

## 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

## A STUDY ON THE ESTIMATION OF SAND-CUSHION DEPTH ON ROCK-SHEDS BY ENERGY CRITERION

園田佳巨\* 佐藤紘志\*\* 石川信隆\*\*\*

By Yoshimi Sonoda, Hiroshi Satoh and Nobutaka Ishikawa

This paper presents an estimation method of the sand-cushion depth on a rock-shed by using the energy criterion. The energy criterion is formulated such that the absorption energy of a rock-shed is greater than the sum of the energy due to the dead load of sand-cushion and a part of the kinematic energy of rock. Therefore, the sand-cushion depth is determined such that the energy criterion is satisfied considering the rigidity of the rock-shed. The standard depth  $h=90\text{cm}$  has been almost confirmed for the existing steel-made rock-shed by using this approach. However, the depth  $h=73\text{cm}$  may be adopted if the elastic limit energy is permitted in the safety criterion.

## 1. 緒言

落石覆工上のサンドクッションは、衝撃緩衝材として極めて重要な役目を果たしているが、このサンドクッション厚は、落石対策便覧の中では約90cmを標準としている<sup>1)</sup>。この根拠は、鋼材倶楽部および金沢大学において行われた落錘式衝撃実験<sup>2), 3)</sup>において、砂層厚さを90cmとした時に衝撃荷重の緩衝効果がほぼ最大となり、それ以上に層厚を増加してもその効果があまり変わらないという結果に基づくものである。しかし、実験範囲を大きく超える落石規模の場合や、落石覆工側の剛性がサンドクッション厚に与える影響については、未だ不明であり、またサンドクッション厚を大きくすることによる死荷重の増加と緩衝効果との関係についても、未解明のままである。

本研究は、上記のような問題点を解決するため、サンドクッションによる死荷重の影響を考慮した上で、エネルギー的観点からサンドクッション厚の決定法について、定性的かつ定量的な検討を試みるものである。すなわち、まず落石覆工側の許容吸収エネルギーが、死荷重による外力エネルギーと落石の持つ運動エネルギーの中で落石覆工側に伝達される外力エネルギーとの和よりも大きくなるようなサンドクッション厚の算定法を提示し、次いで数値計算例により本法を用いたサンドクッション厚の検討と落石覆工の剛性による影響を考察しようとするものである。なお、本研究では以下の仮定を用いる。

- 
- |            |         |       |                       |
|------------|---------|-------|-----------------------|
| * 正会員      | 防衛大学校助手 | 土木工学科 | (〒239 横須賀市走水 1-10-20) |
| ** 正会員 工博  | 防衛大学校教授 | 土木工学科 | (同 上)                 |
| *** 正会員 工博 | 防衛大学校教授 | 土木工学科 | (同 上)                 |

(1)対象構造は、鋼製の落石覆工とする。

(2)落石－サンドクッション－落石覆工の3者関係を3質点系モデルに置換できるものとする。

(3)落石覆工の許容吸収エネルギーは、静的弾塑性増分解析を用いて得られる荷重－変形曲線の面積によって算定されるものとする。

## 2. エネルギー基準によるサンドクッション厚の算定法

### 2.1 エネルギー基準の基本式

いま、落石覆工に作用する外力エネルギーとしては、落石が衝突時に持つ運動エネルギー $E$ と、落石覆工自体の死荷重を支えるために消費される死荷重エネルギー $\Delta U$ の2つが考えられる。この中で、落石の持つ運動エネルギー $E$ は、落石覆工に伝えられる前にその大半がサンドクッションによって吸収されると考えられ、現に、金沢大学が行った実験<sup>4)</sup>においては、その約90%以上がサンドクッションによって吸収され、残りの約10%以下のエネルギーのみが落石覆工に伝達すると報告されている。

ここでは、落石覆工が負担する落石の運動エネルギーを $\gamma_0 \cdot E$ とし、これと、サンドクッション等の死荷重によるエネルギー $\Delta U$ との和よりも落石覆工側の吸収可能な許容吸収エネルギー $U_A$ の方が大きければ安全であるとする。すなわち、これをエネルギー基準とよび、その基本式は次式のように表わされる。

