

津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案

藤井 直樹*・今村 文彦**

Proposal of the Practical Evaluation Method for Tsunami Disaster of Oil Storage Tanks and impact by the Drifting Bodies

Naoki FUJII* and Fumihiko IMAMURA**

Abstract

When large earthquakes such as Tokai and Tonankai in Japan happen, the coastal area in particular industrial zone should suffer huge damage including building and facility on the coast which factor could be basically classified into two; hydrodynamic force of tsunami itself, and drifting bodies due to tsunami. Ships, cars and destroyed objects could be drifting bodies. As seen in the 2004 Indian Ocean Tsunami, drifting/floating bodies and tanks carried by the tsunami attacked to coastal area and destroyed the offshore and land structures. In addition, safety/risk evaluation of storage tank facilities in the industrial area is more important problem. Therefore the purpose of this study is to propose the practical evaluation system for tsunami damage on the drifting bodies and tank facilities.

キーワード：津波，漂流物，屋外タンク，津波波力，被害評価

Key words：tsunami, drifting body, oil storage tank, tsunami wave force, damage evaluation

* 東電設計株式会社
Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

** 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター
Disaster Control Research Center, Graduate School of
Engineering, Tohoku University

本論文に対する討論は平成22年8月末日まで受け付ける。

1. はじめに

津波による災害には、津波の波力による家屋や構造物の損傷・流出被害、人的被害など様々な被害がある。切迫する東南海・南海あるいは想定東海地震が発生した場合、それに伴う津波によって沿岸域では、甚大な被害を受けることが予想されている。その中で、津波が臨海都市部の港湾域に襲った場合、船舶や木材等の漂流物が津波とともに海域・陸域を漂流し、津波波力だけでなく、それに漂流物による衝突力が加わることによって作用津波力が増大して施設や建物を破壊する被害の発生が懸念されている。このような漂流物による被害を予測することは、津波被害の予防・軽減対策を講じる上で極めて重要な課題である。

2004年12月のインド洋大津波では、屋外タンク数基が津波により流されているのが発見された。幸い惨事には至らなかったものの、臨海都市部には石油関連貯蔵施設が多数立地しており、ひとたび地震が発生すると油の流出や火災による二次災害の発生するおそれがある。1964年新潟地震では、地震により石油タンクが破壊されて流出した油が発火し、津波浸水域に火災が広がった。また、同年アラスカ地震では、地震と津波によって屋外タンクが損傷し、油の流出後、タンク施設から火災が発生して屋外タンク群が全滅した。このような災害事例から、津波により屋外タンク施設が破壊され、内容物が大量に流出して火災が津波とともに市街地に広がった場合、甚大な二次災害に至るシナリオが考えられる。しかし、想定される津波に対する屋外タンク施設の被害を予測する手法がないため、そのような災害拡大シナリオを描くことが現状では困難である。

屋外タンクに関連した既往の津波研究としては、油の流出拡散に関する実験的および数値計算モデルの検討がなされているが、屋外タンク本体を対象とした検討はこれまで実施されていない。津波漂流物に関する研究としては、流木、船舶、コンテナ等の挙動に関して検討されているが、船舶等が漂流し、津波とともに陸上に乗り上げた場合に対する検討例はほとんどない。

屋外タンクの被害や津波漂流物による被害につ

いて評価するためには、タンクに作用する津波波力の算定と津波漂流物の挙動を把握することが重要である。そのため、著者らは屋外タンクへ作用する津波波力および津波漂流物に関する水理模型実験を実施し、タンクに作用する津波波力の算定方法および津波漂流物の移動モデルについて検討してきた。

そこで既検討結果を踏まえ、本論文では、臨海都市部における陸上構造物として屋外タンクを対象とし、津波による屋外タンクの被災および津波に伴う漂流物による被災シナリオについて検討する。そして、シミュレーションモデルを活用した津波漂流物による実用的な被害評価の考え方、屋外タンクの簡易被害想定手順について述べる。

2. 屋外タンクと津波漂流物に関する既往の被害実態と研究

2.1 屋外タンク施設と津波漂流物による災害

津波による屋外タンクの被害は、水路部 (1948)、Committee on the Alaska Earthquake (1972)、首藤 (1987)、後藤 (2005) で報告されている。表1に津波によるタンク被害の概要を示す。2004年インド洋大津波だけでなく、過去には1944年東南海地震津波等においてもタンクの移動例がある。タンクはアンカーで固定されず基礎に直接設置されることが多いため、移動しやすい構造物と言える。タンク本体以外では、1979年宮城県沖地震のとき、破損したタンクからの流出油により、タンク基礎および防油堤基礎の洗掘例がある (土木学会東北支部, 1980)。これらの例は流出油の高速な流れにより地盤が洗掘した事例であり、津波においても起こりうる被害形態である。

2004年インド洋地震津波では、大量の木片とともに車両が流されている様子がビデオで見られたが、1707年宝永地震のとき3915隻の船舶被害が記録される (宇佐美, 2003) など、古くから津波来襲の際には、船舶、木材などが漂流物となって建物・構造物に甚大な被害を与えてきた。近年ではコンテナやタンクなどが漂流することもあり、港湾施設やその背後地の破壊の危険性が増している。また、1993年北海道南西沖地震では津波襲来

表1 津波によるタンク被害の概要

	津波	タンク被害の概要
比較的小さな石油タンクの移動破壊	1944年 東南海地震津波	三重県二木島の重油タンクは高さ7 mの津波で300 m以上押し流された。
	1946年 南海地震津波	引き波で重油タンクが4 m移動した。
	1960年 チリ津波	波高(痕跡高)3.8 mで石油タンクが水に浮いて押されて傾いた。
	1983年 日本海中部地震津波	直径7 m, 高さ8 m, 容積130klの軽油タンクが円形のコンクリート基礎から離れ, 約10m押し流されて, 軽油48.6klが溢れ出た。
石油タンクの破壊, 油の流出と火災	1968年 十勝沖地震津波	重油タンクの底部に亀裂が生じ, 重油が流出した。
	1964年 アラスカ地震津波	地震と津波の為に石油タンクが破壊され, 油が流出した。数時間後, 小型船舶地の東にある燃料油貯蔵タンク群から出火して, 石油タンク群が全滅した。
	1964年 新潟地震津波	地震で亀裂の入ったタンクからガソリンが地下水と津波によりに広がった。地震後約5時間経って出火があり, 広がった油によって延焼した。
	2004年 インド洋大津波	石油タンク3基が約300m移動した。また原形をとどめない程に変形したタンク, 防液堤を突き破って移動したタンクがあった。

直後に火災が発生したが、津波漂流物が消火活動を阻み、手のつけられない状態となった。津波漂流物は、構造物を破壊するだけでなく、災害発生後の復旧活動等の妨げとなる場合がある。

2.2 屋外タンクおよび漂流物に関する既往の検討および課題

屋外タンクに関連した既往の津波研究としては、後藤(1985)、岩渕ら(2005, 2006)による油の流出に関する数値計算モデルの検討、細井ら(1980)による遡上津波のタンク群周辺流況および油流出に関する実験的検討がある。これまでは、主に油の拡散に関する実験あるいは数値計算による検討が実施されてきたが、屋外タンク本体の津波時の挙動に関する検討例はほとんどない。そのため、タンク本体に関する検討は、まず実験によりタンクに作用する波力特性を検討し、その結果を踏まえた被害モード、被害予測手法の確立について検討すべきと考える。

