

(66) 弾性波の全周トモグラフィによる空洞掘削の緩み評価

---地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価（その4）---

(株)大林組 技術研究所 桑原 徹、金田義行、平間邦興

(株)大林組 土木技術本部 玉井昭雄

Evaluation of loosened zone in the excavation of underground using seismic tomography data in the horizontal cross section

--- Geotomography Experiments and Evaluation of Rock Properties at Underground Laboratory Site,
Kamioka Mine, Japan (Part 4) ---

Toru Kuwahara, Yoshiyuki Kaneda, Kunioki Hirama *Tech. Res. Inst., Obayashi Corp.*

Akio Tamai *Civil Eng. Tech. Division, Obayashi Corp.*

Abstract

The authors carried out the seismic tomography in the horizontal cross section before and after the excavation of experimental tunnels in the underground laboratory site. We tried to evaluate the character of loosened zone such as width, fracture, velocity, and attenuation. In the tomography analyses, velocity and attenuation analysis, and also numerical simulation of attenuation were carried out based on the results of velocity analysis. We could infer (1) the initial geological structure, (2) loosened zone by momentary tunnel excavation, and also (3) long term creep deformation for 2 years (probably non-linear elastic deformation by opening of fractures) after construction of laboratory site, using both velocity structure and attenuation properties.

1 はじめに

トモグラフィ探査技術については、筆者らは測定・解析・シミュレーション技術および岩盤物性評価について体系化を進めてきた。地下実験施設を利用したトモグラフィの探査結果は、すでにその一部を報告してきた^{1)~3)}。今回は馬蹄形の坑道の側壁面に発振点・受振点を設置し、掘削の前後にわたり、馬蹄形内部の岩盤の水平断面について、弾性波による全周トモグラフィを実施し、地下空洞の緩み評価を実施した。

2 測定・解析条件

2.1 測定条件

第1回目の測定は坑道側壁全周にわたり（図-1A）、第2回目の測定は新たに掘削した坑道（図中の試験坑道）を利用し、坑道側壁の約半分について行った（図-1B）。発振は雷管発破、受振は1成分ジオフォン（28Hz）により実施した。データ収録は（株）応用地質社製のMcSEIS-170(24ch)を3台接続して行った。測定は発振・受振点とも基本的には2m間隔で実施したが、2回目の測定では新設坑道の側壁部分については、緩み領域の精査の意味あいからも、受振点間隔を1mと密にとった。1回目の測定では、発振点は61箇所、受振点はデータ収録装置間の波形確認のために、同じ点で重複観測を行ったために68箇所である。第2回目では、発振点は52箇所、同様な理由から受振点は69箇所である。

2.2 解析条件

解析の流れは図-2に示すように、速度解析・減衰解析実施後、速度解析結果に基づく減衰特性の数値シミュレーションを実施し、解析結果の総合的な評価を行った。また解析は1m x 1mのセルサイズで行った。速度解析および減衰解析は、観測データが4000以上にも及ぶので、SIRT法を用いて行った。

3 トモグラフィ解析結果

3.1 1回目の解析結果

速度解析の結果を図-3Aに、減衰解析の結果については、初動振幅の片振幅データによる結果を図-3Bに、また1波長の全振幅による結果を図-3Cに示す。(1)速度解析結果：概ね5.0-5.7km/secの範囲にある。坑道側壁周辺部では岩盤の緩み領域を表すと考えられる5.0-5.2km/secのやや速度の低い部分が認められる。これは特に図中右下および左下コーナー部分に広く認められる。(2)片振幅データによる減衰解析結果：減衰定数の逆数($1/\alpha$)の分布によると、速度解析と同様に、坑道側壁周辺部では岩盤の緩み領域を表すと考えられる大きな減衰帯が認められる。全体として側壁周辺から岩盤中央部に向かって同心円状に減衰特性が小さくなる傾向にある。(3)全振幅データによる減衰解析結果：減衰特性の傾向は、片振幅による減衰解析結果と極めてよく類似しており、同心円状に減衰特性が小さくなっている。(4)速度解析と減衰解析との対応性：坑道側壁周辺では岩盤の緩み領域を表すやや速度の低い部分と高い減衰性を表す部分がある点で一致している。しかし中央部に関しては、速度分布では図中上側のやや速度の大きい部分(Aブロックと呼ぶ)と下側のやや速度の小さい部分(Bブロックと呼ぶ)の2ブロックに分かれるが、減衰特性では中央部で低減衰帯の形状がややくびれるものの顕著な違いは認められない。また速度の変化($V_{\max}/V_{\min}-1$)が14%と小さいのに対して、減衰特性の変化 $[(1/\alpha)_{\max}/(1/\alpha)_{\min}-1]$ は、4.9倍と極めて大きい。これらの原因の一つとして亀裂面のラフネスの違いが考えられる⁴⁾。

