

魚礁沈設時の着底衝撃力に関する研究

松見 吉晴・横山 忠雄*

社会開発システム工学科・*福部村

(1989年9月1日受理)

Impulsive Force Exerted on the Fish Aggregation Device at Landing on the Sea Floor

by

Yoshiharu MATSUMI, Tadao YOKOYAMA

Department of Social Systems Engineering

*Fukube Village Office

(Received September 1, 1989)

In order to evaluate the stability of the fish aggregation device (FAD) against the impulsive force at landing on the sea floor efficiently, this paper deals with the affection of the sea floor on the added-mass coefficient and the drag coefficient of the settling FAD. Furthermore this study presents an approach to analyze the impulsive force in consideration of the effect of the posture and the rotational motion of the FAD at landing.

Key words : Fish aggregation device, Added-mass, Impulsive force

1 緒言

魚礁の着底衝撃力に関する現行の魚礁に関する設計指針¹⁾では、中村・上北ら²⁾の研究結果が採用されている。中村らは、着底衝撃力を魚礁着底時の地盤の最大変位に比例する地盤反力（PROHLICHの理論³⁾）であると考え、この地盤反力を考慮した衝突時の魚礁の運動方程式より地盤の最大変位を算定し着底衝撃力を求める理論を誘導している。そして彼らは理論式において着底時の魚礁の落下速度に対して鉛直真下に落下している魚礁の運動方程式より終端速度を与えているが、魚礁のように非球形物体の落下の特徴である回転運動とそれに伴う水平方向の動揺を考えた場合、着底瞬時の魚礁の落下速度を精度良く算定され得るか疑問を残す。一方、衝突時の魚礁の運動方程式に含まれる魚礁の着底瞬時の付加質量係数および抗力係数には、従来の海洋構造物の値がそのまま準用されているが、著者らは前報⁴⁾において水中を落下している魚礁の付加質量係数が底面効果によって着底瞬時には無限流体場での値の1.4~2.3倍になることをポテンシャル理論より明らかにしている。しかし、前報では落下している魚礁の動揺まで考慮した理論的解析でなかった。また、抗力係数に及ぼす底面効果についても十分な検討を加えるまでに至らなかった。このようなことから、本研究で、まず落下している魚礁の運動形態を考慮したときの付加質量係数および抗力係数に及ぼす底面効果を魚礁の落下挙動の数値シミュレーション結果⁵⁾にもとづき算定すると共に、魚礁の落下挙動の特徴である回転運動を伴って着底するときの着底衝撃力について検討するものである。

2 付加質量係数に及ぼす底面効果

2-1 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としては、物体周辺の流れを表す複素速度ポテンシャルを用いてBrasiusの第1公式、あるいは圧力方程式によって流体抵抗力を求め、その加速度項にかかる比例定数として付加質量係数を定義し求める方法⁶⁾と物体の運動が流体場に与えるエネルギーの増分量が物体と同体積の流体がもつ運動エネルギーに等しくなるように流体の質量に掛けた定数として付加質量係数を定義し求める方法⁷⁾がある。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⁷⁾。そ

こで本研究は、後者を採用して付加質量係数を求めた。理論展開の詳細は前報⁴⁾を参照されたい。

本研究で注目する着底時の魚礁の運動形態による付加質量係数については、次に示す4種類の運動形態を考えて検討する必要がある。

- I) 鉛直落下
- II) 並進運動を伴って衝突する場合
- III) 回転運動を伴って衝突する場合
- IV) 並進・回転運動を伴って衝突する場合

これらの運動形態を呈しながら魚礁が底面に衝突する際の付加質量係数の算定は以下のように行った。

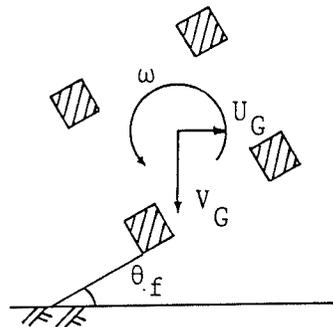


図-1 魚礁の運動形態

いま、魚礁が図-1に示すような運動形態を呈しながら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魚礁の運動とその運動に伴って生じる流体場の運動エネルギーの増分量との間には次式が成立する。

$$E^* = E_x + E_y + E_r \quad (1)$$

ここに、 E^* は魚礁が回転・並進・落下運動を呈することによって流体場が得るエネルギーの増分量、 E_x 、 E_y 、 E_r はそれぞれ魚礁の並進運動（x方向）、鉛直落下（y方向）および回転運動によって流体場が得るエネルギーの増分量である。一方、魚礁の3種類の運動エネルギーを用いて式（1）を表示すると次のようになる。

$$\frac{1}{2} C_{nat} M_r V_T^2 = \frac{1}{2} C_{max} M_r U_G^2 + \frac{1}{2} C_{may} M_r V_G^2 + \frac{1}{2} C_{nar} I_r \omega^2 \quad (2)$$

