

坡地水流動力分析之研究

陳右錚⁽¹⁾ 褚思穎⁽²⁾ 謝平城^{(3)*}

摘要

本研究以水動力學的觀點，探討坡地水流之水理現象，包括裸露地及具植生覆蓋但水深不及草高等兩種地表條件下之流況分析。將流場分成均質水層及可透水土層或植生層及可透水土層二個區域，以層流模式建立完善的理論依據並推求水流流經地表時之速度解析，希望藉此瞭解植生存在對水流流速的影響。文中除了將底床之土壤視為具滲透性之多孔介質，考慮其透水土地表之流速不為零的真實現象外，亦將植生層視為一多孔介質，而植被內與土壤中流動的水流則以孔隙介質流視之。

在層流流況中，以簡化之那維爾-史托克斯方程式(Navier-Stokes equation)搭配宋長虹(1993)根據 Biot 多孔彈性介質理論所建立之多孔介質層流模式為控制方程式，對整體流速分佈進行求解。發現流速會隨水深、坡度變大而增加，草層植生愈稀疏、土層之滲透性愈佳，亦會使流速增大，但土層之滲透性對地表以上之流速無甚大之影響。

於獲得解析解之後，估算漫地流流經草地或裸露地之平均流速，並與 Darcy-Weisbach 公式及運動波方程式相互比較，運動波方程式計算得平均流速為最大，本研究之裸露地計算結果介於運動波方程式及 D-W 公式計算得平均流速之間。當草層植生愈稠密，本研究水深不及草高之計算結果與 D-W 公式計算得平均流速相交於水深愈低時；而草層植生稀疏至 $n_2 > 0.94$ 且水深在 0.05 公尺以下時，D-W 公式之計算結果則為最小。

關鍵詞：漫地流、孔隙介質流、層流

Dynamic analysis of flow on a slope

You-Cheng Chen⁽¹⁾, Szu-Ying Chu⁽²⁾, Ping-Cheng Hsieh⁽³⁾

Graduate Student, Graduate Student, and Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

ABSTRACT

-
- (1) 國立中興大學水土保持學系碩士研究生
(2) 國立中興大學水土保持學系碩士
(3) 國立中興大學水土保持學系副教授 *通訊作者

Hydrodynamics will be applied to delineate the overland flow in this study. This investigation includes the cases of flow passing over a bare ground and vegetative ground. In this study, we aim to figure out how vegetation influences streamwise velocity by analyzing the velocity of flow passing vegetative ground and dividing the flow field into two regions: homogenous water-layer/vegetation-layer and permeable soil-layer. The soil and vegetation are both regarded as porous media and the flow inside the two layers is porous media flow. Thus the nonzero velocity at the ground surface could be estimated.

The velocity distribution in laminar flow is solved by simplified Navier-Stokes equations and Song's (1993) laminar model based on Biot's poroelastic theory. In addition to the development of the fundamental theory, the analytical solution of the velocity profile will be obtained. The velocity will increase when the water depth, the slope or the porosity of vegetation-layer increase. The better permeability of soil layer will increase the velocity, but it has little influence on the velocity above the ground.

After the analytical solution of the velocity profile is obtained, the average velocity of overland flow passing over a vegetative or non-vegetative sloping plane is also calculated. The average velocity of this study is compared with those calculated by Darcy-Weisbach definition and kinematic-wave equation, respectively. The result of kinematic-wave equation is the largest. When the flow passes over a bare ground, the present result is between the result of kinematic-wave equation and that of D-W definition. When the vegetation becomes denser, the average velocity of the vegetative ground and that of D-W definition cross at lower depth. When $n_2 > 0.94$ and $h < 0.05\text{m}$, the result of D-W definition is the smallest.

(Key words : overland flow, porous media flow, laminar flow)

前言

台灣地區地狹人稠，為解決國人居住及活動空間拓展之問題，勢必得對山坡地進行開發，而開發同時必須配合適宜之水土保持處理方法，始能維持環境保育及保障人民生命財產安全。在規劃適宜之水土保持處理方法時，首先需要納入考量的便是山坡地地表上之水流流動情形。通常地表逕流被視作漫地流，據水土保持技術規範及手冊中所列，假設漫地流流為 0.3~0.6 公尺/秒，進行相關工程設施之規劃設計。此假設是否合理，便為目前欲探討之課題。在此，本研究將以層

流(laminar flow)模式建立裸露地和水深不及草高等兩種地表覆蓋條件下，漫地流流況適用之公式，並和相關之前人研究進行比較，如：Darcy-Weisbach 摩擦損失公式及運動波理論公式等，對山坡地表水流做進一步研究。

以往研究山坡地漫地流時，部分學者利用簡單的經驗公式來推估流速，如：曼寧公式(Manning's formula)。至於地表糙度係數的決定，僅憑使用者主觀和經驗來判斷。而推估地表逕流量時，最為廣泛使用者則首推合理化公式(Rational formula)，因其使用最為簡單、方便。同樣地，該公式中的逕流係數需採用何值、如何選擇，也是因使用者不同而

有程度上的差異。理論上，合理化公式為運動波方程式之特殊形式，Izzard (1946)是早期對漫地流進行最廣泛之試驗者，並認為：當降雨強度 i (單位為 in./hr)、漫地流長度 L (單位為 ft) 之乘積小於 500 時，可應用層流方式分析漫地流水流之特性。而 Horton (1945) 則主張一般漫地流的水流情形應包括層流與紊流(turbulent flow)之流況。之後，Morgali & Linsley(1965)及 Woo & Brater(1962)也從事漫地流的相關研究，證明使用紊流方程式可得到和 Izzard 相同的結果。Emmett (1970)以更廣泛的實驗和現場觀測為依據，發現實驗室內的均勻流於粗糙或平滑的地表，水流可為紊流或層流；而於現場觀測中，更進一步證明在實驗室中模擬自然地表情況之困難性。Ragan & Duru(1972)根據運動波理論，繪製諾模圖(Nomograph)以決定集流時間。Henderson & Wooding(1964)將 Lighthill & Whitham(1955)之方法予以簡化，應用在實際流域上以特性法求得斜面上漫地流之解析解。Wooding (1965)提出之 V 型化集水區，Woolhiser (1969)提出之錐型收斂漫地流模型及 Kibler & Woolhiser(1970)提出之多個平面階梯式模型等，皆先將複雜之實際流域予以適當之概念化後，再以數值方法求解運動波方程式。Cundy & Tonto(1985)所提之雙參數特性法，雖可直接求解運動波方程式，不過仍需配合若干簡單之數值運算，但已較為簡化且有甚多改進。王和謝(1993)曾將運動波方程式應用到台灣山區開發坡地興建高爾夫球場時，探討經過開發後坡地之地表逕流特性，並利用運動波方程式計算合理化公式中的兩個基本參數—逕流係數及集流時間，使合理化公式應用於開發坡地興建高爾夫球場時，能推估出合理之尖峰逕流量，提

