

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 地球科學科

040503

水土交融－泥中水的行為

國立宜蘭高級中學

作者姓名：

高二 鄭宇昕 高二 林郁峰 高二 陳煒栩

高二 簡任廷

指導老師：

陳可恭

第四十五屆中小學科學展覽會

作品說明書

科別： 地球科學組

組別： 高中組

作品名稱： 水土交融—泥中水的行為

關鍵詞： 淘選度、孔隙率、表面張力

編號：

壹、摘要

土壤中的水可分為水膜水、游離水及毛細管水，因土壤具有這些不同形式的水分和難以抹除的空氣、礦物質，使其孔隙率不但多變，也成為影響土壤性質的重要因素；鑒於此因，土壤成為一種複雜的非等向性、非均勻的材料。

我們從種植盆栽的觀點切入，對土壤的吸水速度、滲透性及含水量加以討論；並以自製器具，測量土壤對水的特性。除了探討其趨勢外，也試圖套入理論及公式來落實想法，並以塑膠珠的含水量實驗，來強化不同粒徑的保水方式，補足土壤含水量實驗不足處。

此外也參考了部分盆栽用土需要將土分層的現象，將粒徑分析後的土壤以不同程序將土壤分層排列，再經由這些測量出來的數值，找出最適合種植的土壤排列方式。

貳、研究動機

因緣際會下，我們因盆栽而迷戀上土壤與水之間的關係，執著於粒徑的變化，製作了稀奇古怪的工具，希望從含水量、吸水速率和滲透性中能見微知著來參透土壤的奧祕。

參、研究目的

- 一、探討土壤顆粒粒徑對含水量之影響。
- 二、以毛細作用及水壓作用高低的觀點切入，探討土壤顆粒粒徑對垂直吸水速率之影響。
- 三、模擬潮濕環境下的土壤，觀察土壤顆粒粒徑對滲透性之影響。
- 四、以上述諸點為依據，建立數值表並討論其異同。
- 五、歸納一些測驗土壤的簡易試驗，並以之找出適合植物生長的土壤。

肆、研究設備及器材

一、土壤樣本

二、實驗器材：濾網（10目／吋、20目／吋、40目／吋、60目／吋、120目／吋、240目／吋）、透明水管（高30cm，內直徑18.15mm）、塑膠珠（粒徑16、14、12、10、8、6、5.2mm）。

伍、研究過程與方法

一、土壤之取得及分類：

(一) 土壤之取得及處理：

原土取自宜蘭縣員山鄉太陽埤山頂，收集後鋪平於報紙上曝曬，再以電風扇連續吹一天；挑去雜物（樹枝、樹根等）即得樣本試土。

(二) 土壤分類：

1. 初步分類：

將試土倒入自製篩網分類（照片 1）（網目共有 10 目、20 目、40 目、60 目、120 目、240 目六種），即得樣土（樣本試土）甲（10~20 目）、樣土乙（20~40 目）、樣土丙（40~60 目）、樣土丁（60~120 目）、樣土戊（120~240 目）共 5 種。



（照片 1）



（照片 2）

2. 再分類：

將初步分類之樣土任兩種等量上下排列於實驗器具中（照片 2）即得分層樣土，如【甲乙】（10~20 目在上，20~40 目在下），共 $P^5_2 = 20$ 種，加上樣土上序（樣土甲乙丙丁戊各 1/5 量，由上往下依序排列）、下序（與上序相反）、樣土混合（樣土甲乙丙丁戊各 1/5 量，隨機混合）及原先之 5 種樣土，共得 28 種樣土。

(三) 分類依據：

參照中山自然科學大辭典 (P.366)；樣土甲為最粗砂、乙為粗砂、丙為中粒砂、丁為細砂、戊為微砂，使分類較有意義，另外分層排列以及混合則為了探討混合用土時之差異。

二、核心實驗：

(一) 含水量之測量：

1. 實驗目的：

藉由簡易吸水實驗，了解顆粒粒徑大小與含水量之關係。

2. 實驗器具製作：

取寶特瓶上半部，於瓶口處固定上濾網（240 目），即成含水量測定器。（照片 3）

3. 實驗方式：

取含水量測定器 28 只，分別裝入樣土 100g（甲~戊、甲乙~丁戊、上序、下序、混合，共 28 種），將填裝好的測定器置於儲水盆內（照片 4）（水面約與土等高），靜置半日之後，再將測定器取出放於陰暗處靜置半日，秤量其末重。



（照片 3）



（照片 4）



（照片 5）

4.運算式：

$$w = \frac{(W - W_s)}{W_s} 100\%$$

(二) 垂直吸水速率之測定：

1.實驗目的：

觀察水分在等高且不同粒徑土壤間的上升速度率。

2.實驗器具製作：

截取 PVC 管 30cm 為一段，將塑膠管一端開口覆上濾網（240 目），即成垂直吸水速率測定器（照片 5）。

3.實驗方式：

取塑膠管（內直徑 18.15mm）分別置入各樣土至 100mm 高，再置於儲水盆內（水高約距管底 40mm），紀錄水位自管底到土壤全濕（110mm 處）之時間。（照片 6）

PS：全濕：土壤色澤由淺色全部轉變為深色，規定以觀察土壤頂層為準（照片 7）。

4.運算式：

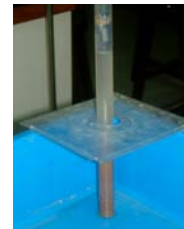
$$V = \frac{H_s (\text{土壤垂直高})}{T (\text{總時間})} (\text{單位 :mm/s})$$



（照片 6）



（照片 7）



（照片 8）

(三) 滲透性之測定：

1.實驗目的：

將水注入飽土（吸飽水的泥土），測量不同粒徑的土壤滲透性

2.實驗器具製作：

使用（二）垂直吸水速率之測定器（截面積為 2.58cm²）

3.實驗方式：

將（二）測量好的器材（塑膠管+飽土）微微傾斜，緩緩加水至管頂，紀錄水自管頂下降到距頂 10cm 處之時間，製成表格。（照片 8）

4. 運算式：

$$V_W (\text{水之體積}) = H_W (\text{水位下降高度}) \times A (\text{水管截面積})$$

$$Q = \frac{V_W (\text{水之體積})}{T (\text{總時間})} (\text{單位 :ml/s})$$



（照片 9）

三、標定實驗：

（一）滲入速率之測定－水平方向及垂直方向：

1.實驗目的：

了解樣土對水分滲入影響是否有其規律，並比較垂直與水平方向之異同。

2.實驗器具製作：

(1)垂直滲入速率：

於底片盒底部接上細管，並在側面接上吸管，最後將底片盒放在吸水速率測定器上方，即為垂直滲入速率測定器。(照片 9)

(2)水平滲入速率：

在 PVC 管一近管口處端打 8 個兩兩對稱的小洞(洞口高度必低於土壤高)，並在小洞上方 1cm 處接上吸管，再將有洞端固定於圓形餅乾盒蓋(內直徑 18.2cm 深 0.13mm)中心，即為水平滲入速率測定器(照片 10)。

3.實驗方式：

(1)垂直滲入速率：

測定器分別置入樣土(甲~戊)至高 200mm 處(土高採一定，且加入後不加以敲擊)，將水倒入底片盒，使水從細管流入土中，多餘的水從上方吸管流出，紀錄水滲入至底部所需之時間。(照片 11)

(2)水平滲入速率：

測定器分別置入樣土(甲~戊)至全滿，以滴定管滴定(水量採持續供應)鐵蓋中央之 PVC 管，使水從管壁小孔流出，多餘的水從上方吸管流出，紀錄水由中心滲入至整個截面所需之時間。(照片 12)

4.運算式：

$$[\text{垂直滲入速率}]V_z = \frac{H(\text{滲入之高度})}{T(\text{總時間})} (\text{單位 :mm/s})$$

$$[\text{水平滲入速率}]V_x = \frac{A(\text{滲入之截面積})}{T(\text{總時間})} (\text{單位 :mm}^2/\text{s})$$



(照片 10)



(照片 11)



(照片 12)

(二) 吸水速率之測定—高水壓及低水壓：

1.實驗目的：

觀察水分在等高土壤間的上升速率，並比較高、低水壓之間的異同

2.實驗器具製作：

使用垂直吸水速率之測定器(截面積為 2.58cm²)

3.實驗方式：

(1)低水壓吸水速率：

同二、(二) 垂直吸水速率(水高約距管底 40mm)

(2)高水壓吸水速率：

同二、(二) 垂直吸水速率(水高約距管底 90mm)

4.運算式：

$$[\text{低水壓吸水速率}] V = \frac{H_s(\text{土壤垂直高})}{T(\text{總時間})} (\text{單位 : mm/s})$$

$$[\text{高水壓吸水速率}] V_h = \frac{H_s(\text{土壤垂直高})}{T(\text{總時間})} (\text{單位 : mm/s})$$

(三) 塑膠珠的含水實驗：

1.實驗目的：

探討水分子附著於塑膠珠的型態，強化實驗結果的分析

2.實驗器具製作：

同二、(一)含水量之測定器

3.實驗方式：

同二、(一)含水量，唯一不同點是分別取不同粒徑塑膠珠（粒徑分別為 16、14、12、10、8、6、5.2mm）分別置入含水量測定器（各塑膠珠的總量為等體積）

4. 運算式：

$$w = W_{\text{濕}} - W_{\text{乾}} (\text{單位 : g})$$

(四)、孔隙直徑之測定（間接）：

1.實驗目的：

製作可測定毛細現象的管柱，先測得不同粒徑的土壤之上升高度，再依上升高度逆推得到不同 D_{10} （有效粒徑）的土壤之孔隙直徑

2.實驗器具製作：

使用垂直吸水速率之測定器（截面積為 2.58cm^2 ）（pvc 管長度改取 600mm）

3.實驗方式：

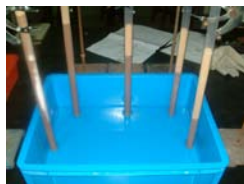
取測定器分別置入樣土（甲~戊）至全滿，再將測定器固定於架上放入盆中（管底略高於盆底），然後將水加入盆中至約高於管底 1cm 處，靜置三天後，測量水位距水面的距離。（照片 13、14）

