

## 地盤凍結工法を対象とした土の凍結膨張

たか し つとむ おお らい たか ひろ  
高 志 勤\* 生 頼 孝 博\*\*  
やま もと ひで お  
山 本 英 夫\*\*\*

### 1. 緒 言

地盤凍結工法の需要増加や LNG 貯蔵用地下タンクの建設に伴って、わが国でも地盤を人工的に凍結する機会が多くなってきた。地盤凍結工法は地下水汚染のおそれはないが、凍結に伴う体積膨張というやっかいな問題を抱えている。水が凍結すると体積が約 9% 膨張する。したがって、土が凍結する場合間ゲキ水の移動がなければ、その土がもとから保持していた水の凍結膨張分だけが体積膨張となってあらわれることになる。しかしながら、ほとんどの土は凍結面またはその後方（低温側）で吸排水を伴いながら凍結するので、場合によっては非常に大きい凍結膨張を示すことがある。

また、一方地球の陸地面積の約 22% を占めるソ連、アラスカ、カナダなどの永久凍土地域では夏に融け、冬に凍結する活動層の自然凍上により、家屋や橋台その他の重要な構造物が破壊することもまれではないといわれている。

凍上現象はこのように寒冷地域の発展に大きな妨げとなっているので、主として第二次世界大戦後、数多くの国の多くの研究者によって、基礎研究はもちろん凍上防止または抑制対策まで広はんな研究が行なわれてきた。しかしながら、これらの研究のほとんどすべてが自然凍上をその対象としているために、これらをそのまま著者らが従事する地盤凍結工法に適用するにはかなりの無理があることがわかった。いま、地盤凍結工法における凍結膨張と自然凍上の相違の主なものを列挙するとつぎの三つとなる。

#### 1) 凍結中の拘束応力の相違

自然凍上における凍結中の拘束応力は、活動層の最大深度を 4 m としてもせいぜい  $0.8 \text{ kg/cm}^2$  程度であるが、人工地盤凍結では  $15 \text{ kg/cm}^2$  程度まではしばしば遭遇する。

#### 2) 間ゲキ水圧

自然凍上における凍結中の間ゲキ水圧は、これもせいぜい  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  程度であるが、人工地盤凍結では  $5 \text{ kg/cm}^2$  までは常識的に遭遇する。

#### 3) 凍結速度

自然凍上における凍結速度は  $0.3 \sim 2.5 \text{ mm/h}$  程度であるが、人工地盤凍結では  $0.2 \sim 50 \text{ mm/h}$  程度の広範囲にわたる凍結速度があらわれる。特に LNG 貯蔵用地下タンクでは  $0.04 \text{ mm/h}$  というようなきわめて小さい凍結速度における凍結膨張挙動の知識が必要であることがわかってきた。

著者らは凍結膨張に及ぼす上記三つの因子の影響を調べるために、土の凍結時における、これら三つの外的因子をそれぞれ独立に変化させ得る開放型（凍結中に未凍結土中の間ゲキ水の出入りが自由である）凍結膨張試験装置を開発し、実験を繰り返した結果、凍結膨張に対してそれぞれの因子の影響を実験式として明確な形に表わすことができた。本論文はこれらの実験式を導出した過程と、これらの式を用いて行なった土の凍結膨張挙動のさらに進んだ解析の結果を概説するのが目的である。

### 2. 土の熱的性質と凍結面の進行

土の凍結現象を解明するには熱的性質を知らなければならない。自然状態の土の組成、構造は複雑で熱的性質も広い範囲で変化しているので一般的に取り扱うことはむずかしい。地盤凍結工法や LNG 貯蔵用地下タンクで取り扱う土はほとんど地下水位以下であるので、本稿で取り扱う土はすべて土粒子間の空ゲキが水で満たされている飽和土と考えることにする。したがって、土粒子自身の熱的性質がわかれば水のそれはわかっているの、混合物の熱的性質も推定できることになる<sup>1)</sup>。土の熱的性質というのは熱伝導率、温度伝導率、比熱、凍結潜熱などであるが、氷の熱伝導率は水のその約 4 倍であるため凍結前後のそれらの値はかなり異なる。飽和土の熱伝導率についていえば、凍結前の概略値  $1 \sim 2 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  に対して凍結後のそれは  $2 \sim 3 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  となり、約 1.5 ~ 2 倍に増加する。なお、不飽和土については気体の存在がこれらの値を低下させることになる。また、現在ではこれらの値は比較的簡単に、しかも正確に実測できるようになった<sup>2), 3)</sup>。

土の熱的諸数値がわかると凍結面の進行が解析できる。冷却面が平板の場合<sup>4)</sup> や地盤凍結工法で用いる円管の場合<sup>5)</sup> に土の中を凍結面が進行する問題は多くの研究者によ

\* 理博 精研冷機（株）常務取締役  
\*\* 精研冷機（株）研究室長  
\*\*\* 精研冷機（株）研究員

No. 1015

って解析されており、地表面に頭を出した円筒形の LNG 貯蔵用地下タンクの場合の解析もなされている<sup>6)</sup>。しかしながら、これらすべての解では凍結面で土が最初から含有していた水だけが凍結するものとして熱伝導方程式を解き、凍結面での吸排水現象(間ゲキ水の移動)を考慮していない。これを考慮するならば、吸水量が多くなるほど処理すべき潜熱が増加し、凍結面の進行は次第に遅くなる。このような場合の最も簡単なものとして、凍結面に吸排水を伴う一次元定速度凍結の厳密解が得られており<sup>7)</sup>、その結果を用いて一定の凍結速度を得るための冷却条件を導き出すことができた。本論文の凍結膨張実験の大部分はこの解析の結果を用いて凍結速度一定のもとに行なったものである。また、本論文で凍結速度  $U$  というのは凍結前線が未凍結土中を進行する速度で、凍土厚みが増加する速度  $U_f$  と混同しないよう注意しなければならない。

