

頁岩風化不飽和土壤之土壤水分特性曲線

范嘉程* 黃俊龍

摘要 本研究為探討不飽和頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線 (SWCC), 並與土壤風化程度進行關聯性探討, 另以 FX 模式 (Fredlund and Xing, 1994) 求取頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線數學模式參數 (a , m , n)。本研究利用壓力鍋試驗探討不同深度頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線, 並進行風化土壤篩分析試驗。研究結果顯示風化程度影響土壤水分特性曲線, 粗顆粒含量較多情況, 於低吸力範圍時, 孔隙中水分即開始排出。頁岩風化土壤之 FX 數學模式 a 值約為 7~9 kPa; n 值約為 1~1.27; m 值約為 0.385~0.42。文中建立頁岩風化土壤粒徑分佈曲線特性及物理性質與土壤水分特性曲線 FX 模式參數 (a , m , n) 之關係, 參數 a 值與初始孔隙比 e 呈現反比關係, 參數 m 值與有效粒徑 D_{10} 成正比關係, 進氣吸力值與有效粒徑 D_{10} 成反比關係, 參數 n 值則與粒徑分佈曲線中央區域斜率呈正比關係。

關鍵詞: 頁岩風化土壤、土壤水分特性曲線、土壤粒徑分佈曲線、壓力鍋。

The Soil-Water Characteristic Curve for Residual Soils Formed from Shale

Chia-Cheng Fan* Chuan-Lung Huang

ABSTRACT This research aims to examine the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) for residual soils formed from shale formation, and the relevance of the SWCC and the degree of weathering are discussed. The FX model (Fredlund and Xing, 1994) is used to describe the Soil-Water Characteristic Curve of the residual soil, and the parameters (a , m , n) in the FX model are back-calculated. A pressure plate apparatus is used to obtain the SWCC for the residual soils at various depths. In addition, the soil particle distribution curve is drawn for the residual soil. The degree of weathering affects the SWCC of the residual soil. Water may dissipate more readily in the pore at low suctions for the soil with a higher percentage of coarse particles. a parameters, n parameters, and m parameters, used in the FX model, for the residual soil formed from shale are 7~9 kPa, 1~1.27, and 0.385~0.42, respectively. The relationship between the characteristics of the soil particle distribution curve and the physical properties and parameters (a , m , n) of the FX model is established in this paper. The parameter “ a ” in the FX model decreases with increasing initial void ratio of the soil. Parameter “ m ” increases with the effective size D_{10} . Air-entry values decrease with the effective size D_{10} . The parameter “ n ” in the FX model increases with the slope gradient at the middle portion of the soil particle distribution curve.

Key Words: Residual soils, soil-water characteristic curve, soil particle distribution curve, pressure plate test.

一、前言

台灣為環太平洋海島型氣候，年平均降雨量高達 2500 公釐以上，約為全球平均年雨量的 2.6 倍，多集中於 4-5 月的梅雨季節及 6-10 月的颱風季節，常帶來長時間的豪大雨，台灣山區邊坡淺層土壤因大量雨水入滲，土壤基質吸力大幅降低，導致邊坡土壤剪力強度降低，易造成邊坡土壤破壞滑動等災害發生，居住環境及道路交通安全性亦遭受威脅。邊坡淺層土壤於降雨情況之行為與土壤之不飽和力學特性相關。Fredlund and Morgenstern (1978) 提出的非飽和土壤剪力強度表示式中，以淨正向應力 ($\sigma_n - u_a$) 與基質吸力 ($u_a - u_w$) 表示非飽和土壤的剪力強度，基質吸力於決定不飽和土壤剪力強度具有相當之角色，土壤基質吸力又與含水量變化有關。為了瞭解非飽和土壤之剪力強度行為，用以描述含水量與基質吸力關係之土壤水分特性曲線 (soil-water characteristic curve, 簡稱 SWCC) 即顯得相當重要。

台灣山坡地面積約佔 70%，近年來，因氣候變遷，極端降雨發生機率頻繁，坡地災害之發生次數及分佈範圍日益增加，坡地安全防治已成為台灣國土保育相當重要之工作。台灣西部麓山帶已具相當程度之開發，砂岩或頁岩等地層分佈廣泛，此一地質條件風化土壤之不飽和力學行為與邊坡穩定之關聯性高。本研究即針對風化頁岩的邊坡土壤進行實驗，探討頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線，並與土壤之物理性質進行關聯性研究，以利評估風化頁岩邊坡土壤之不飽和土壤剪力強度及進一步應用於風化頁岩土壤之邊坡穩定分析。



