

# うねりによる動揺を考慮した フローティングクレーン一括架設に関する考察

宮下力<sup>1</sup>・大橋治一<sup>2</sup>・加藤久人<sup>3</sup>・高尾道明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 本州四国連絡橋公団 維持施設部 (〒105東京都港区虎ノ門5-1-5虎ノ門45森ビル)

<sup>2</sup>正会員 本州四国連絡橋公団 設計部 (〒105東京都港区虎ノ門5-1-5虎ノ門45森ビル)

<sup>3</sup>正会員 NKK橋梁建設部 長大橋室 (〒230神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

<sup>4</sup>正会員 NKK橋梁建設部 長大橋室 (〒230神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

フローティングクレーン (以下、FC) を利用した橋梁の架設は、工期の短縮、経済性、品質と安全性の確保等から、海峡での標準的な架設工法となっている。しかし、吊り状態の橋体ブロックを接地する時には高精度の位置決め作業が要求されるため、FCの動揺の把握が施工の可否を握る重要な問題となる。そこで、FCの基本的な動揺特性を数値解析により求め、実施工時に観測された動揺との対比を行い、次一括架設の作業限界に関する客観基準を設け、最後に海象条件の異なる代表的な海域での稼働率の検討を行った。

*Key Words: floating crane barge, long-period wave, heave, pitch, amplitude, weather downtime*

## 1. まえがき

海上における橋梁の架設には、工場で製作された橋体ブロックを大型フローティングクレーン (以下FC) により一括架設する施工法が採用されることが多い。この施工法は、短時間かつ短期間で架設を完了できるところに特徴があり、海象の変化が激しい海上での施工においては一つの有力な施工法である。また、架設機材がほとんど不要であることから架設費が低減され、現場施工の省力化により工事の安全性や品質の向上が図られる利点がある。

橋梁の架設工事にFCを利用して一括架設する施工法は1960年代頃から始まったが、その後、施工事例は急速に増加し、今日、本州四国連絡橋を始めとする海峡や港湾等における架橋の代表的な施工法になっている。この間、FCの大型化と吊り能力の向上、技術の進歩、FCの操船技術の向上等が図られている。

FCによる一括架設は、短時間に集中して作業が行われるが、吊荷の接地位置に対する許容誤差は数mmであるため、FCを高精度で位置決めすることが要求される。このような作業における施工の可否は、潮流、波浪などの海象条件が大きな影響を及ぼす。潮流は係留作業に影響を与えるが、潮汐表や過

去の調査データを使用することができるため、係留方法、係留時間帯を計画的に選定することにより問題を克服している。また、一旦係留されれば、潮流がFCの挙動に及ぼす影響は比較的少ない。

一方、波浪はFCの動揺の直接的な原因となることが多く係留完了後にも問題になる。特に、うねりと呼ばれる長周期の波浪は、吹送距離の長い開けた海域で発達し減衰時間が長い。このような波浪の卓越周期は大型のFCの固有周期に近接しているため波高が小さくてもFC船体の動揺を引き起こす。

実作業においてはまず、FCのフックを台船上の橋体ブロックと連結する台付け作業が問題となる。この状態では、一般に、台船はFCに直角方向に位置決めされているため、台船およびFCの動揺が競合するなかでの作業となり、動揺が大きい場合には危険な作業となる。次に、FCの動揺により吊り上げられた橋体ブロックの上下動揺が大きい場合には接地作業の可否を決定づけることになるばかりか、添接作業にも影響を与える場合がある。

動揺が架設工事において問題となったことが報告されているのは門崎高架橋、大鳴門橋におけるFC架設であり、事例としては少ない。これは、ほとんどの架設工事が内海あるいは港湾内での施工であったことによるものと推察される。しかし、第二国土

軸構想で検討されている海峡連絡橋の架設地点のように、外洋に直接面した海域においてFC作業を行う場合には、うねりによるFCの動揺の影響が施工条件を大きく左右することが予想される。

本文では、まずFCの動揺に関する基本特性について述べ、次にうねりのある海域での実施工時の動揺計測と解析結果の比較を行い、最後にFCによる一括架設における作業限界と稼働率の関係について考察を行った。

## 2. FC船体の動揺解析

### (1) 解析概要

ここでは、橋体ブロック（以下、吊荷）を吊り上げた状態で波浪中に動揺するFCの船体および吊荷の動揺量を解析的に求める。なお、解析においては次のような仮定を設ける<sup>1)</sup>。

- ①解析は線形規則波のみ取り扱い、波浪の特性は、波周期、波高、波入射角で表されるものとする。
- ②水深は等水深とし、FCの中心の値で代表する。海底の地形による水深の変化は考慮しない。
- ③波の反射・屈折は考慮しない。
- ④係留索は放物線で近似し、等価な線形バネに置き換える。
- ⑤吊荷は船体の動揺にともない、振り子運動をするものとして、船体との連成効果を考慮する。
- ⑥流体力（付加質量、減衰力、波強制力）は、ポテンシャル理論による3次元特異点法にて求める。

### (2) 吊荷の連成効果を考慮した船体の運動方程式

一般に、規則波中の船体の運動方程式は式(1)で表される。吊荷を有するFCについても、吊荷の連成効果を無視し、吊荷を仮想的にFCに剛結したとすればこの式が適用される<sup>2)</sup>。

$$[M + \mu] \cdot \{\ddot{X}\} + [\lambda + c] \cdot \{\dot{X}\} + [K + S] \cdot \{X\} = \{F\} \quad (1)$$

ただし、

$\{X\}$  ; 動揺変位で、 $\{x_1, x_2, \dots, x_6\}^T \cdot e^{-i\omega t}$  の形で表される。変位振幅  $x_i$  は図-1の通りである。 $\omega$  は入射波の角周波数。

$\{F\}$  ; 規則波による波強制力で  $\{f_1, f_2, \dots, f_6\}^T \cdot e^{-i\omega t}$

$[M]$  ; 船体に吊荷分を加えた質量と慣性モーメント

$[\mu]$  ; 造波抵抗に起因する付加質量

$[\lambda]$  ; 造波抵抗に起因する減衰力係数

$[c]$  ; Roll方向の運動にだけ考慮する造渦抵抗減衰係数

$[K]$  ; 静水圧復元力係数

$[S]$  ; 係留索による復元力係数

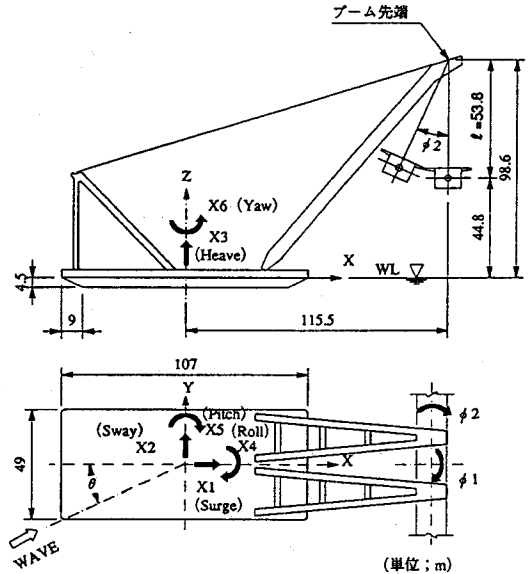


図-1 FCの一般図、座標系、変位の定義  
座標原点は X, Y については FC 水線面内（浮面）重心、Z は水面位置とする。

図-1 FCの一般図、座標系、変位の定義

ここで、 $[\mu]$ 、 $[\lambda]$ 、および  $\{F\}$  はいずれも流体力に起因するものである。 $[\mu]$ 、 $[\lambda]$  は radiation 問題、 $\{F\}$  は diffraction 問題として、それぞれポテンシャル理論によって定式化される境界値問題を解析することで求められる。今回用いた解法は、任意形状への適用に便利な三次元特異点分布法である。

