

メンブレンとコンクリート躯体からなる 新LNG低温岩盤貯槽の提案

岡田 滋^{1*}・百田 博宣²・藤永 友三郎¹

¹清水建設株式会社 土木事業本部 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦1丁目2番3号）

²清水建設株式会社 技術研究所 社会基盤技術センター（〒135-8530 東京都江東区越中島3丁目4-17）

*E-mail: sh.okada@shimz.co.jp

我が国では、メンブレン・保冷材・コンクリート躯体で構成された（以下メンブレン方式）液化天然ガス（LNG）の地下タンク貯蔵技術が確立している．一方で、海外ではLNG低温岩盤貯槽の研究が始まっており、韓国のDaejeonでメンブレン方式LNG低温岩盤貯槽の実証試験も行われている．この実証試験の貯槽方式は地下水制御に独創的な特徴を有するが、地下水制御の確実性や経済性に課題があると考えられる．

本研究では、厚肉構造のコンクリート躯体内にヒーター、吹付コンクリート内に排水パイプを設置して、ヒーターより内側に凍結リングを形成することで、地下水浸入に対する凍結止水を確保するメンブレン方式LNG低温岩盤貯槽を提案し、熱伝導・熱応力解析を行って、提案方式の効果について検討を行った．

Key Words : LNG, refrigerated storage, membrane type, heater, drainage pipe

1. はじめに

天然ガスはクリーンなエネルギーで、埋蔵量も多く石油のような資源の偏在もないため、主要なエネルギーとして需要・供給とも大幅に増大していくことが予想されており、我が国では、受入れ・供給インフラとしての貯槽の大型化が重要になるものと考えられる．天然ガスは大半が、液化天然ガス（LNG、沸点-162℃）としてLNG船で輸入されるため、貯蔵施設としてのLNG低温貯槽（地上タンク・地下タンク）に関する技術は確立されているが、これらのタンクの大幅な大型化には技術的な課題がある．これに対し、久慈・菊間・串木野に建設された水封式石油岩盤貯槽では、150万KL以上の大容量貯槽が実現しており、LNG低温貯槽についても、岩盤空洞を利用した大型化は今後有望な方策の一つになるものと考えられる．

LNG低温岩盤貯槽に関する海外の技術動向に注目すると、当初は既に建設実績のあるLPG¹⁾（液化石油ガス、沸点-42℃）と同様な岩盤空洞に直接貯蔵する凍結方式貯蔵が試みられたが、温度クラックの発生やBOG（ボイルオフガス）の増大で殆どが失敗に終わっている²⁾．このため、メンブレン・保冷材・コンクリート躯体で構成するメンブレン方式の低温岩盤貯槽が提案され、韓国のDaejeonで実証試験が行われた．メンブレン方式低温岩盤

貯槽の概念図を図-1に示す³⁾．建設時からLNG貯蔵初期まで排水トンネル・排水ボーリングによる地下水排水を行って、貯槽用空洞の周辺に不飽和ゾーンを形成し、凍結前線が空洞からある程度進行した時点で排水を止め、再度浸透を開始した地下水で不飽和ゾーン周辺に凍結ゾーンを形成する方式である．この方式で建設時からLNG貯蔵時までの外水圧除去と凍結膨張による構造部材への悪影響を回避できるとの考えであるが、不飽和ゾーンの確実な形成に懸念があること、この方式でも周辺岩盤に掘削応力に熱応力が加わり空洞の力学的安定性が低下すること、および大規模な排水システムがコスト高につながる等の点で課題があるものと考えられる．

こうした課題を踏まえ、本研究ではメンブレン・保冷材・コンクリート躯体のメンブレン方式を採用するが、厚肉のコンクリート躯体に温水等の循環用のヒーター、吹付コンクリートに排水パイプを装備した新たなLNG

