

水非飽和孔隙介質中異質物含量及分佈對 V. G. 模式參數之影響

The Influence of Heterogeneity on the Parameters of Soil Hydraulic Property Curve in Unsaturated Porous Media

國立雲林科技大學
水土資源及防災科技
研究中心助理研究員
國立嘉義大學
土木與水資源學系
兼任助理教授

吳呈懋*

Cheng-Mau Wu

中國科技大學
土木系教授

陳主惠

Chu-Hui Chen

國立台灣大學
土木工程學系副教授
暨國立台灣大學
水工試驗所
副研究員

涂丰盛

Nien-Sheng Hsu

國立成功大學
資源工程學系
教授

李振誥

Cheng-Haw Lee

摘 要

由於 V.G. 模式廣泛被應用在實際非飽和孔隙介質中水分傳輸模擬上，利用 V.G. 模式套配求得之保水曲線(WRC)所得的參數，來估計非飽和水力傳導係數值，這種作法在均質土層中是毋庸置疑的。但是在異質性的土層中，由保水曲線 $\theta(h)$ 所得的參數和由非飽和水力傳導係數曲線(UHC)所得的參數是截然不同的。本文用二維飽和及非飽和地下水數值模擬模式(VSAFT2)數值實驗結果顯示異質物含量的多寡會改變土壤水力特性曲線，在相同的實驗土柱，以數值模擬的保水曲線來套配 V.G. 模式之參數會隨異質物含量的增加而與非飽和水力傳導係數曲線所套配 V.G. 模式之參數差異越來越大。另外，異質物的排列方式也會改變土壤水力特性曲線，在相同的異質物含量下，異質物的排列方式造成保水曲線及非飽和水力傳導係數曲線所擬合參數的不同，因為排列方式會影響水流流動方向而造成差異。

關鍵詞：異質性，土壤水力特性曲線，保水曲線，非飽和水力傳導係數曲線，VSAFT2 模式。

*通訊作者，雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心助理研究員，640 雲林縣斗六市大學路三段 123 號，
wucm0124@yuntech.edu.tw

ABSTRACT

The van Genuchten model (V.G. model) has become one of the most widely used curves for characterizing soil hydraulic properties. Notwithstanding the conclusions that van Genuchten (1980) has made, "a reasonable description of the *Water Release Curve (WRC)* at low water contents was important for an accurate prediction of the *Unsaturated Hydraulic Conductivity curve (UHC)* by comparing five experimental data", applications of V.G. Model by using parameters of *WRC* to predict *UHC* in heterogeneous media are still questioned. This paper used a two-dimensional Variably Saturated Flow and solute Transport finite element model (VSAFT2) to simulate variations of pressure and moisture content in the soil column under a constant head boundary condition. Results show soil hydraulic properties are strongly affected by variation of heterogeneities and their arrangements. Moreover, results reveal that parameters estimated from both *WRC* and *UHC* are also affected by patterns of heterogeneity; this indicates that the parameters obtained from the *WRC* are not suitable for predicting the *UHC* in different patterns of heterogeneous media.

Keywords: Heterogeneity, Soil hydraulic property curve, *WRC*, *UHC*, VSAFT2.

一、前言

土壤水分是對水文過程和生態歷程的一個重要的影響因子，雖然存在土壤中的水體積僅佔地球上全部淡水總量的一小部分。土壤水分對水文過程的重要性，在於它是降雨分開成逕流和入滲時所存留的那部分，土壤水分調節作物生長而成為陸地生態系主要生產來源，土壤水分也對各種土壤過程有重要影響例如：土壤沖蝕、土壤化學過程以及污染物傳輸等等。由於土壤在空間的變異性使得決定非飽和土壤水分傳輸的土壤水力特性曲線亦隨著距離和深度呈現極大的變異 [Russo and Bresler, 1981; Vieira et al., 1981; Byers and Stephens, 1983]。非飽和孔隙介質的水分傳輸過程中兩個重要的特性曲線，分別是保水曲線 (water release curve, *WRC*) 與非飽和水力傳導係數曲線 (unsaturated hydraulic conductivity curve, *UHC*)，此稱為土壤水力特性曲線 (soil hydraulic property curve)。在非飽和孔隙介質中水分及污染物的傳輸模擬中須要以函數形式 (closed-form) 來表示保水曲線 $\theta(h)$ 以及非飽和水力傳導係數曲線 $K(h)$ [Russo 1988; Marison et al. 1994]。由保水曲

線我們就可知道非飽和孔隙介質的水分變化與張力的關係；而非飽和水力傳導係數曲線，可知道非飽和孔隙介質的張力變化與水力傳導係數的關係，或是非飽和孔隙介質的水分變化與水力傳導係數的關係。

