天然ガス高圧岩盤貯蔵施設の設計と実証試験

新美 勝之1・小松原 徹2・奥野 哲夫3・若林 成樹4・栗原 雄二5・岩野 政浩6

¹正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部(〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)
 ²正会員 工修 社団法人日本ガス協会(現 東京瓦斯株式会社)(〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-15-12)
 ³正会員 博(工) 清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島3-14-17)
 ⁴正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島3-14-17)
 ⁵正会員 株式会社大林組 東京本社(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
 ⁶フェロー Ph.D. 大成建設株式会社 土木本部(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

「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実証試験の 概要と試験結果を示すとともに,設計技術について検証する.

鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設の概要を示し、次に岐阜県神岡鉱山内に構築した小規模貯蔵施設を用い た実証試験を対象に、試験の概要と施設の設計について述べる.そして、実証試験施設において、貯蔵圧 力作用時に計測したプラグの挙動と、試験後に観察した裏込めコンクリートのひび割れ発生状況について、 設計時の想定と比較し、設計技術の開発成果について検証する.

キーワード:岩盤空洞,天然ガス高圧貯蔵,実証試験,プラグ,裏込めコンクリート

1. はじめに

天然ガスは、その埋蔵量の豊富さや環境負荷の低 さ、またエネルギー供給源の多様化等の観点から重 要なエネルギーと位置づけられ、その利用拡大が強 く求められている.我が国において天然ガスの利用 拡大を推進するためには、内陸部への需要拡大も考 慮した広域的なパイプラインネットワークの整備・ 拡大ならびに日間・季節間の需要変動を吸収してパ イプラインの利用効率を上げるための、大規模なガ ス貯蔵施設の必要性が指摘されている.既に広域的 な天然ガスパイプラインネットワークが発達してい る欧米では、天然の地質構造を利用した大規模ガス 貯蔵施設が実現しているが、同様の地質構造が殆ど 存在しない我が国においては、人工的な施設である 「鋼製ライニング式天然ガス岩盤貯蔵施設」の設置 が有効と考えられている¹⁾.

このような背景から,(社)日本ガス協会では 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」を国の補助を受けながら実施し ており,小規模の鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設を 用いた実証試験等により実用化への技術開発を行っ ている.

本論では、天然ガス貯蔵を目的とした鋼製ライニ

ング式岩盤貯蔵技術開発において,岐阜県神岡鉱山 内に建設した小規模実証試験施設^{2),3)}を用いて実施 した実証試験を対象に,試験の概要および実証試験 施設の設計について述べる.また,実証試験の結 果^{4),5),6),7)}のうち,加圧試験の際に計測して把握し たプラグの挙動と,加圧試験後の解体調査で確認し た裏込めコンクリートの状況について,設計の際の 想定と比較検討し,設計技術の妥当性について論ず 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, パイプラインから受け入れた天然ガスを圧縮して高 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.

- ・耐圧性は貯槽周辺の岩盤で確保する. 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.



図-1 鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設のイメージ

試験名	試験目的	載荷内容
耐圧試験	設計圧力まで加圧し,構造体(岩 盤,貯槽,プラグ,マンホール)の耐 圧性能を確認	水加圧 20 MPa 確認
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 31 日間
繰返し・長 期載荷試験	実機の運用を想定した載荷・除荷, 長期載荷を行い,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 5~20 MPa 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 30 MPa 0.5 日間

表-1 実証試験内容



*シャットイン:受入・払出バルブを閉じて貯槽を閉塞すること 図-2 実証試験の載荷パターン

・貯槽の外側に排水システムを設置して貯槽に作 用する外水圧を制御して,貯槽内部の圧力が大 気圧となる建設時・内圧解放時には気密材に過 剰な外水圧を作用させない.

3. 実証試験の概要

(1) 実証試験の目的と内容

鋼製ライニング式岩盤貯蔵施設の成立性を確認する目的で,幾何容積約240m³の小規模な実験貯槽を

構築して,耐圧性能および気密性能の検証を行う実 証試験を実施した.実験では,あらかじめ設置した 各種の計測機器によって貯蔵圧力を作用させた際の 施設や周辺岩盤の挙動を把握して,設計時の想定と 比較検討し,先に開発した設計技術^{3),5),8),9)}の妥当 性を確認する.実証試験は,**表**-1 に示す耐圧試験⁶⁾, 気密試験⁷⁾,繰返し・長期載荷試験⁸⁾,30MPa 耐圧 性能試験⁸⁾(以下,加圧試験と総称する)の4種類 からなり,耐圧試験,繰返し・長期載荷試験, 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.各試験の載荷パターンを図-2 に示す.

