



危険物事故 関連情報

令和6年能登半島地震による石油タンクへの 被害・影響と地震動の特徴

消防庁 消防研究センター 畠山 健

1 はじめに

令和6年(2024年)元日に発生した能登半島地震(M7.6)では、石川県内で最大震度7の激しい揺れが観測されたほか、石川県では長周期地震動階級4~3、富山、新潟、長野の3県でも同3の大きな長周期地震動が観測された。この地震後、石川県内の内部浮き蓋式石油タンクにおいて長周期地震動により励起された液面揺動(スロッシング)に起因するとみられる内部浮き蓋の損傷被害が生じたこと、新潟県内の浮き屋根式石油タンクでスロッシングが発生したことなどが把握された。これらのことから、消防研究センターでは、消防庁本庁及び危険物保安技術協会と合同で現地調査(2024年1月から3月にかけて実施)をはじめとする被害調査を行った。現地調査には、消防研究センターからは、著者のほか、徳武皓也主任研究官、吉田祐一研究官、白取賢理主任調査官が参加した。本稿では、地震の概要を述べた後、(i)金沢港北石油コンビナート等特別防災区域(特防区域)における内部浮き蓋の被害等とその周辺で観測された長周期地震動の特徴、(ii)新潟東港特防区域の浮き屋根式石油タンクで発生したスロッシングとそこで観測された長周期地震動の特徴、(iii)能登半島の漁港等にある小型石油タンクが強震動等により受けた被害等に関する調査結果を著者が代表して報告する。これは、危険物保安技術協会主催の2024年度の危険物事故事例セミナーにおいて著者が発表した内容をまとめたものである。

2 地震の概要

令和6年(2024年)1月1日16時10分頃、石川県能登地方を震源(震央は図1の×印、震源の深さ16km)とするマグニチュード7.6(以上、気象庁による推定結果)の地震が発生し、気象庁はこの地震を「令和6年能登半島地震」と命名した。この地震の際、震源域及びその近傍となった能登半島では、石川県輪島市門前町走出と同県志賀町香能において、震度7(最大の震度階級)の激しい揺れが観測されたほか、他の地点でも震度6強から6弱の強い揺れが観測された。石川県に隣接する福井県と富山県では、最大で震度5強の揺れとなり、新潟県でも1地点で震度6弱が観測されたほか、多くの地点で震度5強が観測された(図1)。

この地震では、石川県能登地方に大津波警報が発表されたほか、山形県、新潟県上中下越、佐渡、富山県、石川県加賀、福井県、兵庫県北部の各地方に津波警報が発表された。実際、地震後に気象庁が行った津波に関する現地調査により、新潟県上越市船見公園における5.8mをはじめとして、石川県能登町白丸で4.7m、同県珠洲市飯田港で4.3mなどの津波海上の痕跡高が認められた¹⁾。

長周期地震動については、石川県では長周期地震動階級4~3(長周期地震動階級の最大は4)、富山、新潟、長野の3県でも同3の大きな長周期地震動が観測された。図2は、観測された長周期地震動のレベルを示すものとして、地震動の周期10s(図2(a))と周期5s(図2(b))における疑似速度応答値の空間分布を描いたものである。周期10sはおおむね容量10万kL級のタンクの満液時のスロッシング1次固有周期(T_s)にあたり、周期5sはおおむね容量1万kL級のそれにあたる。剛基礎の上に置かれた剛体タンク内の自由液面を有する液体に対して、①非圧縮性流体であること、②渦なしの運動を行うこと、③液面上昇量(スロッシング波高)が波長に対して微小であるとの仮定に基づく理論(以下、微小波高理論という)からは、1次モードのスロッシングの最大波高と入力地震動の疑似速度応答値の間には次式で表される比例関係があることが示される²⁾。

$$Wh = \frac{D}{2g} \times 0.837 \times \frac{2\pi}{T_s} \times 0.837 \times S_v(T_s) \quad (1)$$

ここで、 W_h は1次モードのスロッシングの最大波高、 $S_v(T_s)$ は入力地震動の T_s における疑似速度応答値、Dはタンク内径、gは重力加速度である。図2は、今回の地震で発生した地震動につき、 T_s が10sと5sであるタンクに対するスロッシング励起能力の大きさを示したものと解することができる。観測された長周期地震動のレベルは、震源近傍の能登半島のみならず、厚い堆積層がある金沢平野、富山平野、新潟平野、庄内平野、関東平野においても大きくなっていることがわかる。これは、長周期地震動はkmオーダーの厚い堆積層により増幅されるという性質が如実に表れたものである。この性質のために、石油タンクのスロッシングは厚い堆積層がある平野や盆地で起こりやすい。実際に、今回の地震では、金沢平野内に位置する金沢港北特防区域と新潟平野内に位置する新潟東港特防区域において、石油タンクにスロッシングが発生したことが把握された。多数の大型浮き屋根式石油タンクを有する国家石油備蓄基地のある福井臨海特防区域における長周期地震動のレベルは、大きなスロッシングを励起させるほどのものではなかった。この地域には厚い堆積層はない。なお、厚い堆積層がない地域であっても、震源近傍などにおいては大きな長周期地震動が発生する場合があり(今回の地震では能登半島がこの場合に該当する)、その周期にスロッシング固有周期を持つ石油タンクがあればスロッシングが発生しうる。

