

LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第 6 報)

——凍土圧計の適用性について——

西林 清 茂 上野 孝 之
佐藤 哲 杉江 茂 彦

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas (Part 6)

——Application of Earth Pressure Gage to Frozen Soil——

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno
Tetsu Sato Shigehiko Sugie

Abstract

Expansion pressure is produced at the frozen plane of the ground surrounding an underground LNG storage tank as freezing progresses with time because of the cold energy of LNG (-162°C). Pressure is applied to the side wall of the tank as reaction to this expansion pressure. The sensor that measures this pressure is a cryogenic earth pressure cell. This cryogenic earth pressure cell should satisfy certain conditions, for example, the output should be constant under variations in the modulus of elasticity, the drift of output due to temperature is constant, etc. In this paper, the authors describe a study of static properties of frozen soil after which two types of earth pressure cells were embedded in concrete, and loading tests were carried out with frozen soil as the medium. As a result of the tests it was found that one of the two types of earth pressure cells showed good qualities by considering drift of output by temperature and that it can be used as a wall earth pressure cell.

概 要

LNG 地下式貯蔵槽の周辺地盤は LNG (-162°C) の冷熱のため時間の経過とともに凍結が進行し凍結面で膨張圧が生ずる、この膨張圧の反力としてタンク側壁に圧力が加わる。この圧力を測定するものが凍土圧計であるが、低温下に置かれるため種々の条件（例えば土の剛性の変化に対して出力が一定であること、温度ドリフトが一定であることなど）を備えている必要がある。本実験では凍結土の力学的特性を把握した後、2種類の土圧計（ロードセル型、2次ダイヤフラム型）をコンクリートに埋め込み、凍土を介して載荷試験を行なった。試験の結果2次ダイヤフラム型土圧計が比較的良好な性能を示し温度ドリフトを考慮することによって壁面凍土圧計として適用可能であることが判明した。

1. まえがき

液化天然ガス (LNG) を地下に貯蔵することは安全性、敷地の有効利用などの点で有利であるが、反面周辺地盤の凍結が時間とともに進行することによって種々の問題が生じてくる。

粘性土が凍結すればその体積は膨張し、地盤に変位が生じて躯体および周辺の構造物に圧力を及ぼす。地下貯蔵槽本体に作用する圧力がどの程度であるかは確かめられていない。また土は凍ると強度・変形係数は常温とはかけ

はなれたものとなる。

ここでは凍結した砂と粘土の強度～変形特性を調べ、つぎに2種類の土圧計について凍土を介した載荷試験を行ない壁面凍土圧計としての適用性を調べた。

2. 凍土の強度・変形特性

2.1. 供試体作成方法

試験に用いた試料は砂とカオリン粘土で、粒径加積曲線を図一1に示す。砂は乾燥密度 1.5 g/cm^3 で飽和状態に、カオリン粘土は含水比118%に調整して鋼製モール

ドに入れ冷凍庫 (-20°C) で凍結させた。供試体寸法は直径 5 cm, 高さ 10 cm である。この冷却方法で作成した凍土は一般にコンクリート状凍土と呼ばれる。

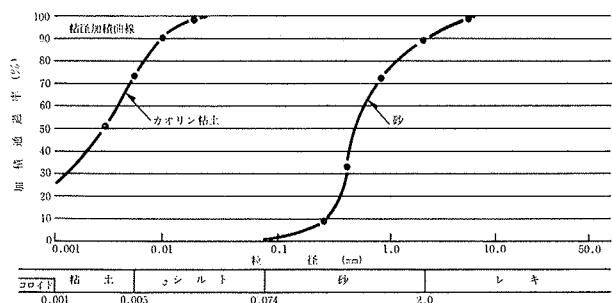


図-1 粒径加積曲線

2.2. 試験装置

試験装置は液体窒素を噴霧することにより常温から -120°C の範囲を ±0.5°C の精度で制御できる低温槽と載荷能力が 5 ton, 載荷速度が 0.002 から 2 mm/min. まで任意に設定できる加圧装置から構成されている。試験装置を写真-1 に示す。

