

防波堤マウンド下面の砂地盤の吸い出しに関する振動流実験

Experimental Study on Sand Scouring under Rubble Mound using Oscillatory water Tunnel

北海道開発土木研究所 ○正会員 山本泰司 (Yasuji Yamamoto)

長谷一矢 (Kazuya Hase)

北海道開発局港湾空港部 正会員 先川光弘 (Mitsuhiro Sakikawa)

1. まえがき

消波ブロック被覆堤は、我が国の主流防波堤のひとつであるが、砂地盤上に消波ブロック被覆堤を建設した後比較的大きな波浪が来襲すると、消波ブロックの沈下が生じる場合のあることが経験的に知られている。その原因については種々考えられているが、主として消波ブロックのり先の砂地盤の洗掘が主要因と考えられてきた。これは、消波ブロックで被覆されていない直立型の防波堤におけるLタイプ洗掘¹⁾の延長線上で考えられてきたためであり、対策工としても直立型防波堤と同様の工法が採用されてきた。

最近になって、北海道の港湾において消波ブロック被覆堤の顕著な沈下被災が相次いで発生した²⁾。特に平成12年に発生した事例は、延長約170mにわたって消波ブロックのみならず本体ケーソンが最大約1.5m沈下する大規模な被害であった³⁾。

最近の研究により、このような消波ブロック被覆堤の沈下現象が、捨石マウンド下面からの砂地盤の吸い出しが主な原因で生じていることが明らかになってきている^{4) 5)}。また、砂地盤の吸い出し発生限界条件や吸い出し量の推定を、VOF法を用いた数値計算プログラム(CADMAS-SURF)⁶⁾により検討する試みもされている^{2) 7)}。本手法では、消波ブロックや捨石マウンドを多孔質体として取り扱っているが、抗力係数 C_D や慣性力係数 C_M の設定値については明確にはなっていない。

本研究では、任意波形を発生可能な大型振動流発生装置を用いて、砕石等の多孔質体の抗力や慣性力について調べるとともに、砕石下面に珪砂を用いて吸い出し現象を再現し、吸い出し発生条件について検討した。

2. 実験の概要

2-1 実験装置

図-1に示す任意波形振動流発生装置は、閉管水路内の水をピストンにより駆動するもので、任意の制御波形を与えることが可能である。観測部は長さ10m、高さ0.55m、幅0.3mの矩形断面であり、前面と上面はガラス張りとなっている。また、本装置が設置されている北海道開発土木研究所多用途低温実験室は室温の管理が可能であり、室温は常に20°Cに設定して実験を行った。

2-2 実験の方法

図-2に示すように、観測部に鋼材と塩ビ板で床を設

けて0.3×0.3mの正方形断面水路の状態にし、水路に固定された金網により砕石等の多孔質体を設置した。振動流を作用させたときの多孔質体の左右2箇所の水圧と水路内の1箇所の流速を、サンプリング周波数100Hzで測定した。また、吸い出し再現実験では、床を加工して多孔質体下面に珪砂を入れ、所定の振動流を作用させた後に、多孔質体の外に吸い出された砂を回収し、乾燥機を使って乾燥重量を計量した。

多孔質体としては、アクリル製の球体と粒径のそろった3種類の大きさの砕石を用いた。球体は立方格子状に配列した整積みと空隙率が小さくなるように配置した千鳥積みの2種の配置を用いた。それぞれの代表径と空隙率は後述の表-1に示されている。吸い出し再現実験では、砕石が沈下した際に砕石上部に隙間が生じないように、厚さ5cmのスポンジを圧縮して詰め込んだ。砂は、東北珪砂7号を、0.15mmと0.212mmのふるいにかけて、間に残ったものを使用した。

振動流波形は、多孔質体の抵抗力および慣性力を直接的に計測できるように、図-3に示す3種類の波形を用い、振動周期を6、10、14s、流速片振幅を5~40cm/sの範囲で4段階に変化させた。

