

沿岸地域の生産施設に対する地震・津波被害の判定方法

Determination Method of Earthquake and Tsunami Damage to Production Facilities in Coastal Area

菅付紘一¹・原田隆典²・野中哲也³

Koichi SUGATSUKE, Takanori HARADA and Tetsuya NONAKA

This paper proposes a determination method of earthquake and tsunami damage to the storage facility at the production facility in the coastal areas. Earthquake and tsunami damage determination was performed combining three dimensional tsunami analysis and structural analysis. First of all, the pressure applied to the structure is calculated by three dimensional tsunami analysis. Next, the structural analysis model which can express a damage situation was created, and seismic response analysis and tsunami response analysis were conducted. Finally, damage judgment was determined by stress and the amount of deformation of the plate. From this result, analysis of the proposed method showed the usefulness by damage simulation of the earthquake and tsunami that apply to the structure.

1. はじめに

石油や高圧ガスを貯蔵する施設が集積している地域は、石油コンビナート等災害防止法により石油コンビナート等特別防災区域と指定されており、これらに該当する区域のほとんどが沿岸地域である。この区域が災害によって被害を受けることは、周辺住民の生命を脅かし、また生産施設の機能が停止することによって社会へ多大なる悪影響を及ぼすことになる。

2011年に起きた東日本大震災では、地震によって球形タンクが倒壊して火災が発生した。これは筋かいの破断と支柱の座屈によってタンクが倒壊し、隣接する配管が破損してガスが漏洩したことでBLEVE現象が発生し火災に至った(消防庁, 2011)。また、別の地区では地震だけでなく津波によって円柱タンクが被災し、内容液(重油等)が流出して火災が起きるといった2次災害も発生した。過去には、1995年の阪神・淡路大震災では地震によって円柱タンク(H/D=1.3以上)の外壁が座屈し、内容液が漏洩する被害が確認され(消防庁, 2006)、2003年の十勝沖地震では地震による長周期地震動によってスロッシングが発生し、浮き屋根が損傷するといった被害が起きている。沿岸地域の貯蔵施設には地震と津波が連鎖的に発生することが考えられ、災害によって様々な被害のシナリオが発生する。これらを受けて生産施設内の構造物に地震と津波が作用した場合に起こる様々な被害に対する判定方法とシナリオを予測する方法が必要と考えている。坂本ら(2012)は球形タンクに対する津波被

害の解析手法を提案している。また、著者ら(2014)は、貯蔵タンクに対する地震と津波の被害判定方法を提案しており、貯蔵施設に対する解析手法の提案を行っている。

そこで、本研究ではこれらの方法を参考にして、ある架空の生産施設に設置した構造物に対する地震と津波の数値シミュレーションを行い、その適用事例を示しながら諸元の異なる構造物に対しての被害判定方法の提案とそこから予測される被害のシナリオについて述べる。

2. 解析手法

(1) 解析手順と被害形態

本提案は、想定した架空の生産施設に設置した構造物に地震と津波を作用させた時の構造物の被害状況を3次元流体解析ツール及び構造解析ツールを組合せて導き出し、ある指標を設定して被害判定まで行う方法(図-1)である。そのため、被害判定を行う上での判定値(終局

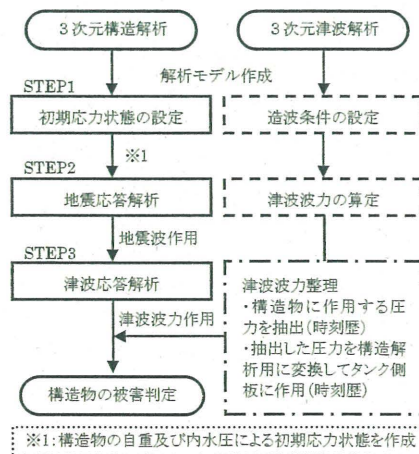


図-1 解析手順

1 正会員 修(工) (株)地震工学研究開発センター
2 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部社会環境システム工学科
3 正会員 博(工) (株)地震工学研究開発センター

