

CAES-G/T 圧縮空気地下貯蔵施設建設地点のスレーキング特性と施工への対処  
Characteristics of rock slaking and step for construction  
in CAES-G/T Underground Air Storage Cavern

津崎 高志<sup>\*</sup>・本江 誠治<sup>\*\*</sup>・高木 慎悟<sup>\*\*\*</sup>・合田 佳弘<sup>\*\*\*\*</sup>  
Takashi TSUZAKI, Seiji HONGO, Shingo TAKAGI, Yoshihiro GODA

The compressed air energy storage gas turbine (CAES-G/T) pilot plant requires the cavern to storage compressed high-pressure air. Surrounding rock mass has characteristics of slaking, so we constructed carefully to prevent deterioration and relaxation of surrounding rock mass. So we did any rock test, for example slaking test, saturation test, and so on.

This paper reports the results of survey during excavation of the cavern, step for construction and effects. In particular, characteristics of rock slaking and condition of saturated rock mass under construction is reported.

## 1. まえがき

現在、北海道上砂川地点において、CAES-G/Tパイロットプラント建設工事が進められている。

CAES-G/T 圧縮空気地下貯蔵施設は最大貯蔵圧 8.0Mpa の圧縮空気を全て岩盤負担させる構造となっており、構築にあたっては、岩盤特性的確かな把握および岩盤の劣化や緩み領域の拡大を極力防ぐ施工が重要となる。本報告は、掘削工事の際に実施した各種岩盤調査のうち、岩盤のスレーキング特性および含水状態に重点を置いた調査結果を報告するとともに、施工時の対処法とその効果について考察したものである。

## 2. 圧縮空気地下貯蔵施設地点の地質概要

圧縮空気地下貯蔵施設の建設位置は、北海道空知郡上砂川町にある三井石炭鉱業(株)旧三井砂川炭鉱の一部を利用し、地表から約 450m の深度(海面下-250m) の 250L 坑道に位置する。

圧縮空気地下貯蔵施設周辺の地質は、古第三紀石狩層群若鍋層上部に属する砂質泥岩であり、その特徴としては、層理面の走向がほぼ南北方向で西へ 70°程度傾斜していること、地山強度比が 2 程度と比較的小さいこと、スレーキング特性を有することおよび圧縮強度の含水比依存性が認められること等があげられる。なお、現在、海面下-560m の標高において排水処理をしているので、当該地点の岩盤は不飽和状態にあり、掘削後の空洞内は乾燥状態にある。

掘削工事の際に実施した切羽地質観察の結果から、坑壁岩盤の岩級区分は大部分が CH 級の堅硬な岩盤で構成されることが確認され、CM 級岩盤の分布は、断層近傍の地質不良部や、局所的に層理沿いに発達した節理等の影響で顕著な緩みが生じたと推定される部分に限定されている。そして、プラグ部および貯槽部で分布が確認された幅 30cm から 1 m 程度の破碎を伴った 3 条の断層部が、局所的に CL 級岩盤となっている。

---

\* 株式会社開発設計コンサルタント 地質事業部大深度地盤研究部 主任  
\*\* 電源開発株式会社 建設部地質グループ  
\*\*\* 正会員 工修 電源開発株式会社 北海道支社 CAES 工事グループ 課長代理  
\*\*\*\* 正会員 工修 電源開発株式会社 北海道支社 CAES 工事グループ グループリーダー

### 3. 岩盤調査結果とスレーキング特性

#### 3.1 岩盤調査結果

##### (1) 切羽簡易物性値測定結果

切羽地質観察の際に、岩級区分を定量的に評価する指標とするために、シュミットロックハンマー試験および簡易測定機を用いた坑壁表面の弾性波伝播速度の測定を実施した。さらに、切羽坑壁から試料を採取し、掘削直後の含水比および飽和度（1日水浸した状態を飽和度 100%と仮定）を測定した。簡易物性値の測定結果を図-1に示す。

