

(1) 新しい緩衝材の落石に対する特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SHOCK ABSORBING CHARACTERISTIC
OF REINFORCED EXPANDED POLYSTYROL AGAINST FALLING ROCKS

吉田 博*・藤井 智弘**・南 和夫***・前川 幸次****

Hiroshi YOSHIDA, Tomohiro FUJII, Kazuo MINAMI and Koji MAEGAWA

*工博 (株) エイ・シー・デイ 代表取締役社長 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸3903番地)

**学博 (株) エイ・シー・デイ 技術部長 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸3903番地)

*** 金森藤平商事(株) 開発部長 (〒933-0946 富山県高岡市昭和町1-1-16)

****工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-0942 石川県金沢市小立野2-40-20)

キーワード：落石, 緩衝材, 重錘落下
(falling rocks, shock absorb, falling weight)

1. まえがき

これまで、落石覆工上には、落石による衝撃力を緩和する目的で、砂、砕砂または山土など（以後、砂材という）が敷かれてきた。これらの砂材に対する緩衝効果については、建設省土木研究所¹⁾、金沢大学²⁾などを中心に研究され、その緩衝メカニズム、衝撃力の伝播機構などがある程度明らかにされてきた。しかし、緩衝材として使用されている砂材には、現在以下のような問題点が指摘されている。

(1) 十分な緩衝効果を得るためには、砂材の厚さは落石の直径程度の厚さを必要とする。これ以上砂厚を増しても、緩衝効果の増大は期待できない。

(2) 大きい落石が予想される位置での落石覆工の設置に対する経済的な対策がない。

(3) 既設落石覆工における設計荷重以上の岩塊に対し、構造を変更することなしに可能な効果的な対応方法が見当たらない。

このような問題点を解決する緩衝材として発泡スチロール（以後、EPSと略称することがある）が注目され、その緩衝特性について検討がなされてきた。発泡スチロールは、盛土材料・梱包材としての実績が多数あり、その力学的挙動や緩衝効果に関する研究も数多くなされている。

一方、落石に対する緩衝効果に関する研究は、最

初吉田ら³⁾によりなされ、実用的な設計式が提案され、現在設計に用いられている。しかし、発泡スチロールを落石用の緩衝材として用いる場合、荷重用範囲がせまいため、エネルギー吸収効率が悪く、高価な発泡スチロールを厚く敷く必要があるなどの短所も有している。

本研究では、これらの問題を解決するために、梱包用のポリプロピレン製バンド（以後、P.P.バンドという）を籠状に編み込んだ補強枠を発泡機に挿入して発泡させた発泡スチロール（以後、補強発泡スチロール (Reinforced EPS, RP-EPS) という.) を緩衝材として用いることを考案し、そのRP-EPSの緩衝特性を究明するための実験方法およびその結果・検討、緩衝材としてRP-EPSを用いる場合の落石覆工の設計のための衝撃力推定式の提案を行う。

2. 実験方法

2.1 実験材料

補強材として使用可能なバンド材は、その素材の引張強度が大きいことが要求されるのはもちろん、発泡スチロールに対し十分な拘束効果が期待できるように、バンドによりループ状に取り巻く必要があり、そのために形成される接合部での強度低下が小さいこと、小半径での折曲げや屈曲に対して強度が

減少しないこと、発泡炉内の高温に対しても強度低下や収縮が小さいことなどが要求される。

実験には、前述した条件を満足する引張強度 11.35kN の梱包用の P.P.バンド（幅 31.4mm、厚さ 0.97mm）を使用した。補強枠は、ループ状に形成した P.P.バンドを組合せて籠状にする。なお、補強枠の端部は、発泡スチロールの拘束効果を高めるために円弧を形成している（写真2.1）。

また、使用する発泡スチロールは、性能の安定性と補強枠による十分な拘束効果を期待するために、単位体積重量 196N/m³ のものを使用した。発泡スチロールの形状・寸法は、土木工法で標準となっている 2m × 1m × 0.5m とした。