表-1 被害形態

対象	外力	被害形態
円柱タンク	地震	①動水圧による側板損傷
		②ロッキング現象による浮上り
		→①or②によるダイヤモンド座屈, 象の足座屈
	津波	①浮上り, ②滑動, ③転倒
		④内外水圧差による側板座屈
		⑤傾斜による底板抜出し ⑥傾斜による側板座屈
球形タンク	地震	球殻, 支柱, 筋かいの損傷 (局部座屈や部材座屈)
	津波	球殻, 支柱, 筋かいの損傷 (局部座屈や部材座屈)

表-2 判定に用いる指標

対象	箇所	判定に用いる指標	損傷状態	
円柱タンク	側板 屋根, 底面	応力 照査	$\sigma/\sigma_y > 1$	側板などの損傷
	アンカー ボルト	ひずみ 照査	$\epsilon/\epsilon_y > 1$	アンカーボルト の損傷
	タンク 頂部, 下端	変位 確認	水平変位	滑動
			鉛直変位	浮上り
		回転 (水平+鉛直)	転倒	
球形タンク	球殻, 支柱	応力 照査	$\sigma/\sigma_y > 1$	球殻, 支柱の損傷
	筋かい	ひずみ 照査	引張: 5% 圧縮: ϵ_u 式 (1)	筋かいの損傷

限界値)などを新たに提案するものではなく、異なる解析ツールの組合せによって解を導き出し、被害判定を行うといった一連の解析手法の方法論と適用事例を示すものである。なお、本検討では流体と構造の相互作用性の強い完全な連成問題を解くものではないため、地震による液状化や津波による基礎の洗掘や崩壊現象については対象外とする。作用させる外力の順番としては①地震作用、②津波作用の順である。表-1には地震と津波作用時の被害形態を示しており、本研究では解析結果より総合的に判断して表-1のような被害形態を表現できるモデル化と解析手順を提案する。

損傷状態の判定(表-2)としては、地震および津波作用のそれぞれの外力に対して部材レベルの応力照査による判定やタンク全体の変位量によって浮き上がりや滑動および転倒といった判断を行うものである。また、構造解析が不安定となり計算が発散した場合はその時点の計算結果で判断する。円柱タンクの変位による判定は、応力による照査とは異なり明確な指標があるわけではない。しかし、少量の変位が伴った場合にはその隙間に流体が流れ込むなど、その後の変形を助長すると推測できることから少量の変位でも総合的に判断して判定する。球形タンクの筋かいについては、野中ら(2010)の提案する部材破壊を考慮する方法を用いた。これは部材が破

壊と判定された場合にその部材を抜いた新たな構造系で応答計算を行う方法である。この方法によって破壊した部材は荷重を伝達しないことから、周辺の部材も連鎖的にダメージを受けるといった崩壊現象を考慮するものである。筋かいの破壊判定に用いる値は、引張に対しては5%ひずみを圧縮に対しては式(1)の鋼パイプ断面の終局ひずみ推定式(土木学会, 2008)を使用した。

$$\frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} = \frac{0.14(1.1 - N/N_y)^{1.8}}{(R_t - 0.03)^{1.4}} + \frac{3.0}{(1 + N/N_y)^{0.7}} \leq 20.0 \quad (1)$$

ここで、 R_t は径厚比パラメータ、 N は応答軸力、 N_y は降伏軸力である。

(2) 解析ソフト

3次元津波解析には、オープンソースコードのOpenFOAM(一般財団法人オープンCAE学会, 2013)内にある不混和流体の非圧縮性・等温の2相流用ソルバのinterFOAMを使用した。離散化手法としては有限体積法を、自由表面解析モデルにはVOF法を採用している。本検討で用いるOpenFOAMの実用性については、OpenFOAMを用いて流体解析の基礎的な精度検証を行っている事例(松浦ら, 2013)や、流体解析において実績のあるソフトとの比較検討(坂本ら, 2013)なども盛んに行われていることから申し分ないと考えている。3次元構造解析には、対象タンクの側板や球形タンクの支柱、筋かいなどの座屈現象を表現するために、材料非線形性および幾何学非線形性による複合非線形解析が行えるSeanFEM((株)耐震解析研究所, 2007)を使用した。

