連続地中壁内に側部ヒーターを有する LNG 地下タンクの設計と施工

東京電力フュエル&パワー株式会社　正会員　○髙坂　理紗 1),　正会員　高橋　智彦 1)
大成建設株式会社　正会員　鈴木　良亮 2),　正会員　三浦　邦秋 3)

1.はじめに

富津火力発電所では，軽質 LNG の導入拡大により効率的かつ柔軟な燃料基地の運用を実現すべく，平成 27 年 6 月から新たに 9・12 号 LNG 地下タンク（12.5 万 kL ×2 基）の本体工事に着手した．構造概要図を図 1 に示す．

LNG 地下タンクは-162℃という極低温の LNG を貯蔵することから，凍結線（0℃線）の位置を制御する必要がある．このため，タンク底部と側部にヒーティング設備と称する温水循環式の加温設備を配置している．本工事では施工の合理化を図るために側部ヒーティング設備（以下，側部ヒーターと称す）を連続地中壁（以下，連壁と称す）内に配置している．本稿では，この合理化策における設計・施工上の課題とその検討結果について報告する．

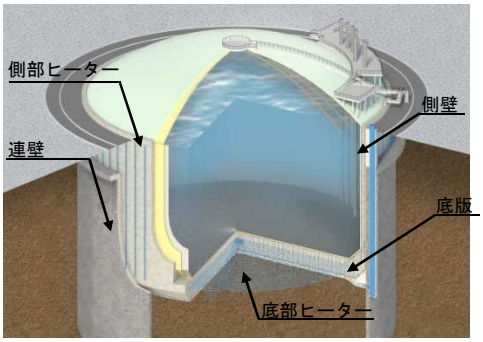


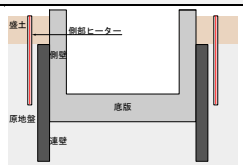
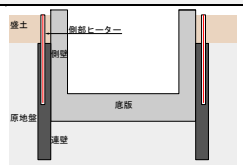
図 1　LNG 地下タンク構造概要図

2.側部ヒーター構造

今回の LNG 地下タンクにおいて連壁からの漏水は，連壁-側壁間に設けた集水材を介して底版下面まで導水して排水する．この導水が阻害されないよう LNG の冷熱による凍結線は側壁内に収まるように，側部ヒーターの運転温度を制御している．表 1 に従来と今回の側部ヒーター構造および施工方法を示す．なお，表中に示す保護管とは側部ヒーター本管を挿入するための外装管である．

従来構造ではタンク外周の地盤内にヒーター管が配置されており，その施工はボーリング削孔により実施されてきた．一方，今回構造では連壁構築時に壁厚内にヒーター管を配置することで，より側壁に近い位置に配置することとした．この構造により，地盤内のボーリング削孔が不要となり，施工の合理化を図ることができる．

表 1　側部ヒーター構造および施工方法比較

	従来構造	今回構造
概要図		
ヒーター管位置	貯槽外周地盤内	連壁内
保護管設置時期	貯槽外周盛土構築後	連壁構築時および 貯槽外周盛土構築時
保護管設置方法	盛土上から，ボーリングマシンで地盤を削孔した後に保護管挿入	連壁構築時は，鉄筋籠建込後の溝内に保護管挿入 盛土部は，盛土を構築しながら保護管継ぎ足し

3.設計課題と検討結果

連壁はタンク外郭として土留め止水壁の機能を担い，内部掘削時の背面土水圧の作用により変形が生じるとともに，円周方向軸圧縮力が卓越する構造物である．したがって，連壁内に側部ヒーターを配置することに対し，以下の検討を行った．

(1)　保護管の変形に対する検討

保護管は連壁構築時に連壁内に配置されることから，内部掘削以降，連壁の挙動に追従して変形する．そこで，変形後の保護管内に側部ヒーター本管が挿入できるのか検討を行う．連壁をシェル要素でモデル化した 3 次元 FEM 解析より算定した連壁の変形図を図 2 に示す．

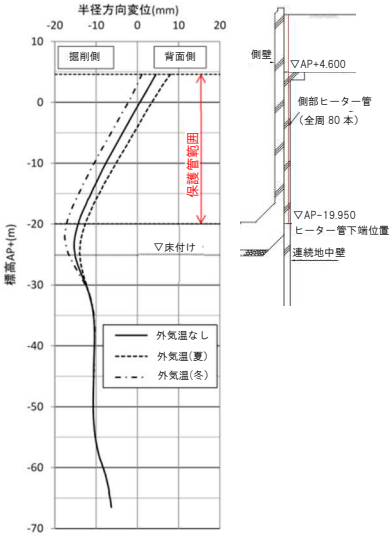


図 2　連壁変形図

保護管設置範囲における上下端の相対変位の最大値は約 20mm となる．保護管の直径 8B（内径 204.7mm）に対し，挿入する側部ヒーター本管の直径は 3B（外径 89.1mm）であり，相互間の隙間は 57.8mm である．こ

キーワード　LNG 地下タンク，側部ヒーター，施工合理化
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㈱　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㈱　土木本部土木設計部特殊構造設計室 TEL.03-5381-5293
3)〒293-0011　千葉県富津市新富 33-1 大成建設㈱　千葉支店富津 LNG タンク作業所 TEL.0439-87-6815

