

大規模地下空洞アーチ部の縁切工法による掘削について — 発破振動の低減と施工実績について —

EXCAVATION BY BLASTING WITH CONTINUOUS SLOTS IN VAULT SECTION OF LARGE ROCK CAVERN

手塚昌信¹⁾・大石富彦²⁾・蓮井昭則³⁾

Masanobu TEZUKA, Tomihiko OHISHI and Akinori HASUI

In Okutataragi pumped storage plant project, the vault section of underground powerhouse was excavated by blasting with continuous slots, for reducing blast damage in surrounding rock mass of the cavern. To confirm the effect of that method, blasting vibrations were measured in-situ rock mass at excavations by only conventional blasting and by that method. The experiment shows the vibration velocity was reduced to 1/10 compared with the value in conventional blasting. And excavation of vault section was finished with no trouble and about 24.5 hours /one sysycle time on the average.

Key Words: underground powerhouse, vault section, excavation method, blasting vibration, slot dorling

1. まえがき

日本における本格的な地下発電所の建設は昭和 18 年に完成した雨竜発電所（現北海道電力）に始まるとされ、平成 8 年までに大小合わせて 50 地点あまりにのぼっている。このうち、昭和 30 年代末以降からは揚水式発電所の建設が増加し、また、地下発電所空洞の掘削断面積は年々大きくなる傾向にあり、最近では $1000 \text{ m}^2 \sim 1500 \text{ m}^2$ の大規模地下空洞も出現している¹⁾。一方、将来の地下発電所を考えると、地下空洞の規模は現在よりさらに大規模に、また、建設位置もより大深度になると予想されるが、それらの建設を実現するためには建設コストの削減や工期短縮を可能にする、より合理的な設計や施工が望まれている。

このような状況のもと、関西電力（株）奥多々良木発電所の増設空洞では、将来の大規模地下空洞をより合理的に設計や施工するための 1 ステップとして、地下空洞の新しい支保設計を試みた。この試みは NATM の考え方の原点に戻り、地山自体の持つ支持力を最大限に生かすことを基本として、事前解析結果から必要最小限の支保設計²⁾を行うもので、その支保設計をいわゆる情報化施工管理面から支援するために計測管理とキープブロック管理³⁾を採用した。また、支保設計を施工面から支援するために、周辺岩盤への発破振動による損傷をできるだけ低減させる目的で掘削線上にスロットを配し内部を発破掘削する掘削方法（以下、縁切工法と呼ぶ）を地下空洞のアーチ部掘削に採用した。

本文では、地下空洞アーチ部の掘削に採用した縁切工法の概要、縁切工法による発破振動の低減効果を確認するために実施した通常の発破による掘削と縁切工法による掘削時の発破振動の測定結果、およびアーチ部の施工実績について報告する。

