

水封式岩盤タンクの健全性評価に対する弾性波・比抵抗トモグラフィ調査の適用

城代 邦宏¹・植出 和雄¹・若林 成樹²・宮下 国一郎²

¹日本地下石油備蓄株式会社 業務部 (〒105-0012 東京都港区柴大門1-1-30)

E-mail:kjyodai@chikabi.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区区越中島 3-4-17)

水封式岩盤タンクの長期にわたる維持管理及び安全確保という観点から、周辺岩盤の劣化や地下水状況の変化などを点検・把握することは重要な管理項目となっている。本報では点検技術として弾性波トモグラフィ、比抵抗トモグラフィ調査を取り上げ、水封式岩盤タンクに適用した結果を報告する。調査は岩盤タンク上部のトンネルから岩盤タンクの両側に削孔された3本のボーリング孔を用いた3断面で行った。弾性波トモグラフィでは岩盤タンクを横断する断面において、亀裂帯の分布状況と良い対応を示す低速度域が確認された。同様に比抵抗トモグラフィでも亀裂帯や塩水に対応した低比抵抗域が確認され、岩盤タンクの健全性評価に有効な調査手法であることが確認された。

Key Words : water-sealed rock cavern, soundness, seismic velocity, resistivity, tomography

1. はじめに

水封式岩盤タンクの長期にわたる健全性評価という観点から、周辺岩盤の劣化や地下水理状況の変化などを点検・把握することは重要な管理項目となっている。岩盤の劣化の進行や不飽和域の生成によって弾性波速度値や比抵抗値が変化することが想定される。そのため、弾性波トモグラフィ及び比抵抗トモグラフィ調査を併用し、互いの手法の得失を補った健全性評価手法の構築を行っている。本報では、その評価手法の実用性確認試験として水封式岩盤タンクに適用した結果を報告する。

2. 調査位置

図-1 に示すように、原油貯蔵中の水封式岩盤タンク(幅 15m×高さ 20m×長さ 112m: 容量 25,000kl) の上部に位置するサービストンネルから掘削した 5 本の調査ボーリング孔のうち、No. 1, 4, 5 孔を利用して弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を行った。これらの 3 孔は掘削長 82.0~84.0m, 孔径 76mm, 傾斜角 70~74° (3 孔と

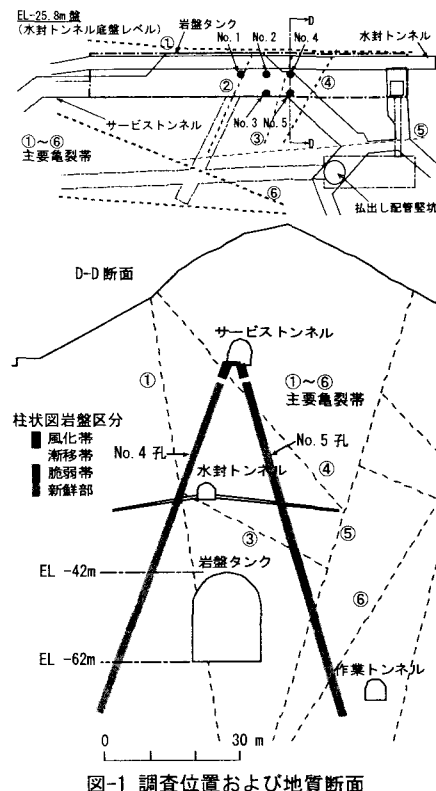


図-1 調査位置および地質断面

もに裸孔状態で、給水設備により常時孔内水が満たされている)で岩盤タンクを取り巻くように配置してある。図-1にはNo.4-5孔の地質断面(D-D)を示しており、岩盤タンク建設時に記録された主要亀裂帯と調査ボーリングのコア観察結果から判断した脆弱帯などの位置も示している。なお、No.2,3孔には間隙水圧計、高精度加速度計、光ファイバひずみ計が埋設されている。

3. 調査方法

弾性波トモグラフィは岩盤タンクの横断方向となるNo.4-5孔、軸方向となるNo.1-4孔及び斜め方向となるNo.1-5孔の3断面で実施した。使用した装置を表-1に示す。震源は大きな振動エネルギーが得られるOWS震源を、受振器は12chのハイドロフォンを使用した。震源及び受振器の間隔は2mとし、これらを順次移動させながら、孔-孔間のクロスホールと孔軸に沿ったインラインで測定を行った。

比抵抗トモグラフィも同様に3孔に電流電極と電位電極を配置して3断面で比抵抗分布を測定した。使用した装置を表-2に示す。比抵抗トモグラフィは孔間だけの測定を行うと孔間中央深部に偽像が発生しやすい。このため、対象断面の直上の地表に、水平距離8.5m間隔で11電極を互いに直交する2方向に配置した。電極配置

