

(71) 大規模地下空洞掘削過程における不連続性岩盤の挙動

関西電力(株) 正会員 ○打田 靖夫, 原田 俊之, 前田 稔
(株)ニュージェック 正会員 浦山 克, 平川 芳明

Behavior of discontinuous rock during large underground cavern excavation

Yasuo UCHITA, Toshiyuki HARADA, Minoru MAEDA, The Kansai Electric Power co., Inc.
Masaru URAYAMA, Yoshiaki HIRAKAWA, NEWJEC Inc.

Abstract

In order to excavate a large underground cavern, it is important to know the development of loosening region around the cavern during excavation and to design an appropriate support system. The authors made clear the actual behavior of discontinuous rock through measurement system during excavation of a large underground cavern. Based upon measurements, we made clear that the loosening region was propagating as the excavation was proceeding. Designed support system for side walls was effective to support the loosening zone. Furthermore, as for the monitoring of rock behavior during excavation, it was made clear that an observation of a borehole through BTV and measuring of a vertical strain were extremely effective.

1. はじめに

近年、エネルギー施設、貯蔵・貯留施設等の地下立地に対する社会的ニーズが高まってきている。しかし、我が国の岩盤は節理等の不連続面に富むため、地下空洞掘削時には、従来の連続体解析手法では説明困難な岩盤挙動がしばしば見うけられ、不連続性岩盤の挙動が十分解明されているとはいえない。

そこで著者らは、不連続性岩盤の挙動の実態を把握し、将来の設計手法の改善に資することを目的として、大規模地下空洞掘削時に、BTV（ボアホールテレビジョン）による孔内観察、岩盤内鉛直ひずみ測定、水平変位測定（スライディング・マイクロメータ）、AE（Acoustic Emission）測定および孔間弾性波速度測定を実施した。

測定結果の概要については既に報告したが^{1)・2)}、本論文では測定結果から新たに推定された岩盤の変形挙動、ゆるみ領域の進展状況ならびに支保工の効果について報告する。

2. 測定概要

今回、測定を実施した地下空洞は、幅24m、高さ46.6m、長さ134.5mの我が国初の弾頭型の大規模地下発電所³⁾であり、かぶり厚約280mの地下深部に位置する。この地下空洞には、図-1に示すように本体空洞から約20m離れた位置に併設トンネルが設けられている。今回の各種測定は、この併設トンネルより本体空洞に向けて穿孔した6本のボーリング孔を利用して実施した。ボーリング孔の位置を図-1および図-2に示す。なお、当地点の岩盤は、電研式岩盤分類でC_H級のひん岩である。

3. 掘削に伴う岩盤挙動の推定

3.1 岩盤の変形挙動

図-3(a)は、本体空洞掘削前にBTVによって観察された既存の亀裂や方解石脈をシュミットネット

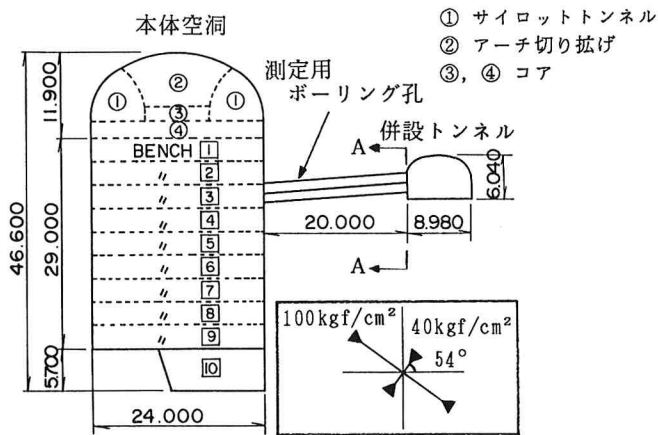


図-1 空洞横断形状と初期応力状態

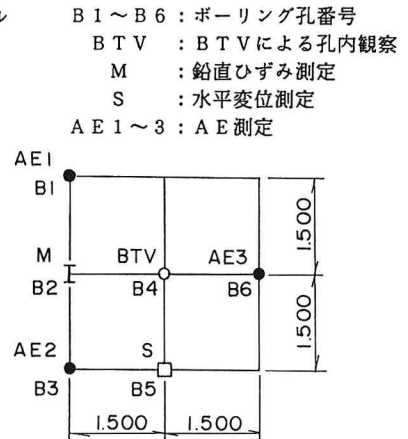


図-2 ボーリング孔正面図 (A-A断面)

