

係留船舶の津波応答特性に関する模型実験

MODEL EXPERIMENT ON TSUNAMI RESPONSE CHARACTERISTIC OF A MOORING SHIPS

津田宗男¹・大垣圭一²・米山治男³・栗原明夫⁴・平石哲也⁵・青野利夫⁶

Muneo TSUDA, Keiichi OHGAKI, Haruo YONEYAMA, Akio KURIHARA,
Tetsuya HIRAISHI and Toshio AONO

¹正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善1-3)

²正会員 修(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善1-3)

³正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 修(工) 東亜建設工業(株) 土木事業本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁵正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 工博 東亜建設工業(株) 土木事業本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

The researches on tsunami heights in the ports have been estimated in detail recently. However, the tsunami external force and the damages of moored ships due to tsunamis have not been made clear. In this study, model experiments about the tsunami impact on a moored ship were conducted to clarify the characteristics of the ship motion and the tsunami impact. In the model experiments, we measured the ship motions, the tensions of mooring ropes and the reaction forces of fenders, and evaluated the safety of the moored ship from the results of the tensions and reaction forces. As a result, we found out that the characteristics of the ship motions and the tsunami impact on the mooring facilities are changed greatly depending on the tsunami incident angles, and that the safety of the moored ship is reduced by the large swaying motion when the incident angle is 60 or 90 degrees.

Key Words: *Tsunami, moored ship, mooring rope, fender, model experiment*

1. はじめに

プレート境界型の巨大地震の発生にともない日本の沿岸に巨大津波が来襲し、日本沿岸域に大規模な災害を引き起こすことが危惧されている。例えば、東南海・南海地震は、100～150年の間隔で発生しており、その地盤変動にともない巨大津波が太平洋沿岸地域を襲うことが予測されている。この津波について、中央防災会議では地域ごとに津波高や津波到達時間などを推定し公表している¹⁾。これによると、多数の大型船舶が係留されている大阪港には最大2.5m、震源に近い高知県須崎港では最大10mに達する津波が来襲すると予測されており、船舶や係留設備に甚大な被害が発生する可能性がある。

「海上保安庁の津波対策等について」²⁾には、津波高さ3m以上の大津波の来襲時には、大型船舶は港外退避を原則とすることが示されている。しかし、荷役中の船舶であれば、出港準備の所要時間や隻数に限りのある曳船の手配、また港口への待避船舶の集中などを考慮すると、津波来襲までにすべての船舶が港外へ避難することは不可能である。スマトラ沖地震津波において大型の発電バージ船が内陸に打

ち上げられた事例³⁾もあるように、津波の作用を受けて係留船舶の係留索が破断し、漂流してしまう可能性がある。さらに、漂流した船舶が他の船舶や荷役施設、危険物貯留施設などに衝突して、被害を拡大させてしまうことも考えられる。

津波来襲時の大型船舶について、大垣⁴⁾や榊原⁵⁾は、数値計算によりその安全性を評価している。しかし、津波の外力については、船舶に作用する入射方向による影響など、これまで十分な検討が加えられているとは言えない。一方、津田⁶⁾は模型実験により、係留索の張力や防舷材への衝突力などを評価している。これは係留船舶に対して津波を船側方向から作用させているもので、津波の入射方向は考慮していない。

本研究では、模型実験により津波の入射方向を考慮した係留船舶の動揺特性や係留設備へ及ぼす影響について検討した。実験では、平面水槽に設置した栈橋に大型船舶を係留し、津波は往復流で再現した。なお、船舶に作用させる津波は4方向とした。そして、係留設備の限界荷重と実験結果との比較検討により津波時の係留船舶の安全性を評価した。

2. 実験方法

(1) 実験模型

独立行政法人港湾空港技術研究所の環境インテリジェント水槽に栈橋と係留船舶を設置して模型実験を行った。実験の縮尺は1/50を想定し、フルード数が一致するように模型の形状や特性を決定した。