圖 1 取樣地點淺層風化土壤樣品
Fig.1 Outcrop of the residual soil at the test site

二、研究方法

1. 實驗方法

本研究利用美國 SOILMOISTURE 公司製造的壓力鍋設備 (pressure plate apparatus)，將現地各深度取回的擾動土樣，進行壓力鍋試驗，求取基質吸力與體積含水量之關係，繪製土壤水分特性曲線。以下就土壤取樣位置及實驗步驟進行說明。

(1) 土壤取樣位置

土壤取樣地點位於高雄市甲仙攔河堰西側邊坡，土壤為頁岩風化殘留土，部份土壤未完全風化。利用手動取樣器獲得擾動土壤，帶回實驗室進行壓力鍋試驗。於一沿邊坡傾斜方向剖面 3 處位置取土樣 (剖面上方、中央附近及下方)，取樣孔位距離約 20~25m，各位置均於 7 種深度取土壤，分別為 0.15 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m 及 3.0 m。現地淺層風化土壤剖面見圖 1。

(2) 試驗步驟

本研究使用壓力鍋進行風化土壤之土壤水分特性曲線實驗，試驗儀器配置如圖 2 所示，計有 5 bar 及 15 bar 壓力鍋各一個，用以量測不同壓力規模之土壤含水量，壓力來源為氮氣瓶。土樣模高 2 cm，直徑 5 cm，各深度土壤於實驗前均執行篩分析及一般物理試驗，各深度土壤以相同方式於土樣模中搗實。將土樣置放於高進氣陶瓷板上，浸泡於水中，浸泡時間至少一天，以達飽和狀態，將試體與高進氣陶瓷板一起放入壓力



圖 2 壓力鍋實驗儀器配置圖
Fig.2 Layout of the pressure plate test

鍋中，開始施加壓力，進行實驗。於施加壓力初期，土壤中水分自孔隙中排出，流經陶瓷板小孔，再透過出水管將水排出鍋外，一段時間內若水分無繼續流出，即可視為平衡。將試體取出秤重後，繼續施加較大壓力值，直到所有壓力值施壓完畢。施加氬氣壓力的壓力值分別為 2、4、8、10、20、40、80、100、200、400、800、1000 kPa。

(3) 土壤物理試驗

各深度土壤均執行一般物理性質試驗，包括篩分析、阿太堡試驗 (#40 篩以下土壤) 等，表 1 為各深度風化土壤一般物理性質，圖 3 為取樣邊坡中央點位各深度風化土壤粒徑分佈曲線，各深度之粗顆粒土壤 (大於 4.75mm) 依深度不同，約為 12.5~26%之間。

2. 土壤水分特性曲線及數學模式

土壤水分特性曲線描述不飽和土壤含水量與基質吸力之變化關係，進氣吸力值 (air-entry value) 及殘餘含水量 (residual water content) 為土壤水分特性曲線之重要特性。進氣吸力值為引發土壤中最大孔隙發生不飽和情況時之基質吸力，為曲線上完全飽和情況水平線與通過反曲點切線之交點所對應之基質吸力；殘餘含水量則為土壤孔隙中液體 (水) 發生不連續情況時對應之含水量，若土壤含水量低於此值時，土壤孔隙中水份不易排出，殘餘含水量為通過反曲點切線與土壤水分特性曲線上高吸力段切線之交點對應之含水

表 1 取樣邊坡中央點位各深度風化土壤一般物理性質

Table 1 Physical properties of the soil at various depths of the middle sampling location

Depth	15cm	50cm	100cm	150cm	200cm	250cm	300cm
D ₆₀ (mm)	3	2.73	2.2	2.2	2.3	1.8	2.1
D ₃₀ (mm)	0.8	0.72	0.48	0.45	0.41	0.34	0.4
D ₁₀ (mm)	0.172	0.114	0.09	0.058	0.05	0.046	0.048
均勻係數 C _u	17.44	23.95	24.44	37.93	46	39.13	43.75
曲率係數 C _d	1.24	1.67	1.16	1.59	1.46	1.4	1.59
粗顆粒 (>4.75mm)%	26	19.12	13.19	12.51	17.95	11.14	19.52
細顆粒 (<0.075mm)%	6.32	7.63	8.85	12.57	14.62	15.05	14.32
比重 G _s	2.69	2.68	2.68	2.70	2.67	2.67	2.68
液性限度 LL	29	30	31	32	32	35	36
塑性限度 PL	20	20	21	21	21	20	24
塑性指數 PI	9	10	10	11	11	13	12