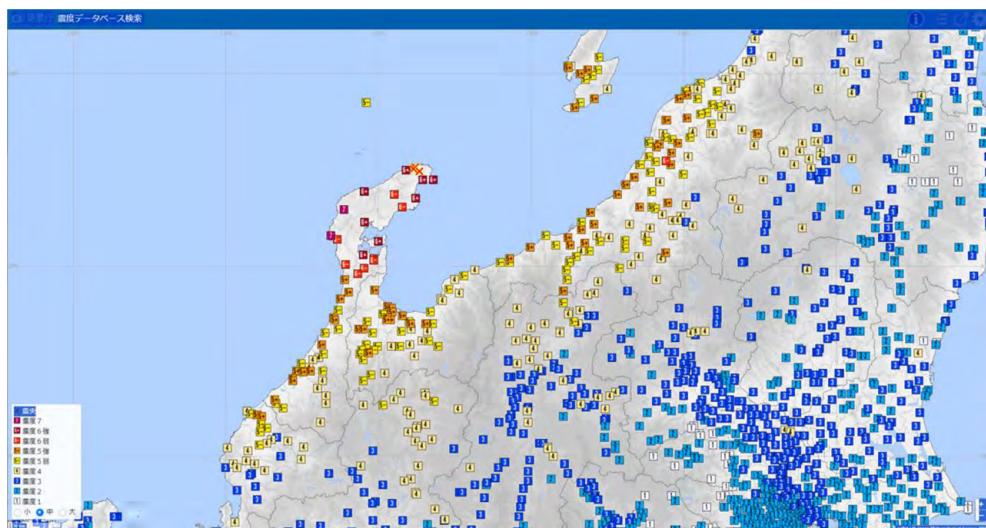


図1 令和6年能登半島地震の際に観測された各地の震度[気象庁]。X印は震央。

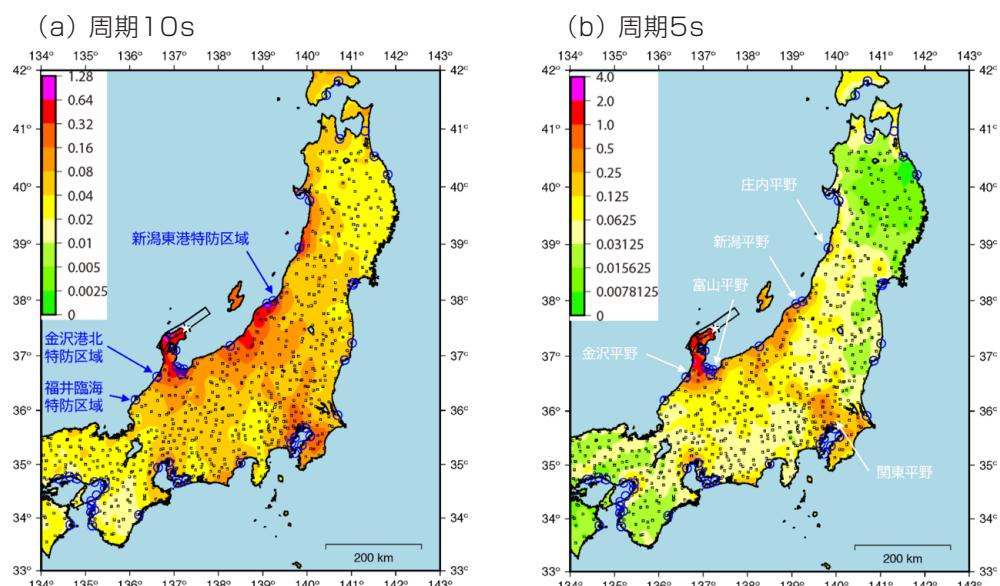


図2 令和6年能登半島地震の際に観測された地震動の疑似速度応答値(減衰0.5%)。水平2成分のうち
大きいほうをプロット。青丸は特防区域のおおよその位置を示している。

3 金沢港北特防区域における長周期地震動と内部浮き蓋の被害等

3-1. 金沢港北特防区域における長周期地震動

金沢港北特防区域から約0.4km(最短距離)の場所に、国土交通省港湾局港湾地域強震観測の金沢港観測点がある。図3は、令和6年能登半島地震の際にその地点で観測された地震動の疑似速度応答スペクトルである。周期4sから7.5sの範囲で、Kh2相当疑似速度応答スペクトル(黒太線)を超えており、南北成分(N000E)の周期4.7sに高さ2.3m/sの鋭いピークがある。この周期範囲では、消防法技術基準で定められているレベル以上の長周期地震動となり、周期4.7s附近では、そのレベルの2倍程度の大きさとなった。

