

空洞掘削時の岩盤挙動メカニズム[†]

吉田 次男* 大西 有三** 西山 哲**

Mechanism of Discontinuous Behavior of Rock Mass during Underground Cavern Excavation

by

Tsugio YOSHIDA^{*}, Yuzo OHNISHI^{**} and Satoshi NISHIYAMA^{**}

Various kinds of measurements were carried out during excavation of two large underground caverns to estimate rock behavior as a discontinuous material. As a result, rock behavior as a discontinuous material was estimated in detail, such as characteristics of crack propagation, displacement and stress redistribution. In particular, it was found that characteristics of displacement and stress redistribution were very remarkable in some areas and that crack propagation was also remarkable in the area. Through the measurements, it was suggested that the sliding of discontinuities were related to the discontinuous behavior. So with a simulation in which the discontinuities were modeled, the influence of the sliding of the discontinuity to crack propagation, displacement and stress redistribution is discussed.

Key words : Underground cavern, Rock mass, Field measurement, Stress redistribution, Crack propagation

1 緒 言

岩盤の力学特性は、不連続面の挙動に強く支配されることが知られている。しかしながら、不連続面の滑りや開口が岩盤の力学特性に与える影響については明確にされていないのが現状である。不連続面の挙動が岩盤の力学特性に与える影響を把握することは、岩盤構造物の設計、施工の合理化を検討する際に重要である。

関西電力(株)の奥多々良木増設発電所および大河内発電所の地下空洞掘削過程において、鉛直方向微小ひずみ計、ボアホールテレビ、地中変位計等の計測手法を複合的に組み合わせて、不連続面および岩盤挙動の詳細な計測がなされた。^{1), 2)} その結果、岩盤は連続体と仮定した場合には説明できない複雑な応力再配分特性、変位特性、亀裂進展特性を示すことが分かった。さらに、ある特定な領域において、応力再配分特性、変位特性、亀裂進展特性が特に顕著であり、その領域には顕著な滑りが生じた不連続面が存在することが分かった。

そこで、不連続面の滑りが岩盤挙動に与える影響を明確にするために、顕著な滑りが認められた不連続面をモデル化し不連続体解析を行った。その結果、不連続面の挙動が応力再配分特性、変位特性、亀裂進展特性に与える影響についての知見が得られたので報告する。

2 サイトおよび計測の概要

2・1 奥多々良木増設発電所の概要

奥多々良木増設発電所の地下空洞は、Fig. 1 に示すとおり、高さ 47m、幅 25m、長さ 130m の弾頭型であり、土被りは約 250m である。地下空洞を構成する地質は、

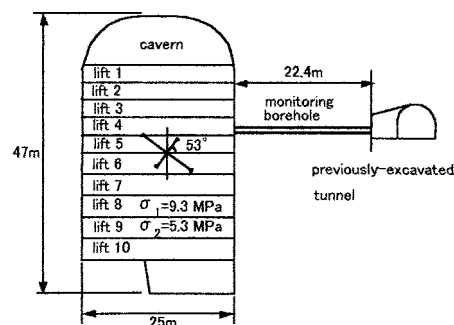


Fig. 1 Okutataragi power station.

流紋岩を主体とし、岩質は風化が少ない新鮮かつ堅硬な B ~ CH 級岩盤である。

掘削は、アーチ部を掘削した後、高さ約 3m ずつ 10 回の盤下げ掘削 (リフト 1 ~ 10) を実施した。側壁部における補強工は、吹き付けコンクリート (8cm × 3 層)、ロックボルト (長さ 5.0m, 2.25m² に 1 本) および PS アンカー (アーチ部: 長さ 10m, 定着長 4m, 側壁部: 長さ 15m, 定着長 4m) である。

計測は、地下空洞放水路側の側壁岩盤で行った。空洞から 22.4m 離れた先行トンネルより、空洞に向けて予め穿孔したボーリング孔を用いて各種計測を行った。

計測項目は、孔内観察、鉛直ひずみ測定、水平方向相対変位測定、鉛直方向相対変位である。

孔内観察は、ボアホールスキャナーを用いて、初期状態、掘削過程、掘削後におけるボーリング孔壁の不連続面の位置、走行・傾斜、開口幅を計測した。

[†] 原稿受理 平成 17 年 8 月 11 日 Received Aug. 11, 2005

* 関西電力(株)電力技術研究所 〒661-0974 尼崎市若王子, The Kansai Electric Power Co., INC., Nakoji, Amagasaki, 661-0974

