

中空ねじり試験機によるせん断履歴を与えた地盤材料の透水係数測定法

The Method Measuring the Permeability Coefficient of Geotechnical Material
Which Has Received the Shear Deformation by Using Torsional Shear Apparatus

| | | |
|------|-----------------|----------------|
| 高岡慶人 | Yoshito TAKAOKA | (広島大学大学院工学研究科) |
| 土田孝 | Takasi TSUCHIDA | (広島大学大学院工学研究院) |
| 片山遥平 | Yohei KATAYAMA | (五洋建設(株)) |
| 栗原大 | Ooki KURIHARA | (広島大学大学院工学研究科) |

2011年3月の福島第一原発事故により発生した放射性セシウムを含む廃棄物の処分を行うために海面処分場の活用が考えられる。安全な処分を行うには、遮水性能に優れた材料で遮水を行う必要がある。また、海面処分場に波浪や地震動などにより遮水層に大きな変形が生じることが予想されるため、変形を受けた遮水層の透水性を検討する必要がある。本研究では、中空ねじり試験機を用いて供試体を K_0 圧密し、せん断ひずみを 20% 与えたのちに、最も透水が大きくなると考えられる、せん断面に対して水平方向の透水係数の測定を行った。その結果、精度のよい K_0 圧密を行うことができ、せん断変形に伴って透水係数が低下するという結果が得られた。

キーワード：中空ねじり試験機、 K_0 圧密、せん断変形、水平方向透水係数 (IGC : D-6)

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災により福島第一原発事故が発生し、福島県を中心とした広範囲に放射性セシウムを含む廃棄物が大量に発生した。また、除染作業により現在も廃棄物は増え続けている。現在、これらの廃棄物は仮置き場から中間貯蔵施設に搬入され始め、一時保管がなされているが、将来的には最終処分場が必要となる。そのために、人々の生活環境から一定の距離に立地し、一か所で大量の処分が可能な海面処分場の活用が考えられる。我が国では、阪神淡路大震災など過去に起こった大震災からの復興において海面処分場が活用されている。放射性廃棄物はその性質上、安全に処理を行うために、海面処分場から汚染物質が漏出しないように、遮水性能に優れた材料で遮水を行う必要がある。これまで、海面処分場に用いることを目的として海成粘土を母材とした遮水地盤材料の研究が行われてきた¹⁾²⁾。また、海面処分場には波浪や地震動により大きな変形が生じると考えられる。図-1は、本研究が対象とする海面処分場のモデルに巨大地震が作用した場合の底面遮水層及び側面遮水層に生じるせん断ひずみを有効応力解析プログラム FLIP により計算したもので、200gal、振動が 20 波の条件での解析結果である⁴⁾。底面遮水層は 5 つのメッシュのうち、代表として上層、中層、下層の計算値を示している。図-1を見ると、20%を超えるような大きなせん断ひずみが生じている。このように海面処分場に大

きな外力が作用した場合、遮水層の変形は避けることができないと考えられるため、変形時の透水性について検討を行う必要がある。

そこで、片山ら³⁾は、変形時の透水性の検討を行うために、三軸圧縮透水試験機を用いて、海成粘土にベントナイト及び製鋼スラグを混合した遮水材料の変形後の透水性の検討を行った。その結果、ベントナイトを添加することで、遮水材料の変形追従性が向上し、せん断変形による透水係数の増加を防止できることを確認した。この三軸試験機を用いた検討法は供試体を鉛直方向に圧縮し、図-2(a)のようにせん断面に対して鉛直に近い方向に透水を行っている。

しかし、実際の処分場では、どの方向にせん断面が生じ、どの方向に透水が起るかは、様々なパターンが考えられるが、せん断面に対して水平方向の透水が最も大きくなると考えられる。そこで、片山、許ら⁴⁾は、中空ねじり試験機を用いて、図-2(b)のようにせん断面に対して水平方向の透水性の検討を行った。この検討では、まず遮水層中の応力状態を再現するため、供試体を K_0 圧密している。圧密終了後、供試体をねじることでせん断ひずみを 20% まで与えたのちにせん断面に対して水平方向の透水を行っており、せん断変形に伴って透水係数が低下するという結果が得られている。しかし、この実験では、 K_0 圧密が正確に行えておらず、十分な実験法ではないため、本研究では問題点を改善し、実験法の確立を目指した。

