

保水曲線在不同頻率的彈性波影響下之變化研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT OF DIFFERENT-FREQUENCY ELASTIC WAVES ON
WATER RETENTION CURVE

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士班研究生

鄧 教 弘
Jiao-Hong Deng

國立成功大學
水利及海洋工程學系
碩士生

戴 嘉 佑
Jia-You Dai

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士後研究員

李 哲 瑋
Jhe-Wei Lee

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

羅 偉 誠*
Wei-Cheng Lo

中國科技大學
土木與防災設計學系
退休教授

陳 主 惠
Chu-Hui Chen

摘 要

近年來彈性波應用在孔彈性介質中之理論研究受到眾多學者的關注，尤其是在含二相或多相非混合流體之孔隙介質中的傳遞特性更引起廣泛討論。目前已經知道彈性波在含二相流體之孔隙介質中傳遞會對土壤保水曲線造成影響，但至今尚未找出保水曲線受彈性波震動頻率影響之特性，也未知彈性波對土壤影響為暫時性或是永久性。

本研究以砂箱試驗將砂箱內土壤分為三層(下、中、上層)分別探討 3 種頻率(150Hz、300Hz、450Hz)的聲波(彈性波)對乾燥過程之保水曲線的影響與聲波影響前後保水曲線之變化，另外再觀察不同深度下的保水曲線受聲波影響之情況。

根據實驗結果發現聲波可以使土體產生膨脹或沉陷，當聲波使土體產生膨脹後，土體能以自然沉陷而恢復到聲波影響前之狀態；反之當聲波使土體沉陷後，土體則無法恢復到聲波影響前之狀態，故認定聲波造成土體膨脹為暫時性影響；造成土體沉陷為永久性影響，也從回歸資料中發現形狀因子 α 會隨著毛細張力減少而上升，而形狀因子 n 則會隨毛細張力減少而下降。

此外從不同深度之土壤受聲波影響下的實驗結果發現，聲波使土體膨脹或沉陷之程度會因土壤深度不同而改變，但使土體產生膨脹或是沉陷僅取決於聲波之頻率，並不會隨著土壤深度產生交替變化。

關鍵詞：彈性波、保水曲線、砂箱試驗。

* 通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系教授

701 台南市東區大學路 1 號，lowc@mail.ncku.edu.tw

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT OF DIFFERENT-FREQUENCY ELASTIC WAVES ON WATER RETENTION CURVE

Jiao-Hong Deng

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Jia-You Dai

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Jhe-Wei Lee

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Wei-Cheng Lo*

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

Chu-Hui Chen

Department/Graduate Institute of Civil Engineering and Hazard Mitigation Design, China University of Technology

ABSTRACT

Over the past few decades, theoretical and experimental studies on the connection between elastic wave attributes and the physical properties of a fluid-bearing porous medium have attracted the attention of many scholars in fields of porous medium flow and hydrogeology. It has been previously demonstrated that the transmission of elastic waves into a porous medium containing two immiscible fluids will have an effect on the water retention curve, but it remains elusive how the water retention curve will be affected by the frequency of elastic vibration waves or whether the effect on the soil is temporary or permanent.

This research is based on a sand box test in which the soil is divided into three layers (lower, middle, and upper layers). In this case, we discuss different impacts on the water retention curve during the drying process under sound waves (elastic waves) subject to three frequencies (150Hz, 300Hz, and 450Hz), respectively. The change in the water retention curve before and after the effect is then discussed. In addition, how sound waves affect the water retention curve at different depths is also observed.

According to the experimental results, we find that sound waves can cause soil either to expand or to contract. When the soil is induced to expand due to sound waves, it can contract naturally and return to the condition it was before the influence of the sound waves. On the contrary, when the soil is induced to contract, it is unable to return to its initial condition. Based on the results discussed above, it is suggested that sound waves causing soil to expand have a temporary impact while those causing soil to contract have a permanent impact.

In addition, our experimental results show how sound waves affect the water retention curve at different depths. The degree of soil expansion and contraction caused by the sound waves is different at various soil depths. Nevertheless, the expanding or contracting of soil is only subject to the frequency of sound waves. These changes are not altered as different soil depths.

Keywords: Elastic waves, Water retention curve, Sand box test.

Deng, J.H., Dai, J.Y., Lee, J.W., Lo, W.C.*, & Chen, C.H. (2020). "An Experimental Study on the Impact of Different-frequency Elastic Waves on Water Retention Curve." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 66(2), 64-75. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202006_66\(2\).0006](https://doi.org/10.29974/JTAE.202006_66(2).0006)

一、前言

非飽和層由於最接近地表，容易受到降雨與蒸發的影響，並且為地表水入滲時必經之通道。因此非飽和層為水流傳輸過程中重要的媒介。非飽和層內岩石與土壤顆粒之間大多被水與空氣填充，在流動時會受到不同相的作用力影響，內部流動機制不僅受到水文地質條件影響，也因土壤之飽和度與毛細張力而有所變化。

將土壤飽和度(S_w)與毛細張力(P_c)之關係繪製成圖即為保水曲線(Water Retention Curve)或是稱為土壤水分特徵曲線(Soil Water Characteristic Curve)，在吸水過程為濕潤曲線，排水過程為乾燥曲線，然而乾溼過程中所得之曲線並非一致，此現象稱之為遲滯現象(Hysteresis)。

影響保水曲線之因子有許多，例如水中鹽分濃度的改變或是土壤體積的改變皆會對保水曲線產生影響。近幾年彈性波應用在孔彈性介質中之理論研究受到眾多學者的關注，尤其是在含二相或多相非混合流體之孔隙介質中的傳遞特性更引起廣泛討論。目前已經知道彈性波在含二相流體之孔隙介質中傳遞會對土壤保水曲線造成影響，但至今尚未找出保水曲線受彈性波震動頻率影響之特性，也未知彈性波對土壤影響為暫時性或是永久性。故本研究以砂箱試驗將砂箱內土壤分為三層(下、中、上層)分別探討不同頻率的聲波(彈性波)對乾燥過程之保水曲線的影響與聲波影響前後保水曲線之變化，另外再觀察不同深度下的保水曲線受聲波影響之情況。

本實驗為保水曲線砂箱試驗，由分段式排水來模擬靜態條件下土壤的乾燥過程，砂箱內安裝三組張力計及含水量計分別來量測下、中、上層的毛細張力(P_c)與飽和度(S_w)再繪製成乾燥過程之靜態保水曲線。此實驗也將探討 3 種不同頻率(150Hz、300Hz、450Hz)之聲波影響下保水曲線的變化情形，並利用 van Genuchten (1980)模式回歸出保水曲線之相關參數，進而瞭解聲波對靜態保水曲線之影響行為。