造渦抵抗  $c$  はマトリックス 4列 4行目にだけ寄与する値で、ここでは式(2)のように線形化したものを用いる。なお、式中の抵抗係数  $E$  については、山下により提案されている二次元箱形断面に対する簡略式<sup>3)</sup> から求める。

$$c = \frac{8\omega x_4 E}{3\pi} \quad (2)$$

さらに、吊荷の連成効果を勘案した場合、FCの運動方程式は、式(1)に吊荷の連成項を加え、次式(3)のようになる<sup>3)</sup>。式中、FC重心点での動揺6成分  $x_1 \sim x_6$  の他に、吊索の振れ角  $\phi_1, \phi_2$  が未知数であり、これらを複素数表示で解けばFC重心点の動揺および吊荷の振れ角が、入射波に対する位相遅れとともに求められる。ここで、吊荷質量  $m$ 、吊索長さ  $l$ 、ブーム先端座標  $(l_1, l_2, l_3)$ 、X軸、Y軸回りの吊索の振れ角  $\phi_1, \phi_2$  (図-1参照) とする。

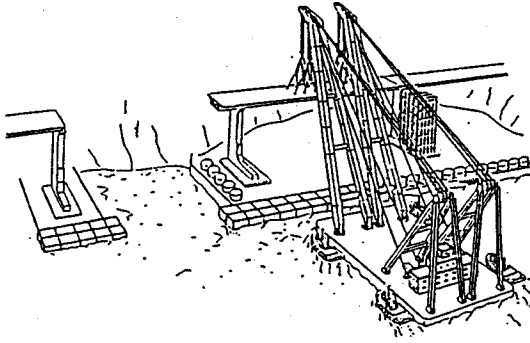


図-2 FC一括架設<sup>9)</sup>

表-1 FC船体および吊荷の諸元

項目	単位	FC諸元
吃水 (draft)	m	4.5
重心位置 (Xg, Yg, Zg)	m	(-1.16, 0.0, 16.74)
底面積 A	m <sup>2</sup>	5,243
排水量 Δ	tf	22,370
慣性モーメント Ix	tf·m <sup>2</sup>	23,750,000
慣性モーメント Iy (=Iz)	tf·m <sup>2</sup>	79,580,000
縦メタセンター高 GMy	m	210.18
横メタセンター高 GMx	m	29.05
FC船体の外寸法	m	幅49×長さ107
吊荷(橋体Bブロック)重量	tf	1,159
ブーム先端座標	m	(115.5, 0.0, 98.6)
吊索の長さ	m	53.8

$$\begin{bmatrix}
 & & & & 0 & -ml \\
 & & & & ml & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & -ml l_3 & 0 \\
 & & & & 0 & -ml l_3 \\
 & & & & ml l_1 & ml l_2 \\
 \hline
 0 & ml & 0 & -ml l_3 & 0 & ml l_1 & ml^2 & 0 \\
 -ml & 0 & 0 & 0 & -ml l_3 & ml l_2 & 0 & ml^2
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 \ddot{x}_1 \\
 \ddot{x}_2 \\
 \ddot{x}_3 \\
 \ddot{x}_4 \\
 \ddot{x}_5 \\
 \ddot{x}_6 \\
 \ddot{\phi}_1 \\
 \ddot{\phi}_2
 \end{Bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 \dot{x}_1 \\
 \dot{x}_2 \\
 \dot{x}_3 \\
 \dot{x}_4 \\
 \dot{x}_5 \\
 \dot{x}_6 \\
 \dot{\phi}_1 \\
 \dot{\phi}_2
 \end{Bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 & & & & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & mgl & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & mgl
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3 \\
 x_4 \\
 x_5 \\
 x_6 \\
 \phi_1 \\
 \phi_2
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 f_1 \\
 f_2 \\
 f_3 \\
 f_4 \\
 f_5 \\
 f_6 \\
 0 \\
 0
 \end{Bmatrix}
 \quad (3)$$

### (3) FC船体と吊荷の動揺特性

FCの基本的な動揺特性を把握するために、波高を10cmとした規則波の3方向からの入射波に対して解析を行った。解析に用いたFCは最大吊り能力3,000 tonf 吊級FCで、図-1のような吊荷状態にあるものとする。FCの各諸元、保留条件、吊荷重量、水深等の基本的な条件は、後述する門崎高架橋での施工時(図-2参照)の条件を用いた<sup>9)</sup>。

FC船体および吊荷の諸元を表-1に、波浪および海域の条件を表-2に示す<sup>9)</sup>。また、表-3に保留索諸元、図-3に保留索展開形状を示す<sup>9)</sup>。

今回、波の入射角は $\theta=0, -26.5, -71.5^\circ$ の3

種類とした。ここで波入射角 $\theta$ は図-1に示す定義による。 $\theta=0^\circ$ はFCの真後ろからの波に相当する。また、 $\theta=-26.5^\circ$ は門崎高架橋では真南からの入射波となり、現地波の卓越方向である。それに対して $45^\circ$ を成す角度が $\theta=-71.5^\circ$ である。

FCの動揺モードのうち、一括架設に重要な影響を与える Heave ( $x_3$ )、Pitch ( $x_5$ )、Roll ( $x_4$ )の計算結果を図-4~6に示す。縦軸はいずれも片振幅値で、波高10cmの規則波に対するものである。

表-4には船体および吊荷の振り子としての固有周期を示す。なお、吊荷の連成効果を見出し、吊荷を仮想的にFCに剛結したと仮定した場合の固有周

表-2 波浪および海域の条件

項目	諸元
波高	H=0.10m (片振幅=0.05m)
波周期	T=2~20 secの規則波
入射角	$\theta=0.0, -26.5, -71.5$ deg
水深	h=15.0m (等水深で仮定)

期を ( ) 内に示す。吊荷重量はF C船体の排水量の約5%にすぎないが、吊荷の存在により Pitch, Roll が短周期化することがわかる。

F C動揺は、波の入射角にかかわらず、波の周期が4秒付近で発現し、7秒を越える付近から顕著になっている。そして、波の周期が長周期化するにしたがい、Heaveは単調増加し、Pitchは周期10~15秒で極大値を示している。なお、波周期4秒での波長は25m程度であり、船体長さの約1/4、幅の約1/2に相当する。一方、Rollについては、F Cの真後ろからの波 ( $\theta=0^\circ$ ) に対しては10秒を越えるまでは大きな動揺は見られないが、F Cの真横近くからの入射波 ( $\theta=-71.5^\circ$ ) では波の周期が4秒付近から動揺が現れ、船体の固有周期7.7秒付近で極大値、吊荷の固有周期14.7秒で極小値を示す。

吊荷の動揺量については、F C重心での動揺6成分の値と吊荷の振り子運動としての振れ角から、位相差を考慮して求められる。特に、F C一括架設の検討では、吊荷の上下動揺  $\delta x_3$  が重要であり、これについて考察する。