津波漂流物に関する研究としては、実験的研究例と解析的研究に分けられ、衝突力については実

験的な検討が、漂流については解析的に検討されている例が多い。研究例としては、流木を対象とした衝突力に関する検討(佐藤ら, 1981;入江ら, 1983;松富, 1999;池野ら, 2003)、木材の拡散実験および漂流シミュレーションによる挙動の検討(後藤ら, 1982;後藤, 1983)、船舶等の漂流物の港湾開口部における拡散および挙動に関する実験(高野ら, 2005;長屋ら, 2005)、エブロン上におけるコンテナの漂流特性と衝突力に関する実験(水谷ら, 2005, 2006)、船舶の漂流シミュレーションの検討(小林ら, 2004)がある。しかしながら、船舶等の漂流物が漂流し、津波とともに陸上に乗り上げた場合に対する検討例はほとんどない。最近では、3次元気液多相乱流数値モデル(川崎ら, 2007)や粒子法(後藤ら, 2006)による高精度な数値モデルが検討されつつある。しかし、広い領域、数時間という比較的大きい時空間領域を対象に、漂流挙動を解析的に検討した例はほとんどない。以上の漂流物に関する既往検討を踏まえ、今後は次の検討が必要と考える。これまでは主に断面2次元水路による実験が実施されて

きたため、平面2次元水槽による実験を実施し、漂流モデルの検証データを取得する必要がある。漂流計算においては漂流物同士あるいは漂流物と構造物間の衝突を考慮することが重要であり、さらに漂流物が海域から陸域へ乗り上げる現象、漂流物が戻り流れにより陸域から海域へ流される現象、漂流物が海底面や陸上面に接する現象を考慮することが重要である。

3. 屋外タンクに作用する津波波力の評価

3.1 タンク複数基に作用する津波波力

藤井ら(2006)では、屋外タンクに作用する水平波力および鉛直波力の算定方法について提案された。しかし、提案された波力算定式は、タンク1基に対するものであり、タンク複数基に対して適用できない可能性がある。そこで、屋外タンク複数基群の水力模型実験(図1)を基に、屋外タンクに作用する津波波力について検討し、さらに数値計算による波力の再現を行った。

図2にタンク単体とタンク群体による水平波力の最大値の比較を示す。タンク群体は、タンク単体と比較して全般的に最大水平波力が小さい傾向にあることがわかる。図3にタンク単体とタンク群前列における水平波力の時刻歴を示す。タンク単体と群体は21秒程度まで一致しているが、それ以降の群体の水平波力は単体のように増加せずほぼ一定となっている。これは写真1で見られるように、後列タンクからの反射波により前列タンク背面に作用する波力が増えるため、タンク単体に比べて水平合力が増加しなかったと考えられる。そのため、タンク群前列の最大水平波力はタンク単体のそれよりも小さくなった。なお、藤井ら(2006)では、群体前列の波圧分布は単体と同様であったと記したが、今回の検討結果から背面の波圧に違いがあると訂正したい。

次に、タンク群に作用する水平波力を前後列で比較すると格子配置の場合は前列が大きく、千鳥配置の場合は後列が大きくなることがわかった。格子配列の後列に作用する水平波力は前列により低減されるためであり、千鳥配置の場合は前列タンク間を通過した波が後列タンクに直接作用する

ためである。一方、図4に示す鉛直波力の最大値は、格子配置、千鳥配置とも前列の鉛直波力が大きく、タンク単体に対して2倍になるケースがある。図5に示すタンク単体とタンク群前列における鉛直波力の時刻歴からも群体の鉛直波力の大きいことがわかる。これは、図に示すタンク群前列の背面水位がタンク後列による影響で津波水位が

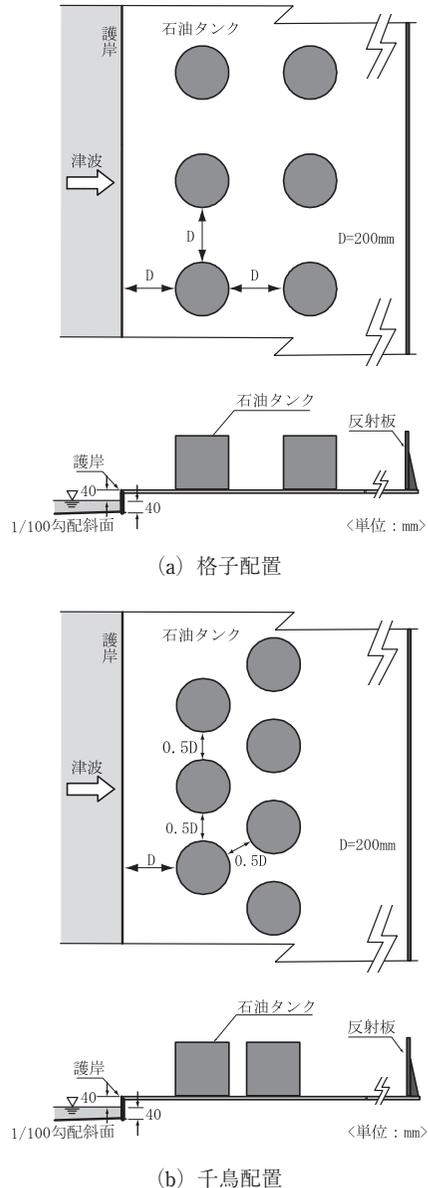
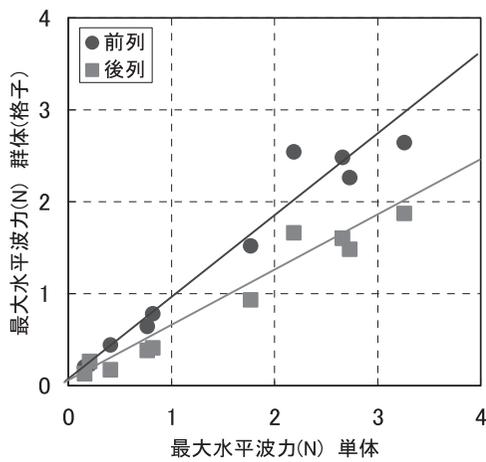
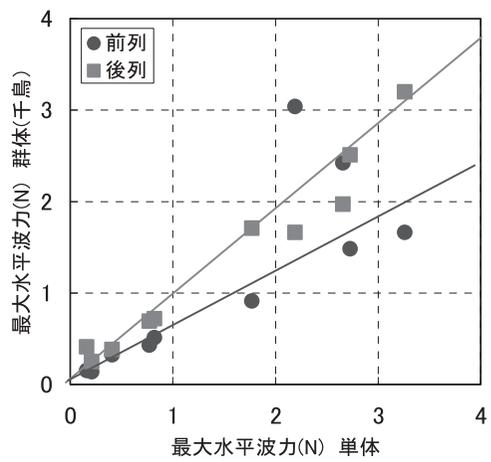


