

底開式バージから投入された捨石粒子群の 堆積形状に関する研究

小田 一紀*・沢田 充弘**・樋口 俊光***・岩田 潔****

1. ま え が き

防波堤などの基礎マウンドは捨石を底開式バージから投入して築造されるのが一般的であるが、所定の形状のマウンドを効率よく造るには投入した捨石粒子群の堆積形状をできる限り正確に予測する必要がある。特に、今後、構造物が大水深海域に築造される機会が増え、潜水夫などによる断面の整形が困難になることを考えると、この予測法の確立はこれらの事業の合理的、経済的な推進のために不可欠なことである。この研究の成果は、沖合漁業資源の増殖対策の一つと考えられている湧昇流発生用の大規模な人工丘状堆の築造にも役立つと考えられるが、この種の研究例は比較的少なく、特に堆積形状の理論的な予測式の提案にまで至った研究例はほとんど見当たらない。筆者らは、このような観点に立ち、2次元拡散理論を適用して底開式バージから投入された捨石粒子群の堆積形状の予測式を導き、その適用性に関する研究成果を第31回海岸工学講演会¹⁾で発表した。今回は研究をさらに進め、3次元拡散理論に基づき、1000 m³型底開式バージを対象として堆積形状の予測式を導くとともに、水槽実験によって堆積形状に及ぼす投入条件の影響を調べ、実用的な堆積形状の予測式を提案する。また、縮尺の異なる実験によって縮尺影響を調べ、捨石粒子群の堆積形状に関する水理実験の相似則をも明らかにする。

2. 堆積形状の予測式

z 方向に一樣で、一定な流速 W_0 を有する流れの中の物質の拡散方程式は一般に次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + W_0 \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t : 時間、 x, y, z : 空間座標、 C : 物質濃度、 K_x, K_y, K_z : それぞれの座標軸方向の拡散係数。

ここで、バージから投入された捨石粒子群の沈降、散乱挙動を近似的に z 方向（水深方向）に一定な速度 w_0 で沈降する等方的な拡散現象とみなし、且つ z 方向に速度 w_0 で移動する座標系 $(x, y, z_1 = z - w_0 t)$ を用いると、式 (1) は次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z_1^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 K は拡散係数で、各軸方向に一定と仮定している。

バージ開口部からの捨石投入を想定して、図-1 に示すような、幅 $2a$ 、長さ $2b$ の矩形面源からの瞬間投入の場合の解を初期条件

$$C(x, y, z_1, 0) = \begin{cases} m_0 \delta(z_1) & : |x| \leq a, |y| \leq b \\ 0 & : |x| > a, |y| > b \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

の下で導くと、

$$C(x, y, z_1, t) = \frac{m_0}{8\sqrt{\pi K t}} \exp \left\{ - \left(\frac{z_1}{2\sqrt{K t}} \right)^2 \right\} \times \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{a-x}{2\sqrt{K t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{a+x}{2\sqrt{K t}} \right) \right\} \cdot \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{b-y}{2\sqrt{K t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{b+y}{2\sqrt{K t}} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $m_0 = W/4ab$: 初期濃度、 W : 瞬間投入重量、 $\delta(z_1)$: Dirac のデルタ関数、 erf は誤差関数を表す。

式 (4) は瞬間投入に対する濃度分布の時間変化を表すが、実際の投入は有限時間 τ_0 の間の連続投入であるので、その投入量の時間変化を $f(\tau)$ で表すと、 $f(\tau)$ に対する水中における濃度分布の時間変化 C_t は、線形応答の仮定の下で、Duhamel 積分を適用すると

$$C_t(x, y, z_1, t) = \int_0^{\tau_0} C(x, y, z_1, t-\tau) f(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。

水底 $z = h$ における捨石の堆積高さ $d(x, y)_{z=h}$ は、

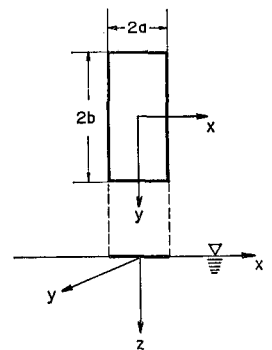


図-1 座標系

* 正 会 員 工 博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 ** 工 修 大阪市交通局
 *** 学生会員 大阪市立大学大学院
 **** 正 会 員 東洋建設株式会社 技術研究所

