

粘性土地盤に対する水平方向透水試験法

A HORIZONTAL PERMEABILITY TEST FOR A COHESIVE SOIL STRATUM

赤木 俊允*・石田 哲朗**

By Toshinobu AKAGI and Tetsuro ISHIDA

A new permeability test is proposed which is conducted on an undisturbed sample encased in a thin-wall sampler. Two rows of small holes are drilled diametrically opposite on the side of a thin-wall tube. Water under constant pressure is supplied through the holes and fed into the soil sample to maintain a steady seepage flow in it. The seepage thus obtained makes it possible to compute the coefficient of permeability in the horizontal direction of the whole sample and to evaluate realistic mass permeability for a stratum of a soft cohesive soil with substantial thickness.

Keywords: anisotropy, laboratory testing, permeability, site investigation, test procedure

1. はじめに

軟弱地盤の透水係数は通常、圧密試験または変水位透水試験によって求められる。鉛直方向の透水係数が要求されている場合には、透水係数の平均値は最小値によって支配されるので、これらの要素試験によって一応の目的は達せられる。しかし、水平方向の軟弱粘土層全体の平均透水係数は、最大値によって大きく影響される。したがって、鉛直方向の場合から90度回転して切り出した小さな試料を用いて、通常の圧密や透水の要素試験を行うのでは、粘土層全体の水平方向の透水性を把握することはできない。

軟弱粘土層は本来、水平な層状に堆積したものであり、しばしば砂やシルトの薄層、腐食有機物、クラックなどを含んでいるが、これらは粘土層内の間隙水の流れ、地層全体の圧密挙動に重大な影響を及ぼす。水平方向のマス・パーミアビリティ（全体としての透水性）は鉛直方向のそれを数十倍から数百倍も上回るケースが少なくないと指摘されている。しかし、そのようなデータが簡便かつ確実に得られなくては、時間～沈下関係の解析や

パーティカルドレーンの有効性について、ケースヒストリーの経験を十分に活用することもできない。実際現在のところ、水平方向のマス・パーミアビリティについては情報が乏しいのみならず、測定方法も確立されていない。

原位置試験が望ましく可能ではあるが、技術的に問題が多いうえ経費の点でも難がある。たとえば原位置透水試験は、単孔式にせよ、多孔式にせよ、試験準備や実施段階において種々の不確定要素があるうえ、試験結果の解析は現実の複雑な条件とは大きく異なる単純な仮定に基づくものであるから、得られる透水係数の値には疑問の残る場合が少なくない。

そこで著者らは数年来、このような問題を克服するべく、経済的で簡便な室内透水試験の開発を行ってきた。

この試験は、地表面に鉛直な方向にシンウォールチューブ試料を連続して採取し、押し出したり成形したりすることなくそのまま用いて透水試験を行い、層全体の透水性を把握しようとするものである。本試験は室内で行うことができるし、試験後には試料を押し出して精査し、物理・力学的試験を行うことができるという利点を有している。しかし、平面的には一点における透水性を求めるものであるから、地層の連続、不連続を判断するためには何か所かで試料を採取して試験する必要がある。

* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科
(〒350 川越市鯨井中野台2100)

** 正会員 工修 東洋大学助手 工学部土木工学科 (同上)

る。

以下、具体的に試験装置、透水係数の算定とその理論的背景、基礎的実験ならびに原地盤への適用例について述べる。

2. 試験装置の概要

試験装置の概略図を図一1に示す。シンウォールチューブ（以下、チューブと記す）は黄銅製で標準内径75mm、長さ1mのものを用い、固定ピストン式シンウォールサンプラーによって粘性土の試料を採取する。試料の詰まったチューブの円形断面で直径の両端に、直径1mmの小孔を2.5mm間隔で穿孔する。小孔群はラバープレートを押込んで黄銅製キャップで覆い、締め付けバンドで固定する。ここで、キャップは中空の直円柱を軸に沿って切断した形状をしており、10cmごとに区切られている。

各区間ごとに給水（排水）バルブとエアイベントプラグが設けてあり、流入口には等しい水圧の水が供給され、一定時間内の流出口からの流量を測定する。給水には小型タンクの位置を高さ数メートルの範囲内で上下させることにより、試料に所定の水圧の水を供給することができる。また、図一1に示すようなコンプレッサー・システムを用い、連結バルブを通して高い水圧の水を長時間一定に流すこともできるようになっている。

チューブの上下端には硬練りしたベントナイトが充填してあり、チューブ取り付けピストンの穴のある端部にはOリング付きピストンを挿入することによって、試験機内の水密性が保たれている。

3. 浸透流の解析

(1) シンウォールチューブ内の流れの場合

対称の位置に相対する小孔群の一方からある一定水圧の水が供給され、流出口からの流量は一区間10cmの長さの各区間ごとに測定される。境界内でダルシーの法則が成り立ち試料が一様で等方性であるならば、図一2