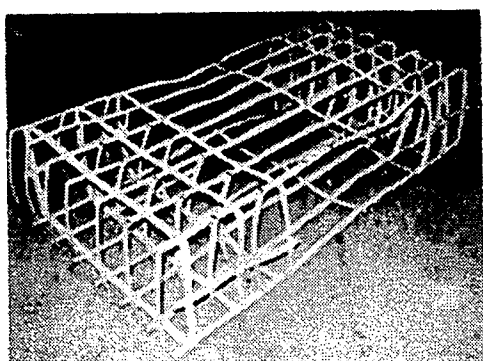


写真2.1 組み立てられた補強枠

2. 2 実験の種類

実験は補強発泡スチロールと、これとの比較のために一般の発泡スチロールの 2 種に対して合計 11 ケースの実験を行った。実験条件を表2.1に示す。

表2.1 実験条件一覧表

実験名	材料	敷厚 (m)	重錘質量 (t)	落下高さ (m)
RP5-5-20	RP-EPS	2.5	5.0	20.0
RP4-5-20	RP-EPS	2.0	5.0	20.0
RP4-5-30	RP-EPS	2.0	5.0	30.0
RP3-5-15	RP-EPS	1.5	5.0	15.0
RP3-5-20	RP-EPS	1.5	5.0	20.0
RP2-1-20	RP-EPS	1.0	1.0	20.0
RP1-1-10	RP-EPS	0.5	1.0	10.0
RG2-1-20	RG-EPS	1.0	1.0	20.0
E5-5-20	EPS	2.5	5.0	20.0
E4-5-20	EPS	2.0	5.0	20.0
E3-1-20	EPS	1.5	1.0	20.0

2. 3 実験方法

厚さ 30cm、幅および奥行きが 7m の鉄筋コンクリートスラブを製作し、内幅 5m × 5m の範囲を高さ 2m の L 型擁壁でとり囲み実験槽とした。荷重計は、重錘の落下予定位置から 30cm 間隔に 6 個配置した。コンクリートスラブ上には、なじみをよくするために 5cm 厚の砂を一様に敷詰めた。発泡スチ

ロールは、目地が上下に重なり合わないよう下段から配置した。なお、実験槽内の発泡スチロールで充填されない空隙部分は、砂で満たされている。

図2.1に、発泡スチロールの敷設厚 2.5m の場合の実験槽の概要を示す。

測定項目は、重錘加速度、緩衝材底面の衝撃圧とし、加速度計および荷重計より測定されたアナログ信号を増幅し、0.2msec 間隔でデジタル量として記録した。また、高速度カメラにより、重錘の変位を毎秒 1000 コマで記録した。

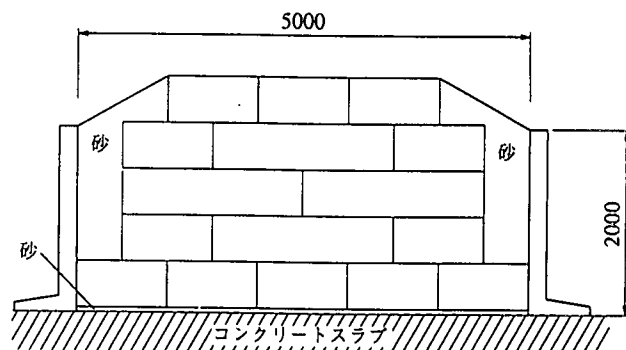


図2.1 実験槽

3. 実験結果および考察

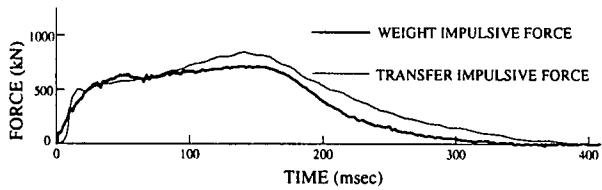
3. 1 重錘衝撃力

測定された重錘の加速度（負値）に重錘の質量を乗じて得られた重錘衝撃力の時間的変化の例を図3.1中の太い実線で示す。

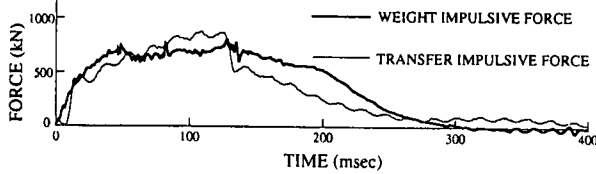
発泡スチロールの補強の有無にかかわらず、発泡スチロールの厚さが落石のエネルギーに対して十分である場合には、重錘衝撃力の作用時間が 300msec 程度と長く、最初の 20msec 程度で衝撃力が立上がり、その後徐々に衝撃力が増加し、100msec ~ 150msec で最大値を示し、その後漸減して消滅する。