津波は周期が長く、波形勾配が小さいという特徴を有していることから、船舶の動揺に及ぼす水位変動の影響は小さいため、往復流で津波を再現した。水槽の両端に設置されたポンプの出力を制御し、正弦波を想定して流速を時間変化させた。任意の断面における流速は等分布であり、水位変動は考慮していない。

なお、造波装置は、津波の長い周期を再現できないこと、実験縮尺を小さく設定するとノイズ等が問題となることから、ここでは採用していない。

表-1に実験に使用した船舶模型の諸元を、写真-1に船舶模型の全体図を示す。船舶は50,000DWTコン

表-1 船舶模型の諸元

		現地		模型(1/50)	
積載量		満載	半載	満載	半載
排水重量(kN)		470400	274400	3.76	2.20
船長(m)		216.5	216.5	4.33	4.33
垂線間長(m)		193.5	187.5	3.87	3.75
船幅(m)		31.5	31.5	0.63	0.63
喫水(m)		11.0	7.5	0.22	0.15
メタセン ター(m)	Roll	4.0	3.5	0.08	0.07
	Pitch	405	265	8.1	5.3
慣動半径 (m)	Roll	10.6	10.9	0.21	0.22
	Pitch	63.9	52.7	1.28	1.05
係留時固 有周期(s)	Surge	133	116	18.8	16.4
	Sway	62	51	8.8	7.2
重心位置(m)		-1.0	2.5	-0.02	0.05



写真-1 船舶模型と動揺6成分の定義

表-2 栈橋模型の諸元

	現地	模型(1/50)
水深(m)	15.0	0.300
延長(m)	375	7.46

テナ船を想定しており、積載条件は満載と半載である。表-1中のメタセンタ高さ、慣動半径、係留船舶の固有周期、重心位置は、船舶の寸法や係留船舶の自由振動実験により確認した。

津波は往復流で再現しており、流速分布を一定に保つため、流れを透過させる必要があった。このため、係留施設は往復流の遮蔽面積が小さい栈橋形式とした。栈橋模型の形状などは技術基準⁷⁾を参考に決定した(表-2)。ただし、防舷材や係留索については、技術基準に従って算定される一般的な外力と比較して、津波による外力が大きいものと予想されたため、標準的な防舷材や係留索よりも強度を大きくした。防舷材は定反力型とし、反力-ひずみ特性は上田の方法に準じてモデル化している⁸⁾。模型1基は現地の防舷材3基分を合成した反力特性を持ち、コイルバネ等を組み合わせて製作し、栈橋模型に4基配置した。図-1には4基の防舷材模型の変位量と反力の検定結果を示すが、モデル化された設定値を良好に再現できている。また、配置間隔については

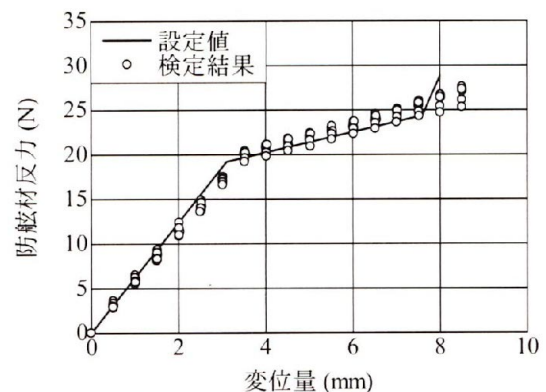


図-1 防舷材模型の反力特性

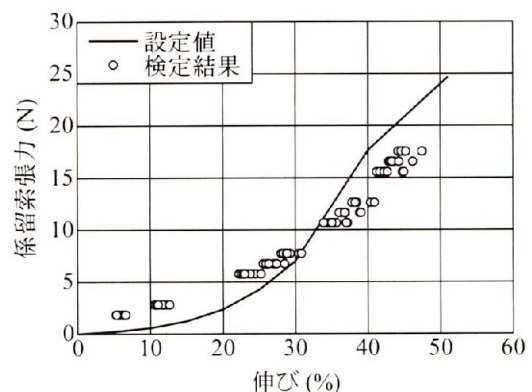


図-2 係留索模型の張力特性

表-3 実験ケース

実験項目	設定条件
入射方向	0, 30, 60, 90°
周期	85, 170, 254s (10, 20, 30min)
最大流速	99, 152, 255mm/s (0.70, 1.07, 1.80m/s)
津波初動	押し波, 引き波
積載量	満載, 半載

