

海外規準に基づいた PC LNG タンクの異常荷重時における試設計

ピーシー橋梁(株) 技術部 正会員 ○立松 博
 ピーシー橋梁(株) 技術部 正会員 澤 大輔
 ピーシー橋梁(株) 技術部 伊東 史顕

1. はじめに

現在、海外で LNG ターミナルのプロジェクトが多数建設、計画されており、その多くに LNG 貯槽形式として Full Containment Tank 形式 (完全格納式タンク) が採用されている。この形式のタンクは、通常運転時には低温度に対して優れた性能を持つ 9%Ni 鋼製の内槽タンクが LNG を保有し、内槽タンクから LNG が漏れた場合は、PC 外槽タンク (以下、PC LNG タンクとする) が LNG の外部への流出を防ぐ構造となっている (図-1)。Full Containment Tank 形式は、内槽と外槽が一体化していることで建設用地を縮小でき、また気化したガスを外槽内で貯留できることから安全面においても評価されている。

PC LNG タンクの設計手法としては、まず施工時、テスト時、通常運転時ならびにクールダウン時に対する検討を行い、その後異常荷重時に対する照査を行う。LNG 貯槽タンクに関する英国規格 BS7777¹⁾では、異常荷重として Major Leak の他、External Fire (詳細は後述する)、地震、衝撃荷重等が記述されている。

本稿では、LNG タンクに関する海外規準を紹介し、16 万 m³クラスの LNG タンクをモデルに Major Leak および External Fire に対する試設計についても報告する。

2. 海外仕様の PC LNG タンクの特徴

日本の LNG 地上式貯槽指針²⁾に基づき設計を行ったタンクは、側壁内面に冷熱抵抗緩和部が設けられているため、Major Leak 時において LNG がコンクリート面に直接触れない構造となっている (図-2)。

BS7777 等の海外規準に基づき設計を行ったタンクは、側壁内面に底版からの高さ 5m 程度までセカンダリーバリア (詳細は後述する) が設けられており、この部位でのコンクリート面には LNG は直接触れない。そのため側壁高さ 5m 以上の部位では鋼製のライナが貼られているだけで直接コンクリート面に LNG が触れ、大きな温度応力が発生する。この応力に対してプレストレスを導入して、部材断面に圧縮領域を持たせることで液密性を確保する構造となっている。

図-1 に示すとおり、フォームグラス等の保冷材と 9%Ni 鋼製のシェルからなる構造をセカンダリーバリアと称する。セカンダリーバリアは、側壁高さ 5m までの PC LNG タンク内側に設けられている。PC LNG タンクの

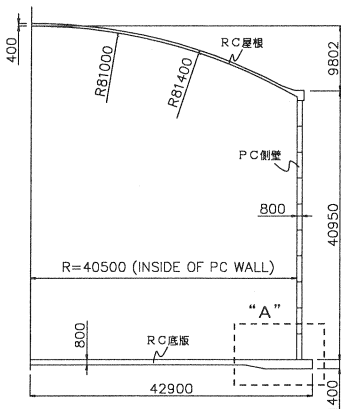


図-1 海外規準に基づいた PC LNG タンク

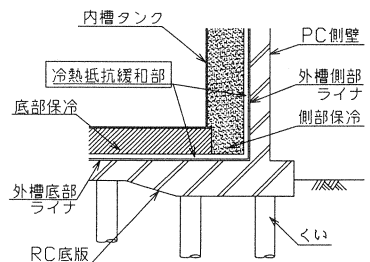
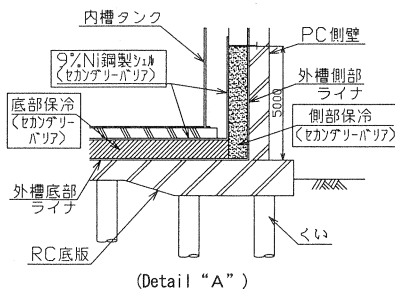