量。土壤水分特性曲線一般經由實驗獲得，典型土壤水分特性曲線見圖 4，其與土壤類型及組成有關，圖 5 顯示不同類型土壤之土壤水分特性曲線之相對關係。

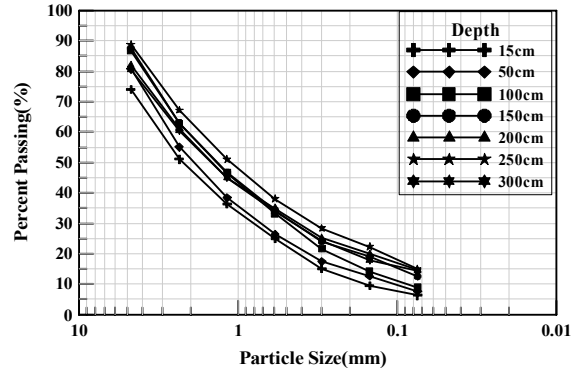


圖 3 取樣邊坡中央點位各深度風化土壤粒徑分佈曲線

Fig.3 Soil particle distribution curves at various depths of the middle sampling location

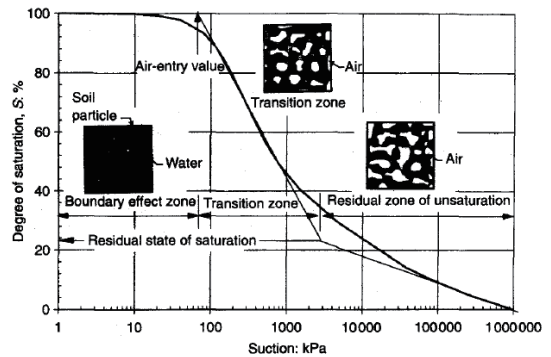


圖 4 典型土壤水分特性曲線 (Vanapalli et al., 1999)

Fig.4 Typical soil-water characteristic curve

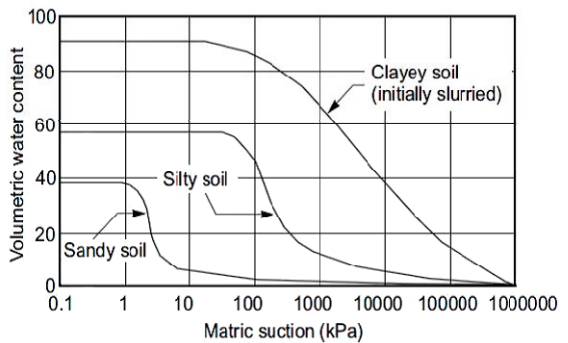


圖 5 不同類型土壤對應之土壤水分特性曲線 (Fredlund and Xing 1994)

Fig.5 Soil-water characteristic curves for various types of soils

Van Genuchten (1980) 提出包括 a 、 m 及 n 三個參數之土壤含水量與吸力之關係數學公式 (簡稱 VG 模式), 如式 (1)。

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中 ψ =基質吸力; Θ =正規化體積含水量, 表示為

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

式中 θ_s =飽和含水量; θ_r =殘餘含水量 (Residual water content); θ =體積含水量。 a 與進氣吸力值 (Air entry value) 有關, m 與土壤水分特性曲線之整體對稱性有關, n 與土壤的孔隙分佈相關, m 值一般直接由 n 值進行推估, Van Genuchten (1980) 建議 $m=1-(1/n)$ 或 $m=1-(1/2n)$ 。

Fredlund and Xing (1994) 參考 VG 模式提出另一土壤水分特性曲線數學模式 (簡稱 FX 模式), 亦包括 a 、 m 、 n 三參數, 如下式。

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + (\psi/a)^n \right]} \right]^m \quad (3)$$

式中 θ_s =飽和體積含水量; e =自然對數值 (=2.71828)。 a 與進氣吸力值 (air-entry value) 有關, a 值一般高於進氣吸力值; m 與土壤水分特性曲線之整體對稱性有關, 參數 m 值控制土壤水分特性曲線高吸力範圍之斜率; n 與土壤的孔隙分佈相關, n 值愈高, 進氣吸力值附近曲線呈現較急劇之轉折 (曲率較大)。 a 、 m 、 n 三參數可經由土壤水分特性曲線實驗數據反推求得。Fredlund and Xing (1994) 建議之參數推求方式如后。

$$a = \psi_i \quad (4)$$

$$m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (5)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i \quad (6)$$

式中 ψ_i =土壤水分特性曲線反曲點 i 對應之基質吸力; θ_i =土壤水分特性曲線反曲點 i 對應之體積含水量; S =土壤水分特性曲線反曲點之切線斜率。此外,

實驗數據顯示, 於體積含水量為 0 情況, 土壤基質吸力最大可達約 10^6 kPa。因此, Fredlund and Xing (1994) 另針對式 (3) 提出一修正因子, 土壤水分特性曲線數學模式表示為

$$\theta = C(\psi)\theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (7)$$

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \quad (8)$$

式中 ψ_r =殘餘體積含水量對應之基質吸力, 為土壤水分特性曲線高吸力範圍曲線段轉為直線之起始位置對應之吸力值; $C(\psi)$ =修正因子, 為設定土壤含水量 0% (乾燥狀態) 時基質吸力值達 10^6 kPa 之修正因子, 低基質吸力時, $C(\psi)=1$, 即式 (3) 及式 (7) 結果相近。 a 值推求方式維持不變 (如式 (4)), 其他各參數推求方式如后。

$$m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right) \quad (9)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3.72s^* \quad (10)$$