4.運算式：

$$d(\text{孔隙直徑}) = \frac{(0.309) \times [1 - (0.0027) \times (T - T_0)]}{h_c(\text{上升高度}[cm])} (\text{單位 : cm})$$



(照片 13)



(照片 14)

陸、研究結果

一、含水量之測量：

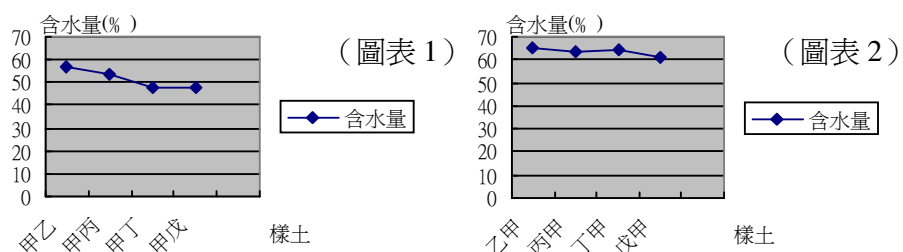
含水量數據如下表（一）【詳細數據請見附錄四】，可知下述幾點：

表（一）

樣土	甲（10~20 目）	乙（20~40 目）	丙（40~60 目）	丁（60~120 目）	戊（120~240 目）
平均含水量	58.68%	65.1%	65.12%	55.97%	54.35%

（一）單層大致為顆粒越細，含水量越多，獨丁與戊的含量遽減。

（二）雙層排列者，顆粒大者在下可含較多的水(如【甲乙】與【乙甲】)。(圖表 1、2)



（三）【X 戊】(X 為甲~丙中任一數)或【X 丁】含水量明顯遽減。

（四）由於本實驗樣土是基於粗略的篩選法，故所謂的不同顆粒粒徑只能說是一群類似大小的鬆散非黏性土壤。長時間浸水下，可塑性將增加，間接地使實驗差異性降低。

二、垂直吸水速率之測定：

（一）低壓吸水速率：

1. 顆粒越小者吸水速率越大（【戊】除外），速率最高約為 1.093mm/s（60~120 目之間）。

2. 【戊】的速率遽降（吸水速率降至 0.103mm/s 左右）。

表（二） 【詳細實驗內容請參照附錄一】

樣土	甲（10~20 目）	乙（20~40 目）	丙（40~60 目）	丁（60~120 目）	戊（120~240 目）
平均吸水速率	0.262mm/s	0.731 mm/s	1.008 mm/s	1.093 mm/s	0.103 mm/s

（二）高壓吸水速率：

1. 顆粒越大反而吸水速率越快，【甲】可達 3.458mm/s

表（三）

樣土	甲（10~20 目）	乙（20~40 目）	丙（40~60 目）	丁（60~120 目）	戊（120~240 目）
平均吸水速率	3.458 mm/s	1.912 mm/s	1.190 mm/s	0.729 mm/s	0.376 mm/s

（三）分層排列之現象：

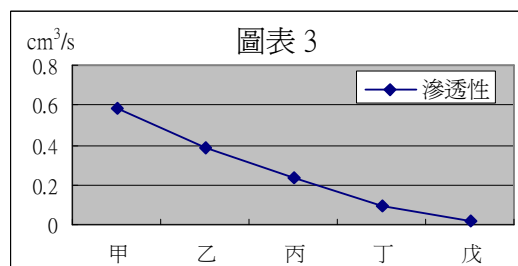
- 1.分層排列之低水壓實驗（水高在 4cm 處），上層之型態較接近於（一）之結果，下層之型態則較接近於（二）之結果。
- 2.若下層為【丁】、【戊】，則吸水速率均慢。
- 3.不論高低水壓，吸水速率皆是下序>上序（粗~細）>混合。

表（四）

樣土（低壓）	甲乙	甲丙	甲丁	甲戊
平均吸水速率	0.229 mm/s	0.157 mm/s	0.039 mm/s	0.068 mm/s
樣土（低壓）	乙甲	丙甲	丁甲	戊甲
平均吸水速率	1.039 mm/s	1.043 mm/s	0.512 mm/s	0.126 mm/s

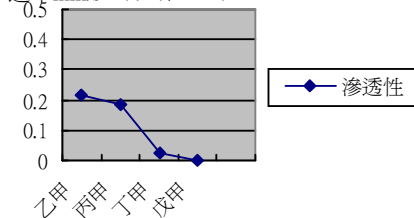
三、滲透性之測定：

- （一）顆粒粒徑越大滲透性越好（圖表 3）。【詳細實驗內容請參照附錄二】

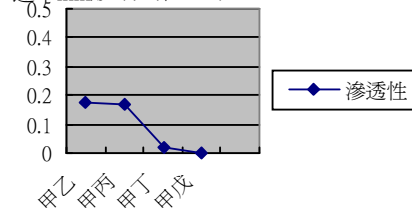


- （二）雙層排列的圖形相比，小顆粒在下者滲透性稍差，然大致類似。

速率mm/s（圖表 4）



速率mm/s（圖表 5）



- （三）隨機混合之滲透性比上、下序好很多。

四、滲入速度：

- （一）垂直滲入速度：

表（五）【詳細實驗內容請參照附錄三】

樣土	甲（10~20 目）	乙（20~40 目）	丙（40~60 目）	丁（60~120 目）	戊（120~240 目）
平滲水速率	10.91mm/s	3.55mm/s	2.30mm/s	1.08mm/s	0.57mm/s

- 1.同上一點之滲透性，亦為顆粒大者滲水快。

(二) 水平滲入速率：

表（六）

樣土	甲	乙	丙	丁	戊
平均滲入速率	619.4mm ² /s	307.26mm ² /s	167.83mm ² /s	79.23mm ² /s	38.07mm ² /s

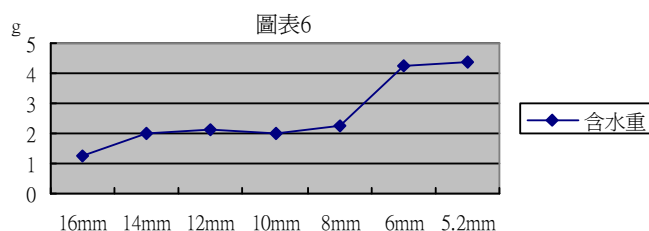
1. 水平滲入速率隨粒徑變小而越慢

五、塑膠珠：

(一) 粒徑在 16mm~8mm 時，含水量的差距約只有 0.5g，而到了 6mm 之時，差距明顯增加，之後又緩和下來。(圖表 6)

表（七）

塑膠珠	16mm	14mm	12mm	10mm	8mm	6mm	5.2mm
含水重	1.25g	1.97g	2.10g	2.03g	2.25g	4.22g	4.38g



六、孔隙直徑(d)之測定：

表（八）

	甲	乙	丙	丁	戊
D ₁₀ (cm)	0.134	0.067	0.044	0.022	0.011
d(cm)	0.022	0.015	0.012	0.008	0.006
D ₁₀ /d	6.031	4.408	3.572	2.783	1.856

