

海上投入法による魚礁の安定配置に関する研究

松見吉晴*・横山忠弘**・瀬山 明***

1. 緒 言

通常、魚礁ブロックの沈設は海上投入法によって行われる。そのため、設置精度の悪さ及び着底衝撃力による破損等が問題となっている。まず、設置誤差は、流体場の波浪運動及び落下に伴って発生する渦流による魚礁周辺の圧力変動に起因した回転と、それに伴う水平方向への動揺に原因するものと考えられる。また、投入時の魚礁の姿勢と落下挙動の関係を考えると、投入直後の魚礁の傾きによっては落下に伴う渦流の形成パターンが異なり、この結果、落下挙動は魚礁の初期姿勢の影響を受けて大きく変化することが予測できる。従って、投入時の魚礁の初期姿勢と落下途中の動揺特性の関係を明らかにすることは、投入法による設置精度の向上化のための有効な手段となり得るであろう。以上のことから、本研究は、落下している魚礁の回転運動と水平方向の動揺を考慮した落下挙動に関する予測手法の開発を行い、魚礁の初期姿勢と魚礁の動揺特性の関係を検討し、設置誤差を低減させる魚礁の初期姿勢を明らかにするものである。

一方、現行の設計指針¹⁾において着底衝撃力の評価は、中村ら²⁾の提案した算定式に基づいて行われている。その際、算定式に含まれる着底時の魚礁の付加質量係数及び抗力係数には、魚礁部材の形状に対応した従来の単一柱状物体の値が準用されている。しかし、これらの値を用いることは着底直前の流体抵抗に及ぼす底面効果を考えると妥当とは言えない。本研究は、これら流体力係数に及ぼす底面効果の影響を定量的に示すとともに、これら流体力係数に対する底面効果の影響を考慮した着底衝撃力について検討を加えた。

2. 魚礁の落下挙動の予測手法

2.1 解析方法

本解析方法の原理は、まず落下する魚礁周辺の圧力分布をポテンシャル論に基づき算定し、この圧力分布より求まる魚礁に作用する流体抵抗力と魚礁の落下に関する

運動方程式より落下挙動を予測するものである。その内容は、落下する魚礁周辺の流況には落下に伴って発生する渦流に対する渦糸モデル法と魚礁表面の境界表示に対する湧き出し分布法を用い、魚礁に作用する流体抵抗力は圧力方程式を介して算定している。

(1) 落下する魚礁周辺の流体場の表示

入射波には微小振幅波を仮定していることから、流体場の自由表面の変動がほぼ無視でき、直線に近似することができる。従って、落下している魚礁周辺の流況を表示する複素速度ポテンシャル ω_z は、物理平面を平板上に写像する Schwartz-Christoffel の定理と底面の境界表示に鏡像法を用いて、入射波、渦糸及び湧き出しの各複素速度ポテンシャル ω_W , ω_V , ω_R の重ね合わせとして次式のように表示することができる。

$$\omega_z = \omega_W + \omega_V + \omega_R \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$\omega_V = \frac{i}{2\pi} \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^N \Gamma_{jk} \{ \log(e^{Cz_{jk}} - e^{Cz}) - \log(e^{C\bar{z}_{jk}} - e^{C\bar{z}}) \} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\omega_R = \oint_0 D(z_0) G(z, z_0) dc \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに、 $C = \pi/h$ (h : 水深), P は渦糸の発生位置の個数 (ここでは $P=16$), z_{jk} , Γ_{jk} は j の剝離点位置より発生した第 k 番目の渦糸の位置とその循環 (右廻りを正), z_0 , $D(z_0)$ は魚礁表面上 c に分布させた湧き出しの位置とその強さ, $i = \sqrt{-1}$, $-$ は共役複素数を示す。また、 $G(z, z_0)$ は次式で与えられるグリーン関数である³⁾。

$$G(z, z_0) = \frac{1}{2\pi} \{ \log(e^{Cz_0} - e^{Cz}) + \log(e^{C\bar{z}_0} - e^{C\bar{z}}) \} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

