

円筒形構造物に作用する津波力に関する水理模型実験*

東北大学 鶴谷裕紀 佐藤公亮 植松康
 秋田工業高等専門学校 寺本尚史
 秋田県立大学 小幡昭彦

1. 研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、建築構造物に対する被害は地震そのものによる被害よりも津波による被害が甚大であったと報告されている。津波の被害は人々の生活施設だけでなく、気仙沼湾などの沿岸部に設置されていたオイルタンクにも及んだ(図1)。オイルタンクには危険物等が貯蔵されている場合が多く、オイルタンクの転倒や破損により内容物が流出して水上火災が発生するなど、広範囲に二次被害を引き起こした(図2)。

このような薄肉の側板を持つ構造体の場合、空の状態で面外剛性が小さくなるため、津波力作用時に側板が座屈するなどの被害が予想される。東北地方太平洋沖地震における実際の被害内容としては浮力により浮き上がり、転倒や滑動を起こすといったタンク全体が一体に力を受ける被害、大きな水圧により側板の座屈を起こすといった局部的な被害などがあった。

東北地方太平洋沖地震以降、その被害の規模と印象が大きかったことで、建築物に対する津波荷重が注目され、研究が増え始めている。日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説」¹⁾(以下、「荷重指針」と称す)にも2015年の改定により、津波荷重の章が盛り込まれた。しかし、一般的な矩形構造物に対して、動的な荷重を等価静的荷重に置き換えた津波荷重の算定式を与えているものの、オイルタンクのような円筒形構造物に対しては規定されていない。したがって、オイルタンクに対して合理的な耐津波設計法を確立するために、円筒形構造物に作用する津波荷重を適切に評価する必要がある。

本研究では水理模型実験に基づき、オイルタンクに代表される円筒形構造物に作用する津波力の性状を把握し、津波荷重の適切な評価方法のための知見を提示することを目的とする。



図1 オイルタンクの津波被害



図2 津波による二次被害

*Hydraulic model test on tsunami force acting on cylindrical structures by Hiroki Kameya, Kosuke Sato, Yasushi Uematsu, Naofumi Teramoto, and Akihiko Obata

2. 水理模型実験の概要

2.1 実験水路

実験は秋田工業高等専門学校の実験水路で行った。水路概要を図3,4に示す。水路の全長は15 m, 水路幅は0.8 m(内法幅0.6 m), 高さ0.8 mであり, このうち, 約3.0 mが貯水槽となっている。津波の押し波は貯水槽に一定量の水を溜め, コンプレッサーによって開閉式の遮水壁を瞬間に開放することで再現する。水路後方には消波装置と排水口が設置されている。

2.2 模型概要と設置位置

本実験では, 円筒形の中型オイルタンクを対象とする。オイルタンクは一般にオーダーメイドであるが, 本研究では気仙沼に設置されており, 東北地方太平洋沖地震による津波の被害にあったオイルタンクに基づき, その形状に近い, 直径30 m, 高さ15.7 mの円筒形中型オイルタンクを対象とする。模型の概要を図5に示す。幾何学的縮尺率を1/250とし, 外径120 mm, 高さ62.8 mmである。これは, 既往の研究²⁾に基づき水路幅の閉塞率を考慮し, 水路幅に対して模型の見付け幅が1/5以下になるように設定したものである。

模型, 各測定器具の測定位置を図6に示す。模型の位置は図4に示す通り, 流入口で起こる乱れが減少し始め, 反射波が到達するまでの時間が十分に取れる, 遮水壁から6.5 m, 後方の消波装置より3.5 mとした。流速計と波高計は模型前後の値を測定するために設置するが, 計測器のフレームなどにより波に乱れが生じたため, 模型位置から左右にずらして設置した。流速計は模型中央から前方へ207 mm, 後方へ273 mmの位置とした。波高計は模型中央から前後110 mmの位置とした。流速計, 波高計, 共に左右方向は模型中央から150 mm, 壁面から150 mmの位置とした。

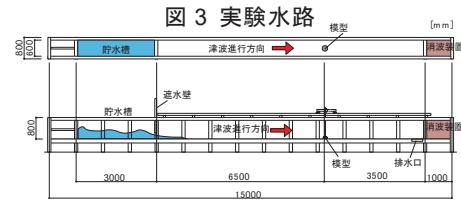
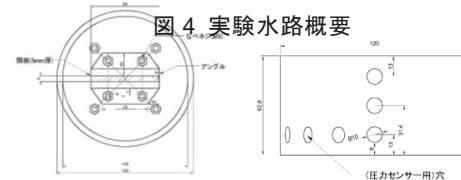
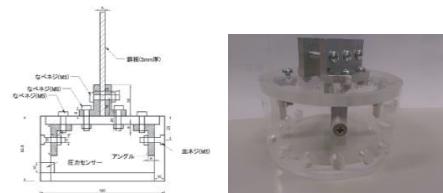


