

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

河川堤岸溢頂沖刷之試驗研究

Experiment Study on Overtopping Erosion of River Embankment

研究生：康偉國

指導教授：葉克家 博士

中華民國九十六年八月

謝誌

首先感謝吾師 葉教授克家，在就學期間相關知識上的傳授與教導，使本論文得以順利完成。研究所跟隨老師學習的歲月裡，老師總能悉心引導學生思考並解決問題；而老師治學處事之態度，學生更引以為模範，謹此獻上最誠摯的感謝與敬意。口試期間感謝水利署謝總工程司勝彥、國立成功大學蔡教授長泰及國立台灣大學許教授銘熙細心斧正與建議，使本論文更加完善；此外，亦感謝所上老師於課業上的教導與啟發，讓學生受益良多。

研究所期間十分感謝昇學學長的傾囊相授與提攜，感謝恩添學長、東霖學長、德勇學長、夢祺學長、祥禎學長、胤隆學長、世偉學長、曉萍學姊在學業及研究上的照顧與指導；寰宇學長、益家學長、峰志學長、俊毅學長、于軒學長、燦仲學長、仲達學長、力瑋學長、浩榮學長、宣汝學姊、欣瑜學姐給予生活上的關心與鼓勵，感謝研究所一起打拼的同學雅婷、宥達、建華、宗明、歆婷、柏宏於課業上的砥礪及幫助，謝謝學弟妹誠達、思廷、佑民、仁凱、鏡如、仙藝、冠顯、俊哲的幫忙與關心。

同時感謝大學時期 陳老師彥璋與好友柏均、紀勛、文欽、禹州、宏裕、添福、明俊、旺震、茹蕙、維隆、啟斌、宗志、坤霖、鼎林、智呈、筠涵、家榮以及所有關心我的朋友，謝謝你們。

最後衷心感謝撫育我成長的母親與家人，謝謝一直以來的鼓勵與栽培，使我得以順利完成論文並獲得學位，謹將此榮耀與喜悅獻給關心我的家人、師長、同學以及所有朋友們。

河川堤岸溢頂沖刷之試驗研究

研究生：康偉國

指導教授：葉克家

國立交通大學土木工程研究所

摘要

對於潰堤或潰壩試驗研究，大多以溢頂、溯源沖刷為主，或探討水流對壩體沖刷現象，如潰口形狀與潰壩過程。一般河堤潰堤行為隨著河川水流方向與流速而有所改變，如河川彎道直沖段與直線河段，將產生不同溢頂之方向。

本實驗以物理模型試驗與影像觀測分析方法，探討河川堤岸溢頂水流對堤岸內側之沖刷現象，沖刷試驗考量兩種坡度變化，試驗過程中進行土堤製作及土壤相關分析，繼而實行溢頂沖刷試驗，並利用攝影機配合雷射測量儀，觀測溢頂沖刷現象。

經由試驗觀測所得之影像進行分析，可得知堤岸內側沖刷變化過程，由統計與迴歸結果可得土壤單寬沖刷量、堤底流速等，並可發現能量水頭損失之增加將造成沖蝕量增大，較大溢頂流量之堤岸亦產生較大之沖蝕量。由同一觀測開口平面圖看出，開口上游端溢頂角度大於下游端，其溢頂速度則小於下游端。

關鍵詞：溢頂沖刷，能量水頭損失，河川堤岸

Experiment Study on Overtopping Erosion of River Embankment

Student : Wei-Kuo Kang

Advisor : Keh-Chia Yeh

Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Most of the experimental studies of dike failure and dam break discuss the overtopping and head cutting phenomenon. In general, dike failure status changes with current direction and velocity. For example, flows in bend channel and in straight channel would result in different overtopping direction.

This research analyzes images observed on a built physical model in order to investigate the lateral overtopping phenomenon caused by the erosion process of the inner river bankment. Laboratory analysis of soil characteristics of the river bankment is conducted. With two types of slopes constructed for the inner river bankment, the lateral overtopping erosion process and its phenomenon are observed using the camera in conjugation with the laser device.

From the analysis of the observed images, erosion volumes and erosion rates are obtained. Larger erosion volume is observed with increasing energy loss and slope of bankment. In the plan view of the bankment, the angle between the directions of the overtopping and the main stream is greater at the upstream site than at the downstream site, however greater overtopping flow speed is observed at the downstream .

Keywords : overtopping erosion, energy loss, river bankment

目錄

謝誌.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
照片目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 文獻回顧.....	3
1.4 研究方法.....	7
1.5 本文組織.....	8
第二章 溢頂沖刷試驗之因次分析.....	14
第三章 實驗佈置及實驗步驟.....	18
3.1 實驗設備.....	18
3.2 實驗佈置及架設.....	19
3.3 實驗步驟.....	20

3.3.1 渠槽流量之率定.....	20
3.3.2 篩分析試驗.....	20
3.3.3 土壤比重試驗.....	21
3.3.4 土壤直接剪力試驗.....	22
3.3.5 土堤製作.....	24
3.3.6 堤岸沖蝕試驗.....	25
3.4 試驗條件.....	26
第四章 實驗觀測結果與討論.....	39
4.1 影像處理與判別.....	39
4.2 邊坡沖刷過程.....	39
4.3 邊坡破壞沖蝕量的推估.....	40
4.4 能量水頭損失對沖蝕量之影響.....	41
4.5 坡度對沖蝕量之影響.....	43
4.6 流量對沖蝕量之影響.....	44
4.7 側向溢頂流速方向推估.....	44
4.8 無因次關係圖.....	45
第五章 結論與建議.....	75
5.1 結論.....	75
5.2 建議.....	77



參考文獻.....79

表目錄

表 3-1 流量率定紀錄表29

表 3-2 實驗用砂粒徑分析紀錄表29

表 3-3 比重試驗紀錄表30

表 3-4 荷重 2 公斤直接剪力試驗表30

表 3-5 荷重 5 公斤直接剪力試驗表30

表 3-6 荷重 10 公斤直接剪力試驗表31

表 4-1 坡度 1:2 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 146

表 4-2 坡度 1:2 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 246

表 4-3 坡度 1:1.5 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 146

表 4-4 坡度 1:1.5 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 247

表 4-5 坡度 1 : 2 堤頂水深資料表_代表斷面 147

表 4-6 坡度 1 : 2 堤頂水深資料表_代表斷面 247

表 4-7 坡度 1 : 1.5 堤頂水深資料表_代表斷面 148

表 4-8 坡度 1 : 1.5 堤頂水深資料表_代表斷面 248

表 4-9 坡度 1 : 2 堤底水深資料表_代表斷面 148

表 4-10 坡度 1 : 2 堤底水深資料表_代表斷面 249

表 4-11 坡度 1 : 1.5 堤底水深資料表_代表斷面 1	49
表 4-12 坡度 1 : 1.5 堤底水深資料表_代表斷面 2	49
表 4-13 代表斷面 1 堤頂速度資料表(1/2)	50
表 4-14 代表斷面 2 堤頂速度資料表(1/3)	52
表 4-15 坡度 1:2 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 1 (1/2).....	55
表 4-16 坡度 1:2 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 2 (1/2).....	57
表 4-17 坡度 1:1.5 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 1 (1/2).....	59
表 4-18 坡度 1:1.5 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 2 (1/2).....	61



圖目錄

圖 1-1 遷移點示意圖	9
圖 1-2 坡度變化處(遷移點)易造成交界處發生沖刷破壞.....	9
圖 1-3 破壞堤岸相關幾何參數.....	10
圖 1-4 描述結合各種抗沖蝕層的影響.....	10
圖 1-5 不透水礫石堤岸溢頂沖刷情況.....	11
圖 1-6 凝聚性堤岸溢頂沖刷情.....	11
圖 1-7 混合型堤岸溢頂沖刷情況.....	12
圖 1-8 中等砂堤岸沖刷時間變化示意圖.....	12
圖 1-9 因溢頂沖刷造成堤岸破壞過程.....	13
圖 2-1 堤岸邊坡示意圖.....	17
圖 3-1 實驗佈置示意圖.....	33
圖 3-2 單位載重與砝碼裝置.....	33
圖 3-3 剪力盒與測微錶.....	34
圖 3-4 試驗斷面示意圖.....	34
圖 3-5 側視攝影機觀測示意圖.....	34
圖 3-6 試驗流程示意圖.....	35
圖 3-7 大型明渠試驗機流量率定曲線.....	35

圖 3-8 側向溢頂沖刷堤防之粒徑分部曲線.....	36
圖 3-9 直接剪力試驗結果圖.....	36
圖 4-1 1:2 section1 坡度變化過程示意圖.....	63
圖 4-2 1:2 section2 坡度變化過程示意圖.....	63
圖 4-3 1:1.5 section1 坡度變化過程示意圖.....	64
圖 4-4 1:1.5 section2 坡度變化過程示意圖.....	64
圖 4-5 1:2 section1 堤岸底流速-時間關係圖.....	65
圖 4-6 1:2 section2 堤岸底流速-時間關係圖.....	65
圖 4-7 1:1.5 section1 堤岸底流速-時間關係圖.....	66
圖 4-8 1:1.5 section2 堤岸底流速-時間關係圖.....	66
圖 4-9 各坡度斷面沖蝕百分率-能量損失趨勢圖.....	67
圖 4-10 坡度 1:1.5 坡度變化-時間關係圖.....	68
圖 4-11 坡度 1:2 坡度變化-時間關係圖.....	68
圖 4-12 開口位置溢頂角度趨勢圖.....	69
圖 4-13 開口位置溢頂流速圖.....	70
圖 4-14 單寬沖蝕量-單位時間無因次關係圖.....	71
圖 4-15 水頭損失-坡度變化無因次關係圖.....	71
圖 4-16 能量水頭損失-單位時間無因次關係圖.....	72
圖 4-17 坡度變化-單位時間無因次關係圖.....	72

圖 4-18 單寬沖蝕量-能量水頭損失無因次關係圖.....73

照片目錄

照片 3-1 雷射測量儀.....	37
照片 3-2 試驗標準篩.....	37
照片 3-3 細骨材搖篩機.....	37
照片 3-4 直接剪力試驗儀.....	37
照片 3-5 土堤夯實.....	38
照片 3-6 實驗觀測儀器架設.....	38
照片 4-1 坡度 1:2 堤岸破壞方向.....	74
照片 4-2 坡度 1:1.5 堤岸破壞方向.....	74



第一章 緒論

1.1 研究動機

近年來台灣水文特性似有明顯改變，各流域降雨量時有接近或超過河川可容納之情形發生，亦可能造成外水之溢淹。因此，堤防安全為保護河岸兩旁居民生命財產之重要因素。此外，由於近年來洪水流量頻頻超過洪水設計標準，如民國 90 年桃芝、納莉颱風，93 年敏督利及艾利，94 年 612 豪雨與海棠颱風屢次重創台灣河川之河防安全，使得堤防設計並非百分之百安全。

對於潰堤或潰壩試驗研究，大多以溢頂、溯源沖刷為主，或針對水流對壩體結構之沖刷過程進行探討，如土壩、堰塞湖潰口與潰壩過程。而潰堤（河堤、海堤）與潰壩過程亦有些差異，如水流方向與沖刷機制。對海堤而言，波浪由於地形關係，於近岸時，波浪水位抬高，反覆拍打堤岸造成之海堤潰堤，而海嘯長浪又是另一種沖擊海堤的方式。一般河堤潰堤在不考慮地下水滲流與管湧之情況下，堤防破壞機制也因地而異，係隨著水流方向與流速差異，如河川彎道直沖段與直線河段，其破壞方式有所差異，並根據水位的高低，破壞方法可區分為：

1. 當外水低於堤防時，堤防由於水流流向與速度關係，使水流具有沖擊力將基腳淘刷，使堤防結構體不穩定而潰堤。
2. 當外水高於堤防時，使水流高過於設計堤防而溢頂沖刷發生潰堤。
3. 上述兩者伴隨著發生潰堤。

本試驗研究將針對當外水高過於堤防高程時，水流溢頂對堤防內側之沖刷行為進行研究與探討。

1.2 研究目的

本研究利用水槽進行河川溢頂之物理模型試驗，其目的為探討渠道水位高過於堤防時，水流對土堤溢堤之沖刷行為，並設計兩種不同堤內坡度進行土壤分析、夯實、繼而進行溢頂沖刷試驗。試驗過程中利用攝影技術，以每秒 30 張數位影像擷取沖刷過程，並藉由雷射量測儀配合影像分析得到其溢頂沖刷時坡度變化關係。此外，於主流上游放置表面漂流物，藉由攝影機放置於堤頂上方，觀測水流表面漂流物溢過堤頂之方向，判別其水流溢頂時之流速與方向，並進行統計，分析其水流溢頂角度。最後藉由影像分析推估其單位體積沖蝕量，經由觀測資料推估能量損失與沖蝕量之關係，希望對河川溢頂沖刷進一步研究有所幫助。

1.3 文獻回顧

回顧前人文獻，側向溢頂沖刷相關研究並不常見，因此，本研究引用溯源沖刷、海堤波浪溢頂沖刷(wave overtopping)之實驗研究，及溢頂沖刷相關理論，將文獻分為堤岸沖刷、沖刷型態及觀測技術三部份，作為側向溢頂沖刷試驗之參考。

1. 堤岸沖刷相關研究

回顧前人所提出影響堤岸沖刷量之相關因子，作為試驗設計與觀測之依據。

Brush (1960)以遷移點(knickpoint，如圖 1-1)觀念描述經過轉折點後之邊坡有最容易破壞之可能 (如圖 1-2)，且提到隨時間變化，坡度較緩之邊坡沖刷量較小。

Meyer 等人(1975)提出溯源沖刷量 g_s 為流量之函數式：

$$g_s = A_1(Q - Q_c)^{A_2} \quad (1-1)$$

式中， Q ：流量、 Q_c ：溯源啟動臨界流量、 A_1 ：土壤溯源常數、 A_2 ：為坡度、土壤、幾何形態參數值約在 1~1.5。

Gardner (1983)應用水流剪應力模式，引用至溯源沖刷量之推估其方程式為：

$$g_s = k_{h1}(\tau - \tau_c)^p \quad (1-2)$$

式中， k_{h1} ：常數， τ ：水流剪應力， τ_c ：臨界剪應力。

Elliot(1988)由能量觀點，提出流量與坡度變化之溯源方程

$$D_h = k_{h2}(QS / B) \quad (1-3)$$

式中， D_h ：溯源造成之沖蝕量， k_{h2} ：土壤溯源沖刷係數，S:坡度，B:渠寬。根據 Elliot 統計分析後，發現此式優於剪應力方程式，且由能量推估模式，解釋能量之消散乃藉由溯源過程進行。

Kohl (1988)以動量觀念推估沖蝕量，其方程式為：

$$D_h = k_{h3}\rho Q\sqrt{z_1} \quad (1-4)$$

式中， k_{h3} 為小溪溯源土壤沖蝕係數、 ρ :流體密度、 Q :溯源沖刷流量、 z_1 :堤岸高度。

Powledge (1989)以水流拖曳應力觀點，將沖刷率表示為：

$$E = k(\tau - \tau_c)^a \quad (1-5)$$

式中， k,a ：相關係數、 τ ：水流拖曳應力、 τ_c ：材料臨界拖曳應力。

並說明溢堤時若為陡坡，增加之能量值得重視，由於陡坡增加之能量，將經由能量損失而達到平衡，因此，在陡坡情況下，其水流拖曳力大於緩坡，較可能產生沖蝕，且說明當滲流影響至侵蝕表面時，將

增加堤岸之沖蝕。

Oumeraci (2002)於海岸波浪，溢頂沖蝕參數研究中，表示溢頂流速為影響邊坡沖刷之重要因素，且在不考慮能量損失及壓力梯度下，利用動量及連續方程式，求出溢頂水流之流速。

Colemen (2002)提出破壞流量觀點決定沖蝕啟動

$$Q_{b*} = 0.242L_{b*}(h_{b*})^{1.5} \quad (1-6)$$

式中， Q_b ：破壞流量， $Q_{b*} = Q_b / (g^{0.5} H^{2.5})$ 、 L_b 破壞平面曲線長度(如圖 1-3 所示) $L_{b*} = L_b / H$ 、 $h_{b*} = h_b / H$ ， h_b 水位至堤頂之高差(如圖 1-3 所示)， H ：蓄水槽高度。



Chinnarasri(2003)提到堤頂的沖刷率(Degradation rate)與坡度有關，坡度越陡其最大沖刷率越大且同時影響沖刷延時。

2. 沖刷型態

Brush (1960)說明堤岸沖刷之型態與其土壤性質有著密切關係，可將沖刷型態分成五種(如圖 1-4)。

Powledge (1989)將溢頂沖刷型態，依堤岸土壤材質分為三類(如圖 1-5~圖 1-7)。

Colemen (2002)描述中等砂(medium sand，粒徑 0.25mm~0.5mm)

堤岸，其不同時間縱剖面之變化(如圖 1-8)

Chinnarasri(2003)描述非均勻砂溢頂沖刷時之變化過程，可分為四個步驟(如圖 1-9)。

3. 觀測技術相關研究

Möller (2002) 利用時域反射方法(time-domain reflectometer)觀測堤岸滲流之情況。

Frazao (2007)利用雷射影像技術，於潰壩時，觀測河道內岸壁沖刷之破壞過程，並利用座標轉換，將觀測影像資料轉換成實際試驗資料。



Ryu(2007)利用 PIV(particle image velocity)與 BIV(bubble image velocimetry)量測技術，觀測海岸波浪溢堤後邊坡上之流場，並推求溢頂波浪之速度關係。

回顧相關試驗研究多以溯源沖刷與海堤波浪溢頂沖刷(wave overtopping)為主、試驗佈置大多以堤岸垂直主流方式進行，以利試驗結果之觀測。本實驗欲探討之河川溢頂沖刷是以堤岸平行主流方式進行，主要敘述溢頂水流將受主流影響使溢頂方向有所不同，對堤岸沖刷造成影響，經由上述文獻回顧可知堤岸沖刷與坡度變化、流量、土壤剪應力、流速及能量水頭皆為相關。因此，本試驗考量堤岸沖刷

量與坡度、流量及能量水頭之關係，且經由觀測技術相關研究，採用雷射光線配合影像進行觀測，描述堤岸變化過程，並比對試驗沖刷之型態，希望對河川溢頂沖刷研究有所幫助。

1.4 研究方法

本研究利用水槽進行河川水流溢頂之模型試驗，探討渠道水流溢堤沖刷行為，考量兩種不同堤岸坡度進行土壤分析、夯實、繼而進行溢頂沖刷試驗，試驗過程利用雷射測量儀配合影像擷取與分析，得到溢頂沖刷時坡度變化關係。經由觀測，溢頂與堤底之流速、水深及溢頂方向資料，推估不同溢頂位置，角度、流速之趨勢，探討坡度改變所造成之影響、能量損失與沖蝕率之關係。研究方法大致可分為，溢頂沖刷試驗、影像觀測及土壤實驗三部份。

(1)溢頂沖刷試驗部份：沖刷實驗採用半模型側向溢頂實驗方式進行，利用大型明渠試驗水槽將渠道利用隔板將水槽隔成兩側，分別為主流側與堤岸側；於水槽下游水流穩定段取 2m 為沖刷試驗渠段，利用天然河砂製作土堤；於堤頂 50cm 與 150cm 處，分別設置高 3cm 寬為 20cm 之開口，並訂定開口代表斷面位置，試驗段採用兩組不同坡度堤岸作為比較，固定上游流量，進行沖刷試驗。

(2)影像觀測部分：於開口處設置四台攝影機，與一台雷射測量

儀，以非入侵量測技術，觀測堤岸沖蝕變化，溢頂方向與堤頂、堤底、水深、流速影像資料，將獲得之影像，利用影像分析軟體，擷取出圖片，進一步做判圖與分析。

(3)土壤實驗部分：為瞭解土壤之性質，將試驗用砂分別做含水量試驗，比重試驗，粒徑分析，直接剪力試驗，以瞭解試驗用砂之基本性質。

本試驗配合兩種不同堤岸坡度及兩處代表斷面，各取 6 組可用數據，共 24 組數據，作為試驗分析之依據。

1.5 本文組織



第一章 緒論：說明研究動機、回顧前人研究及研究方法之描述。

第二章 因次分析：考慮影響因子決定觀測參數。

第三章 實驗佈置及實驗步驟：介紹實驗設備、配置與方法。

第四章 實驗觀測分析與結果：影像處理與判別、邊坡沖刷過程、邊坡破壞單寬沖蝕量的推估、能量損失對沖蝕率之影響、坡度對單寬沖蝕量之影響、側向溢頂流速方向推估。

第五章 結論與建議：實驗結果說明並建議日後可研究之方向。

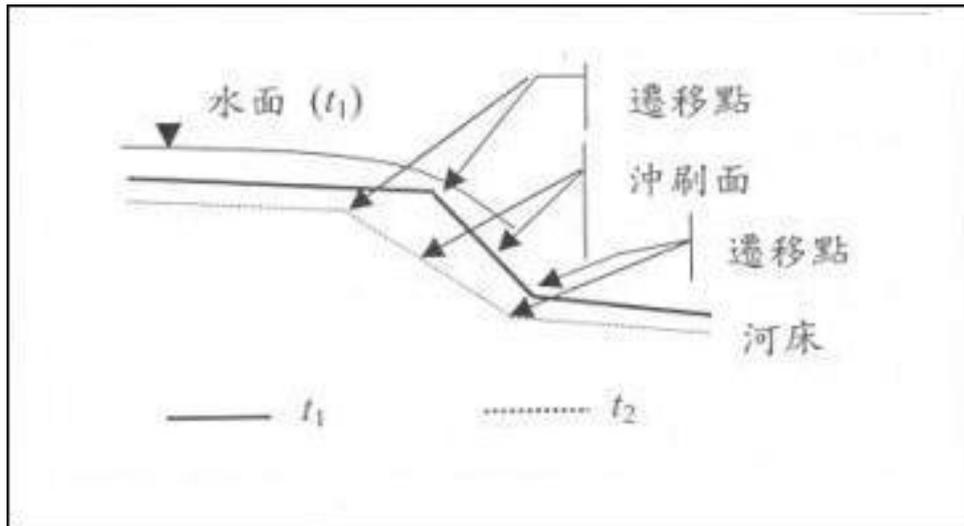


圖 1-1 遷移點示意圖(Brush, 1960)

