

均勻降雨下有限厚土層之植生地表水力分析

胡秀怡 謝平城*

摘要 本研究將流場分成均質水層、水-草混合層和有限厚透水土層 (以下簡稱水層、草層、土層)。考量坡地表面透水, 且地表下的水流為孔隙介質流, 因此地表水流速度不為零。以 Navier-Stokes 方程式來描述水層之流況, 將草、土兩層中之流體視為孔隙介質流的運動, 且引入多孔介質層流模式加以描述之, 最後搭配 Runge-Kutta 法而求得其半解析解。文中分成非浸沒型 (水深不及草高)、浸沒型 (水深漫過草高) 與混合型三種類型討論, 並探討坡度、降雨強度、土層厚度和植株直徑等因子對流況之影響, 以期研究成果在環境和生態工程之設計及地表水的管理上能有所助益。

關鍵詞: 孔彈性介質理論、漫地流、均勻降雨、植生。

Hydraulic Analysis of Water Flow Passing over Vegetated Areas with Finite Thick Soil Layers under Uniform Rainfall

Siou-Yi Hu Ping-Cheng Hsieh*

ABSTRACT To understand the effect of rainfall on water flow down a slope, the flow region was divided into three layers—the homogenous water layer, mixed water-plant layer and finite thick soil layer. The flow of the water layer was governed by the Navier-Stokes equations. The vegetation and soil layers were both regarded as porous media and the laminar model modified from Biot's theory of poroelasticity was applied. The semi-analytical solutions were then obtained via the Runge-Kutta method. Three patterns--submerged vegetation, emergent vegetation and submerged-emergent vegetation--were discussed. Additionally, the effect of slope, rainfall intensity, thickness of soil layer and plant diameter on the flow were also discussed. The results are believed to be helpful in environmental and ecological engineering design and surface water management.

Key Words : Poro-elasticity theory, overland flow, uniform rainfall, vegetation.

一、前言

台灣之山坡地由於大規模開發, 造成地表破壞、土石鬆動, 且在豪雨與颱風侵襲後大量之地表逕流易侵蝕地面造成山崩、地滑、土石流等土砂災害, 為了保障國民之生命財產安全及生態之維護, 山坡地之治理維護是當前不可忽視的課題, 在兼顧安全性及生態保育之原則下, 天然資材-植被之應用便愈趨廣泛。

一般在探討植生對於水流影響之研究上, 均依水深和植株高度之相對高度分成浸沒 (劉, 2008; Huai et al., 2009) 及非浸沒 (郭, 2005) 兩類進行探討, 如 Wu et al. (2006) 和 Wu and He (2009) 以拖曳力和抗彎剛度 (flexural rigidity) 之概念探討浸沒及非浸沒情形下, 彈性植株 (草本植物) 與剛性植株 (木本植物) 之粗糙度、植株密度對渠道中水流之影響, 而後提出一水力模式來估算植生渠道中之流量, 最後以實驗和兩

條天然河川的現地資料進行驗證並將其應用於植生渠道中沙粒之傳輸。Kubrak et al. (2008) 建構一維穩態模式去研究明渠流過浸沒及非浸沒植株之縱向流速的垂直剖面變化，且考慮渠道底部之粗糙度及植株本身對水流造成之阻力，並引入結構學—懸臂樑理論。Wu et al. (1999) 以馬鬃模擬植物，研究浸沒及非浸沒情況下植株之粗糙係數與水深之關係。

孔隙介質流模式在適用性方面，宋 (1993) 根據 Biot (1956a, 1956b, 1962) 多孔彈性介質理論建立多孔介質勢流模式及層流模式，並經由參數檢定以及模式驗證實模式之適用性。孫 (1998) 以宋之孔隙介質流模式配合 Navier-Stokes 方程式來描述流體在坡面的運動情形。許 (2003) 將地表上方之植生層整體視為一多孔介質，引入宋 (1993) 所建立之多孔介質層流模式，將流體與固體間之摩擦力 (水流阻力) 隱含於其中，最後以解析方法進行求解，進而探討均勻流地表上有、無植生之流速變化。而楊 (2007) 及劉 (2007) 分別以實驗及數值分析驗證許 (2003) 所求得之解析流速。楊 (2010) 改良許 (2003) 之研究，探討均勻降雨時無植生坡地上之水理變化，以 4 階 Runge-Kutta 法求得其中半解析解，並分析不同土壤種類下地表水流之流況變化。

與前人研究不同，本文加入降雨因子，並考慮部分浸沒和部分非浸沒 (即混合型) 之植生水流，且以許 (2003) 之研究為基礎，採用解析方式探討降雨植生坡面上流況變化，以期更接近真實流況。

二、理論解析

本研究探討一均勻降雨 (強度為 i) 下，地表水流流經坡度 θ 之植生坡地。將流場分成均質水層、水-草混合層和有限厚透水土層 (以下簡稱水層、草層、土層) 三區，並依水深與草層高度之相對高度將水理現象分成浸沒型 (水深漫過草高)、非浸沒型 (水深不及草高) 與混合型三種，示意圖如圖 1 所示。

本研究除了將流體視為具黏滯性和不可壓縮性外，並做了以下幾點假設：

1. 各區皆為層流。
2. 均勻降雨一段時間後，水深及流速不再受時間影響，亦即達到穩態。
3. 水流長度遠大於深度，故相對於垂直坡面方向 (y) 之導數，平行坡面方向 (x) 之導數可忽略。

4. 無風力和水波之作用，且大氣壓力為 0 (以相對壓力計)。
5. 平行坡面方向之流速遠大於垂直坡面方向之流速，故忽略垂直坡面方向之流速。
6. 土層為飽和狀態，可忽略垂直坡面方向 (y) 之流速。
7. 將坡面視為無限長，並以單位寬度來進行探討，故只針對垂直二維流場做解析。
8. 草層中之植株受水流作用後倒伏而不回復，且土層中之土壤顆粒不受水流流動而位移變形。

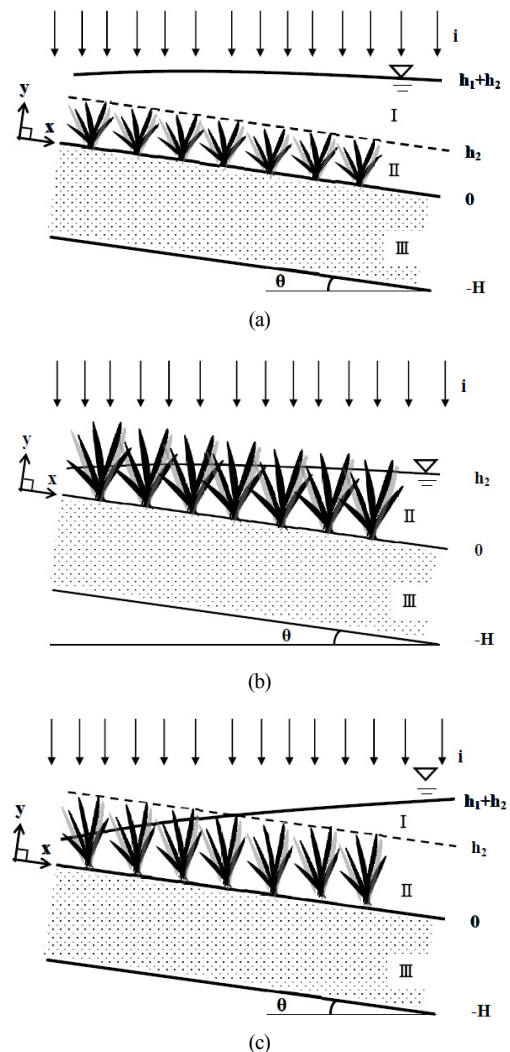


圖 1 研究區域示意圖 (a) 水深漫過草高 (b) 水深不及草高 (c) 混合型

Fig.1 Schematic diagram of the study. (a) submerged vegetation (b) emergent vegetation (c) submerged-emergent vegetation

