



長周期地震動による京葉コンビナートの石油タンクのスロッシング危険度評価

上田英臣¹⁾、山崎文雄²⁾、リュウ・ウェン³⁾

- 1) 非会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻 修(工) (現鹿島建設株式会社)
e-mail : ika_days@yahoo.co.jp
- 2) 正会員 千葉大学大学院 工学研究科 教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
e-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp
- 3) 正会員 千葉大学 大学院工学研究科 助教 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)
e-mail : wen.liu@chiba-u.jp

要 約

日本各地には、石油等を貯蔵・備蓄するタンクが多数設置されている。タンクの固有周期は直径と液深により計算することができ、通常の石油タンクに限っていえばおよそ5秒から10秒と非常に長い周期となる。そのため、これらは長周期地震動の影響を大きく受け、スロッシングなどにより火災が発生する可能性がある。本研究では、今後発生が予測されている巨大地震に対してもこうした事故の可能性が高いと考え、長周期地震動が原因となる石油タンクのスロッシング危険度の評価を行った。その際、多数のタンク高さなどを空撮画像から取得する手法を用いた。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録や想定南海トラフ巨大地震の予測波形を用いてスロッシング波高を計算し、溢流の有無などから京葉コンビナートに位置する石油タンクの危険性について評価を行った。

キーワード： 石油タンク、スロッシング、長周期地震動、東北地方太平洋沖地震、南海トラフ巨大地震

1. はじめに

近年我が国では、超高層ビル、長大橋梁、大型石油タンクなどの固有周期の長い構造物が、長周期の地震動の影響を受け、被害に大小はあるものの、損壊や事故に繋がったりすることが報告されるようになった。長周期地震動が大きな注目を集めたのは2003年十勝沖地震 (M8.0) であり、震源から約250km離れた苫小牧市の石油コンビナートにおいて、地震直後に原油タンク1基のリング火災が発生、およびその2日後にナフサタンク1基から出火し全面火災となった¹⁾。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、震源域から遠く離れた大阪市臨海部の55階建て超高層ビルが、上層部で130cmを超える揺れに見舞われた^{2), 3)}。また東京首都圏でも、長周期地震動が広範囲で観測され⁴⁾、超高層ビルでは非構造部材の被害や室内什器の散乱なども報告されている⁵⁾。

日本国内には石油等を貯蔵するためのタンクが、臨海コンビナート地区を中心として各地に多数設置されている。また、危機に備えた国家による原油の備蓄や、民間による在庫を多めに持つ備蓄には、岩盤タンクや洋上タンク、浮き屋根式タンクなどが用いられている。これらの中で屋根をポンツーンと呼ばれる浮きにより貯蔵液面に浮かせた構造となっている浮き屋根式タンクは、石油・原油を貯蔵するた

めの最も主流なタンクであるといえる⁶⁾。この浮き屋根式タンクは、本研究で取り上げる京葉臨海コンビナート中部地区だけでも優に100を超えており、これまでに巨大な地震が発生した際には、こうしたタンクのいくつかが火災事故を起こしている⁷⁻⁹⁾。火災が起きるのは、タンク貯蔵液が地震によりスロッシングと呼ばれる揺動を起こし、液が溢れ出した後で、静電気や浮き屋根が付随設備又は側板と衝突することにより発生する火花が原因となって着火するためである。スロッシングの大きな要因となっているのが、巨大地震による揺れの長周期成分であり、この周期と巨大タンクの固有周期が合うとこの現象が生ずる。固有周期はタンクの直径と液深により求めることができるが、およそ5秒から10秒前後となることが多い。内容液の液深が変化するたびに固有周期が変わることや、こうしたタンクが臨海コンビナートや備蓄基地には多数建ち並んでいることを考えると、幾つかのタンクは地震動の影響を大きく受ける可能性がある。

本研究では、地震によるタンクの火災事故を減らすために、浮き屋根式タンクのスロッシング評価を、京葉臨海コンビナート中部地区を例として行う。スロッシング計算に必要なタンク情報については、2つの手法を提案し考察する。また、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録や想定南海トラフ巨大地震の解析波形を用いてスロッシング波高を計算し、溢流を発生させないための防災面での対策を考察するなど、スロッシングに関する危険度評価を行う。

2. 研究手順

2.1 空撮画像からのタンク情報の取得

スロッシング評価を行うためにはタンクの高さ、直径、液深を把握する必要がある。一般的にこれらのタンク情報は公開されておらず、過去に火災事故を起こした巨大タンクなどについて一部情報が公開されている程度である。本研究では、巨大タンクだけでなく比較的小さなタンクについても検討するため、タンク情報を空撮画像から求める以下の手法2つを使用して、推定結果を比較した。

a) 影の長さからのタンク高さ計算

空撮画像に写りこんでいるタンクの影の長さから、建物高さを推定する以下の式(1)を用いて、タンクの高さを計算する^{10), 11)}。

$$H_w = \frac{L_{is}}{\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \lambda'} + \frac{1}{\tan^2 \lambda} - \frac{2 \cos(\alpha - \alpha')}{\tan \lambda' \tan \lambda}}} \quad (1)$$

この式において、 L_{is} 、 λ 、 λ' 、 α 、 α' 、は順に、タンク頂部からその頂部の影までの長さ、衛星高度、太陽高度、衛星方位角、太陽方位角としている(図1)。そのため、空撮画像が撮影された時間、写真を撮影した航空機の位置情報などが必ず必要となる。また、高さの精度は使用する空撮画像に依存する。

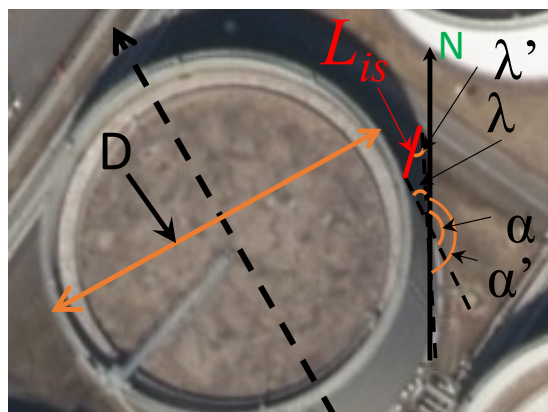


図1 空撮画像上での各パラメータの位置関係

タンク最高点から浮き屋根上に表れている影の長さを測定して求められた高さを、推定されたタンク高さから引くことでタンクの液深を推定することができる。また、タンクの直径 D については、撮影方向に対して直交する方向でのタンクの幅を測ることで推定することができる。

b) SfMによる3次元モデルからのタンク高さ推定

SfM (Structure from motion)ソフトウェアであるAgisoft社のPhotoScanを用いることにより、多方向からの空撮画像から構造物の3次元モデルを容易に構築することが可能である¹²⁾。この手法では、手法a)において必要となる撮影位置、時間などの情報がない場合でもタンク形状の推定が可能である。また、手法a)ではタンク一つ一つに着目した計算を行う必要があるが、この手法では空撮画像に写り込んでいる全てのタンク形状を一度に求めることができる。そのため、作業面においても効率的な手法となりうる。ただし、精度については十分に確認されていないため、本研究では試験的に3Dモデルからのタンク形状の推定を行った。

