地下空洞掘削時の岩盤損傷特性

吉田 次男1*・大西 有三²・西山 哲²

¹関西電力株式会社 電力技術研究所(〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3丁目11-20) ²京都大学大学院 工学系研究科都市環境工学専攻(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂) *E-mail: yoshida.tsugio@e3.kepco.co.jp

不連続面特性が異なる2地点の地下空洞において,掘削時における亀裂進展特性,応力再配分特性など を現場計測により把握するとともに,計測結果を基に岩盤の損傷特性について考察を行った.その結果, 岩盤が損傷を受ける領域は,空洞壁面近傍の応力解放に伴い損傷を受けるゆるみ領域の他に,アーチアク ション形成に伴う応力再配分により損傷を受ける損傷領域が存在することが新たに分かった.アーチアク ション形成に伴う損傷領域は,ゆるみ領域と併行して損傷が進展するととに,変形係数の低下が認めらる ことが分かった.特に,岩盤の不連続面頻度が高い場合,損傷領域の損傷は,ゆるみ領域の損傷より顕著 であり,ひずみが限界ひずみを越え,地下空洞の不安定化をもたらすことが分かった.

Key Words: underground cavern, excavation, crack, arch action, damage

1. はじめに

岩盤内にトンネルや地下空洞を掘削する際には、岩盤 内にアーチアクションが形成され、岩盤自体がトンネル や地下空洞の安定性を高めるメカニズムが生じる.この アーチアクションをうまく形成させることで、支保工の 効果的な設計を行う手法がNATM工法である.近年、地下 空洞やトンネルなどは、NATM工法で行われることが多い. しかしながら、アーチアクション形成に伴う岩盤の損傷 進展特性や初期の不連続面特性が損傷進展特性に与える 影響については、明らかにされていないのが現状である.

アーチアクション領域の損傷は、地下空洞やトンネル の安定性に大きな影響を及ぼすため、掘削時の損傷進展 特性を把握することは、支保工設計の合理化や施工時の 安全性向上に大いに貢献する.

そこで、関西電力㈱の奥多々良木増設発電所と大河内 発電所の地下空洞掘削過程において、種々の計測を行い、 亀裂進展特性、変位特性、応力再配分特性などを把握す るとともに、データ分析を行い、アーチアクション形成 時の応力再配分に伴う岩盤損傷特性や岩盤の損傷が地下 空洞の安定性に与える影響を考察した. さらに、両サイ トの計測データの比較により、初期の不連続面特性が損 傷進展特性に与える影響について考察を行った.

また,現場計測で得られた損傷進展特性を基に,地山 強度を最大限に発揮させ,アーチアクションをうまく形 成させるための支保工の役割について考察を行った.

2. 現場計測の概要

(1) 大河内発電所の概要

大河内発電所の地下空洞は、図-1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C_H級岩盤であり、岩石の一軸圧縮強度の平均は 237MPa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(8 cm×3層)、 ロックボルト(長さ 5.0m、3 m² に1本)およびPS アンカー(アーチ部:長さ 10m、定着長4 m)である.

計測は、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複数のボーリング孔を用いて行った.掘削時の亀裂 進展特性や応力再配分特性を把握するために、施工管理のための計測の他に、孔内観察、鉛直ひずみ測定を行った^{1),2}.

孔内観察は、ボアホールテレビ(BTV)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.計測 データを基に亀裂進展特性の評価を行った.

鉛直ひずみ測定は、埋設型微小ひずみ計を地下空洞から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.



図-1 大河内発電所計測位置図

(2) 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、**図**-2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、 流紋岩を主体とし、岩質は風化が少ない新鮮かつ堅硬な $B \sim C_{H}$ 級岩盤であり、岩石の一軸圧縮強度の平均は 187MPa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、大河内発電所と同様に、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、亀裂進展特性や応力 再配分特性を把握するために、施工管理のための計測の 他に、孔内観察、鉛直ひずみ測定、岩盤変形係数評価を 行った^{2),3}.

孔内観察は、ボアホールスキャナー(BSS)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.

鉛直ひずみ測定は、埋設型微小ひずみ計を地下空洞から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.



図−2 奥多々良木増設発電所計測位置図

岩盤変形係数は、孔内載荷試験(KKT)により、掘 削前に3孔で計測を行い、掘削後に1孔で計測を行った. 計測ピッチは1mである⁴.

3. 大河内発電所における計測結果

(1) 初期から掘削完了時の挙動

図-3にボアホールテレビによる孔内観察より評価した、ボーリング孔1mあたりの掘削中に変化した不連続 面の頻度分布を示す. 掘削中に変化した不連続面は 5.3 本/mである. その内訳は既存亀裂の開口が 38%、鉱物 脈の亀裂化が 23%、新規亀裂が 39%である. 変化が顕 著であった領域は、空洞壁面から0~1mの領域および 空洞壁面から4~12mの領域である.