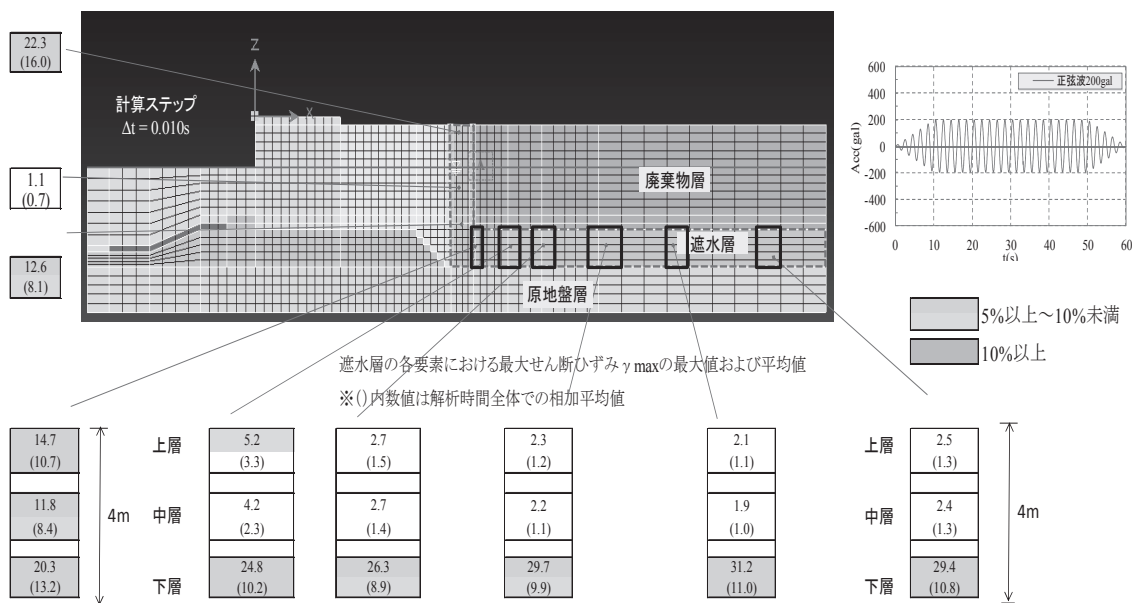


図-1 変形解析による遮水層に生じるせん断ひずみの算出⁴⁾

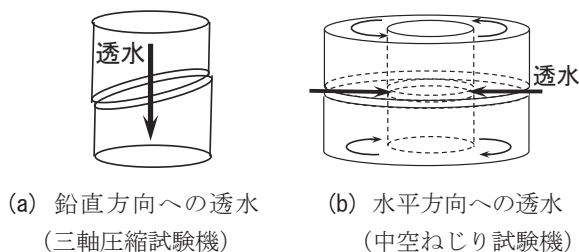


図-2 三軸圧縮試験機と中空ねじり試験機による透水方向の違い

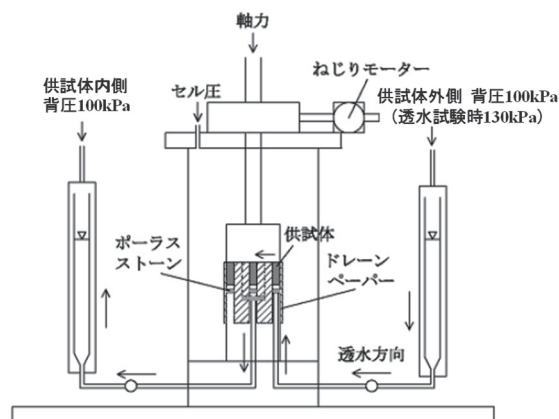


図-3 中空ねじり試験機の模式図

2. 試験の概要と試料

まず、中空ねじり試験機の模式図を図-3 に、供試体部分の詳細を図-4 に、試験機の全体写真を写真-1 (a) に示す。供試体は写真-1 (b) に示すような高さ 3cm、外径 7cm、内径 3cm の中空円筒供試体を用いた。この供試体を写真-1 (c) のようにペダスタルに載せ、キャップをかぶせて、ドレーンペーパー、ゴムスリーブを装着する。供試体をねじるため、ペダスタルとキャップには刃がついている。ここで、図-4 のように供試体の上面、下面は非排水となっており、供試体の内側面、外側面からドレーンペーパー、ポラスストーンを通してそれぞれ供試体内側と外側に通じる二重管式ジュレットに排水する仕組みとなっている。この中空ねじり試験機を用いて、図-5 に示すように供試体を鉛直方向に軸圧が 150kPa になるまで圧密し、圧密終了後、供試体をねじることによりせん断ひずみを 20% 与える。その後、供試体の外側面から内側面に透水をおこなう。図-4 の矢印が透水方向を示している。

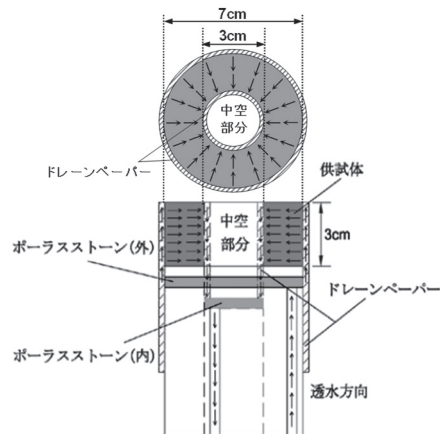


図-4 供試体部分詳細

試料は徳山港粘土を用いており、物性値を表-1 に示す。供試体は、試料の含水比が液性限界の 1.5 倍になるように調泥し、12.3kPa、24.5kPa、49.0kPa の 3 段階で再圧密を行い、写真-1 (b) のようにトリミングした。次

