地震波干渉法による水封式岩盤タンク周辺岩盤の 弾性波速度変化に関する検討

若林 成樹1*・城代 邦宏2・渡部 利文2・片岡 俊一3・福島 啓介4

¹清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ(〒135-8530 東京都江東区越中島3丁目4番17号)
²日本地下石油備蓄株式会社(〒105-0012 東京都港区芝大門1丁目1番30号)
³弘前大学大学院 理工学研究科(〒036-8560 青森県弘前市文京町1番)
⁴独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構(〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目10番1号)
*E-mail: waka@shimz.co.jp

水封式地下岩盤タンク方式の地下石油備蓄基地では長期にわたる維持管理及び安全確保という観点から, 岩盤タンク周辺岩盤の力学的安定性や地下水状況の変化などを点検・評価することは重要な管理項目となっている.本報では岩盤タンク周辺の微小破壊現象を検知する目的で設置しているサイスミックモニタリ ングシステムの新たな利用法として,観測された自然地震波形に地震波干渉法を適用して周辺岩盤のP波 速度とS波速度の経年変化について検討した.その結果,東日本大震災の前後や降雨で孔内水位が変化し ても弾性波速度には大きな変化は見られず,周辺岩盤は安定していることが確認できた.地震波干渉法は 自然地震波形から周辺岩盤の弾性波速度を推定でき,新たな健全性評価手法として有効と考えられる.

Key Words : seismic interferometry, water-sealed rock oil tank, elastic wave velocity, seismic monitoring system

1. はじめに

水封式地下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、周辺岩盤の力学的安定性や地下 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.力学的安定性に関しては坑道や堅坑上 部室での目視点検や内空相対変位,吹付けコンクリート のクラック幅の計測やサイスミックモニタリングシステ ムで岩盤タンク周辺での微小破壊現象の検知などを通じ て点検・評価している.地下水状況に関しては地表から 設けられた地下水位等観測孔の孔内水位,岩盤タンク湧 水量,人工水封水供給量,地下水補給量や間隙水圧の計 測などを通じて点検・評価している.

これらの力学的安定性や地下水状況の変化は上記以外 にも岩盤タンク周辺の岩盤の弾性波速度の変化に表れる と考えられる.サイスミックモニタリングシステムでは 微小破壊現象以外に自然地震の波形も記録している.近 年,地震探鉱の分野で注目されている地震波干渉法を適 用して周辺岩盤のP波速度とS波速度を推定することを 試みた.地震波干渉法とは、地中を伝播する振動を複数 の受振器により観測し、それらの振動波形に対し相互相 関処理を行うことで、任意の受振器を疑似震源とした波 形を合成するデータ処理技術であり^{1),2,3},これにより, 人工的な震源を用いることなく岩盤の弾性波速度を算出 することが可能となる.

算出対象とした期間はシステムを設置した2010年からの4年間とし、2011年3月の東日本大震災(以降,震災)を含む.弾性波速度の4年間の経年変化や震災の前後での変化について検討した.

2. 受振器の配置

対象とした地下石油備蓄基地では図-1 に示す様に 2010年に岩盤タンクを囲むように S-W1, S-W2, S-W3, S-W5, S-W8-1, S-W10-1, S-W12 の 7 地点にサイスミ ックモニタリングシステムが設置された. 受振器は 3 成分高感度加速度計(X,Y:水平成分,Z:鉛直成分) であり,各地点で地表から鉛直ボーリング孔を岩盤タン ク設計時に用いられた岩盤総合評価基準4でM級以上の 新鮮な花崗岩中まで削孔し,その孔底部に埋設した. シ ステムは数秒周期の低周波数振動から2kHzまでの広い 周波数帯域にわたる振動を検知し,サンプリング周波数 4kHz で記録している. 図-1 には7地点の受振器のオリ エンテーションも示した.また,各受振器の東西〜南北 座標,標高を図-2 および図-3 に示す.受振器は東西に 約 500m,南北に 500m の範囲,標高で約 50~110m の 範囲に配置されている.





図-2 受振器の東西~南北の設置座標



3. 対象とした自然地震

2010 年からの 4 年間に岩手県の東方沖(三陸沖)で 発生した自然地震のうち,比較的 SN 比の高いものを, 下記の a) ~h)の期間毎(約6ヶ月ごと)に数個から 10 個程度,合計で 98 個を選定した.選定した自然地震の 震央,マグニチュード(〇印の大きさの違い)や深度 (〇印の色の違い)等の震源マップを図-4に示す. a) 2010 年 4 月(設置後)~9 月(低孔内水位:ID1~10) b) 2010 年 10 月~2011 年 3 月(高孔内水位:ID11)

震災発生(2011年3月11日)時 c) 2011年4月~9月(低孔内水位:ID12~31) d) 2011年10~2012年3月(高孔内水位:ID32~46) e) 2012年4月~9月(低孔内水位:ID47~61) f) 2012年10月~2013年3月(高孔内水位:ID62~76) g) 2013年4月~9月(低孔内水位:ID77~86) h) 2013年10月~2014年3月(高孔内水位:ID87~98)



