

凍結膨張が未凍結領域におよぼす影響の一軽減法

INFLUENCE REDUCTION OF FROST EXPANSION IN UNFROZEN SOIL ZONE AROUND ARTIFICIAL FROZEN SOIL

榎戸 源 則*・山 田 正 男**

By Motonori ENOKIDO and Masao YAMADA

1. ま え が き

土が凍結するとき、その土の粒度、組織、密度などは、土の毛管作用・透水性・保水性などの点で凍上性を左右することになるが、特に、粒径 20μ 以下の微粒子を含む場合には、大なり小なり膨張現象を伴うことは、自然凍上として、古くから知られている事実である¹⁾。

この凍結膨張現象は、地盤を人工的に凍結して地下構造物を建設する地盤凍結工法の大きな問題で、凍結膨張が周囲におよぼす影響の予測と対策は、きわめて重要である。このような問題の解決策は、それぞれの現場の与条件を充分に考慮して実施されてきた。たとえば、鉄道との立体交差部における地盤内凍結の場合は、地表面の上方変位がレールに影響しないように、レール下の土をすきとって工事桁を架設し、すきとり面が隆起しても、その影響が桁におよばないようにして、桁上に列車を走行させたこと²⁾。また、凍土で囲まれる中に未凍土が残る状態で凍結が進行するような地下鉄構築の場合には、密閉型凍結となるので、間隙水が存在するかぎり、冷却時間の経過につれて未凍土の変位が許されなくなり、大きな凍結膨張圧が発生して、周囲の凍土が損傷するという危険が考えられる。したがって、凍結管の冷却順序を考慮しながら、外周凍土の連結直後から、あらかじめ未凍土内に埋設されているストレーナーパイプを利用して、真空引きで間隙水を排出したこと³⁾。さらには、凍結成長を加熱管で制御したこと⁴⁾などがあげられる。

一方、燃焼排気公害のもっとも少ないといわれる天然ガスを液化してわが国に運び、発電用燃料・都市ガスなどに用いることは、すでに1969年から開始されているが、この場合、受入れ基地に -162°C という液化天然ガス(LNG)を大量に貯蔵する地上二重殻金属性タンク

が建設されてきた。しかし、万一の事故の際の被害縮小、地域住民におよぼす心理的威圧感の除去などのため、地上タンクよりもむしろ地下タンクが脚光をあびはじめた。わが国では、地下タンクは1970年末から東京ガス根岸工場内で稼働しはじめ、その後も引続いて建設されている⁵⁾。

ところで、タンクを地下に入れると、タンク周囲地盤がある程度凍結することは避けられないので⁶⁾、時間経過に伴いタンクおよびタンク周辺構造物などが凍結膨張の影響をうける。

凍結膨張対策として、タンクの稼働期間中における未凍結地盤内の応力・変位の増加分を少なくするために、地下タンク建設時の掘削前に、その周囲の地盤を人工凍結する方法が提案されている⁷⁾。この方法は、予備凍結法といわれ、凍土を土留壁として掘削・構築を行うので、先行して発生する応力は、掘削時に解放される。したがって、LNG貯蔵後の凍結膨張圧(以下、簡単に膨張圧という)、膨張変位の経時増加は緩慢になるので、未凍結地盤内の応力・変位はある程度低減される^{6),7)}。

一方、加熱管による凍結成長の制御は、原理が簡単で確実な対策の一つと考えられるが、タンク稼働期間中(たとえば、25~30年)の維持管理が必要となる。

そこで、維持費をほとんどかけずに、未凍結地盤内の応力・変位を制御する目的で、凍結膨張による未凍結地盤の変位が自動的に吸収される膨張変位解放孔をタンク周囲の未凍結地盤内に設置する方法を提案した⁸⁾。この方法は、土質、タンク寸法などを考慮して計画されるもので、他の機械的手段よりもはるかに簡単である。また、古くから実施されている地盤凍結の現場にも用いられるものである。

本文は、第10、12回土質工学研究発表会、土木学会関東支部第4回年次研究発表会などで、すでに発表した膨張変位解放孔による凍結膨張対策に、補足説明、実験資料、考察などを追加し、とくに、模型実験と実物実験

* 正会員 東京瓦斯(株)技術企画室課長

** 正会員 清水建設(株)土木技術部課長

に重点をおいてまとめたものである。模型実験では本対策における機能の実験的証明、および諸計算式の妥当性の検討を試み、実物実験では長期計測による本対策の機能を把握するとともに、実用的効果も考察している。

ここに、実物実験とは、1970年末から稼働開始となったわが国最初の地下タンク周囲地盤に設置した膨張変位解放孔の孔縁と孔周辺地盤の挙動に関するものである。

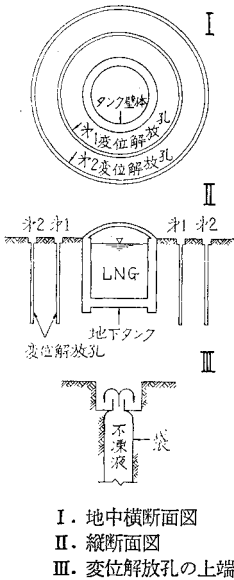
2. 膨張変位解放孔の機構と機能⁸⁾

図一は提案する地下タンク周囲地盤の凍結膨張対策の概要を示す。図示のように、タンク周囲地盤にタンク底部よりも深く、タンク壁体と同心円環状の孔を掘削し、この孔内には、柔軟で水密性の袋に不凍液を充填したものを設置して、この袋内の液圧で孔壁を安定させる。

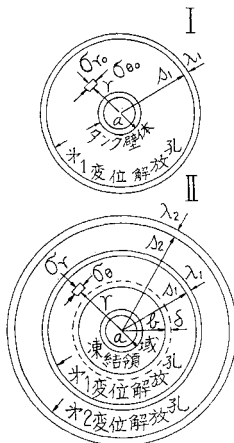
LNG貯蔵後、タンク周囲地盤に凍結膨張が発生すると、そのすぐ外側の未凍結地盤内に変位が生じる。この変位によって、孔縁が押圧された分だけの不凍液が袋の上部から溢れだし、この溢れ分は地表部の場内排水管内流入する。このように、未凍結地盤内の変位が、自動的に吸収されると同時に、凍結膨張に対する拘束条件が緩和されることが、膨張変位解放孔の機能である。

上記のような挙動によって、凍結領域の成長に伴い、膨張変位解放孔の幅は小さくなるとともに、膨張変位解放孔が設置されない場合と比較して、膨張圧の経時上昇も著しく小さくなるものと期待される。

袋内の不凍液は、冬季に凍結せず、また凍結前面が孔



図一 タンク周囲地盤の凍結膨張対策モデル



図二 タンク周囲地盤の凍結膨張対策の解析用モデル

縁に至っても凍結せず、孔幅が消滅するまで袋の上部から溢れ続ける。第1膨張変位解放孔が消滅すれば、次の第2膨張変位解放孔の挙動も上記と同様に期待される。

上記のような機能を保有する機構を膨張変位解放孔と定義し、以下、簡単に変位解放孔という。

3. 基礎的な解析⁸⁾

(1) 解析の概要と仮定

無限に広がる等方均質な地盤内に、タンク1基が存在し、このタンク周辺に図一のように変位解放孔が設置されれば、変位解放孔が設置されない場合と比較して、膨張圧と膨張変位の経時変化がどのように変わるかを把握することが解析の目的である。解析では次の仮定をおく。

a) 地表は太陽熱による加熱の影響をうけるので、タンク周囲の地表部の凍結に影響し、しかも未凍結地盤の地表部の変位は、上方に解放されるので複雑な挙動を示すであろうが、このような地表効果を無視する。

b) 円筒状凍結が始まる前のタンク壁体外表面の地盤内応力 $\sigma_r|_{r=a}$, σ_z は、図二に示すように、

$$\sigma_r|_{r=a} = K_0 \gamma Z, \sigma_z = \gamma Z \dots\dots\dots(1)$$

であり、孔縁は不凍液の液圧で保持されるので、

$$\sigma_r|_{r=s} = wZ \dots\dots\dots(2)$$

である。ここに、 $\sigma_r|_{r=a,s}$:半径方向の主応力、 σ_z :地盤内深度Zの鉛直応力、 K_0 :静止土圧係数、 r :土の単位体積重量、 w :不凍液の単位体積重量である。

凍結膨張によって未凍結地盤が水平に押圧されて、鉛直方向にひずみを生じても、 σ_z は変わらない。

c) 凍結領域のすぐ外側の未凍結地盤は弾・塑性的に挙動するが、膨張圧、膨張変位の大きさは塑性領域発生に支配されない⁷⁾ので、塑性領域は考慮しない。

図二に示す文字を説明すると、

a: タンク中心から壁体の外表面までの距離、b: タンク中心から膨張量を含まない凍結前面までの距離、 δ : 膨張変位(凍結膨張による凍土の増分で、凍結領域と未凍結領域の境界における未凍結地盤の外方変位に一致するものである)、 s_1, s_2 : タンク中心から第1, 第2変位解放孔の内縁までの距離、 λ_1, λ_2 : 第1, 第2変位解放孔の幅である。

