

波方基地 水封式LPG地下岩盤貯槽における空洞掘削時の岩盤挙動と空洞安定性評価について

田坂 嘉章^{1*}・亀村 勝美²・廣末 龍文²・畑 浩二³・小川 智広⁴・前島 俊雄⁵

¹東電設計株式会社 地下環境技術部 (〒135-0061 東京都江東区東雲一丁目7-12)

²大成建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区1-25-1)

³大林組 東京本社技術本部 技術研究所 地盤技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

⁴元(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)

⁵(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: tasaka@tepsco.co.jp

波方基地は、H級の堅硬な岩盤であるが、空洞高さ30m、幅26mの大規模地下空洞の水封式LPG地下岩盤貯槽である。空洞の安定性については、高水圧下での貯槽掘削時のゆるみ領域をひずみ軟化FEM解析により把握し、ゆるみ領域を十分に包含する範囲を対象に均質な水理場となるグラウト改良を実施した。また、ロックボルトと吹付けコンクリートによる支保を情報化施工により実施した。その結果、掘削による変形量は、貯槽全体にわたって予測通りであり、AE計測等に基づくゆるみ領域はほとんど無く、弾性的岩盤挙動の範囲に抑えられた。さらに、掘削後に貯槽空洞への作用水圧が最大となる水封昇圧試験時においても、貯槽周辺間隙水圧や空洞変形に異常はなく、空洞の安定性が確認された。

Key Words : hydraulic containment rock cavern, rock mechanical stability, high hydrostatic pressure

1. はじめに

波方 LPG 備蓄基地の貯槽空洞は、水封貯蔵方式を採用している。貯槽周辺は、H級の堅硬な岩盤であり、連続性の高い粘土介在割れ目等が貯槽に斜交して局所的に分布している。貯槽は、空洞高さ 30m、幅 26m のたまご形の大規模地下空洞である。貯槽の設置深度は、天端位置で EL.-150m であり、施工時から水封ボーリングを用いた水封供給や貯槽周辺へのグラウトによる貯槽湧水量の抑制を行っている(図-1)。掘削はゆるみ領域を十分に包含する範囲をグラウト改良し、ロックボルトと吹き付けコンクリートによる岩盤補強により実施している。掘削後には、貯槽空洞への作用水圧が最大となる水封昇圧試験を実施し、空洞の安定性を確認している。

本論文では、高水圧下における大規模地下空洞の水圧を考慮した挙動予測解析、支保設計について説明し、掘削時や水封昇圧試験等の水圧上昇時の岩盤計測挙動に基づき、同解析・設計手法の有効性ならびに空洞安定性について述べる。

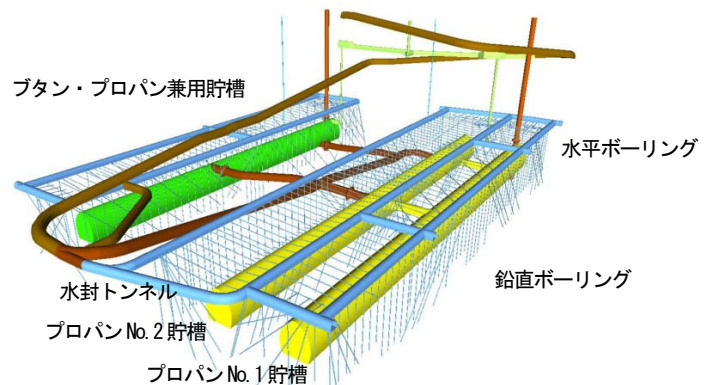


図-1 岩盤貯槽と周辺トンネル鳥瞰図

2. 貯槽空洞の支保設計

(1) 地質概要および岩盤力学特性

波方基地は、高縄半島先端部から西方に伸びる東西約 3km、南北0.8kmの岬に位置している。周辺岩盤は、中世代白亜紀の花崗岩質岩からなり、陸域の大部分は波方花崗岩、海岸付近は高縄花崗閃緑岩が分布している。図-2に示すように花崗岩の風化による割れ目の酸化・褐色化の深度は、地表から約40～60m程度であり、それ以深では新鮮な花崗岩となっている。岩盤貯槽は、平均透水係数 1.0×10^{-6} cm/s程度の新鮮な花崗岩に位置し、地山か

ぶりは尾根部で約250m、埋立て地で約150mとなっている。図-3に岩盤等級平面図を示す。貯槽周辺岩盤は、堅硬なH級岩盤であり、割れ目密度は1.5～3本/mである。局所的に、厚さ3mm以下の連続性の高い粘土介在割れ目等が貯槽に斜交して分布している。

