

制御発破の効果と岩盤への影響度に関する調査研究 EFFECT OF CONTROLLED BLASTING AND THE EVALUATION OF THE INFLUENCE ON ROCK MASS AROUND TUNNEL

玉井 昭雄*・白旗 秀紀**・永久 和正**
Akio TAMAI, Hideki SHIRAHATA and Kazumasa NAGAHISA

Controlled blasting is generally used for producing a smooth final profile, a minimum of overbreak and a minimum of stressing or fracturing of the remaining rock. It is, however, difficult to evaluate the damage to the rock outside the blasting contour. A series of in-situ tests were conducted in discontinuous rock to investigate the influence on the rock by blasting. According to the test results, it is shown that the effect on rock mass strongly depends on blasting methods. It is also revealed that the physical properties of the damaged rock can be estimated quantitatively by the seismic velocities measured in a borehole.

Keywords: controlled blasting, in-situ tests, borehole logging, seismic waves,
rock mass properties

1. はじめに

余掘りの減少、あるいは岩盤の損傷をできるだけ抑える目的でトンネル周壁や地下空洞の壁面の発破には制御発破が用いられることが多い。また、無支保の水路トンネル、地下空洞内の燃料・食料・物品貯蔵といった地下空間の高度利用に対して、岩盤が本来有する透水特性、透気特性を損なわずに積極的に利用するための施工技術としても制御発破は注目されている。しかし、制御発破はその手法の違いにより岩盤に与える影響の大きさは当然異なったものになると考えられ、その影響の程度を調査する手法も現在のところ確立されてはいない。

今回、岐阜県の神岡鉱山において大林組が構築した地下岩盤試験場を利用して、発破掘削試験を行ったので、ここにその報告を行う。ここでは、手法の違いによる制御発破の効果、岩盤への影響度に関して、ボアホールスキャン、孔内P S検層、孔内水平載荷試験といった原位置試験を中心に影響度の評価を行い、発破工法による影響領域の特定を試みている。

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部
** (株)大林組 土木技術本部

2. 調査地点概要

発破掘削試験および調査は、大林組の地下岩盤実験施設において実施された。この地下実験施設は、大林組が不連続性岩盤を対象とした総合的な岩盤関連技術の確立を目指して岐阜県神岡に開設したものである。神岡付近の地質は、日本最古の岩石といわれる飛騨変成岩類で、片麻岩類、変深成岩類、混成岩類よりなっている。今回試験を行った地下実験施設は、土被り約175mの地下岩盤中に設けられ、試験場周辺の地質は、片麻岩を中心に、柰地・アプライト・石灰岩が部分的に現れている。ボーリングコアによる岩石物性試験によれば、一軸圧縮強度、弾性係数は、それぞれ平均で、 1020kgf/cm^2 、 $6.1 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ とかなり堅硬な岩石である。付近に大きな断層はないが、亀裂がかなり発達した岩盤で、亀裂分布は図-2に示すように、N S方向に走向を持ち急傾斜をなす亀裂群が卓越し、それと直交するようにE W方向に走向を持つ亀裂群もみられる。これらの亀裂は、掘削中の切羽およびボーリング孔の亀裂より調査されたものである。

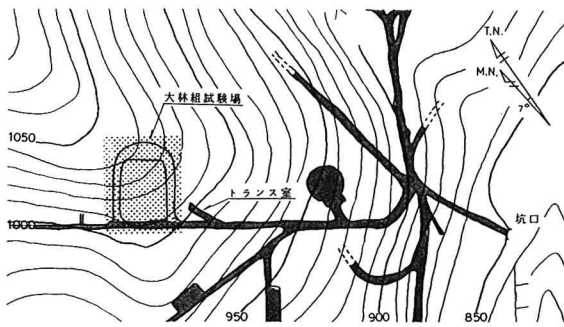


図-1 調査試験位置図

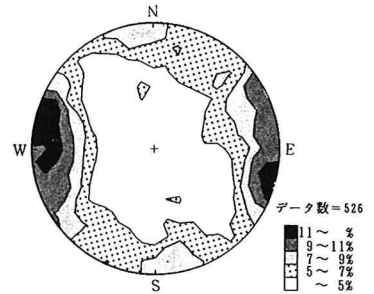


図-2 亀裂分布図
(ウルフネット下半球投影)