$$U_A \geq \Delta U + \gamma_0 \cdot E \quad (1)$$

ただし、 $U_A$ ：落石覆工側の吸収可能な許容吸収エネルギー量，

$\Delta U$ ：落石覆工の死荷重によるエネルギー量，

$E = (\frac{1}{2} m_1 v^2)$  落石の持つ運動エネルギー量，

$m_1, v$ ：落石の質量と衝突時の速度，

$\gamma_0$ ：落石覆工側へ与える運動エネルギーの分担率，

以下に、式(1)中の諸量( $U_A, \Delta U, \gamma_0$ )の算出法について説明する。

#### (1) 落石覆工の許容吸収エネルギー量 $U_A$ の算定法

いま、落石覆工側（例えば、図－1の構造形式と寸法の場合）の許容吸収エネルギー量 $U_A$ は、ある落石荷重 $P_{rock}$ の載荷点における図－2のような荷重－変位曲線の面積の和によって次式のように算定される。

$$U_A = \sum P_{rock} \cdot \delta i \quad (2)$$

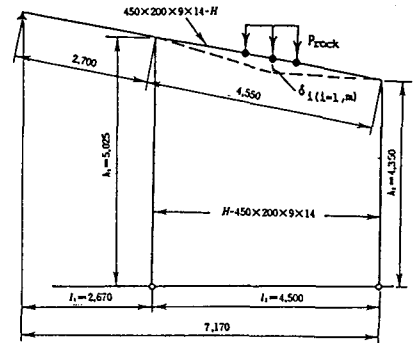
ただし、 $P_{rock}$ ：落石荷重（荷重分散を考慮して換算した

静的な等分布荷重），

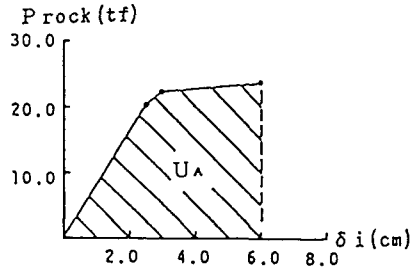
$\delta i$ ：載荷点の変位( $i=1, \dots, m$ )，

$m$ ：落石荷重が作用する節点の総数で、ここでは荷重の分散を考慮している。

ここで、式(2)の載荷点の変位 $\delta i$ は静的弾塑性増分解析によって算定したうえで、落石覆工が崩壊メカニズムを形成するまでの範囲内における、ある許容変形量（例えば、弾性限界変位、終局変位など）を後で指定する。すなわち、この許容変形量 $\delta i$ を指定することにより、式(2)よりその変位までの許容吸収エネルギー量 $U_A$ が算定されることになる。なお、ここでは曲げのみの塑性判定による静的弾塑性増分解析を用いているが、一般に破壊



図－1 落石荷重の載荷形式



図－2 許容吸収エネルギー $U_A$

モードが局部的でなく、全体破壊の場合は、動的吸収エネルギーが静的吸収エネルギーよりも大きくなるので<sup>5)</sup>、静的吸収エネルギーを採用しても安全側の評価となり、差し支えないものと考えられる。

## (2) 死荷重によるエネルギー $\Delta U$ の算定

サンドクッション等による落石覆工の死荷重は、落石覆工側に対して吸収可能な許容吸収エネルギーを予め減少させるマイナス要因として作用する。この死荷重によって消費されるエネルギー量 $\Delta U$ は、図-3に示すように、死荷重のみが作用する時の各節点における死荷重に対する荷重-変位曲線の面積の総和として次式のように算定される。

$$\Delta U = \sum P_{di} \cdot \delta d_i$$

(3) 図-3 死荷重によるエネルギー $\Delta U$ の計算

ただし、 $P_{di}$ :  $i$  点に作用する死荷重、

$\delta d_i$ :  $i$  点における死荷重による変位( $i=1, \dots, n$ )、

$n$ : 死荷重が作用する節点の総数、

なお、厳密には落石の衝撃に対する変形で、サンドクッションのポテンシャルエネルギーの減少分が落石覆工への入力エネルギーとなるが、その値については次節のエネルギー分担率の計算の中で落石覆工とともに振動するサンドクッション領域を考えることで考慮した。

## (3) 落石覆工側のエネルギー分担率 $\gamma_0$ の算定

落石が落石覆工に衝突する際、サンドクッションを透過して落石覆工側へ伝達されるエネルギーの全体に対する割合、つまりエネルギー分担率 $\gamma_0$ は次式のように表わされる。

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

ただし、 $U_{2\max}$ : 落石覆工へ伝達される時刻歴応答エネルギーの最大値

ここで、式(4)の $U_2$ は、図-4に示すような落石-サンドクッション-落石覆工の3者関係をモデル化した3質点系モデルによる衝撃弾塑性応答解析を用いて、以下のように算定される。

まず、図-4(a)の3質点系モデルにおける運動方程式は、図-4(b)の力のつり合いより次式ようになる。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) &= m_1 g \\ m_{2A} \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_3) \\ &\quad - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

