

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2）

——弾性波・電磁波・比抵抗による空洞解析と岩盤緩み評価——

桑原 徹 上野 孝之 金田 義行 鈴木 健一郎
並木 和人 平間 邦興 玉井 昭雄 永久 和正
(本社 土木技術本部
技術第2部) (本社 土木技術本部
技術第2部)

Geotomography Experiments and Evaluation of Rock Properties at Underground Laboratory Site, Kamioka Mine, Japan (Part 2)

——Evaluations of Cavity Distribution and Loosened Zone in Tunneling Using Seismic,
Radar and Resistivity Tomography in Cross Hole Array——

Tohru Kuwahara Takayuki Ueno Yoshiyuki Kaneda Kenichirou Suzuki
Kazuto Namiki Kunioki Hirama Akio Tamai Kazumasa Nagahisa

Abstract

In the previous paper (part 1) we described the rock mass evaluation carried out using the seismic, radar, and resistivity tomography at the underground laboratory. This paper (part 2) describes the evaluation of cavity distribution and loosened zone in tunneling at the same site under the same experimental conditions. Consequently, the evaluations could be shown by seismic and radar velocity analyses, and also by the ratio of resistivity. We also calculated the deformation and shear stress around the cavities using the linear elastic model of 2-dimensional rectangular heterogenesis modeled by crack tensor. Tunneling was accompanied by a decrease in velocity corresponding to an expansion of the loosened zone, as well as an increase or decrease in resistivity due to changes in groundwater saturation.

概 要

（その1）研究報告では、地下実験施設を利用して、弾性波・電磁波・比抵抗によるクロスホールトモグラフィを実施し、各種の岩盤評価を行った。今回の（その2）は、前回の探査領域の中央部に新たな坑道を掘削した後、同じ条件で測定を再度行い、トモグラフィによる空洞の再構成と岩盤緩み評価を実施した。その結果、弾性波・電磁波トモグラフィでは初動走時による速度解析が有効であり、比抵抗トモグラフィでは比抵抗変化率により明確に再現できた。亀裂情報をクラックテンソルで表し、2次元直交異方性モデルの線形弾性解析を行った結果によると、弾性波速度の低下は、変形量と対応しており、岩盤の緩み範囲として把握できた。また比抵抗値の増減は、掘削時の緩みにより生ずる地下水の不飽和化あるいは浸透に対応して評価することができた。以上から、掘削解析との併用あるいは繰返し測定によるモニターにより、施工管理技術として岩盤状況の把握にも有効であると考えられる。

1. はじめに

（その1）研究報告では、岐阜県神岡町神岡鉱山に設置した当社の地下実験施設を利用して、弾性波・電磁波・比抵抗によるボーリング孔間のトモグラフィを実施し、各種の岩盤評価を行った。トンネルおよび地下空洞の設計の際には、岩盤の緩み評価は考慮すべき重要な要素の一つである。そこで今回の研究報告（その2）は、前回の探査領域の中央部に新たな坑道を掘削した後、同じ条件で測定を再度行い、トモグラフィによる弾性波速度と比抵抗値の変化から空洞の再構成と岩盤緩み評価を実施した。併せて掘削解析の面からもトモグラフィ解析結果の評価を行った。

2. 探査実験の流れと測定・解析条件

地下実験施設の概念図を図-1に示す。図中に示した、2本のボーリング孔を利用して、クロスホール・トモグラフィを実施した。探査実験の流れを図-2に示す。今回のトモグラフィ測定は、ボーリング孔間、および試験坑道内壁～ボーリング孔内間で実施した。これらの測定・解析条件を表-1に示す。地質条件、各トモグラフィの基本的な測定・解析条件、およびこれらの流れについては、（その1）を参照されたい。

