

(23) 原位置岩盤におけるひずみ解放試験について

東京電力(株) 正会員 御 牧 陽 一  
東京電力(株) 正会員 ○ 松 尾 和 俊

1. はじめに

東京電力(株)は現在、栃木県に今市地下発電所を建設中であるが、この空洞規模は断面積1420m<sup>2</sup>を有しており、世界でも最大級の大きさである。地下空洞の建設にあたっては、地山かぶりが約400mと大きいことから、我国で初めて天井アーチコンクリートを施工しない、卵形断面を採用した<sup>1),2)</sup>

空洞の掘削にあたっては、多段式岩盤変位計、ロードセル等、合計で約800点の計器を設置し、岩盤の挙動を計測しながら施工を進めた。空洞の掘削は昭和57年10月、約2年半を要して終了したが、その間の空洞壁面の変位は表-1および図-1に示すとおりであり、地山深部に施工した、ほぼ左右対称の空洞であるにもかかわらず空洞の山側と川側で壁面変位量にかなりの差を生じる結果となった。この変位の非対称性の原因は、空洞山側壁面には比較的、角れき岩が広く分布しているのに対し、川側壁面は珪質砂岩が大部分であったため岩種の違いによるものと想定した。しかしながら、既に実施した岩盤試験や岩石試験を再検討した結果では、この非対称性を説明する十分なデータは得られなかった。

本報告は、この空洞変形の非対称性の原因を明らかにするため、空洞壁面の掘削を模擬して行った岩種別の原位置岩盤試験について述べるものである。

| 断面   | 発電機室  |       |       |       |      |      |      |      |      |      | 変圧器室  |     |     |     |      |     |     |   |   |   | 合計   | 平均  |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|-----|-----|------|-----|-----|---|---|---|------|-----|
|      | A     | B     | C     | D     | E    | F    | G    | H    | I    | J    | K     | L   | M   | N   | O    | P   | Q   | R | S | T |      |     |
| 山側壁面 | -28.0 | -18.5 | -16.2 | -20.9 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 209  | -   |
| 山側壁面 | -23.3 | -13.7 | -11.2 | -16.1 | 16   | -    | -    | -    | -    | -    | -     | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 2.9  | 9.1 |
| 山側壁面 | -30.2 | -22.8 | 24.5  | 15.6  | 12.1 | 10   | 5.2  | -    | -    | -    | -     | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 62   | 155 |
| 山側壁面 | -12.8 | -17.8 | 16.5  | 43.1  | 82   | 19.7 | 86   | -    | -    | -    | -     | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 83   | 154 |
| 山側壁面 | 0.2   | 20    | -0.8  | 10.5  | 9.7  | 29.0 | 7.7  | 83   | 21.3 | 5.6  | 24.7  | 4.5 | 0.9 | 0.7 | 0.3  | 84  | 8.3 | - | - | - | -    | -   |
| 山側壁面 | 24    | 3.6   | 3.3   | 13.3  | 16   | 5.8  | -0.7 | 5.6  | 3.3  | 1.6  | 2.8   | 3.7 | 1.5 | 1.6 | 3.2  | 4.3 | 5.6 | - | - | - | -    | -   |
| 山側壁面 | 0.1   | -50   | -50   | 5.2   | 0.5  | 0.1  | 3.8  | -0.1 | 0.1  | 20   | 0.6   | 1.7 | 1.7 | 0.1 | -0.4 | 0.8 | 0.4 | - | - | - | -    | -   |
| 川側壁面 | -3.4  | -     | -     | 7.5   | -    | -    | 7.4  | -    | 6.1  | -2.6 | -12.4 | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 4.1  | 5.1 |
| 川側壁面 | -80   | -     | -     | 9.3   | -    | -    | 12   | -    | 62   | 4.5  | -33.1 | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 12.7 | 104 |
| 川側壁面 | -3.6  | -10.3 | -     | 3.4   | -    | -    | 5.8  | 10.2 | -    | 8.4  | -     | 1.6 | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | 67   | 6.3 |
| 川側壁面 | -2.8  | -     | -     | 6.1   | -    | -    | 1.1  | -    | 3.4  | -    | -     | -   | -   | -   | -    | -   | -   | - | - | - | -    | 34  |