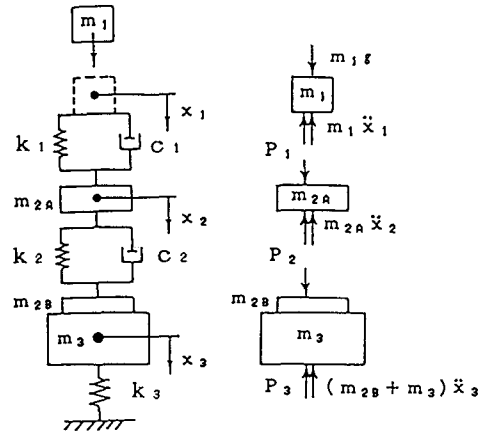
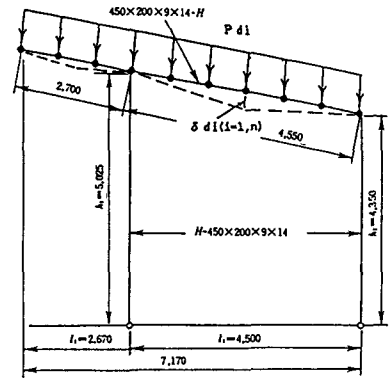
$$(m_{2B} + m_3) \ddot{x}_3 + k_3 x_3 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2(x_2 - x_3) = 0$$

ただし、 $m_1$ : 落石の質量、 $g$ : 重力加速度、

$k_1, c_1$ : 落石とサンドクッションとの接触面のばね係数および粘性減衰係数、

$k_2, c_2$ : サンドクッションの弾性ばね係数および粘性減衰係数、

$k_3$ : 落石覆工の弾塑性ばね係数で、ここでは静的なたわみ曲線と動的なたわみ曲線とが等しいとの仮定を設け、図-2に示した静的な弾塑性解析で得られた荷重-変位曲線の傾きを用いる。



(a) 3質点系モデル (b) 力のつり合い

図-4 エネルギー分担率算定モデル

$m_3$ : 落石覆工の有効質量であり、平面骨組モデルの1次固有周期より等価質量を計算した。

$m_2$ : サンドクッションの有効総質量で、サンドクッションの重量を含めた落石覆工の固有値解析結果から、等価な質量を求め、これより落石覆工の有効質量 $m_3$ を差し引いたもの。

$m_{2A}$ : サンドクッションの有効総質量の中で、図-5に示すような衝撃土圧により振動する領域の質量で、衝撃土圧の分散勾配を考慮して計算する。

$m_{2B}$ : サンドクッションの有効総質量 $m_2$ より $m_{2A}$ を差し引いたもの。これは、衝撃土圧の発生範囲外で、落石覆工とともに振動する領域の質量を意味する。

$x_1, x_2, x_3$ : 衝突位置における落石、サンドクッション、落石覆工の変位を示す。ただし、 $x_2, x_3$ については自重に対する平衡位置からの鉛直下方への変位とした。

$\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$ : 衝突位置における落石、サンドクッション、落石覆工の速度、

$\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3$ : 衝突位置における落石、サンドクッション、落石覆工の加速度

ここで、サンドクッションの弾性ばね係数については、有限層厚であるため接触面におけるばね係数 $k_1$ とサンドクッションそのものの特性を示す弾性ばね係数 $k_2$ とを等しいと仮定し、衝撃土圧の分散領域を三次元的に円錐台形との仮定のもとで、ヘルツの接触理論よりサンドクッション厚 $h$ が有限の場合の応力分散を考慮した<sup>1)</sup>次式により算定するものとする。

$$k_1 = k_0 \cdot (a + \beta h) / \beta h \quad (6)$$

ただし、 $k_0$ : 半無限体に対するバネ係数 ( $= 2aE / (1 - \nu^2)$ ) ,

$a$ : 接触面の半径 (接触面は円柱平底と仮定する) ,

$\nu$ : サンドクッションのポアソン比 ,

$E$ : サンドクッションの弾性係数 ,

$h$ : サンドクッション厚

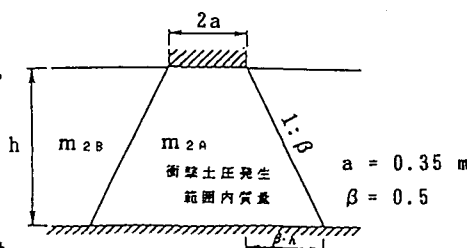


図-5 サンドクッション内の応力分散

なお、応力分散勾配 $\beta$ については過去の衝撃実験による検討

で、 $\beta=0.5$ の時に最も衝撃加速度について実験値と理論値とが一致すると報告されていることから<sup>1)</sup>、 $\beta=0.5$ を採用した。さらに、サンドクッションの粘性減衰係数 $c_1$ および $c_2$ は、現時点では、実験データや推定式が見当たらないので、ここでは、 $c_1=c_2=c_0$ と等しいと仮定し、この $c_0$ をパラメトリックに変化させたときの衝撃荷重の推定値と金沢大学における実験値との整合性から $c_0$ を決定することとした。

