

國立臺灣大學生物資源暨農學院
生物環境系統工程學研究所

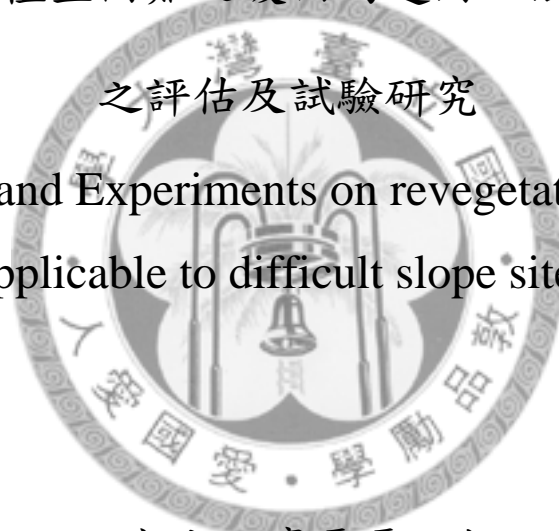
碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering
College of Bioresources and Agriculture
National Taiwan University
Master Thesis

植生困難之坡面的適用工法

之評估及試驗研究

Evaluation and Experiments on revegetation methods
applicable to difficult slope sites.



研究生：廖雯雯 撰

Graduate Student : Liao, Wen-Wen

指導教授：范正成 教授

Advisor : Dr. Jen-Chen Fan

中華民國 99 年 6 月

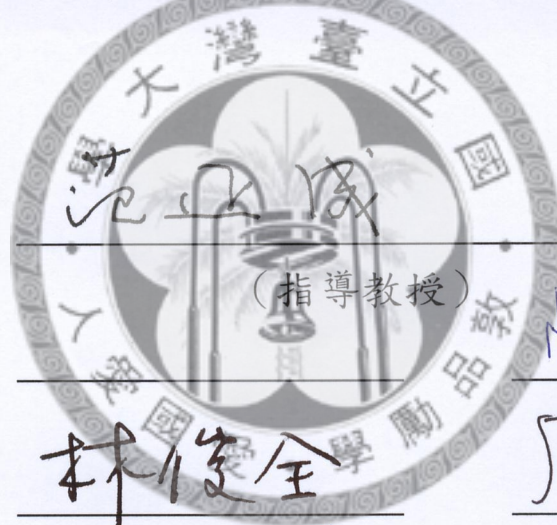
JUNE 2010

國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

植生困難之坡面的適用工法之評估及試驗研究
Evaluation and Experiments on revegetation
applicable methods for difficult slope sites.

本論文係廖雯雯君（R97622001）在國立臺灣大學生物
環境系統工程學系、所完成之碩士學位論文，於民國 99 年
06 月 09 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：



沈水成

(簽名)

(指導教授)

傅榮河

林俊全

盧光輝

吳文斌

系主任、所長

(簽名)

謝誌

謹呈上我最誠摯之感謝，感謝恩師 范正成教授悉心的指導，並在論文研究過程中導引研究方向及提供充裕資源，恩師的教誨提攜、勉勵關懷，使本論文得以順利完成並有所貢獻，在此再次致上最真誠的謝意。感謝口試委員陳榮河教授、林俊全教授、盧光輝教授於論文口試中提供許多保貴的意見及細心的指正，使本文更臻完善，在此致上由衷的謝意。

修業期間，幸有眾多學長、同窗、學弟妹的支持與幫助，使研究之路有趣且豐富，本研究過程中感謝黃建霖學長在試驗技術及經驗之傳授、劉哲欣學長在學術範疇的討論、楊智翔學長對我的疑惑詳加指點；感謝同窗好友連琮勛分享研究及生活，在課業上及精神上給我很多的幫助；感謝學妹陳映潔、張綸纖在實驗上的諸多協助；感謝吳明裕技士對於試驗設備的精心維護，以上皆是本論文誕生的關鍵，特此致上我最誠懇的感謝之意。

最後，感謝求學路上一路陪伴相挺的家人，你們的關懷、鼓勵都是支持我完成學業的動力。謹以此論文，獻給所有關心、幫助我的人，如果今天本論文得以有所成就貢獻，願以此榮耀與喜悅與大家分享。

摘要

本研究的主要目的在於透過模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations) 建立一較為客觀之適用性評估指標，從眾多適用於坡面困難工址的植生技術中，遴選出於施工方法、經濟層面、使用限制等，綜合表現較佳的技術—水泥噴凝植生覆蓋技術(Shotcrete Vegetation Mulching Technique, SVMT)。並以此技術為基礎，進行室內之人工降雨試驗，降雨強度約120mm/hr，試驗坡度60度，分6種齡期進行降雨試驗（分別為1、3、7、14、28、56天），測試其抵抗降雨沖蝕之能力及表面強度大小，本研究將蒐集包括逕流量、沖蝕量、試體表面強度、表面流速、覆蓋之試驗數據。

試驗結果顯示，水泥噴凝植生覆蓋技術(SVMT)因水泥的固化作用可於施工後三天內快速的提升護坡土壤強度、達到快速抗沖蝕能力。且SVMT試體的表面強度為傳統試體的3~10倍，具有較佳的凝聚性及剪力強度，7天內SVMT試體的抗沖蝕能力明顯優於傳統試體，14天後由於傳統試體土壤結構的改變，沖蝕量陡降，但通氣性、透水性變差，植生效果不彰。然而，各試體之逕流量及流速等結果差異不顯著，顯示工法或齡期非主要影響因子。在覆蓋情形的部分，SVMT於7天後之覆蓋約為傳統的10倍，表示水泥的添加提供了坡面有效的抗沖蝕能力及強度，能有效的留住表土及種子，更能達到植生覆蓋的目的。

（坡面植生困難工址於本研究中係定義為「坡度45度以上之一般邊坡、或噴凝土護坡、混凝土擋牆及岩石坡面等不易植生之坡面」。）

關鍵字：水力覆蓋、水泥噴凝植生覆蓋技術、植生綠化、坡面植生困難工址、模糊偏好關係。

ABSTRACT

The main purpose of this study is to establish adaptability evaluation indexes by using the method of Fuzzy Preference Relations, FPR, for choosing an optimum method among all the revegetation methods applied on the difficult sites of the slopes. In this study, difficult sites of slope revegetation is defined as 「 Slopes steeper than 45 degrees, and with a protective cover of shotcrete, or with rock, or common slopes, or concrete retaining walls...etc., which are difficult to be revegetated 」. Accordingly, the method of Shotcrete Vegetation Mulching Technique (SVMT), was then chosen based upon the evaluation indexes of economy, restriction and construction. Using the SVMT method, samples for erosion tests were prepared in the erosion boxes with a length of 125 cm, a width of 100 cm and a height of 11 cm. Using a rainfall simulator developed by Forster et al. (1982) and Fan and Wu (1993), erosion tests were conducted on the samples with the ages of 1, 3, 7, 14, 28 and 56 days, respectively, with a rainfall intensity of 120 mm/hour and a steepness of 60 degrees. During the tests, the data of runoff, erosion, surface strength, surface velocity and vegetation cover were obtained to evaluate the resistance to soil erosion and soil strength.

From the obtained results, it was found that the SVMT method was able to strengthen the resistance to erosion and stability of the slope within 3 days after the samples were prepared. Aside from this, the surface strength of soil slopes prepared using the SVMT method were 3 to 10 times higher than those using the conventional method, and approved to be better in both cohesion and shear strength. The results also showed the erosion of the soil samples with the ages less 7 days using the SVMT method were much less than those using the conventional method. However, due to the change of soil structure, the erosion of the samples prepared using the conventional method were slightly less than those using the SVMT method, yet the ventilation and

permeability became worse, and consequently the vegetation effects were deteriorated. From the test results, it was found the runoff and velocities of the samples prepared using the two methods were quite similar, indicating revegetation method and the age were not the main factors affecting runoff and velocity. For the vegetation cover of the samples prepared using the two methods with the ages greater than 7 days, and after rainfall erosion tests, the vegetation cover of the SVMT method were approximately 10 times of those of the conventional method, which implied that concrete cement were effective in providing sufficient resistance to erosion and stability to hold the soil and seed. As a result, the SVMT method was approved more capable of revegetation on the difficult sites of the slopes.

Keywords. hydraulic mulching, Shotcrete Vegetation Mulching Technique(SVMT), revegetation, difficult sites of slope revegetation , Fuzzy Preference Relations.



目 錄

謝誌.....	I
中文摘要	II
Abstract.....	III
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 研究動機與目的	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 坡地生態工程之重要性	3
2.2 紋溝間土壤沖蝕發生機制	3
2.3 噴植覆蓋植生工法的相關研究	5
2.4 可應用於困難工址的植生技術	6
2.4.1 多孔性綠化水泥植生技術(Green-Growing Concrete)	6
2.4.2 纖維加勁土壤噴植技術(Continuous Fiber Reinforced Soil).....	7
2.4.3 水泥噴凝植生覆蓋技術(Shotcrete Vegetation Mulching Technique,SVMT)	
.....	10
2.4.4 薄層木屑堆肥團粒化劑噴植植生工法(TCP)	10
2.5 模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations, Fuzzy PreRa)	12
第三章 研究方法	15
3.1 適用性評估指標之建立及評分	15
3.1.1 評估指標說明	15
3.1.2 問卷設計及受訪者統計	16
3.1.3 評估因子權重之計算	20
3.1.4 各式工法適用性評估	22
3.2 降雨沖蝕試驗的材料與設備	22
3.2.1 噴植材料	22

3.2.2 沖蝕試驗箱	25
3.2.3 人工降雨機	31
3.3 沖蝕試體製作及養護	33
3.4 人工降雨沖蝕試驗	36
3.5 逕流流速量測	37
3.6 表面強度試驗	42
3.6.1 直接剪力試驗	42
3.6.2 袖珍貫入器(pocket penetrometer)	46
3.7 表面覆蓋分析	47
第四章 試驗結果與討論	49
4.1 各工法適用性評估之結果	49
4.2 人工降雨試驗之結果與討論	57
4.2.1 逕流量量測結果與討論	57
4.2.2 沖蝕量結果與討論	61
4.2.3 試體強度	67
4.2.4 試體表面流速	70
4.2.5 表面覆蓋分析結果與討論	70
第五章 結論與建議	76
5.1 結論	76
5.2 建議	77
參考文獻	79
附錄 A：坡面困難工址植生技術之適用性評估指標問卷.....	82
附錄 B：降雨機率定.....	88
附錄 C：人工降雨沖蝕試驗數據.....	89

圖 目 錄

圖 2.1 多孔性綠化水泥植生技術材料示意圖	8
圖 2.2 纖維加勁土壤噴植技術剖面圖	10
圖 2.3 纖維加勁土壤噴植技術施工示意圖	10
圖 2.4 施工剖面示意圖	12
圖 2.5 施工平面示意圖	12
圖 3.1 整體研究架構	18
圖 3.2 適用性評估指標考量因子架構圖	19
圖 3.3 問卷調查之受訪者統計結果	19
圖 3.4 坡面植生困難工址植生技術室內試驗流程圖	25
圖 3.5 沖蝕箱內、外箱	28
圖 3.6 沖蝕外箱之逕流導槽及滲流導槽	28
圖 3.7 逕流蒐集裝置	29
圖 3.8 沖蝕箱及角鋼支架	29
圖 3.9 推車	29
圖 3.10 人工降雨機設備一覽	33
圖 3.11 試體製作過程一覽	35
圖 3.12 量測試體表面強度	38
圖 3.13 試體裝設推車上移至雨場	38

圖 3.14 確認試體坡度	39
圖 3.15 裝設逕流蒐集槽	40
圖 3.16 試驗進行中	40
圖 3.17 染劑施放擷取圖像	42
圖 3.18 剪力盒詳圖	46
圖 3.19 直接剪力儀	46
圖 3.20 袖珍貫入器(pocket penetrometer)	49
圖 3.21 選取量測覆蓋區域示意圖	49
圖 4.1 問卷調查之受訪者統計結果	52
圖 4.2 各齡期逕流量隨時間變化量測結果	60
圖 4.3 各齡期與總逕流量結果一覽	61
圖 4.4 各齡期沖蝕量隨時間變化量測結果	65
圖 4.5 沖蝕量之比較結果一覽	66
圖 4.11 試體沉陷、龜裂示意圖	67
圖 4.12 各齡期 c 值一覽	70
圖 4.13 各齡期 Φ 值一覽	70
圖 4.14 齡期與單壓強度之變化圖	70
圖 4.15 各齡期試體表面流速分佈圖	72
圖 4.16 試體表面覆蓋不同之示意圖	72
圖 4.17 各齡期於 84 天、112 天時的植生生長情形	75

表 目 錄

表 2.1 各種坡面困難工址植生技術之特性彙整	14
表 3.1 評估指標各考慮因子之說明一覽表	18
表 3.2 評估因子相對權重語意變數表	19
表 3.3 適用性評估指標評分表	23
表 3.4 各式植生技術適用性評分	23
表 3.5 本研究選用草種之特性一覽	25
表 3.6 水泥噴凝植生覆蓋技術之材料說明	26
表 4.1 各式植生技術適用性評分	52
表 4.2 多孔性綠化水泥植生技術適用性評估指標評分表	53
表 4.3 纖維加勁土壤噴植技術適用性評估指標評分表	54
表 4.4 水泥噴凝植生技術適用性評估指標評分表	55
表 4.5 薄層木屑堆肥團粒化劑噴植適用性評估指標評分表	56
表 4.6 掛網客土植生技術適用性評估指標評分表	57
表 4.7 各組 5 分鐘平均逕流量一覽	61
表 4.8 各組 60 分鐘總逕流量一覽	61
表 4.9 各組 5 分鐘平均沖蝕量一覽	66
表 4.10 各組 60 分鐘總沖蝕量一覽	66
表 4.11 各齡期 c 、 Φ 值一覽	70
表 4.12 各齡期單壓強度一覽	70
表 4.13 各齡期流速一覽	72
表 4.14 各齡期於 95 天時的植生生長情形	75
表 4.15 各齡期於 112 天時的植生生長情形	75

第一章 研究動機與目的

1.1 研究動機

近年來的人類活動，導致天災不斷發生，環境品質持續惡化，加以氣候變遷的影響，降雨強度增加，邊坡沖蝕加劇，導致農業生產力降低、湖泊及水庫水質惡化、水利及灌溉設施的壽命減少、水土保持問題、坡地災害等。根據許多相關研究顯示，良好的護坡工法可以保護破碎裸露的山坡地，防止土石被豪雨沖刷、侵蝕，降低山崩的可能性。運用土壤生物工程來增加邊坡的穩定，增強表層土壤對大雨衝擊的抵抗力，減少土壤沖蝕，並利用根、莖部分增加地表粗糙度、增加土壤入滲量、減少逕流量等，以達到減少坡地災害的目的。

目前有很多既有的道路、堤防等工程為了安全及功能性，使用傳統的護坡工法，多為混凝土擋牆、噴凝土護坡，造成表面光滑、缺乏植生或棲地破壞。又崩塌地、岩石等裸露面，因表層無土壤或坡度過大，需要較長的時間才能達到豐富的生物相。不論是噴、混凝土、岩石裸露面、崩塌地、甚至坡度過大的邊坡，皆屬於植生比較困難的區域。於此，本研究定義坡面植生困難工址為「坡度 45 度以上之一般邊坡、或噴凝土護坡、混凝土擋牆及岩石坡面等不易植生之坡面」。

鑒於土壤生物工程的植生技術有助於降低沖蝕、減緩地表逕流、達到穩定邊坡的效用，並且營造出視覺景觀愉悅的效果、改善動植物棲地並增加環境生態的多樣性，因此希望能夠用來改善上述的既有噴凝土工程邊坡(道路、堤防...)、岩石裸露面等植生困難工址區域。只是傳統的土壤生物工程使用上有其限制，而國內外目前可施做於困難工址的植生工法適用性如何，亦值得探討。

在植生困難工址的坡面上施工時，工程所提供的短期抗沖蝕能力及整體強度是很重要的因素，施工完成初期到植生提供根系穩定之前，能否有效的抵抗沖蝕及具有足夠的強度，是工程成功與否的關鍵。台灣為多雨潮濕的地區，假若施工完成初期無法抵抗降雨的沖蝕，不但會導致工程經費的浪費，也會造成施工表面的損壞、表土及草種的流失，使得工程成效不彰。而觀諸國內外目前可以施做於

困難工址的技術，普遍未將工程初期的抗沖蝕能力及強度納入考量，在工程實務應用上，初期的強度及施工初期遇雨對後續植生影響究竟如何，有必要加以深入探究。

1.2 研究目的

各種適用於植生困難工址的工程方法，皆有其優缺點存在。本研究主要目的在藉由模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations) 建立一較為客觀之評估指標，以遴選出較為適用之工程方法。並且以此技術為基礎，進行室內之人工降雨試驗，以探討不同齡期遇雨，對邊坡的強度、抗沖蝕能力及植生覆蓋的後續影響，俾了解其相關機制。

試驗以沖蝕箱模擬現地邊坡，並固定試區坡度為 60 度。分為試驗組及對照組，試驗組為模糊偏好關係選出之工法，對照組為傳統植生覆蓋技術。試驗之控制變因為不同之試體遇降雨沖蝕的齡期，齡期分為 6 種(分別為 1、3、7、14、28、56 天)，進行二重複試驗。以人工降雨機模擬降雨強度約 120 mm /hr 之降雨持續 60 分鐘，此種降雨強度若以石門水庫地區巴陵站之歷年雨量記錄計算，係為超過 100 年頻率之暴雨。量測在此降雨強度下，不同齡期試體的逕流量、滲流量、沖蝕量、單壓強度、表面剪應力、表面覆蓋、表面流速。

由該試驗可以觀察到不同齡期下之逕流、土壤沖蝕及各項土壤物理性質的反應差異，並探究造成差異之原因，從而了解相關機制。同時藉由試驗結果，建立齡期與沖蝕量、土壤強度等關係，能有效提供工程於現地施工的參考。

本論文將由第二章文獻回顧開始探討，介紹各相關前人研究，並整合國內外可施作於坡面植生困難工址的工法及其相關研究，並說明其中的重要特性及成果；第三章探討以模糊偏好關係選出之工法在不同齡期下進行人工降雨沖蝕試驗的研究方法並包括試驗設備與試驗方法的介紹及說明；第四章探討試驗結果及說明機制影響；第五章為結論與建議，旨在對全文進行總結，並建議未來研究方向。

第二章 文獻回顧

2.1 坡地生態工程之重要性

公路、鐵路、水利及電力等大型工程建設，由於開發腹地廣大，路幅寬廣及路線綿長，且經常要大規模的整地及開挖邊坡，破壞了原有植被的表土覆蓋層，亦導致了大量的土壤邊坡裸露，並導致微氣候之改變，衍生了一連串的水土保持及生態環境的問題(Fan et al. 2006；Wu and Feng, 2006)。

大型公共建設進行規劃設計時，大多是依照使用功能、構造安全及地質調查來設計結構體的型式及尺寸，很少以工程美學、環境生態、水土保持、整體構造及生態景觀的角度做一綜合完整的考量(Simonson et al, 2003)。尤其台灣地區許多的公路邊坡，在功能及安全為主要的考量下，噴凝土護坡及混凝土擋牆即成為最常採用的工法(Feng and Lin, 2002)，這些混凝土構造物不僅無法融入當地之環境視覺景觀，而其經年累月受到大自然不斷的侵蝕、風化及暴曬等影響下，更使得構造物之耐久性及外觀上受到破壞(Mohammed Ibrahim, et al. 1999)。

因此，如何運用合適的邊坡植生綠化技術，對這些既有的混凝土結構物或裸露邊坡進行植生，融合環境視覺景觀，延長生命週期，並營造一個生物多樣性及棲地改善的環境，兼具環境保護及資源永續利用的生態工程技術，亟待後續深入之研究。

2.2 紋溝間土壤沖蝕發生機制

不論是自然邊坡或工程坡面，土壤沖蝕都是亟待解決的問題，一般沖蝕模式將沖蝕區分為紋溝(rill)沖蝕及紋溝間(interrill)沖蝕兩種(Foster,1982)。起因於土壤表面逕流集中，由蝕溝中帶走土壤顆粒的現象，稱為紋溝沖蝕；而發生在紋溝之間的區域，由於雨滴撞擊、泥水激濺及水膜載運所造成的土壤沖蝕現象，則稱為紋溝間沖蝕(Watson and Laflen, 1986；Meyer, 1981)，本研究的沖蝕主要為此種型式。

薄膜流可以載運由雨滴撞擊所分離開的土壤顆粒(Gilley et al., 1985a；1985b)，

並提供克服土表顆粒間凝聚力所需之能量，促使土壤顆粒自流床底部揚起(Nearing et al.,1991)。在其研究中發現在平均流動剪應力小於土壤強度數個層級(order)時，便發生土壤顆粒從底部分離的現象，此乃紊流所造成之猝發事件的局部剪應力大於局部土壤強度所致。

Jayawardena and Bhuiyan(1999)對於紋溝間土壤中發現在逕流在有雨之情況下，其承载力高於沒降雨情況達90%，其也發現逕流承载力與流速成次方相關。而依其推估流速需達2cm/s，才能夠對土壤產生剝離作用。

雨滴撞擊是造成紋溝間土壤沖蝕的主因(Meyer and Harmon,1984)。當雨滴撞擊土壤，將分散其能量至每一個與其接觸之土壤顆粒，造成土壤顆粒的分離，並因此易被土表逕流搬移(Liebenow et al.,1990)。

Edwards and Larson (1969)；Jennings et al. (1988)之研究均同時指出，雨滴撞擊能量轉移至土壤顆粒，使得土表密度增加、孔隙與滲透係數變小。

Mutchler and Hansen (1970)研究水表層上雨滴的衝擊力時，發現水深在0.3 個雨滴粒徑以下時，衝擊力隨著水深的增加而增加；可是當水深達到或超過此臨界值時，衝擊力就逐漸減小。當水深大約超過3 個雨滴粒徑時，雨滴在土壤表面的衝擊力和隨之發生的土壤分離(Soil Detachment)都很小，甚至可以忽略。

Al-Durrah and Bradford (1982)用快速照像法研究發現，當水滴撞擊飽和土壤表面時，水滴垂直的力量將轉變成輻射水流而成的側向剪力，引發土壤飛濺(splash)。此外，Kirby and Morgan (1980)也認為從土坡高處被激濺而下的土壤顆粒，亦具有可觀的衝擊力。

Kinnell(2005)歸納其十餘年之研究成果，認為雨滴撞擊流(rain-impacted flow)所造成的沖蝕，在雨滴及逕流的交互作用下，可區分為四種剝離及傳輸系統(detachment and transport systems)：

1. 雨滴剝離並由飛濺(splash)傳輸：指雨滴撞擊土壤表面時藉其能量克服土壤顆粒與土壤表面之黏結，而使土壤顆粒離開原位置。雨滴飛濺為其中

之機制。通常發生於降雨初期，逕流尚未明顯之階段。

2. 雨滴剝離並由雨滴導致之流動(raindrop-induced flow)傳輸(簡稱RD-RIFT)：
當水在土壤表面形成流動，雨滴穿透流動之水體揚起土壤表面之土壤顆粒，並藉由水體之流動而使土壤顆粒在沈降的過程中向下游移動，此種必須由雨滴撞擊及水體流動共同作用方可形成之傳輸稱之(Kinnell,1990; Moss and Green, 1983)。其發生於流動力量尚低之階段，此時之流動尚不足以剝離土壤表面土壤顆粒，且亦未能載運停留於土壤表面之鬆散泥砂(Kinnell,2006)。
3. 雨滴剝離並由水流(flow)傳輸(簡稱RD-FT)：此系統之水流具有移動土壤表面鬆散泥砂之能力，亦可載運由雨滴撞擊而剝離之土壤顆粒，但該水流仍不具有剝離土壤表面土壤顆粒之能力。Kinnell(2001)研究指出在粒徑分佈較廣之土壤，RD-FT與RD-RIFT兩種系統會同時運作。
4. 水流剝離並由水流傳輸：此系統之水流具有較高之流動力量，可克服土壤表面之黏結力及顆粒間之摩擦力，剝離土壤表面泥砂。此傳輸現象會伴隨發生紋溝沖蝕。