** 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

鉛直ひずみ測定は、埋設型微小ひずみ計³⁾を地下空洞から2～12mの範囲のボーリング孔内にセメントミルクで埋設固定し行った。埋設ピッチは約1mであり、計測頻度は、1日1回である。

水平方向相対変位測定は、岩盤変位計（エクステンソメータ）を用いて行った。アンカー点数は8点であり、計測頻度は、1日1回である。

鉛直方向相対変位は、著者らが開発した水圧計型の装置⁴⁾を用いて行った。当装置は、先行トンネルに設置した基準水槽の水面とボーリング孔底の水頭を測定し、初期状態と各掘削過程における水頭の差から、ボーリング孔底の沈下、隆起量を評価するものである。水頭の測定は、水圧計を組み込んだ小型ゾンデを手動でボーリング孔に挿入し、孔軸方向に50cmピッチで行った。

2・2 大河内発電所の概要

大河内発電所の地下空洞は、Fig. 2に示すとおり、高さ46.6m、幅24m、長さ134.5mの弾頭型であり、土被りは約280mである。地下空洞を構成する地質は、中世代の生野層群に属するひん岩であり、岩質は新鮮で堅硬なCH級岩盤である。

掘削は、アーチ部を掘削した後、高さ約3mずつ10回の盤下げ掘削（リフト1～10）を実施した。側壁部における補強工は、吹き付けコンクリート（8cm×3層）、ロックボルト（長さ5.0m、3m²に1本）およびPSアンカー（アーチ部：長さ10m、定着長4m）である。

計測は、奥多々良木発電所と同様に、地下空洞放水路側の側壁岩盤で行い、空洞から20m離れた先行トンネルより、空洞に向け予め穿孔したボーリング孔を用いて行った。計測項目は、孔内観察、鉛直ひずみ測定等である。

3 空洞掘削時の岩盤挙動特性

3・1 奥多々良木増設発電所の岩盤挙動

(1) 亀裂進展特性

Fig. 3に、初期状態と掘削後におけるボアホールスキャナーによる孔内観察より評価した不連続面頻度分布を示す。初期状態の不連続面頻度については、密着亀裂、はく離性亀裂、鉱物脈および地質境界に分類し、ボーリング孔1m毎に存在する本数を計測した。初期状態では3.1本/mの不連続面が存在した。掘削中に変化した不連続面については、既存亀裂の開口、鉱物脈の亀裂化、新規

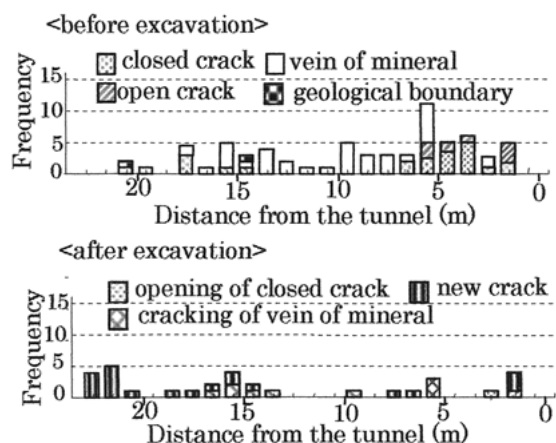


Fig. 3 Frequency distribution of discontinuities in Okutataragi power station.

