

# 論文 ソイルセメントを用いた三層緩衝構造の設計法の一提案

藤堂 俊介<sup>\*1</sup>・牛渡 裕二<sup>\*2</sup>・栗橋 祐介<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

要旨: 本研究では, 落石防護擁壁用のソイルセメントを用いた三層緩衝構造の伝達衝撃力算定法を提案するとともに, 実規模緩衝構造模型の重錘落下衝撃実験を行い, その妥当性を検証した。検討の結果, 1) 重錘衝撃力の最大値は, 振動便覧の式を用いてラーメの定数を  $5,000 \text{ kN/m}^2$  とすることにより評価可能であること, 2) 重錘衝撃力の主波動継続時間は, ソイルセメント厚と高い相関関係を示すこと, 3) 提案の三層緩衝構造の伝達衝撃力は, 既往の落石防護覆工用三層緩衝構造に関する評価式を準用することで概ね評価可能であること, 等が明らかになった。

キーワード: 三層緩衝構造, ソイルセメント, 伝達衝撃力, 評価式, 実規模実験

## 1. はじめに

山間部や海岸線沿いの急崖斜面に近接する道路では落石災害の発生が懸念されるため, 落石防護擁壁など多くの落石防護構造物が建設されている。また, 近年の異常気象や凍結融解作用などが原因で落石規模が設計当初よりも増大している事例が報告されており, 耐衝撃性の改善を必要とする箇所も数多く存在する。このような状況下において, 本研究グループでは落石防護擁壁の耐衝撃性向上を目的に, 既往の緩衝工に代わる新しいタイプの三層緩衝構造(表層材: ソイルセメント, 芯材: ジオグリッド, 裏層材: EPS)を提案し, 室内実験や1/2縮尺模型実験および三次元弾塑性衝撃応答解析等を行い, その実用化に向けた検討を行ってきた。その結果, 提案の三層緩衝構造が優れた緩衝性能を有していることを明らかにしている<sup>1)~3)</sup>。しかしながら, 提案の緩衝構造の設計法の確立には至っていないのが現状である。

このような背景より, 本研究では提案の三層緩衝構造の設計法の提案を目的に, 既往の室内実験結果に基づき, 各入力エネルギーに対応する伝達衝撃力評価式を提案した。さらに, その評価式に基づき実規模落石(対象エネルギー  $E = 1000 \text{ kJ}$ )に対応可能な緩衝構造を設計・製作し, 重錘落下衝撃実験により, その緩衝性能を検証した。

## 2. 実規模実験の概要

表 - 1 には, 実規模重錘落下衝撃実験のケース一覧を示している。表中, 試験体名は英文字 E と入力エネルギー (kJ) の組み合わせとして示している。なお, E300/1000 は予備実験であり質量 5 ton の重錘を用いている。また, E1200 は伝達衝撃力の検証実験(以後, 検証実験)であり質量 10 ton の重錘を用いている。なお, 予備実験は検証実験における入力エネルギーを確定することを目的とした実験であり, 伝達衝撃力は測定していない。図 - 1 および図 - 2 には, それぞれ予備実験および検証実験に用いた試験体の概要を示している。また, 検証実験の場合には伝達衝撃力を測定しているため, 図 - 2 には実験装置についても示している。試験体の平面寸法は予備実験および検証実験でそれぞれ  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  および  $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  とし, いずれの場合もソイルセメント厚を  $100 \text{ cm}$ , EPS プ

表 - 1 実験ケース一覧

試験体名	ソイルセメント厚 (cm)	EPS ブロック厚 (cm)	重錘質量 $m$ (ton)	落下高さ $H$ (m)	入力エネルギー $E$ (kJ)
E300 (予備実験)	100	50	5.0	5.0	250
E1000 (予備実験)			5.0	20.0	1,000
E1200 (検証実験)			10.0	12.0	1,200