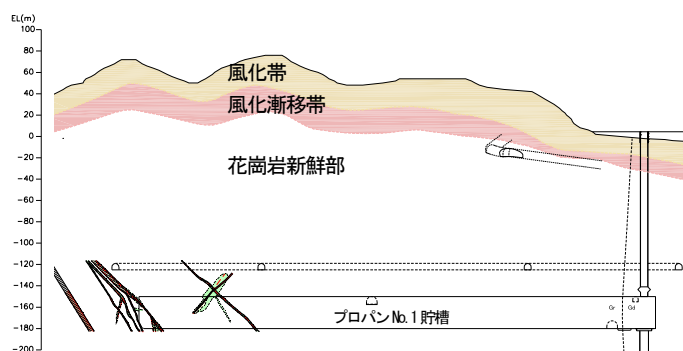


図-2 地形・地質横断面図および貯槽レイアウト図

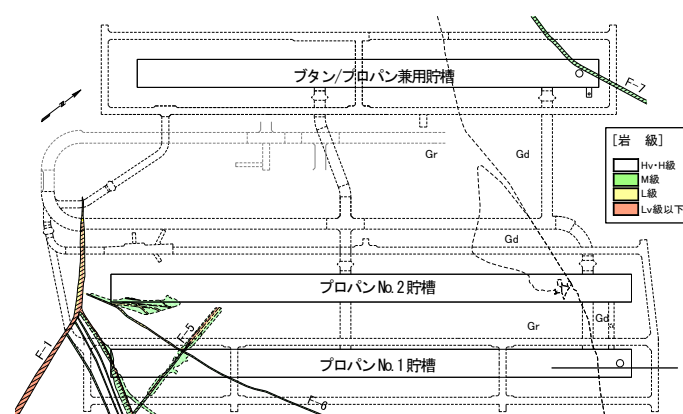


図-3 岩盤等級平面図 (EL. -157.5m)

岩盤の力学特性は、原位置における岩盤せん断試験、孔内載荷試験および平板載荷試験により、表-1に示す設計値を設定した。初期地圧は、円錐孔底ひずみ法により、図-4に示す側圧係数 $K_0=1.6$ （最大水平応力8.6MPa、鉛直応力5.4MPa）を設計値とし、挙動予測解析では $K_0=1.6$ 一定で土かぶり圧に応じた初期応力を与えた。

表-1 岩盤物性の設計値

	弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	せん断強度 τ (MPa)
H級	30	0.25	$4.8+\tan 62^\circ$
M級	8	0.35	$4.0+\tan 50^\circ$
L級	2	0.35	$2.2+\tan 48^\circ$

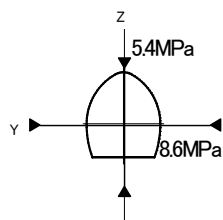


図-4 初期地圧

(2) 空洞支保設計

a) 支保設計の考え方

岩盤貯槽の掘削は、周辺岩盤に所定の水圧場を保持し、湧水量を抑制するため、水封水圧を作用させている状態で、貯槽周囲（10m）をグラウトしながら実施するが、掘削に伴い、貯槽周辺岩盤にゆるみ領域が発生する。掘

削後の水封昇圧試験時には水圧が外力として空洞に作用する。そこで、空洞の安定性は、高水圧下での掘削時、水圧上昇時のゆるみ領域を挙動予測解析により把握し、ゆるみ領域を十分に包含する範囲を対象に均質な水理場となるグラウト改良を実施することとした。ゆるみ領域の岩盤はロックボルトと吹付けコンクリートにより補強することとした。

b) 支保設計の流れと挙動予測解析手法

図-5に掘削時の空洞の支保設計のフローを示す。挙動予測解析によりゆるみ領域を求め、ゆるみ領域内の岩塊の重力場における安定性を照査した。重力場の安定性はアーチ部において吊下げ、側壁部においてすべり岩塊を想定した。想定岩塊への作用荷重は別途、周辺間隙水圧挙動を再現した浸透流解析⁹⁾にて検討して得られた最終段階における水圧とした。支保工については、挙動予測解析により支保工（ロックボルト、吹付けコンクリート）に発生する支保断面力を照査し、支保工の健全性を評価した。

挙動予測解析手法は、岩盤のひずみ軟化特性を考慮したFEMとし、掘削時は、水封水圧0.65～0.7MPaの一定で掘削を進めていることから、解析は、土圧と静水圧が足されたものが初期応力であると仮定して、掘削解放力を掘削面に作用させる全応力解析とした。

