

係留船の SWAY モードにおけるサブハーモニック・モーション について

久保 雅 義*・笹 健 児**

1. 緒 言

係留船の運動特性の解析は非係留時に比べ、より多くのパラメーターを考慮しなければならない。中でも係留条件の非対称性や防舷材・係留索の荷重特性、係留岸壁の形状などが複雑な場合には数値計算上で非常に細かな配慮が必要となる(久保, 1987)。そのため実際に計算を行うにあたって港湾関係者の中で評価しにくい項目の一つに挙げられている。

しかし係留船動揺は港内静穏度、港の年間稼働率などを評価する際に最も現実的な指標であると考えられる。また最近になって運輸省は将来的に港湾機能の拠点を湾外に移転させる計画も打ち出している。この背景には埋立地など湾内海域の多目的利用、船舶の大型化・高速化による所要水深の増大や輸送時間の短縮化といった多くの理由が考えられる。しかし湾外の港はうねりが侵入するためサブハーモニック・モーションが起りやすい。そこでこれをいかに簡単な形でこれを評価できるようにするが重要な問題となる。

本研究ではこのサブハーモニック・モーションに着目し、まず性質を詳しく解析した上で現象を今回著者らが定義した「非対称増幅関数」という極めて単純なステップ関数系で近似した。この関数を用いることによりサブハーモニック・モーションを容易に説明できるようになったので報告する。

2. 係留船運動について

通常、船舶が航行中の場合の動揺は外力(波力)のみによる強制振動であるが、港内に係留されることによって係留力が加わる。これは船体を質量とし、係留索と防舷材をバネとする自由振動である。サブハーモニック・モーションは係留船がスウェー運動するとき、動揺振幅が強制振動振幅の数倍に増幅される現象で防舷材と係留索のバネ定数比が大きいときに顕著になる。サブハーモニック・モーションはつぎの運動方程式を解くことによって求められる。

$$(M + M_{sw})\ddot{x} + N_{sw}\dot{x} + Kx = (M + M_{sw})\dot{U} + N_{sw}U \dots\dots\dots(1)$$

ここで $M + M_{sw}$ は船体の見かけ質量、 N_{sw} は減衰係数を示し、 K は係留索または防舷材のバネ定数を表している。 U は水面下における水粒子の平均速度、 \dot{U} はその平均加速度を示している。

本研究ではコンテナ船が一樣直線岸壁に係留されている状況を想定したために、表-1に示すような要目の船体について計算を行う。

表-1 計算対象とした船舶の諸元

垂線間長 (m)	175.0
船幅 (m)	27.6
喫水 (m)	8.4
水深 (m)	12.0
M_{sw}/M	0.564
N_{sw}/M (s ⁻¹)	0.0214

3. サブハーモニック・モーションの評価方法

本章ではサブハーモニック・モーション波形を図-1のように3種類に区別し、荷役時の影響を考える。係留索と防舷材のバネ定数比が1:1の対称時にはAのようにゼロ点で対称な規則的な波形をしているが、比が1:10, 20となるにつれて変位が沖側へ飛び出す格好となる。Bのように運動振幅の大きさそのものは対称時とほとんど変わらない状態で沖側に変位が移動したような形になっているものは、非対称性が比較的小さい場合に見られる。バネ定数比が1:100以上くらいになるとCのように運動が沖側へ大きく増幅され、完全なサブハーモニック・モーションの形になる。著者らはこれらの波形のパターンを特徴づけるためにAを「対称波形」、Bを「離岸動揺波形」、Cを「非対称成熟波形」と名付けた。

ところで荷役時の船体運動の限界値はいくつかの側面から評価できる。すなわち

1. 船体運動の振幅による荷役限界(久保, 1987)
2. 防舷材の圧縮率からみた防舷材の選定(上田, 1984)

