

BATシステムによる現場透水試験法の砂質地盤への 拡張に関する研究

柳浦 良行¹・豊岡 義則²・友清 悟³

¹正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西支社 (〒550-0011 大阪府大阪市阿波座1-11-4)

²基礎地盤コンサルタンツ(株) 技術開発部 商品開発室 (〒102-8220 東京都千代田区九段北1-11-15)

³基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西支社 (〒550-0011 大阪府大阪市阿波座1-11-4)

砂質土の透水係数を求める方法の一つである単孔式透水試験において、近年、建設工事の多様化に伴い、その適用深度、試験時間、泥水処理等が問題になる場合が多い。これらの問題を生じ難い現場透水試験法としてBATシステム(スウェーデンのB. A. Torstenssonが開発したシステム)があるが、現状では装置自体の損失水頭の影響で粘性土にしか適用できない。本研究では、BATシステムによる現場透水試験法を中間土～砂質土へ拡張するため、この損失水頭の大きさが装置内を流れる水の流速に関係することに着目し、それを最小限にするために装置自体の改良を行い、補正方法を開発した。

Key Words : *in-site permeability test, BAT system, environmental geotechnics, groundwater survey, coefficient of permeability, pore pressure coefficient*

1. はじめに

砂地盤の透水係数を求めることは、地下工事の地下水対策を進める上において従来から重要な課題の一つである。また、最近、コスト削減を目的として、従来は無視されていた中間土が適当な深度に存在する場合には、遮水層として積極的に利用することが検討され、中間土の透水係数を求めることも重要な課題になりつつある。透水係数の現場測定法としては、ボーリング調査と併用して試験が可能な単孔式透水試験が広く用いられているが、多種多様な建設工事の増加に従い、適用深度の限界、長い試験時間、泥水処理の費用等の問題を発生する場合が多くなりつつある。特に泥水は近年問題となっている産業廃棄物であり、建設事業を行うにあたり、その初期の調査時点から廃棄物を極力出さず、リサイクルするような調査方法を積極的に用いる必要があると考えられる。

一方、これらの問題が発生しにくい現場透水試験法としてBATシステム²⁾があるが、現在のシステムでは粘性土にしか適用できない。著者らは、このBATシステムの装置自体の損失水頭成分に着目し、それを少なくするための装置自体の改良および補正方法を考案し、実測値と比較した結果、非常に良好な結果を得、適用範囲を中間土～砂質土まで広げることができたので報告する。

2. 従来の単孔式透水試験の問題点

現場での透水試験方法としては、一般に揚水試験および単孔式透水試験が良く用いられる。

揚水試験は広範囲な帯水層の平均的な水理定数を求めることができ、透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-9}$ cm/secの地盤に対して極めて有効である。しかし、揚水井・観測井の設置および試験に多大な費用と時間を必要とするため、ある程度設計が確定してから、工事前に最終確認のために実施する場合が多いと考えられる。また、大深度になった場合の問題点としては、第一に井戸の掘削が深くなるのでベント機を用いることが出来なくなり掘削に時間がかかること、第二に掘削中ベントナイト泥水を用いるため、大深度部分の孔内洗浄が困難であること、等がある。

単孔式透水試験は、揚水試験に比較して求められる透水係数が限られた狭い範囲(試験孔より半径20～30cm程度の範囲)のものであるため、平均的な透水係数が求められない欠点がある。しかし、透水係数の広い範囲($k=1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ cm/sec)の値が計測でき、大深度で問題となる多層地盤の各層の透水係数が測定できる利点を有しているため、設計の初期の段階では、非常に有効な情報を与える。また、この試験は調査ボーリングにおける原位置試験として実施できるのも大きな特徴でもある。

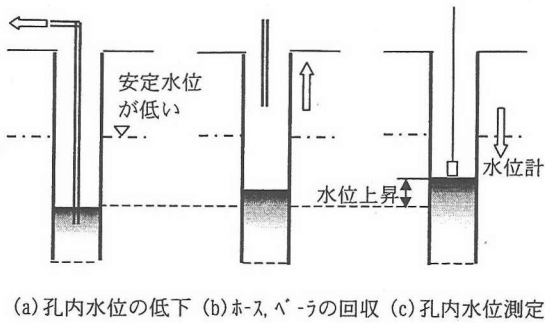


図 - 1 安定水位が低い場合の問題点

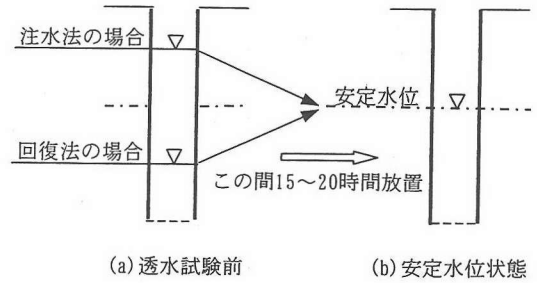


図 - 2 安定水位を求める場合の問題点

ここでは、設計の初期の段階で使用頻度の高い単孔式透水試験に着目し、現在問題となりつつある適用深度、試験時間および泥水処理等について以下に整理した。

(1) 適用深度の問題

原理的には、単孔式透水試験の適用深度の限界は無いと考えられるが、現場では、以下に示すように精度、費用等の面から特別な処置をしない限り、深度50m程度が限界³⁾と考えられる。

第一に試験深度が深くなると一般的に安定水位は低くなる（関西の大阪層群砂礫層ではGL-20m以下の所⁴⁾もある）。通常の調査では、孔内水の低下は（回復法の場合）揚水ポンプおよびベローで行われ、孔内の水位計測は揚水用のホース等を取り除いた後に行われるため、水位計や間隙水圧計を孔内に挿入している間に水位が回復してしまい水位変化を精度良く測定できない問題点を有する。この対策方法としては西垣⁵⁾が提案する「孔内加圧方式による孔内水位低下法」、「JFT法」が有効と考えられるが、孔内を洗浄する必要があり、後述する洗浄で生じる泥水の処理費用の増大が問題となる。

第二に大深度になると、孔壁崩壊防止のために泥水を用いなければならないが、この泥水の透水試験への影響を防ぐため、2重管式が用いられる。しかし、深度が深くなるとガス管がうまく打込めないこともあり、試験毎にガス管を上げたり、挿入したりして手間がかかり、費用も増加する。

