

LPG備蓄のための貯槽周辺岩盤の動的挙動 モニタリング

豊田 耕一^{1*}・田坂 嘉章²・黒瀬 浩公³・水道 健³・藤井 宏和⁴・青木 謙治⁵

¹(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 環境安全・技術部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目10-1)

²東電設計株式会社 地下環境技術部 (〒135-0061 東京都江東区東雲一丁目7-12)

³東電設計株式会社 地盤エンジニアリング部 (〒135-0061 東京都江東区東雲一丁目7-12)

⁴株式会社レーザック (〒124-0002 東京都葛飾区西亀有一丁目5-3)

⁵京都大学名誉教授 (〒615-8530 京都府京都市京都大学桂)

*E-mail: toyoda-koichi@jogmec.go.jp

LPG国家備蓄事業の波方・倉敷基地では水封式岩盤貯槽方式が採用され、貯槽周辺にはその健全性確認を目的としてAE、振動、加速度の各センサーが配置されている。AE計測はプラグ部や貯槽空洞近傍岩盤内の状態変化の把握を、振動計測は建設時の落盤・落石および操業時の貯槽壁における変状の発生・進展の評価を、加速度計測はプラグ部周辺岩盤の力学的安定性の評価を目的とする。

各センサーの観測は、貯槽掘削後に実施された貯槽空洞へ最大作用水圧がかかる水封昇圧試験、アクセストンネル充水によるプラグ部耐圧試験、貯槽内部を加圧・減圧した気密試験などを経て、操業5年を経た現在も継続実施中であり、これら期間における計測実績とその特徴について報告する。

Key Words : rock mechanical stability, underground storage cavern, acoustic emission, microseismic

1. はじめに

LPG国家備蓄事業の波方・倉敷基地は、図-1に示す水封式岩盤貯槽方式が採用され、貯槽空洞を内圧よりも高い地下水圧となる深度に設置し、貯槽を囲うように設置した水封トンネルと水封ボーリングからなる水封カーテンシステムにより貯槽への地下水流れを確保してLPGを封じ込める。また、貯槽周辺には岩盤グラウトを施し、低透水かつ均質なグラウトエリアを形成させることにより湧水量抑制と地下水圧保持を実現した。

図-2に倉敷基地の概要として鳥瞰図を示す。倉敷基地は、貯槽が高さ24m、幅18m、長さ488~640mの4条で構成され、設置深度は貯槽天端でEL.-160mである。

倉敷基地では、貯槽掘削後、水封トンネル充水、水封カーテンの昇圧、アクセストンネル充水及び気密試験が行われ、これらの施工に対し貯槽の空洞安定性及び気密性を評価し、健全性を確保する必要があった。

水封式岩盤貯槽では、気密性を評価するため水理特性を把握する必要があり、湧水量および間隙水圧の水理挙動を監視している。水理挙動と力学挙動は連成することから、空洞安定性が低下した場合には湧水量及び間隙水圧に変化が生じると考えられる。しかし、湧水量および

