

植生渠道之水理實驗

謝平城⁽¹⁾ 楊山慶⁽²⁾

摘要

基於保護整體生態，排水設施應減少使用混凝土的比例，非主要排水設施更可以草溝取代，進而降低整體排水系統混凝土的使用量。為尋求合適之草溝鋪設排水設計，本研究以三種草種及二種土壤進行渠槽實驗，擬針對草溝之水理設計進行分析與探討。結果發現不論底床為黃壤或紅壤，草層為何種植生，現在常用於估算流速之曼寧公式所求得之流速皆偏大，屬於高估的情況，其中假儉草高估之倍數約 1.2 至 3 倍，而百慕達草及類地毯草高估之倍數約 1.2 至 4 倍。於應用例之結果中，發現以曼寧公式估算流量所得結果之高估幅度相當大，最大可達 44 %，顯示其應用於斷面設計上容易與真實情況產生很大差異。

(**關鍵詞**：渠槽試驗、植生渠道、曼寧粗糙係數)

Hydraulic Experiment of A Vegetative Channel

Ping-Cheng Hsieh⁽¹⁾, *Shan-Ching Yang*⁽²⁾

Associate Professor⁽¹⁾ and Graduate Student⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation National Chung Hsing University, Taichung, 402 Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The proportion of using concrete to construct drainage facilities should be reduced for ecological system protection. Some secondary drainage facilities could be replaced with grassed channels for reducing the use of concrete. This experiment was conducted with three kinds of grass and two kinds of soil to analyze the grassed channel design for proper evaluation and to seek the best one. The results show that the velocity estimated by Manning's formula is always over-evaluated and larger than the measured one regardless of types of channel bottom and the vegetation. The degree of over estimation is about 1.2 to 3 times for Centipede grass (*Eremochloa ophiuroides*), and about 1.2 to 4 times for the other ones of Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) and Carpet grass (*Axonopus affinis*). In the application, the estimated discharge by Manning's formula is over-evaluated most significantly

(1) 國立中興大學水土保持學系副教授

(2) 國立中興大學水土保持學系碩士研究生

be up to 44%.

(**Keywords** : Flume Test, Grassed Channel, Coefficient of Manning's Roughness)

前言

台灣因位處板塊擠壓帶上，其地質脆弱且地形陡峭，每到夏季更因為受到密集且集中的暴雨與颱風豪大雨之侵襲，極易使得排水設施堵塞造成排水不良或是低窪地區發生水患，以致造成國人生命財產極大的損失。因此，傳統工法均是使用堅固之混凝土作為排水路之材料，以降低排水路之損害，達到迅速排水之功能。然而，景觀視覺上就顯得與自然環境不融洽，而因使用不透水混凝土作為內面工之材料，因此植物根系無法進入，導致植物無法生長，水中動物缺乏天然屏障的保護，進而慢慢消失，久之，排水路即變成臭水溝。近年來，國內有關生態工法的相關研究逐漸受到重視，並且引起各界的討論與推動。為減少傳統工法對環境的衝擊，基於考量整體生態之保護與平衡下，排水設施之建造應減少使用混凝土的比例，部分非主要排水系統之排水設施更可以草溝或是其他之生態溝取代，進而降低整體排水系統混凝土的使用量；但若使用一般設計混凝土排水設施常用的曼寧公式來設計生態草溝，則將面臨曼寧糙度係數值的選取問題。草溝的曼寧糙度係數與其生長的疏密度密切相關，如何定義其疏密度，常憑設計者個人的主觀或經驗判斷。為尋求合適之草溝鋪設排水設計，本研究以三種草種（假儉草、百慕達草及類地毯草）配合二種土壤（黃壤及紅壤）進行實驗，再與前人解析之流速

作比較，並針對草溝之水理設計進行分析與探討，以明瞭草溝在通水時之水理機制。

前人研究

1. 愛爾蘭工程師 Manning (1891) 所提出的曼寧公式 (Manning's formula)，其單位採用公制的平均流速表示式如下：

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

其中， V 為平均流速 (m/sec)， n 為曼寧糙度係數 (coefficient of Manning's roughness)， R 為水力半徑 (m)， S 為均勻流流況時之水面坡度 (可以底床坡度替代之)。

則其流量 Q 為：

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

式中， Q 為流量 (cms)， A 為通水斷面積 (m^2)。

2. Kaviany (1991) 提出植生之比滲透係數 (specific permeability) 可由植生之孔隙率及植生之莖寬求得比滲透係數，公式如下：

$$k_{p2} = \frac{n_2^3}{180(1-n_2)^2} \left(\frac{3}{2} d_c \right)^2 \quad (3)$$

式中， k_{p2} 為植生之比滲透係數 (m^2)， n_2 為植生之孔隙率， d_c 為植生之莖寬

(m)。

- 我國水土保持手冊(2004)指出：草溝為一種植草類之土築溝，具有防止沖蝕、宣洩逕流、便利農機作業及維護景觀生態等多種功效。手冊中亦指出，草溝適用於坡度小於 30 %之排水系統，流速超過 1.5 m/sec 時應採用複式草溝。在設計時，應先依照截水溝之設計步驟估算出逕流量與溝底坡度後，採用淺寬之拋物線形斷面搭配百喜草、假儉草或類地毯草等匍匐性草類，如圖 1 所示。按拋物線形斷面草溝流量表查出所需之斷面大小，給定草種之估計曼寧糙度係數 n 值(水土保持手冊建議百喜草為 0.067、假儉草為 0.055、類地毯草為 0.05)，再以下式計算水力半徑 R 值：