吊荷の上下動揺  $\delta x_3$  はF C重心での2つの動揺モード、HeaveとPitchとの合成値であり、式(4)にて計算されるブーム先端の上下動揺に相当する。計算結果を図-7に示す。

$$\delta x_3 = \delta h + \delta p$$

$$= x_3 \cdot \sin(\omega t - \psi_3) + L_b \cdot \cos \alpha \cdot x_5 \cdot \sin(\omega t - \psi_5) \quad (4)$$

- ここで、 $\delta x_3$  ; 吊荷の上下動揺の片振幅値
- $\delta h$  ; Heaveによる吊荷の上下動揺
- $\delta p$  ; Pitchによる吊荷の上下動揺
- $x_3$  ; F C重心でのHeave片振幅
- $x_5$  ; F C重心でのPitch片振幅
- $\psi_3$  ; 波周期に対するHeaveの位相遅れ
- $\psi_5$  ; 波周期に対するPitchの位相遅れ
- $L_b$  ; 座標原点~ブーム先端距離
- $\alpha$  ; F Cブームの仰角 ( $\alpha \gg X_5$ )

図-8はPitchに対するHeaveの位相遅れを示すものである。なお、Heaveの正方向の動きが吊荷に鉛直上向きの動きを与えるのに対しPitchの正方向の回転は吊荷に鉛直下向きの動きを与えるので、吊荷の上下動揺にとっては $180^\circ$ の位相遅れが同相を意味する。

図-9はPitch、Heaveによる吊荷上下動揺の振幅比  $\delta h / \delta p$  を示す。HeaveよりもPitchによる吊荷上下動揺の振幅が大きければこの比は1.0以上の値を

表-3 係留索諸元

係留索番号	ワイヤ径 (mm)	重量 (kgf/m)	破断力 (tonf)	伸び剛性 EA (tonf)
1, 2, 5, 6, 8 ~ 11	48	8.28	115	9,560
3, 4, 7, 12	60	12.90	179	14,900

ワイヤ種別は、JIS6号、6×37、G種

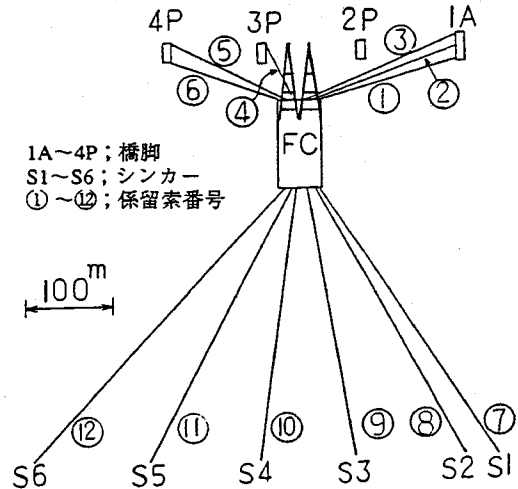


図-3 係留索展開形状

表-4 固有周期

動揺モード	F C	吊荷
Heave (X3)	10.8 (11.0)	—
Pitch (X5)	7.6 (11.7)	14.7
Roll (X4)	7.7 (14.3)	14.7

( )内は吊荷の連成効果を無視し、吊荷を仮想的にF Cに剛結した場合の数値。

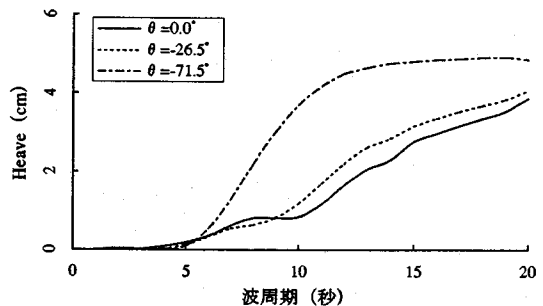


図-4 F C重心の動揺片振幅 (Heave)

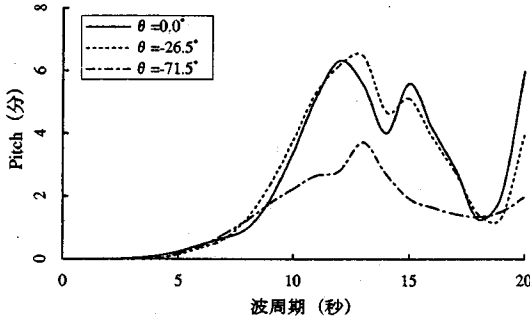


図-5 FC重心の動揺片振幅 (Pitch)

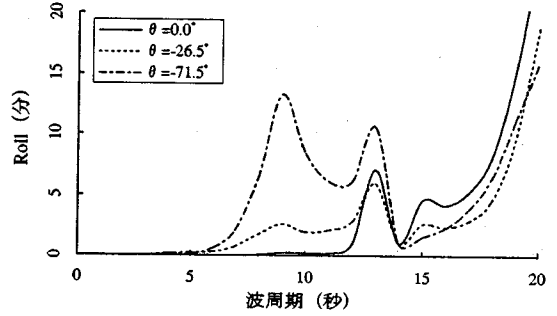


図-6 FC重心の動揺片振幅 (Roll)

とる。

吊荷上下動揺  $\delta x_3$  と波周期との関係については図-7より、波周期に対し4秒前後から発現し、波周期10～15秒で極大値を示している。これは、前述したFC重心でのPitchの発現の仕方と同じ傾向であり、吊荷の上下動揺がHeaveよりもPitchに支配されていることがわかる。このことは図-9より振幅の比  $\delta h / \delta p$  が波周期によらず常に2.0以上であることから説明できる。

### 3. 現地計測と解析結果の比較

#### (1) 波浪および動揺の計測

本章では、門崎高架橋でのFC一括架設<sup>9)</sup>を例にとり、FC動揺に関する実測値と解析値との比較を行うこととする。

門崎高架橋は全長1,009mの箱桁橋であるが、1隻のFCによる単吊りあるいは2隻のFCによる相吊り一括架設を合計7回行い、約4ヶ月間で架設を完了した。架設地点は門崎岬の太平洋側のほぼ東西方向に位置する。北方からの波浪は岬により遮断されるため架設作業に直接影響を与えないが、南方からの波浪については太平洋側からの長期のうねりが観測されている。本橋の架設時期は、南方からの波浪を避けて冬季を選定したが、異常気象により南方からの風波によるうねりが多数発生した。

現地では、架設作業を実施する作業班とは別に計測班を設け、各データの計測と架設作業班への情報伝達を行った。

波浪は、波高計を架設地点付近に設置して計測した。波向は目視によったが、南西 ( $\theta = -71.5^\circ$ ) から南東の範囲にあり、南向き ( $\theta = -26.5^\circ$ ) の頻度が高かった。

動揺の計測は、レーザー光による鉛直方向の変位計1台とPitch, Roll各々の成分に対する傾斜計2台によって行った。個々の振幅値は、約10分ごとに

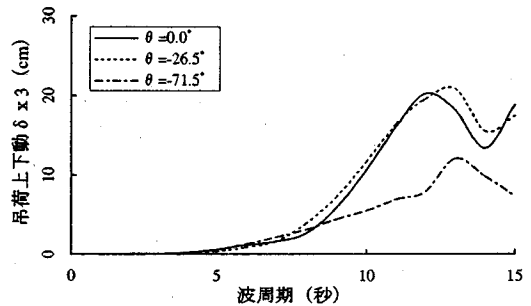


図-7 吊荷の動揺片振幅 (上下動揺)