2. 凍結膨張率と拘束圧<sup>8)</sup>

いま、ある時間内に容積  $V$  の未凍結土が凍結し、そのときの凍結膨張量(容積増加量)が  $\Delta V$  であるとする

$$\xi = \frac{\Delta V}{V} \dots\dots\dots(1)$$

をそのときの凍結膨張率と定義する。自然凍上の観測では  $\xi$  が 100% を越えることはまれではないが、地盤凍結工法においては 5% を越えることすらまれである。この原因の主たるものは上載荷重による凍上量の抑制である。凍結中の速度条件が同一であるならば、 $\xi$  と凍結面に直角方向に作用する拘束圧  $\sigma$  とはほぼ逆比例関係にあり、次式で表わされることがわかった。

$$\xi = \xi_0 + \frac{c}{\sigma} \quad (\xi_0, c: \text{定数}) \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $\xi_0$  は二次膨張率と呼ばれ、凍結面後方の凍土内で不凍水が温度降下に伴って凍結するために発生する膨張率で、対象土の固有値ではあるが凍土の平均温度の関数で

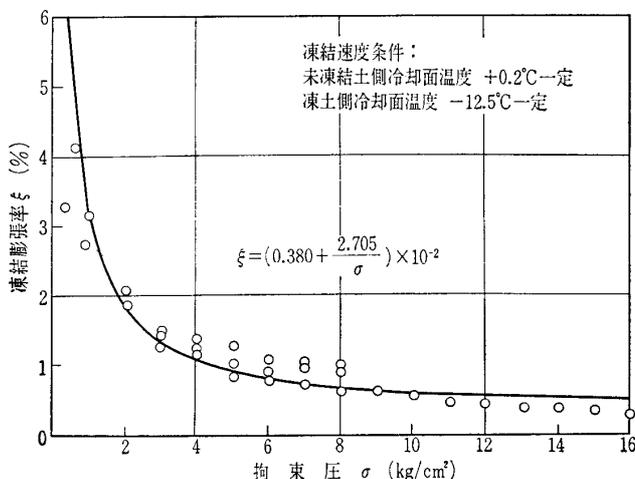


図-1 凍結試験による  $\xi \sim \sigma$  曲線の決定 (根岸固結シルトの例)

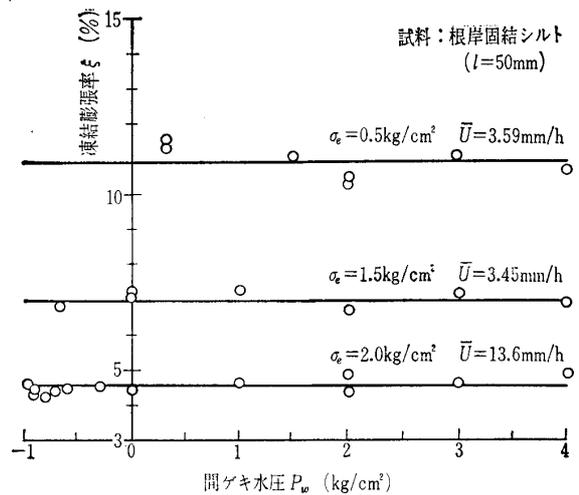


図-2 凍結膨張率と間ゲキ水圧の関係

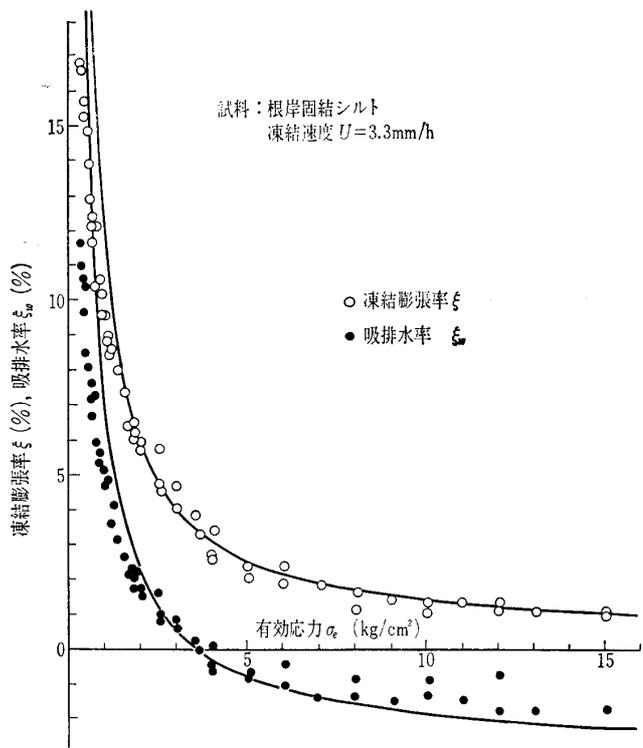


図-3 凍結膨張率  $\xi$ 、吸排水率  $\xi_w$  と有効応力  $\sigma_e$  の関係

ある。 $\xi_0$  の値は細粒成分の多い土ほど大きくなり、凍土温度が低くなるほど大きくなる傾向にある。 $c/\sigma$  は土がもともと持っていたものおよび凍結に伴って吸排水される自由水が凍結することに起因する膨張率であるが、 $c$  は凍結速度条件によって決まる定数であるから、いいかえると凍結速度の関数になる。図-1 は凍結速度条件を一定にして、拘束圧を変えて行なった実験結果と(2)式を比較した例である。なお、図-1 の一連の実験では未凍結土内の間ゲキ水圧は大気圧に等しくなるようにした。

4. 凍結膨張率と有効応力<sup>9)</sup>(間ゲキ水圧の影響)

凍結中に凍結面に直角方向に作用する応力  $\sigma$  は間ゲキ水圧  $P_w$  と有効応力  $\sigma_e$  の和で表わされる。土質力学における

