

(26) 落石覆工のエネルギー分担率に関する一考察

防衛大学校 土木工学科 ○園田佳巨

防衛大学校 土木工学科 佐藤紘志

防衛大学校 土木工学科 石川信隆

1. 緒言

落石覆工は、落石のもつ衝撃エネルギーを一般にサンドクッションという衝撃緩衝材によって吸収させているが、落石のもつ運動エネルギーの約何%がサンドクッションによって吸収され、約何%が落石覆工へ伝達されるのか、落石覆工の安全性照査の観点から、このエネルギー分担率を定量的に明らかにする必要がある。しかし、落石-サンドクッション-落石覆工という三者関係に存在するパラメータ決定の困難さから、現在までのところ、わずかにエネルギー分担率を実験的に求めた例¹⁾があるにすぎない。

本研究では、この落石覆工のエネルギー分担率について、落石-サンドクッション-落石覆工の三者関係を3質点系モデルに置換した簡易的な算定法を示し、これらに存在するパラメータを最適化手法を用いた動的同定手法によって決定することを試みた。ここでは、この算定法の妥当性と適用性について、数値計算によって検討した結果を報告する。

2. 解析モデルとエネルギー分担率の算定式

落石覆工のエネルギー分担率を算定するための解析モデルを提示するにあたり、以下の仮定を用いる。

(1) 図-1 (a) のように、落石-サンドクッション-落石覆工の三者間のみでエネルギー伝達が行われ、基礎の地盤等への逸散は考えない。

(2) 上記の三者関係を3質点系モデルに置換できるものとし、その力学的特性を図-1 (b) のように弾性または弾塑性バネとダッシュポットを組み合わせたレオロジーモデルで表現できるものとする。

以上の仮定を基にして、図-1 (c) のような力のつり合いから3質点系モデルの運動方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + C_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_1 (x_1 - x_2) &= m_1 g \\
 m_{2a} \ddot{x}_2 + C_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + K_2 (x_2 - x_3) - C_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - K_1 (x_1 - x_2) &= 0 \\
 (m_{2b} + m_3) \ddot{x}_3 + K_3 x_3 - C_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - K_2 (x_2 - x_3) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

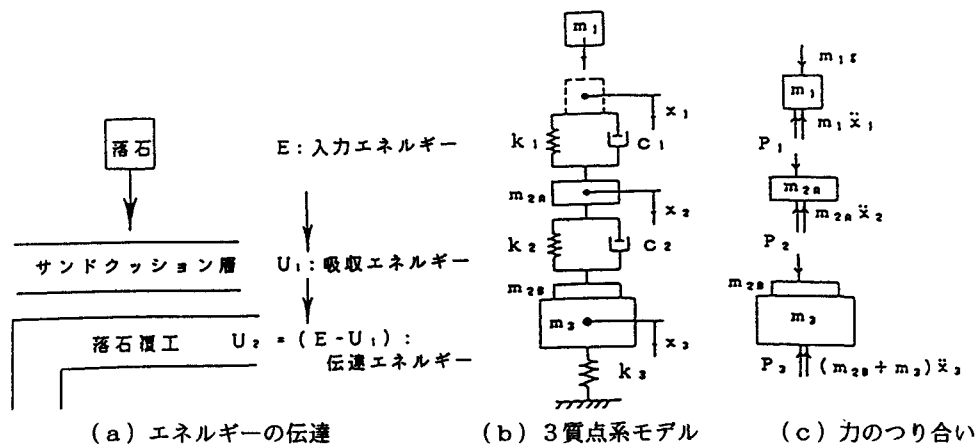


図-1 エネルギー分担率算定のための解析モデル

ただし、 m_1 : 落石の質量、 m_{2a} : サンドクッションの衝撃力伝播領域内の有効質量 (図-2 (b) 参照)、
 m_{2b} : サンドクッションの衝撃力伝播領域外の有効質量、 m_3 : 落石覆工の等価質量
 K_1, C_1 : 落石とサンドクッションとの接触面のバネ係数と減衰係数
 K_2, C_2 : サンドクッションのバネ係数と内部減衰係数、 K_3 : 落石覆工のバネ係数