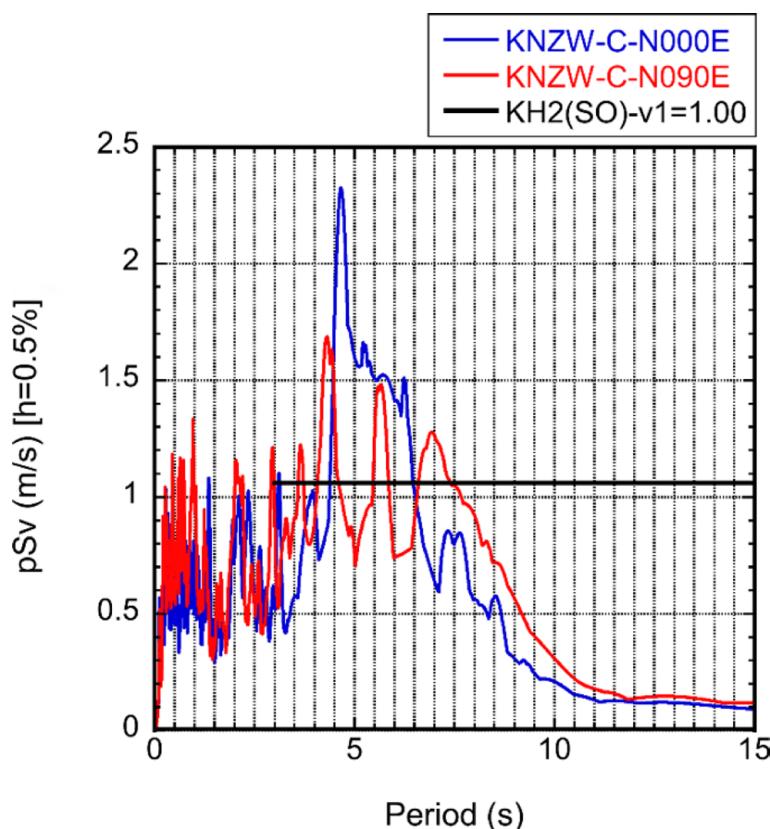


図3 令和6年能登半島地震の際に国土交通省港湾局港湾地域強震観測の金沢港観測点で観測された地震動の疑似速度応答スペクトル(青線(南北成分)と赤線(東西成分)、減衰0.5%)。黒太線は、危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示で定められている液面揺動の設計水平震度(Kh2)に相当する疑似速度応答スペクトル(Kh2相当疑似速度応答スペクトル)。

3-2. 金沢港北特防区域における内部浮き蓋の被害等

金沢港北特防区域における現地調査は、2024年2月6日に実施した。消防研究センターからの参加者は、徳武及び吉田の2名だった。

金沢港北特防区域では、3つの事業所にある内部浮き蓋付き石油タンク全13基中7基の内部浮き蓋に損傷・異常が発生した。ただし、損傷は内部浮き蓋の沈没のおそれがない程度のもので、タンク外への油の流出もなかった。表に、内部浮き蓋に損傷・異常が発生した7基のタンクにつき、諸元と損傷・異常の内容を掲げる。これらのタンクのうち、内部浮き蓋の損傷程度が最も大きかったのは、アルミニウム製簡易フロート式内部浮き蓋を有するタンクCであった。図4は、タンクCの内部浮き蓋のデッキスキン板とポール貫通部周辺部材(ウェルとカバープレート)の破損状況である。同様の破損は、この内部浮き蓋の他の箇所や他のタンクでも生じており、これらのタンクでは油面のシール機能が部分的に失われた状態になってしまったとみられる。図5は、鋼製浮き屋根式内部浮き蓋を有するタンクFの内部浮き蓋のポール・ラダー貫通部付近の板金の変形・損傷状況である。鋼製浮き屋根式内部浮き蓋付きタンクE、F、Gについては、浮き屋根上への油たまりは生

じたものの、油面のシール機能が失われることはなかったものとみられる。地震後、各事業所では、不活性ガス(窒素)をタンク内に注入しながら順次油を安全なタンクに移送し、内部浮き蓋を着底させる措置を実施した。図4や図5の写真は、これらの措置が講じられた後に実施した現地調査において撮影したものである。