(一) 據土力與基礎(趙國華)所述，非黏性土壤可用 D₁₀ 的 1/5 代替 d，因此我們可由表(九)得知，甲、乙大致屬非黏性土壤，丁、戊較趨黏性土壤。

七、含水量、垂直吸水速率(低水壓)、滲透性綜合之探討：

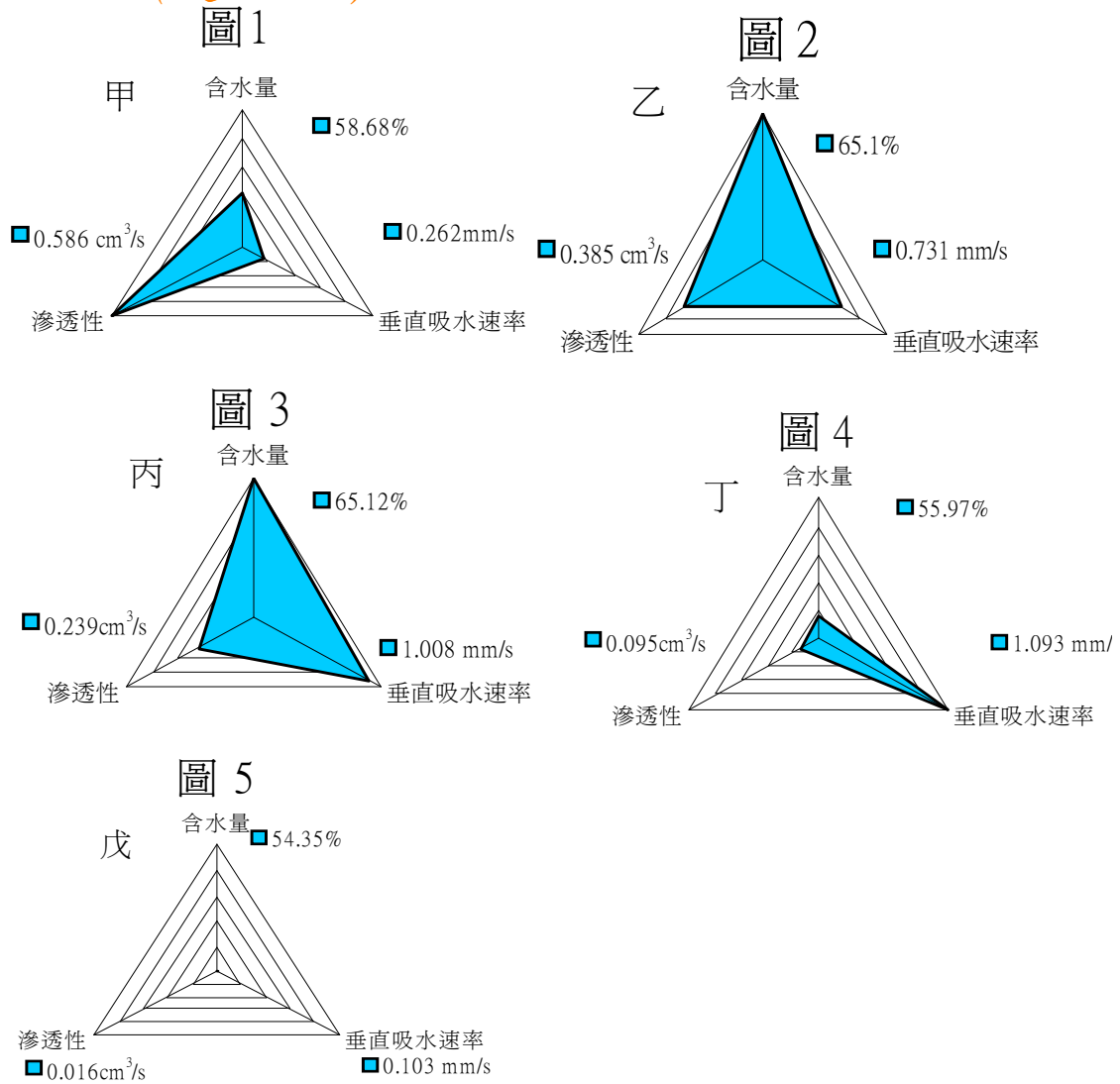
(一) 樣土甲~戊之比較：

(表九)

分類	含水量	吸水速率	滲透性	適宜用途
甲	中	低	最高	排水
乙	最高	高	高	儲存水分
丙	最高	高	中	儲存水分
丁	低	最高	低	雨量少時儲水
戊	最低	最低	最低	絕水體

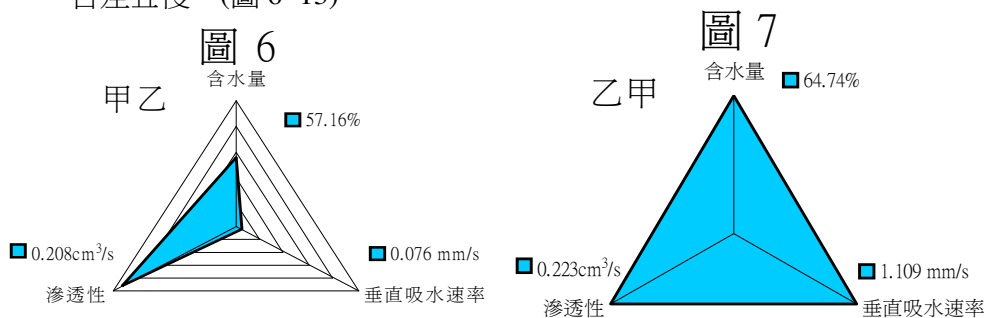
由於滲透性、吸水速率和含水量的數值大小相差甚大，因此我們將三項數值歸一化製成上圖，刻度以100為最大值，0為最小值，每10單位為間距。

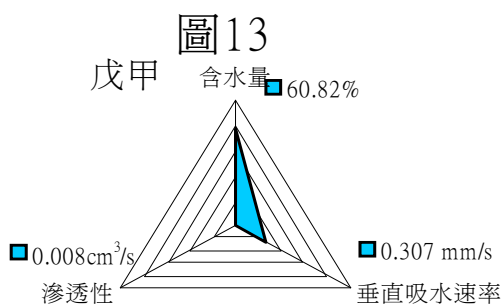
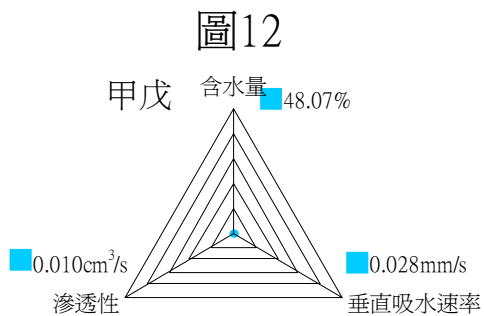
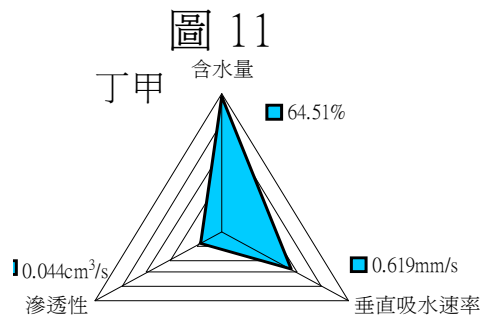
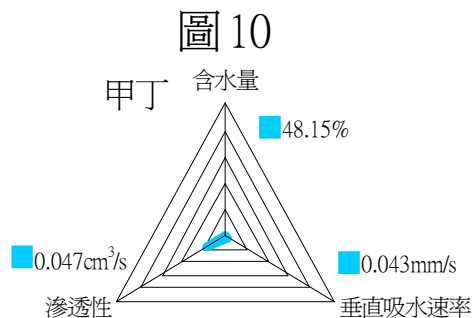
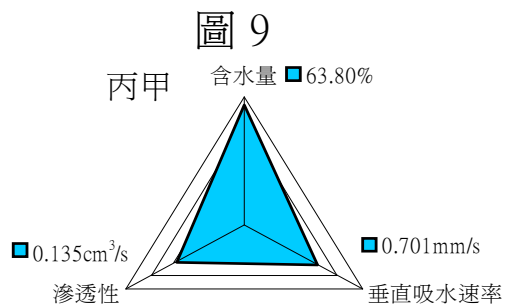
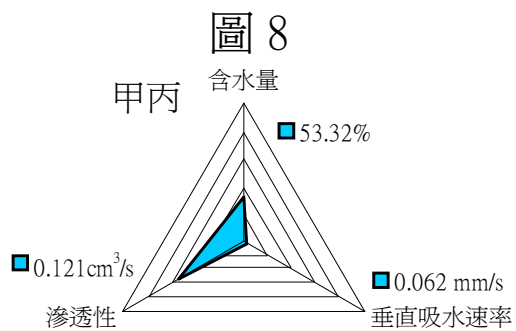
運算式：
$$\frac{(X - \text{Min}) \times 100}{(N\text{之Max} - \text{Min})}$$
 [N為28種樣土任一種，X為實際測量值]



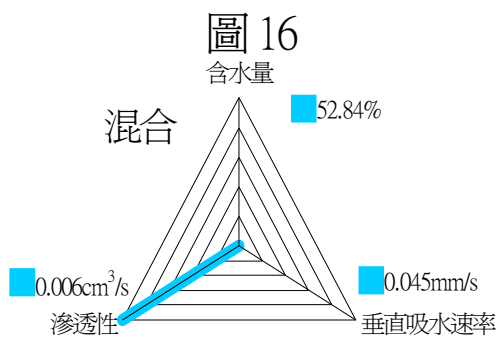
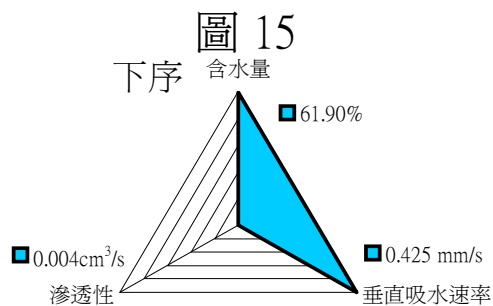
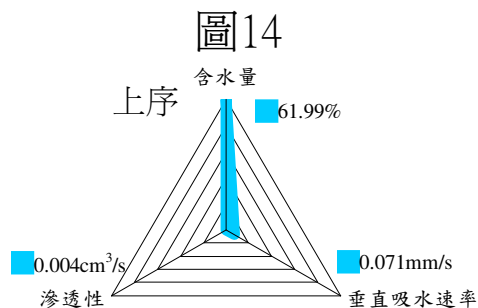
(二) 雙層之比較：

1. 雙層排列中，粒徑上大下小之組合，其含水量、滲透性和吸水速率大都比對調之組合差且慢。(圖 6~13)





2.上、下序含水量、滲透性都差不多，但下序吸水速率較上序快，而混合只有滲透性較好。(圖 14~16)



柒、 討 論

一、由實驗結果，可發現粒徑大小對含水量的影響不盡相同，推測排列緊密程度、孔隙率和保水方式是影響的主因。

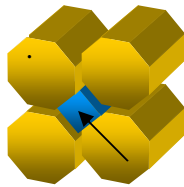
（一）保水方式：

由實驗數據，可發現粒徑大小在 $2^3\text{mm} \sim 2^{13/5}\text{mm}$ 之間和 $2^{-2}\text{mm} \sim 2^{-3}\text{mm}$ 之間，含水量分別出現了明顯落差；推測這個落差就是區分三種保水方式（圖 17~19）的臨界區段。

會造成圖 17、18，這兩種不同的保水方式，主因應是粒徑大小的不同；由於粒徑在 2^3mm 以上其個別表面積較大，加入水分時，水分無法在表面上形成較堅固的水膜包覆整個顆粒。此外，因帶正電之水分子常被土粒表面負電粒子所吸附，所以附著水層厚度與其總帶電量及附著水分子之多寡有關，土粒越細則附著水層厚度與其本身粒徑大小之比值較大，故附著水層內之吸引力對細小土壤性能(如可塑性)有重要的決定性；由於附著水具有膠糊性質之稠性作用，故附著水層厚度大者，其土粒間可塑性(Plasticity)較好，土粒越細，此作用越顯著，相對的土粒間黏著力(Adhesion)和聚合力(Cohesion)也就越強，使土粒與土粒之間再度結合，因此總表面積相對就減少許多，所以粒徑在 2^{-3}mm 以下時含水量就此減少。

