

呉工業高等専門学校 正会員 森脇 武夫
呉工業高等専門学校 学生員 ○古屋 智郷

1. はじめに

一般的に粘土の透水係数は鉛直方向のものより、水平方向のものの方が大きいと言われている。しかし現在基準化された水平方向透水係数の試験法はなく、実務などで用いる場合は鉛直方向透水係数と同等とみなして鉛直方向透水係数を代替している場合が多い。

しかし、海面埋立地などの廃棄物から出る汚染水の遮水層には在来の粘土ライナーが用いられており、その性能の評価には鉛直方向の透水係数だけでなく水平方向の正確な透水係数も必要である。さらに、軟弱地盤に対して水平方向に排水を行うバーチカルドレーン工法を用いた地盤改良において適切な沈下管理を行う際にも正確な水平方向透水係数を求める必要がある。

昨年度までの研究¹⁾により、三次元圧密試験機を用いた軸対象内向き放射流れによる定ひずみ速度載荷圧密試験により水平方向透水係数を求める試験法が開発され、鉛直方向排水試験の結果との比較などから、試験法の妥当性が確認された。しかし、この試験方法では特別な試験装置が必要であり、実務では扱いにくいいため、より簡便な方法で水平方向透水係数を求める必要がある。

そこで本研究では、基準化されている定ひずみ速度載荷圧密試験機を用いて、供試体の軸方向が粘土の堆積時の水平方向と一致するように供試体を成形し、水平方向に圧縮と排水を行って、水平方向の透水係数を算出する方法を試みた。試験に用いた試料は4種類の不攪乱自然堆積粘土で、基準化されている鉛直方向に圧縮と排水を行う定ひずみ速度載荷試験と、三次元圧密試験機を用いて鉛直方向に圧縮し、水平方向に排水する試験を行い、圧縮方向の違いが粘土の圧縮性と透水性に及ぼす影響を検討する。

2. 実験方法

本研究では3種類の試験方法で4種類の不攪乱自然堆積粘土に対して行った。以下にそれぞれの試験方法を示す。

①鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の試験方法

JIS A 1227に規定されている通常の鉛直方向排水条件の定ひずみ速度載荷圧密試験²⁾を行う。試験機は標準的な定ひずみ速度載荷圧密試験機を使用し、ひずみ速度は0.02%/minとした。また、軸圧縮力は3000kPaまで載荷するものとする。そして実験で測定した非排水面における間隙水圧を測定し、(1)の式から鉛直方向透水係数 k_v (m/s)を算出する。

$$k_v = \frac{g_n \rho_w \dot{\epsilon} H_0 H_t}{2u_t} \times \frac{1}{100 \times 100 \times 60} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 g_n は標準の重力加速度(9.81m/s²)、 ρ_w は水の密度(g/cm³)、 $\dot{\epsilon}$ は供試体に与えたひずみ速度(%/min)、 H_0 は供試体の初期高さ(cm)、 H_t は時間 t における供試体高さ(cm)、 u_t は時間 t における非排水面の間隙水圧(kN/m²)である。

②鉛直方向圧縮・水平方向排水の試験法

図-1に示す三次元圧密試験装置を用いた水平方向排水条件で鉛直方向圧縮の定ひずみ速度載荷圧密試験を行う。この試験機はバーチカルドレーンによる圧密を再現した三次元圧密試験機であり、軸対象内向き放射流れによる定ひずみ速度載荷圧密試験である。ひずみ速度は0.02%/minとし、軸圧縮力は3000kPaまで載荷する。この試験機においては中空円柱供試体の内周面を排水面、外周面と上端面を非排水面とし、供試体の非排水面である外周面で発生する間隙水圧 u_e を測定する。そして(2)の式から水平方向透水係数 k_h

(m/s)を算出する。

$$k_h = \frac{\rho_w g}{2u_e} \dot{\epsilon} \cdot r_e^2 \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{r_w}{r_e} \right)^2 \right\} \right] \times \frac{1}{100 \times 100 \times 60} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 r_e は供試体外周面の半径(cm)、 r_w は供試体内周面の半径(cm)、 u_e は時間 t における非排水面の間隙水圧 (kN/m²) である。

③水平方向圧縮・水平方向排水の試験法

JIS A 1227 に規定されている定ひずみ速度荷重圧密試験機を用いて、供試体の軸方向が粘土の堆積時の水平方向と一致するように供試体を取り、水平方向に圧縮と排水を行う定ひずみ速度圧密試験を行う。ひずみ速度は 0.02%/min とし、軸圧縮力は 3000kPa まで荷重する。そして非排水面における間隙水圧を測定し、(1)の式から透水係数を算出するが、軸方向が粘土の堆積時の水平方向と一致するように供試体を採取しているため、得られた透水係数は水平方向透水係数である。

