

上水汚泥の凍結融解処理にともなう縞模様形成について

東北大学工学部 学生員 石橋 良信
 東北大学工学部 学生員 ○ 荒木 康
 東北大学工学部 庄子 信之

1. はじめに

凍結融解処理によって、難ろ過性を示す上水汚泥の脱水性は改善されるが、それは微小な汚泥粒子が凍る過程で、粗大な粒子塊に変質させられるためである。今回は、粗大化する原因となる、水-氷界面での粒子の排除、氷と汚泥層の交互の縞模様について観察するとともに、圧縮透過試験から求まる汚泥の透水能力と氷の生成のための水の必要量とから、縞模様の初期段階を解析する。

2. 試料 および 実験装置

試料は仙台市郊外丁浄水場の高速凝集沈殿池汚泥を自然沈降により所定の濃度にし、実験に供した。その組成は、灼熱減量15.5%, Al_2O_3 16.1%, 真密度2.33 g/cm³であった。凍結は内容積120 lの空気冷却方式のフリーザーで、一辺7 cm, 深さ4 cmのアイス缶に試料200 mlを入れ、下方より一方向に凍らせた。また、凍結の緩急を知る目安として平均凍結速度 $\bar{u}_f$ を用いている。これは試料厚さを、外界に奪われる熱量と氷の生成熱とが熱的平衡関係にあるプラトーな部分の時間で割った値を用いた。

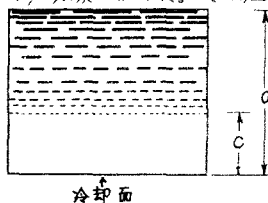


図-1 縞模様形成模式図

3. 縞模様形成

一般に水、氷、粒子が存在する時、氷は氷結晶中に夾雑物を含まないため、粒子は氷の界面によって排除されることが知られており、上水汚泥でも同様の現象が起こる。

汚泥を冷却すると、氷は汚泥粒子を排除しながら成長し、その結果、汚泥層はpile-upの現象をともなって濃縮されていく。しかし、この濃度があまりに高くなると、氷の成長に必要な水の供給が困難になり、氷は高濃度層を飛越えて成長をはじめ。これが順次くり返され、凍結後には、汚泥層と氷との相互の縞模様が形成される。一方、氷間に挟まれた汚泥層はさらに濃縮脱水され、氷結晶圧、カピラール力等で粗大な粒子塊に変えられる。以下、実験を通して、汚泥層がどの位の濃度で氷に捕えらるかを検討してみる。

3-1 縞模様の観察

本実験の凍結方法では、縞は図-1に示すようなパターンで凍るのが観察された。また縞模様は、初期濃度と凍結速度に依存されるように見うけられるので、図中の純粋な氷の厚さcを、試料厚さaで除いた値 c/a を排除の度合の指標とし、図-2に平均凍結速度 $\bar{u}_f$ を、図-3に初期汚泥濃度Sとの関係を図示した。その結果、図-2より同じ $\bar{u}_f$ であれば、Sが低いほど、また図-3より同じSであれば、 $\bar{u}_f$ が緩いほど c/a は大きくなり、氷に捕えられにくい傾向が実験から確かめられた。さらに、重回帰により、この関係式は

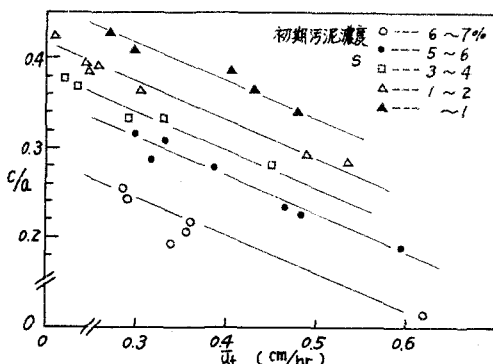


図-2 平均凍結速度 $\bar{u}_f$ と汚泥層排除の関係

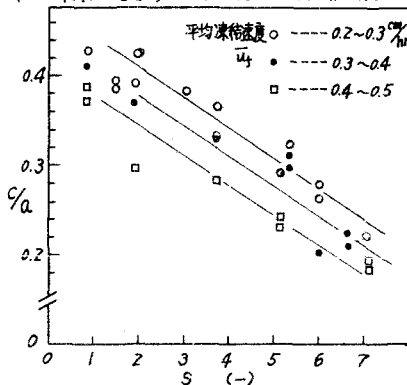


図-3 初期汚泥濃度 S と汚泥層排除の関係

$\bar{u} = 0.501 - 0.363\bar{u} - 2.825'$ で表わされる。ここで S' は濃度分率 ($S/100$)

3-2 圧縮透過試験

氷の成長のために氷界面に輸送される水は排除濃縮された汚泥層内を通って供給される。そこで、この汚泥層が通常どの程度の透水能力を持つかを調べるために圧縮透過試験を行なった。この試験には、土質工学で使われる圧縮試験機と透水試験機を組合わせたような装置を用いる。方法は、段階的に荷重をかけ、沈下が終了したら透水試験を行なうという2つの操作から、ある平衡荷重における汚泥の平衡空隙率を求めるとともに kozeny-Carman 式 $\delta = \frac{e^3}{k_s S_0 (1-E)^2} \frac{g_c A_c P}{\mu L}$ から透水量を求めるものである。ここに、 δ : 透水量 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ sec}$) P : 透過圧力 (kg/cm^2) μ : 粘性係数 (Poise) L : 層厚 (cm) g_c : 重力換算係数 (dyne/g) A_c : 透過面積 (cm^2) E : 空隙率 (-) S_0 : 有効比表面積 ($1/\text{cm}$)、 k_s : kozeny 定数である。以上の操作から、透水に関する一般的な汚泥性状を知り得るが、このうち凍結に応用するために $\mu_{0c} = 0.0179$ $L = 0.05$ また初期濃度を 6.15% とした時の単位面積、単位時間あたりの δ' と E の関係を P をパラメーターとして図-4 に示す。図-5 は透水試験から得られた透水係数 k_d と E の関係、また図-6 は実験結果より、 E とケーキ含水率の関係を求めたものである。

