

石油タンクのスロッシングによる被害と地震動

消防研究センター

座間 信作

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の発生後まもなく、消防研究センターが石油コンビナート等特別防災区域(特防)に設置している地震計から、メール添付の形で地震波形、応答スペクトルの画像が送られてきた。筆者らはその情報に基づき、酒田で大きな被害が、新潟、東京湾岸で何らかの被害が発生しているおそれがあると判断した。そこで、スロッシング被害発生地区の確認と被害の内容・程度を知るために、従来から用いてきている調査票によるアンケート調査を実施(調査主体は消防庁)するとともに、管轄消防本部にご協力いただき現地調査を行ってきた。その結果、上記判断は被害状況の大凡を捉えており、地震観測システムからの情報が初動時での判断に有用であることが認識された。

ここでは、2003年十勝沖地震を受けて実施された長周期帯域の設計地震動の見直し、浮屋根の浮き性能の基準化、補強等の対策の検証という観点も併せ、石油タンクのスロッシング被害に関する現状での取りまとめ状況を報告する。

2. アンケート調査に基づく被害概要

消防庁のまとめによれば¹⁾、宮城、福島、山形、新潟、茨城、千葉、東京、神奈川の8都県で何らかの被害が61基で生じていたことが判明した。

浮き屋根耐震基準該当(適合済)屋外タンク貯蔵所(シングルデッキ)では軽微な被害が4基に、未適合タンク5基で大きな被害(ポンツーン溶接部の割れ、油漏洩など)、19基で軽微な被害が確認された。浮き屋根耐震基準非該当の屋外タンク貯蔵所(シングルデッキ)では大きな被害(ポンツーン溶接部の割れ、油漏洩など)が3基に、軽微な被害が4基に確認された。ダブルデッキでは、大きな被害(ポンツーン内に油漏洩など)が9基に、軽微な被害が7基に確認された。ポンツーン型浮き蓋においては軽微な被害が3基であったが、簡易フロート型で沈没した事例が1基、その他軽微な被害が6基認められた。ただし、以上は事業所からの報告に基づくものであること、すべての事業所からアンケート回答が得られているわけではないことに留意する必要がある(上記まとめの追加として、北海道2基、秋田1基で軽微な被害の報告あり)。

被害としては、浮き屋根の沈没、浮き蓋他の沈没、ポンツーン損傷、ポンツーン内滞油、デッキ母材の割れ、浮屋根上への油流出、ルーフドレインピットへの油の流出、マンホールカバー変形、ローリングラダー脱輪、フォームダム変形、ゲージポール変形・亀裂、ウェザーシールド損傷、液面計ワイヤ絡まり等が挙げられている。

3. 現地調査による地区ごとの被害状況

消防研究センターが調査した10地区(久慈、気仙沼、仙台、いわき、鹿島、市原、川崎、酒田、新発田、新潟)の危険部施設から、スロッシングによるものと思われる被害状況の主なものの概要

について以下に示す。

(1) 酒田地区

アルミ製内部浮き蓋のデッキスキン、フロートチューブ（図1）の破断が認められた。また、当該事業所（消防研究センター地震観測点）の速度応答スペクトルは、このタンクの固有周期4.17秒付近では約200cm/sと大きな値となっている。消防庁²⁾によれば、被災した浮き蓋はタンクの内径が15.508mと小さいこと、地震時のスロッシング固有周期（約4秒）での速度応答スペクトルが約200cm/sであること及びフロートチューブの長さが6.72mと長いことの3点から、フロートチューブに対して許容を超える歪みとなり破断に至ったものと推定されている。



図1 フロートチューブの破断状況

(2) 新潟・新発田地区

ポンツーン内の滞油、アルミ製内部浮き蓋の破損、ゲージポールの変形（図2）、浮屋根上への油の流出などが認められた。スロッシング波高は最大で2mであった。この地区の消防研究センター地震観測点での速度応答スペクトルは、周期9秒付近で100cm/sを若干上回る。

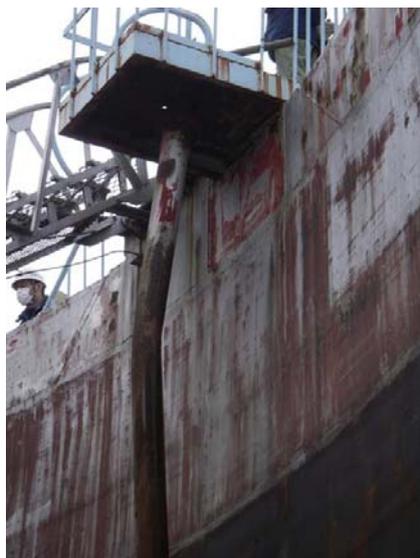


図2 ゲージポールの変形

(3) 川崎地区

浮屋根の沈没（図3）、ガイドポール固定ボルトの破損、内部浮き屋根上への滞油、ポンツーン

での滞油等が認められた。消防研究センター川崎水江観測点の速度応答スペクトルは、周期6秒、7秒付近で約150cm/sとなっている。消防庁²⁾による浮力性能と浮屋根の重量との比較検討では、破損時におけるポンツーン浮力が浮き屋根の重量に対して不足していること、ポンツーンのうち1室が破損した場合に最大喫水がポンツーン外リムと上板との交点を50mm程度上回ることが示されている。



