

CAES-G/T 圧縮空気地下貯蔵施設建設地点の2層岩盤モデル逆解析による岩盤物性値の検討  
 Estimation of Rock properties in underground site (CAES-G/T) by Back analysis using Two layers model

中西昭友\*・福田和寛\*\*・中山義紀\*\*\*・合田佳弘\*\*\*  
 Akitomo Nakanishi, Kazuhiro Fukuda, Yoshinori Nakayama, Yoshihiro Gouda

CAES-G/T (Compressed Air Energy Storage Gas Turbine) system requires the underground compressed air storage cavern. In operation of CAES-G/T, internal air-pressure (4-8MPa) is loaded to the surface of storage cavern. And the compressed air pressurize the rock through the lining and the concrete. This paper describes a result of back analysis that was enforced in order to pursue the most suitable numerical model and material properties. And we examined the properties of the initial design from this result. The demanded numerical model and material properties become the important factors. Because these factors are useful for even that in proof examination in addition to that we rescue understanding for the rock behavior in excavating.

1. まえがき

圧縮空気貯蔵ガスタービン発電 (CAES-G/T)システムの実証試験段階として、現在北海道空知郡上砂川町三井砂川炭鉱跡地にパイロットプラントを建設している<sup>1)</sup>(図-1参照)。

貯蔵施設のライニング構造の挙動は、周辺岩盤、なかでも裏込めコンクリートから内圧を伝達される掘削境界近傍岩盤の変形特性に大きく影響を受けることが、原位置貯蔵試験<sup>2)</sup>や一連のシミュレーション解析により明らかになっている。そのため、ライニングの実施設設計に当たっては、これらの調査・試験や解析的検討の結果を十分に反映させたことは言うまでもないが、施工時に明らかになる実際の岩盤の状況や特性を用いて事前の岩盤調査結果を基に設定された周辺岩盤の現設計値を照査することが重要である。

そこで、貯蔵施設空洞の掘削時に得られた地中変位データを用いて FEM による逆解析を行い、現設計に用いた周辺岩盤の弾性係数の妥当性と、変形の特徴を検討した。

そこで、貯蔵施設空洞の掘削時に得られた地中変位データを用いて FEM による逆解析を行い、現設計に用いた周辺岩盤の弾性係数の妥当性と、変形の特徴を検討した。

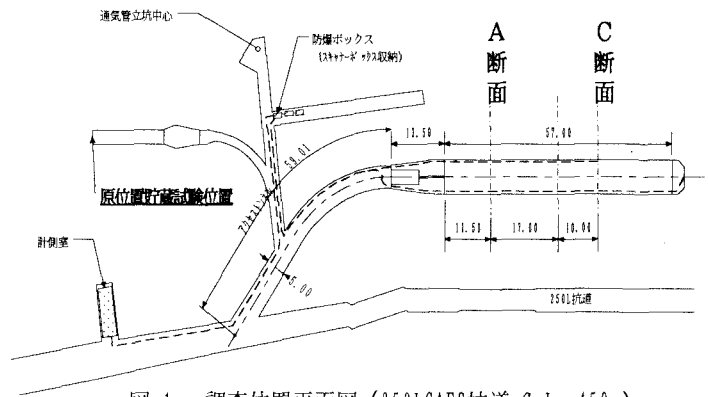


図-1 調査位置平面図 (250LCAES坑道:G.L.-450m)

\* 正会員 工修 応用地質(株) 技術本部 岩盤技術部  
 \*\* 正会員 工博 清水建設(株) 土木本部 技術第二部  
 \*\*\* 正会員 工修 電源開発(株) 北海道支社

