

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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SHOCK ABSORBING EFFECT OF EXPANDED POLYSTYROL AGAINST FALLING ROCKS

吉田 博*・松葉美晴**・法貴貫志郎***・久保田努****

By Hiroshi YOSHIDA, Yoshiharu MATSUBA, Kanshiro HOHKI and Tsutomu KUBOTA

A sand layer has been usually laid on rock sheds as shock absorbing material against a falling rock. However, recently new shock absorbing materials have been expected against a big impulsive force. This time, the shock absorbing behavior of the expanded polystyrol against a falling rock is experimentally investigated.

Experiments have been carried out for the following four types of arrangement.

- (1) Expanded polystyrol blocks only.
- (2) Alternate layers of sand and expanded polystyrol blocks.
- (3) Sand layer only.
- (4) Protection methods of the surface.

From the experimental results, the formula for the impulsive design load are proposed when the expanded polystyrol is laid on the rock sheds against a falling rock.

Keywords: rock sheds, expanded polystyrol, impulsive design load, shock absorb

1. 緒 言

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、金沢大学などを中心に研究され^{1)~8)}、緩衝メカニズム、緩衝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) 一般の落石に対して十分な緩衝効果を得るためには、砂材の厚さは約90~120cm程度を必要とし、これ以上の砂厚に対しては緩衝効果の増大は期待できず、死荷重の増大、ひいては、コストの増大につながる。

(2) 近年、大きい落石が予想される位置での落石覆工の設置による対応策が要求されるようになってきているが、これに対する経済的な対策がない。

(3) 既設の落石覆工において、架設後に発見された

設計荷重以上の大きい落石に対し、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。

(4) 砂材に代わる効果的な緩衝材が開発されていない。

また、鋼製落石防護柵には古タイヤが用いられる例もみられ、古タイヤに対する緩衝効果に関する実験も成されているが、大きい落石に対してはその効果に限界があることなどが指摘されている⁹⁾。

これらの緩衝材に代わる落石に対する効果的な緩衝材の使用が早くから望まれていた。本研究では緩衝材として発泡スチロール（以後、図および表中で、EPSと略称することがある）を用いた場合の緩衝特性について検討する。

一般の発泡スチロールは次のような特徴を有している。

a) 発泡スチロールの密度は土砂やコンクリートの約1/100で、きわめて軽量である。

b) 発泡スチロールのポアソン比は非常に小さいため、そのブロックを積み重ね、上面に荷重を作用させても側圧が生じない。

c) 発泡スチロールは水と結合しない撥水性材料で、長年月が経過してもほとんど水の影響を考慮する必要がない。

* 正会員 工博 日本サミコン(株)研究所
(〒957-01 新発田市佐々木 2527)

** 正会員 日本サミコン(株)研究所(同上)

*** 太陽工業(株)(〒532 大阪市淀川区木川東 4-8-4)

**** (株)長野技研

(〒390-12 松本市大字新村 2326)

d) 発泡スチロールの運搬、移動に際しては大型建設機械が必要でなく、人力による積み重ねが可能である。

このような特徴を利用して、発泡スチロールはすでに盛土材料として用いられ¹⁰⁾、その力学的挙動に関する研究も数多くなされている^{11)~14)}。また、梱包材としての緩衝効果に関する研究も成されているが、落石に対する緩衝効果に関する研究はみられない。

本研究は、このような観点から、発泡スチロールを落石に対する緩衝材として用いた場合の緩衝効果について以下の項目に対して実験的に検討しようとするものである。

(1) 落石荷重が大きい場合、発泡スチロールのみの使用が考えられる。その場合の緩衝効果、衝撃力の分散効果および表面処理方法による緩衝効果の相違。

(2) 発泡スチロールは軽量であるが、高価であるため、砂材との互層の場合について、お互いの層厚の組合せや、発泡スチロールの挿入位置による緩衝効果、衝撃力の分散効果の相違。

(3) 落石覆工のクッション材の表面を傾斜させている場合があり、表面を傾斜させたことによる緩衝効果の相違。

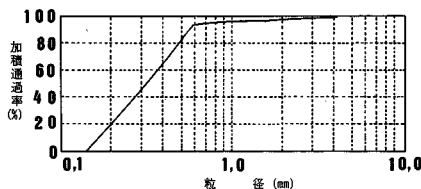
これらの一連の実験の検討より、緩衝材として発泡スチロールを用いた場合の落石覆工の設計のための衝撃力推定式の提案を行う。

2. 実験方法

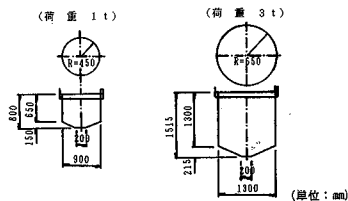
(1) 実験装置および材料

落石実験用槽：厚さ 30 cm のコンクリートスラブの上にプレキャスト鉄筋コンクリート製版を組み合わせ、幅 5.0 m、奥行き 5.0 m、高さ 1.5 m のクッション材槽を製作した。

使用する発泡スチロール：一般に梱包材用に用いられ



図一 用いた砂の粒径加積曲線



図二 用いた重錘

ている発泡スチロールは、単位体積重量が 20 kgf/m³ 程度のものが多いが、本実験では、15 kgf/m³ のものを標準とし、比較のために 20 kgf/m³ および 12 kgf/m³ のものも用いる。発泡スチロールの形状・寸法は、発泡スチロール土木工法¹⁰⁾ では標準的寸法になりつつある、2 000 mm×1 000 mm×500 mm のものを用いた。

使用する砂：実験現場採取のものを用いた。その粒径加積曲線を図一に示す。

使用重錘：使用重錘の重量は 1 t および 3 t (図二) とし、過去の実験^{2), 7)} に使用したものと同様のものとする。各実験ケースについて、電磁石を用いた落下装置により、高さ 10 m または 20 m から落下させた。

