

大阪大学 工学部 学生員○金 憲泰
 大阪大学 工学部 正会員 樫木 亨
 豊橋技術科学大学 建設工学系 正会員 青木伸一

1. まえがき：近年海洋構造物の親水性の声が高まっている。その一環として、著者らは浮防波堤を対象に、その本来の目的である波浪制御効果を維持し、かつその動揺を抑えることによって一つの海上空間として利用が可能である杭係留式浮防波堤の提案を行っている¹⁾。この係留方式は浮体の周りに4本の杭を設置し、杭と浮体の間にはローラーを用いることにより浮体の特定の方向成分の運動を抑制する方法で、つまり半拘束浮体とみなすことができる。この係留方式を用いた実験結果によると、浮防波堤としての消波効果は十分有しているもので、特に杭と浮体の間に初期反力を与え、その大きさを調節することによって消波効果には影響することなく浮体の動揺を抑制することが可能であることなど、非常に興味深い結果が得られている。しかし、それらは限られた実験だけによるもので、杭係留式浮防波堤の諸特性を明らかにするのは不十分であり数値計算による検討が必要であることは言うまでもない。

本研究は、浮防波堤の係留方式を杭係留式にすることにより、杭とローラーの間で生じる摩擦に起因する非線型のエネルギー減衰を等価線型減衰力に近似し浮体の運動方程式を構築したあとこの減衰が浮体の動揺、消波効果などの諸量に及ぼす影響を明らかにしたものである。また実験結果との比較によりその妥当性を明らかにしたものである。

2. 非線型摩擦の線型モデル化：図-1に示したような杭係留式浮防波堤において、杭とローラーの間で生じる摩擦による減衰力は、図-2(a)に示したように、単に浮体の運動速度と比例して起きるものであるがその方向はローラーの運動方向と逆向きであるため非線型性を有することになる。この非線型性を考慮した浮体の運動方程式を解くことは容易でないため、本研究では図-2(b)に示すdash-potのような性質をもつ等価線型減衰を考える。すなわち、運動の一周期間に生じる実際摩擦によるエネルギー減衰 E_f 、等価近似モデルによるエネルギー減衰 E_d はそれぞれ次式のようにになる。

$$E_f = 4 \int_0^T F_0 v_0 \cos \omega t dt = \frac{4F_0 v_0}{\omega} \quad (1)$$

$$E_d = \int_0^T c v_0 \cos \omega t \cdot v_0 \cos \omega t dt = \frac{c v_0^2 \pi}{\omega} \quad (2)$$

従って式(1)と(2)が等しいことを利用すると等価減衰係数 c は次のように表せる。

$$c = 4F_0 / v_0 \pi \quad (3)$$

上式からわかるように等価減衰係数は浮体の運動速度の関数になっている。しかし浮体の運動速度は摩擦係数が定まらない限り求められないため、結果的に繰返し計算で両者を決定するしかないことがわかる。また、等価減衰係数は浮体の沖側と岸側によって異なる値をもつため別々で扱わなければならない。一方、摩擦によるエネルギー減衰は浮体のHeaveとRoll運動に影響を及ぼす

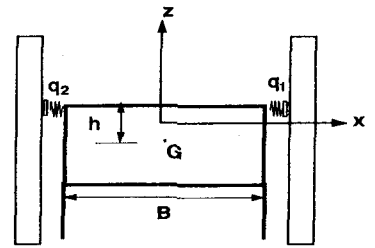


図-1 杭係留浮体のモデル

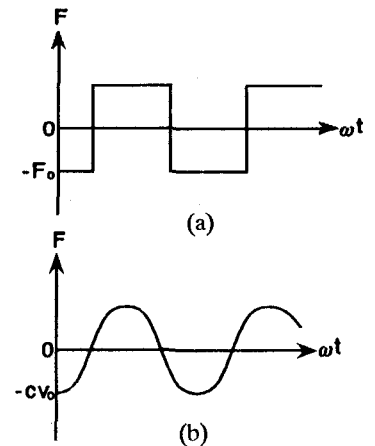


図-2 摩擦による減衰力

ものでSway運動には無関係である。従って、エネルギー減衰を考慮した浮体の運動方程式をHeaveとRollだけ示すと次のようになる。

$$\text{Heave} : M \frac{d^2 z}{dt^2} = \int p_z - c_1 \left(\dot{z} + \frac{B'}{2} \dot{\theta} \right) - c_2 \left(\dot{z} - \frac{B'}{2} \dot{\theta} \right) \quad (4)$$

$$\text{Roll} : I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \int p_r + 2k h x + k (B' s - 2h^2) \theta - c_1 \frac{B'}{2} \left(\dot{z} + \frac{B'}{2} \dot{\theta} \right) - c_2 \frac{B'}{2} \left(\dot{z} - \frac{B'}{2} \dot{\theta} \right) \quad (5)$$

