

土壤粒徑分析實驗方法之比較

林佳燕⁽¹⁾ 蔡義誌⁽²⁾ 林俐玲⁽³⁾

摘 要

粒徑分佈是最常用來判定土壤質地的方法，而農藝及工程上也經常需要使用粒徑分佈來將土壤質地做分類，而本研究主要是利用兩種最廣泛被使用的方法--吸管法(Pipette sampling)及比重計法(hydrometer method)來決定粒徑分佈情況，並比較兩者間的差異。結果顯示，二種方法都將試驗的土樣分類為相同質地，由於兩種方法的程序皆繁瑣費時，但吸管法在事先分離砂粒時需要許多額外的事前步驟，因此若樣本數目很多時，則相對較費時；而雖然比重計法有少許人為及儀器誤差，但其與吸管法比較的結果無明顯差異，因此若樣本數較多時，建議使用比重計法。

(**關鍵詞**：粒徑分析、吸管法、比重計法、Stokes Law)

Comparison of the soil particle size analysis experiment method

Chia-Yen Lin⁽¹⁾, Yi-Zhih Tsai⁽²⁾, Li-Ling Lin⁽³⁾

Graduate Students⁽¹⁾⁽²⁾ and Professor⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, ROC

ABSTRACT

The particle-size distribution is one of the most common used methods of soil texture determination. It is used in textural analysis to classify soils for both agronomic and engineering purposes, and this research mainly uses two kinds of widely used methods which are pipette sampling and hydrometer method to decide particle-size distribution, and compares the difference between the two methods.

The soil samples determined with these two methods have same texture, and although the

(1)國立中興大學水土保持學系研究生

(2)國立中興大學水土保持學系博士研究生

(3)國立中興大學水土保持學系教授

procedures of these methods are very time-consuming , but the pipette method, requires the additional step of separating the sand. When analyzing a lot of soil samples, pipette method is more time-consuming. Therefore, the hydrometer method was recommended .

(**Keywords** : The Particle-Size Analysis, Pipette Sampling, Hydrometer Method, Stokes Law)

前言

土壤的粒徑分佈是用來判定土壤質地最常使用且較正確的方法，而農藝及工程上經常需要將土壤質地做分類(Gee and Or,2002)。林俐玲等(1996)指出於田間中，土壤質地之估測乃由個人經驗及感覺來決定，其主要是根據黏性、塑性和粗糙度進行土壤質地的歸類，但因個人主觀之判斷，使得此方法常造成人為的誤差；由於其中之黏性及塑性時常受到黏粒種類的影響，並不完全只受顆粒大小之改變，因此，不能僅靠上述方式來判斷土壤的質地。而粘土礦物的定義是根據 Stokes Law 在水中以特定速度沉降之部分，且不限制為矽酸礦物。因此在土壤科學領域中不應將黏粒視為無活性之物質，事實上它為一活動的膠體且具有明顯的物化特性；而這些特性乃由其構造及化學組合決定之。

目前用來量測粒徑分佈的方法有很多，包括吸管法(Pipette sampling)、比重計法(hydrometer method)及其他例如 X 射線、雷射光掃描等方法(Gee and Bauber,1986)，其中最被廣泛使用的吸管法及比重計法(Eshel et al.,2004)乃是根據 Stokes Law 在重力下的沉降原理所進行之試驗。最後經由顆粒粒徑分析實驗結果可得土壤之粒徑分佈，進而將其展示為粒徑分佈曲線(Particle

size distribution)以供探討(萬鑫森，1987)。

本研究之目的為比較吸管法及比重計法兩者之間量測土壤粒徑分佈的差異並探討其優劣。

原理

所謂土壤之機械分析(Mechanical analysis)是決定土壤中顆粒尺寸的範圍，並且以總乾重的百分比來表示。通常採用兩種方法求得顆粒尺寸的分佈情形(周毅等，1995)，其一為當土壤粒徑大於 0.05mm 時，使用篩分析(Sieve analysis)；另一部分為土壤粒徑小於 0.05mm 時，常利用沉降法(sedimentation)進行量測，此方法是根據不同粒徑之顆粒於水懸浮液中，相對沉降速度之原理(萬鑫森，1987;Gee and Bauber,1986)。

沉降法的測定，所使用之 Stokes Law，乃依據下列五點假設：

- (1)顆粒夠大，以致不受流體分子熱運動(Brownian 運動)之影響。
- (2)顆粒為剛體、球形且光滑的。
- (3)所有顆粒皆具有相同之密度。
- (4)懸浮液較稀，顆粒不致互相干擾，使每一顆粒得以獨立沉降。
- (5)顆粒四周流體之流動為層流，即無一顆粒有超出開始紊流之界限沉降速度。