(2) 実験の種類

表一に示すように、4 ケースの実験を行った。

a) 発泡スチロールのみを用いた実験 (Case-I)

表一 実験の種類

(a) Case-I

実験番号	密度 kgf/m ³	層数	厚さ cm	重錘重量 ton	落下高さ m	備 考
I-1 A	15	2	100	1	10	発泡スチロール厚さの影響
I-1 B	15	3	150	1, 3	10, 20	
I-1 C	15	4	200	3	10, 20	
I-1 D	15	6	300	3	20	
I-2 A	12	4	200	1, 3	20	発泡スチロールの密度の影響
I-2 B	20	4	200	3	10, 20	
I-3 A	15	2	116	1	10, 20	表面傾斜*

* 表面の傾斜は 1 : 2 (約 27°)、落下点下の厚さ 116 cm

(b) Case-II

実験番号	密度 kgf/m ³	最下層 cm	中間層 cm	最上層 cm	全層厚 cm	重錘重量 ton	落下高さ m	備 考
II-1 A	20	5	50	95	150	3	10, 20	全層厚を一定、EPS材の位置、厚さを変化
II-1 B	15	5	100	45	150	3	10, 20	
II-1 C	15	55	50	45	150	3	20	
II-2 A	20	90	50	10	150	3	10, 20	最下層砂を一定、EPS材の厚さを変化
II-2 B	15	90	100	10	200	3	10, 20	
II-2 C	15	90	150	10	250	3	20	

注) 最下層は砂、中間層は発泡スチロール、最上層は砂である。

(c) Case-III

実験番号	砂 厚 cm	重錘重量 ton	落下高さ m	備 考
III-1 A	90	1	10, 20	各 3 回実施、1 回目は繰り返し、2, 3 回は埋め戻し状態で実施
III-1 B	120	3	10, 20	
III-1 C	150	3	10, 20	

(d) Case-IV

実験番号	密度 kgf/m ³	最下層 cm	中間層 材 料	最上層 厚 (cm)	全層厚 cm	重錘重量 ton	落下高さ cm
IV-1 A	15	5	モルタル	5	160	1	20
IV-1 B	15	5	モルタル	10	165	1	20
IV-2 A	20	5	高分子網	+砂10	215	3	20
IV-3 A	15	90	ハ油状物	+砂10	250	3	20

発泡スチロールのみを層状に重ね、落石実験を行う。厚さの影響、密度の影響、表面の傾斜の影響を調べるため7種類の実験を行った。各ケースとも、最下層は土圧計との馴染みを良くするために5 cm厚の砂を敷き、また、発泡スチロールの表面は表面処理材として10 cm厚の砂を敷き均した。

b) 発泡スチロールと砂の互層に対する実験 (Case-II)

砂材との互層による効果を期待した実験である。実験はいずれのケースとも重量3tの重錘を用い、発泡スチロールは単体体積重量20 kgf/m³または15 kgf/m³を用いた。

c) 砂のみを用いた実験 (Case-III)

Case-IおよびIIとの比較のために砂層のみの実験を行った。

d) 表面処理した実験 (Case-IV)

発泡スチロールの表面処理方法として5 cmおよび10 cm厚のモルタルを150 cm厚の発泡スチロール上に打設した場合、発泡スチロール上にポリエステル製網(ファイバグリッド kt-g 800)を敷いた場合およびハニカム構造の浸食防止網(ハニカムスパイク)を発泡スチロール上に敷き、その中に砂を10 cm厚で入れた場合に対して実験を行った。

(3) 測定項目および方法

計測システムの概念図(互層の例)を図-3に示す。

重錘加速度の測定：ひずみゲージ式加速度変換器(東京測器製 AR-100 E)を重錘の重心付近に固定し、重錘が緩衝材に衝突したときの加速度(負値)を測定した。

緩衝材底面の衝撃土圧の測定：土槽底面のコンクリートスラブ(厚さ30 cm)上面と同一高さとなるように土圧計(東京測器製 BE-20 K)を固定し、重錘落下時の緩衝材底面の衝撃土圧を測定した。重錘落下点より20 cmまたは30 cm間隔に5個の土圧計を配置した。

槽側面に作用する衝撃土圧の測定：重錘落下時に作用

計測システム例

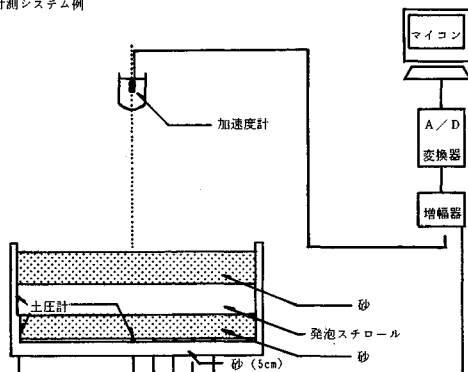


図-3 計測システムの概念図

するクッション材槽側面の衝撃土圧を測定するために、槽壁面の底面から50 cmおよび100 cmの位置に土圧計(東京測器製 BE-10 KD)を配置した。

動的ひずみ測定器：加速度計および土圧計の出力は動的ひずみ測定器(東京測器製)に入力され、その出力をマイクロコンピュータ(PC 9800)に挿入されたA/D変換ボードに入力した。

A/D変換およびデータ処理システム：加速度および土圧は2 ms間隔で2秒間(各1000データ)サンプリングされ、専用メモリーに格納し、これらのデータは直ちに解析され、加速度および各土圧の最大値、最大値の発生時間などを表示し、また波形をディスプレイにグラフィック表示した。同時にX-Yプロッターによっても作画した。