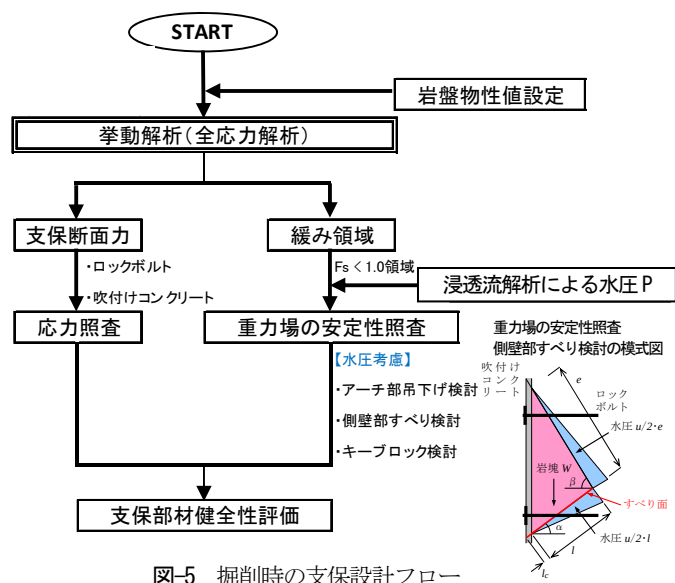


図-5 掘削時の支保設計フロー

図-6に掘削後の水封昇圧試験（水圧上昇）時の空洞の支保設計フローを示す。解析は、掘削時からの応力・変位を引き継ぎ全応力解析である。この解析では、水封水圧が0.65～0.7MPaから最終段階（1.25MPa）に昇圧する際のグラウト外周面（空洞壁面から10m深度）での間隙水圧の増分値を浸透流解析により求め、これをグラウト外周面に外力としてさせることで水圧上昇による岩盤挙動を模擬することとした。

ここで得られた挙動予測解析により最終段階における

ゆるみ領域および支保断面力の照査し、最終的なグラウト範囲および支保仕様を決定した。

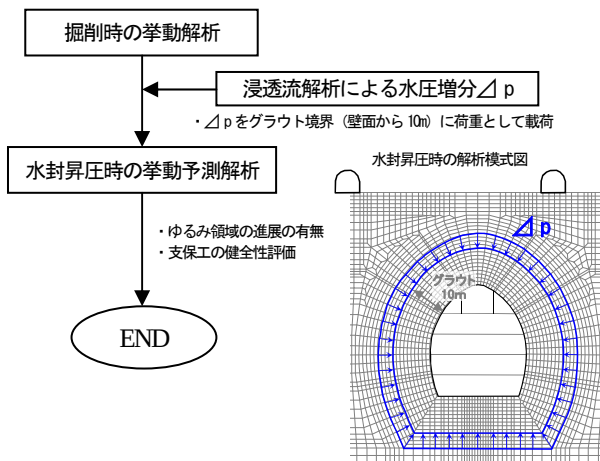


図-6 水封昇圧試験時の空洞の支保設計フロー

c) 事前の挙動予測解析および支保パターン

事前の挙動予測解析は、局所的に分布する粘土介在割れ目を薄層でモデル化した不均質岩盤モデルとし、破壊に伴う応力再配分計算を行った。岩盤の解析用物性値は、表-2に示す通りである。粘土介在割れ目については、厚さが3mm以下で非常に薄いことから弾性係数を周辺岩盤と同じにし、せん断強度は粘土介在割れ目の一面せん断試験結果に基づき、H級岩盤の残留強度相当の（ $\tau = 1.1 + \tan 52^\circ$ ）の値を用いた。

図-7に解析による掘削完了時の局所安全係数分布を示す。局所安全係数1以下（図中の赤い部分）は破壊を表しており、本検討では破壊領域を岩盤補強を必要とするゆるみ領域としている。周辺岩盤のゆるみ領域は、粘土介在割れ目沿いに局所的に発生し、最大値はアーチ部で1m、側壁部で4mとなっている。粘土介在割れ目は、断面毎に現れる部位が異なるが、いずれの断面においてもアーチ部で最大2m、側壁部で4mであることから、この範囲を掘削によるゆるみ領域と想定した。別途実施した水封昇圧時の解析による破壊領域には、掘削完了後からの進展は認められず、堅硬なH級岩盤では、水封昇圧の影響が小さいことを確認している。

