

# 報告 落石防護擁壁に用いるソイルセメント製緩衝工の適用範囲に関する一検討

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

**要旨:** 本研究では、落石防護擁壁に用いるソイルセメント製緩衝工の適用範囲を検討するために、落石径および衝突速度を変化させた場合の伝達衝撃力および適用範囲に関する検討を行った。その結果、1) 落石径が小さい場合には大きい場合に比較して荷重分散範囲が小さくなるため、EPSブロックのひずみも増加しその限界ひずみで適用範囲が決定されること、2) 落石径が大きい場合には荷重分散範囲が大きいためEPSブロックは限界ひずみに至らず、実規模実験にて確認された落石エネルギーで適用範囲が設定できること、3) 換算荷重伝達継続時間はEPSブロックの厚さおよび変形量と高い相関関係があること、等が明らかになった。

**キーワード:** ソイルセメント、三層緩衝構造、落石防護擁壁、伝達衝撃力、換算伝達荷重継続時間

## 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には、落石や土砂崩壊などの自然災害から人命や道路を守るための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<sup>1)</sup>。また、近年、集中豪雨等の異常気象や大地震、積雪寒冷地における凍結融解作用などによる斜面の不安定化によって、設計当初よりも落石規模が大型化している事例が報告されており、落石防護構造物の耐衝撃性の向上を必要とする箇所も数多く存在している。このような状況下において、著者らの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、落石防護擁壁やその緩衝工に関する重錘衝突実験や数値解析を多数実施している<sup>2),3)</sup>。

また、より大きな落石エネルギーに対応可能な緩衝工として、**図-1**に示すソイルセメントを用いた三層緩衝構造を提案し、室内実験や実規模実験を行って、その実用化に向けた検討も実施している<sup>4),5)</sup>。その結果、三層緩衝構造は、落石エネルギー $E = 1,200$  kJ程度までは優れた緩衝性能を有していることを確認<sup>6)</sup>し、さらに擁壁に作用する伝達衝撃力算定式の提案も行い<sup>7)</sup>、本工法を広く現場に普及させることを目的として、設計手順についても事例を踏まえて紹介している<sup>8),9)</sup>。しかしながら、

三層緩衝構造の伝達衝撃力の算定事例は少なく、設計者が実現場への本工法の適用性を検討する資料も不足しているのが現状である。

このような観点から、本研究では実現場における本工法の適用性の判断に関する利便性向上を目的として、落石防護擁壁に用いるソイルセメント緩衝工を対象に、落石径および衝突速度を変化させた場合の伝達衝撃力波形と適用範囲についての検討を行うこととした。また、ソイルセメントと擁壁の接触時間（以下、換算伝達荷重継続時間）を整理し、落石防護擁壁に作用する力積についても併せて検討を行っている。

## 2. 検討概要

### 2.1 工法概要

本工法は、**図-2**に示すように、落石防護擁壁の斜面側に緩衝工を設置することにより耐衝撃性を向上させる工法である。本緩衝工は、表層材として自立あるいは急勾配に構築可能なソイルセメントを用い、ソイルセメン

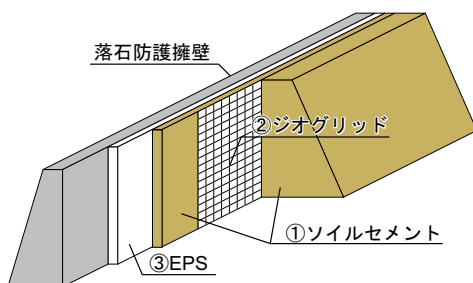


図-1 提案工法

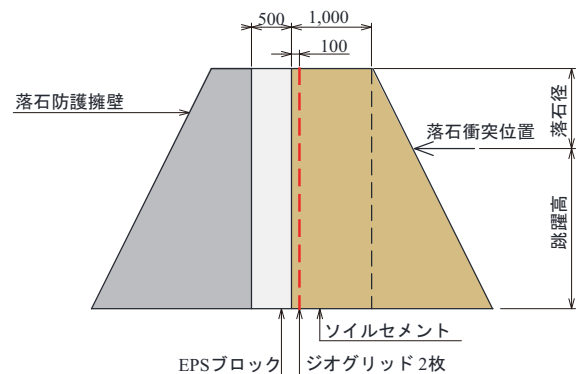


図-2 標準断面図

\*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 部長 博(工) (正会員)

