

透水性路面上漫地流之水理分析

陳右錚 謝平城* 林裕益

摘要 本研究將路面上因降雨等造成之漫地流視為一流場，並分成兩個區域(水層與透水層)，推求漫地流流經道路時之流況解析，希望藉此瞭解當地表為透水性材質時對水流流動之影響。文中之地表為透水鋪面，如開放級配瀝青混凝土，是為具滲透性之多孔介質，考量其地表流速不為零的真實現象外，透水層中的水流則視為孔隙介質流。

漫地流流況求解過程為先對整體流速分佈進行求解，積分後得流量，以此推得水深之微分式，再以數值方法求得水深之值。具體作法如下：以簡化之那維爾-史托克斯方程式 (Navier-Stokes equation) 搭配宋 (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，予以求解。

在求得漫地流流況之解後，再分別探究各參數對水深和流況之影響。結果發現坡度越陡、坡長越短、降雨強度越小、鋪面孔隙率增大、鋪面厚度增加皆能使地表水層水深降低，且各參數越大時水深變化呈非線性成長。本研究的例子中，坡度 0.02、鋪面厚度為 5cm 且孔隙率達 0.4 以上時，將可達到地表完全不積水，即水層之水深降到零。最後，本解可應用於推求設計一道路鋪面之坡度、厚度、孔隙率及路寬等參數值，以符合現地排水之需求。

關鍵詞： 孔隙介質流、透水性鋪面、漫地流。

Hydraulic Analysis of Overland Flow on Pervious Pavement

You-Cheng Chen Ping-Cheng Hsieh* Yu-I Lin

ABSTRACT This study divided the flow field into two regions, the water layer and the permeable layer for analyzing overland flow on a road, and investigated the influence of the flow within a permeable medium. In addition, the flow in the permeable layer was considered as the porous media flow. The differential equation of water depth was formulated and solved by numerical methods. The governing equations were the simplified Navier-Stokes equation and Song's (1993) laminar model based on Biot's poroelastic theory. The results indicate that water depth decreases with steeper slope, shorter slope length, smaller rainfall intensity, larger porosity and thickness of the pavement. The depth of water grows up nonlinearly if each parameter is larger. A case of slope 0.02, the thickness of pavement 5cm, and the porosity over 0.4 will not pond on the surface. The results can be applied to pavement designs.

Key Words: porous media flow, pervious pavement, overland flow.

一、前言

人煙所至之處，總以道路作為連接，道路設置與民生息息相關，故其水土保持問題日益顯得重要，此處欲研究其中降雨時路面排水部份，對道路上之水流做進一步探討，以期瞭解道路物理特性對流況之影響。

對於道路鋪面種類，交通部 84 年交通政策白皮書中提到，各級公路鋪面種類分配比例調查，顯示主要種類有混凝土與瀝青、砂石路面、土路面，及其在各級道路中所佔比例。如今更引進許多新的類型如多孔性瀝青混凝土、開放級配瀝青混凝土等。本研究目標以鋪面質材容易取得之各項特性來推估其排水性，首先道路上水流流況以那維爾-史托克斯方程式描述道路鋪面上水層之流體運動，以多孔介質層流模式進行分析鋪面間流體運動情況，其中 Biot (1956a, 1956b) 在多孔彈性介質中發現三種型態的波，為兩種壓力波及一種剪力波，兩種剪力波經由固體與液體分量的勁度產生偶合作用，而多孔介質層流模式係宋長虹 (1993) 為探討水波作用下多孔介質抵床之動力反應，根據 Biot 多孔彈性介質勢流理論而建立之多孔介質層流模式，描述渠道中流體與孔隙中流體黏性的效應，並對其驗證。在適用性上，孫永達 (1998) 以宋之多孔介質層流模式為孔隙介質流的控制方程式，配合那維爾-史托克斯方程式描述明渠流中之流體運動，求解出在自由表面流的流況下，水流流經具滲透性土壤時之流速分佈，基於若干適當的假設條件，其所求得之解析解，已可貼切地描述水流流經裸露地的水理現象。而許煜聖 (2003) 將草層視為孔隙介質，再有多孔介質層流模式描述草層及土層等孔隙介質中流體的運動，配合那維爾-史托克斯方程式描述明渠流中之流體運動，推求各種流況下水流流經植被地表時之速度解析，楊山慶 (2007) 及劉運澤 (2007) 分別以實驗及數值分析驗證許煜聖 (2003) 所求得之解析流速。

除了基本描述流況的控制方程式外，考量水流為黏性流體以及降雨因素將使流場具有非均質性，對此情況之處理可參考相關研究如：Huppert (1982) 探討黏性流體流經平板之問題，其中垂直方向流速微小可忽略，其壓力為靜水壓，並因水平方向長度遠大於水流厚度，所以水平方向導數遠小於垂直方向導數，故忽略之。在此條件下求得水深與流速之關係，再以數值方法求解液面線，其中參數選用可反應不同黏度

之液體，得到不同液面；Govindaraju and Kavvas (1990) 以淺水波方程式化簡求解漫地流流況之解析解，引入契西糙率因子 (Chezy's roughness coefficient)，在考量降雨的情況下，分別給予擴散波及運動波法不同起始條件，求解漫地流之水面線；林昭仁 (2005) 中提到對無窮寬度傾斜面非定常薄膜流之解析，其因無限寬而視為二維流場，以那維爾-史托克斯方程式及連續方程式對流況作解析求解液面之高度變化的情形。

