

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

現地導水度試驗評估

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-009-018-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：單信瑜

計畫參與人員：賴威宇

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 27 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

現地導水度試驗評估

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 91-2211-E-009-018
執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：單信瑜

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中 華 民 國 九 十 一 年 十 月 二 十 六 日

現地導水度試驗評估

Evaluation of In-Situ Hydraulic Conductivity Test

計畫編號：NSC 91-2211-E-009-018

執行期限：91/8/1 - 92/7/31

主持人：單信瑜 國立交通大學土木工程學系 副教授

一、中文摘要

目前土木工程界所使用的現地導水度量測方法很多，但不論就實驗方法或者是適用條件而言，均未有相關之研究透過較完整的系統加以比較。因此，在許多工程案例中，對於淺層土壤的導水度量測，僅能依照各個單位的傳統來訂定試驗標準。例如，美國墾務局的規範中要求利用單環入滲試驗來量測土壤的導水度，而美國環保署則建議利用封閉式雙環入滲儀量測夯實黏土的導水度。事實上兩種試驗所針對的土壤導水度可能相差不多，也可能相差到 1000 倍以上。除了各種試驗所試驗的土壤體積並不相同，水流方向也並非一致之外，由於土壤的導水度從如黏土等細顆粒土壤到粗顆粒土壤，導水度值相差達 10^9 倍以上，各種試驗方法之間的精確度差異將對於試驗所求出來的結果有很大的影響。本研究將利用三種最常用的現地導水度試驗方法，進行現地試驗加以比較，得出其結果的相對差異性；且利用 FEMWATER 數值模擬，探討各種試驗的絕對精確度，與各種試驗條件變化對其精確度的影響。

關鍵詞：導水度；現地試驗；數值模擬

ABSTRACT

There are many types of in-situ hydraulic conductivity tests that are commonly used. However, there has not been a comprehensive and in-depth study on comparing the relative accuracy of these methods. As a result, different agencies specify various test method for in-situ hydraulic conductivity testing. These tests method differs in the volume of soil tested, the direction of water flow, the method to control water head, and the recording of volume of flow. Since there may be a 10^9 times of difference in the hydraulic conductivity of soils, it is important to access the accuracy of each of these method when testing soils of various range of hydraulic conductivity. Guelph permeameter, double-ring-infiltrometer, and USBR simple infiltrometer were used in this study and In addition, the computer program FEMWATER will be used to simulate the flow conditions of these tests to access the effect of varying boundary conditions on the accuracy of the these tests.

Keywords: Hydraulic Conductivity, In-Situ Test, Numerical Modeling

二、緣由與目的

在許多狀況下工程師必須進行現地土壤導水度試驗，求出土壤的導水度以提供分析與設計之需要。例如：

利用導水度估計入滲量進行地下水補注量的估計、求出掩埋場阻水層與土石壩心層與殼層的材料輻壓試驗產生之夯實土壤的導水度以計算滲流率等。

目前所通用的幾種現地試驗方法，較小型者因形成穩定之飽和球(Bulb of Saturation)濕潤土體太小，雖試驗時迅速穩定但是代表性不足。較大型者如：地表單環、雙環入滲試驗，設置與試驗均相當費時費事，進行不易。

實驗室的土壤透水試驗雖已經廣泛的應用來計算土壤導水度，但是實驗室試驗侷限於儀器的規格，土壤試體體積較小；現場試驗和實驗室的不同則在於可以做比較大的試體，所得到的數據也比實驗室來得有代表性。目前所有的現場透水試驗大致可以分成四大類，分別為(1) Borehole、(2) Porous probe、(3) Infiltrometer、(4) Underdrain。

