

# コンクリート砂防堰堤への礫衝突に関する一考察

A study on the impact of a rock onto concrete Sabo dam

石川信隆\*、金子鉄兵\*\*、別府万寿博\*\*\*

Nobutaka Ishikawa, Teppei Kaneko and Masuhiro Beppu

\*工博，防衛大学校名誉教授，砂防鋼構造物研究会研究顧問(〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5)

\*\*修士(工学)，前防衛大学校研究科学生(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*博士(工学)，防衛大学校建設環境工学科准教授(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

**Key Words:** Impact load of a rock, Concrete Sabo dam wing, DEM-MPS method, Debris flow including rocks

キーワード: 礫衝突荷重, コンクリート砂防堰堤袖部, DEM-MPS 法, 石礫型土石流

## 1. 緒言

土石流中の巨礫がコンクリート砂防堰堤袖部に衝突するとき、写真-1 のように袖部が完全に破壊されることが多い。従来この分野の主な研究としては、下田ら<sup>1)</sup>が個別要素法によるコンクリート製砂防堰堤袖部の衝撃破壊シミュレーション解析を行った例がある。ここでは、石礫型土石流がコンクリート砂防堰堤袖部への衝突荷重と破壊状況を解明するための基礎的段階として、衝撃汎用ソフト Autodyn<sup>2),3)</sup> (有限差分法による解析) を用いて以下の計算を行った。

(1) まずコンクリート砂防堰堤袖部モデルに対する巨礫の直径および礫速度が荷重-局部変形関係に与える影響およびその勾配のバネ定数を求めた。(2) 同時に、巨礫の直径および礫速度がコンクリート堰堤袖部モデルの破壊性状に与える影響を調べた。(3) さらに、個別要素法と粒子法を結合させたシミュレーション解析法 (DEM-MPS 法) を開発して、石礫型土石流を受けるコンクリート壁に対する衝突荷重-時間曲線を求め、石礫型土石流の荷重評価の基礎資料とした。



写真-1 コンクリート砂防堰堤袖部の破壊

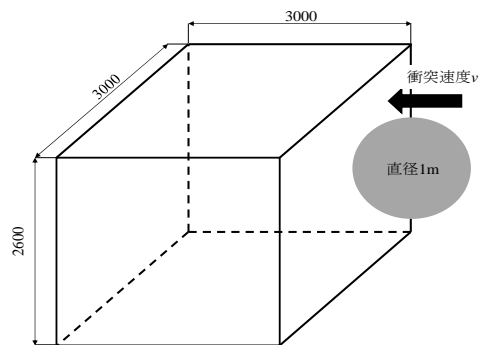


図-1 コンクリート砂防堰堤袖部モデルへの礫衝突

## 2. 巨礫によるコンクリート袖部への衝突計算

図-1 に示すようなコンクリート袖部モデル (天端幅 3m, 袖高 2.6m, ブロック幅 3m, 下端は固定) の中央部に直径 1m および 2m の巨礫が衝突した場合を、衝撃汎用ソフト Autodyn<sup>2)</sup> を用いて解析した。コンクリートの強度、弾性係数およびポアソン比は、表-1 のようにそれぞれ 18N/mm<sup>2</sup>, 22kN/mm<sup>2</sup> および 0.23 とした。また、コンクリートの状態方程式は非線形モデル、降伏条件は二直線降伏モデル、破壊基準はスポール破壊基準を使用した。礫モデルの定数も表-1 の通りである。

表-1 衝突計算における定数

コン ク リ ー ト	密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.3
	ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	2.2×10 <sup>4</sup>
	降伏応力(N/mm <sup>2</sup> )	18
	ポアソン比	0.23
	状態方程式	非線形モデル
礫	降伏条件	二直線降伏モデル
	破壊基準	スポール破壊基準
	密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.6
	ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	4.9×10 <sup>4</sup>
	ポアソン比	0.23
	状態方程式	線形モデル
	降伏条件	弾性モデル

## 2.1 荷重-時間曲線および局部変形-時間曲線

図-2および図-3に礫径1mの場合の荷重-時間関係および局部変形-時間曲線を示す。荷重は、衝突速度10.0m/sの場合は約6000kNとなり、衝突速度2.0m/sの約1000kNに比べて約6倍の大きさとなる。また局部変形は、速度10.0m/sで22mmで、速度2m/sの7mmの約3倍となっている。

