

港内のエネルギー貯蔵施設に及ぼす遡上津波による流体力

國松 航 大阪大学大学院工学研究科
西山 真司 大阪大学大学院工学研究科
古瀬 智博 大阪大学大学院工学研究科
青木 伸一 大阪大学大学院工学研究科
荒木 進歩 大阪大学大学院工学研究科
小竹 康夫 東洋建設(株)鳴尾研究所

HYDRODYNAMIC FORCES ACTING ON ENERGY STORAGE FACILITIES IN A HARBOR BY TSUNAMI INUNDATION FLOW

Wataru KUNIMATSU Graduate School of Engineering, Osaka University
E-mail:kunimatsu_w@civil.eng.osaka-u.ac.jp
Shinji NISHIYAMA Graduate School of Engineering, Osaka University
Tomohiro FURUSE Graduate School of Engineering, Osaka University
Shinichi AOKI Graduate School of Engineering, Osaka University
Susumu ARAKI Graduate School of Engineering, Osaka University
Yasuo KOTAKE Naruo Technical Research Institute, Toyo Construction Co.

Abstract

Model experiments on hydrodynamic forces by run-up tsunami were carried out in a wave basin, where three types of tsunami-like waves were generated. Storage tanks were modeled as circular cylinders and spheres. Horizontal circular cylinders were also used as models of pipelines. A force transducer was attached to them and three-component forces were measured. Measurement of water levels and velocities were carried out in the absence of the models. Characteristics of the hydrodynamic forces were discussed by comparing with wave and current fields. Differences of the forces among the models were also highlighted. 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.

1 はじめに

東日本大震災では石油コンビナート施設において津波による被害が発生した。その特徴として主に貯蔵タンクが被災していること、津波により被害が施設全体に広がっていることが挙げられる¹⁾。石油コンビナート等のエネルギー貯蔵施設が集まる施設は沿岸域に多数存在しており、今後予想される南海トラフ地震などにより津波被害を受ける可能性が高く、対策を講じる必要がある。タンクに作用する流体力は朝倉らの算定式^{2),3)}に代表されるように、護岸越流後の遡上水深や流速を用いるのが一般的である。しかし、実際の港湾内などの複雑な実地形上では津波が複雑な挙動を示すと考えられるため、これらの諸量を与えるのは難しい。また、タンクが群体で設置されるような状況では、津波侵入に伴う水位や流れの分布がさらに複雑になると考えられ、従来の波力算定式がどの程度適用できるのか、十分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。津波を模擬した波高の大きな長周期波を発生できる平面水槽内での水理模型実験により、港内に設置された貯蔵用地に襲す

る津波の挙動とともに、貯蔵タンクおよびパイプラインに作用する津波流体力の特徴を明らかにした。

2 水理模型実験

2.1 実験水槽

模型実験は、東洋建設(株)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製作し、港湾の岸部分にタンク貯蔵用地を設け実験を行った。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式造波機であり、任意波形の疑似津波を造波することができる。

2.2 タンク貯蔵用地模型

図-1 に、タンク貯蔵用地(縦 2.1m, 横 2.9m)内の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, 球形タンクは直径 10cm, 地面と球体下端との距離(クリアランス) 1cm, パイプラインは半径 5mm, 長さ 40cm, 地面とのクリアランス 1.5cm 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。写真-2

はタンク貯蔵用地に円筒タンク・球形タンクを群体として設置したものである。

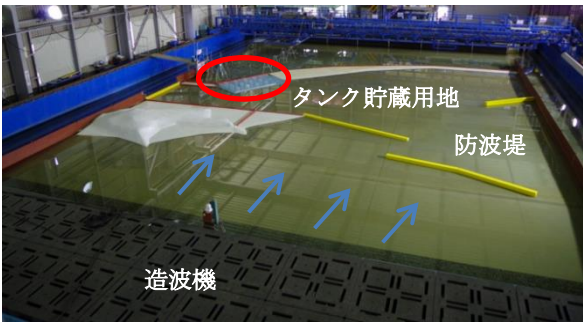


写真-1 港湾およびタンク貯蔵用地の状況
(矢印：疑似津波進行方向)