(2) 試験時間の問題

ほとんどの単孔式透水試験の場合、試験深度の安定水位が解析上必要となる。この安定水位は、潮位、河川水位変動、降雨、気圧、地下水利用によって変動するものである。透水性の良い地盤 ($k=1 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/sec) に対しては試験が数分で終了するため安定水位の変動の影響をあまり受けない。しかし、透水性の悪い地盤（例え

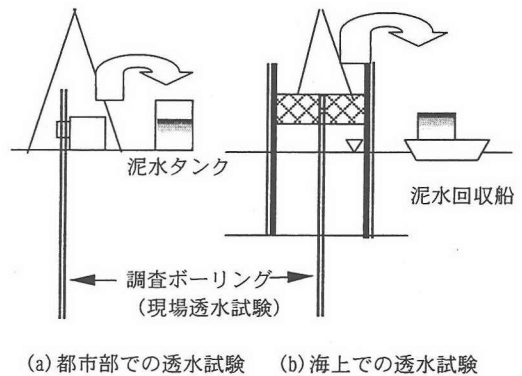
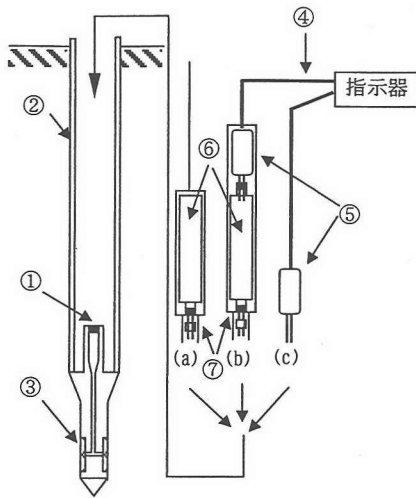


図 - 3 泥水処理の問題

ば中間土)での長時間の試験では、ある程度この変動の影響を受ける。また、孔内を洗浄した後の孔内水位が安定水位であるかどうかの検証の方法が困難である。一般には、孔内を洗浄して1日放置した後の孔内水位を安定水位としているため、工期が無い場合には、この放置期間が問題となる。この解決法として西垣⁵⁾は、「パッカーと間隙水圧計を用いた自然水位の計測法」を提案している。この方法は、間隙水圧を測定するため、その時間遅れはほとんどなく瞬時に安定水位を測定できる特徴を有する。

(3) 泥水処理の問題

単孔式透水試験には、孔内を洗浄した後、孔内水位を安定水位より下げてその回復速度を測定する方法（回復法）と、孔内の水位を安定水位より高くしてその降下速度を測定する方法（注入法）とがある。ここで、近年問題となっているのが、孔内の洗浄水の処理問題である。ボーリング泥水は産業廃棄物であり、許可を受けた業者



- | | |
|-----------|-----------------|
| 部品名 | アタッチメントの交換 |
| ①ラバーディスク | (a) 土中水の採取用 |
| ②ガイド管 | (b) 土中水・ガスの採取用 |
| ③フィルターチップ | MDロック・フラクチャー試験用 |
| ④計測ケーブル | 粘性土の透水試験用 |
| ⑤圧力計 | (c) 間隙水圧測定用 |
| ⑥採水器 | |
| ⑦両端注射針 | |

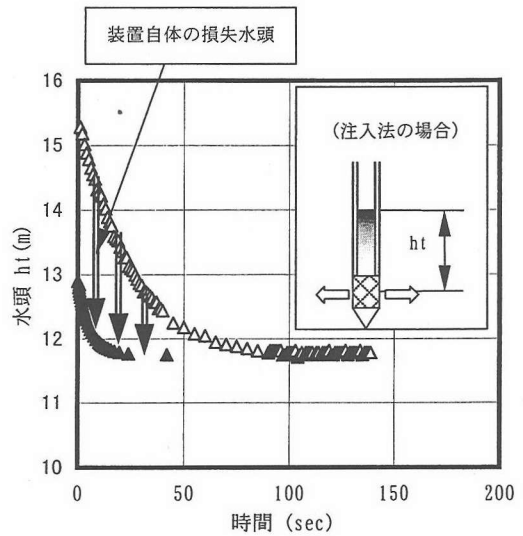
図 - 4 BATシステムの概要

に委託して適切な処理を行う必要がある。このため、透水試験毎に生じる洗浄水を溜める泥水タンクのスペースの確保、泥水処理費用が必要になる。調査敷地の狭い都市部、作業場所の限られた海上部での調査では、スペースの確保が大きな問題となってきている。さらに、泥水を含めた産業廃棄物の最終処分場の確保が難しく、跡地の用途の制限等から処分費用の増加も問題となっている⁹⁾。

3. BATシステムによる透水試験の原理

BATシステムはスウェーデンのB A Torstenssonによって開発された地下水等のモニタリングシステムであり、図-4に示すように「(a)、(b)および(c)」のアタッチメントの交換により、土中水・土中ガスのサンプリング、ハイドロリック・フラクチャー試験、間隙水圧測定および粘性土の現場透水試験が可能である^{9)・7)}。

BATシステムによる透水試験の特徴としては、大深度(通常100m程度)でも問題なく試験が可能であること、安定水位の測定を圧力で測定するため瞬時に水位が判る



- △ BATによる実測値 (装置自体の固有の損失水頭と周辺地盤の透水性成分の和)
- ▲ 単孔式透水試験より得られた透水係数を用いた場合 (周辺地盤の透水性成分のみ)

図 - 5 砂質土におけるBATシステム装置自体の水の流れに対する抵抗の影響

こと、孔内を洗浄する必要がないため泥水処理が要らないこと、などであり、単孔式透水試験の問題点を解決している。

砂質土におけるBATシステムによる実測値と、単孔式透水試験より得られた透水係数 ($k=1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$) を用いた場合との、水位～時間関係を比較したものを図-5に示す。同図から砂質土でBATシステムによる現場透水試験を行った場合、損失水頭を生じ、正確な透水試験ができないことが判る。この損失水頭の原因は、粘性土に比べ透水性の良い砂質土では装置内を流れる水の流速が速くなり、抵抗が増大するためと考えられる。

従って、何らかの方法でこの装置自体の固有の損失水頭を除去すれば真の周辺地盤の透水係数が得られる。

ここでは、BATシステムを透水性の良い砂質土に適用するため、装置自体の損失水頭の補正方法を理論的に解明し、装置自体も損失水頭を少なくする構造へ改良したのでその結果を述べる。