9. 忽略固體和流體間的耦合效應。

10. 草層植株高度均相同；土層為單一土壤、單一土層且厚度均勻。

1. 控制方程式

(1) 水層：

引入 Navier-Stokes 方程式來描述水層之流況並藉由上述之假設，可得水層之運動方程式：

x 方向：

$$\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - \frac{\partial p_1}{\partial x} + \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (1)$$

y 方向：

$$-\frac{\partial p_1}{\partial y} - \rho_w g \cos \theta = 0 \quad (2)$$

其中， μ ：流體之動力黏滯係數； u_1 ：水層中平行坡面方向 (x) 之流速； P_1 ：水層中流體之壓力； ρ_w ：水體密度； g ：重力加速度； θ ：坡度；下標 1：表水層。

(2) 草層和土層：

將草層及土層中流體之運動視為孔隙介質流運動，以許 (2003) 採用 Biot 的孔彈性介質理論為依據，描述孔隙介質流應用於草層及土層中流體的運動。將草層和土層中之多孔介質視為不可移動變形之剛體，並忽略流體與固體間質量耦合之效應，且在孔隙介質內的流體呈完全飽和狀態。在考慮重力作用下，草層和土層之動量方程式可簡化成：

x 方向：

$$n_2 \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} - \frac{\mu n_2^2}{k_{P_2}} u_2 - n_2 \frac{\partial p_2}{\partial x} + n_2 \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (3)$$

y 方向：

$$-n_2 \frac{\partial p_2}{\partial y} - n_2 \rho_w g \cos \theta = 0 \quad (4)$$

x 方向：

$$n_3 \mu \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} - \frac{\mu n_3^2}{k_{P_3}} u_3 - n_3 \frac{\partial p_3}{\partial x} + n_3 \rho_w g \sin \theta = 0 \quad (5)$$

y 方向：

$$-n_3 \frac{\partial p_3}{\partial y} - n_3 \rho_w g \cos \theta = 0 \quad (6)$$

其中， u_2 、 u_3 ：草層和土層中平行坡面方向 (x) 之孔隙中流體速度； P_2 、 P_3 ：草層和土層中孔隙間流體之壓力； n_2 、 n_3 ：草層和土層之孔隙率； k_{P_2} 、 k_{P_3} ：草層和土層之比滲透係數， $[L^2]$ ；下標 2、3：分別表草層、土層。

2. 邊界條件

邊界位於下列 6 處，分別為自由水面處 ($y = h_1 + h_2$)、水層和草層交接面 ($y = h_2$)、草層和土層交接面 ($y = 0$)、土層之不透水底部 ($y = -H$)、初始位置 ($x = 0$) 及距初始位置 L 處 ($x = L$)。以下分述不同位置之邊界條件：

(1) 自由水面處 ($y = h_1 + h_2$)

① 法線 (y) 方向流體應力連續

$$P_1 = 0 \quad (7)$$

② 切線 (x) 方向流體應力連續

$$\mu \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0 \quad (\text{自由水面處剪應力為 } 0) \quad (8)$$

(2) 水、草層交接面 ($y = h_2$)

① 切線 (x) 方向流體速度連續

$$u_1 = n_2 u_2 \quad (9)$$

② 切線 (x) 方向流體應力連續

$$\mu \frac{\partial u_1}{\partial y} = \frac{\partial u_2}{\partial y} \quad (10)$$

③ 法線 (y) 方向流體應力連續

$$P_1 = P_2 \quad (11)$$

(3) 草、土層交接面 ($y = 0$)

① 切線 (x) 方向流體速度連續

$$n_2 u_2 = n_3 u_3 \quad (12)$$

② 切線 (x) 方向流體應力連續

$$\mu \frac{\partial u_2}{\partial y} = \mu \frac{\partial u_3}{\partial y} \quad (13)$$

③ 法線 (y) 方向流體應力連續

$$P_2 = P_3 \quad (14)$$

(4) 土層之不透水底部 ($y = -H$)

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

(5) 初始位置 ($x = 0$)

水、草、土三層之流速為 0

$$u_1 = 0; u_2 = 0; u_3 = 0 \quad (16)$$

(6) $x = L$

$$\frac{dh}{dx} = 0 \quad (\text{見 Morris, 1978}) \quad (17)$$

3. 解析解

首先，對水、草、土三層垂直坡面方向之控制方程式 (2) 式、(4) 式和 (6) 式作 y 的一次積分，並代入邊界條件 (7) 式、(11) 式及 (14) 式，可得到三層之壓力分佈式如下：

$$P_1 = \rho_w g \cos \theta (h_1 + h_2 - y), h_2 \leq y \leq h_1 + h_2 \quad (18)$$

$$P_2 = \rho_w g \cos \theta (h_1 + h_2 - y), 0 \leq y \leq h_2 \quad (19)$$

$$P_3 = \rho_w g \cos \theta (h_1 + h_2 - y), -H \leq y \leq 0 \text{ or } \infty < y \leq 0 \quad (20)$$

根據第 5 項假設忽略垂直方向之流速，因此三層之壓力分佈均呈靜水壓力分佈。

將三層壓力分佈式分別代入 (1) 式、(3) 式及 (5) 式，可解出三層之流速通解如下：

$$u_1 = \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2, h_2 \leq y \leq h_1 + h_2 \quad (21)$$

$$u_2 = C_3 e^{\sqrt{\frac{n_2}{k_{p_2}}} y} + C_4 e^{-\sqrt{\frac{n_2}{k_{p_2}}} y} - \frac{k_{p_2} \rho_w g \cos \theta}{n_2 \mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right], 0 \leq y \leq h_2 \quad (22)$$

$$u_3 = C_5 e^{\sqrt{\frac{n_3}{k_{p_3}}} y} + C_6 e^{-\sqrt{\frac{n_3}{k_{p_3}}} y} - \frac{k_{p_3} \rho_w g \cos \theta}{n_3 \mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right], -H \leq y \leq 0 \quad (23)$$