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 輸送システム工学講座

** 株式会社 郵船海洋科学 海洋事業本部

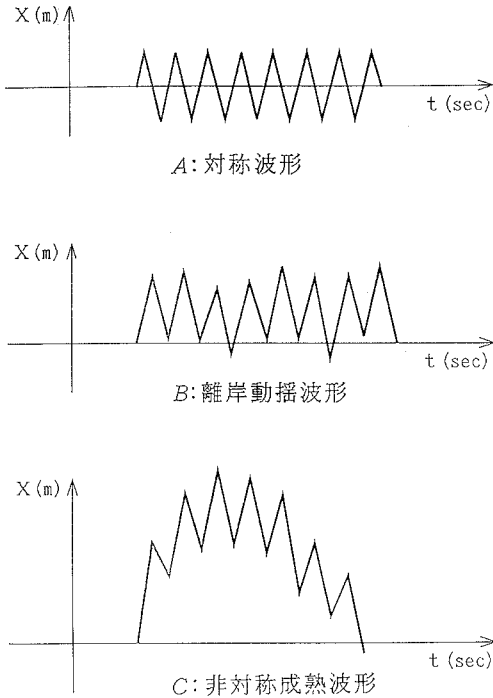


図-1 サブハーモニック・モーション波形の分類

3. 係留索の張力限界

4. 船体運動時の岸壁からの離岸距離

の4つの面から考えることができる。表-1に示すコンテナ船を対象とし、荷役を行うときの限界離岸距離を考えると図-2のようになる。また荷役機械は実際に神戸港で使用されているものを対象とし、クレーンの諸元を表-2に示す。

ここで D_c はクレーンの岸壁よりの最大伸出距離（アウトリーチとバックリーチの差）、 D_f は岸壁と岸壁側船体側面の距離、 D_p は船側と両端のコンテナとの距離を表し、 D_k はコンテナの幅の半分を、 D_{max} は最大離岸許容量を示している。

$$D_{max} = D_c - D_f - B + D_p + D_k \dots \dots \dots (2)$$

すなわち船体の岸壁からの離岸距離 D が D_{max} より小さい場合であれば荷役可能であり、その逆の場合であ

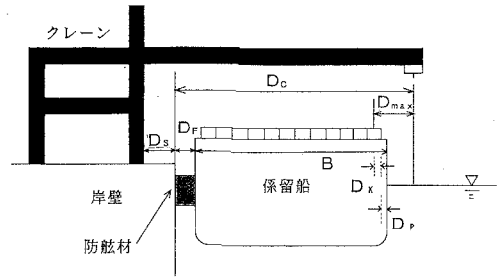


図-2 船体の岸壁からの離岸距離の関係

ば荷役は不可能とする。

ここで実際に神戸港で表-1の船舶が荷役を行った場合の D_{max} を計算してみる。 $D_f = 1.0$ m, $D_p = 0.5$ m, $D_k = 1.2$ m とすると $D_{max} = 5.1$ m となる。この値では荷役にはまず影響はないが、最近では船舶の大型化・肥大化がさらに進んだ結果、船幅が30 m以上のものが増えてきており、将来的には D_{max} はかなり小さくなるが考えられる。

船体運動の振幅による荷役限界ということであれば、図-1-AとBは振幅そのものはほとんど同じである。しかし岸壁からの離岸距離で考えると、BはAの約2倍であるので当然限界値は異なってくる。つまり動揺振幅は許容範囲であるが沖側へ飛び出した波形の場合、 $D > D_{max}$ で荷役不能となりうる場合もある。

一方、係留索にかかる張力の面からの考察を対称波形と離岸動揺波形で考える。まずAでは岸壁側と沖側での運動時間が同じであるので、係留索と防舷材に力が等しく分散している。係留索にかかるかかる張力はこの時、最小となる。Bの場合は動揺振幅そのものは対称時とほとんど変わらないが、船体と防舷材での接触時間が短く力をほとんど係留索だけで受けとめている。このとき係留索に作用する張力の大きさおよび作用時間の合計値は対称時の約2倍になる。このように強度の面から見ると、運動変位は同じでも係留索にかかる負担は倍になることは明かである。また非対称成熟波形では運動変位が数倍に増幅されるので、係留索にかかる負担はさらに大きくなる。このように係留の非対称性により船体変位が沖側へ飛び出し、係留索にかかる負担が大きくなる。よって係留索の切断・破断といった事故が起こりやすくなる。

このように船体運動波形を3種類に大別することによって、より現実的な係留限界値を設定することができる。特に大型船が係留している場合などは、限界離岸距離が小さく、係留索にかかる張力の負担もかなり大きくなるが考えられる。

