	β
3. 雨滴由葉片再滴下，局部強度變大。	α	3. 根系形成網狀，限制下方土層。	β
莖、葉阻擋水流，產生：		根系穿入深層，造成：	
1. 地表儲蓄水增加，更多入滲。	α/β	1. 錨定入深層，形成保護層。	β
2. 地面糙度增加，降低水流。	β	2. 支撐上邊坡形成拱狀。	β
3. 不均勻的植生可能造成集中水流速度增加。	α	高樹，造成：	
根系穿透土壤，導致：		1. 增加邊坡載重，垂直重及滑下的力皆增加。	α/β
1. 縫隙增加入滲。	α	2. 承受風的作用。	α
2. 吸水產生蒸散，降低孔隙水壓力，增加張力進而增加土壤強度。	β	莖與葉覆蓋地表，造成：	
3. 促進乾濕裂隙的生成，造成較多入滲。	α	1. 車輛等外力干擾作用之緩衝，保護地表。	β
		2. 保護地表避免受水流沖蝕。	β

資料來源:崩塌地植生工程暨應用植物手冊

降雨後邊坡之第一次滑動時間為 17.5 分鐘，最後一次滑動時間為 173.3 分鐘，最終的滑移距離為 0.156 H，滑動速率為 7.77×10^{-4} H/min，如圖 4-46、圖 4-47、表 4-25 所示。由側視圖及雷射位移掃描觀測雨水入滲引致的淺層滑動，植物的根系可有效防止因坡趾積水而引發的坡趾掏刷，如圖 4-42、圖 4-44、表 4-23 所示，最大沉陷高度及最高堆積高度為 0.06 H 和 0.054 H，土壤流失和土壤堆積量幾乎不變，如表 4-24 所示。離心模型試驗後對試體作十字片剪試驗及含水量分析，結果顯示坡趾積水處的水份會入滲至邊坡底部，含水量分布如圖 4-43 所示。由孔隙水壓計反應可知中上層之土體因植物根系及砂土孔隙而使水流快速入滲導致土壤基質吸力下降。下層則因坡趾積水而入滲土體中，且植物根系和土體縫隙有雨水流入導致下層孔隙水壓力快速上升，如圖 4-45 所示。

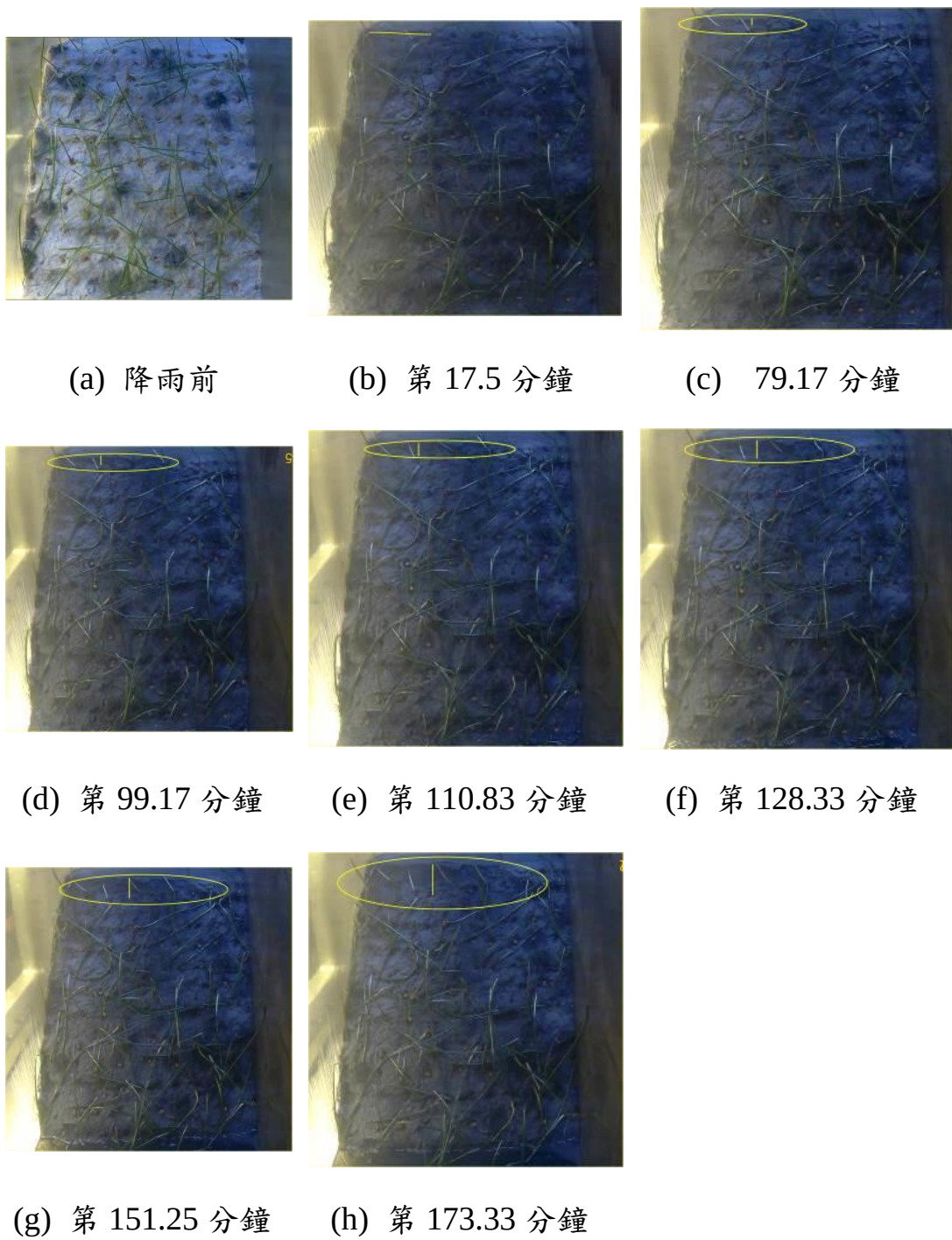


圖 4-41 試驗 VR_25g 邊坡破壞上視圖



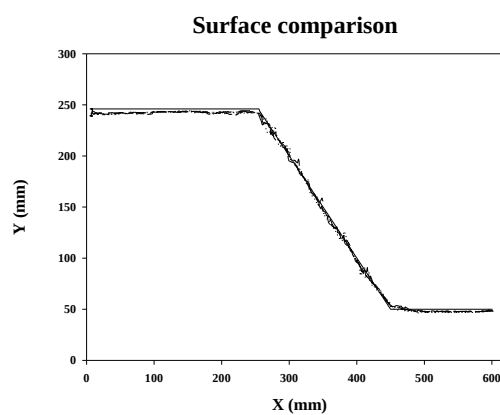
(a) 降雨前模型試體側視圖



(b) 降雨後模型試體側視圖



(c) 試驗後模型試體側視圖



(d) 試驗前後地表位置圖

圖 4-42 試驗 VR_25g 邊坡破壞側視圖

表 4-23 試驗 VR_25g 之破壞程度

	坡度 (degrees)	楔型破壞面積比	滑動面積比率
VR_25g	45	0.337	97 %

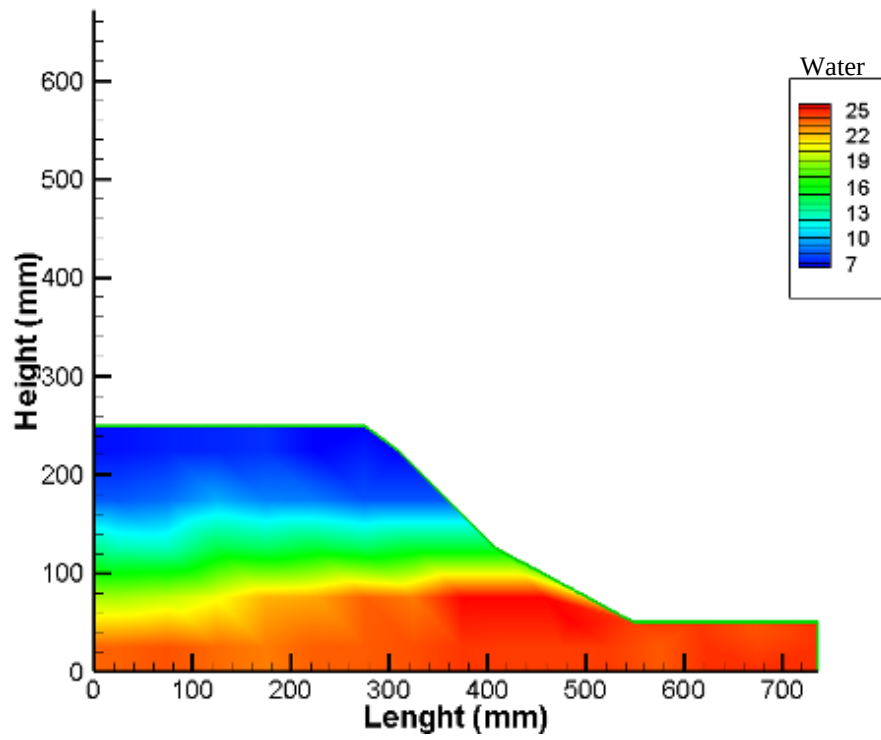
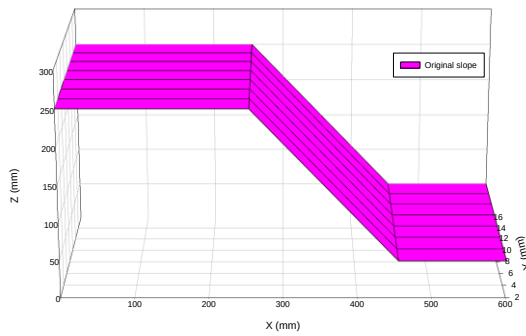
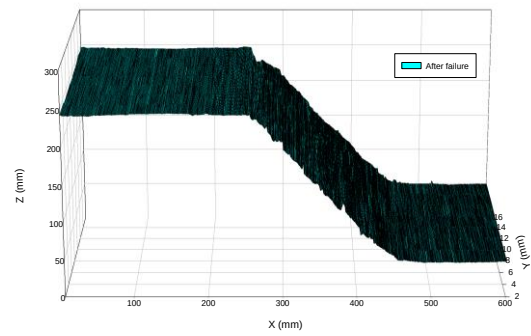


圖 4-43 試驗 VR_25g 含水量分布圖

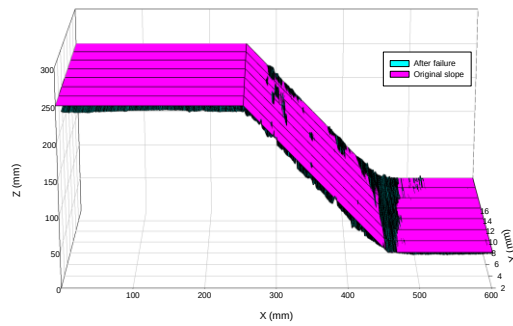
Shear strength



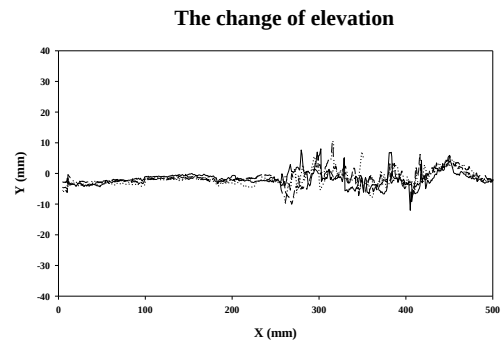
(a) 試驗前



(b) 試驗後



(c) 試驗前後高程比較



(d) 試驗前後模型高程變化

圖 4-44 試驗 VR_25g 高程變化圖

表 4-24 試驗 VR_25g 邊坡土壤流失與坡腳堆積

	最大垂直 沉陷 (d/H)	最大堆積 高度 (d/H)	土壤流失體積 (m ³)	坡腳堆積體積 (m ³)
VR_25g	0.060	0.054	1.00	0.88