図-2 日本の LNG 地上式貯槽指針に基づく PC LNG タンク

側壁基部は、温度や収縮の影響によってひび割れ発生の確率が高く、その上円周方向のプレストレス力が導入されにくい。Major Leak 時においては、部材に圧縮領域を確保して LNG の外部への流出を防ぐことが非常に困難である。そのため、海外規準に基づいた PC LNG タンクの側壁基部は、セカンダリーバリアを設置することで液密性が確保された構造となっている。

3. 異常荷重状態の定義と構造物の要求性能

Major Leak と External Fire の定義と構造物の要求性能は、BS7777 等の規準に基づいて発注者の仕様書の中で記述される。以下に一例を示す。

3. 1 Major Leak

Major Leak とは、通常運転時に 9%Ni 鋼製の内槽タンクで保有していた LNG が、内槽タンクの破壊により PC LNG タンクに達する状態を想定している。Major Leak 時の荷重は、通常運転時の自重やガス圧の他、LNG の低温度（-170℃）と液圧が考慮される。

使用限界状態時において Major Leak は、構造物に対して以下の要求性能が設定される。

- コンクリートの残留圧縮領域を部材厚の 1/10 以上かつ 8cm 以上確保すること。
- 残留圧縮領域内の平均圧縮応力度を 1.0MPa 以上とすること。
- 鉄筋・PC 鋼材の応力度が降伏強度を超えないこと。

3. 2 External Fire

External Fire とは、隣接するタンクの火災により、PC LNG タンクの側壁と屋根部材が炎に包まれる状態である。External Fire の荷重は、BS EN1473⁹⁾等に示される輻射熱 32kW/m²程度が設定される。載荷期間としては、一般的に基地内の消火設備に起因し、2時間と設定されることが多いようである。External Fire 時の荷重は、通常運転時の荷重の他、輻射熱が考慮される。

使用限界状態時において External Fire は、構造物に対して以下の要求性能が設定される。

- 鉄筋・PC 鋼材の応力度が降伏強度を超えないこと。

終局限界状態において Major Leak と External Fire は、BS8110⁹⁾に従い荷重係数 (γ_f) が 1.05、コンクリート、鉄筋・PC 鋼材の材料係数 (γ_m) がそれぞれ 1.30、1.00 に設定される。断面破壊の評価として、Major Leak ではコンクリートが圧壊（コンクリートの圧縮ひずみが 3500×10^{-6} 以下）しないこと、External Fire では鉄筋ひずみが 1%以下となることが設定される。

4. 使用材料

PC LNG タンクに使用される材料は、設計計算に基づいて発注者が決定する。代表的な材料を以下に示す。

コンクリートの圧縮強度は、PC 部材である側壁で 50MPa、RC 部材である底版と屋根で 30MPa 程度が採用される。また耐久性の面から、水セメント比は 50%以下で、シリカフェームやフライアッシュなどの混和材が使用されることが多い。

鉄筋は、BS4449⁹⁾に示される Grade 460（降伏強度 460MPa）と同等な異形鉄筋が使用される。Major Leak が発生した際に側壁内側で LNG が影響する範囲（鉄筋温度が -20℃以下）には、低温特性に優れた鉄筋（以下、低温鉄筋とする）が使用される。低温鉄筋は、BS7777 に記述された引張試験を行い低温状況下においても十分な靱性を有するものとされている。

円周方向および鉛直方向に配置される PC 鋼材は、一般的に 19S15.7mm(BS5896⁹⁾)のような大容量で、低レラクセーションタイプが使用される。また PC 鋼材の定着装置は、BS7777 によると発注者の要求する設計温度に適していることが試験により証明されたものとされている。

5. 異常荷重時の試設計

5. 1 Major Leak の設計概要

Major Leak の設計は、夏と冬のそれぞれの温度条件下で行う。夏は外気温と側壁内面との温度勾配が大きくなるため大きな応力が発生する、そのため残留圧縮領域の確保が厳しい。一方、冬は外気温が低く側壁内面との温度勾配が小さいものの全体的に部材が冷やされるため低温鉄筋が広い範囲で必要となる。