2.2 スロッシング高さの計算

空撮画像から推定されたタンク高さなどの情報を用いて、スロッシングの計算を行い溢流の有無などを推定する。その際、西ら¹³⁾により示された式を用いた。タンクの固有周期 T_s 、スロッシング波高 η^+ はそれぞれ以下の式となる。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\left(\frac{D}{3.682g}\right) \coth\left(\frac{3.682H}{D}\right)} \quad (2)$$

$$\eta^+ = 0.419 \cdot \frac{2\pi}{T_s} \cdot \frac{D}{g} \cdot S_V(T_s) + 0.91 \cdot R \cdot \left(\frac{\eta}{R}\right)^2 \quad (3)$$

式(2)、(3)において D 、 H 、 g 、 R 、 $S_V(T_s)$ は順に、タンク直径、液深、重力加速度、タンク半径、周期 T_s における速度応答スペクトルを表している。式 (2) において、タンクの液深である H の値が小さくなった場合では、 \coth 関数の関係で固有周期が長くなる結果となる。一方で式 (3) において、固有周期の値は逆数として入っているため、固有周期が長くなれば、スロッシング波高は小さくなるのがこれらの式から予想される。

スロッシング高さの計算結果より、波高がタンク側板の高さを超える結果となった場合は、その溢流量を計算する必要があり、式(4)で求めることができる。

$$\Delta v = (R^2 \pi) \cdot \frac{\alpha \cdot \delta h \cdot (R - r_0) \cdot \theta_0}{R} \quad (4)$$

ここで、 α は比例係数であり、自由液面の場合では0.659、浮き屋根の場合では0.4023である。また、 δh は溢流高さ、 r_0 はスロッシング波高がタンク側板の高さと等しくなる $\theta=0^\circ$ の半径との交点、 θ_0 は側板近傍においてスロッシング波高がタンク上部の余裕高さ H_c と等しくなる円周方向角度である。以下の式(5)に、 r_0 では $\theta=0$ 、 $\eta^+=H_c$ を、 θ_0 では $r=R$ 、 $\eta^+=H_c$ を、それぞれ代入することで、 r_0 、 θ_0 を求めることができる。式中の J_1 は第一種ベッセル関数(一次)を、 η 、 $\Delta\eta$ はそれぞれ式(3)右辺の第一項、第二項を示している。

$$\eta^+(r, \theta) = \eta \frac{J_1\left(\varepsilon_1 \cdot \frac{r}{R}\right)}{J_1(\varepsilon_1)} \cos \theta + \frac{r}{R} \Delta\eta \cos 2\theta \quad (5)$$

3. 東北地方太平洋沖地震の地震動と使用した空撮画像

スロッシング計算に使用した地震加速度波形は、東北地方太平洋沖地震の本震時に、気象庁¹⁴⁾（千葉市中央区中央港）とK-NET¹⁵⁾（市原市姉崎、千葉市中央区千葉港）により観測されたものである。観測場所である3地点について、今回の対象地域である京葉コンビナート中部地区とともに図2に示す。また、3地点の中より代表地点として気象庁中央港で観測された加速度波形を積分して得られた速度波形を図2に示す。これを見ると、気象庁中央港とK-NET千葉港の観測点は、500m程度と近い位置にあることがわかる。K-NET姉崎はこれら2地点と離れているが、対象タンク群に近接する観測記録としてこれら3地点を使用した。

今回使用した空撮画像は、東北地方太平洋沖地震の6日後の2011年3月17日に、千葉県防災危機管理部が千葉県沿岸部一帯を撮影したものであり、図3のように各製油所の石油タンクが写り込んでいる画像を使用した。撮影高度はおよそ2,900mであり、画像上の1ピクセルの寸法はおよそ25cmとなっている。

本研究では、このように空撮画像に写り込んでいる京葉臨海コンビナート中部地区のタンク群を取り上げて、スロッシング危険度評価の検討に使用した。また、対象としたタンクは、空撮画像より浮き屋根式と確認されたもので、図3の各製油所の画像上において番号がついているタンクである。最も対象タンクが多かったのは千葉I興産（株）で68基、次いでF石油（株）袖ヶ浦製油所で37基であった。そして、全製油所の合計対象タンク数は206基となった。

4. 東北地方太平洋沖地震に対するスロッシング計算結果

4.1 タンク高さの計算結果

本研究では京葉臨海コンビナート中部地区のタンク群（図3）を対象として、この範囲で直径が20m以上であると考えられたすべての浮き屋根式タンクについてスロッシングの評価を行った。ここでは、その中から空撮画像の情報量より3Dモデルによる検討も可能であった地点として、C石油（株）千葉製油所を取り上げる。また、後述の想定南海トラフ巨大地震に対する検討においては、大型タンクと小型タンクなど複数のタンク群が立ち並ぶ千葉I興産（株）を代表地点として取り上げている。

C石油（株）千葉製油所において影長さからのタンク高さ推定結果を、千葉県コンビナート地域のタンク高さ資料¹⁶⁾と比較した（図4）。C石油（株）において対象としたタンクの合計数は22基であり、タンク高さについては平均約0.5m、タンク直径については平均約0.6mの誤差で求めることができた。なお、空撮画像が撮影された時点での液深データは得られなかったため、精度については今後検討していく必要がある。液深の影については、タンク高さの影長さほど明確に表れていない場合もあり、測定が困難な場合も見受けられた。

それぞれのタンクの大きさの関係を見てみると、タンク高さについては、およそ20m程度に集中していることがわかる。一方で、タンク直径については、40m程度から80m程度のものがあり、タンクの高さから直径を推定することは困難であった。

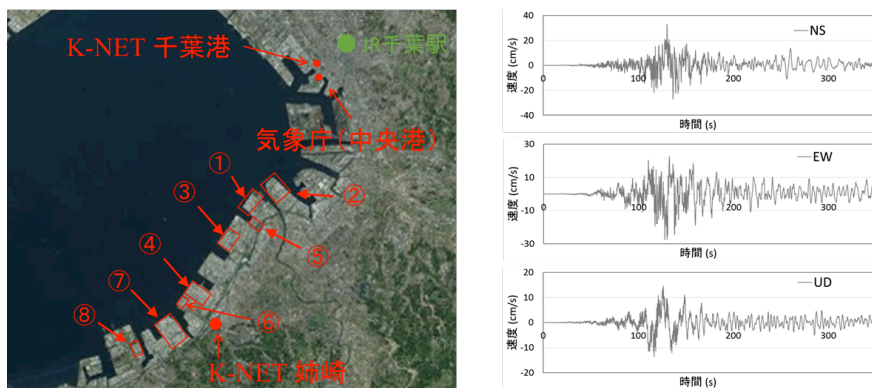


図2 検討対象地域（①～⑧）と地震観測地点および気象庁中央港での速度波形

今回C石油（株）千葉製油所において、試験的に行った3Dモデルによる高さ推定では、10m程度の誤差が生じたタンクが複数見られた。そのため、実際のスロッシング計算で3Dモデルから得た数値を使用することは、誤差の大きな原因となる。3Dモデルからの高さ推定は効率的な手段ではあるが、正確なスロッシング評価が困難になると考えられたため、今回は、スロッシング計算のタンク情報として、影長さから推定した値を使用することとした。