に写真-1 (c) のようにこの供試体をペダスタルにセットし、内側面、外側面にドレーンペーパーおよび、ゴムスリーブを装着し、試験機にセットした。その後、セル圧を 10kPa から 110kPa まで 10kPa 毎に作用させると同時に背圧を 0kPa から 100kPa まで 10kPa 毎に作用させ、供試体を飽和させた。

3. K_0 圧密

自然地盤では、鉛直方向に一次的な圧密が起こっており、鉛直方向圧力と水平方向圧力の大きさは異なる。 K_0 とは、静止土圧係数のことで、鉛直圧力 σ_v と水平圧力 σ_h の比 ($K_0 = \sigma_h / \sigma_v$) で定義される。土は、圧密の条件により特性が変化するため、土の特性を正確に検討するためには、実際の地盤と同じ応力状態 (K_0 状態) を再現する必要がある。そこで、供試体に側方向のひずみが生じないように鉛直方向のみに圧密させる K_0 圧密を行う。本研究においても、まず、供試体を海面処分場の遮水層と同じ状態にするため、 K_0 圧密を行った。その方法として、供試体の断面積が一定になるように軸圧と側圧を調整しながら圧密を行う。供試体の断面積は、軸方向変位 Δh と排水量 ΔV を用いて式(1)のように計算できる。

$$A = \frac{V_0 - \Delta V}{h_0 - \Delta h} \quad (1)$$

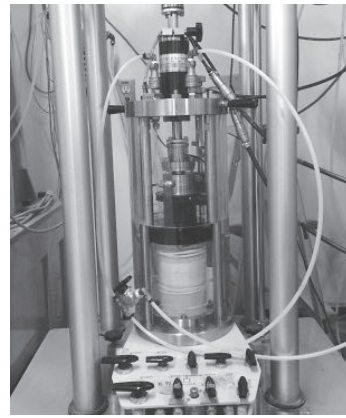
A : 断面積(cm^2), V_0 : 供試体の初期体積(cm^3), ΔV : 排水量(cm^3), h_0 : 供試体の初期高さ(cm), Δh : 軸変位量(cm)
また、断面積変化は測定しやすいように側方ひずみを用いる。側方ひずみは式(2)のように計算できる。

$$\varepsilon = \frac{A_0 - A}{2A_0} \times 100 \quad (2)$$

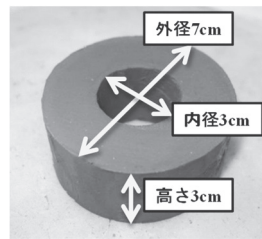
ε : 側方ひずみ(%), A_0 : 初期断面積(cm^2), A : 現在の断面積(cm^2)