碎石が着底後その慣性によって移動しないものと仮定すると、 $z=h$ を通る水平面 ($x-y$ 平面) 上の点 (x, y) における単位面積を単位時間に通過する粒子量 (mass flux) $q=w_0 C_t - K \cdot \partial C_t / \partial z$ を $0 < t < \infty$ の区間で時間積分した量を粒子群の見かけの単位体積重量 γ_0 で割ることによって結局式 (6) のように得られる。

$$d(x, y)_{z=h} = \frac{W_t}{64\gamma_0 ab \sqrt{\pi}} \frac{h}{w_0} \frac{1}{\sqrt{K_w/h}} \\ \times \int_0^{\hat{t}} (\hat{t} - \hat{\tau})^{-3/2} (1 + \hat{t} - \hat{\tau}) \\ \times \exp \left\{ -\frac{1}{4K_w/h} \frac{(1 - \hat{t} + \hat{\tau})^2}{\hat{t} - \hat{\tau}} \right\} \\ \times \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{(a-x)/h}{2\sqrt{K_w/h} \sqrt{\hat{t} - \hat{\tau}}} \right\} + \operatorname{erf} \left\{ \frac{(a+x)/h}{2\sqrt{K_w/h} \sqrt{\hat{t} - \hat{\tau}}} \right\} \right] \\ \times \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{(b-y)/h}{2\sqrt{K_w/h} \sqrt{\hat{t} - \hat{\tau}}} \right\} + \operatorname{erf} \left\{ \frac{(b+y)/h}{2\sqrt{K_w/h} \sqrt{\hat{t} - \hat{\tau}}} \right\} \right] \\ \times f(\hat{\tau}) d\hat{\tau} d\hat{t} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 W_t : 投入粒子群の総重量、 $\hat{t}=w_0 t/h$ 、 $\hat{\tau}=w_0 \tau/h$: 無次元時間、また $K_w=K/w_0$: 粒子群の拡散係数と平均沈降速度に関係し、拡がりやすさを表す有次元パラメータ (cm または m) であるが、 K および w_0 ともは実験によって決定しなければならぬ未知量であり、しかも w_0 は明確には決め難い量であるので、ここでは2つの未知量をブラックボックス的に、便宜上1つの未知量として取扱い、これを拡がり係数と呼ぶことにする。

3. 実験方法

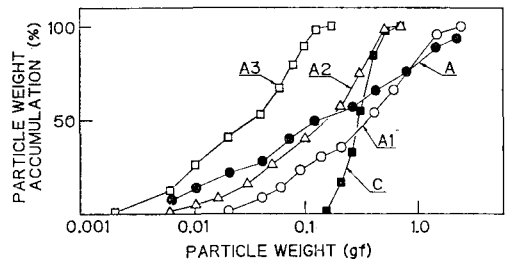
本研究では大きく分けて2種類の水槽実験を行った。1つは堆積形状の予測式の適用性および堆積形状に及ぼす碎石の単位時間当りの投入量、重量分布などの投入条件の影響を調べてみるため、他は実験の縮尺影響を調べるために行った。前者は縮尺 1/60 で、1.5 m × 1.5 m × 1.2 m (高さ) のガラス張り鋼製水槽を用いて、後者は、さらに縮尺 1/20 で、5.0 m × 7.5 m × 3.5 m (高さ) のコンクリート水槽をも用いて行った。

模型バージは何れも 1 000 m³ 型底開式バージの実物とほぼ相似に作り、その喫水が平均喫水 (満載喫水と軽荷喫水の中間喫水) に一致するように水面上から支え、その支持材をロードセルに連結した。底扉の開放は、縮尺 1/60 実験では小型モータによって制御し、開扉幅、開扉速度の測定は底扉の回転軸に取り付けたポテンシオメータで行い、1/20 実験では油圧シリンダーによって制御し、開扉速度は設定された最大開扉幅までに要する時間をストップウォッチで測定して平均速度を求めた。捨石の投入量の時間変化は何れもロードセルによって測定した。堆積マウンドの形状の測定は、1/60 実験では水面から目盛棒を降して、1/20 実験では連続砂面測定器によって予め設定した断面毎に行った。また、現象の