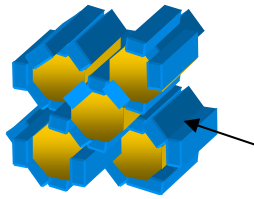
而當粒徑約在 $2^{13/5} \sim 2^{-2}\text{mm}$ 之間，保水方式以水膜存在，在此條件下，粒徑越小，總表面積就越大，相對含水量則越多。

圖 17



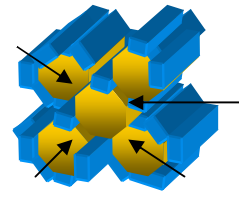
水存在孔隙之間

圖 18



水包覆在土壤周圍形成水膜

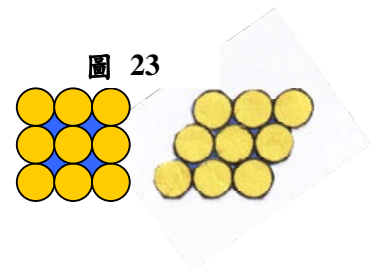
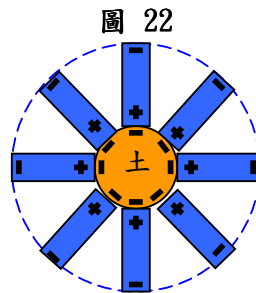
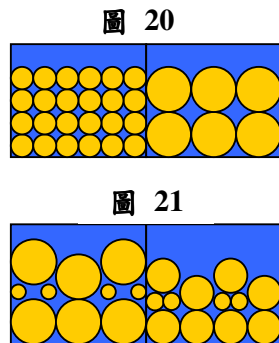
圖 19



顆粒間水膜消失

(二) 孔隙率和排列緊密程度：

由於實驗樣土經過粒級分析，理論上不論粒徑大小，淘選度是一樣的，且在相同排列緊密程度下，孔隙率也會相同（圖 20）。但由於器材限制，粒級分析時不夠嚴謹，使得大顆粒間混雜著小顆粒（圖 21），此一現象於粒徑越大時會越明顯，故實際上淘選度會隨粒徑變小而變好，相對的細質土壤的孔隙率會大於粗質土壤，因此當粒徑在 $2^{13/5} \sim 2^{-2} \text{mm}$ 時粒徑越小含水量就會越大。而自然狀態下，土粒並非完整圓形，且排列緊密程度也不盡相同，因此當粒徑很小時（ $2^{-2} \text{mm} \sim 2^{-3} \text{mm}$ 以下），電荷強度較大（圖 22），呈現高度表面活性，使得土粒排列緊密程度提高（圖 23），造成孔隙率大幅縮減，故含水量曲線到丁、戊之後遽降。



二、我們想藉由滲透性的實驗來求得滲透性係數 K ，並以 A. Hazen 的約估法來輔助參考。

$$\text{Darcy's} \quad K = \frac{Q \times L}{h \times A}$$

(Q 為單位時間通過 A 之流量、 A 為斷面積、 h 為水頭差、 L 為試樣長)

$$\text{A. Hazen 約估法} \quad K = C \times D_{10}^2 \quad (\text{單位 : cm/s})$$

[C 為 100 ~ 150 之常數， D_{10} 為有效粒徑 (cm)]

我們代入各土壤的 D_{10} ，大略推出 K_H ，然此方式並不考慮孔隙率的變化或土粒形狀等。

在粒徑分佈曲線（一塊土樣經粒徑分析後，依通過量百分比所做成的曲線）上，通過的百分比為 10% 時，其相對之土粒粒徑 D_{10} 為有效粒徑。假設我們篩過的土壤均勻分佈在每一粒徑中，故 10 目到 20 目間的土壤有效粒徑應為 19 目所對應的粒徑 (1.337mm)，其他以同樣方式推導；以 D_{10} 算出大略的 K_H ，分別加以比較。【詳細實驗內容請參照附錄五】

A . Hazen 的方程式不能直接得出雙層排列的 K_H ，因此必須將這兩種土壤分開討論；我們聯想到國中談電學時，曾以水流比擬電流加以說明，而電學有效電阻的概念是眾所皆知的，於是就想到：水流經土壤的滲透性是否也有此特性？我們便找出電流的計算式與 Darcy 方程式加以比較，式子如下：

$$Q \text{ (滲透性)} = \frac{K \times h}{L \times A} \text{ (Darcy's)} \rightarrow \frac{h}{Q} = \frac{L}{A \times K} \text{ - (1)}$$

$$R = \frac{V}{I} \text{ (Ohm's law)} = \frac{\rho \times L}{A} \text{ - (2)}$$

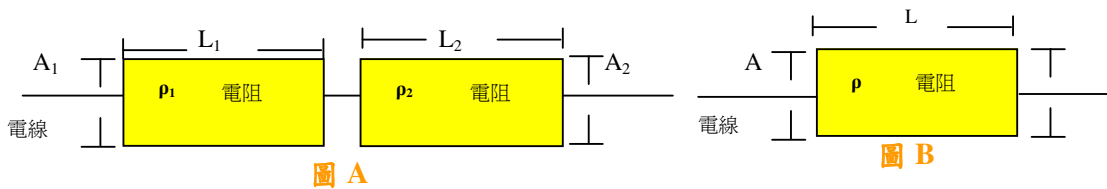
比較 (1) 和 (2) 有多點相同，因此把等效電阻與串聯的滲透性連結在一起

$$\because R_1 + R_2 = R \rightarrow \frac{V_1}{I_1} + \frac{V_2}{I_2} = \frac{V}{I} \rightarrow \frac{\rho_1 \times L_1}{A_1} + \frac{\rho_2 \times L_2}{A_2} = \frac{\rho \times L}{A} \text{ (圖A、B)}$$

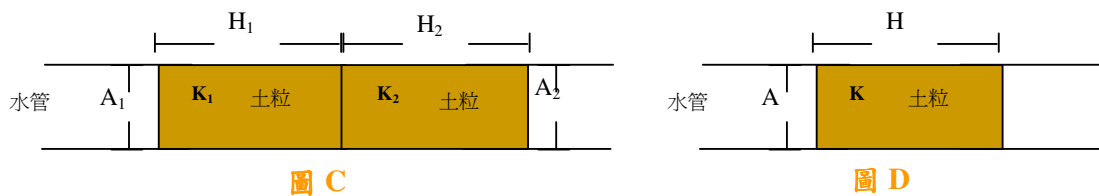
$$\therefore \frac{h_1}{Q_1} + \frac{h_2}{Q_2} = \frac{h}{Q} \rightarrow \frac{L_1}{K_1 \times A_1} + \frac{L_2}{K_2 \times A_2} = \frac{L}{K \times A} \rightarrow \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} = \frac{2}{K}$$

$$\left(\text{本實驗 } L_1 = L_2 = \frac{L}{2} \text{ 且 } A_1 = A_2 = A \right) \text{ (圖C、D)}$$

A、B 圖之電阻效果相等



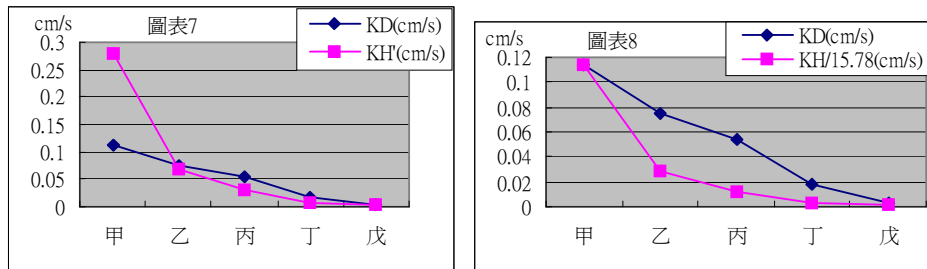
聯想圖 (等效電阻→滲透性)



比較依 H. Darcy 和 A. Hazen 的式子所求的 K_D 和 K_H ，我們依其 K_H/K_D 之平均值，重新定出數個參考值 C' （考量到孔隙率等皆不同， C' 值見附錄五），並就此 C' 重定 K_H' ，就 K_H' 及 K_D 之圖形趨勢，分為三方面來探討：

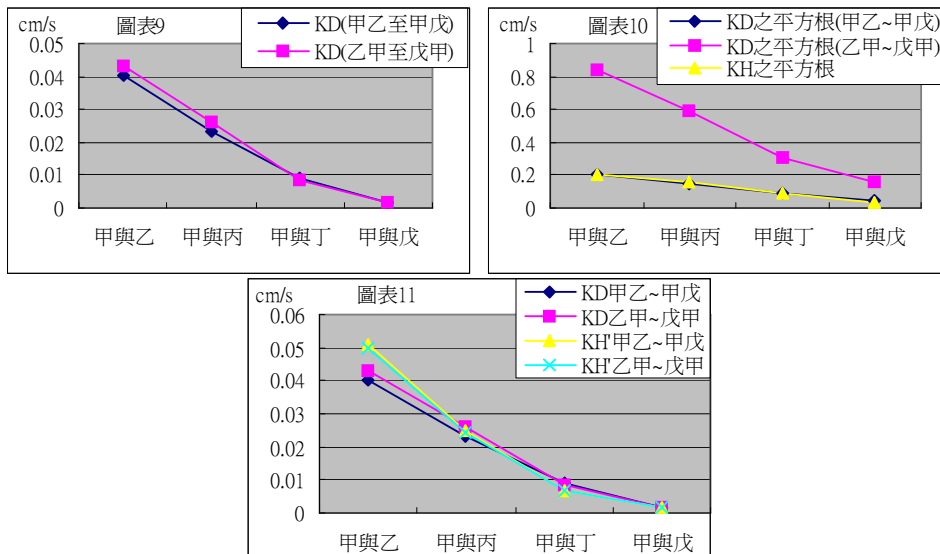
（一）依 Darcy 所求之 K_D 與修正 Hazen 之 C' 後的 K_H' 之比較（【甲】～【戊】）：