3. 解析モデル

(1) 3次元津波解析モデル

図-2に3次元津波解析の空間モデルや配置した構造物の

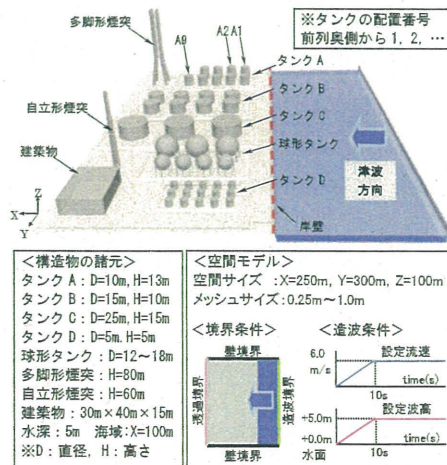


図-2 3次元津波解析のモデル化条件

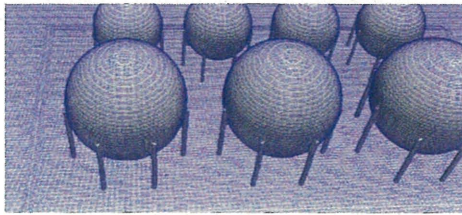


図-3 3次元津波解析のメッシュ図(球形タンク)

諸元および設定した境界条件を、図-3に球形タンク設置付近のメッシュ図を示す。本検討では、250m×300mの解析空間モデルを設定しており、その中に様々な形状の構造物を検討の対象として配置している。空間モデルのメッシュ数は約6000万程度である。本検討で設定した造波条件は解析事例を示す想定した造波として津波高さが水面から5.0mとし、流速は6.0m/sの時刻歴による造波条件を設定した。

(2) 地震・津波応答解析モデル

本検討の構造解析モデルは、円柱タンクの外壁には非線形シェル要素を、タンク底面には摩擦係数が時々刻々と変動しながら摩擦力と浮上りを考慮できるWinklerモデル(原田ら, 2007)を設定した。このモデルの特性は、水平方向においては自重と津波水平力による時々刻々と変化する押し込み力に比例した摩擦力が発生する。鉛直方向において押し込む力については硬いバネ剛性で抵抗し、浮き上がる力については抵抗しない設定となっている。なお、Winklerモデルの下端側は固定としている。球形タンクの球殻と支柱は非線形シェル要素、筋かいはファイバー要素でモデル化を行い、部材の分割を10分割程度施して部材座屈が表現できるようにしている。このようにモデル化をすることで、筋かいが部材座屈した場合には、荷重低下によって周辺部材への荷重分担が変化する。なお、破壊に達した部材については前述した通りである。非線形シェル要素及びファイバー要素には、応力-ひずみ関係の2次勾配がE/100のバイリニア型移動硬化則を設定した。地震応答解析での内容液のモデル化には、タンクの形状に応じて簡便な近似式のHousnerもしくは速度ポテンシャル理論に基づく地震時の動水圧分布モデル(社団法人日本水道協会, 1997)を用いて算出した付加質量をタンク外壁に設定することにより流力弾性振動(バルジング)の影響を考慮した。このモデル化によって正確な流体挙動(スロッシングによる液面揺動や屋根への衝突力など)は考慮できないが、地震時に主として作用する動水圧の影響を側板に与えることができる。スロッシングの影響による損傷が懸念される外径の大きなタンクについては、別途構造と流体の連成解析を行う必要がある。図-4に本検討対象の構造諸元(日本建築学会, 2010)を示す。

対象	寸法など	材料	
円柱タンク(A)	直径	D=10000mm	-
	高さ	H=13000mm	-
	屋根板厚	t=4.5mm	SS400
	側板板厚	t=4.5~9mm	SS400
	底面板厚	t=9mm	SS400
内容物	重油 $\rho=0.96$		
球形タンク	球殻	D=17900mm t=12~15mm	SPV490
	支柱	609.6φx14	SPV490
	筋かいは	267.4φx7	STK400
	支柱本数	12本	-
	内容物	液化ブタン $\rho=0.587$	