のような流線網があらゆる断面で考えられるから、流線網を利用すると透水係数 k は次式で与えられる。

$$k = \frac{N_a}{N_f} \cdot \frac{Q}{h \cdot d} = \alpha \frac{\theta}{h \cdot d} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 Q ：単位時間当たりの流量、 h ：水頭差、 N_a ：等ポテンシャル線に挟まれた部分の数、 N_f ：流線で挟まれた部分の数、 d ：区間の試料長（10cm）、 α ：流線網の形状係数、つまり N_a/N_f の値である。

なお、全区間の平均透水係数 \bar{k} は、チューブ内の全試料長を D とすると、

$$\bar{k} = \frac{1}{D} \sum (k_i \cdot d_i) \dots \dots \dots (2)$$

と表わすことができる。

(2) 流線網の解法

式(1)には、流線網から得られる形状係数 (N_a/N_f) がある。仮定から二次元の流れの場合で速度ポテンシャルが存在し、ラプラスの方程式を満たすと、 $\phi(x, y) = \text{const.}$ 、 $\psi(x, y) = \text{const.}$ の2つの曲線は、コーシー・リーマン (Cauchy-Riemann) の関係式から直交することが知られている¹⁾。

以下の項では数値解析ならびに実験によるポテンシャル値について述べる。

a) 理論解法

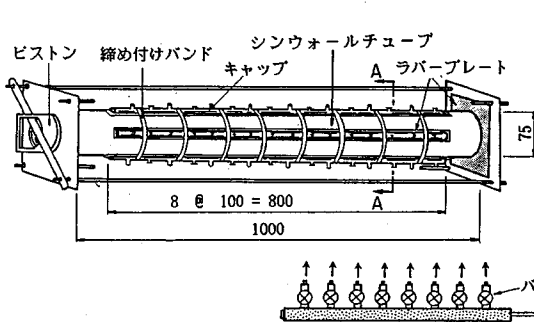
古くから流体力学に活用されている複素関数論で複素平面の写像の考え方を利用すると、円形チューブの断面上の二次元の流れにおいて円形の境界線は1つの流線となる。この境界条件を満足するような写像関数は次式で示される²⁾。

$$z = \zeta + \frac{a^2}{\zeta} \dots \dots \dots (3)$$

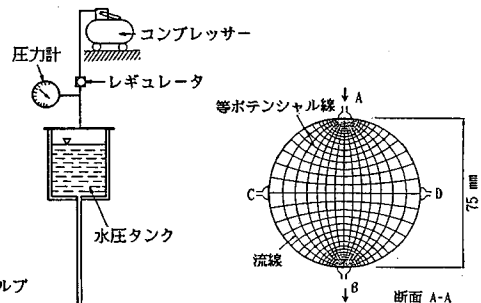
ここで、 a は半径を表わす。式(3)に $\zeta = ae^{i\theta}$ を代入すると、

$$z = ae^{i\theta} + \frac{a}{e^{i\theta}} = a(e^{i\theta} + e^{-i\theta}) = 2a \cos \theta \dots \dots \dots (4)$$

となり、 z 面上では実軸上の $4a$ の長さに対応していることがわかる。そこで、図一3に示すように原点から



図一1 透水試験装置



図一2 流線網

$-2a$, $2a$ 離れたところにそれぞれ湧き出し口, 吸い込み口がある流れを考えると複素ポテンシャルは次の形で与えられる。

$$w = m \log \frac{z+2a}{z-2a} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)に式(3)を代入し, 定数 C を $\zeta=0$, $w=0$ から $C=-2\pi mi$ と求め整理すると,

$$w = 2m \left(\log \frac{\zeta+a}{\zeta-a} - i\pi \right) \dots\dots\dots (6)$$

式(6)を変形して $w = \phi + i\psi$, $a=1$, $\zeta = re^{i\theta}$ とおくと,

$$\frac{1+re^{i\theta}}{1-re^{i\theta}} = e^{\phi+i\psi} \dots\dots\dots (7)$$

さらに, 湧き出し口で1, 吸い込み口で0のポテンシャルになるように図-4の実軸上に点を取り, 特異点を処理し無次元化すると次のようになる。

$$\frac{1+re^{i\theta}}{1-re^{i\theta}} = e^{2 \cdot 5.29(\phi-0.5) + i1.5\pi\psi} \dots\dots\dots (8)$$

