

複数連結浮体を対象とした能動型動揺制御技術に関する研究

大山 巧* ・長谷部雅伸** ・古田 均*** ・古川 忠稔****
松浦正己***** ・藤田 孝***** ・小池 裕二*****

1. はじめに

現在, 大阪オリンピック支援海上施設研究特別委員会 (略称: OSF 研) において, 複数連結浮体を対象とした能動型動揺制御技術に関する検討が進められている。対象となる浮体構造物は複数の部分浮体から構成されており, 各浮体上に宿泊やレクリエーションを目的とする多くの施設を建造することに加え, オリンピック開催後には部分浮体を切り離し災害時の移動基地として活用することも考慮されている。本技術は, このような様々な利用形態に対して求められる高い居住性を浮体構造物上で実現させるための技術である。

すでに船舶工学の分野では, アンチローリングタンクや可動マスをを用いた能動型の浮体動揺低減装置が開発・実現化されている (例えば, 小池ら, 1994, 1999)。これらはいわゆる質量移動方式の制御装置であるが, 浮体が大きくなると制御に必要な質量および移動ストロークが大きくなり, 結果的に装置が大規模なものになってしまう。そこで本委員会においては, 浮体を分割し, 浮体間の連結部において上下方向の制御力を加えることにより, 現実的に最も問題となる Roll 運動の低減を試みることとした。なお, 制御理論としては, 制御効果と装置規模とのバランスが考慮できるフィードバック型の最適制御理論 (例えば小堀, 1993) を採用した。

本研究では, まず, 最適制御理論を組み込んだ 3 次元複数連結浮体の動揺解析モデルを開発し, 部分模型を用いた動揺実験との比較によりモデルの妥当性を検証する。さらに, 実機を対象とした動揺解析を行い, 能動型動揺制御技術の実現化に向けて予想される経済的, 技術的な制約を踏まえ, 制御システムの規模と動揺制御効果の両面から実現可能性を具体的に検討する。

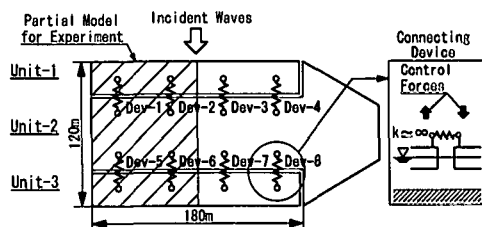


図-1 本検討で対象とした複数連結浮体

2. 解析モデル

図-1 に示すような 3 次元複数連結浮体を対象として, 動揺解析モデルを開発した。浮体間の連結部には, 上下方向の制御力を発生する装置 (Dev-1~8) が設置されている。各浮体はそれぞれ 6 自由度で運動するものとし, 以下の周波数領域の運動方程式によって動揺量を求める。

$$\{m + M(\omega)\} \ddot{X}(\omega) + N(\omega) \dot{X}(\omega) + (K + C) X(\omega) + \Pi(\omega) = F_H(\omega) + U F_U(\omega) \quad (1)$$

$$X^T = e^{-i\omega t} \{ \xi_{11}, \xi_{12}, \dots, \xi_{16}; \xi_{21}, \dots, \xi_{N6} \} \quad (2)$$

ここで, ω : 入射波および浮体動揺の角振動数, N : 浮体数, ξ_{nj} : n 番目浮体の j 方向運動の複素動揺振幅, m : 質量マトリックス, M : 付加質量マトリックス, N : 造波減衰係数マトリックス, K : 係留系および浮体間連結バネによる復元力マトリックス, C : 静水圧による復元力マトリックス, Π : 造波減衰以外の要因に基づく減衰力ベクトル, F_H : 波強制力ベクトル, U : 制御位置マトリックス, F_U : 制御力ベクトルである。なお, 連結部では浮体間の水平距離が拘束されていることから, 本モデルではこの部分にバネ定数 $k \approx \infty$ の水平バネを設けた。

