

水平方向圧密試験における沈下量および間隙水圧から求められる 水平方向圧密係数に関する検討

広島大学 非会員 ○岡村 郁耶

広島大学 正会員 土田 孝

株式会社ニュージェック 非会員 高岡 慶人

1. 目的

バーチカルドレーンによる改良地盤では水平方向圧密係数 c_h が重要なパラメータとなるが、その試験法は未だ確立されていない。本論文では、港湾技術研究所と同じ試験機を用いて沈下量と供試体底面の2点で間隙水圧を測定し、沈下量を用いた方法と間隙水圧を用いた方法の2つの方法から求めた c_h の検討を、定ひずみ速度圧密試験 (CRS) から得られる鉛直方向圧密係数 c_v との比較も交えながら行う。

2. 用いた試料および試験方法

本研究では、徳山港粘土を 49kPa で再圧密した再構成試料と、境港外港竹内南地区でのボーリング試料 (深度: 22~22.83m) の2つを使用した。表-1 に試料の物性値を示す。本研究で c_h を測定するために使用した港研型水平方向圧密試験機の概要を図-1 に示すが、供試体中央部のドレーンのみを排水面とするために供試体外周部にゴム膜を装着しており、水圧によって圧密荷重を作用させている¹⁾。圧密圧力が 20, 40, 80, 160, 320, 640kPa の6段階で圧密し (境港の試料には 850kPa による圧密も実施)、各段階の時間経過による沈下量と間隙水圧を測定することで2通りの方法から c_h を求めている。沈下量からの c_h 算出方法としては、沈下量 d を時間 t の m 乗に対してプロットし、初期部分の直線の F 倍の勾配を持つ直線と沈下曲線との交点から t_{90} , d_{90} , d_{45} と順に求め、 d_{45} に対応する t_{45} から式(1)を用いて算出する。 m , F , T の値はドレーン比やひずみ条件で異なる²⁾。間隙水圧からの算出方法としては、初期過剰間隙水圧の消散割合で圧密度を定義し、圧密度 50% に達する時間 t_{50} を用いて同様に式(1)から算出する。図-2 に間隙水圧の測定箇所を示すが、ここでは中心から距離 15mm の測定箇所を u_{in} , 24mm の箇所を u_{out} と表現する。またそれぞれ直径 3mm の穴で測定される。

$$c_h = T_i \cdot d_e^2 / t_i \times 1440 \quad (1)$$

ここで T は時間係数、 d_e は有効等価円径、添字 i は圧密度に対応している。本研究では沈下量から求める場合、 $m=0.67$, $F=1.31$, $T_{45}=0.066$ を用い、間隙水圧から求める場合、内側 ($r=15\text{mm}$) で $T_{50}=0.0565$, 外側 ($r=24\text{mm}$) で $T_{50}=0.0973$ を用いた¹⁾。また c_v と比較するために CRS 試験も実施した。今回 CRS 試験の結果との比較に際して、CRS 試験で圧密圧力が 640kPa に達する時間を求め、水平方向圧密試験の各圧密段階にその圧密時間を分配することで決定した。

表-1 試料物性値表

試料名	徳山港粘土	境港ボーリング試料 (深度: 22m)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.647	2.608
液性限界 W_L (%)	111.6	102.6
塑性限界 W_P (%)	40.0	32.6
塑性指数 I_P (%)	71.6	70.0

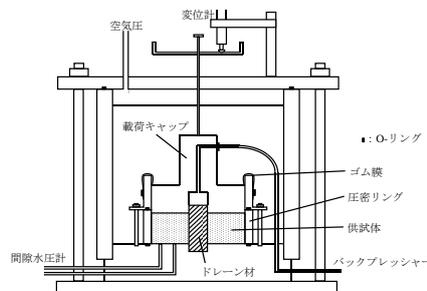


図-1 水平方向圧密試験機

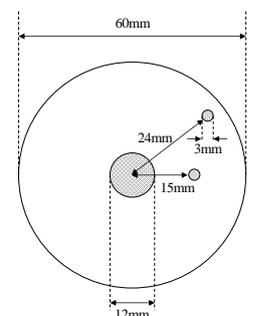


図-2 間隙水圧測定箇所

3. 水平方向圧密試験および CRS 試験結果

まず再構成試料である徳山港粘土から得られた

結果を図-3～図-5 に示す。圧密降伏応力は約 63kPa である。水平圧密試験と CRS から得られた 2 つの圧縮曲線にわずかなずれがあるが、本試験では正規圧密領域における圧縮性は一致しており、排水方向が違っても圧縮性は一致するという既往の研究結果と同様な結果が得られている。また圧密係数についても正規圧密領域での c_h/c_v の比率が約 1.5~2 であり、既往の研究と比べて妥当な結果が得られた。水平方向圧密と鉛直方向圧密における排水距離や排水方向の違いがあるため、圧密の進行が異なり二次圧密の影響を考慮して c_h に一次圧密比を乗じて c_v と比較したものを図-6 に示す。こちらも正規圧密領域での c'_h/c_v の比率が約 1.5~2 であり、既往の研究と比べて妥当な結果が得られた。