図1 タンク群の配置



(a) 格子配置



(b) 千鳥配置

図2 最大水平波力の比較

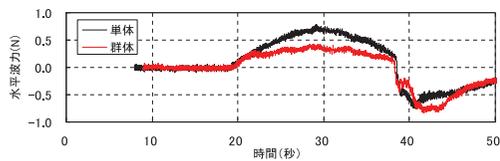


図3 水平波力の時刻歴

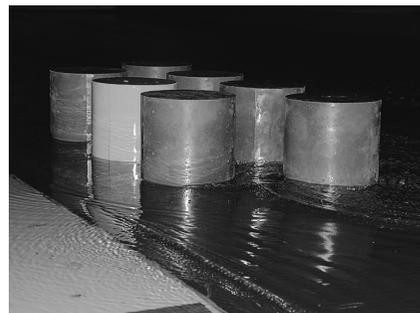
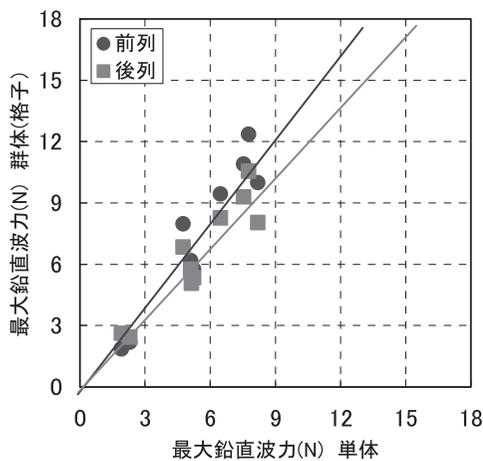
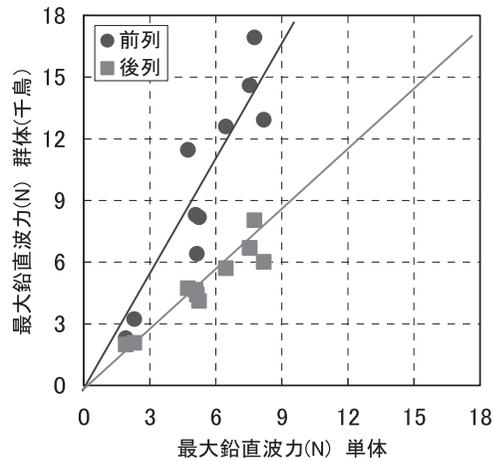


写真1 タンク後列からの反射波の様子



(a) 格子配置



(b) 千鳥配置

図4 最大鉛直波力の比較

上昇したためと考えられる。タンク背面水位が円周方向に一樣に分布し静水圧分布と仮定すると、タンク単体の場合は最大水位1.4 cm に対して鉛直波力4.3N、群体の場合は最大水位3 cm に対して鉛直波力9.2Nと計算される。時刻歴の単体、群体の最大波力は4.8N、8.0Nであることから、単体と群体の鉛直波力の差は、背面水位の上昇による浮力の増加が主な要因と考えられる。なお、時刻歴約38秒に見られるピークは、タンク背面に設置された壁による戻り流れであり、タンク周辺に崖地形や建物施設がある場合は波力が大きくなる可能性があることに留意が必要である。

タンク円周方向の水位波形から水平波力を算定し、実験による水平波力の時刻歴波形と比較したのが図6である。図中上段の計算波形は、タンク

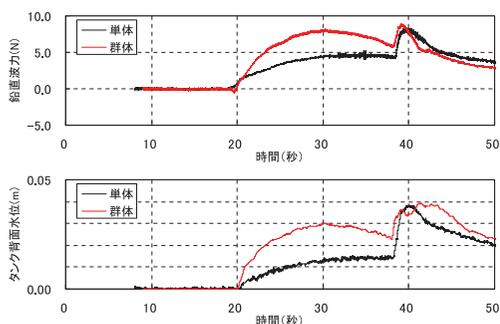


図5 鉛直波力とタンク背面水位の時刻歴

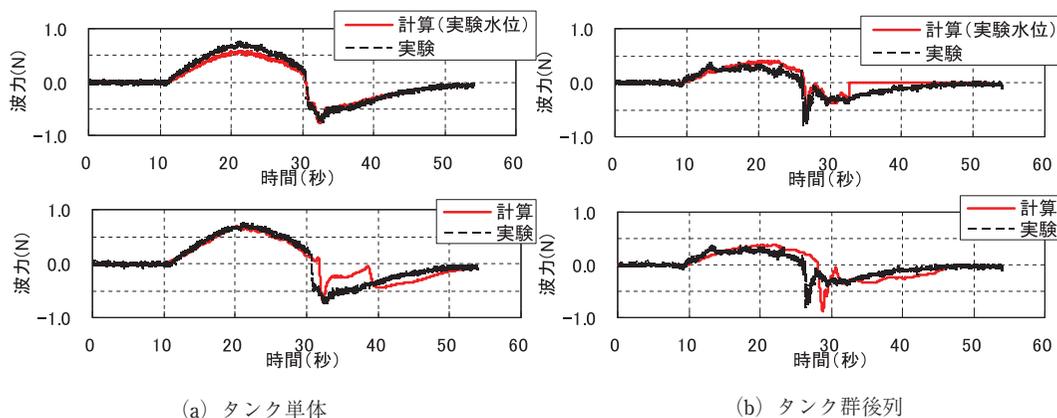


図6 水平波力波形の比較（計算：実線、実験：点線）
 （計算結果：上段が実験による水位計測結果も用いた場合、下段が津波数値計算による水位計算結果を用いた場合）

単体と群体とも実験による水位計測結果から求めた。下段の計算波形は、沖側で計測された水位を入力波とした津波数値計算結果から静水圧分布を仮定して求めたものである。波力の計算結果は、実験結果を概ね再現できている。津波数値計算による波力では、タンク背後に設置していた壁による反射波に差が見られる。これは、反射波に対する水位計算結果と実験結果に差異があるためである。

以上より、群体時の複雑な場における津波波力の時系列は、津波数値計算によるタンク周囲の水位分布から静水圧分布を仮定して波力を評価できることが確認できた。

3.2 防液堤による津波波力の低減効果

消防法では、油が漏れた場合にその流出を防止するため、タンク容量の110%以上の容量を持つ防液堤をタンク群毎に設けることが規定されている。通常、防液堤は0.5～2 mの高さがあるため、津波浸水に対する防護効果を期待できる可能性がある。そこで、タンクに作用する津波波力に対する防液堤の低減効果について検討した。防液堤設置高さは、2 cm（現地換算で2 m）である。図7に防液堤設置の有無による水平波力・鉛直波力の最大値の比較を示す。タンクに作用する水平波力は、設置された防液堤により低減されることがわかる。一方、鉛直波力は防液堤内に津波が貯

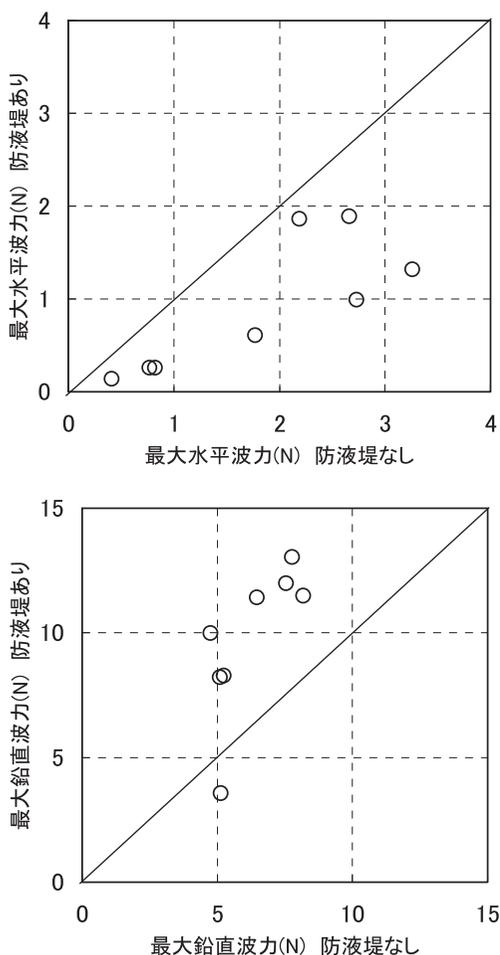


図7 防液堤の有無による波力の比較

留される影響で、防液堤がない場合よりも波力が増大する。

防液堤は水平波力に対してはほぼ半減できる効果がある。しかし、鉛直波力は逆に大きくなり、タンクが浮き上がるおそれがある。防液堤を設置した場合は防液堤がない場合の鉛直波力に対して2倍を見込む必要がある。