2.3 噴植覆蓋植生工法的相關研究

生物技術穩定工法(biotechnical stabilization)中的水力覆蓋 (Hydraulic Mulch)，亦屬於生態工程技術，其常用於地表覆蓋(ground cover)之防護及土壤邊坡之植生綠化，兼具控制地表侵蝕及改善環境視覺景觀之功效(Daniel et al. 2000；Shangning and Ungerb, 2001；Gyasi-Agyei, 2004；Kruse et al., 2004；Randy and Copeland, 2007)。

山寺喜成(1969)、倉田益二郎(1979)將黏著劑定義為施工初期到種子發芽形成覆蓋期間，能發揮防止沖蝕效果的一種短暫性藥劑。林庭暉(2000)、許榮峰(2002)提出一般黏著劑用量越多，保護坡面效果越好，但亦可能抑制種子發芽。

邱創益、謝杉舟等(1995)關於噴植植生工法的研究報告中提出：1.道路邊坡植生方法於緩坡地薄層噴植法植生效果最佳，種子發芽分布均勻，且坡面土壤之防沖效果良好，附近植物易自然入侵，而與當地景觀形成一致性。陡坡道路邊坡因選擇試驗坡面大於 65° ，且噴植基材厚度不足，復逢連續颱風侵襲，造成道路邊坡噴植鋪網部分滑落及植生破壞，形成噴播種子不易固定於坡面而滑落至坡腳處。2.噴植黏著劑之研發，土壤之防沖效果越佳之黏著劑，則種子發芽率越低，配方濃度雖對種子初期發芽率有影響，但經降雨後黏著劑漸被洗去，種子仍可繼續發芽，因此黏著劑使用之種類及濃度，須針對噴植地區之坡面坡度及降雨特性予以了解，再進行選擇與調製適用之黏著劑，如尿素甲醛樹脂及聚醋酸乙烯樹脂；反之，降雨強度小之地區，為使快速達到綠化植生，可選擇較容易水溶性之黏著劑，如水泥漆及澱粉膠類等，可加速種子之發芽。

2.4 可應用於困難工址的植生技術

坡面植生困難工址於本研究中係定義為「坡度 45° 以上之一般邊坡、或噴凝土護坡、混凝土擋牆及岩石坡面等不易植生之坡面」。

傳統的植生工法如噴植、掛網客土植生及打樁編柵等，皆無法於上述條件之邊坡上植生。為改善現有坡面植生困難工址之植生景觀，使其能融合週遭環境。蒐集目前能應用於坡面植生困難工址之各式國內外工法文獻，並回顧簡述如下。

2.4.1 多孔性綠化水泥植生技術(Green-Growing Concrete)

鑑於土石崩落面、岩石邊坡或水泥護坡等，水分不易涵養、沒有孔隙、不利根系生長的特性，為達到有效的坡面綠化，(Yanagibashi et al., 1993)開發了Green-Growing Concrete之植生技術。其結合結構的強度及植生的生長特性，將粗骨材固結在水泥漿體中製造孔隙，孔隙中填充保水劑及肥料，其兼具混凝土的強度、耐久性及土壤可植生之特性，並且廣泛的應用於溪流、湖泊岸邊、工程邊坡、

停車場及高速公路等。此一技術之材料含有上下兩層，下層為多孔性水泥(porous concrete)層，使用硬骨材混合低鹼性、高強度水泥漿體，孔隙率約為25~30%，厚度在15~30公分之間，可承受壓應力強度10~15 N/m²。上層為2~5 cm厚採用噴植的「Surface base」，由混合保水劑及肥料的有機質組成，再混以草種，提供坡面的保護。而下層多孔性水泥層中，則以「Green-fill」填充孔隙，「Green-fill」主要由有機質組成，用以填充多孔性水泥孔隙以提供所需的保水度及肥力並中和鹼性。材料內部示意圖如圖2.1所示。

2.4.2 纖維加勁土壤噴植技術(Continuous Fiber Reinforced Soil)

纖維加勁土壤噴植技術之主要目的即為模擬自然環境中土壤的根系系統，以建立適合植生的生長環境。憑藉著植生的根系在人工表土層延伸纏繞，以提供坡面穩定度，而內部的人工纖維則持續提供坡面強度，提高安全係數。此技術使用200mm厚的砂土以multi-filament polyester fiber加勁，將混有纖維的土壤噴在坡面。傳統的地工織物只提供2維方向的加勁，而此技術則提供3維的坡面保護，使用在達70°的坡面。在試驗中，此技術可以有效的抵抗沖蝕，因此可以應用在河岸的保護，其滲透性大約等於天然土壤的滲透性，故不影響自然的排水情形。

此一技術之表面纖維可提供抵抗逕流沖蝕的能力，並且可在加勁層中預先埋設排水毯(drainage mats)以利內部排水。而加勁條在末端有突出的角度鑽入表層，使材料可與坡面有較佳之結合，如此可提供邊坡穩固並防止變形。同時，排水毯係延坡面設置，並連接到趾部，藉以排除地下水。再者，於現地施作時，係使用wet sand sprayer加壓空氣噴砂土於表面，使用噴嘴利用高壓水拉出纖維捆中的纖維，混合砂土噴於坡面上。混合的纖維砂土須噴於至少寬200 mm、厚500 mm之表層。然而，此一技術之缺點係為覆蓋層較厚，約30~120 cm，且需特殊的設備與人員的訓練及材料的進口，其成本較高及施作工法繁瑣費時(Feng and Lin, 2002)。其每平方公尺的初始成本約為HK \$ 800-HK \$ 1200 (約US \$ 103- US \$ 154)(Horelli, 2005)。圖2.2、2.3為纖維加勁土壤噴植技術剖面圖及施工示意圖。

Cross-section of Green-Growing Concrete

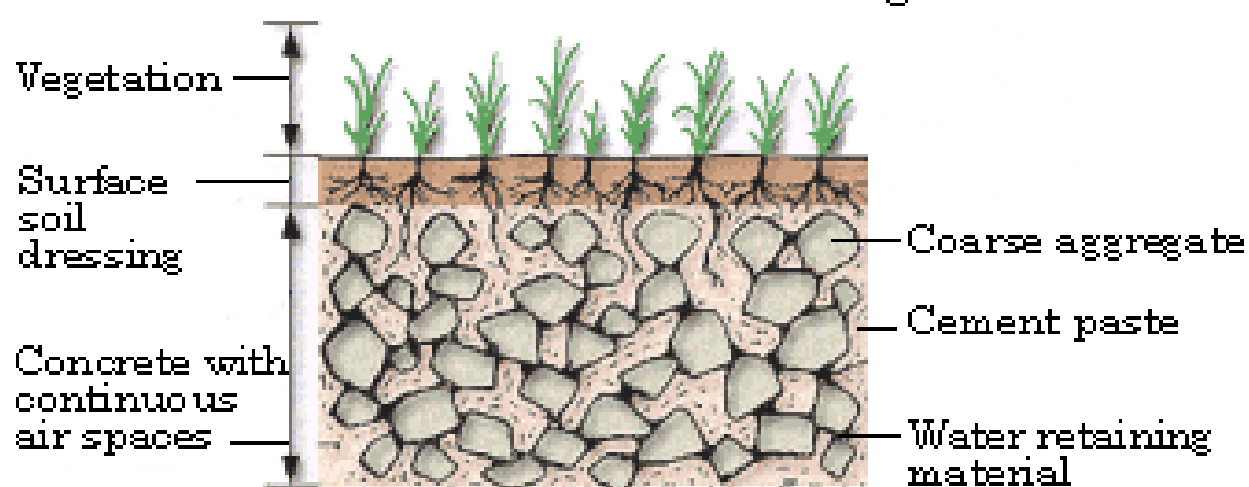


圖 2.1 多孔性綠化水泥植生技術材料示意圖

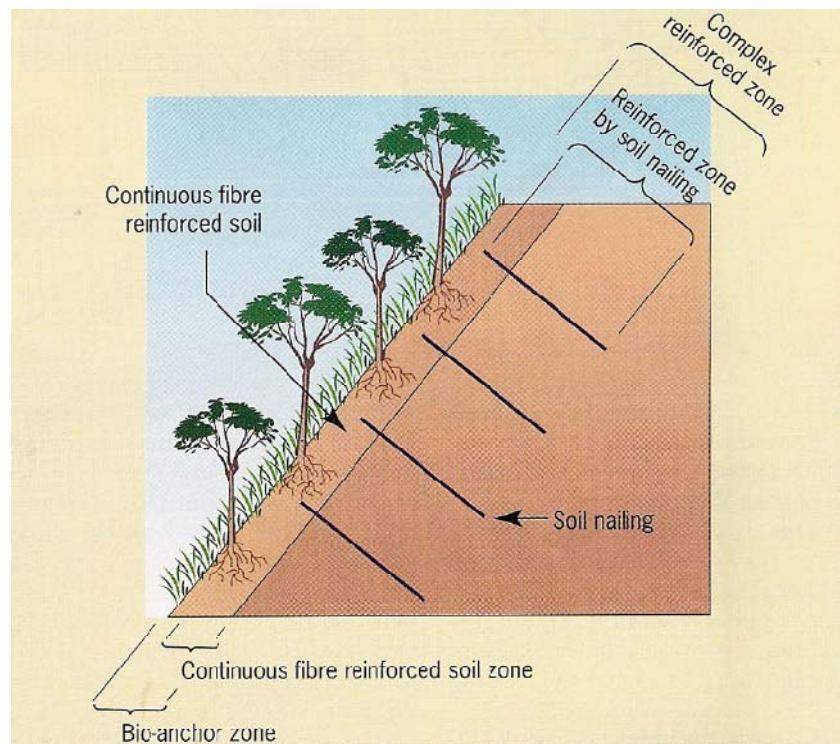


圖 2.2 纖維加勁土壤噴植技術剖面圖

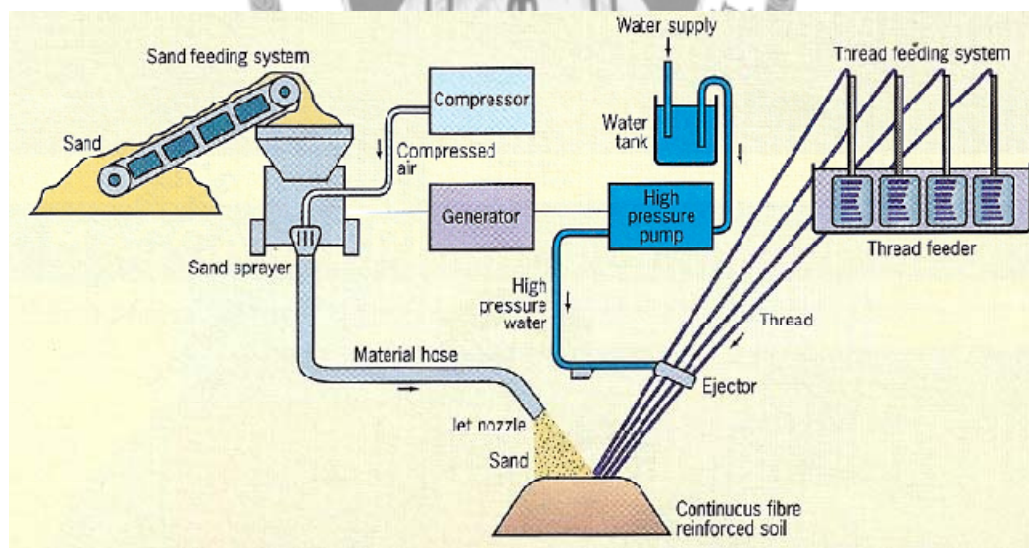


圖 2.3 纖維加勁土壤噴植技術施工示意圖

2.4.3 水泥噴凝植生覆蓋技術(Shotcrete Vegetation Mulching Technique,SVMT)

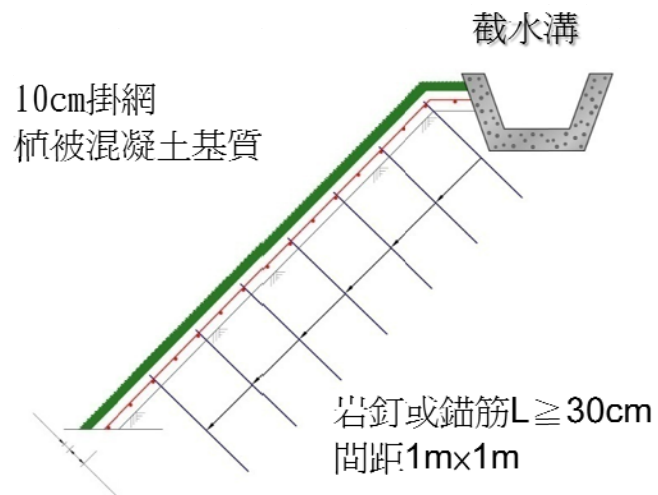
基於覆蓋面發展強度與保水耐旱特性的考量以及植生綠化的效果，於水力覆蓋材料中除了添加可提升覆蓋面強度的水泥外，亦採用三峽大學(許文年及王鐵橋, 2001)所研發可提供長效肥力、保水特性及中和土壤酸鹼性之綠化添加劑(greening additives)專利產品依特定的組成比例加以混合，以水力噴植的方式，於混凝土陡坡上進行噴植。依據當地之土壤、氣候及植生條件，選用特殊的綠化添加劑、水泥材料及合適的植生草種，調配其適當的配比而成為覆蓋材料於既有混凝土坡面上進行水力覆蓋。

其覆蓋層可分為基層和面層。基層厚度約為10cm，其使用的材料為水泥、土壤、腐植質及綠化添加劑。而面層除了基層材料外，並混合優選的種子，其厚度約為1cm。此一技術最主要之特色即在於施作後，因水泥之固化作用，使坡面在短時間內即有足以抵抗沖蝕之能力，且可營造一個適合植物生長的環境(黃建霖、范正成等，2007)。

此外，在施作方式之部份，係將水泥、土壤、腐植質、綠化添加劑及草種依其配比混合後，分基層及面層二層於坡面進行噴植。混凝土擋牆或噴凝土護坡之施工坡面應為穩定的坡面，或經過穩定處理，使其達到邊坡穩定的要求。水力噴植前，應先進行坡面之清理，將有礙植物生長之雜物及石塊清除，並將坡面有凹凸不平之處予以清理。於計畫噴植之範圍內鋪設掛網，並以錨筋將其固定於坡面。噴植時，噴口距坡面約1 m左右，噴嘴與坡面的夾角應盡量垂直，噴植次序由上而下，噴植完成後，表面應光滑平整。噴植厚度為10-11 cm，基層為9-10 cm，面層為1 cm。圖2.4、2.5即為施工之示意圖。

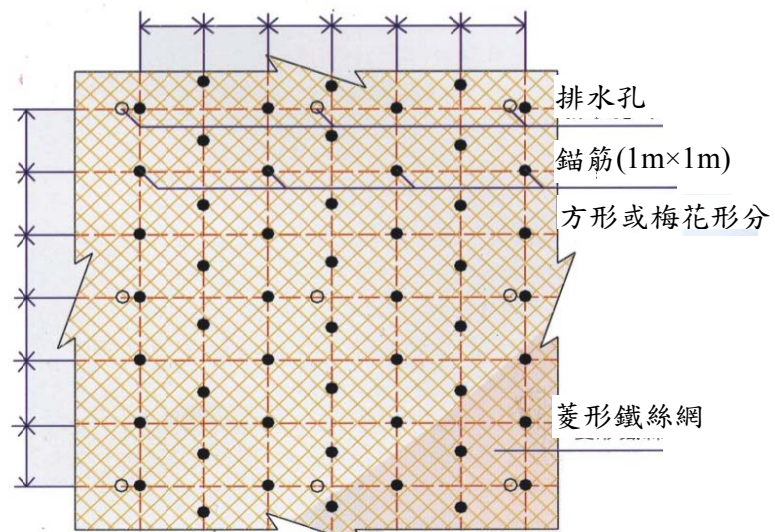
2.4.4 薄層木屑堆肥團粒化劑噴植植生工法(TCP)

李元智(2003)提出利用植物之根、莖、葉來穩定邊坡是一種較符合生態化、景觀化、長久性及經濟性之方法。然而並非加以植生即可達到穩定邊坡之目的，必須應用



註：噴植層含混合草種

圖 2.4 施工剖面示意圖



註：視滲水情況增設排水

圖 2.5 施工平面示意圖

植物演替理論建立複層植被之立體結構，方能有保護及穩定邊坡之效果。然而裸露地經由自然演替至喬木類最少需要10年以上時間，但經由人為之植生工法可免去苔蘚、羊齒植物期，而直接導入草類與喬木類所組成之複層植被。

傳統之噴凝土及岩栓工法雖然於完工後幾年可穩定坡面，但施工過程繁瑣費時、工程單價昂貴、視覺景觀與周遭環境不協調且不符合生態的要求。近年所採用的噴植植生工法主要以厚層鋪網噴植植生工法及厚層鋪網噴植配合自由格樑護坡工法為主，以改善傳統之混凝土工法所產生的一些問題。然其所使用之植生種類仍常採用單一草種或與藤類植物混播，單一草種或導入藤類植物往往抑制了導入草種及入侵灌喬木之生長，另外單一草類株數設計過密，導致鄰近原生植物無法入侵之情形，均是不符合建立道路邊坡複層植被之原則。因此薄層木屑堆肥團粒化劑噴植植生工法(TCP)採用草本類及木本類種子混播，可以達到建立草類與喬木類所組成之複層植被。

此工法對中高海拔板岩地區道路邊坡草本類植物生長之成活株數有較好之效果，木本植物於中高海拔板岩地區仍未見發芽株數(施工後319天)，由於種子發芽之機制受環境之水分、溫度、光度、光期及介質種類之影響甚鉅，因試驗區位於高海拔板岩地區坡地上，固可能因現地環境因子之影響而導致試區之木本植物種子無法順利發芽。本工程單價為1300元/m²。

根據本研究所蒐集之目前可應用在坡面困難工址之各種植生技術，將其施工方法、材料特性、使用限制等彙整如下表所示。此外，於表2.1中亦加入目前廣泛使用於一般坡面之傳統植生覆蓋技術，藉以比較其差異性。

2.5模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations, Fuzzy PreRa)

工程行為在進行決策時，除考量物理性、統計性的設計外，尚須考量社會屬性，如何將技術、經濟、社會、及環境各項因素綜合評估，並做成決策，成為重要挑戰。

表 2.1 各種坡面困難工址植生技術之特性彙整

	多孔性綠化水泥植生技術(Green-Growing Concrete)	纖維加勁土壤噴植技術(Continuous fiber reinforced soil)	水泥噴凝植生技術(SVMT)	薄層木屑堆肥團粒化劑噴植(TCP)	傳統植生覆蓋技術
工法特色	兼具混凝土的強度、耐久性及土壤可植生特性。	使用纖維加勁，可應用於陡坡。	因水泥的固化作用，可於短時間內提升強度，以達到快速抗冲刷的能力。	採用草本類及木本類種子混播，可達到建立草類與喬木類所組成之複層植被。	使用噴植方式，應用於非岩石邊坡綠化。
施作方法	首先傾倒多孔性水泥於坡面，再將綠化填充劑填入其中。最後即將混有肥料及草種之基層噴植於其上。	先使用 200mm 厚的砂土加以聚酯纖維加勁，再將混有纖維的土壤噴在坡面。	將水泥與綠化添加劑添加於水力覆蓋材料中，以水力噴植的方式，於混凝土陡坡上進行噴植。	整理坡面、清除浮動石塊，將植生基材噴附於坡面上。噴植基材厚度為 6cm，配合團粒化劑使用。	土壤中不添加任何黏合劑，直接將土及混合料噴植於坡面上。
材料特性	下層由低鹼性、高強度的水泥漿體組成，厚度約 15~30 cm。上層則為 2~5 cm 厚，由高含水量的有機質、肥料、草種組成。綠化填充劑之主要成分為有機質，用來填充多孔性水泥的空隙，以提供需要的保水度、肥力。	使用砂土之最大粒徑為 20mm，而有 50 % 顆粒介於 0.2mm~1mm，75 μ m 以下的顆粒須小於 10%。使用抗拉強度小於 40%之聚酯纖維加入其中。標準混合比例為每立方公尺土含 3.3kg 纖維。	採用 I 型之卜特蘭水泥，其每 1m ² 覆蓋層用量約 10 至 11kg；綠化添加劑包含長效肥、保水劑及相關礦物質。添加劑中之特殊礦物可中和土壤之酸鹼性，可營造適合植物生長之環境，每 1m ² 覆蓋層用量約 4.0 kg 至 4.5kg。	使用之木屑堆肥係為一般食用菇類培養使用後之木屑堆肥再加入米糠充分混和再製，約 0.01 m ³ /m ² 。而團粒化劑 (Polisoil)：包括乙烯基聚合物及丙烯酸樹脂，0.33 kg/m ² 。此外，亦包括台肥 1 號約 0.05 kg/m ² 。	材料為在土壤中添加泥炭土、保水劑、複合肥等。
使用限制	因多孔性水泥採用傾倒施作，故在高陡的邊坡及混凝土擋牆之應用上有所限制。表面基層僅有肥料和種子，短時間內無法提供抗冲刷之能力。	施做坡度可達 70 度，但覆蓋層較厚，約 30~120cm，且需特殊的設備與人員的訓練及材料的進口，其成本較高及施作工法繁瑣費時。	施做坡度可達 75 度，但坡度愈陡，植物根系伸入土中之深度愈淺，不利於植被的生長繁衍。同時由於厚度僅 10~12cm，無法植生木本植物。	目前成功施工坡度達 50°。惟僅適用崩塌地穩定控制。而木屑堆肥之木質纖維較短，與黏著劑所構築網毯結構之防冲刷效果較差。	無法改變土壤的物理性質，故不能提供早期抗冲刷能力。應用範圍為非純岩石的 35°以下的緩邊坡。且雨季不宜施工。
施工成本	-	HK \$ 800- 1200 /m ² (約 US \$ 103- 154) /m ²	約 1650 元/m ²	約 1300 元/m ²	約 800 元/m ²

Saaty (1970)所發展的層級分析方法(Alytic Hierarchy Process, AHP)應用十分廣泛，一般常用於協助決策之決定，即透過問卷調查分析各項因子對目標層之相對重要性而決定其權重，再透過權重排序挑選政策。

層級分析法基本上是以種類(Classes)或成分(Components)形成網路層級結構；每一層級的要素均假設具獨立性(Independence)；每一層級內的要素，可以用上一層級內某些或所有要素作為評準，進行評估；比較評估時，可將絕對數值尺度轉換成比例尺度(Ratio Scale)；成對比較(Pairwise Comparison)後，可使用正倒值矩陣(Positive Reciprocal Matrix)處理。

層級分析法(AHP)，在處理多準則決策問題中雖是非常有用的決策分析工具，但是當準則或因素多時，該方法所採取的兩兩成對比較方式會變得相當複雜，且亦不易維持評估者於評比過程中的一致性，尤其當層級數增加或評估屬性增多時，容易導致效率降低。因此，Herrera-Viedma et al.(2004)針對專家評估結果提出模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations)解決AHP中因多決策者、多準則及多候選方案所產生的一致性問題，不僅可簡化成對比較次數(假設準則有 n 個時，模糊偏好關係在做成對比較時只需比較 $n-1$ 次)，而且運算上相當簡易，具有參考應用的價值。

透過Herrera-Viedma(2004)提出之模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations, Fuzzy PreRa)可以計算出風險因子相對權重，並作為決策支援之用。

第三章 研究方法

本章旨在透過前述文獻蒐集的各種可應用於坡面植生困難工址之植生技術，將其施工方法、材料特性、使用限制等特性彙整。並依據欲考慮之各項因素以模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations)，建立一較為客觀之適用性評估指標，藉此遴選出一較適用於坡面植生困難工址之植生技術。並以此技術為基礎，進行室內之人工降雨沖蝕試驗，以得知在不同齡期時，其抵抗降雨沖蝕之能力及強度，試驗內容包含逕流量、沖蝕量、試體強度、流速、覆蓋。研究流程如圖 3.1 所示。

