# 倉敷基地 LPG岩盤貯槽における高水圧下の グラウト施工実績と改良効果の評価について

小林 伸司1\*・宮嶋 保幸2・水道 健3・金戸 辰彦4・山本 浩志5・前島 俊雄4

<sup>1</sup>清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
<sup>2</sup>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丁目19-1)
<sup>3</sup>東電設計株式会社 土木本部 水力・地質部 (〒135-0061 東京都江東区東雲一丁目7-12)
<sup>4</sup>(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)
<sup>5</sup>元(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構
\*E-mail: shinji.kobayashi@shimz.co.jp

水封式LPG岩盤貯槽の建設に当っては、施工途上から安定した地下水圧の確保と湧水量の抑制が求めら れる.そのため、倉敷基地では人工的に水封水を供給する水封ボーリング孔を配置するとともに、貯槽の 周囲にグラウトによる低透水の改良帯を構築した.グラウトの施工に当っては、掘削断面の周囲を事前に 改良するプレグラウト方式を採用し、岩盤貯槽の水理地質条件を考慮して高圧注入が実施できる施工方法 を取った.注入範囲を掘削した後には、貯槽の湧水量や周辺岩盤の地下水圧を計測し、水封機能を保持し ているか否かという観点から、改良の良否を判定した.本報文では、その実績について報告する.

Key Words : LPG underground storage, rock cavern, pre-grouting, microcement, colloidal silica

## 1. はじめに

倉敷国家石油ガス備蓄基地では、LPG(プロパン)の 内圧より高い地下水圧となる岩盤内に常温高圧で40万 tonのLPGを貯蔵する水封式岩盤貯槽を建設している<sup>1</sup>.

図-1に、倉敷基地の岩盤貯槽の横断図と周辺の地層構成 を示す.この貯蔵方式は、鉄筋コンクリートやスチール などのライニングを行わずに地下水の圧力によって気密 性を確保するものであり、施工途上から安定した地下水 圧の確保が求められる.このため、倉敷基地では貯槽を 取り囲むように水封ボーリング孔を配置して水封水を加 圧給水するとともに、貯槽の掘削に伴う周辺岩盤の地下 水圧低下を抑制することを目的として、貯槽周囲にグラ ウトによる低透水の改良帯を構築した(図-1).

貯槽周囲のグラウトに当っては、高水圧下で割目の発 達する周辺岩盤に低透水の改良帯を構築するため、注入 機械や材料、施工方法などに様々な工夫を施した.以下 に、倉敷基地におけるグラウト施工の実績を示す.

#### 2. 地質概要

倉敷基地では、EL-70m程度を境にその上位に新第三

紀鮮新世~第四紀完新世の堆積層が,また,その下位に 中生代白亜紀の花崗岩が分布している.下位の花崗岩の 中でも表層は風化が進んでおり,堆積層から花崗岩風化 部までの透水性は,図-1に示すように,相対的に高い.

花崗岩新鮮部は概ね EL-120m 以深に分布し,岩盤貯 槽は EL-160~-184mの深度に配置したが,花崗岩新鮮部 の被りが概ね 40m と薄いため,貯槽周辺の岩盤には割 目が発達しており,風化部からの水みちとなり得る透水 性の高い割目も存在した.貯槽に対するグラウトに当っ ては,設置深度相当の水圧(概ね 1.6~1.85MPa)が作用



図-1 倉敷基地岩盤貯槽横断図と周辺の地層構成



図-2 地質平面図 (貯槽アーチ底盤レベルEL-167.5m)

することに加え、透水性の高い割目が存在することを考慮する必要があった.

図-2に貯槽アーチ底盤レベルの地質平面図を示す.同 図には、割目の卓越方向と密度の観点から区分した5つ の分帯(I~V)および掘削中に確認したマイクロフラ クチャの分布を示した.

このうち、I分帯ではNNW-SSEの割目が卓越してお り、その割目密度は0.5本/m程度である.II・III分帯で は、同様にNNW-SSEの割目が卓越するが、割目密度は それぞれ1本/m程度、2本/m程度と高まる.IV分帯では ENE-WSW系の割目が卓越しており、その割目密度は1 本/m程度である.V分帯はF2・F3断層沿いに発達する割 目密度が2本/m以上の領域である.