$$R = \frac{b^2 d}{1.5b^2 + 4d^2} \quad (4)$$

其中， R 為水力半徑(m)， b 為溝寬(m)， d 為水深(m)。

接著以曼寧公式計算平均流速 V ，其所算出之平均流速 V 應小於規定之安全流速。最後以下式計算出流量：

$$Q = AV = \frac{2}{3}bdV \quad (5)$$

其中， Q 為流量(m^3/sec)， A 為斷面積(m)， V 為平均流速(m/sec)。

此式所得流量須與逕流量相等或稍大，否則必須修改斷面尺寸至適當為止。由於此處之草溝水理的設計原理仍然依據曼寧公式，因此上述三種草類之曼寧糙度係數

仍屬於經驗法則之迴歸數值；而生態草溝曼寧係數值之變動範圍亦與其生長的高度與疏密程度相關，故僅以單一數值來描述草溝中所有水流流況是不恰當的；而且，若選植其他草類亦將面臨曼寧糙度係數值的選取問題。

- 有關土層之水力傳導度則是利用 Darcy 定律求得；另外，王如意和易任(2001)所著「應用水文學(上冊)」一書中提及土層之比滲透係數可由土層之水力傳導度代入下列公式而求得：

$$k_{p3} = \frac{\mu k}{\gamma} \quad (6)$$

式中， k_{p3} 為土層之比滲透係數(m^2)， μ 為水之動力黏滯係數($N\text{-sec}/m^2$)， γ 為水絕對之比重量(N/m^3)， k 為土層之水力傳導度(m/sec)。

- 在考慮植生對水流之影響時，發現前人之相關研究中，多從植株本身之形狀阻力造成水流流動受阻的觀點著手；因此，探討阻力來源、影響程度與範圍為其研究之重點。如 Chow(1959)指出植株之高度、排列密度、分佈情形和植株種類均會影響水流阻力值；Adrian and Martel(1989)則以直立圓柱模擬草生植物，結果發現形狀阻力係數為草生作物高度及其排列密度之函數。

相關理論介紹

- 許煜聖(2003)將流場分為三個區域，區

域一中僅含均質流體（以下簡稱為水層），區域二為草與均質流體（以下簡稱為草層），區域三則為可透水土層（以下簡稱為土層），其示意圖如圖 2 及圖 3 所示，並以解析方法解出各層之流速。如下列各式所示：

$$u_1 = \frac{\rho g \sin \theta}{\mu} \left\{ -\frac{1}{2} y^2 + (h_1 + h_2)y - \frac{1}{2} h_2^2 - h_1 h_2 + k_{p2} \right. \\ \left. + \frac{n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p3} - k_{p2})A_4 - k_{p3}] + n_1 \left[n_2 n_3 A_2 A_3 + n_2 k_{p2} \sqrt{\frac{n_2 n_3}{k_{p2} k_{p3}}} A_4 A_4 \right]}{\left[n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_4 A_3 + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} A_2 A_4 \right]} \right\} \\ \text{for } h_2 \leq y \leq h_1 + h_2, (7)$$

$$u_2 = \frac{\rho g \sin \theta}{\mu} \left\{ \frac{h_1 k_{p2} \sqrt{\frac{n_2 n_3}{k_{p2} k_{p3}}} A_4 + \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p2} - k_{p3})A_4 + k_{p3}] A_4}{\left[n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_4 A_3 + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} A_2 A_4 \right]} \sinh \left(\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} y \right) \right. \\ \left. + \frac{k_{p2}}{n_2} + \frac{h_1 n_3 A_3 - \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p2} - k_{p3})A_4 + k_{p3}] A_2}{\left[n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_4 A_3 + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} A_2 A_4 \right]} \cosh \left(\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} y \right) \right\} \\ \text{for } 0 \leq y \leq h_2, (8)$$

$$u_3 = \frac{\rho g \sin \theta}{\mu} \left\{ \frac{\left[n_2 h_1 + (k_{p2} - k_{p3}) \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_1 \right] A_4 + \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} k_{p3} A_1}{\left[n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_4 A_3 + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} A_2 A_4 \right]} \sinh \left(\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} y \right) \right. \\ \left. + \frac{k_{p3}}{n_3} + \frac{\left[n_2 h_1 + (k_{p2} - k_{p3}) \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_1 \right] A_3 - \frac{n_2}{n_3} \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} k_{p3} A_2}{\left[n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} A_4 A_3 + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} A_2 A_4 \right]} \cosh \left(\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} y \right) \right\} \\ \text{for } -H \leq y \leq 0, (9)$$

其中，

$$A_1 = \sinh \left(\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} h_2 \right),$$

$$A_2 = \cosh \left(\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} h_2 \right),$$

$$A_3 = \sinh \left(\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H \right),$$

$$A_4 = \cosh \left(\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H \right), u_1 \text{ 為水層之流速}$$

(m/s)， u_2 為草層之流速 (m/s)， u_3 為土層之流速 (m/s)， n_2 為草層之孔隙率， n_3 為土層之孔隙率， k_{p2} 為草層之比滲透係數 (m^2)， k_{p3} 為土層之比滲透係數 (m^2)， H 為土層之厚度 (m)。