3. 実験結果および考察

(1) 発泡スチロールの応力-ひずみ関係

発泡スチロールの応力-ひずみ関係を求めるため直径10 cm、高さ10 cmの円筒供試体を作製し、単軸圧縮試験を行った。図-4は発泡スチロールの単体体積重量 ρ が12 kgf/m³、15 kgf/m³および20 kgf/m³に対する応力-ひずみ関係をプロットしたものである。横軸にひずみ(%)を、縦軸に応力(tf/m²)をとって示されている。図において、約5%のひずみより応力の増加に比較してひずみが急速に増加するが、約70~80%のひずみに到達すると応力が急激に増加していることがわかる。

(2) 重錘衝撃力と積分土圧

過去における落石実験データの処理においては、落石の衝撃力の評価方法として、以下の2通りのものが用いられてきた¹⁾⁻⁶⁾。

第1は、重錘が緩衝材に衝突したときの重錘に発生する加速度(負値)に重錘の質量を乗じた重錘に発生する衝撃力である。以後、これを重錘衝撃力とよぶことにする。

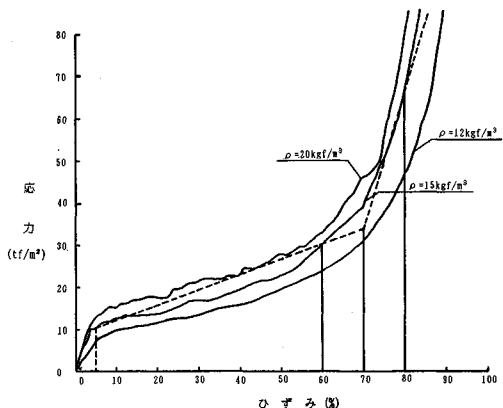


図-4 発泡スチロールの応力-ひずみ関係

第2は、重錘が緩衝材に衝突し、緩衝材中を貫入する間に、衝撃力が緩衝材中を伝播し、緩衝材底面に到達する。緩衝材底面において、構造物に直接作用する圧力が落石による構造物に実際作用する力である。緩衝材底面に配置された計5個の土圧計より測定された衝撃土圧は、重錘落下点を中心に軸対称的に分布するものと仮定して、土圧の作用域で積分することにより、実際の構造物に作用する衝撃力を求めることができる。このようにして得られる衝撃力を、以後、積分土圧とよぶことにする。

図-5は、発泡スチロール厚さが150 cm, 200 cm および 300 cm の場合の、重錘重量 3 t, 落下高さ 20 m に対する重錘衝撃力および積分土圧の時間的変化を、重錘が緩衝材に衝突する瞬間を時間零とし、横軸に時間 (ms) を、縦軸に重錘衝撃力および積分土圧 (tf) をとって示している。図中、太線は発泡スチロール厚さが 150 cm, 中線は 200 cm, 細線は 300 cm に対するもので、それぞれ、実線は重錘衝撃力を、破線は積分土圧を示している。

これらの重錘衝撃力および積分土圧に対応する測定土圧の時間的変化を、図-6に示す。図において、重錘落下位置中心の土圧を No.1 とし、隣接の土圧を順次 No.2~No.5として示されており、これらより、各土圧の波形および土圧の分布状態を検討することができる。

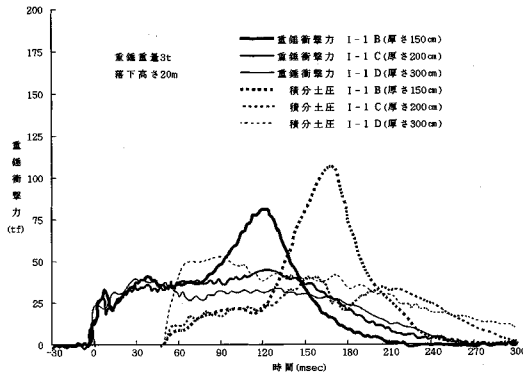


図-5 重錘衝撃力と積分土圧の経時変化 (厚さの影響)

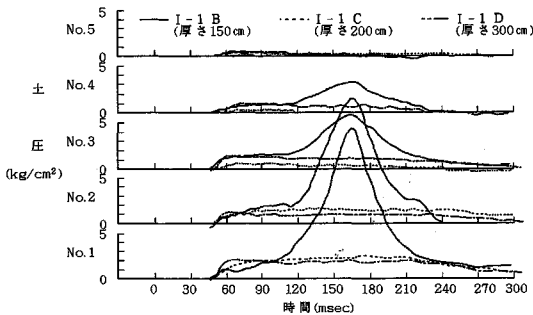


図-6 土圧の経時変化

緩衝材として砂のみを用いたこれまでの実験結果^{3),5),7)}からは、重錘衝撃力と積分土圧とは必ずしも一致せず、積分土圧の方がわずかに大きいことが示されているが、本実験においては、以下のような傾向がみられた。図-7は重錘衝撃力と積分土圧のそれぞれの最大値をプロットしたもので、発泡スチロールのみの場合 (Case-I) は、砂材の場合 (Case-III) とは逆に、ほとんどの積分土圧は重錘衝撃力より小さくなっている。発泡スチロールと砂との互層の場合 (Case-II), ほとんどの積分土圧は重錘衝撃力より大きく、砂と同様の傾向が見られるが、これは発泡スチロールの影響が少ないためと考えられる。しかし、本研究では、重錘のもつ位置エネルギーと発泡スチロールの吸収エネルギーの関係より考察を進めるために、重錘衝撃力の最大値で落石荷重を評価することにする。

(3) 重錘衝撃力

a) 発泡スチロールのみの場合 (Case-I)

