

# 地盤工学実験 実験報告書 透水および液状化試験

ゆり\* (@81suke\_)

実験日 2020/1/31(金)

## Contents

1	実験目的	2
2	実験方法	2
2.1	定水位透水試験 . . . . .	2
2.2	浸透流実験 . . . . .	2
3	実験結果	3
4	考察	3
4.1	透水係数について . . . . .	3
4.1.1	Hazen の式 . . . . .	3
4.1.2	Taylor の式 . . . . .	4
4.2	浸透流実験について . . . . .	6
4.3	ボーリングの生じる理論値と実測値の比較 . . . . .	8
5	追加学習	9
6	感想	10
	References	10

## 1 実験目的

土は粒子が集まったものであるため、粒子と粒子の間に間隙があり、水はそこを流れることができる。この様な多孔質体中の水の流れを浸透といい、この水の浸透しやすさを評価する試験が透水試験である。本実験では、土中の透水現象を理解するために定水位透水試験を行う。また、二次元水槽内にある模型地盤を用いた浸透流実験も行い、土中での水の流れを観察し、土中の浸透流に関する理解を深める。本実験では締固めた試料および乱さない試料を対象に、飽和状態における透水係数を求めることを目的としている。室内供試体で現場を再現できない場合は現場透水試験を用いるのが適切である。

## 2 実験方法

### 2.1 定水位透水試験

1. 水を満たした越流水槽に透水円筒を空気が入らないようにしながら静かに移し替える。
2. 透水円筒カラーに注水し、越流口から越流させ、給水側の水位を一定に保つ。
3. 越流水槽から越流する様子を調べ、越流量がほぼ一定になることを確認する。
4. メスシリンダーを越流口においた時間  $t_1$ (s) から、はずすまでの時間  $t_2$ (s) をストップウォッチではかり、その間にメスシリンダーに流れ込んだ水量で流出水量  $Q(\text{cm}^3)$  を求める。
5. 4. の測定を 3 回以上行う。
6. 4. の条件を保ち、透水円筒カラーの水位と越流水槽の水位の差  $h(\text{cm})$  を測る。
7. 越流水槽の水温  $T(^{\circ}\text{C})$  を 4.5. の作業ごとに測定する。
8. 測定が終われば越流水槽から透水円筒を取り出して、試験後の供試体の含水比  $w(\%)$  を測定する。

### 2.2 浸透流実験

1. 用意した土槽の各寸法を計測する。
2. 試料を入れる予定のラインまで水を入れる。
3. 砂を 2. のラインまで入れる。この時、砂を入れる前後の重さを計測しそこから入れた砂の体積を求める。
4. ホースにより試料を乱さないように気をつけながら静かに試験を開始する。
5. 約 30 分程放置し、定常になったことを確認したら、上流側の試料に三箇所墨汁を滴下する。
6. 墨汁の移動した様子をプラ板に写す。
7. 定常状態の流量を三回計測し、その平均を求め平均流量とする。

### 3 実験結果

詳細は班レポートを参照のこと。

定水位透水試験から、水温  $T[^\circ\text{C}]$  のときの透水係数  $k_T[\text{m/s}]$  を求めたものが下表である。

Table 1: 透水係数

相対密度 $D_r[\%]$	透水係数 $k_T[\text{m/s}]$
80	$3.4 \times 10^{-4}$
60	$3.8 \times 10^{-4}$
30	$5.0 \times 10^{-4}$

また、浸透流実験における透水係数は、

$$k = \frac{1.29}{15} \frac{18}{3.7} \frac{1}{11} \times \frac{1}{100} = 3.80 \times 10^{-4} (\text{m/s})$$

と算出された。

さらに、境界条件からのボーリングの発生する水頭差について、ボーリングの発生する水頭差の理論値は 6.7cm となった。  
また、ボーリングが発生した水頭差の実測値は 5.7cm であった。

### 4 考察

今回行った実験についての考察を行う。

#### 4.1 透水係数について

今回実験で求めた実測値と、各経験式による理論値を比較し論ずる。

##### 4.1.1 Hazen の式

土粒子径が大きくなるほど透水係数  $k$  は大きくなる。このことを表した式として、以下の Hazen の式が知られている。

$$k = C_h(0.7 + 0.03t)D_{10}^2 \times \frac{1}{100} \quad (1)$$

$D_{10}$  : 有効径 (cm)

$t$  : 温度 ( $^\circ\text{C}$ )