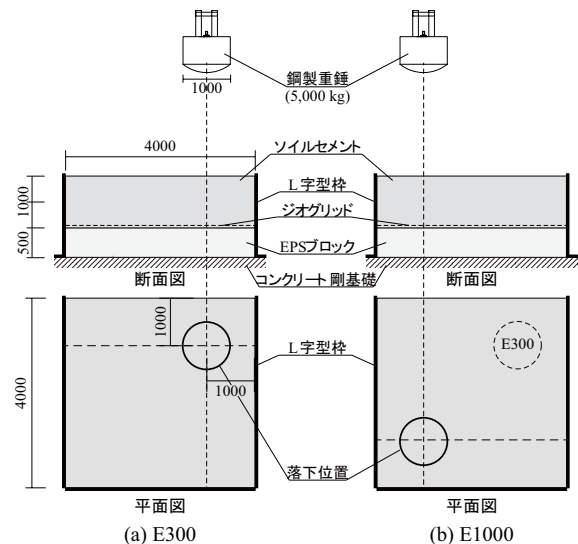


図 - 1 予備実験に関する試験体の概要

\*1 函館市役所 (正会員)  
 \*2 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 技師長 (正会員)  
 \*3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)  
 \*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

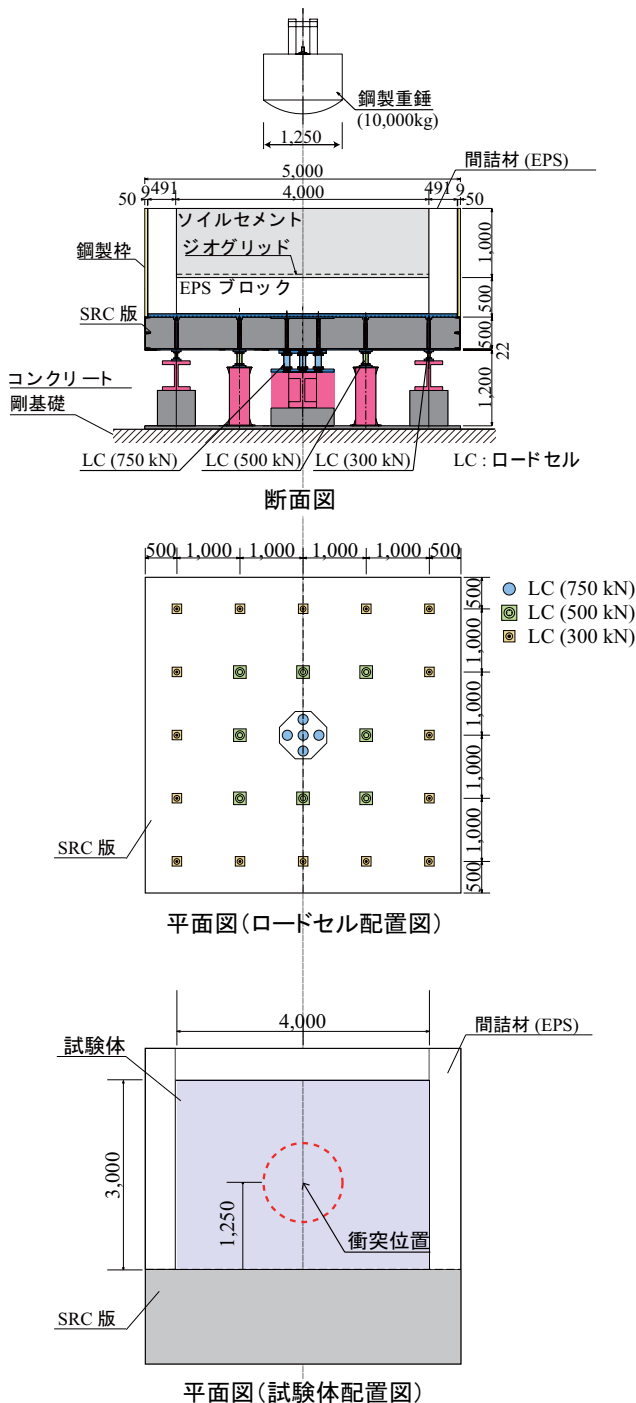


図 - 2 検証実験に関する実験装置および試験体の概要

ロック厚を 50 cm としている。これらの寸法は、実落石防護擁壁への適用を想定して設定したものである。

また、ジオグリッドには品質管理強度  $34 \times 43 \text{ kN/m}$  の 2 方向タイプを用い、ソイルセメント底面から 10 cm の位置に 2 枚重ねて埋設している。なお、試験体の表面保護工として試験体上部と解放面側の側面に対して、超速硬化ウレタン防水材料を厚さ 2 mm 程度吹付けた。