ここに、 M_r は魚礁と同体積の流体の質量、 U_G 、 V_G はそれぞれ魚礁のx、y方向の移動速度を表し、 C_{nat} は魚礁が並進・鉛直落下・回転運動を呈して底面に衝突するときの付加質量係数であり、 C_{max} 、 C_{may} 、 C_{nar} はそれぞれ魚礁が並進、鉛直落下、回転運動のときの付加質量係数を表す。

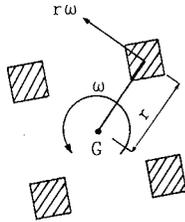


図-2 魚礁の回転運動の説明図

回転運動による魚礁表面上の各点の流速を図-2で示すように魚礁部材の重心における回転速度 $r\omega$ で代表させると、式(2)の右辺第3項は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C_{nar} I_r \omega^2 &= \frac{1}{2} C_{nar} \sum_{i=1}^4 m_w (r\omega)^2 \\ &= \frac{1}{2} C_{nar} M_w (r\omega)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 m_w は魚礁の1本の部材と同体積の流体の質量、 r は魚礁重心から部材中心までの距離である。

式(2)の左辺の V_T^2 は、 U_G 、 V_G および $r\omega$ を用いて次のように表せる。

$$V_T^2 = U_G^2 + V_G^2 + (r\omega)^2 \quad (4)$$

従って、並進・鉛直落下・回転運動を呈して底面に衝突するときの付加質量係数 C_{nat} は、式(2)に式(3)および(4)を代入して整理することによって次のように表せる。

$$C_{nat} = \frac{C_{may} + C_{max}(U_G/V_G)^2 + C_{nar}(r\omega/V_G)^2}{1 + (U_G/V_G)^2 + (r\omega/V_G)^2} \quad (5)$$

C_{max} 、 C_{may} 、 C_{nar} は、各運動形態毎に上述した付加質量係数に関する解析方法⁴⁾によって算定され得る。表-1~3は、魚礁表面と底面となす角度を変化させたときの着底時における C_{max} 、 C_{may} および C_{nar} の計算結果を示したものである。これらの表の値を用いて3種類の運動を同時に呈して着底するときの付加質量係数 C_{nat} が式(5)によって算定できることになる。

表-1 並進運動の場合の着底時時の付加質量係数

γ (%) / θ_r (°)	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 鉛直運動の場合の着底時時の付加質量係数

γ (%) / θ_r (°)	30.5	55.5	75.0	88.9
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時の付加質量係数

γ (%) / θ_r (°)	30.5	55.5	75.0	88.9
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

2-2 計算結果

(1) 鉛直落下の場合

鉛直落下の場合の付加質量係数に及ぼす底面効果については、すでに前報⁴⁾で詳しく述べたので、ここでは着底寸前の付加質量係数に及ぼす魚礁の底面に対する衝突入射角 θ_f の影響について検討を加える。図-3は衝突入射角 θ_f の違いによる着底寸前の付加質量係数の変化を示したものである。この図より、 $C_{n\alpha y}$ は空隙率に関係なく θ_f の増加に伴い減少する。このような衝突入射角の違いによる $C_{n\alpha y}$ の変化特性は、入射角の変化に伴う魚礁周辺の流体粒子の移動速度の差と考えられる。すなわち、図-4は同じ速度で落下している衝突入射角 $\theta_f = 0^\circ$ と 45° の場合の無孔魚礁モデル周辺の水粒子速度をベクトル表示したものであるが、この図から明らかなように $\theta_f = 0^\circ$ の場合の流体粒子の移動速度は $\theta_f = 45^\circ$ の場合と比較してかなり大きくなっている。このような衝突入射角による流体粒子の移動速度の差が $C_{n\alpha y}$ の入射角による変化に現れたものと推測される。