図3 検討対象である各製油所の対象タンク（番号のついたタンク）の空撮画像

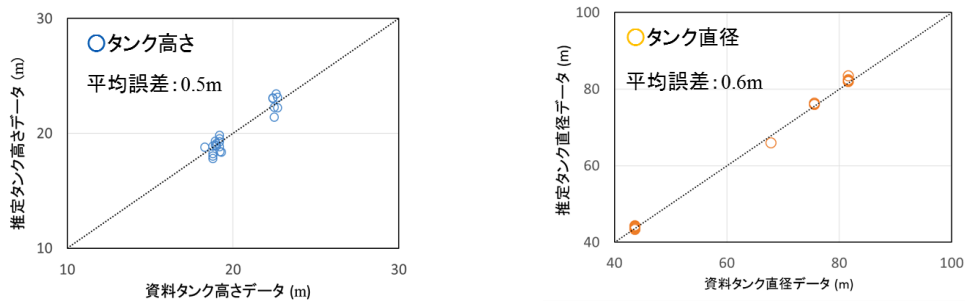


図4 C石油(株)における22基のタンクデータの比較

4.2 速度応答スペクトルの計算

スロッシング波高を求めるために、対象地域近傍の3地点で観測された加速度波形から速度応答スペクトルの計算を行った。減衰率の値については、既往の研究¹⁷⁾などより自由液面の場合では0.1%、シングルデッキ浮き屋根の場合では0.5%程度となることから、今回は減衰率を0.5%として計算した。

気象庁、K-NETの計3地点における東北地方太平洋沖地震の本震記録から計算した速度応答スペクトルと3地点の水平合成の比較を図5に示す。気象庁中央港での応答スペクトルは、周期1秒前後にピークが表れており、その後10秒程度まで幾つかの周期でピークが見られる。K-NET姉崎の応答スペクトルでは、周期3秒から4秒の間にピークが見られ、その前後の所々でピークが見られる。K-NET千葉港は、気象庁中央港の観測地点と非常に近いため、速度応答スペクトルの値も似た結果となっているが、気象庁の観測結果よりも短い、周期0.5秒あたりからピークが見られ、3秒、4秒、10秒あたりで大きな値を示していることがわかる。そのため、東北地方太平洋沖地震の波形は、小型から大型のタンクまで様々な固有周期のタンクに影響があったと考えられる。これら3つの波形については、ピークとなっている周期で速度応答スペクトルが200(cm/s)前後となっているが、重要となるのはタンクの固有周期として考えられる範囲である。タンクの固有周期は前述の通り、液深によって変化するが、液が満たされている場合には10秒前後となる場合が多い。速度応答スペクトルを計算した3箇所で、周期10秒前後を見比べてみると、K-NET千葉港、気象庁中央港では10秒前後でスペクトルの値が175(cm/s)を超えているが、K-NET姉崎では150(cm/s)に達しておらず、他の2つと比べて若干小さな値となっていることが分かった。

4.3 スロッシング波高の計算

計算した速度応答スペクトルから、この22基のタンクにおけるスロッシングの評価を行う。応答スペクトルを計算した地震波形ごとの計算結果、固有周期などを表1に示す。なお、実際の波高計算には、水平2成分を合成した速度応答スペクトルの値を使用している。ここで、水平2方向合成の速度応答スペクトルは、2つの水平成分(NS,EW)の各周期での時刻歴応答を計算し、時刻歴上で二乗和平均の最大値を求めたものである。

計算結果より、タンクC1は液深が浅く固有周期が非常に長くなったため、スロッシング波高も小さくなった。大きなスロッシング波高となったものは、固有周期が約9.6秒から10.0秒のタンクであった。スロッシング波高としては表1に色付けしたタンクで、3mを超えるものもあったが、液が溢流する結果とはならなかった。表1の溢流までの高さは、推定された液高に、それぞれの波形から求められたス

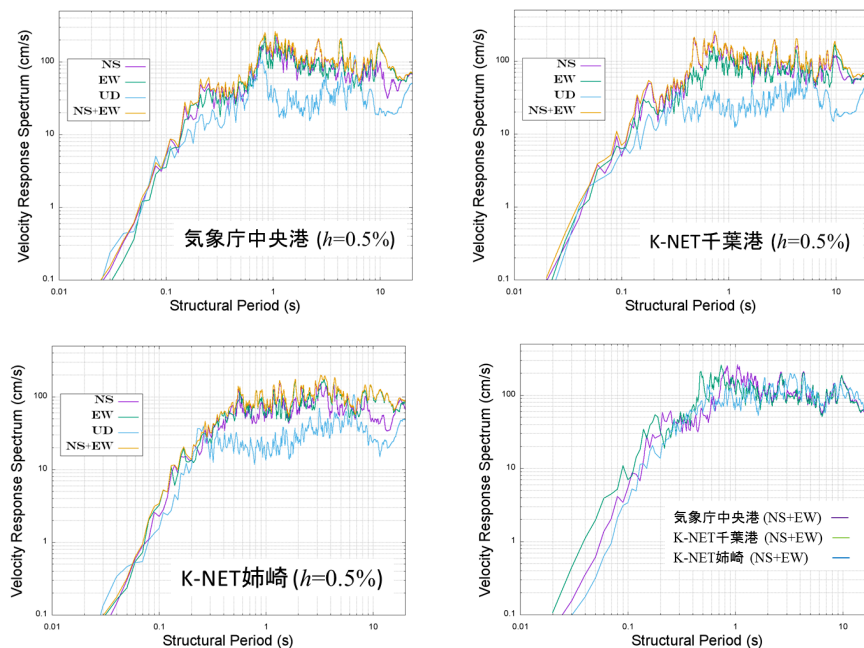


図5 東北地方太平洋沖地震波形の各観測地点での速度応答スペクトルおよび水平合成の比較

ロッシング波高の中で最大のものを足し合わせ、タンク側板上端までの高さを計算したものである。最大スロッシング波高 ($\eta^+=3.6\text{m}$) となったタンクC5の場合でも、1.4mの余裕があることが分かった。また、東北地方太平洋沖地震の際の報告書¹⁸⁾には、これらのタンクが溢流したという記載は見られなかった。しかし、幾つかのタンクでは浮き屋根の上に貯蔵液が溢れたと報告されていた。

今回の計算結果で大きなスロッシング波高となったタンクにおいて、石油が屋根上に溢れだしたかどうかについて、計算結果からのみで判断することはできない。しかし、スロッシング波高が1m程度であっても浮き屋根上に液が漏洩したという報告¹⁹⁾も見られたため、波高が2mを超える場合は十分液が漏洩する可能性が高いと考えられる。

今回計算したタンクの固有周期からはこのような結果となったが、固有周期を求める際の液深は時々刻々と変化するため、様々な液深での固有周期を計算し、過去に観測された地震波と比較して卓越したスロッシング波高にならないか検討する必要があると考えられる。

4.4 京葉臨海コンビナート中部地区の浮屋根式タンクに対する溢流量の推定

今回測定された液深からの計算では、スロッシングによる溢流はなかった。貯蔵タンクはスロッシングによる溢流を防ぐために、最高液面をタンク側板頂部から数メートル下げないように設計される^{20, 21)}。消防庁の規定によると、余裕高さの計算には液面揺動の設計水平震度が用いられ、計算パラメータの一つに長周期地震動に係る地域特性に応じた補正係数がある。この値は貯蔵タンク周辺の強震計地震動記録より貯蔵タンクの液面揺動の一次固有周期に応じた速度を100cm/sで除した値となる。また地震動が得られない場合は自治省告示の図²⁰⁾より求まる値となり、京葉臨海コンビナートでは固有周期が6秒から12秒の範囲にあるタンクは補正係数が大きくなり、必要な余裕高さが大きくなる。