2. 愛爾蘭工程師 Manning (1891) 所提出的曼寧公式 (Manning's formula) 是常用的渠道流速估算公式，本研究之實驗結果即與曼寧公式所求得之流速進行比較，以檢討其設計精度。
3. 本研究因儀器設備之侷限，無法有效地量測草層間之流速，故採用流量除以通水斷面積之算法，以此估算斷面之平均流速。而草層之真實通水斷面積在水漫過草高及水不及草高二種情況下，其通水斷面積應分別為草層之孔隙率乘上草層高度及草層之孔隙率乘上觀測之水深，再乘上渠寬，即得草層之真實通水斷面積。估算斷面平均流速之公式如下：

$$V = Q / [b(h_2 \times n_2)] \cdots \text{水不及草高}, (10)$$

$$V = Q / [b(h_1 + h_2 \times n_2)] \cdots \text{水漫過草高}, (11)$$

式中， V 為斷面平均流速 (m/sec)， Q 為

水桶法量測之流量 (m^3/sec)， b 為實驗渠道寬度 (m)， h_1 為水層高度 (m)， h_2 為草層之水深高度 (m)， n_2 為草層之孔隙率。

室內實驗設計

1. 實驗場地介紹

本研究使用中興大學水土保持學系之室內電動升降水槽（渠道斷面寬為 29 公分，深 30 公分，見圖 4 及圖 5）進行試驗，而實驗用水以抽水馬達取之利用。供水之頭水箱為長 60 公分、寬 30 公分、深 30 公分之壓克力箱，以定水頭之方式穩定流量供水。

2. 實驗步驟

- (1) 選擇一種土壤並鋪蓋厚度五公分以上，本實驗之土壤有黃壤與紅壤二種。
- (2) 對土壤取樣以量測飽和水力傳導度 (k)。
- (3) 鋪設植生草皮並量測其平均流速。
- (4) 取部分植生草皮以量測其孔隙率 (n_2) 及草莖平均寬度 (d_c)
- (5) 打開水閥，待流量穩定後，就可以開始量測平均流速，將結果記錄。
- (6) 分別在水流漫過草（即水深大於草高）時，量測平均流速以及水流未漫過草（即水深小於草高）時，量測平均流速。
- (7) 流速感測器安裝在底床表面上，以減少手部震動而導致人為的誤差。
- (8) 設定資料擷取系統軟體操作參數。

- (9) 變更種植之植物種類，重複步驟 (3) 至 (8)。
- (10) 在做完三種植生草皮之後，再一次對土壤取樣並量測其水力傳導度，比較實驗前與實驗後是否有所差異。
- (11) 更換不同土壤，一樣鋪蓋厚度相同之土壤。
- (12) 再重複步驟 (2) 至 (10)。
- (13) 量測二種土壤（如黃壤及紅壤）及三種植物（如假儉草、百慕達草及類地毯草）不同配置時，記錄其平均流速。

3. 實驗方法

(1) 流速儀量測之平均流速

使用 Nivus 公司設計出的流速量測儀器 (flow monitoring system) 所生產之 PCM3，將超音波流速測定儀之流速感測器直接放置渠道中量測，但因儀器本身之限制，無法有效地量測草層中之流速，若將儀器放置於草層與土層之交界面量測渠道有效通水斷面積之平均流速時，會因植生倒伏及儀器過大而導致所得數據無法使用，因此儀器所量測之平均流速是為水層之平均流速，而非整個有效通水斷面積之平均流速。

(2) 水桶法估算之平均流速

因超音波流速測定儀之流速感測器無法有效且準確地量測草層中之流速，因此本實驗另以水桶量測流量，再將流量除以整個有效通水斷面積，藉由此種方式可有效地得到整個通水斷面之平均流速，且因通水斷面積包含水層及草層所以此平均流速將更接近渠道真實之平均流速。

(3) 草層之孔隙率(n_2)及比滲透係數(k_{p2})

運用體積置換法之概念，量測草層之孔隙率(n_2)，之後量測並紀錄草莖平均寬度(d_c)，將所得之 d_c 及 n_2 代入公式(3)即可求得草層之比滲透係數(k_{p2})。

(4) 土層之飽和水力傳導度(k)及比滲透係數(k_{p3})

使用 Eijkelkamp 公司根據 Darcy 定律設計出的室內量測儀器所生產之 Brochure no.4/09.02.01.05，量測飽和水力傳導度，由此儀器測得水流量(Q)、水頭差(ΔH)，並和已知的土柱截面積(A)、土柱厚度(L)代入公式即可求出飽和水力傳導度(k ，單位：m/day)。

$$k = \frac{Q \times L}{\Delta H \times A} \quad (12)$$

式中， Q 為出流量(m^3/day)， L 為土柱厚度(m)， A 為土柱截面積(m^2)， ΔH 為水頭差(m)。

結果分析與討論

1. 底床土壤為黃壤之結果分析

土層為黃壤時，各草種之流速與相對深度關係圖如圖 6，由圖發現在同一相對深度下，以類地毯草層之水流平均流速為最小，百慕達草次之，假儉草為最大。此結果顯示流速減緩效果最佳者為類地毯草，百慕達草居次，假儉草最差，本研究推測草種之生長型態不同應是造成此項結果之一大主因。

表1為底床土壤為黃壤時，三種草層之

相對深度與流速比值關係表，由表中可知，曼寧流速與實測流速相比，在草層為假儉草時，曼寧流速約高估1.2至1.5倍，百慕達草時，高估程度略為提升，約為1.3至1.6倍，而類地毯草時，高估程度上升至約1.2至2倍之多。

(1) 草層為假儉草之結果分析

於水土保持手冊中規定假儉草之曼寧粗糙係數為 0.055，本研究將理論解析解、水土保持手冊規定之曼寧流速及實驗數據加以比較，如圖 7 所示，發現實驗數據介於曼寧流速與理論解析解之間，其流速值大小順序為曼寧流速最大、實驗數據次之及理論解析解最小。本研究將曼寧流速及理論解析解之流速分別與實驗數據相除，使無因次化，如圖 8 所示，發現不論是曼寧流速或理論流速之流速比值都隨著相對深度增加而增加，其增加程度曼寧流速較大、理論解析解較小，但曼寧流速之比值皆大於一，為高估之情況；理論流速之比值皆小於一，為低估之現象。