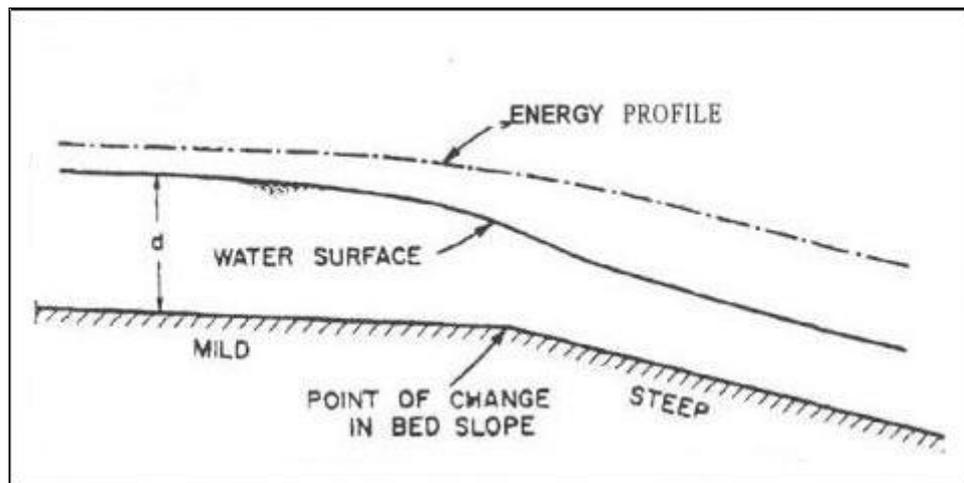


圖 1-2 坡度變化處(遷移點)易造成交界處發生冲刷破壞(Brush, 1960)

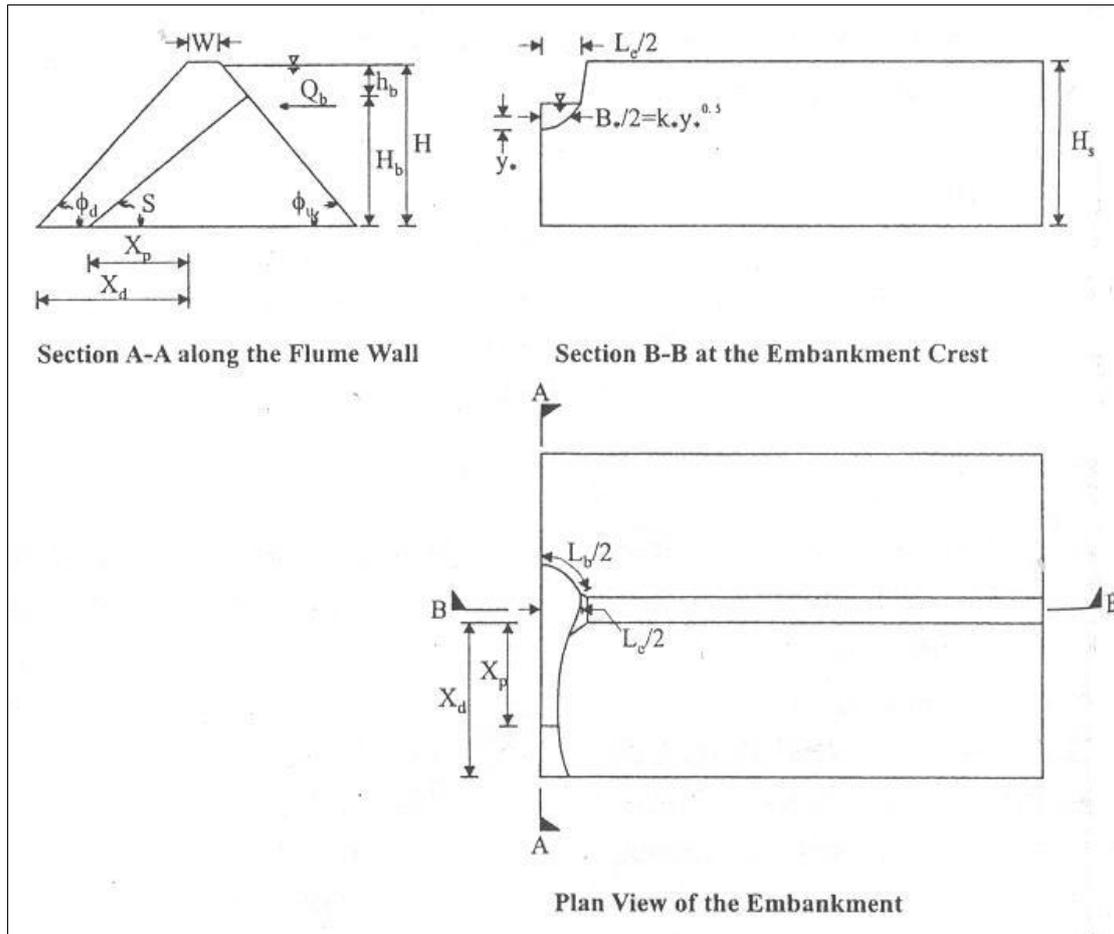


圖 1-3 破壞堤岸相關幾何參數(Colemen, 2002)

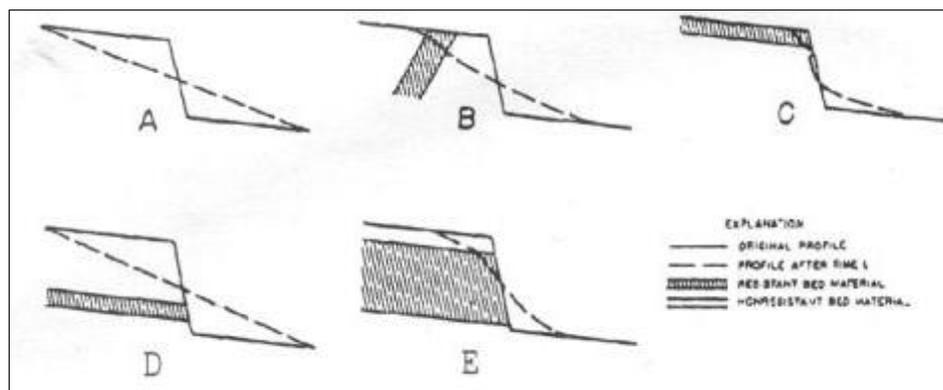


圖 1-4 描述結合各種抗沖蝕層的影響(Brush, 1960)

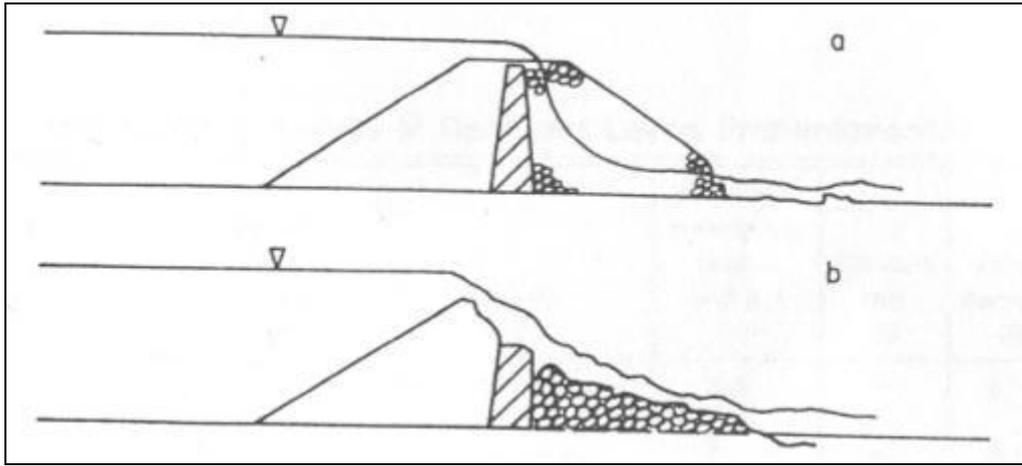


圖 1-5 不透水礫石堤岸溢頂沖刷情況(Powledge, 1989)

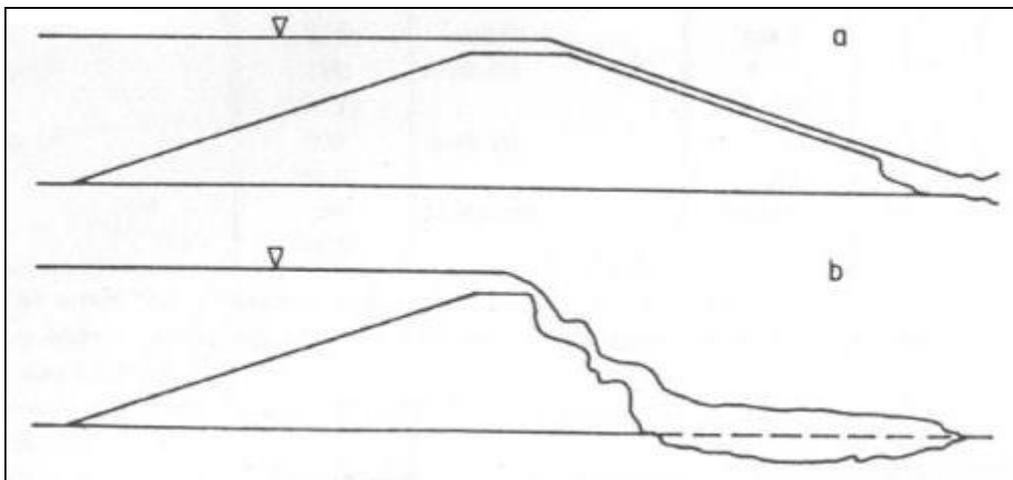


圖 1-6 凝聚性堤岸溢頂沖刷情(Powledge, 1989)

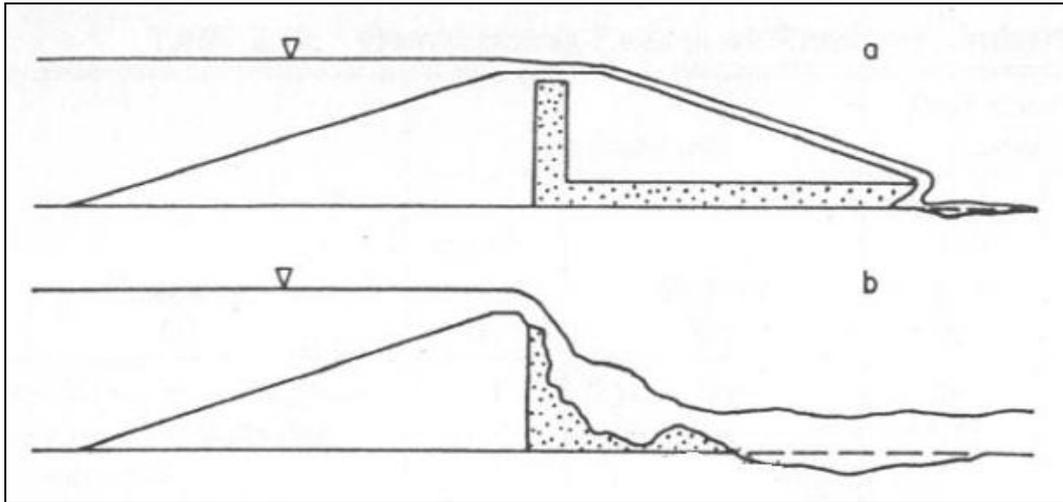


圖 1-7 混合型堤岸溢頂沖刷情況(Powledge, 1989)

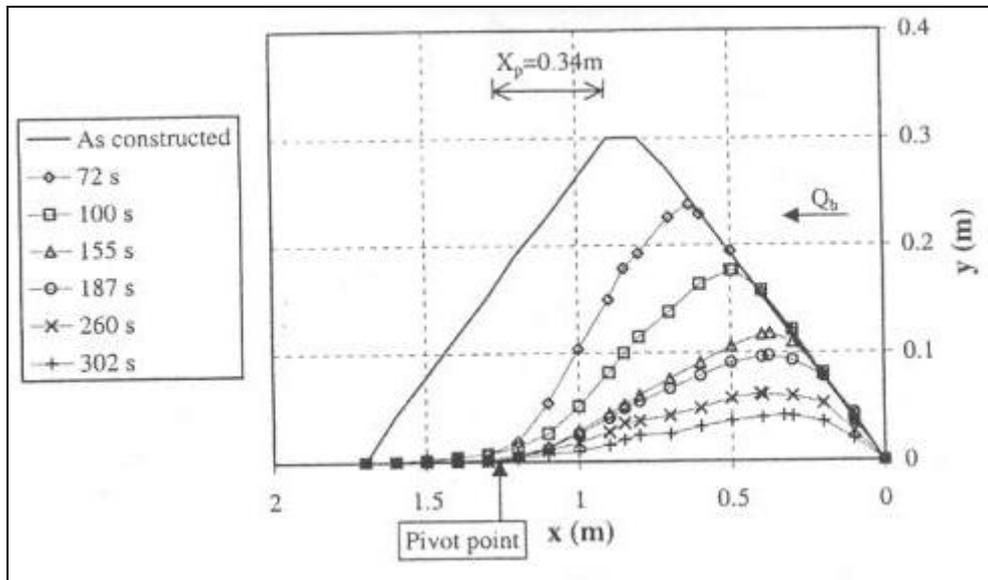


圖 1-8 中等砂堤岸沖刷時間變化示意圖(Colemen, 2002)

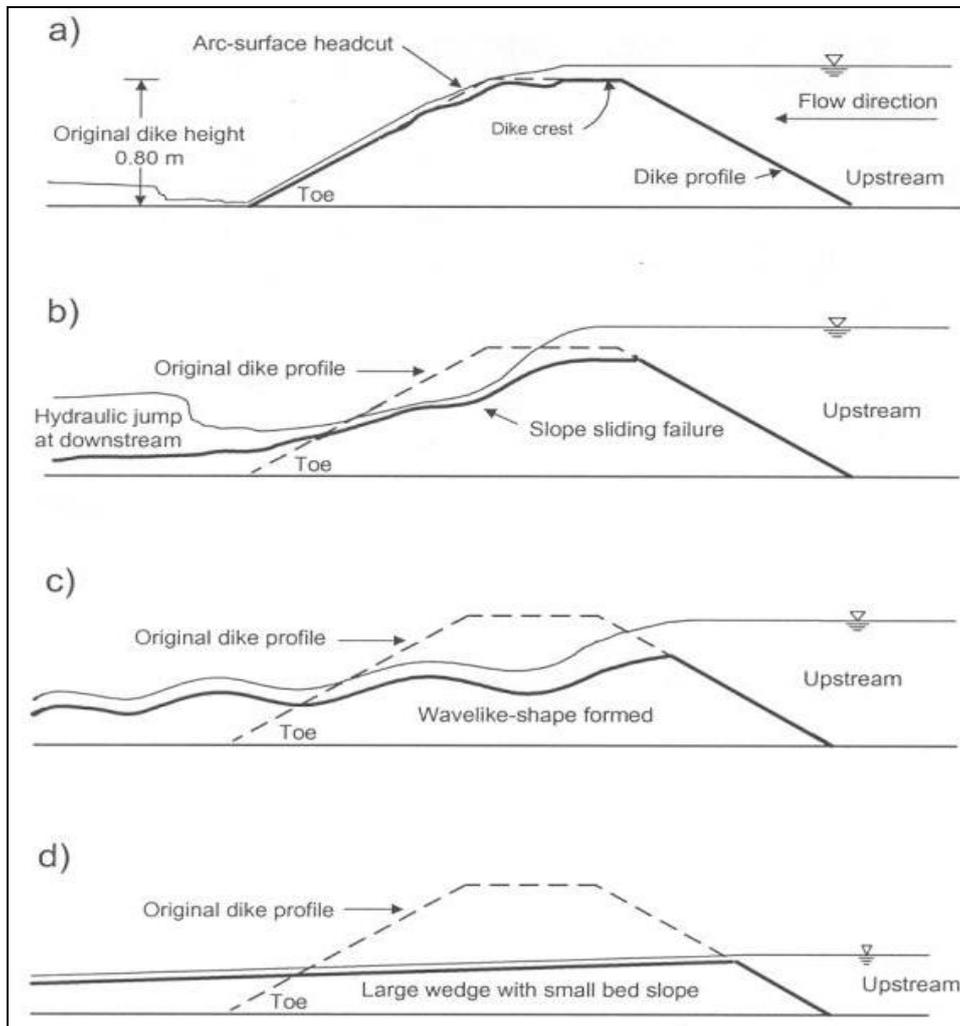


圖 1-9 因溢頂沖刷造成堤岸破壞過程(a)起始於堤頂發生微小沖蝕，(b)邊坡發生滑動破壞，(c)床形發展成波浪形狀，(d)最後發展成一楔型床形(Chinnarasri, 2003)

第二章 溢頂沖刷試驗之因次分析

因次分析，主要是為了減少問題中之變數，將一些有因次之變數組合，形成無因次之參數，使更容易了解各變數間之函數關係。經因次分析決定主要因子，一般常用的因次分析的方法有兩種(a) Rayleigh method；(b) Buckingham π -method。

(a) Rayleigh method

1899 年 Rayleigh 所提出的一種因次分析方法，其方法是以指數方程式的形式表示，等號兩邊之因次須為齊次。一般表示為：

$$A = C(A_1^a, A_2^b, A_3^c, \dots) \quad (2-1)$$



(b) Buckingham π -method

Buckingham π -method 敘述的是，在一個因次齊次方程式若有 n 個變數，被 m 個基本因次(如 M、L、T 等)完全描述，則可將其歸為 $(n-m)$ π -項皆為無因次之參數並以獨立變數 A 表示

$$\begin{aligned} \pi_1 &= A_1^{a_1} A_2^{b_1} \dots A_m^{m_1} A_{m+1} \\ \pi_2 &= A_1^{a_2} A_2^{b_2} \dots A_m^{m_2} A_{m+2} \\ &\dots\dots\dots \\ \pi_{n-m} &= A_1^{a_{n-m}} A_2^{b_{n-m}} \dots A_m^{m_{n-m}} A_n \end{aligned} \quad (2-2)$$

本研究採用之方法為 Buckingham π -method。考量堤岸沖刷之啟動機制，參考輸砂力學中泥砂及沖刷量推估之機制；且本試驗中堤岸

是以溢流為前提下發生沖刷破壞，且溢堤而下之水流，能量損失為土堤沖刷破壞要素，(Elliot,1988)。因此，考量能量損失因子為： ΔE 。

堤岸溢頂沖蝕量須考量因子大致可分為(1)流體性質： ρ 、 μ 、 g ；(2)水流條件： v_T 、 y_T 、 U_* ；(3)幾何條件： w_B 、 w_T 、 H ；(4)土壤性質： ρ_s 、 d_s ；(5)其他因子 ΔE 。

經由以上考量，與堤岸溢頂沖刷量有關物理量之表示式如下：

$$q_s = F(v_T, y_T, U_*, \rho, \mu, g, \rho_s, d_s, S, \Delta E) \quad (2-3)$$

式中： q_s ：堤岸單寬沖刷量， v_T ：堤頂速度， y_T ：堤頂水深， U_* ：剪力速度， ρ ：流體密度， μ ：流體動力黏度， g ：重力加速度， ρ_s ：床質質量密度， d_s ：床質粒徑， S ：堤岸內側坡度 $S = \frac{H}{W_B - W_T}$ ， ΔE ：為沖刷過程中之能量損失，相關參數如圖 2-1 所示。

選取 ρ 、 v_T 、 y_T 為基本變量，經因次分析後之無因次式如下表示：

$$\frac{q_s}{q} = F_1\left(\frac{U_*}{v_T}, \frac{1}{Re}, \frac{1}{Fr}, S, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_s}{y_T}, \frac{\Delta E}{y_T}\right) \quad (2-4)$$

其中 $q = v_T y_T$ ：單寬流量； $\frac{U_*}{v_T}$ ：溢頂水流剪力速度與流速之比值； $\frac{1}{Re}$ ：雷諾數之倒數； $\frac{1}{Fr}$ ：福祿數之倒數； S ：堤岸坡度變化； $\frac{\rho_s}{\rho}$ ：堤岸土壤比重； $\frac{d_s}{y_T}$ ：堤岸土壤粒徑與堤頂水深之比值； $\frac{\Delta E}{y_T}$ ：無因次水頭損失，因堤岸高度 H 在實驗中為定值，故可表為 $\frac{\Delta E}{E}$ ，其中