技術基準を参考に設定した⁹⁾。

係留索にはナイロンエイトロープφ100mm を選定した。模型1本は現地の係留索2本分を合成した張力特性を持ち、ナイロン製の靴下をより合わせて製作した。図-2 には 8 本の係留索模型の伸びと張力の検定結果を示すが、張力-伸び特性の設定曲線を良好に再現できている。

(2) 実験ケース

表-3 に実験ケースを示す。表中の () 内の数値は現地量を表している。津波の入射方向は、船軸の船首から時計回りに、0、30、60、90°の 4 方向とし、入射方向による船舶の動揺特性や係留設備へ及ぼす影響について検討する。なお、入射方向は、栈橋と係留船舶の模型全体を回転させることで設定している。津波周期と最大流速は、それぞれ 3 ケース設定している。津波の初期変動は、押し波初動と引き波初動の 2 ケースとし、引き波を想定した場合の流れの方向を流速の正の方向と定義する。積載条件は満載および半載とし、積載量による動揺特性の違いを確認する。

(3) 計測項目

図-3 は係留設備の配置を示しており、係留系は 8 本の係留索、4 基の防舷材、6 箇所の係船柱で構成されている。

係留索張力は、船首側からバウライン B-1、プレストライン B-2、スプリングライン B-3、B-4、プレストライン B-5、スターンライン B-6 であり、係船柱に取り付けたロードセルによって 0.03s 間隔で測定している。6 箇所の係船柱のうち、B-2 および B-5 ではそれぞれ 2 本分の係留索張力をまとめて測定している。なお、それぞれのロードセルの最大容量は図-3 に示す通りである。

防舷材反力は模型に取り付けた最大容量 50N のロードセルによって 0.03s 間隔で測定した。4 基の防舷材反力は船首側から順に FD-1～FD-4 とする。

船舶の動揺 6 成分は、画像解析で算定した。船舶模型上に取り付けた 4 点の発光ダイオードを 2 方向から 0.10s 間隔でビデオ撮影し、その画像を粒子追跡法 (PTV 法) で解析し、4 点の 3 次元座標を取得した。そして、この座標値を、船体の重心を原点とする 3 成分の変位と重心を中心とする回転の動揺 3 成分に変換した。