ここでMは浮体の質量、Iは慣性モーメント、kは係留部のバネ定数、hは浮体重心とローラーとの鉛直距離、B'は両杭間の距離である。また c_1 、 c_2 はそれぞれ岸・沖側の杭における等価減衰係数を表す。一方、この運動方程式を解く計算手法は領域分割法（選点解法）²⁾を利用した。

3. 計算結果及び考察：図-3と4は、本計算の収束状況と解（透過率 K_t 、反射率 K_r ）の安定性を示した図である。ただし、浮体は図-1に示した形状で、 $d/H=0.15$ 、 $B/H=0.7$ 、 $I/\rho d B^3=0.1$ 、 d は喫水、 H は水深である。ここで、 $\varepsilon = |c_{11} - c_1|$ 、 ε の下添字1,2はそれぞれ岸・沖側を示すものである。また E_L はエネルギー減衰を、 N_r は反復計算回数を表す。両図からわかるように、等価減衰係数の収束は極めて良好であり、解（ K_t ）は2~3回の反復計算で安定している。つまり ε が 10^{-3} 以下であれば安定した解が得られることになる。また浮体の動揺と波力の場合においても同様の結果が得られた。図-5は透過率の計算値と実験値を横軸 B/L に対して比較したものであるが、計算値と実験値は全般的に良好な一致性を示しているが、Rollの共振周期付近の $B/L=0.08$ 前後、Heaveの共振周期付近の $B/L=0.18$ 前後で計算値が実験値よりやや小さい値を示していることがわかる。この原因の一つは、本計算における運動方程式に渦による粘性抵抗力を無視しているためであると考えられる。一方、図-6は計算値と実験値の浮体動揺量（Heave）を B/L に対して比較したものであるが、図-5と同様に共振周期付近の $B/L=0.18$ 前後で若干大きい値を示しているほか計算値は実験値をよく再現しており計算値が十分な妥当性をもっていることがわかる。またここには示していないが摩擦によるエネルギー減衰が、初期反力の小さい場合は全エネルギーの25%、初期反力の大きい場合には50%以上にまで達する結果となっている。

4. あとがき：以上杭係留式浮体に生じる摩擦によるエネルギー減衰を考慮した運動方程式を構築しその妥当性について検討を行った。今後杭係留式浮体の最適なる初期反力に対して検討を加える方針である。

参考文献：1)金 憲泰・榎木 亨・青木伸一：杭係留浮体

による波浪制御に関する実験的研究,海岸工学論文集vol.40,1993,pp.901-905. 2)吉田明徳・小島治幸・鶴本良博：波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の選点解法,土木学会論文集,vol.417,1990,pp.265-274

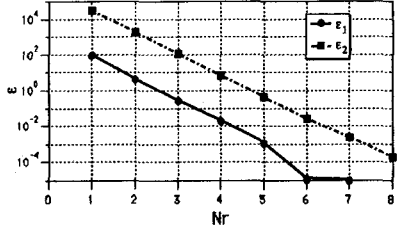


図-3 N_r と ε の関係

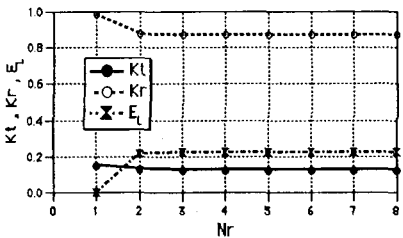


図-4 N_r と K_t, K_r, E_L の関係

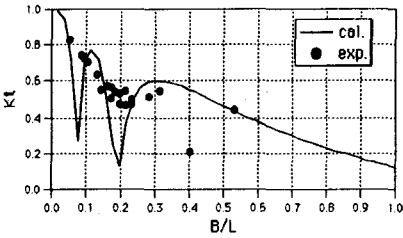


図-5 透過率の比較図

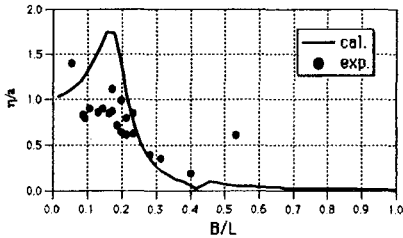


図-6 Heaveの比較図