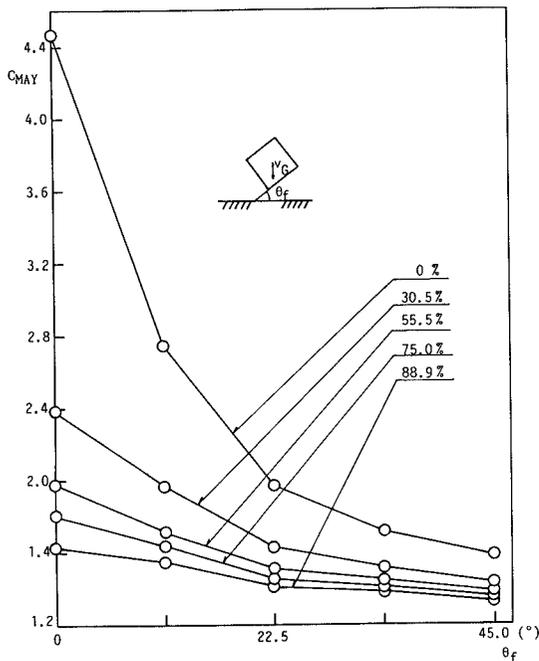


図-3 着底時の $C_{n\alpha y}$ に及ぼす底面効果に対する魚礁の衝突入射角 θ_f の影響

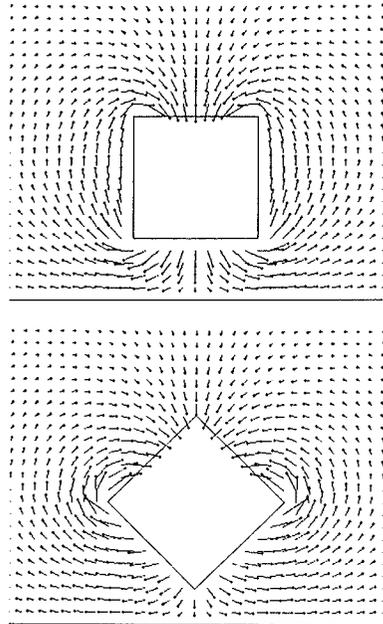


図-4 落下している魚礁周辺の流体粒子の移動状況

(2) 並進運動を伴って衝突する場合

魚礁が並進運動を伴って落下する場合の付加質量係数は式(5)において $\omega = 0$ とすることにより次式で与えられる。

$$C_{n\alpha T} = \frac{C_{n\alpha y} + C_{n\alpha x}(U_0/V_0)^2}{1 + (U_0/V_0)^2} \quad (6)$$

式(6)の U_0/V_0 の値は魚礁の落下方向を表すようなものである。この値は魚礁の落下挙動の特徴を表する並進運動に伴う水平方向への魚礁の単位時間当りの移動量 D_x と鉛直落下に伴う単位時間当りの落下距離 D_y の比⁵⁾で表すことができる。

図-5は式(6)より算定した並進運動による付加質量係数 $C_{n\alpha T}$ の変化の1例を示したもので、魚礁モデルの空隙率 γ は55.5%である。なお、 D_x/D_y は魚礁の落下挙動の数値シミュレーション⁵⁾を参照して0~3まで変化させている。この図より、衝突入射角 θ_f が比較的小さい $\theta_f \leq 11.25^\circ$ 範囲の $C_{n\alpha T}$ は D_x/D_y が大きくなる(並進運動が大きくなる)につれて減少する。一方、 θ_f が大きい $22.5^\circ \leq \theta_f \leq 45^\circ$ 範囲の $C_{n\alpha T}$ は、 D_x/D_y の増加に

伴って増大する。このような変化傾向は他の空隙率の場合にも認められ、空隙率が小さい程度著しく変化すると共に、 $D_x/D_y < 1$ の範囲（落下運動が並進運動より卓越している場合）での変化が大きいことを付記しておく。さらにまた、全ての空隙率の場合に対して水平方向の動揺が大きくなっても、 $\theta_r = 0^\circ$ の場合が最も付加質量係数の値が大きく、 $\theta_r = 45^\circ$ の場合が最小になることが明らかになった。従って、並進運動においても付加質量係数は魚礁が面着地するときに最も底面効果の影響を受けて大きくなる。

(3) 回転運動を伴って衝突する場合

魚礁が回転運動を伴って落下する場合の付加質量係数は式(5)において $U_0 = 0$ とすることにより次式で与えられる。

$$C_{MRT} = \frac{C_{MAV} + C_{MAR}(r\omega/V_0)^2}{1 + (r\omega/V_0)^2} \quad (7)$$

図-6は、表-2, 3より式(7)を用いて算定した C_{MRT} の結果の1例として空隙率55.5%の場合の回転速度による付加質量係数の変化を示したもので、図中横軸には $r\omega/V_0$ をとっている。なお、 $r\omega/V_0$ の値は落下挙動の数値シミュレーション結果⁵⁾を参照して0~1まで変化させた。この図より C_{MRT} の $r\omega/V_0$ による変化は、魚礁の空隙率が小さくかつ衝突入射角 θ_r が小さい場合に顕著になる。このように面を着地する場合($\theta_r = 0^\circ$)の C_{MRT} が回転の影響を最も大きく受けることについては、(1)で述べたように魚礁の側面と底面との間に挟まれた流体粒子の移動速度が他の θ_r 小さくなるに伴って大きくなることから理解できよう。しかし、回転速度が増加することに伴って C_{MRT} が減少することについては、上述した流体粒子の移動速度が大きくなることから考えて矛盾することになるが、この原因については次のように説明できる。すなわち、回転運動のみを対象としたときの付加質量係数は回転の角速度の大きさに影響されず一定であることが予備計算で明らかになっており、表-3に示すように C_{MAR} はいずれの空隙率においても $\theta_r = 0^\circ$ の時が大きい値をとっている。さらに本研究では、回転運動と鉛直運動が合成したときの付加質量係数を式(7)