關於彈性波最早是由 Biot (1956a,b)在孔彈性介質傳遞模式中所提出，這理論被稱為孔彈性理論(Poroelasticity)。Brutsaert (1964)和 Brutsaert and Luthin (1964)由此理論延伸發展所提出非飽和土壤孔彈性行為之理論框架，包括將聲波傳播與土壤水力連接的重要應用，因此使彈性波在含多相流體的孔隙介質中傳遞行為目前已廣泛被應用在各種領域中，並極具有價值性。

在原油開採方面，一般最普遍應用的技術為抽取處理法，即在同一地區同時進行地下水灌注及抽取，藉以獲得原油的擷取，為了提升原油生產率與累積原油產量，Gadiev (1977)藉由超音波刺激來增加其流動性與傳輸能力；在營建工程方面，劉明鑫(1999)以直接暫態彈性波波速量測探討不同種類混凝土及不同骨材性質混凝土之工程材料性質；Wu *et al.* (1995)在不破壞結構物之條件下，以暫態彈性波在結構體中傳遞，傳遞過程中遇到異質邊界會有反射、繞射、折射、散射之現象，再藉由訊號接收器讀取表面訊號後配合波動理論，進行分析其訊號中顯示與結構物物理性質相關資訊；在環境工程方面，Geller *et al.* (1995)利用彈性波探測非水溶性液體(Non-aqueous Phase Liquid, NAPL)之污染場址之位置，在地下水整治上提供了非常重要的資訊，由於 NAPL 被束縛在孔隙中無法隨著水流移動，因此 Lo *et al.* (2005)利用應力-應變關係推導出彈性波在孔隙介質中傳遞特性並且用所得理論模式推導出低頻彈性波在連續理論及孔彈性理論的基礎下，影響污染物在孔隙介質中的流動情況，有效地增加汙染物流出的濃度並提升地下水汙染物整治之效率(Kim and Wang, 2003; Lo *et al.*, 2012)；近幾年在水利工程方面，莊永源(2013)利用彈性波來提升孔彈性介質中流體之流量；陳玟潔(2012)利用砂箱試驗得到滬太華標準砂之保水曲線，再以不同頻率之聲波(彈性波)影響下觀察動態保水曲線之變化；楊佶欽(2014)探討在乾燥過程動態保水曲線受聲波(彈性波)的作用下，聲波頻率對於保水曲線中動態係數之影響，並改變乾燥過程之排水速度，觀察聲波震盪與飽和度變化率之關係。

保水曲線在波傳理論中是一個非常重要的影響條件，由於保水曲線中的遲滯現象在近幾年被廣泛探討並尋找其影響因子，許多學者提出不同之影響因子並利用實驗證明，例如鹽化土壤對遲滯現象影響之探討，林子雲(2003)研究海水倒灌後土壤中水分及鹽分的遲滯現象，以砂箱實驗之方式分析其特性，採用各種濃度之鹽水，進行多組之遲滯現象研究，藉以觀察鹽分濃度對遲滯行為之影響，並進行數值模式之開發，利用數值模式模擬未飽和層土壤中水分與鹽分之傳輸。由實驗與模擬結果發現，鹽溶於水中後會使水密度增加，在濕潤過程中需要更大的張力值才能使鹽水進入孔隙；而乾燥過程由於鹽水密度比較大的情況下，則是空氣需要更大之張力值才能進入孔隙中。

二、研究理論

由土壤乾燥與濕潤之不同過程，將土壤之飽和度

與毛細張力之關係，繪製成之曲線圖形即所謂保水曲線，而乾燥過程所得之曲線為乾燥保水曲線，反之濕潤過程所得之曲線為濕潤保水曲線。在一般情況下，為了簡化土壤水分張力變化之行為通常將乾燥曲線與濕潤曲線視為同樣一條曲線，然而若需要詳細探討土壤水分張力之真實行為則應該分別考慮。

關於前人對於保水曲線之理論研究有許多種，舉例如下：(1) Brooks and Corey (1964)；(2) Clapp and Hornberger (1978)；(3) van Genuchten (1980)；(4) Hutson and Cass (1987)。

由於土壤中的張力與孔隙幾何效應的機制均太複雜，不易以一簡單之公式完全來說明。上述諸位學者所提之函數式也都是半經驗半物理模式(physico-empirical model)，Clapp and Hornberger 模式及 Hutson and Cass 模式為了符合實際曲線之彎曲情形，故將曲線分成兩段，且兩段於保水曲線反曲點之張力水頭之值必須相等，因此在回歸上較為複雜，但因為 van Genuchten 模式(VG model)(1980)相較於 Brooks and Corey (1964)模式而言適用性較廣且較能反應土壤保水曲線之形狀(Aless *et al.*, 1992)，曲線在轉折處有較佳的表現，特別是接近飽和時(van Genuchten and Nielsen, 1985)，故本研究選擇將實驗值採用 VG model 來加以分析比較。

VG model：

$$h_c = 1/\alpha (S_w^{-1/m} - 1)^{1/n} \dots\dots\dots (1)$$

$$m = 1 - 1/n \dots\dots\dots (2)$$

其中， h_c 為毛細張力水頭； S_w 為飽和度； α 、 n 為無物理意義之參數， m 值經由反覆試驗之結果，以 $m = 1 - 1/n$ 能獲得最簡便之值。

三、實驗方法與配置

本試驗主要分為兩個部分，第一部分為土壤基本性質試驗，目的在於為了取得土樣基本物理特性，使未來數值模擬時有參考依據；第二部分為砂箱試驗，藉由量測土壤中水分減少過程中飽和度與毛細張力繪出保水曲線，然後結合聲波裝置觀察聲波對保水曲線之影響。本研究所使用之土壤為渥太華標準砂 C109。

3-1 土壤基本性質試驗

3.1.1 土壤粒徑分析：

利用標準篩決定實驗土壤(渥太華標準砂)之各粒

徑重量及通過各個粒徑重量百分比。篩分析(sieve analysis)適用在大於 0.075mm 之顆粒。表 1 為篩分析結果。

3.1.2 比重試驗：

比重試驗之目的在於利用比重瓶測得烘乾土壤土粒比重及孔隙率。表 2 為比重試驗結果。

3.1.3 定水頭試驗：

此試驗利用達西定律(Darcy's Law)求取土壤之水力傳導係數 K。表 3 為定水頭試驗結果。

3.1.4 殘餘體積含水比試驗：

此試驗將土樣以 1000 倍地心引力之離心力進行實驗，得殘餘體積含水比。表 4 為殘餘體積含水比試驗結果。

表 1 篩分析結果

篩分析					
篩號	篩孔徑 (mm)	篩質量 (g)	個別留篩質量(g)	個別留篩百分率(%)	累積過篩百分率(%)
20	0.840	330.95	0.00	0.00	100
30	0.590	316.50	153.35	15.34	84.66
40	0.420	330.15	799.94	79.99	4.67
50	0.297	327.60	26.8	2.68	1.99
60	0.250	315.95	6.61	0.66	1.33
100	0.149	300.00	12.8	1.28	0.05
底盤	—	324.60	0.5	0.05	0.00