藉由上述描述流場之方程式及各種假設與條件，予以簡化解析，便可探究代表各物理現象之因子對道路上水流之影響，進而瞭解降雨時路面積水現象，對道路設置所需排水能力做評估，以設計符合需求之鋪面。

二、理論推導

將流場分為上、下兩個區域，上部區域中僅含均質 (homogeneous) 流體，以下簡稱為水層；下部區域為飽和之透水鋪面層，以下簡稱為透水層，其示意圖如圖 1 所示：

在解析時除了將流體的特性視為具黏性、不可壓縮、均質以外，並做以下的假設：

1. 降雨經過一段時間後，達到平衡狀態，水面高度、流速不再隨時間變化，假設此時流場為穩態 (steady) 且非均勻的 (non-uniform)。
2. 在透水層達飽和後入滲量極小，可忽略垂直坡面方向之流速 (v)。
3. 水流的長度遠大於深度，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. 研究坡面之寬度 (延道路中心線方向) 可視為無限長，取單位寬度來進行探討，故本研究僅對垂直二維流場做解析。
5. 大氣壓力為定值，且大氣作用於水流表面之剪應力忽略不計。

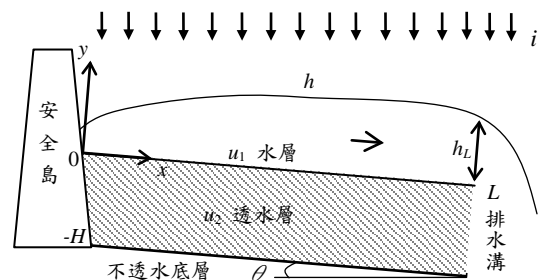


圖 1 研究問題示意圖

Fig.1 Definition sketch of the study.

6. 透水層底部為一不透水質材 (如混凝土等), 在安全島 ($x = 0$) 處亦如是。

1. 水層之控制方程式

水層之流況將以那維爾-史托克斯方程式來描述, 根據假設化簡可表示如下:

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

$$y \text{ 方向: } -\frac{\partial p_1}{\partial y} - \rho g \cos \theta = 0 \quad (2)$$

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 : 水體密度

g : 重力加速度

μ : 流體動力黏滯係數

θ : 傾斜角度

2. 透水層之控制方程式

將在透水層中流動的流體視為孔隙介質流的運動, 引用宋長虹 (1993) 在層流模式中所建立的多孔彈性固體結構與孔隙流體偶合之線性動力反應方程式, 假設透水層可視為剛性多孔介質, 透水層內質材不因水流或其它因素位移並忽略流體與固體間質量偶合之效應, 其動量方程式在考慮重力作用後, 可化簡表示如下:

$$x \text{ 方向: } n\mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} - \frac{\mu n^2}{k_p} u_2 - n \frac{\partial p_2}{\partial x} + n\rho g \sin \theta = 0 \quad (3)$$

$$y \text{ 方向: } -n \frac{\partial p_2}{\partial y} - n\rho g \cos \theta = 0 \quad (4)$$

其中,

u_2 : 透水層中 x 方向之流體速度

p_2 : 透水層中流體的壓力

n : 透水層中之孔隙率

k_p : 透水層中之比滲透係數

3. 邊界條件

本文中之邊界條件分別在自由水面處 ($y = h$)、水層與透水層之交界面 ($y = 0$)、透水層之不透水底部 ($y = -H$)、安全島 ($x = 0$) 與道路外緣 ($x = L$) 共八個, 茲分別說明如下:

(1) 自由水面處 ($y = h$)

① 法線 (y) 方向流體應力連續 ($p_1 = 0$)。

② 切線 (x) 方向流體應力連續 ($\mu \frac{du_1}{dy} = 0$)。

(2) 水層與透水層之交界面 ($y = 0$)

① 切線 (x) 方向流體通量連續 ($u_1 = nu_2$)。

② 切線 (x) 方向流體應力連 ($\mu \frac{\partial u_1}{\partial y} = \mu \frac{\partial u_2}{\partial y}$)。

③ 法線 (y) 方向流體應力連續 ($p_1 = p_2$)。

(3) 透水層之不透水底部 ($y = -H$)

① 切線 (x) 方向流體速度為零 ($u_2 = 0$)。

(4) 安全島 ($x = 0$)

① 在安全島處亦為不透水質材, 故此處水層與透水層流速皆為零 ($u_1 = u_2 = 0$)。

(5) 道路外緣 ($x = L$)

① 假設水流入至道路外緣時, 以自由跌水的方式進入排水溝, 故在此處流況若為亞臨界流, 則水深為 $h_L = h_c$, 若為超臨界流則 $h_L = h_n$, 即 $dh/dx = 0$ 。

4. 解析

以分離變數法對控制方程式求解, 可得水層與透水層流速通解, 再代入邊界條件中, 可解出待定係數, 得水層與透水層流速特解如下:

$$u_1 = \frac{\rho g}{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \tan \theta \right) \cos \theta \cdot \left[\frac{y^2}{2} - hy + (k_p e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} H}} + \sqrt{k_p n h}) \left(\frac{1 - e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} 2H}}}{1 + e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} 2H}}} \right) - k_p (1 - e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} H}}) \right] \quad (5)$$

$$u_2 = \frac{\rho g}{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \tan \theta \right) \cos \theta \cdot \left[\frac{k_p}{n} \left[e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} (H+y)}} + e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} (H-y)}} \right] - \sqrt{\frac{k_p}{n}} h \left[e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} (2H+y)}} - e^{\sqrt{\frac{n}{k_p} (2H-y)}} \right] - \frac{k_p}{n} \right] \quad (6)$$