挙動予測解析によるゆるみ領域内にアーチ部および側壁部に対して岩塊を想定し、極限平衡法による重力場の安定性照査を実施するとともに、支保工（ロックボルト・吹付けコンクリート）に発生する応力照査を実施し、図-8に示す支保仕様を決定した。

表-2 解析用物性値

岩盤等級	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	せん断強度 (MPa)	
			ピーク τ_p	残留 τ_r
H級	30	0.25	$4.8 + \sigma \tan 62^\circ$	$1.1 + \sigma \tan 52^\circ$

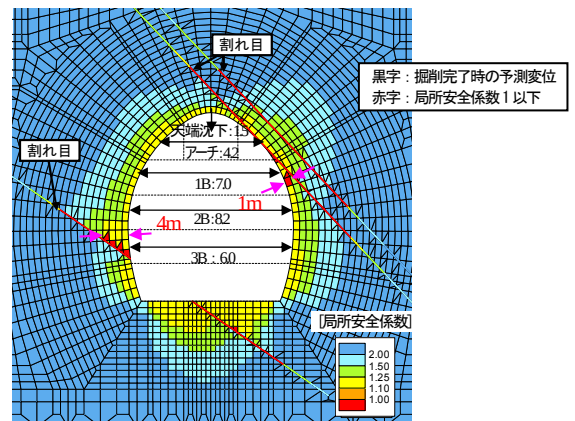


図-7 解析による掘削完了時の局所安全係数分布

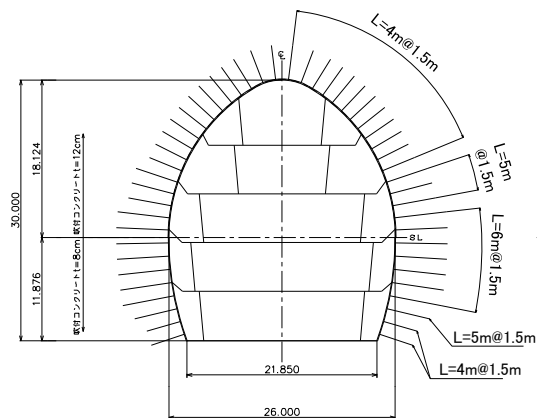


図-8 H級岩盤の支保パターン

3. 岩盤貯槽の空洞安定性評価

(1) 貯槽空洞掘削時の全体挙動

貯槽空洞掘削は、高さ7.5mのアーチ部を掘削し、高さ約5.6mのベンチを4段階掘削した（図-9）。貯槽の施工は、プレグラウトと掘削のサイクルで進めた。



図-9 貯槽加背割り掘削ステップ

図-10に貯槽掘削完了時のA計測による2ベンチ内空変位を示す。掘削時の計測変位は、後述するプロパンNo.1貯槽南側一部（TD.0～130m区間）を除き、約9mm程度であり、概ねH級均質の岩盤モデルの予測値以内である。なお、空洞掘削に伴い発生した支保応力は許容値以内にあり、支保部材は健全性を維持している。