実際にスロッシングによる石油の溢流を防ぐためには、この上部の余裕高さが重要となる。そこで、液が満たされている場合でどの程度溢流量が発生するかを実際に計算した。計算は本研究で対象としている京葉臨海コンビナート中部地区に立ち並ぶ206機のタンクにおいて、消防法令の規制とは異なるが、仮に余裕高さHcを2.5m、3.0m、3.5mとした場合でどの程度の溢流量が発生するかを求めた。3つの地震波形を全タンクにそれぞれ適用した場合の合計溢流量と溢流タンク数を図6に示す。

余裕高さと合計溢流量の関係を見ると、2.5mとした場合、気象庁中央港の波形ではおよそ10000m³、3.0mの場合、K-NET千葉港の波形でおよそ2000m³、3.5mの場合、K-NET千葉港の波形でおよそ100m³という結果となった。そのため、設定する上部高さによって溢流量が大幅に変わることが分かった。

計算結果より、スロッシングで液が溢流したタンクの固有周期は、およそ9.3秒から10.9秒であった。それぞれの波形での溢流量を比較してみると、K-NET姉崎の溢流量が他と比べて少なくなっている。

表1 C石油(株)における22基のタンクのスロッシング計算結果

タンク番号	直径(m)	高さ(m)	液深(m)	固有周期(s)	中央港 η^+ (m)	千葉港 η^+ (m)	姉崎 η^+ (m)	溢流までの高さ(m)
A1	43.68	18.88	9.71	8.42	1.81	1.95	2.18	6.98
A2	44.41	18.39	3.08	13.94	0.63	0.61	0.85	14.46
A3	43.74	17.84	6.81	9.62	2.26	2.31	1.79	8.72
A4	43.94	18.03	9.61	8.49	1.50	1.68	2.15	6.27
A5	44.21	19.29	12.83	7.83	1.50	1.44	1.63	4.83
A6	43.39	19.54	15.37	7.42	1.25	1.34	1.51	2.66
A7	43.98	18.92	13.19	7.75	1.62	1.68	1.53	4.06
A8	43.79	18.25	11.04	8.10	1.73	1.42	1.83	5.39
B1	44.22	19.87	3.80	12.58	0.78	0.79	0.96	15.11
B2	43.81	18.44	6.25	9.98	2.11	2.06	1.37	10.08
B3	44.12	18.83	8.45	8.91	1.20	1.16	1.25	9.13
B4	43.82	19.11	12.30	7.86	1.51	1.42	1.68	5.13
C1	83.46	21.43	1.46	37.69	0.28	0.27	0.29	19.68
C2	81.98	23.47	16.35	11.97	1.59	1.52	2.29	4.82
C3	82.31	22.27	6.76	17.52	0.85	0.82	1.23	14.27
C4	82.05	23.17	11.65	13.68	1.30	1.24	1.82	9.70
C5	66.03	22.31	17.39	9.83	3.49	3.56	2.34	1.36
C6	82.48	23.11	11.48	13.83	1.23	1.17	1.70	9.93
C7	82.30	23.07	7.41	16.78	0.79	0.86	1.05	14.61
C8	76.08	18.99	5.46	17.96	0.77	0.78	1.11	12.42
C9	76.11	18.95	10.03	13.60	1.23	1.18	1.73	7.19
C10	76.35	19.33	3.85	21.33	0.64	0.62	0.74	14.73

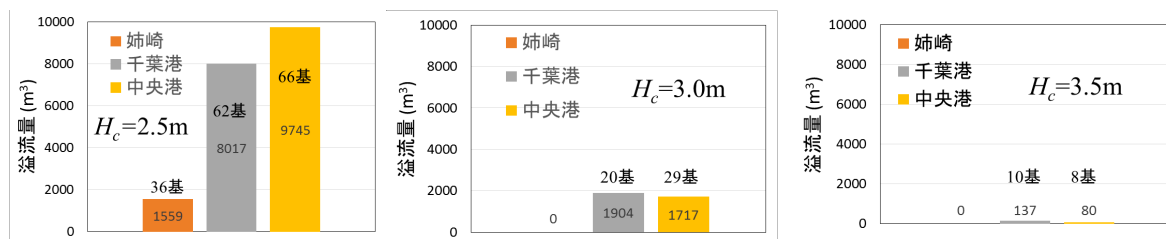


図6 京葉臨海コンビナート中部地区の浮屋根式タンク 206基における溢流量の推定

これは溢流したタンクの固有周期である 10 秒前後の速度応答スペクトルの値が、K-NET 姉崎だけ小さいことが影響していると考えられる。

タンク火災を防ぐためには、スロッシングによる溢流を防ぐことは非常に重要となる。今回計算を行った、京葉臨海コンビナート中部地区においては、3.5mの余裕高さを設けることでほとんどのタンクで溢流を防ぐことができるという結果になった。しかしながら、溢流は発生しなくとも、浮き屋根上に液が漏洩し火災事故につながる可能性も考えられるため、この点については対策を考えていく必要がある。

3.5mを設定した場合で、最も溢流量が多くなったのはK-NET千葉港での波形であった。溢流するタンクは約10基で、これらのタンクは周期がおよそ9.7~9.8秒であった。そのため、K-NET千葉港の速度応答スペクトルのピーク値と重なり、スロッシング波高が最大で約3.7mとなり溢流する結果となった。

今回の計算では、すべてのタンクにおいて一定の余裕高さを設定して計算を行ったため、卓越したスロッシング波高となったタンクでは溢流する結果となった。実際の設計の際には、タンク径と液深により決まるスロッシング波高が、地震動スペクトルの卓越周期において大きくなった場合にも溢流が発生しないように、タンク個々で余裕高さを設定する必要がある。なお、今回計算を行った各製油所のタンク形状、上部の余裕高さを3.5mとした場合のスロッシング波高計算結果は表2に示す通りである。

5. スロッシング危険度評価

スロッシングによるタンクの危険度評価^{22)~24)}は、まずスロッシング波高を計算するところから始まる(図7)。スロッシング計算の結果、溢流があるかないかがまず重要な分岐点となる。続いて重要となるのが溢流量である。溢流が少ない場合はタンク周りでの被害になることが考えられるため、一つのタンクでの火災について考える。一方で、溢流量が多くなる場合では、タンク周りだけでなく、防油堤内に存在する他のタンクへの影響などを考慮しなければならない。続いて重要となるのが、貯蔵している油種である。引火点が低いとされる第1石油類を貯蔵しているタンクでは、流出火災につながる可能性が高くなる。また、浮き屋根式タンクにはシングルデッキタイプとダブルデッキタイプがあるが、シングルデッキタイプの方が貯蔵液溢流の可能性が高く、危険度が高くなることになる。

スロッシングにより液がタンク外に溢流しない場合でも、漏洩することへの危険性も考えなければならない。浮き屋根上への漏洩は、溢流と比較して火災につながる可能性は低い。しかしながら、漏えいが発生するような大きなスロッシング波高となった場合では、浮き屋根の揺動により付随設備などが破壊、若しくは浮き屋根の沈没などが発生する可能性がある。ここで、溢流、漏洩のどちらもタンク火災につながる原因は、静電気やスロッシングにより浮き屋根が付随設備又は側板と衝突することにより発生する火花などである。そのため石油が漏洩して空気中に出ればいつでも火災につながる危険があるため、迅速に対応することを考えなければならない。緊急地震速報よりスロッシング予測をする研究²⁵⁾が行われているように、液が漏洩した後などにタンク火災を未然に防ぐための対応などの研究も重要となる。

