

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

EXPERIMENTS ON THE MOTIONS OF A VESSEL MOORED IN TSUNAMIS
AND ON THE IMPACT FORCES ON SHIP MOORING FENDERS

津田宗男¹・大木泰憲²・高山知司³・東野洋司⁴・林秀和⁵

Muneo TSUDA, Yasunori OOKI, Tomotsuka TAKAYAMA, Hiroshi HIGASHINO, Hidekazu HAYASHI

¹正会員 博(工) 東亜建設工業株式会社 西日本設計室 (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町一丁目5番15号)

²修(工) 東亜建設工業株式会社 西日本設計室 (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町一丁目5番15号)

³フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 修(工) 京都大学工学研究科 都市環境工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵学生会員 京都大学工学部 地球工学科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

The research on the properties and inundation effects of tsunamis has been much advanced recently, but the research on the damages of port facilities and vessels moored at them due to tsunamis has not been pursued sufficiently. It is essential for the reduction of the damages to take effective measures under the abundant knowledge of the damage mechanism. The experiments on the motions of a vessel moored at a wharf or a dolphin type facility in tsunamis were performed to investigate the characteristics of tensile forces of mooring ropes and impact forces on mooring fenders. The sway motion is predominant and the other two motions of roll and heave are too small to affect the mooring forces. The impact forces of the vessel on the fenders are closely related to hitting speed of the vessel.

Key Words : *Tsunami, Motions of a moored vessel, Sway motion, Tensile forces of mooring ropes, Impact forces on fenders*

1. はじめに

東海・東南海・南海地震津波が今世紀半ばには高い確率で発生すると言われていることや、スマトラ沖地震津波による大規模な被災状況が報道されたこともあり、巨大津波による被害状況の推定や対策法の確立が大きな命題となっている。津波の特性や浸水予測などについては研究が進められ、その成果は被害の推定や防災対策に利用されている¹⁾。また、浮体の動揺や漂流に関しても研究が進められている²⁾³⁾ものの、主要なインフラである港湾の被害や対策についての研究はスタートラインに過ぎない。

津波来襲時には、船舶は港外退避が原則である⁴⁾が、狭い航路や曳船数の制約から、津波来襲までの短い時間に港内に係留している全ての大型船舶を退避させることは不可能に近い。また、荷役中の船舶は地震による荷役用設備の故障などで離岸できない可能性もある。津波作用時に退避できない大型係留船舶の挙動や、それにとま

なう衝突によって生じる港湾施設の損傷については、中屋ら⁵⁾が岸壁係留された大型船舶の動揺特性を数値シミュレーションにより解析した例はあるものの、系統的な研究はいまだ行われていない。

本研究では、津波の来襲にともなう大型係留船舶の動揺特性、およびその衝突によって生じる係留設備の反力特性を明らかにするとともに、船舶および港湾施設の被災低減法を提案することを目的として、模型実験を実施した。

2. 実験の概要

(1) 実験水路および縮尺

実験は、水路長50.0m×水路幅1.0m×深さ1.5mの2次元造波水路で行った。ピストン型造波装置の造波ストロークは±1.0mと比較的長いものであるが、今回の実験では長い周期の造波ができるよう、造波開始前に造波板位置を可動範囲の端部に移動し、有効全ストローク

を使用して造波を行った。

水路は、図-1に示すように、造波板から21~26mの間を勾配1/10の斜面で摺り付け、それより後方は水平床とした。水平床上には砕石マウンドを設け、造波板から29mの位置に係留施設模型を設置した。

実験の縮尺は1/50とした。この縮尺では、現地スケールで周期1分程度であれば、静水面からの津波高さ3m程度の造波は可能であるが、周期の長いケースと比較するため、最大津波高さは1.5mとしている。

