

捨石粒子群の多点投入時および流れの中の 堆積形状に関する研究

小田 一紀*・樋口 俊光**・岩田 潔***

1. ま え が き

等者らは、底開式バージから投入された捨石粒子群の沈降・散乱過程を近似的に拡散現象とみなし、3次元拡散モデルにより捨石の堆積形状の予測式を導き、静水中水平床上で、かつ同一地点での投入実験によってその適用性を調べ、その成果を第34回海岸工学講演会で発表した(小田ら, 1987)。

今回は、研究をさらに進め、実際の投入状況を想定し、水面上の複数点での投入(多点投入)によって水平床上に形成される堆積形状の予測法、並びに実際の投入現場での流れを考慮し、堆積形状に及ぼす流れの影響を調べるとともに、流れがある場合の実験の相似律についても検討した。

2. 堆積形状の予測式

等者らの3次元拡散モデル(小田ら, 1987)によれば、幅 $2b$ 、長さ $2a$ のバージ開口部から $q=f(\tau)$ の時間変化で水深 h の静水中に投入された捨石粒子群の水平床での堆積形状は式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{d(x, y)_{z=-h}}{h} = & \frac{Wt}{64\gamma abh} \cdot \frac{1}{\sqrt{K_w/h}} \\ & \times \int_0^\infty \int_0^{\hat{\tau}_0} (\hat{t}-\hat{\tau})^{-3/2} \cdot (1+\hat{t}-\hat{\tau}) \\ & \times \exp\left\{-\left(\frac{(1-\hat{t}+\hat{\tau})}{2\sqrt{K_w/h} \cdot (\hat{t}-\hat{\tau})}\right)^2\right\} \\ & \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{(a-x)/h}{2\sqrt{K_w/h} \cdot (\hat{t}-\hat{\tau})}\right)\right. \\ & \quad \left.+\operatorname{erf}\left(\frac{(a+x)/h}{2\sqrt{K_w/h} \cdot (\hat{t}-\hat{\tau})}\right)\right] \\ & \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{(b-y)/h}{2\sqrt{K_w/h} \cdot (\hat{t}-\hat{\tau})}\right)\right. \\ & \quad \left.+\operatorname{erf}\left(\frac{(b+y)/h}{2\sqrt{K_w/h} \cdot (\hat{t}-\hat{\tau})}\right)\right] \\ & \times f(\hat{\tau}) d\hat{\tau} d\hat{t} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 d : 堆積高、 h : 水深、 Wt : 投入粒子群の総重量、 γ : 粒子群の見かけの単位体積重量、 $\hat{\tau}=w_0\tau/h$ 、 $\hat{t}=w_0t/h$: 無次元時間、 w_0 : 粒子群の平均沈降速度、 K_w : 粒子群の拡がりやすさを表す $[L]$ の次元を有する実験定数(以後、拡がり係数と呼ぶ)、 x, y : バージ開口部の中心に原点を有する平面座標系で、船首尾軸を x 軸とする。式(1)中の実験定数 K_w は、粒子群の単位時間当りの最大投入量 q_{max} 、粒子群の重量分布、および水深に依存し、これらとの関係は静水中、水平床上、同一地点投入(以後、一点投入と呼ぶ)の場合について既に筆者らによって求められている(小田ら, 1987)。

3. 多点投入時の堆積形状

式(1)を多点投入に適用して、その計算値の単純重ね合わせとして多点投入の堆積形状を予測し、これが実験による堆積形状とどの程度一致するかを調べる。

3.1 実験装置と方法投

実験は、長さ 50m、幅 2.5m、深さ 1.5m のコンクリート製流れ水槽のほぼ中央部で行った。実験の幾何学的縮尺は1/60であり、投入船模型は 1000m³ 型底開式バージ船の実物に相似に真ちゅう材で作り、その喫水が満載時と軽荷時の中間の喫水になるようにロードセルを介して投石用移動架台から吊り下げた。底扉の開放は小型電気モータによって制御し、開扉幅、開扉速度はポテンショメータによって測定した。

