河川技術論文集，第13巻，2007年6月

加速度センサーを用いた捨石護岸の表層砕石流出時の挙動把握

STUDY ON FLOW OUT PROCESS BY ACCERELOMETER IN A RIPRAP STONES

二瓶　功[1]・高田保彦[2]・田代洋一[2]
Isao NIHEI , Yasuhiko TAKADA and Youichi TASHIRO

[1] 正会員　(株)建設技術研究所　　東京本社　水理室　(〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1047-27)
[2] 正会員　(財)土木研究センター　研究開発一部　(〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4(タカラビル))

The critical tractive force and flow out process of a riprap stone from riprap bank protection is investigated by the vibration of the crush stone model inside accelerometer.
It is confirmed that the precision of critical tractive force assumed Shield's theory is exteremly high.

Key Words : *Riprap, Critical tractive force, Accelerometer, ,Shield's theory, Tongued effect*

1．はじめに

河川法の改訂に伴い，ブロック張り護岸や根固めブロックから，環境や景観に優れた蛇籠や沈床など在来工法に対する期待が大きい。しかし，自然石や砕石など中詰めした蛇籠は，金網に錆が発生し一端破損すれば，その機能が失われ，流出・散乱に至る。

沈床も，法枠が腐食すると単なる捨石状態となり，その機能が失われ，同様に流出・散乱してしまう。

このため，近年は，化学繊維を編んだ袋体や，腐食に強い金属を用いた法枠に自然石や栗石を詰め込んで護岸や根固めとする工法が増えている。

しかし，変形が容易な袋体や，法枠などは自然石や砕石の拘束力がはるかに小さいため，中詰め材の移動限界を超えると，たやすく変形・移動・流出にいたる。[1,2]　このため，袋体や法枠は，適切な中詰め材の噛み合わせ効果や拘束力によって，一体となって護岸・根固めとしての機能を発揮し，変形・移動・流出を阻止する必要がある。[3]

こうした適切な噛み合わせ効果や拘束力を検討するため，自然石や栗石を捨石状態に敷き並べた状態で，まず単体としての移動限界状況を実験によって確認した。本報告は，管水路内に敷き並べた砕石の表層に加速度センサーを埋没させた試験砕石を敷き，試験砕石近傍の流速と振動特性を計測することにより，振動発生から流出に至るまでの砕石の挙動を明らかにしたものである。