表-1 弾性波トモグラフィ使用機器一覧

項目	仕様
震源	OWS震源 寸法：φ60mm×長さ2.3m トリガー信号：震源内ジワからの波形出力 コントローラ：(W)280mm×(H)210mm×(D)220mm
受振器	名称：ハイドロフォン（チャンネル数：12ch） 周波数応答：7Hz～36Hz 受振感度：-190dBを1V/μPaとして出力 許容使用深度：水深1000m 許容使用温度：70° センサー間隔：2m
記録器	McSEIS-SX24（チャンネル数：24ch） サブリング間隔：25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000μs 周波数帯域：4.6～4600Hz 利得：16, 64, 256, 1024倍

表-2 比抵抗トモグラフィ使用機器一覧

項目	仕様
電気探査装置	送信機 GS606 電圧：DC 5～600V 電流：最大1A 受信器 VM5-105 チャンネル数：105ch
孔中ケーブル	40電極（銅製）100m対応
地表電極	S字アース棒：長さ60cm
地表電線	VSF1.25（有効断面積1.25mm ² ）

は二極法とし、調査位置から約500m離れた2箇所に遠電極を設置した。また、ボーリング孔内の電極の間隔は2.5mとし、孔全長にわたって配置し、電流電極を移動させて電流を流し、残りの全電極で電位分布を測定した。弾性波と同様にクロスホール測定とインライン測定も行った。

4. 調査結果

弾性波トモグラフィで得られた波形の一例を図-2に示す。波形には大きなノイズが認められるが、800Hz～4000Hzを通過させるバンドパスフィルタを設定することでノイズをある程度、除去することができる。以後の解析には同様にノイズを除去したデータを用いた。

解析では水封トンネル内は水封水(=1.5km/sec)、岩盤タンク内は原油(=1.31km/sec)の弾性波速度に固定し、それ以外は4.9km/secを初期値とした。解析結果を図-3に示す。解析領域の側面境界はボーリング孔である。

No.4-5断面では、弾性波速度は全体的に5.0km/sec程度となっており、水封トンネルの左下と右下および岩盤タンクの右側と右下部に3.5～4.5km/sec程度の相対的に低速度の領域が認められる。これらの低速度域は図-1に示した亀裂帯(①, ③, ⑤, ⑥)の分布と良い整合性がみられ、亀裂帯の分布状況をうまく表しているものと考えられる。No.1-4断面では、速度範囲は4.0km/sec～5.7km/secと全体的に均一な速度分布となっている。こ

