

# 大規模地下空洞掘削に伴う周辺岩盤挙動に関する一考察 A STUDY ON ROCK BEHAVIOR DURING LARGE UNDERGROUND CAVERN EXCAVATION

吉田 次男\*・安原 敏夫†・井尻 健嗣†  
Tsugio YOSHIDA, Toshio YASUHARA, Taketsugu IZIRI

Some kind of measurements were done to study rock behavior during a large underground cavern excavation. The results shows that the rock behave as assembly of rock blocks. So in order to study the rock properties as assembly of rock blocks, laboratory test was carried out. And the results shows that rock strength as assembly of rock blocks is different from that given by cohesion and coefficient of internal friction.

## 1. まえがき

著者らは、奥多々良木発電所地下空洞で、空洞掘削時の側壁岩盤の挙動を調べるために、側壁より水平に掘削されたボーリング孔を用いて鉛直方向の微小ひずみの変化を計測した<sup>1)</sup>。その結果、岩盤内の応力変化は連続体と考えられるような特性を示すのではなく、不規則に再配分され、荷重を多く受け持つ領域と荷重をあまり受け持たない領域が存在することが確認された。同様な挙動は、大河内発電所など他の空洞掘削時にも測定されている<sup>3)</sup>。更に、水平方向のボーリング孔を用いた、沈下計による空洞掘削時の岩盤の鉛直方向変位計測の結果、巨視的に見て岩盤は比較的大きなブロックの集合体として挙動することが分かった<sup>1) 2)</sup>。

そこで、ブロックとして挙動する岩盤の力学特性や応力再配分のメカニズムを調べるためにブロック供試体を用いた二軸せん断試験を行った。

## 2. 空洞掘削時の周辺岩盤挙動の特徴

図-2は、奥多々良木発電所の空洞掘削時に図-1に示す位置で水平ボーリング孔を用いて鉛直方向の微小ひずみの変化を示したものである<sup>1)</sup>。圧縮方向の変化はボーリング孔が鉛直方向につぶれたこと、引張方向の変化は、ボーリング孔が鉛直方向に伸びたことを示す。計測位置での岩盤の変形定数は場所によるばらつきが小さいことか、空洞掘削時の応力増加(減少)の変化を示したものであると言える。図-2の挙動は、弾性連続体としての挙動とは異なり、掘削時に応力を多く受け持つ領域とあまり受け持たない領域が出現し、応力が不規則に再配分