4. 津波に伴う漂流物挙動の計算

4.1 漂流物の移動計算モデルの概要

漂流物は津波に伴い漂流・移動するだけでなく、漂流物間あるいは漂流物と港湾構造物や海岸保全施設間との衝突が想定される。また、船舶等の漂流物が港内から陸上部へ乗り上げる場合もある。漂流物が陸上へ乗り上げた場合は、漂流物底部と陸上部が接触して、漂流が停止することもある。さらに、船舶のように大きな漂流物においては船首と船尾で津波流速が異なるため、船首尾への作用力の違いにより船舶が回転する。その結果、漂流物は回転の程度により異なった移動軌跡になると考えられる。したがって、漂流物の移動計算を行うためには、これらの現象を適切に取り入れて予測することが重要である。

既往の木材漂流シミュレーションモデル(後藤, 1983; 中川ら, 2000)では、津波計算に浅水理論式、木材の運動方程式中にモリソン式による流体力算定式が用いられている。しかし、流木間の構造物との衝突が考慮されていない、陸域への乗り

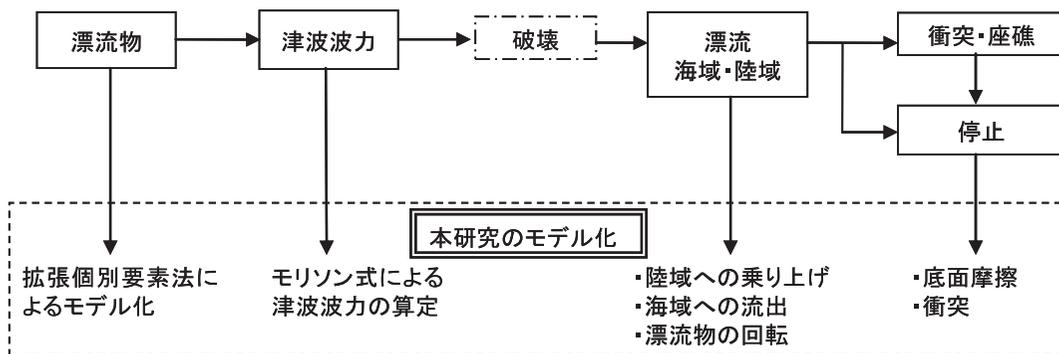


図8 漂流物の移動計算モデルに必要な諸現象と本研究での対応関係

上げや漂流物前後の流速差に起因する回転運動が計算できない等の課題がある。

海水の漂流および衝突問題においては、個別要素法 (DEM) モデルを適用した山口 (2001) による研究例がある。また、目黒 (1988) は不連続体しか取り扱うことができなかつた個別要素法を、連続体にも適用できるように拡張した、拡張個別要素法 (EDEM) を提案した。EDEM は、要素同士を結合させることによって任意形状の連続体を表現でき、衝突も容易に扱えるため、津波漂流物挙動の計算への適用が期待できる。

以上を踏まえて著者らは、漂流物のモデルとして EDEM によるモデル化方法を検討してきた。津波漂流物の移動計算モデルに必要な諸現象と本研究の対応関係を図 8 に整理した。津波漂流物の移動計算は、藤井ら (2005) による EDEM を基にする。津波による漂流物への作用力は、浅水理論方程式によって計算される津波水位および流速からモリソン式により求める。本検討における津波漂流物の移動計算モデルでは、漂流物の挙動として、陸域への乗り上げ、海域への流出、船舶の回転、船舶底部と陸上部の接触・停止、漂流物間や漂流物と構造物との衝突現象が考慮可能である。

4.2 津波漂流物計算結果と考察

藤井ら (2005) では、漂流物として想定した船舶が護岸に乗り上げた場合について計算結果と実験結果を比較した。ここでは、両者の結果の差異を把握するため、移動量に着目し比較した。図 9 にその比較結果を示す。計算による漂流速度は若干遅い傾向があるが、船舶の動き出すタイミングや鉛直方向移動の傾向は概ね再現できていると考えられる。実験では水平位置 0.5m に構造物を設置しているため、漂流物は 46 秒程度でそれに衝突して停止した。一方、計算では構造物を設置しなかつたため、0.5m で停止せず 1.0m において船舶底面が陸上部に接触して回転後、停止した。そのため、0.5m 地点までの結果で比較すると、計算による到達時刻は、約 55 秒と遅い。この原因としては、船舶への津波波力の計算値が小さいことが考えられる。すなわち、津波波力の算定に用いたモリソン式中の係数が小さいことが考えられ、係数の同定について課題が残されている。

実験では船舶が護岸を乗り上げたとき船舶が回転したが、計算においても再現できていることを確認できた。この理由としては、津波が護岸を越流するとき流速が速くなり、船首と船尾で作用す

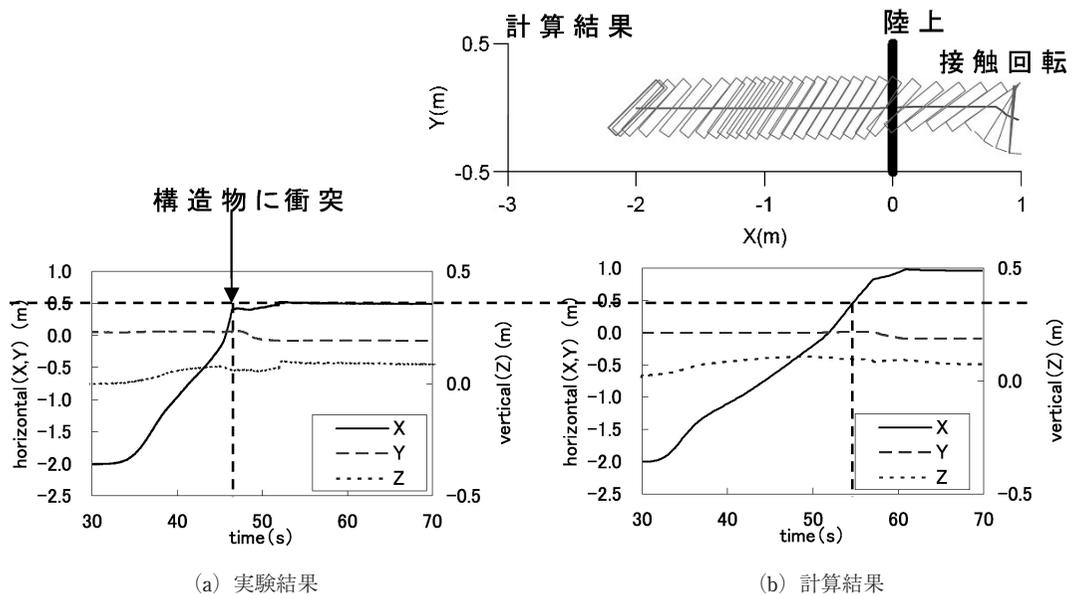


図 9 漂流計算と実験による移動量の比較

る流体力が異なるためであると考えられる。

漂流挙動実験では、実験毎にその挙動が異なる場合があった。そこで、漂流挙動の変動を考慮した計算を実施し、実験との比較を行なった。漂流物の変動性は、EDEMによる漂流物の確定論的な位置と後藤ら(1982)と同様に拡散による変動量との和として評価した。 x 方向と y 方向の拡散係数は同じとし、砕波前の無次元拡散係数は実験結果から0.001、砕波後の無次元拡散係数は0.8とした。乱数発生により拡散を考慮した漂流計算結果(10回試行)を図10に示す。計算結果は60~68秒間で x 方向に比べて y 方向のばらつきが大きい様子や、その後さらにばらつく様子を再現できている。しかし、計算による x 方向の移動量は引き波時で1m程度小さい。これは先の計算において到達時刻が遅いことと同様の原因であり、漂流物への作用力について改善が必要であることがわかった。