補強発泡スチロールでは、衝撃力の時間的変化は極めて滑らかであり、最大値に達するまでの波形と最大値以後の波形は対称性を有している。これに対し、一般の発泡スチロールでは、衝撃力の立上がりから鋸歯状になっており、衝撃力の最大値までと最大値以後では異なった波形になっている。

このような波形の特徴は、補強発泡スチロールでは、発泡スチロール自身が破壊することなく弾性的に変形し、また弾性的に復元するのに対し、一般の発泡スチロールでは、発泡スチロールが破壊しながら変形し、復元する際には発泡スチロールは破壊していることに起因している。



(a) (RP5-5-20, W=5.0t, H=20m, h=2.5m)



(b) (E5-5-20, W=5.0t, H=20m, h=2.5m)

図3.1 重錘衝撃力および伝達衝撃力の経時変化

3.2 緩衝材底面の衝撃圧力

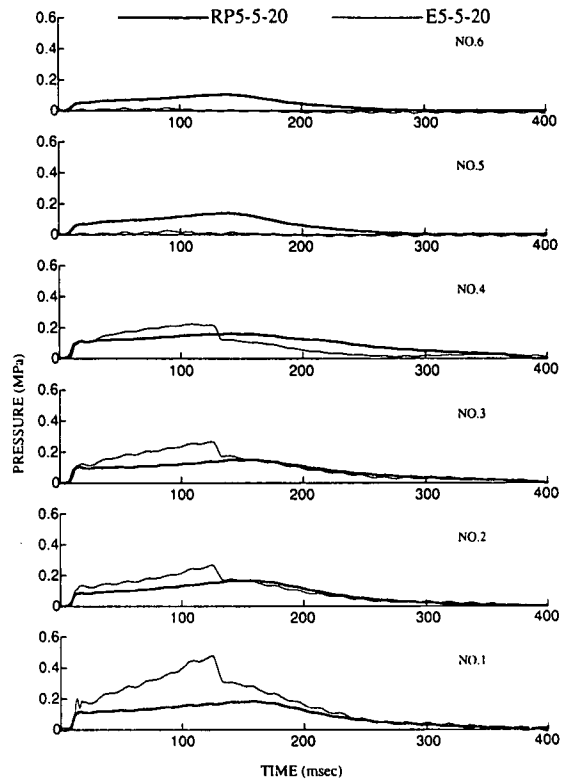
図3.2は、重錘質量 5.0t、落下高さ 20m の条件で、緩衝材の厚さが 2.5m と 2.0m の場合の衝撃圧力の時間的変化を示したものである。図中、太い実線が補強発泡スチロールに対するものであり、細い実線は一般の発泡スチロールに対するものである。

発泡スチロールの厚さが落石のエネルギーに対して十分である場合には、衝撃圧力の作用時間が長く、衝撃圧力が立上がった後、徐々に衝撃力が増加し、最大値を示した後に漸減して消滅する。落石エネルギーに対して発泡スチロール厚さが薄い場合には、衝撃圧力の作用時間は短くなり、これに対して衝撃力の最大値は増加する。

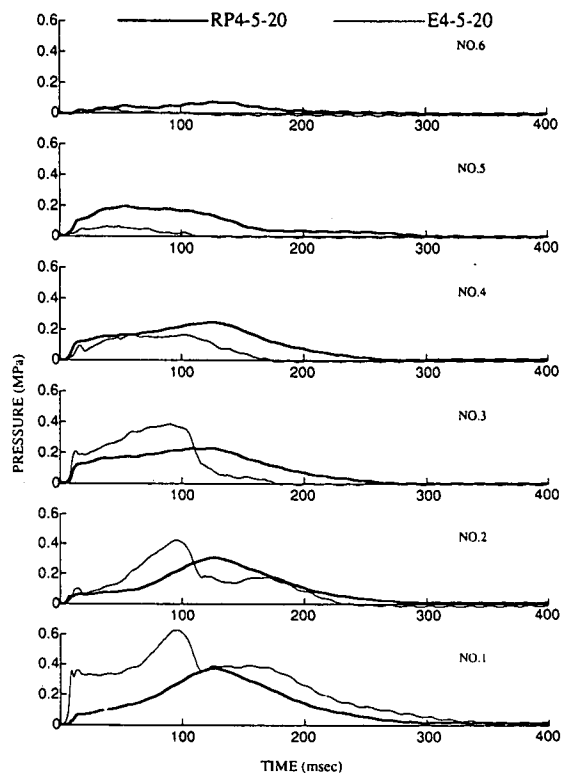
補強発泡スチロールでは、衝撃圧力の時間的変化は極めて滑らかであり、その作用範囲も大きくなっている。これに対し、一般の発泡スチロールでは、波形は鋸歯状になっており、最大値に達したのちに急減している。また、衝撃圧力の作用範囲はせまいことがわかる。一般の発泡スチロールの衝撃圧力は中央に集中し、その値も大きいのに対し、補強発泡スチロールでは、比較的小さい衝撃圧力が広い範囲に分散していることがわかる。

