

石川島播磨重工業 工博 秋田好雄
" 工博 矢田敏夫
" 正員 柳沢一郎

1. まえがき

LPG, LMGなどの低温の液体を貯蔵するに従来の地上タンクを用いてきたが、これを地下タンクに貯蔵すると安全性と経済性においていくつもの利点がある。このため最近アメリカやフランスなどではこれらの可燃性低温液体を地下タンクに貯蔵する趨勢にある。

我国ではこれらの可燃性の低温液体を貯蔵する大型の地下タンクはまだ構築されておらず、このことはこれらの需要が少なかったことによるが、今後これらの需要は大幅に増加する傾向にあるので、低温液体貯蔵用の安全で且つ経済的な地下タンクの建設が要望されている。

地下タンクの中に低温の液体を入れることにより、タンクの側壁内に温度差を生じその結果熱応力が発生する。この熱応力は初期のタンクの徐冷速度に依存する。また時間の経過とともに、タンク周辺の水分を含む土壌は凍結する。凍結によって体積膨張を起して凍土はタンクに凍上現象や凍結土圧を生ずることになる。更にタンクを冷却する初期に特に低温液体の蒸発量が多くなる。そこで地下タンクに低温の液体を入れたときにかかる熱的諸問題について述べる。

2. 本体および土壌の冷却に伴う諸現象

一般に低温地下タンクは内張鋼板、コンクリートそれに必要に応じて断熱材から構成されることが多いと予想される。そこで低温地下タンクの熱的問題をなすものは材料の低温特性、温度分布、熱応力、蒸発熱量、凍上、凍結土圧について考察する。

(1) 本体の材料および凍結土の低温特性

低温液体貯蔵用地下タンクは液の漏洩防止のために薄肉の内張鋼板を使用するが、鋼板は低温になると脆性破壊を起す危険性があるので使用温度において十分な靱性を有する材料の鋼板を使用しなければならない。

そこで軟鋼およびアルミキルド鋼のシャルピー衝撃試験を行なったところ図-1に示す。これからSS-41の2~3mm程度の薄鋼板は-80℃までは低温靱性が常温に較べて劣化するところがないのでLPG用には安心して使用できるとことが確認された。しかしLMGなどの様な超低温の液体を貯

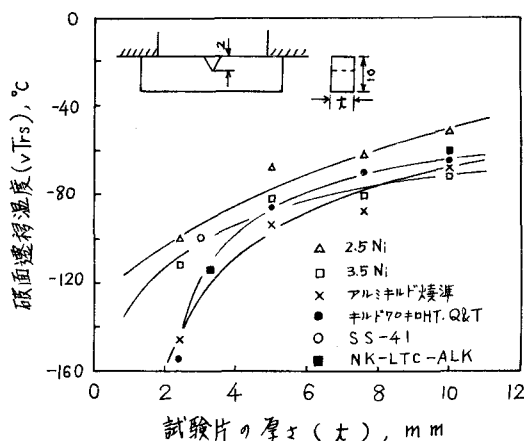


図-1 シャルピー衝撃試験結果

蔵する地下タンクの内張鋼板は9%ニッケル鋼，アルミニウム合金，ステンレス鋼などが適当であ
らう。シャルピー衝撃試験に使用した材料の化学成分と機械的性質を表-1に示す。

B. E. Eakin⁽¹⁾ によつてコンクリート
の圧縮強度は-130℃で常温の3倍，低温引
張強度は-60℃で常温の2.5倍程度に向上
することが報告されている。特にコンクリー
ト中に含まれる水分およびセメント量の多い
ものほど低温になると強度が増す。

次にアメリカの LNG Tank Group⁽²⁾
によつて，凍結土のコンクリートと同様に

低温強度が増すことが報告されている。凍結土の圧縮強度は-150℃で最大700 kg/cm²を示すコンクリ
ートと同程度の強度を期待することが地下タンクの強度上大いに有利であると思われる。

(2) 本体および土壌の温度分布，凍結深度

断熱材，円筒タンクの壁，凍結土壌，未凍結土壌からなる有限中の多層体の熱伝導を理論的に且つ
厳密に解くことは非常に困難である。実際に低温地下タンクの設計に当り，これは各部材の温度分布，熱
応力および各部材の影響を考慮したときの凍結深度，蒸発量などを明確にせよと必要である。
そこで著者は各部材の熱的現象を把握するため次の様な一次元の多層体に於ける熱伝導の近似解
法を試みた。計算モデルは図-2に示す様に三層の部材から構成されているものとし，タンクの内面
は瞬間的に低温 (θ_c) に冷却されるものと仮定すると，Laplace 変換を応用することによつて，各部
材の温度分布は次の様に求められぬ。

- ここに θ_c, θ_∞ 液温及び地中平均温度 (°C)
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 各部材の温度 (°C)
- K_1, K_2, K_3 " 熱伝導率 (kcal/mh°C)
- k_1, k_2, k_3 " 温度伝導率 (m²/h)
- t 時間 (h)