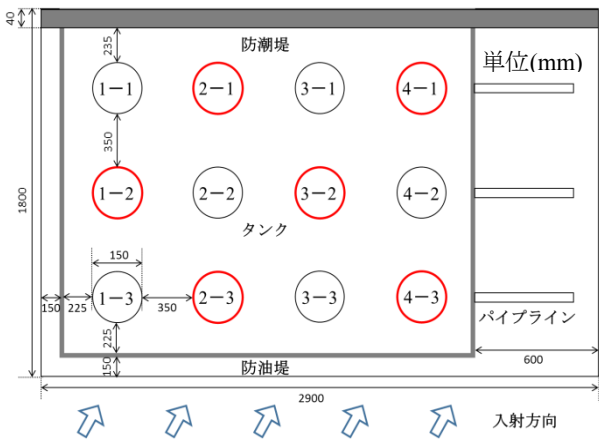


図-1 タンク貯蔵用地内のタンクの配置図



写真-2 円筒・球形タンクの群体

2.3 造波ケース

実験に用いた疑似津波は、(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。

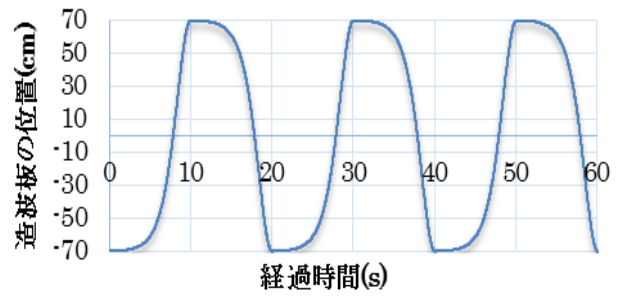
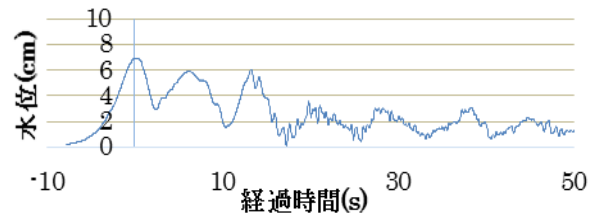
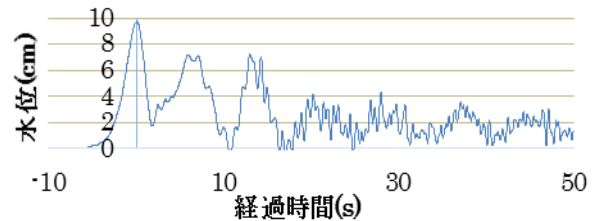


