係留船舶におけるビルジキールの動揺抑制効果に関する検討

小竹 康夫¹・梅津 順一²・杉浦 仁久³・松村 章子⁴・中村 友昭⁵

¹正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

E-mail: kotake-yasuo@toyo-const.co.jp

²正会員 東洋建設株式会社 技術営業部 (〒135-0064 東京都江東区青海二丁目4番24号)

E-mail: umetsu-junichi@toyo-const.co.jp

³東洋建設株式会社 大阪本店 (〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4丁目1番1号)

E-mail: sugiura-hitohisa@toyo-const.co.jp

⁴東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

E-mail: matsumura-akiko@toyo-const.co.jp

⁵正会員 名古屋大学 大学院工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

海上工事における作業船の動揺抑制は、施工精度の向上のみならず、作業の効率化や作業員の安全確保に重要な要素である。旅客船などでは減揺対策としてビルジキールを装着することがあるが、条件によっては十分な効果を有しないといった報告もある。また旅客船では主に航行時の横揺れを対象としているのに対して、作業船では停泊作業時の動揺が問題となる。そこで本研究では、まず対象とする作業船を簡易にモデル化した数値解析を実施し、定性的な傾向を把握するとともに、船体にビルジキールを装着する前後における実海域での作業船の動揺を計測することで、減揺効果を検証した。

Key Words : bilge keel, work vessel, oscillation due to waves, numerical analysis, field measurement

1. 研究の目的

海上工事における作業船の動揺抑制は、施工精度の向上のみならず、作業の効率化や作業員の安全確保に重要な要素である。長距離を航行する旅客船などに対する減揺対策は、快適性の向上も目的として古くから研究が進められており、そのひとつとして、ビルジキールは多くの船舶に備え付けられている(例えば、元良¹⁾)。ビルジキールとは、船底両側湾曲部に幅の狭い板をほぼ外壁に垂直に装着することで横揺れの低減を図ろうとするもので、横揺れをパッシブ制御する機構のひとつである。ただしパッシブ制御では制御可能な動揺に限界が生じることから、機械的に重心位置を移動させることでアクティブに横揺れを抑制したり、さらにそれに必要なエネルギーを動揺から抽出するセルフパワーードアクティブ制御(須田ら²⁾)が提案されるなど、近年においても船舶の横揺れ対策は重要な課題である。一方、作業船においては、動揺制御に複雑な作業や習熟度を要する装置の導入は、費用面だけでなく、本来の目的である施工作业に支障を来す恐れがある。そこで本研究では、パッシブ制御方式であるビルジキールを作業船に装着し、その効果を

検証とすることを目的とした。

ビルジキールに関しては、その設置による摩擦抵抗の増大を考慮した静水中での復原力を定量的に評価することで、船体への装着位置や形状の設計方法が提案されている(加藤³⁾)。また走行による前進速度と横揺れによる横断面内速度の合成速度がビルジキールに作用する仰角を考慮することで、より大きな揚力が得られる楕形ビルジキールが提案されている(加藤⁴⁾)。一方、梅田・片山⁵⁾によると、不規則波による動揺など、非定常振動に対するビルジキールの効果は十分には解明できていないとの指摘があり、また田中ら⁶⁾は浅喫水船舶では、船体の横揺れによる造波との干渉でビルジキールの動揺抑制効果が発揮できない場合があることを示している。

本研究ではポンプ浚渫船を対象とする。海洋工事の作業船は一般的に浅喫水船舶であため、ビルジキールの効果を十分に得ることができないことも懸念される。また旅客船では主に航行時の横揺れを対象としているのに対して、作業船では停泊作業時の動揺が問題となる。そこで本研究では、まず対象とする作業船を簡易にモデル化した数値解析を実施し、定性的な傾向を把握することとした。ついで、ビルジキールを装着する前後における実

図-1 対象とする作業船（ポンプ浚渫船）

図-2 ビルジキールの装着イメージ（正面）

海域での作業船の動揺量を計測し、減揺効果を検証した。

2. 対象とする作業船

本研究で対象とするポンプ式浚渫船を図-1に示す。ポンプ式浚渫船は、船室のほか、原地盤を掘削するためのカッターヘッドを先端に取り付けたラダーと呼ばれるトラス状の架台や、浚渫土を吸入、送泥する大型のポンプ設備などを甲板上に備え付けている。またアンカーやスパッドなどにより船体を保持し、固定点を中心に船体をスイングさせながら浚渫作業を行う。この状態で波浪が作用すると船体が動揺し、カッターヘッドが所定の掘削位置からずれることによって、施工精度や作業効率の低下につながる。

