倉敷基地LPG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

藤井 健知1*・小渕 考晃²・西 琢郎3・金戸 辰彦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1-7-12)
²鹿島建設株式会社 技術研究所 岩盤・地下水グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
³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3-4-17)
⁴独立行政法人石油天然ガス・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2-10-1)
*E-mail: afujii@tepsco.co.jp

水封式LPG岩盤貯槽では、貯槽掘削から操業において水封機能を維持するため、水封ボーリングにより 加圧給水し、貯槽周辺を所定の水理場に保持する必要がある.このため、水封トンネルから設置した水平 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、更に貯槽掘削のステップ毎に水封孔のシャットイン試験と三次元地下水挙動解析などから、 その都度水封機能を分析し、効果的となるよう水封ボーリングの追加対策を行った.本論文では、地下水 挙動データの評価と三次元水理地質モデルによる解析やシャットイン試験に基づいて水封カーテンを構築 したプロセスを示し、気密試験時の地下水挙動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 storage cavern, shut-in test, 3-D groundwater simulation

1. はじめに

水封式LPG岩盤貯槽は、貯槽掘削から操業において水 封機能を維持するため、貯槽周辺を所定の水理場に保持 する必要がある.このため、水封トンネルから設置した 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、貯槽掘削のステップ毎に行った水封孔のシャ ットイン試験と三次元地下水挙動解析などから、水封機 能を分析し、水封ボーリングを追加した. ここでは、地下水挙動データの評価並びに三次元水理 地質モデルによる解析やシャットイン試験の結果に基づ いて水封カーテンを構築したプロセスを示し、貯槽掘削 後の水封トンネル充水や水封昇圧、気密試験時などの地 下水挙動から、倉敷基地における水封カーテンの仕上が りについての評価を報告する.





2. 倉敷基地の水理地質概要

倉敷基地貯槽アーチ底盤レベル(EL-167.5m)の地質 平面図を図-1, No.1貯槽での地質縦断図を図-2に示す.

地表よりEL-70m付近は、新第三紀鮮新世~第四紀完 新世の堆積層により覆われており、その下位に中生代白 亜紀の花崗岩が分布している.花崗岩は風化程度により、 風化部、漸移部、新鮮部に区分されている.堆積層から 花崗岩風化部までの透水性は図中に示すとおり26~ 370Luと相対的に高い.

花崗岩新鮮部は概ねEL-120m以深に分布し,貯槽は EL-160m~EL-184mの深度に配置していることから,花 崗岩新鮮部の被りは概ね40m程度で,貯槽周辺には割れ 目の発達が認められる.

当該地点では5つの断層が貯槽を横断し,貯槽南西部 にはマイクロフラクチャが確認されている.新鮮花崗岩 の一般部は,主としてNNW-SSE系の割れ目が認められ, 割れ目密度は0.5本/m程度であり,透水性は平均0.3Lu

(最大4Lu)である.F2・F3断層周辺領域は,NE-SW系の 断層沿いの割れ目が発達し,割れ目密度は2本/m程度と 高く,透水性は平均0.9Lu(最大13Lu)である.マイク ロフラクチャは,開口幅が極めて小さい微細割れ目の密 集帯であり,その形態的特徴から粒状型(GT),網目 型(MT),波型(WT)に区分される.マイクロフラ クチャの透水性は平均0.6Lu(最大3Lu)であり,同一箇 所において比湧水量が比較的高く,透水試験では小さい 値となる特徴を有する.

3. 水封カーテン構築のプロセス

水封カーテン構築のプロセスを図-3に示す.

貯槽掘削に先立ち,貯槽範囲を取り囲むように配置し た水封トンネル掘削時の調査結果から,透水割れ目に直 交する方向に水封ボーリングを10m間隔でシステマチッ クに配置し,1.0MPaの水封水圧を作用させた.