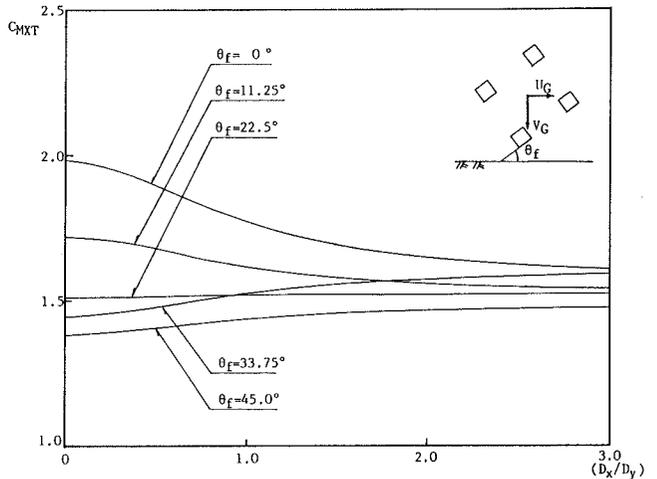


図-5 並進運動による C_{MRT} の変化 ($\gamma = 55.5\%$)

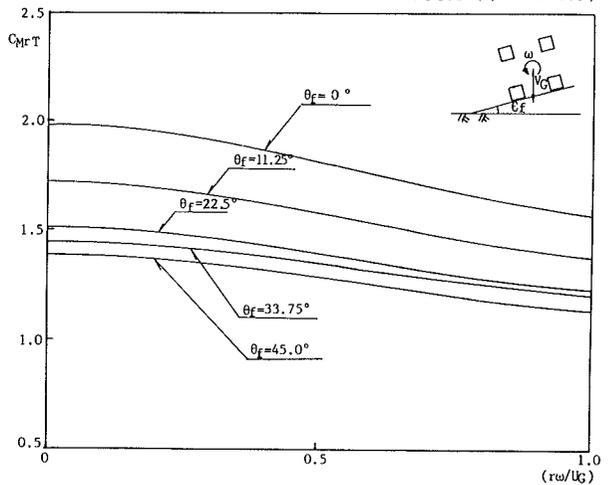


図-6 回転運動による C_{MRT} の変化 ($\gamma = 55.5\%$)

で与えていることから、この式は $r\omega/V_0$ の増加に伴って減少する性質を有している。以上のことより、特に $\theta_r = 0^\circ$ の場合の C_{MRT} が $r\omega/V_0$ の増大に伴って大きく減少する傾向を示したものと云えよう。

(4) 回転・並進運動を伴って衝突する場合

図-7は、回転・並進運動を考慮した落下魚礁の着底瞬時の付加質量係数を式(5)より算定した結果の1例を示したもので、空隙率が55.5%の場合である。なお、 $r\omega/V_0$ は0, 0.4, 0.7の3種類変化させている。この図と他の空隙率の計算結果より、並進運動に回転運動の影響が加わることによって付加質量係数が衝突入射角 θ_r

の大きさにかかわらず減少していることが認められた。特に、 $\theta_r = 0^\circ$ のときその影響が顕著に現れる。また、空隙率の小さいものほど回転、並進による付加質量係数の変化が大きく、付加質量係数に及ぼす底面効果として回転・並進運動の影響を受け易いことが明らかになった。

以上のことより、水平方向の動揺および回転運動を考慮した着底時の魚礁の付加質量係数については、底面効果を受けて無限流体場における値より大きくなるが、付加質量係数に及ぼす運動形態としては水平方向の動揺による影響はほとんどなく、回転運動は付加質量係数を低減する効果を有する。

3 抗力係数に及ぼす底面効果

3-1 解析方法

落下する魚礁の抗力係数は、著者らが複数渦糸モデル法と特異点分布法を併用した魚礁の落下挙動に関する数値シミュレーション手法⁵⁾より得られる魚礁に作用する流体抵抗力、落下速度および加速度の各々の鉛直成分並びに上述した付加質量係数を用い、流体抵抗力に式(8)で示すモリソン式に適用することにより求められる。

$$F = C_{na} M_0 \frac{dV_G}{dt} + \frac{\rho}{2} C_D A V_G^2 \quad (8)$$

ここに、 C_{na} および C_D はそれぞれ魚礁の付加質量係数および抗力係数、 A は魚礁の落下方向に垂直な遮蔽面積、 ρ は流体の密度を表す。

魚礁の落下挙動に関する数値シミュレーション手法より算定される流体抵抗力には、魚礁の回転に伴う揚力(落下方向と直角方向に作用する流体力)の鉛直成分も含まれるため、抗力係数はこの揚力成分の値も含んだものとなる。そこで、ここでは魚礁の水平方向の動揺と回転を拘束したときの魚礁に作用する流体抵抗力を新たに計算し抗力係数を求めることにした。

