

発破による爆破点近傍岩盤の損傷に関する一考察

手塚昌信¹・蓮井昭則²・工藤洋三³・中川浩二⁴

¹フェロー 正会員 関西電力(株)土木建築室土木部長(〒530-0005 大阪市北区中之島3-3-22)

²正会員 工博 (株)間組技術研究所主任研究員(〒305-0822 つくば市荻間西向515-1)

³正会員 工博 徳山高専土木建築工学科教授(〒745-0801 徳山市久米3538)

⁴正会員 工博 山口大学工学部社会建設工学科教授(〒755-0000 宇部市常盤台)

本研究では発破による岩盤の損傷程度を把握するために、発破後の破断面近傍岩盤をはぎ取り、発破によって岩盤中に発生した亀裂を目視観察し、さらに岩石の弾性波速度を測定した。その結果、実験を行った限られた条件に対してではあるが、以下のような知見を得た。発破面から30cm以内のごく近傍岩盤では、岩盤は全体的に細かく破碎され崩落が発生する。発破面から50cm程度までは、部分的に細かく破碎された領域がみられ、一部の岩石においてP波速度が発破前に比べて低下する。50cm～1m程度までは発破孔の方向に伸びる長い亀裂が発生したが、岩石のP波速度の低下はみられない。また、1mより遠方では亀裂の発生など発破の影響はみられなくなる。

Key Words: blasting damage, crack observation, primary wave velocity, rock mass in-situ experiment

1. まえがき

地下発電所等の大規模な地下空洞の設計において、空洞周辺岩盤が受ける損傷をできるだけ小さくして施工することは、岩盤の支持力を十分に期待する上で重要である。地下空洞の施工時に周辺岩盤に損傷が発生する原因としては、2つの要因が考えられる。1つは掘削、つまり岩盤中の初期地圧を解放することによる地下空洞の周辺岩盤内での応力再配分で、その結果として周辺岩盤では既存亀裂の密着度低下や開口、新たな亀裂の発生、岩石の降伏などが発生し、力学特性の低下(損傷)を受けることになる。通常のFEM等による数値計算の力学モデルはこの初期地圧の解放を対象にしている。また、他方は掘削時の発破振動で、この振動が大きい場合には前出の初期地圧の解放と同様に損傷を発生させる。通常発破掘削によって一般に「損傷」あるいは「ゆるみ」と呼ばれている現象はこの両者が混在した結果である。2つの要因のうち、初期地圧の解放に起因する損傷を減少させることは非常に困難であるが、発破振動に関しては、爆薬を使用しない、あるいは発破振動を低減させて掘るなどの施工方法を採用することによって発破損傷の低減が図られている。

一方、発破振動についての研究は古くから行われており¹⁾、発破振動の経験的な推定式²⁾もいくつか提案されている。しかし近接発破による岩盤あるいはコンクリートの損傷について論じたものは多くない。この中で、中野ら³⁾はめがねトンネルの施工に際し、後行トンネルの発破振動が先行トンネルのライニングコンクリートに与える影響について検討している。また、Ouchterlonyら⁴⁾はトンネル近傍岩盤への装薬長の影響について研究を行っている。しかし、発破点から1m以内のごく近傍岩盤における研究は比較的少なく、発破振動が岩盤にあたえる影響についての議論は十分ではない。

本研究では発破による岩盤損傷程度を把握するために発破後の破断面近傍岩盤をはぎ取り、発破によって岩盤中に発生した亀裂を目視観察し、さらにボーリングコア中の弾性波速度の評価などで発破の影響程度の検討を試みたので、ここに報告する。