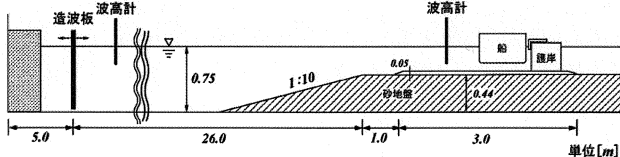


図-1 実験水路の概略図

(2) 実験模型

a) 船体模型

対象とした船舶はパナマックス7万トン級であり、岸壁およびドルフィンに係留された状態で津波を作用させた。実験の縮尺を極力大きくするため、船体模型は船体中央部の断面形状で船軸方向に一樣な2次元模型とした。このため、本実験で対象とする船体挙動は、Sway, Heave, Rollの3成分である。

船体模型の寸法は、幅0.64m×高さ0.39m×奥行き0.99mであり、空載時の質量は105.9kgである。満載時のケースでは、船体内部に重錘を積載し質量を150.0kgとした。なお、空載時の船体の重心位置がそのまま実船と一致するように模型を製作した。満載時には重錘を入れ、発泡スチロール製の架台によって重錘の位置を調整して、実船と一致させた。模型重心の位置は空載時に船底から0.134m、満載時に0.184mの高さである。また、船底のクリアランスは、H.W.L.時の空載で0.127m、満載で0.057mであり、L.W.L.時の空載では0.093m、満載で0.023mである。

b) 係留施設

係留施設は、岸壁およびドルフィンの2形式である。岸壁模型はコンクリート製であり、その躯体上に防舷材模型を2基取り付け付けた。ドルフィンは多数の基礎杭で支持された構造であるが、防舷材模型の制約から、φ10cmの円筒とφ4cmの円柱各2本で構成されている。ただし、波の透過率は実際のドルフィンと同程度となるようにしている。

c) 防舷材模型

防舷材は定反力型を対象とし、コイルバネ、スライダー、重錘を組み合わせ、その反力特性を再現した。定反力に至るまでの区間はコイルバネにより荷重と変位が比例し、定反力の区間では、ワイヤーを介して重錘を取り付けたスライダーがスライドすることによって、反力一定で変位が増加していく特性を表した。防舷材の前面には、図-2に示すように、1箇所当り上下2個の荷

重計を取り付け、船体衝突時の荷重を計測している。

図-3は防舷材模型の反力-変位特性を示したものである。ヒステリシス特性を含めて良好な再現性を示している。

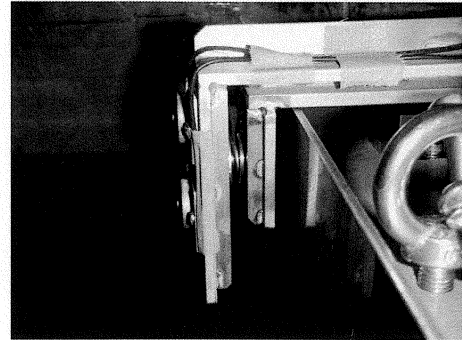


図-2 防舷材模型

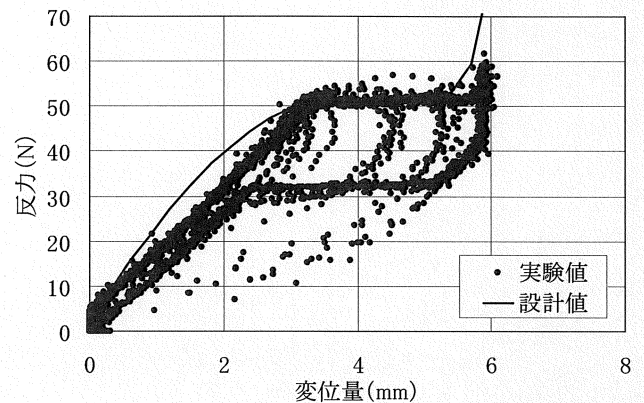


図-3 防舷材模型の特性

d) 係留索模型

係留索は索径65mmのナイロンロープを対象とした。その張力特性は3種類のコイルバネを組み合わせでバネ定数を近似した。図-4に示すように、3種類のバネを直列に接続しており、張力の小さい区間では全てのバネが同時に伸びるようにしている。それぞれのバネには伸びを制限するワイヤーが取り付けられており、一定量以上には伸びない構造としている。これにより、張力の増大につれてバネ定数の小さいものから順に伸びが止まり、合成バネ定数が変化していくようになっている。この係留索模型を船体上面に滑車を介して這わせ、その端部に張力計を取り付けている。

