波方基地プロパン貯槽 岩盤貯槽における水封カーテンの構築と気密試験時の地下水挙動評価について

張 傳聖1*・池谷 貞右1・下茂 道人2・大久保 秀一3・前島 俊雄3

¹東電設計株式会社 土木本部 地下環境技術部(〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12) ²大成建設株式会社 技術センター(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1) ³(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油ガス備蓄部(〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目10-1) *E-mail: chang@tepsco.co.jp

水封式LPG岩盤貯槽の水封機能を維持するため、掘削時から水封ボーリングにより加圧給水し、貯槽周辺岩盤を所定の水理場に保持する必要がある。このため、水封トンネルから水平と縦のボーリング孔からなる水封カーテンは、岩盤の卓越割れ目に交差する方向にシステマチックな配置を基本とし、更に掘削段階毎に水封機能確認試験と3次元地下水解析から、その都度水封機能を分析し、ボーリング孔を追加した。

本論文では、波方基地プロパン貯槽で実施した3次元水理地質モデルの構築プロセスを主体に説明し、その解析結果と地下水挙動データならびに水封機能確認試験により構築した水封カーテンを説明し、気密試験時の地下水挙動の実測データと解析値から水封カーテンの仕上がりについての評価を報告する

Key Words: LPG underground storage, gas tightness test, correction pressure, instrumentation ground water

1. はじめに

水封式岩盤貯槽は、岩盤空洞内に貯めた液体およびガス燃料を、空洞に向かう地下水の流れにより貯蔵する方式である。通常のトンネルや地下空洞と異なり、貯槽建設では、水密性確保のため、完成時はもちろん施工中においても貯槽周辺岩盤内の地下水保持が重要である。このため、岩盤内割れ目に交差するボーリング孔を貯槽の上部と側部に配置し、人工的に地下水を供給する水封ボーリング孔を設置し、地下水挙動を制御しながら施工をすすめた。

ここでは、波方基地プロパン貯槽で実施した3次元水理地質モデルの構築プロセスを説明するとともに、その解析結果と、地下水挙動データならびに水封機能確認試験による水封カーテンの構築と気密試験時の地下水挙動の実測データと解析値などから、水封カーテンの仕上がりの評価について述べる.

2. 波方基地の概要

波方基地のLPG 岩盤貯槽は、幅26m、高さ30m、断面積 650m²のたまご型で、2条のプロパン貯槽と1条のブタン /プロパン兼用貯槽からなる. プロパン貯槽は長さ 485mで. 貯槽の設置深度は, 貯槽の天端位置でEL-150m, 貯槽底盤でEL-180mであり, 貯蔵するLPG の貯蔵圧力と 水封水圧の関係から十分な気密性・液密性が確保できる深度に設置されている. また, 貯槽天端から25m 上部 (EL-125m) の水封トンネルを貯槽を取り囲むように 設置し, 水平および鉛直の水封ボーリングから水封水を供給加圧している.

図-1に波方基地プロパン貯槽部周辺の地質図と間隙 水圧計設置図を示す。

図-1に示すとおり、波方基地は、地表部に風化部・風化漸移部が約20~60m程度覆い、その下部に花崗岩質の新鮮岩部からなる. 地質構造は、構造を変化させる割れ目、破砕帯、変質帯などの分離面と節理の卓越方向と密度などを調査・分析した結果、7つの地質分帯(I-VII)に区分した. 割れ目が最も密に発達しているV分帯では、N20W系、N60W系の貯槽横断方向が卓越している. IIとIV分帯の割れ目には、V分帯の2方向に加えN70E系の貯槽軸方向に近い割れ目が存在しており、構造運動により形成されたものと推定される. N70E系の割れ目の周辺では、一部開口割れ目が分布しており、この分帯は透水性が高い. VI分帯は、IV分帯と同様の割れ目方向であり、割れ目密度は中程度である. I分

帯は、貯槽軸方向の高角な割れ目が分布しているが割れ目密度は疎で透水性が比較的低い.