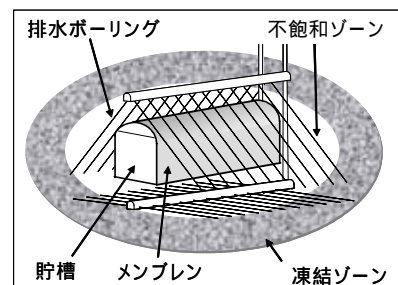


図-1 既存のメンブレン方式のLNG低温岩盤貯槽

低温岩盤貯槽を提案する．また，提案方式の熱伝導・熱応力解析を行って，外水圧除去効果や熱応力の緩和効果を検討し，提案方式の成立性を示す．

2. 新LNG低温貯槽の提案

著者の一人は，図-2に示すメンブレン方式の貯槽部材のコンクリート躯体（以下，RC躯体）に温水等の循環用のヒーター，吹付コンクリート（以下，吹付C）に排水パイプを装備した新たなLNG低温岩盤貯槽を既に提案している^{4),5)}．今回の提案は，既提案の延長線上に位置するが，RC躯体を厚肉構造とした上で，LNG地下タンクで採用されているRC躯体中の部分凍結止水を適用しており，概念図を図-3に示す．

図-2,3とも，水封式石油岩盤貯槽と同等の大容量貯槽を想定して，C₁級（電研式分類）上限相当の岩盤に，

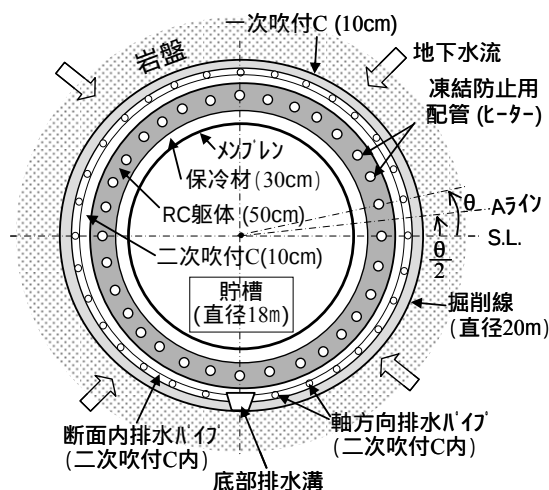


図-2 ヒーター・排水パイプをもつメンブレン方式のLNG低温岩盤貯槽（提案済み）

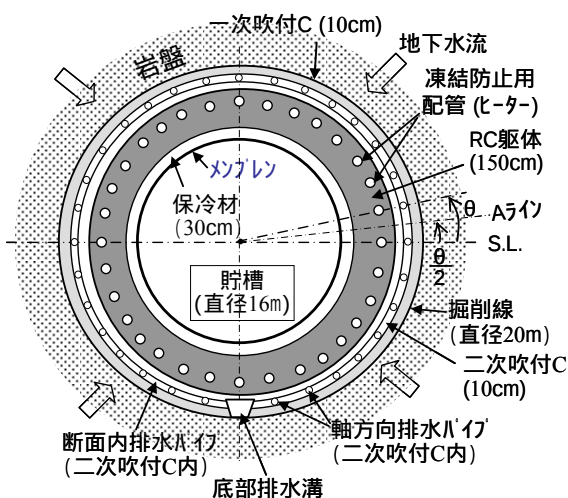


図-3 ヒーター・排水パイプをもつメンブレン方式のLNG低温岩盤貯槽（新規提案）

外径20mの円形空洞を掘削するものとし，空洞掘削後の力学安定性は，吹付Cとロックボルト等の支保部材で確保する．断面内と軸方向の排水パイプ等を一次吹付Cの表面に設置し，二次吹付Cを施工する．RC躯体中には温水等のブラインを循環させる凍結防止用配管（ヒーター）を設置し，RC躯体の内側に保冷材とメンブレンを設置して貯槽を形成する．図-2,3中には各部材の想定厚さを記しており，図-2ではRC躯体が50cmで貯槽は直径18mであり，図-3ではRC躯体が150cmで貯槽は直径16mである．このように，今回の提案は構造的には，RC躯体を厚肉構造とした点に特徴がある．