また、本研究で用いた不攪乱試料の物理特性は表-1 に示すとおりである。

表-1 物理特性

	土粒子の密度. ρ_s (g/cm ³)	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	塑性指数 I_P
⑥(採取場所・深度不明)	2.854	108.4	39.5	68.9
⑧(採取場所・深度不明)	2.727	80.5	41.3	39.2
五日市地区 No.19-4	2.364	100.0	41.3	58.6
深江藻場 GL17.00~17.80	2.795	116.9	55.4	61.5

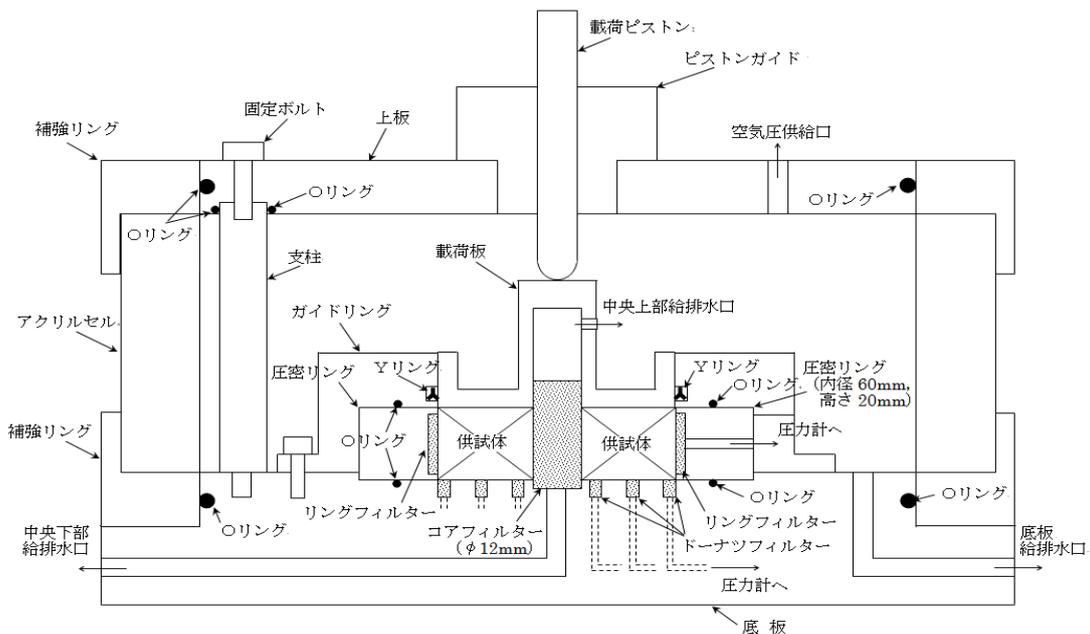


図-1 三次元圧密試験機

3. 実験結果と考察

①圧縮曲線

図-2、図-3 は代表的な圧縮曲線として、五日市地区 No. 19-4 と深江藻場 GL17.00~17.80 の試料における間隙比と圧密圧力の関係を表したものである。

図-2 において、鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の試料の初期間隙比が他のものより小さくなっているが、これは不攪乱試料の不均質が原因であると考えられる。また、圧密圧力が大きくなると間隙比の違いが徐々に小さくなっている。また、鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の場合、水平方向圧縮・水平方向排水場合、鉛直方向圧縮・水平方向排水の場合の圧密降伏応力を表す圧縮曲線の最大曲率点はそれぞれ 400kPa、230kPa、400kPa となっており、鉛直方向に圧縮したものは排水方向に関わらず一致した値となり、水平方向に圧縮したもののより大きくなっている。

また、図-3 において水平方向圧縮・水平方向排水の試料の初期間隙比が他のものと比べて小さくなっているが、これも不攪乱試料の不均質が原因と考えられる。この試料に関しても圧密圧力が大きくなると間隙比の違いが徐々に小さくなっている。また、鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の場合、水平方向圧縮・水平方向排水の場合、鉛直方向圧縮・水平方向排水の場合の圧密降伏応力はそれぞれ 100kPa、70kPa、90kPa となっており、この試料に関しても鉛直方向に圧縮したものは排水方向に関わらず近似した値で、水平方向より大きくなっている。