図-4 構造諸元

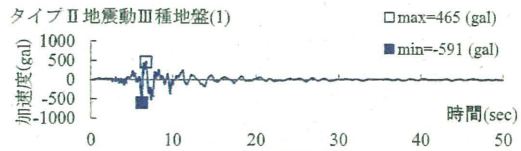


図-5 入力地震波形

(3) 荷重条件

荷重条件は次の3つの条件を設定する。まず、初期応力状態としてタンクの自重と内容液による静水圧を作用させた。次に、地震の外力としてⅢ種地盤のタイプⅡ波形(日本道路協会, 2012)(図-5)を水平方向に作用させた。最後に、津波の外力として3次元津波解析で抽出した時刻歴の津波波力と水位変動に伴う浮力を作用させた。浮力については、タンク前面と背面とで水位の変動に伴い発生する浮力が異なることから、タンクの円周方向で変動する水位を元にタンクに作用する浮力を概算して動的な上向きの荷重としてタンク底面に作用させた。なお、本検討では構造物が被害を受けてその被害状況を表現することが目的であることから、入力地震波形については補正係数などを適用せず、また津波については短時間で比較的大きな津波となるような造波条件を設定している。

4. 構造解析結果

著者ら(2014)は、小型の円柱タンクに対する浮上りなどの被害判定結果は示したが座屈現象については示しておらず、坂本ら(2013)では球形タンクに対して地震作用を含んだ適用事例を示していない。そのため、本検討では座屈現象が起きやすい円柱タンクA(H/D=1.3)と球形タンクについて主に示す。また、各タンクにおいて内容液は満液状態と50%容量の状態の2ケースについて検討を行った。

(1) 地震応答解析

図-6に円柱タンクの地震作用時の応力コンター図を示す。内容液が満液の場合には、内容液の質量に慣性力が働き、側板の下段側で変形が確認できる。この変形は約

3cm程度の面外変形の膨らみとなっており、象の足座屈のような現象である。また、側板の中段から上段側にかけても応力値の高い箇所が確認できる。これは側板の板厚が高さ方向に徐々に薄く変化していることが原因と考えられる。内容液が50%の場合は、質量が小さくなり作用位置が低くなることで応答が小さくなったと考えられる。よって、内容液の容量によって地震時の損傷状態が変わることが分かる。シェル要素とファイバー要素の可視化方法が異なるため、筋かいに着目したひずみコンターを図-7に、球殻と支柱に着目した応力コンターを図-8に示す。球形タンクは、まず初めに筋かいが損傷(部材座屈及び破断)する。その影響によって構造全体の変

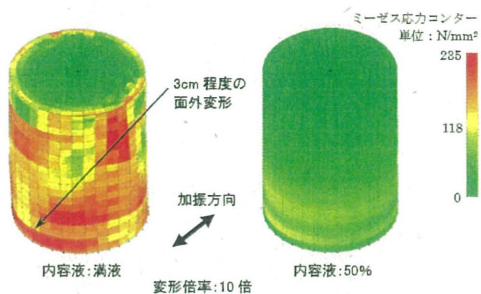


図-6 円柱タンク(A)の応力コンター図

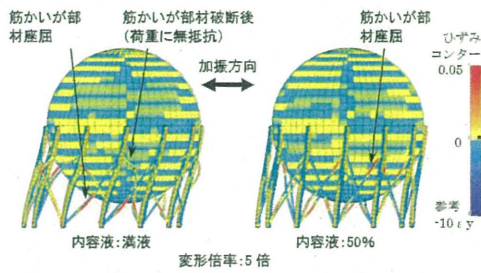


図-7 球形タンクひずみコンター図(筋かいに着目)

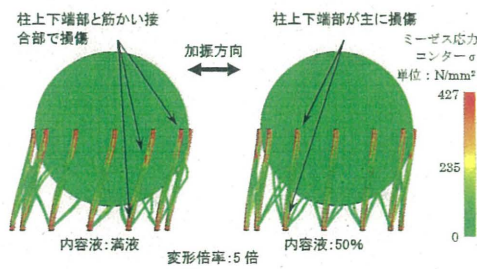


図-8 球形タンクの応力コンター図(球殻、支柱に着目)

