

水平排水材としてプラスチックボードドレーン材を用いた鉛直ドレーン工法の設計について

○根木沙織¹・野村忠明²・山内義文²・伊藤譲¹

¹ 摂南大学・² 錦城護謨株式会社

1. 研究背景

軟弱地盤の代表的な改良工法のひとつである鉛直ドレーン工法(以下、「VD 工法」)は、軟弱地盤の圧密沈下を促進する工法であり、建設後の有害な残留沈下を低減し、地盤の早期の安定化を図ることができる。VD 工法に、天然材料である砂を用いて円柱状の排水井戸を鉛直に打設するサンドドレーン工法(以下、「SD 工法」)と、プラスチックボードドレーン材(以下、「PBD 材」)(図 1)という板状の透水体を鉛直に打設する PBD 工法がある。

SD 工法は、現在に至るまで軟弱地盤の代表的な改良工法として広く利用されてきた。近年では、鉛直排水材に人工材料を用いる PBD 工法が多くなっている。これらの工法の展開において、水平排水層には透水性の良いサンドマットが使用されてきた。ところが最近では、良質のサンドマット材料の入手が困難となり、その代替として PBD 材を使用することも検討されている。

2. 研究目的

本研究は、PBD 工法において水平排水材として PBD 材を用いる場合の実用的な設計方法を提案することであり、今回は以下の報告を行う。

- (1) PBD 工法において水平排水材として PBD 材を用いる場合の設計モデルを示す。
- (2) 設計モデルに従って、2つの設計方法を示し、設計例を紹介する。
- (3) (2)で示した設計方法の妥当性を検証するためモデル実験を行う。

3. 設計方針

3.1 VD 工法の原理

図 2 に VD 工法の原理を示す。VD 工法とは軟弱地盤の圧密において排水距離を短くして、圧密沈下時間の短縮を図るものであり、軟弱地盤に鉛直排水材を多数打設する。その後、地盤上に盛土の施工や真空圧を作用させ、荷重により発生した地盤内の過剰間隙水圧は、鉛直排水材を通じて鉛直方向に排水される。排水は上部のサンドマットに集まり、外部へと排出される。これが VD 工法による軟弱地盤の圧密促進のイメージである。

3.2 鉛直 PD の必要通水量による計算方法

VD 工法の理論的解析法を初めて提案したのが、Barron¹⁾である。Barron は、Terzaghi²⁾の次元圧密理論をベースに、自由ひずみ理論として圧密方程式を確立した。しかし、VD 工法がドレーン長に比べて打設間隔が短いので鉛直流を無視し、水平放射流だけを考慮しても良いと考えられた³⁾。したがって、等ひずみとして、鉛直流の項を無視した Barron の基礎方程式を以下のように簡略化された。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (1)$$

VD 工法の圧密沈下は、この等ひずみ圧密に関する Barron の基礎方程式の近似解に基づいて導出される。

$$T_h = \frac{c_h}{d_e^2} \cdot t \quad (2)$$

$$U(T_h) = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F(n)}\right) \quad (3)$$

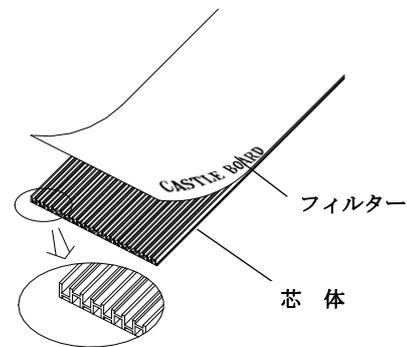


図 1 PBD 材の形状

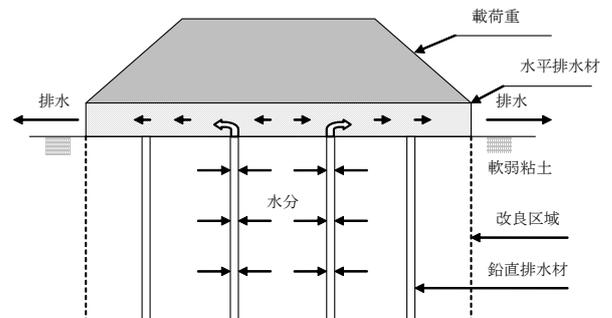


図 2 鉛直ドレーン工法の例

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (4)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log_e n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (5)$$

ここに T_h : 水平方向の時間係数, c_h : 水平方向の圧密係数(cm^2/day), d_e : 有効円の直径(cm), t : 圧密時間(day), U : 圧密度(%), d_w : ドレーンの砂杭換算径(cm), とする.

