

貯蔵タンクに対する地震・津波被害の判定方法

菅付 紘一¹・原田 隆典²・野中 哲也³

¹正会員 株式会社地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎市大淀3丁目5番18号)
E-mail:sugatuke@eerc.co.jp

²正会員 宮崎大学教授 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192宮崎市学園木花台西1-1)
E-mail:harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

³正会員 株式会社地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎市大淀3丁目5番18号)
E-mail:nonaka@eerc.co.jp

本論文では、貯蔵タンクが地震と津波被害を受けた場合の被害判定方法を提案する。地震と津波被害の判定は3次元津波解析と構造解析を組合せて行う。まず、流体解析ソフトを用いて3次元津波解析を行いタンクに作用する圧力を算出する。次に、構造解析ソフトを用いて被害状況を表現できる構造解析モデルを作成して地震応答解析を行い、その損傷状況を移行して津波応答解析を行う。最後に側板の応力状態や変形量によって被害判定を行う。この提案する一連の解析方法によって、貯蔵タンクへの地震と津波による被害シミュレーションの適用事例を示すとともに被害判定の有用性を確認する。

Key Words : storage tank, openfoam, earthquake and tsunami damage, wave pressure

1. はじめに

石油コンビナートや化学薬品工場、港湾航空施設といった生産施設内には、重要な資源や有害な内溶液を貯蔵するタンクが多数配置されている。このような貯蔵タンクが地震や津波によって被災することは、災害の誘発だけでなく経済的損失や環境汚染など被災後においても長期に渡り多大なる悪影響を及ぼすこととなる。

沿岸地域の生産施設にある貯蔵タンクは、地震と津波が連鎖的に発生するために様々な被災状況が考えられ、地震と津波がそれぞれ単体としてではなく一連として作用した被害メカニズムを把握する必要がある。本来、地震と津波の数値シミュレーションを1つの解析ツールに組み込んで実施することが理想的だが現実的には難しい。消防庁から屋外貯蔵タンクの津波被害シミュレーションツールが提供されているが、このツールは津波に対する簡易的な診断を行う方法であり、地震に対する影響だけでなく損傷に対して講じた対策の効果を確認することはできない。そのため、貯蔵タンクには災害に対する被害分析や対策を検討し、その効果を確認できるまでの方法が今後更に必要である。

東北地方太平洋沖地震に伴った津波によって構造物が甚大な被害を受けたことから、著者らはこれまでに被害を受けた構造物を対象とした津波被災状況の再現¹⁾を試みており、その方法を用いて貯蔵タンクの津波に対する

被害判定方法²⁾を提案している。

ここで、本研究では参考文献¹⁾²⁾の手法を参考にして地震と津波が貯蔵タンクに及ぼす被害メカニズムを3次元流体解析ツール及び構造解析ツールを組合せて解明し、その適用事例から地震と津波に対する被害判定の方法について提案する。

2. 貯蔵タンクの被害形態と被害判定方法

(1) 地震と津波作用の被害形態

地震によるタンク本体の被害形態として、図-1(a)に示すような状態が挙げられる。①はやや長周期的な地震動に共振し、②、③は短周期的な地震動に共振する。①では、液面が動くことによってタンクの側壁上部と屋根に損傷を与え内溶液の溢流に繋がる。②、③は側板と内溶液が一体となって挙動することでロッキングが生じ、タンク底面の浮上りによる損傷やタンク下端の座屈に繋がる。本検討の地震応答解析では、流体と構造の連成挙動による厳密なスロッシング現象を解くわけではなく、内溶液を自由水重量と固定水重量とに分けた簡易的なモデル化としている。そのため、スロッシング現象のような流体の複雑な挙動ではなく、自由水と固定水の重量がそれぞれの固有周期で水平に挙動することによるタンク側板への衝突の影響を求めるものとする。津波によるタンク

