

天然ガス高圧貯蔵技術開発における 実証試験施設の岩盤特性と設計

新美 勝之^{1*}・小松原 徹²・奥野 哲夫³・茨田 高志⁴・小野 純二⁵・中谷 一郎⁶

¹清水建設株式会社 土木技術本部 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目 2-3)

²社団法人日本ガス協会 技術開発部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-15-12)

³清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

⁴株式会社IHI 環境・プラントセクター (〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1)

⁵三井造船株式会社 鉄構・物流事業本部 (〒104-8439 東京都中央区築地 5 丁目 6-4)

⁶三菱重工業株式会社 横浜製作所 (〒231-8715 神奈川県横浜市中区錦町12番地)

*E-mail: niimi@shimz.co.jp

「次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発事業」において実施した鋼製ライニング式岩盤貯蔵の小規模実証試験を対象に、試験の概要および実証試験施設の岩盤特性、実証試験施設の設計を示す。

実証試験として実施する耐圧試験と気密試験、繰返し・長期载荷試験、30MPa耐圧性能試験の内容を示し、施設設計での主たる荷重条件を示す。また、実証試験施設周辺での調査結果に基づいて岩盤特性を評価し、施設の設計に用いる岩盤物性条件を得た。これらの条件に基づいて実施した施設の設計に関し、施設の主要な構成因子である貯蔵空洞とプラグ、気密構造を対象に、設計方法と安全性照査、貯蔵圧力作用時および解放時の挙動把握等について、検討した結果を示す。

Key Words : lined rock cavern, rock mass properties, experimental study, natural gas storage

1. はじめに

(社)日本ガス協会では、鋼製ライニング式岩盤貯蔵に関する技術開発として、2004年度から4年間の計画で「次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発事業」を国の補助を受けて実施している。本事業では小規模の鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設を用いた実証試験を中心とした実用化への技術開発が行われている。本論では、岐阜県神岡鉱山内で実施した鋼製ライニング式岩盤貯蔵の小規模実証試験を対象に、試験の概要および岩盤特性、実証試験施設の設計について述べる。

2. 鋼製ライニング式岩盤貯蔵の概要

本論で対象とする鋼製ライニング式岩盤貯蔵は、パイプラインから引き込んだ天然ガスを圧縮し、高圧の気体のまま岩盤内に構築した貯槽に貯蔵するものである。図-1に技術開発の対象とする商用機のイメージと代表的な施設構造を示す¹⁾。本施設の基本コンセプトは次に示すものである。

- ・耐圧性は周辺岩盤で支持する。貯蔵圧力は、裏込めコンクリートを介して耐圧部材である周辺岩盤に伝えるられる。
- ・気密性は鋼製ライニング（気密材）で確保する。
- ・排水システムにより、施工時・内圧解放時には気密材に過剰な外水圧を作用させない。

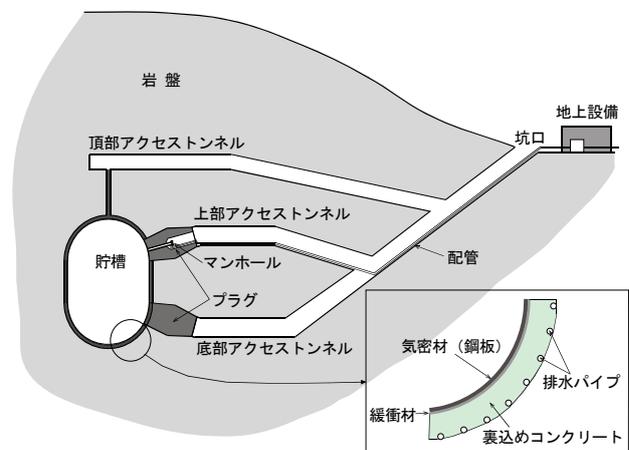


図-1 鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設のイメージ

3. 実証試験の概要

岩盤貯蔵施設の耐圧性能および気密性能の検証を行うため、幾何容積約240m³の小規模な実験貯槽を構築し実証試験を計画・実施した^{2,3,4,5}。実証試験は、表-1に示す耐圧試験⁶、気密試験⁷、繰返し・長期荷重試験、30MPa耐圧性能試験の4つからなるもので、耐圧試験、繰返し・長期荷重試験、30MPa耐圧性能試験は水加圧とし、気密試験は空気加圧とした。各試験の荷重パターンを図-2に示す。耐圧試験では20MPaまで加圧し、20MPaに達した時点でシャットインする。その後、各部の挙動を計測し耐圧性能を確認したのち減圧する。気密試験は、10MPaおよび20MPaで一定時間シャットインして各部の