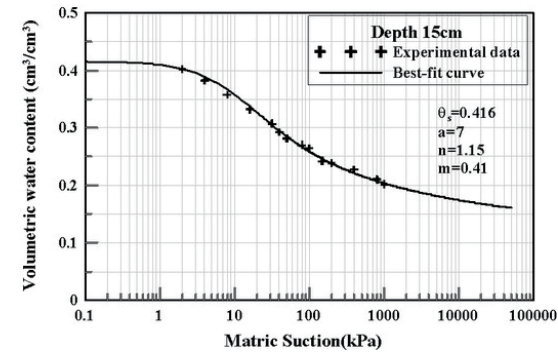
$$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1.31^m (\psi_i + \psi_r) \ln [1 + (1000000/\psi_r)]} \quad (11)$$

式中 ψ_i =土壤水分特性曲線反曲點 i 對應之基質吸力; θ_i =土壤水分特性曲線反曲點對應之體積含水量。

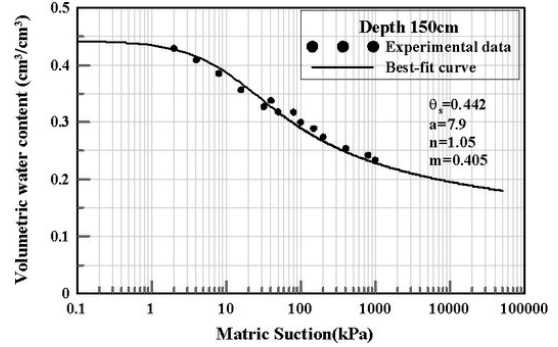
三、頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線

本研究取回的土樣並非完全風化的土壤, 其中包含顆粒較大的未完全風化粗顆粒土壤, 需要考慮粗顆粒土壤對土壤水分特性曲線的影響。取樣邊坡中央點位不同深度風化土壤之土壤水分特性曲線如圖 6 所示, 此一實驗數據透過 FX 模式 (Fredlund and Xing, 1994) 進行模擬, 模擬之各深度土壤水分特性曲線如圖 6 所示, 由於頁岩風化土壤屬細顆粒土壤, 本研究之土壤水分特性曲線數據範圍無法明確達殘餘體積含水量狀態, 無法可靠獲得頁岩風化土壤之殘餘體積含水量

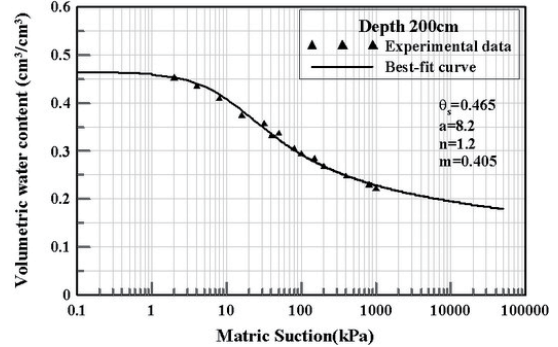
對應之基質吸力 (ψ_f)。因此, 採用式 (3) 之 FX 模式進行模擬實驗數據, 各深度風化土壤之 FX 模式參數 (a 、 m 、 n) 及進氣吸力值列於表 2。此外, 取樣邊坡剖面上方及下方之各深度土壤水分特性曲線趨勢類似於圖 6 (取樣邊坡中央點位) 之結果, 表 3 及 4 分別為取樣邊坡剖面上方及下方之各深度土壤之 FX 模式參數 (a 、 m 、 n) 及進氣吸力值。頁岩風化土壤之進氣吸力值約介於 3~4.3 kPa, FX 數學模式 a 值約為 7~9 kPa, n 值約為 1~1.27, m 值約為 0.385~0.42。



