

室内透水性の測定法

大阪府立大学農学部 手 島 三 二

I ま え が き

土壤の透水性を測定することは、水田および畑地のかんがい排水に関する諸問題あるいはそのための各種の造構物の材料あるいは基礎として土壤を取扱う場合の諸問題に対して重要な意義をもつことは今更言を要しない。

土壤の透水性の測定方法には比較的小さい寸法の試料について実験室内で行なうものと野外で実際の現地土壤について行なうものと2通りあつて、筆者に与えられた課題は前者の透水性の室内における測定法である。

土壤の透水性は1856年Darcyによつて解明された、砂中の飽和流動に関する実験的法則、

$$q = k \cdot i \cdot A$$

q : 単位時間に砂中を層流状態で流下する水量

i : 動水傾度(勾配), いま損失水頭を(h), その間の浸透流路長を(ℓ)とすれば

$$i = h/\ell$$

A : 流下断面積

このDarcyの法則における透水係数(k)の大小を測定することによつて、飽和状態およびその理論の拡張によつて不飽和状態もともに、土壤中の水分の移動の難易の度合、すなわち透水性を知ろうとするのが、この測定法の現在の理論的背景である。

II 飽和流動状態

飽和状態についての測定法としてはTevzaghiなどによつて当初工夫された、定水位透水試験,¹⁾これは動水傾度が不変、すなわち試料の両端における水頭差が不変であれば、先のDarcyの式は

$$Q/t = k \cdot i \cdot A = k (h/\ell) \cdot A$$

Q : t 時間に断面 A の柱状の試料の土壤中を流れる水量

とかくことが出来る。よつてこの原理で $k = Q \cdot \ell / A \cdot t \cdot h$, として結果を求めめる試験方法と、Gilboyなどによつて考案された、変水位透水試験,¹⁾これは試料土の両端の水頭差が変化する場合、

$$dQ = k \cdot (h/\ell) \cdot A \cdot dt$$

h : ある時刻の水頭, dQ : dt 時間の流量

いま断面 a のスタンド・パイプの水位が dt 時間内に dh だけ低下したとすれば、 $dQ = -dh \cdot a$

これらから、 $-\frac{dh}{h} = (k \cdot A / \ell \cdot a) \cdot dt$,

t_1 から t_2 の時間にパイプ内の水位が h_1 から h_2 に低下したとすれば、積分して

$$\ln(h_1/h_2) = k_1 \cdot A / \ell \cdot a \cdot (t_2 - t_1)$$

よつて $k = 2.3 \frac{\ell \cdot a}{A(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2}$

から k が求められる試験方法である。

これらの原理に基いて各方面で試料土の性質に応じて各種の規格が検討、採用されているが、農業工学分野では最近土質工学会が今春発行した土質試験法²⁾で JIS. A. 1218 の規定に準拠して、試験結果の検討に共通の場をもつことを提案したので、その概要を紹介する。

両法の試験装置は図 1. 1 図 1. 2 に示すとおりである。定水位の場合には透水円筒は内径 10 cm, 越流口までの高さ 15 cm を原則とし、内径は少なくとも試料上の最大粒径の 20 倍以上としている。これは円筒の径に対して土粒子の径が比較的に大きいときは円筒周壁に沿つて試料の間隙が大きくなるので、その部分が透水しやすくなることを防ぐためである。試料の高さは約 10 cm で目的によつて突き棒で突き固めるか、サンプル・チューブ中にとつた乱さない試料を使うかする。なお円筒より径の小さい乱さない試料に対してはそのすき間はベントナイトのペーストなどで密封して周辺の漏水を防止しなければならない。フィルターとしては厚さ 1 cm 丈、砂礫でおおうことにしている。これは k が 10^{-8} cm/g よりも大きい試料に適用できるもので、もつとも簡単な試験法であつて、熟練を要しない。また流速もはやいので、浸透水には変水位に対する場合のように煮沸によつて脱気したものを通常は使用せず、また浸透水量を測定する容器中の蒸発を防ぐような特別な措置は講じない。しかしやや透水性が低い場合にはメスシリンダー中に軽油を一滴たらししておくことにする。結果の整理としては、 $T^{\circ}\text{C}$ の水温で測定した k は水の粘性変化による補正を行つて、 15°C に換算した k と土粒子の比重、試料の含水量、乾燥単位体積重および間隙比を共に整理することになっている。

