

岩盤空洞の健全性評価に対する弾性波トモグラフィー の適用性に関する検討

SOUNDNESS EVALUATION OF ROCK CAVERN BY SEISMIC TOMOGRAPHY

多田浩幸*・長谷川誠**・宮下国一郎***・岡本明夫****

Hiroyuki TADA, Makoto HASEGAWA, Kuniichiro MIYASHITA and Akio OKAMOTO

The authors examine applicability of seismic tomography as one of techniques which evaluate soundness of rock cavern. In this study, numerical simulation of seismic tomography is carried out with known models which set faults, loosened zone and unsaturated zone before and after large scale earthquake. The purpose of the numerical simulation is to investigate analytical accuracy to reconstruction of those models. Numerical results show that the faults and the loosened zone can be reconstructed clearly by arranging source and receiver points suitably and such arrangements of the source and receiver points make it possible to detect seismic velocity change due to the expansion of loosened zone.

Key Words: rock cavern, seismic tomography, soundness evaluation

1. はじめに

石油等のエネルギーの地下貯蔵施設における岩盤空洞は、その構造上、基本的にはメンテナンスフリーの考え方に立って設計されるが、石油等の貯蔵後、長期間にわたって安全な操業を行っていくうえで、その健全性を日常的に的確に把握、評価していくことが重要なことであることはいうまでもない。現在、石油地下備蓄基地では、原油貯蔵後の地下水位、湧水量、水封水供給量などの水封データの解析やサービストネルなどの坑道の変位、変状の監視等により岩盤空洞全体としての安全性を把握している。しかし、長い将来にわたってさらに安全な操業を持続させていくためには、現在行われている種々の計測、監視手法を発展させ、さらに的確な評価が可能となる計測手法についての検討も加えて、これを具体化していくことが今後求められていくものと考えられる。

本検討では、その計測手法の一つとして、岩盤状況を推定、可視化する技術である弾性波トモグラフィーに着目し、岩盤空洞の健全性を評価する技術としての適用可能性について検討した。ここでは、破碎帯、ゆるみ域、不飽和域等を仮想的に設定したモデルを考え、このモデルに対して発振・受振点の観測配置をパラメータとした弾性波トモグラフィーの順解析および逆解析を行い、設定モデルのシミュレーションによる再現性について検討を行った。

* 正会員 清水建設(株) 技術研究所
** 正会員 清水建設(株) 土木本部
*** 正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所
**** 工博 日本地下石油備蓄(株) 業務部

2. シミュレーションの概要

シミュレーションモデルとしては既存の石油地下備蓄基地の一部を対象として考えた。解析モデルを図-1に示す。解析断面位置には地質観察により概ね8本の破碎帯があることが分かっている。これらの破碎帯は粘土を挟んだ幅数cm～数10cm程度の比較的小規模のものであったが、モデルでは、その幅を一律1mと拡張して設定した。トモグラフィー解析を行うモデルは以下の手順で作成した。

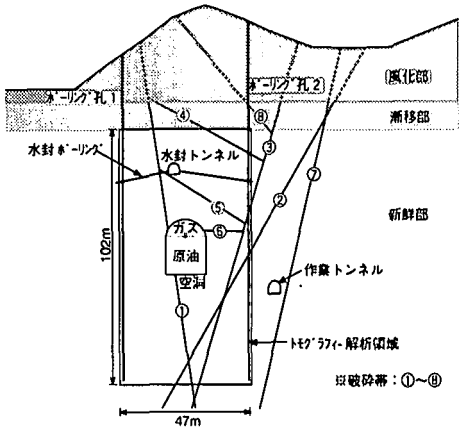


図-1 解析モデル図

- ①対象断面について空洞安定解析を実施し、ゆるみ域を仮想的に設定する。
- ②この結果に対して、静的震度法によりレベルⅡ相当の大規模地震を入力し、ゆるみ域を大きくさせたモデルを作成する。
- ③この2つのモデルをモデルAおよびモデルBとして浸透流解析を行い、それぞれのモデルの不飽和域を設定する。