3. 実験データの解析法

3-1 解析対象データ

流れが多孔質体から受ける抵抗力については、U波形

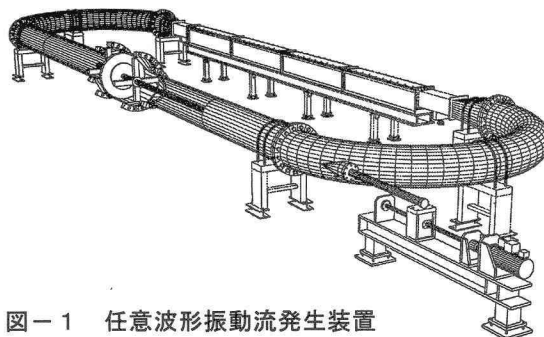


図-1 任意波形振動流発生装置

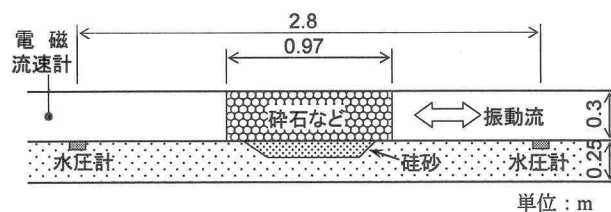


図-2 実験模型と計測位置

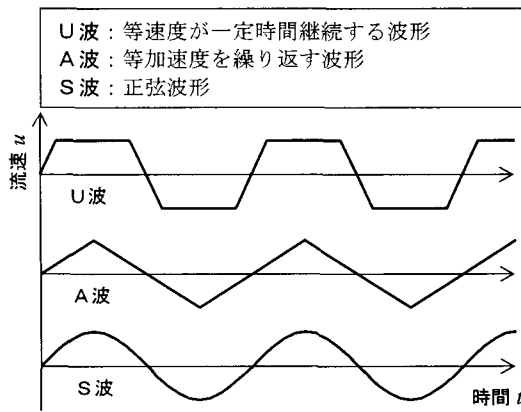


図-3 振動流の波形

(等速度が一定時間継続する波形)の振動流を与えて調べた。図-4(a)は、球体整積みの場合の多孔質体両端の圧力差 Δp と流速 u の時間変化の例である。流速は入力した波形にほぼ従い、流速が一定の時間を繰り返している。流速振幅の設定値は 0.2m/s であるが、駆動部ピストン両端に圧力差が生じると、ピストンの構造上水の漏れが生じ、設定流速よりも発生流速はやや小さくなる。 Δp は u に応じ変化し、振動はあるものの u が一定の区間ではほぼ一定値を示している。 Δp と u の波形が 0 点で交差していないのは、この区間では水が加速度運動をしているためである。また、条件によっては、流れの方向が反転するとき圧力差が瞬間的に大きくなる場合がある。データの解析はこのような区間を除き、流速および圧力差が一定とみなせる区間を対象に行い、流速と圧力差の関係に基づき、次節に示す方法により抵抗力を求めた。

多孔質体からの慣性力については、A 波形 (等加速度を繰り返す波形) の振動流を与えて調べた (図-4(b))。A 波形の場合も、流速は入力した波形にほぼ従い、等加速度運動を繰り返している。前述のピストン水漏れが原因で、実際には等加速度ではなくやや歪んだ波形となるが、解析上は等加速度とみなすことにする。また、流れが反転するとき加速度が正負反転するときは、比較的大きな圧力変動を示すため、このような区間は解析対象外とした。

3-2 解析方法

CADMAS-SURF の基礎式には、2 次元非圧縮粘性流体の Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式が採用されている⁶⁾。水平方向の運動方程式は次式のとおりである。

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (1)$$

ここに、 t : 時間、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, w : 流速の水平、鉛直成分、 ρ : 流体の密度、 p : 流体の圧力、 ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g : 重力加速度、 γ_v : 空隙率、 γ_x, γ_z : 水平、鉛直方向の面積透過率、 D_x : エネ

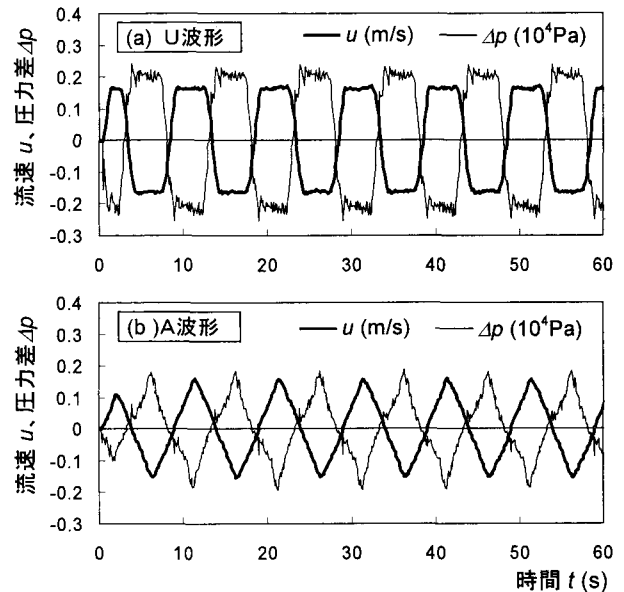


図-4 管内流速と水圧の計測例 (球整積み)