顆粒在真空中降落，並不會遇到阻力；相反地，顆粒在流體中降落時，則會遇到與半徑、速度及黏滯度三者乘積成正比之摩擦阻力(Fr)影響。

摩擦阻力 Fr 表示為：

$$Fr = 6\pi\eta ru \quad (1)$$

式中：

η ：流體黏滯度 ($gm/cm \cdot s$)

r ：顆粒半徑 (cm)

u ：顆粒速度 (cm/s)

由於顆粒開始降落時，速度之增加導致阻力亦逐漸加大，爾後達到某一定點時，即向上的阻力與向下之重力相等，此時顆粒將呈現等速度沉降。

重力所生向下之力 Fg 為：

$$Fg = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_s - \rho_f)g \quad (2)$$

式中：

$\frac{4}{3}\pi r^3$ ：球形顆粒體積 (cm^3)

ρ_s ：球形顆粒密度 (g/cm^3)

ρ_f ：流體密度 (g/cm^3)

g ：重力加速度 (cm/s^2)

令二式相等，則可得 Stokes Law：

$$u_t = \frac{2r^2g}{9\eta}(\rho_s - \rho_f) = \frac{d^2g}{18\eta}(\rho_s - \rho_f) \quad (3)$$

式中：

d ：顆粒直徑 (cm)

假設終端速度瞬間到達，則可得顆粒降落高度 h 時，所需之時間 t 為：

$$t = 18h\eta/d^2g(\rho_s - \rho_f) \quad (4)$$

又重新組合後得顆粒直徑為：

$$d = [18h\eta/tg(\rho_s - \rho_f)]^{1/2} \quad (5)$$

最後，令 $[18\eta/g(\rho_s - \rho_f)]^{1/2}$ 為一常數

K ，則可得終端速度(u_t)與球體直徑(d)之關係為：

$$d = K\sqrt{\frac{h}{t}} = K\sqrt{u_t} \quad (6)$$

$$\text{故 } u_t \propto d^2 \quad (7)$$

根據 Stokes Law 得知，球形顆粒在已知密度及黏滯度之流體中，受重力影響之沉降其終端速度(*terminal velocity*)與顆粒直徑的平方成正比，因此可求得本研究中各沉降時間所對應之顆粒直徑。

又其通過百分比 N 乃由下列公式求得 (ASTM,1985)：

$$N = \frac{G_s}{G_s - 1} \cdot \frac{V}{W_s} \cdot [\gamma(t) - \gamma_w] \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{又 } \gamma_s = G_s \cdot \gamma_w \quad (9)$$

式中，

N ：通過百分比(%)

G_s ：土樣比重

V ：懸浮液總體積(ml)

W_s ：土樣乾土重(g)

$\gamma(t)$ ：在時間 t 時之溶液單位重(g/ml)

γ_w ：5%分散劑水溶液之單位重(ml)

研究材料與方法

一、採樣地理位置

本研究欲探討吸管法及比重計法兩者量測粒徑分佈之差異，分別選擇以下三個地區之土樣進行分析，而採樣地點分別為：南投縣草屯風水坪(黃土)、台中縣新社水井及台中后里(紅土)等三個地區之土壤，並將試區採回之土壤經風乾後，過篩取粒徑 $<2\text{mm}$

的土壤以供實驗分析之用，另外分別將三種土樣編號為土樣一、土樣二及土樣三作為後續說明使用，此三種土壤採樣點之資料及基本性質如表 1 所示。

二、研究流程

本研究分為兩部分實驗，其一是利用吸管於沉降開始後，在規定時間內，一定深度下，吸取固定體積之懸浮液，即為吸管法之試驗。另一種為比重計法之試驗，此方法是

使用比重計測定懸浮液之密度，當顆粒依大小順序先後沉降時，其密度將隨時間增加而減小(萬鑫森，1987)。本研究流程如圖 1 所示。

三、試驗儀器與配置

本研究為吸管法及比重計法兩種試驗，分別以圖 2 及圖 3 說明兩種實驗之儀器配置。

四、試驗方法與步驟

表 1 實驗土樣採樣點地形資料及基本性質
 Table 1 The topographic data and soil properties of experiment soil