3.3 伝達衝撃力

図3.1中の細い実線は、伝達衝撃力の時間的変化の例を示したものである。伝達衝撃力は、補強発泡スチロールの場合は重錘衝撃力とほぼ同じ波形を示しており、その最大値は重錘衝撃力の最大値より大きい値を示している。一般の発泡スチロールでは、伝達衝撃力が最大値に達するまでは重錘衝撃力とほぼ同じ波形を示しているが、最大値に到達後は伝達衝撃力が急激に減少している。



(a) (W=5.0t, H=20m, h=2.5m)



(b) (W=5.0t, H=20m, h=2.0m)

図3.2 コンクリートスラブ上の衝撃圧力の経時変化の比較

4. 設計への適用

4.1 材料の応力-ひずみ関係のモデル化

用いた発泡スチロール（質量 20kg/m³）の圧縮試験より得られた応力-ひずみ関係を図4.1に示すよ

うに3本の直線で近似する。この近似直線は、原点から c_5 のひずみ (5%) までがいわゆる弾性域と考えられる領域で、このときの応力を f_5 (0.12MPa) とする。 c_5 よりひずみが増大すると応力の上昇は極めて緩慢に直線的に増大する。ひずみが c_{60} (60%) に達すると応力は急激に増加しはじめる。このときの応力を f_{60} (0.30MPa) とする。ひずみが c_{70} (70%) を越えると再び応力は直線的に急激に増加するが、 c_{80} (80%) を一応のひずみの限界と考える。このときの応力を f_{80} (0.70MPa) とする。

応力-ひずみ関係のモデル化は、いわゆる弾性域を直線と仮定し、応力 f_5 (0.12MPa)、ひずみ c_5 (5%) の点と、応力 f_{60} (0.30MPa)、ひずみ c_{60} (60%) の点を直線で結び、ひずみが c_{70} (70%) まで直線で延長する。この点の応力 f_{70} は次式で与えられ、 $f_{70} = 0.3327\text{MPa}$ となる。

$$f_{70} = f_5 + \frac{c_{70} - c_5}{c_{60} - c_5} (f_{60} - f_5)$$

さらに、応力 f_{70} (0.3327MPa)、 c_{70} (70%) の点と応力 f_{80} (0.70MPa)、ひずみ c_{80} (80%) を直線で結んで近似する。

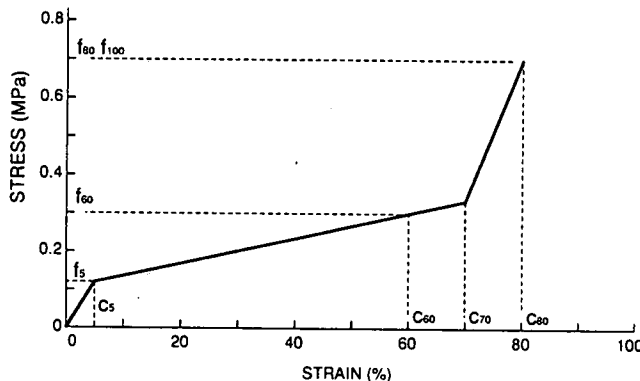


図4.1 発泡スチロールの理想化した応力-ひずみ曲線

4.2 設計衝撃力

重錘の半径 $D_0/2$ の 1.1 倍の半径 $R_0 = 1.1 \cdot D_0/2$ の範囲の補強発泡スチロールが C だけ貫入するものとする。そのときの発泡スチロールの底面の応力を f とすると、衝撃力 P_0 、発泡スチロールの吸収エネルギー E は、以下のように表される。ここに、 h_0 は発泡スチロール厚さである。