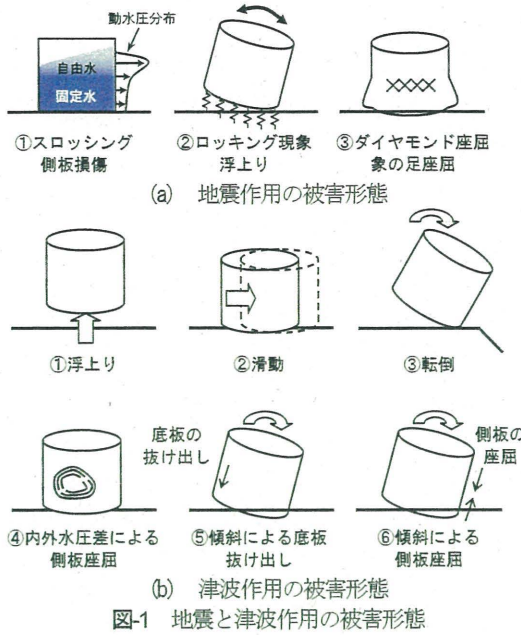


図-1 地震と津波作用の被害形態

本体の被害形態³⁾として、図-1(b)のように6つのパターンが挙げられる。消防庁から津波の簡易診断として津波被害シミュレーションツールが提供されている。それによると、津波浸水深と流速などの入力条件によって①と②についてのみ被害判定を行うことができるが、③～⑥については被害判定を行うことができない。そこで、本検討では図-1の全ての損傷形態を評価することを対象とする。なお、地震による液化化や津波による基礎の洗掘や崩壊現象もあるが本検討では対象外とする。

(2) 被害判定方法

本提案の被害判定方法の基本的な考え方は、地震応答解析と津波応答解析を別々に行い、前者の損傷状態に後者から得られた外力を作用させた結果から被害判定を行うものである。そのため、流体と構造のインタラクション性の強い完全な連成問題を解くものではない。図-2に本被害判定のフローを示す。まず、STEP1で死荷重解析によってタンクの初期応力状態を設定する。STEP2で地震応答解析を行って地震作用による損傷状態を計算する。この際タンク各部位で損傷(降伏)に至った箇所については、その損傷状態を次のステップに移行する。そして、STEP3で津波解析で得られた圧力を外力として3次元構造解析を行うといった3つの手順からなる。損傷状態の判定(表-1)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。変位による判定は、応力による照査とは異なり明確な判定値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

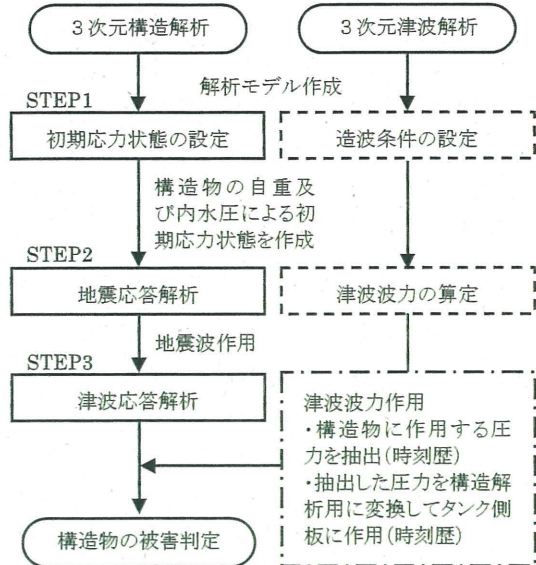


図-2 被害判定のフロー

表-1 被害判定方法と判定した損傷状態

箇所	判定方法	損傷状態	
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	$\varepsilon/\varepsilon_y > 1$ 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

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損傷したものと判定する。例えば、変位については数ミリの場合はやや損傷、数センチ以上は損傷と表現し、アンカーボルトについては残数の有無によってやや損傷と損傷を表現している。よって、本判定では限界状態として限界値を設定してどこまで許容できるか否かの判定を行うものではない。なお、本判定は高さ(H)および直径(D)が5.0mでH/Dが1.0の容量が500 m³以下の津波によって被災しやすい小型な貯蔵タンク1基に対して適用するものである。