3. トモグラフィ解析結果の検証

今回の（その2）解析結果は、空洞およびその周辺の

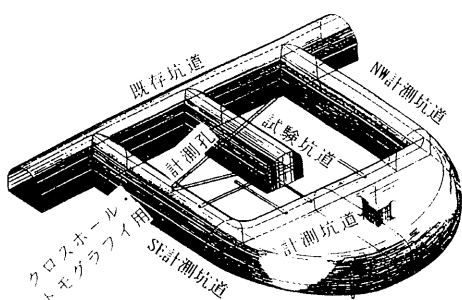


図-1 地下実験施設の概要と実験位置

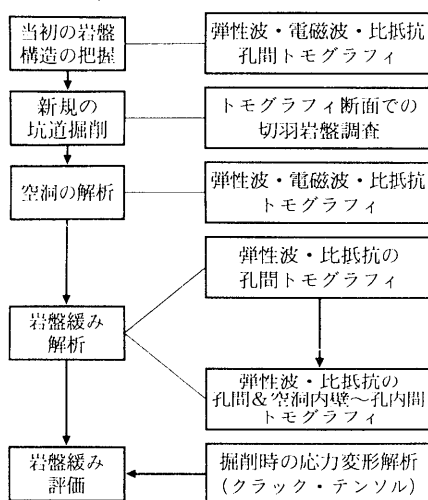


図-2 探査実験の流れ

緩み領域を除いて、(その1)解析結果と同様な傾向が得られるはずである。このためにはトモグラフィ結果の妥当性について検証しておく必要がある。(その1)においても各種岩盤調査結果から、妥当性を評価したが、新規の試験坑道掘削に際しても、トモグラフィ測定断面での切羽岩盤の調査を行い、(その1)のトモグラフィ解析結果を再度検証した。

3.1 切羽調査結果

写真-1の切羽地質状況によると、切羽写真中の左右で岩質が異なる。切羽右側では、黒色のれき状を呈する角閃石黒雲母片麻岩が卓越している。切羽左側では、優白色で塊状の伊西岩(花崗岩質片麻岩)が見られる。微小亀裂は多数見られるものの、主要な亀裂としては、切羽の右上から左下に延びる小規模な断層と、連続性に乏しい節理が若干認められるだけである。断層面には滑りの跡や角閃石片麻岩の薄層が認められる。

屈折法弾性波探査によると、切羽面から0.3~0.5 mにおいては0.6~1.67 km/sec、それ以降では3.57~3.91 km/secであり、孔間トモグラフィの結果(5.25~5.75 km/sec)と比べてかなり低い。測定は掘削直後に実施したが、掘削による緩みのため速度はやや小さい。

写真-1におけるNo.1~No.6地点で採取した試料に対して、X線分析を実施した。表-2に示す分析結果に

表-1 測定・解析条件

トモグラフィ	クロスホール測定	試験坑道内壁~ボーリング孔内
弾性波	測定 測定間隔 解析手法	発振・受振1m間隔 SIRT法
電磁波	測定間隔 解析手法	発信・受信1m間隔 CG法
比抵抗	測定間隔 解析手法	電流電位電極 間隔1m アルファセンター法、FEM

表-2 X線分析結果

試料No.	石英	斜長石	カリ長石	角閃石	方解石	珪灰石	緑泥石	雲母	赤鉄鉱
No.1	+				++	++	+		+++
No.2		16	16	30	5		65		
No.3		26	12	100	4		100		
No.4	56	43	100		2		7	100	
No.5	100	100			3		6	65	
No.6	50	86	84		2		15	67	
No.7	10				100				
No.8					33	100			

No.1: 赤色岩片, No.2-3: 角閃石片麻岩, No.4-6: 花崗岩質片麻岩, No.7-8: 計測坑道の石灰岩
+, ++, +++: No.1における相対的な含有量, 数字: No.2~No.8の試料における相対含有量%