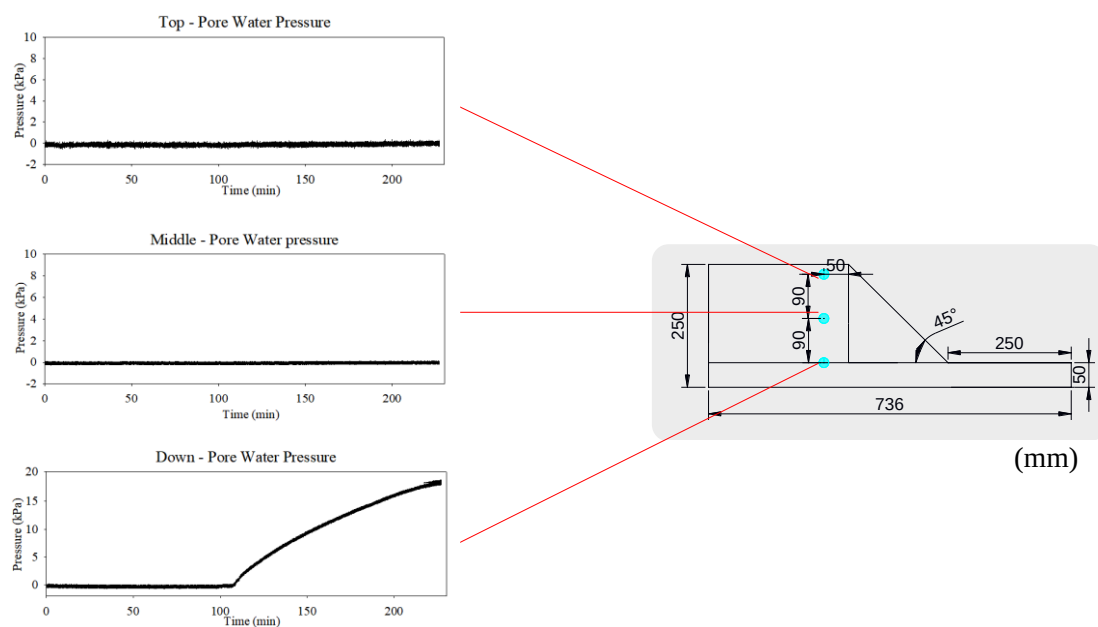


圖 4-45 試驗 VR_25g 於降雨事件中各深度之水壓力變化

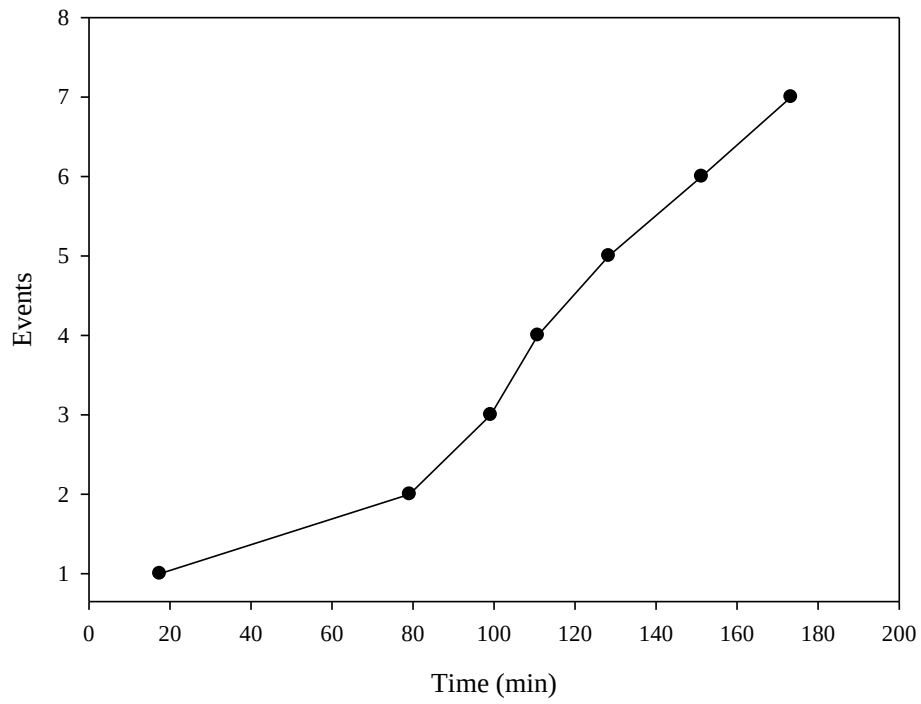


圖 4-46 試驗 VR_25g 於降雨事件中之滑動次數

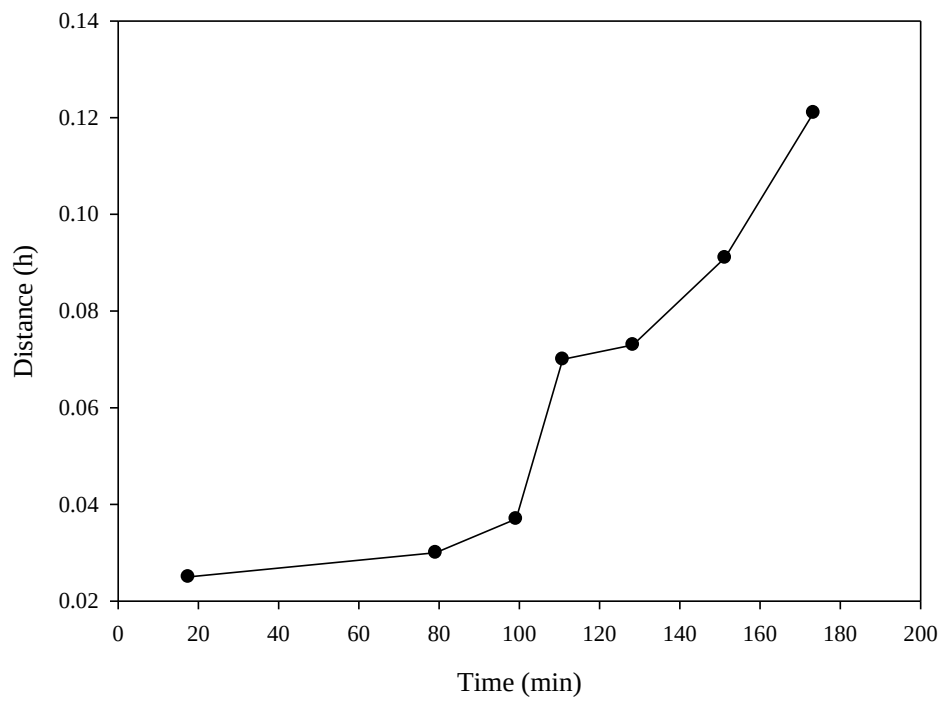


圖 4-47 試驗 VR_25g 於降雨事件中之最大裂縫寬度變化

表 4-25 試驗 VR_25g 邊坡滑動行為

	最大滑移距離 (H)	初始滑動時間 (分鐘)	最後滑動時間 (分鐘)	正規化滑 動速率 (H/min) *
VR_25	0.121	17.5	173.3	7.77×10^{-4}

*H 為邊坡高度

第五章 綜合討論

第一節 重力條件

根據第四章之實驗結果顯示，無植生邊坡試體於增加重力場過程中，在重力場 30 g 時發生第一次表面滑動，第二次及第三次發生於重力場 50 g 及 78 g，而植生邊坡試體則在重力場 76 g 時發生坡面滑動。在重力條件下兩種試體皆無深層的剪切破壞發生，因此本段僅以試體之破壞面積進行討論。崩塌面積顯示植生工法能有效減少重力引致的淺層滑動，當達到 80 g 時，無植生試體破壞面積比為 100 %，而植生邊坡試體為 67 %，試驗結果彙整於表 5-1、圖 5-3，由此結果顯示植物根系能有效加勁邊坡坡面。無植生邊坡試體於增加重力場之過程中，邊坡坡度減少 5.2 度，而植生邊坡試體僅減少 1.7 度，如圖 5-1 所示。由上述可知，植物根系能增加邊坡試體坡趾附近之抗剪強度。

當兩試體達到 80 g 並維持穩定狀態時，輸入基盤加速度 0.2 g 的等振幅正弦波，結果顯示，邊坡高度為 H 時，植生邊坡的最大垂直沉陷和最大堆積高度皆為 $0.14 H$ 。而無植生的最大垂直沉陷和最大堆積高度分別為 $0.18H$ 和 $0.20 H$ ，兩者分別差了 $0.04 H$ 和 $0.06 H$ 。由側向攝像機可知，無植生邊坡坡度減少 10.8 度，但植生邊坡試體只減少 1.1 度，且破壞比率為 0 及 0.406，顯示植生邊坡能減少土壤流失範圍，如圖 5-3 所示，植生邊坡之土壤堆積量及土壤流失量皆些許少

於無植生試體，破壞後植生邊坡表面較無植生者粗糙，表示植物根系能抓住土壤並防止邊坡滑動破壞。

因兩試體皆為砂土，雖土壤含水量會影響土壤凝聚力，但其並不會顯著影響砂土剪力強度，如圖 5-5 所示。由含水量量測得知，邊坡試體受重力引致作用，含水量由下而上遞減。再經由 GeoStudio 2012 模擬進行驗證可得出相似結果，其優點為未來可直接由數值模擬推估結果，無須付出較大的成本做物理試驗。數值模擬試驗代號中，N 表示該試驗為數值模擬(Numerical simulation)；數字表示其模擬的重力場；Uniformly、Dry 及 Layered 分別代表含水量均勻分布、無含水及由下而上分層分布。結果得出 N-30 uniformly 和 N-70 Layered 可分別代表無植生和植生邊坡試體，因數值模擬結果得出之安全係數最接近，恰好近似於離心模型試驗的結果，故以此兩組數值模擬分析對照物理試驗，如圖 5-4、表 5-2 所示。

表 5-1 重力引致邊坡分析比較

試驗編號	滑動面積 比率	坡度 (重力引 致破壞)	坡度 (地震力 引致破壞)	楔型破 壞面積 比	最大堆 積高度 (m)	最大垂 直沉陷 (m)
GE_80g	30 g 27 % 50 g 81 % 78 g 100 %	39.8°	29.0°	0.877	0.18 H	0.20 H
VGE_80g	75 g 67 %	43.3°	42.4°	0.468	0.14 H	0.14 H