厚さの影響：図-5は、重錘重量 3 t, 落下高さ 20 m の場合の重錘衝撃力の波形を、発泡スチロール厚さ 150 cm, 200 cm および 300 cm に対して比較したものであるが、この落下条件では発泡スチロール厚さが 150 cm では不足し、十分な緩衝効果が得られないことを示している。このことは、図-6の土圧の波形からも理解できる。

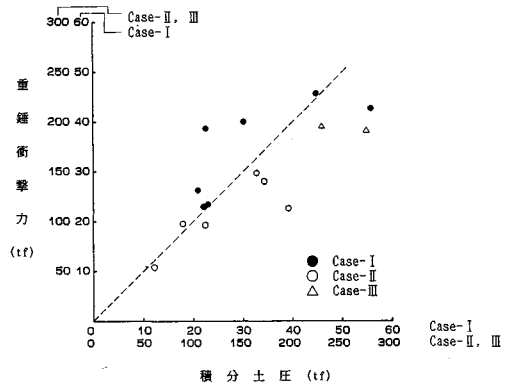


図-7 重錘衝撃力と積分土圧の関係

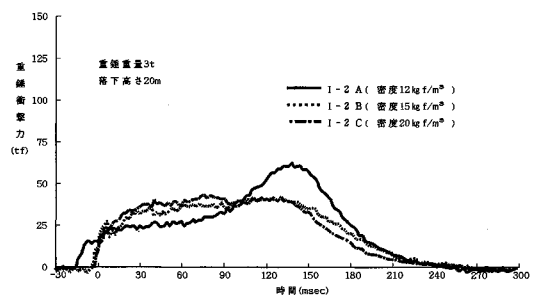


図-8 重錘衝撃力の経時変化 (密度の影響)

また発泡スチロール厚さを300 cmまで増加させた場合と厚さ200 cmの場合では、重錘衝撃力の最大値はほぼ同じとなっており、このような落石条件では厚さの増加に比例した緩衝効果は期待できないことが理解される。

単位体積重量の影響：図-8は、発泡スチロールの厚さ200 cm、重錘重量3 t、落下高さ20 mに対し、発泡スチロールの単位体積重量が12 kgf/m³、15 kgf/m³および20 kgf/m³の比較を行ったものである。単位体積重量が20 kgf/m³に対するものは、15 kgf/m³のものとはほぼ同じであるのに対し、12 kgf/m³のものは、大きい値となっており、このような落石条件では、発泡スチロールの単位体積重量として15 kgf/m³以上のものが必要であることが理解される。

表面の傾斜の影響：図-9は重錘重量1 t、落下高さ10 mに対し、発泡スチロール厚が100 cmの一樣厚さの場合と、表面が1:2(約27°)の傾斜で、落下点の厚さが116 cmの場合の重錘衝撃力の時間的変化の比較を示している。両者の最大値および波形に関しては、差異は認められない。

表面処理の影響：図-10は発泡スチロールの表面処理法として、厚さ150 cmの発泡スチロール上に10 cm厚さのモルタルを打設し、その上に重量1 tの重錘を高さ20 mから落下させたときの波形を示している。モルタルを打設した場合には、重錘がモルタルに衝突した瞬間に大きい衝撃力が発生するが、その後の波形は、モルタルがない同一条件の実験結果と類似している。その他の表面処理材を使用した場合も、その影響はほとんど認められなかった。

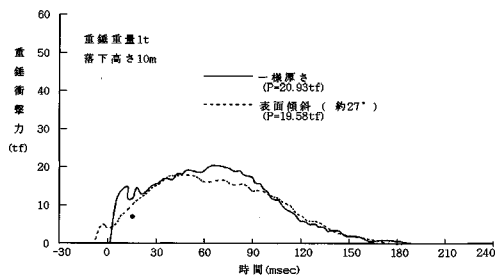


図-9 重錘衝撃力の経時変化(表面傾斜の影響)

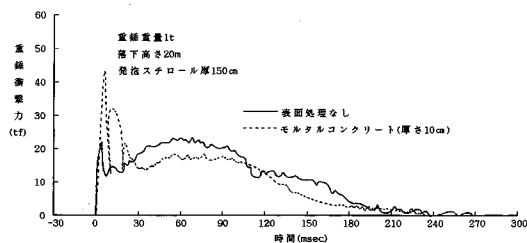


図-10 重錘衝撃力の経時変化(表面処理の影響)

クッション材槽の側圧：クッション材槽側面に作用する衝撃土圧は、ほぼ零であった。

b) 発泡スチロールと砂との互層の場合 (Case-II)

図-11は、互層の緩衝材の総厚が、いずれも150 cmに対するものであるが、発泡スチロール厚さが100 cmのものを除いて、いずれも大きい重錘衝撃力となっており、この場合、発泡スチロール厚さが50 cmでは発泡スチロールの挿入位置にあまり関係がないことが明らかとなった。図-12より、最下層に90 cmの砂を敷き、その上に発泡スチロールを厚さ50 cm、100 cmおよび150 cmで並べた場合の比較を行うと、発泡スチロールの厚さの増加とともに、重錘衝撃力の最大値は次第に減少することが明らかである。発泡スチロールの厚さが50 cmの場合の衝撃力波形は、砂のみを用いた場合の波形に類似しており、砂の影響が大きく現われていることがわかる。

c) 砂のみの場合 (Case-III)

砂のみを用いた場合の実験結果は、既往の実験結果^{6),7)}とほぼ同じであり、重錘重量3 t、落下高さ20 mに対し、砂厚120 cmおよび150 cmでの重錘衝撃力には差異が認められなかった。