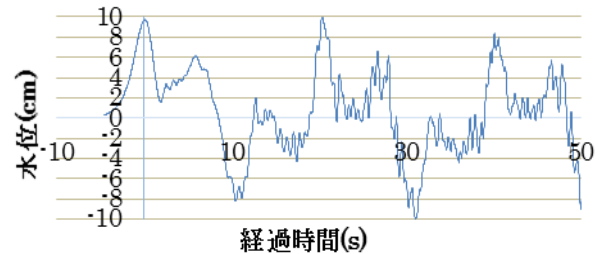
図-2 造波板の動き



(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3

図-3 造波機前面での水位変動

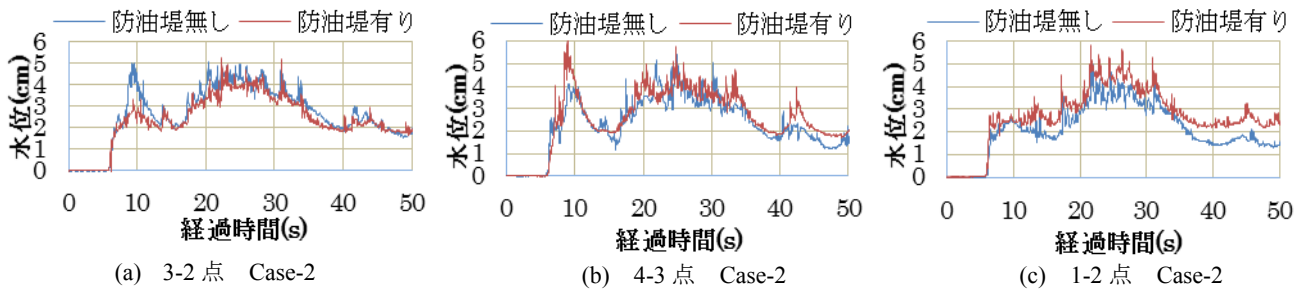


図-4 防油堤有無による水位の変化（タンクの設置は無し）

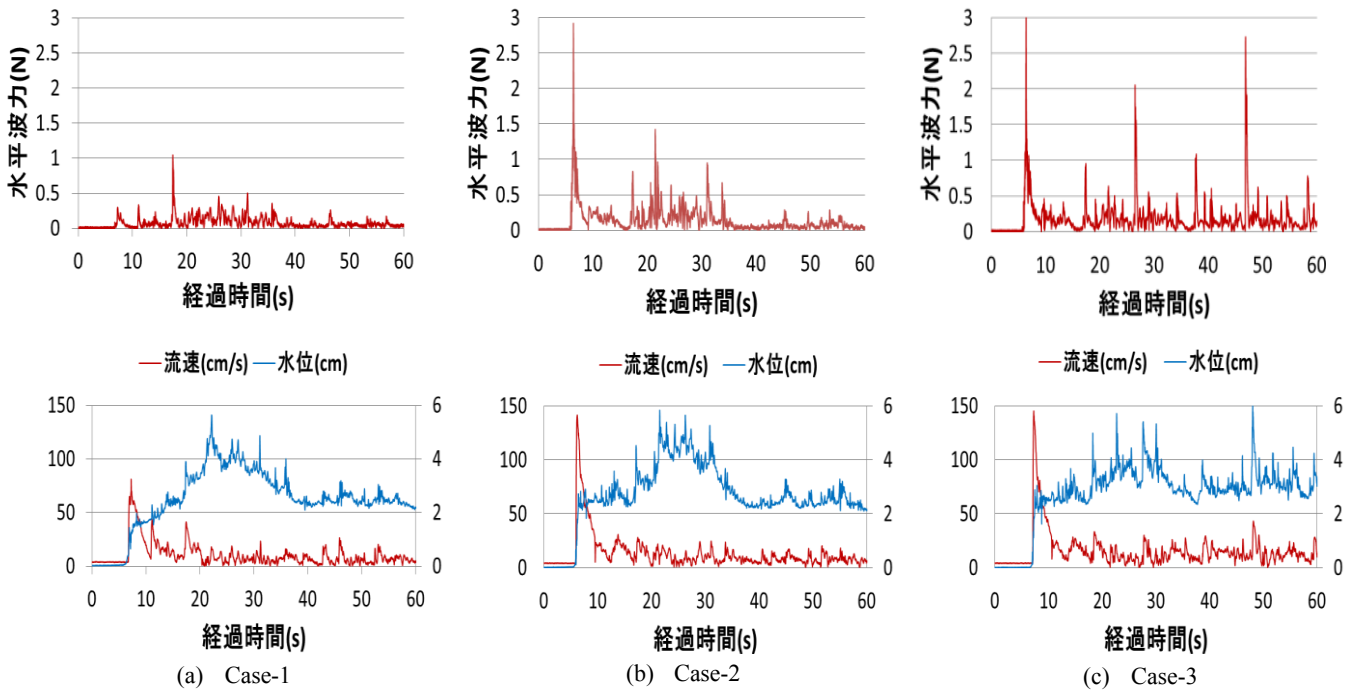


図-5 水平波力及び水位・流速の時系列変化

（波力；1-2点のみにタンクを設置，水位・流速；タンクの設置無し）

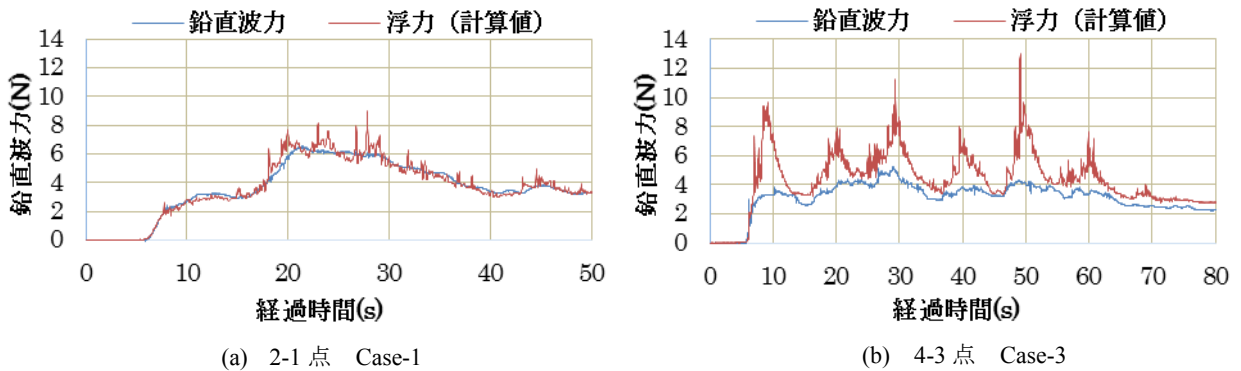


図-6 鉛直波力と浮力の比較

3 実験結果

3.1 水位変動

タンクなどを設置せず計測した貯蔵用地内の水位変動の特徴について、特に防油堤の影響に着目して述べる。Case-2の波について、特徴的であった3つの点での水位変動を図-4に示す。タンク貯蔵用地の中央部に位置する3-2点では、防油

堤により第一波の遡上水深が小さくなっており、水位の低減効果が確認できる。一方、防油堤直後に位置する4-3点では、第一波の遡上水深が、防油堤がな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より跳ね上がるためである。また、1-2点にみられるように、防油堤があることで水位が長時間上昇し下がりにくくなる傾向があることもわかる。

3.2 波力特性

(1) 円筒タンク

まず、単体タンク(用地内にタンク模型を一体のみ設置し、そのタンクに作用する波力を計測)に作用する波力特性について述べる。図-5は1-2点での水平波力及び、タンクを置かない状態で計測した水位・流速の時系列である。波高が小さいCase-1では、波力は第一波到達時にピークを示さず、水位のピークともずれている。波力のピークは、水位がある程度上昇し、周辺地形からの反射波が円筒タンクに作用する際に発生する。一方、Case-2、Case-3では、第一波到達時(水塊衝突時)に波力が最大値を示した。また、Case-3においては、後続の2波到達時にもそれぞれ大きなピークを示しているが、第一波では流速のピークに対応しているのに対して、第二波、第三波では水位の上昇に対応しており、浸水後の波の作用を