其中， $C_1 \sim C_6$ ： u_1 、 u_2 、 u_3 通解之待定係數，皆為 x 的函數。

將邊界條件 (8) 式、(9) 式、(10) 式、(12) 式、(13) 式和 (15) 式代入上述三層之流速通式，解出 $C_1 \sim C_6$ ，再將其代入 $u_1 \sim u_3$ 中，可得三層之流速半解析式，再依其上、下限對其積分，可得水、草、土三層之流量及總流量如下：

$$q_1 = \frac{1}{3} \frac{h_1}{\sqrt{C} \sqrt{D}} \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \times \left\{ e^{\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2} \times (C\sqrt{D}n_3h_1^2 - \sqrt{C}Dn_2h_1^2 - 3\sqrt{C}\sqrt{D}n_2n_3h_1 + 3Dn_2^2h_1 + 3C\sqrt{D}n_3k_{p_2} - 3\sqrt{C}Dn_2k_{p_2}) - e^{\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2} \times (C\sqrt{D}n_3h_1^2 + \sqrt{C}Dn_2h_1^2 + 3\sqrt{C}\sqrt{D}n_2n_3h_1 + 3Dn_2^2h_1 + 3\sqrt{C}Dn_3k_{p_2} + 3\sqrt{C}Dn_2k_{p_2}) + e^{-\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2} \times (-C\sqrt{D}n_3h_1^2 - \sqrt{C}Dn_2h_1^2 + 3\sqrt{C}\sqrt{D}n_2n_3h_1 + 3Dn_2^2h_1 - 3C\sqrt{D}n_3k_{p_2} - 3\sqrt{C}Dn_2k_{p_2}) + e^{-\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2} \times (C\sqrt{D}n_3h_1^2 \sqrt{C}Dn_2h_1^2 + 3\sqrt{C}\sqrt{D}n_2n_3h_1 - 3Dn_2^2h_1 + 3C\sqrt{D}n_3k_{p_2} - 3C\sqrt{D}n_2k_{p_2}) + 6n_2C\sqrt{D}(k_{p_2} - k_{p_3}) \times (e^{\sqrt{D}H} + e^{-\sqrt{D}H}) + 12\sqrt{C}n_2n_3 \right\} \div \left\{ (n_3\sqrt{C} + n_2\sqrt{D}) \times (e^{\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2}) - (n_3\sqrt{C} + n_2\sqrt{D}) \times (e^{\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2}) \right\} \quad (24)$$

$$q_2 = \frac{n_2}{C\sqrt{D}} \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \times \left\{ e^{\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2} \times [(h_1 + h_2) \times (Dn_2 - \sqrt{C}\sqrt{D}n_3) + \sqrt{C}D(k_{p_2} - k_{p_3})] + e^{\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2} \times [(h_1 + h_2) \times (-Dn_2 + \sqrt{C}\sqrt{D}n_3) - \sqrt{C}D(k_{p_2} - k_{p_3})] + e^{-\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2} \times [(h_1 + h_2) \times (-Dn_2 + \sqrt{C}\sqrt{D}n_3) + \sqrt{C}D(k_{p_2} - k_{p_3})] + e^{-\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2} \times [(h_1 + h_2) \times (-Dn_2 - \sqrt{C}\sqrt{D}n_3) - \sqrt{C}D(k_{p_2} - k_{p_3})] + 2Dn_2h_1 \times (e^{\sqrt{D}H} + e^{-\sqrt{D}H}) + 2\sqrt{C}n_3 \times (e^{\sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{C}h_2}) \right\} \div \left\{ (\sqrt{C}n_3 + \sqrt{D}n_2) \times (e^{\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2}) - (\sqrt{C}n_3 - \sqrt{D}n_2) \times (e^{\sqrt{D}H - \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{D}H + \sqrt{C}h_2}) \right\} \quad (25)$$

$$q_3 = \frac{n_2 \rho_w g \cos \theta}{D^{\frac{3}{2}} \mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \times \left\{ e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} \times [-\sqrt{CD}(k_{p_2} - k_{p_3}) + \sqrt{Dn_2} - Dn_2H + \sqrt{Cn_3} - \sqrt{C}\sqrt{Dn_3}H] + e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} \times [\sqrt{CD}(k_{p_2} - k_{p_3}) + \sqrt{Dn_2} - Dn_2H - \sqrt{Cn_3} + \sqrt{C}\sqrt{Dn_3}H] + e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} \times [-\sqrt{CD}(k_{p_2} - k_{p_3}) - \sqrt{Dn_2} - Dn_2H + \sqrt{Cn_3} + \sqrt{C}\sqrt{Dn_3}H] + e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} \times [\sqrt{CD}(k_{p_2} - k_{p_3}) - \sqrt{Dn_2} - Dn_2H - \sqrt{Cn_3} - \sqrt{C}\sqrt{Dn_3}H] - 2Dn_2h_1 \times (e^{\sqrt{DH}} + e^{-\sqrt{DH}}) + [2\sqrt{CD}(k_{p_2} - k_{p_3}) - 2\sqrt{Cn_3}] \times (e^{\sqrt{C}h_2} - e^{-\sqrt{C}h_2}) + 4Dn_2h_1 \right\} \div \left\{ (\sqrt{Cn_3} + \sqrt{Dn_2}) \times (e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2}) + e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} - (\sqrt{Cn_3} - \sqrt{Dn_2}) \times (e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2}) \right\} \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{3C^{\frac{3}{2}}D^{\frac{3}{2}}} \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \left\{ B_1 \times (e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} + e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2}) + B_2 \times (e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} - e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} - e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2}) + B_3 \times (e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} + e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} - e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} - e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2}) + B_4 \times (e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} - e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} - e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2}) + B_5 \times (e^{\sqrt{C}h_2} - e^{-\sqrt{C}h_2}) + B_6 \times (e^{\sqrt{DH}} + e^{-\sqrt{DH}}) - 24h_1C^{\frac{2}{3}}Dn_2n_3 \right\} \div \left\{ -(n_3\sqrt{C}n_2\sqrt{D})(e^{\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2}) + (n_3\sqrt{C} - n_2\sqrt{D})(e^{\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2}) \right\} \quad (3)$$

式中：

$$C = \frac{n_2}{k_{p_2}}$$

$$D = \frac{n_3}{k_{p_3}}$$

$$B_1 = h_1^3 C^{\frac{3}{2}} D^2 n_2 + 3h_1 C^{\frac{3}{2}} D^2 n_2 k_{p_2} +$$

$$3(h_1 + h_2)\sqrt{CD}n_2^2 + 3HC^{\frac{3}{2}}Dn_2n_3$$

$$B_2 = 3h_1^2 CD^2 n_2^2 + 3CD(k_{p_2} - k_{p_3})(Cn_3 - Dn_2) - 3C^2 n_3^2$$

$$B_3 = 3h_1^2 C^{\frac{3}{2}} D^{\frac{3}{2}} n_2 n_3 - 3C^{\frac{3}{2}} \sqrt{D} n_2 n_3$$

$$B_4 = h_1^3 C^2 D^{\frac{3}{2}} n_3 + 3h_1 C^2 D^{\frac{3}{2}} n_3 k_{p_2} + 3(h_1 + h_2) CD^{\frac{3}{2}} n_2 n_3 + 3HC^2 \sqrt{D} n_3^2$$

$$B_5 = -6CDn_2n_3 + 6C^2n_3^2 - 6C^2Dn_3(k_{p_2} - k_{p_3})$$

$$B_6 = 6h_1 \left[-\sqrt{CD}n_2^2 + C^{\frac{3}{2}}Dn_2n_3 - C^{\frac{3}{2}}D^2n_2(k_{p_2} - k_{p_3}) \right]$$