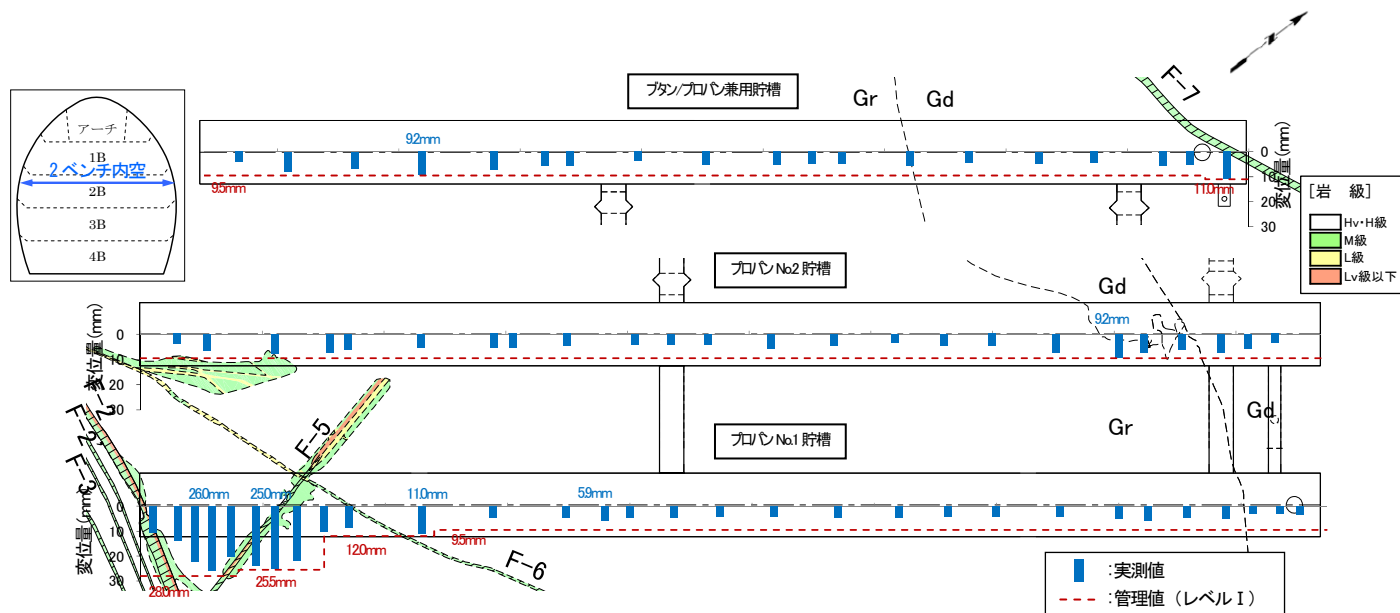


図-10 掘削完了時の空洞全体変形挙動 (2 ベンチ内空)

(2) 一般部 (H 級岩盤) における空洞安定性評価

一般部では、図-11 に示すグラウト改良および支保を実施した結果、図-12 に示す変位挙動を示した。変位量は予測値以内で、掘削後も安定した挙動となっている。同図には、掘削完了後の水封昇圧試験において水封水圧を 0.5MPa から 1.25MPa に昇圧させた時の内空変位の増分変位も示した。計測値は最大で 0.5mm 程度となっており、予測値 (1mm) 以内である。

図-13 に貯槽掘削時のプロパン No.1 貯槽の 2 ベンチに設置した AE 計測結果を示す。AE は当該ベンチ掘削時に発生するもののそれ以降の掘削時には発生していない。また、当該地点の岩石試験や既往大規模空洞掘削²⁾に見られる破壊に伴う周波数低下や m 値の上昇は認められないことから、空洞周辺にゆるみは発生せず、岩盤は弾性的挙動を呈しているものと考えられる。

以上より、一般部では、水封水圧 1.25MPa による高水圧が周辺岩盤に作用しているものの、水封昇圧時においても解析によるゆるみ領域の進展はなく、解析、計測ともに変位量も 1mm 程度であることから、水圧の影響は小さく、ここで示した高水圧条件下でのグラウト改良、

支保工の設計、施工により空洞の安定性を確保できていると考えられる。

挙動予測解析では、水圧上昇増分をグラウト改良域外周面に外力として作用させる全応力解析を実施したが、解析および計測による昇圧時変位増分はともに 1mm 以内で対応しており、本手法の有効性が確認された。

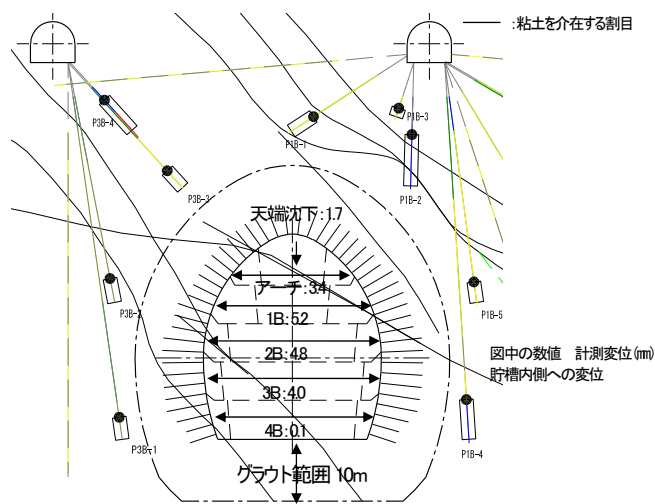


図-11 地質・グラウト・支保実績例 (No. 1P TD. 174)