図-5は係留索模型の外力-変位特性を示したものであり、良好な再現性を示している。

(3) 計測項目

実験計測項目は、水面変位（沖・岸）、流速（船体沖側）、防舷材の反力（片側2箇所、計4箇所）、係留索の張力（実験ケースにより、2箇所または4箇所）、船体の変位である。計測器の設置位置は図-6に示すとおりであり、船体の変位は、鉛直方向2点、水平方向1

点をレーザー変位計にて計測し、Sway, Heave, Rollに換算した。また、サンプリング周期はいずれも100Hzとしている。

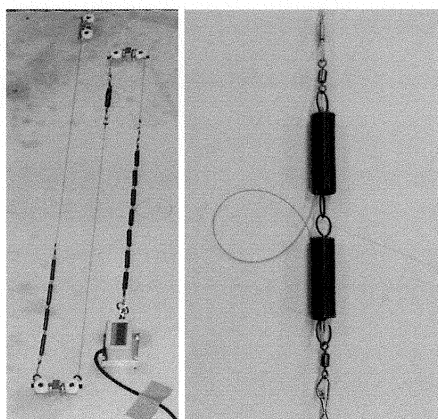


図-4 係留索模型

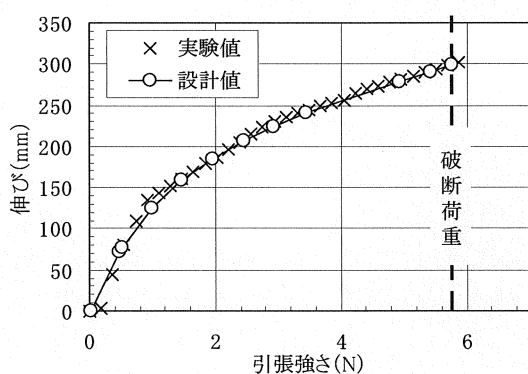


図-5 係留索模型の特性

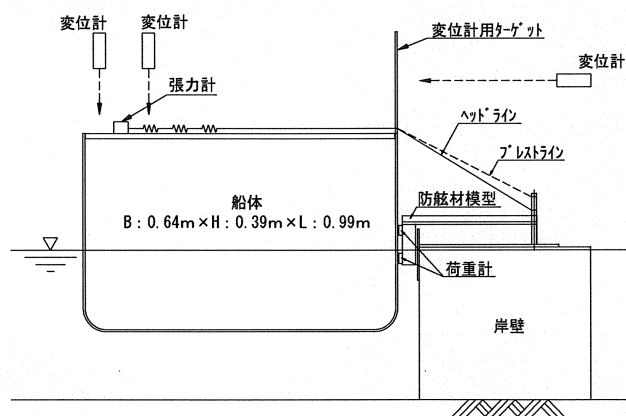


図-6 計測器の設置位置

(4) 実験ケース

実験ケースは、表-1に示すように係留施設、周期、津波高、潮位、载荷状態（喫水）、係留状態を適宜組み合わせるとともに、津波が引波で始まるケース（引波初動）と押波で始まるケース（押波初動）についても実施し、各ケース3回ずつ繰り返し実験を行った。なお、

表-1に示すのは現地スケールでの値であり、以降も注記の無い限り実験ケースは現地スケールで表記する。

表-1 実験ケース

縮尺	1/50
係留施設	岸壁, ドルフィン
周期	1, 3, 5, 15 min
津波高	0.25, 0.50, 1.00, 1.50m
水深	13.0m
潮位	H.W.L+1.70m, L.W.L±0.0m
载荷状態(喫水)	空載(8.0m), 満載(12.0m)
係留状態(係留索本数)	ヘッドラインのみ(2本), プレストライン増し取り(4本)
津波の始まり	引波初動, 押波初動