表一 各種現場透水試驗之優點與缺點之比較

試驗方式	優點	缺點
Boutwell permeameter	<ul style="list-style-type: none">● 儀器價格便宜 (< US\$2000)● 施工簡單，儀器架設容易● 可以同時量測垂直與水平方向的土壤導水度● 可用在導水度低的土壤 (可達到 10^{-9} cm/s)● 不受地形的影響：可以在較深的地方或邊坡上施工	<ul style="list-style-type: none">● 試驗的土壤體積很小● 沒有考慮土壤不飽和的情況下土壤吸水的性質● 所需要的試驗時間較長(當土壤導水度小於 10^{-7} cm/s 時通常需要幾天到幾個禮拜的時間才能達到穩定)
BAT permeameter	<ul style="list-style-type: none">● 架設容易● 試驗時間短(通常在幾分鐘到幾個小時)● 可以同時量測孔隙水壓● 可用在導水度低的土壤 (可達到 10^{-10} cm/s)● 如果試驗的主要目的是要瞭解土壤垂直向的導水度，則為此項試驗之優點● 可以在較深的地方進行試驗	<ul style="list-style-type: none">● 儀器價格昂貴 (> US\$6000)● 試驗的土壤體積非常小● 如果試驗的主要目的是要瞭解土壤水平向的導水度，則為此項試驗之缺點● 沒有考慮土壤不飽和的情況下土壤吸水的性質
Open, single-ring infiltrometer	<ul style="list-style-type: none">● 工程費用低 (< US\$1000)● 安裝與架設容易● 大型的 infiltrometer 可以用來試驗範圍較大的土壤試體● 適用於測量垂直向的土壤導水度	<ul style="list-style-type: none">● 不適合用在導水度低的土壤 (小於 10^{-7} cm/s)● 針對水分的蒸發散必須選擇進行修正或忽略● 針對水往側向滲透情形必須修正(非單向度)● 試驗時間長(當土壤導水度小於 10^{-7} cm/s 時通常需要幾星期到幾個月的時間才能達到穩定)● 在斜率太大的地形不能使用

Open, double-ring infiltrometer	<ul style="list-style-type: none"> ● 工程費用低 (< US\$ 1000) ● 適用於測量垂直向的土壤導水度 ● 內環中的水往側向的滲透小(可視為單向度) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 不適用在導水度低的土壤(小於 10^{-7} cm/s) ● 針對水分的蒸發散必須選擇進行修正或忽略 ● 試驗時間長(當土壤導水度小於 10^{-7} cm/s 時通常需要幾天到幾星期的時間才能達到穩定) ● 在斜率太大的地形不能使用
Sealed, double-ring infiltrometer	<ul style="list-style-type: none"> ● 工程費用適中 (< US\$ 2500) ● 適用於測量垂直向的土壤導水度 ● 可以測量較低的土壤導水度(可達到 10^{-8} cm/s) ● 內環中的水往側向的滲透小(可視為單向度) ● 試驗土壤尺寸較大 	<ul style="list-style-type: none"> ● 試驗時間長(通常需要幾星期到幾個月的時間) ● 不適用在有坡度的地形上

三、研究方法及成果

本研究的實驗計畫，主要分成四個部分：

1. 利用四種現地土壤滲透儀器，分別在黏性與砂性土壤量測現地土壤滲透係數。
2. 現場薄管取樣，在實驗室內利用室內三軸滲透儀器模擬現地狀況量測土壤滲透係數。
3. 利用 FEMWATER 此有限元素分析之數值程式模擬現地土壤狀況計算土壤滲透係數。

將程式模擬、現地試驗與室內試驗結果互相比較，利用其結果比較各試驗之適用性與精確度。

3.1 試驗場地

本試驗所選定的試驗場所，分別為黏性與粉土性質的土壤。黏性土壤的試驗地點選定在交通大學光復校區內工程六管施工地點。粉土性質土壤的試驗地點選在新竹縣寶山鄉三峰國小校地，該校位於寶山鄉內，地層則為土黃色之粉土。

3.2 土壤基本物理試驗

土壤含水量、孔隙比、土壤粒徑分佈和土壤分類，對土壤滲透性質影響極大，在本研究中佔有重要的地位。需要進行的土壤物理性質試驗均以 ASTM 規範為依據。

1. 土壤含水量試驗 (ASTM D2216)
2. 比重試驗 (ASTM D854)
3. 土壤粒徑分析 (ASTM D422)
4. 阿太保液、塑性限度 (ASTM D4318)

3.3.3 土壤保持特性試驗方法

研究測量土壤保持特性之方法，是採用為 Soil Moisture 公司製造的 Model 1500, 15 Bar Pressure Plate Extractor。儀器包含金屬容器、15bar 陶瓷壓力板、壓力調節閥與空壓系統。陶瓷壓力板之設計如圖 3.1，Model 1500 儀器裝置如圖 3.2。

因儀器設計以壓力排出土壤中之水份，故僅能得到土壤的主要排出曲線，並無法獲得土壤的主要濕潤曲線。在本試驗中所採取的壓力範圍為 0 12 Bar，分別施加 1、2、3、4、6、8、10、12bar 共八點壓力，