① $C \leq csh_0$ のとき

$$f = \frac{C}{csh_0} f_5$$

$$P_0 = \pi R_0^2 f$$

$$E = \frac{1}{2} \pi R_0^2 h_0 f \frac{C}{h_0}$$

② $csh_0 < C \leq c_{70}h_0$ のとき

$$f = f_5 + \frac{C - csh_0}{(c_{60} - c_5)h_0} (f_{60} - f_5)$$

$$P_0 = \pi R_0^2 f$$

$$E = \frac{1}{2} \pi R_0^2 h_0 \left\{ c_5 f_5 + (f + f_5) \frac{C - csh_0}{h_0} \right\}$$

③ $c_{70}h_0 < C \leq c_{80}h_0$ のとき

$$f = f_{70} + \frac{C - c_{70}h_0}{(c_{80} - c_{70})h_0} (f_{80} - f_{70})$$

$$P_0 = \pi R_0^2 f$$

$$E = \frac{1}{2} \pi R_0^2 h_0 \left\{ c_5 f_5 + (f_{70} + f_5) \frac{(c_{70} - c_5)h_0}{h_0} + (f + f_{70}) \left[\frac{C - c_{70}h_0}{h_0} \right] \right\}$$

④ $c_{80}h_0 < C \leq h_0$ のとき

$$f = f_{80}$$

$$P_0 = \pi R_0^2 f$$

$$E = \frac{1}{2} \pi R_0^2 h_0 \left\{ c_5 f_5 + (f_{70} + f_5) \frac{(c_{70} - c_5)h_0}{h_0} + (f_{80} + f_{70}) \frac{(c_{80} - c_{70})h_0}{h_0} + 2f_{80} \frac{(C - c_{80}h_0)}{h_0} \right\}$$

これらの発泡スチロールの吸収エネルギーに、補強材 (P.P.バンド) のひずみエネルギーを加える必

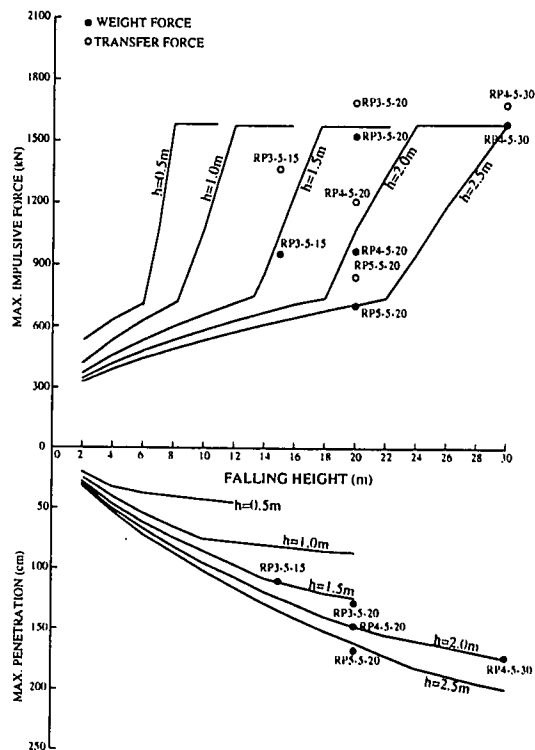


図4.2 衝撃力-貫入量-落下高さ関係の比較(W=5t)

要がある。一個の補強発泡スチロールに使用される P.P.バンドの長さは約 100m に達し、予備実験より P.P.バンドのひずみエネルギーを加えた発泡スチロールの吸収エネルギー E_0 は、発泡スチロールの吸収エネルギー E の 3 分の 4 倍に達するととしてよい。

$$E_0 = \frac{4}{3}E = WH$$

ととき、上記の各式より衝撃力 P_0 および貫入量 C を求めることができる。

補強発泡スチロールの各種の厚さに対し、このようにして計算した最大衝撃力と落下高さの関係を図 4.2 に示す。図中には、実験より得られた最大重錘衝撃力、最大伝達衝撃力および最大貫入量がプロットされている。2～3 の伝達衝撃力を除き、計算値は実験値をよく再現している。

4.3 衝撃力の分散モデル

補強発泡スチロールの衝撃圧力分布およびその時間的変化より、重錘が発泡スチロールの第 1 層を貫入するまで急激に衝撃圧が上昇するが、その後は広い範囲にわたって徐々に増加し、最大値に達する。この時点で伝達衝撃力は最大となり、落下地点の遠方から衝撃圧は消滅する。

