

任意反射率岸壁前面の船体動揺特性

清 川 哲 志*・平 山 彰 彦**

1. ま え が き

港内静穏度を確保するため、あるいは船舶航路の静穏度を確保するために、低反射岸壁や防波堤前面に消波工などが施工される。これは、岸壁等の前面での波高の低減が、船体動揺の低減につながるものと考えられているためであると思われる。これに対し樫木らは、低反射岸壁の採用は、必ずしも船体動揺の低減化につながらないので、計画にあたっては慎重を期する必要があると述べており、著者らも静穏度は単に波高のみでなく船体動揺とからめて論じるべきであると主張してきた²⁾。本論文は以上のことを踏まえ、著者らが開発した任意反射率岸壁前面の船体動揺解析法³⁾を用いて、岸壁の反射率、および岸壁と船体との距離が船体動揺にどのように影響をおよぼすかを系統的に検討した結果について述べるものである。

2. 解析法の概要

図-1 に示すような任意反射率岸壁前面の2次元船体動揺を考える。入射波は図に示すように x 軸の正の方向から負の方向へ進行するものとし、船体はこの入射波によって動揺運動しているものとする。ただし、入射波は波高 H_0 、角振動数 ω の微小振幅波、船体動揺は微小変位運動と仮定し、線型理論による解析を行う。対象とする船体運動は、 x, z 軸に平行な運動、 $x-z$ 平面内での回転運動で、規則波中の定常運動を考える。これらを、それぞれ sway, heave, roll と呼び、その変位を $\{D\}e^{i\omega t}$ とする。ここに $\{D\}$ は複素変位振幅ベクトルで、 $\{D\} = {}^t\{D_1, D_2, D_3\}$ である。ただし、これらはそれぞれ sway, heave, roll の変位振幅を表す。船体は自由浮体とし、粘性減衰は考慮しないものとする。このとき船体の運動方程式から次の複素変位振幅に関する3元の連立方程式を得る。

$$\{[c] + i\omega[N] - \omega^2([m] + [M])\} \{D\} = \{E\} \quad \cdots (1)$$

ここに、 $[m]$: 質量マトリクス、 $[M]$: 付加質量マトリクス、 $[N]$: 造波減衰係数マトリクス、 $[c]$: 静水圧による

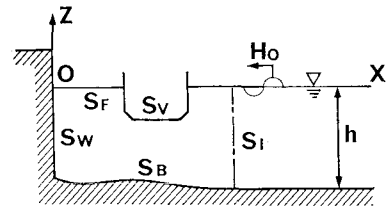


図-1 解析領域と座標系

復元力マトリクス、 $[E]$: 波強制力振幅ベクトルである。これらは 3×3 のマトリクス、および3成分からなるベクトルである。連立方程式 (1) を解くことによって船体の各運動の複素変位振幅が求められる。

次に、式 (1) 中の各係数マトリクス、および波強制力振幅ベクトル等について具体的に示す。 $[m]$ と $[c]$ は次のように表される。

$$[m] = \begin{bmatrix} W & 0 & 0 \\ 0 & W & 0 \\ 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix} \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho g A_W & 0 \\ 0 & 0 & WGM \end{bmatrix} \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに、 W : 船体質量、 I_0 : 重心まわりの慣性モーメント、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 A_W : 船体の水線面積、 GM : roll のメタセンター高である。ただし、 W, I_0, A_W などはすべて単位奥行きあたりの値とする。

付加質量マトリクス $[M]$ および造波減衰係数マトリクス $[N]$ の成分 M_{ij}, N_{ij} ($i, j=1 \sim 3$) は、速度ポテンシャルを用いて一般に次式により求められる。

$$M_{ij} - i \frac{N_{ij}}{\omega} = \rho \int_{S_V} n_j \phi_i ds \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここに、 M_{ij} は i 方向運動による j 方向付加質量 ($j=1, 2$) および付加慣性モーメント ($j=3$)、 N_{ij} は同じく i 方向運動による j 方向の造波減衰係数を表している。ただし、添字以外の i は虚数単位 ($=\sqrt{-1}$) である。また、右辺の積分は船体没水面 S_V における積分で、 n_j は船体の j 方向単位速度 ($j=1, 2$) および単位角速度 ($j=3$) に対応した船体表面上の速度の法線方向成分、 ϕ_i ($i=1 \sim 3$) は、それぞれ各方向の単位速度 (i