兩層之流速分佈 u_1 、 u_2 為 h 之函數式。接著令水層單位寬度的流量為 q_1 , 透水層之單位流量為 q_2 , 兩

層總和之單位流量為 q ，單位流量之表示可藉由流速分佈式積分而得，分別如下：

$$q_1 = \frac{\rho g}{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \tan \theta \right) \cos \theta \left[\frac{-h^3}{3} - \sqrt{k_p n h^2 - k_p h} \right] \quad (7)$$

$$q_2 = \frac{\rho g}{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \tan \theta \right) \cos \theta \left[-k_p h + k_p \sqrt{\frac{k_p}{n} - k_p H} \right] \quad (8)$$

$$q = \frac{\rho g}{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \tan \theta \right) \cos \theta \left[\frac{-h^3}{3} - \sqrt{k_p n h^2 - 2k_p h + k_p} \sqrt{\frac{k_p}{n} - k_p H} \right] \quad (9)$$

另外根據連續方程式，在降雨強度為 i 時，即可視為有一側入流，在 x 方向上一單位長度之入流量為 i ，當流況為穩態 (steady) 時，各物理量不隨時間改變時，連續方程式可表示如下：

$$\frac{dq}{dx} = i \quad (10)$$

對其積分並以邊界條件解出積分常數為零，可得：

$$q = ix \quad (11)$$

將 (11) 式代入 (9) 式移項整理可得水深 h 對距離 x 的微分關係：

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{ix}{\frac{\rho g}{\mu} \cos \theta \left[\frac{-h^3}{3} - \sqrt{k_p n h^2 - 2k_p h + k_p} \sqrt{\frac{k_p}{n} - k_p H} \right]} + \tan \theta \quad (12)$$

至此無法再解析對水深求解，因此後續將以數值方法求出上式水深值，再以此代回流速表示式及流量表示式便可對不同參數所代表之流況進行探討。

5. 水層水深求解

本研究採用四次郎吉-庫塔法 (Fourth-Order Runge-Kutta Method) 對水深求解，其方法如圖 2 之流程，其中用以檢驗的式子推導如下：

在 $x = L$ 處若為臨界水深，則斜面上之臨界水深可表示如下：

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2 \alpha}{g \cos \theta}} \quad (13)$$

將 $x = L$ 處之水層水深及流量代入可改寫成：

$$h_L = h_c = \sqrt[3]{\frac{q_{iL}^2 \alpha}{g \cos \theta}} \quad (14)$$

將流量表示式代入上式可改寫為：

$$h_c = \left\{ \frac{\alpha}{g \cos \theta} \left[\frac{\left(\frac{h_c^3}{3} + \sqrt{k_p n h_c^2 + k_p h_c} \right) i L}{\frac{h_c^3}{3} + \sqrt{k_p n h_c^2 + 2k_p h_c + k_p} \left(H - \sqrt{\frac{k_p}{n}} \right)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

其中能量係數 α 假設其值等於 1。以數值方法試誤求解便可得臨界水深 h_c 之值。

在 $x = L$ 處若為滿足 $dh/dx = 0$ 之水深，則將之代入 (12) 式中，可得：

$$\frac{iL}{\frac{\rho g}{\mu} \cos \theta \left[\frac{-h^3}{3} - \sqrt{k_p n h^2 - 2k_p h + k_p} \sqrt{\frac{k_p}{n} - k_p H} \right]} + \tan \theta = 0 \quad (16)$$

對其以數值方法試誤求解便可得路緣處之已知水深 h_L 之值。而 (15)、(16) 式將用來作為郎吉-庫塔法已知之起始水深，以推求各位置上之水深值。

三、結果與討論

參數中，水的特性與重力是不變的，分別是：水的密度為 1000 kg/m^3 、動力黏滯係數為 $0.001 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 、重力加速度為 9.81 m/s^2 ，將單位化成 SI 制後整理如表 1。

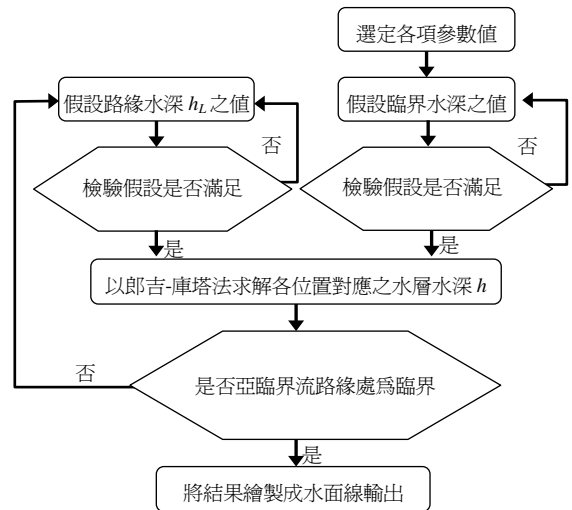


圖 2 郎吉-庫塔法求解水深之流程圖

Fig.2 The flow chart of solving the water depth by Runge-Kutta Method

表 1 基本參數值

Table 1 The values of selected parameters

物理意義	參數	選用值	單位
水的密度	ρ	1000	kg/m^3
重力加速度	g	9.81	m/s^2
水的動力黏滯係數	μ	0.001	$N-s/m^2$

1. 坡度因子探討

依不同設計會有所改變的參數有道路路拱、由安全島至路緣之長度 (即路面寬度)、降雨強度、鋪面之孔拱以 S 稱之, 其他參數路寬 L 定為 20 m、降雨強度 i 除率、鋪面施做厚度。代表坡度因子之參數為道路路為 100 mm/hr、透水層厚度 H 為 5 cm, 以上述參數求得之結果, 改變坡度因子 S , 以探討坡度改變時對流況之影響。將參數之單位皆化成 MKS 制後整理如表 2。

