

貯蔵タンクの津波漂流対策についての検討

坂本 佳子¹・坂本 義則²・菅付 紘一³・原田 隆典⁴・野中 哲也⁵

¹正会員 (株)地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀3-5-13)

E-mail:sakamoto@eerc.co.jp

²(元)旭化成株式会社 延岡支社企画管理部 (〒882-0847 宮崎県延岡市旭町2-1-3)

E-mail:s1949mym@yahoo.co.jp

³正会員 (株)地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀3-5-13)

E-mail:sugatuke@eerc.co.jp

⁴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 宮崎県宮崎市学園木花台1-1)

E-mail:harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

⁵正会員 名古屋工業大学大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: nonaka.tetsuya@nitech.ac.jp

津波発生時においては、重要かつ危険な内容物を保管する貯蔵タンクを損傷させず、タンク自身が所定領域外へ流出することを防ぐ対策が必要である。本研究では、大きな浮力を作用させず、あらゆる方向の津波に対応が可能な1本のケーブルによる係留装置の、貯蔵タンクの津波漂流対策法を提示し、検討を行う。流体-構造の相互連成解析によりタンクの漂流挙動を解析的に予測し、流体解析および構造解析により、提示する漂流対策法の妥当性を確認している。また水路実験によりタンクの漂流挙動を確認している。

Key Words : storage tank, tsunami, fluid-structure interaction, hydraulic experiment

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震に伴う津波では、沿岸域の屋外貯蔵タンクが多数被災し流出した。筆者らは、流体解析と構造解析を用いて、津波被害を受けた貯蔵タンクの被害形態やタンクの損傷メカニズム等を解明してきた^{1), 2)}。現在は、これまでの研究成果をもとに、次のステップとして貯蔵タンクの津波漂流対策に関する研究を実施している。本研究では、検討対象地点の津波特性を考慮したタンク津波漂流対策法を提示した上で、その対策を実施した貯蔵タンクの漂流挙動を解析的に予測し、水路実験によりその漂流挙動を確認する。さらにその対策を実施したことによるタンク自体の損傷の有無についても検討する。

2. タンク漂流対策法

検討対象とするタンクは内容物は液体で、内径19.2m、高さ15.2mの円筒型大型タンクである。検討対象地点の予想される津波の水位上昇速度は0.8m/分で、ゆるやかな水位上昇であるが浸水深さが約10mと深く、流速は3m/sである。このような津波に対するタンク漂流対策として、タンク自体の損傷を抑制しつつ、タンクが所定領域外へ漂流することを防ぐため、図-1に示すようなタン

クにケーブルを付ける係留法を提案している。この係留装置の特徴はケーブルは1本であることと、応力集中を防ぐためにバンドを取り付けることである。ケーブルが1本の場合、複数本で係留する場合よりも方向とタンクの傾く角度の制限がないため、進行方向を予測することは難しく引き波の発生も考えられる津波のあらゆる方向に対応可能である。また傾く角度を固定しないため、自重との釣合以上の浮力をタンクに作用させない効果がある。この係留法におけるケーブルの長さは、想定される最大浸水深とタンク周囲の許容浮遊空間から決定することになる。本漂流対策以外に、タンクを浮かないようにアンカー等で基礎部を固定して、全く漂流させない方法も考えられるが、タンクに働く浮力は非常に大きいため、これに抵抗するような対策は現実的ではない。また、タンクの周りに浸水を防ぐ壁等の設置なども考えられるが、浸水深さが約10mにもなるため大規模な壁が必要となり経済的ではなく、日常の点検や緊急時消化活動等の障害となる大きな壁等はタンクの周りに設置できない。このような観点から、本研究で提案している対策法は、非常に有効であると考えられる。しかし、本漂流対策は、タンクが浮き上がって漂流を開始した時にタンクが傾き、最悪は転倒してバンドからタンクが抜け出すことも考えられる。よって本漂流対策の妥当性を、後述する流体解析と構造解析、また水路実験によって確認する。

