

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣地區屬亞熱帶海島型氣候，夏季炎熱午後常有熱雷雨發生，都市地區常因排水能力不足而導致淹水。都市地區一旦發生淹水，除了造成交通不便及環境衛生等問題影響生活品質甚鉅外，亦可能產生財產的重大損失或人命的損傷。

由於大氣現象複雜多變，降雨可能隨空間(spatial)與時間(temporal)變化。此外，近年來由於環境及水資源永續利用意識的廣受重視，以往都市空地常用的混凝土或瀝青鋪面，已經逐漸被自然植生取代。因此，如何在考慮地表入滲(infiltration)作用下，探討複雜降雨變化所造成之地表逕流(runoff)，以提供作為相關排水設施設計參考之用，儼然已成為都市排水的重要研究課題之一。本研究之目的在於，探討入滲與不同降雨雨型對漫地流(overland flow)之影響。

1.2 文獻回顧

入滲為水文循環(hydrological cycle)中，地表水(surface water)與地下水(subsurface water)相互關聯之重要機制。Horton(1933)觀測土壤水分入滲速率，提出以指數遞減型式來表示入滲量隨時間之變化情形。Philip(1957)利用Boltzmann轉換先求得累積入滲量之近似解，再進一步推估入滲量。Green-Ampt(1911)將土壤之濕鋒假設為一平整的邊界，以解析解的方式求解入滲公式。Richards(1931)利用達西定律，並定義非飽和土層之總水頭係為位置水頭及張力(負壓)之和，且水力傳導係數為張力水頭之函數，再根據一維垂向連續方程，建立非飽和

水流之偏微分方程。許少華(1999)等比較Horton、Philip、Green-Ampt三種入滲公式與Richards方程式的差異性。相較於其他三者，Green-Ampt入滲公式具有簡單及準確之特點，且已被廣泛地利用，如Mein and Larson(1973)、Swartzendruber(1974)、Neuman(1976)、Brakensiek(1977)、Brakensiek and Onstad(1977)及Smith and David(1971)等。

動力波(dynamic wave)理論、擴散波(diffusion wave)理論及運動波(kinematic wave)理論為三種可利用於模擬漫地流之方式，例如Govindaraju et al.(1988)利用擴散波理論模擬漫地流。然而，對於坡度較陡的集水區，因為水流慣性項與壓力項之影響甚微(Henderson,1965)，水位與流量的關係之遲滯效應及迴水效應可忽略，因此利用運動波理論計算較陡地區之漫地流已廣被接受，如Morgali(1970)、Overton(1972)、Woolhiser(1975)、Cundy and Tento(1985)、Schmid (1989)及Julien and Moglen(1990)。Paige et al.(2002)結合Green-Ampt入滲公式和運動波理論模擬降雨逕流。

雨型不論是隨時間改變，或是隨時間和空間改變，對於漫地流而言，都是重要的影響因素。Pilgrim et al.(1987)提出雨型的改變比均勻降雨會較早產生洪峰流量；Bedient and Huber(1988)指出，由於都市集水區之水文反應時間較為短暫，因此降雨之空間分佈不均現象，對逕流生成之影響甚為明顯。Ball(1994)利用運動波理論探討隨時間變化的雨型對流域之影響。此外，移動暴雨對集水區逕流之研究，早已廣受水文研究者所重視Yen and Chow(1969)、Black(1972)、Austin and Austin(1974)。Foroud et al.(1984)的研究顯示，當暴雨以集水區逕流平均速度向下游方向移動，其尖峰流量較定常性暴雨者高，反之，若此暴雨向上游方向移動，其尖峰流量較定常性暴雨者低。Fred et

al.(1995)、李光敦(1997)以移動中的暴雨模擬降雨逕流。Singh(1997)綜合整理說明影響水流歷線的形狀、到洪峰流量的時間、洪峰流量之重要因素為隨時間和空間變化的降雨及流域的特性。Singh(1998)進一步探討暴雨移動方向對降雨逕流的影響。Lima and Singh(2002)探討移動中的雨型往上游和下游方向運動，其對漫地流的影響。

由上述文獻回顧可知，考慮入滲作用下，探討不同降雨雨型對漫地流之影響，直至目前鮮少有相關研究提出。

1.3 研究方法與步驟

本研究之目的在於，探討入滲與降雨對漫地流之影響。研究中，漫地流之計算採用一維運動波理論(one-dimensional kinematic theory)，入滲之模擬採用Green-Ampt理論。結合兩者，在考慮入滲作用下，先探討降雨於時間上分別為均勻型(uniform pattern)分佈及後退型(delayed pattern)、前進型(advanced pattern)及中央型(intermediate pattern)等三角形分佈(Chow et al.,1988)對漫地流之影響，再進一步將上述四種雨型應用於降雨空間分佈，分析移動暴雨產生之時空複雜變化降雨對漫地流之影響，如圖1.1所示。