ルギー減衰帯のための係数、 S_u : 造波ソースのためのソース項である。 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ は C_M を慣性力係数とすれば次のように表され、右辺第 2 項が多孔質体から受ける慣性力の効果となる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、 R_x は多孔質体からの水平方向抵抗力であり、現行の CADMAS-SURF では抵抗力係数 C_D 、 x 方向格子間隔 Δx を用いて、次式のようにモデル化されている。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (3)$$

鈴木ら⁷⁾は、多孔質体の粒径の効果を抵抗力に表現できるように、次に示す Dupuit-Forchheimer 型の式を用いることを提案している。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = u(\alpha + \beta|u|) \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1 - \gamma_v)^3}{\gamma_v^2} \frac{\nu}{d^2}, \quad \beta = \beta_0 \frac{(1 - \gamma_v)}{\gamma_v^3} \frac{1}{d} \quad (5)$$

ここに、 ν : 流体の動粘性係数、 d : 材料の代表径であり、 α_0, β_0 は多孔質体を構成する材料の形状により決まる係数で、過去の研究により、石の場合はそれぞれ 800~1500、1.8~3.6 という値が示されている⁸⁾。しかし、抵抗力係数は Reynolds 数により変化することが知られており、 α_0, β_0 の値についても検討の余地がある。

いまここで、振動流水槽内の水の運動を断面方向で一様であると仮定し水平方向のみの運動を考える。式(1)における移流項、拡散項を無視し、抵抗力を Dupuit-Forchheimer 型の式で表すと次式となる。

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} = -\gamma_v \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + u(\alpha + \beta|u|) \right\} \quad (7)$$

表-1 実験から得られた α_0, β_0 の値

	代表径 d (m)	空隙率 λ	実験値				既往研究 ⁸⁾	
			a	b	α_0	β_0	α_0	β_0
球(整積)	0.075	0.474	1954	65905	17405	1.05	520	0.85
球(千鳥)	0.075	0.310	13485	322293	22876	1.08	—	—
碎石(小)	0.0285	0.412	32661	443480	22854	1.56	800~ 1500	1.8~3.6
碎石(中)	0.0481	0.428	11269	258263	26330	1.77		
碎石(大)	0.0743	0.421	6022	183618	31319	1.83		