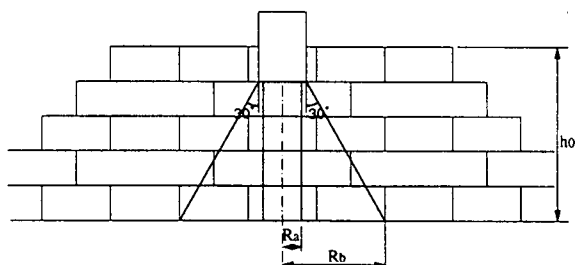


図 4.3 衝撃圧の作用範囲

伝達衝撃力が最大となる時点での衝撃圧分布は、図 4.3 に示すように重錘が第 1 層まで貫入した位置から 30° の分散角で拡大するものと仮定する。重錘落下点からの衝撃圧の分散範囲の半径を R_b とする。さらに、重錘落下点から半径

$$R_a = 0.8 \frac{D_0}{2}$$

では、衝撃圧は一樣に分布し、それより外側では半径 R_b まで一樣に減少するものとする。

最大伝達衝撃力 P_0 は、4.2 より得られるので、まず、

$$P_0 = p_a = p_b$$

とにおいて、半径 R_a 内の伝達衝撃力 P_1 および半径 R_b の外側で半径 R_b までの伝達衝撃力 P_2 を求める。

$$P_1 = \pi R_a^2 p_a$$

$$P_2 = \pi \frac{p_b}{3} (R_b^2 + R_a R_b - 2R_a^2)$$

$$P_0 = P_1 + P_2$$

より p_0 を求め、 $p_0 \leq f_{70}$ ならば、

$$p_a = p_b$$

とおく。 $p_0 > f_{70}$ であれば、 $p_b = f_{70}$ とにおいて、

$$P_1 = P_0 - P_2$$

すなわち、

$$\pi R_a^2 p_a = P_0 - \pi \frac{f_{70}}{3} (R_b^2 + R_a R_b - 2R_a^2)$$

より、 p_a を求めることができる。

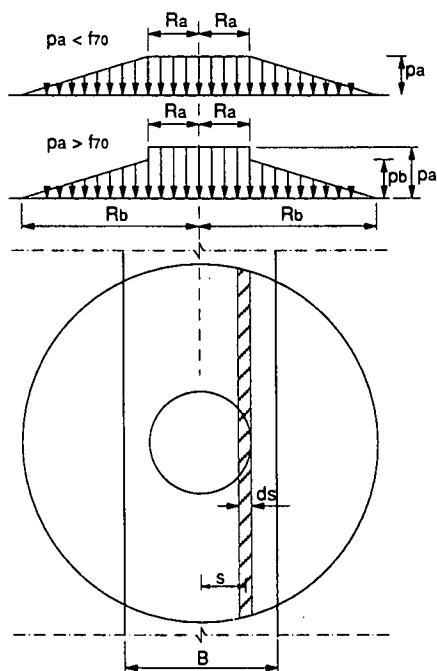


図 4.4 補強発泡スチロールの衝撃圧力分布

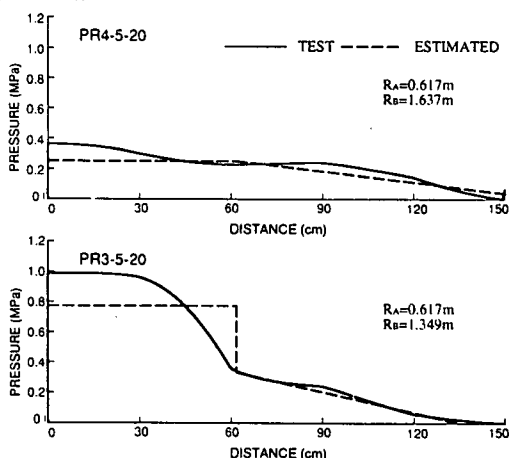


図 4.5 最大圧力分布およびモデル化された圧力分布

このようにして得られる衝撃圧の分布形状モデルを、図 4.4 に示す。また図 4.5 には、実験より得られ

た最大伝達衝撃力時の衝撃圧分布と上記の方法で得られた衝撃圧の分布形状の比較を示す。

これより、このような衝撃圧分布のモデル化が適切であることが確認できる。

4. 4 一般の発泡スチロールとの比較

一般の発泡スチロールの衝撃力の算定方法は、文献 3) の計算法を円筒形重錘に変形し行った。一般の発泡スチロールへ重錘が落下した場合には、重錘の周辺で発泡スチロールがせん断破壊され、発泡スチロールの底面に伝達される衝撃力の作用範囲は、たかだか重錘直径の 1.05 倍程度である。