捨石模型はコンクリート用碎石を用い、その重量分布は現地の捨石のそれに相似になるようにフルード則を適用して図-1中のA材料で表されるようにした。

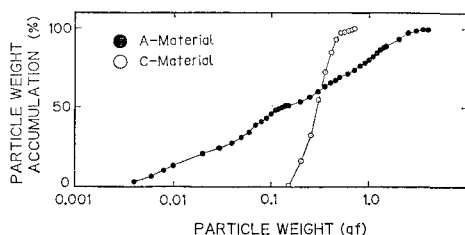


図-1 実験に用いた捨石模型材料(A材料)の重量分布

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 工修 兵庫県北摂整備局

*** 正会員 東洋建設株式会社

捨石投入量の時間変化は前述のロードセルによって測定し、捨石マウンドの堆積形状は超音波式砂面測定器を用いて連続測定した。水深は、現地 60 m を想定して 100 cm とし、実験は A 材料の捨石模型をバージ模型に積載し、所定の開扉条件の下で、後述の投石パターンに従って同一地点に 2 投ないし 3 投して行った。

3.2 投石配置パターンと投入条件

捨石投入は、図-2 に示すような、基本的な 4 つの平面配置パターンを選んだ。図-2 中の実線は先行投入の堆積山を、鎖線はその後の中間点投入による堆積山を意味する。

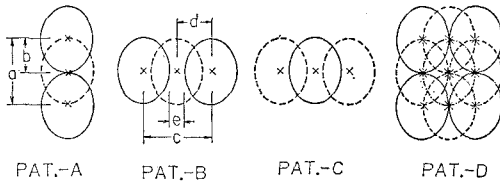


図-2 多点投入の平面配置パターン

また、投石条件は最大投入量 q_{max} を 3 種類に変えるために表-1 ように設定した。

表-1 投入条件

タイプ	最大開扉幅 B_0 (cm)	開扉速度 V_d (cm/s)	投石時間 τ (s)	最大流出量 q_{max} (cm ³ /s)
TYPE-P	3.8	0.5	9.0	1450
TYPE-Q	3.4	1.0	6.7	1810
TYPE-R	4.2	1.3	5.1	2420

3.3 多点投入堆積形状予測への一点投入堆積形状予測式の適用性

a) 計算値と実験値の一致度の評価方法

堆積形状の計算値と実験値の一致度を何をもって評価するかは議論のあるところであるが、ここでは式 (2) で定義されるマウンドの各点における堆積高の計算値と実験値の相関係数 r_{xu} 、および式 (3) で定義される重なり部分における両者の差の標準偏差 σ で評価する。

$$r_{xu} = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D}_i) (R_i - \bar{R}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R}_i)^2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - D_i)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $D_i, \bar{D}_i$: 堆積高の実験値とその平均値、 $R_i, \bar{R}_i$: 堆積高の計算値とその平均値、 n : データ数。

b) 計算値と実験値の一致度

実験を行った 10 ケースについて、実験条件と式 (2) および式 (3) で求めた相関係数と標準偏差をまとめて示し

たものが表-2 である。表-2 中の投入間隔 a, b, c, d および e は図-2 に定義した投入点間の距離を表す。

また、堆積マウンドの代表断面形の計算値と実験値の比較例を図-3 に示す。

表-2 多点投入の実験条件並びに堆積形状の計算値と実験値との比較

CASE	投入配置 タイプ	a	b	c	d	e	投入条件 タイプ	投入 回数	標準偏差 σ (cm)	相関係数 r_{xu}
1	PAT.-A	80	40	—	—	—	P	8	1.08	0.90
2	PAT.-B	—	—	80	0	30	P	8	1.06	0.89
3		—	—	80	0	30	Q	8	0.97	0.88
4		—	—	80	20	40	P	8	0.99	0.81
5	PAT.-D	80	—	80	0	30	P	21	1.22	0.90
6	PAT.-B	—	—	80	0	40	P-P-P	8	0.89	0.84
7		—	—	80	0	40	P-R-P	8	0.98	0.89
8		—	—	80	0	40	P	8	0.77	0.81
9	PAT.-C	—	—	—	—	30	P	5	0.91	0.91
10		—	—	—	—	40	P	5	0.82	0.82

