

複数のオイルタンク群に作用する津波荷重の水理模型実験*

秋田工業高等専門学校 寺本 尚史・丁 威・植松 康
秋田県立大学 小幡 昭彦

1. 研究の背景と目的

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴って発生した大津波によって、沿岸部に建設されていた多数のオイルタンクに甚大な被害が発生した。また、流出したオイルは火災などの二次被害を引き起こした。このように、沿岸部のオイルタンクが津波によって崩壊すると、社会・経済に極めて大きな影響を及ぼす。東南海地震などの発生が危惧されている現在、オイルタンクの津波対策は急務の課題である。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。

また、石油備蓄基地では複数のオイルタンクが建設されるため、津波荷重の評価においては相互作用の影響を考慮する必要がある。その影響を踏まえた上でオイルタンク群に作用する津波波圧・波力の特性を明らかにし、最適な耐津波設計を確立することが重要である。

そのため本研究では、沿岸部に建設される鋼製オイルタンク群を想定した水理実験を行い、その実験結果に基づいて、タンク群の配置パターンが津波荷重に及ぼす影響を把握し、適切な配置を評価方法のための基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 水理模型実験の概要

2.1 実験水路

水理模型実験には秋田工業高等専門学校が所有する実験水路を使用する。実験水路の概要を図1、写真1に示す。水路の全長は約15m、断面形状は長方形であり、水路内法幅0.6m、高さ0.8mである。貯水槽に一定量の水を溜め、遮水壁を瞬間的に開放することで津波の押し波を再現する。模型の位置は図1に示す通り、流入口で起こる乱れが減少し始め、反射波が到達する時間が十分に取れる、遮水壁から6.5m、後方の消波装置より3.5mとした。

2.2 模型概要

本研究では、円筒形の中型オイルタンクを対象とし、模型を単独で配置したもの(単棟)および周辺に同じ寸法のダミー模型(写真2(b)参照)を1~2棟配置したもの(連棟)の実験を行う。幾

*Hydraulic model tests of tsunami force acting on oil tanks by Naofumi Teramoto, Wei Ding, Yasushi Uematsu and Akihiko Obata



写真1 実験水路

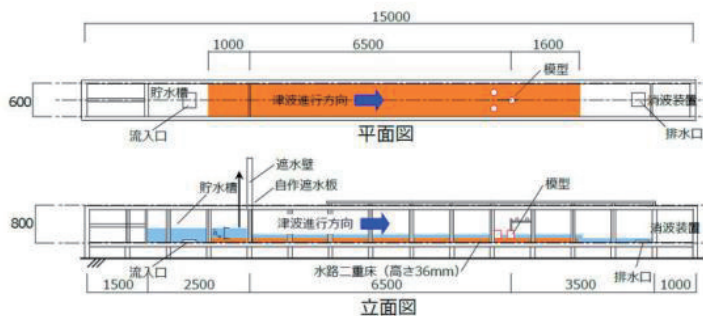
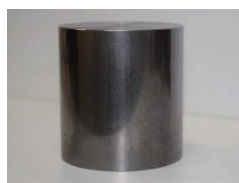


図1 実験水路概要



(a) 測定用模型



(b) ダミー模型

写真2 実験模型

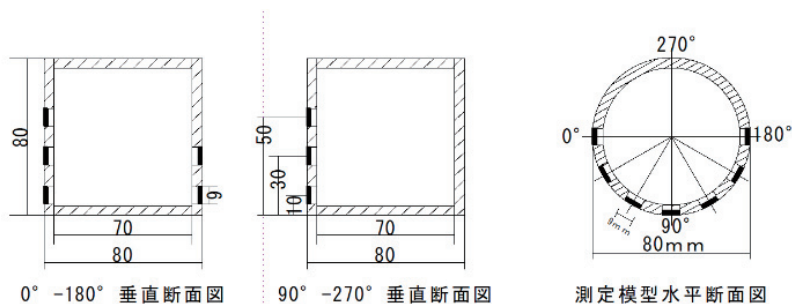


図2 波圧測定点の配置

何学的縮尺率は $\lambda_L=1/250$ とし、模型の外径は80 mm、高さは80 mmとした。

模型の位置は流入口で起こる乱れが減少し始め、反射波が到達する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。模型の位置を図1に示す。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、波に乱れが生じるため、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。

2.3 測定方法

模型、各測定器具の測定位置を図3に示す。模型前後の値を測定するためにプロペラ式流速計と容量式波高計を設置した。なお、波に乱れが生じるため、流速計および波高計は模型位置

から左右にずらして設置した。

また測定用模型には模型の表面に圧力センサーを 18ヶ所設置した。設置個所を図 2 に示す。模型の底部からの高さが 10 mm, 30mm, 50mm の位置に, 片側 180 の範囲にそれぞれ 7 点, 7 点, 4 点設置した。

