

## (10) 礫中詰材を有する鋼製枠砂防堰堤の耐衝撃性能評価に関する基礎的研究

Numerical simulation on the impact resistance of steel frame dam

園田 佳巨\*, 末崎 将司\*\*, 大隅 久\*\*\*

Yoshimi SONODA, Masashi SUEZAKI, Hisashi OHSUMI

\*工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*九州大学大学院修士課程, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*\*砂防鋼構造物研究会 (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-7-5 砂防会館 5F)

キーワード: 鋼製枠砂防堰堤, 衝撃応答, 個別要素法  
(steel frame dam, impact behavior, distinct element method)

## 1. 緒言

我が国は、国土の4分の3を山地や丘陵地が占めるとともに梅雨や台風時期に集中豪雨が多いことから、土石流・地すべり等の土砂災害による被害が各地で生じている。これらの土砂災害から人命や財産の損失を防ぐための代表的な防護構造物として、各種の砂防堰堤が土石流発生危険渓流に提案・施工されている。その砂防堰堤の一つに写真-1に示すような鋼製枠組の中に現地で採取した小径の礫を中詰材として充填した鋼製枠砂防堰堤<sup>1)</sup>がある。鋼製枠砂防堰堤は、コンクリート製の砂防堰堤に比べて、施工期間が短く、優れた透水性により堆積土砂の地下水位を低下させることができるだけでなく、周囲地盤の変形にも追随可能、現地で調達した礫を利用することができるなどの数多くの利点を有する合理的な構造と考えられていたが、平成14年7月に三重県藤原町で発生した土石流による被災事故<sup>2)</sup>によって、その安全性について大きな懸念が持たれることになった。

鋼製枠砂防堰堤において、土石流に対する抵抗力の大半を占めると考えられている物体は中詰材である。しかし、その衝撃荷重に対する抵抗メカニズムや衝撃緩衝効果は複雑なものであり、明確にされていないのが現状である。

そこで本研究では、礫中詰材の緩衝効果を把握することを目的として鉄球落下による衝撃緩衝実験を行った。また、実験のシミュレーションを行うことで、礫中詰材による緩衝効果を表現可能な解析手法についての検討を行った。次に、3次元個別要素法をベースとして独自の改良を加えた数値解析モデルを用いて、中詰材と鋼製枠組の相互作用を考慮した構造全体系での3次元衝撃応答解析手法を作成し、巨礫の衝突に対する鋼製枠砂防堰堤袖部の耐衝撃性能を、シミュレーション解析により評価することを試みた。

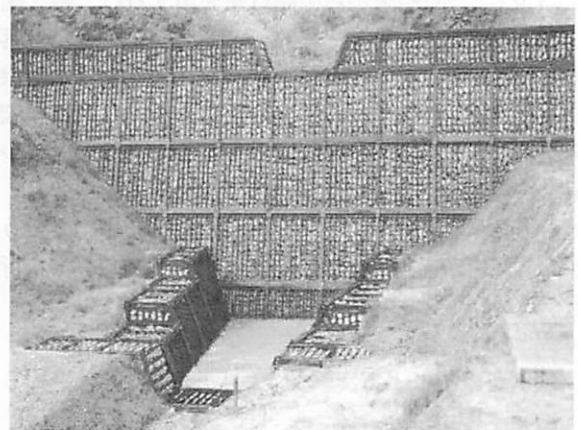


写真-1 鋼製枠砂防堰堤

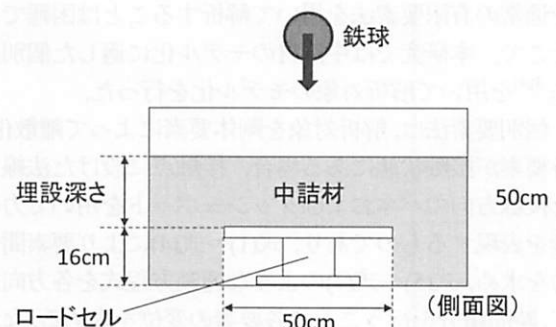


図-1 実験装置

## 2. 鉄球落下による衝撃緩衝実験

## 2.1 実験概要

本実験は、落錘式衝撃実験装置を用いて質量6.0kg、直径13.0cmの鉄球を自由落下させるもので、落下位置にはロードセルを設置した。また、緩衝効果を把握するために、図-1に示すようにロードセル上には直径1cm~2cm程度の礫材を中詰材として充填した。なお、実験パラメ