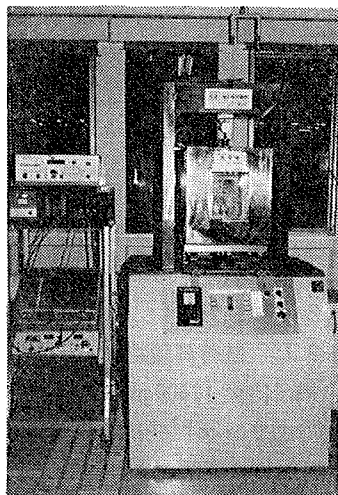


写真-1 試験装置

2.3. 試験条件

凍結土の一軸圧縮試験は -2, -5, -10, -20, -30°C の各温度で行なった。圧縮ひずみ速度は 1%/min. とした。

2.4. 試験結果

応力～ひずみ曲線の一例を図-2 に示す。砂の場合

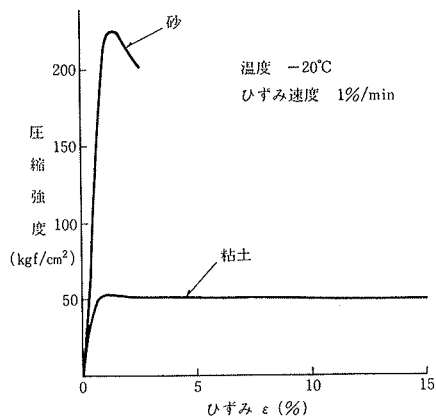


図-2 応力～ひずみ曲線

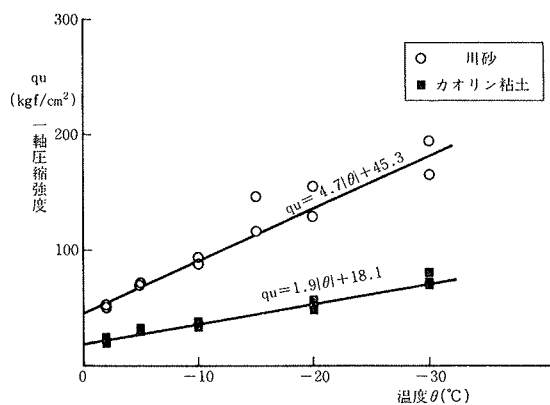


図-3 圧縮強度と温度

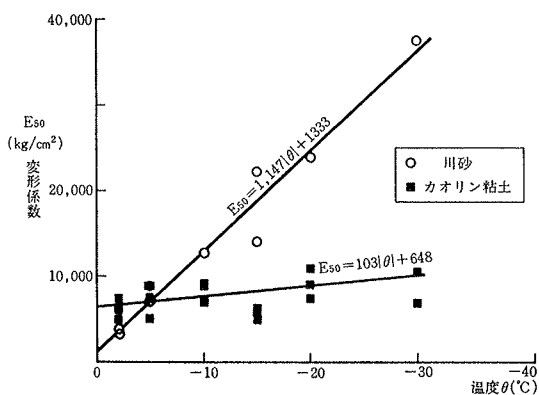


図-4 変形係数と温度

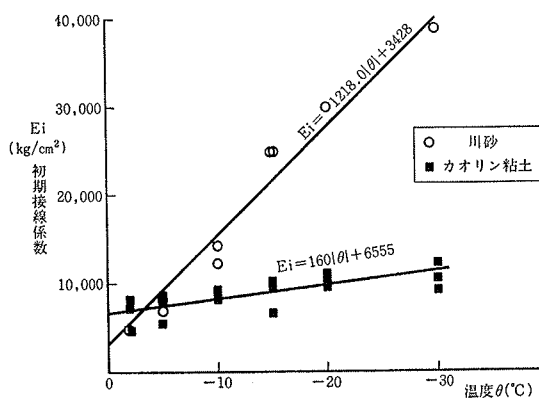


図-5 初期変形係数と温度

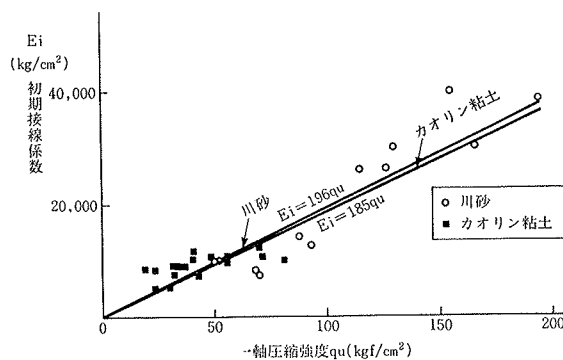


図-6 強度と初期変形係数

隙な最大値があらわれたのに対し、カオリン粘土はひずみが増大しても応力はほぼ一定となった。同じ温度では砂に比べ粘土の q_u は小さい。図-3, 図-4, 図-5 にはそれぞれ温度 (θ) と強度 (q_u), 変形係数 (E_{50}), 初期接線係数 (E_i) の関係を示す。強度, 変形係数, 初期接線係数は温度依存性があり温度の低下とともに直線的に増加する傾向にある。図-6 は強度と初期接線係数の関係である。初期接線係数は強度の変化と比例関係にあることが認められる。

3. 土圧計の性能試験

土は低温になると強度, 剛性が増し温度の低下によりその値も直線的に増加する。凍結膨張圧を計る土圧計はそれらの変化に対応して測定できるものでなければならない。ここでは2種類の壁面土圧計の性能評価試験を行った。

3.1. 土圧計の仕様

凍土は剛性があるため土圧計の受圧面に対しアーチアクションが働くと考えられる。そのためロードセル型土圧計は受圧面の面積を大きくすることにより, 2次ダイヤフラム型土圧計は剛性を増すことによりこの影響を小さくできると予測した。

(1) ロードセル型土圧計(図-7)

剛な受圧板を3個の差動トランス型土圧計で支持し, 変形をピストン式とした。見かけ上の剛性を上げるため土圧計の厚みを増した。

(2) 2次ダイヤフラム型土圧計(図-8)