ここで, 5.29 は $re^{i\theta}=0.99$ から与えられる。式(8)を実部・虚部に分けて連立一次方程式を解くと $\phi(x, y) = \text{const.}$, $\psi(x, y) = \text{const.}$ を求めることができる。

b) 数値解析法

工学的なシミュレーションはコンピュータによって数値解析することが一般的で, 解析法としては領域法と境界法の2つに大別できる。ここでは, それぞれから差分法と境界要素法を取り上げて検討した^{3),4)}。

これらの方法は理論解法に比べて境界条件(流入・流出形状)を設定しやすい利点がある。

実際のチューブ側面の小孔群は直径1mmであるから, 開孔幅とチューブ直径の比は0.013となる。差分法では正方形格子区分で, 格子区分一辺の長さは直径幅の

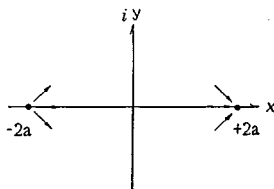


図-3 湧き出し点と吸い込み点 (z 面)

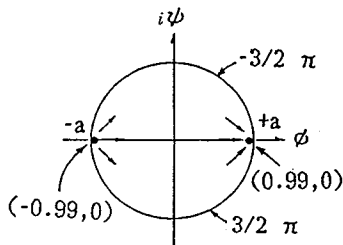


図-4 湧き出し点と吸い込み点 (w 面)

200分の1とし, 境界は仮想節点を考えた虚像法を用いている。流入口として境界条件を与えた格子点の数は, 1, 10および20で, それぞれのきざみ幅の長さチューブ直径に相当するきざみ幅の長さの比は0.005, 0.055および0.105となる。

境界要素法は, 工学的問題を与えられた境界条件下で現象を数式化し, 近似的な離散化モデルに置き換える点では, これまでに多用されてきた領域法と共通している。特色の1つに領域法のように求めたい値が節点位置からはずれても, 解析をやり直す必要がないことが挙げられる。よって無限領域の扱いには最適で, たとえば, 海洋・電磁場のようなものには効果的である。事実, 後述するように流線網の作図には適した方法であると思われる。

解析手順は, 支配方程式を積分定理によって境界上の積分方程式に変換する。これを離散化することによって連立一次方程式に帰着させ, 得られた方程式を解くと境界値が求まる。そのうえで, 内点の値(ここでは, ポテンシャル値)を求める段階へ進んでいく。

本解析では, 離散化するための境界要素の取り方に一定要素を用いた。精度と計算効率を高めるためには高次要素と節点数の減少が望ましいが, より境界形状(円形)に近づけるために節点数を116と増し補った。

解析での固定境界は開孔幅, 開孔時の試料への影響を考慮して図-5に示した4ケースについて行った。

これらの固定境界の要素長と境界領域の直径寸法(座標長)の比はケース1は0.01であり, ケース3では0.02となる。ケース2, 4は図-5に示した θ の角度と座標の直径寸法に対して1/50のきざみ幅だけ境界内に入り込んだ形となる。

c) 電気アナログ実験

実験による方法では, 適用範囲の広い模型実験解析法である電気アナログ法を行った。この電気モデルを利用した実験では, 電導性プラスチックシートを円形に切り取り, 所定の定電圧を与えておき, シート上の格子に区切った節点においての電位を測定した。電極とシートの接触面は十分に固定したつもりであるが, 微視的には電極材表面の凹凸が考えられる。凹凸がないと仮定したときの負荷点の境界領域(円形の直径寸法)に対する比は0.03である。

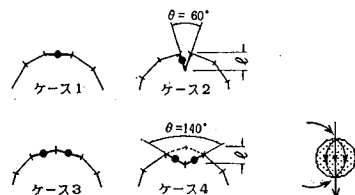


図-5 境界要素法による流入形状

(3) 流線網の作成と形状係数

定常流では等ポテンシャル線と流線は、関数の特異点を除いて互いに直交する。一般に、同一点での流線間隔と等ポテンシャル間隔を等しくとり、それらの作る格子網が最も正方形に近い形になるように作図する。実際に得られたポテンシャル値を用いて正方形流線網を描こうとすると、ここで取り扱う単純な円形境界内であってもかなり難しい。そこで、流線網の性質を利用して、四角形が円に外接するための必要十分条件、つまり二組の対辺の和が等しくなるようにパーソナルコンピュータで計算ならびに作図させてみた。円形断面内における二次元流の場合は対称であるから、4分の1円を領域として、そこでの任意の整数分割による N_a に対して N_r も整数または0.5刻みとなるように作図が完了するまで試行を繰り返させている。

図-6で、 ϕ_i を4分の1円の底辺とすると、そのポテンシャルは流入口の半分となり、 ϕ_i と ϕ_{i+1} で挟まれた ΔS の区間が決まれば、この段階で N_a と N_r は決定し、形状係数は定まることになる。その後、ポテンシャル線 ϕ_{i+1} 上で流線 $\psi_i, \psi_{i+1}, \dots, \psi_{i+n}$ との交点から ϕ_{i+2} に法線を描く操作を行い、各点で逐次 $\phi_{i+3}, \phi_{i+4}, \dots, \phi_{i+n}$ と継続すれば1つの流線網ができあがり、これが上記のような整数あるいは0.5刻み分割の条件を満たすものかどうか分かる。