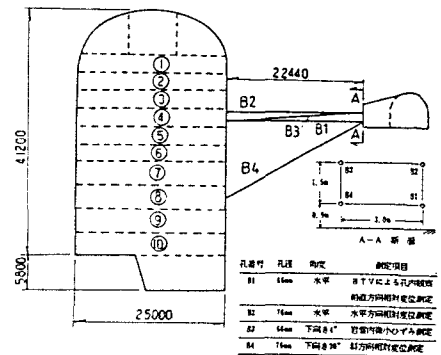


図-1 計測位置図

\* 正会員 関西電力(株)総合技術研究所

† 関電興業(株)土木試験所

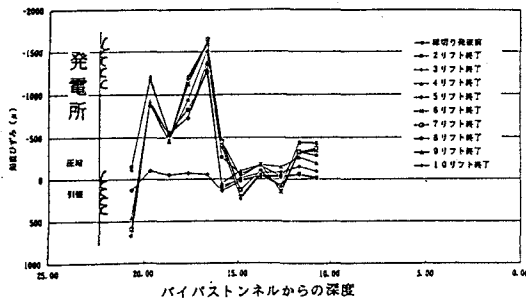


図-2 微小ひずみ計による鉛直ひずみ

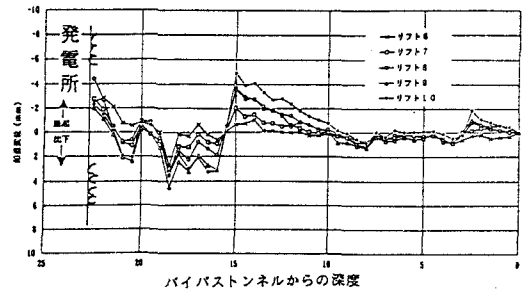


図-3 沈下計による鉛直方向相対変位

したことを示していると言える。

図-3は、鉛直方向の微小ひずみの測定位置より約3m離れた水平ボーリング孔で計測した沈下計による鉛直方向相対変位の変化で、空洞掘削時のボーリング孔底の隆起、沈下の変化を示したものである<sup>(1)(2)</sup>。図-2の鉛直ひずみの変化と比較すると、深度方向に多少のずれがあるものの、鉛直ひずみでピークが生じている位置に対応する位置で鉛直方向相対変位の沈下のボトムが生じ、鉛直ひずみのボトムの位置に対応している位置で鉛直方向相対変位の隆起のピークが生じている。この結果も、掘削時に岩盤内応力が不規則に再配分したことを示すものである。

計測位置での不連続面の頻度は、1m当たり約3本であるが、鉛直方向相対変位は、これよりかなり大きな間隔で比較的直線的に傾斜しながら隆起と沈下を繰り返している。このことは、岩盤は不連続面が全て同程度に変位するのではなく、巨視的に見て変位が大きな不連続面を中心に比較的大きなブロックの集合体として挙動していると同時にブロックに回転が生じていることを示していると言える。図-4は、鉛直方向相対変位より推定できる巨視的な岩盤ブロックの寸法を示したものである。このブロック寸法は不規則な応力再配分による応力のピークとボトムの間隔よりやや小さい目である。

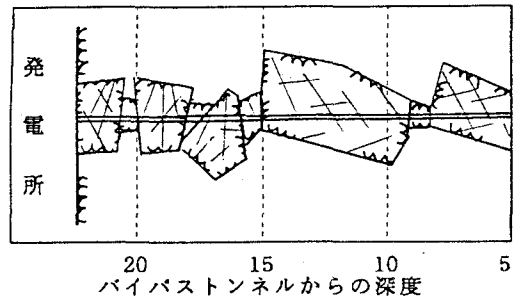


図-4 巨視的なブロックの寸法

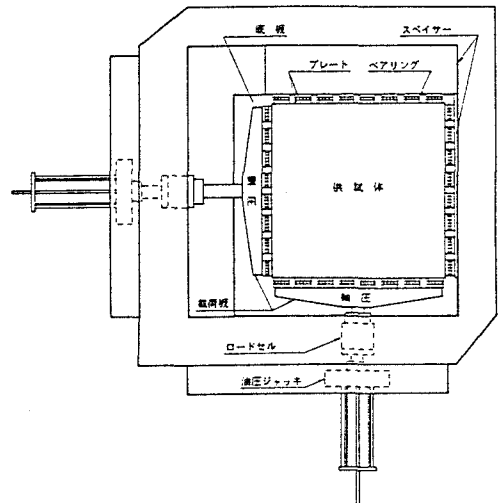


図-5 二軸せん断試験装置

### 3. 二軸せん断試験の概要

空洞掘削時の周辺岩盤挙動を計測した結果、巨視的に見ると岩盤は比較的大きなブロックの集合体として挙動すること、および岩盤内で応力が不規則に再配分されることが分かった。そこで、ブロックの集合体と

して挙動する岩盤の力学的特性を検討するとともに、応力再配分のメカニズムを検討するために、ブロック供試体を用いた二軸せん断試験を行った(図-5) <sup>4) 5)</sup>。

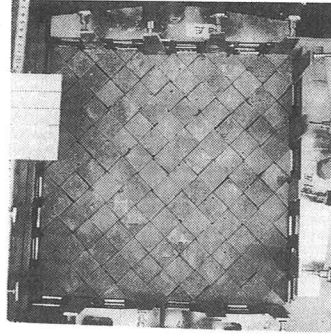
試験は、縦、横36cm、厚さ3cmのブロック供試体を用いて、応力制御方式の二軸せん断試験を行った。供試体は、モルタル製 ( $\phi = 35.6^\circ$ 、 $c = 0.2\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_c = 448.7\text{kgf/cm}^2$ ) および石膏製 ( $\phi = 33.0^\circ$ 、 $c = 0.17\text{kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_c = 36.4\text{kgf/cm}^2$ ) で水圧カッターによる複数の滑らかな不連続面が存在する。載荷方法は、等方載荷より側圧一定で軸圧を単調増加した。変位はダイヤルゲージで供試体周面で一面につき4箇所ずつ測定し、その平均値を用いた。供試体周辺には、ベアリングを挿入して摩擦を軽減した。

