

石油タンクに作用する津波波力と被害予測手法

藤井直樹¹・大森政則¹・池谷 毅²・稲垣 聡³

臨海部には石油関連の製造・貯蔵施設が多数立地しており、地震が発生すると、津波被害や油の流出、火災などの2次災害が発生する危険性がある。本研究は、石油タンクに作用する津波波力の算定方法を検討し、タンク被害想定可能な手法を提案することを目的として実施した。石油タンク施設へ作用する津波の波力を把握するため、水理模型実験による検討を行い、遡上した津波の水位から石油タンクに作用する津波波力の算定方法を提案した。そして、その算定方法に基づき石油タンク被害を簡便的に評価できる被害関係図を作成した。その結果、数値計算等による津波水位を利用して被害関係図から石油タンクの簡易の被害予測判定が可能となった。

1. はじめに

臨海部には石油関連の製造・貯蔵施設が多数立地しており、地震が発生すると、津波被害や油の流出、火災などの2次災害が発生する危険性がある。津波による建物（壁体構造物）の被害に関しては、遡上津波水位から作用波高を推定し被害を評価する方法がある（朝倉ら，2000；池谷ら，2005）。しかし、この方法を形状の異なる石油タンク（円筒構造物）等の施設の被害予測に適用することはできない。また、これらの施設の津波に対する安全性評価は必ずしも十分に行われていない。そこで本研究は、①水理模型実験により津波水位から石油タンクに作用する津波波力の推定方法を提案すること、②それに基づいて遡上した津波水位と石油タンクの被害モードとの関係を簡便的に評価できる被害関係図を作成すること、③複雑な地形条件にあるタンクに関して数値計算により波力時系列を推定することを目的として実施した。

2. 水理実験の概要

(1) 実験装置及び実験条件

石油タンクへの津波作用波力を把握するため、図-1に示す大型平面水槽を用い、縮尺 1/100 の水理実験を実施した。実験は津波により想定される被害モード（藤井ら，2005）を基に、表-1に示す波条件、地形条件、石油タンクに関する条件、防油堤に関する条件について設定した。写真-1にタンク単体、群体（千鳥配置、格子配置）、防油堤を設置した場合の実験状況を示す。

(2) 実験方法

実験は津波遡上実験と波圧・波力実験からなる。まず、タンクを設置しない場合における陸上部に遡上する津波の水位、およびタンクを設置した場合のタンク周囲の水

位変動を容量式波高計により計測した。次に、石油タンクに作用する前面および底面の波圧分布と波力を計測した。写真-2に模型前面の波圧計および分力計設置状況を示す。波圧計は模型下方を密に、また底面においても等間隔に設置した。また、分力計は模型上部に設置した。なお、円周方向の波圧特性を評価するため、模型を 30 度ずつ回転させながら計測を行った。

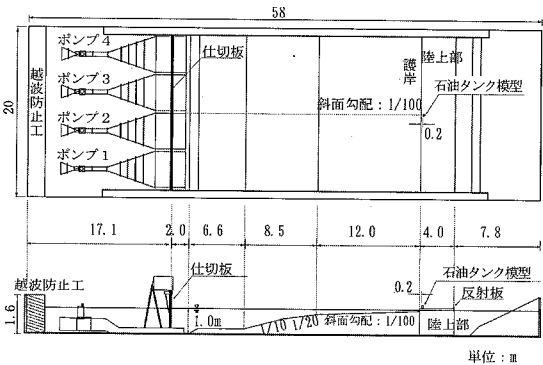


図-1 実験装置

表-1 実験条件

波条件（正弦波）	波高(cm)	5.0, 7.5, 10.0
	周期(s)	90, 180
	初期位相	押し波, 引き波
地形条件	斜面勾配	1/100
	護岸前面の水深(cm)	4, 8
	護岸の天端高(cm)	4
石油タンクの条件	タンク諸元(H/D)	0.25, 1.0 (H: 20cm, D: 内径)
	護岸からの距離	1D
	タンクの基数	単体, 群体(H/D=1.0)
	配置・間隔	千鳥: 0.5D, 格子: 1D
防油堤の条件 (単体時)	形状	直立堤
	高さ(cm)	2
	範囲	タンク容量の 110 %