図-7は均一正方形地盤を想定したときの二例を示す。(a)は等角写像によって解析した結果で、特異点は $re^{i\theta} = 0.999$ を与えて処理している。(b)は境界要素法を用いた場合で、図-5のケース1である。視覚的には同一ポテンシャルの位置は、ほとんど変わらないようにみえるが計算機結果によると N_r の本数はそれぞれ17、14と異なった値になる。

図-8は均一異方形地盤を考えて試料の円形断面内の定常流を解析した場合の二例につき、その変換断面と実際断面を示したものである。(a)は流入口から流出口に向かう方向に対して、直交する方向が10倍の透水性をもつときで、(b)は反対に10分の1の状態を考えてい

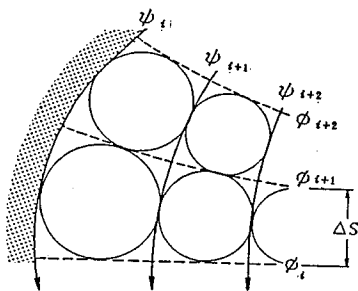
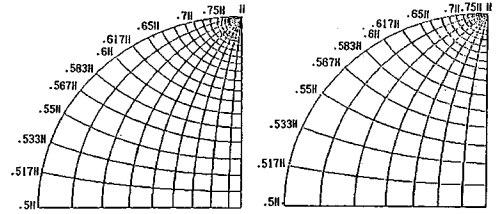
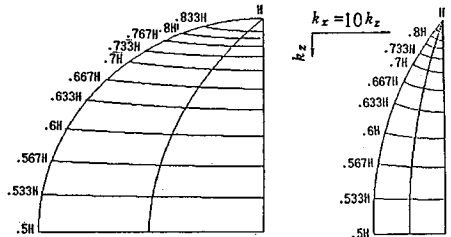


図-6 流線網の一部 (均一正方形地盤)



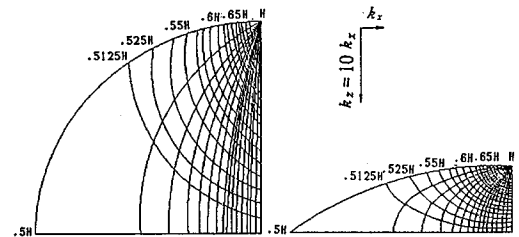
(a) 等角写像理論 $N_a=60, N_r=17$ (b) 境界要素法 $N_a=60, N_r=14$

図-7 均一正方形地盤での流線網



(a) 実際断面 $N_a=30, N_r=4$

変換断面



(b) 実際断面 $N_a=80, N_r=30$

変換断面

図-8 均一異方形地盤の流線網

る。(b)の変換断面でポテンシャルは流入口付近に凝縮し、0.5~0.5125 Hの等区間は円が内接するようにはみえないが、アースダム堤体内の流線網も同様な形状を示すことから、そのまま採用した。

表-1は本研究で得られた各種条件下の形状係数 α の値を示している。この表から、一様で正方形の土については形状係数は3~4の範囲にあることが明らかであり、10倍ほどの異方形を示す均一土でもオーダーは変わらないことがわかる。これらの結果に基づき、理論上と実際上の条件の相異を考慮すれば、透水係数の算定に必要な形状係数 α は4程度とみなしても差し支えないと考えられる。したがって、水平方向透水係数 k_h は式(1)から次式によって決定することができる。

$$k_h = 4 \frac{Q}{h \cdot d} \dots \dots \dots (9)$$

(4) 実験による検証

均一正方形の理想地盤内の流れについて、実験による厳密な検証を行うことはきわめて困難であるが、図-9

表一 形状係数 α の解析結果

解析方法	浸透条件	α
等角写像理論	$re^{i\theta} = 0.99$	3.3
	$re^{i\theta} = 0.999$	3.5
差分法	比 0.005	4.0
	比 0.055	2.8
	比 0.105	2.2
境界要素法	ケース 1	4.3
	ケース 2	3.8
	ケース 3	3.8
	ケース 4	3.1
	$k_x = 10k_z$	7.5
	$k_z = 10k_x$	2.7
電気アナログ法	比 0.03	2.9