以上より、発泡スチロールの緩衝効果について、以下のようにいえる。

発泡スチロールのみの場合および発泡スチロールと砂の互層の場合、落石条件に見合う発泡スチロール厚がある場合には、十分な緩衝効果が期待でき、衝撃力の作用

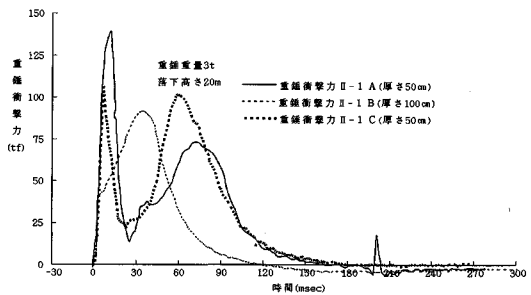


図-11 重錘衝撃力の経時変化(互層, 全厚150 cm)

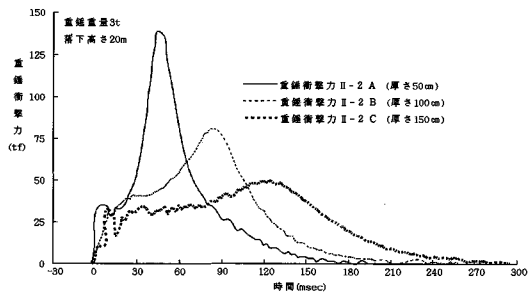


図-12 重錘衝撃力の経時変化(互層, 砂厚90 cm)

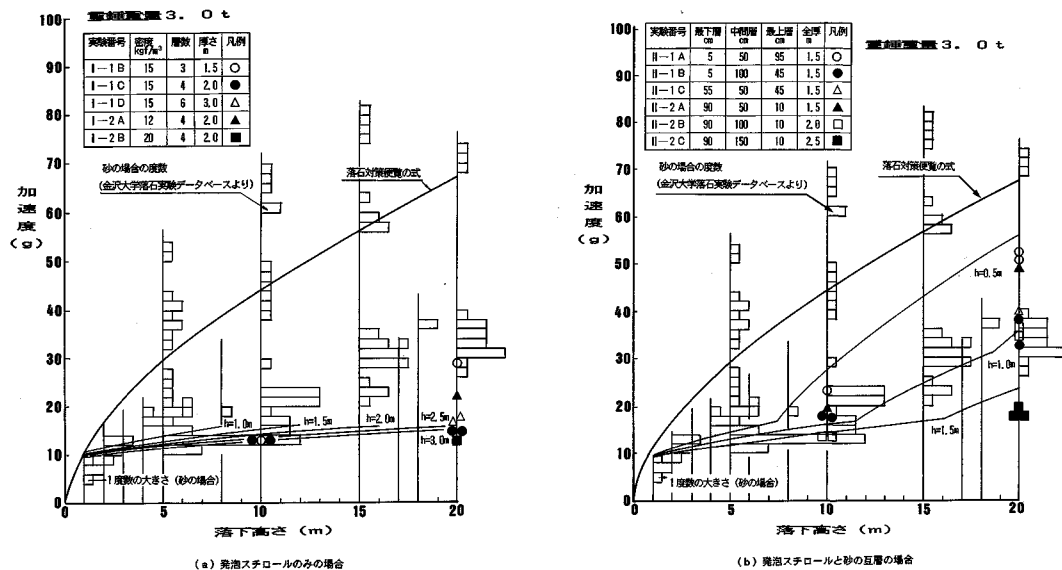


図-13 発泡スチロールと砂の互層の場合

時間も非常に長くなっている。しかし、発泡スチロール厚さが不足すると、衝撃力の作用時間が減少するとともに、緩衝効果も減少する。

(4) 重錘衝撃力と落下高さ

図-13 (a) および (b) は、緩衝材として発泡スチロールのみを用いた場合と発泡スチロールと砂の互層の場合に対する重錘衝撃力と落下高さの関係をプロットしたものである。図中のヒストグラムは、金沢大学で作成された砂材に対する落石実験データベース（データ数 2223）⁹⁾ より、同一重錘重量に対する各落下高さについての重錘衝撃力の分布を描いたもので、ヒストグラムの度数は、最小ブロックが度数 1 としてカウントできる。また、図中には、参考のために落石対策便覧で与えられる衝撃力公式に対応する値が、実線の曲線で示されている。

(5) 重錘衝撃力と貫入量

a) 発泡スチロールのみの場合 (Case-I)

重錘の発泡スチロールへの衝突時の速度は、

$$v_0 = \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (1)$$

より得られる。ここに、 H は落下高さ、 g は重力の加速度である。したがって、重錘が発泡スチロールに貫入しているときの速度 $v(t)$ は、加速度の絶対値を $a(t)$ とすると、以下の式で得られる。

$$v(t) = v_0 - \int_0^t a(t) dt \dots\dots\dots (2)$$

また、重錘の貫入量 $C(t)$ は、速度の積分で、

$$C(t) = \int_0^t v(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

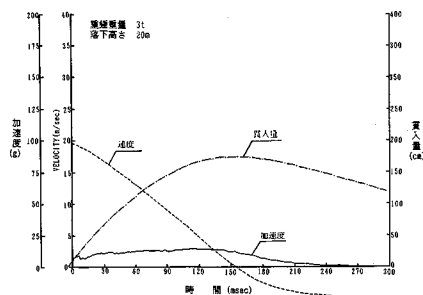


図-14 重錘の加速度・速度・貫入量の関係

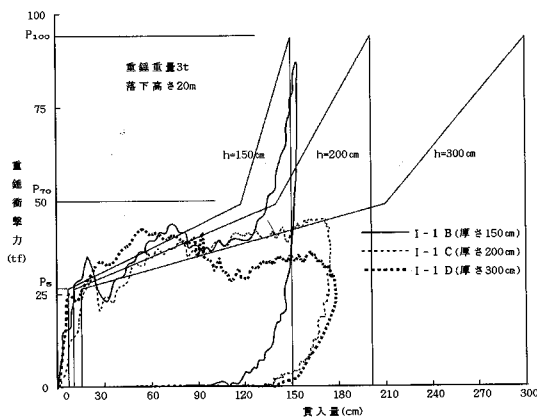


図-15 重錘衝撃力-貫入量関係 (発泡スチロール)