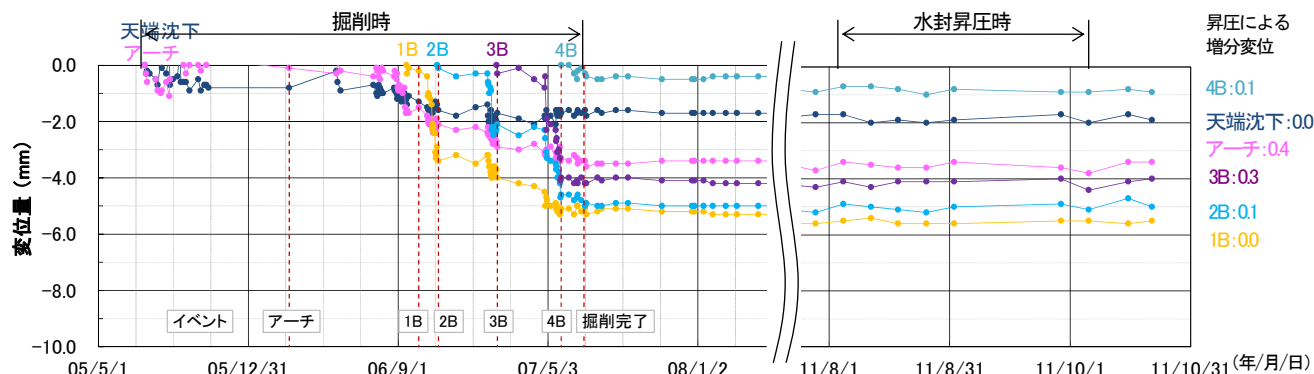


図-12 内空変位の経時変化例 (No. 1P TD. 174)

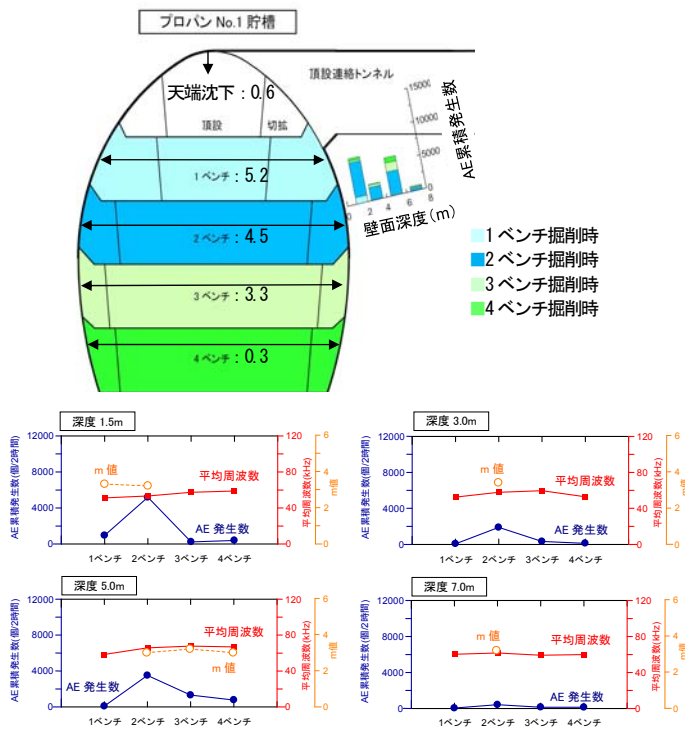


図-13 貯槽掘削時の AE 発生数, 周波数および m 値の関係

(3) プロパン No. 1 貯槽南側の岩盤挙動と空洞安定対策

a) 掘削時および水封昇圧試験時の岩盤挙動

図-14 にプロパン No.1 貯槽の南側における掘削完了時から水封昇圧試験時までの間隙水圧, 区間湧水量および内空変位のステップ図を, 図-15 に地質横断面図を示す。

間隙水圧は水封昇圧に伴い増加し, 水封水圧を 1.2MPa に昇圧した時点で変位が急増し (4 ベンチで 5mm から 13mm に増加), TD.0~100m 区間の湧水量が 80L/min 増加したため, 水封水圧を 1.1MPa まで降圧し,