2. 実験概要

(1) 実験目的および地質

本研究では発破による岩盤損傷を明らかにするために、発破の影響を受けた原位置岩盤面をはぎ取って露

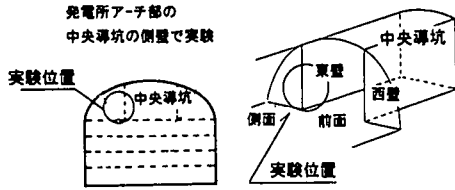


図-1 実験位置

表-1 発破振動測定システムの諸元

機材名	諸元
データレコーダ	帯域DC~40kHz
オシロスコープ	
電磁オシログラフ	
3成分加速度計	最大加速度±9800m/s ²
1成分加速度計	帯域0.1Hz~15kHz

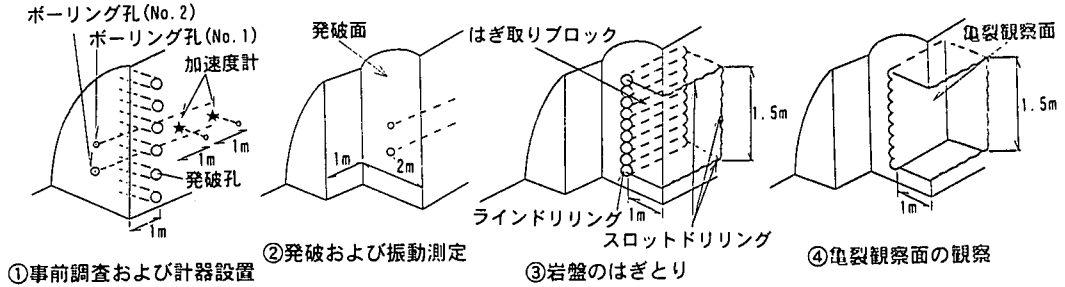


図-2 実験方法および手順

出させ、岩盤の損傷状況を把握することを目的として実験を実施した。

実験は地下約200mに位置する地下発電所アーチ部の中央導坑の側壁部を利用して行った(図-1)。周辺岩盤の地質は生野層群中部累層の凝灰岩で、新鮮部では淡緑灰色を呈し(財)電力中央研究所のダム基礎岩盤分類でB級~C_H級に分類される。また、実験前の岩石試験結果から得られた岩石の物理特性は一軸圧縮強度が約235Mpa、同じく縦波弾性波速度(P波速度)が約5.3 km/s、横波弾性波速度(S波速度)が約3 km/sであった。

(2) 実験方法

実験では岩盤の損傷程度を判断する指標として岩盤中の亀裂とボーリングコアの弾性波速度を用いる。このうち、弾性波速度測定は岩盤の状況を非破壊的に調査する一般的な方法の1つで、弾性波速度が媒体を構成する鉱物の種類や構造などによって左右されるため、媒体内のクラックや空隙を調べる有効な手段である。実験方法および実験手順を図-2および以下に示す。

a) 事前調査および計器設置

事前調査としてボーリング孔No. 1(φ66mm)およびNo. 2(φ100mm)を削孔し、コアとポアホールテレビ(BTV)により実験地点の亀裂状態を確認する。その後、ボーリング孔No. 2は後述するリボーリングのためにモルタルで充填する。

発破孔は孔長2m、60cm間隔で6孔を一列に削孔する。また、発破振動を測定するために発破面から深さ1m地点と2m地点に圧電型加速度計を埋設する(図-2①)。

b) 発破および振動測定

発破孔に装薬、発破し、埋設した加速度計により発破振動を測定する。発破に使用した装薬量は1孔当たり900gで、踏前孔のみ装薬量を1,100g/孔とし、掘削体積1m³当たりの薬量は0.8kgとした。

発破面は発破直後に浮石を除去し、吹付けコンクリートを施工して保護した(図-2②)。なお、発破振動の測定は、1~10kHz程度の高周波波動を平滑な感度で測定できるシステムを採用した。測定システムの諸元を表-1に示す。

c) 岩盤のはぎ取り

モルタル充填されているボーリング孔No. 2をφ66mmでリボーリングしてモルタルコアを採取し、コアの破壊程度を観察する。続いて、ボーリング孔No. 1、No. 2を含む面内でラインドリリング(φ100mm×長さ1m×19本)を行い、幅1m、高さ1.5mの亀裂観察面を作成する。