続いて不攪乱試料である境港ボーリング試料（深度：22m）から得られた結果を図-7～図-9 に示す。圧密降伏応力は約 192kPa である。圧縮曲線は徳山港粘土の場合と同じく正規圧密領域ではよく一致している。圧密係数に関して、沈下量から求めた c_h は c_v に対して 1.5~2 倍と徳山港粘土の場合と同じ結果が得られたが、間隙水圧から求めた場合 c_v に対して 2~4 倍と比較的大きな値を示した。ここで、沈下量から求めた c_h の最後のプロット点が極端に低下しているのは試験装置の制約でこの圧力だけ荷重増分比が下がった影響と考えられる。荷重増分比が小さくなると、二次圧密による沈下量が一次圧密による沈下量より相対的に大きくなり、直線近似による一次圧密の速度の決定が正しく行われなかったと推定される。一次圧密比を乗じて c_v と比較したものを図-10 に示すが、図-9 と変わらず正規圧密領域では間隙水圧から求めた c'_h は c_v に対して 2~4 倍である。沈下量および間隙水圧から求めた圧密係数が不攪乱試料の場合に一致しなかった原因として、沈下量の測定では、供試体上面全体で生じる沈下量の平均を載荷キャップを介して測定しているのに対して、間隙水圧の測定では、図-2 に示すように直径 3mm の円の一点で測定しており、供試体中の要素部分に強く依存するためと考えられる。再構成試料では 2mm のふるいを通って練返した試料を用いているため半径方向に均質であるが、不攪乱試料の場合、貝殻などの異物の存