本研究之研究流程與步驟，如圖1.2所示，首先必須先了解運動波理論及 Green-Ampt入滲理論，再進一步了解如何結合二者，並將其應用於漫地流模擬(如第二章所述)。接下來撰寫運動波與入滲數值計算程式，並利用具有解析解之簡單案例，分別驗證漫地流及入滲計算程式之正確性(如第三章所述)。結合上述兩種理論，進一步探討入滲作用下，降雨之雨型對漫地流的影響，包括降雨逕流歷線形狀、最大流量及最大流量發生時間等(如第四章所述)。最後，對本研究做結

論，並提出建議(如第五章所述)。

1.4 章節介紹

第一章為緒論，首先闡述本研究的動機與目的，並回顧文獻，再提出研究方法與步驟。

第二章為理論基礎，首先介紹運動波理論的控制方程式，再簡介Green-Ampt入滲公式。

第三章為數值計算程式之建立與驗證，本章利用Preissmann四點有限差分法於運動波理論的計算及使用疊代法求解Green-Ampt入滲方程式，並利用具有解析解之簡單案例驗證程式之正確性。

第四章為雨型與入滲對漫地流之影響，本章分別探討入滲作用下，時變降雨及時空變化降雨(移動暴雨)，四種不同代表雨型對漫地流的影響。

第五章為結論與建議，除了對本研究之成果作綜合性之歸納說明外，並對未來研究方向提出建議。

第二章 理論基礎

本研究之目的在於探討不同雨型與入滲對漫地流之影響。研究中，漫地流計算採用一維運動波理論，入滲估計採用Green-Ampt理論。以下分別簡介一維運動波理論以及Green-Ampt理論。

2.1 運動波控制方程式

一維運動波漫地流控制方程式可表示為

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i - f \quad (2.1)$$

$$S_0 = S_f \quad (2.2)$$

(2.1)式為連續方程式(continuity equation)， q 表單位寬度流量(discharge per unit width)， h 表水深(water depth)， i 表降雨強度(rainfall intensity)， f 為入滲率(infiltration rate)。(2.2)式乃是由動量方程式(momentum equation)忽略慣性力(inertial force)以及水壓變化作用所得之結果。 S_0 表示地表坡度(slope)， S_f 表示摩擦坡度(friction slope)。利用曼寧公式(Manning's formulas)，(2.2)式可進一步表示為

$$q = \alpha h^m \quad (2.3)$$

式中， $m=5/3$ 、 $\alpha = \sqrt{S_0}/n$ ， n 為曼寧摩擦係數(Manning's roughness coefficient)。

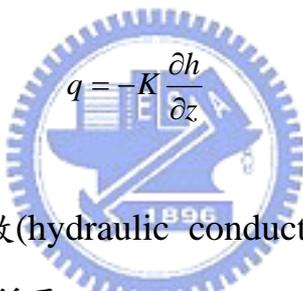
2.2 Green-Ampt 入滲計算

如圖 2.1 所示，降雨經由地表入滲至土壤中，若土壤入滲前含水量(moisture content)為 θ_i ，土壤孔隙率(effective porosity)為 η ，當土壤濕鋒(wetting front)到達地表下深度 L_d 時，利用質量守恆原理，降雨入滲至土壤之累積入滲深度(cumulative infiltration depth) F ，可表示為

$$F(t) = L_d(\eta - \theta_i) = L_d\Delta\theta \quad (2.4)$$

式中， $\Delta\theta = \eta - \theta_i$ 。

根據達西定律(Darcy's law)，流量(discharge)與水頭梯度(hydraulic head gradient)之關係可表示為


$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.5)$$

式中， K 為水力傳導係數(hydraulic conductivity)， z 表示向上為正之垂直方向座標，如圖 2.1 所示。

利用(2.5)式，入滲能力(infiltration capacity) f^* 可表示為

$$f^* = K \left[\frac{h_1 - h_2}{z_1 - z_2} \right] \quad (2.6)$$

式中， f^* 是以向下為正(q 是以向上為正)。若 $h_1 = h_0$ 表示為地表之水位， h_0 為積水深 (water gepth)， $h_2 = -\psi - L_d$ 為濕鋒處之水頭， ψ 為濕鋒處之吸力水頭 (suction head)，則(2.6)式可進一步表示為

$$f^* = K \left[\frac{h_0 - (-\psi - L_d)}{L_d} \right] \quad (2.7)$$

利用(2.4)式及 $f^* = dF/dt$ ，並忽略積水深度，即 $h_0 = 0$ ，則(2.7)式可變為

$$\frac{dF}{dt} = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (2.8)$$

將(2.8)式積分如下

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right) \quad (2.9)$$

再將(2.9)式對時間做微分，則入滲能力可表示為

$$f^*(t) = K \left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (2.10)$$

由(2.9)式可知，初始時 $t=0$ ，入滲能力無限大(因為 $F(t) \rightarrow 0$)，入滲率等於降雨強度 $f=i$ ，降雨完全入滲至土壤。隨著降雨入滲至土壤，也就是累積入滲深度 F 隨時間增加，入滲能力隨時間降低，在入滲能力仍大於降雨強度時，入滲率等於降雨強度 $f=i$ 。然而，當入滲率能力隨時間減少至小於降雨強度時 $f^* < i$ ，地表開始積水而產生漫地流，此時入滲率等於入滲能力 $f=f^*$ 。當入滲能力減至 K 時，則入滲能力保持不變。上述為利用Green-Ampt理論，推估均勻降雨入滲至土壤的過程，如圖2.2所示。