土壤水力特性曲線關係到水分及污染物的傳輸的傳輸行為，過去至今很多學者專家投注大量的時間和精力在這方面的問題上，Yeh 和 Harvey (1990) 利用序率方法來求層狀砂土的有效非飽和水力傳導係數，並與實驗室土柱實驗數據比較；Smith 和 Diekkruger (1996) 在研究一維空間異質性土壤的垂直流問題上，將土壤的異質性視為空間隨機分佈參數，來描述土壤特性曲線關係；Green et al. (1996) 研究層狀土壤放大尺度之保水曲線特性，作為 V.G. 模式中土壤水力特性之參數；Zhu 和 Mohanty (2002) 利用空間平均的方式來求異質性土壤中穩態流的有效參數作為 V.G. 模式中土壤水力特性之參數；Govindaraju et al. (2003) 研究現場尺度 (field scale) 異質性土壤中的入滲，他們考慮飽和水力傳導係數的空間變異可表示為對數常態隨機分佈場；王光志等人 (2005 a) 利用數值實驗模擬異質物對二維非飽和

土柱入滲影響，其結果顯示當土中柱含異質物時，將加快定流量邊界的入滲速率，甚至在異質物的表面會逐漸產生積水現象而出現較大值的壓力水頭；王光志等人(2005 b)利用數值模擬實驗來研究土柱異質物的數量對非飽和土壤水力特性影響，其結論是異質物的多寡會改變土壤水力特性曲線，然而文中只作定性的說明，而無定量的分析；曹昌文等人(2005)針對異質物對二維未飽和土柱入滲影響進行砂箱試驗研究，來驗證王光志等人(2005 a)的數值實驗結果獲得一致的結論。

由於土壤在空間的變異性，使得這些用來決定非飽和土壤水分傳輸的土壤水力特性曲線亦呈現極大的變異，然而被廣泛採納且應用在非飽和孔隙介質中水分傳輸模擬上的 V.G. 模式(van Genuchten model)，實際應用上，利用保水曲線 $\theta(h)$ 所得的參數，來估計非飽和水力傳導係數值 $K(h)$ ，這種作法在均質土層中沒有問題，但是在異質性的土層中是有待商榷的[Wu et al. 2006 (a), (b)]。到底土壤中異質物的多寡及其排列方式如何影響各種壤水力特性曲線模式中參數的數值？相同模式中保水曲線 $\theta(h)$ 所用的參數(如 α ， n)與非飽和水力傳導係數曲線 $K(h)$ 中所用的參數在異質性土壤中還會相同嗎？本文用二維飽和及非飽和地下水數值模擬模式(VSAFT2, Yeh et al.,1993)透過數值實驗來探討此問題。

二、理論背景

2.1 達西定律(Darcy's Law)

達西定律是描述土壤水分在孔隙介質中移動的一個重要原理，它主要陳述是在飽和孔隙介質中比流量會與水力梯度成正比，而此固定的比例為飽和水力傳導係數。更通用的達西定律是當水份在三維非飽和孔隙介質中的移動時，其主方向的比流量可表示為：

$$q_x = -K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x}, \quad q_y = -K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y},$$

$$q_z = -K_z(h) \frac{\partial H}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中 $H=h+z$ 為總水頭； h 為壓力水頭； z 為位置水頭； $K_x(h)$ 為 x 方向的非飽和水力傳導係數，是壓力水頭 h 的函數。

2.2 水分傳輸之控制方程式

在非飽和孔隙介質中，水分傳輸的控制方程式是將達西定律代入到質量守恆方程式，並假設水的密度 ρ 為常數則可得到

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] = C(h) \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

此式稱為理查氏方程式(Richards' equation)，式中

$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ 稱為比水容積(specific water capacity)；

而 $\theta(h)$ 是體積含水比為壓力水頭 h 的函數。

而飽和層中孔隙介質的水分傳輸，則以下列方程式來描述：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{sx} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{sy} \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{sz} \frac{\partial H}{\partial z} \right] = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式中， K_{sx} ， K_{sy} ， K_{sz} 分別為 x ， y ， z 各方向的飽和水力傳導係數，若土壤為等向則 $K_{sx}=K_{sy}=K_{sz}=K_s$ ， S_s 稱為比出水量。

為了同時模擬異質等向性土壤中，水分從非飽至及飽和的變化情況，在 VSAFT2 數值模式中，將(2)式和(3)式合併並引進一個飽和度指標 η ，而將方程式改寫成：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right] = [C(h) + \eta S_s] \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中， η 稱為飽和度指標為 0 或 1。當 $\eta=0$ 時表示在未飽和狀況；而當 $\eta=1$ 表示土壤為飽和狀況。

2.3 土壤水力特性曲線

一般所通稱的土壤水力特性曲線包括保水曲線(WRC)和非飽和水力傳導係數曲線(UHC)，藉由保水曲線我們就可知道非飽和孔隙介質的水分變化與張力的關係；而非飽和水力傳導係數曲線，可知道非飽和孔隙介質的張力變化與水力傳導係數的關係，或是非飽和孔隙介質的水分變化與水力傳導係數的關係，這些土壤水力特性曲線在土壤科學及非飽和孔隙介質中水分及污染物的傳輸行為上，扮演非常重要的角色。由於在非飽和孔隙介質中水分及污染物的傳輸模擬中須要以函數形式(closed-form)來表示保水曲線 $\theta(h)$ 以及非飽和水力傳導係數曲線 $K(h)$ 。因此學者專家嘗試建立各種模型來描述保水曲線 $\theta(h)$ 以及非飽和水力傳導係數曲線 $K(h)$ 與壓力水頭的本構關係(constitutive relationship) [Brutsaert, 1974; Mualem, 1976a,b; van Genuchten, 1980; van Genuchten and Nielsen 1985]。

