波方基地プロパン貯槽 水封式岩盤貯槽の グラウト施工実績と改良効果の評価について

堀田 渉1*・下茂 道人2・安達 哲也1・水道 健3・山本 浩志4 (元)・前島 俊雄4

¹大成建設株式会社 原子力本部(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)
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東電設計株式会社 土木本部(〒135-0061 東京都江東区東雲1-7-12)
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: ht-wtr00@pub.taisei.co.jp

地下水の流れによってLPGを岩盤内に封じ込める水封式岩盤貯槽では、貯槽掘削時においても周辺岩盤 を所定の水圧場に保持する必要がある.波方基地では、人工的に地下水を供給する水封ボーリング孔を設 置するとともに、貯槽周辺の高透水箇所に対して止水グラウト(プレグラウト,ポストグラウト)を行っ た.プレグラウトは、注入範囲を実際に掘削し、地質情報や透水試験の分析・評価を行うことで、次ステ ップの施工方法や改良目標値を適宜修正しながら施工を進めた.ポストグラウトは、計測データと予測値 の比較を繰り返し行う情報化施工により、必要に応じて計画・実施した.本論文では、波方基地プロパン 貯槽におけるプレグラウト及びポストグラウトの計画と実績、さらに改良効果の評価について報告する.

Key Words: LPG underground storage, grouting, groundwater management

1. はじめに

波方国家石油ガス備蓄基地(以下,波方基地と呼ぶ) は、LPガスの安定供給を目的とした国家備蓄基地5地点 のうちの1つであり、岩盤貯槽3条で、約45万トンのLPガ スを水封方式により備蓄する(図-1).当該方式は、コ ンクリートやスチールなどのライニングを行わず、貯槽 周辺の地下水圧により常温高圧で液化したLPガスを貯 蔵するものである.図-2に示すように、貯槽掘削におい ても周辺岩盤を所定の水圧場に保持する(水封機能保 持)目的で、人工的に地下水を供給する水封ボーリング 孔(水封カーテン)を設置する.波方基地においては、 さらに、貯槽周辺の高透水箇所に対して止水グラウトを 行った.

波方基地の岩盤貯槽で行った止水グラウトは、貯槽掘 削に先立って切羽前方の改良を目的としたプレグラウト と、掘削後の止水等を目的としたポストグラウトに区分 される.プレグラウトは、注入範囲を実際に掘削し、地 質情報や透水試験の分析・評価を行うことで次ステップ の施工方法や改良目標値を適宜修正しながら施工を進め た.ポストグラウトは、計測データ(間隙水圧、湧水量 等)と予測値の比較を繰り返し行う情報化施工により、 必要に応じて計画・実施した. 本論文では,波方基地プロパン貯槽におけるプレグラ ウト及びポストグラウトの計画と実績,さらに改良効果 の評価について報告する.



2. 波方基地の概要

(1) 地下岩盤貯槽

波方基地は、愛媛県今治市波方町の瀬戸内海に向かっ て西北西に伸びる岬に位置し、プロパン貯槽2条とブタ ン/プロパン兼用貯槽1条で構成された水封式岩盤貯槽で ある.プロパン貯槽の形状は、幅26m、高さ30m、延長 485mの卵形である.貯槽深度は、貯蔵するLPガスの圧 力(0.8MPa)より高い地下水圧を貯槽周辺に作用させ、 貯槽に向かう地下水の流れにより水封機能が確保できる 深度として、貯槽天端標高をEL-150mとした.

(2) 地形·地質

波方基地の地質は西南日本内帯に属し、中生代白亜 紀に形成された花崗岩が分布している.陸域の大部分 は波方花崗岩(Gr)より成り、北部海岸付近には高縄花崗 閃緑岩(Gd)が分布している.花崗岩は風化の程度により、 風化部、漸移部、新鮮部の3層に区分され、貯槽は新鮮 部に位置する.

図-3 に示すように、地下深部の貯槽周辺の花崗岩に ついては、切羽観察やボーリング孔の BTV 観察及びコ ア観察結果から、割れ目の方向・密度・性状に着目し て、7つの地質分帯に区分した.赤線は主要な粘土介在 割れ目であり、プロパン貯槽周辺で最も卓越する割れ 目方向は N20W、N60W 系の貯槽軸直角方向である. II とIV分帯には、前記の2方向に加え N70E 系の割れ目が 卓越している. No.1 貯槽南側においては、せん断割れ 目沿いに岩級低下部を連続的に伴う破砕帯(F-2, F-6 等)が存在する.