由上述可知，發生積水時刻，也就是所謂的積水時間(ponding time)，乃是整個入滲過程之重要參數。當時間小於積水時間時，降雨完全入滲至土壤，不發生漫地流。然而，當時間大於積水時間時，由於入滲率小於降雨強度，積水產生並引發漫地流。

發生積水時，也就是 $t = t_p$ ，累積入滲深度 $F_p(t = t_p) = it_p$ ，且此時入滲能力等於降雨強度 $f^* = i$ ，由(2.10)式，積水時間可表示為

$$t_p = \frac{K\psi\Delta\theta}{i(i-K)} \quad (2.11)$$

將(2.8)式積分如下

$$\int_{F_p}^F \frac{F}{\psi\Delta\theta + F} dF = \int_{t_p}^t K dt \quad (2.12)$$

則可得

$$F - F_p - \psi\Delta\theta \ln \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{\psi\Delta\theta + F_p} \right] = K(t - t_p) \quad (2.13)$$

由(2.13)式，可求得積水後的累積入滲深度，再將其代入(2.10)式，即可求得積水後的入滲能力。

以上乃是說明利用Green-Ampt理論，計算均勻降雨入滲之過程。然而，大多數降雨事件中，降雨強度乃是隨時間變化，而不是固定不變。因此，上述入滲計算步驟，必須加以修正，才可適用於不均勻降雨之入滲推估。在計算不均勻降雨入滲時，首先需將降雨事件做時間分割，並假設每個時間分割內之降雨強度為一定值，如圖2.3所示。一場降雨事件被等分割成 NM 個等份，每個等份之時間間距 $\Delta t = D/NM$ ， D 表示降雨延時，在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內，假設降雨強度皆為 i_0 。 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內之入滲計算，可能有三種情況發生，如圖2.4所示：(1) t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內皆發生積水，即 $f^*_{t_0} < i_0$ ，(2) t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內不發生積水，也就是 $f^*_{t_0} > i_0$ 且 $f^*_{t_0+\Delta t} > i_0$ ，(3) t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內

某個時刻開始發生積水，即 $f^*_{t_0} > i_{t_0}$ 且 $f^*_{t_0+\Delta t} < i_{t_0}$ 。在情況(1)中，入滲率等於入滲能力；在情況(2)中，入滲率等於降雨強度；在情況(3)中，未發生積水前，入滲率等於降雨強度，發生積水後，入滲率等於入滲能力。以下分別詳述之。

情況(1)

首先利用(2.10)式，計算 t_0 時刻之入滲能力 $f^*_{t_0}$ ，即

$$f^*_{t_0} = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F_{t_0}} + 1 \right) \quad (2.14)$$

若 t_0 時刻之入滲能力小於降雨強度，即 $f^*_{t_0} < i_{t_0}$ ，則表示時間間距內皆發生積水，由(2.13)式，累積入滲深度可表示為

$$F_{t_0+\Delta t} - F_{t_0} - \psi \Delta \theta \ln \left[\frac{\psi \Delta \theta + F_{t_0+\Delta t}}{\psi \Delta \theta + F_{t_0}} \right] = K \Delta t \quad (2.15)$$

再利用(2.10)式，即可求得入滲能力，且入滲率等於入滲能力。

情況(2)與(3)

利用(2.14)式，計算 t_0 時刻之入滲能力 $f^*_{t_0}$ ，若 t_0 時刻之入滲能力大於降雨強度，即 $f^*_{t_0} > i_{t_0}$ ，假設時間間距內，入滲能力皆大於降雨強度，因此，利用質量守衡原理， $t_0 + \Delta t$ 時刻之累積入滲深度為

$$F_{t_0+\Delta t} = F_{t_0} + i_{t_0} \Delta t \quad (2.16)$$

再利用(2.10)式，計算 $t_0 + \Delta t$ 時刻之入滲能力 $f^*_{t_0+\Delta t}$ 。若 $f^*_{t_0+\Delta t} > i_{t_0}$ ，則表示時間間距內入滲能力皆大於降雨強度之假設正確，且入滲率等於