式 (4) の $D(z_0)$ は、魚礁表面上における流体の法線方向の速度と魚礁表面の運動の法線方向の速度が等しくなる境界条件より、次式によって決定される。

$$R \left[\frac{\partial \omega_W}{\partial n} \right] + R \left[\frac{\partial \omega_V}{\partial n} \right] + R \left[\frac{\partial \omega_R}{\partial n} \right] = (u_G + u_r)n_x + (v_G + v_r)n_y \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここに、 n は魚礁表面上における外向きを正とする単位法線ベクトル ($n = n_x + i n_y$), $R[]$ は実数部を表す。 u_G , v_G は後述する魚礁の落下運動に関する運動方程式

* 正 会 員 工 修 鳥取大学助手 工学部海洋土木工学科

** 学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科

*** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

より求められる魚礁の重心位置での落下速度の x, y 方向成分を表す. u_r, v_r は魚礁表面上における魚礁の回転運動による回転速度の x, y 方向成分である. 式(5)の数値化に当たっては, 魚礁表面を線素分 $\Delta C_i (i=1 \sim M)$ に分割し, その各線素分の中点に湧き出し点を置き計算を行っている.

渦糸の循環は, Roshko の提案式に基づいて与え, 渦糸の循環は時間的に保存されるものとして計算を進めている. そして, 各渦糸の発生位置は, 魚礁モデルが角柱であることより流れの剥離点が部材の隅角部に固定されることを考慮し, 各隅角部より魚礁表面に直角に振動流の境界層厚さだけ離れた位置とした. その際, 発生位置の各隅角部からの方向は, 各隅角部からの流れの剥離現象を考慮して決定している.

(2) 流体抵抗力

落下している魚礁に作用する流体抵抗力は, 上述した魚礁周辺の流況に関する複素速度ポテンシャルと圧力方程式より算定できる. その際, 圧力方程式の速度ポテンシャルの時間微分項における湧き出しの強さの時間変化 $dD(z_c)/dt$ は, 式(5)を時間微分した条件式より決定される. そして, 図-1 に示す魚礁の各部材に作用する流体抵抗力の x, y 方向成分 F_{xi}, F_{yi} は, 算定された魚礁表面上の圧力の周辺積分によって求まる.

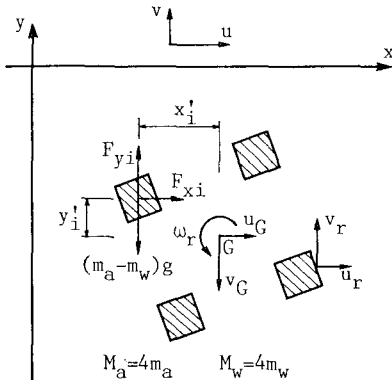


図-1 運動の条件

(3) 落下する魚礁の運動方程式

落下する魚礁の水平, 鉛直方向並びに回転に関する運動方程式は, それぞれ図-1 を参照して次式のように表示できる.

$$\left. \begin{aligned} M_a \frac{du_g}{dt} &= \sum_{i=1}^4 F_{xi} \\ M_a \frac{dv_g}{dt} &= \sum_{i=1}^4 F_{yi} - (M_a - M_w)g \\ I_r \frac{d\omega_r}{dt} &= \sum_{i=1}^4 (x'_i F_{yi} - y'_i F_{xi}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに, M_a, M_w は魚礁の単位幅当りの質量及び水に換算した質量, g は重力加速度, I_r は重心まわりの慣性

モーメント, ω_r は角速度 (左廻りを正), x'_i, y'_i は流体力の作用位置と魚礁の重心位置との x, y 方向の距離である. なお, 式(6)の数値計算には1次の差分式を適用した.

2.2 落下挙動の予測手法の再現性

検証実験は, 長さ 25 m, 幅 60 cm, 深さ 1 m の2次元造波水槽で行った. 魚礁モデルは, 1辺が 1 cm の正方角柱部材 4 本からなる有孔モデル (図-1 参照) で, 1辺 a が 3 cm, 空隙率 γ が 55.5%, 比重が 1.38 (塩化ビニール樹脂) である. なお, 2次元の落下挙動が得られるように魚礁モデルの軸方向の長さを水槽の幅に近づけた. そして, 落下の方法は人為的な誤差ができる限り混入しないように静水面下 4 cm の位置から投入し, 落下挙動はストロボ光源を用いて写真撮影した.

