

浮体動揺低減に関する新技術

Floating Structure Motion Suppression

技術本部 松浦正己*¹ 西垣 亮*²
 船舶・海洋事業本部 矢野州芳*³
 広島製作所 木原一 禎*⁴

浮体橋などの浮体式港湾設備のバリアフリー化促進や作業船の稼働率向上のために、浮体動揺低減化の要求はこれまで以上に高まっている。本報では小型浮体構造物の動揺特性及び従来の動揺低減技術の問題点についてまず解説し、これまで培ってきた動揺推定技術⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾及び水槽実験技術を基に開発した当社の最新動揺低減技術を紹介する。第一の例は、浮体橋などの沿岸浮体構造物を対象としたものであり、浮体形状の工夫や減揺タンクの装備によって横揺れを低減する方法である。第二の例は、作業船を対象に開発中のMSboard (Mitsubishi Motion Suppression Board) である。本コンセプトは船体との間にわずかなすきまを設けて動揺低減板を付加的に取付けるアイデアで、簡易な方法にもかかわらず横揺れを半減できる。

Motion suppression for floating structures has been developed to attain better performance because wave-induced motion is to be supposed that it causes discomfort and danger in cargo handling and device damage. This paper describes the motion characteristics of small floating structures and newly developed technologies of motion suppression based on theoretical calculations and model tests. The first example is roll reduction for floating structures such as coastal piers. Another example is a unique concept under development for work vessels. The concept, called the Mitsubishi motion suppression board (MSboard), consists of simple flat plates attached to the bottom of a floating structure with a narrow gap between the board and the structure. Roll from waves is cut to half or less.

1. はじめに

浮体構造物は干満に対する追随性があり、陸上と船舶との接続構造物として優れている。浮体下部は海水交換性があることから、周辺環境への影響が小さい等の特徴もある。このような利点を生かして近年、生活の利便性と自然環境の保全を両立させる手段の一つとして、浮体構造物を用いた海洋空間の有効利用が注目されている。浮体構造物の適用範囲を拡大するためには、浮体の特性上避けられない動揺を低減して人や設備への影響を小さくする必要がある。波浪中動揺とともに、船が通過するときに発生する航走波による揺れの問題もある。

起重機船や、地盤改良船などの作業船は、従来に比べて外洋に面した自然条件の厳しい海域での港湾整備工事にも従事することが多くなった。船舶の波浪中動揺を低減させる従来の方法には各種あり、減揺タンク（アンチロールタンク）等を船体に装備する方法などがある。しかしながら、十分な復原性を有することが第一に要求される作業船の特質上から、減揺タンクなど復原力が低下するタイプは適用できないことが多い。減揺装置には大きなコストを掛けることができないので、低コストでかつ効果が大きい技術が要求されているが、これにこたえられる技術はこれまでになかった。

本報では浮体橋や作業船などの小型浮体構造物の動揺特性及び従来の動揺低減技術の問題点についてまず解説し、これまで培ってきた波浪中動揺推定技術⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾及び水槽実験による経験から得られた知見を基に開発した当社の最新動揺低減技

術の2例を紹介する。その一つは、浮体橋などの沿岸浮体構造物を対象とした各種動揺低減技術であり、もう一つは、作業船を対象に開発中の動揺低減コンセプトMSboard (Mitsubishi Motion Suppression Board) である。

2. 浮体動揺特性と従来の動揺低減技術

2.1 浮体動揺の特徴

浮体構造物は図1に示すように波浪中において剛体運動として6自由度の動揺をする。各運動モードの中でその大きさが最も大きく重要なのが横揺れ（Roll）である。図には横揺れと縦揺れ（Pitch）の応答関数の様子を示す。最大波傾斜に対する応答振幅の比で無次元振幅を表し、これを波長船長比ベースにしている。横揺れは減衰が小さい運動であり、固有周期に相当する波周期で共振して大きな動揺となる。そのため、横揺れはその固有周期を把握することが重要である。一方、縦揺れは極めて減衰の大きな運動であり、共振現象は発生せずに波による強制力が大きな波周期域で動揺が大きくなる。他のモードに比べて大きな横揺れが動揺低減の対象となるのがほとんどで、本報でも横揺れを低減する技術について示す。