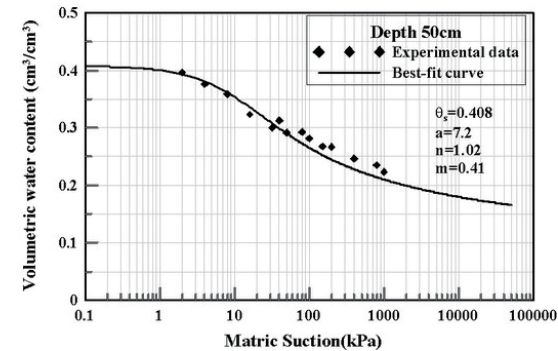
(a)深度 15cm



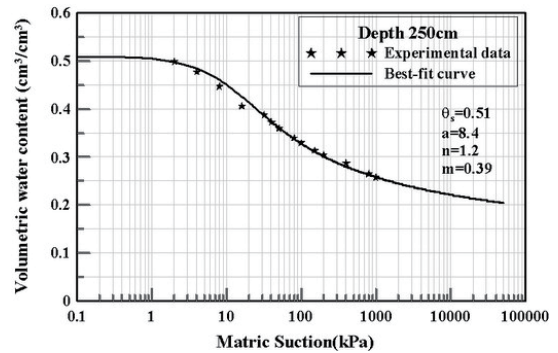
(d)深度 150cm



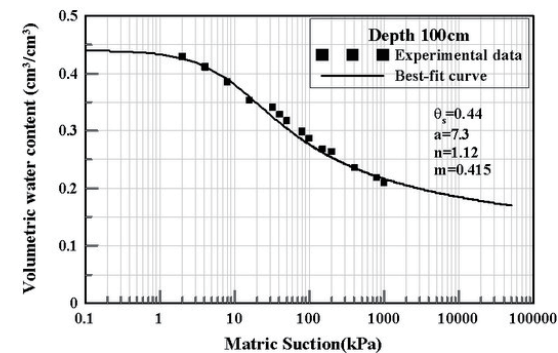
(e)深度 200cm



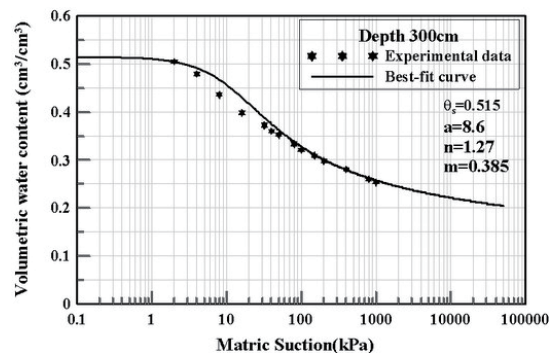
(b)深度 50cm



(f)深度 250cm



(c)深度 100cm



(g)深度 300cm

圖 6 取樣邊坡中央點位各深度土壤之土壤水分特性曲線

Fig.6 The soil-water characteristic curves at various depths of the middle sampling location

四、成果討論

1. 土壤水分特性曲線與土壤風化程度關係探討

圖 7 為各深度風化土壤經 FX 模式模擬之土壤水分特性曲線，此一成果顯示土壤水分特性曲線與深度無明顯趨勢。風化殘留土粒徑分佈曲線 (圖 3) 為將現地取回土樣進行篩分析之成果，將各深度風化土壤之土壤水分特性曲線與圖 3 各深度土壤粒徑分佈曲線進行比較，發現整體土壤顆粒愈粗或含較多粗顆粒土壤情況 (例如深度 15 及 50 cm 之土壤)，其土壤水分特性曲線較細顆粒土壤較多情況 (例如深度 250 及 300 cm 之土壤) 之位置較低，即含較多粗顆粒土壤情況，飽和體積含水量 (Saturated volumetric water content) 與殘餘體積含水量 (Residual volumetric water content) 均較低。由於本研究之土壤為使用螺旋式鑽桿進行取樣，土壤之擾動程度受鑽桿扭動程度影響，因此，風化程度與深度之趨勢較無法由本研究獲得具體結論。一般而言，風化程度愈高，細粒徑土壤含量愈多，經由各

深度土壤水分特性曲線與粒徑分佈曲線之比較，本研究初步可獲得之結論為：岩層風化程度愈高 (細粒徑土壤含量愈多) 之土壤，其土壤水分特性曲線之飽和含水量與殘餘含水量相對較高。

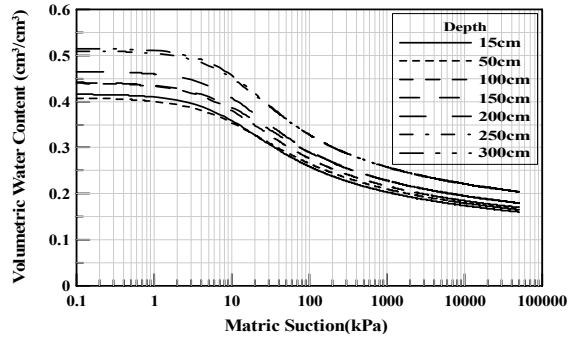


圖 7 取樣邊坡中央點位各深度風化土壤之土壤水分特性曲線 (經 FX 模式模擬結果)

Fig.7 The soil-water characteristic curves at various depths of the middle sampling location based on the curve fitting of the FX model

表 2 取樣邊坡中央點位各深度風化土壤之 FX 模式參數

Table 2 The FX model parameters at various depths of the middle sampling location