図3 実験水路



(a) 平面図

(b) 立面図



(c) 断面図

(d) 実物写真

図5 模型概要

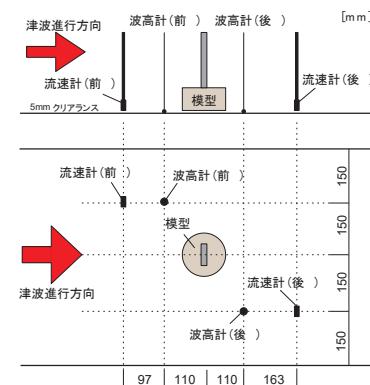


図6 測定器具配置図

2.3 津波波力と津波波圧の測定方法

図7に津波波力測定の概要を示す。ここで、波力とはオイルタンク全体にかかる平均流れ方向の荷重を指す。津波波力測定には片持ち型鋼板を用いる。鋼板を水路上の架台から吊るし、先に模型を設置する。荷重が作用したときの2点の曲げひずみ度 ε を鋼板に貼り付けたひずみゲージから計測する。得られた曲げひずみ度 ε を応力度 σ にし、応力度 σ から曲げモーメントに変換する。2点の曲げモーメント勾配からせん断力を算出し、これを模型に作用する津波波力とする。なお、測定にあたっては、津波作用時の鋼板のひずみと模型の回転によって模型底部分と床との衝突を防ぐため、模型と水路床との間に5 mmクリアランスを設ける。ひずみゲージ間の距離は既往の研究²⁾に基づき、300 mmとした。ひずみゲージの接続方法は4ゲージ法を採用した。

津波波圧は、鉛直方向の分布と周方向の分布を測定する。測定点は模型が左右対称であるため、周方向は片側180度の範囲に22.5°ピッチで9点、鉛直方向には底部から13 mm, 31.4 mm, 49.8 mmの3点の計27点である。測定点を図8に示す。津波波圧の測定には圧力センサーを用いる。しかし、本実験で使用する圧力センサーは4つであるため、全27点同時測定ができない。そこで、今回の実験では以下のようないくつかの測定方法を採用する。測定方法の概要を図9に示す。周上9点のうち一ヶ所は鉛直方向に3点圧力センサーを設け、主測定点とする。模型を回転させることで、主測定点の位置を変化させ、周方向の波圧を得る。主測定点と同時に、波に正対する圧力センサー位置を基準点($\theta = 0^\circ$)としてそこで得られる波圧を同時測定することで、津波衝突時刻や継続時間などを揃える。これを22.5°ごとに9回、模型を回転させて測定し、基準点での圧力変動と他の点での圧力変動との関係により、瞬間的な波圧分布を求める。