土圧は薄い1次ダイヤフラムを介して液圧で2次ダイ

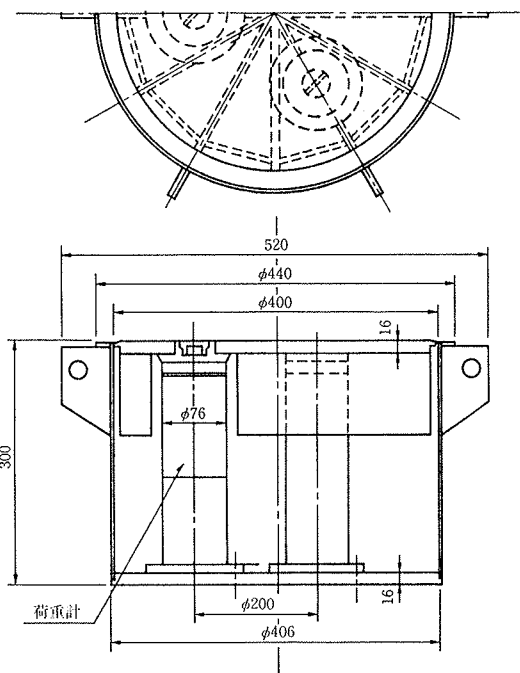


図-7 ロードセル型土圧計

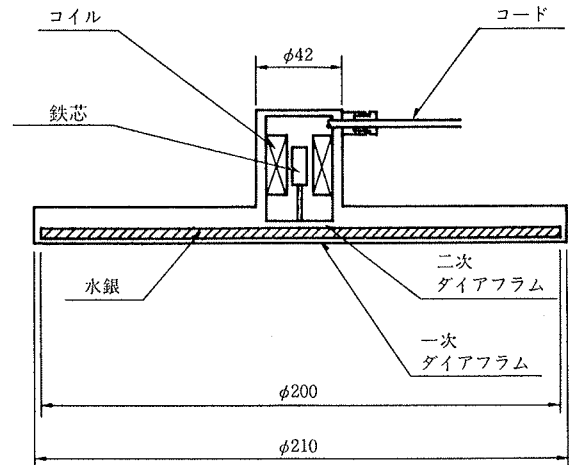


図-8 2次ダイヤフラム型土圧計

凍土圧計	容量	受圧面直径	取き	見かけのヤング率	計器の外径(D) 受圧板中央のたわみ量(a)
ロードセル型 凍土圧計	10kg/cm ²	400mm	300mm	1.01×10 ⁵ kg/cm ²	-
2次ダイヤフラム型 凍土圧計	15kg/cm ²	200mm	12mm	2.11×10 ⁵ kg/cm ²	1.4×10 ⁵

表-1 土圧計の仕様

ヤフラムへ伝達される。1次ダイヤフラムと2次ダイヤフラムの面積比を大きくとることにより受圧面変形を小さくできる。

3.2. 試験方法

3.2.1. 載荷試験装置

使用した土槽を図-9に示す。土槽は内径1,400mmで周囲は断熱材で覆われている。内部のコンクリートの厚さは400mmで, 土を1,500mmの厚さで入れることができる。土試料, コンクリート, 土圧計を冷却するためφ15mmの冷却管を埋設し, 一様に冷却されていることを確認するため熱電対を設置した。また等分布に載荷されていることを確認するため, ひずみ計をコンクリート内に設置した。コンクリートの圧縮強度・初期接線係数は常温で $\sigma_s = 240 \text{ kgf/cm}^2$, $E_c = 2.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。これらの値は温度の低下とともに増加する^{1), 2)}。