供球場排水系統設計之參考應用，或供球場興建後依實際之地文條件重新檢討規劃、設計之排水系統。Singh (1997)也探討運動波模式應用於水資源方面的問題。Barros & Colello(2001)探討礫石層上的漫地流流況，且由實驗結果指出影響漫地流的有效地表糙度係為逕流率、糙度元素高度(roughness element height)，以及土壤條件的函數。Liu & Singh(2004)曾探討漫地流受局部地形、坡長、坡度及植生覆蓋等因子的影響效應，以一維運動波模式結合修正型的 Green-Ampt 入滲公式，模擬均一坡度和不均勻坡度之地表條件時，漫地流和土壤沖蝕之現象。Liu 等 (2005) 則探討轉動波 (roll wave) 在漫地流中對土壤沖蝕的影響效應，並發現當轉動波出現時，水流的剪應力會出現，進而加速土壤的沖蝕。

從前述諸多研究中，可見漫地流的研究不勝枚舉，但常用的仍為：(1) 若流況為層流時，以 Darcy-Weisbach 摩擦損失公式；(2) 若流況為紊流時，則以曼寧公式(Manning's formula)或蔡斯(Chezy's formula)；(3) 運動波模式推估單位寬度之流量。這些公式大多為半經驗、半理論的公式，而運動波的理論卻是動量方程式過度簡化的結果。在此擬提出更完整的理論依據，推導漫地流速度分佈、平均流速等，以更精確地推估漫地流之流速。

模式建立

將裸露地流場分為二個區域，一為僅含均質(homogeneous)流體之區域(以下簡稱為水層)，一為可透水土層(以下簡稱為土層)；

而在水深不及草高的狀況下，則分為草層及土層兩部份，草層包括植株與均質流體，而土層同裸露地狀況為可透水土層，其示意圖如圖 1 及圖 2 所示。

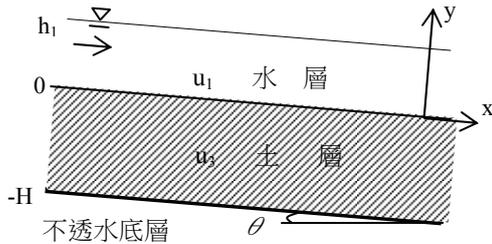


圖 1 裸露地之示意圖

Figure 1. Definition sketch of bare ground.

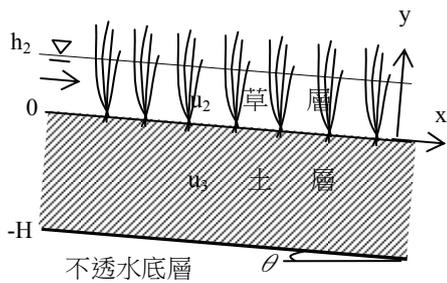


圖 2 水深不及草高之示意圖

Figure 2. Definition sketch of emergent vegetation.

控制方程式

本研究將流體的特性視為具黏性、不可壓縮性，亦假設流場為穩態、流體速度為完全發展且各區流況均為層流，並僅對二維流場做一解析。根據上述之基本假設，流場各區域之控制方程式可表示如下：

水層之控制方程式考慮二維流場並假設本區流速為完全發展，連續方程式可表示如下：

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

再將那維爾-史托克斯方程式化簡可得運動方程式如下：

$$x \text{ 方向: } \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - \frac{\partial p_1}{\partial x} + \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (2)$$

$$y \text{ 方向: } -\frac{\partial p_1}{\partial y} - \rho_w g \cos \theta = 0 \quad (3)$$

其中，

u_1 ：水層中 x 方向之流體速度

p_1 ：水層中流體的壓力

ρ_w ：水體密度

g ：重力加速度

μ ：流體動力黏滯係數

θ ：傾斜角度

本研究將草層與土層中的流體運動視為孔隙介質流，根據謝和許(2003)可採 Biot 的孔彈性介質理論予以描述。假設草層內的植株受水流作用後倒伏而不回復、土層內之土壤不因水流而位移變形，將此兩部分視為剛性多孔介質，並忽略流體與固體間質量偶合之效應，且在多孔介質內的流體呈完全飽和狀態，如此在草層中孔隙流體的連續方程式可表示如下：

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

而其動量方程式在考慮重力作用後，可改寫成下列方程式：

$$x \text{ 方向: } n_2 \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} - \frac{\mu n_2^2}{k_{p2}} u_2 - n_2 \frac{\partial p_2}{\partial x} + n_2 \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (5)$$

$$y \text{ 方向: } -n_2 \frac{\partial p_2}{\partial y} - n_2 \rho_w g \cos \theta = 0 \quad (6)$$

其中，

u_2 ：草層中 x 方向之流體速度

p_2 ：草層中流體的壓力

n_2 ：草層中之孔隙率

k_{p2} ：草層中之比滲透係數

而在土層中孔隙流體的連續方程式可表示如下：

$$\frac{\partial u_3}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

其動量方程式同樣可在考慮重力作用後，予以簡化成下列式子：

$$x \text{ 方向: } n_3 \mu \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} - \frac{\mu n_3^2}{k_{p3}} u_3 - n_3 \frac{\partial p_3}{\partial x} + n_3 \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (8)$$

$$y \text{ 方向: } -n_3 \frac{\partial p_3}{\partial y} - n_3 \rho_w g \cos \theta = 0 \quad (9)$$

其中，

u_3 ：土層中 x 方向之流體速度

p_3 ：土層中流體的壓力

n_3 ：土層中之孔隙率

k_{p3} ：土層中之比滲透係數

邊界條件

此處將分別以裸露地及水深不及草高等兩種狀況來建立不同之邊界條件。

一、裸露地

1. 自由水面處 ($y = h_1$)

(1) 法線 (y) 方向流體應力連續可得：

$$p_1 = 0 \quad (10)$$

(2) 切線 (x) 方向流體應力連續：

$$\mu \frac{du_1}{dy} = 0 \quad (11)$$

2. 水層與土層之交界面 ($y = 0$)

(1) 切線 (x) 方向流體速度連續

$$u_1 = n_3 u_3 \quad (12)$$

(2) 切線 (x) 方向流體應力連續

$$\mu \frac{\partial u_1}{\partial y} = \mu \frac{\partial u_3}{\partial y} \quad (13)$$