表-1 実証試験内容

試験名	試験目的	荷重内容
耐圧試験	設計圧力まで加圧し、構造体(岩盤貯蔵プラグ、マンホール)の耐圧性能、水密性能を確認	水加圧 20MPa (加圧期間: 7日間)
気密試験	設計圧力まで加圧し、構造体の気密性能を確認	空気加圧 20MPa (加圧期間: 31日間)
繰返し・長期荷重試験	実機の運用を想定した荷重・除荷、長期荷重を行い、構造体の挙動を把握し、健全性を確認して設計の検証用データを取得する	水加圧 繰返し 5~20MPa 長期荷重 20MPa (加圧期間: 10日間)
30MPa耐圧性能試験	構造体の30MPaまでの耐圧性能を把握するために、加圧装置最大圧まで加圧して挙動を計測し、設計の検証用データを取得する	水加圧 最大 30MPa (加圧期間: 0.5日間)

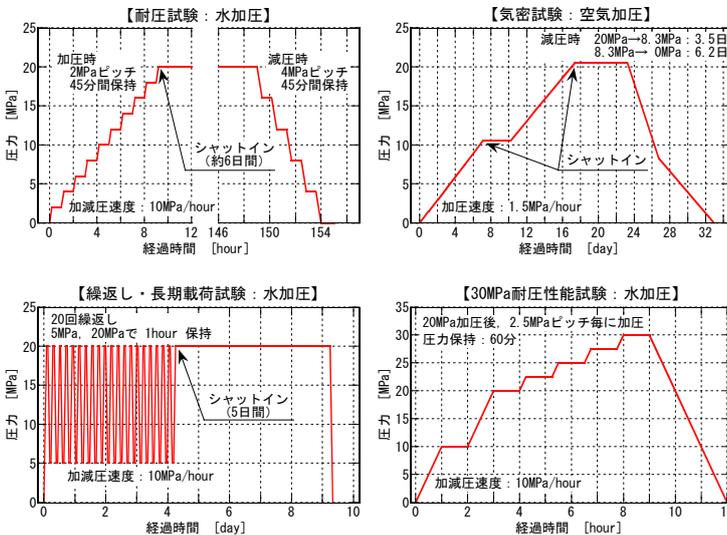


図-2 実証試験の荷重パターン

挙動を計測すると共に、漏洩がないことを確認する。繰返し・長期荷重試験は、実機の運用圧力を想定してまず5MPa~20MPaの圧力範囲で20回の加圧・減圧を繰り返す。続いて長期荷重試験では、先の耐圧試験と同様に20MPaでシャットインして、各部の挙動を計測で把握する。以上の試験により実証試験施設の健全性を確認したのち、最後に30MPa耐圧性能試験により30MPaまでの荷重を行い、実証試験施設の耐圧性能を評価する。

4. 実証試験施設周辺の岩盤特性

実証試験施設は、岐阜県飛騨市の神岡鉱山・茂住坑道内に、既存坑道の一部から新たにアクセストンネルおよび貯槽本体を掘削して構築した。実証試験施設の設計に先立ち各種の岩石・岩盤の調査・試験を実施した。岩盤は、手取層と呼ばれる堆積岩(砂岩・頁岩の互層)からなり、電中研式岩盤分類でCM~CH級を主体とする岩盤である。実証目的や試験条件等を勘案し、カプセル型の貯槽を横置き(貯槽軸：水平方向)にした状態で構築することとした。

表-2 初期地圧測定結果と設計条件

方向	測定結果	設計条件
貯槽軸	16.7MPa	16.7MPa
貯槽軸直角(水平)	11.9MPa	9.5MPa(最小値)
貯槽軸直角(鉛直)	9.5MPa	

表-3 孔内荷重試験による変形係数等の算定結果

岩種・岩級	実施箇所	変形係数D (Gpa)	弾性係数E (Gpa)	残留変位率
砂岩：CH級	A地点	15.24	23.44	0.457
	B地点	13.33	19.36	0.681
	平均	14.28	21.4	0.569
砂岩：CM級	C地点	8.20	11.43	0.536
	D地点	10.38	13.76	0.500
平均	9.29	12.59	0.518	
頁岩：CH級	E地点	9.59	14.91	0.643
頁岩：CM級	F地点	4.39	6.19	0.352