2.2 従来の動揺低減技術

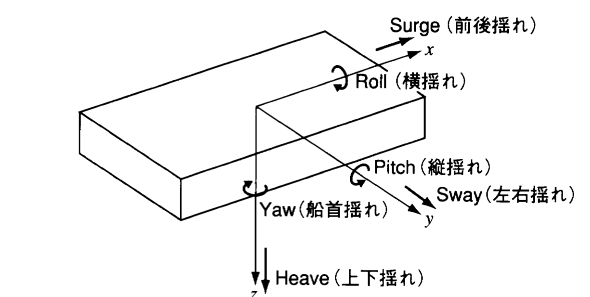
従来の様々な動揺低減技術を分類して表1に示す。浮体の質量、付加質量を大きくし、あるいは復原力を小さくして横揺れ固有周期を長周期化し、固有周期を波浪外乱の周期よりも長周期域に外す方法がある。横揺れ固有周期を長周期化しても、長周期域にずれたピーク値が必ずしも小さくはないこともある。減衰力を大きくする方法では、共振点でのピ

*1 長崎研究所船舶・海洋研究推進室主席

*3 船舶技術部海洋計画グループ主席

*2 長崎研究所船舶・海洋研究推進室

*4 鉄構技術部鉄構装置技術課



横揺れ固有周期: $T = \frac{2\pi\kappa}{\sqrt{g \cdot GM}}$ κ : 慣動半径 (付加質量を含む) GM : メタセンタ高さ

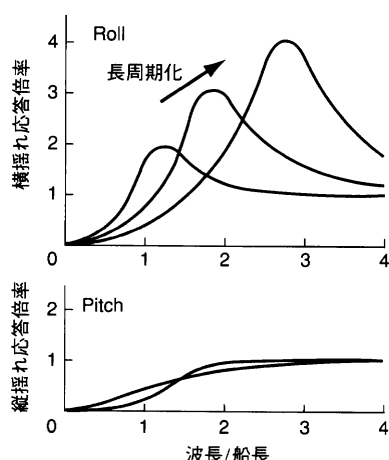


図1 浮体動揺の特性 浮体動揺の定義と横揺れと縦揺れの応答の特徴を示す。
Roll and pitch motion characteristics in waves

ーク値を下げる可以降低。減衰力を大きくすることをねらって付加物を大きくしすぎると、波強制力が増える場合もある。浮体の形状を工夫して波強制力を小さくする方法もある。波強制力を小さくする浮体形式として良く知られているのは半潜水型浮体（セミサブ浮体）であるが、喫水が深いため浅水深の沿岸域での浮体構造物には適さないとともに、複雑な形状になるのでコスト面でも不利になる。

減揺タンクなど浮体とは別の外部力学系を動吸振器として装備する方法もある。動揺制御する方法には大きく分けて、パッシブ制御とアクティブ制御があるが、通常の減揺タンクはパッシブ制御に属する。小型浮体構造物への適用性が高いのは、特別な動力及び制御装置を必要としないパッシブ型である。浮体構造物本体の動揺を制御する方法だけでなく、起重機船の吊りフックのふれまわりを制御するように、対象物の運動のみを制御する方法もある。適用度が高いのは、浮体そのものの動揺を低減する方法である。

減揺装置の能力は波浪による強制力に対抗できる容量で評価できる。波浪による強制横揺れモーメントは、モーメントレバーに対応するメタセンタ高さ GM が大きいほど大きい。浮桟橋や作業船は、その性格上大きな GM を有するように設計されているため、浮体の大きさの割には大きな容量の減揺装置が必要となる。これが動揺低減対策を困難にしており、従来技術があるにもかかわらず、実用にあまり供されていない。