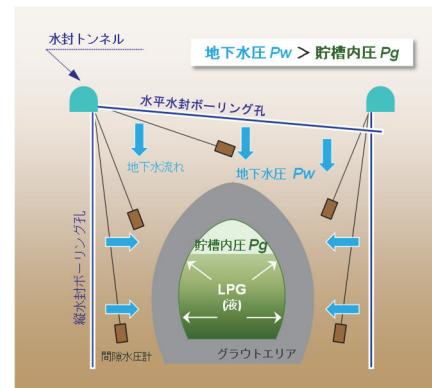


図-1 水封式地下岩盤貯槽の概念図

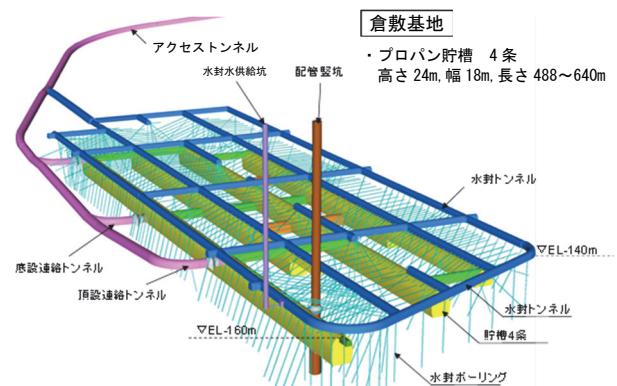


図-2 倉敷基地の貯槽空洞と水封カーテンシステム

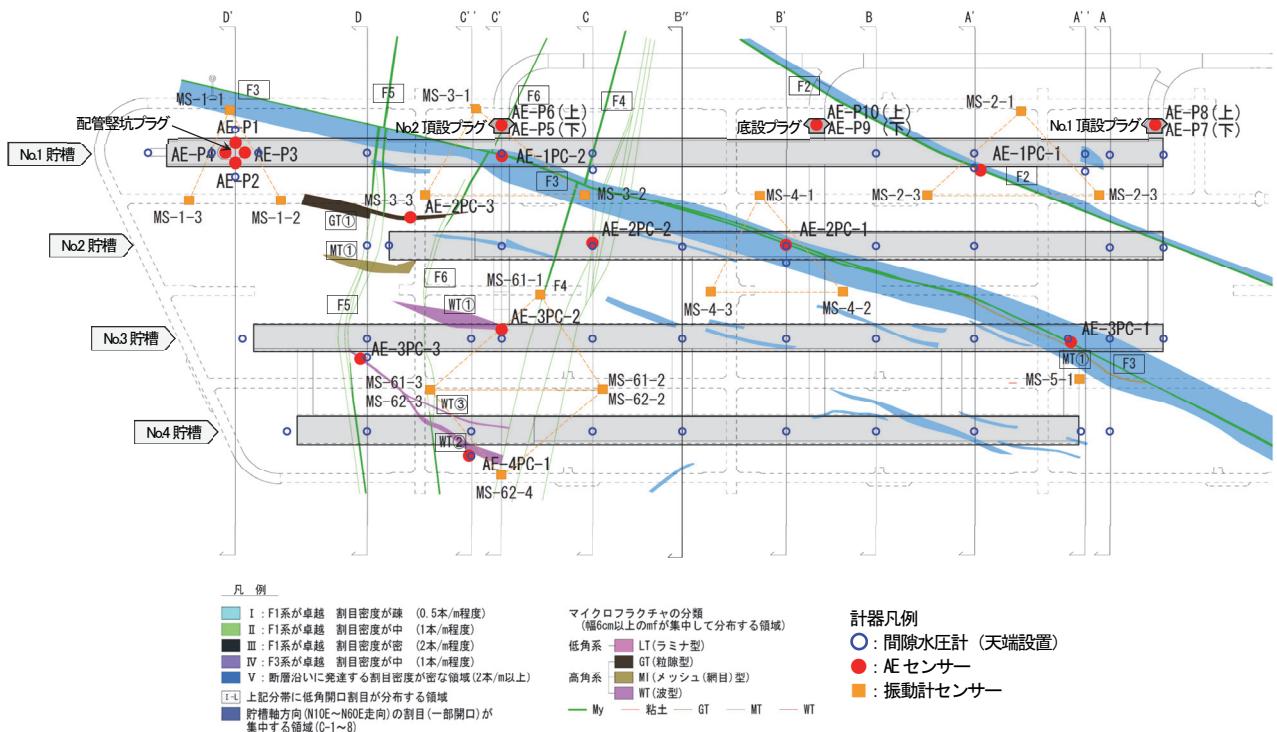


図-3 倉敷基地の地質平面図 (貯槽天端レベル: EL.-160m)

間隙水圧は周辺岩盤の巨視的な挙動を間接的に捉えたものであり、変状が生じた際に必要な対策を検討するためには、変状箇所の周辺岩盤の力学挙動を捉える必要があった。そのため、倉敷基地では、空洞安定性上のリスクとなる地質不良部及び重要構造物を対象に、力学挙動を把握するべくAEセンサー、振動センサー、加速度センサーを配置し、動的モニタリングを行ってきた。これらの中の動的挙動センサーは、操業に入ってからも湧水量および間隙水圧と共にモニタリングを継続している。