1 正会員 東電設計(株) 港湾・海岸部
2 フェロー 工博 鹿島建設(株) 技術研究所
3 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所

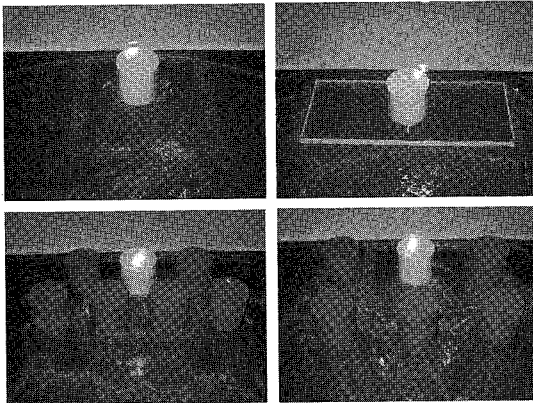


写真-1 タンク・防油堤の設置状況

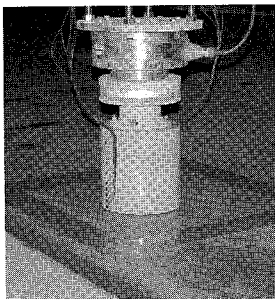


写真-2 波圧・波力の計測実験

3. 実験結果

(1) タンクに作用する前面・底面波圧

タンク単体時における前面に作用する水平波力最大時の波圧の鉛直分布および鉛直波力最大時のタンク底面の波圧分布を図-2に示す。前面波圧分布は、波条件により波圧値に違いはあるものの三角形分布であることがわかる。底面波圧分布は、前面側で大きく僅かに背面で小さい傾向がある。しかし、前面波圧ほど明瞭な分布形でない。

(2) タンク円周方向の波圧分布

タンク円周方向の波圧分布を図-3に示す。実験は半周分のみ計測しているため、対称に表示している。波条件は波高 7.5 cm, 周期 90 s, 押し初動である。単体の波圧はタンク前面側で大きく、側面ではほとんど作用していない。防油堤を設置した場合は、防油堤がない場合と比較して前面波圧の値は小さいものの、周囲の波圧が大きく、ほぼ一様になっている。これは、防油堤により津波が低減し前面波圧が小さくなるが、防油堤を越流した水が防油堤内に溜まるため周辺圧力が大きくなるためである。一方、千鳥配置後列の波圧は縮流効果で加速した流れが作用するため僅かに大きい値を示している。な