図-2の貯蔵方式は，ヒーターには5～15程度の温水等のブラインを循環させることにより，LNG貯蔵期間中，凍結域を保冷材内に封じ込めて，RC躯体・吹付Cおよび岩盤内の温度を0℃以上に維持するとの考え方である．このため，排水パイプによる施工時の外水圧除去ばかりでなく，貯蔵時も排水パイプによる外水圧除去が行える．また，保冷材の外側は凍結膨張もなく，温度低下量も小さいため，温度応力の大幅に削減が行えるものである．

しかし，RC躯体の収縮クラックによる漏水や排水パイプを用いたトンネルの裏面排水の実績から，完全なウォータータイトトンネルの実現が困難とも予想されるので，図-2の場合にも，保冷材外面での止水膜設置等の防水対策を行うことが望ましい．そこで，防水対策として，LNG地下タンクで採用されているRC躯体中の部分凍結止水を適用したものが，図-3の貯蔵方式の考え方である．

すなわち，図-3の貯蔵方式は，ヒーターには5～15程度の温水等のブラインを循環させることにより，LNG貯蔵期間中，凍結前線を保冷材外面とヒーター設置ラインの間に制御し，RC躯体の部分凍結を行い，凍結線外側の吹付Cと岩盤内の温度を0℃以上に維持するとの考え方である．このため，排水パイプによる外水圧除去は施工時・貯蔵時とも行えると共に，RC躯体中に地下水が浸入した場合も凍結止水される．また，図-2に比べてRC躯体中の温度低下量は大きくなるが，吹付C・岩盤は凍結膨張もなく，温度低下量も小さいため，温度応力の大幅に削減が行えるものである．

図-3の提案方式は，図-1のような大規模な排水システムが不要で，岩盤部に発生する熱応力が極めて小さいと予想されるため，大断面空洞の建設が容易であると考えられる．また，地表への温度低下の影響がないため，設置深度を浅くできるなど経済性に優れたものと考えている．次章では，図-3の提案方式に対して，熱伝導・熱応力解析を行って，RC躯体の部分凍結状況や外水圧除去効果および熱応力低減効果を検討し，新LNG低温岩盤貯槽の成立性を示す．

3. 提案方式の成立性に関する解析検討

(1) 熱伝導解析による検討結果

流入出熱量や BOR などの貯槽性能，およびヒーター設置効果の検討のため，保冷材厚さ，ブライン循環温度およびヒーター間隔をパラメータとした二次元有限要素法熱伝導解析を行う．

貯槽構造は図-3で，解析モデルは対称性を利用して図-4の半断面とした．貯槽中心の深度は60m，地温勾配は国内の平均的な値である0.03 /m，地表面の気温は関東地方の平均気温15 としている．図-4には境界条件も示す．地表熱伝達率はLNG地下式貯槽指針⁶⁾を参考に設定した．貯槽については，メンブレンは考慮せず保冷材表面で境界条件を与えるが，保冷材設置後t=0日は15 ，0～1日はクールダウン期間でt=1日後に-162 ，t 1日後はLNG貯蔵期間中を通じて-162 で一定とする．また，ヒーターは，RC躯体外側から25cm，貯槽中心から9.55mの位置にθ=11.25° 間隔に設置し，ブライン温水の循環温度は5 ，10 の条件とする．熱伝導解析では，t=0日に定常解析を行い，その結果を初期条件として50年間の非定常解析を行う．