土の力学的応答が有効応力によって支配されることはよく知られている。そこで凍結膨張現象においても同じことがいえるかどうかを調べるために $\xi$ と有効応力 $\sigma_e$ に関する実験的解析がなされ、凍結中の速度条件が同一であるならば、 $\xi$ は次式で表わされることが明らかになった。

$$\xi = \xi_0 + \frac{c}{\sigma_e} \dots\dots\dots(3)$$

したがって、凍結膨張率は間ゲキ水圧に無関係に有効応力のみ依存し、(2)式は(3)式のように修正される。図-2は定速度凍結のもとで $\sigma_e$ が一定となるように全拘束圧 $\sigma_T$ と間ゲキ水圧 $F_w$ の組合せを種々変化させ、 $\xi$ に対する影響を調べた実験結果を示したものである。間ゲキ水圧が変化しても凍結面に作用する $\sigma_e$ が同じならば $\xi$ は一定になることがわかる。特に $\sigma_e = 2 \text{ kg/cm}^2$ のときにみられるように、 $F_w$ を大気圧以下に減圧しても $\xi$ はほとんど変化しない。つぎに、図-3は凍結速度 $U \approx 3.3 \text{ mm/h}$ で $\sigma_e$ を $0.4 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ の範囲内で変化させて $\xi$ および吸排水率 $\xi_w$ （凍結開始前の試料容積に対する吸排水容積の割合）を調べた実験結果<sup>10)</sup>である。(3)式とよく適合していることがわかる。縦軸の $\xi_w$ で負の部分( $\sigma_e > 3.5 \text{ kg/cm}^2$ )は排水しながら凍結膨張をしていることを示している。 $\sigma_e$ が $1 \text{ kg/cm}^2$ より小さくなると $\xi$ 、 $\xi_w$ ともに曲線より外れて(3)式より小さな値を示すようになるが、これは第8項に述べるように未凍結土中の動水抵抗に相当する分だけ有効応力が増加するためである。

5. 凍結膨張率と凍結速度<sup>10)</sup>

凍結速度 $U$ が小さくなるほど凍結膨張率 $\xi$ が大きくなる

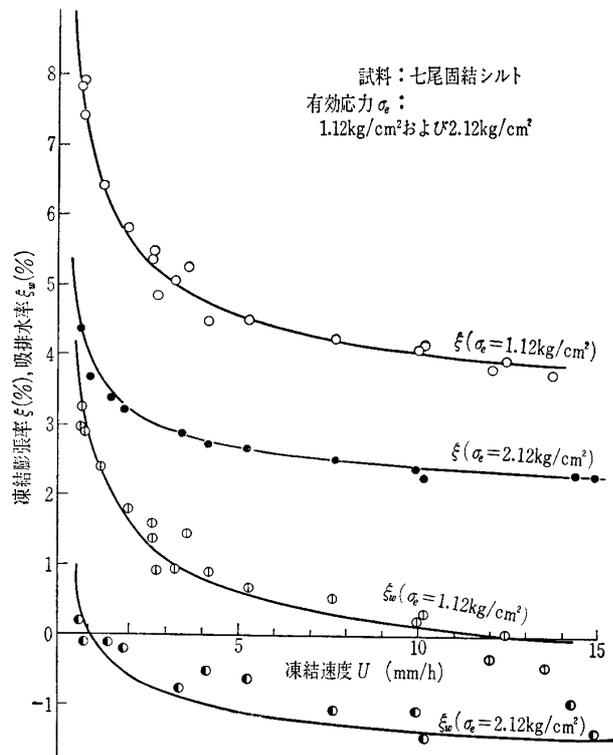


図-4 凍結膨張率 $\xi$ 、吸排水率 $\xi_w$ と凍結速度 $U$ の関係

ことはすでに1929年にテーバー (Taber)<sup>11),12)</sup> によって見つけられた。凍結面に吸排水を伴う場合に $U$ を一定に制御することは困難であるが、著者らは文献7の結果を用いて冷却面温度をプログラムコントロールして、 $U$ を一定にする方法を見だし数多くの実験を行なった結果、 $\xi$ と $U$ の間にはつぎの関係があることを見いだした。

$$\xi = A + B \frac{1}{\sqrt{U}} \quad (A, B: \text{定数}) \dots\dots\dots(4)$$

ここに $A, B$ は $\sigma_e$ が一定のときは正の定数であり、いいかえると $A, B$ は $\sigma_e$ だけの関数である。図-4は $\sigma_e = 1.12 \text{ kg/cm}^2, 2.12 \text{ kg/cm}^2$ のもとで $\xi$ と $U$ の関係を調べた実験例である。 $U$ が小さくなるにつれて $\xi$ が顕著に増加することがよくわかる。なお、吸排水率 $\xi_w$ も $\xi$ とほぼ同じ傾向を示しているが、 $U$ が大きいときは排水しながら凍結し、 $U$ が小さくなると吸水しながら凍結することがわかる。(4)式の妥当性をみるために、これら実験結果を縦軸に $\xi$ 、横軸に $1/\sqrt{U}$ をとって示したものが図-5であるが、非常によく直線上に載っていることがわかる。

さて、 $\xi$ が $\sigma_e$ および $U$ に関して普遍的な法則性をもたなければ(3)式と(4)式は一つの表式にまとめられなければならない。いま、二次膨張率 $\xi_0$ は $\sigma_e, U$ に無関係な定数と考えることができるから、 $\xi$ の $\sigma_e, U$ 依存性を示すものとしてつぎの実験式が得られる。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) \dots\dots\dots(5)$$

ここに $\xi_0, \sigma_0, U_0$ は土の固有定数で、これらの値が大きいほど凍結膨張しやすいということになる。図-6は実験結果と(5)式がよく一致することを示すために縦軸に $(\xi - \xi_0)\sigma_e$ 、横軸に $1/\sqrt{U}$ をとったものである。2種類の試料についての実験結果であるが、それぞれ見事に直線上に載っていることがわかる。(5)式は土が一定の $\sigma_e$ および $U$ のもとに、未凍結土内の動水抵抗がない状態(完全開放型)で凍結膨張するときの $\xi$ を表わす式として重要なもの