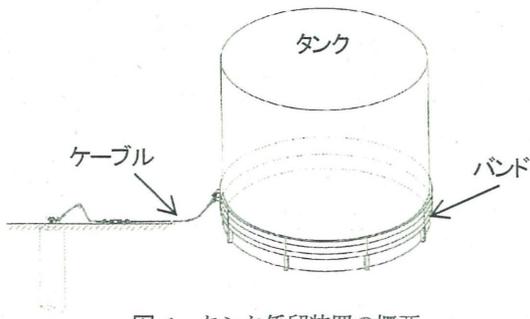


図-1 タンク係留装置の概要

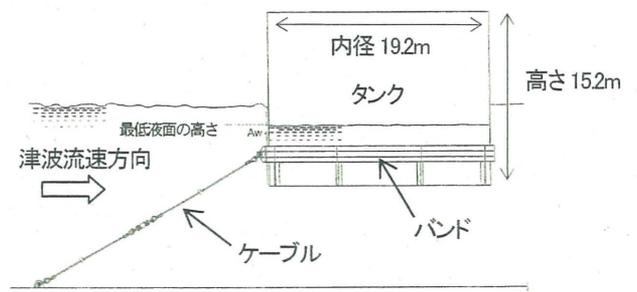


図-2 タンク係留装置が作動した状態

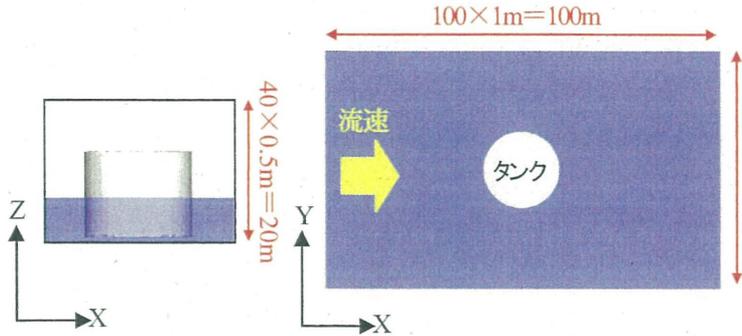


図-3 解析条件 (解析領域, メッシュサイズ)

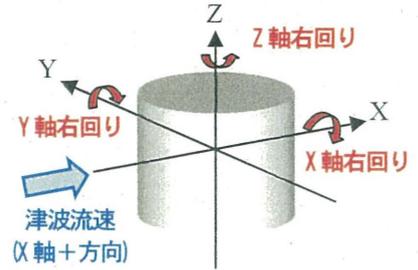


図-4 座標の定義 (右手座標系)

3. 初期挙動

まず、タンク漂流の初期段階 (図-2のようにケーブルが張る状態の前まで) の挙動に着目して、想定している津波に対して、タンクがどのように漂流するか確認するため流体解析を実施した。流体解析で使用したコードは、OpenFOAM³⁾であり、その複数の標準ソルバの中で境界の移動とそれに伴う計算領域の変形を扱うことができる二相流ソルバinterDyMFoamを用いた。使用した移動メッシュ機能は、sixDoFRigidBodyMotion⁴⁾ (6自由度剛体移動計算) で、剛体移動させる境界を今回はタンクとし、メッシュを変形させる範囲、剛体の質量中心 (回転中心)、質量、慣性モーメントなどを設定する。タンク内の液体は自由表面ではなくタンク全体を一体とする剛体として扱われる。そのため発生する応力などを解析から直接求めることはできないが、流体 (タンク外の海水) と固体 (タンク) の相互作用を考慮したFSI解析 (流体-構造相互連成解析) を行っている。

解析条件については図-3に示す。X軸一側の境界からX軸+方向の流速を与え、流速下流側境界と側面境界は放射境界とした。本研究では、対象地点の水位上昇が非常にゆるやかであることから入射津波の水位変動は与えていないが、タンクの動揺による局所的な水位変動に伴う壁面に働く圧力の積分値を波力と定義する。対象タンクは、内容液が75%以上の場合は想定する浸水深10mでは浮きあがり発生しない。浮きあがりが発生する内容液20%と50%の場合を想定して解析を行った。解析方法は、タンクが僅かに浮き、自重と浮力が釣り合い静止する水位状態から想定している流速を作用させる。それぞれ