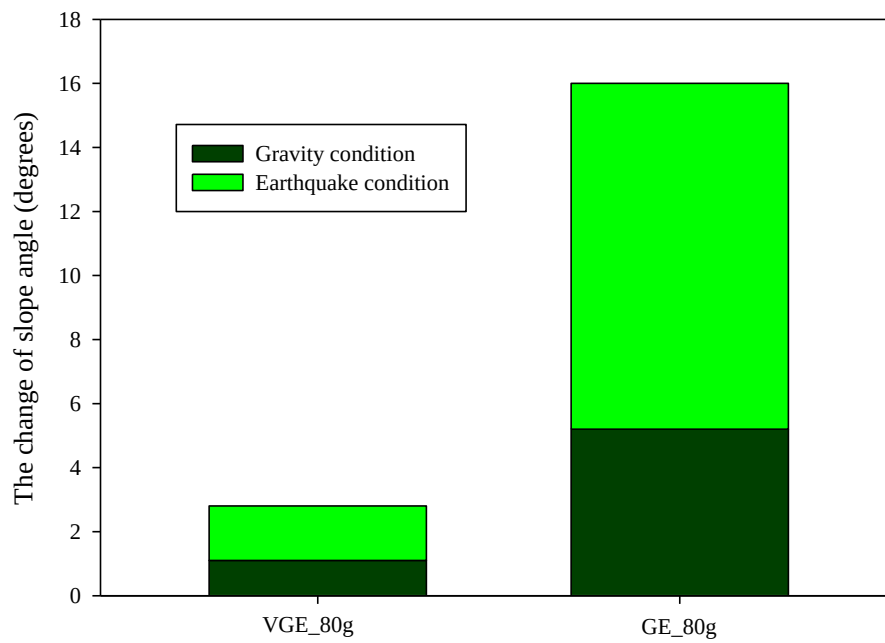


圖 5-1 試驗 VGE_80g 和試驗 GE_80g 坡度比較圖

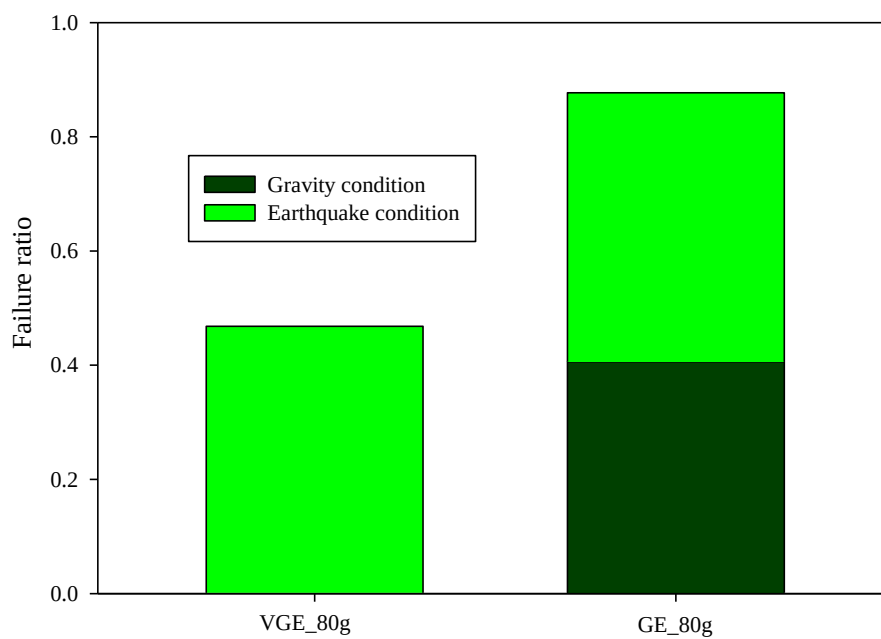


圖 5-2 試驗 VGE_80g 和試驗 GE_80g 楔型破壞面積比比較圖

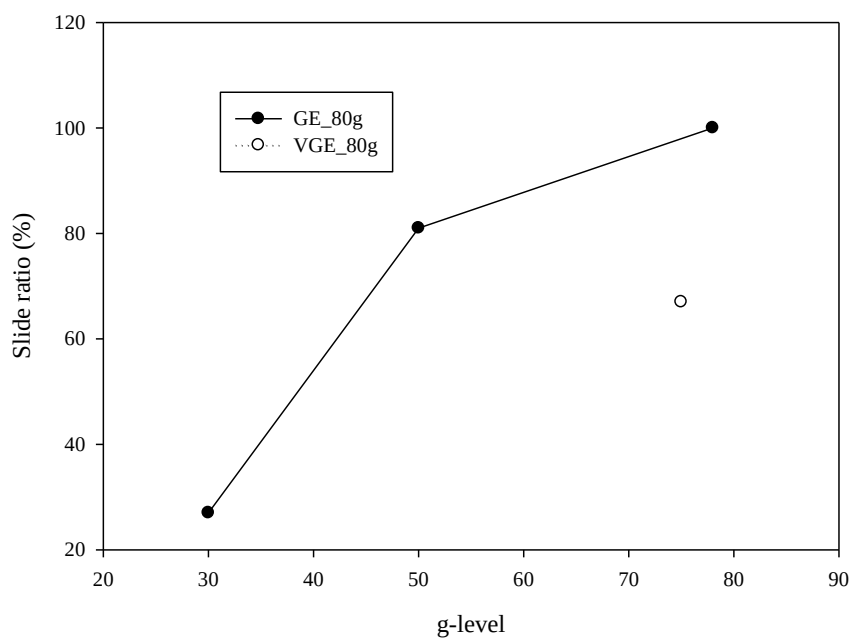


圖 5-3 試驗 VGE_80g 和試驗 GE_80g 滑動面積比率

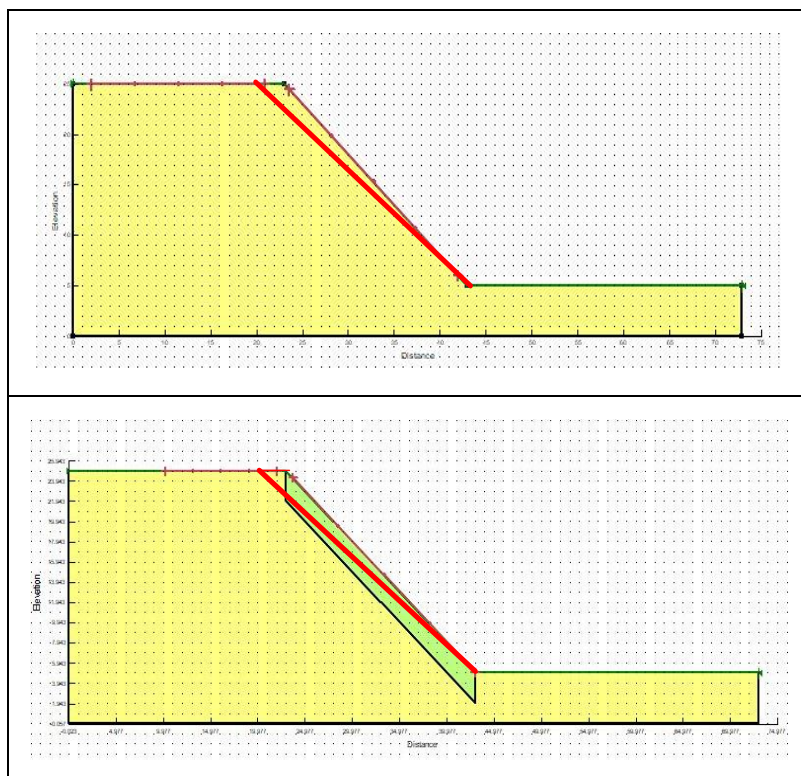


圖 5-4 GeoStudio 2012 邊坡數值模擬模型

表 5-2 GeoStudio 2012 數值模擬結果

	N-30 uniformly	N-70 uniformly	N-30 Dry	N-70 Dry	N-30 Layered	N-70 Layered	GE_80g	VGE_80g
安全係數	1.078	1.046	0.702	0.900	1.122	1.010	30g~ 40g slide	70g~80g slide
滑動土壤 體積 (m^3/m)	4.873	25.028	0.391	25.543	4.921	26.538	25.600	9.310
楔型破壞 面積比	1.414	1.334	0.113	1.361	1.428	1.414	0.406	-

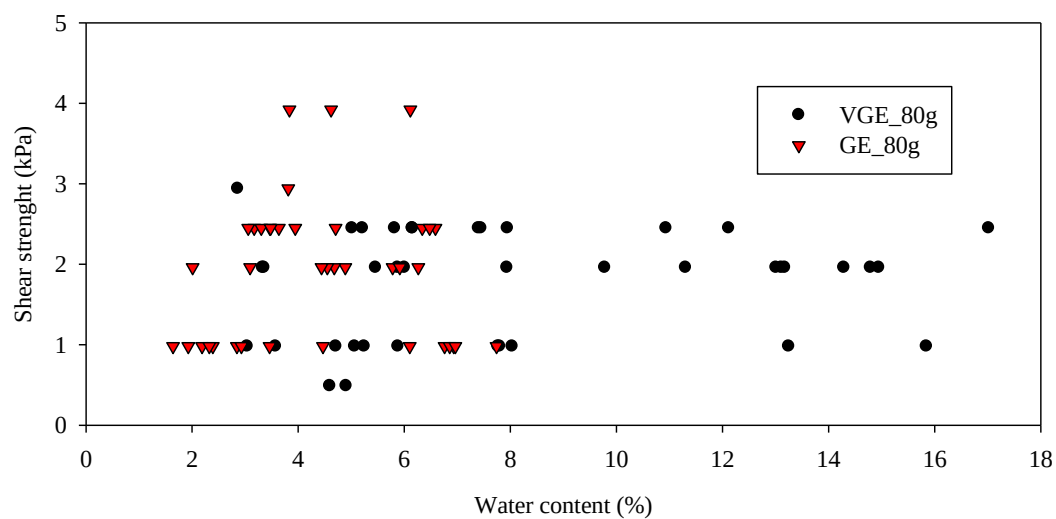


圖 5-5 試驗 VGE_80g 和試驗 GE_80g 土壤含水量與剪力強度關係圖

第二節 地震力條件

根據試驗 E_25g 和試驗 VE_25g 的實驗結果顯示，兩組於基盤加速度為 0.2 g 之情況下，無植生邊坡發生破壞，但植生試體並沒有發生破壞，顯示植生工法能有效減少地震力所引致之滑動，且之後再次輸入振幅更大的振動於邊坡試體後才造成其破壞，如破壞後之試體情形如表 5-3 所示。無植生邊坡破壞後的坡面非常平滑，邊坡上部與下部之水平位移呈現對稱狀態，而植生邊坡試體之坡趾至邊坡中間則有植物根系作用於土體中，土體下滑時根系加勁提升邊坡土體的抗滑、抗剪力，使土體下滑之堆積區範圍不大，如圖 5-6、表 5-3 所示。

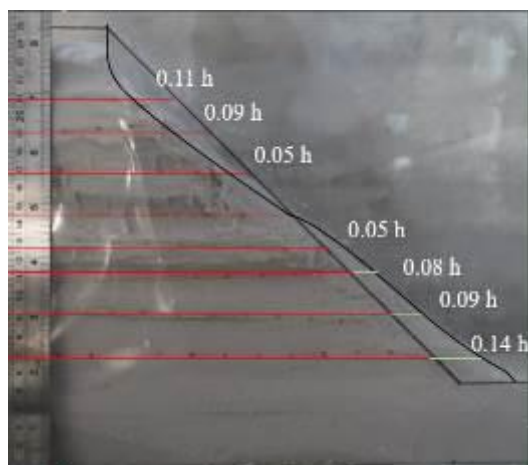
無植生邊坡和植生邊坡之滑動面積比率為 83 %和 100 %，然而植生邊坡因輸入較多次振動事件，因此滑動面積的比例較高，但其滑動破壞的行為明顯不同，如圖 5-7 所示，植生邊坡之坡頂崩塌範圍為無植邊坡的 2~3 倍；而坡趾處之堆積範圍無植生試體為植生試體的 1.5~2 倍，如圖 5-9 所示。此現象顯示，如要施作植生工法，其坡頂後方也是必須注意的範圍之一，而坡趾處植生工法能緩衝土壤堆積的發生。因兩試體皆為砂土，故凝聚力並沒有顯著變化且與含水量無直接關係，由含水量量測得知，邊坡試體受重力引致作用，因此含水量由下而上遞減，如圖 5-8 所示。

由表 5-4 可知，試驗 VE_25g 和試驗 E_25g 的加速度反應，可使用 Newmark 法推估邊坡的降伏加速度，但 Newmark 法假設邊坡滑動土塊為剛塑性材料，故仍需進一步討論。結果顯示，有無植生邊坡於輸入基盤加速為 0.2 g 的情況下，坡頂加速度因場址效應分別放大為 0.27 g 和 0.31 g。試驗 E_25g 的滑動型態並非表面侵蝕，而是較深層的剪切滑動與楔形滑動，楔形滑動破壞比為 0.781，坡角減少為 32 度，滑移距離為 0.24 H。VE_25g_m3 楔形滑動的破壞比為 0.899，坡角減少為 41 度，VE_25g_m2 因離心模型試驗尚未終止而無法對試體進行量測，因此沒有紀錄該次振動事件後之邊坡破壞情形。由上述可知，雖然 VE_25g_m3 破壞比大於 E_25g 約 0.1，但坡角卻大於 E_25g 11 度，因此推斷植生加勁可緩衝土壤堆積。藉由 Newmark 法公式可推斷各試體與振動事件的降伏加速度，E_25g、VE_25g_m2 及 VE_25g_m3 之降伏加速度分別為 0.08 g、0.11 g 及 0.16 g。顯示植生邊坡有較佳的耐震能力，使邊坡較不易受地震力而引致滑動，故能抵抗能量較大的地震。

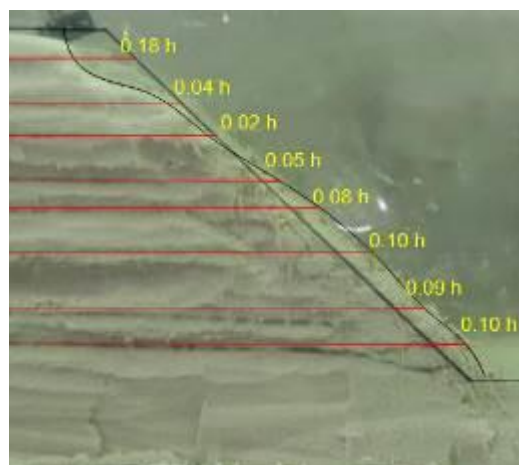
表 5-3 試驗 VE_25g 和試驗 E_25g 邊坡破壞結果整理

試驗	最大垂直沉陷	最大堆積高度 (m)	土壤流失體積	坡腳堆積體積
----	--------	---------------	--------	--------