1) フェロー 関西電力（株） 土木建築室 土木部長

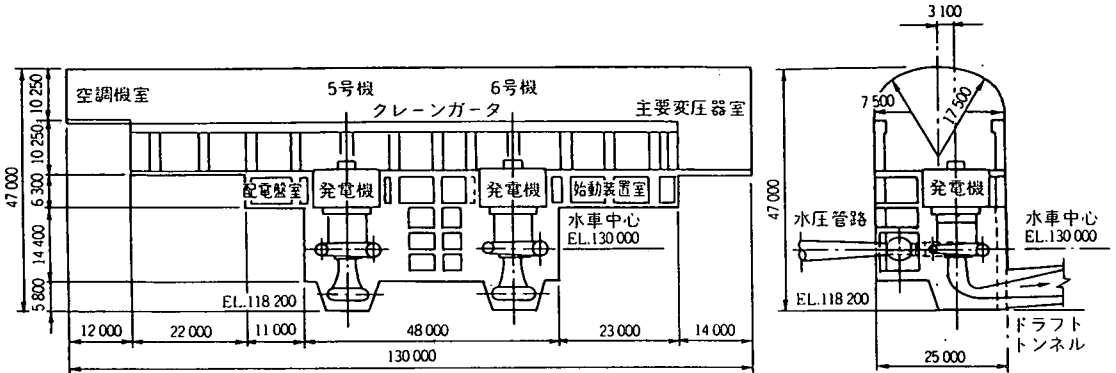
2) 正会員 関西電力（株） 奥多々良木発電所増設工事建設所 第二工区長

3) 正会員 （株）間組 技術研究所 主任研究員

2. 縁切工法の概要

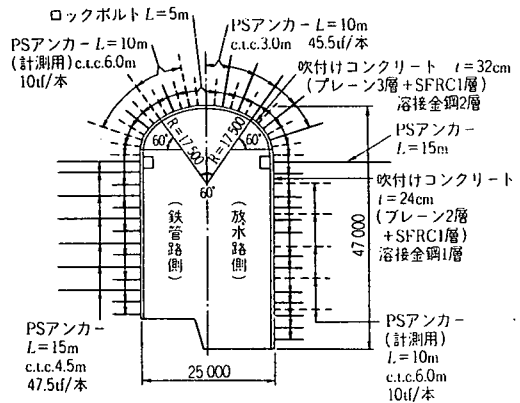
(1) 奥多々良木発電所増設空洞の概要

奥多々良木発電所増設工事は、昭和 49 年から運転を開始している純揚水式の奥多々良木発電所に近接して 36 万kw×2 基の純揚水式発電所を増設するもので、既設ダムは現状のまま利用し、新たに水路、地下発電所を設置する。この増設発電所空洞の掘削横断面は幅 25 m、高さ 47 m、空洞延長は 130 m である。図－1 に地下発電所縦・横断面を示す。建設地点周辺岩盤の地質は中生代白亜紀中葉（110 百万年～ 90 百万年前）の生野層群の火山岩類に属する流紋岩を主体としており、電力中央研究所のダム基礎岩盤分類でおおむね B 級～C_H 級の良好な岩盤で形成されている。



図－1 地下発電所縦・横断面

初期支保設計に補強対策領域を決定するために、非線形粘弾性逐次掘削解析を実施した。その結果、空洞のアーチ部においては放水路側に連続したせん断破壊領域が発生し、側壁部においては逆に鉄管路側にせん断破壊と引張破壊が連続するすべり領域が発生することがわかり、それらの岩塊の落下あるいはすべりに抵抗するため、PSアンカー（ロックアンカー）を打設することとした。また、PSアンカーの不要となったアーチ部鉄管路側、側壁部放水路側については計測を目的としたPSアンカーを若干配置した⁴⁾。そのため、従来の同規模の地下発電所空洞と比較すると、PSアンカーの設計数量は半分程度となっている。図－2 に初期支保設計の標準断面を示す。



図－2 初期支保設計の標準断面

(2) 縁切工法の概要

初期支保設計を施工面から支援するために、周辺岩盤への発破振動による損傷をできるだけ低減させる目的で掘削線上にスロットを配し内部を発破掘削する縁切工法を地下空洞のアーチ部掘削に採用した。図－3 に縁切工法による施工概要を示す。アーチ部の掘削は中央導坑を先進し、両サイドの拡幅部を掘削する手順で行ったが、中央導坑、拡幅部ともに、掘削部分と周辺岩盤との境界に深さ 2 m で連続したスロットを設け、内部の岩盤を発破掘削した。スロットの削孔には大型機械を複数導入できること、通常の作業員で操作・作業ができること、施工実績があることから、SD (Slot Drilling) 工法を使用した。表－1 に SD 機械の仕様を示す。