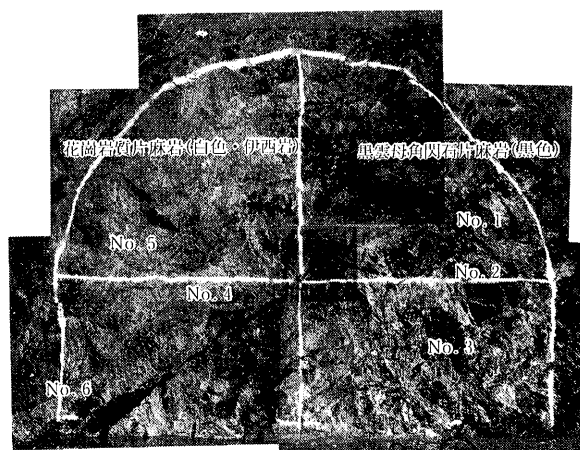


写真-1 トモグラフィ断面の岩盤状況

よると、以下のような特徴が認められる。

① フィルム状の赤色岩片 (No.1 試料) は、水酸化鉄からなる赤鉄鉱であり、長期間地下水の水みちがあったことを示す。

② 石灰岩含有量については、角閃石片麻岩の方が伊西岩よりも約2倍の石灰岩を含むと言える (No.2~No.5 試料)。(その1)では、トモグラフィ計測孔のコア試料における石灰岩含有量の差は、数倍~数十倍であった。

これと比較すると、今回の含有量の差は著しく小さい。偏光顕微鏡観察によると、脈状方解石が多く、石英や黒雲母等を交代置換した方解石も一部に認められた。

③ 計測坑道の結晶質石灰岩を基準にすると (No.7, 8 試料), 伊西岩や角閃石片麻岩における石灰岩含有量は 2~5%程度と見なせる。

3.2 トモグラフィ結果の検証

トモグラフィ解析結果は(その1)を参照されたい。切羽断面内では、地質観察によれば左右両側で岩質的に明確な変化が認められた。これに対応するようにトモグラフィによる結果では、切羽右側が“低速度帯-高減衰帯-低比抵抗帯”の一部に該当し、切羽左側は“高速度帯-低減衰帯に漸移する途中のやや速度の大きい、減衰の小さい部分”として特徴づけられる。

また弾性波・電磁波で解析された「亀裂帯(低速度帯-高減衰帯-低比抵抗帯)」の実態は、切羽右側の亀裂性・ブロック状・ゼノリス状の角閃石片麻岩に対応するものであった。赤鉄鉱の存在も、電磁波の減衰をいっそう促進したものと考えられる。

一方、岩質および石灰岩含有量からみると、切羽右側が、角閃石片麻岩により、高比抵抗帯・低減衰帯となるはずであるが、電磁波・比抵抗トモグラフィの結果とは相反している。これは、含有量の差が少なかったため、“亀裂帯からの地下水浸透・高含水状態”による影響が、“石灰岩含有量”による局所的な影響を上回ったためと考えられる。

