

タンクの内容液のスロッシングについて

株式会社 プラント耐震設計システムズ
池 田 雅 俊

1. まえがき

平成 15 年 9 月 26 日 4 時 50 分頃に北海道十勝沖を震源とする地震が発生した。地震の規模はマグニチュード 8.0 で、巨大地震であった。この地震は、文部科学省に設置された地震調査研究推進本部が想定していたマグニチュード 8.1 の十勝沖のプレート間の地震である。

この地震により胆振支庁苫小牧に位置する出光興産株式会社北海道製油所において 30,000kl の原油タンク及び同じく 30,000kl のナフサタンクから発災(それぞれリング火災及び全面火災となった)した。大量の危険物を貯蔵する大型タンクの全面火災がもたらす恐ろしさを印象付け、テレビ、新聞は過熱気味に報道したことは、耳新しい。火災に至った原因は、やや長周期地震動によるタンク内液体のスロッシングによる浮き屋根の揺動、沈没等によるものと考えられている。



図1 平成 15 年十勝沖地震で発災し崩壊した 30,000kl ナフサタンク

この地震以前にも 1964 年の新潟地震、1983 年の日本海中部地震などで多くのタンクがスロッシングによると考えられる被害を受けている。スロッシングとは、タンクの内容液が地震により揺れる現象をいい、「やや長周期の地震動」といわれる特殊な成分の地震波形が大きく影響していると考えられている。

本稿では、スロッシングがタンクに及ぼす影響、耐震設計についての概要と技術的な問題点を解説することにする。

2. スロッシングによるタンクの地震被害

平成 15 年十勝沖地震でタンクがスロッシングにより被った損傷は、浮屋根式タンクを中心に次のようなものである。

- 浮屋根ポンツーンやデッキの破損による沈没
- 浮屋根マンホール等から内溶液がデッキ上に浸入・滞留
- 浮屋根のポンツーンの変形、損傷（内外リムが圧縮力による破壊）
- ポンツーンとデッキの取り付け部の損傷
- ゲージポール（測定用ケーブル等を貯槽内部へ導入する垂直管）の変形、損傷
- 浮屋根回転止めポールの変形、損傷
- 浮屋根が揺れ側版、屋根、付属品に衝突し損傷・変形、衝突火花等
- 浮屋根の側板の変形、われ等
- 屋根板等の変形、われ等
- 液面計本体の変形、亀裂
- ウェザーシールに亀裂、損傷
- 重量物（ローディングラダー、測定小屋等）の落下

これらの損傷状態をみると、スロッシングによる内溶液の液面が揺れのために、やわらかい構造である浮屋根が変形しながら、傾いたり、円周方向に回転したりする。浮屋根が側版、屋根板、浮屋根付属品等に接触・衝突しながら相互に力を及ぼし合い、各部が変形、損傷等に至る。この結果、内溶液がタンク外部に漏洩、浸出、流出し、発火に至ることにもなる。

スロッシングによるタンクの地震被害は、今までの多くの地震で発生している。その被害の概要を、表 1 に示す。これらの被害は、平成 15 年の十勝沖地震におけるにおける出光興産株式会社北海道製油所（苫小牧）のように全面火災までには至っていないが、発火に至るまでの損傷モードは類似している。

表 1

地震名称	地震の概要	被害の概要
新潟地震	1964/6/16 マグニチュード 7.7 酒田：震度* 5 ~ 6, 新潟：震度 5	昭和石油新潟製油所において、 1) 浮屋根原油タンク 5 基(45 及び 30 千 kl)、製品タンク 10 基で、スロッシングにより浮屋根が側板上方まで揺れ(4 回)、炎上し、タンクヤードに一面に燃え広がり、2 週間にわたり燃え続けた。 2) ドームルーフタンクの配管接続部で配管折損のためガソリンが噴出、着火し、火はたちまち延焼拡大し、臨港町の民家 300 戸を焼失するまでに至った。
宮城沖地震	1978/6/12 マグニチュード 7.4 仙台、石巻、大船渡：震度* 5	東北石油仙台製油所において、 1) ドームルーフタンク 3 基の底板付近が損傷し、石油がほぼ全量が流出した。基礎地盤には亀裂等の異常とスロッシングの複合効果によりタンクのロッキングのためアニュラー部にアップリフトが生じ損傷に至った。 2) 浮屋根式原油タンク 10 基(5.5 ~ 10.2 万 kl)はいずれも満液に近い状態で、浮屋根上に原油が滞留、その他、ローディングラダーの変形、脱輪、液面計取付部の損傷があった。 3) ナフサタンク(1.1 万 kl)は側版上部が変形
日本海中部地震	1983/5/26 マグニチュード 7.7 深浦、秋田：震度* 5	1) 東北電力秋田火力発電所においてダブルデッキ浮屋根原油タンク (35 千 kl) でスロッシングによるリング火災が発生した。溢流、浮屋根にはめだった損傷は見られなかった。 2) 新潟地区で加速度は震度 3 程度であったが、石油タンク 864 基のうち 12 基についてやや長周期の地震動によるスロッシングが発生し、側板上部からの溢流、浮屋根とその付属品の損傷が見られた。