弾性波トモグラフィーによる順解析および逆解析は、この③の結果得られるモデルAとモデルBそれぞれにおけるゆるみ域および不飽和域を設定したモデルに対して実施し、その差異および再現性について調べた。

なお、上記各解析で使用した物性値は空洞建設時に検討された物性値等を参考として設定した。

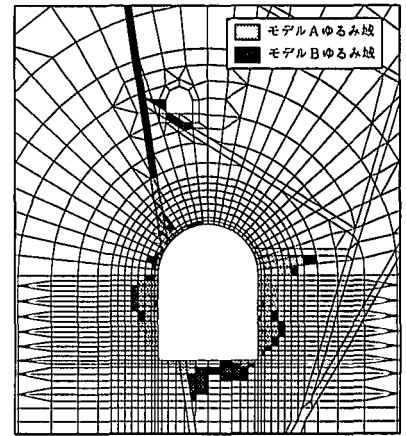


図-2 設定モデルのゆるみ域分布

3. トモグラフィー解析モデル

空洞安定解析ならびに浸透流解析によって得られたゆるみ域および不飽和域の分布を図-2、3に示す。算出されたゆるみ域は、地震の入力により左肩破碎帯部に沿って上方へ広がる結果となるなど大きめに現れているが、これは、以降の解析における感度の確認をクリアなものとするため、やや過大と思われるゆるみ範囲が生じるべく条件設定を行ったことによるものである。これに対して、不飽和域は空洞周囲の極限られた一部の範囲に留まり、地震の入力によっても大きくは広がらない結果となっている。

トモグラフィー検討用のモデルは図-4に示す2本のボーリング孔で囲む範囲を対象とした。解析モデルにおいては、上記検討による破碎帯、ゆるみ域、不飽和域を設定するとともに、空洞内の原油およびガス空間、水封トンネル(滴水状態)に該当する弾性波速度を設定した。各弾性波速度は、既存の岩盤空洞周辺で行われた調査結果等を参考に設定した。解析に用いた弾性波速度値を表-1に示す。

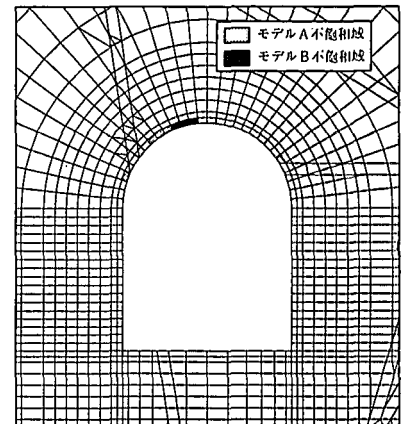


図-3 設定モデルの不飽和域分布

解析では、発振点および受振点の観測配置については、図-5に示すように、ボーリング孔間でのクロスホー

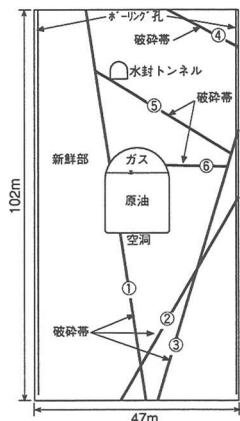


図-4 解析領域

表-1 弾性波速度一覧

区 分		弾性波速度 (km/sec)	
新鮮部	飽和域	非ゆるみ域	4.8
		ゆるみ域	2.5
	不飽和域	非ゆるみ域	3.0
		ゆるみ域	1.5
断層部	飽和域	非ゆるみ域	2.0
		ゆるみ域	1.2
	水封トンネル		1.5
空洞内ガス部		0.35	
空洞内原油部		1.31	