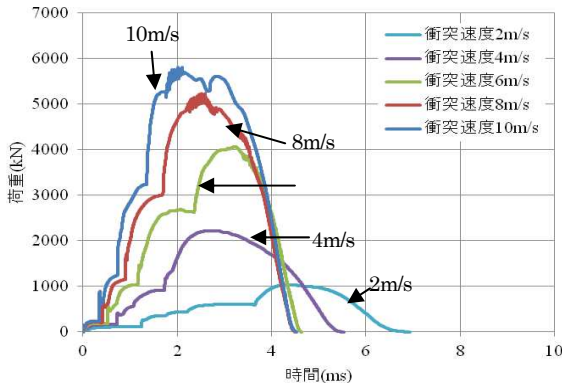


図-2 荷重-時間曲線 (礫径1m)

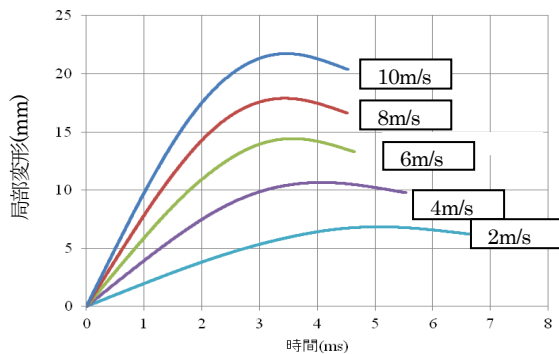


図-3 局部変形-時間曲線 (礫径1m)

## 2.2 荷重-局部変形曲線

### 2.2.1 礫径1mの場合:

図-4は、図-2,3から時間軸を消去して、衝突速度2m/s-10m/sの場合の荷重-局部変形曲線を示したもので、速度の増加と共に包絡線を描くようになっている。この曲線内部の面積が吸収エネルギーであり、礫衝突による衝撃エネルギーの約90-95%となっている。

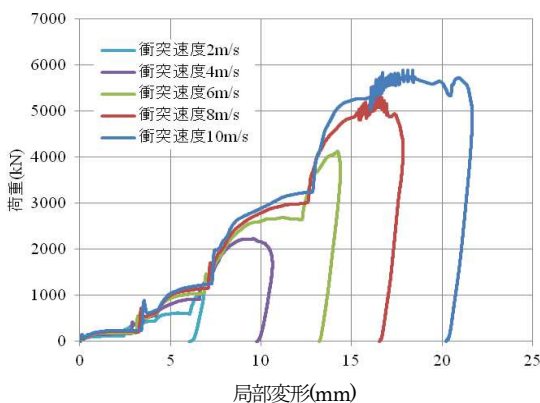


図-4 荷重-局部変形曲線 (礫径1m)

### 2.2.2 礫径2mの場合

図-5は礫径2mで衝突速度2m/s-10m/sの場合の荷重-局部変形曲線を示したもので、礫径2mで衝突速度10m/sの場合(約18000kN)は、礫径1mの場合(約6000kN)より約3倍も大きい衝突荷重となっている。また礫径1mに比べ勾配が急になっている。

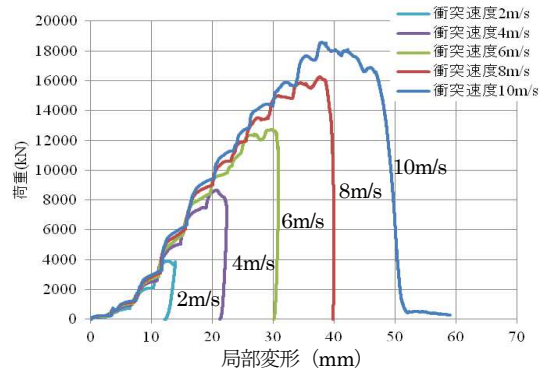


図-5 荷重-局部変形曲線 (礫径2m)

### 2.2.3 バネ定数の決定

図-4および図-5の荷重-局部変形曲線の勾配から、バネ定数Kがそれぞれ礫径1mの場合 $K=250-300$  kN/mmおよび礫径2mの場合 $K=450-500$  kN/mmと得られた。これらは、個別要素法における礫衝突のバネ定数として用いられる。