\*2 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 上席研究員 (正会員)

\*3 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

\*4 (独) 高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

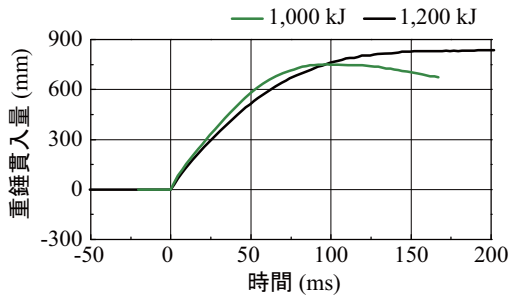


図-3 実規模実験における重錘貫入量波形

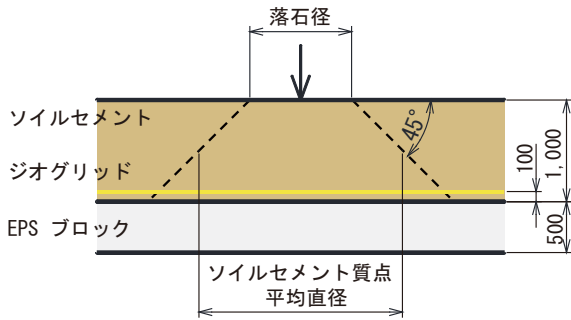


図-4 落石衝突時の模式図

ト内に芯材として緩衝工の割裂破壊抑制と衝撃力を分散させるためのジオグリッドを埋設し、裏層材として衝撃エネルギー吸収材としてのEPSブロックを用いるものである。この工法の最大の特徴はソイルセメントを用いる点である。その利点は、1) 現地発生土の流用が可能のため、安価かつ建設廃材発生の抑制に寄与できること、2) 自立可能であり省スペースと高い緩衝効果が期待できること、である。

既往の実験<sup>6)</sup>で緩衝効果が確認された最大エネルギー規模は、重錘質量  $m = 5 \text{ ton}$ 、落下高さ  $H = 20 \text{ m}$ 、衝突エネルギー  $E = 1,000 \text{ kJ}$  および  $m = 10 \text{ ton}$ 、 $H = 12 \text{ m}$ 、 $E = 1,200 \text{ kJ}$  である。図-3は、それらの実験より得られた重錘貫入量波形を示している。図より、入力エネルギーが  $E = 1,000 \text{ kJ}$  の場合は重錘のリバウンドが認められるが、 $1,200 \text{ kJ}$  ではリバウンドは生じていないことが分かる。このように  $E = 1,200 \text{ kJ}$  はリバウンドが生じず終局状態に至っていることから、緩衝システムの限界に近いエネルギー規模であったことが推察される。一方、両実験ケースの衝突エネルギーは1.2倍異なるのに対し、運動量は1.5倍異なる。これより、緩衝工の破壊性状はエネルギーよりも運動量に大きく影響を受けている可能性も考えられる。このため、本論文では落石径および衝突速度を変化させて、提案の算定式の算定結果を検証すると共に本工法の適用範囲を明らかにすることとした。なお、適用範囲の検討は実務者の利便性を考慮し、エネルギーにて整理するものとする。

