

非線形減衰力を考慮したケーソン型構造物の 動揺推定技術の開発

長澤大次郎*・宮坂政司**・和田洋二郎***・池上国広****

1. ま え が き

海に囲まれた我が国には、防波堤・消波堤・護岸などの沿岸整備に長い歴史があり、様々な技術開発と実用化への取り組みがなされてきた。特に数多くの事例を持つ防波堤や護岸についてはケーソンが多く用いられているが、近年より厳しい環境海域への対応の必要性から、大水深化・大波浪化への傾向が進んでおり、最近の港湾整備計画の中にも水深 10 m 以上の海域での大型ケーソン構築の予定が多い。

ケーソンの建造にあたっては、その運搬手段の問題から、構築現場近くに建造ヤードをあらかじめ建設してケーソンの大量生産化を図るなど、多大な資金を投入してきた。しかし、この種大型ケーソンが海上浮遊の状態では、大型ケーソンを高品質にしてかつ高効率に建造することが可能となるわけで、大型ケーソンの海上回航技術の確立は、既存工場を活用する場合の課題であった。

そのために今回、横浜～石巻間約 520 km にも及ぶ太平洋海上のケーソンの遠距離回航を行うにあたり、以降に述べる研究を実施し、実用に適用できることを確認したので、ここに研究内容を報告する。

2. ケーソン設計法の概要

重力式護岸ケーソンの設計は据付時、波浪時、地震時の各設計荷重に対して安全であるように設計される。通常は、波浪時または地震時の荷重によりケーソン断面が決定され、据付時の荷重がクリティカルになることはない。ケーソンを遠距離浮遊回航させる場合は、回航中に遭遇するであろう最大波浪条件で動揺解析を行い強度照査をする必要がある。その際、通常船舶の動揺解析手法を用いると、ケーソン型構造物（フーティングを有する矩形構造物、以下ケーソンとする）の場合、形状が通常船舶と異なるため浮体の運動が過大に算定されてしまい、設計荷重を大きく上回る荷重が作用することになり、

回航不能となるかあるいは不経済な補強設計を余儀なくされることが多い。その原因はケーソンのフーティングによる動揺減衰効果を正しく評価できていないためと考えられるが、その評価方法がないのが現状である。

このようなことから、遠距離回航を行うケーソンの設計を効率的に行うためには、ケーソンの動揺解析において動揺特性、特に上下揺れに及ぼすフーティングの影響を正しく評価することが重要な要素であると考えられる。

3. 水槽実験

ケーソンを波浪中で曳航する際の動揺特性を把握し、理論検討を実施する際の基礎データを得るために次に示すような水槽実験を実施し、動揺特性に及ぼす排水量やフーティング幅の影響、波高の影響について調査した。

(1) 対象とする実験の要目

供試実験機として次の要目を有するケーソンを対象とした。実験機形状を図-1 に示す。

これらを基本要目として、この他にフーティング幅を 2 種類、喫水を 1 種類変更して実験を実施した。これらの要目をまとめて表-1 に示す。模型の大きさは、取り扱い易さ等を考慮して縮尺比 1/20 とした。

(2) 実験方法

水槽実験は曳航実験とし、ケーソンを波浪中で曳航してこの際のケーソンの動揺および上下加速度、ケーソン前

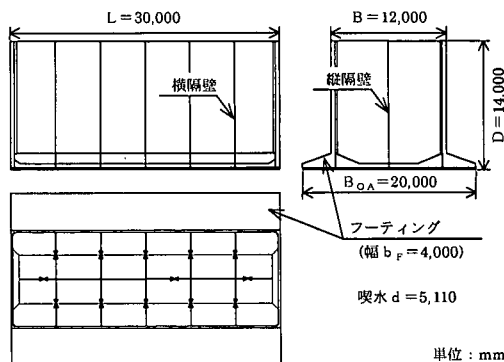


図-1 ケーソン形状図（実験機）

* 正会員 工修 三菱重工業(株)横浜製作所鉄構技術部
 ** 三菱重工業(株)横浜製作所鉄構技術部
 *** 工修 三菱重工業(株)長崎研究所
 **** 工博 三菱重工業(株)長崎研究所

表-1 ケーソンの要目

船長 L [m]	30.0			
高さ D [m]	10.0 (模型)			
本体幅 B [m]	12.0			
フーティング幅 b_F [m]	4.0	2.0	6.0	4.0
全幅 B_{0A} [m]	20.0	16.0	24.0	20.0
喫水 d [m]	5.11			2.3
排水量 Δ [ton]	2,113			1,029

表-2 実験条件

d (m)	b_F (m)	規則波				一方向不規則波		多方向不規則波	
		180°		90°		180°	90°	180°	90°
		1 m	3 m	1 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
5.11	4	○	○	○	○	○	○	○	○
	2	×	○	×	○	×	×	×	×
	6	×	○	×	○	×	×	×	×
2.3	4	×	○	×	○	×	×	×	×

(波方向は、正面波を 180°とする.)