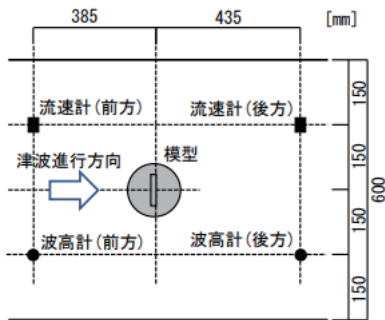


図 3 測定機械の配置

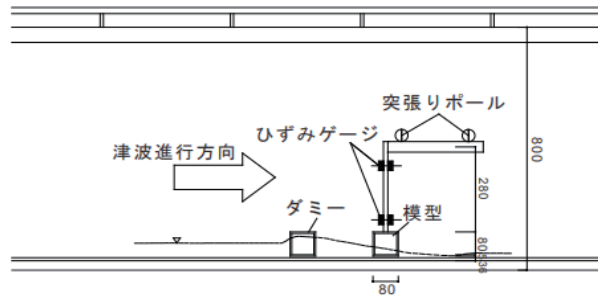


図 4 津波力測定方法

津波の大きさは貯水槽の貯水高さ h_w を変化させることによって調整する。本実験では貯水高さ $h_w = 140\text{mm}, 180\text{mm}$ の 2 種類とした。津波波力測定には片持ちの鋼板を用いる。図 4 に津波波力測定方法を示す。先端に模型を取り付けた鋼板を架台から吊りし, 荷重が作用したときの 2 点の曲げひずみ 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た。

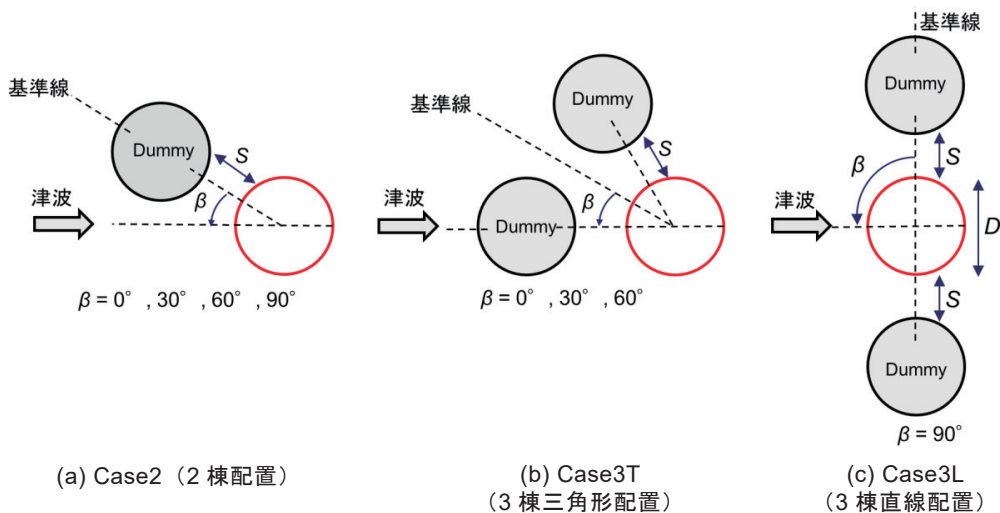


図 5 連棟配置ケース

模型の配置パターンを図 5 に示す。配置パターンは、単棟(Case1), 2 棟(Case2), 3 棟を三角形に配置(Case3T), 3 棟を直列に配置(Case3L)の 4 ケースとした。ここで, 図中の S は隣棟間隔, D はタンクの直径, β は各配置の基準線に対しての津波入射方向である。隣棟間隔は消防法に基づき $S/D=0.25, 0.5, 1.0$ とした。実験を行ったケースの一覧を表 1 に示す。各ケースそれぞれ 5 回ずつ実験を行い, アンサンブル平均した値を測定値とした。サンプリング周波数はいずれも 100 Hz, 測定時間 T は約 60 秒である。

表 1 実験ケース一覧 (各ケースとも $h_w = 140\text{mm}$, $h_w = 180\text{mm}$ を実施)

	S/D	$\beta(^{\circ})$			
Case 1	—				
Case 2	0.25	0	30	60	90
	0.5	0	30	60	90
	1.0	0	30	60	90
Case 3T	0.25	0	30	60	
	0.5	0	30	60	
	1.0	0	30	60	
Case 3L	0.25				90
	0.5				90
	1.0				90