3. 調査試験の概要

3.1 調査試験のフロー

岩盤内に空洞を掘削すると発破の影響や地山の応力再配分などによって、空洞周辺には「ゆるみ域」が発生する。しかし、この「ゆるみ域」の発生原因を特定し、それらの影響度を区別することはなかなか困難である。今回の試験では、制御発破手法の違いによる空洞掘削前後の亀裂状況の変化、および空洞周辺岩盤に対する影響領域をどの程度捉えることができるかを明確にする目的で、図-3に示すフローに従って調査試験を行った。将来的には高精度の調査手法の開発や影響度の評価手法、さらにはゆるみ域の発生メカニズムに基づく予測手法の確立を実現することを目標としている。

調査項目はNo. 1 ボアホールにおける掘削前後のボアホールスキャン、各種発破パターンによる掘削の余掘りの調査、そして掘削終了後のNo. 2～No. 5 ボアホールのボアホールスキャン、PS検層、および孔内載荷試験を実施した。図-4の試験場平面図上に各ボアホールの配置と、それらに対応する「発破パターン」を示す。

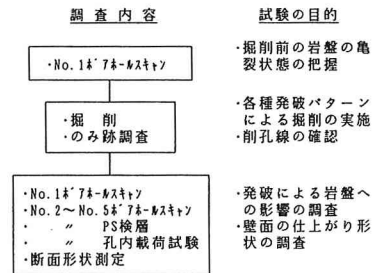


図-3 調査試験フロー

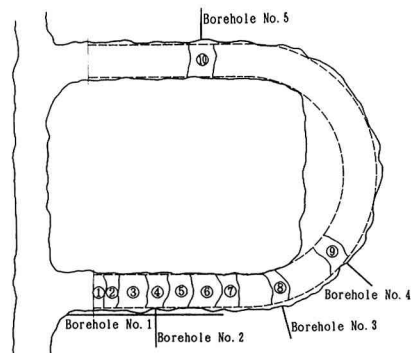


図-4 試験場平面図

3. 2 調査試験方法

調査試験方法について以下に述べる。なお、発破による周辺岩盤への影響要因と考えられる周辺孔装薬量、周辺孔間隔および制御発破方法の組み合わせを「発破パターン」とし、これについても同時に述べている。

(a) 発破パターン

発破パターンは周辺孔装薬量、周辺孔間隔および制御発破方法をパラメータとした。孔内試験を実施したNo. 1～No. 5 ボアホールに影響がおよぶと考えられる発破パターンについて表-1に示す。表中のS Bはスムーズプラスティング工法、P Sはプレスブリッティング工法を表す。

表-1 発破パターン

発破パターン	制御発破法	周辺孔装薬量 (kg/孔/m)	周辺孔間隔 (cm)
①	S B	0.8148	90(9)
②	S B	0.5926	60(15)
③	S B	0.6500	60(15)
④	S B	0.6500	60(15)
⑤	P S	0.6341	60(15)
⑥	S B	1.2688	60(15)
⑦	S B	0.5642	60(15)
⑧	S B	0.5659	70(11)
⑨	P S	0.5311	40(21)
⑩	S B	0.7577	60(15)

*周辺孔間隔の()内は周辺孔数

(b) のみ跡調査

掘削断面の余掘りを調べるために、各発破後に坑壁に残った周辺孔のみ跡を三次元測量システムを用いて三次元での座標値で求めた。ここで求めたのみ跡を結んだ線を「削孔線」とし、余掘りにおける削孔精度の影響を除去している。

(c) 掘削断面形状測定

内空断面計測器(ノンプリズム型光波距離計)を用いて発破後の各掘削断面形状の測定を実施した。断面形状測定は、トンネルの側壁下部からアーチ部を経由したもう一方の側壁下部までの範囲において、切羽のセンターポイント(S Lとセンターラインの交点)を中心に、5度ピッチで48～49点の測点について二次元の座標値を求めた。

このようにして求めた断面形状と先に述べた削孔線で囲まれた部分の面積を設計周長で除したものを「余掘り」とした。

(d) No. 1 ボアホールにおけるボアホールスキャン

掘削前後での亀裂分布の変化を調べるために、掘削坑道と平行に削孔された孔長25mのNo. 1 ボアホール(口径76mm、仰角2°)において、(株)コア製のボアホールスキャナーシステムを用い、掘削前後にボアホールスキャンを行った(図-5)。