実験より得られた魚礁の落下挙動は不規則性を示すため, 落下の軌跡そのものについて計算結果と実験結果を比較することは不可能である. 本研究では, 落下挙動の特徴である魚礁の回転運動と水平方向への動揺に着目して本予測手法の妥当性を検証することにした. 魚礁の回転に伴う横揺れの指標としては, 図-2 に模式的に示すように魚礁の水平方向への移動距離 D_x を鉛直方向の落下距離 D_y で除した D_x/D_y で表示することにした.

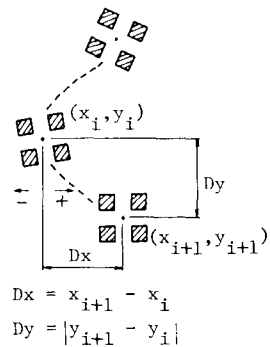


図-2 魚礁の動揺量の説明図

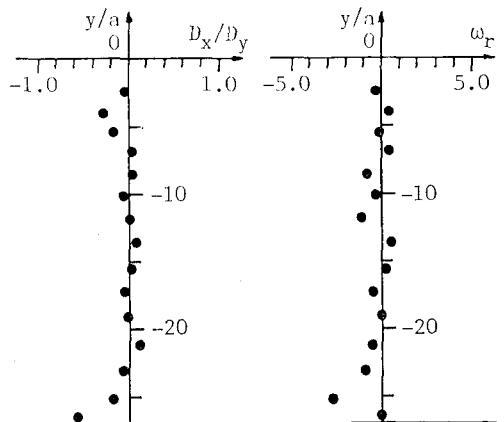


図-3 水平動揺量及び角速度の実験結果

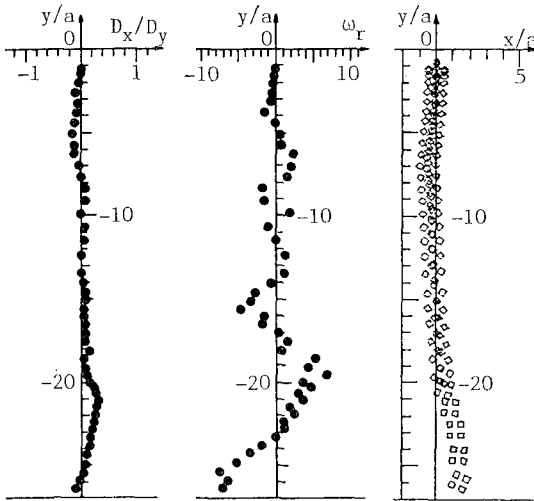


図-4 水平動揺量、角速度及び落下軌跡の計算結果

図-3は、投入時の魚礁の初期角 $\theta_0 = 45^\circ$ の実験結果の D_x/D_y 及び ω_r の水深方向の変化を示したものである。この図より魚礁の落下挙動の特徴をみると、 D_x/D_y と ω_r の水深方向の変化にみられる変曲点の間には、明確なタイムラグが認められる。このタイムラグは、魚礁の落下運動における慣性運動のため、角速度の変曲に対して魚礁の横揺れが瞬時に対応しないことに原因するものである。一方、図-4は上述した実験条件に対応した計算結果の D_x/D_y 及び ω_r の水深方向の変化並びに落下の軌跡を示したものである。この図より、 D_x/D_y の値より判定できる魚礁の横揺れの方法は、 ω_r の符号の変化とよく対応していることがわかる。また、 ω_r と D_x/D_y の変曲点の間にはタイムラグが認められ、上述した実験結果の図-3にみられた現象を良く再現している。以上のことより、本解析手法は回転運動に伴う水平方向の動揺現象をほぼ再現できるものと判断できる。

3. 投入時の魚礁の姿勢と落下挙動の関係

ここでは、設置精度の向上を図るための魚礁の初期姿勢について、先の図-4に示した $\theta_0 = 45^\circ$ の結果、並びに $\theta_0 = 0^\circ$ 、 22.5° の計算結果を示した図-5より考察する。まず、落下の軌跡の結果より、何れの θ_0 においても

$y/a = -8$ 付近まで真下に落下しているが、それ以後での落下の軌跡には θ_0 の差が明確に現れることがわかる。従って、投入時の魚礁の初期姿勢が着底時の散乱範囲を規定する重要なパラメーターであると指摘できよう。