式 (1) における流体係数 F_H , M , N の算定には拡張緩勾配方程式モデル (大山・土田, 1995; 土田・大山, 1996) を用い, Radiation 流体力における浮体間の相互干渉作用も考慮した。また, 減衰力ベクトル Π は, 流体の粘性に伴う剝離渦や摩擦による成分, および浮体連結部での構造摩擦に起因する成分から構成されるが, 本検討では Roll 運動に対する前者の成分のみを考慮することとし, フルードの表現を用いて以下のように評価した (例

* 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所
** 正会員 工修 清水建設(株)技術研究所
*** 正会員 工博 関西大学教授 総合情報学部総合情報学科
**** 正会員 工博 大阪大学学内講師 大学院地球総合工学専攻
***** 正会員 工修 三菱重工(株)長崎研究所
***** 正会員 工修 日立造船(株)技術研究所
***** 正会員 工修 石川島播磨重工業(株)機械・プラント開発センター

えは元良, 1982).

$$\Pi_{n4} = \{A_n + B_n | \xi_{n4}\} \xi_{n4} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} A_n &= 2\omega\alpha(I_{n4} + M_{n4})/\pi \\ B_n &= 3\beta(I_{n4} + M_{n4})/4 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし, α, β は減減係数, I_{n4} および M_{n4} は n 番目浮体の Roll 運動の慣性モーメントと付加慣性モーメントである. なお, 他の運動モードについては造波減衰が卓越すると考え(元良, 1982), 粘性減衰を無視することとした.

状態フィードバック制御則に基づく制御力 F_u は, ゲイン行列 G と状態量ベクトル x により以下のように与えられる.

$$F_u = -Gx \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$x^T = \{X^T, \dot{X}^T\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, G は制御効果および制御システム規模に関する重み関数 Q, R を入力値とした評価関数:

$$J = \int \{x^T Q x + F_u^T R F_u\} dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

に対して, 最小原理に基づいて求められる(例えば, 小堀, 1993). なお, 付加質量 M , 造波減衰係数 N が周波数の関数となるため, 厳密にはゲイン行列 G も周波数依存性を有するが, 現実的には特定の周波数に対するゲインを用いても広周波数帯域で動揺低減効果が期待できる(大山ら, 1999).

3. 模型実験との比較によるモデルの検証

(1) 模型実験の概要

本モデルの妥当性を確認するために, 平面水槽 (20 m × 10 m) を用いた模型動揺実験(古川ら, 2000) との比較を行う. 実験は, 実機の 1/40 スケールを想定したものであるが, 実験施設の規模等の制約から, 図-1 における網掛け部分に相当する部分浮体を対象として行った. 浮体は 3 分割されており, 波上側, および波下側連結部の各 2 箇所にあクチュエーターが設けられている(図-1 における Dev-1, 2 および Dev-5, 6). 連結アクチュエーターは, スライドレールとベアリングによって鉛直および回転方向に可動となっており, さらに鉛直方向に制御力を発生する構造となっている(古川ら, 2000).

実験における水深は 30 cm (実機換算 12 m) で一定とし, 入射波浪は実機換算で周期 T_w が 4.4~10.0 s, 波高 H_w が 1.0 m の一方規則波を対象とした. 実験は, 3 分割浮体における制御有り, 無しのケースのほかに, 各浮体を剛結合した一体型浮体についても行った. これら模型浮体の主な諸元を表-1 に示す. なお, 本実験では中央部浮体の Roll 運動を重点的に制御するようにゲイン行列 G を決定している. ゲイン設定周期は, $T_w = 4.4 \sim 6.0$ s の範囲では 4.4 s, $T_w = 6.0 \sim 10.0$ s では 10.0 s とした.