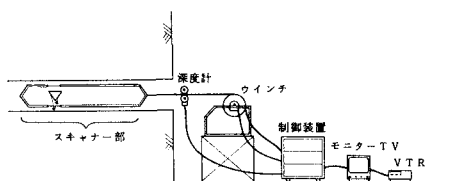


図-5 ボアホールスキャン

(e) No. 2～No. 5 ボアホールにおける孔内試験

発破パターンが異なる場所における発破の影響度の違いを調べるために、4ヶ所において掘削後トンネル軸に対して垂直な方向に孔長5mのボーリング孔(口径76mm、仰角10°)を設け、それぞれのボアホールにおいて各種孔内試験を実施した。

① ボアホールスキャン

No. 2～No. 5 ボアホールにおける掘削後の亀裂分布の違いを調査するためにボアホールスキャンを実施した。

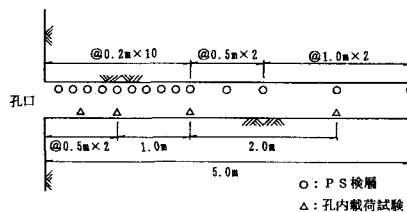


図-6 P S 検層および孔内载荷試験

における測点

② P S 検層

発破パターンの違いによる岩盤物性値の変化、および、影響領域の違いを調べるために P S 検層を実施した。P S 検層は 1 つのボアホールにつき図-6 中○印に示す 14 の測点で行った。

③ 孔内载荷試験

岩盤の変形特性の違いを調査するために、川崎地質(株)製の高圧型 K K T を用いた孔内载荷試験を行った(図-7)。载荷パターンは、载荷幅 25cm、最大荷重強度 150 kgf/cm^2 での繰り返し载荷とし、1 つのボアホールにつき図-6 中△印上の 4ヶ所にて実施した。

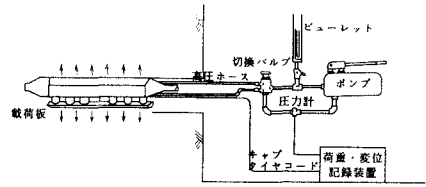


図-7 孔内载荷試験

4. 調査試験結果および考察

4.1 壁面の仕上がり形状

制御発破の効果を判断する指標の一つとして「余掘り」を用いた。ここでいう「余掘り」とは先の試験調査方法のところで述べたように削孔線を基準としたものであり、削孔誤差による影響については除かれていると考えられる。ただし、亀裂状況や破碎効果が大きい等の理由によりのみ跡が残らなかった場合の余掘り量は算出してない。

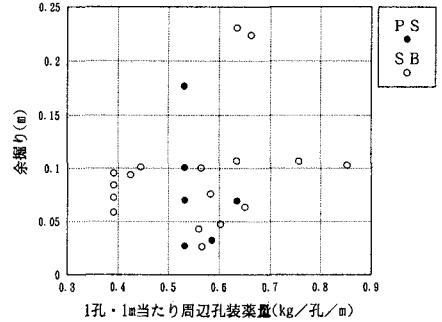


図-8 周辺孔装薬量と余掘りの関係

図-8 に今回の試験における全発破パターンを対象とした 1 孔、1 m 当たりの周辺孔装薬量と余掘りの関係を制御発破方法別に表示している。これによると、1 孔、1 m 当たりの周辺孔装薬量の増加に伴い、余掘りが増加する傾向がみられる。また、余掘りに関する制御発破の効果は周辺孔間隔が短い程発揮されることが確認された。一方、今回試験を行ったサイトにおいて明らかに亀裂等の影響によって余掘りが増大するケースがみられ、発破パターンだけでなく、地質や亀裂状況も余掘りに対する大きな要因となっているものと考えられる。

4.2 No. 1 ボアホールの亀裂調査結果

No. 1 ボアホールの亀裂の調査状況を掘削の前後で比較したものが図-9 である。発破時における周辺孔間隔は、この区間ではほぼ一定であるので、これらの影響は、周辺孔装薬量、制御発破方法あるいは坑壁からの距離の関係であると考えられる。この結果によれば 1 孔当りの装薬量が多い場合、既存亀裂が多い場合、また坑壁面に近い場合には、発破による亀裂の変化(開口、新たな亀裂の発生等)が、発生しやすいことがうかがえる。こうしたことは、当然予想される結果であるが今回の調査により実際の現場において、これらが確認されている。また、プレスブリッキング工法を用いた場合には、坑壁面との距離が小さくても亀裂に影響が出ないこと、1 孔当たりの装薬量が多い場合には坑壁との距離があるにもかかわらず、新たな亀裂