V.G. 模式(Maulem, 1976a and van Genuchten, 1980)被廣泛的用來描述土壤水力特性的特徵。van Genuchten (1980)從實際許多種土壤中量測水分含量和張力的關係，並採用一個S型的函數來擬合量測資料得到下列關係：

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{-m} + \theta_r \dots\dots\dots(5)$$

式中， α [1/L]為孔隙尺度分布函數； n []和 m []均為土壤參數且 $m=1-1/n$ 。(5)式可適切的描述常用的張力水頭範圍下，實驗量測土壤水分含量和張力水頭的關係[Russo, 1988; Michiels et al. 1989; Vereeken et al. 1989; Hill et al. 1989]，它可與多種土壤之量測的水分保持特性有很好的擬合[Zhu and Mohanty, 2002]。van Genuchten (1980)將(5)式與 Mualem (1976)的水力傳導係數函數合併來預測非飽和水力傳導係數

$$K(h) = K_s \frac{\left(1 - (\alpha h)^{n-1} \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{-m} \right)^2}{\left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{m/2}} \dots\dots(6)$$

式中 K_s 為飽和水力傳導係數。V.G. 模式是一個

非線性模式，模式中有 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 以及 K_s 等五個待定參數，它較其他模式適用於更廣的壓力水頭範圍，而且其土壤水力特性曲線適用於多種土壤(Zhu and Mohanty, 2003)。本文主要著重於探討非線性土壤問題，故採用 V.G. 模式作為模式中求得土壤水力特性曲線的依據。

2.3 V.G. 模式應用於異質性土壤中的問題

在實際應用上，由於土壤水分含量 $\theta(h)$ 與張力 h 的關係較非飽和水力傳導係數 $K(h)$ 與張力 h 的關係容易藉由實驗量測得到，所以最常採用的方法是由實驗量測的 θ_s 、 θ_r 以及土壤水分含量 $\theta(h)$ 與張力 h 的資料，利用非線性擬合來求保水曲線(5)式中的參數 α 、 n ，然後代入非飽和水力傳導係數曲線(6)式中來估計非飽和水力傳導係數值 $K(h)$ 。這種作法在均質土層中沒有問題，但是在異質性的土層中是有待商榷的[Wu et al. 2006 (a), (b)]，其主要問題是：

1. 保水曲線(5)式是一個經驗公式，藉由實測的土壤含水量及張力水頭資料，利用S型的函數曲線擬合而得。
2. 非飽和水力傳導係數曲線(6)式是 van Genuchten (1980)根據 Mualem (1976a,b)之理論孔隙尺度模型而推導出來，此模型考慮連節孔隙的介質是均質介質。

由於(5)式是藉由實測土壤而求得的經驗公式，而(6)式是均質介質假設條件下的模式，因此，從(5)式推導到(6)式作了一個不合理的連結，亦即將均質的水力傳導係數函數套用到異質性的保水曲線函數。雖然 van Genuchten (1980)曾作了下列了結論：『在五種土壤的實驗數據顯示，土壤在低含水量的情況下，由 WRC 求得的參數可以準確的預測 UHC』。但是要將 V.G. 模式應用於異質性土壤中或現場，還是相當被質疑的，在下節的數值實驗中，將會展示並探討這些問題。

三、數值模擬

數值實驗乃利用 VSAFT2 二維地下水模擬模式採用實際土壤參數(如表 1 所示)，模擬不同數值模擬網格範圍內加入均勻的異質物並且變

表 2 數值模擬給定之邊界條件

次號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上邊界* (cm)	-0.00001	-1	-5	-10	-20	-30	-40	-50	-100	-150	-200	-300
下邊界* (cm)	-0.00001	-1	-5	-10	-20	-30	-40	-50	-100	-150	-200	-300

*壓力水頭(cm)

表 1 數值模擬之土壤參數 (模擬網格大小：
1cm×1cm)

土壤參數 土壤種類	θ_s	θ_r	K_s (cm/hr)	α (cm ⁻¹)	β
Sandy loam	0.412	0.139	1.09	0.0523	1.857
Clay	0.385	0.180	0.03	0.027	1.60

化其排列方式，探討其對土壤水力特性曲線之影響；其次增加其異質物的含量，來觀察土壤水力特性曲線隨之變化的情況。數值實驗模擬土柱尺寸為 28cm×60cm，數值模擬的離散網格大小為 1cm×1cm 如圖 1(a)所示。數值模擬時上下邊界的設定，依照各模擬次號給定不同之定水頭如表 2 所列的值，其餘的邊界均假設為不透水邊界。