表1 浮体動揺低減の各種方法

Various method of motion reduction for floating structures

動揺低減の手段	横揺れ応答の変化	従来技術の代表例
M: 質量 大きくする→固有周期の長周期化		浮体の大型化 喫水の増大
A: 付加質量 大きくする→固有周期の長周期化		没水部形状の工夫
B: 減衰力係数 大きくする		ビルジキール
C: 復原力係数 小さくする→固有周期の長周期化		重心を高く 水線幅減少
F: 波強制力 小さくする		半潜水型
D: 外部力学系 動吸振器として付加		減揺タンク

運動方程式: $(M+A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta + D = F$ η : 浮体運動

3. 新しい動揺低減技術

3.1 浮桟橋の各種動揺低減技術

ここで紹介する浮桟橋に適用した動揺低減技術は(財)沿岸開発技術研究センターの研究で開発⁽⁴⁾⁽⁵⁾されたものである。船舶等に適用されている動揺制御技術を分類・整理し、浮桟橋などの小型浮体構造物への適用性を検討した。表2に示す単純な構造で効果が大きい4タイプの機構を選定し、実機幅10mのポンツーン模型(模型縮率: 1/15)による水槽実験及び数値計算によりその効果を検証した。図2に示すように、動揺低減対策をしない場合に比べて波周期6s以下で横揺れ低減効果が期待できる。図は規則波中の横揺れ振幅応答を波周期ベースに示している。動揺低減対策により、横揺れ固有周期が長周期域にずれて、応答ピーク値も下がる効果が現れている。

従来型と4タイプの動揺低減機構の工費比較を行った結果、水線幅変更型は工作は多少複雑になるが使用材料の量が減少するので工費はほとんど変わらない。その他の動揺低減方法についても10%以下の増加で済むことが確認されている。工費の観点からは水線幅変更型が有利であるが、SLO-ROLタンク付加型では6s以上の波周期でも効果があること、減揺タンク付加型などは既存の構造物への改造にも比較的容易に対応できることなど、いずれも実用性が高い。

3.2 MSboardによる作業船の動揺低減

作業船の動揺低減技術の例として紹介するのは、MSboard (Mitsubishi Motion Suppression Board) と名付けた新しいコンセプト⁽⁶⁾である。波上側舷側に主船体との間にわずかなすきまを設けて鉛直板を船底下方に垂下するもので、図3にその概念を示す。簡易な方法にもかかわらず、横揺れを半減できることが実験的に確認されている。

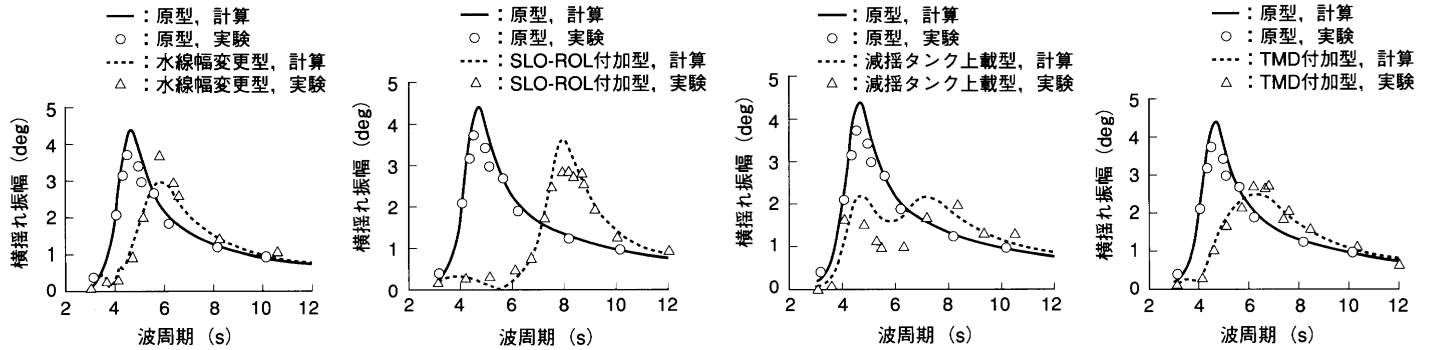


図2 浮桟橋の横揺れ低減効果 浮桟橋の横揺れ低減効果を基本船形と比較して示す。
Comparison of various roll reduction methods for floating piers