$C_h$  : 係数

今回は豊浦砂を使用した。豊浦砂の状態量から

$$D_{10} = 0.143\text{mm}[3]$$

$$t = 15.1^{\circ}\text{C}$$

$$C_h = 150$$

として、代入し求めると、

$$k = 3.536 \times 10^{-4} \simeq 3.54 \times 10^{-4} (\text{m/s})$$

今回の実験により得られた結果 (Table 1) と比較すれば、相対密度  $D_r$  が 60～80% の範囲で有効な経験式であると推測される。

#### 4.1.2 Taylor の式

Taylor の式を使用して同様に間接的に推定する。

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} C_k \frac{e^3}{1+e} D_s^2 \times \frac{1}{10^4} \quad (2)$$

$\gamma_w$  : 水の単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )

$\eta$  : 水の粘性係数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

$e$  : 間隙比

$D_s$  : 土粒子の直径 ( $\text{cm}$ )

$C_k$  : 形状係数

今回は

$$\gamma_w = 10 (\text{kN/m}^3)$$

$$\eta = 0.001140 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$

$$D_s = 0.202\text{mm}[3]$$

$$C_k = 3.6$$

として、代入すると、

$$k = 1.289 \times 10^{-3} \times \frac{e^3}{1+e} \quad (3)$$

となる。

次に、相対密度  $D_r$  と間隙比  $e$  の関係を考える。

相対密度  $D_r$  は

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4)$$

によって定義される。

つまり、

$$e = e_{\max} - D_r(e_{\max} - e_{\min}) \quad (5)$$

今回は

$$e_{\max} = 0.973$$

$$e_{\min} = 0.609$$

これより、 $D_r = 30, 60, 80[\%]$  それぞれにおいて  $e$  を計算すると

$$D_r = 30(\%) \text{ なら } e = 0.864$$

$$D_r = 60(\%) \text{ なら } e = 0.755$$

$$D_r = 80(\%) \text{ なら } e = 0.682$$

これを式 (3) に代入することで

$$D_r = 30(\%) \text{ なら } k = 4.46 \times 10^{-4}(\text{m/s})$$

$$D_r = 60(\%) \text{ なら } k = 3.16 \times 10^{-4}(\text{m/s})$$

$$D_r = 80(\%) \text{ なら } k = 2.43 \times 10^{-4}(\text{m/s})$$

と導かれた。

なお、透水係数  $k$  は式 (3) のとおり、間隙比関数  $\frac{e^3}{1+e}$  に比例することが知られている。  
今回の実測値と比例曲線を比較することを考える。

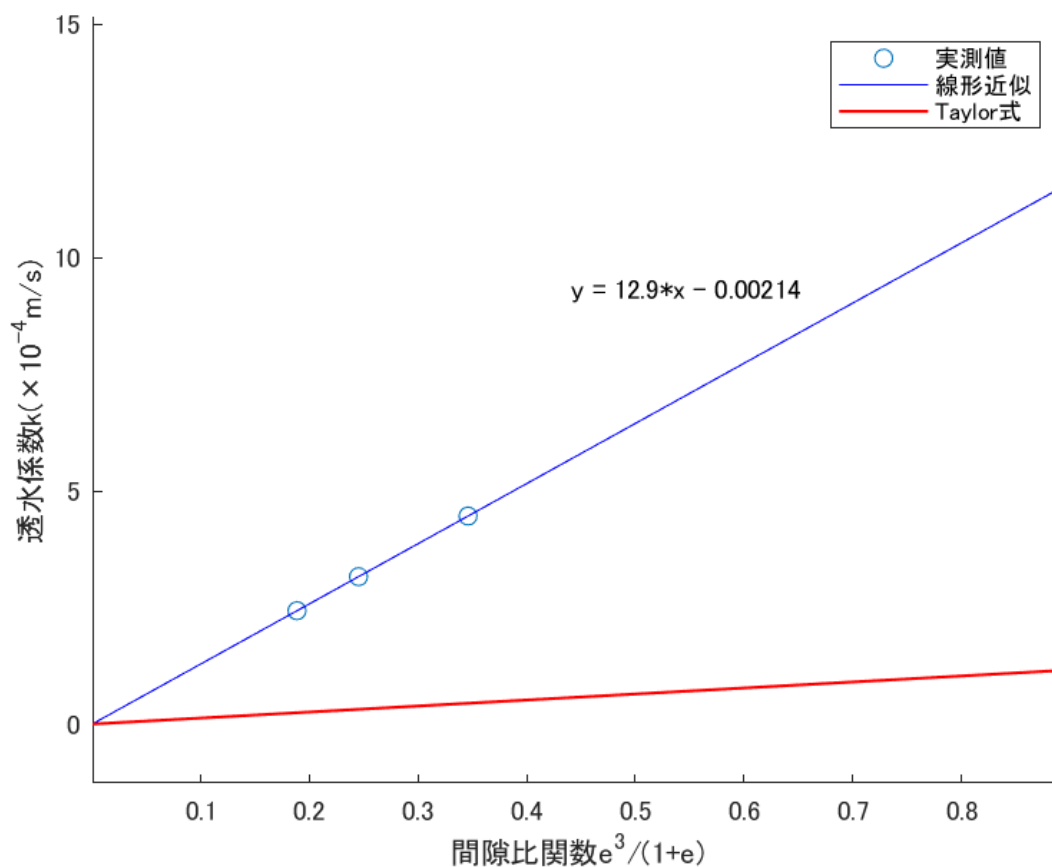


Figure 1: Taylor 式の図示

以上から、今回の実測値は直接的に近似できることは確認できた。ただし、比例係数は導いた値 ( $1.289 \times 10^{-4}$ ) とは異なり、 $12.9 \times 10^{-4}$  と大きくなった。