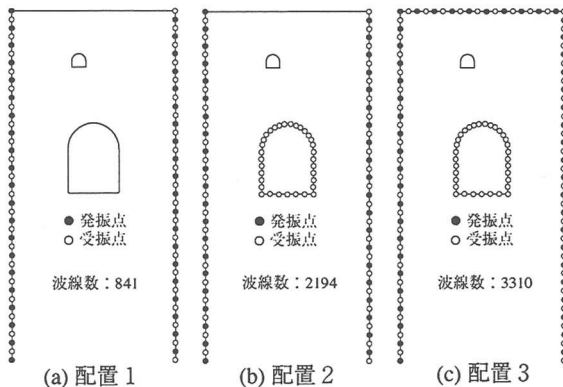


図-5 観測配置ケース

ル配置のケースを基本として、空洞壁面に受振点を設けるケース、および空洞の上部に受発振点を設けるケースの3ケースを設定した。ここで、解析においては、解析領域を0.5m間隔の格子に分割した解析メッシュを用いている。図-6に順解析モデルの弾性波速度分布を示す。同図のモデルにより、発振点から受振点までの弾性波伝播時間を計算し、次の逆解析に入力する模擬観測データとした。

4. 解析結果

逆解析は、順解析と同一の解析メッシュを用いて、C G法により行った。ここで、空洞内の原油部とガス部および水封トンネル内の水については弾性波速度値を既知として値を固定し、岩盤部分については初期値として一律4.8km/secを設定して逆解析を行った。また、モデルAとモデルBの速度値の変化を検討するため、次式を用いて速度変化率(%)を算出した。

$$\text{速度変化率 (\%)} = (\text{モデルAの速度} - \text{モデルBの速度}) / \text{モデルAの速度} \times 100 \quad (1)$$

各ケースの逆解析結果を図-7に示す。逆解析結果を整理すると次のようになる。

(a) モデルA

配置1では、岩盤空洞の天端部にモデルに対応しない低速度分布が現れるなど、設定モデルの再現性は全体的に低い。これに対して、空洞壁面に受振点を配置する配置2では、空洞右肩部のゆるみ部分、左肩部の破砕帯①のゆるみ部、左右側壁のゆるみ部分、底盤左隅角部付近の破砕帯①のゆるみ部に対応する低速度分布が認められる。上部に受発振点を配置した配置3では、配置2と同様、空洞周囲に設定モデルに対応する低速度分布が現れており、さらに、解析領域の右最上部の破砕帯④と空洞から解析領域の左最上部へのびる破砕帯①、解析領域の右側面から水封トンネルへのびる破砕帯⑤に対応する部分に周辺よりも低い速度分布が認められる。空洞周辺については配置2と配置3に大きな違いは見られない。