よって、落石覆工へ伝達されるエネルギー $U_2$ は、式(5)をNewmark- $\beta$ 法などによって数値的に解くことにより、落石の衝突時から、跳ね上がるまでの荷重-変位曲線の面積の和によって、サンドクッション側の吸収エネルギー量 $U_1$ とともに次のように算定される。

$$U_1 = \sum P_1 (\Delta x_1 - \Delta x_2) + \sum P_2 (\Delta x_2 - \Delta x_3) + \frac{1}{2} \cdot m_{2A} \cdot \dot{x}_2^2 \quad (7)$$

$$U_2 = \sum P_3 \cdot \Delta x_3 + \frac{1}{2} \cdot (m_3 + m_{2B}) \cdot \dot{x}_3^2$$

$$\text{ただし、} P_1 = k_1 (x_1 - x_2) + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (8)$$

$$P_2 = k_2 (x_2 - x_3) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3)$$

$$P_3 = k_3 \cdot x_3$$

したがって、式(7)の第2式より $U_2$ が得られ、その中で時刻歴応答エネルギーの最大値 $U_{2max}$ を式(4)に代入して落石覆工が負担するエネルギー分担率 $\gamma$ が算定されることになる。

## 2.2 サンドクッション厚の算定法

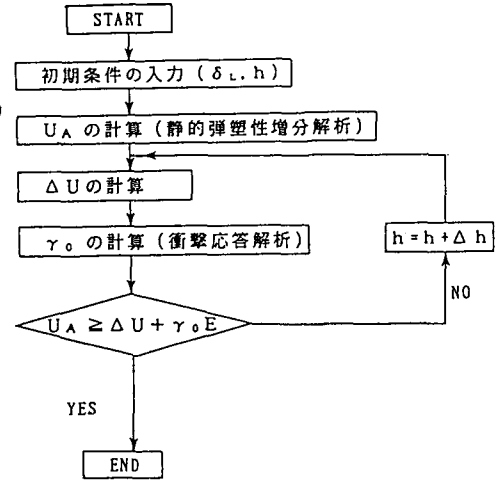
以上の式(1)～式(8)を用いて、サンドクッション厚を算定するには、以下の手順に従うものとする。

(1) まず、対象とする鋼製落石覆工の諸元および落石条件 (落石重量、落下高さ) をインプットデータとして与える。

(2) 次に、落石覆工の限界変形量 $\delta_L$ と、サンドクッション厚 $h$ を当初仮定する。

(3) 式(2)より落石覆工の許容吸収エネルギー量 $U_A$ を、式(3)より死荷重エネルギー $\Delta U$ を、さらに式(4)よりエネルギー分担率 $\gamma_0$ をそれぞれ算定する。

(4) 式(1)のエネルギー基準に照らし合わせ、式(1)を満足するか否かをチェックする。もし満足しなければサンドクッション厚 $h$ を変更し、再び(3)、(4)を繰り返す。式(1)を満足する中で最小のサンドクッション厚 $h$ が対象落石覆工に対する解となる。



### 3. 数値計算例

#### 3.1 サンドクッション厚の検討例

ここでは、サンドクッション厚の検討を図-7に示す鋼製落石覆工（石川県白山公園線既設）の諸元<sup>6)</sup>を用いて行った。落石条件としては、重量 1.0t、落下高さ10.0m の落石が落石覆工の屋根の中央に落下するものとした。また落石覆工の許容吸収エネルギー $U_A$ の算定に必要な限界変形量は、弾性限界変位 $\delta_e$ と終局変位 $\delta_p$ （崩壊メカニズム形成時の変位）の2つを用いた。なお、以下の数値計算においては、落石覆工の使用鋼材をH-350に変更した場合に関する計算結果も併記した。