れより，保護管の変位・変形によって，側部ヒーター本管は干渉することなく挿入が可能といえる．なお，連壁内に配置した傾斜管の測定結果によると，実施工では10mm 程度の相対変位となっており，解析値よりも小さくなっている．

(2) 円周方向軸圧縮力に対する検討

連壁断面において保護管は断面欠損にあたり，管周辺に応力集中が生じることにより断面耐力が低下することが考えられる．この断面欠損を考慮した場合の断面耐力について非線形 FEM 解析により検討した．解析では，連壁背面に等分布荷重を漸増載荷させた．解析モデルを図 3 に示す．

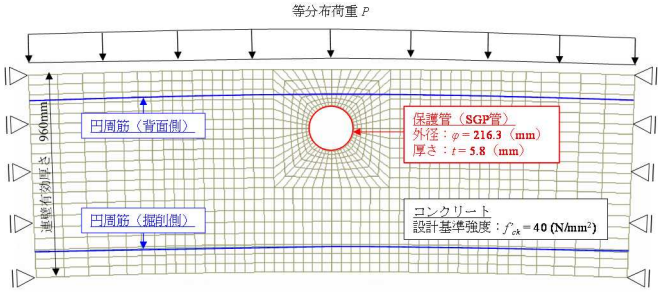
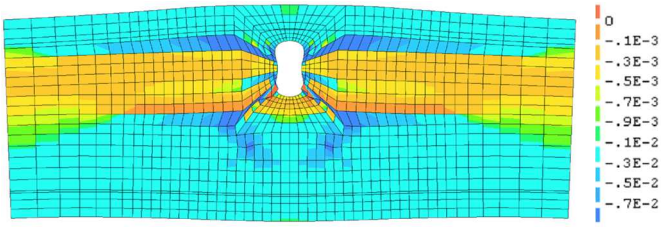


図 3　解析モデル

内部掘削の進捗に伴い，円周方向の軸圧縮力が増大する．この軸圧縮力により保護管は潰れるような挙動となり連壁背面側のコンクリートは抜け出すような変形モードとなるものの，断面破壊に対する照査値は 0.9 となり 1.0 を下回った．変形図を図 4 に示す．



※変形倍率：20 倍

図 4　変形図(最小主ひずみコンター)

一方，断面欠損がない一般部のモデルにおいて，3 次元シェルモデルで線形 FEM 解析を実施したところ，断面破壊に対する照査値が最大で 0.83 となった．

連壁内に側部ヒーターを配置するということは新たな試みであるため，この部分が弱部とならないように保護管周りを補強することとした．

補強方法としては断面欠損の有無によらず照査値が同等となるようにすることとし，その結果は表 2 に示すとおりである．なお補強筋は，せん断破壊面に対して直行するように補強筋を配置するとともに，管周りに集中する応力による放射方向のひび割れに配慮し，U 字形状とした．補強筋配置図を図 5 に示す．

表 2　検討結果

	断面欠損考慮なし	断面欠損考慮あり	
		補強筋なし	補強筋あり
解析手法	線形 FEM 解析	非線形 FEM 解析	非線形 FEM 解析
検討断面	AP-24.000	AP-19.950（側部ヒーター下端）	
軸方向圧縮力 (kN/m)	16,134	15,488	15,488
破壊荷重(kN/m)	32,641	29,000	31,500
照査値※1	0.83	0.90	0.83

※1）照査値：軸方向圧縮力/（破壊荷重/γ_c/γ_b）より算出，γ_c：材料係数（＝1.3），γ_b：部材係数（＝1.3）

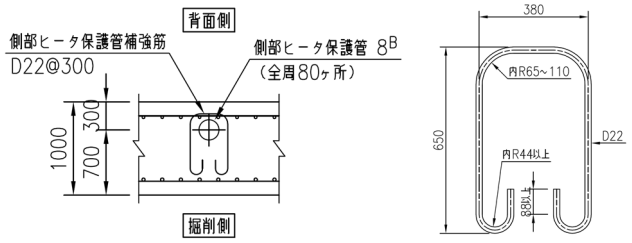


図 5　補強筋配置図

4. 施工課題と対策

当初計画では，予め保護管を鉄筋かごに設置し，鉄筋かごの建込みの際につなぎ合わせの溶接作業を行うこととしていた．しかし，予め保護管を鉄筋かごに設置しておくと，保護管をつなぎ合わせる際，吊上げられている鉄筋かごの内部に作業員が入らなければならず，このような作業は安全上避けなければならない．そこで，鉄筋かごの建込みが完了した後，施工基面まで一本化した保護管を建込むこととした．

延長 70m の鉄筋かごは深度方向の直線性を確保するため，写真 1 に示すように 1 直線上の架台で製作し，建込前まで架台上に仮置きしておく．また保護管を所定の位置に建込むために，鉄筋かごのフレームにガイドとなるフラットバーを設置するとともに，写真 2 に示すように保護管を先端部の形状を球形とした．

写真 1 鉄筋かご

写真 2 保護管先端部

5. まとめ

本稿では，LNG 地下タンクの施工合理化を目的に側部ヒーターを連壁内に配置することによる課題について，設計・施工による検討および対策について報告した．工事中の 2 基とも現在は連壁構築を完了しており，連壁内への保護管の設置も不具合なく完了することができ，施工の合理化に寄与している．さらに，タンク供用中のヒーター運転費用の削減も見込まれる．