

# 落石覆工への落石のエネルギー伝達率に関する基礎的考察

園田佳巨\*・佐藤紘志\*\*・石川信隆\*\*\*・  
榎谷 浩\*\*\*\*

本研究は、エネルギー的観点から落石覆工の破壊に対する安全性評価を行うため、落石覆工への落石のエネルギー伝達率を基礎的に把握しようと試みたものである。すなわち、まず落石—サンドクッション—落石覆工という3者関係を3質点系モデルに置換したうえで、落石覆工が負担すべきエネルギーを時刻歴応答として算定した。その際、解析モデルに用いるパラメータを過去の実験データを基に動的同定手法により決定し、種々の落石条件やサンドクッション（山砂、川砂、砕砂など）に適用できる回帰式を導いた。最後に、落石覆工へのエネルギー伝達率を用いた安全性照査法の一例を示した。

**Keywords :** rock-shed, energy transmission factor, dynamic identification

## 1. 緒 言

現在、落石覆工（ロックシェッド）は、落石の衝撃力を静的な力に置き換えて許容応力度設計法によって設計されているが、設計荷重をはるかに超えるような巨岩に対して、落石覆工の破壊に対する安全性の照査を行うためには、弾性理論に基づく許容応力度設計法によってこれを照査することはかなり困難である。すなわち、落石覆工の破壊に対する安全性照査法としては、落石のもつ運動エネルギーに基づいたエネルギー的観点から、落石覆工の終局限界状態を調べることが合理的であると思われる。そのためには、落石覆工へ伝達されるエネルギーを知ることが必要である。落石覆工に作用する外力エネルギーとしては、落石が衝突時にもつ運動エネルギーと、落石覆工上のサンドクッション等の死荷重によるエネルギーの2つが考えられる。このうち落石のもつ運動エネルギーは、サンドクッション等によって衝突時にその大半が吸収され、残りのエネルギーが落石覆工に伝達されると考えられる。したがって、落石覆工へ伝達される落石の運動エネルギーはどれくらいか、そのエネルギー伝達率が解明されれば、落石覆工の安全性をエネルギー的観点から照査できるものと思われる。著者ら<sup>1)</sup>は、先にエネルギー基準によるサンドクッション厚の算定法を提示したが、ここではサンドクッション厚を一定（例えば、 $h=90$  cm）とし、サンドクッションの種類（山砂、川砂、砕砂など）や落石覆工の種類（鋼製かRC製か）などによって、エネルギー伝達率がどのように変わるかを調べるものである。

すなわち、本研究は、落石覆工の安全性をエネルギー

的観点から照査することを目的として、落石覆工へ伝達される運動エネルギーの割合、すなわちエネルギー伝達率を基礎的に把握しようと試みたものである。そのため、まず落石—サンドクッション—落石覆工という3者関係を3質点系モデルに置換したうえで、落石覆工が吸収すべきエネルギーを時刻歴応答として算定した。その際、解析モデルに用いるパラメータを過去の実験データを基に動的同定手法により決定し、種々の落石条件や各種のサンドクッション（山砂、川砂、砕砂など）に適用できる回帰式を導いた。最後に、鋼製およびRC製の落石覆工へのエネルギー伝達率を算定するとともに、鋼製落石覆工に対する安全性照査法の一例を示し、この分野における基礎的資料を提供しようとしたものである。

なお、従来、落石覆工へのエネルギー伝達率に関する研究としては、金沢大学の辰口実験場における鉄塔式落石衝突実験による研究<sup>2)</sup>および著者ら<sup>1)</sup>のサンドクッション厚の算定法に関する解析的研究等があるにすぎない。また園田<sup>3)</sup>は、ロックシェッドの終局限界状態を曲げ破壊と仮定して、破壊時におけるエネルギー吸収を考慮した落石の衝撃力の評価方法を検討している。

## 2. 解析モデルとエネルギー伝達率の算定式

落石覆工への落石のエネルギー伝達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3者間のみでエネルギー伝達が行われ、基礎的地盤等への逸散は考えない。

(2) 上記の3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ばね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。

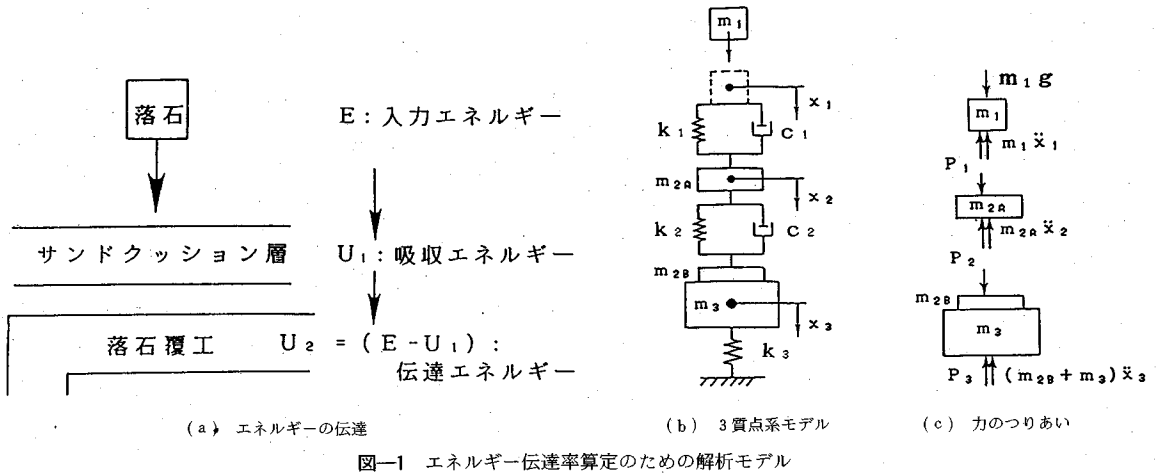
以上の仮定を基にして、図-1(c)のような力のつり合いから3質点系モデルの運動方程式は次のように表