その後、亀裂観察面を覆っている岩塊を取り除くために図示する3面にスロットドリリング工法でスロットを入れ、岩塊を周辺岩盤から切り離して亀裂観察面を露呈させる(図-2③)。

d) 亀裂観察面の観察および弾性波測定

地質専門家により、亀裂観察面の地質、亀裂の観察を行う(図-2④)。

また、ラインドリリングによって得られるコアを用いて弾性波測定⁵⁾を行い、コア長約2cm毎にコアを横断するP波速度の分布状況を測定する。測定には発振子、受振子ともに圧電素子を用いた測定方法を採用する。コアは亀裂によって部分的に破壊分断されているため、分断された岩塊をシアノアクリレート系接着剤によって接着し、円柱状のコアに復元する。

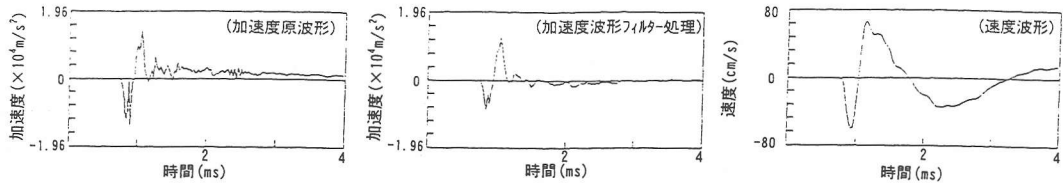


図-3 波動例 (発破点からの距離 2 m地点での測定波動)

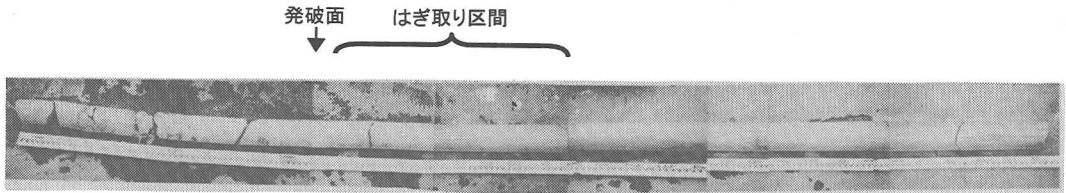


写真-1 実験前のボーリングNo. 2のコア状況

表-2 発破振動測定結果

波形区分	薬量 (kg)	1 m地点		2 m地点	
		発破孔から の距離 (m)	振動速度 (cm/s)	発破孔から の距離 (m)	振動速度 (cm/s)
瞬発	0.9×2	1.77	117.4	2.46	81.7
2段1波	0.9	1.05	127.7	2.02	72.9
2段2波	0.9	1.05	59.7	2.02	37.5
3段1波	1.1	計測不能		2.17	52.5
3段2波	1.1	計測不能		2.17	67.5

3. 実験結果

(1) 発破振動

全6孔を上方の発破孔から2孔ずつ瞬発, 2段, 3段の電気雷管を用い3回に分けて起爆した。

そのときの圧電型加速度計による測定波形は, 瞬発雷管では2孔分ものがほぼ完全に重なって1波となり, 2段, 3段ではそれぞれ雷管の起爆秒時のばらつきにより分離して観測された。また, 1m地点では2段の発破時に岩盤の移動で信号ケーブルが切断されたため, 3段の振動を測定できなかった。

測定された各成分の加速度波形はフィルター処理を行ってノイズを除去した後, 数値積分を行い速度波形に変換し, 速度波形の最大片振幅を振動速度とした。波形の例を図-3に示す。さらに, 1m地点(3成分測定)では亀裂観察面内にあるX成分とZ成分をベクトル合成して, また, 2m地点(1成分測定)では発破孔の方向と受振方向との差角から, 波動伝播方向の最大振動速度を算定した。その結果を表-2に示すが, 各発破によって測定された最大振動速度は発破点から2m離れた地点では38~82cm/s, 1m離れた地点では60~128cm/sであった。なお, 2孔ずつを同段の雷管を用いて起爆したため, 測定された波動の振源位置を限定することができず, 2孔の中間位置を仮想の発破点として整理している。