亀裂に分類し、ボーリング孔1m毎に変化した不連続面本数を示す。掘削中に変化した不連続面は1.5本/mであり、変化が顕著であった領域は、空洞近傍と先行トンネルから14～17m（空洞から5.4～8.4m）の領域である。

Fig. 4に先行トンネルを基点とした初期状態と掘削後における亀裂開口幅の累計曲線を示す。初期状態では3.6mmの累計開口幅があり、掘削により新たに7.1mmの開口が発生した。亀裂開口が顕著な領域は、空洞近傍と先行トンネルから14～17m（空洞から5.4～8.4m）の領域であり、掘削時に変化が生じた亀裂の頻度が大きい領域と一致する。

(2) 鉛直応力再配分特性

Fig. 5に掘削各リフトにおける鉛直ひずみ分布を圧縮側を負として示す。計測前の孔内載荷試験により、地下空洞と先行トンネルの間の岩盤剛性はほぼ一定であることが確かめられているため、鉛直ひずみ分布は掘削における鉛直応力の再配分特性を示している。応力再配分は不連続な挙動を示し、掘削時に鉛直応力が増加した領域と逆に減少した領域が存在する。先行トンネルから15～18.5m（空洞から3.9～7.4m）では鉛直応力が増加し、空洞近傍、および先行トンネルから12～15.0m（空洞から7.4～10.4m）では鉛直応力が減少した。特に、先行トンネルから15～16m（空洞から6.4～7.4m）の領域での急激な鉛直応力の減少は、岩盤の不連続体としての挙動を顕著に示していると言え、岩盤を連続体と見なす

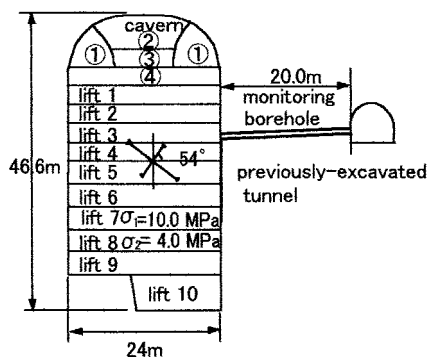


Fig. 2 Okawachi power station.

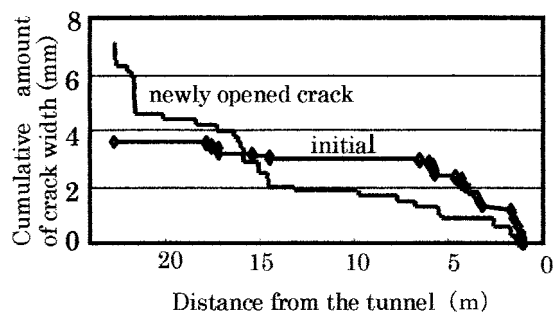


Fig. 4 Cumulative amount of crack width in Okutataragi power station.

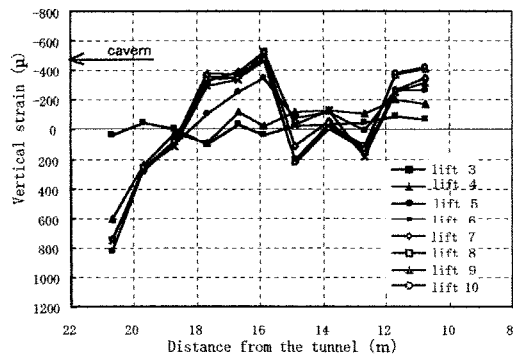


Fig. 5 Vertical strain distribution in Okutataragi power station.

と説明ができない。このような不連続な挙動は、他の地下発電所掘削時の計測データでも示されている^{5),6)}

(3) 鉛直方向相対変位特性

Fig. 6 に掘削各リフトにおける鉛直方向相対変位を沈下側を負として示す。鉛直方向相対変位は応力再配分特性と整合する挙動を示し、先行トンネルから 15.5 ~ 18.5m (空洞から 3.9 ~ 6.9m) における鉛直応力が増加した領域とほぼ整合する領域では沈下し、空洞近傍と先行トンネルから 12 ~ 15.5m (空洞から 6.9 ~ 10.4m) において鉛直応力が減少した領域では隆起した。先行トンネルから 15 ~ 16m (空洞から 6.4 ~ 7.4m) の領域での特に顕著な変位の再配分が生じた。

(4) 水平方向総体変位特性

Fig. 7 に掘削各リフトにおける水平方向相対変位を示す。変位が大きい領域は空洞近傍と先行トンネルから 14 ~ 16m (空洞から 6.4 ~ 8.4m) である。空洞近傍は、亀裂進展が顕著で、鉛直応力の減少に伴い岩盤が隆起した領域である。先行トンネルから 14 ~ 16m (空洞から 6.4 ~ 8.4m) も亀裂進展が顕著領域であり、鉛直応力、鉛直方向相対変位に大きな不連続性が認められた領域に対応する。