編號	採集地點	座標	海拔(m)	坡度(°)	坡向	總體密度 (g/cm^3)	顆粒密度 (g/cm^3)
土樣一	南投草屯風水坪	E221559 N2650490	201.2	18	北偏西 10°	1.52	2.67
土樣二	台中新社鄉水井	E226022 N2679348	545	45	南偏東 70°	1.30	2.68
土樣三	台中后里地區	E221999 N2690675	200	1	北偏西 74°	1.45	2.61

本研究是根據 Stokes Law 的沉降原理來決定土壤粒徑分佈之試驗，分別使用吸管法及比重計法。

而在做顆粒大小分佈實驗時，最重要的是必須將土壤中之顆粒完全分散，使團粒中土壤顆粒的連鍵被破壞並且去除團粒之結合

劑。兩種最常見之結合劑為碳酸鈣(Calcium carbonate)和有機質(Organic matter)，它們可由酸性處理與過氧化氫之氧化作用去除之，本研究中使用 5% 偏磷酸鈉 (Sodium hexametaphosphate) 作為分散劑 (Dispersing agents)，以利後續實驗進行。

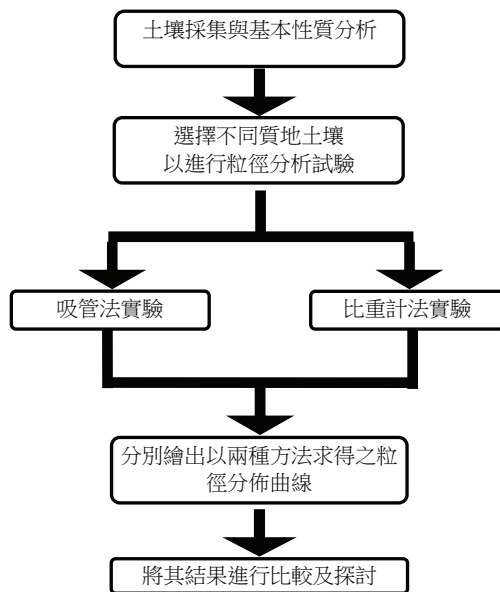


圖 1 研究流程圖

Figure. 1 The flow chart of study

茲將兩種量測方法之操作步驟敘述如下：

1. 吸管法分析(林俐玲，1996)

(1) 取 30g 乘以水分係數(MF)之風乾土，加入 100ml 蒸餾水及 50ml 的 5% 偏磷酸鈉，並用超音波分散器分散 10 分鐘，若質地較細的土壤建議分散 15 分鐘以上。

(2) 利用 #325(0.044mm) 篩子將砂粒從懸浮液中分離，並且使用 1000ml 量筒盛接通過之懸浮液，而操作時必須將停留在篩子上

的砂粒用沖洗瓶反覆沖洗，洗至其液體不再呈現混濁狀態；此時若有團粒出現在篩子上，必需重新將其分散，最後將此砂粒烘乾並稱重。

(3) 此方法是利用篩子將砂粒從土壤中分開，而粉粒與粘粒所佔比例則是利用吸管法來量測；對於吸管法之操作，首先，在吸管從吸入口量起 10 公分處做一記號，接著用手掌緊蓋量筒口，且充分搖動使量筒內的土粒完全混合，爾後將量筒靜置桌面，隨即記錄時間並準備吸管做第一次之取樣。

(4) 在取樣前約 30 秒將吸管插入懸浮液 10 公分處，當時間到達時，即慢慢的吸取 20ml 的懸浮液樣品，並將吸取之樣品放入燒杯中烘乾稱重。而在每一次取樣後，即必需將量筒內之土粒再徹底混合，才可進行下一次的取樣；又取樣的時間乃根據 Stokes Law 計算不同粒徑下降 10cm 所需之時間而定。

(5) 同時做一對照組並在相同時間內吸取 20ml 溶液，以決定分散劑之重量。

2. 比重計分析

經 ASTM 所認定之比重計分析適用範圍是粒徑小於 0.075mm 的顆粒直徑(Keller and Gee, 2006)，因此於本試驗中所使用之篩網為 #200(0.074mm)，並將其操作步驟簡述如下：

(1) 取 40g 乘以水分係數(MF)之烘乾土，加入 100ml 蒸餾水及 50ml 的 5% 偏磷酸鈉，並用超音波分散器分散 10 分鐘，若質地較細的土壤建議分散 15 分鐘以上。