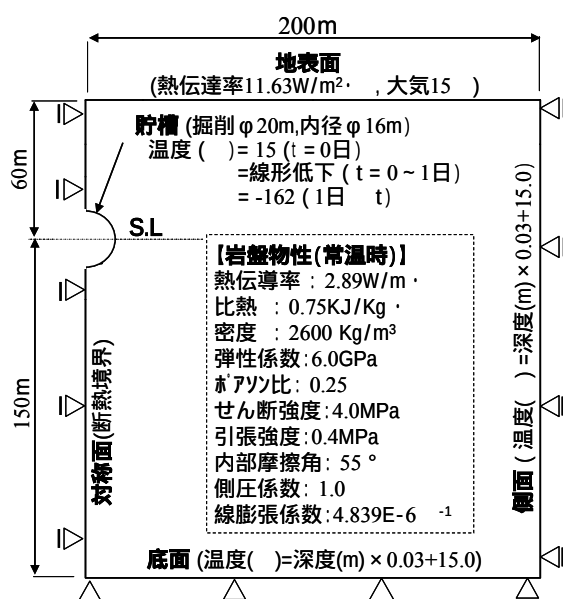


図-4 熱伝導・熱応力解析モデル

表-1 貯槽部材の熱特性

項目	保冷材	RC躯体,吹付C
熱伝導率(W/m・)	0.0267	2.326
比熱(J/kg・)	1046.5	837.2
密度(kg/m³)	50.0	2400.0
弾性係数(GPa)	熱応力 解析では 考慮せず	25.0
ポアソン比		0.2
粘着力(MPa)		4.0
内部摩擦角(°)		55.0
引張強度(MPa)		0.4
線膨張係数(° ⁻¹)		1.0E-5

図-4中に示した岩盤の熱伝導率，比熱，密度は花崗岩の平均的な値⁷⁾を設定し，保冷材はポリウレタンフォーム，コンクリート躯体，および吹付コンクリートはLNG地下式貯槽指針⁶⁾を参考に，表-1の通り設定した．

解析結果として，ブライン温水循環が，なし，10 ，5 の3条件について，貯槽中心を通るSLライン上の温度分布を凡例に示す経過時点で，図-5に示す．図のように，温水循環なしの場合は，凍結域が岩盤中に拡大し，10 の場合はRC躯体は凍結しないが，5 の場合はヒーターより内側のRC躯体の一部が凍結することがわかる．