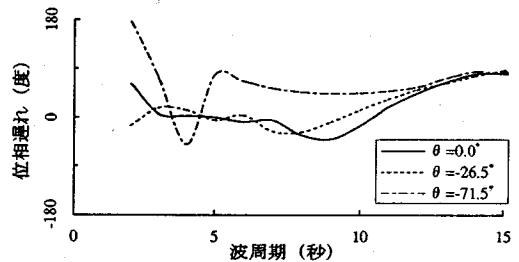


図-8 Pitchに対するHeaveの位相遅れ

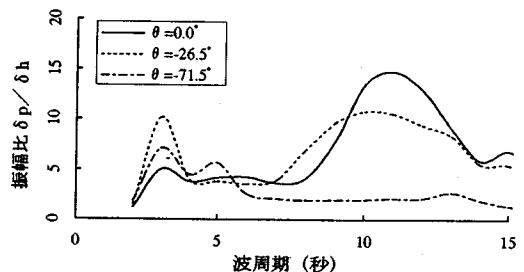


図-9 Pitch, Heaveによる吊荷上下動揺の振幅比

3分間サンプリング周波数5Hzにて収集したデータをAD変換し、その中での最大応答値を読みとった。

図-10は各動揺振幅の計測記録とそれに対してスペクトル解析を行った結果である。記録波形からわかるように、FCの動揺量は時間的にかなり変動し周期成分にも幅のある不規則振動である。

図-11, 12には、FC重心点での各動揺成分ならびにブーム先端位置での上下揺れ(=吊荷の上下動揺)の結果を示す。横軸には9:00前後の時刻を示す。セッティングビームが既設桁に接地した時刻は9:10で、それ以前の時刻にはFCは吊荷を吊り上げ架設地点へ接近中の状態であった。

### (2) 不規則波によるFC船体の動揺

実海中でのFC船体の動揺を推定するために、不規則波による動揺をスペクトル解析により求める。不規則波の特性はBretschneiderのスペクトル<sup>9)</sup>を用いた。このスペクトルは、有限な吹送距離に対する風波について、統計的な代表波の波高や周期(例えばH1/3, T1/3)が与えられると、式(5)のようにそのスペクトルの形を推定することができるものである。

$$Es(f) = 0.430 \cdot \left( \frac{H_{mean}}{g \cdot T_{mean}^2} \right)^2 \cdot \frac{g^2}{f^5} \cdot \exp \left\{ -0.675 \cdot \left( \frac{1}{T_{mean} \cdot f} \right)^4 \right\}$$

(単位: m<sup>2</sup>·sec)

(5)

ここに、 $H_{mean} \approx 0.625 \cdot H_{1/3}$   
 $T_{mean} \approx 0.9 \cdot T_{1/3}$   
 $f = \text{波浪周波数}$   
 $g = \text{重力加速度}$

規則波中の船体の周波数領域における動揺解析値をXi(f)で示すとき、このXi(f)と不規則波中の船体の動揺スペクトルRis(f)の関係およびRis(f)の分散 $\sigma_i^2$ は下式で求められる<sup>9)</sup>。

$$Ris(f) = Xi(f)^2 \cdot Es(f) \quad (6a)$$

$$\sigma_i^2 = \int_0^{\infty} Ris(f) df \quad (6b)$$

ここにiはHeave, Roll, Pitch等の動揺成分を示す<sup>9)</sup>。一般に不規則波の波高の確率密度関数はRaileigh分布に従うと言われ、その様な不規則波中の船体の動揺の極大値もRaileigh分布に従う。

これらより、不規則波中での船体動揺の有義値(Xi 1/n)や期待値(Xi mean)を下式から求めることができる。

$$Xi_{mean} = 1.25 \cdot \sigma_i \quad (7a)$$

$$Xi_{1/3} = 2.00 \cdot \sigma_i \quad (7b)$$

$$Xi_{1/10} = 2.55 \cdot \sigma_i \quad (7c)$$

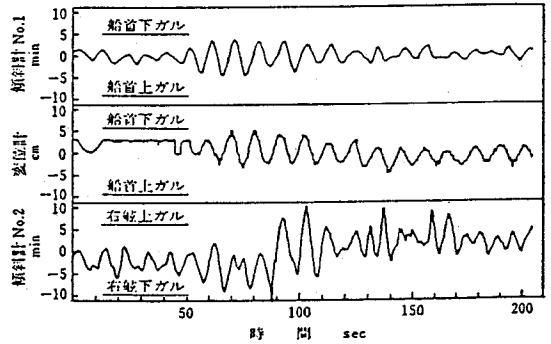
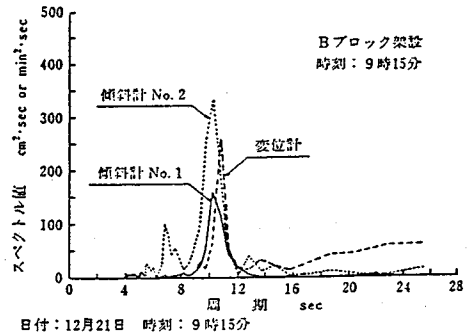


図-10 記録波形とスペクトル解析結果<sup>1)</sup>

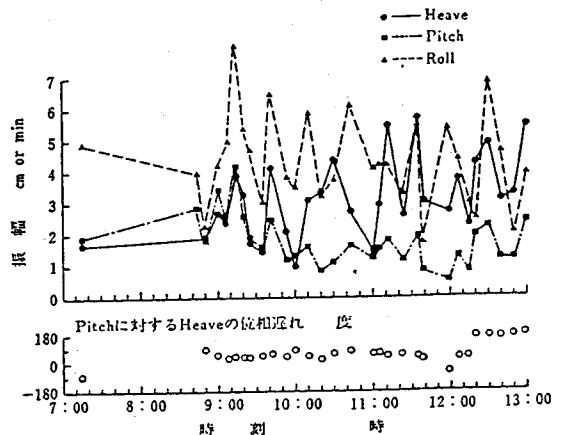


図-11 FC動揺計測の結果<sup>1)</sup>

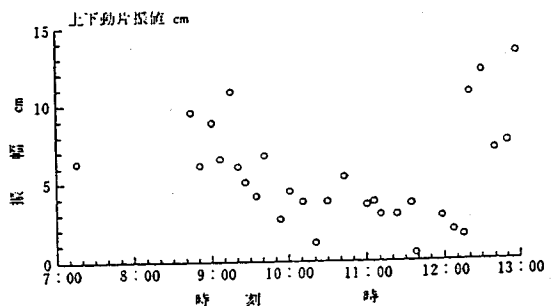


図-12 ブーム先端の上下揺れ換算実測値<sup>1)</sup>

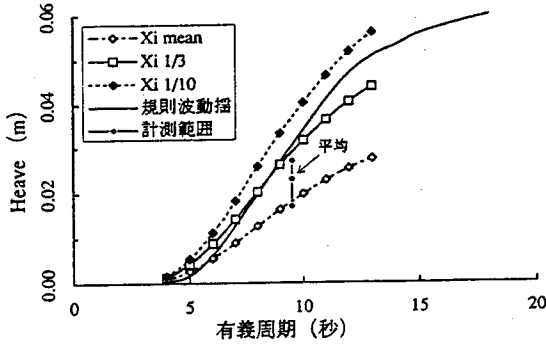


図 - 13 有義動揺, 規則波動揺および計算値 (Heave)