5. 津波被害の実用的評価

屋外タンクの被害や津波漂流物による被害を評価するためには、津波外力による屋外タンクの被災モード、津波漂流物による構造物等の被災シナリオを把握することが重要である。そこで、津波

による屋外タンクの被災に着目し、津波に伴う漂流物による被災シナリオも含めて検討する。次に、実務への適用を目指した屋外タンクの被害想定について、タンクへの外力の評価や漂流シミュレーションモデルも取り込んだ手順を提案する。

5.1 津波による被災シナリオ

(1) 屋外タンクの被災シナリオ

屋外タンクの特徴やタンクに作用する津波波力特性および過去の被害事例を基に、津波による屋外タンクの被災モード(a)~(i)を想定した。屋外タンクが被災すると、貯槽としての機能が果たせなくなるばかりでなく、内容液が油の場合、火災災害に結びつく可能性がある。そして、想定される各被災モードは、以下のように主に配管の破損による漏えい、あるいはタンクの破損による側板・底板からの漏えいへと進展する可能性がある。

(a) 屋外タンクの浮き上がり

タンクは空の場合0.2~0.5mの浸水で浮き上がる。

→滑り・転倒→本体破損・配管破損→漏えい

(b) 屋外タンクの滑動

滑動限界を超える水平波力と鉛直波力が作用する。

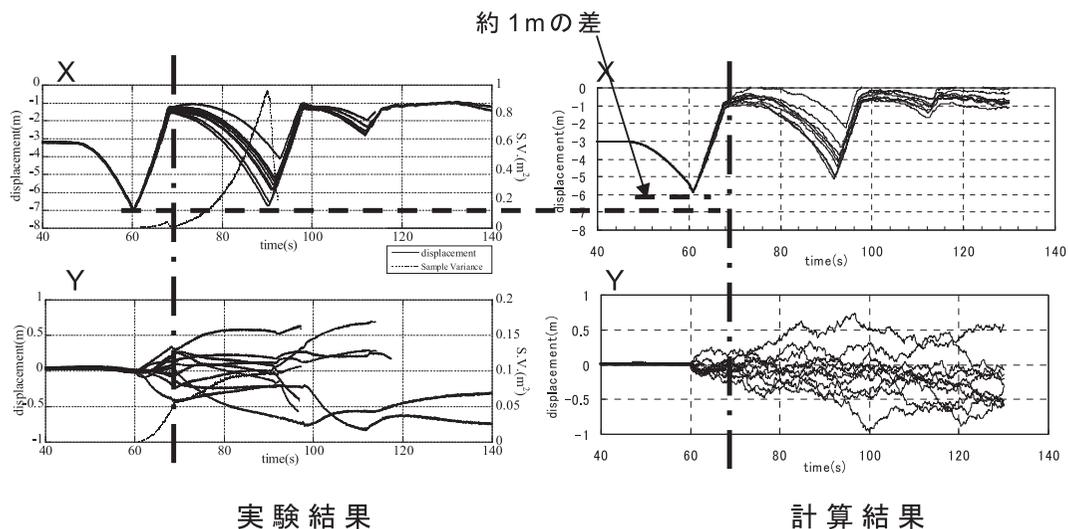


図10 漂流挙動計算結果と実験結果の比較

- 配管破損→漏えい
- (c) 屋外タンクの転倒
転倒限界を超える水平波力と鉛直波力が作用する。
→本体破損・配管破損→漏えい
- (d) 屋外タンク側板の座屈
水平波力により部材の応力が降伏値を越える。
→破損→漏えい
- (e) 屋外タンクの傾斜
側板下部への大きな水平力や揚圧力により屋外タンクが傾斜する場合、浮き上がりに起因して底板と側板の溶接部で引張り力による破壊が生じる。また、反対側では軸圧縮力により側板の座屈が生じる。
→溶接部の破壊・側板の座屈→破損→漏えい
- (f) 配管の破損
速い津波流速により配管が破損あるいは接続部が破断する。また、屋外タンクの浮き上がり、滑動、転倒が生じやすくなるため、屋外タンクの移動による配管の破損が生じる。
→漏えい
- (g) 構造物周辺の洗掘
速い津波流速により屋外タンクの基礎部が洗掘される。
→滑り・転倒→本体破損・配管破損→漏えい
- (h) 漂流物の衝突
津波と一緒に木材や船舶等の漂流物が屋外タンクに衝突する。
→本体破損→漏えい
- (i) 防液堤の破壊
防液堤が滑りや転倒することにより、屋外タンクから流出した内容液に起因した二次災害に対する防止機能が損なわれる。また、津波によるタンクへの作用波力が増大する。
→防災機能喪失→流出→津波波力増加→破損→漏えい

そこで、津波時の側板・底板からの漏えいに起因する被害拡大のシナリオを図11のように作成した。津波時の初期事象として設定した側板・底板からの漏えいは、地震時と比べ発生原因に違いはあるものの被災が同様であり、さらに事象の種類

や発生後の被害拡大シナリオも同様であると考えられる。したがって、地震時を想定したイベントツリーに津波時の想定（破線で囲んだ部分）を加筆した。津波時として加筆した被害拡大シナリオは、①津波が遡上し浸水することにより油とともに防液堤外へ流出、②津波とともに着火した油と火災の拡大である。

(2) 津波に伴う漂流物による被災シナリオ

臨海都市部には、船舶、コンテナ、木材等の津波漂流物となると考えられるものが多数存在している。臨海部の背後域には市街地が控えている場合もあり、津波漂流物の人家への衝突、あるいは屋外タンクなどへの衝突による二次的な被害の発生が懸念される。津波に伴う漂流物による被災シナリオを図12に示す。臨海都市部としては、港湾、マリーナ、漁港を、津波漂流物としては船舶、コンテナ、流木、車両を想定した。船舶は大型船舶、小型船舶、タンカー船に分けた。プレジャーボートや漁船は小型船舶に分類される。係留船舶は、津波により索やロープが切断され、海域を漂流することとなる。あるいは、航行中に船舶が漂流する場合もある。漂流船舶は、引き波時に座礁して被災する場合がある。また、海域の漂流による港湾構造物への衝突や陸域乗り上げ後の陸上施設への衝突によって、構造物や施設を破壊することも考えられる。

陸域に蔵置されているコンテナは、遡上した津波とともに漂流し、倉庫などへの衝突による損害が想定される。また、津波の戻り流れによってコンテナが海域に落下し、漂流する場合もある。コンテナは雨水に対して耐水性があるが、海中に落下した場合は数十分から数日で沈没する(熊谷ら、2008)。航路や泊地に漂流物が沈没して船舶の航行を阻害する場合は、船舶の航行の安全性が確保されるまで港湾機能が停止する可能性がある。そのため、津波発生後の復旧活動に支障をきたすおそれがある。車両の漂流挙動についてもコンテナと同じであると考えられるが、海域への沈没速度は速いと考えられる。また、屋外タンクも漂流物として十分想定されるため、ここに取り上げた。

