

防衛大学校 正員 ○園田佳巨 正員 佐藤結志 正員 石川信隆

1. 緒言

著者らは、これまで落石覆工の安全性の評価について、エネルギー的観点から行うことを目的とした研究を行ってきた¹⁾。その結果として、使用される緩衝材のエネルギー吸収性能を把握し、落石覆工のエネルギー分担率（落石の運動エネルギーに対する落石覆工への入力エネルギーの割合）を正確に算定することが必要であることがわかった。ところで、このエネルギー分担率は使用する緩衝材によって当然異なると考えられるが、いまだに緩衝材の衝撃吸収エネルギーに関する研究は行われていない。そこで、本研究では3種類の砂と、発泡スチロールの4種類の緩衝材について、従来のような衝撃荷重の低減効果ではなく、衝撃エネルギーの吸収効果に着目した定量的評価の検討を試みた。

2. 落石覆工のエネルギー分担率の算定法

落石覆工のエネルギー分担率を求めるためには、落石・衝撃緩衝材・落石覆工の3者の動的相互作用を考慮した解析が必要である。したがって、ここでは図-1に示すような3質点系モデルを用いた衝撃応答解析を行い、その解析結果を用いてエネルギー分担率を算定する。即ち、3質点の運動方程式をNewmark- β 法（ $\beta=1/8$ ）を用いて計算し、その応答値から各時刻毎に、緩衝材の吸収エネルギー $U_{1(t)}$ として弾性バネ k_1 、 k_2 およびダッシュポット c_1 、 c_2 が蓄える歪みエネルギーに質点 m_2 の運動エネルギーを加えた値を計算する。また、落石覆工への入力エネルギー $U_{2(t)}$ は、質点 m_3 の運動エネルギーと弾性バネ k_3 の歪みエネルギーの和として計算する。その後、エネルギー分担率 γ_0 は、 $U_{2(t)}$ の最大値と落石が衝突時に有する運動エネルギー E との比率（ $\gamma_0 = U_{2(t), \max} / E \times 100 (\%)$ ）で計算される。

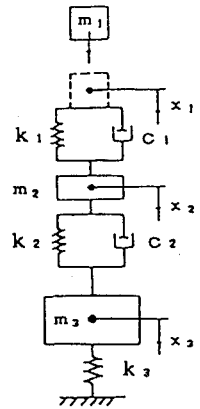
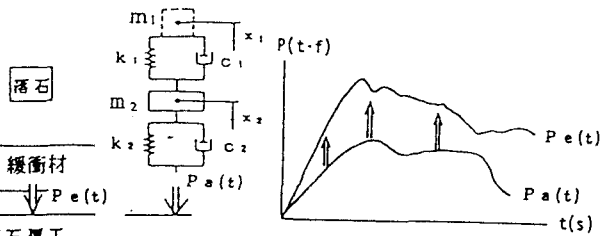


図-1 エネルギー分担率算出モデル

3. 動的同定法による緩衝材のパラメータの決定

落石覆工のエネルギー分担率を、図-1の3質点系モデルを用いて算定するには、緩衝材の動的特性を表す弾性バネ定数 k_1 、 k_2 および粘性減衰係数 c_1 、 c_2 の値を求めておかねばならない。そこで本研究では、図-2に示すように緩衝材の底面での衝撃力に関して実験結果 $P_e(t)$ と解析値 $P_a(t)$ とを各時刻毎に同定させる落石覆工



ことによって決定した。以下に基本式を示す。 図-2 動的同定法による各パラメータの決定

未知数： k_1, k_2, c_1, c_2 ただし、 $k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0$

目的関数： $Z = \sum \{P_{e(t)} - P_{a(t)}\}^2 \rightarrow \min$ (ここに、 $P_{a(t)} = c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2$)

制約条件： $m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = m_1 g$ (1)

$$m_2 \ddot{x}_2 + P_{a(t)} - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) = 0$$

式(1)の解法としては、準ニュートン法を採用したが、修正量決定のためのステップ幅 α の決定については黄金分割法を用いている。

4. 数値計算例

(1) 3種類の砂および発泡スチロールの各パラメータの決定

ここでは、3種類の砂(山砂、川砂、砕砂)と発泡スチロールを対象と

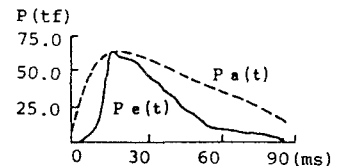


図-3 同定計算結果(山砂)