	(m)		(m ³)	(m ³)
E_25g	0.17H	0.18H	6.71	8.26
VE_25g	0.18H	0.15H	7.60	6.23

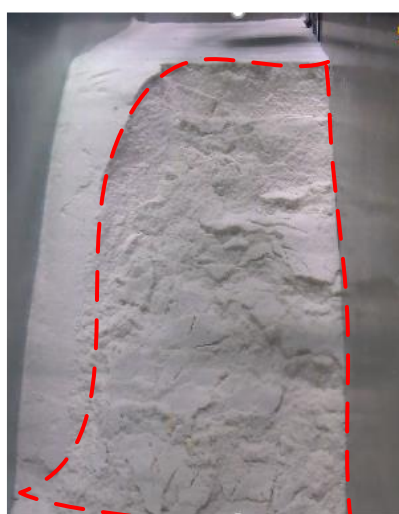


(a) 試驗 E_25g



(b) 試驗 VE_25g

圖 5-6 邊坡側向變形圖



(a) 試驗 E_25g



(b) 試驗 VE_25g

圖 5-7 坡面滑動範圍

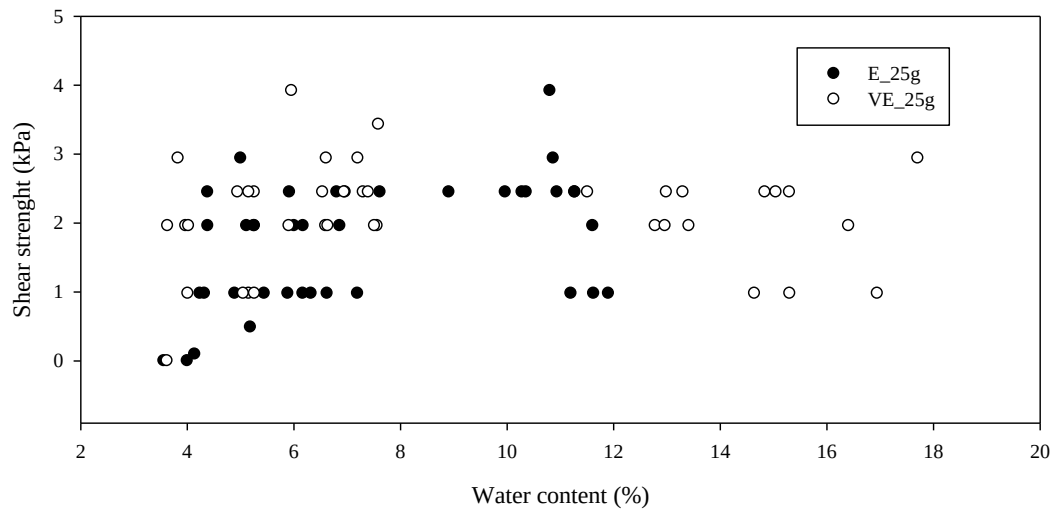


圖 5-8 試驗 VE_25g 和試驗 E_25g 含水量與剪力強度關係圖

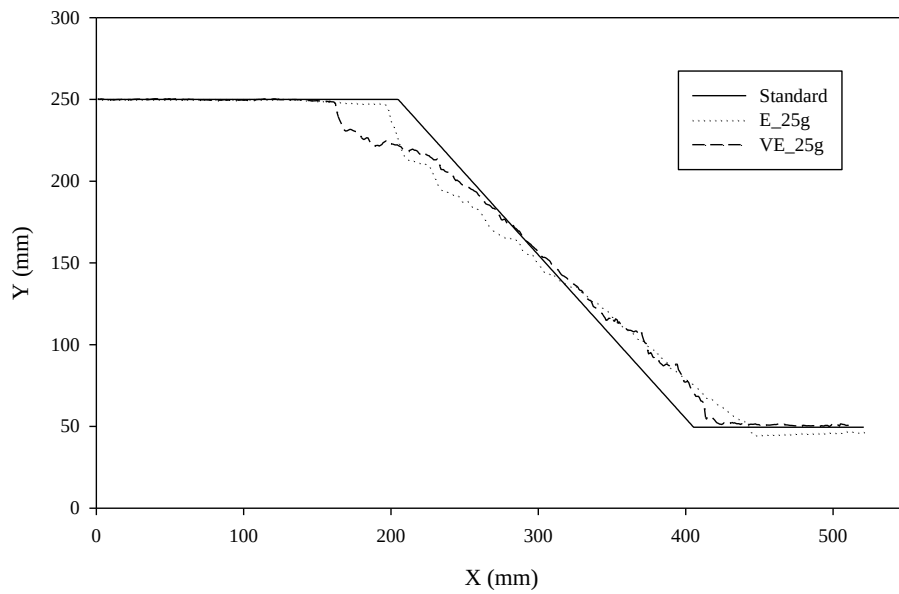


圖 5-9 試驗 VE_25g 和試驗 E_25g 破壞面比較圖

表 5-4 試驗 VE_25g 和試驗 E_25g 邊坡破壞結果整理

試驗	尖峰 基盤 加速 度	尖峰 地表 加速 度	降伏加速度 (水平向)	滑動 面積 比率	楔型 破壞 面積 比	坡度 (degrees)	側向滑移距 離 (m)
E_25g	0.2 g	0.27 g	0.08 g	83 %	0.781	32	0.24 H
VE_25g_m2	0.2 g	0.31 g	0.11 g (假設位移量 與振動事件 m3 相同)	-	-	-	-
VE_25g_m3	0.23 g	0.41 g	0.16 g	100 %	0.899	41	0.25 H

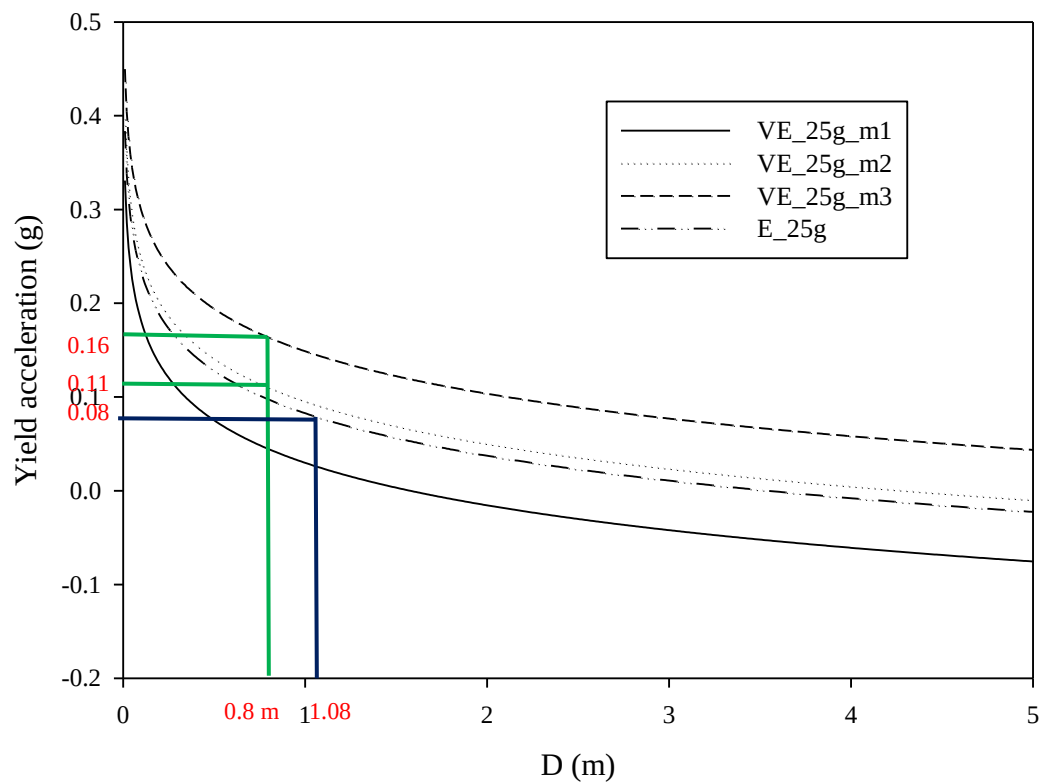


圖 5-10 試驗 VE_25g 和試驗 E_25g 之降伏加速度

第三節 降雨條件

根據試驗 VR_25g 和試驗 R_25g 的實驗結果顯示因受科氏力影響，雨滴由原本的垂直自由落體運動變成拋物線軌跡落下，而降雨強度皆為 197 mm/hr。無植生邊坡之破壞模式主要為坡趾積水掏刷而形成的張力裂縫，且滑移範圍由下而上蔓延延展至邊坡中間層的位置。而植生邊坡因植物根系與土體間有空隙使雨水能流入至邊坡深層區域，故植生邊坡試體發生較深層的平面滑動，如圖 5-11、圖 5-12。

植生邊坡與無植生邊坡之首次滑動時間為 17.5 分鐘和 136.3 分鐘，最後滑動事件之時間為 173.3 和 199.3 分鐘。首次滑動時間植生邊坡比無植生邊坡多了 155 分鐘，但最後滑動時間無植生邊坡比植生邊坡多了 26 分鐘，滑動次數植生邊坡比無植生邊坡多了三次，且停止降雨後約 4 分鐘無植生邊坡仍發生滑動，顯示剛降雨後之邊坡試體有一定的危險性，而植生邊坡因坡趾根系加勁則能防止此現象發生，如圖 5-13 所示。從滑動時間可推測滑動速率，無植生邊坡之滑移速率為 24.76×10^{-4} H/min，而植生邊坡為 7.77×10^{-4} H/min，如表 5-5 所示，由此可知無植生邊坡之滑移速率為植生邊坡之 3.2 倍。植生邊坡因雨水入滲至土體引致較為深層的滑動，而無植生邊坡雖雨水也入滲至土體，但入滲速度不夠快，破壞發生時間較晚，其破壞模式為坡趾積水掏刷。

由表 5-可知，無植生邊坡為表面坡趾掏刷，故不易從側邊判斷出破壞比，植生邊坡因為有較深層的平面滑動，因此可觀測破壞比為 0.67。從滑動比率可得出植生邊坡為無植生的 2.9 倍，且植生邊坡為平面滑動，因此坡頂處有較深的沉陷，最大沉陷量為無植生邊坡的 3 倍，但兩者的最大堆積高度幾乎相同。

圖 5-14 為試驗 VR_25g 和試驗 R_25g 之剪力強度與含水量關係圖，因兩試體皆為砂土故各凝聚力並無顯著變化。

有無植生之邊坡上層含水量於降雨時水壓並沒有變化，因為當雨水入侵時雖能增加含水量，但同時雨水快速向下滲流，導致坡頂無水壓變化，如圖 5-15 所示。無植生邊坡之中間層因離心重力場引致水向下入滲，導致產生 3 kPa 的基質吸力，但 150 分鐘後因降雨入滲導致含水量增加而基質吸力減少不再增加，如圖 5-16 所示。下層因雨水入滲坡底和坡趾積水入滲導致坡趾處地下水位增加使水壓力上升。植生邊坡之最終水壓力約為 18 kPa，而無植生邊坡為 7 kPa，植生邊坡坡趾水壓力之上升速率為無植生邊坡的 2.5 倍，如圖 5-17 所示。此可驗證當雨水入滲時，植生邊坡因土壤與根系間之孔隙導致地下水位上升較快。

詳細探究無植生邊坡之水壓力與由 Geostudio 2012 計算出的土壤水份特性曲線之關係，可推估離心模型試驗的飽和度變化。試體中

間層受離心力引致 3 kPa 的基質吸力，含水量從 10 % 變為 6 %，但又因降雨致使含水量從 6 % 變為 15 %，如圖 5-18 所示，故可推測飽和度原先從 37 % 因重力作用降為 22 %，再受雨水入滲飽和度從 22 % 上升為 56 %。

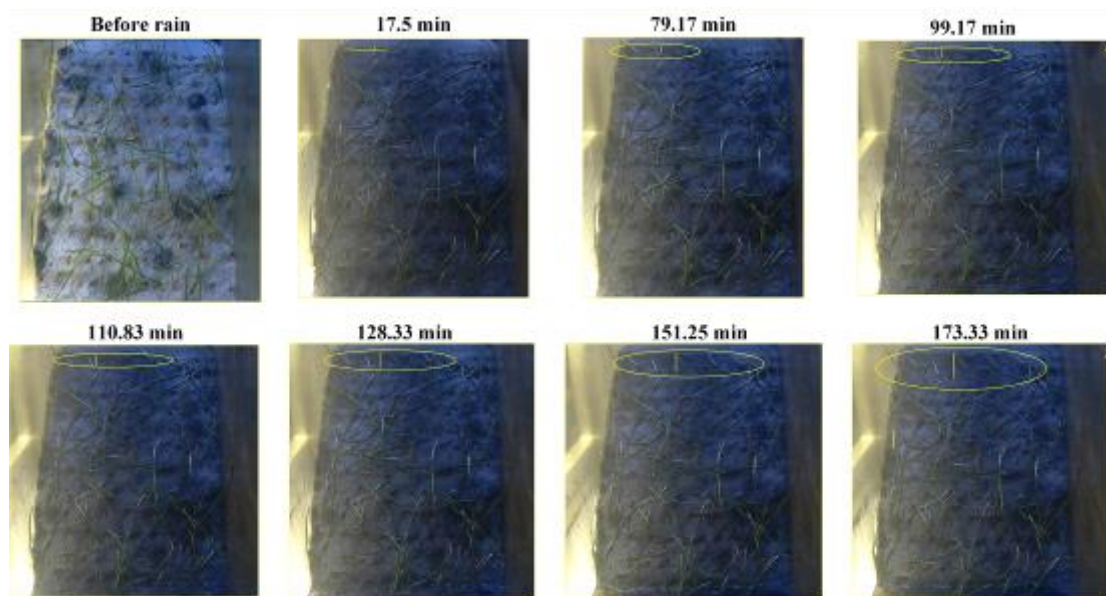


圖 5-11 試驗 VR_25g 邊坡破壞歷程

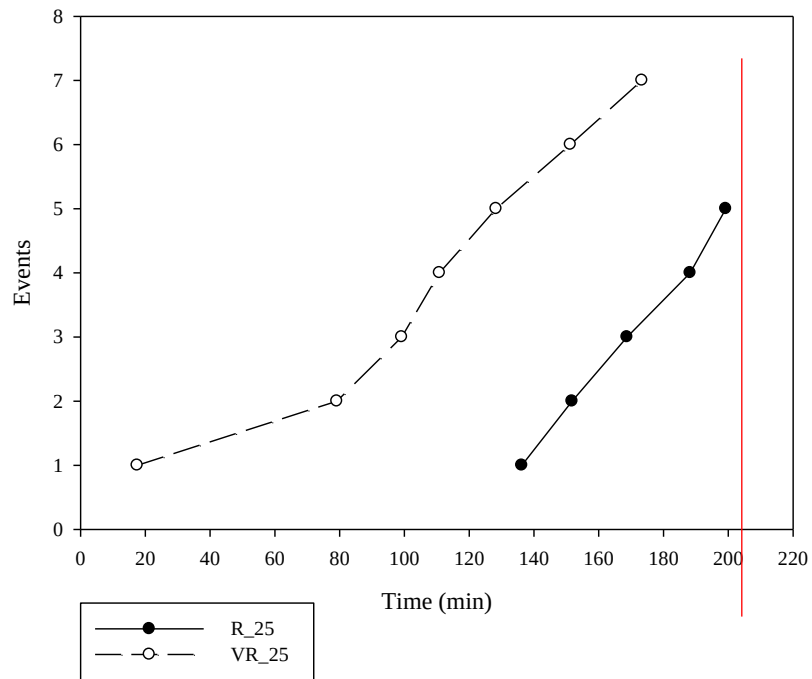


圖 5-12 試驗 R_25g 和試驗 VR_25g 滑動事件時間圖

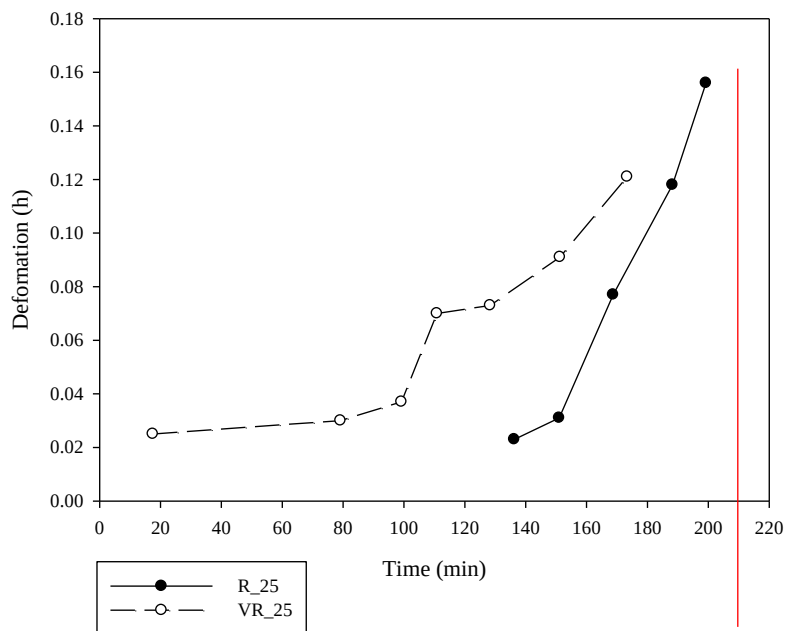


圖 5-13 Slide distance of 試驗 R_25g 和試驗 VR_25g 側向變形與時間關係圖

表 5-5 試驗 R_25g 和試驗 VR_25g 邊坡滑動結果

	最大滑移 距離 (m)	初始滑動 時間 (分鐘)	最後滑動 時間 (分鐘)	滑動速率 (m/分鐘)
R_25	0.156 H	136.3	199.3	$24.76 \times 10^{-4} H$
VR_25	0.121 H	17.5	173.3	$7.77 \times 10^{-4} H$