(5) 岩盤挙動の不連続性

各計測結果より、岩盤の不連続体としての挙動が顕著であったのは、空洞近傍および先行トンネルから 15 ~ 16m (空洞から 6.4 ~ 7.4m) の領域である。空洞近傍は、掘削による応力開放に伴う岩盤隆起とはらみだし、およびそれらに伴う亀裂の進展が顕著に生じた領域である。

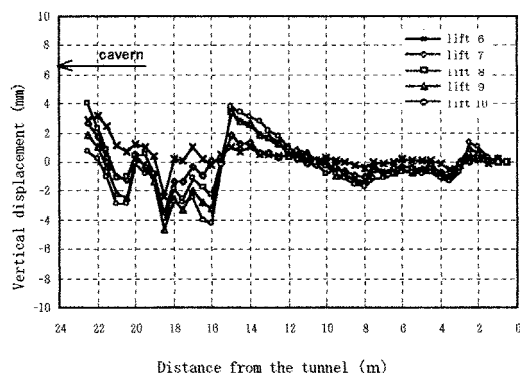


Fig. 6 Relative vertical displacement in Okutataragi power station.

一方、先行トンネルから 15 ~ 16m (空洞から 6.4 ~ 7.4m) の領域において、空洞からトンネル方向において急激な鉛直応力の減少とそれに伴う岩盤の隆起が発生し、亀裂の進展も顕著である。岩盤を連続体と考えるとこれらの挙動は説明できないため、この領域の不連続面の変化を詳細に検討した。その結果、Fig. 8 に示すとおり、領域内 (空洞から 6.6m) に滑りが生じたと評価できる不連続面が存在することが確認された。鉛直応力や鉛直方向相対変位はこの不連続面の近傍で顕著に不連続な挙動を示している。

Fig. 9 は、滑りが生じた不連続面の掘削前と掘削後のボアホールスキャナー画像を示す。当ボーリング孔は、掘削前に、微小ひずみ計をセメントミルクで埋設固定し、掘削後、先行トンネル側からリボーリングを行った。掘削後の画像で、不連続面より空洞側のボーリング孔底にグラウトの付着が認められるとともに、鉱物脈が亀裂化したことから、不連続面で鉛直方向に滑りが生じたことが分かる。

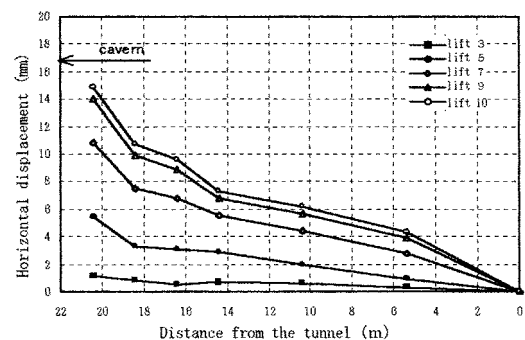


Fig. 7 Relative horizontal displacement in Okutataragi power station.

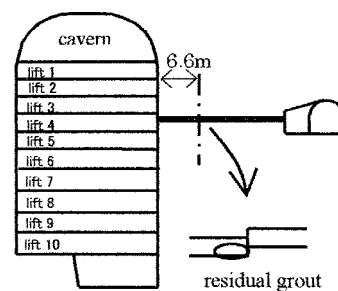


Fig. 8 Sliding of discontinuity.

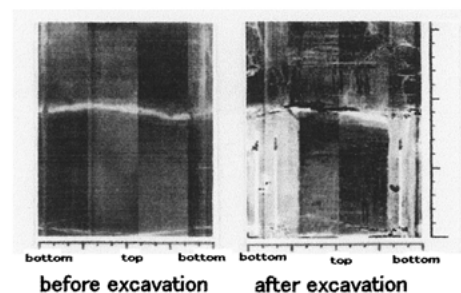


Fig. 9 Projection image of borehole.