今回取り上げた京葉臨海コンビナート中部地区のC石油(株)千葉製油所において、空撮画像から測定した液深より求めたスロッシング波高からは溢流しないという結果になった。空撮画像が撮影され日での液深であるため、液が満たされている場合の検討ではないが、この場所に立ち並ぶタンク群は、スロッシング火災への対策がとられていたといえよう。

表 2 京葉臨海コンビナート中部地区における対象タンクの形状および余裕高さ H_0 を 3.5m とした場合のスロッシング波高計算結果一覧

	タンク番号	直径 (m)	高さ (m)	周期 (s)	姉崎 η^* (m)	千葉港 η^* (m)	中央港 η^* (m)	タンク番号	直径 (m)	高さ (m)	周期 (s)	姉崎 η^* (m)	千葉港 η^* (m)	中央港 η^* (m)
① C石油株 千葉製油所 南岸	A1	43.68	18.88	7.45	1.48	1.30	1.25	A1	77.61	25.29	10.47	1.87	2.96	3.05
	A2	44.41	18.39	7.59	1.41	1.65	1.74	A2	78.65	24.88	10.63	1.92	2.75	2.81
	A3	43.74	17.85	7.57	1.36	1.54	1.66	A3	78.31	24.46	10.65	1.91	2.73	2.79
	A4	43.94	18.03	7.57	1.37	1.55	1.66	A4	78.58	25.35	10.56	1.90	2.84	2.94
	A5	44.21	19.29	7.48	1.45	1.31	1.31	A5	78.66	24.57	10.67	1.92	2.73	2.79
	A6	43.39	19.54	7.36	1.51	1.42	1.35	A6	78.44	25.27	10.55	1.90	2.84	2.95
	A7	43.98	18.92	7.48	1.44	1.30	1.31	A7	78.51	25.19	10.57	1.90	2.82	2.91
	A8	43.79	18.25	7.53	1.31	1.40	1.48	B1	65.16	22.35	9.51	2.85	3.05	3.11
	B1	44.23	19.87	7.43	1.53	1.35	1.26	B2	65.32	22.78	9.48	2.90	2.94	3.08
	B2	43.81	18.44	7.51	1.37	1.35	1.39	B3	64.73	22.26	9.48	2.87	2.92	3.05
B3	44.12	18.83	7.51	1.37	1.36	1.40	B4	65.15	22.49	9.50	2.87	3.01	3.10	
B4	43.82	19.11	7.45	1.49	1.30	1.26	B5	64.91	22.27	9.50	2.86	3.00	3.09	
C1	83.46	21.43	11.77	2.51	1.60	1.74	B6	64.67	22.16	9.48	2.87	2.91	3.05	
C2	81.98	23.47	11.20	2.28	2.36	2.41	B7	65.15	22.39	9.51	2.85	3.05	3.11	
C3	82.31	22.27	11.46	2.52	2.00	2.12	B8	64.98	22.94	9.42	2.90	2.76	2.92	
C4	82.05	23.17	11.26	2.32	2.29	2.35	B9	65.31	22.16	9.56	2.79	3.28	3.23	
C5	66.03	22.31	9.62	2.70	3.49	3.41	C1	68.16	22.74	9.79	2.48	3.76	3.70	
C6	82.48	23.11	11.32	2.35	2.21	2.30	C2	64.77	22.37	9.47	2.89	2.89	3.04	
C7	82.30	23.07	11.31	2.35	2.22	2.31	C3	65.26	22.45	9.51	2.86	3.06	3.11	
C8	76.08	18.99	11.45	2.32	1.87	1.97	C4	68.06	22.83	9.77	2.52	3.78	3.73	
C9	76.11	18.95	11.46	2.33	1.85	1.96	C5	64.37	22.56	9.40	2.85	2.67	2.83	
C10	76.35	19.33	11.40	2.29	1.94	2.04	C6	68.27	18.40	10.59	1.66	2.43	2.49	
A1	67.67	18.62	10.46	1.64	2.59	2.67	C7	68.31	22.82	9.80	2.47	3.75	3.69	
A2	28.41	19.92	5.65	1.31	1.00	1.08	C8	68.11	18.66	10.51	1.64	2.53	2.62	
A3	28.28	20.52	5.63	1.30	0.99	1.09	C9	68.37	18.97	10.47	1.65	2.60	2.68	
A4	28.02	21.13	5.59	1.25	0.97	1.07	D1	68.63	19.06	10.49	1.65	2.58	2.67	
A5	27.95	21.02	5.59	1.25	0.97	1.07	D2	68.52	19.51	10.38	1.75	2.72	2.76	
A6	28.24	19.51	5.64	1.29	0.99	1.08	D3	68.49	19.25	10.43	1.70	2.66	2.73	
B1	44.21	14.68	8.13	1.85	1.58	1.90	D4	68.38	19.51	10.38	1.77	2.73	2.77	
B2	44.35	14.66	8.16	1.86	1.76	2.05	D5	67.95	18.96	10.42	1.70	2.65	2.71	
C1	31.44	16.12	6.18	1.08	0.84	0.95	D6	68.54	18.96	10.50	1.65	2.57	2.65	
C2	30.95	14.92	6.22	1.08	0.79	0.88	D7	68.08	18.71	10.49	1.64	2.56	2.65	
C3	30.74	15.70	6.12	1.08	0.89	0.96	D8	68.05	19.16	10.39	1.73	2.69	2.74	
C4	30.74	16.55	6.06	1.16	1.15	1.05	E1	36.89	21.83	6.52	1.18	0.87	0.92	
C5	30.84	15.40	6.16	1.06	0.84	0.95	E2	37.51	21.22	6.61	1.13	0.96	0.98	
C6	30.57	15.74	6.09	1.12	1.01	0.96	E3	36.68	21.90	6.49	1.22	0.86	0.89	
C7	30.94	15.73	6.14	1.07	0.85	0.96	E4	37.02	21.65	6.54	1.15	0.90	0.96	
C8	31.09	16.50	6.11	1.11	0.94	1.08	E5	37.38	22.12	6.56	1.17	0.92	0.98	
C9	23.23	14.26	5.21	1.43	1.31	1.55	E6	37.14	22.07	6.54	1.15	0.90	0.96	
C10	23.06	14.12	5.19	1.40	1.10	1.50	F1	36.91	22.27	6.51	1.19	0.87	0.91	
C11	23.40	14.37	5.23	1.40	1.55	1.65	F8	37.02	22.03	6.53	1.17	0.89	0.94	
C12	23.58	14.23	5.26	1.43	1.82	1.82	F1	23.32	13.48	5.27	1.49	1.82	1.81	
C13	23.24	13.19	5.28	1.54	1.81	1.77	F2	23.27	14.43	5.21	1.43	1.31	1.55	
D1	23.25	15.03	5.18	1.39	1.04	1.50	F3	23.19	14.79	5.18	1.39	1.03	1.49	
D2	23.08	11.07	5.50	1.04	1.10	0.91	F4	32.73	13.96	6.58	1.03	0.81	0.87	
D3	23.34	14.13	5.23	1.40	1.54	1.64	F5	33.25	14.57	6.58	1.04	0.83	0.88	
D4	30.90	15.40	6.17	1.05	0.84	0.94	F6	33.44	14.83	6.57	1.05	0.83	0.89	
D5	19.04	15.51	4.61	1.41	1.08	1.22	F7	33.25	13.75	6.69	0.89	0.87	0.94	
D6	19.17	15.83	4.62	1.46	1.05	1.19	F8	33.40	13.97	6.66	0.90	0.88	0.94	
D7	19.33	15.92	4.64	1.60	1.00	1.12	F9	33.19	14.15	6.62	0.89	0.86	0.92	
D8	19.39	13.00	4.73	1.59	0.94	0.89	F10	33.35	14.74	6.57	1.05	0.82	0.88	
A1	75.98	21.86	10.81	1.99	2.48	2.61	F11	33.19	13.45	6.73	0.84	0.86	0.90	
A2	75.87	21.73	10.82	1.99	2.46	2.60	F12	33.13	13.68	6.68	0.90	0.87	0.94	
B1	76.04	21.13	10.96	2.11	2.39	2.43	F13	33.41	14.64	6.59	1.04	0.84	0.89	
B2	76.50	20.59	11.12	2.10	2.29	2.31	F14	33.64	14.91	6.59	1.05	0.85	0.89	
B3	76.66	21.09	11.04	2.13	2.37	2.35	G1	28.31	13.45	6.00	1.11	1.31	1.36	
B4	76.38	20.47	11.14	2.11	2.27	2.30	G2	28.83	13.73	6.05	1.09	1.13	1.07	
B5	76.24	21.61	10.89	2.07	2.41	2.54	G3	27.97	14.14	5.88	1.31	1.50	1.46	
C1	82.32	21.38	11.65	2.49	1.74	1.86	H1	33.25	14.19	6.63	0.97	0.86	0.87	
C2	82.27	21.77	11.56	2.45	1.86	1.99	H2	32.85	14.63	6.53	1.04	0.79	0.84	
C3	68.21	17.38	10.84	1.81	2.20	2.32	H3	32.96	14.53	6.52	1.03	0.78	0.82	
C4	67.89	18.64	10.49	1.63	2.56	2.64	I	33.25	14.51	6.58	1.04	0.82	0.88	
D1	67.86	18.33	10.55	1.64	2.46	2.55	J	31.17	15.15	6.22	1.09	0.79	0.89	
D2	67.64	18.29	10.54	1.64	2.47	2.56	K	33.34	14.31	6.62	0.98	0.86	0.86	
D3	67.79	18.22	10.57	1.64	2.44	2.51	L	31.44	15.41	6.24	1.09	0.77	0.87	
D4	67.54	18.61	10.45	1.65	2.60	2.67	E	31.33	15.19	6.24	1.08	0.77	0.86	
D5	68.27	18.41	10.59	1.66	2.43	2.49	A1	81.33	19.84	11.90	2.29	1.51	1.58	
D6	68.26	18.84	10.49	1.64	2.57	2.65	A2	81.24	21.23	11.55	2.43	1.85	1.97	
E1	35.20	16.85	6.60	1.08	0.90	0.93	A3	81.23	20.38	11.75	2.46	1.58	1.71	
E2	46.19	18.90	7.75	1.80	1.76	1.71	A4	90.25	19.24	13.21	2.05	1.53	1.62	
E3	46.63	21.11	7.60	1.49	1.77	1.85	A5	90.09	20.90	12.70	1.82	1.54	1.61	
E4	46.57	20.63	7.63	1.52	1.86	1.93	A6	90.16	21.30	12.60	1.94	1.60	1.59	
E5	46.41	18.19	7.86	1.78	1.50	1.60	B1	90.42	20.36	12.89	1.81	1.54	1.65	
F	35.46	18.96	6.49	1.18	0.83	0.86	B2	63.71	20.43	9.63	2.58	3.38	3.31	
G1	68.60	22.86	9.83	2.43	3.69	3.63	B3	63.93	20.30	9.67	2.58	3.40	3.41	
G2	68.63	23.10	9.80	2.48	3.77	3.71	B4	63.87	20.19	9.68	2.57	3.43	3.43	
A1	38.02	22.37	6.62	1.12	0.98	0.99	B5	63.97	20.88	9.59	2.68	3.31	3.24	
A2	42.68	22.21	7.11	1.48	2.06	1.96	C1	49.76	21.02	7.95	2.06	1.60	1.81	
A3	42.90	22.65	7.11	1.48	2.07	1.97	C2	49.18	19.74	8.01	2.11	1.62	1.80	
A4	42.65	22.26	7.10	1.45	2.07	1.99	C3	63.79	20.66	9.60	2.65	3.33	3.26	
A5	42.73	22.71	7.09	1.42	2.09	2.01	C4	64.00	19.82	9.76	2.40	3.55	3.51	
A6	47.11	18.59	7.89	1.84	1.50	1.65	C5	64.08	20.04	9.73	2.49	3.54	3.51	
A7	47.33	18.77	7.90	1.86	1.50	1.67	C6	63.96	20.48	9.64	2.58	3.40	3.33	
A1	48.45	18.64	8.05	2.08	1.60	1.76	C7	64.14	20.11	9.73	2.50	3.55	3.52	
A2	48.49	18.70	8.05	2.08	1.60	1.77	C8	64.20	20.26	9.71	2.54	3.52	3.50	
A3	49.40	19.78	8.03	2.13	1.63	1.81	C9	63.73	19.49	9.79	2.32	3.52	3.46	
A4	61.33	19.33	9.52	2.68	2.91	2.93	C10	63.92	20.63	9.62	2.61	3.37	3.30	
A5	61.94	19.92	9.50	2.73	2.86	2.95	C11	63.89	20.92	9.57	2.72	3.24	3.18	
A6	61.82	20.00	9.47	2.75	2.76	2.90	C12	63.93	20.79	9.59	2.68	3.31	3.24	
A1	61.03	25.59	8.76	2.24	1.58	1.61	D1	37.59	20.74</					

