潮流発電装置据付時の水中動揺特性と 施工限界の推定

松田 信彦¹・倉原 義之介¹・江口 三希子¹・
津田 宗男¹・栗原 明夫²・河邊 寛³

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

E-mail:n_matsuda@toa-const.co.jp

²正会員 東亜建設工業（株）土木事業本部設計部
（〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-731 新宿パークタワー31F）

³非会員 元ベルナンブコ大学教授

東日本大震災以降、我が国のエネルギー政策の見直しが行われ、海洋再生エネルギーの利用拡大が求められている。潮流発電は天候に左右されず、昼夜問わず発電量が安定していることや、潮の干満により年間を通して発電量を予測できる特徴がある。潮流発電装置の据付作業では波浪や潮流の作用により、船体や水中の吊荷が動揺して据付精度が低下するため、船体や吊荷の動揺特性を把握して施工することが重要である。本研究は、潮流発電装置据付時の動揺について模型実験で特性を明らかにした。また、動揺解析を用いて動揺特性を再現し、海象条件からではなく吊荷の動揺から作業可否判定をする方法を提案した。

Key Words : tidal current power generation system, floating crane, ship motions, limit condition of marine construction works

1. はじめに

東日本大震災の影響による電力不足や温室効果ガスの排出量削減を背景に、海洋再生可能エネルギーの利用拡大が進められている¹⁾。潮流発電は発電装置を海底に設置するため台風などの天候に左右されず、昼夜問わず発電量が安定していることや、潮汐流により年間を通して発電量を予測できる特徴がある。

潮流発電装置の据付工事では、波浪や潮流の作用により作業船や吊荷が動揺して安全性や据付精度が低下する。図-1 は作業中止基準と施工限界の海象との関係を示したイメージ図である。ここでは、全ての作業が安全にできる基準を作業中止基準とし、施工に必要な玉掛けや投錨などの作業ができ、施工管理基準内の精度で施工ができる限界を施工限界とした。一般的に作業中止基準や施

工限界は、気象や海象、作業内容などの複合的な影響を考慮して、会社や船団ごとに経験的に基準が決められている。しかし、基準値にばらつきが大きく実際の工事で施工精度を考慮した作業可否を判断することは容易ではない^{2,3)}。そのため、海象条件からではなく作業船や吊荷の動揺と言う観点から作業可否判定を試みた。

本研究は複雑な形状をした潮流発電装置を、起重機船で水中に吊下げた時の動揺特性を模型実験で明らかにした。また、河邊ら^{4,5)}が開発した動揺解析モデルを複雑な形状の吊荷に対して拡張し、水中の動揺を再現し施工限界条件について検討した。

2. 起重機船模型による動揺実験

(1) 実験概要

実験に使用した潮流発電装置は、長崎県五島市での潮流発電実証事業で計画されたもので、図-2 のようにナセルとそれを支えるタービンベースからなっており上下を分離することができる構造となっている。装置全体を一括設置する場合は大型の2200t 吊起重機船を使用する計画である。本論ではこの状態の発電装置を全体を「一括」と称す。また、メンテナンスでナセルや回転翼などの上部のみを脱着する時は小型の700t 吊起重機船やDP

図-1 作業中止基準と施工限界

図-2 潮流発電装置

表-1 起重機船の緒元

	起重機船A 2200t吊		起重機船B 700t吊	
	現地	実験(1/50)	現地	実験(1/50)
船長	90.0 m	1.800 m	56.3 m	1.125 m
幅	41.0 m	0.820 m	25.6 m	0.513 m
高さ	7.0 m	0.140 m	4.4 m	0.088 m
喫水	4.2 m	0.084 m	2.6 m	0.053 m
重量	15,533 t	124.3 kg	3,792 t	30.3 kg
ジブトップ高さ	98.6 m	1.971 m	61.6 m	1.232 m
アウトリーチ	51.9 m	1.038 m	32.4 m	0.649 m
固有周期 Roll	9.7 s	1.37 s	7.4 s	1.05 s
固有周期 Pitch	9.0 s	1.27 s	7.3 s	1.03 s