端での相対水位を計測した。また、平水中での自由上下揺実験および自由横揺実験を実施して上下揺れおよび横揺れの減衰特性を調査した。座標系を図-2、上下加速度および相対水位の計測位置を図-3に示す。

(3) 実験条件

実験条件としては、喫水 5.11 m、フーティング幅 4 m を基準状態とし、表-2に示す条件の組合せにて実施した。

- ・船速 $V_s=3$ kn
- ・波浪条件 規則波 波高 $H_w=1.0, 3.0$ m
不規則波 有義波高 $H_{1/3}=3.0$ m
平均周期 $T_v=6.7, 7.7, 9.1$ sec

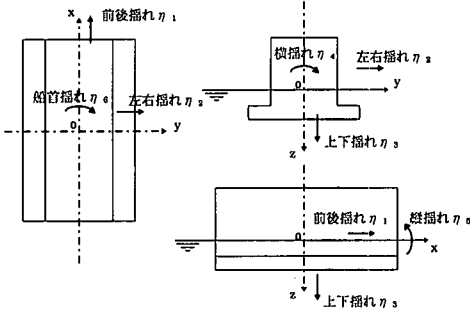


図-2 座標系

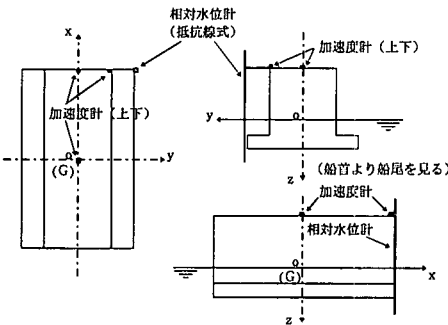


図-3 加速度および相対水位の計測位置

(4) 水槽実験結果

以下では、今回の主目的である上下揺れを主体に、自由動揺実験結果および波浪中実験結果について述べる。

a) 自由動揺実験結果

自由上下揺れおよび自由横揺れ実験で計測された波形の例を図-4、解析例として、フーティング幅と上下揺れの非線形減衰係数 b との関係を図-5に示す。 b 係数は、自由上下揺れ実験結果として得られた減減曲線を (1) 式、(2) 式のように近似した場合の係数であり、図ではフーティング幅 4 m の基準状態における値 b_{390} (計測した 2 点の平均値) との比を表している。

フーティング幅が大きくなると減衰力係数も若干増加する傾向が認められるが、あまり顕著ではないことがわかる。

$$\Delta\eta_3 = a_{33} \cdot \eta_{3m} + b_{33} \cdot \eta_{3m}^2 \dots\dots\dots (1)$$

ただし

$$\Delta\eta_3 = \eta_{3n} - \eta_{3n+1}, \eta_{3m} = \frac{\eta_{3n} + \eta_{3n+1}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

- η_{3n}, η_{3n+1} : $n, n+1$ 番目の振幅
- a_{33} : 線形減衰係数
- b_{33} : 非線形減衰係数

b) 波浪中動揺実験結果

ここでは波浪中での上下揺れを例にとり、フーティング幅と波高の影響について示す。不規則向波 (正面波) 中での単位有義波高当たりの有義振幅を図-6に示す。幅が狭いほど上下揺れが大きくなっていることがわかる。また、規則向波中で波高を変更した場合の上下揺れ振幅を図-7に示す。縦軸は波片振幅 h_A で無次元化した値である。フーティング幅は 4 m である。波高が高くなるとピーク付近での上下揺れが小さくなることがわかる。