3.1 異質物含量變化之數值模擬

此數值模擬是為了解探土壤中夾雜著其他不同性質的土壤異質物時，其中異質物的多寡如何影響土壤水力特性曲線中參數的數值。以 VSAFT2 來進行數值模擬，不同異質物含量的數值實驗土柱如圖 1 所示，其中圖 1(a)為均質土柱，而圖 1(b)-(d)分別為異質物含量 6%，12%和 24%的異質性土柱。實驗土柱本身主要土質是砂質壤土(sandy loam)，而異質物為粘土(clay)其特性如表 1。

3.2 異質物的排列形式之數值模擬

在相同的模擬土柱的數值網格範圍內，以等量異質物(12%)改變其排列方式，土柱本身主要土質和異質物與前面的數值實例相同其特性如表 1 所列。以 VSAFT2 模擬五種不同異質物排列形式的土柱如圖 2 所示，其中 Pattern 1 到 Pattern 5 為五種不同排列形式的實驗土柱，以數值模擬

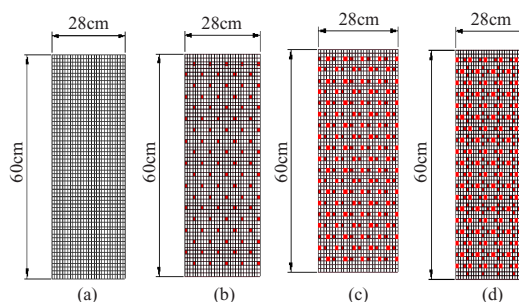


圖 1 不同異質物含量的數值實驗土柱：(a)均質 (0%)；(b)含 6%異質物；(c)含 12%異質物；(d)含 24%異質物

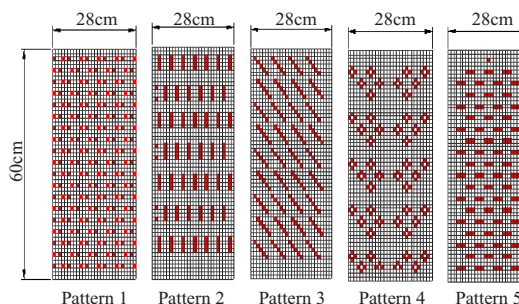


圖 2 異質物的排列形式：(所有土柱均含 12%異質物)

實驗來模擬土壤水力特性曲線之變化的情況。

四、結果與討論

4.1 均質土壤的水力特性曲線

數值試驗首先以均質土柱進行模擬，土柱的土質是砂質壤土(sandy loam)，圖 3 均是質土壤的非飽和水力傳導係數曲線，圖中實線是用 V.G. 模式的 UHC 求得，而圓形符號為 VSAFT2 數值模擬的結果，可看出理論的值和數值模擬值完全一致，求得的參數 $\alpha=0.0524$ ， $n=1.859$ 與模式給