図-6 サンドクッション厚の計算手順

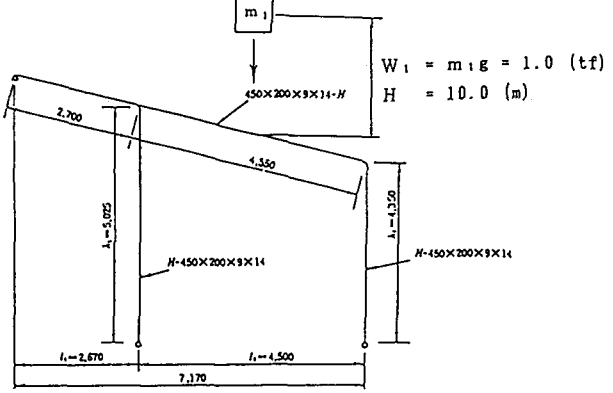


図-7 構造形式および荷重載荷形式

(1) 落石覆工の吸収エネルギー $U_A$ の算定結果

表-1は、限界変形量を $\delta_e$ と $\delta_p$ にしたときの落石覆工の許容吸収エネルギー $U_A$ を計算したものである。表-1より、弾性限界吸収エネルギー $U_e$ （図-8(a)参照）に比較して、終局限界吸収エネルギー $U_p$ （図-8(b)参照）は約2.5倍もあることが認められる。

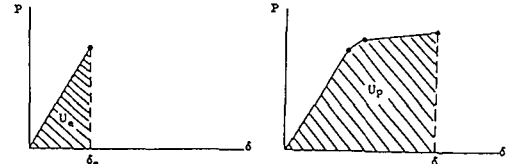
表-1 鋼製落石覆工の許容吸収エネルギー

| 限界変形量           | 弾性限界変位         | 終局限界変位         |
|-----------------|----------------|----------------|
| (H-450)吸収エネルギー量 | ( $U_e$ )0.893 | ( $U_p$ )2.321 |
| (H-350)吸収エネルギー量 | ( $U_e$ )0.492 | ( $U_p$ )1.283 |

単位 (tf・m)

(2) 死荷重によるエネルギー $\Delta U$ の算定結果

図-9は、死荷重による消費エネルギー $\Delta U$ について、サンドクッション厚を横軸にとって示した算定結果である。これより、落石覆工の剛性大きい(H-450の場合)ほど変形量小さいため、死荷重によるエネルギー $\Delta U$ は小さいことがわかる。また厚さ $h$ を増していくにしたがい、 $\Delta U$ は2次曲線的に増加していくこと



(a) 弾性限界吸収エネルギー  $U_e$  (b) 終局限界吸収エネルギー  $U_p$

図-8 落石覆工の許容吸収エネルギー

が認められるが、消費エネルギー $\Delta U$ 自体の値は極めて小さいことが注目される。

(3) 落石覆工のエネルギー分担率 $\gamma_0$ の算定結果  
a)  $k_1(=k_2)$ と $c_1(=c_2)$ の算定

落石覆工のエネルギー分担率 $\gamma_0$ を算定するためには、式(6)中の $k_1(=k_2)$ および $c_1(=c_2)$ の値をまず決定しておく必要がある。まず $k_1$ については、式(6)において砂のポアソン比を $\nu=0.25$ 、ラーメの定数を $\lambda=100.0 \text{ t/m}^2$ と仮定すると、弾性係数は $E=2.5\lambda=250.0 \text{ t/m}^2$ となる。ここで落石との接触面の半径を $a=0.35 \text{ m}$ とすると、 $k_0=186.6 \text{ t/m}$ が得られる。よって、本計算例では、サンドクッション厚 $h$ をパラメータとして、式(6)の $k_1$ を用いるものとした。

次に、粘性減衰係数 $c_1(=c_2)$ についてはこれをパラメトリックに変化させ、金沢大学の榎谷氏が行った落錘式実験結果<sup>7)</sup>の衝撃土圧の荷重-時間曲線と照合することにより決定した。すなわち、半無限体に対する粘性減衰係数 $c_0$ をパラメータとして実験値と比較すると、図-10(a)、(b)で示すように $c_0=5.0 \text{ t}\cdot\text{s/m}^2$ の場合が比較的良くシミュレートすることから、 $c_0=5.0 \text{ t}\cdot\text{s/m}^2$ を基準値とし、有限層厚 $h$ の場合は、式(6)を用いたばね係数同様に、サンドクッション厚 $h$ の関数によって変化するものとした。