(2) 草層為百慕達草之結果分析

由於水土保持手冊中並無明確規定百慕達草之曼寧粗糙係數，僅定義無內面工時全面密草生之 n 值範圍為 0.04 至 0.06，故本研究將百慕達草之 n 值假設為其平均值 0.05，水深漫過草高的情況下，將曼寧流速、理論解析解及實驗數據作比較，結果如圖 9 所示，發現流速儀量測之實驗數據大致介於曼寧流速與理論解析解之間，其流速值大小順序為曼寧流速最大、實驗數據次之及理論解析解最小。本研究將曼寧流速及理論解析

解之流速分別除以實驗數據，結果如圖 10 所示，發現其趨勢與草層為假儉草時相似，曼寧流速有高估現象，而理論流速為低估。

(3) 草層為類地毯草之結果分析

水土保持手冊中規定類地毯草之曼寧粗糙係數為 0.05，本研究將理論解析解、利用曼寧公式求得之曼寧流速與實驗數據三者作比較，如圖 11 所示，發現實驗數據介於曼寧流速與理論解析解之間，其流速值大小順序為曼寧流速最大、實驗數據次之及理論解析解最小。本研究將曼寧流速及理論解析解之流速分別除以實驗數據得到流速比值，如圖 12 所示，發現其趨勢雖與上述多種狀況相同，但理論流速之比值卻偏小許多。

2. 底床土壤為紅壤之結果分析

以流速儀量測之結果如表 2 所示，底床土壤為紅壤時，三種草層之相對深度與流速比值關係表，由表中可知，曼寧流速與實測流速相比，在草層為假儉草時，曼寧流速約高估 1.3 至 1.6 倍，百慕達草時，高估程度略為下降，約為 1.2 至 1.6 倍，而類地毯草時，高估程度上升至約 1.6 至 1.8 倍之多。

另以水桶法量測之結果如表 3 所示，由表中可知，曼寧流速與實測流速相比，在草層為假儉草時，曼寧流速約高估 2 至 3 倍，百慕達草時，高估程度略為提升，約為 2.4 至 4 倍，而類地毯草時，高估程度上升至約 2.6 至 4.6 倍之多。

底床土層為紅壤時，以水桶法所求得各草種之流速與相對深度關係圖如圖 13，在同一相對深度時，由圖中發現以百慕達草層之

水流平均流速為最小，類地毯草次之，假儉草為最大，此項結果與圖 6 有所不同。由此結果中得知，在底床土層為紅壤時，減緩流速效果最佳者為百慕達草，類地毯草次之，但最差者依然為假儉草，而造成結果不同之原因，本研究推測應是底床土層不同所導致之效果。

(1) 草層為假儉草之結果分析

本研究將其所求得之曼寧流速與理論解析解、流速儀及水桶法所量測之實驗數據四者相互比較，比較結果如圖 14 所示，發現曼寧流速最大，流速儀量測之實驗數據次之，理論解析解再次之，而水桶法測得之實驗數據為最小。結果顯示，水桶法之實測數據與理論解析解相當接近。將曼寧流速及理論解析解之流速分別除以流速儀測得之實驗數據，結果如圖 15 所示，發現曼寧流速之流速比值隨著相對深度增加而增加，但理論解析解之流速比值卻是隨著相對深度增加而減少。流速儀量測之理論流速比值約為 0.7，水桶法之理論流速比值則約為 1.0。

(2) 草層為百慕達草之結果分析

由於水土保持手冊中並無明確規定百慕達草之曼寧粗糙係數，僅定義無內面工時全面密草生之 n 值範圍為 0.04 至 0.06，故本研究將百慕達草之 n 值假設為其平均值 0.05，本研究將曼寧流速與理論解析解及流速儀量測、水桶法量測之實驗數據作比較，結果如圖 16 所示，發現流速儀及水桶法量測之實驗數據皆小於曼寧流速與理論解析解之流速，其流速值大小順序為曼寧流速最大、理論解析解次之，流速儀量測數據再次之，而以水桶法量測者為最小。曼寧流速及

理論解析解之流速除以流速儀量測所測得之實驗數據，結果如圖 17 所示，發現曼寧流速與理論解析之流速比值皆隨相對深度增加而增加，其中，以流速儀量測所得之兩迴歸線幾近平行，另以水桶法量測所得之兩迴歸線於相對深度愈小時愈接近。

(3) 草層為類地毯草之結果分析

水土保持手冊中規定類地毯草之曼寧粗糙係數為 0.05，本研究將利用其所求得之曼寧流速與理論解析解、流速儀及水桶法所量測之實驗數據四者相互比較，結果如圖 18 所示，發現四者分別對應之迴歸線有相同趨勢，當相對深度愈大時，流速皆愈小。將曼寧流速及理論解析解之流速除以流速儀量測之實驗數據，所得之流速比值結果如圖 19 所示，發現曼寧流速之流速比值隨相對深度增加而增加，而理論解析之流速比值皆趨近一定值，以流速儀量測者趨於 0.8，水桶法量測者則趨於 1.2。

3. 水理設計之應用例

假設已知一處拋物線溝渠，坡度為 1.3 度，溝寬為 1 公尺，無內面工且全面密草生覆蓋，草種為假儉草，底床土壤為紅壤，草高約 2.5 公分，試計算當水深約為 10 公分時，草溝之流量。計算流程如下：