の下半球投影コンター図として表示したものである。同様に、図-3 (b)は、本体空洞の掘削中に発生した新規の亀裂ならびに開口幅が変化した亀裂のシュミットネット下半球投影コンター図である。図-4は、掘削の進行に伴って発生した新規の亀裂や開口幅が変化した亀裂の深度方向の頻度分布であり、空洞横断面内の見かけの傾斜角も表示している。

図-3 (a)と図-3 (b)を比較すると、両者の分布は非常によく一致していることがわかる。これは、掘削に伴う岩盤亀裂の進展が、既存の亀裂やそれに平行な潜在的弱層面に大きく依存することを示すものであると考えられる。また、図-4より、亀裂の進展は大局的には掘削の進行に伴って徐々に空洞側壁から深部に及んでいることがうかがえる。さらに、空洞側壁に対して、60~90°の角度で流れ目となる亀裂群 (C群) や60~90°の角度でさし目となる亀裂群 (D群) が多く進展していることがわかる。

図-5は、図-3 (a), (b)で高い極密度の観察された亀裂方向を空洞側壁岩盤中の断面で示した模式図である。この図を用いて上述の測定結果を総合すると、空洞側壁岩盤の変形挙動はマクロ的には次のように推定される。すなわち、盤下げ掘削の進行に伴って、空洞側壁近傍の岩盤内の応力状態は図-1に示した初期応力状態から徐々に鉛直方向に一軸化し、せん断角の方向にある既存の亀裂や潜在的な弱層面のうちC群の不連続面がせん断変形し、これと共役なD群の不連続面が、はく離を生じたものと考えられる。