$E = \frac{v_T^2}{2g} + H + y_T$ 為總能量水頭。由於本試驗中溢堤水流假設為定量，使溢頂水流剪力速度、雷諾數、福祿數固定，因此不考慮其影響。此外本試驗堤岸材料使用固定性質土壤，使土壤比重及粒徑皆為固定，故不考量土壤比重與代表粒徑之變化影響。因此本研究探討單寬沖刷量與坡度變化、能量水頭損失之關係，其中能量水頭損失與坡度變化隨著時間將有所變化。為了方便考量坡度及能量損失隨時間之變化將 S 以 $\frac{S_i}{S_0}$ 表示其中 S_i 為不同時刻之堤岸坡度、 S_0 為初始坡度，而不同時刻能量水頭損失 ΔE 以能量水頭損失與總能量水頭之比值 $\frac{\Delta E}{E}$ 表示，此外能量水頭損失隨著坡度改變而有所不同，其中 $\frac{S_i}{S_0}$ 為 $\frac{\Delta E}{E}$ 之自變數，可表示成 $\frac{\Delta E}{E} = F_2\left(\frac{S_i}{S_0}\right)$ 並經由因次分析得知 $\frac{q_s}{q} = F_3\left(\frac{S_i}{S_0}\right)$ 因此 $\frac{q_s}{q}$ 與 $\frac{\Delta E}{E}$ 之無因次關係式，可以下式表示：

$$\frac{q_s}{q} = F_4\left(\frac{\Delta E}{E}\right) \quad (2-5)$$

式中 ΔE 為能量水頭損失、 E 為總能量水頭，試驗無因次關係圖將於第四章表示。

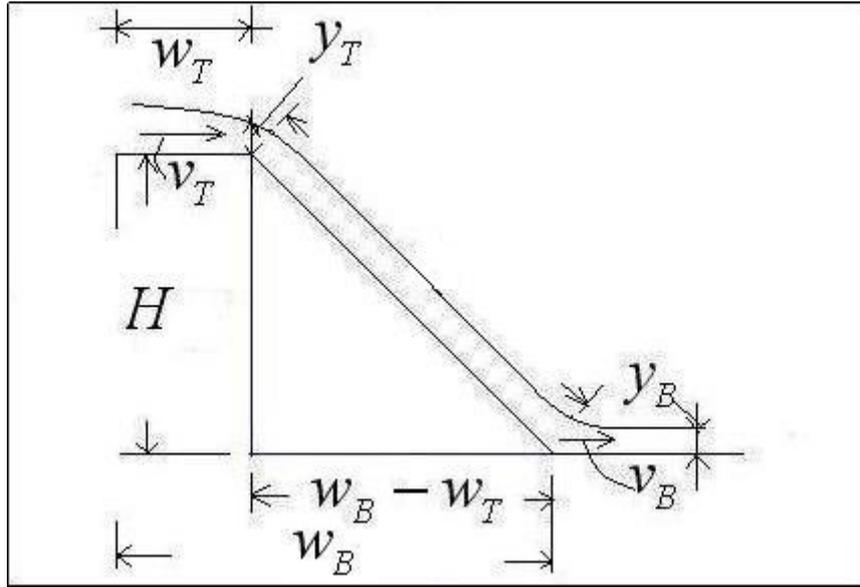


圖 2-1 堤岸邊坡示意圖



第三章 實驗佈置及實驗步驟

3.1 實驗設備

A. 側向溢頂沖刷試驗：

1. 可坡度大型明渠試驗水槽:長 15m 寬度 0.6m 渠道坡度 $S=0.004$ 。

(如圖 3-1)

2. 馬達變頻調速器：控制馬達之轉速。
3. 錄影照相機四台。
4. 坡度 1:2 及 1:1.5 之壓克力板。
5. 雷射測量儀器。(照片 3-1)
6. 抽水馬達:採用流量 4000l/hr 之抽水機。
7. 保麗龍球。
8. 標準夯錘:錘重 2.5kg，落距 40cm。



B. 土壤試驗:

1. 標準篩:採用 #4、#8、#16、#30、#50、#100、#200、底盤之標準篩。(如照片 3-2)
2. 細骨材搖篩試驗機。(如照片 3-3)
3. 直接剪力試驗儀。(如圖 3-2~3-3、照片 3-4)

3.2 實驗佈置及架設

本實驗暫不考量主流側堤岸之岸壁沖刷(bank erosion)及滲流(seepage)影響所造成之堤岸損壞，因此試驗段以不透水材料分隔，以避免主流對觀測堤岸於未溢頂前產生破壞。

溢頂沖刷實驗利用長 15m、寬 0.6m 之水槽，分隔成主河道與堤岸部分，於下游水流穩定處取長度 2m 之試驗堤岸，並製作堤高 8cm、堤頂寬 4cm，堤寬 20cm(及 16cm)之堤岸(如圖 3-4)，並於堤底邊設置排水溝渠，將溢頂之水流集於下游，利用抽水機抽至堤岸外，避免觀測之堤岸產生溢淹。



此外，為了便於試驗觀測，於堤頂沿程 50cm 與 150cm 處分別設置高 3cm 寬為 20cm 之開口(如圖 3-1)，開口處將決定觀測代表斷面，並於代表斷面架設觀測儀器，每次試驗以一個開口位置進行試驗，開口將設置四台錄影照相機及一台雷射測量儀做實驗觀測。

觀測斷面所設置四台錄影照相機，分別觀測：

1. 堤頂水深：堤頂水深，於缺口處設置觀測尺，以攝影機直接觀測堤頂水深高度。
2. 堤底水深：於不影響水流情況下，將觀測尺設置於玻璃試驗水槽

外避免觀測誤差，利用水平雷射儀，訂出觀測尺與堤底平行之刻度，並使攝影機平行觀測尺及堤底(即觀測尺與堤底於同一平面上)，避免觀測角度差異所造成之誤差。

3. 觀測堤頂及堤底水流速度：於渠道上方架設攝影機，利用漂流物放置於渠道上游，以拍攝溢頂水流方向與堤頂、堤底速度。
4. 觀測坡度變化：以雷射光線投射於代表斷面，利用攝影機拍攝堤岸溢頂時堤岸沖蝕變化過程，攝影機架設相關位置如圖 3-5 所示。

3.3 實驗步驟



本研究實驗步驟流程如圖 3-6 所示，各試驗過程如下。

3.3.1 渠槽流量之率定

流量率定部分，採用大型明渠試驗水槽，於渠槽出流處連接一蓄水槽，量測其蓄滿速度求得其流量，相關數據如表 3-1 所示、率定曲線如圖 3-7。

3.3.2 篩分析試驗

試驗儀器：

1. 烘箱

2. 標準篩
3. 搖篩機
4. 電子秤

試驗步驟：

1. 將試驗之沙土置入烘箱烘乾。
2. 量測各篩號之篩重。
3. 將烘乾之砂土倒至疊好之篩組中順序為#4、#8、#16、#30、#50、#100、#200、底盤並加上頂蓋。
4. 將篩組置於搖篩機上搖動5分鐘。
5. 分別秤各篩加土重。
6. 將數據繪製成表格與圖形，篩分析粒徑分布如表3-2、圖3-8所示。

3.3.3 土壤比重試驗

實驗堤岸採用天然河砂為實驗材料，而土壤基本性質為工程上所重視，土壤之比重為土壤性質考量之基本要素。

試驗目的：求土壤絕對比重，作為其他土壤性質參考與設計。

試驗儀器：

1. 比重瓶

2. 恆溫水槽(保持比重瓶溫度)
3. 酒精燈
4. 電子秤
5. 烘箱
6. 燒杯
7. 溫度計

試驗步驟：

1. 取試驗用土置入烘箱烘乾 24hr 後取用取烘乾土重 30g。
2. 量測比重瓶空瓶重(w_c)。
3. 比重瓶裝水到記號位置秤重(W_{c+w})。
4. 將土放入空比重瓶中加入水淹沒土體。
5. 將比重瓶放於三角鐵架石棉板上加熱以驅除氣泡。
6. 將比重瓶放置於水盆冷卻直至室溫。
7. 將冷卻之比重瓶加水至標記刻度秤重($W_{c+s=w}$)。

實驗結果如表 3-3 所示。

3.3.4 土壤直接剪力試驗

直接剪力試驗，目的為模擬現地土壤之抗剪強度，求得凝聚力： c 及摩擦角： ϕ ，提供邊坡穩定、基礎承载力、開挖隆起穩定性之參考，然而直接剪力試驗有其實驗上之缺點，主要為土壤被迫於沿著剪力盒

上下兩半之間裂縫破壞，而非最弱面發生破壞，儘管如此直接剪力試驗仍為最簡單經濟之方法。

試驗內容：量測土壤的不排水剪力強度、摩擦角、凝聚力。

試驗儀器：

1. 直接剪力試驗儀：

(1) 剪力盒

(2) 垂直力承載裝置

(3) 剪力承載裝置

(4) 測定裝置包括：

(a) 水平變位測微儀；

(b) 垂直變位測微儀；

(c) 壓力環。



2. 砝碼

3. 電子秤

4. 碼表

5. 蓋板

試驗步驟：

1. 量出直剪盒尺寸。

2. 秤上部剪力盒(上蓋與上部透水石)之重量，以便加入正向應力

的計算。

3. 剪力盒組好，裝於剪力儀上。
4. 秤取一盤試驗用之乾砂。
5. 將砂土放入容器內，鋪成約 2.8cm 厚。
6. 將蓋板放置於土上。
7. 量出試驗厚度。
8. 施加所要的正向力。
9. 將上盒與下盒分開一段距離。
10. 架好量測之應變計，記錄初始讀數(表格中)。
11. 進行試驗前，需檢查剪力盒之上下部份不相接觸，避免上下盒間產生摩擦阻力。
12. 開始施加剪力，並每隔 10 秒記錄側向位移、垂直位移及側向力(later displacement、vertical displacement & later force)。
13. 試驗待水平位移以達試體全長之 15%，即停止試驗。除非作用之剪力已先達一固定值，則可停止。
14. 將數據製成表格與圖形繪製，(如表 3-4~表 3-6、圖 3-9)。

3.3.5 土堤製作

堤岸的施作，堤岸材料使用天然河砂；由於本實驗僅探討溢頂水

流對，堤內堤岸之沖蝕現象，並不考慮堤外邊坡潰壞造成之影響。因此，堤岸施作為堤內部份，而堤岸邊坡坡度採用 1:2 及 1:1.5 之比例施作，邊坡坡度分別為 $\tan^{-1}(0.5)$ 及 $\tan^{-1}(0.67)$ ，土堤分二層施作，每層均以標準夯錘夯實兩下(如照片 3-5)，夯錘錘重 2.5kg、落距 40cm，夯實完成後，再以 1:2 及 1:1.5 比例之壓克力板與鏟刀施作出所預設坡度。

3.3.6 堤岸沖蝕試驗

堤岸沖蝕試驗，在經過水槽率定、土壤含水量、土壤比重試驗、粒徑分析、土壤剪力試驗及土堤製作完成後，即可進行堤岸沖蝕試驗，其步驟為：



1. 於觀測斷面，架設四台錄影照相機及一台雷射測量儀(如照片 3-6)。
2. 開啟四台錄影照相機與雷射測量儀器，使雷射光線投射於代表斷面。
3. 開啟馬達，流量利用馬達變頻調速器，調整固定水槽入流量。
4. 開啟抽水機，防止溢頂水流造成堤內之溢淹。
5. 溢頂時，於堤頂上游及堤底處，放置漂流物，以利觀測上下游流速及方向，直到觀測至堤岸完全破壞。

3.4 試驗條件

經由上述相關試驗，將試驗條件作一說明。

渠道試驗方面：

1. 試驗渠道為長 15m、寬 0.6m 之水槽，坡度為 0.004，取水槽下游水流穩定段 2m，為試驗渠段。
2. 試驗流量為 $7,465\text{cm}^3/\text{s}$ ，試驗渠段於第二開口後經一束縮，其下游為自由溢流。
3. 於堤頂沿程 50cm 與 150cm 處分別設置高 3cm 寬為 20cm 之開口，開口一、二代表斷面分別於堤岸長 50cm、160cm 處，且流量分別為 $571.5\text{cm}^3/\text{s}$ 與 $840.6\text{cm}^3/\text{s}$ ，而兩開口溢頂水流條件為 $Fr < 1, Re < 2000$ 為亞臨界流與層流條件，而第二開口受迴水影響水面線為 M1 curve，代表斷面之決定與開口流量量測將於後說明；開口之溢頂水流在初始時深度較淺而後漸趨於穩定，而本試驗之試驗水深甚小，由試驗觀測數據發現，溢頂時水流變化在短時間內即能穩定，因此本試驗堤頂水深假設為固定。
4. 本試驗堤岸沖刷之起始時間是以溢頂水流到達堤岸底時開始計算。

代表斷面之決定：開口一、二分別考量，受到迴水影響與無迴水影響之溢頂水流，因此在試驗渠道後製作一束縮渠段，使水流迴水於開口二溢出，其代表斷面之決定，於開口一及開口二，位置並不相同。

開口一代表斷面定於開口中央，亦即堤岸 50cm 處，開口二位於下游，溢頂時將受到下游迴水之影響，因此其代表斷面訂於下游開口處，亦即堤岸 160cm 處。

堤頂開口之流量之量測，利用開口的開閉控制，於出流處接一蓄水槽量測開口溢頂流量，其操作方法為：

(1) 將開口 1、2 封閉，量測沒有溢流時出流之流量(Q_{total})。

(2) 將開口 1 打開，量測下游出流量($Q_{total-s1}$)。

(3) 開啟開口 2，量測開啟兩開口時之出流流量($Q_{total-s1-s2}$)

其中 $Q_{s1} = Q_{total} - Q_{total-s1}$ ， $Q_{s2} = Q_{total-s1} - Q_{total-s1-s2}$

相關數據如表 3-8 所示。

土壤性質方面：

1. 土壤之比重經由比重試驗得知為 2.73。
2. 土壤之粒徑分布如圖 3-7 其中 $D_{50} = 1.339\text{mm}$ 。
3. 土壤之含水量為 13% (如表 3-7)。

4. 土壤由直接剪力試驗結果，如圖 3-8 所示，得知土壤剪應力在 16.6~31.1(KN/m²)之間、 $\phi=31.64^\circ$ 。

本試驗土壤相關試驗參考河川輸砂研究，發現多以比重試驗與粒徑分析為主，而試驗土壤夯實方面多以固定夯實條件方式進行，如陳聯光，2000，於「溯源沖刷對河道演變分析之研究」，以固定重量滾輪來回夯實十次為試驗條件，此外由於本實驗欲提供數值模擬使用以及更進一步描述試驗堤岸性質使試驗條件更為完整，因此另外進行土壤直接剪力試驗(參考 Braja M. Das ,“principles of geotechnical engineering”，大地工程原理第五版 黃安斌譯 p:375)以了解試驗土壤剪力強度及摩擦角。



表 3-1 流量率定紀錄表

頻率 (Hz)	流量 (cms)	流量 (cm ³ /s)	試驗一	試驗二	試驗三	試驗四	試驗五	Ave
14	0.007465	7465	94.68	77.91	107.15	68.64	90.69	87.81
15	0.008752	8752	79.21	61.07	89.15	60.02	85.06	74.90
16	0.010575	10575	68.99	59.06	71.71	49.66	60.5	61.98
17	0.011902	11902	56.57	49.44	66.08	44.65	58.63	55.07
18	0.013699	13699	46.28	44.09	56.01	42.16	50.71	47.85
20	0.015625	15625	45.94	40.50	46.00	35.43	41.89	41.95
25	0.020245	20245	42.23	27.73	31.56	29.22	31.15	32.37
30	0.025738	25738	29.17	21.32	24.63	25.29	26.93	25.46
35	0.031873	31873	22.03	20.91	21.48	17.64	20.77	20.56

註：蓄水體積為 0.655m³

表 3-2 實驗用砂粒徑分析紀錄表

篩號	篩孔(mm)	留篩重(g)	過篩重(g)	過篩率(%)
4	4.750	0.00	1019.80	100.00
8	2.360	104.80	915.00	89.72
16	1.180	495.40	419.60	41.15
30	0.600	27.20	392.40	38.48
50	0.300	77.20	315.20	30.91
100	0.150	242.40	72.80	7.14
200	0.075	37.20	35.60	3.49
pan		35.60	0.00	0.00

表 3-3 比重試驗紀錄表

空瓶重: W_c	162.90 (g)
瓶加水: W_{c+w}	658.90(g)
瓶加水加土: W_{c+w+s}	677.93(g)
W_s	30.00(g)
$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{c+w} - W_{c+w+s}}$	2.73

表 3-4 荷重 2 公斤直接剪力試驗表

試驗土重	150.00(g)
垂直載重	76.10(N)
比重	2.73
試驗土體高度	2.80(cm)
試驗直徑	6.38(cm)
最終側向位移	515.00(10^{-2} mm)
載重	2.00(kg)
試驗面積	32.00cm ²
垂直應力	14.33(kN/ m ²)
剪應力	16.20(kN/ m ²)

表 3-5 荷重 5 公斤直接剪力試驗表

試驗土重	150.00(g)
垂直載重	76.10(N)
比重	2.73
試驗土體高度	2.80(cm)
試驗直徑	6.38(cm)
最終側向位移	504.00(10^{-2} mm)
載重	5.00(kg)
試驗面積	32.00cm ²
垂直應力	23.35(kN/ m ²)
剪應力	19.40(kN/ m ²)

表 3-6 荷重 10 公斤直接剪力試驗表

試驗土重	150.00(g)
垂直載重	76.10(N)
比重	2.73
試驗土體高度	2.80(cm)
試驗直徑	6.38(cm)
最終側向位移	574.00(10 ⁻² mm)
載重	10.00(kg)
試驗面積	32.00cm ²
垂直應力	38.39(kN/ m ²)
剪應力	31.00(kN/ m ²)

表 3-7 試驗土壤含水量

Data	取樣土種(g)	烘乾土重(g)	含水量(g)	含水率
1	130	114	16	14%
2	194	174	20	11%
3	146	128	18	14%
4	174	154	20	13%
5	134	118	16	14%
6	158	138	20	14%
7	148	132	16	12%
8	130	116	14	12%
9	148	134	14	10%
10	134	118	16	14%
土壤平均含水量				13%

表 3-8 渠道開口流量紀錄表

蓄水時間(sec)	蓄水時間(sec)	蓄水時間(sec)
27.87	28.34	32.98
29.59	29.22	33.32
29.47	30.88	31.68
27.78	29.58	34.00
27.56	32.07	31.31
平均蓄水時間(sec)		
28.45	30.02	32.66
$Q_{total}(cm^3/s)$	$Q_{s1}(cm^3/s)$	$Q_{s2}(cm^3/s)$
10970.19	571.57	840.60
蓄水體積(m^3)		0.3121



