

弾性波速度を用いた発破による岩盤損傷域の推定

BLAST DAMAGE STUDY BY ELASTIC WAVE MEASUREMENT OF DRILLED CORES

工藤洋三^{*}・松田浩朗^{**}・中川浩二^{***}・手塚昌信^{****}

Yozo KUDO, Hiroaki MATSUDA, Koji NAKAGAWA, Masanobu TEZUKA

Rock specimens from drilled cores of retained wall were obtained to evaluate the damaged region caused by blasting in a rock cavern. After combining the separated cores in their original positions, elastic waves propagated normal to core axes were measured. Elastic wave's recovery was found at 500 to 600 mm from the blast hole. After the measurement each core was cut into two pieces along the direction parallel to the core axis and careful visual observation was performed. Thin section analysis was performed to observe damaged region in detail. The observation by thin section supports the result of the damaged region obtained from the experiment. The experimental results and the observation show that primary wave velocity is a good measure for the evaluation of damaged zone.

1. まえがき

地下空洞の掘削では作業を効率的に進めるために一般に発破が使用される。発破による振動・波動は広範に及ぶため、しばしば構造物の一部として機能すべき掘削対象外の領域に損傷をもたらす。このため発破によって生じる損傷域について評価しておく必要があるが、損傷域の範囲は岩盤を構成する岩石や不連続面の性質だけでなく火薬の量や装薬孔の間隔など発破の設計条件によっても大きく異なるものと考えられる。

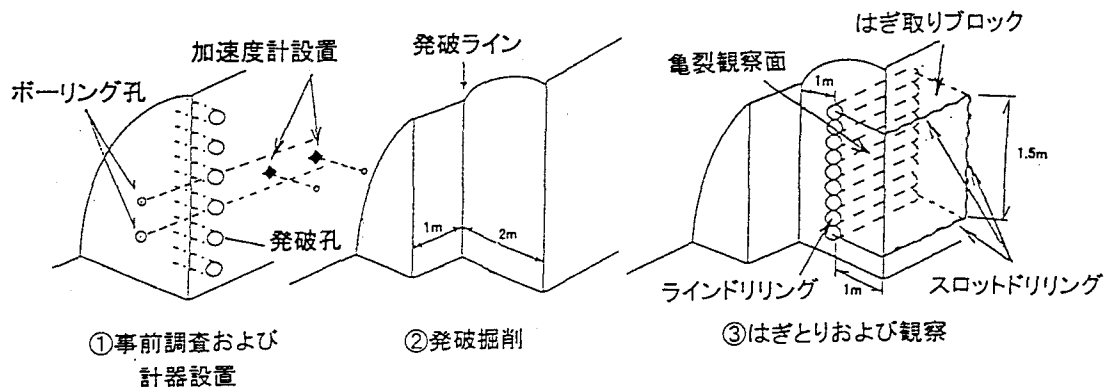
本研究では、発破による岩盤損傷域を評価するために、まず節理など不連続面の影響が小さいと考えられる岩盤について、発破実験を行い損傷域の評価を行う。実験前後の現場における岩盤の観察と実験後に行われたボーリングによって得られた岩石コアを用いて、発破による損傷域を評価する。損傷域の評価は、コア断面を伝播する弾性波速度の測定とボーリングコアから得られた岩石薄片を用いて行う。

2. 実験方法

2.1 原位置試験

発破実験は兵庫県朝来町奥多々良木に建設中の揚水式発電所用の地下空洞で行われた。掘削現場の岩盤の主要な部分は堅硬な流紋岩よりなるが、実験は、この流紋岩の下に堅硬で淡緑灰色の凝灰岩が位置している場所で行われた。発破実験は、図-1 に示すように、①削孔、および計器設置、②発破掘削、③はぎとりおよび観察の順序で行われた。実験の前に2本のボーリング孔を設置し、ここにセメントモルタルを充填し

* 正会員 工博 徳山高専教授 土木建築工学科
** 学生会員 徳山高専専攻科
*** 正会員 工博 山口大学工学部教授 土木建築工学科
**** 正会員 関西電力(株)奥多々良木発電所増設工事建設所所長



た。発破前にはこれらのモルタルは亀裂のない状態にあるので、実験後にモルタル中に見いだされる亀裂はすべて発破の影響を受けたものと考えることができる。実験の際には発破面から 1m および 2m 離れた位置に加速度計を設置して加速度を測定した。実験後に、発破断面の肉眼観察、ボアホールTV観察セメンティングの発破損傷観察などを行った。