以數據製成實際曲線（圖表 7）及將 $K_{甲}$ 值調整到類似高度的方式成比例做圖（圖表 8）；相較下【甲】之 K_D 較小，可能是實驗誤差或 K 值有一個較難突破的臨界值。

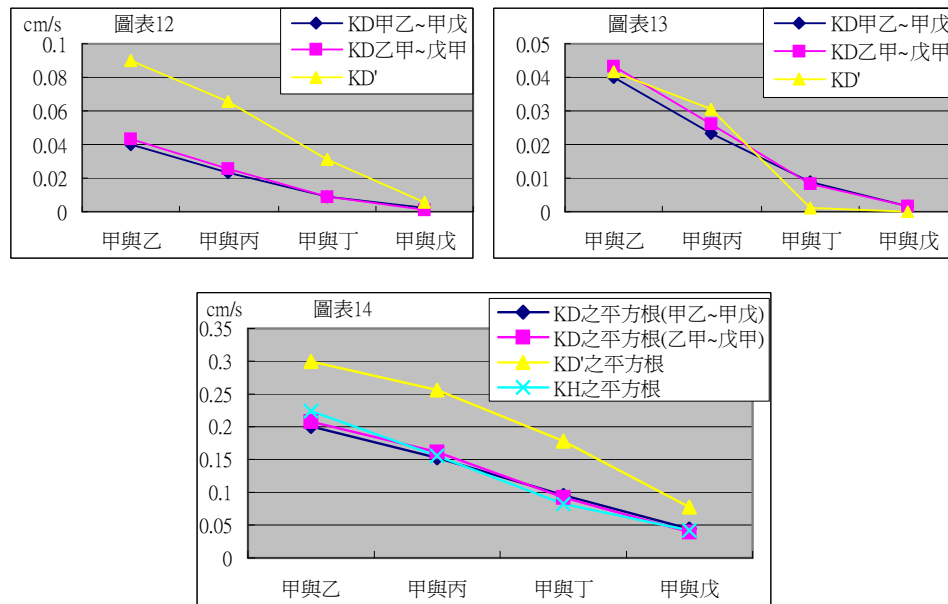


（二）依 Darcy 所求之 K_D 與修正 Hazen 之 C' 後的 K_H 之比較（雙層部分）：

依先前的計算方式，理論上【甲乙】～【甲戊】之 K_D 與【乙甲】～【戊甲】之 K_D 曲線應相等，而從滲透性實驗中可發現這兩組的 Q 大致類似、曲線極為相像（圖表 9）；各組取根號後之圖形，亦呈斜直線性（圖表 10）（由 Hazen 公式之 D_{10}^2 可推知）；調整曲線後， K_D 與 K_H 之曲線也幾乎一致（圖表 11），表示滲透性的等效性假設合理。至於其 K_H/K_D 之平均值遠高於【甲】～【戊】者（大約相差一倍），可看成後面所述界面斷層（見討論三）所帶來的影響。



(三) 由 K_D (【甲】~【戊】) 所求得之 K_D' (雙層部分) 與 K_D (雙層部分) 之相對比較，將兩者做成真實圖形 (圖表 12)、調整圖形 (圖表 13) 及平方根值圖形 (圖表 14)；可發現 C' 值之比約兩倍 (即斷層之因)，也可為滲透性的等效性假設佐證。



三、比較單層與雙層的數據，發現雙層實驗所需時間多數超過各分層之和，因此猜測其間出現了所謂的斷層。實驗中常可發現水分到達某一高度後即停滯不前，除了結構破壞外，另外則是水分經過截然不同的二個界面 (顆粒差距大)，介面將會產生強大的阻力，阻礙水在泥中的移動。由數據可判讀出組合相同者，往往顆粒大者在下，其高、低壓吸水速率會較快，代表著上大下小的排列，阻力較強；另外，多層的層面雖然多，但由於都是粒徑較接近者，故其影響反而沒有如【甲戊】等那麼明顯；至於隨機混合之速率比上下序來的快，可能是因為沒有太多斷層的阻力，在加水之後尚保有相當的通道。

四、土壤結構被破壞的程度

除了滲透性與滲入速率實驗外，我們又對高壓吸水及低壓吸水後的土壤再進行滲透性測試來觀察其異同。以下將分別討論此二種實驗的目的及結果：大體而言，低吸飽土和高吸飽土的曲線是相當接近，且大致低吸略比高吸快。這種情形可導因於高壓吸水時會有較強烈的破壞，使得滲水時出現輸水不良、或水分囤積於底部不易滲出等問題。至於樣土與濕土的比較，樣土如我們所預測的，大致都大於濕土滲入的速率 (因前所提的孔隙問題)，且此兩種皆顯示出類似的曲線，表示在滲水方面，土粒間水含量的多寡對於滲水速率的曲線影響不明顯。

五、天然土壤內部之孔隙通常呈連續狀態，並形成錯綜複雜的網狀結構，導致天然土壤的毛細管，其性質狀態與玻璃毛細管不同。

爲了觀察土壤粒徑對毛細現象所表現的趨勢，我們設計了毛細管的實驗，參考的公式如下：

$$h_{e_r} = \frac{(0.309) \times [1 - (0.0027) \times (T - T_0)]}{d} \quad - \quad (1)$$

$$h_c = \frac{k}{e \times D_{10}} \quad - \quad (2)$$

$$\left[\begin{array}{l} h_c \text{ 為毛細管上升高度、} T \text{ 為現在溫度、} d \text{ 為孔隙直徑} (cm) \\ k \text{ 為介於 } 0.1 \sim 0.5 cm^2 \text{ 間之常數、} e \text{ 為空隙比} \end{array} \right]$$

觀察毛細管水上升的高度，可明顯看出毛細管水上升高度與粒徑大小成反比，除了可利用（1）式來找出不同粒徑土壤的孔隙直徑外，也可觀察（2）式，將 k 在同一種土壤下視爲定值，比較不同粒徑土壤的空隙比。

利用數據比較後，我們發現：

從（1）中算出的 d ，可以看出粒徑越小 d 越小；但粒徑越小，其 D_{10} 與 d 之比則較小，推測與其黏性有關，土壤越趨向黏性，則其孔隙率相對較大。

另外，已知 D_{10} 越小者， h_c 越大，從（2）式的實驗結果中又可以得知， h_c 越大者， e 越大， $e = n / (1 - n)$ （ n 爲孔隙率），因此 e 越大， n 越大；由此可推知先前假設的結果→ D_{10} 越小， n 越大。

從實驗及（2）式中也得出一個現象：雖然 $e \times D_{10}$ 和 h_c 成反比，而之前又提到 D_{10} 和 e 也成反比；但由實驗所得的結果，則可知隨著粒徑的增加， D_{10} 的變化幅度會大於 e ，所以粒徑愈大， h_c 愈小。

六、實驗變因與控制：

（一）土壤結構破壞：

初期將水緩慢的傾斜注入以避免結構破壞；後改用細管將水導入土面以減緩冲刷力。

（二）水壓不固定：

吸水速率部分，使用截面積大的水盆，使液壓差的影響降低。滲水速率部分，外接管子將多餘的水導出以固定水壓。

（三）同種土壤孔隙率無法固定：

每次實驗同種土壤都取等重，置入管中，再調整到相同高度，使土壤孔隙率相近。

（四）環境因子不同：

在同一時間點進行同一組實驗，控制住相同的環境因子。

（五）塑膠珠與土壤之差異：

由於表面較土壤光滑（附著力較小），使其更難形成水膜，而圖 17、18 之間的臨界區段是由塑膠珠的實驗結果所推出，因此與實際土壤之臨界區段甚有差距。

捌、 結 論

一、含水量與粒徑之關係：

- (一)淘選度越好，孔隙率越高，相對的含水量就越大。
- (二)含水量的臨界值約在丙、丁間。

二、吸水速率與粒徑之關係：

- (一)低水壓下，毛細現象影響大，因此粒徑越小吸水速率越快；而在高水壓下，粒徑越大阻力則越小，故吸水速率越快。
- (二)雙層排列時，粒徑較大者在下吸水速率較快。
- (三)毛細管水上升高度與孔隙大小成反比。

三、滲透性與粒徑之關係：

- (一)粒徑越大者，滲透性越好。
- (二)雙層排列時的滲透性係數具有等效電阻的性質

四、滲入速度與粒徑之關係：(垂直及水平之探討)

- (一)粒徑越大者，垂直及水平的滲水速率越快。

五、綜合以上數點：

- (一)可以發現在種植之前，土壤的篩選是相當重要的，因為尚未篩選之土壤粒徑差異度較大，宛如實驗中的混合土一般，含水量較篩選過且經由人為分層排列後少，且吸水速率也較慢。
- (二)種植時底部應先放入較大粒徑之土壤，由大而小依序放入，但粒徑在 0.43mm 以下者則不宜使用。
- (三)丁、戊土並不適合種植，因為含水沒有乙、丙來的多，滲水也比其它慢，較易滯留在土表，特別是戊土吸水速率極慢；因此若表層土為丁、戊，在澆水時，常誤以為所有土已吸飽水。