3. 津波応答解析

(1) 津波解析ソフト

津波解析ではOpenFOAM⁴⁾内にあるソルバの中で非圧縮性の気液二相流の解析が行えるinterFoamを使用した。離散化手法としては有限体積法を、自由表面流体解析モデルにはVOF法を採用している。なお、乱流現象によるタンク周辺の圧力損失を考慮する必要があると考えて乱流モデル(LES)を採用する。坂本ら⁵⁾は、流体解析において実績のある解析ツールCADMAS-SURF/3D⁶⁾とOpenFOAMを用いて橋梁(I桁橋)を対象とした波圧分布の比較検討を行っており、空気塊のできない条件では両ソフトにおいて圧力などが精度よく一致する結果を得

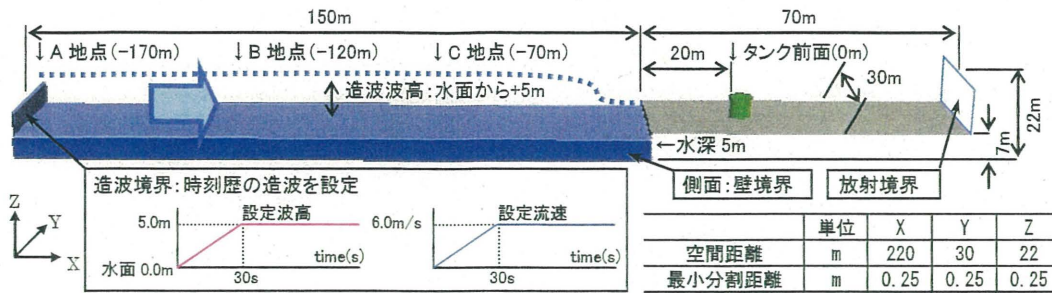


図3 モデル空間の諸元と境界条件

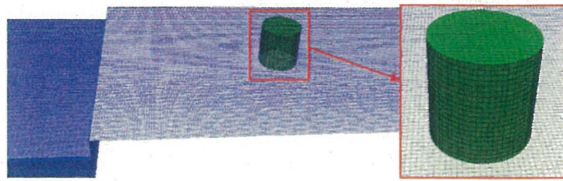


図4 対象タンクのマッシュ分割図

ている。また、Wijtmikoら⁷⁾は本対象のような円柱構造物を対象とした水理実験とCADMAS-SURF/3Dによる解析とで精度良く一致した報告をしている。また、松浦ら⁸⁾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。これらを踏まえて本検討で用いるOpenFOAMの実用性については申し分ないと考えている。

(2) 津波解析モデル

図-3にモデル空間の諸元と境界条件を、図-4に対象タンクのマッシュ図を示す。本検討で定義した造波条件は本提案の被害判定の一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を設定した。発生させる津波は、最大波高に到達するまでに30秒かけて徐々に造波させる段波状の方法で設定した。

(3) 津波解析結果

図-5に各位置の抽出した水位を示す。グラフ凡例の距離はタンク前面からの距離を示している。図よりA地点では徐々に水位が高くなり、30秒付近で想定した造波になっていることが分かる。B、C地点と徐々に陸側に近づくにつれて水位が高くなっているのは、護岸に衝突した津波が反射によって戻されたため、35秒以降は反射の影響と考えられる。図-6にタンク前面の下端位置から+0, +3, +5m位置に作用した圧力を示す。図より30秒付近から圧力が発生しており、下端位置では40秒付近で圧力値が最大となっている。高さ方向に位置が高くなるにつれて静水圧分布のように圧力値が小さくなっている。図-7にタンク下端位置の前面と側面および背面の圧力を示す。タンク下端の各位置で圧力が徐々に大きくなって一定となるが、タンクの側面と背面とで36秒付近から圧力の大きさが入れ替わる。これは流体が回折運動によってタンクの円周を渦のような挙動で回り込み、背面にぶつ

