

海上投入法による魚礁沈設時の着底衝撃力について

松 見 吉 晴*

1. ま え が き

魚礁ブロックの沈設は、通常、作業船による海上投入法が採用されるため、着底時の衝撃力による破損が問題となる。この点に関して魚礁に関する現行の設計指針（日本水産資源保護協会，1984）では、魚礁部材の強度計算に中村ら（1975）の提案した衝撃力算定式を採用しており、この算定式に含まれる魚礁の流体力係数に従来の海洋構造物における値を準用している。しかし、海中を落下する魚礁の付加質量係数に関しては、著者（1988）が既に明らかにしているように魚礁が底面に衝突するとき底面効果によって無限流体場での値の1.4～2.3倍になることから、上述したような海洋構造物における値を準用することは破損の危険性を持つことになる。また、魚礁のような非球型物体の落下挙動の特徴である回転運動を伴って海底に衝突するときの衝撃力には、海底面と魚礁の接点における回転運動による衝撃力の付加も考慮する必要がある。

本研究は、まず魚礁の落下動揺として水平方向の動揺および回転運動を伴った魚礁の着底時の付加質量係数を明かにし、その底面効果が考慮された付加質量係数、並びに魚礁の落下挙動に関する数値シミュレーション手法（松見ら，1988）より求まる着底時の魚礁の姿勢と回転運動の角速度を用い、着底衝撃力に及ぼす魚礁の回転運動の影響について検討したものである。

2. 落下する魚礁の付加質量係数

(1) 解析方法

流体場を運動している物体の付加質量係数の算定法には、物体周辺の流れを表す複素速度ポテンシャルを用いて流体抵抗力を求め、その加速度項に掛かる比例定数として付加質量係数を定義して求める方法、並びに物体の運動によって生じる流体場の運動エネルギーの増分と物体を流体に置き換えたときの運動エネルギーが等価になるように流体質量に掛けられた係数として求める方法がある。そして、ポテンシャル理論に基づくかぎり両者

の方法によって算出される付加質量係数の値は等しくなる（松浦，1973）。本研究では、後者の方法を用いて回転運動を伴って落下する魚礁の着底時の付加質量係数を求めることにした。

魚礁の落下によって生じる流体場の運動エネルギーの増分量 T_W は、ポテンシャル論より速度ポテンシャルを ϕ とすると次式で与えられる。

$$T_W = -\frac{\rho}{2} \oint_c \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dc \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ は流体の密度であり、 c は魚礁表面を表し、 $\partial/\partial n$ は魚礁表面での法線方向の微分を表す。

一方、魚礁を流体に置き換えたときの運動エネルギー E_W は、魚礁の体積を V 、付加質量係数を C_{MA} 、魚礁の落下速度を v_0 とすると次式で表示される。

$$E_W = \frac{\rho}{2} C_{MA} V v_0^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

速度ポテンシャルより得られる流体場の運動エネルギー T_W と魚礁を流体に置き換えた運動エネルギー E_W が等しいことから、付加質量係数は式（1）および（2）より次式のように与えられる。

$$C_{MA} = - \oint_c \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dc / (V v_0^2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

本研究では、流体場として固定底面を有する半無限の静止流体場を対象に解析を進めることにした。また、落下する魚礁表面の境界表示に対しては湧き出し分布法を適用し、底面表示に対して鏡像法を用いると、速度ポテンシャル ϕ は次式のように表示される。

$$\phi = \text{Real} \left[\frac{1}{2\pi} \oint_c D(z_c) \{ \log(z - z_c) + \log(z - \bar{z}_c) \} dc \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\text{Real} [\]$ は実数部を表し、 z_c 、 $\bar{z}_c$ は魚礁表面上に配置された湧き出しの位置とその鏡像位置を示す。また、 $D(z_c)$ は z_c における湧き出しの強さであって、この値は魚礁表面上の流体速度と魚礁表面の運動の法線方向速度が等しくなる境界条件により決定される。なお、 ϕ および $\partial\phi/\partial n$ の積分計算については、魚礁表面上を線素分に分割し、その中点に湧き出しを置くことにより数値積分を行っている。

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

図-1は、本解析方法の妥当性を検証するため、無限流体場を対象として計算された魚礁の付加質量係数 C_{MA} を示したもので、横軸には魚礁の空隙率 γ をとっている。この図より、 $\gamma=0\%$ の C_{MA} の値は 1.19 を示し、従来明らかにされている角柱の付加質量係数の値と一致し、本解析手法の妥当性が確認できる。また、 C_{MA} は魚礁の空隙率によって変化するが、その変化率は $\gamma=0\%$ の値を基準としたなら下限側で 5% 程度の減少、上限側で 1% 程度の増加と比較的小さいことがわかる。