以上から(その1)の解析結果は妥当と判断され、これを基にして今回の(その2)を実施することになる。

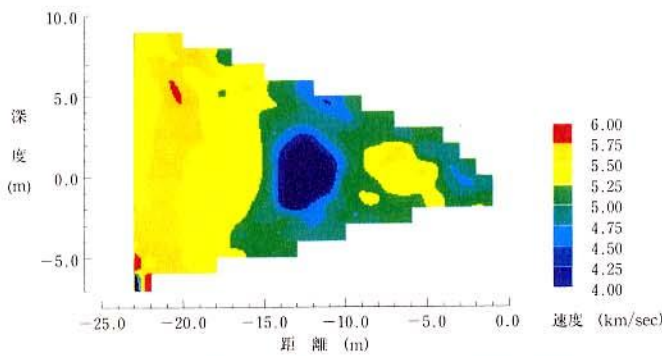


図-3 弾性波トモグラフィによる速度解析結果

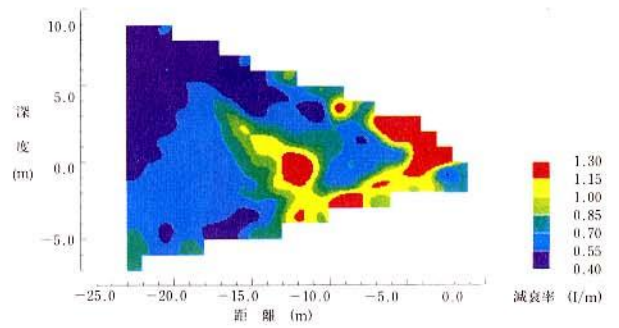


図-4 弾性波トモグラフィによる減衰解析結果

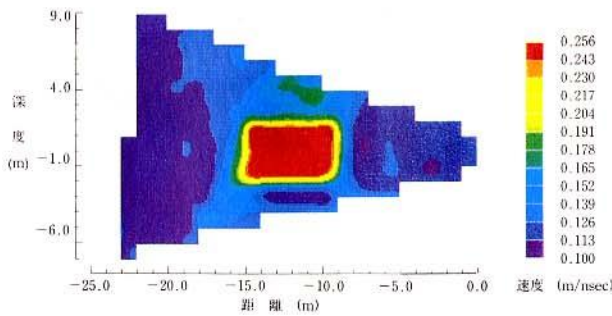


図-5 電磁波トモグラフィによる速度解析結果

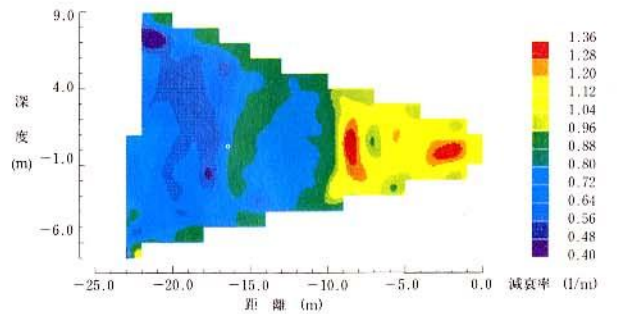


図-6 電磁波トモグラフィによる減衰解析結果

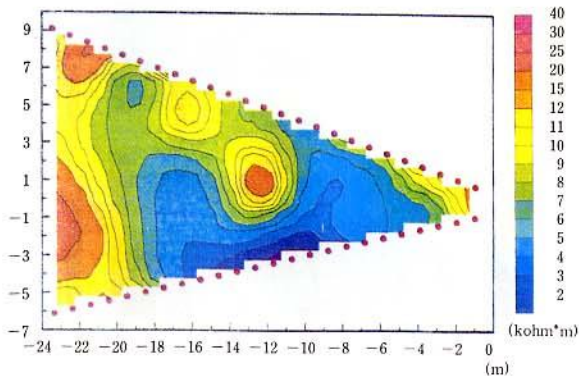


図-7 比抵抗トモグラフィによる解析結果

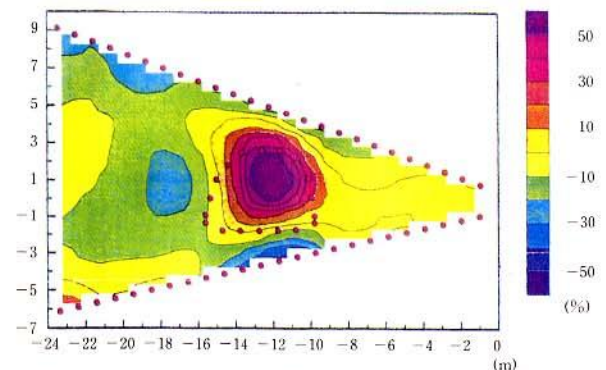


図-8 比抵抗トモグラフィ解析結果の変化率

4. トモグラフィによる空洞解析

各トモグラフィによる空洞分布の再構成結果を示すが、いずれにおいても良好な結果が得られた。ここでは解析領域に対して空洞が十分大きく、地下水ではなく空気で満たされているので、弾性波・比抵抗でも良好に再構成できた。

4.1 弾性波トモグラフィ

図-3は、孔間データを用いた屈折波線による解析結果である。空洞は、周辺岩盤に対してコントラストの大きい低速度帯として再構成されており、概ね実際の空洞と一致している。直線波線と屈折波線を比較すると、前者の方が解は発散しにくい、空洞形状がやや小さく楕円形状に再現されており、後者はやや発散しやすいが、空洞形状はよりいっそう真の形状に近い。