以上の Barron の近似解は, 排水材間の含水比や強度などの分布が変化する場合には評価できない. しかし, 軟弱地盤の沈下速さや強度増加等の平均的な予測をするときに有効である.

現在では, 嘉門⁴⁾らによりドレーンの通水性能(必要通水量)を評価する方法が提案され, 以下のような簡略化した式が使われている.

$$q_A = U \times F_s \times S \times \frac{\pi}{4} \times \frac{d_e^2}{t} \quad [\text{cm}^3/\text{sec}] \quad (6)$$

ここに, q_A : ドレーン材の必要通水量(cm^3/sec), 圧密度 U : 沈下進行と排水量が最大である圧密度 10%のとき, F_s : 安全率, S : 沈下量(cm), t : 圧密度 U に要する時間(sec)とする.

式(6)に式(2)を代入すると, 次式となる.

$$q_A = U \times F_s \times S \times \frac{\pi}{4} \times \frac{c_h}{T_h} \quad [\text{cm}^3/\text{sec}] \quad (7)$$

式(7)の各値は, 式(3)~(5)の近似解を用いることによりドレーンの必要通水量として算出される.

3.3 水平排水材の設計方針

このように鉛直ドレーン材からの必要通水量は, 実用的な設計に用いられている.

図3に鉛直ドレーンと水平排水材の設計計算モデルを示す. この図は n 本の鉛直ドレーンが上端部で水平ドレーンに接続されて, 水平ドレーン端部から排水されることを示している. 鉛直ドレーンの中心部での水頭(過剰間隙水圧)を h_2, h_4, \dots, h_{2n} , 水平ドレーン端部の水頭 h_{2n+1} を仮定して, 鉛直ドレーン上端と水平ドレーンの接続部の水頭 $h_1, h_3, \dots, h_{2n-1}$ を計算する. この結果を用いて, 接点間の流量 $q_{21}, q_{13}, \dots, q_{2n-1, 2n+1}$ が計算される.

これらの流量と式(6)または(7)との大小関係から, 1本の水平排水材が処理可能な鉛直ドレーンの本数を求めることができる. この方法は, 2通り考えられる.

設計方法1としては, 鉛直ドレーン材からの排水量の合計を水平ドレーン材の末端部分で処理が行えるか検討する.

$$q_A \times n < q_B (=q_{2n-1, 2n+1}) \quad (8)$$

ここに, $q_A \times n$: ドレーン材の必要通水量×ドレーン材の本数, q_B : 水平に PBD 材を用いた場合の全排水量

設計方法2としては, 個々の鉛直ドレーンの通水量よりもネットワークの各々の接点で, 処理能力が大きいのか検討する.

$$q_A < q_{2i, 2i-1} \quad (9)$$

ここに, $q_{2i, 2i-1}$: 水平に PBD 材を用いた場合の鉛直 PBD 材 1本の排水量

以上二つの関係を格付する.

PD材内の流量は, 単位時間あたりの透水量の式 $q = v \cdot A$ にダルシーの法則 $v = k \cdot i$ と動水勾配 $i = h/l$ を代入して, 鉛直ドレーンで q_V , 水平ドレーン q_H とすると, 次式になる.

$$q_V = k_V \cdot \frac{h_V}{l_V} \cdot b_V \cdot t_V \quad [\text{cm}^3/\text{sec}] \quad (10)$$

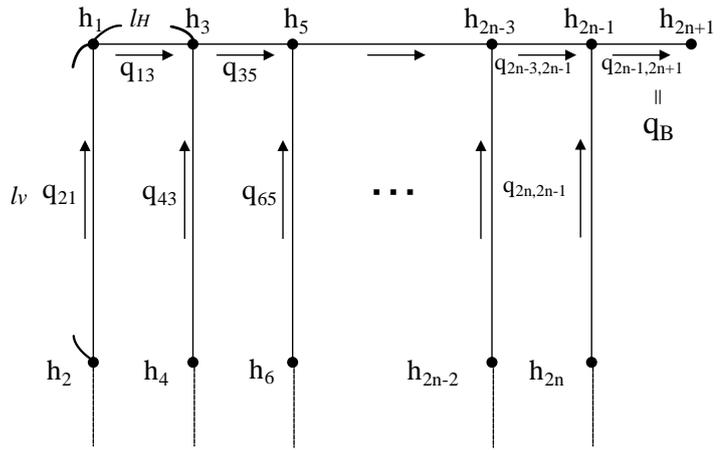


図3 設計の考え方

$$q_H = k_H \cdot \frac{h_H}{l_H} \cdot b_H \cdot t_H \quad [\text{cm}^3/\text{sec}] \quad (11)$$