3.1 適用性評估指標之建立及評分

此一部分工作旨在透過蒐集現行各種可應用於坡面植生困難工址之植生技術，將其施工方法、材料特性、使用限制等特性彙整。並依據欲考慮之各項因素，建立一較為客觀之適用性評估指標。藉以遴選出一適用於坡面植生困難工址之植生技術。

3.1.1 評估指標說明

鑑於文獻回顧中各工程方法，皆有其優缺點存在。而本研究又期能從中選擇一個不論於經濟、社會、工程方面都較適用於坡面植生困難工址之方法，因此設定考量因素包括施作技術、施工限制及施工成本等。而目前一般在多準則決策問題之處理，多採用層級分析法(AHP)，其在處理多準則決策問題中雖是非常有用的決策分析工具，但是當準則或因素多時，該方法所採取的兩兩成對比較方式會變得相當複雜，且亦不易維持評估者於評比過程中的一致性。尤其當層級數增加或評估屬性增多時，良好的一致性實際上很難獲得，容易導致效率降低。因此，Herrera-Viedma et al.(2004)針對專家評估結果提出模糊偏好關係(Fuzzy Preference

Relations)解決 AHP 中因多決策者、多準則及多候選方案所產生的一致性問題，不僅可簡化成對比較次數，而且運算上相當簡易，具有參考應用的價值。

因此，本研究透過 Herrera-Viedma 等，於 2004 年提出之模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations, Fuzzy PreRa)建立一較為客觀之評估指標，藉此遴選出較為適用之工程方法。其中，需考量之層面包括技術、經濟及限制等三大層面，而各層面下考量之因子釋義如表 3.1 所示，整體評估指標架構如圖 3.2 所示。

3.1.2 問卷設計及受訪者統計

根據上述所選擇之各項評估因子，本研究利用問卷調查之方式，進行各項因子之重要性評估。在相對權重語意變數定義的部份，本研究參照 E. Herrera-Viedma 等人(2004)之研究，將語意變數定義為 $[1/9, 9]$ ，詳如表 3.2 所示。其後，依據前述建立之各項評估因子及語意變數，設計問卷針對各領域之專家學者、相關工程人員進行訪查，坡面植生困難工址植生技術之適用性評估指標問卷如附錄 A 所示。

本調查問卷之內容係為針對坡面植生困難工址之適用性評分標準進行調查，故受訪者皆為相關之專家學者。其包含石門水庫內各相關主管機關之服務人員（水土保持局、北區水資源局等）、工程顧問公司之相關技師（水土保持、水利、大地及土木技師等）與工程人員，以及學術單位之相關教授及研究員等。期能透過其對邊坡植生技術豐富之管理、設計及實務經驗，使問卷結果能清楚呈現工法適用性之評分標準。有效問卷之受訪者身份及其最高學歷統計結果如圖 3.3 所示，茲將問卷統計結果詳細展述於第四章試驗結果與討論。

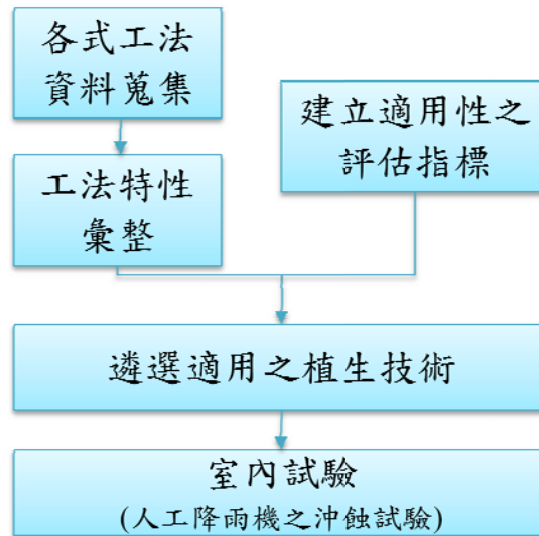


圖 3.1 整體研究架構

表 3.1 評估指標各考慮因子之說明一覽表

	項目	說明
技術層面	工期長短	各工法需要之施工工期長短不同，而所需工期越長之工法將使施工日期之限制大幅提升。
	施工程序之複雜性	各工法之施工程序皆不盡相同，而其複雜性將直接影響各工法施作及推廣之難易度。
	特殊設備或技術	此項因子取決於各工法是否需要較為特殊之設備或特殊之技術人員，若需要則易使施工較難完成且亦需較高之經費。
經濟層面	初始成本	此因子涵蓋材料、機具及人員費用等所有在施工初期需準備之項目。
	後續維護成本	在施工完成後，針對坡面進行養護及修補等，維持坡面效益及植生所需之費用。
限制層面	坡度限制	各工法之適用坡度不盡相同，而本研究坡面植生困難工址係指坡度大於 45 度之邊坡，因此本評估指標中將坡度分為 45 度以上適用及不適用兩種。
	坡面條件限制	坡面植生困難工址除指 45 度以上邊坡外，亦指惰性鋪面(噴凝土擋牆、岩石坡面等)，因此本評估指標將坡面條件分為惰性鋪面適用及不適用兩種。

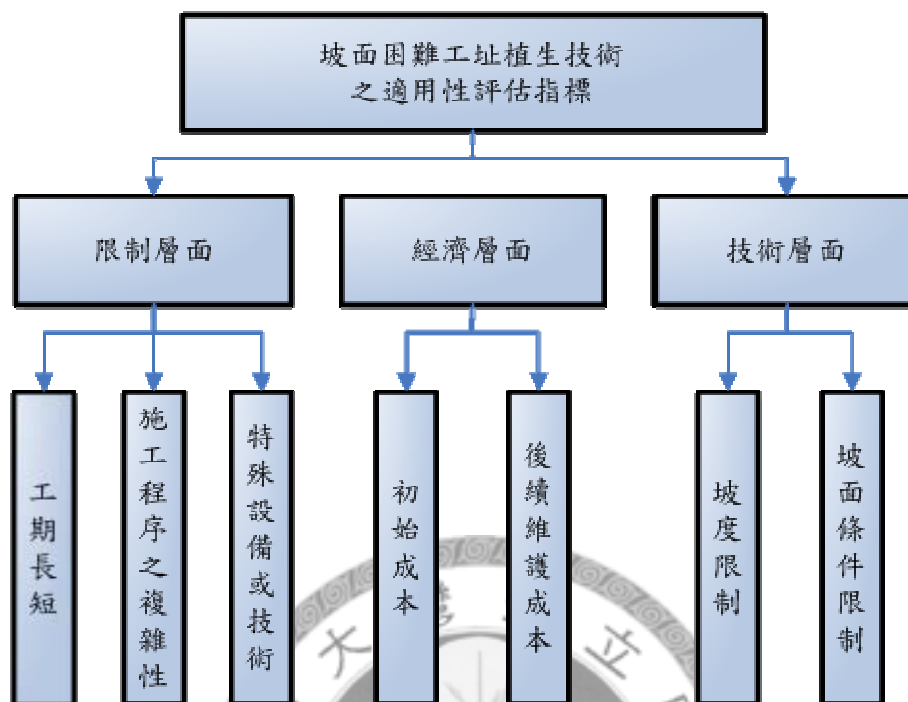


圖 3.2 適用性評估指標考量因子架構圖

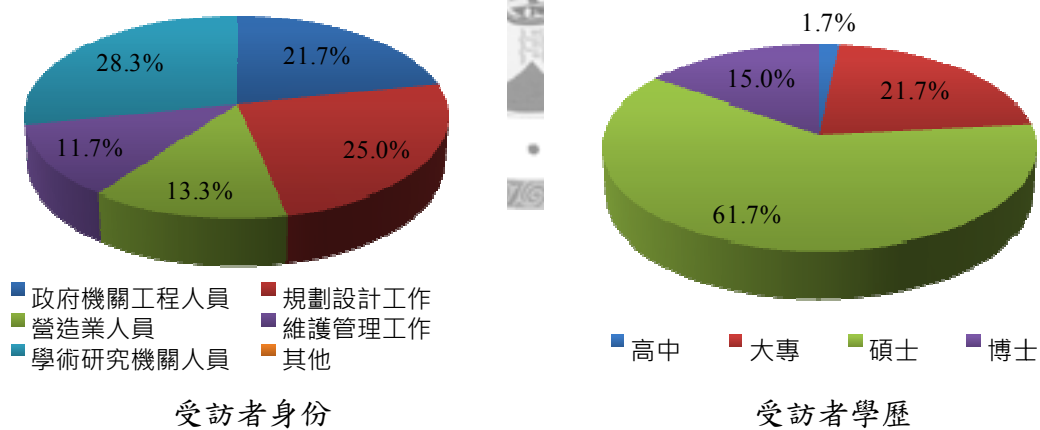
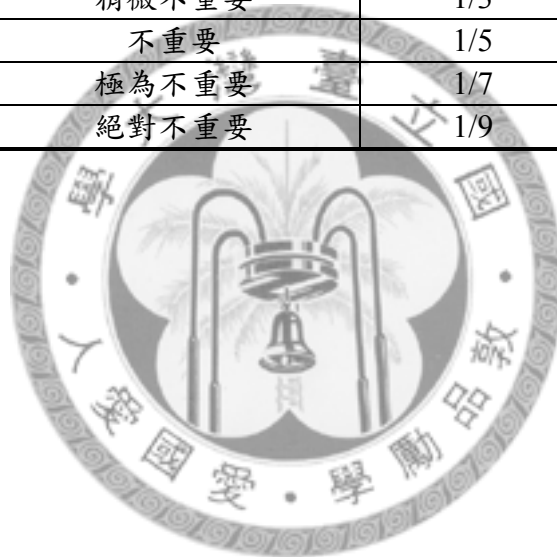


圖 3.3 問卷調查之受訪者統計結果

表 3.2 評估因子相對權重語意變數表

定義	重要性程度
絕對重要	9
極為重要	7
重要	5
稍微重要	3
一樣重要	1
稍微不重要	1/3
不重要	1/5
極為不重要	1/7
絕對不重要	1/9



3.1.3 評估因子權重之計算

由前述問卷調查之結果，需針對各評估層面及因子進行其相對權重之計算，以建立本適用性評估指標。茲將因子權重計算之步驟及方式說明如下。

(1) 建置成對比較矩陣

令本研究適用性評估指標之影響因子為 $F_i, i = 1, 2, \dots, n$ ；而每位受測者係為 $E_k, k = 1, 2, \dots, m$ (k 為受測者編號)。針對兩兩屬性間進行成對比較，亦即 F_1 比 F_2 、 F_2 比 F_3 及 F_3 比 F_4 等。可獲得相關的正倒值乘積偏好關係 $A = (a_{ij})$ 。其 $a_{ij} \in [1/9, 9]$ ，如式 3.1 所示。從成對比較偏好關係值 a_{ij} ，透過 $p_{ij} = g(a_{ij}) = 1/2 (1 + \log_9 a_{ij})$ 求得與 A 之相對應的正倒值模糊偏好關係 $P = (p_{ij})$ ，其中 $p_{ij} \in [0, 1]$ ，如式 3.2 所示。

$$A^k = \begin{matrix} & \begin{matrix} F_1 & F_2 & F_3 & \dots & F_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12}^k & \times & \times & \times \\ \times & 1 & a_{23}^k & \times & \times \\ \times & \times & 1 & a_{34}^k & \times \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & a_{n-1n}^k \\ \times & \times & \times & \times & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (式 3.1)$$

$$A^k \Rightarrow P^k = \begin{matrix} & \begin{matrix} F_1 & F_2 & F_3 & \dots & F_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & p_{12}^k & \times & \times & \times \\ 1-p_{12}^k & 0.5 & p_{23}^k & \times & \times \\ \times & 1-p_{23}^k & 0.5 & p_{34}^k & \times \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & p_{n-1n}^k \\ \times & \times & \times & \times & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (式 3.2)$$

(2) 計算一致性模糊偏好關係

此步驟之意義，即在於透過轉換函數公式(式 3.3)，求得成對比較矩陣中，其

餘之模糊偏好關係值。其中， $P_{ij} \in [0,1]$ 矩陣 P 的數值必須在 0 與 1 之間。而若有一數值未介於 0 與 1 之間，需透過式 3.4 加以轉換獲得一致性模糊偏好關係 P ，確保整個矩陣一致性。

$$p_{ji} = \frac{j-i+1}{2} - p_{ii+1} - p_{i+1i+2} \cdots - p_{j-1j} \quad (\text{式 3.3})$$

$$f(x) = \frac{x+a}{1+2a} \quad (\text{式 3.4})$$

$$\text{其中， } a = \left| \min \{ B \cup \{p_{12}, p_{23}, \dots, p_{n-1n}\} \cup -B \cup \{1-p_{12}, 1-p_{23}, \dots, 1-p_{n-1n}\} \} \right|$$

(3) 平均各問卷結果建立之成對矩陣

將各個決策者做出的 P_{ij}^k 值，加權平均求出 P_{ij} 。如式 3.5 所示。

$$p_{ij} = \frac{1}{m} (p_{ij}^1 + p_{ij}^2 + \dots + p_{ij}^m) \quad (\text{式 3.5})$$

(4) 正規化 FPR 矩陣

依據式 3.6，針對上述所求之平均成對矩陣，給予正規化處理。

$$r_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^n p_{ij}} \quad (\text{式 3.6})$$

(5) 求取各評估因子之相對權重

最後則依據式 3.7，即可求得評估指標各影響因子之相對權重 \bar{w}_i 。

$$\bar{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (\text{式 3.7})$$

依照問卷回收之統計結果，再配合上述各影響因子權重之計算方式，本研究之適用性評估指標各影響因子之權重結果如表 3.3 所示。其中，在各主要考慮層面中，以限制層面之 0.38 為最高，顯示坡面植生困難工址適用性評估中，應以工法適用範圍之限制為最主要之考量。而技術層面內之各考慮因子係以特殊設備或技術之 0.35 最高，但與其餘兩項因子相距不大；經濟層面內則是以初始成本之權重較高，約有 0.56；最後限制層面中係以坡度限制之考量較重要，權重約為 0.52。

後續本研究即以表 3.3 為基礎，針對已蒐集之各式坡面植生困難工址植生技術，進行適用性之評估。其評估方式係為先行針對各式工法之特行進行評分層級之勾選，再分別乘上其層面及因子之相對權重，最後將其累加，即為工法之適用性總評分。 $[(1) \times (2) \times (3) = (4); \text{sum}(4) = (5)]$ 。

3.1.4 各式工法適用性評估

本研究於坡面植生困難工址植生技術適用性評估指標建置完成後，以前述(第二章)所蒐集之各式可應用於坡面植生困難工址之植生技術，配合表 3.3 進行適用性之評分。評分結果於表 3.4 為各式技術之適用性總評分一覽表；而各式技術詳細之評分內容及說明將在第四章詳述，如表 4.2~表 4.6 所示。

根據各式植生技術之適用性評分結果，分數最高係為「水泥噴凝植生技術(SVMT)」之 73.95。因此，在綜合考量下，選擇「水泥噴凝植生技術(SVMT)」作為後續室內人工降雨沖蝕試驗施作之植生技術。

3.2 降雨沖蝕試驗的材料與設備

主要之試驗材料包含兩種噴植技術：試驗組之水泥噴凝植生覆蓋技術(SVMT)及對照組之傳統植生覆蓋技術。試驗設備主要為沖蝕試驗箱及人工降雨機。試驗流程如圖 3.4 所示。

3.2.1 噴植材料

水泥噴凝植生覆蓋技術(SVMT)之材料是將水泥、土壤、綠化添加劑及草種，依特定的組成比例加以混合，以水力覆蓋的方式，進行噴植。此技術中採用特殊的綠化添加劑，並於水力覆蓋材料配比中添加水泥，如此可藉由水泥的固化作用，

表 3.3 適用性評估指標評分表

層面	(1) 權重	因子	(2) 權重	(3) 評分層級					(4) 因子評分
技術	0.34	工期長短	0.33	極短	短	適中	長	極長	
				100	75	50	25	0	
		施工程序之複雜性	0.32	極易	易	適中	難	極難	
				100	75	50	25	0	
		特殊設備或技術	0.35	極少	少	適中	多	極多	
				100	75	50	25	0	
經濟	0.28	初始成本	0.56	極低	低	適中	高	極高	
				100	75	50	25	0	
		後續維護成本	0.44	極低	低	適中	高	極高	
				100	75	50	25	0	
限制	0.38	坡度限制	0.52	45 度以上		45 度以下			
				100		0			
		坡面條件限制	0.48	惰性		土壤			
				100		0			
(5)適用性評分 (越接近 100 之適用性為最高)									

表 3.4 各式植生技術適用性評分

	多孔性綠化水泥植生技術	纖維加勁土壤噴植技術	水泥噴凝植生技術	薄層木屑堆肥團粒化劑噴植	掛網客土植生技術
適用性 評分	45.86	46.61	73.95	58.99	44.27
序位	4	3	1	2	5

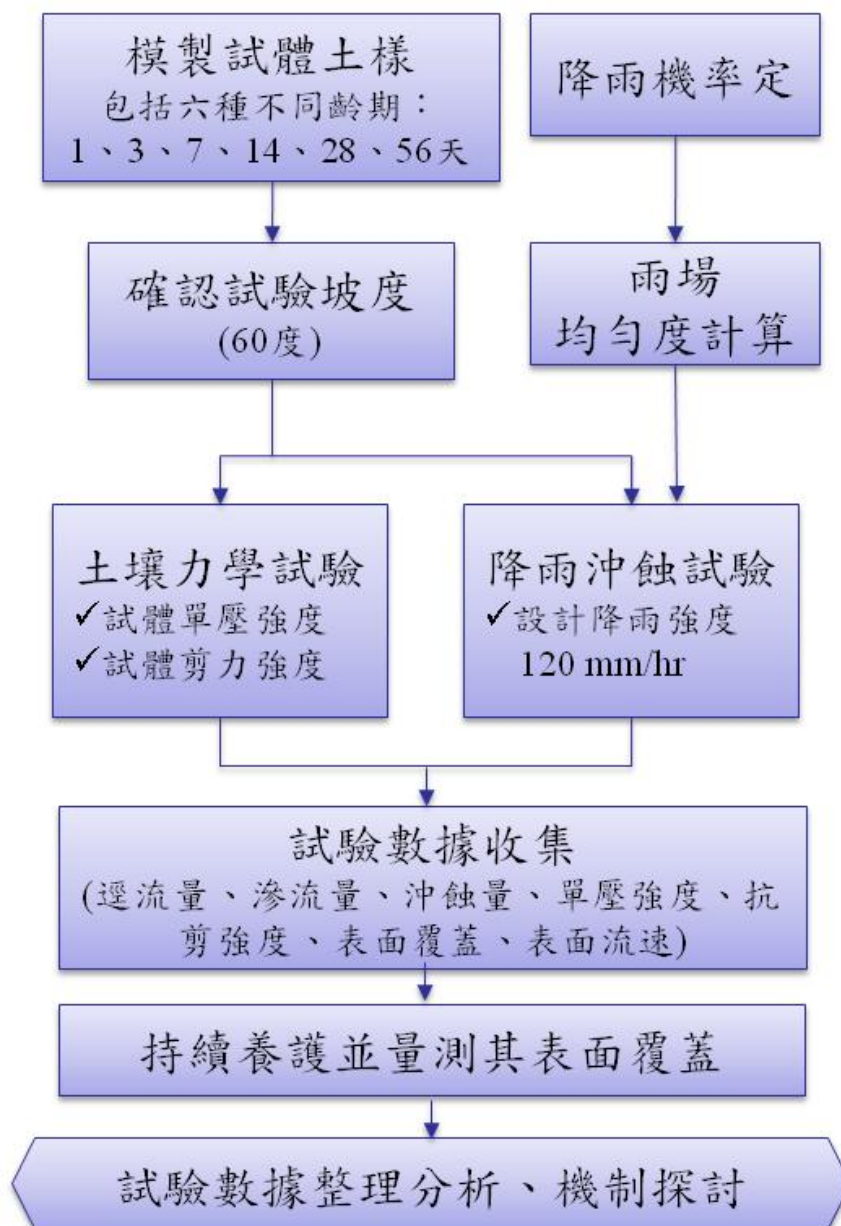


圖 3.4 坡面植生困難工址植生技術室內試驗流程圖

於短時間內提升護坡的土壤強度，以達到快速抗沖蝕的能力。此外，材料中含有特殊的保水基材，可使噴植後之水力覆蓋面不會產生表層龜裂的現象。而綠化添加劑中之特殊礦物中和了土壤中水泥的之鹼性，改變了土壤之化學特性，可於混凝土坡面上重新營造一個較適合植物生長的環境。此技術根據植物生長的特性及氣候條件，優選冷季型與暖季型之混合草種，於不同季節之轉變時，坡面植被能枯榮交替，經年都有合適的植被生長。

本次試驗使用之草種有百喜草、百慕達草、高狐草、黑麥草，比例依序為 2：1：1：1。挑選的主要考量為百喜草為根系較強物種，百慕達草是暖季型草種、高狐草是冷季型草種，黑麥草的生長快速，各草種的特性列於表 3.5。

本技術分為基層和面層，基層所使用之材料為水泥、土壤、腐植質、保水劑、長效肥及綠化添加劑，覆蓋厚度約為 10 cm。而面層除了基層材料外，並混合優選的種子，其厚度約為 1 cm。相關之材料特性說明如表 3.6 所示。其中，材料之配比，基層配方以壤土（或砂質壤土） 1.0 m^3 、水泥 100 kg、綠化添加劑 40 kg 及腐植質 0.50 m^3 ，充分拌合均勻而成。面層配方係由壤土（或砂質壤土） 1.1 m^3 、水泥 100 kg、綠化添加劑 40 kg 及腐植質 0.50 m^3 ，加上優選之種子經充分混合而成。惟所使用草種的用量，一般不得少於 0.030 kg/m^2 。另外，SVMT 試體的孔隙率為 0.35~0.45 左右。

3.2.2 沖蝕試驗箱

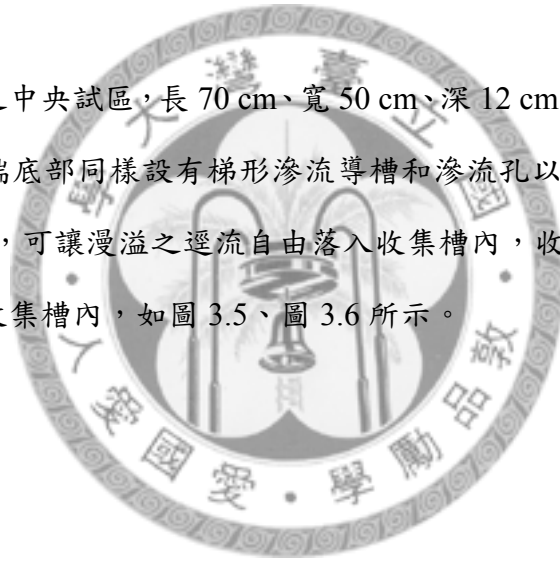
本研究之坡面植生困難工址植生技術降雨試驗，係採用范和楊(1995)所設計製造的沖蝕試驗箱，如圖 3.5 所示。主要構造包括沖蝕外箱、沖蝕內箱、坡度調整裝置、逕流收集裝置及推車等，如圖 3.5~圖 3.9 所示。惟在沖蝕試驗箱的部分，本研究將依照試驗之需求，進行些許改良，如坡度調整裝置改採用電動調整、逕流收集裝置之開孔需增大等。茲針對各項試驗儀器說明如下。

(1)沖蝕外箱

長 125 cm、寬 100 cm、深 12 cm，由厚度為 2 mm 之不銹鋼板製成，主要作為中央內箱試區周圍的飛濺補償區，下游端之底部設有梯形滲流導槽和滲流孔以允許自由排水，尾端另有寬 5 cm 的逕流收集導槽可收集飛濺補償區的逕流。如圖 3.5、圖 3.6 所示。

(2)沖蝕內箱

內箱為本研究之中央試區，長 70 cm、寬 50 cm、深 12 cm，材質亦為厚度 2 mm 之不銹鋼板。下游端底部同樣設有梯形滲流導槽和滲流孔以允許自由排水。尾端邊緣堰板高度 9 cm，可讓漫溢之逕流自由落入收集槽內，收集槽上方有擋板用以避免降雨直接落入收集槽內，如圖 3.5、圖 3.6 所示。