(3) 法線 (y) 方向流體應力連續

$$p_1 = p_3 \quad (14)$$

3. 土層之不透水底部 ($y = -H$)

(1) 切線 (x) 方向流體速度為零

$$u_3 = 0 \quad (15)$$

二、水深不及草高

1. 草層與空氣界面/自由水面處 ($y = h_2$)

(1) 法線 (y) 方向流體應力連續

$$p_2 = 0 \quad (16)$$

(2) 切線 (x) 方向流體應力連續

$$\mu \frac{du_2}{dy} = 0 \quad (17)$$

2. 草層與土層之交界面 ($y = 0$)

(1) 切線 (x) 方向流體速度連續

$$n_2 u_2 = n_3 u_3 \quad (18)$$

(2) 切線 (x) 方向流體應力連續

$$\mu \frac{\partial u_2}{\partial y} = \mu \frac{\partial u_3}{\partial y} \quad (19)$$

(3) 法線 (y) 方向流體應力連續

$$p_2 = p_3 \quad (20)$$

3. 土層之不透水底部 ($y = -H$)

(1) 切線 (x) 方向流體速度為零

$$u_3 = 0 \quad (21)$$

解析解

分別考量裸露地及水深不及草高等兩種情況，求得其解析解如下：

一、裸露地

由水層與土層之控制方程式可推求出各層之流速分佈通式為：

$$u_1 = -\frac{1}{2} \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (22)$$

$$u_3 = \frac{\rho_w g \sin \theta k_{p3}}{n_3 \mu} + C_3 \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y) + C_4 \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y) \quad (23)$$

其中， $C_1 \sim C_4$ 為待定係數，可藉由裸露地之邊界條件解之，其結果如下：

$$C_1 = \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \cdot h_1 \quad (24)$$

$$C_2 = \frac{k_{p3} \rho_w g \sin \theta}{\mu} + \frac{\sqrt{n_3 k_{p3}} \cdot h_1 \rho_w g \sin \theta \cdot \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3} \rho_w g \sin \theta}{\mu \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \quad (25)$$

$$C_3 = \frac{\rho_w g \sin \theta \cdot h_1}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{k_{p3}}{n_3}} \quad (26)$$

$$C_4 = \frac{\sqrt{n_3 k_{p3}} \cdot h_1 \rho_w g \sin \theta \cdot \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)}{n_3 \mu \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} - \frac{k_{p3} \rho_w g \sin \theta}{n_3 \mu \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \quad (27)$$

然後將以上待定係數分別代入 u_1 及 u_3 的通解式中，經整理化簡可分別得到水層流速分佈 u_1 及土層中水流流速分佈 u_3 之特解如下：

$$u_1 = \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \left[-\frac{1}{2} y^2 + h_1 y + k_{p3} + \frac{h_1 \sqrt{n_3 k_{p3}} \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3}}{\cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \right] \quad (28)$$

$$u_3 = \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \left[\frac{k_{p3}}{n_3} + h_1 \sqrt{\frac{k_{p3}}{n_3}} \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y) + \frac{h_1 \sqrt{n_3 k_{p3}} \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3}}{n_3 \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \times \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y) \right] \quad (29)$$

二、水深不及草高

由草層與土層之控制方程式可推求出各層之流速分佈通式為：

$$u_2 = \frac{\rho_w g \sin \theta k_{p2}}{n_2 \mu} + C_5 \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} y) + C_8 \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y) \quad (31)$$

$$C_6 \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} y) \quad (30)$$

其中， $C_5 \sim C_8$ 為待定係數，可藉由水深不及草高之邊界條件求解，其結果如下：

$$u_3 = \frac{\rho_w g \sin \theta k_{p3}}{n_3 \mu} + C_7 \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y)$$

$$C_5 = \frac{\frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cdot \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) [(k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + k_{p3}]}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \quad (32)$$

$$C_6 = \frac{\frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cdot \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) [(k_{p3} - k_{p2}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3}]}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \quad (33)$$

$$C_7 = \frac{\frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \cdot \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) [(k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + k_{p3}]}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \quad (34)$$

$$C_8 = \frac{\rho_w g \sin \theta}{n_3 \mu} (k_{p2} - k_{p3}) + \frac{\frac{\rho_w g \sin \theta}{n_3 \mu} \cdot n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cdot \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) [(k_{p3} - k_{p2}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3}]}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \quad (35)$$

然後將以上待定係數分別代入 u_2 及 u_3 的通解式中，經整理化簡可分別得到草層流速分佈 u_2 及土層中水流流速分佈 u_3 之特解如下：

$$\begin{aligned}
 u_2 = & \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \cdot \left\{ \frac{k_{p2}}{n_2} \right. \\
 & + \frac{\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + k_{p3}] \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} y)}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \\
 & \left. - \frac{\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + k_{p3}] \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} y)}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \right\} \quad (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_3 = & \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \cdot \left\{ \frac{k_{p3}}{n_3} \right. \\
 & + \frac{\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} [(k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + k_{p3}] \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y)}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \\
 & + \left\{ \frac{1}{n_3} (k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y) \right. \\
 & \left. + \frac{\frac{n_2}{n_3} \cdot \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p3} - k_{p2}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3}] \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} y)}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \right\} \quad (37)
 \end{aligned}$$

又由於草層的孔隙率 n_2 較比滲透係數 k_{p2} 容易量測及計算，故在此引用 Kaviany(1991)曾提出孔隙率 n 與比滲透係數 k_p 之關係式：

$$k_p = \frac{n^3}{80(1-n)^2} d_c^2 \quad (38)$$

其中 d_c 為圓柱體之直徑，本文以草種之平均莖幹直徑代之。若已知草種之平均莖幹直徑，則草層之比滲透係數 k_{p2} 可直接由其孔隙率 n_2 代入下式求得。

$$k_{p2} = \frac{n_2^3}{80(1-n_2)^2} d_c^2 \quad (39)$$

流速之無因次化

求得裸露地及水深不及草高等二種情況於層流模式下的流速分佈後，為瞭解各項因子對流速分佈的影響及考慮日後進行實驗之方便，應對速度式做無因次化處理。

根據柏金漢 π 理論 (Buckingham π -method)，分析的對象為地表以上的流速分佈，針對裸露地及水深不及草高二種不同情況分別進行討論如下：

一、裸露地之流速無因次化

利用柏金漢 π 理論，要先決定出一組合宜的 π 項，裸露地中地表上方的流速 u_1 式 (28)，從式中可知

$$u_1 = f_1(y; \rho_w, g, \theta, \mu, h_1, n_3, H, k_{p3}) \quad (40)$$

其中，各變數之因次為 $[u_1] \cong LT^{-1}$ 、 $[y] \cong L$ 、 $[\rho_w] \cong ML^{-3}$ 、 $[g] \cong LT^{-2}$ 、 $[\mu] \cong ML^{-1}T^{-1}$ 、 $[h_1] \cong L$ 、 $[H] \cong L$ 、 $[k_{p3}] \cong L^2$ ，而 θ 與 n_3 為無因次參數；若選用 ρ_w 、 μ 、 h_1 為 MLT 的重複變數，則流速分佈的無因次式可表示如下：

$$\frac{\rho_w h_1 u_1}{\mu} = f_2\left(\frac{y}{h_1}, \frac{\rho_w^2 h_1^3 g}{\mu^2}, \theta, n_3, \frac{k_{p3}}{h_1^2}, \frac{H}{h_1}\right) \quad (41)$$