\* 正会員 防衛大学校助手 土木工学教室  
(〒239 横須賀市走水1-10-20)

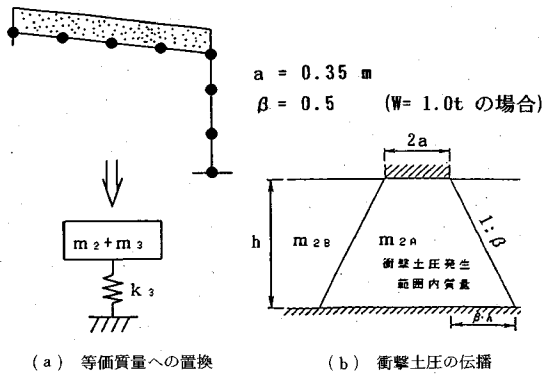
\*\* 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室

\*\*\* 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室

\*\*\*\* 正会員 工博 金沢大学助手 土木建設工学科



図一 エネルギー伝達率算定のための解析モデル



図二 有効質量  $m_2, m_3$  の算定モデル

される。

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) &= m_1 g \\
 m_{2A} \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_3) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\
 - k_1(x_1 - x_2) &= 0 \dots\dots\dots (1) \\
 (m_{2B} + m_3) \ddot{x}_3 + k_3 x_3 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2(x_2 - x_3) &= 0
 \end{aligned}$$

ただし、

- $m_1$  : 落石の質量,  $g$  : 重力加速度,
- $m_{2A}$  : 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,  $k_3$  : 落石覆工のばね係数,
- $k_1, c_1$  : 落石とサンドクッションとの接触面のばね係数と減衰係数,
- $k_2, c_2$  : サンドクッションのばね係数と内部減衰係数,

式 (1) を解くには、通常の Newmark- $\beta$  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 ( $\dot{x}_3 = 0$  にな

るまで) 計算する。ここで、式 (1) の計算結果より、サンドクッションが受け持つエネルギー量  $U_{1(t)}$  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。

$$U_{1(t)} = \sum P_{1(t)} (\Delta x_{1(t)} - \Delta x_{2(t)}) + \sum P_{2(t)} (\Delta x_{2(t)} - \Delta x_{3(t)}) + 1/2 m_{2A} \dot{x}_{2(t)}^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$U_{2(t)} = \sum P_{3(t)} \Delta x_{3(t)} + 1/2 (m_{2B} + m_3) \dot{x}_{3(t)}^2$$

ただし、 $P_{1(t)}$  は落石の衝突部における発生衝撃力を、 $P_{2(t)}$  はサンドクッション底面での発生衝撃力を、 $P_{3(t)}$  は落石覆工の復元力を示し、それぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned}
 P_{1(t)} &= k_1(x_{1(t)} - x_{2(t)}) + c_1(\dot{x}_{1(t)} - \dot{x}_{2(t)}) \\
 P_{2(t)} &= k_2(x_{2(t)} - x_{3(t)}) + c_2(\dot{x}_{2(t)} - \dot{x}_{3(t)}) \dots\dots\dots (3) \\
 P_{3(t)} &= k_3 x_{3(t)}
 \end{aligned}$$

よって、落石覆工へのエネルギー伝達率  $\gamma_0$  は、式 (2) の  $U_{2(t)}$  の最大値より次式を用いて計算される。

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

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パラメータの決定

図一の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

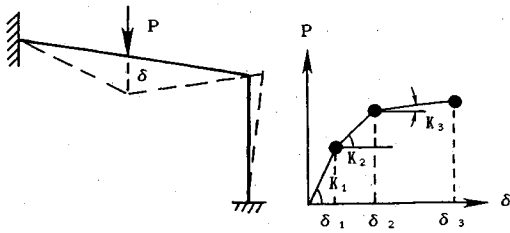


図-3 落石覆工の弾塑性ばね定数

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、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は図-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。なお、衝撃土圧の分散勾配については、過去の実験結果より静的土圧の分散勾配より小さいことが指摘されており<sup>4)</sup>、1:0.5程度が実状に合っているものと考えられる。したがって、ここでは衝撃土圧の分散勾配として、 $\beta=0.5$  を用いることとした（図-2 参照）。

また、落石覆工の剛性  $k_3$  は、図-3 のように落石覆工を平面骨組モデルに置換（縦断方向の剛性については主梁間隔で除して平均の値を用いている）したうえで弾塑性増分解析を行い、その荷重-変位曲線の傾きを求めて次のように与えた。

- (i)  $\Delta P \geq 0$  : 載荷時
  - $x_3 < \delta_1$  のとき  $k_3 = K_1$
  - $\delta_1 \leq x_3 < \delta_2$  のとき  $k_3 = K_2$ .....(5a)
  - $\delta_2 \leq x_3 < \delta_3$  のとき  $k_3 = K_3$
- (ii)  $\Delta P < 0$  : 除荷時  $k_3 = K_1$ .....(5b)