表-2 ガントリークレーンの緒元

形式	ローブトロリ式橋型クレーン
全揚程	走行レール面上下 37 m
アウトリーチ	36 m
バックリーチ	11 m
レール幅	16 m
D_s	4 m

4. サブハーモニック・モーションの分解

サブハーモニック・モーションは自由振動と強制振動が合成されたものであり、強制振動変位を x_0 、自由振動を x_1 とすると $x = x_0 + x_1$ である。また自由振動部分は外力が0であるので式(1)はつぎのように分解できる。

$$(M + M_{sw})\ddot{x}_0 + N_{sw}\dot{x}_0 + Kx_0 = (M + M_{sw})\dot{U} + N_{sw}U \dots\dots\dots (3)$$

$$(M + M_{sw})\dot{x}_1 + N_{sw}x_1 + Kx_1 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここでは運動振幅を増幅させている自由振動部分に注目し、式(4)について考える。式(4)の解を求めるにあたってつぎのような初期条件を与えることによって自由振動波形が得られる。

$$t=0 \text{ のとき, } x_1=0 \text{ かつ } \dot{x}_1 = V - U \dots\dots (5)$$

ここで V は船体が防舷材に衝突またはその反力で飛び出すときの速度、 U はその時の平均水粒子速度であり、この場合は V と U の差で与えることで近似波形となること注目すべき点である。また式(4)の解は式(6)で与えられる。

$$x_1 = \frac{(V - U) \sin \sqrt{n_{sw}^2 - \epsilon_{sw}^2} t}{\sqrt{n_{sw}^2 - \epsilon_{sw}^2}} \cdot \exp(-\epsilon_{sw} t) \dots\dots\dots (6)$$

ここで ϵ_{sw} 、 n_{sw}^2 は次式で表される。

$$\epsilon_{sw} = \frac{N_{sw}}{2(M + M_{sw})} \dots\dots\dots (7)$$

$$n_{sw}^2 = \frac{K}{M + M_{sw}} \dots\dots\dots (8)$$

図-3に(6)式の曲線とサブハーモニック・モーション波形の比較を示す。これから自由振動の振幅で動揺時の増幅率が決定されることが分かる。

自由振動による船体運動変位の最大値を X'_{max} 、強制振動時の最大片振幅を ζ_{max} とすれば、サブハーモニック・モーション時の最大変位 X_{max} は

$$X_{max} = X'_{max} + \zeta_{max} \dots\dots\dots (9)$$

の関係にあり、さらに振幅増幅率 $AF(T)$ は波周期ごとの関数とすれば次式で求められる。

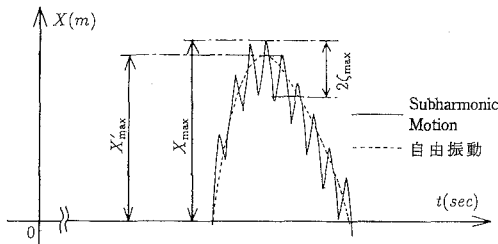


図-3 サブハーモニック・モーション波形と自由振動形の比較の様子

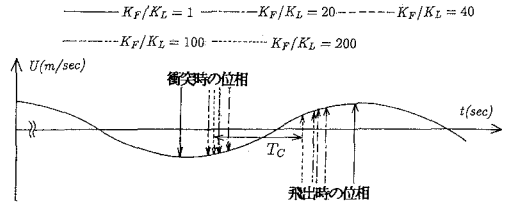


図-4 防舷材衝突および飛び出し時の U の位相

$$AF(T) = 1 + \frac{X'_{max}(T_w)}{\zeta_{max}(T_w)} \dots\dots\dots (10)$$

このようにサブハーモニック・モーション時の振幅増幅率を求める場合は、式(3)を用いなくても式(6)の値を計算するだけでよいことが分かった。

以上から自由振動変位 x_1 は船体移動速度 V と水粒子速度 U の値によってその大きさが決まってくる。そこで船体が岸壁の防舷材に衝突する時とこの反力で沖側へ飛び出す時、すなわち船体運動変位がゼロの位置で両者の時系列波形で位相関係がどのようになっているかを調べた。図-4は波周期 $T_w/12$ (s)の場合で、係留索と防舷材のバネ定数比を対称時から非対称性の顕著な場合まで変化した場合の U との位相関係を示している。この図を見るとバネ定数比が1:1の時には衝突および飛び出し時の U の位相がちょうど谷と峰のところにきているが、非対称性を増すにつれて位相がずれている。特に1:200の場合には飛び出し時の位相がかなりずれている。定性的に見るとバネ定数比が大きくなるにつれて、船体飛び出し時の U の値が小さくなっている。一方対称時には $V - U = 0$ であるが非対称性が顕著になってくると $V - U$ の値が大きくなることからバネ定数比と入射波周期によって自由振動時の動揺振幅が決定されることがわかる。