於上式中，可得知無因次化後的流速分佈與水深的相對關係；而其中 $\frac{\rho_w^2 h_1^3 g}{\mu^2}$ 代表總水

深因子、 θ 為坡度因子，而 n_3 、 $\frac{k_{p3}}{h_1^2}$ 與 $\frac{H}{h_1}$ 分別代表土層中孔隙率、滲透性與土層厚度之因子。由式(41)可清楚看出：只要控制地表

上方之總水深 h_1 、坡度 θ 與土層內之各項參數值，便可掌控裸露地中層流流況時之速度剖面。

雖然已把影響流速的因子予以簡化，但仍略顯繁雜，在此將流速分佈的解析解與流速無因次式比較，發現無因次因子中的總水深因子與坡度因子可合併成一新的無因次

參數 $\frac{\rho_w^2 h_1^3 g \sin \theta}{\mu^2}$ ，而代表土層內孔隙率、

比滲透係數與土層厚度之因子，亦可合併成一

無因次參數 $\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H$ ；因此裸露地之水層

流速分佈之無因次式可改寫如下：

$$\frac{u_1}{u_{1\max}} = f_3\left(\frac{y}{h_1}, \frac{\rho_w^2 h_1^3 g \sin \theta}{\mu^2}, \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H\right) \quad (42)$$

二、水深不及草高時之流速無因次化

水深不及草高時地表上方的流速 u_2 式 (36)，從式中可知

$$u_2 = f_4(y; \rho_w, g, \theta, \mu, h_2, n_2, k_{p2}, n_3, H, k_{p3}) \quad (43)$$

其中，各變數之因次為 $[u_2] \cong LT^{-1}$ 、 $[y] \cong L$ 、 $[\rho_w] \cong ML^{-3}$ 、 $[g] \cong LT^{-2}$ 、 $[\mu] \cong ML^{-1}T^{-1}$ 、 $[h_2] \cong L$ 、 $[k_{p2}] \cong L^2$ 、

$[H] \cong L$ 、 $[k_{p3}] \cong L^2$ ，而 θ 、 n_2 與 n_3 為無因

次參數；若選用 ρ_w 、 μ 、 h_2 為 MLT 的重複變數，在此 h_2 代表草層內水位的高度，則流速分佈的無因次式可表示為：

$$\frac{\rho_w h_2 u_2}{\mu} = f_5\left(\frac{y}{h_2}, \frac{\rho_w^2 h_2^3 g}{\mu^2}, \theta, n_2, \frac{k_{p2}}{h_2}, n_3, \frac{k_{p3}}{h_2^2}, \frac{H}{h_2}\right)$$

(44)

其中 $\frac{\rho_w^2 h_2^3 g}{\mu^2}$ 代表草層內之總水深因子、 θ 為坡度因子， n_2 、 n_3 分別代表草層與土層的孔隙率， $\frac{k_{p2}}{h_2^2}$ 、 $\frac{k_{p3}}{h_2^2}$ 分別代表草層與土層的滲透性因子，而 $\frac{H}{h_2}$ 則是代表土層厚度因子。由式(44)可得知，只要控制草層內的總水深 h_2 、坡度 θ ，及草層與土層內之各項參數值，便可掌控水深不及草高層流況時之速度剖面。

由於流速的影響因子在簡化後仍顯繁雜，在此同裸露地狀況將流速分佈的解析解與流速無因次式作比較，發現無因次因子中的總水深因子與坡度因子可合併成一新的無因次參數 $\frac{\rho_w^2 h_2^3 g \sin \theta}{\mu^2}$ ；而草層及土層內之孔隙率、比滲透係數與土層厚度因子，亦可分別合併成 $\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} h_2$ 及 $\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H$ ，因此在水深不及草高的狀況下，速度無因次式可改寫為：

$$\frac{u_2}{u_{2\max}} = f_6\left(\frac{y}{h_2}, \frac{\rho_w^2 h_2^3 g \sin \theta}{\mu^2}, \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H, \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} h_2\right) \quad (45)$$

結果與討論

流速之無因次參數探討

一、裸露地流速之無因次參數探討

將式(42)中之 $\frac{\rho_w^2 h_1^3 g \sin \theta}{\mu^2}$ 與 $\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H$ 分別以無因次參數 η_1 與 η_2 表示。

固定 $\eta_2 = 6455$ ，改變 η_1 值分別為 125568，62784，31392 及 12556.8，可得一流速剖面圖，如圖 3。從圖中可發現：隨著 η_1 的增大，流速亦隨之變快，這意味著水深、坡度變大，將導致流速變快。

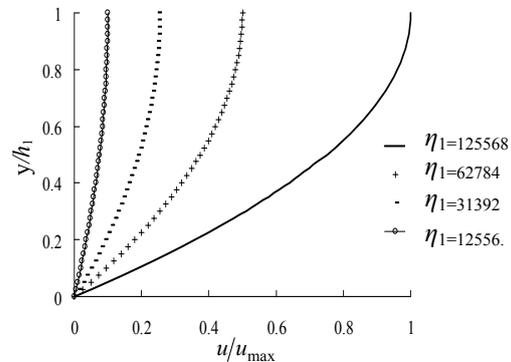


圖 3 裸露地改變 η_1 值之流速剖面圖

Figure 3. Effect of the parameter η_1 on velocity profiles with bare ground.