本稿では、水封式LPG地下岩盤貯槽の健全性評価のため実施した水理挙動及び力学挙動のモニタリングについて、実績と特徴を報告する。

2. 水封式岩盤貯槽の健全性評価

(1) 倉敷基地の地質概要

倉敷基地は、埋立地の下部EL.-70m程度まで新第三紀鮮新世～第四紀完新世の堆積層で覆われ、さらにその下部には、中生代白亜紀の花崗岩が分布している。花崗岩は、EL.-120m程度まで風化しており、それ以深に新鮮花崗岩が分布する。貯槽天端はEL.-160mであり、平均透水係数 $3 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 程度の新鮮花崗岩内に位置し、周辺岩盤はH級岩盤であり、割れ目密度は0.5～2本/mである¹⁾。

図-3に貯槽天端レベルの地質平面図を示す。同図に示すように、貯槽を横断する5本の断層が確認されており、貯槽と斜交する50°～70°傾斜のF2, F3断層と貯槽と直

交する高角度傾斜のF4～F6断層が分布する。断層部は強い変質を被り、粘土を挟在し、一部に非常に微細な割れ目から構成されるマイクロフラクチャー発達部(MT, WT, GT)が分布する。

(2) 水封昇圧試験

水封昇圧試験では、水封トンネルを充水後にトンネル内圧を水封ボーリング圧(1100 kPa)まで上昇させ、その後水封ボーリング圧を1350 kPa (EL.-2.4m)まで、水封トンネル圧は1225 kPa (EL.-15m)まで共に上昇させた。貯槽は開放された大気圧状態であったため、貯槽と水封カーテン間の岩盤にかかる作用水圧が最大となった。

その際のリスクとして、作用水圧により貯槽周辺岩盤の力学特性の変化と共に水理特性の変化が生じ、空洞の不安定化及び湧水量の増大並びに間隙水圧の低下を引き起こし、水封機能が低下することが想定された。

(3) アクセストンネル充水

アクセストンネル充水では、貯槽を密閉するためアクセストンネルとの境界にコンクリートプラグを設置した後、アクセストンネル底盤 (EL.-182m)からトンネル坑口レベル (EL.+4m)まで注水した。貯槽内は大気圧状態であったためコンクリートプラグにはアクセストンネル側から最大186m相当の静水圧が作用した。

その際のリスクとしては、アクセストンネルの水圧が作用したプラグを支持する周辺岩盤の不安定化と、さらにプラグと岩盤の接触面に隙間が生じ貯槽の密閉性が損

なわれることが想定された。

(4) 気密試験

気密試験では、圧縮空気により試験圧力まで貯槽を加圧した後に、貯槽内圧力を72時間計測し、貯槽内圧力の変動が無いことにより気密性を確認した²⁾。気密試験に伴い、貯槽内圧力は0から960kPaG (EL.-62m) まで加圧した。貯槽加圧から気密試験の期間中は、水封カーテン圧力はEL.-15mで保持した。

その際のリスクとして、貯槽への動水勾配が最小となることから、貯槽の気密性の限界を超過した場合に空気が周辺岩盤内に浸透することが想定された³⁾。また、貯槽加圧により貯槽周辺岩盤の力学特性及び水理特性が変化することも懸念された。

3. 動的挙動モニタリングの概要

(1) 動的挙動センサーの概要

動的挙動モニタリングについてAEセンサー及び振動センサーの配置を図-3に示す。また、表-1にAEセンサー、振動センサー及び加速度センサーの設置個数と測定周波数帯域を示す。

表-1 各種センサーの測定周波数帯域

センサー	方式	測定周波数帯域	設置個数
AE	光式	30kHz~60kHz	19
振動	光式	150Hz~1kHz	18
加速度	電気式	1Hz~10kHz	4

(2) AE計測

AE計測は、配管堅坑並びにアクセストンネルとの境界に設置したコンクリートプラグ部近傍、及び貯槽空洞に出現する断層など地質不良部の近傍における岩盤の状態変化（微小破壊や内部応力変化）を評価することを目的としている。図-4にプラグ部及び貯槽上部に配置したAEセンサーの設置例を示す。プラグ部のAEセンサーはプラグの辺縁部近傍に設置しており、貯槽上部のAEセンサーは、センサー設置のため水封トンネルから掘削するボーリング孔が貯槽からの気体の移動経路となることを避けるため、グラウトエリア外に設置している。また、間隙水圧との連成性を評価するため、間隙水圧計と近接させている。