兵庫県 南部地震	1995/1/17 マグニチュード 7.2 須磨、西宮、宝塚、北淡等：震度* 7 神戸、洲本等：震度* 6	スロッシングによる浮屋根の揺れによる内容液の漏洩が一部見られた（6施設）ものの、側板、浮屋根、付属品等の損傷は見られなかった なお、地震の横揺れ、縦揺れにもとづく側板の座屈、変形や地盤の液状化に伴う不等沈下、側方流動による被害が多く見られた。
集集地震 (台湾)	1999/9/21 マグニチュード 7.7 南投 TCU129：983 Gal	中国石油公司（CPU）において 1）沙崙貯蔵基地：シングルデッキ浮屋根タンク(13万kl)で、ポンツーンが座屈しデッキに原油が流出 2）鐵砧 LPG 製造基地；ダブルデッキ浮屋根タンク(2000kl)で、タンク最下段側板のガイドポール固定部に浮屋根の揺れの影響で穴が開き原油が流出 3）円錐形固定屋根タンク(25,000kl)で、側板屋根接合部の座屈で開口し原油が流出
コジャエリ 地震 (トルコ)	1999/8/17 マグニチュード 7.4 サカリヤ(アダバザル近傍)：400 Gal, ヤリムカ (Tupuras 近傍)：322Gal	TUPURAS 製油所において 1）14基のうち6基の浮屋根タンク（直径20～25m）が焼損 2）80基のうち45基のタンクの浮屋根が全部又は一部が沈下
平成15年 十勝沖 地震	2003/9/26 マグニチュード 8.0 浦河、厚岸：震度6弱 苫小牧：震度5弱(86 Gal)	出光興産株式会社北海道製油所において 1）30千kl原油浮屋根タンクにおいて、地震直後にリング火災発生、7時間後消火 なお、同タンク近傍の配管から漏洩火災があった。 2）30千klナフサ浮屋根タンクにおいて、地震から54時間後に浮屋根上に滞留したナフサに泡消化剤でシール中に着火し全面火災となる。タンクは崩壊し44時間後に消火した 3）事業所内の105基の平底タンクのうち、43基のタンクでスロッシングによる何らかの損傷が見られた。

*は、旧震度階を表す。

3. スロッシングの力学

スロッシングは、図2のように振り子の運動と良く似ている。長さが $L = 0.27D$ （ここで、 D はタンク直径）の振り子に相当する。波高が高くなると、波高に比例して、最高と最低の水頭差だけ波高を下げる方向に力が作用する。このため、振り子と同様の運動となり、左右の最高液面間を振動する。