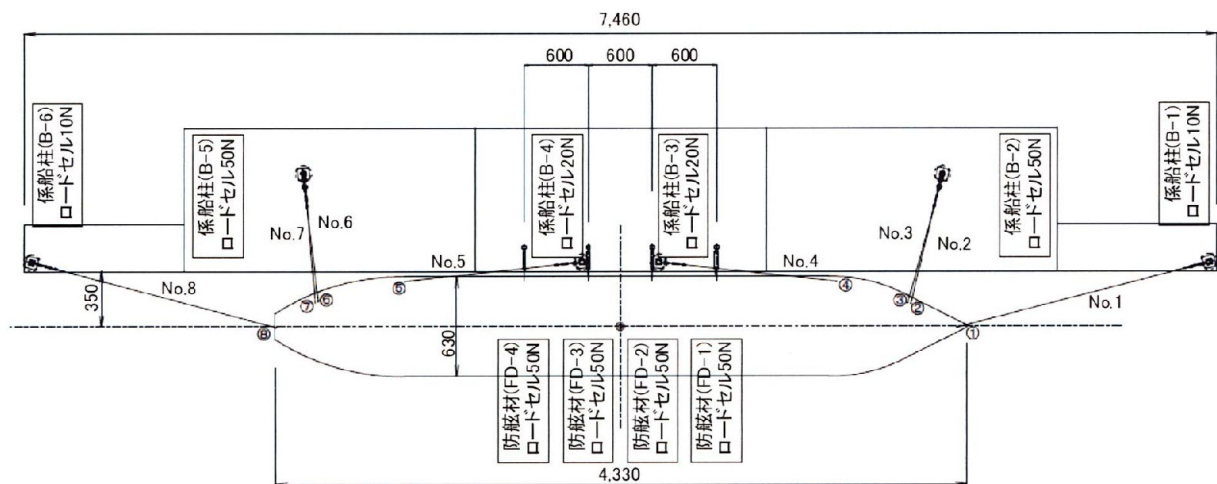


図-3 係留索および防舷材の配置

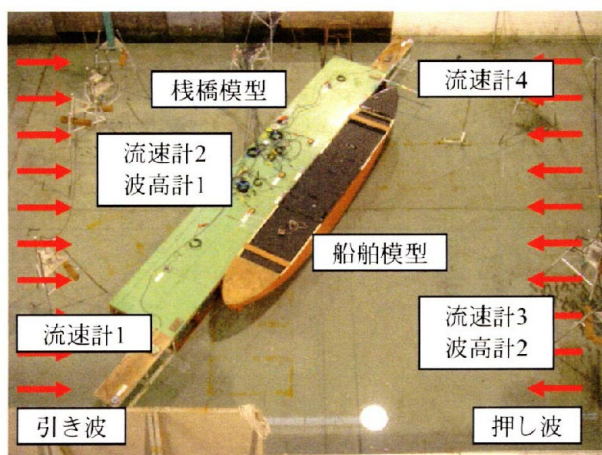


写真-2 模型の配置状況（入射角度60°）

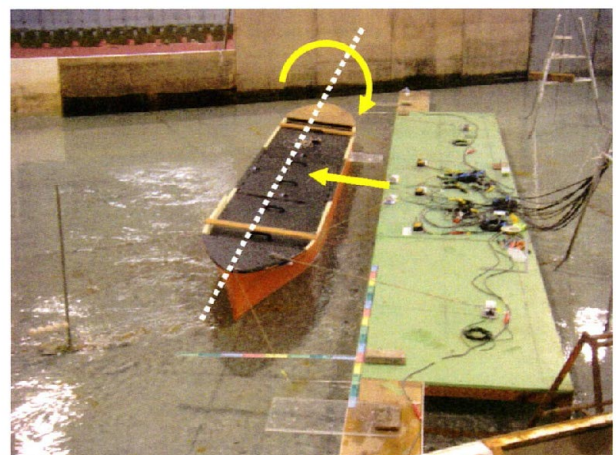


写真-3 引き波による船舶の動揺

写真-2 に入射方向 60°における模型の配置状況を
示す。水路内には容量式波高計 2 基と電磁流速計 4
基を配置して、実験時の水位変動および流速を測定
している。これらの測定間隔は 0.03s である。

3. 実験結果

(1) 船体動揺の応答特性

積載量満載の船舶に入射方向 60°，最大流速
255mm/s (1.80m/s)，周期 85s (10min)，引き波初動の
津波を作用させたときの実験状況を写真-3 に示す。
この最大流速は、4.5mの津波波高に相当する。引
き波時にはその強い流れによって、船舶が栈橋から
大きく引き離されており、プレストラインの係留索
の伸びも大きい。このとき、甲板部に繋がれた係留
索によって船舶の水平変位が制限されており、係留
索には大きな張力が作用する。そのため、Roll の
モーメントが大きくなり、船舶は栈橋方向にやや傾
いている。この実験ケースにより得られた時系列
データを図-4 に示す。係留索張力 B-2、B-5 と防舷
材反力 FD-1～FD-4 の図中には係留索模型 2 本分の
破断荷重 49.2N と防舷材模型の限界荷重 28.8N を示

す。

流速の時系列は、その変動に多少乱れがあるが、
想定した正弦波形状に近い時系列となっている。最
大流速は 255mm/s (1.80m/s)と設定しているが、実験
中の流速はこれより少し小さく、平均で 221mm/s
であった。これは船舶模型が障害物となっているた
めである。