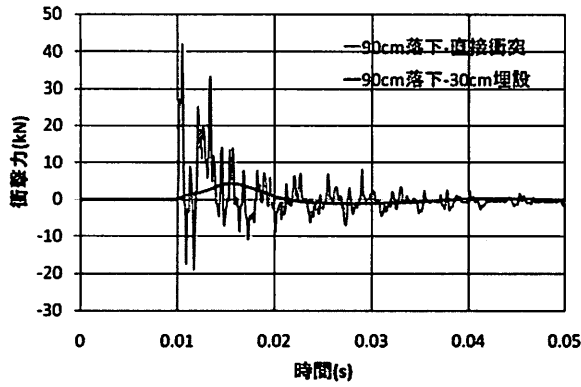


図-2 衝撃力-時間関係

一タとしては、鉄球の落下高さ、中詰材の埋設深さを取り入れた。

## 2.2 実験結果

図-2 には、実験より得られた衝撃力-時間関係を示している。この結果から中詰材を充填すれば、最大衝撃力が約 90%低減することが確認できた。図-3 には落下高さを 210cm とし、埋設深さをパラメータとした衝撃力-時間関係を示している。この図より中詰材の埋設深さが増加すると、緩衝効果が増大し、最大衝撃力は減少することが分かった。

実験のシミュレーションを個別要素法を用いて行うことで、礫中詰材の緩衝効果を表現する手法の提案を行った。

## 3. 個別要素法による実験シミュレーション

### 3.1 個別要素法

礫中詰材は個々が独立した固体であるため、その挙動を通常の有限要素法を用いて解析することは困難である。そこで、本研究では中詰材のモデル化に適した個別要素法<sup>3,4)</sup>を用いて解析対象のモデル化を行った。

個別要素法は、解析対象を剛体要素によって離散化し、各要素が接触状態にある場合、接触点に設けた法線方向と接線方向のバネおよびダッシュポットを用いて力の伝達を表現するものであり、式(1)~式(4)により要素間作用力を求め、式(5)~式(7)のような運動方程式を各方向に立て、時間積分を行うことで各要素の変位を求める。なお、時間積分には中央差分法を用いる。

$$f_n = k_n \Delta u_n \quad (1)$$

$$f_s = \begin{cases} k_s \Delta u_s (k_s \Delta u_s \leq \mu f_n) \\ \mu f_n (k_s \Delta u_s > \mu f_n) \end{cases} \quad (2)$$

$$k_n = \frac{EA}{l} \quad (3)$$

$$M = r f_s \quad (4)$$

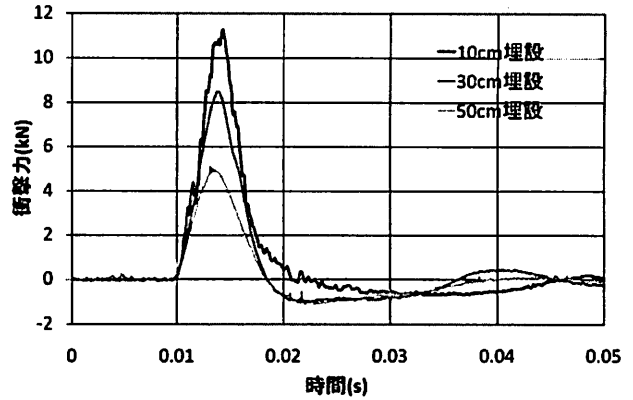


図-3 落下高さ 210cm

$$m\ddot{u}_n + c\dot{u}_n + f_n = 0 \quad (5)$$

$$m\ddot{u}_s + c\dot{u}_s + f_s = 0 \quad (6)$$

$$I\ddot{\phi} + c\dot{\phi} + M = 0 \quad (7)$$

ここで、 $f$  は要素間作用力、 $k$  はバネ剛性、 $\Delta u$  は要素間の相対変位、 $n$  は法線方向の意味、 $s$  は接線方向の意味、 $\mu$  は摩擦係数、 $E$  は接触素のヤング率の平均、 $A$  は接触面積、 $l$  は接触要素の半径和、 $r$  は要素半径、 $m$  は要素質量、 $u$  は要素変位、 $c$  は減衰定数、 $I$  は慣性モーメント、 $\phi$  は要素の回転変位、 $M$  は要素に働くモーメントを示す。