(3)逕流收集裝置

包含長 100 cm、寬 15 cm 的軌道及長 60 cm、寬 15 cm 的抽取式不鏽鋼收集槽，位於中央試區尾端堰板溢流處的正下方，如圖 3.7 所示。係用以直接蓄集逕流，並可依試驗的需求，快速抽換收集槽，分時段收集。

(4)滲流收集裝置

自沖蝕內箱之滲流孔以導水管連接至滲流收集筒。該收集筒附有頂蓋，以避免降雨直接落入。其同樣可依試驗的需求，快速抽換收集筒，分時段收集。

表 3.5 本研究選用草種之特性一覽

草種	特性
百喜草	耐熱性、耐旱性很強，在貧瘠、砂質、酸性、鹼性、潮濕或乾燥的土壤中都能生長，最適合生長氣溫為25-35℃，耐修剪、耐踐踏、耐鹽性中等，葉質粗糙，具短走莖，深根性且強健。
百慕達草	生長快速，抗寒性差，早春生長勢強恢復快，對於土壤之選擇不嚴格，耐陰性差，具中等的抗旱性，耐踐踏及耐修剪。
高狐草	生長慢、叢生性的草種，以耐旱、耐濕及中度耐陰為其特點。在秋至春季生長迅速，具有良好的耐磨性，在濕熱的夏季生長較差些。是一種優良的秋冬春草種。耐踐踏，在重度使用時，仍可維持良好的草坪。
黑麥草	發芽最速，約5-7天，在低溫的寒冬仍能保持青綠，受損後復原迅速，耐候性強。



表 3.6 水泥噴凝植生覆蓋技術之材料說明

	特性	用量
水泥	符合CNS 61 R2001 第一型之規定。	每1m ² 用量約8至10kg。
土壤	為提高草種的存活率，植生所需之客土，可採用pH值為6.5至7.5之砂質壤土且含砂量須小於5%。土壤所含的雜草、雜物及粒徑1cm以上之石子必須予以篩除。	
腐植質	腐植質採用已發酵之酒糟、菌包、木削或稻殼，其腐化後可提供植物氮、磷、鉀等養分之供應，同時亦可增加水力覆蓋的孔隙率。	各種肥料之用量比例依不同地質條件及綠化方式而有所不同，一般狀況下，每1m ² 用量約0.04 m ³ 至0.05m ³ 。
綠化添加劑	含長效肥、保水劑及相關礦物質。長效肥是提供植物生長，長期效力的複合肥，一般採用尿素(Urea)、生物肥(microbial fertilizer)及化學複合肥(chemical compound fertilizer)等。保水劑於水分豐富時先行吸收水分儲存，待天氣乾燥時可提供水分為植物所吸收。添加劑中之特殊礦物可中和土壤之酸鹼性，可營造適合植物生長的環境。	每1m ² 之用量約3.5 kg至4kg。
草種	考量植物生長的特性、氣候條件、噴植技術、經濟成本以及覆蓋厚度的限制，選擇根系較淺、匍匐性較高的冷季型與暖季型草種。	每1m ² 之用量至少約30g。



圖 3.5 沖蝕箱內、外箱

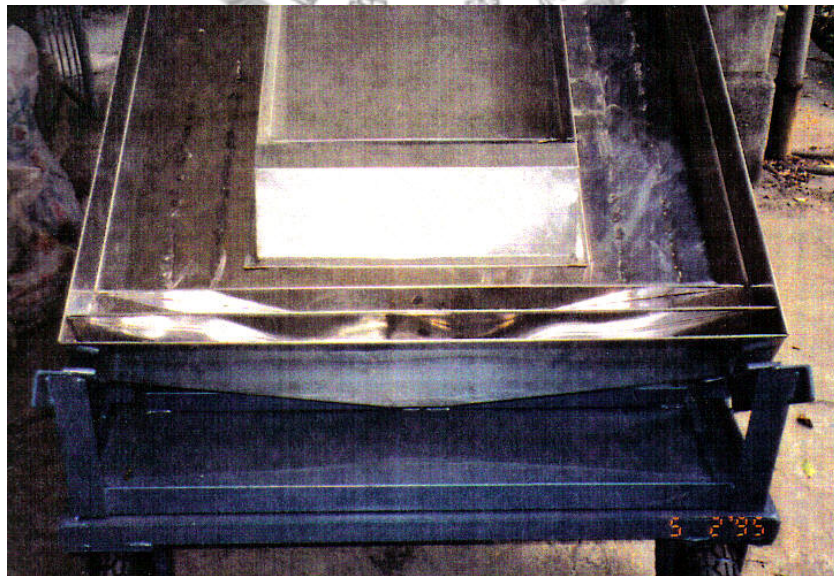


圖 3.6 沖蝕外箱之逕流導槽及滲流導槽

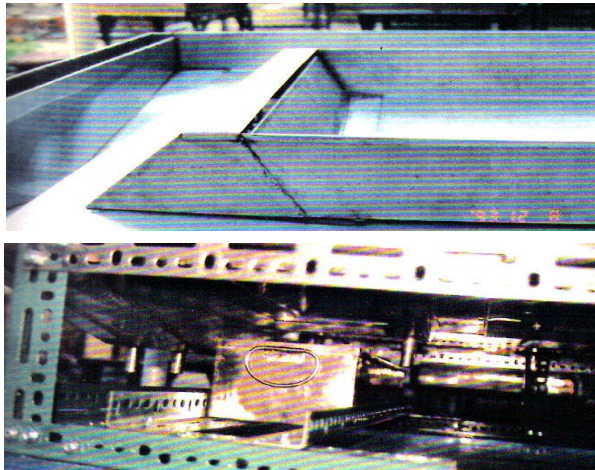


圖 3.7 逕流蒐集裝置



圖 3.8 沖蝕箱及角鋼支架



圖 3.9 推車

3.2.3 人工降雨機

本研究採用范正成和吳明峰(1996)所設計、製造並率定的降雨機。係參考 Foster et al.(1982)及 Fan and Lovell(1987)之田間人工降雨機，依國內研究發展之需要重新設計而來，並請國內廠商代為製造。范正成和謝宏元(1991)曾蒐集國內外共 134 種有關人工降雨機之資料進行分析評估，評估項目包括雨滴形成器、試驗場面積、雨滴落高、降雨強度、噴嘴壓力、操作人數、適用坡度、雨滴粒徑、均勻係數、構造成本、操作性等，結果認為 Fan and Lovell(1987)之人工降雨機具有最佳之研究性能，惟其構造成本及搬運性則稍差。人工降雨機之主要構造包括雨滴形成器、噴灑系統(spraying system)、支架、供水系統及控制器，如圖 3.10 所示。茲將各設備重點說明如下。

(1)雨滴形成器(drop-former)

採用 Veejet 80100 噴嘴。在同一長槽機體(troughs)中相鄰兩噴嘴之中心距為 1.1 m，其噴灑型態為沿坡向呈 80 度張角之扇形面。

(2)噴灑系統

噴灑系統包含水路系統及擺動機制，完全佈置於三具以不銹鋼構建之長槽機體中。每一具長槽機體之外觀長度皆為 3.04 m，相鄰兩機體之中心距為 1.38 m，並包含水泵(pump)、儲水池、浮動閘門、管路、迴水閘門、驅動馬達、驅動桿件、三個噴嘴及三個電磁閥。由於每一具長槽機體之構造及零組件皆完全相同，而且其連外電力線路及進水管路皆呈並聯形式，因此各機體皆可獨立運作。

水路系統係由水泵、儲水池、浮動閘門、管路、迴水閘門、噴嘴及電磁閥所組成。當降雨機運作時，水泵即由儲水池中將水抽入管路，並同時造成管路內水體達 10 psi 之壓力，由於此管路具有迴水裝置，容許部分水量回流入儲水池，因此

管中之水壓力可經由迴水閥門之開啟而獲致適度之調低，例如本研究使用之壓力為 6 psi。至於管路中具有壓力之水體則在電磁閥接受控制器之訊號開啟時，經由噴嘴壓出，形成降雨。擺動機制係由驅動馬達、驅動桿件及軸承所構成。當降雨機運作時，各長槽機體中的三個噴嘴即在驅動桿件的牽引及驅動馬達的帶動下，同步沿等高方向進行 90 度擺角之往復擺動，頻率約為每分鐘 120 週期。

(3) 控制器

控制器之功用包括作為長槽機體內水泵及驅動馬達之電力開關，以及經由時間控制器控制長槽機體水路系統中電磁閥之開啟延時及關閉延時。例如設定噴灑延時為 1 秒，關閉延時為 2.5 秒時，表示降雨機將每噴灑 1 秒即暫停 2.5 秒，並反覆運作直至按下停機紐為止，此方式即為降雨強度之控制方式。

(4) 其他相關性能

此降雨機與本研究相關之性能尚包括：

雨滴落距: 8 ft (2.44 m)

雨滴初速: 6.247 m s^{-1}

中值雨滴粒徑: 2.26 mm

最大雨滴粒徑: 3.79 mm

最大降雨強度: 184 mm hr^{-1}

單位降雨動能: $793 \text{ ft-ton acre}^{-1} \text{ inch}^{-1}$ ($0.2092 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)

另由於本研究之沖蝕試區範圍為 $1.25 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 放置 60 度的投影面積，使用兩具長槽機體運作便足以滿足沖蝕試驗之需求，遂擇定兩具機體間之中心位置作為固定試驗位置，並對該位置之降雨強度均勻性進行率定。以 Christiansen(1941)所提出之計算法，計算均勻係數(Uc)，如式 4.8。其中， X_i 為第 i 個量筒之量測值、 n 為

量筒之總數、 \bar{X} 為 n 個量測值之算術平均值。

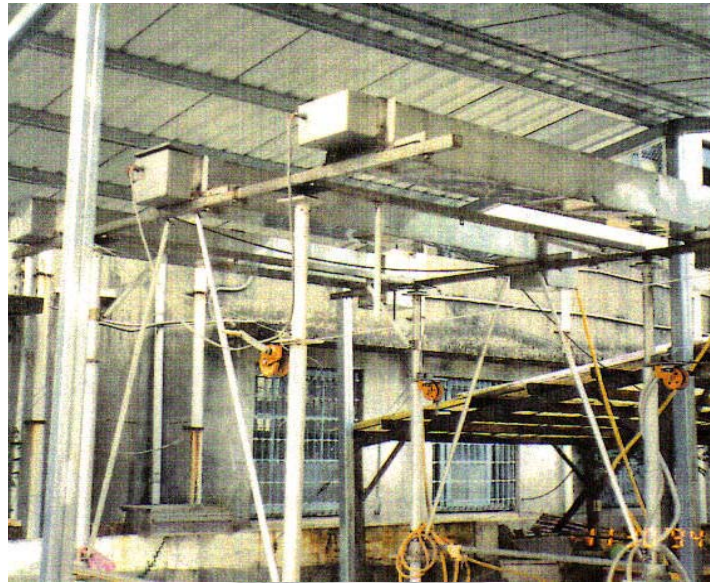
$$U_c = 1 - \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{\sum X_i} \quad (\text{式 4.8})$$

本研究中降雨控制為降 2 秒停 0.5 秒，經過降雨率定試驗顯示其均勻係數約在 86.47% 左右，強度約在 120mm/hr，數據於附錄 B。

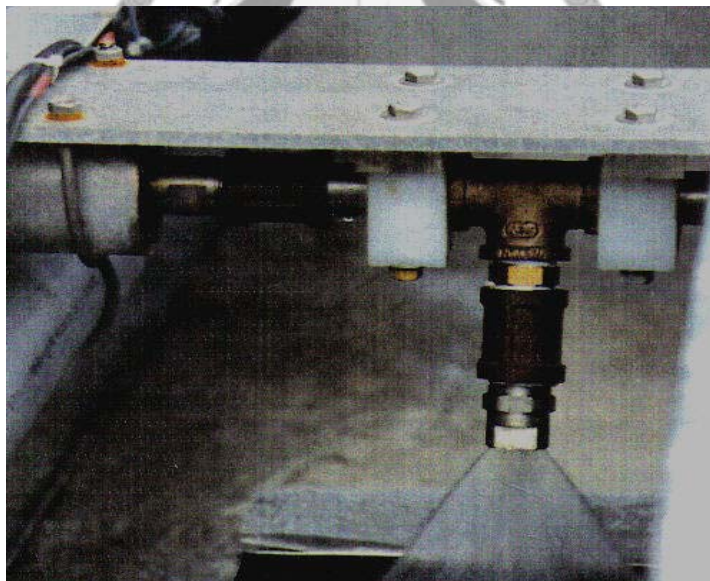
3.3 沖蝕試體製作及養護

本研究之試體依設計坡度(60 度)放置，試體製作及養護流程如下。圖 3.11 則為試體製作使用之機具及過程一覽。

- (1) 將沖蝕試驗箱放置於固定 60 度之角鋼支架上，再噴上基層厚度約 10 cm，其使用的材料為水泥、土壤、腐植質及綠化添加劑。面層除基層材料外，並混合優選的種子，其厚度約為 1cm。同時，按照預定試驗之齡期予以編號。此外，對照組試體的製作方式同上，惟噴植材料係選用一般傳統噴植方法，以進行比較。
- (2) 上述人工降雨試驗用試體，包括 6 種齡期、2 種植生技術及 2 重複試驗，共計 24 組。同時，亦需製作 2 組試體供後續土壤力學試驗之用。此外，本研究亦準備 2 組預備試體，預防試驗因儀器或人為因素失敗。因此，共計製作 28 組試驗試體。
- (3) 試體製作完成後，按照預定之試體齡期進行人工降雨沖蝕試驗。而每次試驗結束之後，對試體進行養護，並每天澆水兩次。



人工降雨機



噴灑系統

圖 3.10 人工降雨機設備一覽



沖蝕箱放置於角鋼支架上



鋪設立體菱形網



植生基材拌合、送料



噴植 1



噴植 2



試體製作完成

圖 3.11 試體製作過程一覽

3.4 人工降雨沖蝕試驗

試驗均固定試區坡度為 60 度，並以人工降雨機模擬降雨強度約 120 mm hr^{-1} 之降雨 60 分鐘，此種降雨強度若以石門水庫地區巴陵站之歷年雨量記錄計算，係為超過 100 年頻率之暴雨。而試驗之控制變因為不同之試體進行降雨試驗的齡期。其中，製做試驗用試體(水泥噴凝植生覆蓋技術 SVMT)及對照組(傳統植生覆蓋技術)，齡期分為 6 種(分別為 1、3、7、14、28、56 天)，進行二重複試驗，共 24 組。此外，尚有兩組預備試體及兩組土壤力學試驗用試體。茲將人工降雨沖蝕試驗之步驟說明如下。

- (1) 平放試體，使用袖珍貫入器測量降雨前表面強度，每個試體各取 3 個點量測。如圖 3.12 所示。(袖珍貫入器試驗方法於 3.6.2 中詳述)
- (2) 人工降雨機預先降雨 5 分鐘，使降雨均勻，確認噴嘴供水正常。
- (3) 調整降雨機高度，使噴嘴至試體表面之平均高程為 2.44 m。並確認試體坡度為 60%。如圖 3.14 所示。
- (4) 將逕流收集槽推入軌道定位，並裝設滲流收集筒。如圖 3.15 所示。
- (5) 啟動降雨機並調整降雨強度約為 120 mm hr^{-1} ，降雨 60 分鐘。降雨強度發生之後每 5 分鐘即抽換逕流收集槽及滲流收集筒。試驗進行中情形如圖 3.13、圖 3.16 所示。
- (6) 於降雨開始後 26 分鐘及 46 分鐘時，測量主要試區之表面平均流速，使用鹽基桃精(紅色)染色劑法。
- (7) 降雨完成後，使用袖珍貫入器測量降雨後表面強度，每個試體各取 3 個點量測。

- (8) 將逕流收集槽及滲流收集筒分別稱重，扣除容器重，可得逕流量及滲流量。
- (9) 將逕流收集槽放入烘箱內，以 $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾後稱重，扣除槽重，可得沖蝕量。
- (10) 於土壤力學試驗用試體上取土樣，直剪試體每個齡期取 4 組，進行直接剪力試驗。
- (11) 進行養護並量測表面覆蓋。

3.5 逕流流速量測

本研究希望能夠觀察不同齡期下薄膜流流速造成的逕流沖蝕差異，故利用染劑(鹽基桃精)對逕流進行染色。經試驗結果可知，該染劑不會在水中快速擴散，且在水中及土壤並不會產生化學變化，可以作為流速之測定。流速量測土壤沖蝕試驗中逕流較穩定之狀態，以確保量測為穩定之流速，故本研究選擇逕流較穩定中土壤沖蝕試驗第 26 分鐘及第 46 分鐘進行施放染劑共進行兩次試驗。其施放間距為 20 分鐘是希望藉雨水之淋洗以沖淡染劑之顏色，避免前後次染劑顏色相互干擾造成判釋之誤差。施放染劑伸入中央試區距逕流收集口上游約 50 公分處，兩次放置等高但不相同之位置，避免染劑相互干擾所造成之誤差。染劑之施放採單點施放，單點施放是儘量避免雨滴直接落在染劑上，造成染劑隨著雨滴飛濺落在下游造成影像判釋之困難。全程實況利用土壤沖蝕箱上方之數位攝影機進行拍攝。

在獲得數位影像後，視各組情況擷取染劑施放初始及後期之圖像兩張，如圖 3.17 所示。利用影像分析軟體將染劑所屬相同色系框出，找尋該框線最低點之座標位置，以沖蝕內箱長 70cm 作為比例尺，比較四張染劑最低點之位置除以時間可得流速。如發生飛濺作用導致染劑染到下游逕流以至於無法判定流速，或因當天光線不足無法清楚辨析染劑等狀況皆作廢



圖 3.12 量測試體表面強度



圖 3.13 試體裝設推車上移至雨場



圖 3.14 確認試體坡度



圖 3.15 裝設逕流蒐集槽



圖 3.16 試驗進行中



施放後 3 s



施放後 18 s

圖 3.17 染劑施放擷取圖像

3.6 表面強度試驗

坡面植生困難工址技術希望具有一定的強度以達成護坡的目的，本研究希望透過一些土壤基本性質試驗來了解不同齡期下該技術是否會有強度的差異，故進行兩項試驗分別為直接剪力試驗及袖珍貫入試驗，試驗說明如下：

3.6.1 直接剪力試驗

(A) 參考資料：

美國材料試驗學會(ASTM: D3080-04)

(B) 試驗目的：

測定土壤在自然含水量情況下之凝聚力(Cohesion)及內摩擦角(Angle of Internal Friction)，以便計算在此情況下土壤之剪力強度。

(C) 試驗儀器與設備：

- (1) 試樣修整器：修整不擾動試體使適合直接剪力儀內剪力盒之用。
- (2) 直接剪力儀：分有應力控制及應變控制兩種型式，主要包括剪力盒(Shear Box)見圖 3.18，適合圓形土樣試體分上、下兩半部，下半部固定，上半部藉剪力作用桿之推拉能自由移動，剪力儀(如圖 3.19 所示)一端設有一齒輪箱，可用手操作或馬達操作促使剪力經過壓力環而達剪力盒之上半部。測定剪力及垂直壓力所致試體之變形係用千分之一吋之測微計，壓力環內測微計係萬分之一吋。加於試體之垂直壓力設備係用鐵塊加於吊架上經過儀器上而有一平衡重之吊鉤而達於試體上，為防止試體在試驗過程中，對剪力盒蓋面與盒底發生滑動現象，在透水銅盒蓋與盒底鑲有細薄銅條之齒條，該齒條方向與剪力方向相垂直，使能對試體上下面相互齒和。
- (3) 磅稱：靈敏度達 0.1g。

(4)烘箱：保持溫度 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 之恆溫烘箱。

(5)小夯錘：將砂夯實之用。

(6)頂樣器：如有必要，用以頂出薄管內不擾動土樣。

(7)計時儀。

(D)試樣：

(1)每次試驗同樣試體需準備四個，由預先製作的預備試體中取樣。

(2)由頂樣器取出圓形不擾動土樣，必要時用土樣修整器加以修整，惟兩端切割面應與中心軸垂直，試體厚度約 2.5cm。將試體小心納入底面放有透水底板且上下部剪力盒已用插梢固定之剪力盒內，使齒條嵌入試體內，其次將透水銅盒蓋蓋在試體上，並輕輕加壓使齒條嵌入。

(E)試驗步驟：

(1)將鋼珠放在透水銅盒蓋凹部，載重吊架之橫桿安置於鋼珠上，準備加垂直壓力。

(2)使試體在自然含水狀態下進行試驗，在剪力盒四周填滿濕棉花，以防試體水份蒸發。

(3)安置適當重量的加重塊於吊架之加重盤上，此垂直壓力之決定根據試體在地層中所承受上層土重而來，即先前壓密壓力，普通試驗所用之垂直壓力均較先前壓密壓力為大。

(4)藉剪力盒上半部頂盒表面上之三個間距調整螺絲調整頂盒微微提高，與下半部底盒間保持 1~1.5mm 間距為使上下兩半盒間距均勻，可用一適當厚度之薄銅片塞入間隙內檢核之。其次旋緊上半部頂盒四周邊緣之固定螺絲，以鎖住頂盒之位置。然後將間距調整螺絲旋回到原來位置，使間距調整螺絲不致接觸到下半部底盒。在剪力盒上下兩半部重合前，在

兩盒接觸面塗抹一層潤滑油，以減低上下盒間之摩擦力。

(5)調整剪力作用桿，壓力環使接觸剪力盒上半部頂盒，並使壓力環內測微計讀數歸零。安裝水平變位之測微計，並將指針歸零。

(6)視實地情況，使用快試法(Q 法)一因為不讓試體在試驗前及試驗中途發生壓密，故當垂直壓力加上而插梢拔除後立刻施以剪力，剪力增加率普通是每分鐘橫移 0.08 吋(2mm)，測微計讀數在最初兩分鐘內每隔 15 秒讀一次，然後每 30 秒鐘一次，直到橫向變形等於試體長度之 15%為止或直到剪力保持不變為止或剪力下降為止。

(7)將試體取出做含水量試驗。

(8)其餘三個試體按前述步驟在個別垂直壓力下進行剪力試驗。

(F) 計算：

(1)最大剪應力

$$S = \frac{F}{A'} \quad (\text{式 3.1})$$

S = 剪應力(Kpa or kg/cm²)

F = 剪力(N or kg)

A' = 試體斷面積(cm²)

(2)壓應力

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{式 3.2})$$

σ = 壓應力(Kpa or kg/cm²)

P = 垂直壓力(N or kg)

A = 試體斷面積(cm²)

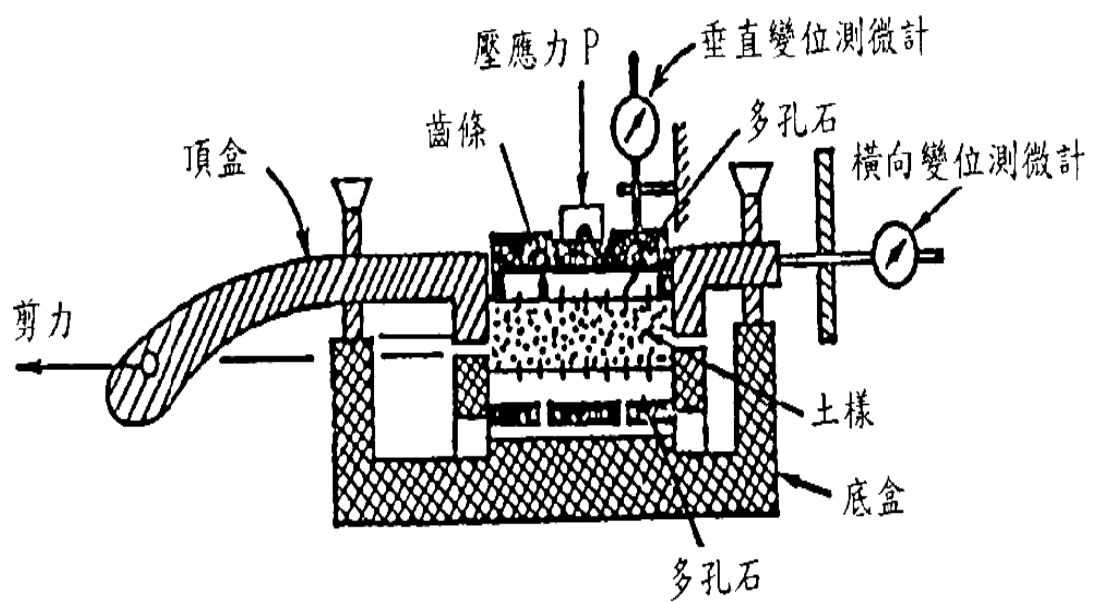


圖 3.18 剪力盒詳圖



圖 3.19 直接剪力儀

3.6.2 袖珍貫入器(pocket penetrometer)