再固定 $\eta_1 = 62784$ ，改變 η_2 值分別為 6455，566.9，50 及 4.47，可得一流速剖面圖，如圖 4。 $\eta_2 = \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} H$ ，為土層之滲透性因子， η_2 越小表示其滲透性越佳，由圖可得證：滲透性越佳之土層，該狀況下之底床流速便不為零，如 $\eta_2 = 4.47$ 時，該流速明顯大於 η_2 值較大者；且由圖可發現： η_2 較大時，土層之相關參數對地表上方的流速並無甚大之影響。

二、水深不及草高時流速之無因次參數探討

將式(45)中之 $\sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}H}$ 、 $\frac{\rho_w^2 h_2^3 g \sin \theta}{\mu^2}$ 與 $\sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}h_2}$ 分別以無因次參數 η_2 、 η_3 與 η_4 表示。

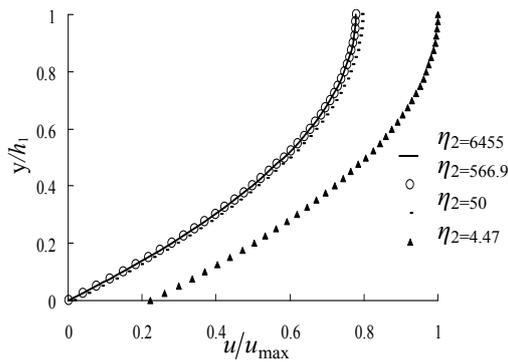


圖 4 裸露地改變 η_2 值之流速剖面圖

Figure 4. Effect of the parameter η_2 on velocity profiles with bare ground.

固定 $\eta_3 = 62784$ 與 $\eta_4 = 13.25$ ，改變 η_2 值分別為 6455，566.9，50 及 15，可得一速度剖面圖，如圖 5。同前節裸露地狀況下之探討，由圖顯示： η_2 值愈小表示土層滲透性愈佳，該狀況下之底床流速便愈大。在水深不及草高的狀況下，顯示土層之相關參數對於相對水深在 0.3 以上的水流流速幾無影響；而相對水深小於 0.3 時， η_2 偏小之相對流速明顯大於 η_2 較大者。

若固定 $\eta_2 = 6455$ 與 $\eta_4 = 13.25$ ，改變 η_3 值分別為 125568，62784，31392 及 12556.8，可得一流速剖面圖，如圖 6。結果顯示在水深不及草高的狀況下，趨勢與裸露地狀況下改變 η_1 值時相同，即隨著 η_3 的增大，流速隨之變快，意味著水深、坡度變大，

將導致流速變快。由圖 3 及圖 6 可發現，兩種地表覆蓋情形下，改變水深及坡度造成相對流速變大之趨勢相同，差異僅在於水深不及草高之流況較接近均勻流。

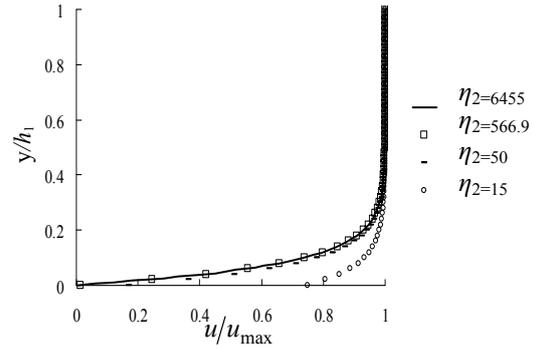


圖 5 水深不及草高時改變 η_2 之流速剖面圖

Figure 5. Effect of the parameter η_2 on velocity profiles with emergent vegetation.

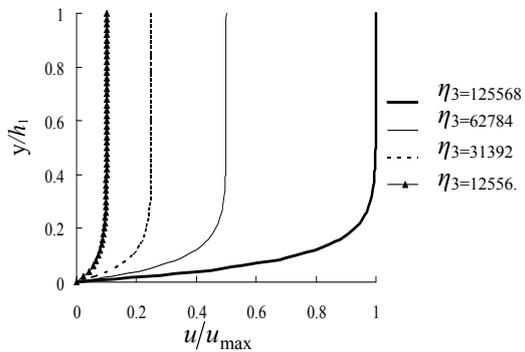


圖 6 水深不及草高時改變 η_3 值之流速剖面

Figure 6. Effect of the parameter η_3 on velocity profiles with emergent vegetation.

最後固定 $\eta_2 = 6455$ 、 $\eta_3 = 62784$ ，改變 η_4 值分別為 63.14，39.75，21.05 及 13.25，亦可得一流速剖面圖，如圖 7。由於 $\eta_4 = \sqrt{n_2/k_{p2}}h_2$ ，代表草層之稠密度因子，其值越大表示植生生長情形越茂密。由圖顯

示：當 η_4 值越大，流速便越小，意指當植生生長越茂密，其水流的阻力越大，進而導致水流流速越緩慢之結果。

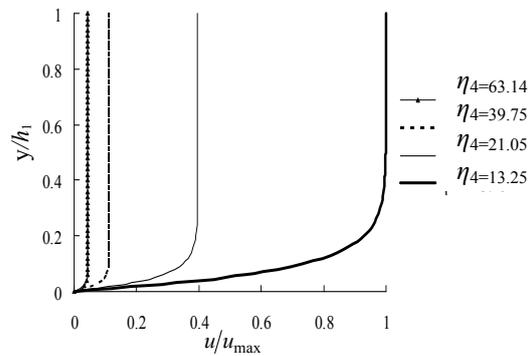


圖 7 水深不及草高時改變 η_4 之流速剖面圖
Figure 7. Effect of the parameter η_4 on velocity profiles with emergent vegetation.

比較

本研究將與前人研究進行比較，包括 Darcy-Weisbach 摩擦損失公式及運動波方程式。

由於 Darcy-Weisbach 摩擦損失公式及運動波方程式皆僅能求得平均流速，為與之相比較，便進一步將裸露地之流速分佈 u_1 式(28) 及水深不及草高之流速分佈 u_2 式(36)分別積分得平均流速 \bar{u}_1 及 \bar{u}_2 方程式如下：

$$\bar{u}_1 = \frac{\int_0^{h_1} u_1 dy}{h_1} = \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu} \left[\frac{1}{3} h_1^2 + k_{p3} + \frac{h_1 \sqrt{n_3 k_{p3}} \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) - k_{p3}}{\cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \right] \quad (46)$$

$$\bar{u}_2 = \frac{\int_0^{h_2} u_2 dy}{h_2} = \frac{\rho_w g \sin \theta}{\mu \cdot h_2} \cdot \left\{ \frac{k_{p2}}{n_2} \cdot h_2 \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{\frac{k_{p2}}{n_2}} \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} [(k_{p2} - k_{p3}) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + k_{p3}] \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2)}{n_3 \sqrt{\frac{n_2}{k_{p2}}} \sinh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \sinh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H) + n_2 \sqrt{\frac{n_3}{k_{p3}}} \cosh(\sqrt{n_2/k_{p2}} h_2) \cosh(\sqrt{n_3/k_{p3}} H)} \right\} \quad (47)$$

