

大規模地下空洞における効率的掘削システムの提案とその適用

A proposition and application of efficient excavation system on the large rock cavern

手塚昌信¹⁾・加藤清策²⁾・河邊信之³⁾

Masanobu TEZUKA, Seisaku KATOU, Nobuyuki KAWABE

The establishment of the efficient excavation system on the large rock cavern is an important subject in consideration of the enlargement and the big depth of the large rock cavern. In the Okutataragi underground power station, when rock conditions were good at the time of the bench excavation, we increased the efficiency of the excavation by adopting a large section blasting. This paper introduces the judgment of rock conditions to excavate a large section and blasting technology consisting of NONEL detonator and ANFO explosive. By studying an actual application of the proposed system, the paper discusses its impacts on the improvement of the excavation efficiency

Keywords : large rock cavern, efficient excavation system, bench blasting, NONEL detonator, ANFO explosive

1. まえがき

近年、地下発電所や石油備蓄基地などの大規模地下空洞が各地で建設されている。今後ますます地下空洞の需要が高まるにつれて、地下空洞の大規模化、大深度化が進むと予想される。それに伴い、施工の効率化が求められており、なかでも効率的な掘削システムの確立は重要な課題である。

一般的な山岳トンネルにおいては NATM の導入以来、大型施工機械の導入による効率的な掘削を図るため加背割りの大断面化の方向にある。一方、大規模地下空洞の掘削は空洞のアーチ部分を掘削後、高さ 3 m 程度のベンチ掘削により切り下がるのが一般的な工法であるが、施工実績を調査した結果盤下げ掘削における 1 発破当たりの掘削量は、地山状況に関わらず 600 m³ 程度に留まっている。このため、盤下げ掘削における各作業は狭い施工エリアでの輻輳作業となり、効率的な掘削には至っていない状況である。

筆者らは、大規模地下空洞において地山状況が良好で掘削時における地山の崩壊等がないと判断される場合には大断面ベンチ掘削が可能と考えられ、今回、関西電力御多々良木発電所増設工事本体空洞で大断面ベンチ掘削を試みた。

本報告では、大断面ベンチ掘削を実施する上での地山状況の判断、および火薬上の制約を解決するため採用した「NONEL 雷管+ANFO 爆薬」による合理的発破を紹介するとともに、大断面ベンチ掘削を実施することで得られた掘削効率の優位性について報告する。

1) フェロー 関西電力 土木建築室土木部長

2) ハザマ・大成・近畿コンクリート・明生共同企業体所長

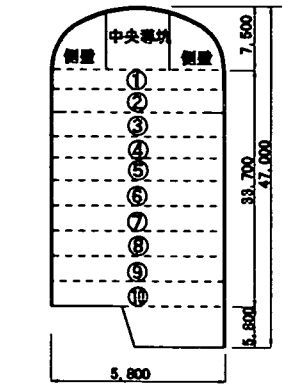
3) 正会員 御間組 土木本部トンネル統括部

2. 奥多々良木発電所の概要

奥多々良木発電所増設工事は、既設の奥多々良木発電所に離隔距離約 120 m で増設される純揚水式発電所 (72 万 KW) の建設工事である。本体空洞は、幅 25 m、高さ 47 m、長さ 130 m、掘削量 93,780m³ に及ぶ弾頭型地下空洞である。発電所付近の地質は大部分が流紋岩類であり、一部に流紋岩質凝灰岩および最大幅 5 m 程度のひん岩の貫入が認められた。断層破碎帯幅は最大で 60cm 程度であり、平均すると 1 ～ 10cm である。岩盤等級は電中研の岩盤分類によると概ね B ～ C_H 級と良好であり、ひん岩岩脈の貫入面近傍や破碎帯により変質を受けた狭い範囲に C_M 級以下の劣化した岩盤が分布している。