(1) BATシステムによる装置の損失成分を考慮した透水試験の原理

a) ダルシーの法則

土中の水の流れは式(1)に示すダルシーの法則に従うと考える。

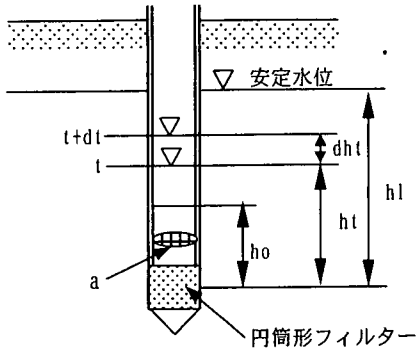


図-6 円筒形フィルターと変水位透水試験

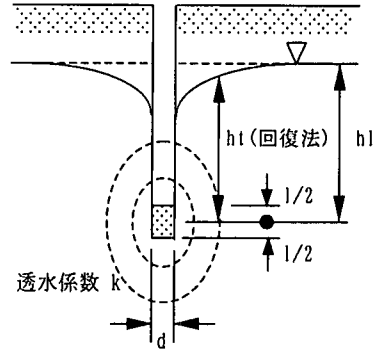


図-7 円筒形フィルターのフローファクター

$$Q = dV/dt = kAl = kAh/L \quad (1)$$

ここで、

- Q: 流量 (cm³/sec)
- dV: dt間の体積変化 (cm³)
- dt: 時間間隔 (sec)
- k: 透水係数 (cm/sec)
- A: 水が流れる所の断面積 (cm²)
- l: 動水勾配
- h: 動水勾配の鉛直成分
- L: 動水勾配の水平成分

式(1)において、流れは無限の広がりのある均質で放射状に等方な地層の中で生じると仮定している。

b) 円筒形フィルター周辺の放射流について

円筒形フィルターを通る放射流を、スタンドパイプ内の変水位透水試験をもとに解くと、式(1)より図-6を参考にして次式となる。

$$Q = kAh/L = k(A/L)(h_1 - h_t) = kF(h_1 - h_t) \quad (2)$$

ここで、

- h₁: 地盤中の安定水位 (cm)
 - h_t: スタンドパイプ内の時間tの水位高 (cm)
 - h₀: スタンドパイプ内の初期水位高 (cm)
 - F: フローファクター (cm),
- Fはフィルターの形状や寸法によって変化する係数であり、図-7に示すような円筒フィルターからほぼ放射状であると仮定すると式(3)のように定義される。

$$F = (A/L) = 2\pi l / [\ln\{(l/d) + \sqrt{1 + (l/d)^2}\}] \quad (3)$$

ここで、

- l: フィルタの長さ (cm)
- d: フィルタの直径 (cm)

時間dt間の流量を考えれば次式(連続の式)が得られる。

$$Qdt = adh \quad (4)$$

ここで、

- a: スタンドパイプ内の断面積 (cm²)
- dt: 時間間隔 (sec)
- dh: スタンドパイプ内の時間dt間の水位変化量 (cm)

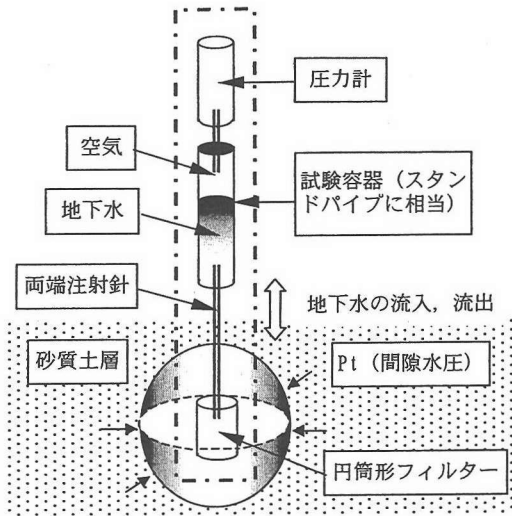
c) 透水係数の算定式

式(2)に式(4)を代入すれば、透水係数は次のようになる。

$$k = a(dh/dt) / \{F(h_1 - h_t)\} \quad (5)$$

BATシステムはスタンドパイプ内の水位を直接測定するのではなく、図-8のように閉鎖系の試験容器内の圧力変化速度を測定するシステムである。

Torstensonは、このような閉鎖システムに対し、試験中の温度変化が無いと仮定するとシステム内の気体圧力の変化速度は、ボイルマリオットの法則より気体の体積変化速度、言い換えれば試験容器内への水の流入速度と直接関係することを見出した。従ってBATシステムでは式(5)は圧力計の読みで式(6)のように表現できる。ただし、圧力の基準は大気圧=98.1kPaとしている。



：閉鎖システム

図 - 8 BATシステムにおける閉鎖システム

$$k = a(dP/dt) / [F(P_1 - P_t)] = (a/F) / T \quad (6)$$

$$T = (P_1 - P_t) / (dP/dt) \quad (7)$$

ここで,

k: 透水係数 (cm/sec)

P₁: 地盤中の平衡間隙水圧 (kPa) = h₁ ρ g / 100

P_t: 時間 t における容器内の圧力 (kPa) = h_t ρ g / 100

dP: 試験容器内の時間 dt 間の圧力変化 (kPa) = dh ρ g / 100

ρ g: 水の単位体積重量 (9.81 kN/m³)

T: 基本的タイムラグ (basic time lag, Q = kF(h₁ - h_t)) を維持した時に圧力差を同化するのに必要な時間, すなわち (h₁ - h_t) が初期値 (h₁ - h₀) の 37% (= 1/e) となる時間, sec

F: フローファクター (cm)

また, Torstenson の仮定より式 (8) が成り立つ.

$$P_t V_t = P_0 V_0 = \text{一定} \quad (8)$$

ここで,

P₀: 容器内の初期圧力 (kPa)

V₀: 容器内の気体の初期体積 (cm³)

P_t: 時間 t における容器内の気体の圧力 (kPa)

V_t: 時間 t における容器内の気体の体積 (cm³)

式 (6) に式 (8) を代入して, BAT システムを用いた場合の透水係数を求めると式 (9) のようになる.