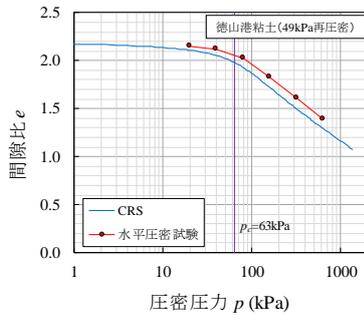


図-3 圧縮曲線（徳山港粘土）

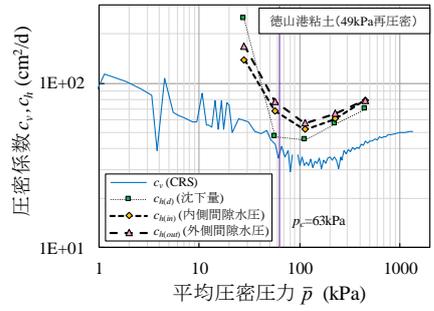


図-4 圧密係数-平均圧密圧力（徳山港粘土）

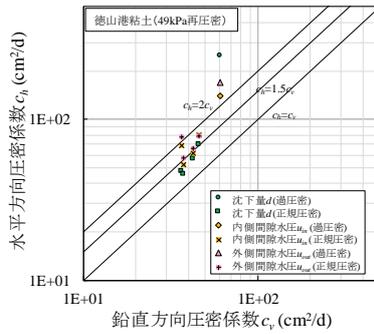


図-5 圧密係数の比較（徳山港粘土）

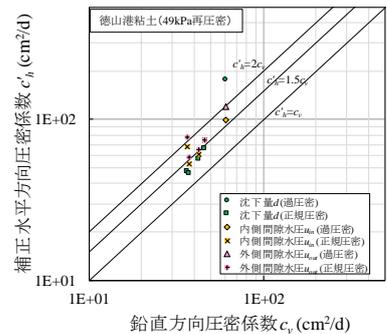


図-6 一次圧密比で補正した圧密係数の比較（徳山港粘土）

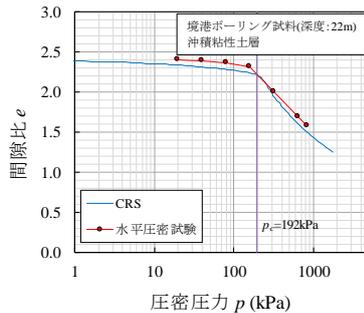


図-7 圧縮曲線（境港試料）

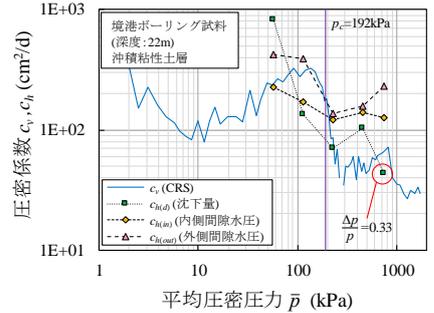


図-8 圧密係数-平均圧密圧力（境港試料）

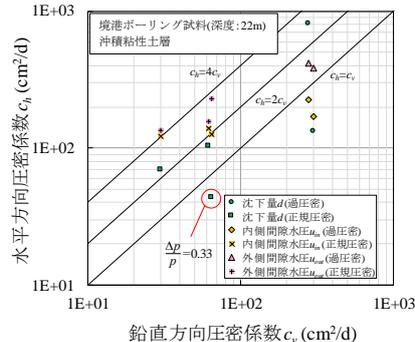


図-9 圧密係数の比較（境港試料）

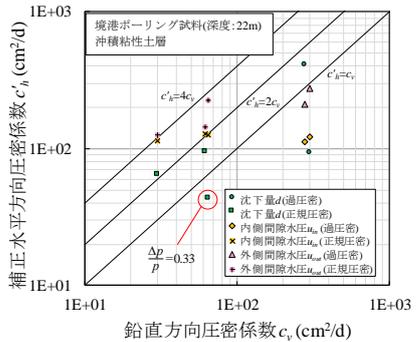


図-10 一次圧密比で補正した圧密係数の比較（境港試料）

在による水路の形成が考えられる。

そこで圧密理論および測定から得られる間隙水圧比 u_{in}/u_{out} ³⁾を比較し、間隙水圧から求めた c_h の妥当性を評価する。式(2)は時間係数 T に対して中心からの距離 r における間隙水圧 u を求める式であり、二次元放射状排水における圧密方程式を境界条件を用いて解くことで導出される。境界条件には自由ひずみの場合と等ひずみの場合があるが、Olson らの研究⁴⁾から本研究では自由ひずみの場合の境界条件を用いることとする。ここで u_0 は初期の過剰間隙水圧、 J_0 、 J_1 はそれぞれ零次および一次の第一種ベッセル関数、 Y_0 、 Y_1 は零次および一次の第二種ベッセル関数であり、 α_1 、 α_2 、 $\alpha_3 \dots$ は式(3)を満足する根である。

$$u_r = u_0 \sum_{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots}^{\alpha=\infty} \frac{-2U_1(\alpha)U_0(\frac{ar}{r_w})}{\alpha^2 \{n^2 U_0^2(\alpha n) - U_1^2(\alpha)\}} e^{-4\alpha^2 n^2 T_h} \quad (2)$$

$$J_1(\alpha n)Y_0(\alpha) - Y_1(\alpha n)J_0(\alpha) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_1(\alpha) = J_1(\alpha)Y_0(\alpha) - Y_1(\alpha)J_0(\alpha) & U_0(\alpha n) = J_0(\alpha n)Y_0(\alpha) - Y_0(\alpha n)J_0(\alpha) \\ U_0(\frac{ar}{r_w}) = J_0(\frac{ar}{r_w})Y_0(\alpha) - Y_0(\frac{ar}{r_w})J_0(\alpha) \end{cases}$$

間隙水圧の測定箇所の直径が 3mm であることを考慮し、 r に 2 つの間隙水圧測定位置 ($r=15 \pm 1\text{mm}$, $24 \pm 1\text{mm}$) を代入して求めた間隙水圧比 u_{in}/u_{out} と、 u_{in} および u_{out} から得られる圧密度を図-11 に示す。

u_{in} と u_{out} は圧密の進行に伴い低下するが、 u_{in}/u_{out} は圧密度が 40% 以上ではほぼ一定となっていること、間隙水圧を用いた算出では圧密度 50% を使用したことから、式(2)から求めた比の範囲は 0.67~0.79 である。次に

測定から得られる u_{in}/u_{out} がこの範囲に含まれるか徳山港粘土と境港ボーリング試料のそれぞれについて 320kPa 圧密段階を例に調べたものを図-12 に示す。計算で使用された圧密度 50% 付近に注目すると、(a) では 0.67~0.79 の範囲付近に位置し、かつ一定であるが、(b) ではその範囲から離れ一定ではない。図をみると間隙水圧から