#### 4. 試験結果

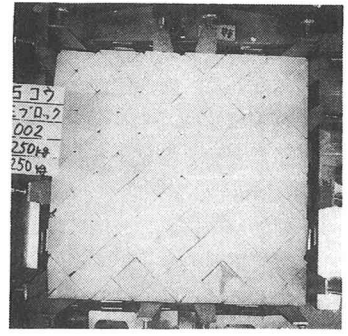
写真1-1～1-3は、モルタル供試体で $45^\circ$ 方向に2方向の不連続面を有する供試体のせん断時の変形・破壊挙動を示したものである。試験は、側圧 $1.85\text{kgf/cm}^2$ 一定で側圧を単調増加した。軸力の増加に伴い不連続面の開口幅が増大している。この際、不連続面は、長方形に開口するのではなく、ブロック要素の回転によりくさび型に開口し要素どうしが、隅角部付近で接触しあっているものが多い。また、せん断時に新規亀裂の発生・開口が見られた。モルタル

の一軸強度は $448.7\text{kgf/cm}^2$ であるが、軸圧 $7.41\text{kgf/cm}^2$ ですでに新規亀裂が発生しており、軸圧 $9.26\text{kgf/cm}^2$ で新規亀裂が大きく開口しているものがある。また、変形は供試体全体に一樣ではなく、新規亀裂の発生が多く変位も大きい領域と、新規亀裂の発生が小さく変位も小さい領域が出現した。 $45^\circ$ 方向の単一不連続面で滑りが生じる軸圧は理論値で $12.3\text{kgf/cm}^2$ であるが、2方向の不連続面を有する供試体では変形時にブロック要素どうしの噛み合いにより、軸圧 $12.3\text{kgf/cm}^2$ 以上の強度を発揮している。

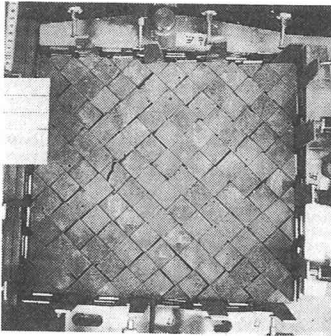
写真2-1～2-3は、石膏供試体で $45^\circ$ 方向に2方向の不連続面を有する供試体のせん断時の変形・



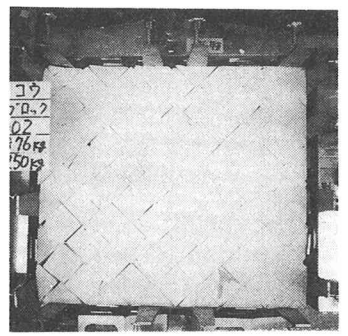
1-1  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1.85\text{kgf/cm}^2$



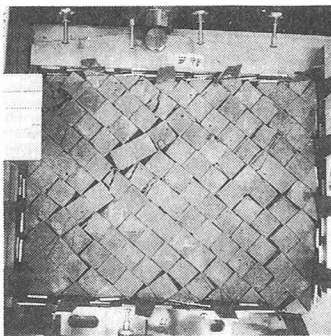
2-1  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2.31\text{kgf/cm}^2$



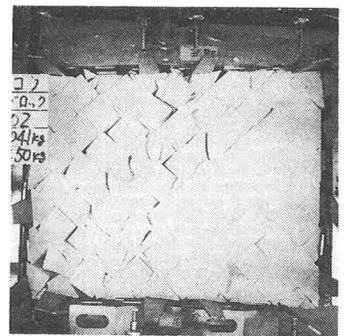
1-2  $\sigma_1 = 9.26\text{kgf/cm}^2$



2-2  $\sigma_1 = 17.4\text{kgf/cm}^2$



1-3  $\sigma_1 = 30.6\text{kgf/cm}^2$



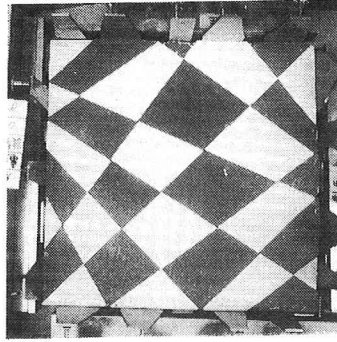
2-3  $\sigma_1 = 18.9\text{kgf/cm}^2$

写真-1 モルタル供試体 ( $45^\circ \times 2$ )      写真-2 石膏供試体 ( $45^\circ \times 2$ )