写真 - 1 には、予備実験および検証実験の状況を示している。測定項目は、重錘衝撃力、重錘貫入量および伝達衝撃力である。重錘衝撃力は、重錘頂部に設置した加



(a) 予備実験



(b) 検証実験

写真 - 1 実験状況

速度計より測定された減速度に重錘質量を乗じて評価した。また、重錘貫入量は高速カメラを用いて測定した。伝達衝撃力は図 - 2 に示す全 27 個のロードセルによって測定された荷重の総和として評価した。なお、前述のとおり予備実験では伝達衝撃力は計測していない。

### 3. 実規模実験結果

#### 3.1 各種時刻歴応答波形

図 - 3 には、(a) 重錘衝撃力、(b) 重錘貫入量および (c) 伝達衝撃力に関する時刻歴応答波形を示している。

(a) 図の重錘衝撃力に着目すると、E300 の場合には継続時間が 25 ms 程度の正弦半波状の第 1 波のみで構成されており、最大重錘衝撃力は 1,000 kN 程度であることが分かる。一方、E1000/1200 の波形は、継続時間が 10 ms 程度の第 1 波と継続時間が長い第 2 波から構成されている。また、第 1 波の最大値は E1000 および E1200 でそれぞれ 4,900 および 5,600 kN 程度となっている。

(b) 図の重錘貫入量に着目すると、その増加勾配は E300 の場合よりも E1000/1200 の場合が大きいことが分かる。また、これら 2 ケースにおける貫入量の増加勾配はほぼ同程度の値を示している。ただし、E1000 の場合については、最大貫入量を示した後、貫入量が復元しており重錘がリバウンドしている状況が窺えるものの、E1200 の場合には確認できない。これは、E1200 の場合には、緩衝構造が限界状態に近いことを示しているものと推察される。

(c) 図より E1200 の伝達衝撃力は、重錘衝突とともに増加し、最大値到達後に一定値を示した後、徐々に減少する分布性状を示している。なお、最大伝達衝撃力は 2,000 kN 程度となっている。また、伝達衝撃力を重錘衝撃力と比較すると、継続時間 10 ms 程度以降において両者は類