発電所本体空洞の施工は、アーチ部を中央導坑先進側壁拡幅並進工法により掘削完了後、1 ベンチ高さ 3 m を基本として盤下げ掘削を行った。

図－1 に発電所横断面図を示す。



図－1 発電所横断面図

3. 大規模地下空洞盤下げ掘削の現状

①盤下げ掘削の実績調査

表－1 に国内における大規模地下空洞の盤下げ掘削の施工実績を調査した結果を示す。1 発破当たりの掘削範囲はベンチ高さ 3 m 程度、ベンチ幅 10 m ～空洞幅、ベンチ奥行き長 5 m ～ 15 m 程度である。1 発破当たりの掘削量は平均 300 m³ 程度、最大でも 600 m³ 程度であり、小断面ベンチ掘削を繰り返すことにより掘削を行っている。

表－1 盤下げ掘削の施工実績¹⁾

発 電 所 名	完成年月 (運開他)	出 力 (KW)	発 電 所 空 洞 諸 元				盤下げ部 1 発破施工実績			
			幅 (m)	延 長 (m)	高 さ (m)	掘 削 量 (m ³)	ベンチ幅 (m)	ベンチ奥行き (m)	ベンチ高 (m)	1 発破掘削量 (m ³)
奥多々良木(既設)	1975.08	121.2	24.9	133.4	43.9	145,000	25.0	5.0	3.0	370
新高瀬川	1978.11	128.0	27.0	163.0	54.5	211,200	27.0	6.0	2.8	450
第 2 沼沢	1981.05	46.0	26.0	96.5	47.6	97,000	5.0	5.0	3.0	75
天 山	1985.12	60.0	24.0	89.0	48.2	100,000	8.0	8.0	3.0	200
今 市	1988.07	105.0	33.5	160.0	51.0	200,000	12.0	10.5	3.0	380
大 河 内	1992.11	128.0	24.0	134.5	46.6	120,000	12.0	15.0	3.2	600
奥 美 濃	1994.05	150.0	20.5	129.0	44.1	102,000	10.25	6.0	3.0	185

盤下げ掘削において、大断面ベンチ掘削が用いられない理由としては、以下の理由が挙げられる。

- 1) 大断面ベンチ掘削は応力解放領域が大きくなることと、発破掘削時から支保完了までのタイムラグが大きくなることから、空洞壁面崩壊の懸念がある。
- 2) 一般的に、発破時に用いられる雷管は電気雷管である。したがって、雷管の延時差に制限があるため、発破面積が限られてくる。また、地下発電所においては、掘削と並行してクレーンポスト、クレーンガーター等のコンクリート構造物を構築することが多いため、発破振動による構造物への影響が懸念される。したがって、1段当たりの斉発量を少なくした制御発破等を採用することが多いため、雷管上の制約からも大断面掘削は難しい。

②従来工法による施工性

本工事においても当初の1～5リフトにおいては、盤下げ掘削時の岩盤の安定性を評価する十分なデータが得られてなかったため、電気雷管+含水爆薬による従来工法の小断面掘削を繰り返すことによりベンチ掘削を行った。掘削手順は幅15m×奥行き10m×ベンチ高さ3m、掘削量450 m^3 の中割掘削を行った後、幅5mの側壁払い発破を行った。例えば、幅25m×奥行き50m×ベンチ高さ3mの断面における1次支保（吹付けコンクリート $t=8\text{cm}$ 、ロックボルト $L=5\text{m}$ ）完了までの各作業の割合と各作業のロス時間を図-2に示す。

各作業間の準備、後片付け時間、発破時の待避時間等のロス時間が全体の21.6%占め、小断面掘削を繰り返すことにより純粋な作業以外のロスタイムが大きな割合をしめることがわかる。したがって、この時間を短縮することにより、ベンチ掘削における施工性を向上させることが可能であると考えられる。