お、群体の場合の前列は単体と同様の波圧分布であった。

4. タンクに作用する津波波力の評価

タンクに作用する水平波力と鉛直波力を評価するため、

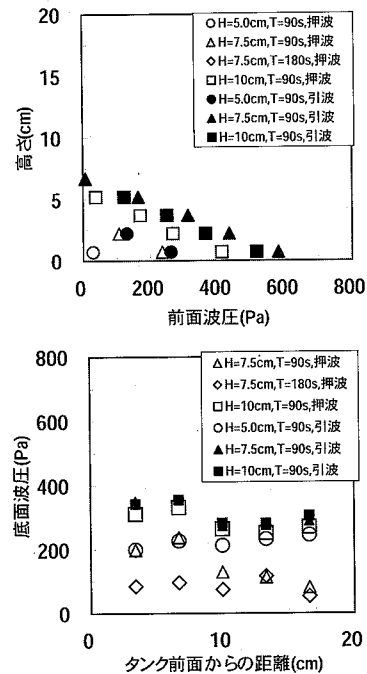


図-2 タンク前面・底面の波圧分布

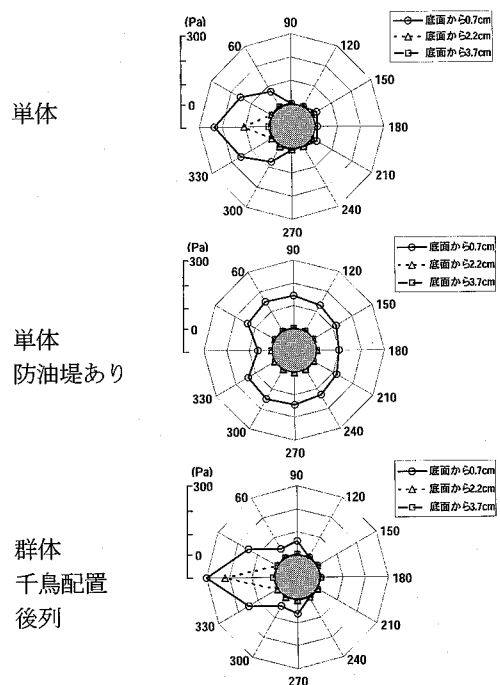


図-3 タンク円周方向の波圧分布

朝倉ら(2000)と同様に、タンクがない状態での津波の最大遡上水位を用いて推定する方法について検討する。図-4にタンク円周方向の水位分布図を示す。円周方向の実験水位分布は、タンク前面0度から背面180度へ余弦曲線的に変化している。そこで、円周方向水位分布を式(1)のようにフーリエ展開する。

$$\eta(\theta) = \sum_{m=0}^{\infty} h_m \cos m\theta \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\eta(\theta)$:タンクに作用する水位分布、 h_m :フーリエ係数、 m :フーリエ展開項数、 θ :角度である。式(1)から三角関数の直交性により次式が得られる。

$$h_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \eta(\theta) \cos m\theta d\theta \dots\dots\dots (2)$$

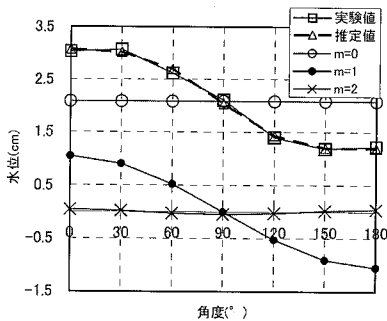


図-4 タンク周囲の水位分布

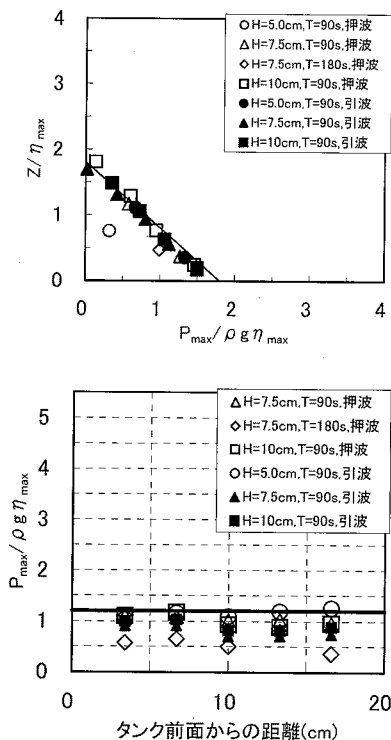


図-5 タンク前面・底面の無次元波圧分布

図-4に円周方向の水位分布の推定結果を示す。図中の推定値は、0次と1次の水位分布を足し合わせた結果であり、実験値を精度良く再現できている。このときの係数はタンクがない状態での最大遡上水位 $\eta_{\max}$ で無次元化すると0次が1.2、1次が0.6であった。

図-5の波圧分布は $\eta_{\max}$ を用いて、図-2の波圧を $\rho g \eta_{\max}$ で除すことにより無次元化した図である。前面波圧分布図中の直線は、タンクがない状態での最大遡上水位の1.8倍の高さに相当する静水圧の三角形分布を表している。1.8は0次と1次の無次元化係数の和である。また、底面波圧図中の直線は、0次の無次元化係数1.2を用いた場合の波圧である。