將所選用的各參數值代入, 以四次朗吉-庫塔法求解便可得到在各位置上水深之值。其式中坡度因子 S , 分別代入 0、0.00001、0.0001、0.001、0.01 及 0.02 求解, 觀察不同坡度對水深變化之影響。所得結果繪製如圖 3。

圖中顯示在坡度因子 $S = 0$ 時所求得之水面線, 其起始值接近 9mm, 一路下降到路緣時降至約 3mm, 此處為臨界水深, 係因在路緣處依據假設為以自由跌水方式進入排水溝; 在 $S = 0.00001$ 時之情況, 由於坡度很小, 所得之結果僅略小於前者; $S = 0.0001$ 之水面線, 隨坡度變大, 與前面兩個結果之差異也漸漸明顯; 在 $S = 0.001$ 時之水面線, 其起始值明顯降低許多, 而後水深隨距離漸漸增加, 直至接近路緣才又下降, 回到臨界水深之深度; $S = 0.01$ 時之水面線, 離開安全島一段距離後才有水深, 由於假設為飽和狀態, 故起始水深於安全島 $x = 0$ 處水深為 0, 而路緣 $x = L$ 處則為滿足 $dh/dx = 0$ 所求得之水深; $S = 0.02$ 時之水面線, 結果類似 $S = 0.01$ 時之情況, 惟整體水深值皆較小且距安全島更遠才開始出現水深。

2. 坡長因子探討

在不同坡度下之水面線變化趨勢會有些許差異, 往後探討時坡度因子 S 採用 0.00001-0.001 及 0.02 作為 3 種較具代表性之趨勢進行比較, 而此處探討之坡長因子乃指由安全島至路緣的距離, 此處將分別代入 5m、10m、20m, 將選用的參數分別代入求解,

其結果繪製如圖 4, 選定改變之參數及其他參數整理如表 3。

在坡度因子 $S = 0.00001$ 時, $L = 10$ m 之水面線, 其起始水位, 流動過程及臨界水深皆比 20 m 時更低; 在 $L = 5$ m 時, 其值又更低。 $S = 0.001$ 時, 三條水面線皆低於第一組曲線之值; $L = 10$ m, 其臨界水深之結果與 $S = 0.00001$ 、 $L=10$ m 之情況接近,

表 2 不同坡度之參數選用值

Table 2 The selected parameters for different slopes

物理意義	參數	選用值	單位
路面寬度	L	20	m
孔隙率	n	0.2	—
降雨強度	i	2.778×10^{-5}	m/s
透水層厚度	H	0.05	m

表 3 不同坡長之參數選用值

Table 3 The selected parameters for different slope length

物理意義	參數	選用值	單位
孔隙率	n	0.2	—
降雨強度	i	2.778×10^{-5}	m/s
透水層厚度	H	0.05	m
路拱	S	0.00001	—
		0.001	—
		0.02	—
路面寬度	L	5	m
		10	m
		20	m

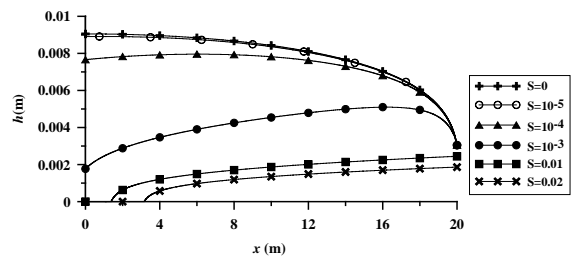


圖 3 不同坡度之水面線

Fig.3 The water surface lines for different slopes of the permeable pavement

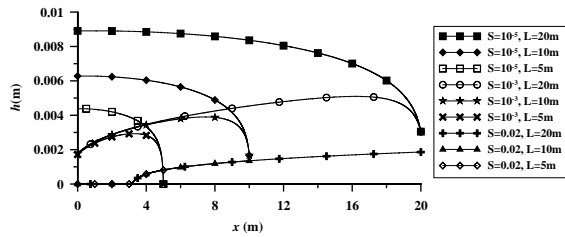


圖 4 不同道路寬度之水面線

Fig.4 The water surface lines for different road width of the permeable pavement

而整體之值皆較其為小，並且其結果亦皆小於 20 m 之情況；在 $L = 5$ m 時，亦有同樣之趨勢且其值又更小。 $S = 0.02$ 時， $L = 10$ m 時，其發展與 20 m 之情況相同，惟路緣處之水深較低； $L = 5$ m，其結果水深則為整體最低。