(2) 同時準備一對照組並以此水溶液練習比重計之放置與讀數，並且量取量筒(1000ml)之截面積(斷面 A')。

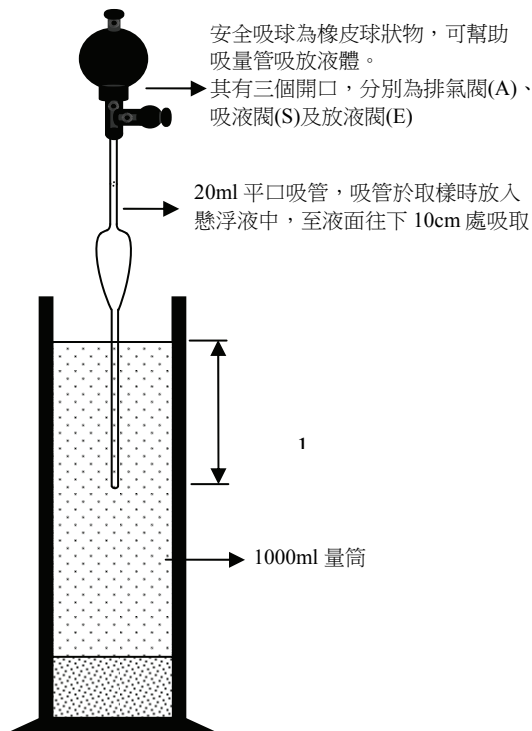


圖 2 吸管法配置圖

Figure 2 The disposition by pipette sampling

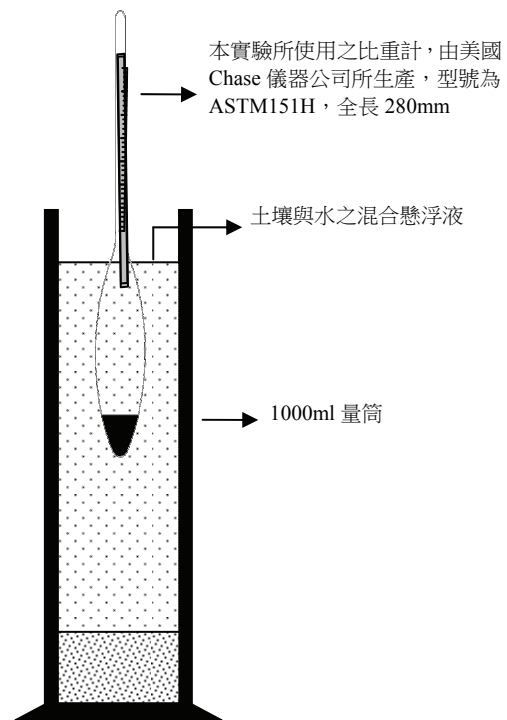


圖 3 比重計法配置圖

Figure 3 The disposition by hydrometer method

(3)將攪拌後之懸浮液洗入已量斷面 A' 之量筒並加水至 1000ml，接著以手掌緊壓量筒口，上下翻轉使懸浮液均勻混合，翻轉時若有土粒黏於底部，則用力震動使之鬆動落下，但需注意溶液不可逸出。

(4)爾後迅速將量筒置於恆溫槽中，隨即小心放入比重計並記錄時間，於 1/2、1、2、5、15、30、60、120 及 1440 分鐘時讀取比重計之讀數。此時 2min 之前的比重計是放置懸浮液中，而 2min 之後則將比重計取出，於每一讀數之前 30 秒再將比重計放入懸浮液中，同時讀取對照組之讀數及水溫。

(5)比重計分析完後將懸浮液倒入 #200(0.074mm)篩內以水沖洗至出水為清水為止，接著將留於篩內之顆粒洗入燒杯中，並使用 105°C 之溫度烘乾稱重。

(6)最後將烘乾之土樣倒入篩組中進行篩分析，可利用刷子將附於篩孔上之顆粒清理乾淨。而篩前與篩後之乾土重差別不得大於 2%。

結果與討論

本研究主要為比較兩種粒徑分析實驗之差異，而粒徑分佈是最常用來判定土壤質地

的方法，因此將本研究中兩種方法分析之數據結果點繪於圖 4(質地三角圖)，並判斷三種土樣之質地分類。且將兩種方法所分析之粒徑分佈資料及質地分類列於表 2。

本研究每一土樣皆做三重複試驗以確保實驗的精確度，本實驗之吸管法欲量測粒徑大小為 0.001mm 及 0.0002mm 的含量，其沉降時間經公式(4)及(5)計算後可得，而分別由兩種方法量測後之結果如表 3 及表 4 所示。