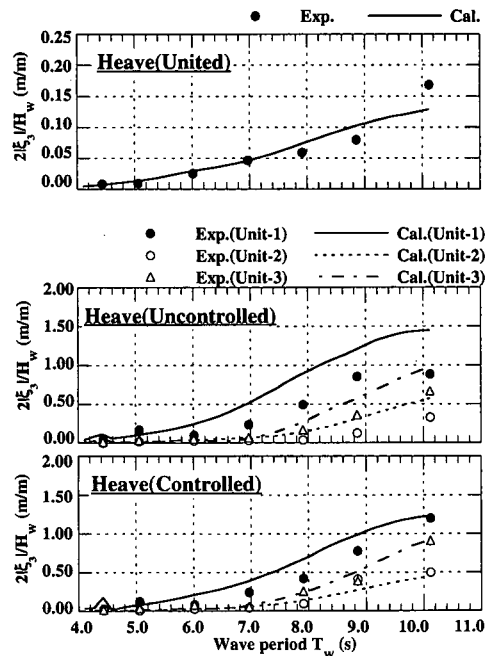


図-2 Heave 動揺振幅の比較

表-1 模型浮体の主な諸元

項目	一体型	三分割浮体	
		Unit-1, 3	Unit-2
長さ L	2.25 m	2.25 m	2.25 m
幅 b	3.00 m	0.75 m	1.50 m
高さ H	237.5 mm	237.5 mm	237.5 mm
喫水 D	125.0 mm	125.0 mm	125.0 mm
排水量 Δ	843.8 kg	210.9 kg	421.9 kg
重心高 KG	203.3 mm	203.3 mm	203.3 mm
ロールメタセンター高 GM_r	5.86 m	0.234 m	1.36 m
慣動半径 κ_{xx}	879.0 mm	219.8 mm	439.5 mm

(2) 動揺量の比較

図-2, 3 は, それぞれ Heave, Roll 運動の振幅について, 一体型浮体, 非制御 3 分割浮体, 制御 3 分割浮体のケースで数値解析と模型実験の結果を比較したものである. なお, 各図は実機スケールの次元量でプロットしてある. 解析における Roll 運動に関する減減係数 α, β は, 一体型浮体の実験結果との整合性を踏まえ, $\alpha = 0.3, \beta = 0.01$ と設定した.

実験結果の全体的な傾向としては, 各浮体の Heave, Roll 運動ともに周期が長くなるにしたがって振幅が大きくなっている. Heave 運動振幅に関しては, 3 分割型は一体型よりも大きくなるが, 制御時と非制御時の差異は比較的小さい. これに対して, 制御時の端部浮体(Unit-

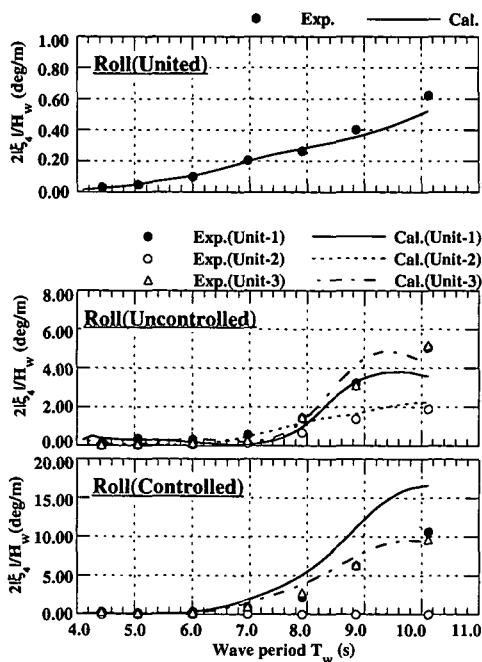


図-3 Roll 動揺振幅の比較

1, 3) の Roll 運動振幅は、一体型および非制御 3 分割型のケースに比べてはるかに大きくなっている。これは、中央部浮体 (Unit-2) の Roll 動揺量を低減させるようにゲイン行列 G を設定していることに起因して、Unit-2 に与える制御力の反作用力が Unit-1, 3 の Roll 動揺量を増大させているためである。

本解析結果は、実験結果に見られるこのような動揺特性の差異を良好に再現している。ただし、一体型浮体についての解析結果が実験結果と非常に良く一致しているのに対して、3 分割浮体の場合には実験結果をやや上回る傾向が現れている。このような差異の主な原因としては、解析では考慮されていない制御装置での構造的な摩擦力の影響が挙げられる。