して、各緩衝材の底面で計測した衝撃力波形の実験データ^{2), 3)}(落石重量3.0t, 落下高さ10.0m)について動的同定を行うことで各パラメータの決定を行った。図-3、4、5はそれぞれ山砂、川砂、砕砂の土圧衝撃力の同定結果を、図-6は発泡スチロール底面の衝撃力の同定結果を示したものである。これらの図より、4ケースとも比較的よく同定できていることがわかる。また、3種類の砂で最大衝撃力が非常に異なるが、荷重の継続時間は約90msとほぼ等しい。一方、発泡スチロールは荷重継続時間が約3倍も長いので、最大衝撃力は小さくても落石覆工へ与える力積としては、山砂より大きくなることが十分に考えられる。なお、表-1に各緩衝材のパラメータの同定計算値を示す。表より、砂と発泡スチロールを比較すると、発泡スチロールの局部弾性バネ定数 k_1 が小さく逆に k_2 が大きい。また減衰係数 c_1, c_2 が非常に小さいので、全体としてほぼ弾性体と考えて差し支えないことがわかった。砂については各パラメータの値も種類別により異なるが、衝突直後の最大衝撃力は主として減衰係数 c_2 の値によって同定されていることがわかる。

(2) 各緩衝材使用時の落石覆工のエネルギー分担率

ここでは、4.(1)の同定結果を用いて、図-7に示す既設鋼製落石覆工について、各緩衝材を使用した場合のエネルギー分担率を解析的に求めた。ただし、落石条件については、4.(1)で用いた実験データの条件と一致させている。表-2は、エネルギー分担率の結果を示したので、発泡スチロールが山砂の約1/10以下のエネルギー分担率(0.2%)を示し、最も効果的な緩衝材であることがわかる。また、砂の中では山砂が $\gamma_0=2.3\%$ と最も優れており、続いて砕砂(5.4%)、川砂(6.8%)の順となることが判明した。したがって、本計算例より最大衝撃力を低減する効果が高い緩衝材が、エネルギー的観点からも優れているという結果が得られた。なお、本計算では落石が緩衝材を貫通することは考慮していないが、小さい衝撃力を発生させるには、当然落石が緩衝材の内部へ深く貫入していると考えられるので、緩衝材の層厚を十分厚くする必要があると思われる。

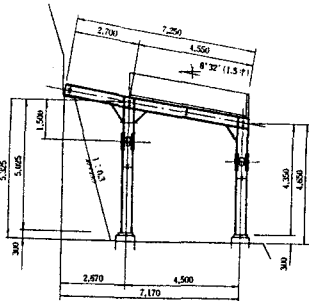


図-7 鋼製落石覆工

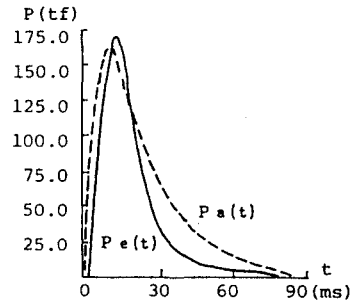


図-4 同定計算結果(川砂)

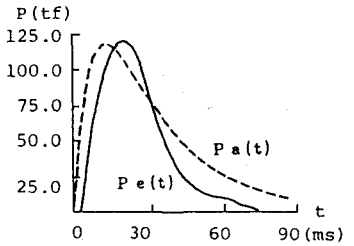


図-5 同定計算結果(砕砂)

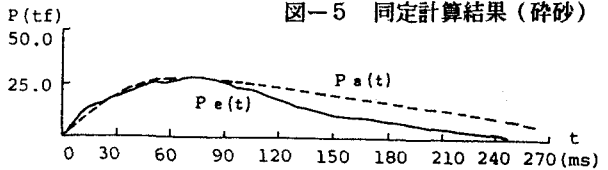


図-6 同定計算結果(発泡スチロール)

表-1 各緩衝材のパラメータ

パラメータ 緩衝材	k_1 (t/m)	k_2 (t/m)	c_1 (t·s/m ²)	c_2 (t·s/m ²)
山 砂	300.7	0.2	29.8	25.1
川 砂	72.1	55.3	38.2	89.8
砕 砂	176.0	3.1	29.7	65.9
発泡スチロール	2.1	108.0	2.2	0.9

表-2 各緩衝材を使用したときのエネルギー分担率

緩 衝 材	山 砂	川 砂	砕 砂	発泡スチロール
エネルギー分担率 $\gamma_0(\%)$	2.3	6.8	5.4	0.2

参 考 文 献

- 1) 園田佳巨、佐藤紘志、石川信隆：弾塑性吸収エネルギー量による鋼製ロックシェッドの安全性評価法に関する一考察、土木学会第45回年次学術講演会概要集I、平成2年9月
- 2) 吉田博、榎谷浩、佐藤真、井原朋美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について、構造工学論文集、Vol.33A, pp.571-583, 1987年 3月
- 3) 日本サミコン㈱、太陽工業㈱、徳長野技研：発泡スチロールの落石による衝撃力の緩衝効果に関する実験報告書、平成2年2月