(2) 回転運動を伴う魚礁の付加質量係数の算定式

本研究では、次に示す 3 種類の着底時の魚礁の運動形態別に付加質量係数を上述した解析方法より算定し、その結果を用いて水平動揺・鉛直落下・回転運動が合成されたときの魚礁の付加質量係数を求めることにした。

I) 水平動揺の場合

II) 鉛直落下運動の場合

III) 回転運動の場合

いま、魚礁が図-2に示すような回転・水平動揺・鉛直落下を伴った運動形態で底面に衝突する場合を考える。ポテンシャル理論が成立する完全流体中では、エネルギー保存則が成立することより、3種類の運動の合成に伴って生じる流体場の運動エネルギーの増分と各運動成分による運動エネルギーの増分との間には次式が成立する。

$$E_T = E_X + E_Y + E_R \quad \dots\dots\dots (5)$$

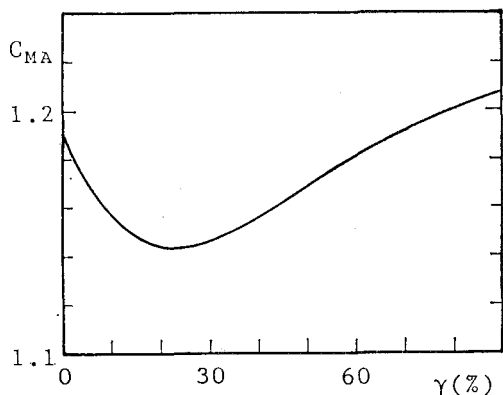


図-1 無限流体場における C_{MA} の空隙率変化

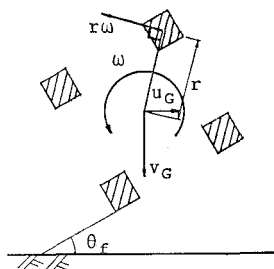


図-2 魚礁の落下運動の説明図

ここに、 E_T は魚礁の水平動揺・鉛直落下・回転運動の合成運動によって流体場に生じるエネルギーの増分量、 E_X 、 E_Y 、 E_R はそれぞれ水平動揺、鉛直落下および回転運動による運動エネルギーの増分量である。 E_T 、 E_X 、 E_Y および E_R は、式 (2) の運動エネルギーを用いて表示すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} E_T &= \frac{1}{2} \rho C_{MAT} V v_T^2 \\ E_X &= \frac{1}{2} \rho C_{MAX} V u_G^2 \\ E_Y &= \frac{1}{2} \rho C_{MAY} V v_G^2 \\ E_R &= \frac{1}{2} \rho C_{MAR} V (r\omega)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 v_T は 3 種類の合成運動による魚礁の移動速度、 u_G 、 v_G は魚礁の x および y 方向の移動速度、 r は魚礁重心から部材中心までの距離、 ω は角速度、 C_{MAT} は 3 種類の運動が合成したときの付加質量係数、 C_{MAX} 、 C_{MAY} および C_{MAR} はそれぞれ水平動揺、鉛直落下および回転運動における付加質量係数を表す。 v_T については、魚礁の回転運動による速度成分も含めた形式で表現するため、 u_G 、 v_G および $r\omega$ を用いて次式のように定義している。

$$v_T^2 = u_G^2 + v_G^2 + (r\omega)^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

従って、3種類の運動が合成して底面に衝突するときの魚礁の付加質量係数は、式 (5)、(6) および (7) より次式で与えられる。

$$C_{MAT} = \frac{C_{MAY} + C_{MAX}(u_G/v_G)^2 + C_{MAR}(r\omega/v_G)^2}{1 + (u_G/v_G)^2 + (r\omega/v_G)^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

C_{MAX} 、 C_{MAY} 、 C_{MAR} は、各運動成分別に上述した付加質量係数に関する解析方法によって算定できる。

表-1~3 は、角型魚礁を対象に魚礁表面と底面となす角度 θ_f を $0^\circ \sim 45^\circ$ まで 11.25° 毎に変化させたときの着底時における各運動成分別の付加質量係数 C_{MAX} 、 C_{MAY} および C_{MAR} に関する計算結果を示したものである。これらの表より、3種類の運動が合成して着底するときの付加質量係数 C_{MAT} が式 (8) によって算定できることになる。