4. 波浪中動揺特性の理論推定法の検討

(1) 波浪中での運動方程式

波浪中でのケーソンの動揺を推定するための方法として、通常船舶の波浪中動揺の推定に使用されている 6 自

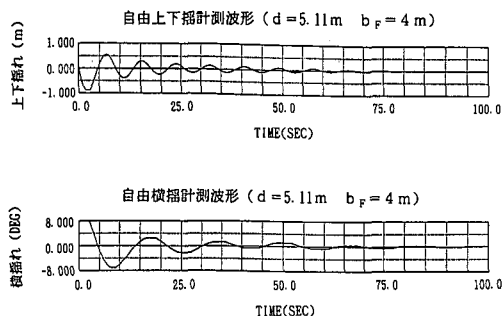


図-4 自由動揺実験における計測波形の例

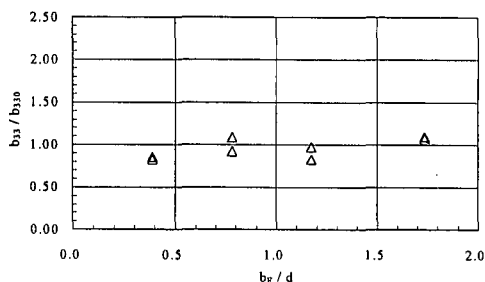


図-5 非線形減衰力係数に及ぼすフーティング幅と喫水の影響

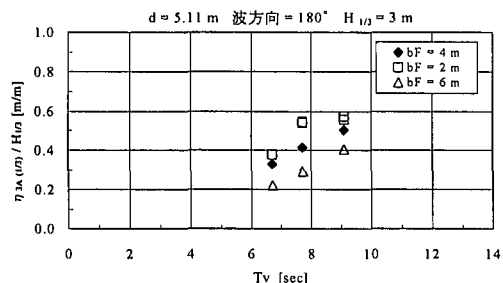


図-6 多方向不規則波中での上下揺れに及ぼすフーティング幅の影響

由度の運動方程式を適用する。すなわち、図-2に示す座標系において、ケーソンの運動方程式は一般的な形として次式のように与えられる。

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \cdot \ddot{\eta}_k + B_{jk} \cdot \dot{\eta}_k + D_{jk} \cdot \eta_k + C_{jk} \cdot \eta_k] = F_{Ej} \quad (j=1 \sim 6) \quad (3)$$

η_k ; k モードの動揺

$[M_{jk}]$; ケーソンの質量 (慣性モーメント)

$[A_{jk}]$; 付加質量

$[B_{jk}]$; 線形 (造波) 減衰力係数

$[D_{jk}]$; 非線形減衰力係数

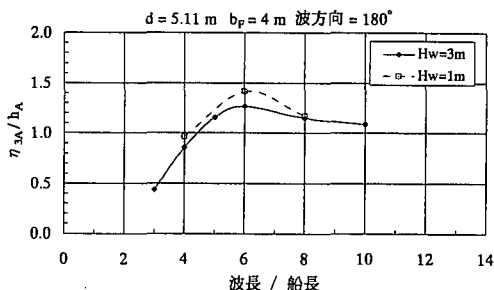


図-7 規則波中での上下揺れに及ぼす波高の影響

$[C_{jk}]$; 復原力係数

$[F_{jk}]$; 波強制力

通常船舶の波浪中船体運動においては、横揺れ以外のモードでは造波による線形減衰力が支配的であり、粘性等に基づく非線形減衰力は相対的に小さいため、横揺れに対してのみビルジキールの効果などによる非線形減衰力を考慮している。

しかし、ケーソンのように構造物本体の要目に比べて大きなフーティングがある場合には非線形減衰力の影響を無視できないため、上下揺れにおいても造波減衰力の他に粘性減衰力を考慮する必要があると考えられる。

以下では、上下揺れを対象に自由上下揺れ実験により得られた非線形減衰力係数を用いて理論計算を実施し、波浪中実験による上下揺れの計測結果と比較して理論計算法の推定精度について検討した。なお、運動方程式中の非線形減衰力係数 D_{33} と自由動揺実験により得られた (1) 式中の減衰力係数 b_{33} の間には次の関係がある。

$$D_{33} = \frac{3 \cdot T_z^2 \cdot \rho g \cdot A_w}{16\pi^2} \cdot b_{33} = \frac{3}{4} \cdot b_{33} (M + A_{33}) \quad (4)$$

ρ ; 流体密度

g ; 重力加速度

T_z ; 上下揺れの固有周期

A_w ; 水線面積

(2) 波浪中動揺特性の推定

前節で求めた非線形減衰力係数を用いて波浪中でのケーソンの動揺を求め、水槽実験結果と比較した。この際、図-5に示す結果より、非線形減衰力係数の値としてはフーティング幅および喫水によらず、同じ値を使用した。