玖、 主要參考資料

- 一.王雲五，中山自然科學大辭典－地球科學篇
- 二.李文勳，土壤力學問題詳解，魯風印書，增訂五版
- 三.趙國華，土力與基礎，中國土木水利工程學會，三版
- 四.陳清源，土壤力學與基礎工程，文笙書局，三版
- 五.梁 昇，地下水文學，大學圖書出版社，1994
- 六.游啓亨，土壤力學與基礎工程學，大行出版社，1980

附 錄 一

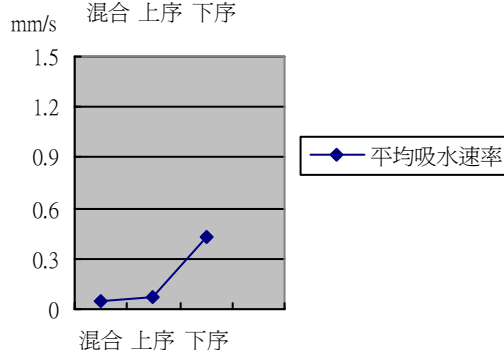
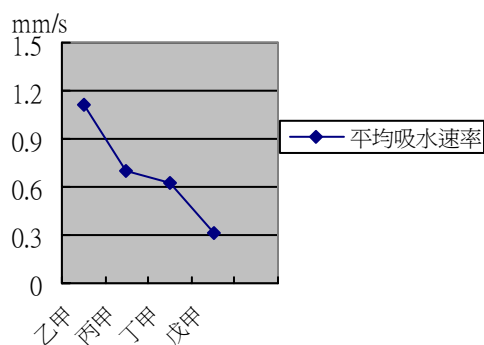
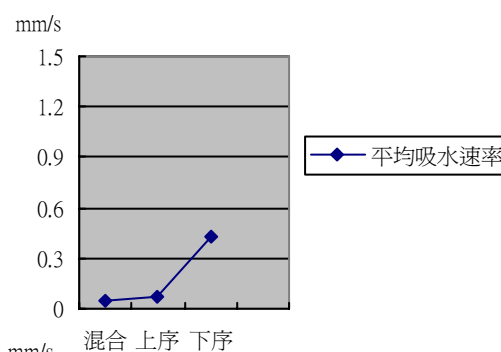
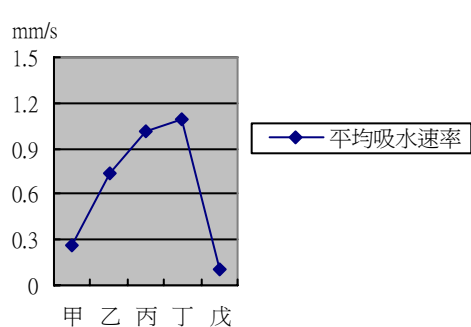
低壓吸水速率測量結果統計表 $V=H_s$ (土壤垂直高) / T (總時間)

時間(分'秒'')	甲	乙	丙	丁	戊
T1	6'20''	2'16''	1'38''	1'33''	16'03''
T2	6'25''	2'18''	1'33''	1'35''	15'55''
T3	6'18''	2'15''	1'45''	1'25''	15'59''
平均吸水速率	0.262mm/s	0.731 mm/s	1.008 mm/s	1.093 mm/s	0.103 mm/s

時間(分'秒'')	甲乙	甲丙	甲丁	甲戊
T1	20'46''	24'52''	37'43''	1 ^{hr} 26'37''
T2	22'39''	28'01''	41'05''	1 ^{hr} 25'12''
T3	22'08''	27'50''	36'28''	1 ^{hr} 36'46''
平均速率	0.076 mm/s	0.062 mm/s	0.043 mm/s	0.028 mm/s

時間(分'秒'')	乙甲	丙甲	丁甲	戊甲
T1	1'24''	2'21''	2'46''	5'16''
T2	1'38''	2'24''	2'37''	6'04''
T3	1'28''	2'22''	2'41''	5'02''
平均速率	1.109 mm/s	0.701 mm/s	0.619 mm/s	0.307 mm/s

時間(分'秒'')	混合	上序	下序
T1	37'10''	23'21''	03'55''
平均吸水速率	0.045 mm/s	0.071 mm/s	0.425 mm/s



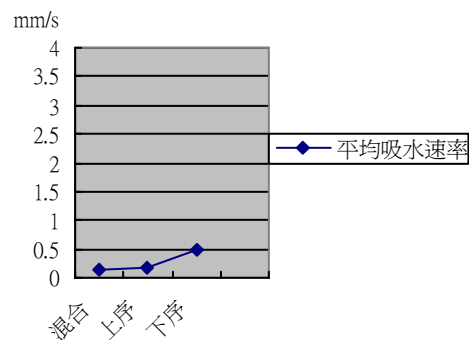
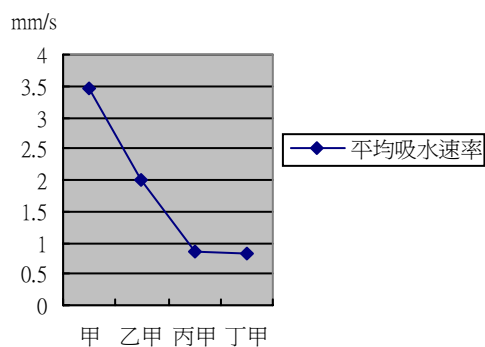
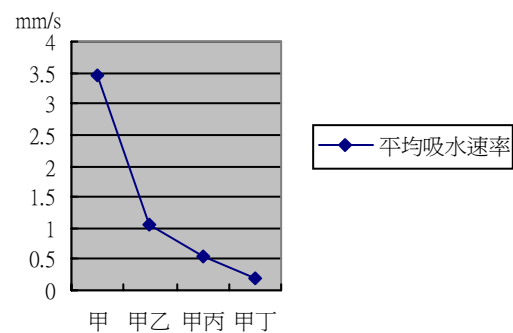
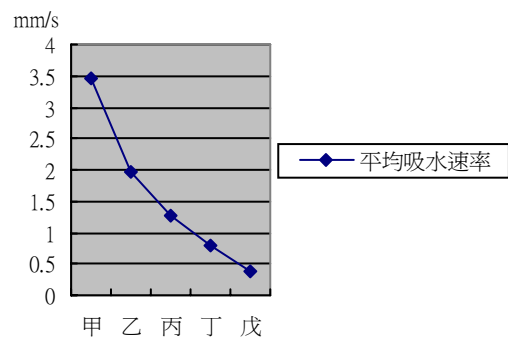
高壓吸水速率測量之結果統計表

時間(分'秒'')	甲	乙	丙	丁	戊
T1	0'28''	0'48''	1'04''	2'12''	3'32''
T2	0'29''	0'48''	1'23''	2'27''	4'02''
T3	0'29''	1'00''	1'33''	2'12''	5'44''
平均速率	3.459 mm/s	1.978 mm/s	1.268 mm/s	0.779 mm/s	0.392 mm/s

時間(分'秒'')	甲	甲乙	甲丙	甲丁
T1	0'28''	1'24''	3'04''	8'14''
T2	0'28''	1'36''	3'16''	9'47''
T3	0'29''	1'48''	2'55''	9'42''
平均速率	3.459 mm/s	1.046 mm/s	0.540 mm/s	0.181 mm/s

時間(分'秒'')	甲	乙甲	丙甲	丁甲
T1	0'28''	0'51''	1'52''	1'58''
T2	0'28''	0'52''	2'03''	2'01''
T3	0'29''	0'47''	1'13''	2'08''
平均速率	3.459mm/s	1.993 mm/s	0.858 mm/s	0.814 mm/s

時間(分'秒'')	混合	上序	下序
T1 (分'秒'')	11'27''	9'14''	3'18''
平均吸水速率	0.145 mm/s	0.180 mm/s	0.503 mm/s



附 錄 二

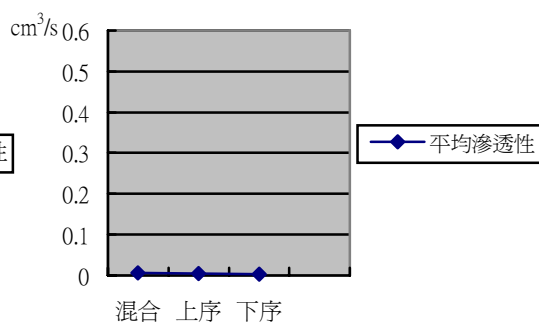
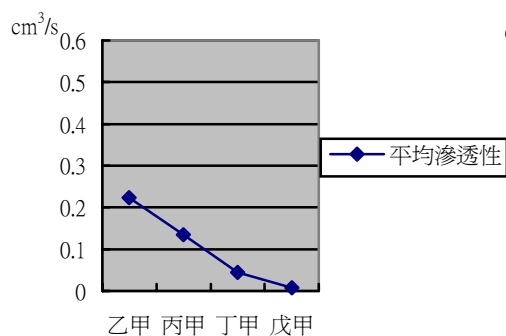
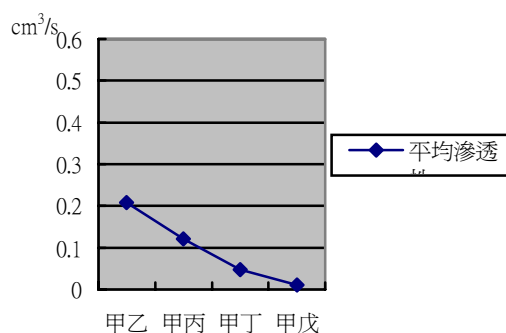
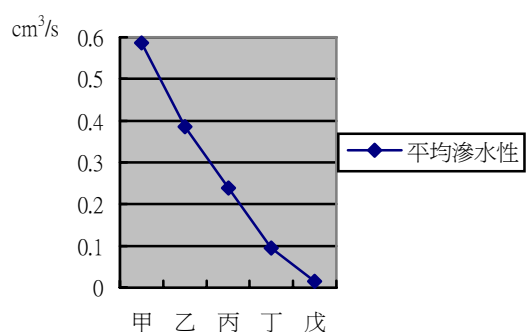
滲透性測量結果統計(低吸飽土) $Q = V_w$ (水之體積) / T (總時間)