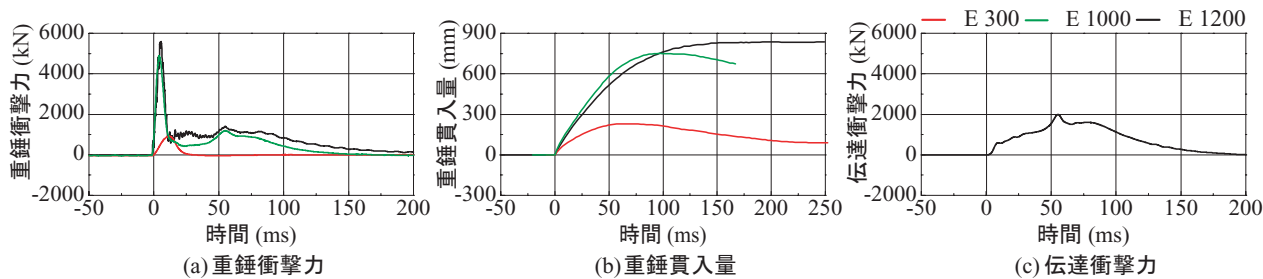


図 - 3 各種時刻歴応答波形

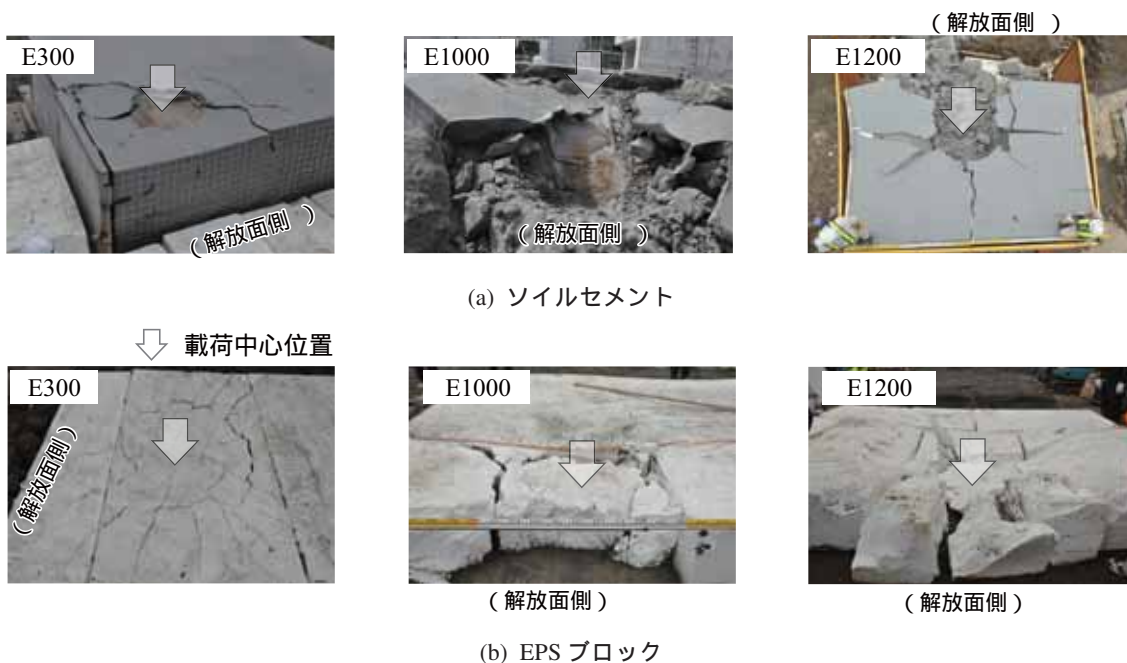


写真 - 2 実験終了後における破壊状況

似の性状を示していることが分かる。これは、ソイルセメントが押抜きせん断破壊した後、重錘がソイルセメントとともに EPS ブロックに深く貫入し、EPS ブロックの応力-ひずみ関係(後述の図 - 6 参照)が強く影響した波形性状を示したことによるものと推察される。

### 3.2 破壊性状

写真 - 2 には、実験ケース終了後における破壊性状を示している。図より、表層材のソイルセメントは入力エネルギーの増加に伴い、その損傷範囲が増大していることが分かる。一方、裏層材の EPS ブロックは入力エネルギーの増加に伴いひび割れが開口し、貫入量が大きくなっていることが確認できる。ただし、重錘衝突位置周辺の EPS ブロックは残存していることから、緩衝性能は未だ消失していないものと推察される。なお、EPS ブロックの表面の変形や損傷はほぼ全域に渡っている。従って、荷重分散範囲は、図 - 4 に示すようにソイルセメントの押抜きせん断領域(直径 3.25 m の円の面積)とすることで安全側に評価できるものと考えられる。

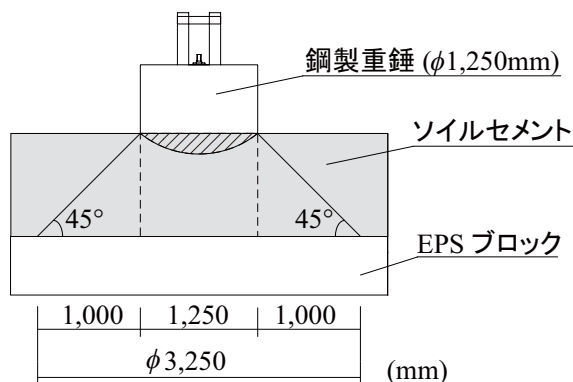


図 - 4 荷重分散範囲の模式図

## 4. 伝達衝撃力算定法の基本概念

### 4.1 仮定条件

提案の緩衝構造は、1) 表層材ソイルセメントにて衝撃力が分散され、2) 裏層材 EPS で衝撃エネルギーが吸収され、3) 低減された衝撃力が分散して、落石防護擁壁に伝達される機構となっている。落石防護擁壁に作用する伝達衝撃力の算定式は、既往の落石防護覆工用三層緩衝構