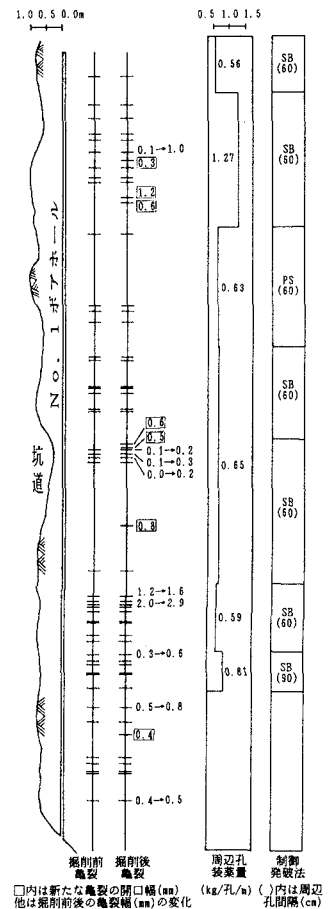


図-9 掘削前後の亀裂変化

が発生していることは注目に値する。亀裂の発生、開口のメカニズムについては今回は触れないが、制御発破法を用いた場合でも既存亀裂状況により坑壁から1m前後まで発破の影響が亀裂状況の変化として発生する可能性のあることが確認された。

4.3 No. 2～No. 5 ボアホールの調査結果

No. 2～No. 5 のボアホールにおける調査結果をまとめて図-10に示す。行った調査は、ボアホールスキャン、PS検層、孔内载荷試験で、これらより得られたデータをもとに、亀裂分布、P波区間速度、P波による亀裂係数、S波による亀裂係数、動弾性係数、孔内载荷からの変形係数でまとめている。P波およびS波による亀裂係数は、各ボーリング孔の深度2～5m区間におけるP波、S波の速度がほぼ一定であるため、これを乱されていない岩盤の弾性波速度とみなし、以下の式で算出している。

$$K_P = \left(\frac{v_P}{V_P} \right)^2 \quad K_S = \left(\frac{v_S}{V_S} \right)^2$$