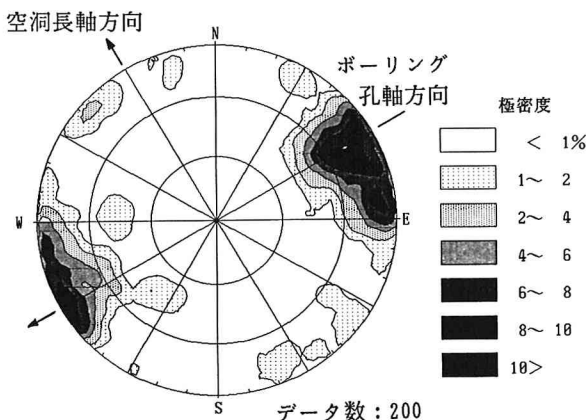


図-3 (a) 初期状態の不連続面の極コンター

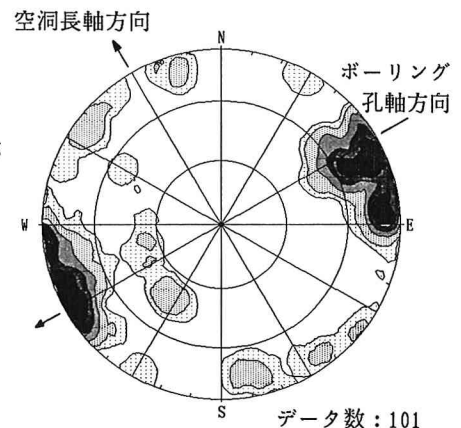


図-3 (b) 掘削中に進展した不連続面の極コンター

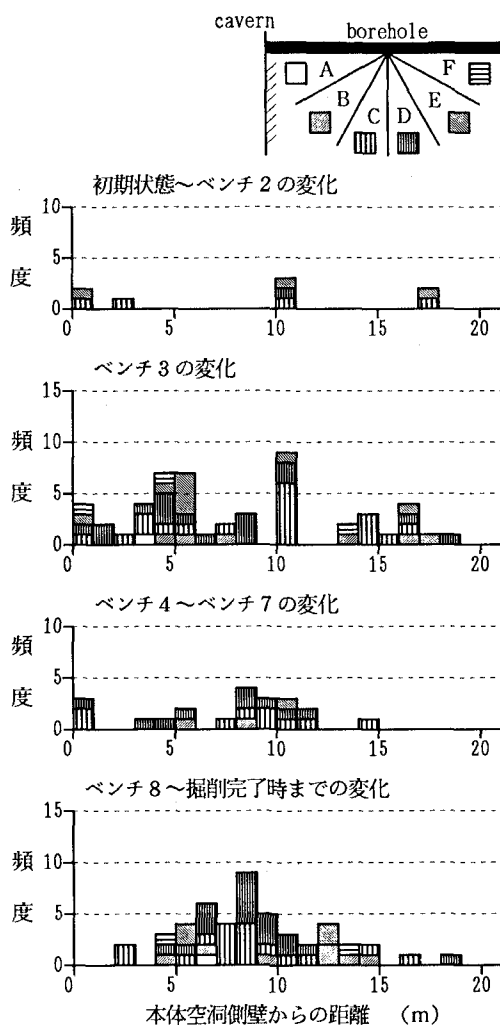


図-4 掘削に伴う亀裂の変化

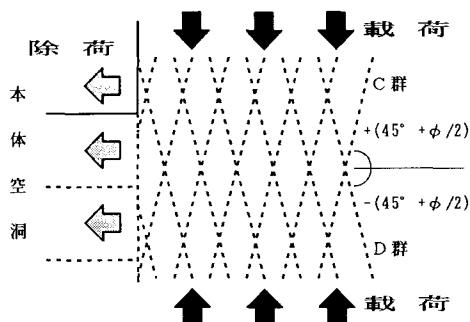


図-5 岩盤挙動の模式図

3.2 ゆるみ領域の進展状況

図-6は、図-2に示したB4孔を発振孔とし、B3孔を受振孔とした時の孔間弾性波速度測定の結果を、ジョトモグラフィ手法により解析した結果である。同図より、盤下げ掘削の進行に伴い、大局的には空洞側壁から岩盤深部に向って徐々に弾性波速度が低下していく傾向がみられる。この傾向は、図-4に示した亀裂の進展状況の傾向と一致している。このことから、掘削により亀裂が進展し、結果として弾性波速度が低下し、マクロ的な岩盤物性も低減したものと考えられる。

図-7は、掘削の進行に伴う岩盤内鉛直ひずみ分布の変化を示したものである。鉛直ひずみの分布に着目すると、アーチ切り掘削を完了した時点で既に、側壁から深度約4.5mの地点と約8.5mの地点で圧縮側のピークを示す傾向が現われ、この傾向は掘削の進行に伴って徐々に顕著になっている。ただし、深度4.5mのピークはベンチ3掘削時以降は消滅し、それより1m奥の深度5.5mにピークが移動している。このピークの移動は測定箇所に対する空洞形状の変化による可能性もあるが、ベンチ3掘削時には、深度約5mの位置でA-Eが多く発生していること²⁾や、側壁から深度6mまでの範囲で亀裂が進展していること(図-4)などを勘案すると、このピークの移動は、ベンチ3掘削に伴う新たな応力増分に対して深度4.5m付近の岩盤が耐えられなくなり、深度5.5m以深の岩盤で応力増分を負担するようになったことを示すものであると考えられる。ベンチ4以降の掘削においては、深度5.5mと8.5mの地点ではA-Eの発生²⁾や亀裂の進展は見られるものの、鉛直ひずみは圧縮側へ増加しているため、掘削に伴う応力増分を負担しているものと考えられる。

以上のことから、掘削の進行に伴って亀裂が進展したため、側壁岩盤のマクロ的な物性は低下したものの、“ゆるみ領域”を石田らが指摘するように“新たな応力増分を負担できない領域”⁴⁾と考える⁴⁾と、その領域は、側壁から約5mまでの範囲であると推定される。