K_0 圧密の具体的な方法は以下のとおりである。まず、側圧を 10kPa 作用させる。側圧を作用させると、供試体は側方向に圧縮されるため、供試体の断面積は小さくなる。元の断面積に戻すために軸圧を上昇させ、鉛直方向に圧縮する。圧力を調整し、側方ひずみが 0% 付近で落ち着くと、供試体からの排水が終了するまで待つ。排水が終了すると、この段階は終了とし、さらに側圧を 10kPa 上昇させ、同様の操作を行う。このように段階的に圧力をあげていき、軸圧が 150kPa になるまで圧密を行う。この軸圧の最終値は、海面処分場の底面遮水層にかかる上載圧を算出したものである。

ここで、過去に片山、許ら⁴⁾が行った K_0 圧密における排水量と軸変位量の関係を図-6 に示す。図-6 において、直線が断面積一定で K_0 圧密が行えた場合を示しており、T0 は徳山港粘土のみ、T25、T50 は、徳山港粘土 1m^3 あたりにベントナイトをそれぞれ 25kg、50kg 混合した供試体を示している。図-6 を見ると、実験で計測されたデータのプロット点は、断面積一定の場合の直線から大きく外れており、正確に K_0 圧密が行えていない。この実験では、はじめに K_0 値を設定し、 K_0 値に応じて軸圧と側圧を設定して圧密を行い、圧密終了後、式(1)を用いて断面積を計算し、断面積に応じて次段階の軸圧



(a) 中空ねじり試験機



(b) 供試体



(c) ゴムスリーブの装着

写真-1 試験機と供試体

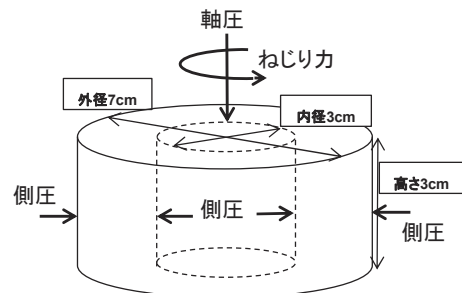


図-5 中空ねじり試験

表-1 徳山港粘土の物性値

| | 徳山港粘土 |
|---|-------|
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm^3) | 2.616 |
| 液性限界 w_L (%) | 110.6 |
| 塑性限界 w_P (%) | 40.0 |
| 塑性指数 I_P (%) | 70.6 |

と側圧を設定し直している。そのため、断面積が大きく変化し、十分な精度で K_0 圧密が行えていない。そこで、本研究では、リアルタイムでの断面積測定と排水量の読取り精度を向上させるため、写真-2 に示す差圧計を用いてビュレットの水位を測定し、側方ひずみの変化を測定しながら、 K_0 圧密を行った。具体的には、図-7 に示すような側方ひずみ ε (%) の経時変化をモニター上に表示し、リアルタイムで測定しながら、軸圧と側圧を調整し、圧密を行った。図-7 においてひずみが正に急激に

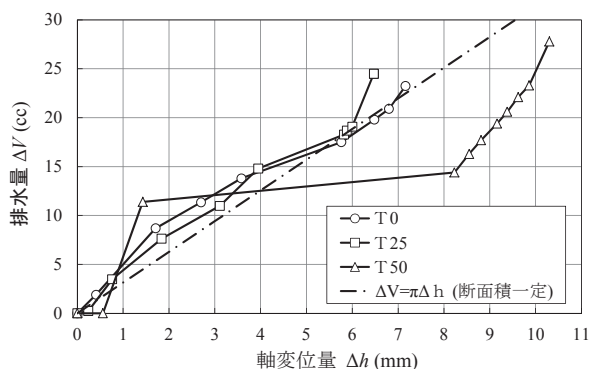


図-6 排水量—軸変位量関係(片山, 許ら⁴⁾に加筆修正)