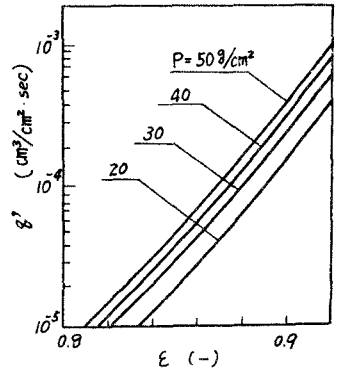


図-4 透水量と空隙率との関係

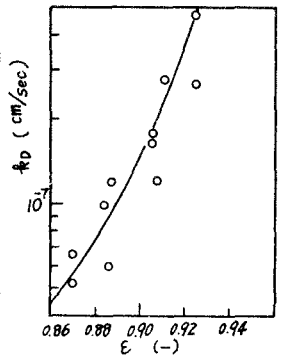


図-5 透水係数と空隙率の関係

3-3 氷の生成量

氷の生成に必要な水の供給量を求めるために、Neumann の解より、凍結温度別に、氷の生成量を算出した。単位面積あたりの氷の生長量を $\delta = n(t - t_0)$ とし、 n を次の伝熱式
$$\frac{\sqrt{\pi} k_i T_f}{\text{erf}(\frac{\sqrt{\pi} k_i t}{2\sqrt{\alpha_i}})} \left\{ e^{\frac{h_1}{k_i} \delta + \frac{h_2 \alpha_i t}{k_i^2}} \text{erfc} \left(\frac{n}{2\sqrt{\alpha_i}} + \frac{h_1 \sqrt{\alpha_i t}}{k_i} \right) \right\} - \frac{k_2 (T_{0i} - T_f) e^{-\frac{(n^2/4\alpha_i)}{\text{erfc}(\frac{n}{2\sqrt{\alpha_i}})}}}{\text{erfc}(\frac{n}{2\sqrt{\alpha_i}})} = \frac{\lambda \rho n}{2}$$
 から、左辺=右辺とした超越方程式の解として求め、(1)式に代入して δ を得た。ここに n : 定数 α_i : 氷の温度伝導率 $1.96 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{hr})$ α_2 : 水の温度伝導率 $5.0 \times 10^{-4} (\text{m}^2/\text{hr})$ k_i : 氷の熱伝導率 $1.7 (\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ k_2 : 水の熱伝導率 $0.5 (\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ h_1 : 熱伝達率 $11.5 (\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ λ : 凍結潜熱 $80 (\text{kcal}/\text{kg})$ t : 凍結時間 (hr) ρ : 密度 (kg/m^3) T_f , T_{0i} : 凍結界面、無限距離での温度変数である。(図-7)

3-4 結果 および 考察 — 結論にかえて —

上記の 3-2, 3-3 を用いて縞模様が形成されはじめる濃度を推定し得る。すなわち、実験から求める図-1 の C の値を図-7 の δ に入れ、曲線と接する点の接線の傾きから、 $\delta' (=d\delta/dt)$ を求め、図-4 により対応する E と δ' とが、また図-6 から含水率が与えられる。ところで図-4 で、氷を引き抜く driving force としての P は、本来なる化学ポテンシャル、自由エネルギーで表わすのが妥当であるが、実際にこれらの算定は困難である。そこで、Poiseuille の式を変形した $P = 8\eta L / k_d$ の氷の単位体積重量 (kg/cm^3) で k_d として図-5 の $E = 0.9$ に相当する値として 10^{-7} を、 L を縞の間隔から 0.05 cm として圧を概算すると、50%前後後となると考えられる。この P が氷を引く圧に相当する圧力と仮定して上記の操作を行なう。その結果、初期濃度 6% 程の汚泥では $\bar{u} = 0.2 \sim 0.3 \text{ cm/hr}$ (-10°C) の時、含水率 67~68% $\bar{u} = 0.3 \sim 0.4$ (-20°C) で 71~72%、 $\bar{u} = 0.5 \sim 0.6$ (-30°C) で 74~75% まで縞が形成されると思われる。また、濃度が 3% 程度では、それぞれの値より 2~3% 多目であった。

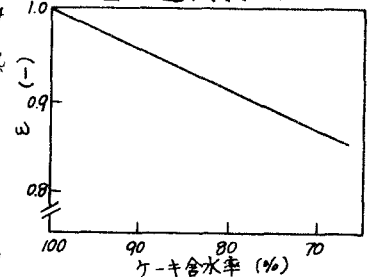


図-6 空隙率とケーキ含水率の関係

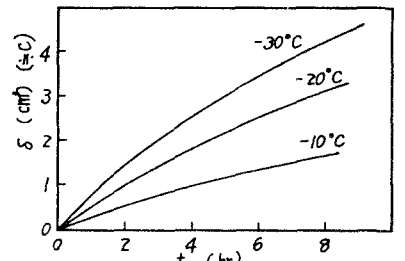


図-7 氷生成量と時間との関係

尚、融解後の脱水性すなわち抵抗やケーキ含水率にかかわる粗大粒子の形成と影響は機会と別に報告する。