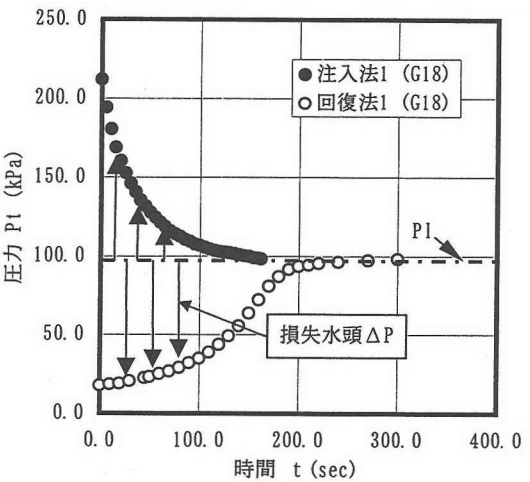


図-9 水中での実験結果 P_t ~ t 関係

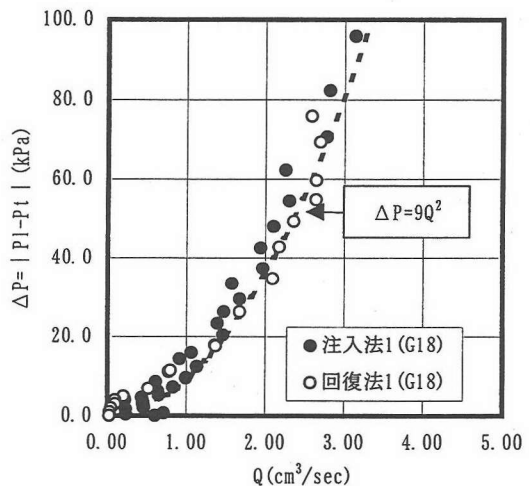


図-10 水中での実験結果 ΔP ~ Q 関係

$$k = V_0 P_0 \rho g / (F t) [1 / (P_1 P_0) - 1 / (P_1 P_t) + 1 / (P_1)^2 \ln \{ (P_0 - P_1) / (P_0 P_t / (P_t - P_1)) \}] / 100 \quad (9)$$

d) 装置自体の損失成分の補正方法

もし, 装置自体の損失成分がなければ式 (9) を用いて透水係数を求めることができる. しかし, 実際には装置に水が流入すると損失水頭が発生するため, これを補正する必要がある.

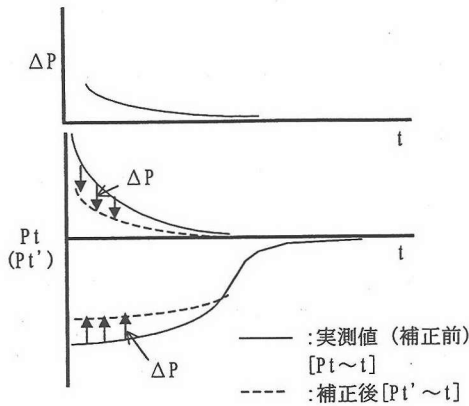


図-11 損失成分の補正方法

①装置自体の損失成分の測定

BATシステムを用いて周辺地盤の透水性が無量大となる水中で透水試験を行った結果を図-9に示す。装置自体の損失がなければ図中の損失水頭=0となる。図中G18とは内径1.2mmの両端注射針の規格である。

試験装置内の水は図-12に示すようにフィルターチップから管径が変化する中間部を通り両端注射針を介して試験容器に流れる構造である。管路の損失水頭の考え方⁹を適用すると、この装置内を水が流れる間に次式で表現される損失水頭 ΔP を受けると考えられる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= (\text{管路の損失}) + (\text{形状損失}) \\ &= 1/2g\{\sum f_i (l_i/d_i) v_i^2 + \sum K_i v_i^2\} \\ &= 1/2g\{\sum f_i (l_i/d_i) (Q/A_i)^2 + \sum K_i (Q/A_i)^2\} \\ &= Q^2/2g\{\sum f_i (l_i/d_i) (1/A_i)^2 + \sum K_i (1/A_i)^2\} \\ &= \alpha Q^2 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、

l_i : 管の長さ (cm)

d_i : 管の径 (cm)

A_i : 管の断面積 (cm²)

f_i : 摩擦損失係数

K_i : 形状等に関する損失係数

v_i, v_i' : 流速 (cm/sec)

Q : 流量 (cm³/sec)

$\alpha = 1/2g\{\sum f_i (l_i/d_i) (1/A_i)^2 + \sum K_i (1/A_i)^2\}$: キャリブレーションより求める。

一方、図-9の損失水頭 $\Delta P = |P_1 - P_t|$ と流量 Q の関係で整理したものを図-10に示す。 ΔP は式(10)で近似できることが判り、 α の値は装置固有の値であり、その都度キャリブレーションを行って求める。