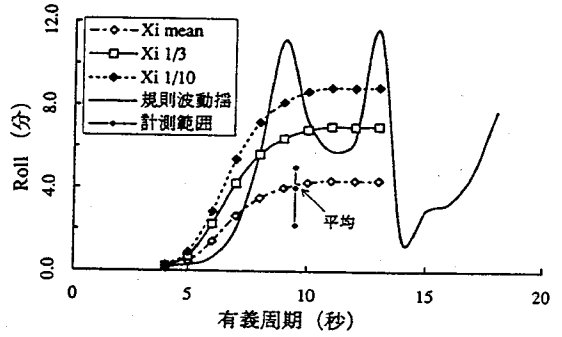


図 - 15 有義動揺, 規則波動揺および計算値 (Roll)

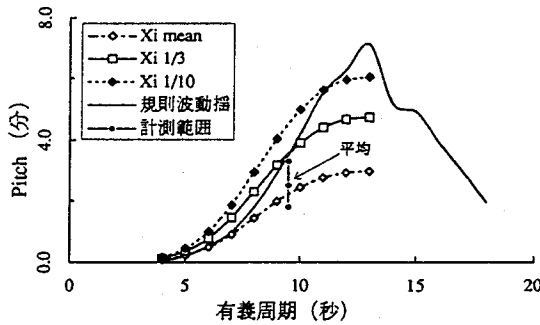


図 - 14 有義動揺, 規則波動揺および計算値 (Pitch)

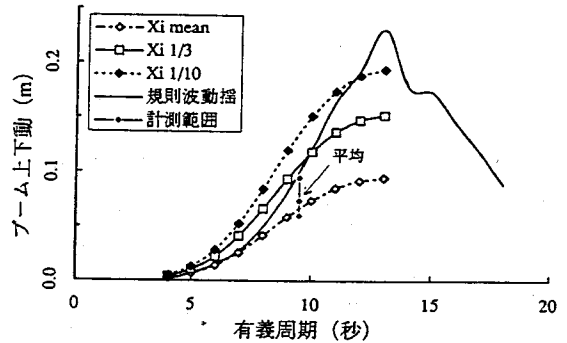


図 - 16 有義動揺, 規則波動揺および計算値 (ブーム先端)

これらの関係にしたがい、前章で示した規則波中でのFCの動揺解析値をもとに、不規則波中での動揺量を算出する。

現地計測は架設工事を実施中という制約条件の下に行われたものであり、解析結果と比較するための十分なデータが得られているのではないが、採取されたデータについて以下に述べる仮定を設け、現地計測値と解析結果の比較検討を行う。

- ①計測中に観測された入射波は  $H_{max}=20\text{cm}$ ,  $T_{max}=10$  秒と報告されている。1回の計測時間が短時間であることを考慮し、 $H_{1/3}=14\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=9\sim 10$ 秒 ( $H_{1/3}\approx H_{max}/1.4$ および  $T_{max}\approx T_{1/3}^2$  の関係より推定) とする。
- ②入射波方向  $\theta$  については、架設に先だて実施された観測結果にて、南西 ( $\theta=-71.5^\circ$ ) から南東の範囲で、南 ( $\theta=-26.5^\circ$ ) からが最も頻度が高いことが報告されており、前章で示した解析値のうち  $\theta=-26.5^\circ$  と  $-71.5^\circ$  に対する動揺量の平均値を用いることとする。

上記仮定のもとで、 $T_{1/3}$ を変化させた場合の Heave, Pitch, Roll および吊荷上下動揺 (=ブームの上下動揺) のそれぞれについて  $X_{i\text{ mean}}$ ,  $X_{i/3}$ ,  $X_{i/10}$  を求め、図 - 13 ~ 16 に示す。図中には、規則波で  $H=14\text{cm}$  に対する規則波動揺量  $X_i$  も同時に

示す。

これらの図より、Roll 以外では、規則波動揺量  $X_i$  が周期の増大とともに増加することを反映して、概ね周期が小さい 5 ~ 9 秒の場合には

$$X_{i\text{ mean}} < X_i < X_{i/3}$$

の関係が、周期が 9 ~ 11 秒では

$$X_{i\text{ mean}} < X_{i/3} < X_i$$

の関係が見られる。

FC が吊荷を吊った状態での計測値については、吊荷を接地する時刻 9:10 以前に、それぞれの成分を 5 回にわたって計測している。

計測時の  $T_{1/3}$  を 9 ~ 10 秒とし、これらのばらつきのある計測値とそれらの平均値を、図 - 13 ~ 16 の 9.5 秒の線上に併記する。

また、表 - 5 に解析値  $X_{i/3}$  と計測値の平均値との比較を示す。

表中、Roll 以外では、解析値は計測値の平均を 30 ~ 40% 上回る値を示した。一方、図 - 13 ~ 16 では計測値のばらつきの範囲は概ね  $X_{i/3}$  と  $X_{i\text{ mean}}$  の間に位置した。これらより  $X_{i/3}$  によって安全側に良好な動揺予測ができたと思われる。

Roll 成分については、図 - 15 に示す通り、規則波動揺量  $X_i$  では  $T=9$  秒付近に船体自身の共振周期と見られるピーク値があるため、解析値は波の周期変

表 - 5 計測値と解析値の比較

動揺モード	計測値 (1)	解析値 (2)	比率 = (2)/(1)
Heave	2.3 cm	2.9 cm	126%
Pitch	2.5 min	3.5 min	140%
Roll	4.0 min	6.6 min	165%
ブーム上下動	7.4 cm	10.7 cm	145%

化に極めて敏感で動揺予測が難しく、計測値との間に大きな隔たりが生じたものと思われる。

#### 4. FC一括架設の作業限界

##### (1) 検討条件の整理

FCによる一括架設作業において動揺が問題になるのは次の三つの段階である。

第一段階は、FCのフックを台船上の橋体ブロックに連結する台付け作業である。これは、フック先端に取り付けたピンプレートと橋体ブロックの吊環に合わせてピンを挿入し、ピンプレートと吊環を連結する作業である。通常は、台船の動揺とFCの動揺とが競合するなかで人的作業によって行われる。このため、動揺が大きい場合には、ピン孔とピンとの径差が1～2mm程度しかないとピン挿入が困難となるばかりか、作業に危険をともなうことがある。

第二段階は、橋体ブロックを徐々に吊り上げて台船から切り離す地切り作業時である。このときには台船とFCの動揺およびFCのフック中心と吊荷の平面的位置のずれから水平力が生じ、それによる吊荷・台船間の相対的な移動が問題となる。

第三段階は、吊り上げられた吊荷の上下動揺が、FCのHeaveとPitchの動揺により増幅され、大きな値をとる場合には、接地作業が困難となる。

上記の作業のうち、第一～二段階の作業については、うねりが直接来襲せず動揺量が小さい内港であらかじめ台付けおよび地切り作業を実施し、橋体ブロックを吊り上げた状態でFCが架設地点に進入することで対処可能な場合もある。したがって、ここでは、第三段階の作業である吊荷の接地作業の可否に着目し、FC一括架設時における作業限界について検討する<sup>9)</sup>。なお接地作業の可否は、吊荷の各動揺モードのうち以下の①、②の理由から吊荷の上下動揺によって判定する。また、動揺については $H1/3$ 、 $T1/3$ を有する不規則波中の有義動揺 $X1/3$ の数値で評価する。

- ①平面内での吊荷の動揺は、吊荷とFCを連結する揺れ止め索、あるいは吊荷を架設位置に引き込むための引き込み索によって拘束できる。
- ②一方、吊荷の上下動揺はブームの上下動揺によるもので、これを抑えるためには船体自体の動揺を