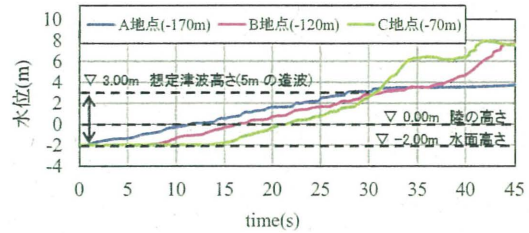


図5 水位変動

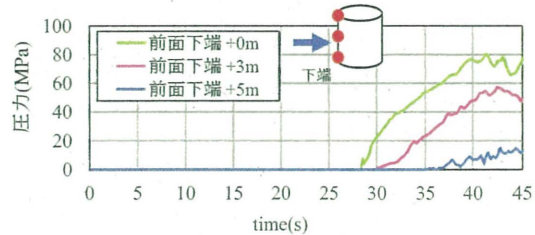


図6 タンク前面の圧力

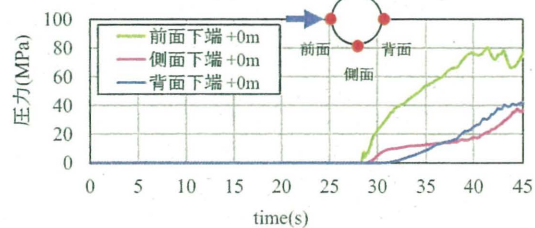


図7 タンク下端円周方向の圧力

かることで圧力が小さくならなかったものと考えられる。図-8にはタンク円周方向の圧力分布を示す。この分布からタンク前面の圧力が大きく、側面よりも背面の方が大きくなっていることが分かる。図-9に津波が護岸を乗り越えてからタンクに衝突し圧力が最大となった時のスナップショットを示す。津波がタンクに衝突するまでの進行過程は、護岸を乗り越える際に水面が盛り上がり重力の影響で水表面が急降下して陸上を遡上している。このように海面から陸上へと地形の変化がある場合には、その地形の変化によって津波遡上時の津波高さや流速が急激に変化するなどの影響を受ける。津波高さや流速が変化するということは、タンクに衝突する際に発生する圧力分布にも影響することから被害判定の結果を左右することになる。このように時々刻々と複雑に変化する圧力分布を伴う対象物に対して被害判定を行う場合は、津波被害シミュレーションツールでは難しい。

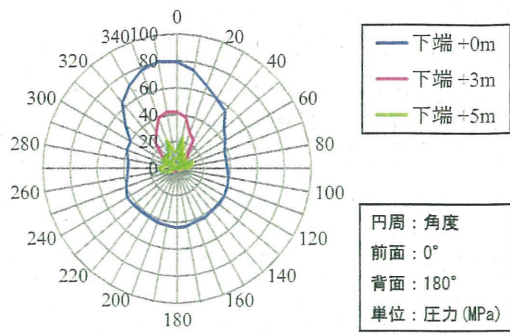


図-8 タンク円周方向の圧力分布



図-9 津波作用のスナップショット (t=40s)

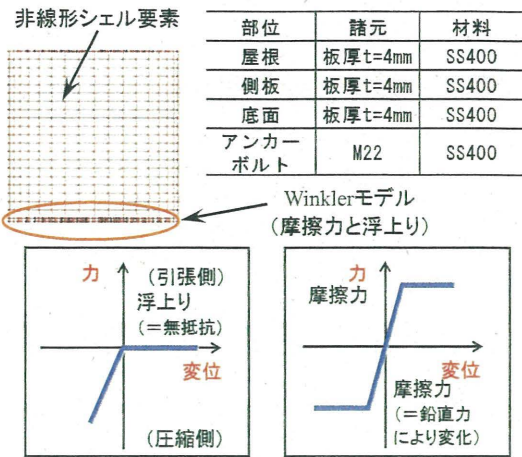


図-10 構造解析モデルの概要

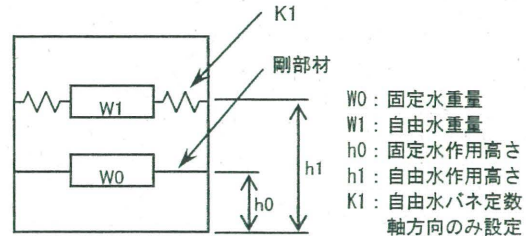


図-11 Housnerの振動力モデル

表-2 Housnerの振動力モデル諸元

直径	D	m	5.00
高さ(水深)	H	m	5.00
固定水作用高さ	h0	m	2.48
自由水作用高さ	h1	m	3.78
固定水重量	W0	kN	745.98
自由水重量	W1	kN	146.71
スロッシング周期	T	s	2.34
自由水ばね定数	K1	kN/m	107.80
密度(重油)	ρ	kN/m ³	9.41