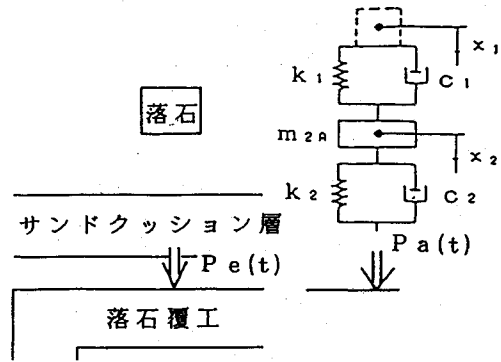
ただし、 $x_3$  : 落石覆工側の変位で、図-1 の 3 質点系モデルによる動的弾塑性解析から算定される。

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  : 平面骨組モデルの静的弾塑性解析によって得られる第 1, 第 2, 第 3 塑性ヒンジ発生時の変位を示す。

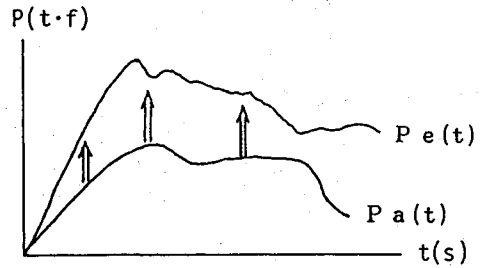
$K_1, K_2, K_3$  : 第 1, 第 2, 第 3 塑性ヒンジ発生時までの各段階における落石覆工の剛性を示す。

(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



(a) 2 質点系モデル



(b) 土圧衝撃力の同定

図-4 動的同定法による  $k_1, k_2, c_1, c_2$  の決定

メータ  $k_1, k_2, c_1, c_2$  の 4 つを、落石衝突実験<sup>2)</sup> で得られる土圧衝撃力  $P_{e(t)}$  と図-4 (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（図-4 (b) 参照）、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、その基本式は以下のようなになる<sup>10)</sup>。

未知数:  $k_1, k_2, c_1, c_2$

目的関数:  $Z = \sum (P_{e(t)} - P_{a(t)})^2 \rightarrow \min$ .....(6 a)

制約条件:  $m_1 \dot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 (x_1 - x_2) = m_1 g$ .....(6 b)

$m_{2A} \ddot{x}_2 + P_{a(t)} - c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1 (x_1 - x_2) = 0$ .....(6 c)

$P_{a(t)} = k_2 x_2 + c_2 \dot{x}_2$ .....(6 d)

$k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0$ .....(6 e)

ただし、 $P_{e(t)}$  : 落石衝突実験で測定された土圧衝撃力  
 $P_{a(t)}$  : 2 質点系モデルで計算される土圧衝撃力  
 式 (6) の解法にあたっては、準ニュートン法を採用した。その際、目的関数の修正方向は、2 質点系モデルの時刻例応答量に対する各パラメータの感度解析の結果から求め、修正量決定のためのステップ幅  $\alpha$  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-5 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、エネルギー伝達率  $\gamma_0$  が算定される。

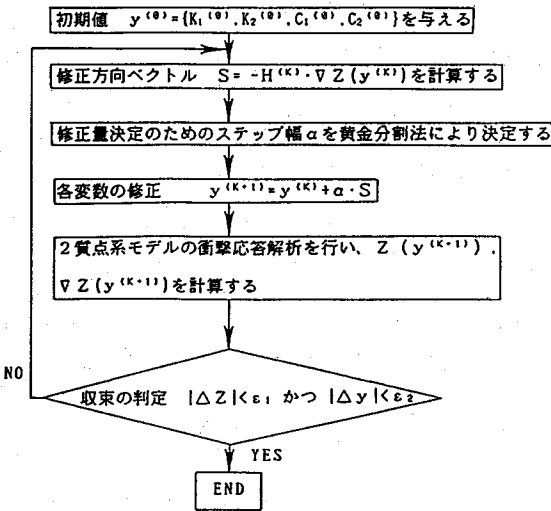


図-5 動的同定法の計算手順

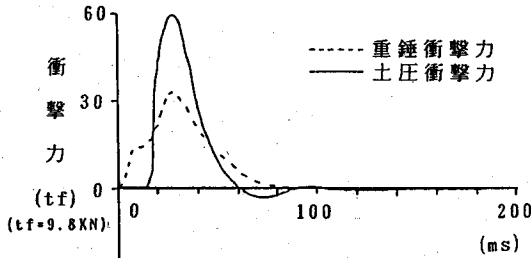


図-6 落石衝撃実験による土圧衝撃力

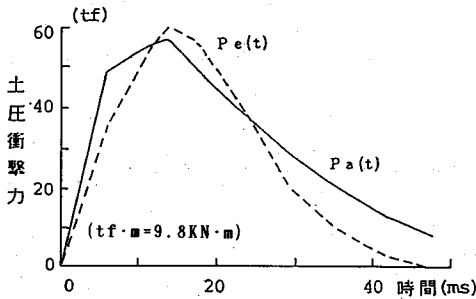


図-7 動的同定計算結果

4. 数値計算例

(1) エネルギー伝達率算定法の妥当性の検討

まず、本法の妥当性を検討するために、金沢大学で行われた落石衝突実験<sup>2)</sup>(重錘重量  $W=1.0t$ , 落下高さ  $H=10.0m$ )の図-6に示すような土圧衝撃力-時間曲線  $P_e(t)$  に対する同定計算を行った。

式(6)を用いてサンドクッションのパラメータ  $k_1, k_2, c_1, c_2$  を求めると、図-7に示すような衝撃力-時間曲線の同定結果が得られ(繰り返し計算数  $n=82$ 回),