※数値は現地スケール

3. 実験の結果

(1) 船体の動揺特性

a) 計測波形の一例

図-7は、空載状態の岸壁係留で、周期3分で津波高1.0mの津波を引波初動で作用させた場合の計測波形を示したものである。Heaveは水面変位に同調している。また、Rollは、ほとんど生じておらず、防舷材衝突時の衝撃によってわずかに生じる程度である。Heave, Rollについては、全てのケースで同様の特徴を示していた。

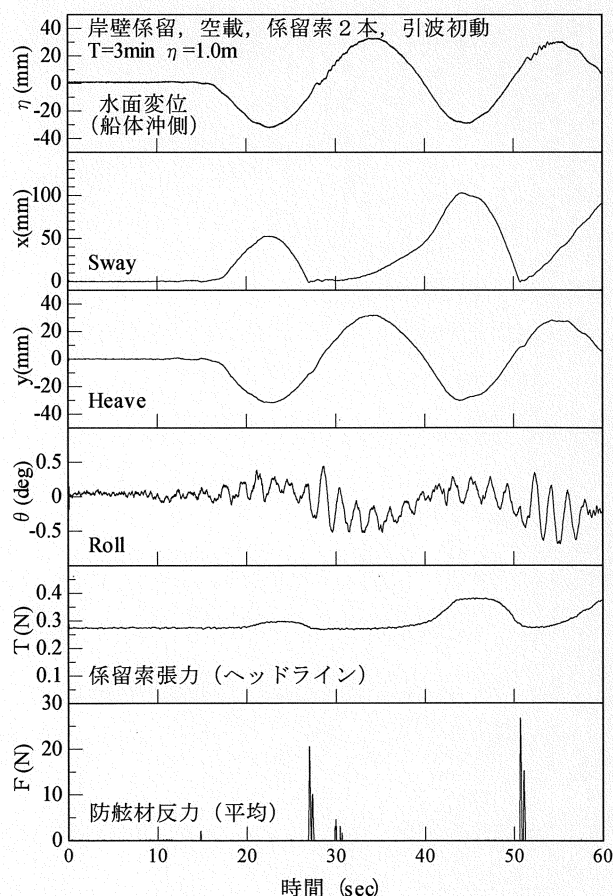


図-7 計測波形の一例

一方、Swayは船体の質量や係留状態など、条件の違いによってその特性が大きく異なっている。津波作用時の係留船舶の挙動はSwayが支配的となることが分かった。

b) 船体動揺の軌跡

図-8における上段と下段の図は、それぞれ、岸壁およびドルフィン係留における引波初動時の1、2波目の船体動揺の軌跡を示したものである。横軸 x が水平変位、縦軸 y が鉛直変位を示している。岸壁係留については周期3分、津波高1.0mで、空載および満載のケースを、ドルフィン係留については、同じ周期で津波高0.25mの空載のケースを示している。図中の数字は船体移動の順番を示したものである。なお、上段と下段のプロット間隔はいずれも0.1sである。

岸壁係留、空載のケース(①→⑤)では、水位の下降にともなって沖合に引き離された後、水位の上昇が始まると直ちに岸側に戻り始め、静水面近くで防舷材に衝突する。そして、その位置で再び波が引き始めるまで、防舷材をこすりながら水位とともに上昇する。しかし、岸壁係留、満載のケース(1→5)では、水位の下降にともなって沖合に引き離された後、水位の上昇が始まって少し経ってから岸側に戻り始め、波の峰近くになった時点で防舷材に衝突する。これは船体を係留しているバネに関係していると考えられ、質量の大きい満載時の方が相対的にバネが弱くなるためと考えられる。

一方、ドルフィン係留の場合には、津波高が岸壁の場合に比して1/4であるにも関わらず、水平移動は同じ空載時の岸壁の場合に比べて4倍程度と非常に大きい。これは、岸壁の場合には津波がせき止められるために、流速がドルフィンの場合に比べて小さくなるためである。