表 2 比重試驗結果

土樣編號	a	b
溫度T(°C)	26	26
比重瓶質量(g)	30.90	31.90
比重瓶+烘乾土質量(g)	87.45	80.65
烘乾土質量 W_s (g)	56.55	48.66
比重瓶+水之質量 W_a (g)	81.10	82.30
比重瓶+水+烘乾土樣質量 W_b (g)	116.40	112.60
水在溫度 T°C之密度(g/cm ³)	0.9968156	0.9968156
土粒之體積(cm ³)	21.315	18.418
土樣顆粒密度(g/cm ³)	2.653	2.642
土粒比重 G_s	2.661	2.650
G_s 平均值	2.656	
比重瓶+滿土烘乾後質量(g)	113.30	113.75
比重瓶體積(cm ³)	50	50
滿土乾土重(g)	82.40	81.85
乾單位重(g/cm ³)	1.648	1.637
乾單位重平均值(g/cm ³)	1.6425	
土壤孔隙比 e	0.612	
土壤孔隙率 ϵ	0.380	

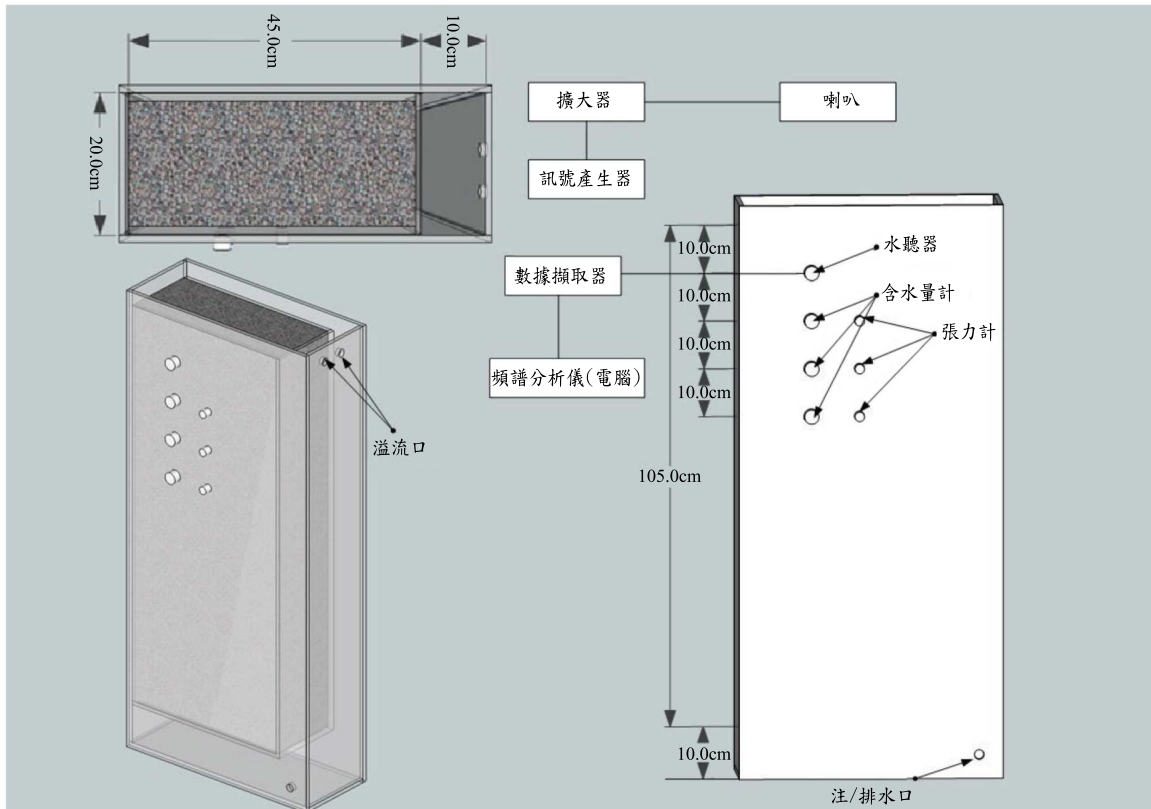


圖 1 實驗配置圖

表 3 定水頭試驗結果

溫度(°C)	25
水頭差 h(cm)	176
試體斷面積 A(cm ²)	80.71
試體長度 L(cm)	15.4
單位時間之流量 q(cm ³ /s)	21
水力傳導係數 K(m/s)	0.000228
滲透係數 k _s (m ²)	2.0957×10 ⁻¹¹

表 4 殘餘含水比試驗結果

	c	d
土樣+殘餘水重(g)	74.85	76.55
烘乾土重(g)	72.3	74.15
殘餘水重(g)	2.55	2.40
土樣+殘餘水體積(cm ³)	45.571	46.606
殘餘含水比	0.0560	0.0515
平均值	0.0538	

3-2 保水曲線砂箱試驗

本研究使用砂箱試驗量測渥太華標準砂在靜態條件下乾燥過程之保水曲線，主要使用的儀器有：含水量

計(EC-5)、張力計(Tensiometer, 2100F)、水聽器(Hydrophone, B&K8103)、頻譜分析儀(Spectrum Analyzer, PW700)、數據擷取儲存器(Data Logger, CR1000)、訊號產生器(Protek 9300)、擴大機(Altec 9441A)、喇叭(Altec 515-8G)和長方體砂箱。

實驗所用砂箱參考楊估欽(2014)之試驗配置，由厚度 0.8cm 之壓克力板結合而成，砂箱尺寸為內徑長 55cm、寬 20cm、高 115cm，並在上方溢流口以下 10cm 處鑽孔放置水聽器，以下 20cm、30cm、40cm 開孔裝設三組張力計與含水量計，於砂箱底部再鑽設一孔為注、排水口，詳細實驗配置如圖 1。

