

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専攻科 学生会員 古屋智郷
呉工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○坂田将大

1. はじめに

一般的に自然堆積粘土の透水係数は鉛直方向より水平方向の方が大きいとされているが、水平方向の透水係数を正確に求めるための試験法は確立されていない。

しかし、軟弱地盤改良工法であるバーチカルドレーン工法においては地盤中の間隙水を水平方向に排水させるため、適切な沈下管理を行うには正確な水平方向透水係数を求める必要がある。

そこで、これまでの研究¹⁾により、三次元圧密試験機を用いた水平方向透水係数を求める試験法が開発され、試験法の妥当性が確認されるとともに鉛直方向排水試験と比較した結果、透水係数の異方性が明らかにされている。

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取り、水平方向に圧縮と排水を行うことで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3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併せて行い、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。さらに、圧密試験前後の供試体の微視的構造を電子顕微鏡によって観察することで透水特性と圧縮特性の異方性に関して粒子の構造面から検討を加える。

2. 透水係数の測定方法

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と、開発した三次元圧密試験装置を用いた水平方向排水条件の定ひずみ速度載荷圧密試験を3つの不攪乱試料に対して行った。そして実験で測定した非排水面における間隙水圧を用いて、(1)の式から鉛直方向透水係数 k_v (m/s)を、(2)の式から水平方向透水係数 k_h (m/s)を算出する²⁾。なお、水平方向圧縮・水平方向排水の場合、(1)の式によって透水係数を算出するが、得られた透水係数は水平方向透水係数である。

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

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

$\dot{\varepsilon}$:ひずみ速度(%/s)、 H_0 :初期高さ(cm)、 H_t : t における初期高さ(cm)、 g_n :重力加速度(m^2/s)、 ρ_w :水の密度(g/cm^3)、 u_t および u_e : t における非排水面の間隙水圧(kN/m^2)、 r_e :供試体外周面半径(cm)、 r_w :供試体内周面半径(cm)を表わしている。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮曲線

図-1 は代表的な試料 A の圧縮曲線でありこの図から求められた圧密降伏応力は、鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の場合 290kPa、水平方向圧縮・水平方向排水の場合 210kPa、鉛直方向圧縮・水平方向排水の場合は 320kPa となった。

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

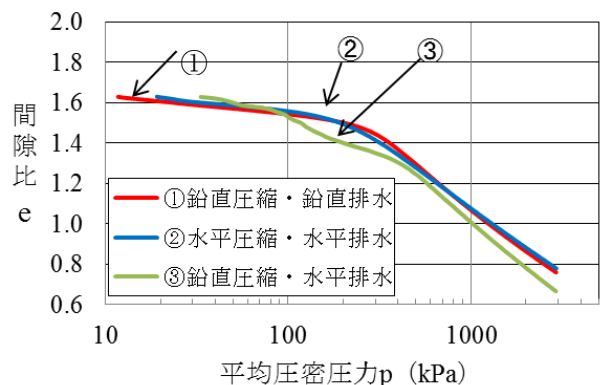


図-1 圧縮曲線(試料 A)

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った。

3.2 透水係数

(1) 透水係数

図一2は代表的な試料Aの鉛直方向透水係数と水平方向透水係数を比較したものである。なお、鉛直方向圧縮・鉛直方向排水の透水係数を k_v 、水平方向圧縮・水平方向排水の透水係数を k_{hh} 、鉛直方向圧縮・水平方向排水の透水係数を k_{vh} と表す。この図から k_v より k_{hh} 、 k_{vh} の方が大きいことがわかる。

また、 k_{vh} と k_{hh} の大小関係が圧密が進行し間隙比が小さくなるにしたがって逆転していることがわかる。これは後述するように k_{hh} 試験のときは圧密によって土粒子の配向が約 90 度変わることにより排水を遮ることで k_{hh} が小さくなったと考えられる。一方、 k_{vh} 試験のときは圧密により土粒子の配向が整ったことで排水が容易になったことで k_{vh} が大きくなったと考えられる。