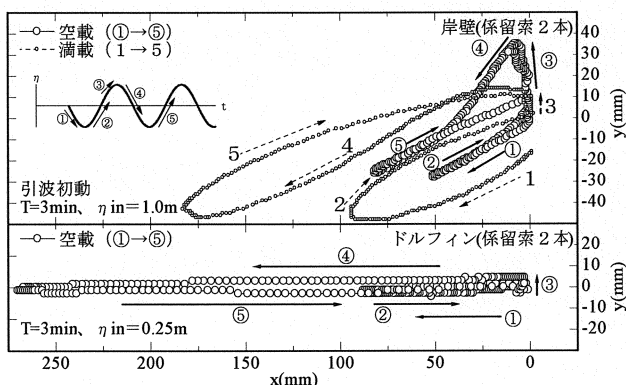


図-8 船体重心位置の軌跡(1, 2波目)

c) Sway

図-9の中で、上段の図は空載と満載のケース、中段の図はヘッドラインのみ(係留索2本)とブレストラインを増し取り(係留索4本)したケース、下段の図は引波初動と押波初動のケースのSwayを比較したものである。

岸壁係留と比較して、ドルフィン係留の方が大きいことが分かる。ドルフィン係留の場合の津波高は最大で0.5mであるにも関わらず、岸壁係留に比べてSwayは非常に大きく、係留索が破断する位置まで沖に流されるケー

スがいくつも見られた。これは、ドルフィンの場合、水の動きを妨げるものがなく、船体が流れに乗って大きく移動するためである。

Swayは空載に比べて満載の方が大きくなるが、この理由については、係留バネによるものであることを既に上で述べている。

係留状態の違いでは、ブレストラインを増し取りし係留索4本とした場合の方がSwayは小さくなる。特にドルフィン係留の場合には流れに乗って水平方向に移動する力が顕著であるため、それに抗する方向に作用するブレストラインを増し取りすることは、Swayを抑えるためには効果が大きい。ただし、その効果は、空載と満載で異なっており、空載時には25~30%程度のSwayになるのに対し、満載時には70~80%程度に留まっており、満載時の増し取りは、それほど効果が期待できないといえる。

下段の図に示すように、Swayは引波初動よりも押波初動の方が大きくなる傾向が見られた。これは、引波初動の第1波目が静水面から波が引いていくのに対し、押波初動では一度水面が上昇した状態から引いていくため、沖方向への力が長時間作用することに起因する。定常状態になれば、波の初動に関わらず動揺特性は同じ傾向になると考えられるが、津波は数波であることが多いため、津波初動によって被災の規模が異なることも考えられる。

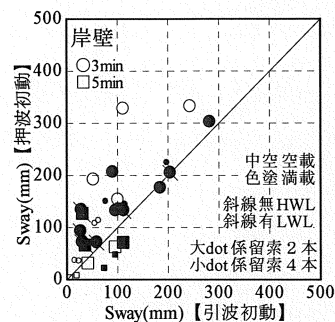
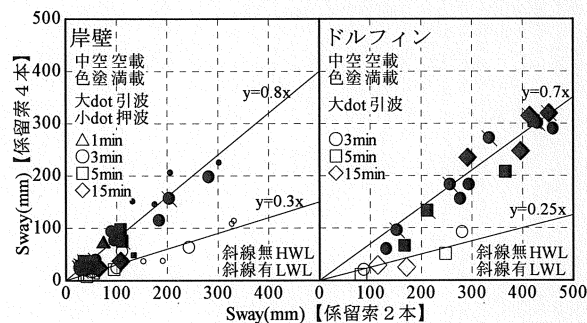
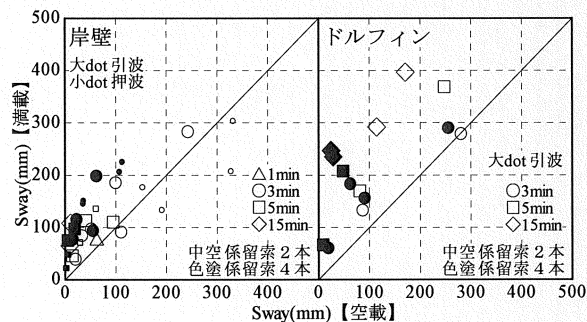