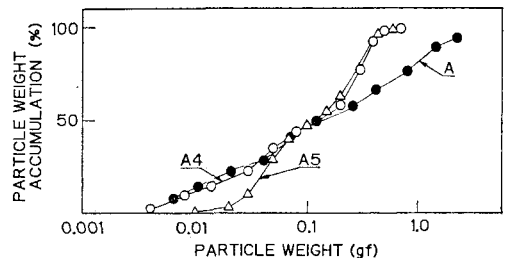
解明を助けるため、ビデオカメラによって粒子群の沈降速度、散乱幅、連行流の速度などを観測した。

水深は何れも現地で 60 m を基準としたが、縮尺 1/60 実験では水深影響をも調べるため現地で 24 m ~ 60 m の範囲で水深を変化させた。

捨石模型は碎石を用い、縮尺 1/60 実験ではその重量分布の影響を調べるため、図-2 (a) に示すように重量分布特性の異なる5種類の材料を標準として用いた。このうち、Cは粒径のかなり揃った材料、Aは現地標準材料に相似な材料、A₁、A₂およびA₃は重量分布曲線の形状がほぼ相似な材料 (相似粒度材料) である。さらに、細粒分の影響を調べるため、同図 (b) に示すように、W₅₀ (通過重量百分率が 50% における碎石単体重量) 以上の重量分布はほとんど同じであるが、それ以下の分布が異なる A₄ および A₅ 材料を加えた。



(a)

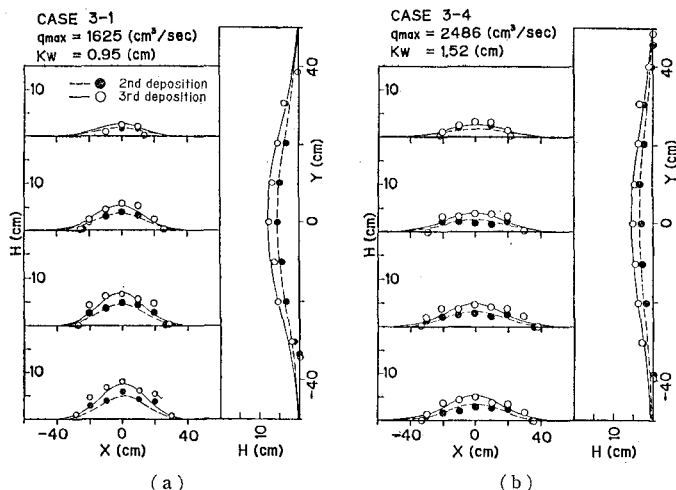


(b)

図-2 実験に使用した材料の重量分布

4. 予測式の適合性

まず、式 (6) で計算される堆積形状が実験結果とどの程度一致するかを調べる。図-3 は、A₁ 材料を同一地点で4回連続投入したときの、2投目と3投目の累積堆積形状について、実験結果と予測式による計算結果を比較したものである。ただし、この計算結果は、1投目を除く各投入毎の堆積形状に最も適合するような予測式中の未知定数 K_w の値を最小自乗法によって逆算的に求め、それらの平均値を用いて計算したものである。同図 (a) および (b) は、後述の単位時間当りの最大投入量 $q_{\max}$ が、それぞれ 1 625 cm³/sec および 2 486 cm³/sec の場合の比較図であるが、これらの図から明らかなよう



図—3 堆積形状の計算値と実験値の比較

に、両者とも計算結果は実験結果とほぼ一致していると言える。図—3 は比較の一例を示したものであるが、他の材料の場合もほぼ同じ結果を得た。ただし、細粒分の多い A 材料や A₄ 材料では、 $q_{\max}$ の大きい場合は沈降時の連行流の影響によって、横に拡がりやすく、実験結果は中央部が平坦で、両肩がやや盛り上がる傾向を持ち、予測式の適合性は若干低下することが見出された。

5. 堆積形状に及ぼす投入条件の影響

5.1 単位時間当りの最大投入量 $q_{\max}$ の影響

同一捨石材料、同一水深条件であっても、バージ低扉の開扉速度および最大開扉幅によって堆積形状はかなり異なる。この開扉速度と最大開扉幅の変化は結局捨石投入量の時間的な変化に集約され、時間変化曲線が同一であれば同一の堆積形状を生じた。また、投入開始から終了までの投入時間 t_f が短いと堆積形状は偏平に、長いと山の高いものになった。このことは安濃²⁾や奥山ら³⁾の指摘したとおりである。しかし、例えば投入時間が異って