時間(分'秒'')	甲	乙	丙	丁	戊
T1	0'43''	1'02''	1'44''	4'16''	28'05''
T2	0'45''	1'03''	1'57''	4'32''	25'02''
T3	0'44''	1'17''	1'43''	4'48''	27'05''
平均透水性	0.586cm ³ /s	0.385cm ³ /s	0.239cm ³ /s	0.095cm ³ /s	0.016cm ³ /s

時間(分'秒'')	甲乙	甲丙	甲丁	甲戊
T1	2'07''	3'37''	9'09''	35'58''
T2	1'58''	3'57''	9'10''	47'22''
T3	2'08''	3'11''	9'21''	48'00''
平均滲透性	0.208cm ³ /s	0.121cm ³ /s	0.047cm ³ /s	0.010cm ³ /s

時間(分'秒'')	乙甲	丙甲	丁甲	戊甲
T1	1'56''	3'17''	9'38''	58'53''
T2	1'37''	3'17''	8'39''	1 ^{hr} 04'14''
T3	2'02''	3'00''	11'10''	47'09''
平均滲透性	0.223cm ³ /s	0.135cm ³ /s	0.044cm ³ /s	0.008cm ³ /s

時間(分'秒'')	混合	上序	下序
T1	1 ^{hr} 15'16''	1 ^{hr} 48'34''	2 ^{hr} 01'34''
平均滲透性	0.006cm ³ /s	0.004cm ³ /s	0.004cm ³ /s

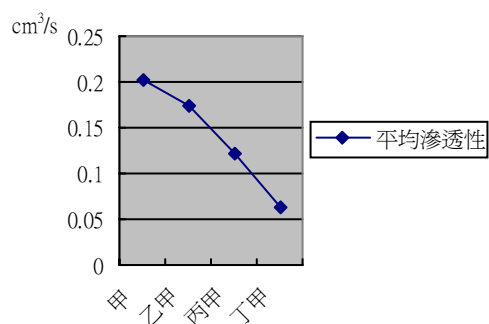
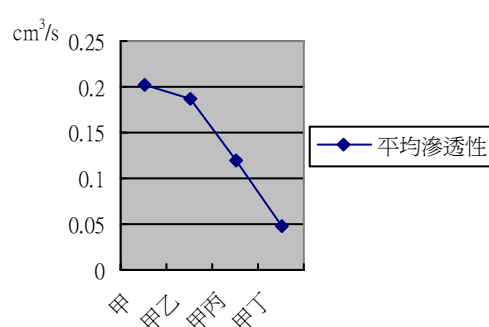
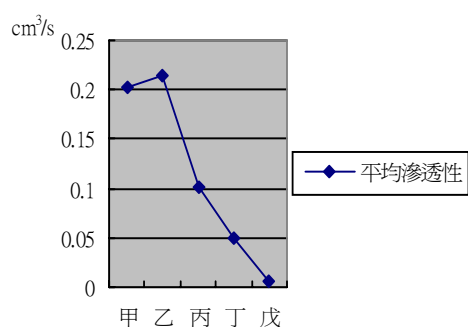


滲透性測量結果統計(高吸飽土)

時間(分'秒'')	甲	乙	丙	丁	戊
T1	2'18''	2'01''	4'12''	8'45''	1 ^{hr} 12'19''
T2	2'07''	2'07''	4'00''	8'31''	1 ^{hr} 20'34''
T3	1'58''	1'53''	4'36''	8'40''	1 ^{hr} 28'14''
平均滲透性	0.203cm ³ /s	0.215cm ³ /s	0.101cm ³ /s	0.050cm ³ /s	0.005cm ³ /s

時間(分'秒'')	甲	甲乙	甲丙	甲丁
T1	2'18''	2'07''	3'23''	9'47''
T2	2'07''	2'15''	3'47''	9'02''
T3	1'58''	2'35''	3'36''	9'08''
平均滲透性	0.203cm ³ /s	0.187cm ³ /s	0.120cm ³ /s	0.047cm ³ /s

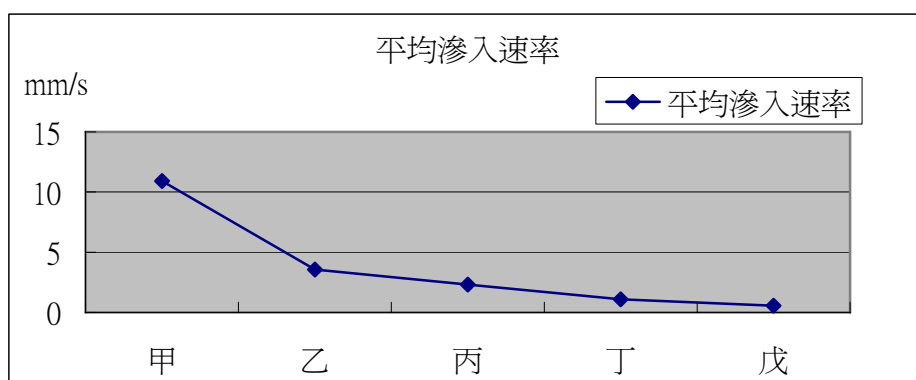
時間(分'秒'')	甲	乙甲	丙甲	丁甲
T1	2'18''	2'33''	3'32''	6'12''
T2	2'07''	2'28''	3'43''	7'39''
T3	1'58''	2'28''	3'27''	6'31''
平均滲透性	0.203cm ³ /s	0.173cm ³ /s	0.121cm ³ /s	0.064cm ³ /s



附 錄 三

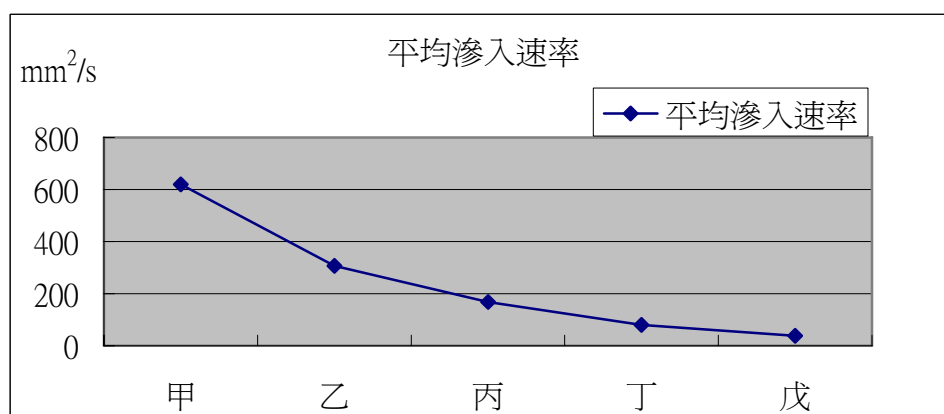
垂直滲入速率測量結果統計表 $V_z = H$ (滲入之高度) / T (總時間)

時間 (分'秒'')	甲	乙	丙	丁	戊
T1	0'19''	0'53''	1'26''	3'03''	5'40''
T2	0'18''	0'58''	1'28''	3'05''	5'32''
T3	0'18''	0'58''	1'27''	3'08''	6'26''
平均滲入速率	10.91mm/s	3.55mm/s	2.30mm/s	1.08mm/s	0.57mm/s



水平滲入速率測量結果統計表 $V_x = A$ (滲入之截面積) / T (總時間)

時間 (分'秒'')	甲	乙	丙	丁	戊
T1	0'41''	1'26''	2'40''	5'27''	10'50''
T2	0'43''	1'25''	2'31''	5'37''	12'00''
T3	0'42''	1'23''	2'34''	5'21''	11'20''
平均滲入速率	619.40mm ² /s	307.26mm ² /s	167.83mm ² /s	79.23mm ² /s	38.07mm ² /s



附 錄 四

含水量測量結果統計表 ($w = (W - W_s) / W_s \times 100\%$)

樣土 (土總重 100g)	甲	乙	丙	丁	戊
器材重	11.38g	11.46g	11.28g	11.25g	11.00g
含水重 W1	58.71g	63.51 g	64.11g	56.89g	54.31g
含水重 W2	58.64g	66.60g	66.14g	55.05g	53.39g
平均	58.68%	65.1%	65.12%	55.97%	54.35%

樣土 (土總重 100g)	甲乙	甲丙	甲丁	甲戊
器材重	11.17g	11.34g	11.41g	11.00g
含水重 W1	57.38g	52.26g	47.60g	47.84g
含水重 W2	56.94g	54.38g	48.96g	48.31g
平均	57.16%	53.32%	48.15%	48.07%