初動振幅による解析結果を、図-4に示す。空洞を反映する高減衰帯が再構成されているが、位置・大きさとも実際の空洞とはやや異なり、解析領域全体での発散性が高い。これは半振幅および全振幅のいずれにおいても同様であった。したがって、減衰による精度の高い空洞の再構成については、今後の課題である。

4.2 電磁波（レーダー）トモグラフィ

速度解析の結果を図-5に示す。岩盤部分の速度はおおよそ11~13 cm/nsecであり、坑道掘削前に測定解析

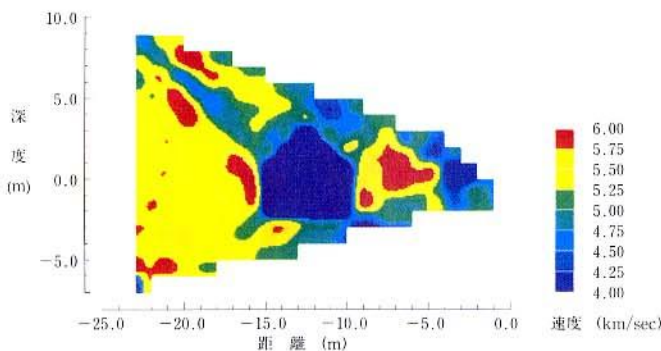


図-9 弾性波トモグラフィによる速度解析結果
(孔間データのみ)

した平均速度とほぼ等しい。空洞部分の速度は約25 cm/nsecで再構成され、空気中の電磁波速度約30 cm/nsecよりも小さいものの、岩盤の約2倍の高速帯として再構成されており、空洞が概ね再現されている。

減衰解析の結果を図-6に示す。これによると、空洞の空気と岩盤境界でのインピーダンスが大きく、透過波の減衰が大きくなるため、空洞部が低減衰領域として再構成されることはなかった。

4.3 比抵抗トモグラフィ

図-7の解析結果によると、比抵抗により再構成された空洞は、実際の空洞よりもやや小型で、上側によっている。ここでは当初の低比抵抗帯の中に高比抵抗の空洞として表されている。すなわち、低比抵抗帯はやや水を含んだ岩盤の亀裂帯を表し、高比抵抗帯は空気からなる(水で満たされていない)空洞を表している。また図-8のように、比抵抗に関して(試験坑道掘削後の比抵抗値)/(試験坑道掘削前の比抵抗値)という比抵抗変化率で表すと、空洞形状のコントラストはさらに明確になり、空洞位置も比抵抗値のみよりも、正しい位置に示されている。以上の点から、空洞については比抵抗変化率によりほぼ確定することができた。

5. トモグラフィによる岩盤緩み領域の解析

空洞掘削による岩盤緩み領域の詳細な解析は、通常の

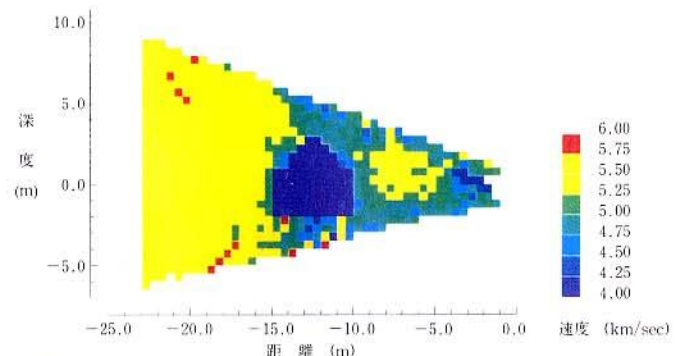


図-10 弾性波トモグラフィによる速度解析結果
(孔間データ+空洞内壁~ボーリング孔間データ)