発破孔の位置と観察面の関係を図-2 に示す。発破点は6箇所、上2箇所を発破した0.25秒後中央2箇所を発破、その0.25秒後に残りの下2箇所を発破した。本来同時起爆である2箇所を発破点についても、測定された受信信波形には若干の時間差が認められた。火薬の量は上から4箇所は各々0.9kg、下2箇所が1.1kgである。発破面から垂直方向にボーリングを行い、直径約100mm、長さ約200mmのコアを得た。

2.2 供試体の準備

サンプリングしたコアは、発破により部分的に破壊分断されているため、完全に分離した部分は数カ所シアノアクリレート系接着剤を用いて復元した。採取したボーリングコアには上から順に番号がつけられているが、今回復元した供試体は、発破された岩盤の中央部No. 10（以下供試体Aとよぶ）と最下部No. 19（以下供試体Bとよぶ）の2本である。

2.3 彈性波速度試驗

弾性波速度計測のシステムを簡単に示すと図-4のよ

うになる。ボーリングコアの側面から、発振器によって $1\mu s$ の矩形波を発振子（PZT センサー）に送って弾性波を発生させ、ボーリングコアの中心軸を伝播した波動を、対面に設置した受振子で受振した。弾性波速度の測定はすべて気乾状態で行った。

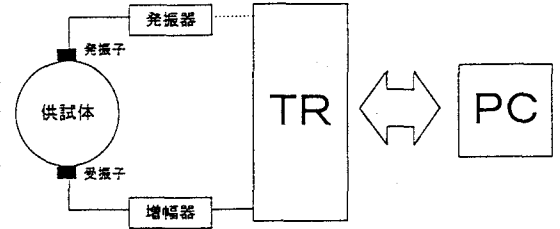


図-4 実験装置の模式図

(TR:トランスジェントレコーダ PC:パソコン)

2.4 損傷域の観察

a) 巨視的なクラックの観察

ボーリングコアを採取した壁面の破損状況は、現場実験の際に観察され、マーキングがほどこされている。し

かし、この壁面はわん曲した面であること、微視的な観察を行う部分から距離があることなどを考慮して、岩石薄片にする前にボーリングコアを軸方向に切断して二部し内部を肉眼で観察した。

供試体を鉛直方向に切断した後、供試体表面を写真撮影した。これにより切断して生じた両方の面が観察されることになり、肉眼によるクラックの判定が容易になる。実際の観察においては、切断した一方の側の写真をミラーイメージにして、もう一方の写真と類似のイメージとし、両方の供試体に共通に認められるクラックのみを観察の対象とした。写真撮影は解像度を大きくするため供試体を4枚に分けて撮影した。この写真は観察を容易にするため、フォトCDに取り込みコンピュータ上で合成、処理した。

b) 顕微鏡による観察

クラックの発達が異なる部分を数箇所選び薄片化し、顕微鏡により観察した。できるだけ広い視野を観察できるように、 $100\text{mm} \times 70\text{mm}$ の大型薄片を使用した。構成鉱物を観察するため偏光板を通し写真撮影を行った。偏光顕微鏡下の撮影では写真の視野が極めて狭くなるため、供試体の下から偏光板を通した光をあて、カメラのレンズにもう一方の偏光板を付け撮影するという方法をとった。