5. 非対称増幅関数の導入

以上で船体運動の自由振動部分の値で振幅増幅率が決定されること、さらにこれは式(5)から船体が沖側へ飛び出すときの初速度 $V - U$ の値に大きく影響されることが分かった。表-3は今回計算するにあたって設定した係留索と防舷材のバネ定数を示している。また図-5は表-3のバネ定数比ごとに縦軸に $V - U$ の値を平均水粒子速度の振幅 U_{max} で無次元化したものを取り、これを入射波周期 T_w ごとに計算した結果を示す。ここで U_{max} はつぎのように表される。

$$U_{max} = \frac{2\zeta_0 g \sinh kh - \sinh k(h-d)}{d \sigma k \cosh kh} \times \frac{\sinh kl \sinh kr}{l} \dots\dots\dots (11)$$

ここで ζ_0 は入射波の振幅、 d は船の喫水を示し、 k は波

表-3 今回計算した係留条件

バネ定数比	K_L (tf/m)	K_F (tf/m)
1:1	6.5	6.5
1:20	6.5	130
1:40	6.5	260
1:100	6.5	650
1:200	6.5	1300
1:230	6.5	1500

数, h は水深, l は船幅の半分を, r は岸壁と船体中央部との距離を示している。

図-5 よりバネ定数比が1:40 以下のような低い場合は全体的に $V-U$ の値も小さいが, 比が1:100 以上では入射波周期の長い領域では大きな値になっており, x_1 の値は $V-U$ の値に依存していることが分かる。

図-6 にバネ定数比ごとに縦軸に振幅増幅率 $AF(T_w)$ の計算結果をプロットし, 横軸に入射波周期をとったものを示す。この図から $AF(T_w)$ の値はある周期を境にステップ関数的に増幅していると考えれば, 次式のように近似できる。

$$AS(T_w) = \begin{cases} 1(T_w \leq T_b \dots \text{主に湾内のとき}) \\ \beta(T_w \geq T_b \dots \text{主に湾内のとき}) \end{cases} \dots \dots \dots (12)$$

ここに T_b はサブハーモニック・モーションがおこる

ときの限界周期, β は $T_w > T_b$ における $AF(T)$ の平均値を示している。上式から湾内の港では振幅増幅率は1倍であるが, 湾外では β 倍になる。今回著者らは $AS(T_w)$ を「非対称増幅関数」と名付けた。ここで $AF(T_w)$ の値をこの関数で近した様子を図-6 に示す。また図-7 はバネ定数比の違いによる β の値を示している。

また運動波形よりサブハーモニック・モーションはつぎのような関係の時に生じていることが分かる。

$$m_a \times T_w = T_{sn} = \frac{T_L + T_F}{2} \dots \dots \dots (13)$$

ここで m_a はモード数を示し, m_a 波の波に対して一回の割合で防舷材に衝突することを示している。また T_{sn} は防舷材への船体の衝突時間間隔, T_L および T_F はそれぞれ係留索, 防舷材のみで係留したときの固有周期を表す。これは次式で示される。

$$T_F = 2\pi\sqrt{\frac{M + M_{sw}}{K_F}}, \quad T_L = 2\pi\sqrt{\frac{M + M_{sw}}{K_L}} \dots (14)$$

非対称成熟波形が完全に繰り返される形でのサブハーモニック・モーションがおこる限界周期を T_{wc} とし, バネ定数比ごとに T_F の値と比較を行うと

$$\left. \begin{aligned} K_F/K_L = 80 : T_{wc} = 18(\text{s}) \quad \text{のとき} \quad T_F = 22(\text{s}) \\ K_F/K_L = 100 : T_{wc} = 18(\text{s}) \quad \text{のとき} \quad T_F = 20(\text{s}) \\ K_F/K_L = 200 : T_{wc} = 16(\text{s}) \quad \text{のとき} \quad T_F = 14(\text{s}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (15)$$