表2 浮桟橋の動揺低減技術

Motion suppression method for floating piers

機構概念図及び模型	原理・特徴
水線幅変更型	- 水線幅の減少と水平没水フィンの張出しにより、付加質量及び減衰力が増大する。 - 横揺れ固有周期の長周期化及び動揺低減が図れる。
SLO-ROLタンク付加型	- エアバルブを開くことにより、左右舷のタンク空気圧が一定に保たれ、復原モーメントが小さくなる。 - 横揺れ固有周期を極めて長周期化できる。
減揺タンク上載型	- 水を可動質量とする動吸振器として機能する。 - タンク設置高さは高い位置が効果的なため、屋根構造部分を利用する。
TMD付加型	- 天秤型の動吸振器 (TMD: Tuned Mass Damper) である。 - 陸上建築物での実用実績が多く、信頼性が高い。

MSboard はビルジキールに似た減揺フィンであるが、比較的大きな全体面積を有し、船体と減揺フィンとの間にすきまを設けた点が従来技術にない特徴である。MSboard による横揺れ低減効果は、船体動揺に伴って船底下部の流体が船体と MSboard 間との間のすきまを通過しようとするときに発生するダンピングによってもたらされている。一般に大きな減揺フィンを装備すると、付加質量が増えるため横揺れ固有周期が長周期域に移行する。減揺フィンは波強制モーメントを増加させる傾向もあるため、固有周期域での動揺が期待したほど減少しないことがある。すなわち、固有周期が長周期化すると、短周期での横揺れは減少するものの、そのずれた固有周期域では横揺れのピークが減らないばかりでなく、大きくなる場合もある。これに対し、MSboard コンセプトはそのすきま効果により非常に大きなダンピングを発生するため、固有周期域で大きな減揺効果が確実に得られる。