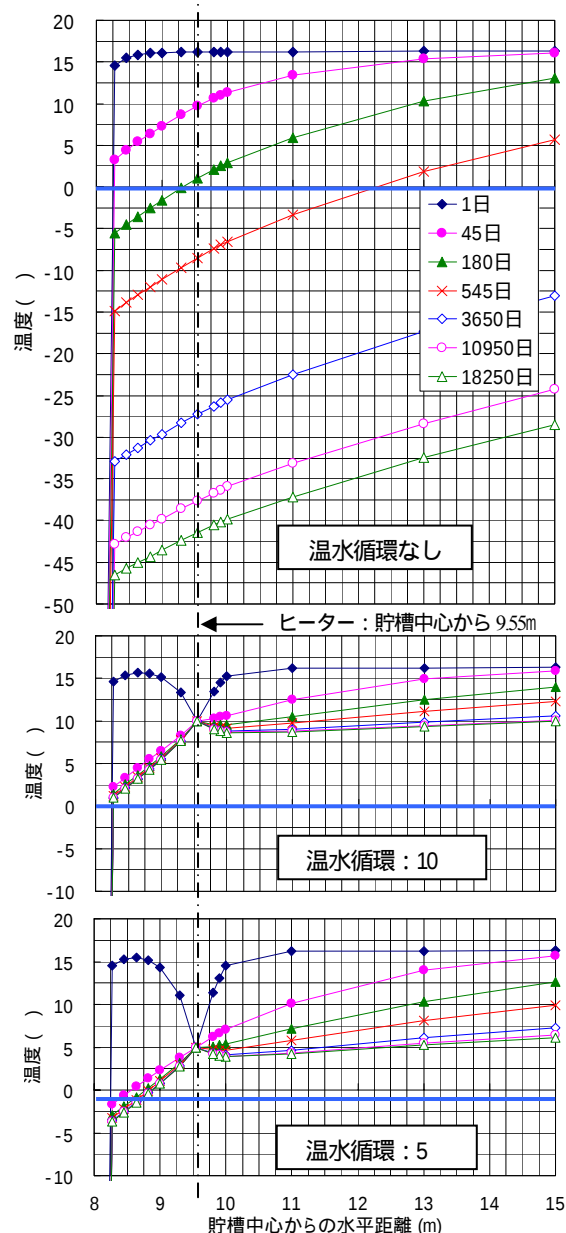


図-5 SL ライン上の温度分布

そこで，温水循環5 の場合の貯槽近傍の180日後の温度分布を図-6に示しているが，ヒーターより内側のRC躯体に凍結リングが形成されることが確認できる．

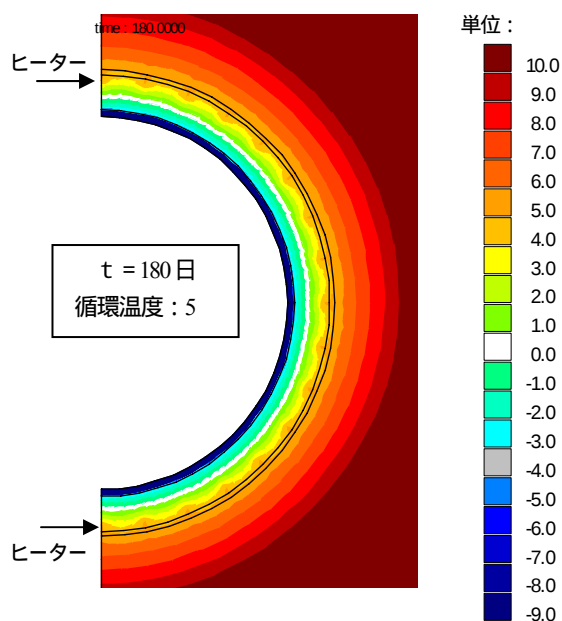


図-6 貯槽近傍の温度分布

次に、今回の提案方式の貯蔵性能を評価するため、貯槽流入熱量、BOR、ブライン流出熱量の算出結果をまとめ、ブライン温水の循環なしの解析結果と共に、図-7に示す。BORは、次式の貯蔵性能を判断する重要な指標で、貯槽への全流入熱量がすべてLNGを気化させるものとしたボイルオフガス量の貯蔵容量に対する割合(%/日)である⁶⁾。

$$BOR = \frac{Qt \times 86400}{Ar\rho h_v} \times 100 \quad (1)$$

ここに、BOR：1日当たりボイルオフ率(%)、Qt：貯槽全周の流入熱量(W/m)、A：貯槽断面積(m²)、r：貯液率(0.97と仮定)、ρ：LNGの密度(425kg/m³)、h_v：LNGの蒸発熱(509.91J/kg)。

図-7より、温水循環なしの場合は、時間の経過と共に貯槽流入熱量・BORは低下していくが、温水循環をした場合は、LNG貯蔵期間中ほぼ一定値で、100日程度経過後は循環なしに比べてBORはやや大きく、循環温度5では0.15%/日以下と認められる。BORについては、図-1に示した既存のLNG低温岩盤貯槽では30年後のBORが0.1%未満となるよう設計すると記されており²⁾、メンブレンLNG船ではBORは通常0.15%程度と記されている⁸⁾ことから、0.15%/日以下の結果は、十分な貯蔵性能を有すると考える。

(2) 熱伝導解析結果を用いた熱応力解析による検討結果

これまで行ってきた熱伝導解析ケースのうち、ブライン温度5の条件を対象に、二次元有限要素法による熱応力解析を行って、貯槽の力学的安定性を検討する。岩盤の力学特性は図-3、貯槽部材の力学特性は表-1に示しており、応力・ひずみは引張方向を正とする。本検討では、掘削応力やRC躯体等の打設による応力と熱応力の重ね合わせが必要なため、自重解析、空洞掘削解析、