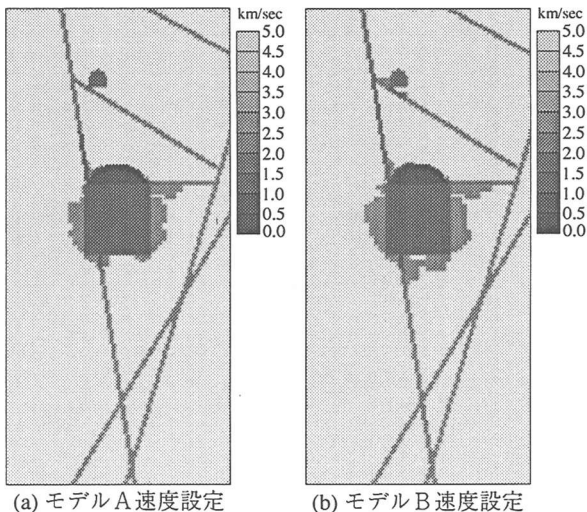


図-6 順解析モデル

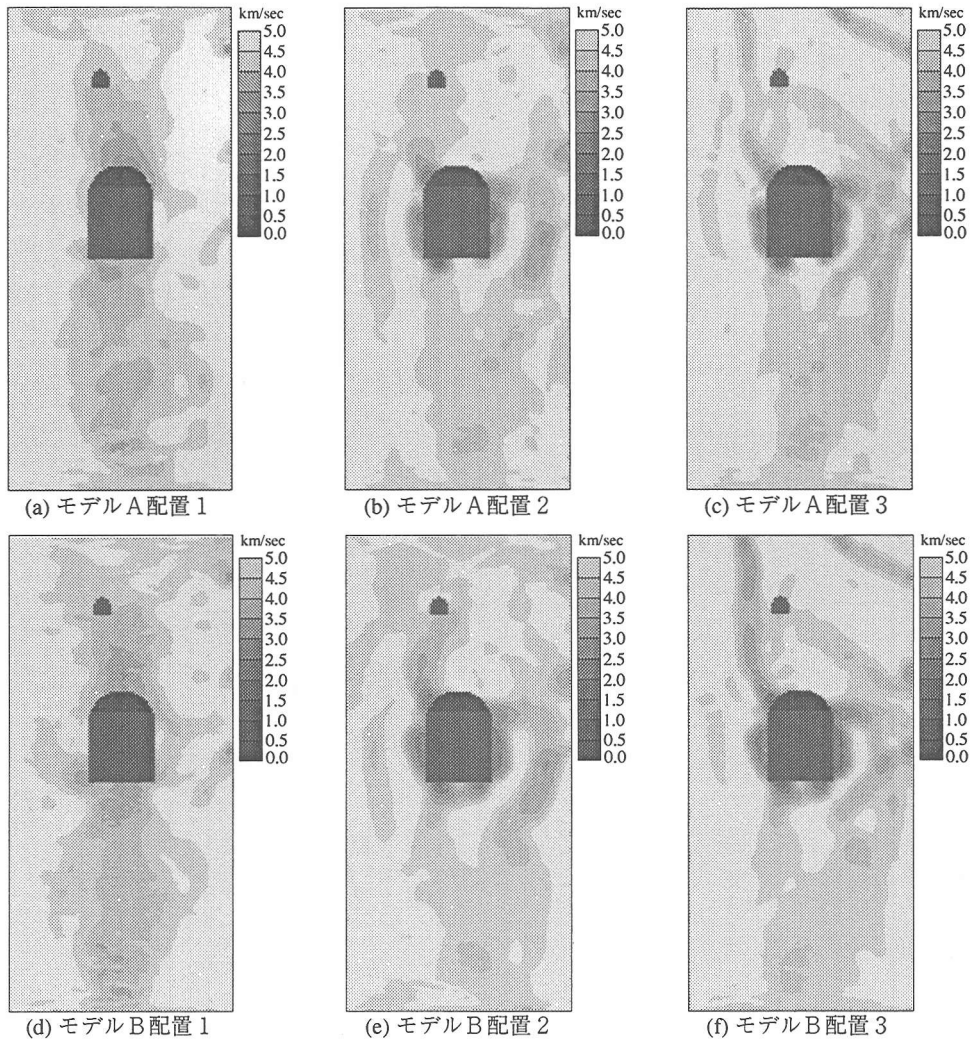


図-7 逆解析結果

(b)モデルB

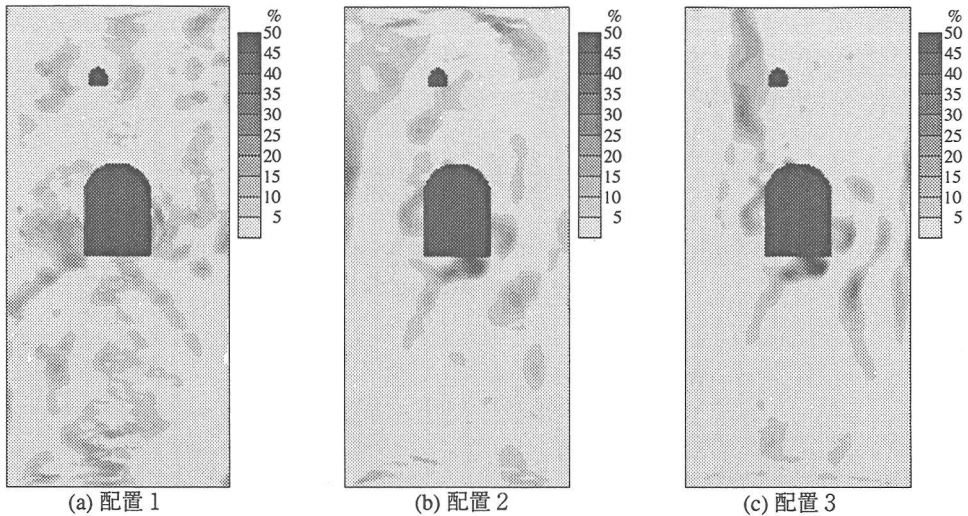
配置1では、モデルAと同様、空洞の天端部に設定モデルに対応しない低速度分布が現れており、同様にモデルの再現性は低い。これに対して、配置2と配置3では、モデルAに比べ、空洞周辺の低速度分布が広がり、さらに、低速度部が解析領域の左上方にのびる傾向が示されている。これは、モデルBにおける破砕帯①のゆるみ部の変化が再現されているものと考えられる。