2．実験施設と実験方法

(1) 実験施設

実験施設概要を図-1 に示す。実験施設は，幅 0.3m，高さ 0.3m，長さ 9.0m，給水能力 0.5m³/s の矩形管水路を使用した。

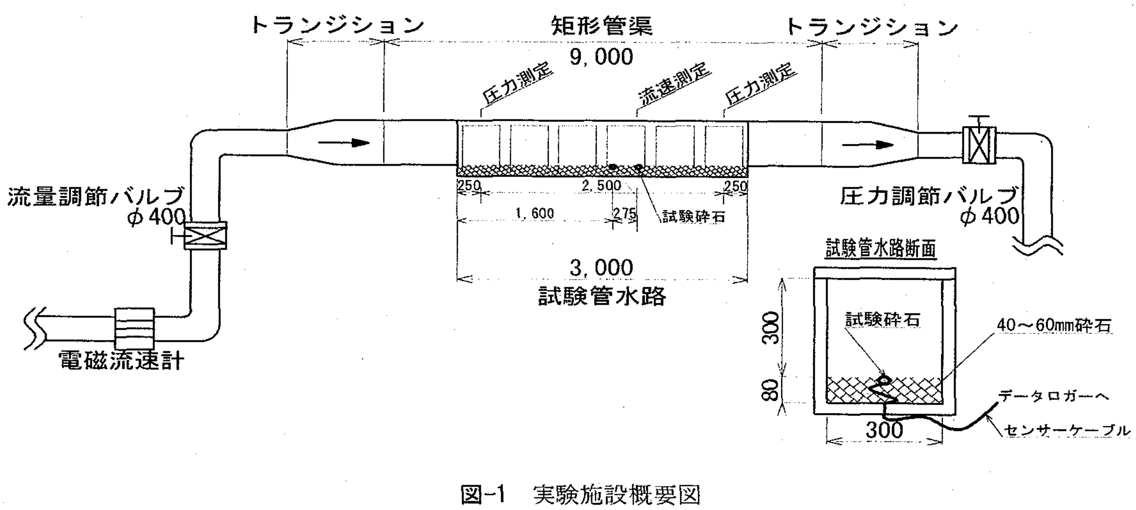


図-1　実験施設概要図

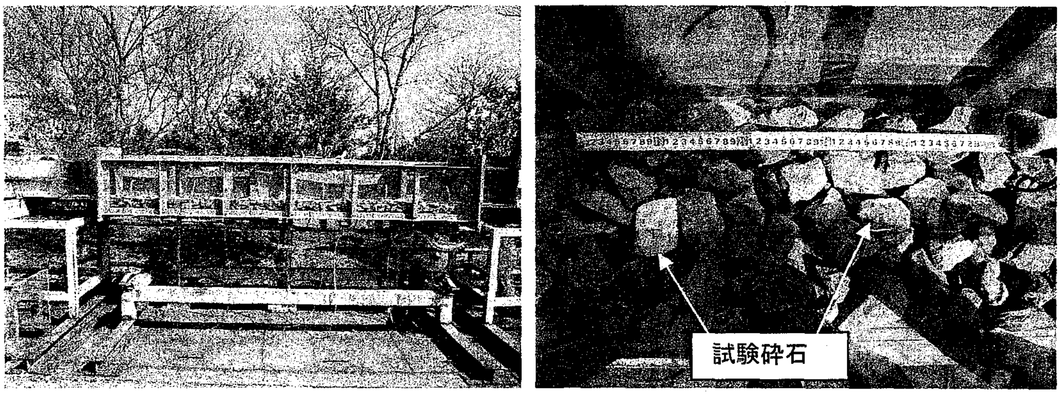


写真-1 実験施設および試験砕石

加速度センサーを埋設した試験砕石を捨石護岸表層部に２箇所設置し（**図-1** 参照），試験砕石が流れによって流出するまでの振動を計測した。（**写真-1**）

試験砕石の加速度計は**表-2** に示す仕様の有線式の３方向成分センサー（流れ方向 x，横方向 y，鉛直方向 z）を用い、振動データはデータロガー（PC＋AD 変換器）により連続取り込みを行った。

試験砕石は，２号単粒度砕石（粒径 d=40～60mm）から代表的な砕石を選定し，型どりして製作した。材質はモルタル製として，加速度センサを中心部に埋め込み、全体の比重を 2.65 に調整し，実際の砕石と同様の挙動を示すように製作した。

(2) 実験方法

流量条件の設定は，管水路上流の電磁式流量計及び矩形管渠上下流の流量調節バルブにより行った。

水理量の計測は，流量，動水勾配，流速分布について行った。動水勾配は，管水路上下流の圧力水頭をピエゾメータにより計測して求めた。流速分布は，ピトー管に圧力計を接続し，管路中央の鉛直流速分布を計測した。実験状況はビデオにより連続記録し，砕石の流出状況はビデオ記録から把握した。

(3) 水理量の定義

本報告における水理量の定義を次に示す。

a) 試験体表面の摩擦速度 u_{*1}

管水路の平均摩擦速度は管水路の各潤辺の摩擦速度により，次式で表される。

$$u_* = \frac{u_{*1} \cdot S_1 + u_{*2} \cdot S_2}{S} \qquad (1)$$

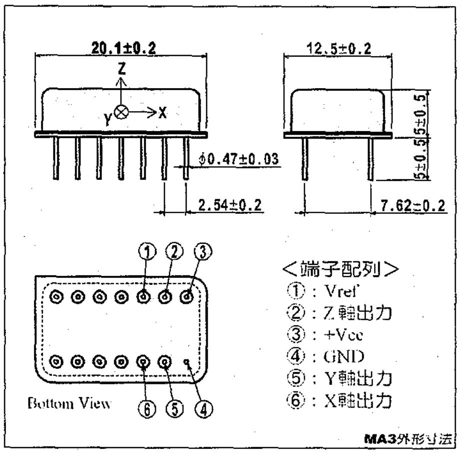
ここに、u_*: 管水路全周平均の摩擦速度、u_{*2}: 管水路側面および上面の摩擦速度、S：管水路全周の潤辺長(1.2 m)、S_1: 管水路底面（試験体）の潤辺長(0.3m)、S_2: 管水路側面および上面（アクリル製）を合わせた潤辺長(0.9m) よって、試験体表面の摩擦速度 u_{*1} は、

$$u_{*1} = \frac{u_* \cdot S - u_{*2} \cdot S_2}{S_1} \qquad (2)$$

表-2 加速度センサー仕様

項目/ Item	仕様/ Specification
製品名 Product Name	3軸加速度センサ MA3-04Ac（マイクロストーン(株)）
検出範囲 Detect Range	±4G
周波数特性 Frequency Feature	0.8～1000Hz
他軸感度 Sensitivity Vs Other Axis	±10%以下/ Less than 10%
大きさ Size	W20.5×D12.5×H5(mm)