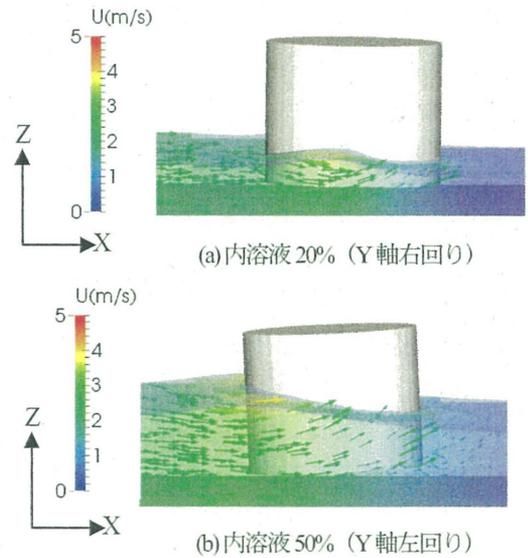


図-5 流体解析の結果

の内容量の初期状態として質量、回転中心位置、慣性モーメント、初期水位状態を設定している。タンク全体の移動は考慮されるが、タンク内の内容液が移動することによる影響は考慮していない。本検討における座標系の定義は図-4に示すとおりとする。初期段階においては、係留装置のケーブル張力は作用しないため、タンクには拘束条件を設けていない。このようにして解析した結果を、図-5に示す。この図は、タンク内の内容液20%と50%の場合について、タンクの漂流状態および流速を示している。本結果から、内容液20%ではY軸右回りに、50%のときにY軸左回りにタンクが回転し、内容液の量によって回転する向きが異なることがわかる。それぞれの内容液量でタンクに作用する圧力分布 (最大時) を図-6に示す。同図(a)と(c)より津波に対して前方側の側面の圧力は、後方側の側面の圧力よりも大きい。これは、前方側には流速が直接作用し、かつタンクが流れの障害と

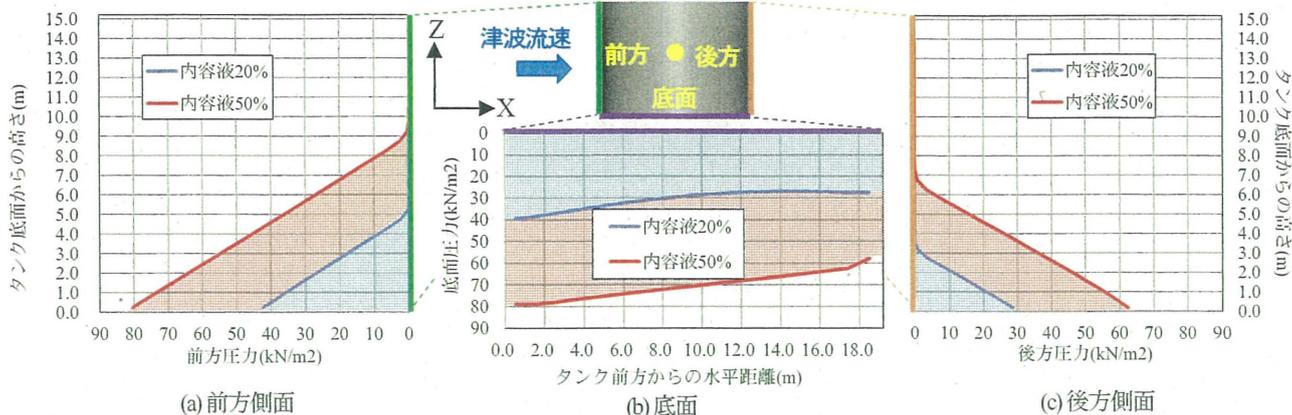


図-6 タンクに作用する圧力分布 (最大圧力発生時)