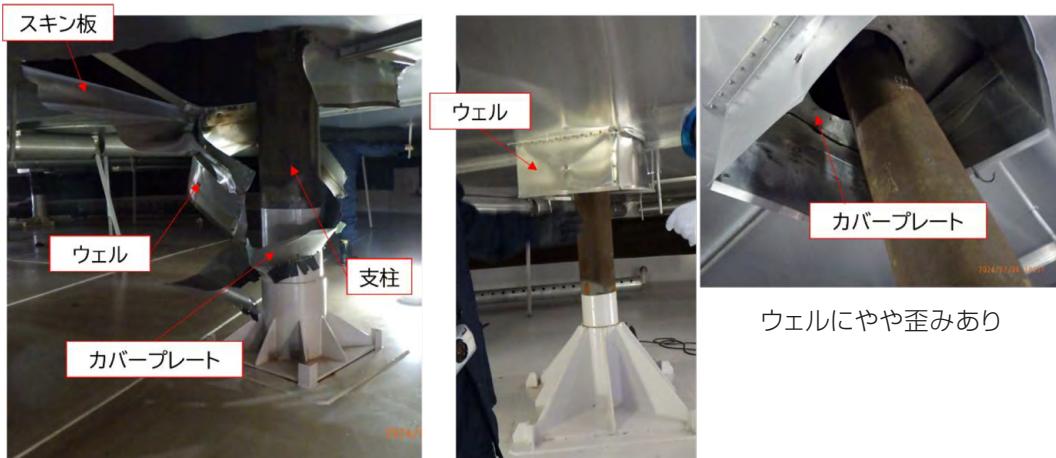
表 金沢港北特防区域で内部浮き蓋に損傷・異常が発生した石油タンク

タンク記号	浮き蓋の形式 ^{注)}	許可容量(kL)	内径(m)	地震時液面高さ(m)	Ts(s)	Wh'(m)	内部浮き蓋に関する損傷・異常の状況
A	簡易	845	13.56	3.91	4.3	1.5	○デッキスキン板のゆがみ ○ラダー・ポール周辺部材の変形・破損
B	簡易	4,780	19.38	8.34	4.8	2.0	○ラダー・ポール周辺部材の変形・破損 ○外周のリムプレート変形
C	簡易	4,830	19.37	13.54	4.6	2.6	○デッキスキン板の破れ・ゆがみ ○ラダー・ポール周辺部材の変形・破損 ○外周のリムプレート変形 ○メインポンツーン溶接部継手クラック
D	簡易	3,078	13.56	5.46	4.8	1.7	○液面計・ラダー部周囲の部材の変形・破損 ○デッキスキン板の破損 ○シール材しわ ○100mm程度回転したとみられる痕跡
E	浮屋根	5,000	21.28	8.53	5.1	1.8	○浮き屋根上への油たまり
F	浮屋根	2,000	15.50	6.37	4.3	1.7	○浮き屋根上への油たまり ○ポール・ラダー等付近の板金変形・損傷
G	浮屋根	3,000	18.00	7.89	4.6	2.4	○浮き屋根上への油たまり

注)浮き蓋の形式:「簡易」はアルミニウム製簡易フロート式、「浮屋根」は鋼製浮き屋根式。

破損の状況

無被害に近い他のタンクの状況(比較のため)

図4 タンクCのアルミニウム製浮き屋根式内部浮き蓋のデッキスキン板と
ポール貫通部周辺部材(ウェルとカバーブレート)の破損状況。

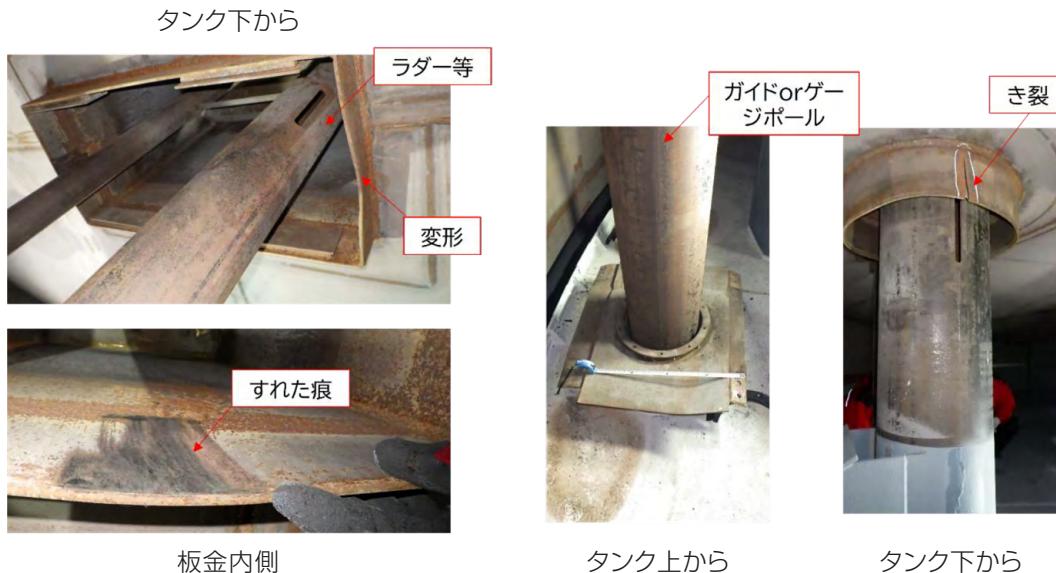


図5 タンクFの鋼製浮き屋根式内部浮き蓋のポール・ラダー貫通部付近の板金の変形・損傷状況。

表には、地震時の液面高さ(H)から計算したT_sと(1)式とは別の方法で計算したスロッシング最大波高(Wh')を掲げている。ここで、T_sは微小波高理論から導かれる次の(2)式で計算したものである。Wh'は、港湾地域強震観測・金沢港観測点の地震波形記録の水平2成分を入力として、微小波高理論により自由液面形状、すなわち液面各点の上下方向の変位の時刻歴を計算³⁾した結果から、タンク側板内壁における最大振幅を読み取ったものである。自由液面形状の時刻歴の計算ではスロッシングの1次から5次モードまでを足し合わせた。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.68} \coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)} \quad (2)$$