Depth	15cm	50cm	100cm	150cm	200cm	250cm	300cm
a (kPa)	7.0	7.2	7.3	7.9	8.2	8.4	8.6
n	1.15	1.02	1.12	1.05	1.2	1.2	1.27
m	0.41	0.41	0.415	0.405	0.405	0.39	0.385
進氣吸力值 (kPa)	3	3.2	3.2	3.3	3.6	3.73	4

表 3 取樣邊坡上方點位各深度風化土壤之 FX 模式參數

Table 3 The FX model parameters at various depths of the upper sampling location

Depth	15cm	50cm	100cm	150cm	200cm	250cm	300cm
a (kPa)	7.0	7.3	7.3	8	8.8	8.3	9
n	1.15	1.05	1.1	1.15	1.12	1.18	1.25
m	0.41	0.415	0.42	0.417	0.396	0.405	0.395
進氣吸力值 (kPa)	3.25	3.28	3.28	3.5	4.0	3.75	4.32

表 4 取樣邊坡下方點位各深度風化土壤之 FX 模式參數

Table 4 The FX model parameters at various depths of the lower sampling location

Depth	15cm	50cm	100cm	150cm	200cm	250cm	300cm
a (kPa)	7.0	7.2	7.8	7.8	8.2	8.5	9.1
n	1.02	1.05	1.17	1.2	1.05	1.12	1.2
m	0.41	0.409	0.402	0.39	0.4	0.4	0.385
進氣吸力值 (kPa)	3	3	3.28	3.28	3.5	3.75	4

2. 頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線數學模式參數

FX 模式以三參數 (a 、 m 、 n) 模擬土壤水分特性曲線, 此三參數與土壤水分特性曲線之分佈有關。 a 值與進氣吸力值有關, 圖 8 為頁岩風化土壤之 a 值與進氣吸力值之關係, 顯示 a 值隨進氣吸力值 (AEV) 之增加而增加。參數 n 值控制土壤水分特性曲線之進氣吸力值與殘餘吸力值間漸變區 (transition zone) 之分佈行為, 圖 9 為頁岩風化土壤之 n 值與通過土壤水分特性曲線反曲點切線斜率之關係, 顯示 n 值與漸變區斜率呈正比關係。參數 m 值控制土壤水分特性曲線高吸力範圍之斜率, 與殘餘含水量對應之吸力值有關, 本研究殘餘含水量對應之吸力值由數值模擬曲線 (FX model) 取得, 圖 10 為頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線殘餘含水量對應之吸力值 ψ_r 與 m 值之關係, 顯示 m 值隨 ψ_r 值之增加而略為降低。

3. 頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線模式參數與粒徑分佈之關係

土壤水分特性曲線之影響因素包括土壤結構、初始含水量、孔隙分佈、土壤類型、土壤礦物組成、應力歷程及壓實的方式等 (Vanapalli et al., 1999), 其中土壤孔隙分佈情況與土壤類型 (粒徑組成) 尤為重要。土壤水分特性曲線線型與土壤粒徑分佈曲線相似, Fredlund et al. (2002) 試圖建立一以土壤粒徑分佈預測土壤水分特性曲線之方法, Yang et al. (2004) 嘗試建立

砂土粒徑分佈特性與進氣吸力值及 SWCC 反曲點切線斜率之關係。本研究嘗試建立頁岩風化土壤之粒徑分佈曲線特性與 FX 模式參數 (a 、 m 、 n) 之關聯性。

由圖 10 知 m 值與殘餘含水量對應吸力值有關, 土壤有效粒徑 D_{10} 影響土壤的透水性, 圖 11 為參數 m 值與有效粒徑 D_{10} 之關係, 顯示參數 m 值隨 D_{10} 之增加而增加, 頁岩風化土壤之 m 值與 D_{10} 之迴歸方程式亦顯示於圖 11 中。參數 n 值影響土壤水分特性曲線漸變區

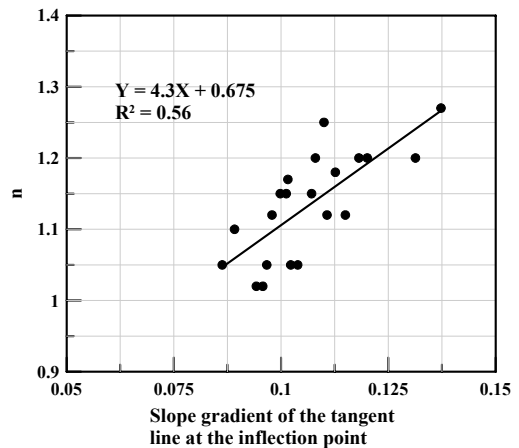


圖 9 頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線反曲點斜率與參數 n 值之關係

Fig.9 The relationship between the slope gradient of the tangent line at the inflection point in the SWCC and the n value for the residual soil formed from shale