一般の落石覆工では、PC 桁または鋼桁の主桁間隔が 1.5m または 2.0m のものが多い。主桁間隔を B とし、補強発泡スチロールの衝撃圧分布を図 4.4 のように仮定し、一本の主桁に作用する範囲のみで衝撃圧を積分すると、発泡スチロールを敷設した場合の設計衝撃荷重が得られる。

●例-1

落石荷重 120tf で設計された落石覆工上に、重量 5tf の落石が鉛直高さ 16m から落下する場合の必要発泡スチロール厚さを求める。ただし、主桁間隔は 1.5m である。

図 4.6 より、一般の発泡スチロールでは厚さ 2.0m で設計荷重 86.9tf であるが、70%ひずみを越えており危険である。したがって、発泡スチロール厚さ 2.5m を必要とする。一般の発泡スチロールでは、落石が発泡スチロールをせん断破壊して貫入するため、安全性を考慮して 70%以下のひずみにおさえるのがよい。補強発泡スチロールでは、たとえ縦長の落石（等価球径より直径が小さい落石）でもせん断破壊することなく、1ブロックが一つの塊となって挙動するので、80%ひずみまで許容できるものとする。したがって、補強発泡スチロール厚さは 1.5m でよい。

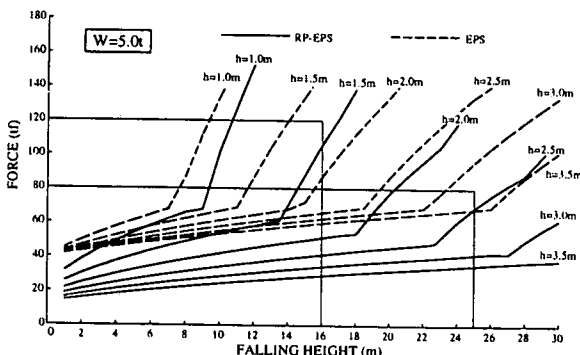


図 4.6 設計衝撃力-落下高さ関係の比較(設計例)

●例-2

重量 5tf の落石が、鉛直高さ 25m から落下する場合、設計荷重が 80tf の主桁を使用したい。この場合の必要発泡スチロール厚さを求める。ただし、主桁間隔は 1.5m である。

図 4.6 より、一般の発泡スチロールでは厚さ 3.5m を必要とするが、補強発泡スチロールでは厚さ 2.5m でよい。

5. あとがき

本研究では、梱包用のポリプロピレン製バンドを籠状に編み込んだ補強枠を製作し、これを発泡機に挿入して発泡させた発泡スチロールを緩衝材として用いる場合の基礎的な実験を行い、落石の緩衝材としての有効性を確認し、以下の結論を得た。

(1) ポリプロピレン製バンドで作製した籠、かぶり約 5cm を確保して発泡スチロール内に挿入することにより、1ブロックの発泡スチロールが一つの弾性体のように挙動する。すなわち、落石の衝突によって破壊することがない。

(2) 落石が補強発泡スチロールに衝突しても、衝突した部分のみが局部的に変形することがなく、ポリプロピレン製バンドの拘束効果により一つのブロックが一体となって変形・復元し、一般の発泡スチロールのように局所的な破壊が生じない。

(3) ブロック単位で変形するため、特殊な落石形状に対しても緩衝効果に影響を及ぼさない。

(4) このような特性を有しているので、補強発泡スチロールの底面に作用する圧力は広い範囲に分散し、同一厚さでも大きいエネルギー吸収性能を有している。

(5) 過大な落石に対しても、衝撃荷重が急激に増大することがなく、補強発泡スチロール単独での使用が可能である。

(6) 同一の落石条件に対し、一般の発泡スチロールに比較して経済的な設計が可能である。

参考文献

- 1) 米田義弘・他：落石覆工に作用する落石衝撃力に関する重錘落下実験、第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、土木学会構造工学委員会、pp.161-166、1993 年 6 月。
- 2) 吉田 博・他：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。
- 3) 吉田 博・他：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/VI-14、pp.143-152、1991 年 3 月。