接著將各例中水深最大值及此最大值發生於距離安全島多遠之處列表比較，即如表 4，可發現 $S = 0.00001$ 之例中，當坡長增大一倍時，水深最大值約為原來之 1.4 倍，當坡度增為 $S = 0.001$ 時，坡長增大一倍時，水深最大值約為原來之 1.3 倍， $S = 0.02$ 時，坡長增大一倍，水深最大值則增大約 2 倍。由此可見，在亞臨界流下，坡度越大時，坡長增大對水深最大值之影響越小，而若增大到流況成為超臨界流，波長增大對最大水深則變大。且可由結果發現坡長越長，最大水深發生處離安全島越遠，且坡度越大越遠離。

3. 降雨因子探討

降雨強度之選取便採 100 mm/hr，另外用來比較的部份則取 200 及 50 mm/hr，其他參數如表 5，代入計算結果繪製如圖 5。

在 $S = 0.00001$ 時，降雨強度越小對應之水深相對越低，且在起始水深處差距較大；在 $S = 0.001$ 時，不同降雨強度反應在水深上，則是在最大水深處與臨界水深處之差距較大；在 $S = 0.02$ 時，一樣是將降雨強度反應在最大水深處，而起始水深則皆為零，且降雨強度越小時，出現水深之位置離安全島越遠。

接著將圖中各例水深最大值及此最大值發生於距離安全島多遠之處列如表 6 比較，可發現 $S = 0.00001$ 時，當降雨強度增大一倍，水深最大值約為原來之 1.2 倍；當坡度增為 $S = 0.001$ 時，降雨強度增大一倍，水深最大值約為原來之 1.25 倍；而坡度增到 $S = 0.02$ 時，降雨強度增大一倍，最大水深增加大於 1.6 倍。

由此可推知當坡度越大時，降雨強度增加對最大水深增加之影響越大。另外可發現降雨強度增加對最大水深發生處影響並不大，雖然隱隱有強度越大發生點離安全島越近的趨勢，但結果仍然都很接近，其位置主要還是受到坡度控制，坡度越大發生的位置就越遠離安全島。

4. 孔隙率之探討

將 n 值代入 0.1、0.2、0.3、0.4，其他參數如表 7，推求水面線以比較其影響，其結果繪製如圖 6。

表 4 不同坡長下最大值及最大值發生位置

Table 4 The maximum water depth and its location for different slope length

參數	位置 (m)	最大值 (m)	
$S = 0.00001$	$L = 20m$	0.847	0.008912
	$L = 10m$	0.3	0.006285
	$L = 5m$	0.103	0.004385
$S = 0.001$	$L = 20m$	16.211	0.005098
	$L = 10m$	7.439	0.003904
	$L = 5m$	3.297	0.002934
$S = 0.02$	$L = 20m$	20	0.003052
	$L = 10m$	10	0.001674
	$L = 5m$	4.765	0.000763

表 5 不同降雨強度之參數選用值

Table 5 The selected parameters for different rainfall intensity.

物理意義	參數	選用值	單位
孔隙率	n	0.2	—
路面寬度	L	20	m
透水層厚度	H	0.05	m
路拱	S	0.00001	—
		0.001	—
		0.02	—
降雨強度	i	5.556×10^{-5}	m/s
		2.778×10^{-5}	m/s
		1.389×10^{-5}	m/s

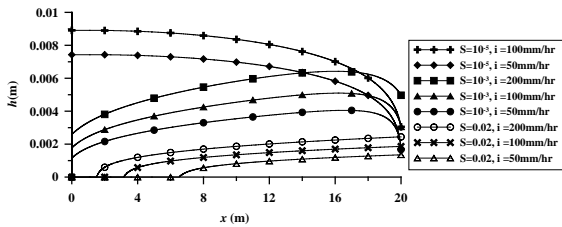


圖 5 不同降雨強度之水面線

Fig.5 The water surface lines for different rainfall intensity

6 上部所代表的是在 $S = 0.00001$ 時之情況，水深隨著孔隙率增大而變小，且在孔隙率越大時改變越明顯；中間部份所代表的是 $S = 0.001$ 時之情況，其仍然皆保有該角度線型之形式，且對孔隙率也有與前者相同之反應；下部則是 $S = 0.02$ ，除了水深隨孔隙率增大而變小，且孔隙率越大越明顯外，出現水深之位置也隨增大而遠離安全島，特別在 $S = 0.02$ 、 $n = 0.4$ 時，所演算結果整體水深之值皆等於零。

5. 透水層厚度之探討

透水層厚度因子即為鋪面施做厚度，選用 5 cm 及 30 cm 作為比較，一樣在三種坡度條件下計算，選用參數列如表 8，推求水面線以比較其影響，將結果繪製如圖 7。

圖 7 上部的水面線為 $S = 0.00001$ 之情況，水深隨透水層厚度增加而下降，且於末端路緣處有較大的差距；中間兩條水面線的情形為 $S = 0.001$ ，整體水面亦隨透水層厚度增加而下降，於起始處、最大值及末端處之差距較大；下面兩條為 $S = 0.02$ ，在厚度增加後，整體水深皆變成零。由此可發現，透水層厚度增加時，於末端路緣處之水深變化最大，即使是 $S = 0.02$ 水深已為零亦如是。另外亦可看出，坡度越大，改變透水層厚度之影響越明顯，而在起始水深為零之例中，透水層越厚，開始出現水深之位置離安全島越遠。

6. 流速分佈之探討

利用求解出來之水深及各項參數值代入前述所推導之流速式中，可分別求出水層及透水層在特定位置上之流速剖面。圖 8 為距離安全島 20 m 處、 $S = 0.0015$ 之例，其所選用之參數如表 9。