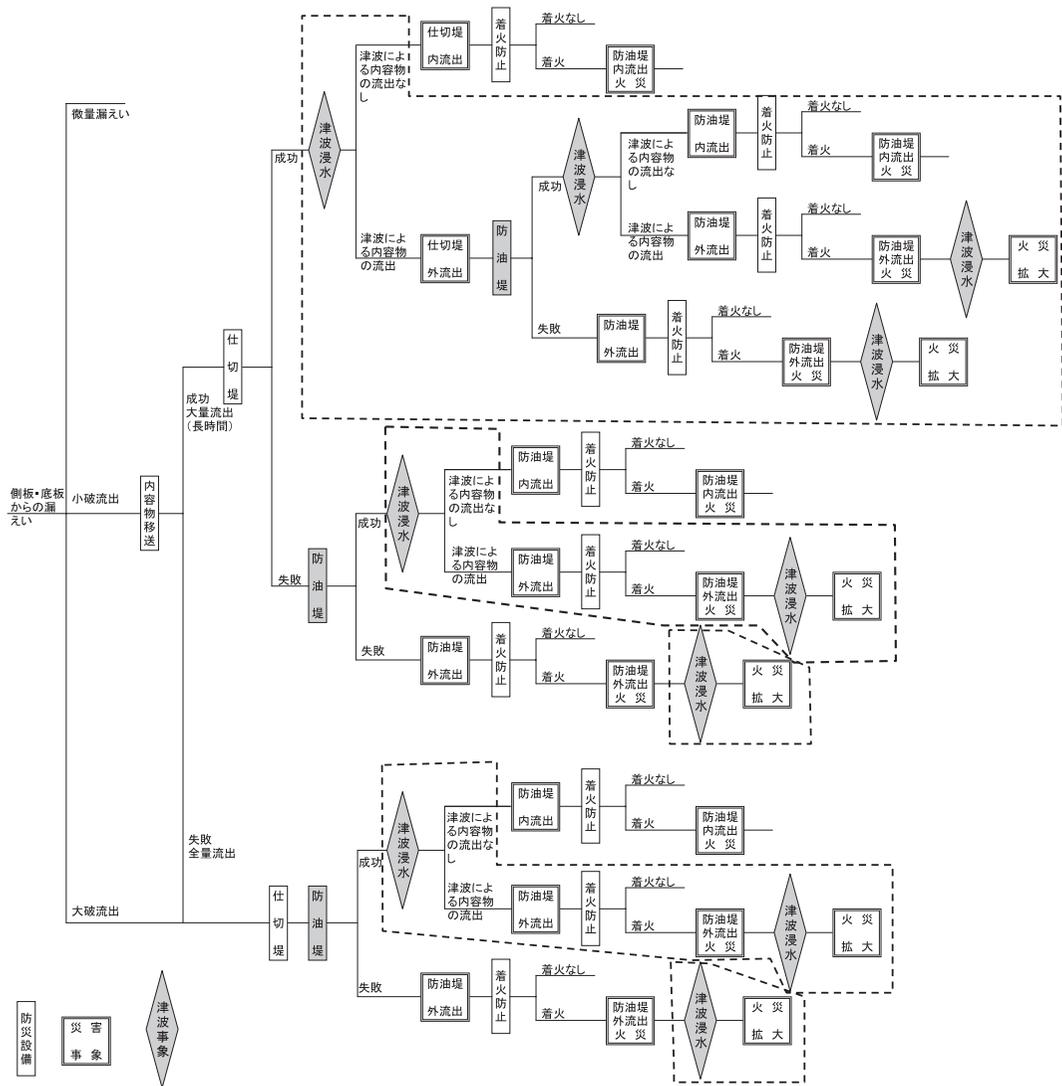


図11 津波による被災拡大ツリー（側板・底板からの内容物が漏えいした場合，消防庁特殊災害室（2001）に加筆）

流木については水面貯木されている場合もあり，コンテナや車両のように沈没することがなく，海面上に滞留している。そのため，航路や泊地に漂流物が滞留し船舶の航行を阻害する場合は，港湾機能を損なうことが想定される。

また，その他の被害としては漂流物が人家や屋外タンクなどに衝突し，二次的被害を引き起こすおそれが想定される。

5.2 津波の被害評価

(1) 屋外タンクの被害評価

前章で示したとおり津波波力の時系列波形を津波数値計算により概ね再現できることから，津波による屋外タンクの被害予測手法としては，数値計算が有効である。ただし，数値計算によって評価を行う場合も，計算領域や屋外タンクの形状・基数・配置，さらに防液堤の有無によっては格子の作成が煩雑となる。また，計算自体に時間を要

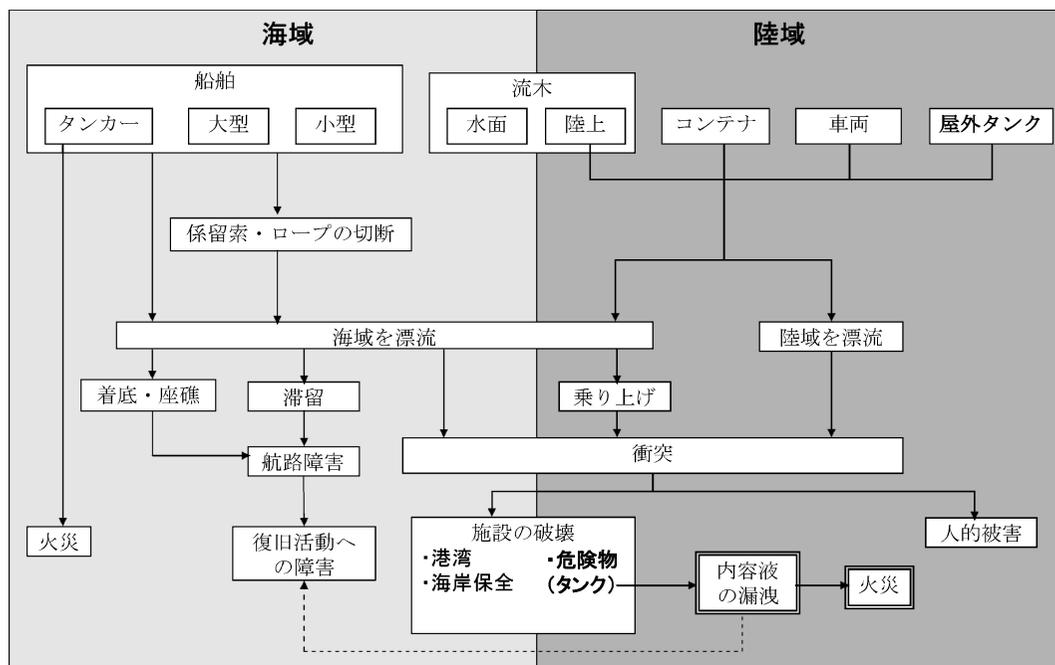


図12 津波に伴う漂流物の被災シナリオ

するため、すべての地域、施設に対し同じ手法を適用するのは実用的ではない場合も考えられる。そこで、津波浸水深と屋外タンクの被災モードとの関係から屋外タンク施設の被害を簡便的に評価できる藤井ら（2006）によって作成された被害判定図を用いることとした。図13は内液量、浸水深、 H/D （タンク高さ/タンク内径）を変化させた場合の屋外タンクの簡易被害判定図であり、本研究では被災モードとして滑動、浮き上がり、転倒を対象としているため、3つのモードに関連した図を藤井ら（2006）より引用したものである。