### 3.2 中詰材のモデル化

各中詰材要素間で以下の接触条件を満足する場合に、力の伝達を求める。

$$r_i + r_j \geq R_{ij} \text{ (接触)} \quad (8a)$$

$$r_i + r_j < R_{ij} \text{ (非接触)} \quad (8b)$$

ここで、 $R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$  :  $i, j$  要素中心間距離、 $(x_i, y_i, z_i)$  :  $i$  要素の中心座標、 $(x_j, y_j, z_j)$  :  $j$  要素の中心座標、 $r_i, r_j$  :  $i, j$  要素の半径を示す。

法線方向バネ剛性を求める際、式(3)に用いる接触面積は、厳密には中詰材相互の相対変位の非線形関数として評価する必要があるが、中詰材の衝撃緩衝効果を簡易に評価するために、接触面積として図-4 に示すような要素の投影面積を用いた。この場合、中詰材の集合体を均質な連続体とみなした場合に相当するので、低減係数 $\alpha$ を想定し、低減係数 $\alpha$ を式(9)に示すように法線方向バネ剛性に乗じて緩衝効果を表現した。

$$K = \alpha \times EA / l \quad (9)$$

### 3.3 解析条件

本解析では、図-5 のように球形要素で離散化した解析モデルを用いる。中詰材の埋設深さは 30cm とし、鉄球には 210cm の高さから落下させた際の衝突速度として初速  $6.4 \times 10^3$  (mm/s) を与える。また、ロードセル要素、

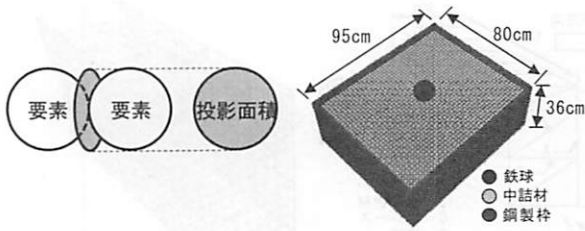


図-4 投影面積 図-5 解析モデル

表-1 材料特性

材料	要素半径(cm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )
中詰材	1.0	2.67	$4.8 \times 10^4 \times \alpha$
ロードセル	1.0	7.87	$2.1 \times 10^5$
鋼製枠	1.0	7.87	$2.1 \times 10^5$
鉄球	6.5	5.22	$2.1 \times 10^5$