図-4に, 掘削中に増加した亀裂開口幅の累計曲線を 先行トンネルを基点として示す. 掘削により新たに 54.8mmの開口が発生した. 亀裂開口幅増分が顕著であ ったのは, 空洞壁面から4~12mの領域であり, 累計 41mmの開口幅の増分があった. 亀裂開口幅増分が顕著 であった領域は,変化した亀裂頻度が顕著であった領域 と整合する.

図−5は、掘削各リフトにおける圧縮側を負とした鉛 直ひずみ分布を示す.鉛直ひずみは、微小ひずみ計をセ メントミルクで岩盤と一体化して計測したため、岩石の 弾性係数を乗じることで応力変化の分布を示す.

鉛直応力が解放される領域は、リフト3では、空洞壁 面から3.8m程度の領域、リフト6では、空洞壁面から 4.5m程度の領域であり、図-3や図-4で示した掘削中 に開口幅増分や変化した亀裂頻度が顕著であった領域

(空洞壁面から4~12m)は、空洞掘削により鉛直応力が増加した領域である.



図-3 掘削時に変化が生じた亀裂の頻度(大河内発電所)



図-4 掘削による亀裂開口幅の累積曲線(大河内発電所)



降日5 始直いりみ分布(人间内発電用

(2) 各掘削ステップにおける挙動

亀裂進展が顕著であった領域は、地下空洞掘削時に鉛 直応力が増加した領域である.これは、従来考えられて いたように、応力解放により亀裂が進展する(ゆるみ領 域の進展)特性とは異なる.そこで、応力再配分特性と 亀裂進展特性の詳細な考察を行うために、各掘削ステッ プ毎の亀裂進展特性を検討した.

a) アーチ切拡げ~リフト3掘削

図-6にアーチ切拡げからリフト3掘削において変化 した亀裂の頻度分布を示す.図から亀裂変化が顕著であ った領域は、空洞壁面から0~1mの領域、4~6mの 領域および 10~11mの領域である.掘削により変化し た亀裂の本数は、それぞれ6本、14本、12本である.

図−5から、アーチ切拡げからリフト3掘削において 鉛直応力が解放された領域は、おおむね壁面から 3.8m の領域と評価できる. そのため、鉛直応力が解放された 領域よりも、鉛直応力が増加した領域での亀裂変化が顕 著である. また、最も亀裂の変化が顕著な領域は、空洞 壁面から3~6mの領域である.



図-6 掘削時に変化した亀裂頻度(アーチ切拡げ~リフト3)







図−8 掘削時に変化した亀裂頻度(リフト4~リフト7)



図-9 亀裂進展領域(リフト4~リフト7)

図−7に, 亀裂変化が顕著であった領域と鉛直応力解 放領域境界線の位置関係を示す.

b) リフト4~リフト7掘削

図-8にリフト4からリフト7掘削において変化した 亀裂の頻度分布を示す. 亀裂変化が最も顕著であったの は,空洞壁面から8~12mの領域であり,12本の亀裂 変化が生じた.空洞壁面から0~1m区間,5~6mで 変化した亀裂は,それぞれ3本,2本と少ない.アーチ 切拡げから3リフト掘削時と比較すると,亀裂の変化が 顕著な領域は,壁面から離れた領域に移った.図-5か ら,リフト4からリフト7掘削において鉛直応力が解放 された領域は,おおむね壁面から4.5mの領域と評価で きる.そのため,アーチ切拡げからリフト3掘削時と同 様に,顕著な亀裂の変化が生じた領域は,鉛直応力が増 加した領域である.図-9に,亀裂変化が顕著であった 領域と鉛直応力解放領域境界線の位置関係を示す.

c) 8リフト~掘削完了

図-10 にリフト8から掘削完了時において変化した亀 裂の頻度分布を示す. 亀裂変化が最も顕著であったのは, 空洞壁面から4~12mの領域であり, 39 本の亀裂変化 が生じた. 図-4から空洞壁面から4~12mの領域での 初期状態からの亀裂開口幅の増分は 41mm であり, ひず みで表すと0.5%程度で,岩石の限界ひずみ0.3%を超え る. 岩盤変位の増大に伴い,8リフト掘削後,PS 工の 追加施工がなされた.空洞から0~1mの領域における 初期状態からの亀裂開口幅の増分は2.2mm であり,ひず みで表すと約0.2%であり,応力解放領域のひずみは小



図-10 変化した亀裂の頻度(リフト8〜掘削完了)



図-11 亀裂進展領域(リフト7~掘削完了)

さい. 図-11 に, 亀裂変化が顕著であった領域と鉛直応 力解放領域境界線の位置関係を示す.