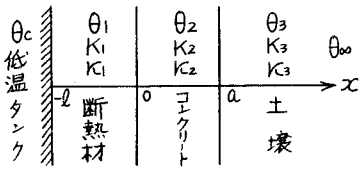


図-2 計算モデル

$$\frac{\theta_3 - \theta_\infty}{\theta_c - \theta_\infty} = \frac{2(1-\alpha_0)}{1+\sigma} \left[\operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + a + \frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + a + \frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} - \alpha\alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 3a + \frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 3(a + \frac{l}{k})\}}{2\sqrt{K_2 t}} \right. \\ + \alpha^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + a + \frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} - 2\alpha^2 \alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 3(a + \frac{l}{k})\}}{2\sqrt{K_2 t}} + 2\alpha\alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 3a + \frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha^2 \alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 5a + \frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} \\ \left. - 2\alpha\alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 5a + \frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x-a)k_0 + 5(a + \frac{l}{k})\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \dots \right] \quad (1)$$

$$\frac{\theta_2 - \theta_\infty}{\theta_c - \theta_\infty} = \frac{2}{1+\sigma} \left[\operatorname{erfc} \frac{x + \frac{l}{k}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha \operatorname{erfc} \frac{x + \frac{3l}{k}}{2\sqrt{K_2 t}} - \alpha\alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(x+2a) + \frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + (\alpha_0^2 - 2\alpha^2 \alpha_0) \operatorname{erfc} \frac{\{(x+2a) + \frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} \right. \\ \left. + \alpha^2 \operatorname{erfc} \frac{x + \frac{5l}{k}}{2\sqrt{K_2 t}} + 2\alpha\alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(x+2a) + \frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha^2 \alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x+4a) + \frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} - 2\alpha\alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x+4a) + \frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(x+4a)+\frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} - \left\{ \alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(2a-x)+\frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha_0 \operatorname{erfc} \frac{\{(2a-x)+\frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} - \alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(4a-x)+\frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} \right. \\
& + (\alpha_0^2 - 2\alpha_0^3) \operatorname{erfc} \frac{\{(4a-x)+\frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha_0^3 \operatorname{erfc} \frac{\{(2a-x)+\frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + 2\alpha_0 \alpha_0^2 \operatorname{erfc} \frac{\{(4a-x)+\frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} \\
& \left. + \alpha_0^2 \alpha_0^3 \operatorname{erfc} \frac{\{(6a-x)+\frac{l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} - 2\alpha_0 \alpha_0^3 \operatorname{erfc} \frac{\{(6a-x)+\frac{3l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} + \alpha_0^3 \operatorname{erfc} \frac{\{(6a-x)+\frac{5l}{k}\}}{2\sqrt{K_2 t}} \right\} \dots \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\text{ただし } k^2 = \frac{K_1}{K_2} \quad k_0^2 = \frac{K_2}{K_3} \quad \sigma = \frac{K_2}{K_1} k \quad \sigma_0 = \frac{K_3}{K_2} k_0 \quad \alpha = \frac{\sigma-1}{\sigma+1} \quad \alpha_0 = \frac{\sigma_0-1}{\sigma_0+1} \quad (3)$$

$$\operatorname{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-\xi^2} d\xi \quad \operatorname{erfc}(X) = 1 - \operatorname{erf}(X) \quad (4)$$

θ_1 については $\bar{\theta}_1$ から θ_1 への逆変換が困難である。したがって θ_1 については比較的短期間の蒸発量または熱応力を計算するとともに有用となるので、二層近似しても十分な精度が得られるものと思われる。そこで二層近似のときの θ_1 と θ_2 について解くと次式を得る。

$$\frac{\theta_1 - \theta_\infty}{\theta_c - \theta_\infty} = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{K_1 t}} - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l-x}{2\sqrt{K_1 t}} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\theta_2 - \theta_\infty}{\theta_c - \theta_\infty} = \frac{2}{1+\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)l+kx}{2\sqrt{K_1 t}} \quad (6)$$

$$\text{したがって蒸発量は} \quad Q = K_1 \left[\frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right]_{x=l} = \frac{K_1 (\theta_c - \theta_\infty)}{\sqrt{\pi K_1 t}} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2\alpha^n e^{-\frac{n^2 l^2}{K_1 t}} \right\} \quad (7)$$

(6) 式より算出した凍結深度を実験値と共に図-3に示す。

(3) タンク内の液体の蒸発量(徐冷速度を考慮した場合)