(1) 相對深度 (i) 為草高除以水深，所以

$$i = \frac{2.5}{10} = 0.4。$$

(2) 於圖 14 中，流速儀量測、水桶法與理論解之迴歸式分別為下列三式：

$$V = -0.6757 \times i + 0.5697 \quad (\text{流速儀})$$

$$V = -0.4173 \times i + 0.3517 \quad (\text{水桶法})$$

$$V = -0.5532 \times i + 0.4452 \quad (\text{理論解})$$

式中， V 為流速 (m/sec)， i 為相對深度。

(3) 將 $i = 0.4$ 代入上述三式中，分別得到三者之流速，

$$V_{\text{流速儀}} = 0.4(\text{m/sec})、$$

$$V_{\text{水桶法}} = 0.247(\text{m/sec}) \text{ 與}$$

$$V_{\text{理論解}} = 0.307(\text{m/sec})。$$

(4) 依式 (4) 計算水力半徑出 $R = 0.065(m)$ 。

(5) 依照式 (1)，計算出

$$V_{\text{曼寧公式}} = 0.443(\text{m/sec})$$

(6) 依式 (5) 分別計算得到四者之流量，

$$Q_{\text{流速儀}} = 0.0267(\text{m}^3/\text{sec})，$$

$$Q_{\text{水桶法}} = 0.0165(\text{m}^3/\text{sec})，$$

$$Q_{\text{理論解}} = 0.0205(\text{m}^3/\text{sec}) \text{ 與}$$

$$Q_{\text{曼寧公式}} = 0.0295(\text{m}^3/\text{sec})$$

(7) 由流量結果發現，解析解與本研究所採用之流速儀量測與水桶法兩種方法其流量均較現今常用之曼寧公式小，其中，水桶法之流量低達 44%，而流速儀量測之流量約低 9.5%，解析解之流量則約低 30.5%。

結論與建議

1. 結論

- (1) 當土層為黃壤時，流速減緩效果最佳者為孔隙率54.7%之類地毯草，次者為孔隙率85.3%之百慕達草，最差者為孔隙率63.2%之假儉草；當土層為紅壤時，減緩流速效果最好者為孔隙率88.3%之百慕達草，次者為孔隙率60.2%之類地毯草，但最差者依然為孔隙率為65.1%之假儉草。
- (2) 當土壤孔隙率為45%時，草種孔隙率為63.2%之曼寧流速與流速儀量測之值相比，約高估1.2至1.5倍，草種孔隙率為85.3%之高估程度略為提升，約為1.3至1.6倍，而草種孔隙率為54.7%之高估程度則增加至約1.2至2倍。
- (3) 當土壤為紅壤時，以流速儀量測之值，假儉草層之曼寧流速約高估1.3至1.6倍，百慕達草層之高估程度略為下降，約為1.2至1.6倍，而類地毯草層之高估程度則增加至約1.6至1.8倍。以水桶法量測時，假儉草層之曼寧流速約高估2至3倍，百慕達草層之高估程度略為提升，約為2.4至4倍，而類地毯草層之高估程度則增加至約2.6至4.6倍。
- (4) 於應用例中顯示，與使用曼寧公式估算之流量比較時，水桶法量測之流量低達44%，流速儀量測之流量約低9.5%，而解析解之流量則約低30.5%。

2. 建議

- (1) 本研究僅針對單一坡度進行實驗，未來

可以選擇多種坡度進行實驗，以比較在不同坡度時，流速分布之變化。

- (2) 本研究因侷限於實驗設備，水深無法過高，導致相對深度之變化不大，無法模擬與現地草溝發生洪峰逕流時之相對深度，未來可採用更大之流量進行實驗，以更接近現地之情形。
- (3) 本研究之草層是使用真草皮，因此受到植物生長情形之限制，無法對草層孔隙率做有效之控制，未來可往如何控制植物孔隙率方向努力。

參考文獻

1. 王如意、易任，2001 「應用水文學（上冊）」，茂昌圖書公司，台北，第249—250頁。
2. 農委會，2004 「水土保持手冊」，行政院農委會水土保持局。
3. 許煜聖，2003 「水流流經植生地表之水理分析」，碩士論文，中興大學水土保持學系碩士班，台中。
4. Adraian, D.D., and C.J. Martel, (1989) "Determination of Manning's n and Friction Factor in Vegetated Waterways," Proceedings of the international Conference for Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula, pp.579-588.
5. Chow, V.T., (1959) "Open-Channel Hydraulics," McGraw-Hill.
6. Darcy, H., (1854) "Sur des recherches expérimentales relatives au mouvement des eaux dans les tuyaux (Experimental researches on the flow of water in pipes),"

水土保持學報 39 (4) : 371 - 385 (2007)

Journal of Soil and Water Conservation , 39 (4) : 371 - 385 (2007)

Comptes rendus des séances de l'Académie
des Sciences, Vol. 38, pp.1109-1121.

7. Kaviany, M., (1991) "Principles of heat transfer in porous media," Springer-Verlag.
8. Manning, R., (1891) "On the flow of water in open channels and pipes," Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland, Vol.20, pp.161-207.

96 年 10 月 23 日 收稿

96 年 11 月 24 日 修改

96 年 12 月 2 日 接受

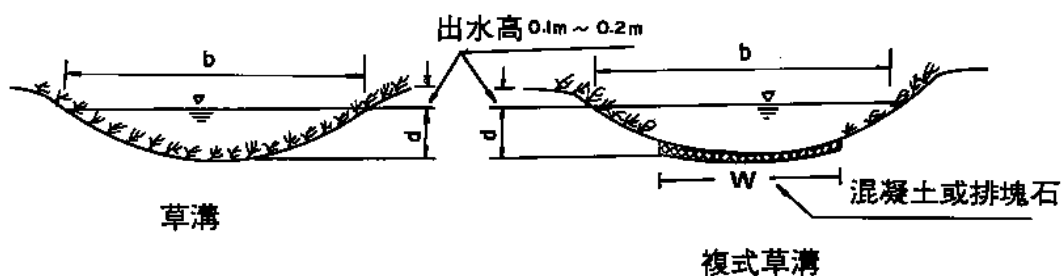


圖 1. 草溝及複式草溝示意圖

Figure 1. Schematic diagram of a grassed channel and a polymorphous grassed channel.