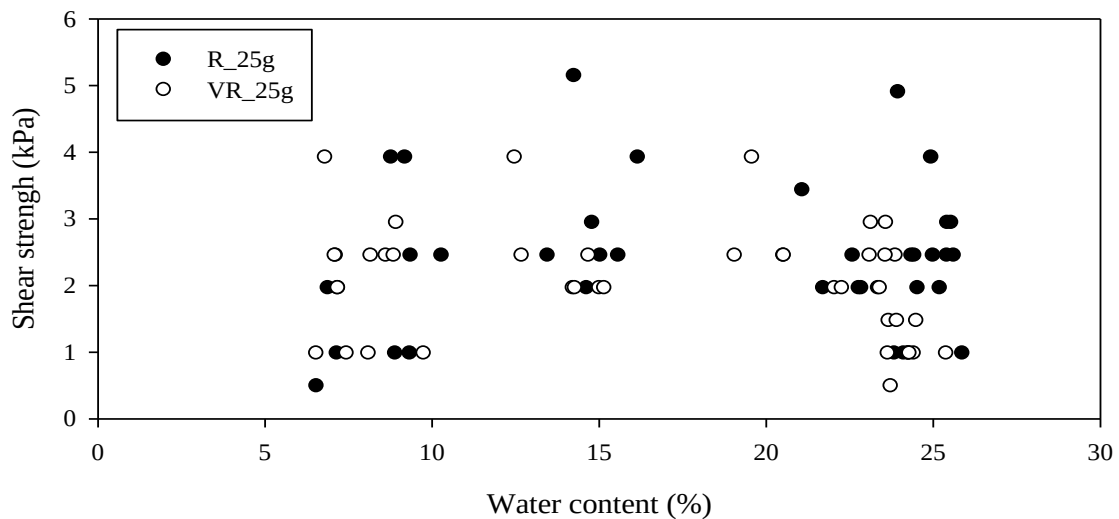


圖 5-14 試驗 VR_25g 和試驗 R_25g 土壤含水量與剪力強度關係圖

表 5-6 試驗 R_25g 和試驗 VR_25g 邊坡破壞結果整理

	楔型 破壞 面積 比	滑動 面積 比率	最大垂直 沉陷 (m)	最大堆積高 度 (m)	土壤流 失體積 (m ³)	坡腳堆積體 積 (m ³)
R_25	-	0.337	0.020 H	0.045 H	2.48	0.08
VR_25	0.67	0.970	0.060 H	0.054 H	1.00	0.88

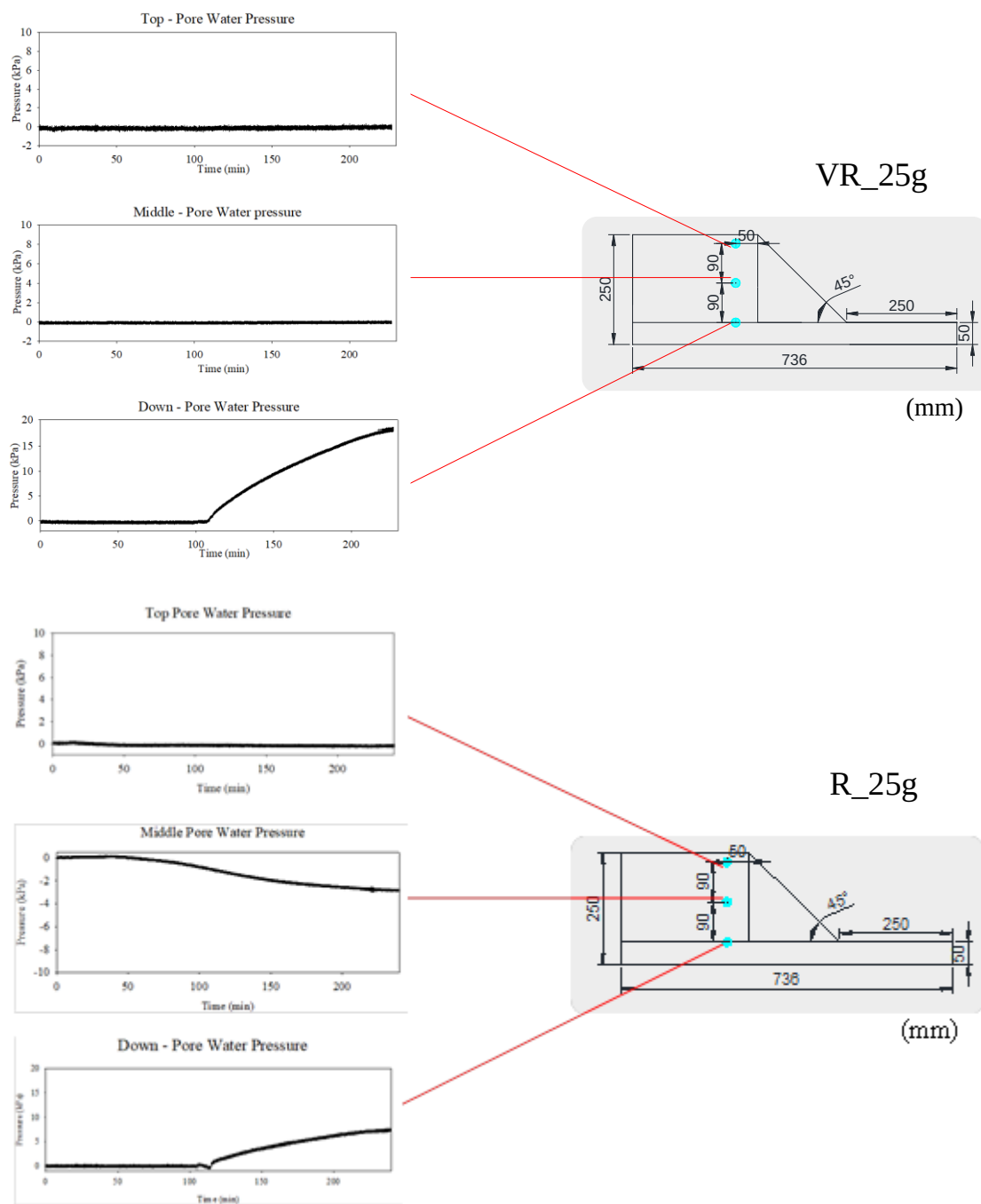


圖 5-15 試驗 VR_25g 和試驗 R_25g 孔隙水壓反應比較圖

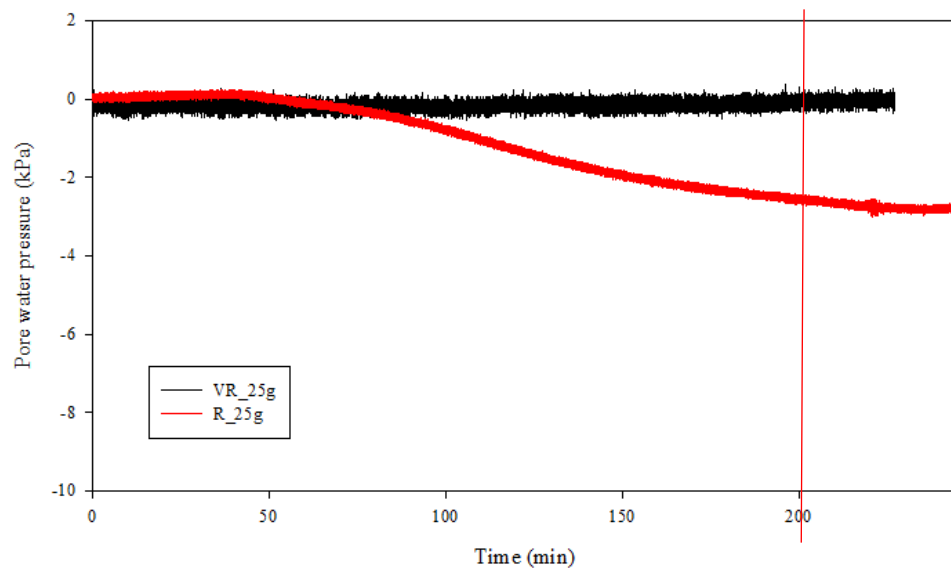


圖 5-16 試驗 VR_25g 和試驗 R_25g 孔隙水壓反應比較圖 (中間土層)

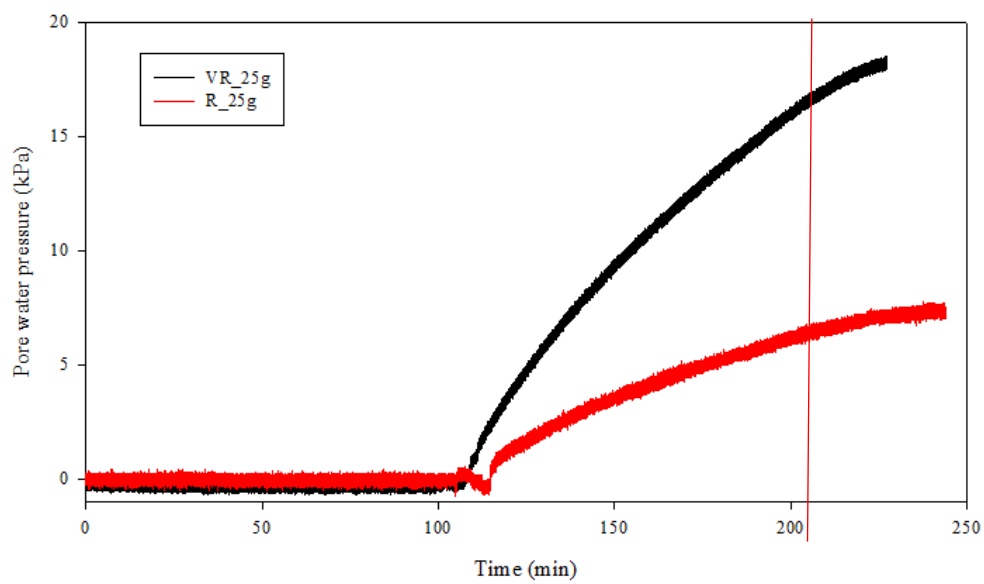


圖 5-17 試驗 VR_25g 和試驗 R_25g 孔隙水壓反應比較圖 (底層土層)

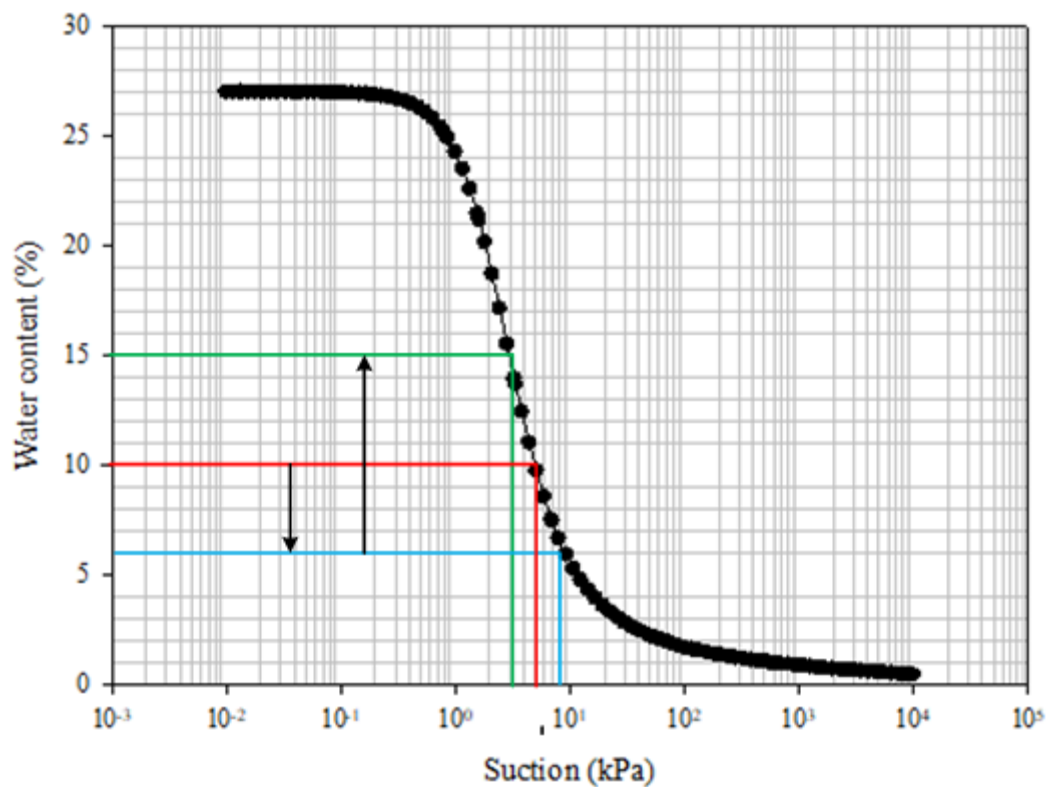


圖 5-18 試驗 R_25g 中間土層土壤之土壤水分特性曲線

第四節 重力、地震力及降雨之綜合比較

綜觀上述結論，植生加勁工法可有效增加邊坡穩定性且減少土壤沖蝕。因重力引致破壞之植生邊坡為表面滑動並無深層破壞，故從側視圖無法得知破壞比，如圖 5-19 所示。地震力引致之最大沉陷和最大堆積高度分別為 0.15 H 和 0.18 H，而降雨引致之最大沉陷和最大堆積高度分別為 0.06 H 和 0.05 H，從側視圖可知除了上坡有深層滑動外，大部分為表面入滲和地表逕流導致的側向滑移。地震力引致之