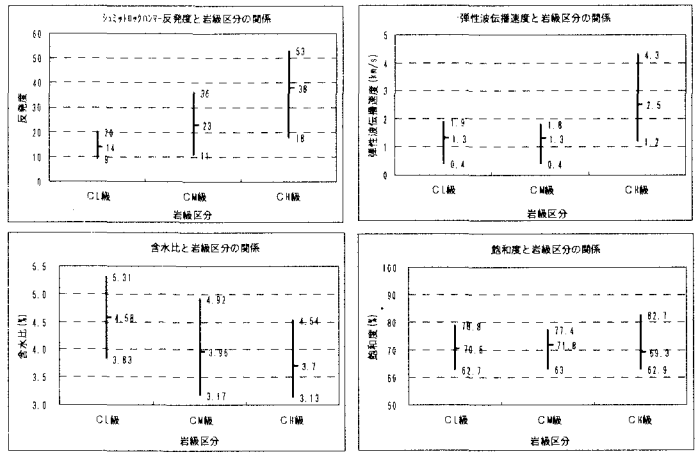


図-1 岩級区分別簡易物性値

図-1のとおり、測定値にばらつきはあるものの、シュミットロックハンマーによる反発度と弾性波伝播速度は、概ね岩級がよくなるにつれて値が大きくなり正の相関があるといえる。一方、含水比は岩級がよくなるにつれて値が小さくなり負の相関がある。また、飽和度は各岩級とも60~80%と、1日水浸した状態と比べると不飽和である。

##### (2) スレーキング試験結果

圧縮空気地下貯蔵施設のスレーキング特性を把握するために岩級区別に ISRM 指針<sup>2)</sup>による耐スレーキング性試験を実施した。また、土木学会指針<sup>3)</sup>を参考に、自然状態の試料について1日水浸させて、スレーキング区分および吸水含水比試験を行った。試験の結果を図-2, 図-3に示す。なお、図-3には本地点の既往調査において実施された、乾燥側へ調整した試料を用いた結果も合わせて示した。

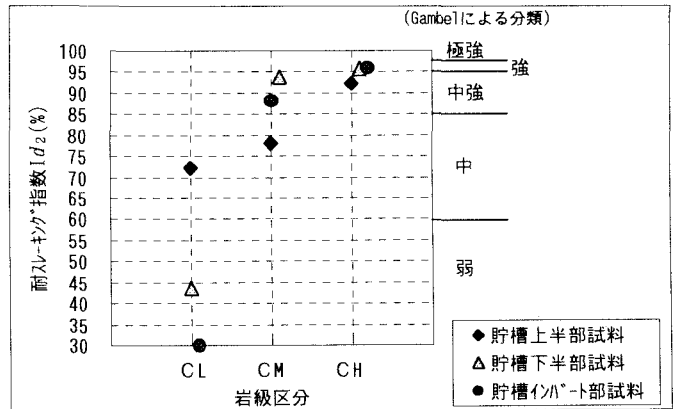


図-2 岩級区分別 ISRM 指針<sup>2)</sup> 2回乾湿繰返し耐スレーキング指数  $I_{d2}$

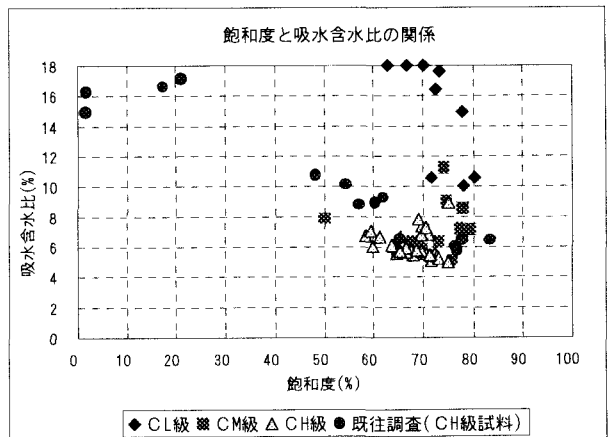
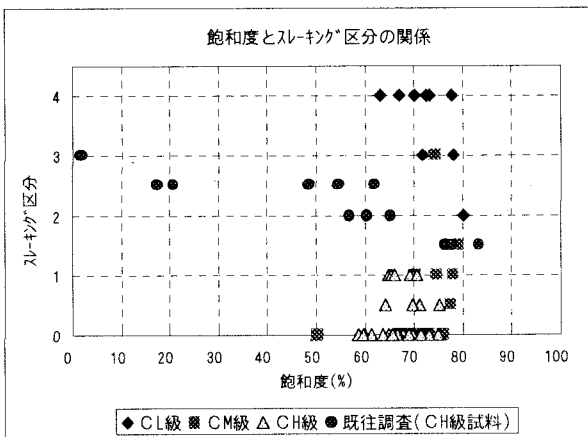