※碎石の代表径 d は、同体積の球の直径

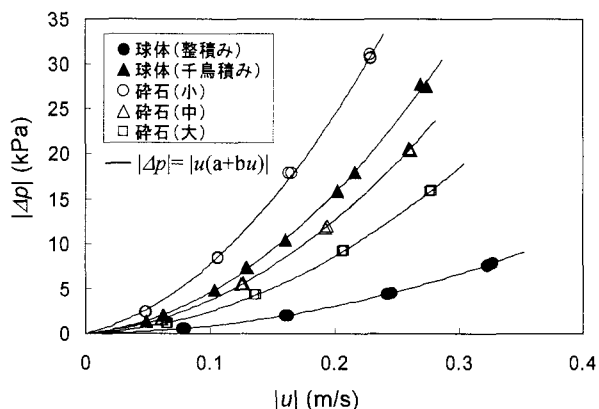


図-5 U波形実験での流速と圧力差の関係

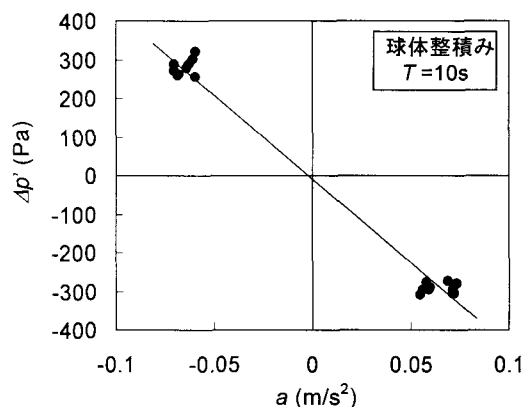


図-6 加速度と補正圧力差の関係の例

U波形を使った実験では、流速一定の区間を解析対象とするので上式の左辺を0として、多孔質体内の圧力勾配から α, β を求めることができる。

一方、A波形を用いた実験では解析区間の加速度を一定とみなし、流速と圧力差の時系列データから上式右辺を計算し、式(2)の第1式から C_M を算出する。

4. 多孔質体の抵抗力および慣性力係数

4-1 抵抗力

図-5は、U波形を用いた実験での流速と圧力差の絶対値の関係である。流速が大きくなるに従って圧力差も大きくなる。球体の整積みと千鳥積みでは、空隙率の小さい千鳥積みの圧力差が大きい。また、碎石は各粒径とも空隙率はほぼ等しいが、粒径が小さいほど圧力差は大きくなっている。図中の実線は、Dupuit-Forchheimer型の次式で表した近似曲線であるが、各ケースともこの式形で非常によく表すことができる。

$$|\Delta p| = |u(a+bu)| \quad (8)$$

各ケースで近似係数 a, b を求め、 α_0, β_0 を計算する。なお、水路内に模型を設置しないケースと多孔質体固定用の金網のみを設置した実験も行い、水路の摩擦抵抗は無視できることを確認し、係数 a, b を求める際には金網の抵抗力の補正をしている。各材料の α_0, β_0 を、水の動粘性係数 $\nu = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (水温 20°C)、代表径 d を球の直径として求めると表-1のようになった。

式(4)の α は u にかかる係数であり、Darcy 則の透水係数の逆数に相当すると考えられる。球体の場合、整積みと比べ千鳥積みの α_0 が3割ほど大きな値となっている。これは、空隙の形状や配列の違いの影響によるものと考

えられる。 β は u の2乗の係数であり、乱流条件における抗力係数に相当する。球体の場合、 β_0 には積み方の違いの影響はあまりみられない。

碎石では、粒径が大きくなるほど α_0, β_0 も大きくなる傾向が見られる。また、球に比べると β_0 は6~7割ほど大きいのが、材料の表面粗度の違いが表れているものと考えられる。

既往の研究による値と比較すると、今回の実験により得られた β_0 の値に大きな違いはないが、 α_0 は20倍程度の値となった。既往の値は、開水路の実験や小型の波動水槽実験から推定されたものであり、今回の実験のように直接的に計測したものではない。また、Reynolds数を $Re = u \cdot d / (1 - \gamma) \nu$ ⁹⁾で定義すると、今回は $10^3 \sim 10^5$ のオーダーの実験となり、現地の条件に近い。

4-1 慣性力係数

図-6は、A波形を用いた実験での加速度 a と補正圧力差 $\Delta p'$ の関係の例である。補正圧力差とは、測定値に対して前節で求めた多孔質体の抵抗による圧力差分を補正したものであり、式(7)の右辺に相当する。図に示すように、 a と $\Delta p'$ は比例関係にあり、回帰直線の傾きから λ を求め慣性力係数 C_M を算出する。ただし、慣性力は抵抗力に比べて非常に小さいため、1点で計測している流速を断面平均流速とみなしていることもあり誤差が大きくなるケースがある。このような場合、図-6におけるデータのばらつきが大きくなり、回帰直線も原点から大きくずれてしまう。このため、以下の慣性力係数の検討は球体整積みと大粒径碎石のみを対象に行う。

図-7は、実験で求めた C_M を横軸に加速度の絶対値 $|a|$ をとって示したものである。球体整積みでは $|a|$ の大

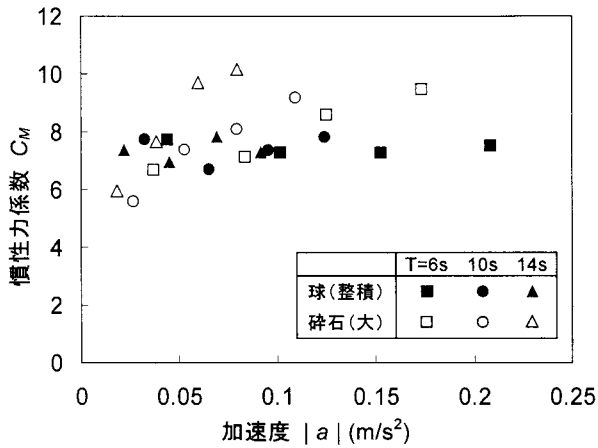


図-7 加速度と慣性力係数

きさや振動周期によらず平均 $C_M=8.0$ で一定値となっている。一方、大粒径碎石では、 $C_M=6\sim 10$ 程度の範囲でばらついている。これは、前述した計測上の誤差が現れていると考えられる。平均的には $C_M=7.5$ 程度となる。

