

礫石含量對於不同土壤之飽和水力傳導度之影響

王琮元⁽¹⁾ 林俐玲^{(2)*} 蔡義誌⁽³⁾

摘 要

自然化育的土壤內大多含有礫石，均質土壤與異質土壤之飽和水力傳導度因而有所差異。本研究使用砂土藉由添加不同體積百分含量的礫石，觀察其水力傳導度的變化情形。使用的礫石含量介於 5%-50%，飽和水力傳導度採用定水頭實驗，並且利用壓力鍋排水實驗計算土體中粗孔隙度(macroporosity)。實驗結果指出，隨著礫石含量的增加，水力傳導度也隨之增加。而實驗中亦發現飽和水力傳導度與“粗孔隙度與總孔隙度之比值， f^* ”，呈現正相關。本研究另外分析砂質壤土與粉質壤土，發現砂質壤土與砂土在礫石體積百分含量與飽和水力傳導度之間有相同的趨勢；而粉質壤土則是體積含量增加，水力傳導度下降。推測其原因為細質地土壤其細孔隙較多，故 f^* 上升和緩，而礫石增加曲折度變大，所造成的影響較 f^* 大，導致水力傳導度下降。

(**關鍵詞**：粗孔隙度，孔隙比，礫石含量，飽和水力傳導度)

Effect of Gravel Content on Saturated Hydraulic Conductivity in Different Soil Texture

Li-Ling Lin⁽¹⁾ Tsung-Yuan Wang⁽²⁾ Yi-Zhih Tsai⁽³⁾

Graduate student⁽¹⁾, Professor⁽²⁾ and Doctor of Philosophy⁽³⁾ Department of Soil and Water Conservation National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

ABSTRACT

In natural condition, there are gravel content in the soil. The saturated hydraulic conductivity between the homogeneous soil and heterogeneous soil are quite different. Sand with different gravel content soil samples were chosen as the experiment materials in this research. The saturated hydraulic conductivity of different treatment was measured. The gravel volume content was between 5%-50%. The saturated hydraulic conductivity was measured in constant head condition. The macroporosity in sample was measured by draining in pressureplate experiment. The results indicated that, the saturated hydraulic conductivity would increase with the increased gravel amount. During the draining in pressureplate experiment, we found that the saturated hydraulic conductivity is positive correlation

1 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

2 國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 email:lllin@dragon.nchu.edu.tw)

3 國立中興大學水土保持學系博士

with “ the ratio of macroporosity to total porosity, f^* ” This research also analysis the saturated hydraulic conductivity which were two soil texture, sandy loam and silty loam. Sandy loam showed the same trend with sand soil . However , the silty loam showed that the gravel content increased , the saturated hydraulic conductivity decreased . We speculate that the find-textured soil has more minor porosity , so the f^* increased slightly. And the gravel content increased coming with the higher tortuosity. The effect of tortuosity is stronger than f^* in find-textured soil. Therefore, the saturated hydraulic conductivity decreased.

(KEYWORD: Macroporosity, Volume percentage of gravel, The ratio of macroporosity to total porosity)

前言

台灣有許多地方為土石流之好發地區，故台灣在土石流的研究與防治上不遺餘力，而誘發土石流的因素有很多，其中之一即是土壤的水力傳導度。土壤之水力傳導度高低，代表水分在土壤中移動的難易與快慢。倘若水分難以入滲進土壤，造成逕流，將會帶走土壤表面之砂石；若水分易入滲，則土壤飽含水分的速度快，易造成土體變重而崩塌。

大雨過後之土壤多為飽和狀態，基於前述原因飽和水力傳導度為一重要的研究課題。

土壤為異質性介質，其中含有許多礫石、根系、昆蟲及蟲道等，這些因素都會影響水力傳導度之高低，然實驗室之研究難以重現現地之所有因素，故本研究以礫石含量為主要研究目標。