表-4 実証試験施設の設計に用いた岩盤物性値

領域	単位重量	厚さ	内部摩擦角	粘着力	変形係数		ポアソン比	クリープ率	残留変位率
					初期荷重時	試験時			
					E_0	E			
健全部	26.5	—	50	2.5	10.00	8.47	0.3	0.180	0.234
ゆるみ領域		—	45	1.9	4.00	3.38	0.4		
残留域		—	50	0.75	—	—	—		
風化部	20.0	50	—	—	—	—	—	—	—

表-2に示すように初期地圧測定の結果から水平方向（貯槽軸方向）の初期地圧が高いことが判明した。このため、施設の設計ではこの初期地圧の異方性を考慮することとした。一方、表-3には孔内載荷試験から得られた主な物性を示す。同一の岩級では砂岩の変形係数の方が頁岩より若干高い。しかし、砂岩・頁岩の互層分布を積層モデルでモデル化し等価な（平均的）変形係数を評価した結果、変形特性の異方性はほとんどないものと評価された。これらの評価結果に基づき、実証試験施設の設計に用いた岩盤物性値を表-4に示す。

5. 実証試験施設の設計

次に、実証試験施設を構成する貯蔵空洞とプラグ、気密構造の設計を示す。

(1) 設計方法の概要

実証試験施設の設計は、既往の研究¹⁾で検討した設計法に基づいて実施した。設計のポイントは、貯蔵空洞とプラグに関する貯蔵圧力に対する安定性の検討と貯蔵圧力作用時の変形挙動の把握、それらを条件とした気密構造の設計である。設計フローを図-3に示す。

(2) 設計対象と設計条件

設計に用いた周辺岩盤の物性値および初期地圧は、前章に示したとおりである。コンクリートの物性値は、表-5に示す。荷重は、図-2に示した実証試験時の貯蔵圧力が、設計荷重となる。岩盤のゆるみ領域の判定には、

モール・クーロンの破壊規準に対する近接度を局所安全率として評価した。

実証試験施設の貯槽は、図-4に示すとおり直径6m奥行10.5mのカプセル型で、幾何容積は240m³、アクセストンネルの直径3mに対しプラグは最大拡幅幅が6mで、長さは7mである。気密材の厚さは6mm、気密材・緩衝材と岩盤との間の裏込めコンクリートの厚さは0.7mで、貯蔵圧力作用時に発生するひびわれを細かく分散する目的で貯槽側に鉄筋を配置した。

なお、貯槽およびプラグは回転対称体であることから、一部の設計に用いるFEM解析では、軸対称問題として扱った。プラグの設計に用いた軸対称解析モデルを、図-5に示す。

岩盤は、弾塑性材料としてモデル化し、破壊規準にはモール・クーロンを用いた。

裏込めコンクリートは、圧縮側の応力-ひずみ関係は、線形と仮定した。引張側については、剛性は圧縮側と同じとし、強度はコンクリートの引張強度を無視して鉄筋の降伏強度のみを期待するものとした。

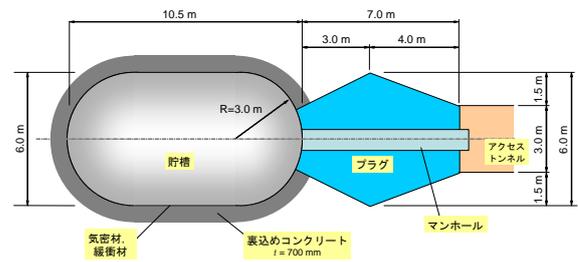


図-4 設計対象施設

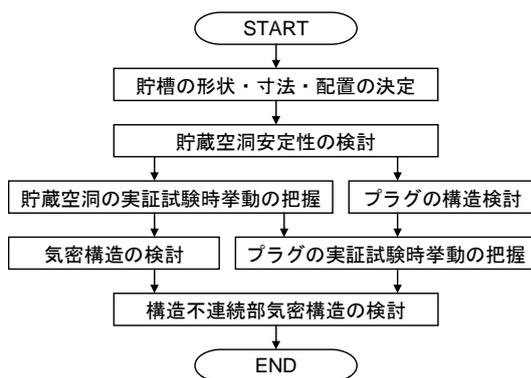


図-3 設計フロー

表-5 コンクリートの物性値

	裏込めコンクリート	プラグコンクリート
設計基準強度	40 N/mm ²	50 N/mm ²
ヤング係数	31.0 kN/mm ²	33.0 kN/mm ²
ポアソン比	0.0	0.2