利用表 3 及表 4 中之顆粒直徑 $d(mm)$ 及通過百分比(N%)，可分別繪出土樣一、土樣二及土樣三的粒徑分佈曲線，如圖 5 至圖 7 所示。

比重計法主要量測範圍為小於 0.075mm 之粒徑，因此本文中三個土樣利用兩種方法所繪製之粒徑分佈曲線圖，僅探討直徑小於 0.075mm 的部分。

(1)由圖 5、6、7 顯示，比重計分析與篩分析合併時在其重疊處有不連續的情形，這是因為沉降時顆粒為不規則形狀所造成(周毅等，1995)，又土樣一之差距略大於土樣二，而土樣三之差距最小，其原因應為土樣一之質地較粗，使得比重計量測時受到粗顆粒的干擾而造成紊流(turbulence)情形較嚴重，進而影響比重計的讀數，且由於比重計量測土壤之初期其懸浮液尚處於混濁階段(大致由 0.5~2min 時)，此時粗顆粒土壤的讀數受到細顆粒之影響而有偏低的現象，故比重計之數據略小於吸管法；反之土樣三的細顆粒土壤含量較高，故紊流所造成之影響相對較小。

(2) 而比重計量測之末(約 120~1440min)

其粒徑較小，當比重計放入時雖然非常緩慢小心，但還是造成小幅度的擾動；又於粒徑

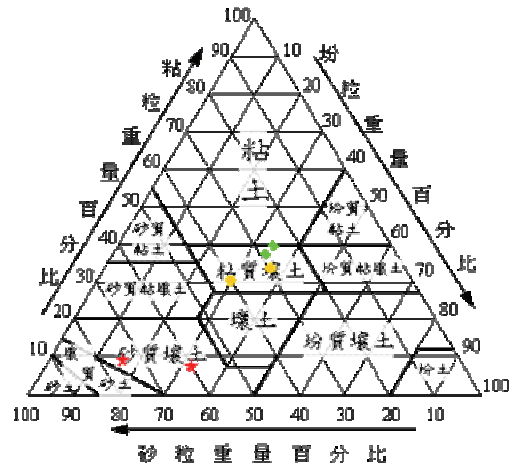


圖 4 質地三角圖

Fig 4 The Textural triangle

小於 0.001mm 時沉降速度會受到布朗運動(Brownian motion)的影響，使其結果較不可靠(Eshel et al.,2004)；且三種質地的土樣皆發生此情況，故將以統計方法分析其差異。

為了更加了解兩種方法之間的差異，因此將吸管法量測到之重量累積百分比繪於縱軸，比重計法繪於橫軸，並且利用線性迴歸方式判斷兩者之間是否存在直線關係。

(3)如圖 8、9、10 顯示的直線，三種土樣中其量測方式皆存在著線性關係，又土樣一中的直線斜率較偏離 1:1 Line，此即表示兩種方法於土樣一時相關性較低，而其餘兩者的斜率則無法明顯看出差距，因此將以統計方式分析。

茲將三種土樣的判定係數與均方根誤差數據列於表 5。

(4)利用表 5 的判定係數(r^2)可看出三種土樣中土樣二的值最接近 1，這表示兩種方

表 2 粒徑分佈資料
Table 2 The Particle-size distribution data

土樣	吸管法				比重計法			
	砂粒(%)	粉粒(%)	粘粒(%)	質地	砂粒(%)	粉粒(%)	粘粒(%)	質地
土樣一	60.0	32.0	8.0	砂質壤土	40.0	30.0	30.0	粘質壤土
土樣二	30.0	35.0	35.0	粘質壤土	28.0	34.0	38.0	粘質壤土
土樣三	26.0	35.0	39.0	粘質壤土	75.0	15.5	9.5	砂質壤土

表 3 吸管法之土樣實驗數據
Table 3 The data of experiment soil by pipette sampling

土樣	粒徑大小(mm)	時間(時: 分' 秒")	吸取之土量(g)		
土樣一	0.001	18'10"	1.5	1.5	1.5
	0.0002	7:27'10"	3.5	2.0	3.0
土樣二	0.001	17'50"	8.5	9.0	8.5
	0.0002	7:24'28"	4.0	4.5	4.5
土樣三	0.001	20'33"	4.0	1.5	2.5
	0.0002	7:45'10"	10.5	11.0	11.0