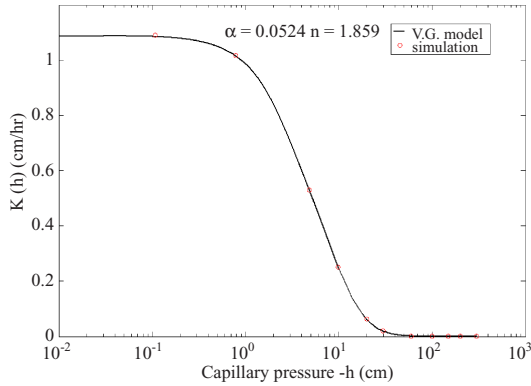


圖 3 均質土壤的非飽和水力傳導係數曲線

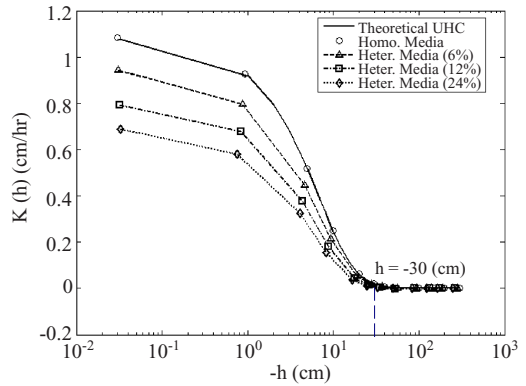


圖 5 UHC 隨異質物增加的變化

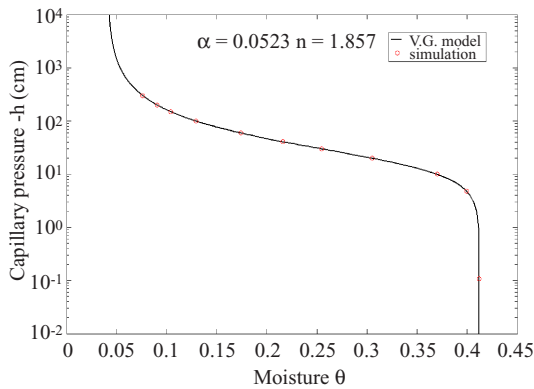


圖 4 均質土壤的保水曲線

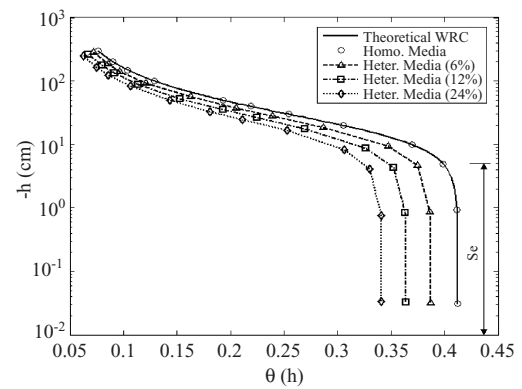


圖 6 WRC 隨異質物增加的變化

定的參數值完全相同。圖 4 為均質土壤的保水曲線，同樣的實線是用 V.G. 模式的 WRC 求得，而圓形符號為 VSAFT2 數值模擬的結果，可看出理論的數和數值模擬值亦完全一致，而求得的參數分別是 $\alpha = 0.0523$ ， $n = 1.857$ 與模式給定的參數相同。從圖 3 和圖 4 的結果亦可看出在均質土壤中，利用 UHC 和 WRC 所求得的參數 α 和 n 是完全一樣的。

4.2 異質物含量對土壤水力特性曲線的影響

在異質物含量對土壤水力特性曲線之影響的數值實驗結果圖 5 中實線為 V.G. 模式之非飽和水力傳導係數曲線理論值，圓形符號為均質土柱 (0%) 的非飽和水力傳導係數曲線，而三角形、正方形及菱形符號分別表示異質物含量為 6%、12% 和 24% 的非飽和水力傳導係數曲線。從圖中可發

現當土壤含水量很低時非飽和水力傳導係數會趨近於零，在相同含水量下，非飽和水力傳導係數會隨異質物增加而逐漸升高；同樣的，在圖 6 中實線為 V.G. 模式之保水曲線理論值，圓形符號為均質土柱 (0%) 的保水曲線，而三角形、正方形及菱形符號分別為異質物含量為 6%、12% 和 24% 的保水曲線，從圖中亦可看出在相同張力下土柱中隨異質物增加會使含水比逐漸減少，當土壤愈乾燥保水曲線彼此愈靠近。從圖 5 和圖 6 中可看出當土壤含水量很低時，用 WRC 求得的參數可以較準確的預測 UHC，這與 van Genuchten (1980) 的結論一致，而且在均質土柱中的實驗中，數值模擬的保水曲線及非飽和水力傳導係數曲線與 V.G. 模式所求得的保水曲線及水力傳導曲線相同，此亦說明模式是可靠的；然而，異質物的多寡會改變土壤水力特性曲線，從圖 5 和

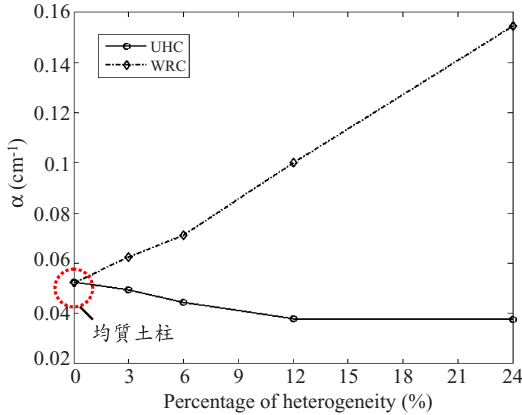


圖 7 參數 α 隨異質物增加的變化

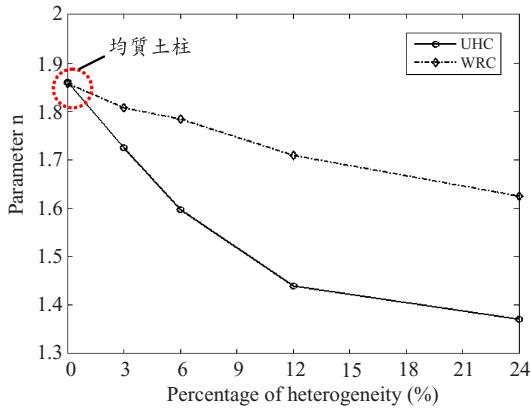


圖 8 參數 n 隨異質物增加的變化

圖 6 中亦可發現在相同張力下土柱中隨異質物增加會使含水量比逐漸減少；在相同含水量下，非飽和水力傳導係數會隨異質物增加而逐漸減小。

圖 7 為參數 α 隨異質物增加的變化情況，圖中實線和虛線分別是用 *UHC* 和 *WRC* 擬合而得的參數 α ，從圖中可看出當實驗的土柱是均質(0%)時參數 α 不管是用 *WRC* 擬合求得或是用 *UHC* 擬合求得完全重合，在異質介質的情況下利用 *UHC* 擬合而得的 α 隨異質物增加而增大；向反的，利用 *WRC* 擬合而得的參數 α 隨異質物增加而減小。相同的，圖 8 為參數 n 隨異質物增加的變化情況，圖中實線和虛線分別是用 *UHC* 和 *WRC* 擬合而得的參數 n ，從圖中可看出當實驗的土柱是均質(0%)時參數 n 不管是用 *WRC* 擬合求得或是用 *UHC* 擬合求得完全重合，在異質

