

中部電力株式会社

内田 敏久

日本国土開発株式会社

○小沢 拓夫

1. はじめに

最近スムーズブラスティング工法は長大トンネル、地下発電所、切土法面等において安全性、経済性および新しい設計施工法の確立等の面から、注目され一部に施工例があるが、本工法は、まだ理論と施工の関連性が解明されていないのが現状である。

スムーズブラスティング工法 (Smooth Blasting 以下SB工法) はスウェーデンで開発され、アメリカ等で、すでに実用化されているが、我が国では地質が複雑なこともあり、試験的に施工されているにすぎない。しかし削孔機械の性能、発破技術と爆薬の進歩等により今後発展するものと考えられる。また、新オーストリア工法と称する吹付けコンクリートとロックアンカーによる覆工の施工のためにも、振削後の坑壁を損傷しないようなSB工法が必要である。SB工法にはラインドリリング、クッションブラスティング、プレスブリッキングおよび前述の併用による4通りがあるが、ここではクッションブラスティングを取りあげた。

本試験はSB工法による岩石の破壊機構にけふれず、施工性試験を重点に行っており、削孔機械の性能、削孔パターン、爆破方法、余振り等を解明し、さらにSB工法による岩盤のゆるみ範囲の減少および吹付けコンクリートによるアーチアクションの期待等岩盤の挙動特性を把握するため、変位、弾性波速度、発破振動を主体に試験を行なった。(試験は中部電力株式会社と共同で行なったものであります。) 以下に振削試験の概要を述べる。

2. 概要

試験は昭和50年2月17日から4月23日までの約2ヶ月間、奥矢作第二発電所試験斜坑下部水平坑内で行なったもので、SB工法区間101.60m、普通発破工法区間93.50mにわたり、両工法の比較を行なった。また、試験区間は無普請で振削したが、断層および多亀裂帯は吹付けコンクリートで施した。吹付け区間は延長80mに達した。

当試験斜坑は地下発電所予定地に達するドリコウ配25%の斜坑(水平延長302.0m)および水平坑(延長285.0m)で延長596.233mである。設計振削断面は幅4800mm、高さ3800mm、断面積17.861m²である。

試験区域は領家花崗岩類にわけられており、このうちで串原地区に分布するのは武節花崗岩と呼ばれる細～中粒の白雲母、黒雲母花崗岩であり、坑内は中粒花崗岩よりなり岩質は一定している。断層はほとんど断層面に粘土をはさんであり、卓越割れ目はN55E、N65Wである。圧縮強度は新鮮部分で800～1200kg/cm²で花崗岩中ではやや低めの値であり、断層部分では100～600kg/cm²である。

3. SB工法による振削試験

試験区間195.10mのうち47.90mはSBブームジャンボの操作およびSB発破工法の訓練区間とし、以後SB発破工法と普通発破工法を14～25m間隔で交互に施した。また一部ではSBダイナマイトを使用せず2号掘ダイナマイトとクッションピースの組合せでSB効果を試験した。

3.1. 削孔機械の選定

SB発破工法では正確な削孔パターンで削孔でき、特に松孔、松助孔が同じ差し角で平行に削孔が可能なTYWS-M-SBブームジャンボ(車洋工業製)を採用した。上段2台はTYWS-M-SBブーム、下段2台はTYWS-Mフルオートマチックブーム、計4ブームとした。また、急速掘進を考え、全て

TY-110 ドリフターを登載した。操作上特に問題となったことはセルの平行移動が上下方向・左右方向が別系統であり、差し角および振り角の調整もセルリフトシリンダーおよびセルスイングシリンダーを兼用しているので1孔1孔4通りのバルブ操作が必要で坑夫の勤にたよる要率が多い点である。TY-110 ドリフターは打撃力が強く正確な位置での削孔が難しく、サンピングのための打撃力の制御が可能な湖圧ドリフターの使用が今後増加するであろう。