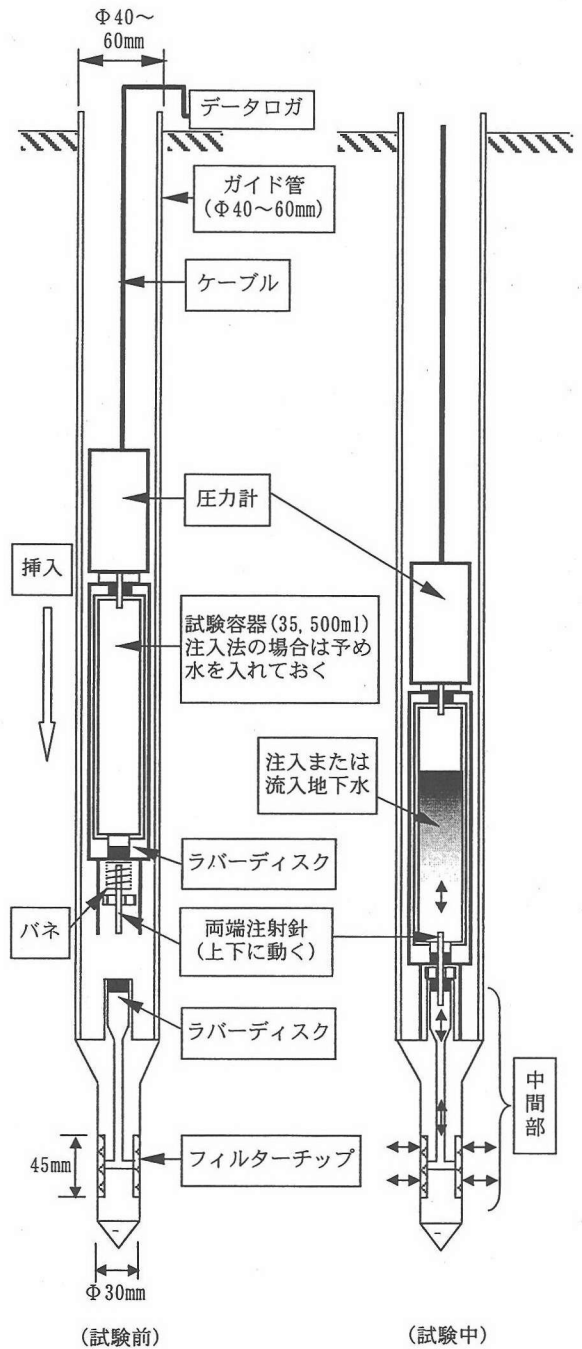


図-12 主な採取機器および試験手順

②損失成分の補正方法

式(10)で求めた損失水頭を図-11に示すように、実測の圧力の経時変化から補正し、地盤の透水性のみに関係

する $P_t \sim t$ 関係を次式より求める。

$$P_t = P_i \pm \Delta P \quad (11)$$

③周辺地盤の真の透水係数

式(9)を式(12)のように変換すると $V_0, P_0, \rho, g, F, P_i$ および P_0 は試験上の固定値であるため、式(13)のように表現される。図-11に示す補正された実測値($P_t \sim t$ 関係)に式(13)を基本形とした最小二乗法を適用し、透水係数 k を求める。

$$t = V_0 P_0 \rho g / (Fk) [1/(P_i P_0) - 1/(P_t P_i) + 1/(P_i) \ln\{(P_0 - P_i)/P_0 \cdot P_t / (P_t - P_i)\}] / 100 \quad (12)$$

$$t = l / k_f (P_i) \quad (13)$$

$$f(P_t) = V_0 P_0 \rho g / F [1/(P_i P_0) - 1/(P_t P_i) + 1/(P_i) \ln\{(P_0 - P_i)/P_0 \cdot P_t / (P_t - P_i)\}] / 100 \quad (14)$$

詳細は後述するが同一装置であるなら V_0, P_0, P_i の変化に関係なく、式(13)を用いて精度良く実測値をシミュレート可能である。

4. BATシステムによる透水試験方法

(1) 試験機器

試験装置は図-12に示すBATシステムを使用し、主な機器の概要は以下の通りである。

a) フィルターチップ

フィルターチップは、試験装置の先端にあり、フィルターを通して地下水が試験容器内に流入したり(回復法)、試験容器内の水が地盤に流出したり(注入法)する部分であり、試験に先立ちガイド管と共に試験位置に設置される。上部にはラバーディスクで蓋がしてあるため、ガイド管内に地下水が流入することは無い。

b) ガイド管

ケーシングパイプやガス管が用いられ、ケーシングパイプの場合にはパイプ内に水が漏水しないように接合部にはOリングを装着する場合もある。

c) 試験容器

先端に上下に動く両端針があり、その上部には両口にラバーディスクを装着した試験容器がある。この試験容器を圧力計と共に所定深度に設置された「フィルターチップ+ガイド管」の中に挿入し、先端部に達したら試験容器の自重で両端針がフィルターチップと試験容器のラバーディスクを貫通し、フィルターチップと試験容器は連結され容器内(P_0)と土中(P_i)の圧力差で水が流入、流出する。

d) 圧力計

圧力計は試験容器と接続しており、試験容器内の圧力を測定することにより、試験容器内の水の出入りによる

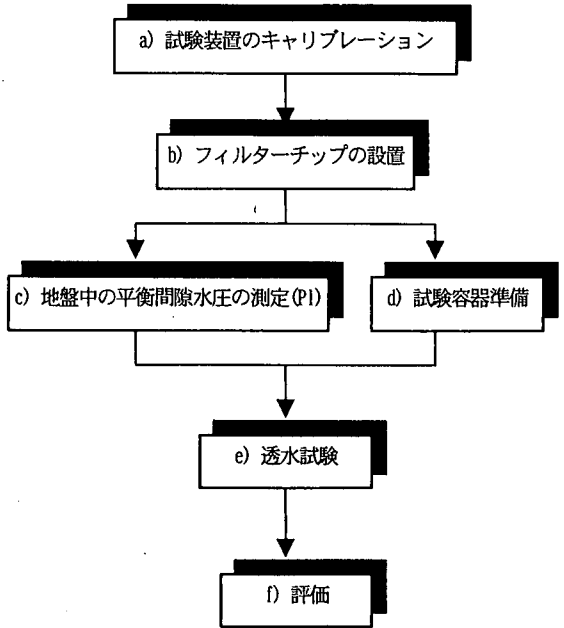


図-13 BATシステムによる透水試験の手順

圧力変化をモニタリングする。

(2) 透水試験の手順

このBATシステムによる透水試験の流れを図-13に示す。

a) 試験装置のキャリブレーション

試験装置自体の損失成分 ΔP を求めるため、図-9のようなフィルター周辺の透水係数が無限大となる水中でのキャリブレーションより α を求める。

表-1、図-14に異なる装置(両端注射針の径が違う)で、 V_0, P_0, P_i を変化させて、キャリブレーションを行った結果を示す。同図より以下のことが判る。

第一に同一の装置では、 V_0, P_0, P_i の変化に関わらず $\Delta P = \alpha Q^2$ で表現できる。このことは、大気圧下の水中で予め装置のキャリブレーションを行っておけば、あらゆる深度に適用できることを意味する。

第二に同一装置では回復法と注入法では ΔP には大きな変化は生じない。

第三に従来から用いられて来た両端針G21(内径0.8mm)より内径の大きいG18(内径1.2mm)を用いることにより、同一の Q に対し ΔP を小さくでき、より透水性の良い地盤に適用できることが判る。

b) フィルターチップの設置

調査ボーリングと併用して「フィルターチップ+ガイド管」を図-15に示すようにボーリング孔底から、試験

表-1 試験条件

| 記号 | 試験法 | 両端注射針のタイプ | Vo (cm ³) | Po (kPa) | PI (kPa) |
|----|------|-----------|-----------------------|----------|----------|
| ○ | 回復法1 | G21 | 520 | 19 | 98 |
| △ | 回復法2 | G21 | 520 | 98 | 279 |
| ▲ | 回復法3 | G18 | 520 | 22 | 98 |
| ● | 注入法1 | G18 | 200 | 194 | 98 |