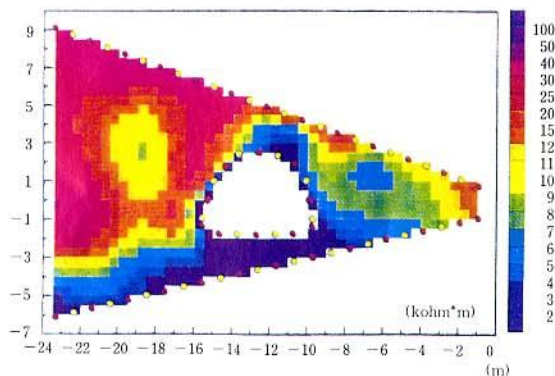


図-11 比抵抗トモグラフィによる解析結果

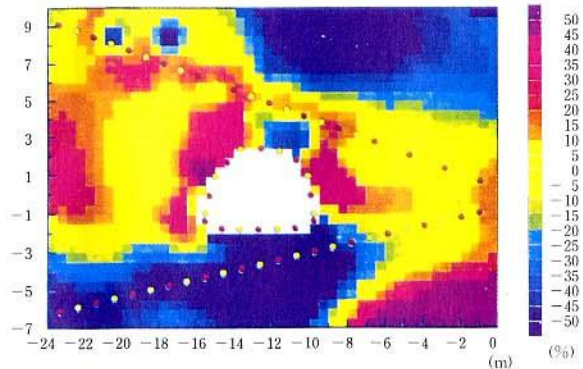


図-12 比抵抗トモグラフィ解析結果の変化率

孔間データに加えて、空洞内壁～ボーリング孔内の測定データも加えて行が必要があった。そこで測定装置の設置条件から、弾性波・比抵抗について行った。

5.1 弾性波トモグラフィ

ここでは、空洞を初期条件として組み込んで、空洞周辺の緩み領域のトモグラフィ解析を行った。すなわち、空洞部分を1.0 km/secとして初期モデルを作成し、屈折波線で解析を行った。この初期モデルに対してインバージョンを繰返すと、スネルの法則により空洞部分は低速帯として残り、空洞周辺の緩み領域を詳細に解析することができるはずである。

孔間データによると、図-9のように解析領域全体で発散性がやや大きく、緩み領域を精度良く評価するのは困難であった。次に、解析精度を上げるために、孔間データに試験坑道内壁～ボーリング孔内間のデータを加えてトモグラフィ解析を行った。その際にセルサイズを通常の1m×1m、およびより細分した0.5m×0.5mの2ケースについて実施した。前者では空洞周辺の速度低下の範囲がほぼ一定であるのに対して、後者では図-10のように速度の低下は坑道の天場の左右と底盤右側で顕著であり、緩み領域の厚さの変化が読み取れる。一方減衰解析では緩みの解析は困難であった。

5.2 比抵抗トモグラフィ

図-11に解析結果を示す。図中で、空洞の比抵抗は白抜きで表現してあるが、実際には1~3 KΩmの相対的な低比抵抗帯として解析されている。解析領域全体の岩盤が高比抵抗である中で、空洞周辺および空洞下側がかなりの低比抵抗帯となっている。次に比抵抗変化率(前出)を図-12に示す。空洞側壁および上部ではかなり広い範囲にわたって比抵抗値が増加し、空洞底盤ではかなり下まで減少している。また空洞天場の一部でも比抵抗値が減少している。

6. トモグラフィによる岩盤緩み評価

6.1 2次元直交異方性モデルによる掘削解析結果

坑道における亀裂調査に基づきクラックテンソルを求め³⁾、2次元直交異方性モデルによる線形弾性解析を行った。解析断面およびクラックテンソルの算定区域は、図-13に示す。初期応力は文献4)より、入力物性値は表-3に示す。クラックテンソルから算定された巨視的な弾性係数は、孔内载荷試験における変形係数(平均 1.05×10^5 kgf/cm²)³⁾と概ね等しいと考えられる。境界条件としては、底面は鉛直方向を、両側は水平方向をそれぞれ固定した。掘削ステップは、1ステップで左右の計測坑道を全断面掘削し、2ステップで中央の試験坑道を全断面掘削した。