## 2.3 コンクリート砂防堰堤袖部の破壊状況

図-6および図-7は、礫径1mおよび2mの礫が2m/s-10m/sの衝突速度で衝突したときのコンクリート砂防堰堤袖部の破壊状況を示したもので、礫径1mの場合は速度8m/s以上、礫径2mの場合は速度4m/s以上になると、それぞれ袖部下面に引張破壊を生じた。これは、写真-1のような袖部が消失する破壊が起こる可能性を示唆している。

## 2.4 現行の設計荷重との比較

図-8は、計算による最大衝突荷重と現行設計荷重<sup>4)</sup>およびヘルツの接触理論値と比較したものである。

- ① 計算値は、ヘルツの理論値と設計荷重値の間にあることが分かった。
- ② 計算値は、速度4m/sまでは設計荷重とほぼ一致しているが、6m/sを越えると、約1.1-2.0倍大きくなることが認められた。これは、現行の設計荷重式が実際に観測した動的荷重を静的荷重に置換した算定式であるためと考えられる。
- ③ また、ヘルツの理論値と設計荷重を比較すると、ヘルツの理論値はほぼ線形に増加しているが、現行の設計荷重は、礫衝突速度6.0m/sを境に一定値に収束している。

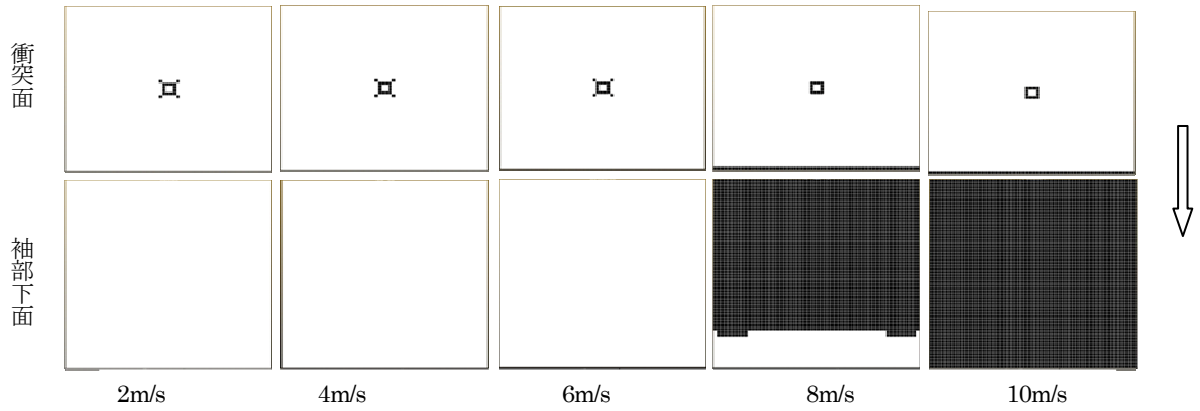


図-6 コンクリート砂防堰堤袖部の破壊状況 (礫径 1m) 黒色:引張破壊

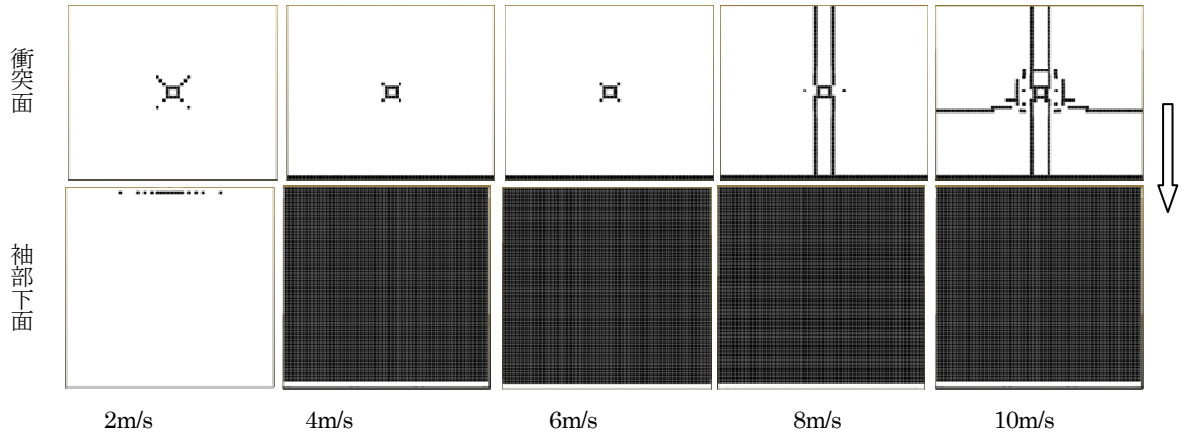


図-7 コンクリート砂防堰堤袖部の破壊状況 (礫径 2m) 黒色:引張破壊

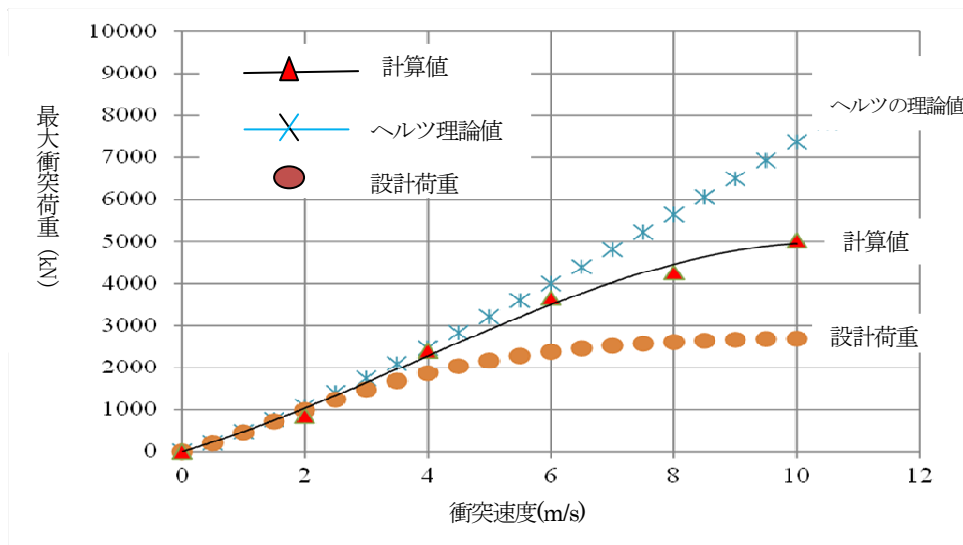