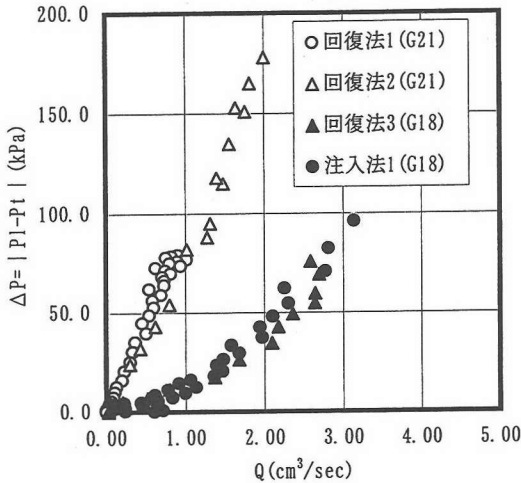


図 - 14 BATシステムのキャリブレーション結果

深度まで周辺地盤をなるべく乱さないように押し込んで設置する。この時、従来の試験法のようにボーリング孔内を洗浄する必要はない。

c) 地盤中の平衡間隙水圧(PI)の測定

フィルターチップ押し込み時に細粒が多いと周辺地盤の間隙水圧が一時的に上昇する。図-4のアタッチメント(c)を「フィルターチップ+ガイド管」の中に挿入して、この間隙水圧の消散を確認しながら地盤中の平衡間隙水圧(PI)を測定する。安定水位は、この平衡間隙水圧で測定するため、従来より早く求めることができる。

d) 試験容器の準備

回復法の場合には、試験容器内に地下水が流入する。採取深度により試験容器内の圧力を大気圧以下に真空ポンプ等を用いて調整し、容器内圧力Poを測定する。

注入法の場合には、試験容器内から水を地盤中に注入する。試験容器に半分程度水を入れ、試験深度の平衡間隙水圧(PI)より50~200kPa程度加圧し、容器内圧力Poを測定する。

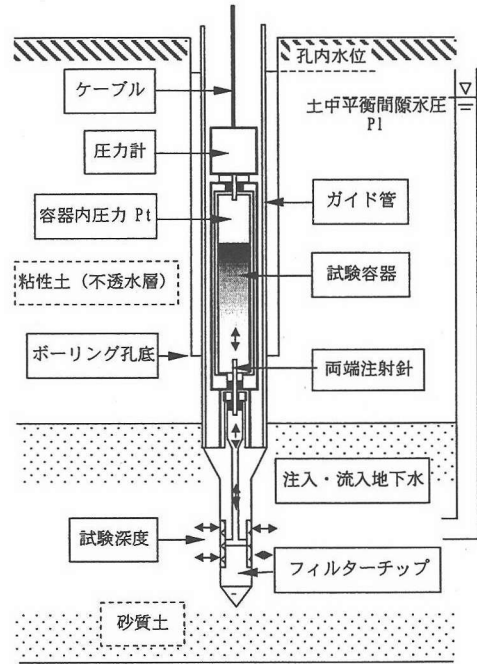


図 - 15 BATシステムによる透水試験

- 注入法 (補正前) ○ 注入法 (補正後)
- 注入法 (評価値) ▲ 回復法 (補正前)
- △ 回復法 (補正後) - - - - 回復法 (評価値)

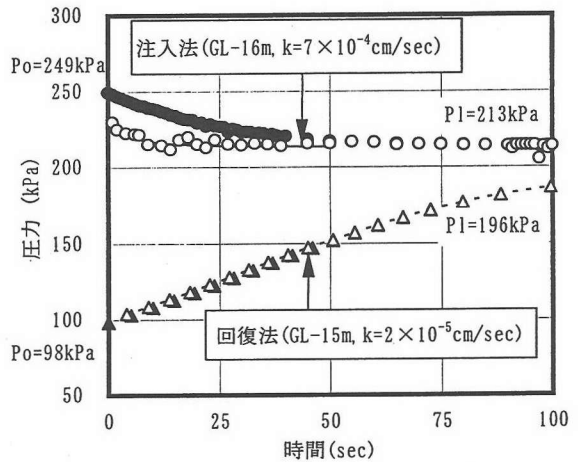


図 - 16 BATシステムによる透水試験結果例

e) 透水試験

「試験容器+圧力計」をガイド管内を降下させ、両端注射針を用いてフィルターチップと試験容器を連結させる。図-16に示すように回復法の場合には、地下水が流入し容器内の圧力はPIまで上昇する。注入法の場合には、水を地盤中に注入し容器内の圧力はPIまで減少する。本

| 試験方法 | | 時間 | 0.1 | 1 | 10 | 100 | 1000 |
|-----------------|--------|------|-----|---|----|-----|------|
| BAT法 | フィルタ設置 | 0.5 | ■ | | | | |
| | 平衡水圧測定 | 0.5 | | ■ | | | |
| | 透水試験 | 1.0 | | ■ | | | |
| 単孔式 透水 試験 | 測定管の設置 | 0.5 | ■ | | | | |
| | 孔内洗浄 | 1.5 | | ■ | | | |
| | 透水試験 | 2.0 | | ■ | | | |
| | 平衡水圧測定 | 15.0 | | | ■ | | |

(a) 砂質土 (条件: GL-30m, $k=10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sec)

| 試験方法 | | 時間 | 0.1 | 1 | 10 | 100 | 1000 |
|----------|--------|------|-----|---|----|-----|------|
| BAT法 | フィルタ設置 | 0.5 | ■ | | | | |
| | 平衡水圧測定 | 15.0 | | ■ | | | |
| | 透水試験 | 3.0 | | ■ | | | |
| 室内 試験 | サンプリング | 0.5 | ■ | | | | |
| | 試料運搬 | 1.5 | | ■ | | | |
| | 圧密試験 | 240 | | | | ■ | |

(a) 粘性土 (条件: GL-30m, $k=10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec)