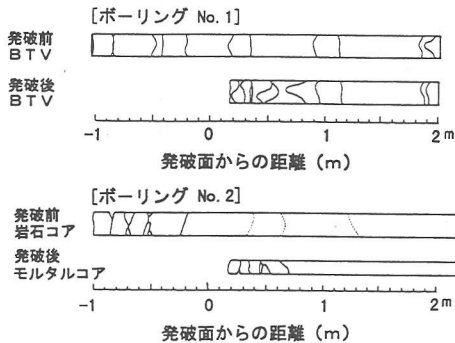


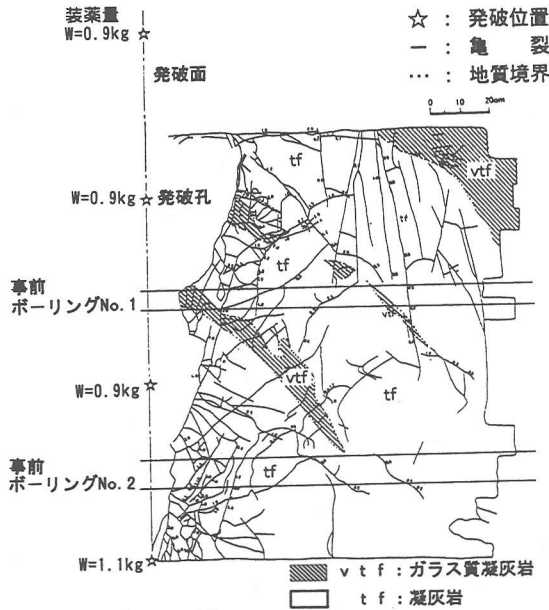
図-4 ボーリングコアおよびBTV結果

(2) コアおよびBTVによる亀裂状況の観察

ボーリング孔No. 1でのBTV観察, およびボーリング孔No. 2での岩石コア(写真-1)と発破後に採取したモルタルコアを図-4に示す。なお, 図中の標尺は発破面からの距離を表しており, 発破前の岩盤面は約-1m位置にある。

ボーリング孔No. 1のBTV結果では発破前から亀裂が孔全長にわたってまばらに観察されていた。発破後の観察によると, 発破面から15cm程度までは孔壁が保存されていないが, 50cm程度までの間は比較的密に新しい亀裂が発生しており, その新しい亀裂として最も深部に見られたものは発破面から約80cm位置であった。

一方, ボーリング孔No. 2では発破前における岩石コアと, そのボーリング孔へ充填したモルタルを発破後にリボーリングしたコアを比較した。モルタルコアを採取したのはモルタルには発破前には亀裂は存在せずコアに観察される亀裂は発破により発生したものとほぼ断定できるためである。発破前の岩石コアでは深部に亀裂らしきものが認められるものの明確なものは存在せず, -0.2mより深部で2m余の棒状のコアが得



【壁面観察コメント】

- ・岩盤は淡緑灰色の凝灰岩を主体として構成されている。
- ・図中の斜線部分は黒～黒灰色を呈するガラス質凝灰岩で全体に微細なクラックが多い。
- ・ガラス質凝灰岩のほとんどは凝灰岩中にレンズ状に分布し、この分布形態は観察面以外でも多く見られる。
- ・最も右上のものは、他のレンズ状のものと異なり凝灰岩層と流紋岩柱途の境界をなし、その連続性は極めて良い。