も、図—4 に示すように、投入量の時間変化曲線における最大勾配、すなわち単位時間当りの最大流出量 $q_{\max}$ さえ同じであれば堆積形状はほぼ同じになることが筆者らの実験で見出された。

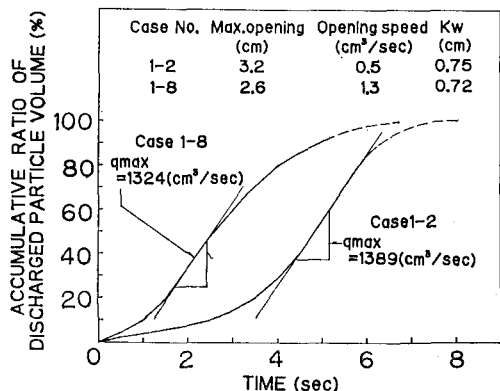
図—4 は C 材料を用いた実験における投入量の時間変化曲線の一例を示すが、CASE 1-2 と CASE 1-8 の投入時間は異なるが、その時間変化曲線の最大勾配、すなわち単位時間当りの最大投入量 $q_{\max}$ はそれぞれ 1389 cm³/sec および 1324 cm³/sec とほぼ等しく、その結果拡がり係数 K_w もそれぞれ 0.75 cm および 0.72 cm とほぼ等しく、したがって堆積形状もほぼ一致することを示している。他の CASE についても同様な結果が見出され、開扉速度

などの諸々の投入条件は $q_{\max}$ に集約されることが明らかとなった。そこで、各材料について $q_{\max}$ とその堆積形状を特徴づける拡がり係数 K_w との関係を、後述する材料の重量分布を特徴づける指標 W_{30} をパラメータとして表すと 図—5 (a) に示すとおりであり、これらの間には一義的な関係が見出され、 $q_{\max}$ が大きいほど K_w は大きくなる。すなわち堆積形状が偏平になることがわかる。

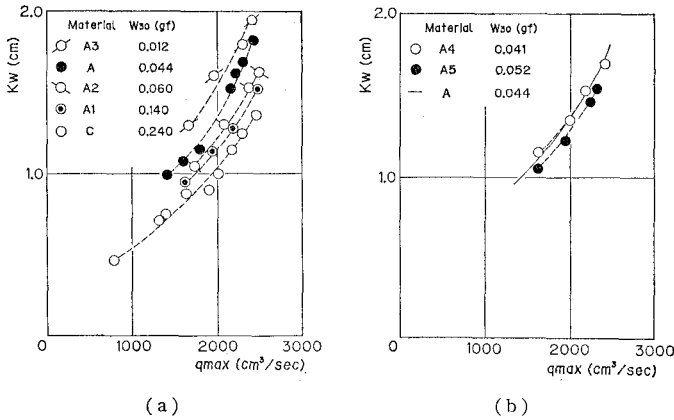
5.2 投入材料の重量分布の影響

捨石粒子群の水中落下過程を VTR で観測した結果、材料中の細粒分（ここでは一応 $W < 0.13$ gf を意味することとする）の量が多くなると粒子群の投入初期における単位時間当りの投入量が比較的大きくなり、このため粒子群の沈降速度が速くなることが見出された。このことは、沈降過程での粒子群の拡がりを大きくすると同時に、着底前の運動量も大きくし、結果として着底後の粒子群の横への拡がりを増大させることになる。また沈降に伴う連行流の速度をも速め、したがって、水底付近において比較的大きな水平流が発生し、粒子群の拡がりを一層増大させることになる。そこで、細粒分の影響を表す指標として何が適しているかを検討するため、各材料の W_{10} , W_{20} , W_{30} , W_{40} および W_{50} の値と堆積マウンドの拡がりやすさとの関係を調べたところ、表—1 に示すような結果を得た。

表—1 中の材料名の欄には拡がりやすさを表す指標としての K_w の値の大きい順に材料名を記してあり、() 中の数字はその順位を表している。一方、例えば W_{10} の欄における () 中の数字は、その欄における W_{10} の値の小さい順番を示している。この両者を比較すると、両者の順位が一致しているのは W_{30} であることがわかる。このことは、 W_{30} の値が小さい材料ほど堆積マウンドが