3.2. 削孔パターンの試験

削孔パターンを決定するには、i) 松孔の間隔、松孔の差し角、ii) 松孔と松助孔の間隔（最小抵抗線）iii) 松助孔の間隔、松助孔の差し角、iv) デイカップリング係数、v) 使用爆薬の種類、vi) 薬量と装填密度、vii) 装薬方法と起爆方法等を岩盤の状況に合わせ種々試行する必要がある。

削孔パターンは松孔間隔E/最小抵抗線Vを0.8前後に設定し、右表の如く5通りで削孔長1.60m（一部削孔長1.90m）、松孔1孔当り装薬量400g、装填密度0.22t/cm³で試験した。

松孔間隔	最小抵抗線	松助孔間隔
400	500	600
400	600	700
500	600	600
500	600	700
600	700	700

単位：mm

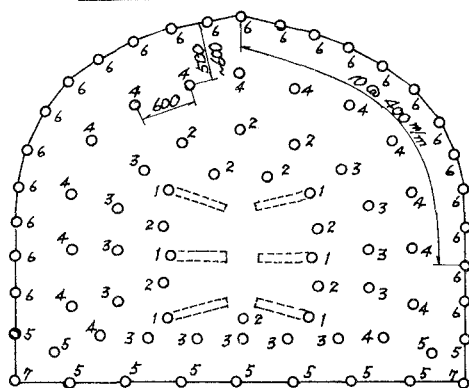
試験区間の花崗岩に対し、地質分類B～CM級の硬岩では松孔間隔400mm、最小抵抗線500～600mm、松助孔間隔600mm、 $E/V=0.80$ Or 0.67、CL～D級の軟岩では松孔間隔500mm、最小抵抗線600mm、松助孔間隔600mm、 $E/V=0.83$ が最適な削孔パターンであった。結果からCL～D級では従来の $E/V \leq 0.8$ 以下の基準より大きめの値で施工してもSB効果は期待できる。SB効果は E/V の関与のみでなく、特に松助孔の間隔およびに抜の適正な削孔、爆破が大きく影響する。また、2号複ダイナマイトとクッションピースの組合せによる爆破でも前述SB工法と同じ条件でSB効果が期待できた。当試験区間は14.0mと短かったが、SBダイナマイトを爆破した場合にしばしば生じた不発は発生せず、当り取りの懸念もなかった。今後さらに当工法で試験を行なう必要がある。

削孔数は一般に普通工法に比べSB工法のほうが多いが、本試験においては普通岩破工法区間での削孔数はB～CM級で85～90孔、CL～D級で70孔前後でSB工法に劣るが若干多く、後者でほぼ同様であり、適正な削孔パターンでないことが明らかで坑夫の勤による施工に起因している。削孔パターンもB～CM級で松孔間隔500mm、最小抵抗線500mm、松助孔間隔500～600mm、D～CL級で松孔間隔600mm、最小抵抗線500mm、松助孔間隔600mmとSB工法の削孔パターンと異なっていた。

(1) 発破諸元

爆薬 2号複ダイナマイト 25φ×100g
SBダイナマイト 21φ×300g
電気雷管 DS 1～7投
1発破進行長 1.50m（削孔長1.60m）
削孔数 B～CM（80孔）、CL～D（72孔）
削孔径 38mm
サンピング材 マイトコーク
SBダイナマイト 外径φ21mm、内径17mm
長さ1000mm、ポリエチレン筒
薬量300g/本（50g×6個/本×170mm）

B～CM標準削孔パターン図



孔数80孔、SB孔21孔 1.717kg/m³
(CL～D、孔数72孔、SB孔19孔、1.523kg/m³)

(2) 装薬方法および爆破状況

装薬は削孔長1.60m、1.90mの2種類について計8通りの装薬方法で試験し、爆破状況、殉爆程度、爆破後の岩盤の状態等を観察した結果、最適な装薬方法を右図の如く設定した。装填密度は地質分類D～Bまで一定とし、風化程度により松孔間隔、最小抵抗線、松助孔間隔等削孔パターン、松孔以外の孔の装薬量も変化させることにより対処した。