なお、図-7には、事前解析(電研式非線形粘弾性解析)で得られた岩盤内ひずみも併記したが、解析ひずみと実測ひずみとは、その傾向が大きく異なることがわかる。

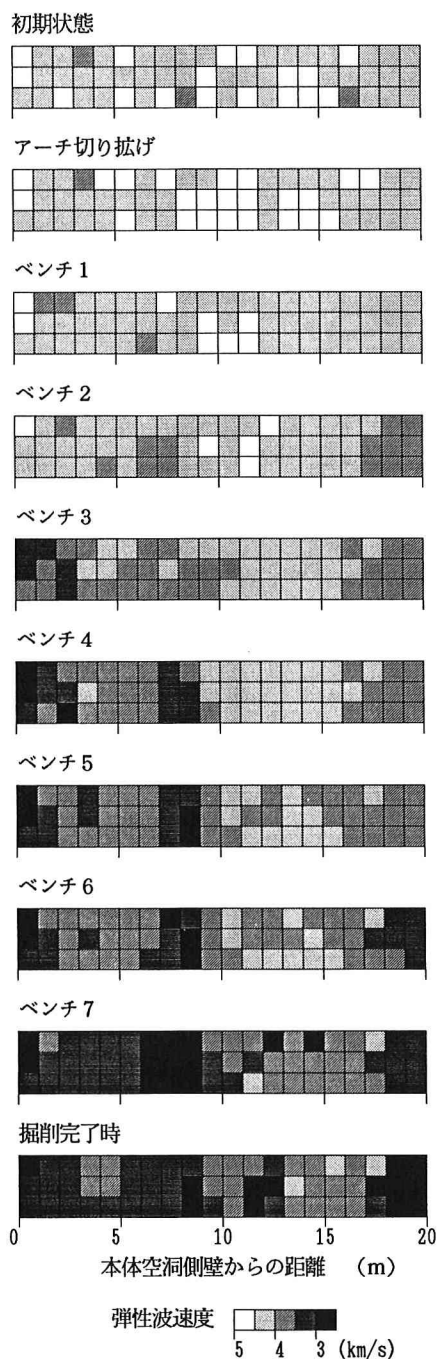


図-6 弾性波速度の変化

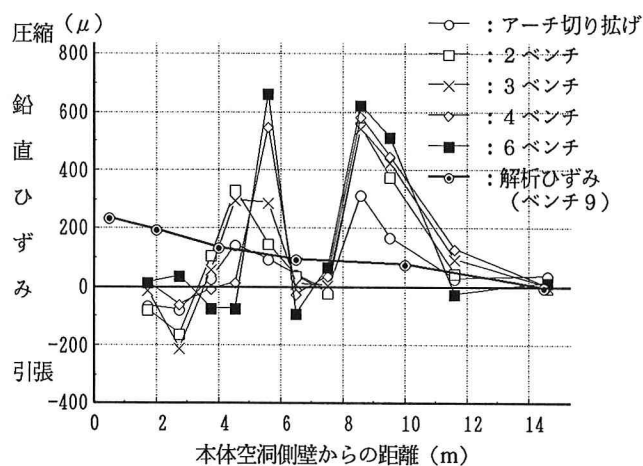


図-7 鉛直ひずみの変化

3.3 支保工の効果

図-8には、鉛直ひずみ計No. M1～M11によって測定した空洞掘削過程における鉛直ひずみの変化を示す。この図中には、各掘削ベンチの掘削数標高と計器埋設標高の位置関係およびロックボルトとPS工の施工長を併記した。

埋設ひずみ計M1およびM2は、ベンチ2の掘削後までに圧縮力の解放による引張ひずみの増加傾向を示した。この傾向から、これらの位置における引張ひずみは、ベンチ3の掘削により側方拘束が大きく減少するので、さらに増加すると推測された。しかし、これらの鉛直ひずみは、ロックボルトが施工されたベンチ3から急激に圧縮側へ転じ、ベンチ5以降は若干の圧縮ひずみを示した状態で安定した。