表-2 潮流発電装置の空中重量と水中重量

	一括設置		分割設置	
	現地	実験(1/50)	現地	実験(1/50)
空中重量	788.7 t	6.3 kg	176.1 t	1.4 kg
水中重量	589.1 t	4.7 kg	61.3 t	0.5 kg

船を用いて効率的に作業を行うことを想定している。この状態の発電装置を「分割」と称す。また、2200t 吊起重機船を起重機船A、700t 吊起重機船を起重機船Bと称す。実験は潮流の速い現場海域の特徴を考慮して、波浪と流速の条件を変えて起重機船の動揺と水中吊荷の動揺について調べた。

(2) 実験水槽、起重機船と潮流発電装置の緒元

実験は縮尺1/50の起重機船模型と潮流発電装置模型を製作して、一括設置（全体）と分割設置（ナセル）の実験を行った。表-1と表-2はそれぞれ起重機船と潮流発電装置の緒元である。図-3は起重機船Aの実験の様子である。模型を水槽に浮かべて係留し、発電装置を水面から回転翼の中心まで深度20 m（模型 0.4m）まで降ろした状態で、波と流れを作用させて船体と吊荷の動揺を測定した。起重機船Bについても同様に吊荷をナセルに代えて行った。

(3) 計測項目と計測方法

起重機船の動揺は、3軸ジャイロ스코プと加速度セ

図-3 起重機船Aの実験条件

図-4 起重機船と吊荷の動揺成分

ンサーを内蔵した小型姿勢角検出器を使用した。また、水中吊荷の動揺は水槽側面から撮影したビデオ映像から、運動解析ソフトウェアを用いて測定した。図-4は起重機船と吊荷の動揺成分である。波・流れの向きは水槽縦断方向であり、起重機船模型を回転させて入射角 β を変えている。ビデオ撮影は水槽側面のガラスから水槽横断方向に撮影しているため、水中吊荷の水平方向は船体と同じではなく、波・流れと同じ方向になっている。波高は容量式波高計、流速は電磁流速を船体中心から沖側へ6.6m離れた場所に設置して計測した。

(4) 実験条件と実験ケース

実験ケースは表-3に示す通りである。表中の起重機船Aは、4本のワイヤーで発電装置全体を吊る4点吊りである。また、起重機船Bは、2本のワイヤーでナセルを吊る2点吊りで実験を行った。

3. 実験結果

(1) 起重機船の固有周期

動揺実験に先立って、吊荷の無い状態で起重機船模型のRollとPitchの自由振動実験を実施して固有周期を求めた。起重機船Aの固有周期はRoll 9.7s、Pitch 9.0s、起重

表-3 実験ケース

CASE No.	起重機船	吊荷	入射波				流速 [m/s]
			入射角 [deg]	周期 [sec]	波高 [m]	種類	
1	A	一括	0	10	0.5,1.0,1.5,2.0	規則波	0
2	A	一括	0	4,6,8,10,12,14	1.0	規則波	0
3	A	一括	0	10	1.0	規則波	0.0,5,1.0,1.5
4	A	一括	0,45,90	6	1.0	規則波	0
5	B	分割	0	4,6,8,10	1.0	規則波	0
6	A	一括	0	4,6,8	1.0	不規則波	0

図-5 潮流発電装置の抗力係数

機船Bの固有周期はそれぞれ7.4s, 7.3sであった。

(2) 潮流発電装置の抗力係数

発電装置の形状が複雑で一括設置では非対称形状であることから、一括と分割の抗力実験を行った。実験は水中に固定した発電装置に一定流速1.0 m/s (0.14 m/s模型)を当て、装置に作用する流体力を3分力計で測定した。また、据付時の回転翼のPitch 角度は、流れの影響を最小限とするため、据付時と同じフェザリングに設定している。一括と分割の実験結果を図-5に示す。潮流発電装置の抗力係数は0.8～1.7程度である。

(3) 起重機船の動揺特性

図-4に定義した起重機船と吊荷の各動揺成分について整理した。起重機船の動揺角度と水中吊荷（一括、分割）の動揺量は、全て片振幅を示している。

a) 波高の影響 (CASE 1)