3・2 大河内発電所の岩盤挙動

(1) 亀裂進展特性

Fig. 10 にボアホールテレビによる孔内観察より評価した不連続面頻度分布を示す。初期状態では 10.0 本/m の不連続面が存在した。掘削中に変化した不連続面は 5.3 本/m であり、変化が顕著であった領域は、空洞近傍、先行トンネルから 14 ~ 16m (空洞から 4.0 ~ 6.0m) および、9 ~ 12m (空洞から 8.0 ~ 11.0m) の領域である。

Fig. 11 に、初期状態と掘削後における先行トンネルを基点とした亀裂開口幅の累計曲線を示す。初期状態では 32.3mm の累計開口幅があり、掘削により新たに 54.8mm の開口が発生した。先行トンネルから 14.1m (空洞から 5.9m) と 10.5m (空洞から 9.5m) の位置に掘削時に滑りが生じ大きく開口した不連続面が存在し、掘削時の開口幅増分は、それぞれ 8.5mm, 5.8mm である。また、これら滑りが発生した不連続面は亀裂進展が顕著な領域内に存在する。

(2) 鉛直応力再配分特性

Fig. 12 に掘削各リフトにおける鉛直ひずみ分布 (鉛直応力の再配分) を示す。奥多々良木増設発電所と同様に、応力再配分は不連続な挙動を示し、空洞近傍では、鉛直応力が減少し、先行トンネルから 13 ~ 15.5m (空洞から 4.5 ~ 7.0m) および、7.5 ~ 12.0m (空洞から 8.0 ~ 12.5m) の領域で鉛直応力の増加が大きい。

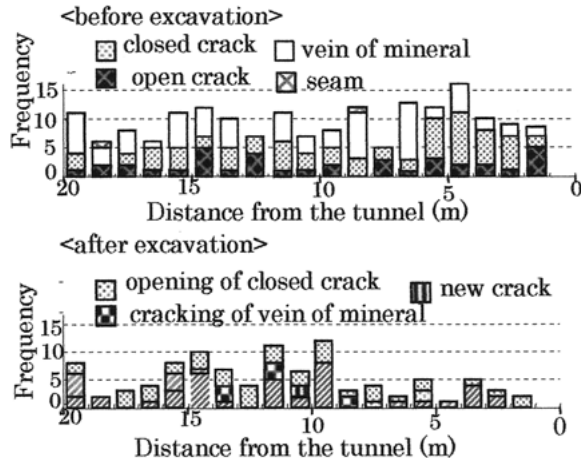


Fig. 10 Frequency distribution of discontinuities in Okawachi power station.

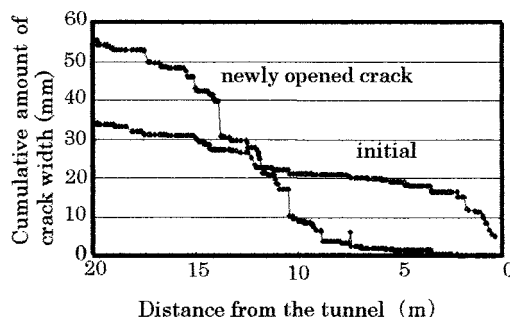


Fig. 11 Cumulative amount of crack width in Okawachi power station.

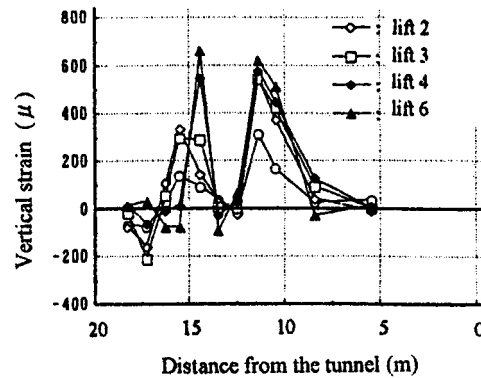


Fig. 12 Vertical strain distribution in Okawachi power station.