引き波の流速が最大となったときに Sway と Roll
は最大となっており、最大値はそれぞれ-290mm (-
14.5m)，-6.2°であった。これは、流れによる抗力
が原因である。Surge は、引き波の向きに流れ始め
たときに最大値+60mm (+3.0m)となるが、Sway が
大きくなるにつれてほぼ 0 となる。逆に、押し波が
作用している間は船体が栈橋に押し付けられている
ため、船舶の水平変位が制約されて、-40mm (-
2.0m)とほぼ一定値であった。Yaw については、引
き波時に徐々に大きくなり、船舶が防舷材に衝突す
るときには、瞬間的に 1.0°以上回転していた。今
回の実験では水位の変動はほとんどなく、Heave は
1.5mm 以下であり、Pitch も他の動揺成分と比べて
変動が非常に小さかった。

入射方向 60° のケースでは、特に、プレストラ

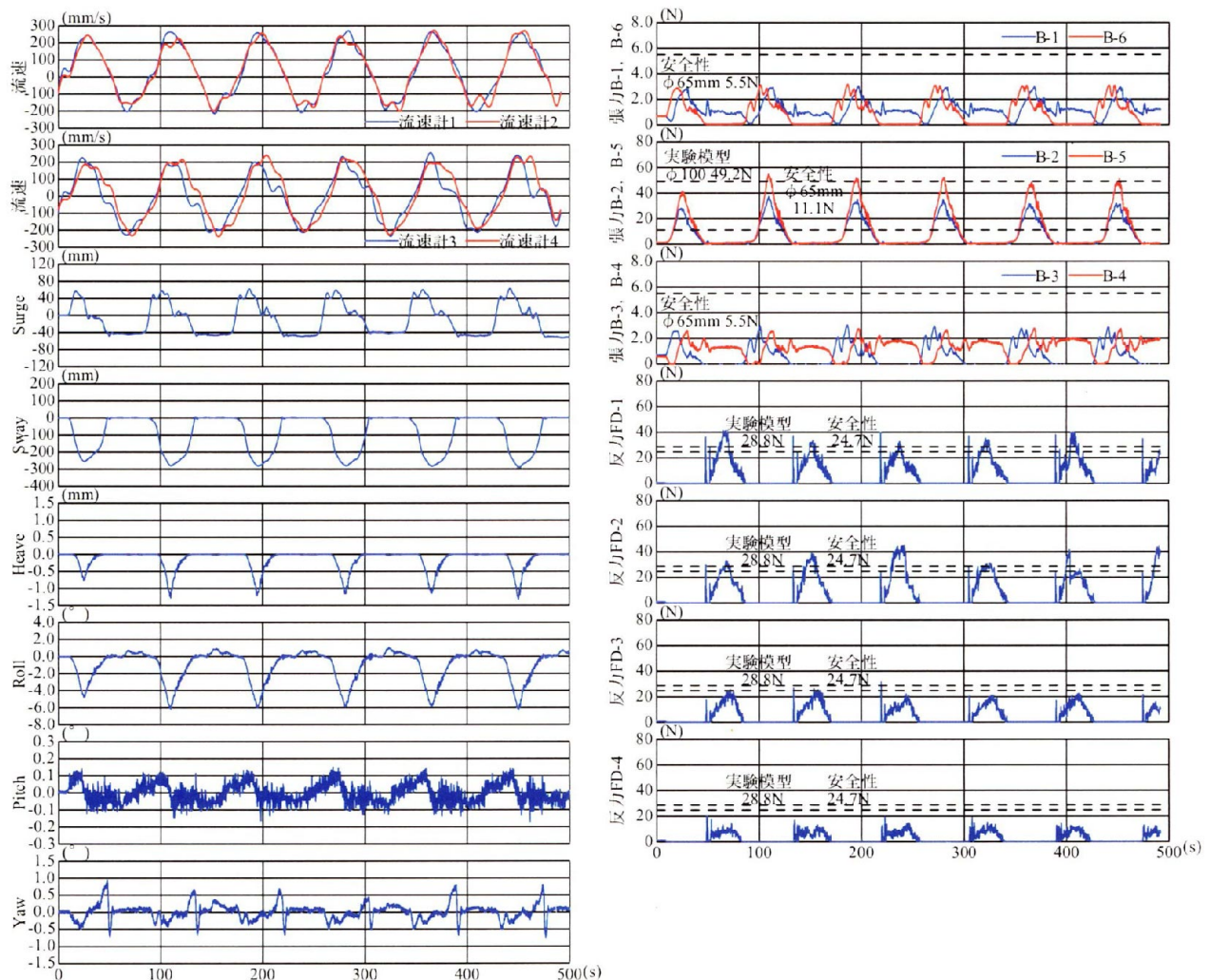


図-4 実験結果の時系列 (CASE16)

インの係留索張力 B-2 と B-5 に津波の影響が顕著に表れ、Sway が大きくなったときに、係留索が大きく伸ばされている。プレストラインの係留索は船側方向に配置されていることから、他の係留索張力よりも索長が短いことから、Sway の影響を受けやすく、張力が大きい値となった。B-5 における最大張力は模型の破断荷重 49.2N(6150kN)を超える 53.1N(6638kN)を示している。B-2 より B-5 の方が張力が大きいのは、B-5 で張力を測定している係留索の方が流れに平行に近い角度に配置されているためと考えられる。

全ての防舷材反力に共通して、反力の時系列には 1 周期の間に 2 度反力のピークが出現している。最初のピークは栈橋から引き離されていた船舶が防舷材に衝突したときの衝撃波形であり、継続時間は短いが大きな反力を示している。なお、衝撃波形は FD-1 から FD-4 まで順に出ているが、これは、栈橋から引き離されていた船舶が回転しながら防舷材に衝突するためである。次のピークは押し波によって船舶が栈橋に長時間押し付けられているときであり、細かい振動を含むが緩やかな変化を示している。

(2) 最大値の比較

表-4 に各実験条件における Surge と Sway の最大値を示す。また、船舶の動揺、係留索張力、防舷材反力を測定し、その最大値をまとめた結果を図-5～図-7 に示す。図中の番号は全 26 ケースで最大となったケースの実験番号である。