図-4 は、中央部浮体の Roll 動揺振幅を各ケースで比較したものである。一体型浮体と非制御 3 分割浮体の結果比較からわかるように、浮体を単に分割すると長周期帯域の Roll 動揺量が大きくなるのに対して、制御力を加えることにより広周期帯域で動揺量が大幅に低減できる。図-5 には、制御時に波上側の制御装置 (Dev-1, 2) で発生した制御力の振幅の比較を示す。解析結果と実験結果の一致はほぼ良好であり、非制御時の動揺特性に対応して長周期側で大きな制御力が発生されている。

4. 実機に対する検討

(1) 計算条件

本制御技術を実現化の上で、十分な制御効果を得る

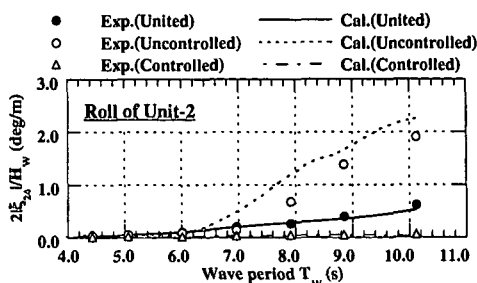


図-4 中央部浮体の Roll 動揺制御効果の比較

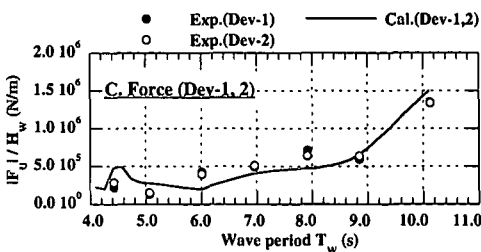


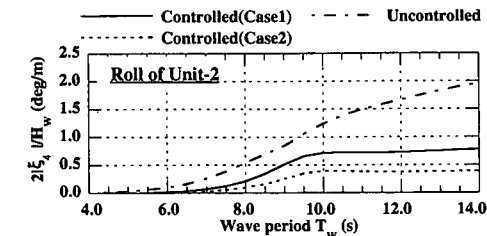
図-5 制御力振幅の比較 (Dev-1, 2)

ために必要な装置規模、あるいは現実的な装置規模で期待できる制御効果を見積もっておくことは、非常に重要である。そこで、図-1 に示すような実機全体を想定した動揺解析を行い、動揺低減効果と制御装置規模の関係について具体的に検討する。

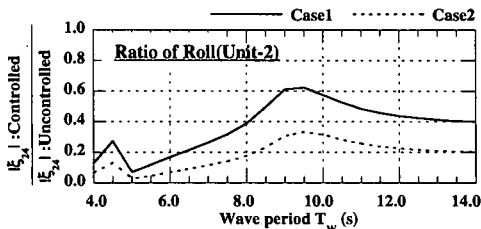
実機浮体の主な諸元は、表-2 に示すとおりである。ここでは合計 8 箇所の連結部 (Dev-1~8) において制御力を与え、実験の場合と同様に最適制御理論に基づいて中央部浮体の Roll 動揺を重点的に抑えることとした。ゲイン行列 G の設定周期は 7 s で一定とし、制御装置規模に対する重み R の異なる 2 種類のゲインに対して計算を行った (それぞれ Case 1, Case 2 と称する)。入射波向は浮体の長手方向に直角な方向とし、入射波としては周期 $T_w = 4 \sim 14$ s, 波高 $H_w = 1$ m の規則波および有義波周期 $T_{1/3} = 6 \sim 10$ s, 有義波高 $H_{1/3} = 1$ m の Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波を設定した。ただし、不規則波のケースでは入射波の方向分散性は考慮していない。なお、水深は 12 m で一定とした。

(2) 計算結果の考察

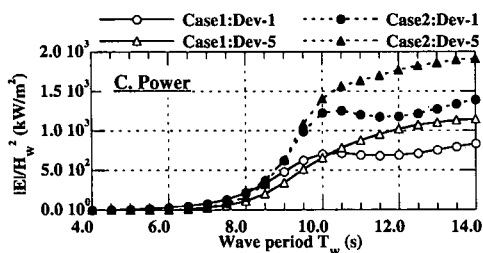
本検討ケースでは、制御時と非制御時で最も顕著な差が見られたのは Roll 運動であった。図-6 には、Case 1 および 2 について、規則波入射時の中央部浮体の Roll 動揺特性、動揺振幅比 (制御時の振幅/非制御時の振幅)、制御装置 (Dev-1, 5) で要した仕事率を示す。なお、仕事率 E は、浮体間の鉛直相対速度 w^* と制御力 F_u の積として算定した。Dev-2~4, Dev-6~8 での仕事率については、それぞれ Dev-1, Dev-5 とほぼ同様であったので結果