研究方法與材料

1. 理論基礎

本文主要以達西定律(1856)為研究原理：

$$q = K \left(\frac{\Delta H}{L} \right) \quad (1)$$

式中：

q 為比流出率(specific discharge rate)，即單位時間(t)通過單位截面積(A)之水分體積(V)，或稱為流束密度(flux density)，

$$q = Q/A = V/At。$$

ΔH 為水力頭(hydraulic head)差值，簡稱水力頭。

L 為土柱長度。

並選擇 Klute et al.(1986)整理之室內定水頭實驗設計，進行飽和水力傳導度之測定。

2. 試驗設計

本研究以哈盆溪 2 池所採的風乾擾動土為主要材料，哈盆溪位於台灣新北市烏來區之哈盆自然保留區內。另外以研究室內之土壤資料庫之資料作為驗證。三種土壤之土壤質地分別是砂土、砂質壤土、粉質壤土，其基本性質如表 1。因風水坪與八卦山為研究室土壤資料庫數據，故使用之礫石與哈盆溪 2 池所使用之礫石不同。

哈盆溪 2 池所使用之礫石粒徑介於 3.175mm 至 3.35mm，顆粒密度為 2.83 g/cm^3 。

為了解礫石含量與飽和水力傳導度之關係，土柱之礫石含量取數個區間觀察其趨勢，而礫石含量以體積百分含量計算，分別為 0%、5%、15%、30%、40%、50%，並利用礫石密度與土環體積換算出所需之礫石重量。

而土壤體積與重量以總體密度 $1.45\text{g}/\text{cm}^3$ 進行換算。

填土所使用的土環之材質為壓克力，高 3cm，內徑 4.865cm，體積為 55.77cm³ 為避免填土時礫石分布不均而造成誤差，填土時將土壤攤平於托盤上，並將礫石均勻分布在

表層土壤上，以確保一定土壤體積含有一定的礫石體積。填土時以 Oliviera et al.(1996)的方法為原則，以牛角匙每次挖進一小匙並鋪平，並在按壓後輕刮表面防止不連續面產生定水頭試驗設計如圖 1.所示，為確保土樣充分飽和，水頭分三次提升，每一次提升土柱之三分之一高，每段飽和時間兩小時以上，避免水頭提升幅度過高，造成土柱內空氣未能及時排出。接著利用水頭差及連通管原理，測定一定時間內流出之水體積，並以達西定律計算出各土樣之飽和水力傳導度。

表 1. 土壤及所添加礫石之基本性質
table1.The properties of soil and added gravel.

土樣	砂粒(%) Sand(%)	粉粒(%) Silt(%)	黏粒(%) Clay(%)	土壤質地 Soil texture	顆粒密度 Particle density g/cm^3	使用礫石大小 (mm)
哈盆溪 2 池	89.23	6.57	4.20	砂土	2.74	3.175-3.35
風水坪	58.72	28.60	12.68	砂質壤土	2.56	12.35
八卦山	18.4	69.90	11.70	粉質壤土	2.55	12.35

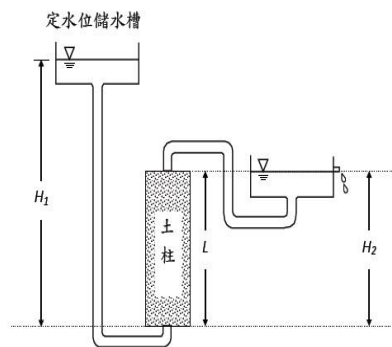


圖 1. 定水頭試驗量測飽和水力傳(蔡, 2011)

Fig.1 Constant head measurement (Tsai, 2011)

飽和水力傳導度、總孔隙度、粗孔隙度之計算

1. 飽和水力傳導度

因選用之土壤為砂土，水力傳導度較大，故每三十秒量出水體積，利用公式(2)

$$K_s = \frac{Q \times L}{\Delta H \times A} \quad (2)$$

式中：

K_s ：飽和水力傳導度(cm/hr)

Q ：流量(cm³/hr)， $Q=V$ (出水體積)/ t (時間)

L ：土柱厚度(cm)

A ：土柱截面積(cm²)

ΔH ：水力頭差(cm)