受けていることがわかる。次に単体タンクに作用する鉛直波力について述べる。図-6は計測した鉛直波力と、タンク無しで計測した水位から静水圧を仮定して算出した浮力の比較である。計測値・算出浮力ともに鉛直上向きの力を正としている。2-1点のCase-1では鉛直波力の変動傾向をよく再現できているが、4-3点のCase-3では浮力が際立ったピークを示すのに対し、鉛直波力は一定の値を維持する傾向にあり、水位変動が大きい場合には浮力は鉛直波力を過大評価する結果となった。次に単体と群体(用地内の計測点に全てタンクを設置し計測点のタンクに作用する波力を計測))の比較について述べる。図-7に単体と群体の場合で波力が大きく異なるケースについて水平波力の時系列を示す。2-1点のタンク位置では、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、2-1点では第一波到達時

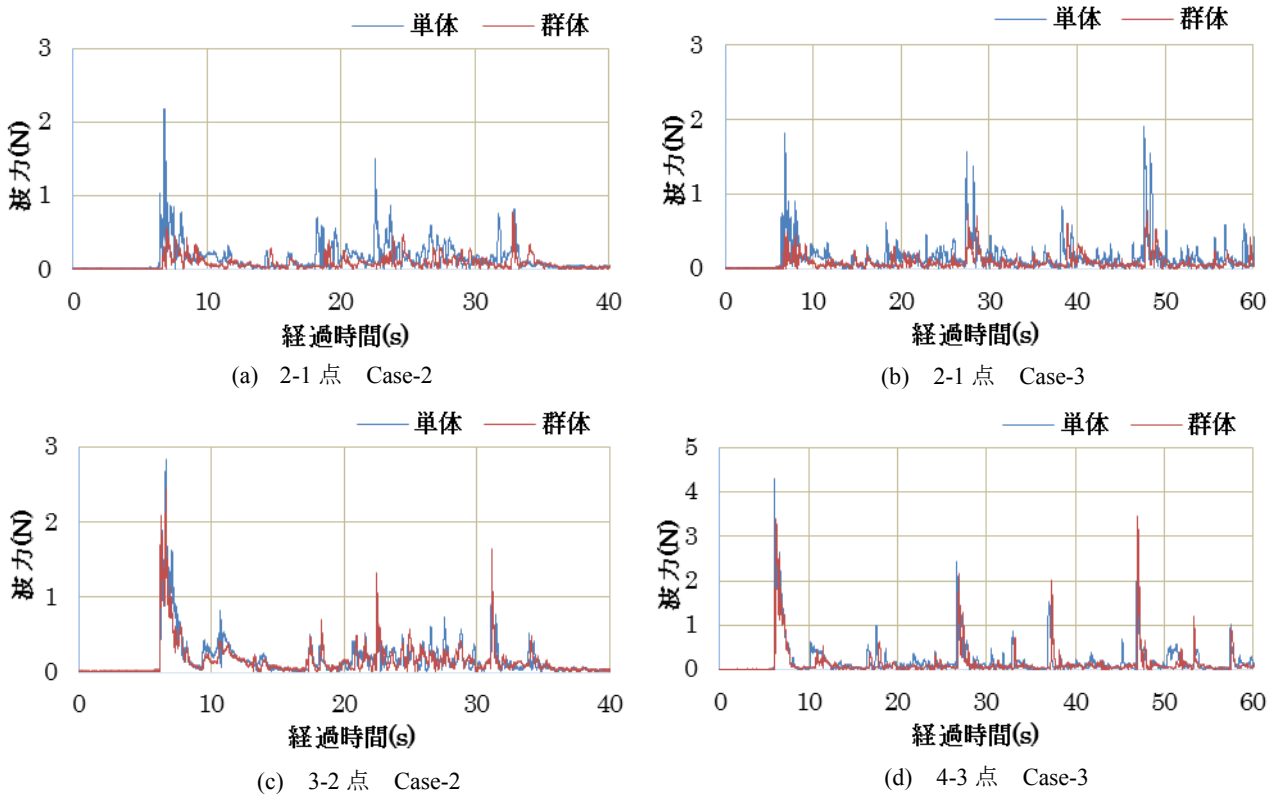


図-7 水平波力変動の比較 (単体と群体)