本計算により、内部浮き蓋に損傷・異常が発生した7基の石油タンクのうち、最も大きなスロッシングが生じたのはタンクCであり、その高さは2.6mであることが推定された。タンクCは内部浮き蓋の損傷程度が最も大きかったタンクであり、この推定結果と矛盾しない。タンクCとGのT_sは4.6sと計算されており、これは図3に示した疑似速度応答スペクトルのピーク周期とほぼ一致する。このスペクトルのピークはたいへん鋭く、ピーク周期を少しでもはずれると、スペクトルレベルが急激に小さくなる。タンクCとGで推定されたWh'が、2m台と他のタンクに比べてとりわけ大きいのはこのようなことのためと考えられる。すなわち、タンクCは、たまたまT_sが今回の地震動のスペクトルの鋭いピークにあたってしまったために、他のタンクに比べて内部浮き蓋の損傷程度が大きくなってしまったといえるだろう。

金沢港北特防区域では、内部浮き蓋付き石油タンク全13基中7基の内部浮き蓋に損傷・異常が発生したものの、残りの6基には損傷・異常はなかった。そこで、スロッシング最大波高と損傷・異常の有無の関係を調べる目的で、図6に13基すべてのタンクに対するWh'の計算結果を示す。図6において、この図から、アルミニウム製簡易フロート式内部浮き蓋(黄色の丸印を付したタンク)については、スロッシング最大波高がおおむね1.5mを超えたタンクでは内部浮き蓋に損傷・異常が発生したことが読み取れる。鋼製浮き屋根式内部浮き蓋3基については、3基とも内部浮き蓋に損傷・異常が発生したことから、今回の調査結果から、このような閾値を見出すことはできなかった。

ここで、過去の地震におけるアルミニウム製簡易フロート式内部浮き蓋の損傷事例をふりかえってみる。2003年十勝沖地震の際、石狩では容量5,000kLのガソリンタンクの内部浮き蓋が原形をとどめないほどに大破する被害が生じた。このときのスロッシング最大波高は、擦過痕から約3mと推定された⁴⁾。2011年東北地方太平洋沖地震の際、酒田では容量2,700kLのガソリンタンクの内部浮き蓋のデッキスキンが破れたり、フロートチューブが折れたりするなどの被害が生じた。このときのスロッシング最大波高は、観測地震記録を入力とした計算から2.0mと推定された⁵⁾。これらのこととは、今回

の調査結果、すなわち、スロッシング最大波高がおおむね1.5m以上になると、アルミニウム製簡易フロート式内部浮き蓋に何らかの損傷・異常が発生したということと矛盾しない。

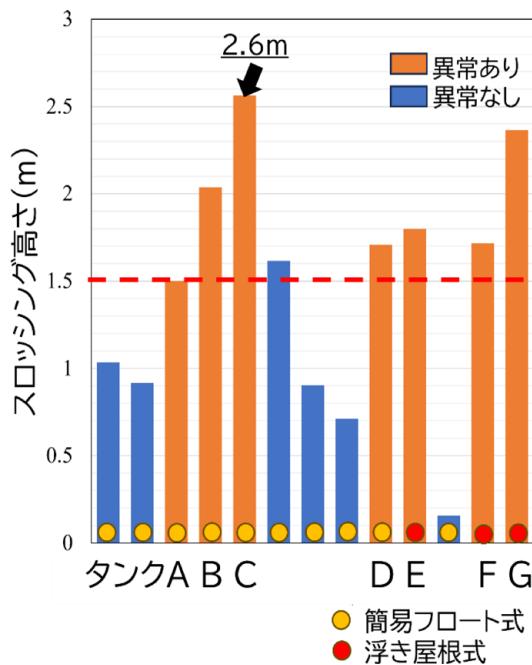


図6 スロッシング最大波高(推定値)と内部浮き蓋の損傷・異常の有無の関係。

4 新潟東港特防区域における長周期地震動とスロッシング発生状況

4-1. 新潟東港特防区域における長周期地震動

新潟東港特防区域内には、2005年頃から消防研究センターが強震計を設置して地震観測を行っている。図7は、令和6年能登半島地震の際に消防研究センターの強震計で観測された地震動の疑似速度応答スペクトルである。新潟東港特防区域における長周期地震動は、消防法技術基準で定められているレベル(黒太線)を下回った。また、2003年十勝沖地震の際に浮き屋根式石油タンクに火災、浮き屋根沈没等の甚大なスロッシング被害が生じた苫小牧特防区域でそのときに観測された長周期地震動(橙色の線)に比べると、おおむね1/3から1/2程度のレベルであった。