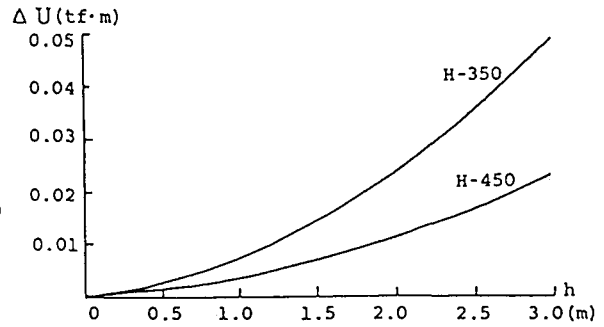
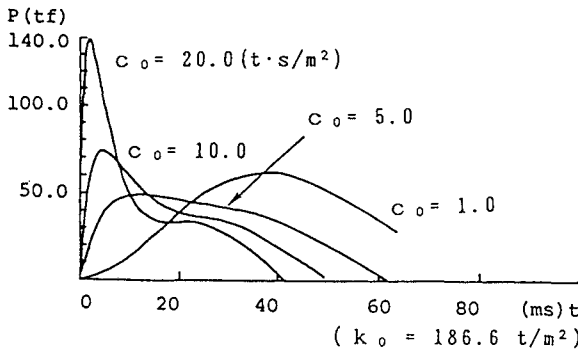
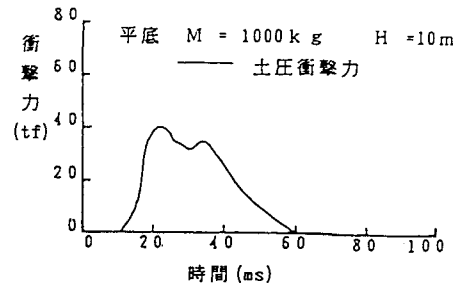


図-9 サンドクッション厚と死荷重エネルギー



(a) 本解析結果



(b) 榎谷氏の実験結果

図-10 粘性減衰係数の検討(榎谷氏の実験結果<sup>7)</sup>との比較)

なお、金沢大学の実験結果と本解析例では落石覆工側の剛性が異なっているが、本解析例でも落石覆工側の剛性を2倍に変えて荷重-時間曲線を調べた結果、図-11に示すように衝撃荷重 $P(t)$ に与える影響はさほど大きくないので、 $c_1=c_2=c_0=5.0 \text{ t}\cdot\text{s/m}^2$ をそのまま採用することとした。

b) エネルギー分担率 $\gamma_0$ の算定

ここでは、まず $m_1=0.102 \text{ (t}\cdot\text{s}^2/\text{m)}$ 、 $m_{2A}=0.077 \text{ (t}\cdot\text{s}^2/\text{m)}$ 、 $m_{2B}=0.374 \text{ (t}\cdot\text{s}^2/\text{m)}$ 、 $m_3=$

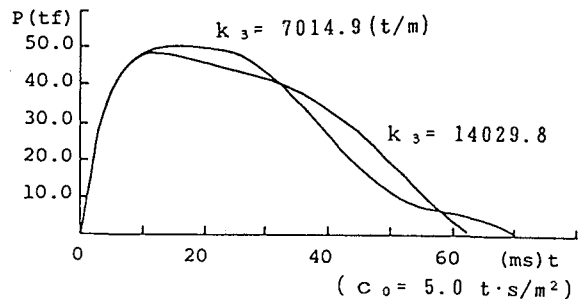


図-11 落石覆工の剛性と荷重-時間曲線

0.122(t・s<sup>2</sup>/m) の値を用い、サンドクッション厚  $h = 90$  cm の場合について式(5) を数值的に解き、式(7) のサンドクッションの吸収エネルギー  $U_1$  および落石覆工へ伝達されるエネルギー  $U_2$  を時間的に調べると、図-12 のようになる。また落石の運動エネルギー  $E$  も同図に併記したが、運動エネルギー  $E$  は衝突直後より急速に減少し、約30ms後にほぼゼロとなる。これに対して、サンドクッションの吸収エネルギー量  $U_1$  は、衝突直後より急速に増加し始め、約40ms後にピーク値となっている。一方、落石覆工へ伝達されるエネルギー  $U_2$  は、約30ms後にピーク値をとっており、このときの落石覆工のエネルギー分担率  $\gamma$  は約 7.2% となっている。

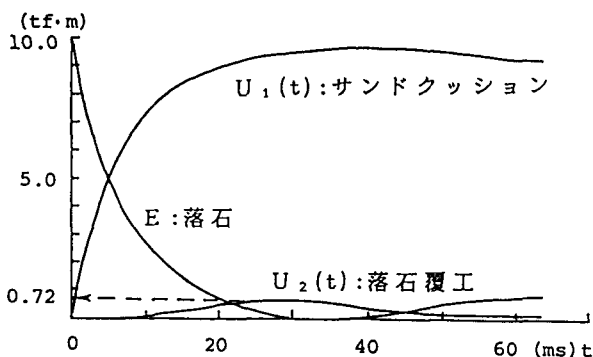


図-12 エネルギーの時間的变化

また表-2 にサンドクッションのラメの定数  $\lambda$  と粘性減衰係数  $c_0$  ( $=c_1=c_2$ ) を変化させたときの衝撃荷重の最大値  $P_{max}$  と落石覆工のエネルギー分担率  $\gamma$  の値の変化を示す。表-2 (a), (b) よりエネルギー分担率  $\gamma$  は、 $\lambda$  と  $c_0$  を変化させても 4~12% とあまり変化せず、衝撃荷重の最大値と比べて、サンドクッションの状態の影響をあまり受けないことが認められた。