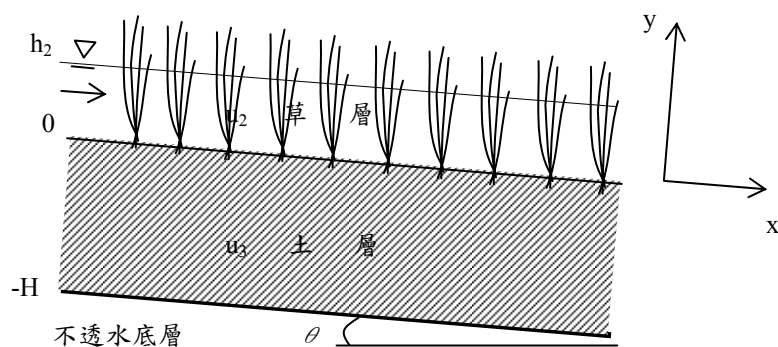


圖 2. 水不漫過草高示意圖

Figure 2. Schematic diagram of the emergent vegetation.

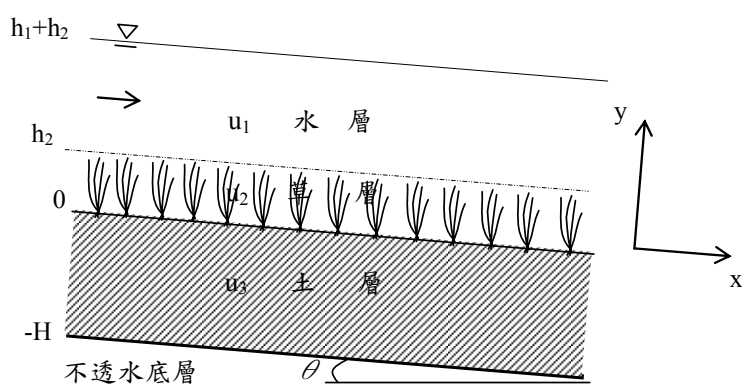


圖 3. 水漫過草高示意圖

Figure 3. Schematic diagram of the submerged vegetation.

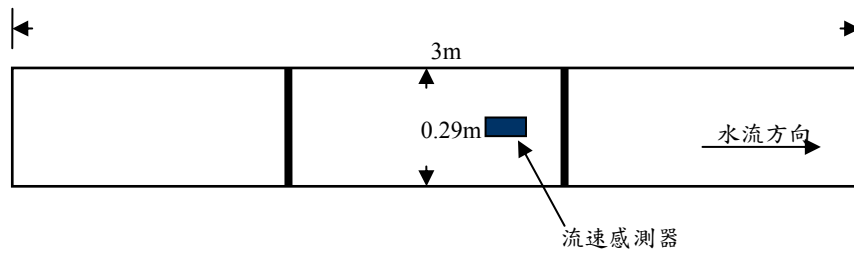


圖 4. 水槽平面圖

Figure 4. Top view of the experimental flume.

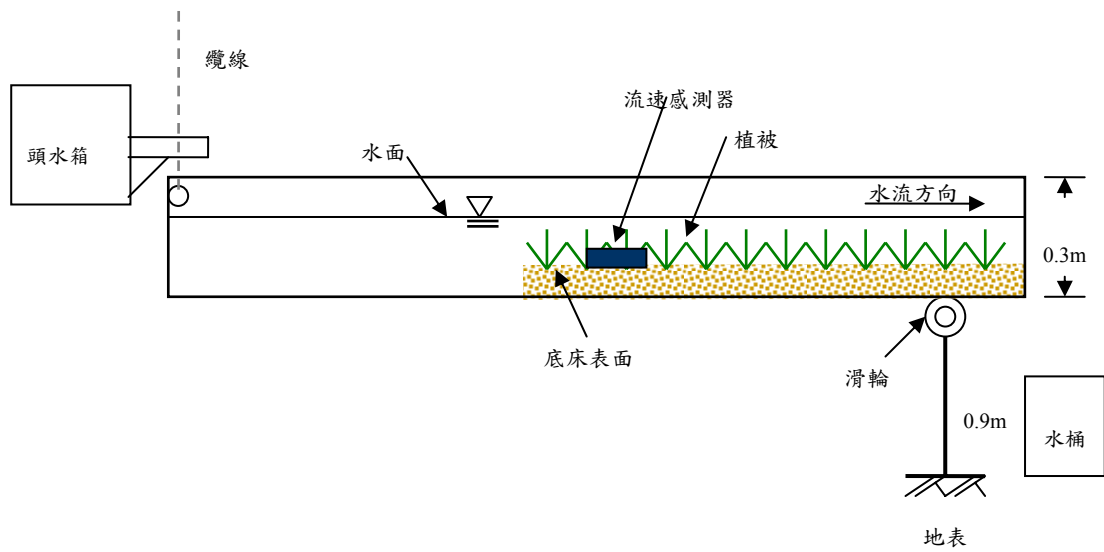


圖 5. 水槽實驗佈置示意側視圖

Figure 5. Side view of the experimental flume.