破壞比為 0.899，降雨引致之破壞比為 0.337，顯示地震力對植生邊坡穩定性之破壞較降雨具有更強大的破壞力，如圖 5-20 所示。

重力引致造成 67 %坡面滑動其為範圍最小者，依次為降雨及地震兩者皆造成 97 %和 100 %的坡面滑動，顯示深層破壞易造成大範圍的坡面滑動，邊坡植生工法在地震力作用下，會穿過根系加勁區域下方，引致較深層的破壞，如圖 5-21、圖 5-22 所示。

此三種破壞力引致之坡角變化皆可分別以植生工法達到加勁之效果，尤其於坡趾處植物根系可減少從上坡滑下的土體，即能減少土體堆積區域。植生工法於此三種條件下都能緩衝坡角至 40 度以上，但以地震力條件之坡角變化最為劇烈，如圖 5-23 所示。坡角變化能間接得知土體堆積量的多寡，因此可對坡趾附近潛在受邊坡滑動影響之堆積區域作防患。

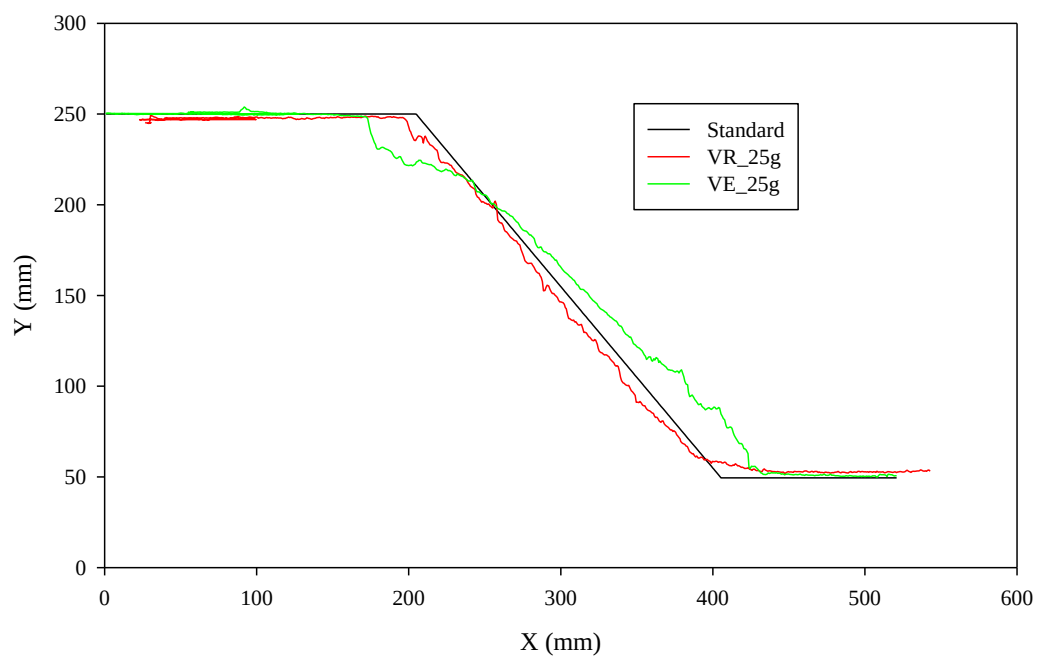


圖 5-19 試驗 VR_25g 和試驗 VE_25g 邊坡破壞面比較圖

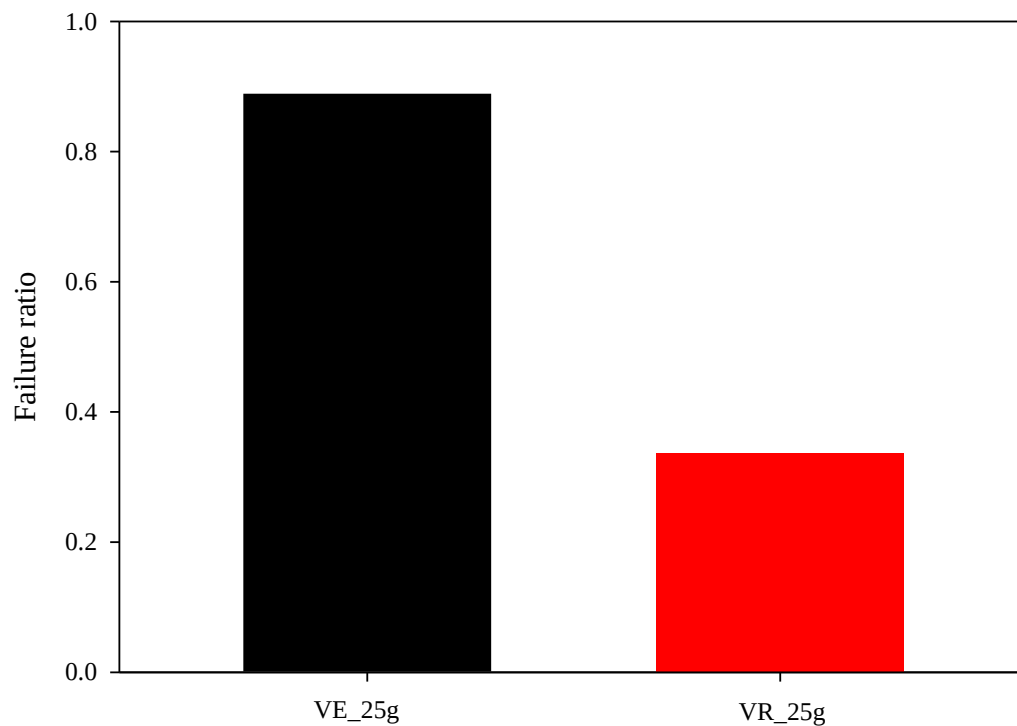


圖 5-20 試驗 VR_25g 和試驗 VE_25g 楔型破壞面積比比較

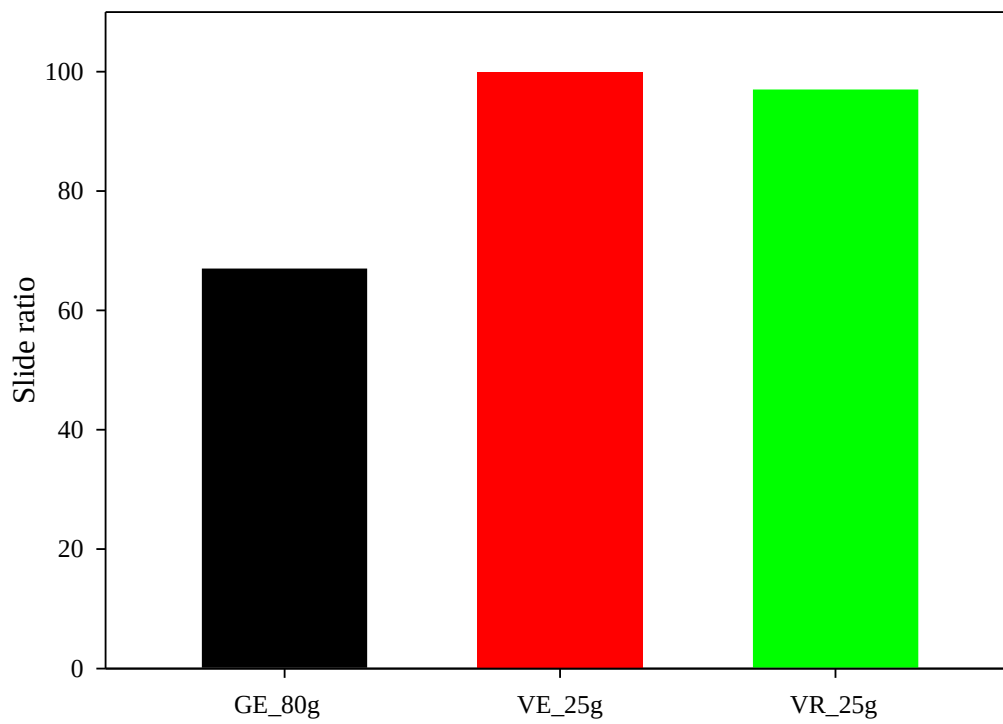


圖 5-21 試驗滑動面積比比較圖

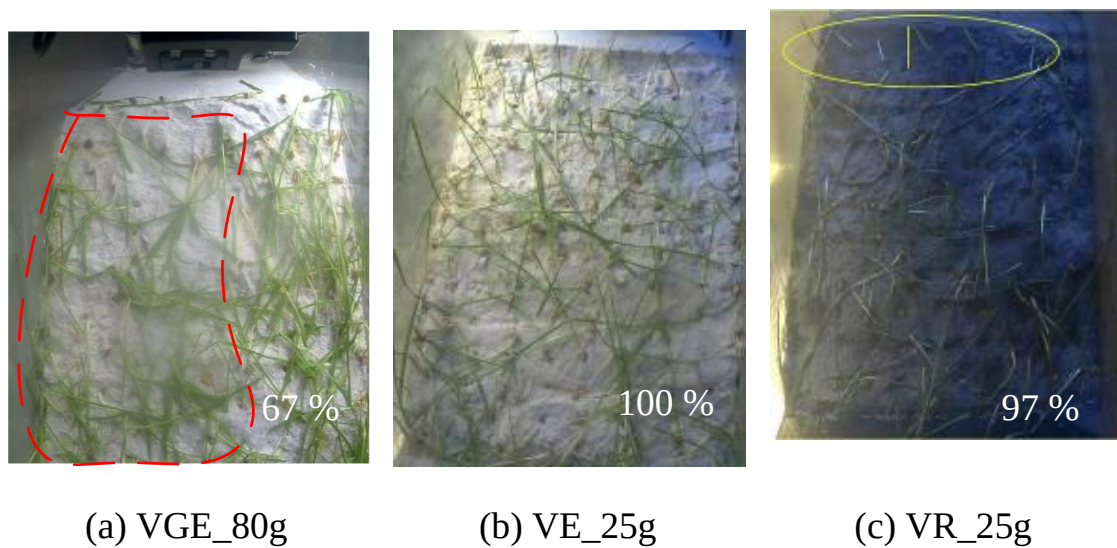


圖 5-22 試驗滑動面積範圍上視圖

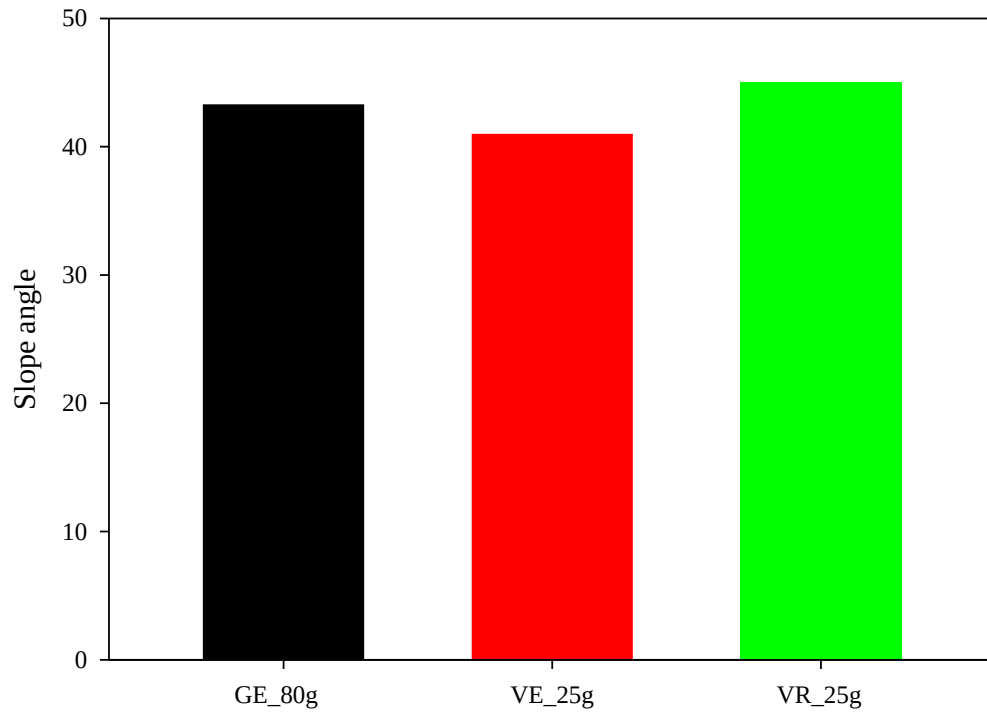


圖 5-23 試驗坡角比較圖

第六章 結論

本研究試驗內容包含材料基礎特性測試與離心振動台試驗，材料基礎特性包括石英砂之粒徑分佈、剪力強度、滲透係數、小麥草之基本生長特性，石英砂與小麥草根系結合後之剪力強度與滲透係數等，再進行離心振動台試驗，使用小麥草模擬植物根系在邊坡中的加勁效果，分別在重力場改變、基盤地震力輸入與強降雨的作用下，探討邊坡植生對邊坡抗沖蝕效能及邊坡穩定性的影響。試驗中以攝影機監測邊坡滑動破壞情形，試驗前後以雷射掃描紀錄邊坡表面高程變化。