4. 奥多々良木増設発電所における計測結果

大河内発電所の地下空洞掘削時に,鉛直応力が解放された領域と鉛直応力が増加した領域において,併行して 亀裂の進展が生じたことが分かった.そこで,奥多々良 木増設発電所の地下空洞における掘削時の亀裂進展特性 についても同様の考察を行う.図-12 に,地下空洞掘削 時において変化した亀裂を,既存亀裂の開口,鉱物脈の 亀裂化および新規亀裂に分類した頻度分布を示す.図-13 に空洞掘削伴い発生した亀裂開口幅増分の先行トン ネルからの累積曲線を示す.

図-12より, 掘削による亀裂本数の変化が顕著であった領域は, 空洞壁面から0~1mの領域と空洞壁面から6~8mの領域であり, それぞれ9本, 8本の変化があった. **図-13**から空洞壁面から0~1mの領域で2.5mmの亀裂開口幅の増加があり, 空洞壁面から6~8mの領域で2.0mmの亀裂開口幅の増加があった.

図-14 に空洞掘削時における鉛直ひずみ分布を示す. 図より掘削時に鉛直応力が解放された領域は、空洞壁面から 3.8mの領域である.そのため、空洞壁面から0~ 1mで亀裂変化が顕著であった領域は、鉛直応力が開放 された領域であり、壁面から6~8mで亀裂変化が顕著 であった領域は、掘削時に鉛直応力が解放された領域である. 掘削時に亀裂変化が顕著であった領域を図-15 に示す.

大河内発電所の地下空洞の場合と同様に,掘削時に鉛 直応力が解放された領域と鉛直応力が増加した領域にお いて,併行して亀裂の進展が見られた.壁面から0~1 mの領域における亀裂開口幅増分をひずみに換算すると 約0.25%である.一方,壁面から6~8mの領域では, 亀裂開口幅増分をひずみに換算すると約0.1%であり, 大河内発電所と比べてはるかに小さい.



図-12 掘削時に変化が生じた亀裂の頻度(奥多々良木増設発電所)



図-13 掘削による亀裂開口幅の累積曲線(奥多々良木増設発電所)



図-14 鉛直ひずみ分布 (奥多々良木増設発電所)



図-15 亀裂進展領域(奥多々良木増設発電所)



空洞からの距離(m) 図-17 掘削後の岩盤変形係数分布

図-16, 図-17に、それぞれ初期状態と掘削後における孔内載荷試験による岩盤変形係数の分布を示す. 初期状態では、計測孔全域において岩盤変形係数は、ほぼ一定であり、5,400MPa 程度である. 掘削に伴い、空洞壁面から6~8mの領域の近傍において、変形係数の低下が顕著であり 40%程度の低下が見られる. 当領域は、鉛直応力の増加に伴い亀裂進展が顕著であった領域である.

5. 初期不連続面特性と損傷進展特性の関係

大河内発電所と奥多々良木増設発電所の地下空洞掘 削時に、ゆるみ領域の他に鉛直応力の増加に伴って、亀 裂が顕著に進展する損傷領域が存在することが分かった. 大河内発電所では、損傷領域の亀裂開口ひずみが 0.5% 程度となり岩石の限界ひずみを超え、追加の支保工が必 要となった.一方、奥多々良木増設発電所では、損傷領 域の亀裂開口ひずみが 0.1%程度であり、地下空洞の安 定性に大きな影響を与えなかった.また、損傷領域の範 囲についても大きな違いが見られ、大河内発電所では 8 m程度であるのに対し、奥多々良木増設発電所では 2 m 程度である.両発電所において、損傷領域の亀裂進展特 性に大きな違いが見られる.そこで、初期の不連続面頻 度と損傷領域の亀裂進展特性の関係を考察した.

図-18 は、大河内発電所における初期状態のボーリン グ孔1mあたりの不連続面頻度と掘削時に変化した亀裂 頻度を示す.損傷領域は空洞壁面から4~12mの領域で あり、初期状態では1m当たり、9.9本の不連続面が存 在した.図-19は、奥多々良木増設発電所における初期 状態のボーリング孔1mあたりの不連続面頻度と掘削時



に変化した亀裂頻度を示す.損傷領域は空洞壁面から6~8mの領域であり、初期状態では1m当たりの不連続面は4本である.

