

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

Tsunami loads and tsunami resistant design of oil storage tanks in coastal areas with consideration of mutual interaction

秋田工業高等専門学校 准教授 寺本 尚史

(研究計画ないし研究手法の概略)

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の津波被害は、人々の生活施設だけでなく、沿岸部に設置されていたオイルタンクにも及び、内容物流出による水上火災が発生するなど、広範囲にわたる二次被害を引き起こした。石油備蓄基地をはじめ、我が国の海浜地帯には多くのオイルタンクが建設されており、近い将来発生が懸念されている南海トラフ地震等の津波により甚大な被害が発生すると予想される。そのような被害を低減するためには適切な津波荷重評価や耐津波設計法の確立が求められる。タンクの津波荷重の規定化のためには、写真1に示すような実状に近い複数棟のタンク配置時における、津波荷重の適切な評価および補強方法を確立する必要がある。そこで本研究では複数棟のオイルタンクに代表される円筒形構造物を配置した水路実験および数値流体解析を行い、得られた円筒形構造物に作用する津波波力や津波波圧を用いて、タンクのより合理的な耐津波設計法を提案することを目指している。本報告では、オイルタンクの模型を複数棟配置した津波水理実験の概要およびその結果について報告する。



写真1 石油備蓄基地の例

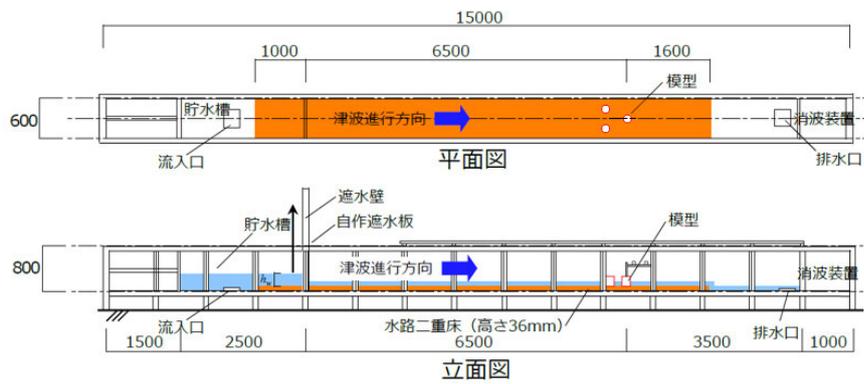
実験水路の概要を図1に示す。水路の断面は、内法幅0.6m、高さ0.8mの矩形形状であり、水路の全長は15mである。水路前方(図1左側)に開閉式ゲート(遮水壁)で区切られた貯水槽があり、貯水槽に水をためた後に遮水壁を上下させることで津波の押し波を再現した。模型は流入口で発生する乱れが十分に減衰することを考慮し、遮水壁から6.5m離れた位置に設置した。また計測機器(浸水深計)のフレームが流水に干渉するのを防止するため、ベニヤ合板で作成した上げ床を設置し、水路実験の流入部から模型設置位置を含む全長9mを二重床とした。

津波の大きさは、貯水槽の貯水高さ h_w を変化させる事によって調整し、本実験では貯水高さ $h_w=140\text{mm}$ 、 180mm の2種類とした。なお、津波の高さは $h_w=180\text{mm}$ の場合に模型の半分の高さに到達し、模型を設置しない場合の各貯水高さ時におけるフルード数は、貯水高さが 140mm の場合1.54、 180mm の場合1.92である。

測定機器の配置および実験模型の設置の概要を図2および図3にそれぞれ示す。実験では、流速、浸水深、模型に作用する津波主流方向の水平波力および模型側面の波圧を測定した。実験模型については、アスペクト比1.0の小型～中型の円筒形オイルタンクを想定した

直径 80 mm、高さ 80 mm(幾何学的縮尺率 1/250)の円筒とし、模型の前後に流速計および浸水深計を設置した。模型に作用する津波主流方向の水平波力については、図 4 に示すように片持ち鋼板の先端に模型を取り付け、鋼板に作用する 2 か所のひずみ量から得られる曲げモーメントの勾配より算出した。