注) 比は、解析での流入(出)幅/円の直径寸法

に示すような二方向の流れに対して、その透水係数の比から形状係数について比較検討することができる。ここに、(a) の流れを一次元流、(b) を二次元流とよぶことにする。このとき、二次元流の透水係数は式(9)の α を1として計算する。二次元流の実験に用いた流入形状は、幅1mmのスリット(記号、F1)と直径1mmの小孔を2.5mm間隔(F2)および5mm間隔(F3)で開けた3ケースである。このような検討はスリット状の流入口を容易に開けることができれば不必要であるが、これまでの経験から、試料への振動による影響、たとえば、攪乱、剝離ならびに作業の手間を考えると小孔を穿孔する方が実際的と思われる。川砂の粒径範囲と充填したときの間隙比および豊浦標準砂の結果は、表一2に示すとおりである。ここに示す透水係数は水頭差40cmで測定したときの算術平均である。なお、実験に用いた試料は内径75mm、長さ130mmのシンウォールチューブに詰められたものである。

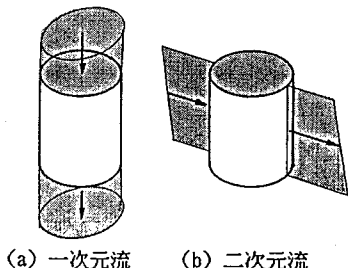
一次元流は粒径が等しい範囲内にあれば、透水係数はほぼ同様な値を示すと考えて、この値を間隙比とともに詰め込みの程度を知る指標とした。二次元流を比較するとF1、F2の結果がよく一致しているのに対して、F3

の結果は相当に異なっている。F1、F2の結果から得られた形状係数は約3前後であるがF3では大きく変動していることがわかる。

実際に通水中の試料内の間隙水圧の測定を行った。埋設した間隙水圧計は直径6.5mm、長さ12mmの円形柱でシリコン(半導体)を利用した力センサーを用いている。ピエゾ抵抗効果を利用した計測器である。この間隙水圧計を用いるときに、通常のチューブ(内径75mm)ではセンサーの寸法による影響が大きすぎると考えられるので、直径30cm、高さ35cmの大型サンプラーを採用した。実験に用いた試料は豊浦標準砂と粒径範囲が840~420 μ mの砂である。これらを詰めたときの透水係数は 10^{-4} ~ 10^{-3} cm/sであった。

間隙水圧を測定した結果は、図一10に要約されている。完全に均一で等方性の土は存在しないであろうし、手軽に作ることも困難である。図一10は数種の試料を用いて行った数十回の実験結果に基づいて作成したものである。理論上は流入口で極端に動水勾配が大きく表われるのに比べ、流入口付近で測定された浸透水の損失水頭は相当に小さいが、中央でポテンシャルがほぼ半分になる点では一致しているといえることができる。

境界内の流れの様子を視察するとき、染料などを投入することがある。この試みは砂質土のように比較の間隙径が大きく着色材の微粒子を通すものには有効であるが、粘性土には不向きである。そこで、試料土に塩化ナトリウムを混合して、ある時間通水した後に、区分箇所塩化物含有量試験(土質工学会基準JSF T12)⁵⁾を行い、その含有量の分布から浸潤状況を把握した。試験容器は間隙水圧計を埋設したものと同様である。試料土は関東ロームで、塩化ナトリウムはその乾燥土の質量に対して3%の割合で混合攪伴した。採取した試料の区分箇所は、図一11に示してある。理論的には図一7の流線網からわかるように、中央に比べてチューブ面に近いほど流速は遅くなるが、流量は $q = k\Delta h$ で等しくなるはずである。表一3に示した結果から、動水勾配の大きい、つまり浸透水圧の大きい中心に近いほど塩分濃度が低く現われている。しかし、チューブ面の付近も初期の塩分



図一9 浸透流モデル

表一2 透水係数による形状係数の検討

粒度分布	間隙比	透水係数 (10^{-3} cm/s)					形状係数 α		
		一次元流		二次元流			F1	F2	F3
		F1	F2	F3					
420~250 μ m	0.74	5.8	2.5	2.4	1.9	2.3	2.4	3.1	
250~105 μ m	0.71	2.4	0.7	0.6	0.2	3.4	4.0	12.0	
豊浦標準砂	0.66	4.5	1.7	2.2	1.0	2.6	2.0	4.5	