(3) 水理特性

Π

低透水領域

F--2

図-3 に示すように、プロパン貯槽周辺の透水性を水 封ボーリング孔の透水試験結果から大きく4つに区分し た. 貯槽中央部のIV分帯は、N70E系の割れ目が一部開 口しており、透水試験で 1.0Lu 以上のボーリングが多く、

F-5

中·低透水領域

,粘土介在割れ目⑤

IV-a

F-6

高透水領域と評価した.一方貯槽の南北方向は,中央 部に比べるとルジオン値は小さい結果であった.貯槽 南側に位置する F-2 よりもさらに南側は,縦水封ボーリ ング等の透水試験結果をもとに低透水領域と評価した.

3. 水封式岩盤貯槽における情報化施工

水封式岩盤貯槽では、水封機能を保持するために図-4 に示すような地下水を管理した情報化施工により貯槽の 建設を行う必要がある.地下水管理に関する計測項目の うち、貯槽周辺間隙水圧計配置を図-5に示す.





(1) 水封カーテンの施工

貯槽掘削に先立ち,貯槽上部の水封トンネルを掘削し, 水封トンネルから貯槽を取り囲むようにボーリングを配 置,当該孔から人工的に地下水を供給することで,水封 カーテンを形成した.ボーリング孔の施工では,削孔時 の湧水量,湧水圧,隣接孔との水圧応答,透水試験, BTVによる地質観察を行いながら,水封カーテンの機能 を評価し,必要に応じて水封ボーリング孔を追加した.

(2) 貯槽空洞の施工

貯槽の掘削は、図-6に示すような加背割りで施工を行った.貯槽アーチ掘削においては、頂設導坑からアーチ プレグラウトを実施することにより、貯槽掘削前に高透 水箇所を改良し、その後掘削を行った.ベンチ掘削は4 段で施工し、アーチ盤から側壁部を対象にベンチプレグ ラウトを行った後、1~2ベンチを掘削し、3ベンチ掘削 前に2ベンチ盤からインバート部を対象にベンチプレグ ラウトを行ってから、3~4ベンチを掘削した.

プレグラウトの立案にあたっては、水封ボーリング孔 やグラウト孔の透水試験結果、水封トンネルや貯槽掘削 時の地質情報により、貯槽周辺岩盤の地質や透水性を評 価し、グラウト削孔方向や完了基準の見直しを逐次行っ た. さらに解析手法を用いて、改良幅や改良目標値を変 えた貯槽湧水量の予測解析結果からグラウト仕様を決定 した¹⁾(改良幅10m,改良目標値1.0Lu).また、各掘削 段階において、間隙水圧や貯槽湧水量の計測データとそ れぞれの予測値との比較を繰り返し行い、ポストグラウ トまたは水封ボーリング孔の追加施工を計画・実施した.

(3) 水封昇圧試験及び貯槽気密試験

貯槽掘削後,水封ボーリング圧を設計圧(1.25MPa) に昇圧し,貯槽湧水量が設計湧水量以内に収まっている か,空洞安定性に問題は無いか等を確認する水封昇圧試 験を実施した.水封昇圧試験においても,計測データの 分析・評価を行い,必要に応じてポストグラウトを計 画・実施した.最後に,貯槽を設計圧(0.97MPa)まで 加圧する気密試験を実施し,貯槽の気密性ならびに最終 的な水封機能の評価を行った.

4. プレグラウト計画及び実績

(1) プレグラウト計画

波方基地で行ったプレグラウトは、高水圧下の施工で あることを考慮し、注入圧2.5MPaでのパッカー方式によ る高圧グラウトを行った. グラウト材料は、事前に現場 試験を実施し、長期耐久性、化学的安定性(LPGとの反 応)及び施工性を考慮し、早強セメント(塩水が混入す る区間は高炉セメント)を基本とし、低透水箇所は超微 粒子セメントを採用することとした(表-1).また、改 良効果の向上を目的とした動的注入工法を採用した.