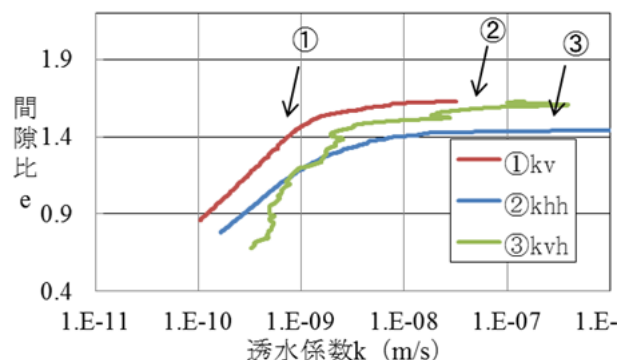
(2) 透水係数比

図一3、4、5 は水平方向の透水係数と鉛直方向の透水係数の大小関係を圧縮方向の違いを考慮して比較した図で縦軸に k_{hh} を k_v で除した値と k_{vh} を k_v で除した値を取り、横軸に間隙比 e を算術目盛で取った図である。

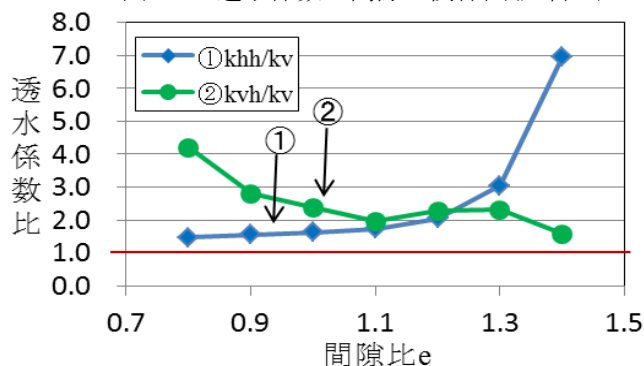
これまでの研究で得られた一般的な傾向として、 k_{hh}/k_v は間隙比が大きい初期状態では大きく、圧密が進行するに従って小さくなっていった。反対に、 k_{vh}/k_v は間隙比が大きい初期状態では小さく、圧密が進行するにしたがって大きくなる関係にあった。試料 A はこれまでと同じ傾向を示すが、試料 B、C は異なった傾向を示した。

過去の試料とこれらの試料を比べると類似した傾向を示すものがあつたので、それぞれ間隙比—透水係数比の図の形から 3 種類に分類した。試料 A のように k_{vh}/k_v と k_{hh}/k_v の関係が逆転するものをパターン A、試料 B のように k_{hh}/k_v があまり変化しないものをパターン B、試料 C のように k_{vh}/k_v があまり変化しないものをパターン C として表一1にまとめた。

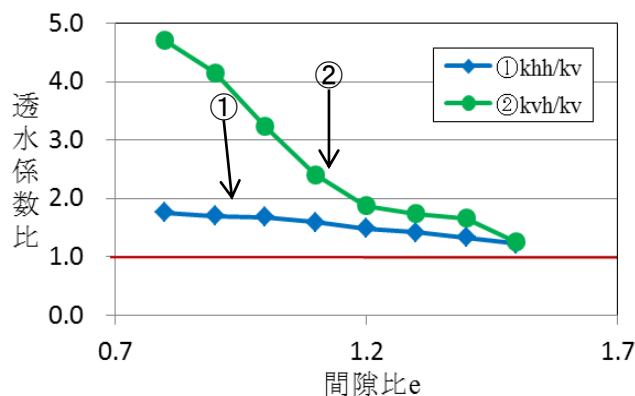
表一1より、パターン B の試料の特徴として液性限界 W_L が 100% 以上を示すことがわかる。液性限界が大きい粘土は一般的に土粒子が比較的小さいため、土粒子の配向の変化が透水性に及ぼす影響が小さく k_{hh}/k_v があまり変化しなかったものと考えられる。また、パターン C の試料の特徴として塑性指数 I_p が比較的小さい 20 程度を示すことがわかる。塑



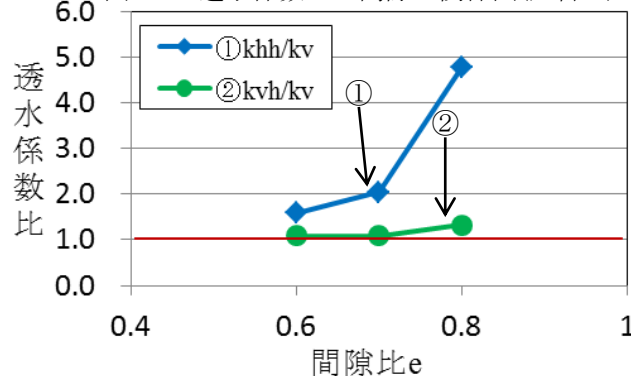
図一2 透水係数—間隙比関係図(試料 A)