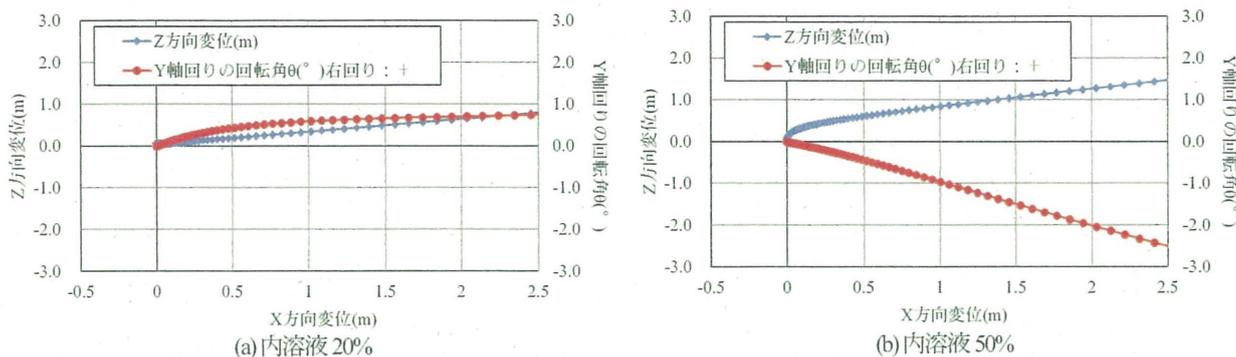


図-7 タンクの移動量 (回転量と浮き上がり量) の変化

なるため水位が若干高くなり静水圧も増すためである。よって側面に作用する圧力により生じるモーメントは前方側の圧力が大きい \Rightarrow Y軸左回転である。一方、同図(b)より、底面の圧力は前方側の圧力が後方側より大きくなる。これは前方側の方が水位が高いためである。よって底面に作用する圧力により生じるモーメントはY軸右回転である。この側面と底面によるモーメントの大小関係によりタンク全体が回転する方向が決まることになる。ただし、その回転量および浮き上がり量は、図-7に示すように僅かであり、初期挙動においてタンクが抜け出すようなことはないと考えられる。

4. タンク係留装置作動時の挙動

(1) 流体解析

想定される浸水深10mで流速3m/sの状況でタンク係留装置が作動して図-2のようにケーブルが張った状態の挙動に着目して、前述の初期挙動と同じ解析手法を用いて流体解析を実施した。図-2に示すように係留装置のバンドは、タンクの全周について水平方向、鉛直方向、回転方向を柔軟に拘束することになるが、流体の挙動によって刻一刻と変化するバンドの拘束状態を正確に解析条件に反映させることは困難である。よって、まず移動を制限された状態での波力による挙動を確認するために、図-8に示すOの位置を中心とするY軸回りの回転はフリーとし、中心Y軸OのX方向、Z方向の移動を固定する拘束

条件をタンクに設定して、内容液20%、50%について流体解析を行った。タンクの初期状態における鉛直位置は、浸水深10mの状態 \Rightarrow 自重と浮力が釣り合う位置に設定した。このようにして行った解析結果を図-9に示す。内容液20%、50%においてY軸左回転をする結果となった。この挙動から波力によってタンクにはY軸左回りのモーメントが生じることがわかる。図-10に内容液20%の場合の回転量の時間変化を示す。内容液20%は50%に比べ回転する速度は遅く、内容液20%では約5.8秒かかって5°の回転をするのに比べ内容液50%では1.5秒で5°回転した。これは、内容液20%よりも50%では波力を受ける面積(水に沈む面積)が大きく、波力の影響が大きいためと考えられる。また、内容液20%は質量が小さいことが影響すると考えられるが、図-10に示すように回転量は増減を繰り返して安定せずに変動する結果となった。

次に、他の条件は同様とし、タンクの全ての移動と回転を拘束した状態で流体解析を行った。これによりタンクに作用する水平波力と鉛直波力、Y軸回転モーメントの変化を図-11に示す。これはタンクに作用する波圧を全表面積について積分して求めているものである。同図(a)のタンクに作用する水平波力と同図(b)の鉛直波力では、内容液20%と50%の両方の場合で鉛直波力の方が、水平波力より大きい。ただし鉛直波力はタンク自重と内容液の重量によって、ほぼ相殺されることになり、鉛直方向の釣り合いをとることになる。水平波力はタンクのバンドを介したケーブルの張力によって拘束されることになる。