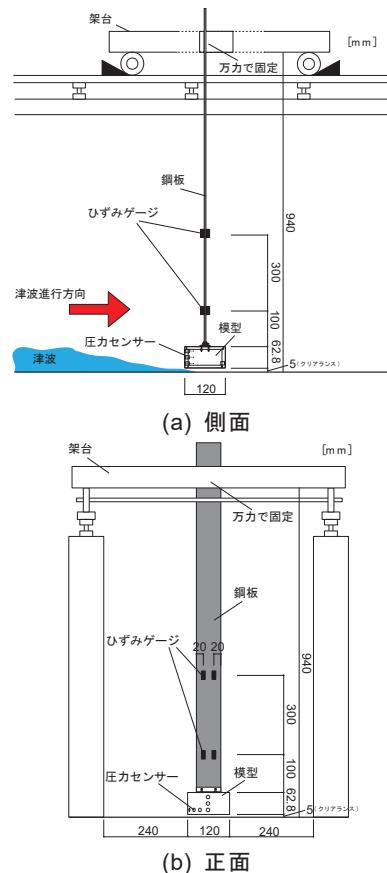


図7 実験器具概要

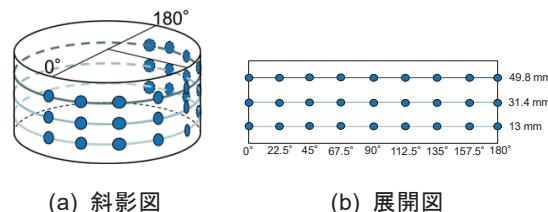


図8 波圧測定点

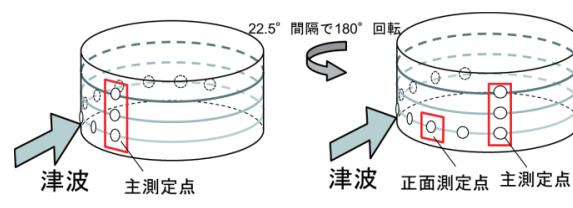


図9 波圧測定方法

3. 水理模型実験の結果と考察

3.1 水理模型実験の様子

水理模型実験を水路横と水路後方から撮影した様子を図 10 に示す。



(a) 水路横から撮影

(b) 水路後方から撮影

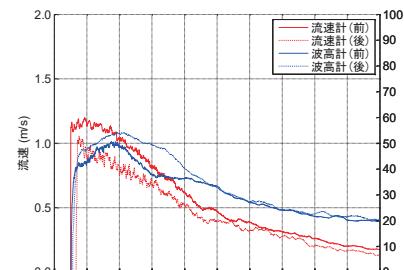
図 10 津波通過の様子 (貯水高さ 180 mm)

本実験で観測された津波は、模型に衝突して模型前面で弧状の滞留を作り、波は徐々に模型側面へ回り込んで剥離し、回り込みと共に波の落ち込みが見られた。

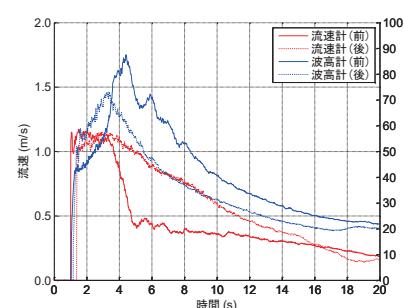
3.2 津波流速および波高に関する結果と考察

円筒形模型を設置したことによる津波性状の変化について確認するため、模型を配置せず流速と波高を測定した結果と模型を配置して流速と波高を測定した結果を図 11 に示す。測定開始時刻は前にある流速計に波が到達する 1 秒前を基準としている。

流速、波高の時刻歴変化について、模型の有無による違いを比較すると、流速の最大値に変化はないが、模型前において模型ありの方が最大値に達した後、急激に減速していることが分かる。これは模型前面に滞留が生じるためであると考えられる。同様の理由で、津波到達から模型前において波高が徐々に上昇していることも分かる。対して、模型後においては、模型ありの方の波高が低くなっている。これは模型に対して波が回り込むと共に、落ち込みが起こっているためと考えられる。



(a) 模型なし



(b) 模型あり

図 11 流速と波高の時刻歴変化

3.3 津波波力に関する結果と考察

津波波力の時刻歴変化を図12に示す。ただし、パワースペクトルに基づき、用いた鋼板と模型の固有周期を考慮して3.0 Hz以上をカットするようローパスフィルターを施した。また、本実験の円筒形構造物との比較のため、矩形構造物を対象とした既往の実験結果²⁾も合わせて図13に示す。

図12において、津波波力の最大値はサージフロント波力時よりも2~3秒後に最大となっていることが分かる。これは模型前面での波の衝突が時間差をもって起こるため、大きなサージフロント波力とならず、その後滞留による波高の上昇で静水圧が上昇して最大値に達したと考えられる。一方、図13に示す矩形構造物の場合、模型前面に津波の衝突が同時に起こるため、サージフロント波力で最大の波力が発生している。

各貯水高さにおける最大津波波力時における抗力係数 C_D の時刻歴変化を図14に示す。抗力係数 C_D は測定した流速と波高および波力から式(1)を用いて算出した。

$$C_D = \frac{2F}{\rho v^2 h B} \quad (1)$$

ここで、 F は波力(N)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 v は流速(m/s)、 h は波高(m)、 B は投影幅(m)である。

抗力係数 C_D の時刻歴変化を見ると、津波のサージフロント波力時には大きな値をとり、2秒程上昇と下降繰り返した後、急激に上昇している。測定開始3秒付近では滞留により、流速が急激に低下しており、そのため抗力係数が急激に上昇したと考えられ、動水圧よりも静水圧が支配的になっているといえる。式(1)は動圧に対して一般的に用いられる式であり、静水圧が支配的な時刻には適用できないと考えられるため、その直前までの値に着目する。着目範囲において、サージフロント波力時の抗力係数が最大値1.5を示している。荷重指針¹⁾では、浸水深と流速の時系列を利用することができる場合、矩形構造物に対する抗力係数を先端部で2.0以上、非先端部で2.1としているが、円筒形にこれを適用すると過大評価となるため、円筒形構造物に適した抗力係数の検討が必要であると考えられる。