表-1 動的同定法による同定パラメータ

n	$k_1$ (tf/m)	$k_2$ (tf/m)	$c_1$ (tf·s/m)	$c_2$ (tf·s/m)
1	200.0	200.0	5.0	5.0
82	309.0	4.9	9.1	27.2

$n$ : 繰り返し計算数 (tf=9.8kN)

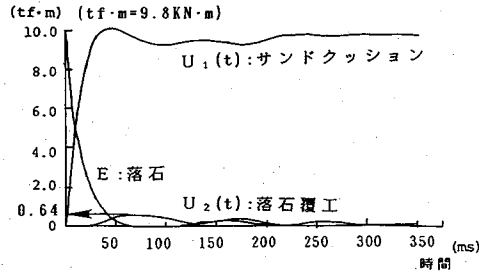


図-8 各エネルギーの時間的変化

ほぼ良くシミュレートしていることがわかる。ただし、実際には重錘がサンドクッションに衝突してからサンドクッションの底部に衝撃土圧が伝播するまでには約10ms程度のタイムラグがあるが、ここではこれを考慮していない。

このとき得られたサンドクッションのパラメータ値を表-1に示すが、この表よりサンドクッション内のばね定数  $k_2$  が非常に小さく、 $c_2$  がやや大きいことが注目される。これは、衝撃荷重が作用した時のサンドクッションの状態を粘弾性体として評価した方が良いことを示しており、落石対策便覧の評価式<sup>4)</sup>のように弾性体と仮定することにはやや無理があると思われる。

次に、この値を用いて、実際の衝突実験における落石-サンドクッション-落石覆工(H型鋼による単純梁)系のエネルギー伝達率の算定を行った。図-8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、時刻約70(ms)で、落石覆工への伝達エネルギーは、 $U_{2(t)}=0.64(t·m)$  と最大になり、したがって、このときのエネルギー伝達率は  $\gamma_0=6.4\%$  と算定される。なお、この計算例では落石覆工の応答量は弾性範囲内にあり、変形による履歴吸収エネルギー量は認められなかった。一方、衝突実験においてH型鋼梁のたわみから求めたエネルギー伝達率は  $\gamma_0=6.9\%$ <sup>2)</sup>であり、本法による値と極めて良く一致しており、本法の妥当性が確認される。

(2) 各種緩衝材のパラメータ値の比較

次に、3種類の砂(山砂, 川砂, 砕砂)の発泡スチロールを緩衝材とした場合を想定して、それぞれについて同定計算を行い、各パラメータ  $k_1, k_2, c_1, c_2$  を求めた。

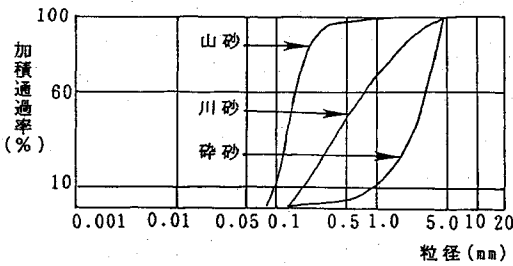


図-9 各種の砂の粒径加積曲線

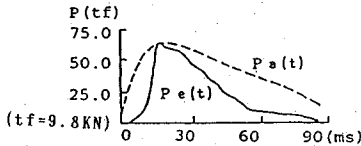


図-10 山砂の同定計算結果

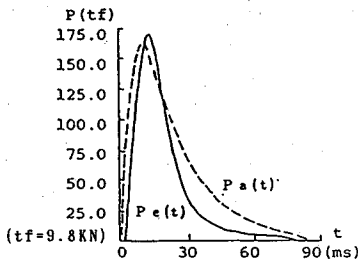


図-11 川砂の同定計算結果

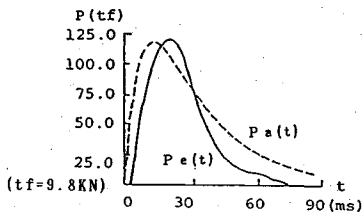


図-12 砕砂の同定計算結果

ここで使用した落石衝突実験<sup>5),6)</sup>の重錘条件は、全て重錘重量  $W=3.0t$ 、落下高さ  $H=10.0m$  である。まず検討を行った3種類の砂の粒径加積曲線を図-9に示す。

図-9から、この実験で用いた山砂は、川砂や砕砂に比べて粒径が揃っていることが認められる。一般に粒径が不均一な砂の場合には、大きい粒径の砂粒の間に小さい砂粒が詰まることにより、締め固まりやすい傾向にあると考えられる。したがって、山砂は他の砂に比べてあまり締め固まらないために、柔軟な緩衝材と見なされると考えられ、現実には過去の吉田ら<sup>4)</sup>の実験においても衝撃荷重の低減効果は3種類の砂の中で最も優れていることが確認されている。

図-10, 11, 12はそれぞれ山砂, 川砂, 砕砂を、図-13は発泡スチロールを緩衝材としたときの衝撃力を

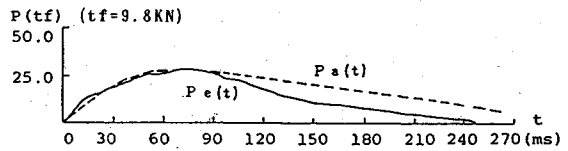


図-13 発泡スチロールの同定計算結果

表-2 各緩衝材のパラメータ

パラメータ 緩衝材	$k_1$ (tf/m)	$k_2$ (tf/m)	$C_1$ (tf·s/m <sup>2</sup> )	$C_2$ (tf·s/m <sup>2</sup> )
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