図-4 震源マップ(数字は地震の ID 番号)

4. 地震波干渉法による弾性波速度の推定

(1)3成分加速度計データのローテーション処理

図-1 に示したように 7 地点の受振器の X, Y 方向は それぞれ大きく異なっている. Z 方向は鉛直ボーリング 孔内に埋設しているので上下方向に概ね一致している. 各受振器の X,Y,Z 方向の自然地震データに対して 3 成分 ホドグラム処理を行い,その結果をもとに東西,南北, 上下方向に一致するようにローテーション処理を行う. 例として図-4 に示した ID12 (震災後の 2011 年 5 月 29 日 09:03,最大振幅 0.462gal,深度 40.9km,マグニチ ュード 4.1,岩手県東方沖)の自然地震に対して,ロー テーションを行った後の 7 地点の受振器の上下方向, 東西方向,南北方向の地震波形を図-5 に示す.また, 各図の左側にホドグラム処理による地震波の到達方向を 示す. ID12 の自然地震の振動は 7 地点とも南東方向 (方位角約 135 度)から到来しており,方位角は震央 の方向とほぼ一致している. 選定した 98 個の自然地震 に対して同じ処理を行ったところ,ほぼ全ての地震で振 動の到来方向に関して,方位角は震央の方向とほぼ一致 したが,鉛直角は 10~20 度で,ほぼ真下から振動が到 来していることが確認された.そのため,P 波初動デ



ータにはわずかな水平動しか含まれず、ホドグラム解析 により到来方向(方位角)を定めると誤差が大きくなる と考えられた.そこで、方位角は震央と観測点を結んだ 方向と仮定し、最終的なデータのローテーション処理を 行った.その結果を図-6に示す.

(2) 弾性波速度の算出

弾性波速度の算出は以下の手順で行った.

- a) ローテーション後の鉛直成分の P 波初動について, 任意の観測点データをリファレンスにしてその他の観 測点データとの相互相関をとり,相互相関波形のピー クを与える時間差を求める.
- b) 地震波面を平面と仮定し、法線方向の観測点間の距離を、全ての観測点の組み合わせについて求める.
- c) リファレンス観測点から各観測点までの地震波の時間 差(伝播時間)とその距離を,全ての組み合わせにつ いてまとめ,自然地震毎に地震波伝播速度を求める.
- d) 震央方向の水平成分のS波初動に関して同様にa) ~ c)の処理を行う.

自然地震 ID12 に対して S-W8-1 観測点データをリフ アレンス, S-W1 観測点をデータとした場合の P 波初動



図-7 P 波初動の相互相関波形



図-8 観測点間の距離の算出方法



図-9 自然地震 ID12 における P 波速度

に相互相関処理を適用した波形を図-7 に示す.また, 観測点間の距離の算出方法を図-8 に示す.その他の観 測点データについても同様の処理を行い,全ての観測点 の組み合わせについて,相互相関波形のピーク点の時間 差と観測点間の距離を求めてグラフにまとめたものが図 -9 である.これらのプロットを最小二乗法で直線近似 し,その傾きを岩盤タンク周辺の岩盤の P 波速度 (Vp) とした.同様の処理をS波初動に対しても実施し,S波 速度 (Vs) も求めた.

処理に用いた自然地震データの中には S/N 比が不十 分等の理由により弾性波速度が極端に大きいものや小さ いものが散見された.そのため 1km/s<Vp<8km/s, 0.5km/s<Vs<6km/s の制限を設け,逸脱する場合は除外 した.また,速度解析に用いる相互相関関係数が 3 個 未満や,得られた平均速度に対して相関分析から求めら れる変動係数(標準偏差/平均速度)が 2 倍を超えるよ うな結果は除外することにした.

(3) 弾性波速度の経年変化と孔内水位の関係

岩盤タンクの周辺岩盤の Vp, Vs の経年変化を図-10 に示す.これより,周辺岩盤の Vp の平均値は 3.88km/s, Vs の平均値は 1.68km/s で,Vp/Vs 比は 2.35 程であった. Vpは 3~5km/s, Vs は 1~3km/s の間でばらついており, 明確な経年変化は認められないようである.

Vp, Vs は孔内水位の変化に対応している可能性もあ ることから,受振器を設置した 7 地点の内,水位計測 している S-W1, S-W2, S-W3, S-W5 の孔内水位の経 年変化と水位計測している全 13 孔の平均孔内水位の経 年変化を図-10 に示す.対象期間の4年間では S-W5の 水位は季節的に大きく変動しながら低下する傾向がみら れる.他の S-W1, S-W2, S-W3 に関しても漸減傾向が みられる.また,地下石油備蓄基地全体の水位変動を表 していると考えられる全 13 孔の平均水位は小さな季節 変動をしながら漸減する傾向である.