なお、鋼板の変形と模型の回転に伴い模型底部分が水路床に衝突することを防止するため、模型と水路床との間に 5 mm のクリアランスを設けた。模型側面の波圧については水圧計を用いて測定し、設置位置は津波入射方向正面の模型底から 10 mm、30mm および 50mm の高さの計 3 段とし、津波入射方向正面からそれぞれ 30° 間隔で設置した。サンプリング周波数はいずれも 100 Hz、測定時間は約 20 秒である。



(a) 平面図および立面図

(b) 後方からの外観

図 1 開閉式実験水路の概要

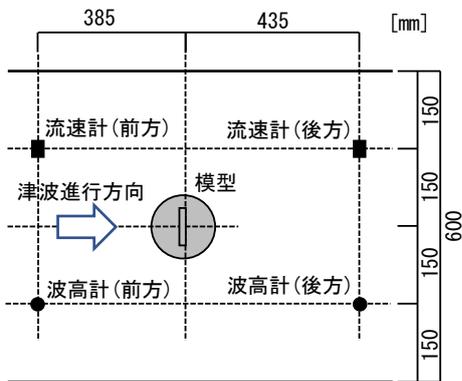


図 2 測定機器の配置

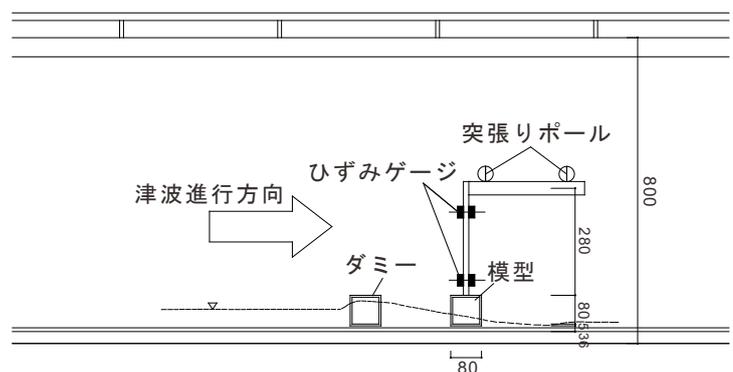


図 3 実験模型の設置概要

円筒形模型の配置パターンについては、図 4 に示すように(1)単棟 (Case1)、(2) 2 棟 (Case2)、(3)3 棟を三角形に配置 (Case3T)、(4)3 棟を直列に配置 (Case3L) の 4 ケースとし、複数棟配置の(2)~(4)のケースについては隣接するタンク間の距離 (以下「隣棟間隔」) および津波の入射角(β)を変動させる配置とした。各ケースの概要および配置パターンを図 5 および表 1 にそれぞれ示す。ここで、 S/D は隣棟間隔(S)とタンク直径(D)の比を表し、本実験では $S/D = 1.0, 0.5, 0.25$ とした。また、入射角(β)については、Case2 では 0° から 90° まで、Case3T では 0° から 60° まで 30° 間隔で変化させた。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実験値とした。