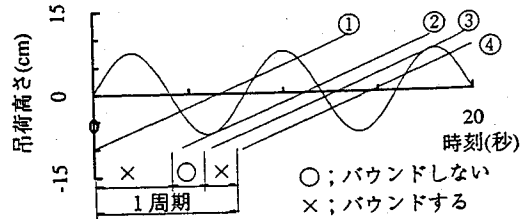


図 - 17 吊荷と接地面の関係

拘束する必要がある。架設作業中の船体は海底のシンカーと係留索で結ばれ、これにより水平方向の拘束力は得られる。しかしこれはHeave, Pitch等の鉛直方向の動揺に対して殆ど効果がなく、吊荷の上下動を拘束することは容易ではない。

##### (2) 吊荷の接地可能条件

吊荷の接地作業において、以下の3つの条件を接地可否の重要な判断基準と考える。

###### a) 条件1 吊荷振幅の上限

吊荷の巻下げは、経験的に概ね3段階に分けられる。第一回目の巻下げにて既設桁上150cm程度まで吊荷を降下させる。第二回目の巻下げでは吊荷を残り高さ25cm程度まで既設桁上に近づけ、巻下げを一旦停止する。この状態で、吊荷の位置、勾配等の最終確認および調整を行う。そして、吊荷巻下げ用ウインチの運転者は吊荷の動揺状態を観察しながら、最も良好なタイミングを選び吊荷の最終巻下げを一気に行う。

FC動揺による吊荷上下動揺の振幅があまり大きすぎると、吊荷状態の最終確認が困難で接地ができなくなる。さらに大きい振幅では、吊荷が既設桁に衝突する可能性がある。したがってここでは、最終巻下げ前の吊荷の高さ25cmを倍振幅と考え、半分の12.5cmを吊荷上下動揺の振幅の上限と仮定する。

###### b) 条件2 吊荷をバウンドさせない条件

最終の巻下げにより吊荷が既設桁上に接地される時、複数の作業員が連携動作によって吊荷の接地位置の確認、ピンのさし込み、防護木片の除去など数種の作業が行われる。この一連の作業において、一度接地した吊荷が動揺によって再度持ち上がる(バウンドする)ことは、危険をともなうため極力避けなければならない。

吊荷の挙動はうねりによって生じる上下動とウインチの巻下げによる降下の2つに分解できる。前者をある振幅と周期を持った正弦波として考える。後者は一定の動きであり、吊荷にとっては接地面が一定速度で上昇してくることになる。巻下げ速度については、ウインチの能力および接地作業の実状を勘案し、ここでは1.5cm/秒と仮定する。



表 - 6 吊荷の非バウンド確率と接地可能範囲

		(単位: %)					
		4秒	5秒	6秒	8秒	10秒	12秒
片振幅	周期						
	2.5 cm		63	70	92	94	95
5.0 cm		0	10	42	56	75	88
7.5 cm		0	0	0	19	45	63
10.0 cm		0	0	0	0	15	38
12.5 cm		0	0	0	0	0	4

■ 接地可能範囲 (非バウンド確率 ≥ 30%)

表 - 7 吊荷の最大速度

		(単位: cm / 秒)					
		4秒	5秒	6秒	8秒	10秒	12秒
片振幅	周期						
	2.5 cm		5.43	4.64	4.12	3.46	3.07
5.0 cm		9.35	7.78	6.74	5.43	4.64	4.12
7.5 cm		13.28	10.92	9.35	7.39	6.21	5.43
10.0 cm		17.21	14.07	11.97	9.35	7.78	6.74
12.5 cm		21.13	17.21	14.59	11.32	9.35	8.04

■ 接地可能範囲

図 - 17 は上下動揺する吊荷と一定速度で上昇する接地面の関係を例示したものである。図中の正弦曲線は、振幅7.5cm、周期8秒で上下動揺する吊荷を示す。右上がりの直線は一つの試行例を示し、1.5cm/秒で上昇する接地面を示す。ウィンチの巻下げは任意のタイミングで開始できることから、直線を順次平行移動させ各直線と正弦曲線との会合の状況を追跡していく。

これら巻下げ開始時刻の異なる直線①～④のうち、①または④のように正弦曲線と3点以上で会合する場合、吊荷がバウンドすることを意味する。また、②～③の間に引かれる直線の会合点数は1点でありバウンドしないことになる。そこで、1周期の間での全試行回数に対しバウンドしない回数の比率を「非バウンド確率」とする。

この非バウンド確率が30%以上の場合には、巻下げのタイミングを慎重にとることでバウンドを回避できると考え、「接地作業が可能」であるものとする。

表 - 6 に任意の周期と振幅 (ただし12.5cm以下) で上下動揺する吊荷の非バウンド確率を示す。表中、網掛け箇所は接地可能範囲である。

### c) 条件3 吊荷の衝突

一般に、吊荷の運動エネルギーの一部は接地時に衝突力として橋体ブロックおよび接地点の接地部分に作用する。FC架設の場合、吊荷は一定の巻下げ速度の他に上下方向の動揺速度を持っており、波浪条件によっては吊荷が激しく動揺し極端に大きな衝突力が作用することになる。

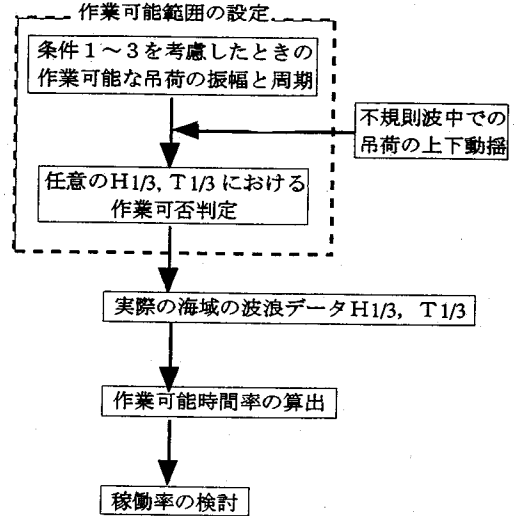


図 - 18 稼働率の算出手順

上下動揺を片振幅A、周期Tの正弦関数と仮定すると、最大速度は  $A \cdot \omega = A \cdot 2\pi/T$  で算出される。これに巻下げ速度 1.5 cm/秒 を加えたものが吊荷の最大降下速度であり、任意の周期と振幅に対する最大速度を表 - 7 に示す。

表中の網掛け箇所は、先の条件2の表 - 6 にて接地可能と判定された範囲を写したものである。この中で吊荷の最大速度は 6.74 cm/秒で、これは高さ1mmからの自由落下速度 (14 cm/秒) の半分にも満たない。経験的には、この程度の速度では吊荷もしくは既設桁に損傷を及ぼすほどの衝突力が発生するとは考えられず、接地可否の判定では本条件よりも条件2の方が支配的であると言えよう。

以上より、条件2で得られた吊荷の接地可能範囲 (表 - 6 の網掛け箇所) をFC一括架設の作業可能範囲とする。

### (3) FC一括架設の作業可能時間率

ここまでの検討では吊荷の動揺を中心に接地作業の可否を考察した。吊荷の動揺は波浪による船体の動揺に起因するものであり、実施工では波浪の条件による接地作業の可否判断が必要となる。実海での作業可能時間率を算出するための手順を図 - 18 に示す。