(2) 膨張圧と膨張変位の関係

凍結中の土の間隙水の出入を自由にしながら、熱流方向に一致する拘束圧(上載荷重)を変化させることのできる開放型凍上試験により、従来より合理的な次の実験式が提案されている⁷⁾。

$$\xi = \xi_0 + \zeta/p \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ξ ：膨張率、 p ：拘束圧（地盤凍結では、膨張圧に相当する）、 ξ_0, ζ ：凍上試験定数である。

Beskow (1935)⁹⁾ による ξ と p の双曲線関係に比較して、上式では p が大きくなっても、 ξ はわずかであるが残留して零にならない。この残留膨張率 ξ_0 は、土粒子のまわりの不凍水の凍結によるものといわれている。なお、上式では、 p が零に接近するとき、つまり、地表面からごく浅い深度では、 ξ は非常に大きくなるが地中深い部分の土を凍結する場合の ξ は小さい^{7),10)}。

タンク周囲地盤が凍結する場合、膨張圧によって未凍結地盤は外方に押出されるとともに、鉄筋コンクリートの壁体は内方に圧縮される。さらに、壁体は温度変化による収縮もうけるが、壁体の変位は、未凍結地盤の外方変位に比較して微小⁷⁾であるから無視すれば、膨張率 ξ は図-2 により、次式で表わされる。

$$\xi = \{(b+\delta)^2 - b^2\} / (b^2 - a^2) \dots\dots\dots (4)$$

この ξ と式 (3) の ξ を等置し、 δ^2 は他に比較して微小であるから、 δ^2 のかかる項を省くと次式が与えられる。

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\xi_0 + \frac{\zeta}{p} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right\} b \dots\dots\dots (5)$$

p と δ を求めるためには、式 (5) の他にもう一つ式をたてる必要がある。そこで、次に凍結膨張の発生による未凍結地盤内の応力と変位の関係を求めて、膨張圧、膨張変位、孔縁変位などの計算式を誘導する。

(3) 膨張圧、膨張変位、孔縁変位の計算式

凍結が始まる前の地盤内応力 σ_r, σ_θ は、 $\partial\sigma_r/\partial r + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0$ の解として、次式で表わされる。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{matrix} \right\} = C_1 \pm \frac{C_2}{r^2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 C_1, C_2 は積分定数で、 \pm 複号のうち、 $+$ が σ_r に、 $-$ が σ_θ に対応する。3.(1)の仮定 b)、つまり $\sigma_r|_{r=a} = K_0 r Z$ 、 $\sigma_r|_{r=s_1} = wZ$ なる境界条件を満足するように C_1, C_2 をきめれば、

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{matrix} \right\} = \frac{(ws_1^2 - K_0 r a^2)Z}{s_1^2 - a^2} \pm \frac{(K_0 r - w)a^2 s_1^2 Z}{s_1^2 - a^2} \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots (7)$$

となる。このような地盤内に、図-2 に示すような円筒状凍結領域が発生するときの未凍結地盤内の主応力 σ_r, σ_θ は、式 (6) の誘導とおなじ考え方により、 $\sigma_r, \sigma_\theta = D_1 \pm D_2/r^2$ で表わされる。 D_1, D_2 は積分定数である。

凍結領域内に膨張が生じると、そのすぐ外側の未凍結地盤内に変位が発生し、この変位に対抗するために対抗土圧が生じる。膨張した凍土も含みいわゆる凍土領域と未凍土領域の境界上の対抗土圧が、いわゆる膨張圧といわれるものである。いま、凍結領域の外表面 $r=b$ に比

較して膨張変位 δ は微小であるから、 δ を無視すれば、 $r=b$ で $\sigma_r=p$ という境界条件が示される。一方、孔縁 $r=s_1$ で $\sigma_r=wZ$ であるから、この2つの境界条件を満足するように積分定数 D_1, D_2 をきめると、未凍結地盤内の主応力 σ_r, σ_θ は次式で表わされる。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{matrix} \right\} = \frac{wZs_1^2 - pb^2}{s_1^2 - b^2} \pm \frac{(p - wZ)b^2 s_1^2}{s_1^2 - b^2} \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 b が成長して $b=s_1$ になると未凍結地盤は残らないので、未凍結地盤内応力を示す上式は $a < b < s_1$ なる b の領域に対して成立するものである。

したがって、凍結領域発生後の未凍結地盤内の応力変化 $d\sigma_r = \sigma_r - \sigma_{r0}$ 、 $d\sigma_\theta = \sigma_\theta - \sigma_{\theta0}$ は次式で表わされる。

$$\left. \begin{matrix} d\sigma_r \\ d\sigma_\theta \end{matrix} \right\} = \frac{wZs_1^2 - pb^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(ws_1^2 - K_0 r a^2)Z}{s_1^2 - a^2} \pm \left\{ \frac{(p - wZ)b^2 s_1^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(K_0 r - w)a^2 s_1^2 Z}{s_1^2 - a^2} \right\} \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots (9)$$

凍結領域が図-2 のように a から b に成長すると、膨張変位 δ と未凍結地盤内の変位との間に次式が成立する。

$$\int_b^{s_1} 2\pi r \epsilon_r dr + 2\pi s_1 u_{r=s_1} = 2\pi b\delta \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $\epsilon_r = (d\sigma_r - \mu d\sigma_\theta)/E$ 、 μ ：土のポアソン比、 E ：土の弾性係数、 $u_{r=s_1} = -(\Delta\sigma_\theta - \mu\Delta\sigma_r)r/E|_{r=s_1}$ (注) で、次式で $r=s_1$ として孔縁変位が表わされる。

$$u = \frac{1}{E} \left[(\mu - 1) \left\{ \frac{wZs_1^2 - pb^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(ws_1^2 - K_0 r a^2)Z}{s_1^2 - a^2} \right\} + (1 + \mu) \left\{ \frac{(p - wZ)b^2 s_1^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(K_0 r - w)a^2 s_1^2 Z}{s_1^2 - a^2} \right\} \frac{1}{r^2} \right] r \dots\dots\dots (11)$$

式 (10) を δ について解くと、 δ が次式で表わされる。

$$\delta = \frac{1}{bE} \left[\frac{(\mu - 1)(s_1^2 + b^2)}{2} \left\{ \frac{wZs_1^2 - pb^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(ws_1^2 - K_0 r a^2)Z}{s_1^2 - a^2} \right\} + (1 + \mu) \left(\ln \frac{s_1}{b} + 1 \right) \cdot \left\{ \frac{(p - wZ)b^2 s_1^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(K_0 r - w)a^2 s_1^2 Z}{s_1^2 - a^2} \right\} \right] \dots\dots\dots (12)$$

式 (5) と (12) における p と δ の関係が同時に満足される条件 (両式の δ を等置) で、 p の計算式が、

$$\frac{b^2}{s_1^2 - b^2} \left\{ (1 - \mu)(s_1^2 + b^2) + 2(1 + \mu) \left(\ln \frac{s_1}{b} + 1 \right) s_1^2 \right\} p^2 + \left[(\mu - 1)(s_1^2 + b^2) \left\{ \frac{wZs_1^2}{s_1^2 - b^2} - \frac{(ws_1^2 - K_0 r a^2)Z}{s_1^2 - a^2} \right\} - 2(1 + \mu) \left(\ln \frac{s_1}{b} + 1 \right) \left\{ \frac{wZb^2 s_1^2}{s_1^2 - b^2} + \frac{(K_0 r - w)a^2 s_1^2 Z}{s_1^2 - a^2} \right\} \right] p = 0$$

(注) 本文では、圧縮応力を正、引張応力を負としているので、 $(\Delta\sigma_\theta - \mu\Delta\sigma_r)r/E|_{r=s_1}$ は負となる。いま $r=s_1$ 点の外方変位を正とする。

$$-E\epsilon_0(b^2-a^2) \Big] p - E\zeta(b^2-a^2) = 0 \dots\dots\dots(13)$$

なる p の 2 次方程式の正根で表わされる。この正根を式 (5) に代入して δ が計算される。

以上で、第 1 変位解放孔の機能消滅までの解析は示されたが、引き続き第 2 変位解放孔の機能消滅までの期間に対しては、すでに誘導した諸式における a, s_1, K_{or} をそれぞれ $(s_1+\lambda_1), s_2, w$ に置換すればよい。

(4) 解析の考察

a) 図-2 のように凍結領域が a から b に成長する間に、膨張圧は $K_{or}Z|_{r=a}$ から p に変化するので、この期間の膨張率 ϵ は、文献 7) の考え方によれば、次式の平均膨張率 $\bar{\epsilon}$ で表わされる。

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{p-K_{or}Z} \int_{K_{or}Z}^p \left(\epsilon_0 + \frac{\zeta}{\sigma} \right) d\sigma$$

$$= \epsilon_0 + \frac{\zeta}{p-K_{or}Z} \ln \frac{p}{K_{or}Z} \dots\dots\dots(14)$$