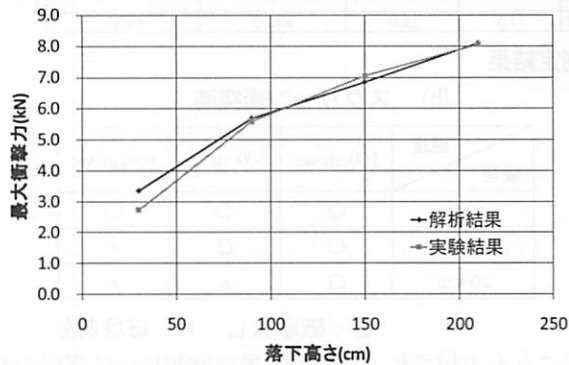


図-7 埋設深さ 30cm

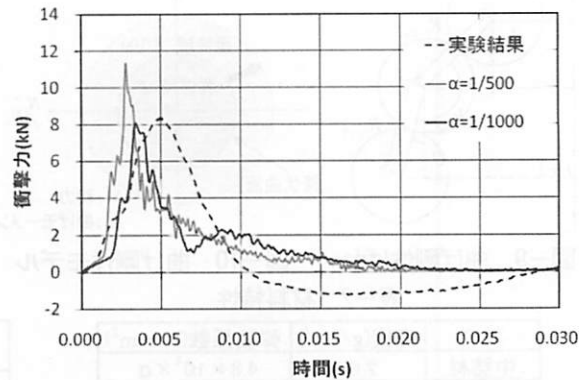


図-6 解析結果と実験結果

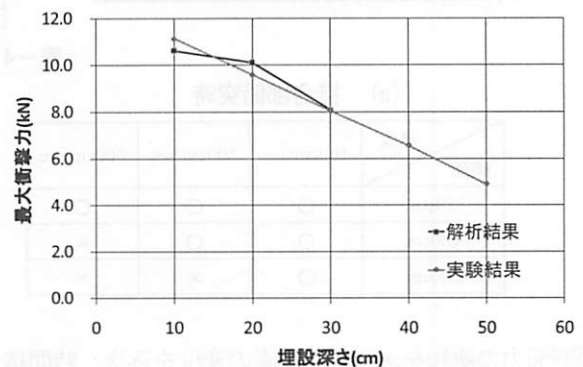


図-8 落下高さ 210cm

鋼製枠要素は全方向に固定し、ロードセル要素の鉛直方向に作用する力の総和をロードセルに作用する衝撃力として算出した。中詰材、ロードセル、鋼製枠、鉄球の材料特性は表-1の通りである。

### 3.4 解析結果

図-6に、低減係数 $\alpha$ をパラメータとした解析結果と実験結果との比較を示しているが、この結果より低減係数 $\alpha$ を小さく設定すれば得られる最大衝撃力も減少し、 $\alpha=1/1000$ と設定すれば、最大衝撃力は実験結果と概ね近い値を示すことが分かった。このことは、図-7、図-8に示すように落下高さ、埋設深さが異なる条件での解析においても認められた。低減係数が非常に小さい値となる原因としては、1) 現実の礫材が点接触に近いこと、2) 中詰材個々が独立して非可逆的な変位を生じて衝撃エネルギーを消費する効果が存在することの2点が主たる理由であると考えられる。

## 4. 個別要素法を用いた鋼製枠砂防堰堤の解析モデル

### 4.1 鋼製枠のモデル化

鋼部材については、通常の骨組要素でモデル化しても構わないと考えられるが、中詰材との接触判定を容易にするために球状要素の集合体として表し、個別要素法の考えを利用してモデル化を行った。すなわち、法線方向

の力については、3.1と同様にバネおよびダッシュポットを用いて、式(1)、(3)より与える。

本来、鋼製枠砂防堰堤は各部材が軸力(法線方向力)のみを伝達するトラス構造として設計されているため、接線方向のバネやダッシュポットを設けないモデルも考えられるが、鋼製枠組内に充填された中詰材の側圧や衝撃荷重による影響を正確に評価するには、曲げモーメントを伝達できる構造要素でモデル化した方が望ましいと考えられる。そこで、鋼部材要素間には曲げモーメントを表現できるように、図-9に示すような曲げバネ $k_M$ を設けた。

$$M = k_M \Delta\theta \quad (10)$$

ここに、 $k_M = EI/\bar{R}$ 、 $E$ : 弾性係数、 $I$ : 断面2次モーメント、 $\bar{R} = (R_{i-1,i} + R_{i,i+1})/2$ : 隣接要素中心平均距離、 $\Delta\theta = \theta_i - \theta_{i-1}$ : 相対回転角を示す。

また、鋼製骨組の剛性は、断面力として作用する曲げモーメントと軸力の相互の影響を考慮した図-10に示すようなモデルを適用し、降伏後は初期剛性の1/100となるバイリニア型の構成則とした。ここで、降伏および破壊曲げモーメントは、片持ち梁の先端に静的荷重を行い、降伏応力 $235(\text{N/mm}^2)$ および破壊応力 $400(\text{N/mm}^2)$ のそれぞれの応力に達したときの曲げモーメントを算出することにより決定した。

以上のモデル化をもとに、接触状態にある要素間で作

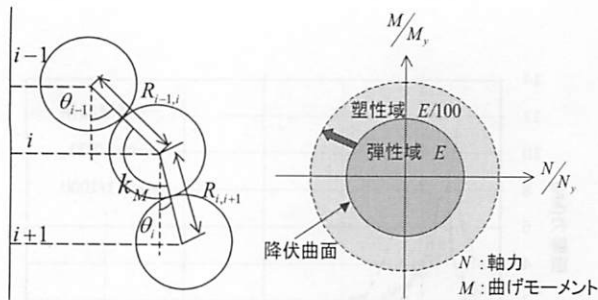


図-9 曲げ剛性ばね 図-10 曲げ剛性モデル

表-2 材料特性

材料	密度(g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )
中詰材	2.67	4.8 × 10 <sup>4</sup> × α
衝突礫	2.67	4.8 × 10 <sup>4</sup>
鋼製柵	7.87	2.06 × 10 <sup>5</sup>