透水試験で比較的透水性の高かったIV帯、V帯について、ルジオン値のヒストグラムを図-2に示す。いずれも平均ルジオン値は0.1Lu程度であるが、1Luを超える高透水部がIV帯では約10%、V帯では約6%含まれている。

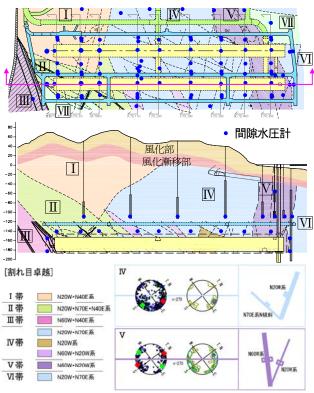
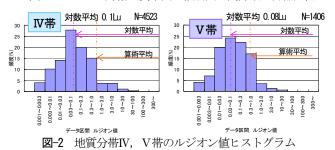


図-1 プロパン貯槽地質平面・縦断図と間隙水圧計器配置



3. 水封カーテンの構築

プロパン貯槽における水封カーテンは、貯槽(貯槽天端標高EL-150m)上部3本の水封トンネル(水封トンネル敷標高EL-125m)から、水平・縦方向、それぞれ基本間隔10mとして平行に削孔した水封ボーリングからなる、貯槽掘削時は、気密試験時の水封水圧1.1MPaGを下回る水封水圧0.4~0.95MPaGで、所要の水理場を確保するため、水封機能を評価する必要があった。

水封カーテン構築と水封機能評価のプロセスを, **図-3** に示す.

貯槽掘削中は、水封機能確認試験(アーチ掘削時, 貯槽掘削終了時), 各掘削段階で, 間隙水圧値を基本設計の解析値(0.1Lu均質モデル)と対比し地下水挙動を監視することにより、水封機能を評価し、必要に応じて追加水封対策を実施した.

水封機能確認試験では、1本おきに水封ボーリングを加圧給水停止し、その時の水頭低下量を測定し、基準値との比較により、水封カーテンの仕上がりを評価した。試験方法は後述ならびに参考文献¹⁾に示す。

間隙水圧は、図-1に示すとおり、貯槽周辺部、水封上部・側方部に網羅的配置した計器により監視を行った。また、調査時と、掘削時の情報を逐次反映した三次元不均質水理構造モデルを構築し、水封トンネル充水時や気密試験時の間隙水圧データと、構築したモデルによる予測解析結果から、水封機能の評価を行った。

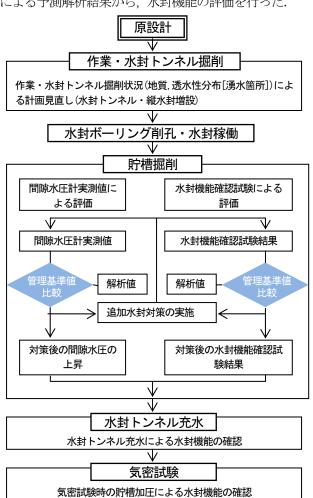


図-3 水封カーテン構築と水封機能評価のプロセス

水封機能確認試験方法の概要を以下に示す.

図-4 に示すとおり、3次元 FEM 浸透流解析により、1本の水封ボーリングを加圧給水停止した場合の事象を確認した結果は以下のとおりである.

・給水停止孔の水頭低下量は, 貯槽と連絡する割れ目 が介在する場合は, 均質地山に比べて明らかに大き くなる. ・図-5 に時間軸を対数とした水封ボーリング加圧給水停止後の水頭低下曲線を示す. 図-5 に示すとおり,経時的な水頭変動の変化は,一定時間経過後,時間の対数に比例して直線的に低下する. 水頭変動を対数時間で除した水頭低下勾配はH/dlogiotは, 貯槽と連絡する高透水割れ目が介在する場合,均質モデルに比べて大きくなる.

上記に基づき、均質モデルの水頭低下勾配|dH/dlog₁₀t|を基準値とした。

図-6 に、水封機能試験結果のうち水頭低下勾配 |dH/dlog₁₀t|が比較的大きかったプロパン No2 水封北側の縦水封ボーリングの水頭低下勾配|dH/dlog₁₀t|を示す.