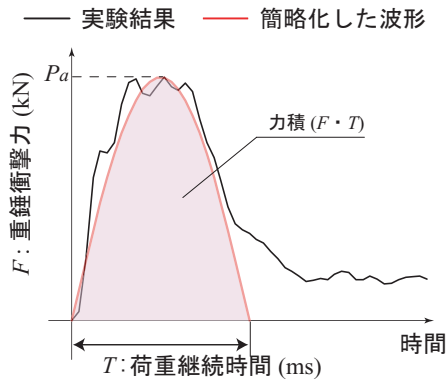


図 - 5 重錘衝撃力波形の一例 (要素実験)

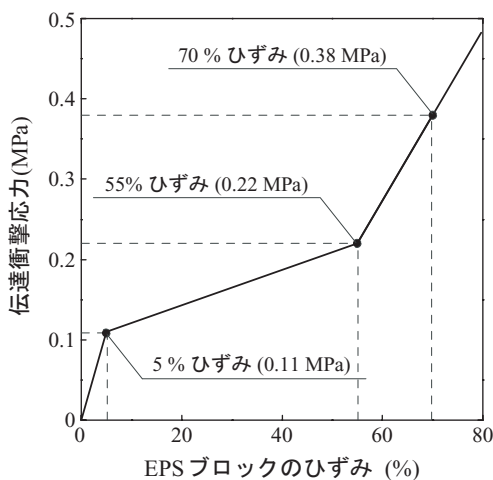


図 - 6 裏層 EPS 材の応力-ひずみ曲線の近似図

造の考え方を基本として、以下の仮定条件の下に提案することとする。

- 落石等が提案の緩衝システムに衝突した際に発生する重錘衝撃力波形を、図 - 5 のように便宜的に正弦半波に置き換え、荷重継続時間で積分した値を緩衝システムに入力された力積と仮定する。
- 重錘衝突後直後に荷重分散範囲のソイルセメントが重錘と一体化し合質点として運動し、このときの運動量変化が上記で求めた力積と等しいと仮定する。その結果、合質点の速度と運動エネルギーが求められる。
- 上記の運動エネルギーが EPS ブロックに入力されるエネルギーと考え、そのエネルギーが EPS ブロック全面に均等に作用し塑性変形によるひずみエネルギーに全て変換されると仮定する。

なお、本設計法において用いた EPS ブロックの応力-ひずみ曲線<sup>4)</sup>を 図 - 6 に示す。

#### 4.2 伝達衝撃力算定の手順

提案のソイルセメントを用いた三層緩衝構造の伝達衝

撃力は、前節の仮定条件に基づき以下の手順で算定することとする。

- (i) 振動便覧の式を用い、重錘衝撃力  $P_a$  を算出する。ラーメの定数は、 $\lambda = 5,000 \text{ kN/m}^2$  とする。
- (ii) 荷重継続時間  $T$  を既往の実験結果に基づいて推定する。
- (iii) (i), (ii) で求めた  $P_a$  および  $T$  より、緩衝システムに入力される力積  $FT$  を算出する。
- (iv) 荷重分散範囲のソイルセメント質量と重錘質量を重錘衝突後の合質点の質量  $W$  と仮定する。
- (v) (iv) で求めた合質点に対応し、(i)~(iii) で得られた力積と等価になる速度  $v$  を算出する。
- (vi) (iv), (v) より、ソイルセメントが得る運動エネルギー  $E_w$  を算出する。
- (vii) (vi) で求めた運動エネルギーと等価となる EPS ブロックの平均ひずみおよび EPS ブロックの応力を算定し伝達衝撃力  $P_t$  を算出する。

#### 5. 伝達衝撃力算定式の提案

ここでは、前章に示した伝達衝撃力算定の概要に基づき、伝達衝撃力算定式の提案を試みる。また、提案の算定式により求めた伝達衝撃力と、前述の実規模実験により得られた伝達衝撃力を比較し、提案式の妥当性を検討する。