由於土層比滲透係數值極小，因此位於分母時會產生一極大的值，採用量階分析法進行簡化，其過程中發現 $e^{-\sqrt{DH} + \sqrt{C}h_2}$ 、 $e^{-\sqrt{DH} - \sqrt{C}h_2}$ 及 $e^{-\sqrt{DH}}$ 三項的值均極小，影響甚微，故不予以考量。下列為簡化後之總流量：

$$q^* = \frac{\rho_w g \cos \theta}{3\mu C^{\frac{3}{2}} D^{\frac{3}{2}} (n_3\sqrt{C} + n_2\sqrt{d})} \left[\frac{d(h_1 + h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \left\{ -(C^{\frac{3}{2}}D^2n_2 + C^2D^{\frac{3}{2}}n_3)h_1^3 - (3CD^2n_2^2 + 3D^{\frac{3}{2}}C^{\frac{3}{2}}n_2n_3)h_1^2 - \left[3CD^{\frac{3}{2}}n_2n_3 + 3\sqrt{CD}D^2n_2^2 + 3C^{\frac{3}{2}}D^2n_2k_{p_2} + 3C^2D^{\frac{3}{2}}n_3k_{p_2} + e^{-\sqrt{C}h_2}(-6\sqrt{CD}D^2n_2^2 + 6C^{\frac{3}{2}}Dn_2n_3 - 6C^{\frac{3}{2}}D^2n_2(k_{p_2} - k_{p_3})) \right] h_1 - (3CD^{\frac{3}{2}}n_2n_3 + 3\sqrt{CD}D^2n_2^2)h_2 - (3C^{\frac{3}{2}}Dn_2n_3 + 3C^2\sqrt{D}n_3^2)H - 3CD(k_{p_2} - k_{p_3})(Cn_3 - Dn_2) + 3C^{\frac{3}{2}}\sqrt{D}n_2n_3 + 3C^2n_3^2 \right\} \quad (28)$$

將降雨強度 i 視為一側入流，且假設流場達到穩態，各物理量不隨時間改變，連續方程式可表示如下：

$$\frac{dq}{dx} = i \quad (29)$$

上式對 x 積分，並代入邊界條件 (16) 式，於初始位置 ($x = 0$) 水、草、土三層之流速為 0，總流量亦為 0。單位寬度之流量 q 和位置 x 的關係式為：

$$q = ix \quad (30)$$

將 (30) 式代入 (28) 式，並移項整理得水深和位置 x 的微分關係式：

$$\begin{aligned} \frac{d(h_1 + h_2)}{dx} = & i\alpha \frac{3C^{\frac{3}{2}}D^{\frac{3}{2}}(n_3\sqrt{C} + n_2\sqrt{D})\mu}{\rho_w g \cos\theta} \\ & \div \left\{ -(C^{\frac{3}{2}}D^2n_2 + C^2D^{\frac{3}{2}}n_3)h_1^3 - \right. \\ & (3CD^2n_2^2 + 3D^{\frac{3}{2}}C^{\frac{3}{2}}n_2n_3)h_1^2 - \\ & \left[3CD^{\frac{3}{2}}n_2n_3 + 3\sqrt{CD}D^2n_2^2 + 3C^{\frac{3}{2}}D^2n_2k_{p_2} + \right. \\ & 3C^2D^{\frac{3}{2}}n_3k_{p_2} + e^{-\sqrt{C}h_2} \times (-6\sqrt{CD}D^2n_2^2 + \\ & 6C^{\frac{3}{2}}Dn_2n_3 - 6C^{\frac{3}{2}}D^2n_2(k_{p_2} - k_{p_3})) \left. \right] h_1 - \\ & (3CD^{\frac{3}{2}}n_2n_3 + 3\sqrt{CD}D^2n_2^2)h_2 - \\ & (3C^{\frac{3}{2}}Dn_2n_3 + 3C^2\sqrt{D}n_2^2)H - 3CD(k_{p_2} - k_{p_3}) \\ & \left. (Cn_3 - Dn_2) + 3C^{\frac{3}{2}}\sqrt{D}n_2n_3 + 3C^2n_3^2 \right\} + \tan\theta \end{aligned} \quad (31)$$

4. Runge-Kutta 法

由於 (31) 式無法以解析方法解得閉合解 (Closed-Form Solution)，故以 4 階 Runge-Kutta 法來求解水深。由邊界條件 (17) 式可求出 $x=L$ 時的水深，再由相鄰兩點水深之關係式可求出往上游端方向之下一點位置的水深，以此便可求得每一位置上的水深。

將 (31) 式水深和位置 x 的微分關係式令為函數 Z ，即

$$\frac{d(h)}{dx} = Z(h, x) \quad (32)$$

相鄰兩點水深之關係式：

$$h_{n+1} = h_n + \frac{1}{6}(a_1 + 2a_2 + 2a_3 + a_4) \quad (33)$$

式中：

$$a_1 = l \times Z(x_n, h_n)$$

$$a_2 = l \times Z(x_n + \frac{1}{2}, h_n + \frac{a_1}{2})$$

$$a_3 = l \times Z(x_n + \frac{1}{2}, h_n + \frac{a_2}{2})$$

$$a_4 = l \times Z(x_n + 1, h_n + a_3)$$

其中， l ： x 方向上相鄰兩點之間距。

三、結果與討論

本研究以草層孔隙率來決定植生之疏密度，在此將植株直徑 d_c 與孔隙率 n 之關係定義如 (34) 式，並引用 Kaviany (1991, 1995) 提出的孔隙率 (n) 和比滲透係數 (k_p) 之關係式 (35) 式。若已知草層植株平均直徑及每平方公尺內的種植株數，則可經由 (34) 式和 (35) 式求出草層之比滲透係數。

$$n = 1 - \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \pi \cdot m \quad (34)$$

$$k_p = \frac{n^2}{80(1-n)^2} d_c^2 \quad (35)$$

其中， m ：每平方公尺內種植之株數； d_c ：圓柱體之直徑 (m)。

參數中，水之特性、重力與坡長是不變的，分別為 $\mu = 0.001 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ， $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ， $L = 100 \text{ m}$ ，而草層植株直徑如表 1 所示，土層為粗砂 ($n_3 = 0.35$ 、 $k_{p_3} = 6.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$)。

1. 水面剖線之分析

為瞭解土層有限厚度下降雨強度及坡度對水深之影響，草層選用高 0.03m，孔隙率 0.9 之百慕達草 ($d_c = 0.001 \text{ m}$)，而土層厚度 1m，在固定其它參數的前提下，改變坡度與降雨強度二參數，其水面剖線隨坡長之變化如圖 2。圖中九條曲線之水理型態可分為浸沒型 ($S=0.0001$)、混合型 ($S=0.001$) 與非浸沒型 ($S=0.01$)。水理型態為浸沒者其土層坡度較緩且草層為飽和，整體水深高於草高，此時水流流動受重力之驅動小，導致坡面上各點水深十分接近，水面剖線與地表近乎平行，改變降雨強度，造成初始位置水深的變化，使水

表 1 常見水保植物之平均直徑選擇值 (楊山麓, 2007)