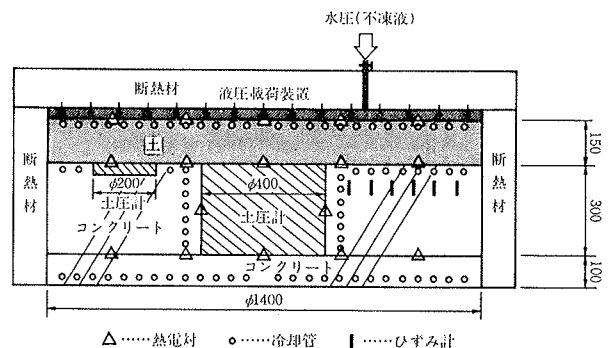


図-9 試験土槽

3.2.2. 冷却・載荷システム

図-10に冷却・載荷システムを示す。低温槽内の不凍液を冷凍機で所定の温度に冷却し, 土槽内に配管した冷却管内を循環させて一様

に冷却した。載荷は水圧（不凍液）をかけて行なった。

3.3. 試験内容と手順

3.3.1. 温度ドリフト試験 LNG タンク側壁は時間とともに低温になるため土圧計も温度の影響を受けると考えられる。そこで土圧計単体の零点移動量を低温槽を用いて測定した。低温槽は液体窒素を噴霧することにより常温から -120°C まで制御できる。試験は常温から -40°C の範囲で行なった。

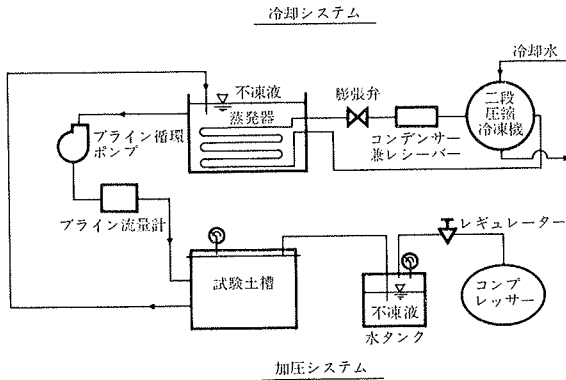


図-10 冷却載荷システム

3.3.2. 水圧試験 液体を使用した場合の出力確認のため図-9の土の変わりに受圧面に直接水圧をかけた。

3.3.3. 土を介した載荷試験 土試料は強度変形特性の試験に供した砂とカオリン粘土を用いた。砂は乾燥密度： $\gamma_d=1.5\text{ g/cm}^3$ に調整したものを乾燥状態と飽和状態の二つの状態で使用した。粘土は含水比60%に調整したものを上部から給水させ凍結速度がほぼ一定となるよう1次元凍結させた。最終含水率は118%であった。