#### 4.2 浸透流実験について

浸透流実験においても、流量から透水係数を求めることができた。このとき得られた実測値から、浸透流実験における土粒子状態を考える。

今回の実験によって得られた透水係数  $k$  は土の状態量といえる。定水位透水試験と浸透流実験で同じ状態の試料を用いていたならば、各試験方法により得られた透水係数が一致するはずである。今回の浸透流実験では、相対密度  $D_r = 16.8(\%)$  で透水係数  $k = 3.80 \times 10^{-4}(\text{m/s})$  と求められた。しかし、Table 1 から、 $D_r < 30(\%)$  であるから  $k > 5.0 \times 10^{-4}(\text{m/s})$  となると考えるのが自然であり、今回の結果はこの理論に反することとなった。ここではなぜこのような結果となったのか考察を行う。

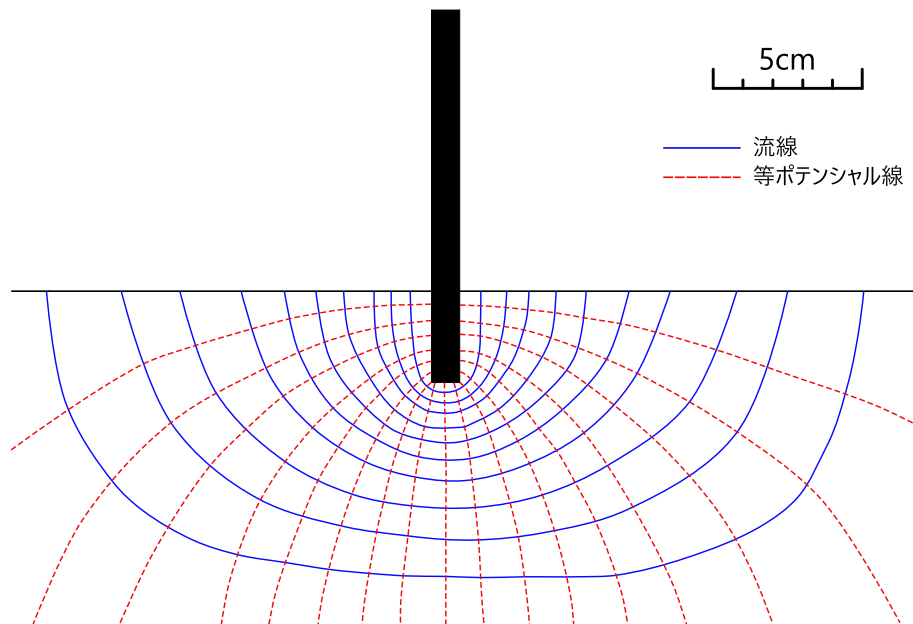


Figure 2: 浸透流のフローネット

今回の透水係数導出に用いたフローネットは上図の通りであるが、仕切り板の下部が多少縦に細長いように見受けられる。この部分をより正方形フローネットにするために等ポテンシャル線を1本抜くことを考える。このとき、等ポテンシャル線で仕切られた区画の数  $N_d$  は18から17となる。

透水係数は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} k &= \frac{q'}{\Delta h} \frac{N_d}{N_f} \times \frac{1}{100} \\ &= \frac{q}{d\Delta h} \frac{N_d}{N_f} \times \frac{1}{100} \end{aligned} \quad (6)$$

$q'$  : 単位時間単位奥行きあたりの透水量 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$q$  : 単位時間あたりの透水量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )

$d$  : 奥行き (cm)

$\Delta h$  : 水位差 (cm)

今回のフローネットはフローネットの流管の数  $N_f$  は11であるから、測定によって得られた  $q = 1.29(\text{cm}^3/\text{s})$ 、 $\Delta h = 3.7(\text{cm})$ 、 $d = 15.0(\text{cm})$  を代入すると、透水係数は

$$k = \frac{1.29}{15 \cdot 3.7} \frac{17}{11} \times \frac{1}{100} = 3.59 \times 10^{-4}(\text{m/s})$$