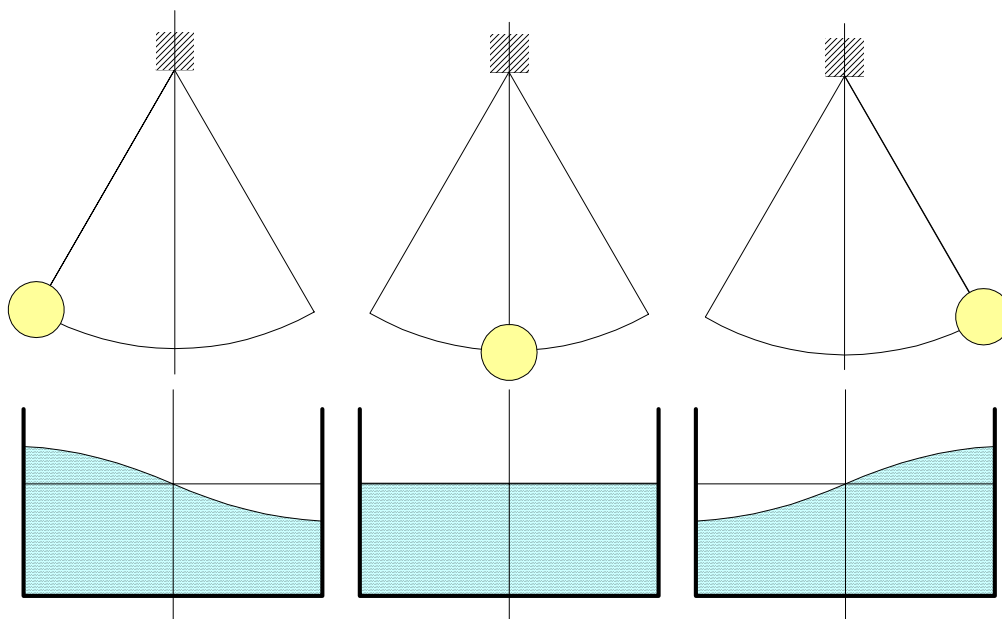


図2 スロッシング運動

スロッシングの固有周期は、詳細な計算式は耐震規定等に規定されているが、およそ、 $T = 1.05\sqrt{D}$ で計算される。たとえば、タンクの直径が $D = 25$ m なら、固有周期は $T = 1.05\sqrt{25} = 5.1$ 秒、 $D = 50$ m なら $T = 1.05\sqrt{50} \cong 7.4$ 秒程度となる。

液面高さ H が $D/2$ より小さい時はこの計算式より周期は長くなる。 $H = D/3$ の時は10%、 $H = D/4$ の時は15%、 $H = D/5$ の時は25%位長くなる。

平成15年十勝沖地震で全面火災となり崩壊したナフサタンクの場合、タンク直径は42.7m、液面高さ18mとして、 $T = 7$ 秒程度となる。

このように、スロッシングで液面が揺動する周期は、塔で通常高いもので1秒程度、球形貯槽で0.6秒程度などと比較すると、かなり長くゆっくりと揺れる。「長周期の揺れ」という。そのうえ振動の減衰（第4講参考）が小さく、振幅が1/10に減衰するまでに1時間程度を要する。

このように周期が長いために、スロッシングの揺れの性状は、通常の構造物の揺れとは、かなり異なったものとなる。通常の構造物（塔槽類、架構など）は、周期が0.1~1秒程度（短周期型構造物という。）であり、減衰率も0.03~0.07程度であるので、地震の主要動がくるとすぐ応答して大きく揺れ、すぐ減衰する。スロッシングの場合、衝撃的な地震波が来てもすぐ立ち上がりせずに数秒してから揺れが大きくなる。そのころには、短周期型の揺れは減衰してなくなり、長周期の

揺れだけ（単独のスロッシング周期の正弦波）になり、長時間揺れ続ける。

タンクは、短周期の揺れ（タンク本体の揺れ—バルジング振動）と長周期の揺れ（スロッシング）が共に発生するが、短周期の揺れは地震動の早い時間に最大応答を示すが、すぐ減衰してしまう。スロッシングはそのあと徐々に立ち上がり最大値を示す。このように両者は最大応答となる時刻が違うので、高圧ガスの耐震告示のように通常は、両者の最大値を合算せずそれぞれ独立事象として耐震性の評価を行なっている。

液面の高さ η （m）は、概略、 $\eta = 0.42K_{MH} \cdot D$ で計算できる。ここで、 K_{MH} は設計水平修正震度、 D はタンク直径（m）である。苫小牧の全面火災で崩壊したタンクの場合、 $T = 7$ 秒の周期に対しては、計測された波形から推定すると $K_{MH} = 0.18$ 程度であったので、 $\eta \approx 0.42 \times 0.18 \times 42.7 = 3.28$ （m）程度の波高であったと推定される。消防法の規定で算定すると、約半分の1.7mとなる。平成15年十勝沖地震の苫小牧での地震波が、短周期側で90Gal程度の地表における最大加速度しか計測されていないのに、長周期成分が予想外に大きく最大級の揺れであったことが良く分かる。なお、高圧ガス保安法による耐震規定では、評価法が安全側の規定になり計算上6.6mの波高と計算される。