次に、 ω_r の水深方向の変化をみると、図-5の場合の ω_r は連続的に同一符号を示しながら落下することから、この結果 D_x/D_y も同一符号を取り、落下の軌跡に水平方向の片揺れが認められる。一方、図-4の $\theta_0 = 45^\circ$ の場合、 ω_r の値は $\theta_0 = 0^\circ$ 、 22.5° の場合とそれほど大差は認められないが、 ω_r の符号は落下に伴って正負に周期的な変動を示している。そこで、魚礁の水平方向の動揺が回転運動に関係づけられること、回転の方向が魚礁の横揺れの方法を規定するパラメーターであることを考慮すると、回転の方向が周期的に変動することは魚礁の同一方向への慣性運動が同一方向の回転を連続的に有する場合に比べて弱いと推定される。従って、 $\theta_0 = 45^\circ$ の場合、魚礁の落下の軌跡は左右への横揺れを示すものの、その揺れ幅は小さく、結果的に魚礁の落下挙動

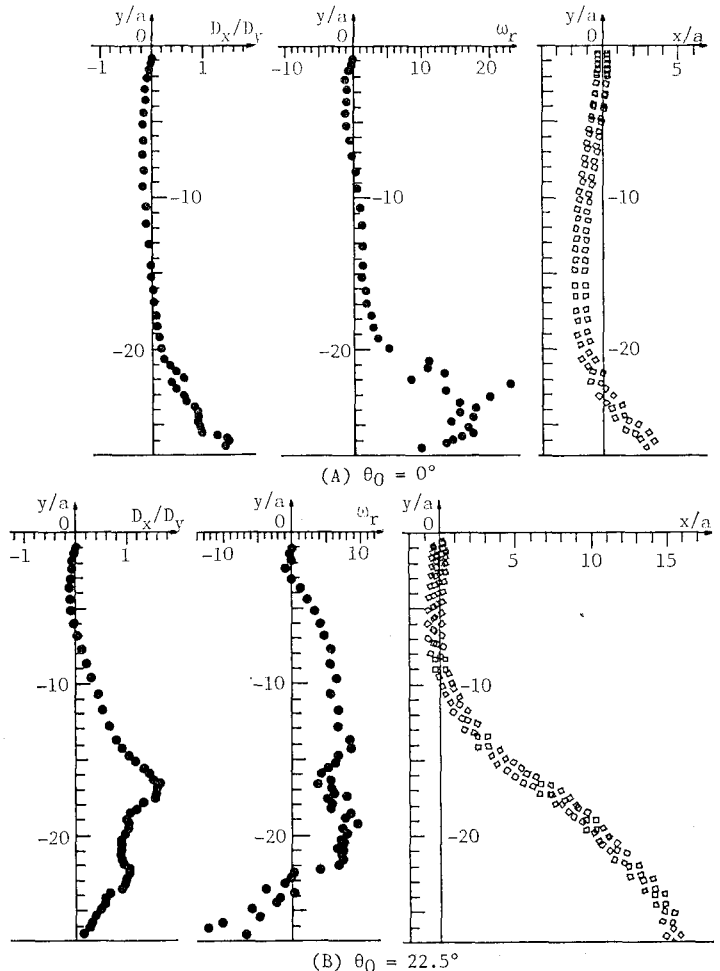


図-5 各初期角における動揺量、角速度及び落下軌跡の水深方向の変化

は y/a 軸を中心軸としてはほぼ真下に落下する傾向を示す。さらにまた、入射波の周期を変化させた計算結果 ($T=0.8, 1.5$ 秒) においても、 $\theta_0=45^\circ$ の場合の ω_r は入射波の周期に関係なく上述した符号の周期的な反転を示すことが認められたので付記しておく。以上の事柄より、魚礁の落下に伴う回転運動が魚礁の横揺れを引き起して着底時の設置誤差の原因となることを考えると、投入法により沈設される魚礁の設置精度の向上を図る方法としては、投入時の魚礁の初期姿勢として魚礁を静水面に対して 45° 傾けることが散乱範囲を極力狭める方法と結論付けられる。

4. 着底衝撃力について

4.1 流体力係数 (C_{MA} , C_D) に及ぼす底面効果

従来、流体場を運動している物体の付加質量係数 C_{MA} の算定法には、ポテンシャル論に基づいて作用流体力から求める方法と、物体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から求める方法⁴⁾がある。ここでは、後者の方法に基づき魚礁を自由落下させたときの魚礁の回転運動及び水平方向の動揺を考慮せずに落下している魚礁の C_{MA} を求めることにした。その際、流体場としては固定底面を有する半無限の静止流体場を対象とし、魚礁表面の境界表示には湧き出し分布法、底面の境界表示には鏡像法を適用して解析を行った。

