

東北大学工学部 正員 石橋良信
東北大学工学部 正員 佐藤敦久

1. はじめに

上水汚泥の処理のために、ここ数年来それぞれに特色をもった脱水方法および脱水前処理の研究が進んでおり、各処理法の透過性能、脱水機構もかなり解明されてきている。その反面、上水汚泥そのものの性状の把握は以前と少しも変わっていない感がある。そこで新しい試みとして圧縮透過試験を行ない、上水汚泥の圧力と透水性および空隙率の関係を得たので報告するとともに、その結果を利用して凍結融解処理の凍結の際にみられる亀模様

2. 実験試料および装置

試料は仙台市郊外丁浄水場の上水汚泥を平均3.18%, 6.15%に自然濃縮して実験に供した。その汚泥成分は灼熱減量15.5%, Al_2O_3 16.1%, 真密度2.33 g/cm^3 である。凍結は試料200mlをフリーザー内で冷えた空気により下方、一方向から凍らせ、凍結試料は切断して写真判定した。同時に試料内温度を測定し、凍結速度算定の資料とした。

3. 圧縮透過試験¹⁾

圧縮透過試験はケーキろ過の諸特性値を求めるために化学工学で用いられる方法であり、その装置は土質力学で通常使われる圧密試験機を改良し、透水(透過)試験が同時にできるようにしたものである。今回の装置は小さな荷重で測定するため、下方より荷重がかかるように、また圧密解析、ケーキろ過解析の両方ができるように、さらに改良したものである。

実験方法は図-2に示すConsolidmeterの円筒内に所定の濃度の汚泥を試料厚さ3cmに入れ、段階ごとに荷重をかける。各荷重段階で沈下が終了した時点を平衡状態とみなし、その時の平衡荷重を P_3 とする。さらに、平衡に達したケーキにつき蒸留水で変水位透水試験を行ない、平衡段階における透水係数 k_d を計算する。この操作を数段階くりかえす一方、別個に平衡の空隙率 n を次の(1)式より算定しておく。

$$n = 1 - (1 - w_0/100) \rho_{s0} L_0 / \rho_s L \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 w_0 :初期汚泥含水率(%), $1 - w_0/100$:初期汚泥分率 $S(-)$, ρ_{s0} :みかけ密度(g/cm^3), ρ_s :汚泥真密度, L_0 :荷重載荷前の試料厚さ(cm), L :各平衡荷重時の試料厚さ(cm)である。

以上の操作より P_3 と n との関係は荷重の小さな段階をのぞいて両対数紙上で直線にのる。Tiller, Ingmanson等は $n = n_0 P_3^{-C}$ なる実験式を与えている。また、 n の値は初期汚泥濃度とともにわずかに変化するといわれるが、今回の上水汚泥にあてはめれば、初期濃度3.18%の試料については $n = 0.841 P_3^{-0.0579}$, 6.15%では $n = 0.845 P_3^{-0.0531}$ の結果が得られこの関係を図-1に P_3 に対応した)モグラフとして示した。さらに、各 P_3 に対する透水係数の変化を同図にプロットして表わした。上水汚泥では概略この程度の値をとるものと考えられるが、この透水係数の初期と最終荷重での差は汚泥濃度のうすい3%台の方が大きく、圧縮圧力の増

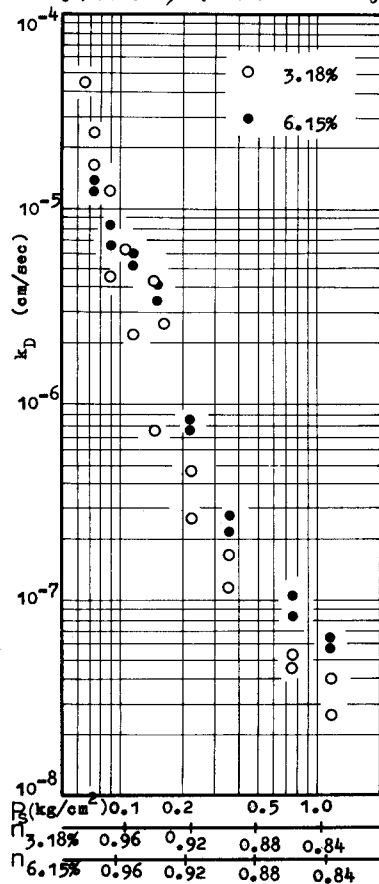


図-1 P_3 vs. n , k_d

大につれて透水性が悪くなりやすいと思われる。また圧の高い段階でも、初濃度のうすい方が透水係数が低く、恒圧ろ過において、比抵抗は初期濃度の減少とともに増大するといわれる結果からみても、濃度のうすい場合は濃い場合に比して難脱水性を示す傾向にあるものと思われる。また、空隙率 n と汚泥濃度分率 S の関係は実験的には各試料ともほぼ一定となり、 $n = -0.45S + 1$ ---- (2) で表わされる。ここで汚泥濃度は $100S$ の関係にある。