前節で考察した条件1～3を考慮したときの接地作業可能な吊荷の振幅と周期の関係に対して動揺解析から求められる不規則波中での吊荷の上下動揺量を関連づける。それらをもとに任意のH1/3, T1/3における作業の可否判断の基準を設定する。

図 - 19 は、有義波高H1/3を6種類に変化させた時の不規則波中にある船体のブームの有義上下動揺

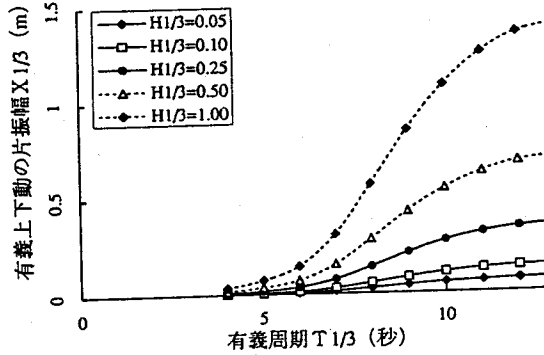


図 - 19 吊荷の有義上下動揺

表 - 8 吊荷の有義上下動と作業可能範囲 (単位: cm)

波高	周期	有義周期 T1/3 (秒)					
		4	5	6	8	10	12
	0	0	0	0	0	0	0
有義波高	5	0.2	0.4	0.7	2.8	5.4	6.8
	10	0.4	0.8	1.5	5.7	10.8	13.5
H1/3 (cm)	25	0.9	1.9	3.7	14.2	27.1	33.8
	50	1.8	3.8	7.3	28.4	54.2	67.5
	75	2.7	5.6	11.0	42.6	81.4	101.3
	100	3.6	7.5	14.6	56.8	108.5	135.0
	125	4.5	9.4	18.3	71.1	135.6	168.8

作業可能範囲

表 - 9 内海での波浪データと作業可能範囲例

波高		周期	S49.9~H5.12実施 (単位: 個数)												
			有義周期 T1/3 (秒)												
			3以下	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14以上
有義波高	25以下		422	2140	222	13	3	1	4						
	25~50		4540	36343	6935	670	98	25	1	1	3				
	50~75		374	4703	796	159	59	30	10	2	1				
	75~100		11	1149	499	22	7	5	2	2					
	100~125			171	485	21	3								
	125~150			8	282	25	5	1							
	150~175				96	24	3								
	175~200				23	23	3								
	200~225				2	36	2								
	H1/3 (cm)	225~250				4	1								
	250~275						1								
	275~300							1							
	300~325														
	325~350														
	350以上														
作業可能範囲内のデータ個数			5347	43186	222	13									
			(合計 = 48768 個)				全データ個数 = 60475								

作業可能範囲

X1/3 と有義周期 T1/3 の関係を示したものである。波入射角については最大の上動揺が生じる  $\theta = 0^\circ$  とする。

この関係のもとで、種々の H1/3 に対し算出した動揺量を表 - 8 に示す。ここで網掛け箇所は、前節で接地可能と判断された片振幅と周期の範囲に対応している。次に、この範囲を実際の海域の波浪データ (H1/3, T1/3) にあてはめることで作業可能な波浪の発生頻度が算出され、さらに FC一括架設の作業可能時間率が求められる。

一般に、稼働率はこのように算出された作業可能時間率を基本に労働条件、作業継続時間、その他の現場条件を加味して求められる。作業可能時間率が著しく低い場合は当然ながら稼働率が低下することが予想される。

次に、内海で施工する場合と外洋から長周期のうねりが来襲する海域で施工する場合の 2 ケースにつ

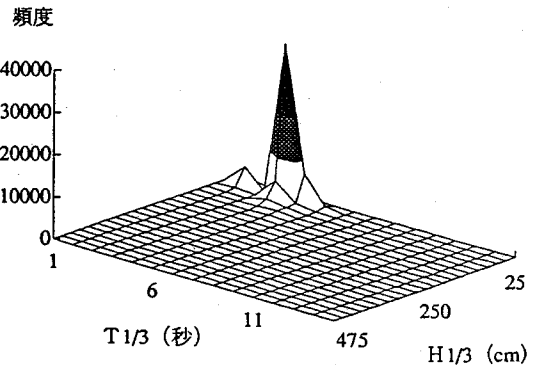


図 - 20 内海での波浪データ分布図例

いて FC一括架設の作業可能時間率を比較する。

内海の例として、瀬戸内海に面した海域での波浪観測値<sup>10)</sup>を用いる。H1/3 と T1/3 の実測頻度分布は図 - 20 の通りで、波高が小さく比較的短周期の波浪

表 - 10 外洋での波浪データと作業可能範囲例

波高		S57.4~S61.3実施 (単位: 個数)														
		有義周期 T 1/3 (秒)														
周期		3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
		以下	~4	~5	~6	~7	~8	~9	~10	~11	~12	~13	~14	以上		
有義波高	25以下	84	2	10	3	9	3	2	9	1						
	25~50	663	18	8	108	110	72	21	7	5	4	5	3	4		
	50~75	516	334	5	115	230	84	38	13	9	3	5	1	6		
	75~100	68	766	17	48	228	89	34	20	8	8	4	9	5		
	100~125		378	64	11	186	68	23	19	10	7	3	4	9		
	125~150		82	213	2	87	82	35	10	8	7	6	4	5		
	150~175		9	127	4	48	53	25	14	4	3	8	8	10		
	175~200			53	10	16	23	19	9	5	2	2	10	7		
	200~225			6	7	2	17	14	10	9	7	4	9	6		
	H1/3 (cm)	225~250			2	5	1	6	11	4	3	6	5	2	6	
250~275				1	2		7	8	2	3	1	1	4	1		
275~300					1			3	4	2	1	1	2	5		
300~325							1	1	3	2	2	3	1			
325~350						1			1	1	2		1	1		
350~375								1	1	4		2		1		
375~400									1	5			1			
400~425										1		1				
425~450									1	1	1	1		1		
450~475										1	1					
475~500										1						
500以上											1					
		全データ個数 = 5844														
作業可能範囲内のデータ個数		1331	354	10	3										発生頻度 = 29.1%	
		(合計 = 1698 個, 発生頻度 = 29.1%)														

表 - 11 内海と外洋での作業可能時間率の試算結果

海域の種類	作業可能時間率
内海の例	75.1%
外洋の例	15.2%

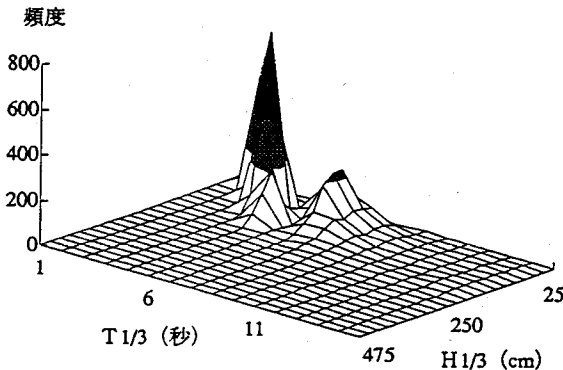


図 - 21 外洋での波浪データ分布図例

が大半を占める。発生頻度の具体的な数値は表 - 9 の通りで、網掛け箇所は先の表 - 8 で示した F C 一括架設の作業可能範囲に対応する。

表 - 9 より全データ数 60,475 個のうち作業可能範囲に含まれるものは 48,768 個である。さらに、全時間に占める作業可能時間率を算出するため、発生頻度に各々の周期分を占有時間として重み付けすると、全データの総時間 (周期の合計) が 213,272 時間、これに対し作業可能範囲内の総時間が 160,242 時間であり作業可能時間率は 75.1% となる。