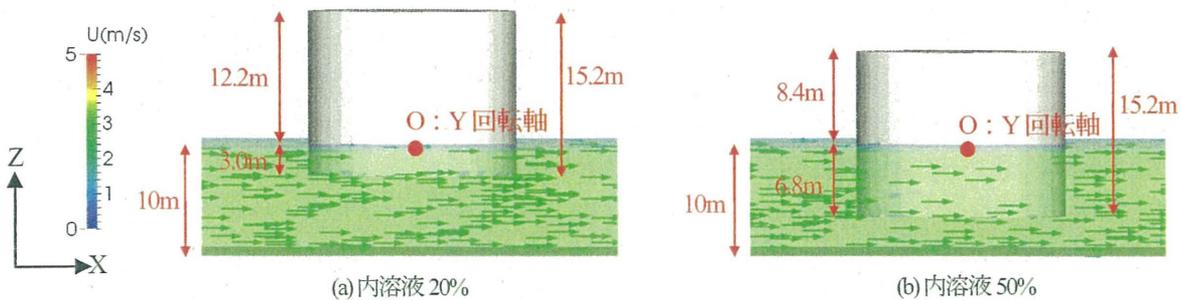


図-8 初期状態と水平 X 方向と鉛直 Z 方向の移動を拘束する Y 回転軸

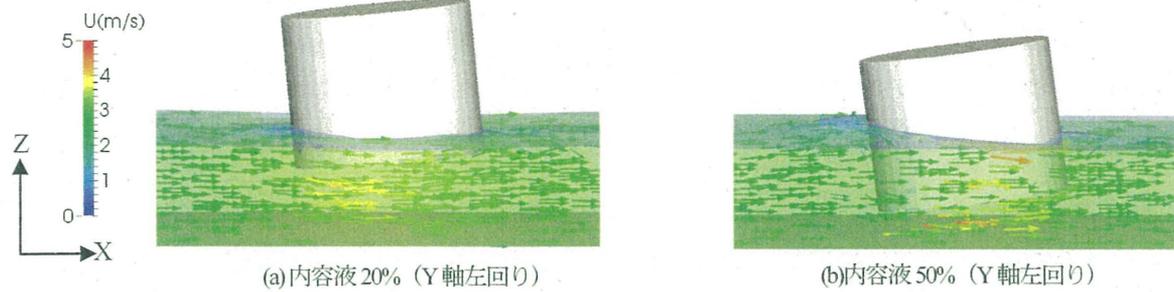


図-9 Y 回転軸の水平、鉛直移動を固定した浸水 10m、流速 3m/s の流体解析の結果

同図(c)の波力による回転モーメントの値は、内容液20%と50%の両方の場合で、負の値でありY軸左回りの回転モーメントが生じている。波力、回転モーメントともに約7秒周期の変動が生じている。この変動の理由について、カルマン渦の可能性を検証したが、本現象がカルマン渦の特徴と一致せず解明できていないため、今後の検討課題としたい。内容液50%の場合には、内容液20%の場合と比べ波力を受ける面積（水に沈む面積）が大きいため、水平波力、鉛直波力、回転モーメントのいずれも大きくなっているが、傾向は同様である。

(2) 回転を生じさせないバンド位置

ここで、係留装置のバンドをタンクのどの位置に設置するのが妥当であるかを検討する。タンクが水平に保たれていると仮定した場合、図-12に示すようにタンクに作用する水平波力と同等の力が接触部のバンドから逆方向にタンクに作用することになる。前述の流体解析の結果から波力はタンクをY軸左回りに回転させるため、できるだけ回転をさせないという観点からは、左回りの回転を打ち消す右回りのモーメントが作用するように、バンドは水面よりも下の位置に設置する方が良いと考えられる。計算上は、波力による回転モーメントを水平波力で除した値が、タンクが回転せずに水平を保ちつり合うためのバンドのO点からの距離となる。回転モーメントも水平波力も時刻によって変動するため一定値とはならないが、回転が生じないバンド位置は常に、内容液20%ではO点から5mより下の位置（これは内容液20%の場合には水面下に沈んでいる高さは3m程度なので現実には不可能）、内容液50%ではO点から4.7mより下の位置（タンク底板からタンク高さの14%高より下）となった。