其中因空壓機僅能穩定提供到 8bar，故 10、12bar 之壓力則採用高壓氮氣鋼瓶來進行。

3.3 現地土壤透水試驗

3.3.1 Guelph Permeameter 試驗

Guelph Permeameter 由美國 Soil Moisture Equipment Corp. 所製造。此試驗可視為 Borehole 定水頭試驗，其理論基礎為，在一鑽孔中之定水頭狀況下，一特定大小的飽和球體(Bulb)會形成，此穩定球體產生時，則孔中水之流量會維持為定值，孔中的水位與流量則可用來求得土壤的飽和含水量。

試驗步驟與數據計算：

試驗首先以儀器中特製鑽頭 A，再以鑽頭 B 將孔底挖平，最後以鑽頭 C 將孔壁受擾動的土刷去。將組裝好的儀器架上鑽好的孔中。試驗開始時只需將氣管依照水頭控制管刻度提高至所需高度即可，依照水流速度定時記讀儲水管讀數，直到連續三次讀數差相同時即可進行第二階段試驗。通常第一階段試驗採用 5 公分定水頭進行試驗，第二階段採取 10 公分定水頭試驗，試驗方式只需再將氣管提高 5 公分，則可繼續記讀數據直到末三次讀數差值相同時，試驗即可停止。利用兩階段穩定時所得時間與滲流量之關係，再以下列公式可以求得土壤的飽和滲透係數：

$$k_{fs} = (0.0041)(Y)(\overline{R_2}) - (0.0054)(Y)(\overline{R_1}) \quad (3.1)$$

其中： k_{fs} 為現地土壤飽和之滲透係數； $\overline{R_1}$ 、 $\overline{R_2}$ 則分別為階段一與階段二達穩定狀況下儲水管內每秒鐘下降的高度； Y 為儲水管係數，每組 Guelph Permeameter 儀器都有不同的儲水管係數，係數分為內管係數與雙管係數，視試驗方式來使用。上式所得的土壤滲透係數單位為 cm/s。

3.3.2 Open Double-Ring Infiltrometer 試驗

試驗採用 Geotest Instrument Corp. 所製做的 Double-Ring Infiltrometer Instrument。規格及實驗方法參考 ASTM D3385 規範。試驗步驟與數據計算：

1. 將地表土壤整平後，將外環打進土層約 15 公分(敲打過程先將外環蓋上蓋子，並在蓋子上墊上木塊，用榔頭敲擊一至兩下，繞著蓋子敲打，直到外環打入土層約達 15 公分)。
2. 將內環中心，對準外環，再將內環打入土層約 10 公分。
3. 將大、小量筒架設好，大量筒用水管接至外環，小量筒用水管接至內環。
4. 決定內外環水位高度(內外環水位高度需相等)，可視現地土壤種類而調整，其水位高度範圍大致為 2.5 公分 15 公分。將內外環進水浮板調整至步驟 8 所決定之內外環水位高度。並分別將水管接至內外環浮板之進水口。分別同時於大小量筒注水，直至大小量筒注滿水。
5. 將水注滿大小量筒後，開始計時。記錄大、小量筒讀數，於實驗開始第一小時內，每隔 15 分鐘記錄一次，第二小時起，每隔 30 分鐘記錄一次，第三小時起至第六小時每隔 60 分鐘記錄一

次。

試驗數據結果僅借助於假設的水頭狀況來計算水力梯度，並利用達西公式計算現地飽和滲透係數。

3.3.3 簡易現地滲透試驗

簡易現地滲透試驗是孔內注水變水頭方式試驗，是由 Borehole 試驗簡化而來。

試驗步驟與數據計算：

試驗僅有一階段，且試驗方式可直接利用現地工地密度試驗之試坑進行試驗，孔徑約 16 公分、孔深 30 公分。開挖後若注水後有坍塌之虞，可事先在孔內填補乾淨沙。孔內注水靜置 24 小時以上，若單位時間入滲量達到穩定時，即可視為孔邊之土壤已達飽和，則可開始進行試驗觀測讀數。觀測時間間隔則視土壤種類或滲流速度來決定，原則上每小時觀測一次數據。當所得的單位時間入滲量達到穩定時，現場試驗即告完成。

簡易試驗之滲透係數是根據 Two Stages Borehole Permeameter 規範，將 ASTM D 6391-99 中所定之公式將水位高 H_i 稍微修改，以符合此試驗之條件。