3-2 計算結果

本解析においては、抗力係数に及ぼす底面効果を魚礁の落下姿勢および衝突入射角より検討するため投入時の魚礁の静水面に対する傾き(以下、初期角を称す) θ_0 を 0° から 45° まで 11.25° 刻みで変化させた5種類の

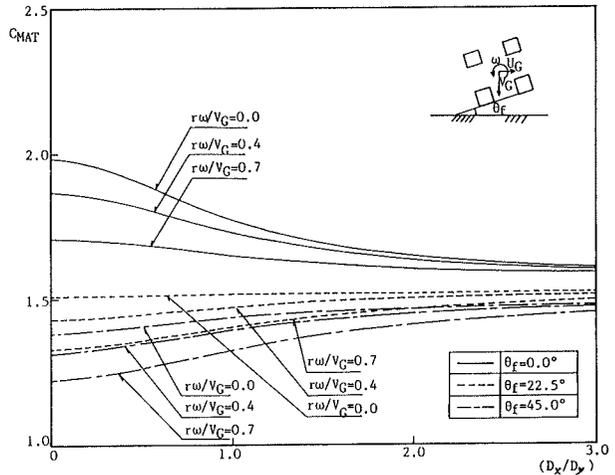


図-7 並進及び回転運動による C_{MAT} の変化($\gamma=55.5\%$)

初期角について計算を行った。

図-9は、上述した解析方法に基づいて無孔モデルについて $\theta_0 = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ ときの抗力係数 C_D の水深方向の変化を示したものである。図中横軸の h_0/a は水底から魚礁下端面までの距離 h_0 を魚礁の一边 a で割った値である。図-9より、落下直後の C_D の値は初期角によってその大きさが異なり、 θ_0 の値が大きくなるにつれて急激に大きくなる。このような変化特性は、落下に伴って魚礁から発生する渦列パターンが落下時の魚礁の姿勢によって異なるためである。また、着底直前の C_D を見てみると、何れの初期角においても C_D は増加する傾向が認められる。このことより、抗力係数についても付加質量係数の場合と同じように底面効果の影響を受けて増加することになる。特に $\theta_0 = 45^\circ$ の場合の C_D の値は通常の角柱構造物と同様 $C_D = 2$ 程度の値から着底直前では底面効果によって $C_D = 3$ 程度まで増大する。

図-10は、空隙率 $\gamma=55\%$ の有孔魚礁モデルの C_D の水深方向変化を示したものである。この図を見ると全ての初期角に対して C_D が正負の変動を示し、無孔モデルの場合のように抗力係数に及ぼす底面効果を明確に見出すことができない。このような変動を示した理由としては、一般に渦糸モデルを用いて物体背後の流況を予測する場合、計算の時間間隔が予測精度の上に重要な要素となることより、本計算で用いた計算ステップの時間間隔が有孔モデルの場合に適当な値でなかったものと推測される。従って、この問題に対して時間間隔を種々変化させた計

算結果よりさらに今後検討して行くと共に、実験を含めた検討を行う予定である。

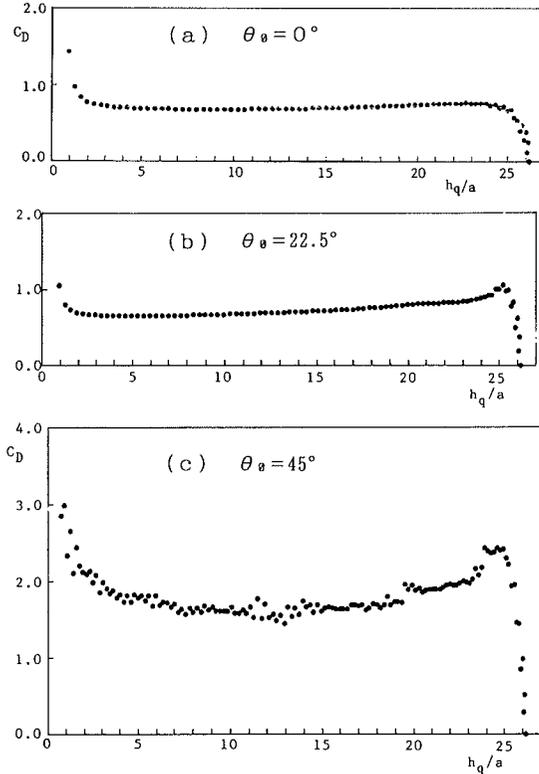


図-8 C_D の水深方向変化(無孔モデル)