##### 5.1 ソイルセメントが得る運動エネルギーの算定式

まず、落石等の衝突時における衝撃力  $P_a$  を式 (1) に示した振動便覧式<sup>5)</sup>を用いて算定する。

$$P_a = 2.108 (m_0 \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (1)$$

ここで、 $m_0$  は衝突する物体の質量 (t)、 $g$  は重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )、 $H$  は落下高さ (m)、 $\lambda$  は緩衝構造のラーメの定数 ( $\text{kN/m}^2$ ) である。既往の室内要素実験<sup>2)-3)</sup> および実規模実験の結果を基に最大重錘衝撃力と入力エネルギーとの関係を整理すると 図 - 7 のように示される。図より、室内の実験の場合にはラーメの定数  $\lambda$  を特定することは困難であるものの、実規模実験の場合には、 $\lambda = 5,000 \text{ kN/m}^2$  とすることで入力エネルギー  $E = 1,000 \sim 1,200 \text{ kJ}$  時の最大重錘衝撃力を概ね評価可能であることが分かる。

また、荷重継続時間  $T$  は、図 - 8 が示すようにソイルセメント厚  $h_s$  と高い相関関係にある。ここでは、実験結果に基づき、荷重継続時間  $T = 10.1 \cdot h_s$  と仮定することとした。

次に、重錘衝撃力波形を 図 - 5 のように便宜的に正弦半波とし、以下に示す式 (2) を用いて緩衝構造に作用した力積を求める。

$$P = P_a \sin \frac{\pi}{T} t \quad (2)$$

上述の  $P_a$  および  $T$  を式 (2) に用いることで、緩衝システムに作用する力積を算出できる。

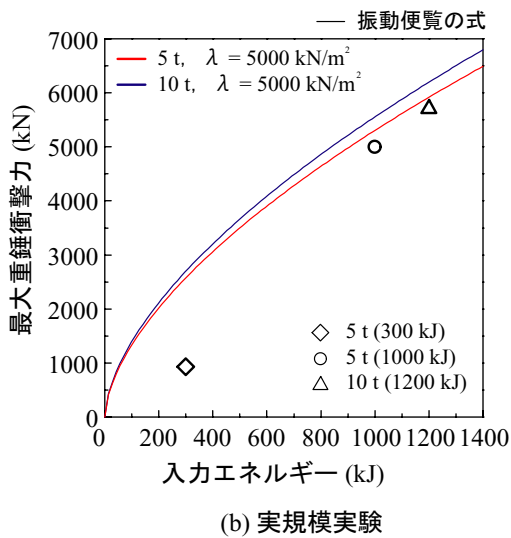
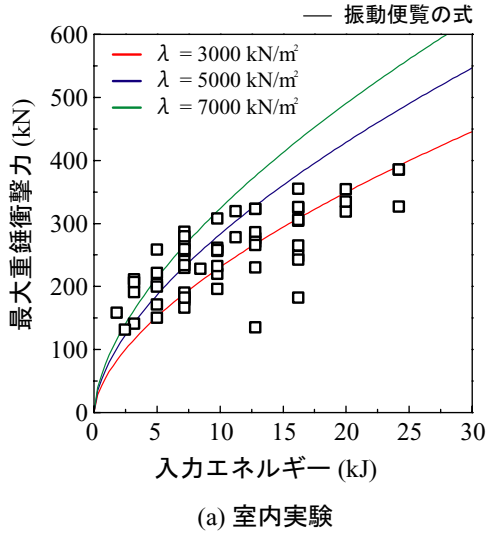


図 - 7 ラーメの定数の検討

落石等の衝突によって、表層材に力積が作用すると仮定した場合、重錘衝突後における合質点を得る速度は、力積が運動量に等しいことから次式のように示される。いま、 $m$  を合質点の質量、 $W$  を質点の重量、 $v$  を質点を得る速度とすると、下記のように示される。

$$mv = \int_0^T P dt \quad \therefore v = \frac{1}{m} \int_0^T P dt \quad (3)$$

一方、重錘衝撃力波形  $P$  は式 (1) のように仮定している。前項で仮定した式で示されることから、以下のように示される。

$$\int_0^T P dt = \int_0^T P_a \sin \frac{\pi}{T} t dt = \frac{2T}{\pi} P_a \quad (4)$$