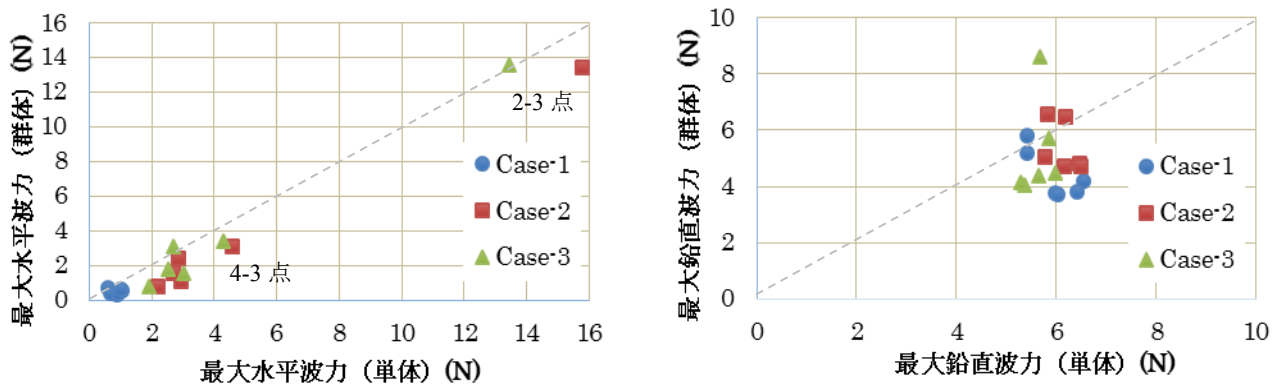


図-8 タンク単体と群体での最大波力の比較

には水位・流速ともに単体の場合よりも小さいため、

図の二回目、三回目の波力のピークを見ればわかるように貯蔵用地背面の防潮堤による反射波も低減される。3-2 点のタンク的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、本実験では単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単体よりも大きな値を示していることから、群体の場合に周囲にタンクがあることで波力が大きくなる可能性もあることがわかる。次に、単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、概ね単体の方が大きな値を示した。岸壁に最も近い位置(2-3 点・4-3 点)では波力は同じであると想定されるが、岸壁及び防潮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、両者に大きな違いは見られなかった⁴⁾。

(2) 球形タンク

球形タンクについては、群体の場合についてのみ実験を行った。図-9 は最前列に位置する 2-3 点の Case-1 および Case-2 の水平波力を、タンクを置かない状態で計測した水位・流速と比較して示したものである。円筒タンクのケースと比較すると波力そのものは全体的にやや小さいが、Case-1 では浸水後に、Case-2 では第一波の衝突時に最大値が発生するのは同じである。一方、図-10 は各計測点での Case ごとの最大水平波力の比較と 4-1 点の Case-1 の水平波力の時系列である。4-1 点は Case-1 では計測点の中で最大であり、水平波力のピークは高い水位を保ちながら反射波が作用した時間帯に相当することが確認されており、唯一群体の円筒タンクよりも最大水平力が大きくなった点である。群体の場合、奥のタンクほど波力が小さくなる傾向にあるが、2-3 点の Case-2・Case-3 を除くと、4-1 点は最も奥に位置する点であるにも関わらず、比較的大きな波力が計測されている。これは、4-1 点は波力計測点の中で最も水位が高くなる点であり、高い水位が持続する点だからである。したがって、球形タンクの浸水深が大きくなることにより受圧面積が増大したためと考えられる。このことから、球形タンクについては、水位変化が水平波力に及ぼす影響が大きいと考えられる。次に、鉛直波力について述べる。図-11 は 4-1 点および 4-3 点で計測された鉛直波力と水位の時系列である。水位が高くなると、波が球形タンクに作用する度に非常に大きな波力が発生していることがわかる。特に 4-3 点では、水平波力よりも圧倒的に大きな波力が

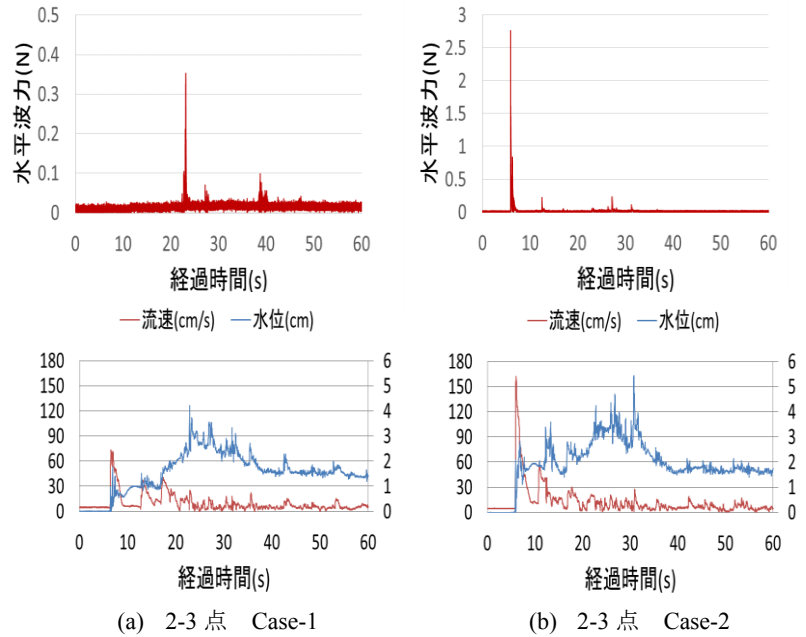


図-9 水平波力及び水位・流速の時系列変化
(水位・流速；タンクの設置無し)