表-2 サンドクッションの特性とエネルギー分担率

(a) ラメの定数とエネルギー分担率

| ラメの定数 $\lambda$ (t/m <sup>2</sup> ) | 50    | 100   | 200   | 500   |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 最大衝撃荷重 $P_{max}$ (tf)               | 41.75 | 65.02 | 79.55 | 100.8 |
| エネルギー分担率 $\gamma_0$ (%)             | 4.4   | 7.15  | 8.8   | 12.2  |

( $c_0 = 5.0$  t・s/m<sup>2</sup>)

(b) 粘性減衰係数とエネルギー分担率

| 粘性減衰係数 $c_0$ (t・s/m <sup>2</sup> ) | 1.0   | 5.0   | 10.0  | 20.0  |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 最大衝撃荷重 $P_{max}$ (tf)              | 61.43 | 65.02 | 74.77 | 139.6 |
| エネルギー分担率 $\gamma_0$ (%)            | 6.9   | 7.15  | 8.3   | 11.1  |

( $\lambda = 100$  t/m<sup>2</sup>)

次に、サンドクッション厚  $h$  を増大させたときのエネルギー分担率  $\gamma_0$  の変化を図-13 に示す。これより、 $h$  を増していくと、当然ながらサンドクッションによるエネルギー吸収が増大するため、落石覆工のエネルギー分担率  $\gamma$  は単調に減少していくことがわかる。また、落石覆工の剛性が大きい (H-450 の場合) ほど、変形によるエネルギー吸収量が減少する。したがって、全吸収エネルギーの中で相対的にサンドクッションが吸収するエネルギーの割合が増加し、落石覆工のエネルギー分担率が減ることが認められた。

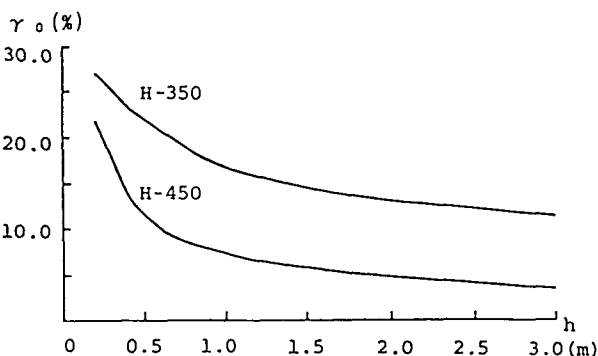
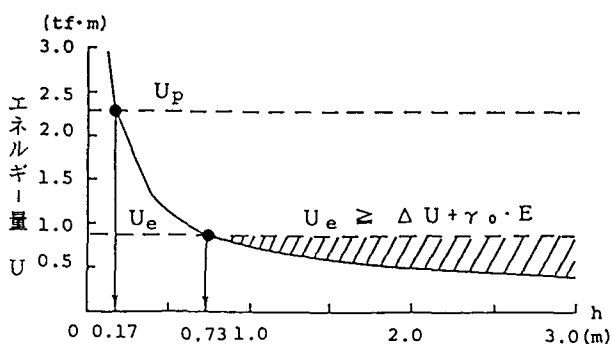


図-13 サンドクッション厚とエネルギー分担率

#### (4) サンドクッション厚の決定法

図-14 は、式(1) のエネルギー基準によるサンドクッション厚の決定法を示したものである。すなわち、落石覆工の許容吸収エネルギー量  $U_A$  を弾性限界吸収エネルギー  $U_e$  と仮定すれば ( $U_A = U_e$ )、これを死荷重による外力エネルギー  $\Delta U$  と動的解析で求めた時刻歴応答エネルギーの最大値  $U_{2max}$  の和が超えなけ