【外形寸法図】



※メーカーカタログより

なお、u_{*2} は、粗度係数 n_2 が既知（アクリル0.009）として、４面アクリルの管水路を想定して次式で求めた。

$$u_{*2} = \sqrt{gRI_b'} \qquad (3)$$

$$I_b' = \frac{n_2^{\,2} v_2^{\,2}}{R^{4/3}} \qquad (4)$$

ここに、R：管水路の径深、
I_b': 動水勾配（計算値）
n_2: 粗度係数（アクリル0.009）、
v_2: 管水路の平均流速

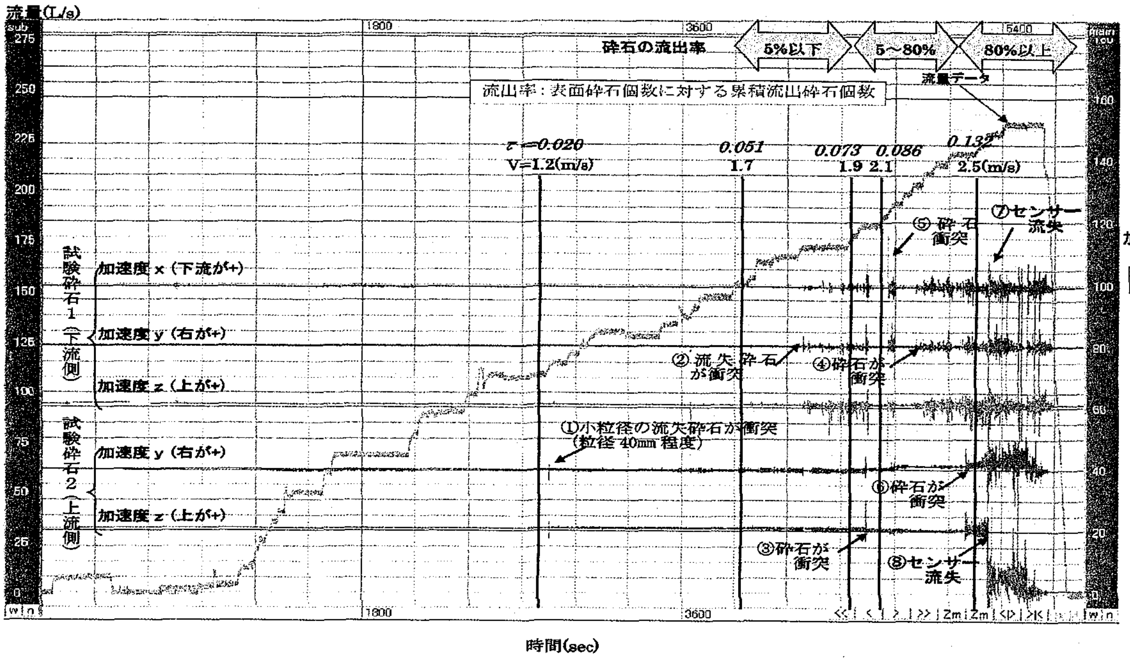


図-2　試験砕石加速度計測値の時系列データ

b) 無次元掃流力 τ_{*d}

$$\tau_{*d} = \frac{{u_{*1}}^2}{s \cdot g \cdot D_m} \qquad (5)$$

ここに、s：水中重量(1.65)、

D_m: 代表粒径 (50mm)

(2号単粒度砕石40～60mm)

(4) 移動状況の定義

試験体表層の砕石の移動限界は一様でなく，最初の流出から表層の最後の砕石が流出するまで移動限界に幅がある。ここでは，移動状況を初期移動，中間移動，全面移動の３つの段階に区分した。試験体表層の砕石数は約 200 個あり，表層砕石の流出数が5%以下を初期移動，80%以上を全面移動，これらの中間を中間移動と定義した。

3．試験砕石の振動と流出のプロセス

実験では，管水路を満水の静水状態にし，徐々に流量を増加させて，試験砕石が流出するまで水理量と試験砕石の加速度の計測，ビデオ記録を行った。実験開始から終了までの水理量と加速度計測値の時系列データを**図-2** に示す。