図—4 捨石投入量の時間変化曲線

図-5 K_w と q_{max} の関係表-1 各材料の拡がりやすさ順位と通過重量百分率 W_n の順位との関係

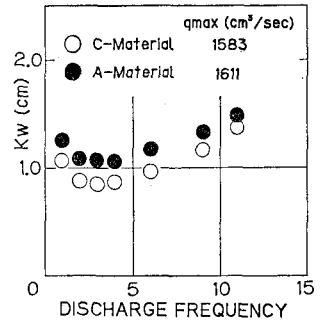
材料名	W_n	W_{10} (gf)	W_{20} (gf)	W_{30} (gf)	W_{40} (gf)	W_{50} (gf)
A3 (1)		0.005 (1)	0.008 (1)	0.012 (1)	0.019 (1)	0.035 (1)
A4 (2)		0.008 (2)	0.024 (3)	0.041 (2)	0.065 (2)	0.13 (2)
A (3)		0.008 (2)	0.019 (2)	0.044 (3)	0.075 (4)	0.13 (2)
A5 (4)		0.03 (5)	0.04 (5)	0.052 (4)	0.074 (3)	0.13 (2)
A2 (5)		0.02 (4)	0.036 (4)	0.06 (5)	0.1 (5)	0.16 (5)
A1 (6)		0.037 (6)	0.072 (6)	0.14 (6)	0.25 (6)	0.35 (7)
C (7)		0.18 (7)	0.21 (7)	0.24 (7)	0.27 (7)	0.29 (6)

拡がりやすいということを意味しており、粒子材料の重量分布の影響を表す指標としては、 W_{50} などよりは W_{30} 程度が適していると言える。図-5 (a) および (b) は、 q_{max} の値が同じであれば W_{30} の小さい材料ほど K_w の値が大きくなることを明瞭に示している。

5.3 投入回数の影響

現地での投入回数は同一地点投入の場合には多くても 5 投までであるが、粒子群の挙動の解明を助けるため、11 投までの実験を行った。使用した材料は A 材料および C 材料であり、 q_{max} はそれぞれ 1 611 cm³/sec および 1 583 cm³/sec と一定に保った。これらの実験からそれぞれの材料に対する K_w と投入回数との関係を求めて示すと、図-6 のごとくである。

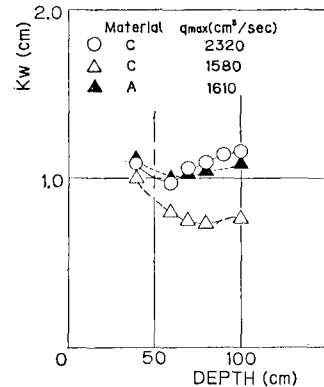
この図から、どちらの材料の場合も、1 投目の K_w は 2 投、3 投および 4 投目の K_w より大きくなっているが、これは、1 投目は捨石が比較的摩擦係数の小さな水槽底面(鋼板)に直接落下するので他に比べて横へ拡がりやすいためであろう。また、6 投目以後は、 K_w は直線的

図-6 K_w と投入回数の関係

に増加しているが、これは堆積マウンド上に落下した捨石がマウンド斜面を転がり落ちるためであろうと考えられる。

5.4 水深影響

前節と同様に、A 材料と C 材料を用い、 q_{max} を一定に保って投入実験を行ない、 K_w と水深の関係を求めたものが図-7 である。この K_w は 2 投目~4 投目の平均値を表わす。図-7 によれば、各ケースともある水深を境にして、それより浅い水深では水深の増大とともに K_w が減少するが、それより深くなると緩やかに増大し、1.0 m 程度(現地で 60 m) 以上になるとほぼ一定値に収束する傾向がある。

図-7 K_w と水深の関係

6. 捨石投入実験の相似則

安濃²⁾は堆積形状に関して、留萌港および苫小牧港における捨石投入実験の結果と模型実験の結果を比較して、フルード則適用のもとで両者が比較的良好に一致することを見出しているが、1 回投入の実験であるのでデータのばらつきが大きく、精度的に若干の問題が残されている。また、奥出ら³⁾は捨石投入模型実験の相似性について、これに影響を及ぼす種々の因子の考察を行っているが、実験結果に及ぼす縮尺影響の検討や現地実験結果との比較が不十分で、この種の水利実験の相似則に關す

る明解な結論を示していない。

さらに、以上の模型実験の縮尺は何れも $1/15$ と $1/25$ と比較的大きい。この種の実験では、特に大型石運船 (1000 m^3 型) を対象とする場合には、縮尺が大きいと多量の捨石材料が必要となり、多大な労力と時間を要する。この点を考慮して、筆者らは比較的簡単に、短時間でできる縮尺 $1/60$ の小縮尺実験を行い、堆積形状に関して縮尺 $1/20$ 実験の結果と比較し、縮尺影響を調べた。