表 3 在不同含量的異質物下利用 *UHC* 擬合而得的 α 和 n

Soil column (cm×cm)	(%)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm/hr)
28x60	homogeneous	0.0525	1.860	1.090
	(3%)	0.0495	1.725	1.033
	(6%)	0.0444	1.597	1.015
	(12%)	0.0380	1.440	0.915
	(24%)	0.0376	1.370	0.830

表 4 在不同含量的異質物下利用 *WRC* 擬合而得的 α 和 n

Soil column (cm×cm)	(%)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm/hr)
28x60	homogeneous	0.0523	1.857	1.090
	(3%)	0.0624	1.808	1.033
	(6%)	0.0712	1.784	1.015
	(12%)	0.1001	1.709	0.915
	(24%)	0.1544	1.624	0.830

介質的情況下利用 *UHC* 和 *WRC* 擬合而得的 n 都隨異質物增加而逐漸減小。從表 3 是數值實驗在不同含量的異質物下利用 *UHC* 擬合而得的 α 和 n ，表 4 是數值實驗在不同含量的異質物下利用 *WRC* 擬合而得的 α 和 n 。從表中可看出當實驗的土柱是均質時，*V.G.* 模式中的參數 α 和 n 不管是用 *WRC* 擬合而得或是用 *UHC* 擬合而得均完全相同。然而，在異質介質的情況下利用 *UHC* 和 *WRC* 擬合 *V.G.* 模式所求得的兩組參數完全不同。而且，隨異質物含量的增加，*UHC* 和 *WRC* 擬合 *V.G.* 模式參數所得的差異越來越大。從表 3 和表 4 的數值模擬亦顯示，隨異質物含量的增加會使土壤飽和水力傳導度降低。

4.3 異質物的排列形式對土壤水力特性曲線的影響

異質物的排列形式對土壤水力特性曲線的影響的數值實驗結果圖 9 為數值實驗在不同異質

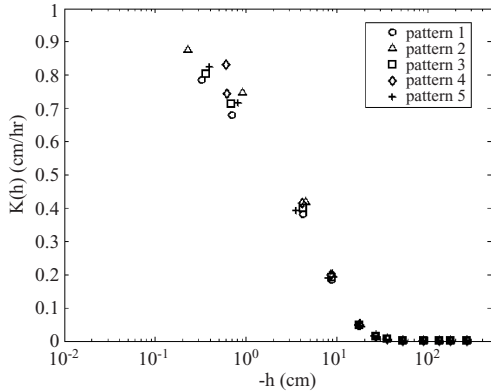


圖 9 UHC 隨異質物形式的變化

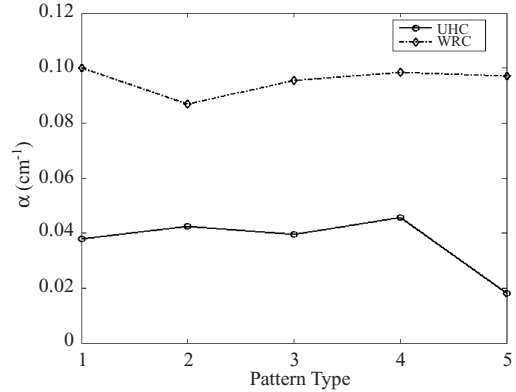


圖 11 參數 α 隨異質物形式的變化

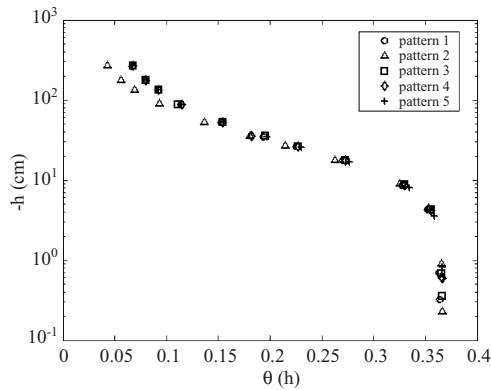


圖 10 WRC 隨異質物形式的變化

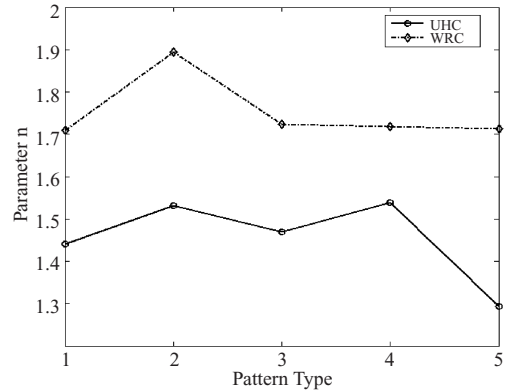


圖 12 參數 n 隨異質物形式的變化

物排列形式對 UHC 造成的變化，而圖 10 為數值實驗在不同異質物排列形式對 WRC 造成的變化。在相同的異質物含量下(12%)，異質物的排列方式造成 WRC 及非飽和 UHC 套配所求得同一組參數(α 和 n)亦明顯不同，尤其在土壤含水量接近飽和時受異質物排列形式的影響越大。