規則向波中での上下揺れ振幅を比較した結果を、図-8, 9に示す。フーティング幅 $b_F = 4, 6$ m の場合について、非線形減衰力を考慮しない場合、および考慮した場合と水槽実験結果を比較した図である。これらの結果から、非線形減衰力により上下揺れ応答のピーク値が大幅に低減されており、理論計算において非線形減衰力を考慮することにより、水槽実験結果と非常に良く一致す

ることがわかる。

不規則波中での上下揺れを比較した結果を図-10, 11に示す。図-10は一方向の横波, 図-11は多方向の向波を受ける場合である。横軸は平均波周期, 縦軸は単位有義波高当たりの上下揺れの有義振幅を示している。不規則波中での応答の推定には, 通常船舶の場合と同様, 福田(1969)による規則波中応答と不規則波スペクトルの線形重ね合わせに基づくエネルギースペクトル法を用いた。不規則波中においてもフーティングによって上下揺れが大幅に低減されており, 非線形減衰力を考慮した規則波中応答を用いて不規則波中での応答を推定した結果は水槽実験結果と良く一致している。

上下揺れ以外の項目として, スラミングの判定の際に重要となる船首相対運動および船首上下加速度について, 多方向不規則波中での応答を比較した例をそれぞれ図-12, 13に示す。条件は正面向波, 船速は3 knで, フーティング幅は4 mである。横軸は平均波周期, 縦軸は単位有義波高当たりの有義振幅を示している。全般的には

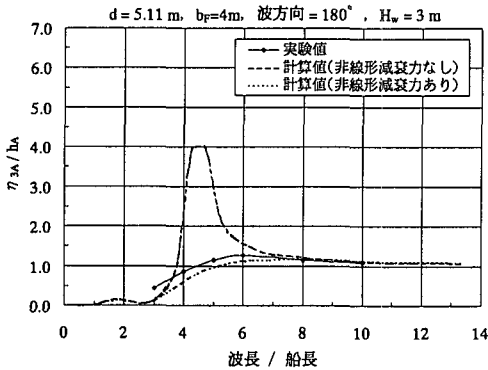


図-8 規則波中応答関数の理論計算値と水槽実験結果の比較 (正面向波)

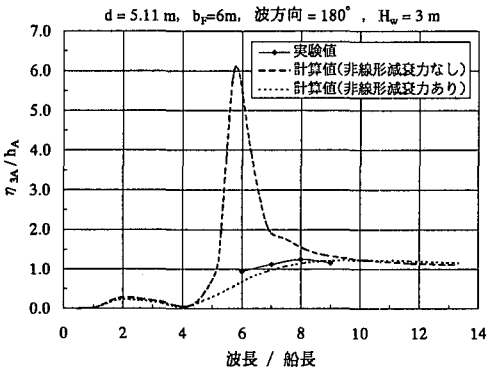


図-9 規則波中応答関数の理論計算値と水槽実験結果の比較

上下揺れの場合と同様に水槽実験結果と計算結果の対応は良く, 上下揺れ以外についても既存の理論推定法を適用可能であると言える。

このように理論計算結果と水槽実験結果は良く一致しており, 非線形減衰力を考慮することにより, ケーソンの波浪中動揺特性を実用上十分な精度で推定可能であると言える。また, この際非線形減衰力係数の値は, 通常のケーソンに対しては幅や喫水によらずに一定の値を使用して差し支えないと考えられる。

5. 実工事への適用例

宮城県石巻港建設工事に用いる護岸用ケーソン(鋼製ケーソン)は, 建造能力の大きい東京湾内の工場で建造し海上輸送を行う必要があるが, 当初は浮遊回航せずにフローティングドックを用いて輸送していたためコストが課題であった。浮遊回航の場合では, 従来の動揺解析手法を用いるとフーティングによる減衰効果を正しく評価できないため動揺量が過大になり, 特に喫水が浅い場