となる。発泡スチロール厚さ 200 cm、重錘重量 3 t、落下高さ 20 m の場合の速度および貫入量の数値計算例が図-14 に示されている。速度は自由落下速度 v_0 より次第に減少し零となった時点で貫入量は最大となり、速度

は負（上向き）となって重錘は反発を開始する。図-14に示された加速度 $a(t)$ に重錘質量を乗じた、重錘衝撃力と重錘の貫入量 $C(t)$ から時間を消去すると重錘衝撃力-貫入量曲線が得られる。図-15は重錘重量 3 t、落下高さ 20 m に対する、発泡スチロール厚さ 150 cm、200 cm および 300 cm の場合の重錘衝撃力-貫入量曲線を示している。

衝撃力-貫入量曲線において、貫入量 C に対応する衝撃力を P_c 、最大貫入量を C_{max} とすると、重錘のなす仕事量（発泡スチロールの吸収エネルギー）は、

$$E_w = \int_0^{C_{max}} P_c dC \dots\dots\dots (4)$$

で表わされる。すなわち、 E_w は $P_c \sim C$ 曲線の最大貫入量までの下側の面積である。また、重錘の位置エネルギー E_p は、

$$E_p = WH \dots\dots\dots (5)$$

である。各実験ケースごとに $P_c \sim C$ 曲線の下側の面積 E_w を求め、 E_p と比較したところ、

$$E_w = E_p \dots\dots\dots (6)$$

の関係がきわめて高い精度で得られた。

図-15において、発泡スチロール厚さが 150 cm の場合、重錘がもつ位置エネルギーを発泡スチロールが吸収するには厚さが不足して過大な変形を必要とし、最大貫入量付近で急激に衝撃力が増加している。

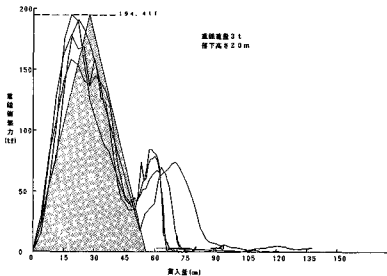


図-16 重錘衝撃力-貫入量関係（砂）

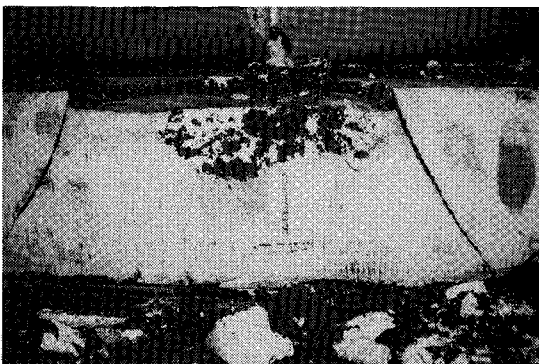


写真-1 発泡スチロールの破壊形状

b) 砂のみの場合 (Case-III)

発泡スチロールのみの場合と同様にして、クッション材として砂のみを用いた場合の、重錘衝撃力-貫入量関係を求めた例が図-16であり、落石重量 3 t、落下高さ 20 m に対するものである。この場合も発泡スチロールのみの場合と同様、砂の吸収エネルギー E_w と重錘の位置エネルギー E_p を比較したところ、両者はきわめてよく一致した。

4. 設計への適用

(1) 発泡スチロールの応力-ひずみ関係の近似

図-4に示した密度の異なる3種類の発泡スチロールの圧縮試験より得られた応力-ひずみ曲線のうち、単位体積重量 $\rho = 15 \text{ kgf/m}^3$ のものを、破線で示す3本の直線で近似する。この場合、5%、60% および 80% のひずみに対応する各応力は、 $\sigma_5 = 10 \text{ tf/m}^2$ 、 $\sigma_{60} = 30 \text{ tf/m}^2$ および $\sigma_{80} = 65 \text{ tf/m}^2$ となる。

(2) 衝撃力の分散

重錘が発泡スチロールに衝突した初期においては土圧は広い範囲で分布しているが、時間の経過とともに外側の土圧は消失し、中央部分の土圧のみが残存し、比較的均一となっていることが認められる（図-6参照）。これより、衝突の初期では比較的広い範囲に衝撃力は分散し、重錘の貫入とともに範囲が狭くなるものと思われる。実験における発泡スチロールの破壊形状は、衝突の初期の第1層では写真-1のように重錘の直径より、鉛直方向に対して 30° の角度の円錐台状であり、第2層以後は重錘の直径よりやや広い範囲の円筒状である。これらのことを考慮して、衝撃力の分散範囲を図-17に示す3段階に分類できるものと仮定する。すなわち、衝突の初期における分散の直径 d_1 は、

$$d_1 = d_0 + 2\lambda \tan 30^\circ \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 d_0 は重錘の直径、 λ は発泡スチロールの1層の厚さである。また、最大貫入時の分散直径 d_2 および貫通時の分散直径 d_3 を以下の様に仮定する（図-17 (b) および (c)）。

$$d_2 = 1.1 d_0, \quad d_3 = 1.05 d_0 \dots\dots\dots (8)$$

これらに対応する分散面積は、

$$A_1 = \frac{1}{4} \pi d_1^2, \quad A_2 = \frac{1}{4} \pi d_2^2, \quad A_3 = \frac{1}{4} \pi d_3^2 \dots\dots\dots (9)$$