一、Darcy-Weisbach 摩擦損失公式

參考 Robert(1990)之研究，其中層流部份係採用 Darcy-Weisbach 摩擦損失公式，公式如下：

$$S = f \frac{\bar{V}^2}{8gh} \quad (48)$$

式中，

S ：坡度，相當於 $\tan \theta \approx \sin \theta$

f ：摩擦因子 ($= \frac{C}{\text{Re}}$)， C 為與地表糙度有關之無因次參數

Re ：雷諾數 ($= \frac{\rho \bar{V} h}{\mu}$)

\bar{V} ：平均流速

引用 Gilley 等(1985) 應用於淺水流流經裸露地表時之 C 值 ($= 200$)，可推導得裸露地時 D-W 公式之平均流速為：

$$\bar{V}_1 = \frac{\rho g \sin \theta}{25\mu} \cdot h^2 \quad (49)$$

而草地部分則引用 Helmers 等(2006)，考量植生地表阻力增大時採用 $C = 800$ ，如此可推導得草地狀況下 D-W 公式之平均流速，並與本研究相互比較。

$$\bar{V}_2 = \frac{\rho g \sin \theta}{100\mu} \cdot h^2 \quad (50)$$

二、運動波方程式

參考 Woolhiser & Liggett(1967) 及 Eaglson (1970)等氏之研究，其中漫地流流況為層流時，運動波方程式如下：

$$\bar{v} = \left(\frac{2g \sin \theta}{C_r} \right)^{1/2} h^{1/2} \quad (51)$$

式中，

\bar{v} ：平均流速

θ ：地面逕流與水平方向夾角

C_r ：雷諾數及地表糙度係數之函數

$$\left(= \frac{4}{\text{Re}} \right)$$

Re ：雷諾數 ($= \frac{\rho \bar{v} h}{\mu}$)

由上式可推導得平均流速 \bar{v} 為：

$$\bar{v} = \frac{\rho g \sin \theta}{2\mu} \cdot h^2 \quad (52)$$

由式(52)得知：運動波方程式求得之平均速度 \bar{v} 僅與流體密度 ρ 、流體動力黏滯係數 μ 、重力加速度 g 及傾斜角度 θ 、水深 h 等因子有關，顯示無法利用該式分別求取裸露地或水深不及草高等不同地表狀況下之平均速度，而本研究則可利用不同公式分別求得裸露地及水深不及草高等不同地表狀況之下的平均流速，此乃本研究優於運動坡方程式之處。

雖然 D-W 公式可依不同地表狀況分別求得不同之平均流速公式，如本研究裸露地採 $C = 200$ 得式(49)，而草地採 $C = 800$ 得式(50)，但在草地部份仍無法根據各種草種在各種生長狀況下，所產生之不同植生密度或不同平均莖幹直徑等計算出平均流速，此乃本研究優於 D-W 公式之處。

今給定如表 1 之參數值，則可繪出平均流速與水深的關係圖：裸露地狀況下漫地流平均流速比較如圖 8；草地狀況下漫地流平均流速比較如圖 9，其中 k_{p2} 為由 n_2 及 d_c 利用式(39)求得，本研究將 n_2 分別以 0.9 及 0.95 代入計算，則可分別繪製成圖 9(a)及圖 9(b)。

由圖 8 可發現，本研究漫地流流經裸露地之平均流速，介於運動波方程式及 D-W 公

式所求得之結果。而將圖 9(a)、(b)兩圖相比較，可發現當草層孔隙率 n_2 值較小，即草層較茂密時，平均流速較小甚至趨近於零；而當 n_2 值高至 0.95 時，該平均流速之曲線已明顯變大。圖 9(a)顯示，當 $n_2 = 0.9$ 時，本研究水深不及草高之漫地流平均流速結果與 D-W 公式之草地計算結果幾乎吻合，惟水深較大時，D-W 公式計算之結果略大於本研究水深不及草高之漫地流平均流速結果。圖 9(b)則顯示，當 $n_2 = 0.95$ 時，本研究水深不及草高之漫地流平均流速結果略大於 D-W 公式之草地計算結果，此乃因 D-W 公式並無法考量植生之稠密度所致。

由於草地狀況下，本研究漫地流之平均流速結果與 D-W 公式計算之結果相當接近，且已知改變草層之植生密度時，平均流速結果亦隨之改變，因此將 D-W 公式計算之平均流速與本研究不同植生密度下漫地流平均流速繪製於同一張圖上以利比較，如圖 10。由圖可明顯看出，本研究水深不及草高之漫地流平均流速隨草層孔隙率增加而增大，即當草層植生愈稀疏，漫地流平均流速愈快。當草層孔隙率 n_2 為 0.90、0.91、0.92、0.93 及 0.94 時，本研究之平均流速與 D-W 公式計算之平均流速分別相交於水深約為 0.028、0.032、0.037、0.042 及 0.049 公尺處，而當草層孔隙率 $n_2 = 0.95$ 且水深小於 0.05 公尺時，本研究之平均流速則皆大於 D-W 公式計算之結果。

表 1 與 D-W 公式及運動波方程式比較時之參數選用值表

Table 1. The selected parameters when compared with D-W formula and kinematic wave equation.

參數	值	單位
ρ_w	1000	kg/m^3
g	9.81	m/s^2
$\sin \theta$	0.0001	-
μ	0.001	$kg/m \cdot s$
n_3	0.5	-
k_{p3}	3×10^{-11}	m^2
H	0.05	m
d_c	0.003	m

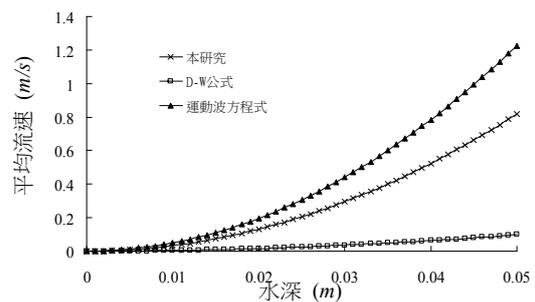


圖 8 裸露地平均流速之比較
Figure 8. Comparison among the mean velocities of bare ground

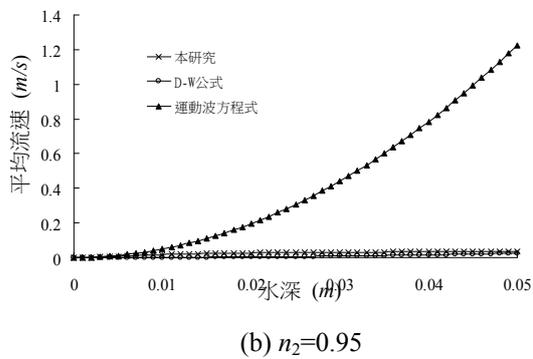
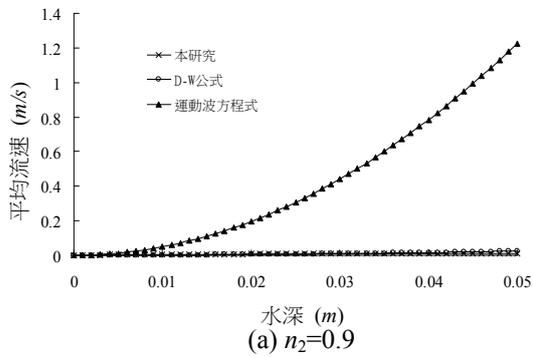