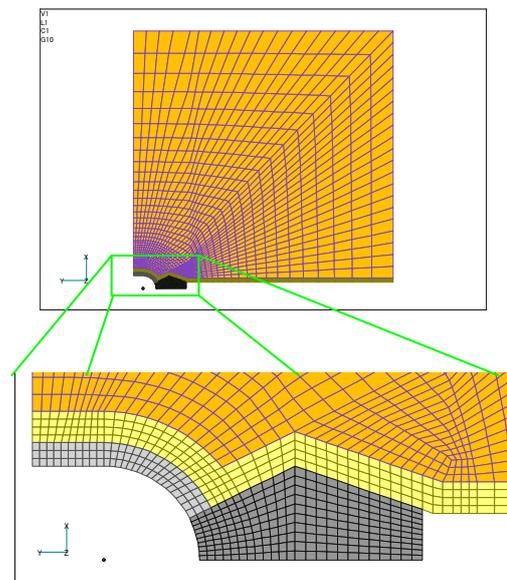


図-5 FEM解析モデル

(3) 貯蔵空洞の設計

a) 貯蔵空洞の安定性の検討

貯蔵空洞の安定性に関して、次の3点を検討した。

- ・貯蔵圧力作用時のアップリフトの検討
- ・掘削時の貯蔵空洞安定性の検討
- ・貯蔵圧力作用時の貯蔵空洞安定性の検討

まず、貯蔵圧力作用時のアップリフトに関して、貯槽上部の岩盤の安定性を照査した。検討対象地点は地表面から約400mの深度である。そのため貯槽直上の岩盤重量およびせん断抵抗力は、貯蔵圧力による地表面方向への浮き上がり力に対しては、十分大きい。その結果、アップリフトについては、安全率54.8となり、十分な安定性が確保できることを確認した。

次に、掘削時のゆるみ領域を把握するために、掘削時の応力解放に伴う貯蔵空洞安定性を検討した。初期地圧を考慮した掘削解析により、応力解放に伴うゆるみ領域を評価した。局所安全率分布を、図-6に示す。解析の結果、応力解放に伴うゆるみ領域は、掘削面から最大1.5mの深さまでであり、掘削時の発破による影響も考慮してゆるみ領域を設定した。

次に、貯蔵圧力作用時の貯蔵空洞安定性の検討として、圧力作用時の応力分布をFEM解析で把握し、局所安全率分布を得た。その結果、圧力作用時にはゆるみ領域が拡大しないことを確認した。

b) 貯蔵圧力作用時の変形挙動の把握

実証試験時の貯蔵圧力変動に伴う貯蔵空洞の変形挙動をFEM解析で把握し、裏込めコンクリート表面のひずみ分布を評価した。解析で得られた圧力と貯槽円筒中央部の裏込めコンクリート表面の周方向ひずみの関係を図-7に、クリープ後の裏込めコンクリート表面のひずみ分布を図-8に示す。裏込めコンクリートに発生するひずみは貯槽円筒中央部の周方向が最大で、その値は0.32%、またその部分の繰返し載荷試験時のひずみ振幅は0.15%である。