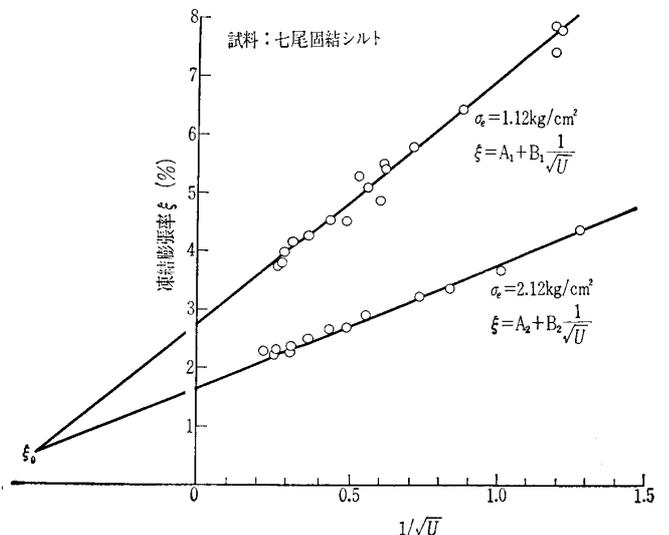


図-5  $\xi$ と $1/\sqrt{U}$ の関係

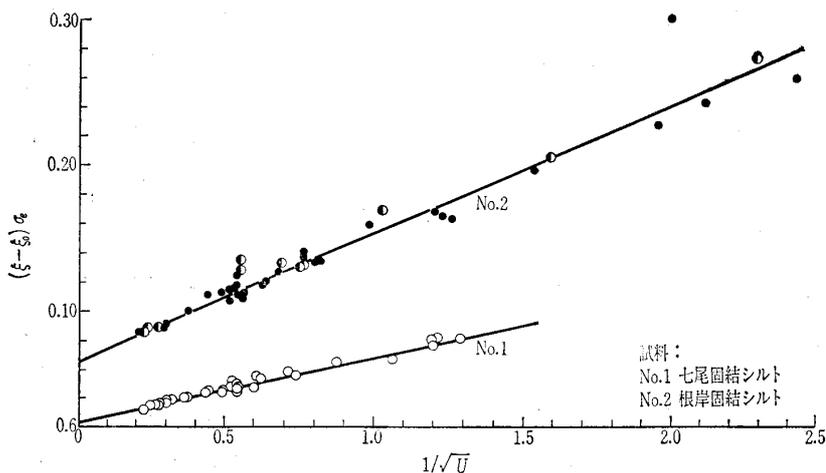


図-6  $(\xi - \xi_0)\sigma_e$  と  $1/\sqrt{U}$  の関係

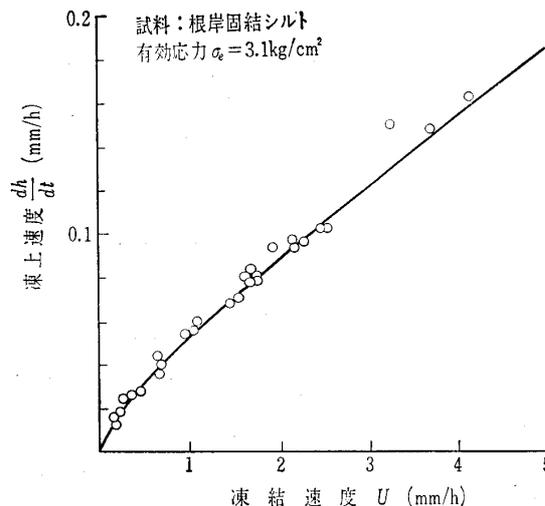


図-8 凍上速度と凍結速度の関係

で、著者らの凍結膨張に関する一連の研究で得られた最大の成果である。

6. 吸排水率と凍結速度<sup>10)</sup>

図-3、図-4に示すように  $\sigma_e$ 、 $U$  が大きいときは凍結面から水を吐き出しながら凍結し、その反対のときは水を吸い込みながら凍結している。本来、 $\xi$  と  $\xi_w$  との間には保存法則よりつぎの関係式がある。

$$\xi = \xi_0 (\text{二次膨張率}) + n_f \Gamma (\text{自由水凍結膨張率}) + (1 + \Gamma) \xi_w (\text{吸排水凍結膨張率}) \dots (6)$$

ここに  $\Gamma$  は間ゲキ水が凍結するときの体積膨張率 (= 0.09),  $n_f$  は凍結面における自由水容積含水率である。したがって、(5)式と(6)式より次式が得られる。

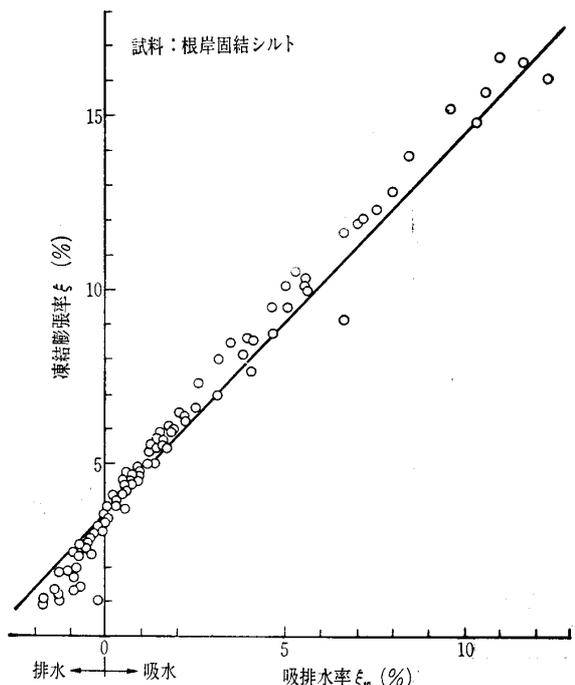


図-7 凍結膨張率  $\xi$  と吸排水率  $\xi_w$  の関係

$$\xi_w = \frac{1}{1 + \Gamma} \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) - n_f \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \dots (7)$$

図-3、図-4の  $\xi_w$  を示す実線は(7)式によって計算したものであるが実験と良好な一致を示している。図-7は  $\xi$  と  $\xi_w$  の関係を示した実験例である。 $\xi$  を縦軸に、 $\xi_w$  を横軸にとった実験結果は  $(1 + \Gamma)$  のコウ配をもつ直線上に乗っていることがわかる。もちろん(6)式から明らかなように  $\xi_w = 0$  のときは  $\xi = \xi_0 + n_f \Gamma$  となるが、この試料の計算値は3.431%で図の値とよく一致している。

7. (5), (7)式よりの演繹事項<sup>10)</sup>

まず、凍上速度および吸排水速度について考えてみる。いま、 $dt$  時間に  $dx$  だけ凍結が進行し、 $dw$  の吸水の結果  $dh$  の凍上(一次元の凍結膨張)が生じたとする、凍上速度  $dh/dt$  は次式で表わされる。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dh}{dx} U = \xi U \dots (8)$$

したがって、(5)式と(8)式より凍上速度と凍結速度の関係を示す次式が得られる。

$$\frac{dh}{dt} = \left(\xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma_e}\right) U + \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \sqrt{U_0 U} \dots (9)$$