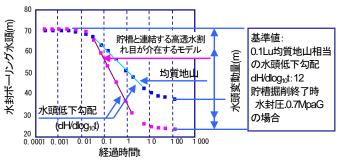


図-5 給水停止後の水頭低下曲線

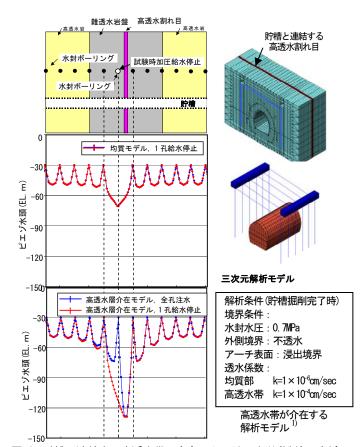


図-4 貯槽に連結する高透水帯の存在による地下水挙動評価の概念

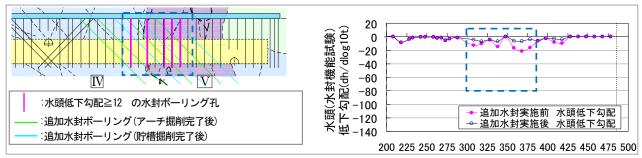


図-6 プロパン No2 縦水封ボーリング 貯槽アーチ掘削完了時水封機能試験実施時の水頭低下勾配

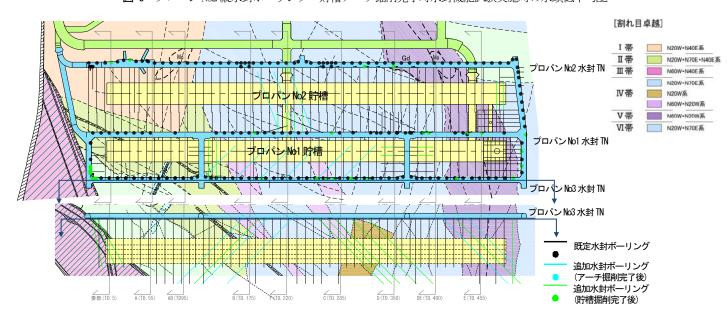


図-7 水封ボーリング最終レイアウト

図-6 に示すとおり、貯槽 TD300~400m間で、水頭低下勾配が大きい箇所が存在した. この区間は、地質分帯IV,Vが分布する. これらの分帯は、貯槽横断方向の割れ目が卓越していることが確認されていることから、割れ目への水封水の供給不足の可能性が考えられる.

当該箇所については、近傍に、割れ目に交差する様に、削孔方向を設定した追加水封ボーリングを設置することとし、貯槽周辺のグラウトによる止水対策と併せて、水封機能を強化することとした.

最終的な水封ボーリングレイアウトを図-7に示す.

4. 水理構造モデルの構築

水封式岩盤貯槽では、建設から操業に至るまで、適切な水封機能を維持することが重要である。そのため、現状再現並びに将来予測に基づく合理的な地下水制御対策を実現すべく、各施工段階の地下挙動を高い精度でもって説明可能な水理構造モデルを構築した。モデル設定は、ブタン/プロパン兼用貯槽と同様、地盤透水性の不均質性を考慮した^{2,3}.

図-8にモデル形状を示す. 図-8に示すとおり, 貯槽周辺部を包括する領域を地球統計学的手法により不均質透水分布を設定した. 設定の際には, 観測孔, 計測孔, 水封Bor, グラウト孔(最終次数孔)等の各透水試験データを入力値として用いた. 図-9にプロパン貯槽の周辺部の透水分布設定例を示す. 図-9に示すとおり, 設定した透水分布は, 貯槽周辺部のグラウト施工範囲にグラウトの改良効果が反映されていることが表されている.

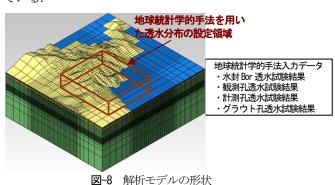


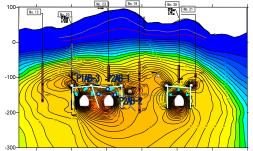
図-9 透水試験データと透水分布 (プロパン貯槽:計測断面C)

構築したモデルを用い、各水理条件で予測解析を実施した.

図-10に、水封トンネル充水・昇圧前後の間隙水圧コンタ図を、図-11に、水封昇圧時におけるNo.2プロパン貯槽計測計器の間隙水圧の予測解析値と実測値、図-12に、プロパン貯槽湧水量の解析値と実測値を示す。

図-10~12に示すとおり、水封トンネル充水・昇圧により間隙水圧が回復し、湧水量が増加する等から、適切な水封機能が構築されたことを示すものと考える.