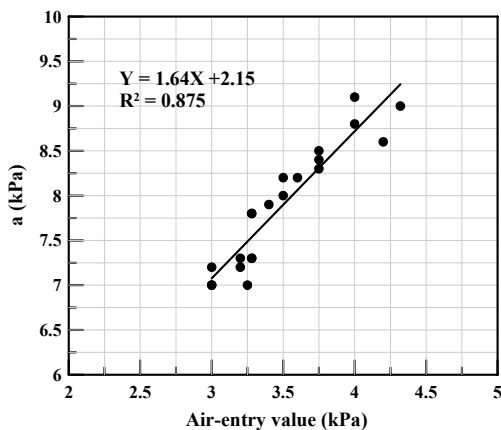


圖 8 頁岩風化土壤之參數 a 值與進氣吸力值之關係

Fig.8 The relationship between a value and the air-entry value for the residual soil formed from shale

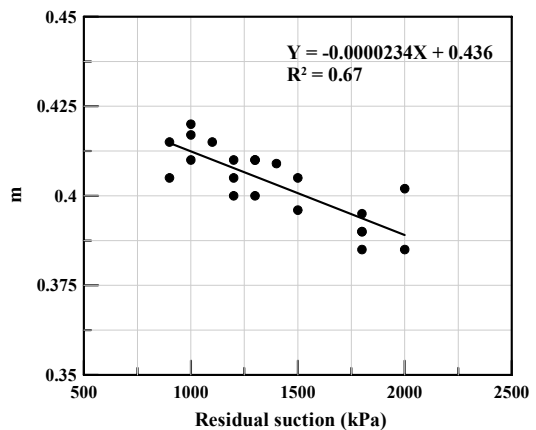


圖 10 頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線殘餘含水量對應之吸力值 ψ_r 與參數 m 值之關係

Fig.10 The relationship between the suction corresponding to the residual water content ψ_r and the m value for the residual soil formed from shale

切線之斜率 (Fredlund and Xing, 1994)，本研究嘗試建立參數 n 值與土壤之粒徑分佈曲線中央區域 (約 D_{30} 與 D_{60} 間) 斜率之關係，圖 12 為粒徑分佈曲線中央區域斜率之決定方式示意圖，圖 13 為頁岩風化土壤參數 n 值與粒徑分佈曲線直線段斜率之關係，顯示粒徑分佈曲線斜率越大，參數 n 值隨之增加，頁岩風化土壤之 n 值與粒徑分佈曲線直線段斜率之迴歸方程式亦顯示於圖中。土壤初始孔隙比 e 值與進氣吸力值相關

(Vanapalli et al., 1999)，由圖 8 知參數 a 值與進氣吸力值有關，土壤結構組成控制進氣吸力值，土壤結構組成直接影響初始孔隙比，圖 14 建立頁岩風化土壤參數 a 值與初始孔隙比 e 之關係，顯示參數 a 值隨初始孔隙比 e 值之增加而降低。本研究初步成果可提供經由頁岩風化土壤之粒徑分佈曲線特性及初始孔隙比推求土壤水分特性曲線 FX 模式之參數 (a 、 m 、 n)，以利進一步應用於頁岩風化不飽和土壤邊坡之穩定分析。

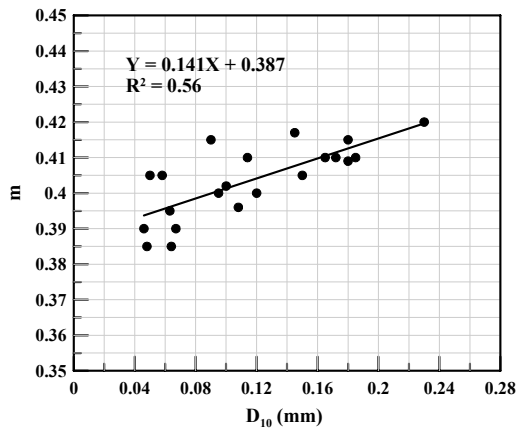


圖 11 頁岩風化土壤有效粒徑 D_{10} 與參數 m 值關係
Fig.11 The relationship between the effective size D_{10} and the m value for the residual soil formed from shale