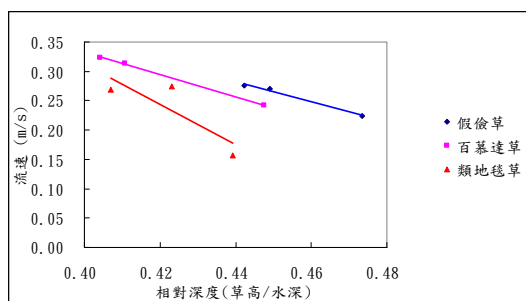


圖 6. 底床土壤為黃壤時，三種草層之水流流速與相對深度關係圖

Figure 6. Relationship between velocity and relative depth with three kinds of grass (yellow loam bottom)

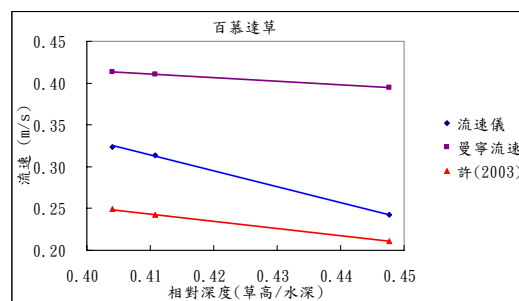


圖 9. 草層為百慕達草時，相對深度與三種流速關係圖 (黃壤)

Figure 9. Relationship between relative depth and three kinds of velocities with Bermuda grass (yellow loam bottom)

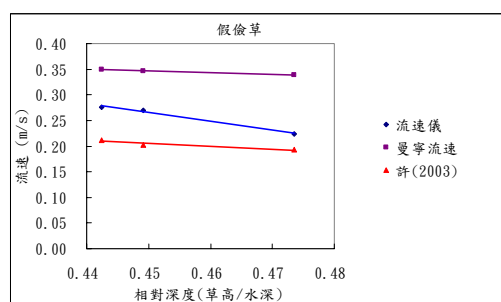


圖 7. 草層為假儉草時，相對深度與三種流速關係圖 (黃壤)

Figure 7. Relationship between relative depth and three kinds of velocities with Centipede grass (yellow loam bottom)

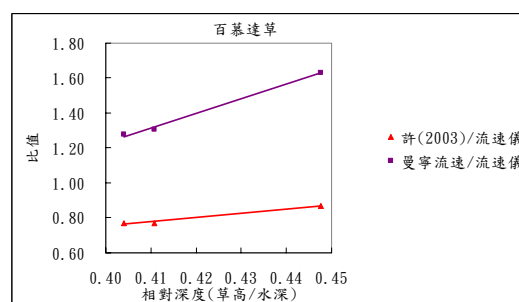


圖 10. 草層為百慕達草時，相對深度與流速比值關係圖 (黃壤)

Figure 10. Relationship between relative depth and ratio of velocity with Bermuda grass (yellow loam bottom)

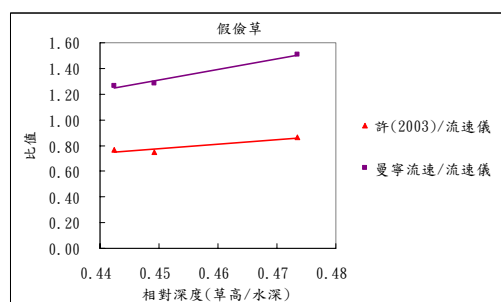


圖 8. 草層為假儉草時，相對深度與流速比值關係圖 (黃壤)

Figure 8. Relationship between relative depth and ratio of velocity with Centipede grass (yellow loam bottom)

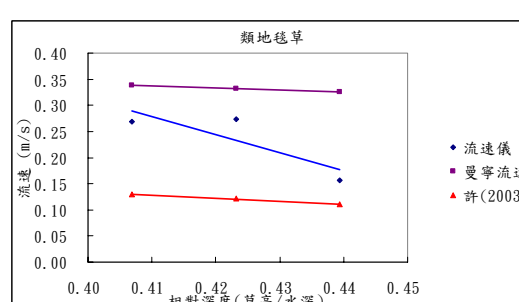


圖 11. 草層為類地毯草時，相對深度與三種流速關係圖 (黃壤)

Figure 11. Relationship between relative depth and three kinds of velocities with Carpet grass (yellow loam bottom)

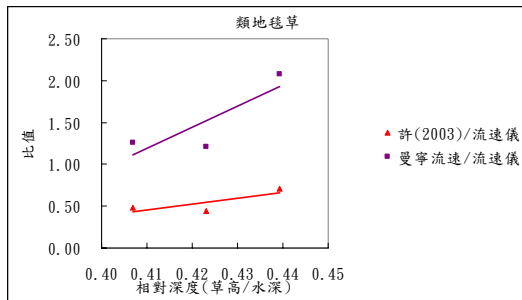


圖 12. 草層為類地毯草時，相對深度與流速比值關係圖（黃壤）

Figure 12. Relationship between relative depth and ratio of velocity with Carpet grass.(yellow loam bottom)

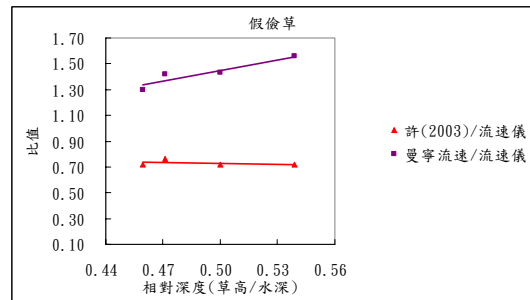


圖 15. 草層為假儉草時，相對深度與流速比值關係圖（紅壤）

Figure 15. Relationship between relative depth and ratio of velocity with Centipede grass.(red loam bottom)