図-8は  $\sigma_e$  が一定の場合の実験結果と(9)式から計算された結果(実線)とを比較した例であるが、両者がよく一致していることがわかる。また、

$$\xi_w = \frac{dw}{dx} = \frac{dw}{dt} \frac{dt}{dx} \dots (10)$$

と表わされるから、(7)式を用いて吸排水速度  $dw/dt$  は

$$\frac{dw}{dt} = \frac{U}{1 + \Gamma} \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) - n_f \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} U \dots (11)$$

となる。この式の  $n_f$  は厳密には  $\sigma_e$  の関数であるが、一般的傾向を知るために  $n_f =$  一定と仮定して、種々の  $\sigma_e$  について  $dw/dt$  の  $U$  に対する依存性を図示すると図-9を得る。実験値との一致がかなり良好であることがわかる。

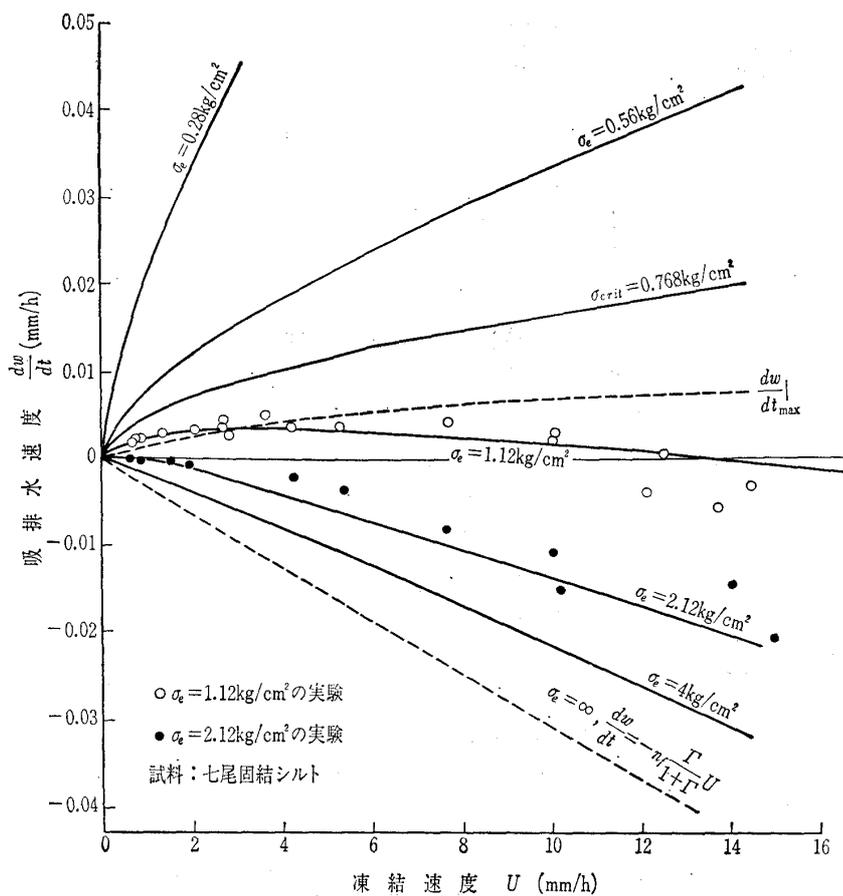


図-9 吸排水速度と凍結速度の関係

$\sigma_e$ がある程度小さいとき  $dw/dt$  は  $U$  の増加とともに単調増加するが、 $\sigma_e$  が大きくなると初めは  $U$  の増加とともに増大し最大値に達した後減少し、 $dw/dt$  が最大になる  $U$  が存在することがわかる。このときの凍結速度を  $U_1$  とすると、 $U_1$  は(1)式を  $U$  について微分したものを0とおいて、 $U$  について解くことによって求められる。

$$\sqrt{U_1} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{U_0 \sigma_0}}{n_f \Gamma \sigma_e - \sigma_0} \quad (12)$$

ここで  $\sigma_e \leq \sigma_0 / n_f \Gamma$  のときは左辺は負となり物理的矛盾となるが、これは  $U_1$  が存在せず、 $dw/dt$  が  $U$  の増大とともに無限に増大することを示している。したがって、 $\sigma_e \leq \sigma_0 / n_f \Gamma$  のときは  $U$ 、 $\sigma_e$  に無関係に吸水しながら凍結することになる。このような応力を吸排水限界有効応力と呼び、計算値は図-9に  $\sigma_{crit}$  で示した。

つぎに、吸水と排水の境界、すなわち  $dw/dt=0$  となる凍結速度  $U_c$  (吸排水限界凍結速度と呼ぶ) について考えてみる。 $U_c$  は(1)式の右辺を0と等置して求められ、次式で表わされる。

$$\sqrt{U_c} = \frac{\sqrt{U_0 \sigma_0}}{n_f \Gamma \sigma_e - \sigma_0} \quad (13)$$

(12)式と(13)式から  $U_c = 4U_1$  であることがわかる。図-10は(13)式の計算結果と実験結果を比較した例である。各点の数值は吸排水が0となるように  $U_c$ 、 $\sigma_e$  の組合せのもとに

実験を行なったときの値であるが、計算値 3.851% (試料 No.1), 3.431% (試料 No.2) とほぼ一致している。

### 8. 凍結膨張実験における未凍結土内の動水抵抗の影響<sup>13)</sup> (硬質粘土およびシルトの場合)

(5)式、(7)式を実際の地盤の凍結現象にそのまま適用するには問題がある。この場合は、地下水が自由に供給される層と凍結面の間にある未凍結層が凍結面への水の移動に対して何がしかの抵抗をもつからである。第4項で示したように有効応力が小さいほどこの計算式と実験とのずれは大きくなる。図-11は図-3と同じ実験結果を横軸に  $1/\sigma_e$  をとった図に書き換えたものである。点線で示した(5)式、(7)式に対して  $\sigma_e$  が小さいほどずれが大きくなるのがよくわかる。理論解析の結果、この原因は間ゲキ水の動水抵抗に起因する凍結面付近の有効応力の増加によることが明らかになった。いま、凍結面に吸い寄せられる未凍結土内の水流速度はダルシー(Darcy)の法則によりつぎのようになる。

$$\frac{dw}{dt} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{dP}{dx} \quad (14)$$