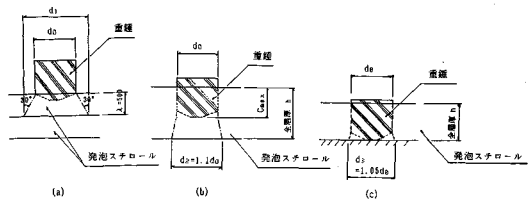
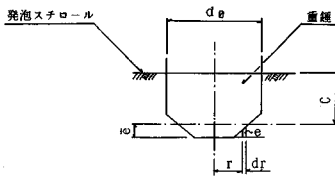
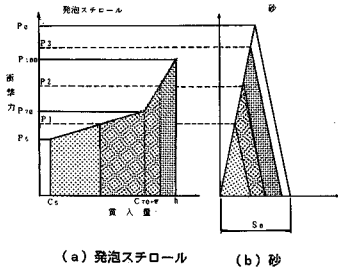


図-17 衝撃力の分散モデル



図一18 重錘底面の形状



図一19 モデル化された重錘衝撃力-貫入量関係

となる。

(3) 設計衝撃力

a) 重錘の平均突出量

重錘底面の形状を考慮した重錘の平均突出量 \bar{e} (図18参照) が次式で与えられるものとする。ただし A_0 は重錘の断面積である。

$$\bar{e} = \frac{1}{A_0} \int_0^{d_0/2} 2\pi redr \dots (10)$$

図一2に示す1tおよび3tの重錘に対しては、それぞれ、 $\bar{e} = 8.64 \text{ cm}$ および 13.06 cm となった。

b) 衝撃力-貫入量関係のモデル化

発泡スチロールの衝撃力-貫入量関係：図一15に示した重錘衝撃力-貫入量関係において、前述の発泡スチロールの応力-ひずみ関係の近似および衝撃力の分散を考慮して得られるモデル化した衝撃力-貫入量関係を同図中に示す。これをさらにモデル化して示したものが、図一19(a)である。図中、 C_5 および C_{70} は、それぞれ、発泡スチロールの全厚さの5%および70%に対する重錘の平均貫入量を示しており、 P_5, P_{70}, P_{100} は、次式により与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_5 &= \sigma_5 A_1 \\ P_{60} &= \sigma_{60} A_2 \\ P_{70} &= P_5 + \frac{0.65 h + \bar{e}}{0.55 h + \bar{e}} (P_{60} - P_5) \\ P_{100} &= \sigma_{80} A_3 \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

砂の衝撃力-貫入量関係：図一16に示したクッション材として砂を用いた場合の衝撃力-貫入量関係において、水平の破線は、落石対策便覧式

$$P_0 = 15.49 W^{2/3} H^{3/5} \dots (12)$$

より得られる衝撃力である。ここに、 W は落石重量 (t)、

H は落下高さ (m) である。式 (12) より求めた衝撃力は、位置エネルギーの小さい場合は過少となるが、位置エネルギーの大きい場合は実験値を良く近似している。

図一16の曲線は2つの山を有している。最初の山は、重錘が砂に衝突した瞬間に砂が局部的に圧縮されてできるものと思われる。その後、重錘と局部的に圧縮された砂が下方に移動するが、これだけでは重錘のもつ位置エネルギーをすべて吸収できないため、底部の砂は側方へ移動し、破壊面を形成して砂を側方へ押し上げることに伴う第2の山が発生するものと思われる。

第1の山はほぼ三角形をしており、その面積は全体の面積の約90%となっている。これより、この三角形の頂点、すなわち最大衝撃力は式 (12) より求まるものとし、三角形の面積が重錘のもつ位置エネルギーの90%であるとして底辺の長さ S_0 を

$$S_0 = 1.8 \frac{WH}{P_0} \dots (13)$$

より求め、さらに、この三角形を2等辺三角形として描いたものが図一16に示されている。以後の計算においては、すべてこの2等辺三角形で近似することにする。これをモデル化して示したものが、図一19(b)である。

c) 設計衝撃力-発泡スチロールのみの場合

十分な緩衝効果を得るためには、図一4より発泡スチロールのひずみは70%以内であることが望ましいので、以後、ひずみはこの範囲内であると仮定する。貫入量 C における衝撃力 P_c は図一19より

$$P_c = P_5 + \frac{P_{60} - P_5}{0.55 h + \bar{e}} (C + 0.05 h) \dots (14)$$

で表わされ、また、そのときの吸収エネルギー E_w は、

$$E_w = \frac{1}{2} (P_c + P_5) (C - 0.05 h) \dots (15)$$

で与えられる。ここに、 h は発泡スチロール厚さである。式 (14) および (15) より C を消去し、さらに式 (5) および (6) より $E_w = WH$ を代入すると、重錘の衝撃力 $P (= P_c)$ は、

$$P = \sqrt{\frac{2WH}{0.55 h + \bar{e}} (P_{60} - P_5) + P_5^2} \dots (16)$$

となる。なお、これに対する貫入量 C_{\max} は、

$$C_{\max} = \frac{2WH}{P + P_5} + 0.05 h < 0.7 h \dots (17)$$

で与えられる。発泡スチロール厚さ $h = 100 \sim 300 \text{ cm}$ まで 50 cm 間隔に、式 (16) より計算した値が図一13(a)に実線で示されている。なお、計算値が途中で切れているのは、式 (17) で与えられる限界値を越えたためである。計算値は図において、適切な密度と厚さを有する発泡スチロールの実験値に対しては、きわめて良い一致を示している。

d) 設計衝撃力-発泡スチロールと砂の互層の場合
 発泡スチロールおよび砂の組合せに対して、落石の位置エネルギーの大きさにより次の3ケースが考えられる。

(i) 貫入量が発泡スチロールの70%ひずみ以下のとき ($C_{max} < C_{70} + \bar{e}$)