4. 構造解析

(1) 構造解析モデル

消防庁⁹⁾の津波被害分析を行う構造解析によると、タンク側板をモデル化するシェル要素の応力-ひずみ関係は線形関係、タンク底面には摩擦係数が一定として摩擦力と浮上りを考慮するといった接触要素でモデル化を行っている。なお、載荷する津波荷重は静的漸増載荷で与えている。そこで、本検討ではシェル要素の応力-ひずみ関係には非線形関係を、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¹⁰⁾を設定した。このWinkler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(摩擦係数が変動)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(圧縮側)については硬いバネ剛性で抵抗し、浮き上がる力(引張側)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。また、載荷する津波荷重は動的な荷重を載荷する。図-10に構造解析モデルの概要を示す。

地震応答解析では、内容液のモデル化にHousnerの振動力モデル¹¹⁾(図-11)を用い、簡易的なモデル化によって挙動を表現した。表-2に設定したモデル化の諸元を示す。このモデル化によって正確なスロッシング挙動(屋根への衝突力など)は考慮できないが、自由水域の重量と固定水域の重量がスロッシングによって振動した

荷重を側板に与えることができる。自由水重量と側板との連結には、スロッシング周期から算出した剛性(線形ばね)を円周方向に分散させて連結した。固定水重量は側板と一体となって挙動することから剛体部材で連結している。内容液の重量については空液と満液の2つの状態を検討対象とした。また、タンク側板の鋼重は側板のシェルの節点に分散させて設定した。

小型のタンク下端にはずれ止めおよび浮上り対策としてしばしばアンカーボルトが設置してある。そこで、タンク下端の円周方向にはアンカーボルトのモデル化を行った。アンカーボルトはM22(SS400)相当とし、ファイバーモデルによってモデル化した。設定した応力-ひずみ関係は2次勾配がE/100のバイリニア型移動硬化則を設定した。本検討の構造解析ソフトには、これらのモデル化と求める被害形態を踏まえた構造解析が可能で材料非線形性と幾何学非線形性による複合非線形性を考慮できるSeanFEM(ver.1.22)を使用した。

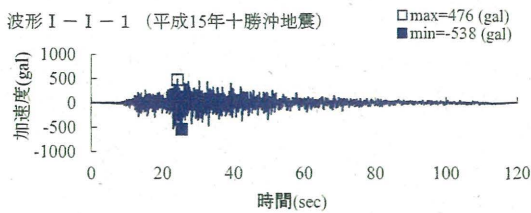


図-12 入力地震波形

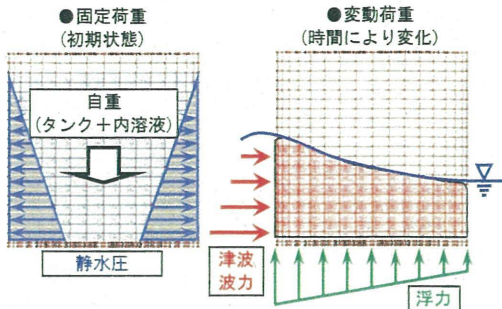


図-13 タンクに作用させる荷重条件

(2) 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溶液による静水圧を作用させた。次に、地震の外力として、道路橋示方書¹²⁾のレベル2の波形(図-12)を水平方向に作用させた。この波形は、対象タンクに対して側板の応力比およびアンカーボルトの損傷が最も大きくなった結果の一例として用いている。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(図-13)。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。そこで、タンクの円周方向で変動する水位が時系列でわかることから、その水位変動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。このような荷重条件と解析手順によって、タンクに作用する荷重をイベントの順に載荷した。