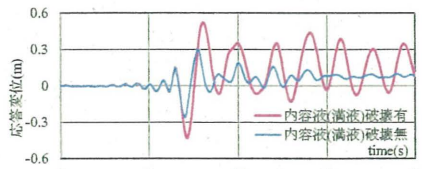


図-9 球形タンク(球殻頂部)の水平変位

形量が大きくなり、支柱が受け持つ荷重の負担が大きくなる。その結果、支柱の上端と下端で降伏応力を超える応力が発生する。筋かいについてはほぼすべてが破壊した結果となった。なお、円柱タンクと同様に内容液の容量が少なくなることによって損傷が小さくなる。図-9に球形タンク球殻頂部の水平変位を示す。本検討では部材破壊を考慮した解析を行っているが、その効果を確認するために部材破壊を考慮しない解析結果と比較した。その結果、部材破壊の考慮有無によって、水平変位の大きさや破断後の挙動に大きく影響することが分かった。

(2) 津波応答解析

図-10に施設全体に作用する津波の状態を、図-11にタンクA周辺に作用する津波の状態を示す。タンク前面に作用する津波の水位が高く、背面側は低くなっていることが分かる。図-12に最前列にあるタンク前面の高さ方向の圧力を示す。圧力が高さ方向に高くなるにつれて小さくなっていることが分かる。18秒付近がピークとなり、その後はほぼ一定となっている。図-13にタンク下

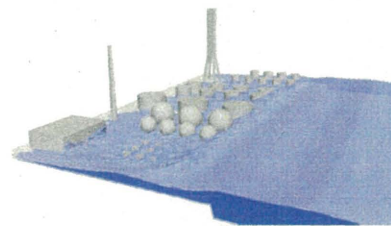


図-10 施設全体に作用する津波の状態(t=25s)

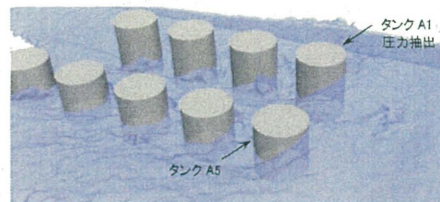


図-11 タンクA周辺に作用する津波の状態(t=25s)

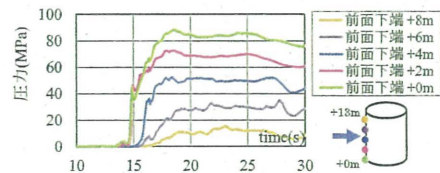


図-12 タンクA1前面の圧力

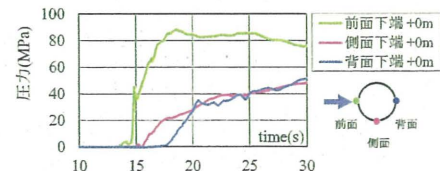


図-13 タンクA1下端の円周方向の圧力

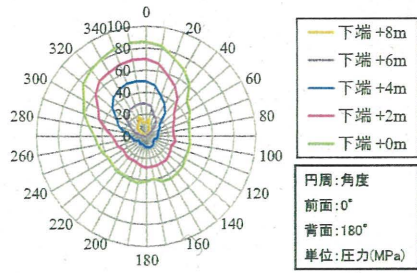


図-14 タンクA1の円周方向の圧力分布 (t=25s)

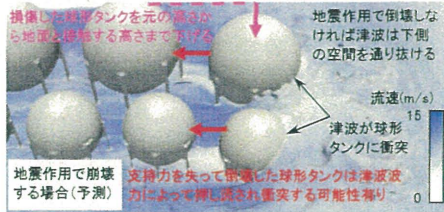


図-15 予測シナリオ

表-3 構造物の被害判定

対象	容量	地震作用	津波作用
円柱 タンクA	満液	×: 座屈	△
	50%	○	△
円柱 タンクB	満液	△	○
	50%	○	△
円柱 タンクD	満液	○	×: 浮上りなど
	50%	○	×: 浮上りなど
球形 タンク	満液	×: 座屈	×: 予測シナリオの場合
	50%	△	○