しかし、 $\epsilon_0+\zeta/\sigma$ は新鮮な試料ごとに一定の拘束圧(上載荷重)をかけて凍上試験を行った結果であるから、式 (14) では、すでに発生した凍土の膨張量が、凍結領域の成長につれて増減する膨張圧によって圧縮・解放されることまでも考慮されていない。変位解放孔を設置する目的の一つは、膨張圧が $K_{or}Z$ より著しく大きくなることを制御するためであるから、膨張圧 p が $K_{or}Z$ とそれほど変らなければ、式 (14) よりも簡単な式 (3) を実用的に用いることは、ほとんど問題にならないと思われる¹⁰⁾。

b) 3.(1) の仮定 b) に示す $d\sigma_z=0$ によれば、未凍結地盤内の鉛直方向ひずみ ϵ_z は、 $\epsilon_z = -(d\sigma_r + d\sigma_\theta) \mu/E$ となる。この式に式 (9) の $d\sigma_r, d\sigma_\theta$ を代入すれば、 $\epsilon_z \approx 0$ となるが、 ϵ_z の計算値は無視されるほど小さい。

(5) 数値計算例

変位解放孔設置の有・無における膨張圧・膨張変位の比較のため、前節の諸式の数値計算を試みる。

a) 数値計算条件

対象タンクは、内径と深さがともに 40 m でタンク壁体は厚さ 2 m の鉄筋コンクリート、その内側に厚さ 15 cm の発泡ポリウレタン保冷層(熱伝導率 0.03 kcal/m・hr・°C)を設置するものとする。

表-1 は実在地盤を対象とする計算用土質定数で、文献 7) の計算用土質定数によく近似するものである。

軟弱土における孔壁安定のために、軟弱土の K_{or} と袋内の不凍液の単位体積重量 w を等しくすれば、 K_{or} は表-1 から $1.067 \approx 1.1 \text{ t/m}^3$ で与えられるので w は 1.1 t/m^3 となる。

一方、土丹では、いまの場合、袋内に不凍液がなくて

表-1 土の諸定数

土の定数項目		軟弱土	土丹
単位体積重量	kg/m ³	1600	1900
含水比	%	66.9	32.2
土粒子比重		2.672	2.676
飽和度	%	100	100
粘着力	kg/cm ²	0.2	7.0
内部摩擦角		2.0	26.0
弾性係数	kg/cm ²	45	4000
静止土圧係数		0.667	1.0
ポアソン比		0.4	0.3
熱伝導率	凍結前	1.160	1.516
	凍結後	2.276	2.467
凍結潜熱	kcal/kg	32.633	18.620
凍上試験定数	ϵ_0	0.0095	0.0074
	ζ	0.0338	0.0177

も孔壁は自立するが、孔壁養生程度を考慮して、たとえば $w=1.2 \text{ t/m}^3$ とする。ただし、土丹の場合は単なる計算用として、土丹の K_{or} に等しい w の値 1.9 t/m^3 も対象とする。

不凍液として、軟弱土では $w=1.1 \text{ t/m}^3$ 、土丹では $w=1.2 \text{ t/m}^3$ の塩化カルシウム溶液を選定する。それぞれの塩化カルシウム溶液の凍結温度は、 $-7.1, -21.2^\circ\text{C}$ ¹¹⁾ である。

タンク周辺地盤とタンク内面温度は、それぞれ $18, -162^\circ\text{C}$ である。図-2 に示す凍結領域 b と時間の関係は、文献 12), 13) によって結びつけられる。

表-2 s_1, s_2 の値

$s_1(\text{m})$	$s_2(\text{m})$
$a+7.5=29.65$	40
$a+15.0=37.15$	50
$a+20.0=42.15$	50

膨張圧 p 、膨張変位 δ の計算深度 Z は 20 m、孔縁変位の計算深度 Z は 10~50 m の範囲とし、タンク中心から孔縁までの距離 s_1, s_2 は表-2 に示す。表中の a はタンク外半径で 22.15 m である。

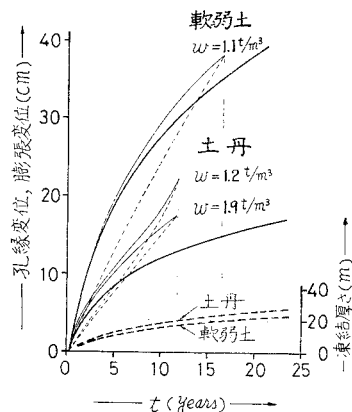
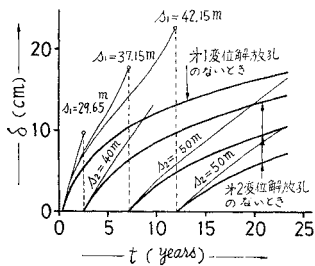


図-3 凍結厚さ (m)、および深度 $Z=20 \text{ m}$ における膨張変位 $\delta(\text{cm})$ 、孔縁変位 $u_{r=s_1=42.15\text{cm}}(\text{cm})$

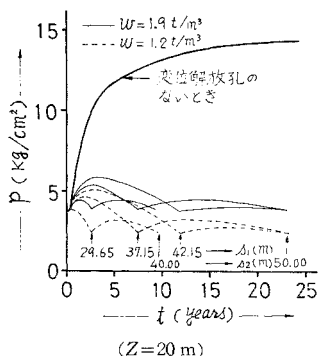
b) 計算結果

図-3は軟弱土と土丹内にそれぞれタンク1基が存在する場合¹⁰⁾と、タンク周囲に第1変位解放孔も考慮する場合の膨張変位で、変位解放孔によって解放(増加)される膨張変位量を把握しようとするものである。なお、変位解放孔を考慮するときの膨張変位 δ と孔縁変位 $u_r=42.15\text{ m}$ の比較も示す。さらに、軟弱土と土丹の経時凍結厚さも同時に示す。



($\rho_w=1.2\text{ t/m}^3$, $Z=20\text{ m}$)

図-4 第1, 第2変位解放孔の設置位置による土丹の膨張変位 $\delta(\text{cm})$



($Z=20\text{ m}$)

図-5 第1, 第2変位解放孔の設置位置による土丹の膨張圧 $p(\text{kg/cm}^2)$

上記の計算例によれば、提案する凍結膨張対策に期待できる顕著な効果は、次のようである。

i) 膨張変位は土丹よりも軟弱土のほうが顕著である。変位解放孔を設置しても、軟弱土の膨張変位は、ほとんど解放(増加)されない。

ii) 変位解放孔によって、膨張変位が顕著に解放されるのは土丹である。土丹では解放分を含む膨張変位によって生じる未凍結地盤の変位が、変位解放孔で吸収さ

表-3 孔縁変位 ($u_r=s_i$) $b \rightarrow s_i$ (cm)

$s_i(\text{m})$	軟弱土					土丹				
	$Z(\text{m})$					$Z(\text{m})$				
	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
29.65	27.0	16.6	13.1	11.4	10.4	14.5	9.7	8.1	7.3	6.8
37.15	49.3	30.3	24.0	20.9	19.0	26.5	17.7	14.7	13.3	12.4

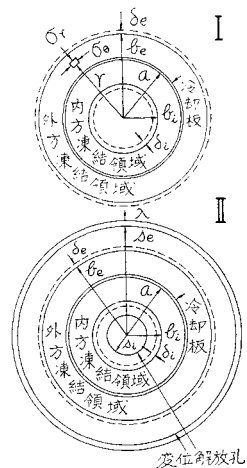
れる。膨張圧と膨張変位は、ほぼ反比例関係にあるので、膨張変位が解放されると、土丹の膨張圧は大幅に低減される。

4. 模型実験¹⁴⁾

模型実験では、変位解放孔の機能の実験的証明を主たる目的とした。しかし、これだけでは十分な模型実験といえないので、同一地盤内に間隔をおいて、変位解放孔を設置しない場合(モデルI)と、設置する場合(モデルII)の2つの実験装置を用意して、提案する凍結膨張対策の効果を明確にするとともに、それぞれのモデルにおける諸測定値と計算値の比較も取り上げた。

(1) モデル I, II における計算式^{10), 14)}

図-6は解析用モデルである。半径 a なる円筒状冷却板が仮想地下タンクである。図示の外方凍結は、タンク-基の周囲地盤が凍結する場合で、内方凍結は群設するそれぞれのタンク周囲の凍結領域が成長し、タンク間の未凍結領域が少なくなって、凍結が閉合する場合をモデル化したものである。図示の b, δ, s などのサフィクス e, i はそれぞれ外方, 内方凍結の場合である。



a) モデルIの外方凍結における計算式

この場合の計算式の誘導は、文献10)で述べたので、ここでは途中の計算を省略して結果のみを列挙する。

$$\delta_e = \frac{b_e}{2} \left(\varepsilon_0 + \frac{\zeta}{p_e} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b_e} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (15)$$

$$2(1+\mu)p_e^2 - \left[2K_{\sigma r} Z(1+\mu) + \varepsilon_0 E \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b_e} \right)^2 \right\} \right] p_e - \zeta E \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b_e} \right)^2 \right\} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

$$\sigma_r = (p_e - K_{\sigma r} Z) \left(\frac{b_e}{r} \right)^2 + K_{\sigma r} Z \dots\dots\dots (17)$$

$$u_r = (p_e - K_{\sigma r} Z) \cdot \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{b_e^2}{r} \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 δ_e : 膨張変位、 p_e (式(16)の正根): 膨張圧、 σ_r, u_r : 未凍結地盤内 r 点の半径方向土圧と変位