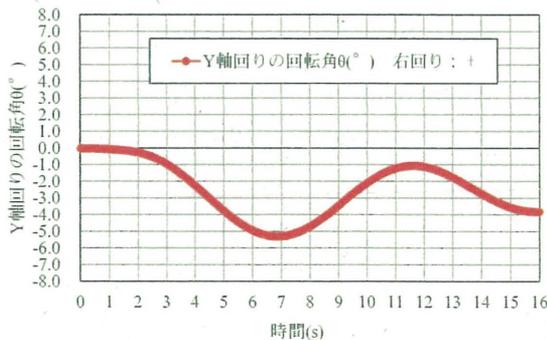


図-10 タンクの回転量の変化（内容液 20%）

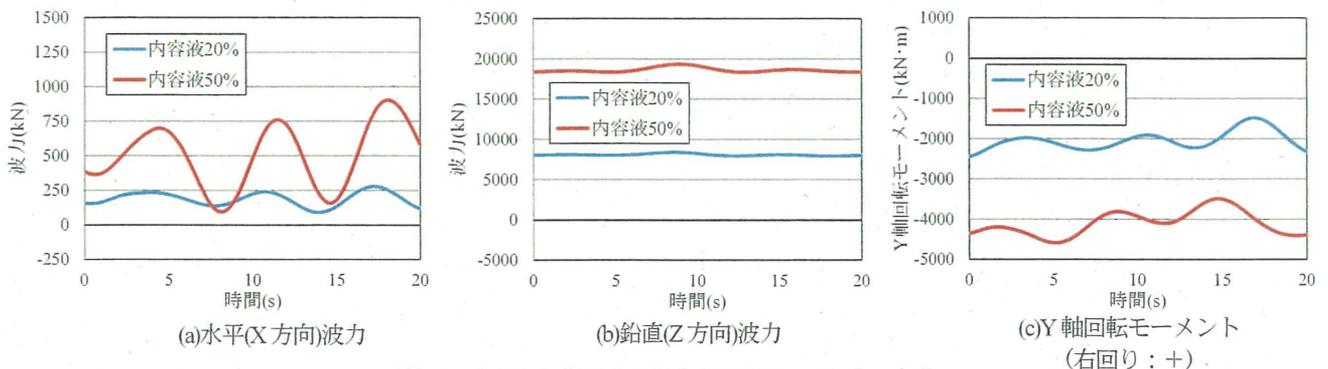


図-11 タンクに作用する波力と回転モーメントの変化

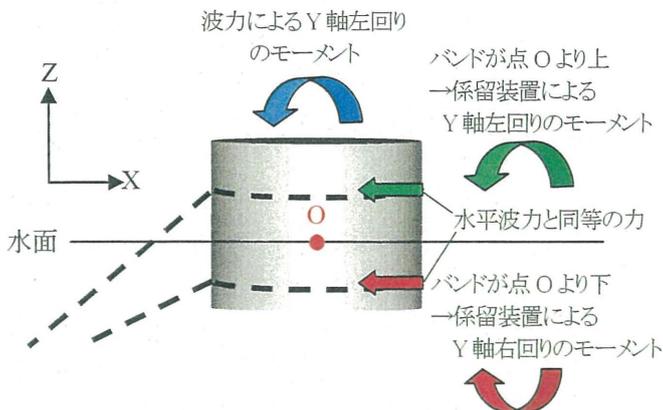


図-12 係留時に作用する回転モーメントのイメージ

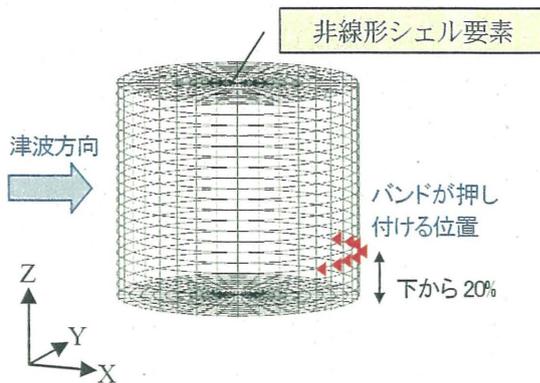


図-13 構造解析モデル

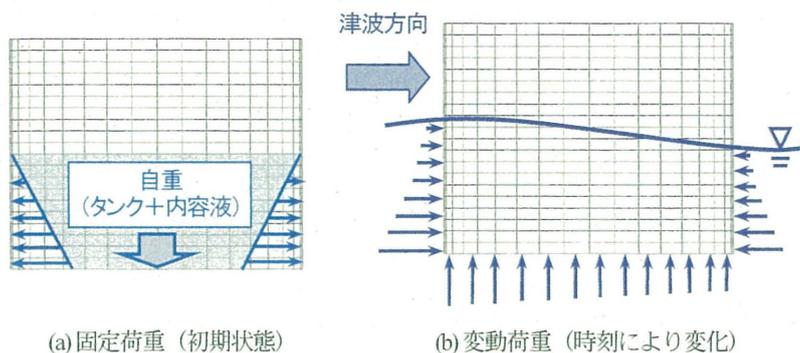
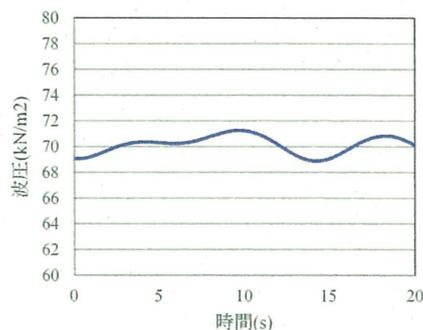


図-14 構造解析の荷重条件



(c) 作用させる波圧の時刻歴波形 (例: 50%内容液タンク下部)

(変形表示倍率:50)

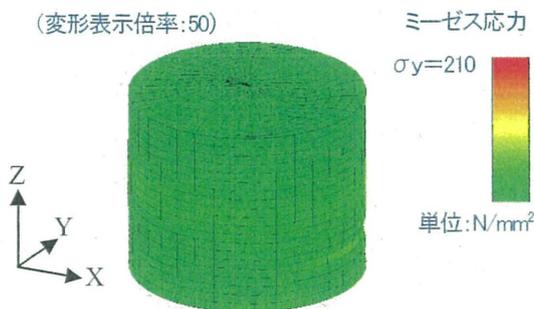


図-15 構造解析の結果 (内容液 75~100%)

(3) 構造解析

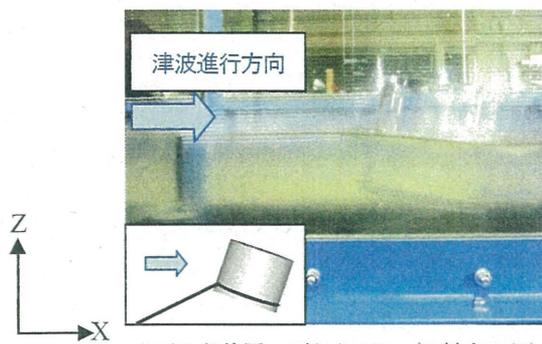