朝倉ら(2000)と同様に、実験で得られた最大遡上水位 $\eta_{\max}$ と無次元係数からタンク周辺の水位分布を算定し、静水圧分布を仮定することにより、水平波力を推定した。図-6はその推定結果と分力計で得られた実験結果を比較したものであり、 $D=20$ cmは良く一致している。同様に、 $D=80$ cmについても、多少大きめであるが $\eta_{\max}$ から安全側に評価できることがわかった。

壁体構造物に作用する水平波力は、構造物がない状態での最大遡上水位の3倍の高さに相当する静水圧分布で近似できるとされており、石油タンクのような円筒構造物は壁体構造物に比べて津波作用波力は小さい。

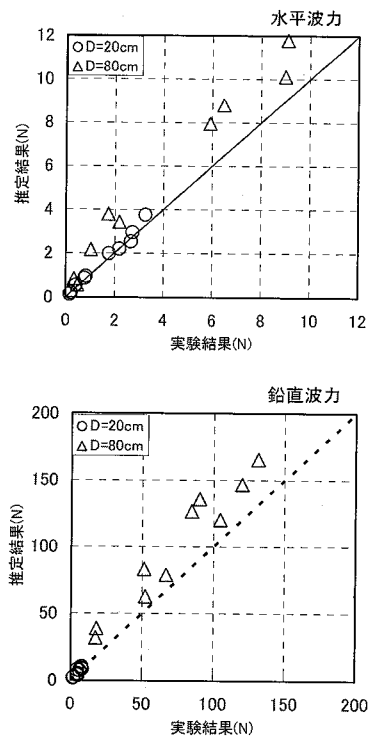


図-6 $\eta_{\max}$ から推定した波力と実験結果の比較

5. 津波水位と石油タンクの被害に関する検討

進行波として遡上する津波水位から水平波力と鉛直波力が算定可能となったことから、この津波波力算定を基に津波水位と石油タンクの被害モードとの関係を、簡便的に評価できる被害関係図の作成を試みた。被害モードは、滑動、浮き上がり、転倒、座屈を対象とした。水平波力に対する滑動は、タンク自重、内容液重量、津波鉛直波力より摩擦係数を0.5として摩擦抵抗力を求め検討した。転倒は滑動同様に抵抗モーメントを求め転倒モー

メントと比較した。浮き上がりは、タンク自重、内容液重量と鉛直力を考慮した。座屈の場合は、タンク側板周囲に作用する津波波力以外に、タンク内容液による内圧力を考慮する必要がある。そこで、本研究では日本機械学会(2000)に紹介されている Chiba ら(1989)の周囲液体からの静液圧を受ける円筒シェルの座屈理論を利用した。