4 魚礁の着底衝撃力

現行の設計指針では、中村、上北ら²⁾の算定式に基づき着底衝撃力の算定を行っているが、その算定式に含まれる抗力係数 C_D 、付加質量係数 C_{Ma} に対して、例えば角柱部材の場合 $C_D = 2$ 、 $C_{Ma} = 1$ という値を用いている¹⁾。しかし、上述したように魚礁の付加質量係数が底面の影響を受けて増大することが理論的に明らかになったことにより、現行の設計指針のように従来の海洋構造物における値を準用することは妥当であるとは言い難い。さらにまた、魚礁のように回転運動を有して落下する場合の着底衝撃力に関しては着底時の回転運動の影響についても検討しておく必要がある。ここでは魚礁の着底衝撃力の問題として、流体力係数に及ぼす底面効果並びに魚礁の回転運動の影響に着目した検討を行う。

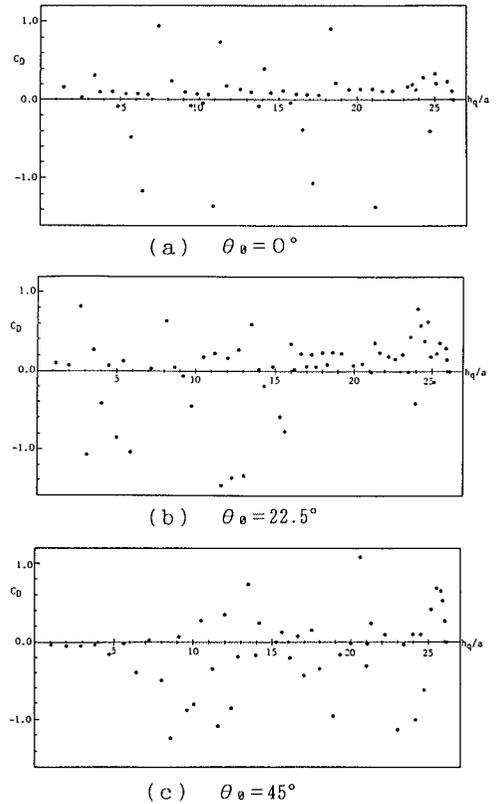


図-9 C_D の水深方向の変化(有孔モデル)

4-1 着底衝撃力の算定法

魚礁が図-10に示すような角度から底面に衝突する際、魚礁に作用する衝撃力 $f(t)$ は次式によって与えられる。

$$\int_0^{\Delta T} f(t) dt = (M + C_{Ma}M_w)U \sin \alpha (1 + e) \quad (9)$$

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速度、 C_{Ma} は付加質量係数、 e は反発係数、 M 、 M_w はそれぞれの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った結果、 $f(t)$ の ΔT 間の時間変化が図-11に示すようにサインカーブで近似できることが明らかになったので、本研究では $f(t)$ を次式で与えて以下の議論を進めた。

$$f(t) = f_{max} \cdot \sin(\pi/24T)t \quad (10)$$

最大着底衝撃力 f_{max} は式(9)および式(10)より次のように表せる。

$$f_{max} = (\pi/24T)(M+C_{Na}M_w)Usin\alpha(1+e) \quad (11)$$

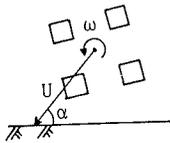


図-10 着底瞬時の魚礁の運動形態

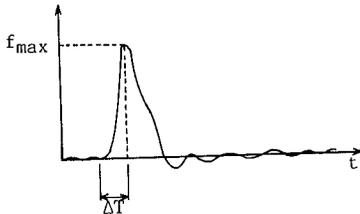


図-11 着底衝撃力の時間変化

本研究では、砂質層の海底に魚礁が衝突するときの衝撃力を対象にしていることから、魚礁の衝突現象としては魚礁が地盤に潜り込んで反発しない完全非弾性衝突と考え、式(11)に含まれる反発係数 e をゼロとして f_{max} を算定することにした。従って、 ΔT 、 C_{Na} 、 U および α が求めれば着底衝撃力が算定されることになる。 C_{Na} は2で明らかになったので、 ΔT の算定法について以下に説明する。

式(11)の地盤変位が最大となるまでの時間 ΔT の算定には、中村ら²⁾と同じように着底後の魚礁の速度変化を線形近似し、整理すると次式で与えられる。

$$\Delta T = 2\varepsilon_{max}/v_0 \quad (12)$$

ここに、 ε_{max} は地盤の最大変位量、 v_0 は魚礁の着底瞬時の鉛直方向の速度成分である。 ε_{max} は中村ら²⁾の工

ネルギー方程式から求めた。一方、魚礁の着底瞬時の速度 v_0 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、落下速度の計算結果が実験結果と十分な一致をみるに至らなかった⁵⁾ことより、ここでは中村らと同様に魚礁が落下しているときの運動方程式における落下加速度に関する項をゼロとして求まる次式で示す終端速度で与えた。

$$v_0 = \sqrt{2gV/(C_0A)(\sigma_0/\omega_0 - 1)} \quad (13)$$

ここに、 σ_0 および ω_0 は魚礁部材および海水の単位体積重量である。式(13)の C_0 に対しては、底面効果の影響を考慮したものを与えるべきであるが、3で述べたように有孔魚礁に対して明確な結論を得るまでに至っていないことより、ここでは便宜上従来の角柱部材に採用されている $C_0 = 2$ を適用して着底瞬時の落下速度を計算することにした。なお、この C_0 の変化に伴う着底衝撃力の変化については次に示す図-12で論議する。