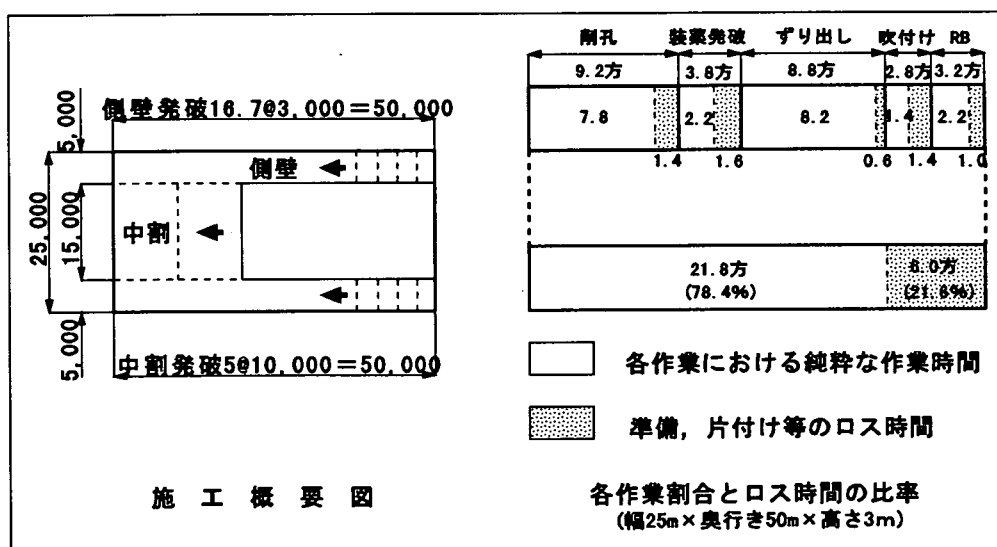


図-2 従来工法(電気雷管+含水爆薬)による各作業割合とロス時間の比率

4. ベンチ掘削における効率的掘削システムの提案

6リフト以降はベンチ幅25m、長さ50mになるため、1ベンチを半分割(幅25m×長さ25m)して、一方では削孔、装薬発破、他方ではずり出し、支保を行う効率的掘削システムを実施した。図-3に概念図を示す。またベンチ高さも3mかつ3.5mに変更することにした。

1 ベンチの半分以上を1度に発破掘削するため、従来工法と比べ大断面ベンチ掘削になる。したがって、発破回数の減少により施工ロス時間が格段に減少し、施工効率が向上すると見込まれた。大断面掘削を実施するにあたっては、前述の問題点を解決するため、以下の所見、システムを取り入れることにより実施した。

- ①ベンチ掘削に伴う空洞壁面の安定性に関しては、
1～5リフトでの地質観察と計測結果から注意すべき岩盤の範囲を把握することができた。そして、空洞の大部分は良好な岩盤であり、岩盤の不安定挙動に対する計測監視を強化する、対策工がいつでも実施できる施工体制にすることにより大断面掘削が可能であると判断した。

- ②雷管の制約条件をクリアするため、NONEL 雷管を採用、併せて爆力の強いANFO爆薬による合理的発破技術を採用した。

(1) NONEL 雷管+ ANFO 爆薬による合理的発破
盤下げ掘削における雷管上の制約を解決するため、発破時の延時差を無限にとることが可能なNONEL 雷管(非電気式雷管)を採用した。NONEL 雷管の発破システムを図-4に示す。雷管は同一延時差を使用し、地表面にてNONEL チューブを結線するコネクタに延時差を設けることにより、無限の延時差をとることが可能である。したがって、地下発電所において、掘削と並行して構築することが多いクレーンガーター、クレーンポスト等のコンクリート構造物への発破振動も、数種類のコネクタを使用することにより発破振動を抑制することが可能である。表-2にNONEL 雷管と電気雷管の比較を示す。

爆薬には従来、坑内にて用いられている含水爆薬に代わって ANFO 爆薬を採用した。表-3に ANFO 爆薬と含水爆薬の比較を示す。ANFO 爆薬は、顆粒状であり削孔した孔に密充填できるため、含水爆薬と比べ爆力が強い。したがって、削孔数が1～5リフトでは1.3 m×1.3 mピッチであったが、ANFO 爆薬の採用により2.0 m×2.0 mピッチまで広げることが可能であり、削孔数にして約58%減少し、削孔、装薬時間の減少効果が見込まれる。また、最外周孔には ANFO 爆薬を使用した場合、爆力が強く地山に与える損傷が大きすぎるため、SB爆薬を採用した。