と算出される。

しかしこれは理論からより離れる結果である。したがって、フローネット以外にずれの要因があると考ええる。そこで、今回の測定量について検討した場合、特に単位時間透水量  $q$  が不安定要素であることが考えられる。流量は、測定された時間における流量から算出したが、時間の測り方はストップウォッチの合図によるものであり、3回測定して平均をとったとはいえ測定者の癖が反映されるものであり、信頼性は低い。理論から照らし合わせると、今回の実験では、定水位透水試験で透水係数  $k$  が大きく算出された、あるいは浸透流実験においてストップウォッチの計測のラグなどで  $q$  が小さくなり結果として透水係数  $k$  が小さくなったと考えられる。

#### 4.3 ボイリングの生じる理論値と実測値の比較

ボイリングの発生する水頭差の理論値は 6.7cm に対して実測値は 5.7cm であった。誤差は -14.9% であった。まずは定性的な考察、つまりなぜ理論値より小さい値となったのかを考察する。

ボイリング時の水頭差  $\Delta H(\text{cm})$  は以下の式で表される。

$$\Delta H = i_c L \quad (7)$$

$i_c$  : 限界動水勾配

$L$  : 地盤内の流線の長さ (cm)

つまり今回の誤差要因として考えられるのは

1.  $L$  が小さかった。
2.  $i_c$  が小さかった。

である。それぞれについて考える。

1.  $L$  が小さかった。

$L$  が小さいということは理論上より短い経路の流線を取りうることに同義である。ただし今回は装置の仕様上、 $L \geq 7.7$  であるから、このような場合はないと結論づけられる。仮に誤差要因だったとした場合、それは装置の寸法の計測ミス、つまり過誤である。

2.  $i_c$  が小さかった。

$L$  が起こりえない時点で、こちらの誤差が主要な原因である可能性が高い。今回は  $i_c$  の変動要因について論じる。

限界動水勾配  $i_c$  は以下の式で与えられる。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (8)$$

土粒子比重  $G_s$  は土粒子固有の値であり、信頼性は高い。これより、主たる誤差は間隙比  $e$  によるものであると推測される。

今回は間隙比  $e$  を以下の式により求めた。

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{G_s}{\rho_d} - 1 \quad (9)$$

$$= \frac{G_s}{m_s/V_s} - 1 \quad (10)$$

$m_s$  : 土試料質量

$V_s$  : 土試料体積

ここで今回、土を土槽に入れていく際、誤って土をこぼしてしまった。このことから土試料質量  $m_s$  が小さくなってしまった。このことにより、 $e$  は大きくなり。結果として  $i_c$  が小さく見積もられることになったと考えられる。ただ、土を 14.9% もこぼしたはずはないので、別の誤差要因も含まれているはずである。

そこで、今回影響があったと考えられるのは、浸透流下での流体の抵抗である。浸透流下では、水は土粒子間隙を通るから、水と流体で摩擦によるエネルギー損失が発生する。このことに加え、摩擦が内部応力として作用するなどにより、理論上より低い水頭差により破壊が生じてしまったと推測できる。この際の影響は計算で求められるほど単純でないため今回は考えないこととするが、誤差約-15%になるほどの大きな要因であることは疑う余地はない。

## 5 追加学習

カムクレイの比喩について学ぶ。

### 1. 地下浸透流の国

酒の比喩では、“永遠に汲めどもつきぬ生命のみなもと”とある。水は、定常的な流れをもたらす物質として捉えられていた。

### 2. 圧密沈下の国

酒の比喩では、“過ぎ去った青春のように2度ともに戻らぬはかなさ”とある。圧密が発生すると、地盤中の水が排出されて沈下が発生する。この分野では、水は圧密などの不可逆的变化をもたらす要因とされた。

### 3. 破壊理論と安定解析の国

酒の比喩では、“個人の生活だけではなくその家族の将来までメチャクチャにしてしまう呪いの前兆”とある。水に対しては、ボーリングやパイピングのような、地盤の主要な破壊要因であると述べている。

このように、水はそれぞれの視点、分野によってかなりの扱いの差があることがうかがえる。

## 6 感想

今回の実験では地盤内の浸透流現象について理解を深めることが出来た。また、ボーリングや液状化現象の現象を実際に目にすることにより、実感を高めることが出来た。

通常は地盤の破壊現象としてまず考えるのは土圧によるせん断破壊などが想起されるが、水によるボーリング、パイピングなどの影響も無視できないと感じたので、今後は留意する必要があると思った。

## References

- [1] 公益社団法人 地盤工学会 土質試験-基本と手引き- 丸善出版 2010
- [2] JIS A 1218 土の透水試験方法 2009
- [3] 細野 康代 吉嶺 充俊 豊浦砂の粒度分布 土木学会第 64 回年次学術講演会 2009  
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2009/64-03/64-03-0168.pdf>