

低温地下式貯槽に作用する凍結土圧に関する研究

Analytical and Experimental Study on the Pressure Originated from Expansion of Freezing Soil Acting on Underground Storage Tank for Liquefied Cryogenic Gas

土橋 吉輝* 萩谷 宏三**
Yoshiteru Dobashi Kozo Hagiya

要 約

砂質地盤内の低温地下式貯槽に作用する凍結土圧に関する解析および実験を実施して一応の成果を収めることができた。解析は有限要素法で行い、未凍土の応力解析に Duncan and Chang の接線弾性係数式を用いた増分法による非線形解析を適用した。実験は直径1.0 m、高さ1.5 m のモデルタンクを用い、ブライン循環方式による冷却方法で行った。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 凍結土圧解析
- § 3. 凍結実験
- § 4. 土質試験・凍上試験および凍土の一軸圧縮試験
- § 5. 実験結果と解析結果との比較
- § 6. あとがき

§ 1. はじめに

LNG・LPG等の低温地下式貯槽において、貯槽内液の冷熱による地盤の凍結を防止するため一般的に低部に関してはヒーティング方式が採用される。しかし、側部に関してはヒーティングを行う場合とヒーティングを行わない場合に分類される。

後者の場合、内液の冷熱が地盤内に移流し地盤を凍結膨張させる。この凍結土がその外側の未凍結地盤を押すことになり、その結果貯槽躯体は反力を受ける。この反力を凍結土圧という。ヒーティングを行わない場合には貯槽躯体の設計で、この凍結土圧の考慮を要する。しかし、この凍結土圧の算定に用いる一般的な慣用式はなく²⁾ 2次元円筒モデルや有限要素法による非線形解析で応力計算しているのが現状である。³⁾⁴⁾

このような前提のもとに、本報告は有限要素法による非線形解析で凍結土圧の算定を試み、併せて実験結果との比較検討を行ったものである。

§ 2. 凍結土圧解析

有限要素法による地盤の応力解析は既に数多くの試み⁵⁾ がなされ一般化しているので、ここでは有限要素法の定式化については省略し、解析上での凍結土及び未凍結土の取扱いについて述べる。

2-1 凍結膨張ひずみ (初期ひずみ)

有限要素法において初期ひずみが発生する問題の場合には、応力・ひずみ関係式は、

$$\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\}) \cdots \cdots (1)$$

となり、凍結膨張ひずみ $\{\epsilon_0\}$ の決定が必要となる。地盤の凍結膨張を表現するのに凍結膨張率があるが本解析ではこれを凍結膨張ひずみとする。ただし、Fig.-1に示すように、凍結膨張ひずみは凍結進行方向（熱流方向）にのみ生じると仮定する。

凍結膨張率については高志等⁶⁾が数多くの実験を行い、拘束圧が大きい程小さく、凍結速度が大きい程小さいという実験結果から、次に示す実験式を提案している。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \cdots \cdots (2)$$

ここに、

ξ : 凍結膨張率

σ : 有効拘束圧 (kgf/cm²)

U : 凍結速度 (mm/h)

ξ_0, σ_0, U_0 : 凍上試験定数

本解析ではこの式を凍結膨張ひずみとして用い、具体的にはFig.-1に示すように t 時間後の凍結膨張要素にこれを与え、問題が軸対称場であることから r —座標系に変換するとひずみベクトルは次のように与えられる。

*技術研究部土木技術課

**技術研究部原子力室

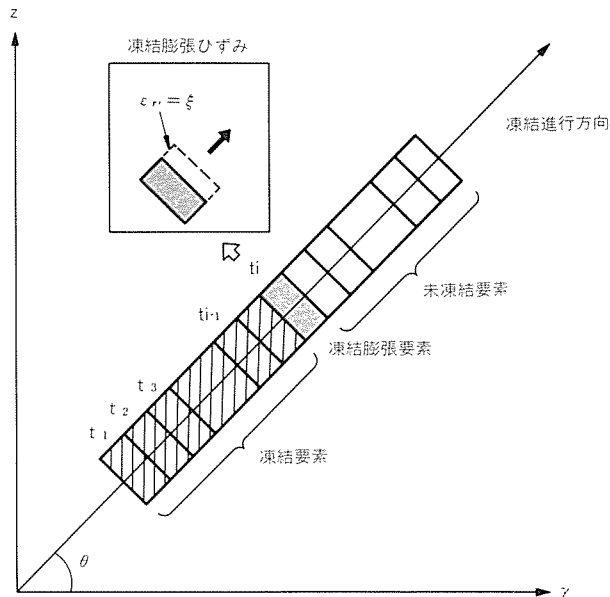


Fig-1 凍結進行と要素特性
Progress of freezing and propaties of freezing element

$$\{\varepsilon_o\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{ro} \\ \varepsilon_{zo} \\ \gamma_{rzo} \\ \varepsilon_{\theta o} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi \cdot \cos^2 \theta \\ \xi \cdot \sin^2 \theta \\ \xi \cdot \sin 2\theta \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