図-6 は、 C_{MA} の魚礁の重心位置と底面との距離 h_q による変化を示したものである。まず、同図中の表より無限流体場 ($h_q/a=\infty$) における $\gamma=0\%$ の C_{MA} 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⁵⁾と一致し本解析手法の妥当性が確認できる。この図より C_{MA} の h_q/a による変化をみると、 $h_q/a=4$ 以上では C_{MA} の h_q/a による変化はほとんどない。逆

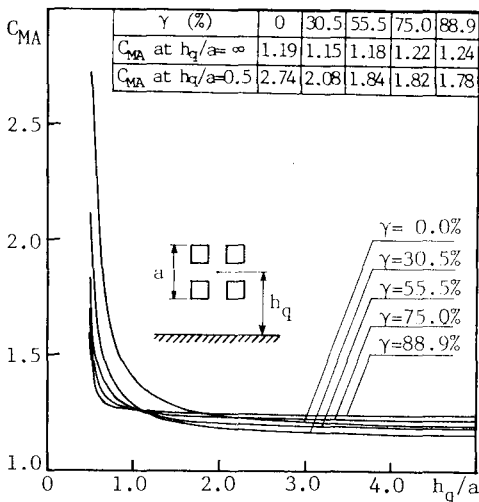


図-6 付加質量係数の水深方向の変化

に、底面に近づくとき空隙率の小さいものから順に底面の影響を受け始めて C_{MA} の値が急激に増大する。そして、 $h_q/a=0.5$ では、各 γ の C_{MA} は $h_q/a=\infty$ における C_{MA} の値の 1.4~2.3 倍の値をとることになる。また、空隙率の小さいものから底面の影響を受け始めたことについては、同じ落下速度で空隙率の異なる魚礁の場合、周辺の流体粒子の移動速度には差が生じることになり、この差が各空隙率の C_{MA} の h_q/a による変化特性に差が現われたものと推測される。

一方、抗力係数 C_D については、2. で述べた落下挙動の計算結果の魚礁に作用する流体抵抗力にモリソン式を適用し、上述した付加質量係数を用いることにより求められる。ただし、2. で算定された流体抵抗力には、魚礁