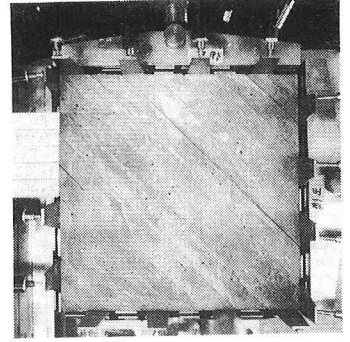
破壊挙動を示したものである。試験は、側圧 $2.31\text{kgf/cm}^2$ 一定で側圧を単調増加した。変形特性、新規亀裂の発生特性は、モルタル供試体と同様の特性を示す。また、軸力が $18.9\text{kgf/cm}^2$ でブロックの破壊に伴って供試体全体の破壊が生じた。 $45^\circ$ 方向の単一不連続面の滑りが生じる軸圧は理論値で $14.8\text{kgf/cm}^2$ である。

写真3-1～3-2は、石膏供試体で2方向にランダムな不連続面を有する供試体のせん断時の変形・破壊特性を示したものである。試験は、側圧 $0.93\text{kgf/cm}^2$ 一定で側圧を単調増加した。軸力が $9.3\text{kgf/cm}^2$ でブロックの破壊に伴って供試体全体の破壊が生じた。

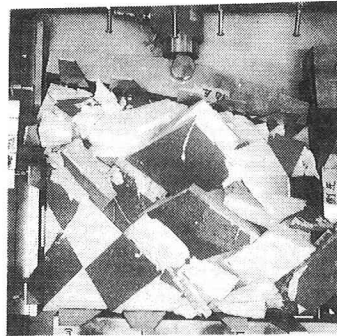
写真4-1～4-2モルタル供試体で $45^\circ$ 方向に1方向の不連続面を有する供試体のせん断時の変形特性を示したものである。側圧 $2.5\text{kgf/cm}^2$ 軸圧を単調増加した。軸圧 $15.9\text{kgf/cm}^2$ で不連続面に大きな滑りが発生した。この際、新規亀裂は発生していない。



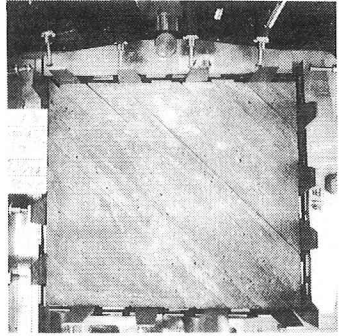
3-1  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.93\text{kgf/cm}^2$



4-1  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2.50\text{kgf/cm}^2$



3-2  $\sigma_1 = 9.30\text{kgf/cm}^2$



4-2  $\sigma_1 = 15.9\text{kgf/cm}^2$

写真-3 石膏供試体 (ランダム)

写真-4 モルタル供試体 ( $45^\circ \times 1$ )

## 5. 試験結果の考察

沈下計による鉛直方向相対変位計測の結果、岩盤は巨視的に見て比較的大きなブロックの集合体として挙動していると言える結果が得られた。そこで、ブロック供試体を用いた二軸せん断試験を行い、力学的特性を検討した。その結果、岩盤が複数のブロック要素の集合体として挙動する場合、変形時にブロック要素どうしの噛み合わせが生じ不連続面で滑りが生じ難くなることが分かった。その際、荷重がブロック要素の一部分に集中するとともに、大きく変位する要素とあまり変位しない要素が生じることが分かった。この結果、現場計測による鉛直ひずみの結果と比較すると、空洞掘削時の側壁岩盤の不規則な応力再配分は、巨視的に見た岩盤ブロックが不連続面で変形する際の噛み合わせにより生じたものと考えられる。また、岩盤ブロックの変位や噛み合わせの程度にばらつきがあるため不規則な応力再配分の応力変動間隔の方が岩盤ブロックの寸法よりも大きくなる傾向となると考えられる。また、巨視的に見た岩盤ブロックも更に小さなブロック要素の集合体と見なせるため、巨視的な岩盤ブロック内においてもある程度の応力再配分や噛み合わせが生じるものと考えられる。