3.4 室內土壤三軸滲透試驗

此試驗參考 ATSM D 5084-90：Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter。

3.5 FEMWATER 程式模擬

試驗結果使用 FEMWATER 程式進行模擬，因現地土層試驗狀況多為未飽和，FEMWATER 計算中除了需要提供基本土壤參數，另外還需要三組曲線以表示土壤特性，相對滲透係數(relative conductivity)對張力(pressure head)之關係、含水量(moisture content)對張力之關係、保水容量(water capacity)對張力之關係。

1. 輸入室內三軸滲透試驗之土壤滲透係數 k_s ，模擬現地土壤狀況計算可得現地狀況單位時間之流量，比較各種試驗計算之流量與實際流量間之差異。
2. 改變 FEMWATER 中輸入的土壤滲透係數 k_s ，利用試誤法使計算所得之流量與實際狀況相同。比較不同試驗所得 k_s 值與室內三軸滲透試驗之差異。
3. 根據 1、2 的比較，找出實際與計算所得之土壤滲透係數 k_s 最接近的試驗，應為最理想的試驗。
4. 根據 1 之計算方式，分別輸入 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} cm/s，計算各試驗所得的流量，再根據各規範，計算各流量所得之土壤滲透係數，比較這些數值則可歸納在以上範圍各試驗精確度的差異。

四、結與果討論

4.1 現地土壤滲透儀器試驗結果

三組儀器所得現地土壤滲透係數如表 4.1，其中

Double-Ring Infiltrometer 試驗時間歷時較長，試驗面積較大，相對水之蒸發散量會對實驗結果產生影響。以類似之環境測量相對於試驗面積，隨溫度與溼度之改變，內環水量有 1 ml/min 以上的蒸發散量，以試驗觀測間隔 1 小時計算，將有 60ml 以上的誤差量，此誤差量在滲透係數越小的土壤試驗時，此誤差量的影響將更顯著。

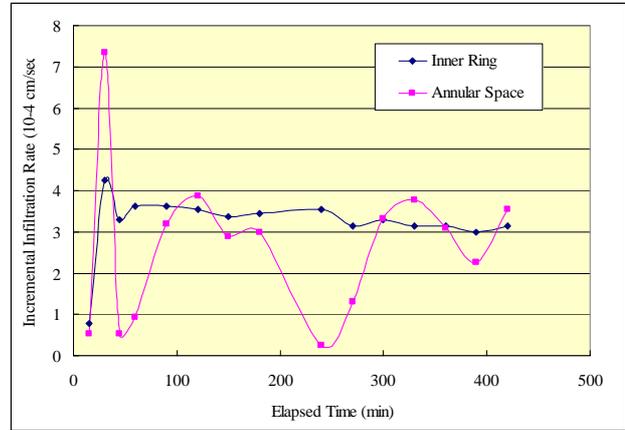


圖 4.1 交大紅土雙環試驗結果

Guelph Permeameter 試驗屬於定水頭 Borehole 試驗，試驗水頭相較 TSB 試驗為小，在本試驗中較為適合。試驗孔徑相對也較小，試驗時間縮短，蒸發散量之影響也相對減小。

表 4.1 現地試驗試驗所得土壤滲透係數

	新竹交大紅土	三峰國小黃土
Guelph Permeameter	8.14×10^{-6} cm/s	2.63×10^{-5} cm/s
Double-Ring Infiltrometer	3.14×10^{-4} cm/s	1.41×10^{-3} cm/s
簡易現地透水試驗	5.62×10^{-2} cm/s	8.31×10^{-2} cm/s
室內三軸滲透試驗	4.5×10^{-7} cm/s	2.02×10^{-6} cm/s

4.2 FEMWATER 參數設定與模式建立

執行 FEMWATER 進行計算，需要給定土壤飽和狀況下之滲透係數 k_s ；三組曲線以表示土壤特性，相對滲透係數(relative conductivity)對張力(pressure head)之關係、含水量(moisture content)對張力之關係、保水容量(water capacity)對張力之關係。

FEMWATER 屬於三維之有限元素分析方式，其中滲透係數之設定分為 xx、yy、zz 三方向，在本試驗中假設土壤狀況為均質等向的，故三向的飽和滲透係數均相等。而上述三組曲線之關係，可利用 RETC 軟體進行迴歸計算之後所得，此軟體用以分析不飽和區域中之土壤滲透係數，程式主要以 van Genuchten (1980)土壤特性與壓力水頭關係做為計算的依據。利用已知之參數，飽和含水量 w_s (%)、殘餘含水量 w_r (%)、飽和狀況之土壤滲透係數 k_s (cm/s)與室內試驗所得土壤保持曲線進行迴歸計算，可以得出 FEMWATER 所需之參數，其依據的公式與 RETC 相

