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

池谷 貞右[1*]・張 傳聖[1]・鈴木 健一郎[2]・宮崎 裕光[3]・大久保 秀一[4]・前島 俊雄[4]

[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]㈱大林組　技術研究所（〒204-8558　東京都清瀬市下清戸4-640）
[3]㈱大林組　土木本部（〒108-8052　東京都港区港南2-15-2）
[4]（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: aikeyas@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，波方基地ブタン／プロパン兼用貯槽の水理地質構造や水封効果確認試験と3次元地下水挙動解析により構築した水封カーテンについて説明するとともに，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，波方基地ブタン／プロパン兼用貯槽で実施した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650m^{2}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．ブタン／プロパン兼用貯槽は長さ430m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．プロパン貯槽と同様に，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，10mを基本間隔とする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，波方基地ブタン/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．このうちブタン／プロパン兼用貯槽に分布する地質分帯は，Ⅰ，Ⅳ，Ⅴ，Ⅵ帯であり，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．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，この分帯は透水性は高い．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．

Ⅰ帯，Ⅳ帯について，ルジオン値のヒストグラムを**図-2**に示す．Ⅳ帯の平均ルジオン値は0.1Luであるが，1Luを超える高透水部が約10%含まれている．

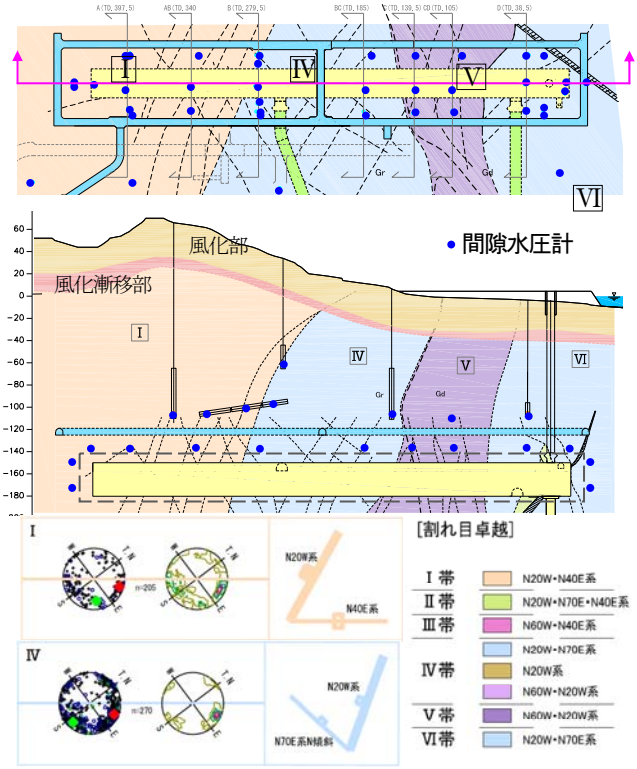


図-1　ブタン/プロパン貯槽地質平面・縦断図と間隙水圧

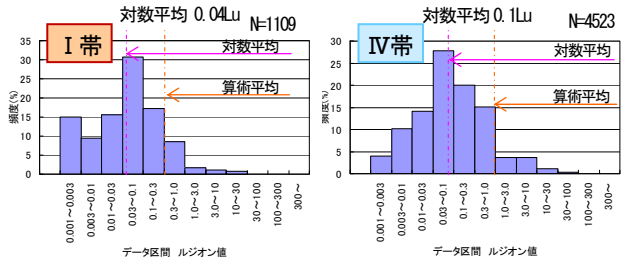


図-2　地質分帯Ⅰ，Ⅳ帯のルジオン値ヒストグラム

3．水封カーテンの構築

ブタン/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2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．試験方法の詳細は，参考文献[1)3)]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，掘削時の調査結果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．