(A) 參考資料：

美國材料試驗學會(ASTM:WK27337)

(B) 試驗目的：

快速且簡易的得到土壤的 unconfined compressive strength(UCS)無側限壓縮強度。

(C) 試驗儀器與設備：

使用義大利 Controls 公司製造的 16-T0163 Penetrometro tascabile Pocket penetrometer，儀器如圖 3.20 所示，可應用於試驗室及野外。

使用方式為將之壓入土中，最深可貫入土壤 6cm。儀器附有大、中、小三種貫入接頭，最大貫入接頭直徑 8.98mm，面積 63.335 mm²，中接頭斷面積為大接頭的一半，小接頭面積為大接頭面積之四分之一。使用最大貫入接頭所讀得之值為土壤的 unconfined compressive strength (UCS)，可量測範圍為 0~2 MPa。

貫入器上附有紅色 PVC 環，貫入器壓入土中後，PVC 環會維持在所讀到的最大值，其值為該處土壤的無側限壓縮強度。

(D) 試樣：

於沖蝕試驗箱內噴植水泥噴凝植生覆蓋技術(SVMT)土樣及傳統植生覆蓋技術土樣。

(E) 試驗步驟：

- i. 降雨試驗前將試體水平放置。
- ii. 旋入所選擇適當大小的土壤貫入器接頭。

- iii. 使用袖珍貫入器於試體中取三點量測強度，施做點以不擾動中央土樣為準。
- iv. 降雨試驗完成後，將試體恢復水平放置。
- v. 在試體中各取三點異於降雨試驗前所取之三點，施做點以不擾動中央土樣為準。

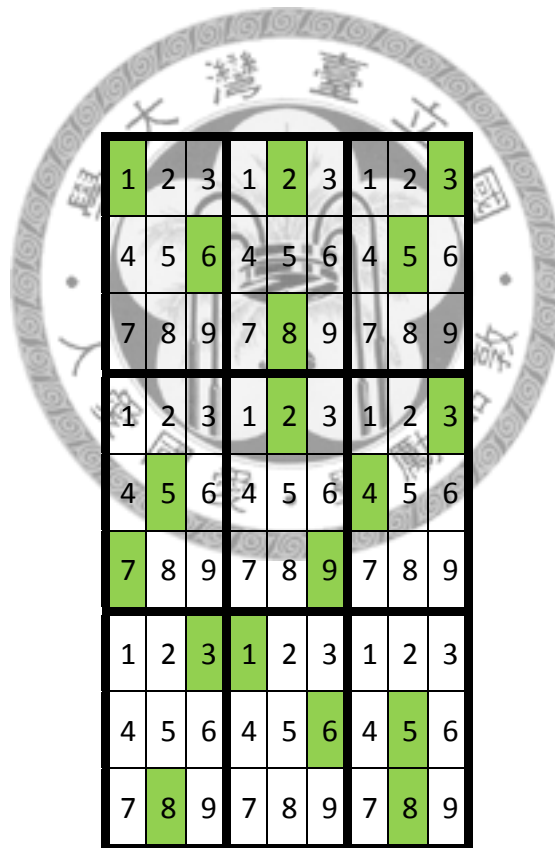
3.7 表面覆蓋分析

本研究為了解於不同齡期沖蝕之試體植生生長情形，於第 84 天進行傳統及 SVMT 覆蓋量測。研究方式為將沖蝕箱中央試區(70cm*50cm)依照面積分為九大格，每大格再分九小格，每一大格內以亂數選取兩小格計算草類株數，加總後平均再乘 81 為中央試區總植物株數。此方式進行二重複試驗，即計算完成後，再隨機取樣一次，與前次做平均，中央試區如圖 3.21 所示分割，綠色區域為亂數所選取的點示意。

本研究採用植物株數表示植生生長的情形，原因為生長之草類多屬於細長型針狀草類，由於無片狀葉面，因此正向投影面積較不具有代表性。



圖 3.20 袖珍貫入器(pocket penetrometer)



1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	5	6	4	5	6	4	5	6
7	8	9	7	8	9	7	8	9
1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	5	6	4	5	6	4	5	6
7	8	9	7	8	9	7	8	9
1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	5	6	4	5	6	4	5	6
7	8	9	7	8	9	7	8	9

圖 3.21 選取量測覆蓋區域示意圖

第四章 試驗結果與討論

4.1 各工法適用性評估之結果

鑒於國內外可應用於植生困難工址的各工法皆有其優缺點存在，本研究期望能從中遴選出綜合各項條件包含施作方法、施工限制及施工成本等，較符合需求的工法來進行室內降雨試驗。工法的選用與現地的條件有很大的關係，本研究所設計的適用性評估表，亦可依據現地特殊條件給分，提供現地施工施供參考的依據。

本調查問卷之內容係為針對坡面困難工址之適用性評分標準進行調查，故受訪者皆為相關之專家學者。其包含石門水庫內各相關主管機關之服務人員（水土保持局、北區水資源局等）、工程顧問公司之相關技師（水土保持、水利、大地及土木技師等）與工程人員，以及學術單位之相關教授及研究員等。期能透過其對邊坡植生技術豐富之管理、設計及實務經驗，使問卷結果能清楚呈現工法適用性之評分標準。

本次問卷共計發放 70 份、回收數量達 64 份、有效問卷總計 60 份。而與使用層及分析法(AHP)不同之處，即在於模糊偏好關係法已將一致性檢定之內容涵蓋於問卷設計及權重計算之中。因此，相對於 AHP 法而言，模糊偏好關係法改善了問卷通過一致性檢定率過低之問題，使有效問卷之數量大幅提升。以本研究為例，回收之 64 份問卷中，除作答不完整的 4 份之外，其餘皆屬有效問卷，可做為各因子權重計算之依據。而有效問卷之受訪者身份及其最高學歷統計結果如圖 4.1 所示。由受訪者身份之統計結果，可看出本研究問卷調查之對象以學術、規畫設計及政府人員為最多，所佔比例皆在 20 % 以上。而營造及維護管理人員之比例較少，但亦皆在 10 % 之上。此一結果顯示本問卷調查之結果並無特別偏重某一領域或專長

之專家，故結果應較為客觀。此外，由受訪者學歷之統計結果，碩士以上學歷佔 76 % 以上，顯示受訪者有足夠之學識基礎。

依據第三章所提到的模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations)將文獻中蒐集到的五種可施作在困難工址的植生技術，透過各式植生技術之適用性評分表，得到各技術適用性總評分結果如表 4-1 所示。而各式技術詳細之評分內容及說明如表 4-2~表 4-6 所示。

分數最高的工法係為「水泥噴凝植生覆蓋技術」之 73.95。其最主要之特點係為可應用於超過 45 度之惰性鋪面(混凝土、岩石邊坡等)之上，因此於限制層面獲得滿分。而另一個於限制層面獲得滿分之技術係為「纖維加勁土壤噴植技術」，但其初始成本較高，且需特殊設備及技術，因此在經濟及技術層面之評分皆過低，導致總分僅有 46.61。此外，總分第二高係為「薄層木屑堆肥團粒化劑噴植」之 58.99，因其屬薄層工法，在施工程序及工期之表現皆較為優越，同時，於初始成本在各式技術中亦屬適中，惟其技術僅能適用於一般土壤邊坡，因此總分較「水泥噴凝植生覆蓋技術」為低。

綜合各式植生技術適用性評分之結果，若僅以技術及經濟層面而言，係以「薄層木屑堆肥團粒化劑噴植」之得分最高。但其僅可應用於約 50 度且一般土壤邊坡之上；而「水泥噴凝植生覆蓋技術」之應用範圍較廣，其適用性得分亦較高。鑒於本研究之目的，在於找尋一可應用坡面困難工址(包括坡度 45 度以上及惰性鋪面之工址)之植生技術。因此，在綜合考量下，選擇「水泥噴凝植生覆蓋技術」作為後續室內人工降雨沖蝕試驗之植生技術。

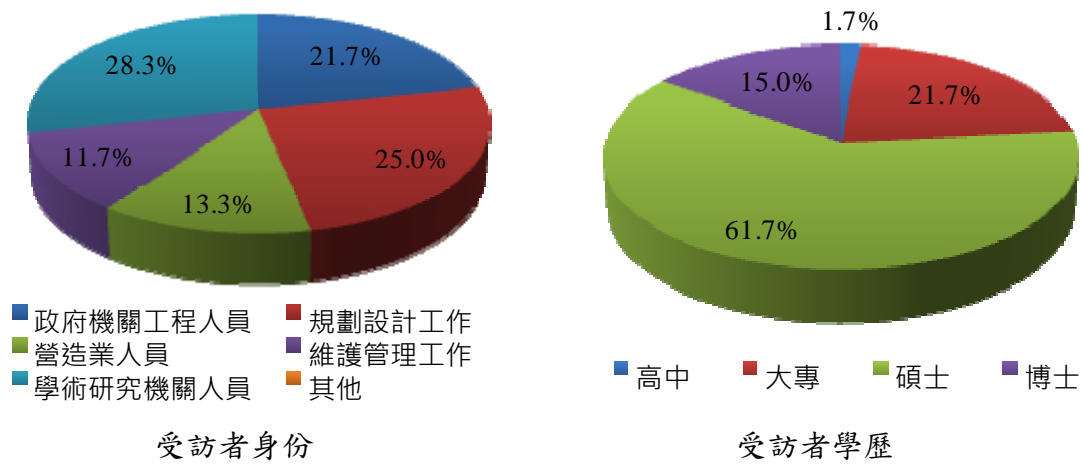


圖 4.1 問卷調查之受訪者統計結果

表 4-1 各式植生技術適用性評分

	多孔性綠 化水泥 植生技術	纖維加勁 土壤噴植 技術	水泥噴凝 植生技術	薄層木屑堆 肥團粒化劑 噴植	掛網客土 植生技術
適用性 評分	45.86	46.61	73.95	58.99	44.27
序位	4	3	1	2	5

表 4-2 多孔性綠化水泥植生技術適用性評估指標評分表

層面	(1) 權重	項目	(2) 權重	(4) 評分層級					(5) 因子評分	說明		
技術	0.34	工期長短	0.33	極短	短	適中	長	極長	2.81	須待底層的多孔性水泥固結後，才能施做面層。		
				100	75	50	25	0				
		施工程序之複雜性	0.32	極易	易	適中	難	極難	2.72	需要分兩層施作，先傾倒下層水泥，再噴植面層。		
				100	75	50	25	0				
		特殊設備或技術	0.35	極少	少	適中	多	極多	8.93	僅需噴植設備		
				100	75	50	25	0				
經濟	0.28	初始成本	0.56	極低	低	適中	高	極高	3.92	噴植層無特殊添加，僅土壤、肥料、多孔性水泥成本		
				100	75	50	25	0				
		後續維護成本	0.44	極低	低	適中	高	極高	9.24	含保水劑、肥料，可減少後續維護次數，但面層抗沖刷較弱，植生生長前需多次維護。		
				100	75	50	25	0				
		限制	0.38	坡度限制	0.52	45 度以上		45 度以下			0	多孔性水泥採傾倒施作，故陡坡之應用上有其限制。
						100		0				
坡面條件限制	0.48			惰性		土壤			18.24	可使用在惰性鋪面		
				100		0						
適用性評分 (越接近 100 之適用性為最高)									45.86			

表 4-3 纖維加勁土壤噴植技術適用性評估指標評分表

層面	(1) 權重	項目	(2) 權重	(4) 評分層級					(5) 因子評分	說明
技術	0.34	工期長短	0.33	極短	短	適中	長	極長	2.81	需以錨釘固定面層及坡面，施工過程、機具操作需要較久。
				100	75	50	25	0		
		施工程序之複雜性	0.32	極易	易	適中	難	極難	2.72	施工程序比較複雜，需將纖維混合噴於坡面上。
				100	75	50	25	0		
		特殊設備或技術	0.35	極少	少	適中	多	極多	0	需特殊的設備與人員的訓練
				100	75	50	25	0		
經濟	0.28	初始成本	0.56	極低	低	適中	高	極高	0	每平方公尺的初始成本約為 US \$ 103- 154。
				100	75	50	25	0		
		後續維護成本	0.44	極低	低	適中	高	極高	3.08	需定期追肥養護
				100	75	50	25	0		
限制	0.38	坡度限制	0.52	45 度以上		45 度以下			19.76	可施作到 70 度
				100		0				
		坡面條件限制	0.48	惰性		土壤			18.24	可施作於惰性鋪面
				100		0				
適用性評分 (越接近 100 之適用性為最高)									46.61	

表 4-4 水泥噴凝植生覆蓋技術適用性評估指標評分表

層面	(1) 權重	項目	(2) 權重	(4) 評分層級					(5) 因子評分	說明
技術	0.34	工期長短	0.33	極短	短	適中	長	極長	8.42	掛網後可直接進行噴植
				100	75	50	25	0		
		施工程序之複雜性	0.32	極易	易	適中	難	極難	5.44	清理坡面、掛網即可噴植，惟噴植基材需添加多種材料。
				100	75	50	25	0		
		特殊設備或技術	0.35	極少	少	適中	多	極多	8.93	僅需噴植設備
				100	75	50	25	0		
經濟	0.28	初始成本	0.56	極低	低	適中	高	極高	3.92	約 1650 元/m2
				100	75	50	25	0		
		後續維護成本	0.44	極低	低	適中	高	極高	9.24	含保水劑、肥料，僅需後續於植生生長前，定期澆水維護。
				100	75	50	25	0		
限制	0.38	坡度限制	0.52	45 度以上		45 度以下			19.76	可施作到 75 度
				100		0				
		坡面條件限制	0.48	惰性		土壤			18.24	可施作於惰性鋪面
				100		0				
適用性評分 (越接近 100 之適用性為最高)									73.95	

表 4-5 薄層木屑堆肥團粒化劑噴植適用性評估指標評分表

層面	(1) 權重	項目	(2) 權重	(4) 評分層級					(5) 因子評分	說明
技術	0.34	工期長短	0.33	極短	短	適中	長	極長	11.22	薄層工法不需掛網，可直接噴植。
				100	75	50	25	0		
		施工程序之複雜性	0.32	極易	易	適中	難	極難	8.16	不需要掛網，且噴植層只有1cm。
				100	75	50	25	0		
		特殊設備或技術	0.35	極少	少	適中	多	極多	8.93	僅需噴植設備
				100	75	50	25	0		
經濟	0.28	初始成本	0.56	極低	低	適中	高	極高	7.84	約 1300 元/m2
				100	75	50	25	0		
		後續維護成本	0.44	極低	低	適中	高	極高	3.08	不含保水劑，且木屑纖維較短，抗沖蝕力弱，需維護。
				100	75	50	25	0		
限制	0.38	坡度限制	0.52	45 度以上		45 度以下		19.76	可施作到 50 度	
				100		0				
		坡面條件限制	0.48	惰性		土壤		0	因為噴植基材厚度僅 1cm，僅能應用於一般土壤邊坡。	
				100		0				
適用性評分 (越接近 100 之適用性為最高)									58.99	

表 4-6 掛網客土植生技術適用性評估指標評分表

層面	(1) 權重	項目	(2) 權重	(4) 評分層級					(5) 因子評分	說明
技術	0.34	工期長短	0.33	極短	短	適中	長	極長	8.42	掛網後可直接進行噴植
				100	75	50	25	0		
		施工程序之複雜性	0.32	極易	易	適中	難	極難	8.16	清理坡面、掛網即可噴植。
				100	75	50	25	0		
		特殊設備或技術	0.35	極少	少	適中	多	極多	8.93	僅需噴植設備
				100	75	50	25	0		
經濟	0.28	初始成本	0.56	極低	低	適中	高	極高	15.68	約 800 元/m2
				100	75	50	25	0		
		後續維護成本	0.44	極低	低	適中	高	極高	3.08	需定期追肥與維護
				100	75	50	25	0		
限制	0.38	坡度限制	0.52	45 度以上		45 度以下			0	只能應用於 35 度以下的緩邊坡。
				100		0				
		坡面條件限制	0.48	惰性土壤					0	無法應用於惰性鋪面
				100		0				
適用性評分 (越接近 100 之適用性為最高)									44.27	

4.2 人工降雨試驗之結果與討論

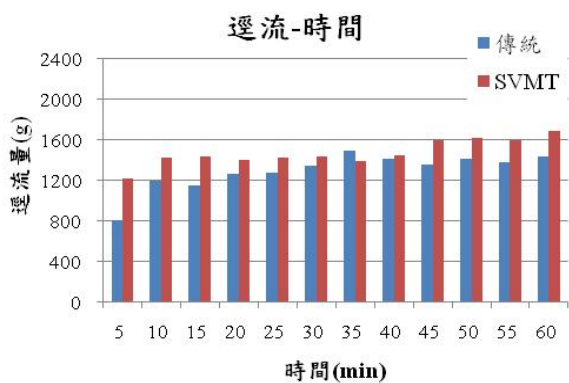
本試驗旨在利用兩種不同之植生技術製作試體，進行人工降雨試驗，藉以比較其抗沖蝕能力、試體強度、表面流速及覆蓋率等。本研究之控制變因為不同之試體受降雨沖蝕的齡期，齡期共分為 6 種(分別為 1、3、7、14、28、56 天)，實驗組試體為「水泥噴凝植生覆蓋技術(SVMT)」，對照組採用「傳統植生覆蓋技術」。固定試體坡度為 60 度，並模擬降雨強度約 120 mm/h 之降雨，持續 60 分鐘，每種條件均至少進行二重複試驗，取得 24 組完整數據進行分析及比較，詳細數據列於附錄 C。而在試驗開始前針對試體進行土壤力學試驗，以取得試體之單壓強度及抗剪強度。其後在試驗進行中，持續蒐集逕流量、沖蝕量、流速等數據，並在試驗結束後，持續養護試體，最後再量測其表面覆蓋。透過不同齡期的試驗結果，比較此一技術受降雨沖蝕的抗沖蝕能力及強度。

4.2.1 逕流量量測結果與討論

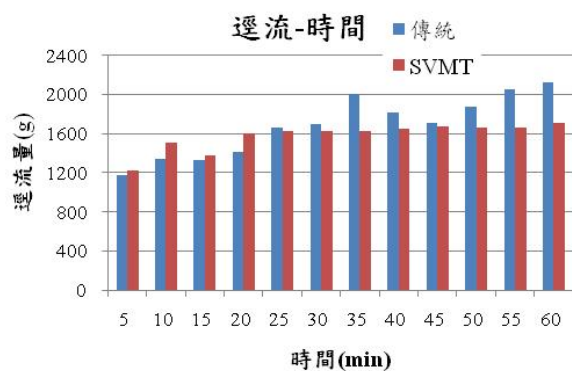
本研究於試驗中，採取每 5 分鐘抽換逕流蒐集槽一次，在抽取逕流蒐集槽後即予以秤重並送入烘箱烘乾，再配合空槽重即可得到逕流量及沖蝕量之數據。首先圖 4.2(a)~(f)係為各組試驗蒐集之逕流量量測結果，圖 4.3 則為各齡期逕流總量之量測結果。

由圖 4.2(a)~(f)逕流量隨時間變化之結果可知，不論是傳統或 SVMT 試體，於試驗初始約 5 至 15 分鐘左右之逕流量皆較少，而在試驗之後段，逕流量漸增且趨於穩定。然而，其前、後段之逕流量差值不甚顯著。此外，由表 4.7 亦可看出傳統及 SVMT 試體在每 5 分鐘之逕流量並無顯著之差異，傳統之均值大致介於 1264~2018 g、SVMT 則介於 1420~1703 g。再者，由圖 4.5 中各齡期之逕流總量觀之，發現 56 天齡期之逕流總量明顯較大，又而傳統總逕流大於 SVMT；而 14 及 28 天齡期之逕流總量較小，又 SVMT 總逕流大於傳統。綜合上述逕流量之分析結果，彙整數點初步結論如下。

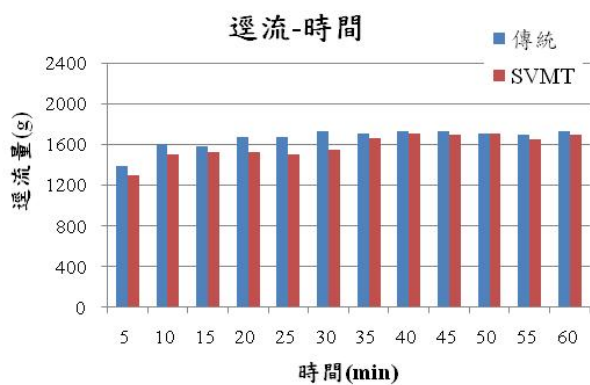
- (1) 試驗開始土壤未完全飽和，之後隨時間增加土壤表層漸趨近飽和狀態，因而在土壤表面產生窪蓄，當窪蓄無法再蓄積更多水量時，則逕流量逐漸增加。同時，雨滴撞擊對土壤表面造成孔隙封鎖之效應，故隨時間增加土壤入滲降低，逕流量增加。
- (2) 於每 5 分鐘逕流量均值比較之結果顯示，兩種試體間並無明顯之差異。此表示雖然 SVMT 試體於基材中加入少許水泥，使其表面有些微類似於一般混凝土鋪面之固化現象產生，但並未使單位時間內之逕流量大幅增加。且於 3、7、56 天齡期之逕流量甚至小於傳統試體。此種情形下，推論施工法或齡期並非影響逕流量的唯一因素，尚需考量其他因子，如：坡度、降雨強度、植生情形…等。
- (3) 由齡期與逕流總量結果觀之，在 14 及 28 天時 SVMT 試體之逕流總量超過傳統試體。經檢視各別試體後發現，14 及 28 天齡期試體之表面植生狀況，皆是以傳統試體之表現較佳。因此，推測可能係由於植生狀況較佳，致使土壤入滲增加，造成傳統試體之逕流總量較小之結果。
- (4) 由齡期與逕流總量結果觀之，第 56 天時傳統試體之逕流總量超過 SVMT 試體。經檢視各別試體後發現，56 天以後，SVMT 植生生長情形遠優於傳統試體，是以土壤入滲較多，逕流較少。傳統試體在 56 天時的觀察結果，由於沉陷作用，土壤顆粒排列緊密，孔隙變小，也使得表面較光滑，植生幾乎不再生長，故逕流量大增。SVMT 試體則因為有水泥的固化作用及保水劑的保水性質，試體幾乎不坍塌、龜裂，植生情形良好，惟其逕流量還是略高於 1、3、7、14 天。