入射方向が 0°以外のケースでは、Sway は-200mm(10m)以上になることが多い。津波の入射方向は角度が大きいケースほど Sway が大きくなる傾向があり、入射方向 90° の CASE(21)では-374mm(-18.7m)と、全ケースの中で最大であった。一方、Surge は入射方向が 0°である CASE(3)で最大となる。Surge は CASE(8)や CASE(11)でも大きい値を示しており、周期が短いときに大きくなる傾向がある。なお、実験では水位を変動させていないため、Heave は Surge や Sway に比べて非常に小さかった。Roll は引き波による抗力の影響が大きいために Sway と同様に負の方向だけ大きくなっており、CASE(21)で最大となった。Pitch はどのケースでも小さく、Yaw は斜め方向から津波が作用したときに大きくなっていった。

表-4 実験結果と安全性の評価

CASE	入射方向(°)	積載量	周期(s)	最大流速(mm/s)	最大動揺量(mm)		安全性	CASE	入射方向(°)	積載量	周期(s)	最大流速(mm/s)	最大動揺量(mm)		安全性
					Surge	Sway							Surge	Sway	
(1)	0	満載	85	99	42	-1	○	(14)	60	満載	85	99	25	-131	○
(2)	0	満載	85	152	98	-1	○	(15)	60	満載	85	152	54	-220	×
(3)	0	満載	85	255	192	-8	○	(16)	60	満載	85	255	60	-291	×
(4)	0	満載	170	99	11	-1	○	(17)	60	満載	170	99	12	-99	○
(5)	0	満載	170	152	19	-2	○	(18)	60	満載	170	152	-17	-187	×
(6)	0	満載	170	255	56	-12	○	(19)	60	満載	170	255	27	-237	×
(7)	0	満載	254	255	41	-30	○	(20)	60	満載	254	255	30	-260	×
(8)	0	半載	85	255	106	-4	○	(21)	90	満載	85	255	31	-374	×
(9)	0	半載	170	255	24	-4	○	(22)	90	満載	170	255	33	-310	×
(10)	0	半載	254	255	21	-8	○	(23)	90	満載	254	255	30	-313	×
(11)	30	満載	85	255	169	-200	×	(24)	90	半載	85	255	35	-245	×
(12)	30	満載	170	255	70	-196	×	(25)	90	半載	170	255	34	-223	×
(13)	30	満載	254	255	45	-197	×	(26)	90	半載	254	255	28	-227	×