Table 1 Data for average diameter of the common plant of soil and water conservation (Yang, 2007)

草種	葉寬範圍 (m)	選用值 (m)
百慕達草	--	0.001
假儉草	--	0.003
類地毯草	0.002-0.008	0.005
百喜草	0.006-0.012	0.008

面剖線向上或向下移動，但整體形狀大致相同，表示於此狀態降雨強度對水面剖線形狀之影響不大。水理型態為混合型的三條曲線中，其水面剖線在虛線（即草高）附近水面線有明顯的變動，即浸沒與非浸沒交接處，係因在水層中水體的流動不受阻擋，流速變化大，但水深變動小，受降雨強度影響小；反之，草層中水流受植株阻擋影響，其水理變化與水層情況相反。觀察圖 2，發現 $S=0.001$ 時，非浸沒部分水深變動趨勢與 $S=0.01$ 的不完全相同， $S=0.01$ 屬完全非浸沒型，其水面線之斜率與降雨強度呈正比，但 $S=0.001$ 的三條曲線中，草層的水面線斜率彼此大致相同。非浸沒狀態下整體水深偏低，且均低於草高，係因坡度較陡，水流流動受重力之驅動大，水流容易往下游流動，從圖 2 可明顯看出三種降雨強度下水面剖線約呈一直線，降雨強度較大者，其水面剖線之斜率亦越大。圖中水面剖線受降雨強度和坡度影響之變動趨勢與胡&謝 (2012) 均勻降雨下無限土厚植生坡地之研究相同，顯示坡度對水剖面線之影響遠大於降雨強度土層厚度，是控制水面剖線形式的主要因子。

由前段討論可知坡度是決定水面剖線形式的主要參數，於此將分別以三種不同坡度 (0.0001、0.001 和 0.01) 代表三種水理型態，探討土層厚度 (0m、0.3m、1m、5m) 在三種水理型態下對水深之影響程度，其它參數：降雨強度 50mm/hr、草高 0.05m、草層孔隙率 0.9，計算結果繪製如圖 3。圖 3(a) 係浸沒型之水面剖線，圖中四種土層厚度之水面剖線幾乎完全一樣，只有些微差異，土厚為 0 公尺 (即不透水地表) 之水面線因沒有土層之存在，全部的水流量均存在於地表之上，故水面剖線最高，增加土層厚度使得土層可容納

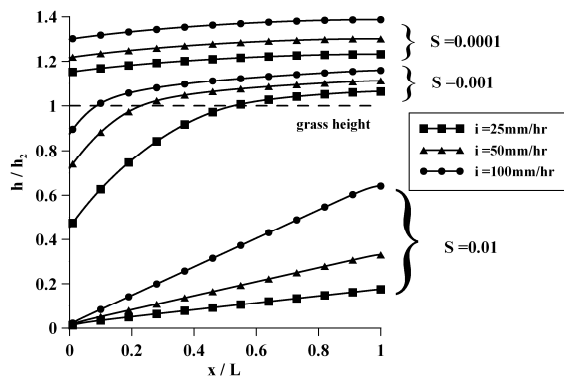


圖 2 不同坡度與降雨強度之水面剖線 (有限土層)
Fig.2 Profiles of surface water for different slope and rainfall intensity (finite thickness soil layer)

之水流量漸增，造成水面線整體往下移動，不同土厚之水面剖線形狀均相同。圖 3(c) 屬非浸沒型之水面剖線，可看到水深與土層厚度呈負相關，在土層慢慢增厚下，起始水深的位置開始往下游方向移動，係因坡度較陡且地表上水流量減少，故產生延後積水之效應。圖 3(b) 坡度為 0.001 屬混合型，由圖中發現浸沒部分水深受土厚之影響極小，幾乎不變，而由浸沒和非浸沒交界處開始往上游端則可慢慢看出差異，但整體而言，水面剖線還是隨著土層厚度的增加而下降。

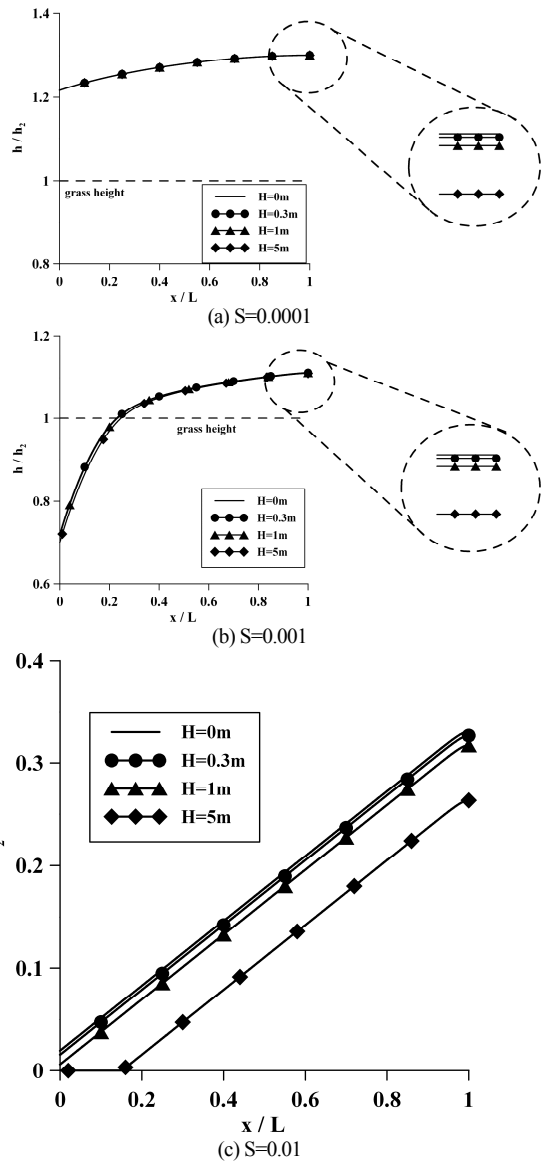


圖 3 不同土層厚度下水面線變化
Fig.3 The free surface water profiles for different thickness of the soil layer

2. 流速分佈之分析

將前述求得之有限厚土層三層的流速半解析分佈式以量階分析法進行簡化，下列為簡化後之流速半解析分佈式：

$$u_1^* = \frac{1}{2\sqrt{C}\sqrt{D}} \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1+h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \left\{ a \times e^{\sqrt{D}H+\sqrt{C}h_2} + b \times e^{\sqrt{D}H-\sqrt{C}h_2} + 4\sqrt{C}Dn_2(k_{p_2} - k_{p_3})e^{\sqrt{D}H} \right\} \div \left\{ (\sqrt{C}n_3 + \sqrt{D}n_2) \times e^{\sqrt{D}H+\sqrt{C}h_2} - (\sqrt{C}n_3 - \sqrt{D}n_2) \times e^{\sqrt{D}H-\sqrt{C}h_2} \right\}, \quad (36)$$