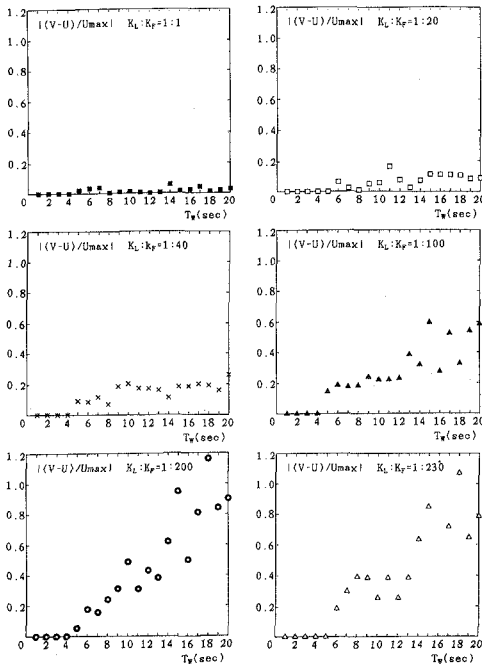


図-5 バネ定数比・波周期ごとの離岸時の移動速度

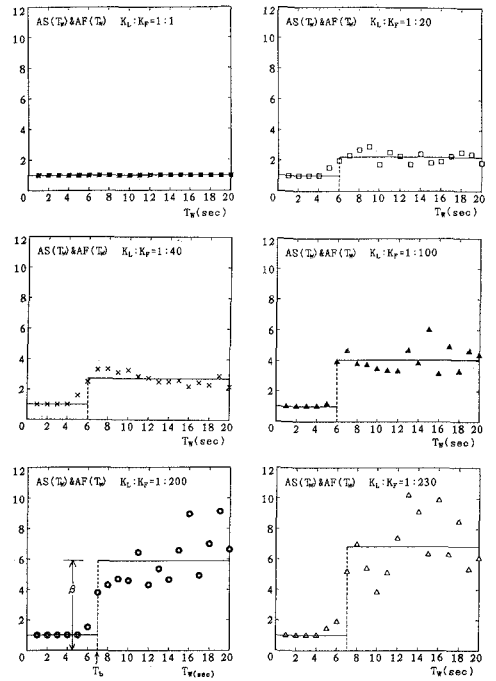
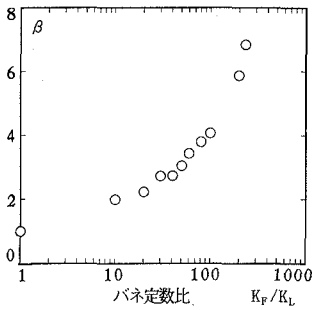


図-6 バネ定数比・波周期ごとの振幅増幅率と非対称増幅関数による近似の様子



図一7 バネ定数比ごとの β の値の変化の様子

となる。

サブハーモニック・モーションは非線形振動であることから必ずしも一致していないが、おおよその関係としてつぎのような関係が成り立つ。

$$T_{wc} \approx T_F \quad \dots\dots\dots (16)$$

よって港湾で岸壁に防舷材を設置するにあたって、 T_F が限界波周期 T_{wc} 以下になるように防舷材を選定すればサブハーモニック・モーションを防止できると考えられる。

6. 結 語

本研究では複雑な係留船運動を容易に計算できるように、簡単な関数系で近似することを目的に行ったが以下のことが結論として得られた。

(1) 振幅増幅率はバネ定数比が大きくなり、うねりなどが侵入した場合に大きくなるが、今回この現象を「非対称増幅関数」という極めて単純なステップ関数系で近似を行った。この関数から湾内の港ではあまり影響はないが、湾外の港では大きく影響されることを意味している。これによってサブハーモニック・モーションのような複雑な船体運動を容易に計算することができるようになっ

た。

(2) サブハーモニック・モーションを自由振動と強制振動に分離し、自由振動部分を詳しく解析した。自由振動が増幅されることによって船体運動振幅を増幅されていることが確認され、振幅増幅率を求めるときはこの部分に注目すればよいことが分かった。

(3) 非対称係留時で防舷材による固有周期と入射波周期が $T_F < T_w$ の関係になっているときにサブハーモニック・モーションが起こっていることが分かった。また対称係留時には $T_F = T_w$ となっており、これは水粒子速度 U との位相のずれにより引き起こされている。これより対象港の入射波周期が既知であれば、サブハーモニック・モーションを起こさないための防舷材の選定が可能となった。

(4) 荷役時の限界条件はいくつかの側面から設定できる。船体運動振幅、防舷材の圧縮率、係留索の張力限界などがあるが、今回サブハーモニック・モーション波形を3種類に大別することにより、サブハーモニック・モーションの新たな評価方法を確立した。さらに船舶荷役時の岸壁からの離岸距離によるクレーンの稼働限界といった指標を導入することでより現実的な限界値が設定できるようになった。

参 考 文 献

- 上田 茂 (1984): 係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 504.
 運輸省港湾局 (1992): 人と地球にやさしい港湾をめざして—港湾の技術開発の長期政策—, 17 p.
 久保雅義 (1987): 港内係留船の動揺とその制御, 水工学に関する夏期研修会講義集, 87-B-2, 土木学会水理委員会.
 久保雅義, 笹 健児 (1993): 湾内港湾と湾外港湾の年間稼働率の比較に関する研究, 日本航海学会論文集第90号, pp. 99-109.
 社団法人港湾荷役機械化協会 (1983): 港湾荷役機械要覧, pp. 121-141.