原設計 作業トンネル掘削 作業トンネル掘削状況(地質、透水性分布)による 計画の見直し(水封トンネル増設、外周縦水封設置) 水封トンネル掘削 水封トンネル掘削状況(透水割れ目と卓越方向)による 水封ボーリング配置の設定(削孔方向、貯槽間縦水封設置) 水封ボーリング削孔・水封稼働 貯槽掘削 間隙水圧計実測値 シャットイン試験 による評価 による評価 間隙水圧計実測値 シャットイン試験結果 理基準値 比較 解析値 解析値 No No 追加水封対策の実施 Yes Yes 間隙水圧計実測点における 水封カーテンの確認 水封機能の確認 貯槽周辺全線にわたる水封機能の評価 水封トンネル充水・水封昇圧 水封トンネル充水、水封昇圧による水封機能の確認 ★必要に応じてポストグラウト工実施 気密試験 気密試験時の貯槽加圧による水封機能の確認

図-3 水封カーテン構築と水封機能評価のプロセス

貯槽周辺には、網羅的に計174個に及ぶ間隙水圧計を 配し、貯槽建設中の間隙水圧の常時監視を可能とした. この間隙水圧計の経時的変化の分析や水封水供給量、貯 槽湧水量測定による水収支の評価、三次元地下水挙動解 析結果に基づく管理基準値との比較分析から、また一方 で、アーチ掘削時、ベンチ掘削時などの施工ステップ毎 に実施した水封孔のシャットイン試験の分析結果から、 合理的な地下水制御となるよう、適宜、追加水封対策を 実施した.

貯槽掘削後は、水封トンネル充水、水封昇圧試験を実施し、必要に応じてポストグラウト工を実施した.

このようにして、貯槽の最終的な完成検査に位置づけ られる貯槽気密試験では、貯槽加圧開始からの全試験期 間において十分な水封機能が維持されていることを確認 しているものである.



図-4 シャットイン試験 概念図





図-7 No. 2貯槽 F3断層交差部 水封ボーリング配置

4. 貯槽掘削から水封トンネル充水までの水封機能 評価

(1) 貯槽掘削完了までの水封機能評価

シャットイン試験は、稼働中の水封ボーリング孔の単 孔を給水停止し、停止後の水圧低下量を測定する試験で ある.各水封ボーリング孔について実施することで、面 的な水圧分布を把握することができる.

シャットイン試験の概念を図-4に示す.シャットイン による水頭低下量は、貯槽に連続する高透水割れ目が介 在すると均質地盤に対して大きくなる¹⁾.

シャットイン試験により得られる水圧分布を評価する ため、シャットイン時の水圧低下量の管理基準値を三次 元浸透流解析により設定した.アーチ掘削時の水平水封 をシャットインした解析結果の例を図-5に示す.

実施工の例としてNo.2貯槽TD150~TD260区間につい て図-6に追加水封前後のシャットイン試験結果を示す. シャットイン試験結果からEL-80m程度まで水頭値が低 下していることが判明した.当該部の地質状況と水封ボ ーリング配置を図-7に示す.

水圧低下の原因としては、F3断層周辺の透水割れ目が 貯槽に連続することで、規定孔(10m間隔)における水 封機能が一部そがれていることが推定された.



図-5 三次元解析によるシャットイン時の圧力分布

n:786

h



N65E 75N

T.N

N30W 80.5W



図-9 水封ボーリング最終レイアウト

当該区間は、高透水性を示すF3断層が貯槽を斜めに横断し、断層周辺の割れ目卓越方向は図-8に示すとおり第1ピークが断層沿い、第2ピークが断層直交方向となっている。従って貯槽内からポストグラウト工により透水割れ目を改良するとともに、追加水封を各割れ目卓越方向に直交するよう配置することで、追加水封後のシャットイン試験の水頭値を回復させている。

最終的な水封ボーリングのレイアウトを図-9に示す. 基本レイアウトは、水封トンネル掘削時に判明した透水 割れ目に直交する方向に10mピッチで配置している.追 加水封ボーリングは、前述のF3断層の例と同様に水圧低 下の原因と想定された地質構造を考慮して配置した.

(2)水封トンネル充水時の水封機能評価

全施工期間にわたる水封機能を定量的に評価すべく, 施工の各段階で得られた地質調査結果と地下水計測デー タから,随時,水理地質モデルを更新し,三次元浸透流 解析結果に基づく管理基準値との比較分析を行い,地下 水挙動を制御しながら施工を進めた.