以上より、質点の速度  $v$  は式 (5) のように示される。

$$v = \frac{2T}{m\pi} P_a = \frac{2Tg}{W\pi} P_a \quad (5)$$

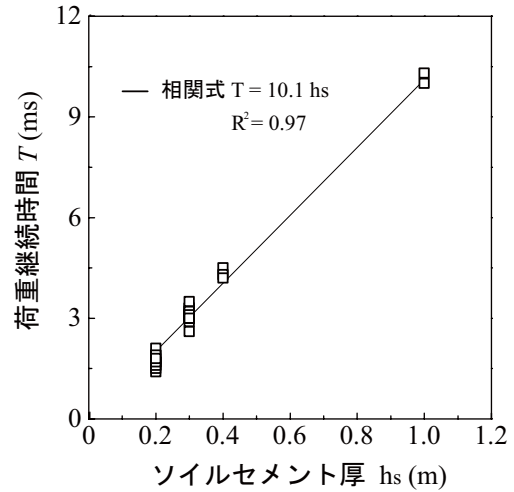


図 - 8 荷重継続時間とソイルセメント厚との相関図

従って、質点の運動エネルギー  $E_w$  は、式 (6) のように示される。

$$E_w = \frac{mv^2}{2} = \frac{2gT^2}{\pi^2 W} P_a^2 \quad (6)$$

## 5.2 裏層 EPS 材のエネルギー吸収に基づく伝達衝撃力の算定

4.1 に示した通り、質点の運動エネルギー  $E_w$  が EPS ブロックによって全て吸収されるものとし、衝撃エネルギー吸収時における EPS ブロックの伝達衝撃応力を求めることで伝達衝撃力を算定する。ここで、図 - 6 に示す EPS ブロックのひずみが 5%、55%、70% の場合の伝達衝撃応力をそれぞれ  $\sigma_5$ 、 $\sigma_{55}$ 、 $\sigma_{70}$  とする。また、これらに対応するひずみをそれぞれ  $\varepsilon_5$ 、 $\varepsilon_{55}$ 、 $\varepsilon_{70}$  とする。したがって、EPS ブロックの荷重分散範囲の表面積を  $A$  とすると、伝達衝撃力  $P_t$  は以下のような式で得られる。ここで、 $P_5$ 、 $P_{55}$ 、 $P_{70}$  は上述の EPS ブロックひずみがそれぞれ 5、55 および 70% の時の伝達衝撃力である。

$$P_t = \frac{\sigma_5}{\varepsilon_5} \varepsilon A = P_5 \frac{100\varepsilon}{5} \quad (0 < \varepsilon < 0.05) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_t &= P_5 + \frac{P_{55} - P_5}{\varepsilon_{55} - \varepsilon_5} (\varepsilon - \varepsilon_5) \quad (0.05 < \varepsilon < 0.55) \\ &= P_5 + (P_{55} - P_5) \left( \frac{100\varepsilon}{50} - \frac{5}{50} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_t &= P_{55} + \frac{P_{70} - P_{55}}{\varepsilon_{70} - \varepsilon_{55}} (\varepsilon - \varepsilon_{55}) \quad (0.55 < \varepsilon < 0.7) \\ &= P_{55} + (P_{70} - P_{55}) \left( \frac{100\varepsilon}{15} - \frac{55}{15} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

また、式 (8)、式 (9) を  $\varepsilon$  について解くと、下式のように示される。

表 - 2 E1200 における実験結果と計算結果の比較

項目	実験結果 (1)	計算結果 (2)	(2)/(1)
重錘衝撃力 (kN)	5600	6007	1.08
伝達衝撃力 (kN)	2025	2270	1.12
EPS 平均ひずみ (%)	-	61	-

$$\varepsilon = \frac{50}{100} \frac{P_t - P_5}{P_{55} - P_5} + \frac{5}{100} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{15}{100} \frac{P_t - P_{55}}{P_{70} - P_{55}} + \frac{55}{100} \quad (11)$$