法於土樣二時有高度的線性相關，土樣三次之，而土樣一相對最低；由於三者皆達 1% 顯著水準，因此二種方法皆達高度線性相關。

(5)由表 5 中的均方根誤差(RMSE)顯示出，兩種方法於土樣三之同一粒徑下其量測結果差異不大，亦代表兩種方法皆可用於此土樣；又土樣二其 RMSE 的值較大，代表兩種方法所測得之結果差異較大，而以圖 6 來說，吸管法所量測結果能與篩分析結合，因此吸管法較適用於土樣二。

結論

兩種方法若提供相似的前置處理方式，則可用來相互比較其結果(Liu et al.,1966 ; Walter et al.,1978)，而經由本研究粒徑分析結果顯示，二種方法都將土樣分類為相同質地，因此比較後得知兩者皆適用於此三種土

壤的質地。

雖然兩種方法的程序皆繁瑣費時，且經常需要相當多的樣本數，卻僅得到有限的粒徑尺寸分佈(Allen,1997)，但由於吸管法在分離砂粒時，需要許多的事前準備步驟(Gee and Bauder,1986)，且每吸取一次溶液則必須再重新混合，因此若樣本數較多時，相較之下則較比重計法耗時。

Gee and Bauder(1979)指出比重計法的誤差大部分來自於比重計的讀數不精確。需經過修正但無法完全吻合，於本研究中其與吸管法之土壤質地分類結果無明顯差異，因此量測效果尚佳。

由於此兩種方法成本較低，亦為最普遍的粒徑尺寸分析方式，因此建議若欲做此部分的分析實驗時，選擇實驗室設備方便的儀器即可。

表 4 比重計法之土樣實驗數據
Table 4 The data of experiment soil by hydrometer method

土樣	時間 (min)	$\gamma(t)$			γ_w			d(mm)	N(%)
		1	2	3	1	2	3		
土樣一	0.5	1.0080	1.0070	1.0080	1.0010	1.0010	1.0010	0.0428	24.6482
	1	1.0080	1.0065	1.0075	1.0010	1.0010	1.0010	0.0286	22.6497
	2	1.0075	1.0060	1.0070	1.0010	1.0010	1.0010	0.0172	19.9850
	5	1.0065	1.0055	1.0060	1.0010	1.0010	1.0010	0.0108	16.6542
	15	1.0055	1.0050	1.0050	1.0010	1.0010	1.0010	0.0077	14.6557
	30	1.0050	1.0045	1.0045	1.0010	1.0010	1.0010	0.0054	12.6572
	60	1.0045	1.0040	1.0040	1.0010	1.0010	1.0010	0.0029	10.6587
	120	1.0040	1.0040	1.0040	1.0005	1.0010	1.0010	0.0013	8.6602
	1440	1.0030	1.0030	1.0030	1.0010	1.0010	1.0010	0.0006	5.9955
土樣二	0.5	1.0150	1.0160	1.0160	1.0000	1.0010	1.0010	0.0399	55.1687
	1	1.0145	1.0150	1.0150	1.0000	1.0010	1.0010	0.0267	51.8452
	2	1.0140	1.0140	1.0140	1.0000	1.0010	1.0010	0.0160	47.8571
	5	1.0125	1.0135	1.0130	1.0000	1.0010	1.0010	0.0101	43.2044
	15	1.0115	1.0120	1.0120	1.0000	1.0010	1.0010	0.0072	39.2163
	30	1.0105	1.0110	1.0110	1.0000	1.0010	1.0010	0.0052	36.5575
	60	1.0095	1.0100	1.0110	1.0000	1.0010	1.0010	0.0028	32.5694
	120	1.0090	1.0095	1.0090	1.0000	1.0010	1.0010	0.0012	24.5933
	1440	1.0070	1.0075	1.0070	1.0000	1.0010	1.0010	0.0006	22.5992
土樣三	0.5	1.0190	1.0175	1.0185	1.0010	1.0010	1.0010	0.0397	67.5466
	1	1.0180	1.0170	1.0180	1.0010	1.0010	1.0010	0.0267	62.1429
	2	1.0170	1.0160	1.0160	1.0010	1.0010	1.0010	0.0160	58.0901
	5	1.0155	1.0150	1.0150	1.0010	1.0010	1.0010	0.0102	50.6599
	15	1.0135	1.0130	1.0135	1.0010	1.0010	1.0010	0.0073	47.2826
	30	1.0125	1.0125	1.0125	1.0010	1.0010	1.0010	0.0052	43.9053
	60	1.0120	1.0120	1.0115	1.0010	1.0010	1.0010	0.0028	40.5280
	120	1.0110	1.0110	1.0110	1.0010	1.0010	1.0010	0.0012	34.4488
	1440	1.0090	1.0100	1.0090	1.0010	1.0010	1.0010	0.0006	32.4224