(3) 振動計測

振動計測は、貯槽を密閉した後にキーブロック等による落盤・落石の発生を評価することを目的としている。そのため、図-3に示すように、貯槽に地質不良部が出現する箇所について3個のセンサーで包囲するように底盤

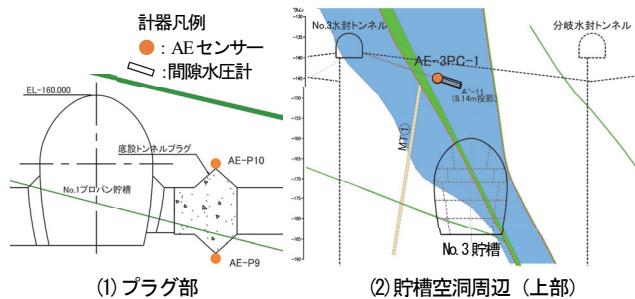


図-4 AEセンサーの設置位置例

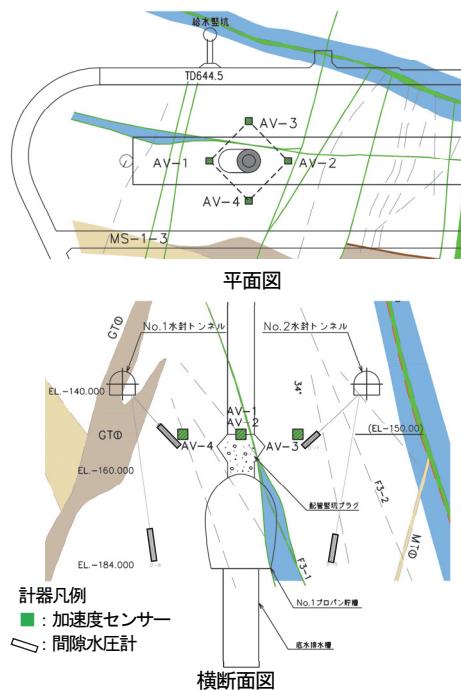


図-5 加速度センサーの配置図

(EL-184m) 深度に配置している。

また、貯槽の気密性及び水封機能を損なうような甚大な破壊では、落下物の規模及び落下の連続性並びに範囲の拡大が顕在化すると考えられるため、落下規模及び位置を3個のセンサーにより推定を行う。操業期間は、LPG液中への落下となるため、規模や位置の推定精度は低くなるが、イベント発生及びその連続性により破壊進展を評価する。

(4) 加速度計測

加速度計測は、貯槽を密閉し、排水、LPG受扱、計測等のための金属管を支持する重要構造物である配管堅坑プラグの周辺岩盤の力学的安定性を評価することを目的としている。図-5に加速度センサーの配置を示す。同図に示すように、4個のセンサーをプラグ上面深度のEL-150mにプラグを包囲するように設置している。これらのセンサーにより周辺岩盤の亀裂発生等の微小振動を監視し、震源位置、規模及びその進展を評価する。また、地震時に計測される加速度は耐震設計加速度との照査を行う。

4. 動的モニタリングの挙動実績

(1) 花崗岩供試体の破壊とAE特性

波方基地及び倉敷基地における貯槽周辺岩盤である花崗岩の原位置供試体を用いた三軸圧縮試験で得られたAE挙動の例⁴⁾を図-6に示す。同図から、岩石供試体が破壊するAE挙動の特徴として、軸差応力が大きくなるに従い、AE発生数は破壊に至る直前で急増し、周波数及びm値は低下（振幅が増加）する傾向が分かる。

(2) 水封昇圧試験時の挙動実績

水封昇圧試験時の挙動実績を図-7に示す。水封トンネル圧及び水封ボーリング圧の昇圧に伴い、線形的な湧水量の増加及び間隙水圧の上昇が認められる⁵⁾。同図に示した間隙水圧は、No.3貯槽のF3断層位置にあり、AEイベントが最多であったAE-3PC-1に近接するA'-11である。AE発生数は、貯槽上部の全てのAEセンサーの累積数を示すものであり、何れも水封昇圧に伴いAEが発生している。次に水封昇圧試験以後のAE-3PC-1のAE挙動を図-8に示す。AEイベントは、A'-11の最高圧（EL.-70m）到達後も継続して発生したが、その後A'-11がEL.-77mで保持されていた中で次第に収束した。各AE波形の周波数と振幅に着目すると、周波数の低下及び振幅の増大は認められなかった。以上の水理挙動とAE挙動から、水封昇圧試験時の周辺岩盤は弾性的な挙動を呈しており、安定性が確保されていたものと評価できる。