求める c_h が一致するには測定から得られる u_{in}/u_{out} が式(2)で求めた範囲に含まれかつ一定であるときだとわかる。徳山港粘土および境港ボーリング試料それぞれの 320kPa 圧密段階における間隙水圧と時間の関係を図-13 に示すが、(a) では u_{in} と u_{out} の値の差が圧密度 50% に達するまで (約 80 分間) ほぼ一定であるのに対して、(b) では u_{in} が圧密度 50% に達するまでの時間 (20 分) 付近に注目すると u_{in} と u_{out} がほぼ同じ値になっており、何らかの原因で u_{in} の消散が遅れた、もしくは u_{out} の消散が速くなったことが考えられる。

ここで境港ボーリング試料において u_{in}/u_{out} が式(2)から求めた範囲に含まれるときの時間およびそれに対応した圧密度と時間係数を使用して、間隙水圧から圧密係数を再計算したものを図-14 および図-15 に示す。表-2 はこのとき計算で使用した圧密度とそれに対応する時間係数をまとめたものである。両間隙水圧で求めたものは一致し、正規圧密領域では沈下量から求めた c_h と一致している。一次圧密比を乗じて c_v と比較したも

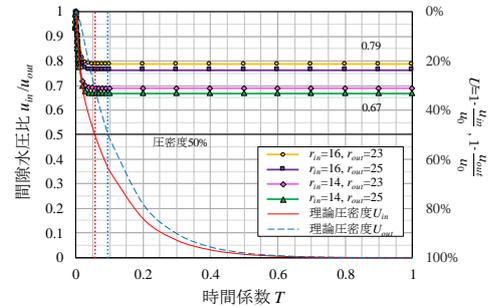
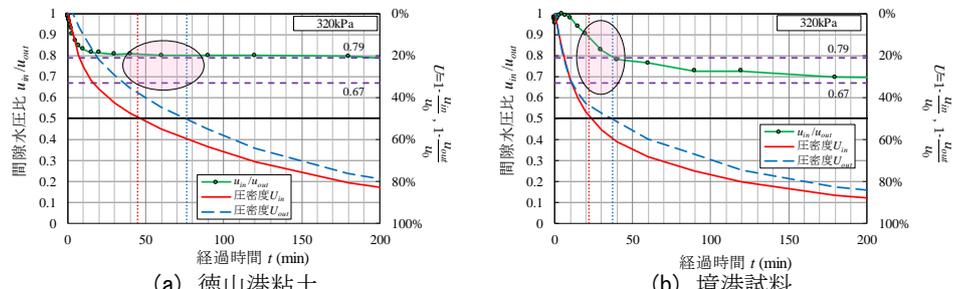
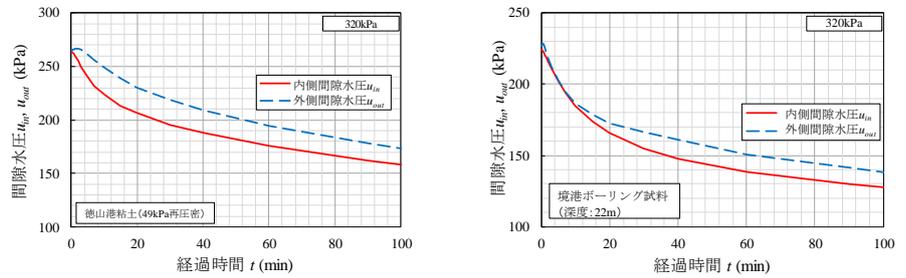


図-11 間隙水圧比・圧密度—時間係数関係



(a) 徳山港粘土 (b) 境港試料
図-12 式(2)および測定から得られる間隙水圧比の比較



(a) 徳山港粘土 (b) 境港試料
図-13 間隙水圧—時間関係 (320kPa 圧密段階)

表-2 間隙水圧比を考慮して選択した圧密度・時間係数表

圧密段階	1	2	3	4	5	6	7
圧密圧力 (kPa)	20	40	80	160	320	640	850
圧密度 U (%)	50	50	80	90	80	80	90
時間係数 T (内側: $r=15\text{mm}$)	0.0565	0.0565	0.172	0.261	0.172	0.172	0.261
(外側: $r=24\text{mm}$)	0.0973	0.0973	0.212	0.295	0.212	0.212	0.295

のを図-16 に示すが、図-15 と変わらず正規圧密領域での 3 つの c'_h がほぼ一致していることが確認できる。

ここで式(2)から求めた範囲に含まれる圧密度として、圧密度 90% のような高い圧密度を用いて算出されることは次の 2 点からあまり好ましくない。1 点目は選択した圧密度に応じて抽出した時間に含まれる誤差が大きくなることである。これは一般に圧密度-時間関係が時間経過によって勾配が緩やかになることから示唆される。