これらの表および図から以下のことが言える：

(i) 各ケースとも相関係数は 0.81~0.91 の間にあり、計算値と実験値の一致度は概ね良好である。

(ii) しかし、CASE-2 と CASE-5 の標準偏差の比較でわかるように、先行投入による隣接堆積山の中心間隔が狭い場合は、その中間点投入による堆積山との重なり部の面積が大きくなり、互いに影響しあうので計算値と実験値の一致度は低下する。

(iii) また、CASE-2 と CASE-10 あるいは CASE-4 と CASE-11 の標準偏差を比較すると、両側に先行投入の堆積山がある CASE-2 あるいは CASE-4 の方が、片側だけ先行投入のある CASE-10 あるいは CASE-11 より大きく、相対的に計算値と実験値の一致が劣る。その理由も、(i) で述べた隣接堆積山との重なり部の面積の大きさの影響に関係あるものと思われる。

(iv) 一般的に、先行投入の後の中間点投入の q_{max} が大きいほど標準偏差が小さく、計算値と実験値の一致度がよい。このことは、複雑な投入配置パターンで投入する CASE-6 (図-3) と CASE-7 の比較によっても明かである。

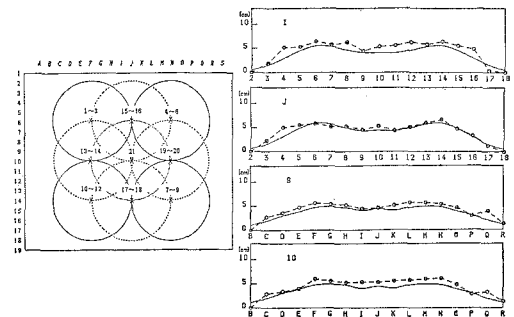


図-3 堆積マウンドの代表断面形に関する計算値と実験値の比 (CASE-6)

以上のことから、実験で採用した投入条件の下では、多点投入による捨石粒子群の堆積形状は、一点投入に対する堆積形状の予測値の単純重ね合わせによって実用的な精度の範囲内で予測することが可能であるといえる。しかし、この単純重ね合わせ法は、重なり部の面積が大きくなり、かつ最大投入量 $q_{\max}$ が小さくなるに従って適用性が悪くなることに留意する必要がある。

4. 流れの中の堆積形状

開水路の流れの中に砕石粒子群を一点投入してその堆積形状を求め、流れの影響を考慮していない式(1)で計算される堆積形状と比較してそれらの相違点を調べる。また、流れの中の単一粒子の着底位置の予測式を導き、その計算値と実験による砕石粒子群の堆積位置とを比較することによって捨石粒子群の槽積位置の予測法を検討する。

4.1 実験方法

実験には前述の多点投入と同じ流れ水槽および投入船模型を用いた。実験の幾何学的縮尺は多点投入実験と同じ1/60とした。捨石材料に多点投入で用いたA材料の外に、図-1に示す重量分布が比較的均一なC材料も用いた。水深は $h=40, 60, 80$ および 100 cm に、また流速は $V=6.9\sim 13.6$ cm/s (現地で約 $1\sim 2$ knot) に変えた。2軸の電磁流速計で水槽横断面内の流速分布を測定し、水路床および側壁近傍を除いてそれがほぼ一様であることを確認した。投入条件は、 $q_{\max}=1200, 1600$ および

2200 cm³/s に変えた。以上のように、実験は、粒子材料 $h, V, q_{\max}$ を変化させて、合計 63 ケースについて行った。なお、投入船模型はその船首尾軸が流れに平行になるように設置した。

4.2 実験結果

a) 堆積形状

流れの影響は水深が大きいほど大きいことが実験によって確認された。ここでは、実験を行った中で最も水深の大きな $h=100$ cm の場合の実験結果について述べる。

図-4 は、粒子材料として A 材料を用い、 $V=13.6$ cm/s, $q_{\max}=1200$ cm³/s のときの堆積マウンドの代表断面形の実験結果を流れの影響を考慮していない式(1)の計算値(実線と鎖線)と比較して示したものである。ただし、後述のように流れの中に投入された捨石粒子群は一般に流れによって下流側に押し流され、その堆積マウンドの中心点は投石中心点より下流側にずれる。このため、実験における堆積マウンドの中心点としてその重心点を取り、式(1)の計算値はこの点を原点として求めた。