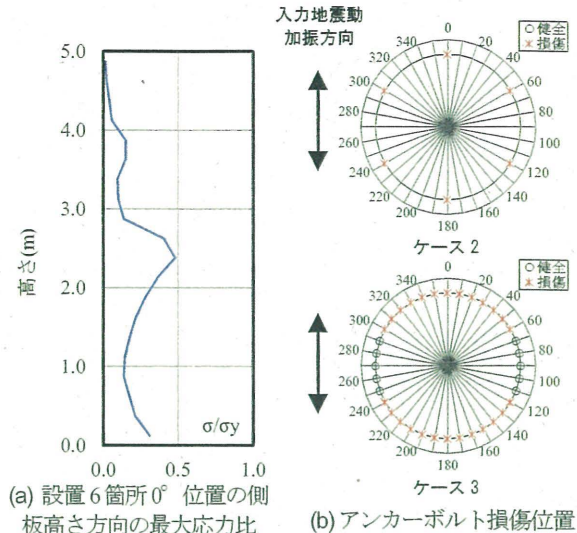
(3) 地震応答解析結果

表-3に検討を行ったケースと結果一覧を示す。ここで、検討ケースとしてアンカーボルトを6本を取り付けた状態を基本とし、内容液が空液と満液とでそれぞれケース1とケース2とした。地震応答結果としては、タンクの外壁については無損傷となった(図-14(a))。しかしながら、内容液が満液の場合はロッキングによって転倒モーメントが作用してアンカーボルトが全て損傷する結果となった(図-14(b))。著者ら²⁾は、津波作用の構造解析においてアンカーボルトの設置が浮上りに対して抑える効果があることを確認している。そこで、アンカーボルトを6本から36本(モデルに設定できる最大本数)へ追加したケース(ケース3)についても実施したところ、

表-3 地震作用の検討ケースと結果一覧

検討ケース	内容液	被害状況						
		外壁損傷			変位			アンカーボルト 残数/設置(本)
		屋根	側板	底面	転倒	滑動	浮上	
1	空液	○	○	○	○	○	○ (6/6)	
2	満液	○	○	○	○	○	× (0/6)	
3	満液	○	○	○	○	○	△ (10/36)	

○:健全, △:やや損傷, ×:損傷



(a) 設置6箇所0°位置の側板高さ方向の最大応力比

(b) アンカーボルト損傷位置

図-14 タンク側板の応力比とアンカーボルトの損傷位置

損傷しないアンカーボルトが約1/3程度残る結果となった。また、図-14(a)の高さ0 m付近より、アンカーボルトが靱性的に耐えることによるタンク側板下端への悪影響は若干あるものの塑性化に至るまでではなかった。

(4) 津波応答解析結果

地震応答解析の各ケースに対して連続して津波応答解析を行った。表-4に津波解析結果一覧を、図-15に各ケースのタンク前面下端の鉛直変位を示す。表内の着色は地震応答結果から変わった結果である。まず、ケース1は内溶液が無く、アンカーボルトが損傷して浮上りに対する抵抗力が無くなったことで側板の損傷を伴うことなく浮き上がったと考えられる。次に、ケース2は内溶液の自重によって浮力に対して抵抗することができるが、津波波力によって次第にタンクが倒れだすことが分かる。その際に底板が塑性化していることから何らかの損傷を受けるものと考えられる。図-15の鉛直変位より、ケース1よりもケース2の方が先に浮上りが発生していることが分かる。この差は内溶液の自重による抵抗力とアンカーボルトの抵抗力の働き方の差となる。最後に、ケース3は内溶液の自重とアンカーボルトの抵抗力によって津波波力が最大値となる40秒付近においても浮き上がることは無かった。図-16にケース2の構造解析結果のスナップショットを、色は側板のミーゼス応力コンターを示している。これらの結果より、内溶液やアンカーボルトの有無によってタンクの流出過程が変わることが分かった。