$$h_2 \leq y \leq h_1 + h_2$$

$$u_2^* = \frac{1}{C^{\frac{3}{2}}\sqrt{D}} \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1+h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \left\{ (\sqrt{C}Dn_2 + C\sqrt{D}n_3) \times e^{\sqrt{D}H+\sqrt{C}h_2} + (\sqrt{C}Dn_2 - C\sqrt{D}n_3) \times e^{\sqrt{D}H-\sqrt{C}h_2} + (CDn_2 + C^{\frac{3}{2}}\sqrt{D}n_3)h_1 e^{\sqrt{C}y+\sqrt{D}H} - (CDn_2 - C^{\frac{3}{2}}\sqrt{D}n_3)h_1 e^{-\sqrt{C}y+\sqrt{D}H} - C^{\frac{3}{2}}D(k_{p_2} - k_{p_3}) \times (e^{\sqrt{C}y+\sqrt{D}H-\sqrt{C}h_2} + e^{-\sqrt{C}y+\sqrt{D}H+\sqrt{C}h_2}) \right\} \div \left\{ -(\sqrt{C}n_3 + \sqrt{D}n_2) e^{\sqrt{D}H+\sqrt{C}h_2} + (\sqrt{C}n_3 - \sqrt{D}n_2) e^{\sqrt{D}H-\sqrt{C}h_2} \right\}, \quad (37)$$

$$0 \leq y \leq h_2$$

$$u_3^* = \frac{-1}{D} \frac{\rho_w g \cos \theta}{\mu} \left[\frac{d(h_1+h_2)}{dx} - \tan \theta \right] \left\{ 1 - e^{-\sqrt{D}(y+H)} + e^{\sqrt{D}y} \left[\sqrt{C}D(k_{p_2} - k_{p_3}) + 2Dn_2h_1 e^{-\sqrt{C}h_2} \right] \div (\sqrt{C}n_3 + \sqrt{D}n_2) \right\}, \quad (38)$$

$$-H \leq y \leq 0$$

式中：

$$a = (\sqrt{C}Dn_2 + C\sqrt{D}n_3) \times [y^2 - 2(h_1 + h_2)y + h_2^2 + 2h_1h_2 - 2k_{p_2}] - 2(\sqrt{C}\sqrt{D}n_2n_3 + Dn_2^2)h_1$$

$$b = (\sqrt{C}Dn_2 - C\sqrt{D}n_3) \times [y^2 - 2(h_1 + h_2)y + h_2^2 + 2h_1h_2 - 2k_{p_2}] - 2(\sqrt{C}\sqrt{D}n_2n_3 - Dn_2^2)h_1$$

將參數代入簡化之流速分佈式 (36) 式-(38) 式，可得特定位置上水、草、土三層中流體在平行坡面方向之流速分佈剖面。此處將以坡面上 L 處進行探討，依坡度將流速分佈分成浸沒及非浸沒兩種型態，選用之參數為草層植株直徑 0.005m(類地毯草)、坡度

0.001(非浸沒)、坡度 0.0001(浸沒)、降雨強度 80mm/hr、草高 0.05m、草層孔隙率 0.9、土層厚度 3m，結果繪製於圖 4 和圖 5。觀察圖 4(a) 和圖 5(a) 後發現兩者之流速值越接近水面越大，圖 4(a) 為浸沒型，水深高於草高有水層之存在，由圖中可明顯看出草層中流速受植株阻擋影響，水流流動速度較水層流速小，流速分佈亦較均勻，故於水層-草層交接處附近流速有明顯反曲點存在，而圖 5(a) 為非浸沒型，無水層存在，草層中水流流動不受水層水流影響，流速剖面為一圓滑曲線，此時坡度為 0.001 較圖 5 之案例的坡度大，故流速較大，最大流速約為坡度 0.0001 之 1.7 倍。考慮土壤之透水性，故土層表面流速不為零且與草層流速連續，如此之流速剖面更符合實際之流況，隨著土層深度增加流速急遽下降，很快便趨於定值。

3. 剪應力分佈之分析

將簡化之流速式 (36) 式-(38) 式代入 (39) 式，可分別求得有限土厚之水、草、土三層之剪應力。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

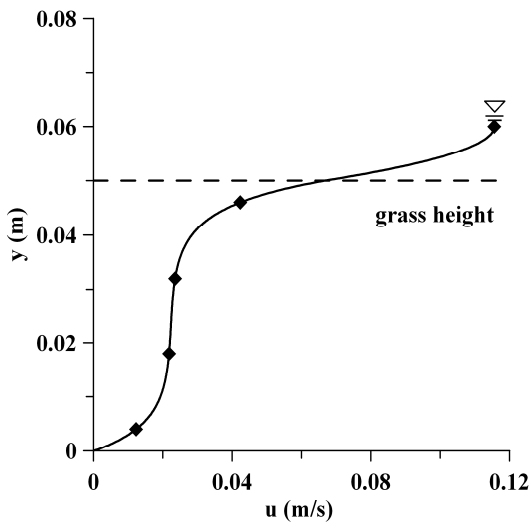
探討常見水保植物-類地毯草 ($d_c = 0.005\text{m}$)、假儉草 ($d_c = 0.003\text{m}$) 及百喜草 ($d_c = 0.008\text{m}$) 於降雨坡地上剪應力之變化，此處將以坡面上 L 處進行探討，將選用之參數 (見表 2) 代入三層之簡化流速式與剪應力分佈式，可得不同植株直徑下流體剪應力分佈圖以及相對應之流速分佈圖，依降雨強度的不同又分為浸沒與非浸沒兩種型態，結果繪製於圖 6 與圖 7，圖中 τ_M 和 u_M 分別為三條曲線中最大剪應力及流速。觀察圖 6(a) 和圖 7(a) 發現植株直徑較大者流速就越小，且流速隨深度之變動小分佈也較均勻，係因此處固定種植株數，若植株直徑較大則草層中植株所佔之體積較多，水流流動受到之阻力亦較大。圖 6(b) 屬浸沒型，圖中三條曲線之水層剪應力呈線性分佈且彼此之斜率大致相同，而草層中流體剪應力分佈呈開口向右之圓滑曲線，圖中草層-土層交界面上以假儉草 ($d_c = 0.003\text{m}$) 之剪應力最大，百喜草 ($d_c = 0.008\text{m}$) 之剪應力最小；而水層-草層交界面上則相反，以假儉草 ($d_c = 0.003\text{m}$) 之剪應力最小，百喜草 ($d_c = 0.008\text{m}$) 之剪應力最大，主要係因此案例之降雨強度大且坡度緩，地表水流無法快速沿著坡面往下游移動，而產生積水，當草層植株株徑越來越大草層中能容納水流量之空間減少，使得

水層深度增加，水層-草層交界面上之剪應力便越大。浸沒型之剪應力分佈圖可依最大剪應力之位置分成三類：最大剪應力位於水層-草層交界面、草層-土層交界面或同時存在兩交界面上，其中以第一類最可有效減緩地表沖蝕；非浸沒型之最大剪應力位於草層-土層交界面，增加地表覆蓋面積可降低交界面上之剪應力值。總而言之，在固定種植株數及其他條件下，任何水理情形下，植株直徑愈粗則可有效降低草層中水流流速，增加地表上植株覆蓋率，降低土層表面與水流接觸面積，進而減少因水流流動造成之沖蝕現象。