表-1 空洞壁面変位一覧表(掘削完了時)

2. 試験方法の概要

試験は、空洞の近傍(空洞壁面からの離間距離約30m)に位置する排水トンネルの一部を拡幅して実施した。試験方法の概要は以下のとおりである。

① 発電所の地質を代表すると思われる角れき岩、珪質砂岩、砂岩・粘板岩の互層(以下互層と略す)の3岩種について、それぞれ試験箇所を選定する。

② 試験箇所においては、図-2に示すように火薬制限掘削(掘削A)および膨張材を使用した無発破掘削(掘削B)を行うものとし、掘削終了後50cm×50cmの試験ブロック表面を整形、研磨する。

③ 試験ブロック表面にひずみ計を設置し、深さ80cmのラインドリリングによる側方4面解放時、およびフラットジャッキを用いた側方載荷時の岩盤表面のひずみを、それぞれ測定する。

以上の試験によって得られたデータに基づいて、岩種別の変形挙動の差異を比較検討した。

3. 解放試験

3.1 試験方法

試験ブロック表面にはひずみゲージ16点、一軸ひずみ計4点を設置し、φ100の連続ラインドリリン

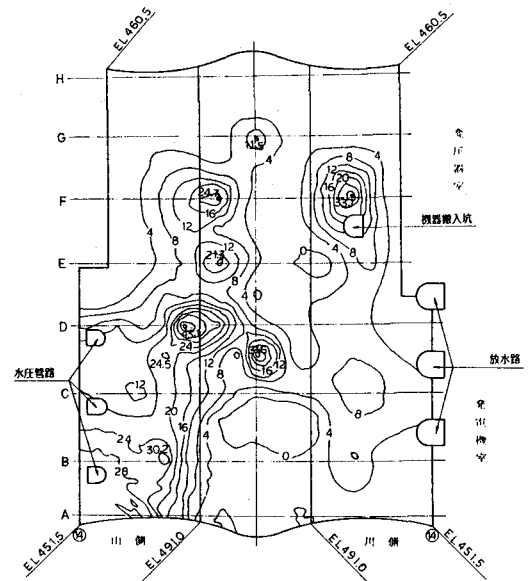


図-1 空洞壁面変位分布図(壁面展開図)