図-7 に内容液の容量、津波水位、 H/D (タンク高さ/タンク径)を変化させた場合の滑動、浮き上がり、転倒、座屈に対する簡易被害判定図を示す。作図するに

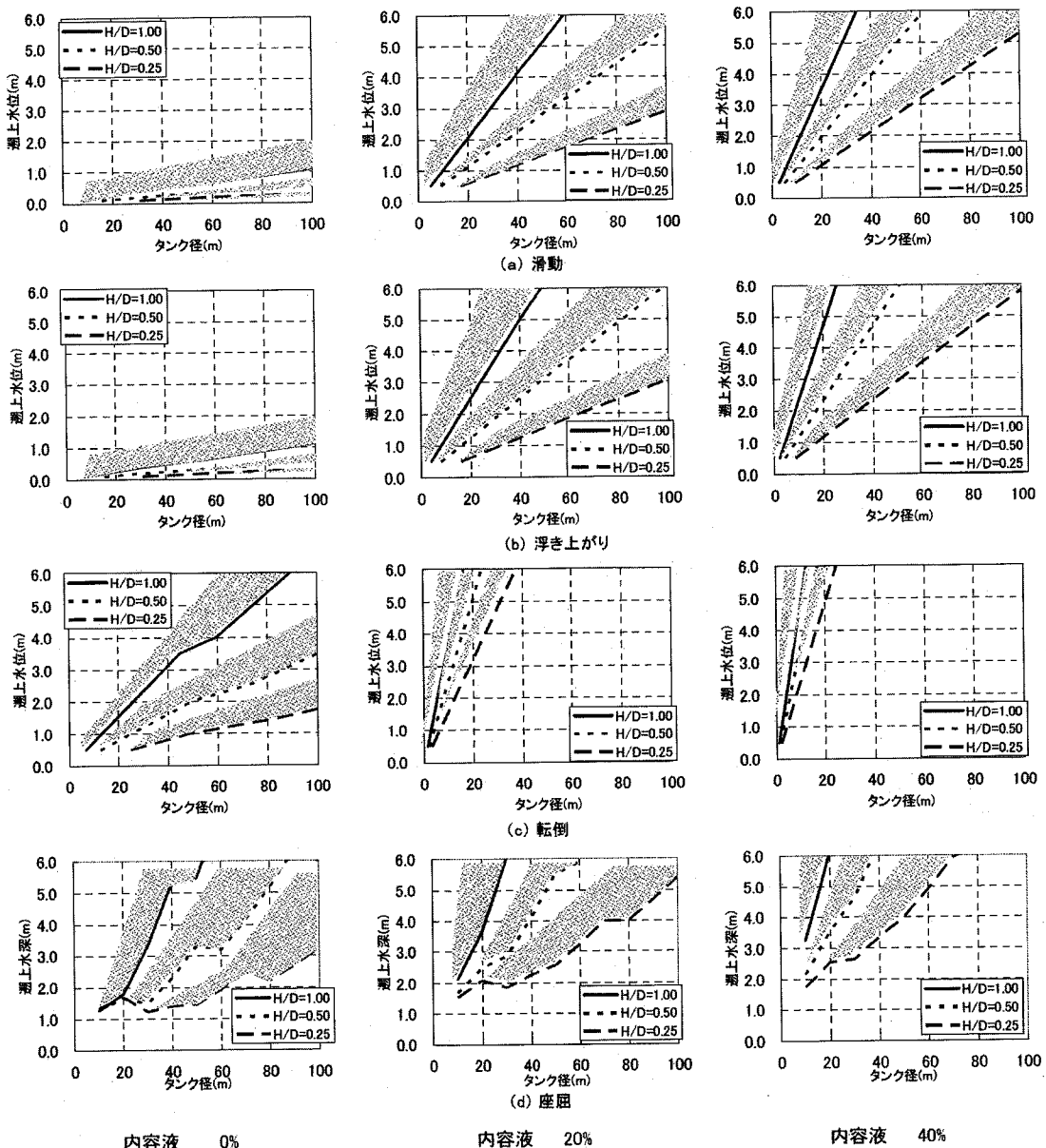


図-7 被害判定図 (各線より上側領域が被害領域を示す)

当たって安全率は全てのモードにおいて1.0としている。津波の液体比重は1.03、タンク内部液体の比重は0.85とした。材料の降伏点強度は、タンク容量75,000 kℓ未満の場合、軟鋼(MS) 245 N/mm²とし、75,000 kℓ以上の場合、高張力鋼(HT) 325 N/mm²を用いた。図中、直線が折れ曲がるのは、容量により板厚や鋼材料が切り替わるためである。

判定図より石油タンクの重量は軽いため、内容液量が少ない場合は、小さな遡上水位で浮き上がることがわかる。また、 H/D が小さいほど底面積が大きくなるため浮上し易くなる。タンク内の内容液量に寄らず、浮き上がり、滑動が座屈、転倒より先に発生することがわかる。特に転倒は考慮しなくてよいと考えられる。

