

清水建設㈱ 正○長 澤 保 紀
 清水建設㈱ 正 中 沢 亨
 東京瓦斯㈱ 正 高 橋 行 茂

1. はじめに

近年、液化天然ガス（LNG）を貯蔵する鉄筋コンクリート造地下式貯槽の建設は、その安全性および環境との調和等の観点から増加してきている。この地下式貯槽の設計にあたって、貯槽内のLNGからの吸熱による熱収縮および貯槽周辺の地盤の凍結による凍結膨張圧を考慮する必要がある。そこで、前報でも述べたが、東京瓦斯㈱袖ヶ浦工場内の地下式貯槽の底版および周辺地盤に種々の測定器を埋設し、運転時の維持管理と今後の設計施工資料を得るための計測を行ってきた。本報告では、これらの測定結果を示すとともに、その解析手法について述べる。

2. 温度分布と熱伝導解析

温度の測定結果（図2）によると、貯槽内にLNGの貯蔵が開始された後、貯槽の底版は貯槽内壁の断熱材を介して冷却され、300日経過後に底版下地盤が0℃に達し、凍結を開始している。また、底版内の半径方向の温度差はほとんどなく一次元的に冷却されており、底版上下面の温度勾配はLNG貯蔵開始後300日以降約35℃の直線勾配で経緯している。845日経過後においては底版内温度分布はほぼ定常状態に達しつつあると考えられ、一方、底版下地盤の凍結面は今後さらに進展していくものと考えられる。そこで、表1に示す材料特性値を用いて土の凍結潜熱を考慮した一次元非定常熱伝導解析を行なった結果、図2の実線で示すとおりであり、各経日分布とも実測結果と良い一致を示している。解析において多段配筋された鉄筋の影響を無視したが、結果として、その影響は顕著でないと考えられる。以上により、地下式貯槽底版の温度分布の推定には、土の凍結潜熱を考慮した一次元非定常熱伝導解析を適用することが妥当であり、その材料特性値については建設予定地の地盤定数、使用するコンクリート（主として骨材）、断熱材に応じて修正することで良いと考えられる。

3. 底版内熱応力歪分布と熱応力解析

地下式貯槽底版に作用する熱応力の発生機構として次のように考えた。まず、底版内に生じた温度分布によって底版断面内に収縮差が生ずる。この収縮歪分布は曲線分布をなすが、断面内のつり合いにより直線分布状態、すなわち、面外曲げモーメントが作用したと同様な曲げ変形状態に移行しようとする。ところが、この曲げ変形は底版下の地盤の弾性的性質によって拘束を受

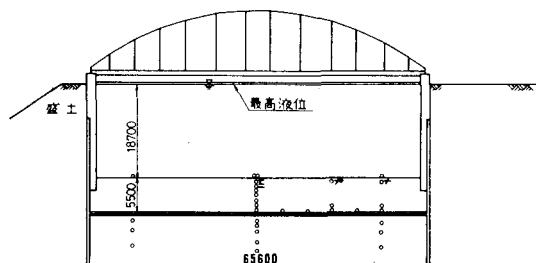


図1 対象タンク断面と測点位置

表1 熱伝導解析に用いた材料特性値

断熱材	熱伝達率	0.133 kcal/m ² ·hr·℃
コンクリート	比熱	0.20 kcal/kg·℃
	熱伝導率	2.00 kcal/m·hr·℃
底版下4 m までの地盤	比熱	0.42 kcal/kg·℃
	熱伝導率	1.251 kcal/m·hr·℃
	凍結後の比熱	0.31 kcal/kg·℃
	凍結後の熱伝導率	2.124 kcal/m·hr·℃
底版下4 m 以下の地盤	比熱	0.52 kcal/kg·℃
	熱伝導率	1.056 kcal/m·hr·℃
	凍結後の比熱	0.35 kcal/kg·℃
	凍結後の熱伝導率	2.007 kcal/m·hr·℃

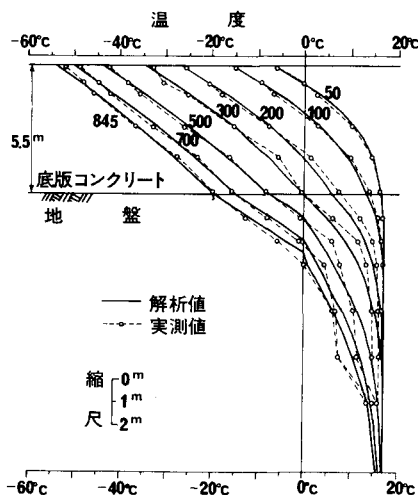


図2 底版中央部での温度測定結果と解析結果

け、新たなつり合い状態で安定する。よって、この新たなつり合い歪状態と前述の温度分布による曲線的な収縮歪状態との差が熱応力として作用するものと考えた。そこで、解析方法として次のように行なった。まず、地盤からの拘束がないものとして、温度分布による底版内断面内のつり合い歪 ϵ_c (直線分布, $\epsilon_c = \alpha y + \beta$)を全断面有効な複鉄筋コンクリート断面として次式により算出した。