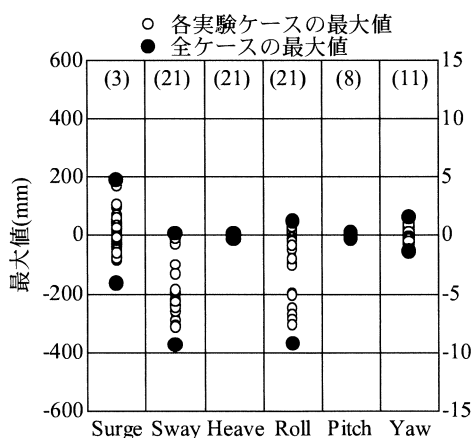


図-5 動揺量の最大値

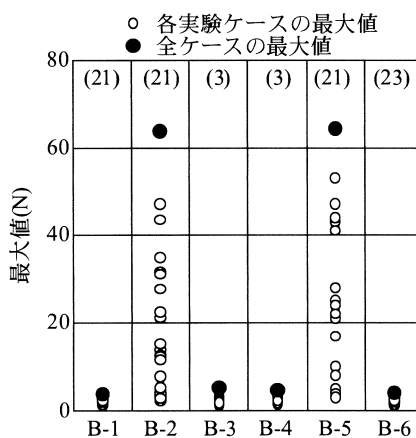


図-6 係留索張力の最大値

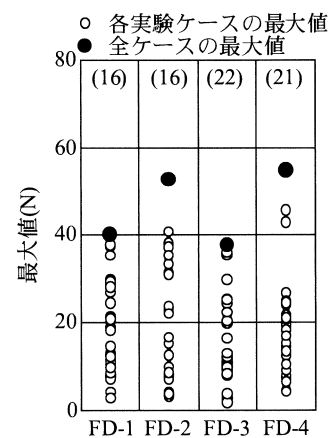


図-7 防舷材反力の最大値

Surge や Sway については、船舶は津波の入射方向と同じ方向への動揺が大きくなりやすいことが分かる。Surge や Sway が最も大きくなった CASE(3) と CASE(21)はともに満載で、最大流速が大きく、周期が短い条件であった。よって、上記の条件では船舶の動揺が大きくなりやすいと考えられる。また、同じ実験条件で、満載時の CASE(21)～(23)と半載時の CASE(24)～(26)を比較すると、Surge はほとんど変わらないが、Sway はそれぞれ満載時の方が明らかに大きい値を示している。これは、満載時の方が没水深が大きく、流れによる抗力を強く受けるためである。

係留索張力 B-1, B-2, B-5 は CASE(21)で最大となった。CASE(21)では Sway や Roll が最大となっており、それらの影響で係留索張力が大きくなったと考えられる。また、CASE(21)において、プレストラインは往復流にほぼ平行に配置されており、B-2, B-5 はその影響を特に大きく受けていると考えられる。一方、スプリングラインの係留索張力 B-3, B-4 は CASE(3)で最大となった。スプリングラインは、バウラインやスターンラインよりも索長が短いために、入射方向 0° のケースでは Surge の影響を受けて張力が大きくなったと考えられる。

防舷材反力 FD-1 と FD-2 は CASE(16)で、FD-3 と FD-4 は CASE(21), (22)で最大となった。入射方向 60°, もしくは 90°のときには Sway が大きくなったために防舷材反力も大きくなったと考えられる。なお、この 3 ケースは満載で、最大流速が大きい条件であった。