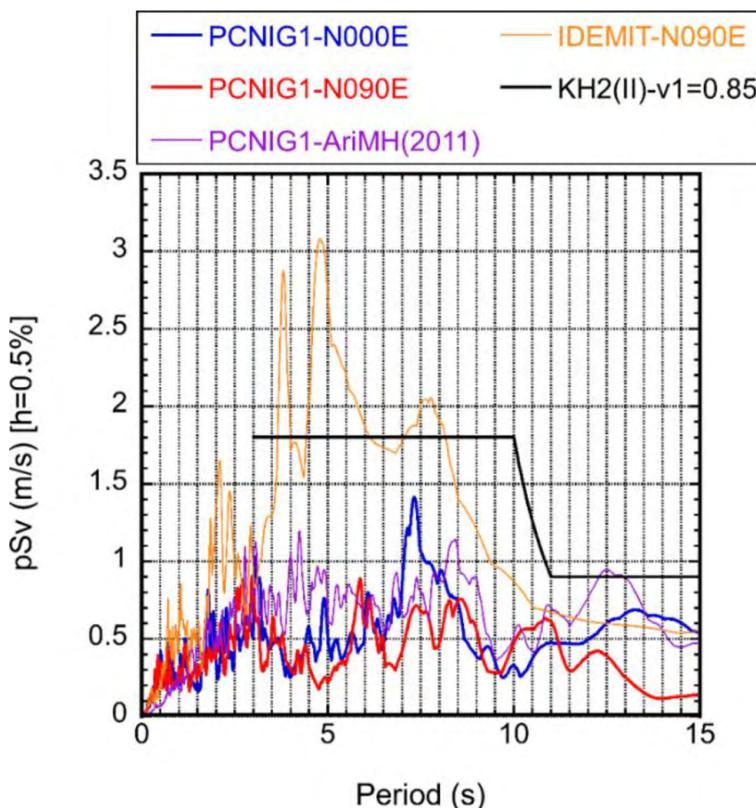


図7 令和6年能登半島地震の際に新潟東港特防区域内に消防研究センターが設置している強震計で観測された地震動の疑似速度応答スペクトル(青線(南北成分)と赤線(東西成分)、減衰0.5%)。黒太線は、Kh2相当疑似速度応答スペクトル。橙色の線は、2003年十勝沖地震の際に苫小牧特防区域で観測された地震動の疑似速度応答スペクトル(東西成分、減衰0.5%)。

4-2. 新潟東港特防区域におけるスロッキング発生状況

新潟東港特防区域における現地調査は、2024年1月11日から12日にかけて実施した。消防研究センターからの参加者は、著者、徳武、吉田及び白取の4名だった。

新潟東港特防区域には、許可容量6～10万kLの浮き屋根式原油タンクが立地している。これらのタンクでスロッキングが発生し、浮き屋根上への滯油・油の飛散は生じたものの(図8)、タンク外に油が溢流することはなかった。また、浮き屋根の浮き室部分が損傷したタンクはなかったものの、一部のタンクでは浮き屋根を構成する部材の一部が損傷・変形する被害が生じた。現地調査では、これらの被害状況を確認するとともに、13基のタンクについて発生したスロッキング波高を実測した(図9)。13基の内訳は、許可容量10万kL級が7基、同9万kL級が3基、同8万kL級が1基、同6万kL級が2基である。

浮き屋根を構成する部材の被害の内容は次のとおりである。スロッキングに伴う浮き屋根の揺動により、ローリングラダーとフォームダムの一部(銅板部分)が衝突することで銅板に凹みが生じたタンクが3基あった(図10)。ゲージポールのガイドローラーに曲がりが生じたタンクが2基あった(図11)。この曲がりは、浮き屋根の揺動が、単純な上下方向の運動ではなく、動径方向の運動も伴っていたことを示唆している。また、ガイドポールに凹みが生じたタンクが2基あった。この凹みは、浮き屋根の揺動に、動径方向または回転方向の運動も伴っていたことを示唆している。これらの被害が生じたタンクは、いずれも許可容量10万kL級のものであった。

スロッキングが発生したタンクでは、側板内壁に付着した油痕の高さに正弦波様の方位分布が見られた(図8の赤色の破線)。そこで、許可容量9万kL級のタンク1基については、ポンツーンマンホールの位置を目印として、側板内壁に付着した油痕の高さを1周、約9°刻みで40箇所測定した。図12に測定結果を示す。この図が示すように、スロッキング波高に正弦波様の明瞭な方位分布が見られる。このことから、今回のケースでは、タンクの浮き屋根の揺動は、すりこぎのような運動を伴わなかったと考えられる。13基のタンクに対するスロッキング波高の実測は、タンク側板内壁の油痕を1周見渡して、

最も高いものの高さを測定した。その結果、最も波高が大きかったのは、許可容量10万kL級のタンクにおける1.7mであった。このタンクでは、上述のような浮き屋根構成部材の被害は認められなかった。

図13は、表におけるWh'の計算、すなわち、微小波高理論に基づくスロッシング最大波高の計算結果の精度を確認するために、スロッシング最大波高を実測した13基のタンクについて、実測値(横軸)と、微小波高理論に基づく計算値(縦軸)を比較したものである。計算に用いた入力地震動は、令和6年能登半島地震の際に新潟東港特防区域内に消防研究センターが設置している強震計で得られた地震波形記録の水平2成分とした。この図から、実測値と計算値はよく合っており、微小波高理論に基づくスロッシング最大波高の計算は、単純な仮定に基づく比較的簡単なものであるにもかかわらず、実用上十分な精度を有しているといえる。このようなスロッシング最大波高の実測値と微小波高理論に基づく計算値の合致は、2003年十勝沖地震の際の苫小牧特防区域⁴⁾や2011年東北地方太平洋沖地震の際の新潟東港特防区域⁵⁾におけるスロッシング発生事例など、これまでの地震でも確認されている。