図-4 によると、 $q_{\max}=1200$ cm³/s の場合は、断面形の計算値は上流側先端部付近を除いて全般的に実験値とほぼ一致している。 $q_{\max}$ の大きい場合はさらによく一致することが確認された。これは $q_{\max}$ が大きいほど粒子群の沈降速度が速くなり、流れの影響を受けにくくなるためであると考えられる。また、上流側先端部付近の断面形が計算値と合わないのは、投石後の落下過程において粒子群の上流側が流れの影響を比較的強く受け、下流側に圧流されるためであると考えられる。

以上述べた流れの中の堆積マウンドの断面形状に関する計算値と実験値の一致の傾向は粒子材料が C 材料に変わってもほぼ同様であること、また、流速が $V=13.6$ cm/s より小さい場合および水深が $h=100$ cm より小さい場合は計算値と実験値の一致はさらによくなることが他の実験結果から確認された。

流れの中の堆積マウンドの形状特性をもう少し詳しく調べるためにその平面形状および重心点を通る主要断面形状の実験結果を、A 材料、 $h=100$ cm, $q_{\max}=1200$ cm³/s の場合について流速をパラメータにして示したものが図-5 である。この図より流れの中の堆積マウンドの平面形状は、上流側先端部付近の比較的細かい粒子が流れに圧流され、その一部が側方に、一部は下流側の後尾部に押しやられる結果、前後非対称となり、先端部の勾配も急になることが分かる。このような傾向は流速が速くなると僅かに強まることが図から見出せる。粒子材料が C 材料の時は粒子群としての沈降速度が A 材料に比べて若干遅くなるため流れの影響は比較的強くなり、前後の非対称性は A 材料の場合よりさらに増大するこ

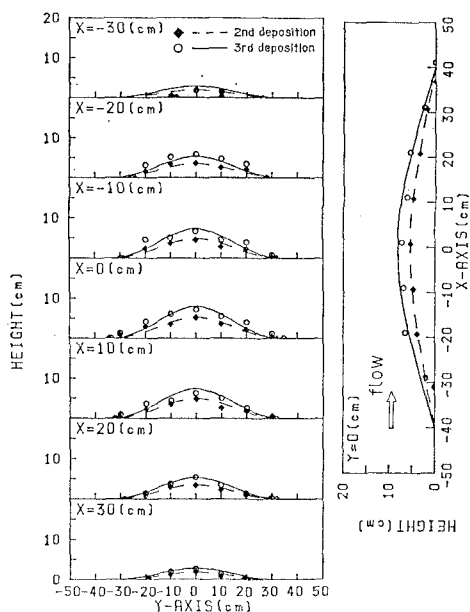


図-4 流れの中の堆積マウンドの代表断面形の計算値と実験値の比較(A 材料, $h=100$ cm, $q_{\max}=1200$ cm³/sec)

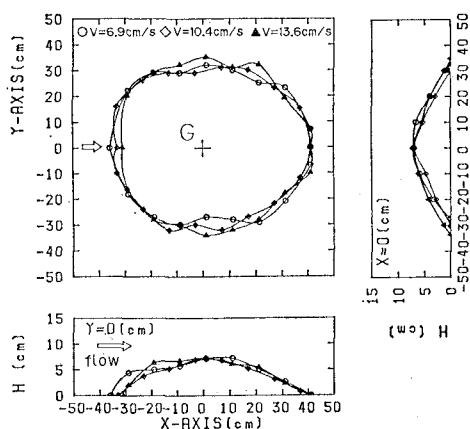


図-5 流れの中の堆積マウンドの平面形状および主要断面形 (A 材料)

とが見出された。しかし、これらの図に示された堆積マウンドの平面形状はマウンド周辺の比較的細粒子分で構成される裾野を連ねたものであり、堆積マウンドの主要部分ではないので実用的な堆積形状の予測においては平面形状の非対称性はそれほど重要なことではないと考えられる。以上のことから、流れの中の捨石粒子群の堆積形状については $q_{\max}$ が大きいときは A 材料、C 材料とも静水中の堆積形状を求める算定式 (1) からほぼ予測することができるが、 $q_{\max}$ が小さいときは、平面形状に非対称性が表れるといえる。

b) 堆積位置のずれ

流れの中の堆積形状については 前述のとおりであるが、砕石粒子群は流れによって全体的に下流側に押し流され堆積マウンドの重心点は投石中心点から下流側にずれる。この堆積位置のずれを予測するために、まず一様流中を初速度 0 で自由落下する単一粒子群の着底位置の予測式を以下のようにして導く。