(a) 中央部浮体の Roll 動揺特性

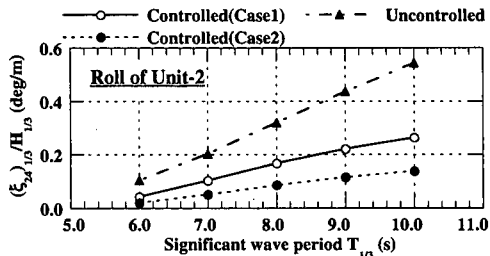


(b) 動揺振幅比

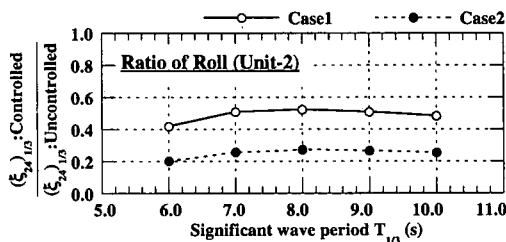


(c) 仕事率振幅

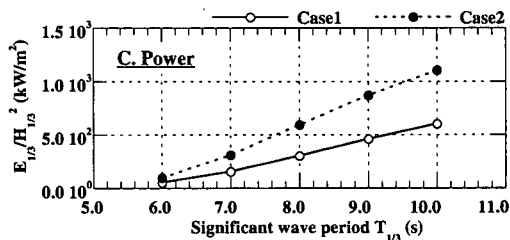
図-6 規則波に対する制御効果と仕事率の比較



(a) 中央部浮体の Roll 動揺特性



(b) 動揺振幅比



(c) 仕事率振幅

図-7 不規則波に対する制御効果と仕事率の比較

表-2 実機浮体の主な諸元

項目	Unit-1, 3	Unit-2
長さ L	179.5 m	245.0 m
幅 b	29.5 m	(120.0 m)
高さ H	9.5 m	9.5 m
喫水 D	5.0 m	5.0 m
排水量 Δ	27138 t	82833 t
重心高 KG	8.13 m	8.13 m
ロールメタセンター高 GM_r	9.0 m	79.8 m
慣動半径 K_{xx}	9.1 m	21.0 m

は省略する。先に示した部分模型の場合と同様に、非制御時には周期が長くなるほど振幅が大きくなる傾向にあるが、 $T_w \geq 8$ s において Case 1 では約 40~60%，Case 2 では約 20~35% に動揺量を低減できることがわかる。制御に要する仕事率 E は周期が長くなるほど大きくなる傾向にあり、相対的に制御効果の高い Case 2 の方が大きなパワーを必要とする。

図-7 には不規則波に対する結果を示す。図中、 $(\xi_{24})_{1/3}$ 、

$E_{1/3}$ はそれぞれ Roll 動揺振幅および仕事率の有義値である。なお、 $T_{1/3} \leq 10$ s では各装置の仕事率にはほとんど差が現れなかったため、Dev-1 の結果のみを示してある。不規則波の場合でも定性的には規則波と同様な特性を有しているが、各ケースの動揺振幅は有義波周期に対してほぼ直線的に変化し、動揺振幅比は波周期に対してほぼ一定値となっている。動揺振幅比がほぼ 50% となる Case 1 では、例えば $H_{1/3} = 1$ m、 $T_{1/3} = 10$ s に対して約 600 kW のパワー(有義値)が必要となるが、この程度の規模の装置を設計することは現段階で十分に可能である。一方、動揺振幅を 25% まで低減させることのできる Case 2 では、Case 1 のほぼ 2 倍の仕事率を必要とする。しかし、有義波周期が短くなるにつれて仕事率は小さくなるため、例えば $T_{1/3} = 8$ s ($H_{1/3} = 1$ m) に対する Case 2 のパワーは、 $T_{1/3} = 10$ s の Case 1 とほぼ同等となる。すなわち、同一規模の制御装置であれば、入射波周期が短いほど高い動揺低減効果が期待できることになる。