ここに、 k_V 、 k_H ：鉛直、水平 PBD 材の透水係数、 l_V 、 l_H ：鉛直、水平 PBD 材の長さ、 b_V 、 b_H ：鉛直、水平 PBD 材の幅、 t_V 、 t_H ：鉛直、水平 PBD 材の厚さ

式(10)、(11)では、PBD 材内部にダルシーの法則が成立すると仮定するため、動水勾配 $i=1.0$ のときの透水係数を採用することにした。

式(10)、(11)を用いて、図 3 に示す鉛直 PBD 材が n 本の場合を例として、排水量を求める。 q_{2l} の流量は、打設された PBD 材の中央である。各々の PBD 材の流量には、以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} q_{13} &= q_{21} \\ q_{35} &= q_{13} + q_{43} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (12)$$

$$q_{2n-1,2n+1} = q_{2n-3,2n-1} + q_{2n,2n-1}$$

ここに、 q_{13} ：点 1 から点 3 へと流れる流量、 q_{21} ：点 2 から点 1 に流れる流量とする。

鉛直 PBD 材上端の水圧 h (kN/m^2) を未知数としている。また、鉛直 PBD 材下端の水圧 h は PBD 材に対して均一に作用するが、単純化するため鉛直 PBD 材の長さ $2l_V$ の $1/2$ の位置 l_V に集中的にかかることと仮定する。それは、鉛直 PBD 材下端の水圧 h (kN/m^2) = 盛土厚 H (m) \times 土の単位体積重量 γ_t (kN/m^3) として算出する。

式(12)に式(10)、(11)を代入して、以下のように整理する。

$$\begin{cases} (x+y)h_1 - yh_3 = xh_2 \\ -yh_{(j-4)} + (x+2y)h_{(j-2)} - yh_j = xh_{(j-1)} \\ \vdots \\ -yh_{(l-4)} + (x+2y)h_{(l-2)} - yh_l = xh_{(l-1)} \\ \vdots \\ -yh_{\{(2n+1)-4\}} + (x+2y)h_{\{(2n+1)-2\}} - yh_{(2n+1)} = xh_{\{(2n+1)-1\}} \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 $x = k_V \cdot b_V \cdot t_V \cdot l_H$ 、 $y = k_H \cdot b_H \cdot t_H \cdot l_V$ 、 $j=3, 5, \dots, l, \dots, 2n+1$ とする。

5, ..., l, ..., 2n+1 とする。

連立方程式(13)を解き、未知数である鉛直 PBD 材上部の水圧を求め、式(10)、(11)を用いて、流量が算出される。以上が、水平 PBD 材を使用した場合の排水量計算過程である。式(8)、(9)に示したとおり、これと式(7)の計算結果を利用して、設計の妥当性を評価する。

3.4 透水係数の仮定

水平 PBD の設計では、PBD 材中の水流にはダルシーの法則が成立すると仮定している。PBD 材には、形状と厚みが異なった CB-M、CB-5、CB-10 の計 3 種類があり、透水係数は図 4 に示す三軸透水試験装置⁵⁾を用いて求めた。本試験では、厚さ約 0.3、0.5、1.0cm、幅約 9.4cm、長さ 20cm に加工したものを使用した。

図 4 より、PBD 用キャップと PBD 用ペダスタルの溝に試験体を上下各 1.0cm 挿入し、PBD 材を PBD 用キャップおよび PBD 用ペダスタルをビニルテープで固定した後、ゴムスリーブで PBD 材を包む。