図-3 土木学会指針<sup>3)</sup>を参考にした1日水浸後のスレーキング区分および吸水含水比試験結果

図-2より、耐スレーキング性はCH級やCM級に比べてCL級が最も耐性が低い結果となった。また、図-3に示したとおり、スレーキング区分および吸水含水比を見ると、CH級やCM級では顕著なスレーキングはほとんど生じないのに対し、CL級では掘削直後であっても、スレーキングの進行が顕著であった。さらに、既往調査で実施した乾燥側へ調整した試料の状況を見ると、水浸前の初期の飽和度が60%程度以下である場合は、CH級の試料であってもスレーキングが顕著に進行する。

### (3) 粘土鉱物分析結果

前述した通り、CH級・CM級とCL級ではスレーキング特性に違いが認められた。岩級区分によるスレーキング特性の違いが膨潤性のある粘土鉱物（とくにスメクタイト）の量比の違いである可能性がある<sup>1)</sup>ことから、各岩級毎にその粘土鉱物の同定を行った。

粘土鉱物の分析は、造岩鉱物の同定を行うために一般的に実施されるX線回折試験と、粘土鉱物（主にスメクタイト）の活性（相対的な含有量）を把握するためにメチレンブルー吸着試験およびCEC試験を実施した。分析結果を表-1、図-4および図-5に示す。

X線回折試験の結果、各岩級とも膨潤性のある粘土鉱物のスメクタイト類（表-1中のM/M）の量比はきわめて微量程度であった。また、図-4および図-5に示した通り、CL級の一部の試料(CL-1)を除くと、各岩級の間には粘土鉱物の活性に有意な差は認められなかった。

表-1 X線回折試験結果

| 試料名  | 鉱物名 |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |
|------|-----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|
|      | Qz  | Pl | Ab | Mi | Ch | Ka | M/M | An | Cc | Sd | Py |
| CL-1 | ◎   | +  |    | +  | +  | ±  | ±   | +  | ±  | ±  | ±  |
| CL-2 | ○   |    | +  | ±  | ±  | ±  | ±   |    | ○  | ±  | ±  |
| CM-1 | ◎   |    | +  | +  | ±  | ±  | ±   |    |    | ±  | ±  |
| CM-2 | ◎~○ |    | +  | +  | ±  | ±  | ±   |    | +  | ±  | ±  |
| CH-1 | ◎   |    | +  | +  | ±  | ±  | ±   |    | ±  | ±  | ±  |
| CH-2 | ◎   |    | +  | +  | ±  | ±  | ±   |    | ±  | ±  | ±  |

(凡例)  
 鉱物記号 Qz:石英、Pl:斜長石、Ab:曹長石、Mi:黽主  
 Ch:緑泥石、Ka:カオリン、M/M:雲母-モ伊利石(スメクタイト)混合層鉱物、  
 An:方沸石、Cc:方解石、Sd:シダライト(菱鉄鉱)、Py:黄鉄鉱  
 量比 ◎:多量、○:中量、△:少量、+:微量、±:きわめて微量