図3 浮屋根の沈没

4 スロッシングに係る長周期地震動に関する検証

スロッシングに係る設計地震動は、タンクの直径と液高で定まるスロッシング固有周期での速度応答スペクトル値(減衰0.1~1%)換算で概ね100cm/sが基準であったが、2003年十勝沖地震での被害を受け、苫小牧、酒田、新潟、東京湾、名古屋、大阪等は最大で約200cm/s(周期による)とされた。はじめに述べたように、消防研究センターでは23か所の特防で広帯域速度型強震計による強震観測を行っており、東北地方太平洋沖地震の本震記録は、仙台観測点を除く22地点で得られた。そこで、これらの記録および特防最寄りのK-NET、KiK-net、港湾地域強震観測記録と上記基準値とを比較してみたところ、特防及びその周辺での長周期地震動の強さは設計地震動をほぼ下回っていたことが分かった。

5 スロッシング最大波高から推察される地震動の空間変化

新潟東港を挟んで約2km離れた事業所において、タンク側板、ゲージ・ガイドポールに残っている油痕高さ、あるいは衝突したエアフォームダムとラダーとの距離などからスロッシング最大波高を計測した。その最大波高を説明できるか、地震計の置かれている東地区の記録を用い2次元スロッシング応答解析を実施したところ、地震計の置かれている事業所(Niigata-E)においては、両者は良い一致を見せているが、約2km西の事業所(Niigata-W)に関しては実測値の方が大きく、応答解析結果は過小評価となった(図4)。これらの事業所のタンクは、ほぼ同一の諸元でかつ内容物は同じであること、同一チームによる計測であることから計測に伴うばらつきは同程度とみなせる。したがって、西地区に対する過小評価は、東地区事業所の地震記録を用いたためであり、西地区事業所の方がこの帯域ではより強い地震動であったものと考えられる。そうであるならば、Niigata-Wにおいて計算では180cm程度となるべきところが約120cmという結果となっていることから、高々2km程度離れていてもこの長周期帯域(約10秒)の地震動は50%程度変わりうることを示唆される。

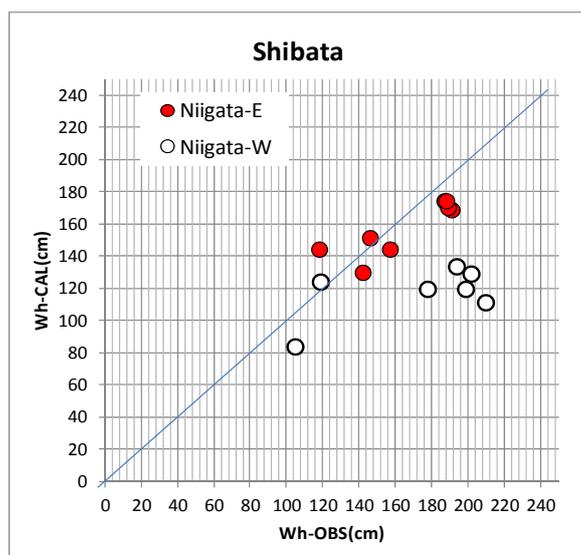


図4 スロッシング最大波高に係る測定値と計算値との比較

6. おわりに

Mw9.0という超巨大地震によって励起された周期数秒から10秒付近までのやや長周期帯域での地震動強さは、2003年十勝沖地震(M8.0)を受けて改正された告示スペクトルをほぼ下回るものであって、幸いにもスロッシングによる被害は2003年十勝沖地震でのそれよりは小さくて済んだ。しかし、今後の発生が危惧されている南海トラフ沿いの巨大地震に対しては、M8クラスでも今回の地震動以上になることも考えられる³⁾ことから、今後の更なる地震動予測に関する検討とスロッシング対策の一層の充実が望まれる。

謝辞

被害調査においては、管轄消防本部および事業所関係者に変にお世話になった。防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-net並びに国土交通省港湾局・港湾空港技術研究所の港湾地域強震観測による強震記録を利用した。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 消防庁：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会屋外タンク貯蔵所等分科会、2011
http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/jishin_tsunami/tanku/01/1-4.pdf
- 2) 消防庁：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会屋外タンク貯蔵所等分科会、2011
http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/jishin_tsunami/tanku/02/2-1.pdf
- 3) 太田外氣晴、座間信作：巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策—、共立出版、2005