ここに  $k$  は透水係数、 $\gamma_w$  は間ゲキ水の単位容積重量、 $dP/dx$  は間ゲキ水圧コウ配である。(1)式と(14)式から

$$\sigma_e = \sigma_T - P \quad (\sigma_T: \text{実験中の全圧}) \quad (15)$$

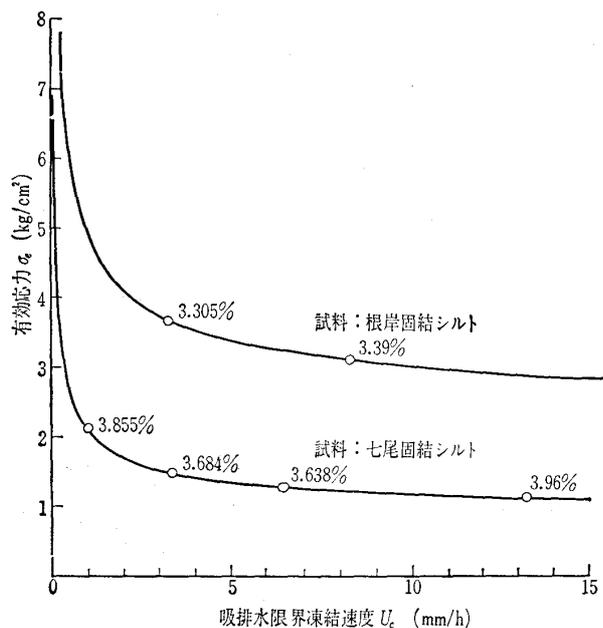


図-10 有効応力  $\sigma_e$  と吸排水限界凍結速度  $U_c$  の関係

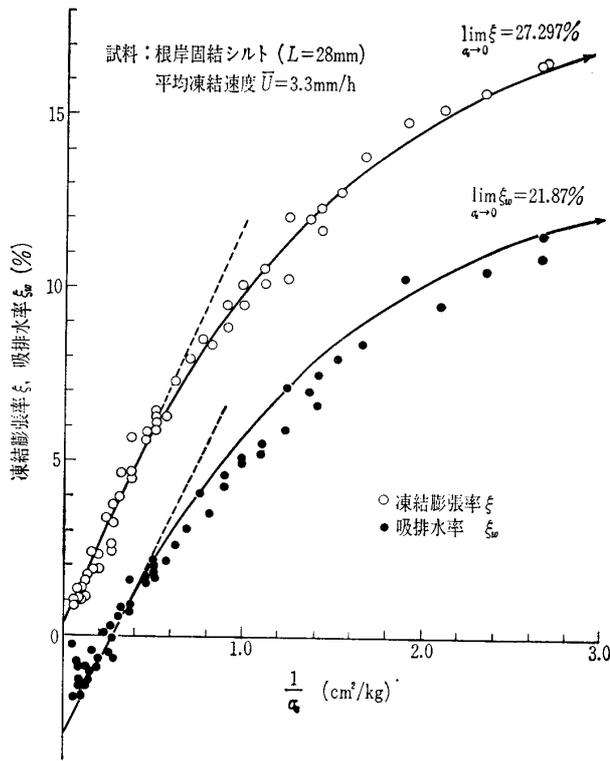


図-11 凍結膨張率  $\xi$ , 吸排水率  $\xi_w$  と  $\frac{1}{\sigma_e}$  の関係

の関係を考慮すると、間ゲキ水圧の経時変化が求まる。したがって、(14)式を凍結時間について積分することにより吸水量が求まるので、 $\xi$  および  $\xi_w$  を計算することができる。図-11に示した実線は上記の方法によって計算した結果であるが、見事に実験と一致していることがわかる。未凍結土内に動水抵抗がある場合は、拘束圧  $\sigma_r$  が0であっても凍結面で生じる負の間ゲキ水圧に相当する有効応力が発生し、そのため $\xi$ ,  $\xi_w$  は無限大とならず有限にとどまることになる。なお、これまでに述べた実験に用いた試料はすべて先行応力の大きいもので、間ゲキ水圧の低下に起因する有効応力の増加によって生ずる容積変化は無視できる程度である。

### 9. 無限の広がりをもつ軟弱地盤における凍結面前方の間ゲキ水圧と脱水圧密<sup>14)</sup>

凍結面近くに地下水を自由に供給しうる層が全く存在しない場合には、未凍結土内の動水抵抗の影響は前項の場合よりさらに大きくなる。地盤凍結工法の対象土である軟弱地盤では細粒成分が多く、必ず吸水型の凍結を示すので、凍結面付近に発生する間ゲキ水圧の低下によって有効応力が増大し、未凍結土は脱水圧密を受ける。もちろん凍結面での有効応力の増加により $\xi$ も小さくなる。図-12は均質な飽和土中の一次元定速度凍結のときに考えられる凍結前線付近の模式図である。このような未凍結土内の間ゲキ水圧  $P$  の分布は著者らによって、 $U$  と同じ速度で動く移動座標系  $(\zeta, t)$  からみて現象が定常化した場合 ( $\partial P/\partial t = 0$ ) の厳密解が得られ、また現象が定常化するまでの遷移時間内では比較的信頼度の高い近似解が得られた。解は間ゲキ水圧を支配するものとしてテルツァーギ (Terzaghi) の圧密微分方程式を未凍結土側の半無限空間に適用し、凍結面における境界条件に(11)式を用いて得られ、その結果、未凍結土内の  $P$  の分布は定常解の場合、次式で表わされる。

$$P = \frac{(1+\Gamma)m_v\sigma_e + n_f\Gamma - \sqrt{\{(1+\Gamma)m_v\sigma_e - n_f\Gamma\}^2 + 4(1+\Gamma)m_v\sigma_e\left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right)}}{2(1+\Gamma)m_v} e^{-\frac{\Gamma}{c_v} \zeta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに  $m_v$  は体積圧縮係数、 $c_v$  は圧密係数である。(10)式で  $\zeta = 0$  とおけば凍結面における  $P$  が計算できる。図-13は軟弱土ではないが比較的物理定数のそろっている3種類の土について数値計算を行ない、凍結面における  $P$  と  $U$  との関係を示したものである。凍結面ではかなり大きい間ゲキ水圧の低下が発生し、特に  $U$  の減少とともに圧力降下が顕著になることがわかる。このような凍結面前方における間ゲキ水圧の予想外の低下は、逆に有効応力の増加となり、したがって未凍結土は凍結する前に脱水圧密を受けることになる。かくて脱水した未凍結土はやがてそのまま凍