表-1 水平動揺の場合の着底時の付加質量係数

$\theta_f(^{\circ}) \backslash \gamma(\%)$	30.5	55.5	75.0	88.9
0	1.68	1.57	1.51	1.47
11.25	1.64	1.52	1.46	1.42
22.50	1.67	1.53	1.46	1.41
33.75	1.78	1.61	1.53	1.47
45.00	1.62	1.49	1.42	1.37

表-2 鉛直落下の場合の着底時の付加質量係数

$\gamma(\%)$	30.5	55.5	75.0	88.9
$\theta_f(^{\circ})$				
0	2.38	1.98	1.80	1.63
11.25	1.97	1.72	1.64	1.55
22.50	1.63	1.51	1.46	1.41
33.75	1.52	1.45	1.41	1.39
45.00	1.43	1.39	1.36	1.34

表-3 回転運動の場合の着底時の付加質量係数

$\gamma(\%)$	30.5	55.5	75.0	88.9
$\theta_f(^{\circ})$				
0	0.93	1.16	1.35	1.43
11.25	0.80	1.04	1.27	1.39
22.50	0.71	0.96	1.18	1.32
33.75	0.73	0.97	1.20	1.35
45.00	0.65	0.90	1.11	1.25

(3) 計算結果

図-3(a) および (b) は、空隙率 $\gamma=55.5\%$ および 88.9% の場合の3種類の運動が合成されたときの着底時の付加質量係数を示したもので、図中の θ_f は衝突時の魚礁の姿勢を表す角度である。なお、図中横軸の u_G/v_G については、魚礁の落下挙動に関する数値シミュレーション結果(松見ら, 1988)を参照して $0\sim 3$ まで変化させている。両図より明らかなように、水平・鉛直・回転運動が合成されたときの着底時の付加質量係数は、底面効果によって先に示した図-1の無限流体場におけるそれぞれの値($\gamma=55.5\%$ の場合: $C_{MA}=1.18$, $\gamma=88.9\%$ の場合: $C_{MA}=1.24$)より大きくなる。特に、面で着地する場合($\theta_f=0^{\circ}$)に最も底面効果の影響を受けて C_{MAT} の値が増加することがわかる。また、付加質量係数に及ぼす回転運動の影響について図中の各 $r\omega/v_G$ における C_{MAT} の値を比較すると、魚礁の空隙率および衝突入射角に関係なく、付加質量係数は回転運動が付加されることによって減少し、またその回転運動の影響は空隙率の小さい魚礁に顕著に現れることがわかる。この回転速度の増加に伴う付加質量係数の減少については、水平・鉛直・回転運動を伴うときの魚礁の付加質量係数を式(8)によって定義していることによるものである。すなわち、 $r\omega/v_G$ を変数としたとき、式(8)が表-2および3から明らかなように単調減少の性質を有するためである。

3. 魚礁に作用する着底衝撃力

(1) 着底衝撃力の算定方法

ここでは、着底衝撃力の算定に際して、底面効果を考慮した付加質量係数、並びに着底時の魚礁の姿勢と回転

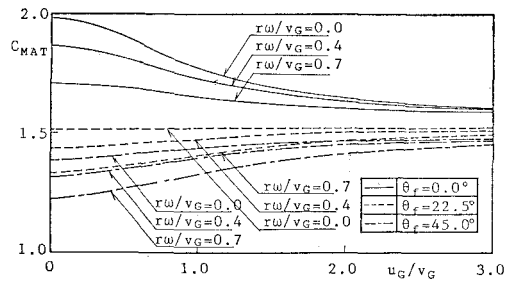
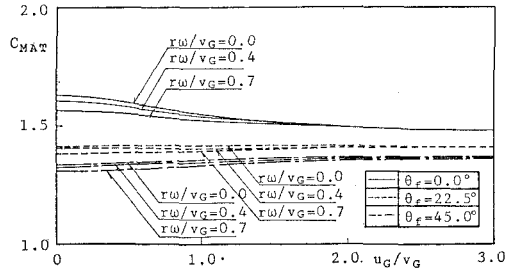
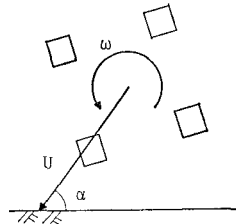
図-3(a) 水平・鉛直・回転運動を伴う付加質量係数 ($\gamma=55.5\%$)図-3(b) 水平・鉛直・回転運動を伴う付加質量係数 ($\gamma=88.9\%$)

図-4 着底時の魚礁の運動に関する説明図

運動の角速度を導入することにより、着底衝撃力に対して魚礁の回転運動がどの程度の影響を及ぼすものかについて検討を加える。なお、本研究では砂層に魚礁が衝突するときを対象に理論展開を行っている。