図-9 Swayの比較

d) 防舷材反力

図-10では防舷材反力について、上段の図で空載と満載のケース、下段の図でヘッドラインのみとブレストラインを増し取りしたケースを比較したものである。

岸壁係留に比べてドルフィン係留の方が大きい防舷材反力が生じている。岸壁係留の場合、流速は岸壁に近づくほど小さくなるのに対して、ドルフィン係留では津波はドルフィンを通過するため、同じ流速が作用し続け、大きな衝突力を発生させる。

载荷状態の違いを見ると、防舷材反力は満載時の方が大きくなっている。これは満載時の船体質量が空載の場合より大きいことが主たる原因である。

係留状態の違いから比較すると、ドルフィン係留の場合にはほぼ全てのケースで、防舷材反力は増し取りした係留索4本の方が小さく出ており、増し取りによってSwayを抑えることで、防舷材反力も小さくすることができ。しかし、岸壁係留の場合を見ると、防舷材反力は満載のケースで係留索4本の方が大きくなるケースも見られ、Swayが小さくなくても、防舷材反力が大きくなっている。これは、満載のケースでは、増し取りしてもSwayは70～80%に低減する程度であるため、Swayがそれほど減っていないにも関わらず係留索による張力が作用し、船体が大きな速度で衝突するためであると考えられる。

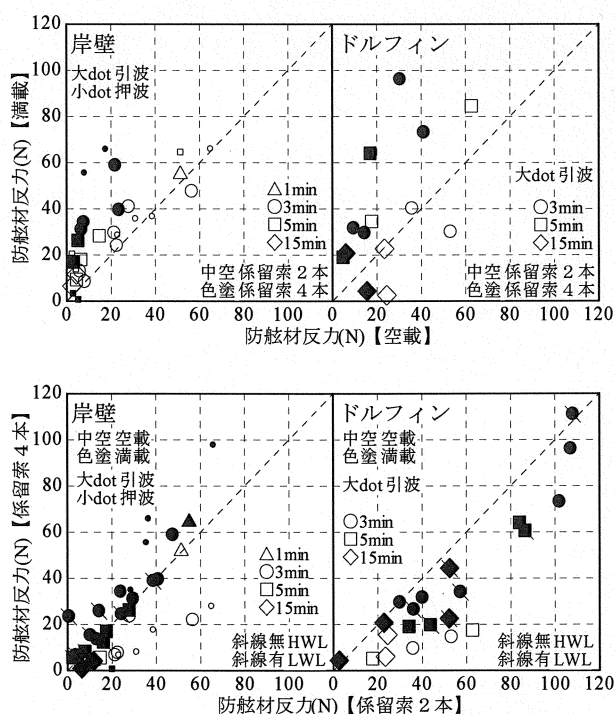


図-10 防舷材反力の比較

e) 防舷材衝突時の水面位相

図-11は、船体が防舷材に衝突した時点の水面の位相を比較したものである。図中の $-\pi/2$, $+\pi/2$ がそれぞれ、水面が最も下がった谷、最も上がった峰を指してい

る。位相が負の場合には水面が静水面に達する前に防舷材に衝突している場合であり、位相が正の場合にはその逆である。

岸壁係留の場合には $-\pi/2$ から $+\pi/2$ の間に広く分布するのに対し、ドルフィン係留では、負の側に多く分布している。ドルフィン係留の場合、流れによる抗力が最も大きく卓越するためであり、他の実験条件の違いが現れにくいためだと考えられる。

積載状態の違いを見ると、岸壁係留では、空載の場合に負の側、満載の場合に正の側に偏って分布しており、空載より満載の方が防舷材への衝突が遅くなることが分かる。一度沖方向へ流された船体は、質量が大きいほど岸方向へ反転し難くなるため、防舷材への衝突が遅くなるといえる。一方、ドルフィン係留の場合には積載状態の違いによる影響は小さい。

