

## 中詰材の緩衝効果に関する基礎的研究

九州大学 学生会員 ○末崎 将司 九州大学大学院 正会員 園田 佳巨  
 砂防鋼構造物研究会 大隅 久 九州大学大学院 正会員 森谷 晋

## 1. 緒言

日本では土砂災害が多発するため、その被害抑制を目的とした防護構造物が設計、施工されており、その一つに写真-1に示すような鋼製枠砂防堰堤がある。鋼製枠砂防堰堤は、透水性に優れていることや、周囲地盤の変形にも追随可能などの利点を有しているが、一方で鋼製枠、中詰材から構成される構造形式は複雑であるため、その耐衝撃性能は不明確である。そこで、本研究では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中詰材に着目し、衝撃荷重の緩衝効果に関する模型実験を行い、解析によって実験をシミュレートすることにより、その緩衝効果を表現可能な衝撃応答解析手法の開発を行った。



写真-1 鋼製枠砂防堰堤

## 2. 実験

## 2.1 実験内容

落錘式実験装置を用いて鉄球をロードセルに落下させる実験を行った。中詰材としては小径(直径 2cm 程度)の礫を用いた。本実験では、緩衝効果の確認を目的として、ロードセル上に詰める中詰材の埋設高さ(0cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm)、鉄球の落下高さ(30cm, 90cm, 150cm, 210cm)をパラメータとして、計 22 ケース(直接落下は 2 ケースのみ)の実験を行った。なお、本実験では図-1のような寸法の鋼製枠、鉄球を用い、ロードセルに作用する衝撃力-時間関係を測定した。

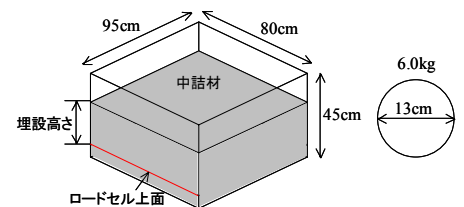


図-1 鋼製枠および鉄球の寸法

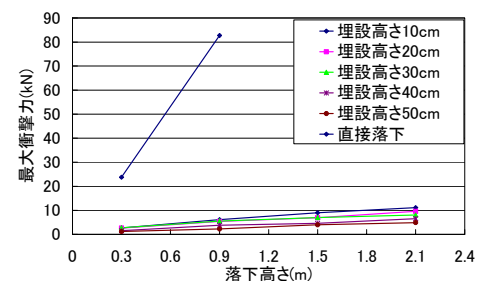


図-2 最大衝撃力-落下高さ

## 2.2 実験結果

## 1) 中詰材の緩衝効果

図-2 に落下高さをパラメータとした最大衝撃力-落下高さ関係を示す。この図より中詰材を埋設した場合は直接落下の場合と比較して、衝撃力が約 90%も低減されることが分かった。また、当然の結果として落下高さが増加すると、最大衝撃力も増加することが確認できた。

## 2) 中詰材の埋設高さの影響

図-3 に落下高さを 210cm とし、埋設高さをパラメータとした衝撃力-時間関係を示す。この図より中詰材の埋設高さが増加すると、最大衝撃力は減少することが分かった。

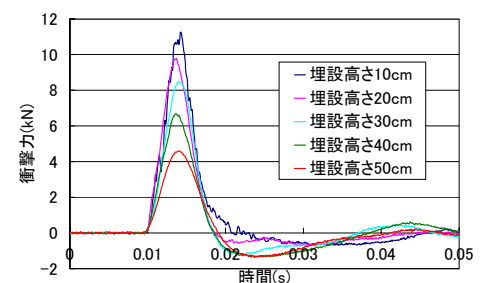


図-3 衝撃力-時間関係

## 3. 解析

## 3.1 解析手法

解析対象は、鋼製枠、中詰材、鉄球、ロードセルの 4 種類から構成されており、その挙動を正確に把握するためには、それぞれの力学的特性を考慮したモデル化を行う必要がある。特に、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、本解析では中詰材のモデル化に適した個別要素法を用いた。また、拘束条件を考慮する必要があることから、3 次元でモデル化を行った。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。

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

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

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

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

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

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

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

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、 $E$  は接触要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 解析モデル

本解析では、図-4のように球形要素で離散化した解析モデルを用いる。中詰材の埋設高さは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、鋼製棒は全方向に固定し、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かかる衝撃力とする。中詰材、ロードセル、鋼製棒、鉄球の材料特性は表-1の通りである。

### 3.3 解析結果

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には、図-6に示すような要素の投影面積を用いた(中詰材の集合体を均質な連続体とみなした場合に相当)場合の換算ヤング率と礫材本来のヤング率の定量的な関係を把握することが望ましい。そこで、本研究では中詰材のヤング率をパラメータとして、礫材本来のヤング率  $E = 4.8 \times 10^4$  (N/mm<sup>2</sup>) を基準としたパラメトリックな解析を試みた。図-5に中詰材のヤング率をパラメータとした衝撃力-時間関係を示す。この図より、中詰材の換算ヤング率を小さくすれば、ロードセルにかかる最大衝撃力も減少し、個々が分離した中詰材の緩衝効果は、礫材本来のヤング率の10000分の1程度に見積もれば良いことが認められた。換算ヤング率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. 結論

本研究では、簡易な衝撃実験により中詰材の緩衝効果を確認することができた。また、3次元個別要素法をベースとした解析により、中詰材の集合体としての換算ヤング率と礫材本来のヤング率との定量的な関係を推定することができた。今後は、適切な中詰材モデルを用いた鋼製棒砂防堰堤の全体解析を行い、耐衝撃性能の定量的な評価を行う予定である。

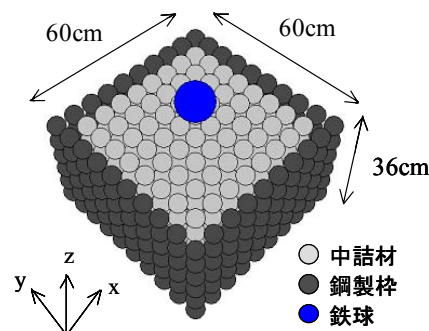


図-4 解析モデル

表-1 本解析に用いた材料定数

| 材料    | 要素半径<br>mm | 密度<br>g/cm <sup>3</sup> | ヤング率<br>N/mm <sup>2</sup> |
|-------|------------|-------------------------|---------------------------|
| 中詰材   | 30.0       | 2.67                    | —                         |
| ロードセル | 30.0       | 7.87                    | $2.1 \times 10^5$         |
| 鋼製棒   | 30.0       | 7.87                    | $2.1 \times 10^5$         |
| 鉄球    | 65.0       | 5.22                    | $2.1 \times 10^5$         |

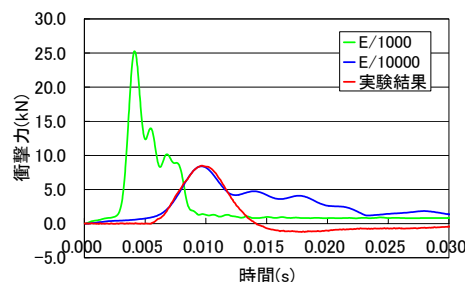


図-5 衝撃力-時間関係

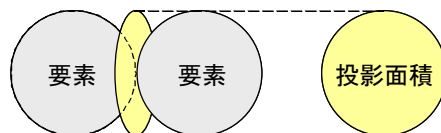


図-6 接触面積 (投影面積)