由圖 8 (a) 可知水層之流速遠大於土層，且越接近

水面流速越快，而土層之流速很小，且越接近不透水底床流速越接近零。由圖 8 (b) 之放大圖可明顯的看見土層中的流速不為零之真實現象，及其流速之連續性。

接著將距離安全島不同距離之位置所得各水深代入流速式中，即可求得各位置上之流速，取其最大值，且推求各通水斷面之平均流速，將上述兩項結果與距離之關係繪製成圖 9，並將各位置上之水深與流量繪出，以供比較。

圖 9 (a) 代表路面上各位置之最大流速與平均流速，(b) 所代表的是各位置之水深與水層之流量。

表 6 不同降雨強度下最大值及最大值發生位置

Table 6 The maximum water depth and its location for different rainfall intensity

參數		位置 (m)	最大值 (m)
$S = 0.00001$	$i = 100\text{mm/hr}$	0.847	0.008912
	$i = 50\text{mm/hr}$	0.988	0.007435
	$i = 200\text{mm/hr}$	16.031	0.006424
$S = 0.001$	$i = 100\text{mm/hr}$	16.211	0.005098
	$i = 50\text{mm/hr}$	16.591	0.004053
	$i = 200\text{mm/hr}$	20	0.004970
$S = 0.02$	$i = 100\text{mm/hr}$	20	0.003052
	$i = 50\text{mm/hr}$	20	0.001674
	$i = 100\text{mm/hr}$	0.847	0.008912

表 7 不同孔隙率之參數選用值

Table 7 The selected parameters for different porosity

物理意義	參數	選用值	單位
降雨強度	i	2.778×10^{-5}	m/s
路面寬度	L	20	m
透水層厚度	H	0.05	m
路拱	S	0.00001	—
		0.001	—
		0.02	—
		0.02	—
孔隙率	n	0.1	—
		0.2	—
		0.3	—
		0.4	—
		0.4	—

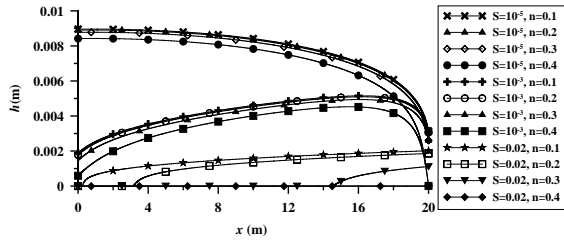


圖 6 不同孔隙率之水面線

Fig.6 The water surface lines for different porosity of the permeable pavement

此例為 $S = 0.001$ ，其水面線線型為水深隨距離而增大，達到最大水深後又漸漸下降至臨界水深，而水層流量隨距離而增大，故接近路緣處通水斷面減小而流量增大，使末端之流速快速上升，在最大流速及平均流速中皆有此現象。

另外對於不同坡度時，流速剖面之結果與前者雷同，不再贅述。此處除了坡度因子採 $S = 0.00001$ 、 0.02 以外，其他設計參數之選用皆同表 9，將各斷面最大流速、水層之平均流速、水深及流量繪製如圖 10、圖 11 比較不同坡度對流速之影響。

圖 10 為 $S = 0.00001$ 時之結果，由圖 10 (b) 可見水面線隨距離增加而下降，至接近路緣處更加快下

表 8 不同透水層厚度之參數選用值

Table 8 The selected parameters for different thickness of pavement

物理意義	參數	選用值	單位
降雨強度	i	2.778×10^{-5}	m/s
路面寬度	L	20	m
孔隙率	n	0.2	—
路拱	S	0.00001	—
		0.001	—
		0.02	—
透水層厚度	H	0.05	m
		0.3	m

表 9 計算參數選用值

Table 9 The selected parameters of the designing example

物理意義	參數	選用值	單位
------	----	-----	----

降速度到臨界水深，而水層之流量仍隨距離增加而增加，因此反應在最大流速與平均流速上則如圖 10 (a)，於末端處快速上升。其結果與 $S = 0.001$ 時相比較，流量皆隨距離增加，而在 $S = 0.001$ 之水面線先上升後下降，因此流速增加速率先驅緩後轉急，有一較明顯之反曲點，而 $S = 0.00001$ 則沒有此一現象，流速增加之速率隨距離增加越來越快。而圖 11 為 $S = 0.02$ 時之結果，由圖 11 (b) 可見水面線自出現水深之位置後，隨距離增加而上升，其值變大之速率隨距離增加而趨緩。由圖 11 (a) 可發現流速亦隨距離增加而加大，其增加速率亦隨距離增加而趨緩，由此可知在此一例中，因水深增加致使通水斷面增加之速率較流量增加之速率為快，因此流速變化會隨距離減緩。

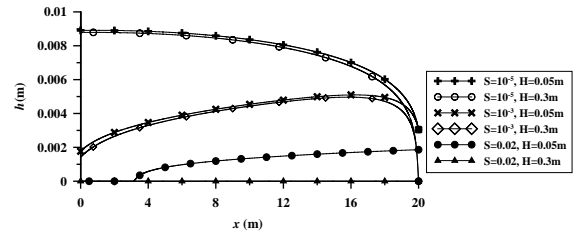
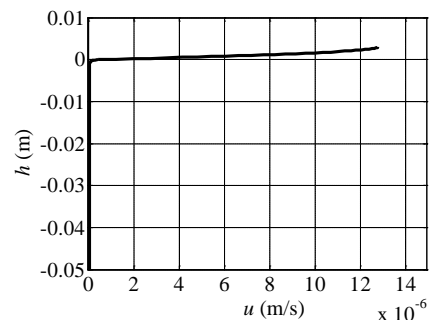