図-6 解析用モデル

- I. 変位解放孔を設置しない場合
- II. 変位解放孔を設置する場合

である。上式の誘導法は、文献 7) と異なるけれども、数値計算結果は、文献 7) によく近似している¹⁰⁾。

b) モデル I の内方凍結における計算式

凍結領域が少ないときの諸計算式は、文献 14) で述べた。しかし、凍結領域の成長に伴って未凍結領域が少なくなると、未凍土の鉛直方向ひずみ ϵ_z が顕著に生じるか、または未凍土が膨張圧の影響を大きくうけて、たとえば、トコロテン状に押し出されるような現象¹⁵⁾も生じるであろうから、未凍結領域がなくなるまでの諸計算式の提案は困難と思われる。

c) モデル II の外方凍結における計算式

この場合は、すでに 3. で述べたので省略する。

d) モデル II の内方凍結における計算式

膨張変位 δ_i 、膨張圧 p_i 、未凍結地盤内鉛直方向ひずみ ϵ_z などの計算式は、上記 c) における δ_e 、 p_e 、 ϵ_z の計算式中の b_e 、 s_e 、 p_e を、それぞれ b_i 、 s_i 、 p_i に置きかえて与えられる。ただし、膨張変位 δ_i 、および孔縁変位 $u_{r=s_i}$ はそれぞれ δ_e 、 $u_{r=s_e}$ の計算式に負号を付して与えられる。

(2) 実験場所の土質、および実験装置と測定法

a) 実験場所の土質

実験場所としては、均一とみなされる軟弱土と土丹の 2 つを選定することが望ましいが、地表からの深度が比較的浅いところに、均一な土丹層を見い出せなかったため、東京ガス・根岸工場敷地内の軟弱地盤を対象とした。

図-7 は、土層構成で、深度 7.4 m までの軟弱土層内に模型実験装置を設置した。表-4 は、図-7 に示す深度から採取した乱さない試料の試験結果である。図-7 の地表部の埋土は厚さ 70 cm、湿潤密度 1.7 t/m³ 程度の小礫混り土丹ずりで、下層の軟弱土と比較してかなり堅い。

b) 実験装置

実験装置の見取図と平面図を 図-8, 9 に示す。図-6

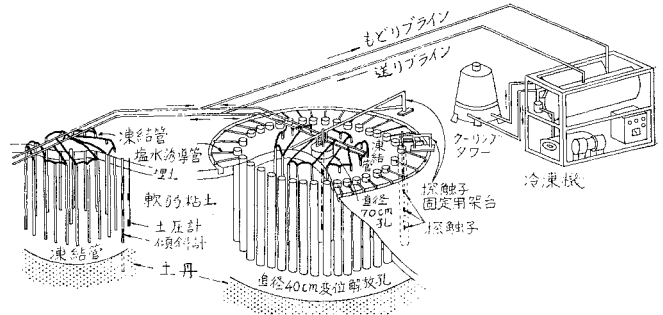
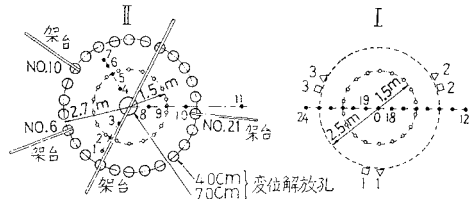


図-8 模型実験装置の見取図



(○:凍結管, ●:測温管, △:土圧計, □:傾斜計)

図-9 模型実験装置の平面図と各種測点の配置図

の冷却板(仮想タンク)に対し、冷却装置として、直径 3 m の円周上に、外径 76.3 mm の凍結管を 52.36 cm ピッチに深度 6 m まで埋設し、それぞれの凍結管に、-20°C のブラインを循環させた。用意した冷凍機の冷凍能力は、31.76 冷凍 t である。

土の液性限界が自然含水比にほぼ等しい軟弱土では、孔周囲地盤を乱さずに、図-6, II のような円環状変位解放孔が設置できなかったため、図-8, 9 のように直径 5.4 m の円周上に、直径 40 cm の円柱状変位解放孔を互いに、25.2 cm 離して配置した。一方、凍結管の内側には、直径 70 cm の変位解放孔を設置した。孔の深度は 7.0 m である。

いずれの孔内にも、厚さ 0.3 mm のポリエチレン製袋に、比重 1.1 の塩化カルシウム溶液(以下、簡単に塩水という)を充填したものを設置して、孔壁を安定させた。孔壁の安定確認後、冷凍機の運転を開始した。

模型実験装置の地盤冷却法と、変位解放孔の形状を上記のようにきめた理由は次のようである。

実物タンク周囲地盤の凍結速度は、だいたい 0.40~0.05 mm/hr 程度と予測されているので、きわめて遅い。それゆえ、実物タンク周囲の変位解放孔の機能を検証するためには、少なくとも数年を要する。そこで、実験時間の短縮と、冷却装置埋設による地盤の乱れを最小にするために、図-8 に示す凍結管による地盤冷却法を選定した。

今回の外方、内方凍結におけるそれぞれの平均地盤凍結速度は 0.6, 1.3 mm/hr 程度と予測されるので、外方凍結速度は、実物の初期凍結速度に近似する。

表-4 土質定数

試料番号	S-1	S-2
深 度 (m)	3.0~3.8	4.0~4.8
単位体積重量 kg/m ³	1560	1580
含 水 比 %	81.2	82.1
土 粒 子 比 重	2.67	2.71
液 性 限 界 %	81.8	81.9
塑 性 限 界 %	26.8	32.7
一軸圧縮強さ kg/cm ²	0.31	0.34
弾 性 係 数 kg/cm ²	14.7	15.0
静止土圧係数		0.79
ポアソン比		0.44

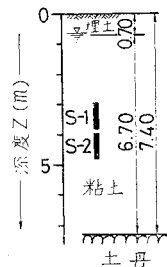


図-7 実験場所の土層図

変位解放孔の横断面形状は、図-1, 6 のような円環状が理想である。しかし、軟弱地盤の場合は、施工中に孔周囲地盤が乱されやすいので、事前に、乱される領域内の地盤改良が必要と考えられる。

ひるがえって、実用的には、たとえば、円環の幅に相当する連続円状、または不連続円状なども考えられ、不連続円状ならば地盤改良は不用となるであろう。

ここに、不連続円状の不連続部分とは、孔の鉛直精度、およびつぎつぎに隣接して設置される孔内の袋が、施工中に損傷されないことなどを考慮して計画されるものであるが、地盤が弱いほど不連続部は広くなる傾向にある。

今回の経験によれば、軟弱土における不連続部の寸法は、独立孔の半径程度にしぼられるものと思われる。

模型実験装置の設置にさいし、できるだけ地盤を乱さないことを大前提としたので、本装置は解析用モデルと完全に一致していないけれども、提案する凍結膨張対策のいくつかの特性は見出されるであろう。

c) 測定法

i) 地中温度：図-9 に示す測温管（外径 48.6 mm）内にサーミスターを設置して、深度別（ $Z=0.5\sim 8.0$ m）温度を測定した。測温管内には不凍液（比重 1.26 の塩水）を充填し、対流止めをほどこした。

ii) 地盤変位：地盤変位を把握するために、坂田電機製差動トランス型傾斜計（FD-1300）を選定した。本器は深度 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 m 地点に固定するピック・アップの微小な傾斜量が差動トランスの変化で、その角度が測定器で検出されるものである。変位零点を確保するために連絡管の最深部を堅い土丹層に 1.0 m 入れた。

iii) 土圧：土圧計は、坂田電機製差動トランス型（PD 50）を選定した。受圧器を深度 4.0, 6.0 m 地点に埋設して、地上の測定器で検出した。

傾斜計、土圧計に付随する測定器は、いずれも坂田電機製 MD-2 D 型を使用した。なお、地盤変位、土圧の平面的測定位置は、図-9 に示す $r=2.5$ m 地点である。

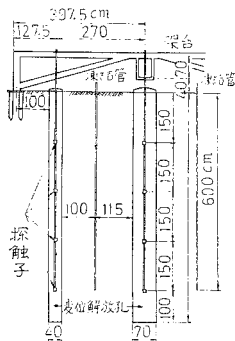


図-10 探触子の深度別配置

iv) 孔径：変位解放孔の孔径変化を把握するために、図-10 に示す直径 70, 40 cm (No. 6, 10, 21) の孔内深度 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 m 点にロッドつなぎの探触子を設置して、ロッドの上部を地上の鋼製架台に固定した。

各深度の探触子で、0, 90, 180, 270° 方向の孔半

径を、三菱電機製超音波探傷器（FD-210 型）、渡辺測器製記録計（WTR-721 型）で測定した。

超音波伝播速度は、溶液濃度、温度、液圧などの変化に影響されるので、長さ 20 cm のキャリブレーション用試験片の端部に探触子を取付けたものを、所定深度で鉛直方向に固定させて、実験中の音速を検定した。

孔径測定法として、金属用探傷器を採用した理由は、① 塩水内では、超音波の減衰が少ない。② 精密測定上、高周波の超音波（たとえば、周波数 4 MHz、波長 0.3 mm）が有利である。③ ブラウン管波形が記録器で、そっくり記録されるなどがあげられる。