* 正会員 清水建設(株) 大崎研究室

** 正会員 清水建設(株) 技術研究所

=1, 2), 単位角速度 ($i=3$) 運動により生じる発生波の速度ポテンシャルである。このうち n_j は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n_x, & n_2 &= n_z \\ n_3 &= (z-z_0)n_x - (x-x_0)n_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ただし, n_x, n_z は船体表面上の単位法線ベクトルの x, z 成分, (x_0, z_0) は船体重心の座標である。

複素波強制力振幅ベクトル $\{E\}$ の各成分 E_i ($i=1\sim 3$) は次式によって求められる。

$$E_i = -i\rho\omega \int_{S_V} n_i(\phi_0 + \phi_i) ds \dots\dots\dots (6)$$

ここに, ϕ_0 および ϕ_i はそれぞれ入射, 反射散乱波のポテンシャルである。

以上, 連立方程式 (1) に現れる各項について説明したわけであるが, これから $[M], [N]$ および $\{E\}$ を知るためには ϕ_i ($i=1\sim 4$) を知る必要があることがわかる。この求め方として, 著者らは, 前報³⁾でハイブリッド型境界要素法を提案した。この特長は, 従来の解析法に比べて解析領域を狭くとれ, したがって経済的な解析が行えること, 任意反射率岸壁に対する解析が行えることである。本報においてもこの解析法を用いているので詳細は前報を参照されたい。

3. 模型実験

(1) 実験方法

実験は長さ 40m, 奥行 0.6m, 深さ 0.5m の 2 次元造波水槽において規則波を用いて行った。実験に用いた模型は厚さ 10mm の塩化ビニール製で, 幅 0.5m, 奥行 0.57m, 高さ 0.4m の矩形断面とし, 模型内部に鋼板を敷き吃水を 0.25m とした。模型と水槽壁面の間は左右 1.5cm あいており両者の間に摩擦を生じないようにになっている。また模型重心位置と水槽の固定点とをごく弱いバネを連結した細い糸で結び, 波漂流力を打ち消している。なお固定壁 (反射率 $K_r=1.0$) は造波板より 30m の位置に設けて, 実験は模型および固定壁からの反射波が造波板で再反射され, 模型に到達するまでに終了した。実験はまず入射波の周波数を固定し, 固定壁と模型重心との距離 l_1 と入射波長 L との比 l_1/L を 0.05~0.1 刻みに変化させ, 次に l_1/L を固定し入射波の周波数を変化させて行った。模型の動揺による各変位振幅の測定は, 浮体重心位置と水槽ガラス面に 10cm 刻みで発光ダイオード (LED) をとりつけ, シャッター開放で撮影を行い, 撮影された光の軌跡から変位量を読みとり実際の変位振幅に換算した。

(2) 実験結果

図-2 は入射波の周波数を 0.45 Hz に固定し, l_1/L を変化させたときの実験値および計算値で, 横軸は l_1/L , 縦軸は無次元変位振幅である。また 図-3 は, l_1/L を

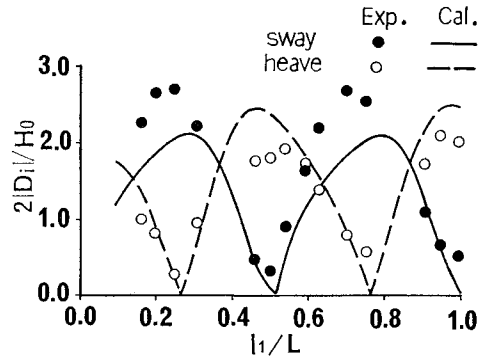


図-2 動揺におよぼす固定壁と船体との距離の影響

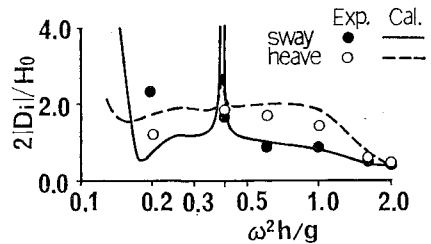


図-3 固定壁前面での船体動揺 ($l_1/L=0.6$)