實驗中使用含水量計 EC-5 來量測土壤體積含水比，經土壤校正精度為 1%~2%，比起以往所使用的 TDR 反應時間來的短，且不需要時時校正，加上張力計 2100F 量測土壤毛細張力的變化量，感測器構造為一具有高傳送性的多孔陶瓷材質覆杯，經由小孔的毛細管與壓力量測裝置相連結，量測前需將管徑內注滿蒸餾水，呈現完全無氣泡狀態再放置於砂箱中，此張力計之優點為量測系統安裝容易且外界影響因子少，可連接轉換器得到所需資料，但實驗過程需非常注意是否有空氣進入管中，一旦有空氣進入所量測之數據就會出現錯誤。利用上者 2 項感測器，即可量測靜態條

件下乾燥過程之保水曲線。

本研究利用訊號產生器產生 3 種低頻率聲波。考慮喇叭與擴大機使用範圍為 10Hz 至 4000Hz，但穩定輸出頻率範圍為 70Hz 至 1000Hz。且陳玟潔(2012)實驗中發現在動態條件下 150Hz 聲波對乾燥過程之保水曲線有影響，因此選擇 150Hz、300 Hz 和 450 Hz 之聲波來進行實驗。擴大機調整聲壓藉由喇叭輸出，再經由水聽器來接收，最後利用頻譜分析儀觀測每次實驗開始前之各頻率聲壓是否一致(1Pa)。

由於本實驗埋設三組不同深度之張力計與含水量計，即砂箱上方溢水口以下 20cm、30cm、40cm 處，分別稱為上、中、下層，因此可針對不同深度所量測之數據加以探討。

實驗步驟：

- (1) 將渥太華標準砂放入烘箱烘烤 12 小時，烘乾後置於烘箱中自然冷卻至室溫，切勿開啟長期接觸空氣。
- (2) 分層鋪砂，首先固定每次倒入砂箱中標準砂之重量，再以夯實器固定高度且固定次數自由落下，夯實結束後以刷子輕輕刷開砂土表面，避免沙土因為局部夯實過於緊密導致土壤明顯分層，因而影響孔隙率分布不均。
- (3) 當砂土表面位於儀器放置孔時，將儀器放入並使用防水膠密封，以避免實驗過程中發生漏水之現象，等待防水膠凝固後，繼續分層鋪砂。
- (4) 由底部注水口緩慢注水直到水面到達砂箱上方溢流口流出，靜待水面穩定後再將水由底部排出。重覆注排水使砂箱內土壤自然沉陷達到穩定。
- (5) 沉陷達到穩定後，將砂箱注滿水達飽和狀態。
- (6) 飽和後靜待一段時間，便開始分段式排水，每次排出固定重量之水量並且待儀器穩定後讀取數據再繼續分段式排水，直到砂箱中的水不再排出為止。
- (7) 將所得數據繪製成聲波影響前乾燥過程之保水曲線。
- (8) 結合訊號產生器、擴大機和喇叭產生特定頻率(150Hz、300 Hz、450 Hz)之聲波，並利用水聽器接收聲波訊號經由頻譜分析儀顯示聲壓，聲壓固定為 1Pa。
- (9) 加入特定頻率之聲波後重複步驟(5)、(6)，所得數據即可繪出聲波影響下乾燥過程之保水曲線。
- (10) 聲波影響完後關閉聲波，再重複步驟(5)、(6)，所得數據繪出之結果為聲波影響後乾燥過程之保水曲線。
- (11) 將所得數據利用 VG 模式回歸求得回歸曲線與形狀因子。

四、實驗結果與討論

本實驗利用三組張力計與含水量計分別在三種不同深度下量測受到聲波(150Hz、300Hz、450Hz)影響下與影響前後之土壤毛細張力與飽和度數據再利用 VG 模式將實驗數據回歸得到回歸曲線與形狀因子 α 、形狀因子 n 。

4-1 受各頻率聲波影響前之保水曲線比較

探討土壤受到 150Hz、300Hz 及 450Hz 之聲波影響前保水曲線之間的差異，分別將下、中、上層受 3 種頻率的聲波影響前之毛細張力和飽和度數據繪製成圖。由圖 2 至圖 4 中可以看出三層土壤受聲波影響前

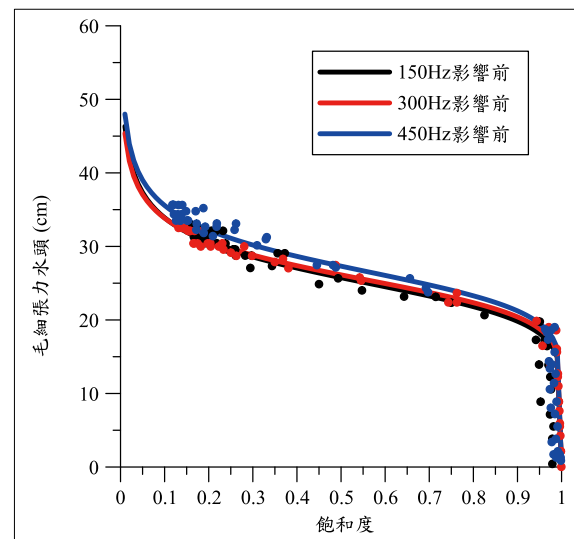


圖 2 下層土壤受各頻率聲波影響前之保水曲線

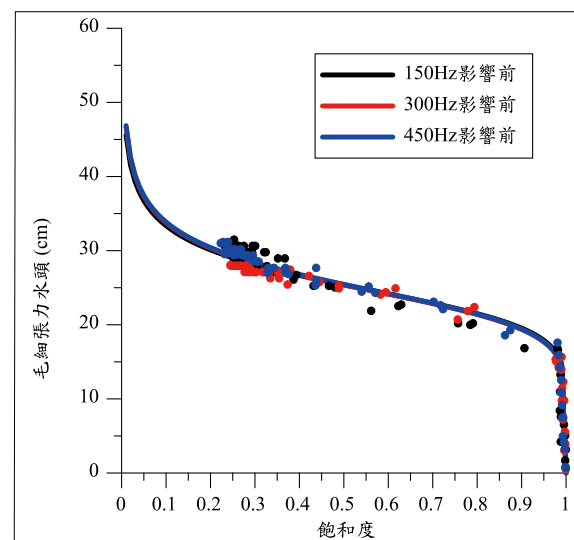


圖 3 中層土壤受各頻率聲波影響前之保水曲線

表 5 土壤受各頻率聲波影響前之回歸參數

	飽和體積含水比(θ_s)	殘餘體積含水比(θ_r)	形狀因子(α)	形狀因子(n)	R^2
下層	150Hz 影響前	0.38	0.0538	0.03964	0.995538
	300Hz 影響前	0.38	0.0538	0.03897	0.991430
	450Hz 影響前	0.38	0.0538	0.03731	0.992160
中層	150Hz 影響前	0.38	0.0538	0.04023	0.991620
	300Hz 影響前	0.38	0.0538	0.04026	0.986423
	450Hz 影響前	0.38	0.0538	0.04015	0.991480
上層	150Hz 影響前	0.38	0.0538	0.04343	0.991844
	300Hz 影響前	0.38	0.0538	0.04361	0.984610
	450Hz 影響前	0.38	0.0538	0.04309	0.992493