係留状態の違いでは、岸壁係留の場合には、係留索2本のケースでは正の側に、係留索4本のケースでは0付近を中心に分布している。ドルフィン係留の場合には、係留索の違いによらず、いずれも静水面より若干、負の側に分布しており、係留索の影響はあまり見られない。岸壁係留の場合には流れが小さいため、係留索の効果が相対的に大きく現れているものと考えられる。

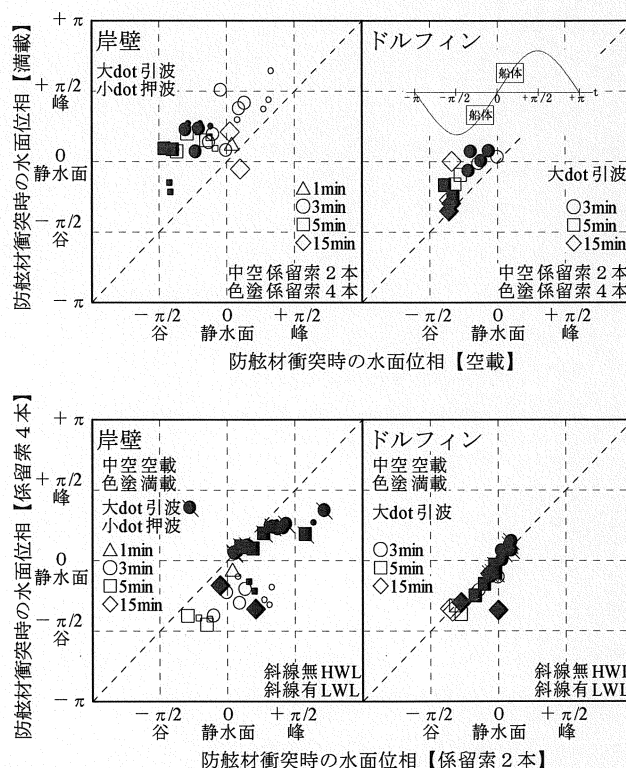


図-11 衝突時の水面位相の比較

(2) 動揺特性間の相関

図-12は、船体が防舷材に衝突する速度と、防舷材反力を示したものである。衝突速度は、実験で得られた船体前面波高を用いて算出した水粒子速度で無次元化し

ている。また、防舷材反力は、津波高さおよび没水面積を用いて無次元化している。

図には種々の実験条件下で得られた値を全てプロットしているが、条件に関わりなく、衝突速度と防舷材反力には高い相関があることが分かる。また、その関係は、岸壁係留、ドルフィン係留いずれも同様で、無次元防舷材反力は船体の無次元衝突速度の6倍前後を示しており、衝突速度と防舷材反力には密接な関係があることが判明した。

ただし、今回の実験では、直接衝突速度を導くことのできるほど高い相関をもつデータは得られなかった。衝突速度に関わる要素としては、津波の周期、高さ、Swayの大きさ、係留索の張力、衝突時の津波の位相など、種々の要素が複雑に関わっており、実験結果から衝突速度を導くためには、さらに条件を変えた実験を行い種々のデータを蓄積することが必要であると考えられる。

なお、特にドルフィン係留の場合、津波高が0.25～0.5mと小さいにも関わらず、衝突速度は0.3～0.6m/sとなり、係留施設の設計で適用する接岸速度0.1～0.2m/sより大きいことに注意が必要である。