仮想質量 M の球体粒子が水平方向に R_H 、鉛直方向に R_V なる抗力を受けて沈降するときの運動方程式は

$$M \frac{du}{dt} = R_H, \quad M \frac{dv}{dt} = W_S - R_V \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u, v : 球体粒子の水平および鉛直速度、 W_S : 球体粒子の水中重量。

R_H, R_V を近似的に

$$R_H = \frac{1}{2} C_{Dp} A (V - u)^2, \quad R_V = \frac{1}{2} C_{Dp} A v^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおき、初速度 0 の下で式 (3) を解くと原点から着底位置までの距離 (以後着底距離と呼ぶ) S および着底時間 τ が次のように導かれる。

$$S = U \tau - \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha U \tau + 1)$$

$$\tau = -\frac{1}{\sqrt{\alpha \gamma}} [\alpha h + \ln(\sqrt{1 - e^{-2\alpha h}} + 1)] \quad \dots (5)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{1}{2} C_{Dp} \rho A / (\rho' + \rho C_a) V_0$$

$$\gamma = (\rho' - \rho) g / (\rho' + \rho C_a) \quad \dots\dots\dots (6)$$

C_D, C_a : 球体粒子の抗力係数および付加質量係数、 ρ, ρ' : 流体密度および球体粒子密度、 V_0 : 球体粒子の体積、 h : 水深。

球体粒子に実際の捨石粒子の抗力特性をもたせるため上式中の抗力係数 C_D の代わりに次式で定義される等価抗力係数 C_{De} を用いる。

$$ab \times C_{Dq} = \frac{\pi d^2}{4} \times C_{De} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 a, b : 捨石粒子の外接直方体の最大長さとして最大長さ、 C_{Dq} : 捨石粒子の抗力係数、 d : 捨石と同体積の球の換算直径。

筆者らが求めた捨石粒子の抗力係数のデータ (Oda・Kadoya, 1983) に基づき、式 (7) から C_{De} を求めると図-6 のごとくであり、換算直径にはほとんど関係なく、その平均値は $C_{De} = 1.78$ と求められる。

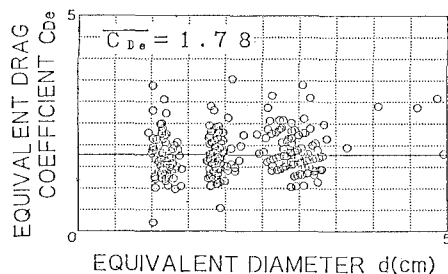


図-6 換算直径と等価抗力係数の関係

捨石粒子群の沈降速度は一般に単一粒子のそれより速いこと、およびバージから投入される時にある程度の初速度を有することなどの理由から流れの中の捨石粒子群の着底距離 S_g は単一粒子の着底距離 S より一般に小さくなる。前述の流れの中の実験結果から捨石粒子群の堆積マウンドの重心点を求め、投石中心点からの距離を捨石粒子群の着底距離 S_g とみなし、一方捨石粒子群の重量分布における W_{50} (累積通過重量百分率が 50% に相当する捨石単体重量) を代表粒子重量として式 (5) からその粒子の着底距離 S を算定し、それらの比 $\epsilon = S_g / S$ を求め、水深との関係を表したものが図-7 である。このようにして求めた ϵ を補正係数として、 $S_g = \epsilon S$ の関係から捨石粒子群の着底距離 S_g を求め流速 V との関係を表したものが図-8 である。この図から捨石粒子群の着底距離はほぼ流速に比例して増大するといえる。