式(1)を解くには、通常の Newmark- β 法 ($\beta=1/6$)を用い、落石の衝突時 ($t=0$ において $\dot{x}_1 = \sqrt{2gH}$ を与える) から落石覆工の応答が終了するまで ($\dot{x}_3 \approx 0$ になるまで) 計算する。ここで、式(1)の計算結果より、サンドクッションによって吸収されるエネルギー量 $U_1(t)$ および落石覆工へ伝達されるエネルギー量 $U_2(t)$ が各時刻ごとに次のように算定される。

$$U_1(t) = \Sigma \Delta P_1(t) \{ \Delta x_1(t) - \Delta x_2(t) \} + \Sigma \Delta P_2(t) \{ \Delta x_2(t) - \Delta x_3(t) \} + 1/2 m_{2a} \dot{x}_2(t)^2 \quad (2)$$

$$U_2(t) = \Sigma \Delta P_3(t) \Delta x_3(t) + 1/2 (m_{2b} + m_3) \dot{x}_3(t)^2$$

ただし、 $\Delta P_1(t)$ 、 $\Delta P_2(t)$ 、 $\Delta P_3(t)$ は落石の衝撃力 P_1 、サンドクッションの復元力 P_2 、落石覆工の復元力 P_3 の増分量を示し、それぞれ次式で表される。

$$\Delta P_1(t) = K_1 \{ \Delta x_1(t) - \Delta x_2(t) \} + C_1 \{ \Delta \dot{x}_1(t) - \Delta \dot{x}_2(t) \} \quad (3)$$

$$\Delta P_2(t) = K_2 \{ \Delta x_2(t) - \Delta x_3(t) \} + C_2 \{ \Delta \dot{x}_2(t) - \Delta \dot{x}_3(t) \}$$

$$\Delta P_3(t) = K_3 \Delta x_3(t)$$

よって、落石覆工のエネルギー分担率 γ_0 は、式(2)の $U_2(t)$ の最大値より次式を用いて計算される。

$$\gamma_0 = U_{2(t)\max} / E \times 100 (\%) \quad (4)$$

ただし、 $U_{2(t)\max}$: 落石覆工へ伝達されるエネルギー $U_2(t)$ の最大値

$E (=1/2 \cdot m_1 \dot{x}_1^2)$: 落石が衝突時に持つ運動エネルギー

3. 動的同定法による入力データの決定

図-1の3質点系モデルには、 $m_1, m_2, m_3, K_1, K_2, K_3, C_1, C_2$ の8つのパラメータが存在するが、このうち m_1, m_2, m_3, K_3 は以下のように比較的容易に決めることができる。しかし、 K_1, K_2, C_1, C_2 の値については予め与えることがかなり困難であるので、これらを動的同定法により決定するものとした。

(1) m_1, m_2, m_3, K_3 の決定法

m_1 については落石の質量そのものとし、 m_2, m_3 については、まず図-2 (a) に示すように落石覆工を平面骨組モデルとし、各節点にサンドクッションの死荷重を含めた集中質量を与えたときの固有周期を計算することにより (サンドクッション+落石覆工) 系の等価質量 $M (=m_2+m_3)$ を求めることができる。このうち、落石覆工の等価質量 m_3 については落石覆工のみを集中質量とした固有値解析から求め、

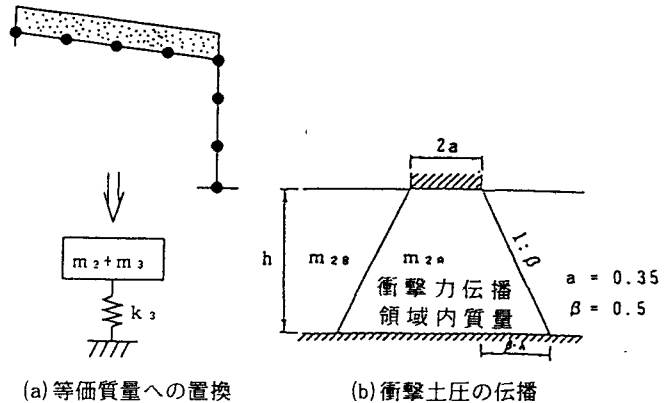


図-2 有効質量 m_2, m_3 の算定モデル

サンドクッションの有効質量 m_2 は $m_2 = M - m_3$ で計算される。ここで、サンドクッションについて図-2 (b) のように、落石の衝突時に衝撃力の伝播を受け振動する領域 (その領域の有効質量を m_{2a} とする) と、衝撃力の伝播範囲外で落石覆工とともに振動する領域 (その領域の有効質量を m_{2b} とし、 $m_{2b} = m_2 - m_{2a}$ である) とが存在すると仮定し、それらを区別して取扱う。すなわち、サンドクッションとして挙動する質点の有効質量は m_{2a} であり、落石覆工側の有効質量は、 $m_3 + m_{2b}$ とした。また、落石覆工の剛性 K_3 は、