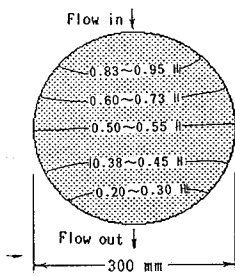


図-10 間隙水圧計による水圧分布

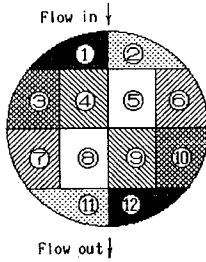


図-11 塩分含有量試験での試料区分

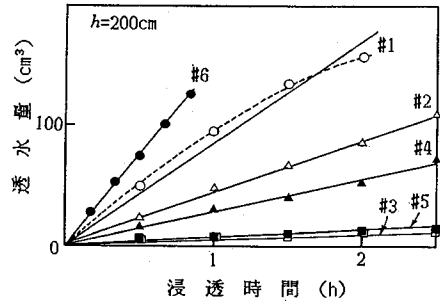


図-12 浸透水量と時間の関係

濃度および時間経過につれての変化から、確実に浸透水が浸潤していることが確かめられる。

4. 原地盤への適用

(1) 粘性土地盤での検証実験

試料採取は、埼玉県坂戸市の越辺川河岸で深さ1.4～1.7 mに掘削したテストピットで、ハンドルチャックで固定する浅孔式用ピストンサンプラーを用いて行った。

試料の自然含水比は60%前後、 $LL=65\%$ 、 $PI=35$ 程度の軟弱粘土である。腐植物や砂利層をかんでいることもあるが、かなり均一に堆積した粘土層である。また、標準圧密試験から得た先行圧密圧力 $p_0=88.3\sim 107.9$ kN/m²、圧縮指数 $C_c=0.5\sim 0.6$ であった。

図-12は浸透水量と時間の関係の一例を示す。図中に示した破線のように、時間が経過するにつれて浸透水量が減少する傾向が現われることがあるが、一般にはほぼ直線が得られた段階で単位時間当たりの透水量を求め、これにより透水係数を決定する。

試料端から任意に区切った10 cmごとの各区間で、たとえば、区間番号#1と#3のように浸透水量には通常相当な差がみられる。一方表-4には図-12での透水試験結果を損失水頭別に透水係数で示した。表で8 m以上の水頭では浸透水に泥水が混じり、試料が破壊しはじめたと思われるときの値である。透水係数の高い区間は、試料を押し出して観察すると、他区間に比べて細砂～砂利または腐植した植物根などが多く存在し、そのために透水性が大きくなったものと理解できる場合が多かった。

(2) 現場検証実験

軟弱地盤とよばれる主なものは海成粘土層と陸成粘土層および有機質土で、その重要な土質定数は圧密定数と

表-4 粘性土試料による透水試験結果の一例

損失水頭 (m)	透水係数 ($\times 10^{-6}$ cm/s)						平均
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	
2	42	22	1.9	9.2	1.5	5.6	14
5	19	12	1.0	7.4	1.3	5.3	7.7
8	16	1400	4.9	13	0.01	129	260
10	0.9	3200	5.8	31	2.7	1.1	540

非排水強度である。

沈下を考えるときには、地層厚、排水層の有無およびその透水性が重要な検討事項となる。排水層の連続、不連続についてはボーリングを比較的密に行えば、ある程度その目的が達せられるが、現状のように透水性を圧密試験のみに依存するのでは問題があるように思われる。

地表面に鉛直に採取した試料に対して、その切出し方を鉛直・水平と変えて圧密係数 c_v 、 c_h を得ても、その大きさから地層のマス・パーミアビリティを正しく評価することはきわめて困難である。

今回、神奈川県伊勢原市付近の沖積低地2か所においてサンプリングを行ったが、その地層構成は図-13の土質断面図に示すとおりである。一箇所は地表から深さ17.5 mまで、ほぼ連続して採取し22本の試料チューブを得たが、チューブ内で試料が移動した非常に軟弱なピート試料と試料長さが極端に短いものは除き、透水試験には12本を用いた。他方は、ある程度試料間の距離をあけてそれぞれの地層からサンプリングした13本であるが、このボーリングの最大深度は20.15 mであった。図-14には土質試験結果を示す。調査地盤の腐植土層は表土から深さ8 mにまで及ぶ。腐植土のトリミングは粘性土に比べて非常に難しい。そのためとも思われるが、土層に対して鉛直・水平と切出し方を変えると

表-3 塩分含有量の分布状況 ($\times 10^{-2}$ %)

通水時間 h	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
24	2	3	8	2	2	4	113	59	58	130	320	211
48	2	2	17	7	7	28	6	27	65	93	103	111

圧縮指数にばらつきがでている。

図-15は試験孔2で採取したチューブ番号6と10の試料について、黄銅製キャップで10cmごとに区切った各区間別の透水係数を算出した一例である。図中の凡例に示したように通水方向による違いも併せて示す。測定での水頭差は3mである。この水頭が透水係数に及ぼす影響を調べるために、水頭差を1.5, 3, 4.5mと変えてみたが、この程度の水頭の差では若干の違いを生じることがあってもオーダーが変わることはなかった。