降雨強度。然而，若 $f_{t_0+\Delta t}^* < i_{t_0}$ ，則表示積水發生在時間間距內某個時刻 t' 。 t' 時刻積水發生，表示此時之入滲能力與降雨強度相等，即 $f_{t'}^* = i_{t_0}$ ，利用(2.10)式，積水發生時刻之累積入滲深度 $F_{t'}$ 可表示為

$$F_{t'} = \frac{K\psi\Delta\theta}{i_{t_0} - K} \quad (2.17)$$

在 $t_0 < t < t'$ 時間內，入滲率等於降雨強度，利用質量守恆原理，可將 t_0 至 t' 之時間差，即 $\Delta t' = t' - t_0$ ，表示為

$$\Delta t' = \frac{F_{t'} - F_{t_0}}{i_{t_0}} \quad (2.18)$$

當 $t_0 < t < t'$ 時，入滲率等於降雨強度，將 Δt 以 $\Delta t'$ 取代，利用(2.16)式，可求得累積入滲深度，再利用(2.10)式即可計算入滲能力。然而，當 $t' < t < t_0 + \Delta t$ 時，積水產生，入滲率等於入滲能力，以 t' 代替 t_0 並利用(2.15)式，求得累積入滲深度，入滲能力則相同地可利用(2.10)式求得。

利用Green-Ampt理論計算入滲，所需參數包括水力傳導係數 K 、有效孔隙率 θ_e 、以及土壤吸力水頭 ψ 。不同土壤中之相關入滲參數，如表2.1所示(Rawls et al., 1983)。

第三章 數值計算程式之建立與驗證

第二章中已分別闡述一維運動波漫地流以及Green-Ampt入滲計算之理論基礎，本章首先說明如何求解一維運動波漫地流以及Green-Ampt入滲計算，再簡述如何結合兩者，分析降雨與入滲對漫地流之影響，最後驗證研究中所建立數值計算程式之正確性。

一維運動波漫地流之控制方程式，如(2.1)式與(2.3)式所示，可使用數學解析(analytic)或數值計算(numerical)方式分別求解。例如，Parlange et al.(1981)及Singh(1998)利用運動波理論，求解在不考慮入滲下時變降雨的解析解。然而，對於曼寧 n 值為變數、複雜降雨型態以及考慮入滲作用下之運動波漫地流，則難以利用數學解析方式求解，而須利用數值計算求解。本研究利用普立斯蒙四點差分法(Preissmann four point finite difference scheme)求解一維運動波漫地流控制方程式。至於Green-Ampt入滲計算，如(2.9)式與(2.10)式所示，為數學代數方程式，而不是微分方程式，僅須利用疊代技巧求解即可(見3.1.2)。

3.1 程式之建立

3.1.1 運動波程式之建立

利用普立斯蒙四點差分法，可將一維運動波漫地流之連續方程式，如(2.1)式，離散化如下

$$(1-b)\frac{(h_{I+1}^{N+1} - h_{I+1}^N)}{\Delta t} + b\frac{(h_I^{N+1} - h_I^N)}{\Delta t} + (1-a)\frac{(q_{I+1}^{N+1} - q_I^{N+1})}{\Delta x} + a\frac{(q_{I+1}^N - q_I^N)}{\Delta x} = i_e \quad (3.1)$$

其中， $a(0 \leq a \leq 1)$ 為空間加權因子； $b(0 \leq b \leq 1)$ 為時間加權因子，如圖 3.1 所示。 N 表示網格時間座標； I 表示網格空間座標； Δt 為時間時距； Δx 為空間間距， $i_e = i - f$ 為超滲降雨量(rate of excess rainfall)。假設起始水深為零，也就是 $h_i^1 = 0.0$ ， $I = 1, 2, 3, \dots, NX$ ， NX 表示為網格空間座標終點，如圖 3.2 所示。上游邊界條件為固定水深，即 $h_1^N = \text{constant}$ ， $N = 2, 3, 4, \dots, NT$ ， NT 表示為網格時間座標終點。利用初始條件與邊界條件，並根據水深與流量之關係如(2.3)式即曼寧公式，可將(3.1)式改寫為

$$(1-a)\theta\alpha H^m + (1-b)H = RHS \quad (3.2)$$

其中， $H = h_{I+1}^{N+1}$ ， $\alpha H^m = \alpha (h_{I+1}^{N+1})^m = q_{I+1}^{N+1}$ ， $\Delta t / \Delta x = \theta$ ， RHS 為已知值可表示為

$$RHS = (1-b)h_{I+1}^N - b(h_I^{N+1} - h_I^N) + (1-a)\frac{\Delta t}{\Delta x}q_I^{N+1} - a\frac{\Delta t}{\Delta x}(q_{I+1}^N - q_I^N) + i_e\Delta t \quad (3.3)$$

(3.2) 式為非線性代數方程式，可利用 Newton-Raphson 方法 (Steven and Raymond, 1988) 加以求解。

3.1.2 Green-Ampt 入滲程式之建立

本研究中以 Green-Ampt 估計入滲，首先需得知降雨隨時間之分佈及土壤與地表相關參數，如表 2.1 和表 3.1 所示。然後利用 (2.9) 式求得累積入滲深度 F_t 後再利用 (2.10) 式求得入滲能力 f^* ，比較入滲能力 f^* 和降雨強度 i 之大小關係，其關係大致上可分成三種情形，如圖 2.4 所示。在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內，假設降雨強度皆為 i_{t_0} ，參考圖 2.3， $f_{t_0}^*$ 和 i_{t_0}