また、M3、M4、M6は、ベンチ2掘削完了時までは圧縮状態にあったが、その後の掘削で急激に圧縮ひずみが解放され、引張側に転じている。しかし、PS工が設置されたベンチ5以降では新たな引張ひずみの増加はほとんどなくなっている。

このような結果から、ロックボルトやPS工は、掘削の進行に伴う新たな応力増分に対する岩盤の耐力を増加する効果や岩盤の耐力低下を抑制する効果を果たしていると考えられる。

4. まとめ

大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動について総合的に分析した結果、次のことが明らかとなった。

①空洞側壁の大局的な変形挙動として、盤下げ掘削に伴って、側壁近傍の岩盤内の応力状態が鉛直方向に一軸化し、せん断角の方向にある既存の亀裂群や潜在的な弱層面群に沿う変位やはく離を生じたことが考えられた。このことから、不連続性岩盤の変形挙動は、岩盤内の応力状態と卓越する不連続面群の方向に大きく支配されると考えられる。

②盤下げ掘削に伴って亀裂が進展するため、空洞側壁の岩盤物性は徐々に低下したが、ゆるみ領域（新たな応力増分を負担できない領域）は空洞側壁から約5 mの範囲であると推定された。

③岩盤内鉛直ひずみの経時的な傾向から、ロックボルトやP S工は、掘削の進行に伴う新たな応力増分に対する岩盤の耐力を増加する効果や岩盤の耐力低下を抑制する効果を果たしていると考えられた。

5. あとがき

大規模地下空洞掘削時に各種測定を実施することにより、岩盤の大局的な変形挙動、ゆるみ領域の進展状況および支保工の効果を明らかにした。また、岩盤挙動を推定するうえで、B T Vによる孔内観察と岩盤内鉛直ひずみ測定は極めて有効であった。

今後は当地点の岩盤の変形量や微小の破壊モードを定量的に解明していく予定である。

参考文献

- 1) 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, pp. 316~320, 1992
- 2) 中村・浦山 他 ; 孔内亀裂の進展から見た大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 321~325, 1992
- 3) 原田・片山・矢田 ; 大河内水力発電所地下空洞の設計と施工, 電力土木, No. 230, pp. 46~57, 1991
- 4) 石田・金川 他 ; 空洞掘削時の応力再配置に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 227~231, 1990

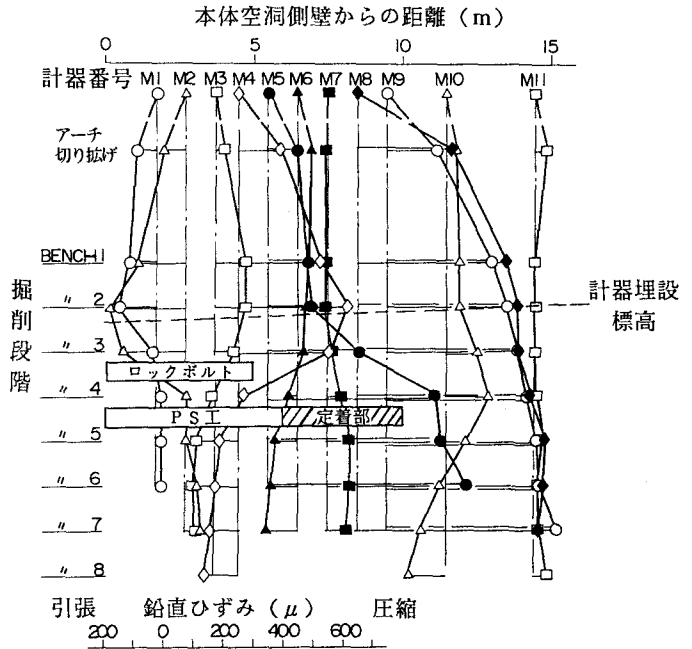


図-8 掘削段階と鉛直ひずみの関係