3. 水理模型実験の結果と考察

3.1 津波流速および波高

単棟(Case1), 貯水高さ $h_w = 180\text{mm}$ 時の流速と波高の測定結果を図 6 に示す。模型前面に滞留が生じるため, 模型前方の流速は最大値に達した後, 急激に減速しているのに対し, 波高は津波到達後に徐々に上昇する傾向が見られた。

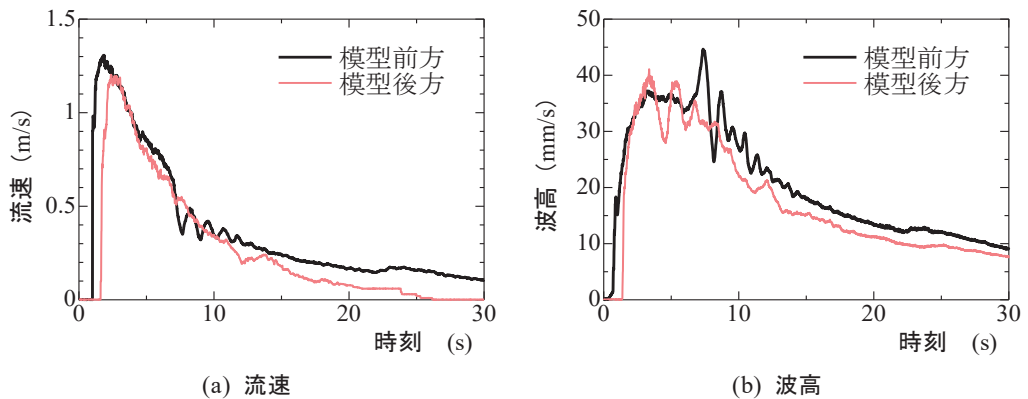


図 6 流速と波高の時刻歴変化(Case 1)

3.2 津波波力

図 7 に、貯水高さ $h_w = 140\text{mm}$, $S/D = 0.5$ 時における Case2, Case3T および Case3L の各実験ケースの最大波力 F を、Case1(単棟配置時)における最大波力で除して無次元化した値(最大波力比)を示す。Case2 の津波入射角 $\beta = 0^\circ, \beta = 30^\circ$ の場合、最大波力比が 1 を下回ったが、これは波がダミー模型側面で剥離することで、津波先端部が対象模型に直接衝突しないためであると考えられる。これを連棟配置における「シールド効果(図 8)」と呼ぶ。一方、Case2 の $\beta = 60^\circ \sim 90^\circ$ の波力は最大波力比が 1 を上回ったが、これは模型が津波を堰き止めることにより(図 8)、模型前方の波高が上昇したことが影響していると考えられる。同様に、三角形 Case3T の $\beta = 0 \sim 30^\circ$ ではシールド効果により波力が減少し、Case3T ($\beta = 60^\circ$) と Case3L ($\beta = 90^\circ$) では堰き止めにより波力が増大し、特に Case3L の場合の波力は約 1.8 倍に増加した。

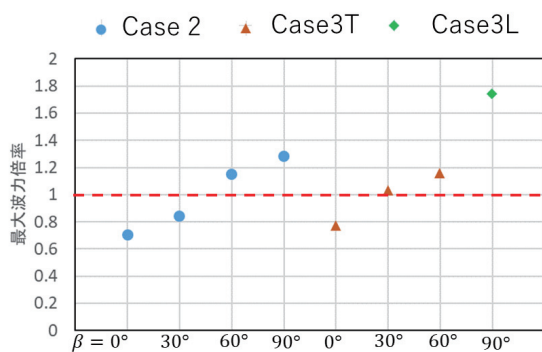


図 7 最大波力比

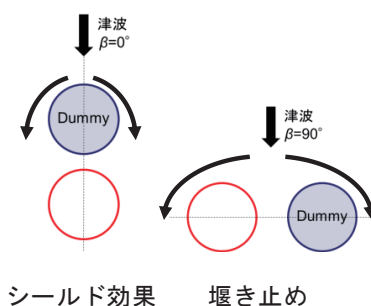


図 8 シールド効果と堰き止めの概要

3.3 津波波圧

Case2, Case3T, Case3L のうち、Case1 と比べて波力が減少したケースおよび増加したケースにおける波圧分布(模型高さ 10mm の位置)の比較を図 9(a),(b)および図 9(c),(d)に示す。ここで、図中の薄い色の線が単棟の波圧分布、黒色の線が連棟の波圧分布を示す。図 9(a)の Case2, $\beta = 0^\circ$ の波圧分布を見ると、模型前面 (0°) の波圧が Case1 に比べて大きく減少しているのに対し、模型側面 ($\pm 30^\circ$ および $\pm 60^\circ$) の波圧が増加していることが分かる。図 9(b) の Case2, $\beta = 30^\circ$ の配置パターンでも、模型前面 (0°) の波圧は単棟配置時に比べて減少している点は同様であった。模型側面 (30° および 60°) の波圧については、ダミー模型の配置されている方向の波圧が小さくなったが、それによってはじかれた波によって配置されていない方向の模型側面 (-60°) の波圧は逆に上昇した。