將量取到的水體積帶入(2)可得飽和水力傳導度。

2. 總孔隙度及粗孔隙度

萬鑫森(1968)指出總孔隙度(total porosity)之減少，並非是讓水力傳導度變小的真正原因，粗孔隙數量(Macroporosity)的減少才是關鍵。因此粗孔隙數量才是決定飽和水分移動之速度之原因。

雖然總孔隙度並不是決定飽和水分移動速度之主因，但會影響飽和水分之含量(萬鑫森，1991)，且粗孔隙度也包含在總孔隙度之中，故亦為一重要因子。理論總孔隙度之算法如公式(3)：

$$f = \frac{V_a + V_w}{V_s + V_a + V_w} = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中：

f ：總孔隙度

V_a ：空氣體積(cm³)

V_w ：液體體積(cm³)

V_s ：固體體積(cm³)

ρ_b ：總體密度(cm³/g)

ρ_s ：顆粒密度(cm³/g)

但由於此次實驗含有礫石，不可直接套用公式計算理論總孔隙度，故計算方式改為土體內的水分總體積除以土柱體積。因土柱飽和後，所有孔隙皆填滿水，故水分體積等於孔隙體積。本實驗假設水的密度為 1g/cm³，

公式(4)：

$$f = \frac{\left(\frac{W_s - W_d}{\rho_w}\right)}{V_t} = \frac{V_f}{V_t} \quad (4)$$

式中：

W_s ：飽和土柱重(g)

W_d ：乾土柱重(g)

V_t ：土柱體積(cm³)

ρ_w ：水密度(g/cm³)

V_f ：孔隙體積

粗孔隙度為重力影響下，可排出的水量佔總體積之比值，即為土壤無法保持水分之孔隙佔總體積之比值，可利用公式(5)計算：

$$f_{ma} = \frac{\left(\frac{W_{1/3bar}}{\rho_w}\right)}{V_t} = \frac{V_{ma}}{V_t} \quad (5)$$

式中：

f_{ma} ：粗孔隙度

$W_{1/3bar}$ ：壓力 1/3bar 時排出之水量(g)

V_{ma} ：粗孔隙體積(cm³)

利用壓力鍋排水實驗，將飽和後的土樣置於壓力鍋內，並將鍋內壓力維持在 1/3bar，靜待三天等待穩定後，取出土樣並秤重，可秤得排出水重，再利用公式(5)，可求得粗孔隙度。

求得粗孔隙度後，將粗孔隙度與總孔隙度相除，可得“粗孔隙度與總孔隙度之比值 f^* ”，如式(6)

$$f^* = \frac{f_{ma}}{f} \times 100\% \quad (6)$$

結果與討論

礫石含量與飽和水力傳導度之關係

礫石含量與水力傳導度之關係如圖 2，雖然在礫石體積含量 5% 有些微下降，但可以看出添加礫石後整體的水力傳導度是上升的。5% 體積含量時水力傳導度的下降，推測為因添加的礫石含量尚不算多，故粗孔隙度的增加並不明顯，但從無礫石到有礫石之間的通水路徑變長，故飽和水力傳導度些微下降。

而礫石含量 5% 之後可以看出飽和水力傳導度與礫石體積含量呈現正相關，且越多越快。

吳佳俊等(2012)在添加礫石含量於 19.06% 至 39.46%，發現在 30% 以上礫石含量與飽和水力傳導度呈現高度正相關。

礫石含量與粗孔隙度之關係

實驗結果如表 2。因為礫石取代了土粒的體積，在體積不變的情況下，整體的重量上升，故總體密度上升。

而礫石風化程度低，為一整體之結構，故取代土粒的體積後整體之總孔隙度下降。

而粗孔隙度維持在 20% 之間，推測原因為填入土柱之礫石材料粒徑一致，且填入方式一致，在整體體積不變的情況下，礫石含量不影響粗孔隙度，如圖 3，兩者不具關係性。

但可看出粗孔隙度，隨著礫石含量的增加，占總孔隙的比值隨之增加，如圖 4。也就是土體的孔隙中，隨著礫石的增加造成細孔隙的減少，粗孔隙度占總孔隙度的比值 f^* 也隨之增加。

