

(4) EPS の復元性を考慮した落石衝撃力の算出における一提案

CALCULATION OF IMPACTING FORCE OF FALLING ROCKS.
CONSIDERING EFFECTS OF RESTORATION OF EPS

勘田益男^{*}, 前育弘^{**}

Masuo KANDA, Yasuhiro MAE

^{*} (有) 斜面防災研究所 代表取締役 (〒921-8062金沢市新保本4丁目4番地)

^{**} 積水化成品工業(株) 建材技術部 (〒306-0235茨城県猿島郡総和町下辺見1336-2)

キーワード: EPS, 復元性, 衝撃力

(Expanded poly-styrol, Restoration, Impacting force)

1. はじめに

落石の緩衝材として発泡スチロール (EPSと言う) が広く用いられ, 落石がEPSへ貫入した場合のEPSの取り替えについて判断基準は一般化されていない。一般的に, EPSは復元性能が大きいので, 繰り返し落石に対してある程度対応可能であると考えられる。吉田らの研究によって均一な材質のEPSでは, 落石吸収エネルギーが理論的に求められることが確認されているため, EPSの繰り返し圧縮試験より繰り返し落石の衝撃力算定を試みた。

2. EPS の繰り返し圧縮試験

EPS (20kgf/m³) の繰り返し圧縮試験の結果を表1, 応力-歪み曲線を図1に示す。EPSは1回目の圧縮に対して2~5回目では85~81%程度の復元率(元の層厚に対する復元後の高さの比)となり, 高い値を示す。また, 2~5回目の応力-歪み曲線は1回目を下回るものの, 差異は小さくほぼ一定している。

表1 応力と歪みの値

		応力(kgf/cm ²)				
圧縮回数		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
復元率		100%	85%	82%	81%	81%
歪 %	5.0	1.33	0.63	0.58	0.40	0.40
	10.0	1.47	0.83	0.76	0.72	0.71
	15.0	1.58	0.97	0.88	0.85	0.84
	20.0	1.67	1.10	1.00	0.98	0.97
	25.0	1.76	1.26	1.13	1.14	1.11
	30.0	1.86	1.42	1.26	1.30	1.24
	35.0	1.97	1.64	1.48	1.53	1.43
	40.0	2.10	1.86	1.69	1.76	1.62
	45.0	2.26	2.22	2.00	2.09	1.92
	50.0	2.47	2.58	2.30	2.41	2.22
	55.0	2.72	3.23	2.81	3.02	2.74
	60.0	3.04	3.88	3.31	3.62	3.25
65.0	3.47	4.94	4.31	4.66	4.38	
70.0	4.08	6.00	5.30	5.70	5.50	

3. 設計式の提案

EPSを緩衝材とした場合, 吉田らの研究報告^{2, 3, 4)}により, 以下の衝撃力評価式が一般的に用いられている。

EPSの単位体積重量を $\rho=15\sim 20\text{kgf/m}^3$, 落石は完全球形で単位体積重量 $\rho=2.6\text{tf/m}^3$, EPS1層の厚さ $\lambda=0.5\text{m}$ として式を求める。ただし, W (tf) および H (m) は既知とする。また $h>3.33\bar{e}$ でなければならない。