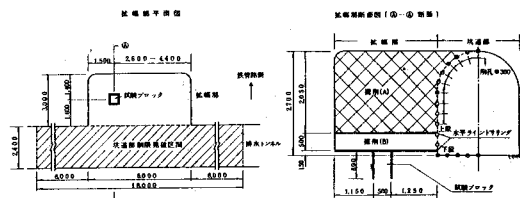


圖-2 試驗坑掘削圖

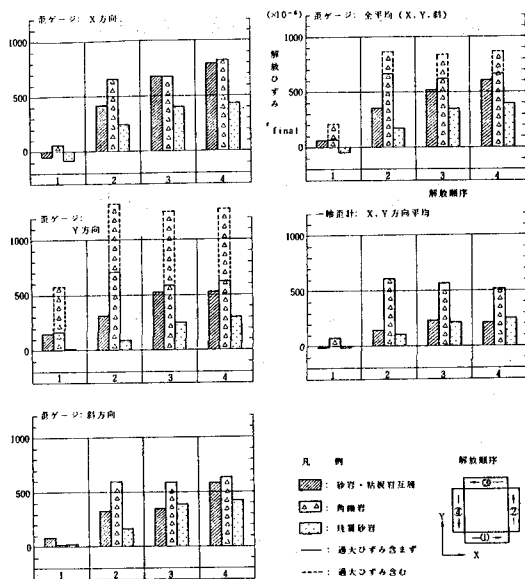


図-4 解放ひずみの岩種別比較図

グの進行10cmごとに解放ひずみを測定，記録した（図-3）。

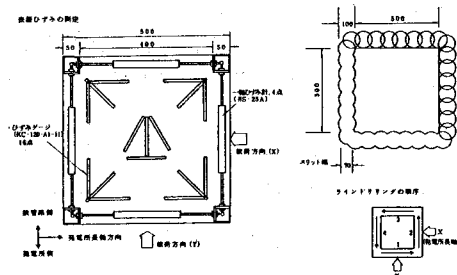


図-3 測定計器の配置と応力解放の方法

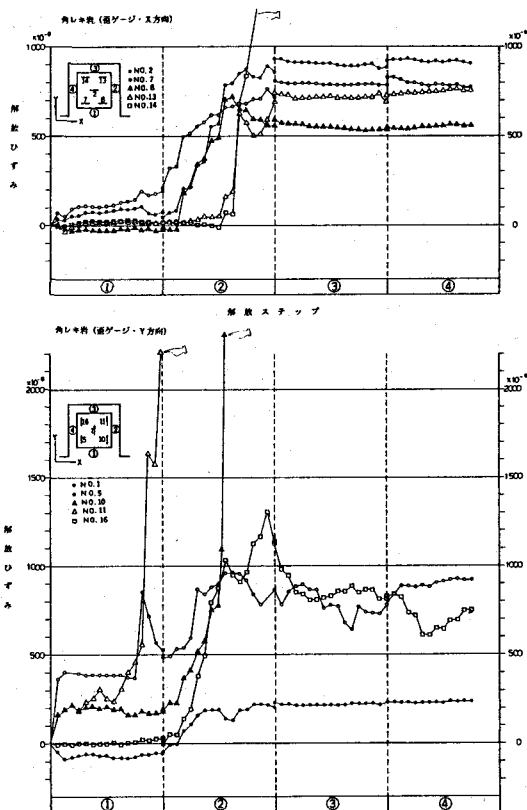


図-5 角れき岩の解放ひずみの経時変化

なお、試験箇所から室内試験用の岩石コアを各岩種ごとに3本採取した。

### 3.2 試驗結果

(單位:  $\times 10^{-6}$ )

| 岩種 \ 方向    | X   | Y             | 斜   | 平均           |
|------------|-----|---------------|-----|--------------|
| 互層 (A l)   | 696 | 533           | 589 | 606          |
| 角れき岩 (B r) | 725 | 625<br>(1278) | 640 | 663<br>(881) |
| 珪質砂岩 (S S) | 438 | 300           | 423 | 387          |

注) カッコ内は過大ひずみを含んだ値

いる。

- ③ ひずみゲージにより求めた最終のひずみ量を表-2に示すが、この関係を比率で表わせれば次のとおりである。

$$A \delta : B r : S S = 1.6 : 1.7 (2.3) : 1$$

- ④ 一軸ひずみ計の値もひずみゲージと同様の傾向を示しており、角れき岩が大きなひずみを示している。

#### 4. 載荷試験

##### 4.1 試験方法

図-6に示すように解放試験によって掘削されたスリットにフラットジャッキを2方向建込み、空けきを硬質樹脂石こう（ハイストーン）で充填した。試験に使用したジャッキは外形50cm×50cm、最大荷重245ton、最大ストローク36mmである。載荷パターンの一例を図-7に示す。

##### 4.2 試験結果

載荷試験によって得られた解放前応力の推定値を図-8に示す。解放前応力は近似的に次式によって推定した。

$$\text{解放前応力} = (\text{解放ひずみ量} \div \text{載荷ひずみ量}) \times \text{載荷応力}$$

この試験結果からみると、解放前の平均応力は互層で144kg/cm<sup>2</sup>、角れき岩で155kg/cm<sup>2</sup>、珪質砂岩で287kg/cm<sup>2</sup>であり、過大ひずみの発生した角れき岩は互層と同程度であるのに対し、珪質砂岩は角れき岩および互層の約2倍の値を示した。

解放前の応力状態をより高い精度で求めるため、オーバーコリングによる初期地圧測定の手法を用いて応力値の推定を行い、空洞掘削前に測定した当地点の初期地圧（試験位置レベルに補正した値）と比較した。この結果を図-9に示す。この図から以下ことがいえる。