試験砕石の振動の状況としては，流速 1.2m/s(τ_{*d}=0. 020) 付近から一方の試験砕石の加速度が徐々に大きくなっている。流速 1.9m/s(τ_{*d}=0. 073) を越えると２つの試験砕石がともに加速度の変化が顕著になり，流速 2. 47m/s 付近で２つの試験砕石が流出した。

水理量と砕石の流出状況を**表-2** に示す。

表-2　水理量と砕石の流出状況

流量 Q (L/s)	平均流速 V (m/s)	動水勾配 Ib	摩擦速度 u* (m/s)	無次元掃流力 τ*	試験砕石の振動状況と流出状況 (試験砕石以外の砕石を単に砕石と表記)
108	1.20	0.0079	0.136	0.020	･砕石が1個流出(粒径40mm程度) ･試験砕石の振動が生じ始めた
150	1.67	0.0171	0.201	0.051	･砕石が1個流出
173	1.92	0.0235	0.240	0.073	･砕石が2～3個流出 ･試験砕石の振動が顕著
185	2.06	0.0273	0.261	0.086	･砕石が約10個流出
222	2.47	0.0406	0.329	0.132	･砕石の流出が次々に生じ、試験砕石が流出 ･試験砕石流出直前では振動が顕著

砕石の流出状況としては，流速 1. 2m/s(τ_{*d}=0. 020) 時に，試験砕石以外の 1 個目の流出を確認した。なお，このとき流出した砕石は粒径 40mm であった。流速 1. 7m/s(τ_{*d}=0. 051) ではさらに 1 個の流出が生じ，流速 1. 9m/s(τ_{*d}=0. 073) では２～３個の流出，流速 2. 5m/s(τ_{*d}=0. 13) では，ほぼ全面的に流出が生じた。この流量のときに加速度計を埋設した試験砕石が流出した。試験砕石流出時の状況を**写真-2** に示す。

シールズダイヤグラム及び岩垣の式 [1] (**図-3**) によれば，無次元掃流力 τ_{*d}＝0. 05～0. 06 付近が移動限界と判断できる。本検討の砕石の初期移動は，1 個目の流出が τ_{*d}＝0. 02 とかなり低い掃流力で生じたが，２個目以降の初期移動は τ_{*d}＝0. 051～0. 073 の範囲となり，同図式の移動限界にほぼ近似する結果となった。一方，加速度センサーを埋設した試験砕石は全面移動の τ_{*d}＝0. 13 の水理条件で流出したため，初期移動の τ_{*d}＝0. 05～0. 06 付近における流出時の挙動は残念ながら捉えられなかった。しかし，全面移動に至るまでの砕石の挙動を把握することができ，砕石の流出が一様に生じないことを裏付けるデータが得られた。

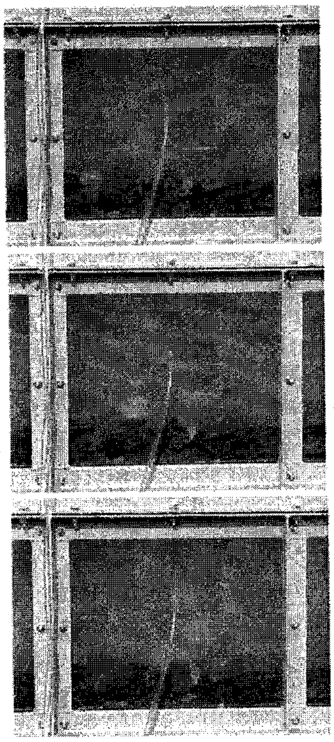


写真-2　模擬砕石流出時の連続写真

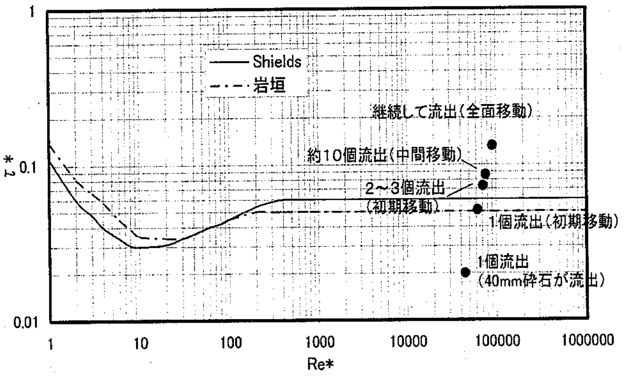


図-3　限界掃流力

実験中，上流から流出した砕石が試験砕石に衝突する状況が生じるが，加速度データから，衝突後に試験砕石の振動状況が変化する状況が確認された。これは，流出砕石の衝突により，試験砕石と周囲の砕石と隙間が広がったり，かみ合ったりすることによると考えられる。