図4に示すように、すきまがある場合には横揺れが極めて小さくなることが分かった。図には幅 870 mm の二次元ポン

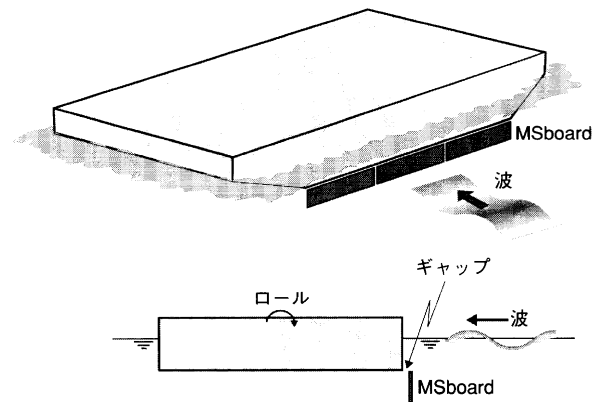


図3 MSboard の概念 すきまをあけて減揺フィンを作業船に取付ける MSboard コンセプトを示す。
MSboard concept

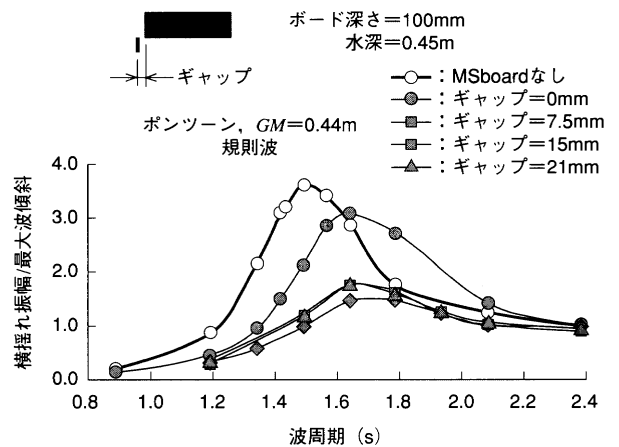


図4 MSboard のすきま効果 MSboard のすきまが横揺れ低減に大きな効果がある。
Effect of gap of MSboard on roll motion reduction

ツーン浮体の規則波中の横揺れ応答を最大波傾斜で除した無次元振幅を波周期ベースに表しており、MSboard のすきまあり及びなしの場合を原型浮体と比較している。ボードの深さ d_{board} は喫水 d と同じ 100 mm とし、すきまは 7.5 mm, 15 mm, 21 mm の 3 ケースの変更をした。すきま 15 mm の場合が最も横揺れが小さいが、すきまの大きさによる応答変化は比較的小さい。

実際の作業船に即した実船の長さ 60 m, 幅 25 m の供試模型船 (模型縮率: 1/25) を製作し、MSboard の実用性を実

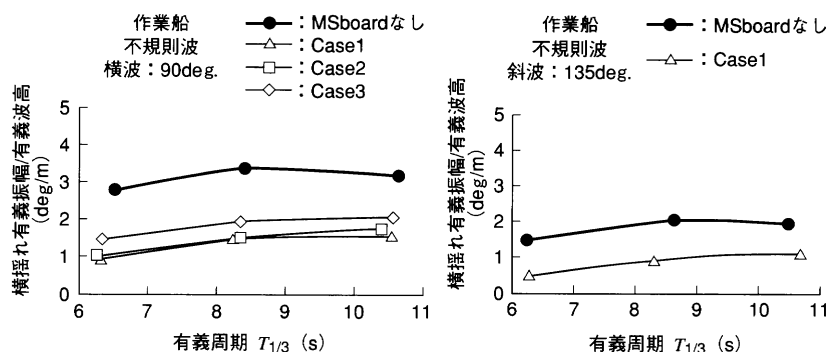


図5 MSboardを装備した作業船の不規則波中横揺れ MSboardを装備することで横揺れが半減する。

Roll motions of work vessel with MSboard in irregular waves

験的に検証した。MSboardは以下の3ケースの状態を設定し、ボードのサイズ変更をした。

Case 1 : $L_{\text{board}} = 1.0 L$, $d_{\text{board}} = 1.0 d$

Case 2 : $L_{\text{board}} = 0.75 L$, $d_{\text{board}} = 1.0 d$

Case 3 : $L_{\text{board}} = 0.75 L$, $d_{\text{board}} = 0.5 d$

ここで L , d は船体の長さ及び喫水であり, L_{board} , d_{board} はMSboardの合計長さ, 深さである。ボードすきまは実機相当0.4 mである。横波 (90 deg) 及び斜波 (135 deg) の2種の波方向について, 規則波中及び不規則波中の実験を行った。不規則波中実験結果を図5に示す。図には有義波周期ベースに単位有義波高当りの横揺れ有義振幅を示す。最大サイズのCase 1の減揺効果が当然ながら大きい, 最小サイズCase 3の場合でも横揺れをほぼ半減できる極めて大きな減揺効果が認められる。斜波の場合でも, 減揺効果は確実にあることが分かる。作業船が実海域で遭遇する可能性の高い有義波周期6~10 sの範囲で全体的に良好な減揺効果がある。

MSboardを作業船に適用することによる稼働率向上効果を, 以下の条件下で評価した。海域として鹿島港を想定した波浪発現頻度データ⁷⁾を用いた。作業船の作業限界は有義波高0.5~0.75 m程度といわれていることを参考にして, 横揺れの有義振幅2.5 degを限界値と仮定し, 横波中で評価した。すなわち, 有義波高0.75 m, 有義波周期7~9 s付近で横揺れ有義振幅が2.5 degとなるため, これを限界値と仮定した。