試験は常温、 -2 、 -5 、 -10 、 -15 、 -20 、 -30°C の各温度で、図-9の状態の上部載荷装置から液圧による載荷を行なった。

4. 試験結果とその考察

4.1. 温度ドリフト

図-11に温度ドリフト試験結果を示す。両者とも温度に対し直線的にドリフトしている。ロードセル型土圧計

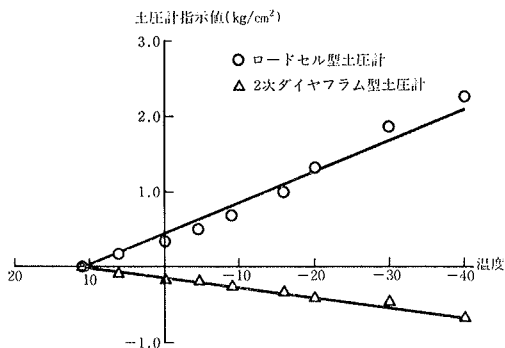


図-11 温度ドリフト

は $0.04\text{ kgf/cm}^2/^{\circ}\text{C}$ 、2次ダイヤフラム型土圧計は $-0.01\text{ kgf/cm}^2/^{\circ}\text{C}$ のドリフト量であった。

4.2. 水圧試験

水圧試験による検定曲線は二つの土圧計とも直線性があり過圧、減圧の過程でヒステリシスはなく、繰り返しの影響もなかった。以後この結果から得られた係数を用いて指示土圧に換算する。

4.3. 土を介した載荷試験

図-12に飽和砂を用いた場合の各試験温度での加圧力と指示土圧の関係を示す。加圧力は上載加力装置の液圧、指示土圧は土圧計の出力を意味する。乾燥砂を用いた各試験温度での結果は、飽和砂の常温での結果と同じであった。

図-13に粘土を用いた場合の各試験温度での加圧力と指示土圧の関係の一例を示す。

両土圧計とも加圧力と指示土圧は各試験温度で1次の相関が得られ、繰り返しの影響もなかった。また載荷時のコンクリート面に加わる荷重は、コンクリート中のひずみ計から換算し、ばらつきはあったが等分布であることが確認された。

図-14に温度と土圧計の指示率の関係を示す。指示率は土圧計の指示土圧と加圧力の比を意味する。

乾燥砂を用いた場合、各試験温度に対してすべて指示率は一定でロードセル型土圧計で0.7、2次ダイヤフラム型で1を得た。乾燥砂は低温になっても剛性が変化しないと考えられるので、両土圧計の出力は温度に影響されず一定であることがわかる。飽和砂の場合、ロードセル型土圧計の指示率は 0°C 以下で約0.1と急激に小さくなる。2次ダイヤフラム型では 0°C 以下で指示率0.8とほぼ一定であった。粘土の場合はロードセル型土圧計では 0°C 以下で0.3から0.1と徐々に小さくなり、2次ダイヤフラム型では約0.8と一定値を示している。

図-15に土の初期接線係数と指示率の関係を示す。ロードセル型土圧計の指示率は初期接線係数の増加につれて低減し $E_i=1.0 \times 10^4\text{ kg/cm}^2$ 以上では約0.1であった。2次ダイヤフラム型土圧計の指示率は $E_i=6 \times 10^3\text{ kg/cm}^2$ 以上では0.8と一定であった。両土圧計とも指示率は土の種類に関係なく土の初期接線係数で表現できることがわかる。

低温になるとロードセル型土圧計の出力が急激に減少する原因として、土圧計の剛性がコンクリートに比べ小さいため、土の剛性が増すほど加圧力はコンクリートに応力集中すると考えられる。