2 点目は測定から得られる間隙水圧の値に含まれる誤差が大きくなることである。間隙水圧の消散から圧密度を定義しているため、圧密度が高いほど供試体中に残留する間隙水圧は低くなる。したがって測定値に含まれる誤差の割合も応じて高くなると考えられる。これはセル室にかかる圧密圧力が小さいほど影響し、本試験でも圧密圧力が比較的小さい過圧密領域において、間隙水圧の不安定な挙動が確認された。間隙水圧比を考慮した圧密係数の再計算では表-2 に示したように、圧密段階 4 と 7 において圧密度 90% という高い圧密度を計算に用いたが、測定から得られた間隙水圧比が 0.67~0.79 の範囲に含まれる時間が非常に微小であり条件を満たすのが圧密度 90% のみであったこと、また作用する圧密圧力が比較的大きいことから採用している。

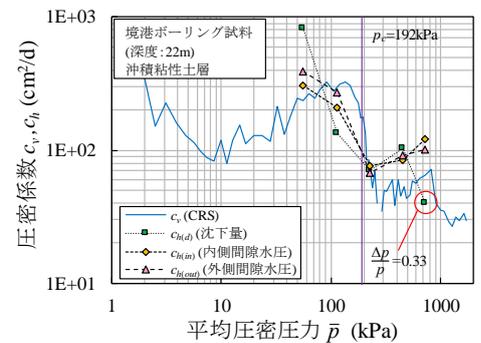


図-14 圧密係数-平均圧密圧力 (境港試料, 再計算後)

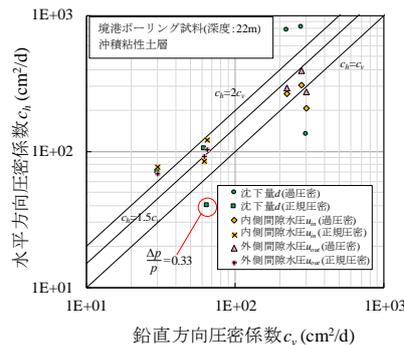


図-15 圧密係数の比較 (境港試料, 再計算後)

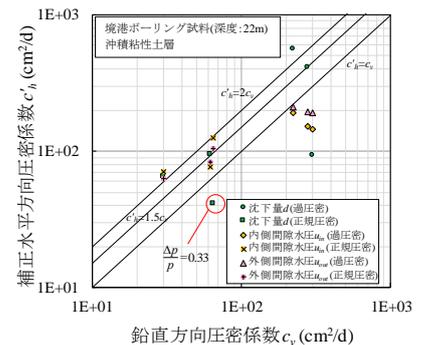


図-16 一次圧密比で補正した圧密係数の比較 (境港試料, 再計算後)

4. 結論

沈下量から求めた c_h は再構成試料と不攪乱試料のどちらの場合でも c_v に対して 1.5~2 倍であったが、間隙水圧から求めた場合、不攪乱試料のときには 2~4 倍と大きな比率を示した。これは、沈下量の測定では供試体全体に生じる沈下量の平均に依存しているのに対して、間隙水圧の測定では供試体中の要素部分に依存しているためと考えられる。間隙水圧を用いて算出した c_h が沈下量を用いて算出した c_h と一致しなかった場合、測定から得られる間隙水圧比 u_{in}/u_{out} は式(2)から得られる間隙水圧比 0.67~0.79 の範囲から離れており、一致した場合にはその範囲付近に位置し、またほぼ一定であった。このことから試験結果の解釈には測定および式(2)から得られる間隙水圧比を考慮する必要がある。式(2)で求めた範囲を考慮し、計算に使用する圧密度とそれに伴う係数を選択して再計算した圧密係数の値は、内側および外側間隙水圧から求めたもので一致し、沈下量を用いて算出したものとも正規圧密領域でほぼ一致した。

参考文献

- 1) 水上純一, 小林正樹, 土田孝: 粘性土の水平方向圧密係数, 土木学会論文集 No.535/III-34,1-12,1996.3
- 2) 西村伸一, 北川佳弘, 西山竜朗, 村上章, 村山八洲雄: 練返しおよび不攪乱粘土の鉛直・水平方向圧密係数の比較, 農業土木学会論文集, No.228,pp.91~98 (2003.12)
- 3) Tian Ho Seah, Teerawut Juirnarongrit: Constant Rate of Strain Consolidation with Radial Drainage, Geotechnical Testing Journal, Vol.26, No.4
- 4) Olson, R.E.: State of the art: Consolidation testing, Consolidation of Soil: Testing and Evaluation, ASTMSTP892, 1986.