SBダイナマイトの装薬方法は図-1、図-2に示す如く、孔尻に親ダイ（削孔長1.90mでは増ダイ追加）を装填した場合、爆破後のカットオフもなく、きれいなみ跡が生じている。SBダイナマイトを孔中心に位置させるため羽根付スリーブ（径21mm、長さ110mm）を使用した材質がプラスチックのため爆破後換気に十分時間をかけても発生後ガスにより目、鼻、のどが痛くなりスリーブの使用は中止した。

2号複ダイナマイトとクッションピースの組合せでは図-3、図-4に示す如く孔尻に増ダイを入れ、次いで親ダイを装填した。装填密度、ディカップリングはSB工法を満足しているが、ディカップリング指数は低く、爆破後のバックブレークの危険性は多かったが、殉爆状況、SB効果はSBダイナマイトの場合とほとんど変わらなかった。クッションピースは径20mm、長さ125mm、ポリエチレン製である。

ディカップリング指数は装薬の規定が一定しておりSBダイナマイトで $D=2.24$ 、2号複ダイナマイトで $D=1.52$ で試験ではディカップリング指数を変化させることは不可能であった。また装填密度も削孔長1.60mで 0.221g/cm 、1.90mで 0.232g/cm と一定で試験した。ディカップリング指数ではそれ程、爆破後の相違は見られなかったが、CL～D岩盤ではディカップリング指数を上げる必要がある。SBダイナマイトの爆破後ガス濃度（北川式ガス検知器測定）は2号複ダイナマイトと変わらなかった。

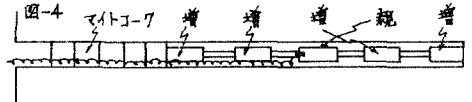
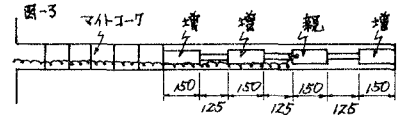
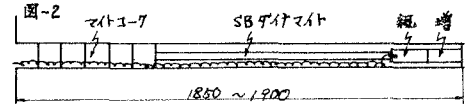
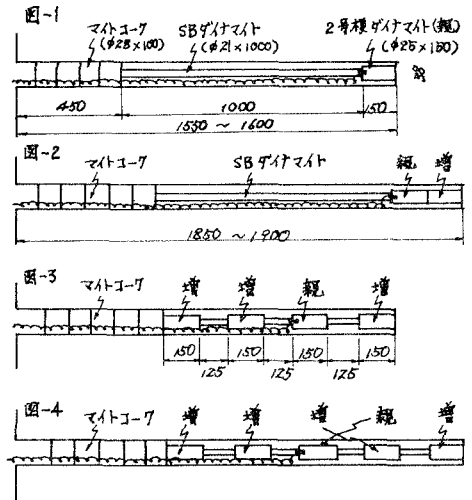
3.3. 施工実績

SB効果は掘削量の減少およびコンクリート覆工の減少に直接影響を与えるが、本試験区間でも断面測定器（試作）で3mピッチでトンネル掘削断面を測定し、余振率を求めた。削孔長1.60m、差し角70°で松孔の削孔を設定した場合、平均10cmの余振厚はやむをえないが、実際には岩の硬軟、目の状況、削孔技術等で不要な余振りが生じる。余振率は1発破ごとにバラツキはあるが、SB工法で85%、2号複ダイナマイトとクッションピースで7.6%（掘削延長短い）、普通発破工法で9.9%であった。普通発破工法で9.9%は低い値であるが、これはSB工法と同様の削孔技術で施工したためと考えられ、試験区間以外のTYCJ-ZXクロージャランボ（トンネルマスター）での実績は14.1%であった。

掘削サイクルは工法別に差は少なく330分/サイクル程度であり、SBダイナマイトおよびクッションピースの装薬手間もほとんど変わらない。掘削単価は使用するダイナマイトの材料費の差、ならびに専用ジャンボアームの機械費の差額を考慮する必要がある。