可能發生情形(1) t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內皆發生積水，即 $f_{t_0}^* < i_{t_0}$ ，利用(2.14)式和(2.15)式求解，此時入滲率 f_{t_0} 等於入滲能力 $f_{t_0}^*$ ；情形(2) t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內不發生積水，也就是 $f_{t_0}^* > i_{t_0}$ 且 $f_{t_0+\Delta t}^* > i_{t_0}$ 此時入滲率 f_{t_0} 等於降雨強度 i_{t_0} ；情形(3) t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間內某個時刻開始發生積水，即 $f_{t_0}^* > i_{t_0}$ 且 $f_{t_0+\Delta t}^* < i_{t_0}$ ，未發生積水前，入滲率 f_{t_0} 等於降雨強度 i_{t_0} ，發生積水後，入滲率 f_{t_0} 等於入滲能力 $f_{t_0}^*$ ，情形(2)和(3)可利用(2.16)式至(2.18)式求解，整個演算步驟可參考圖3.3。在上述三種情況中，累積入滲深度之計算可以下列通式表示

$$F_{T+\Delta t} - F_T = A + B \ln \left(1 + \frac{F_{T+\Delta t} - F_T}{B + F_T} \right), T = 1, 2, 3 \dots MT \quad (3.4)$$

其中， $A = K\Delta t$ ， $B = \psi\Delta\theta$ ， Δt 為任意兩個時間的間距差， T 表示為某時間的累積入滲深度， MT 表示演算累積入滲深度的總時間。在不同時情形下， A 的值會隨之改變，例如在情形(1)時，下個待求累積入滲深度的時間為 t ，則(3.4)式中， $T = t_0$ ， $\Delta t = t - t_0$ ， $A = K(t - t_0)$ 。利用下列疊代步驟，即可求得累積入滲深度 F_t 。

$$F_t^{M+1} = Kt + \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F_t^M}{\psi\Delta\theta} \right), M = 1, 2, 3 \dots \quad (3.5)$$

$$\left| \frac{F_t^{M+1} - F_t^M}{F_t^{M+1}} \right| \leq 10^{-6} \quad (3.6)$$

其中， M 為疊代次數。

3.1.3 計算流程

由上述可知，本研究採用非耦合(uncouple)方式，計算入滲對漫地流之影響。也就是先依據降雨推估入滲量，再利用所得之超滲降雨量分佈計算漫地流，如圖3.4所示。在計算流程中，首先定義所要模擬的參數，輸入已知降雨強度(隨時空變化的降雨)，根據已知降雨強度利用Green-Ampt入滲方程式推估入滲率，再根據入滲率及降雨強度求得超滲降雨量，然後將其代入運動波程式中計算，即可獲得整場降雨中漫地流之水深及流量。

3.2 程式之驗證

由於無相關解析解可驗證考慮入滲作用下之漫地流計算，因此本研究分別驗證運動波漫地流與入滲計算之正確性。



3.2.1 運動波之驗證

假設一平面長為 $500m$ ，降雨強度為 $10cm/h$ ，曼寧係數 $n=0.1$ ，坡降 $S_0=0.01$ ， $m=1.5$ ，降雨延時分別為 $D=1500s$ 和 $D=300s$ 。普立斯蒙四點差分法中的係數設定為 $a=0.5$ 、 $b=0.4$ 。空間間距以及時間間距為 $\Delta x=1.0m$ 及 $\Delta t=1.0s$ 。

程式及解析解(Singh,1996)之水深歷線模擬結果，如圖3.5及圖3.6，流量歷線模擬結果如圖3.7和圖3.8。由圖3.5至圖3.8可知，計算結果與解析解幾乎完全一致，由此可驗證本研究運動波數值計算程式之正確性。此外，由圖3.5至圖3.8可看出，降雨延時為 $D=1500s$ 所產生之最大流量比降雨延時為 $D=300s$ 者大，但是發生最大流量的時間

卻比較晚。

3.2.2 入滲之驗證

有一降雨資料如表3.2，土壤入滲前的含水量為 $\theta_i = 0.206$ ，利用Green-Ampt 理論，計算降雨、入滲以及超滲降雨之關係。

首先由表2.1可知砂質黏土之Green-Ampt入滲相關係數，利用Green-Ampt入滲方程式推估入滲和超滲降雨之結果，如圖3.9所示。由圖3.9可知，模擬結果與Chow et al. (1988)之結果一致，由此可驗證研究中所建立Green-Ampt入滲計算程式之正確性。另外，由圖3.9中可知， $t = 60\text{min}$ 開始積水，且積水結束時間為 $t = 140\text{min}$ 。



第四章 雨型與入滲對漫地流之影響

本章探討考慮入滲作用下，時變降雨及移動暴雨之雨型，對運動波漫地流之影響。

4.1 時變降雨

坡長400m，坡降 S_0 為0.01，曼寧 n 值為0.1。在總降雨量為25公釐，降雨延時分別為0.5小時、1小時以及2小時，四種代表雨型，在黏土(clay)與壤土(loam)坡地下游100公尺與400公尺處之單位寬度流量歷線分別如圖4.1至圖4.6，最大單位寬度流量分別如表4.1與表4.2所示。黏土與壤土之初始含水量分別為 $\theta_i = 0.244$ 與 $\theta_i = 0.203$ ，且相關入滲推估所需參數見表2.1。