(3) 岩盤挙動の不連続性

空洞近傍においては、奥多々良木増設発電所と同様に、掘削による応力開放に伴い不連続な挙動が生じ、鉛直応力の減少と亀裂の進展が見られた。

応力再配分特性も奥多々良木増設発電所と同様に、滑りが生じた不連続面の近傍で応力の大きな変化が見られ、その結果、掘削に伴い鉛直応力が大きく増加した領域とほとんど増加しない領域が生じた。

亀裂進展についても、奥多々良木増設発電所と同様であり、不連続面の滑りが発生し、応力再配分特性の顕著な領域で亀裂の進展も顕著であった。

4 シミュレーションによる岩盤挙動メカニズム

4・1 奥多々良木増設発電所

空洞掘削時の岩盤挙動計測より、奥多々良木増設発電所、大河内発電所の両発電所において、滑りが生じた不連続面の近傍で鉛直応力に大きな再配分が発生した。奥多々良木増設発電所においては、鉛直応力の再配分に伴う鉛直変位の再配分も確認された。そこで、不連続面の滑りに伴う応力、変位再配分メカニズムをさらに検討するために個別要素法 (UDEEC) による掘削時の挙動シミュレーションを行った。

対象とする不連続面は、空洞から 6.6m の位置にあり掘削により滑りが認められた不連続面のみで、実質部は弾性体として有限差分メッシュにより分割してシミュレーションした。ボアホールスキャナーによる観察により不連続面は、ほぼ鉛直であることが確認されたため、Fig. 13 に示すモデルでシミュレーションした。なお、不連続面

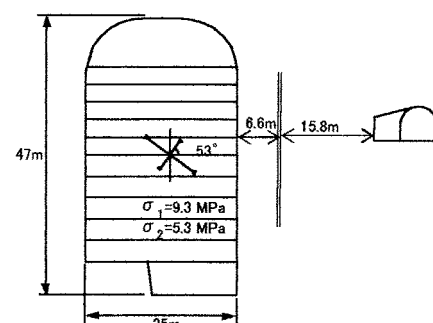


Fig. 13 Simulation model (Okutataragi).

の長さを正確に評価することが困難であるため、本シミュレーションでは不連続面の滑りによる岩盤挙動メカニズムの定性的評価を目的とした。入力物性値は、Table 1 に示すとおりであり、不連続面の物性は一面せん断試験より評価し、実質部の物性は原位置変形試験により評価した。初期地圧は Fig. 13 に示すとおりであり、オーバーコアリング法による値を用いた。

Fig. 14 に鉛直応力（鉛直ひずみ）のシミュレーション結果を示す。現場で計測された挙動と同様に、不連続面近傍で顕著な応力再配分が発生し、先行トンネル側は、岩盤が受け持つ鉛直応力が急激に減少する。また、鉛直応力が減少した後、空洞から離れた領域では、岩盤が受け持つ鉛直応力が増加する特性が見られ現場の挙動と整合する。

Fig. 15 は、鉛直方向相対変位のシミュレーション結果を示す。現場挙動と同様に、不連続面近傍で不連続な挙動を示し、不連続面の空洞側で沈下、先行トンネル側

Table 1 Input parameter (Okutataragi).

[Discontinuity]	Parameter
Modulus of shearing stiffness	490 MPa
Modulus of compressive stiffness	4900 MPa
Cohesion	0.01 MPa
Angle of internal friction	26°
[Intact]	
Elastic modulus	16000 MPa
Poisson's ratio	0.25

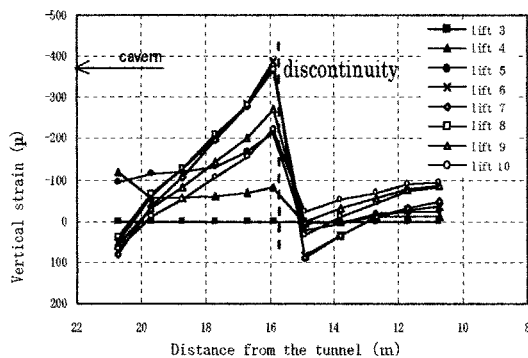


Fig. 14 Vertical strain distribution in Okutataragi power station (simulation).

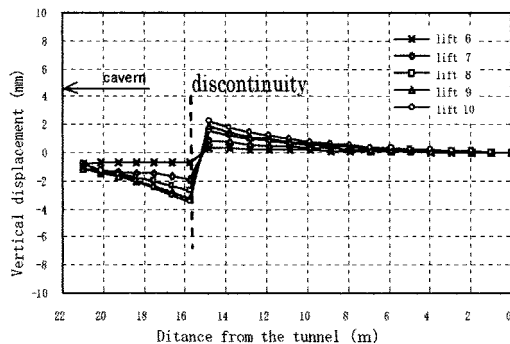


Fig. 15 Relative vertical displacement in Okutataragi power station (simulation).