3.2 2回目の解析結果

1回目と同様に、速度解析・片振幅および全振幅による減衰解析の結果を、それぞれ図-4A、4B、4Cに示す。(1)速度解析結果：概ね4.7-5.7km/secの範囲にある。1回目の解析結果と比較すると、新設坑道の掘削により新設坑道側壁部分のみならず岩盤全体の速度の低下が認められる。すなわち、第1回目では5.4-5.7km/secとやや速度の大きいAブロックは、2回目では5.2-5.6km/secへ、一方第1回目では5.2-5.4km/secとやや速度の小さいBブロックは、2回目では4.7-5.2km/secへとそれぞれ低下している。(2)片振幅データによる減衰解析結果：減衰定数の逆数($1/\alpha$)の分布によると、新設坑道掘削により側壁周辺の高減衰領域が拡大し、低減衰領域は図中の上下に2つに分かれてくる。また図中右上端部(既設の外周坑道と新設坑道との間に残った厚さ約10mの岩盤)が、速度の低下はあまり見られないものの、著しい高減衰帯となっている。(3)全振幅データによる減衰解析結果：減衰特性の傾向は、片振幅による減衰解析結果とほぼ同様である。(4)速度解析と減衰解析との対応性：図中右上端部を除くと、速度と減衰の特性は良く一致している。1回目との比較では、新設の坑道掘削により、新設坑道の側壁周辺では岩盤の緩みが進むとともに、岩盤全体が劣