2次ダイヤフラム型土圧計は次の処理を行なうことにより壁面凍土圧計として適用可能であると判断した。

(1) 温度ドリフト分を補正する。

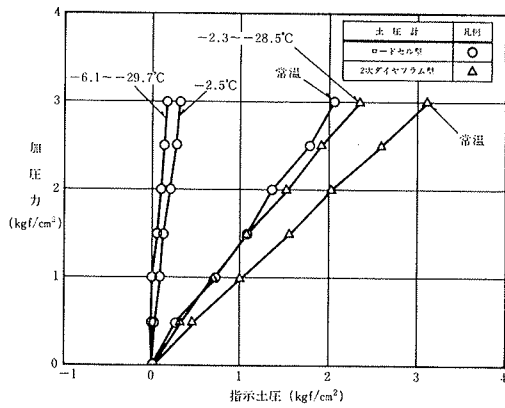


図-12 砂を用いた場合の検定曲線

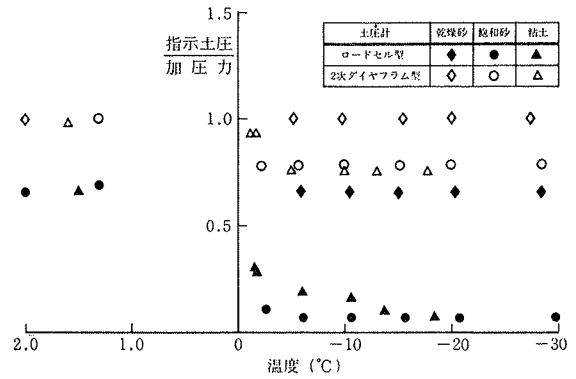


図-14 土の温度と土圧指示率

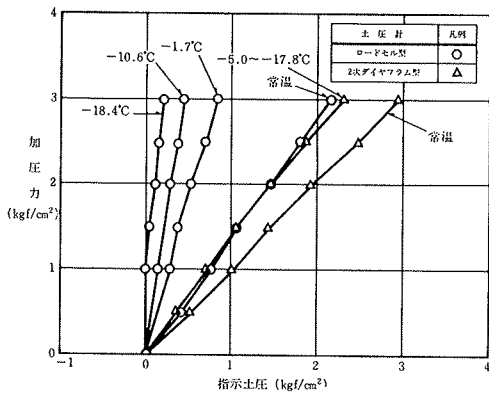


図-13 粘土を用いた場合の検定曲線

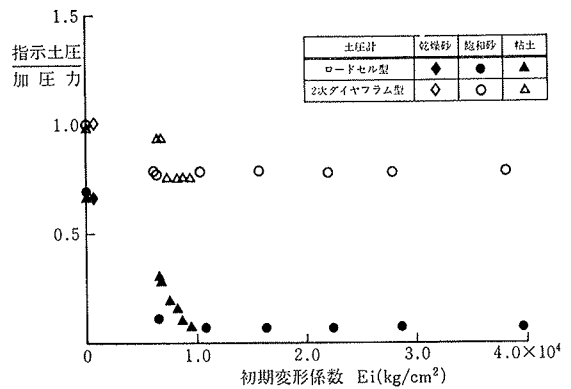


図-15 土の初期変形係数と土圧指示率

(2) 適用する周辺地盤の低温時の初期接線係数より指示率を求める。

5. あとがき

凍結した土の強度と変形係数は低温になるにつれて直線的に増加するといわれているが本実験においても同様の結果となった³⁾。このような性質をもつ凍土を対象とした土圧計の壁面凍土圧計としての適用性については2次ダイヤフラム型が比較的良好な結果を示し、指示率と温度ドリフトの補正を行なうことによって使用可能であることがわかった。

今回凍結土の剛性をひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1\%/min.$ の一軸圧

縮試験で評価しているが凍結土の強度変形特性はひずみ速度にも影響される。今後はひずみ速度を考慮した実験を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 斎藤, 内藤, 上野, 土屋: LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第3報), 大林組技術研究所報, No. 10, (1975), pp. 101~105
- 2) 内藤, 上野, 十河, 久木田: LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第4報), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 134~138
- 3) 木下誠一: 凍土の物理学, 森北出版, pp. 61~73