## 2.2 設計手順

本工法を設置した場合の落石防護擁壁の設計は、提案

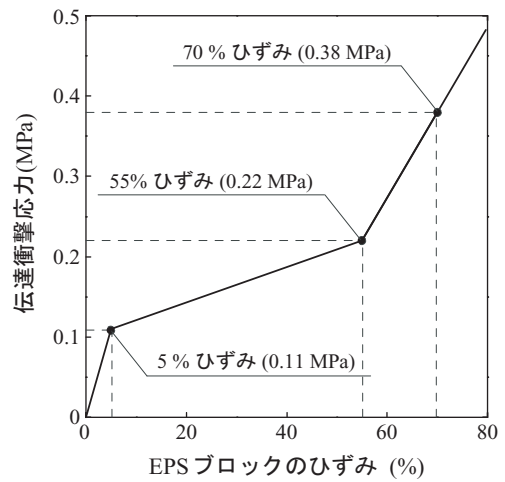


図-5 EPS材の応力-ひずみ曲線の近似図

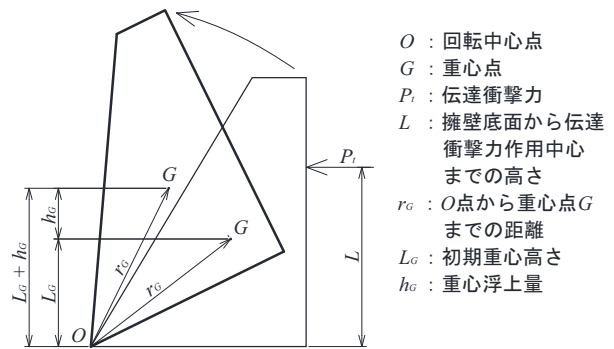


図-6 擁壁回転運動の模式図

の算定式<sup>7)</sup>によって、以下の手順により算出される。

- 1) 落石質量  $m_n$ 、落下高さ  $H$  より、本緩衝工に入力される落石衝撃力  $P_a$  を算出する。
- 2) ソイルセメント厚  $h_s$  より、落石およびソイルセメントとの接触時間である落石荷重継続時間  $T$  を算出する。
- 3) ソイルセメントおよび落石が一体化した合質点の重量  $W$  より、合質点の速度  $v$  およびエネルギー  $E_w$  を算出する。なお、ソイルセメントは図-4に示すように落石径を上底半径とした傾斜角が  $45^\circ$  の押し抜きせん断コーン(ソイルセメント質点)が形成されるものと仮定するため、落石径によって合質点重量が変化する。
- 4) 伝達衝撃力  $P_t$  および EPS ひずみ  $\varepsilon$  を算出する。なお、ひずみの限界値は、図-5に示すとおり  $\varepsilon = 70\%$  を上限とする。
- 5) 伝達衝撃力  $P_t$ 、ソイルセメントおよび擁壁本体との換算伝達荷重継続時間  $t$  により、擁壁に作用する力積を求め、図-6に示すように重心浮上量を算出して擁壁工の安定性を照査する。

これまでの安定照査事例では、換算伝達荷重継続時間  $t$  は図-7に示す  $E = 1,200 \text{ kJ}$  の実規模実験結果で得られ

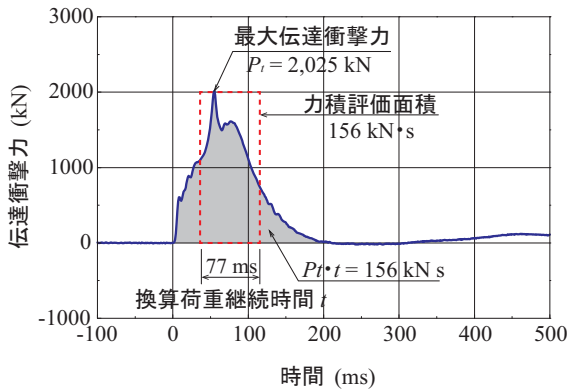


図-7 実規模実験における伝達衝撃力波形

表-1 検討ケース一覧

検討ケース	落石形状 (m)	体積 (m <sup>3</sup> )	質量 (ton)	衝突エネルギー (kJ)	衝突速度 (m/s)
□ 0.8m	0.8 × 0.8 × 0.8	0.512	1.357	200 ~ 605	17.2 ~ 29.9
□ 1.0m	1.0 × 1.0 × 1.0	1.000	2.651	200 ~ 829	12.3 ~ 25.0
□ 1.5m	1.5 × 1.5 × 1.5	3.375	8.948	200 ~ 1,200	6.7 ~ 16.4
□ 2.0m	2.0 × 2.0 × 2.0	8.000	21.210	200 ~ 1,200	4.3 ~ 10.6

た伝達衝撃力の時系列波形を基に  $t = 77$  ms と設定しているが、エネルギー規模が小さい場合には伝達衝撃力  $P_t$  および換算伝達荷重継続時間  $t$  は小さくなるものと考えられる。伝達衝撃力  $P_t$  は次式の算定式<sup>7)</sup>で評価することが可能となる。