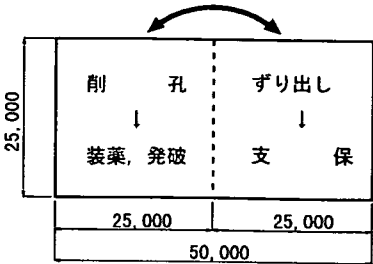


図-3 効率的ベンチ掘削の概念図

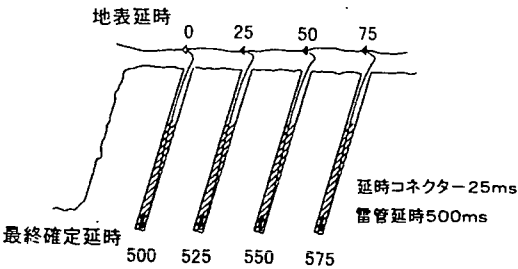


図-4 NONEL 雷管による発破システム

表-2 NONEL 雷管と電気雷管の比較表

	NONEL 雷管(非電気式雷管)	電 気 雷 管
構 造	電気脚線の代わりにプラスチックチューブを伝達する衝撃波によって雷管を起爆する。電氣的障害を受けない。	電気脚線に電流を流すことにより雷管を起爆する。耐静電気構造にはなっているが、100%信頼できるものはない。
延時時間	ベンチ掘削の場合、雷管には同時延時差(500ms)を使用し、接続するコネクタにより延時差を設ける。無限の延時差を設けることが可能なため、雷管による発破面積の制限を受けない。	通常で最大20段までであり、雷管による発破面積の制限を受ける。