2-2 凍結土の剛性

地盤が凍結するときアイスレンズが発生し凍結土の剛性に異方性が考えられるが、凍結土は等方弾性体として扱う。弾性係数は応力に依存しない一定の値を用いるが、温度低下に伴い剛性が増加するので、これについては考慮し、次に示す式で表わす。

$$E = E_{50} = g - ft \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

E : 弾性係数 (kgf/cm²)

t : 温度 (°C)

g, f : 実験定数

次に、貯槽躯体と凍結土の境界面の剛性については、当然境界面に凍着力が働いてある程度引張力に抵抗すると考えられるが、解析上引張に対しては弾性係数に非常に小さい値を用いて剛性を小さくし、圧縮力のみ伝達するものとする。また、境界面の表現はR・E・グッドマンの提案するジョイント要素を用いて行う。

2-3 未凍結土の剛性

一般に地盤の応力-ひずみ曲線は弾性的でなくごく小さい応力から非線形性を示すことは過去の研究で知られている。従って地盤内応力の計算にはその地盤の応力-ひずみ曲線に基づいた解析が必要となる。本解析ではこ

れらの理由により、土の応力-ひずみ曲線に、Kondnerの双曲線関数を用いDuncan & Changによって導かれた次に示す接線弾性係数式を採用し、未凍結土の変形解析を増分法により行う。

$$E_t = \left\{ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right\}^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

E_t : 接線弾性係数 (kgf/cm²)

R_f : 破壊比

σ_1, σ_3 : 最大主応力および最小主応力 (kgf/cm²)

C : 粘着力 (kgf/cm²)

ϕ : せん断抵抗角 (度)

P_a : 大気圧 (kgf/cm²)

K, n : 実験定数

さらに本解析では、破壊後の地盤は体積圧縮に対して高い抵抗を示すがせん断変形に対して抵抗が小さいという性質を表わすため、応力-ひずみマトリックス $[D]$ を破壊前と破壊後で、次のように変化させる。

破壊前

$$[D] = \begin{bmatrix} M_B + M_D & M_B - M_D & 0 & M_B - M_D \\ M_B - M_D & M_B + M_D & 0 & M_B - M_D \\ 0 & 0 & M_D & 0 \\ M_B - M_D & M_B - M_D & 0 & M_B + M_D \end{bmatrix} \dots\dots(6)$$

破壊後

$$[D] = \begin{bmatrix} M_B & M_B & 0 & M_B \\ M_B & M_B & 0 & M_B \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_B & M_B & 0 & M_B \end{bmatrix} \dots\dots(7)$$

ここに、

$$M_B = \frac{E_t}{2(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$M_D = \frac{E_t}{2(1+\nu)}$$

ν : ポアソン比

2-4 解析プログラムのフロー

Fig.-2に凍結土圧解析プログラムのフローを示す。

§ 3. 凍結実験

実験はFig.-3に示す通り土中に設置した直径5m、高さ2mのコルゲート水槽内にモデル地盤を作成して行った。モデル地盤として比較的凍上性の少ない砂質土を用いたが、これは従来の実験が主に凍上性の高い粘土質地盤に対してなされていることから、逆に凍上性の少ない砂質土の場合どの程度の凍結土圧が発生するかを知り、