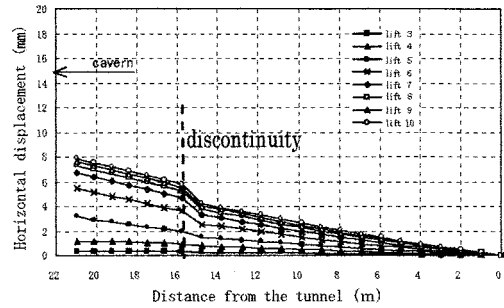


Fig. 16 Relative horizontal displacement in Okutataragi power station (simulation).

で隆起する挙動が確認できた。Fig. 16 は、水平方向相対変位のシミュレーション結果であり、現場の挙動と同様に不連続面の近傍で変位が大きい。

滑りが生じた不連続面はほぼ鉛直である。一方、空洞側壁岩盤の応力は、掘削に伴い鉛直方向の平均応力は増加し、水平方向の応力は開放される。このため、滑りが生じやすい不連続面の方向と、掘削時の応力変化の方向との関連性が示唆される。

4・2 大河内発電所

奥多々良木増設発電所と同様に、個別要素法 (UDEC) によりシミュレーションを行った。モデル化した不連続面は、空洞から 5.9m と 9.5m の位置で掘削により滑りが認められた 2 面の不連続面であり、実質部は弾性体として有限差分メッシュにより分割してシミュレーションを行った。ボアホールテレビによる観察により不連続面は、ほぼ鉛直であることが確認されたため、Fig. 17 に示すモデルでシミュレーションした。入力物性値は、Table 2 に示すとおりであり、不連続面の物性は一面せん断試験より評価し、実質部の物性は原位置変形試験より評価し

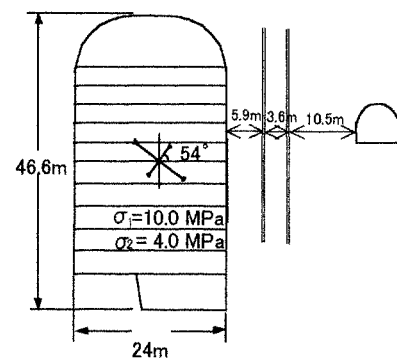


Fig. 17 Simulation model (Okawachi).

Table 2 Input parameter (Okawachi).

[Discontinuity]	Parameter
Modulus of shearing stiffness	83 MPa
Modulus of compressive stiffness	29430 MPa
Cohesion	0.01 MPa
Angle of internal friction	30°
[Intact]	
Elastic modulus	13000 MPa
Poisson's ratio	0.25

た、初期地圧は Fig. 13 に示すとおりであり、オーバーコアリング法により評価した値を用いた。

Fig. 18 に鉛直応力（鉛直ひずみ）のシミュレーション結果を示す。現場の挙動と同様に、2 面の不連続面近傍で顕著な応力再配分が発生し、先行トンネル側で岩盤が受け持つ鉛直応力が急激に減少し、現場挙動と整合する。

滑りが生じた不連続面は、ほぼ鉛直であり、奥多々良木増設発電所と同様に、掘削時の応力変化の方向との関連性が示唆される。

4・3 岩盤挙動メカニズムの考察

現場挙動とシミュレーションから不連続面の滑りが、岩盤の応力再配分特性、亀裂進展特性、変位特性に大きな影響を与えると評価できる。Fig. 19, Fig. 20 にそれぞれ、奥多々良木増設発電所、大河内発電所における岩盤挙動メカニズムを示す。不連続面の滑りにより、先行トンネル側の領域では、岩盤が受け持つ鉛直応力が急減し、それに伴い岩盤が隆起する。逆に、不連続面の空洞側の領域は岩盤が受け持つ鉛直応力が顕著に増加し、それに伴い岩盤は沈下する。また、不連続面の影響で応力再配分特性が顕著な領域では、亀裂の進展が顕著である。1 面の不連続面で顕著な滑りが発生した奥多々良木増設発電所においても、2 面の不連続面で顕著な滑りが発生した大