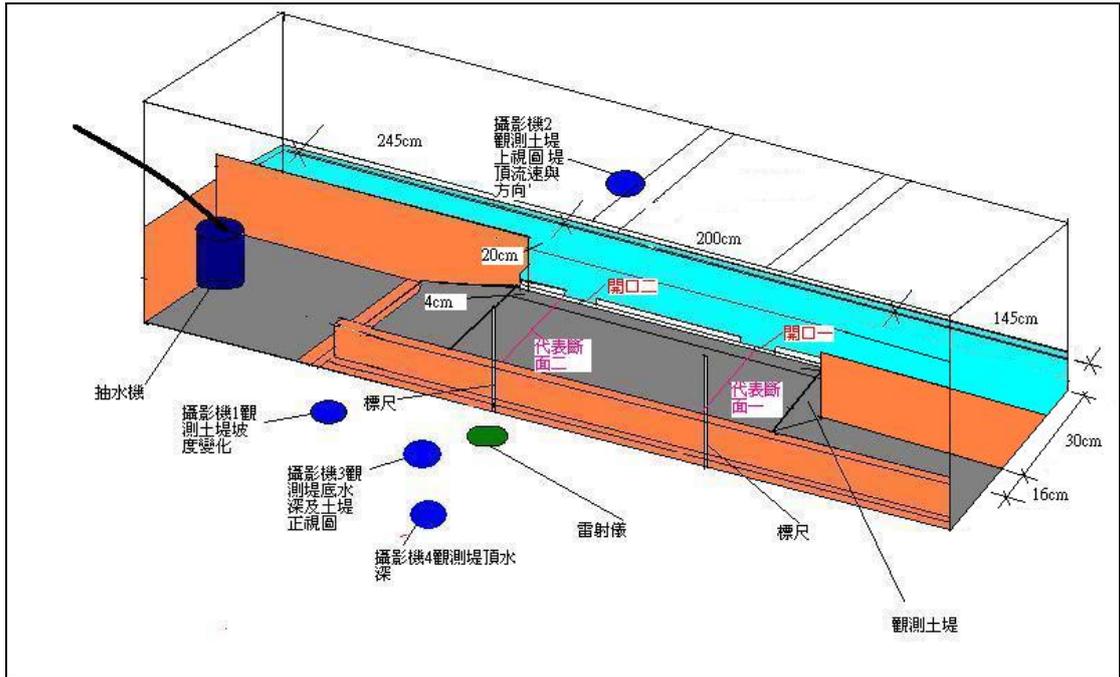


圖 3-1 實驗佈置示意圖

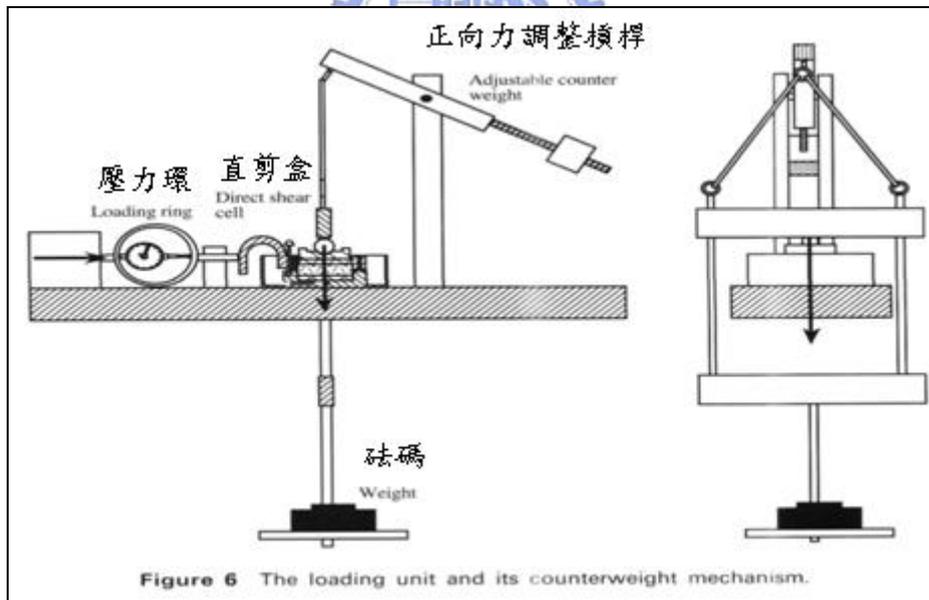


圖 3-2 單位載重與砝碼裝置

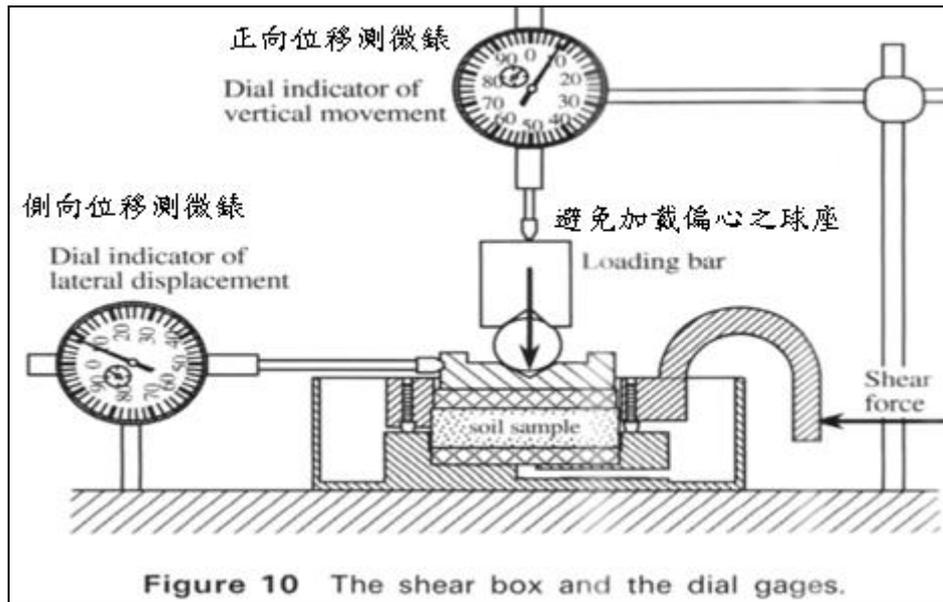


圖 3-3 剪力盒與測微錶

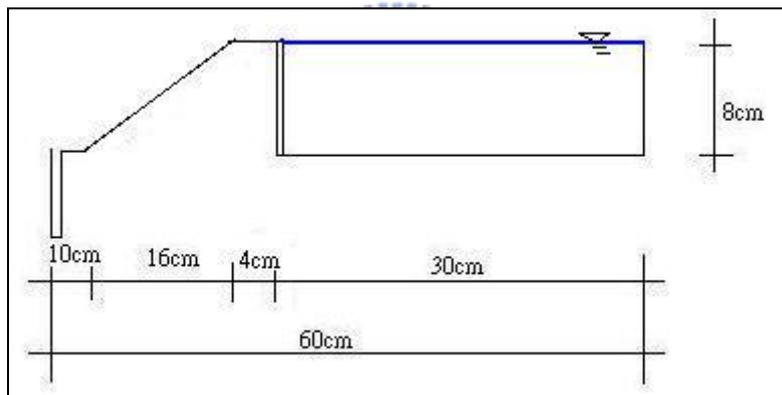


圖 3-4 試驗斷面示意圖

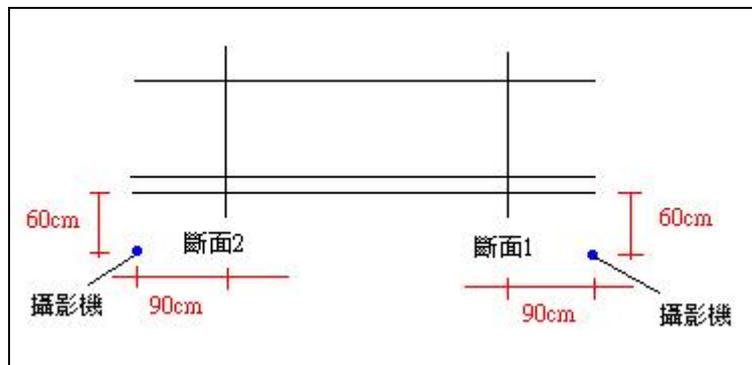


圖 3-5 側視攝影機觀測示意圖

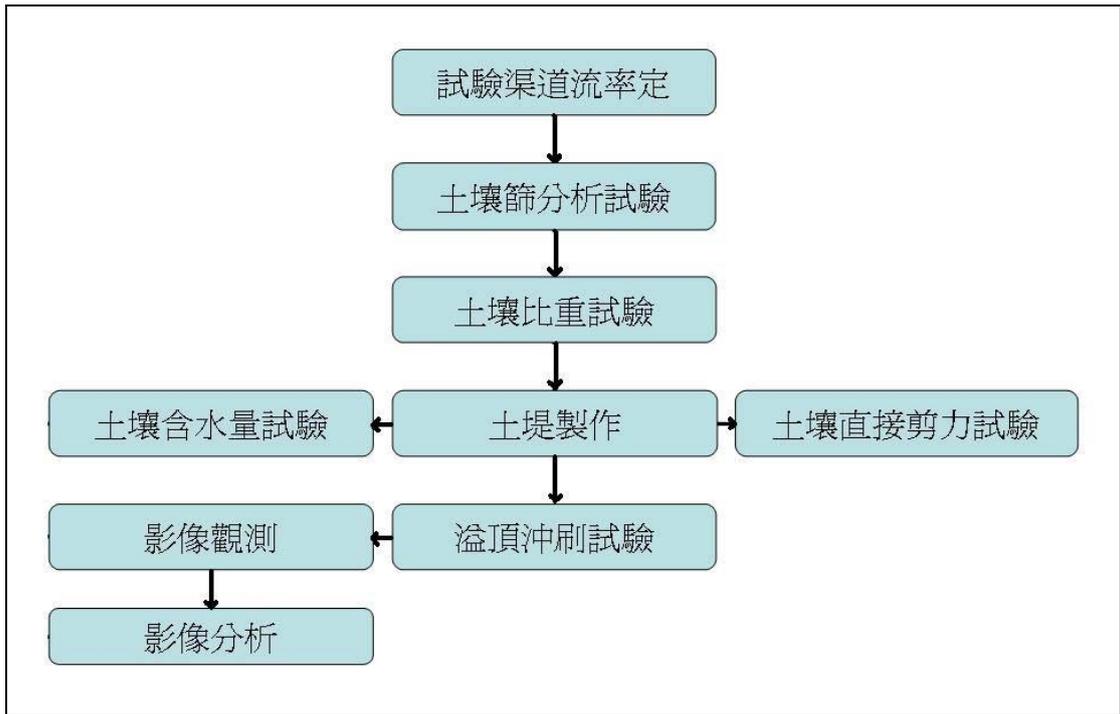


圖 3-6 試驗流程示意圖

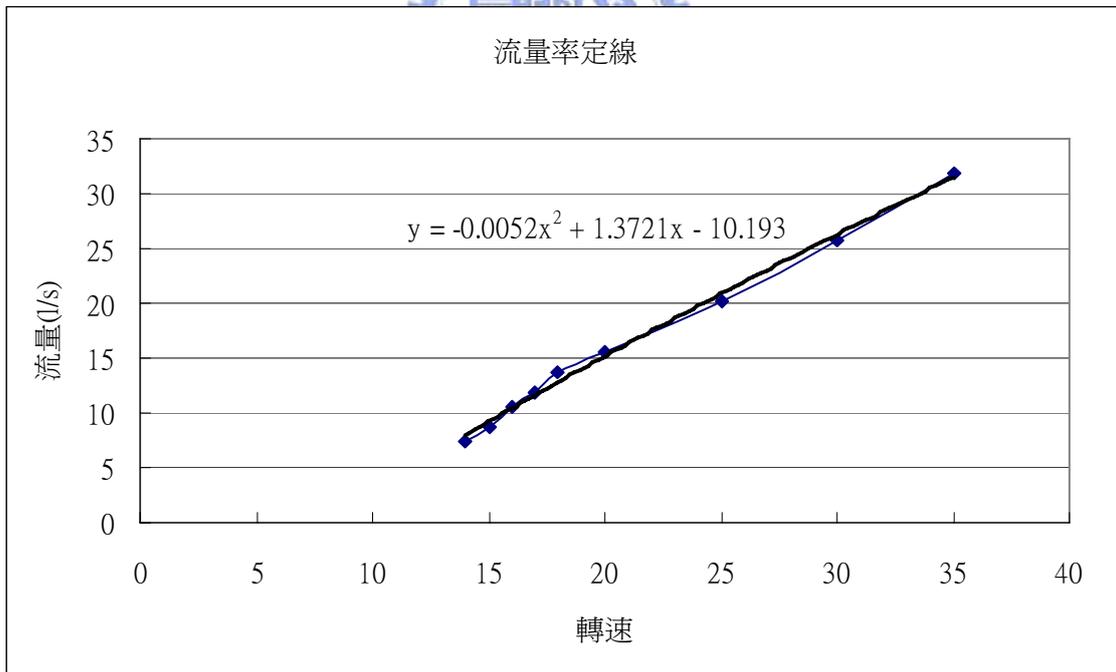


圖 3-7 大型明渠試驗機流量率定曲線

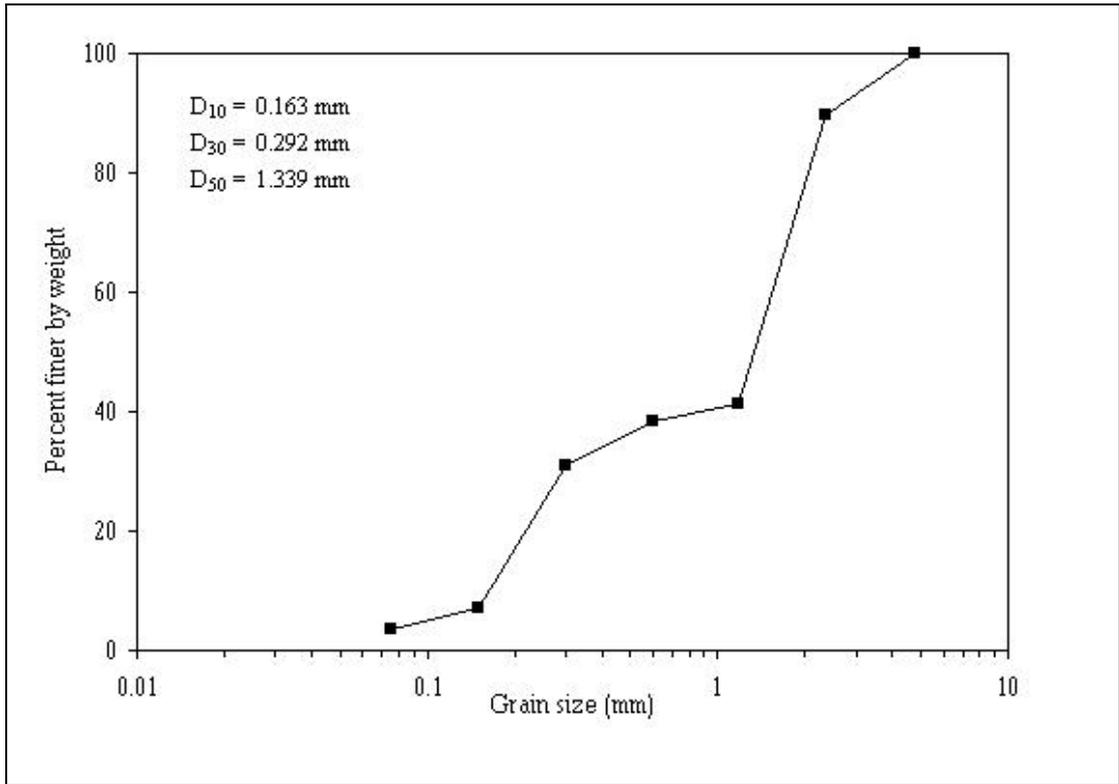


圖 3-8 側向溢頂沖刷堤防之粒徑分部曲線

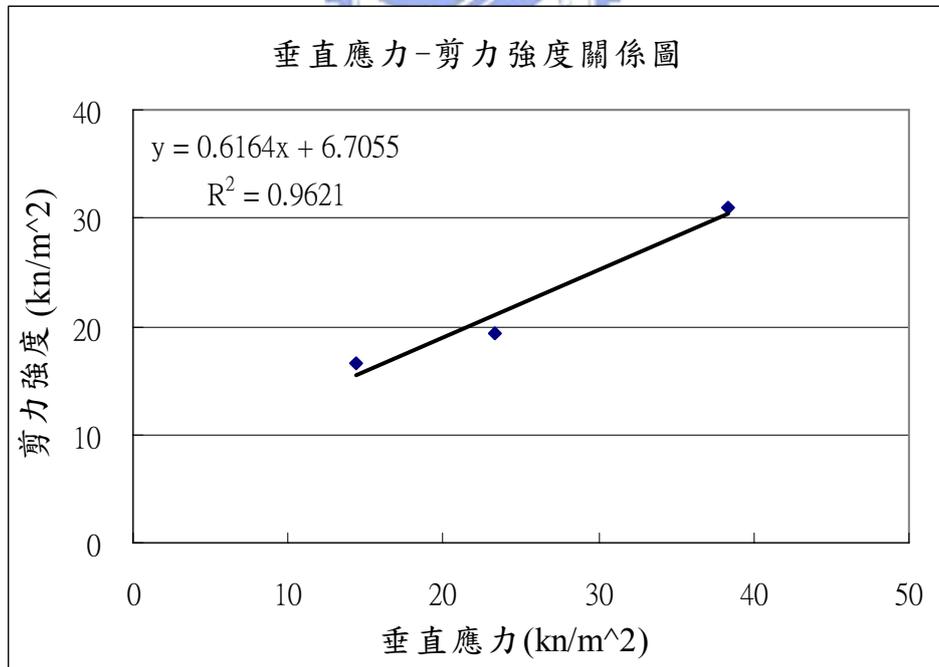


圖 3-9 直接剪力試驗結果圖



照片 3-1 雷射測量儀



照片 3-2 試驗標準節



照片 3-3 細骨材搖篩機



照片 3-4 直接剪力試驗儀



照片 3-5 土堤夯實



照片 3-6 實驗觀測儀器架設



第四章 實驗觀測結果與討論

4.1 影像處理與判別

本研究所獲取之實驗結果以影像表示，因此影像之處理方式甚為重要，實驗中錄製之影像為 1/30 秒之時間間距。利用取像時間特性，取得顯現出試驗過程之影像資料，然而並非所有時刻影像資料都具有代表性，必須經由影像擷取，挑選可分析影像，例如流速求得必須要挑選有漂浮物溢過堤頂之影像，才能進一步得到流速。

影像經挑選後，須經由軟體將影像轉換為圖片，此時可依不同特性及需求，決定每張影像時刻間隔(最小取像時間不小於 1/30 秒)，例如流速所取影像，採用 0.2 秒一張；邊坡變化影像，取 1 秒一張。此外由於判圖方面並無相關軟體作應用處理，因此必須將圖片擷取後經由人工方式判讀，依照各不同觀測項目，擷取適合影像與判圖方法，以獲得實驗結果。

4.2 邊坡沖刷過程

堤岸沖刷過程中，影像資料之取得，主要是利用雷射光線投射於控制斷面上，以攝影機拍攝堤岸沖蝕過程，取得斷面變化之影像，試

驗中所得之邊坡沖刷過程，係以每秒取一張影像，以每秒鐘之變化表示堤岸沖蝕情形。此外為考慮試驗具有不確定性，本研究將於相同堤岸坡度，相同代表斷面固定試驗條件重複進行六次試驗，試驗完成後將六次所得之影像結果取相同時刻做分析並進一步迴歸，繪出一組堤岸變化過程。

本試驗考量兩組不同堤岸坡度變化，及兩處代表斷面，最後繪出四組坡度位置之沖蝕變化過程，其結果如圖 4-1~圖 4-4 所示，經試驗結果發現堤岸坡度變化($\frac{S_i}{S_0}$)並不劇烈，其原因可能在於試驗不考慮主流影響之條件下，使得試驗堤岸減少了主流岸壁沖刷及滲流影響，因而造成坡度變化不明顯之結果。此外試驗中堤岸破壞將起始於堤頂或者堤底處，與(powledge, 1989)所提出混合型堤岸沖刷型態相符。

實驗中邊坡變化之影像是由側方向拍攝，因此土堤變化並非直接觀測之變化情形，應該給予修正。修正之方法，於觀測代表斷面上放置網格板，並攝影觀測代表斷面於影像中位置，作為判圖時堤岸起始位置之依據。

4.3 邊坡破壞沖蝕量的推估

依據邊坡沖刷過程結果，得到四組堤岸沖蝕變化過程迴歸曲線圖

(如圖 4-1~圖 4-4)，將迴歸曲線做積分，可得不同時刻，堤岸單寬沖蝕量，並利用所得之沖蝕量，作為坡度變化、流量變化及能量損失對沖蝕量影響之參考依據，相關數據如表 4-1~表 4-4 所示。

4.4 能量水頭損失對沖蝕量之影響

Elliot(1988)之能量推估模式，解釋能量之消散由溯源過程進行，說明能量損失與沖蝕量有相當之關係。因此，本試驗嘗試了解能量水頭損失與側向溢頂沖蝕關係，利用能量公式求出不同時刻，堤岸頂、堤岸底能量水頭差，得知能量水頭損失後，與單寬沖蝕量對應，了解能量水頭損失之相關趨勢。能量水頭損失結果須結合時間變化之堤頂、堤底水深、流速，以及堤岸寬沖蝕量之結果來做進一步之判別，相關結果如下：

1. 堤頂水深

理論上於相同試驗條件下水深應為相同，經由實驗發現其堤頂水深變化甚小如表 4-4~表 4-8 所示，因此採用水深資料為各開口之平均水深，作為堤頂水深條件。

2. 堤底水深

由試驗觀測得知堤底水深變化甚小，因此，以平均之水深為堤底

水深條件，相關資料如表 4-9~表 4-12 所示。

3. 堤頂流速

本研究欲求堤頂流速，係以代表斷面附近流速平均代表之。因下游開口受到迴水影響，使代表斷面於兩開口位置不同，使溢頂流速所估算範圍將有所差異。其中開口 1 代表斷面於開口中心(50cm 處)，其平均速度之取法為代表斷面處取五公分之範圍(左右各 2.5 公分)之平均流速如表 4-13 所示。開口 2 代表斷面於開口後端(160cm 處)，其流速擷取範圍為往上游五公分之平均流速，其相關計算資料如表 4-14 所示。



4. 堤底流速

堤底流速依不同時刻之沖蝕變化而有所改變，因此利用所測得之相關數據，迴歸出方程式，代表不同時刻堤底流速之變化，如圖 4-5~圖 4-8 所示。

經由上述資料利用能量公式求出能量水頭損失，對照相同時刻之單寬沖刷量，以了解能量水頭損失與沖刷百分率之趨勢關係，所求出試驗堤岸單寬沖刷量對應之能量損失，數據結果如表 4-15~表 4-18，且由試驗發現沖刷現象必須經過一段時間才趨於穩定，因此資料採用沖刷十秒後所得之能量水頭損失與沖刷量，由試驗結果可得知，單寬

沖刷量對應之能量水頭損失，於 1:2 邊坡代表斷面 1 位置其範圍為 6.78~10.97cm，1:2 邊坡代表斷面 2 位置其範圍為 5.21~8.16cm，1:1.5 邊坡代表斷面 1 位置其範圍為 10.87~15.25cm，1:1.5 邊坡代表斷面 2 位置其範圍為 7.35~10.85cm。

能量損失累積百分率與單寬沖蝕量關係如圖 4-9。由圖表可發現能量損失增加，其沖蝕百分比將越大之趨勢，與 Elliot(1988)所提出，能量之消散由溯源過程進行之理論相同。

4.5 坡度對沖蝕量之影響



Elliot(1988)及 Powledge(1989)研究皆提出，不同坡度情況將影響沖蝕量多寡。因此，為瞭解側向溢頂沖刷，於坡度變化下對沖蝕量之影響，實驗改變兩組不同堤岸坡度，在相同實驗條件下，比較堤岸坡度改變對沖蝕量之影響，相關結果如表 4-1~表 4-4。

由相關數據比較可發現，堤岸坡度改變時，沖蝕量差異並不明顯，參考 Chinnarasri(2003)溢頂沖刷試驗研究指出，堤岸坡度變化將影響最大沖刷速率以及沖刷延時，其整個試驗沖蝕過程在 200 秒左右，可發現陡坡最大沖蝕速率將增加，相較之下本研究堤岸坡度變化之影響並無明顯現象，其原因可能為以下兩點。(1)本試驗堤岸破壞過程約在 30 秒內完成，時間短促因此堤岸坡度改變之影響並不明