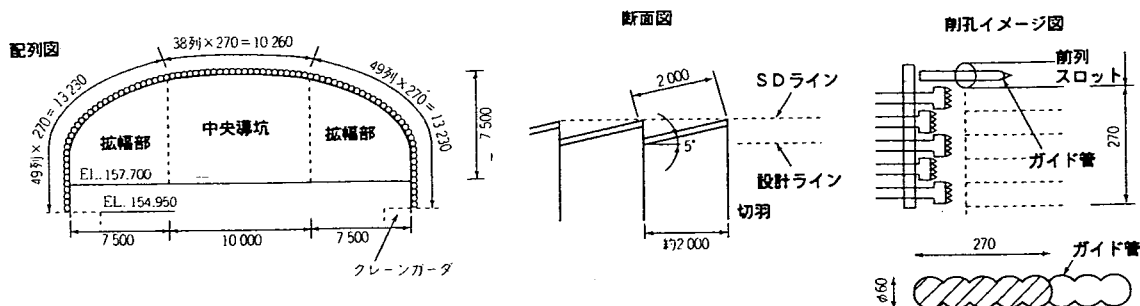


図-3 縁切工法の概要

表-1 SD機械の仕様

ベースマシン	2ブームホイールジャンボ (JTH2RS-135) 2台
ドリフタ	SDⅡ型×2台/ベースマシン
削孔ビット	クロステンバービット (φ 60mm)

3. 発破振動の低減効果

(1) 発破振動の測定

縁切工法による発破振動の低減状況を定量的に把握するため、地下空洞アーチ部掘削の初期段階で、中央導坑に発破工法のみによる掘削区間（発破区間）と縁切工法による掘削区間（縁切区間）を15mずつ設け、天端岩盤内に加速度計を埋設して掘削時の発破振動を測定した⁹⁾。また、測定した発破振動の加速度波動は数値積分によって速度波動に変換し、両者の比較を行った。各区間と測定位置の関係を図-4に示す。

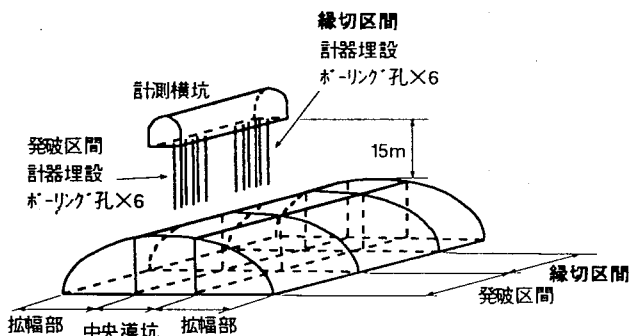
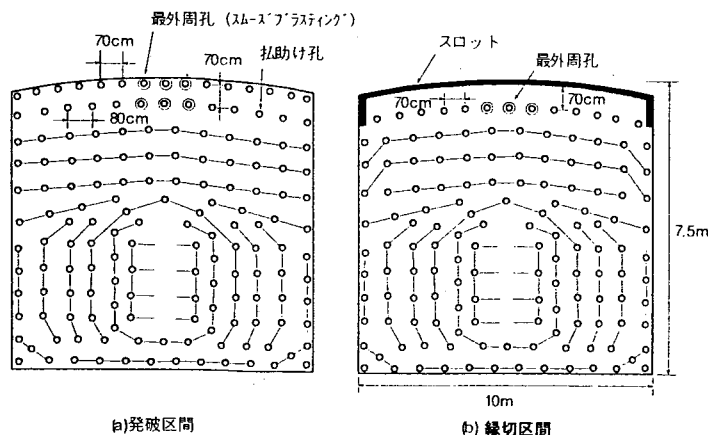


図-4 測定位置

発破パターンは、まず発破区間においてVカット芯抜き発破での孔配置、装薬量を決め、続いて、発破区間での発破パターンの最外周孔位置にスロットを設けたものを縁切区間の発破パターンとした。図-5に発