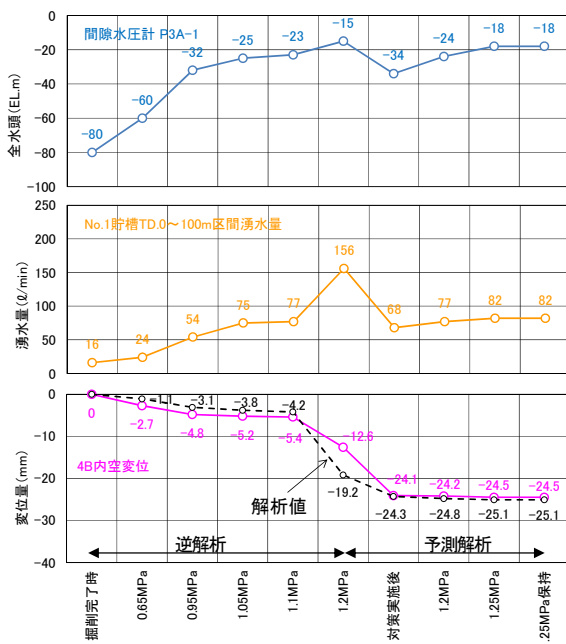


図-14 水封昇圧時の間隙水圧, 湧水量および内空変位のステップ図

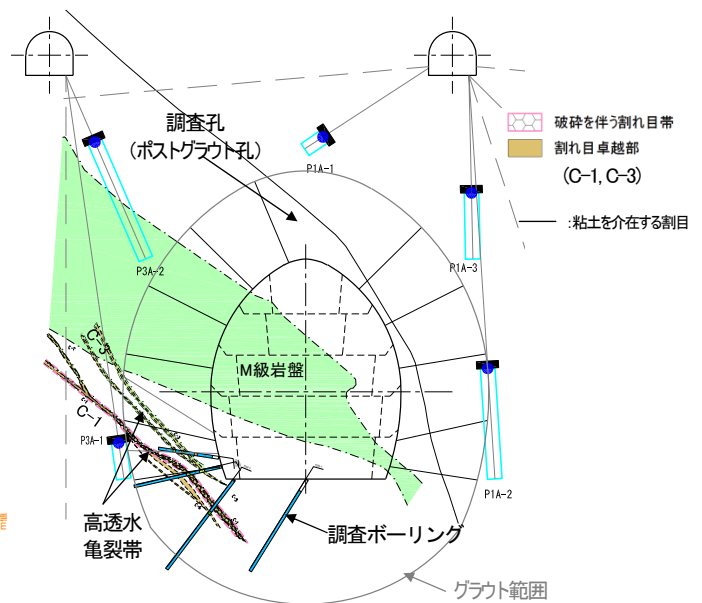


図-15 詳細調査に基づく No. 1 貯槽南側の地質横断面図 (TD. 55)

BTV 観察, 透水・湧水圧試験などの詳細な追加調査を実施した。その結果, 東側底板部背面に高透水亀裂帯が 3 条分布し, 近傍の間隙水圧計の値 (1.55MPa) と同程度の高湧水圧になっていることが判明した。

b) 水封昇圧試験時の挙動予測解析

貯槽に近接した高透水亀裂帯が昇圧試験時の変位発生の主要因であると考え, 挙動予測解析を実施し, 岩盤補強およびポストグラウトの対策工を検討した。

解析は, 掘削時, 変位が急増した水封水圧 1.2MPa 作用時を再現する逆解析と, そのモデルを用いた予測解析として, ポストグラウト時および最終段階の水封水圧 1.25MPa (対策工後) のステップ解析とした。

図-16 に現状を再現するための岩盤モデルおよび物性値を示す。作用水圧は, 湧水圧測定および浸透流解析に基づき設定し, 高透水亀裂帯とグラウト外周面に作用させた。

図-14 に示した掘削時から昇圧時の内空変位の解析値と実測値の比較から, この解析手法により, 内空変位の計測挙動を表現できていると考えられる。

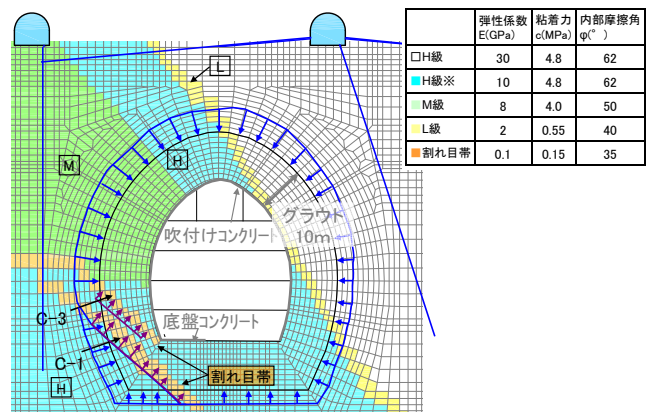


図-16 岩盤モデル (逆解析および予測解析)