顯。(2)由堤岸邊坡變化關係圖(如圖 4-10~圖 4-11)，發現較陡之邊坡有較快變緩之趨勢，可能因此造成試驗結果不明顯。

4.6 流量對沖蝕量之影響

根據試驗考量兩開口分別考量迴水與非迴水情況，使得兩開口流量有所差異，根據表 4-1~表 4-4 沖蝕結果，在沖刷現象穩定後可看出較大流量將使沖刷量增加，例如坡度 1:2 代表斷面一與斷面二在十秒時之沖蝕面積分別為 7.65cm^2 與 10.44cm^2 ，坡度 1:1.5 代表斷面一與斷面二在十秒時之沖蝕面積分別為 7.05cm^2 及 8.82cm^2 ，均可看出較大流量將使沖刷量增加之現象，此結論相同於 Elliot(1988)及 Kohl(1988)所提溯源沖刷量關係式，分別如式 1-3 及式 1-4。

此外兩開口除了在流量上有差異外，溢頂角度方面因受迴水影響使第二開口於開口下端，溢頂角度小於第一開口下端(如圖 4-10)，溢頂速度方面則差異不大。

4.7 側向溢頂流速方向推估

側向溢頂流速方向推估，主要說明側向溢流時，溢頂水流將受到主流影響產生速度方向，本研究將利用攝影機架設於渠道上方，並於上游放置漂流物，觀測溢頂水流，流速與角度，其中角度為溢頂水流與主流之夾角，分別以四種組合做分析，探討不同位置，溢頂速度及

方向之趨勢，試驗結果發現，四種組合皆有相同趨勢(如圖 4-12~4-13)。

由所得結果，於同一開口觀測堤頂沿程看出，開口上游端溢頂角度大於下游端，溢頂速度小於下游端，且在實驗開口平行主流之條件下，發現溢頂水流受主流影響下溢頂角度約在 $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之範圍，速度約在 $15\text{cm/s}\sim 30\text{cm/s}$ 之間。

由於本研究探討側向溢頂沖刷，溢頂水流速度及其方向，為側向溢頂沖刷重要之因子，將影響沖刷後之堤岸型態(照片 4-1~照片 4-2)，由照片所示，不同坡度條件下兩代表斷面之沖刷趨勢皆傾向往下游沖刷，可看出側向溢頂沖刷與正向溢頂沖刷型態有所差異。

4.8 無因次關係圖



經因次分析所得無因次關係式，依據試驗所觀測之結果繪出無因次關係圖，如圖 4-14~圖 4-18 所示。由圖可看出單寬沖蝕量將隨時間而增加、坡度越陡其能量水頭損失越大、試驗過程中能量水頭損失隨時間減小、堤岸坡度受到水流沖刷後有越來越緩之趨勢、單寬沖蝕量隨水頭損失增加而越大。

表 4-1 坡度 1:2 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 1

時間(sec)	面積(cm ²)	沖刷面積(cm ²)	沖刷百分率(%)
0	64.00	0	0.00%
2	62.24	1.75	2.74%
4	59.64	4.35	6.81%
10	56.34	7.65	11.96%
14	51.39	12.60	19.70%
17	46.29	17.70	27.67%
20	39.38	24.61	38.46%

表 4-2 坡度 1:2 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 2

時間(sec)	面積(cm ²)	沖刷面積(cm ²)	沖刷百分率(%)
0	64.00	0	0.00%
2	63.07	0.92	1.45%
4	60.62	3.37	5.28%
6	59.74	4.25	6.65%
8	55.59	8.40	13.14%
10	53.55	10.44	16.32%
12	50.56	13.43	20.99%
16	45.82	18.17	28.39%
18	34.77	29.22	45.66%

表 4-3 坡度 1:1.5 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 1

時間(sec)	面積(cm ²)	沖刷面積(cm ²)	沖刷百分率(%)
0	48.00	0	0.00%
3	45.68	2.31	4.82%
6	41.17	6.82	14.23%
10	40.94	7.05	14.70%
14	40.29	7.70	16.05%
16	37.97	10.02	20.88%
24	29.56	18.43	38.40%
26	28.47	19.52	40.68%

表 4-4 坡度 1:1.5 邊坡破壞沖蝕百分比_代表斷面 2

時間(sec)	面積(cm ²)	沖刷面積(cm ²)	沖刷百分率(%)
0	48.00	0	0.00%
3	47.79	0.20	0.43%
6	44.72	3.27	6.82%
9	41.73	6.26	13.05%
10	39.17	8.82	18.39%
15	36.35	11.64	24.25%
16	29.68	18.32	38.16%

表 4-5 坡度 1 : 2 堤頂水深資料表_代表斷面 1

Time (sec)	水深(cm)								
	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10
5	0.25	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.35	0.4
10	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.35	0.4
15		0.3		0.3	0.4	0.3	0.3	0.35	0.4
20				0.3	0.4	0.3	0.3	0.35	0.4
25					0.4	0.3	0.3	0.35	0.4
30					0.4	0.3	0.3		0.4
平均	0.336								

表 4-6 坡度 1 : 2 堤頂水深資料表_代表斷面 2

Time (sec)	水深(cm)						
	case1	case2	case3	case4	case5	case7	case9
5	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.4
10	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4
15	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.35	0.4
20	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5		0.4
25	0.4		0.4	0.4	0.5		
30				0.4	0.5		
平均	0.373						

表 4-7 坡度 1：1.5 堤頂水深資料表_代表斷面 1

Time (sec)	水深(cm)								
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
5	0.35	0.35	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.25
10	0.35	0.35	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.25
15	0.3	0.35	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.25
20	0.3	0.35	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.25
25	0.3	0.35	0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.25
30	0.3		0.3	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3	0.25
平均	0.295								

表 4-8 坡度 1：1.5 堤頂水深資料表_代表斷面 2

Time (sec)	水深(cm)								
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10
5	5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
10	10	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
15	15	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
20	20	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3		0.3	0.3
25	25	0.5	0.4	0.3	0.3			0.3	0.3
30	30							0.3	
平均	0.327								

表 4-9 坡度 1：2 堤底水深資料表_代表斷面 1

Time (sec)	水深(cm)								
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case10
5	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.15	0.2
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.2	0.2	0.2
15	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
20	0.2	0.2	0.2		0.2	0.2	0.15	0.2	0.15
25	0.2	0.2	0.2		0.3	0.2	0.2	0.2	
30	0.2	0.2						0.2	
35	0.2	0.2							
平均	0.202								

表 4-10 坡度 1 : 2 堤底水深資料表_代表斷面 2

Time (sec)	水深(cm)						
	case1	Case3	Case4	Case5	Case7	Case8	case9
5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
20	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
25	0.2	0.2					0.2
30	0.2						
平均	0.2						

表 4-11 坡度 1 : 1.5 堤底水深資料表_代表斷面 1

Time (sec)	水深(cm)							
	case1	case2	case3	case4	case6	case7	case8	case9
5	0.2	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.15	0.2
10	0.2	0.15	0.15	0.2	0.15	0.25	0.15	0.15
15	0.2	0.15	0.15	0.2	0.15	0.2	0.15	0.2
20	0.2	0.2	0.15		0.15	0.15		0.2
25	0.2	0.2	0.15		0.15	0.2		0.2
30	0.2				0.15	0.15		0.2
平均	0.176							

表 4-12 坡度 1 : 1.5 堤底水深資料表_代表斷面 2

Time (sec)	水深(cm)									
	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10
5	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2
10	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2
15	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.2	0.25
20	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.2	0.25
25	0.2	0.25	0.2	0.2				0.25	0.2	0.25
30	0.2	0.25		0.2					0.25	0.25
平均	0.215									

表 4-13 代表斷面 1 堤頂速度資料表(1/2)

坡度 1:2 代表斷面 1 堤頂流速			坡度 1:1.5 代表斷面 1 堤頂流速		
距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)	距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)
14.43	22.78	0.00	1.46	29.27	0.00
7.69	24.36	24.36	10.24	23.17	23.17
14.38	17.19	0.00	1.46	36.59	0.00
11.08	30.77	30.77	10.86	32.10	32.10
15.38	18.46	0.00	3.00	22.50	0.00
4.31	32.31	0.00	0.62	35.38	0.00
12.92	27.69	0.00	6.06	21.21	0.00
4.62	27.69	0.00	6.06	21.21	0.00
15.38	27.69	0.00	15.15	15.15	0.00
18.15	29.23	0.00	7.88	27.27	27.27
11.69	24.62	24.62	7.27	21.21	0.00
14.15	30.77	0.00	7.27	24.24	0.00
3.08	30.77	0.00	3.94	22.73	0.00
15.08	30.77	0.00	12.38	25.40	25.40
8.31	32.31	32.31	17.14	15.87	0.00
14.25	21.25	0.00	0.00	22.22	0.00
16.50	22.50	0.00	2.22	22.22	0.00
3.50	25.00	0.00	7.62	19.05	19.05
4.10	23.08	0.00	13.33	22.22	0.00
16.92	20.51	0.00	14.71	18.39	0.00
10.79	26.32	26.32	15.63	17.24	0.00
12.11	21.05	21.05	16.09	16.09	0.00
2.11	28.95	0.00	14.71	20.69	0.00
10.27	18.92	18.92	14.94	21.84	0.00
10.00	24.32	24.32	6.90	19.54	0.00
7.03	20.27	0.00	4.83	10.34	0.00
8.65	24.32	24.32	6.44	21.84	0.00

註：0 為不採用之流速

表 4-13 代表斷面 1 堤頂速度資料表(2/2)

坡度 1:2 代表斷面 1 堤頂流速			坡度 1:1.5 代表斷面 1 堤頂流速		
距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)	距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)
17.03	18.92	0.00	11.49	22.99	22.99
1.75	23.75	0.00	7.36	24.14	0.00
18.75	20.00	0.00	4.44	22.22	0.00
1.50	22.50	0.00	18.89	22.22	0.00
17.75	17.50	0.00	11.39	19.44	19.44
12.50	23.75	0.00	11.94	36.11	36.11
7.65	24.69	24.69	7.50	25.00	0.00
14.81	23.46	0.00	14.36	29.49	0.00
14.32	19.75	0.00	8.72	20.51	20.51
5.25	20.00	0.00	11.79	24.36	24.36
17.75	20.00	0.00	4.10	25.64	0.00
16.25	13.75	0.00			
11.51	19.18	19.18			
10.14	21.92	21.92			
6.03	24.66	0.00			
10.50	26.25	26.25			
17.81	28.77	0.00			
5.14	25.71	0.00			
0.00	22.86	0.00			
10.29	22.86	22.86			
10.40	24.00	24.00			
9.60	21.33	21.33			
5.87	26.67	0.00			
12.70	25.68	0.00			
7.47	21.33	0.00			
平均流速		24.20	平均流速		25.04

註：0 為不採用之流速

表 4-14 代表斷面 2 堤頂速度資料表(1/3)

坡度 1:2 代表斷面 2 堤頂流速			坡度 1:1.5 代表斷面 2 堤頂流速		
距開口尾 端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)	距開口尾 端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)
2.31	23.08	23.08	3.45	36.21	36.21
4.36	24.36	24.36	5.52	43.10	0.00
5.38	24.36	0.00	10.34	37.93	0.00
8.68	26.32	0.00	4.14	37.93	37.93
14.74	18.42	0.00	5.52	32.76	0.00
11.84	27.63	0.00	3.45	31.03	31.03
4.44	31.94	31.94	12.12	30.30	0.00
4.44	26.39	26.39	13.94	27.27	0.00
10.56	26.39	0.00	12.12	21.21	0.00
9.71	30.00	0.00	12.50	34.38	0.00
11.83	25.35	0.00	8.13	28.13	0.00
17.18	26.76	0.00	4.29	23.81	23.81
4.32	25.68	25.68	11.71	21.95	0.00
13.89	27.78	0.00	11.22	29.27	0.00
0.83	29.17	29.17	14.63	29.27	0.00
10.00	27.27	0.00	10.95	35.71	0.00
6.06	34.85	0.00	2.86	30.95	30.95
10.91	25.76	0.00	14.76	29.76	0.00
3.33	27.27	27.27	15.24	20.24	0.00
11.52	24.24	0.00	12.38	30.95	0.00
0.00	27.63	27.63	8.57	27.38	0.00
0.00	30.30	30.30	3.81	30.95	30.95
4.24	33.33	33.33	14.05	23.81	0.00
5.45	36.36	0.00	12.86	23.81	0.00
13.55	25.81	0.00	11.90	30.95	0.00
10.00	33.87	0.00	14.51	24.18	0.00
1.05	36.84	36.84	8.79	24.18	0.00

註：0 為不採用之流速

表 4-14 代表斷面 2 堤頂速度資料表(2/3)

坡度 1:2 代表斷面 2 堤頂流速			坡度 1:1.5 代表斷面 2 堤頂流速		
距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)	距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)
8.05	25.97	0.00	14.07	21.98	0.00
3.90	27.27	27.27	10.11	24.18	0.00
4.16	23.38	23.38	7.91	35.16	0.00
1.82	24.68	24.68	8.35	17.58	0.00
6.23	19.48	0.00	9.01	20.88	0.00
4.16	24.68	24.68	17.58	20.88	0.00
11.05	34.21	0.00	10.99	29.67	0.00
3.24	27.03	27.03	9.53	18.60	0.00
7.03	27.03	0.00	9.30	20.93	0.00
3.84	21.92	21.92	8.37	25.58	0.00
9.86	27.40	0.00	6.51	23.26	0.00
4.38	30.14	30.14	7.67	27.91	0.00
15.34	32.88	0.00	16.67	25.00	0.00
7.40	35.62	0.00	7.86	33.33	0.00
4.93	26.03	26.03	6.30	28.26	0.00
8.57	25.71	0.00	11.56	23.33	0.00
11.23	27.40	0.00	13.33	22.22	0.00
16.57	27.14	0.00	10.22	23.33	0.00
2.82	33.80	33.80	15.56	22.22	0.00
6.76	28.17	0.00	9.78	23.33	0.00
5.92	29.58	0.00	5.37	24.39	0.00
4.79	32.39	32.39	6.34	23.17	0.00
2.19	27.40	27.40	7.32	24.39	0.00
10.96	27.40	0.00	7.32	34.15	0.00
6.93	32.00	0.00	13.90	24.39	0.00
9.07	29.33	0.00	11.22	26.83	0.00
6.67	26.67	0.00	10.24	29.27	0.00

註：0 為不採用之流速

表 4-14 代表斷面 2 堤頂速度資料表(3/3)

坡度 1:2 代表斷面 2 堤頂流速			坡度 1:1.5 代表斷面 2 堤頂流速		
距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)	距開口尾端之距離 (cm)	流速 (cm/s)	採用流速 (cm/s)
5.92	29.58	0.00	5.37	24.39	0.00
4.79	32.39	32.39	6.34	23.17	0.00
2.19	27.40	27.40	7.32	24.39	0.00
10.96	27.40	0.00	7.32	34.15	0.00
6.93	32.00	0.00	13.90	24.39	0.00
9.07	29.33	0.00	11.22	26.83	0.00
6.67	26.67	0.00	10.24	29.27	0.00
			6.34	19.51	0.00
			3.86	31.33	31.33
			13.49	36.14	0.00
			8.67	21.69	0.00
			8.92	31.33	0.00
			17.83	19.28	0.00
			4.29	24.49	24.49
			4.90	20.41	20.41
			8.98	30.61	0.00
			2.45	22.45	22.45
			5.71	30.61	0.00
			4.49	33.67	33.67
平均流速		27.94	平均流速		29.38

註：0 為不採用之流速

表 4-15 坡度 1:2 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 1 (1/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
1	0.34	0.20	24.20		8.43				
2	0.34	0.20	24.20		8.43	16.87	1.75	3%	9.62
3	0.34	0.20	24.20	2.82	8.43	25.29			
4	0.34	0.20	24.20	5.26	8.42	33.71	4.36	7%	7.74
5	0.34	0.20	24.20	7.14	8.41	42.12			
6	0.34	0.20	24.20	8.69	8.39	50.52			
7	0.34	0.20	24.20	9.99	8.38	58.90			
8	0.34	0.20	24.20	11.12	8.37	67.27			
9	0.34	0.20	24.20	12.12	8.36	75.63			
10	0.34	0.20	24.20	13.01	8.35	83.97	7.66	12%	10.96
11	0.34	0.20	24.20	13.81	8.34	92.31			
12	0.34	0.20	24.20	14.55	8.32	100.63			
13	0.34	0.20	24.20	15.23	8.31	108.95			
14	0.34	0.20	24.20	15.85	8.30	117.25	12.61	20%	9.30
15	0.34	0.20	24.20	16.44	8.30	125.55			
16	0.34	0.20	24.20	16.98	8.29	133.83			
17	0.34	0.20	24.20	17.49	8.28	142.11	17.71	28%	8.03
18	0.34	0.20	24.20	17.98	8.27	150.38			
19	0.34	0.20	24.20	18.44	8.26	158.64			
20	0.34	0.20	24.20	18.87	8.25	166.89	24.62	38%	6.78
21	0.34	0.20	24.20	19.28	8.24	175.13			
22	0.34	0.20	24.20	19.68	8.24	183.37			
23	0.34	0.20	24.20	20.05	8.23	191.60			
24	0.34	0.20	24.20	20.41	8.22	199.82			
25	0.34	0.20	24.20	20.76	8.21	208.03			
26	0.34	0.20	24.20	21.09	8.21	216.23			
27	0.34	0.20	24.20	21.41	8.20	224.43			
28	0.34	0.20	24.20	21.72	8.19	232.63			

表 4-15 坡度 1:2 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 1 (2/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
29	0.34	0.20	24.20	22.01	8.19	240.81			
30	0.34	0.20	24.20	22.30	8.18	248.99			
31	0.34	0.20	24.20	22.58	8.17	257.16			
32	0.34	0.20	24.20	22.84	8.17	265.33			
33	0.34	0.20	24.20	23.10	8.16	273.49			
34	0.34	0.20	24.20	23.36	8.15	281.65			
30	0.34	0.20	24.20	22.30	8.18	248.99			
迴歸式					$y=0.00001x^2-0.0002x-0.04$				

註：y 為沖刷百分率，x 為累積能量損失



表 4-16 坡度 1:2 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 2 (1/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
1	0.37	0.20	27.94		8.57	8.57			
2	0.37	0.20	27.94	0.72	8.57	17.14	0.9269	1.45%	18.49
3	0.37	0.20	27.94	4.27	8.56	25.70			
4	0.37	0.20	27.94	6.78	8.55	34.25	3.3792	5.28%	10.13
5	0.37	0.20	27.94	8.73	8.53	42.78			
6	0.37	0.20	27.94	10.33	8.52	51.30	4.2549	6.65%	12.06
7	0.37	0.20	27.94	11.68	8.50	59.80			
8	0.37	0.20	27.94	12.84	8.49	68.29	8.4064	13.14%	8.12
9	0.37	0.20	27.94	13.87	8.47	76.76			
10	0.37	0.20	27.94	14.79	8.46	85.22	10.4416	16.32%	8.16
11	0.37	0.20	27.94	15.63	8.45	93.67			
12	0.37	0.20	27.94	16.39	8.43	102.10	13.4304	20.99%	7.60
13	0.37	0.20	27.94	17.09	8.42	110.52			
14	0.37	0.20	27.94	17.74	8.41	118.93			
15	0.37	0.20	27.94	18.34	8.40	127.33			
16	0.37	0.20	27.94	18.90	8.39	135.72	18.1701	28.39%	7.47
17	0.37	0.20	27.94	19.43	8.38	144.10			
18	0.37	0.20	27.94	19.93	8.37	152.47	29.2213	45.66%	5.21
19	0.37	0.20	27.94	20.41	8.36	160.83			
20	0.37	0.20	27.94	20.85	8.35	169.18			
21	0.37	0.20	27.94	21.28	8.34	177.52			
22	0.37	0.20	27.94	21.69	8.33	185.85			
23	0.37	0.20	27.94	22.08	8.32	194.17			
24	0.37	0.20	27.94	22.45	8.31	202.48			
25	0.37	0.20	27.94	22.81	8.31	210.79			
26	0.37	0.20	27.94	23.15	8.30	219.09			
27	0.37	0.20	27.94	23.48	8.29	227.38			
28	0.37	0.20	27.94	23.80	8.28	235.66			

表 4-16 坡度 1:2 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 2 (2/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
29	0.37	0.20	27.94	24.10	8.27	243.93			
30	0.37	0.20	27.94	24.40	8.27	252.20			
31	0.37	0.20	27.94	24.69	8.26	260.46			
32	0.37	0.20	27.94	24.96	8.25	268.71			
33	0.37	0.20	27.94	25.23	8.25	276.96			
34	0.37	0.20	27.94	25.49	8.24	285.20			
30	0.37	0.20	27.94	24.40	8.27	252.20			
迴歸式					$y=0.00001x^2-0.0004x+0.0132$				