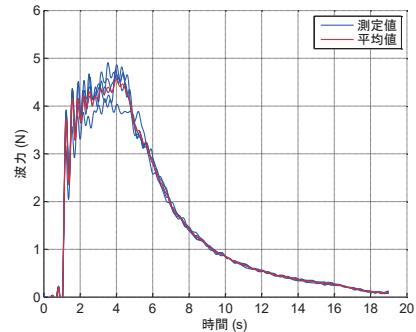


図12 津波波力の時刻歴変化

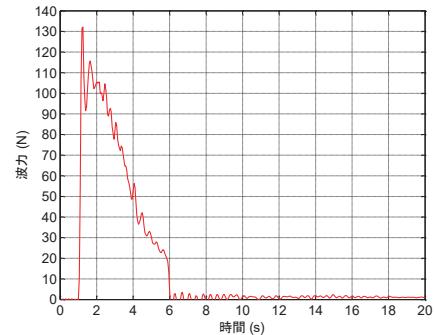


図13 津波波力の時刻歴変化
(貯水高さ 700 mm, 矩形)

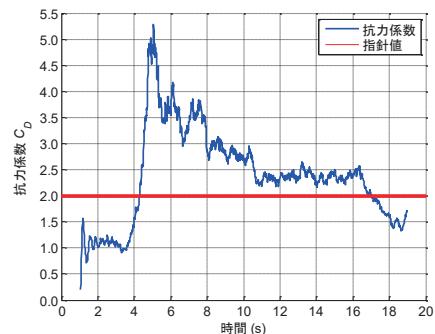


図14 抗力係数の時刻歴変化

3.4 津波波圧に関する結果と考察

津波波圧の時刻歴変化を測定角度ごとに図 15 に示す。貯水高さは 180 mm で測定開始時刻は正面測定点に波が到達する 1 秒前を基準としている。

津波波圧の時刻歴変化について、鉛直方向に着目すると、下に設置した波圧計ほど大きな波圧が生じている。これは作用している静水圧が三角形分布になっているからであると考えられる。周方向について、測定角度 0° ではサージフロント波圧が最大値となっているが、 45° ではサージフロント波圧が発生してから数秒後に最大値となり、 90° 以降はサージフロント波圧が発生していないという特徴が見られる。波圧は面に直行方向にはたらくため、主流方向に正対している正面に近い測定点ほど動水圧の影響を受け、サージフロント波圧が大きくなると考えられる。

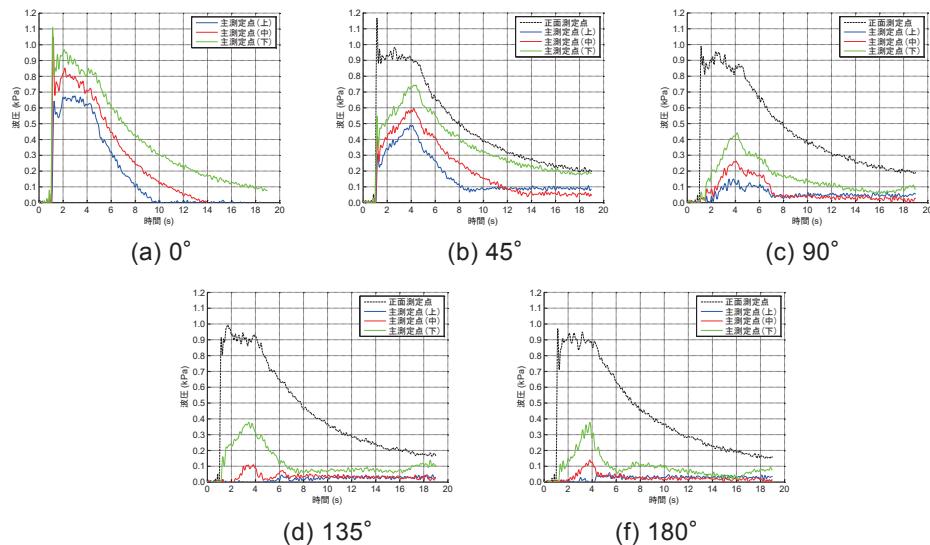


図 15 津波波圧の時刻歴変化 (貯水高さ 180 mm)

4.まとめ

本研究では水理模型実験により、津波の流速および波高、円筒形構造物に作用する津波波力と津波波圧の測定を行うことで、周方向および鉛直方向の流れと津波波力の性状を把握した。また、現行の荷重指針で用いられている抗力係数において、円筒形に対しては過大評価となる可能性があるため、円筒形構造物に適した抗力係数の検討が必要であることが分かった。

謝辞

本研究は防災研究協会の若手研究者研究助成金(研究代表者：佐藤公亮)を受けて行ったものであります。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、2015
- 2) 緑川雄貴, 小幡昭彦, 西田哲也, 小林淳：流体解析を用いた建築物に作用する津波波圧分布に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.83-84, 2014.9