一般に、居住性を論じる場合には、変位だけではなく

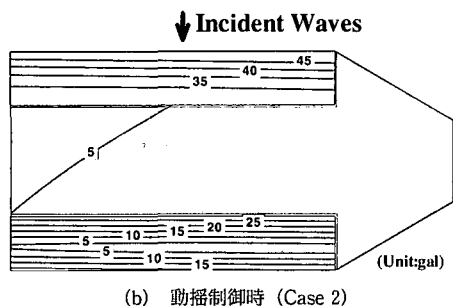
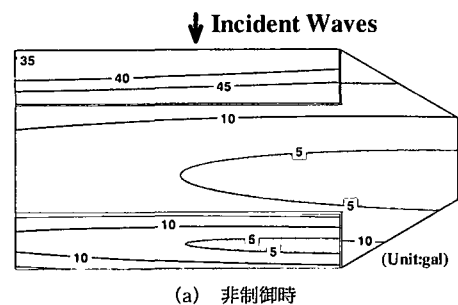


図-8 不規則波に対する鉛直加速度分布

加速度が重要なファクターになる。そこで図-8には、 $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=1$ m の場合について、非制御時と制御時 (Case 2) における鉛直加速度振幅 (有義値) の分布を示す。非制御時の分布において中央部浮体の重心近くで加速度振幅が小さくなっていることからわかるように、鉛直方向の加速度については Heave 運動よりも Roll 運動が支配的な運動モードとなる。このため制御力を与えて Roll 動揺を抑えた場合には、加速度が 5 gal 以下となる領域が大幅に拡大されており、高い居住性が浮体全体で確保できることがわかる。

5. おわりに

3次元複数連結浮体を対象として、最適制御理論を導

入した動揺解析モデルを開発し、部分模型を用いた実験結果との比較から本モデルが各浮体の動揺量および制御力を良好に再現できることを検証した。さらに、実機を対象として、装置規模に対する重みをパラメータとしたケーススタディーを行い、動揺低減効果と装置規模の関係を具体的に調べた。その結果、有義波周期 10 秒、有義波高 1 m 程度の波浪条件下では現実的な装置規模で動揺量を少なくとも半減させることが可能であること、波周期が相対的に短い条件下ではさらに効果的な動揺制御が期待できることを明らかにするとともに、Roll 運動の制御に伴い高い居住性が確保できる領域が浮体上で大幅に拡大できることを示した。

謝辞：本研究は日本鋼構造協会主催の大阪オリンピック支援海上施設研究特別委員会における研究の一環として行われたことを付記するとともに、ご協力頂いた制御 WG のメンバー各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 大山 巧・土田 充 (1995): 拡張緩勾配方程式による港内船舶の動揺解析, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 141-154.
- 大山 巧・長谷部雅伸・古川忠稔・古田 均 (1999): 最適制御理論に基づく複数連結浮体の動揺制御, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 866-870.
- 小池裕二・吉海 研・広重栄基・谷田宏次・牟田口勝生 (1994): 能動型減揺装置の開発と実海域試験一統報一, 日本造船学会論文集, 第 176 号, pp. 137-143.
- 小池裕二・佐伯愛一郎・牟田口勝生・今関正典・宮部宏彰・山下誠也 (1999): ハイブリッド式船用減揺装置の実船への適用, 日本造船学会論文集, 第 185 号, pp. 111-117.
- 小堀鉦二 (1993): 制振構造一理論と実際一, 鹿島出版会, pp. 41-48.
- 土田 充・大山 巧 (1996): 拡張緩勾配方程式を用いた港湾内の複数浮体の動揺解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 936-940.
- 古川忠稔・井澤達也・松浦正己・藤田 孝・小池裕二・大山 巧・堂垣正博 (2000): 複数連結浮体のアクティブ動揺制御技術に関する実験的研究, テクノオーシャン 2000 (投稿中).
- 元良誠三 (1982): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 79-87.