註：y 為沖刷百分率，x 為累積能量損失



表 4-17 坡度 1:1.5 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 1 (1/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
1	0.30	0.18	25.04		8.44	8.44			
2	0.30	0.18	25.04		8.44	16.88			
3	0.30	0.18	25.04	2.55	8.44	25.31	2.3124	5%	10.95
4	0.30	0.18	25.04	4.77	8.43	33.74			
5	0.30	0.18	25.04	6.50	8.42	42.16			
6	0.30	0.18	25.04	7.91	8.41	50.56	6.8282	14%	7.41
7	0.30	0.18	25.04	9.11	8.40	58.96			
8	0.30	0.18	25.04	10.14	8.39	67.35			
9	0.30	0.18	25.04	11.05	8.38	75.72			
10	0.30	0.18	25.04	11.87	8.37	84.09	7.0538	15%	11.92
11	0.30	0.18	25.04	12.60	8.36	92.45			
12	0.30	0.18	25.04	13.28	8.35	100.80			
13	0.30	0.18	25.04	13.90	8.34	109.14			
14	0.30	0.18	25.04	14.47	8.33	117.47	7.7028	16%	15.25
15	0.30	0.18	25.04	15.01	8.32	125.79			
16	0.30	0.18	25.04	15.50	8.32	134.11	10.0238	21%	13.37
17	0.30	0.18	25.04	15.97	8.31	142.42			
18	0.30	0.18	25.04	16.42	8.30	150.72			
19	0.30	0.18	25.04	16.84	8.29	159.01			
20	0.30	0.18	25.04	17.23	8.29	167.30			
21	0.30	0.18	25.04	17.61	8.28	175.58			
22	0.30	0.18	25.04	17.97	8.27	183.86			
23	0.30	0.18	25.04	18.31	8.27	192.12			
24	0.30	0.18	25.04	18.64	8.26	200.39	18.432	38%	10.87
25	0.30	0.18	25.04	18.96	8.26	208.64			
26	0.30	0.18	25.04	19.26	8.25	216.89	19.5276	41%	11.11
27	0.30	0.18	25.04	19.56	8.24	225.13			
28	0.30	0.18	25.04	19.84	8.24	233.37			

表 4-17 坡度 1:1.5 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 1 (2/2)

時間 (sec)	堤頂水深(cm)	堤底水深(cm)	堤頂流速(cm/s)	堤底流速(cm/s)	能量水頭損失 (cm)	累積能量水頭損失 (cm)	單寬沖蝕量 (cm ²)	沖刷百分率(%)	單寬沖蝕量之能量水頭損失 (cm)
29	0.30	0.18	25.04	20.11	8.23	241.61			
30	0.30	0.18	25.04	20.37	8.23	249.83			
31	0.30	0.18	25.04	20.62	8.22	258.05			
32	0.30	0.18	25.04	20.87	8.22	266.27			
33	0.30	0.18	25.04	21.11	8.21	274.48			
34	0.30	0.18	25.04	21.34	8.21	282.69			
迴歸式					$y=0.000006x^2-0.0004x+0.0651$				

註：y 為沖刷百分率，x 為累積能量損失



表 4-18 坡度 1:1.5 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 2 (1/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
1	0.33	0.22	29.39		8.55	8.55			
2	0.33	0.22	29.39	15.17	8.43	16.99			
3	0.33	0.22	29.39	15.39	8.43	25.42			
4	0.33	0.22	29.39	15.62	8.43	33.85			
5	0.33	0.22	29.39	15.85	8.42	42.27			
6	0.33	0.22	29.39	16.08	8.42	50.69	3.27	6.82%	15.48
7	0.33	0.22	29.39	16.32	8.42	59.11			
8	0.33	0.22	29.39	16.56	8.41	67.52			
9	0.33	0.22	29.39	16.80	8.41	75.93	6.26	13.05%	12.12
10	0.33	0.22	29.39	17.05	8.40	84.33	8.83	18.39%	9.55
11	0.33	0.22	29.39	17.30	8.40	92.73			
12	0.33	0.22	29.39	17.55	8.40	101.13			
13	0.33	0.22	29.39	17.81	8.39	109.52			
14	0.33	0.22	29.39	18.07	8.39	117.90			
15	0.33	0.22	29.39	18.34	8.38	126.29	11.64	24.25%	10.85
16	0.33	0.22	29.39	18.61	8.38	134.66	18.32	38.16%	7.35
17	0.33	0.22	29.39	18.88	8.37	143.03			
18	0.33	0.22	29.39	19.16	8.37	151.40			
19	0.33	0.22	29.39	19.44	8.36	159.76			
20	0.33	0.22	29.39	19.73	8.35	168.11			
21	0.33	0.22	29.39	20.02	8.35	176.46			
22	0.33	0.22	29.39	20.31	8.34	184.80			
23	0.33	0.22	29.39	20.61	8.34	193.14			
24	0.33	0.22	29.39	20.91	8.33	201.46			
25	0.33	0.22	29.39	21.22	8.32	209.79			
26	0.33	0.22	29.39	21.53	8.32	218.10			
27	0.33	0.22	29.39	21.85	8.31	226.41			
28	0.33	0.22	29.39	22.17	8.30	234.71			

表 4-18 坡度 1:1.5 能量損失與沖蝕率數據表_代表斷面 2 (2/2)

時間 (sec)	堤頂水 深(cm)	堤底水 深(cm)	堤頂流 速(cm/s)	堤底流 速(cm/s)	能量水 頭損失 (cm)	累積能 量水頭 損失 (cm)	單寬沖 蝕量 (cm ²)	沖刷百 分率(%)	單寬沖蝕 量之能量 水頭損失 (cm)
29	0.33	0.22	29.39	22.50	8.29	243.01			
30	0.33	0.22	29.39	22.83	8.29	251.29			
31	0.33	0.22	29.39	23.16	8.28	259.57			
32	0.33	0.22	29.39	23.50	8.27	267.84			
33	0.33	0.22	29.39	23.85	8.26	276.11			
34	0.33	0.22	29.39	24.20	8.25	284.36			
迴歸式					$y=0.000008x^2+0.0018x-0.0432$				