この被害判定図および津波数値計算結果を用いた屋外タンクの被害想定手順を図14に示す。簡便な方法としては、津波ハザードマップ等の津波水位を利用して被害判定図から屋外タンクの被害を予測することが考えられる。ただし、屋外タンクの被害発生の可能性が高いと判断された場合、あるいは被害判定図が単純に適用できない複雑な地形条件にある屋外タンクについては、地形や構造物を考慮した津波数値計算を実施し、波力を算定する必要があり、状況に応じて使い分ける。

なお、上記以外の被災モードに対する簡便的な被害評価については、今後の課題である。

（2）漂流物による被害評価の考え方

ここでは、実務への適用を踏まえ、津波浸水シミュレーションと漂流シミュレーションを活用した津波漂流物による被害評価の考え方を述べる。図15に津波漂流物による被害評価手順を示す。被害評価を行うためには津波浸水シミュレーションと漂流シミュレーションに分け、以下の検討が必要と考える。

1) 津波浸水シミュレーションの実施

津波浸水シミュレーションでは、計算結果から浸水範囲を把握し、その範囲から津波漂流物の衝突を防御すべき構造物、施設、民家等を抽出する。そして、屋外タンクや港湾構造物については津波波力算定式により安全性を評価する。ただし、津波浸水シミュレーションにおいて防波堤等の構造物が考慮されており、その構造物が津波波力により損壊する場合は、構造物がない状態にて再度、津波浸水シミュレーションの実施が必要で

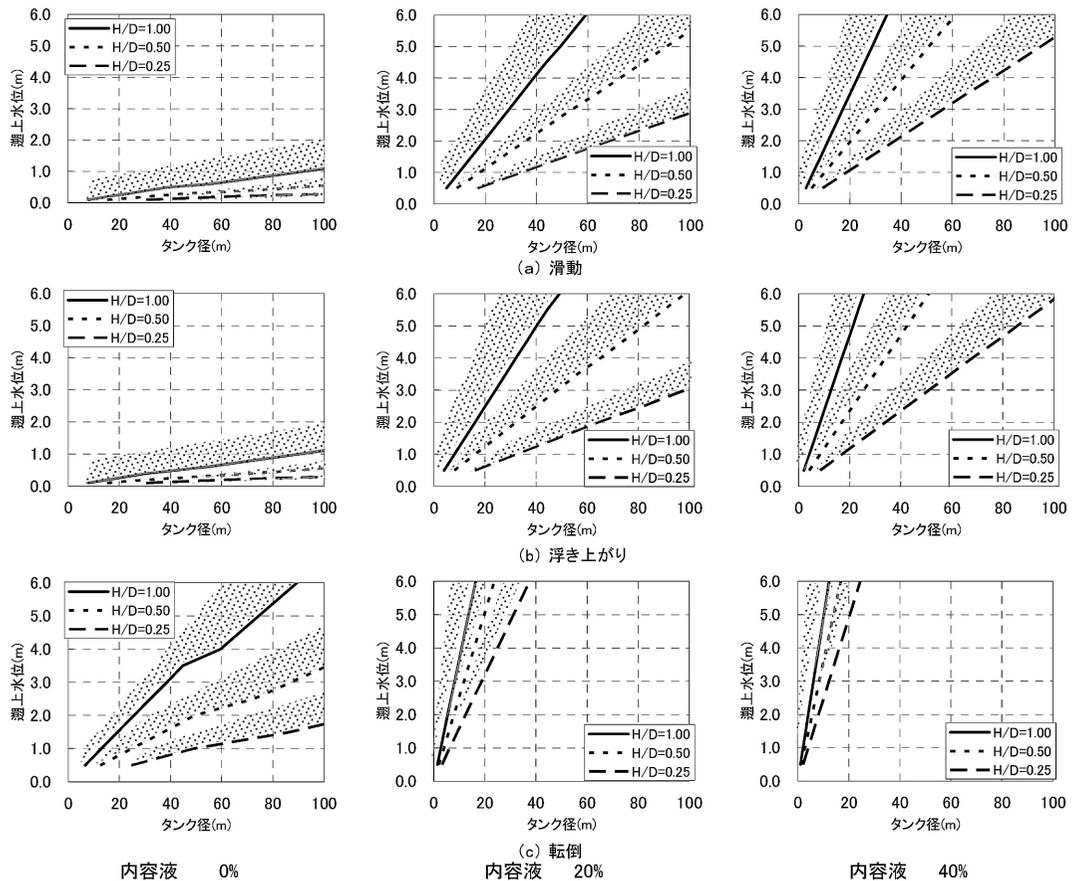


図13 屋外タンクの被害判定図
(各線より上側領域が被害領域を示す)

ある。

2) 漂流シミュレーションの実施

津波漂流物として想定される船舶 (大型船舶, 漁船, プレジャーボート, 作業船等), コンテナ, 車両, 木材などを津波浸水シミュレーション結果や航空写真, 現地踏査により抽出し, 漂流物の位置, 諸元, 数量, 航路・泊地, 係留施設等について把握する。抽出した漂流物の漂流シミュレーションは, 津波浸水シミュレーション結果を外力とする。このとき, 碎波等による乱れが発生する場合は, 漂流物の変動性を考慮した計算を実施する。漂流物による被害の検討事項を以下に示す。

① 構造物, 施設への衝突発生の可能性検討

漂流物の軌跡, 漂流範囲から被衝突構造物との衝突発生の有無を把握する。また, 衝突速度や衝突角度に関する情報も得られるため, 漂流物対策工の設計に対する有益な資料とする。