特に、配置3では、破砕帯④と破砕帯①の空洞から左最上部へののびる部分、破砕帯⑤に対応する低速度部がモデルAに比べてより明瞭に現れ、また空洞右肩部のゆるみ部分も解析領域の右側面に向かって細長くのびる傾向が表現されており、ゆるみ部の拡大に対応していることが分かる。

(c)適用性の検討

図-8にモデルA、Bの対比ケース毎の速度変化率を示す。順解析モデルでの地震入力によるゆるみ部の拡大状況は、大きくは、

- 1)空洞の底盤部におけるやや大きな拡大
- 2)空洞の左右壁面部でのわずかな拡大
- 3)破砕帯①における上方への拡大



図一 8 速度変化率分布 (モデルA→モデルB)

の3点であり、これらは各配置ケースで以下のように考察される。

- ・1)に対しては、各配置ケースとも速度低下域の変化は現れているが、配置1よりも配置2、3の方がゆるみ部の変化に対応した結果となっており、速度低下率も大きい。配置2と配置3では速度低下域の分布に大きな違いは見られない。
- ・2)に対しては、配置1の場合、速度低下域は現れているが、空洞壁面から離れたところまで広がり、ゆるみ域の拡大範囲を超えている。これに対して、配置2、3では比較的大きな速度低下域が現れており、ゆるみ域の拡大に良く対応している。
- ・3)に対しては、配置1では空洞の左肩部に速度低下率の小さな領域が若干見られる程度で、配置2、3のように左最上部へのびる破碎帯①に沿って速度低下域が分布する傾向は見られない。一方、配置2と配置3では、配置2よりも配置3の方が破碎帯①に沿って速度低下域がのびる傾向が良く現れており、破碎帯での速度低下を明瞭に捉えている。

以上のことから、クロスホールのみの配置1では、ゆるみ域の変化を捉えることには難があり、また誤った評価をする可能性があるということができ、空洞周辺のゆるみ域の変化を捉えるには、空洞壁面に受振点を配置するのが良いということが分かる。また、上部に受発振点を配置することによりさらに再現性が高まるとともに、空洞周辺以外の弾性波速度変化も捉えることが可能となってくるものと考えられる。

なお、不飽和域については、その分布範囲が小さく、また地震入力による変化もほとんどなかったため、再現性を検討するまでには至っていない。

5. まとめ

岩盤空洞の健全性を評価する技術の一つとして弾性波トモグラフィーの適用性について検討した。その結果、岩盤空洞内壁面への受振点の配置、あるいは上部への受発振点の配置等の検討の目的に合わせた計測上の対応を図ることにより、モデルの再現性が向上し、また、破碎帯、ゆるみ域等の変化状況も良好に追跡できる可能性があることを示した。

しかし、実際は今回のように受振点を空洞内部に設けることは困難な点も多いと考えられ、今後は空洞壁面に受振点を設けない場合等の検討も含め、その再現性についてさらに詰めていく必要があると考えられる。