0.6 に固定し, 入射波の周波数を変化させたもので横軸は無次元角振動数, 縦軸は無次元変位振幅である。図-2 では, sway, heave ともに実験値と計算値とでピーク付近でのずれがみられる。通常, 粘性減衰を考慮しない計算値の方が実験値より大きくなることが知られているが, ここでは, sway は実験値の方が計算値より大きく, 逆の結果を示している。これは後にも述べるように, 固定壁からの反射波と入射波および船体からの放射波の干渉効果のために, 固定壁からの反射波が大きいほど (固定壁の反射率が 1 に近いほど) 船体の応答が押えられる場合があるが, 実験では反射波自体がエネルギーを失っているため干渉効果が弱く, 理論どおりには応答が押えられなかったものと考えられる。しかし, いずれにしてもこれらの図に示されるように, 実験値と計算値は比較的良く一致し, 本解析法の妥当性が確かめられたといえよう。

4. 計算と考察

700t 貨物船と 10 万 t タンカーを例にとり, 船体の動揺におよぼす岸壁反射率の影響, 岸壁と船体との距離の影響について明らかにするとともに, 岸壁付近の船体動揺のうち, 最も重要と考えられる接岸状態の船体について動揺特性を調べた。貨物船およびタンカーの諸元は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の標準船型⁴⁾を用いた。ただし, 船舶の重量については, 全重量を船長で除した値を用い, 船体形状は矩形断面とした。表-1 に計算に用いた値を示す。なお以下の計算では前報の検

表-1 船舶の諸元(単位奥行あたり)

種	類	貨物船	タンカー
幅	(m)	8.5	39.0
吃水	(m)	3.8	14.6
高さ	(m)	4.6	19.2
重量	(t)	13.7	370.0
重心高	(m)	-1.5	-5.0
慣性モーメント	($t \cdot m^2$)	106.0	58 260.0

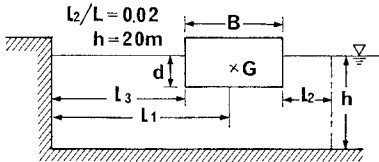


図-4 岸壁前面の矩形断面船体

討結果に基づき分割要素長 a^* と入射波長の比 a^*/L を 0.02, 収束係数 ϵ と入射波長との比 ϵ/L を 0.01 とした。その他の条件は 図-4 に示すとおりである。

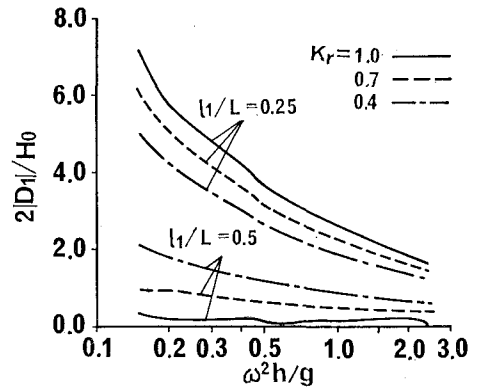
(1) 岸壁の反射率の影響

岸壁と船体重心との距離 l_1 と入射波長の比 l_1/L を、重複波の影響が大きく現れると思われる 0.25 と 0.5 に固定し、岸壁の反射率 K_r を 0.4, 0.7, 1.0 の 3 種類に変化させて各変位振幅の周波数特性におよぼす反射率の影響を調べた。図-5 は貨物船、図-6 はタンカーの場合で、横軸は無次元角振動数、縦軸は無次元変位振幅、 B は船体幅を示す。貨物船の場合、 $l_1/L=0.5$ では、sway, roll はすべての周波数範囲にわたって反射率が小さいほど、変位振幅が大きくなっている。