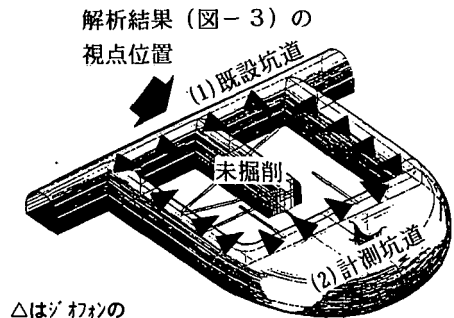


図-1A 1回目測定配置概念図

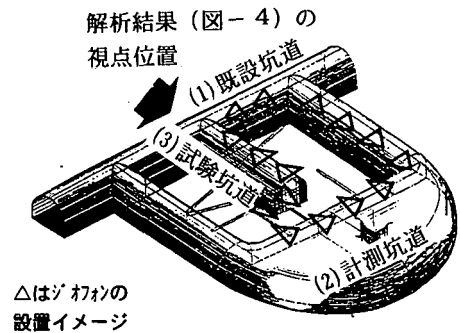


図-1B 2回目測定配置概念図

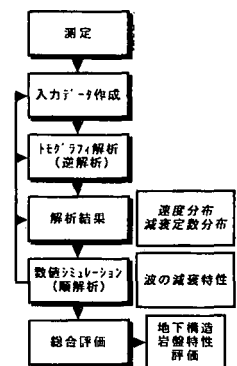


図-2 測定・解析の流れ

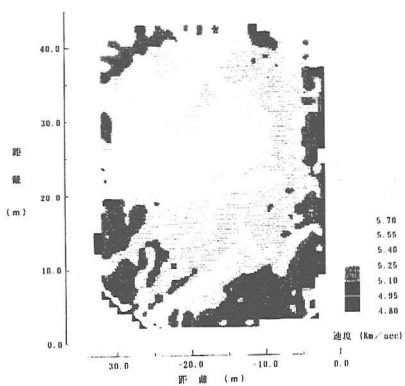


图-3A 1回目速度解析

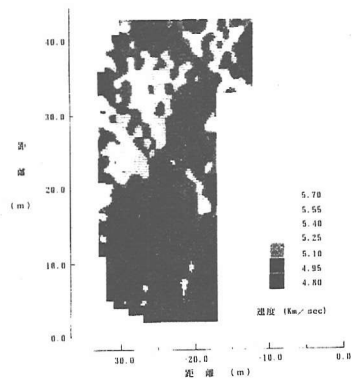


图-4A 2回目速度解析

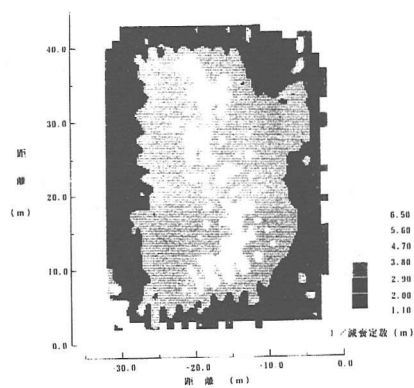


图-3B 1回目減衰解析 (片振幅)

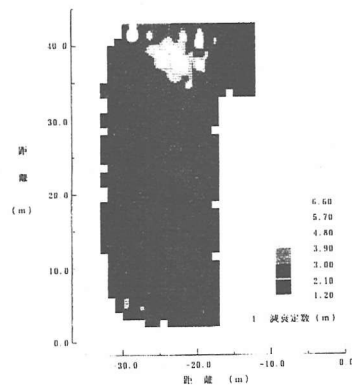


图-4B 2回目減衰解析 (片振幅)

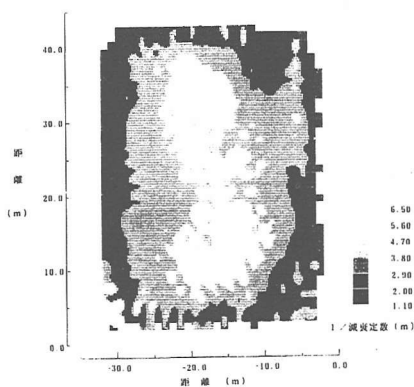


图-3C 1回目減衰解析 (全振幅)

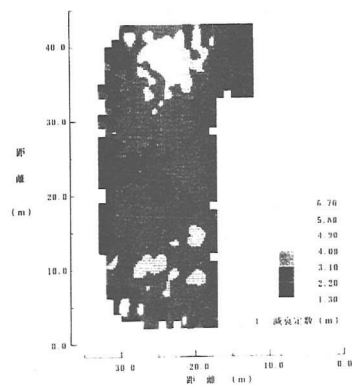


图-4C 2回目減衰解析 (全振幅)

化していく様子を示している。また領域における速度の変化は21%、減衰特性の変化は片振幅で4.5倍、全振幅で4.2倍と、減衰の変化が大きい。これは1回目と同様な傾向である。

3.3 数値シミュレーション

図-3Aの速度解析の結果を基にして、動的応答関数(FEM)により、初動振幅の波形をシミュレーションした。シミュレーション波形の一例を図-5に示す。図-6には、標準化したシミュレーション波形および観測波形からそれぞれ得られた相対的な振幅比を示す。これらの間には良好な相関が見られる。シミュレーションに用いたパラメータから求められた減衰定数 h は、岩盤周辺の緩み領域で0.02、中心部で0.01である。これは既往報告の孔間トモグラフィで得られた減衰定数¹⁾とも良い対応を示している。

4 緩み領域の評価

4.1 岩盤の初期構造

実験場の岩盤は飛騨片麻岩からなり、坑壁では片麻岩質花崗岩(伊西岩)・黒雲母角閃岩が主に分布し、結晶質石灰岩・アブライトも一部で見られる。坑壁での亀裂調査によると、卓越する方向は亀裂全体でN45W,74N(図-7A)、1m以上の亀裂でもN65W,61N(図-7B)であり、さらにボーリング孔内での亀裂調査結果を加えても、全体としてNW-SE性が卓越している⁵⁾。これらは実験場近くにあるNE-SW性の跡津川断層と共役の関係にある。