3. 実験結果

3.1 弾性波速度試験

復元された2本の供試体について弾性波速度試験を行った。供試体Aについて、各断面ごとに測定された

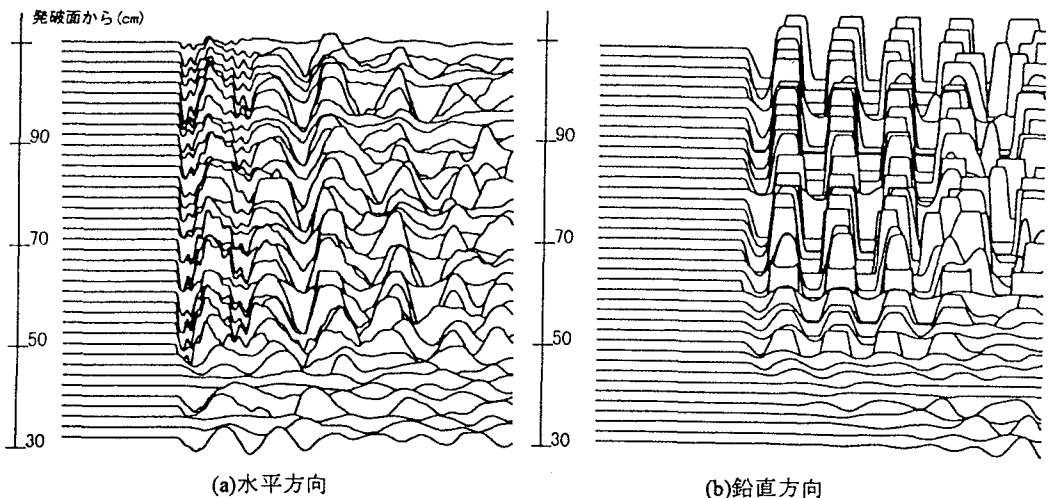
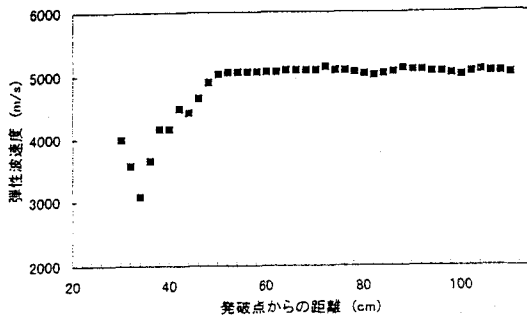
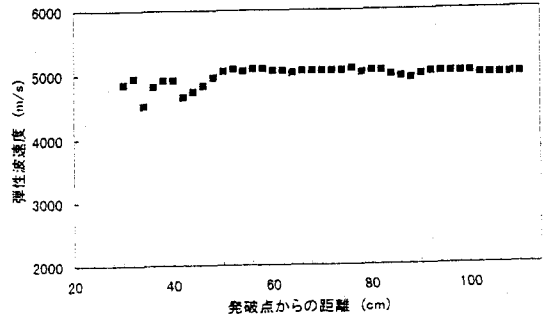


図-5 ボーリングコア内を伝播する弾性波の波形



(a)鉛直方向



(b)水平方向

図-6 ボーリングコア内を伝播する弾性波の速度

弾性波の波形を示したものが図-5である。横軸は時間軸で、縦軸は発破面からの距離を示している。弾性波の立ち上がり部分が右にシフトしているものほど弾性波速度が遅いことを示す。水平方向に伝播する弾性波の波形と鉛直方向に伝播する弾性波の波形が異なっているのは、供試体が完全に円断面でないためである。図-5を概観すると、発破面の近くでは発破面に近い断面を通る弾性波ほど速度も遅く、振幅も小さい。このことは発破面に近い部分の岩石内に発破によって生じたクラックが存在することを示している。

発破による損傷域を判断する場合に、速度情報によって判断する方法と、全般の振幅情報から判断する方法がある。弾性波波形に接触面の状態が大きな影響を与えるので、振幅については、波形解析に供するほどの精度はない。このため本研究では振幅情報は参考データとしてのみ用い、以下は速度情報をもとに議論することにする。

図-6は供試体Aについて、発破面からの距離と弾性波速度の関係を示したものである。前述したように発破面近傍では発破面から遠ざかりにつれて弾性波速度増加する傾向を示しており、発破面から十分に離れた点では弾性波速度はほぼ一定で、その値も現場で測定された弾性波速度（5200m/s）にほぼ等しい。

供試体Aの水平方向の弾性波速度が鉛直方向の弾性波速度の変化に比べて小さいのは、両者の測定に時間差があったためである。すなわち、鉛直方向の測定の際に使用したグリスが岩石内に侵入し、弾性率を増加させたために生じたものである。

供試体Aについては、両方向の弾性波速度についても発破面から50cm付近で岩盤の持つ本来の弾性波速度に回復している。供試体Bについては、鉛直方向は36cm付近で、水平方向は50cm付近で弾性波速度が回復した。これは、36cmから50cmの部分で鉛直方向のクラックが発達していることを示している。

3.2 切断面の観察による損傷域の推定

図-7は、合成された写真や、供試体の直接観察により得られた情報をもとにスケッチしたものである。現場実験の直後に観察されたクラックは太い実線で、実験室内の観察で新たに観察されたクラックは細い実線で示してある。鉛直方向にボーリングコアを切断した断面なので、鉛直面にほぼ垂直な方向のクラックに関する情報を与える。