$$d_0 = 0.902W^{1/3}, \quad \bar{e} = \frac{d_0}{6} \quad (\text{m})$$

$$P_5 = 7.854(d_0 + 0.577)^2 \quad (\text{tf}) \quad (\text{A.1})$$

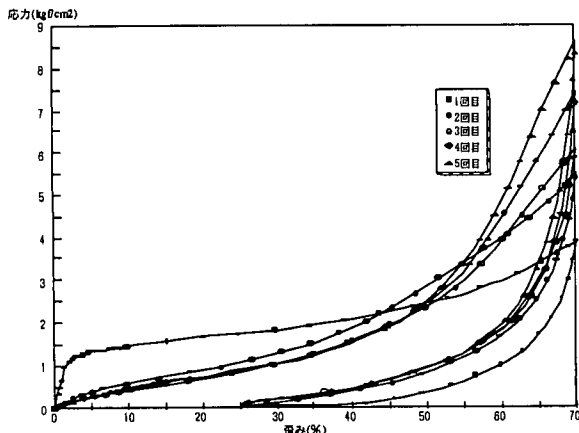


図1 応力・歪み曲線

$$P_{60} = 28.51d_0^2 \quad (\text{tf})$$

$$P_{100} = 56.29d_0^2 \quad (\text{tf})$$

実設計にあたっては、EPS厚さ h と衝撃力 P を必要とし、未知数が2つとなることから、これらの決定には試行錯誤法によらねばならない。ひずみ70%における衝撃力 P_{70} の近似値 P' を求め、EPSの必要厚さの推定値 h' を求める。得られた衝撃力に対し、 $C_{\max} < 0.7h'$ の条件を満足していることを確認する。

$$P_p = 1.182 P_{60} - 0.182 P_5 \quad (\text{tf})$$

$$T > 3.077 (P' + P_5) \cdot WH \quad (\text{m})$$

$$P = \sqrt{\frac{2WH}{(0.55h' + e)} \cdot (P_{60} - P_5) + P_5^2} < P_{70} \quad (\text{tf}) \quad (\text{A.2})$$

$$P_{70} = P_5 + \frac{(0.65T + e)}{(0.55T + e)} \cdot (P_{60} - P_5) \quad (\text{tf})$$

$$C_{\max} = \frac{2WH}{P' + P_5} + 0.05T \leq 0.7T \quad (\text{m})$$

吉田らの式を基に2回目以降の落石に対する設計式を導入する。第1層貫入時の分散直径および最大貫入時の分散直径は落石直径の110%とする。

$\sigma_5' = 4 \text{ tf/m}^2$, $\sigma_{50}' = 23 \text{ tf/m}^2$ とすれば、

$$P_5 = 4 \cdot 1 / 4\pi (d_0 \cdot 1.1)^2 = 3.801d_0^2 \quad (\text{tf})$$

$$P_{50} = 23 \cdot 1 / 4 \cdot \pi (d_0 \cdot 1.1)^2 = 21.858d_0^2 \quad (\text{tf})(\text{B})$$

$$P' = \sqrt{\frac{2WH}{(0.45T' + e)} \cdot (P_{60}' - P_5') + P_5'^2} \quad (\text{tf})$$

$$C_{\max} = \frac{2WH}{P' + P_5'} + 0.05T' \leq 0.6T' \quad (\text{m})$$

ここに、 q' : 2回目落下以降のEPS5%ひずみに対応する応力(tf/m)

σ_{50}' : 2回目落下以降のEPS50%ひずみに対応する応力(tf/m)

P_5' : 2回目落下以降のEPS5%ひずみに対応する衝撃力(tf)

P_{50}' : 2回目落下以降のEPS50%ひずみに対応する衝撃力(tf)

P : 2回目落下以降の落石の衝撃力(tf)

T : 初期設定したEPS層厚の80%厚さ(m)

4. 重錘落下実験による照査

繰り返し圧縮試験を重錘を用いた落下実験にて照査する。重錘落下実験は同じ箇所を繰り返し落

下させる関係上、比較的規模の小さなミニチュア版で行った。

重錘重量100kgf、最大落下高さが10mである。重錘に取り付けた加速度計の値より、速度・貫入量・衝撃力を求め、設計式による値との照査を行った。繰り返し重錘落下実験の結果は表-2および図-3のとおりである。なお、EPSは密度 $\sigma = 20 \text{ kgf/m}^3$ を用いる。