図-6は表-3の実験CASE 1における入射波波高と船体動揺角および吊荷動揺量の関係を示したものである。図-7は実験CASE 1における波高と吊荷動揺速度の関係を示したものである。

- ・波高に比例して船体動揺角と吊荷動揺量は増加する。
- ・船体Pitchと吊荷鉛直の傾向は、ほぼ一致しており連動している。これは波が船首方向から入射すると、起重機船のPitchが卓越し、クレーンのジブトップが上下に動揺するため、ジブトップから吊り下げられた吊荷は鉛直方向に動揺するためである。
- ・このケースでは波が船首から入射するため、船体Rollと吊荷水平は小さく、波高が増加してもあまり変化しない。吊荷水平は吊荷が水中にあるため水の抵抗を受けて動揺量が小さくなっている。

図-6 波高と動揺の関係

図-7 波高と吊荷の動揺速度の関係

図-8 周期と動揺の関係

- ・吊荷動揺速度は波高に比例して増加する。

b) 周期の影響 (CASE 2)

図-8は表-3の実験CASE 2における入射波周期と船体動揺角および吊荷動揺量の関係を示したものである。

- ・船体Pitchと吊荷鉛直の傾向は、ほぼ一致しており連動している。
- ・船体Pitchと吊荷鉛直の動揺は、周期10sで動揺が最大になる。これは、起重機船AのPitchの固有周期は9.0sに同調したため、吊荷鉛直は船体Pitchの影響を強く受けているためである。
- ・船体RollはPitchよりも固有周期が長く、周期が10.0sより長くなると動揺が増加する。
- ・吊荷水平は、周期が8.0sより長くなると動揺が増加する。

c) 流れの影響 (CASE 3)

図-9は表-3の実験CASE 3における流速と船体動揺角および吊荷動揺量の関係を示したものである。

- ・船体Pitchと吊荷鉛直の傾向は、ほぼ一致しており連動している。

図-9 流速と動揺の関係

図-10 入射角と動揺の関係

図-11 起重機船Bの周期と動揺の関係

- ・船体Pitchと吊荷鉛直の動揺は、流速が増加してもほぼ一定であり流速の影響は小さい。
- ・船体Rollは流速が増加すると、わずかに船体動揺が増加する。

d) 入射角の影響 (CASE 4)

図-10は表-3の実験CASE 4における波の入射角と船体動揺角および吊荷動揺量の関係を示したものである。

- ・入射角が 0° から 90° へ変化すると、船体動揺角はRollが増加し、Pitchは 45° を超えると減少する。
- ・船体Pitchと吊荷鉛直の傾向は、ほぼ一致しており連動している。
- ・船体Rollと吊荷水平の傾向は、ほぼ一致しており連動している。
- ・入射角が 0° から 90° へ変化すると、吊荷動揺量は水平変位が増加し、鉛直変位は 45° を超えると減少する。これは船体Pitchが卓越しているとジブトップは上下に動揺し、船体Rollが卓越していると、ジブトップが左右に動揺するためである。
- ・船体Pitchと吊荷鉛直の動揺は 45° で最大になる。

e) 起重機船Bの動揺 (CASE 5)

図-11は表-3の実験CASE 5における、入射波周期と船体動揺角および吊荷動揺量の関係を示したものである。このケースは、表-1, 2のように起重機船の船体が小さく、吊荷の水中重量が非常に軽いケースである。

- ・吊荷の鉛直変位は船体Pitchの影響を受けており連動している。
- ・船体Pitchと吊荷鉛直の傾向は、周期が長くなると動揺が増加する。
- ・船体Rollの動揺は周期が長くなると増加する。
- ・船体Rollと船体Pitchの動揺は、起重機船Bの固有周期7.4s付近でピークが見られない。これは船体と吊荷の連成運動の効果が大きいことが考えられる。
- ・吊荷水平の動揺は、8sで最大となっており船体Pitchの動揺と一致していない。これは吊荷が2点吊りであるため、吊荷自体が回転しやすくその影響を受けている。