船の主要諸元は、長さ $L=70.0\text{m}$ 、幅 $B=18.4\text{m}$ 、喫水 $d=3.15\text{m}$ であり、重心高さおよびメタセンタ高さの設計値は各々 $KG=5.00\text{m}$ 、 $GM=5.98\text{m}$ である。船体正面から見たビルジキールの装着イメージを図-2に示す。ビルジキールは両側面の各2か所に装着するものとし、長さは片面2か所の合計で船体長の25%に相当する長さ 17.5m 、幅 0.40m とした。このとき、定常な横揺れを仮定し、実験定数を用いる加藤³⁾の手法に従うと、導出過程の詳細は割愛するが、ビルジキールが無い場合の船体長軸周りの横揺れ角が2度および5度の場合に対して、各々0.4度、1.6度の横揺れ角が減少すると試算される。

3. 数値解析による事前検討

(1) 数値解析手法

定常な横揺れを仮定した加藤³⁾の手法によりビルジキールに一定の効果が見込めることが分かったが、実海域での実証試験の前に、波浪場における船体の動揺状態を更に詳しく把握することを目的として、可動構造物の時々刻々の運動を算定可能な数値解析により事前検討を実施した。ここでは、中村ら⁷⁾により開発された3次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデル（FS3M）を用いた。FS3Mは、メインソルバーと3つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、透過性材料の間隙内部の流体を含む非圧縮性粘性流体からなる全気液相に適用できるように一般化し、さらに可動構造物の運動や地形変化を取り扱えるように拡張した連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLarge-Eddy Simulation（LES）である。そのLESには、気液界面を追跡するVolume of Fluid（VOF）法を改良したMulti-Interface Advection and Reconstruction Solver（MARS）に基づくVOFモジュール、可動構造物を取り扱う体積力型埋め込み境界（Immersed Boundary；IB）法に基づく埋め込み境界モジュール等が、LESとの相互作用を考慮できるようにTwo-Wayカップリング手法により組み込まれている。モデルの詳細は中村ら⁷⁾を参照されたい。また本手法の解析精度に関して、中村ら⁸⁾は、断面2次元での規則波作用下における上部斜面堤ケーソンの動揺を算定し、水路実験結果との比較により、解析精度を検証するとともに、動揺特性についても検討している。さらにNakamura et al.⁹⁾は津波作用下におけるコンテナの漂流現象に、Manawasekara et al.¹⁰⁾は津波による橋桁の流出現象に適用し、水理模型実験との比較を通じて、計算結果の妥当性を示している。

事前検討では船体長軸周りの横揺れ（roll）を主な対象とする断面2次元で、施工時の作業限界を念頭に複数の規則波による数値解析を行った。解析に際してまず水路両端部に波浪エネルギーの減衰領域を設けた解析領域を設定し、水路全長のほぼ中央に船体モデルを設けるものとした。つぎに船体を設置しない条件で通過波検定を行い、所定の周期、波高の規則波を造波することができ、エネルギー減衰領域で十分に波浪が減衰し、水路端部からの反射波が船体の設置領域に再入射しないことを確認した。つぎに船体のモデル化に際して、本検討では断面2次元を対象としており、構造物諸元を実物と一致させることができないことから、極めて単純なモデル化として、ラダーやポンプ施設などは質量のみを考慮し、喫水および重心が実物と一致する矩形断面の自由浮体としてモデル化するものとした。格子は矩形で、ビルジキールの形状を精度良く再現することを目的にビルジキールの近傍では水平方向 $\Delta x=0.05\text{m}$ 、鉛直方向 $\Delta y=0.05\text{m}$ とした。

ビルジキールから離れた領域では、等比級数的に $\Delta x=1.0\text{m}$, $\Delta y=0.4\text{m}$ となるまで格子間隔を拡大し、それ以降は一定とした。エネルギー減衰帯を除く解析領域と船体モデルおよび船体モデル周辺の格子を図-3に示す。

(2) 数値解析結果

数値解析結果の代表的な事例を図-4および図-5に示す。入射波周期 $T=6\text{s}$ と $T=9\text{s}$ に対して、波高は各々 $H=0.3\text{m}$, 0.4m であり、いずれも横軸は周期で無次元化している。縦軸は水平揺 (sway) と上下揺 (heave) を波高で無次元化しており、横揺れ (roll) は微小角度を仮定して、船体幅 B と H を用いた無次元数で表示している。また水平揺、上下揺は船体モデル重心位置の岸向きおよび上向きの並進運動を正、横揺れは重心を回転中心とする時計回りを正方向としている。