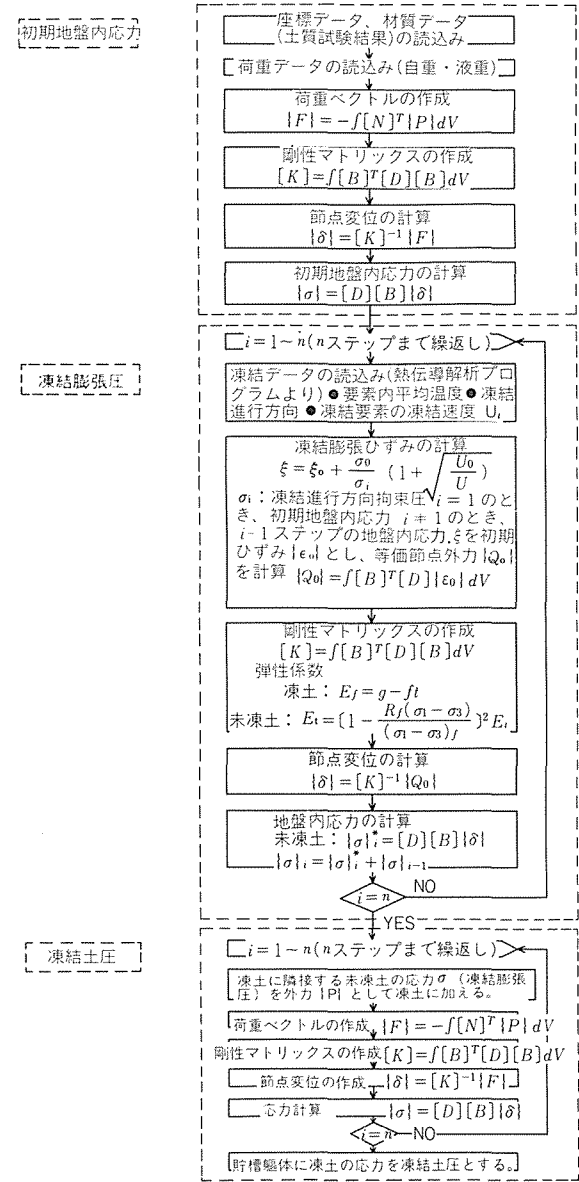


Fig-2 解析プログラムのフロー
Flow sheet of analysis program

併せて、本報告で示した砂質地盤に対する凍結土圧解析法の適用性を知りたいがためである。さらにもうひとつの理由として、現実の地下式貯槽建設場所では周辺地盤が砂質地盤であることが比較的多く、又側部ヒーティングタイプの地下式貯槽の場合でも側壁背面を砂質土で置換し、ある程度凍結を許す方法がとられていることが挙げられる。

モデルタンクは直径1m、高さ1.5mであり、タンク底部にはタンク鉛直下の凍結進行を抑制するために断熱層(t=10cm)を設けた。

熱電対および土圧計等の計測用センサ類の配置をFig.-4に示す。又測定ブロック図をFig.-5に示す。

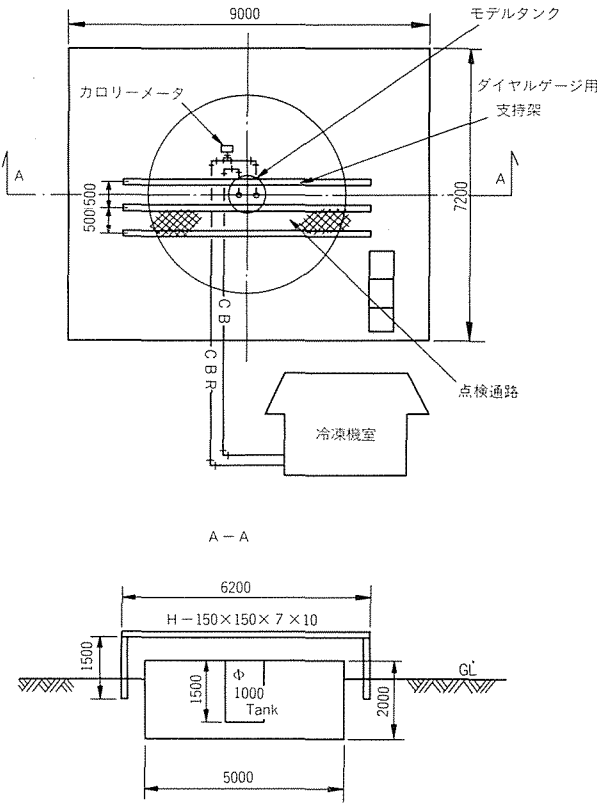
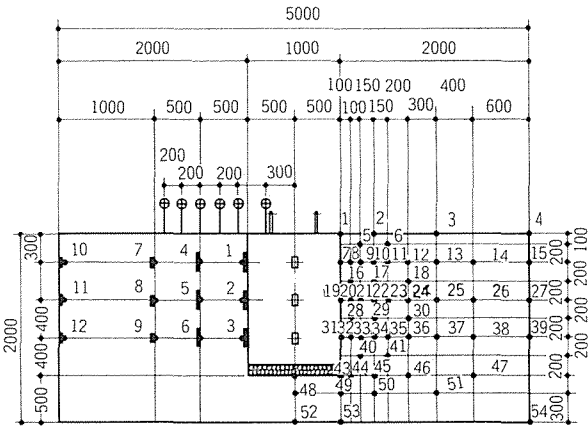