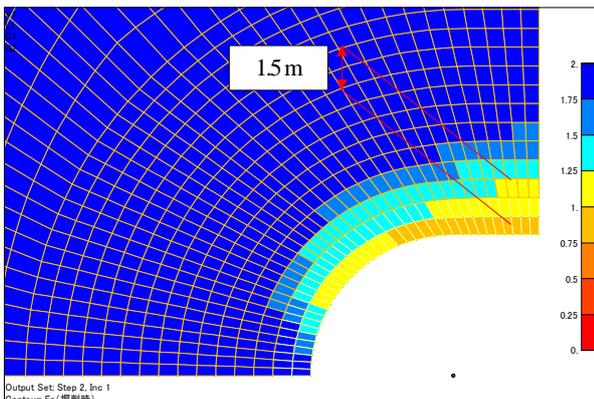


図-6 掘削時の局所安全率分布

(4) プラグの設計

a) プラグの安定性の検討

プラグの設計は、限界状態設計法で実施した。想定した限界状態は、終局限界状態に関しては、断面破壊の終局限界状態として軸圧縮力による断面破壊と押抜きせん断破壊を、剛体安定の終局限界状態として支持岩盤の滑動による破壊を検討対象とした。また、設計に支配的な貯槽内圧力荷重が変動荷重であるため、疲労限界状態に対する断面破壊の検討も行う。各限界状態に関する検討項目を表-6に示す。

b) 貯蔵圧力作用時のプラグの挙動の把握

貯蔵圧力作用時のプラグおよびその周辺部の挙動をFEM解析により把握し、構造不連続部気密構造の設計条件を得た。解析で得られた圧力作用時の構造不連続部周辺の変形形状を、図-9に示す。

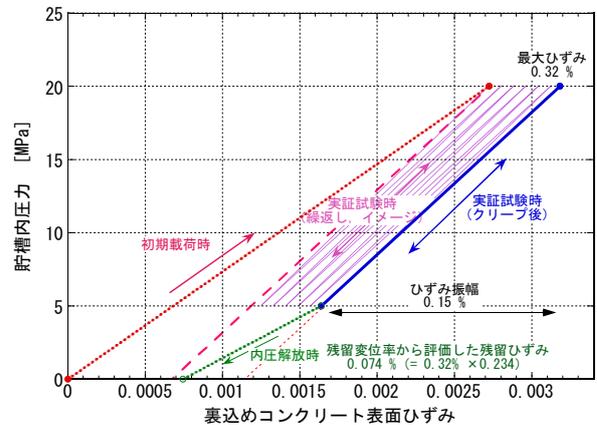


図-7 掘削時の局所安全率分布

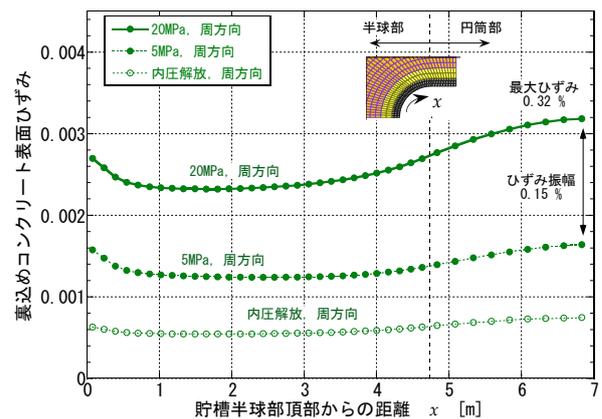


図-8 裏込めコンクリート表面ひずみ分布

表-6 プラグの安全性照査項目

区分	検討項目
終局限界状態	断面破壊
	軸方向力 押し抜きせん断
疲労限界状態	剛体安定
	周辺支持岩盤安定性
	軸方向疲労
	押し抜きせん断疲労

(5) 気密構造の設計

気密構造の設計では、貯蔵空洞およびプラグの変形挙動に基づいて、次の4点を検討した。

a) 貯蔵圧力変動に対するひずみ進展

貯蔵圧力の変動及びそれに伴う裏込めコンクリートの変形により、気密材に発生する塑性ひずみが徐々に進展して、気密材が破壊することが懸念される。そのため、貯槽の4分の1をモデル化した三次元弾塑性FEM解析を実施し、ひずみ進展の有無を確認した。解析モデルを図-10に示す。解析で得られた貯槽円筒部中央における気密材の応力ひずみ履歴を、図-11に示す。圧力変動が繰返されても、応力-ひずみは同じ履歴を描き、ひずみの進展が発生していないことが確認できる。検討の結果、他の代表的な気密材の位置でも、ひずみの進展の発生は認