図-2、図-3 において鉛直方向圧縮・水平方向排水と鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の圧密降伏応力がほぼ一致するとともに、過圧密領域であるこの点までは間隙比の低下は少ないが、この点を越えて正規圧密領域にはいると、間隙比は大きく下がっている。一方、水平方向圧縮・水平方向排水の場合では圧密降伏応力が鉛直圧縮・水平排水と鉛直圧縮・鉛直排水の時と比べて約 0.6 倍 ($p_{ch}/p_{cv} \approx 0.6$) となっている。これは試料の堆積時の鉛直応力 σ_v に対する水平応力 σ_H の比である K_0 値 ($K_0 = \sigma_H / \sigma_v$) が一般的に 0.5 として知られていることとほぼ一致しているため、水平方向圧縮・水平方向排水では堆積時に受けていた水平応力が圧密降伏応力として測定できることがわかる。以上のことから、鉛直方向排水定ひずみ速度載荷圧密試験と同様に、水平方向排水の試験方法でも粘土特有の圧縮曲線を計測することが可能であると言える。

②透水係数

図-4、図-5 は代表的な透水特性として試料⑥と五日市地区 No.19-4 の試料における間隙比と透水係数の関係を表した図である。

図-4 において間隙比の減少とともに透水係数が減少している。また、間隙比の大きな初期部分は過圧密領域での透水係数であり、間隙比が小さくなった直線部からが正規圧密領域での透水係数である。同じ間隙比

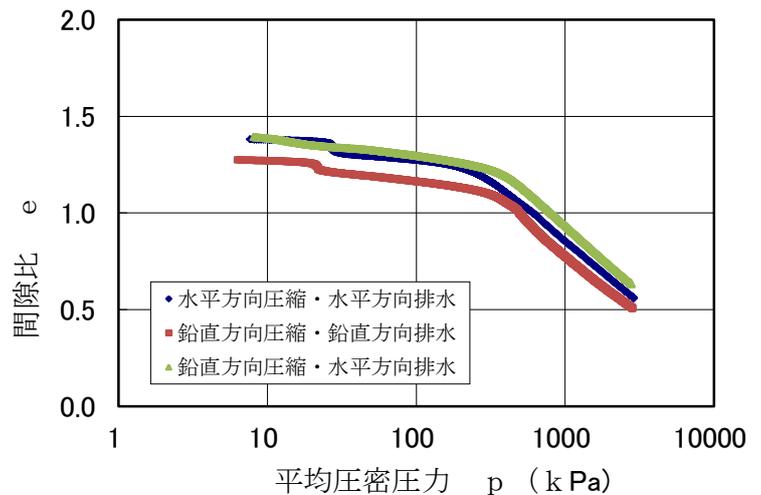


図-2 圧縮曲線(五日市地区 No.19-4)

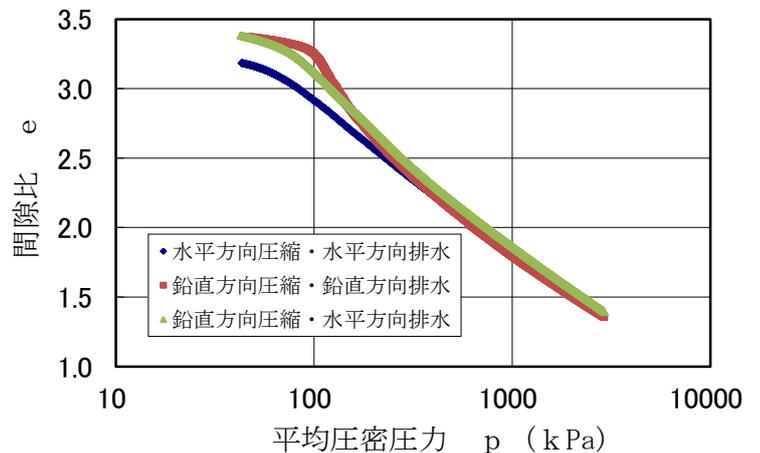


図-3 圧縮曲線(深江藻場 GL17.00~17.80)

における鉛直方向透水係数と水平方向透水係数を比較すると、水平方向透水係数の方が大きく、間隙比 $e=1.5$ では約 3.4 倍程度大きくなっている。そして、圧密が進行するにつれて両者の透水係数の差は減少していく。これは土の初期構造が圧密により破壊され、異方性が減少したためだと考えられる。また鉛直方向圧縮・水平方向排水の場合で求めた水平方向透水係数（以下、鉛直方向圧縮・水平方向排水透水係数と表す）は鉛直方向透水係数より大きく、水平方向透水係数に近い値になった。

