

礫中詰材による衝撃緩衝効果に関する基礎的研究

九州大学大学院 学生会員
砂防鋼構造物研究会

○末崎 将司
大隅 久

九州大学大学院
九州大学大学院

正会員 園田 佳巨
正会員 森谷 晋

1. 序論

土砂災害による減災を目的とした防護構造物として、砂防堰堤が各地に設置されている。この砂防堰堤の一つに写真-1に示すような鋼製枠の中に礫を中詰材として充填した鋼製枠砂防堰堤がある。鋼製枠砂防堰堤は、施工期間が短い、透水性に優れているなど、コンクリート製砂防堰堤にはない利点を持つ構造と考えられるが、平成14年に三重県で発生した土石流による崩壊事故で、その耐荷性能を再評価する必要が生じた。そこで本研究では、礫中詰材に対する衝撃実験を実施した上で、SPH粒子法を用いたシミュレーションを行い、礫中詰材の緩衝効果を定量的に表現可能な力学モデルの検討を行った。

2. 礫中詰材の衝撃緩衝実験

本実験は、落錘式衝撃実験装置を用いて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けた。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程度の礫中詰材を充填した。なお、実験パラメータとしては、鉄球の落下高さ、中詰材の埋設深さを取り入れた。図-2に得られた衝撃力-時間関係の1例を示す。この結果から中詰材により最大衝撃力が約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、最大衝撃力は減少することが分かった。図-4には、ロードセル上板のサイズを30cm×30cm、50cm×50cmとしたときの実験結果を示しているが、この図より、上板のサイズが広くなれば力積も大きくなることが確認できた。すなわち、衝撃力の分散効果が作用していると考えられる。このような緩衝効果、分散効果についてSPH粒子法を用いたシミュレーションにより表現する。

3. SPH粒子法

SPH法は、連続体を粒子(評価点)の集合とみなし、粒子上での任意の時刻における加速度やひずみなどの物理量を、式(1)に示すようなkernel関数により近似の概念を用いて評価する。

$$f(x) \approx \int f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、 $f(x)$ は任意の関数、 $W(x-x', h)$ はkernel関数、 h は影響半径、 x は評価点座標値、 x' は任意評価点の座標値である。

SPH法では、図-5に示すように評価対象の点からある影響半径内の領域積分を、影響半径内に存在する別の評価点の値を合算することで

キーワード 鋼製枠砂防堰堤、緩衝効果、SPH粒子法、衝撃応答析

連絡先

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地 九州大学 TEL 092-802-3370



写真-1 鋼製枠砂防堰堤

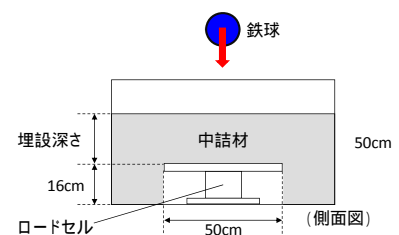


図-1 計測状況

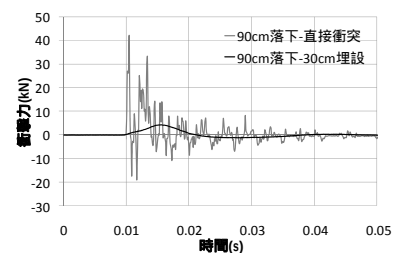


図-2 衝撃力-時間関係

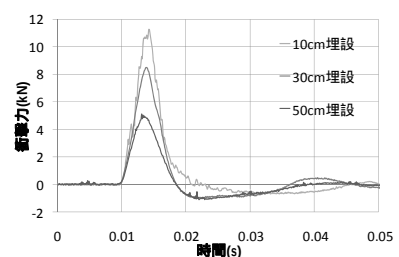


図-3 衝撃力-時間関係

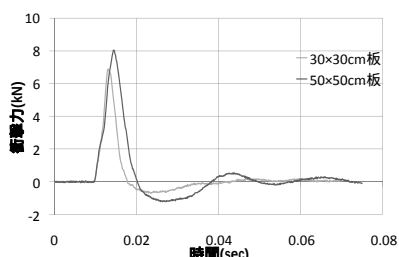


図-4 衝撃力の分散効果

近似する。影響半径内に内挿されている評価点を J 、粒子の質量を m 、密度を ρ 、内挿されている評価点の総数を N とすると、式(2)のように表される。また、その微分形は式(3)のように表される。

$$f(x) \approx \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} f(x^J) W(x-x^J, h) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot f(x) \approx - \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} f(x^J) \cdot \nabla W(x-x^J, h) \quad (3)$$