図-2 の②では，流出砕石が試験砕石に衝突しており，これをきっかけとして流速 1.9m/s(τ_{*d}=0.073) 時の試験砕石の振動が大きくなっている。一方，その後の流速 2.1m/s(τ_{*d}=0.086) 時では，再び振動が小さくなっている。これは，試験砕石が大きく振動しているうちに，周囲の砕石とかみ合って，振動しにくい状況になったものと考えられる。

試験砕石が流出する直前の流速 **2.5m/s(** τ_{*d}**=0.13)** 時では振動が大きくなっているが，このときも流出砕石の衝突がきっかけで顕著な振動が始まっており，その後，流出に至っている。

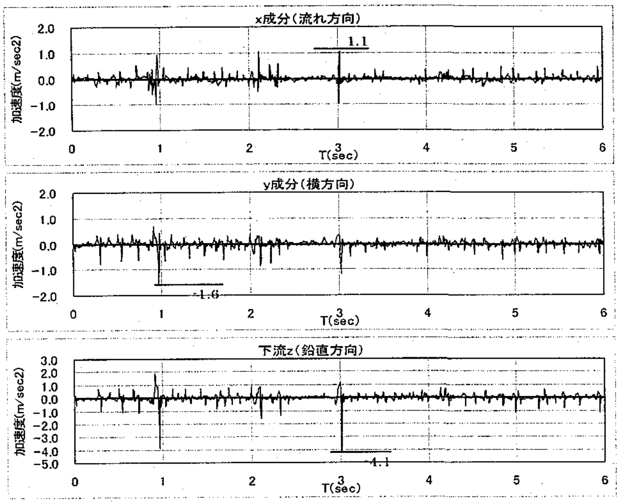


図-4　流速 1.9m/s(τ_{*d}=0.073) 時の振動時系列

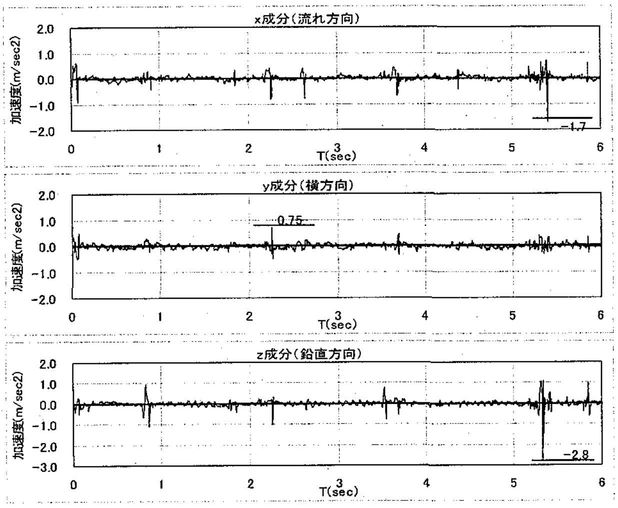


図-5　流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) 時の振動時系列

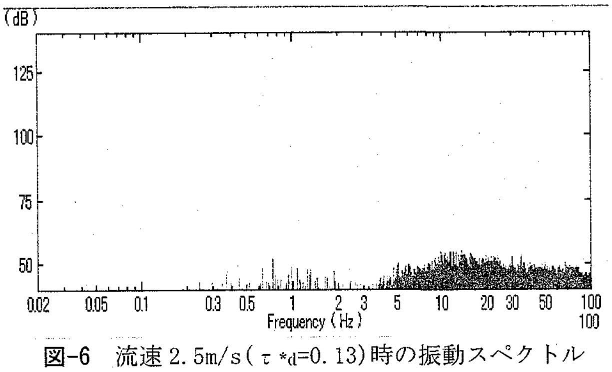


図-6　流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) 時の振動スペクトル

4. 試験砕石の振動特性と水理量の関係

試験砕石の振動データを解析して，水理量との相関を考察した。その結果，試験砕石の大きな振動の発生間隔と流速の卓越周波数に相関が認められた。

振動が顕著な流速 1.9m/s(τ_{*d}=0.073) と流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) の振動データを**図-4**, **図-5** に示す。振動の特徴として，0.5～1.5 秒の間隔で，大きな振動が瞬間的に生じている。**図-6** は流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) 時の振動のスペクトルである。主な振動周