上下揺は、いずれの周期においても、ビルジキールの

図-3 船体モデルと船体周辺の格子

有無によらず振幅が同等である。この傾向は他の周期においても同様である。

水平揺については、周期により絶対値が異なるものの、平均位置が岸向きに移動する傾向を示し、この傾向は他の周期においても同様である。ただし、 $T=6\text{s}$ の場合はビルジキールがあることにより、平均位置の移動量が無い場合に比べて増大しており、 $T=9\text{s}$ の場合は、逆に、ビルジキールがあることで平均位置の移動量が減少している。1周期ごとの移動量を見ると、 $T=6\text{s}$ の場合には、岸方向に移動する位相で、ビルジキールがある場合に、無い場合に比べて移動量が大きく、沖方向に移動する位相では、ビルジキールがある場合の移動量が無い場合に比べて小さくなっており、全体として平均位置の岸向き移動量がビルジキールの無い場合に比べてある場合に大きくなっている。また1周期の移動振幅は、ビルジキールがあることで若干大きくなる傾向を示す。一方、 $T=9\text{s}$ の場合には、岸向きに移動する位相で、ビルジキールが有る場合に、無い場合に比べて移動量が若干小さく、沖向きに移動する位相での移動量は、ビルジキールの有無にかかわらずほぼ等しい。そのため、全体的には平均位置の岸向き移動量が、ビルジキールの無い場合に比べて有る場合では小さくなっている。また、1周期の移動振幅も、無い場合に比べてある場合に小さい。

横揺れについては、いずれの周期においても、振幅が若干低減しており、加藤³⁾の手法による検討結果と同じ傾向を示す。しかしながら、横揺れの振動波形が乱れており、この結果から定量的な評価は困難である。この波形の乱れの原因としては、数値解析上の問題が挙げられ

図-4 ビルジキールの有無による動揺量の時間変動 (波浪周期6秒, 波高0.3m, 数値解析)

図-5 ビルジキールの有無による動揺量時間変動 (波浪周期9秒, 波高0.4m, 数値解析)

る。すなわち可動構造物の移動計算に際し、IB法により算定される格子内の構造物の占有割合の移動量と、流体計算による同じ格子内の流体の占有割合の移流量が、計算の過程で微小に不整合を生じる。そのため、重心周りの回転角度算定に際して誤差が混入したためと考えられる。ただし本事前検討は傾向の把握を目的としており、計算プログラムの改良は今後の課題とする。

(3) 事前検討のまとめ

異なる周期の規則波を作用させる断面2次元での数値解析により、水平揺、上下揺および横揺れの傾向を把握した。上下揺に関しては、周期に寄らずほぼ同様の傾向を示すことが分かった。横揺れに関しては、定常を仮定した加藤³⁾の手法による検討結果と同様に振幅が減少し、一定の減揺効果が見込まれる。一方、水平揺に関して、ビルジキールの有無によらず平均位置が岸側に移動する傾向を示すことが分かった。平均位置の移動量に対するビルジキールの影響については、波浪の周期に依存する傾向が示された。このことから、ビルジキール装着で水平方向の移動量増大が危惧される。

なお今回の事前検討は、極めて単純化した船体モデルを用いており、プログラム上の問題も確認できたことから、定量的に詳細な評価を行うことは困難と考えられたため、定性的な評価に留め、実海域での現地計測により、効果の検証を行うものとした。

4. 実海域での動揺計測

(1) 現地計測の概要

図-1に示すポンプ浚渫船へのビルジキール装着前後における浚渫作業中の船体の長軸周りの横揺れおよび短軸周りの前後揺れ（pitch）を2軸傾斜計により測定した。ポンプ浚渫船の作業時にはアンカーにより係留、あるいは

はスパッドを海底面に着底し、作業船が波浪や潮流により移動することが無いように船体位置を保持した上で、保持位置を中心に船体を回転させながらカッターヘッドを移動させて浚渫を行う。今回はアンカー係留とした。また作業場所は、日本海に面した港湾の防波堤内側の比較的静穏な海域で、ビルジキール装着前の2014年10月～11月とビルジキール装着後の2016年6月に実施した。2軸傾斜計の測定間隔は、0.2-0.3秒の不等間隔である。いずれの期間も、作業場所から沖側に約100mの地点に設置した水圧式波高計にて0.1秒間隔で水位データを取得した。