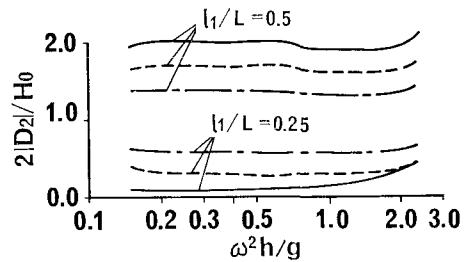
一方、タンカーにおいては同じ $l_1/L=0.5$ の場合でも $\omega^2 h/g \geq 0.4$ の領域で、sway, heave, roll とともに反射率の影響をほとんど受けないことがわかる。また $l_1/L=0.25$ の地点では、タンカーの応答は $\omega^2 h/g \approx 0.5$ を境に、反射率と変位振幅の関係が逆転し、 $\omega^2 h/g \geq 0.5$ では sway, roll は反射率が小さいほど変位振幅が大きくなり、常に反射率が高いほど変位振幅も大きい貨物船とは全く異なった特性を示している。これらの現象は、岸壁および船体からの反射波と、入射波および船体からの放射波の干渉効果によるものと考えられる。樁木らは多孔壁岸壁と鉛直岸壁前面での船体動揺を比較し、heave において多孔壁岸壁、すなわち低反射岸壁の方が動揺が大きくなる場合のあることを示している⁹⁾。ここに示した結果からも、船体の動揺は、岸壁の反射率、岸壁と船体との距離、および船舶の種類によってその応答特性が変わり、反射率を下げるのが一概に動揺の低減につながらないことがわかる。

(2) 岸壁と船体間の距離の影響

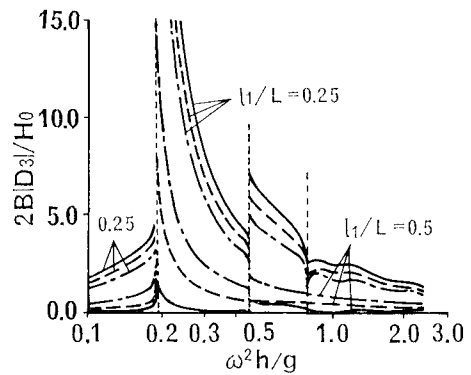
図-7 は、貨物船を対象に、入射波の周期 T を 18 秒に固定し、船体と岸壁との距離を変化させたときの動揺



