津波作用下における屋外タンク貯蔵用地での 流れ場と流体力に関する実験的研究

国松 航¹・西山 真司¹・古瀬 智博¹・
青木 伸一²・小竹 康夫³

¹ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kunimatsu_w@civil.eng.osaka-u.ac.jp
E-mail: furuse_t@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² フェロー会員 工博 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

³ 正会員 博(工) 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1)

港湾内に位置する石油コンビナートの貯蔵タンク用地に津波が遡上する状況を想定し、なるべく実際に近い条件で模型実験を実施した。高さ及び時間波形の異なる3種類の津波を発生させ、タンクに作用する津波流体力の特性を明らかにした。本研究では、貯蔵用地内の水位及び流速の特性、流体力の特性、タンク群体としての影響、防油堤の影響などについて論じた。大きな津波流体力は、津波遡上時に波面前面がタンクに衝突する際に発生する衝撃力、および遡上後の波の再反射に伴うモリソン波力的な流体力の2種類が存在することがわかった。特に津波波高が大きい条件では後者の流体力が卓越した。防油堤の効果については必ずしも波力の低減に寄与するわけではないこと、群体の影響については、水平力については低減する場合が多いが、鉛直力については増大する場合も多いことがわかった。

Key Words : Tsunami, hydrodynamic force, oil storage tank, harbor, impulsive force

1. はじめに

東日本大震災では石油コンビナート火災が発生し被害が拡大した。その原因の一つは遡上した津波による各種施設の被災であり、南海トラフ大地震に向けて対策を講じる必要がある。タンクに作用する流体力は護岸越流後の遡上水深を用いて算出するのが一般的である。朝倉ら¹⁾は2次元水理模型実験を行い、直立護岸を越流した津波の遡上特性から護岸背後の陸上構造物に作用する波力の評価手法を提案した。また、総務省消防庁²⁾は水理模型実験により津波遡上水深から石油タンクに作用する津波波力の推定方法を提案した。ここでは波力に係る無次元係数にフルード数を導入することにより流速を考慮した津波波力の算定を行っている。

しかし、特に港湾内などの複雑な実地形では津波が複雑な挙動を示すと考えられるため、護岸越流後の遡上水深を一律に与えるのは難しい。またタンクが群体となるような状況では、津波侵入に伴う水位や流れの分布が複雑になると思われ、従来用いられている波力算定式などの程度適用できるのか検討しておく必要がある。

本研究は、港湾内に位置する貯蔵タンクを対象として、

なるべく実際に近い条件で起こりうる現象をまず把握し、今後の検討課題を抽出することを目的として行ったものである。擬似津波を発生できる平面水槽での水理模型実験により、屋外タンク貯蔵用地に來襲する津波の挙動と、タンクに作用する流体力の特性を明らかにするとともに流体力の推定に対するいくつかの問題点を指摘した。

2. 水理模型実験

(1) 実験水槽

模型実験は、東洋建設鳴尾研究所の平面津波造波水槽（縦 30m, 横 19m）に 1/100 縮尺想定 of 模倣的な港湾模型を作製し、港湾の一部にタンク貯蔵用地を設置して実験を行った。平面水槽及び港湾の概略を写真-1 に示す。津波造波装置は、ストロークの大きなピストン型の造波機であり、任意の波形で造波することが可能である。

(2) タンク貯蔵用地模型

図-1 に、タンク貯蔵用地（縦 1.8m, 横 2.9m）内の円筒タンクの配置状況を示す。赤丸はタンクに作用する流体

力及び水位・流速を計測した位置を示している。円筒タンクはアクリル製で、直径 15cm、高さ 10cm である。また、防油堤は高さ 1cm でタンク群を囲むように設置した。水位については沖（造波機前面）での計測も行った。

(3) 造波ケース

実験に用いた擬似津波は、(a)沖の最大水位上昇量 6.9cm（造波板ストローク 1.4m/15s）の津波(Case-1)、(b)沖の最大水位上昇量 9.7cm（造波板ストローク 1.4m/10s）の津波(Case-2)、(c)Case-2 の津波を 3 波連続で作用させたもの(Case-3)、の 3 ケースを行った。すべてのケースで津波は沖の防波堤を越流して港内に侵入するが、Case-1 と、Case-2、Case-3 の津波ではタンク貯蔵用地への津波の侵入状況が異なっている。図-2 に Case-3 の造波板の動きを示す。図-3 に造波機前で計測した各ケースの水位変動を示す。図では沖での第一波ピーク時を 0s としている。

写真-1 港湾およびタンク貯蔵用地の状況

図-1 タンク貯蔵用地内のタンクの配置図

図-2 造波板の動き

(a) Case-1

(b) Case-2

(c) Case-3

図-3 造波機前面での水位変動

3. 実験結果

(1) 流れと水位変動

防油堤の有無による用地内での水位変動（タンクの設置は無し）の例として、特徴的であったケースを図-4 に示す。図(a)に示すように岸壁から離れた 3-2 のタンクの位置では、防油堤により、第一波の遡上水深が小さくなっており防油堤の効果が確認できる。一方、図(b)に示す岸壁近くに位置する 4-3 では、津波到来時の第一波の遡上水深が、防油堤が無い場合よりも大きくなっている。これは、津波が岸壁だけでなく防油堤においても跳ね上がるためである。図(c)では防油堤が長時間水位を上昇させているが、防油堤の有無にかかわらず用地内では比較的浸水深が大きくなり、水位が下がりにくい傾向があることがわかった。