Major Leak の熱伝導解析は、初期状態で側壁内面に低温度(-170℃)が与えられ、その後側壁部材の温度が定常状態となるまで続けられる。Major Leak の設計は、最も応力状態が厳しくなる温度定常状態で行われる。

5. 2 External Fire の設計概要

コンクリート構造物が高温状態になると、例えば図-3に示されるように、コンクリート、鉄筋、PC鋼材の材料強度が減少する。そのため、External Fire の設計は、材料非線形性を考慮した上で、さらに材料の温度依存性を考慮して解析を行う。

5. 3 構造解析

異常荷重時の解析は、熱伝導解析を行って、続いてその熱伝導解析結果を使用して熱応力解析を実施する。解析には、汎用非線形 FEM ソフトである DIANA ver.8.1 を用いる。解析モデルは、図-4に示すとおり軸対称ソリッドモデルとする。なお、地盤と杭の影響はバネ要素によって評価し、鉄筋と PC 鋼材 (図-5) は埋込鉄筋要素でモデル化する。

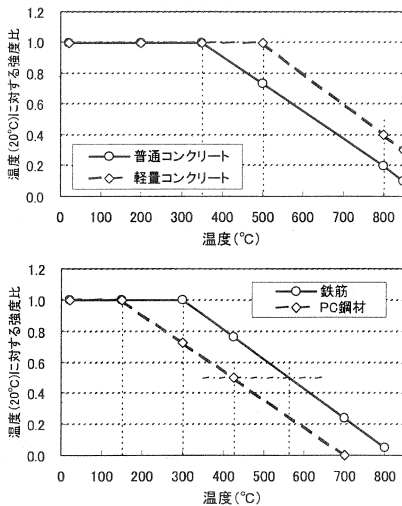


図-3 材料強度の温度依存性 (BS8110)

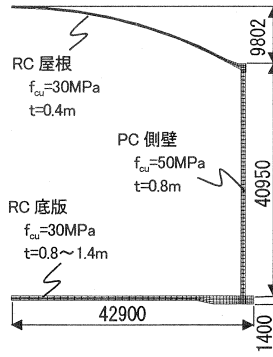


図-4 解析モデル

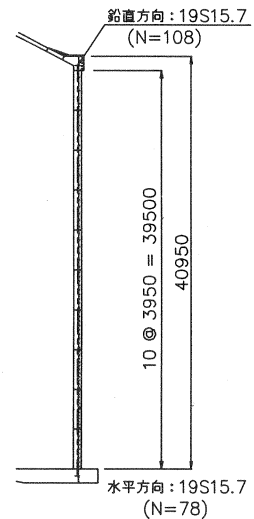


図-5 PC 鋼材の配置

6. 検討結果

6. 1 Major Leak の検討結果

図-6に、冬を想定した Major Leak の初期状態、24 時間後、48 時間後ならびに一週間後における熱伝導解析結果を示す。解析結果から温度は一週間後に定常状態となった。またセカンダリーバリアによって側壁基部では、低温の影響は進行していないことが分かる。発注者の要求により低温鉄筋は、図-6で側壁内側の温度が-20℃以下となる領域に配置される。本検討のように外気温が低い条件では、側壁外側の鉄筋位置でも温度が-20℃以下となる場合があるが、一般的に発注者の仕様書では圧縮応力部に低温鉄筋を配置しなくてもよいことになっている。また、図-7に、最も応力状態が厳しくなった底版からの高さ 5.5m 付近における側壁コンクリートの円周方向応力度分布図を示す。図から残留圧縮領域は 80mm 以上、圧縮領域でのコンクリート応力度の平均値は 1.0MPa 以上となり、構造物の要求性能を満足した。