(a) sway



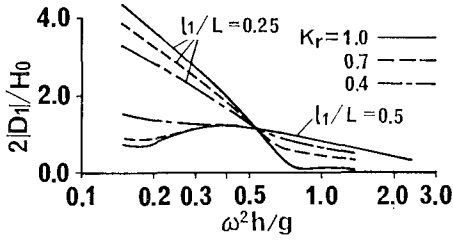
(b) heave



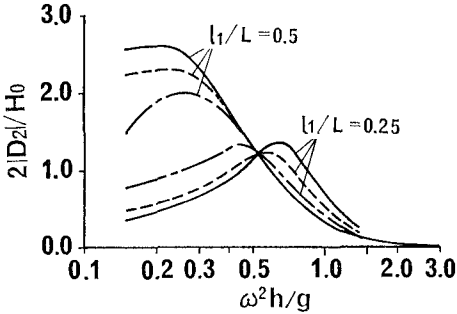
(c) roll

図-5 貨物船の動揺特性におよぼす岸壁反射率の影響

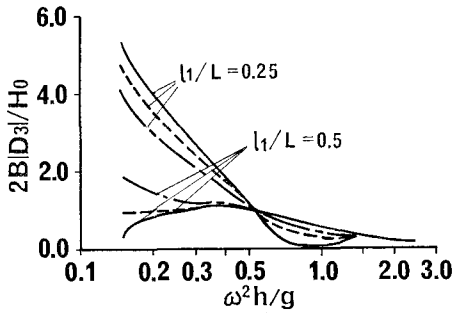
特性を示している。この場合、船体幅と波長の比 B/L が 0.035 と小さいため、船体はほぼ重複波に乗って運動していることがわかる。図-8 はタンカーの場合で $T=10$ 秒に対するものである。井島らは、鉛直壁前面の自由浮体について、浮体幅と浮体・岸壁間の距離の比を 3 種類に変化させ、動揺の周波数特性を調べている⁶⁾。そして浮体と岸壁間の距離の違いにより動揺に著しい差が生じないと結論づけている。しかしながら、ここに示された結果からもわかるように、船舶の種類、入射波の周波数によっては岸壁と船体との距離は船体動揺に大きく影響する。



(a) sway



(b) heave



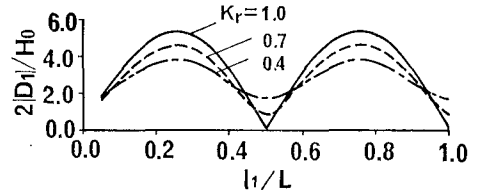
(c) roll

図-6 タンカーの動揺特性におよぼす岸壁反射率の影響

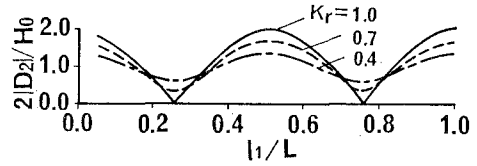
(3) 接岸状態における動揺特性

岸壁と船体左舷間の距離 l_0 を貨物船は 2m, タンカーは 4m に固定して, 接岸状態における船体の動揺特性を調べた. 図-9 は貨物船の場合で, 横軸は入射波の周期, 縦軸は無次元変位振幅である. sway においては $T \approx 8 \sim 14$ 秒の領域で $K_r = 0.4$ の場合が最も変位振幅が大きい. また roll においては $K_r = 0.4$ の場合, $K_r = 1.0$ に対し, 最大で 4 倍の応答値を示している. 図-10 はタンカーの場合で, $T = 12$ 秒付近で sway, heave, roll ともに $K_r = 1.0$ の場合が最も変位振幅が小さい. また, sway, roll にみられるように $T \approx 7.5 \sim 13$ 秒の広い領域で反射率が小さいほど変位振幅が大きくなっている.

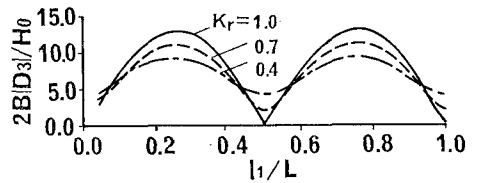
以上のように, ここで示した結果は, 岸壁の反射率の低減が逆に船体の動揺を増幅する場合のあることを示しており, 低反射岸壁の採用には, 船体動揺を考慮した検討が必要であると言えることができる.



(a) sway

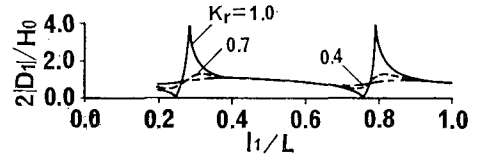


(b) heave

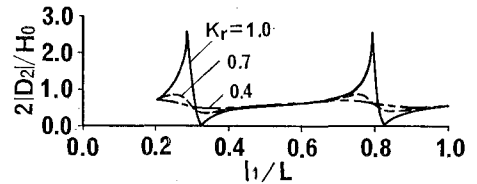


(c) roll

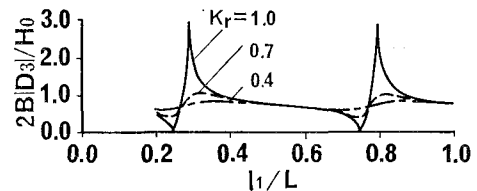
図-7 岸壁と船体との距離の影響 (貨物船)