註：y 為沖刷百分率，x 為累積能量損失



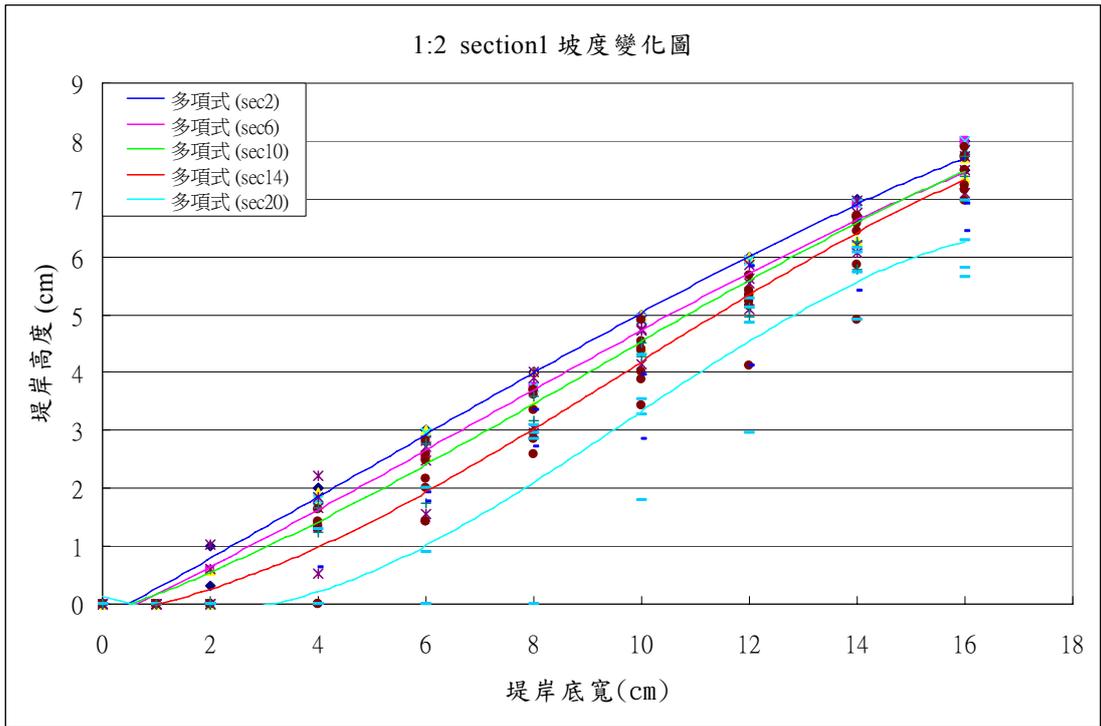


圖 4-1 1:2 section1 坡度變化過程示意圖

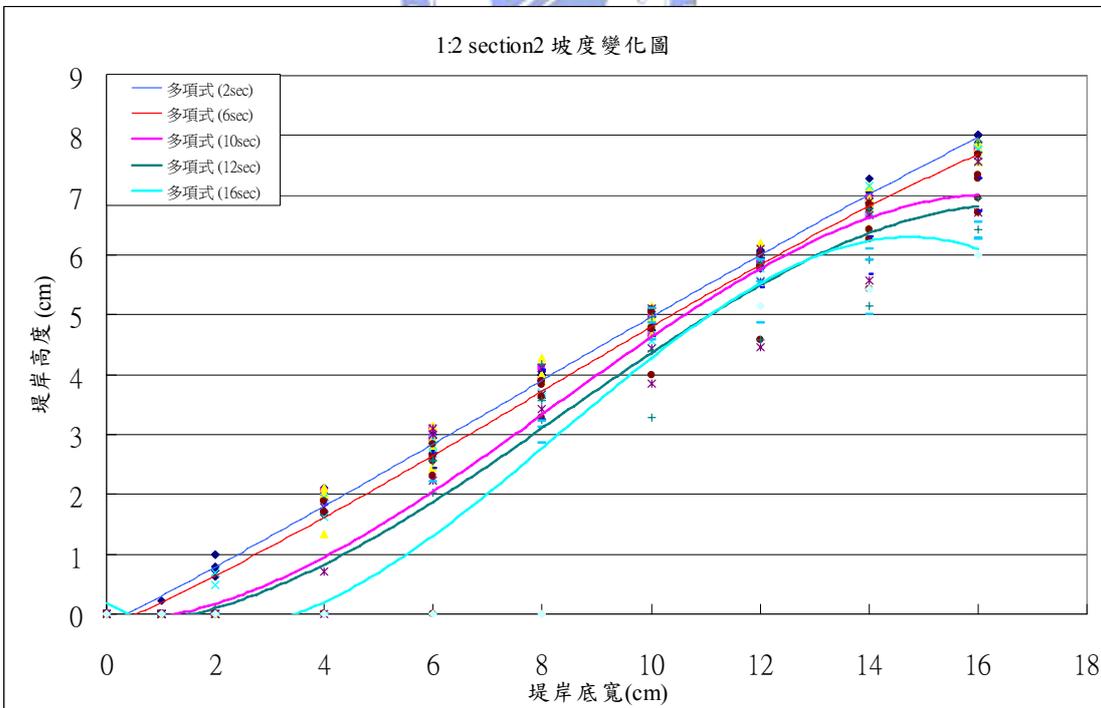


圖 4-2 1:2 section2 坡度變化過程示意圖

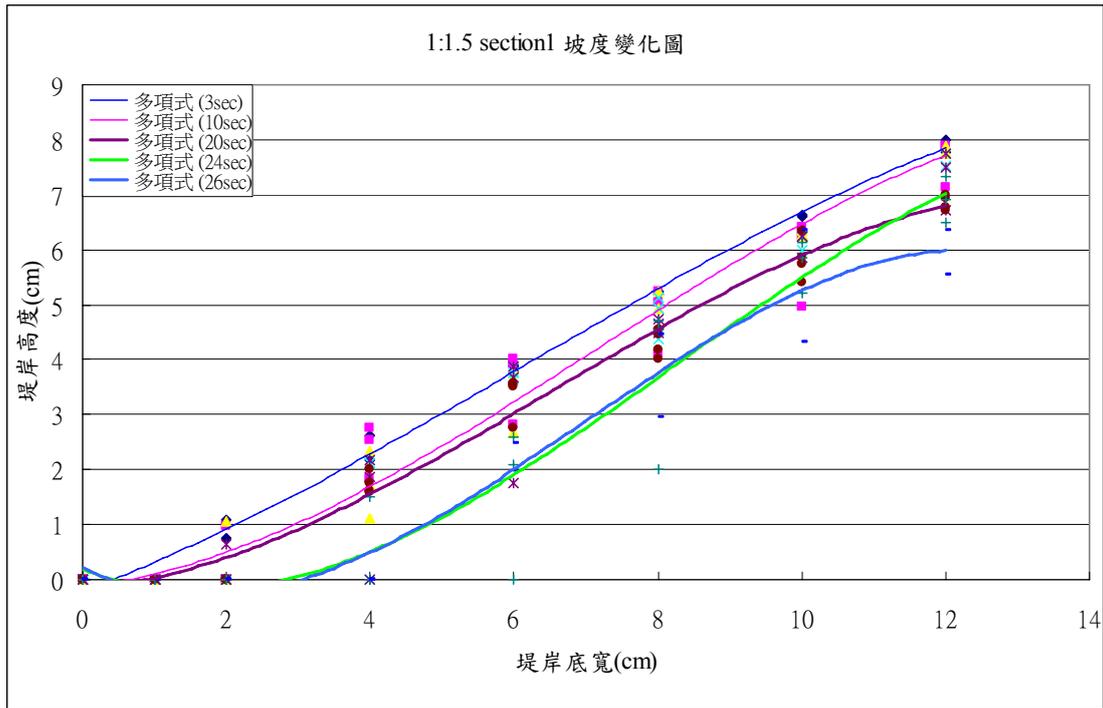


圖 4-3 1:1.5 section1 坡度變化過程示意圖

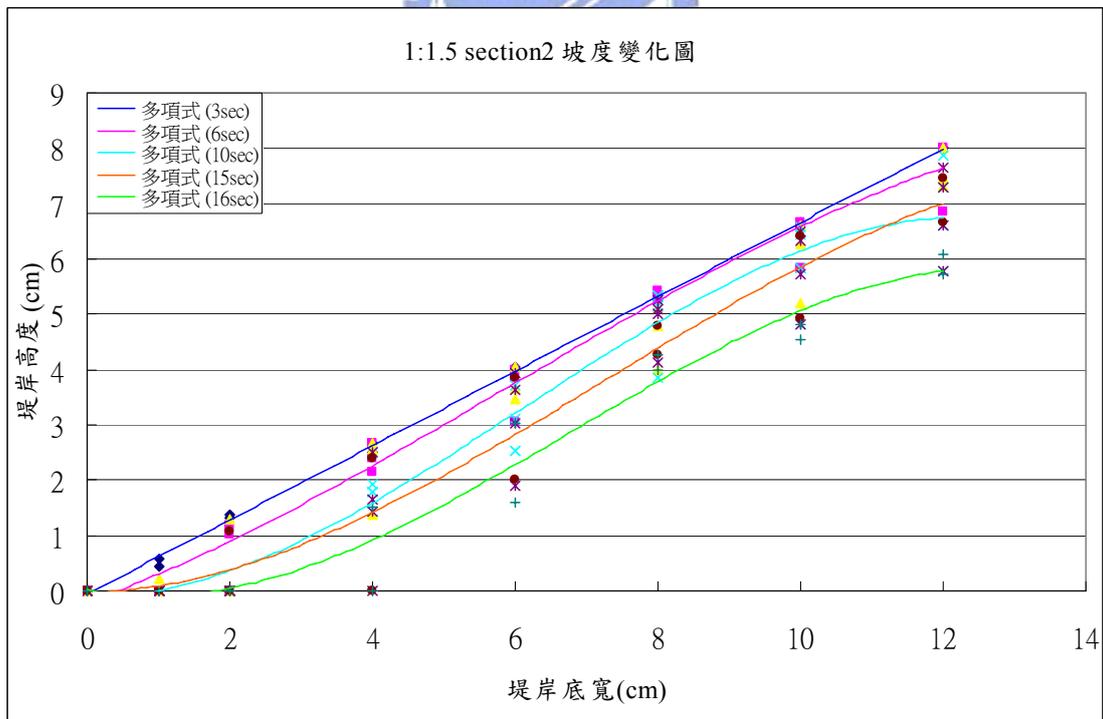


圖 4-4 1:1.5 section2 坡度變化過程示意圖

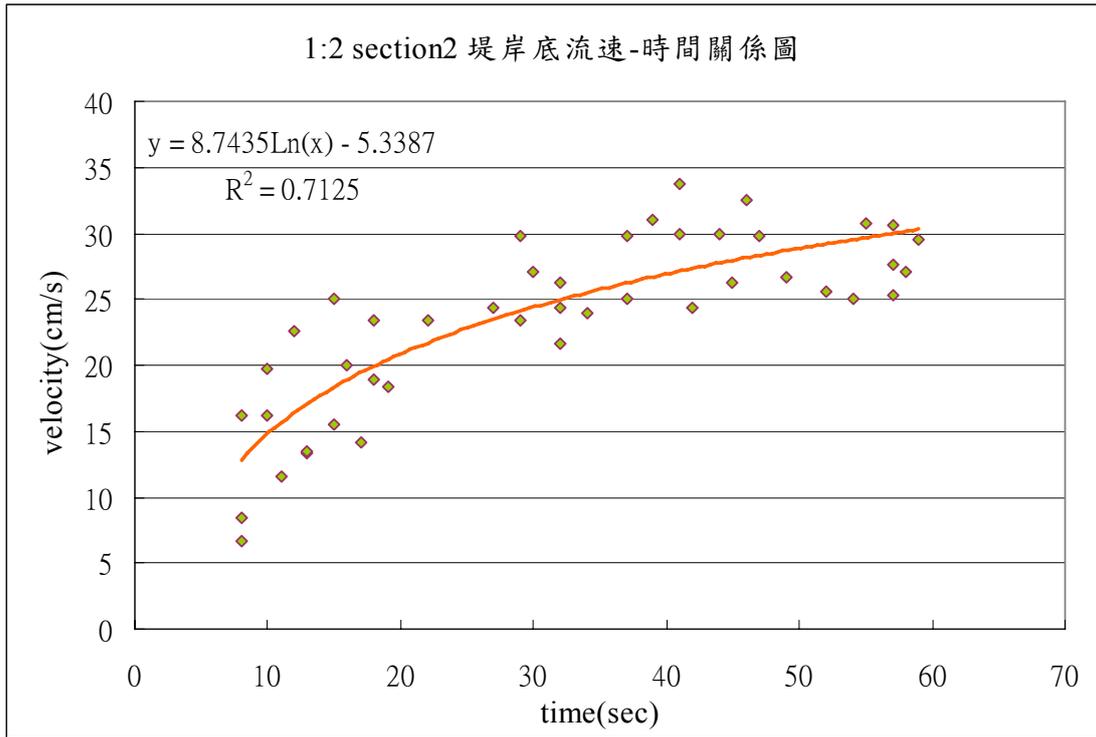


圖 4-5 1:2 section1 堤岸底流速-時間關係圖

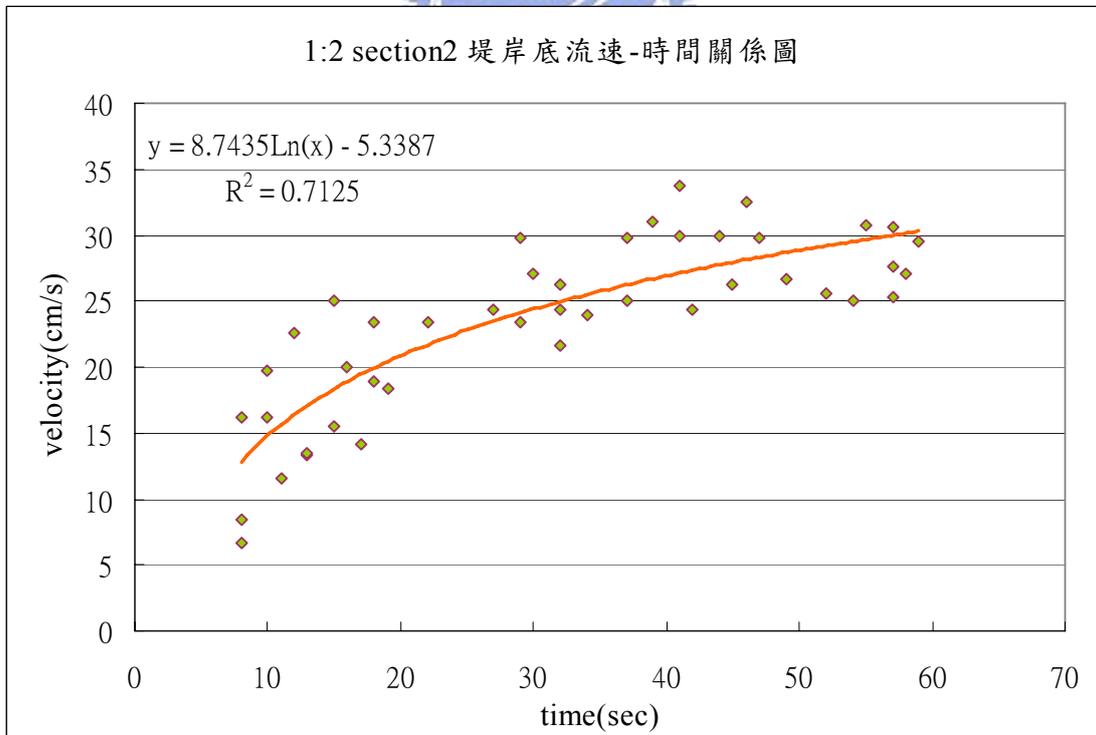


圖 4-6 1:2 section2 堤岸底流速-時間關係圖

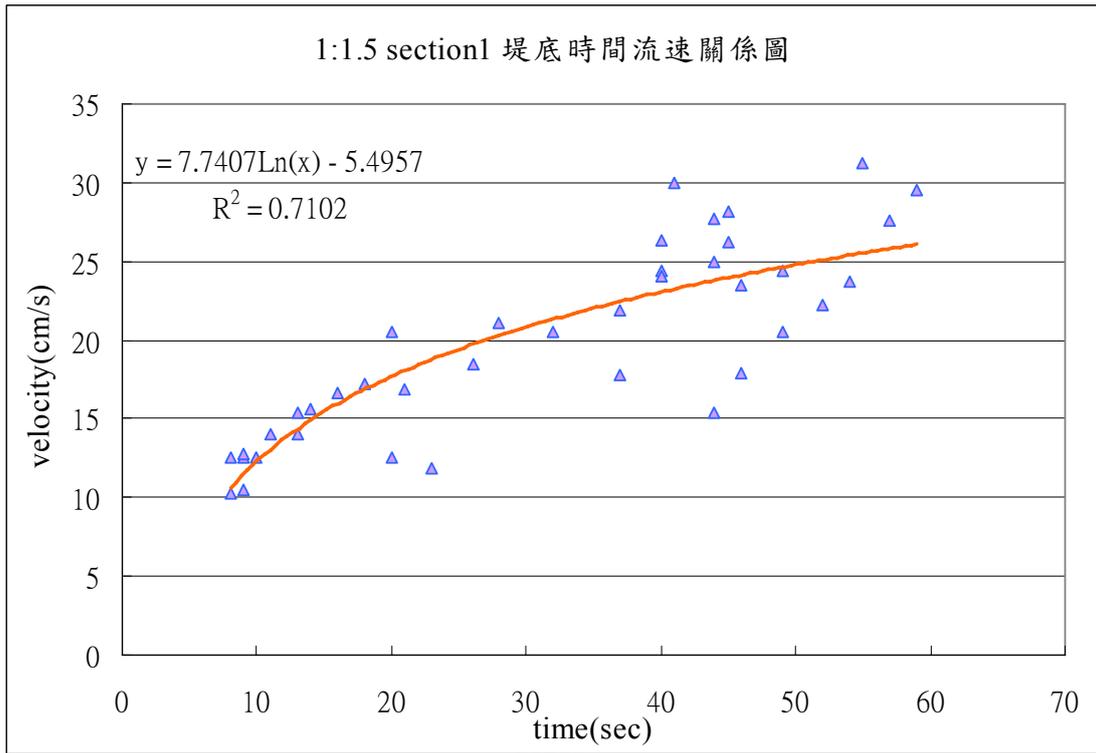


圖 4-7 1:1.5 section1 堤岸底流速-時間關係圖

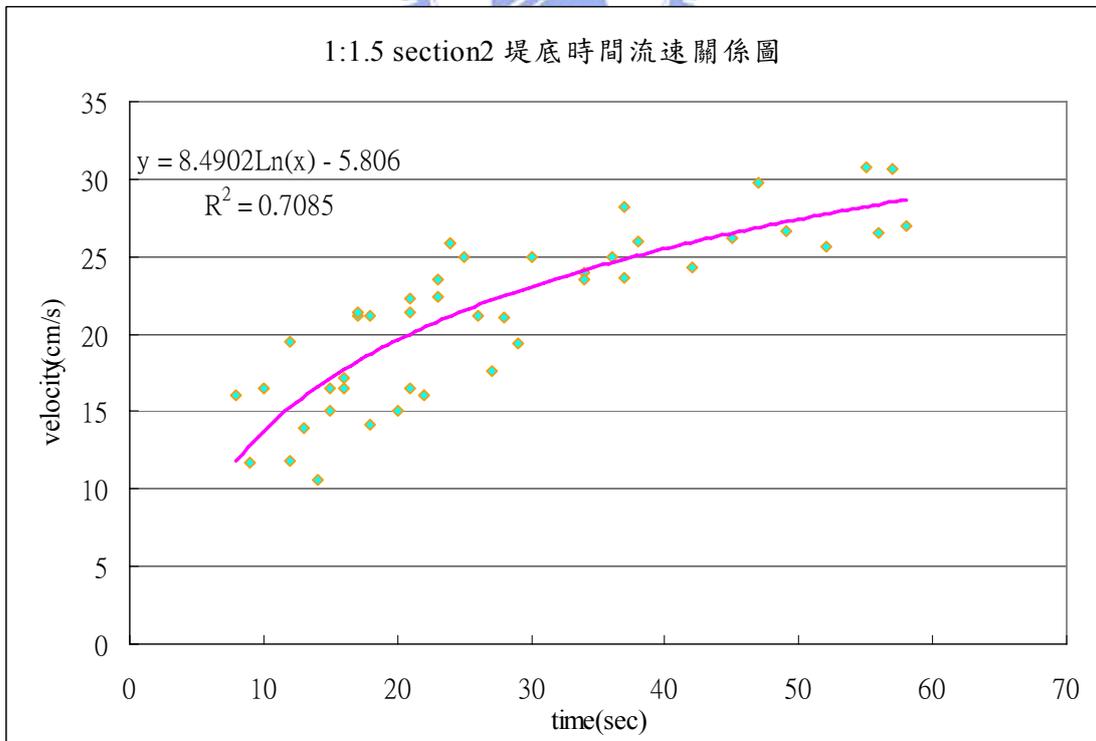


圖 4-8 1:1.5 section2 堤岸底流速-時間關係圖

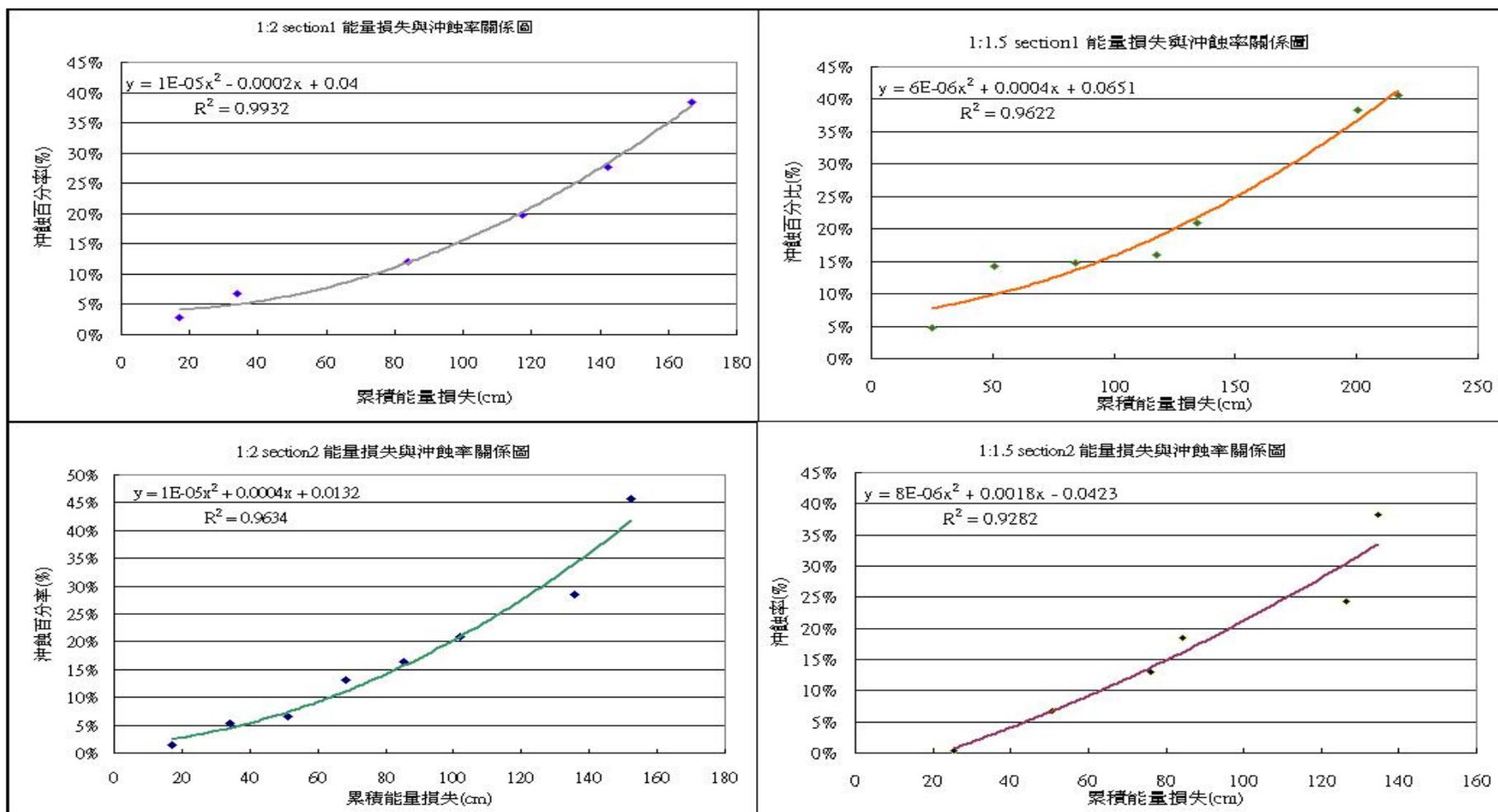


圖 4-9 各坡度斷面沖蝕百分率-能量損失趨勢圖

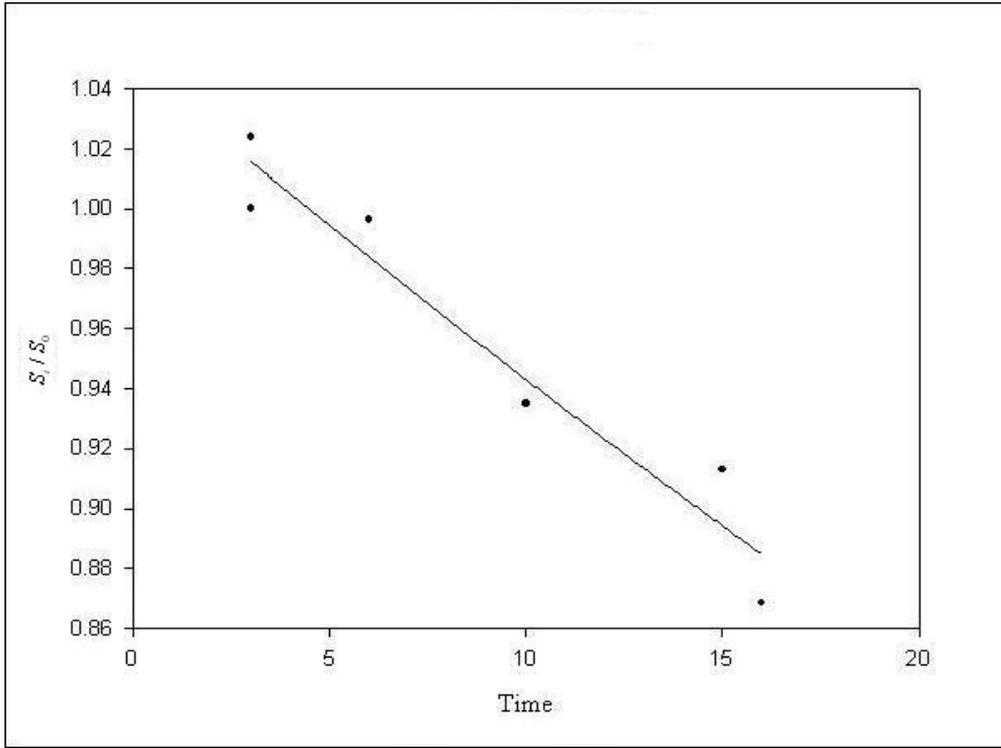


圖 4-10 坡度 1:1.5 坡度變化-時間關係圖

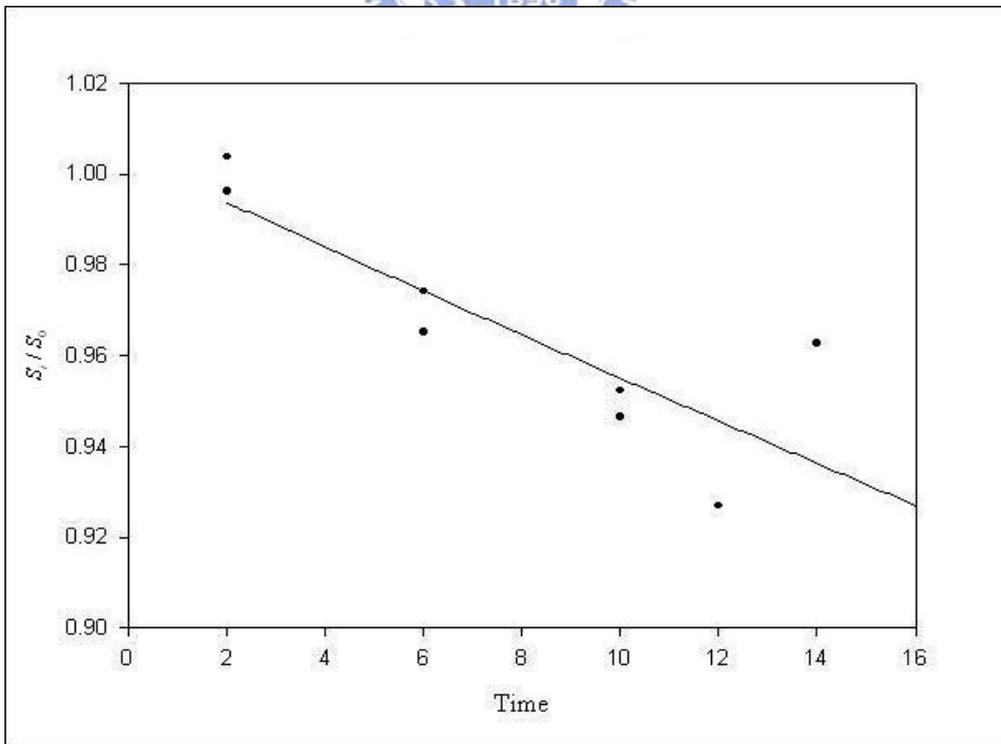


圖 4-11 坡度 1:2 坡度變化-時間關係圖

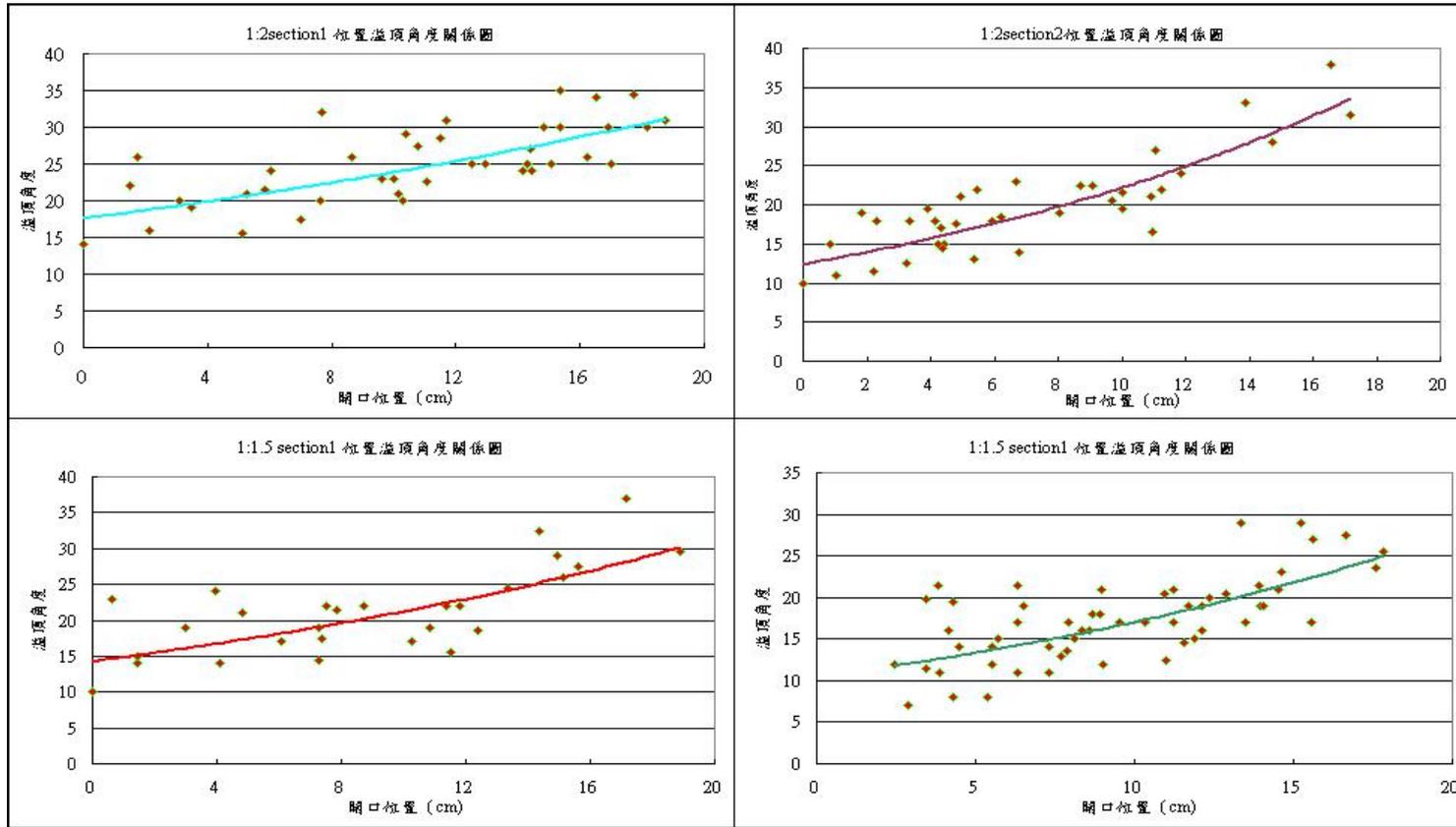


圖 4-12 開口位置溢頂角度趨勢圖

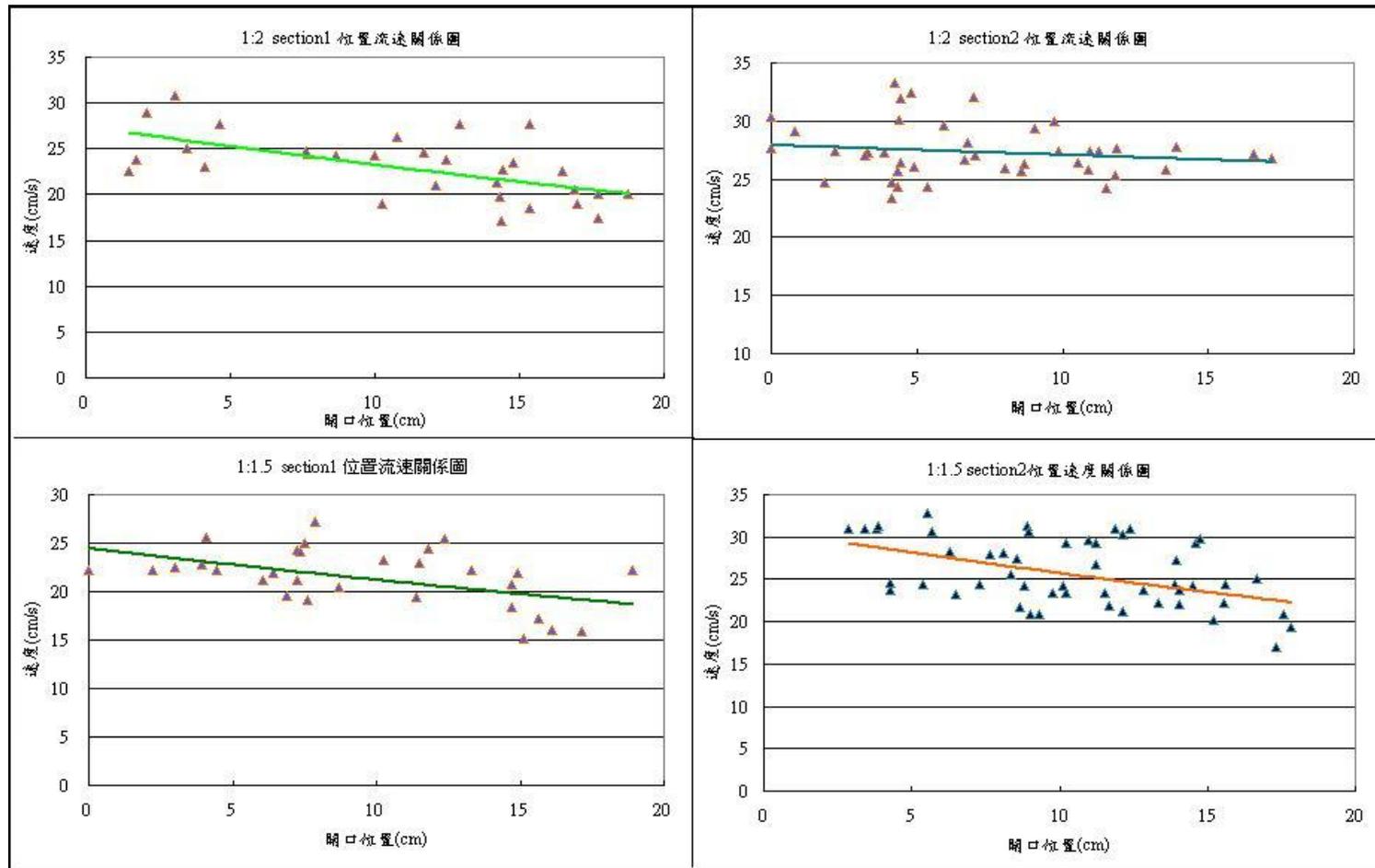


圖 4-13 開口位置溢頂流速圖

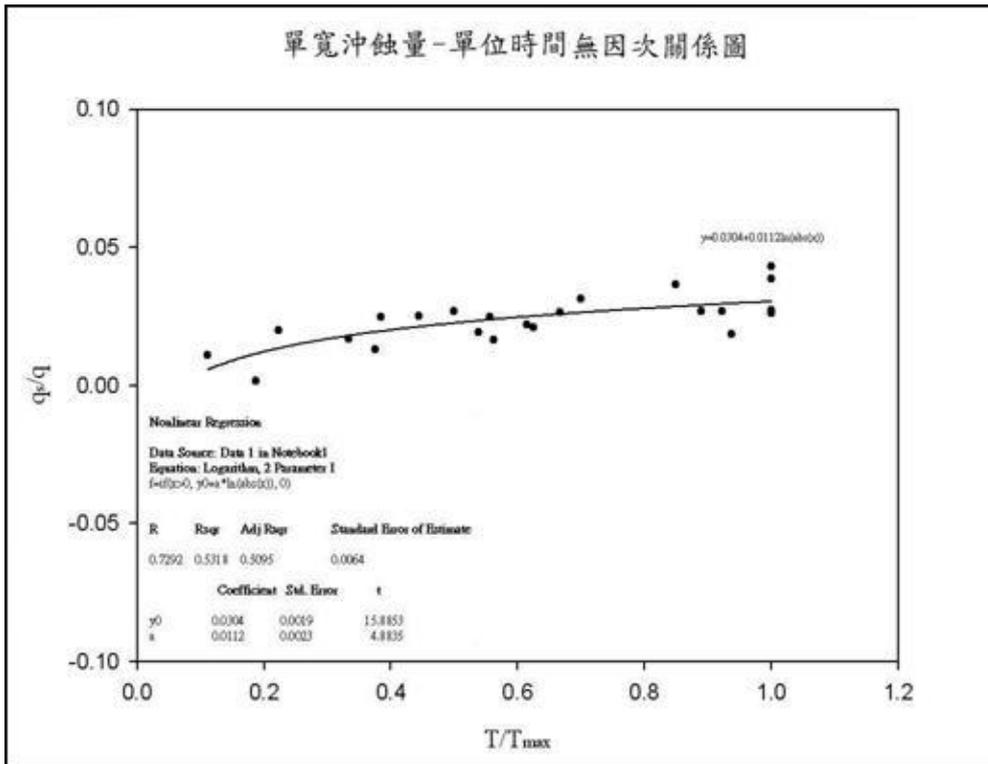


圖 4-14 單寬沖蝕量-單位時間無因次關係圖

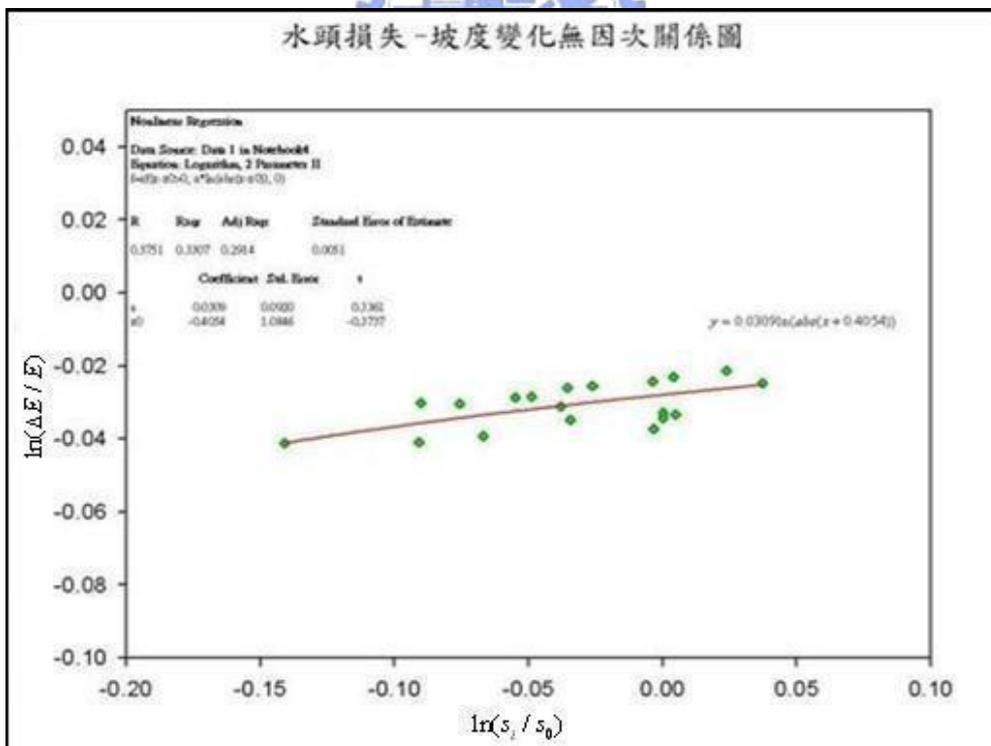


圖 4-15 水頭損失-坡度變化無因次關係圖

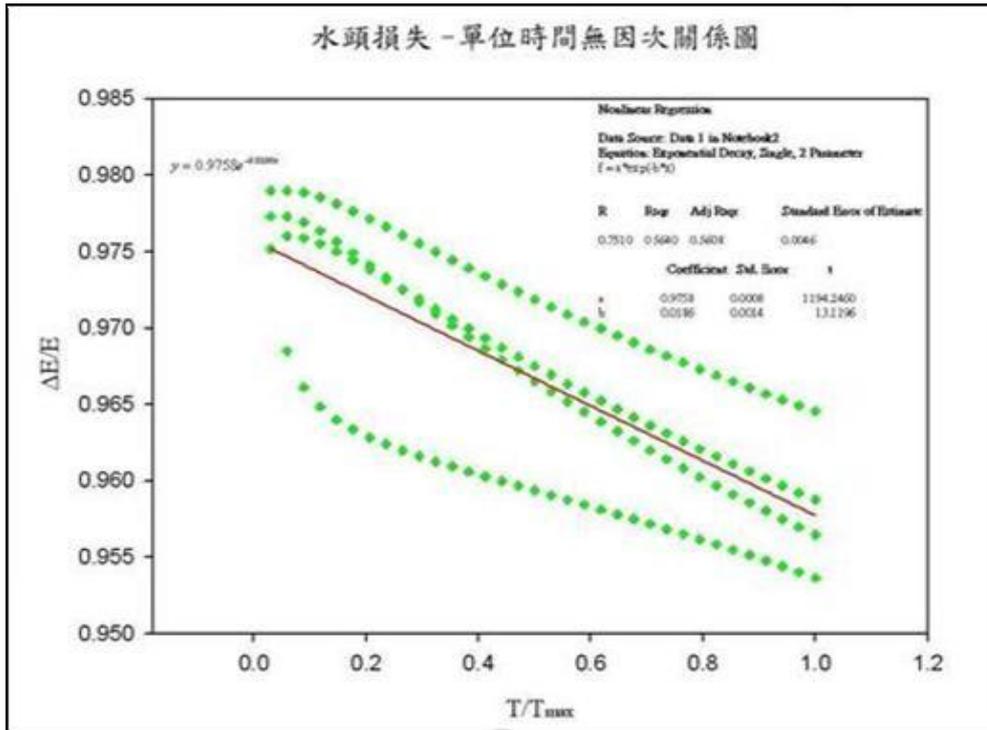


圖 4-16 能量水頭損失-單位時間無因次關係圖

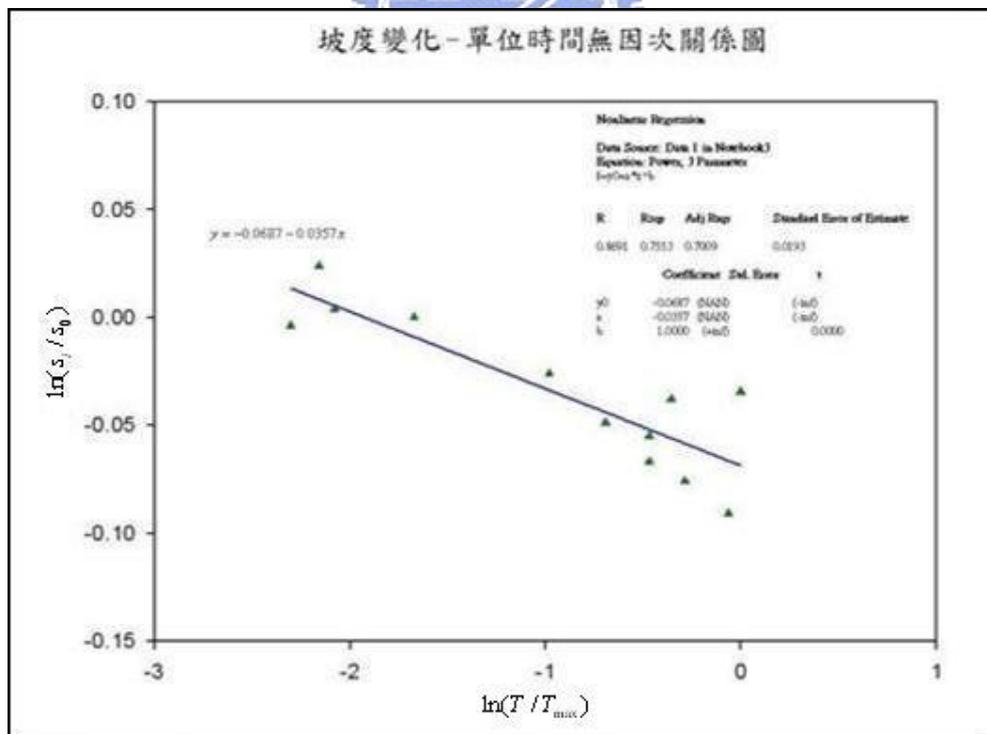


圖 4-17 坡度變化-單位時間無因次關係圖

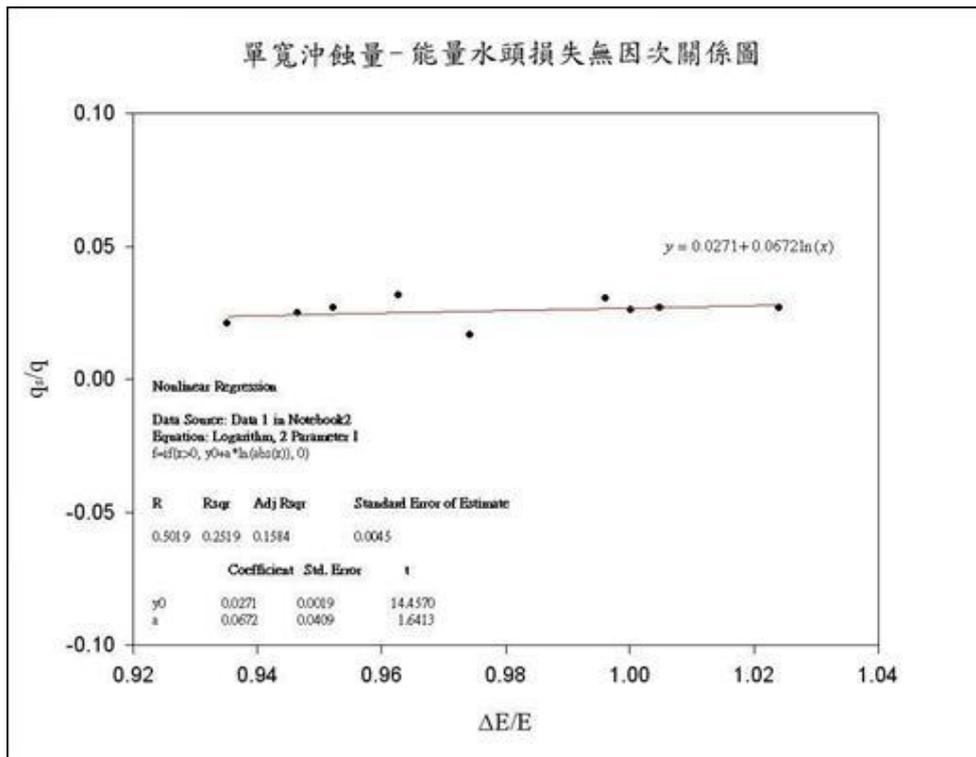
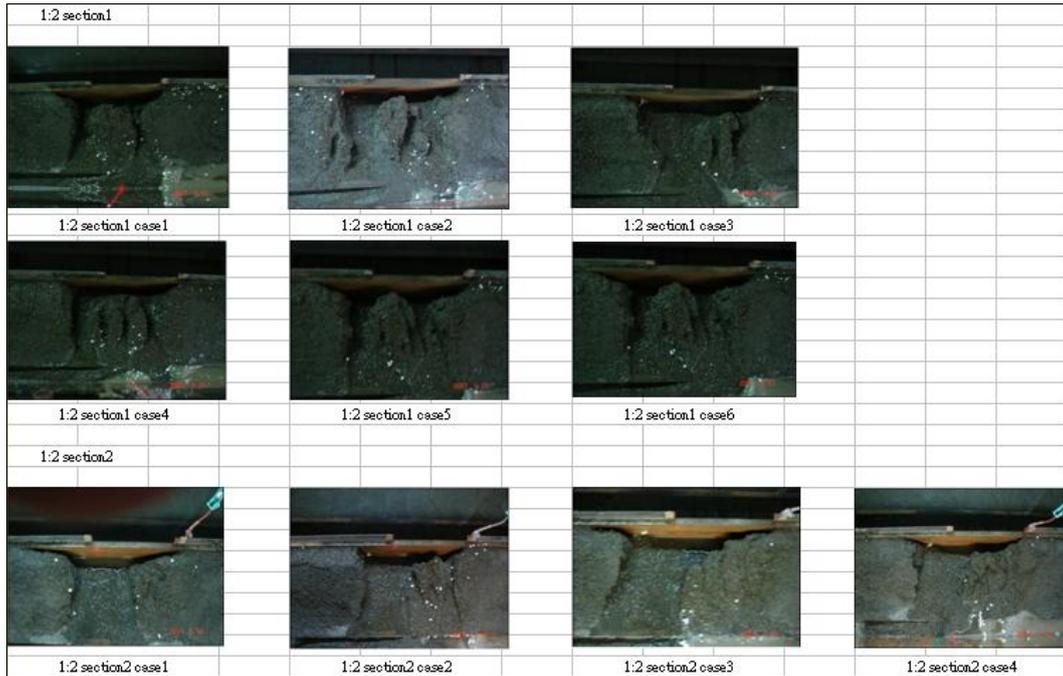


圖 4-18 單寬沖蝕量-能量水頭損失無因次關係圖





照片 4-1 坡度 1:2 堤岸破壞方向



照片 4-2 坡度 1:1.5 堤岸破壞方向

第五章 結論與建議

本研究主要利用攝影機配合雷射光線，於沖刷過程中拍攝側向溢頂沖刷時開口之代表斷面變化情形，開口水深變化、流速方向及其大小，推求土堤破壞單寬沖蝕率，實驗開口高 3cm 寬 20cm 分別位於堤岸 50cm 處與 150cm 處。上游邊界入流量為 $7,465\text{cm}^3/\text{s}$ ，試驗渠段於第二開口後經一束縮段其下游出流處為自由溢流，渠道坡度為 0.004。開口 1、2 之溢頂流量分別為 $571.5\text{cm}^3/\text{s}$ 及 $840.6\text{cm}^3/\text{s}$ 。在土壤條件方面，土壤比重為 2.73，土壤之粒徑分布中 $D_{50}=1.339\text{mm}$ ，土壤之含水量為 13%，土壤之剪應力在 $16.6\sim 31.1(\text{KN}/\text{m}^2)$ 之間，摩擦角 $\phi=31.64^\circ$ 。



5.1 結論

1. 邊坡破壞過程及沖蝕量：

本試驗利用雷射光線配合攝影機得知沖蝕變化過程迴歸曲線，將堤岸之變化過程曲線積分後，求得不同時刻單寬體積，計算單寬沖蝕量及沖蝕百分率。

2. 能量損失對沖蝕率之影響：

經由能量公式求出能量水頭損失，並對照相同時刻之單寬沖蝕

量、沖蝕百分率，能量水頭損失之增加將使沖蝕量、沖蝕百分率越大。

3. 流量對沖蝕量之影響：

根據試驗考量兩開口分別考量迴水與非迴水情況，使得兩開口流量有所差異，根據試驗結果可看出較大之流量將使沖刷量增加。

4. 側向溢頂流速分佈及溢頂角度：

側向溢頂流速分佈及溢頂方向推估，依據試驗結果得知，同一觀測開口堤頂沿程，開口上游端溢頂角度大於下游端，溢頂速度小於下游端，且在實驗開口平行主流之條件下，其溢頂角度約在 $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 、速度約在 $15\text{cm/s}\sim 30\text{cm/s}$ 間。



5. 無因次關係圖：

由無因次關係圖可看出單寬沖蝕量將隨時間而增加、坡度越陡其能量水頭損失越大、試驗過程中能量水頭損失隨時間減小、堤岸坡度受到水流沖刷後有越來越緩之趨勢、單寬沖蝕量隨水頭損失增加而越大。

6. 本試驗以堤岸平行主流方式進行，並結合雷射觀測技術描述堤岸變化過程，且配合土壤相關試驗得知土壤剪力強度等性質。因此，本試驗結果可供堤岸溢頂沖刷數值模擬之用。

5.2 建議

1. 本實驗堤岸邊坡之破壞過程經由影像擷取後，須由人工判讀其結果，故所得數據包含人為之誤差，因此需要有效判斷邊坡變化之影像處理系統，使觀測資料更為完整更具說服力。
2. 本實驗採用雷射觀測儀配合攝影機觀測代表斷面之變化，用以表示堤岸沖蝕過程，而試驗中雷射測量儀僅有一雷射光線，實難以描述堤岸整體受到不同方向水流溢頂沖刷之現象，因此，建議引用發展可觀測整體堤岸變化之量測技術，以對實驗現象之觀測有更進一步突破。
3. 本實驗尚未考量主流側水流對堤岸所產生之沖刷及滲流影響，僅探討堤岸內溢頂沖刷部分，若考慮實際情況應將主流之影響加以考量，使實驗代表性更具完整。