4. スロッシングを起こさせる地震動

タンクのスロッシング周期は、3節で述べたように4～10秒くらいに分布する。（液面が低いと15秒位になることもありうる。）そこで、スロッシングの検討では地震動の4～15秒位の周期特性が重要になる。

この周期帯の地震動を「やや長周期地震動」又は単に「長周期地震動」といつている。これにたいして0.04～2秒くらいまでの地震動を「短周期地震動」という。短周期地震動と長周期地震動では同じ地震でも波の伝わり方等が違い、耐震設計における地震動の設定にも注意が必要である。

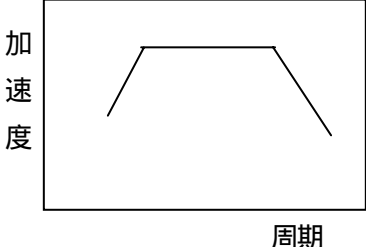
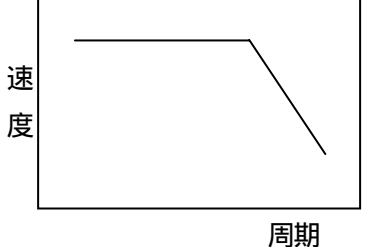
表2に長周期地震動と短周期地震動の特徴の比較表を示す。

平成15年十勝沖地震では、苫小牧は震源から遠く震度5弱として加速度は大きくないが、やや長周期地震動では最大応答速度が200～300 cm/secと大きな値をしめした。

やや長周期地震動を正確に把握してスロッシングに対する設計を確実なものにするには、全国のそれぞれの地区における深地下地盤構造を把握する必要があるが、現状十分に明らかにされているとはいえない。高圧ガス設備の耐震設計基準では、応答計算方法で余裕をみて安全性を担保しているが安全すぎる設定になっている地区もある、今後はやや長周期地震動に関するデータを広く収集してスロッシングに関する適切な耐震設計を行なえるようにすることが望まれる。

やや長周期地震動はタンクのスロッシングの他に、超高層ビル、超大橋等の耐震性、地震時の挙動解明に重要であり、今後、明らかにされて行くものと思われる。

表2 スロッシングを起こさせる地震動の特徴

項目	短周期型地震動の特徴	やや長周期地震動に特徴
地震波	実体波（岩盤を伝播する） （縦波：P波、横波：S波）	表面波（地表を伝播する。） （レーリー波、ラブ波）
主たる周期帯	0 ~ 2ないし4秒	2 ~ 15秒
伝播特性	マグニチュード及び震源から観測点までの距離で決まる。	途中の地震は伝播経路の影響を大きく受ける。震源と観測地点の組み合わせで特性が異なる。
距離減衰性	地震波は比較的近い距離で減衰する。	遠くまで減衰せず伝播する。遠くの地震でもやや長周期地震が励起されることがある。
地盤の影響	地震基盤（岩盤等）から上の表層地盤の影響を受ける。	表層地盤より深い深地下地盤の広い範囲の地帯構造の影響を受ける。
応答スペクトル	縦軸を加速度とし、横軸を周期とする応答スペクトルが使われる。周期0.1秒から1秒の範囲で加速度一定（最大加速度応答）のあるスペクトルとなる。 	縦軸を速度とし、横軸を周期とする応答スペクトルが使われる。周期2秒から8秒位までの範囲で速度一定（最大速度）のあるスペクトルとなる。 
その他	耐震規定等で規定している地域区分は短周期地震動に対するものである。	耐震規定等で規定している地域区分と異なる。 苫小牧、秋田、酒田、新潟、東京、横浜、川崎、埼玉、千葉、大阪、名古屋、四日市等はかなり励振される恐れがある。

5. さいごに

今回は、タンクのスロッシングに対する耐震設計法に関して解説した。昨年の平成15年十勝沖地震で苫小牧の出光興産北海道製油所でスロッシングによる浮屋根等の損傷から2基から出火して炎上したため、消防研究所等でさまざまな検討が行なわれている。スロッシングに関する設計法、特に浮屋根を有するタンクに関しては未だ解明すべき点が多く残されている。

- 1) やや長周期地震動に関する知見
- 2) スロッシング波の形状と浮屋根の変形挙動の把握
- 3) 浮屋根の耐震強度の検討
- 4) 地震動特性とスロッシングモード(高次のモード)関係

表1にある通り、これまでも度々、類似の損傷モードから発災していることから早急な解明とデータの収集、設計法の開発が望まれる。