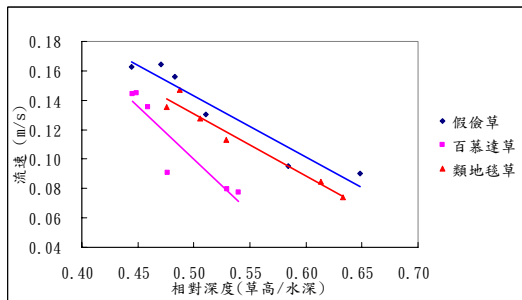


圖 13. 底床土壤為紅壤時，三種草層之水流流速與相對深度關係圖（水桶法）

Figure 13. Relationship between velocity and relative depth with three kinds of grass by tank method.(red loam bottom)

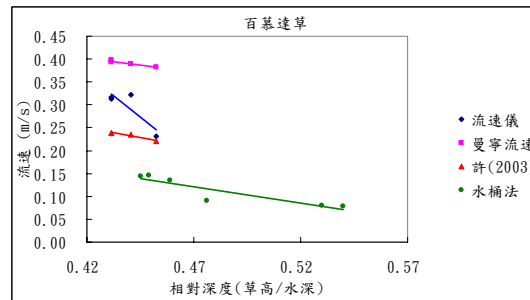


圖 16. 草層為百慕達草時，相對深度與四種流速關係圖（紅壤）

Figure 9. Relationship between relative depth and four kinds of velocities with Bermuda grass.(red loam bottom)

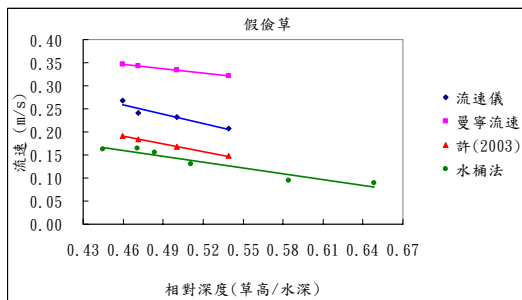


圖 14. 草層為假儉草時，相對深度與四種流速關係圖（紅壤）

Figure 14. Relationship between relative depth and four kinds of velocities with Centipede grass.(red loam bottom)

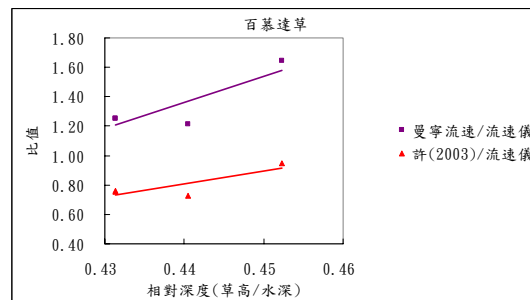


圖 17. 草層為百慕達草時，相對深度與流速比值關係圖（紅壤）

Figure 17. Relationship between relative depth and ratio of velocity with Bermuda grass.(red loam bottom)

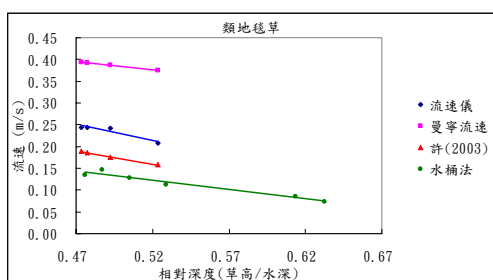


圖 10. 草層為類地毯草時，相對深度與四種流速關係圖（紅壤）

Figure 11. Relationship between relative depth and four kinds of velocities with Carpet grass.(red loam bottom)

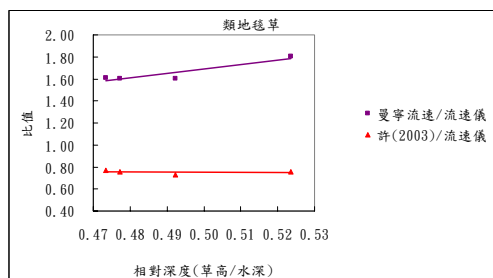


圖 12. 草層為類地毯草時，相對深度與流速比值關係圖（紅壤）

Figure 12. Relationship between relative depth and ratio of velocity with Carpet grass.(red loam bottom)

表 1. 底床鋪黃壤時，三種草層之相對深度與流速比值關係表

Table 1. Relationship between velocity and relative depth with three kinds of grass.(yellow loam bottom)

假儉草		百慕達草		類地毯草	
相對深度	流速比值	相對深度	流速比值	相對深度	流速比值
0.442	1.265	0.404	1.277	0.423	1.214
0.449	1.282	0.411	1.307	0.407	1.261
0.474	1.510	0.448	1.633	0.439	2.079

表 2. 底床鋪紅壤時，三種草層之相對深度與流速比值關係表（由流速儀量測）

Table 2. Relationship between velocity and relative depth with three kinds of grass by flow meter.(red loam bottom)

假儉草		百慕達草		類地毯草	
相對深度	流速比值	相對深度	流速比值	相對深度	流速比值
0.459	1.296	0.395	1.254	0.473	1.609
0.471	1.421	0.405	1.255	0.477	1.603
0.500	1.431	0.413	1.211	0.492	1.602
0.539	1.557	0.432	1.646	0.524	1.805

表 3. 底床鋪紅壤時，三種草層之相對深度與流速比值關係表（水桶法）

Table 3. Relationship between velocity and relative depth with three kinds of grass by tank method.(red loam bottom)

假儉草		百慕達草		類地毯草	
相對深度	流速比值	相對深度	流速比值	相對深度	流速比值
0.445	2.014	0.445	2.496	0.487	2.614
0.470	1.944	0.449	2.424	0.476	2.867
0.483	2.022	0.459	2.564	0.505	2.965
0.511	2.352	0.476	4.045	0.529	3.270
0.584	3.007	0.530	3.970	0.614	4.078
0.649	3.036	0.540	3.881	0.633	4.601