式(3)を用いることで、ある物理量に対する一階偏微分を計算する際、物理量そのものを一階偏微分することなく、kernel 関数の一階偏微分を計算することで近似される。この考え方が SPH 法の大きな特徴であり、メッシュに依存せずに解析できる理由である。

4. 衝撃緩衝実験の数値シミュレーション

本解析では、礫中詰材の埋設深さを 30cm、鋼球の落下高さを 210cm としたときの衝撃緩衝実験を解析対象とし、図-6 に示すように全ての要素を球体でモデル化した。異なる物体間の衝突に関しては、ペナルティ法的に粒子間の重なりを許容し、重なり領域比を体積ひずみ(圧縮)とみなすことで、式(4)を用いて作用力を計算している。

$$f = -K\varepsilon_v A \quad (4)$$

ここで、 f は作用力、 K は体積弾性係数、 ε_v は体積ひずみ、 A は粒子の投影面積である。固定条件は図-7 に示すように仮定し、ロードセル上板に作用する接触力を衝撃力として算出した。各材料の物性値は表-1 に示している。なお、中詰材である礫のヤング率に関しては、礫を支持材料としてするバラストの物性や、個別要素法によるパラメトリックな解析結果を参考に設定している。

図-8 に、SPH 法により得られた衝撃力-時間波形を示している。個別要素法による結果や実験結果と比較して、衝撃力の継続時間は概ね一致しているが、最大衝撃力については 2.5 倍程度大きな値を示していることが分かる。これは、各粒子が衝突する際に生じると考えられるエネルギー損失等が解析のアルゴリズムにおいて考慮されていないためであると考えられる。図-9 にはロードセルに作用する衝撃力分布を示している。個別要素法による解析では、衝撃力の荷重分散が要素配置に依存するため、衝突地点直下の衝撃力が卓越するのに対して、SPH 法を用いると粒子の配置に依存することなく、衝撃力の分散が表現できることが確認できる。なお、SPH 法の場合には用いる kernel 関数と影響範囲長によって、荷重分散範囲を現実に近い状態に設定できることが期待される。

5. 結論

本研究では、簡易な礫中詰材の衝撃実験によって、礫材が十分な緩衝効果を有することが確認できた。また、SPH 粒子法を用いた解析により、粒子配置に依存せずに衝撃力の分散効果を表現できることが分かった。今後は、SPH 法に衝突時のエネルギー損失を考慮できるように改良し、緩衝効果を定量的に表現する予定である。

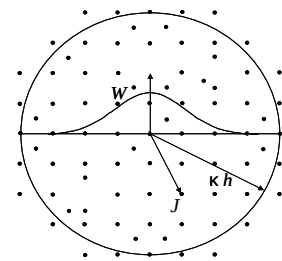


図-5 影響半径

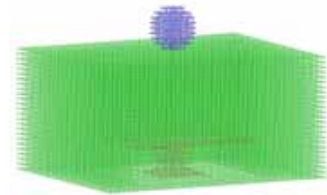


図-6 解析モデル

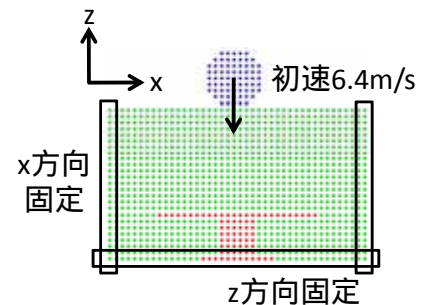


図-7 解析条件
表-1 材料物性

	粒子半径 (mm)	密度 ρ (g/cm ³)	ヤング率 E (N/mm ²)	影響半径 (mm)
鉄球	10.0	7.85	210000	30.0
中詰材	10.0	1.64	48	17.0
ロードセル	10.0	7.85	210000	30.0

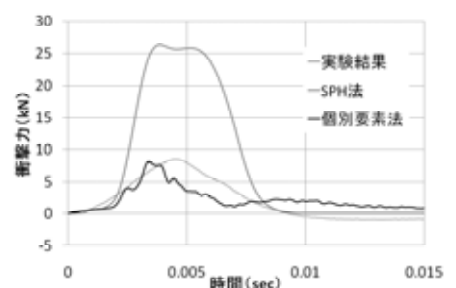


図-8 解析結果

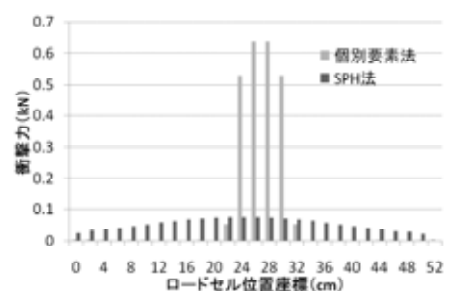


図-9 衝撃力分布図