

貯蔵タンクに対する津波被害の判定方法

	（株）地震工学研究開発センター	正会員	○菅付	紘一
宮崎大学	工学部社会環境システム工学科	正会員	原田	隆典
	（株）地震工学研究開発センター	正会員	野中	哲也
宮崎大学	工学部社会環境システム工学科	正会員	中村	真貴
	（株）地震工学研究開発センター	正会員	坂本	佳子

1. はじめに

2011年3月11日にマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、この地震に伴った津波により、道路、ライフライン、構造物などが被災した。貯蔵タンクに対しても、滑動や浮き上がりといった被害が多数見受けられた。そこで、本研究では、津波による貯蔵タンクの津波被害メカニズムを解明するため、3次元の流体解析ソフトによる津波解析およびその結果を用いた構造解析を実施してきた。本文では、その解析を用いた貯蔵タンク津波被害の判定方法および適用例を示す。

2. 貯蔵タンクの被害形態

津波による貯蔵タンク自体の被害形態として、①浮き上がり、②滑動、③転倒、④内外水圧や波力による側板座屈、⑤タンク傾斜による底板抜け出し、⑥タンク傾斜による側板座屈の6つのパターンが挙げられる。通常の簡易判定ツールでは、①と②しか判定できないのが一般的であるが、本検討では、①～⑥を対象とする。なお、津波による基礎の洗掘や崩壊もあるが本検討では対象外とする。

3. タンクの被害判定方法の概要

本判定方法の基本的な考えは、実現象をできるだけ表現できるようにモデル化して解析し判定するというものである。本判定では、前述した①～⑥の全ての損傷形態を評価することにしている。本判定の手順は、想定される造波（津波高さや流速）による3次元津波解析（流体解析）を行い、その後、津波解析で得られる圧力（波力）を外力とした3次元構造解析を行うという2つのステップからなる。ただし、タンクの漂流までは考えず、タンクが被害を受けるかどうか（タンクが滑動や浮き上がり等が発生するかどうか）の判定に着目する。本解析では、流体と構造の完全な連成問題とし解くのではない。すなわち、タンクの挙動により流れがかわらないし、タンクの漂流計算を行うものではない。この2つ解析を使った判定手順を示すと図-1のようなフローとなる。

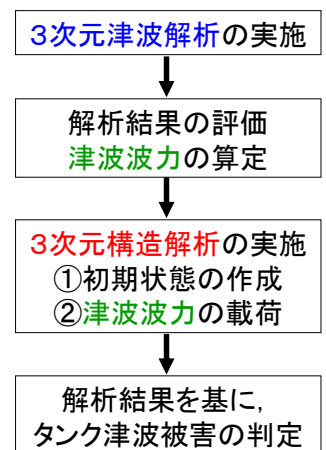


図-1 被害判定フロー

4. 解析事例

4.1 対象タンクおよび境界条件

対象タンクは、一般的な円柱形式のタンクとする。境界条件として、2次元津波解析（非線形長波理論）の結果から得られる流速と津波高さをもとにして、本解析の造波を定義する（図-2）。また、下流境界面においては、波が反射しないように放射境界を定義する。

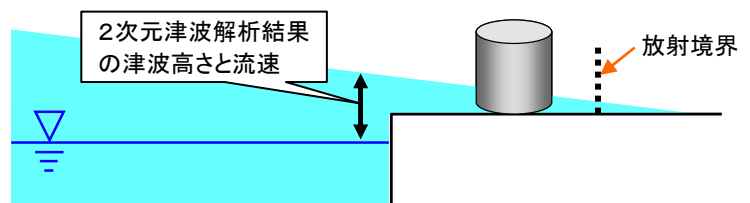


図-2 対象タンクの解析条件

4.2 3次元流体解析およびその結果

本解析では、水と空気の2相流とし、不混和流体の非圧縮性とする。解析ソフトとしてOpenFOAMを用いている。本解析ソフトは、数値解析手法として有限体積法が採用され、自由表面解析モ

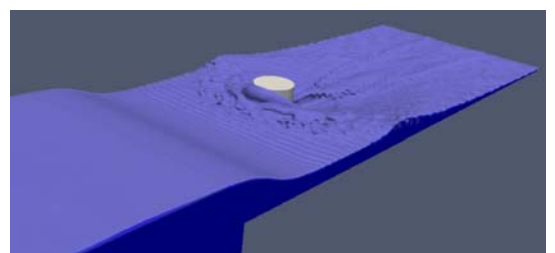


図-3 津波解析結果のスナップショット

デルとしては VOF 法が使用できる。対象タンクのモデルサイズは、264 万メッシュである。なお、乱流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、乱流モデル（RANS）を採用している。