◎ 振動の検討を行った発破孔

図-5 発破パターン

表-2 発破パターンの諸元

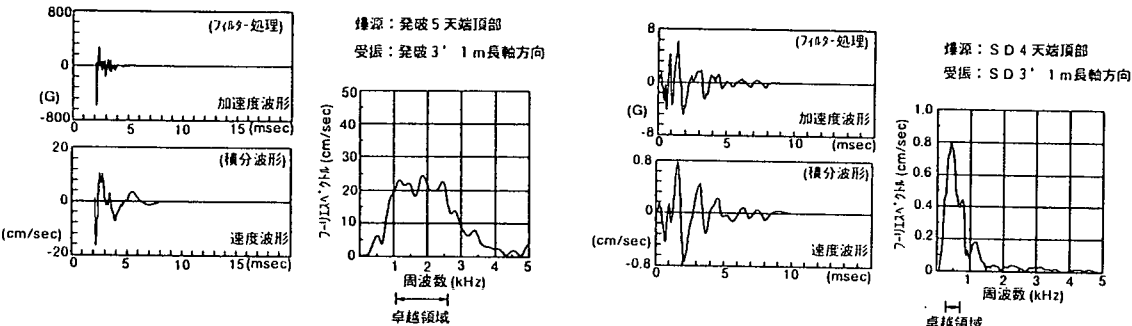
	発破区間	縁切区間
発破孔数	156 孔	142 孔
発破段数	38 段	41 段
装薬量	106.7kg	99.6kg
最外周、 払い助孔薬量	400g ~ 600g	400g ~ 600g
装薬孔削孔長	1.4 m	1.4 m
1 発破進行長	1.36 m	1.67 m

破パターンを、諸元を表－2に示す。発破区間での1発破当たりの装薬量は107kg、平均薬量は約1.01kg/m³、縁切区間での装薬量は99.4kg、平均薬量は0.82kg/m³であった。両者において、装薬孔長が1.4mと同じにも関わらず、縁切区間の方が1発破平均掘進長が大きいのは、スロットによって天端部岩盤がコソクによって壊れやすくなり掘進長が延びたことが要因と思われる。

(2) 測定結果

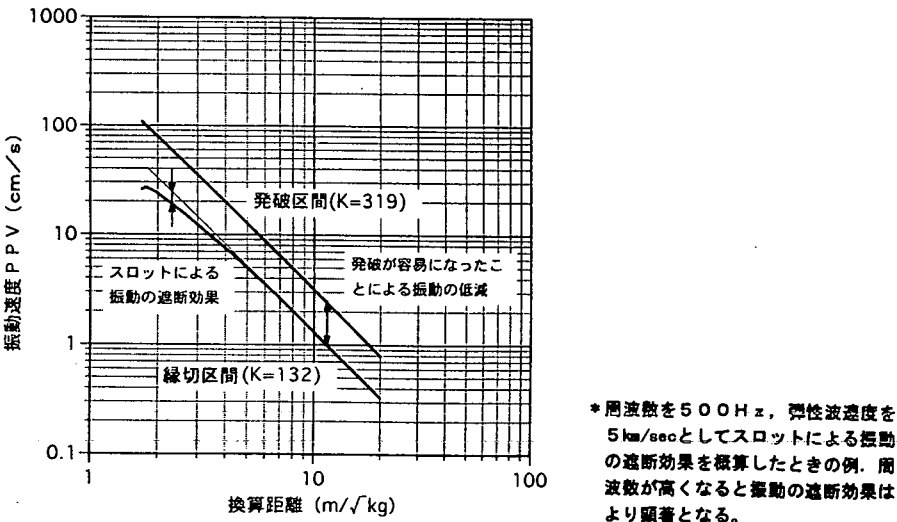
測定された加速度波形から数値積分によって求めた発破振動の速度波形の例を図－6に示す。発破のみによって中央道坑の掘削を行った発破区間では振動速度が両振幅で14cm/s、一方、スロットを設けた掘削を行った縁切区間では同じく1.5cm/sと、縁切区間の方がかなり発破振動が小さくなっていることが明確である。また、振動の卓越周波数に関しても、縁切区間の方が低くなっていることが分かる。