- ① 平均主応力で比較すると、互層で約150kg/cm<sup>2</sup>、角れき岩で210kg/cm<sup>2</sup>、珪質砂岩で約310kg/cm<sup>2</sup>を示し、簡易的に求めた応力値と同様、珪質砂岩が大きな値を示している。
- ② 今回の試験値を空洞掘削前に求めた初期地圧と比較すると、各岩種ともかなり大きな値となっている。
- ③ 初期地圧の第1主応力の方向は発電所長軸に対し+5°（反時計回りを正）であるが、今回の試験より求めた値は平均で-17°～+28°であり、両者の方向は概ね一致している。

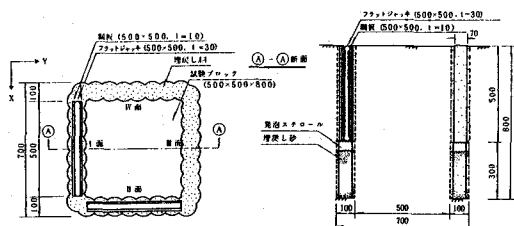


図-6 フラットジャッキの設置方法

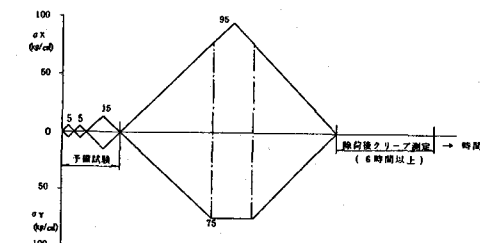


図-7 載荷パターンの一例

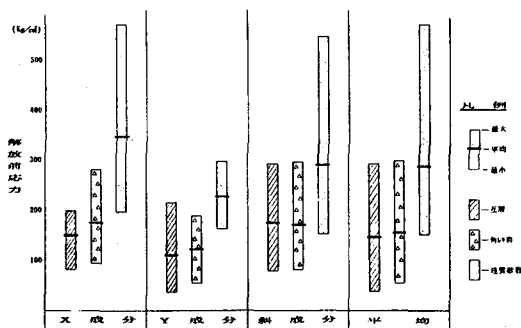


図-8 解放前応力の推定値

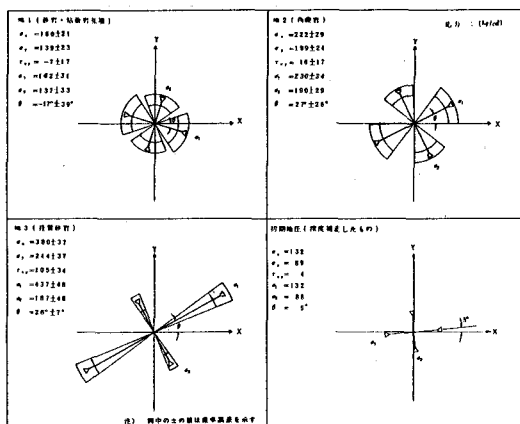


図-9 解放前応力と初期地圧の比較

## 5. 試験結果に対する考察

今回の試験は地下空洞の挙動解析の一環として実施されたが、解放過程において、角れき岩の一部に  $2000 \times 10^{-6}$  を越える過大ひずみが測定された。この要因としては次の2点が考えられた。

- ① 角れき岩は他の岩種に比べ局部的に大きな地圧を有している。
- ② 角れき岩は地山応力が解放されると、他の岩種に比べて見かけ上、大きな解放ひずみが発生する。

このうち①については引続き実施した載荷試験で、可能性として薄いことが明らかとなった。

角れき岩は秩父古生層に属する砂岩・粘板岩に、中生代から古第三紀の酸成火成活動に伴ってマグマが貫入し、基岩を破碎角れき化して生成されたものであり、他に比べて節理の発達が少ない岩である。