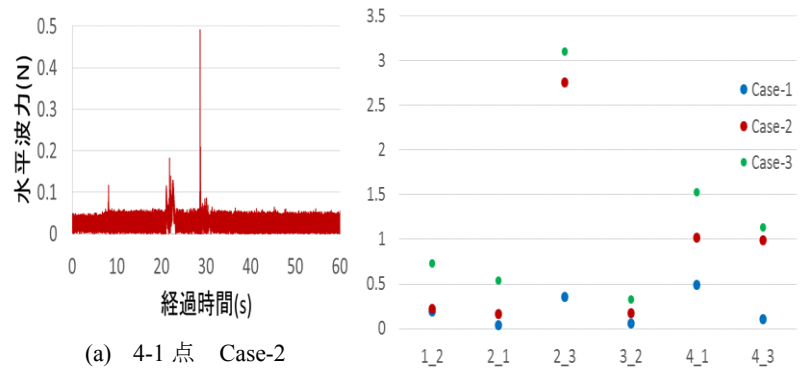


図-10 水平波力の時系列変化・各 Case の最大水平波力比較

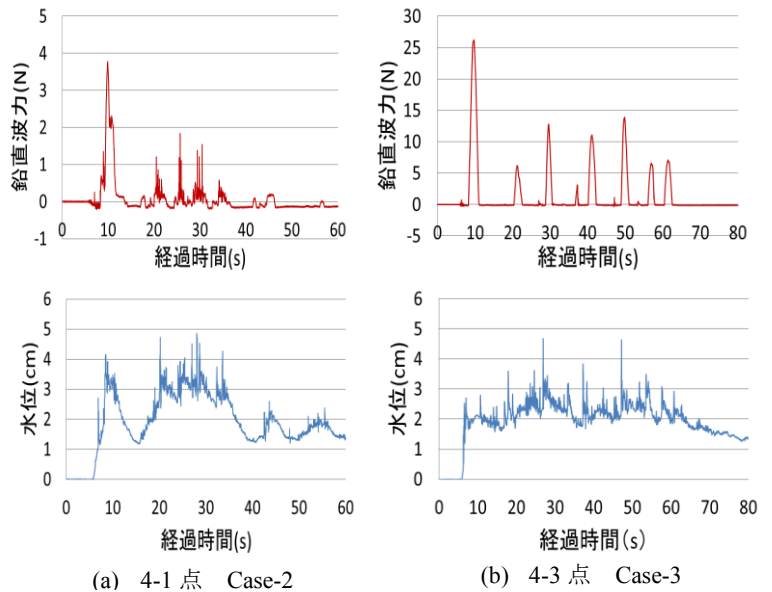


図-11 鉛直波力・水位の時系列変化

計測されており、本実験で計測された最大の波力であった。図-6の円筒タンクの鉛直波力と比較すると、この鉛直波力は球形タンク特有のものであり、球形タンクに作用する波力については、鉛直波力に十分注意しなければならないことがわかった。

(3) パイプライン

まず、単体のパイプラインに作用する波力について述べる。図-12に5-1点および5-3点での各ケースの水平波力の時系列を示す。5-1点ではどのケースにおいても水平波力のピークはある程度浸水してから発生しており、ピーク値はどのケースでもあまり変わらない。一方、5-3点では、円筒タンクと同様にCase-1ではある程度浸水深がある時間帯にピークを計測し、Case-2、Case-3では第一波目到達時においてCase-1に比べると大きなピークを計測している。5-3点においては波が護岸で跳ね上がり急激な水位上昇が生じ、パイプラインに波が衝突するためである。鉛直波力に関しては、図-13に5-3点のCase-2の鉛直波力と水位変動の時系列を示すが、波がパイプラインに衝突する度に鉛直上向きに力が発生し、反射波が重なり合いパイプラインに覆いかぶさるように作用する時に鉛直下向きの力が発生する。また、第一波到達時には、円筒タンクに作用する力よりも大きな力を計測することから、球形タンクと同様に、鉛直波力はパイプラインについても重要である。次に、パイプラインにおける単体と群体の比較について述べる。ここに言う群体とは、パイプライン以外にもタンク群が設置されていることを意味している。図-14は単体とそれぞれの群体（円筒の群体と球形の群体）で計測された最大波力の比較である。鉛直波力は鉛直上向きの力を正としてプロットしている。水平波力に関しては、単体がどちらの群体よりも大きな波力を計測しており群体どうしはほぼ同等の波力を計測する結果となった。それに対して、鉛直波力では、護岸から遠い5-1点では単体、群体ともにほぼ同等の波力を計測した。一方で、護岸に近い5-3点では群体の波力が単体にくらべて大幅に小さくなるという結果であった。