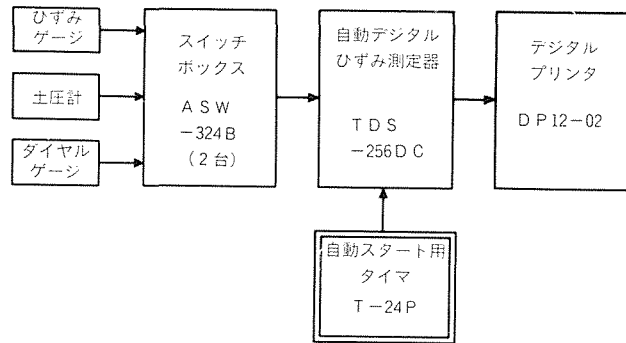
Fig-3 実験計画図
Experimental plan



センサー(記号)一覧表 Symbol of sensors			
記号	センサー	型番	個数
□	ひずみゲージ	KFL-1-C1-11	24
■	土圧計	BE-3KJS	6
		BE-2KC	6
●	熱電対	C-C	71
⊕	ダイヤルゲージ	DDP-30	6

Fig-4 計測センサー配置図
Arrangement of measuring sensor

応力・土圧・変位測定
measurement of stress, earth pressure and displacement



温度測定
measurement of temperature

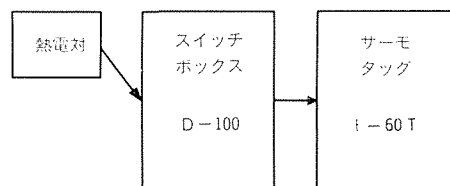


Fig-5 ブロック図
Block diagram of the measurement

§ 4. 土質試験・凍上試験および凍土の一軸圧縮試験

凍結土圧解析に必要なデータを得る目的で各種試験を実施したので結果を紹介する。

4-1 土質試験

熱伝導解析および未凍結土の非線形解析に必要なデータを得る目的でモデル地盤の物理試験および力学試験を実施した。

(1) 物理的性質

Table-1 に示す通りである。

Table-1 物理的性質
Physical properties

比重 G_s		2.74
粒度 (%)	シルト分	2
	砂 分	98
含水比 w_n (%)		22.2
飽和度 S_r (%)		70.1
容積分水率 p (%)		32.6
空ゲキ率 p' (%)		13.9

(2) 力学的性質

三軸圧縮試験 (CD 試験) から求めた, Duncan & Chang の接線弾性係数式に対する各定数の値は Table -2 に示す通りである。

Table-2 力学的性質
Mechanical properties

R_f'	0.86
K	760
n	0.43
C_d (kgf/cm ²)	0.1
ϕ_d (°)	43.4

4-2 凍上試験

本試験の主目的は凍結膨張率に及ぼす有効応力, 凍結速度の影響を調べ, 凍結土圧解析に用いる凍上試験定数の決定にある。

不攪乱状態で供試体を作製することは困難であったので, 攪乱した試料土を試験装置の試料収納シリンダーに充填する方法で供試体を作製した。試験装置は供試体に任意の有効拘束圧を加えた状態で水分の吸排水が自由ないわゆる開放型の凍上試験が可能である。

試験は有効拘束圧, 凍結速度の影響を調べるため 2 つのシリーズに分けて行った。

[シリーズ A]

目的: 凍結膨張率に及ぼす有効拘束圧の影響

凍結速度: 1.5mm/h (一定)

有効拘束圧: 0.03, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 および
4.0kgf/cm²

[シリーズ B]

目的: 凍結膨張率に及ぼす凍結速度の影響

有効拘束圧: 1.0kgf/cm² (一定)

凍結速度: 0.98, 1.23, 2.25, 3.05 および
4.39mm/h

試験の結果, 本試料土に対する実験式として次の式が得られた。

$$\xi = 0.0017 + \frac{0.030}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{11}{U}} \right)$$