(3) アクセストンネル充水時の挙動実績

アクセストンネル充水時の挙動実績を図-9に示す。同図には底設プラグ部のAEセンサーであるAE-P10のAE挙動を示す。トンネル充水は段階的に行われ、トンネル水位は上昇と停止を繰り返し、最高水位のEL.+4mに達している。そのトンネル水位に対し、1時間毎のAEイベント数は、充水開始から水位がEL.-100mまでは発生せず、EL.-80mに達すると増加し始めた。トンネル水位がEL.-20mに達するとAEイベント数は急増し、最高水位のEL.+4mに達するまで同程度のAEイベント数が続いた。最高水位に達した後は、AEイベント数は漸減しながらほぼ無くなった。また、段階的なトンネル充水において、AEイベント数は、水位上昇する際には漸増し、水位保持中には漸減する特徴が認められることから、プラグ部周辺岩盤は弾性的に挙動していたものと推察される。また、AE周波数は低下しておらず、振幅の増大やm値の低下も認められなかった。

上記のAE挙動から、アクセストンネル充水においてプラグ部周辺岩盤に破壊の前兆となるような挙動は認められず⁶⁾、周辺岩盤の安定性は確保されていたものと評価できる。

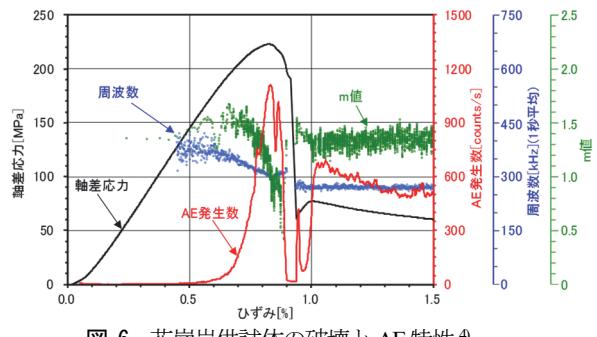


図-6 花崗岩供試体の破壊とAE特性⁴⁾

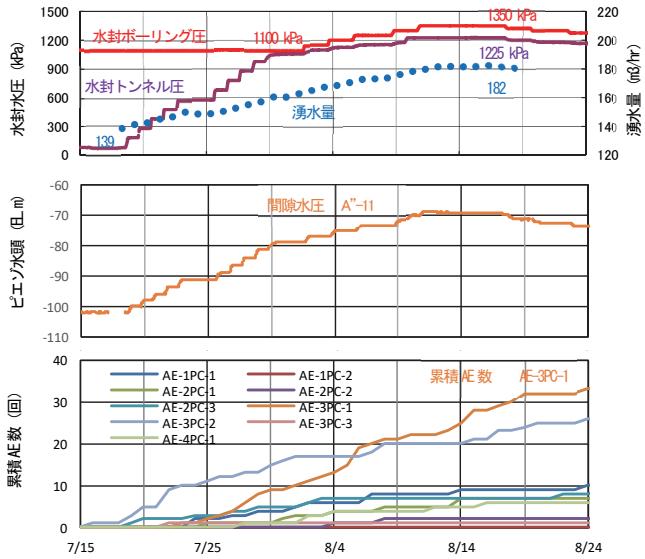


図-7 水封昇圧試験時の水理挙動及びAE挙動

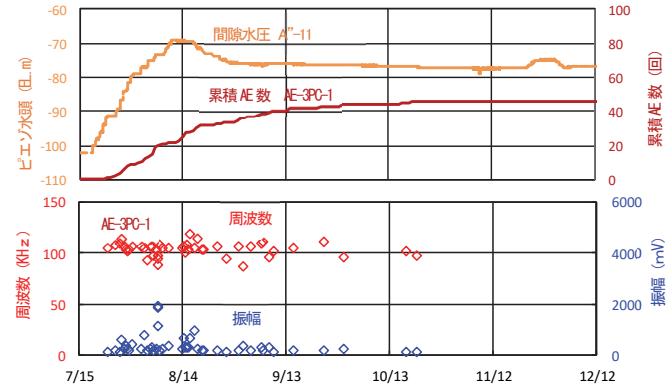


図-8 水封昇圧試験以後の水理挙動及びAE挙動

(4) 気密試験時の貯槽上部AE挙動