本解析結果のスナップショットの例を図-3 に示す。

4.3 3次元構造解析およびタンクの判定結果

(1) 解析モデル

タンク全体を非線形シェル要素でモデル化する。タンクの底板に対しては、摩擦力が考慮できる Winkler モデルでモデル化する（図-4, 5）。なお、摩擦係数は、0.5 と仮定した。この Winkler モデルの特性は、水平方向において、押さえる力（自重と津波水平力による押し込み力）に比例した摩擦力（図-5 のグラフ）が発生する。鉛直方向においては、押し込み（図-5 のグラフの圧縮側）は硬いバネ剛性で抵抗し、浮き上がり（引張側）は抵抗しない特性となっている。

(2) 解析条件

本解析は、次の2つのステップから成り立つ。

ステップ1：初期状態の作成

津波が襲来する前に、タンクに作用する荷重は、タンク本体と内溶液の自重、内溶液による静水圧である（図-6）。

ステップ2：津波による外力の作用

(a) 津波浮力の作用

津波が襲来時には、水位に比例した浮力が発生する（図-7）。水位が時々刻々と変化するので、この浮力も変化する。津波が最初にあたるタンクの前面では水位が高く、後方では水位が下がる。よって、浮力はタンク前面の方が大きくなり、タンクが転倒し易くなるように働くといえる。

(b) 津波波力の作用

前述した3次元津波解析で得られたタンク周りの圧力を波力として、タンクに作用させる（図-8）。この波力も時々刻々と変化する。また、これと同時に、底板には津波波力に対して抵抗する摩擦力が発生する。

(3) 解析結果および被害判定

津波波力およびそれに伴った浮力を漸増させていき、タンク自体が浮き上がりや滑動等によって、解析が不安定になった時点を終局とする。すなわち、抵抗するタンクの自重と摩擦力以上に津波波力を作用したことになる。この終局に至るまでに、タンク自体の座屈や変形を起こすことがある。

本タンクの終局に至った時点の状態を図-9 に示す。この状態から、前述の①浮き上がり、②滑動、③転倒、⑤タンク傾斜による底板抜け出しが起きていることがわかる。

5. まとめ

本提案する解析モデルおよび解析方法による判定方法で、貯蔵タンクに対して、詳細な津波被害の判定が行えることがわかった。さらに、この方法を用いれば、タンクに発生する力等がわかるため、津波の波力に対する補強検討にも活用できるといえる。

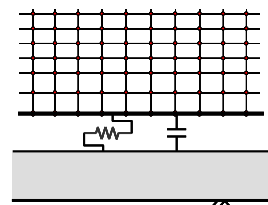


図-4 タンク底板のバネ設定

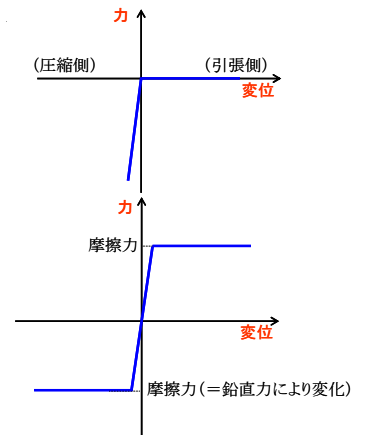


図-5 Winkler モデル

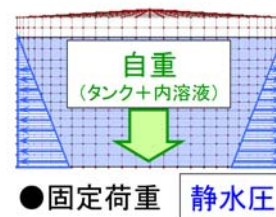


図-6 初期状態の作成

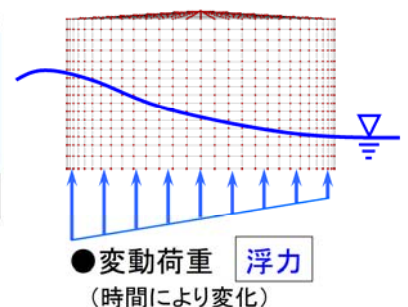


図-7 津波浮力の作用

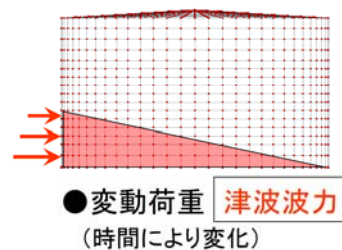


図-8 津波波力の作用

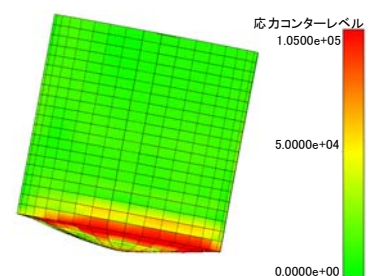


図-9 タンクの終局状態