表-4 津波作用の検討ケースと結果一覧

解析ケース	内容液	被害状況						アンカーボルト 残数/設置 (本)
		外壁損傷			変位			
		屋根	側板	底面	転倒	滑動	浮上	
ケース1	空液	○	○	×	×	△	×	× (0/6)
ケース2	満液	○	○	×	×	△	×	× (0/6)
ケース3	満液	○	○	○	○	○	○	△ (10/36)

○:健全, △:やや損傷, ×:損傷

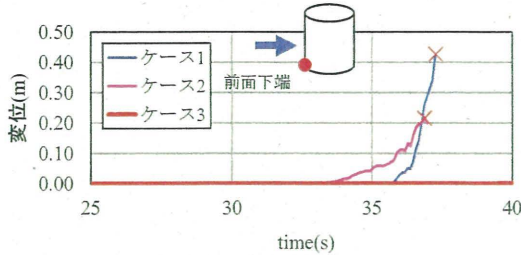


図-15 タンク前面下端の鉛直変位

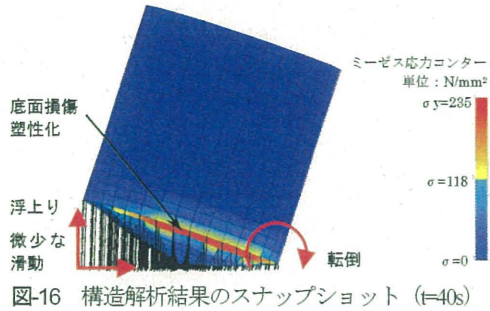


図-16 構造解析結果のスナップショット (t=40s)

6. まとめ

本研究では、貯蔵タンクに対する地震と津波の被害判定方法と試算例を示した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 地震作用の場合、ロッキングによってアンカーボルトが損傷しやすいことが分かった。ただし、本数を増やすことで降伏しない結果も得られた。
- 2) 3次元津波解析より算出した動的な圧力を地震作用後の状態に作用させて貯蔵タンクの損傷状態を判定できた。
- 3) その結果、ケース1と2より津波作用時の損傷形態である①浮上り、②滑動、③転倒、⑤タンク底板抜け出しなどが表現できた。ただし、タンクの形状と外力条件の関係から、本検討では

座屈現象を表現した事例は示していない。

今後の検討課題としては、タンクの形状や外力条件を変えたケースについても同手法を用いて検討することで、座屈等の被害状況についても示すことを考えている。

参考文献

- 1) 坂本佳子, 原田隆典, 村上啓介, 福田利紀, 野中哲也: 津波により桁流失した床版橋の再現解析と水路実験, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.387-398, 2012.3.
- 2) 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也, 中村真貴, 馬越一也: 貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol69, No.2, pp.1_826-I_830, 2013.
- 3) 総務省消防庁: 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報告書, 参考資料3, 2011.
- 4) 一般財団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM ユーザガイド和訳 Version 2.1.1 (オンライン), <http://www.opencae.jp/>, 参照 2013-06-02.
- 5) 坂本佳子, 原田隆典, 野中哲也, 吉野廣一, 鳥越卓志: I 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, 2013.
- 6) (財)沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, pp.216-220, 2010.
- 7) Wijatmiko, I・Murakami, K: Numerical Simulation of Tsunami Bore Pressure on Cylindrical Structure, 海洋開発論文集, 第26, pp.273-278, 2010.
- 8) 松浦翔, 森貴寛, 坂谷太基, 川崎浩司: 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, pp.147-148, 2013.3.
- 9) 総務省消防庁: 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書, 2009.
- 10) 原田隆典, 野中哲也, 馬越一也, 岩村真樹, 王宏沢: 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, 2007.8.
- 11) 社団法人日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 1997.
- 12) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.113-117, 2012.

DETERMINATION METHOD OF EARTHQUAKE AND TSUNAMI DAMAGE TO STORAGE TANK

Koichi SUGATSUKE, Takanori HARADA and Tetsuya NONAKA

In this paper, earthquake and tsunami damage determination method of the storage tank is proposed. Earthquake and tsunami damage determination was performed combining three-dimensional tsunami analysis and structural analysis. First of all, the pressure applied to the tank is calculated by three-dimensional analysis Tsunami. 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 on the storage tank.