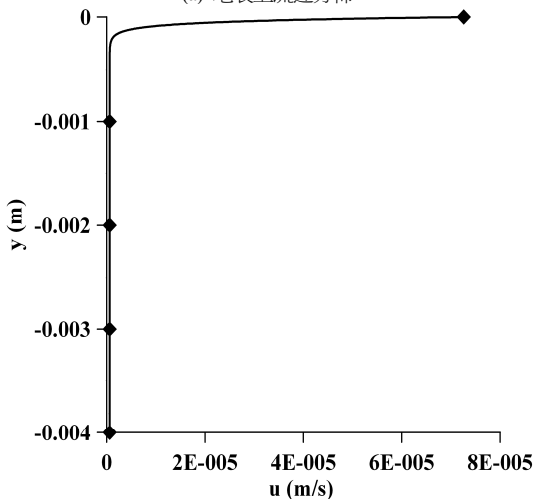
表 2 不同植株直徑下對流體剪應力影響之選用值

Table 2 Data for shear stress for different diameters of vegetation

物理意義	參數	選用值	單位
降雨強度	i	5	mm/hr
		100	mm/hr
坡度	S	0.0001	-
草層高度	h_2	0.03	m
每平方公里種植的株數	m	5000	1/m ²
土層厚度	H	1	m



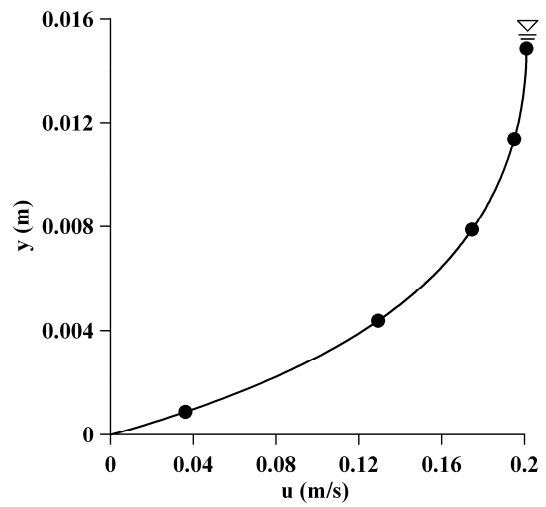
(a) 地表上流速分佈



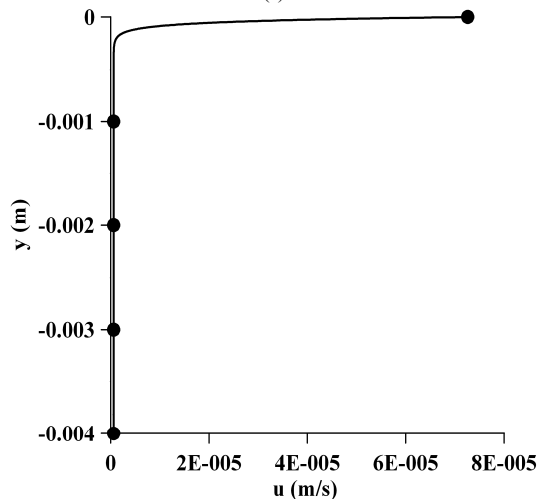
(b) 地表下流速分佈

圖 4 浸沒型之流速剖面 (S=0.0001) (a) 地表上水流 (b) 地表下水流

Fig.4 The velocity profile for submerged vegetation. (S=0.0001) (a) surface water flow (b) subsurface water flow



(a)



(b)

圖 5 非浸沒型之流速剖面 (S=0.0001) (a) 地表上水流 (b) 地表下水流

Fig.5 The velocity profile for emergent vegetation. (S=0.0001) (a) surface water flow (b) subsurface water flow

四、結 論

本研究以解析方法搭配 Runge-Kutta 法解得均勻降雨下有限厚土層之植生坡面的水深與位置的關係式，以此推得流速與流量分佈式，並針對各項參數對於流況之影響做進一步探討，討論結果可綜合如下：

1. 與前人研究不同，本文加入降雨因子，並考量混合型之植生水流流況，同時也增加了解析的困難度。本研究只適用於小集水區、流場為層流之情況下，其結果會更接近真實流況。

2. 坡度係控制水面剖線型式的主要參數，依文中所示水面剖線型式分為浸沒型（水深超過草高）、非浸沒型（水深不及草高）與浸沒-非浸沒混合型三種。在緩坡上，水面剖線屬浸沒型，隨著坡度上升，初始點附近水深開始下降，直到低於草高，此時水面線型式係浸沒-非浸沒混合型，更進一步增加坡度，直到下游端的水深亦低於草高時，水理情況則為非浸沒型。

3. 降雨強度對浸沒型水面剖線影響不大，調整降雨強度會使得初始水深改變，造成水剖面線向上或

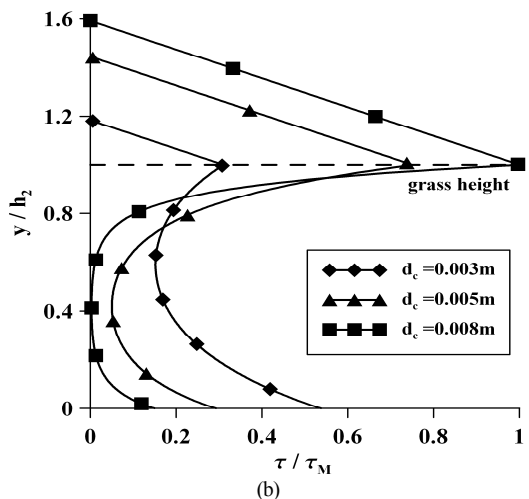
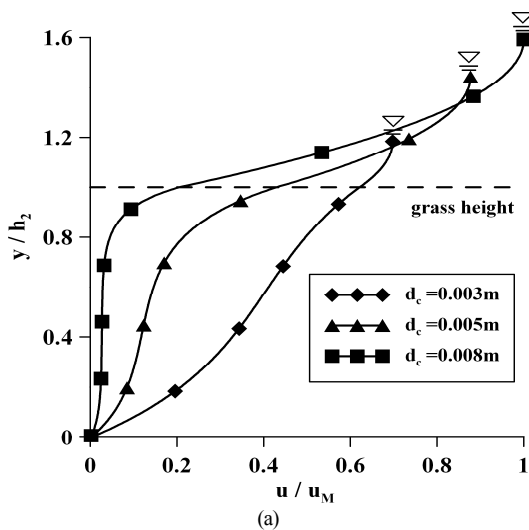


圖6 不同植株直徑下對應之流速變化 ($i=100\text{mm/hr}$) (a) 流速分佈 (b) 剪應力分佈

Fig.6 The shear stress and velocity distribution for different diameters of vegetation. ($i=100\text{mm/hr}$) (a) velocity distribution (b) shear stress distribution