捨石模型として、縮尺 $1/60$ 実験では図-2に示した比較的均一な重量分布を有するC材料および現地標準材料に相似なA材料を用い、縮尺 $1/20$ 実験では、これらと現地換算値がほぼ一致する材料をそれぞれ用いた。

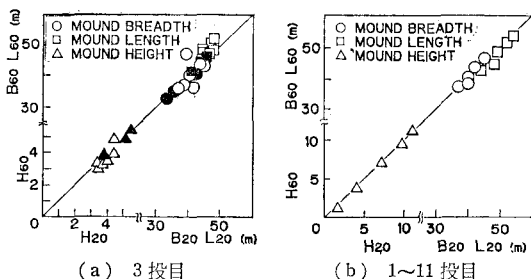


図-8 堆積形状に関する縮尺 $1/60$ と $1/20$ の実験結果の比較

図-8 (a) は、フルード則で現地換算した $q_{\max}$ の値がほぼ同じ場合の堆積マウンドの幅 B 、長さ L 、高さ H について両縮尺実験の結果を現地換算して比較したものである。ただし、同一地点 3 投目の測定結果に基づいている。また、 $q_{\max}$ 範囲は、現地換算値で、 $q_{\max} = 38.7 \sim 68.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。図中の黒印は C 材料に対する実験結果を示す。また、図-8 (b) は $q_{\max} = 44.8 \sim 46.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ とほぼ一定にして、同一地点で 1 投、3 投、6 投、9 投および 11 投目の堆積マウンドについて比較したものである。これらの図によれば、 $q_{\max}$ の値および投入回数に係わらず、両縮尺実験の結果はよく一致しており、本実験の範囲内では堆積形状に関して縮尺影響は見られないと言える。以上のことから、捨石のような大粒径の粒子群の投入実験にはフルード則を適用することができると言える。また、この種の実験は、少なくとも

$1/60$ の小縮尺実験も可能であることが明らかとなった。

7. 結 論

本研究の結果、以下のような結論を得た。

- 1) 3次元拡散理論に基づいて導かれた捨石粒子群の堆積形状を求める予測式は、着底後の石の慣性による移動および粒子群の沈降にともなう連行流の影響を考慮していない不完全なものであるが、実際の投入条件をも含む本実験条件の範囲内では、式中の拡がり係数 K_w の値を適切に選ぶ限り、実験結果とほぼ一致した計算結果を与える。
- 2) 拡がり係数 K_w は主として粒子群の単位時間当りの最大投入量 $q_{\max}$ および重量分布曲線における W_{80} の値に支配される。しかし、水深が現地で $50 \sim 60 \text{ m}$ 以上になると水深の影響をほとんど受けず、また投入回数が $2 \sim 4$ 投の範囲内では投入回数の影響もほとんど受けない。
- 3) フルード則を適用して行った実験の結果、堆積マウンドの高さ、幅、長さなどの堆積形状に関して、縮尺 $1/60$ と $1/20$ の実験結果はよく一致し、安濃²⁾および奥出ら³⁾が指摘したようにこの種の実験にフルード則が適用できることが再確認された。
- 4) 以上の結果、底開式バージより投入された捨石粒子群の堆積形状は、水深が $50 \sim 60 \text{ m}$ 以上の大水深海域では、主として粒子群の重量分布における W_{80} と $q_{\max}$ に支配され、これらの値が与えられれば本実験結果に基づいて拡がり係数 K_w が求められ、堆積形状を実用的な精度の範囲内で予測することができる。しかし、 $50 \sim 60 \text{ m}$ より水深の浅い海域では、 K_w にさらに水深の影響を考慮しなければならない。

参 考 文 献

- 1) 小用一紀・角谷広樹・岩田 潔：石運船から投入された捨石粒子群の堆積形状に関する基礎的研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 586~590, 1984。
- 2) 安濃 豊：捨石投入船の模型実験，北海道開発局建機技報，Vol. 14, No. 57, pp. 43~46, 1979。
- 3) 奥出 律・山谷弘幸・松本 茂：底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験，港湾技術研究所報告，Vol. 21, No. 4, pp. 131~171, 1982。