$$P_t^2 = \begin{cases} 40P_5 \frac{E_w}{h_e} & (0 < \varepsilon < 0.05) & (1a) \\ P_5^2 + \frac{100}{25}(P_{55} - P_5) \left( \frac{E_w}{h_e} - \frac{0.05}{2}P_5 \right) & (0.05 < \varepsilon < 0.55) & (1b) \\ P_{55}^2 + \frac{40}{3}(P_{70} - P_{55}) \times \left( \frac{E_w}{h_e} - \frac{11}{40}P_5 - \frac{1}{4}P_{55} \right) & (0.55 < \varepsilon < 0.70) & (1c) \end{cases}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{5}{100} \frac{P_t}{P_5} & (0 < \varepsilon < 0.05) & (2a) \\ \frac{50}{100} \frac{P_t - P_5}{P_{55} - P_5} + \frac{5}{100} & (0.05 < \varepsilon < 0.55) & (2b) \\ \frac{15}{100} \frac{P_t - P_{55}}{P_{70} - P_{55}} + \frac{55}{100} & (0.55 < \varepsilon < 0.70) & (2c) \end{cases}$$

ここで、 $P_t$  は計算伝達衝撃力 (ton)、 $P_5, P_{55}, P_{70}$  は EPS ブロックひずみのそれぞれ 5, 55, 70 % 時の伝達衝撃力 (ton)、 $h_e$  は EPS ブロック厚 (m) である。

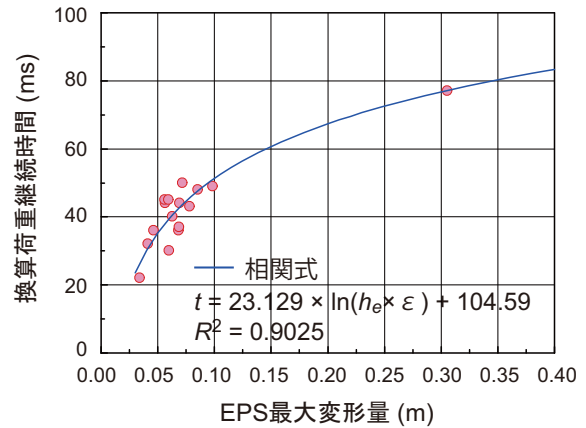


図-8 換算伝達荷重継続時間と EPS 最大変位量の関係

表-2 三層緩衝構造の規格・構成

材料名	項目	規格・構成等
ソイルセメント	単重	20 kN/m <sup>3</sup>
	厚さ	1.0 m
	圧縮強度	1.0 MPa
ジオグリッド	目合	28 × 33 mm
	品質管理強度	34 × 43 kN/m
	枚数	2 枚 (直交配置)
EPS ブロック	厚さ	0.5 m
	密度	20 kg/m <sup>3</sup>

一方、安定照査上、重要となる換算伝達荷重継続時間  $t$  については示されていない。次節では、伝達衝撃力を計測した既往の小型供試体を用いた室内要素実験結果も用いて、換算伝達荷重継続時間  $t$  の評価方法について検討することとする。

### 2.3 換算伝達荷重継続時間 $t$ の検討

換算伝達荷重継続時間  $t$  は、ソイルセメントおよび EPS ブロックの接触時間であり、ソイルセメントが EPS ブロックを押し続ける時間、すなわち EPS ブロックが変形する時間である。そのため、換算伝達荷重継続時間  $t$  は、EPS ブロックの変形量  $d_e$  と相関があるものと推察される。既往の室内要素実験および実規模実験の結果<sup>4)~6)</sup>を基に換算伝達荷重継続時間  $t$  と EPS ブロックの最大変形量との関係を整理すると、図-8 のように示される。図の縦軸には、最大伝達衝撃力  $P_t$  (実測値 A) および伝達衝撃力波形における力積  $F \cdot t$  (実測値 B) から算出される換算伝達荷重継続時間  $t$  (B/A) を、横軸には EPS ブロック厚  $h_e$  (設定値 C) および EPS ブロックの最大ひずみ  $\varepsilon$  (計算値 D) から算出される EPS ブロックの最大変形量  $d_e$  (C × D) を取ったものである。図より、EPS ブロックの最大変形量が 0.03 ~ 0.10 m 程度と小さい場合 (室内要素実験) には換算伝達荷重継続時間が 20 ~ 50 ms 程度、EPS ブロックの最大変形量が 0.30 m 程度と大きい場合 (実規模実験) には 80 ms 程度を示し、落石エネルギー規模に応じて換算伝達荷重継続時間  $t$  が変化することが分かる。