図8 新潟東港特防区域に立地する浮き屋根式原油タンクで発生したスロッシングによる油痕と浮き屋根上への滞油・油の飛散の状況。



図9 スロッシング波高を実測する様子。タンク側板内壁の油痕を1周見渡して、最も高いものの高さを測定した。



図10 ローリングラダーとフォームダムの一部（銅板部分）が衝突することにより生じた銅板の凹み。

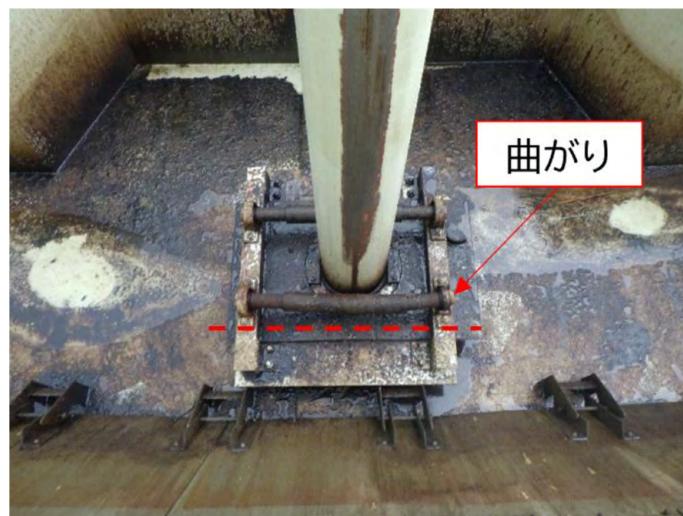


図11 ゲージポールのガイドローラーに生じた曲がり。

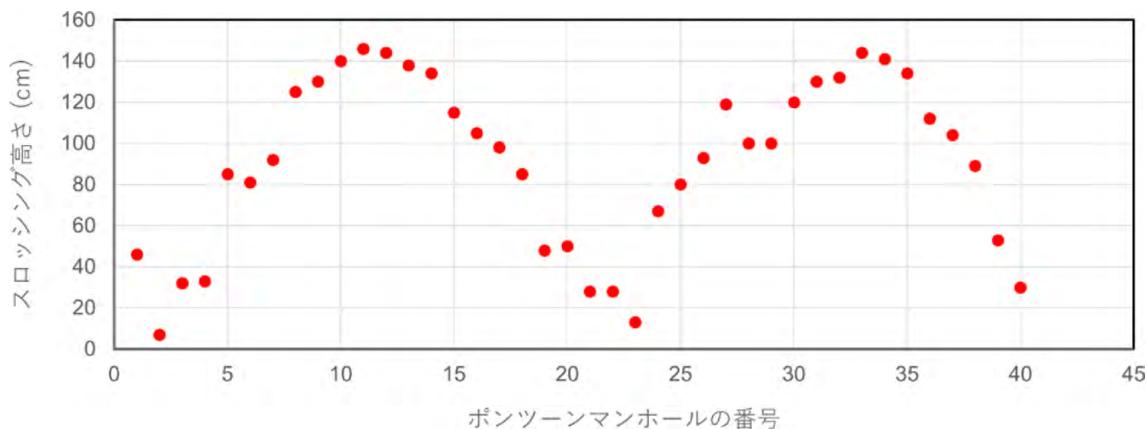


図12 許可容量9万kL級のタンク1基における側板内壁に付着した油痕の高さの1周分の測定結果。

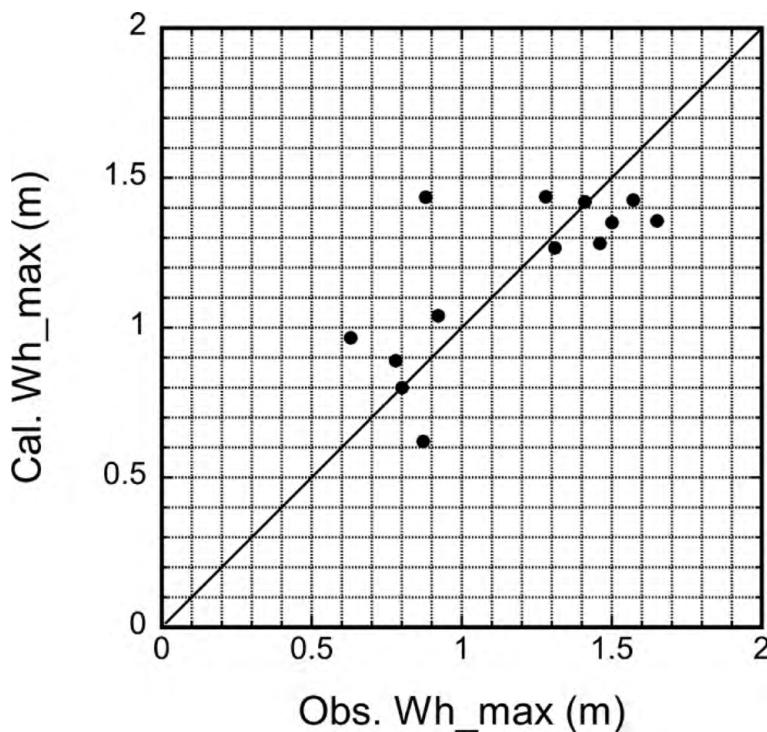


図13 スロッシング最大波高の実測値(横軸)と微小波高理論に基づく計算値(縦軸)の比較。
計算に用いた入力地震動は、令和6年能登半島地震の際に新潟東港特防区域内に消防研究センターが設置している強震計で得られた地震波形記録の水平2成分。