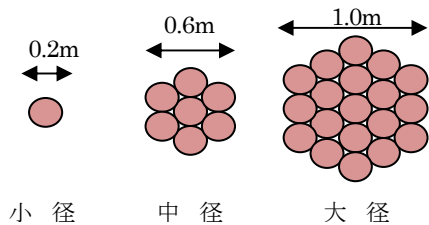


図-8 最大衝突荷重と衝突速度との関係

### 3. MPS-DEM 法による石礫型土石流の衝突荷重解析

ここでは、MPS 法を用いて剛体と流体の連成解析を行う。礫は剛体粒子の集合体としてモデル化し、図-9に示すように、直径 0.2m, 0.6m および 1.0m の 3 種類とした。これらの礫と流体粒子を混合することで、石礫型

土石流モデルを作成する。巨礫がコンクリート堰堤袖部に衝突する場合の荷重応答は、個別要素法を用いて評価する。すなわち、図-10 に示すような衝突現象を局部バネによって表現することを試みる。この局部バネの特性については、2 章の礫衝突解析から得られた荷重～へこみ量関係の勾配とした。



小径 中径 大径

図-9 礫のモデル化

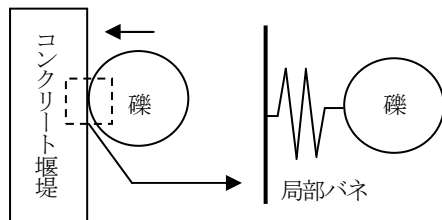


図-10 局部バネのモデル化

図-11 に石礫型土石流の解析モデルを示す。石礫型土石流モデルは、長さ10m、高さ1.9mの長方形でモデル化し、泥流の先頭部に大径礫を3個、中径礫を4個、小径礫を3個の合計10個をランダムに配置した。泥流粒子の密度は $1.2\text{g/cm}^3$ とした。礫の密度は $2.6\text{g/cm}^3$ とした。モデルの粒子に一樣に初速 $3\text{m/s}$ を与えている。荷重については、図-11 に示す左端の壁の圧力に壁の高さに乗じて、単位幅(1m)当りの流体力を求めた。