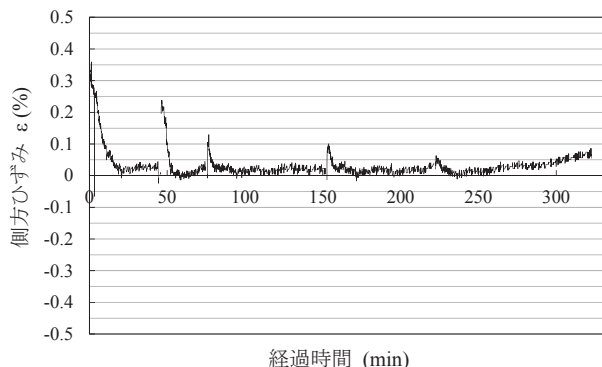


図-7 側方ひずみの経時変化



写真-2 差圧計

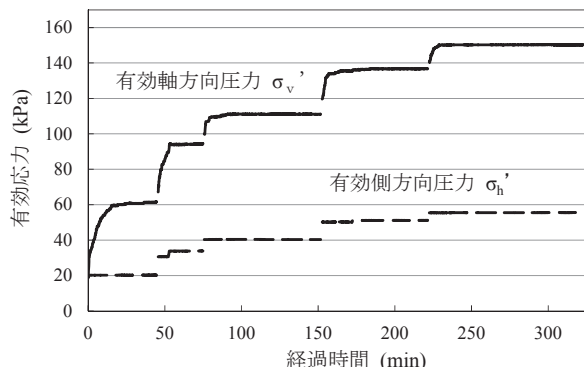


図-8 軸圧と側圧の経時変化

増加している部分は、側圧を上昇させ断面積が減少していることを示している。この場合、軸圧を増加させたことで、側方ひずみが0%付近にもどっている。逆に側方ひずみが負になった場合、側圧を増加させる。このように K_0 圧密を行った結果、図-7 のように側圧を上昇させた各段階の初期を除けば、側方ひずみが約 0.1%以内で圧密を行うことができた。また、最後に側方ひずみが増加しているのは、所定の軸圧 150kPa に達した後、軸圧、側圧を変化させずに、圧密終了を待ったためである。 K_0 圧密中の軸圧 σ_v と側圧 σ_h の経時変化は図-8 のようになった。図-8 において、線が連続していないのは段階的に圧力を上げる際、インターバル測定を停止させたためである。次に、 K_0 圧密中の軸圧と側圧の関係を図-9 に示す。図-9 には、軸圧と側圧のプロット点と合わせて、軸圧と側圧の比である K_0 値が、 $K_0=0.3, 0.37, 0.5$ となる場合の直線を引いている。図-9 に示すように K_0 値の最終値は 0.37 程度となった。次に、図-10 に K_0 圧密中の排水量と軸変位量の関係を示す。計測値のプロットは、断面積一定の場合の直線とほぼ一致しており、図-6 に示した片山, 許ら⁴⁾ のものと比べ、はるかに精度の高い K_0 圧密が行えたことが分かる。

4. せん断と透水

K_0 圧密終了後、供試体外側に通じるピュレットの背圧を 130kPa に上昇させ、図-4 の矢印が示すように供試体の外側面から内側面に透水を行った。透水係数は式(3)で求めることができる。

$$k = 9.8 \times 10^{-4} \frac{\Delta q}{2\pi H \Delta t \Delta P_b} \ln \frac{R}{r} \quad (3)$$

k : 透水係数(m/s), Δq : Δt における透水量(cm^3), H : 供試体高さ(cm), Δt : 透水時間(s)=3600(s), ΔP_b : 背圧差(kPa)=30(kPa), R : 供試体外径(cm), r : 供試体内径(cm)
透水量は、供試体に流入する量と供試体から流出する量を平均し、3600 秒間での透水量を 3 回計測して平均をとって、透水係数を算出した。

次に、供試体にせん断変形を与える。背圧を 100kPa に戻した後、排水弁を閉じ、非排水状態とした。その後、供試体をねじることでせん断ひずみを 20%まで与えた。せん断速度は地盤工学会の地盤材料試験の方法と解説⁵⁾を参考に 0.1%/min とした。また、せん断ひずみは式(4)で求めることができる⁵⁾。

$$\gamma = \frac{\Delta\theta \cdot (R+r)}{2H} \times 100 \quad (4)$$

γ : せん断ひずみ(%), $\Delta\theta$: 回転角(rad), R : 外半径(cm), r : 内半径(cm), H : 供試体高さ(cm)
式(4)は中空円筒供試体の外半径と内半径の平均位置でのせん断ひずみを表している。次に、せん断応力は、式(5)で求めることができる⁵⁾。ここで、 T は計測されるトルク(N m)である。

$$\tau = \frac{3T}{2\pi(R^3 - r^3)} \times 10^3 \quad (5)$$

τ : せん断応力(kPa), T : トルク(N m), R : 供試体外径(cm), r : 供試体内径(cm)
せん断は、軸応力一定で行い、軸応力の値は圧密終了時の 150kPa である。せん断応力、間隙水圧とせん断ひず