表-3 各落石径における計算結果一覧

落石径	記号	単位	□ 0.8m		□ 1.0m		□ 1.5m		□ 2.0m	
衝突速度	$v_0$	(m/s)	24.277	29.860	21.267	25.005	14.953	16.380	9.713	10.638
落石エネルギー	$E$	(kJ)	400	605	600	829	1,000	1,200	1,000	1,200
入力運動量	$m_n \cdot v_0$	(kN·s)	323	397	553	650	1,312	1,437	2,020	2,213
EPS ひずみ	$\varepsilon$	(%)	52.20	70.00	56.34	70.00	46.22	54.01	25.79	30.38
伝達衝撃力	$P_t$	(kN)	1,317	2,340	1,656	2,686	1,931	2,096	1,957	2,084
EPS 最大変形量	$d_e$	(m)	0.261	0.350	0.282	0.350	0.231	0.270	0.129	0.152
換算伝達荷重継続時間	$t$	(ms)	73.6	80.4	75.3	80.4	70.8	74.4	57.3	61.1
伝達力積	$P_t \cdot t$	(kN·s)	96.9	188.1	124.7	216.0	136.7	155.9	112.1	127.3

さらに、換算伝達荷重継続時間  $t$  は、EPS ブロックの最大変形量  $d_e$  との対数関係が成立するものと仮定し、換算伝達荷重継続時間  $t$  を以下のように評価することとした。

$$t = 23.129 \times \ln(h_e \times \varepsilon) + 104.59 \quad (3)$$

これより、換算伝達荷重継続時間  $t$  は、EPS ブロックの設定厚さ  $h_e$  および計算ひずみ  $\varepsilon$  より算出することが可能となる。

### 2.4 検討ケース

本緩衝工の適用範囲としては、(a) 落石エネルギーは実験にて確認された  $E = 1,200 \text{ kJ}$  程度以下で、(b) EPS ブロックの限界ひずみが 図-5 より 70% 程度以下を設定している。最大落石エネルギーについては、前述の実規模実験結果を踏まえ、 $E_{max} = 1,000 \text{ kJ}$  程度以下にすることが望ましい。また、提案の伝達衝撃力算定式<sup>7)</sup>は、図-4 に示すように、落石がソイルセメントに衝突する際にせん断コーンを形成して破壊するものと仮定している。これより、上底半径は落石径と等しい値を用いることから、落石径によって緩衝性能が変化することとなる。本検討では、表-1 に示すように、落石エネルギー  $E = 200 \sim 1,200 \text{ kJ}$  の範囲において、一辺の長さが  $D = 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ m}$  の立方体の落石（以下、それぞれ □ 0.5m, □ 1.0m, □ 1.5m, □ 2.0m,）を設定し、検討することとした。なお、□ 1.0 m 以下の場合には EPS ブロックが限界ひずみに到達するため、 $E = 1,000 \text{ kJ}$  未満までの検討となっている。

表-2 には、本検討に用いた三層緩衝構造の規格を示している。また、落石およびソイルセメントの単位体積重量は、それぞれ  $26 \text{ kN/m}^3, 20 \text{ kN/m}^3$  と仮定する。

## 3. 検討結果

### 3.1 各落石径におけるソイルセメント緩衝工の適用限界

表-3 には、各落石径において入力エネルギーを変化させた場合の計算結果の一覧を示している。表には、EPS ひずみ  $\varepsilon$ 、伝達衝撃力  $P_t$ 、EPS ブロックの最大変形量  $d_e$ 、換算伝達荷重継続時間  $t$  のほか、伝達衝撃力  $P_t$  に換算伝達荷重継続時間  $t$  を乗じた伝達力積  $P_t \cdot t$  も併せて示している。なお、落石径が  $\phi 1.0 \text{ m}$  までは EPS ブロックのひずみが 55 および 70% 程度の 2 ケース、落石径が  $\phi 1.5 \text{ m}$  以