圖 11 為相同異質物含量(12%)但排列形式不同的情況下，參數 α 隨異質物形式的變化情況。圖中實線和虛線分別是用 UHC 和 WRC 擬合而得的 α ，從圖中可看出異質性土柱的參數 α 不管是用 WRC 擬合求得或是用 UHC 擬合求得均完全不同，在相同異質物含量但排列形式不同的情況下利用 UHC 擬合而得的參數 α 和利用 WRC 擬合而得的參數 α 有明顯的差異。圖 12 為相同異質物含量(12%)但排列形式不同的情況下，參數 n 隨異質物形式的變化情況。同樣的，圖中實線和虛

線分別是用 UHC 和 WRC 擬合而得的參數 n ，從圖中可看出在相同異質物含量但排列形式不同的情況下，參數 n 不管是用 WRC 擬合求得或是用 UHC 擬合求得亦完全不同。從圖 11 和圖 12 中亦發現，不同異質物排列形式下用 UHC 擬合求得的參數不管是 α 或 n 都比用 WRC 擬合求得的值來得高。表 5 是在不同異質物排列下，利用 UHC 擬合而得的 α 和 n ，而表 6 為不同含量的異質物下，利用 WRC 擬合而得的 α 和 n 。從表 5 和表 6 亦發現當排列形式與水流方向平行時，不管是 UHC 或 WRC 所擬合參數 n 都明顯增高，而數值模擬的飽和水力傳導度 K_s 也明顯增高。相反的，發現當排列形式與水流方向垂直相同時擬合參 n 明顯減小，而數值模擬的飽和水力傳導度 K_s 也明顯減小，此乃因為排列方式會影響水流流動方向而造成差異。

表 5 在不同異質物排列下利用 UHC 擬合而得的 α 和 n

Soil column (cm×cm)	Pattern of Heterogeneity	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm/hr)
28x60	1	0.0380	1.440	0.915
	2	0.0458	1.538	0.907
	3	0.0424	1.531	0.938
	4	0.0395	1.470	0.907
	5	0.0181	1.294	0.747

表 6 在不同含量的異質物下利用 WRC 擬合而得的 α 和 n

Soil column (cm×cm)	Pattern of Heterogeneity	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm/hr)
28x60	1	0.1001	1.709	0.915
	2	0.0983	1.718	0.907
	3	0.0870	1.895	0.938
	4	0.0956	1.724	0.907
	5	0.0970	1.713	0.747

五、結 論

數值實驗結果顯示，數值模擬所獲得之均質土柱保水曲線及非飽和水力傳導係數曲線與 V.G. 模式所求得之結果相同，以此證實數值模式的正確性。在異質情況下，異質物含量的多寡會改變土壤水力特性曲線，在相同張力下土柱中隨異質物增加會使含水比逐漸減少；在相同含水量下，非飽和水力傳導係數會隨異質物增加而逐漸減小。在相同的實驗土柱，以數值模擬的保水曲線來套配 V.G. 模式之參數會隨異質物含量的減少增加而與非飽和水力傳導係數曲線所套配 V.G. 模式之參數差異越來越大。另外，異質物的排列方式也會改變土壤水力特性曲線，在相同的異質物含量下(12%)，異質物的排列方式造成保水曲線及非飽和水力傳導係數曲線所套配參數的不同，因為排列方式會影響水流流動方向而造成差異。

在實際情況中土壤在空間的變異性很大，每個量測位置都可能是上面兩個實驗例子的組合，亦即每個量測位置的土壤異質性程度及異質物的排列方式都會改變。因此，現場土壤的異質情況遠比本文中數值實驗例子複雜。而利用 V.G. 模式套配求得之保水曲線 $\theta(h)$ 所得的參數，來估計非飽和水力傳導係數值，這種作法在均質土層中是毫無疑問的。但是在異質性的土層中，由保水曲線 $\theta(h)$ 所得的參數和由非飽和水力傳導係數曲線所得的參數是截然不同的。因此，將保水曲線 $\theta(h)$ 所得的參數用來估計非飽和水力傳導係數值，這種作法是錯誤且不合理的。