(2) 波浪と動揺の位相干渉

計測データを整理するにあたり、まず水位変動データに着目し、1時間ごとにスペクトル解析を行い、波浪の変化傾向を確認した。ここで、詳細は割愛するが、解析対象期間においては、ほぼ同じ波浪条件が6時間程度は継続することが確認できたことから、データを6時間ごとに分割するものとし、動揺量のデータについても同じ時間区切りで分割した。すなわちこの6時間の間は同じ波浪条件が継続しているものとして、その波浪条件に対する動揺量の特性を把握するものとした。波浪と横揺れおよび前後揺れのコヒーレンスを図-6に示す。図-6(a)はビルジキールの装着前、図-6(b)は装着後であり、横軸は周波数、縦軸は主軸がコヒーレンスである。またこれらの図には、対応する波浪スペクトルも描画されており、縦軸の副軸はスペクトル密度である。ビルジキール装着前後での相違を比較する目的から、外力となる波浪条件が比較的近い条件を選択して例示しており、ピーク周期は6～8秒程度、スペクトル密度も概ね一致した条件であるが、形状が異なることに留意が必要である。

図-6からは、ビルジキールの有無によらず、全般的に横揺れ、前後揺れともに長周期側で大きく、短周期側に

図-6 ビルジキールの有無による動揺量と波浪のコヒーレンスの一例（現地計測）

図-7 波浪および動揺量のスペクトルの一例（現地計測）

（ビルジキール (B.K.) 無し：2014年11月1日12時～18時，B.K.有り：2016年6月15日6時～12時）

表-1 ビルジキールの有無によるコヒーレンスの比較

動揺方向	周期100秒に対する コヒーレンス		コヒーレンスが 0.1以下になる周期[s]	
	roll	pitch	roll	pitch
ビルジキール無し	1.00	0.78	9.0	30.5
ビルジキール有り	0.50	0.42	54.5	38.6

かけて低下する傾向があることが分かる。これは短周期の波浪に比べて、波浪の長周期側の成分の影響を受けやすいことを示している。この傾向と、事前の数値解析結果で平均位置が移動することが示されたことを総合すると、ビルジキール装着の有無にかかわらず、波浪の長周期成分により移動する傾向があることが示唆される。

一方、ビルジキール装着の有無で比較すると、横揺れ、前後揺れともに、ビルジキールの装着で、コヒーレンスが低下している傾向を確認することができる。ここに示した例では、横揺れはビルジキールを装着したことで、装着前に比べてコヒーレンスが周波数帯全域で大きく低下している。特に、装着前において波浪のピーク周波数から短周期側にかけての周波数帯に存在している局所的なピークが消滅するとともに、長周期側での低下が顕著である。この例以外の時間帯においても、6時間ごとに取りまとめたコヒーレンスは似たような形状を示すことが確認できたことから、長周期側の傾向をより明確に把握することを目的として、ビルジキール無しでは2014年

11月1日、有りでは2016年6月15日の各24時間について、6時間ごとに整理した各4データから、周期100秒に対するコヒーレンスおよびコヒーレンスが0.1秒以下になる周期を読み取り、平均した値を表-1に示す。表-1から、ビルジキールの装着で周期100秒の波浪に対するコヒーレンスは、横揺れ (roll)，前後揺れ (pitch) とともに、無い場合より小さく、また長周期側から短周期側にかけてコヒーレンスが低下する過程において、ビルジキールがある場合にはより長周期側で0.1秒以下になることが示された。これらより、ビルジキールは広い周期帯でコヒーレンスを低減していることが確認できる。ただし前後揺れ (pitch) では、表-1のいずれのパラメタもビルジキールの有無による数値の差が横揺れよりも小さく、前後揺れに対してはビルジキールの効果は小さいことも示された。

(3) 水位および動揺のパワースペクトル

前節では、ビルジキールの装着による波浪との位相干渉について評価した。ここでは、動揺エネルギーに与える影響を評価することを目的として、図-6と同じ時間帯のデータを用いて、横揺れおよび前後揺れのスペクトルを図-7に示す。波浪スペクトルは図-6の再掲である。また横揺れおよび前後揺れのスペクトルは、各動揺量の時間変動をもとに、波浪スペクトルと同じ手順により算定