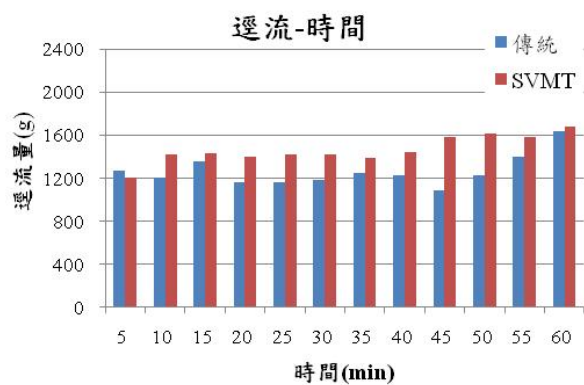
(a) 1 day



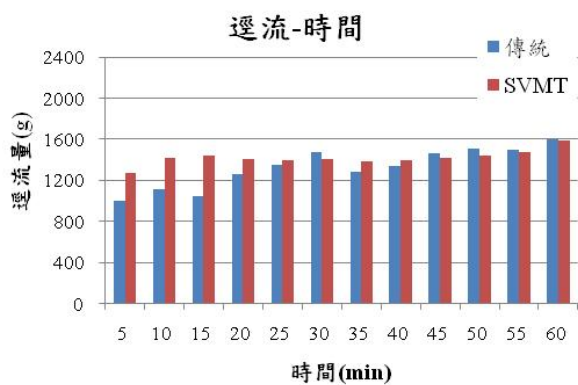
(b) 3 days



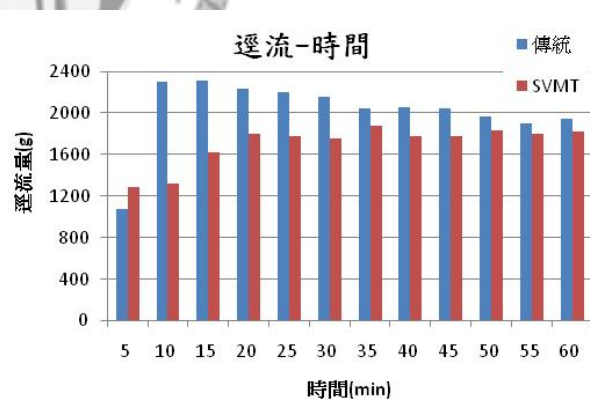
(c) 7 days



(d) 14 days



(e) 28 days



(f) 56 days

圖 4.2 各齡期逕流量隨時間變化量測結果

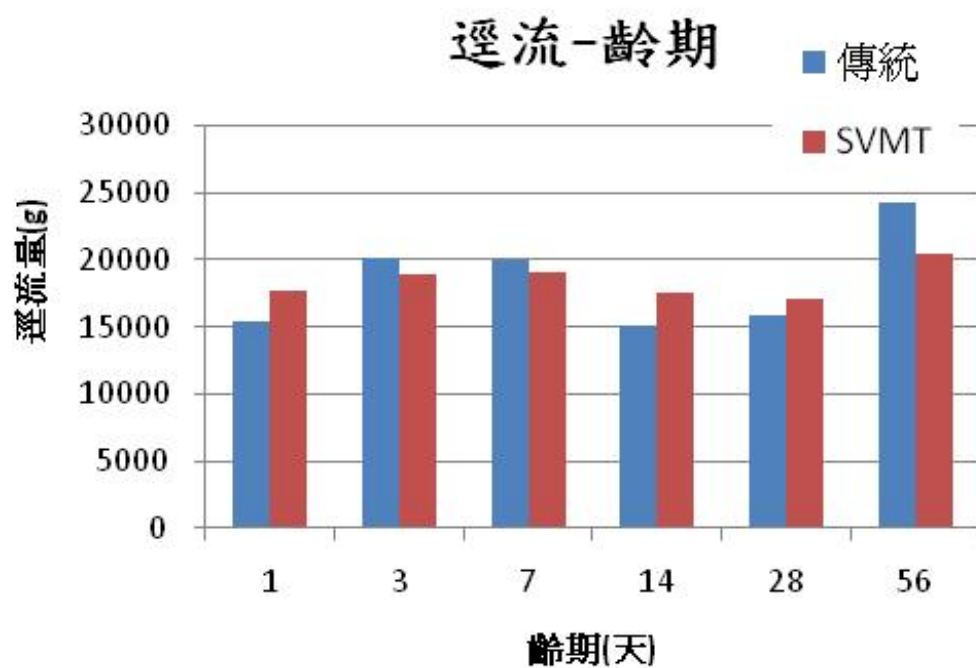


圖 4.3 各齡期與總逕流量結果一覽

表 4.7 各組 5 分鐘平均逕流量一覽

齡期	1	3	7	14	28	56
傳統	1286 g	1684 g	1663 g	1264 g	1328 g	2018 g
SVMT	1475 g	1581 g	1583 g	1467 g	1420 g	1703 g

表 4.8 各組 60 分鐘總逕流量一覽

齡期	1	3	7	14	28	56
傳統	15427 g	20208 g	19954 g	15166 g	15939 g	24219 g
SVMT	17704 g	18967 g	18996 g	17602 g	17041 g	20440 g

4.2.2 沖蝕量結果與討論

與上述相同，本研究每 5 分鐘抽換逕流蒐集槽一次，以獲得試體沖蝕量之數據。圖 4.4(a)~(e)為各齡期沖蝕量隨時間變化之量測結果，圖 4.5 則為各齡期沖蝕量總量之量測結果。

試驗結果由圖 4.4(a)~(e)各齡期沖蝕量隨時間變化圖及表 4-9 觀之。

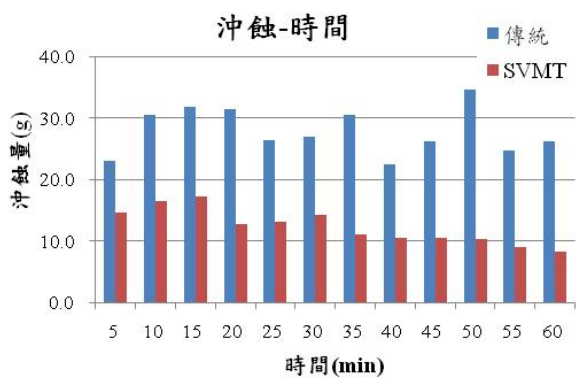
- (1) 一天齡期時，SVMT 試體於每 5 分鐘間隔時間內之沖蝕量皆較傳統試體少了一倍有餘。同時，若以均值而言，SVMT 與傳統試體之沖蝕量分別為 27.9 g 及 12.3 g，亦是相差約一倍之多。
- (2) 隨著齡期增加至 3 及 7 天時，SVMT 試體之 5 分鐘沖蝕量皆大幅下降，均值僅剩 1.4 g 及 2.8 g；反觀傳統試體之 5 分鐘沖蝕量與一天齡期相比無太大變化，三種齡期之均值大致介於 25~28 g 之間，盡皆遠超出 SVMT 試體之沖蝕量。
- (3) 然而在 14 齡期時，傳統試體之 5 分鐘沖蝕量出現大幅下降之趨勢，其均值陡降至 5.3 g，與前三種齡期相差甚遠。SVMT 試體之部分，於 14 天齡期開始，5 分鐘沖蝕量反而增加至 8.0 g。
- (4) 於 28 天齡期時，傳統試體之 5 分鐘沖蝕量均值持續下降至 1.9 g。SVMT 試體之部分，28 天齡期之結果係為 6.6 g，亦較前三種齡期之均值為多。
- (5) 56 天的趨勢和 28 天齡期相近，傳統試體之 5 分鐘沖蝕量均值為 1.1 g。SVMT 試體之部分為 6.3 g。
- (6) 從圖 4.4(a)~(e)中可看出 SVMT 各齡期前 30 分鐘的沖蝕量皆略大於後 30 分鐘。

試驗討論以圖 4.5 之各齡期與總沖蝕量比較圖觀之，可明顯看出傳統試體於 1、3 及 7 天齡期之總沖蝕量無特別差異，約介於 300~340 g 之間；SVMT 試體於一天齡期之總沖蝕量約為 147.9 g，而 3 及 7 天齡期時，總沖蝕量即大幅降低至 17.3 及 33.5 g，僅約為同一時期傳統試體之 0.08 倍。然而，傳統試體於 14 天齡期時，總沖蝕量大幅下降至 63.0 g，而 28 天齡期則為 22.8 g，56 天齡期為 13.0 g，齡期 14 天以後傳統試體的沖蝕量隨齡期呈現持續的下降。反觀 SVMT 試體，14、28、56 天齡期之總沖蝕量分別為 95.5、79.5、75.5 g，不僅較前期的齡期為大，與傳統試體相比亦表現較差。根據上述沖蝕量之分析結果，本研究彙整數點結論如下。

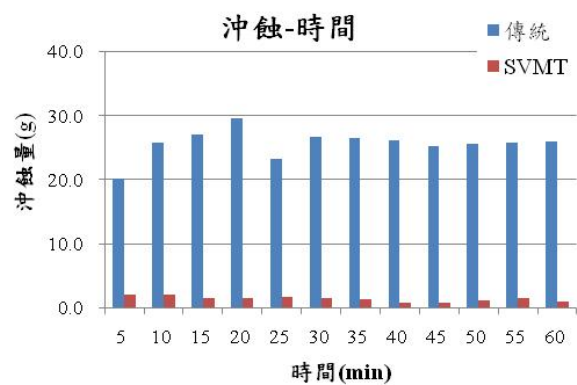
- (1) 從傳統試體 1、3 及 7 天齡期之試驗結果可知，傳統試體於 7 天內受降雨侵襲之抗沖蝕能力大致相同。一般傳統植生技術欲抵抗降雨沖蝕，皆需依靠表面植生覆蓋之多寡，雖然傳統試體於 6 天齡期時發現有少數之草種生長，但畢竟極為少數，無法藉以提供試體表面抗沖蝕之能力。
- (2) 由 SVMT 試體 1、3 及 7 天齡期之試驗結果可知，雖然在 1 天齡期時之沖蝕量較大，但隨著齡期增長水泥之固化作用亦發顯著，使 SVMT 試體從 3 天齡期開始，即獲得極佳之抗沖蝕能力。同時，1 天齡期之沖蝕量亦僅為傳統試體 0.5 倍。上述結果說明，SVMT 技術能在極短時間內，大幅降低沖蝕量，與傳統技術相比，更能有效的於短時間內抵抗降雨之沖蝕。
- (3) SVMT 試體於 14 天齡期之試驗結果與 3、7 天相比，沖蝕量反而增加，甚至較同一時間傳統試體為多。而檢視試體後發現，SVMT 試體以手輕壓感受之表面強度明顯較傳統試體為強，但表面形成團粒結構造成許多較鬆散之細顆粒，遇水分散。Winterkorn (1942)水分破壞風乾團粒之原因為當水分進入團粒的力量大於團粒的內聚力，則團粒的內聚力與膠結的力量就會破壞而分散。Yoder (1936)推測團粒之破碎，主要是由於吸水造成不均勻膨脹，延續斷裂平面將團粒破壞，且水分進入毛細管時將空氣向團粒內部擠壓，當壓力大於土粒間的內聚力時，團粒即會被打碎。而團粒的成因可能

為養護時表層土壤黏著劑的流失，表土風化造成。同時，觀察傳統試體亦明顯感受到傳統試體之表面膠結較密實且較無鬆散之細顆粒。

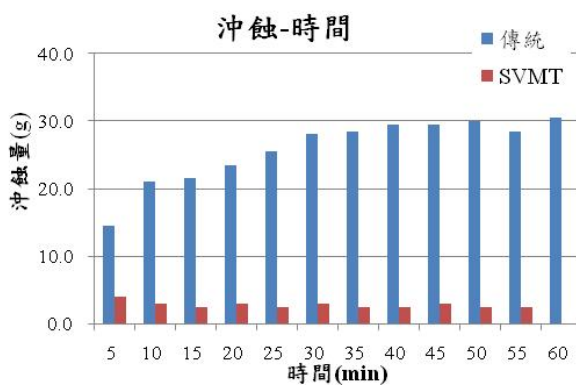
- (4) 傳統試體於 14 天齡期時，沖蝕量陡降。觀察其試體表面植生生長情形，雖較前期為多，但仍不致使沖蝕量大幅減少。而在觀察試體後發現，傳統試體於 7 天左右即開始出現沉陷、龜裂等現象，至 14 天齡期時現象更為明顯(如圖 4.11 所示)，到 56 天時，中央試區長 70cm，沉陷已達 2cm，最長龜裂長度 18cm，裂隙寬 0.7cm。土體由上方開始沉陷，致使下方試體更為緊密，使得土壤通氣性、透水性變差。此外，土壤表層排列成緊密結構，土粒相互密接，使得土壤中孔隙收縮，導致水分較難入滲至土層中，在此情況下可達到防止沖蝕的正面效果，但入滲量較差，土壤水分較低，可能影響到植物根系發展，導致植物生長不良；SVMT 試體由於有水泥及保水劑的添加，因此並無沉陷、龜裂等現象。
- (5) 綜合觀之，傳統試體的總沖蝕量在 1、3、7 天齡期時皆大於 300 g，14 天齡期時驟降至 63 g，之後隨齡期持續降低。故傳統試體施工初期較容易受到沖蝕，14 天後由於土壤結構改變，可達到防止沖蝕的正面效果，但植生情形較差。。
- (6) SVMT 試體在一星期內展現良好的抗沖蝕能力，第 3、7 天的總沖蝕量甚至只有 17.3、33.5 g，後期沖蝕量稍增，但最高也只有 95.5 g 的總沖蝕量。初期因試體強度較大植生生長情形較差，14 天後植生情形優於傳統試體。
- (7) SVMT 試體各齡期前 30 分鐘的沖蝕量皆較大是由於一開始土表含水量較少，團粒較不穩定，容易被沖蝕，後期較鬆散的土壤顆粒以被水流帶走，土壤表面呈現較穩定的現象。與 Yoder (1936)、Nijhawan & Clmstead (1947)、Alder (1950)等人均提出的當團粒水分含量高而浸入水中時，其穩定性高於風乾團粒相符。



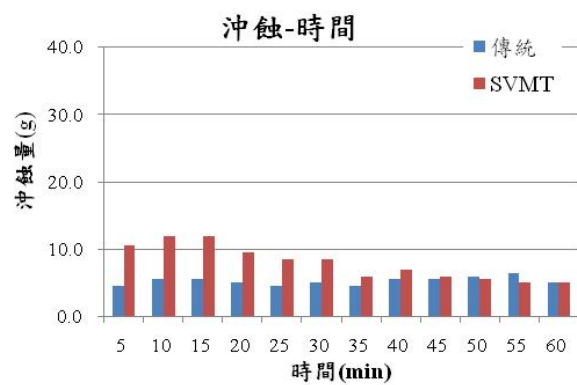
(a) 1 day



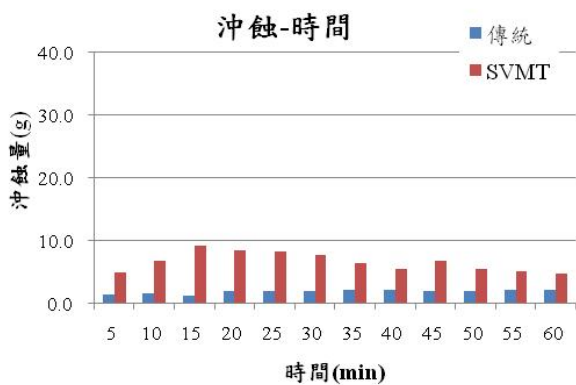
(b) 3 days



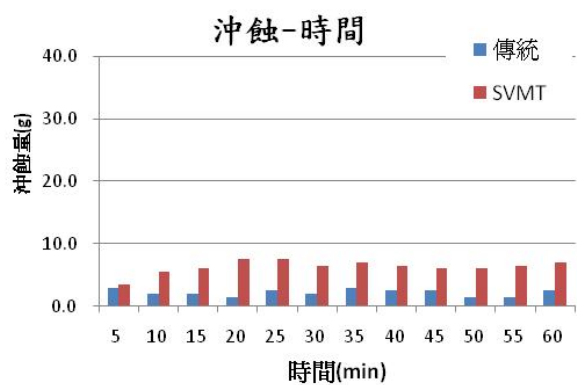
(c) 7 days



(d) 14 days



(e) 28 days



(f) 56 days

圖 4.4 各齡期沖蝕量隨時間變化量測結果

沖蝕-齡期

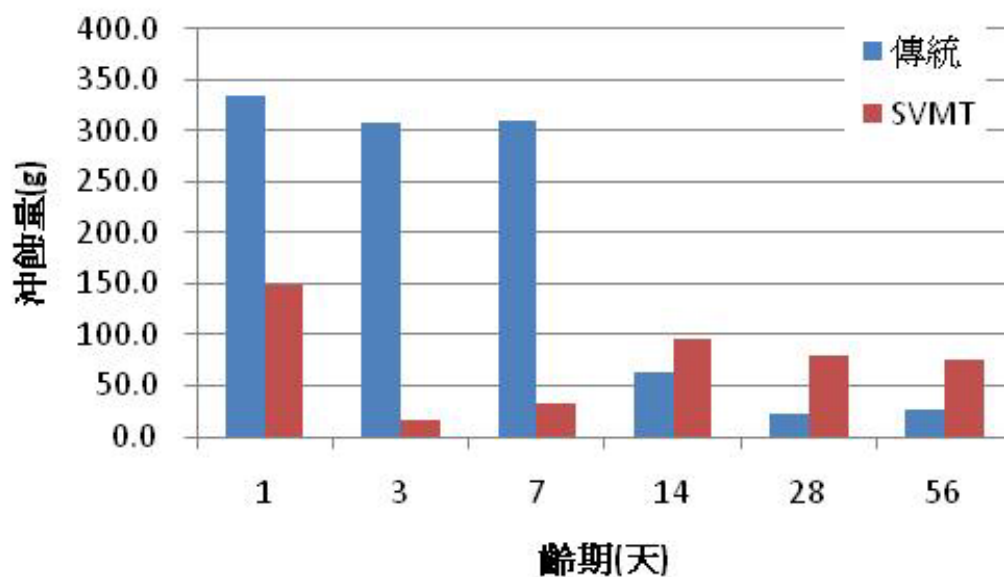


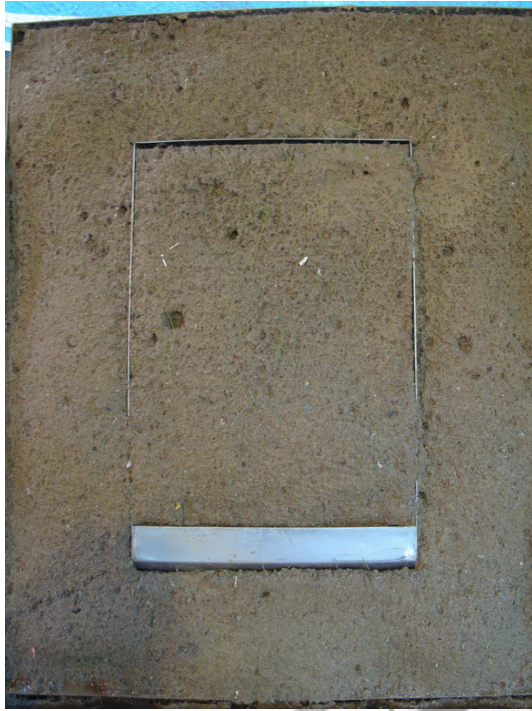
圖 4.5 沖蝕量之比較結果一覽

表 4.9 各組 5 分鐘平均沖蝕量一覽

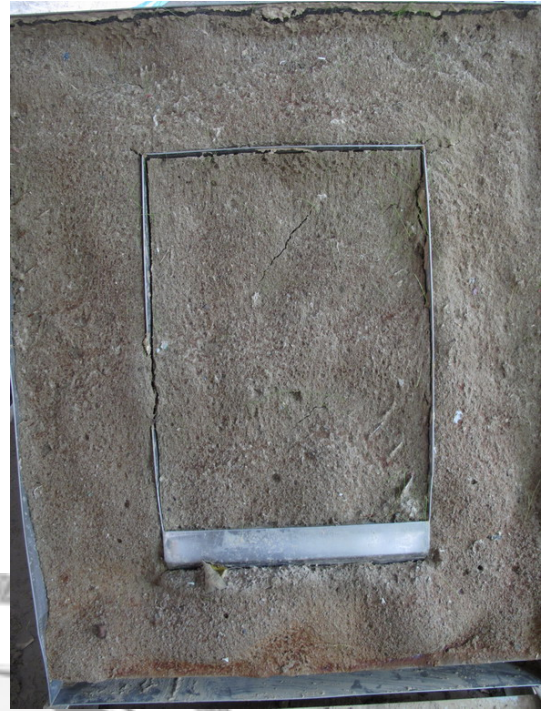
齡期	1	3	7	14	28	56
傳統	27.9 g	25.6 g	25.9 g	5.3 g	1.9 g	2.2 g
SVMT	12.3 g	1.4 g	2.8 g	8.0 g	6.6 g	6.3 g

表 4.10 各組 60 分鐘總沖蝕量一覽

齡期	1	3	7	14	28	56
傳統	334.2 g	307.4 g	310.5 g	63.0 g	22.8 g	26.5 g
SVMT	147.9 g	17.3 g	33.5 g	95.5 g	79.5 g	75.5 g



試體沉陷示意



試體沉陷、龜裂示意



試體沉陷局部示意



試體沉陷、龜裂局部示意

圖 4.11 試體沉陷、龜裂示意圖

4.2.3 試體強度

為瞭解兩種不同技術於不同齡期之試體強度變化，本研究以直接剪力試驗及袖珍貫入器兩種方法，對試體進行試驗。

直接剪力試驗之方法、流程已於第三章詳述。每種齡期的試體皆取四個土樣進行直接剪力試驗，繪製剪應力與正向應力關係圖，得到土壤凝聚力 c 值(圖 4.12)及內摩擦角 Φ 值(圖 4.13)，各齡期 c 、 Φ 值一覽結果如表 4.11 所示。由試驗結果可知，傳統試體 c 值之範圍約介於 0.10~0.30 之間， Φ 值範圍介於 28.6~33.15 之間；SVMT 試體 c 值之範圍則介於 0.26~0.43， Φ 值範圍介於 21.1~40.68 之間。

由剪力試驗結果本研究彙整結論如下：

- (1) SVMT 試體在所有齡期中，土壤凝聚力 c 值皆大於傳統試體，表示 SVMT 試體中所添加的水泥可以有效提高土壤的凝聚性。
- (2) 而除一天齡期外，SVMT 試體的內摩擦角 Φ 值均大於傳統試體，表示 SVMT 試體在水泥水化後強度可以有效的提升。

本研究於沖蝕試驗前後皆使用袖珍貫入器量測各齡期試體之表面單壓強度，但試體於降雨試驗進行前之量測結果較不穩定，各量測點間之差異較大。據推測係由於降雨前各區塊含水量不同，而造成量測數據不穩定之結果。而以沖蝕後試體的量測結果觀之，由於試體經 60 分鐘之均勻降雨後達穩定狀態，故各點量測之數據較為穩定。因此，本研究試體之單壓強度量測，即以沖蝕後量測之數據為基礎進行分析。圖 4.14 即為試體單壓強度隨齡期變化之分佈圖。由圖中可知，SVMT 試體於第一天時，強度較低，第三天開始強度上升，而自 7 天至 28 天之間，強度並無顯著之變化，其值皆約 3.0 kg/cm^2 ，第 56 天強度降為 1.58 kg/cm^2 ；在傳統試體強度之部分，單壓強度之範圍介於 0.3~0.43 kg/cm^2 之間，其隨齡期之增加，並無明顯之變化趨勢。

根據上述袖珍貫入器試驗強度之分析結果，本研究彙整數點結論如下。

- (1) 試驗結果顯示因水泥固化作用，三天後 SVMT 試體即達到一定的強度，而自 7 天齡期到 28 天齡期之階段，試體強度無明顯之變化，值皆約 3.0 kg/cm^2 。
- (2) 傳統試體由於無特殊添加，因此表面強度並不隨齡期而變化。
- (3) 林信輝(2009)提到降雨會逐漸洗去黏著劑。56 天齡期時，試體中水泥撐起的孔隙結構，由於降雨、養護造成表面的黏著劑(水泥)流失，使得試體脆化，表面結構因貫入而坍塌，SVMT 表面強度降至 1.58 kg/cm^2 。儘管表面黏著劑會因為養護、降雨而逐漸洗去，但後期隨著植生生長，根系提供摩擦力，坡面穩定會持續上升。