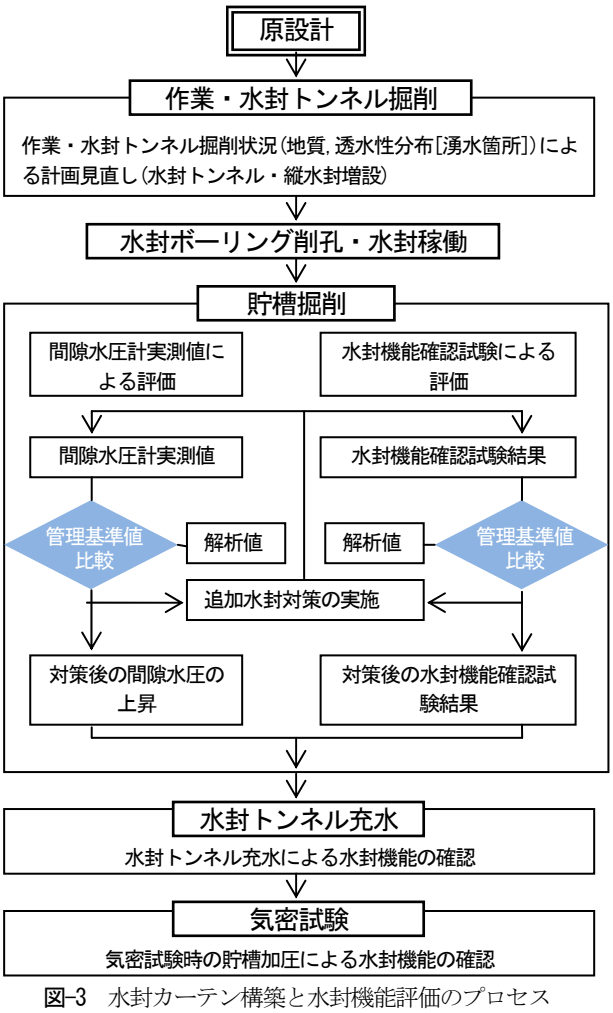


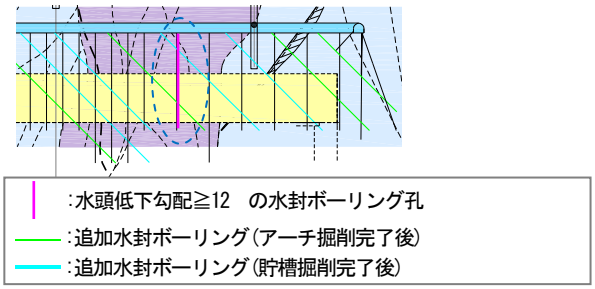
図-3　水封カーテン構築と水封機能評価のプロセス

図-4 に，貯槽掘削後に実施した水封機能試験結果のうちブタン/プロパン貯槽上部の水平水封ボーリング水頭低下勾配を示す．

図-4 に示すとおり，貯槽北側(貯槽 TD99.5 m)において水頭低下勾配が大きい箇所が存在した．貯槽北側(TD99.5m) は，割れ目が密なV帯領域内にあり，このうち貯槽を横断する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，間隙水圧低下箇所と併せて総合的に判断して解析精度の向上を図り割れ目に交差する様に，削孔方向を設定した複数の追加水封ボーリングを設置し，貯槽周辺のグラウトによる止水対策と複合的な効果により， 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-5** に示す．