岩盤の弾性波速度の内, Vp は岩盤の飽和度が低下す ると低下するが, Vs は飽和度の変化の影響は小さいこ とや劣化等により岩盤の空隙率が増加すれば Vp,Vs の 両者とも低下することが報告されている ⁵. 対象期間の 4 年間では,平均孔内水位は漸減傾向にあるが,図-10 のすべての観測点データを用いた平均的な Vp や Vs に は孔内水位との相関は見られないようである.

また, 震災時の Vp, Vs はやや小さいようであるが, 全体を通してみれば変動の範囲内と考えられる. 震災後 は停電のため数ヶ月間の欠測が発生したが, その前後を 比較しても Vp, Vs に顕著な変化はなく, 震災による岩 盤劣化の影響は認められないと考えられる.

S-W5 の受振器は EL102.41m に設置されており,孔 内水位は EL20~100m で大きく変動しながら低下して いる.そのため,受振器付近の岩盤の飽和度の変化が顕 著であると考えられる.また,地形的に同じ尾根にある S-W1 の受振器は EL101.81m に設置されており,孔内 水位は受振器より上の EL130~120m で推移している. この受振器付近の岩盤は常に飽和状態に近いと考えられ る.飽和度の変化の影響を考慮するために,最も深い位 置に受振器が設置されている S-W10-1(設置深度: EL51.77m)と飽和度の変化が顕著な S-W5 との相互相関, および飽和状態に近い S-W1 との相互相関から Vp, Vs を求め,水位変動の影響について比較した結果を図-11



に示す. S-W10-1 と S-W5 間の Vp の平均値は 3.24km/s, Vs の平均値は 1.60km/s で, S-W10-1 と S-W1 間の Vp は 3.56km/s, Vs は 1.72km/s である. 平均値では飽和状 態に近い S-W10-1 と S-W1 間の Vpの方が飽和度の変 動が顕著な S-W10-1 と S-W5 間の Vpよりやや大きい. しかし, ばらつきを考慮すると S-W5の水位変動に応じ て Vp が変動しているとは言えず, 飽和状態の変化に対 応しているとは明確には認められない.

弾性波速度の4年間の経年変化や震災前後での変化 について検討したが、孔内水位の変動による変化や震災 による岩盤劣化などに起因する変化は認められず、岩盤 タンクの周辺岩盤は安定して推移していると考えられる.

(4) 既存調査結果との対応

前述した岩盤総合評価基準によれば、P波速度はL級 で1.5~4km/s, M級以上で3km/s以上となっている.本 検討で推定された岩盤タンク周辺岩盤の平均的なP波速 度は3.88km/sであり、概ねL級の上限、またはM級に相 当している. M級以上の新鮮な花崗岩中に受振器が設置 したことを踏まえると概ね、妥当な速度と考えられる.

5. おわりに

岩盤タンク周辺に設置された7地点のサイスミックモ ニタリングシステムで取得した自然地震データに対し, 地震波干渉法を適用し、周辺岩盤のP波速度,S波速度 を求めることができることを確認した.弾性波速度の4 年間の経年変化や震災の前後での変化について検討した が、孔内水位の変動による変化や震災による岩盤劣化な どに起因する変化は認められず、岩盤タンクの周辺岩盤 は安定していると考えられる.

地震波干渉法は特別な地震探査を行うことなく,自然 地震データを用いて繰り返し岩盤の弾性波速度を求める ことができ,新たな健全性評価のモニタリング手法とし て有効であると考えられる.

参考文献

- Wapenaar, K., Synthesis of an inhomogeneous medium from its acoustic transmission response. Geophysics, 68, pp.1756-1759, 2003.
- 2) 松岡俊文,白石和也:地震波干渉法によるグリーン関数合成と地下構造イメージング、物理探査、第61巻、第5号、 pp.133-144,2008.
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X. and Verdel, A. : Tutorial on seismic interferometry: Part 1–Basic principles and applications. Geophysics, 75(5), pp.75A195-75A209, 2010.
- 4) 菊間地下石油備蓄基地工事記録(岩盤土木),日本地 下石油備蓄株式会社,1994.
- 5) 斎藤徳美:含有水分による花崗岩の S 波速度の変化, 物理探査,第40巻,第5号, pp.299-307, 1987.

A STUDY ON THE CHANGE OF ELASTIC WAVE VELOCITY OF ROCK MASS AROUND THE WATER SEALED ROCK OIL TANK BY USING SEISMIC INTERFEROMETRY

Naruki WAKABAYASHI, Kunihiro JYODAI, Toshifumi WATABE, Syunichi KATAOKA and Keisuke FUKUSHIMA

From the point of view of long-term maintenance and safety of the water sealed rock oil tank, evaluation on the change of mechanical stability and groundwater situation around the rock oil tank has become an important management item. In this paper, the change of P-wave and S-wave velocity determined from the natural earthquakes obetained by the seismic monitoring system by using seismic interferometry. As a result, any apparent change of elastic wave velocity was not comfirmed even if the ground water level has been changed by the rainfall and before and after the Great East Japan Earthquake. Seismic interferometry is considered to be effective as a monitoring method of a new health assessment.