(a) sway



(b) heave

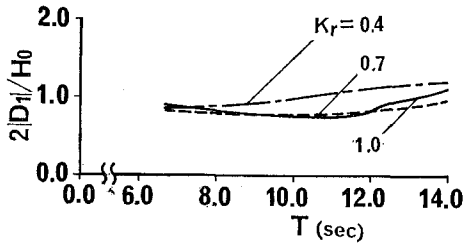


(c) roll

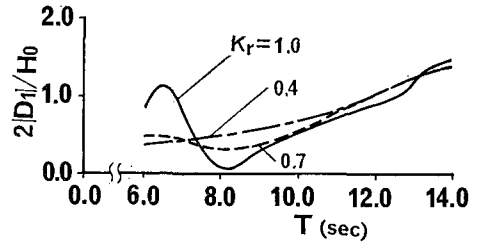
図-8 岸壁と船体との距離の影響 (タンカー)

5. あとがき

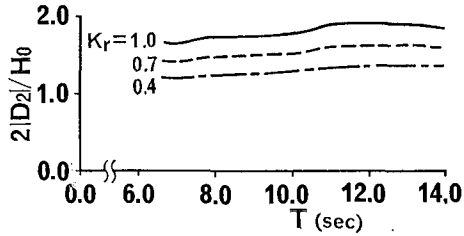
以上, 本論文では任意反射率岸壁前面における船体動揺を, 著者らが開発したハイブリッド型境界要素法によ



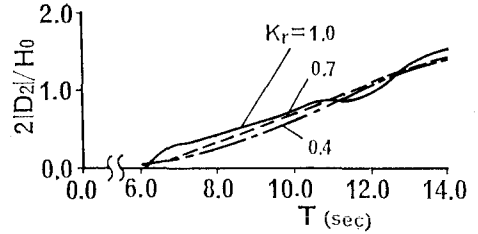
(a) sway



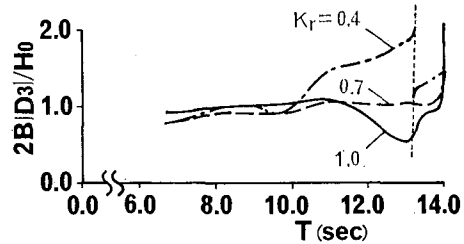
(a) sway



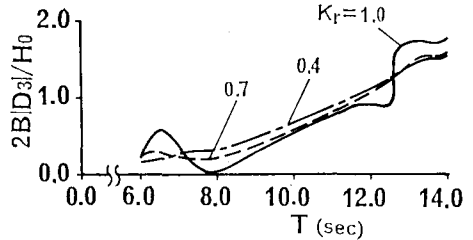
(b) heave



(b) heave



(c) roll



(c) roll

図-9 接岸状態の貨物船の動揺特性

図-10 接岸状態のタンカーの動揺特性

って解析した結果について考察した。得られた結果で特に興味深いのは、低反射岸壁の採用は必ずしも船体動揺の低減につながらないということである。この事実は既に樁木らによって指摘されていることであるが、低反射岸壁に対する取り扱い方が全く異なる2つの解析結果から同様な結論が導かれたことは意義深い。

参考文献

- 1) 樁木 亨・久保雅義：係留船体運動からみた港内静穏度の算定について(3), 港湾, pp. 73~77, 1983.
- 2) 清川哲志：港内静穏度解析について, OCEAN AGE, pp. 39~46, 1983.
- 3) 清川哲志・平山彰彦・高梨和光・小林 浩：ハイブリッド型境界要素法による任意反射率防波堤前面の船体動揺解析, 第30回海講演集, pp. 450~454, 1983.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 運輸省港湾局監修, p. 2~4, 1979.
- 5) 樁木 亨・久保雅義・京谷光高：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究(第3報), 第26回海講演集, pp. 646~650, 1979.
- 6) 井島武士・田淵幹修・湯村やす：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形, 土木学会論報 No. 202, pp. 33~48, 1972.