アーチプレグラウトの基本パターン図-7に示す.施工 効率,施工精度を考慮して,切羽から約21mを1回の施 工延長とし,切羽前方に放射状に配孔することとした. 規定孔のパターンは、図-3に示すように岩盤の透水不均 質性を考慮し,高透水パターン(1.0≦Lu),中透水パ ターン(0.5≦Lu<1.0),低透水パターン(Lu<0.5)の3 つに区分した.高透水パターンにおいては,A,B,Cの 3リングを規定孔とし,改良幅を10mに設定した.中透 水パターンは、Aリングのみを規定孔とし、改良幅は5m とした.低透水パターンは、先進ボーリング(Zリン グ)による確認孔とした.



図-6 プロパン貯槽加背割り及びプレグラウト改良範囲 **キ**-1 プレグラウト仕様一覧

改良範囲	貯槽壁面より10m
注入工法	パッカー方式
注入材料	原則として早強セメント
注入圧力	最大2.5MPa
初期配合(W/C)	6/1~1/1 (ルジオン値より決定)
完了基準	注入量0.2L/min/mで30分間注入



アーチプレグラウトの施工フローを図-8に示す. 規定 孔削孔後,孔内湧水量(Q)及び孔内湧水圧を測定し,透 水試験を実施した. 孔内湧水量や透水試験結果(Lu), ま た中・高透水パターンについては単位セメント注入量 (Ce)が基準値を超える孔については、中央内挿法等によ る追加孔を施工した. 最終次数孔は孔ごとに判定基準を 満足した段階での次数孔とした. これら透水区分に応じ た改良目標値及び規定孔のパターンを設定することで、 施工の効率化を図り、適正なグラウトの施工を行った²⁾. ベンチプレグラウトの基本パターンを図-9に示す.ア ーチプレグラウトの実績により、ボーリング孔間は12m (低透水パターンは24m)とし、改良幅を10mとした. アーチプレグラウト同様,透水試験結果(水封ボーリン グ孔かつアーチプレグラウト孔)を基に、高、中、低透 水パターンに区分し、それぞれに応じた規定孔や判定基 進を設定した.

(2) アーチプレグラウト実績

アーチプレグラウトの注入結果を図-10に示す.貯槽 掘削前の段階で高透水領域と評価されたNo.1貯槽中央部 では、大部分高透水パターンの規定孔で施工を行った. その結果、高ルジオン値を確認し、かつセメント量も多 い結果となり、図-11に示す超過確率においては十分な 改良が確認された.一方、貯槽掘削前の段階で中・低透 水領域と評価されたNo.2貯槽の南側も同様に、低透水パ ターンとしての施工を行い効率的な施工を行うことがで きた.図-11に示すように、両領域ともに最終次数孔に おいては、改良目標値であった1.0Lu以下、かつ平均 (超過確率50%) 0.1Lu以下を達成した.



図-8 アーチプレグラウト施工フロー





5. グラウトの情報化施工実績例

(1) 間隙水圧評価とポストグラウト計画への反映

アーチ掘削完了後において,図-12に示すようなエリ アに対してポストグラウトを計画・実施した.エリア選 定の計画にあたっては、①間隙水圧が均質モデルによる 予測解析結果よりも低い、②貯槽壁面の局所湧水量が多 い、③プレグラウト孔やロックボルト孔の湧水量が多い 箇所を対象に、総合的に評価し決定した.ポストグラウ トの規定孔配置については、図-13に示すように、アー チプレグラウト孔に対して交差するよう南北向きに斜め 45°を基本とした.