起重機船Aによる一括設置(図-8)と起重機船Bによる分割設置(図-11)を比較すると以下のことが言える。

- ・船体動揺はPitchとRoll共に起重機船Bが大きい。
- ・吊荷水平の動揺は分割設置の方が大きい。
- ・吊荷鉛直の動揺は同程度である。これは起重機船BのPitch回転軸から吊荷までの離隔が、起重機船Aより短いため、船体Pitchが大きくなっても、吊荷の変位が小さくなるためである。

4. 数値シミュレーション

(1) 数値計算法

潮流発電装置の据付作業では、波浪により起重機船が動揺して据付精度が低くなる場合がある。このため、施工限界波高を精度よく推定することが重要である。様々な条件で施工条件を検討するために、河邊ら³⁾が開発した起重機船と水中吊荷の連成運動の数値計算法を用いて計算した。起重機船に働く流体力を、3次元特異点

図-12 座標系

法を用いて求め、水中吊荷の連動を考慮して両者の連成運動方程式を周波数領域において解くものである。計算における仮定は以下のとおりである。

- ・ x 軸と角度 β となす、振幅 h 、円周波数 ω の規則波が起重機船に入射する。
- ・ 起重機船、吊荷の運動は微小振幅運動とする。
- ・ 起重機船、水中の吊荷との流体力学的干渉は無視できるものとする。
- ・ 吊荷は、起重機船からタガールあるいは索によって回転運動の防止策が取られているとし、 xyz 軸方向の併進運動のみを行うものとする。

座標系は図-12 に示すように、起重機船に固定した xyz 座標を取り、ジブトップの座標を (l_x, l_y, l_z) として、ジブトップから長さ l の位置に吊荷が吊り下げられているものとする。起重機船と吊荷の9自由度の運動方程式は次式となる。

$$\sum_{j=1}^9 [(m_{ij} + A_{ij}) \ddot{X}_j + B_{ij} \dot{X}_j + C_{ij} X_j] = E_i$$

for $i = 1 \sim 9$ (1)

ここに、 i, j はそれぞれ起重機船および吊荷の各運動モードを示し、 m_{ij} は質量、 A_{ij} は付加質量、 B_{ij} は造波減衰力係数、 C_{ij} は復元力係数、 E_i は入射波強制力を示す。起重機船の動揺に対する減衰については、矩形状の形状を考慮して Roll および Pitch について非線形減衰係数を考慮する。吊荷については、流体の粘性影響、渦の発生を考慮して Morison 式の減衰項を加えて起重機船と吊荷の連成運動の運動方程式を定式化している。また、起重機船および吊荷それぞれの非線形減衰影響は、それぞれを個別に考慮することができる。

一般に、起重機船と吊荷の応答関数は、ある周波数範囲に集中した形状になり、波スペクトルも平均波周期付近の狭い範囲にエネルギーが分布する⁹⁾。したがって、不規則波中の起重機船、吊荷の応答スペクトルは狭帯域のスペクトルとなる。このような、不規則時系列のピーク値の確率分布は Rayleigh 分布によって表現できるため、起重機船および吊荷の不規則波中での応答は、これを統計処理することによって評価することができる。

(2) 数値解析の再現性 (CASE 6)

図-13～15 は、有義波波高 $H_{1/3} = 1.0$ m の不規則波に対する、起重機船Aと水中吊荷の動揺の数値計算結果と実験結果を示したものである。図中の縦軸は、それぞれ船体動揺角度、水中吊荷の動揺量、吊荷の動揺速度を、入

図-13 船舶の動揺角 (船体)

図-14 吊荷の動揺量 (水中吊荷)

図-15 吊荷の動揺速度 (水中吊荷)

射波波高との比で示している。船体動揺角度と水中吊荷の動揺量の計算値は、実験結果と良く一致している。また、水中吊荷の動揺速度についても計算結果の再現性は高い。

(3) 施工限界の波浪条件の推定

発電装置一括設置の施工管理基準は、水平変位と装置の傾斜、着底速度である。着底速度は岩盤への着底時の衝撃による発電装置の破損を考慮して規定しており、着底時の鉛直速度を0.8m/s以下にする必要がある。水平変位は±10m以下であるが、図-14のように吊荷の水平変位は、有義波周期4～8秒で波高の半分以下であり、鉛直速度よりも作業ができる限界波高は大きい。