三次元水理モデルは、図-10に示すとおり、地表から EL.-400mまで地層を考慮してモデル化した.



図-10 三次元浸透流解析モデルの概要

境界条件は、モデル側面は静水圧での水頭固定、モデ ル底面は不透水とし、水封水圧は水封ボーリング孔位置 の節点を水頭固定とした.解析コードは透水異方性を考 慮できる三次元飽和・不飽和浸透流解析のSoil Plus Flowを用いた.

貯槽周辺の透水性は、地球統計学手法の一つであるイ ンディケータクリギング法により三次元的空間分布を推 定した.地山の透水性分布の推定に用いたデータは、地 下水観測ボーリング孔、水封ボーリング孔、間隙水圧設 置孔、貯槽グラウト外リング1次孔のルジオン値である.

貯槽周囲のグラウト部については、グラウト最終次数 孔のルジオン値を用い、グラウト改良範囲である貯槽か ら8mの範囲にクリギングを適用した.透水性分布を推定 した結果例を図-11に示す.B断面付近の地山の透水性は 概ね0.5Lu以下が分布し、断層周辺は1Lu以上の高透水性 を示しており、実際の透水性分布が再現できているもの と考えられる.



貯槽掘削完了時,水封トンネル充水・昇圧時の間隙水 圧の実測値と解析結果の例を図-12に,貯槽湧水量の実 測値と解析結果の例を図-13に,B断面のピエゾ水頭コン ターを図-14,図-15に示す.

水封トンネルを充水し、水封水圧を1.1から1.35MPaまで昇圧したことにより、間隙水圧は10m~15m程度(図-12)、貯槽湧水量は20m³/hr程度上昇し(図-13)、概ね 予測通りの結果であった.掘削により低下した間隙水圧 は、水封トンネル充水・昇圧により回復し、特に水封カ ーテン上部では広い範囲でその傾向が認められる(図-14,図-15).





図-15 水封トンネル充水・昇圧時 B断面 解析水頭分布

5. 気密試験時の水封機能評価

気密試験時の解析コンターを図-16に、貯槽加圧時の 貯槽天端の間隙水圧計の経時変化を図-17に、貯槽湧水 量の経時変化を図-18に、貯槽内圧と間隙水圧の水頭差 のコンターを貯槽壁面から12m離れた間隙水圧計設置位 置における展開図として図-19に示す.

貯槽加圧で水封カーテン内側の間隙水圧が大きく回復 していることがわかる(図-16).気密試験時における 貯槽天端での水頭差は最小15m(動水勾配1.3)であり (図-17),また,貯槽全体での最小水頭差はNo.3貯槽A 断面肩部A-10の12mであった(図-19).動水勾配として は1.0となり気密性基準となる0.5を満足する結果が得ら れ,十分な気密性を有している結果となった.

また,貯槽湧水量も貯槽加圧に伴い低減し,気密試験時には加圧開始から80m³/hr程度低下し,概ね予測通りの結果となった(図-18).



水封式岩盤貯槽では、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、 ボーリング孔を貯槽上部・側部に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三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 毎に水封孔のシャットイン試験を実施し、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,貯槽完成検査となる気密試験時には,水封カー テンが有効に機能し,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シャットイン試験による水封機能評価などにより,地下水挙動を制御しながらの施工が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ポジウム講 演集,pp.55-60,2008.



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

Kenji FUJII, Takaaki KOBUCHI, Takurou NISHI, Tatsuhiko KANETO, Toshio MAEJIMA

For the hydraulic containment LPG storage cavern, the hydraulic containment ability is maintained by water injection from the water curtain to provide stable hydraulic condition in the vicinity of LPG storage cavern from cavern excavation throughout the operation phase. The authors were conducted shut-in tests and 3-D groundwater simulation for evaluating the efficiency of water curtain , in each cavern excavation stage. In this paper, the authors have taken Kurashiki for an example to introduce the construction and improvement process of water curtain system with evaluation by shut-in tests and 3-D groundwater simulation.