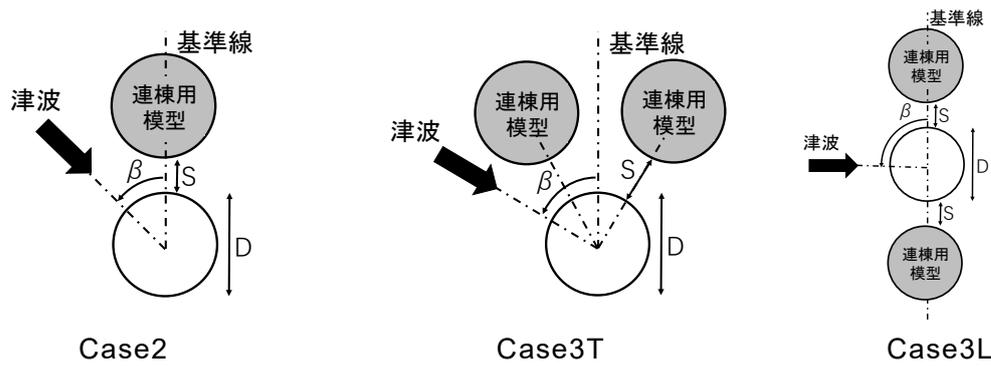


図4 各ケースの連棟配置および津波入射角の定義

表1 実験ケース一覧

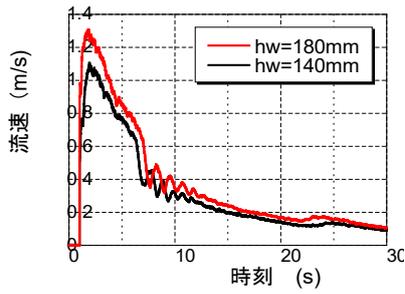
(各ケースとも $h_w=140\text{mm}$ 、 180mm を実施)

Case	S/D	$\beta(^{\circ})$			
		0	30	60	90
Case1	—				
Case2	0.25	0	30	60	90
	0.5	0	30	60	90
	1.0	0	30	60	90
Case3T	0.25	0	30	60	
	0.5	0	30	60	
	1.0	0	30	60	
Case3L	0.25				90
	0.5				90
	1.0				90

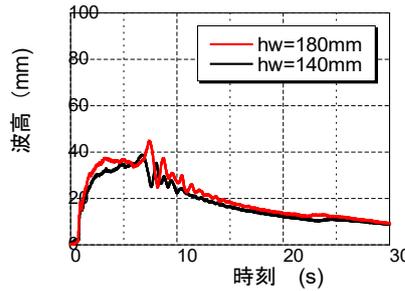
(実験調査によって得られた新しい知見)

(1) 単棟配置時に作用する波力と模型周りの流れ場

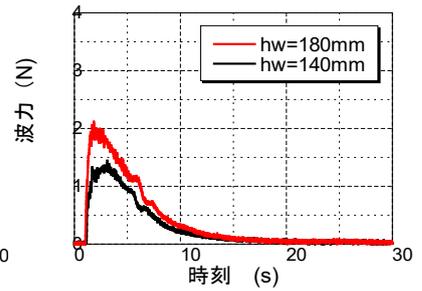
実験によって得られた単棟配置時(Case1)の流速、浸水深、波力の時刻歴を図5(a)~(c)にそれぞれ示す。また津波が模型に到達した時の様子を写真2(a)および(b)に示す。最大浸水深は、 $h_w=180\text{mm}$ 、 140mm のいずれも模型高さ(80mm)のおおよそ半分程度となり、貯水高さ h_w が高いほど値が大きくなる結果となった。模型側面からの写真2(a)を見ると、模型前面で弧状の滞留域を形成して浸水深が上昇しており、模型後方からの写真(b)から、津波は模型や測定器具等により左右に分離されている様子が見られる。各測定値のピークは、流速の場合は津波到達時刻(約1秒)の直後に観測されているのに対し、浸水深および波力(特に $h_w=140\text{mm}$)の場合はやや遅れてピークとなっている。矩形平面を有する建物の場合、津波衝突直後のサージフロント波力が最大波力となるケースが主とされているが、円筒形構造物の場合は、津波を受ける模型側面が曲面となっていることから、模型前面に津波が到達した時に生じる波力が矩形平面を有する建物と比べて小さく、津波が進むにつれ徐々に波力が大きくなっていくためであると考えられる。



(a) 流速－時刻歴関係



(b) 浸水深－時刻歴関係



(c) 波力－時刻歴関係

図 5 実験結果(Case1)



(a) 水路横面



(b) 模型後方

写真 2 津波が模型に到達した時の様子(Case1、 $h_w=140\text{mm}$)