表 6 保水曲線受各頻率聲波影響前之平均誤差百分比

	平均誤差百分比(%)	
下層	150Hz 影響前	2.437
	300Hz 影響前	1.038
	450Hz 影響前	0.035
中層	150Hz 影響前	0.457
	300Hz 影響前	0.224
	450Hz 影響前	0.002
上層	150Hz 影響前	3.821
	300Hz 影響前	2.667
	450Hz 影響前	0.017

4-2 土壤保水曲線受聲波影響之變化

圖 5 至圖 7 分別為下、中、上層土壤受到 150Hz 聲波影響下與其聲波影響前後之保水曲線比較圖，由圖中可以發現當土壤受到 150Hz 聲波影響時，三層土壤所得保水曲線之毛細張力皆有下降的趨勢，然而影響毛細張力的主要原因為土體膨脹或沉陷，故判定為土體受到 150Hz 聲波作用下產生膨脹而使毛細張力降低；而當關閉 150Hz 聲波之後，發現保水曲線會恢復到接近聲波影響前之狀態，由此可知土體受到聲波影響造成的膨脹只是暫時性，無聲波影響下仍會產生自然沉陷。表 7 為三層土壤受到 150Hz 聲波影響前後資料回歸相關參數，當毛細張力降低時，形狀因子 α 會隨著毛細張力減少而增加，形狀因子 n 則會隨著毛細張力減少而減少。

當土壤受到 300Hz 聲波影響時，由圖 8 至圖 10 可發現三層土壤所得保水曲線之毛細張力皆有上升的趨勢，也表示當土體受到 300Hz 聲波影響時孔隙有變小的現象。當關閉 300Hz 聲波之後，發現保水曲線不會恢復到聲波影響前之狀態，反而是非常接近聲波影響下之保水曲線，因為無法自然恢復成原來的狀態，因此認為土體受到聲波影響造成的沉陷是永久性影響。表 8 為三層土壤受到 300Hz 聲波影響前後資料回歸相關參數，當毛細張力上升時，形狀因子 α 會隨著毛細張力增加而減少，形狀因子 n 則會隨著毛細張力增加而增加。

由圖 11 至圖 13 可發現當土壤受到 450Hz 聲波影響時，下、中、上層保水曲線之毛細張力皆有上升之趨勢，表示 450Hz 聲波作用下會使土壤出現沉陷之現象，也代表 450Hz 聲波讓土體孔隙率減少導致毛細張力上升。當關閉 450Hz 聲波之後，三層土壤受聲波影響後之保水曲線與聲波影響下之保水曲線幾乎沒有明顯改變，亦說明了沉陷後之土壤無法自然膨脹成彈性波作

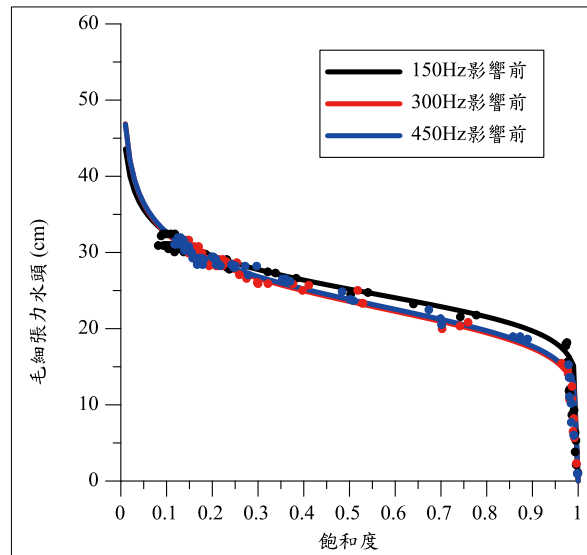


圖 4 上層土壤受各頻率聲波影響前之保水曲線

之保水曲線非常接近，VG 模式回歸出保水曲線之相關參數如表 5，也發現僅有微小之差異，若分別將各層受聲波影響前的保水曲線取平均並當成基準值，進一步求得保水曲線之平均誤差(表 6)，得知其誤差範圍皆小於 4%，故可確認觀測之 VG 曲線是由聲波頻率不同所造成的而不是重複試驗本身的觀測誤差造成。

表 7 頻率 150Hz 聲波影響前後數據之回歸相關參數

	飽和體積含水比(θ_s)	殘餘體積含水比(θ_r)	形狀因子(α)	形狀因子(n)	R^2	
下層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.03964	8.96393	0.995538
	150Hz 影響	0.38	0.0538	0.04352	7.00586	0.983048
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.03755	8.83057	0.990704
中層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.04023	8.59517	0.991620
	150Hz 影響	0.38	0.0538	0.04755	5.95237	0.994029
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.03968	8.60768	0.987928
上層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.04343	7.11852	0.991844
	150Hz 影響	0.38	0.0538	0.05074	6.16561	0.994023
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.04193	7.27432	0.992514