圖 9 草地時漫地流平均流速之比較
Figure 9. Comparison among the mean velocities for emergent vegetation as (a) $n_2=0.9$ (b) $n_2=0.95$.

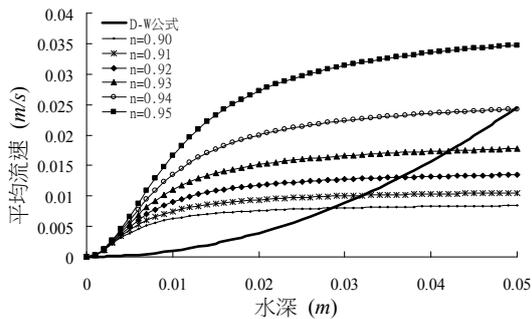


圖 10 不同植生密度時本研究與 D-W 公式之漫地流平均流速比較
Figure 10. Comparison among the mean velocities for different porosity for emergent vegetation

流速分佈

最後，將表 2 中之各參數值代入裸露地之 u_1 式(28)及水深不及草高之 u_2 式(36)中，繪製成圖以呈現其狀況下之流速分佈，如圖 11 及圖 12 所示。

圖 11 及圖 12 中，(a)為該狀況下由地表上至下整體之流速分佈曲線，由於地表以下之流速甚小，無法看出其流速變化，因此本研究特別將該狀況下底床附近之流速分佈曲線以局部放大圖(b)來展示。由局部放大圖可看出，底床處流速並不為零，但在土層甚淺處，流速便已趨近於零。

表 2 流速分佈採用之參數值表
Table 2. The selected parameters for calculating the velocity profiles.

參數	值	單位
ρ_w	1000	kg/m^3
g	9.81	m/s^2
$\sin \theta$	0.0001	-
μ	0.001	$kg/m \cdot s$
n_3	0.5	-
k_{p3}	3×10^{-11}	m^2
h_1, h_2	0.04	m
H	0.05	m
n_2	0.9	-
d_c	0.003	m
k_{p2}	約 8.2×10^{-6}	m^2

註：表中 k_{p2} 為 n_2 及 d_c 代入式(39)計算所得。

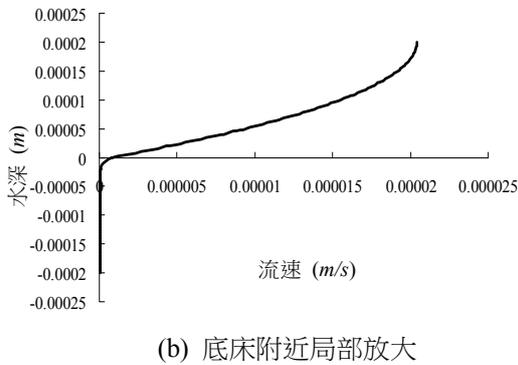
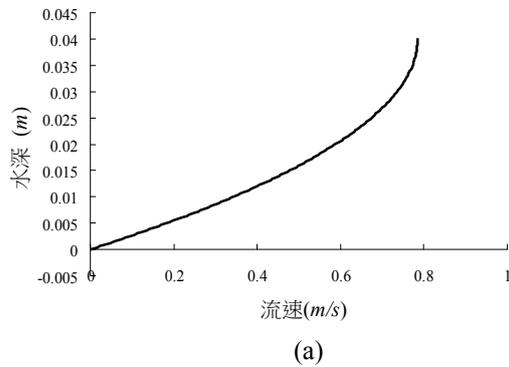


圖 11 裸露地之流速分佈
 Figure 11. (a)The velocity profile of bare ground and (b)near the bottom.

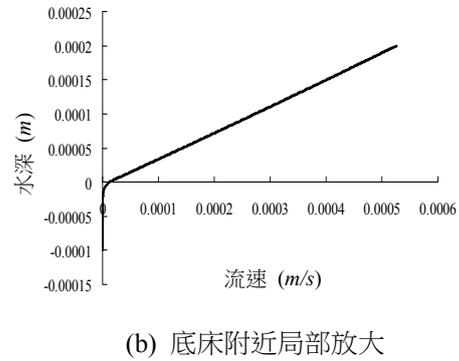
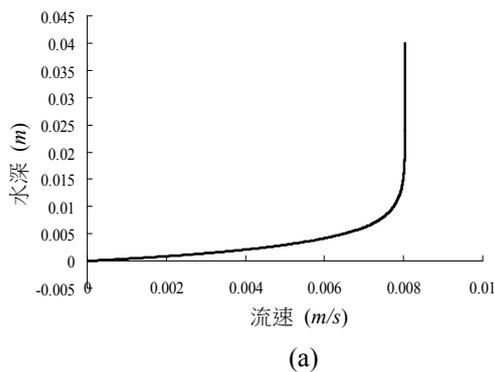


圖 12 水深不及草高之流速分佈
 Figure 12. (a)The velocity profile of emergent vegetation and (b)near the bottom.