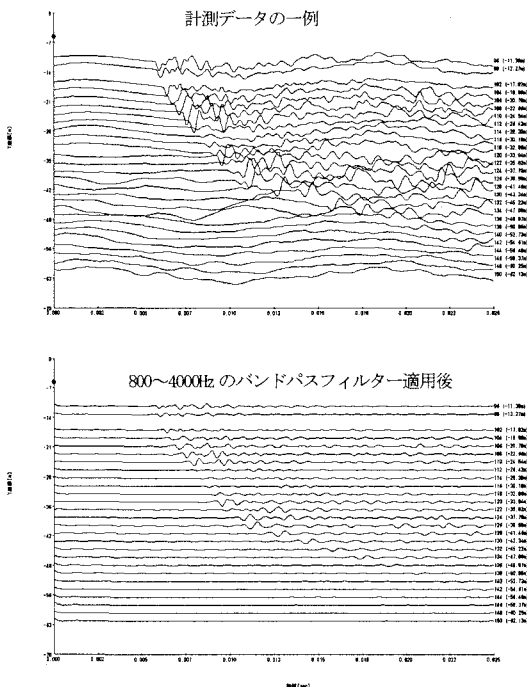


図-2 波形データの一部

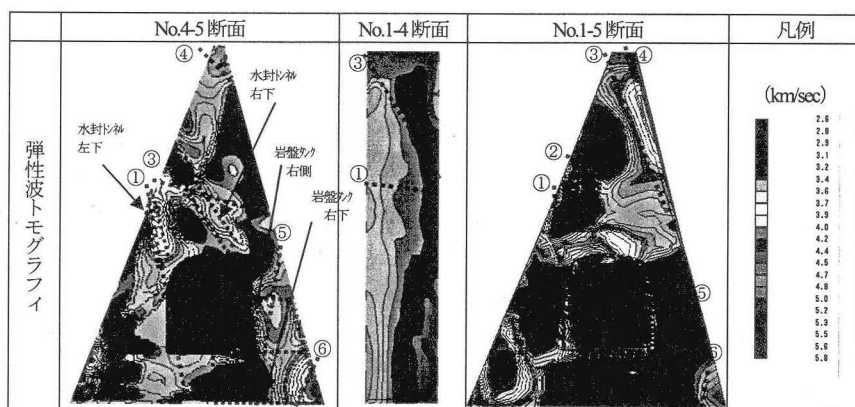


図-3 弾性波トモグラフィ解析結果

の断面では亀裂帯が計測断面とほぼ平行して存在することから、弾性波速度の変化に乏しい結果となっている。No. 1-5 断面はボーリング孔の位置関係より、2 次元平面上に正確に投影できないため、結果の解釈にはやや難があるが、全体的には 5.0km/sec 程度の速度分布が認められ、低速度域は亀裂帯(③, ④, ⑥)の分布と概ね整合している。このように、今回の計測及び解析では岩盤タンクを横断する方向となる No. 4-5, No. 1-5 断面において、岩盤状況と良い対応を示す結果が得られた。

比抵抗トモグラフィ解析では水封トンネルは水封水の比抵抗値(=50Ω・m)、岩盤タンク内は水封水や原油の比抵抗値(無限大)に固定し、それ以外は 600Ω・m を初期値とした。解析は 2 次元で地表測線を考慮しない場合と考慮した場合で行った。解析結果を図-4 に示す。解析結果から岩盤タンク周辺の比抵抗値は概ね 2000~4000Ω・m 程度であり、部分的に 200Ω・m 以下の低比抵抗域がみられる。

No. 4-5 断面では、地表測線を考慮しなかった場合では、No. 4 孔から岩盤タンク上部にかけて高比抵抗域が認められる。一方、地表測線を考慮した場合は、その高比抵抗域が減少し、タンク上部に推定されるゆるみ域や水封トンネル左下、右下に亀裂帯①, ③に相当する低

比抵抗域がみられる。また、亀裂帯⑤, ⑥が分布する岩盤タンク右側から右下部にも低比抵抗域がみられ、岩盤状況と対応した比抵抗分布になっている。このように地表測線を考慮した方が精度の良い結果になっていると判断できる。以下の No. 1-4, No. 1-5 断面では地表測線を考慮した場合の結果を示している。No. 1-4 断面では、上部に低比抵抗域が出現している。この断面は亀裂帯が計測断面とほぼ平行して存在するためか、低比抵抗域と亀裂帯との整合性は十分でない。No. 1-5 断面では、岩盤タンク右側から右下部に水封水の比抵抗値である 50Ω・m を下回る低比抵抗域が認められ、海水の影響が示唆される。

なお、No. 1-4-5 の 3 次元解析も行ったが、お互いの断面間でフィッティングが図られ、2 次元解析に比べて比抵抗値のコントラストが弱まり、地質構造との対比が不明瞭となる傾向が認められた。

図-5 に No. 4-5 断面の弾性波速度値と比抵抗値との相関、および文献調査¹⁾で推定した物性値を示す。弾性波速度は 3~6km/sec で分布し、概ね新鮮部に相当する良好な岩盤であることを示している。亀裂帯の存在を示していると考えられる水封トンネルの左下と右下の領域では、弾性波速度は 3.5~4.5km/sec と相対的に低いが、