探触子は、直径 40 cm の孔内に設置して、孔径縮小を測定するものであるから、できるだけ小型であること、また 100 日程度の計測期間中、塩水内に常置されるので、少なくともこの期間中は完全防水でなければならない。この条件を考慮して、試作した探触子を図-11 に示す。

v) 溢れ出る塩水：図-8 のようにそれぞれの袋上部に細い柔軟な誘導管を取付け、管末を受袋内に挿入して、受袋内にたまる塩水の重量を測定した。

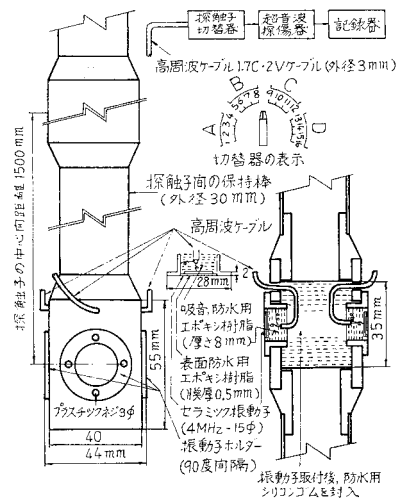


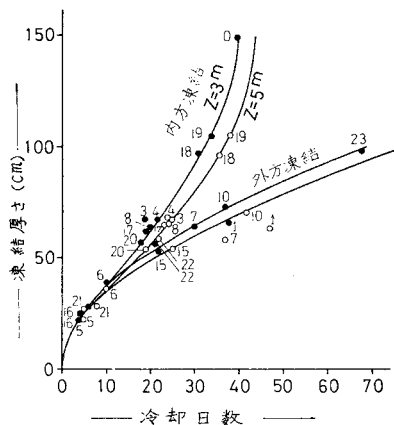
図-11 変位解放孔の孔径変化測定用探触子

上記の諸測定法による測定期間は、モデル I では、外方凍結前面が $r=2.5$ m 点に埋設した土圧計、傾斜計に接し、モデル II では、外方凍結前面が変位解放孔に接するまでとした。それゆえ凍結領域 (b_e-a) は 1 m である。

(3) 測定結果

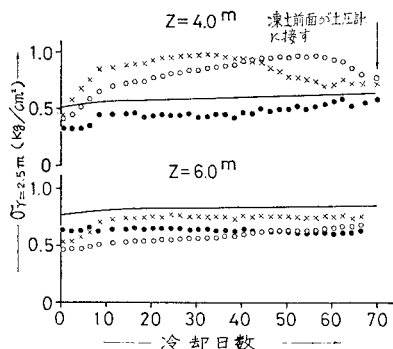
a) モデル I における経時凍結厚さと凍結膨張率

図-12 の ●, ○ は、それぞれ深度 Z が 3, 5 m の経時凍結厚さで、この土の凍結温度の測定値は -2°C である。5 m より 3 m の凍結速度が速い理由は、実験が



(図中の数字は測温管番号、実線は実験値を結んだものである。初期地中温度は 16°C、凍結管の表面温度は -20°C である。)

図-12 モデル I における凍結厚さの経時変化



(●, ○, ×は土圧計1, 2, 3による)

図-13 モデル I における深度別経時土圧 $\sigma_{r=2.5m}$ (kg/cm²)

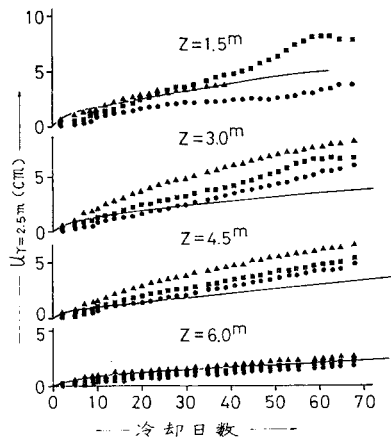
冬期 (12~2月) であるので、地表部温度が土中温度 16°C より低かったためである。

従来のいわゆる開放型凍上試験機では、特に $p < 1$ kg/cm² 領域で精度のよい試験結果を得るまでの研究が進められていなかったため、 $p < 1$ kg/cm² 領域の凍上試験は、図-9 のモデル I を対象とした。

図-13 の ●, ○, × は、 $r=2.5$ m 地点に設置した土圧計 1, 2, 3 による深度別 ($Z=4, 6$ m) 土圧の測定値で、凍結領域の膨張による凍土の増分も含むいわゆる凍土領域の前面が土圧計に接する直前の測定土圧が、膨張圧 p として把握される。

図-14 の ●, ■, ▲ は、 $r=2.5$ m 地点に設置した傾斜計 1, 2, 3 による深度別 ($Z=1.5, 3.0, 4.5, 6.0$ m) 地盤変位 $u_{r=2.5m}$ で、いわゆる凍土領域の前面が傾斜計に接すると、 $u_{r=2.5m}$ が膨張変位 δ として把握される。

深度 4 m には傾斜計が設置されていないので、深度 4 m の δ を図-14 で判読すれば、土圧計の埋設深度



(●, ■, ▲は傾斜計1, 2, 3による)

図-14 モデル I における深度別経時地盤変位 $u_{r=2.5m}$ (cm)

4, 6 m に対応する δ は、把握されることになる。

上記の δ と $b=2.5$ m を対象として、式 (4) で計算されると、 p の関係を図-15 に示す。ただし、 $p > 1$ kg/cm² 領域内の ○ は、室内凍上試験によるものである。

図-15 に示す ξ と p の関係は、次式で表わされる。

$$\xi = 0.0246 + 0.0157/p$$

$$\dots\dots\dots (19)$$

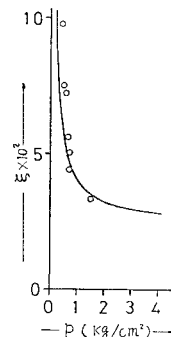


図-15 膨張率 ξ と膨張圧 p の関係

したがって、凍上試験定数 ξ_0 は、それぞれ 0.0246, 0.0157 と提示される。

b) 本対策における機能の実証

本対策に期待される機能を実証するためには、① 地盤変位によって、孔縁が押圧された分だけの塩水が袋の上部から溢れ出し、② 溢れ出た分だけ孔径が縮小して、地盤変位を吸収する。さらに、③ 変位解放孔設置の有無における $r=2.5$ m 地点の深度別経時変位の比較などの測定値が重視される。

i) 溢れ出た塩水量：図-8, 9 のような直径 40 cm の変位解放孔の配置は実用対策になると考えられるので、直径 40 cm のすべての孔から溢れ出る塩水の重量を測定したが、いずれも同様であるので、No. 6, 10 孔を代表例としてそれぞれ ●, ▲ で示すものが図-16 である。

ii) 孔径の深度別経時変化：図-17 は、内方凍結によって等方周圧をうける直径 70 cm の変位解放孔の深度別経時孔径変化である。外方凍結によって偏圧をうける直径 40 cm の変位解放孔の孔径変化は、No. 6, 10,

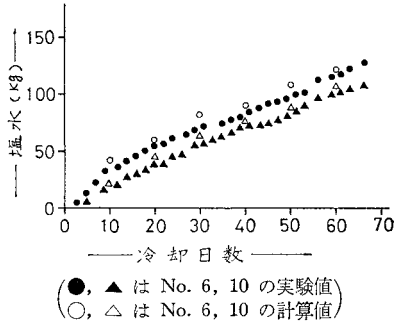


図-16 直径 40 cm の No. 6, 10 変位解放孔から溢れ出した塩水量と、孔の形状変化によって溢れ出す塩水計算量の比較

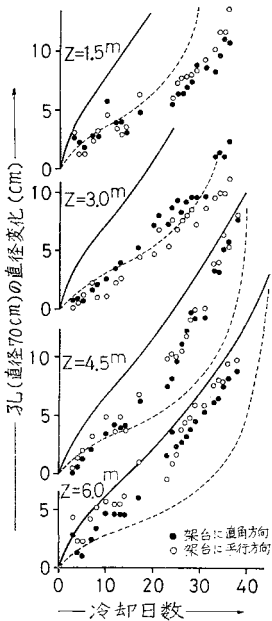


図-17 直径 70 cm 変位解放孔における孔径の深度別変化の計算値(実線)と測定値の比較(点線は $2\delta_i$ である)

6, 10 の変位解放孔の形状変化(図-18)によって溢れ出す塩水の計算重量であり、図-16 の測定重量と比較すれば、両値はよく近似している。

したがって、2. で述べたように、未凍結地盤の変位によって、孔縁が押圧された分だけの塩水が袋の上部から溢れ出したものとみられる。

iii) 変位解放孔設置の有・無における $u_{r=2.5m}$ の比較: 図-9 のモデル I の $r=2.5m$ 点と、モデル II の孔縁 $r=2.5m$ 点の深度別経時変位の比較を 図-19 に示す。変位解放孔設置のほうの変位が大きい理由は、当然ながら、変位解放孔で地盤変位が吸収されたためと指摘される。

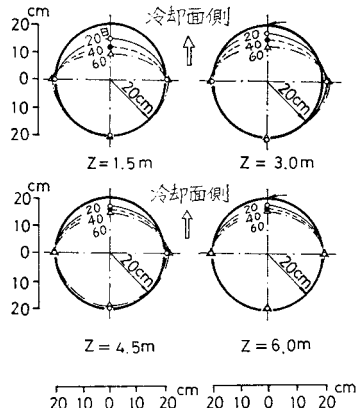


図-18 直径 40 cm 変位解放孔 (No. 6) の深度別経日形状変化

21 孔のみで測定したが、いずれも同様であるので、No. 6 を代表例として、図-18 に孔の横断面形状の深度別経時変化を示す。

なお、図-16 に示す \bigcirc, \triangle は、それぞれ No.