② 滞留域, 座礁・沈没域の把握

復旧, 復興の妨げになる木材等の漂流物の滞留箇所, 船舶の座礁, コンテナ等の沈没箇所を予め把握することができる。

6. おわりに

本研究では, 臨海都市部における陸上構造物として屋外タンクを対象とし, 津波による被害想定

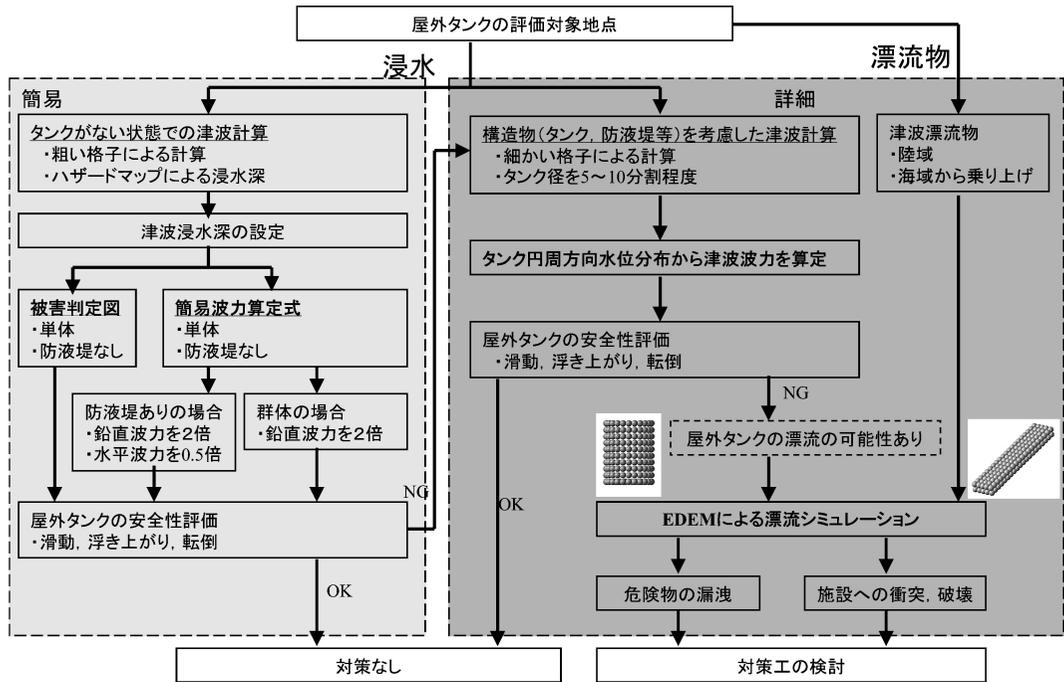


図14 屋外タンクの被害想定手順

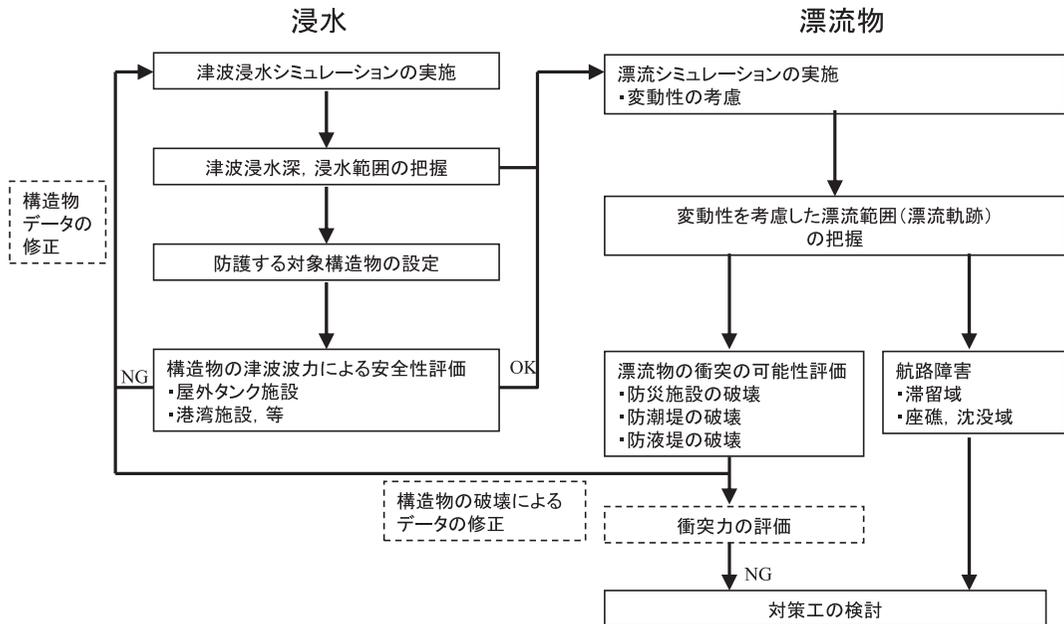


図15 津波漂流物による被害想定手順

手法について検討した。まず、屋外タンク単体と複数基群に作用する津波波力の違いを明らかにし、津波波力の評価手法を提案した。次に、藤井ら(2005)の津波漂流物の移動モデルを用いて水理実験に対する計算を実施し、その再現性と課題を示した。最後に、津波に伴う漂流物による被災、および津波による屋外タンクの被災シナリオについて実務への適用を目指した検討を実施し、タンクへの作用波力評価と漂流物移動モデルを含めた屋外タンクの被害想定手順を提案した。

津波漂流物の移動速度の予測精度の向上を図ることが当面の課題であり、それを基礎とした衝突力および衝突被害評価について今後取り組んでいきたい。

参考文献

- 池野正明・田中寛好(2003):陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 721-725.
- 入江 靖・三村信男・堀川清司(1983):砕波した津波による漂流物の衝突力, 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 235-236.
- 岩淵洋子・今村文彦(2005):津波来襲による原油流出・拡散問題の整理と解析手法の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 301-305.
- 岩淵洋子・越村俊一・今村文彦(2006):津波の陸上遡上域における油・水輸送問題の数値実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1361-1365.
- 宇佐美龍夫(2003):最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001, 東京大学出版会, 605p.
- 川崎浩司・袴田充哉(2007):3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 31-35.
- 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹(2008):コンテナ沈没挙動測定の現地実験と港湾における漂流数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 271-275.
- 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫(1982):津波による木材の流動, 海岸工学論文集, 第29巻, pp. 491-495.
- 後藤智明(1983):津波による木材の流出に関する計算, 海岸工学論文集, 第30巻, vol. 30, pp. 594-597.
- 後藤智明(1985):津波による油の拡がりに関する数値計算, 土木学会論文集, Vol. 357, II-3, pp. 217-223.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥 謙介(2006):浮体群を伴う津波氾濫流の3Dシミュレーション, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 196-200.
- 後藤洋三(2005):スマトラ地震の津波災害による屋外タンク貯蔵所等の被害事例調査報告, Safety and Tomorrow, No. 114, pp. 60-73.
- 小林英一・越村俊一・久保雅義(2004):津波による船舶の漂流に関する基礎研究, 秋季造船三学会連合大会関西造船協会講演概要集, pp. 9-12.
- 佐藤慎司・堀川清司(1981):津波による漂流物の橋脚への衝突力, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 789-790.
- 首藤伸夫(1987):津波来襲時の石油に関する災害, 津波防災実験所研究報告, 第4号, pp. 42-60.
- 消防庁特殊災害室(2001):石油コンビナートの防災アセスメント指針, 121p.
- 水路部(1948):水路要報 増刊号 昭和21年南海大地震報告 津浪編, 67p.
- 高野英之・藤間功司・長屋昌弘・嶋原良典(2005):2次元波動場における漂流物の拡散現象に関する水理実験, 第32回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集第2部.
- 土木学会東北支部(1980):1978年宮城県沖地震調査報告書, 504p.
- 長屋昌弘・嶋原良典・藤間功司(2005):津波による湾内における漂流物の挙動に関する実験的研究, 第32回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集第2部.
- 中川 一・高橋 保(2000):湾内に流出した流木群の挙動解析, 京都大学防災研究所年報, 第43号, B-2, pp. 295-306.
- 藤井直樹・大森政則・池谷 毅・朝倉良介・武田智吉・柳沢 賢(2005):港湾における津波漂流物の数値解析, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 296-300.
- 藤井直樹・大森政則・池谷 毅・稲垣 聡(2006):石油タンクに作用する津波波力と被害予測手法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 271-275.
- 細井正延・坪田幸雄(1980):陸岸に遡上した津波の障害物付近の流況, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 85-89.
- 松富英夫(1999):流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127.
- 水谷法美・高木祐介・白石和陸・宮島正悟・富田孝史(2005):エプロン上のコンテナに作用する津

- 波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 741-745.
- 水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史 (2006) : エプロン上のコンテナへの津波の作用と漂流衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 791-795.
- 目黒公郎 (1988) : 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所彙報, Vol. 63, pp. 409-468.
- 山口一 (2001) : 海水変動の数値予測, ながれ, No. 20, pp. 295-303.
- Committee on the Alaska Earthquake (1972): The Great Alaska of 1964, *Oceanograph and Coastal Engineering*, 556p.

(投稿受理：平成21年7月16日
訂正稿受理：平成21年11月13日)