図-17 BATシステムと従来の方法の試験時間の比較

システムは、差圧の変化によって透水試験を行うため、基本的に適用深度限界はないが、現在の実績では100m程度までは適用可能である。

a)~e)の試験に要する時間は図-17に示すように従来の方法より1/10程度の時間で試験が可能であることが判る。

f) 評価

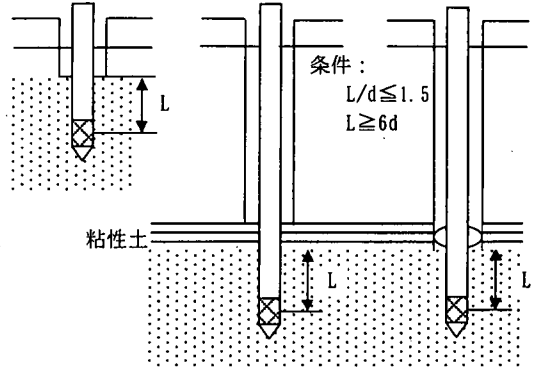
式(11)により補正された圧力の変化過程を図-16に示す。同図を用いて式(13)より透水係数を求める。フィルタチップは、不圧、被圧に応じて図-18のように設置するとフローファクターFは、式(3)で設定できる。

5. 現地への適用例

(1) 透水係数(土質)毎の損失成分 ΔP の影響

式(10)が成り立つためには、装置内の水の流れを層流に保つ必要がある。管内の流れに対して工学的にはレイノルズ数 Re が、 $Re > 4000$ を乱流、 $Re < 2000$ を層流、 $2000 < Re < 4000$ を過渡状態と考えられている⁹⁾。装置内において一番流速が速いと考えられるのは管径の小さい両端注射針内であり、透水係数(土質)毎の圧力の差圧 $|P_1 - P_2|$ とこの針内における流量 Q およびレイノルズ数 Re の関係を図-19にまとめた。同図より砂質土($k=10^{-3} \sim$

(粘性土をハッカに利用)(布ハッカを使用)



(a) 不圧の場合 (b) 被圧の場合

d : フィルターの直径(cm)
 l : フィルタの長さ(cm)

図-18 フィルタチップの設置状況

- $k=1 \times 10^{-3}$ cm/sec
- ▲ $k=5 \times 10^{-5}$ cm/sec
- $k=1 \times 10^{-6}$ cm/sec
- $k=1 \times 10^{-4}$ cm/sec
- $k=1 \times 10^{-5}$ cm/sec
- △ $k=1 \times 10^{-7}$ cm/sec

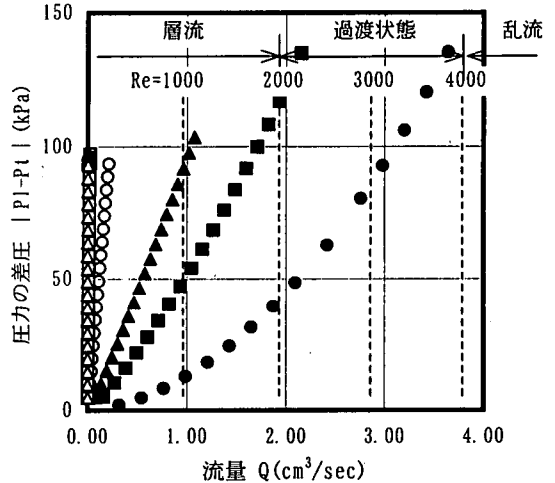
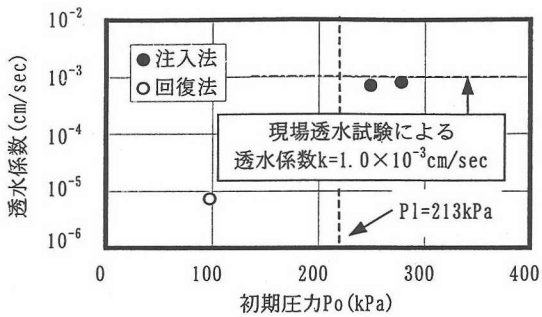
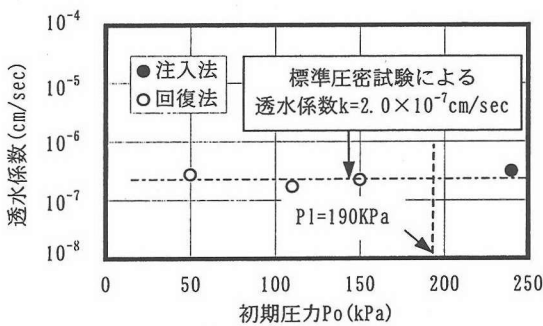


図-19 透水係数(土質)毎の損失成分の評価
両端注射針はG18を使用

10^{-4} cm/sec)については、装置内の水の流れが層流状態を保つためには、初期差圧 $|P_1 - P_0|$ を50~100kPa以下にする必要がある。粘性土については、流量が非常に小さくなるため、図-10に示すキャリブレーション曲線を用いた場合、従来のBATシステムが対象としていた透水係数 $k=10^{-6}$ cm/sec以下の粘性土は、補正を行わなくてもよいことが判る。



(a) 砂質土の実施例



(b) 粘性土の実施例

図 - 20 初期圧 P_0 の違いが透水係数に与える影響
P1: 地盤中の平衡間隙水圧 (kPa)

(2) 初期圧 P_0 の影響および回復・注入法の比較検討

BATシステムにおける初期圧 P_0 の透水係数への影響を比較したものを図-20に示す。層流の範囲内の圧力であれば、初期圧 P_0 は透水試験結果に大きな影響は無いと考えられる。ただし、砂質土の回復法の場合（経験的に 10^{-4} cm/sec以上）に透水係数が実際より小さくなることがあるが、これはフィルタの隙間に土の微粒子が入るためと考えられ、適用に当たっては試験法の選択に注意が必要である。すなわち、透水係数と安定水位を求める場合には、基本的に注入法が良いと考えられる。

この場合の注入圧力は、1) 前述の装置内の水の流れを層流に保つための圧力（図-19参照）である必要があるとともに、2) ハイドロリック・フラクチャー試験から求まる地盤にクラックを生じさせない圧力（= 静止土圧 + 間隙水圧）¹⁰以下を選定する必要がある。

また、透水試験と採水を目的とする場合には、 $k = 10^{-4}$ cm/sec 以下では回復法が良いが、 $k = 10^{-4}$ cm/sec 以上の場合には注入法による透水試験と採水を別々に行う必要がある。