5. 砂の吸い出しの特性

硅砂を用いた吸い出し再現実験は、小粒径碎石を用いて行った。周期 10s の S 波形振動流を 35 波作用させた後、碎石を固定している網の外へ流出した砂の量を計測した。流速振幅は 7 段階に変化させ、吸い出し量は 1 波あたりの重量で整理した。

図-8 は、砂の吸い出し量を、横軸にシールズ数をとって示したものである。シールズ数 ψ は、砂を動かそうとする力と砂をとどまらせようとする力の比を表し、次式で計算される。

$$\psi = \frac{1}{2} \frac{fu^2}{sgd} \quad (9)$$

ここに、 u : 流速振幅、 s : 砂の水中比重、 g : 重力加速度、 d : 砂の粒径である。また、 f は摩擦係数であり、ここでは Kamphuis による粗面上の乱流の摩擦係数を用いた。また、 u は管内流速を空隙率 n で除した値を用いた。

同図から、シールズ数が大きくなるに従って、言い換えると流速振幅が大きくなるに従って、吸い出される砂の量が増加している。図中に白丸○で示した点は、吸い出し量が大きく、水路床の一部が露出したもので、本来よりやや小さめの値になっている。

一般的な漂砂解析では、掃流移動の限界シールズ数は $\psi=0.05$ 程度といわれているが、今回の実験では吸い出し発生限界は $\psi=0.02$ 程度であった。これは、碎石内の流れが局部的に非常に大きくなっていると考えられること、また、碎石内に発生する渦により砂が巻き上げられやすくなっているためと考えられる。

6. あとがき

数値計算により防波堤捨石マウンドからの砂地盤の吸い出し条件を検討することを目指して、計算上必要な多孔質体の抵抗力と慣性力を振動流実験により調べた。ま

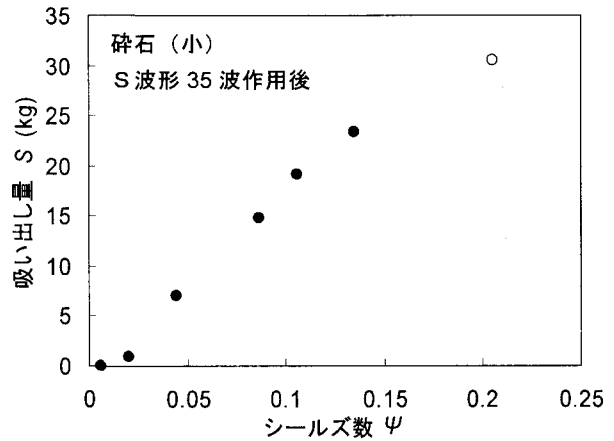


図-8 シールズ数と吸い出し量の関係

た、硅砂を用いて吸い出し発生限界条件をシールズ数に着目して調べた。今後は、実験で得られた知見を数値計算に適用し、その妥当性を検討したい。

参考文献

- 1) 入江功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘 — 底質の移動機構に着目した研究 —、港湾技術研究所報告、第 23 巻、第 1 号、pp.3-52、1984。
- 2) 北海道における消波ブロック被覆堤の沈下被災事例とその原因について — 数値計算による吸い出しメカニズムの検討 —、北海道開発土木研究所月報、No.600、2003。
- 3) 早川篤・宮部秀一・高田稔年・上杉智・荒川泰二：石狩湾新港東防砂堤の吸い出しによる沈下被災について、海洋開発論文集、Vol.19、pp.493-498、2003。
- 4) 鈴木高二朗・高橋重雄：消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験 — マウンドとブロック下部の洗掘 —、海岸工学論文集、第 45 巻、pp.821-825、1998。
- 5) 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎：砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤の沈下被災について — 現地調査と大規模実験 —、港湾空港技術研究所報告、第 41 巻、第 1 号、pp.51-89、2002。
- 6) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会：海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発とその将来展望、土木学会論文集、No.705/II-59、pp.1-17、2002。
- 7) 鈴木高二朗・大寄菜々子・山本泰司：防波堤基礎での洗掘量の推定について、海岸工学論文集、第 50 巻、pp.886-890、2003。
- 8) 近藤俊郎・竹田英章：消波構造物、森北出版株式会社、1983。
- 9) 富永正照・坂本忠彦：透過性構造物による波の変形に関する研究 (1) — 鉛直捨石堤による波の反射率と透過率について —、海岸工学講演集、第 16 回、pp.309-319、1969。