ただし, σ の単位は [kgf/cm²], U の単位は [mm/h] である。

4-3 凍土の一軸圧縮試験

本試験の主目的は凍結土の弾性係数に及ぼす温度の影響を調べることにある。試験は, -2, -5, -10, -20℃ の各温度について行った。試験の結果は式(4)で整理すると次の実験式が得られた。

$$E = 470 - 950t \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ここに,

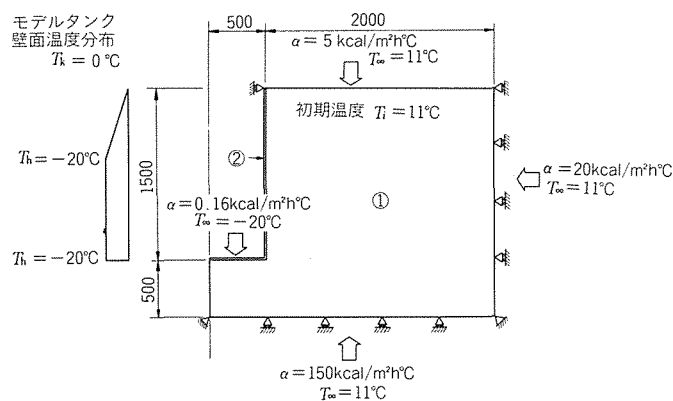
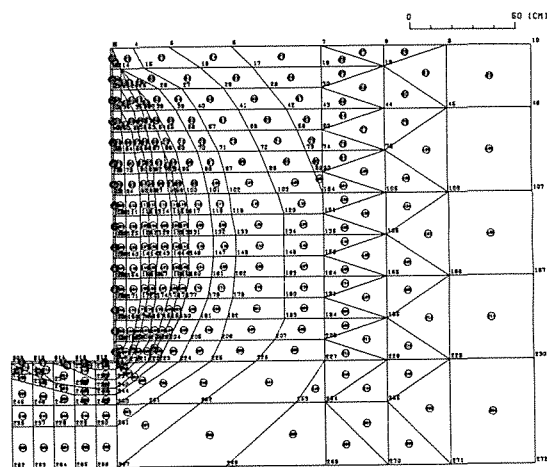
t : 温度 (°C)

§ 5. 実験結果と解析結果との比較

5-1 解析モデル

Table-3 解析用定数
Constants used for analysis

番号	部材名	状態	熱伝導率 (kcal/mh°C)	密度 (kg/m³)	比熱 (kcal/kg°C)	凍結潜熱 (kcal/kg)	弾性係数 (kgf/cm²)	ポアソン比	粘着力 (kgf/cm²) せん断抵抗角 (度)	凍土率
①	モデル地盤	凍結前	1.67	1,792	0.329	14.5	$E_1 = \left[1 - \frac{0.27(\sigma_1 - \sigma_2)}{0.145 + 1.37\sigma_1} \right]^2 \times 760\sigma_1^{0.5}$	0.35	$C_u = 0.1$ $\phi_d = 43.4$	$f = 0.0017 + \frac{0.030}{\sigma} \left(1 + \frac{11}{V} \right)$
		凍結後	2.24	1,876	0.250	—	$E_2 = 470 - 950t$	0.33	—	—
②	モデルタンク	—	36.0	7,850	0.117	—	$E = 2.1 \times 10^6$	0.3	—	—