いま, EPS ブロック厚を  $h_e$  とし, ひずみエネルギーの総和を求めると, 下式のように示される。

$$E_w = \begin{cases} \frac{\sigma \varepsilon}{2} A h_e & (12a) \\ \left\{ \frac{\sigma_5 \varepsilon_5}{2} + \frac{(\sigma_5 + \sigma)(\varepsilon - \varepsilon_5)}{2} \right\} A h_e & (12b) \\ \left\{ \frac{\sigma_5 \varepsilon_5}{2} + \frac{(\sigma_5 + \sigma_{55})(\varepsilon_{55} - \varepsilon_5)}{2} \right. \\ \quad \left. + \frac{(\sigma_{55} + \sigma)(\varepsilon - \varepsilon_{55})}{2} \right\} A h_e & (12c) \end{cases}$$

式 (7), (10)~(12) より伝達衝撃力  $P_t$  について整理すると, 下式のように示される。

$$P_t^2 = \begin{cases} 40 P_5 \frac{E_w}{h_e} & (13a) \\ P_5^2 + \frac{100}{25} (P_{55} - P_5) \left( \frac{E_w}{h_e} - \frac{0.05}{2} P_5 \right) & (13b) \\ P_{55}^2 + \frac{40}{3} (P_{70} - P_{55}) \\ \quad \times \left( \frac{E_w}{h_e} - \frac{11}{40} P_5 - \frac{1}{4} P_{55} \right) & (13c) \end{cases}$$

### 5.3 伝達衝撃力の算定式の妥当性検証

表 - 2 には, E1200 に関する実験結果および提案式による計算結果を示している。表より, 重錘衝撃力および伝達衝撃力ともに計算結果は実験結果を 1 割程度大きく評価しており, 安全側の評価を与えていることが分かる。

また, EPS ブロックの平均ひずみは計算結果において 61% と評価されている。従って, EPS ブロックは提案の算定式では, 緩衝性能が消失するまで著しく変形・損傷

するものと評価されており, 実験結果とも概ね対応している。これらのことから, 本研究により提案した伝達衝撃力の算定式は, 落石防護擁壁用三層緩衝構造の設計法として適用可能であるもの判断される。

### 6. まとめ

本研究では提案の三層緩衝構造の設計法の提案を目的に, 既往の室内実験結果に基づき, 各入力エネルギーに対応する伝達衝撃力評価式を提案した。さらに, その評価式に基づき実規模落石に対応可能な緩衝構造を設計・製作し, 重錘落下衝撃実験によりその緩衝性能を検証するとともに, 提案の伝達衝撃力評価式の妥当性を検証した。本研究で得られた結果をまとめると, 以下の通りである。

- 1) 落石衝撃力の最大値  $P_a$  は, 振動便覧の式を用いてラーメの定数を  $\lambda = 5,000 \text{ kN/m}^2$  とすることにより評価可能である。
- 2) 落石衝撃力の荷重継続時間  $T$  は, ソイルセメント厚  $h_s$  と高い相関関係を示す。
- 3) 提案の三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式は実測値を 1 割程度安全側に評価する。

### 謝辞:

本研究は, 国土交通省建設技術研究開発助成制度における政策課題解決型技術開発 (中小企業タイプ) の援助により行われたものである。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 小室雅人, 牛渡裕二, 岸 徳光, トウラシット  
タウン: ソイルセメントを有する三層緩衝構造を付設した落石防護擁壁模型の耐衝撃挙動に関する弾塑性衝撃応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.745-750, CD-ROM, 2013.7
- 2) 藤堂俊介, 牛渡裕二, 栗橋祐介, 岸 徳光: ソイルセメント厚が異なる落石防護擁壁用三層緩衝構造の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.769-774, CD-ROM, 2013.7
- 3) 牛渡裕二, 栗橋祐介, 前田健一, 鈴木健太郎, 岸 徳光: ソイルセメントを用いた三層緩衝構造を設置した落石防護擁壁模型に関する重錘衝突実験, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.997-1007, 2013.3
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ 8 ロックシェットの耐衝撃設計, 1998.11
- 5) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6