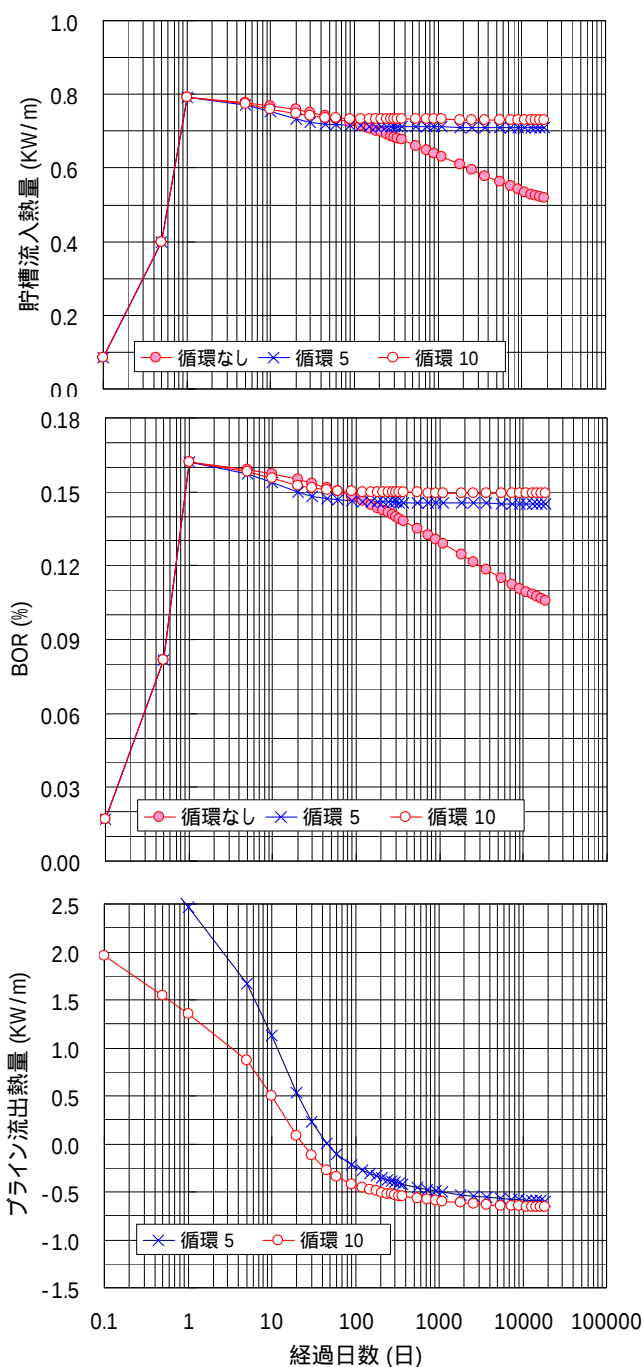


図-7 LNG貯蔵時の流入出熱量とBOR

RC躯体・吹付C打設時の解析、熱伝導解析、熱応力解析、の手順で解析する。なお、保冷材は非構造部材とし、熱伝導解析では、保冷材の熱特性は式(2)を用いて熱伝達率hに置換え、コンクリート躯体内面を熱伝達境界として解析する($h=0.089\text{W/m}^2$)。

$$v = k \frac{\Delta T}{a} = h \Delta T \quad \therefore h = \frac{k}{a} \quad (2)$$

ここに、k：保冷材の熱伝導率(W/m)、v：保冷材における熱流速(m/s)、ΔT：保冷材両面の温度差(°C)、a：保冷材厚さ(m)

まず、保冷材のモデル化の影響を検討するため、図-3の A ライン上の保冷材・RC 躯体接触部(貯槽中心から 8.3m)の温度の経時変化を図-8 に示す。保冷材を熱伝達率でモデル化したものが「循環・熱伝達」、保冷材を熱伝導体として考慮したものが「循環・熱伝導」である。ブライン循環の有無に拘らず、保冷材の熱伝達率によるモデル化の影響は極めて小さく、以下の熱応力解析には「循環・熱伝達」の熱伝導解析結果を用いた。

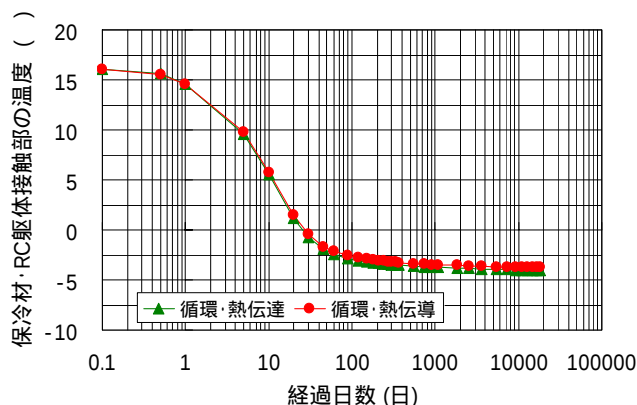


図-8 A ライン上の (貯槽中心から 8.3m)の温度の経時変化

熱応力解析結果としては、貯槽中心から 8.3mの位置を「RC 内側」、貯槽中心から 9.8mの位置を「RC 外側」と称することとし、ヒーターを通る SL ライン上とヒーター間の中央を通る A ライン上の「RC 内側」と「RC 外側」の最大主応力 σ_1 の経時変化を図-9 に示す。経過日数の増大に伴って引張応力が増加し、100～1000 日頃をピークに低下する傾向をもつこと、引張応力度は RC 内側が外側より高いこと、SL ライン上の引張応力度が A ライン上の値に比べてやや高いことがわかる。