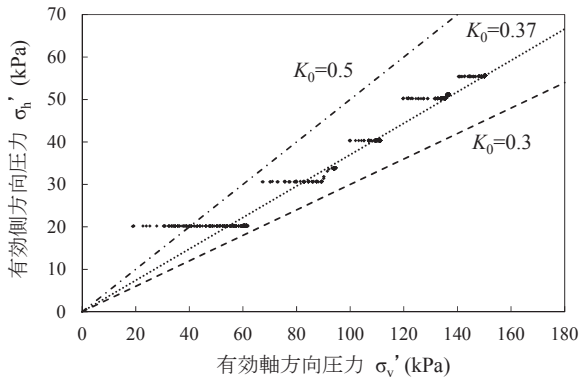


図-9 K_0 値($K_0=\sigma_h/\sigma_v$)の変化状況

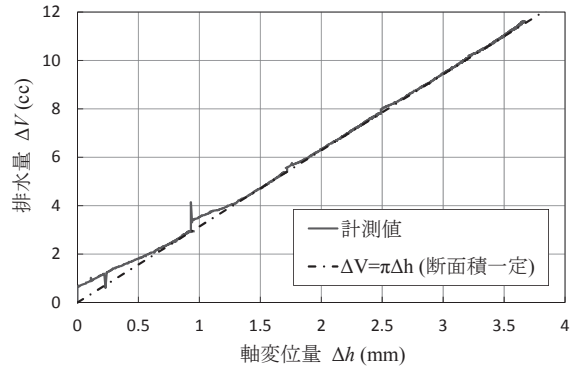


図-10 排水量—軸変位量関係

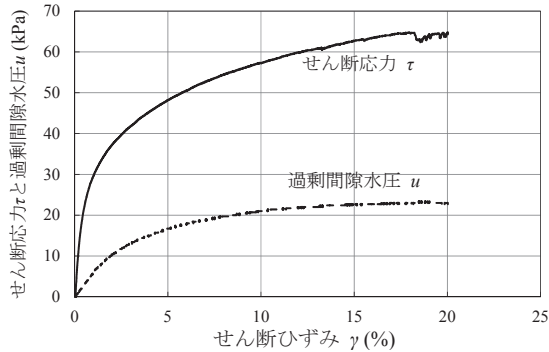


図-11 せん断応力—せん断ひずみ関係

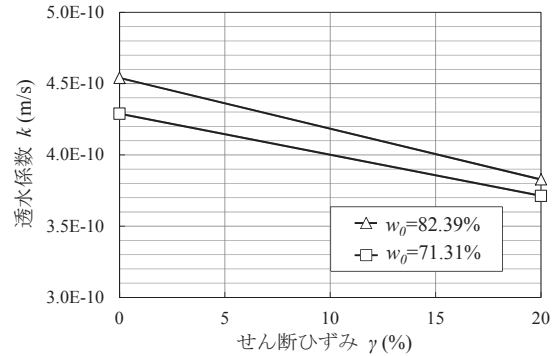


図-12 透水係数—せん断ひずみ関係

みの関係を図-11に示す。せん断応力の最大値は65kPa程度となった。また、せん断応力の上昇に伴って、間隙水圧も上昇し、23kPa程度となった。

せん断ひずみを20%まで与えた後、せん断応力一定の下で、排水弁を開放し、排水を行った。排水終了後、再び外側面のビュレットの背圧を130kPaとして透水を行い、透水係数を測定した。図-12にせん断ひずみと透水係数の関係を示す。図-12を見ると、せん断ひずみの増加に伴って透水係数が0.8~0.9倍に低下している。これは、せん断変形に伴って供試体の間隙が減少したためだと考えられる。また、初期含水比が低いほど、透水係数も低くなっている。含水比が小さければ、当然間隙比も小さくなるためであり、妥当な結果といえる。