3.3 算定式の適用性に関する検討（単体円筒タンク）

本実験の各ケースにおいて計測した単体円筒タンクに作用する水平波力については、第一波の衝撃的な波力とともに、第一波以降の円筒タンクが浸水してから作用する波力も無視できない大きさであることがわかった。

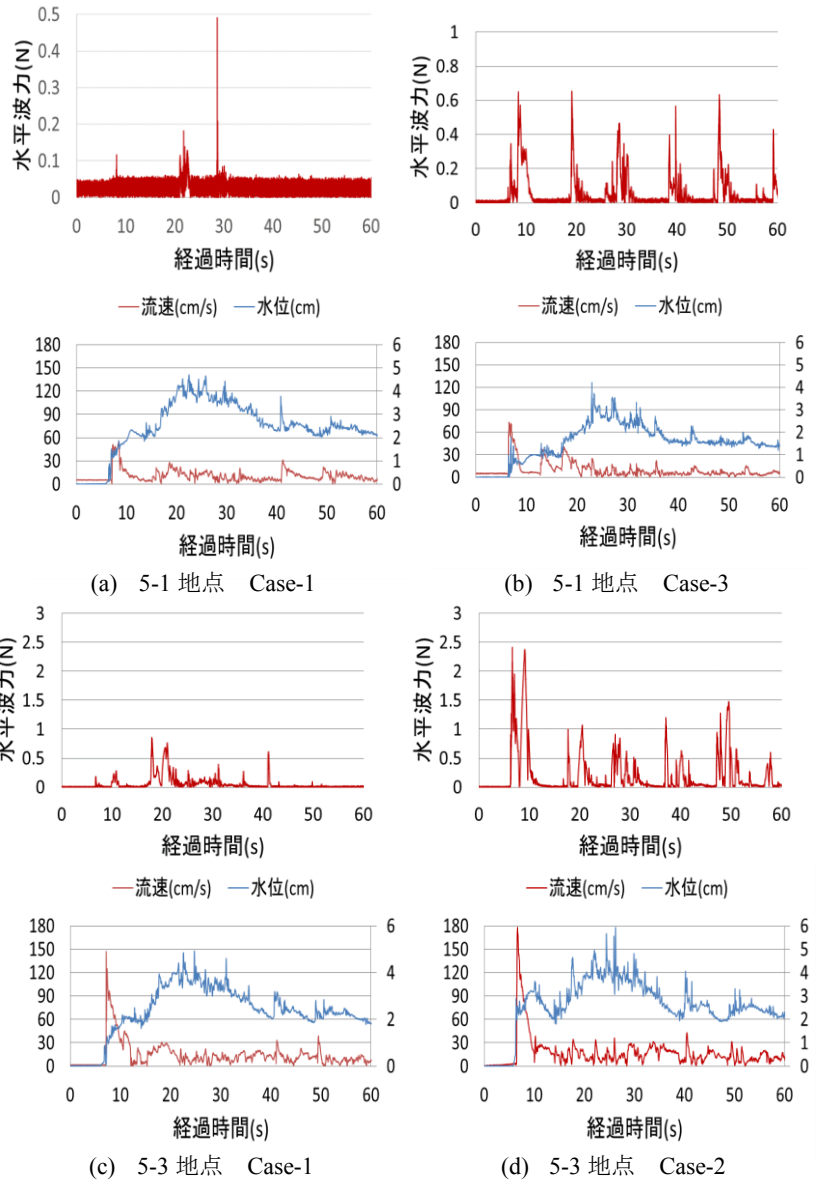


図-12 水平波力及び水位・流速の時系列変化

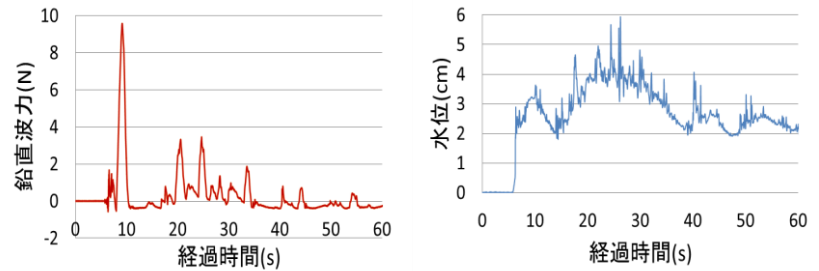


図-13 5-3点, Case-2 鉛直波力・水位の時系列変化

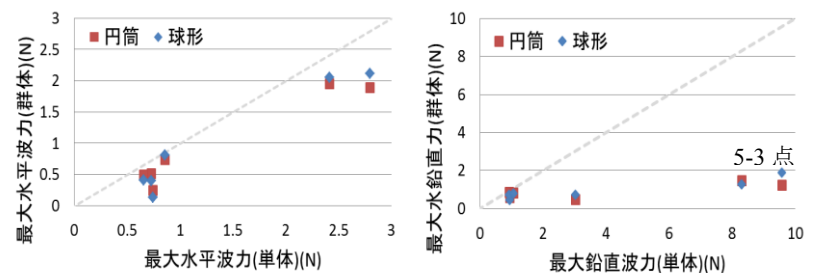
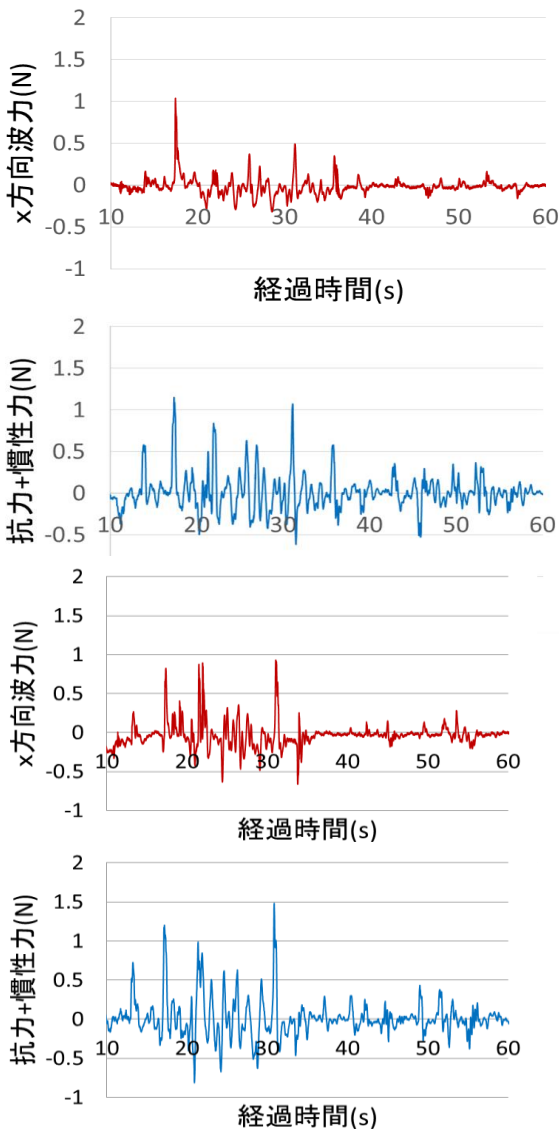


図-14 パイプライン単体と群体での最大波力の比較

た。この波力については、通常のモリソン式で推定可能と考えられるため、タンクを設置していない状態での水位と流速変動から、次式のモリソン式を用いて計算して比較した。ただし、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-15 は 1-2 点の Case-1 と Case-2 の X 方向（流速計・分力計ともに岸沖方向の岸向きが正）それぞれの計測された波力を式(1)のモリソンの式から求められる X 方向の波力と比較したものである。第一波目以降の再現性を見るために 10s からの時系列としている。どちらのケースにおいてもピークが出る時刻、ピーク値の大きさをよく再現できている。しかしながら、流速データのスムージングの方法や慣性係数・抗力係数の検討がさらに必要であると考えられる。



(b) 1-2 地点 Case-2

図-15 計測波力(方向)と抗力+慣性力の和の比

4 おわりに

平面津波造波水槽に模擬的な港湾地形を作製し、実際に近い状態で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く場合がある。また護岸近くのタンクの位置では津波が跳ね上がり衝突する。
- 2) 円筒タンクに作用する水平力は、第一波による衝撃力と浸水後の波による流体力の2つが同程度に重要である。また鉛直波力については、水面変動が小さい場合には静水状態を仮定して求めた浮力で概ね算定できる。