圖 7 不同透水層厚度之水面線

Fig.7 The water surface lines for different thickness of the permeable pavement

降雨強度	i	2.778×10^{-5}	m/s
路面寬度	L	20	m
孔隙率	n	0.2	—
透水層厚度路拱	H	0.05	m
		0.00001	—
		0.001	—
路拱	S	0.001	—
		0.02	—



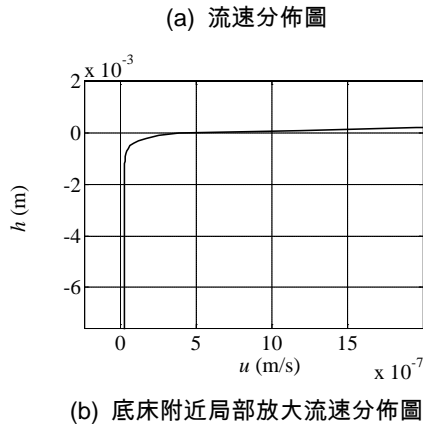
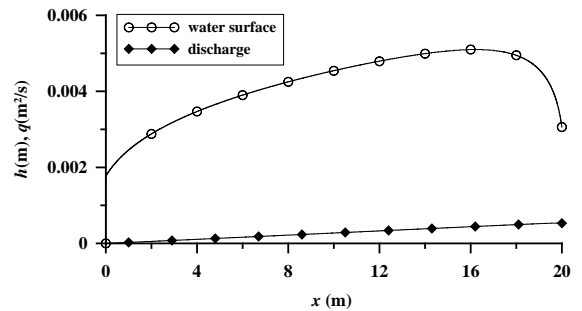
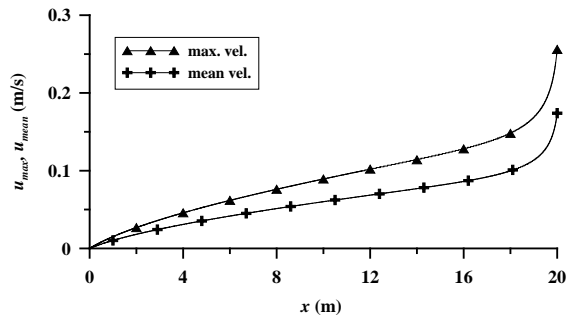


Fig.8 The velocity profile above and inside the pavement

圖 8 流速剖面線

由前述各項因子之探討可知各種特性對路面排水的影響，如鋪面孔隙率、施作厚度或路拱之坡度等，可模擬改變設計參數將對路面積水狀況造成之影響，亦可由降雨強度及可容許積水深度反推求可滿足要求之各項參數值，用以做為設計鋪面之依據，以達成各

級道路或不同降雨條件地區之道路鋪面設計。此外，若現有材料無法配合設計，亦可以此做為材料科學開發之目標，增加路面鋪面排水性以降低路面積水，甚至達到特定降雨強度下，路面完全不積水，使得降於路面之雨水皆由透水層排除，以確保道路安全。

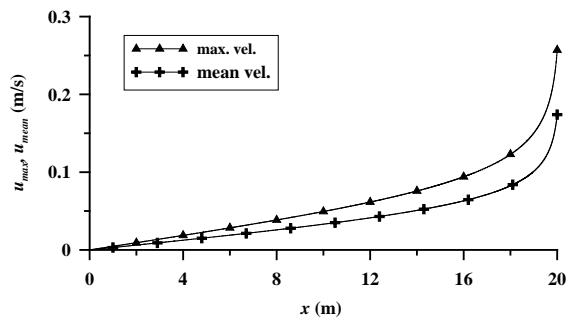


(a) 最大流速、平均流速圖

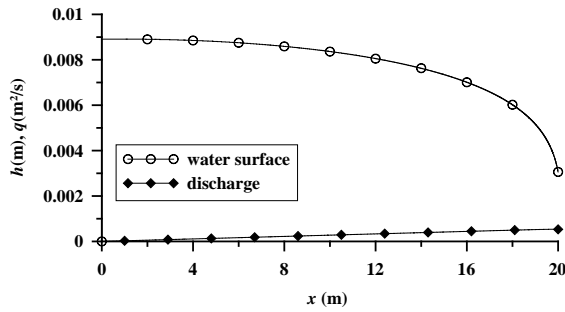
(b) 水深、流量圖

圖 9 S = 0.001 時，流速與水深及流量關係圖

Fig.9 The relation between velocity, water depth and discharge for S = 0.001.