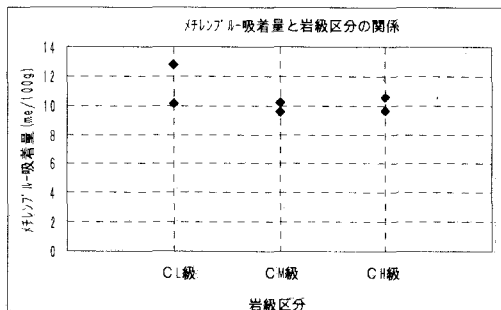


図-4 メチレンブルー吸着試験結果

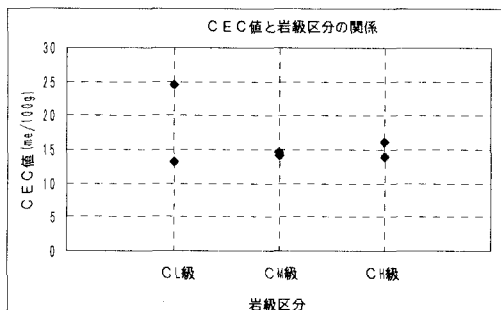


図-5 CEC試験結果

### (4) 坑壁経時劣化試験結果

スレーキング試験の結果より、CH級およびCM級岩盤では、掘削直後の試料を1日水浸させた状態ではほとんどスレーキングは進行しなかった。しかし、掘削の際の粉塵防止および摩擦熱を押しやるためにロードヘッダーやドリルジャンボより散布される水の影響で、坑壁岩盤のスレーキングが進行する可能性が懸念される。そこで、掘削後のCH級の坑壁岩盤に定期的に水を散布し、岩盤の劣化状況を経時的に測定した。岩盤の劣化状況は、シュミットロックハンマーの反発度の変化によって捕らえることとした。図-6に坑壁経時劣化試験の結果を示す。

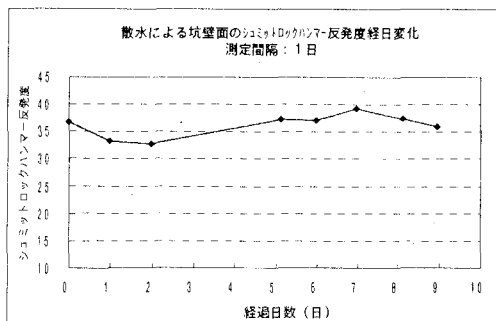


図-6 坑壁経時劣化測定結果

図-6より、測定を行った9日間では、反発度に大きな変化はなく、CH級の坑壁岩盤では、施工水程度の散布ではスレーキングは生じないことが確認された。

### (5)一軸圧縮強度と含水比の関係

計測計器設置用ボーリングのコアを用いて、一軸圧縮試験を実施した。その際、含水比の増加が力学特性に与える影響を把握するために、試料のいくつかについては質量変化が認められなくなるまで水浸させ、飽和状態にしてから試験を実施した。図-7に今回の試験結果を既往調査の試験結果と合わせて示す。なお、既往試験結果のうち、H3-H4試験の試料は乾燥側へ含水比が調整されている。

図-7のとおり、本地点の岩盤の一軸圧縮強度は、自然状態の含水比よりも乾燥側にある場合は大きく、含水比が半分程度になると強度が約3倍となる。一方、湿潤側にある場合は、自然状態の強度の下限値程度となる。

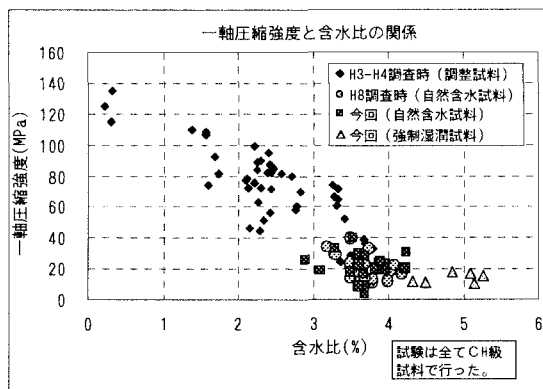


図-7 一軸圧縮強度と含水比の関係

### 3.2 当該地点の岩盤の含水状態およびスレーキング特性等の特徴

以上の岩盤調査および解析結果から明らかとなった岩盤性状より、当該地点の岩盤の含水状態およびスレーキング特性等についての特徴を整理すると、以下の通りである。

- ①圧縮空気地下貯蔵施設周辺の岩盤は、各岩級とも不飽和な状態にある。
- ②CL級岩盤はCH級やCM級岩盤に比べて、スレーキングに対する耐性が低い。
- ③CH級やCM級岩盤は、掘削直後より湿潤状態となっても顕著なスレーキングはほとんど生じないが、CL級岩盤は掘削直後より湿潤状態となると、顕著にスレーキングが進行する。
- ④初期の飽和度（1日水浸した状態を飽和度100%と仮定）が60%程度を下回って乾燥している場合、次に湿潤状態となると、CH級やCM級岩盤であってもスレーキングが顕著に進行する。
- ⑤岩級区分によるスレーキング特性の違いは、膨潤性のある粘土鉱物（主にスメクタイト）の含有量の違いによるものとはいえない。
- ⑥CH級の坑壁岩盤は、施工水の散布程度ではスレーキングは生じない。
- ⑦乾燥側にあるほど一軸圧縮強度は大きくなる。