(tf=9.8KN)

同定した結果を示したものであるが、4ケースとも比較的良く同定できていることがわかる。3種類の砂については、それぞれ最大衝撃荷重は非常に異なっており、山砂, 砕砂, 川砂の順に大きくなっているが、逆に衝撃荷重の時間的な減衰性に関しては山砂が最も小さく、荷重の継続時間が長くなる傾向にある。また、発泡スチロールについては3種類の砂に比べて最大衝撃荷重が非常に小さくなるだけ(山砂の約1/2)、荷重の継続時間が2~3倍に長くなるなど顕著な相違が認められる。

次に、これらの同定計算で得られた各パラメータの値を表-2に示す。この表より、砂と発泡スチロールを比較すると、発泡スチロールの衝突部における弾性ばね係数  $k_1$  が小さく、逆に  $k_2$  の値は大きい。また粘性減衰係数  $C_1, C_2$  が非常に小さいことが認められる。一方、砂についてはパラメータの値も種類別により異なるが、4. (1) の考察で示したように、弾性ばね係数  $k_2$  の値がかなり小さくなる傾向にあることが認められる。また、衝突直後の最大衝撃荷重は、緩衝材の粘性減衰係数  $C_2$  の値が大きいほど大きくなる傾向にある。すなわち、式(6d)より衝突直後の応答量は、 $\dot{x}_2$ の方が  $x_2$  より大きいので、衝撃荷重  $P_a$  は  $k_2$  より  $C_2$  に大きく影響されるものと思われる。

### (3) 各種の砂のパラメータ値の回帰式

前節の計算例(重量  $W=3.0t$ 、落下高さ  $H=10.0m$  の場合)から、砂の種類によってパラメータ値が異なることが明らかとなった。しかし、落石の条件(重量  $W$  や落下高さ  $H$  の値)が違えばサンドクッションの応答性状も変わるため、同じ種類の砂であっても当然パラメータは異なった値になるものと考えられる。したがって、本節では各種の砂のパラメータ値  $k_1, k_2, C_1, C_2$  を、落石の条件(重量  $W$ 、落下高さ  $H$ )およびサンドクッションの層厚  $h$  の3変数が多少変化しても、任意の状態にも適用しうるように一般式として表わすことを試みる。

すなわち、落石重量  $W$ 、落下高さ  $H$ 、サンドクッション

表-3 回帰分析に用いた実験ケース

NO	落石重量W(t)	落下高さH(m)	サンドクッション層厚h(m)
1	0.3	5.0	0.9
2	0.3	10.0	0.9
3	0.3	15.0	0.9
4	0.3	20.0	0.9
5	1.0	5.0	0.9
6	1.0	10.0	0.9
7	1.0	15.0	0.9
8	1.0	20.0	0.9
9	3.0	5.0	1.2
10	3.0	10.0	1.2
11	3.0	15.0	1.2
12	3.0	20.0	1.2

ンの層厚  $h$  が、それぞれ異なる過去の実験データ<sup>7)</sup> (山砂, 川砂, 砕砂ともに表-3 に示す 12 ケースを選んだ) をもとに、次に示すような最適化手法により各パラメータの回帰式を求めることとする。

未知係数  $a, b, c, d$

目的関数  $Z = \sum (x_i - y_i)^2 \rightarrow \min \dots\dots\dots (13 a)$

回帰式  $y_i = a \cdot W_i^b \cdot H_i^c \cdot h_i^d \dots\dots\dots (13 b)$

ここに、 $y_i$ : それぞれ各パラメータ  $k_1, k_2, c_1, c_2$  の回帰式の値。

$x_i$ : 同定計算により得られるパラメータ値を示す。

$i$ : 計算に用いた落石条件のケース数を示し、ここでは  $i=1-12$  である。

なお、実際の衝突実験では、同じ落石条件およびサンドクッション層厚でも計測される衝撃土圧波形は、ばらつきが大きい<sup>7)</sup>ので、ここでは同一の落石・サンドクッション層厚の条件下で行った、多数回の実験データの平均波形を用いた。以上の計算手順により、各種の砂について求めた各パラメータの回帰式を次に示す。ただし、本回帰式の適用範囲は、 $0.3 t \leq W \leq 3.0 t, 5.0 m \leq H \leq 20.0 m, 0.9 m \leq h \leq 1.2 m$  である。