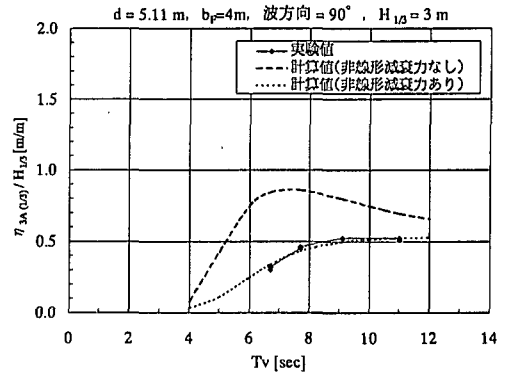


図-10 一方向不規則波中応答の理論計算値と水槽実験結果の比較

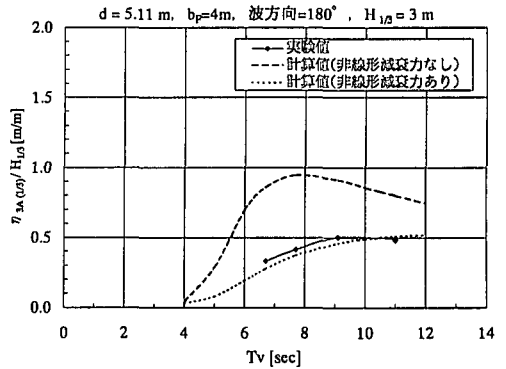
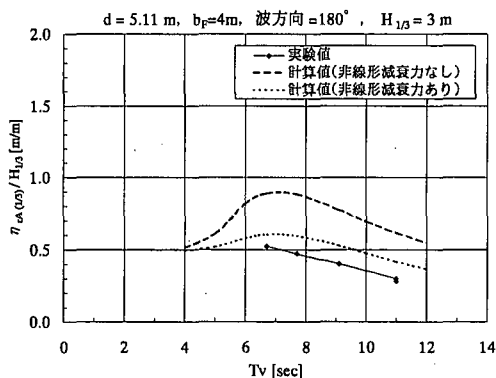
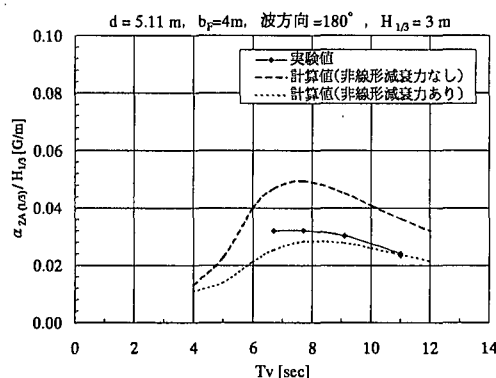


図-11 多方向不規則波中応答の理論計算値と水槽実験結果の比較



図一12 多方向不規則波中応答の理論計算値と水槽実験結果の比較



図一13 多方向不規則波中応答の理論計算値と水槽実験結果の比較

合は底版と水面との衝撃荷重が設計荷重を大きく上回り、その対策が必要であった。

本研究の成果は、平成8年輸送分のケーソン（長さ50 m，輸送数：5 函）の横浜～石巻間約520 kmの遠距離浮

遊回航の検討において適用し、有義波高 $H_{1/3}=3.0$ m，最大波高 $H_{max}=5.8$ m の回航検討条件で強度設計および輸送の安全性の評価を行った。その結果、回航時の荷重がケーソンの設計荷重を越えないことが確認できたため、過剰な回航補強が不要となり、経済的かつ安全に遠距離浮遊回航を行うことができた。

6. あとがき

ケーソンを波浪中で曳航する際の動揺特性を調査し、通常船舶を対象とした動揺計算法のケーソン型構造物への適用性を評価することを目的として、水槽実験および理論推定法の検討を行い、次のような結果を得た。

(1) これまで実績のなかったケーソン型構造物の曳航時の波浪中動揺特性を水槽実験により調査し動揺量とフーティング幅、喫水、波高との関係を定量的に示した。

(2) ケーソン型構造物の波浪中動揺特性の推定において、従来使用されている理論計算法を改良し、上下方向運動に非線形減衰力を考慮した新たな方法を開発した。その非線形減衰力を考慮した計算値は、考慮なしの計算値に比べ上下運動のピーク値が大幅に軽減され、実験結果と良く一致する。

今後の課題としては、大水深化・大波浪化あるいはケーソン回航海域の拡大などを考慮し、本研究の条件としている有義波高 $H_{1/3}=3.0$ m，最大波高 $H_{max}=5.8$ m の回航条件を越えた高波浪の海域に対応するなど、条件範囲を拡大した場合の検証が必要である。

参考文献

- 福田淳一 (1969): 船体応答の統計的予測, 耐航性に関するシンポジウム (日本造船学会), 第三章, pp. 99-119.
- 元良誠三監修 (1982): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, pp. 79-87.