気密試験時の挙動実績を図-10に示す。気密試験では、最高圧力時において貯槽内空気の温度変化や体積変化等による圧力変動要因を補正した貯槽内圧力には低下傾向が認められずに気密性判定基準を満足し、貯槽の気密性を証明した²⁾。貯槽内圧力の上昇に対し、湧水量の減少及び間隙水圧（A'-11）の上昇は、線形性が保たれていた⁵⁾。また、貯槽加圧～気密試験において、貯槽上部の大半のAEセンサーではAEイベントの発生が認められなかつた。このように、貯槽の気密性の限界を超過した場合に生じる間隙水圧の急激な変動やAEイベントの急増

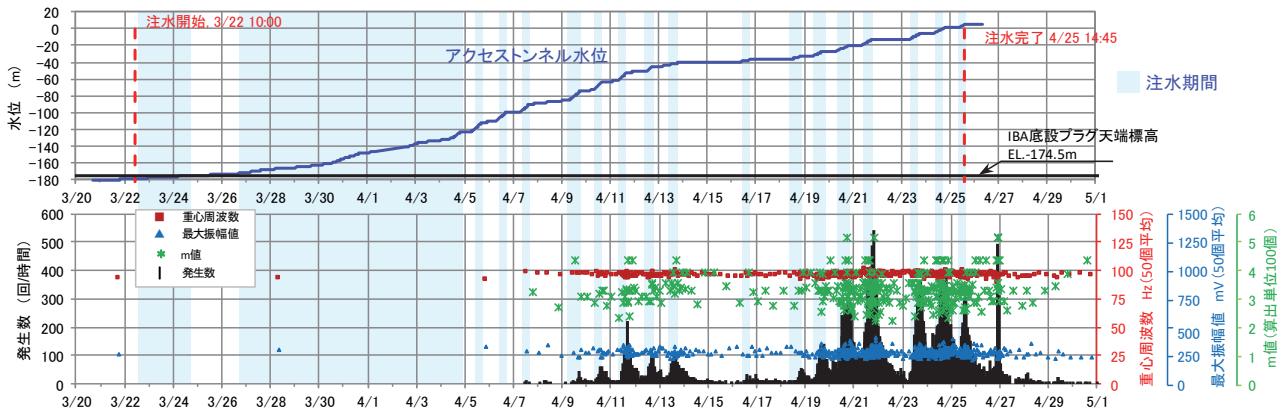


図-9 アクセストンネル充水時における底設プラグ部のAE挙動^⑨

という現象^③は認められなかった。また、貯槽周辺の水理特性及び力学特性に変化も生じていないものと考えられた。

以上により、気密試験では貯槽の健全性が確保されていたものと評価できた。

(5) 操業開始後の挙動実績

操業開始後の挙動実績を図-11に示す。同図にはAE挙動として、AE-P10及びAE-3PC-1の一日当たりのAEイベント数を示す。AE-P10によりプラグ部周辺岩盤では、アクセストンネル水位の年周期的な変動に対応してAEイベントが発生し、アクセストンネル水位の回復が収束するに従って年毎のイベント数は減少している。そのAE波形では、周波数に低下傾向はなく、振幅も増大することなく次第に小さくなる傾向が認められる。

同様にAE-3PC-1により貯槽周辺岩盤でも、間隙水圧A”-11の年周期変動と回復傾向に対応してAEイベントが発生している。ただし、間隙水圧A”-11は現状右肩上がりの回復過程にあり、年毎のAEイベント数に大きな変化は認められない。また、AE波形の周波数及び振幅についても年毎の変化は認められない。

上記の操業中の間隙水圧及びアクセストンネル水位の変化量は、水封昇圧試験時及びアクセストンネル充水時の変化量に比較して小さく、AEイベント数は少なく振幅は小さいものであり、また計測されたAEイベントは既存亀裂内の水圧変化による微小変形（閉合・再開口や滑動）が発生要因として推察できる等、空洞安定性及び気密性を損なうものではないと評価できる。