4. 本試驗所採用之堤岸材料為天然河砂，日後研究可採用不同特性及不同比例泥砂，觀測不同性質堤岸之沖刷特性。

5. 本試驗堤岸位置與主流平行，然而天然河川堤岸是蜿蜒變化的，
因此，日後亦可考量各種不同河道情況下，堤岸溢頂沖刷之行為。



參考文獻

1. Brush, Lucien M., JR ,and Wolman, M. Gordon, (1960), “Knicpoint behavior in noncohesive material: A laboratory study”, Bulletin of the Geological Society of America,J,VOL.71. PP.59-74.
2. Begin, Z. B., D. F. Meyer, and S. A. Schumm, (1980a), “Sediment Production of Alluvial Channel in Response to Base Level Lowering”, Trans.,ASAE,23(5):1183-1188.
3. Begin, Z. B., D. F. Meyer, and S. A. Schumm, (1980b), ”Knickpoint Migration Due to Base Level Lowering”, Jour. Waterways port. Coastal and Ocean Div., ASCE., 106:369-388.
4. Coleman, Stephen E., Andrews, Darryl P., and Grant, M.,Webby, (2002), ”Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments” , Journal of Hydraulic. Engineering, S., 829-838.
5. Chinnarasri, Chaiyuth, Tingsanchali, Tawatchai, Wessakul, Sutat, and Wongwises, somchai, (2003), “Flow patterns and damage of dike overtopping”, International Journal of sediment Research, Vol.18, No.4. pp.301-309.
6. Elliot, W. J., (1988), ”A Process Based Rill Erosion Model”, PhD Dissertation, Iowa State University Library, Ames, Iowa.
7. Gardner, T. W., (1983), ”Experiment Study of Knickpoint and Longitudinal Profile Evolution in Cohesive, Homogeneous Material” , Geol. Soc. Amer. Bull., 94:664-672.
8. Kohl, K. D., (1988), ”Mechanics of Rill Headcutting”, PhD. Dissertation, Iowa State University, Iowa USA.
9. Möller, J., Weissmann, R., Schüttrumpf, H., Grüne, J., Oumeraci, H., Richwien, W., Kudella, M., (2002), ”Interaction of wave overtopping and clay properties for seadikes”, Proceedings 28th International Conference Coastal Engineering (ICCE), ASCE, Volume 2, Cardiff, U.K., pp. 2105-2127.
10. Oumeraci, H., ”Overtopping Flow parameters on the inner slope of seadikes”, ICCE(2002), Gardiff, Wales.

11. Powledge, George R., Ralston, David C., Miller, Paul, Yang, Hai Chen, Clopper, Paul E., and Temple, D. M., (1989), "Mechanics of Overflow Erosion on Embankment. II: Hydraulic and Design Considerations", ASCE, Vol.115, No.8, August, pp.1056-1075.
12. Ryu, Y., Chang, K.A., Mercier, R., (2007), "Runup and green water velocities due to breaking wave impinging and overtopping", Springer-Verlag. DOI:, 10.1007/s00348-007-0332-0.
13. Frazao, Soares S., Grelle, N. Le, Spinewine, B., Zech, Y., (2007), "Dam-break induced morphological changes in a channel with uniform sediments: measurement by a laser-sheet imaging technique", Journal of hydraulic Research Vol. 45 Extra Issue, pp.87-95.
14. Takahisa, M., Shigekiyo, T., Toshio, M., Fumito W., and Kimio, I., (2004), "Outbursts of landslide dams and their prevention", Interpraevent, pp. 221-229.
15. 陳聯光，2000，「溯源沖刷對河道演變分析之研究」，國立中興大學水土保持學系研究所博士論文。