平面骨組モデルの弾塑性増分解析を行い、その荷重一変位曲線の傾きを求めて与えた。

(2) 動的同定法による K_1, K_2, C_1, C_2 の決定法

ここでは、サンドクッションのモデル化に必要なパラメータ K_1, K_2, C_1, C_2 の4つを、落石衝突実験¹⁾で得られる土圧衝撃力 $P_o(t)$ と図-3 (a) に示す2質点系モデルによる衝撃力 $P_a(t)$ とが、ほぼ一致するように、最適化手法による動的同定法を採用して決定する。すなわち、その基本式は以下ようになる。

未知数: K_1, K_2, C_1, C_2

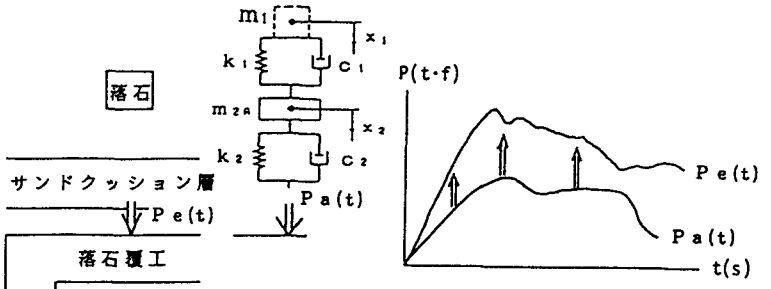
目的関数: $Z = \sum \{ P_o(t) - P_a(t) \}^2 \rightarrow \min$

制約条件: $m_1 \ddot{x}_1 + C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_1(x_1 - x_2) = m_1 g$ (5)

$m_2 \ddot{x}_2 + P_a(t) - C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - K_1(x_1 - x_2) = 0$

$P_a(t) = C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2, \quad K_1 \geq 0, K_2 \geq 0, C_1 \geq 0, C_2 \geq 0$

式(5)の解法にあたっては、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。この動的同定法についての計算手順を示せば、図-4のようになる。以上で得られた8つの入力データを用いて、式(1)~(4)を計算すれば、エネルギー分担率 γ_0 が算定される。



(a) 2質点系モデル (b) 土圧衝撃力の同定
図-3 動的同定法による K_1, K_2, C_1, C_2 の決定

4. 数値計算例

(1) 計算例1: 本法の妥当性の検討

本法の妥当性を検討するために、まず金沢大学で行われた落石衝突実験¹⁾ (重錘重量 1.0t, 落下高さ 10.0m) で得られた図-5に示すような土圧衝撃力 $P_o(t)$ を用いて、サンドクッションのパラメータ K_1, K_2, C_1, C_2 を同定計算により求め、次にこれを用いて、落石-サンドクッション-落石覆工 (H型鋼単純梁) 系におけるエネルギー分担率の計算を行った。図-6は、動的同定法による土圧衝撃力の計算結果であり、ほぼ良くシミュレートしていることがわかる (ただし、土圧衝撃力の発生時刻を $t=0$ (ms) とした)。この同定結果を表-1に示す。次に、落石覆工へのエネルギー分担率を計算すると $\gamma_0 = 6.4\%$ となり、実験¹⁾により得られた値6.9%と良く一致していることが認められた。

1. 初期値 $y^{(0)} = (K_1^{(0)}, K_2^{(0)}, C_1^{(0)}, C_2^{(0)})$ を与える
2. 修正方向ベクトル $S = -H^{(k)} \cdot \nabla Z(y^{(k)})$ を計算する
3. 修正量決定のためのステップ幅 α を黄金分割法により決定する
4. 各変数の修正 $y^{(k+1)} = y^{(k)} + \alpha \cdot S$
5. 2質点系モデルの衝撃応答解析を行い、 $Z(y^{(k+1)})$, $\nabla Z(y^{(k+1)})$ を計算する
6. 収束の判定 $|\Delta Z| < \epsilon_1$ かつ $|\Delta y| < \epsilon_2$
7. 収束条件が満足されなければ 2.~5. を繰り返す