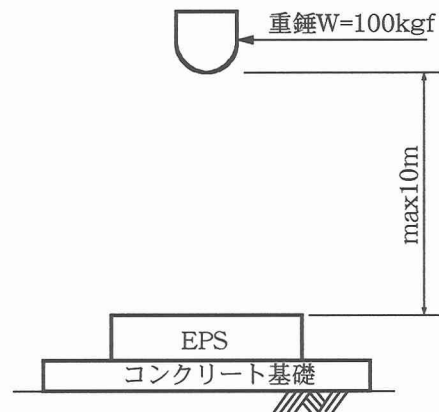


図-2 重錘落下実験図

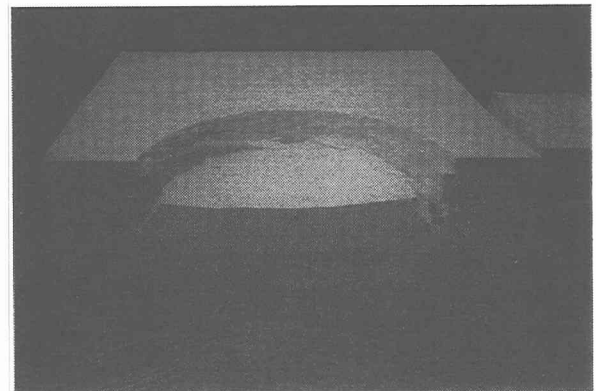


写真-1 EPSの変状

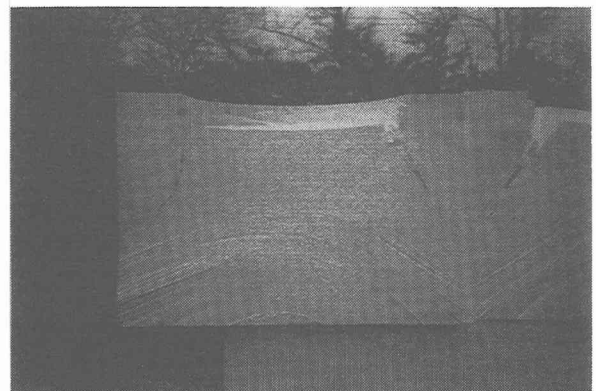


写真-2 EPSの変状

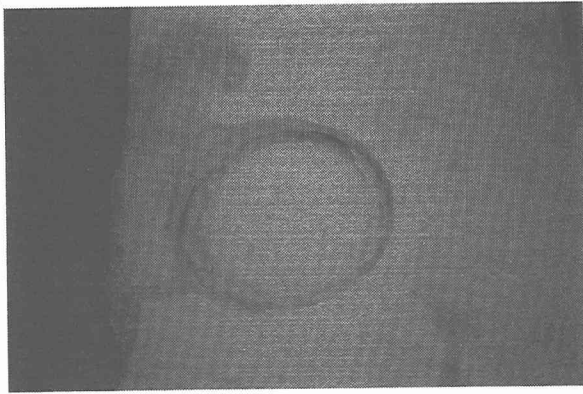


写真-3 EPSの変状

表-2 重錘衝撃力と設計式による衝撃力

重錘	落下回数	落下高さ	重錘衝撃力	復元した高さ	設計式による衝撃力	計算上の復元高さ
100kgf	1	9m	6.16	50cm	6.79	—
	2	4m	5.09	45cm	3.25	40
	3	4m	5.38	44cm	3.25	40
	4	4m	5.44	44cm	3.25	40
	5	4m	5.38	44cm	3.25	40
		6	6m	6.22	44cm	3.96

表-3 重錘衝撃力と落下回数

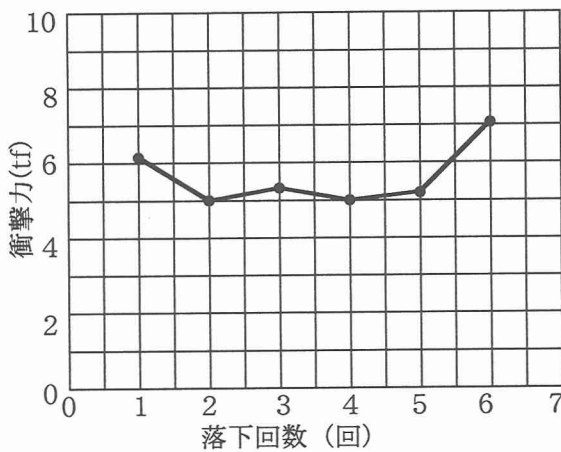


表-2に示すように設計式による衝撃力は重錘衝撃力を大きく下回る結果となった。これは、実験のEPSが1層で行ったため、分散が大きく、設計式で設定した10%を上回ったためと考えられる。