表-3 孔内載荷試験による変形係数等の算定結果

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	16.7 MPa	16.7 MPa			
貯槽軸直角 (水平)	11.9 MPa	9.5 MPa			
貯槽軸直角(鉛直)	9.5 MPa	(最小値)			

岩種・岩級	実施 地点	変形係数 [GPa]	弹性係数 [GPa]	残留変位 率
	А	15.24	23.44	0.457
砂岩 C _H 級	В	13.33	19.36	0.681
	平均	14.28	21.40	0.569
	С	8.20	11.43	0.536
砂岩 C _M 級	D	10.38	13.76	0.500
	平均	9.29	12.59	0.518
頁岩 C _H 級	Е	9.59	14.91	0.643
頁岩 C _M 級	F	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

単位 重量	単位	厚さ	内部 摩擦角	粘着力	変形係数		ポアソン	クリー	残留
	重量				初期載荷時	試験時	比	プ率	変位率
頂坝	γr	Н	ϕ	С	Ero	Er	Vr	Ecr	
	kN/m ³	m	度	MPa	GPa	GPa	—		_
健全部		—	50	2.5	10.00	8.47	0.3	0.190	0.224
ゆるみ領域	26.5	—	45	1.9	4.00	3.38	0.4	0.180	0.234
残留域		—	50	0.75	—	—	—	—	—
風化部	20.0	50	_	_	_	_	_	_	_

(2) 実証試験施設周辺の岩盤特性^{2),4),9)}

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 C_M ~C_H級を主体とする岩盤である.

また、オーバーコアリングによる初期地圧測定を 実施した結果、表-2 に示すように水平方向(貯槽 軸方向)の初期地圧が他に比べて 1.4 倍以上高いこ とを確認した.このため、設計においてはこの初期 地圧の異方性を考慮することとした.一方、孔内載 荷試験から得られた主な物性を表-3 に示す.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(平均的)な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 は、表-4 に示す岩盤物性値を用いた.

4. 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, 気密構造の設計について述べる.



(1) 設計方法の概要

実証試験施設の設計は,既往の研究^{1),5),9),10)}で商 用の実機を想定して検討した設計方法に基づいて実 施した.設計のポイントは,貯蔵圧力に対する貯蔵 空洞とプラグの安定性の検討と,貯蔵圧力作用時の 変形挙動の把握,そして,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. 設計荷重は, 図-2 に示した実証

表-5設計に用いた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/mm²ヤング係数31.0 kN/mm²ポアソン比0.00.2



図-4 実証試験施設

図−5 FEM 解析モデル

試験時の貯蔵圧力である. 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 リートの厚さは施工性を考慮して 0.7m とし、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,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に関して, 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,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考慮するものとし た.また,ひび割れを許容する設計としたため,ポ アソン比は 0.0 とした.

(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は,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



図-6 掘削時の局所安全率分布

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.貯槽設置地点 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十分大き く,アップリフトに対する,安全率は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して掘削の応力 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.掘削時の局所安全率分布を,図-6 に示す.解析の結果,応力解放に伴う局所安全率 1.25 以下の領域は,掘削面から最大 1.5 m の深さ までであった.これに掘削時の発破による損傷の影 響領域を掘削面から一律 1m とし,これら両領域を 包含する領域と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 解析で評価し, 局所安全率分布を得た. その結果, 圧力作用時には



図-7 圧力と裏込めコンクリート表面ひずみの関係



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,岩盤がクリープした後の裏 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 %,また同 じ部分の繰返し載荷試験時のひずみ振幅は 0.15%で ある.

c) 裏込めコンクリートのひび割れ検討

貯蔵圧力作用時に、岩盤の変形に伴って裏込めコ ンクリートには引張ひずみが生じて、ひび割れが発 生する.気密構造の健全性を確保するためには、裏 込めコンクリートのひび割れが特定の箇所に集中し ないように、裏込めコンクリート内部に鉄筋を配置 してひび割れを分散させる必要がある.既往の検 討¹¹⁾に基づいた設計により、ひびわれの分散に必要 となる配筋は、厚さ 700 mm、設計基準強度 40