MSboardを装備した場合と, 装備しない場合について稼働限界曲線を求め, 波浪発現頻度テーブルに図示したものを図6に示す。MSboardとして, 最小サイズのCase 3のタイプを例に選んだ。図において稼働限界曲線の下方が稼働可能な波浪条件となる。MSboard付きの稼働率が62%で, MSboardなしの28%に比べて大幅に改善された。MSboardは既存船への適用も比較的容易であると考えられる。

4. む す び

浮桟橋の動揺低減技術は実験的に検証された技術であるとともに推定計算手法も確立している。本技術を適用した浮桟橋の試設計も行っているため, 実機への展開ができる段階に

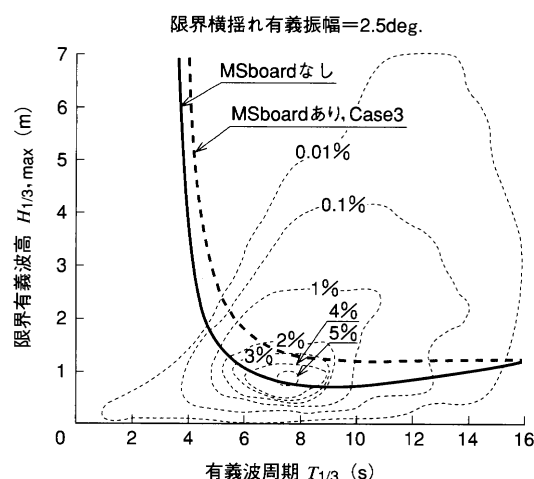


図6 MSboardを装備した作業船の稼働率 MSboardを装備することにより稼働率が大幅に向上する。

Limitation of work vessel operation

ある。これにより, より環境と人に優しい浮体構造物が実現でき, 海洋空間の有効利用がさらに進められる。MSboardコンセプトに基づく簡易な減揺手段により, 作業船の横揺れを大幅に低減できることが実験的に確認できた。現在, 実船への取付方法, 着脱機構の検討などを鋭意進め, 実用化を目指している。

紹介した2例の技術は小型浮体構造物を対象に開発を進めたものではあるが, 同技術は大型浮体の動揺低減にも適用できる可能性がある。横揺れだけでなく縦揺れの動揺低減などへの応用も含めて, 研究をさらに継続していく予定である。

最後に, 浮桟橋の動揺低減に関する研究は, (財)沿岸開発技術研究センターが日本財団の補助を得て実施し, これに当社が協力したものである。“揺れない浮体構造物の研究委員会”の委員長(広島大学高木幹夫教授)を始めとする各委員のご指導により成果が得られたことを記し, 関係者の皆様に心より感謝します。

参 考 文 献

- (1) Ikegami, K. et. al., Study on Motions of a Floating Body Under Composite External Loads, 日本造船学会論文集 第144号 (1978)
- (2) 松浦正己ほか, 係留・連結された複数浮体の波浪中挙動解析法, 三菱重工技報 Vol.31 No.4 (1994)
- (3) 宮川典久ほか, 低動揺型浮体の開発と浮遊式石油生産設備への応用, 日本造船学会論文集 第169号 (1991)
- (4) 福田幸司ほか, 揺れない浮体構造物に関する研究, 土木学会第54回年次学術講演会 講演概要集 (1999)
- (5) 和田耕造ほか, 人にやさしい浮体構造物, 土木学会誌 Vol.85 (2000)
- (6) 松浦正己ほか, 三菱動揺低減ボード MSboard, 作業船 No.251 (2000)
- (7) (財)沿岸開発技術研究センター, 全国港湾海洋波浪観測25年統計資料 NOWPHAS 1979~1994 (1996)