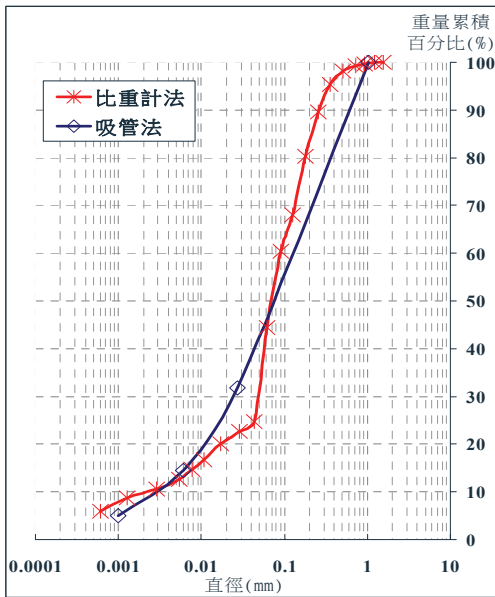


圖 5 土樣一之粒徑分佈圖

Figure 5 particle size distribution of sample one

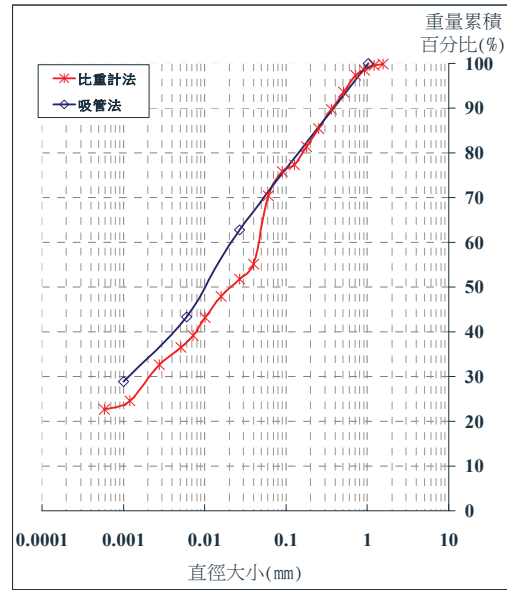


圖 6 土樣二之粒徑分佈圖

Figure 6 particle size distribution of sample

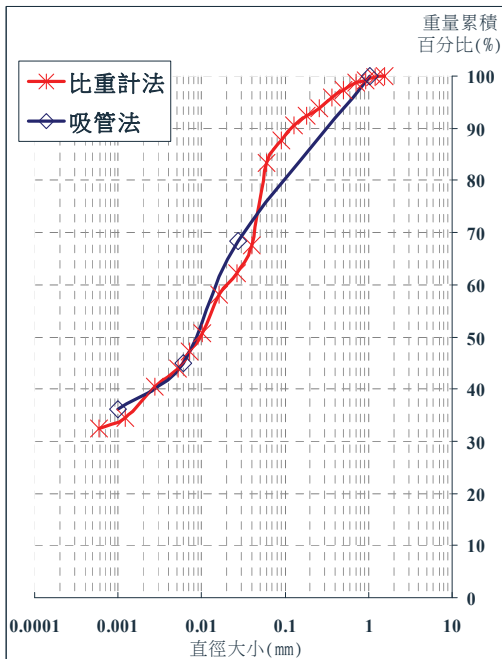


圖 7 土樣三之粒徑分佈圖

Figure 7 particle size distribution of sample three.

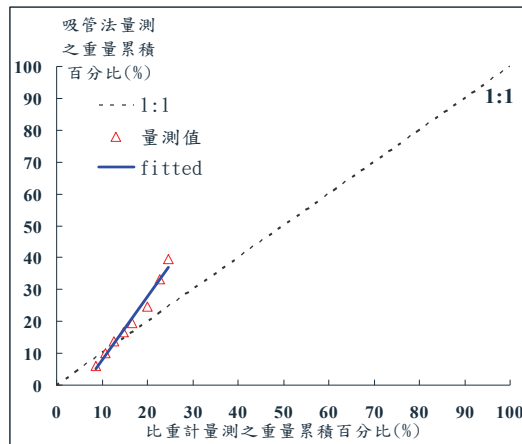


圖 8 土樣一之重量累積百分比線性迴歸分析

Figure 8. Linear regression analysis of accumulative percentage weighing for sample one.