(2) 波力の特性

1-2 の位置のみにタンクを設置したケースの水平波力及びタンクを設置していない場合の 1-2 の位置での水位・流速の変化を図-5 に示す。Case-2、Case-3 では、第一波到達時（水塊衝突時）の波力が最大であり、Case-3 においては後続の 2 波の到達時にもそれぞれ大きなピークを示しているが、第一波が流速のピークに対応して波力がピークを示しているのに対して、第二波、第三波は水位

図4 防油堤有無による水位の変化 (タンクの設置は無し)

図5 水平波力及び水位・流速の時系列変化

(波力; 1-2 地点のみにタンクを設置, 水位・流速; タンクの設置は無し)

図6 鉛直波力と浮力の比較

の上昇とも対応しており浸水後の波の作用を受けて発生していることがわかる。一方、波高の小さな Case-1 の場合では、第一波がタンクを通過する時刻では波力はピークを示さず、水位がある程度上昇し、周辺地形からの反射波が作用する時間帯で最大値を示した。次に、鉛直波力と浮力の比較を図-6 に示す。ここに浮力はタンクを設置しない場合の水位をもとに静水状態を仮定して計算した力である。2-1 のタンクの位置では他の位置よりも鉛直波力の変動傾向をよく再現できており、特に Case-1 では

再現性が高い。一方、4-3 のタンクの位置では、浮力は際立ったピークを示し鉛直波力とは大きく結果が異なった。Case-3 は数回にわたり入射波と反射波が用地内に来襲し水面の変動が大きく、静水状態を仮定して浮力を計算すると過大に評価してしまうことがわかった。また、それぞれの鉛直波力の変動を見ると(b)の 4-3 地点の Case-3 では一定の鉛直波力を維持する傾向にあり、(a)の 2-1 地点の Case-1 では鉛直波力は水位変動に追従して変動するという結果となった。

図-7 水平波力変動の比較 (单体と群体)

図-8 タンク单体と群体での最大波力の比較

(3) タンク单体と群体の比較

実際のタンク貯蔵用地では、タンクが群を成しているケースが一般的である。すなわち、実際に起こりうる現象を把握するためにはタンク群の中に置かれたタンクに作用する力についての考察が必要である。図-7に单体と群体の場合で波力変動が異なるケースを比較して水平波力の時系列を示す。2-1のタンクの位置では、最後列であることから第一波による波力は群体である方が低減されることが確認された。また、第一波到達時には水位・流速ともに单体である場合よりも小さいため貯蔵用地背面の防潮堤による反射波の波力も低減される。3-2のタンクの位置では最前列のタンクによる波力低減効果が考えられるが、本実験では单体である場合とあまり差は見られなかった。これは、貯蔵用地に対して津波が斜め右方向に入射するためであると考えられる。第一波以降のピークをみると单体よりも大きな値を示していることから、

群体の場合では周囲にタンクがあることで波力が大きくなる可能性があることがわかった。4-3のタンクの位置では、群体である方が最前列であるにもかかわらず第一波による波力が小さくなったが、岸壁及び防油堤での跳ね上がりには差があったとも考えられる。一方、第三波は群体の方が单体よりも大きく、また群体のこのケースでは最大の波力であった。第三波到達時には港内・貯蔵用地ともに水位は上昇しており岸壁及び防油堤による跳ね上がりは生じない。例で示したケースでは最前列・中央列に関しては波力の大きさに少し違いが生じているものの変動傾向は類似する。最後列では、波力は大きく低減され4-1のタンクの位置でも同様の結果であった。次に、单体と群体の場合での最大水平波力と最大鉛直波力の比較を図-8に示す。水平波力については、概ね单体である場合の方が大きな値を示した。岸壁に最も近い位置では波力は同じであると想定されるが、岸壁及び防油堤によ

り入射波が跳ね上がるように越流するため、計測値にはばらつきが見られた。鉛直波力については、どちらかの場合が大きい値を示すとは言い難い。また、3 ケースとも類似した値を示すこと、図-6 のように水塊衝突時に鉛直波力が大きなピークを示していないことから、最大鉛直波力は水位上昇後の浮力ではほぼ決まると考えられる。