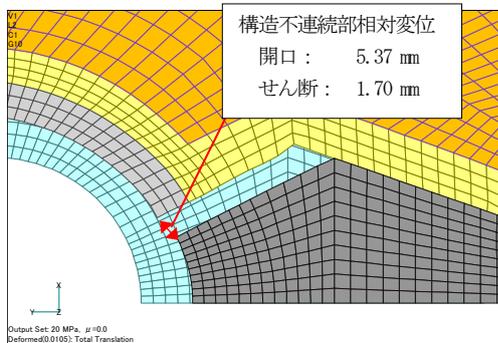


図-9 プラグ周辺の変形形状

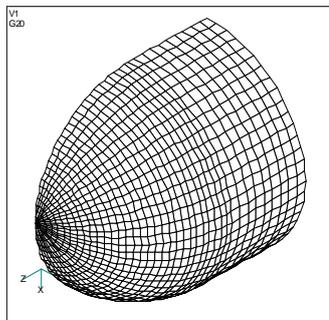


図-10 気密材安定性検討に用いる解析モデル

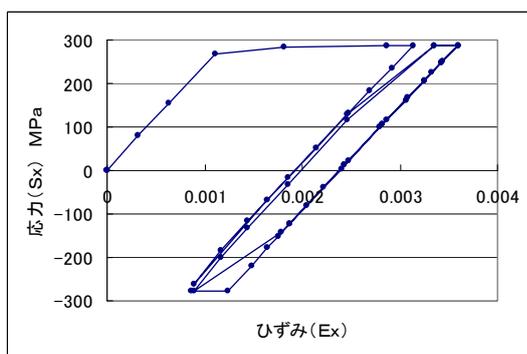


図-11 貯槽円筒部中央の応力ひずみ履歴

められなかった。

b) 貯蔵圧力解放時の全体座屈に対する安定性の検討

前項に示したとおり、貯蔵圧力作用時には気密材が塑性化して塑性ひずみが発生する。このため貯蔵圧力を大気圧まで解放した場合には、気密材には圧縮応力が発生し、この影響による座屈の発生が懸念される。そのため、貯槽の4分の1をモデル化した三次元非線形FEM解析により、全体座屈に対する安全性を検討した。

検討では、まず線形座屈解析を実施して座屈モードを得る。そしてその座屈モードを初期不整として与えた解析モデルに対して、貯蔵圧力変動に対応した増分非線形解析を実施した。

解析で得られた気密材の von Mises 応力分布を図-12に示す。解析の結果、貯蔵圧力解放時においても座屈現象と判断するような面外変形は発生しておらず、全体座屈に対する安定性を確認した。

c) 貯蔵圧力解放時の局部座屈に対する安定性の検討

気密材は複数の鋼板を突き合わせ溶接で接合して製作するため、溶接部周辺では角変形が発生する。前項の全体座屈と同様に貯蔵圧力解放時には、溶接部周辺の角変形が初期不整となり局部座屈の発生が懸念される。そのため、気密材の溶接部周辺をモデル化した三次元FEM解析により、局部座屈に対する安全性を検討した。

図-13に示すような、貯槽の円筒部中央を対象に気密材施工時における許容角変形量10mmを初期不整とした解析モデルを用いて、三次元非線形FEM解析を実施した。

解析の結果、貯蔵圧力解放時においても座屈現象と判断するような面外変形は発生しておらず、局部座屈に対する安定性を確認した。

d) 裏込めコンクリートのひびわれの影響検討

貯蔵圧力作用時に裏込めコンクリートに発生するひび割れによって、気密材にひずみ集中が発生することが懸念される。裏込めコンクリートのひび割れは、最大500mm間隔に発生し、ひび割れ幅は最大1.5mmと推定される。図-14に示す裏込めコンクリートと緩衝材、気密材の範囲を対象に、非線形FEM解析を用いてひび割れ発