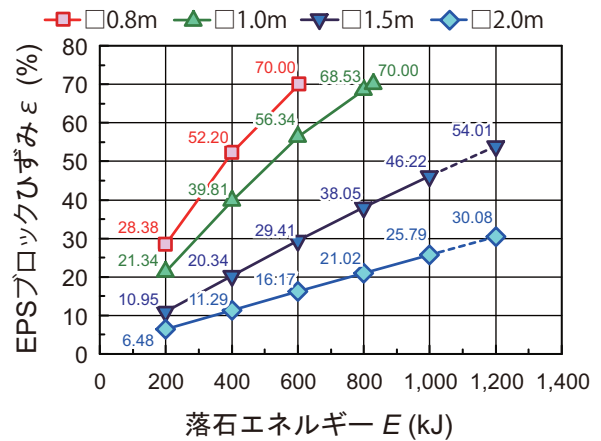


図-9 EPS ブロックのひずみと落石エネルギーの関係

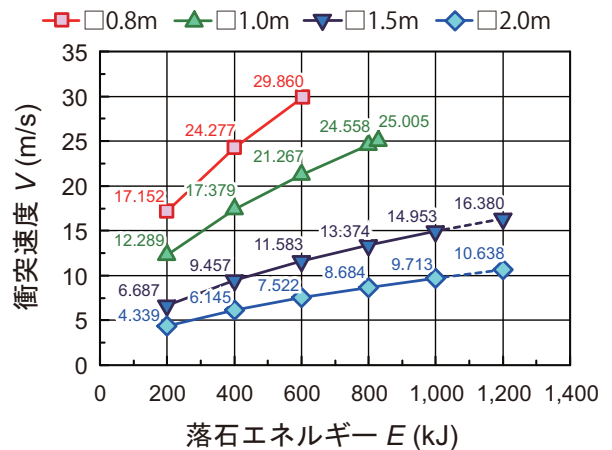


図-10 落石衝突速度と落石エネルギーの関係

上の場合にはエネルギーが大きい 2 ケースを示しており、以降の図において全計算結果を示すこととし、 $E = 1,000 \text{ kJ}$  以上は破線として表している。

図-9 には、各落石径の落石エネルギー  $E$  と EPS ブロックのひずみ  $\varepsilon$  との関係を示している。図より、落石径が小さい場合には大きい場合よりも荷重分散範囲が小さいことから、同じ落石エネルギーに対しても EPS ブロックのひずみが大きくなる傾向にあることが分かる。そのた

め、落石径が小さい場合には  $E = 600 \sim 800 \text{ kJ}$  で EPS ブロックのひずみが限界ひずみである  $\epsilon = 70 \%$  に達し、落石エネルギーの上限である  $E = 1,200 \text{ kJ}$  には到達しないことが分かる。

一方、落石径が大きい場合には荷重分散範囲が大きいことから、落石エネルギーの上限である  $E = 1,200 \text{ kJ}$  においても EPS ブロックのひずみが  $50 \%$  程度以下と小さく示されることが分かる。ただし、落石径が大きい場合で EPS ブロックの最大ひずみが  $50 \%$  以下であっても、本緩衝工の適用範囲は実証実験にて確認された最大衝突エネルギーを考慮した  $E = 1,000 \text{ kJ}$  を適用限界とすることが望ましい。

図-10には、各落石径の落石エネルギー  $E$  と衝突速度  $V$  の関係を示している。図より、落石径が小さい場合には衝突速度  $V = 30 \text{ m/s}$  程度であり、落石対策便覧 P12 に示される終端速度  $V = 28 \text{ m/s}$  までは対応可能であることが分かる。ここで、終端速度とは、長大斜面等において斜面高の約  $40 \text{ m}$  を超過すると、落石は落下時における摩擦等によるエネルギー損失により速度が一定の傾向を示す、とされているものである。

### 3.2 各落石径における伝達衝撃力および換算伝達荷重継続時間

図-11には、各落石径の落石エネルギー  $E$  と伝達衝撃力  $P_t$  の関係を示している。図より、落石径が小さい場合には  $E = 400 \sim 600 \text{ kJ}$  で EPS ブロックのひずみに関する増加勾配の変化点（図-5のひずみ  $55 \%$ ）を超過するため、伝達衝撃力が急増することが分かる。これより、落石径が小さい場合には同じ落石エネルギーにおいても伝達衝撃力が大きく示されることとなり、実設計時には注意を要する。一方、落石径が大きい場合には EPS ブロックのひずみの増加勾配の変化点を超過しないことから、落石エネルギーの増加に伴い伝達衝撃力も比例して増加することが分かる。

図-12には、各落石径の入力運動量と伝達衝撃力の関係を示している。図より、横軸を入力運動量とすることで、図-11のような逆転現象は生じていないことが分かる。しかしながら、適用範囲を検討する上では、実設計では落石エネルギーを用いて整理する場合が利用しやすいことから、以降の検討でも落石エネルギーと各算定値の関係について考察を行うものとする。