図一3 透水係数比—間隙比関係図(試料 A)



図一4 透水係数比—間隙比関係図(試料 B)



図一5 透水係数比—間隙比関係図(試料 C)

性指数 I_p が小さい粘土は一般的に粒径が大きく、また、初期間隙比が小さいため鉛直方向・水平方向ともに土粒子の構造が密で透水性が小さく、圧縮前後で配向が変化しても k_{hh}/k_v には変化を及ぼさなかったと考えられる。

3.3 顕微鏡画像

図－6～9は各圧密試験後の試料を荷重方向と直交する方向に分割し荷重方向から観察した断面(以降、直交断面とする)と、荷重方向に分割し荷重方向と直交する方向から観察した断面(以降、平行断面とする)を顕微鏡で撮影した画像である。図－6、7は鉛直方向圧縮・鉛直方向排水試験後の顕微鏡画像である。初期状態に比べ配向構造が密になっていることがわかった。一方、図－8、9に示す水平方向圧縮・水平方向排水試験後は、排水方向と平行に配向していた土粒子が圧密により約 90 度回転し排水方向と直交する配向構造になった。このことから、排水方向が同じであっても、圧縮方向が異なると土粒子の配向構造の変化が異なり、透水性も異なると考えられる。

4. 結論

①水平方向圧縮・水平方向排水試験では圧縮曲線から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。

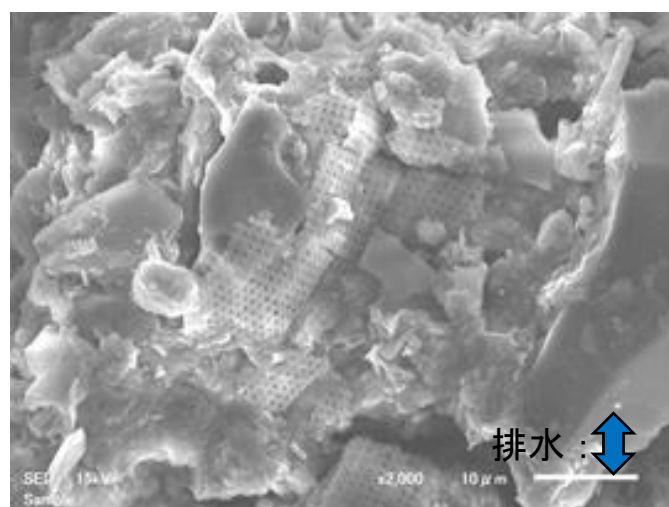
②今回の試料とこれまでの試料を透水係数比と間隙比の関係および物理特性から A、B、C、3つのパターンに分類できた。

③圧密初期に k_{hh}/k_v が k_{vh}/k_v より大きく圧密が進むと逆転するパターン A の試料は液性限界が 100%以下で塑性指数 I_p が 30 以上の一般的な粘土であった。 k_{hh}/k_v があまり変化しないパターン B の試料は液性限界が 100%以上の粘土であり、 k_{vh}/k_v があまり変化しないパターン C の試料は、塑性指数が 20 程度と小さい粘土であった。

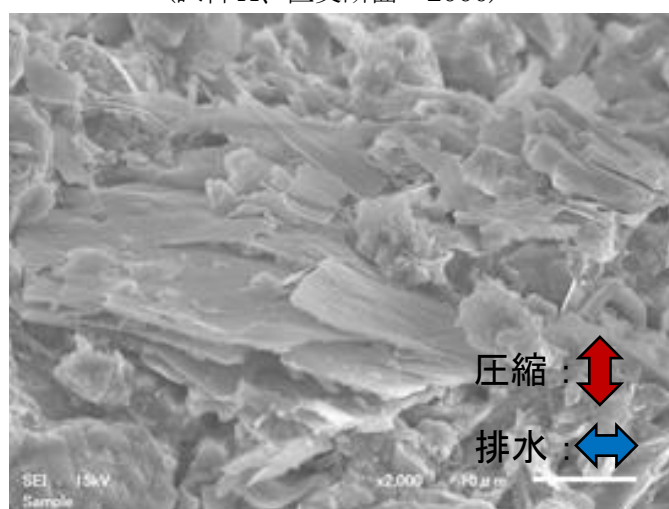
④顕微鏡画像を観察した結果、排水方向が同じであっても圧縮方向が異なると粒子の回転が起こり、配向構造の変化が起こり、透水性も異なることがわかった。