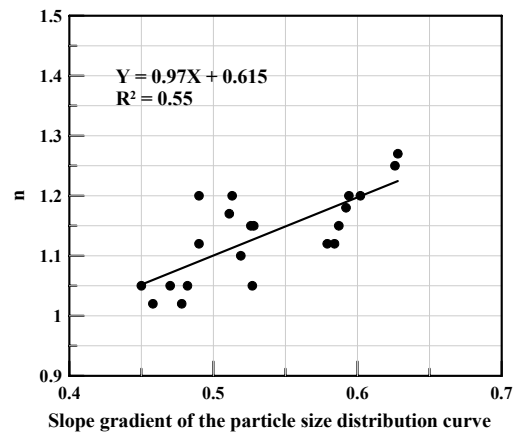


圖 13 頁岩風化土壤粒徑分佈曲線中央區域直線段斜率與 n 值關係
Fig.13 The relationship between the slope gradient at the middle portion of the soil particle size distribution curve and the n value for the residual soil formed from shale

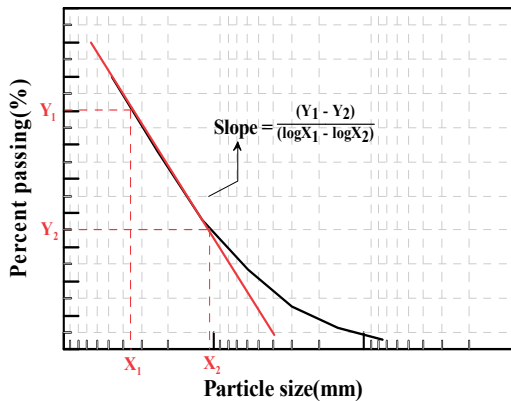


圖 12 粒徑分佈曲線中央區域直線段斜率決定方式
Fig.12 Definition of the slope gradient at the middle portion of the soil particle size distribution curve

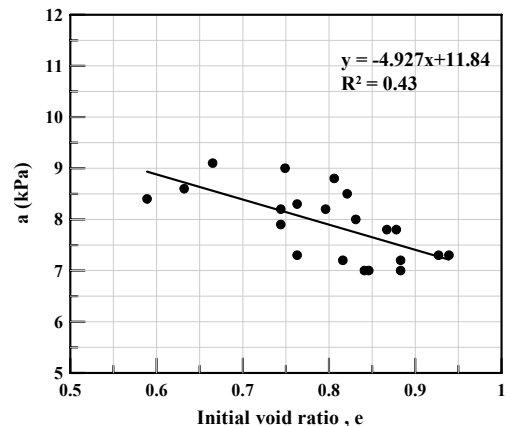


圖 14 頁岩風化土壤之 a 值與初始孔隙比 e 關係
Fig.14 The relationship between a value and initial void ratio e for the residual soil formed from shale

五、結 論

本研究為探討不飽和頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線 (SWCC), 並與土壤風化程度進行關聯性探討, 另以 FX 模式求取頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線數學模式參數。此外, 本研究亦就頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線 FX 數學模式參數與基本土壤物理性質進行關聯性探討, 以利此一成果能進一步應用於台灣頁岩風化殘留土之邊坡穩定分析。主要結論臚列如后。

1. 頁岩風化土壤之進氣吸力值約介於 3~4.3 kPa。
2. 岩層風化程度愈高之土壤, 其土壤水分特性曲線之飽和體積含水量與殘餘體積含水量相對較高。
3. 頁岩風化土壤之 FX 數學模式 a 值約為 7~9 kPa, n 值約為 1~1.27, m 值約為 0.385~0.42。
4. FX 模式 a 值隨進氣吸力值之增加而增加; n 值與土壤水分特性曲線漸變區斜率呈正比關係; m 值隨殘餘基質吸力 (ψ_r) 之增加而略為降低。
5. 本研究初步建立頁岩風化土壤之土壤水分特性曲線 FX 模式參數與基本土壤物理性質之關係。包括: (1) 建立參數 a 值與初始孔隙比 e 值之關係, a 值隨初始孔隙比 e 值之增加而降低; (2) 建立參數 n 值與土壤之粒徑分佈曲線中央區域斜率之關係, 粒徑分佈曲線斜率越大, 參數 n 值亦增加; (3) 建立有效粒徑 D_{10} 與參數 m 值之關係, 參數 m 值隨 D_{10} 之增加而增加。

誌 謝

本研究由國科會專題研究計畫 NSC 99-2625-M-327-003 提供研究經費, 使本研究得以順利完成, 特此誌謝。

參考文獻

1. Fredlund, D.G., and Morgenstern, N.R. (1978). "The shear strength of unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
2. Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
3. Fredlund, M.D., Wilson, G.W., and Fredlund, D.G. (2002). "Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 1103-1117.
4. Van Genuchten, M.Th. (1980). "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
5. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., and Pufahl, D.E. (1999). "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till." *Geotechnique*, 49(2), 143-159.
6. Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E.C., and Fredlund, D.G. (2004). "Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 908-920.

2011 年 12 月 05 日 收稿

2011 年 02 月 09 日 修正

2012 年 02 月 16 日 接受

(本文開放討論至 2013 年 3 月 31 日)