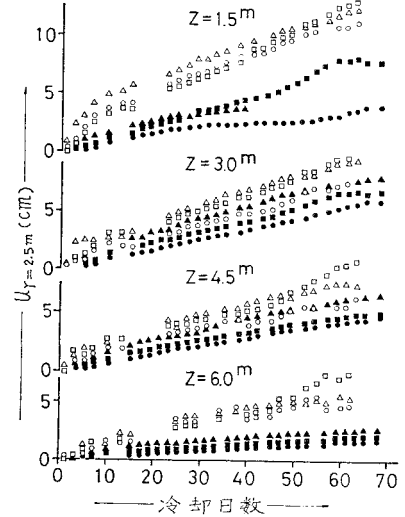


図-19 変位解放孔設置の有・無における $u_{r=2.5m}$ (cm) の比較 (\square : No. 6, \bigcirc : No. 10, \triangle : No. 21.) (ぬりつぶしは孔のない場合で 図-14 の転載である)

上記測定値の列挙によって、変位解放孔の機能が実証されるものと思われるが、さらに理解を深めるためには、実験条件と計算条件が合致する直径 70 cm 孔の深度別経時孔径変化量の測定値と計算値の比較も必要である。

c) 測定値と計算値の比較

図-9 のモデル I の外方凍結による未凍結地盤内 $r=2.5m$ 点の土圧、変位をそれぞれ式 (17), (18) で計算すれば、図-13, 14 の実線で表わされる。

図-13 の経時土圧の傾向は、Z が 4.0 m よりも 6.0 m のほうが計算値によく近似している。

図-14 の $Z=3.0, 4.5m$ における測定変位 \blacktriangle は、凍結初期から計算値より明らかに大きい、その他は冷却日数 50 日程度まで、測定値と計算値は近似し、特に Z が 6.0 m では、実用的に十分な近似を示している。

図-17 の実線、点線は、それぞれ 4. (1d) で述べた計算式による直径 70 cm の孔径と $2\delta_i$ の経時変化である。孔径の経時変化量の測定値と計算値は、深度が増すにつれて両値はよく近似する傾向が見出される。しかしながら、地表部では、測定値は計算値よりもかなり小さい。

この主原因は、4. (2) で述べたように、軟弱粘土層の上部が厚さ 70 cm の堅い埋立表層であったので、地表部の半径方向変位が著しく拘束されたためと考えられる。

したがって、上記比較に用いた諸計算式は、現場の土の凍結条件(特に凍結速度)を考慮する凍上試験定数を対象とすれば、実用上、それほど問題にならない。

今回は、図-6の解析用モデルⅠの内方凍結における測定値と計算値の比較を断念したが、その後、モデルⅠの外方凍結で地盤変位が拘束される場合の室内模型実験によって、凍結厚さが約16cm成長して未凍土が約26cm残る状態に至るまでの未凍土内応力、変位が測定され、計算式¹⁹⁾の妥当性が検証されている¹⁹⁾。

なお残された不連続変位解放孔の不連続部分による地盤変位の背後への影響範囲の検討は、実物実験にゆづる。

5. 実物実験¹⁷⁾

1970年末から稼働開始となったわが国最初の地下タンク周囲の凍結厚さが6mに成長した時点で、凍結領域の外側の未凍結領域内に、変位解放孔を試験的に設置して、長期計測を試みた。

実物実験のおもな目的は、実物タンク周囲地盤の緩慢な凍結速度に対応する変位解放孔の形状変化、および不連続変位解放孔の不連続部分による地盤変位の背後への影響範囲などの把握である。

(1) 解析モデルにおける計算式¹⁸⁾

変位解放孔設置の時期として、前節までは、タンクの稼働開始前を対象としたが、ここでは、タンクの稼働による凍結領域発生後の任意時点が考慮される。

さて、実際は、不連続変位解放孔であるが、ひとまず、図-20に示す円環状を解析用モデルとする。

a) 解析の概要と仮定

図-20,Ⅰで、凍結領域が $r=b$ に成長した時点の膨張圧、膨張変位をそれぞれ p, δ 、未凍結領域内の $r=$

$l_1, l_2 (l_2 > l_1)$ 点の半径方向主応力をそれぞれ $\sigma_{r=l_1}, \sigma_{r=l_2}$ とする。

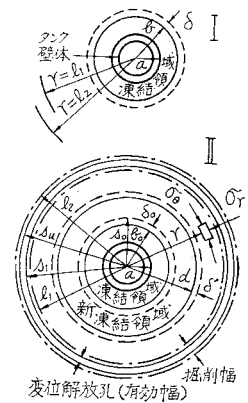
図-20,Ⅱのように、凍結領域 $b=b_0$ の時点で、孔幅 (l_2-l_1) なる変位解放孔を瞬時に設置すれば、 $\sigma_{r=l_1}$ と孔内液圧 $wZ (wZ < \sigma_{r=l_1})$ の差に対応して、 p は $p_0 (p_0 < p)$ に、 δ は $\delta_0 (\delta_0 > \delta)$ に変化するとともに、 $r=l_1$ は s_1 に外方変位する。同時に、 $\sigma_{r=l_2}$ と $wZ (wZ < \sigma_{r=l_2})$ の差に対応して、 $r=l_2$ は s_u に内方変位する。このような状態で孔縁は安定するものとする。

変位解放孔の安定後、新凍結領域 $r=d (b_0 + \delta_0 = s_0 \leq d < s_1)$ の成長につれて、孔縁 $(r=s_1)$ は外方に変位する。新凍結領域の成長による膨張圧 p' 、膨張変位 δ' 、および孔縁変位 u' などの経時変化傾向を把握するのが解析の目的である。

なお、地表、および未凍結地盤に関する仮定は、それぞれ3.(1)a), c)とおなじとする。この場合は、3.と同様な考え方で解が誘導されるので、途中の計算を省略して、結果のみを示す。

b) 計算式

$\delta', p',$ および u' の計算式は、それぞれ式(20), (21)の正根、(22)で表わされる。



Ⅰ. 変位解放孔設置前の凍結モデル
Ⅱ. 凍結領域発生後に設置する変位解放孔と新凍結モデル

図-20 解析用モデル

$$\delta' = \left[\frac{(\mu-1)(s_1^2+d^2)}{2} \left(\frac{wZs_1^2-p'd^2}{s_1^2-d^2} - \frac{wZs_1^2-p_0s_0^2}{s_1^2-s_0^2} \right) + \left\{ \frac{(p'-wZ)d^2}{s_1^2-d^2} - \frac{(p_0-wZ)s_0^2}{s_1^2-s_0^2} \right\} \left(\ln \frac{s_1}{d} + 1 \right) (1+\mu)s_1^2 \right] \frac{1}{dE} \dots (20)$$

$$\frac{d^2}{s_1^2-d^2} \left\{ (1-\mu)(s_1^2+d^2) \div 2 \left(\ln \frac{s_1}{d} + 1 \right) (1+\mu)s_1^2 \right\} p'^2 - \left[(1-\mu)(s_1^2+d^2) \left(\frac{wZs_1^2}{s_1^2-d^2} - \frac{wZs_1^2-p_0s_0^2}{s_1^2-s_0^2} \right) + 2s_1^2 \left(\ln \frac{s_1}{d} + 1 \right) (1+\mu) \right] \times \left\{ \frac{wZd^2}{s_1^2-d^2} + \frac{(p_0-wZ)s_0^2}{s_1^2-s_0^2} \right\} + \xi_0 E (d^2-s_0^2) \left[p' - \zeta E (d^2-s_0^2) \right] = 0 \dots (21)$$

$$u' = \left[(\mu-1) \left(\frac{wZs_1^2-p'd^2}{s_1^2-d^2} - \frac{wZs_1^2-p_0s_0^2}{s_1^2-s_0^2} \right) + \left\{ \frac{(p'-wZ)d^2}{s_1^2-d^2} - \frac{(p_0-wZ)s_0^2}{s_1^2-s_0^2} \right\} \frac{(1+\mu)s_1^2}{r^2} \right] \frac{r}{E} \dots (22)$$

ここに、 p_0 は式(23)の正根である。

$$\frac{\{(1-\mu)b_0^2 + (1+\mu)l_1^2\} p}{l_1^2 - b_0^2} - p_0^2 - \left[\frac{(1+\mu)l_1^2 p}{l_1^2 - b_0^2} \left\{ p + wZ - K_0 r Z - \frac{b_0^2}{l_1^2} (p - K_0 r Z) \right\} + \frac{1-\mu}{l_1^2 - b_0^2} \left[\left\{ wZ - K_0 r Z - \frac{b_0^2}{l_1^2} (p - K_0 r Z) \right\} l_1^2 p + b_0^2 p^2 \right] - \frac{\zeta E}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b_0} \right)^2 \right\} \right] p_0 - \frac{\zeta E p}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{b_0} \right)^2 \right\} = 0 \dots (23)$$