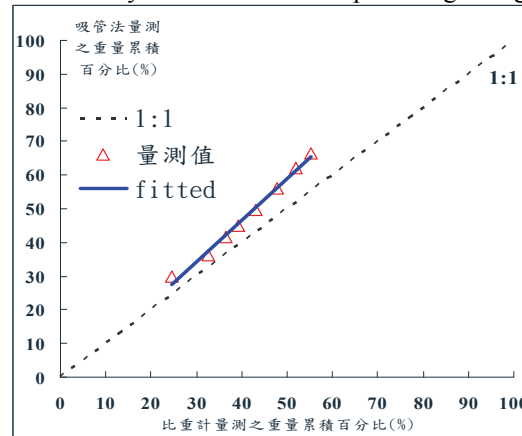


圖 9 土樣二之重量累積百分比線性迴歸分析

Figure 9 Linear regression analysis of accumulative percentage weighing for sample two.

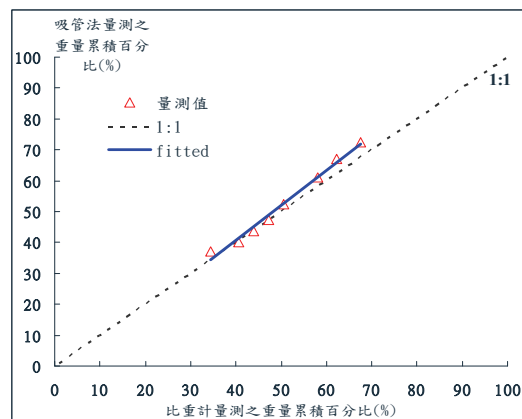


圖 10 土樣三之重量累積百分比線性迴歸分析

Figure 10 Linear regression analysis of accumulative percentage weighing for sample three.

表 5 粒徑分析實驗判定係數與均方根誤差
Table 5 r^2 and RMSE of particle size distribution experimental values

土樣	r^2	RMSE(n=8)
土樣一	0.9768**	0.0682
土樣二	0.9893**	0.0738
土樣三	0.9879**	0.0288

(**達 1%顯著水準)

表 6 粒徑分析實驗方法之比較
Table 6 Comparison of the particle size analysis experiment method

方法	花費時間	程序	前置處理	分析組數	質地分析結果	費用
吸管法	較長	較繁瑣	兩者皆	較少	兩者相當接近	較低
比重計法	較短	較簡易	複雜	較多		較高

茲將研究後兩種方法之差異列於表 6 以供參考。

參考文獻

- 周毅，洪明瑞共譯(1995) 「大地工程原理 第三版」，高立圖書有限公司，第 17-28 頁。
- 林俐玲，董小萍(1996) 「土壤物理學實習手冊」，國立中興大學。
- 林慧姿等(2002) 「統計學 二版」，新科技書局。
- 萬鑫森譯(1987) 「基礎土壤物理學 初版」，國立編譯館。
- Allen, T. (1997) "Particle size measurement," 5th ed, Chapman and Hall, New York.
- Eshel, G., G.J. Levy, U. Mingelgrin, and M. J. Singer(2004) "Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis", Soil Sci. Soc. Am. J. 68:736-743.
- Gee, G. W. and J.W. Bauder (1979). "Particle-size analysis by hydrometer:A simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters,," Soil Sci. Soc. Am. J. 43:1004-1007.
- Gee, G. W. and, J. W. Bauber (1986) "Particle-size analysis," P. 383-411. In A. Klute(ed.) Methods of soil analysis . Part1: Physical and Mineralogical methods . 2nd ed. "Agronomy Monograph no.9.ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- Gee, G.W., and D. Or. (2002). Particle-size analysis. p. 255–293. In J.H. Dane and G. C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison, WI.
- Keller, J. M. and G. W. Gee (2006) "Comparison of American society of testing materials and soil science society of America hydrometer methods for particle-size analysis", Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1094-1100.
- Liu, T. K., R. T. Odell, W.C. Etter, and T.H. Thornburn(1966) "Comparison of clay

contents determined by hydrometer and pipette methods using reduced major axis analysis,” Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:665-669.

12. Walter, N.F., G.R. Hallberg, and T. S. Fenton(1978) “Particle size analysis by the Iowa State Univ. Soil Survey Lab. P61-74.” In G. R. Hallberg (ed.) Standard procedures for evaluation of quaternary materials in Iowa. Iowa Geological Survey, Iowa City.

97年03月22日 收稿

97年04月11日 修改

97年04月25日 接受