5. 標準圧密試験との比較

本試験の結果を考察するために、中空ねじり試験で用いた供試体と同様に、徳山港粘土を圧密圧力12.3kPa、24.5kPa、49kPaで再圧密した供試体を用いて標準圧密試験を行った。供試体の初期含水比は、 $w_0=71.28\%$ であった。まず、図-13に標準圧密試験より得られた $e-\log p$ 曲線と中空ねじり試験の K_0 圧密で得られた $e-\log p$ 曲線を示す。 K_0 圧密による $e-\log p$ 曲線は K_0 圧密各段階の軸圧と圧密終了時点の間隙比をプロットしている。図-13を見ると、 K_0 圧密試験による $w_0=71.31\%$ の $e-\log p$ 曲線は、標準圧密試験の供試体と含水比はほぼ同じであり、標準圧密試験の $e-\log p$ 曲線とほぼ一致している。一方、 $w_0=82.39\%$ の $e-\log p$ 曲線は、初期含水比が標準圧密試験

の供試体より10%程度大きく、初期の間隙比が標準圧密試験のものより高くなっているが、圧密圧力が上昇するに従い、標準圧密試験の $e-\log p$ 曲線に近づいている。標準圧密試験では断面積一定で圧密されているため、 K_0 圧密が行えているといえる。初期含水比がほぼ等しい $w_0=71.31\%$ の $e-\log p$ 曲線が標準圧密試験で得られたものとほぼ一致していることから、本研究において K_0 圧密が正確に行えていると考えられる。次に、標準圧密試験より得られる鉛直方向透水係数 k_v と本研究で得られた K_0 圧密終了時点の水平方向透水係数 k_h とを比較する。そのために図-14に示す標準圧密試験より得られた透水係数と間隙比の関係から、 K_0 圧密終了時における間隙比での鉛直方向透水係数を算出した。続いて、この鉛直方向透水係数 k_v と中空ねじり試験機で求めた水平方向透水係数 k_h との関係を図-15に示す。図-15によると、 $w_0=82.39\%$ の供試体で $k_h=1.31k_v$ 、 $w_0=71.31\%$ の供試体で $k_h=1.78k_v$ となっている。

HS Tianら⁹⁾は、ひずみ速度一定で圧密するCRS(Constant Rate of Strain)圧密試験機を用いてバンコク粘土の水平方向透水係数 k_h 、水平方向圧密係数 c_h 、及び圧密特性について検討を行っている。CRS圧密試験による c_h の連続測定はこれまでなされておらず、注目しているデータである。図-16はCRS圧密試験機で求めた水平方向透水係数と標準圧密試験で求めた鉛直方向透水係数を比較したものである。結果的に水平方向透水係数は鉛直方向透水係数の約1.45倍になるという結論に達している。本研究において実施した2ケースの供試体では、水平方向透水係数は鉛直方向透水係数の