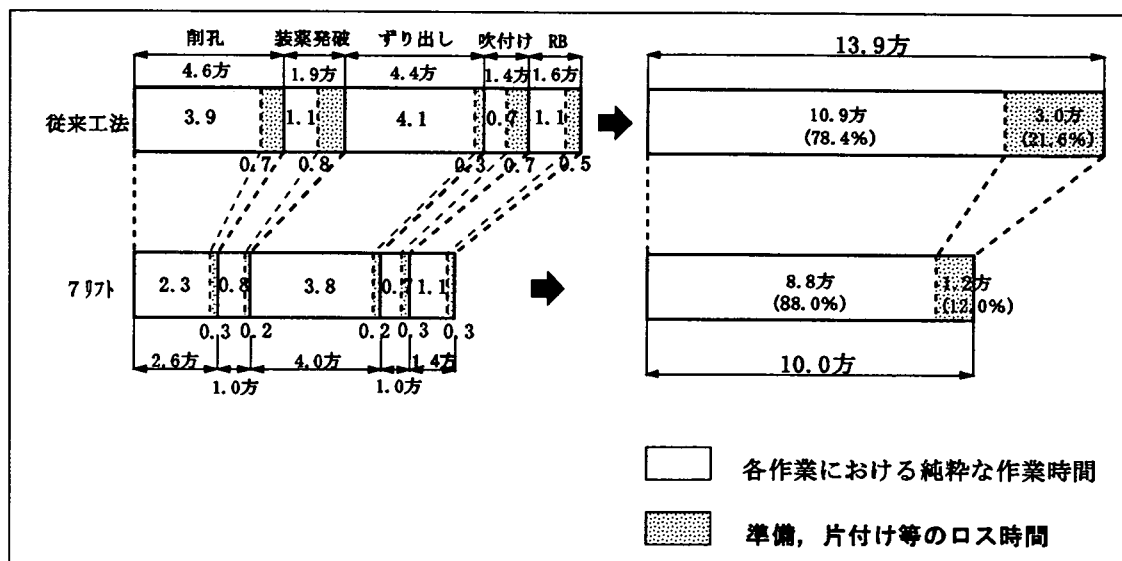
表－3 ANFO爆薬と含水爆薬の比較表

	A N F O 爆 薬	含 水 爆 薬
物 質	硝安と燃料油の混合物で顆粒状である。	水溶性の酸化剤を不溶性の油で包んだ爆薬で、形状はピース状である。
爆 力	爆速は 3,000m/s と低いが、顆粒状のため孔に密充填できる。したがって、1 孔当たりの爆域は含水爆薬と比べ大きい。	爆速は 5,000m/s と高く爆力は大いが、ピース状であるため孔に密充填できない。したがって、1 孔当たりの爆域は A N F O 爆薬と比べ小さい。
耐 水 性	水孔において急速に溶ける。	水孔における使用にも問題がない。
後 ガ ス	含水爆薬と比べ、5 ～ 10 倍の後ガスが発生する。	A N F O 爆薬と比べ、1/5 ～ 1/10 倍の後ガスが発生する。

5. 効率的盤下げ掘削システムの効果

発電所空洞 6 リフト以降に効率的掘削システムを適用し、得られた施工データより今回提案した効率的掘削システムの効果について考察を加える。

図－5 に従来工法と 7 リフトで実施した 1 ペンチを 2 分割して掘削を行った場合の片側断面（幅 25m × 奥行き 25m × ペンチ高さ 3.5 m）における施工サイクルの比較を示す。純粋な作業以外のロス時間は全体の 12.0 % となり、1 ～ 5 リフトで実施した従来工法の作業ロス時間の割合 21.6 % と比べ大幅に減少し、効率的な掘削を行っているのがわかる。また、全体サイクルも従来工法と比べ約 30 % サイクル短縮に繋がっており、今回適用した掘削システムが十分に掘削サイクル上有効であったと考えられる。特に、純粋な削孔時間が 41 %、装薬時間が 27 % 減少し、ANFO 爆薬採用による削孔数減少が施工サイクル短縮に有効であったと考えられる。なお、耐水性に対する対策として水孔にはチューブを装填し、その中に ANFO 爆薬入れる



図－5 従来工法と効率的掘削システムの作業サイクルの比較（幅 25m × 奥行き 25m × ペンチ高さ 3.5m）

こととし、後ガスに対しては地下空洞全体の換気として最大 $14,000 \text{ m}^3 / \text{min}$ の排気を行っており、計算上 4～6 分で空洞内の空気が入れかわる状態であり、特に問題にならなかった。

6. おわりに

今回採用した効率的掘削システムによる施工は、大規模地下空洞における盤下げ掘削の効率化に大きな効果があることがわかった。今回 10 リフトでは将来の地下空洞の大規模化、大深度化における急速施工を見据えて、1 ベンチを 1 回の発破での掘削(幅 $20 \text{ m} \times$ 長さ $50 \text{ m} \times$ ベンチ高さ 3.6 m 、1 発破掘削量 $3,600 \text{ m}^3$)を実施した。その結果、十分な発破効果が得られ、空洞壁面の崩壊等なく無事、掘削を完了することができた。したがって、今回採用したシステムが地下空洞の大規模化における急速施工に十分対応可能であると確信している。

ただし、今回の施工中 8 リフトの掘削においては、空洞壁面に断層破砕帯が出現したため、小断面ベンチ掘削をせざるを得なかった。したがって、今回提案した掘削システムは、どのような地質状況でも適用するのは難しく、地質状況を考慮しながらの適用となる。今後、大規模地下空洞において数多く適用することにより地山状況の定量的な評価を確立し、今回提案した掘削システム適用の指針を確立する必要があると思われる。

7. 参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：大規模地下空洞の情報化施工，土木学会，1996
- 2) 手塚昌信，吉舎廣之，美野誠一：奥多々良木発電所工事の設計と施工，電力土木，No.260，pp51-59，1995
- 3) スティグ オロフソン：最新発破技術ハンドブック，山海堂