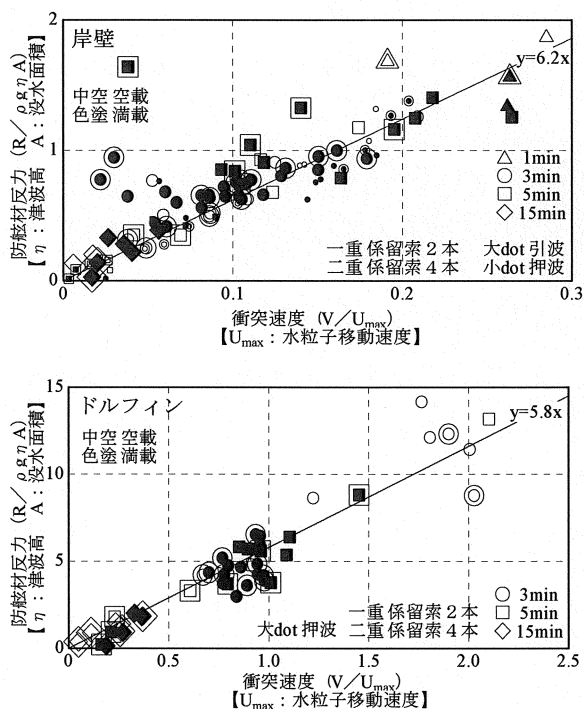


図-12 衝突速度と防舷材反力の関係

4. まとめ

本実験によって得られた、主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 津波作用時の係留船舶の挙動では、Sway が支配的であり、Heave は水面変動に同調し、Roll は防舷材衝突時にわずかに生じる程度であった。
- 2) 岸壁係留とドルフィン係留で実験したところ、ドルフィン係留の場合に、津波高が 0.5m と小さいにも関わらず、係留索が破断する位置まで沖合に引き離される

ケースがあった。ドルフィン係留の場合には、岸壁のように水の流れをせき止めるものがなく、船体が流れに乗って速く移動する。この結果、防舷材衝突時の反力も大きくなった。沖合のドルフィンでは接岸力から決まる設計荷重より大きい力が作用する可能性があり、防舷材のみならず、ドルフィンの構造本体が損傷する危険性もある。

3) 津波が引波で始まる場合よりも押波で始まる場合の方が Sway は大きくなる傾向が見られた。これは、押波で始まる場合一度水面が上昇した状態から引いていくため、その分沖方向への力が長く作用するためである。沖方向への移動量が大きくなると、係留索が破断し、船舶が漂流する可能性が高くなる。津波の初動が引波か押波かによって、被災の規模が異なることも考えられる。

4) Sway を小さくするためにプレストラインを増し取りすることは、多くのケースで有効である。空載の場合で 25～30%、満載の場合で 70～80%程度に Sway を低減する効果があった。しかし、岸壁係留で満載の条件では、Sway の低減効果以上に、係留索の張力が相対的に大きく作用するため、防舷材反力は増し取りした場合の方が大きくなるという結果となった。係留索の破断、船舶の漂流防止に対しては、増し取りは効果があるものの、防舷材への再衝突に際しては、船舶や係留索によっては増し取りが有効でないケースもある。

5) 計測結果の相関を調べたところ、船舶衝突時の無次元防舷材反力は、無次元衝突速度と密接な関係があることが判明した。したがって、衝突速度を適切に推定できれば、この関係から係留施設に作用する外力を算出することができ、構造部材の耐力検証などに利用することができる。なお、衝突速度は、係留施設の設計で適用する接岸速度よりも大きくなることに注意が必要である。

6) 衝突速度には種々の要素が複雑に関わっており、実験結果から導くためには、さらにデータの蓄積が必要となる。あるいは、実験とは別に簡便に衝突速度を算出する手法の開発などが今後の課題となる。

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資料，2001～2006。
- 2) 増田光一，佐竹寛之，高村浩彰，宮崎 剛：津波による沿岸域に係留された浮体式構造物の運動と係留索張力応答の簡易推定法に関する研究，海岸工学論文集，第43巻，pp. 956～960，1996。
- 3) 小林英一，越村俊一，久保雅義：津波による船舶の漂流に関する基礎研究，関西造船協会論文集，第243号，pp. 49～56，2005。
- 4) 高橋 勝：「津波が予想される場合の船舶安全確保に関する調査研究委員会」での検討概要，海と安全，No.523，pp.16～23，2004。
- 5) 中屋行雄，津田宗男，青野利夫，杉浦秀之，本多将人：港湾内に進行する津波の推定と係留船舶への影響評価の試み，海洋開発論文集，第21巻，pp.133-138，2005。