(4) 波力と流れの方向

ここで、波が最大値を示すときの流れ場の特徴を把握するために、波力及び流れの作用方向を比較する。図-9 に波力最大発生時の波力と流れの作用方向を示す。波力及び流れはベクトルで表されている。下向きが沖向き方向であり、○印で示したタンクの位置では第一波で波力が最大値を示した。流れと波力の作用方向がほぼ一致している地点が多いが、方向が一致していない地点もみられる。群体では単体よりも全体的に流速が小さくなり、また第一波で波力最大値を示さない位置が増えた。2-3 のタンクの位置では、単体・群体とも波力のベクトルは概ね一致しているが、一方で、流速が大きく異なっている。タンクの位置による波力の特徴は明確ではないが、どの位置でも津波の入射方向に最大波力をとる傾向にあった。

(5) 算定式の適用性に関する検討

本実験の Case-3 の第二波以降のように浸水後に発生する波力は抗力及び慣性力で変動をうまく再現できると考えられる。この場合、円筒タンクに作用する流体力の算定は、以下のモリソン式を用いることができる。ただし、

ここでは波力と流速の作用方向が一致すると仮定する。

$$F = C_M \rho V \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho A U |U| \quad (1)$$

ここに、 C_M : 慣性係数、 C_D : 抗力係数、 U : 流速、 ρ : 密度、 V : 浸水部分の体積、 A : 円筒タンク浸水時の波力作用方向投影面積、であり $C_M = 2.0$ 、 $C_D = 1.2$ を用いる。図-10 は 4-1 地点、Case-3 で計測された波力を、式(1)のモリソン式から求められる波力と比較したものである。第一波衝突時の衝撃力を除いて時系列を比較すると、それらの波形の時系列はよく一致していることがわかる。ただし、定量的な予測にはさらに検討が必要である。

図-11 は、第一波衝突時に計測された衝撃力について、遡上水深の 2 乗に比例するとする朝倉式に代表される静水圧的な表現と、流速の 2 乗と水位の積に比例するとする波面衝突による衝撃力の表現のどちらが適切であるかをみるために、それぞれ、 $\rho g D \eta^2$ と $\rho D u^2 \eta$ を横軸にとって衝撃力の最大値をプロットしたものである。ここに、 D : タンク直径、 η : 遡上水深、 u : 流速である。図-11 の上図より 2-3、4-3 といったタンク最前列の位置と中央列・最後列の位置の各々でその傾きは異なるものの、それぞれ比例関係にあることがわかる。これより、静水圧的な表現を用いる場合には岸壁からの距離によって波力係数を低減させる必要があることを示している。一方、図-11 の下図では、データ自体のまとまりは良いものの、すべてのデータを統一的に説明できるまでには至っておらず、さらなる検討が必要である。これより、円筒タンクについても、朝倉らが壁面に対して行った実験と同様のメカ

※下向きが沖向き方向、○印は第一波で波力最大値を示した位置

図-9 波力最大時の波力と流れの作用方向と大きさ

ニズムで衝撃力が発生していると考え、静水圧的な表現の式の波力係数をタンク形状や岸壁からの距離を考慮して適切に修正して用いるのが現実的であると思われる。

図-10 モリソン式との比較

図-11 第一波衝突時の波力特性

4. おわりに

平面津波造波水槽に模擬的な地形を作製し、実際に近い現象から流れ場と流体力の計測を行った。本実験では以下のことがわかった。

- 1) 防油堤により貯蔵用地の水位上昇が長時間続き、岸壁近くのタンクの位置では水塊が跳ね上がりタンクに衝突する
- 2) 水面変動が小さい場合、鉛直波力は静水状態を仮定して求めた浮力で算定できる
- 3) タンク群体では単体の場合よりも最大水平波力は概ね小さくなる
- 4) 第一波衝突時の波力と浸水後の波力では性質が異なり、波力の時系列変動を求めるために衝撃力と抗力・慣性力を分けて考える必要がある
- 5) 第一波衝突時の波力については、朝倉の式と同様に静水圧的な表現が妥当であるが、岸壁からの距離を波力係数に考慮する必要がある。

謝辞：実験を行うにあたって、実験準備からデータ整理に至るまで終始協力してくださった東洋建設株式会社、鳴尾研究所の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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: 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, 2000.
- 2) 総務省消防庁: 参考資料 7, 屋外貯蔵タンクに作用する津波波力の算定方法, 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書, 2009.

FLOW FIELD AND HYDRODYNAMIC FORCES ON TANKS BY TSUNAMI RUNNING UP ON A STORAGE AREA IN A HARBOR

Wataru KUNIMATSU, Shinji NISHIYAMA, Tomohiro FURUSE,
Shin-ichi AOKI and Yasuo KOTAKE

Model experiments on hydrodynamic forces by run-up tsunami were carried out in a wave basin, where three types of tsunami were generated. Circular cylinders were used as models of oil storage tanks located at a storage area in a harbor. A force transducer was attached to the cylinders and three-component forces acting on the cylinders were measured. Measurement of water levels and velocities were carried out in the absence of a cylinder. Characteristics of the hydrodynamic forces were discussed by comparing wave and current fields. Impulsive forces were observed at an instance of collision with run-up tsunami. After the tsunami ran up, the water level rose for a long time and thus the drag and inertia forces became predominant. The effects of protection walls for oil spill and interaction with other cylinders were also discussed.