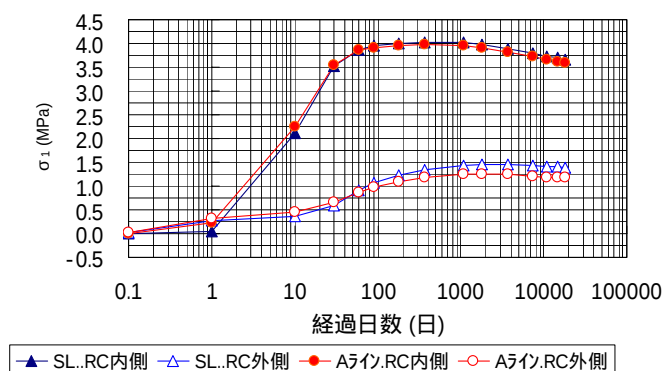


図-9 RC 躯体の最大主応力 σ_1 の経時変化

このため、代表 3 時点の SL ライン上の応力分布として、 σ_1 と鉛直方向応力 σ_y を図-10 に示す。図-9,10 によれば、岩盤は凍結しないため、岩盤部は圧縮応力場になるが、RC 躯体・吹付 C には最大主応力 σ_1 が y 軸方向に引張応力として発生する。これは、RC 躯体等の線膨張係数が岩盤のその 2 倍程度で温度低下量も RC 躯体等

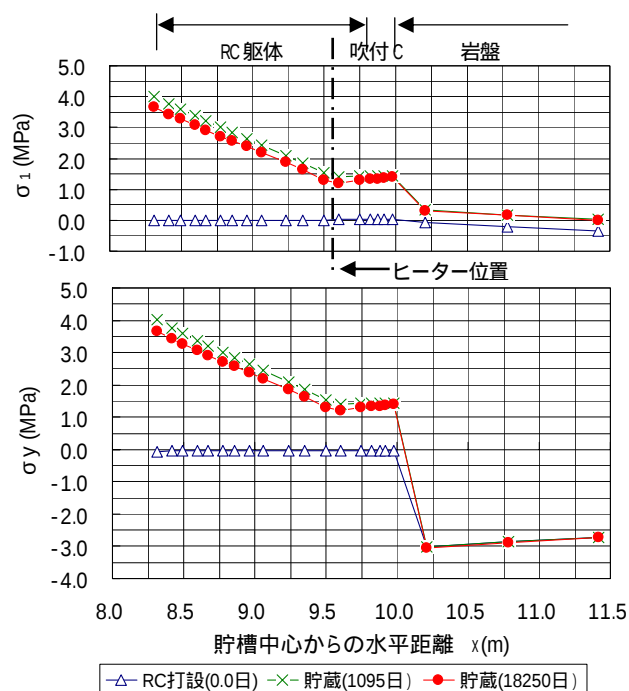


図-10 SL 上の最大主応力 σ_1 と y 軸方向の応力 σ_y の分布

の方が大きいため、RC 躯体等は低温収縮しようとするが、岩盤に拘束されて収縮量が制限されるため引張応力が発生するものと考えられる。しかし、ヒーターの設置によって温水循環がない場合より RC 躯体等の温度低下量は大幅に低下しているため、発生する引張応力度も大幅に削減されており、鉄筋で十分対応可能な範囲と考えられる。また図-10 より、岩盤部の熱応力が極めて小さい値であるため、貯槽の力学安定性を掘削応力で評価でき、ヒーターを設置した場合は、設置しない場合に比べて貯槽の力学的安定性が向上することがわかる。