然而填土的過程中，無法確保每一土樣內之礫石排列等情況能完全相同，故皆會有些微差異。在 5% 時突然上升，推測為填土時造成的實驗誤差。

飽和水力傳導度與 f^* 之關係

土體中影響水力傳導度最主要因素是粗孔隙的數量(萬鑫森，1968)，但在本實驗研究發現，結果如圖 5，粗孔隙度與飽和水力傳導度之間的相關係數相當低。

然而粗孔隙數量與總孔隙度的比值 f^* 如圖 6，可看出具有相當的正相關性。

故推測影響飽和水力傳導度之因子除了粗孔隙度外，也有相當大的因素是來自 f^* 。雖然粗孔隙有一定的數量，但若在整體孔隙率中僅占一小部分，則粗孔隙度對於水力傳

導度的影響就不大；但土體孔隙中，若大半為粗孔隙的話，其對於飽和水力傳導度的影響將大大提升。

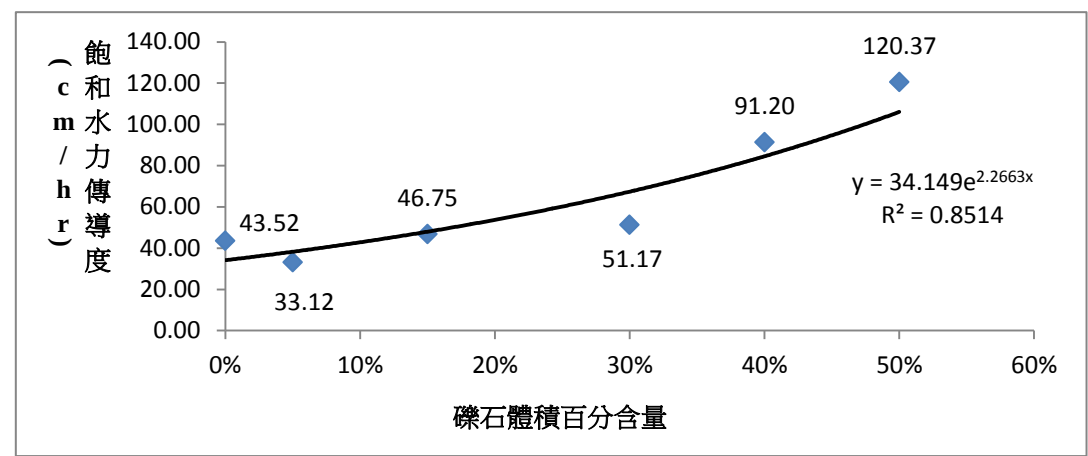


圖 2. 礫石體積百分含量與飽和水力傳導度之關係
 Fig2. The relationship between volume percentage of gravel and saturated hydraulic conductivity.

表 2. 礫石含量與孔隙之關係
 Table2. Gravel contents and its porosities.

礫石體積 百分含量(%)	總體密度 cm^3/g	總孔隙度 $f(\%)$	粗孔隙度 $f_{ma}(\%)$	粗孔隙度與總孔隙 度之比值 $f^*(\%)$
0	1.45	39.65	21.93	55.31
5	1.52	38.46	24.64	64.07
15	1.66	32.16	19.90	61.87
30	1.86	30.52	19.81	64.90
40	2.00	28.74	20.48	71.26
50	2.14	29.79	22.16	74.39

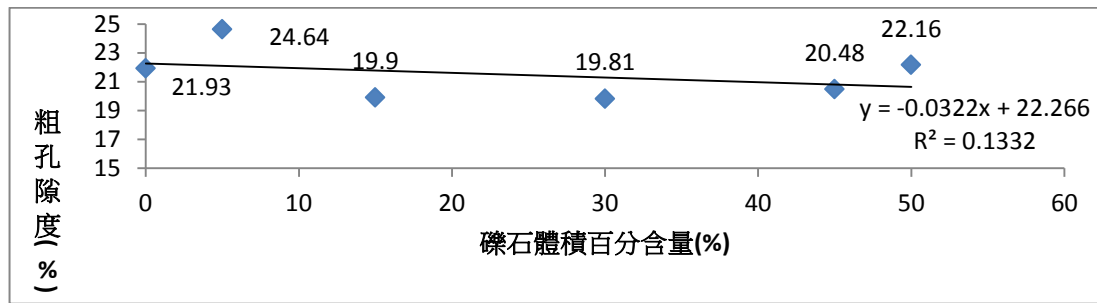


圖 3. 粗孔隙度與礫石體積含量之關係

Fig3.The relationship between marco-porosity and volume percentage of gravel.

