剛結合形式 LNG 地下タンクの底版の設計

東京電力フュエル&パワー株式会社 正会員 高橋 智彦¹⁾, 正会員 山邊 洋之¹⁾ 大成建設株式会社 正会員 〇浜野 旭²⁾, 正会員 鈴木 良亮²⁾

1.はじめに

富津火力発電所では,容量 12.5 万 kL の 2 基の LNG 地下タンク(9・12号貯槽)を建設中である.9・12号 貯槽が既設貯槽と構造的に大きく異なる点は、側壁-底版の結合形式を剛結合とした点と、従来は底版下方 としていた底部ヒーター位置を底版上方にした点であ る. 上方配置とすることで、凍結線(0℃線)位置が従 来よりも底版上方に位置し,底版の平均温度が上昇す る. その結果, 底版に作用する温度による断面力(軸 引張力および内引張曲げモーメント)が低減する.し かし、底版の温度応力分布が複雑となるため、従来手 法(線形解析および RC 照査)では、応力を正しく評価 することはできない. そこで, 従来手法で決定した配 筋に対し, RC 非線形解析を行うことで, 底版の鉄筋の 応力状態を直接的に評価し, 配筋の妥当性を確認する こととした.本稿では、底版の RC 非線形解析の結果と 従来手法との比較考察を示す.

2. 側壁 - 底版の結合形式と底部ヒーター位置

側壁 - 底版の結合形式を図 1 に示す. 既設貯槽はピン結合であり, 側壁 - 底版間に目地部がある. 目地部から躯体内部への地下水の浸入を防止するため, 止水板を数箇所設けるだけでなく, 底部ヒーターを下方配置とし, 目地部を凍結範囲内に収めることで, 凍結による止水機能を発揮させている. 一方, 今回の貯槽は, 設計の合理化と止水性能の向上(水みちとなる目地部はないことが望ましい)を目的とし剛結合としている. 剛結合の貯槽では, 側壁と底版が一体化しているため目地部がなく, 底部ヒーターを下方配置として広い凍結範囲を確保する必要がない. そこで, 底部ヒーター は温度による断面力を低減できる上方配置とした.



3. 底部ヒーター位置と設計手法

(1) 従来手法(線形解析および RC 照査)

LNG 地下タンクの底版は版厚が厚く,解析に FEM ソ リッド要素を用いている.従来の設計では,解析結果 の応力値を断面内で積分し断面力を求め,平面保持の 仮定に基づいた RC 計算により配筋の照査を行う.

(2) 下方配置した底部ヒーターに対する従来手法

底部ヒーターが下方配置の場合の温度分布と温度応 力分布を図 2 に示す.温度分布がほぼ一定勾配となる ため,線形解析による応力分布もほぼ一定勾配となる. そのため,従来手法で問題は生じない.



図 2 温度分布と温度応力分布(ヒーター下方配置)

(3) 上方配置した底部ヒーターに対する課題

底部ヒーターが上方配置の場合の温度分布と温度応 力分布を図3に示す.従来の断面力を用いた RC 計算 では,平面保持の仮定に基づいて,断面力から応力分 布を求める.そのため,線形解析による「く」の字型 の温度応力分布は,断面力に換算された後,断面力が 等しい一定勾配の応力分布として扱われることになり, 底版上部に発生する応力を過小評価する恐れがある.

一方,「く」の字型の温度応力分布の引張応力を全て 鉄筋が負担するとした場合,コンクリートのひび割れ によって解放されるはずの引張応力も鉄筋が負担する ことになるため,底版上部に発生する応力を過大評価 することになる.



キーワード LNG 地下タンク、剛結合、温度荷重、非線形解析

1)〒293-0011 千葉県富津市新富 25 番地 東京電力フュエル&パワー(株) 富津火力発電所 LNG 土木グループ TEL.0439-77-2381
2)〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 土木本部土木設計部特殊構造設計室 TEL.03-5381-5293

そこで、底版の温度分布の局所的な変化に伴うコン クリートのひび割れ挙動を捉えることができる非線形 解析を行い、鉄筋に発生する応力を評価する.

4. RC 非線形解析による評価手法

前述の課題に対し、従来手法から決定した配筋に対して RC 非線形解析を行い、配筋の妥当性を確認する. RC 非線形解析の解析モデルを表 1 に示す.鉄筋およびひび割れのモデル化により、鉄筋を含む内部応力状態を直接的に求めることが可能となる.

RC 非線形解析の結果,底版上筋に発生する応力は 326N/mm²となり,平均降伏強度(458N/mm²)以内であ ることが確認できた.また従来手法(線形解析による 断面力を用いた RC 照査)による底版上筋の応力は 457N/mm²であった.この差の要因として,以下の3項 目が考えられる.



表 1 RC 非線形解析の解析モデル

(1) ひび割れ発生による軸圧縮力の増加の影響

RC 非線形解析と線形解析による底版の半径方向軸 力分布を図 4 に示す. RC 非線形解析では、ひび割れ発 生に伴う底版の半径方向の伸びが側壁や周辺地盤によ り拘束されるため、底版中心部で軸圧縮力が 1,340kN 増加する.これにより底版中心部の上筋の引張応力は 59N/mm²の減少となる.



図 4 底版に発生する半径方向軸力

(2) ひび割れ発生による温度荷重解放の影響

RC 非線形解析と線形解析における底版中心部のコ ンクリートの温度応力分布を図 5 に示す.線形解析で は、ひび割れによる剛性低下を考慮してコンクリート の剛性を 0.5*E*₀*I*₀ (*E*₀*I*₀:初期剛性)として,温度応力を 求める.その応力分布による断面力を用いた RC 計算に より,底版上筋に発生する引張応力は 43N/mm²となる.

一方, RC 非線形解析では,底版上面側のコンクリートにひび割れが発生することで温度応力が解放されるため,底版中心部の上筋の引張応力は 18N/mm²となり 25N/mm²の減少となる.



図 5 底版中心部のコンクリートの温度応力分布 (3) コンクリートが引張応力を負担する影響

図 6 に断面力が等しくなるコンクリートの応力分布 を2つ示す.一方は RC 非線形解析による応力分布であ り,もう一方は RC 計算による応力分布である. RC 計 算ではコンクリートが引張応力を負担しないとしてい るが, RC 非線形解析ではコンクリートが引張強度を上 限として引張応力を負担する.これにより底版中心部 の上筋の引張応力は 59N/mm²の減少となる.



図 6 底版中心部のコンクリートの応力分布

5.まとめ

底部ヒーターを上方配置とした場合に底版に発生す る応力状態を, RC 非線形解析手法を用いることで評価 した.また,今回の貯槽において従来手法(線形解析 手法および RC 照査)が,温度分布の局所的な変化を考 慮した非線形解析よりも安全側の検討となっており, 従来手法で決定した配筋が安全側の仕様であることを 確認した.