山 砂

$c_1 = 7.70 \cdot W^{0.313} \cdot H^{0.410} \cdot h^{-0.146}$

$c_2 = 4.30 \cdot W^{0.317} \cdot H^{0.412} \cdot h^{-0.104}$

$k_1 = 20.6 \cdot W^{0.251} \cdot H^{0.296} \cdot h^{-0.273}$

$k_2 = 2.90 \cdot W^{0.214} \cdot H^{0.416} \cdot h^{-0.090}$

川 砂

$c_1 = 5.33 \cdot W^{0.304} \cdot H^{0.497} \cdot h^{-0.080}$

$c_2 = 15.4 \cdot W^{0.571} \cdot H^{0.433} \cdot h^{-0.833}$

$k_1 = 72.6 \cdot W^{0.427} \cdot H^{0.205} \cdot h^{-1.080}$

$k_2 = 1.70 \cdot W^{0.412} \cdot H^{0.138} \cdot h^{-0.100}$

砕 砂

$c_1 = 6.79 \cdot W^{0.256} \cdot H^{0.483} \cdot h^{-0.100}$

$c_2 = 11.4 \cdot W^{0.515} \cdot H^{0.428} \cdot h^{-0.937}$

$k_1 = 80.7 \cdot W^{0.354} \cdot H^{0.166} \cdot h^{-0.935}$

$k_2 = 2.20 \cdot W^{0.779} \cdot H^{0.098} \cdot h^{-0.910}$

ここで、図-14 および図-15 に、山砂と砕砂を用い

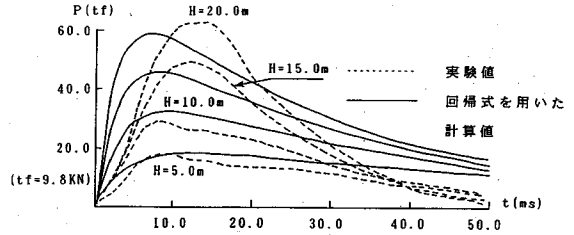


図-14 山砂を用いた場合の衝撃土圧波形

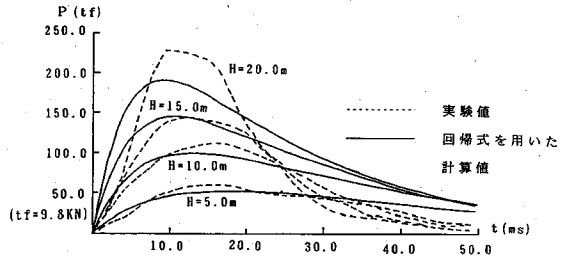


図-15 砕砂を用いた場合の衝撃土圧波形

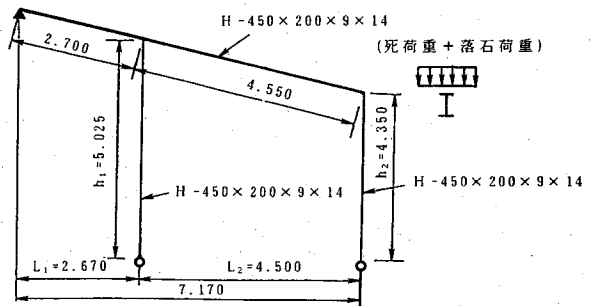
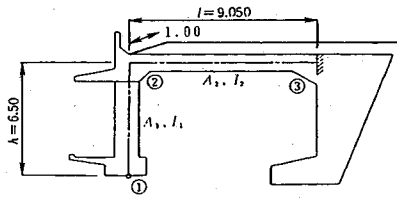


図-16 鋼製落石覆工

た場合の衝撃土圧波形について、回帰式による各パラメータを用いた場合と、実験で得た衝撃土圧の平均波形との比較を示す。これらより、回帰式によるパラメータを用いた計算値は、実験で得た衝撃土圧波形を比較的よくシミュレートしているものと考えられ、これらの回帰式はほぼ妥当であると思われる。

(4) 各種緩衝材における落石覆工へのエネルギー伝達率

ここでは、まず 4.(2) で求めた各緩衝材のパラメータ値を用いて、それらを使用した場合の落石覆工へのエネルギー伝達率の比較を行った結果を示す。落石の条件は同定計算で用いた実験条件と同様に、落石重量 3.0 t, 落下高さ 10.0 m とし、落石覆工としては、図-16 に示す鋼製落石覆工<sup>8)</sup> および図-17 に示す RC 落石覆工<sup>4)</sup> の 2 通りについて検討した。ただし、鋼製落石覆工の剛性については、縦断方向隣接桁の荷重分担は見込まず、主桁 1 本当たりの剛性を弾塑性ばねとして評価した。また、RC 落石覆工の剛性については、縦断方向の単位長当たりの剛性を弾性ばねとして評価した。すなわち、それぞ



$$A_1 = 1.50 \times 1.10 \times 1/5.0 = 0.330 \text{m}^2 \quad A_2 = 1.00 \times 0.80 = 0.800 \text{m}^2$$

$$I_1 = 1/12 \times 1.50 \times 1.10^2 \times 1/5.0 \quad I_2 = 1/12 \times 1.00 \times 0.80^2$$

$$= 0.033 \text{m}^4 \quad = 0.043 \text{m}^4$$

図-17 RC 落石覆工

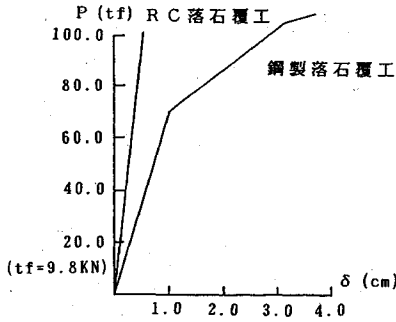


図-18 荷重-変位曲線

表-4 鋼製およびRC 落石覆工へのエネルギー伝達率

落石覆工	緩衝材	山砂	川砂	砕砂	発泡スチロール
鋼製落石覆工 (図-15)		4.6	16.2	14.0	0.4
RC落石覆工 (図-16)		3.8	7.0	5.9	0.2

(落石重量W=3.0t, 落下高さH=10.0mの場合)

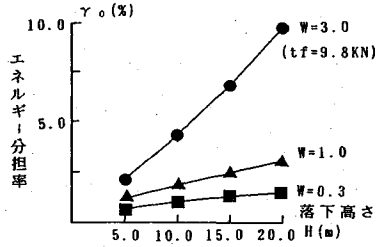
れ図-18 に示すような荷重-変位曲線の傾きによって与えることとした。

以上のデータをもとに、鋼製落石覆工およびRC落石覆工へのエネルギー伝達率を計算すると、表-4 に示す値が得られた。表-4 より、① 発泡スチロールが極めて優れたエネルギー吸収効果を示すこと、② 砂の中では山砂が砕砂、川砂に比べて優れていることがどちらの落石覆工についても認められる。この結果より、優れた衝撃緩衝材が備えておくべき特性とは、緩衝材自体の剛性は小さく変形性に富んだ材料であることが必要であるといえる。ただし、衝突物に対して貫通されない程度の厚さは、少なくとも保持していなければならない。