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		軸方向力		
	即囬饭婊	押し抜きせん断		
	剛体安定	周辺支持岩盤安定性		
疲労限界状態		軸方向疲労		
		押し抜きせん断疲労		

N/mm²の裏込めコンクリートに対して D25@150 (SD390)である.また,ここで鉄筋のかぶりを 100 mm とした場合の最大ひびわれ間隔は 500 mm である. 裏込めコンクリート表面に発生する最大のひずみは, 前項に示した貯蔵空洞の解析結果より,貯蔵圧力 20 MPa 時に貯槽円筒部中央の横断面に沿った周方 向に 0.32 %と算定されており,これより裏込めコ ンクリートのひび割れは,最大 500 mm 間隔に発生 し,ひび割れ幅は最大 1.6 mm と推定する.

(4) プラグの設計

本施設では、アーチ構造タイププラグ^{10,11}を採 用して、プラグ構造の合理化を図た.アーチ構造タ イププラグの設計上の特徴は、貯蔵圧力がプラグに 作用した際にプラグの内部に仮想的なアーチ構造が 形成され、プラグに作用する貯蔵圧力が効率的に周 辺の岩盤に伝達されることにある.このアーチ効果 によりプラグ内部で圧縮応力が卓越するため、従来 のせん断支持タイプのプラグに比べ、プラグ長を短 くし補強鉄筋量を低減する事ができる¹¹.

a) プラグの安定性の検討

プラグは、限界状態設計法に基づいて設計した. 想定した限界状態は、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ことから、疲労限界 状態に対する断面破壊に対しても検討した.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

プラグの設計では、軸対称 FEM 解析を用いて貯蔵 圧力作用時のプラグ内部の応力分布を評価し、前項 に示した項目に対して安全性を照査する.その際、 プラグ受圧部と岩盤との接触部における挙動が不明 確であること、貯蔵圧力作用時のプラグ内部の応力 分布はプラグ受圧部と岩盤との接触条件に影響を受 けることから、設計ではこの条件が異なる 3 ケース (「摩擦なし」「摩擦あり、摩擦係数 μ=1.0」、 「固着」)の状況を設定して解析を実施した.なお、 「摩擦係数 μ=1.0」は、受圧部に接するゆるみ領域





の岩盤の内部摩擦角φを用いて,tanφで評価して 設定した.軸対称 FEM 解析で得られた 20MPa 作用 時のプラグのひずみ分布を図-9 に示す.接触の条 件が「摩擦なし」では,プラグ受圧部と岩盤との間 にせん断ずれが生じて,プラグ内部のひずみは圧縮 が卓越して構造的に有利になるが,「摩擦あり」と 「固着」では引張側にシフトする.

(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.

- ・貯蔵圧力変動に対するひずみ進展
- ・貯蔵圧力解放時の全体座屈に対する安定性の検討
- ・貯蔵圧力解放時の局部座屈に対する安定性の検討
- ・裏込めコンクリートのひびわれの影響検討

これら気密構造の設計の詳細については、参考文 献 5)を参照されたい.

5. 実証試験結果の検討

実証試験によって,20MPaの耐圧性・気密性を確認した.試験結果の詳細な内容については,参考文献4)を参照されたい.



図-10 プラグ内部のひずみ計配置





本論では、実証試験で得られた結果のうち、加圧 試験の際に計測したプラグの挙動と、試験終了後の 解体調査で確認した裏込めコンクリートのひび割れ 状況について検討する.

(1) プラグの挙動の検討

加圧試験の際に計測で把握したプラグの挙動について,設計時の解析結果と比較検討し,プラグの設計技術を検証する.

実証試験施設のプラグ内部には、図-10に示す配置でコンクリートひずみ計を設置し、加圧試験時に発生するひずみを計測した.また、アクセストンネル側から、プラグの絶対変位を計測した.

プラグの絶対変位と貯蔵圧力の関係を,図-11に 示す.変位は1mm程度と非常に小さく,解析で接触 条件が固着とした場合に最も近い.