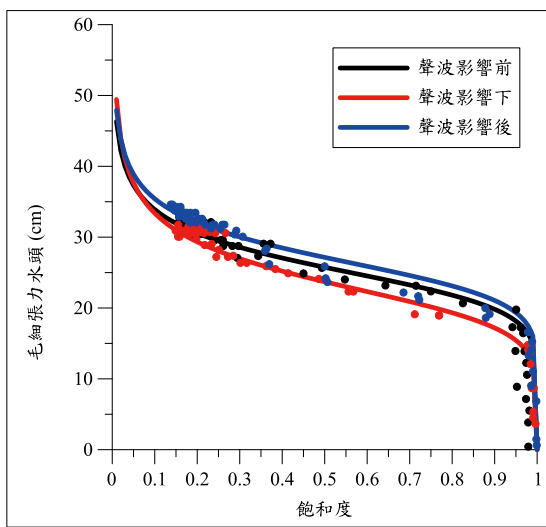


圖 5 下層受 150Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

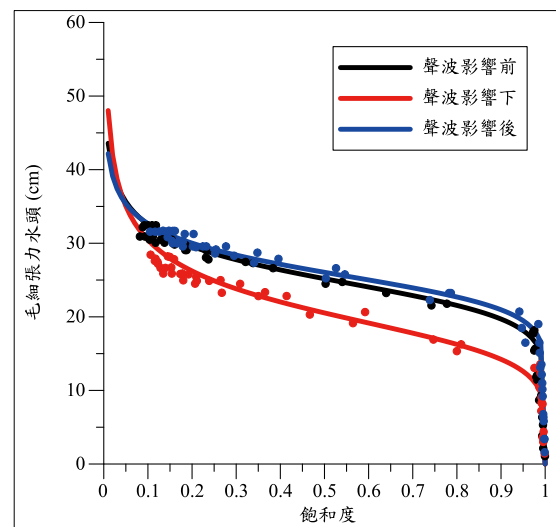


圖 7 上層受 150Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

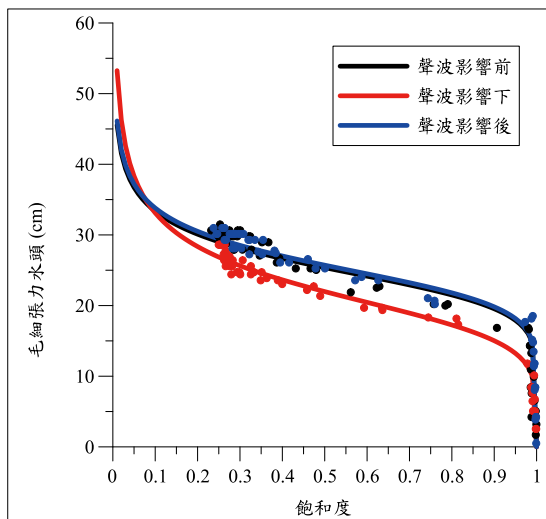


圖 6 中層受 150Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

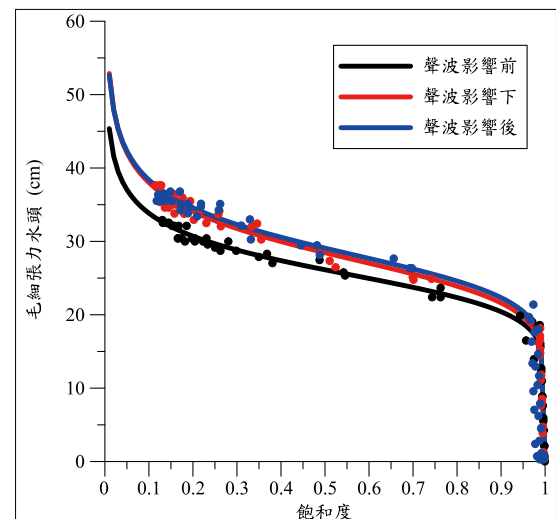


圖 8 下層受 300Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

用前之狀態。表 9 中形狀因子 α 與形狀因子 n 受毛細張力影響甚大，當毛細張力上升時，形狀因子 n 會上升，而形狀因子 α 會下降。

從上述 3 種頻率(150Hz、300Hz、450Hz)之聲波對保水曲線的影響發現，聲波可以使土體膨脹或沉陷，當聲波使土體造成膨脹後，土體會產生自然沉陷而恢復

表 8 頻率 300Hz 聲波影響前後數據之回歸相關參數

	飽和體積含水比(θ_s)	殘餘體積含水比(θ_r)	形狀因子(α)	形狀因子(n)	R^2	
下層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.03897	9.07085	0.991430
	300Hz 影響	0.38	0.0538	0.03595	9.16069	0.987495
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.03511	9.49465	0.990361
中層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.04026	8.27652	0.986423
	300Hz 影響	0.38	0.0538	0.03843	9.39669	0.990625
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.03750	9.59631	0.991288
上層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.04361	7.43126	0.984610
	300Hz 影響	0.38	0.0538	0.04137	8.12955	0.983061
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.04009	8.45562	0.991516

表 9 頻率 450Hz 聲波影響前後數據之回歸相關參數

	飽和體積含水比(θ_s)	殘餘體積含水比(θ_r)	形狀因子(α)	形狀因子(n)	R^2	
下層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.03731	8.89465	0.992160
	450Hz 影響	0.38	0.0538	0.03419	9.90357	0.994366
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.03481	9.84812	0.991748
中層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.04015	8.27630	0.991480
	450Hz 影響	0.38	0.0538	0.03696	9.21864	0.989799
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.03678	9.33014	0.988345
上層	聲波影響前	0.38	0.0538	0.04309	7.55562	0.992493
	450Hz 影響	0.38	0.0538	0.04128	8.16426	0.987457
	聲波影響後	0.38	0.0538	0.04009	8.09949	0.987921

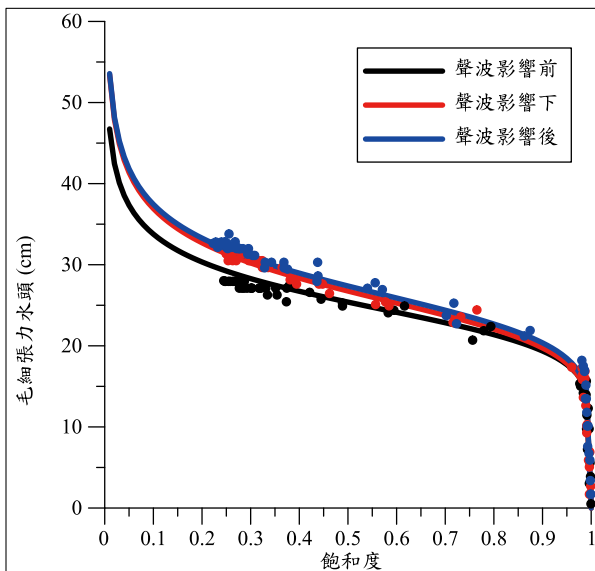


圖 9 中層受 300Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

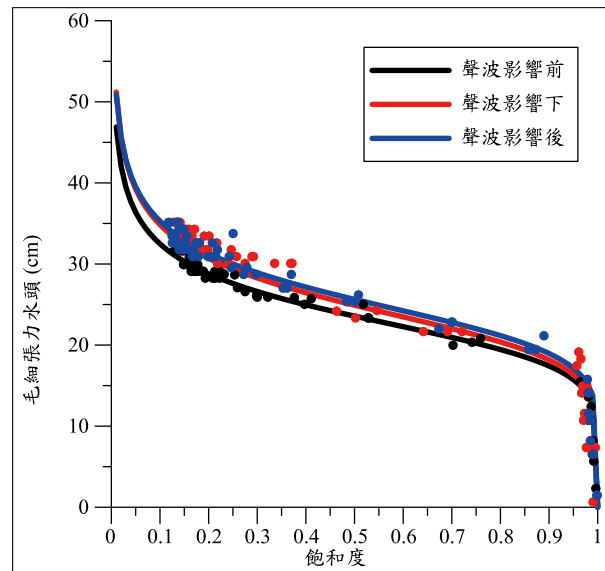


圖 10 上層受 300Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

到聲波影響前之狀態；反之當聲波使土體造成沉陷後，土體則無法恢復到聲波影響前之狀態，故認定聲波使土體膨脹(毛細張力變小)為暫時性影響；使土體沉陷(毛細張力變大)為永久性影響，也從回歸資料中發現形狀因子 α 會隨著毛細張力減少而上升，而形狀因子 n 會隨毛細張力減少而下降。