試驗結果顯示：(1) 由直剪試驗結果顯示，具有根系的砂土試體內摩擦角會增加約 6 度，凝聚力則影響不大；(2) 由定水頭試驗結果顯示，根系對砂土滲透係數沒有明顯的影響；(3) 離心模型振動台試驗結果顯示，加入根系的邊坡試體在受振後之坡頂沉陷減少約 50%，且坡腳堆積區坡角增加 11 度，砂土堆積體積水平範圍減少 13%。試驗後將植生與未植生邊坡模型剖面進行含水量試驗，結果顯示試驗後邊坡含水量隨高度增加而遞減，邊坡表面的含水量偏低；(4) 模擬降雨作用試驗結果顯示，無根系加勁邊坡之滑動速率為根系加勁邊坡的 3.2 倍，植物根系能減緩淺層邊坡滑動發生，但發生滑動時破壞面較深且試體之地下水位上升速度快約 2.5 倍。

本報告以縮尺物理模型試驗初步模擬植物根系對於邊坡土壤加勁之效果，並考慮基本的自然營力如重力、地震力和降雨等。在本研究試驗過程中發現植物根系對土壤加勁具有不確定性，未來研究工作可針對此不確定性、不同植物根系、根系深度和密度等等條件探討植生對於邊坡土壤加勁之效果。目前許多邊坡施工準則和規範中，雖並無針對植生邊坡加勁進行建議，然而有考慮坡度、抗沖蝕、植生種植難易度、植生高度與安全性等等給出建議和規範。透過本研究結合未來的研究成果，期望之後可以在這些建議規範的基礎下進一步考慮邊坡加勁之效益。

參考文獻

1. Askarinejad, A., Laue, J., Zweidler, A., Iten, M., Bleiker, E., Buschor, H., Springman, S.M., “Physical modelling of rainfall induced landslides under controlled climatic conditions,” EuroFuge 2012, pp. 1-10, 2012.
2. Askarinejad, A., and Springman, S. M., “Centrifuge modelling of the effects of vegetation on the response of a silty sand slope subjected to rainfall,” Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics - Proceedings of the 14th Int. Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, IACMAG 2014, pp. 1339-1344, 2015.
3. Ali, F.H., and Osman, N., “Shear strength of a soil containing vegetation roots,” Soils Found, Vol. 48, pp. 587-596, 2008.
4. Chen, C. W., Chen, H., and Oguchi, T., “Distributions of landslides, vegetation, and related sediment yields during typhoon events in northwestern Taiwan,” Geomorphology, Vol. 273, pp. 1-13, 2016.
5. Chen LK., Chen SC., and Ke MC., “Centrifuge model test study of rainfall-induced deformation of cohesive soil slopes,” Soils and Foundations, Vol 51, pp 297 - 305, 2011
6. Coulomb, C. A., “Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de stratique, relatifs a l’ Architecture,” Memoires de Mathematique et de Physique, Presentes a l’Academie Royale des Sciences, Paris, Vol. 7, pp. 343-387, 1776.
7. Das, B.M. and Sobhan, K., Principles of Geotechnical Engineering, Ninth Edition, SI, Cengage Learning, Boston (2016).

8. Eab, K. H., Bransby, A. and Likitlersuang, S., “Centrifuge modelling of root-reinforced soil slope subjected to rainfall infiltration,” *Geotechnique Letters*, Vol. 4, pp. 211–216 (2014).
9. Fredlund, D, G., and Xing, A., “Equation of soil-water characteristic,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 521-532, 1994.
10. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A., “The shear strength of unsaturated soils,” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321, 1978.
11. Hung, W, Y., and Tran, M, C., “Centrifuge Modelling on Failure Behaviours of Sandy Slope Caused by Gravity, Rainfall and Earthquake,” *National Central University* pp. 100-111, 2017.
12. Kreng, H, K., Likitlersuang, S., and Takahashi, A., “Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation,” *Soils and Foundations*, Vol. 55, pp. 1270-1281, 2015.
13. Ling, H. I., Wu, M. H., Leshchinsky, D., and Leshchinsky, B., “Centrifuge Modeling of Slope Instability,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 6, pp. 758-767, 2009.
14. Ling, H., Ling, H. I., and Asce, M. “Centrifuge Model Simulations of Rainfall-Induced Slope Instability,” *Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, pp. 1151-1157, 2012.
15. Liang, T., and Knappett, J. A., “Newmark sliding block model for predicting the seismic performance of vegetated slopes,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 101, pp.27-40, 2017.

16. Mohr, O., "Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials?, " Zeit des Ver Deut Ing , Vol. 44, pp. 1524-1530, 1900.
17. Nishimura, T., "Relationship between shear strength and matrix suction in an unsaturated silty soil," Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils, pp.563-568, 2000.
18. Operstein, V., and Frydman, S., "The influence of vegetation on soil strength," Ground Improvement, Vol. 4, pp. 81-89, 2000.
19. Rutherford, I. D and Abernethy, B., "The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement," Hydrol. Proc, Vol. 22, pp.63-79.
20. Tohari, A., Nishigaki, M., and Komatsu, M., "Laboratory Rainfall-Induced Slope Failure with Moisture Content Measurement," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 5, pp. 575-587, 2007.
21. Taylor, R.N., "Centrifuges in modelling: principles and scale effects," Geotechnical centrifuge technology, Champ & Hall, pp.19-33, 1995.
22. Terzaghi, K., "The shear resistance of saturated soils." In Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass, Vol. 1, pp.54 - 56, 1936.
23. Wang, R., Zhang, G., and Zhang, J. M., "Centrifuge modelling of clay slope with montmorillonite weak layer under rainfall conditions," Applied Clay Science, Vol. 50, No. 3, pp. 386-394, 2010.

24. Wang, R., Zhang, G., Zhang, and J.M., “Centrifuge modelling of clay slope with montmorillonite weak layer under rainfall conditions,” *Applied Clay Science*, Vol.50, No. 3, pp. 153-164, 2010.
25. Wu, T. H., W. P. McKinnell III, and Swanston, D. N., “Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, ” *Alaska, Can. Geotech. J.*, Vol.16, pp. 19-33, 1979.
26. Yu, Y., Deng, L., Sun, X., and Lu, H., “Centrifuge modeling of a dry sandy slope response to earthquake loading,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 447-461, 2008.
27. Zhang, G., Qian, J., Wang, R., and Zhang, J. M., “Centrifuge model test study of rainfall – induced deformation of cohesion soil slopes,” *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 2, pp. 297-305, 2011.
28. Zhang, G., Qian, J.Y., Wang, R., Zhang, and J.M., “Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 1, pp.85-98, 2010.
29. 张敏，吴宏伟，「边坡离心模型试验中的降雨模拟研究」，*岩土力学*，第 28 卷，第 53-57 頁，2007 年。
30. 介玉新，柏永亮，张彬，「边坡稳定分析中加速度临界滑动面研究」，*工程地质学报*，第 25 卷，第 1238-1244 頁，2017 年。
31. 田海，孔令伟，李波，「降雨条件下松散堆积体边坡稳定性离心模型试验研究」，*岩土力学*，第 36 卷，第 11 期，第 3180-3186

- 頁，2015 年。
32. 卓越人，「離心機模擬水文因子導致滑坡之研究」，國立高雄大學，2012 年。
33. 林俐玲，陳威竹，「應用土壤粒徑分布模式推估土壤水分特性曲線之研究」，第 11-15 頁，2013 年。
34. 經濟部水利署北區水資源局，「崩塌地植生工程與應用植生手冊」，第 36-51 頁，2007 年。

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	試驗土樣是否只使用石英細砂或是還有高嶺土及礫石？ P7與P10說明何以不同？	本研究原本預計使用與前一期計畫相同之石英細砂混高嶺土材料，以模擬現場顆粒性土壤與凝聚性土壤混合材料。但經過試驗後，小麥草無法在該土壤中生長，因此改由純石英砂進行試驗。
二	夯實能量為何？作法為何？	本研究以每層兩公分方式使用濕搗法製作試體，先混合石英砂與 10%含水量，在已知邊坡體積中填入已知重量土壤的以達到土壤目標單位重，以達到設定之相對密度。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	P13試驗成果欲與數值模擬比對，使用之軟體為何？	本研究主要以物理模型試驗進行模擬，本階段尚未規劃數值模型模擬。因本研究使用的是非飽和土壤，離心模型試驗過程中，含水量會隨重力場而改變，進而改變基質吸力，因此建議可以使用模擬非飽和土壤，或以視凝聚力方式進行模擬。
四	P12植生之影響能否量化？方法為何？	本研究中使用根-面積比進行植生效果之量化，亦即小麥草根截面積總和除以坡面總面積，作為評估植生之量化方法。
五	本試驗是否使用湄公河土樣？另河堤邊坡崩塌之機制與本試驗之降雨入滲崩塌好像不太一致，煩請說明。	越南肯特湄公河土樣是顆粒性土壤混部分凝聚性土壤，但肯特大學希望藉由本試驗得到植生對淺層邊坡穩定之效

項次	審查意見	回覆辦理情形
		果驗證，以期未來能運用於河堤坡面植生增加其穩定穩定性之現場試驗。本研究未來將進行週期性河水面拍打岸面土壤引致的破壞行為實驗，進而提供肯特大學在現場進行植生對河堤邊坡穩定試驗之參考。
六	本研究未來如何回饋本局應用，有勞思考。	本研究結果將初步提供已知植生的根-面積比情況下，重力、降雨及地震力作用下，滑動體積比與坡面滑動面積比等結果，瞭解植生對淺層活動有效性評估。
七	物理模擬中，關於土壤結構與粒徑的模擬似乎較欠缺。	在小型物理模型試驗中，通常使用均質材料以簡化土層條件，並以質降或壓實方法控制顆粒性土壤單位重（相對密

項次	審查意見	回覆辦理情形
		度)，進而控制土壤滲透性，未來若模擬現地邊坡的行為，可以使用現地土壤進行實驗。
八	以植生方法作為抗震的作為有違水土保持植生概念，通常植生只應用於抗沖蝕作用。	本研究雖然使用小麥草進行表面植生，但在高重力場環境下，根系的效果可以達到比較深的情況，類似加勁或土釘之效用，因此在降雨情況下，地表以上的草可以作為降雨之緩衝，避免坡面土壤的侵蝕，在地震與重力情況下，根系可以模擬喬木的根系對邊坡有淺層加勁的效果。
九	試驗條件建議有小於安息角（ 34.5° ）的條件。	針對顆粒性土壤在坡角小於安息角的條件下，重力不會引致邊坡破壞，因地震引致破化的臨界加速度亦較大，試驗結

項次	審查意見	回覆辦理情形
		果無法凸顯淺層土壤因植生根系的加勁效果，因此本研究規劃在大於安息角的情況下進行試驗，且已 10%含水量具有基質吸力的不飽和情況下進行試體準備。誠如委員建議，在較緩坡度情況下，可以準備乾砂試體，去除離心模型試驗過程中因孔隙水流定引致基質吸力改變的影響，進而探討不同外力作用下植生對緩坡穩定性的效果。
十	模擬的土壤深度在於植生根系深度，請問原因為何？	坡面植生根系的長度約為 30 mm，約為坡高的 15%，主要模擬淺層加勁對穩定性與抗侵蝕能力的效果。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十一	建議模型與原型間的關係應有較嚴謹的說明。	感謝委員建議，已於期中報告內容詳述離心模型試驗中，模型與原型之間的對應關係，以及量測的各物理量之換算。
十二	植物盤根現象易形成土壤內部之不連續面，導致滑動面產生，建請探討其根系之力學有效性。	感謝委員建議，不同植物的根系發展不同，因地質條件與盤根現象確實會造成不連續之弱面，使邊坡滑動時沿該弱面錯動。本研究為簡化根系之加勁影響，選擇單一根係的小麥草進行試驗，未來的試驗可以選擇會發展茂密根系的植物，探討不同盤根情況植生在邊坡穩定的影響程度。
十三	地下水位高低影響根系發產，建請一併探討其影響性。	目前實驗之邊坡試體是以10%含水量進行準備，小麥草培養時係以霧狀灑水系統進行供水，使根系能垂直向下身長約

項次	審查意見	回覆辦理情形
		30mm，在進行離心模型試驗。誠如委員建議，未來可以進行非均一根系深度的研究，以探討其影響性。
十四	根系對於淺層崩塌的助益與根系的型態之關係（深度與分佈）值得進一步探討。	感謝委員建議，根系的發展型態對淺層邊坡滑動有不同的抵抗能力，未來確實可以在單一種外力作用下，探討不同根系型態對邊坡穩定的影響。
十五	離心機與模型試驗中，重力與植生抗剪能力是否為等比例？宜有系統化分析。	在離心模型試驗中，重力場的增加會增加土壤自重，使區動力增加，亦增加土壤有效圍壓，但不會增加植生根系本身的抗剪強度，因此重力場增加，在邊坡穩定分析中會增加驅動力，不會增加抵抗力，從試驗結果可以探討不同材料、不同加勁方式的臨界坡