Fig-6 境界条件
Boundary conditionFig-7 要素分割図
Finite element mesh

熱伝導解析と凍結土圧解析の解析モデルの要素分割は共通であり、境界条件および要素分割はそれぞれFig.-6、Fig.-7に示す通りである。

5-2 温度

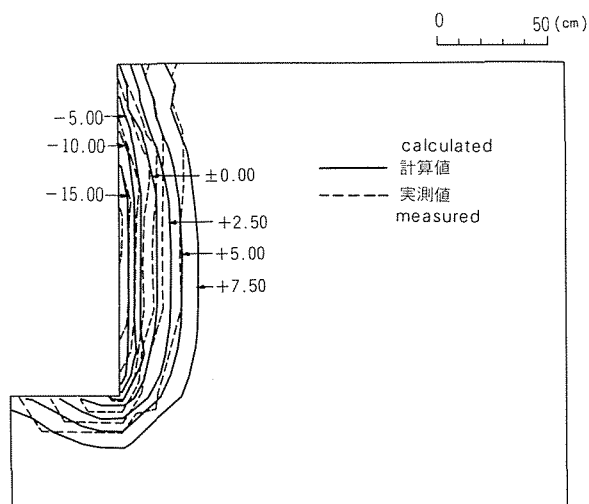
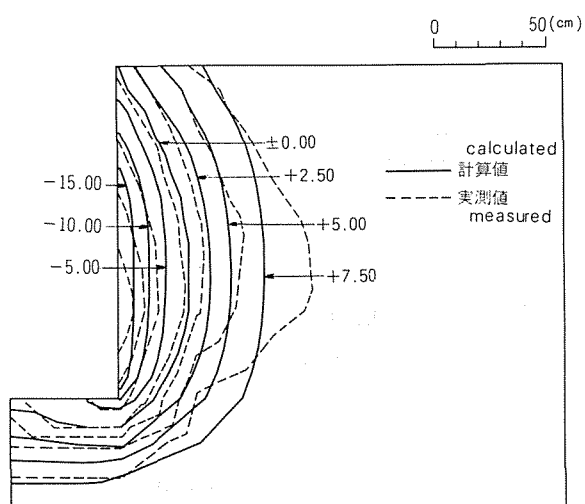
Fig.-8およびFig.-9はそれぞれ凍結開始から12時間経過後と48時間経過後の地盤の等温線（モデルタンク側面側から順に、-15°C、-10°C、-5°C、0°C、2.5°C、5°C、7.5°C）を示したものである。図中、実線は非定常熱伝導解析プログラムによる計算値を示し、破線は実測値を示す。これらの計算値と実測値との凍結進行に関する比較結果を考察すると、定性的な傾向は、全体によ

く一致しているが、定量的な面では計算値が実測値を上廻る傾向を示している。このことは過去の実験においても同様の結果が示されており、一般にFEMによる熱伝導解析を行う場合、この程度の解析対象時間の範囲内では計算値が実測値を上廻る傾向がある。

Fig.-10～Fig.-14に各測点の地中温度の経時変化（実測値）を示す。図中の番号はFig.-4に示した熱電対の番号と対応する。

5-3 凍結土圧

Fig.-15は凍結開始より2時間後から48時間後までの

Fig-8 12時間後の等温線
Isotherm contour after 12h.Fig-9 48時間後の等温線
Isotherm contour after 48h.

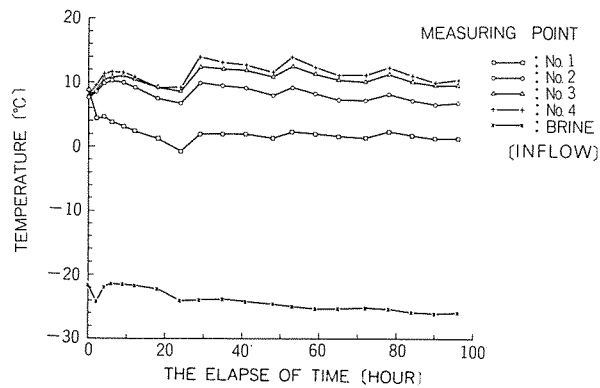


Fig-10 地中温度の経時変化 (GL ± 0.0) (実測値)
Ground temperature change with time
(GL ± 0.0)(measured)

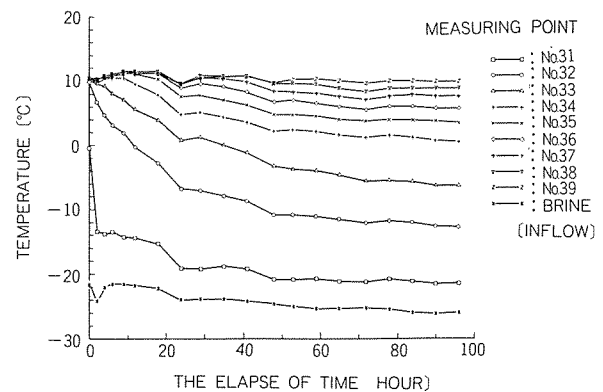


Fig-13 地中温度の経時変化 (GL - 1.100) (実測値)
Ground temperature change with time
(GL - 1.100)(measured)

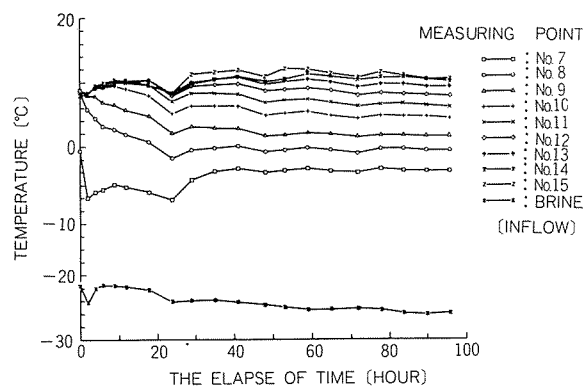


Fig-11 地中温度の経時変化 (GL - 0.300) (実測値)
Ground temperature change with time
(GL - 0.300)(measured)