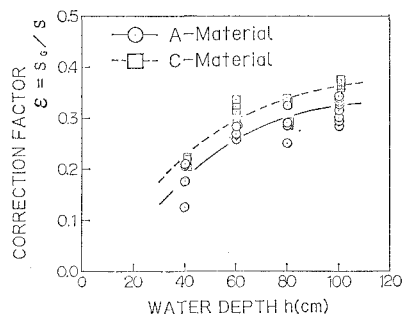


図-7 水深と補正係数の関係

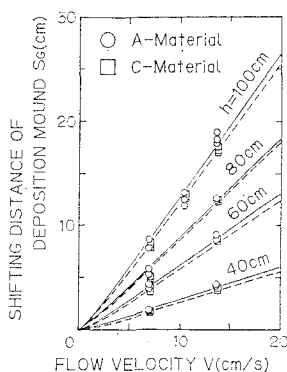


図-8 流れの中の捨石粒子群の着底距離

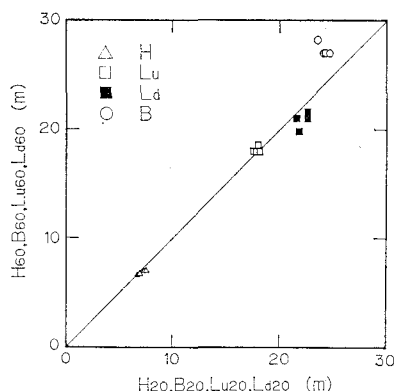


図-9 縮尺1/20と1/60の実験結果の比較

5. 縮尺影響

等者らは既に縮尺1/20と1/60の模型実験の結果を比較することによって、静水中に投入された捨石粒子群の沈降・散乱・堆積現象には実験の縮尺影響はなく、実験結果の実物換算にはフルード側が適用できることを前論文で示した(小田ら, 1986)。

今回、流れの中の堆積形状についても同様な実験を行って捨石粒子群の堆積形状に及ぼす縮尺影響を調べた。ただし、流速は現地で1 ktを想定し、縮尺1/20実験では $V=11.5$ cm/s, 1/60実験では $V=6.6$ cm/sとした。他の条件についてはフルード側で実物換算した値が両縮尺実験で一致するようにした。

図-9は同一地点での3投後の堆積マウンドの主要寸法をそれぞれ実物換算して比較したものである。ただし図中の H , B , L_u , L_d はそれぞれ投石中心点における堆積高, 投石中心点より上流側の堆積長, および下流側の堆積長を表す。図-9から、堆積幅 B は縮尺1/60実験の方が僅かに大きくなっているが、他の主要寸法については両縮尺実験ともよく一致しており、全体的には縮尺影響はほとんどないといえる。実験条件の範囲がきわめて狭いので今後さらに実験を重ねる必要があるが、今回の比較実験によって流れの中に投入された捨石粒子の沈降・散乱・堆積現象の実験にもほぼフルード側が適用できると判断される。

6. 結 論

本研究によって以下のことが明かとなった。

1) 静水中における捨石粒子群の多点投入による堆積形状は、今回の実験条件(現地の条件にほぼ近い)の範囲内では、一点投入に対する堆積形状の予測式の計算値を単純に重ね合わせることによってほぼ予測することができる。しかし、 q_{max} が小さいときは隣接堆積山の影響が比較的大きくなり、単純重ね合わせの適用性が若干低下する。

2) 流れの中の堆積マウンドの形状については、その主要部は投入条件にあまり関係なく、静水中の堆積形状の算定式からほぼ予測することができる。しかし、流速が大きく、 q_{max} が小さい投入に対しては、上流側先端部付近の比較的小さい粒子が流れに圧流され、その一部の粒子は側方に、一部は下流側の後尾部に押しやられる結果、平面形状における前後の非対称性が增大する。

3) 流れの中の堆積マウンドの堆積位置は一般に投石中心点から下流側にずれ、そのずれの距離(着底距離)は、一様流中の単一粒子の着底距離の予測式を補正することによってほぼ正確に予測することができる。

4) 流れの中の捨石粒子群の沈降・散乱・堆積現象の実験には縮尺影響はほとんどなく、ほぼフルード側が適用できる。

参 考 文 献

- 小田一紀・沢田充弘・樋口俊光・岩田 潔 (1986): 底開式ペ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, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 281~285.
Oda, K. and H., Kadoya (1983): Terminal velocity of crushed stones and ripraps in still water, Memoires of Faculty of Engineering, Osaka City University, pp. 313~323.