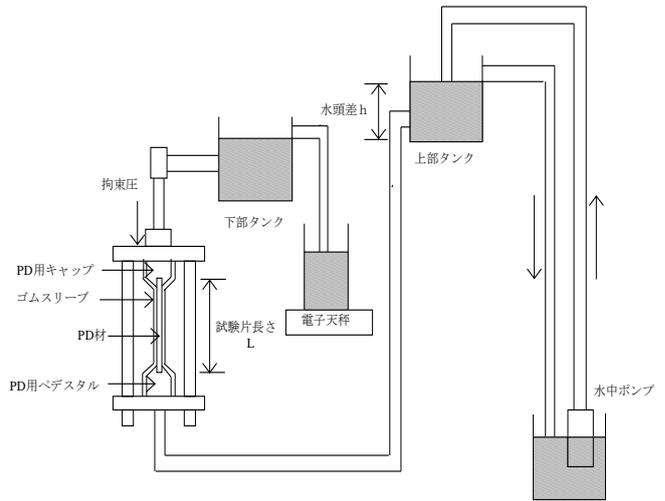


図 4 三軸透水試験装置⁵⁾

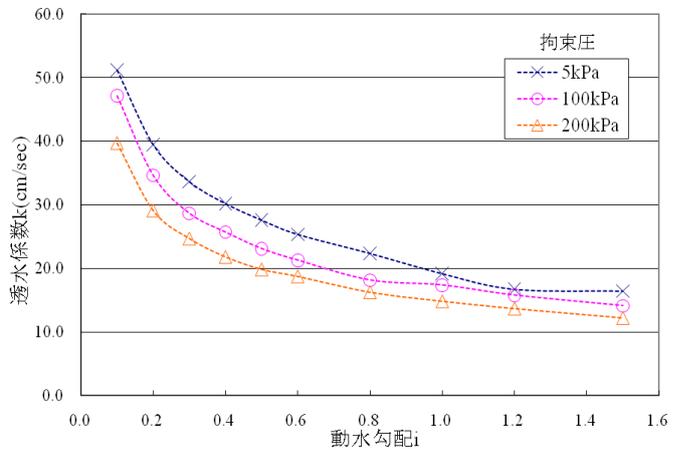


図 5 透水係数と動水勾配の関係(CB-5)

表 1 PBD 材の透水係数

種類	CB-M	CB-5	CB-10
透水係数 k (cm/sec)	14.12	14.81	13.89

表 2 計算条件の一例

条件	水平	鉛直
PBD材の種類	CB-5	CB-M
l (cm)	100	1000
b (cm)	30	10
t (cm)	0.5	0.4
k (cm/sec)	14.81	14.12
境界条件 (kN/m^2)		
鉛直 PBD の下端 $h_2 \cdots h_{2n}$	100	
水平 PBD の末端 h_{2n+1}	0	

次に、セル内部を水で満たし、拘束圧をかけ、PBD材の下端から上端へと通水し、飽和させる。動水勾配を0.1~1.5まで順に変化させて一定時間5秒から30秒あたりの透水量を測定する。この操作を拘束圧5, 100, 200kPaの順に繰り返す。なお、拘束圧と動水勾配を変化させるたびに、透水量を安定させるために1分間静置させた。

通水量から透水係数を式(14)で算出し、動水勾配に対する透水係数の変化を図5のようにまとめた。

$$k = \frac{q}{A \cdot i} \cdot \eta_t \quad [\text{cm/sec}] \quad (14)$$

ここに、 k : 透水係数(cm/sec), q : 通水量(cc/sec), A : 透水断面積(cm²), i : 動水勾配, η_t : 水温15°Cに対する補正係数

図5よりCB-5を例に示すと、動水勾配が小さいほど透水係数が大きく、逆に動水勾配が大きいほど透水係数が小さい傾向にある。また、動水勾配1.0以上では、透水係数の減少が収束している。CB-M, CB-10も同様の傾向がみられた。このことから拘束圧200kPaの場合の*i*=1.0の透水係数を採用した。表1に*i*=1.0のときの各PBD材での透水係数を示す。今回の設計計算において、この値を使用する。

4. 設計計算例

4.1 設計方法1

式(8)に示すように水平PBD材には、鉛直PBD材すべての排水量を受けもつことから、鉛直PBD材を何本まで連結することができるか求めた。さまざまな現場条件に合わせて、多くのパターンを想定しグラフを作成することができる。今回は、表2の条件を用いたグラフに、表3のA現場の条件をあてはめた図6を作成した。作成手順を以下に示す。