一方,マイクロフラクチャは,開口幅が10~30µmの 微細割目の密集帯である.その性状から粒隙型(GT), 網目型(MT),波型(WT)に区分した.

図-2には、初期透水性としてベンチプレグラウトの規 定孔のルジオン値(1ルジオン≒1.0×10<sup>5</sup>cm/scc)を併せ て示した. I分帯では最大4.3ルジオン(平均0.3ルジオ ン),Ⅱ・Ⅲ分帯では最大8.4ルジオン(平均0.5ルジオ ン),Ⅳ分帯では最大2.1ルジオン(平均0.3ルジオン), V分帯では最大13ルジオン(平均0.9ルジオン)であっ た.また、マイクロフラクチャ(WT)部では、最大3.3 ルジオン(平均0.6ルジオン)であった.透水性の高い 領域は、グラウトの1・2次孔の透水性からF2・F3断層周 辺のV分帯、マイクロフラクチャ部、F4~F5断層間で割 目密度の高いⅡ分帯およびⅢ分帯であった.

#### 3. 貯槽に対するグラウト施工の概要

#### (1) 基本方針

前述のように、岩盤貯槽には概ね1.6~1.85MPaの水圧 が作用するため、グラウトにおいてはその水圧より高い 圧力を加えた高圧注入を行う必要がある.そのため、注 入圧に耐えるカバーロックを残した状態で注入を行うこ ととし、対象とする岩盤の掘削前にグラウトを行うプレ グラウト方式をグラウト工事の主体とした.

図-3に貯槽に対するグラウト施工の全体フローを示す. 貯槽アーチ部においては、アーチ部および第1段ベンチ 部に相当する掘削断面の周辺岩盤に対して掘削前にプレ グラウトを施し、改良が完了した後に掘削に移行すると いう、プレグラウトと掘削の交互施工を繰り返した.ア ーチ掘削完了後は、アーチ壁面の湧水箇所に対してポス トグラウトを実施するとともに、第1段ベンチ掘削時に 湧水増加の恐れのある区間に対して先行ベンチプレグラ ウトを実施した.その後、第1段ベンチを掘削し、第1段 ベンチ盤からそれ以深の貯槽周辺にベンチプレグラウト を行い、改良が完了した区間から盤下げ掘削を実施した. また、第3段ベンチ盤から貯槽の底盤以深に底盤グラウ トを実施した後に、最終ベンチである第4段ベンチの盤 下げ掘削を行った.貯槽掘削完了後は、貯槽内大気圧状 態の下で水封水圧を上昇させる水封昇圧試験に備えて, 壁面に残る湧水箇所に対してポストグラウトを実施し, 水封昇圧試験後にも昇圧時に湧水量が増加した箇所に対 してポストグラウトを実施した.

図-4に個別のグラウト区間における施工フローを示す. 貯槽アーチ部およびベンチ部の個々のグラウト区間にお いては、所定の完了基準に達するまでプレグラウトを実 施して改良を完了させた後に、そのプレグラウト区間を 掘削し、その後、掘削区間の湧水量が管理値以下かつ地 下水圧が所定の水圧以上であることを確認した.また、 計測結果から対策が必要になった場合には、ポストグラ ウトを施すとともに、以後のプレグラウトの仕様を見直 した.以上のように、掘削後の水封機能の保持状況を確 認し、それによって完了基準に達するまでグラウトした 結果の良否を判定しながら、情報化施工を進めた.

#### (2) グラウト施工範囲と改良目標値

グラウトは、貯槽の全周にわたって実施した.改良帯 の幅は、掘削による周辺岩盤のゆるみやロックボルト打 設によって壁面近傍の透水性が高くなったとしても、水 封機能を保持できるように、ロックボルト長 3m の外側 5m まで改良するものとして、貯槽の周囲 8m とした. この範囲内の改良目標値は、貯槽掘削時から操業後の水 封機能確保を考慮して、図-5 に示すように、設定した.