解析結果は、図-14, 15に、2ステップ後の最大せん断応力分布および変位分布をそれぞれ示す。NW計測坑道からSE計測坑道に向かって亀裂密度(F0)は増加する。中央の試験坑道とSE計測坑道周辺では亀裂が鉛直方向に卓越するために、ここではNW計測坑道よりも大きな変位と応力集中を許している。また1および2ステップを比較すると、2ステップ時に、SE計測坑道での鉛直変位が顕著である。2ステップ時には、中央の試験坑道とSE計測坑道との間に変形が進行していることから、亀裂特性と空洞間距離の影響が現れているものと考えられる。

6.2 トモグラフィ解析と掘削解析の対応性

表-4に今回の弾性波・電磁波・比抵抗のトモグラフィ解析結果、空洞掘削解析の結果、および緩み領域の評価をまとめて示す。

変位量は空洞の天場左側と底盤右側で大きい。これを

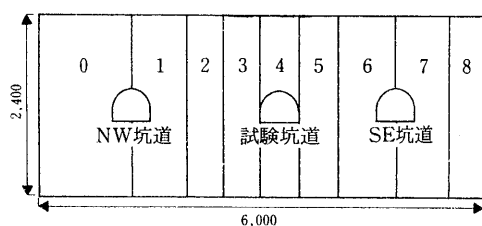


図-13 クラックテンソルの算定区間域

表-3 入力物性値

領域	F0 F11 F22			E1 E2 E3			ν21 ν31 ν32			G12 G23 G31		
	クラックテンソル			弾性係数(10 ⁵)			ポアソン比			せん断剛性(10 ⁵)		
0	0	0	0	5.78	5.78	5.78	0.15	0.15	0.15	2.01	1.26	1.12
1	1.82	1.45	0.37	1.76	3.66	5.78	0.10	0.15	0.15	1.83	1.66	1.33
2	1.3	0.75	0.55	2.65	3.11	5.78	0.08	0.15	0.15	2.09	0.75	0.71
3	3.74	3.44	0.30	0.90	3.94	5.78	0.10	0.15	0.15	1.73	1.29	1.05
4	2.06	1.38	0.67	1.82	2.82	5.78	0.07	0.15	0.15	1.51	0.65	0.56
5	5.16	4.18	0.98	0.76	2.28	5.78	0.06	0.15	0.15	1.28	0.59	0.48
6	6.19	4.77	1.42	0.68	1.79	5.78	0.05	0.15	0.15	1.20	0.54	0.44
7	7.0	5.39	1.61	0.61	1.64	5.78	0.04	0.15	0.15	1.11	0.48	0.39
8	8.0	6.16	1.84	0.54	1.49	5.78	0.04	0.15	0.15	2.51	2.51	2.51

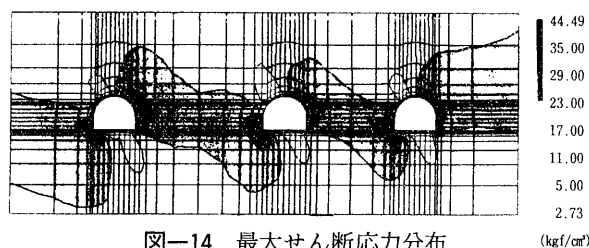


図-14 最大せん断応力分布

(kgf/cm²)

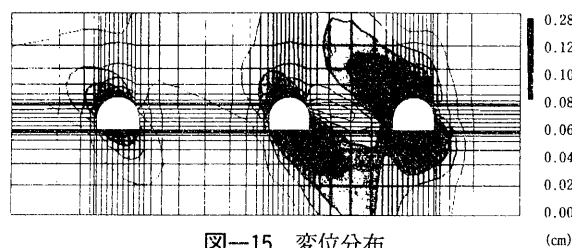


図-15 変位分布

(cm)