また、図-5 においても鉛直方向透水係数と水平方向透水係数の関係は水平方向透水係数の方が大きく、間隙比 $e=1.0$ において約 1.5 倍大きくなっている。そして、こちらに関しても圧密が進行するにつれて両者の透水係数の差は減少しており、同様に土の初期構造が圧密により破壊され、異方性が減少したためだと考えられる。

また図-4、図-5 において鉛直方向圧縮・水平方向排水の透水係数は水平方向透水係数と近い値になっているが、厳密には過圧密領域では鉛直方向圧縮・水平方向排水の透水係数の方が小さく、正規圧密領域に入ると間隙比が減少すると鉛直方向圧縮・水平方向排水の透水係数が水平方向透水係数に近くなっている。当初、排水方向が同じである鉛直方向圧縮・水平方向排水と水平方向圧縮・水平方向排水の透水係数は一致すると予想していたが、過圧密領域では鉛直方向圧縮水平方向排水透水係数の方が小さく、正規圧密領域に入ると鉛直方向圧縮水平方向排水透水係数が水平方向透水係数より大きくなった。すなわち、排水方向が同じであっても圧縮方向が異なると透水係数は異なったものとなるため、現場で生じる圧縮方向と排水方向に一致した試験を行う必要があることが明らかとなった。

4. まとめ

- 1) 圧縮曲線から水平方向圧縮・水平方向排水では堆積時に受けていた水平応力が圧密降伏応力として測定できる。
- 2) 過圧密領域では水平透水係数に比べて鉛直方向圧縮・水平方向排水透水係数の方が小さく、正規圧密領域に入ると鉛直方向圧縮水平方向排水透水係数の方が大きくなった。このことから同じ排水方向であっても圧縮方向の違いによって透水係数が異なったものとなると思われる。

5. 参考文献

- 1) 森脇武夫・品本淳也：自然堆積粘土の透水係数と強度・変形特性の異方性に関する研究，呉工業高等専門学校技卒業論文，pp. 2-50，2010
- 2) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1—，地盤工学会，pp. 500-522，2000。

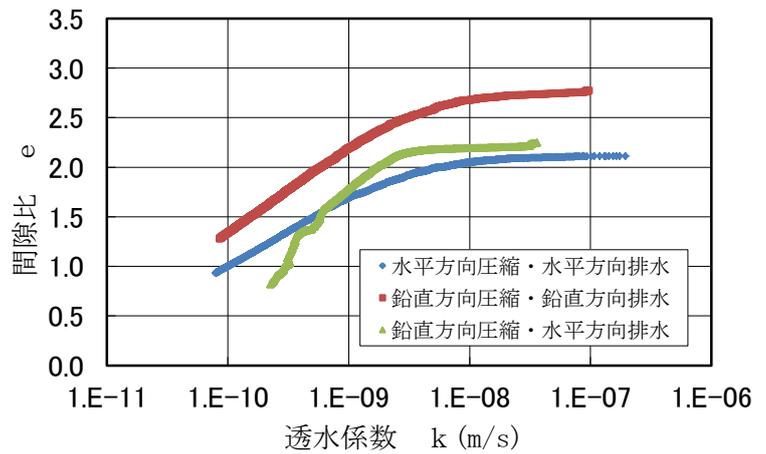


図-4 間隙比-透水係数関係図(試料⑥)

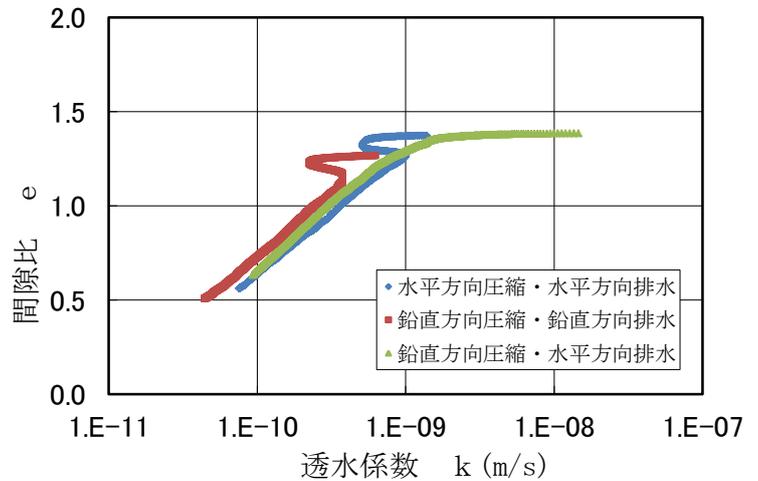


図-5 間隙比-透水係数関係図(五日市地区 No.19-4)