4-2 流体力係数(C_{Na} , C_D)に対して底面効果を考慮した着底衝撃力

図-12は、 $\gamma = 55.5\%$ の魚礁モデルを対象として流体力係数(C_{Na} , C_D)に対して底面効果が考慮して計算された着底衝撃力 f'_{max} と現行の設計通り $C_{Na} = 1$ および $C_D = 2$ として求めた着底衝撃力 f_{max} の比を地盤の反力係数 K_R をパラメータとして示したものである。なお、魚礁の底面への衝突入射角 θ_r は 0° 、 22.5° 、 45° と変化させている。また、図中の横軸の C_D については、有孔魚礁モデルの抗力係数のバラツキが大きかったことと、無孔魚礁モデルの計算結果から判断して0.1から4まで変化させた。この図より各 θ_r の f'_{max}/f_{max} は C_D の値に関係なく1以上の値を示すことから、まず現行の設計指針で規定されている C_{Na} および C_D に関する値では着底衝撃力を過小に評価し部材強度の点から危険側になることがわかる。さらに各 f'_{max}/f_{max} の値を比較すると θ_r が小さいほど f'_{max}/f_{max} の値が大きくなり、特に $\theta_r = 0^\circ$ の場合、 C_{Na} に対して底面効果を考慮することにより着底衝撃力が現行の設計より約18~20%程度増加することがわかる。また、 C_D の変化に伴う f'_{max}/f_{max} の変化を見ると f'_{max}/f_{max} は C_D の増加に伴って増加するが、その増加量は $C_D = 0$ の場合を基準としても0.5~1.5%程度とそれほど大きいものではない。従って C_D に及ぼす底面効果は着底衝撃力の算定には無視できる程度のものであると

言ってもさしつかえなからう。それに反して、各 θ_f の f'_{max}/f_{max} に見られる θ_f の違いによる差異は図-3に示した C_{Na} の変化に起因したものであるから、 C_{Na} の底面効果については着底衝撃力を算定する際に考慮しなければならぬものと結論づけられる。

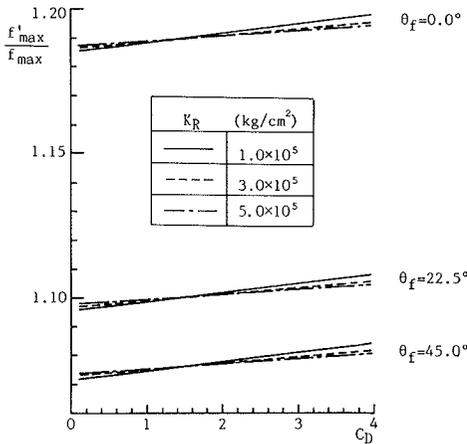


図-12 着底衝撃力に及ぼす付加質量係数及び抗力係数の底面効果の影響

4-3 着底時の魚礁の姿勢と着底衝撃力の関係

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-13に示すように魚礁の重心位置での落下速度 v_0 だけでなく、魚礁の接地点における回転による速度 U_θ の鉛直成分 v_θ も関係することになる。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_0 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。このような事柄より、ここでは前報の魚礁の落下挙動に関する計算結果並びに2で明らかにした θ_f の変化に伴