変水位の場合は円筒は内径 10 cm, 高さ 12 cm を原則とする。スタンド・パイプは長さ 1 m の目盛付ガラス管で内径は試料の透水性の大小に応じて、5 mm, 20 mm, 50 mm 程度のもを選ぶ、そして一度沸騰させて脱気した浸透水を貯水槽に貯え、また試料を充分飽和させるために真空度 600 mm Hg 以上に保ちうる真空ポンプ吸引装置が付加されている。この方法は k の比較的に小さい試料に適用する目的で規定されているが、スタンドパイプの径を適当に選ぶことによつて、 k が $10^{-1} \sim 10^{-8} \text{ cm/g}$ の広い範囲に適用できる。しかし主目的は $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ cm/g}$ の範囲であつて、この付近では透水性が不安定であつて、正確に測定するにはかなりの熟

練が必要のようである。この試験では浸透水や試料土あるいはフィルター中に残留する空気の影響は見のがせないで、高い飽和度を実現しかつ試料土中に気泡を生ずることを避けるため真空ポンプによる吸引を行い、さらに一度沸騰させて脱気した水、これは常温では空気含有量を回復する速度はかなりおそいので、これを使用する。試験中、漏水、飽和度の変化、細粒子の流失などの欠陥がおこつて k に影響しているかどうかを検査するため、スタンド・パイプに2つの高さ h_1, h_2 の外に $\sqrt{h_1 \cdot h_2}$ の高さを標示しておき、 $h_1, \sqrt{h_1 \cdot h_2}, h_2$ をそれぞれ通過する時刻を t_1, t_m, t_2 として読みとつておく。完全に飽和されているときは、 $(t_m - t_1) = (t_2 - t_m)$ が成り立つべきであつて、両項が2~3%以上相違したときは先の欠陥がおこつている疑いがあるから、試験をやり直す必要がある。

比較的 k が大きい耕地の表土や心土に対して、結果の精度はやや劣るが、現地にも運搬して簡易にやれる変水位試験の方法の1例として Flannery と Don Kirkham が工夫した装置³⁾がある。これは Field Core Permeameter と称しており、

$$k = \frac{2}{t}$$

t : 2cm丈水位低下するに要した時間

で近似的に迅速にもとめることを提案している。この場合、採土地点を field capacity 程度に湿らせ、円筒状に試料土をとり、1~2日水漬した後、試料土上に水を張り、1cm透過させては満水することを繰り返す、定常状態に達したとき測定するものとしている。

k が $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ よりも小さい試料土には変水位試験方法では長時間を要すること、かつ周壁をよくシールしても漏水量がかなりの誤差となることなどのため、かなり困難である。これには別に土壌の圧密試験 (JIS. A. 1217 に規定された圧密リングを用いる方法と軸圧密試験法とがある) を実施し、圧密係数、体積圧縮係数などから間接的に k をもとめる方法²⁾がある。

さらにこの方法では現地から乱さない試料を採取して、その k を知ろうとしても、実際の地盤の透水性とはかなり相違することがある。これは、試料が小さすぎてき裂や大孔隙あるいは大きな礫や転石がある状態の現地の透水性を代表しないこと、試料の含水比が変化したり、気泡がはいつたりすること、試験する浸透水と地下水とで成分が異なることなどが主な原因と考えられる。

また現地では透水方向によつて k が異なる傾向があることと共に透水性を知つて適用する目的の如何によつて、現地における透水試験を併せて行なうなど、これらの結果を利用するにはそれをもつ意義を充分に考える必要がある。