改良範囲内を内リング・外リングという2リングに分けた(図-5)のは、外側を先に改良することによって、貯 槽壁面近傍の内側の改良効率を向上させることを図った ことによる.これは、貯槽に先行して実施した水封トン ネルにおけるグラウト施工実績に基づく.図-6に示すよ うに、外側を先に改良することによって、内側の改良後 のルジオン値が外側よりも小さくなることが分かる.

## (3) 注入圧力, 注入速度

注入においては、動的注入方式を採用し、その振幅の 中心圧力は4.2MPaとした.この圧力は、貯槽設置深度相 当の水圧1.6~1.85MPaを考慮すると、できるだけ高圧に するのがよいが、設備上の制約があり、湧水圧+3MPa 以上となるように設定したものである.動的注入方式に



おける振動数は基本的に6Hz, 振幅は中心圧力の約15% に当る±0.6MPaとした.

注入速度は、10L/minを上限とし、1L/min以下に速度が 低下した後、30分間圧力を保持して注入終了とした.

#### (4) 注入材料、練混ぜおよび配合

改良目標値が0.15~0.65ルジオン(図-5)と小さな値 であること、また、周辺岩盤には開口幅10~30µmのマ イクロフラクチャが高透水領域を形成していることから、 注入材料には粒径10µm以下の超微粒子セメントを用い た.その際に、セメント系材料単体では硬化時間を制御 できないため、一定時間の分散効果を維持しつつ添加量 によって凝結時間を調整できる分散剤を添加した<sup>2)</sup>.

その練混ぜには、図-7に示すように、単位注入セメント量を増加させる効果が認められたため、高速せん断ミキサ(1,800rpm)を用いた.

注入開始配合は、注入前の透水性が1ルジオン以上の ステージがある場合、水セメント比(W/C)400%とし、 1ルジオン未満の場合はW/Cを600%とした.配合切替基 準は、1,000~2,000Lとし、注入1回当りの上限量を8,000L とした.

なお、マイクロフラクチャ(WT)部においては、超 微粒子セメントだけでは透水性の次数低減が進まなかっ たため、溶液型グラウト(コロイダルシリカ、粒径0.01 ~0.02µm)を補助的に用いた<sup>3</sup>.

## (5) 注入孔配置

図-8にアーチプレグラウト、ベンチプレグラウトお

よびベンチプレグラウトの底盤部を仕上げるために実施 した底盤グラウトの規定孔配置を示す.カバーロックは, アーチプレグラウトでは 3m, ベンチプレグラウトでは 3~11m とし,これによって高圧プレグラウトが成立す ることを施工時に確認した.また,図-9 に示すように, 一部のプレグラウトにおいては,土平をカバーロックと して残置して掘削することによって高圧注入を可能とし, 改良効果の向上を図った.ポストグラウトにおいては, カバーロックを 3m とし,壁面から 3~7mの区間に対し て注入圧 42MPa で超微粒子セメントを注入した.

透水性を測定する水押し試験は2ステージ(lst, 2st) において実施し、プレグラウトの注入は2ステージー括 とした.アーチプレグラウトにおいては注入区間長を長 く取れば、1シフトの掘削長も長くすることができたが、 ジャンボドリルの削孔精度を勘案して31mの注入区間長 とした.1シフトの掘削長は、基本的に15mとした.



点線は、従来型ミキサを用いた場合の目安



図-8 プレグラウト孔配置



#### (6) グラウト完了基準

表-1に、アーチプレグラウトの施工段階で試行を重ね て定めたグラウト完了基準を示す.表-1は、ルジオン値 (単位:Lu)および比湧水量(単位:L/min/m)が同表 に示した値以下になった場合、その孔を最終次数孔とす る(その孔に注入し、追加孔を配置しない)ことを表す ものである.水押し試験中の全てのグラウト孔がこの完 了基準を満足すれば、1区間のグラウトが完了となる. すなわち、ここに示す完了基準は最終次数孔に対する最 大値規定となる.ベンチプレグラウトの場合は、アーチ 部での施工実績を踏まえてI~V分帯の内リングの完了 基準を0.35から0.25(単位:Lu、L/min/m)に変更した.