魚礁が図-4に示すような角度から底面に衝突する場合、魚礁に作用する衝撃力 $f(t)$ は次式で示すような力積で与えられる。

$$\int_0^{\Delta T} f(t) dt = (M + C_{MAT} M_w) U \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 ΔT は地盤の変位が最大になるまでの時間、 U は衝突直前の魚礁の落下速度、 M 、 M_w はそれぞれ魚礁の質量および魚礁と同体積の流体の質量を表す。式(9)より着底衝撃力を計算するためには $f(t)$ の時間変化を与える必要がある。そこで、魚礁の着底衝撃力に関する水理模型実験を行い、着底衝撃力を測定した結果、図-5に示すような着底衝撃力の時間変化を得た。この結果を基に、ここでは最大衝撃力 f_m に達するまでの着底衝

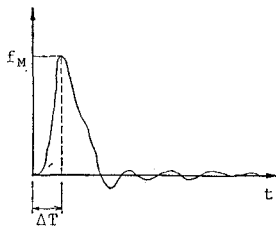


図-5 着底衝撃力の時間変化

撃力の時間変化を次式のような正弦曲線で近似し与えることにした。

$$f(t) = f_m \sin\left(\frac{\pi}{2\Delta T} t\right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(9)および式(10)より、最大着底衝撃力 f_m は次式のように表示できる。

$$f_m = \frac{\pi}{2\Delta T} (M + C_{MAT} M_w) U \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (11)$$

従って、式(11)より ΔT 、 C_{MAT} 、 U および α が求まれば着底衝撃力が算定されることになる。 C_{MAT} は2. で明らかになっているが、 ΔT については中村ら(1975)の方法に基づいて以下のように与えた。すなわち、着底後の魚礁の速度変化を線形近似し、この魚礁の速度と地盤の変位速度との関係より整理すると、 ΔT が次式によって与えられる。

$$\Delta T = 2\varepsilon_m / v_g \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 ε_m は地盤の最大変位量を表し、この ε_m は中村らのエネルギー方程式から求められる。なお、このエネルギー方程式に含まれる抗力係数 C_D については、著者(1988)が既に発表しているように抗力係数の底面効果が着底衝撃力にほとんど影響を及ぼさないことから、現行の設計指針で用いられている $C_D=2$ を適用した。一方、着底時の魚礁の落下速度の鉛直成分 $U \sin \alpha$ については、魚礁の落下挙動に関する数値シミュレーション手法に基づいて与えるべきであるが、落下速度に関する計算結果が実験結果と十分な一致を示していないことから、ここでは魚礁の落下に関する運動方程式における加速度項をゼロとして得られる終端速度で与えることにした。

(2) 着底時の魚礁の姿勢と回転運動の導入の必要性

現行の設計指針は、着底時の魚礁の姿勢と着底衝撃力の関係について、面着地 ($\theta_f=0^\circ$) と稜着地 ($\theta_f=45^\circ$) の2種類の場合に区別して着底衝撃力の計算方法を説明しているが、両者の計算方法における実質的な差は魚礁の終端速度を求める際の落下方向に直面する魚礁の遮蔽面積の変化に伴う終端速度の差だけである。しかしながら、魚礁の場合のように回転運動を伴って落下するときの着底衝撃力に対しては、図-6 に示すように魚礁の重

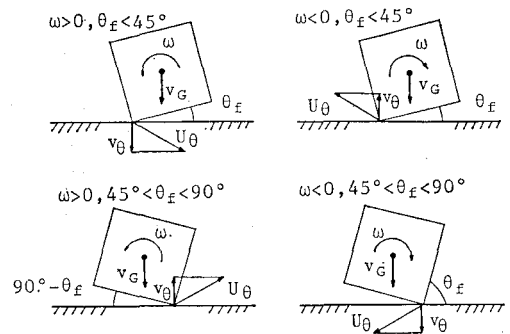


図-6 着底衝撃力に及ぼす魚礁の回転運動の影響の説明図

心位置での落下速度 v_g だけでなく、魚礁と底面との接地点における回転運動による速度 U_θ の鉛直成分 v_θ も寄与することになる。この v_θ は、魚礁の角速度 ω の符号、大きさおよび魚礁の底面に対する衝突入射角 θ_f の如何によっては v_g と同一方向に作用して着底衝撃力を増加させることになり、着底衝撃力の算定上重要な要素と言えよう。なお、 $\theta_f=45^\circ$ の場合は、 U_θ が水平方向となり v_θ がゼロとなることから、着底衝撃力に対して魚礁の回転速度を考慮する必要はない。このようなことより、本研究では式(11)中の着底時の魚礁の落下速度 U に回転運動による速度 U_θ の鉛直成分 v_θ を付加すると共に、先の2. で明らかにした水平・鉛直・回転運動を伴うときの魚礁の付加質量係数を用いて、着底衝撃力に及ぼす魚礁の回転運動の影響について検討を行った。