III 不飽和流動状態

この状態に対して先の Darcy 法則を基礎として、それを含水比の拡散方程式に変型、拡張して適用することを 1950 年に Childs と Collis-George が提唱して以来、Klute, Gardner, Philip, Young, Miller と Elrick, Rijtema, Kunze と Don Kirkham, Jackson と van Bavel と Reginato などによつて Infiltration や Absorption の研究に対する基礎式として使われ、その発展として 1957~1958 年に Philip と de Vries は液相の移動だけではなく、気相にも分れて水分は移動することを考え、しかも非等温過程の水分移動を記述するには、液、気両相の運動方程式、両相の相互転化項を含んだ水分連続式、熱輸送式および熱量保存則の 4 つの基礎式にもとづいた連立 2 階の偏微分方程式を不飽和透水の基礎式としなければならないことを示したが、その解析は未だ手がつけられていない段階であつて、現在は気相としての移動は無視して、Childs 型の拡散方程式を基礎式とした実際の解析が行われている。

$$\partial\theta/\partial t = V \cdot \{K(\theta) \nabla\phi\}$$

ϕ : 毛管, 重力両 potential の和,

∇ : vector differential operator

であつて、特に Darcy 法則の拡張としながら飽和透水と著しく相違する点は透水係数にあたる、この場合は capillary conductivity あるいは unsaturated hydraulic conductivity (L/T) とよばれる定数 $\{K(\theta)\}$ は含水状態 (θ) の関数である点であつて、原理的に大きい疑点と考えられるところである。ともあれ、これを基礎式として Gardner 以下大部分の人達は 1 次元水平流の場合、

$$\partial\theta/\partial t = \partial/\partial x \cdot \{K(\theta) \partial\Psi/\partial x\}$$

Ψ : 毛管 potential

であつて、つぎの 2 つの仮定を導入する。

(1) $\Psi = a + b \cdot \theta$ a, b : 定数

(2) Ψ の微小変化の範囲 ($\Delta\Psi$) では $K(\theta)$ は一定とする。

その上で先の式は

$$\partial\Psi/\partial t = D \cdot \partial^2\Psi/\partial x^2, \quad D = K(\theta) \cdot b$$

この D は Soil moisture diffusivity と称されるものであつて、このように線型化した上で、解をもとめている。

その測定装置としては Moore, Taylor, Richard と Weeks などによつて試みられた土柱内に Tensiometer を埋めて、水分移動に伴う水分張力の時間的、場所的变化をもとめて、 $K(\theta)$ を計算する方法 (土柱法)、あるいは Haines 以来多くの人達が行なう pF 特性をもとめる元来の目的の外に、Tension plate に吸引負圧をかけることに

よつて、outflow method と称する流出量の非定常解析法を用い、 $K(t)$ をもとめる負圧法や cellophane の半透膜（これはもつとも高圧な1.5気圧の加圧ができる）や多孔質な ceramic plate あるいは millipore filter と称する monel plate や stainless steel plate を流出界面とする pressure membrane や pressure cell を使用し、同じく outflow method によつて解析する加圧法とがある。ここでは最近アメリカその他で盛んに試みられていることが報告されている加圧あるいは吸引装置による outflow method の現状を紹介する。