任意に10cmと定めた区間長においては、図-15の例にみられるよう区間によって浸透量が多かったり、少なかったりする。なかには他区間からの回り込みによるものと思われるものもあるが、前述の粘性土試料同様に、試験後に試料を押し出して精査すると、玉砂利状の団粒や木質の有機物質が分解を完全に受けていないものが多く含まれた所は、高い透水性を示していた。当然その深度付近の透水性は高くなるが、これは混入物を含んで堆

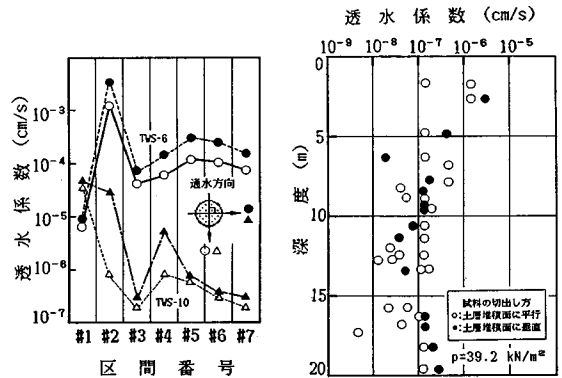


図-15 透水試験結果の一例

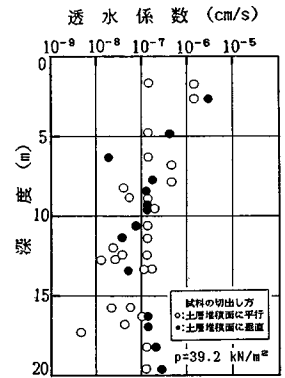


図-16 圧密試験結果からの透水係数

積した自然地盤全体を評価するためには必要かつ重要な情報である。すなわち、解析には式(9)によって得られる値を式(2)によってマス・パーミアビリティの平均値として求めれば、より合理的な二次元解析への道が開けるものと期待できよう。

透水試験後に、試料の切出し方を変えて行った圧密試験から求めた透水係数を図-16に示す。腐植土層の透水係数は下層の粘土層とほとんど変わらないほどに低く現われている。また、地表面に平行および垂直に切出した試料がほぼ同じオーダーの透水係数を示している点も注目される。

図-17は、本研究で提案する水平方向透水試験から得られた透水係数を示す。値は $\alpha=4$ として求めてある。2回のサンプリングで求められた値をそれぞれ(a),(b)に表わしている。測定値は水頭差、通水方向を変えたときのそれぞれのチューブ試料の平均透水係数で最大値と最小値を示す。腐植土層の自然状態における透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ のオーダーである。(a)の深度10~15m付近では狭い範囲で差がみられるが、試料を押し出

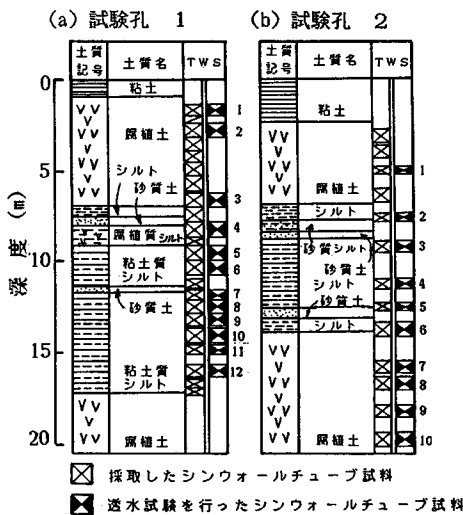


図-13 土質断面図

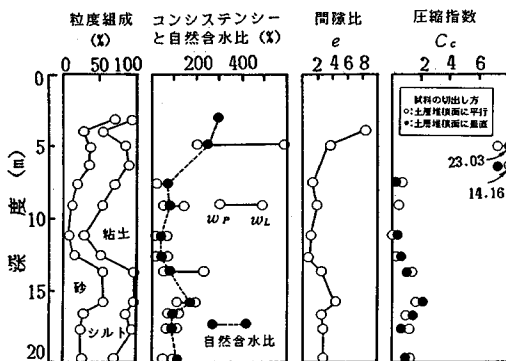


図-14 地盤の分類特性

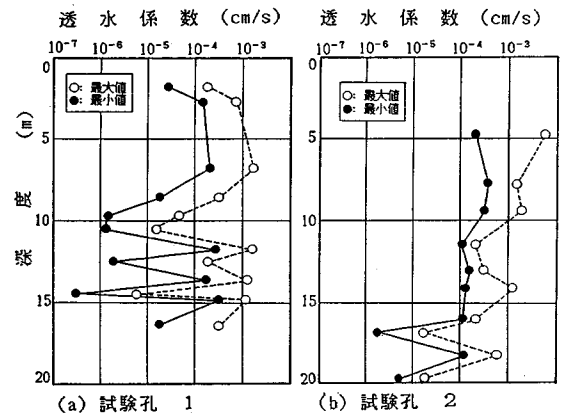
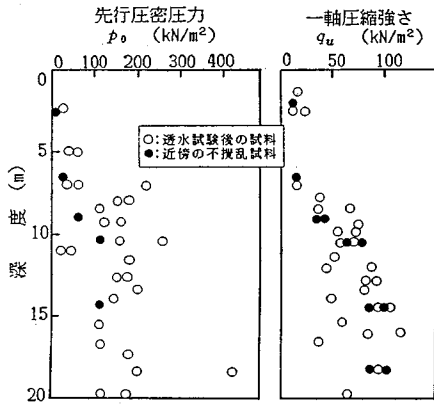