いずれにしても2~5回における各重錘衝撃力の差異は小さい。

5. エネルギー吸収のメカニズムの推測

EPSは石油を原料として得られるスチレンモノマーを重合して球状のポリスチレン樹脂を生成し、これにブタンガス等の発泡剤を含浸すると、発泡ポリスチレンビーズができる。さらに、所定の倍率に予備発泡させたものをサイロで乾燥熟成させた後、成形機に充填し蒸気でブロック状に成形し、完成する。

写真4~7は予備発泡粒の顕微鏡写真である。EPSは独立気泡の集合体であることがわかる。予備発泡体の中の粒を立体骨格構造とセルフエースを持つモデル化して考える。外力に対して、骨格の曲げ、セルフエース内の空気内圧、およびセルフエースの伸張により抵抗すると仮定する。

EPSを圧縮すると、骨格の曲げおよびセルフエースの変形が進行する(①)。次に骨格の座屈に起因する非線形段階となる(②)、この時点でセルフエースの破壊が進行する。

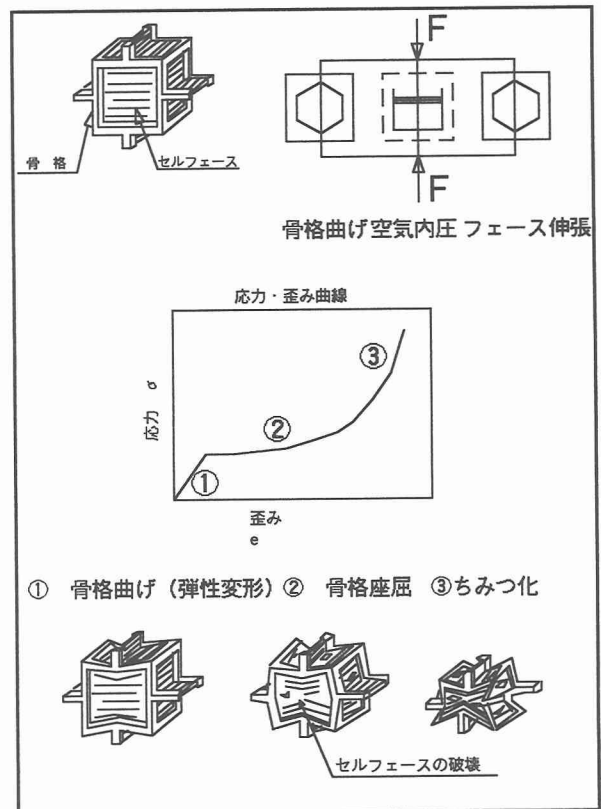


図-4 予備発泡粒圧縮のモデル化

さらに、歪みが大きくなると、隣接しあう骨格同志が接触し、骨格材そのものの圧縮となり、応力は急な傾斜となる(③)。その後、骨格自体の復元性能によって、骨格はある程度(80%程度)元形に復帰する。再度、圧縮すれば、初期の弾性変形は見られず②→③の挙動を繰り返すことになる。

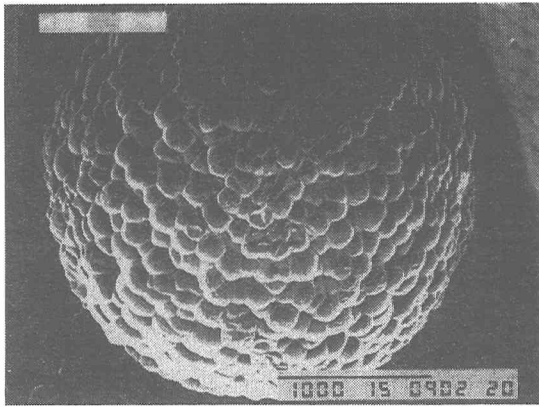


写真-4 予備発泡粒 (×35)