トモグラフィの結果ではこのような亀裂集中帯は認められないが、岩体内部での速度の変化(A,Bブロックの境界)はこのNW-SE方向に支配されている。また最も速度の大きい部分は、おおそ石灰岩に対応している。

4.2 掘削による緩み評価

今回の地下実験施設では、掘削断面の大きさおよび初期地圧に対して岩盤強度が比較的高いため、短期的な応力の再配分による大きな強度劣化領域は発生しにくいと予想される。したがって掘削による緩み領域は概ね発破によるものと考えられる。ここではPS検層、ポアホールスキャナ、孔内水平載荷試験から、発破による緩み領域は0.8-1.6mと推定されている⁶⁾。これは1回目のトモグラフィにより坑道側壁周辺で認められる低速度および高減衰帯の部分と一致している。

また坑道側壁では多数の亀裂が認められるのに対して、ボーリング孔内では亀裂は少なく、やや内部の岩盤の透水性は 10^{-8} から 10^{-9} cm/sec程度と極めて小さい⁷⁾というも、1回目のトモグラフィ結果とも対応している。また坑道側壁の亀裂分布から得られるクラックテンソルの F_0 の大小^{8),9)}とトモグラフィから推定される坑壁緩み領域の速度分布も、おおそ対応が認められた。

また2回目の解析結果によると、新設坑道側壁沿いの緩みは1mから3m程度であり、坑道の奥ほど緩み範囲が小さい。また図-4B、4Cの右上の

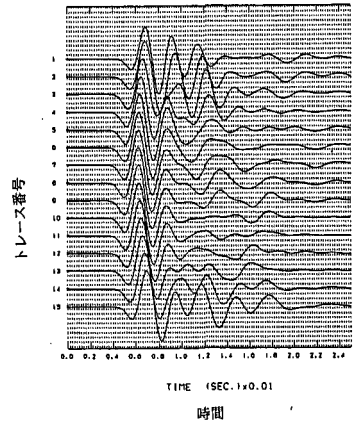


図-5 シミュレーション波形

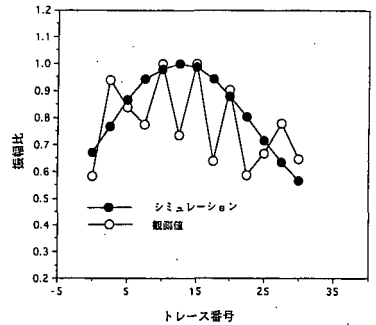


図-6 初動振幅比

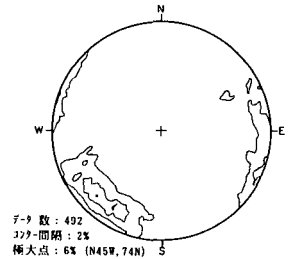


図-7A 亀裂分布(全体)

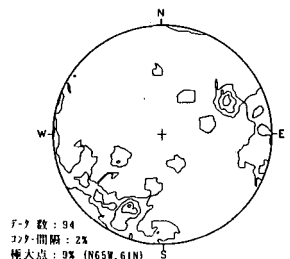


図-7B 亀裂分布(1m以上)

高減衰帯は約10mの幅がある。掘削解析からはこの部分に過大な緩みの発生は考えにくい、図-3Bの右上コーナーでも減衰は大きいので、掘削によりこの部分が移動・拡大したとも推定される。またこの付近にはNW-SE性の亀裂が多く¹⁰⁾、これらは新設坑道の切羽に平行となっているので、トモグラフィの波線が亀裂群に直交する。そのためにインピーダンスが大きく反射波が強くなり、結果的に透過波が減少し見掛け上減衰が大きくなっている¹¹⁾可能性もある。なお調査領域は鉱山全体としてみれば不飽和領域であるので、緩みに伴う領域の飽和/不飽和特性は考慮していない。