徐冷速度を考慮しない場合の蒸発量は(7)式から求めるとができる。しかし実際にはタンクを徐冷しながら液体を注入するので、タンク内壁を常温から液温まで直線的に t_0 時間要して徐冷するものと仮定して二層近似で理論計算を行うと蒸発量は次式で表される。

$$\frac{Ql}{K_1(\theta_c - \theta_\infty)} \cong -\frac{l}{\sqrt{K_1 t}} \frac{t}{t_0} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n 2 \operatorname{erfc} \frac{nl}{\sqrt{K_1 t}} \right\} \quad t \leq t_0 \quad (8)$$

$$\frac{Ql}{K_1(\theta_c - \theta_\infty)} \cong \frac{t-t_0}{t_0} \frac{l}{\sqrt{K_1(t-t_0)}} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n 2 \operatorname{erfc} \frac{nl}{\sqrt{K_1(t-t_0)}} \right\} - \frac{t}{t_0} \frac{l}{\sqrt{K_1 t}} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n 2 \operatorname{erfc} \frac{nl}{\sqrt{K_1 t}} \right\} \quad t \geq t_0 \quad (9)$$

$$\text{ただし} \quad 2 \operatorname{erfc}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} - 2X \operatorname{erfc}(X) \quad (10)$$

(8), (9) 式の計算結果を図-4に示す。この図より徐冷が完了するとともに $(t/t_0=1)$ 最大蒸発量を示すことがわかる。それ以後は時間の経過と共に減少していく。

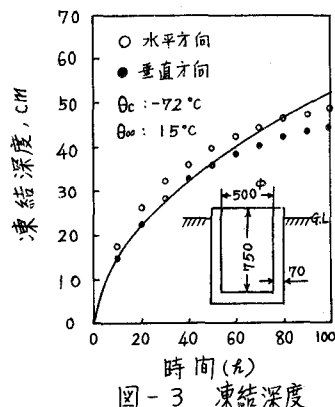


図-3 凍結深度

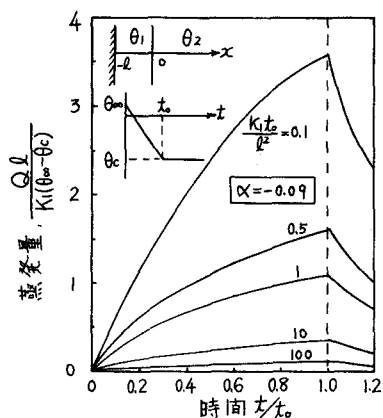


図-4 液体の蒸発量

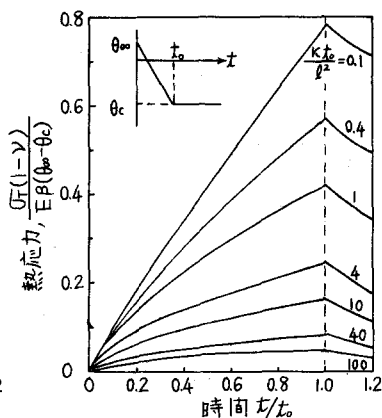


図-5 タンク内壁に発生する熱応力

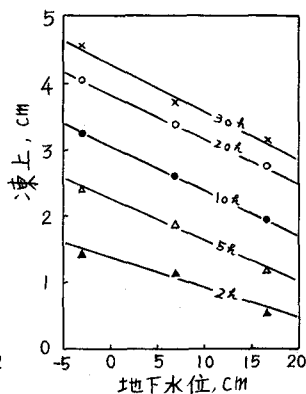


図-6 凍上と地下水位の関係

(4) タンク内壁に発生する熱応力と徐冷速度の関係

タンク内壁に発生する熱応力 σ_T は次の様に表示される。

$$\sigma_T = \frac{E\beta}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{l} \int_0^l \theta dx - \theta \right\} \quad (10)$$

ただし K , E , β , ν はそれぞれ温度伝導率, ヤング率, 線膨張係数, ポアソン比である。

蒸発量と同様に徐冷速度を考慮して一層近似で求めた温度分布を(10)式に代入し数値計算した結果を無次元化して図-5に示す。この図から蒸発量と同じく徐冷が完了するとともに最大熱応力の発生するこがわかる。またタンクの壁厚が厚くなることは熱応力に対して不利である。

(5) 凍上現象と防止対策

凍上現象は周囲の種々の条件に大きく依存しているが、凍上に最も影響を与える因子は土質と地下水位である。粘土の中に模型タンクを埋設してドライアイスで冷却しながら凍上量と地下水位の関係を探らば結果図-6の關係が得られた。この実験によると凍上量と地下水位は直線的な關係にあることがわかる。土質についてはシルトは不整凍上を伴う大きな凍上を起し、砂は地下水位に關係なくほとんど凍上しない。

凍上防止対策としては熱影響部の土質を砂で置換するか、氷点降下剤を土壌中に散布させること、更に電気ヒーターを埋設する方法も考えられるが、可燃性ガスを貯蔵するタンクでは十分注意する必要がある。

なお本論文の詳細については土木学会論文集に今秋発表する予定である。

参考文献

- 1) B.E. Eakin: Belowground Storage of Liquefied Natural Gas in Prestressed Concrete Tanks, American Gas Association, Inc 1963
- 2) LNG Tank Group of the Manufactured Gas Production Committee; LNG Information Book, American Gas Association, Inc 1965