図-5 地質観察スケッチ

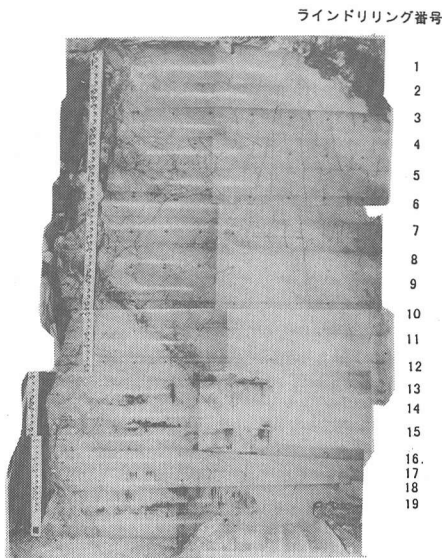


写真-2 亀裂観察面とラインドリリング番号

られている。これに対し発破後のモルタルコアでは発破面から70cm程度の深度まで亀裂があり、コア採取時の亀裂の発生は考えられるものの、ほぼこの深さまで発破によるモルタルの亀裂発生が推定された。

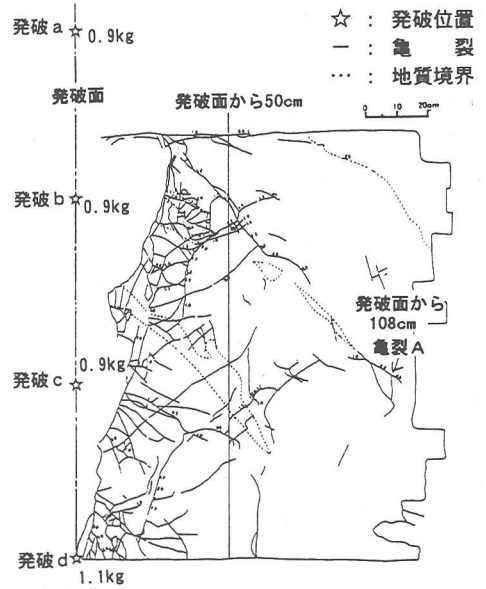
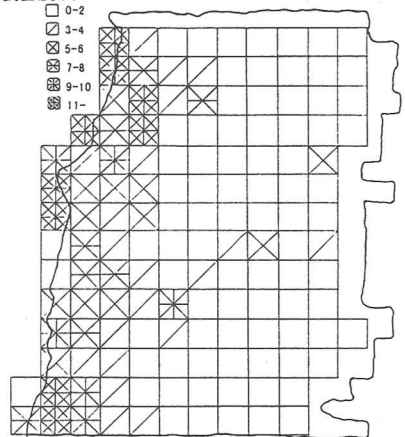


図-6 発破によって発生した亀裂

亀裂密度(本/10×10cm)

- 0-2
- ▨ 3-4
- ▩ 5-6
- ⊗ 7-8
- ⊕ 9-10
- ⊖ 11-



距離(cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110											
本数	4	0	8	3	7	5	7	0	4	6	2	1	2	3	0	9	0	5	0	3	0	8	0

図-7 亀裂密度

以上の観察により、発破による亀裂の発生は初期条件に大きく依存するが岩盤では発破面から深さ80cm程度、モルタルコアでは深さ70cm程度と推定された。

(3) はぎ取り面での亀裂観察

はぎ取りによって露呈した亀裂観察面を写真-2に、地質および亀裂観察結果を図-5に示す。岩盤は淡緑色の凝灰岩がほとんどであるが、一部に黒～黒灰色のガラス質凝灰岩がレンズ状、脈状に存在していた。

写真や図ではラインドリリング孔口部分が欠落しているが、これは発破後の浮石の除去やはぎ取りに際して生じた崩落によるものである。はぎ取り前の観察に

表-3 実験結果まとめ

発破面からの距離 (m)	発破による亀裂の密度	岩石のP波速度	発破振動	岩盤状況
0~30cm	7本以上	—	—	全体的に細かく破砕
30~50cm	2~7本	低下	—	一部で細かく破砕
50cm~1m	0~0.2本	変化なし	1m地点で128cm/s	一部に亀裂が発生
1m~	なし	変化なし	2m地点で82cm/s	影響なし