(6) 地震時の挙動実績

倉敷基地の加速度センサーにおいて、最大計測値を記録した地震は、伊予灘の地震（2014年3月14日2時6分発生、震源深さ78km、M6.2）であった。同地震で計測された波形を図-12に示す。計測された最大加速度は11.3galであり、設計値の198 galよりも十分に小さいレベルであった。さらに、図-13に示すように、地震発生前

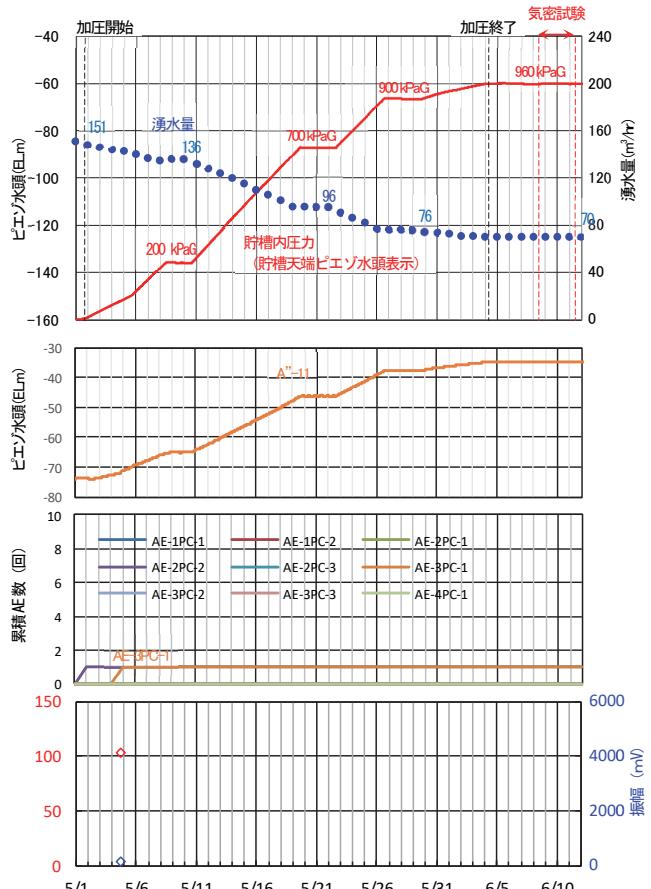


図-10 気密試験時の水理挙動及びAE挙動

後において間隙水圧（A”-11）及び湧水量は急変することは無かった。また、AEセンサー及び振動センサーに地震に起因するイベントは認められていない。以上のことから、基地が経験した最大地震時においても貯槽の健全性は保たれていたものと評価できた。