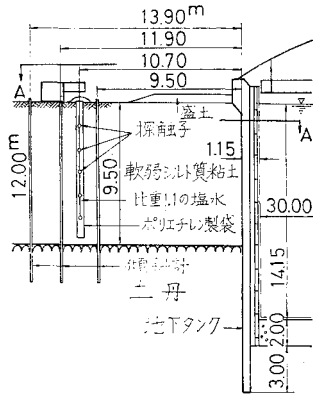


図-21 実験場所の土質と実験装置

ここに、 p は式 (16) の正根である。

(2) 実験場所の土質、および実験装置と測定法

a) 実験場所の土質

実験場所の土質と実験装置を 図-21 に示す。地盤は、深度 9.5 m までは軟弱なシルト質粘土、深度 9.5 m 以深は土丹である。タンク底部は土丹内に、変位解放孔は軟弱地盤内に設置されている。それぞれの土層から採取した乱さない代表試料の試験結果は、表-1 とおなじで、表-1、4 の軟弱土の水分容積率は 0.64, 0.68 である。

b) 実験装置と測定法

図-22 は、図-21 の A-A 断面図である。図-22 のように、凍結領域 $r=b$ に比較して、凍結前面から変位解放孔に至る距離がかなり小さい場合は、半径 26.85 m の全円周上ではなく、たとえば、この円周上の 20 m 部分のみに変位解放孔を設置して、中央部の I, II 孔で測定される孔径変化は、半径 26.85 m の全円周上に配置される変位解放孔の中の I, II 孔の孔径変化とみなしても、ほとんど問題にならないであろう。

そこで、半径 26.85 m の円周上の約 20 m 部分に、直径 40 cm、深さ 9.0 m の独立変位解放孔を、互いに 25 cm 離して配置し、いずれの孔内にも、厚さ 0.3 mm のポリエチレン製袋に比重 1.1 の塩水を充填したものを

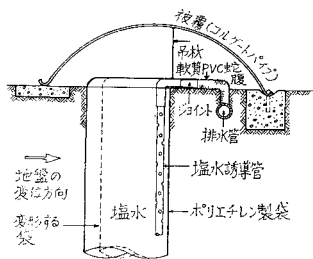


図-23 変位解放孔の保護および塩水の溢れ出し用装置

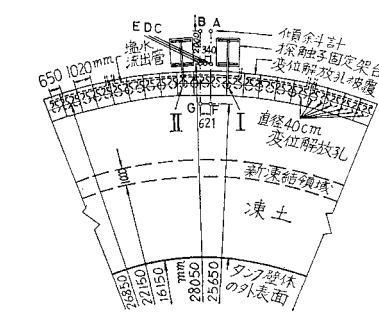


図-22 図-21 の A-A 断面図 (実験装置の平面図)

したがって、孔径と孔間隔、孔の機

構、および孔径変化の測定法などは、模型実験と合致する。さらに、模型実験と実物実験における軟弱土の水分容積率は、0.64, 0.68 で、単位体積重量は、1570, 1600 kg/m³ であるので、熱的性質は、ほとんど同じ地盤とみなされる¹²⁾。

実物実験の孔径変化測定は長期になるので、図-23 に示すような孔上端の保護装置を設置した。この目的は、① 溢れ出る塩水誘導管の支持、② 太陽輻射による加熱防止と袋の損傷防止、③ 作業員の墜落防止などを考慮して孔を被覆するもので、この被覆の一端はピン固定、他端は自由とした。

不連続部分による地盤変位は、図-22 に示す A~G 点で測定した。測定には坂田電機製挿入式傾斜計 (FD-1300) を使用した。測定範囲は ±300 分、精度は 5 分以内である。A, B 点の後にも傾斜計を設置する予定であったが、柵、ケーブルによる制約のため断念した。

地中温度は、図-24 に示す 180~360° 領域内に設置したサーミスターで測定し、凍結成長を把握した。今回は、新凍結領域が 1.0 m 成長するまでの期間における諸測定を対象としたので、凍結厚さも模型実験に合致する。

凍結領域の経時成長に伴う未凍結領域内の応力、変位は、変位解放孔を設置しなかった地盤内で、模型実験と同様な方法で測定し、凍上試験定数 ϵ_0, κ を求めた。ただし、応力、変位測定には、坂田電機製 PD-2 FT 型土圧計、上記傾斜計を使用した。

なお、孔の後に設置した探触子固定架台、および傾斜計用測定管の上端などは、地盤変位の影響をうけて完全な固定点とならないので、不動地点に設置した引照点を利用して、測定値を補正することにした。

(3) 測定結果

a) 経時凍結厚さと凍結膨張率

図-24 はタンク稼働開始後、約 5 年半におけるタンク周囲地盤の凍結厚さの測定例で、深度は 7.5 m である。この地盤

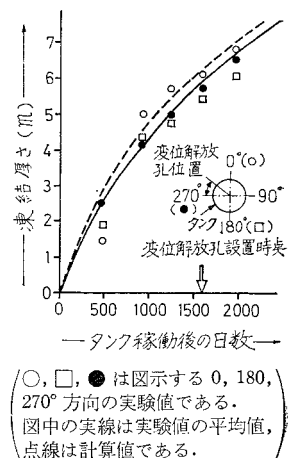


図-24 タンク周囲地盤の経時凍結厚さ ($Z=7.5$ m)

の凍結温度は -2°C である。

○, □, ● は, 図示する $0, 180, 270^{\circ}$ 方向の測定値で, 平均値を実線で示した. 270° 方向の ● は, 変位解放孔設置領域にもっとも近い. 図示する点線は, 測定値に対比される計算値¹⁾ (土の凍結温度は 0°C) で, この土の凍結前後における熱伝導率は, $1.160, 2.276 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$, 凍結潜熱は 32.633 kcal/kg である. この熱的定数は, 文献 12) によるものであるが, 妥当性は確かめられている.

新凍結領域の成長期間の膨張率 ξ は, 式 (19) の誘導と同様にして提示されるので, 結果のみを示す.

$$\xi = 0.0095 + 0.1300/p \dots\dots\dots (24)$$

この場合の凍結速度は, 0.1 mm/hr であるから, 模型実験の外方凍結速度の平均値 0.6 mm/hr の $1/6$ である.

式 (19) と (24) の ξ の比較によって, 凍結速度が遅くなれば, 膨張率は大きくなる傾向がわかる.

b) 変位解放孔の経時孔縁変位

図-22 に示す変位解放孔 I, II の孔縁変位は, いずれも同様であるので, ここでは, 孔 I の孔縁 (タンクにもっとも近い $r=26.65 \text{ m}$ 点) の深度別経時変位と, 孔形状の深度別経時変化を 図-25, 26 に示す.

図示のように, 孔形状変化は深度増加に伴って緩慢になるので, 地表部の孔縁が消滅し始めると, 下部の塩水が溢れ出にくくなるから, 袋内上部には, 図-23 に示すような塩水誘導管が必要と思われる.

c) 不連続部分による地盤変位の背後への影響

図-27 は, 図-22 に示す傾斜計 F, G ($r=25.65 \text{ m}$), C, D, E ($r=28.05 \text{ m}$), A, B ($r=30.05 \text{ m}$) による変位解放孔の前後の深度別経時地盤変位である.

$r=28.05 \text{ m}$ における傾斜計 C, E は, 不連続部分の midpoint の後方に, 傾斜計 D は独立変位解放孔の中心の後方に設置されているにもかかわらず, 傾斜計 C, D, E で測定された地盤変位には, 顕著なる差が認められずほとんどおなじであるから, $r=28.05 \text{ m}$ 以遠の変位は r に対応する均等変位として次第に小さくなるものと思われる.

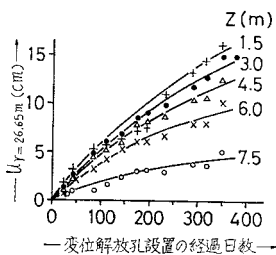


図-25 孔縁の深度別経時変位 $U_{r=26.65\text{m}}$ (cm)

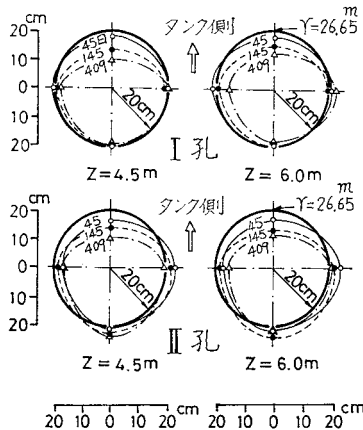


図-26 孔形の深度別経時変化

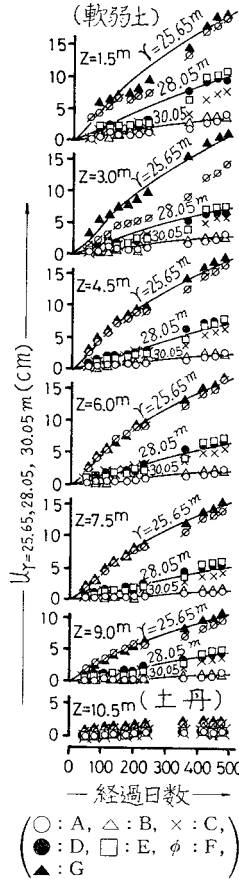


図-27 不連続変位解放孔の孔前後の地盤変位

$r=28.05 \text{ m}$ 以遠の測定変位は直線的減少とみなしたものである.