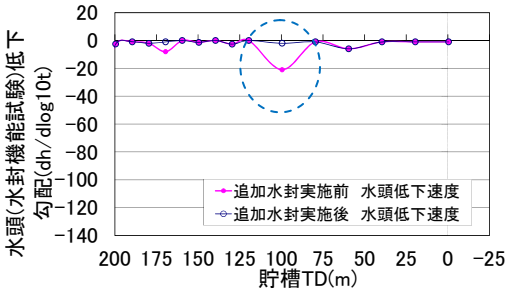


図-4　ブタン/プロパン貯槽 No2 縦水封　貯槽掘削完了時水封機能試験実施時の水頭低下速度

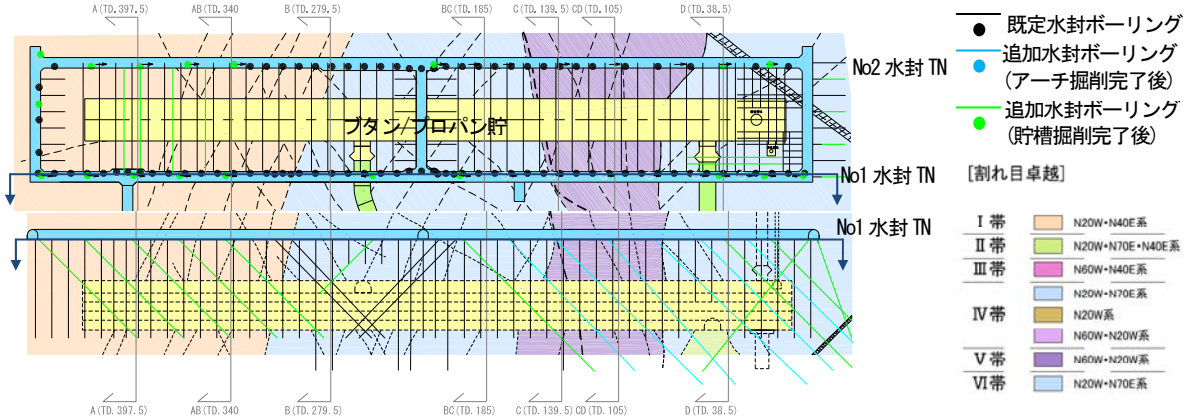


図-5　水封ボーリング最終レイアウト

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，各施工段階の地下水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．

モデルの構築について，以下に示す．

(1) 地球統計学的手法による透水性分布の設定

3 次元浸透流解析に適用した不均質モデルの透水係数分布は，調査時の観測孔ボーリング，各建設段階での水封ボーリング孔，間隙水圧計設置孔およびグラウト孔（初期透水場：1･2 次孔，グラウト実施後：最終次数孔）で実施した透水試験により得られた透水係数を入力値とし，地球統計学的手法である Sequential Indicator Simulation(以下 SIS と呼ぶ)[2]を用いて設定した．

SIS は，確率論的シミュレーションにより得られた推定量を基にした確率分布を設定し，対象とする物理量の不確定性について乱数列を用いて評価する方法である．

各位置における推定値は，この位置の近傍における実際の観測値と先にシミュレーションにより推定された値から計算される確率分布関数を基にして推定される．

クリギング手法では，推定点において推定される値は，近傍の実測観測値のみによるが，SIS では，それに前段階で推定した点の値も用いられる．

この手法では，シミュレーションの範囲に設定された格子上の点を，乱数列を用いて，ランダムに逐次選定していく．選定した各位置では，指定する近傍の値(実測値と前にシミュレーションにより得られた値)を探索し値をシミュレーションする．

この手法では，既往のクリギング手法の特性であるスムージングの効果(局所的な透水性の変化がクリギングでは平均化され的確に表現できない場合がある)を受けないことから，不均質な地質状況を評価する場合には，より適した手法である．