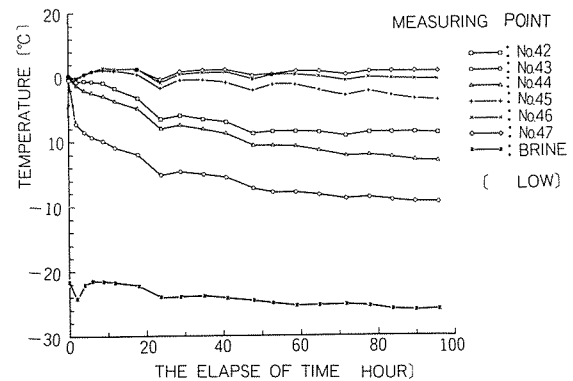


Fig-14 地中温度の経時変化 (GL - 1.500) (実測値)
Ground temperature change with time
(GL - 1.500)(measured)

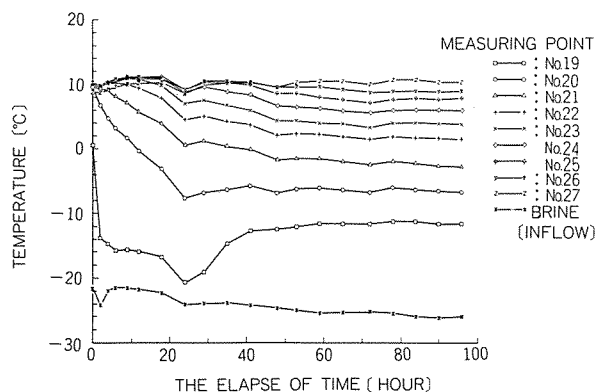


Fig-12 地中温度の経時変化 (GL - 0.700) (実測値)
Ground temperature change with time
(GL - 0.700)(measured)

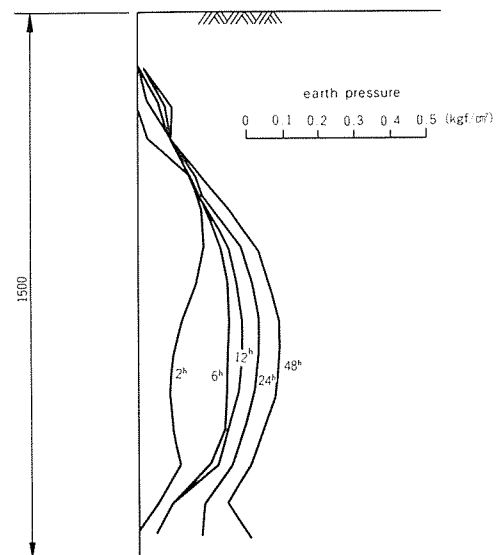


Fig-15 初期土圧を含まない凍結土圧 (計算値)
Freezing earth pressure excluding
initial pressure (calculated)

初期土圧を含まない凍結土圧の計算値を示したものである。Fig.-16は各時間における凍結土圧の実測値をプロットしたものであり、各番号はFig.-4の土圧番号と対応する。この実測結果は土圧計の温度低下に伴う零ドリフトを考慮しているものの、現実の凍結土圧を表わしていないと考えられる。これは主に次の理由による。まず凍結初期においては、急激な温度低下により土圧計の前後面に温度差が生じ、温度ひずみが発生したこと、また

次に土圧計の周囲が凍結した後は土圧計の出力が低下したことである。

Fig.-17, Fig.-18はそれぞれ初期土圧を含まない凍

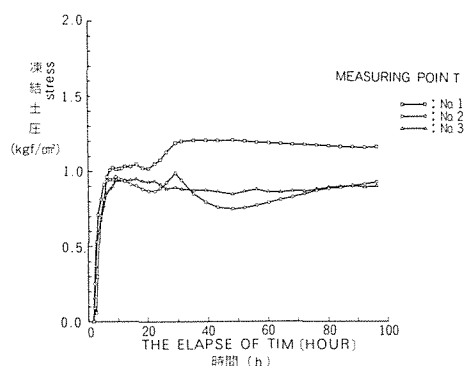


Fig-16 凍結土圧の経時変化(実測値)
Change of freezing earth pressure
with time (measured)