タンク係留装置が作動した状態 (図-2) で、係留装置のバンドの締め付けによってタンクが損傷することもあると考えられるため、流体解析によって得られた波圧を動的に載荷し、締め付けによる影響を確認するための構造解析を実施した。構造解析には材料非線形性と幾何学非線形性による複合非線形性を考慮できるSeanFEM(ver.1.22)⁵⁾を使用した。構造解析モデルは図-13に示すようにタンクを非線形シェル要素でモデル化した。バンドの位置は、周辺の配管等を考慮して下から20%とし、バンド幅は1.1mである。作用させる荷重条件を図-14に示す。荷重条件は、同図(a)のように初期状態としてタンクの自重と内容液による静水圧を作用させた状態で、同図(b)に示すように津波による時刻歴で変化する波圧を各位置に動的に作用させる。同図(c)は内容液50%の場合にタンク下部の位置に作用させる変動波圧である。作用させる波圧

は、内容液20%、50%、75%~100%の浮きあがりが発生しない場合について解析を行った。応答が大きい内容液75~100%の場合の構造解析結果のミーゼス応力と変形量を図-15に示す。発生応力は降伏応力の25%程度で僅かに変形する程度であるため、本対策法でタンク自体が損傷することはないことが確認できた。また、ケーブルの張力についても最大で1610kN程度であり、十分対応することが可能であることが確認できた。