## 2. 圧縮空気地下貯蔵施設地点の岩盤条件とその特徴

圧縮空気地下貯蔵施設(以下『貯蔵施設』と呼ぶ)地点周辺の岩盤は、古第三紀石狩層群若鍋層上部に属する砂質泥岩である。その特質点を以下に示す。

- ① 地質的には、層理面の走向がほぼ南北方向で西へ70°程度傾斜しており、立った地質構造となっている。(貯蔵施設の軸線はほぼ南北方向と地層の走向と同様の方向となっている。)
- ② 貯蔵施設の建設位置は、地表面下450mで岩盤の地山強度比が2程度と比較的小さく、掘削に伴い周辺にゆるみの発生しやすい状況となっていた。
- ③ 分布する砂質泥岩はスレーキング特性を有し、乾湿繰返しにより強度の低下する特徴を有している。
- ④ 現設計に用いた岩盤の変形特性(弾性係数)は、貯蔵施設位置周辺の調査ボーリング孔で実施した孔内載荷試験結果、調査横坑で実施した平板載荷試験結果、ならびにコアの岩石試験結果等も参考に、表に示すように岩級区分CH~CLに対して、各値を定めている。

表-1 現設計採用値

岩級区分		弾性係数 (GPa)	初期応力 (MPa)
CH	健全部	13.0	11.0 (等方)
	ゆるみ部	5.2	
CM	健全部	5.8	
	ゆるみ部	2.7	
CL	健全部	1.2	
	ゆるみ部	0.5	

## 3. 解析手順

ここで実施した解析手順を以下に示す。

- ① 解析条件を種々のデータより吟味する。
- ② 力学モデルを単純化した等方2層モデル(図-2 参照)にて解析を実施する。その際初期応力測定の結果を解析条件の一つとして逆解析を実施した。この時点で健全部とゆるみ部の弾性係数比(『低減率=n:健全部を1とした場合のゆるみ部の値』)の最適値を決定する。
- ③ 実際の地中変位データより想定した各断面のゆるみ領域を用いた等方2層モデルにて逆解析を実施する。
- ④ 以上の逆解析結果より現設計の妥当性を検証する。

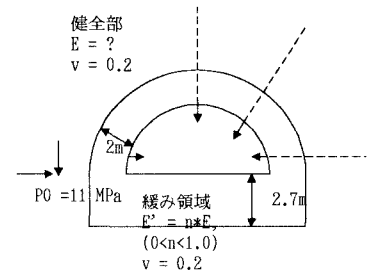


図-2 逆解析の等方2層モデル(現設計時の力学モデル)

## 4. 解析条件

逆解析により岩盤の弾性係数を求めるためには、地山の鉛直応力、地中変位計の設置断面における応力解放率、地中変位データの弾性変形の収束値、異方性を考慮するときの地層の傾斜等を明らかにしておく必要がある。

ここで実施する逆解析は、貯蔵施設掘削時点で一部断面(幅30cm)を含むがほぼCM級岩盤と推定されたA断面と、ほぼCH級岩盤と推定されたC断面の2断面で行った。両断面とも天端部、右肩部、および両側壁部に設置した1断面当たり合計4本の地中変位計で計測されたデータを用いた。表-2に解析条件を示す。

表-2 解析条件一覧表

条件項目	条件
鉛直応力	10.7MPa
応力解放率	40%
弾性変形の収束値	切羽が2D離れた時期の値
地層の傾斜	70度右下に傾斜

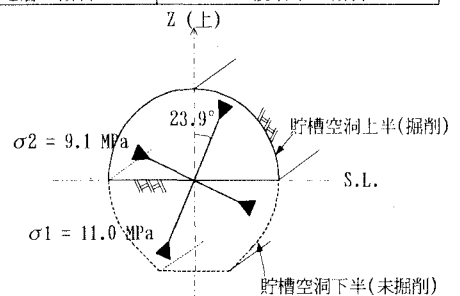


図-3 初期応力測定結果

### [鉛直応力]

逆解析により求まる岩盤の弾性係数Eは、初期地圧の3応力成分との比として得られる。したがって、Eを決定するには3応力成分の1つを仮定する必要がある。ここでは初期応

力を実測しているため、その鉛直応力の値 10.7MPa を採用した。初期応力測定結果を図-3 に示す。また、この値は土被り圧 10.6MPa(岩盤の密度を 2.4g/cm<sup>3</sup> の場合)とほぼ同じ値となっている。

### [応力解放率]

逆解析により求まる岩盤の弾性係数 E を求めるとき、応力解放率を仮定する必要がある。応力解放率は、計測断面に切羽が通過した時の変形量がその時点で全変位量の何%が変化していたかで表される。