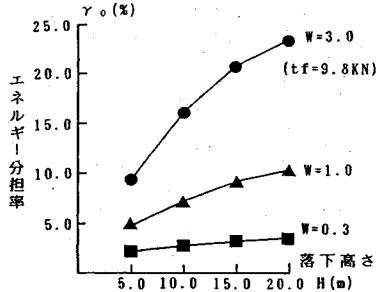
また、③ 鋼製落石覆工とRC落石覆工の比較を行うと、剛性が高いRC落石覆工へのエネルギー伝達率の方が小さいことがわかった。これは落石覆工の剛性が高いほど、緩衝材と落石覆工との境界面で反射されるエネルギー量が多くなるためと考えられる。したがって、当然の結果であるが、耐衝撃性が優れた落石覆工としては、仮に許容変形量が同じであるならば剛性が高い構造が望ましいといえる。

表-5 落石条件とエネルギー伝達率

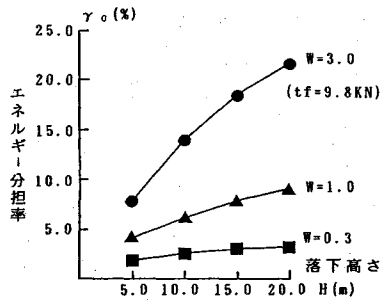
落石重量 W(t)	落下高さ H(m)	落石の運動 エネルギー E (t·m)	エネルギー伝達率 $\gamma_0$ (%)		
			山砂	川砂	砕砂
0.3	5.0	1.5	0.7	2.3	1.9
0.3	10.0	3.0	1.0	2.9	2.6
0.3	15.0	4.5	1.3	3.3	3.0
0.3	20.0	6.0	1.5	3.6	3.2
1.0	5.0	5.0	1.2	4.8	4.2
1.0	10.0	10.0	1.9	7.2	6.2
1.0	15.0	15.0	2.5	9.2	8.0
1.0	20.0	20.0	3.1	10.4	9.1
3.0	5.0	15.0	2.2	9.2	7.7
3.0	10.0	30.0	4.4	16.2	14.0
3.0	15.0	45.0	6.9	20.8	18.6
3.0	20.0	60.0	9.8	23.5	21.6



(a) 山砂の場合



(b) 川砂の場合



(c) 砕砂の場合

図-19 鋼製落石覆工のエネルギー伝達率の変化

次に、4.(3) で示したパラメータ回帰式を用いて、落石条件の変化とともに落石覆工へのエネルギー伝達率がどのように変わるか、図-16の鋼製落石覆工を対象として検討を試みた。

表-5 および図-19 に各種の砂を用いたときのエネルギー伝達率を示す。図-19 より、① 落石条件が小さい

表一七 鋼製落石覆工の安全性照査の一例

落石条件		山砂使用		川砂使用		砕砂使用	
落石重量 W(t)	落下高さ H(m)	伝達エネルギー (t·m) $\gamma_0 \cdot E$	$U_A \geq \gamma_0 \cdot E$	伝達エネルギー (t·m) $\gamma_0 \cdot E$	$U_A \geq \gamma_0 \cdot E$	伝達エネルギー (t·m) $\gamma_0 \cdot E$	$U_A \geq \gamma_0 \cdot E$
0.3	5.0	0.01	Safe	0.03	Safe	0.03	Safe
0.3	10.0	0.03	Safe	0.09	Safe	0.08	Safe
0.3	15.0	0.06	Safe	0.15	Safe	0.14	Safe
0.3	20.0	0.09	Safe	0.22	Safe	0.19	Safe
1.0	5.0	0.06	Safe	0.24	Safe	0.21	Safe
1.0	10.0	0.19	Safe	0.72	Fail	0.62	Safe
1.0	15.0	0.38	Safe	1.38	Fail	1.20	Fail
1.0	20.0	0.62	Safe	2.08	Fail	1.82	Fail
3.0	5.0	0.33	Safe	1.38	Fail	1.16	Fail
3.0	10.0	1.32	Fail	4.86	Fail	4.20	Fail
3.0	15.0	3.11	Fail	9.36	Fail	8.37	Fail
3.0	20.0	5.88	Fail	14.10	Fail	12.96	Fail

表一六 鋼製落石覆工の許容吸収エネルギー量

許容変位	弾性限界変位 ( $\delta_a=1.0\text{cm}$ )	終局限界変位 ( $\delta_a=3.8\text{cm}$ )
吸収エネルギー量 $U_A$	0.651	1.996

( $\text{tf} \cdot \text{m} = 9.8\text{KN} \cdot \text{m}$ )

場合には同一重量の落石についてはエネルギー伝達率はほぼ一定である。②しかし、落石条件が大きくなり弾性応答範囲内におさまらなくなると、エネルギー伝達率は急激に増加していくことがわかる。したがって、落石条件が厳しくなるほど落石覆工へのエネルギー伝達量は飛躍的に増加することが明らかである。