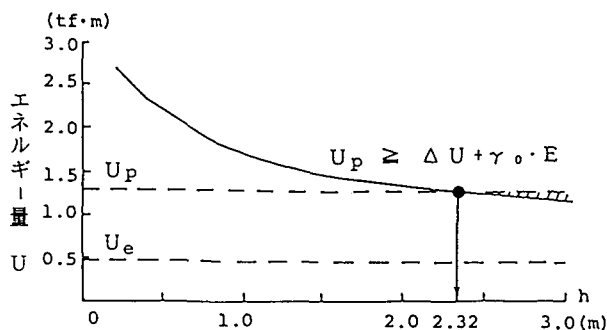
れば安全である ( $U_e \geq \Delta U + U_{2max}$ ) というエネルギー基準により、安全なサンドクッション厚は  $h \geq 73 \text{ cm}$  となった。また許容吸収エネルギー量  $U_A$  を終局限界吸収エネルギー  $U_p$  と仮定すると ( $U_A = U_p$ )、 $h \geq 17 \text{ cm}$  となる。したがって、現行の約  $90 \text{ cm}$  のサンドクッション厚は本落石覆工に対し安全側であり、ほぼ妥当であることがわかる。しかし、場合によっては許容吸収エネルギーを弾性限界吸収エネルギーとして、 $h \geq 73 \text{ cm}$  としても差し支えないものと思われる。



図一14 サンドクッション厚の検討結果 (H-450)

### 3.2 落石覆工の剛性の影響

ここでは、図一6の鋼製落石覆工の断面のみを変更してH-350x175の鋼材を使用した場合について、サンドクッション厚を検討する。図一15は、図一14のH-450x200の場合と同様の図であるが、この場合は弾性限界変位  $U_e$  を基準とすると、サンドクッション厚をどんなに厚くしても落石覆工側がエネルギーを吸収できず破壊する ( $U_e < \Delta U + \gamma_0 \cdot E$ ) ことが認められる。したがって、本構造物の場合には、 $U_p$  を基準とすると  $h \geq 232 \text{ cm}$  の場合によ



図一15 サンドクッション厚の検討結果 (H-350)

やく安全であることになる。よって、落石覆工側の剛性がサンドクッション厚の決定に大きな影響を与えることが認められ、サンドクッション厚の決定に対し、落石覆工の剛性の影響を加味した本法が有用であることが確認される。

## 4. 結 論

本研究は、吸収エネルギーによる安全性照査基準 (エネルギー基準) を用いて、サンドクッション厚の算定法について考察を行ったもので、以下のことが要約される。

- (1) 死荷重による消費エネルギーは定量的に見て非常に小さく、通常のスンドクッション厚  $90 \text{ cm}$  程度であれば、落石エネルギーの中で落石覆工へ伝達されるエネルギーのみが落石覆工への外力エネルギーと考えて差し支えない。
- (2) 落石覆工のエネルギー分担率は、サンドクッション厚を変化させても約  $4 \sim 12\%$  程度であることが認められた。
- (3) 既存の鋼製落石覆工に対し、エネルギー基準によりサンドクッション厚の検討を行ったが、現行のスンドクッションの標準層厚  $h = 90 \text{ cm}$  がほぼ妥当であることが計算例によって確認された。しかし、さらに弾性限界吸収エネルギーまで認めると、 $h = 73 \text{ cm}$  まで少なくともよいことが認められた。
- (4) 落石覆工の剛性を小さくすると、弾性限界吸収エネルギー  $U_e$  では吸収しきれず、終局限界吸収エネルギー  $U_p$  まで吸収させるとしてもサンドクッション厚を  $2.32 \text{ m}$  以上にならなければならないという結果が得られた。したがって、落石覆工側の剛性を高めることにより、サンドクッション厚を小さくすることが可能で

あり、この点については今後、経済性の観点も含めて検討する必要がある。

なお、今後の問題点としては、(1)落石覆工の破壊形態がせん断破壊等の局所破壊についての吸収エネルギー量の評価法 (2)落石の生起確率、落石覆工の耐用年数等を考慮した落石覆工の限界変形量の決定 (3)エネルギー分担率に関するより詳細な実験的、理論的検討などが挙げられる。

#### 参 考 文 献

- (1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年 7月
- (2) 鋼材倶楽部：新しい落石覆の開発に関する研究，1973年
- (3) 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，1976年10月
- (4) 榎谷浩、前川幸次、水木彰、吉田博：鋼性ロックシェッド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
- (5) 斉藤英明、大野友則、石川信隆、水山高久：局部変形を考慮した鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.35A,pp.1057-1068，1989年 3月
- (6) 三上善蔵：落石防止防護工法，pp.191,理工図書
- (7) 榎谷浩：落石覆工の落石による衝撃力に関する研究，博士論文，pp.84，1989年4月  
(1990年10月12日受付)