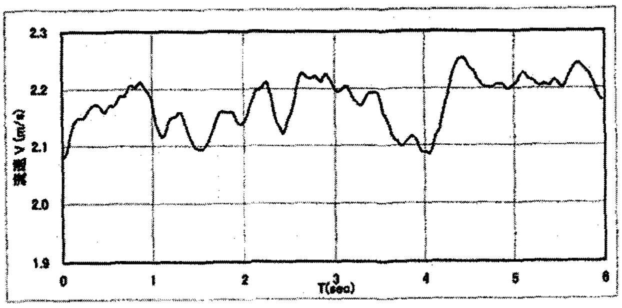


図-7　流速 1.9m/s(τ_{*d}=0.073)時の流速時系列

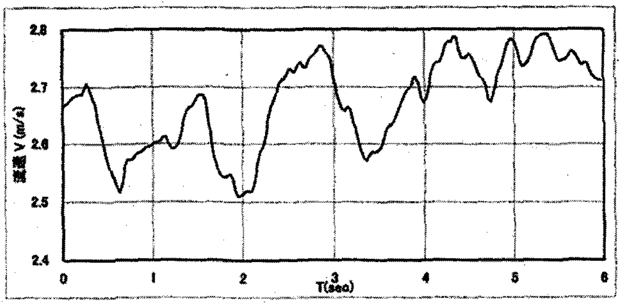


図-8　流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13)時の流速時系列

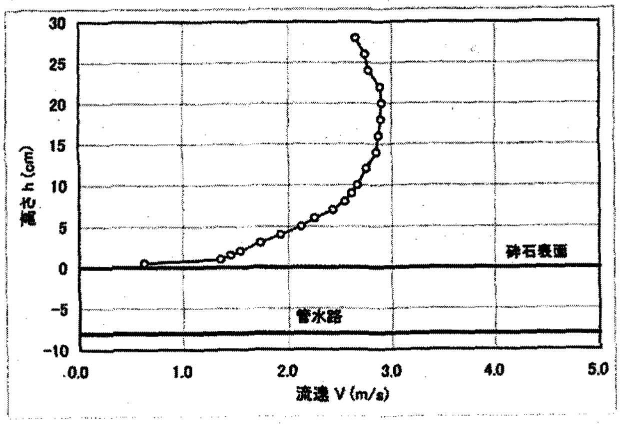


図-9　流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13)時の流速鉛直分布

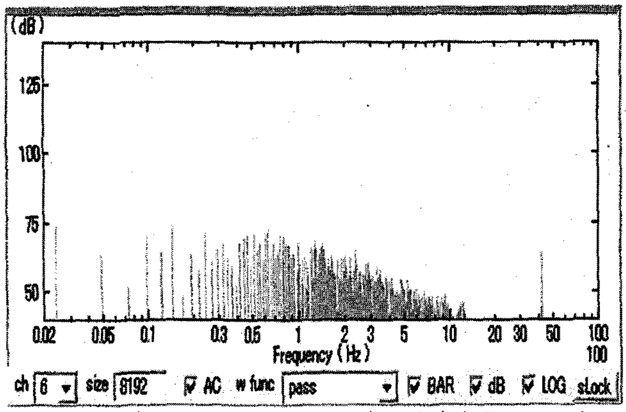


図-10　流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13)時の流速変動スペクトル

表-3　砕石の最大加速度と水理量の関係

流量 Q (L/s)	平均流速 V (m/s)	粒径 d (m)	動水勾配 Ib	動粘性係数 ν(9℃) (m²/s)	ﾚｲﾉﾙｽﾞ数 Re	相当粗度 ks (m)	ﾏﾆﾝｸﾞの粗度係数 n	摩擦速度 u* (m/s)	砕石平面投影面積 Ab (m²)	砕石抗力 D (kgf)	無次元掃流力 τ* d=40mm	d=50mm	d=60mm	最大加速度(m/s²) 下流側模擬砕石 αx	αy	αz	上流側模擬砕石 αx	αy
108	1.20	0.05	0.00795	1.35E-06	4.44E+04	-	0.0237	0.136	0.0020	0.036	0.025	0.020	0.017	0.14	0.15	0.14	0.11	0.13
150	1.67	0.05	0.01707	1.35E-06	6.16E+04	0.079	0.0253	0.201	0.0020	0.079	0.063	0.051	0.042	0.14	0.19	0.16	0.40	0.26
173	1.92	0.05	0.02350	1.35E-06	7.11E+04	0.103	0.0260	0.240	0.0020	0.113	0.091	0.073	0.061	1.10	1.60	4.10	0.42	0.40
185	2.06	0.05	0.02725	1.35E-06	7.60E+04	0.112	0.0263	0.261	0.0020	0.133	0.107	0.086	0.071	0.42	0.50	0.80	0.60	0.48
222	2.47	0.05	0.04057	1.35E-06	9.12E+04	0.126	0.0270	0.329	0.0020	0.212	0.165	0.132	0.110	1.70	0.75	2.80	1.50	1.80