(3) 計算結果

図-7 は、空隙率 $\gamma=55.5\%$ の魚礁モデルを対象に着底時の回転運動による鉛直方向の速度成分を付加すると共に、付加質量係数の底面効果を考慮して算定された着底衝撃力 f_{Tm} と、現行の設計指針に基づき $C_{MA}=1$ および $C_D=2$ として算定した衝撃力 f_m を比較して示したものである。まず、この図によると、 f_{Tm}/f_m は1以上の値を示すことから、現行の設計指針では危険側の設計になる可能性が十分にあると言える。次に、着底衝撃力に及ぼす着底時の魚礁の水平動揺の影響と回転運動の影響について比較してみると、 $\theta_f=0^\circ$ と 22.5° の場合、 f_{Tm}/f_m の ra/v_g による変化は ua/v_g による変化より大きいことから、回転運動の影響を大きく受けることがわかる。また、同じ ra/v_g であっても θ_f の値が小さい程、魚礁と底面の接点における回転運動による鉛直方向の速度成分 v_θ の値が大きくなることから f_{Tm}/f_m は大きくなり、 $\theta_f=0^\circ$ の場合、 $ra/v_g=0$ と 0.7 における f_{Tm}/f_m の値では約2倍の差が生じている。一方、 $\theta_f=45^\circ$ の場合は、 $v_\theta=0$ となることから、回転速度による影響は生じておらず、 ra/v_g による f_{Tm}/f_m の差

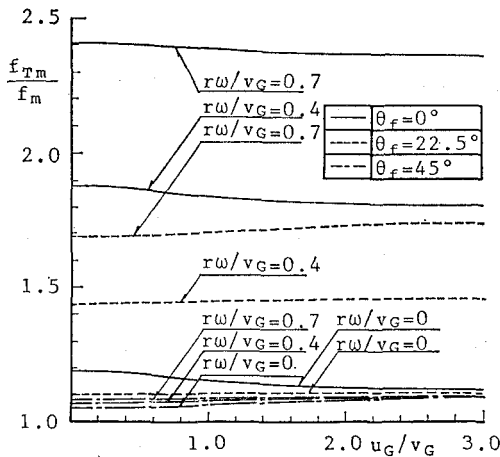


図-7 水平・回転運動による着底衝撃力の変化

は図-3に示した付加質量係数の差によるものである。このようなことより、着底時の魚礁の姿勢並びに回転運動の角速度は、着底衝撃力に対して重要なパラメータであると指摘できる。特に、その影響は魚礁が面($\theta_f=0^\circ$)で着地するとき最も大きくなる。

以上のことより、着底衝撃力を評価するに当っては、着底時の魚礁の姿勢、魚礁の回転運動に伴う衝撃力の付加、並びに付加質量係数に及ぼす底面効果を取り入れて行う必要があると言える。その方法としては、まず著者が既に発表している魚礁の落下挙動に関する予測手法(1988)により着底時の魚礁の姿勢並びに回転運動の角速度を求め、次にその運動形態における着底時の付加質

量係数を式(8)によって求め、これらの結果を式(11)に代入することより、着底衝撃力が評価できることになる。

4. あとがき

本研究は、現行の魚礁に関する設計指針に用いられている着底衝撃力の算定式に含まれる付加質量係数について、魚礁の落下運動の形態も含めて底面効果による影響をポテンシャル理論に基づいた理論的考察より定量的に明らかにしたと共に、着底衝撃力に及ぼす着底時の魚礁の姿勢と回転運動の影響について検討を行った。特に、着底時の魚礁の姿勢と回転運動を考慮したときの着底衝撃力については、魚礁が回転を有して面着地に近い入射角で底面に衝突する場合、現行の設計指針に基づいて算定される着底衝撃力より極端に大きくなり、着底衝撃力の算定に当っては着底時の魚礁の姿勢と回転運動の角速度を考慮して行わなければならないことが明らかになった。

参考文献

- 中村 充・上北征男ら(1975): 海中落体の底着衝撃に関する研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 483~487.
- 日本水産資源保護協会(1984): 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針(昭和59年度版), pp. 126~129.
- 松浦義一(1973): 船体振動と付加質量, 1972年度水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, pp. B-8-1~B-8-24.
- 松見吉晴・横山忠弘・瀬山 明(1988): 海上投入法による魚礁の安定配置に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 747~751.