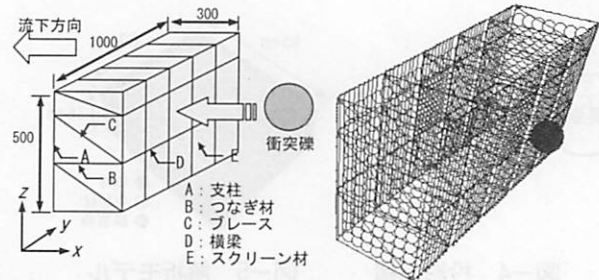


図-11 解析対象 図-12 解析モデル

表-3 鋼製柵の材料特性

規格	断面積(cm <sup>2</sup> )	断面2次(cm <sup>4</sup> )	降伏曲げモーメント(kN・cm)	破壊曲げモーメント(kN・cm)
支柱	39.1	1620.0	5400.0	11400.0
横梁	30.0	839.0	3400.0	7200.0
つなぎ材	17.1	839.0	700.0	1400.0
ブレース材				
スクリーン材	11.3	26.0	220.0	640.0

表-4 破壊判定結果

(a) 接合部衝突時

礫径	速度		
	100cm/sec	300cm/sec	600cm/sec
50cm	○	○	○
100cm	○	○	×
200cm	○	×	×

(b) スクリーン衝突時

礫径	速度		
	100cm/sec	300cm/sec	600cm/sec
50cm	○	○	○
100cm	○	○	×
200cm	○	×	×

○ : 破壊なし × : 破壊あり

用断面力の総和を求め、各要素の変位を逐次、時間積分により求めた。

#### 4.2 解析条件

本研究では、図-11に示すような下流側の主要部材(支柱、横梁)およびスクリーン材に破断が生じたときに本構造物が終局限界に達すると仮定した。これは、下流側の主要部材の破壊が全体崩壊につながる危険性があるとともに、下流側のスクリーン材の破壊により礫中詰材が流出した場合にも、耐衝撃性能が損なわれると考えられるためである。以上の判定基準をもとに、図-12に示す解析モデルを用いて、本構造物の耐衝撃性能評価を試みた。衝突条件として、礫径、衝突速度をパラメータとして解析を行い、衝突箇所は、接合部、スクリーン中央の2箇所とした。

中詰材、鋼製柵、衝突礫の材料特性は表-2の通りで、鋼製柵各部材の材料特性は表-3の通りである。

#### 4.3 解析結果

表-4(a), (b)には、各衝突箇所における破壊判定結果を示している。衝突箇所が接合部、スクリーン中央ともに同様の条件で破壊が発生したが、破壊形態は異なる結果となった。接合部衝突では、つなぎ材に破壊が生じた後、背面の主要部材または横梁の破壊が発生した。一方、スクリーン衝突では背面のスクリーン材が破壊する結果となった。実際には、衝撃力が砂防堰堤の前面から背面まで伝達する過程で、大半の衝撃エネルギーが消費され

ることも予想され、今回の結果は鋼製柵砂防堰堤の耐衝撃性能を過小評価している可能性があると考えられる。

#### 5. 結言

鋼製柵砂防堰堤の衝撃応答解析手法を提案し、破壊基準を設けることで破壊の可能性を予測することができた。今後、1)中詰材間を衝撃力が伝達される際のエネルギー損失を評価すること、2)土石流を適切にモデル化することで、鋼製柵砂防堰堤の耐衝撃性能の評価精度の向上を試みる予定である。

#### 参考文献

- 1)砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物研究会：鋼製砂防構造物に関する研究，1983
- 2)近藤観慈，沼本晋也，林拙郎：2002年7月17日三重県藤原町で発生した土石流，砂防学会誌，Vol.55，No.5，p.31 - 39，2003
- 3)Cundall,P.A.: A Computer Model for simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock System, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp.129-136, 1971
- 4)木山英郎，藤村尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号，pp.137-146,1983