

岩塊転動による構造物への影響評価に関する検討(2) ～自由落下実験による岩塊・土砂の衝突荷重の分析～

鉄道総合技術研究所 (正) ○成田 浩明, 阿部 慶太, 名取 努
 日本大学 (正) 中村 晋 東京都市大学 (正) 吉田 郁政
 東北大学 (正) 河井 正 東電設計 (正) 中瀬 仁

1. はじめに 原子力施設では, 施設周辺斜面の崩壊が建屋内機器および屋外機器の同時損傷の要因ともなり得るため, 斜面崩壊などの地震随伴事象による影響評価が極めて重要である. よって, これまでの斜面安定性評価に加え, 想定外の地震動などによる斜面崩壊後の岩塊・土砂の挙動と衝突荷重の評価が必要である. そこで, 筆者らは, 自由落下させた岩塊および土砂模型の衝突荷重を荷重計で計測する自由落下実験を実施した¹⁾. 本論文では, 自由落下実験のうち, 土砂模型の衝突荷重および画像解析を用いた岩塊模型の衝突荷重の分析結果を報告する.

2. 自由落下実験の概要 実験ではバックホウで岩塊模型を掘み, 反力壁上の荷重計に自由落下させることで衝突荷重の計測を行った. また, 荷重計の受圧面の違いが衝突荷重に与える影響を確認するために, 受圧面はベニヤ板, 鉄筋コンクリート板(以降, RC板と呼ぶ)の2ケースについて実験を行った.

実験に用いた岩塊模型は, 代表径 20cm, 40cm の球形, 塊状の模型の他, 碎石場より採取した安山岩の実岩塊を用いた. 土砂模型は図-1 に示すように粒度調整碎石 M-40 をトンパックまたは土のうに詰めたものを用いた. なお, 土のうを用いた模型については, 土のうを 2 段, 4 段, 6 段と積み上げた状態で落下させた. 模型の落下高さは 0.5m ~ 5.0m とし, 衝突直前の速度 V (m/s) を式 $V = \sqrt{2gh}$ より求めた. ここで, g は重力加速度 (m/s^2), h は落下高さ (m) である. 以上の実験を全 238 ケース実施した. また, このうち 20 ケースについては, 模型衝突前後の挙動を高速カメラで撮影し, 画像解析の結果からも衝突速度および衝突荷重の算定を行った. なお, 実験の詳細については文献 1) を参照されたい.

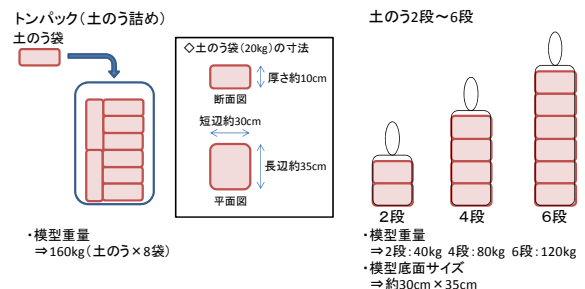


図-1 土砂模型の概要

3. 土砂模型の衝突荷重の分析

図-2 に土砂模型の衝突荷重のピーク値と衝突直前速度の関係を示す. なお, 岩塊模型の衝突荷重のピーク値と衝突直前速度の関係は文献 2) を参照されたい. 図-2 では受圧面がベニヤ板のケースと RC 板のケースでは同等の結果であったため, RC 板のケースのみ示す. また, 実験では模型衝突時に RC 板にクラックが入るなどの損傷が確認されたため, RC 板の損傷状況も併せて示した. 図-2 より衝突荷重と速度の間には正の相関関係が確認できる.