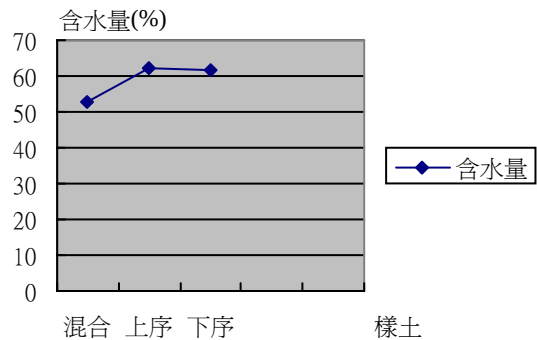
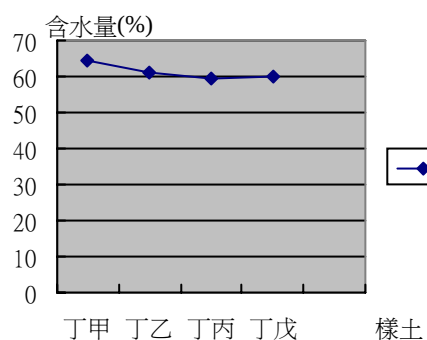
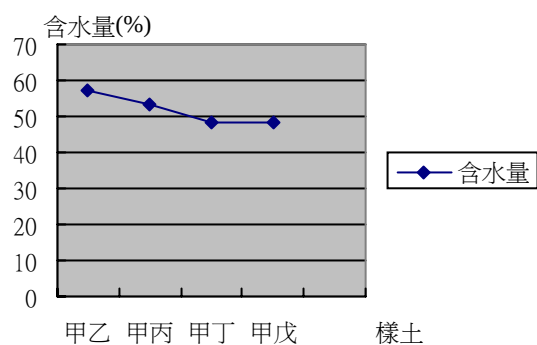
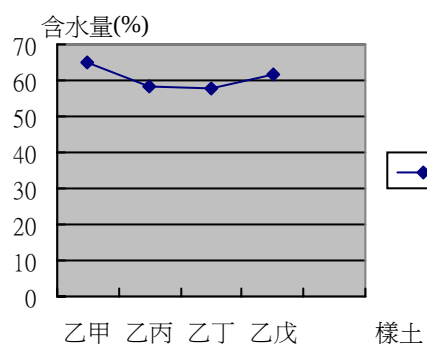
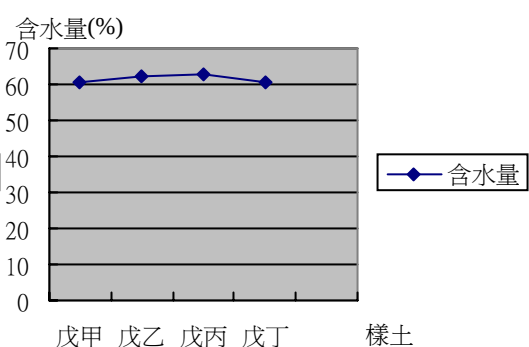
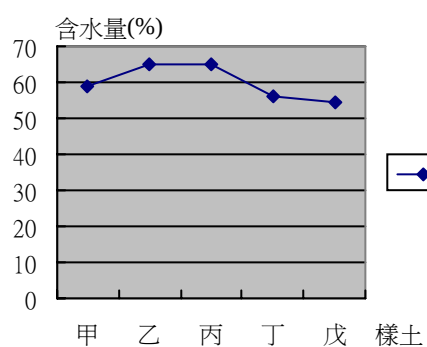
樣土 (土總重 100g)	乙甲	乙丙	乙丁	乙戊
器材重	11.34g	11.29g	11.47g	11.17g
含水重 W1	63.67g	58.78g	57.51g	61.33g
含水重 W2	65.82g	58.41g	58.57g	61.45g
平均	64.74%	58.60%	58.04%	61.39%

樣土 (土總重 100g)	丙甲	丙乙	丙丁	丙戊
器材重	11.37g	11.44g	11.22g	11.17g
含水重 W1	63.19g	60.52g	57.22g	59.7g
含水重 W2	64.41g	60.98g	58.07g	60.4g
平均	63.80%	60.75%	57.64%	60.05%

樣土 (土總重 100g)	丁甲	丁乙	丁丙	丁戊
器材重	11.37g	11.42g	11.25g	11.30g
含水重 W1	64.8g	61.90g	59.42g	59.89g
含水重 W2	64.22g	59.91g	59.11g	60.27g
平均	64.51%	60.9%	59.26%	60.08%

樣土	戊甲	戊乙	戊丙	戊丁
器材重	11.30g	11.18g	11.39g	11.39g
含水重 W1 (土總重 100g)	60.56g	62.44g	62.55g	61.01g
含水重 W2 (土總重 100g)	61.07g	61.48g	62.84g	60.23g
平均	60.82%	61.96%	62.70%	60.62%

樣土	上序	下序	混合
器材重	11.33g	11.17g	11.18g
含水重 W1 (土總重 100g)	61.95g	62.20g	52.48g
含水重 W2 (土總重 100g)	62.03g	61.61g	53.21g
平均	61.99%	61.90%	52.84%



附錄五

	K_D					K_H					$C'=100/(K_H/K_D)_{ave}$						
	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$i \text{ (h/L)}$	$A(\text{cm}^2)$	$K_D(\text{cm/s})$	$(K_D)^{1/2}$	$C(\text{標準值})$	網目	$D_{10}(\text{cm})$	$K_H(\text{cm/s})$	$(K_H)^{1/2}$	K_H/K_D	$K_H/K_D\text{-之ave}$	$C'(\text{參考修正})$	$K_H'(\text{cm/s})$	$(K_H')^{1/2}$	$K_H/15.78$	
甲	0.586	2	2.587	0.113259	0.3365	100	19	0.1337	1.78715	1.3368	15.78		15.31273	0.273661	0.5231	0.113254	
乙	0.385	2	2.587	0.074411	0.2728	100	38	0.0668	0.44679	0.6684	6.004		15.31273	0.068415	0.2616	0.028313	
丙	0.239	2	2.587	0.046193	0.2149	100	58	0.0438	0.19178	0.4379	4.152	6.53051	15.31273	0.029367	0.1714	0.012154	
丁	0.095	2	2.587	0.018361	0.1355	100	114	0.0223	0.04964	0.2228	2.704		15.31273	0.007602	0.0872	0.003146	
戊	0.016	2	2.587	0.003092	0.0556	100	228	0.0111	0.01241	0.1114	4.013		15.31273	0.0019	0.0436	0.000786	
						$1/K_{Hi}+1/K_{Hj}=2/K_{Hij}$					$K_H'=K_H*C'/100=K_H/(K_H/K_D)_{ave}$						
	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$i \text{ (h/L)}$	$A(\text{cm}^2)$	$K_D(\text{cm/s})$	$(K_D)^{1/2}$	$C(\text{標準值})$	—	—	$K_H(\text{cm/s})$	$(K_H)^{1/2}$	K_H/K_D	$K_H/K_D\text{-之ave}$	$C'(\text{參考修正})$	$K_H'(\text{cm/s})$	$(K_H')^{1/2}$	$K_H/17.78$	
甲乙	0.208	2	2.587	0.040201	0.2005	100	—	—	0.71486	0.8455	17.78		7.145074	0.051077	0.226	0.045302	
甲丙	0.121	2	2.587	0.023386	0.1529	100	—	—	0.34639	0.5886	14.81	13.9957	7.145074	0.02475	0.1573	0.021951	
甲丁	0.047	2	2.587	0.009084	0.0953	100	—	—	0.0966	0.3108	10.63		7.145074	0.006902	0.0831	0.006122	
甲戊	0.01	2	2.587	0.001933	0.044	100	—	—	0.02465	0.157	12.75		7.145074	0.001761	0.042	0.001562	
						$1/K_{Hi}+1/K_{Hj}=2/K_{Hij}$					$C'=100/(K_H/K_D)_{ave}$						
	$Q(\text{cm}^3/\text{s})$	$i \text{ (h/L)}$	$A(\text{cm}^2)$	$K_D(\text{cm/s})$	$(K_D)^{1/2}$	$C(\text{標準值})$	—	—	$K_H(\text{cm/s})$	$(K_H)^{1/2}$	K_H/K_D	$K_H/K_D\text{-之ave}$	$C'(\text{參考修正})$	$K_H'(\text{cm/s})$	$(K_H')^{1/2}$	$K_H/16.6$	
乙甲	0.223	2	2.587	0.0431	0.2076	100	—	—	0.71486	0.8455	16.59		6.997403	0.050022	0.2237	0.043064	
丙甲	0.135	2	2.587	0.026092	0.1615	100	—	—	0.34639	0.5886	13.28	14.291	6.997403	0.024239	0.1557	0.020867	
丁甲	0.044	2	2.587	0.008504	0.0922	100	—	—	0.0966	0.3108	11.36		6.997403	0.00676	0.0822	0.005819	
戊甲	0.008	2	2.587	0.001546	0.0393	100	—	—	0.02465	0.157	15.94		6.997403	0.001725	0.0415	0.001485	
	$1/K_{Di}+1/K_{Dj}=2/K_{D'ij}$					$1/K_{Hi}+1/K_{Hj}=2/K_{Hij}$					$K_H'=K_H*C'/100=K_H/(K_H/K_D)_{ave}$						
	$Q_{估}(\text{cm}^3/\text{s})$	$i \text{ (h/L)}$	$A(\text{cm}^2)$	$K_D(\text{cm/s})$	$(K_D)^{1/2}$	$C(\text{標準值})$	—	—	$K_H(\text{cm/s})$	$(K_H)^{1/2}$	K_H/K_D	$K_H/K_D\text{-之ave}$	$C'(\text{參考修正})$	$K_H'(\text{cm/s})$	$(K_H')^{1/2}$	$K_H/7.96$	
甲與乙	0.464696	2	2.587	0.089814	0.2997	100	—	—	0.71486	0.8455	7.959		19.61783	0.14024	0.3745	0.089806	
甲與丙	0.339525	2	2.587	0.065621	0.2562	100	—	—	0.34639	0.5886	5.279	5.0974	19.61783	0.067955	0.2607	0.043517	
甲與丁	0.163495	2	2.587	0.031599	0.1778	100	—	—	0.0966	0.3108	3.057		19.61783	0.018951	0.1377	0.012136	
甲與戊	0.03115	2	2.587	0.00602	0.0776	100	—	—	0.02465	0.157	4.094		19.61783	0.004836	0.0695	0.003097	

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

高中組 地球科學科

040503

水土交融—泥中水的行為

國立宜蘭高級中學

評語：

1. 對土壤組成及其實驗方法並不了解，以致連實驗設計都有偏差。
2. 能自行設計研究，仍值得肯定。
3. 報告中有許多錯誤，圖表單位有誤。