ひずみ計の計測データと解析で得られた値を, 貯 蔵圧力との関係で比較して図-12 に示す. 解析結果 は,計測器設置位置に対応する解析モデル上の位置 におけるひずみを,設計の際に考慮したプラグ受圧 部と岩盤との接触条件が異なる3ケースについて, 内圧 20MPa と 5MPa での値を線形補間して示した. 計測値は耐圧試験,気密試験,繰返し長期載荷試験 時に得られた記録を示す.計測値は,半径方向には



引張ひずみが発生しており,20MPa 時のひずみの計 測値は,解析で接触条件が固着とした場合に最も近 い.また,圧力変化に対するひずみの変化量は少な く,20MPa と 5MPa の繰返し試験時の変化量に着目 すると,解析で接触条件が摩擦ありまたは固着とし た場合に最も近い.周方向のひずみも引張が発生し ており,20MPa 時の値も,20MPa と 5MPa の繰返し試



図-13 ひび割れ検討対象位置



験時の変化量も,解析で接触条件が摩擦ありとした 場合に最も近い.

以上の検討により、プラグ受圧部と岩盤の接触条件は、固着または摩擦ありに近い状態であったと考えられる.プラグ内部で圧縮が卓越する合理的な構造とするためには、プラグの設計および施工において、プラグ受圧部と岩盤との接触条件でせん断抵抗を適切に切る工夫をして、圧力作用時にせん断ずれを発生させることが重要と考える.

(2) 裏込めコンクリートのひび割れ状況の検討

加圧試験終了後、気密材の一部を切断して裏込め

コンクリート表面の状況を観察した.そのうち, 図-13 に示すように,設計上最大のひずみが発生する貯槽円筒部中央の横断面に沿った 1m×2m の範囲 「C-1」と「C-2」を検討対象とする.この部分の裏 込めコンクリート表面の観察記録を,図-14 に示す.

C-1 位置では、ほぼ水平方向に幅が 0~0.2mm 程 度のひび割れが 50~100mm 間隔に発生している. C-2 に近い方がひび割れの密度も開口幅も大きくなっ ている. 20MPa の耐圧試験時に C-1 位置での気密材 に発生したひずみは、BOTDR 方式の光ファイバ計測 によれば 2,000 μ 程度であり、設計で想定した値 3,200 μ (0.32%)よりも小さかった.

一方, C-2 位置では、ほぼ水平方向に 0.2~3.0 mm 程度の幅の広いひび割れが 100~200 mm 間隔に 発生している. 耐圧試験時に C-2 位置の気密材に発 生したひずみは 5,000 μ 程度であり、設計で想定し た値 3,200 μ (0.32%)よりも大きかった.

上記のとおり,裏込めコンクリート表面のひび割 れ間隔に関しては,設計で想定した最大ひび割れ間 隔 500mm 以下で発生しており,鉄筋量とかぶりに関 する設計方法の妥当性を確認することができた.

6. おわりに

本技術開発では、実証試験によって鋼製ライニン グ式岩盤貯蔵施設での20MPaという高圧の耐圧性・ 気密性を確認することができた.試験で得られた結 果や知見は、設計技術の検証に有効に役立つもので ある.今後は、商用実機の実現に向けて、コストダ ウンや更なる合理的な設計を目指した技術開発を進 めていく.

謝辞

本技術開発内容は,東京瓦斯(株),大阪瓦斯 (株),東邦瓦斯(株),西部瓦斯(株),北海道 瓦斯(株),帝国石油(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

 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 Internationa Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Rock Mechnaics 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 LinedRock Cavern for Natural Gas Storage in Japan, ISRM Internationa Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Rock Mechnaics 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,pp.79-84,土木学会 岩盤力学委員会,2008
- 9)新美 勝之,小松原 徹,奥野 哲夫,茨田 高志,小野 純二,中谷 一郎: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,第37回岩盤力学に関 するシンポジウム講演論文集,pp.73-78,土木学会 岩 盤力学委員会,2008
- 10) 平成14年度「地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調 査(都市ガスの岩盤貯蔵技術調査)」報告書,日本ガ ス協会,2003.
- 11)澤一男,新美勝之,石塚与志雄,延藤遵:岩盤内 高圧気体貯蔵施設における耐圧プラグの形状検討,土 木学会第57回年次学術講演会,Ⅲ-209,2002.