図-6 に，地球統計学的手法による透水分布設定例を示す．

図-7 に，３次元透水分布とモデル設定を示す．

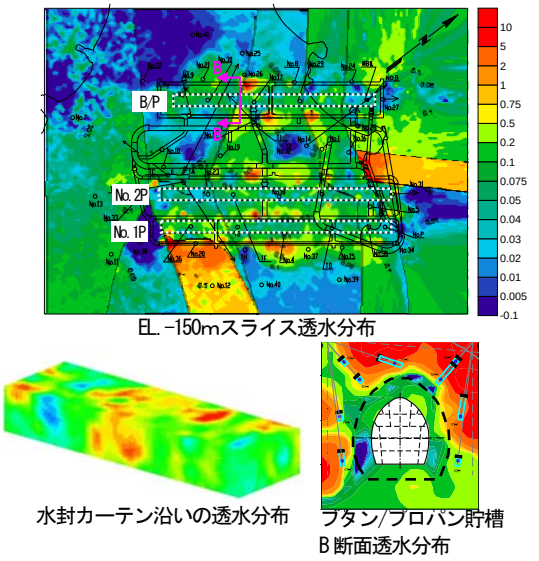


図-6　地球統計学的手法による透水分布の設定例

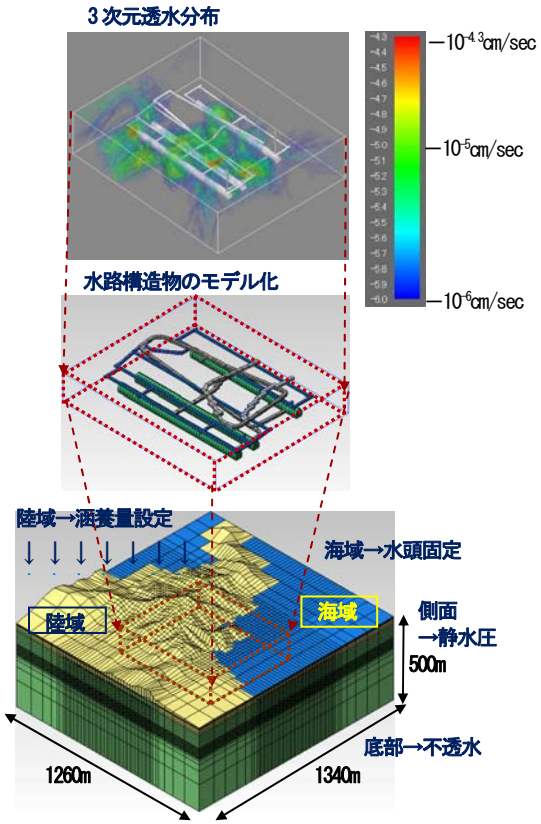


図-7　３次元透水分布・モデルの設定

(2) 解析モデルの設定

モデルは境界の影響を受けないよう十分な領域を確保するとともに，貯槽や水封・作業トンネル，水封圧力等の境界条件は，掘削時の施工ステップや水封昇圧等の各工事工程に応じて段階的に設定した．

3次元浸透流解析には，異方性の透水特性が表現できる飽和･不飽和浸透流解析コード（Soil Plus Flow）を用いた．

このモデルを，水封・作業トンネル充水や水封水圧昇圧時の間隙水圧，湧水量等の地下水挙動評価に適用した．

図-8に，水封トンネル充水前後の間隙水圧ピエゾ水頭分布を，図-9に，ブタン/プロパン兼用貯槽計測計器における間隙水圧，図-10に，ブタン/プロパン兼用貯槽湧水量の解析予測値と実測値を示す．

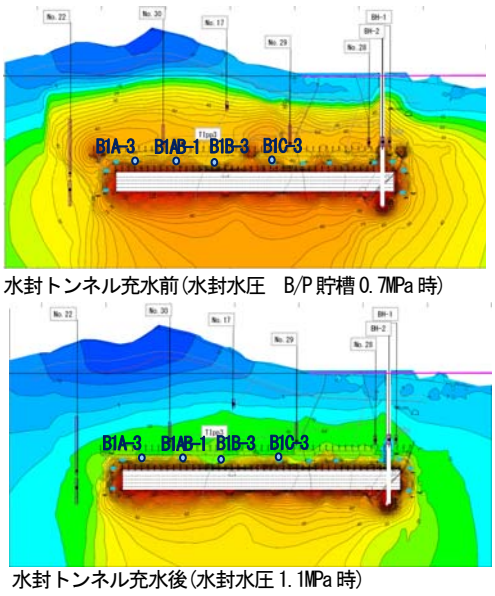


図-8　水封トンネル充水・昇圧前後の解析結果
間隙水圧(ピエゾ水頭)縦断面コンタ図

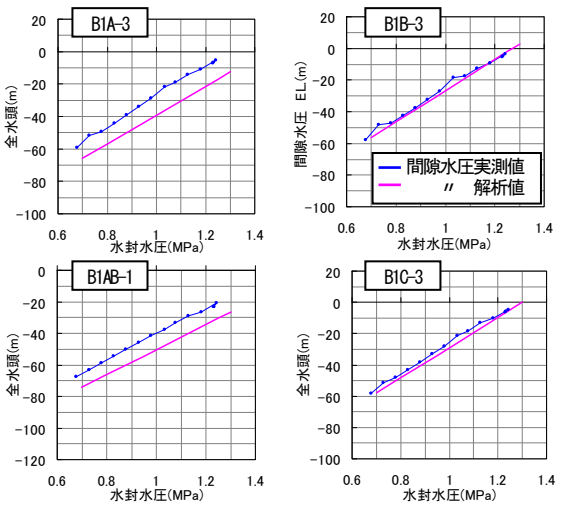


図-9　水封昇圧時の間隙水圧計実測値と解析値の比較

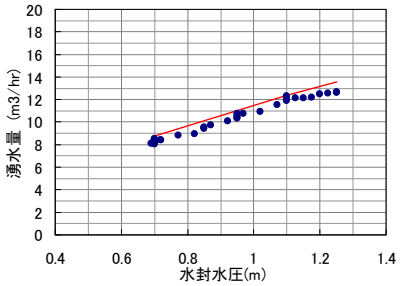


図-10　水封昇圧時の湧水量実測値と解析値の比較

図-8～10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，ほぼ，解析予測と実測に基づく地下水挙動は整合しており，適切な水封機能が構築されたことを示すものと考える．