図-28 によれば, 深度 1.5 m における地盤変位の背後への影響範囲は, 4.5 m 程度と判読され, 深度増加とともに小さくなっている. いまの場合, 新凍結領域の厚さは 1.0 m 程度であるが, さらに成長して変位解放孔に近づいても 図-28 のように経日変位分布勾配が急になるので, 変位の背後への影響範囲はそれほど広がらないであろう.

d) 測定値と計算値の比較

不連続変位解放孔の場合には, ① 一般的な解析用境界条件が定めにくい. ② 独立円形孔が偏圧をうけながら消滅していく過程における孔周辺の土の性状変化もまた定めにくいので, まだ十分な解析結果を得るに至っていない.

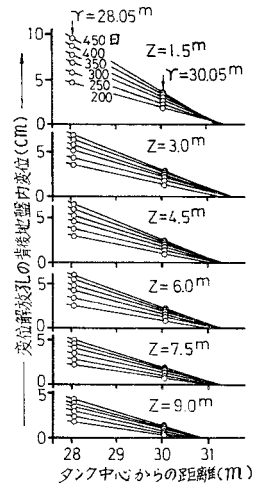
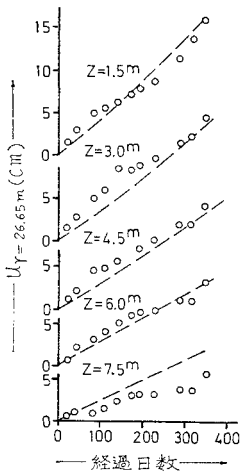


図-28 不連続変位解放孔の背後地盤内変位の分布

図-28 は, 変位解放孔の背後における地盤変位で, 図-27 に示す $r=28.05, 30.05 \text{ m}$ 点の変位を図示し直したものである. $r=30.05 \sim 32.0 \text{ m}$ 間には, 柵, 小型埋設ケーブルが地表部にあって, この間の測定値は得られていないが, たとえば, 式 (18) の数値計算例によれば, 変位分布は r に反比例するので,



(点線は円環状孔縁変位の計算値)
 図-29 不連続状と円環状変位解放孔の孔縁変位 $u_{r=26.65m}$ (cm)

増加につれてよく近似するので、考え方の同様な円環の孔縁変位計算法による計算値もまた測定値に近似するものと思われる。

図-29は、不連続部分が独立孔の半径程度のような今回の実験で得られたものであるが、いま独立孔の半径を R 、独立孔の中心間隔を x とし、 $\pi R^2 = x(s_u - s_1)$ 、つまり独立孔の面積と円環の部分面積が等しいような独立孔の配置ならば、図-29に示すような関係が得られるものと考えても、実用的にはそれほど問題にならないと思われる。経験として得られた図-29は、今後の孔縁変位予測の手がかりになるであろう。

なお、上記の円環の部分面積が不連続に配置されてできる不連続変位解放孔に関する実験は残されている。

6. あとがき

前節までに述べた数値計算、および測定結果から誘導される結論を以下に列挙する。

(1) 3. の基礎的な解析による数値計算結果

a) 膨張変位は土丹よりも軟弱土のほうが顕著である。変位解放孔を設置しても、軟弱土の膨張変位は、ほとんど解放(増加)されない。

b) 変位解放孔によって、膨張変位が顕著に解放されるのは土丹である。土丹では解放分を含む膨張変位によって生じる未凍結地盤の変位が、変位解放孔で吸収される。膨張圧と膨張変位は、ほぼ反比例関係にあるので、膨張変位が解放されると、土丹の膨張圧は大幅に低減さ

れる。

(2) 模型実験結果

a) 直径 40 cm の不連続変位解放孔が地盤変位によって押圧されて、溢れ出した塩水の測定重量と、孔の形状変化によって溢れ出す塩水の計算重量を比較すれば、両値はよく近似している。したがって、未凍結地盤の変位によって、孔縁が押圧された分だけの塩水が袋の上部から溢れ出したものとみられる。

b) 変位解放孔設置の有・無におけるそれぞれの $u_{r=2.5m}$ (図-9のモデルIの $r=2.5m$ 点と、モデルIIの孔縁 $r=2.5m$ 点の変位)の深度別経時変位の比較が図-19で、変位解放孔設置のほうの変位が大きい理由は、変位解放孔で地盤変位が吸収されたためである。上記の a)、b) によって、変位解放孔の機能が実証される。

c) 変位解放孔を設置しない場合の外方凍結(図-9のモデルI)による未凍結地盤内の土圧、変位の測定値と計算値、および直径 70 cm の変位解放孔(図-9のモデルII)の深度別孔径経時変化量の測定値と計算値は、それぞれ近似するので、現場の凍結条件(特に凍結速度)を考慮する凍上試験定数を用いるならば、上記比較に用いた計算式は実用計算式になる。

(3) 実物実験結果

a) 実物タンク周囲地盤の経時凍結厚さの測定値と計算値は近似する。

b) 模型実験と実物実験における土の凍結速度は、それぞれ 0.6, 0.1 mm/hr で、両方の土の熱的性質は近似するので、式(19)と(24)の凍結膨張率 ϵ の比較によって、凍結速度が遅くなれば膨張率は大きくなる傾向がわかる。

c) 変位解放孔の消滅は、深度が浅いほど速いので、深度が増すほど塩水が溢れ出にくくなる。したがって、図-23のように、袋内の上部に誘導管が必要となる。

d) 凍結膨張による未凍結地盤の変位(図-27)は、軟弱土に比較して土丹は著しく小さい。したがって、土丹の膨張圧は軟弱土より顕著に大きくなるものと考えられるので、上記(1)の数値計算結果の傾向が肯定される。

e) 不連続変位解放孔の不連続部分による地盤変位の背後への影響(図-28)は、深度増加に伴って減少し、新凍結領域が成長して変位解放孔に近づいても、図示のように経日変位分布勾配が急になるので、変位の背後への影響範囲は、それほど広がらない。

f) 不連続円状と円環状の孔縁変位 $u_{r=26.65m}$ (図-29)は、それぞれ測定値、計算値であるが、両値は近似

するので、不連続円状の孔縁変位予測の手がかりとなる。

なお、今後の問題として、① 実際のタンク周囲地盤の凍結速度は、0.40～0.05 mm/hr 程度と予測されている。現在の室内凍上試験の凍結速度は、0.2 mm/hr 程度が限界であるから、より低い凍結速度の室内凍上試験法を開発すること。② 変位解放孔内に設置する袋の耐久性向上対策として、高密度ポリエチレン糸を素材とする布でポリエチレン製袋を被覆することなどがあげられる。

参 考 文 献

- 1) 高橋敏五郎：寒地の土木（I），土木学会誌，pp. 25～32，昭和33年2月。
- 2) 山田正男：地盤凍結と強制解凍による凍上・沈下の一考察，土木学会論文報告集，第234号，pp. 97～109，1975。
- 3) 千本彌三郎ほか：地盤凍結工法における2, 3の対策，第27回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp. 523～524，昭和47年。
- 4) 村田 浩ほか：地下鉄6号線神田川川底部凍結工法，土木技術，27巻，8号，1972。
- 5) 都市エネルギー協会：新しい都市のエネルギー（ニューエネルギー別冊），1976年12月。
- 6) 経営開発センター出版部：LNG 基地建設総合資料集，pp. 168～187，1976。
- 7) 高志 勤：凍結膨張による未凍結領域内の土圧と変位の経時変化，土木学会論文報告集，第200号，pp. 49～62，1972。
- 8) 山田正男：凍結膨張変位の解放による膨張圧力の低減法，第10回土質工学研究発表会，pp. 755～758，1975。
- 9) Beskow, G., 1935 : Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads. Translated by J.O. Osterberg, Technological Institute, Northwestern Univ., 1947.
- 10) 山田正男：LNG 貯蔵用地下タンク周囲地盤の凍結膨張圧力と膨張変位，土木技術，第30巻10号，pp. 24～38，1975。
- 11) 長岡順吉：冷凍工学，標準機械工学講座，コロナ社，p. 87，昭和39年。
- 12) 高志 勤・和田正八郎：土讓凍結工法について，冷凍，第36巻，pp. 889～903，1961。
- 13) 高志 勤・住吉正光：液化低温ガス貯蔵用地下タンク周囲地盤の凍結（I），冷凍，第44巻，第504号，pp. 910～922，1969。
- 14) 山田正男・了戒公利・榎戸源則・佐波佳宏・西浦英行：凍結膨張による未凍結領域内の土圧と変位に関する一考察，第10回土質工学研究発表会，pp. 759～762，1975。
- 15) 井上 保：凍結工法の施工例，河底横過，地下鉄千日前線～今里大橋，施工技術，p. 33，写真3，1970年3月。
- 16) 了戒公利ほか：LNG 地下タンク周囲地盤の凍結に伴う未凍結地盤の土圧と変位についての実験，第11回土質工学研究発表会，pp. 889～892，1976。
- 17) 山田正男・中村公道・佐波佳宏・高橋行茂：凍結膨張による不連続円柱状変位解放孔周辺の変位挙動，第12回土質工学研究発表会，pp. 1037～1040，1977。
- 18) 山田正男：凍結膨張変位の解放による膨張圧力の低減法（その2），第4回土木学会関東支部年次研究発表会，pp. 121～122，1977。
- 19) 高志 勤：液化低温ガス貯蔵用地下タンク周囲地盤の凍結（II），冷凍，第47巻，第536号，pp. 521～537，1971。
(1977. 5. 19・受付)