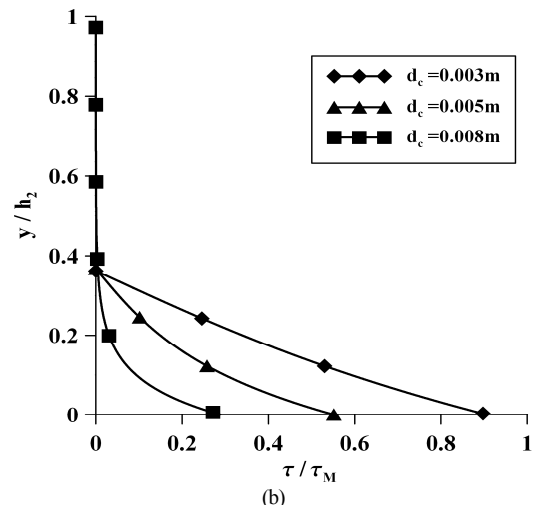
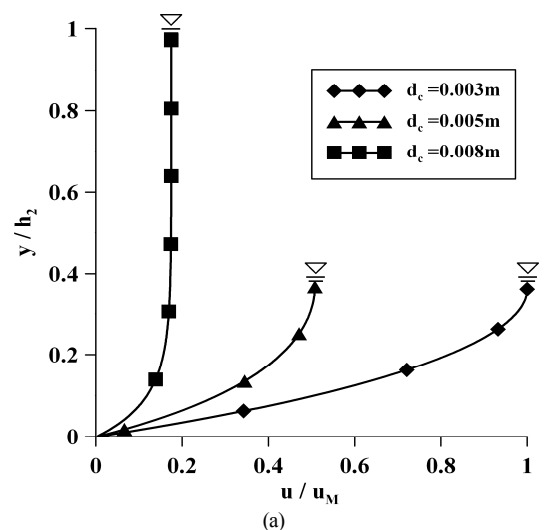


圖7 不同植株直徑下對應之流速變化 ($i=5\text{mm/hr}$) (a) 流速分佈 (b) 剪應力分佈

Fig.7 The shear stress and velocity distribution for different diameters of vegetation. ($i=5\text{mm/hr}$) (a) velocity distribution (b) shear stress distribution

向下垂直移動，但整體形狀相同；降雨強度對於混合型水面剖線水深高於草高部分之影響與浸沒型相同，而對水深低於草高部分影響較大，水深變動趨勢隨降雨強度增加而上升。

4. 浸沒狀態下土層厚度對水深之影響極小，幾乎不變，而由浸沒和非浸沒交界處開始往上游端則可慢慢看出差異，但整體而言，水面剖線還是隨著土層厚度的增加而下降。

若流況屬於浸沒型，則剪應力分佈可依最大剪應力所在位置分成 3 類，當最大剪應力位於水-草層交界面而非位於草-土層交界面時，更能有效降低地表沖蝕。浸沒型水理狀態下水深高於草高有水層存在，而草層中水流流動受植株阻擋，流速較慢，因此兩層水流流動趨勢不同，且於水-草層交界處流速剖面有反曲點存在，當兩者流速差值愈大，則反曲點愈明顯。若流況為非浸沒型，此時無水層存在，流速剖面為一圓滑曲線，最大剪應力只位於草-土層交界面，若流速梯度愈小，則最大剪應力值愈小。

參考文獻

- [1] 宋長虹 (1993), 「水波作用下多孔彈性底床動力反應之研究」, 國立台灣大學土木工程學系研究所博士論文。(Song, C.H. (1993). *Dynamic response of water waves on a poroelastic bed*, doctoral dissertation, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan. (in Chinese))
- [2] 胡秀怡、謝平城 (2012), 「植生地表上均勻降雨之水理分析」, 100 年度中華水土保持學會年會論文集, 第 II-32 頁, 台中, 台灣。(Hu, S.Y. and Hsieh, P.C. (2011). "Hydraulic Analysis of Water Flow Passing over Vegetated Areas under a Uniform Rainfall." *Proceedings of the 2012 Conference of Chinese Soil and Water Conservation Society*, Taichung, Taiwan, II-32. (in Chinese))
- [3] 許煜聖 (2003), 「水流流經植生地表之水理分析」, 國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文, 台中。(Shiu, Y.S. (2003). *Hydraulic analysis of flow passing vegetative ground*, master thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. (in Chinese))
- [4] 郭律君 (2005), 「水流流經群樁之水理特性研究」, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文, 台南。(Guo, L.J. (2005). *Characteristics of water flow through emergent cylinders*, master thesis, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan. (in Chinese))
- [5] 孫永達 (1998), 「剛性透水底床明渠水流及其懸浮泥沙之分析」, 國立台灣大學土木工程學系研究所碩士論文, 台北。(Suen, Y.D. (1998). *The analysis of open channel flow and suspended sediment over rigid permeable bed*, master thesis, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei. (in Chinese))
- [6] 楊山慶 (2007), 「草溝水理實驗之研究」, 國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文, 台中。(Yang, S.C. (2007). *Study on hydraulic experiments in grassed channel design*, master thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. (in Chinese))
- [7] 楊佳錫 (2010), 「均勻降雨時坡地之水理分析」, 國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文, 台中。(Yang, C.H. (2010). *Hydraulic analysis of flow down a slope under a uniform rainfall*, master thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. (in Chinese))
- [8] 劉運澤 (2007), 「水流流經植生渠道之有限元素分析」, 國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文, 台中。(Liou, Y.T. (2007). *Finite element analysis of water flow passing vegetative channel*, master thesis, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. (in Chinese))
- [9] 劉誠達 (2008), 「水流流經植被區域之阻力研究」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, 新竹。(Liou, C.D. (2008). *Study on flow resistance through vegetated area*, master thesis, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsin Chu, Taiwan. (in Chinese))
- [10] Biot, M.A. (1956a). "Theory of propagation elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. low-frequency range," *Journal of Acoustical Society of America*, 28, 168-178.
- [11] Biot, M.A. (1956b). "Theory of propagation elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. high-frequency range," *Journal of Acoustical Society of America*, 28, 179-191.

- [12] Biot, M.A. (1962). "Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous Media," *Journal of Physics*, 33(4), 1482-1498.
- [13] Huai, W.X., Zeng, Y.H. Xu, Z.G., and Yang, Z.H. (2009). "Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation," *Advances in Water Resources*, 32(4), 487-492.
- [14] Kaviany, M. (1991). *Principles of heat transfer in porous media*. Springer, Berlin.
- [15] Kaviany, M. (1995). *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Second Edition, Springer, Berlin.
- [16] Kubrak, E., Kubrak, J. and Rowiński, P.M. (2008). "Vertical velocity distributions through and above submerged, flexible vegetation," *Hydraulic Sciences Journal*, 53(4), 905-920.
- [17] Morris, E.M. (1978). "The effect of the small-slope approximation and lower boundary condition on the solutions of the Saint Venant equations," *Journal of Hydrology*, 40, 31-47.
- [18] Wu, F.C., Shen, H.W., and Chou, Y.J. (1999). "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation," *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), 934-942.
- [19] Wu, W., He, Z., and Wang, S.Y. (2006). "Flow conveyance and sediment transport capacity in vegetated channels," *Proceedings of the 7th Conference on Hydroscience and Engineering*, Philadelphia, USA, 1-12.
- [20] Wu, W. and He, Z. (2009). "Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity," *International Journal of Sediment Research*, 24(3), 247-259.

2012 年 07 月 25 日 收稿

2012 年 10 月 01 日 修正

2012 年 10 月 22 日 接受

(本文開放討論至 2013 年 9 月 30 日)