(2) 連棟配置時における津波波力の特性

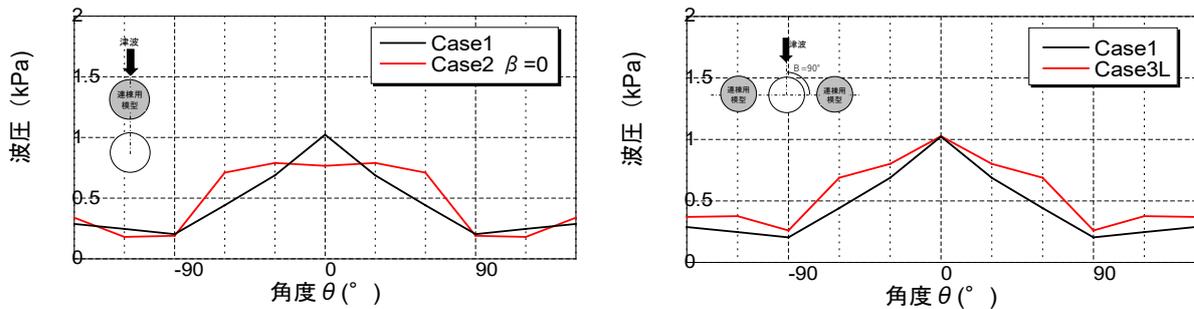
$h_w=140\text{mm}$ 時における各実験ケースの最大波力 F を、単棟配置時における最大波力 F_{max} で除して無次元化した結果を表 2 に示す。ここで、表中の値(F/F_{max})が 1 を超える場合、単棟配置時と比べ波力が増大する事を表している。前方方向に配置された隣棟模型により、波力を低減するシールド効果が生じる $\beta=0^\circ$ および 30° では、単棟配置時に比べて波力が 5 割～9 割低減するが、隣棟模型が側方方向に配置される $\beta=60^\circ$ および 90° の場合は、せき止め効果により波力が 1.1～1.9 倍に増大する結果となった。

なお、隣棟間隔 S/D と最大波力の関係については、 F/F_{max} が 1 を下回る Case2 および Case3 の $\beta=0^\circ$ および 30° では S/D が小さくなるほど最大波圧が大きくなり、逆に F/F_{max} が 1 を上回る Case2 および Case3 の $\beta=60^\circ$ および 90° では、 S/D が小さくなるほど最大波圧が小さくなる傾向が見られた。

図 6(a)および(b)に、波力が小さくなる場合(Case2 $\beta=0^\circ$ 、 $S/D=0.5$)および波力が大きくなる場合(Case3L、 $\beta=90^\circ$ 、 $S/D=0.5$)の側面周りの波圧分布の例をそれぞれ示す。なお、測定点は模型底から 10 mm の位置におけるもので、模型角度 θ は模型側面の津波正面を 0° 、背面を 180° とした。また比較のため Case1 の波圧分布を併せて示した。波力が小さくなる Case2、 $\beta=0^\circ$ の場合、正面($\theta=0^\circ$)の波圧は Case1 と比べて小さくなるものの、流れ場の影響により $\theta=30\sim 60^\circ$ において Case1 よりも波圧が増加する傾向が見られた。また波力が大きくなる Case3L、 $\beta=90^\circ$ の場合は、Case1 と比べ側面の側圧が全体的に大きくなるものの、正面($\theta=0^\circ$)については大きな上昇が見られなかった。

表 2 Case1 に対する各ケースの最大波圧の比較($h_w=140\text{mm}$ 時)

F/F_{max}		S/D		
Case	β	$h_w=140$		
		0.25	0.5	1
Case1		1.00		
Case2	0	0.73	0.76	0.79
	30	0.81	0.87	0.87
	60	1.22	1.20	1.30
	90	1.43	1.32	1.27
Case3T	0	0.52	0.58	0.75
	30	0.83	0.95	0.99
	60	1.22	1.20	1.11
Case3L	90	1.87	1.68	1.47



(a) Case2、 $\beta = 0^\circ$

(b) case3L、 $\beta = 90^\circ$

図 6 連棟配置時の波圧分布の例(S/D=0.5)

今後の課題

今後は、今回の津波水理実験の結果および数値流体解析ソフトウェア OpenFOAM を用いた三次元津波解析の結果に基づき、オイルタンクに作用する波圧・波力の特性を明らかにし、実状に近いタンク配置に反映させ、どのような配置パターンの場合に隣接するオイルタンク同士の相互作用により津波波力が増大する可能性があるのか検討する必要がある。

また、薄肉の壁面を持つオイルタンクは、外力による壁面の座屈が問題となっていることから、オイルタンク側面に生じる津波波力や波圧分布を踏まえた上で基本的座屈性状の検討を行う予定である。

(発表論文)

2022 年発表予定で現在執筆中