4-3 三層土壤保水曲線受各頻率聲波影響之比較

實驗中利用三組張力計與含水量計觀察不同深度之土壤受各頻率聲波影響下變化之情形。由圖 14 可發現當土壤受到 150Hz 聲波影響會使三層土壤之毛細張

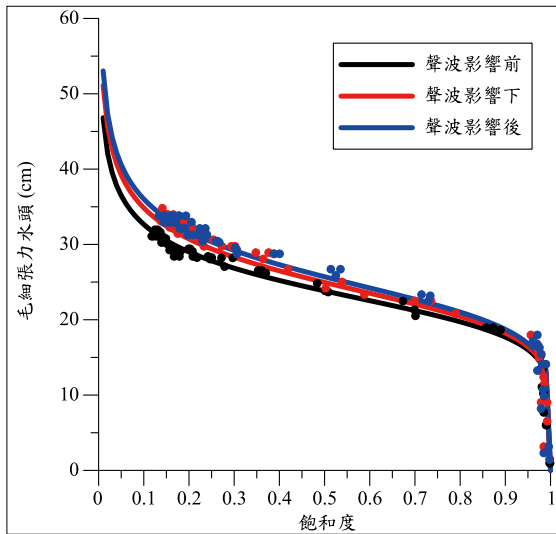


圖 11 下層受 450Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

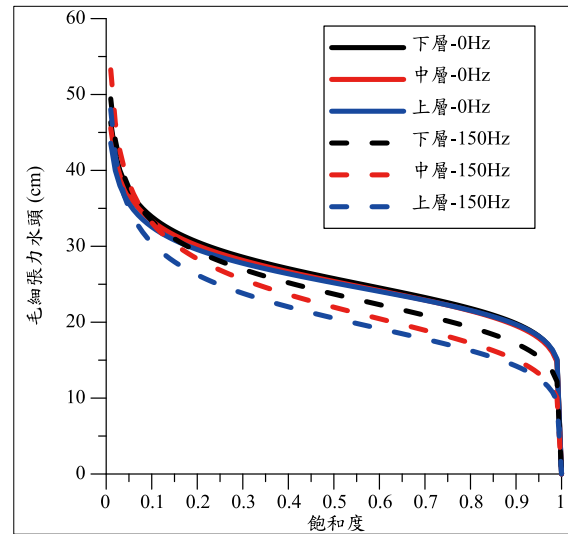


圖 14 三層土壤受 150Hz 聲波影響下保水曲線變化比較圖

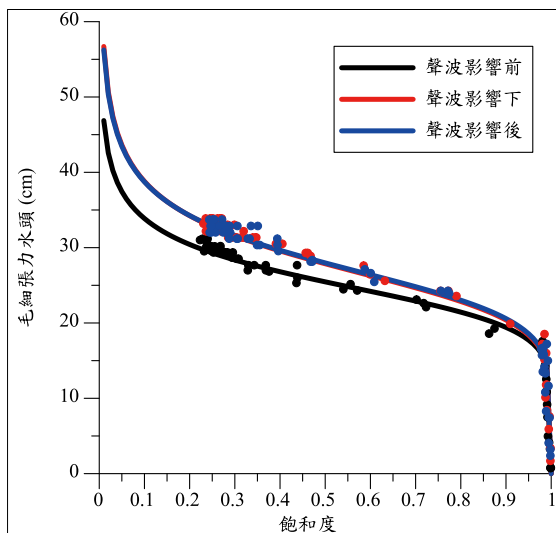


圖 12 中層受 450Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

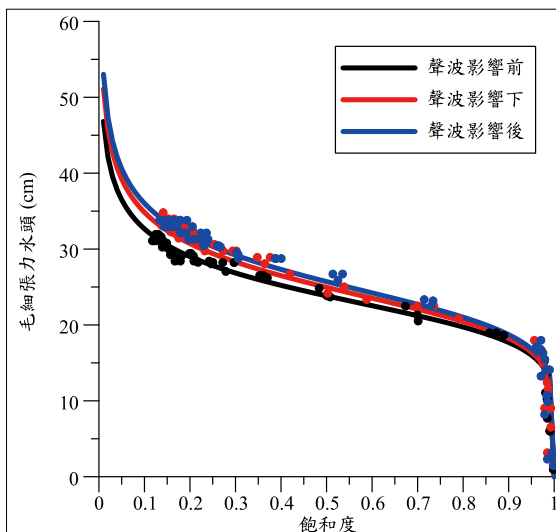


圖 13 上層受 450Hz 聲波影響下與影響前後之保水曲線比較圖

表 10 三層土壤分別受 150Hz、300Hz、450Hz 影響下張力變化表

		平均張力變化百分比(%)
150Hz	下層	-7.63
	中層	-12.52
	上層	-17.69
300Hz	下層	9.01
	中層	6.53
	上層	5.73
450Hz	下層	9.85
	中層	8.64
	上層	5.57

力下降，表示著土體孔隙變大，從表 10 得知張力下降的程度也隨著深度增加而減少，推論其原因是下方的土壤需承受上方土壤之重量，使土體膨脹能力受限。

由圖 15 與圖 16 發現 300Hz 和 450Hz 之聲波皆是使三層土壤之毛細張力上升，代表著土體孔隙受到聲波影響而變小，且同樣從表 10 可以知道毛細張力上升之程度會隨著土壤深度增加而增加，推測土壤受壓後孔隙會隨深度增加逐漸變小。