4.3 岩盤全体の緩み評価

当実験施設の掘削解析が予備的に実施されているが、通常の解析条件（弾性/弾塑性、亀裂分布情報の有無など）では、トモグラフィで得られたような

岩盤全体の速度の低下（岩盤全体の緩み）に対応するような、大きな変形領域は再現されていない。そこで今回のトモグラフィの結果を、掘削による短期的な緩み（上述の発破によると判断されるもの）と、長期的な緩み（開口亀裂による非線形弾性的な長期クリープと思われるもの）とに分けて、時間効果を含めた速度の変化を概念的に図-8に示した。馬蹄形の坑道掘削直後の弾性波速度を、実験場でのPS検層結果から6.2km/secと想定すると、図-3AのAブロックでは2年間（PS検層から2回目のトモグラフィまで）で13%、4ヵ月（1回目から2回目のトモグラフィ）で3%の速度低下が、またBブロックでは4ヵ月（同上）で6%の低下が認められた。岩石試料の暴露試験から推定された長期劣化（非線形弾性的）による岩盤物性の低減率は、半年で5%、2年で約7%である¹²⁾。これらによると物性値の低減は指数関数的に減少し、ある時間でほぼ一定値に収束するが、今回はデータ数が少ないのでこのような詳細な時間的变化については推測の域を出ない。しかし今回のトモグラフィ結果は、いずれにしてもこの暴露試験による低減率よりもかなり大きい。

5 まとめ

今回鉱山中に設置した地下実験施設を利用して、弾性波を用い医学分野のCTスキャン的なトモグラフィを行い、速度解析・減衰解析・数値シミュレーションを実施した。その結果当初の岩盤構造に加えて、短期的および長期的な緩みを反映したと考えられる速度および減衰特性の変化を検出できた。今回の岩盤は元来極めて安定した岩盤で、また掘削断面も決して大きいわけではないが、それにもかかわらず緩みが時間とともにかなり進行していることが明らかになった。今後このような現象を解析的にも再現できるように検討したい。

参考文献 1) 桑原、他：大規模地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価（その1）、大林組技術研究所報、No.49、1994、2) 桑原、他：地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価（その3）、土木学会第49回年次学術講演会概要集第3部、1994、3) 金田、他：減衰トモグラフィの応用実験、物理探査学会第91回学術講演会講演論文集、1994、4) 谷本、他：き裂における弾性波伝播挙動を考慮したジオトモグラフィに関する基礎的研究、第9回岩の力学シンポジウム講演論文集、1994、5) 玉井、他：トンネル掘削による不連続性岩盤の三次元的力学挙動の研究、同上、1994、6) 玉井、他：制御発破工法と岩盤への影響度、トンネルと地下、第24巻4号、1993、7) 須藤、他：低透水性岩盤の亀裂特性と原位置透水試験・透気試験結果について、土木学会第49回年次学術講演会概要集第3部、1994、8) 土原、他：神岡実験場における岩盤き裂特性評価（その1）、土木学会第48回年次学術講演会概要集第3部、1993、9) 鈴木、他：同（その2）、同上、1993、10) 小杉、他：神岡鉱山におけるジョイント標定と特性評価、ジョイント変位計の開発、第9回岩の力学シンポジウム講演論文集、1994、11) 桑原、他：トモグラフィ技術による地盤・岩盤探査の研究（その2）、大林組技術研究所報、No.46、1993、12) 平間、他：岩盤の長期変形性推定の試み、土木学会第43回年次学術講演会概要集第3部、1988

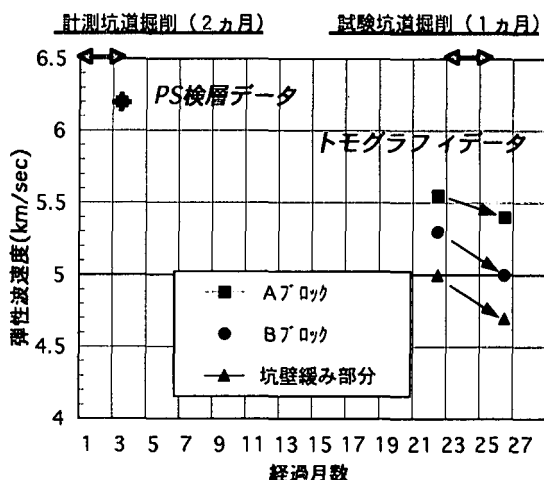


図-8 掘削後の経過時間と弾性波速度