図-13には、各落石径の落石エネルギー  $E$  と換算伝達荷重継続時間  $t$  の関係を示している。図より、落石エネルギーが小さい場合には換算伝達荷重継続時間も小さくなることが分かる。これより、既往の研究<sup>8),9)</sup>では換算伝達荷重継続時間を一律  $t = 77 \text{ ms}$  と設定していたことから、本提案によってより合理的な設計が可能になるものと判断される。

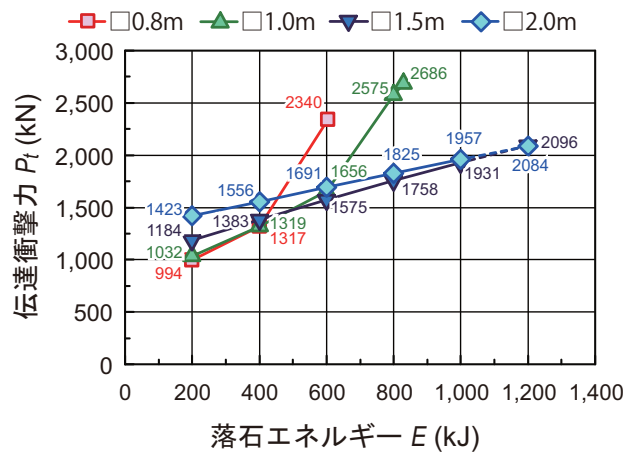


図-11 伝達衝撃力と落石エネルギーの関係

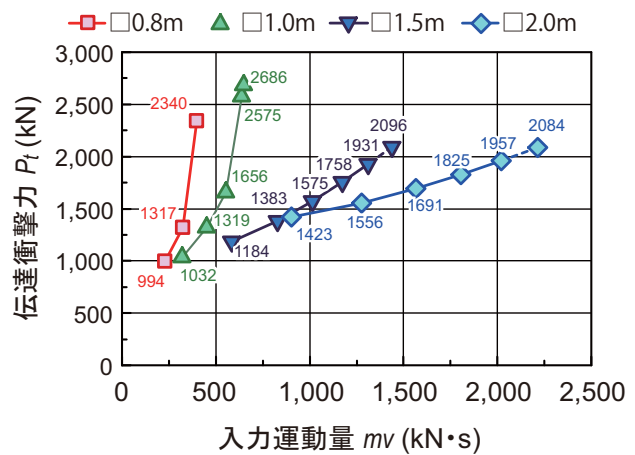


図-12 伝達衝撃力と入力運動量の関係

### 3.3 重心浮上量による照査を実施する際の入力値

図-14には、各落石径の落石エネルギー  $E$  と伝達力積  $P_t \cdot t$  の関係を示している。伝達力積は伝達衝撃力と換算伝達荷重継続時間を乗じた値で示される。図より、同じ落石エネルギーの場合においても、落石径が大きい場合には荷重分散範囲も大きいため、伝達力積が小さく示されることが分かる。なお、擁壁工の安定性照査において落石対策便覧の式を用いる場合には、合質点の質量  $m$  および速度  $V_e$  が必要となる。この速度は伝達力積  $P_t \cdot t$  と運動量  $m \cdot V_e$  が等価であるとの仮定により、算出することが可能となる。

## 4. まとめ

本研究では、実現場における本工法の適用性に関する利便性向上を目的として、落石防護擁壁に用いるソイルセメント製緩衝工について、落石径および衝突速度を変化させた場合の伝達衝撃力および適用範囲について検討を行った。また、ソイルセメントと擁壁への換算伝達荷重継続時間を整理し、落石防護擁壁に作用する力積についても併せて検討を行った。本研究で得られた結果をま