上記判定図は、タンク単体における実験結果を基に作成した図である。そこで、複雑な場における波力を評価するため、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波力を算定する方法について検討した。津波計算方法は、後藤・小川(1982)と同様である。

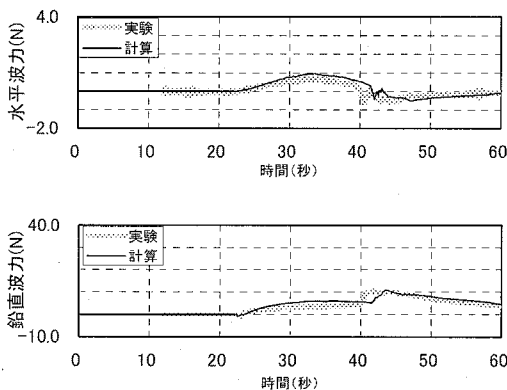


図-8 津波波力の時系列の比較

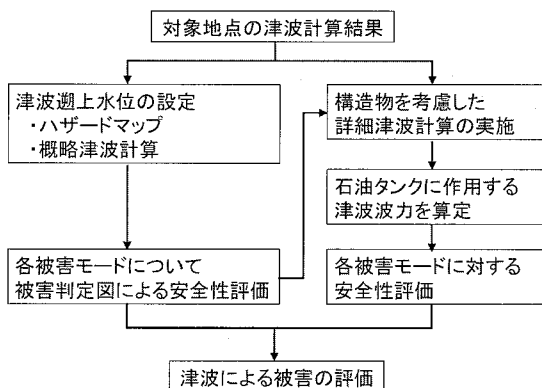


図-9 タンクの被害予測手順

図-8は数値計算と実験による津波波力の時系列を比較した図であり、波力の計算結果は実験結果を概ね再現できている。計算波力は実験結果より大きい傾向があり、流況場の再現性も含め今後検討していきたい。

以上の被害判定図や津波数値計算結果を用いた石油タンクの安全性予測手順を図-9に示す。津波ハザードマップ等の津波水位を利用して被害関係図から石油タンクの簡易の被害予測判定を行う。ただし、危険性が高いと評価されたタンク、あるいは被害関係図が適用できない複雑な地形条件にあるタンクに関しては、詳細な格子間隔による数値計算を行う必要がある。

6. まとめ

- 1) 石油タンクへの津波作用波力（水平、鉛直）を津波遡上水位から推定する方法と、津波数値計算により波力時系列を推定する方法について提案した。
- 2) 津波遡上水位より簡便的に評価できる被害判定図を作成した。その結果、津波遡上水位を利用して被害判定図から石油タンクの簡易の被害予測が可能となった。また、簡易判定図から危険性が高いと判断されるタンク、あるいは被害判定図が適用できない複雑な地形条件にあるタンクに関しては、詳細な数値計算を行うことで、より実用的な被害予測評価が可能になった。
- 3) 上記結果を踏まえ石油タンクの安全性予測手順を示した。

謝辞：本研究は、「消防防災科学技術研究推進制度」により実施されたことを付記する。また、本研究の遂行にあたり、東北大学大学院今村文彦教授から大変有益な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則(2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 911-915。
- 池谷毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・入谷剛・柳沢賢(2005)：陸上構造物に作用する津波波圧の時空間変動特性，海洋開発論文集，第21巻，pp. 121-126。
- 後藤智明・小川由信(1982)：Leap-frog法を用いた津波の数値計算法，東北大学工学部土木工学科資料，52p。
- 日本機械学会編(2003)：シェルの振動と座屈ハンドブック，技報堂出版，350p。
- 藤井直樹・大森政則・朝倉良介・池谷毅(2005)：津波による石油タンクに係わる被害について，地域安全学会梗概集，No. 16，pp. 87-90。
- Chiba, M., Yamashida, T., and Yamauchi, M (1989) : Buckling of Circular Cylindrical Shells Partially Subjected to External Liquid Pressure, Thin-Walled Structures, 8, pp. 217-333.