外洋の例として、太平洋に面した海域での波浪観測値<sup>10)</sup>を用いる。図 - 21 に H1/3 と T1/3 の実測頻度分布を示す。先に述べた内海 (図 - 19) の場合に比べて波周期の長く、いわゆる「うねり」の範囲での発生頻度が大きい。また、発生頻度の具体的な数値は表 - 10 の通りで、全データ数 5,844 個のうち作業可能範囲に含まれるものは 1,698 個である。また全データの総時間が 29,673 時間、これに対し作業可能範囲内の総時間が 4,507 時間で、作業可能時間率は 15.2% となる。

以上、内海と外洋について各々一例ずつとりあげ、作業可能時間率について試算した結果を表 - 11 にまとめた。内海・港湾内のようにうねりの発生しない海域では、今回の解析および試算によっても F C の動揺は問題にならず、実施工での経験を裏付ける結果となっている。一方、外洋性の強い海域では長周期のうねりの発生する時間が長く、F C の動揺により作業可能時間率が低くなり、施工計画の上で、稼働率の大幅な低下という大きな問題となることを示している。

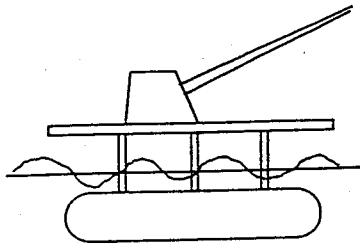


図 - 22 半没式F C船

以上は、吊荷の上下動揺が大きく生じる場合として波入射角  $\theta = 0^\circ$  を前提に検討を進めてきた。

最後に波入射角が変化した場合の作業限界について考察を行う。波入射角の変化に伴う吊荷の上下動揺量の変化を示す図 - 7 を観察すると、吊荷の上下動揺の特性には、既述した作業限界が存在する波周期 4 ~ 8 秒程度の範囲では波入射角によらず  $\theta = 0^\circ$  の場合に対して類似性があることがわかる。さらに、波入射角が  $90^\circ$  に近い場合、図 - 6 に示すように、同様の周期範囲で急激に Roll が発生し、これにともない吊荷の平面内の動揺が発散的に増加することが予想される。したがって  $\theta = 0^\circ$  以外の波入射角における接地作業は  $\theta = 0^\circ$  の時と同等かあるいはそれよりもさらに困難なものとなることが予想される。すなわち船体の設置方向を変更し、その結果、波入射角を変化させても作業可能時間率が改善されない。

#### (4) F C の動揺対策

現在、大規模な海峡連絡橋の建設計画が幾つか提案されている。これらの架設地点は外洋に面した海域であり、今回の試算例によると、従来のような F C 一括架設では、うねりの影響により稼働率が極めて低くなると思われる。

今後、これらの計画のなかで F C 一括架設を立案するにあたっては F C の動揺を積極的に拘束する手法を考案すること、あるいは波浪の影響を直接受けない、従来とは異なった新しい架設方法を開発することが重要であると思われる。

最後に F C のような箱形状船体の Heave と Pitch を制御する方法について、具体的な例を以下に挙げる。

##### ①半没式 F C の採用

これは、復元力 (バネ値) を小さくし、船体の固有周期を長周期化する方法である。船形の概略を図 - 22 に示す。有力な案と思われるが、吃水が深く架設地点が限定される。

##### ②吊荷位置を F C 重心上にする

橋体ブロックを F C 重心上で吊った状態で架設することで吊荷上下動揺のうち Pitch の影響分を抑

える方法である。例としてはグレートベルトの架設で使われたタイプの F C が挙げられるが、F C が桁の架設位置の真下にまで進入する必要があるため施工条件が限定される。

##### ③制振装置の設置

制振装置の規模が大きくなるものと予想されるが、検討の余地はある。

他に、係留索を頑強なものにすることも考えたが、係留索のバネ剛性の増加により船体の固有周期が短周期化するため、効果的な対策とはならなかった。

## 5. 結 論

本論文では、吊荷の連成運動 (振り子運動) の影響を考慮した F C 動揺解析を行い、内海と外洋での F C 一括架設の稼働率を比較した。その結果、以下のことが結論づけられた。

- ①門崎高架橋の F C 一括架設時の実測データと解析値との比較を行い、解析により安全側で良好な動揺予測値が得られることが確認できた。
- ②吊荷の上下動揺に着目し、F C による一括架設の作業可能条件の考え方を示した。
- ③内海と外洋の波浪データをもとに、動揺を考慮した F C による一括架設の稼働率を検討した。その結果、外洋ではうねりのために稼働率が著しく低下する傾向が明らかとなった。
- ④波浪条件は、周辺地形の影響を受ける。また、季節によっても特性が異なる。したがって、F C 架設では現地の波浪条件の正確な把握が必要である。
- ⑤外洋に面した海域での橋梁架設工事に F C を用いる場合には、動揺対策が重要な課題となる。

## 参考文献

- 1) 砂原, 高久, 藤本, 中西, 伊藤加納: フローティングクレーンの動揺および大ブロックのモーメント連結工法, 日本鋼管技報, No.100, pp.71-83, 1983.
- 2) 山下, 片桐: 浅喫水箱形浮体の横揺れに関する系統的実験結果, 造船学会, 第24回海洋工学委員会資料, p.26, 1979.
- 3) 野尻信弘: クレーンバージと吊荷の連成運動について (その2), 西部造船会会報, Vol.65, pp.95-106, 1982.
- 4) 宮下, 大橋, 真辺: 門崎高架橋の架設 (架設編), 本四技報, Vol.8/No.27, 1984.
- 5) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会, pp.48-50, 1973.
- 6) 元良, 小山, 藤野, 前田: 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp.39-41, 1982.
- 7) 合田良実: 不規則波浪に対する設計計算法の体系化について, 土木学会論文報告集, Vol.253, pp.59-68, 1976.

- 8) 上田茂: 係留施設の計画および設計に係わる係留船舶の動揺, 平成二年度港湾技術研究所講演会講演集, pp.52-90, 1990.
- 9) Philip J. M. Rawstron・Graham J. Blight: *Prediction of weather downtime for derrick barges*, Offshore Technology Conference 3150, 1978. (1995. 8. 28 受付)
- 10) 運輸省港湾局監修 / (財) 沿岸開発技術研究センター発行: 全国港湾海洋波浪観測資料.

## SOME CONSIDERATIONS ON THE ERECTION OF BRIDGE GIRDERS BY USE OF FLOATING CRANE BARGE AND ITS DYNAMIC BEHAVIOR IN LONG-PERIOD WAVES

Chikara MIYASHITA, Harukazu OHASHI, Hisato KATO  
and Michiaki TAKAO

The use of a floating crane barge for the construction of bridges built over the straits has many advantages such as being time-saving, economical, higher quality, and safety assurance. In this construction method the prefabricated girders are hoisted by the floating crane and installed on the designated place. Because this operation requires a very accurate positioning, oscillation of the floating crane due to long-period waves is critical element. This paper analyzed a fundamental characteristics of the oscillation of floating crane and coupled motion of a hoisted girder. The oscillation amplitudes of the observation and numerical analysis are compared. Finally, some weather downtime analysis of floating crane works are carried out at different sea conditions at an inland sea and at an open sea.