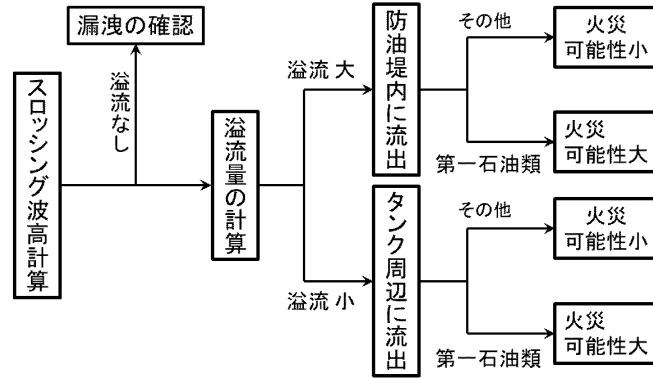


図7 スロッシング危険度評価の流れ²²⁾

6. 想定南海トラフ巨大地震に対する検討

今後、数十年以内に発生が予想されている南海トラフ巨大地震に対する検討を行った。使用した長周期地震動は、内閣府が3次元差分法による数値解析で求めた、京葉コンビナート地区の南海トラフ巨大地震による工学基盤上の速度波形²⁰⁾である。長周期地震断層モデルは、「最大クラスの地震」に対応するものとし、断層の破壊伝播速度の揺らぎに関しては、5通りの乱数系列のうち対象地点で「最大」の長周期地震動を発生させるものを用いて算出した波形を使用することにした。これは大きめの入力を想定したことになるが、南海トラフ巨大地震の震源域が関東地方からは遠いことを考慮したためである。