由剪力試驗後的數據可看出，剪力試驗結果和齡期並無明顯關係，此一結果說明於試體中添加水泥可增加抗壓強度，但與剪力強度較無直接關係。

而由袖珍貫入器的結果可看出，隨齡期增加，抗壓強度明顯增大，但是由於袖珍貫入器所量測為表面強度，經過降雨及養護的淋洗，表面黏著劑流失，強度於 56 天時下降。

表 4.11 各齡期 c、Φ 值一覽

齡期		1	3	7	14	28	56	平均
傳統	c	0.30	0.13	0.14	0.18	0.10	0.17	0.17
	Φ	32.27	27.92	29.52	28.60	33.15	30.17	30.29
SVMT	c	0.43	0.26	0.30	0.30	0.37	0.22	0.33
	Φ	21.10	40.68	35.63	38.08	33.43	40.09	33.78

表 4.12 各齡期單壓強度一覽

齡期	1	3	7	14	28	56
傳統(kg/cm ²)	0.39	0.43	0.30	0.31	0.42	0.31
SVMT(kg/cm ²)	1.28	1.84	3.04	3.06	3.02	1.58

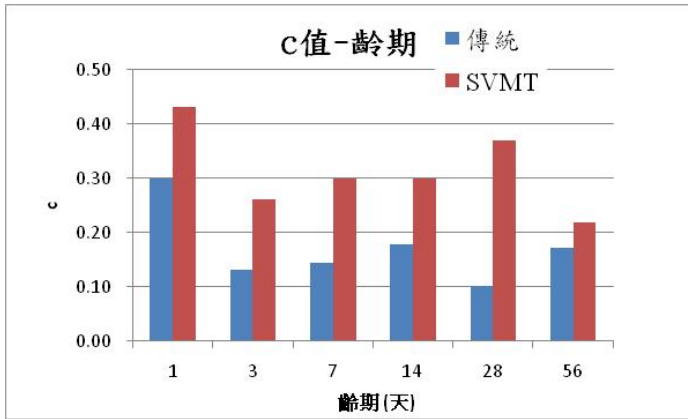


圖 4.12 各齡期 c 值一覽

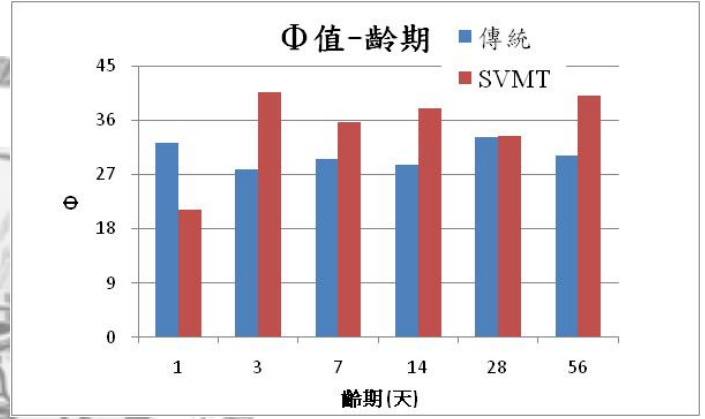


圖 4.13 各齡期 Φ 值一覽

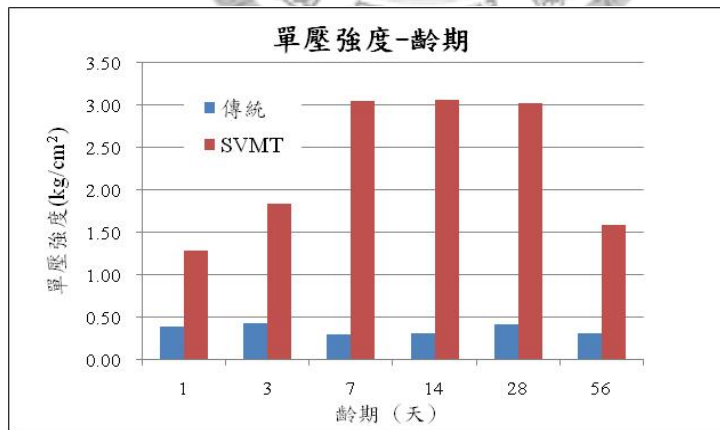


圖 4.14 齡期與單壓強度之變化圖

4.2.4 試體表面流速

由於逕流、沖蝕量可能受表面逕流流速影響，而本研究為瞭解流速對兩種不同試體土壤沖蝕的關係，以染料法於試驗進行中 26 及 46 分鐘時進行試體表面流速之量測。然而，於各組試驗 26 分鐘量測所得之數據較不穩定，二重複試體所得之數據歧異度較大。本研究推測係為降雨初期試體未達到飽和狀態，導致表面流速較不穩定所致。因此，本研究採用 46 分鐘所量測之數據做為代表。圖 4.15 即為各齡期試體二重複試驗所量測之流速均值分佈圖。

由圖 4.15 可發現，於齡期 1 至 14 天之試驗中，不論是傳統或 SVMT 試體所量測之流速皆大致相仿，約介於 1.0~1.2 cm/s 之間。而從 28 天齡期起表面流速之量測結果，可看出其流速有下降之趨勢，其值大致約為 0.7 cm/s。本研究推測造成 28 天以後齡期試體之表面流速下降之原因，應為試體表面已有些許植生覆蓋之情形出現(如圖 4.16 所示)。

但整體流速差異不明顯，表示施工之工法(SVMT、傳統)或齡期並非影響流速的唯一因素，推測尚有其他影響因子，如：坡度、降雨強度、雨量…等。

4.2.5 表面覆蓋分析結果與討論

本研究於第 84 及 112 天時量測傳統及 SVMT 試體覆蓋情形，以了解於不同齡期遇降雨沖蝕之試體對後續植生生長情形的影響，此試驗採用草類株數做為覆蓋的表示方式。由表 4.14 各齡期於 84 天時的植生生長情形得知，傳統試體的植生株數介於 48~144 株之間；SVMT 試體的植生株數介於 71~1025 株，各齡期草類株數除了 1 天齡期以外，SVMT 試體覆蓋皆高於傳統。從圖 4.17 中可以清楚的看出傳統植生表面覆蓋隨受降雨沖時的齡期無明顯變化趨勢；SVMT 試體則是齡期 1、3 天受到降雨沖蝕的植生情形較差，分別為 71、158 株；7 天齡期以上的 SVMT 試

表 4.13 各齡期流速一覽

齡期(天)	1	3	7	14	28	56
傳統(cm/s)	1.03	1.03	1.07	1.06	0.76	0.73
SVMT(cm/s)	1.04	1.19	1.17	1.06	0.73	0.72

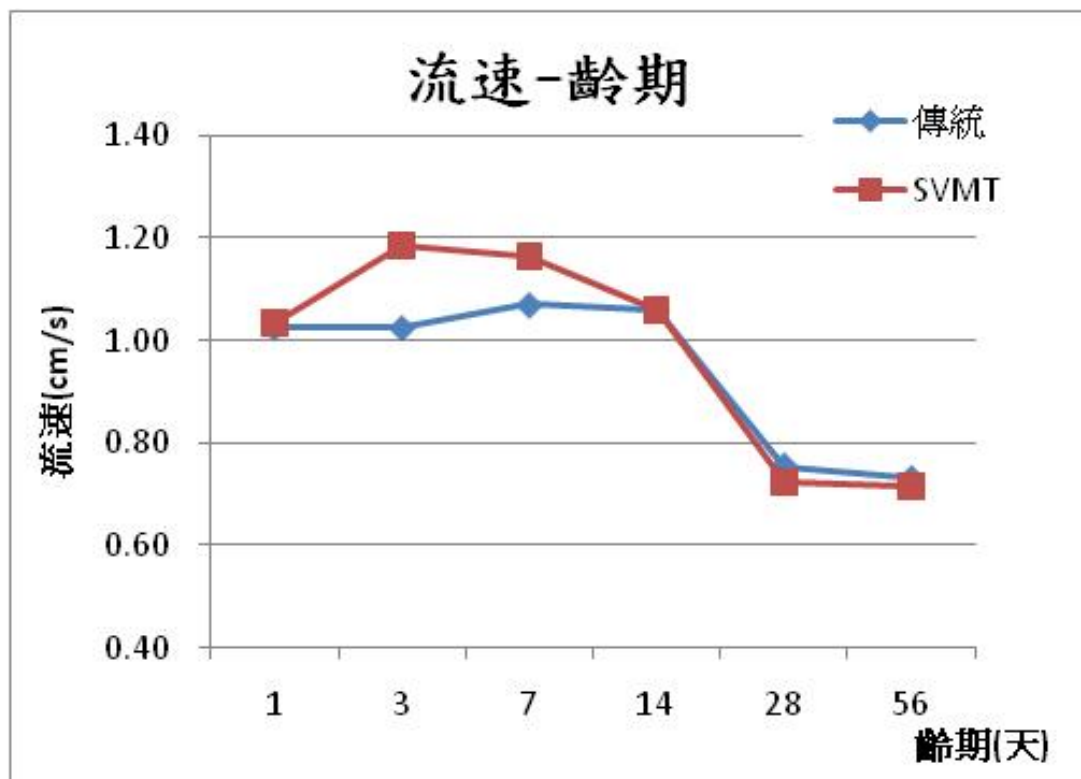


圖 4.15 各齡期試體表面流速分佈圖



1 天齡期試體

56 天齡期試體

圖 4.16 試體表面覆蓋不同之示意圖

體植生株數範圍為 700~1025 株之間，7、14、28 天 SVMT 試體株數為傳統試體的 10 倍左右，28 天齡其更達到 20 倍的草量。

於 112 天時的植生生長情形得知，傳統試體的植生株數介於 5~125 株之間；SVMT 試體的植生株數介於 84~1103 株，傳統植生表面覆蓋隨受降雨沖時的齡期無明顯變化趨勢；SVMT 試體則是齡期 1、3 天受到降雨沖蝕的植生情形較差，分別為 84、89 株；7 天齡期以上的 SVMT 試體植生體植生株數範圍為 837~1130 株之間。如表 4.15 所示。

根據上述覆蓋試驗的結果，本研究彙整數點結論如下。

- (1) 傳統試體植生隨齡期無明顯變化的主要原因為 84 天時，傳統試體因無保水劑及水泥的添加，故土壤表面發生沉陷、龜裂等現象，加以表層結構排列趨於緊密，導致土壤表面透氣性及透水性降低，不利於植生生長，所以植生情形不佳。
- (2) 從 SVMT 試體植生生長情形觀之，1、3 天齡期受到降雨沖蝕的 SVMT 試體植生情形較差，分別為 71、158 株，1 天齡期更是唯一筆資料 SVMT 試體株數少於傳統試體。這表示初期水泥水化尚未完全，遇雨無法提供足夠的強度及抗沖蝕能力，導致表層土壤、草種、黏著劑的流失，以至於後續植生情形不佳。
- (3) 7 天齡期以後，SVMT 試體的植生數量大幅提升，且植生情形隨齡期變異不大，表示水泥的添加提供了坡面有效的抗沖蝕能力及強度，能有效的留住表土及種子，更能達到植生覆蓋的目的。
- (4) 以整體植生情形觀之，雖 SVMT 試體植生情形優於傳統，但依然不甚理想，其因素是本研究為了不同情況考量選用了四種草種分別為百喜草(根系較強物種)、百慕達草(暖季型草種)、高狐草(冷季型草種)、黑麥草(生長快速)，因季節、環境因素目前只生長了部分草種，且為了實驗條件的統一及控制

降雨條件，所有試體皆養護於棚架之下，與現地施工的差異在於缺乏日照，加以施工初期一個月內連續寒流低溫，抑制植物生長，故植生情形較預期略差。

植生情形依據試驗期間的觀察，初期 SVMT 試體強度較大，於 10 天左右開始有植生生長；傳統試體於 6 天左右開始生長，初期生長情形較 SVMT 良好，但 14 天以後，傳統試體土壤沉陷、龜裂，致使土壤表層的排列成緊密結構，土粒相互密接，使得土壤中孔隙收縮，導致水分較難入滲至土層中，在此情況下可達到防止沖蝕的正面效果，但入滲量較差，土壤水分較低，影響到植物根系發展，導致植物生長不良。SVMT 因有保水劑及水泥的添加，試體無龜裂情形。



表 4.14 各齡期於 84 天時的植生生長情形

齡期(天)	1	3	7	14	28	56
SVMT(株)	71	158	965	925	704	1025
傳統(株)	144	98	101	102	77	48
SVMT(株/m ²)	203	451	2757	2643	2011	2929
傳統(株/m ²)	410	279	287	290	220	137

表 4.15 各齡期於 112 天時的植生生長情形

齡期(天)	1	3	7	14	28	56
SVMT(株)	84	89	992	837	900	1103
傳統(株)	100	119	97	125	14	5
SVMT(株/m ²)	240	254	340	2391	2571	3151
傳統(株/m ²)	286	340	277	357	40	14

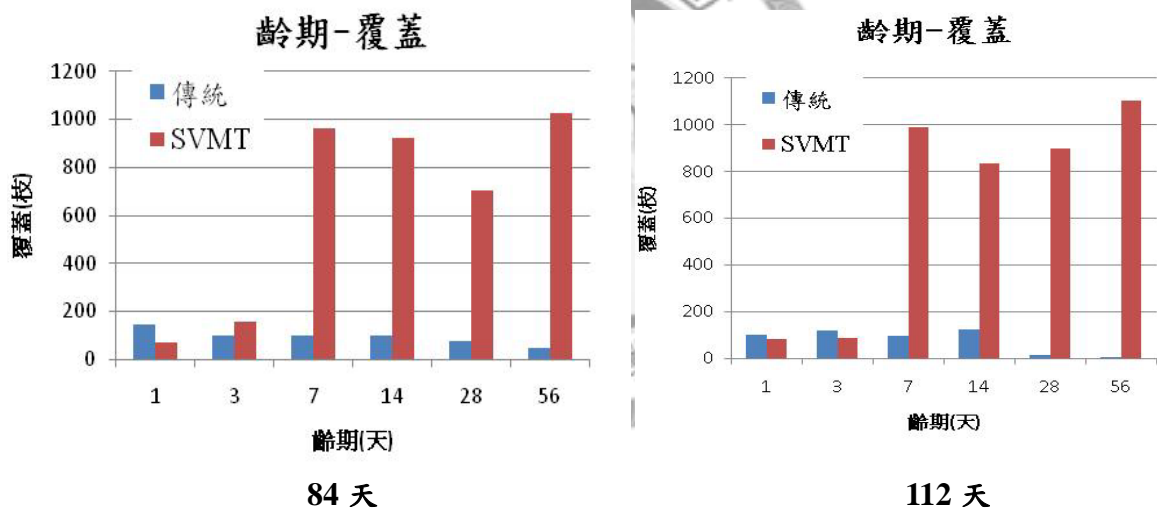


圖 4.17 各齡期於 84 天、112 天時的植生生長情形

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究以模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations)，建立適用性評估指標。藉此遴選出一較適用於坡面植生困難工址之植生技術--水泥噴凝植生覆蓋技術。並以此技術為基礎，進行室內人工降雨沖蝕試驗，降雨強度約 120mm/hr，試驗坡度 60 度，分 6 種齡期進行試驗（分別為 1、3、7、14、28、56 天），依據試驗結果獲致下列結論：

- (1) 本研究採用模糊偏好關係(Fuzzy Preference Relations)，建立適用性評估指標，此方式可簡化成對比較次數，而且運算上相當簡易，具有參考應用的價值。
- (2) 評估指標的建立考量之層面包括技術、經濟及限制，藉此遴選出水泥噴凝植生覆蓋技術為最佳施作工法，並以此為基礎進行後續試驗。
- (3) 在 60 分鐘的室內人工降雨試驗中，逕流量在前 15 分鐘時較少，因初始入滲量較大；依齡期觀察，14 及 28 天由於植生的生長使得逕流量減少，56 天時傳統試體由於土壤表層結構改變使逕流增加，但差異皆不顯著。
- (4) 沖蝕量依不同試體及齡期有顯著差異，傳統試體 1、3、7 天齡期總沖蝕量皆大於 300g，14、28、56 天陡降至 70g 以下。顯示出於一星期內抗沖蝕能力較差，14 天後因土壤結構改變，始顯現出抗沖蝕能力，但入滲量較差，可能影響植物根系發展，導致植物生長不良。
- (5) SVMT 試體在 3、7 天齡期時總沖蝕量僅有 17、34g，顯示出可快速達到抗沖蝕的能力，後期總沖蝕量略增，約 70~100g，因土壤表面形成團粒結構，造成許多較鬆散之細顆粒所致。
- (6) 透過剪力試驗，SVMT 試體在所有齡期中，土壤凝聚力 c 值及內摩擦角 Φ 值多大於傳統試體，表示水泥的添加能有效的提升土壤的凝聚力及剪力強度。

- (7) 袖珍貫入器試驗結果，SVMT 試體的強度為傳統試體的 3~10 倍，傳統試體因無水泥添加，強度不隨齡期有顯著變化，其值約 $0.3\sim0.4\text{ kg/cm}^2$ ；SVMT 試體強度隨齡期有增加的趨勢，7~28 天強度約 3.0 kg/cm^2 ，56 天降至 1.58 kg/cm^2 ，推測係由於降雨或養護導致表層水泥黏著劑的流失。
- (8) 流速各試體差異不顯著，顯示工法或齡期非流速的主要影響因子，尚須考量坡度、降雨強度、植生…等。
- (9) 植生覆蓋情形，傳統試體植生覆蓋隨受降雨沖蝕齡期無明顯變化，SVMT 試體 1、3 天齡期受到降雨沖蝕的試體植生表現較差，7 天齡期以後，SVMT 試體的植生數量大幅提升，且植生情形隨齡期變異不大，表示水泥的添加可以快速提供了坡面有效的抗沖蝕能力及強度，能有效的留住表土及種子，更能達到植生覆蓋的目的。
- (10) 而本研究顯示 SVMT 工法可於短時間內(3 天~7 天)達到一定的強度及抗沖蝕能力，可與準確率較高的近期氣象預報配合，做為現地施工時程的參考，即可有效的彰顯工程成效，並節省因沖蝕而損失的成本。
- (11) 施工完成初期到植生提供根系穩定之前，能否有效的抵抗沖蝕及具有足夠的強度，是工程成功與否的關鍵。從本研究的結果顯示，植生開始生長之前，水泥噴凝植生覆蓋技術(SVMT)即可以提供有效的抗沖蝕能力及強度，故使施工初期到植生生長期間，坡面穩定無虞。

5.2 建議

- (1) 本研究僅進行室內降雨沖蝕試驗，未來可以考慮選擇一適當之示範區域，進行現地水泥噴凝植生覆蓋技術之施作，並於施工完成後，進行強度、覆蓋等現地試驗。並於後續持續追蹤其工程成效，評估其生態效益，包括植生演替情形、生物多樣性調查等。也可進行成本分析，持續觀察後續維護的情形，做整體工

程經濟的評估。

- (2) 本研究主要的目的是針對一般邊坡進行模擬試驗，未來可增加水泥噴凝植生技術(SVMT)抵抗水流的沖蝕試驗，測試其在高灘地、高流速，如草溝、河岸邊坡等的適用性研究。傳統植生技術易受水流破壞，故在高流速區域的應用有一定的限制，如果能夠有效利用水泥噴凝植生覆蓋技術於上述區域，不但可以達到環境美化，更可以兼顧生態環境的需求。
- (3) 本研究的控制變因為齡期，未來可以增加水泥噴凝植生覆蓋技術於不同坡度、不同降雨強度下，逕流量、沖蝕量、試體表面強度、表面流速、植生覆蓋情形等研究，以了解不同坡度、不同降雨強度下，該技術之成效。



參考文獻

1. 王鐵橋(2006)，「邊坡綠化技術及其施工方法選擇」，中國水土保持科學，4(supp.):148-149。
2. 吳明峰(2006)，「石塊之覆蓋率及嵌入對紋溝間土壤沖蝕影響之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所，博士論文。
3. 李元智(2003)，「南部橫貫公路中高海拔道路邊坡噴植植生工法之研究」，國立屏東科技大學水土保持系碩士班，碩士學位論文。
4. 林庭暉(2000)，「不同黏著劑噴植對紅土礫石坡面保護與植物生長影響」，國立中興大學水土保持學系研究所，碩士論文。
5. 邱創益、陳慶雄、謝杉舟、陳光輝(1995)「噴播技術在植生方法之研究(二)」，83 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，pp.238-242。
6. 張于漢(2006)，「石塊覆蓋對紋溝間土壤沖蝕及薄膜流流速之影響」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所，碩士論文。
7. 許文年、王鐵橋 (2001)，混凝土護坡綠化添加劑，專利、公開號：CN1358685A。
8. 許榮峰(2002)，「土壤團粒化劑濃度對紅壤抗蝕性與種子發芽之研究」，國立中興大學水土保持學系研究所，碩士論文。
9. 黃建霖、范正成、楊文仁(2007)，「水泥噴凝植生敷蓋技術在混凝土陡坡之應用研究」，地工技術雜誌。
10. 山寺喜成(1969)，「綠化工程中防止土壤遭侵蝕之研究(III)」，第 80 次日本林學會演講集。
11. 倉田益二郎(1979)，綠化工技術，森田出版株式會社。
12. Al-Durrah, M.M., and J.M. Bradford. (1982). Parameters for describing soil detachment due to single water-drop impact. Soil Sci. Soc. Am. J. 46(4): 836-840.
13. Alder, R. B. (1950), Influence of seasonal and cultural conditions on aggregation of Hagerstown soil. Soil Sci: 193-203.
14. Daniel, P. R., A. J. M. Smucker and D. Santos., (2000). Alfalfa Root and Shoot Mulching Effects on Soil Hydraulic Properties and Aggregation, Soil Science Society of America Journal 64:725-731.
15. Edwards, W.M., and W.E. Larson. (1969). Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. Trans. ASAE 12:463-465,470.
16. Fan, J.C, W.J. Yang, M.F. Wu and C.H. Liu, (2006) “Determination and analysis of interrill erosion of a soil with coarse fragments in Taiwan”, Transactions of the ASABE, 49(5) : 1305-1314.

17. Feng, Z. Y. and Lin, Y. K.,(2002). Slope Protection Techniques Considering Environmental, Ecological and Landscape Requirements, Sino-Geotechnical Journall 92, 5-18.(in Taiwan)
18. Foster, G.R. (1982). Modeling the erosion process. In Hann, C.T., Jonson, H.P., and Brakensiek, D.L. (eds), Hydrologic Modeling of Small Watersheds, Monogr. Ser., vol. 5. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. 297-380.
19. Foster, G.R., C.B. Johnson, and W.C. Moldenhauer. (1982). Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. Transactions of the ASAE 25(4):940-947.
20. Gilley, J. E., D. A. Woolhiser, and D. B. McWhorter. (1985)a. Interrill soil erosion - part I: Development of model equations. Transactions of the ASAE 28(1):147-153,159.
21. Gilley, J. E., D. A. Woolhiser, and D. B. McWhorter. (1985)b. Interrill soil erosion - part II: Testing and use of model equations. Transactions of the ASAE 28(1): 154-159.
22. Green-Growing Concrete Group, (2000) "Green-Growing Concrete Using Coal Ash from Power Plant Developed."
23. Gyasi-Agyei, Y. (2004), "Optimum Use of Erosion Control Blankets and Waste Ballast (Rock) Mulch to Aid Grass Establishment on Steep Slopes", ASCE, Volume 9, Issue 2, 150-159.
24. Herrera-Viedma, E., Herrera, F., Chiclana, F. and Luque, M (2004), "Some Issues on Consistency of Fuzzy Preference Relations," European Journal of Operational Research, 154, 98-109.
25. Jennings, G. D., A. R. Jarrett, and J.R. Hoover. (1988). Evaluating the effect of puddling on infiltration using the Green and Ampt equation. Transactions of the ASAE 31(3): 761-768.
26. Kirby, M. J. and R. P. C. Morgan. (1980). Soil Erosion. John Wiley & Sons.
27. Kruse, R. et al. (2004), "Native plant regeneration and introduction of non-natives following post-fire rehabilitation with straw mulch and barley seeding", Elsevier, Amsterdam, Netherlands 196, 299-310.
28. Liebenow, A. M., W. J. Elliot, J. M. Laflen, and K. D. Kohl. (1990). Interrill erodibility: Collection and analysis of data from cropland soils. Transactions of the ASAE 33(6): 1882-1888.
29. Meyer, L. D. (1981). How rain intensity affects interrill erosion. Transactions of the

- ASAE 24(6): 1472-1475.
30. Meyer, L. D., and W. C. Harmon. (1984.) Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 48:1152-1157.
 31. Mohammed Ibrahim, et al. (1999), "Use of Surface Treatment Materials to Improve Concrete Durability", ASCE Volume 11, Issue 1, 36-40.
 32. Mutchler, C. K., and L. M. Hansen. 1970. Splash of a water-drop at terminal velocity. *Science* 169: 1311-1312.
 33. Nijlawan, S.D. and L.E. Clmstead (1947). The effect of sample pretreatment upon soil aggregation in wet-sieve analysis. *Soil Sci. Am. Proc.* :21-50.
 34. Randy, B. Foltz and Natalie S Copeland (2007), "Field Testing of Wood-based Biomass Erosion Control Materials on Obliterated Roads", paper number 078046, ASABE Annual Meeting, Sponsored by ASABE Minneapolis Convention Center, Minneapolis, 17 - 20 June 2007.
 35. Simonson, W. H., US Bureau of Public Road, and US Department of Commerce (2003), *Landscape design and its relation to the modern highway*, US Department of Transportation Federal Highway Administration.
 36. Shangning, J. and P. W. Ungerb (2001), "Soil Water Accumulation under Different Precipitation, Potential Evaporation, and Straw Mulch Conditions", *Soil Science Society of America Journal* 65:442-448.
 37. Toyo Greenland Co. Ltd, "Sustainable Vegetation System on Steep Concrete Slope at Princess Margaret Hospital Building."
 38. Takenaka Corporation (1999), "Implementation of Green-Growing Concrete for Planting Arboreal Vegetation"
 39. Watson, D. A., and J. M. Laflen. (1986). Soil strength, slope and rainfall intensity effects on interrill erosion. *Transactions of the ASAE* 29(1): 98-102.
 40. Wu, H. L. and Feng, Z. Y. (2006), "Ecological Engineering Methods for Soils and Water Conservation in Taiwan", *Ecological Engineering* 28, 333-344.
 41. Winterkorn, Han F. (1942), Mechanism of water attack on dry cohesive soil system. *Soil Sci*:259-273.
 42. Yoder, R.E. (1936), A direct method of aggregate analysis and a study of the physical natural of erosion losses. *J.Am.Soc.Agron*:28,337-351.