- 3) 球形タンクおよびパイプラインについては、円筒タンクに比べて鉛直力の評価が重要であり、水位上昇・水位変動の影響を強く受ける。
- 4) 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。
- 5) 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。第一波衝突以降の波力の時系列変化は抗力と慣性力の和で再現できる。しかし、抗力係数・慣性力係数など課題は残る。

実際の港湾では津波が複雑な挙動を示すため、従来の算定式そのままでは陸上のタンクに作用する波力を精度よく算定することは難しい。同時に起こる様々な現象をいかに複合できるかが課題である。

謝辞

本研究は、大阪大学専攻横断的研究組織である「石油コンビナート防災研究イニシアティブ」の研究の一環として実施したものである。また、実験にあたっては東洋建設鳴尾研究所の皆さんに多大なご協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 危険物保安室 特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設及び、石油コンビナート施設の地震・津波対策について
- 2) 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.
- 3) Asakura, R., Iwase, K., Ikeya, T., Takao, M., Kaneto, T., Fujii, N. and Ohmori, M., The Tsunami Wave Force Acting on Land Structures, Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1191-1202, 2002.
- 4) 國松航, 西山真司, 古瀬智博, 青木伸一, 小竹康夫：津波作用下における屋外タンク貯蔵地での流れ場と流体力に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発特集号 vol.71.No.2)