## 4. 施工への対処方法

当該地点の岩盤は、スレーキング性と強度の含水比依存性が顕著であり、とくにCL級岩盤は掘削直後の状態より湿潤状態となるとスレーキングが進行する。また、掘削直後より乾燥させると、乾燥状態のままであれば一軸圧縮強度は大きくなるが、次に湿潤状態となった際には、CH級やCM級岩盤であってもスレーキングが顕著に進行する状態となる。したがって、スレーキングによる劣化を防止するためには、施工に際して極力、掘削直後の含水状態を変化させないようにすることが重要であり、以下の事項を実施した。

- ①掘削および坑壁清掃時に水の使用を禁止した。水を使用せざるをえない計測計器設置用ボーリング工の実施にあたっては、削孔水の完全回収に努めた。
- ②空洞掘削の各々のステップ（上半部、下半部、インバート部）で掘削後すみやかに吹付けコンクリートを実施し、岩盤の露出を必要最小限にとどめた。
- ③CL級岩盤出現部は、その出現範囲が局所的であっても、より密な支保工パターンを採用した。特に、

スレーキングによる劣化が懸念されるインバート部は、インバート掘削前に下向きに先行ロックボルト（GFRP）を施工した。

以上の3点を実施した結果、インバート部を含めた全切羽において、坑壁岩盤にスレーキングによる劣化は認められず、健全な状態で吹付けコンクリートを完了することが出来た。

## 5. 吹付けコンクリート施工後の坑壁岩盤の含水状態の確認

吹付けコンクリートによる支保工が、坑壁岩盤の含水状態やスレーキング特性に対してどのような効果があるのかを確認するために、コンクリート吹付け後65日経過した後、コンクリート吹付けの裏の岩盤より各岩級毎に試料を採取して、含水比を測定した。測定結果を図-8に示す。図-8には、露出した坑壁岩盤から採取し、含水比の経時変化を測定した結果も合わせて示した。

コンクリート吹付け裏の岩盤の含水比は、吹付け後65日経過した時点において、どの岩級も掘削直後の状態とほとんど差のない結果を示した。一方、露出した岩盤より採取した試料では、CL級の岩盤は、約1週間経過した後より乾燥の進行が認められたが、CH級およびCM級の岩盤は、若干低下する傾向にあるものの有意差は認められなかった。

以上の結果より、露出させた岩盤の含水比の変化状況は岩級により異なるものの、早期の吹付けコンクリートによる支保工が、坑壁岩盤の含水状態を掘削直後の状態で保持するのに有効であることが確認できた。

## 6. まとめ

掘削工事に実施した岩盤調査の結果、当該地点の岩盤は不飽和な状態にあり、CL級岩盤部は掘削直後の状態より湿潤状態となると顕著にスレーキングが進行することが確認された。また、CH級やCM級岩盤部も、掘削直後の状態より乾燥したのち、湿潤状態となるとスレーキングを生ずることが判明した。これらの性状に留意し、掘削直後の含水状態を保持するよう施工を行った結果、健全な状態で吹付けコンクリートを完了することが出来た。さらに、早期の吹付けコンクリートによる支保工が、坑壁岩盤の含水状態やスレーキング特性を、掘削直後の状態で保持するのに有効であることも確認された。

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、本報告のとりまとめに際して、多くの関係者の方々にご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

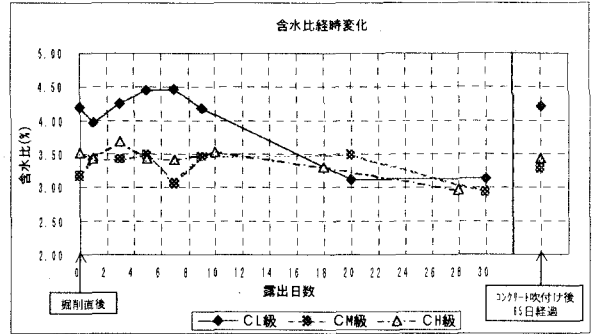


図-8 含水比経時変化測定結果

1)西本吉伸,高木慎悟: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試験,第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,pp.701-706,1998.

2)岩の力学連合会:ISRM指針,Vol.1,pp21-24,1982.9.

3)土木学会:軟岩の調査・試験の指針(案)-1991年版-,pp64-84,1991.

4)松倉公憲,谷津栄寿:頁岩および凝灰岩のスレーキングについてII,第15回土質工学研究発表会講演集,pp.1397-1400,1980.