(2) ポストグラウトによる間隙水圧の上昇

プロパン貯槽は並設する2貯槽を同時に掘削したため、 掘削による影響の大きい両貯槽間の岩盤内の間隙水圧保 持が水封機能上の課題の一つであった. 貯槽南側の計測 断面 AA 断面(TD55)においては、間隙水圧計 P1A-3の 計測値が、ベンチ掘削の時点から他断面の同位置の計測 値と比較して低い値が得られ、4 ベンチ完了段階で設置 深度+10m程度まで低下した.三次元水理地質モデルに よる再現解析³の結果, F-6 による水平水封ボーリング からの供給の遮断と貯槽への連通が要因と考えられた. そこで、掘削完了直後 No.1 プロパン貯槽より F-6 上盤に 向けてポストグラウトを行った. このときの間隙水圧挙 動を図-14(b)に示す. 注入圧により間隙水圧も一時的に 大きく上昇するが、注入完了後は一定値に収束する.内 挿法による仕上げを試み、最終的に F-6 上盤に対して効 果のあった8孔の注入によって、約9mの間隙水圧の回 復がみられ、その効果が確認された. さらに図-15 に示 すように、グラウト結果を考慮した水理地質モデルを逐 次見直し、予測解析を実施することで、気密試験におい て所定の間隙水圧が確保されていることを確認した.





(3) 貯槽湧水量に与えるグラウトの効果

図-16に示すように、各施工段階で更新した水理地質 モデルによる地下水流動解析によって最終的な湧水量予 測を行いながら、湧水量低減に必要なグラウトを計画・ 実施した.その結果、湧水量が最大となる水封昇圧(水 封水圧1.25MPa)結果は、事前解析の予測値7191/minに対 して計測値7161/minであり、設計貯槽湧水量800L/min

(48m³h)以下の値となった.一方,グラウトを実施しない場合(アーチプレグラウトを除く)の予測値は 876l/minであり,止水対策の効果が確認された.

6. グラウト改良効果の評価

気密試験時の貯槽周辺の差圧(間隙水圧-貯槽内圧) 分布を図-17に示す.貯槽内圧の上昇とともに周辺の間 隙水圧は上昇し,気密試験時において差圧は最小で9m (動水勾配0.6)となり,気密条件(動水勾配0.5以上) を満足したことで,グラウトの改良効果を含む最終的な 水封機能の保持を確認した.

7. まとめ

波方基地における水封機能保持を目的としたグラウト では、貯槽掘削と並行して、調査・計測・解析を行い、 施工方法や改良目標値を適宜修正する情報化施工を行っ た.その結果、周辺岩盤を均質な水理場に近い状態に改 良できたことで、貯槽周辺岩盤を所定の水圧場に保持す ることができ、その後の貯槽気密試験においてLPG岩盤 貯槽としての水封機能保持を確認することができた.

以上の結果より,本論文で述べたグラウトの情報化施 工技術及び評価方法は,水封式岩盤貯槽における水封機 能性評価に適用可能であることを確認した.



図-17 気密試験時の差圧(間隙水圧-貯槽内圧)分布

参考文献

- 下茂道人,安達哲也,前島俊雄,山本浩志:LPG 岩盤貯槽 掘削時の湧水量予測手法とグラウト仕様の検討-波方プロ パン貯槽工事-,第63回土木学会年次講演会,PP.581-582, 2008.
- 安達哲也,下茂道人,前島俊雄,山本浩志:LPG岩盤貯槽 掘削時のグラウト計画と止水対策結果の評価-波方プロパン貯槽工事-,第63回土木学会年次講演会,PP.583-584, 2008.
- 3) 下茂道人, 堀田渉, 下野正人, 前島俊雄, 山本浩志, 青木 謙治:主要割れ目を反映した3次元水理地質構造モデルに よるLPG貯槽周辺の地下水挙動解析, 第38回岩盤力学に関 するシンポジウム講演集, PP.208-213, 2009.

RESULTS AND EVALUATION OF GROUTING DURING CONSTRUCTION OF THE UNDERGROUND LPG STORAGE CAVERN WITH HYDRAULIC CONTAINMENT SYSTEM -NAMIKATA SITE PROPANE STORAGE CAVERNS-

Wataru HOTTA, Michito SHIMO, Tetsuya ADACHI, Ken SUIDOU, Hiroshi YAMAMOTO and Toshio MAEJIMA

To ensure the storage capability of the underground storage cavern with hydraulic containment system, it is important to maintain groundwater pressure during construction. In Namikata, we employed water curtain and pre- and post-grouting to control groundwater conditions. Pre-grouting was designed based on hydrogeological conditions obtained before cavern excavation, such as results from water injection boreholes. For planning of post-grouting, an observational approach, based on the monitoring data on groundwater pressure and flow rate after cavern excavation, was employed. This paper describes grouting design, implementation and effects on groundwater flow around the propane storage caverns in Namikata.