4. おわりに

本報告では、厚肉構造のコンクリート躯体 (RC 躯体) 内にヒーター、吹付コンクリート (吹付 C) 内に排水パイプをもつ新たな LNG 低温岩盤貯槽を提案した。提案方式は、RC 躯体中のヒーターより内側に凍結リングを形成し、地下水浸入に対する凍結止水を目的とした。また、凍結域外側の RC 躯体や吹付 C および岩盤を 0 以上に保ち、凍結膨張や熱応力の大幅削減と排水パイプの外水圧削減機能の維持を目的としている。このため本報告では、この提案方式に対する熱伝導解析・熱応力解析および地下水解析を行い、提案方式の成立性を検討した。得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- ・ヒーターを設置しない場合は、メンブレン・保冷材・RC 躯体・吹付 C で構成する貯槽部材を設置した条件でも、凍結域は時間の経過に伴って岩盤部に拡大する。

これに対し、ヒーターを設置した場合は、温水循環温度 10 の条件では、凍結域は保冷材に封じ込められるが、5 では RC 躯体のヒーター内側に凍結リングが形成できることが確認できた。このため、5 の条件で RC 躯体の凍結止水が可能なことが示しえた。

- ・温水循環温度 5 の条件では、RC 躯体の内側部に凍結リングが形成されるが、それより外側の吹付 C・岩盤は 0 以上を保持しているため、排水パイプによる外水圧削減効果は十分機能するものと確認できた。
- ・自重解析、空洞掘削解析、RC 躯体設置時解析による応力算出後、温水循環温度 5 の条件に対する熱応力を加算した結果、LNG 貯蔵日数の増大に伴って RC 躯体・吹付 C 中に引張応力が発生するが、ヒーターの設置によって RC 躯体等の温度低下量は大幅に小さくなっており、鉄筋で十分対応可能な範囲と考えられた。また、岩盤部には熱応力がほとんど発生しないため、ヒーターなしの場合に比べて力学的安定性が大幅に向上することが推察された。

参考文献

- 1) Broms, L., Fredriksson, A., Glamheden, R. and Pilebro, H. : Conversion of an oil storage cavern to a refrigerated LPG storage facility , Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001, pp.659-664, 2001.
- 2) Amantini, E., Chanfreau, E. and Kim, H. Y. : Daejon pilot project: Lined cavern LNG storage , LNG Joournal March/April 2003, pp.25-27, 2003.
- 3) 米山一幸, 百田博宣, 若林成樹, 岡田滋: 液体燃料の低温岩盤貯蔵の成立性に関する解析検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.12, pp.9-18, 2007.
- 4) 百田博宣, 米山一幸: メンブレン方式の新 LNG 低温岩盤貯槽の成立性に対する検討(その 1), 土木学会第 62 回年次学術講演会, 3-418, pp.833-834, 2007.
- 5) 百田博宣, 米山一幸, 風間広志: メンブレン方式の新 LNG 低温岩盤貯槽の成立性に対する解析検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.13, 投稿中.
- 6) 日本ガス協会: LNG 地下式貯槽指針, 2002.
- 7) 土木学会: 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして - 熱物性と解析 -, 丸善, 2006.
- 8) 難波直愛, 玖久正憲, 湯浅和昭, 石丸純史郎: クリーンエネルギー輸送 ~ LNG 船の昨日・今日・あした, 三菱重工技報, Vol.40, No.1, pp.32-35, 2003.

PROPOSE OF A NEW MEMBRANE TYPE UNDERGROUND REFRIGERATED STORAGE

Shigeru OKADA , Hironobu MOMOTA and Tomosaburo FUJINAGA

In Japan, LNG storage technologies using inground tanks which consist of membranes, insulations and concrete structures were established. On the other hand, LNG underground refrigerated storage have been studied in other countries , eg, a pilot LNG underground storage at Daejon in South Korea.

In this paper a new membrane type underground refrigerated LNG storage preventing groundwater intrusion by a frozen ring made by heaters in relatively thick concrete structures and drainage pipese in shotcrete is proposed. Then, thermal conduction and stress analyses are conducted in orther to confirm the possibility of this system.