土内に取り込まれ、その間にアイスレンズが介在することになる。さて、このような凍土が解凍すると、上記アイスレンズが水路となってたちまち水が抜け去るために、もとの容積より小さくなってしまふ。これが軟弱地盤の解凍沈下およびヘドロの凍結解凍脱水の定性的説明である。なお、計算に用いた土は程度からいうと No.1 → No.2 → No.3 の順で軟弱土に近づいている。

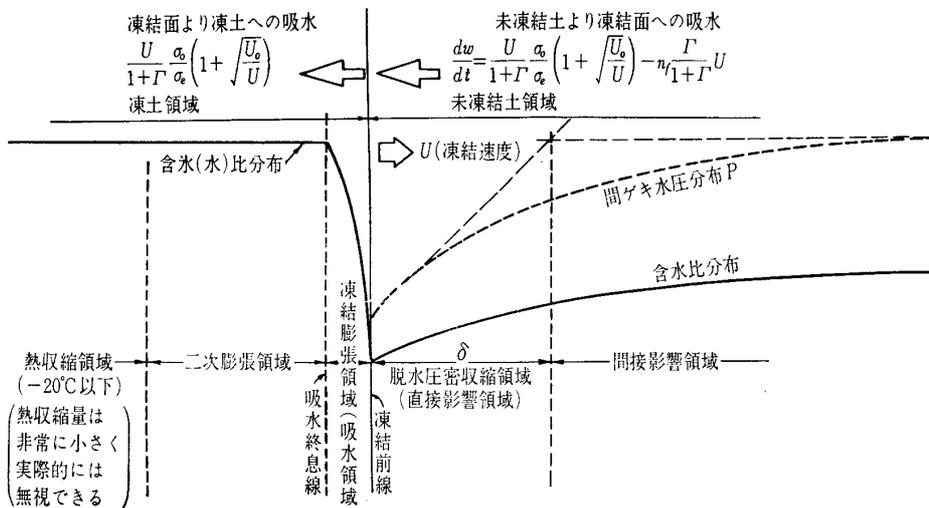


図-12 凍結前線付近模式図 (一次元定速度凍結)

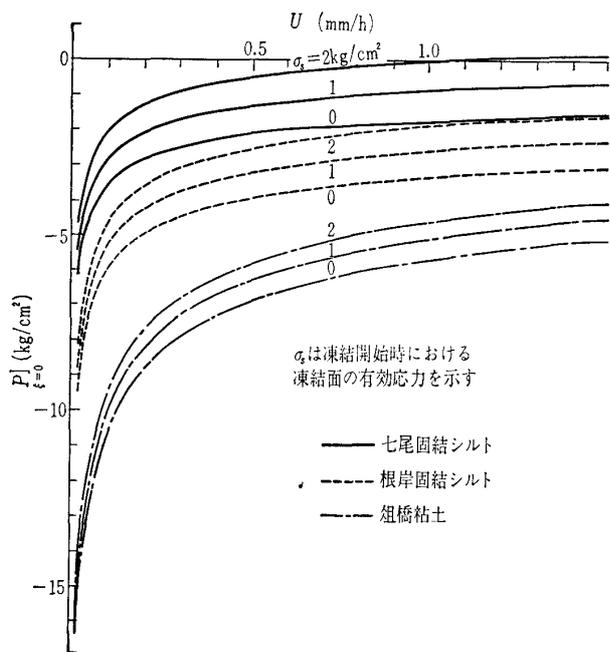


図-13  $P/ \sim U$  曲線  $\zeta=0$

また、図-12に示すように脱水圧密領域  $\delta$  を、凍結面における間ゲキ水圧分布曲線の接線と無限遠における間ゲキ水圧の接線との交点と、凍結面との距離と定義すると、 $\delta$  は次式で表わされる。

$$\delta = \frac{c_v}{U} \dots \dots \dots (17)$$

$\delta$  は  $\sigma_e$  に依存しない。図-13に用いたと同じ試料で数値計算をすると、自然凍結および地盤凍結工法における凍結速度範囲では  $\delta$  は大きくても 1.5m 程度となり、LNG 貯蔵用地下タンクに現われる凍結速度範囲では 10m 以上になる。なお、現象が定常状態に到達するまでの遷移時間（非定常期間）は  $c_v$  に比例し  $U^2$  に反比例することがわかり、数値計算結果は前者の速度範囲で半年～1年、後者の速度範囲で 50～100 年のオーダーとなる。

10. 未凍結土側から観測した凍結膨張率<sup>14)</sup>

図-12に示すように凍結面を境にして凍土側は膨張、未凍土側は収縮となり、未凍結土側からはこれらの差し引きされたものが観測される。したがって、未凍結土側の変位の測定により得られる、現実に現われる凍結膨張率は、凍結面からの距離の関数で表わされる。このような測定より得られる凍結膨張率は凍結面で最大になり、無限遠点で最小になることから、その範囲はつぎのようになる。

$$\xi_0 + n_f \Gamma < \text{現実に現われる凍結膨張率}$$

$$< \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma_s - P/} \left( 1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \dots \dots \dots (18)$$

ここに  $P/$  は(16)式で  $\zeta=0$  とおいた値である。地盤凍結工法の実施においては初期有効応力  $\sigma_s$  は 1 kg/cm<sup>2</sup> 程度が

圧倒的に多く、 $P/$  の絶対値は  $\sigma_s$  の値以上の場合が多い。  
 一般に、室内実験を行なう場合には(18)式の  $\sigma_s$ ,  $U$  は現場の  $\sigma_s$ ,  $U$  と一致させて行なうので、大ざっぱにいうと現実に現われる  $\xi$  は現場の応力および凍結速度に合わせて行なった室内実験の  $\xi$  の 1/2 以下になる。