結論

本研究主要在探討水流流於坡面時之動力分析，考慮土層的滲透性，以水力學的觀點，運用那維爾-史托克斯方程式及孔隙介質流的理論，對整體流速分佈進行解析。經過上述討論後，可歸納出下列結論：

1. 本研究在探討植被與水流之交互作用時，並非從水流阻力的觀點著手，而是將草層視為一均質(homogeneous)且具等向性(isotropic)的孔隙介質，再以相關理論直接對草層內的流速分佈進行求解。
2. 裸露地之地表狀況下，流速隨著水深、坡度變大而增大，且當土層滲透性愈佳，其流速亦愈大，惟土層之滲透性對於地表以上之流速無甚大之影響性。
3. 有植株覆蓋但水深不及草高之地表狀況下，本研究結果顯示其流況接近均勻流。該狀況下之流速隨水深、坡度增加而變大；土層相關參數對於地表以上流速亦無顯著影響，僅影響底床附近之水流流速；

而草層相關參數，當植生生長愈茂密時，對於地表以上水流流速減緩之程度愈大，此現象說明了植被確有降低逕流流速之功能。

4. 將本研究之流速分佈解析解積分得平均流速，並與 D-W 公式及運動波方程式計算得平均流速繪圖以相互比較，結果顯示：不論裸露地或草地，運動波方程式計算得平均流速結果皆為最大。裸露地狀況下，本研究計算得平均流速介於運動波方程式及 D-W 公式計算之結果間。草地狀況下，本研究水深不及草高之漫地流平均流速隨草層植生愈稀疏而愈大。
5. 本研究之流速解析解，除了可描述地表上方之流速分佈外，更考慮地表下土層具滲透性的性質，換言之，本解可詮釋底床流速不為零的真實現象。
6. 本研究是針對植被存在與否對坡地水流流速的影響進行探討，雖然由控制方程式與邊界條件亦可解出流場中的壓力，但因流速為完全發展之假設，導致本解中各區內的壓力僅為靜水壓力分佈，因此文中並無特別討論。

謝誌

本研究承蒙 行政院國家科學委員會補助經費，特此致謝！

參考文獻

1. 王如意、謝平城(1993)，「以運動波方程式探討應用合理化公式之合適性研究--(三)高爾夫球場」，國立台灣大學水工試驗所第 160 號研究報告。
2. 宋長虹(1993)，「水波作用下多孔彈性底床動力反應之研究」，博士論文，台北。
3. 謝平城、許煜聖(2003)，「水流通過植被地表之研究」，水土保持學報，第三十五卷，第一期，第 33-46 頁。
4. Barros, A.P. and J.D. Colello (2001), "Surface roughness for shallow overland flow on crushed stone surfaces," J. Hydraul. Eng. ASCE, Vol.127, No.1.
5. Biot, M.A.(1956a),"Theory of propagation elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low-frequency range," JASA, Vol.28, pp.168-178.
6. Biot, M.A.(1956b),"Theory of propagation elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. Higher frequency range," JASA, Vol.28: pp.179-191.
7. Biot, M.A.(1962),"Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media," J. Appl. Phys., Vol.33, No.4, pp.1482-1498.
8. Chen, C. (1976), "Flow resistance in broad shallow grassed channels," J. Hydraul. Div., ASCE, Vol.102, pp.307-322.
9. Cundy, T.W. and S.W. Tento(1985), "Solution to the kinematic wave approach to overland flow routing with rainfall excess given by Philip's equation," Water Resour. Res., Vol.21, pp.1132-1140.
10. Eagleson, P.S.(1970),"Surface Runoff and Streamflow,"Chap. 15 Dynamic Hydrology, pp.325-364.
11. Emmett, W.W.(1970),"The hydraulics of overland flow on hillslopes," U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 662A.
12. Gilley, J.E., D.A Woolhiser, D.B. McWhorter (1985), "Interrill soil erosion -

- Part I: Development of model equations,”
Trans. ASAE, Vol.28, pp.147-153.
13. Helmers, M.J. and D.E. Eisenhauer(2006),
“Overland flow modeling in a vegetative
filter considering non-planar topography
and spatial variability of soil hydraulic
properties and vegetation density,” J.
Hydrology, Vol.328, pp.267-282.
14. Henderson, F.M. and R.A. Wooding(1964),
“Overland flow and groundwater flow from
a steady rainfall of finite duration,” J.
Geophys. Res., Vol.69, pp.1531-1540.
15. Horton, R.E.(1945),“Erosional
development of streams and their drainage
basins-hydrophysical approach to
quantitative morphology,” Bull. Geol. Soc.
Am., Vol.56, pp.275-370.
16. Hsieh, Ping-Cheng and Yu-Sheng
Shiu(2006), “Analytical solutions for water
flow passing over a vegetal area,”
Advances in Water Resources, Vol.29, No.9,
pp.1257-1266.
17. Izzard, C.F.(1946),“Hydraulics of runoff
from developed surfaces,” Proc. High Res.
Board, Vol.26, pp.129-150.
18. Kaviany, M.(1991), “Principles of Heat
Transfer in Porous Media,”Springer, Berlin.
19. Kibler, D.F. and D.A. Woolhiser(1970),
“The kinematic cascade as a hydrologic
model,” Hydrology Papers No. 39,
Colorado State University, Fort Collins,
Colorado.
20. Lighthill, M.J. and G.B. Whitham(1955),
“Kinematic waves,”Proc. R. Soc. London,
Ser. A 229, pp.281-316.
21. Liu, Q.Q. and V.P. Singh(2004), “Effect of
microtopography, slope length and gradient
and vegetative cover on overland flow
through simulation,” J. Hydraul. Eng.
ASCE, Vol.9, No.5, pp.375-382.
22. Liu, Q.Q., L. Chen and V.P. Singh(2005),
“Roll waves in overland flow,” J. Hydraul.
Eng. ASCE, Vol.10, No.2, pp.110-117.
23. Morgali, J.R. and R.K. Linsley(1965),
“Computer analysis of overland flow,” J.
Hydraul. Div. ASCE, Vol.91, pp.81-100.
24. Ragan, R.M. and J.O. Duru(1972),
“Kinematic wave nomograph for time of
concentration,” J. Hydraul. Div. ASCE.
Vol.98 (HY10), pp.1765-1771.
25. Robert H. Kadlec(1990), “Overland flow in
wetlands: vegetation resistance,” J. Hydraul.
Eng., Vol.116, No.5.
26. Singh, V.P.(1997),“Kinematic wave
modeling in water resources,” John Wiley
& Sons, New York.
27. Woo, D.C. and E.F. Brater(1962),“Spatially
varied flow from controlled rainfall,” Proc.
ASCE, Vol.88, pp.31-56.
28. Wooding, R.A.(1965),“A Hydraulic Model
for the Catchment-Problem, 1.
Kinematic-Wave Theory,” J. Hydrology,
Vol.3, pp.254-267.
29. Woolhiser, D.A.(1969), “Overland flow on
a converging surface,” Trans. ASAE,
Vol.12, No.4, pp.460-462.
30. Woolhiser, D.A., and J.A. Liggett(1967),
“Unsteady, one-dimensional flow over a
plane – The rising hydrograph,” Water
Resour. Res., Vol.3, No.3, pp.753-771.

97 年 05 月 13 日 收稿

97 年 05 月 30 日 修改

97 年 06 月 02 日 接受