4. 岩盤挙動試験

トンネル周辺のゆるみ領域は地質条件はもとより、トンネル断面の大きさ、掘削工法、掘削断面の不規則性、掘削後の経過時間等、種々の条件により変化する。直接的に岩盤の挙動をみるには鉛直変位、水平変位を測定することが一般的であり、当地においても変位から地山状態、SB工法および普通発破工法の違いによる岩盤のゆるみの程度を定量的にあらわし、岩盤のゆるみ範囲を求め地圧を推定して支保工の有無、吹付けコンクリ



ートの厚さ等の設計に利用することを目的に試験したが、本試験工事では掘削工程に支障をおよぼさないことが前提条件であり、測定方法、測定計器も簡単な試験法を採用した。

試験としては内部変位、内空断面変位、弾性波速度および発破振動を行なったが、計器自体の問題、測定方法の問題等SB工法と普通発破工法の違いを定量的に把握することは困難であった。その概要を以下に述べる。

内部変位試験は計器埋設が容易なコンバージェンスメータ（土木測器、RE-75型、測定範囲10‰、最小目盛0.1‰、本体260×350×180㎜）を右図の如く設置した。計器設置時侯では変位はすでに50%程おきていると考えられ、次の1発破進行以後の数‰のオーダーと推定される変位を測定する必要があるが、計器の精度、発破の衝撃による計器の停止等、正確な測定が困難であった。

内空断面変位はトンネル断面の6測線をバーニヤスケール（土木測器TE-10M、測定範囲10m、最小目盛0.05‰）で測定したが、計器自体の精度が問題であり、正確な測定が困難であった。

弾性波測定から弾性波速度および走時曲線の不連続性を求め、トンネル周辺岩盤のゆるみ厚を定性的に求めた。測定はポケットサイス（応用地質、ES-1A、最小読取0.1msec、計器本体77×170×59㎜、重量550g、ピックアップGSC-20D、ハンマー4kg）で7測線長15.0m、測器間隔1.5m、往復走時観測とした。新鮮な岩盤の弾性波速度は6km/sec程度であり平均弾性波速度は4～5km/sec程度である。トンネル周辺の低速度帯は弾性波速度2.5km/sec以下であり、低速度帯の厚さは50～100cm程度である。

発破振動は測定器（リオン、ピックアップPV-09A、フリアンVP-26、3チャンネル振動計VM-21A）、記録器（TEAC、4チャンネルデータレコーダR-70A）および電磁オシロ（協和RMV-33P）で測定、解析を行なった。ピックアップを切羽から20mの地奥に設置し、以後切羽の進行にともない20mおきに設置し、変位、振動速度を測した。その結果、振動数は200～430c/sの間で大部分は300以上である。振動の継続時間は1.60～2.45secの間であり、最大変位はDS1段（心枝）の発破により生じている。発破振動の距離による減衰は $y = 15 \cdot W^{0.454} \cdot D^{-0.349}$ （ y : 変位μ、 W : 薬量kg、 D : 距離m）であった。

以上の試験結果からはSB工法、普通発破工法の比較は不可能であったが、弾性波測定から発破によるゆるみは50～100cm程度と推定され、また、本試験区間は地質も良質で、掘削断面も小さく、変位試験の結果からみて、いずれの工法によっても変位は微少なオーダーであったと思われる。

終りに

SB工法は岩盤の状況により適した削孔パターンを試験で設定する必要がある。またSBブームジャンボも高性能にはなったが、いまだ坑夫の勤にたよる要素が多い。実際のトンネル内でのSB効果、吹付コンクリート厚さ等を設計、施工に反映するには本試験のような小断面のものではなく、大規模な条件下でそれに適した計器、計測方法で試験を行なう必要がある。

上記の試験工事はトンネル工事着手当初から計画されたものではなく、工程、試験内容等の制約のもとで実施したため、結果としては不十分な面が多いが、問題点はかなり明確になったと思われる。今後の合理的な発破工法の開発の一端となることを期待したい。