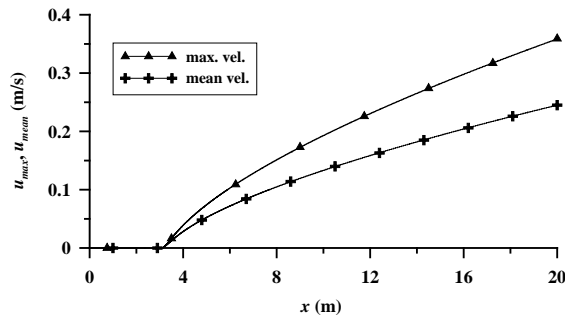
(a) 最大流速、平均流速圖



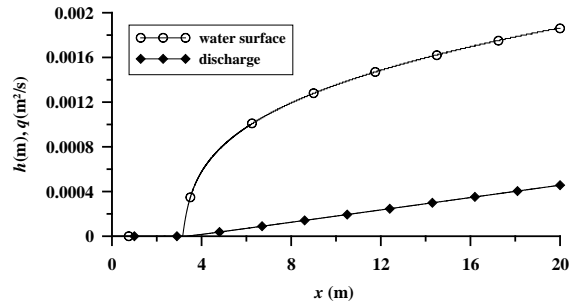
(b) 水深、流量圖

圖 10 $S = 0.00001$ 流速與水深及流量關係圖

Fig.10 The relation between velocity, water depth and discharge for $S = 0.00001$.



(a) 最大流速、平均流速圖



(b) 水深、流量圖

圖 11 $S = 0.02$ 流速與水深及流量關係圖

Fig.11 The relation between velocity, water depth and discharge for $S = 0.02$.

四、結 論

1. 坡長增大或坡度增大都將使最大水深發生處離安全島越遠，且流況為超臨界流時，改變坡長對水深之影響較亞臨界流時大，又亞臨界流中，坡度越大時、坡長增加時水深抬升越多，但其增加量相對減緩。如超臨界流中， $S = 0.02$ 時，坡長增大 1 倍，水深最大值則增大約 2 倍；而亞臨界流中， $S = 0.00001$ 時，坡長增大 1 倍，水深最大值增為原來之 1.4 倍；當 S 增為 0.001 時，坡長增大 1 倍，水深最大值僅增為原來之 1.3 倍。
2. 坡度越大時，降雨強度增加時水深抬升越多，且其增加量相對加快，如 $S = 0.00001$ 時， i 增大 1 倍，水深最大值增為原來之 1.2 倍；當 S 增為 0.001 時， i 增大 1 倍，水深最大值則增為原來之 1.25 倍；而 $S = 0.02$ 時，降雨強度增大一倍時，最大水深增加大於 1.6 倍。
3. 孔隙率越大時，孔隙率改變對水層之影響越明

顯，意即對水深影響之變化，隨著孔隙率變大，其增高量成長幅度是非線性的。而若起始水深為零之情況，孔隙率越大，其水深出現位置距安全島越遠。當 $S = 0.02$ 、 $n = 0.4$ 時，所演算結果整體水深之值皆等於零，即路面已無積水。

4. 透水層厚度增加時，地表水深將隨之降低。在透水層厚度越大時，改變透水層厚度對水深變化影響越大，尤其以道路外緣變化最明顯。當 $S = 0.02$ 時， H 值在 29.1 cm 以上，路面上將完全不會積水，不過高於目前一般實務上透水層（如多孔性瀝青混凝土、開放級配瀝青混凝土等）之施作厚度。除了施做的困難以外，經費的提高亦是不容小覷，因此改變鋪面質材、提高孔隙率將會是較佳的作法。

參考文獻

1. 交通部 (1995), 「交通政策白皮書」, 交通部運輸

- 研究所, 台灣. (Ministry of Transportation and Communications (1995). *Policy of Transportation*, Institute of Transportation MOTC, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
2. 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博士論文. (Song, C. H (1993). *Dynamic Response of a Poroelastic Bed under the Action of Water Waves*, Dissertation, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 3. 林昭仁 (2005), 「薄膜流技術」, 高立圖書有限公司, 台灣. (Lin, J. R. (2005). *Thin-Film Flow Technology*, Gau Lih Book Co. Ltd., Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 4. 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碩士論文. (Hsun, Y. T. (1998). *Analysis of Flow and Suspended Sediment in an Open Channel with a Permeable Rigid Bed*, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 5. 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碩士論文. (Shiu, Y. S. (2003). *Hydraulic Analysis of Flow Passing Vegetative Ground*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 6. 楊山慶 (2007), 「草溝設計水理實驗之研究」, 國立中興大學水土保持學系碩士論文. (Yang, S. C. (2003). *Study on Hydraulic Experiments in Grassed Channel*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 7. 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碩士論文. (Liu, Y. T. (2003). *Finite Element Analysis of Water Flow Passing Vegetative Channel*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 8. Biot, M.A. and Willis, D.G. (1957). "The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation." *JAM*, 24, 594-601.
 9. Biot, M.A. (1956a). "Theory of Propagation Elastic Waves in a Fluid Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range." *JASA*, 28, 168-178.
 10. Biot, M.A. (1956b). "Theory of Propagation Elastic Waves in a Fluid Saturated Porous Solid. II. High-Frequency Range." *JASA*, 28, 179-191.
 11. Govindaraju, R.S. and Kavvas, M.L. (1990). "Approximate Analytical Solutions for Overland Flows." *Water Resources Research*, 26(12), 2903-2912.
 12. Huppert, H.E. (1982). "The Propagation of Two-Dimensional and Axisymmetric Viscous Gravity Currents over a Rigid Horizontal Surface." *JFM*, 121, 43-58.
 13. Huppert, H.E. (1982). "Flow and Instability of a Viscous Current down a Slope." *Nature*, 300, 427-429.
-
- 2010 年 12 月 14 日 收稿
2011 年 02 月 08 日 修正
2011 年 03 月 03 日 接受
- (本文開放討論至 2011 年 09 月 30 日)