首先探討不考慮入滲作用下，即 $K=0$ ，不同降雨延時以及雨型對漫地流之影響。由圖4.1(a)至圖4.6(a)以及表4.1與表4.2可發現，流量歷線大致可區分為完全發展型，如圖4.2(a)與圖4.4(a)所示，以及未完全發展型兩種(Ball, 1994)。在未完發展類型中，不同雨型所產生之流量歷線形狀有明顯之差別，另外最大流量以及最大流量發生時間也有顯著之差異。然而，在完全發展類型歷線中，不同雨型所產生之流量歷線形狀卻頗為相近，最大流量以及最大流量發生時間也頗為一致。

在未完發展類型中，不同雨型所產生之最大流量皆隨降雨延時增長而顯著減小。此外，在不同降雨延時下，不同雨型所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型最小。以後退型之最大流量為基準，利用相對最大流量差比值，進一步探討雨型、降雨延

時以及最大流量之關係。譬如，中央型之相對最大流量差比值可表示為，後退型雨型與中央型雨型兩者所產生之最大流量差與後退型雨型所產生最大流量之比值，也就是 $[(q_{\max})_{\text{後退型}} - (q_{\max})_{\text{中央型}}] / (q_{\max})_{\text{後退型}}$ ， q_{\max} 表示最大流量。均勻型與前進型之相對最大流量差比值亦同理可得。吾人可發現，前進型及中央型所產生之相對最大流量差比值，隨降雨延時增加而減小，尤其是對中央型而言。然而，均勻型之相對最大流量差比值，卻隨降雨延時增加而變大。此外，在不同降雨延時下，不同雨型之最大流量發生時間，皆以前進型最早，後退型最晚，且不同雨型之最大流量發生時間，皆隨降雨延時增長而延後，尤其是對後退型而言。由上述可知，在相同降雨量下，降雨之延時與雨型，嚴重影響運動波漫地流。

接下來進一步分析入滲作用下，不同降雨延時以及雨型對運動波漫地流之影響。累積入滲深度隨時間之變化如圖4.7至圖4.9所示，最終累積入滲深度值如表4.3，此外，圖4.10至圖4.15表示隨時間變化之入滲能力。由圖4.7至圖4.9可知，前進型起始累積入滲深度大於均勻型，然而，當時間越久，均勻型之最終累積入滲深度會大於前進型。由表4.3可知，不同雨型所產生之最終累積入滲深度皆隨降雨延時增長而變大，皆以均勻型為最大，前進型次之，後退型為最小。由4.1至圖4.6以及表4.1與表4.2明顯可知，不同雨型，在不同降雨延時及土壤種類時，所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型為最小。此乃由於最終累積入滲深度越大，也就是入滲量越大，則最大流量會隨之變小，如後退型之最終累積入滲深度為最小，所產生之最大流量為最大。

由圖4.10至圖4.15知，壤土的入滲能力大於黏土入滲能力。由圖4.1至圖4.6以及表4.1與表4.2明顯可知，不同雨型所產生之最大流量皆

隨降雨延時增長而減小，尤其是對入滲能力較佳之壤土而言。另外，前進型、中央型及均勻型之相對最大流量差比值，皆隨降雨延時增加而變大，尤其是對入滲能力較佳之壤土而言。此外，不同雨型之最大流量發生時間，似乎皆隨降雨延時增長而延後，且在不同降雨延時下，皆以前進型最早發生最大流量。在相同降雨延時下，後退型之最大流量發生時間，似乎不受土壤入滲能力影響，但其餘三者則不然。由上述吾人可知，運動波漫地流，除了與降雨延時以及雨型有密切關係外，入滲亦是重要的影響因素。此外，吾人必須提及，原本不考慮入滲作用時，當降雨延時為0.5及1.0小時，在坡面下游400公尺處之流量歷線屬於完全發展型，然而考慮入滲作用下，則不再屬於完全發展類型，而變為不完全發展型。



4.2 時空變化降雨(移動暴雨)