５．気密試験の地下水挙動評価

(1) 貯槽周辺間隙水圧挙動による評価

図-11 に，気密試験時の間隙水圧ピエゾ水頭縦断面図(ブタン/プロパン兼用貯槽)を示す．また，貯槽加圧時の間隙水圧経時変化を，同断面上の計器のうち貯槽上部計器設置標高 EL-135m の計器について図-12 に，計器 B1AB-X を例として，解析と実測の経時変化を図-13 に，計器湧水量の経時変化を図-14 に示す．

図-12 に示すとおり，水封ボーリング下部の B1AB-1 は貯槽加圧と連動して上昇してた．最も水頭が低かった B1AB-1 は,貯槽加圧前ピエゾ水頭 EL-38m から最高圧時ピエゾ水頭 EL-25m迄約 13m上昇した．

間隙水圧については，貯槽内圧との水頭差が確保するため，解析予測値と実測値を逐次確認しながら，加圧を進めた．図-13 に示すとおり，例示した B1AB-1 は，概ね解析と実測の挙動が整合しており，気密試験時の水頭差 24m を確保した．

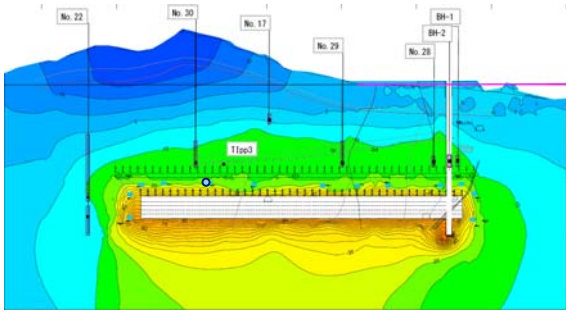


図-11 気密試験時解析結果 間隙水圧ピエゾ水頭コンタ図
ブタン/プロパン兼用貯槽縦断断面図

図-14 に示すとおり，実測湧水量は，貯槽加圧前 10.8m³/hr，貯槽最高圧到達時 5.7m³/hr で，約 5 m³/hr 減少した．

(2) 気密試験時の貯槽気密性による評価

図-15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11m，動水勾配で0.73=11/15m(>0.5)が確保されたことを確認した．

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 6 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．

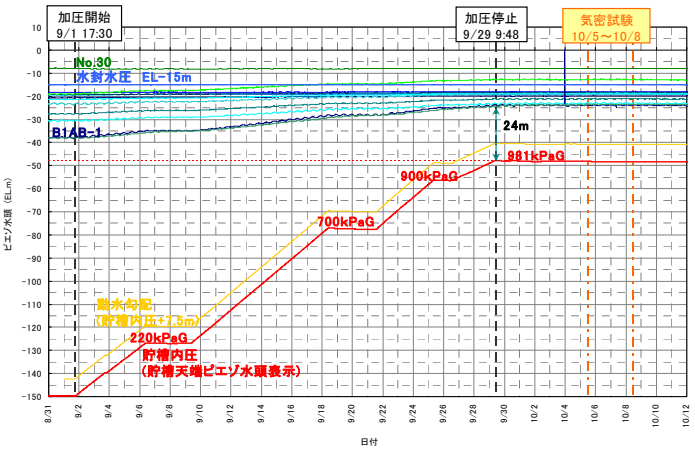


図-12 貯槽加圧時間隙水圧経時変化(B1AB-1)

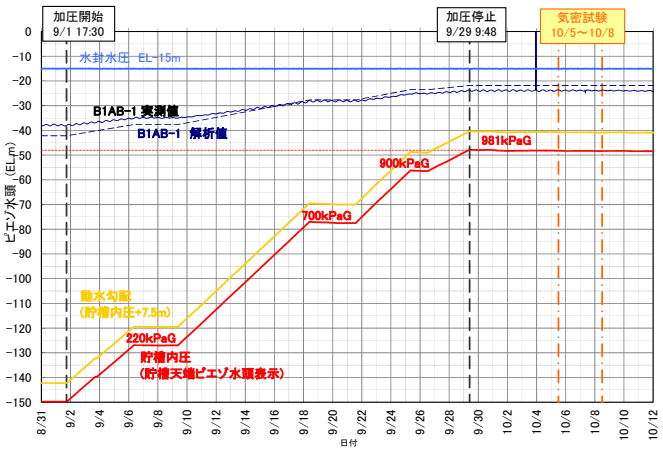


図-13 貯槽加圧時間隙水圧経時変化(B1AB-1 解析値と実測値)