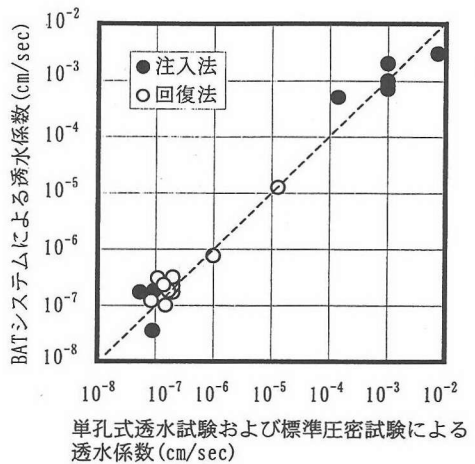


図 - 21 BATシステムと従来の透水試験との比較
(文献 2), 10), 11) にデータ追加

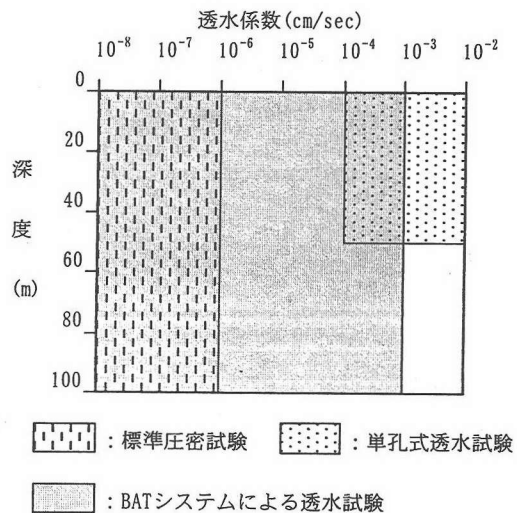


図 - 22 各種透水試験適用範囲

(3) 従来の現場透水試験との比較

BATシステムと従来の透水試験法で夫々求めた透水係数を比較したものを図-21に示す。ここで従来の透水試験とは砂質土では単孔式透水試験、粘性土では標準圧密試験（有効土被りに相当する値）である。

同図からBAT法と従来の透水試験法から求めた透水係数は実務上ほぼ一致しており、透水係数 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ cm/secの間でBATシステムを用いて透水試験を行うことが可能であると考えられる。

(4) 本手法の適用範囲

調査深度（深度100mまで）に応じた各種透水試験法による透水係数の適用範囲を図-22に示す。同図の単孔式透水試験の透水係数については、自然水位の把握の問題（最小 10^{-4} cm/sec）⁹および試験法自体の計測の限界（最大 10^{-2} cm/sec）¹⁰などから設定した。

従来、透水係数（土質）によって透水試験法は別れていたが、BATシステムにより広範囲な透水係数が一つの試験方法で試験可能である。特に、従来、境界領域であった中間土領域の透水係数 10^{-6} ～ 10^{-4} cm/secに実務上問題なく適用でき、中間土の遮水性評価が現地でも可能である。

6. まとめ

本研究は、BATシステムを用いた透水試験法の適用範囲を中間土～砂質土まで広げ、実際の地盤への適用性について考察を行ったものである。開発されたBATシステムによる現場透水試験法は以下のような特徴を有している。

- (1) 中間土～砂質土を対象とするBATシステムによる現場透水試験において、装置自体の損失成分を差し引くことにより、地盤の真の透水係数を求めることが可能である。
- (2) 装置自体の損失成分を最小にするためには、フィルタチップと試験容器を接続する両端注射針を太くすれば良い。
- (3) 透水試験時に泥水処理を必要としないため、環境への負荷が少なく、今後の環境保全を考慮した透水試験法である。
- (4) 従来は透水試験法が透水係数（土質）により異なっていたが、BATシステムを用いることにより、 $k=10^{-6}$ ～ 10^{-3} cm/secの広範囲な土質に同一システムで適用可能である。
- (5) 透水試験に要する時間は、従来の方法より1/10程度の時間で試験可能となり、その分試験費用も安価と

なる。

- (6) 適用深度は理論的には制限はないが、実績として100m程度までは可能である。

参考文献

- 1) (社)土質工学会：ジオテクノート2 中間土, 1992.
- 2) 山下哲郎, 大河内 保彦：新しい間隙水圧測定システムによる透水試験, 原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集, (社)土質工学会, pp. 75-78, 1985.
- 3) 日本道路公団：土質地質調査要領, pp. 148-149, 1992.
- 4) 霜上 民生, 岸尾 俊茂, 鎌田 敏正, 有本 弘孝, 小林 圭, 沖 泰三：大阪地盤帯水層の水理特性, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'95, 地下水地盤環境に関する研究協議会, pp. 21~38, 1995.
- 5) 西垣 誠：単孔式原位置透水試験法の諸問題, 地下水と井戸とポンプ, 第28号, 第5号, pp. 1-13, 1986.
- 6) (社)地盤工学会：廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用, pp. 143-144, 1998.
- 7) 柳浦 良行, 豊岡 義則, 友清 悟：BATシステムによる土中メタンガスの定量的調査法の開発, 土木学会論文集, NO. 609/VI-41, pp. 111-121, 1998.
- 8) 吉川 秀夫：水理学, 技報堂出版(株), p. 148, 1980.
- 9) 細井 正延, 杉山 錦雄：水理学, コロナ社(株), p. 64, 1972.
- 10) 豊岡 義則, 和田 英孝：BATシステムによる広範囲な透水性地盤における現場透水試験について, 全地連「技術フォーラム'97」, pp. 113-116, 1997.
- 11) 柳浦 良行, 豊岡 義則, 友清 悟：BATシステムによる砂質土の現場透水試験法の開発, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 1847-1848, 1998.
- 12) 森 研二, 大河内 保彦, 山下 哲郎：新しい間隙水圧測定システムによる測定例, 第20回土質工学研究発表会, pp. 97-98, 1985.
- 13) (社)地盤工学会：地盤調査法, pp. 288-290, 1995.

(1998.9.29 受付)

APPLICATION OF BAT IN-SITU PERMEABILITY TEST SYSTEM TO SANDY GROUND

Yoshiyuki YAGIURA, Yoshinori TOYOOKA and Satoru TOMOKIYO

Conventionally, in-situ permeability test by single-hole is employed to obtain the coefficient of permeability for sandy ground. However, it becomes difficult to apply this conventional method due to the complication of present construction projects, such as very deep location, short testing time afforded and use of mud drilling. Although only to clayey ground because of head loss in the system, BAT system, developed by B. A. Torstensen, Sweden, can be basically applied to overcome these limitations presently. In this study, we improved BAT system and developed how to minimize the head loss on the basis of the fact that head loss is closely related to the velocity of groundwater flow inside the system in order to apply BAT system to sandy ground.