使用した長周期地震動の計算地点と速度波形を図8に、速度応答スペクトル ($h=0.5\%$) を図9に示す。今回、千葉I興産(株)のタンク群を取り上げる理由は、大型のものから小型のタンクまで設置されているため、タンクの中では比較的短い周期となるものに対しても、検討も行うことができるためである。

想定南海トラフ地震によるものと、東北地方太平洋沖地震の際のK-NET姉崎、K-NET千葉港、気象庁中央港での観測波形によるスロッシング波高の計算結果を図10に示す。スロッシング波高の計算は、液が満たされていると仮定し、上部の余裕高さについては消防法令の規制とは異なるが、4章で求められた溢流を概ね防げると考えられる3.5mとして行った。

図9より速度応答スペクトルの大きさはピークとなる周期でおよそ110(cm/s)であるため、東北地方太平洋沖地震時のスペクトル(図5)と比較すると小さいことが分かる。図10より、京葉コンビナート地区

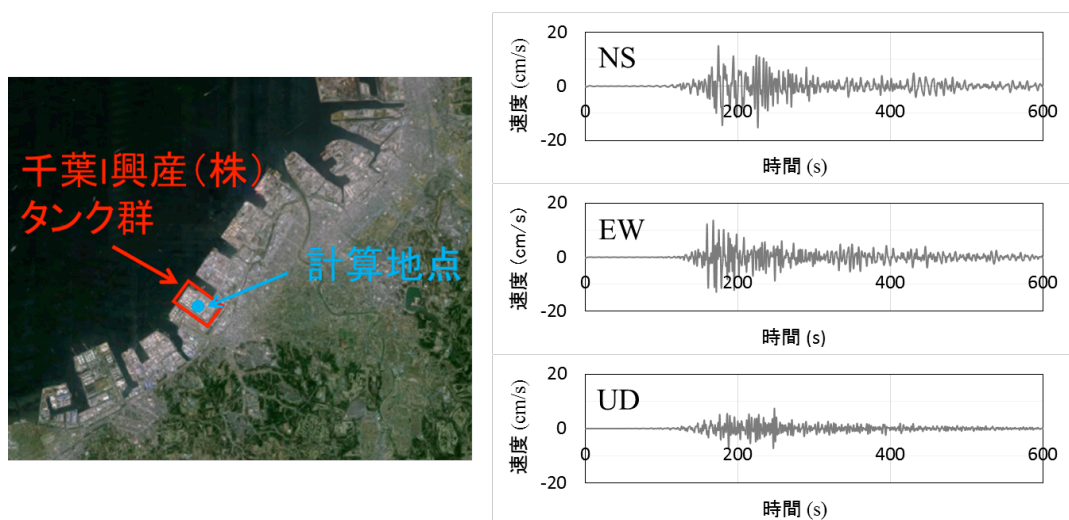


図8 南海トラフ巨大地震の波形計算地点(左)および速度波形(右)

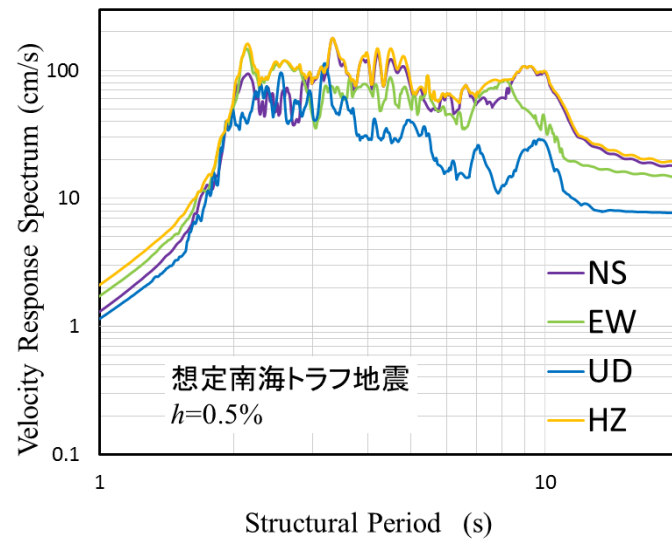


図9 南海トラフ巨大地震千葉I興産（株）での速度応答スペクトル

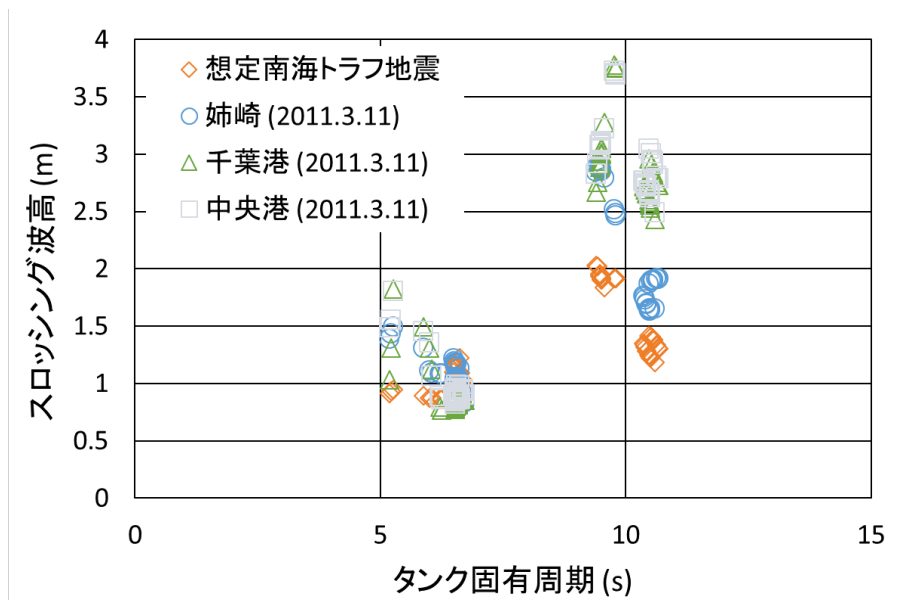


図10 千葉I興産（株）タンク群の固有周期とスロッシング波高計算結果

における想定南海トラフ巨大地震の計算波形でのスロッシング波高は、最大でおよそ2mであった。一方、東北地方太平洋沖地震時の千葉I興産（株）のタンク群の近辺での観測波形から予想されるスロッシング波高は、最大で3.5mを超えていたことが分かる。

以上の検討より、想定南海トラフ巨大地震による京葉臨海コンビナート中部地区のタンク群への影響は、東北地方太平洋沖地震と比べると小さいといえよう。しかし、中日本や西日本にある石油タンクにとっては、想定南海トラフ巨大地震は最も影響が大きいと予想されるもので、これらに対する長周期地震動の評価と安全対策が必要であろう。一方、首都圏に関しては、最大の長周期地震動を発生させるのは相模トラフを震源とする海溝型地震である。2016年1月に内閣府が「相模トラフ沿いの巨大地震等による長周期地震動検討会」を発足させたように、今後、中長期的な視野でこの地震による長周期地震動に対する構造物の安全性評価も必要となると考えられる。

7. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震による観測地震記録を使用して、京葉臨海コンビナート中部地区における浮き屋根式石油タンクのスロッシング波高の計算と危険度評価を行った。スロッシング波高の計算の際に必要なタンク形状や液深などの情報は、空撮画像に写り込んだタンクとその影長さから推定した。この手法では、タンク高さについては平均約0.5m、タンク直径については平均約0.6mの誤差でタンク情報を取得することができた。また、複数枚の空撮画像から構築した3Dモデルからのタンク情報の算出も試みたが、現段階では精度が充分ではなかった。しかし、今後ソフトでの計算処理を正確に行えるようになれば、効率的にタンクデータを構築し、スロッシング危険度評価を行う際に有効な手段になり得ると考えられる。