cellophane 膜を使った pressure membrane は1941年にRichard⁴⁾によつてpF ~水分特性をもとめる装置として開発されたもので、図1-3の通り、2本の gas source に若干の差圧をもたせることにより試料土を cellophane に密着させ下から出てくる浸透水をうける構造であるが、高圧時ほど浸透水の誘導とそれが小量であるためにおこる誤差や長時間の測定中の gas 圧の調節あるいは蒸発などのため、初期のものは測定がなかなか困難であつたが、最近は改良されたものがわが国でも製品化されている。さらに最近1.000 millibares までの低圧下では透水に対する抵抗性（これはimpedance として取扱われる）が明瞭でよい ceramic plate や 200 millibares までのさらに低圧下では monel plate や stainless steel plate による pressure cell が開発されてきた。図2-1は Kunze と Kirkham⁵⁾のもので、cell は plexiglas 製 試料土は径7.5cm、高さ7.5cmで流出量は目盛のある1cc のピペット内の気泡の移動で測定し、porous plate 内に浸入する空気を排除する給水装置を付加している。図2-2は Reginato と Van Bavel⁶⁾のもので、cell は真鍮製で試料土は径5.8cm、高さ3.2cmであつて、この cell 全体を逆転して取り外し、重量で測つて流出量を求める方法をとつている。また吸引圧を水頭によつてかけ、気泡の移動によつて流出量を知る、図3-2の Bruce と Klute⁷⁾の装置などがある。さらに porous plate 内に気泡が浸入しやすい欠点および試料土の収縮によつて plate 上で試料土がはがれ、impedance が不安定となる欠点を是正する目的で、図3-3に示すとおり Klute と Whisler と Scott⁸⁾は円筒状の porous ceramic cylinder を製作し、円筒流によつて行つた装置を考案した。ceramic cylinder 内から気泡を追い出すために多くの loop をつけた小さい棒磁石を挿入しておき、外から別の磁石でそれを動かすよう考へている。

以上は装置の概要であるが、解析法としては当初 Gardner は membrane 自体の impedance は無視して解をもとめた。

$$\ln \frac{Q_{\infty} - Q_t}{Q_{\infty}} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{D\pi^2 t}{4L^2}$$

Q_{∞} : 総流出量 , Q_t : t 時刻までの流出量 , L : 試料土の厚さ

しかし、その実験結果は porous plate の種類をかえることによつて D すなわち $K(\theta)$ に大きい差異を生ずる、不満足なものであつたので、Miller と Elrick あるいは Rijtema は membrane の plate の impedance を無視せず、それを試料土の impedance に対する比率とした無次元項に書きかえた。それを Rijtema によつて示せば、

$$hL = \frac{K_p \cdot L}{K \cdot L_p} = \alpha \tan \alpha$$

K_p : membrane の K , L_p : membrane の厚さ
と超越関数において、解をもとめたものは、

$$\ln \frac{Q_{\infty} - Q_t}{Q_{\infty}} = \ln \left[\frac{2 h^2 L^2}{\alpha_1^2 \{ hL(hL+1) + \alpha_1^2 \}} \right] - \alpha_1^2 \frac{Dt}{L^2}$$

α_1 : $\alpha \cdot \tan \alpha = hL$ の第1根

そして、これから hL の各段階の値に対する標準の理論曲線を描いておいて、実験でえた値を透明対数紙に図示したものをそれに重ねて図解的に D を求め、別にえた b の値によつて $K(\theta)$ を計算する、簡便な方法を Kunze と Kirkham⁵⁾ は考案し、それによつて $K(\theta) \sim \theta$ の特性を検討した。それらの実験結果を一部示せば、図3-1は総流出量の時間的変化⁶⁾を示し、図3-2は張力～水分特性⁷⁾を示すものであつて、図2-3は $K(\theta) \sim \theta$ 特性⁵⁾を各種の plate によつて求めたものである。

これらの方法と実験結果に対して、Jackson, van Bavel と Reginato⁹⁾ は忠実な追試にもとづいて、あるいは Bruce と Klute は自己の工夫による Tension plate outflow method⁷⁾ でえた結果によつて検討しているが、これらの検討結果を総合的に判断すると、測定の繰り返しによる結果のばらつきが大きいことは改良の余地があると考えられるところであり、現在の段階では、ややきびしすぎるかも知れないが、outflow method によつては値の大きさの order をおさえる程度であるといえるが、基礎とする理論、すなわち Darcy 法則の発展に対する試みと共に、不飽和透水の難易を定量的にとらえようとする、これら一連の研究結果は今後の発展に大きい意義をもつものとするものである。

IV むすび

以上、未熟な小論であるが、各分野の知識の交流に幾分なりとも役立てばと考え、とりまとめたものである。なお、文献内容の検討その他に京都大学農学部農業工学教室、海田能宏氏に多大の協力をえたことを付記し、謝意を表するものである。