期は 10Hz 付近にあるが、0.6～1.5Hz 付近にもうひとつのピークがある。

砕石表面から 100mm の高さ（≒相当粗度 ks）における流速 1.9m/s(τ_{*d}=0.073) と流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) の流速の時系列データを図-7, 図-8 に示す。これらから，流速の時間変化も周期性が認められる。なお，流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) 時の管水路中央の流速鉛直分布を図-9 に示す。流速鉛直分布が対数則に従うとして算出した砕石表面の相当粗度は 0.079～0.126m となっている。

図-10 は流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) 時の流速変動のスペクトルであるが，0.5～1Hz 付近にピークがある。これらから，試験砕石の 0.5～1.5 秒間隔の大きな振動は，流速の変動周期に連動して生じているものと考えられる。0.5～1.5 秒の間隔で，大きな振動が瞬間的に生じる際の変位量を図-11 に示す。流速 2.5m/s(τ_{*d}=0.13) 時における加速度計測値に基づく振動の変位量は 0.4mm となった。

試験砕石の振動は，砕石の衝突や振動によるかみ合わせ状態の変化により，流速や掃流力との関係に

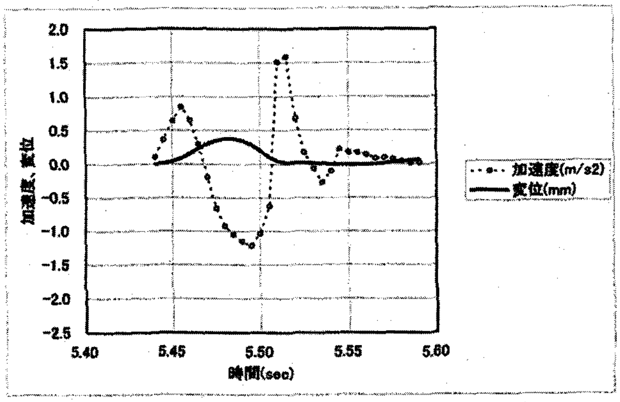


図-11　振動が顕著な状況での砕石の変位量

ばらつきがあるが，傾向としては流速の増加に伴い砕石の振動が増大して，流出に至る。特に，周期的に生じる大きな振動が砕石の流出に大きく関連すると考えられる。動水勾配，流速分布の計測結果に基づく，無次元掃流力 τ_{*d}，摩擦速度 u_* 等の水理量算定値と試験砕石の最大加速度の関係を表-3 に示す。ここで，最大加速度値は，時系列データの 3σ（標