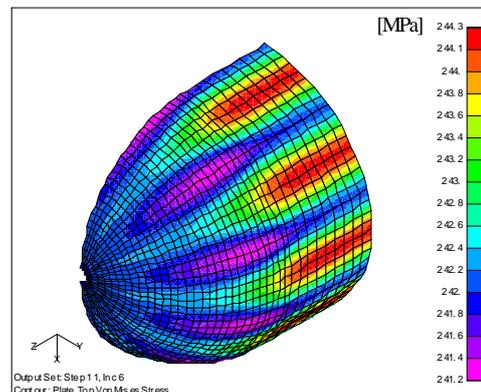


図-12 気密材全体座屈検討結果

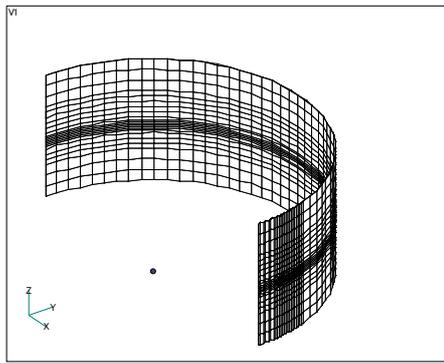


図-13 気密材局部座屈検討解析モデル

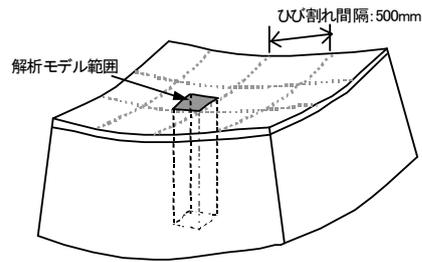


図-14 ひび割れ部ひずみ集中の検討

生時に気密材に発生するひずみを評価した。

検討の結果、裏込めコンクリートのひび割れの影響は緩衝材で緩和され、気密材にはひずみ集中は発生しないことが確認された。

6. おわりに

鋼製ライニング式岩盤貯蔵の小規模実証試験を対象に、試験の概要および実証試験施設の岩盤特性、実証試験施設の設計を示した。今後は、設計の際に評価した挙動と、実証試験で得られた計測データ^{6),7),8)}とを比較し、設計方法の妥当性について検討する予定である。

謝辞：本技術開発内容は、東京瓦斯（株）、大阪瓦斯（株）、帝国石油（株）、東邦瓦斯（株）、西部瓦斯（株）、北海道瓦斯（株）ならびに天然ガス高圧貯蔵技術開発共同企業体（代表者：清水建設（株）、（株）大林組、大成建設（株）、（株）IHI、三井造船（株）、三菱重工業（株））の関係各位にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 澤 一男, 石塚 与志雄：都市ガス岩盤貯蔵の実用可能性の調査研究, トンネルと地下, 第 35 巻, 4 号, pp.31-39, 2004.
- 2) Okuno, T., Wakabayashi, N., Takeuchi, K., Iwano, M.

and Tsutsumi, Y. : Experimental Lined Rock Cavern for Natural Gas Storage in Japan, ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, *Rock Mechanics in Underground Construction*, CD-ROM, Singapore, 8-10, November 2006.

- 3) Niimi, K., Ibata, T., Ono, J., Aiba, M. and Tsutsumi, Y. : Design Analysis of Experimental Lined Rock Cavern for Natural Gas Storage in Japan, ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, *Rock Mechanics in Underground Construction*, CD-ROM, Singapore, 8-10, November 2006.
- 4) 小松原 徹, 奥野 哲夫, 若林 成樹, 武内 邦文, 岩野 政浩：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験計画と実証試験サイトの岩盤特性, 土木学会第 62 回年次学術講演会, III-420, 2007.
- 5) 新美 勝之, 奥野 哲夫, 小松原 徹, 橋爪 正博, 大塚 勇：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験施設の設計, 土木学会第 62 回年次学術講演会, III-421, 2007.
- 6) 若林 成樹, 奥野 哲夫, 小松原 徹, 中岡 健一, 林 成浩：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験結果（耐圧試験結果）, 土木学会第 62 回年次学術講演会, III-422, 2007.
- 7) 奥野 哲夫, 若林 成樹, 小松原 徹, 並木 和人, 板垣 賢：天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証試験結果（気密試験結果）, 土木学会第 62 回年次学術講演会, III-423, 2007.
- 8) 奥野 哲夫, 小松原 徹, 若林 成樹, 新美 勝之, 栗原 雄二, 岩野 政浩：天然ガス高圧貯蔵技術開発における小規模岩盤貯蔵槽を用いた実証試験, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会 岩盤力学委員会, 投稿中, 2008.

DESIGN ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL LINED ROCK CAVERN FOR NATURAL GAS STORAGE

Katsuyuki NIIMI, Toru KOMATSUBARA, Tetsuo OKUNO, Takashi IBATA,
Junji ONO and Ichiro NAKAYA

In this paper, we introduce the small experimental Lined Rock Cavern at the Kamioka mine of the ANGAS project and its design which is based on the design method discussed in the previous investigations. The details of the design and the numerical analysis are presented.