一方、波力が増加した Case2, $\beta = 90^\circ$ (図 9(c)) および Case3L, $\beta = 90^\circ$ (図 9(d)) のケースにおける波圧分布を見ると、いずれも Case1 との波圧と比べ全体的に大きい傾向を示したが、模型前面 (0°) の波圧はほぼ同じ値となっているのに対し、模型側面 ($\pm 30^\circ$ および $\pm 60^\circ$) の波圧は大きくなる傾向となった。そのため、波力には津波進行方向に対して模型前面の波圧よりも模型側面にかかる波圧が大きく影響を及ぼしている可能性が考えられる。

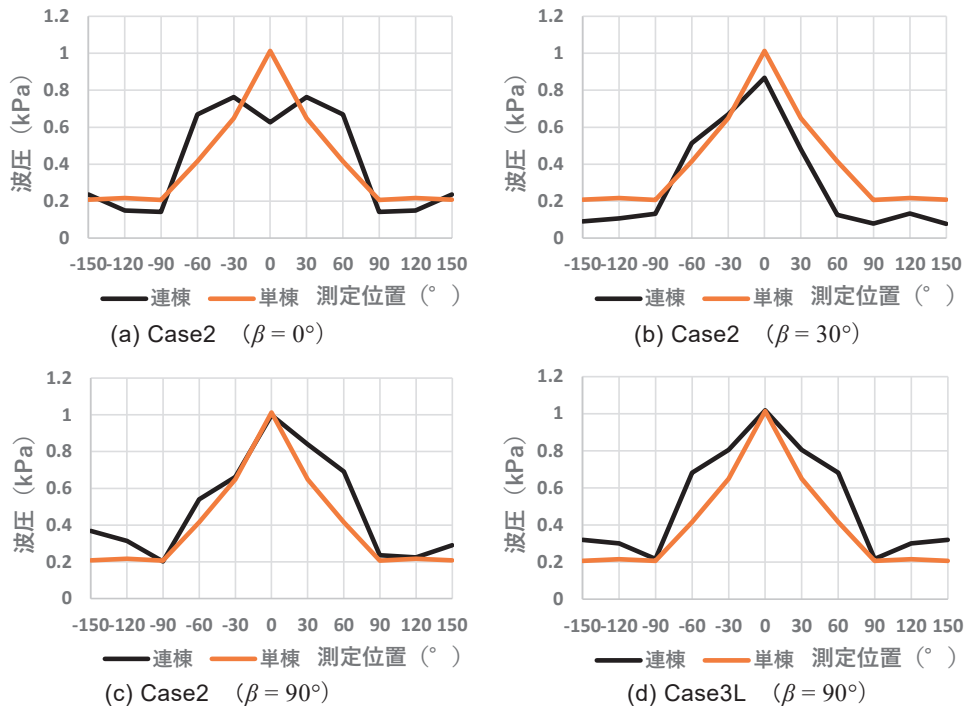


図 9 各配置パターンにおける波圧分布 ($S/D=0.5$, $hw=108\text{mm}$, 模型高さ 10mm の位置)

4. 結論

本研究では配置パターンの異なる円筒形オイルタンク群に作用する津波波力および波圧を検討するために水路実験を行った。

水路実験による配置・棟数が与える影響を検討した結果、単棟配置時の最大波圧と比較した場合、連棟配置時の最大波力は津波入射角の違いにより、増加・減少のいずれの場合もあること、特に 2 棟配置の場合は、入射角 45° がその境界となっていることが分かった。また、波力の増減には全体的な波圧の大きさだけでなく測定模型側面の波圧差の影響も関係していると考えられる。

謝辞

本研究は前田記念工学振興財団 令和 3 年度研究助成「海浜地帯に建つオイルタンク群の相互干渉を考慮した津波荷重と耐津波設計」(2021 年, 研究代表者: 寺本尚史), および科研費研究活動スタート支援「オイルタンク群に作用する津波荷重および耐津波設計に関する研究」(2021 年, 研究代表者: 丁威) の一部によるものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 2) Akihiko OBATA, Naofumi TERAMOTO, Hiroki KAMEYA, Yuki TAKADATE, Kosuke SATO, Yasushi UEMATSU: Experimental Investigation of Tsunami Loads on a Group of Cylindrical Oil Storage Tanks, Advanced experimental mechanics, Vol.7, pp.155-161, 2022.8