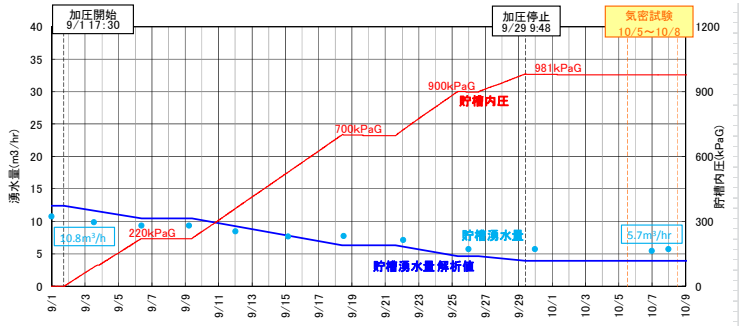


図-14 貯槽加圧時湧水量経時変化(B1AB-1)

6. まとめ

波方基地ブタン／プロパン兼用貯槽は，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工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，ブタン／プロパン兼用貯槽の十分に高い気密性が確認された．

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ｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ，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) 張傳聖, 池谷貞右, 下茂道人, 大久保 秀一, 前島 俊雄：波方基地プロパン兼用貯槽 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

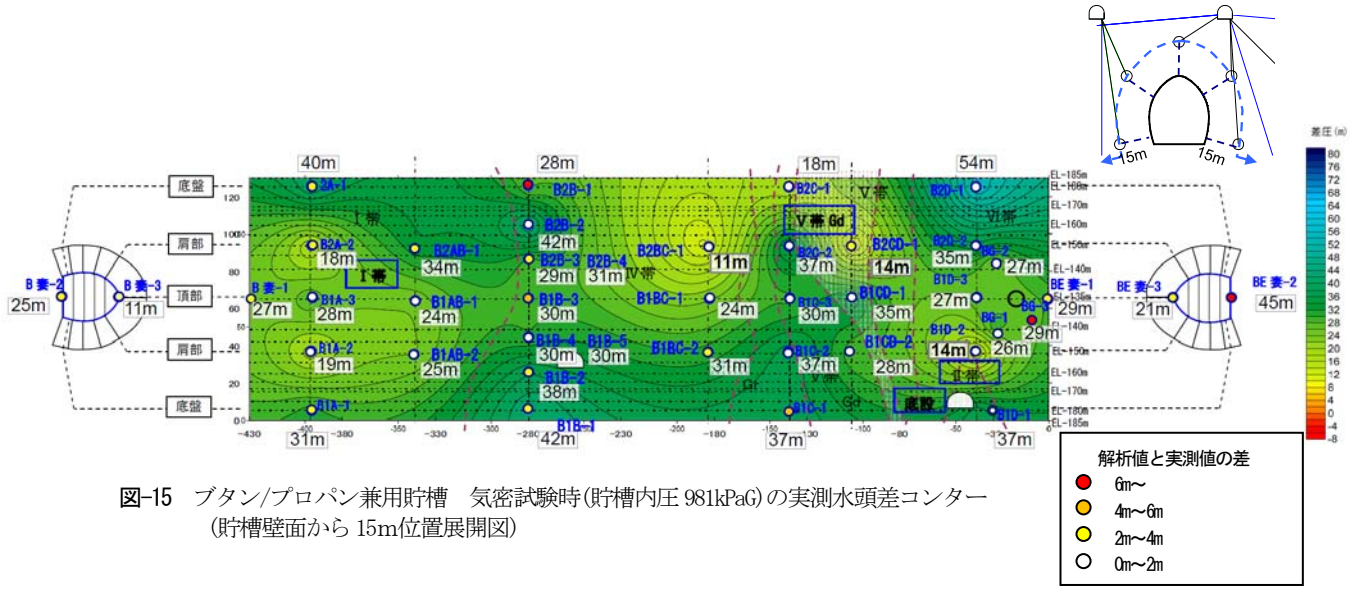


図-15　ブタン/プロパン兼用貯槽　気密試験時(貯槽内圧 981kPaG)の実測水頭差コンター
(貯槽壁面から 15m位置展開図)

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

Sadau IKEYA, Chuan-Sheng CHANG, Kenichiro SUZUKI, Hiromitsu MIYAZAKI, 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.