※○: 無損傷, △: やや損傷, ×: 損傷

端の円周方向の圧力を示す。前面に比べて側面と背面の圧力は小さいが、時間と共に緩やかに大きくなっている。図-14にタンク円周方向の圧力分布を示す。こちらも図-12, 13と同様のことが分かる。中心よりもやや左側(340°寄り)の圧力が大きくなっているのは、津波は0°方向より向かってくることからタンクA1の横のタンクA5に作用した津波の流れの影響が原因と考えられる。このように密集したタンク群の圧力分布は周辺の影響を受けやすいことが分かる。これらの圧力を構造解析モデルに作用させる。

地震作用の結果を受けて球形タンクが崩壊したと仮定した場合には、3次元津波応答解析において球殻が地上に接触した状況が予測できる。図-15に球形タンクが崩壊したと予測した場合の3次元津波解析結果を示す。図のように本来であれば球殻の下を通過する津波が衝突して堰き止めていることが分かる。なお、座屈によって支柱と筋かいからの支持力がないため、まともな抵抗力はないと考えられ、図中の赤矢印のように周辺の構造物への衝突が懸念される。このように地震作用の結果を受けて津波応答解析に影響のある構造物については、結果を踏

まえて別途検討を行うことも被害シナリオを把握するうえで重要と考えられる。

これらを踏まえて地震と津波を作用させた被害判定結果を表-3に示す。表内の結果は、海側の最前列に配置している構造物を対象として判定を行っている。タンクCについては、スロッシング現象に対する問題などもあり、今後の検討課題として本検討では判定を行っていない。

5. おわりに

本研究では、架空の生産施設に配置した構造物に対して地震と津波の被害判定を試みた。地震作用によって円柱タンク (H/D=1.3) の側板が満液時においては座屈する結果となった。また、球形タンクに部材破壊による地震応答解析を行った。その結果、部材破壊考慮の有無によって損傷状態が大きく変わることが分かった。また、球形タンクについて崩壊したと仮定した場合の3次元津波応答解析を実施した結果、津波の流れに影響することが分かった。以上より、本研究で提案する方法は地震と津波被害判定の方法論として有用性のある方法と考えられる。

参考文献

一般財団法人オープンCAE学会 (2013): OpenFOAMユーザガイド和訳Version 2.2.0 (オンライン), <http://www.openca.jp/>, 参照2013-06-10.

(株)耐震解析研究所 (2007): SeanFEM ver.1.22 理論マニュアルと検証.

坂本佳子・菅付絏一・野中哲也・吉野広一・宇佐美勉 (2012): 球形ガスホルダーに対する津波解析手法の提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第67巻, 1-602.

坂本佳子・原田隆典・野中哲也・吉野広一・鳥越卓志 (2013): 桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.450-458.

社団法人日本水道協会 (1997): 水道施設耐震工法指針・解説, pp.33-36.

消防庁 (2006): 阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書.

消防庁 (2011): 平成23年度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) pp.322-330

菅付絏一・原田隆典・野中哲也 (2014): 貯蔵タンクに対する地震・津波被害の判定方法, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.70 (掲載予定).

土木学会 (2008): 鋼・合成構造標準示方書, 耐震設計編, pp.46.

日本建築学会 (2010): 容器構造設計指針・同解説, pp.284-286.

日本道路協会 (2012): 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.113-117.

野中哲也・宇佐美勉・岩村真樹・廣住敦士・吉野広一 (2010): 連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.779-791.

原田隆典・野中哲也・馬越一也・岩村真樹・王 宏沢 (2007): ファイバー要素を用いた地盤・基礎の非線形動的相互作用モデルとその橋梁全体系の地震応答解析への適用, 応用力学論文集, Vol.10, pp.1047-1054.

松浦 翔・森 貴寛・坂谷太基・川崎浩司 (2013): OpenFOAMを用いたダムブレイク解析とその精度検証, 土木学会中部支部研究発表会, 2013.3, pp.147-148.