測定結果をまとめると、縁切区間では①スロットによる自由面が増加したため、外周部付近での発破で掘削が容易になり、発生する発破振動そのものが小さくなること、②スロット背面における回折減衰により伝播する振動の減衰が大きくなることが明らかになった。そして、発破区間と縁切区間での発破振動を図－7のように表現することができ、発破のみによる掘削に比べて、縁切工法では極近傍の周辺岩盤に与える影響は1／10程度に低減することが判明した。



(a) 発破区間（観測点 発破3' 孔 空洞長軸方向成分） (b) 縁切区間（観測点 SD3' 孔 空洞長軸方向成分）

図－6 発破振動の速度波形

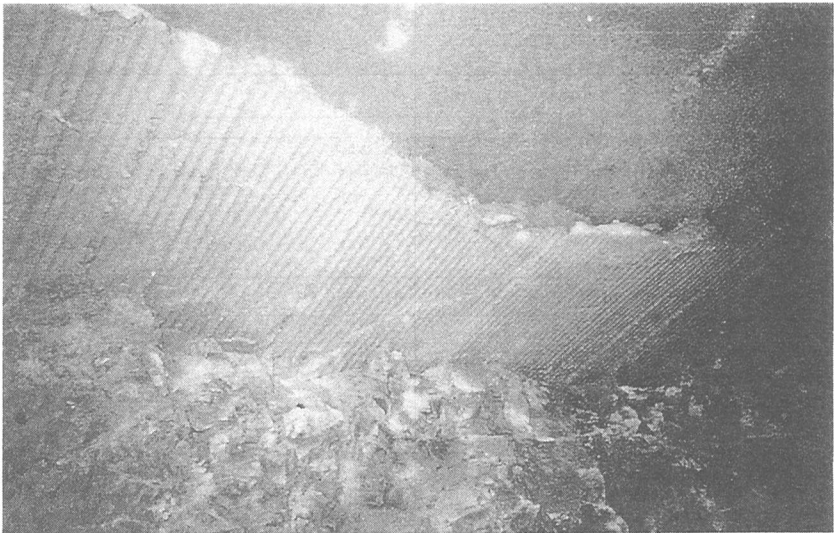


図－7 発破区間と縁切区間での発破振動

4. アーチ部の施工実績

(1) スロット削孔実績

空洞アーチ部のうち、前述の発破区間を除いた全部分で縁切工法による掘削を行った。写真－1に掘削によって露出したスロット削孔面の状況を示す。中央導坑、拡幅部にわけたスロット削孔の作業実績を表－3に示すが、幅27cm孔長2mのスロットを1本削孔するのにかかった純削孔時間は平均18分程度であるが、全作業時間でみると23分程度になり、SD機械の修理やビットの交換に比較的多くの時間を要していることが分かる。また、ビットの交換はスロット削孔平均5.6m/回で、図－3に示したスロット削孔機の最前列にある3つのビットの摩耗が早く、交換も頻繁に行った。



写真－1 スロット削孔面の状況

表－3 スロット作業時間

	SD純削孔時間 (分/2m)	純のみ下がり速度 (cm/分)	SD作業時間 (分/2m)
アーチ部 中央導坑	18.21	11.0	22.33
アーチ部 放水路側拡幅部	17.31	11.5	22.8
アーチ部 鉄管路側拡幅部	17.95	11.1	22.66
アーチ部 平均	17.82	11.2	22.6

(2) アーチ部の掘削実績

アーチ掘削中の平均的な掘削サイクルタイムを図－8に示す。中央導坑－拡幅部を連続した1サイクルの作業時間は実働24.5時間であった。なお、中央導坑ではSD機2台、拡幅部ではそれぞれ1台でスロットを削孔している。図から分かるように、掘削サイクルに占めるスロット切削の時間は大きく、中央導坑では27%、側壁部で47%、また、中央導坑では側壁部のスロットが削孔中のためスロット機械が転用できず、待ち時間が発生している。このように、掘削サイクルはスロット削孔に左右されるため、実施工では機械のトラブルによる作業停止やビットの摩耗による削孔能率の低下を防ぐ工夫を実施しながら施工を行った。