11. 凍結膨張抑制法

以上述べた実験理論両面からの研究によって、地盤凍結工法の実施にあたって凍結膨張量の予測がほぼ可能になり、その対策もいくつかあることがわかってきた。しかしながら、現在のところ凍結膨張そのものをゼロにする方法はない。これまでに述べたように、凍結膨張率を大きくする原因は凍結面での吸水である。そこで真空ポンプで凍結面付近の水分を取り除く方法が実施され<sup>15)</sup>、その効果が確認された。しかしながら、この方法による凍結膨張の抑制効果は無処理の場合の 2/3 程度しか期待できない。また、未凍結土の動水抵抗が凍結膨張を抑制することから、土の透水係数を小さくすることが考えられるが、一般には非常に困難である。そこで著者らは比較的容易に動水抵抗を増加させる方法として、間ゲキ水の粘性の増加を思いつき、現在その効果を確認するいくつかの実験を行ないつつある<sup>16)</sup>。図-14は移動する間ゲキ水の粘度を変化させ、 $\xi$  に対する影響を調べた結果である。溶液粘度  $\eta$  が増加すると  $\xi$  は顕著に減少し、特に  $\eta=10$  cps までは抑制効果が大きいことがわかる。なお、凍結速度が大きい場合は吸水量が少ないので間ゲキ水の粘度の影響は少なく、逆に凍結速度が小さい場合は粘度の影響が大きいことも実験により確認した。実際の地盤に適用するためには粘性溶液の地盤中への注入方法、長期間の粘性の維持、公害性の検討などの問題も含めさらに基礎的研究が必要であるが、これまで凍結膨張抑制剤が全くなかっただけにその将来に大きな期待がかけられる。

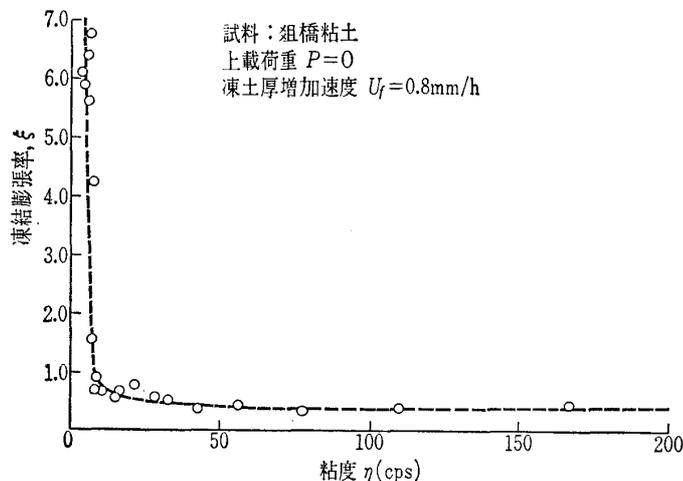


図-14 凍結膨張率  $\xi$  と粘度  $\eta$  の関係

## 12. あとがき

本論文では地盤凍結工法に付随して生じる凍結膨張の法則性を求めて著者らが行った研究成果を概説したが、筆力の不足で十分な説明ができなかった。これらの点については引用文献を参考にして判読願いたい。また実験や数値計算に用いた土の諸定数についても文献を参考にされたい。

本稿で述べた法則性は明確な形であり、凍結膨張の諸現象をおおむね矛盾なく説明できるが、これらのうち特に理論解析では、問題の単純化のためにかなり大たんなる仮定を行なったものがある。したがって、これらの結果を実際に適用するにあたっては仮定条件の十分な吟味検討が必要であらう。

## 引用文献

- 1) 松本・大久保：土の伝熱特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第257号，1977
- 2) 片山・服部・池田・三井：湿った土壌の凍結前後における熱物性値測定法，冷凍，第44巻第504号，1969
- 3) 福田・先川：凍土の熱伝導率の測定，低温科学物理篇，第33輯，1975

- 4) Stefan: Ann. Phys. u. Chem. (Wiedemann) N. F., 42, 269—86, 1891
- 5) 高志・松浦・谷口：土壌凍結工法〔II〕，冷凍，第36巻第410号，1961
- 6) 高志：液化低温ガス貯蔵用地下タンク周囲の地盤の凍結について〔II〕，冷凍，第47巻第536号，1972
- 7) 高志・益田：凍結面に吸排水を伴う定常密解とその応用，雪氷，第37巻第1号，1975
- 8) 高志・益田：拘束圧下における土の凍上量と間隙水移動について，雪氷，第33巻3号，1971
- 9) 高志・益田：間隙水圧を加えた土の凍上実験，昭和47年度日本雪氷学会講演予稿集
- 10) 高志・益田・山本：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度，有効応力の影響に関する研究，雪氷，第36巻2号，1974
- 11) Taber, S: Frost heaving, J. Geol., 37, 1929.
- 12) Taber, S: The mechanics of frost heaving, J. Geol., 38, 1930
- 13) 高志・益田・山本：凍上に及ぼす未凍結土内の動水抵抗の影響，雪氷，第38巻1号，1976
- 14) 高志・生頼・山本：一次元定速度凍結における凍結面前方の間隙水圧と脱水圧密について（現在雪氷に投稿中）
- 15) 村田・浅間：地下鉄6号線神田川河底部の凍結工法，土木技術，27—8，1972
- 16) 高志・生頼・山本：凍上に及ぼす間隙水の粘性の影響，第12回土質工学研究発表会講演集，1977

(原稿受理 1977. 4. 6)

土質工学会発行

## 土質基礎工学ライブラリー

シリーズ既刊 13巻

A5判 布クロス製本

送料1冊 240円

	ページ数	会員特価	定価
1 軟弱地盤の調査・設計・施工法	310ページ	3,200円	4,200円
2 軟弱地盤における工事実施例	225ページ	1,700円	2,200円
3 掘削のポイント(第1回改訂版)	399ページ	3,800円	4,900円
4 土質調査試験結果の解釈と適用例	306ページ	2,300円	3,000円
5 建設工事における土質工学の実用例	376ページ	2,800円	3,600円
6 鋼グイ(鋼グイ研究委員会報告)	376ページ	2,800円	3,600円
7 土と基礎実用数式・図表の解説	443ページ	3,300円	4,300円
8 掘削にともなう公害とその対策	305ページ	2,200円	2,900円
9 土と構造物の動的相互作用	567ページ	4,200円	5,500円
10 日本の特異土	356ページ	3,200円	4,200円
11 土留め構造物の設計法	360ページ	3,300円	4,300円
12 切土ノリ面	395ページ	4,000円	5,200円
13 軟弱地盤における工事実施例(その2)	360ページ	4,600円	5,900円

発売：(社)土質工学会 ☎03-502-6256~9

〒105 東京都港区西新橋1-13-5 東亜別館