引 用 文 献

- 1) D. P. Krynine : Soil Mechanics, 1941
- 2) 土質工学会編 : 土質試験法, 1964
- 3) R. O. Flannery & Don Kirkham : Soil Sci. 97, 1964
- 4) L. A. Richards : Soil Sci. 51, 1941
- 5) R. J. Kunze & Don Kirkham : Soil Sci. Soc. Amer. Proceedings, 26-5, 1962
- 6) R. J. Reginato & C. H. M. van Bavel : Soil Sci. Soc. Amer. Proceedings, 26-1, 1962
- 7) R. R. Bruce & A. Klute : Soil Sci. Soc. Amer. Proceedings, 27-1, 1963
- 8) A. Klute, F. D. Whisler & E. J. Scott : Soil Sci. Soc. Amer. Proceedings, 28-2, 1964
- 9) R. D. Jackson, C. H. M. van Bavel & R. J. Reginato : Soil Science, 96, 1963

以 上

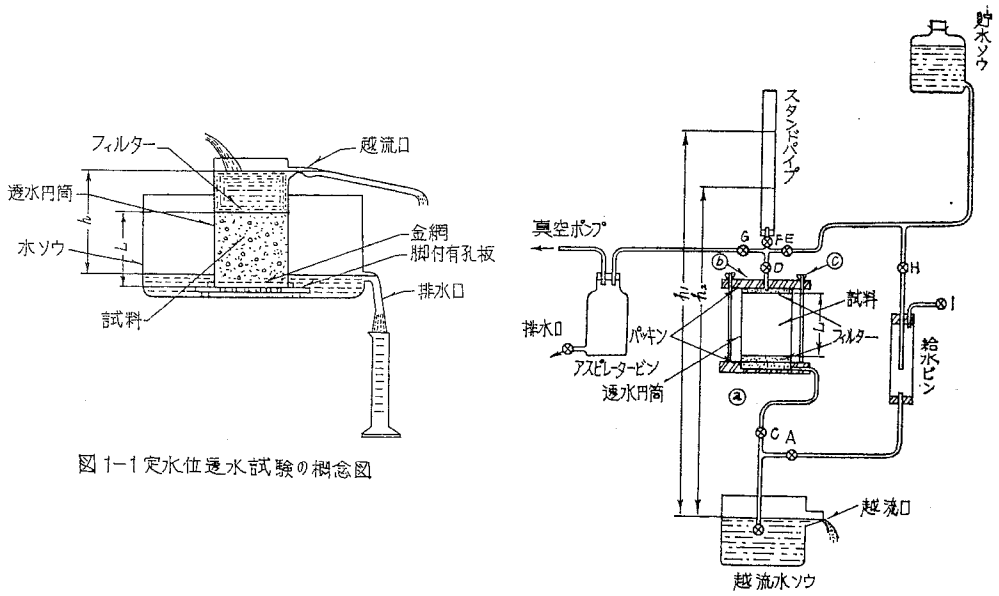


図 1-1 定水位透水試験の概念図

図 1-2 変水位透水試験の概念図

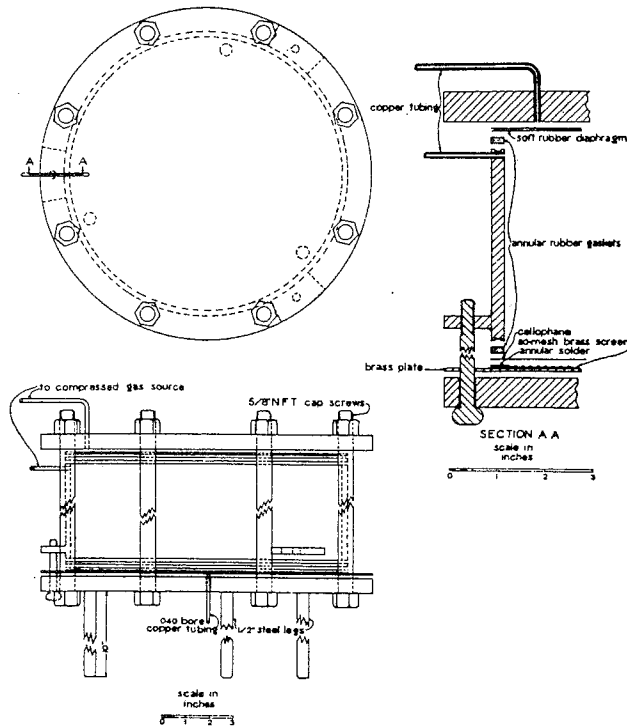


図 1-3 PRESSURE-MEMBRANE EXTRACTION APPARATUS

(after L. A. Richards, 1941)