図-12 に石礫型土石流の挙動を示す。石礫群はほぼ同時に壁に衝突し、その後は逆流した泥流とともに流されている様子がわかる。図-13 に石礫型土石流モデルの流体力～時間関係を示す。この荷重は、礫の衝突を含んでいない流体力であり、壁の圧力から算出したものである。水深が高いことおよび流体が礫に拘束されるため、最大荷重は $200\text{kN/m}$ となった。

図-14 に石礫型土石流の礫衝突荷重～時間関係を示す。図の原点は、土石流が壁に衝突した時刻を示している。図-12 からわかるように、石礫群がほぼ同時に壁に衝突しているため、礫衝突荷重は初期に最大約 $7500\text{kN}$ もの大きな値を示した。また、最初の衝突以降も礫同士の衝突や土石流の流れの影響によって $1000\text{kN}\sim 3000\text{kN}$ の衝突荷重が生じていることがわかる。

#### 4. 結言

本研究では、コンクリート製砂防堰堤袖部に対して衝突荷重と破壊について検討したが、今後、鋼製透過型砂防堰堤に対しても同様な解析を試み、石礫型土石流に対する砂防堰堤の安全性照査の資料とするものである。

##### 参考文献：

- (1) 下田義文, 水山高久, 石川信隆, 古川浩平: 巨礫を受けるコンクリート製砂防ダム袖部の衝撃模型実験と被災例シミュレーション, 土木学会論文集, No. 450, I-20, pp. 131-140, 平成4年7月。

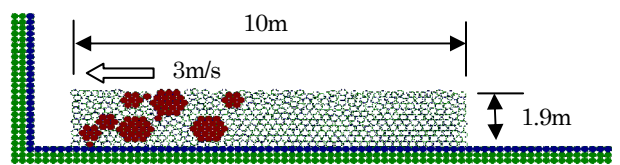


図-11 石礫型土石流モデル

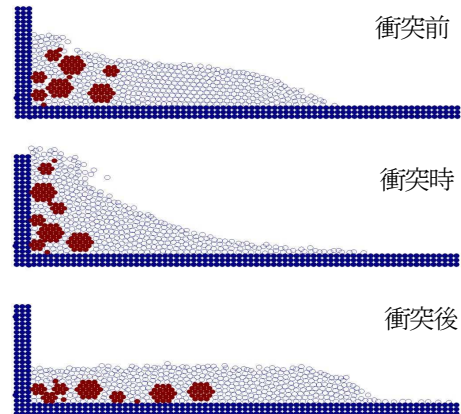


図-12 石礫型土石流の挙動

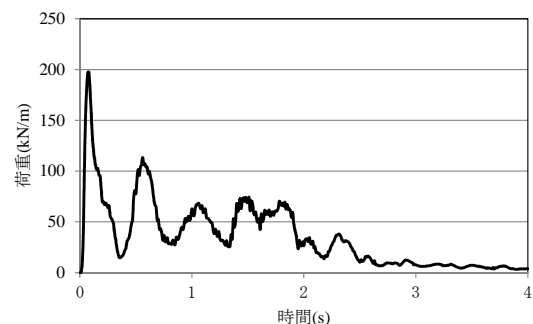


図-13 石礫型土石流の流体力(単位幅当り)

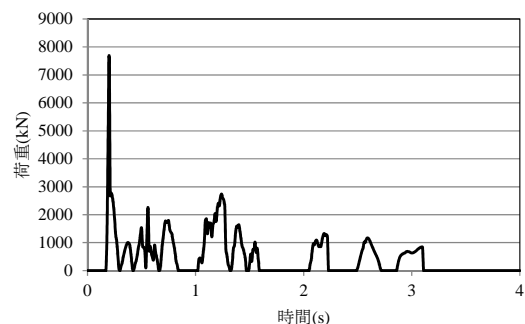


図-14 礫衝突荷重

- (2) AUTODYN: <http://www.engineering-eye.com/AUTODYN/outline.html>.
- (3) M. Itoh, M. Beppu and R. Matsuzawa: Numerical simulations of RC slabs subjected to impact loading by using the improved caprour constitutive model, Proc. of 10th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2013.
- (4) 砂防・地すべり技術センター: 鋼製砂防構造物設計便覧, p. 22, 平成21年版, 平成21年9月。