項次	審查意見	回覆辦理情形
		高，亦為離心模型試驗之優點。
十六	土壤沖蝕量除降雨強度外，與匯水面積有關，另根系亦可能產生指狀流（fingering flow），如此則滲透量會增快。	感謝委員建議，確實降雨強度、匯水面積會影響地表土壤沖蝕量，因此實驗中會固定匯水面積以比較降雨強度的影響程度。植物根系引致的流動情況會影響水體入滲速度，未來亦可以針對指狀流的影響進行試驗與探討。
十七	如何分類不同外力導致發生之土砂災害類型，且不同災害類型對擋土結構之影響如何量測？	本研究過程中，會以僅施加重力、降雨或地震力的方式，探討不同外力導致的滑動程度，未來的後續研究若設置擋土結構物時，會以應變計、土壓計、雷射位移計等感測器，量測擋土結構所受彎矩、土壓力分布與牆體位移等物理

項次	審查意見	回覆辦理情形
		量，進行有效性的評估。
十八	降雨引致之災害類型，其降雨強度之設計基準為何？是否探討災害事件降雨、不同頻率年降雨或氣候變遷下降雨強度改變之降雨強度事件。	感謝委員建議，本研究選擇兩種降雨強度，一為接近台灣過去曾經經歷的極限降雨強度197 mm/hr，未來可以依委員建議進行不同強度、頻率、延時的探討，瞭解不同降雨因子對邊坡穩定的影響。
十九	各組離心模型試驗，其詳細試驗條件，建請補充於書面報告。	謝謝委員指教，各組離心模型試驗之試驗條件，補充於期中報告第四章第二節裡。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二十	試驗使用三種不同土砂材料，其三種之比例為何？是均質材料或混合粒徑試驗？	本研究原本預計使用與前期計畫相同之石英細砂混高嶺土材料，但經過試驗後，小麥草無法在該土壤中生長，因此改由純石英砂進行試驗。按統一土壤分類法，本研究使用的石英砂屬於均勻粒徑的不良級配砂土。
二一	植生根系對抗沖蝕（刷）之影響（保護效益）可否試驗模擬？	離心模型試驗中的降雨與循環系統，未來可以探討植生根系對抗沖蝕的影響，在後續的計畫中進行模擬與探討。

附錄二、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	實驗的尺度如何轉為現場尺度？	本報告使用離心模型試驗係可藉由增加離心加速度模擬不同倍數的地球重力場使縮尺模型可模擬與原型（現場）尺度相同的物理行為，離心模型試驗中相關尺度的轉換請參閱本報告第二章第五、六節。本報告中除非有特別註明，否則所有物理量、單位皆是以原型尺度和比例呈現。
二	一般草本植物的根性最深約達 30cm，如何提供加勁或土釘功能？	本研究報告係提供植物根系對於邊坡穩定的有效性，為簡化實驗與分析之複雜性而選用單一根系的小麥草，並非模擬與建議現場施作時使用草

項次	審查意見	回覆辦理情形
		本植物。在真實情況中若邊坡上為種植喬木類等，則其根系可達土壤較深處，以達到加勁效果。感謝委員之意見，已於本報告第三章第一節中補充說明。
三	根系密度與內摩擦角增加之關係為何？	本報告為初步探討植物根系對於土壤加勁的效果，並無進一步探討根系密度與內摩擦角之關係，在未來可以探討小麥草根系密度對於土壤加勁的影響與其邊界效益，或測試根系較密植物的效果，以最佳化應用在山坡地施作工程上，並在現地針對不同種植生使用給予建議。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	採用草本植物作為邊坡抗震，且具有一定功能是否符合實際狀況？	本報告係以縮尺模型探討植物根系對於土壤加勁的效果，並非建議現地採用草本植物。由試驗結果顯示具根系加勁之邊坡對於抗震有一定的改善效果，試驗中為了縮尺模型製作的可行性與降低實驗與分析的複雜性因而選用小麥草。感謝委員之意見，已於本報告第三章第一節中補充說明。
五	實驗的邊界效應如何消除？	由試驗中攝相機所記錄的坡面影像顯示出於邊界與試體中心在發生滑動、位移後並無因邊界影響而產生位移差異，據此判斷試驗中之邊界效應可以忽略。而在離心模型試驗中，主要為分析試體剖面中

項次	審查意見	回覆辦理情形
		心之行為，以最小化可能的邊界效應的影響。
六	此研究係以石英砂為主進行相關試驗，惟現地狀況不如試驗室中完美，請問使用砂土之原因為何？另，後續如有相關延續研究，建議可加入討論細粒土壤（如粉土或黏土等）。	一般在進行實驗室試驗時為了試體模型準備的可行性、降低試驗與分析之複雜性和研究結果之可比較性並標準化試驗結果，通常都選用均質且粒徑單一的石英砂或重模試體進行試驗。 感謝委員提供建議，以於第三章第二節補充委員之提問。未來可以針對不同土壤條件如黏、粉土比例較高之土層，進行模型試驗，以探討增加細粒料土壤對於植生工法效果的影響。

項次	審查意見	回覆辦理情形
七	此研究之植生材料係使用小麥草，後續如需在現地使用相關植生材料，是否有建議之草種或木本植物？另，建議可利用根系之長度為依據，進行邊坡穩定度相關試驗，以利後續現地使用植生材料之參考。	感謝委員建議，因本報僅初步探討植物根系對於邊坡土壤的加勁效果，對於不同根系種類、根系密度和深度等對於邊坡土壤加勁的影響並未有全面的研究和瞭解，目前許多邊坡施工準則和規範中，雖並無針對植生邊坡加勁進行建議，然而有考慮坡度、抗沖蝕、植生種植難易度、植生高度與安全性等等給出建議和規範。透過本研究報告，期望未來可以在這些建議規範的基礎下進一步考慮邊坡加勁之效益。
八	研究成果中，提及植物根系的表面加勁作用具不確定性，建議這部分可深入探討其不確	感謝委員建議，本報告因僅初步探討植物根系對土壤加勁之效果，對於其他行為如加勁

項次	審查意見	回覆辦理情形
	定性之來源，例如植生密度或根系種類等等。	之不確定性、根系密度和深度與加勁之關係等並未深入探討，未來研究工作將會更全面探討根系加勁等各種因素。
九	P5-2 說明使用 GeoStudio2012 軟體進行模擬，惟其不同情境建議加以說明，譬如 N-30 或 N-70 之意義等。	感謝委員建議，以於報告中第五章第一節補充敘述。試驗代號中，N 表示該試驗為數值模擬(Numerical simulation)、數字表示其模擬的重力場。

附錄三、期末報告會前審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	此研究之邊坡砂土模型中，關於植生係以20 mm之間距植入小麥草種子，這部分密度是否有依據可循？另，根據實驗結果顯示，大部分的破壞皆為抽出破壞，研判與植生密度可能有關，建議後續可再針對不同植生密度進行比較。	於離心模型內植生種植之設計間距有部分參考公共工程委員會施工綱要規範第02920章-植草第3節施工之說明。本篇報告為以物理模型試驗探討根系加勁土壤之效果，因此模型內植生設計主要依據試體模型準備過程、避免植物根系密度過高影響試驗結果與物理試驗之合理性等考量，前述規範依據為確保試驗設計間距與實際施工之設計間距在同一個量級內，非完全按照該規範進行縮尺。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	P4-21 表4-8中係以滑移距離進行比較說明，惟其餘的結果皆係以滑動面積比率為主，建議結果欄位前後應一致或在文中加以說明使用滑移距離之理由。	本報告中探討邊坡所受到之自然營力有重力、地震力與降雨，而因為重力造成的破壞並無深層的剪切破壞發生，無法明確量化其滑移距離，因此僅以滑動面積比率進行說明。於地震力與降雨條件下，則皆以有以滑移距離與滑動面積對結果進行討論，以於 5-1 節補充說明。
三	針對E_25g及VE_25g試驗步驟中，其振動事件並非相同(在VE_25g中，加速度0.2g事件M2前有一0.18g之事件M1；而在E_25g則無)，是否會影響最終之結果，建議於討論中可加以說明。	因試驗 VE_25g 於 M1 與 M2 振動事件中坡面皆無明顯破壞，因此再輸入 M3 震動事件使試體觀察到明顯破壞。5-2 節討論中關於試驗結果之敘述階已考慮不同輸入震動事件次數的條件，其並不影響最終結果。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	針對 R_25g 及 VR_25g 試驗結果中，對於滑動速率的表示建議應一致 (R_25g 為滑動速率；VR_25g 則為正規化滑動速率)。	R_25g 試驗結果中滑動速率之表示亦為正規化滑動速率，該錯誤為內容誤植，已對內容進行修正。
五	P5-2，內文中「...。由含水量測得知，邊坡試體受重力引致作用，含水量由上而下遞減。...」這部分經此研究之結果圖顯示，其含水量應係由上而下遞增，建議修正。	感謝委員指正筆誤處，已於內文中修改。
六	內文中仍有許多部分有誤，譬如交互參照顯示「錯誤！找不到參照來源」、文字誤植及滑動速率顯示錯誤等，建議宜再多加留意並修正。	感謝委員指正，已重新檢視與修正錯誤之內容。

附錄四、成果發表會議紀錄意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	表表4-12、表4-16 為何坡腳堆積大於土壤流失?請補充說明	本報告中對離心模型試體主要的觀察剖面為試體模型中心平行長軸之剖面，其結果通常以二維平面方式呈現。而試驗中邊坡模型破壞後造成的土壤流失與堆積情形係為三維，因此當以二維平面呈現結果時坡腳堆積的土壤體積有可能來自於中心剖面兩旁之土體，造成流失土體小於堆積土體之數據結果。 試體量測與分析過程中為簡化其複雜性且使呈現之結果單純化、明確化，因此一律以簡單的二維平面呈現。在4-4-2節中已補充相關之說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	表 4-19 及表 5-4 之 VE-25 中，為何楔型破壞比為無資料 (-)?請說明	試驗 R-25g 之破壞為發生於靠近坡腳之張力裂縫與坡腳處之掏刷，並無明顯的深層滑動破壞發生，因此不予計算其楔型破壞比。 試驗 VE-25g-m2 為該離心模型試驗中輸入之第二次震動事件，因沒有明顯破壞而再繼續輸入第三次振動事件。而因為 VE-25g-m2 在輸入振動事件後並沒有停止離心機運轉以雷射掃描系統紀錄其滑動破壞情形，因此表格中僅呈現 VE-25g-m3 之滑動破壞情形相關結果。以上均分別於 4-5 節與 5-2 節內文中補充說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	地震對邊坡影響較深層，通常植生根系無法到達那麼深，如何考慮地震因子的影響程度？請說明。	本篇報告為初步探討植生對於土壤加勁之效果，在地震力條件的情況可視為探討在實際情況中喬木類等可達到較深土層之根系對邊坡的淺層加勁效果。未來研究中可以探討模型試驗內不同根系深度對試驗結果之影響、並對於植生實際可達到之土壤加勁深度進行討論。
四	小麥草之草高/根系長比例與真實喬木不同，是否有調整或折減方式	本研究中使用小麥草係為模型製作考量，其目的為探討植物根系對於土壤加勁效果，而非以小麥草模擬其他種類之植生。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	離心機運作下，水所滲流行為還會與正常重力下相同嗎?請說明。	離心模型試驗中除土壤孔隙水在模型中滲流之速率較正常重力下快之外，僅存在可能受柯氏力影響之問題。在離心模型試驗中若質點之運動是沿著旋轉半徑方向，則會有科氏力影響，在報告 5-3 節中有針對該問題作敘述。在本報告之試驗中，雖然水滲流方向為徑向，然而水在砂土孔隙中之滲流路徑並非直線，其為蜿蜒曲折之路徑，因此認為滲流行為受柯氏力之影響可予以忽略。
六	離心試驗下，各基礎數值是否會發生變化?如是，該如何因應?請說明。	在離心模型試驗中，材料之基本性質並不會有改變，例如材料之密度、物理性質、化學性質等等。離心機提供試體模型

項次	審查意見	回覆辦理情形
		一高加速度場，使得縮尺模型在自重上升之後可以縮尺模型模擬原型之情況，因此材料之基礎數值並不會有改變，離心機僅是對試驗材料施加原型之應力狀態，觀察試驗材料在該應力狀態下之行為。
七	文中提及有種植物，其雨水可能沿根系較快滲入土壤；但結論提到定水頭試驗根系對砂土之滲透係數沒有明顯影響，似不一致。請說明。	在降雨情況中雨水可沿植物根系較快由地表入滲至淺層土壤。而在大地工程領域中土壤若要有明顯的行為差異，其滲透係數至少要相差一個 10 的次方倍以上，因此本篇報告中定水頭試驗之結果主要闡明土壤試體不管在有無根系加勁的條件下，其壓密與土壤行為並不會有明顯差異，然而對於有植生之地表，雨水由地

項次	審查意見	回覆辦理情形
		表入滲之速率則較快。在 3-4 節中已修正與補充土壤滲透係數等相關之敘述。
八	此研究使用樣本是否有考慮植生密度之影響?請說明。	在本文中並無考慮植生密度對於邊坡之影響，植生之種植密度僅依據施工規範並考量試體模型製作的可行性而由試驗者自行定義。未來研究工作將會更全面探討植生密度、根系密度和深度與邊坡加勁之關係。