岩盤ブロックの噛み合わせと岩盤破壊の関係を見ると、岩盤が噛み合った場合に応力が集中するため一軸強度で示される強度よりかなり小さい応力で破壊が発生する可能性がある。空洞掘削時の周辺岩盤において岩盤の一軸強度よりかなり小さな応力において新規亀裂が多数確認されている<sup>3)</sup>。

以上、現場計測と室内試験の結果より、岩盤の噛み合わせとして、①不連続面の小さい間隔の凹凸（ラフネス）による噛み合わせ②不連続面の大きな間隔の凹凸（アンジュレーション）による噛み合わせの他に③岩盤ブロック同士の回転等による噛み合わせが挙げられるものと考えられる。③の噛み合わせが生じる条件としては、不連続面の方向がある程度ばらついていることや $c$ 、 $\phi$ がある程度大きいことなどが必要である<sup>5)</sup>。図-6はこれら3種の噛み合わせをまとめたものである。

岩盤構造物の安定性や支保工の作用効果において、岩盤の噛み合わせや岩盤のインタクトな部分の破壊に関する問題は重要であり、今後、更に検討を進める必要があると考えられる。

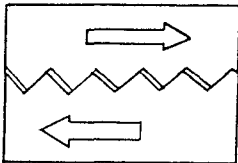
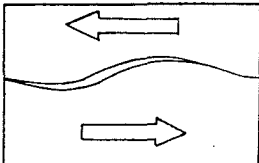
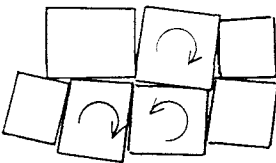
| ラフネスによる噛み合わせ                                                                                        | アンジュレーションによる噛み合わせ                                                                                   | ブロック同士の噛み合わせ                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                    |                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・不連続面の間隔の小さな凹凸による噛み合わせ。</li> <li>・一方向のみの不連続面で生じる。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・不連続面の間隔の大きな凹凸による噛み合わせ。</li> <li>・一方向のみの不連続面で生じる。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・岩盤ブロック相互の変位による噛み合わせ。</li> <li>・二方向以上の不連続面が存在する場合に生じる。</li> </ul> |

図-6 岩盤の噛み合わせ分類

## 6. まとめ

空洞掘削時の岩盤挙動特性とブロック供試体を用いた二軸せん断試験の結果より以下の結論を得た。

- ①不連続性岩盤は巨視的に見ると、不連続面の間隔よりかなり大きなブロックの集合体として挙動し、岩盤が変形する際、このブロック同士の不連続面での変位に起因する特性が強く現れる。
- ②岩盤ブロックが不連続面で変形する時、ブロックの性状や幾何学的形状によってはブロック同士の噛み合わせが生じる。
- ③岩盤ブロックの噛み合わせが生じた場合、不連続面は滑り難くなる一方、応力の集中により岩盤のインタクトな部分で破壊が生じ易くなる。
- ④空洞掘削時に周辺岩盤で見られる不規則な応力の再配分は、巨視的に見た岩盤ブロック同士が不連続面で変位する際に生じる噛み合わせによるものと考えられる。

## 7. 参考文献

- 1) 森、平川、吉田；大規模地下空洞掘削に伴う空洞側壁の鉛直方向挙動、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集（投稿予定）
- 2) 吉田、森、平川；孔内挿入型の鉛直方向相対変位測定装置の開発と原位置への適用、第6回トンネル工学研究論文・報告集，pp.275～278，1996.11
- 3) 打田、原田 他；地下発電所空洞掘削における側壁岩盤の挙動、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp316～320，1992.2
- 4) 打田、吉田 他；節理性岩盤の応力再配分に関する一考察，第30回土質工学研究発表会，pp.1195～1196，1995.7
- 5) 吉田、打田 他；節理性岩盤の変形特性に関する一考察，第31回地盤工学研究発表会，pp.1381～1382，1996.7