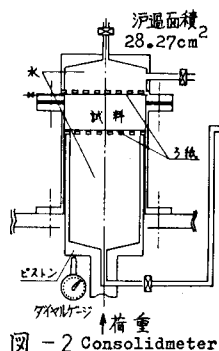


図-2 Consolidometer

4. 凍結融解処理への応用

凍結融解処理によって、難脱水性が解消されるのは汚泥粒子が凍る過程で粗大な粒子塊に変わるためであり、その前提として氷界面によって汚泥粒子が排除される現象が起こる。氷の成長のために必要な水は、この pile-up された汚泥層中を通して供給されるが、氷の成長量が層内の透水能力を越えるとき、氷は汚泥層を飛び越えて成長する。その結果、凍結後には氷と汚泥との交互の縞模様を形成する。今回は、はじめて縞が形成される濃度を算定する。実験写真を模式化した図-3において、はじめて縞ができる位置 b を試料厚さ a (4cm)で割った b/a は濃度と凍結速度 $\bar{u}$ に比例し、 $b/a = -0.501 - 0.363\bar{u} - 2.82S$ で表わし得た。すなわち、 S が小さく $\bar{u}$ が緩いほど b/a は大きくなり、脱水性のためには緩速凍結がよいことと関連していく。ここで $\bar{u}$ は a を凍結時間で割った平均凍結速度 (cm/hr) である。

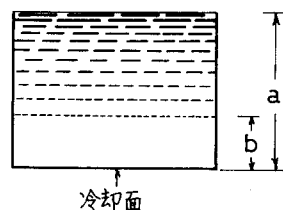


図-3 縞模様形成模式図

汚泥層内の透過能力は次式の kozeny-Carman 式が成立つとして前節の圧縮透過試験を利用して求めた。 $\bar{g} = n^3 g_c A_c P / k S_0^2 (1-n)^2 \mu' L_e$ ---- (3) ここに $\bar{g}$: 透水量 (cm³/sec), P : 透過圧力 (g/cm²), μ' : 粘性係数 (0.0179 poise), L_e : 層厚 (cm), g_c : 重力換算係数 (dyn/g), A_c : 透過面積 (cm²), S_0 : 有効比表面積 (1/cm) k : kozeny 定数で 6.15% の上水汚泥では $\log k S_0^2 = 21.9 - 9.9n$ である。

式中 L を縞模様の実験写真および顕微鏡での観察から 0.03~0.05cm とし、 P は数段階想定して、種々の組合せの $\bar{g}$, n , L_e , P の計算図表を作製した。図-4は P をパラメータに初濃度 6.15% で $L_e = 0.05$ cm の場合の $\bar{g}$ と n との関係を示した一例である。

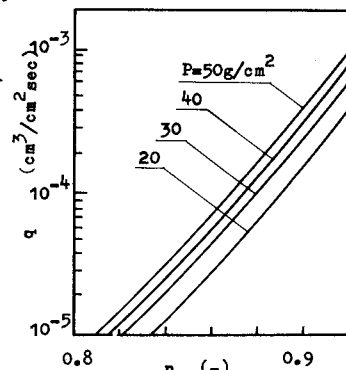


図-4 透水量 $\bar{g}$ と空隙率 n との関係

また、単位面積あたりの氷の成長量 δ は水と氷の熱物性値および本実験装置の熱伝達係数 11.5 (kcal/m²·hr·°C) を用いて Neumann の解より求め、結果を図-5に示す。

さて、はじめて縞模様を形成する濃度を求める操作は実験写真の単位面積あたりの b の値が図-5の δ に相当するとして代入すると曲線と接する点の接線の傾き ($d\delta/dt$) から $\bar{g}$ (cm³/sec) が求まる。この値を図-4に代入することにより、ある P における値として n が、また(2)式より汚泥濃度が与えられる。ところで図-4で氷を引抜く driving force

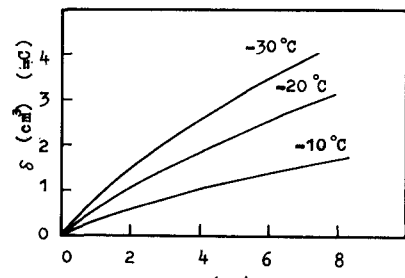


図-5 氷生成量 δ と時間 t との関係

としての P は、本来なら化学ポテンシャルで表わすのが妥当であるが、実際にあてはめるのは困難である。そこで(3)式を用いた実験からの推定と真空試験におけるろ液量と汚濁圧力との概算から $P \approx 50$ g/cm²と定める。この P が氷を引き抜く圧に相当すると仮定して上記の操作を行なうと、汚泥濃度 6.15% の汚泥では $\bar{u} = 0.2 \sim 0.3$ cm/hr (-10°C) で汚泥濃度 32~33%, $\bar{u} = 0.3 \sim 0.4$ (-20°C) で 28~29%, $\bar{u} = 0.5 \sim 0.6$ (-30°C) で 25~26% ではじめて縞が形成されると思われる。また、濃度が 3.18% では、それぞれの値より 2~3% 少目であった。

参考文献 1) 白戸, 化工, 19, 3 (1955) 2) Tiller, Chem. Eng. Progress, 49, 9 (1953) 3) Ingmanson, Ibid, 49, 11 (1953) 4) 白戸, 化工, 27, 7 (1963)