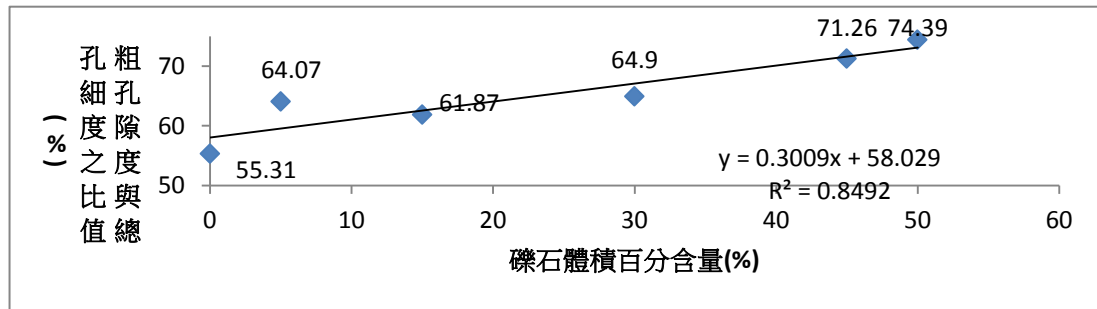


圖 4. 粗孔隙度與總孔隙度之比值f*與礫石體積百分含量之關係

Fig4. The relationship between the ratio of macroporosity to total porosity, and volume percentage of volume.

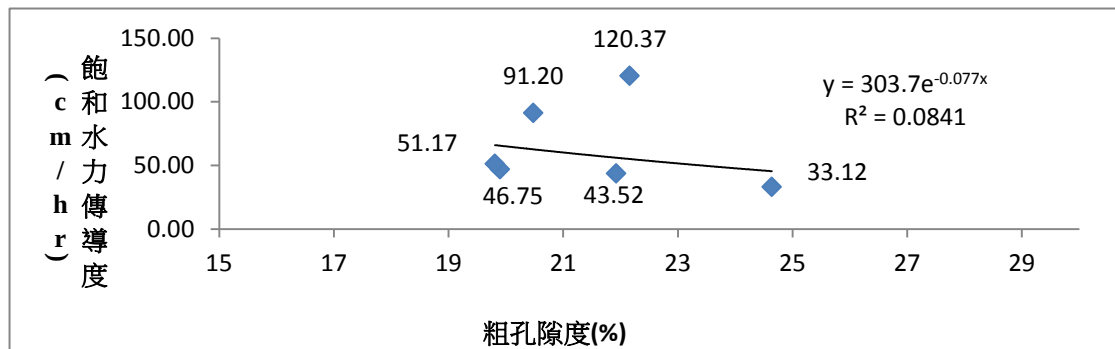


圖 5.飽和水力傳導度與粗孔隙度之關係

Fig5.The relationship between saturated hydraulic conductivity and macroporosity.