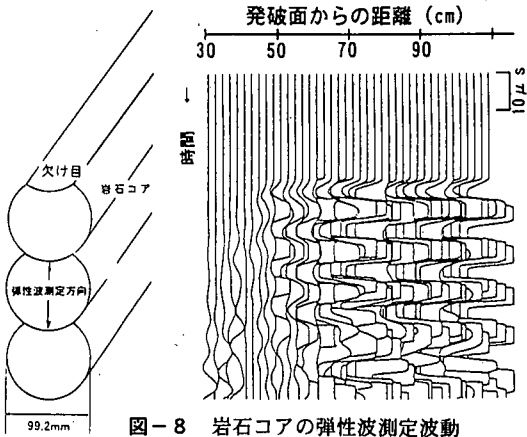


図-8 岩石コアの弾性波測定波動

よってもこの部分には密な亀裂が発達しており、はぎ取りにともなう振動等に対して形状を維持できなかったものである。

一方、図-5に示した地質および亀裂観察結果には発破によって発生した亀裂と掘削前から既に存在した亀裂が混在しており、この観察結果から発破前から存在した亀裂と思われるものを除去した亀裂状況を図-6に示す。なお、その判別作業は地質専門家に依頼し、得られた結果を採用している。これをみると発破により発生した亀裂は発破孔付近から岩盤内部に向けて伸びる長い亀裂、発破面に並行に近い亀裂、そして、長い亀裂に区切られ直交する短い亀裂に大別されることがわかる。これらは発破により生じる衝撃波、岩盤表面での反射波およびその後の振動や爆圧によって岩盤が破砕されたものであろう。また、図-6に示された亀裂には右下方方向への亀裂が比較的多く、これはレンズ状のガラス質凝灰岩の分布からも分かるように、地質の弱線が影響したものと考えられる。図中の亀裂Aは発破aによって発生した亀裂である可能性が考えられ、その左上方のガラス質凝灰岩のレンズ層の先端部から伸びている。目視観察した範囲の亀裂のうち、この亀裂Aが最も深部(108cm)にまで達している。

さらに、図-6の結果を10cm×10cmの格子に分け、その格子内における発破で発生したと思われる亀裂の本数(亀裂密度)を図-7に示す。発破面から40~50cm以内では急に亀裂密度が高くなっており、亀裂密度の高い領域は比較的短い亀裂が存在し、岩盤が細かく破砕されている部分であることが分かる。

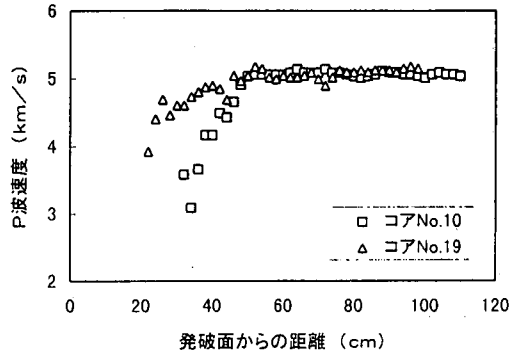


図-9 岩石コアのP波速度

(4) 弾性波測定結果

ラインドリリングによって得られた岩石コアを用いてP波速度の分布状況を測定した結果のうち、コア10を鉛直方向(原位置における鉛直方向)に伝播する弾性波の測定波動を図-8に示す(ラインドリリングコア番号については写真-2を参照)。ここで、横軸は発破面からの距離、縦軸は時間を示している。なお、測定は円柱状コアを復元することが可能となる発破面からの距離30cmより2cm間隔で行っている。図より、波動は、発破面から50cm以上では弾性波の立ち上がりが明確であるが、50cm以下では立ち上がりが鈍くかつ周波数が低くなっている。

発破面からの距離が50cm以内でP波速度測定ができたコア(コアNo.10, 19)での測定結果を図-9に示す。図中、場所による大小の差はあるものの、発破面近傍でのP波速度は低く、発破面から離れるに従って増加し、約50cm以上離れた位置では一定値となり、実験前に測定した岩石コアのP波速度(約5.3km/s)に近い値を示している。したがって、発破面から概ね50cmまでは発破の影響により岩石コアのP波速度が低下するような多数の微小亀裂がコア中に発生していると言える。