両発電所を比較すると、大河内発電所では、損傷領域 に、初期状態で奥多々良木増設発電所の2倍以上の頻度 で不連続面が存在した.このため、損傷領域での亀裂進 展が顕著であったと考察できる.また、奥多々良木増設 発電所の場合、空洞壁面から8~12mの領域では、亀裂 の進展が小なく、大河内発電所においては、対応する領 域で亀裂の進展が最も顕著であったのとは異なる.これ は、初期状態における当領域1m当たりの不連続面頻度 が、平均で2本程度と非常に低かったことに起因すると 考えられる.

6. 損傷領域に関する考察

大河内発電所と奥多々良木増設発電所の地下空洞側 壁岩盤において、ゆるみと併行して損傷が進展する損傷 領域が存在することが新たに分かった.この特性は、側 壁岩盤だけでなくアーチ部などでも同様であると考察で きる.この場合、図-20に示すとおり、周方向、法線方 向の応力解放に起因するゆるみ領域と周方向応力の解放, 法線方向応力の増加に起因する損傷領域が存在する.

軟岩などの膨張性地山にトンネルを掘削する場合、地



図−20 地下空洞掘削時の岩盤損傷領域

山応力の増加によって岩盤が塑性状態となり、トンネル 壁面が押し出される現象が生じる場合がある.不連続性 性岩盤においても、同様に、初期の不連続面頻度が高い 場合や地下空洞、トンネルの断面積が大きく掘削時の再 配分応力が高い場合は、アーチアクション形成時の応力 再配分に起因する損傷が進展し、地下空洞の安定性に大 きな影響を与えることが分かった.

岩盤内に地下空洞やトンネルを掘削する場合、周方向 応力の解放、法線方向応力の増加により、岩盤内にアー チアクションが形成され、地下空洞やトンネルの安定性 を高めるメカニズムが生じる. このアーチアクションを うまく形成させることで、支保工の効果的な設計を行う 手法が NATM 工法である. NATM 工法では、ゆるみ領域に おける岩盤と支保工の複合体が最大強度発揮時のひずみ までに変形をとどめ、支保工の効果的な設計を行うとい うものである.しかし、アーチアクション形成に伴う応 力再配分により損傷を受ける損傷領域が存在することが 新たに分かった.このため、岩盤の強度を最大限に発揮 させ、支保工の効果的な設計を行うためには、図-21 に 示すとおりアーチアクション領域内の損傷を抑え、岩盤 と支保工の複合体に対して,最大強度発揮時のひずみま でに変形をとどめることが重要である. それと併行して, ゆるみ領域に対して迅速に支保工を施工することで、損 傷進展を抑え、落盤等を防止することが重要である.



7.おわりに

地下空洞掘削時の岩盤計測データを基に,周辺岩盤 の損傷進展特性について考察を行った.結果は,以下の とおりである.

- 地下空洞掘削時に岩盤が損傷を受ける領域は、応力解 放に伴うゆるみ領域の他に、アーチアクション形成に 伴う損傷領域が存在することが新たに分かった。
- 2)損傷領域の損傷は、ゆるみ領域の損傷と併行して進展し、亀裂の開口や変形係数の低下をもたらす。
- 3) 岩盤の初期不連続面頻度が高い場合,損傷領域の損傷 度が高く,地下空洞の不安定化をもたらす場合がある.
- 4)地下空洞やトンネル掘削時に、岩盤の強度を最大限に 発揮させるためには、アーチアクション領域のひずみ を最大応力発揮時のひずみに抑えることが重要である. なお、現場計測に於いては、株式会社ニュージェック の平川芳明氏、森聡氏に多大なご協力をいただきました. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 打田靖夫,吉田次男,浦山克,平川芳明:ボアホールテレ ビによる亀裂観察から見た大規模空洞掘削時の岩盤挙動の 検討,土木学会論文集No517/III-31,1995,pp33-41.
- 吉田次男,大西有三,西山哲:空洞掘削時の岩盤挙動メカ ニズム,材料 55巻,2006, pp501-506.
- 3) 吉田次男,平川芳明,森聡:奥多々良木発電所地下空洞掘 削時の計測結果と考察,電力土木, No.283,1999, pp35-39.
- 4) 三木幸蔵,宮川純一,栃木泰浩,吉田次男:岩盤総合柱状 図の提案,第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文 集,1997, pp313-317.

ROCK DAMAGE DURING UNDERGROUND CAVERN EXCAVATION

Tsugio YOSHIDA, Yuzo OHNISHI and Satoshi NISHIYAMA

This paper discussed the damage of the rock mass caused during underground cavern excavation. By analysis of in-situ measurement data, it was found that the rock mass received damage in two areas. One is the loosened area that receives damage by stress release, the other is the damaged area that receives damage by an arch action formation. In the damaged area, crack progress and decrease of deformation coefficient occurs. When crack frequency of the rock mass is high, the damage of the damaged area is remarkable and causes large deformation of the underground cavern.