これには、岩盤ひずみ計のデータを用いた。岩盤ひずみ計は、3成分(ロゼット配置)を1セットとし、貯槽施設の坑壁から

1m、3m、7m の深度に掘削前に予め設置した。図-4 に貯槽施設壁面から約 1 m離れた地点の岩盤ひずみのデータを示す。このデータならびに既往の FEM で得られた値<sup>3)</sup>を参考に解放率は 40%とした。

### [弾性変形の収束値]

切羽の進行に伴う地中変位は、弾性変形にクリープ様の変形が重なった挙動として計測される。逆解析により岩盤の弾性係数を同定するため、厳密には地中変位を弾性変形量とクリープ変形量とに分離して用いる必要があるが、ここでは弾性変形の収束時点で含まれているクリープ変形量も併せて全変位量として採用した。したがって、この逆解析で求められる弾性係数は微小なクリープ変形も含む等価弾性係数として評価される。具体的には図-5 に示す変位速度の経時変化から、変位速度が低下する変曲点を求め、この時点弾性変形の収束値とした。なおこの時点は切羽が計測断面より 2D 離れた位置となった。

### [地層の傾斜]

異方性を考慮した逆解析では、観察された地質状況から直交異方性としてモデルを作成した。貯槽の上半掘進中の切羽観察結果によると、層理面は貯層奥に向かってほぼ 70° 右側に傾斜しており、走向は概ね貯層の軸と一致している。

## 5. 解析結果

### 5.1. 最適低減率の決定

ここでは、実測した初期応力を使用し、単純な力学モデルを用いて最適な低減率を求めた。単純な力学モデルとは現設計時に採用した等方 2 層モデルである。また、最適低減率とは、逆解析結果より求まる解析変位量と地中変位データの変位量の誤差が最小の時の低減率と考えた。その誤差の求め方を式(1)に示す。

$$\text{誤差(\%)} = \frac{\sum_{i=1}^N (v_i - v_i^*)^2}{\sum_{i=1}^N v_i^*} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

N は計測点の総数  
v<sub>i</sub> は変位の計算値  
v<sub>i</sub><sup>\*</sup> は変位の計測値

また、最適低減率とは、逆解析結果より求まる解析変位量と地中変位データの変位量の誤差が最小の時の低減率と考えた。その誤差の求め方を式(1)に示す。

ここで実施した逆解析は、低減率が n=0.2,0.4,0.6,1.0 の 4 通りの場合であり、n=1.0 の場合は等方均質モデルに該当する。

その結果として、図-6 に低減率と誤差の関係を示す。図-6 に示したとおり A 断面、C 断面のいずれの逆解

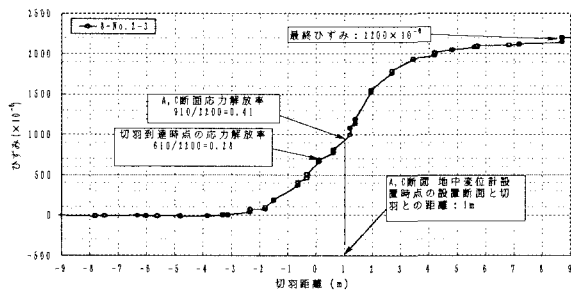


図-4 切羽進行に伴うひずみ(1a地点)の解放曲線

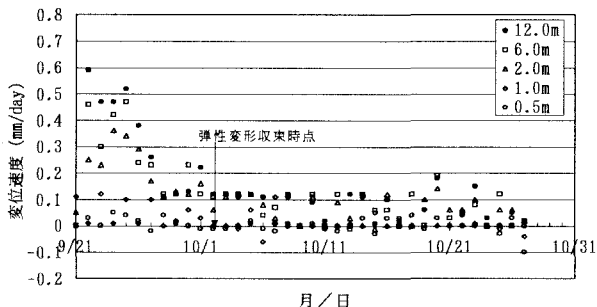


図-5 変位速度の経時変化図(一例)