4. まとめ

観察および測定結果をまとめると、表-3に示すようになり、実験地点の岩盤および発破条件という限定されたものではあるが、発破によって岩盤に生じた状

況を発破面からの距離別に以下のように表現することができる。

- ① 発破面から深さ30cm程度では亀裂密度は7本以上と密であり、岩盤は細かく破碎されている。また、孔崩れにみられる部分的な崩落が生じている。
- ② 発破面から30～50cm間では、亀裂密度は2～7本とやや密であり、一部の岩石ではP波速度が低下している。岩盤中には発破孔の方向から伸びる亀裂が存在し、岩盤の一部に細かく破碎されている部分が見られる。
- ③ 発破面から50cm～1m間では、岩石のP波速度の低下は認められない。発破孔の方向から伸びる数本の亀裂が存在しているが亀裂密度は0～0.2本と少ない。1m地点での最大振動速度は約128cm/s程度であった。なお、この位置に見られる亀裂は隣接したレンズ状のガラス質凝灰岩から伸びるように存在しており、地質上の弱線が発破振動によって開口したと見ることもできる。
- ④ 発破面から1m以上の地点では亀裂、岩石のP波速度ともに変化は見られなかった。また、2m地点での最大振動速度は82cm/sであった。

5. あとがき

本実験では発破による岩盤損傷を明確にするために発破後の近傍岩盤をはぎ取り、目視により発破によって岩盤に発生した亀裂を観察し、弾性波速度などで損傷の定量化を試みた。その結果、実験地点での一例と

いう限定された条件のもとではあるが、亀裂やP波速度を指標として発破の影響を捉えることができた。最後に、実験に際してご指導や数多くの貴重な意見を賜った京都大学工学部足立紀尚教授、大西有三教授、ならびに実験にご協力いただいたハザマ・大成・近畿コンクリート・明生共同企業体、基礎地盤コンサルタンツ(株)の方々に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、李義雄、佐々宏一、伊藤一郎：発破振動とその応答スペクトルについて、日本鉱業会誌/95, 1094, pp. 187～192, 1979. 4.
- 2) 日本トンネル技術協会：トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査報告書、日本トンネル協会、1977.
- 3) 中野研一郎、岡田滋、古川浩平、中川浩二：トンネル掘削における超近接発破に関する研究、土木学会論文集, No. 462/VI-18, pp. 53～62, 1993. 3.
- 4) たとえば、カテロニ、フィ、中川浩二：スウェーデン“A S P O”SKB地下実験施設坑道における坑道周縁の発破損傷について—振動計測による予測—、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 395～399, 1992. 2.
- 5) 工藤洋三、松田浩朗、中川浩二、手塚昌信：弾性波速度を用いた発破振動による岩盤損傷域の推定、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 38～42, 1997. 1.

(1997.7.8 受付)

A STUDY OF BLASTING DAMAGE IN ROCK MASS

Masanobu TEZUKA, Akinori HASUI, Yozo KUDO and Koji NAKAGAWA

Experiments were designed to investigate near field damages caused by blasting in a rock cavern. Six blast holes were detonated with well-designed blast parameters and drilled cores, oriented normal to the blast surface, were obtained sequentially from a retained wall. Covered rocks were removed so as to enable observation of the damage zone. Both the pre-existing cracks and the blast-induced cracks on the wall were observed visually.

Primary waves propagated normal to drilled core axes were measured in order to evaluate blast-induced cracks. It has been found that surrounding region within 30 cm from the blast hole was seriously fractured into small pieces and the region within 50 cm was damaged and resulted in numerous small cracks. Primary wave recovery was found beyond these regions although a few radial cracks were detected up to 1 m from the blast holes. No blast-induced damage was found beyond this region.