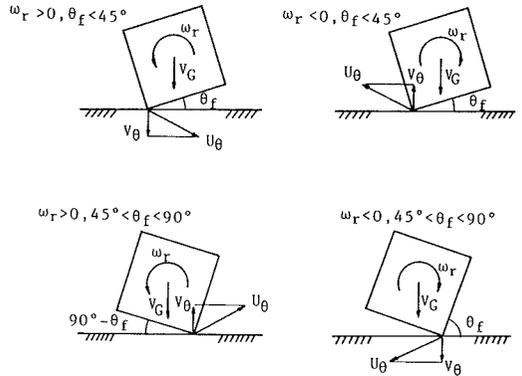


図-13 着底衝撃力に及ぼす魚礁の回転運動の影響の説明図

う付加質量係数の変化特性を用いて着底衝撃力に及ぼす魚礁の回転の影響について検討を加える。

図-14は、空隙率 $\gamma = 55.5\%$ の魚礁モデルを対象として回転運動および並進運動を考慮したときの着底衝撃力 f'_{Tmax} と現行の設計指針通り算定した衝撃力 f_{max} との比を魚礁の動揺パラメータ D_x/D_y について示したものである。この図より、まず着底衝撃力は D_x/D_y による変化(並進運動による影響)より回転運動による影響を大きく受け易いことがわかる。また同じ $r\omega/v_0$ において θ_f が小さい程 f'_{Tmax}/f_{max} の値は大きくなっているが、この原因は θ_f が0に近づくにつれて同じ回転速度であっても v_θ の値が大きくなるためである。一方、 $\theta_f = 45^\circ$ 前後では回転による速度 U_θ の方向が水平に方向に近づくことから、 U_θ の鉛直成分 v_θ が0に漸近するためと推定される。各 θ_f の f'_{Tmax}/f_{max} を見ると、 $\theta_f = 0^\circ$ の場合は $r\omega/v_0 = 0.7$ で2.4程度の値を示す。このようなことより、着底時魚礁の姿勢並びに回転の各速度は着底衝撃力に対して非常に重要なパラメータであると指摘できる。特に、その影響は空隙率の小さい魚礁ほど受け易く、また魚礁が面着地($\theta_f = 0^\circ$)するときにも最大となる。

以上のことより、着底衝撃力の算定には着底時の魚礁の姿勢、回転運動による落下速度の増加および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。そのための方法としては、まず著者らが開発した魚礁の落下挙動に関する予測手法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

魚礁の付加質量係数を求め、これらの結果を用いることによって本報告で説明したようにより正確な着底衝撃力の評価ができることになる。

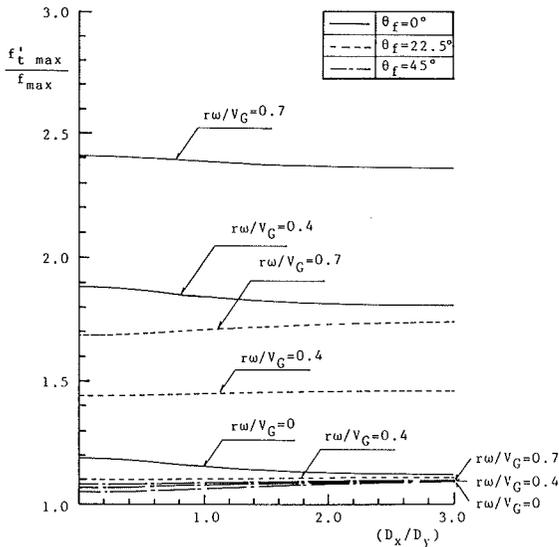


図-14 並進及び回転運動による着底衝撃力の変化

5 結論

本研究は、現行の魚礁沈設時の着底衝撃力の算定式に含まれる付加質量係数および抗力係数に対する底面効果、また着底時の魚礁の運動形態を考慮した着底衝撃力について検討を加えた。本研究によって得られた主要な結果を要約すると以下のようである。

(1) 魚礁の付加質量係数は、魚礁が底面に衝突するときには無限流体場の1.14~3.76倍の値をとることがポテンシャル理論に基づいた理論的考察より明らかになった。また、付加質量係数に及ぼす魚礁水平方向の動揺および回転運動の影響については、特に回転運動の影響が大きく、回転速度の増加に伴って減少する傾向を示す。

(2) 魚礁の抗力係数に及ぼす底面効果については、無孔魚礁の場合には底面の影響を受けて2程度まで増加することが明らかになったが、有孔モデルの場合には計算結果のバラツキが大きく明確結論を得るまでに至らなかった。

(3) 着底衝撃力を計算するときの付加質量係数および抗力係数については、中村・上北らの算定式中の付加質量係数および抗力係数に対して底面効果を考慮した場合と考慮しない場合の着底衝撃力の比較検討を行った結果、着底衝撃力の算定に当っては付加質量係数についてのみ底面効果を考慮した値を用いて行う必要があると結論できる。また、抗力係数については底面効果を考慮した場合と考慮しない場合の着底衝撃力の大きさに大差がなく、従来通りの値を適用してもさしつかえないと言える。

(4) 着底衝撃力に及ぼす着底時の魚礁の姿勢と回転の角速度の影響について検討した結果、特に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には現行の設計指針に基づいて算定される着底衝撃力より大きくなり、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

- 1) 日本水産資源保護協会：沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針（昭和59年度版），1984。
- 2) 中村 充・上北征男ら：海中落体の底面衝撃に関する研究，第22回海岸工学講演会論文集，pp.483~487，1975。
- 3) 赤井浩一著：土質工学，朝倉土木工学講座5，朝倉書店，pp.200。
- 4) 裕見吉晴・瀬山 明・横山忠弘：水中を落下する魚礁の付加質量係数に及ぼす底面効果，鳥取大学工学部研究報告，第18巻，第1号，PP.99-109，1987。
- 5) Matsumi, Y. and A. Seyama: The fundamental study to reduce the settled area of the fish aggregation devices on the sea floor thrown from a ship, Proc. 21st International Conf. on Coastal Eng., PP.2937-2951, 1988.
- 6) 今井 功：流体力学，前編，裳華房
- 7) 松浦義一：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-8-24，1973。