力のつり合いおよびモーメントのつり合いにより、

$$\alpha \left[b \int_0^h y E_c(t) dy + (d_s A_s + d'_s A'_s) E_s \right] + \beta \left[b \int_0^h E_c(t) dy + (A_s + A'_s) E_s \right] - b \int_0^h \epsilon_{cf}(t) E_c(t) dy - E_s \left[\epsilon_{sf}(t_s) A_s + \epsilon_{sf}(t'_s) A'_s \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha \left[b \int_0^h y^2 E_c(t) dy + (d_s^2 A_s + d_s'^2 A'_s) E_s \right] + \beta \left[b \int_0^h y E_c(t) dy + (d_s A_s + d'_s A'_s) E_s \right] - b \int_0^h y \epsilon_{cf}(t) E_c(t) dy - E_s \left[\epsilon_{sf}(t_s) d_s A_s + \epsilon_{sf}(t'_s) d'_s A'_s \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 d_s, d'_s ；上部鉄筋および下部鉄筋の有効高さ、 b ；底版断面の単位幅、 h ；底版断面の全高、 A_s, A'_s ；上部鉄筋および下部鉄筋の断面積、 t, t_s, t'_s ；底版上面からの距離 y, d_s, d'_s における温度、 $\epsilon_{sf}(t)$ ；温度 t におけるコンクリートの温度自由収縮歪、 $\epsilon_{sf}(t_s)$ ；温度 t_s における鉄筋の温度自由収縮歪、 $E_c(t)$ ；温度 t におけるコンクリートの弾性係数、 E_s ；鉄筋の弾性係数（ $= 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ，一定）である。

上記の材料定数はコンクリートおよび鉄筋の低温実験結果にもとづく値を採用した。式(1), (2)より求めたつり合い歪を強制歪として周辺単純支持の弾性円板解析を行ない、底版に作用する熱応力歪を算出した。ただし、地盤反力係数は N 値により、 $K = 1.30 \text{ kg/cm}^2$ とした。次に、底版内に配置した鉄筋計の実測結果より熱応力歪を求め、かつ、底版上面コンクリートの維歪を求めた。以上の結果を図示すると図 3、4 に示すとおりであり、実測結果と解析結果が、地盤の凍結が開始する 300 日経過後まで良い一致を示していると考えられる。

300 日以降については、図 4 に示すように地盤凍結による凍結膨張圧が作用したために、解析結果と差が生じたものと考えられる。なお、845 日経過後においても底版コンクリートにひびわれは発生していないものとする。

4. おわりに

LNG 地下式貯槽の底版の温度および歪の測定結果から、温度については土の凍結潜熱を考慮した一次元非定常熱伝導解析が、熱応力についてはコンクリートおよび鉄筋の低温特性を考慮した弾性解析が、それぞれ適用できることが明らかとなった。ただし、地盤の凍結後については凍結土の諸特性を考慮のうえ、さらに検討を行なう予定である。

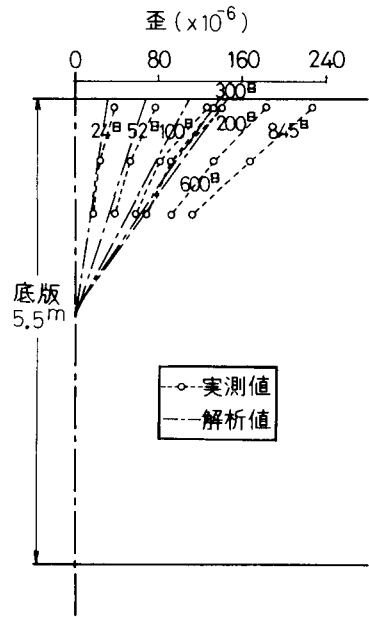


図 3 底版コンクリートの歪分布

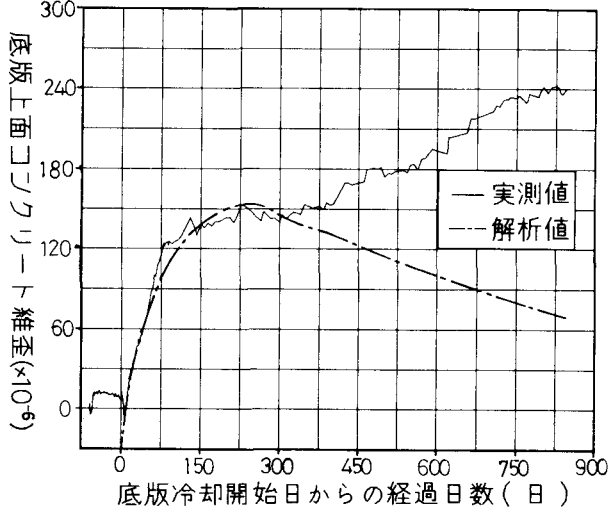


図 4 底版コンクリート上面縦歪実測結果と解析結果