実施工においては、最終次数孔の平均ルジオン値が改 良目標値に相当すると考えた.1区間のグラウトが完了 した際には改良目標値を同時に満足する必要があるため、 図-10に示すように、ルジオン値および比湧水量の最大 値と平均値の関係を明らかにし、所定の改良目標値を満 足するための最大値を完了基準とした.また、図-11に 示すように、グラウト改良範囲を更に左右に分割し、各 範囲の平均ルジオン値が改良目標値以内に収まるよう、 追加孔を配置した.

### 4. 施工実績

#### (1) 改良結果

図-12に、I~Ⅲ分帯、V分帯およびマイクロフラク チャ(WT)部のグラウト孔のルジオン値分布を示す. グラウト孔の中には1ルジオンを超えるものが存在した が、最終次数孔の段階では完了基準(0.25ルジオン)以 下に収まった.最終次数孔の平均値は改良目標値(0.15 ルジオン)以下の0.07~0.09ルジオンを示している.

図-13に、V分帯のF3断層近傍の注入結果を示す.同 図に示すように、最終次数孔のルジオン値は完了基準 (0.25ルジオン)以下となっている.

マイクロフラクチャ(WT)部では、前述のように、 セメントグラウトによる透水性改良効率が極めて低い区 域が一部に存在したため、溶液型グラウトを補足的に使 用している.その注入結果(貯槽アーチプレグラウト) を図-14に示す.同図より、超微粒子セメントよりも溶 液型グラウトによってマイクロフラクチャ(WT)部が 改良されていることが分かる.



図-10 改良範囲の平均値と最大値の関係

左 <

0.37

→右

0.10





図-15に、ベンチプレグラウト・底盤グラウトにおける1次孔と最終次数孔のルジオン値の超過確率を示す.1 次孔の算術平均ルジオン値は0.53ルジオンであったが、 最終次数孔では設計湧水量算定ルジオン値(0.35ルジオ ン)よりも小さな値に抑えることができた.

#### (2) 水封機能

図-16に、貯槽湧水量の予測値と実測値の比較を示す. 貯槽の実測湧水量は水封昇圧試験時で約185m<sup>3</sup>/hrであり, 予測値および設計湧水量(312m<sup>3</sup>/hr)以内に収まってい る.図-17には、水封昇圧時の地下水圧の実測値に基づ く全水頭コンターを示す.岩盤貯槽周辺の水圧分布は、



水封昇圧に先立って実施した予測解析とほぼ同様となった.これらの湧水量および地下水圧の実測結果より,水 封機能が確保されているものと判断した.

#### 5. おわりに

超微粒子セメントを用いた高圧プレグラウトによって 岩盤貯槽の周囲に低透水の改良帯を構築した. その結果, 貯槽の湧水量および周辺の地下水圧変動が予測の範囲内 に収まり,水封機能を確保することができた.

#### 参考文献

- 1) 前島俊雄: 我が国初の LPG 地下岩盤貯槽の建設,土木 技術, Vol.67, No.11, pp.103-108, 2012.
- 宮嶋,手塚,高岸,小渕,金戸:水封式 LPG 地下備蓄岩盤 空洞において開発・適用した止水対策技術,土木学会第 68 回年次学術講演会,VI-198, 2013.
- 小林, 征矢, 竹内, 大西, 金戸: 倉敷 LPG 貯槽建設工事 における溶液型グラウトによる止水対策(その1), 土木学会第68回年次学術講演会, VI-194, 2013.

# THE GROUTING RESULTS DURING THE EXCAVATION OF ROCK CAVERNS AT KURASHIKI UNDERGROUND LPG STORAGE BASE

# Shinji KOBAYASHI, Yasuyuki MIYAJIMA, Takeshi SUIDO, Tatsuhiko KANETO, Hiroshi YAMAMOTO and Toshio MAEJIMA

An artificial groundwater supply and grouting were designed at Kurashiki underground storage base in order to control the groundwater pressure and to restrict the inflow to underground storage caverns of Liquefied Petroleum Gas. Pre-grouting was conducted during the excavation of rock caverns by using microcement under high grouting pressure. After the excavation of the grouted areas, the effects of grouting were checked by measuring the inflow rate and the pore pressure around the storage caverns.