今回の試験結果をみると、角れき岩は応力解放時に、れきとマトリックスの境界、あるいはマトリックス自身にマイクロフラクチャーを発生させる性質があり、これが見かけ上、大きな解放ひずみとなって現れるものと想定される。この仮説を、試験終了後の岩盤ブロックの目視観察から裏づけることはできなかったが、空洞掘削時に実施した空洞周辺地山応力の測定においても同様の現象がみられたことから、上記仮説はほぼ間違いないものと判断される。

一方、載荷試験においては角れき岩の局部地圧の存在が否定されるとともに、珪質砂岩をはじめ今回測定した地圧が予想以上に大きいという結果を示した。この原因としては以下の点があげられる。

- ① 空洞からの離間距離が30mと近いと、空洞掘削の影響によってマクロな応力集中を受けている。
- ② 排水トンネルおよび試験坑の掘削の影響によってミクロな応力集中を受けている。
- ③ 載荷によって回復したひずみは全体平均で65%程度であり、ひずみを完全に復元していない。

図-10は、載荷試験時の岩種別のひずみの回復率を示したものであるが、これによると特に珪質砂岩では、平均で45%しかひずみを回復することができなかった。このため珪質砂岩の測定値には、外挿による誤差がかなり含まれているものと想定される。しかしながら、ひずみの回復率の高い互層および角れき岩においてもかなり大きな応力値を示したことを考えれば、上記①および②の影響のために解放前の試験岩盤は初期状態よりも大きな応力状態であったことは間違いないであろう。

## 6. まとめ

検討結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 地下大断面空洞掘削時の周辺岩盤の挙動を分析したところ、空洞壁面の変位はかなり非対称なものであり、この原因は岩石試験では表現し得ない、岩種による違いと予想された。
- ② これを実証するため、原位置岩盤において空洞掘削を模擬した解放試験を実施し、角れき岩は過大なひずみが発生することを実測によって確認した。
- ③ 解放ひずみを復元させる載荷試験の結果も含めて考えると、この過大ひずみは角れき岩に特有のマイクロフラクチャー現象によるものと考えられた。

以上のように、今回の原位置試験によって、空洞挙動の非対称性を検証することができた。

## 参考文献

- 1) 御牧陽一：今市地下発電所の設計，電力土木，No.173，1981年7月
- 2) 御牧陽一ほか：今市地下発電所の施工と空洞周辺岩盤の挙動について，電力土木，No.185，1983年7月

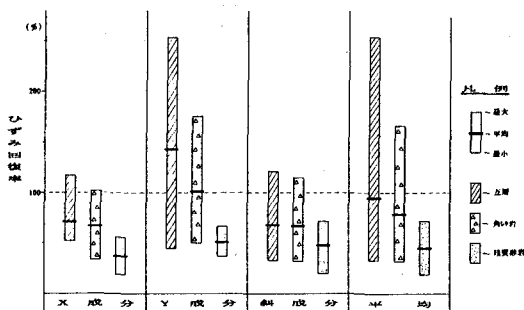


図-10 載荷試験時のひずみ回復率

(23) In-situ Stress Relief Tests at Cavern Bedrock

Youichi Mimaki\*

Kazutoshi Matsuo\*

Imichi underground power plant is installed in a large cavern of which cross section represents an area of 1420m<sup>2</sup>. A horseshoe-shaped cross section is adopted for the reason that the overburden of the cavern is very deep, about 400m.

The measurement results of the surrounding bedrock during cavern opening showed the remarkable behavior that, in spite of nearly symmetric cavern shape, the considerable unsymmetric displacement of the bedrock was appeared. This reason was expected to be caused by the difference of geological condition, but could not be cleared by conventional rock tests.

In order to make sure of the expected reason, the in-situ tests simulating cavern opening were carried out for three rocks, that is, breccia, siliceous sandstone, and alternation of sandstone and slate. The test results showed that excessive strain is occurred at the time of stress relief in breccia, which is distributed at the mountain side of the cavern, so that the reason of unsymmetric behavior of surrounding bedrock during cavern opening was verified.

---

\* Tokyo Electric Power Co., Inc.