表－1 透水特性と物理特性の関係

	密度 ρ	液性限界 W_L	塑性限界 W_p	塑性指数 I_p	パターン
A	2.608	92.5	42.5	50.0	A
B	2.710	105.3	42.5	62.8	B
C	2.728	53	27.5	25.5	C
D	2.854	91.9	39.5	52.4	A
E	2.364	99.9	41.3	58.6	C
F	2.795	116.9	55.4	61.5	B
G	2.719	69.9	32.3	37.6	A
H	2.654	113.4	58.9	54.5	B
I	2.741	65.6	38.8	26.8	C



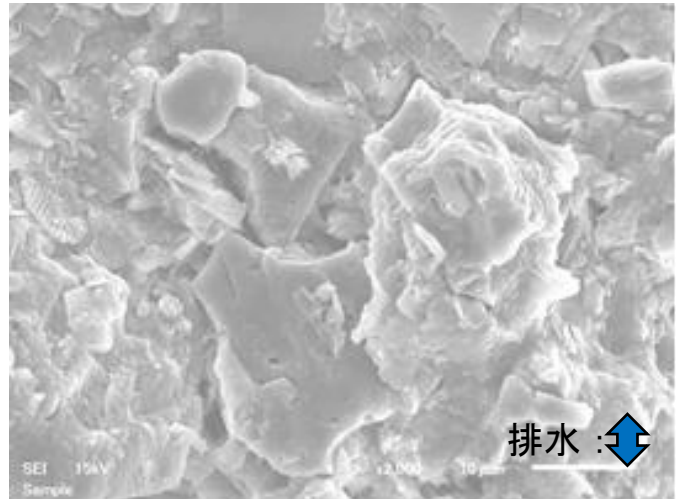
図－6 鉛直方向圧縮・水平方向排水試験後
(試料 A、直交断面×2000)



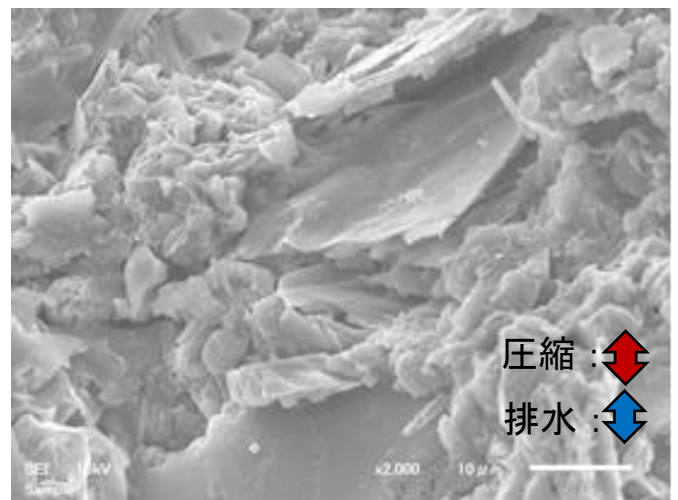
図－7 鉛直方向圧縮・水平方向排水試験後
(試料 A、平行断面×2000)

参考文献

- 1) 森脇武夫・加納誠二・古屋智郷：自然堆積粘土の透水特性と圧縮特性における異方性に関する研究：土木学会第 68 回年次学術講演会概要集，第 3 部門，pp.367－368，2013.
- 2) 森脇武夫・佐藤友彦・古屋智郷：自然堆積粘土の水平方向透水係数の評価法：第 57 回地盤工学シンポジウム論文集，pp.167－174，2012.



図－8 水平方向圧縮・水平方向排水試験後
(試料 A、直交断面×2000)



図－9 水平方向圧縮・水平方向排水試験後
(試料 A、平行断面×2000)