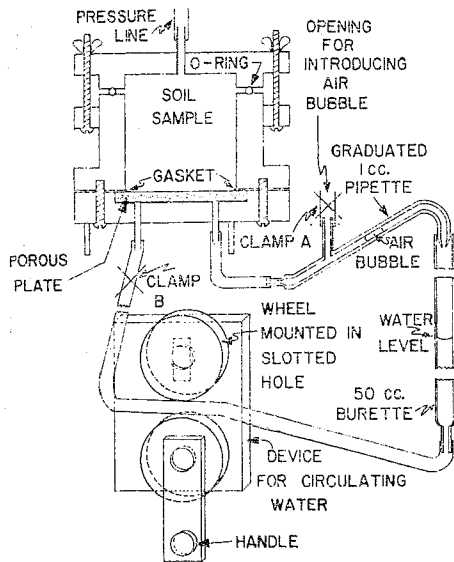


Figure 1--Laboratory equipment used in measuring outflow from the soil sample.

(after R.J. Rejzista & G.H. Mason, 1962)

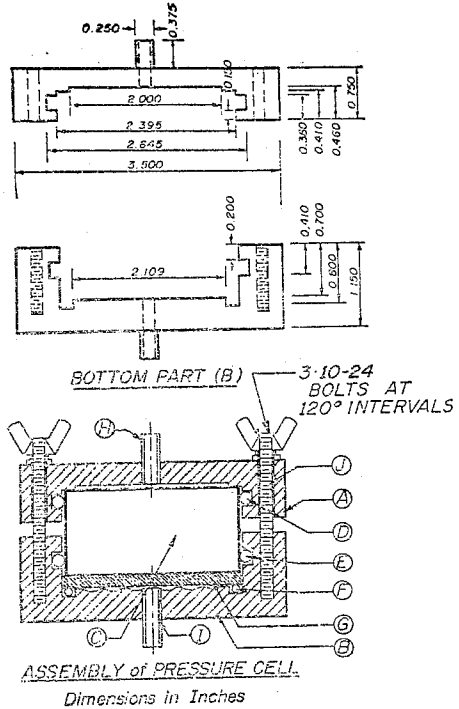


Figure 1--Dimensions and assembly of pressure cell.

(after R.J. Rejzista & G.H. Mason, 1962)

2-3

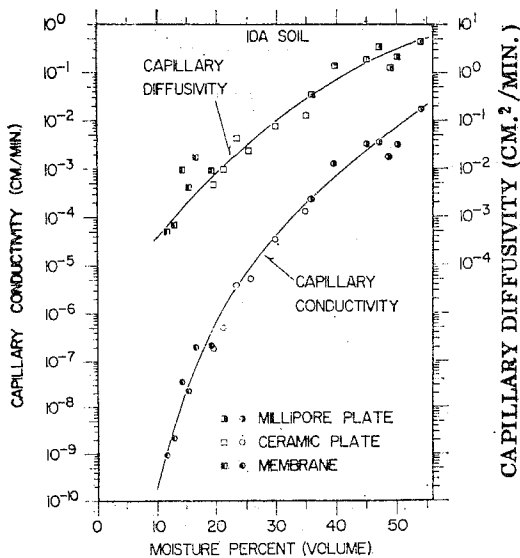


Figure 4--Capillary diffusivity and capillary conductivity determinations of the Ida soil plotted as a function of the moisture content.