C石油(株)千葉製油所での東北地方太平洋沖地震時のスロッシング計算結果として、最大波高は3.6mと推定された。今回使った推定液深などの条件からは、溢流をする結果とはならなかったが、石油などが屋根上に漏れ出すことが十分に考えられる値である。予想した通り、多く立ち並ぶタンクのうちの幾つかは卓越したスロッシング波高となることが、今回の計算結果から明らかとなった。京葉臨海コンビナート中部地区における206基の浮き屋根式タンクを対象とした溢流量の計算では、内容液からタンク側板頂部までの余裕高さの重要性を示した。この結果、京葉臨海コンビナート中部地区のタンク群では、余裕高さを3.5mとすれば溢流をおおむね防げることが分かった。今後は、消防法令で決められた手法により各タンクの余裕高さを計算して正確な評価を行っていきたい。

内閣府が想定した南海トラフ巨大地震による京葉コンビナート地区の計算波形を使用して、スロッシング波高の計算を行った。その結果、同地区の石油タンクへの影響は、東北地方太平洋沖地震時の波高計算結果と比べて小さかった。最大スロッシング波高もおおよそ2m程度であったことから、同想定地震による、京葉コンビナートにおけるスロッシングによる石油の溢流は発生しないと考えられる。しかし、この地震に対する西日本、中日本の長周期地震動対策は極めて重要性が高い。

本研究では、京葉臨海コンビナート中部地区を対象に石油タンクのスロッシング評価を行ったが、日本国内には他にも多くの石油や原油の浮き屋根式タンクがある。今後、他の地域についてもこうした検証を行っていきたい。

謝 辞

本研究では、気象庁、防災科学技術研究所K-NETにより観測された地震波、内閣府により提供された想定南海トラフ巨大地震の波形を使用しました。また、空撮画像は千葉県が撮影したものを使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 座間信作：長周期地震動、地震2、第61巻特集号、2009年、S433-440.
- 2) 大阪府：咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、2011年。
<http://www.pref.osaka.lg.jp/otemaemachi/saseibi/bousaitai.html> (参考2016-08-27).
- 3) Mehmet Celebi, Izuru Okawa, Toshidate Kashima, Shin Koyama and Masanori Iiba: Response of a tall building far from the epicenter of the 11 March 2011 M9.0 Great East Japan earthquake and aftershocks, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23, 2014, pp.427-441.
- 4) 津野靖士、山中浩明、翠川三郎、山本俊六、三浦弘之、酒井慎一、平田直、笠原敬司、木村尚紀、明田川保：2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の本震記録と余震記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性、*日本地震工学会論文集*、第12巻、第5号(特集号)、2012年、pp.102-116.
- 5) 久保智弘、久田嘉章、相澤幸治、大宮憲司、小泉秀斗：東日本大震災における首都圏超高層建築における被害調査と震度アンケート調査、*日本地震工学会論文集*、第12巻、第5号(特集号)、2012年、pp.1-20.
- 6) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構：
http://www.jogmec.go.jp/library/stockpiling_oil_065.html (参考 2016-08-27)
- 7) 総務省消防庁：出光興産(株)北海道製油所屋外タンク貯蔵所火災の火災原因調査結果、2004年.

- 8) 伊藤英男：消防法令の改正の契機となった地震災害事例、2013年。
- 9) 西晴樹：東日本大震災における危険物施設の被害、予防時報、vol.249、2012年。
- 10) 岩崎洋志、リュウ・ウェン、山崎文雄：光学センサ画像における日影長さと SAR 強度画像における倒れ込み量に基づく建物高さ地震による倒壊の検出、日本地震工学会論文集、第12巻、第6号（特集号）、2012年。
- 11) Xiaojing Huang and Leong Keong Kwoh：3D Building Reconstruction and Visualization for Single High Resolution Satellite Image, IGARSS, 2007, pp. 5009-5012.
- 12) 内山庄一郎、井上公、鈴木比奈子：SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究、防災科学技術研究所研究報告、第81号、2014年。
- 13) 西晴樹、山田實、座間信作、御子柴正、箕輪親弘：石油タンクのスロッシングによる溢流量の算定、圧力技術、第46巻、第5号、2008年。
- 14) 気象庁強震観測データ（東北地方太平洋沖地震）、
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html?sess=6e1b37b3613bd087e7ce042e42f4670b>（参考 2016-08-27）
- 15) 防災科学技術研究所強震観測網（K-NET、KiK-net）：<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>（参考 2016-08-27）
- 16) 京葉臨海中部地区共同防災協議会 警防計画 追録資料、2008年。
- 17) 西晴樹、山田實、座間信作、関根和喜、箕輪親宏、御子柴正：小規模タンクを用いたスロッシング時の浮き屋根の揺動に関する実験的研究、圧力技術、第45巻、第3号、2007年。
- 18) 総務省消防庁：コスモ石油（株）千葉製油所の2つの事故におけるコンビナート等防災本部の活動、石油コンビナート等防災体制検討会（第2回）、2012年。
- 19) 消防庁危険物保安室・特殊災害室：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報告書、2011年。
- 20) 自治省告示119号、1983年。
- 21) 総務省告示30号、2005年。
- 22) 消防庁特殊災害室：石油コンビナートの防災アセスメント指針、2013年。
- 23) 財団法人消防科学総合センター：第2回「石油コンビナート等における災害時の影響評価等に係る調査研究会」報告事項、2012年。
- 24) 九都県市防災・危機管理対策委員会：「石油コンビナート等民間企業の減災対策について」九都県市共同研究報告書、2013年。
- 25) 座間 信作、西 晴樹、山田 實、廣川 幹浩、遠藤 真：緊急地震速報に基づくリアルタイムスロッシング予測、JHPI、Vol.48、No.6、2010年。
- 26) 内閣府：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告、2015年。
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_report.html（参考2016-08-27）

（受理：2016年3月3日）
（掲載決定：2016年8月24日）

Sloshing Assessment of Oil Tanks in Keiyo Petrochemical Industrial Complex under Long-Period Seismic Ground Motion

UEDA Hideomi ¹⁾, YAMAZAKI Fumio ²⁾ and LIU Wen ³⁾

1) Kajima Corporation, M.Eng.

2) Professor, Department of Urban Environment Systems, Chiba University, Chiba, Japan

3) Assistant Professor, Department of Urban Environment Systems, Chiba University, Chiba, Japan

ABSTRACT

Large tanks for storing petroleum are placed in various locations in Japan. The natural periods of liquid sloshing of these tanks are calculated from their diameters and contained liquid heights. The natural periods are approximately between 5 to 10 seconds and hence, petroleum tanks are affected by long-period seismic ground motion. Thus the sloshing phenomenon, oscillation of the contained liquid, may occur and sometimes fire will be associated. Considering this background, this study focuses on the sloshing phenomenon and the sloshing heights in the 2011 Tohoku-Oki earthquake were calculated to assess the fire risk in the Keiyo petrochemical industrial complex. The long-period ground motion due to the scenario Nankai-Trough earthquake was also employed for sloshing analysis at this site. From the calculation of sloshing heights and overflow amount of oil under various conditions, the method to prevent oil overflow was suggested for future earthquakes.

Keywords: Petroleum tank, sloshing, long-period ground motion, the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Nankai Trough earthquake