析結果とも、 $n=0.4$  の場合で誤差が最小となり、本サイトの最適低減率と考えられる。表-3 に各種低減率で求めた各断面の弾性係数をおよび誤差を示す。

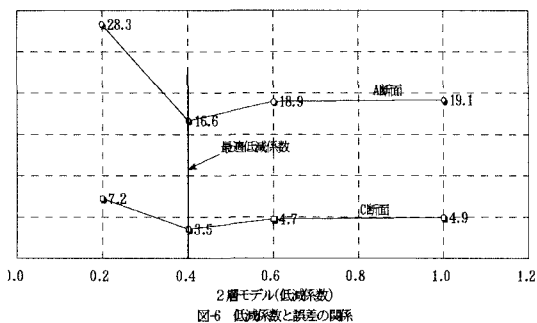


図-6 低減率と誤差の関係

表-3 各低減率時の弾性係数

低減率 (n)	A 断面			C 断面		
	弾性係数(GPa)		誤差 (%)	弾性係数(GPa)		誤差 (%)
	健全部	ゆるみ部		健全部	ゆるみ部	
0.2	12.13	2.43	28.3	17.24	3.45	7.2
0.4	7.39	2.96	16.6	11.20	4.48	3.5
0.6	5.86	3.52	18.9	8.82	5.29	4.7
1.0	4.09	4.09	19.1	6.21	6.21	4.9

## 5.2. 等方 2 層モデルの解析結果

先で求めた最適低減率( $n=0.4$ )を用いて、ここでは地中変位データより想定した 2 層モデルにて逆解析を実施することにより A 断面、C 断面それぞれの弾性係数を求め、現設計採用値の妥当性を検討する。

図-7 および図-8 に A 断面、C 断面のゆるみ範囲と地中変位データ実測値を示す。なお、逆解析より求めた変位量もそれぞれの図に示す。

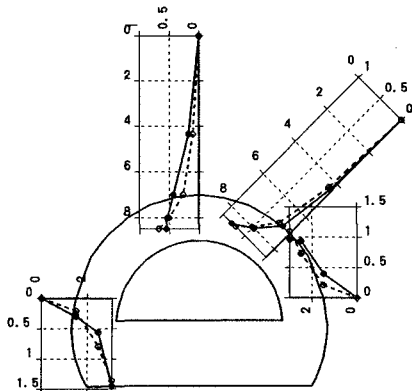


図-7 地中変位の計測値(●)と解析値(○)の比較 (A 断面：初期応力採用しない等方 2 層モデル)

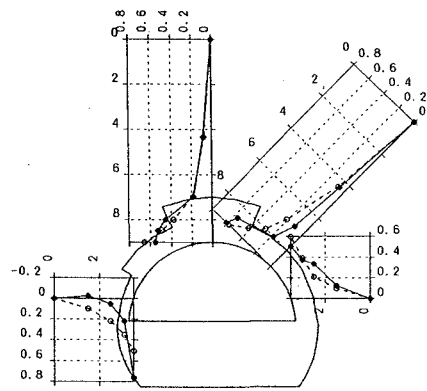


図-8 地中変位の計測値(●)と解析値(○)の比較 (C 断面：初期応力採用しない等方 2 層モデル)

ここで実施した解析ケースを表-4 に示す。

A 断面においては、小断面の調査坑を掘削した後、これを拡幅して貯蔵施設を掘削したため、地中変位データは、調査坑掘削時の影響を受けていた。

そこで A 断面の地中変位データに関しては、調査坑掘削、貯蔵施設拡幅掘削の過程を再現した逐次非弾性解析によって調査坑掘削の影響を評価し、この影響を逆解析に反映させた(Case-1)。また、計測された地中変位のうち、特に A 断面では坑壁近傍での圧縮傾向があり、安全側評価のため坑壁部(0.0m)のデータを除いて解析した(Case-2)。

これらの解析結果を表-5 および表-6 に示す。

この他、A、C 断面それぞれにおいて、異方性について別途検討したが、誤差も若干大きくなり有意な異方性は評価できなかった。

表-4 解析ケース

解析ケース	低減率:n	内容
Case-1	0.4	調査坑影響考慮(A 断面)
Case-2		Case-2+0.0m 地点データ除外(A 断面)