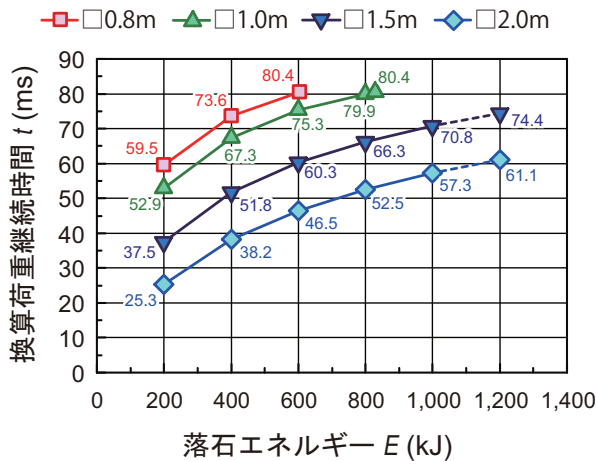


図-13 換算荷重継続時間と落石エネルギーの関係

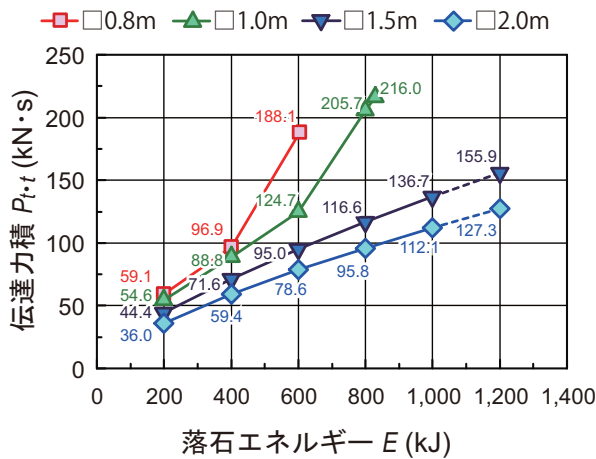


図-14 伝達力積と落石エネルギーの関係

とめると、以下のとおりである。

- 1) 落石径が小さい場合には、落石径が大きい場合よりも荷重分散範囲が小さいため、同じ落石エネルギーでも EPS ブロックのひずみが大きくなる傾向にある。
- 2) 落石径が小さい場合の適用範囲は、EPS ブロックが限界ひずみに到達する落石エネルギーの上限である  $E = 1,200$  kJ 未満となる場合がある。しかしながら、落石対策便覧に示される終端速度  $V = 28$  m/s まででは対応可能である。
- 3) 落石径が小さくエネルギーが大きい場合には、EPS ブロックのひずみに関する増加勾配の変化点を超過し、伝達衝撃力が急増する傾向にあるため、実設計時には注意を要する。
- 4) 落石径が大きい場合には、落石径に比例して荷重分散範囲が大きくなるため、落石エネルギーが上限である  $E = 1,200$  kJ においても EPS ブロックのひずみは  $\epsilon = 50\%$  程度以下となる。

- 5) 換算伝達荷重継続時間は EPS ブロックの厚さおよび変形量と高い相関関係があることが明らかになった。これより、落石エネルギー規模に応じた合理的な設計が可能となる。
- 6) 本工法の落石エネルギーに関する適用範囲は、実規模実験結果を踏まえ、 $E_{max} = 1,000$  kJ 程度以下にすることが望ましい。

#### 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（平成 23～25 年度）により実施した研究成果の下に行ったものである。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 川瀬良司，岸徳光，今野久志：二層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の転倒安定性評価法に関する一検討，構造工学論文集，Vol.50A，pp.1327-1336，2004.3
- 3) 川瀬良司，岸徳光，西弘明，牛渡裕二，刈田圭一：杭付 RC 落石防護擁壁の数値シミュレーションと簡易設計法の提案，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1213-1224，2011.3
- 4) 牛渡裕二，保木和弘，栗橋祐介，岸徳光：落石防護擁壁用三層緩衝構造のジオグリッド位置が緩衝性能に及ぼす影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.541-546，2014.7
- 5) 鈴木健太郎，栗橋祐介，川瀬良司，岸徳光：三層緩衝構造におけるソイルセメントの長期耐久性向上策に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.499-504，2014.7
- 6) 牛渡裕二，小室雅人，前田健一，保木和弘，岸徳光：ソイルセメントを用いた緩衝システムの模型実験および実規模擁壁に関する衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.60A，pp.973-982，2014.3
- 7) 藤堂俊介，牛渡裕二，栗橋祐介，岸徳光：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.505-510，2014.7
- 8) 保木和弘，牛渡裕二，小室雅人，鈴木健太郎，岸徳光，川瀬良司：三層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の安定照査に関する一検討，平成 27 年度土木学会全国大会 第 70 回年次学術講演会，I-265，2015.9
- 9) 鈴木健太郎，保木和弘，牛渡裕二，小室雅人，栗橋祐介，山澤文雄，川瀬良司，岸徳光：ソイルセメントを用いた緩衝工を設置した落石防護擁壁の安定照査検討，平成 28 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会，A-45，2017.2