移動暴雨之雨型示意圖，如圖4.16所示，假設有一坡地長度為 L ，暴雨長度為 L_s ，暴雨以一等速度 V_s 前進。由圖4.16可知，不同暴雨長度或暴雨移動速度，將造成不同之總降雨量，且降雨延時 D 可表示為

$$D = \frac{(L + L_s)}{V_s} \quad (4.1)$$

若不同暴雨長度以及暴雨移動速度下，欲產生總量相同之降雨量，則需滿足

$$L_{s2} = L_{s1} \frac{V_{s2}}{V_{s1}} \quad (4.2)$$

其中， L_{s1} 與 L_{s2} 分別代表不同暴雨長度， V_{s1} 與 V_{s2} 與則分別表示相對應

之暴雨移動速度。以下分別就總降雨量相同與不同情況，探討考慮入滲作用下，移動暴雨雨型，對運動波漫地流之影響。

4.2.1 總降雨量不同情況

坡長100m，坡降 S_0 為0.01，曼寧 n 值為0.01，空間上的平均降雨量為3.0cm/h，如圖4.16所示，在暴雨長度為700m，暴雨移動速度分別為往上游與下游0.5m/s、1.0m/s、1.5m/s及2.0m/s時，四種代表雨型，在黏土及壤土坡地下游100m處之單位寬度流量歷線以及最大單位寬度流量，分別如圖4.17至圖4.24及表4.4與表4.5所示。

首先探討不考慮入滲作用下，不同雨型及暴雨移動速度與方向，對運動波漫地流之影響。由圖4.17至圖4.24及表4.4與表4.5可發現，所得之歷線圖與Lima and Singh(2002)之定性結果相同。當暴雨移動速度往上游或下游2.0m/s及往上游1.5m/s時，流量歷線似乎屬於完全發展型。然而，在速度為0.5m/s、1.0m/s及往下游1.5m/s時，不同雨型之流量歷線形狀有極大的差異，且最大流量與最大流量發生時間差異甚大。

由圖4.17至圖4.24及表4.4與表4.5可知，暴雨移動速度往下游所產生之最大流量大於暴雨移動速度往上游所產生之最大流量，且速度愈大，最大流量愈小。在不同暴雨移動速度下，不同雨型所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型最小。在未完全發展情況中，前進型與中央型之相對最大流量差比值，隨暴雨移動速度增加而變大，然而均勻型卻相反。此外，除後退型雨型外，其他三種雨型，暴雨移動速度往下游之最大流量發生時間比暴雨移動速度往上游者早。另外，暴雨移動速度愈大，最大流量發生時間似乎愈早，且不

同暴雨速度下，不同雨型之最大流量發生時間，皆以前進型最早，後退型最晚。

接下來進一步探討入滲作用下，不同雨型及暴雨移動速度與方向，對運動波漫地流之影響。由圖4.17至圖4.24及表4.4與表4.5明顯可知，不同雨型之最大流量皆隨暴雨移動速度增大而明顯減小，尤其是對入滲能力較佳之壤土而言。不同雨型，在不同暴雨移動速度及土壤種類時，所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型為最小。另外，前進型及中央型之相對最大流量差比值，皆隨暴雨移動速度變大而變大，尤其是前進型而言，然而均勻型卻相反。此外，不同雨型之最大流量發生時間，似乎皆隨暴雨移動速度增加而提早，且在不同暴雨移動速度下，皆以前進型最早發生最大流量，後退型最晚。另外，除後退型雨型外，其餘三種雨型，暴雨移動往下游之最大流量發生時間比暴雨移動往上游者早。由上述可知，除了移動暴雨之雨型及移動速度與方向外，入滲亦是影響運動波漫地流之重要因素。

4.2.2 總降雨量相同情況

進一步探討總降雨量相同條件下，入滲作用及移動暴雨之雨型與速度，對運動波漫地流之影響。

坡長100m，坡降 S_0 為0.01，曼寧 n 值為0.01，總雨量為5.8mm，當 V_s 分別為往上游與下游0.3m/s、0.5m/s、1.0m/s及2.0m/s時，四種不同代表雨型，在黏土與壤土坡地下游100公尺處之單位寬度流量歷線以及最大單位寬度流量，分別如圖4.25至圖4.32以及表4.6與表4.7所示。

首先探討不考慮入滲作用下，不同雨型及暴雨移動速度與方向，對運動波漫地流之影響。由圖4.25至圖4.32以及表4.6與表4.7可發現，所得之歷線圖與Lima and Singh(2002)之定性結果相同。當暴雨移動速度往上游0.3m/s時，流量歷線似乎屬於完全發展型。然而，在速度為0.5m/s、1.0m/s及2.0m/s時，不同雨型之流量歷線形狀有極大的差異，且最大流量與最大流量發生時間差異甚大。

由圖4.25至圖4.32以及表4.6與表4.7可知，暴雨移動速度往下游所產生之最大流量大於暴雨移動速度往上游。此外，當暴雨移動往下游時，不同雨型之最大流量隨著暴雨移動速度增加而減小，然而當暴雨移動往上游時卻相反。在不同暴雨移動速度下，不同雨型所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型最小。此外，除後退型雨型外，其他三種雨型，暴雨移動速度往下游之最大流量發生時間比暴雨移動速度往上游者早。另外，暴雨移動速度愈大，不同雨型之最大流量發生時間似乎愈早，且不同暴雨移動速度下，不同雨型之最大流量發生時間，皆以前進型最早，後退型最晚。