また,解析予測と実測に基づく地下水挙動は整合しており,構築した水理構造モデルは概ね現状を再現できたものと判断される。



水封トンネル充水・昇圧前(水封水圧 P 貯槽 0.5MPa, B/P 貯槽 0.7MPa 時)

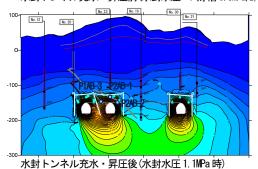


図-10 水封トンネル充水・昇圧前後の解析結果 間隙水圧(ピエゾ水頭)横断面コンタ図(AB 断面)

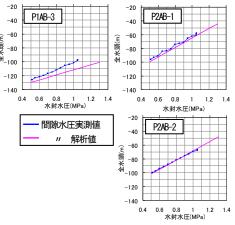


図-11 水封昇圧時の間隙水圧計実測値と解析値の比較

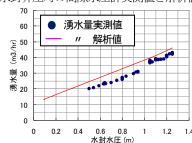


図-12 水封昇圧時の湧水量(プロパン貯槽2本合計) 実測値と解析値の比較

気密試験時の地下水挙動評価

(1) 貯槽加圧時の水封効能評価

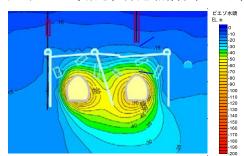
図-13 に、気密試験時の間隙水圧ピエゾ水頭横断面図 (計測断面 AB)を示す. 図-14 に, 貯槽頂部計測計器(設 置標高 EL-135m)の貯槽加圧時の間隙水圧経時変化を, 図-15 に、湧水量の経時変化を示す.

図-14 に示すとおり、貯槽頂部計器は、貯槽加圧と連 動して上昇した. この中で最も水頭が低かった P2AB-1 は、貯槽加圧前ピエゾ水頭 EL-54m から最高圧時ピエゾ水 頭 EL-31m迄約23m上昇した.

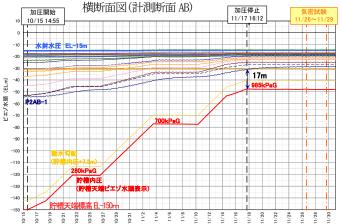
図-15 に示すとおり、実測湧水量は、貯槽加圧前 43.6m³/hr, 貯槽最高圧到達時 18.4m³/hr で, 約 25 m³/hr 減 少した.

非定常挙動を示す計器 P3D-1 について、図-16 に気密 試験時の間隙水圧ピエゾ水頭横断面図, 図-17 に貯槽加 圧時の間隙水圧経時変化を示す.

図-16 に示すとおり、P3D-1 は開始から 4 日程度水頭 が殆ど上昇しない等, 大きな時間遅れを伴う挙動を示 した. この様に大きな時間遅れを示す計器については、 最高加圧時までの挙動を、非定常解析等により、逐次



気密試験時解析結果 間隙水圧ピエゾ水頭コンタ図 図-13



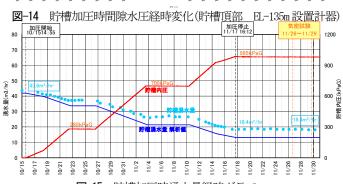


図-15 貯槽加圧時湧水量経時グラフ

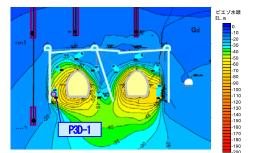
確認しながら、慎重に加圧を進めることとし、貯槽内 圧水頭を下回らないように留意した. 具体的には、貯 槽を加圧を進めた. そこで, 貯槽内圧昇圧を一時止め 静定期間, 内圧 280kPaG 時 4 日, 内圧 700kPaG 時 7 日計 11 日を設け加圧時の水頭差を確保することとした. そ の結果,最小水頭差11mを確保することができた.

(2) 気密試験時の貯槽気密性による評価

図-18に、貯槽壁面から15m位置での間隙水圧水頭解 析予測値ならびに実測値と貯槽壁面水頭との水頭差分 布図を示す. 気密試験後, 実測値に基づき貯槽の気密 性について確認を行った結果, 水頭差は最小で約9m, 動水勾配で0.6=9/15m(>0.5)が確保されていることを確認 した.

このことから、十分な気密性を有しており、構築した 水封カーテンが貯槽に対して、有効に水封機能効果が 作用しているものと判断される.

また、計測箇所の約7割が、解析値と実測値の差は 2m 以下であったことから、解析により概ね実測を再現 できたものと判断される.