計測した土砂模型の衝突荷重のピーク値と衝突直前速度の関係から, 衝突直前速度をパラメータとした衝突荷重の算定式の提案を試みた. 土砂の衝突荷重の算定には, 異なる質量, 剛性, 大きさを持つ二つの球体間の衝突荷重の理論式であるヘルツの式³⁾に基づく式(式(1))および, 土石流荷重の算定に用いられる流体力に基づく式⁴⁾(式(2))の2つの式を用いて算定結果の比較を行った. なお, 式(1)は土砂を弾性体の球, 受圧面を平坦な剛体と仮定した場合の理論式である.

$$P = \alpha \cdot \left\{ \frac{4(1-2\nu)\lambda}{3(1-\nu)} \sqrt{R} \right\}^{2/5} \cdot \left(\frac{5}{4} m V^2 \right)^{3/5} \quad (1)$$

$$P_s = \beta \frac{\gamma_s}{g} A V_s^2 \quad (2)$$

ここで, 式(1)の P は衝突荷重のピーク値 (kN), α は補正係数 (剛な球形岩塊の場合は 1.0), ν は土砂のポアソン比, λ は土砂のラメの定数 (kN/m^2), R は模型の半径 (m), m は模型の質量 (kg), V は衝突直前速度 (m/s) である. ν については, 既往の文献⁵⁾に示されるポアソン比を用いた. R については, 土砂模型と等体積となる球の半径を用い, λ は土砂模型の三軸圧縮試験結果から求めた弾性係数 E ($E=2500\text{kN/m}^2$) と合う値とした. 式(2)の P_s は

キーワード: 斜面, 岩塊, 土砂, 衝突荷重

連絡先: 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所 TEL: 042-573-7261

土砂の衝突荷重 (kN), β は補正係数, γ_s は土砂の単位体積重量 (kN/m^3), A は衝突時の土砂と反力体の接触面積 (m^2), V_s は土砂の衝突直前速度 (m/s) である. 本来, 式(2)において A は土砂の深さと幅から求められるが, ここではトンパックおよび土のうの底面積から求めた.

図-2 に式(1) (以降, 岩塊設計式と呼ぶ) で求めた土砂の衝突荷重の算定値, 式(2) (以降, 土砂設計式と呼ぶ) で求めた土砂の衝突荷重の算定値を示す. 土砂の衝突荷重の算定式構築においては, 上記のパラメータを用いて実験結果を概ね包絡するように補正係数 α , β を定めた. 算定に用いたパラメータを表-1 および表-2 に示す.

岩塊設計式を用いた場合は, 補正係数 α は 0.03~0.06 と球形岩塊の 1.0 に比べ小さい値となった. これは衝突時の土砂の塑性化により, 衝突荷重が小さくなったためと考えられる. 一方, 土砂設計式を用いた場合は, 補正係数 β は 10.0~20.0 と大きく設定する必要がある, 流動化した土砂の衝突式である土砂設計式では衝突荷重を過少評価する結果となった. また, 土砂設計式では土砂の質量を考慮できていないことから, 土砂が塊で衝突する場合に適用することは適切ではないと考えられる.

4. 岩塊模型の衝突荷重の分析

高速カメラで撮影した岩塊の画像から PTV 法により画像解析を行った. 図-3 に標点の位置データから求めた衝突直前の岩塊模型の速度と, $V = \sqrt{2gh}$ から求められる速度の関係を示す.

図-3 より両者はよく一致していることが分かる. また, 図-4 に画像解析から求めた衝突荷重と荷重計で計測した衝突荷重の関係を示す. 画像解析から求めた衝突荷重は力積から導出される式 $F = (mv - mv')/\Delta t$ により求めた. ここで, m は岩塊模型の質量 (kg), v , v' はそれぞれ衝突前, 衝突後の衝突面直交方向の速度 (m/s), Δt は衝突時間 (s) である. 図-4 に示すとおり, 画像解析から求めた衝突荷重は全体的に計測値よりも小さい値となった. これは, 衝突面の剛性や岩塊の形状を考慮していないことに加え, 衝突面直交方向とは異なる方向に回転しながら跳ね返る試験体について, 衝突面直交方向の速度成分だけで算定したためであると考えられる.