5 能登半島の漁港等にある小型石油タンクが強震動等により受けた被害等

能登半島の漁港等にある小型石油タンクを対象とした現地調査は、2024年3月26日から28日にかけて実施した。消防研究センターからの参加者は、著者、徳武及び吉田の3名だった。

本稿では、3つの事業所で見られた被害等について報告する。3つの事業所はいずれも石川県珠洲市内にある。珠洲市内では、K-NET正院観測点で震度6強の揺れが観測された。

A事業所に設置されている許可容量29.8kL(内径2.7m,高さ5.5m)のタンクは、タンク底部が滑動・回転し、アンカーが破損するとともに可撓管が屈曲していたことから(図14)、浮き上がり(ロッキング)が発生した可能性がある。B事業所では、許可容量70kL(内径4.3m,高さ5.1m)のタンク1基が傾斜した(図15のNo.4タンク)。この事業所では、地震前は防油堤の外にあった消火器が、地震後は防油堤内に入っていたことから、津波で浸水したと考えられる。タンクの傾斜は、基礎・地盤の変状によるものであるが、この変状が地震動によるものか、津波によるものかは不明である。C事業所に設置されている許可容量30kL(内径2.7m,高さ5.5m)のタンクは、雨水浸入防止シートが破れるとともに、北方向に2~3cm滑動してアンカーボルトが曲がっていた(図16)。また、基礎も傾いていた。このタンクにもロッキングが発生した可能性がある。能登半島の漁港等にある小型石油タンクにはこのような被害が生じたものの、油の大量流出につながるおそれのあるタンク本体の甚大な損傷は起こらなかった。



図14 石川県珠洲市内にあるA事業所の許可容量29.8kLのタンクの被害。



図15 石川県珠洲市内にあるB事業所の許可容量70kLのタンク(No.4)の被害(傾斜)。



図16 石川県珠洲市内にあるC事業所の許可容量30kLのタンクの被害。

6 まとめ

- (1) 2024年元日に発生した能登半島地震(M7.6)では、石川県能登地方で最大震度7の強い揺れが観測されたほか、石川、富山、新潟、長野県では大振幅の長周期地震動(長周期地震動階級3以上)が観測された。周期3秒以上の長周期帯域での疑似速度応答(減衰0.5%)の最大値は、金沢港北特防区域付近で約2.3m/s、新潟東港特防区域で約1.4m/sだった。
- (2) 金沢港北特防区域付近では、3つの事業所にある内部浮き蓋付き石油タンク全13基中7基の内部浮き蓋に、簡易フロート式のデッキスキン板が破れるなどの損傷・異常が発生した。今回のケースでは、アルミニウム製簡易フロート式内部浮き蓋については、スロッシング高さが1.5m以上と計算されたタンクで、何らかの異常・被害が発生した。
- (3) 新潟東港特防区域では、浮き屋根式石油タンクでスロッシングが発生した。最大波高は、許可容量10万KL級タンクでの1.7mだった。タンク外への油の溢流は発生しなかった。今回のケースでも、発生したスロッシングの高さは、微小波高理論に基づく既往の計算式でおおむね説明可能だった。
- (4) 最大震度7の強震動に見舞われた能登地方では、漁港等に設置されている小型の石油タンクに被害等が発生した。タンク本体のずれ・回転(強震動によるロッキングの疑い)や基礎・地盤の変状(強震動の影響か、津波の影響か不明)によるタンク本体の傾斜などの被害が発生したもの、油の大量流出につながるおそれのあるタンク本体の甚大な損傷は起こらなかった。

謝辞

現地調査にご協力いただいたすべての方々に感謝します。危険物保安技術協会主催の2024年度の危険物事事故例セミナーにおいて本調査結果を発表することについてご了承いただいた事業所の方々に感謝します。本調査では、国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET及びKiK-netならびに国土交通省港湾局港湾地域強震観測の強震観測記録を使わせていただきました。

参考文献

- 1) 気象庁地震火山部、報道発表「令和6年能登半島地震」における気象庁機動調査班(JMA-MOT)による津波に関する現地調査の結果について、2024年1月26日。
- 2) 坂井藤一、円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二、三の提案、圧力技術、Vol.18, No.4, pp. 184-192, 1980.
- 3) 座間信作、1983年日本海中部地震による苫小牧での石油タンクの液面揺動について、消防研究所報告、No.60, pp. 1-10, 1985.
- 4) 畑山健・他、2003年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害、地震2、Vol.57, pp. 83-103, 2004.
- 5) 消防庁消防研究センター、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書(第1報)、消防研究技術資料第82号、2011年12月。