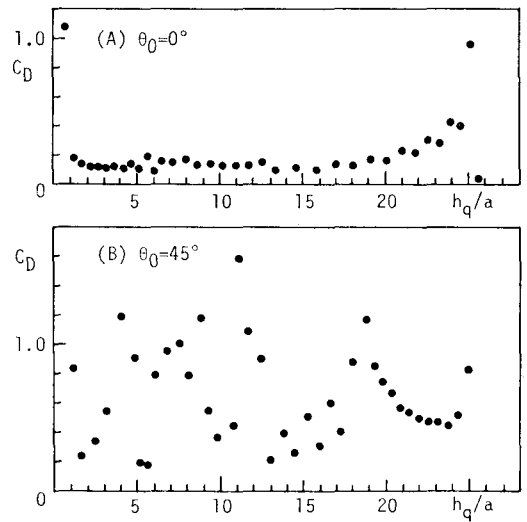


図-7 抗力係数の水深方向の変化

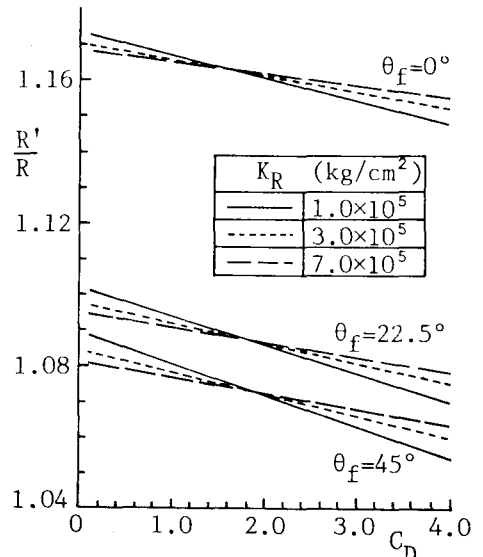


図-8 着底衝撃力に及ぼす C_{MA} , C_D の底面効果の影響

の回転に伴う落下方向と直角方向に作用する流体力の鉛直方向成分も含まれるため、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流体抵抗力を新たに計算して抗力係数を求めることにした。図-7 は、このようにして求めた $\gamma=55.5\%$ の抗力係数 C_D の h_q/a による変化を示したもので、(A)、(B) はそれぞれ魚礁の投入時の初期角が $\theta_0=0^\circ$ 、 45° の場合である。この図より、(A)、(B) 共に C_D に及ぼす底面効果を明確に見いだすことができないが、 C_D の h_q/a による変化特性としては、同じ空隙率であっても、魚礁の落下姿勢によって渦流の形成パターンが異なることから、両者の間に明確な違いが現れることが確認できる。また、本計算結果が通常の角柱物体の $C_D=2$ と比較してかなり小さい値を示す。この点に関しては、次に示す図-8 の C_D の変化に伴う着底衝撃力の変化で論議する。

4.2 流体力係数に対して底面効果を考慮した着底衝撃力

ここでは、魚礁の着底衝撃力を中村ら²⁾の算定式に基づき計算する場合、算定式中の付加質量係数及び抗力係数に対して底面効果を考慮することにより、着底衝撃力に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、着底衝撃力の算定式に含まれる魚礁の終端落下速度は、中村らと同様に落下運動に関する運動方程式の落下加速度項をゼロとして計算して与えた。

図-8 は、 $\gamma=55.5\%$ の魚礁を対象として、 C_{MA} 及び C_D に底面効果を考慮したときの衝撃力 R' と現行の設計指針通り $C_{MA}=1$ 及び $C_D=2$ としたときの衝撃力 R の比を地盤の反力係数 K_R をパラメーターにとって示したもので、魚礁の底面への衝突入射角 θ_f を 0° 、 22.5° 、 45° と3種類変化させている。なお、図中の横軸の C_D の値は、図-7 において $C_D=0.1$ 程度の値が得られたことを考慮して 0.1 から 4.0 まで変化させた。この図より、各 θ_f の R'/R は C_D の値に関係なく 1 以上の値を示し、現行の設計指針で規定されている C_{MA} 及び C_D の値では着底衝撃力を過小に評価することが指摘できる。さらに、各 θ_f の R'/R の値を比較すると、 θ_f が小さいほど R'/R の値が大きくなり、特に $\theta_f=0^\circ$ の場合、

C_{MA} の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指針より $15\sim 17\%$ 程度も増加することになる。

また、 C_D の変化に伴う各 θ_f における R'/R の変化は C_D の増加に伴って減少するが、その減少量は $0.02\sim 0.03$ 程度とそれほど大きい値ではない。従って、 C_D に対する底面効果は、着底衝撃力の算定に対して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 R'/R にみられる θ_f による差異は、 θ_f の変化に伴う C_{MA} の変化に起因したものであるから、 C_{MA} に及ぼす底面効果は着底衝撃力に対して考慮する必要があると結論付けられる。

5. 結 語

本研究の結果を要約すると以下のようである。

(1) 魚礁沈設時の投入法による設置精度の向上化を目的として開発した魚礁の落下挙動に関する予測手法の妥当性が検証された。この予測手法に基づいて投入時の魚礁の初期姿勢と落下途中の魚礁の動揺特性を検討した結果、静水面に対して 45° 傾けて投入した場合が落下途中の魚礁の回転運動の方向が短い周期で反転し、散乱範囲を狭める効果がある。

(2) 現行の着底衝撃力の算定式に含まれる着底時の魚礁の流体力係数については、特に付加質量係数が無限流体場における値の $1.4\sim 2.3$ 倍まで増大する。

(3) 着底衝撃力の算定式に含まれる流体力係数に対して底面効果を考慮することにより、着底衝撃力は現行の設計指針より $15\sim 17\%$ 程度増大する。

参 考 文 献

- 1) 全国沿岸漁業振興開発協会：沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針（昭和59年度版），1985。
- 2) 中村 充・上北征男ら：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. 433～487，1975。
- 3) 中村孝幸・楳本太司・石本浩司：隅角部を有する浮体構造物まわりの渦形成と作用波力の算定法，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 415～419，1983。
- 4) 例えば、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。
- 5) 土木学会編：水理公式集，1986。