從實驗結果可以發現聲波使土體膨脹或沉陷之程度會因土壤深度不同而改變，但使土體產生膨脹或是沉陷僅取決於聲波之頻率，並不會隨著土壤深度產生變化。

五、結論

本研究利用渥太華標準砂 C109 作為實驗用砂，第

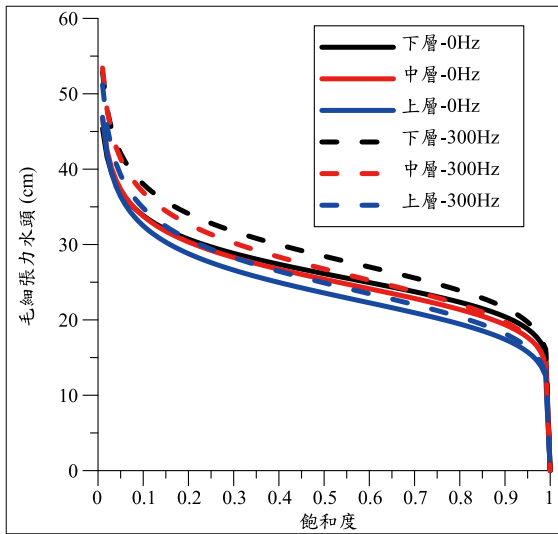


圖 15 三層土壤受 300Hz 聲波影響下保水曲線變化比較圖

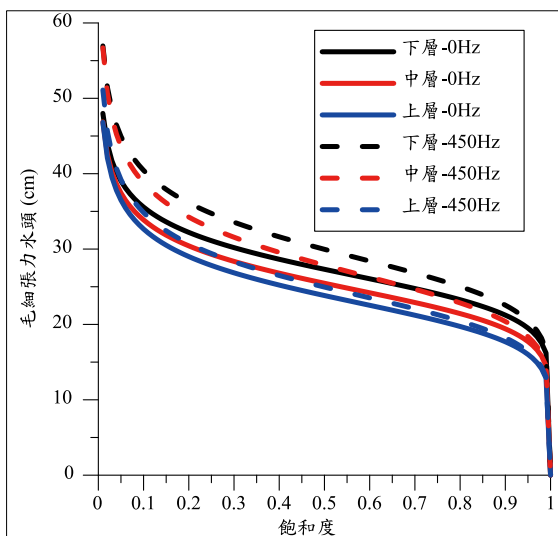


圖 16 三層土壤受 450Hz 聲波影響下保水曲線變化比較圖

一部分由土壤基本性質試驗得到土壤參數，如粒徑分佈、土壤比重、水力傳導係數、殘餘含水比等，這些參數對未來理論推導或模式運算有著重要的參考價值。

第二部分以砂箱試驗模擬真實土壤在靜態條件下之乾燥過程，得到毛細張力與飽和度數據繪製成保水曲線，再結合訊號產生器經由功率放大機及喇叭，由土體上方產生 3 種頻率(150Hz、300Hz、450Hz)為 1Pa 之聲波，並將聲波影響下之土壤毛細張力與飽和度繪製成保水曲線，再利用 van Genuchten (1980)模式得到回歸曲線與形狀因子，探討靜態保水曲線受不同頻率的聲波影響下與影響前後之變化。

實驗結果發現聲波可以使土體產生膨脹或沉陷，當聲波使土體產生膨脹後，土體能以自然沉陷而恢復

到聲波影響前之狀態；反之當聲波使土體沉陷後，土體則無法恢復到聲波影響前之狀態，故認定聲波造成土體膨脹為暫時性影響；造成土體沉陷為永久性影響，也從回歸資料中發現形狀因子 α 會隨著毛細張力減少而上升，而形狀因子 n 則會隨毛細張力減少而下降。本研究的重要發現是觀測到保水曲線受彈性波震動頻率影響之特性，同時確認彈性波對土壤影響為暫時性或是永久性。

此外再將三層土壤受聲波影響下保水曲線之變化情形加以分析，發現聲波使土體膨脹或沉陷之程度會因土壤深度不同而改變，但使土體產生膨脹或是沉陷僅取決於聲波之頻率，並不會隨著土壤深度產生交替變化。

參考文獻

1. Alessi, S., L. Prunty, and W. H. Schu (1992), Infiltration simulations among five hydraulic property model, Soil Science Society of America Journal, Vol. 56, pp. 675-682.
2. Biot, M. A. (1956a), Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, I. Low-frequency range, The Journal of the Acoustical Society of America, 28 (2), pp. 168-178.
3. Biot, M. A. (1956b), Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, II. Higher frequency range, The Journal of the Acoustical Society of America, 28 (2), pp. 179-191.
4. Brooks, R. H., and A. T. Corey (1964), Hydraulic properties of porous media, Colorado State University, Hydrology Paper, No. 3.
5. Brutsaert, W. (1964), The propagation of elastic waves in unconsolidated unsaturated granular mediums, J. Geophys. Res. , 69 (2), pp. 243-257.
6. Brutsaert, W., and J. N. Luthin (1964), The velocity of sound in soils near the surface as a function of the moisture content, J. Geophys. Res. , 69 (4), pp. 643-652.
7. Clapp, R. B., and G. M. Hornberger (1978), Empirical equations for some soil hydraulic-properties, Water Resources Research, Vol. 14, pp. 601-604.
8. Gadiev, S. M. (1977), Use of vibrations in oil producing (Isopol'zovaniye vibratsii v dobyche nefi), Nedra Press (in Russian).
9. Geller, J. T., and L. R. Myer (1995), Ultrasonic imaging of organic liquid contaminants in unconsolidated porous

- media, *J. Contam. Hydrol.*, 19 (2), pp. 85-104.
10. Hutson, J. T., and A. Cass (1987), A retentivity function for use in soil water simulation models. *Journal of Soil Science*, Vol. 38, pp. 105-113.
 11. Kim, Y. U., and M. C. Wang (2003), Effect of ultrasound on oil removal from soils, *Ultrasonics*, 41 (7), pp. 539-542.
 12. Lo, W. C., G. Sposito, and E. Majer (2005), Wave propagation through elastic porous media containing two immiscible fluids, *Water Resources Research*, Vol. 41, W02025.
 13. Lo, W. C., G. Sposito and Y. H. Huang (2012), Modeling Seismic Stimulation: Enhanced Non-aqueous Fluid Extraction from Saturated Porous Media Under Pore-pressure Pulsing at Low Frequencies, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 78, pp. 77-84.
 14. van Genuchten, M. T. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science of America journal*, 44 (5), pp. 892-898.
 15. Wu, T. T., J. S. Fang, and P. L. Liu (1995), Detection of the depth of a surface-breaking crack using transient elastic waves, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, pp. 1678-1686.
 16. 林子雲(2003), 鹽化土壤遲滯現象之研究, 國立臺灣大學生物環境系統工程學系研究所碩士論文。
 17. 劉明鑫(1999), 非破壞檢測混凝土工程性質之研究, 國立臺灣科技大學營建工程研究所碩士論文。
 18. 莊永源(2013), 震波對提升孔彈性介質中流體流量之實驗研究, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
 19. 陳玟潔(2012), 壓力波對保水曲線特性之實驗影響評估, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
 20. 楊佶欽(2014), 非飽和土壤乾燥保水曲線在震動環境下動態變化之研究, 國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
- 收稿日期：民國 108 年 06 月 18 日
修正日期：民國 109 年 01 月 20 日
接受日期：民國 109 年 02 月 07 日