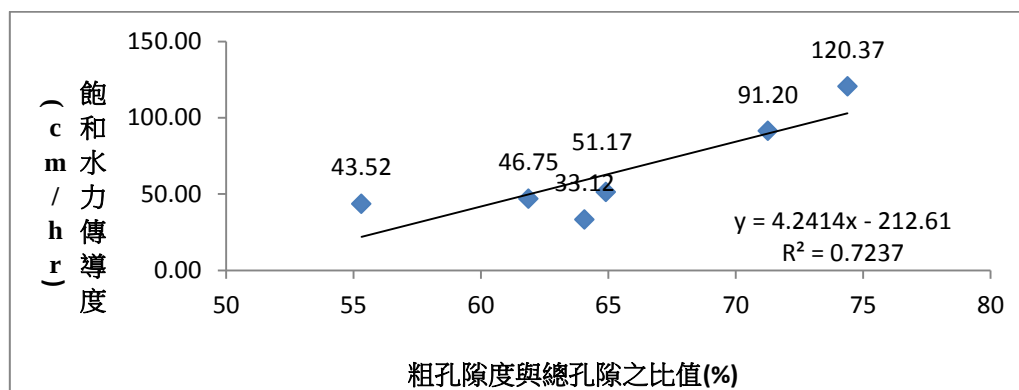


圖 6. 飽和水力傳導度與粗孔隙度與總孔隙之比值 f^* 之關係

Fig6. The relationship between saturated hydraulic conductivity and the ratio of macroporosity to total porosity

與其他土壤質地之比較

與砂質壤土(黃懿慈, 2005)相比, 如圖 7, 因為土壤質地接近, 故飽和水力傳導度上升的趨勢也類似, 礫石含量與飽和水力傳導度呈正相關。

但與粉質壤土(陳克強, 2009)相比, 如圖 8, 可看出飽和水力傳導度隨著礫石體積含量的上升而下降, 推測原因為土壤質地較細, 孔隙主要為細孔隙, 在 f^* 的表現方面, 粗孔隙

的比值不高, 故 f^* 對於飽和水力傳導度的影響較低。

且因顆粒密度較低, 土粒較小較細碎, 礫石產生的粗孔隙容易被填滿, 使得礫石造成的曲折度影響就相對上升。故礫石含量增加, 曲折度也增加, 飽和水力傳導度就下降。

上述二者所使用的礫石粒徑大於本次實驗所使用的礫石相當多, 在曲折度的影響較本次實驗來的劇烈, 故上述二者的飽和水力傳導度都較低。

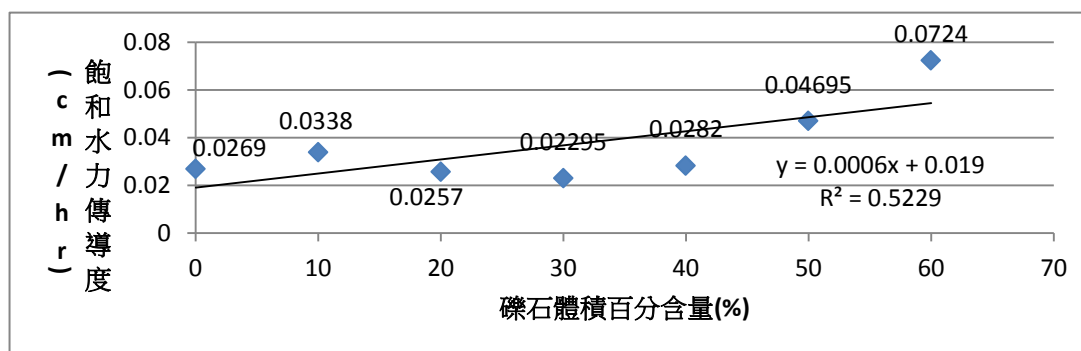


圖 7. 砂質壤土之飽和水力傳導度與礫石體積百分含量之關係

Fig7. The relationship between saturated hydraulic conductivity and volume percentage of gravel in