5. まとめ

本稿では、水封式LPG備蓄基地における貯槽空洞の健全性評価のための動的挙動モニタリングについて、倉敷基地を事例に実績を示した。挙動実績には、水封昇圧試

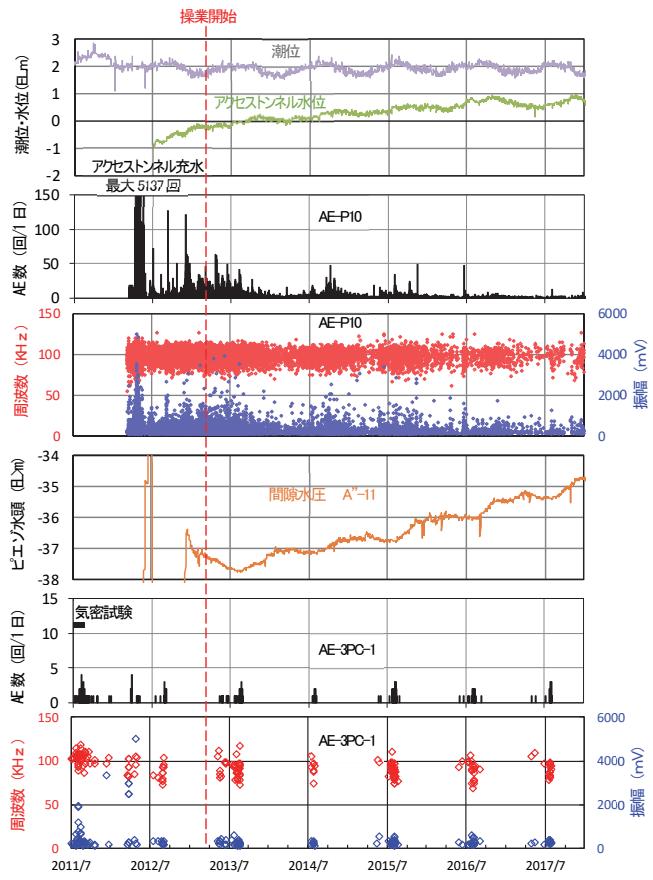


図-11 操業中の水理挙動及びAE挙動

験、アクセストンネル充水及び気密試験において、貯槽周辺岩盤の水理挙動及び力学挙動に巨視的な破壊を示唆する挙動は認められず、貯槽の健全性を確保できていたものと評価できた。

上記の各施工時の挙動に対し、操業の挙動は小規模であり、今まで貯槽の健全性は確保されていると評価できる。また、地震発生時には貯槽の挙動をリアルタイムにモニタリングを行い、貯槽の健全性を評価している。

参考文献

- 菊井孝利, 田坂嘉章, 畠田篤志, 征矢雅宏, 小川智広, 前島俊雄: 倉敷基地水封 LPG 岩盤貯槽における空洞掘

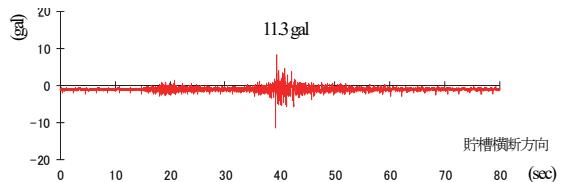


図-12 倉敷基地において計測された伊予灘の地震波形
(2014年3月14日2:06発)

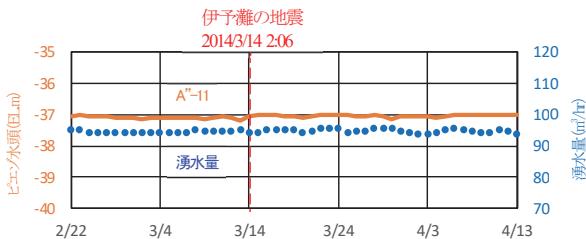


図-13 伊予灘の地震発生前後の間隙水圧及び湧水量の経時変化

削時の岩盤挙動と空洞安定性評価について、第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.389-390, 2014.

- 前島俊雄, 岡崎百合子, 金戸辰彦, 森孝之, 征矢雅宏, 黒瀬浩公: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽の気密試験方法と試験結果の評価について、第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.44-49, 2014.
- 田坂嘉章, 張傳聖, 黒瀬浩公, 下茂道人, 前島俊雄, 青木謙治: ボーリング孔を利用した岩盤透気試験と応力浸透流連成解析による気密性評価、第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.255-260, 2010.
- 谷卓也, 青木智幸, 平井秀幸: 花崗岩供試体三軸圧縮試験時の AE 測定、土木学会第 62 回年次学術講演会, III-195, pp.389-390, 2007.
- 藤井健知, 小渕孝晃, 西琢郎, 金戸辰彦, 前島俊雄: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽における水封カーテンの構築と気密試験時の地下水挙動評価について、第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.131-136, 2014.
- 森孝之, 手塚康成, 宮嶋保幸, 村上浩次, 高岸哲哉, 藤井宏和, 町島裕一, 金戸辰彦: 大深度高水圧下の岩盤地下空洞への光ファイバ式 AE モニタリングの適用－倉敷国家石油ガス備蓄基地－、土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-204, pp.407-408, 2013.

ROCK MECHANICAL STABILITY MONITORING FOR THE UNDERGROUND LPG STORAGE CAVERNS

Koichi TOYODA, Yoshiaki TASAKA, Hiroki KUROSE, Takeshi SUIDO,
Hirokazu FUJII and Kenji AOKI

Namikata and Kurashiki underground LPG storage caverns apply the acoustic emission (AE), microseismic sensors and accelerometers to monitor the long-term rock mechanical stability of storage caverns. The series of monitoring started from the cavern excavation. After the excavation was completed, the storage caverns and concrete plugs were examined within the maximum water pressure by water curtain compression test and access tunnel water filling respectively. Then, the storage caverns were experienced a series of compression, decompression, water and LPG filling. This study would like to report the characteristics of monitoring data in the construction, performance test and operation duration