(5) エネルギー基準による落石覆工の安全性照査法の例

ここでは、著者らが先に提示したエネルギー基準式<sup>1)</sup>を用いて落石覆工の安全性の評価を行った例を示す。すなわち、エネルギー基準とは、落石覆工側の吸収エネルギーが落石による外力エネルギーを上回っていれば安全であるとする次式によって示される。

$$U_A \geq \gamma_0 \cdot E \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 $U_A$ ：死荷重の影響を考慮した落石覆工の許容吸収エネルギー量

$\gamma_0$ ：落石覆工へ伝達されるエネルギー伝達率

$E$ ：落石の運動エネルギー量

いま、図一六の鋼製落石覆工を対象とすると、その許容吸収エネルギー量  $U_A$  は静的な弾塑性解析による荷重-変形曲線（死荷重を考慮した）の面積によって求められ、表一六に示すような値が得られる。

次に、種々の落石条件と各種のサンドクッションを用いた場合に、落石覆工に弾性限界までの変形 ( $\delta_a=1.0\text{cm}$ ) を許容すると、それぞれの安全性照査は表一七のようになる。

この落石覆工は、落石重量  $W=1.0\text{t}$ 、落下高さ  $H=10.0\text{m}$  の条件で設計されているが、表一七より、山砂

のように耐衝撃性に優れた緩衝材を使用すれば、設計条件よりかなり大きな落石条件に対しても ( $W=1.0\text{t}$ 、 $H=20.0\text{m}$  あるいは  $W=3.0\text{t}$ 、 $H=5.0\text{m}$  など) 安全である可能性が十分あることを示している。

5. 結 論

本研究は、鋼製およびRC製の落石覆工へのエネルギー伝達率を算定する手法を開発するとともに、エネルギー基準による落石覆工の安全性照査法の一例を示したものである。本研究の成果を再度列挙すると以下のようになる。

(1) サンドクッションの力学的パラメータを最適化手法による動的同定法を用いて、ほぼ良くシミュレートできることが認められた。

(2) 3質点系モデルにより計算されたエネルギー伝達率は、衝突実験において求められたエネルギー伝達率と極めて良く一致することが確認された。

(3) 山砂、川砂、砕砂および発泡スチロールに対する同定計算結果は、実験値をほぼ良くシミュレートしていることがわかった。

(4) 12ケースの実験データと同定計算結果を基に、山砂、川砂、砕砂に対する力学的パラメータの回帰式を、 $W \leq 3.0\text{t}$ 、 $H \leq 20.0\text{m}$ 、 $h \leq 1.2\text{m}$  の範囲で導くことができた。

(5) 各種の緩衝材における落石覆工へのエネルギー伝達率を計算すると、発泡スチロールは、山砂の約1/10程度で極めて優れた緩衝材であること、また砂の中では山砂が砕砂、川砂よりも優れたエネルギー吸収効果を示すことがわかった。

(6) RC製の落石覆工の方が鋼製のものよりもエネルギー伝達率が小さいことが認められた。これは、RC製の方が剛性が大きいため、反射されるエネルギー量も大きいためと考えられる。

(7) エネルギー基準による安全性照査の一例によっ



て、山砂のように耐衝撃性に優れた緩衝材を使用することにより、かなり大きな落石条件に対しても安全性が増すことが確認された。

なお、本研究で提示したエネルギー基準による安全性照査法は、現行の許容応力度設計法で設計された落石覆工の安全性をチェック、つまり、終局限界状態における安全性照査を行うための一つの基礎的参考資料となりうるものと思われる。なお、今後は三次元的な解析手法により、荷重の分散効果を考慮した検討も行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 園田佳巨・佐藤紘志・石川信隆：エネルギー基準による落石覆工上のサンドクッション厚の算定法に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 1617～1625，1991年3月。
- 2) 榎谷浩・前川幸次・水木彰・吉田博：鋼製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。
- 3) 園田恵一郎：限界状態設計法とロックシェットの設計，北陸道路研究会 35 周年記念シンポジウム論文集，pp. 22～34，1988年10月。
- 4) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月。
- 5) 吉田博・竹島忠・古市進作・石塚賢吉：ロックシェッド上の落石による衝撃力の推定に関する実験，道路，No. 428，pp. 35～41，1976年10月。
- 6) 日本サミコン（株）・太陽工業（株）・榎長野技研：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，1990年2月。
- 7) 吉田博・榎谷浩・佐藤真・井原明美：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。
- 8) 三上善蔵：落石防止防護工法，p. 191，理工図書。
- 9) 吉田博・榎谷浩・右城猛・柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，土木学会論文集第421号 / VI-13，pp. 213～222，1990年9月。
- 10) 松井邦人・栗田哲史：応答加速度波を用いた構造特性の同定，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 689～698，1987年3月。

(1991. 8. 2 受付)

## A STUDY ON ENERGY TRANSMISSION FACTOR OF ROCK ONTO ROCK-SHEDS

Yoshimi SONODA, Hiroshi SATOH, Nobutaka ISHIKAWA and Hiroshi MASUYA

This paper presents an estimation method for the energy transmission factor of a rock onto the rock-shed in order to perform the safety check for the collapse of a rock-shed from the view point of energy criterion. The energy transmission factor means the ratio between the absorption energy of a rock-shed and the kinematic energy of a rock. At first, the three relationships of rock-sand cushion-rock shed are modelled into the three-degrees of freedom and, the transmission energy onto a rock-shed has been calculated as the time response. Herein, the model parameters of various sand cushion have been determined by the dynamic identification technique and derived as the regressive formulation which may be applied in various situations. Finally, the energy transmission factors of steel and RC rock-sheds have been estimated this method and, the safety check for the steel rock-shed has been performed by the energy criterion.