図-7は、観察をていねいに行うことによって、全体としてクラックの数は増えることを示している。図-7の①は、凝灰岩の線構造と平行なクラックの代表例である。また発破面に近い部分には②に示されるような圧砕領域も認められた。

図-7から明らかなように、供試体Aは発破面から54cmまで鉛直方向にクラックが発達している。また水平方向のクラックの発達は64cmまでにおよ

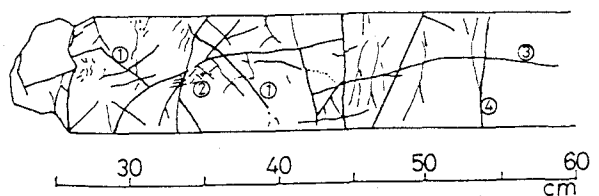


図-7 切断面の観察結果

んでいる。③に示すクラックはほぼ水平面内に分布しており、直線性の高いクラックとして切断面の両面に認められたが図-7(a)の弾性波速度には反映されてない。④に示すようなクラックの存在も弾性波速度の減少をもたらしてないが、これは、鉛直方向に進行する弾性波がこの方向のクラックに鈍感なためである。

3.3 岩石薄片を用いた損傷域の観察

図-8は、切断面をベースとして作製された岩石薄片の観察結果を示したものである。薄片の製作前に、クラックの識別のために染色されたシアノ

アクリレートを含浸させてある1)ので、薄片観察の際にオープクラックは赤く染色されるようになっている。図-8は、観察されたクラックの内部が染色されているものを太い実線で、そうでないものを細い実線で示してある。

図よりまず明らかなことは、薄片観察によって観察されるクラックは全体として増加するが、必ずしも切断面の観察と一致していないことである。たとえば、線構造と関連したクラックの中で、切断面の観察では認められながらも、薄片観察ではその存在が確認されない場合もある。

1つの連続するクラックと考えられた図-7の③のクラックが、図-8(b)より明かなように、発破面から約48cmの位置で不連続となっていることである。すなわち、発破面から48cmの位置より左側はオープクラックからなり、この位置で不連続となって、これより右側ではクラックの内部は方解石で充填される形で閉じている。すなわち発破による損傷域ではない。

以上の議論から弾性波速度試験によって得られた結果と、切断面の観察や薄片の観察によって得られた結果はよく一致しており、こうした手法が発破による損傷域の観察に有効であることを示している。

4. あとがき

本研究では、発破によるトンネル周辺部の損傷域を正確に評価することを目的として、発破実験によって得られた兵庫県産の凝灰岩のボーリングコアを用いて、弾性波速度試験や肉眼・顕微鏡によるクラックの観察を行ってきた。発破による岩盤損傷域の実験現場における観察、ボーリングコア切断面の観察、薄片観察によるさまざまな段階の観察では、同一断面を観察しても、検出されるクラックの量に変化が認められ、一般に観察視野を狭くしていくことでクラック数が増加する。また、弾性波速度に影響を及ぼす岩石内の構造が、ボーリングコア切断面の観察および薄片観察により明らかにされ、ボーリングコア内部の損傷域の評価については、弾性波速度の測定が比較的正確な評価を与えることが明らかにされた。

謝辞 本研究を進めるに当たり、間組技術研究所蓮井昭則氏には資料の整理などをお願いした。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 西山孝, 日下部吉彦: *7次方シリカ反応生成物染色と顕微鏡観察*, 土木学会論文集, 第390号, pp. 107-112, 1988.
- 2) 蓮井昭則, 山下亮, 世一英俊, 中川浩二, 高周波波動を用いた孔間弾性波測定による施工時岩盤の調査とモニタリング, 土木学会論文集, No.492/V1-23, pp. 97-106, 1994
- 3) Yang R., P. Rocque, P. Katsabanis and W. F. Bawden, Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the area adjacent to blast hole, Proc. 4th Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, pp. 137-144, 1993

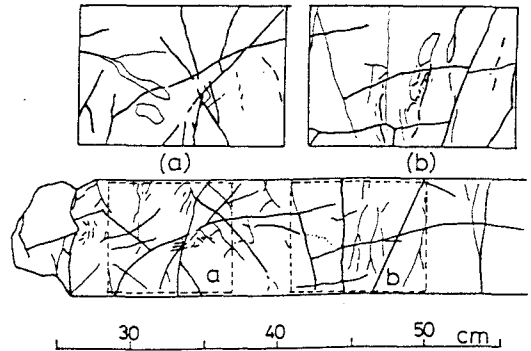


図-8 岩石薄片による観察結果