図-17 本研究で提案した透水試験機による測定結果



図一18 透水試験後の試料と近傍で採取された不攪乱試料についての先行圧密圧力と一軸圧縮強さの比較

した後での目視観察からも腐植土、粘性土の互層が確認されている。また、粘性土の多く含まれている箇所は、図一16の透水係数とも近い値を示していることがわかる。

このようにして得られた値は、少なくとも境界条件が判然としない平均的な値を示す原位置試験の結果と比較して、より実際に近い情報を与えていると思われる。

図一18は、近傍で採取された試料から得られた先行圧密圧力と一軸圧縮強さを、本研究における透水試験後に得られたデータと比較したものである。ここで提案する透水試験は試料を乱すものではない。図一18は本試験を実施した後その試料を圧密・圧縮試験のような力学的試験に用いることが可能であることを明確に示している。

5. 結 論

大略層状に堆積していると思われる自然地盤における、その水平方向のマス・パーミアビリティを知る新しい測定方法として、採取したシンウォールチューブ試料をそのまま用いて行う簡便な透水試験方法を開発するべく、この数年来研究を進めてきた^{6),7)}。一応の実用レベルに到達したと思われるので、今回その結果の解析における理論的背景と実用性について検討し、ここに報告することにした。この試験方法の特色および得られた知見は以下に要約するとおりである。

(1) シンウォールチューブ断面の円形境界内で、その流れの場に、ダルシーの法則を適用して示された式(1)中の形状係数 α は、種々の検討から大約4としてよいことを示した。また、そのときの流入口は直径1mm ϕ の小孔群を2.5mm間隔で開孔することで実用上

十分であり、また理論的にもスリット状の開孔に近似できることを実験によって検証した。

(2) 実際に軟弱地盤から連続してサンプリングした場合の試験結果から、本試験は腐植土のように透水性の高いものから粘性土のように低いものまで広範囲の土に対して活用できることが示された。従来の原位置透水試験から得られる透水係数のように境界条件が判然としない大雑把な情報に比べ、本試験方法によれば地盤の各深さにおける水平方向透水係数が明確な条件下で決定できるので、特に異方性の地層に対しては、よりよい方法であると考えられる。

(3) 試験後の試料は、10cmごとに測定した区間で目視観察による比較検討ができるし、試料は乱されるわけではないから、圧密・強度試験を含む力学試験にも十分に活用することができる。

(4) 粘土層に含まれる砂の堆積状況がレンズ状であるか連続な層状に存在して排水層の役割を果たすかは、単孔式透水試験と同様に平面的に数か所実施して確認する必要がある。従来の原位置試験のように試験孔作成のための泥水の影響はないので測定値には十分な信頼性があると思われる。

(5) 本試験法は従来の原位置透水試験に代わる新しい水平方向透水試験として十分に実用的な価値のあるものと考ええる。

謝 辞：本研究をまとめるにあたり、卒業研究として実験に携わった松沢基工(株)松沢一行氏(元修士課程)を始めとする多くの卒論生諸氏に謝意を表す。また、サンプリングでの便宜を計って下さった不動建設(株)一本英三郎常務取締役および鹿島建設(株)長谷川正勝氏はじめ関係各位に御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) たとえば、日野幹雄：明解水理学，丸善，pp.65～66，1983年7月。
- 2) たとえば、日野幹雄：流体力学，朝倉書店，p.44，1974年3月。
- 3) 近藤次郎：数学モデル—現象の数式化—，丸善，pp.256～276，1976年3月。
- 4) 榎園正人：マイコンによる境界要素解析，培風館，pp.54～116，1984年3月。
- 5) 土質工学会編：土質試験法(第2回改訂版)，土質工学会，pp.241～257，1982年10月。
- 6) 赤木俊允：軟弱粘土層の水平方向透水係数の測定(第一報)，土木学会年次講演会，Ⅲ-320，1981年10月。
- 7) 赤木俊允・松沢一行：軟弱粘土層の水平方向透水係数の測定(第三報)，土質工学会研究発表会，75，1984年5月。

(1987.10.24・受付)