5. まとめ 土砂が塊で衝突する場合の衝突荷重は岩塊と土砂の衝突荷重の中間程度となることを確認した. また, 画像解析から求めた衝突速度と自由落下の理論式から求めた衝突速度が概ね一致すること, 力積の式を通じて算出した衝突荷重は計測値を過小評価することを確認した. 今後は, 土砂が塊で衝突した場合に衝突荷重に与える影響および岩塊の形状が衝突荷重に与える影響についてさらに分析を進めていきたい.

謝辞 本研究の成果は, 原子力規制庁の委託研究「斜面の安定性に係るリスク評価手法に関する岩塊転動実験」により得られたものです.

参考文献 1) 名取ら: 岩塊転動による構造物への影響評価に関する検討 (1), 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, 2016.9(投稿中). 2) 阿部ら: 岩塊転動・衝突のリスク評価に向けた検討 (2), 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.9. (投稿中) 3) 日本道路協会編: 落石対策便覧 (第 12 刷), 丸善出版, 2013. 4) 国土技術政策総合研究所: 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, No.364, 2007. 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007.

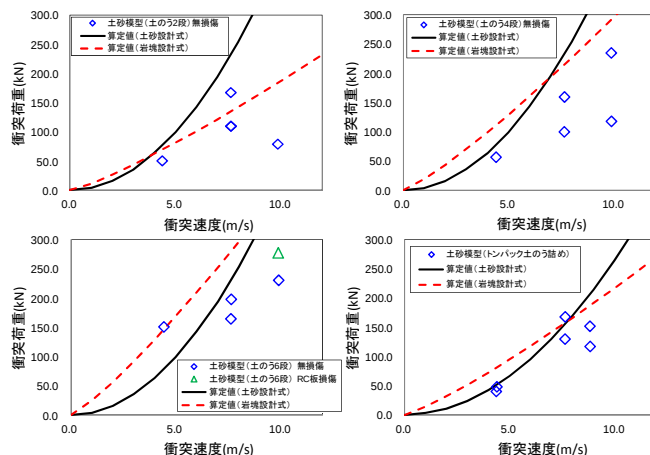


図-2 土砂模型の衝突荷重と速度の関係 (RC 板)

表-1 衝突荷重算定式のパラメータ
(岩塊設計式)

形状	土のう			トンパック
段数	2段	4段	6段	—
質量 m (kg)	40	80	120	160
半径 R (m)	0.17	0.22	0.25	0.27
補正係数 α	0.06			0.03
ラメの定数 λ (kN/m^2)	1450			
ポアソン比 ν	0.30			

表-2 衝突荷重算定式のパラメータ
(土砂設計式)

	土のう	トンパック
単位体積重量 γ_s (kN/m^3)	18.5	18.5
接触面積 A (m^2)	0.105	0.25
補正係数 β	20.0	10.0

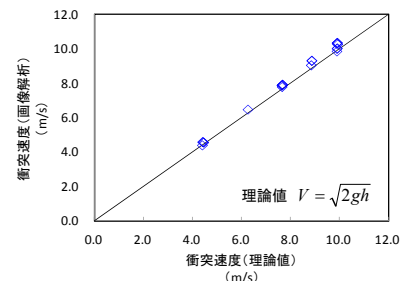


図-3 画像解析による衝突速度

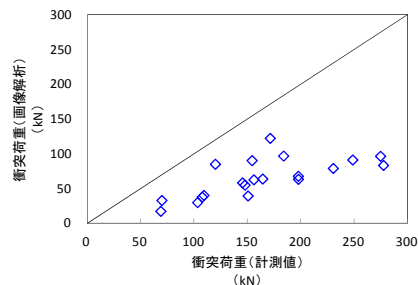


図-4 画像解析による衝突荷重