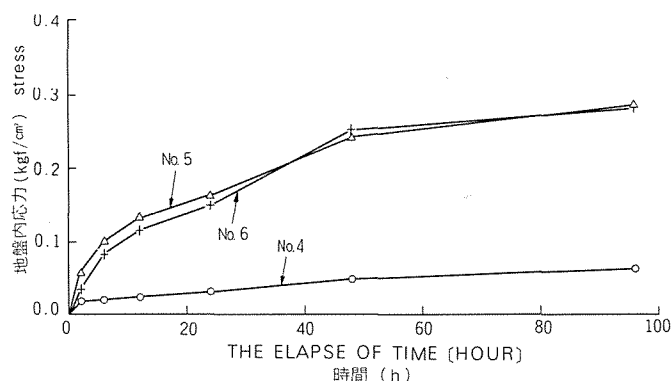


Fig-17 初期土圧を含まない凍結膨張による地盤内応力
(計算値)
Calculated stress in the ground caused by the
freezing inflation (excluding initial pressure)

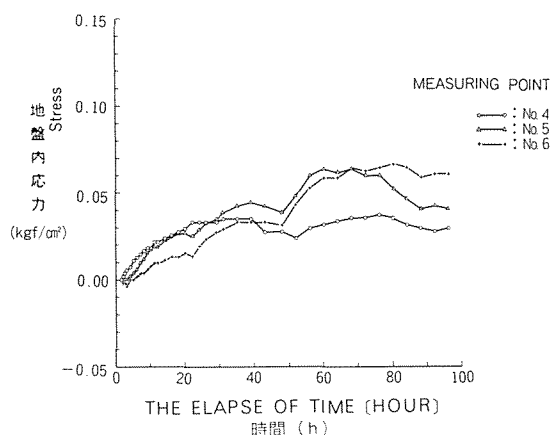


Fig-18 地盤内応力の経時変化(実測値)
Change of stress in ground with time
(measured)

結膨張による地盤内応力の経時変化の計算値と実測値を示したものであり、図中の番号は、Fig-4の土圧計番号と対応する。両者を比較すると、実測値の場合、各測点ともほぼ同じ値を示しているのに対し、計算値の場合、浅い位置にあるNo. 4と比較的深い位置にあるNo. 5およびNo. 6との間には大きな差が見られる。No. 5および

No. 6に着目すると計算値の方が実測値に比べ3倍程度の値を示している。これは温度の項で述べたように、計算値の方が凍結進行において上廻っていることと、凍結膨張ひずみの算定に用いた(2)式が一般に凍上性の高い粘性土に適用されており、今回の実験のような凍上性の少ない砂質土の場合、凍上試験定数の決定が難しく、凍結膨張ひずみに過大な評価を与えたことなどが原因と考えられる。

§ 6. あとがき

今回の解析・実験を通じて、砂質地盤における凍結土圧についてある程度の理解を深めることができた。しかし問題点もかなり残されており、今後の検討課題も含めて、列挙すると次のようになる。

- (a) 解析上の問題として、凍上性の少ない砂質地盤において凍結膨張ひずみの算定式に(2)式を用いる場合の凍上試験定数の評価。
 - (b) 凍結土圧の測定に関して土圧計を用いる場合の土圧計前後面の温度差によるひずみの消去方法。
- 最後に本実験に御協力頂いた関係者各位に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 電気事業連合会「LNG地下式貯槽(土木設備)設計指針」, 昭和53年
- 2) 高志「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250号, 1972年
- 3) 中村, 高橋, 松本, 阿部「LNG地下タンクの凍結土圧に関する有限要素解析」第14回土質工学研究発表会, 昭和54年
- 4) 川崎, 井畔, 後藤「地盤の粘弾性現象を考慮した凍結膨張解析法」, 土木学会第34回年次講演会, 昭和54年
- 5) 吉識監訳「マトリックス有限要素法」, 培風館
- 6) 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年
- 7) R. E. グッドマン「不連続性岩盤の地質工学」, 森北出版
- 8) Dancan J.M. and Chang C-Y「Nonlinear Analysis of stress and strain in soils」, JSMFD, ASCE Vol.96, SM5, 1970年
- 9) 小沢「土の弾塑性有限要素解析について」, 土木学会第29回年次講演会, 昭和49年
- 10) 土橋, 吉田, 平野「低温地下タンク基礎実験」, 西松建設技報 Vol. 1, 1978年