接下來進一步探討入滲作用下，不同雨型及暴雨移動速度與方向，對運動波漫地流之影響。由圖4.25至圖4.32以及表4.6與表4.7明顯可知，不同雨型之最大流量皆隨暴雨移動速度增大而明顯減小，尤其是對入滲能力較佳之壤土而言。不同雨型，在不同暴雨移動速度及土壤種類時，所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型為最小。除中央型暴雨移動速度往下游及均勻型與前進型暴雨移動速度往上游時，所產生之相對最大流量差比值，隨暴雨移動速度變大而變大外，其餘情況無法獲得一致的結論。此外，不同雨型之最大流量發生時間，似乎皆隨暴雨移動速度增加而提早，且在不同暴雨移動速度下，皆以前進型最早發生最大流量，均勻型次之，後退型最晚。

另外，除後退型雨型外，其餘三種雨型，暴雨移動往下游之最大流量發生時間比暴雨移動往上游者早。



第五章 結論與建議

本章除了對本研究之結果做綜合性說明外，並對未來研究方向提出建議。

5.1 結論

本研究結合Green-Ampt入滲公式及運動波理論探討雨型與入滲對漫地流的影響。研究中，首先探討降雨於時間上分別為均勻型分佈及後退型、前進型及中央型等三角形分佈對漫地流之影響，再進一步將上述四種雨型應用於降雨空間分佈，分析移動暴雨產生之時空複雜變化降雨對漫地流之影響。以下分別為入滲及雨型，在時變降雨及時空變化降雨情況下對漫地流影響之結論。

時變降雨

1. 不論是否考慮入滲，在不同降雨延時下，不同雨型所產生之累積入滲深度皆隨降雨延時增長而變大，皆以均勻型為最大，前進型次之，後退型為最小，所以產生之最大流量，以後退型為最大，中央型次之，均勻型最小；且最大流量發生時間，皆以前進型最早，後退型最晚。由此可知，雨型對漫地流有極大之影響，一般常用之均勻型雨型，可能會低估最大流量。
2. 考慮入滲會嚴重減少最大流量，且考慮入滲下，前進型、中央型及均勻型之相對最大流量差比值，皆隨降雨延時增加而變大。然而，對於不考慮入滲下，均勻型之相對最大流量差比值，隨降雨延時增加而變大，但是前進型及中央型之相對最大流量差比值，卻隨降雨延時增加而減少。由此可知，除了降雨雨型外，入滲亦

是影響漫地流之重要因素。

3. 原本不考慮入滲作用時，當降雨延時為0.5及1.0小時，在坡面下游400公尺處之流量歷線屬於完全發展型，然而考慮入滲作用下，則不再屬於完全發展類型，而變為不完全發展型，也就是說考慮入滲可能改變逕流歷線之型態。

時空變化降雨(移動暴雨)

1. 在總降雨量分別為相同及不同時，不論是否考慮入滲，不同雨型暴雨移動往下游所產生之最大流量皆大於暴雨移動往上游者。此外，除後退型雨型外，其他三種雨型，暴雨移動往下游之最大流量發生時間比暴雨移動往上游者早。由此可知，在移動暴雨情況中，隨空間變化雨型對漫地流也有極大之影響。
2. 在總降雨量分別為相同及不同時，不同雨型，在不同暴雨移動速度及土壤種類下，所產生之最大流量，皆以後退型為最大，中央型次之，均勻型為最小。
3. 在總降雨量分別為相同及不同時，不論是否考慮入滲，暴雨移動速度愈大，不同雨型之最大流量發生時間似乎愈早，且不同暴雨移動速度下，不同雨型之最大流量發生時間，皆以前進型最早，後退型最晚。
4. 在總降雨量不同情形時，不論是否考慮入滲，不同雨型之最大流量皆隨暴雨移動速度增大而明顯減小。然而，對總降雨量相同情形而言，在暴雨往下游移動時，不同雨型之最大流量皆隨暴雨移動速度增大而明顯減小，但是當暴雨往上游移動時，不同雨型之最大流量皆隨暴雨移動速度增大而明顯變大。

5. 在總降雨量不同情形時，不論是否考慮入滲，於未完全發展情況中，前進型與中央型之相對最大流量差比值，隨暴雨移動速度增加而變大，均勻型之相對最大流量差比值，隨暴雨移動速度增加而減少。然而，在總降雨量相同情形時，除考慮入滲下，中央型暴雨移動速度往下游及均勻型與前進型暴雨移動速度往上游時，相對最大流量差比值，隨暴雨移動速度增加而變大，其餘情況皆沒有一致之結果產生。

由上述結果，可得知雨型與入滲對於漫地流有極大之影響。故對於都市排水設施之設計，暴雨之雨型與入滲皆是不可忽略之因素。

5.2 建議

本研究建議將來可進一步探討之方向陳列如下以供參考：

1. 本研究利用運動波理論計算漫地流，未來可利用動力波或擴散波理論，並進一步比較結果。
2. 本研究利用非耦合方式探討入滲對漫地流之影響，未來可進一步利用較嚴謹之耦合方式求解。
3. 本研究僅以一維運動波理論模擬漫地流，未來可進一步利用二維運動波計算漫地流。