『坡面困難工址植生技術之適用性評估指標』

~問卷調查~

現行各式可應用於坡面困難工址之植生技術，其在施工方法、使用限制等特性皆不盡相同。而本研究為能較為客觀性的遴選出適用性高之工程方法，首先篩選出可能將影響其工法適用性之因子，期能藉此**建立一客觀之適用性評估指標**。

鑒於上述，本問卷調查之主要目的即在於瞭解您對於『坡面困難工址植生技術之適用性評估指標』中，各影響因子相互重要性之評估。此一問卷的填寫方式，係完全依據您的**主觀認知**決定，懇請您不吝提供寶貴意見！

敬祝
順安

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
研究主持人：范正成 教授
聯絡人：楊智翔
連絡電話：0930-860499
E-mail：yzs316@yahoo.com.tw

一、問卷說明	1
二、評估指標影響因子之相互權重調查	2
三、填寫個人資料	3

一、問卷說明

本研究係利用 Herrera-Viedma 等，於 2004 年提出之模糊偏好關係 (Fuzzy Preference Relations, Fuzzy PreRa)，期能建立一較為客觀之評估指標，藉以遴選適用性較高之工程方法。其中，需考量之層面包括技術、經濟及限制等三大層面。茲將各影響因子說明如下所示。

	項目	說明
技術層面	工期長短	各工法需要之施工工期長短不同，而所需工期越長之工法將使施工日期之限制性大幅提升。
	施工程序之複雜性	各工法之施工程序皆不盡相同，而其複雜性將直接影響各工法於施作及推廣性之難易度。
	特殊設備或技術	此項因子取決於各工法是否需要較為特殊之設備或特殊之技術人員，若需要則易使施工較難完成且亦需較高之經費。
經濟層面	初始成本	此因子涵蓋材料、機具及人員費用等所有在施工初期需準備之項目。
	後續維護成本	在施工完成後，針對坡面進行養護及修補等，直至坡面不易被降雨沖蝕所破壞之費用。
限制層面	坡度限制	各工法之適用坡度不盡相同，而本研究坡面困難工址係指坡度大於 45 度之邊坡，因此本評估指標中將坡度分為 45 度以上適用及不適用兩種。
	坡面條件限制	坡面困難工址除指 45 度以上邊坡外，亦指惰性鋪面(噴凝土擋牆、岩石坡面等)，因此本評估指標將坡面條件分為惰性鋪面適用及不適用兩種。

二、評估指標影響因子之相互權重調查

1. 範例說明-技術層面因子之相互權重比較

欲進行技術層面之適用性分析時，您覺得『工期長短』與『施工程序之複雜性』兩因子何者較為重要；而『施工程序之複雜性』與『特殊設備或技術』又是何者較為重要。請依您的主觀認知進行比較，並於該欄位中劃記。

	絕對重要	頗重要	同等重要	頗不重要	絕對不重要	
工期長短				V		施工程序之複雜性
施工程序之複雜性			V			特殊設備或技術

上表即說明您認為『工期長短』相較於『施工程序之複雜性』而言，係為頗不重要之因子，因此在頗不重要之欄位註記；而『施工程序之複雜性』相較於『特殊設備或技術』而言，其重要程度差不多，因此在同等重要之欄位註記。

2. 評估指標各層面之相互權重比較

	絕對重要		頗重要		同等重要		頗不重要		絕對不重要	
技術層面										經濟層面
經濟層面										限制層面

3. 技術層面因子之相互權重比較

	絕對重要		頗重要		同等重要		頗不重要		絕對不重要	
工期長短										施工程序之複雜性
施工程序之複雜性										特殊設備或技術

4.經濟層面因子之相互權重比較

	絕對重要		頗重要		同等重要		頗不重要		絕對不重要	
初始成本										後續維護成本

5.限制層面因子之相互權重比較

	絕對重要		頗重要		同等重要		頗不重要		絕對不重要	
坡度限制										坡面條件限制

三、填寫個人資料

最後請留下您的相關資料：

1.您的身份是？

- ☐政府機關工程人員 ☐規劃設計工作 ☐營造業人員
☐維護管理工作 ☐學術研究機關人員 ☐其他_____

2.請問您的學歷是：

- ☐高中以下 ☐高中 ☐大專 ☐碩士 ☐博士

感謝您花費時間於本問卷上，如尚有其他不同之指正意見，煩請
您詳填於下，我們將會參考改正，以期提升本研究之深度與廣度。



本問卷到此全部結束，再次謝謝您的合作！

附錄 B：降雨機率定

本研究取中央試區 24 點均勻分布量測降雨量，降雨控制為降 2 秒停 0.5 秒，經過降雨率定試驗顯示其均勻係數約在 87.01% 左右，強度約在 120mm/hr。

Christiansen(1941)所提出之計算法，計算均勻係數(Uc)，如下。其中，Xi 為第

i 個量筒之量測值、n 為量筒之總數、 \bar{X} 為 n 個量測值之算術平均值。

編號	量筒+水(g)	量筒重(g)	水重(g)	降雨強度(mm/hr)	Xi-X
1	374.20	151.00	223.20	96.48	55.80
2	375.70	145.00	230.70	99.73	54.30
3	400.40	152.00	248.40	107.38	29.60
4	418.50	152.00	266.50	115.20	11.50
5	429.30	151.00	278.30	120.30	0.70
6	421.30	151.00	270.30	116.84	8.70
7	432.40	150.00	282.40	122.07	2.40
8	483.40	151.00	332.40	143.69	53.40
9	595.20	155.00	440.20	190.29	165.20
10	562.50	150.00	412.50	178.31	132.50
11	568.30	144.50	423.80	183.20	138.30
12	599.20	150.10	449.10	194.14	169.20
13	420.10	151.50	268.60	116.11	9.90
14	417.30	151.10	266.20	115.07	12.70
15	438.10	151.00	287.10	124.11	8.10
16	426.80	152.00	274.80	118.79	3.20
17	327.60	151.00	176.60	76.34	102.40
18	330.50	151.00	179.50	77.59	99.50
19	345.50	151.00	194.50	84.08	84.50
20	360.80	151.00	209.80	90.69	69.20
21	373.70	151.00	222.70	96.27	56.30
22	388.40	152.00	236.40	102.19	41.60
23	402.20	152.00	250.20	108.16	27.80
24	426.90	151.00	275.90	119.27	3.10
AVE	429.93		279.17	120.68	55.83
SUM	10318.30		6700.10		1395.73
				Uc=	0.8647

$$U_c = 1 - \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{\sum X_i}$$

附錄 C：人工降雨沖蝕試驗數據

傳統試體，第一天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
1	5	1004	273	255	749	17.8
2	10	1320	320	284	1036	35.8
3	15	1270	284	254	1016	29.7
4	20	1324	286	255	1069	31.3
5	25	1803	835	812	991	23.4
6	30	2043	848	822	1221	25.7
7	35	2260	862	831	1429	31.4
8	40	2040	846	823	1217	22.9
9	45	1346	203	180	1166	22.8
10	50	1641	417	394	1247	23.0
A12	55	2823	1645	1623	1200	21.9
B6	60	2839	1626	1603	1236	22.7
total					13577	308.4

傳統試體，第一天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
A6	5	2415	1805	1777	638	28.4
A14	10	2978	1640	1615	1363	25.0
A8	15	2869	1628	1594	1275	33.9
A11	20	3091	1655	1624	1467	31.4
D2	25	3156	1622	1593	1563	29.2
A5	30	3081	1646	1618	1463	28.0
A7	35	3144	1620	1590	1554	29.5
A12	40	3242	1645	1623	1619	21.9
A10	45	3165	1639	1609	1556	29.7
B9	50	3180	1642	1596	1584	46.1
C12	55	3170	1644	1617	1553	27.4
B1	60	3247	1636	1606	1641	29.5
total					17276	360.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第一天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
A13	5	2747	1598	1587	1160	11.0
A2	10	2995	1632	1619	1376	13.0
B13	15	2968	1609	1593	1375	16.0
C9	20	2963	1623	1613	1350	10.0
B11	25	2992	1625	1613	1379	12.0
A1	30	2988	1636	1621	1367	15.0
A3	35	2944	1604	1592	1352	12.2
D1	40	2945	1597	1587	1358	10.5
A4	45	3102	1625	1614	1488	11.3
C7	50	3133	1632	1621	1512	11.4
B12	55	3116	1617	1608	1508	9.0
B4	60	3138	1623	1613	1525	9.6
total					16750	141.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第一天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B3	5	2878	1623	1605	1273	18.1
B5	10	3098	1631	1611	1487	19.9
C11	15	3111	1618	1600	1511	18.5
W1	20	3049	1612	1597	1452	15.4
B7	25	3090	1628	1614	1476	14.2
C8	30	3108	1621	1608	1500	13.4
B10	35	3039	1607	1597	1442	9.7
B14	40	3165	1626	1615	1550	10.6
W2	45	3322	1625	1615	1707	9.8
C6	50	3328	1607	1598	1730	9.2
C5	55	3279	1606	1597	1682	9.0
B8	60	3465	1622	1615	1850	7.0
total					18658	154.8

傳統試體，第三天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
1	5	1298	268	255	1043	13.2
2	10	1559	306	284	1275	22.1
4	15	1543	283	255	1288	28.3
5	20	1960	845	812	1148	33.0
6	25	2303	843	822	1481	21.4
8	30	2362	851	823	1539	27.7
A12	35	3759	1650	1623	2136	26.5
A9	40	3245	1642	1613	1632	29.3
A11	45	3114	1648	1624	1490	24.2
D2	50	3136	1618	1593	1543	25.4
W2	55	3185	1641	1615	1570	26.2
B6	60	3224	1629	1603	1621	26.4
total					17766	303.7

傳統試體，第三天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
10	5	1705	421	394	1311	27.1
A8	10	4316	1651	1594	1411	29.5
3	15	1621	280	254	1367	25.6
7	20	2511	857	831	1680	26.0
9	25	2131	307	282	1849	24.9
C12	30	3482	1643	1617	1865	25.8
A10	35	3483	1636	1609	1874	26.5
A5	40	3618	1641	1618	2000	22.8
A14	45	3547	1641	1615	1932	26.3
B1	50	3816	1632	1606	2210	25.9
A7	55	4123	1615	1590	2533	25.3
A6	60	4395	1802	1777	2618	25.4
total					22650	311.1

水泥噴凝植生覆蓋技術，第三天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B2	5	2910	1619	1617	1293	2.4
B12	10	3294	1611	1608	1686	3.4
B8	15	3080	1617	1615	1465	2.2
B4	20	3079	1615	1613	1466	1.9
B3	25	3073	1606	1605	1468	1.1
B11	30	3027	1614	1613	1414	1.0
A1	35	3096	1622	1621	1475	1.2
A3	40	3150	1593	1592	1558	0.9
A4	45	3177	1615	1614	1563	0.6
A2	50	3182	1620	1619	1563	1.1
B7	55	3177	1615	1613	1564	1.9
A13	60	3221	1588	1587	1634	1.0
total					18149	18.7

水泥噴凝植生覆蓋技術，第二天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B10	5	2745	1599	1597	1148	1.9
B13	10	2915	1594	1593	1322	0.8
B14	15	2914	1616	1615	1299	0.9
W1	20	3341	1598	1597	1744	1.0
C7	25	3415	1623	1621	1794	2.3
D1	30	3432	1589	1587	1845	1.9
C8	35	3395	1610	1608	1787	1.6
C5	40	3351	1598	1597	1754	0.8
W2	45	3408	1616	1615	1793	1.1
C11	50	3366	1601	1600	1766	1.4
C6	55	3354	1599	1598	1756	1.0
B5	60	3388	1612	1611	1777	1.1
total					19785	15.8

傳統試體，第七天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
6	5	2523	836	822	1701	14.0
A9	10	3324	1628	1613	1711	15.0
A5	15	3338	1632	1618	1720	14.0
4	20	1969	270	255	1714	15.0
1	25	1963	272	255	1708	17.0
7	30	2633	853	831	1802	22.0
8	35	2644	846	823	1821	23.0
9	40	2129	306	282	1847	24.0
10	45	2220	419	394	1826	25.0
2	50	2127	310	284	1843	26.0
3	55	2074	277	254	1820	23.0
A14	60	3455	1641	1615	1840	26.0
total					21353	244.0

傳統試體，第七天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
A4	5	2698	1629	1614	1084	15.0
C7	10	3114	1648	1621	1493	27.0
B3	15	3057	1634	1605	1452	29.0
C5	20	3226	1629	1597	1629	32.0
A6	25	3423	1811	1777	1646	34.0
A12	30	3272	1657	1623	1649	34.0
D1	35	3185	1621	1587	1598	34.0
A10	40	3220	1644	1609	1611	35.0
B8	45	3252	1649	1615	1637	34.0
B2	50	3185	1651	1617	1568	34.0
W2	55	3187	1649	1615	1572	34.0
A8	60	3209	1629	1594	1615	35.0
total					18554	377.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第七天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
C6	5	2896	1601	1598	1298	3.0
A11	10	3091	1628	1624	1467	4.0
B14	15	3093	1618	1615	1478	3.0
B5	20	3094	1615	1611	1483	4.0
C12	25	3099	1621	1617	1482	4.0
D2	30	3084	1595	1593	1491	2.0
B14	35	3162	1609	1606	1556	3.0
A7	40	3226	1593	1590	1636	3.0
B4	45	3232	1616	1613	1619	3.0
B12	50	3215	1611	1608	1607	3.0
C12	55	3201	1603	1600	1601	3.0
W1	60	3253	1599	1597	1656	2.0
total					18374	37.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第七天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B9	5	2880	1598	1596	1284	2.0
A13	10	3132	1591	1587	1545	4.0
B6	15	3163	1606	1603	1560	3.0
W2	20	3188	1616	1615	1573	1.0
B13	25	3115	1595	1593	1522	2.0
A2	30	3233	1622	1619	1614	3.0
C8	35	3366	1611	1608	1758	3.0
B10	40	3363	1599	1597	1766	2.0
A3	45	3353	1594	1592	1761	2.0
A13	50	3417	1624	1621	1796	3.0
B11	55	3321	1615	1613	1708	2.0
B7	60	3344	1617	1614	1730	3.0
total					19617	30.0

傳統試體，第十四天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
1	5	2093	261	255	1838	6.0
2	10	1832	290	284	1548	6.0
3	15	1593	258	254	1339	4.0
4	20	1242	259	255	987	4.0
6	25	1897	825	822	1075	3.0
7	30	2045	835	831	1214	4.0
8	35	2090	827	823	1267	4.0
9	40	1453	286	282	1171	4.0
10	45	1326	397	394	932	3.0
B6	50	2801	1611	1603	1198	5.0
A14	55	3121	1624	1615	1506	5.0
A4	60	3373	1625	1614	1759	4.0
total					15834	52.0

傳統試體，第十四天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B10	5	2310	1600	1597	713	3.0
B7	10	2487	1619	1614	873	5.0
C8	15	2989	1615	1608	1381	7.0
B5	20	2947	1617	1611	1336	6.0
W2	25	2864	1621	1615	1249	6.0
D1	30	2750	1593	1587	1163	6.0
A12	35	2852	1628	1623	1229	5.0
A11	40	2903	1631	1624	1279	7.0
B8	45	2847	1623	1615	1232	8.0
C6	50	2846	1605	1598	1248	7.0
B2	55	2904	1625	1617	1287	8.0
A2	60	3126	1630	1619	1507	6.0
total					14497	74.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第十四天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B14	5	2767	1621	1615	1152	6.0
B11	10	2982	1621	1613	1369	8.0
W1	15	2962	1605	1597	1365	8.0
A8	20	2941	1601	1594	1347	7.0
D2	25	2965	1599	1593	1372	6.0
A6	30	3132	1784	1777	1355	7.0
C11	35	2943	1606	1600	1343	6.0
B4	40	2965	1619	1613	1352	6.0
A5	45	3099	1623	1618	1481	5.0
A10	50	3110	1614	1609	1501	5.0
A7	55	3089	1594	1590	1499	4.0
A1	60	3139	1626	1621	1518	5.0
total					16654	73.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第十四天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
C5	5	2858	1612	1597	1261	15.0
B9	10	3072	1612	1596	1476	16.0
B3	15	3109	1621	1605	1504	16.0
C12	20	3062	1629	1617	1445	12.0
A3	25	3061	1603	1592	1469	11.0
B12	30	3102	1618	1608	1494	10.0
W2	35	3049	1621	1615	1434	6.0
C7	40	3160	1629	1621	1539	8.0
A9	45	3308	1620	1613	1695	7.0
B12	50	3327	1612	1606	1721	6.0
A13	55	3258	1593	1587	1671	6.0
B13	60	3433	1598	1593	1840	5.0
total					18549	118.0

傳統試體，第二十八天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
1	5	1320	257	255	1065	1.5
2	10	1479	285	284	1195	0.9
3	15	1296	255	254	1042	0.9
4	20	1569	257	255	1314	1.6
6	25	2139	824	822	1317	1.5
7	30	2332	833	831	1501	1.7
8	35	2060	824	823	1237	1.4
9	40	1587	284	282	1305	1.5
10	45	1981	396	394	1587	2.1
A8	50	3287	1596	1594	1693	1.5
W1	55	3252	1599	1597	1655	2.0
D2	60	3306	1594	1593	1713	1.2
total					16624	17.8

傳統試體，第二十八天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B5	5	2555	1613	1611	944	1.5
C8	10	2639	1610	1608	1031	2.3
B14	15	2669	1617	1615	1054	1.5
B10	20	2814	1600	1597	1217	2.5
C6	25	2978	1601	1598	1380	2.6
A5	30	3066	1620	1618	1448	2.2
B7	35	2941	1617	1614	1327	2.8
C7	40	2991	1624	1621	1370	2.8
A7	45	2934	1592	1590	1344	1.8
B8	50	2932	1618	1615	1317	2.6
W2	55	2946	1617	1615	1331	2.2
A1	60	3112	1624	1621	1491	3.1
total					15254	27.9

水泥噴凝植生覆蓋技術，第二十八天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
D1	5	3186	1593	1587	1599	5.6
A12	10	3312	1632	1623	1689	8.7
B13	15	3281	1604	1593	1688	11.1
A14	20	3311	1626	1615	1696	11.0
A2	25	3254	1629	1619	1635	10.3
B6	30	3246	1612	1603	1643	9.4
A6	35	3382	1785	1777	1605	7.5
B4	40	3228	1621	1613	1615	7.8
C11	45	3169	1609	1600	1569	9.1
A11	50	3197	1630	1624	1573	5.8
B11	55	3250	1619	1613	1637	6.1
A10	60	3405	1615	1609	1796	5.5
total					19745	97.9

水泥噴凝植生覆蓋技術，第二十八天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
A4	5	2549	1618	1614	935	4.2
B9	10	2747	1601	1596	1151	4.7
B3	15	2801	1612	1605	1196	7.3
B1	20	2736	1612	1606	1130	5.9
A13	25	2735	1593	1587	1148	6.3
A3	30	2765	1598	1592	1173	6.2
C12	35	2777	1623	1617	1160	5.5
W2	40	2782	1618	1615	1167	3.1
B2	45	2876	1622	1617	1259	4.5
B12	50	2927	1613	1608	1319	5.1
A9	55	2937	1617	1613	1324	4.3
C5	60	2972	1601	1597	1375	4.1
total					14337	61.2

傳統試體，第五十六天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
1	5	2728	1628	1625	1103	3.0
2	10	3920	1612	1610	2310	2.0
3	15	3933	1612	1611	2322	1.0
4	20	3780	1601	1600	2180	1.0
5	25	3832	1623	1621	2211	2.0
6	30	3655	1603	1600	2055	3.0
7	35	3690	1615	1611	2079	4.0
8	40	3634	1583	1580	2054	3.0
9	45	3679	1613	1611	2068	2.0
10	50	3610	1601	1600	2010	1.0
11	55	3519	1622	1620	1899	2.0
12	60	3570	1603	1600	1970	3.0
total					24261	27.0

傳統試體，第五十六天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
A11	5	2668	1627	1624	1044	3.0
A10	10	3898	1611	1609	2289	2.0
B5	15	3922	1614	1611	2311	3.0
C5	20	3877	1599	1597	2280	2.0
A2	25	3802	1622	1619	2183	3.0
A7	30	3835	1591	1590	2245	1.0
A3	35	3601	1594	1592	2009	2.0
A7	40	3656	1592	1590	2066	2.0
B4	45	3629	1616	1613	2016	3.0
C3	50	3526	1599	1597	1929	2.0
A12	55	3519	1624	1623	1896	1.0
B3	60	3514	1607	1605	1909	2.0
total					24177	26.0

水泥噴凝植生覆蓋技術，第五十六天，第一組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
C12	5	3220	1621	1617	1275	4
B6	10	3446	1608	1603	1321	5
B14	15	3430	1620	1615	1612	5
C7	20	3435	1627	1621	1800	6
A1	25	3450	1627	1621	1777	6
B2	30	3417	1622	1617	1753	5
C10	35	3388	1621	1615	1954	6
A8	40	3434	1599	1594	1785	5
C6	45	3509	1603	1598	1770	5
A13	50	3543	1593	1587	1847	6
A14	55	3468	1621	1615	1798	6
D1	60	3661	1593	1587	1833	6
total					20525	65

水泥噴凝植生覆蓋技術，第五十六天，第二組。

編號	時間 (min)	槽+土+水 (g)	槽+土 (g)	槽 (g)	逕流量 (g)	沖蝕量 (g)
B9	5	2892	1599	1596	1296	3
B10	10	2924	1603	1597	1327	6
B1	15	3227	1613	1606	1621	7
B11	20	3421	1622	1613	1808	9
B8	25	3398	1624	1615	1783	9
A5	30	3370	1626	1618	1752	8
A6	35	3569	1785	1777	1792	8
B7	40	3379	1622	1614	1765	8
B13	45	3368	1600	1593	1775	7
w2	50	3434	1621	1615	1819	6
B12	55	3413	1615	1608	1805	7
C8	60	3420	1616	1608	1812	8
total					20355	86