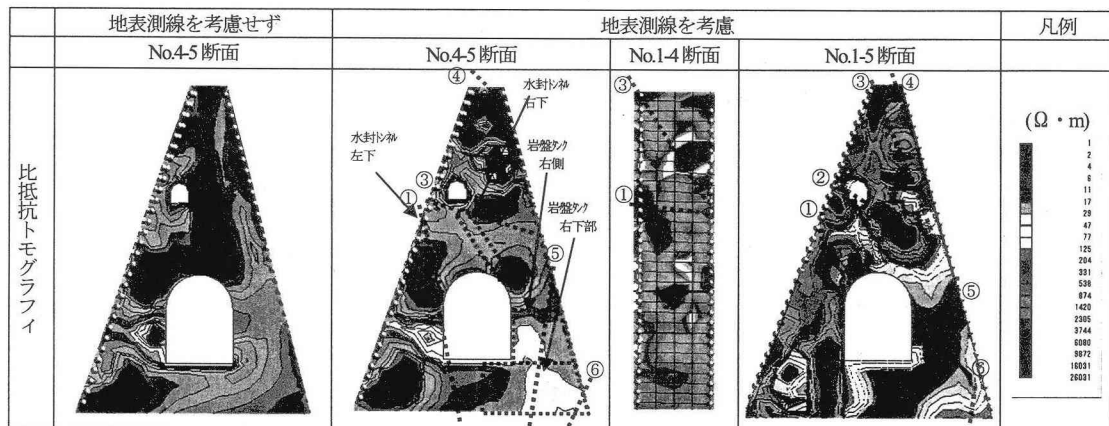


図-4 比抵抗トモグラフィ解析結果

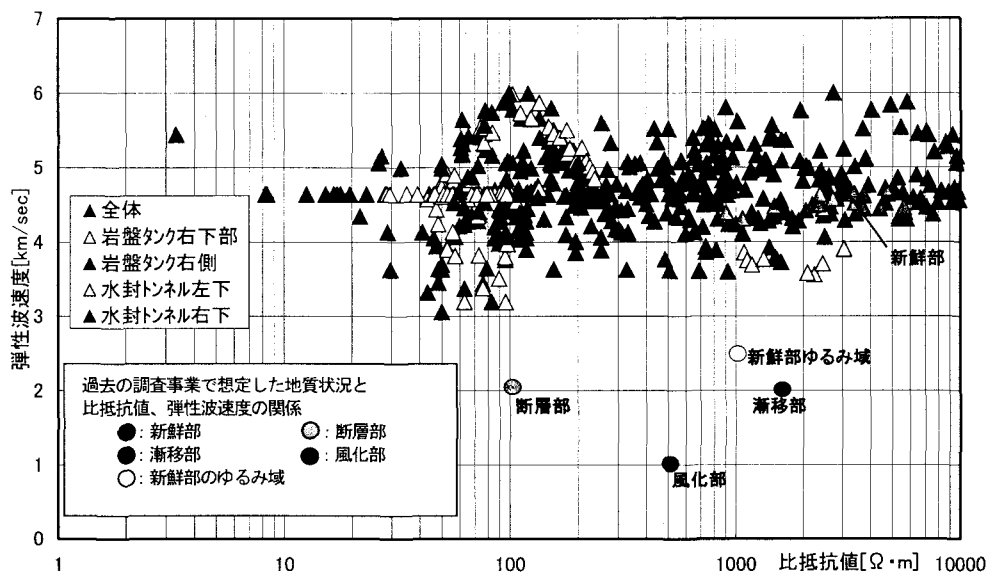


図-5 弾性波速度と比抵抗値の相関

比抵抗値は新鮮部から新鮮部のゆるみ域相当の良好な値を示している。また、岩盤タンクの右側および右下部では、弾性波速度は 3~6km/sec で分布するが、比抵抗値は 200 $\Omega \cdot m$ 以下と断層部相当の小さな値を示しており、No. 1-5 断面の結果から海水の影響と考えられる。

4. まとめ

水封式岩盤タンクを対象に弾性波・比抵抗トモグラフィ調査を実施し、岩盤状況に概ね整合する結果が得られた。岩盤タンク周辺の弾性波速度は 3~6km/sec と良好な値を示し、亀裂帯に該当する領域は 3.5~4.5km/sec

と相対的に低くなった。比抵抗値はゆるみ域や亀裂帯に該当する領域はその周辺より相対的に低い値を示した。また、海水の影響と考えられる低比抵抗域も確認された。今回の調査は岩盤タンク周辺の岩盤の初期状態を把握する目的で行った。今後、同一の測定条件のもとで定期的、または原油受払いや地震発生後などに測定し、弾性波速度と比抵抗値の変化を把握し、岩盤の劣化や不飽和域の変化状況を評価する予定である。また、弾性波速度と比抵抗値からの飽和度等の推定方法の構築や間隙水圧分布との比較検討等も進める予定である。

参考文献

1) 石油備蓄技術(地下備蓄)調査報告書, 石油公団, 1983 年 3 月

APPLICATION OF SEISMIC AND RESISTIVITY TOMOGRAPHY FOR WATER-SEALED ROCK CAVERN

Naruki WAKABAYASHI, Kuniichiro MIYASHITA,
Kunihiro JODAI and Kazuo UEDE

It is important for long term maintenance and soundness of the water-sealed rock cavern to investigate and estimate the change of mechanical property and hydraulic condition of rock mass surrounding the cavern under operation. This paper shows the results of applying seismic and resistivity tomography to the water-sealed rock cavern. Seismic and resistivity tomography is performed using the three boreholes surrounding the cavern. In the cross section of the cavern some low seismic velocity regions corresponded with the fracture zone. Similarly some low resistivity regions corresponded with the fracture zone and underground salt water. Seismic and resistivity tomography is effective investigation method for the estimation of soundness.