気密試験時解析結果 間隙水圧ピエゾ水頭コンタ図 図-16

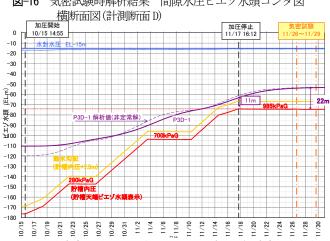
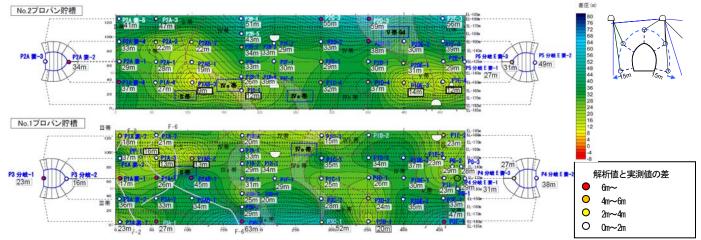


図-17 非定常挙動を示す計器 3D-1 の間隙水圧経時変化(3D-1)



6. まとめ

波方基地プロパン貯槽は、水封式岩盤貯槽であり、 貯槽の建設から操業に至るまで所定の水理場を保持す ることが重要である.このため、貯槽の上部・側部に ボーリング孔を設置して人工的に地下水を供給する水 封カーテンの構築や、地質の不均質性に起因した貯槽 周りの高透水箇所を均質で低透水な場に改良するグラ ウトエといった対策を行い、地下水挙動を制御しなが らの施工を進めてきた.

貯槽掘削時には、地下水関連データの分析や施工段階の情報を逐次反映して構築した3次元水理構造モデルとの比較による地下水挙動の評価を行うともに、施工段階毎に水封機能確認試験を実施し、水封カーテンの仕上がりを確認・評価した.

また、これらの検討に基づく情報化施工の一環として、必要に応じてポストグラウト工や追加の水封ボーリング孔設置などの対策工を適宜実施した.

結果, 貯槽の完成検査に位置づけられる気密試験時には, 水封カーテンが有効に機能し, プロパン貯槽の十分に高い気密性が確認された. なお, プロパン貯槽の貯槽周辺計器では, 貯槽変動時に, 貯槽内圧の変化に対し, 間隙水圧が応答に時間を要する計器が存在し

た. これらの計器については、非定常解析結果と比較する等、逐次挙動を確認すると伴に、一定期間貯槽内圧の加圧を中断し、間隙水圧の上昇を確認して加圧を再開させることにより、貯槽との水頭差を確保した.

調査・計測・解析の高度化に基づく情報化施工や水 封機能確認試験などにより、地下水挙動を制御しなが らの施工が合理的に実現できたものと判断される.

参考文献

- 1) 下茂道人, 真下秀明, 前島俊雄, 山本浩志, 青木謙治: 水封ボーリングを用いたLPG貯蔵空洞周辺の水封機能確認 方法, 第37回岩盤力学に関するジポジウム, PP.55-60, 2007.
- 2) 前島俊雄,山本浩志,宇野晴彦,池谷貞右,青木謙治: 3次元不均質モデルによるLPG岩盤貯槽掘削時の地下水挙 動評価,第38回岩盤力学に関するシンポジウム,PP.202-207,2009.
- 3) 池谷貞右,張傳聖,鈴木 健一郎,宮崎 裕光,大久保 秀一,前 島 俊雄:波方基地 ブタン/プロパン兼用貯槽 岩盤貯槽 における水封カーテンの構築と気密試験時の地下水挙動評 価について,第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演論 文集2013.

ESTABLISHMENT OF WATER CURTAIN SYSTEM ON THE NAMIKATA LPG STORAGE CAVERN AND EVALUATION ON HYDRAULIC BEHAVIORS DURING CAVERN AIR-TIGHTNESS TEST

Chuan-Sheng CHANG, Sadau IKEYA, Michito SHIMO, Shuichi OKUBO and Toshio MAEJIMA

For the hydraulic containment LPG storage cavern, the hydraulic containment ability is maintained by water injection from the water curtain boreholes to provide stable hydraulic condition surrounding LPG storage cavern from cavern excavation throughout the operation phase. In order to deriving higher efficacy of the water curtain boreholes, the authors have determined the layout of water curtain boreholes with consideration on the primary orientation of fractures. In this study, the authors have established a 3-dimensional hydrogeological model for evaluating the efficiency of water curtain boreholes in Namikata site and achieved to estimate the hydraulic behaviors in the cavern air-tightness test.