図-16 は、図-15 で示した水中吊荷の動揺速度の最大値の安全率を2倍と設定して、据付管理基準から施工限界波高を逆算したものである。ただし、動揺速度の最大値の安全率を何倍にするかは、安全性や施工精度を考慮して今後検討する必要がある。図中の緑線で示した範囲は、起重機船関係者のヒアリングによる経験的な施工限界で有義波高0.5m、周期6.0sである。これは実験と計

図-16 入射波周期と施工限界波高

図-17 波浪入射角と施工限界波高

算で求めた施工限界波高に対して十分な余裕があり、動揺の影響を受けずに作業が可能である。

図-17 は起重機船に作用する波の入射角と吊荷の鉛直速度に対する施工限界波高の関係を示したレーダーチャートである。放射軸が波の入射角で、中心から外へ向かう軸が施工限界波高である。例えば、周期6秒での波が入射角0°で起重機船に作用する時は、波高1.0mまで据付作業が可能である。このようなレーダーチャートを作成することで、動揺量の観点から施工限界を容易に推定することが可能であり、作業の安全性の向上や施工精度の推定に供することができる。

5. おわりに

本研究は起重機船で潮流発電装置を水中に吊下げた時の動揺特性について、模型実験と数値計算を実施し、次のことを明らかにした。

起重機船 A の実験では、船体と吊荷が最大動揺となる周期は、Pitch の固有周期とほぼ一致する。吊荷鉛直は船体 Pitch の影響を強く受ける。船体 Pitch と吊荷鉛直の動揺は流速の影響が小さい。また、起重機船 B の実験では、起重機船 A よりも船体動揺が Pitch と Roll で大きくなり、吊荷は水平変位が大きくなるが、鉛直変位は Pitch 回転軸から吊荷までの離隔が短いため、同程度になる。数値計算では、船体動揺と水中吊荷動揺を精度良く再現できる。また、吊荷の動揺から作業可否判断する方法を提案した。経験的な施工限界は十分な余裕のある波浪条件であることが明らかになった。

謝辞：本研究は、環境省の業務委託として川崎重工・東亜・古河電工・九州大コンソーシアムで実施した。本研究を進めるにあたっては、環境省地球環境局の諸氏に多大なるご指導、ご助言を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 首相官邸政策会議：海洋再生可能エネルギー利用促進に関する取組について（オンライン），<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/energy/renewableenergy.html>，参照 2016-05-24。
- 2) 白石悟，石見剛：アンケートおよび動揺シミュレーションによる作業船の海上作業限界条件に関する検討，港湾技研資料，N.898，1998。
- 3) 上田茂，樋口豊志：起重機船の動揺特性と稼働条件，港湾技研資料，N.709，1991。
- 4) 宮崎哲史，武田将英，倉原義之介，浅沼丈夫，津田宗男，河邊寛：波浪中の起重機船と吊フック，シャックルの連成運動，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 70, No. 2, pp.1051-1055, 2014。
- 5) 河邊寛，津田宗男，宮崎哲史，倉原義之介，松田信彦，諫山太郎：吊り荷が水中にある時の起重機船の波浪中の運動，日本船舶海洋工学会講演会論文集，21号，p.495-498，2015。
- 6) 山内保文：船舶・海洋技術者のための不規則現象論，海文堂出版，1986。

(2016.5.26 受付)

THE UNDERWATER MOTION OF TIDAL CURRENT POWER GENERATOR DURING CRANE VESSEL LIFTING OPERATIONS

Nobuhiko MATSUDA, Yoshinosuke KURAHARA, Mikiko EGUCHI, Muneo TSUDA, Aiko KURIHARA, Hiroshi KAWABE

Japan's energy policy has been changed after the Great East Japan Earthquake. Marine renewable energy is increasing. An advantage of tidal current energies is hardly influenced by weather conditions. Energy can be generated both day and night. During the installation work of tidal power generation device, the vessel and the suspended load are moving by the waves and tidal currents. As a result, the installation accuracy of the suspended load is reduced. Therefore, it is important to understand the motion characteristics of the vessel and the suspended load. This study examined the characteristics of movement during installation of tidal power generation device using a crane vessel in the hydraulic model experiment.