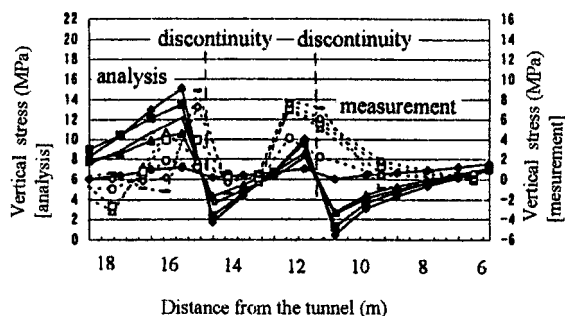


Fig. 18 Vertical strain distribution in Okawachi power station (simulation).

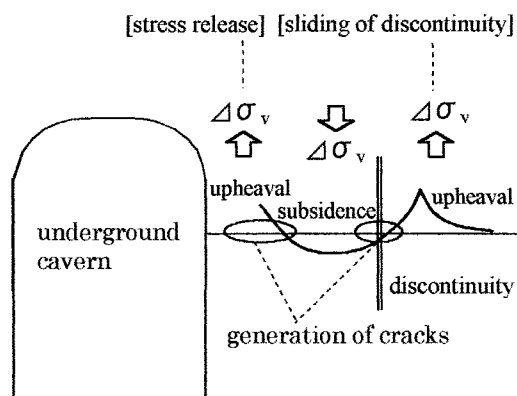


Fig. 19 Mechanism of discontinuous behavior in Okutataragi power station.

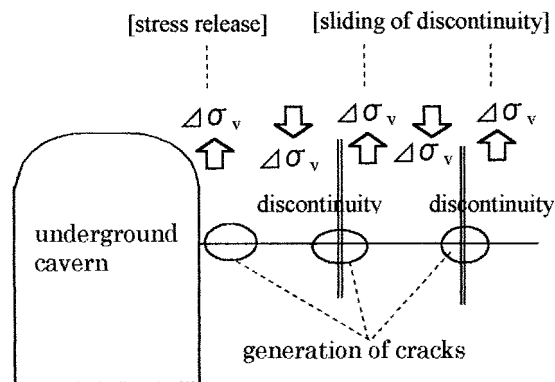


Fig. 20 Mechanism of discontinuous behavior in Okawachi power station.

河内発電所においても、不連続面の滑りが岩盤の応力再配分特性、亀裂進展特性に与える影響は同様である。

5 おわりに

地下空洞掘削過程に側壁岩盤において、各種計測を行い不連続面挙動、応力再配分特性、変位特性を把握するとともに、不連続体解析によりシミュレーションを行い、挙動メカニズムの検討を行った。その結果、不連続面の滑りが、応力再配分特性、亀裂進展特性などに大きな影響を及ぼすことが分かった。今後は、これらの結果を基に不連続体解析手法による設計法の高度化を検討する予定である。

参考文献

- 1) Y. Uchida, T. Yoshida, M. Urayama and Y. Hirakawa, "Rock Behavior Observed by Means of Borehole Television Camera during a Large Underground Cavern Excavation", Journal of Geotechnical Engineering, No.517, pp.33-41 (1995).
- 2) S. Mori, Y. Hirakawa and T. Yoshida, "Vertical direction behavior of large rock cavern side wall due to excavation" Proceedings of the 28 the Symposium on Rock Mechanics, pp.48-52 (1997).
- 3) T. Ishida, T. Kanagawa, A. Yada and M. Tanaka, "Proposing of a New Method to Detect Loosened Regions Around a Rock Chamber, Taking Note of Stress Redistribution due to Excavation", Proceedings of the 23 the Symposium on Rock Mechanics, pp.227-231 (1991).
- 4) T. Yoshida, S. Mori and Y. Hirakawa, "Development of vertical direction relative displacement measurement device and its application to a field", Proceedings of Tunnel Engineering, VOL.6, pp.275-278 (1996).
- 5) T. Maejima and A. Tomita, "Rock Behavior of Large Underground Rock Cavern during Excavation", Proceedings of the 24 the Symposium on Rock Mechanics, pp.326-330 (1992).