ここに、 K_P 、 K_S ：P波、S波による亀裂係数

v_P 、 v_S ：各区間のP波、S波速度

V_P 、 V_S ：2～5m区間のP波、S波速度の平均値

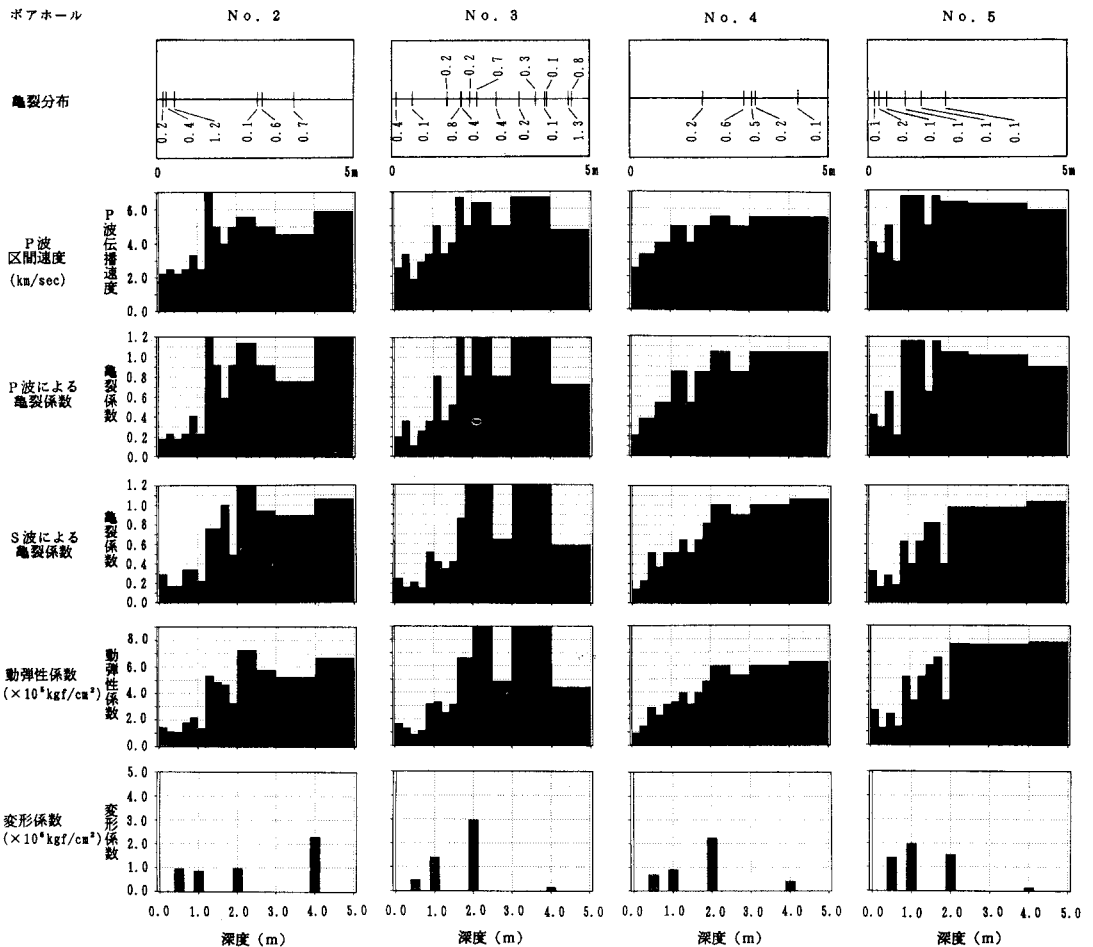


図-10 No. 2～No. 5 ボアホールの調査結果

である。また、動弾性係数は、岩石試験から求められた岩石の密度、各区間のP波、S波速度を用いて算出したものである。

これらの結果みると、PS検層が比較的よく地盤への影響を捉えていることがわかる。これは、発破による岩盤への影響が亀裂状況の変化としてあらわれるためと考えられる。総合的に判断すると、各ボアホールにおける影響領域は、表-2のように推定される。

今回の実験サイトでは、掘削断面の大きさや予想される初期地圧に対して岩盤の強度が比較的高いため、応力の再配分による強度劣化領域は、発生しにくいと考えられる。したがって今回PS検層結果を中心に推定された岩盤への影響領域は、ほぼ発破による影響領域であると考えられることができる。物性値の変化の大きさについては、No. 2ボアホールの岩石試験結果が参考となる。コア試験結果による岩石の動弾性係数は、 $5.03 \sim 6.29 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、コア採取位置におけるP波を用いた亀裂係数0.3を用いて低減すると、 $1.51 \sim 1.89 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となって、PS検層結果での動弾性係数、 $1.05 \sim 2.16 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ と比較的よい対応を示している。これより、地山の物性値を亀裂係数を用いて低減することの妥当性が確認されたと考えられる。

次に発破パターンとの関連で述べると、スムーズプラスティング工法を採用する際は、周辺孔間隔が地山への影響度に対しても重要なパラメータであることがうかがえる。孔間隔(S)と抵抗線長(L)の比で示すと、孔間隔60cmのとき $S/L=0.86$ 、70cmのとき $S/L=1.00$ である。また、プレスプリッティング工法を用いた場合は、通常のスムーズプラスティング工法よりも周辺岩盤への影響を抑えることができると考えられる。

5. まとめ

亀裂の発達した片麻岩中において、パラメータを変化させた制御発破法を用い、ボーリング孔内試験を中心として、岩盤への発破による影響度の評価を試みた。

これによれば、周辺孔の間隔、装薬量、制御発破方法は掘削の仕上がり面のみならず、岩盤への影響度においても大きな要因となっていることが確認された。また、岩盤への影響度を調査するうえでPS検層はかなり有効な手段であること、物性値をある程度定量的に評価できることも示された。さらにボアホールスキャンは、亀裂状況の変化も視覚的に捉えることが確認でき、プレスプリッティング工法は、岩盤への損傷を抑えるのに効果的な制御発破法であることも確認された。

今回行った一連の試験を常に現場において適用することは難しいと考えられるが、こうしたデータを積み重ねることにより、限られた情報(例えば亀裂情報、P波速度、S波速度等)から、より正確に地盤物性(強度、変形、透水特性等)を評価することが可能となると考えられる。また、地山にできるだけ損傷を与えない発破工法の開発や、周辺地山の補強・改良領域の判定、補強手法の立案にも役立つものと考えられる。

なお、今回の試験は、基本的な調査のみであったが、今後は亀裂の発生、開口のメカニズムをも考慮した岩盤への影響度について、詳細な調査、研究を行っていく予定である。

6. 謝辞

地下実験場での施工、調査にあたり御協力を頂きました神岡鉱業株式会社殿に対して、深甚の謝意を表します。

表-2 各ボアホールにおける影響領域

ボアホールNo	影響領域 (坑壁からの深度)
No. 2	1.2m
No. 3	1.6m
No. 4	0.8m
No. 5	0.8m