- ① 表2から水平PBD材CB-5の条件と鉛直PBD材CB-Mの条件、境界条件の鉛直PBD材の下端、水平PBD材の末端の各値を式(10), (11)に代入し、 q_B を算出すると $q_B=333.4\text{cm}^3/\text{sec}$ であった。
- ② 式(7)より、安全率 $F_s=2.0$ 、沈下量 S を100~600cmと圧密係数 c_v を20~500cm²/dayの範囲で1本あたりの排水量を算出する。
- ③ ①の q_B と②で計算された各排水量 q_A で除すると、排水可能な鉛直PD材の最大本数が算出される。
- ④ 図6より、x軸に鉛直PBD材の本数 n 、y軸に沈下量 S をとり、圧密係数 c_v ごとにプロットする。

表3 A現場の条件

条件	水平	鉛直
PBD材の種類	CB-5	CB-M
l (cm)	100	1000
b (cm)	30	10
t (cm)	0.55	0.4
k (cm/sec)	14.81	14.12

境界条件(kN/m ²)	
鉛直PDの下端 $h_2 \cdots h_{2n}$	100
水平PDの末端 h_{2n+1}	0

現場条件	
盛土厚H(cm)	500
沈下量S(cm)	157
圧密係数 c_v (cm ² /day)	100
鉛直PBDの本数n(本)	26

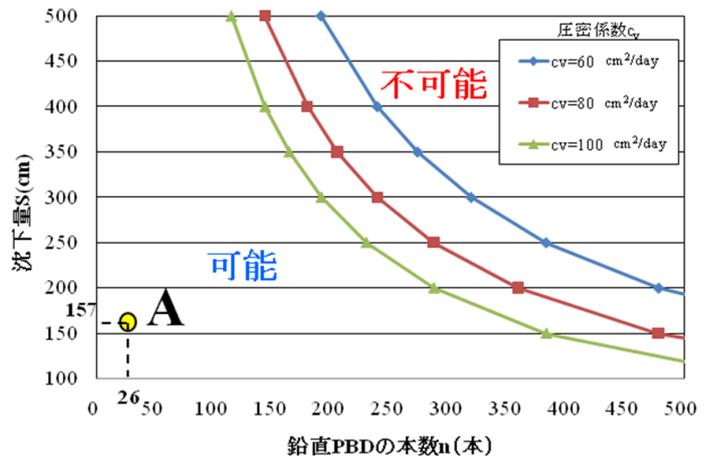


図6 水平PBD材の設計例

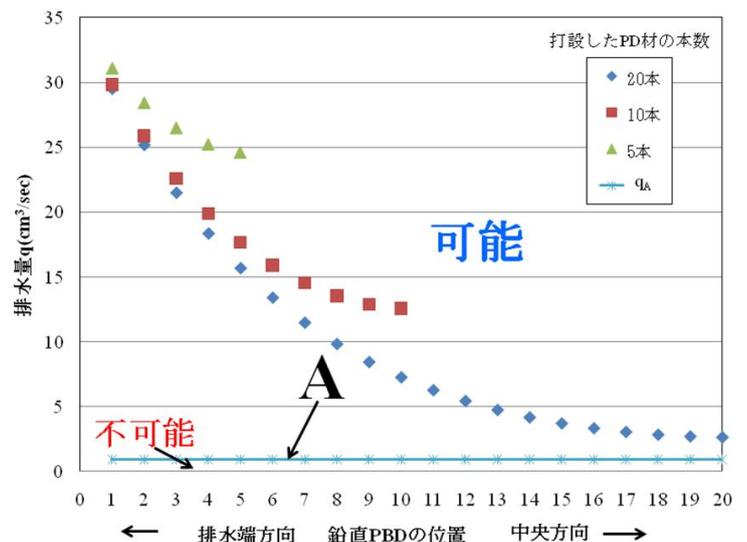


図7 鉛直PBD材1本分の排水能力

- ⑤ 図6において表3のA現場の条件であるSとnの値が交差する点、表3の条件に一致する c_v のグラフ線よりも左側にあれば排水可能、右側にあれば排水不可能だと判断できる。

図6より、A現場の条件であるSとnをグラフにあてはめると、Aの位置が表3の条件 c_v のグラフ線より左側に位置している。したがって、水平PBD材によりすべての排水量が排出可能とわかる。

4.2 設計方法2

式(9)に示すように、1本の鉛直ドレーンの q_A と $q_{2i,2i-1}$ とを比較して、水平排水層に水平PBD材を使用する場合、排水口から遠い位置にある鉛直PBD材ほど、排水能力が衰える傾向にあると考えられた。そのため、十分な排水能力が望めない。そこで、排水口から何本までの鉛直PBD材が排水機能を満たしているのかグラフで表す。こちらも表2と3の条件を使用し、図7を作成した。作成手順を以下に示す。