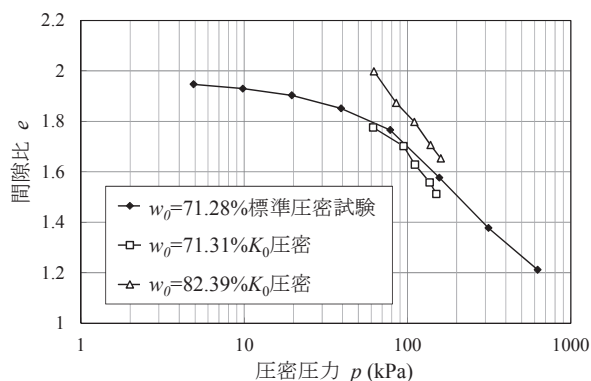


図-13 間隙比-圧密圧力関係

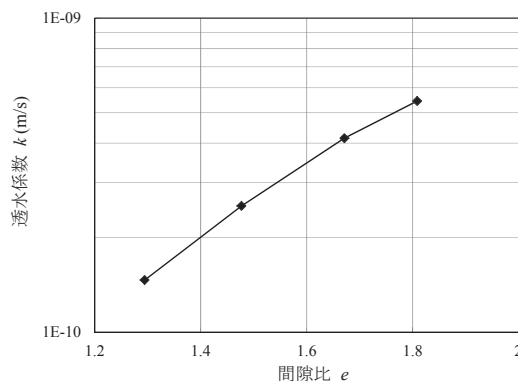


図-14 透水係数-間隙比関係

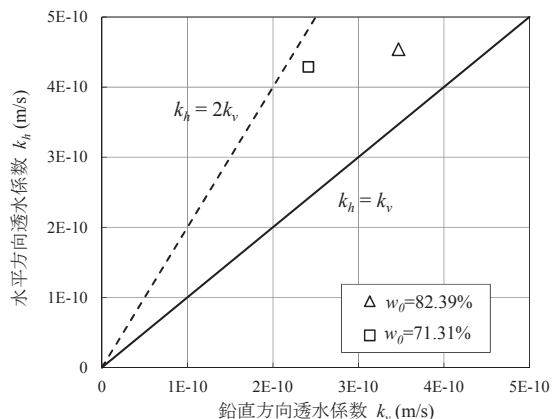


図-15 水平方向透水係数と鉛直方向透水係数の関係

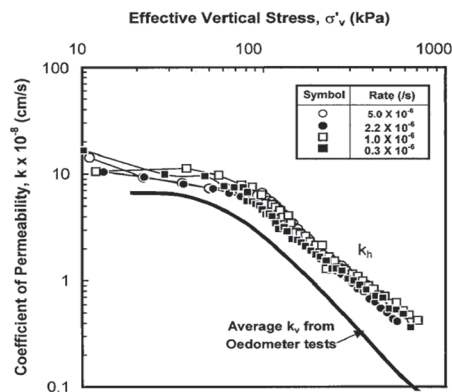


図-16 バンコク粘土の水平方向透水係数と鉛直方向透水係数(Tian HS ら⁶⁾)

1.31 倍と 1.78 倍であり、HS Tian ら⁶⁾の結果とは相違がみられる。本結果と HS Tian らによる結果では試料が異なることが、その理由として挙げられるが、本研究の 2 ケースでもばらつきがあるため、今後実験ケースを増やし、検討を行う必要がある。

6. 結論

- (1) 差圧計を用いてピュレットの水位を計測し、リアルタイムで側方ひずみを測定しながら圧力の調整を行うことで、各段階の側圧をかけた直後を除けば側方ひずみが約 0.1%以内で K_0 圧密を行うことができた。また、標準圧密試験の e - $\log p$ 曲線と比較したところ、初期含水比がほぼ等しい供試体では、 e - $\log p$ 曲線が一致していることから K_0 圧密が正確に行えていると考えられる。
- (2) 供試体に 20%のせん断ひずみを与えたところ、せん断前に比べてせん断後の透水係数は 0.8~0.9 倍程度に低下するという結果が得られた。
- (3) せん断変形を与える前に本試験法で測定した水平方向透水係数 k_h と標準圧密試験で求めた鉛直方向透水係数 k_v を比較したところ、水平方向透水係数は鉛直方向透水係数の 1.31 倍と 1.78 倍という結果が得られたが、今後実験ケースを増やし、検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 上野一彦, 山田耕一, 渡部要一: 管理型海面処分場に用いる浚渫粘土を主材料とした土質遮水材料の提案, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.2, pp177-186, 2008.
- 2) 村上博樹, 土田孝, 安部太紀, 上野一彦, 田中裕一: 放射性セシウムを含む廃棄物等を対象とした海面処分場に用いる遮水地盤材料の研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.1, pp17-32, 2015.
- 3) 片山遥平, 村上博紀, 土田孝: 変形を与えた遮水材料の透水特性について, 地盤と建設, Vol.32, No.1, pp.111-116, 2014.
- 4) 片山遥平, 許博皓, 土田孝, 村上博紀: 中空ねじり試験機による遮水地盤材料のせん断変形後の水平方向透水係数に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, p.1_1143-1_1148, 2015.
- 5) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説一二分冊の 2, 第 5 章ねじりせん断試験, pp700-729, 2009.
- 6) Tian H S., Teerawut J.: Constant Rate of Strain Consolidation with Radial Drainage, Geotechnical Testing Journal, Vol.26, No.4, pp1-12, 2003.

(2016 年 6 月 20 日 受付)