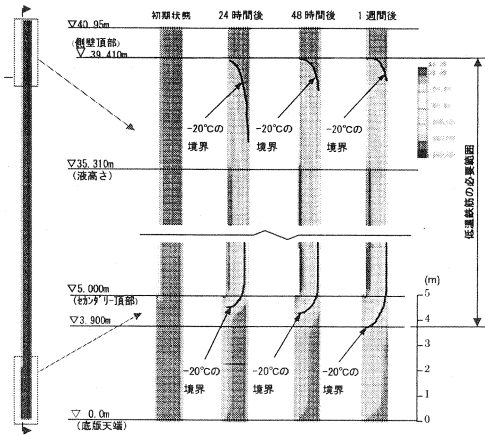


図-6 側壁の熱伝導解析結果(冬)

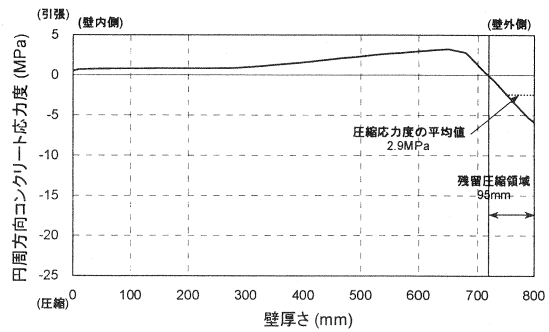


図-7 側壁コンクリートの円周方向応力度分布図(夏)

6. 2 External Fire の検討結果

図-8に、External Fire の10分後、30分後、60分後ならび120分後における側壁の熱伝導解析結果を示す。図-3によると、鉄筋は温度300°C以上で降伏強度が減少し始める。一方、図-8では側壁外側の鉄筋位置での温度は329°Cとなった。

表-1に、側壁円周方向鉄筋の熱応力解析結果一覧表を示す。検討断面の配置鉄筋は、側壁内側でD25が200mmピッチ、側壁外側でD25が150mmピッチである。側壁内側の鉄筋応力度は降伏強度460MPaに対して272MPaとなり、また温度が300°Cを越えた外側鉄筋の応力度は-343MPaとなったが降伏強度(-434MPa)に達していない。

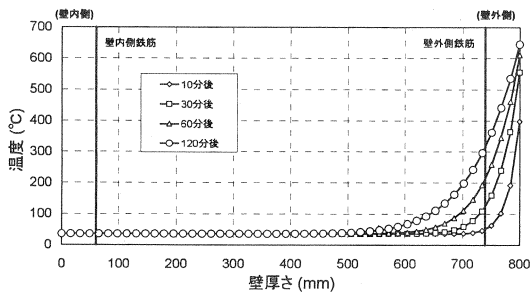


図-8 側壁の熱伝導解析結果

表-1 側壁円周方向鉄筋の熱応力解析結果一覧表

時間	側壁内側円周鉄筋 (D25ctc200)			側壁外側円周鉄筋 (D25ctc150)		
	温度 (°C)	鉄筋応力度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	温度 (°C)	鉄筋応力度 (MPa)	降伏強度 (MPa)
10分後	36	1	460	54	-90	-460
30分後	36	17	460	134	-287	-460
60分後	36	176	460	227	-291	-460
120分後	36	272	460	329	-343	-434

Note: (+: 引張、-: 圧縮)、鉄筋かぶり厚は50mm

7. まとめ

本稿では、LNGタンクに関する海外規準を紹介し、またMajor LeakおよびExternal Fireに対する試設計を行い解析結果の一例を示した。

最近のLNGプロジェクトでは、Major Leakと地震力が同時に作用した状態での安全性の照査が要求される場合もある。地震力のような軸対称モデルでは解けない荷重に対しては、本稿とは別の設計方針が必要となる。これについては、今後の課題として次回に報告する。

参考文献

- 1) BSI: BS7777 Part I, II, III, Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service, 1993
- 2) (社)日本ガス協会: LNG地上式貯槽指針, 平成14年
- 3) BSI: BS EN1473, Installation and equipment for liquefied natural gas, 1997
- 4) BSI: BS8110 Part I, II, Structure use of concrete, 1997, 1985
- 5) BSI: BS4449, Specification for carbon steel bars for the reinforcement of concrete, 1997
- 6) BSI: BS5896, Specification for design prestressing reinforcement, 1980