同，迴歸結果數據計算結果列於表 4.2。

表 4.2 RETC 迴歸計算結果

	已知數據			RETC 迴歸	
	w_r %	w_s %	k_s cm/day	VG- α	VG- β
交大紅土	18.95	35.53	0.0388	0.00414	1.56517
三峰黃土	8.03	30.54	0.1745	0.00424	1.79281

FEMWATER 網格之建立以越接近試驗儀器之地方越小為原則，同時為減小計算量，縮短計算時間，採取切片之方式，試驗模式網格如圖 4.2。

邊界值之設定假設地下水位在 630 cm 處，下邊界至 1000 cm；上邊界之土壤假設為田間含水量所對應之壓力值；其餘各邊之邊界假設為 no flow 狀態。田間含水量之值以保持曲線中當 suction 為 0.3 bar 時所對應之土壤含水量(Jamison & Kroth, 1958)計算。計算首先以上述狀況模擬，計算結果可得到試驗前未飽和層之壓力分布，即為未進行試驗前之土層狀況，同時以此結果視為模擬試驗過程時之初始狀況。

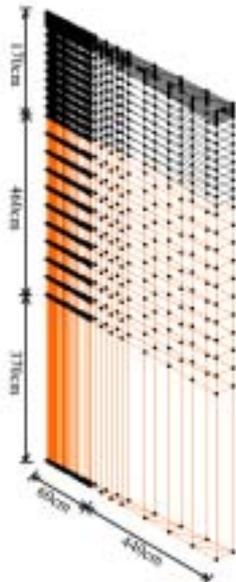


圖 4.2 FEMWATER 模式網格

五、結論

1. 三種現地試驗結果顯示，三種試驗的結果所得之土壤導水度與實驗室試驗之土壤導水度有相當大的差異；且均較室內試驗所得之值為高。
2. 三種現地試驗中，Guelph Permeameter 所得之導水度最接近室內試驗結果；簡易 borehole 試驗結果差距最大。
3. 利用 FEMWATER 模擬，改變土壤側向與垂直向導水度之比例，可探討三種現地試驗受此比例之影響。其中，Guelph Permeameter 所受影響較小。

六、參考文獻

1. Daniel, D. E., (1983), "Permeability test for unsaturated soil." *Geotech. Test. J.*, 6(2), 81-86
2. Daniel, D. E., (1984), "Predicting the hydraulic conductivity of compacted clay liners." *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 110(2), 285-300
3. Daniel, D. E., et al. (1984), "Permeability testing with flexible-wall permeameters." *Geotech. Test. J.*, 7(3), 113-122
4. Daniel, D. E., and Trautwein, S. J. (1986), "Field permeability test for earthen liners." *Proc., In Situ '86*, Blacksburg, Va., 146-160
5. David E. Daniel (1989), "In Situ Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Clay" *Journal of Geotechnical Engineering* v 115 n 9 Sep 1989
6. Hvorslev, M. J. (1949), *Time lag in the observation of ground-water levels and pressures*. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
7. M. Th. van Genuchten, F. J. Leij and S. R. Yates (1991), *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Riverside, California 92501
8. Olson, R. E., and Daniel, D. E. (1981), "Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils." *ASTM STP 746*, 18-64
9. Reynolds, W. D., and Elrick, D. E. (1985), "In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the a-parameter using the Guelph Permeameter." *Soil Sci.*, 140(4), 292-302
10. Reynolds, W. D., and Elrick, D. E. (1986), "A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationships." *Ground Water Monitoring Rev.*, 6(1), 84-95
11. Reynolds, W. D., Elrick, D. E. and Clothier, B. E. (1985), "The constant head well Permeameter: Effect of unsaturated flow." *Soil Sci.*, 139(2), 172-180
12. Reynolds, W. D., Elrick, D. E., and Topp, G. C. (1983), "A reexamination of the constant head well Permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table." *Soil Sci.*, 136(2), 250-268.
13. Soilmoisture Equipment Corp. (1987). Model 2800 *Guelph Permeameter*. Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, Calif.
14. Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium- Textured Soils by Porous-Plate Apparatus (2000), *ASTM D2325-68 (Reapproved 2000)*
15. Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Fine-Textured Soils by Pressure-Membrane Apparatus (2000), *ASTM D3152-72 (Reapproved 2000)*