

東北大学 正員○西村 修 正員 後藤光龜
正員 佐藤敦久 学生員 佐藤秀樹

1. はじめに

汚泥の固液分離に関する基本的パラメーターである圧縮性、透水性を定率ひずみ圧密実験より求め、この結果を用いて数値計算を行い、重力脱水過程を解析した。

2. 固液分離に関する基礎式⁽¹⁾

汚泥を固相と液相に分離して、運動方程式、連続の式を導く。運動方程式は、

$$(\text{汚泥固相}) \quad \frac{\partial P_s}{\partial x} - \frac{\rho_s g}{K} (V_1 - V_s) + (1 - \varepsilon) (\rho_s - \rho_l) g = 0 \quad ①$$

$$(\text{汚泥液相}) \quad \frac{\partial P_l}{\partial x} + \frac{\rho_l g}{K} (V_1 - V_s) = 0 \quad ②$$

となる。ここで、 P_s :汚泥固相に加わる有効圧力、(固相に加わる水压(静水压も含む)を除く)、 P_l :汚泥液相に加わる圧力、(液相に加わる静水压を除く)、 V_s :汚泥固相の空塔速度、 V_l :汚泥液相の空塔速度、 K :透水係数、 ε :空隙率、 ρ_s :汚泥固相の密度、 ρ_l :汚泥液相の密度、 x :鉛直方向の座標(上向き正)、を示す。

連続の式は、

$$(\text{汚泥固相}) \quad \frac{\partial V_s}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad ③ \quad (\text{汚泥液相}) \quad \frac{\partial V_l}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad ④$$

となる。ここで、 t :時間の座標、 $q(t)$:汚泥全体のフラックス、を示す。

上記の方程式群を解くため、一般に次のような関係が求められる。

$$(\text{有効圧力}) \quad P_s = f(\varepsilon) \quad ⑤$$

$$(\text{透水係数}) \quad K = g(\varepsilon) \quad ⑥$$

式⑤のように、有効圧力は空隙率のみの関数であるとし、 $dP_s/d\varepsilon = M$ とおき、以上の式を整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & -\frac{1}{2\rho_l g} [(\rho_s - \rho_l) g \left\{ \frac{dK}{d\varepsilon} (1 - \varepsilon) - K \right\} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \\ & + \frac{d(KM)}{d\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right)^2 + KM \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}] \quad ⑦ \end{aligned}$$

となり、自重を考慮した圧密係数が一定でない(透水係数、体積圧縮係数それぞれが一定でない)場合の圧密方程式に相当する。ここで、自重を無視できる場合には右辺第一項が、 KM が一定とできる場合には右辺第二項が消去される。

2. 実験試料および実験方法

2-1 実験試料 試料汚泥は、仙台市近郊の浄水場排泥池より採取し、十分重力沈降させ上澄水を排除したものを用いた。そのときの汚泥濃度は約6.4%である。

2-2 定率ひずみ圧密実験 定率ひずみ圧密実験は標準圧密試験の代用として検討されてきた方法で、著者らは実験装置を上水汚泥を対象として工夫し、汚泥の圧縮性、透水性を評価した⁽²⁾。圧密容器は直径8(cm)で初期試料厚さ2(cm)、ひずみ速度約3/100(mm/min)である。

2-2 重力脱水実験 内径12(cm)のガラス管に汚泥を50(cm)打ち込み、ろ材としてはろ紙(No. 5C)を用いた。ろ材面より2, 3, 5, 10, 16, 25(cm)の壁面に小型圧力変換器を取り付け水压を検出した。また、汚泥打ち込み直後、適当な位置に配したマーカー(直径約5(mm)の球形の管に針金を巻き汚泥の比重に近づけたもの)の動きを測定した。このマーカーは汚泥の固体成分とともに移動する。

3. 定率ひずみ圧密実験結果

図-1は定率ひずみ圧密実験より得られた有効圧力と $(e_0 - e)$ の関係である。本実験の圧力範囲(100-50000(Pa))で、両対数紙上で直線に近似でき式⑧が求められる。

$$(e_0 - e) = a \cdot P_s^b \quad e_0 = 0.9735, \quad a = 0.0037, \quad b = 0.344 \quad ⑧$$

ここで e_0 は有効圧力が生じ始める時の空隙率であり、ここでは十分に重力沈降濃縮した汚泥の空隙率とした。

図-2は、透水係数とKozeny関数 $(e^3 / (1 - e)^2)$ の関係であり、式⑨が求められた。

$$K = c \cdot \left(\frac{e^3}{(1 - e)^2} \right)^d \quad c = 2.03 \times 10^{-12}, \quad d = 2.05 \quad ⑨$$

4. 重力脱水過程のシミュレーション

定率ひずみ圧密実験によって汚泥の圧縮性、透水性が求められたので、この値を用いて重力脱水過程のシミュレーション

をを試みた。まず、式⑦を計算の便宜のため固体分の質量を基準とした座標に変換して差分化した。境界条件は下部排水面において式⑧から $P_s = 4900$ (Pa) (水頭にして 50 (cm)) のときの $\epsilon = 0.905$ となり、この値を用いた。上部境界面では $\frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$ とした。