図-4 動的同定法の計算手順

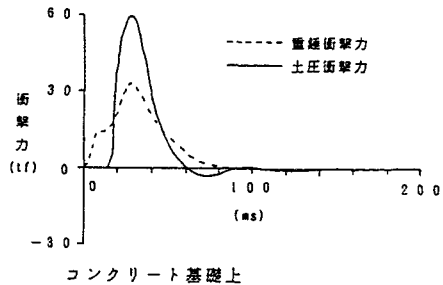
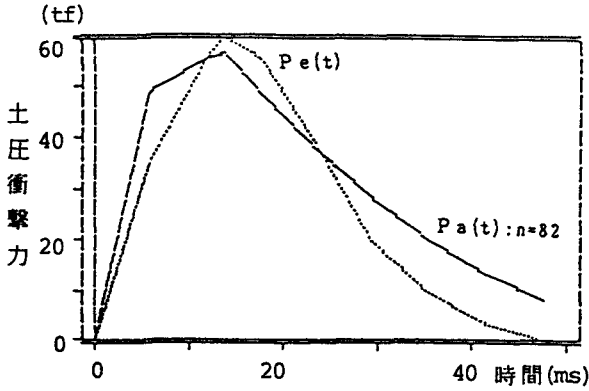


図-5 落石衝突実験による土圧衝撃力



図一六 動的同定計算結果

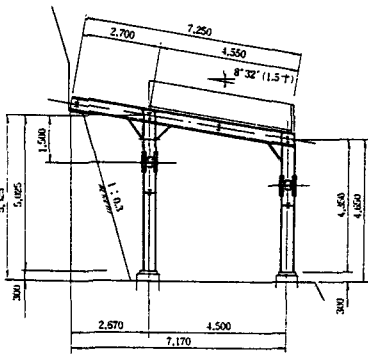
表一 動的同定法による同定パラメータ

n	K_1	K_2	C_1	C_2
1	200.0	200.0	5.0	5.0
82	309.0	4.9	9.1	27.2

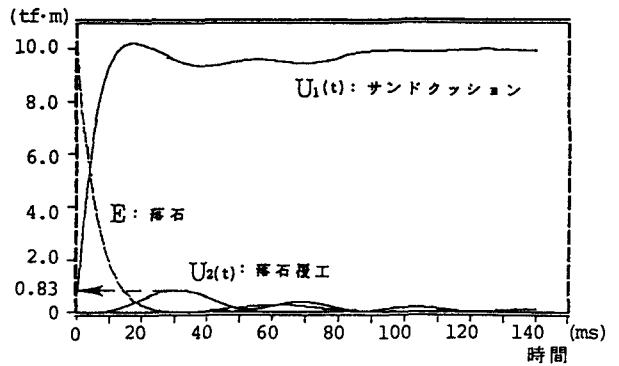
n : 繰返し計算数

(2) 計算例 2: 本法の既設落石覆工への適用例

図一七に示す既設の鋼製落石覆工²⁾(落石条件は設計条件と同じ重量 1.0t、落下高さ 10.0mとし、サンドクッション厚は約90cmとする)に対するエネルギー分担率を、計算例1と同じパラメータ K_1 , K_2 , C_1 , C_2 を用いて計算した。図一八は、落石の運動エネルギー E 、サンドクッションの吸収エネルギー $U_1(t)$ 、落石覆工の吸収エネルギー $U_2(t)$ の時間的変化を示したもので、 $U_{2(t)max} = 0.83$ (tf·m) となっている。よって、このときの落石覆工のエネルギー分担率は $\gamma_0 = 8.3\%$ と算定される。



図一七 既設の鋼製落石覆工



図一八 各エネルギーの時間的変化

5. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 落石-サンドクッションの2質点系モデルについて動的同定を行うことにより、サンドクッションに関するパラメータを決定することが可能となった。これらのパラメータを用いて、落石-サンドクッション-落石覆工の3質点系モデルによるエネルギー分担率の算定手法を確立することができた。
- (2) 本法による動的同定法を用いて、既往の実験結果と比較すると、ほぼ本法の妥当性を確認することができた。
- (3) 本法によれば、エネルギー分担率をある程度定量的に推定することが可能となった。

参考文献

- 1) 榎谷浩、前川幸次、水木彰、吉田博：鋼性ロックシェットの落石による衝撃力、構造工学論文集、Vol. 36A, pp. 41-49, 1990年 3月
- 2) 三上善蔵：落石防止防護工法、pp. 191, 理工図書