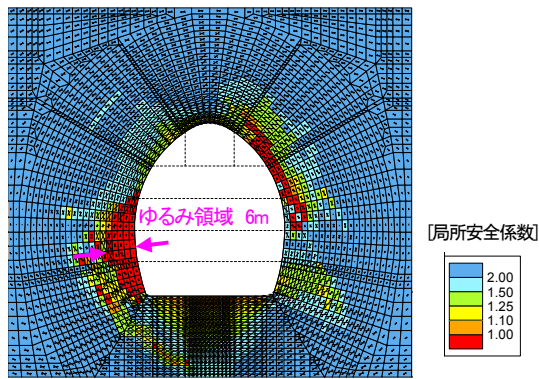


図-17 予測解析による水封昇圧時のゆりみ領域

c) 対策工と空洞安定性評価

底板部の高透水亀裂帯をグラウト改良することとし、図-16 の解析モデルを高透水亀裂帯を改良したモデルに修正し、水封水圧昇圧時のゆりみ領域を予測した結果を図-17 に示す。

この結果と地質性状などを総合的に分析し、対策工は、図-18 に示す増しボルト、増し吹付けコンクリートおよびポストグラウトとした。

グラウトゾーンの再構築にあたっては、カバーロックを 5m 深度で確保し、注入圧力を 2MPa として実施した結果、深度 5m~10m のグラウトゾーンの平均レジオン値は、対策工前の最大 2.4Lu から 0.07~0.18Lu に改良された。

対策工実施後に、最終段階（水封水圧1.25MPa）までの水封昇圧を実施した結果、図-14に示したように、変位増分は一般部と同様に0.5mm以下で、予測値1.0mm以内に抑えられ、昇圧後の変位、湧水量、間隙水圧は安定している。

以上より、グラウト改良と支保工により空洞の安定性が確保されていることが確認された。

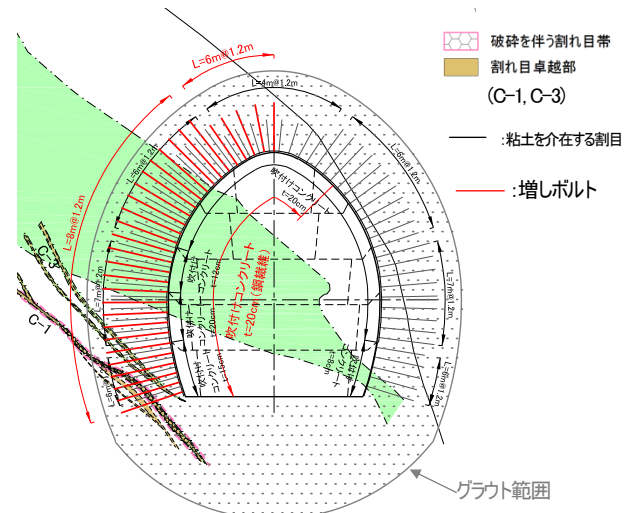


図-18 岩盤補強工およびポストグラウト範囲

4. まとめ

本論文では、高水圧下における大規模地下空洞の水圧を考慮した挙動予測解析、支保設計の有効性を示した。また、高水圧下での貯槽掘削時、水圧上昇時においては、ゆりみ領域を十分に包含するグラウト改良と、ゆりみ領域をロックボルトと吹付けコンクリートにより補強することで、掘削後に貯槽空洞への作用水圧が最大となる水封昇圧試験時においても、空洞の安定性を確保できることを示した。

参考文献

- 1) 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講演集, pp.202-207, 2009.
- 2) 森岡 宏之, 南 将行, 前島 俊雄, 田坂 嘉章, Ming CAI, 青木 謙治: AE 計測による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp81-96, 2005.

ROCK MECHANICAL EVALUATION AND MANAGEMENT ON EXCAVATION OF HYDRAULIC CONTAINMENT LPG STORAGE CAVERN. -A CASE OF KURASHIKI LPG STORAGE CAVERN

Yoshiaki TASAKA, Katsumi KAMEMURA, Tatsufumi HIROSUE,
Kouji HATA, Tomohiro OGAWA and Toshio MAEJIMA

For the hydraulic containment LPG storage cavern, the hydraulic containment ability is maintained by water injection from the surrounding water curtain boreholes to provide stable hydraulic condition in the vicinity of LPG storage cavern from cavern excavation throughout the operation phase. In this study, the authors have evaluated the cavern deformation under high surrounding water pressure by an FEM rock mechanical analysis tool. For the countermeasures, the authors applied grouting to cover the weak zone for permeability and geological improvement, the authors also applied high tension rock-bolt and short concrete as reinforce for the fractured and fault zone.