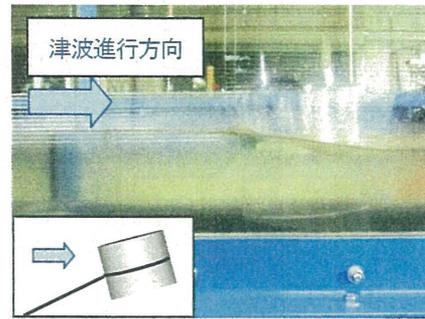
5. 水路実験によるタンク係留装置作動時の挙動の確認

タンクの漂流挙動を確認するために水路実験を行った。タンク模型は、対象とするタンクの約1/75のスケールとし係留装置を設置して、長さ12m、幅0.4mの開水路で行った。水位、流速等、フルード相似則を満たすように設定している。

実験の係留装置作動時のスナップショットを写真-1に示す。同写真(a)よりタンクの内容液50%で、係留装置のバンドを下から10%の位置に設置したときはY軸右回りに回転し、同写真(b)よりバンドを下から50%の位置に設置したときは、Y軸左回りに回転している。これは、前述した解析結果から得られた結論と一致しており、定性的にはあるが、解析がタンクの挙動を予測できていることが確認できた。実験では、両者ともに一定の回転状



(a)バンド位置：下から10% (Y軸右回り)



(b)バンド位置：下から50% (Y軸左回り)

写真-1 水路実験のスナップショット (内容液50%)

態を保ち定常状態となった。漂流開始の初期挙動についても、係留装置作動時についても、タンクが完全に転倒したり、バンドが外れることは起きないことが確認できた。

実験ではカルマン渦が発生し、特にタンク内容量が少なく質量が小さい状態ではタンクが左右に揺れる現象が生じており、内容液にスロッシング現象も発生した。しかし、内容液の振動はわずかで、タンク全体の振動と内容液の振動の共振現象は発生していないものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、提案するタンクの漂流対策について、以下の結論が得られた。

- (1)タンクの初期挙動を確認するための流体解析により、タンクの内容量により回転する方向が変わることが確認された。しかし、移動量、回転量ともに僅かであり、初期挙動においてタンクが抜け出すようことはないと考えられる。
- (2)タンクの係留装置作動時の流体解析により、波圧はタンクをY軸左回転させるモーメントを発生させ、タンクの回転を少なくするためには、タンクの下側にバンドを設置する方が良いことがわかった。
- (3)流体解析によって得られた波圧を作用させる構造解析により、タンクは提案する本係留方法で損傷するこ

とはないことが確認できた。

- (4)水路実験により、解析がタンクの挙動を予測することができることが確認できた。初期挙動、係留装置作動時において、タンクが完全に転倒したりバンドが外れることはないことが確認できた。

今後は、本解析では考慮できていない内容液の変動とスロッシング現象について検討を重ねていきたい。

謝辞：水路実験については宮崎大学工学部 村上啓介教授にご協力を得て実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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), Vol.69, No.2, pp.I_826-I_830, 2013.
- 2) 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也: 沿岸地域の生産施設に対する地震・津波被害の判定方法, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_886-I_890, 2014.
- 3) OpenFOAM Foundation : OpenFOAM User Guide, <http://www.openfoam.org/docs/user/>, 参照 2015-03-10.
- 4) <http://openfoam.org/release/2-3-0/mesh-motion/>, 参照 2015-03-10.
- 5) 野中哲也, 吉野廣一: パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析, 丸善, 2010.

(2016.3.16 受付)

EXAMINATION OF A METHOD OF COUNTERMEASURE FOR STORAGE TANK DRIFTING DURING TSUNAMI

Yoshiko SAKAMOTO, Yoshinori SAKAMOTO, Koichi SUGATUSKE,
Takanori HARADA and Tetsuya NONAKA

It is necessary to take measure for flowing out the stores and drifting the storage tanks during tsunami, because the storage tanks store usually the dangerous contents. In this paper a method of countermeasure of drifting the storage tank during tsunami is proposed and its effectiveness is examined by the analytical and experimental methods. The analytical method in this examination is able to take into account the drifting behavior of storage tank during tsunami and consequently can evaluate the effectiveness of the proposed countermeasure. The hydraulic experiment carried out to confirm the drifting behavior.