図-3は重力脱水の界面(○プロット)とマーカー(●プロット)の移動状態の実測値を示し、実線は計算値である。汚泥界面に関しては、定率ひずみ圧密実験結果を用いた理論曲線は実測値にほぼ一致しているといえ

よう。また、各マーカーの動きを計算した値は排水面に近いほどよく一致している。これは、実験開始直後から上澄水が生じ始め、この現象が影響を及ぼしていると考えられる。しかし、この影響は排水面に近いマーカーほど短時間でなくなり、上澄水が減少し始める120時間以降では全体としてよい一致を示している。

図-4は重力脱水過程での空隙率分布の計算値である。初期の空隙率分布は、汚泥上部において初期空隙率0.9735とあまり差がなく、排水面付近に形成するケーキ層が脱水を律速していることがわかる。高速天日乾燥法は機械的攪はんによってケーキ層を破壊し重力脱水を促進させる方法であるが、空隙率分布の破壊と組み合わせることによって、その効果を理論的に評価できると考えられる。

図-5は、重力脱水過程での水圧の分布の実測値(図中プロット)と計算値(図中実線)である。静水圧分布に近い10 (cm) 以上の部分ではどの時間の計算値と実測値もよく一致している。しかし、10 (cm) 以下のケーキ層と認められる部分では脱水の進行にしたがって実測値と計算値にズレが生じ、計算値の方が大きくなる傾向がある。言い換えれば、有効圧力を過小に評価しており排水面付近での空隙率の減少は、計算値よりも実測値の方が大きい。この原因としては計算上の問題(差分間隔等)および定率ひずみ圧密実験より得られた P_s と $(\epsilon_0 - \epsilon)$ の関係(式⑧)の精度の問題等が考えられる。

5. おわりに

定率ひずみ圧密実験より得られた圧縮性、透水性を用いて重力脱水過程の数値計算を行い、脱水曲線に関してはよい結果が得られたが、特に排水面付近での水圧分布に問題が残された。今後、より精度を高めるとともに、

高速天日乾燥法の解析を行いたい。
参考文献(1) 楠田 他:「汚泥の沈降濃縮に関する研究」土木学会論文集, 第294号(1980. 12) (2) 西村 ら:「定率ひずみ圧密実験による上水汚泥の固液分離性について」, 昭和62年度土木学会東北支部講(1988. 3)

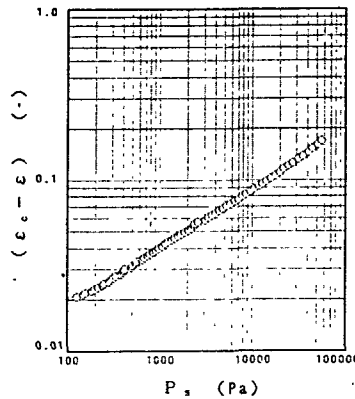


図-1 P_s と $(\epsilon_0 - \epsilon)$ の関係

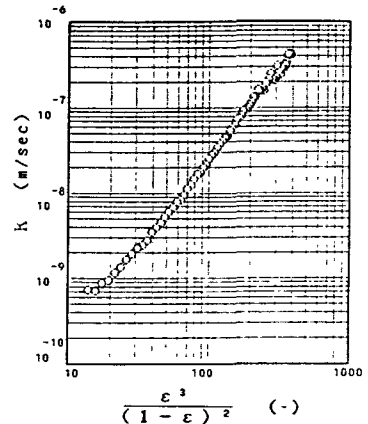


図-2 $\frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2}$ と K の関係

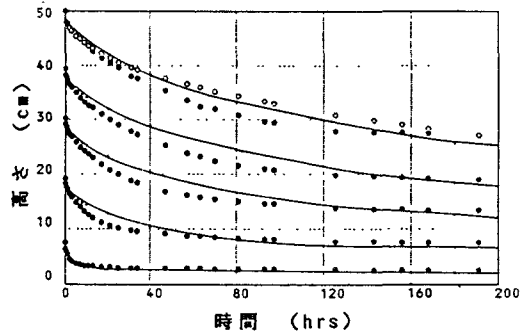


図-3 重力脱水曲線

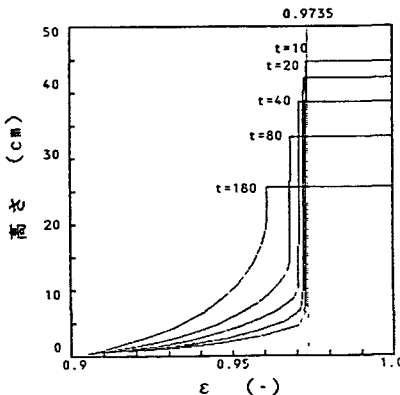


図-4 重力脱水過程での空隙率分布

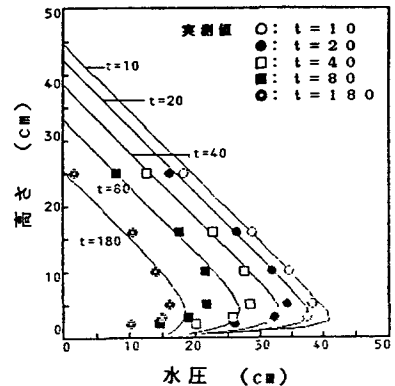


図-5 重力脱水過程での水圧の分布