表-5 A断面 解析結果(等方2層モデル)

解析ケース	低減率:n	弾性係数(GPa)		初期応力(MPa)				誤差 (%)
		健全部	ゆるみ部	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1/\sigma_2$	$\theta$	
Case-1	0.4	6.29	2.52	23.51	9.53	2.47	71.60	4.69
Case-2		5.25	2.10	24.08	9.11	2.64	69.68	3.00

表-6 C断面 解析結果(等方2層モデル)

解析ケース	低減率:n	弾性係数(GPa)		初期応力(MPa)				誤差 (%)
		健全部	ゆるみ部	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1/\sigma_2$	$\theta$	
補正なし	0.4	8.82	3.53	18.89	10.19	1.83	73.19	3.70

このA断面の解析結果は、坑壁(0.0m)の地中変位データを除外して逆解析した結果が、弾性係数において設計サイドから、より安全側に考えられるためCase-2で現設計の妥当性を考える。

これらのケースでは、鉛直応力をすべて 10.7MPa として計算しているため、最小主応力 $\sigma_2$ はすべて 10.7MPa 以下の値となっているが、最大主応力 $\sigma_1$ はいずれのケースにおいても計測値での 11.0MPa よりかなり大きな値となっている。この理由は、図-7、図-8の地中変位の計測値と解析値の比較から明らかなように、A,C断面ともに側壁部での地中変位が大きく現れており、特にA断面においてはこの傾向が顕著であることによる。すなわち、地中変位を計測した時点での掘削断面は上半部の半円形の断面であり、この時点では円形上半の空洞周縁部に吹付けコンクリートとロックボルトが施されているが、空洞の下盤は素掘り状態である。したがって、下盤部のゆるみが大きいため、両側壁が内空側に大きく押出したことにより、見掛け上水平成分の初期応力が大きく算定されたものと思われる。

## 6. 現設計の妥当性評価

現設計時に採用した弾性係数およびA断面、C断面の逆解析結果を表-7に示す。以上の結果、断層を含むA断面の変形特性は設計のCM級岩盤の値を若干下回る値であり、また貯槽一般断面であるC断面では設計のCM~CH級岩盤の値であることが確認できた。したがって、実際の施工中データより逆解析を行った結果が現設計値と同程度であることから、現設計が妥当なものであると判断できる。

表-7 現設計時の物性値

岩級区分	弾性係数(MPa)	
	健全部	ゆるみ部
CH	13.0	5.2
CM	5.8	2.7
CL	1.2	0.5
A断面	5.25	2.10
C断面	8.82	3.53

## 7. あとがき

現在建設中の圧縮空気地下貯蔵施設の現設計時に採用した岩盤の物性値は、空洞周辺岩盤のゆるみを考慮した2層岩盤モデルを仮定した逆解析で得られる弾性係数と比較して各岩級(各断面)とも、2層岩盤それぞれの弾性係数の比が0.4のとき最も計算誤差が小さく、現設計値に整合することがわかった。今後は、実規模での圧縮空気貯蔵試験時の岩盤挙動、物性値の変化や構造物の劣化程度を捉えるため、建設中に設置した各種の計測機器を用いて継続的な測定を実施していく計画である。

当該プロジェクトは、通商産業省が(財)新エネルギー財団に委託して実施する『新型負荷平準化電源技術開発調査』の一環として実施されているものであり、本報分の取りまとめに際して、多くの関係者の方々にご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

<sup>1)</sup> 高木慎吾, 合田佳弘, 西本吉伸: CAES-G/T 圧縮空気地下貯蔵施設掘削時の岩盤調査について, 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp101-105, 1999

<sup>2)</sup> 西本吉伸, 高木慎吾: 岩盤を利用した圧縮空気地下貯蔵施設の設計のための原位置貯蔵試験, 第10回岩の力学シンポジウム講演論文集, pp701-706, 1998

<sup>3)</sup> 桜井春輔: Numerical Method in Geomechanics, Vol.2, p163, 1978