- ① 表2の条件より、鉛直PBD材の本数が $n=5, 10, 20$ 本ときの排水量を式(10), (11)により算出する。
- ② 排水機能を満たしていると判断する排水量として、式(7)より鉛直PBD材1本の必要通水量 q_A を算出する。表3より、 $F_s=2.0$, $c_v=100\text{cm}^2/\text{day}$, $S=157\text{cm}$ のときの排水量 $=0.91\text{cm}^3/\text{sec}$ とした。
- ③ 図7より、 x 軸に排水口から数えた鉛直PBD材の位置、 y 軸に1本あたりの排水量 $q_{2i,2i-1}$ をとり、グラフにプロットする。
- ④ 図7に q_A をあてはめると、水平排水層にPBD材を使用した場合の鉛直PBD材が排水機能を満たしている本数が判断できる。

図7より、A現場では、鉛直PBD材が5, 10, 20本以上のケースのすべてが式(9)を満足している結果となった。

4.3 モデル実験

本実験では、水平排水材の設計方法より算出した排水量とモデル実験により得た総排水量を比較した水平PBD材の設計方法の妥当性を検証する。

試料土は藤森粘土($c_v \doteq 500\text{cm}^2/\text{day}$)とし、初期含水比は液性限界の1.2倍以上に設定する。図8に直径25cm、高さ20cmの円筒形の実験装置を示す。実際の現場では、下方から上方へ排水するが、本実験では排水量を正確に測定するため上方から下方へと排水させた。試料土からの排水は、ドレーン材を通してのみであり、上下端面にはビニルシートを張り、排水を制限した。

鉛直PBD材は、圧密時間180minで圧密度90%となるPBD材の有効円を考慮して、ドレーンピッチ9.05cmで図9のように正三角形に7枚設置する。水平、鉛直PBD材ともに、幅 $b=2\text{mm}$ 、厚さ $t=3\text{mm}$ のCB-Mを使用する。鉛直PBD材7枚を水平PBD材で接続し、上下アクリル板の溝に設置し、PBD材間をシリコンシーラントで固定した。上部より圧密荷重100kPaを載荷させ、沈下量と排水量を測定した。