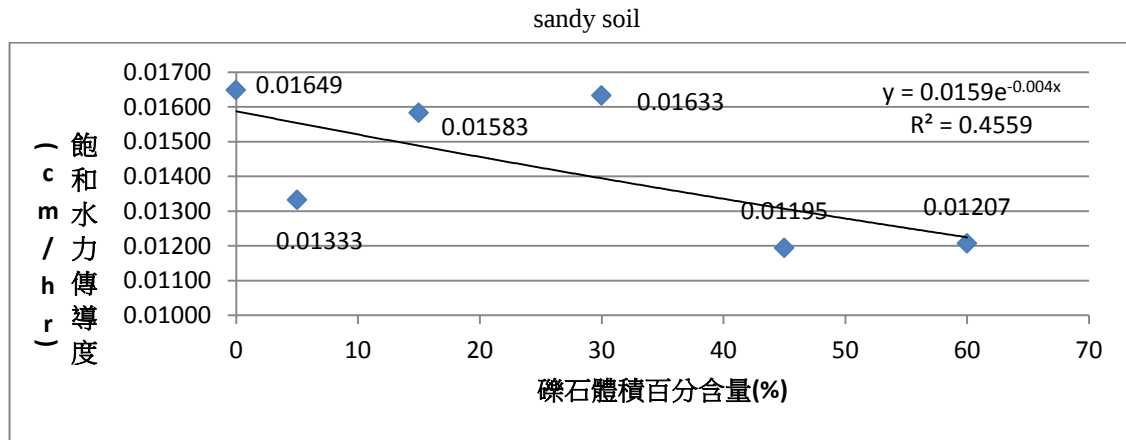


圖 8. 砂質壤土之飽和水力傳導度與礫石體積百分含量之關係

Fig8. The relationship between saturated hydraulic conductivity and volume percentage of gravel in silty soil

結論

土壤中含有礫石會影響土體之飽和水力傳導度，且與其體積百分含量有正相關，意即體積百分含量越高，飽和水力傳導度則有增加的趨勢。

當土體中混有礫石時，總體密度會上升，總孔隙度會下降，但 f^* 會上升。即隨著礫石含量的增加， f^* 也會跟著上升。

總孔隙度的下降不會使飽和水力傳導度下降，但會使飽和含水量減少；而粗孔隙度對飽和水力傳導度的影響，在本研究中是相對較低的。 f^* 的上升，對於飽和水力傳導度呈正相關。

所以礫石含量增加，促使 f^* 上升，而 f^* 的上升，導致飽和水力傳導度上升。

然而土壤質地才是影響飽和水力傳導度最直接的因素，粗質地土壤在礫石含量增加時水力傳導度會上升；而細質地土壤在礫石

含量增加時，水力傳導度會下降。因為細質地土壤中的孔隙多為小孔隙，導致 f^* 對於水力傳導度的影響較細微。

而礫石之粒徑與形狀對於飽和水力傳導度也有影響，粒徑大的礫石會使曲折度上升，造成水分移動路徑增長，使得水力傳導度降低(A.J.Dunn et.al., 1984)。

引用文獻

1. 林俐玲、董小萍 (1996)，土壤物理學實習手冊，國立中興大學水土保持學系。
2. 吳家俊、王建涵、詹于婷 (2012)，礫石地之土壤水分入滲特性研究，中華水土保持學報(43)1
3. 陳克強 (2009)，土壤礫石含量及分布對飽和水力傳導度之影響，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
4. 黃懿慈 (2005)，礫石含量影響土壤飽和水力傳導度之研究。國立中興大學水土

- 保持研究所碩士論文。
5. 蔡義誌 (2011)，土壤學特論實習講義，國立中興大學水土保持學系。
 6. 萬鑫森 (1968)，「土壤水分及移動」，水土保持學報，(1)1。
 7. 萬鑫森 譯 (1991)，基礎土壤物理學，初版二印，國立編譯館主編，茂昌圖書有限公司發行。
 8. A.J. Dunn and G. R. Meguys (1984), Relationship Between Gravel Content of Soils and Saturated Hydraulic Conductivity in Laboratory Tests. ,SSSA Special Publication No.13
 9. Darcy, H(1856). “Les Fontaines Publigue de la ville de Dijon” Dalmont, Paris
 10. Klute,A., and C. Dirksen.(1986) hydraulic conductivity and diffusivity : Laboratory methods. In : A. Klute(Ed.), Methods of Soil Analysis. Part1. Monograph 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
 11. Oliviera, I. B., and A. H. Demond, and A. Salehzadeh. (1996), Packing of Sands for the Production of Homogeneous Porous Media. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:49-53.
-

103 年 05 月 06 日收稿

103 年 05 月 19 日修改

103 年 05 月 21 日接受