(after R.J. Kunze & Don Kirkham, 1962)

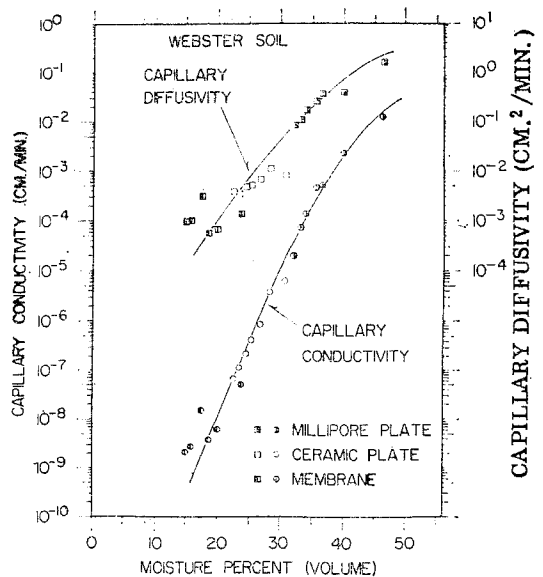


Figure 5--Capillary diffusivity and capillary conductivity determinations of the Webster soil plotted as a function of the moisture content.

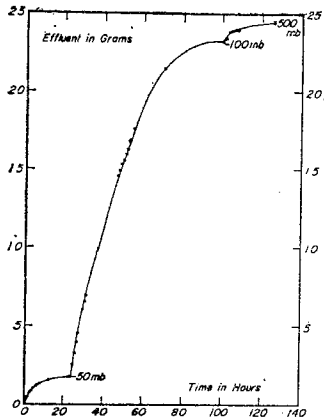


Figure 3-1 Amount of water released at three pressure potentials vs. time for 50-500 μ sand using ceramic plate in cell.

(after R.J. Kung & Don Kirkham, 1952)

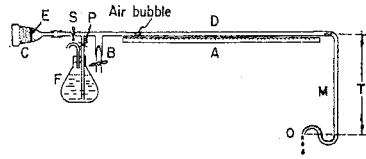


Figure 3-2 Tension plate apparatus for measurements of volume outflow as a function of time.

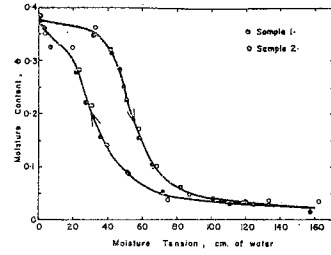


Figure 3-2 Moisture retention curves for 50 to 250 μ Bloomfield sand.

(after R.R. Bruce & A. Klute, 1953)

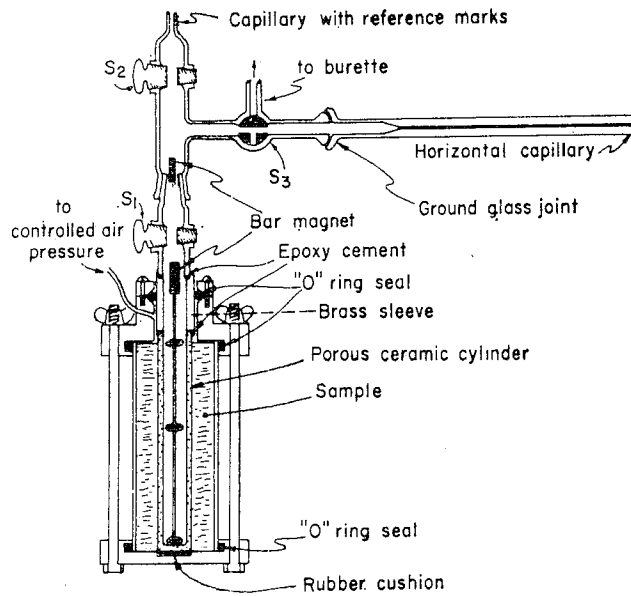


Figure 3-3 Diagram of the pressure cell with cylindrical flow geometry.

(after A. Klute, F.D. Whisler & E.J. Scott, 1964)