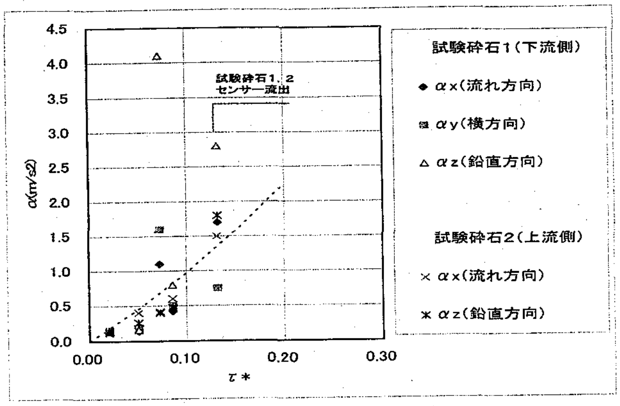


図-12　無次元掃流力τ_{*d}と最大加速度αの関係

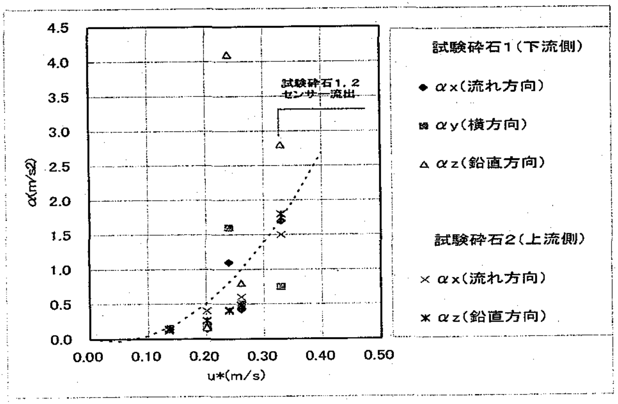


図-13　摩擦速度u^*と最大加速度の関係

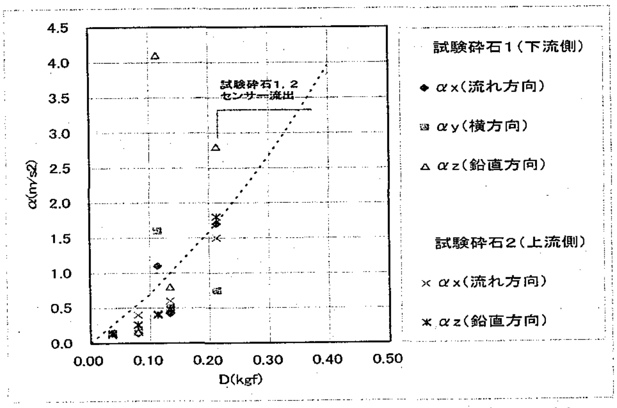


図-14　砕石への作用抗力Dと最大加速度の関係

準偏差σの3倍の値）を用いた。

無次元掃流力τ_{*d}，摩擦速度u_*，砕石への作用抗力Dと最大加速度の関係を図-12～図-14に示す。無次元掃流力τ_{*d}と最大加速度αの関係では，τ_{*d}の増加に伴い，最大加速度の各成分は概ね増加傾向になっており，τ_{*d}=0.13付近で鉛直方向の最大加速度2.8m/s^{2}が生じて，試験砕石が流出している。ただし，τ_{*d}=0.07付近で鉛直方向の最大加速度4.1m/s^{2}が発生しているが，このときには流出に至っていない。これは，砕石の振動と流出のプロセスで述べたとおり，振動した砕石が周囲の砕石と再びかみ合ったためである。

5．結論と今後の展開

(1) 結論

本検討から、以下の知見が得られた。

①砕石表層の初期移動は，シールズダイヤグラム及び岩垣の式による移動限界（τ_{*c}=0.05～0.06）とほぼ一致していることを確認した。

②砕石が流出する直前では，顕著な振動が生じていることが判った。

③周囲の砕石とのかみ合わせが緩い場合に振動が生じるが，上流から流出してきた砕石の衝突や周囲の砕石の流出がきっかけとなる。

④振動が増大した砕石でも，振動によって，周囲の砕石とのかみ合わせが強くなり，振動が弱まる場合がある。これらの現象により，移動限界τ_{*c}に幅が生じる。

⑤振動が顕著な状況では，加速度の変化の特徴として，0.5～1.5秒の間隔で，大きな加速度が瞬間的に生じている。流速の時間変化も周期性が認められ，1Hz付近にピークがあり，相関が認められる。

(2) 今後の展開

本報告では，捨石護岸の砕石を対象に小型加速度計を埋設して挙動の分析を行ったが、この中で、かみ合わせや拘束力を大きくすることで、移動限界を大きくできることが判った。ふとん籠の中詰め材設計時にτ_*=0.10を採用しているのも拘束力を反映させたものと考えることができる。今後、砕石の拘束力に着目して、枠構造など耐流速を高めるための工法の評価に加速度計を用いた検討を応用できると考えられる。また，現地の石やブロック，構造物の動態観測の一方法として応用が可能と考えられる。

振動特性の特徴から，洪水あるいは波浪による外力の推定を行ったり，ブロックや構造物の異変を捉えて，維持管理や改築の目安として活用できるように，研究開発を進める。

参考文献

1) 山本晃一著，山海堂，護岸・水制の計画・設計，2003. 水理公式集（昭和60年版），pp. 221，1985.
2) 高田保彦，末次忠司，諏訪義雄，東高徳，平林桂：袋体工の流れに対する応答特性と設計上考慮するべき事項について，河川技術論文集，第7巻，pp. 127-132，2001.
3) 財団法人　国土開発技術研究センター偏，山海堂，護岸の力学設計法，2000.
4) 水理公式集（昭和60年版），pp. 221，1985.

(2007.4.5受付)