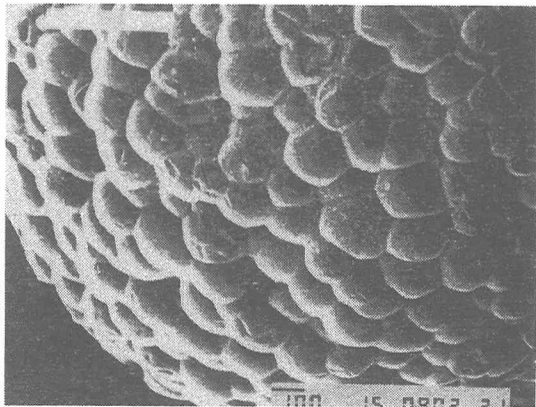


写真-5 予備発泡粒 (×75)

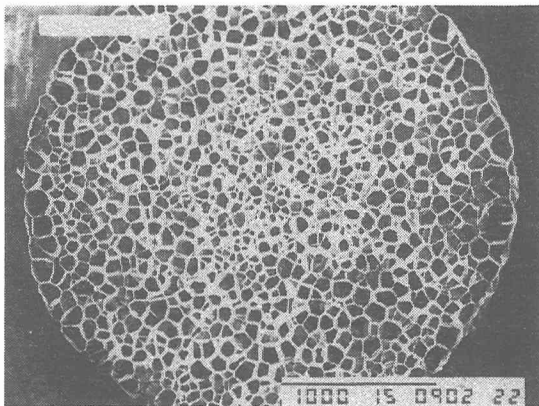


写真-6 予備発泡のスライス面 (×35)

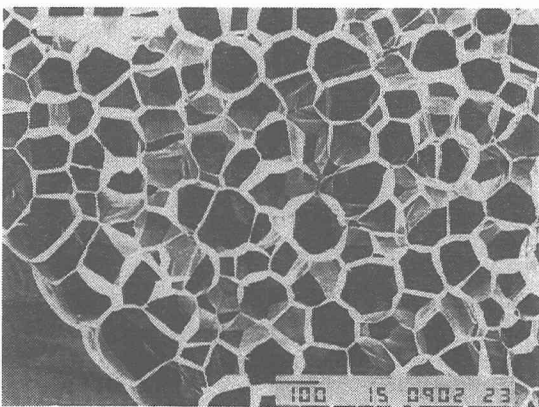


写真-7 予備発泡のスライス面 (×100)

6. 設計手法

設計対象となる落石に対して、1回目落下の場合は吉田らの式により必要厚さ・衝撃力・貫入量を求め、同様の落石条件で2回目以降を検査する場合は、EPSの吸収エネルギー量の減少により最小必要厚さより厚く設定する必要がある。

一般的には2回目以降の落下の場合は、設定した厚さの80%復元すると考えて、復元式より衝撃力が1回目落下の場合を下回ることを確認する方法が望ましい。

以上の点をフローチャートにして図11に示す。

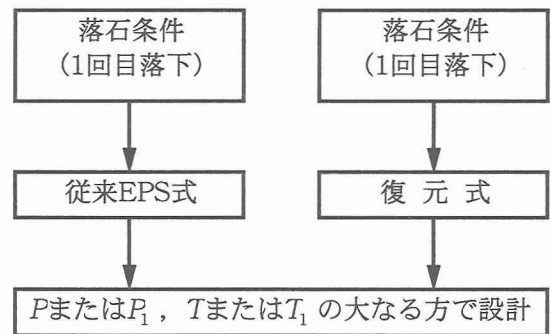


図-11 EPS設計のフローチャート

7. まとめ

落石がEPSへ落下し、EPSの損傷が小さなものはある程度再利用が可能であることが判明した。近年、資材の再利用が注目される中で、有効利用の一つの目安となろう。ただし、本研究は新設するロックシェッド緩衝材にEPSの復元性を見込んだ設計を進めているわけではなく、あくまでも損傷したEPSの再利用の有無の可能性について目安を提案することを目的としている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，83.7.
- 2) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，H6.1.
- 3) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，一落石覆工の設計法—資料集，H7.4.
- 4) 吉田博・松葉美晴・法貴貴志郎・久保田努：発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究，土木学会論文集，第427号/IV-14