した。前節同様に、ビルジキールの装着前後で、外力となる波浪スペクトルの形状が異なることに留意が必要である。

図-7から、波浪スペクトルはいずれも周波数に対して概ね単峰型の形状を示すのに対して、横揺れ、前後揺れともに、ビルジキールの有無に関わらず、波浪のピーク付近と、長周期側の双方型のピークを持つ形状を示している。このことから、横揺れ、前後揺れともに波浪のスペクトルピーク付近の周期で動揺するものの、長周期側の動揺エネルギーの影響で、短周期側のコヒーレンスは低下するものと推測される。ただしこの長周期側の動揺のピークの原因は解明できていない。またここに示した例では、ビルジキール有りの横揺れが全体的に無しの場合に比べて大きな値を示しており、この理由も明らかではない。今回の現地計測では、浚渫作業に起因する動揺との分離ができていないことから、今後は、作業船の固有振動や作業に起因する動揺を把握し、波浪による動揺を特定することで、ビルジキールの動揺低減効果をより明確にすることが課題である。

5. 結論

本検討では、定常横揺れを対象とした既往の検討手法をもとに設計されたビルジキールを作業船に装着した場合の効果について、極めて簡易なモデル化による断面2次元の数値解析と、浚渫作業時の作業船動揺量の現地計測により、ビルジキールの減揺効果の把握を試みた。その結果、数値解析から、ビルジキールによる減揺効果が示唆されるとともに、水平方向の移動増大が危惧された。そして現地計測からは、幅広い周期帯でビルジキールの減揺効果が確認されるとともに、特に波浪のピーク周波数に近い短周期側での効果が大きいことが分かった。

参考文献

- 1) 元良誠三: 船体運動力学 (電子訂正版), (社) 日本船舶海洋工学会, 121p, (オンライン) <https://www.jasnaoe.or.jp/publish/others/dl/sentaiundourikigaku.pdf>, 参照 2017-3-15.
- 2) 須田義大, 林隆三, 小池裕二, 中野公彦, 中代重幸: セルフパワード・アクティブ制御による船用減揺装置: 模型船による実証実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.670, pp.1735-1740, 2002.
- 3) 加藤弘: 船の横揺れに対するビルジキールの効果について, 造船協会論文集, Vol.1965, No.117, pp. 93-101, 1965.
- 4) 加藤弘: 縦列矩形板型湾曲部龍骨の横揺れ防止効果に就いて, 造船協会論文集, Vol.1955, No.87, pp.87-96, 1955.
- 5) 梅田隼, 片山徹: 非定常横揺れの減衰力に関する研究ービルジキール成分の履歴影響ー, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 23 号, pp.97-94, 2016.
- 6) 田中紀男, 姫野洋司, 池田良穂, 磯村幸次: 浅喫水船のビルジキールの効きに関する実験的研究, 関西造船協会誌, 第 180 号, pp.69-75, 1981.
- 7) 中村友昭, 小竹康夫, 水谷法美: 3 次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルを用いた施工時における上部斜面堤の波浪動揺に関する数値シミュレーション, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, E11-5, 10p., 2011.
- 8) 中村友昭, 山本勘太, 水谷法美, 小竹康夫: 上部斜面堤ケーソンの規則波下における動揺特性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1039-I_1044, 2015.
- 9) Nakamura, T., Mizutani, N.: Numerical analysis of the tsunami-induced drift behaviour of a shipping container and the effectiveness of its countermeasure, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.24, No.4, pp.253-261, 2014.
- 10) Manawasekara, C., Oda, Y., Honda, Y. and Watanabe, K.: Numerical study on the stability of railway bridge girder under tsunami-induced loading, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2 (Coastal Engineering)*, Vol.72, No.2, pp.I_1009-I_1014, 2016.

(2017.3.15 受付)

A STUDY ON OSCILLATION REDUCTION EFFECTIVENESS OF BILGE KEEL ATTACHED ON MOORING VESSELS

Yasuo KOTAKE, Junichi UMETSU, Hitohisa SUGIURA, Akiko MATSUMURA and Tomoaki NAKAMURA

During a construction process, it is essential to reduce the oscillation of work vessels for not only the accuracy of the work but also the safety of workers. Of oscillation reduction methods for mooring vessels, this study focused on a bilge keel, which is usually expected to reduce the rolling of passenger ships. From numerical experiments, it was clarified that a bilge keel can reduce the rolling of work vessels. However, it was pointed out that the bilge keel can also increase the horizontal displacement of the work vessels. Furthermore, field surveys were carried out to measure the rolling and pitching of a mooring vessel before and after a bilge keel was attached on the vessel. From observation data, it was verified that the bilge keel is effective to reduce the rolling and pitching.