表-4 トモグラフィ解析結果, 空洞掘削解析の結果, および緩み領域の評価

解析項目	弾性波トモグラフィ	電磁波トモグラフィ	比抵抗トモグラフィ
空洞解析	弾性波速度: 良好 減衰特性: 不良	電磁波速度: 良好 減衰特性: 不可	比抵抗値: やや良 比抵抗変化率: 良好
緩み領域 の評価	弾性波速度の変化と範囲 天場: 低下大, 1m> 左壁: 低下, 0.5 m 右壁: 低下, 0.5 m 底盤右: 低下大, 0.5 m> 底盤左: 低下: 0.5 m>		比抵抗変化率の変化と範囲 天場右: 増加, 2 m 左右側壁: 増加, 2 m 底盤: 減少, 2 m>
応力 変形 解析	クラックテンソルによる2次元直交異方性モデル: 線形弾性解析 / 変形量 天場左側: 大, 左壁: やや大, 右壁: 小, 底盤右側: 大		

緩みと考えると, 弾性波速度における天場と底盤右側での大きな速度低下は, これと対応している。

一方, 空洞側壁および天場での比抵抗の増加は, 含水比の減少・乾燥化を表しており, これは空洞掘削による不飽和化に対応している。実験場は, 鉱山全層の中でも山体のかなり上部に位置しているために, 概ね不飽和帯にあると考えられるので, このような比抵抗の変化は, 飽和帯から不飽和帯への急激な変化と言うよりは, 不飽和がさらに進んだ結果であると考えられる。したがって, 弾性波速度の評価上, 含水比の変化によるP波速度の変化までは考慮する必要はないと考えられる。

空洞底盤での比抵抗の減少は, 変形量の増大とも一致し, 緩みによる地下水の浸出と判断できる。また天場右側での局所的な低比抵抗は, 比抵抗トモグラフィ実施時の孔内水(強制注入)が, (その1)で明らかになった亀裂集中帯を通過している状況を反映しているものと考えられる。

地下空洞周辺では, 地下水面は自然水位から空洞に向かって低下するとされているが, 今回の比抵抗トモグラフィの結果をみる限りでは, 空洞周辺のみ部分的に不飽和になり, 空洞周辺で不飽和度が増加しているように見える。

以上から, トモグラフィの変化は空洞に対してやや非対称的であり, これは初期応力の主応力軸配置に基づく, 変形の非対象性(図-14, 15)に対応している。また表-4より, 含水特性(比抵抗変化率)による緩み領域は, 力学特性(弾性波速度)によるそれに比べて2~4倍も大きく, 掘削に伴う水分特性の大きな変化が予想される。

7. まとめ

① 孔間トモグラフィの解析領域の中央部に, 新たな試験坑道を掘削し, 弾性波・電磁波・比抵抗の各トモ

グラフィによる空洞解析と岩盤の緩み評価を行った。

② 空洞解析は, いずれのトモグラフィでも可能であった。

③ 岩盤緩み評価に関しては, 弾性波トモグラフィでは速度解析が有効であり, 比抵抗トモグラフィでは比抵抗の変化率により明確に表現できた。

④ 亀裂情報をクラックテンソルで取り込み, 2次元直交異方性モデルの線形弾性による掘削解析を行うと, トモグラフィとも良い対応性が認められた。

⑤ 以上から, 測定配置をうまく工夫することにより, 詳しい岩盤緩み評価が可能であることが確認できた。掘削解析との併用, あるいは繰返し測定によるモニターにより, 施工管理技術として岩盤状況の把握にも有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 桑原 徹, 他: 大規模地下実験施設におけるジオトモグラフィと岩盤評価(その1)ークロスホール測定による弾性波・電磁波・比抵抗トモグラフィー, 大林組技術研究所報, No. 49, p. 63~70, (1994)
- 2) 上野孝之, 他: レーダー・トモグラフィによる岩盤探査実験(その4), 土木学会第49回年次学術講演会第3部, p. 4~5, (1994)
- 3) 土原久哉, 他: 地下岩盤試験場におけるき裂特性評価(その1)ーき裂分布特性と岩盤分類の相関性についてー, 土木学会第48回年次学術講演会第3部, p. 1370~1371, (1993)
- 4) 坂口清敏, 他: 円錐孔底ひずみ法の不均質岩盤への適用と考察, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 229~234, (1994)
- 5) 玉井昭雄, 他: トンネル掘削による不連続性岩盤の3次元力学挙動の研究, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 605~610, (1994)