(3) 係留船舶の安全性

50,000DWT コンテナ船に対して標準的な設計手法で係留系を選定すると、例えば、ナイロンエイトロープφ65mm と V 型防舷材が選定される。ここでは、これらの強度から係留船舶の安全性を評価する。係留索の破断荷重は、B-1, B-3, B-4, B-6 では 5.5N (692kN), B-2 と B-5 では 11.0N (1384kN), 防舷材の圧縮限界荷重は、FD-1～FD-4 では 24.7N (3088kN), 吸収エネルギーは 119N・mm(236kN・m)である。これらの値と実験値を比較して係留船舶の安全性を評価した結果を表-4 中に示す。

入射方向 0° のケースでは他の条件に関わらず、係留船舶は安全であった。波高 90mm (4.5m)に対応する流速 255mm/s (1.80m/s)以上の津波が作用しても安全性に問題は生じない。これは、津波の流れが船首側から作用するとき、船舶形状の特性上、抗力がほとんど生じないためである。

入射方向 30°, 60°, 90° のケースでは、波高 34mm (1.70m)に対応する一番小さい流速 99mm/s (0.70m/s)のケースを除いて、係留索や防舷材にその限界荷重を超える力が作用しており、係留船舶は危険な状態である。津波の流れが船側から作用するときには、大きい外力が作用するものと思われる。特に、CASE(21)では、全ケースの中で係留索張力が最も大きくなっていたことから、周期が短く、流速

が大きい津波が船側方向から来襲した場合に係留船舶は最も危険な状態となると考えられる。また、CASE(21)では Sway が最も大きくなっており、係留船舶の安全性を評価する上では、Sway の大きさが重要な指標になるものと考えられる。なお、今回の係留条件では、Sway が-187mm (-9.4m)を超えたケースで係留船舶は危険と判定している。

4. 結論

本研究では、模型実験により係留船舶に津波として往復流を作用させ、船舶の動揺応答特性および係留索や防舷材へ及ぼす影響について確認した。そして、係留索張力と防舷材反力の測定結果から係留船舶の安全性を評価した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ・船舶は津波の流れと同じ方向へ動揺し、満載で、最大流速が大きく、周期が短い条件のときに動揺量が大きくなる傾向があった。
- ・入射方向60°もしくは90°のときには、大きいSwayが生じるため、係留索張力や防舷材反力が大きい値を示す。
- ・流速の大きい津波が船舶の斜め方向もしくは船側方向から作用するケースでは、船舶や係留設備が損傷する可能性が高くなる。

謝辞:本研究を進めるに当たり、高山知司京都大学名誉教授には実験条件や実験手法について有益なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会（第16回）資料，2003
- 2) 海上保安庁：海上保安庁の津波対策等について，15p，2005.
- 3) 富田孝史，本多和彦，菅野高弘，有川太郎：インド洋津波によるスリランカ，モルディブ，インドネシアの被害現地調査報告と数値解析，港湾空港技術研究所資料，No.1110，pp.31-36，2005.
- 4) 大垣圭一，米山治男，鈴木貴志：港内係留船舶の津波影響に関する数値計算，海洋開発論文集，第24巻，pp.99-104，2008.
- 5) 榊原繁樹，久保雅義，小林英一，大竹祐一郎，原田賢治：津波来襲時の港内係留船舶の運動特性の違いについて，日本航海学会論文集，118号，pp.159-168，2008.
- 6) 津田宗男，大木泰憲，高山知司，東野洋司，林秀和：津波による係留船舶の動揺特性および係留施設への衝突力に関する模型実験，海洋開発論文集，第22巻，pp.535-540，2006.
- 7) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.826-832，1999.
- 8) 上田茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究，港湾技研資料，No.504，pp.337-342，1984.
- 9) 北島昭一，阪本浩，岸正平，中野拓治，柿崎秀作：港湾構造物設計基準作成に当たっての諸問題について，港湾技研資料，No.30，pp.53-64，1967.