まず、図10より、 x 軸に時間 \sqrt{t} 、 y 軸に排水量 q と圧密度 U をとり、排水量の結果を示す。圧密度90%に達した時

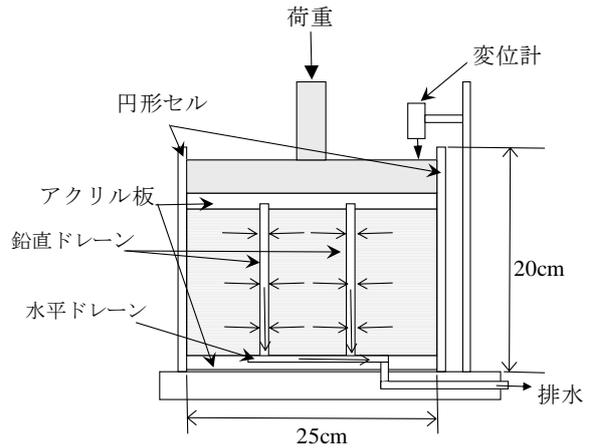


図8 モデル実験装置

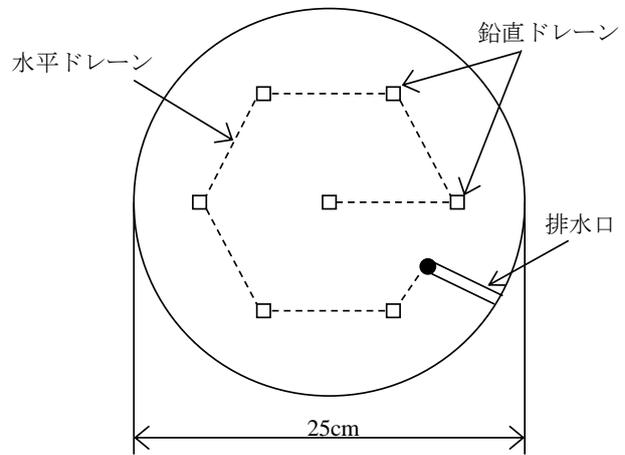


図9 鉛直PBD材の配置

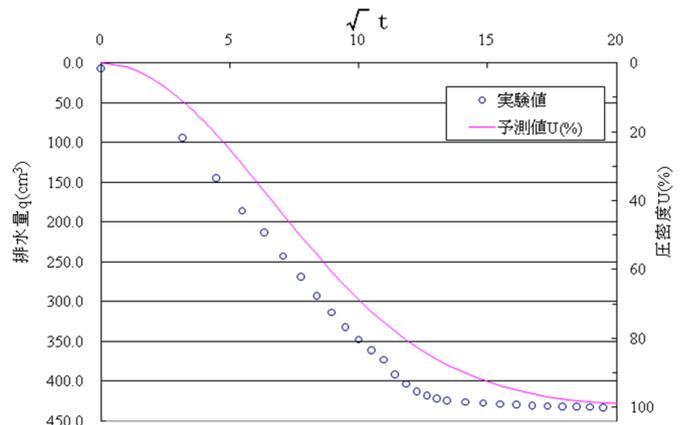


図10 実験結果(予測と結果)

間は、 $t_{90}=140\text{min}$ 前後であり予想よりも早く圧密が進行したことがわかる。また、予想総排水量では、 $t_{90}=180\text{min}$ で 375cm^3 であったが、 $t_{90}=140\text{min}$ の総排水量は 412cm^3 と予想を上回る結果となった。そして、予想圧密沈下量 $S=8.4\text{mm}$ であったが、モデル実験では $S=13.5\text{mm}$ という結果となった。

5. まとめ

本研究の成果と課題を以下に示す。

- (1) 図3に示す鉛直ドレーンと水平排水材の設計計算モデルから、水平 PBD 材を使用したとき、排水量の算出式として式(10)~(13)を用いた方法を提案した。
- (2) 設計方法1として、式(8)の関係より、水平 PBD の末端部で受けもつことのできる排水量を鉛直 PBD 材1本分の排水量を除することで、鉛直 PBD 材を何本までつなぐことができるかを求める方法が示された。
- (3) 設計方法2として、式(9)の関係より、水平 PBD 材を使用した場合、水平 PBD 材の末端から中央方向にかけて、排水能力が機能している鉛直 PBD 材は何本あるかを鉛直ドレーンの必要通水量と比較して求める方法が示された。
- (4) モデル実験では、予測よりも早く圧密され、排水量も多いと結果となり、これら計算モデルによる排水量の算出方法は、多少過大であるかと思われるがほぼ妥当であると考えられる。
- (5) この方法の問題として、PBD 材でダルシーの法則が成立するとして、さらに PBD 材の透水係数 k を動水勾配 1.0 の値を採用していることが挙げられる。PBD 材内では、ダルシーの法則が成立すると仮定しているが、実際には動水勾配が変化すると透水係数も変化する。たとえば、表1の CB-5 を例にすると実際の計算結果では、拘束圧 200kPa の $i=0.1$ のとき、 $k=39.7\text{cm/sec}$ であり、 $i=1.0$ のときに比べて動水勾配が小さい場合における透水係数が大きいことがわかる。
- (6) 今後の課題として、設計方法2の妥当性を検証するために、水平 PBD 材につなげた鉛直 PBD 材1本あたりの排水量を測定するモデル実験を行う予定である。

謝辞：本報告について、摂南大学工学部都市環境システム工学科の守本絵美子氏の協力を得ています。また、三軸透水試験においては、錦城護謨株式会社の方々にご協力頂きました。ここに深く感謝の意を記します。

参考文献

- 1) Barron, R. A., : Consolidation of Fine Grained Soil by Drain Wells, Trans. A. S. C. E., pp.113-718, 1948.
- 2) Terzaghi, K. : “Die Theorie der Hydrodynamischen Spannung serscheinungen und Ihr Erdbautechsisches Anwendungsgebiet” Proc. Int. Cong. Appl. Mech., pp.1-288, 1924.
- 3) 吉国洋：土質基礎シリーズ パーチカルドレーン工法の設計方法と施工管理，技法堂出版，1979.
- 4) 嘉門雅史，三浦哲彦：プラスチックボードドレーン工法 その理論と実際，プラスチックボードドレーン工法研究会 [編]，pp.1-79, 2009.
- 5) 嘉門雅史・諏訪靖二・プラダンテージ：プラスチックボードドレーンの通水機能評価試験法について，第4回ジオテクスタイルシンポジウム，国際ジオテクスタイル学会，pp.76-82, 1989.