誌 謝

本文中數值模擬所採用的二維飽和及非飽和地下水模擬程式(VSAFT2)係由美國亞歷桑那大學水資源與水文學系葉天齊教授的研究團隊所開發的，特此申謝。

參考文獻

1. 王光志，吳呈懋，呂文堯，張學誠，陳主惠 (2005a)，「異質物對二維未飽和土柱入滲影響之研究」，九十四年度農業工程研討會，新竹市。
2. 王光志，吳呈懋，張學誠，游璧菁，陳主惠 (2005b)，「土柱異質物的數量對非飽和土壤水力特性影響之研究」，九十四年度中華水資源管理學會第四屆研討會，台中市。
3. 曹昌文，吳呈懋，田耀遠，張學誠，陳主惠 (2005)，「異質物對二維未飽和土柱入滲影響之砂箱試驗研究」，九十四年度中華水資源管理學會第四屆研討會，台中市，94年12月。
4. Byers, E., and D.E. Stephens (1983), Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in fluvial sand, Soil Sci. Soc. Am. J. 47, 1072-1080.
5. Brutsaert, W. (1974), Some Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Sci., 117, 311-314.
6. Green T.R., J.E. Contantz, and D. L. Freyberg (1996), Upscaling soil-water retention using van Genuchten's function, J. Hydrologic Eng. ASCE, 1 (13), 123.
7. Govindaraju, R.S., R. Morbidelli, and C.

- Corradini (2003), A real infiltration modeling over soil with spatially correlated hydraulic conductivities, *J. Hydrol. Eng. ASCE*, 6 (2), 150.
8. Hill, R., D.B. Hudson, I. Porro, and P.J. Wierenga (1989), Modeling one-dimensional infiltration into very dry soil, 2: Estimation of the soil water parameters and model predictions. *Water Resource Res.*, Vol. 25, No.6, pp.1271-1282.
 9. Marison, J.M., D. Or, D.E. Rolston, M.L.Kavas, and J.W. Biggar (1994), Evaluation of methods for determining soil-water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity, *Soil Sci*, v.158, pp.1-13.
 10. Michiels, P., R. Hartmann, and E. D. Strooper (1989), Comparisons of the unsaturated hydraulic conductivity of a coarse-textured soil as determined in the field, in laboratory, and with mathematical models. *Soil Sci.* 47(4), 299-304.
 11. Mualem, Y. (1976a), Hysteretial, Models for Prediction of the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resources Research*, 12(6), 1248-1254.
 12. Mualem, Y. (1976b), A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resource Res.*, Vol. 12, No.3, 513-522.
 13. Russo, D., and E. Bresler (1981), Soil hydraulic property as stochastic process, 1-D analysis of field variability, *Soil Sci Soc. Amer. J.*, 45, pp.699-704.
 14. Russo, D. (1988), Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for the hydraulic properties, *Water Resources Research*, 24 (3), 453.
 15. Smith, R. E. and B. Diekkruger (1996), Effective soil water characteristics and ensemble soil water profiles in heterogeneous soils, *Water Resources Research*, 32 (7), 193.
 16. van Genuchten, M. T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci. Soc. J.*, Vol. 44, 892-898.
 17. van Genuchten, M. T., and D. R. Nielsen., (1985), "On Describing and Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Annales Geophysi-cae*, 3, 615-628.
 18. Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen, and P. Darius (1989), *Estimating the soil moisture retention characteristic from texture*, bulk density, carbon content. *Soil Sci.*, 148(6), 389-403.
 19. Vieira, S.R., R.D. Nielsen, and J.W. Biggar (1981), *Spatial variability of field measured infiltration rate*, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1040-1048.
 20. Wu, Cheng-Mau, Chu-Hui Chen, Nien-Sheng Hsu, and Tian-Chyi J. Yeh, *Examining the Influence of Heterogeneity on van Genuchten Hydraulic Parameters: A numerical experiment*, *Water Resources Research* (submitted, Apr. 2006).
 21. Wu, Cheng-Mau, Chu-Hui. Chen, Nien-Sheng Hsu, and Wei-Cheng Lo (2006), Influences of Local Heterogeneities and Scale effects on Soil Hydraulic Properties in Subsurface Porous Media: A numerical experiment, *Hydrological Processes* (submitted, Apr. 2006).
 22. Yeh, T.-C. Jim and D. J. Harvey (1990), Effective Unsaturated Hydraulic Conductivity of Layered Sands, *Water Resources Research*, 26.(6), 1271-1279.
 23. Yeh, T.-C. J., R. Srivastava, A. Guzman, and T. Harter, A numerical model for water flow and chemical transport in variably saturated porous media, *Ground Water*, 31(4), 634-644, 1993.
 24. Zhu, J. and B. P., Mohanty (2002), Spatial Average of van Genuchten Hydraulic Parameters for steady-state flow in Heterogeneous Soils: A numerical study, *Vadose Zone Journal* (1), 261-272.
 25. Zhu, J. and B. P., Mohanty (2003), Upscaling of Hydraulic Properties of Heterogeneous Soils, in *Scaling Methods in Soil Physics*, edited by Pachepsky, Y., D. E., Radcliffe, and H. M., Selim, p.97-118, Chapter 7, CPC Press.

收稿日期：民國 95 年 9 月 22 日

修正日期：民國 95 年 12 月 1 日

接受日期：民國 95 年 12 月 5 日