発泡スチロールおよび砂の吸収エネルギー E_{wc} , E_{ws} は、以下のように得られる。

$$W_{wc} = \frac{1}{2} (P_c + P_s) (C_{max} - 0.05h) \dots\dots\dots (18)$$

$$E_{ws} = \frac{P_s^2}{2P_0} S_0 \dots\dots\dots (19)$$

また、 P_{70} と P_s を結ぶ直線の式は

$$P_c = P_s + \frac{P_{s0} - P_s}{C_{s0} + \bar{e} - C_s} (C_{max} - 0.05) \dots\dots\dots (20)$$

となる。発泡スチロールおよび砂の吸収エネルギーは、落石のもつ位置エネルギーに等しい。

$$E_w = E_{wc} + E_{ws} \dots\dots\dots (21)$$

式(18)および(20)より C_{max} を消去し、 $P = P_c = P_s$ とおくと、衝撃力 P として次式を得る。

$$P = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{S_0}{P_0} \frac{P_{s0} - P_s}{0.55h + \bar{e}}}} \sqrt{\frac{2WH}{0.55h + \bar{e}} (P_{s0} - P_s) + P_s^2} < P_{70} \dots\dots\dots (22)$$

(ii) 貫入量が発泡スチロールの70~100%ひずみ以下のとき ($C_{70} + \bar{e} < h$)

発泡スチロールの吸収エネルギー E_{wc} は次式であり、砂の吸収エネルギーは式(19)と同じである。

$$E_{wc} = \frac{1}{2} (P_{70} + P_s) \{ (C_{70} + \bar{e}) - C_s \} + \frac{1}{2} (P_c + P_{70}) \{ C_{max} - (C_{70} + \bar{e}) \} \dots\dots\dots (23)$$

P_{70} と P_{100} を結ぶ直線の式は、

$$P_c = P_{70} + \frac{P_{100} - P_{70}}{h - (C_{70} + \bar{e})} \{ C_{max} - (C_{70} + \bar{e}) \} \dots\dots\dots (24)$$

となる。(i)と同様に発泡スチロールおよび砂の吸収エネルギーと落石の位置エネルギーを等置し、 $P = P_c = P_s$ とおくと次式を得る。

$$P = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{S_0}{P_0} \frac{P_{100} - P_{70}}{0.30h - \bar{e}}}} \cdot \sqrt{\frac{2WH}{0.30h - \bar{e}} (P_{100} - P_{70}) - \frac{0.65h + \bar{e}}{0.30h - \bar{e}} (P_{100} - P_{70})(P_{70} + P_s) + P_{70}^2} \dots\dots\dots (25)$$

(iii) 貫入量が発泡スチロールの100%ひずみ以上のとき ($h < C_{max}$)

発泡スチロールを貫通している場合である。発泡スチロールの吸収エネルギー E_{wc} は、衝撃力-貫入量関係の

近似直線の下側の全面積であり、砂の吸収エネルギーは式(19)と同じである。

$$E_{wc} = \frac{1}{2} (P_{70} + P_s) \{ (C_{70} + \bar{e}) - C_s \} + \frac{1}{2} (P_{100} + P_{70}) \{ h - (C_{70} + \bar{e}) - C_s \} \dots\dots\dots (26)$$

発泡スチロールおよび砂の吸収エネルギーと落石の位置エネルギーを等置すると次式を得る。ただし、 $P = P_s$ であり、 $P_s > P_{100}$ である。

$$P = \frac{1}{\sqrt{S_0/P_0}} \cdot \sqrt{2WH - (0.65h + \bar{e})(P_{70} + P_s) - (0.30h - \bar{e})(P_{100} + P_{70})} \dots\dots\dots (27)$$

発泡スチロール厚さ $h = 50 \sim 150$ cm まで 50 cm 間隔に、式(22)、(25)または(27)より計算した値が図-13(b)に実線で示されている。なお、計算値が途中で屈曲しているのは、各式の限界点を示している。計算値は図において、実験値の上限を押さえており、設計衝撃力の推定値として妥当なものと考えられる。

5. 結 言

本研究では、落石に対する緩衝材として、従来から用いられてきた砂材に代わる、より効果的な緩衝材として、発泡スチロールを用いた場合の緩衝特性について実験的に検討を行った。まず、発泡スチロールを用いた一連の実験方法、実験結果について述べ、それに基づいた実用の設計衝撃力の推定式を導出した。

発泡スチロールは均質であることから、同一条件での実験結果にはばらつきがほとんど認められず、信頼性の高い実験データを得ることができた。したがって、導出された衝撃力式も信頼度の高いものとなっている。さらに、実験で用いたものより大きい落石および落下高さに対する外挿も可能であると考えられる。発泡スチロールを適正に使用すれば、死荷重の低減とともに、砂材よりはるかに大きな緩衝効果が期待できる。

謝 辞：本研究にあたり、貴重なご意見、ご指摘を頂きました多くの方々、ならびに実験にご協力頂いた方々に感謝の意を表します。

付録一設計のための実用式

発泡スチロールの単位体積重量を $\rho = 15$ kgf/m³、落石は完全球形で単位体積重量 $\rho_R = 2.6$ tf/m³、発泡スチロール1層の厚さ $\lambda = 0.5$ m として式(11)を整理すると以下の式が得られる。ただし、 W (t) 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。

$$\left. \begin{aligned} d_0 &= 0.902 W^{1/3}, \quad \bar{e} = d_0/6 \quad (m) \\ P_s &= 7.854 (d_0 + 0.557)^2 \quad (tf) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\begin{aligned} P_{60} &= 28.51 d_0^2 && \text{(tf)} \\ P_{100} &= 56.29 d_0^2 && \text{(tf)} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P_{60} \\ P_{100} \end{aligned}} \right\}$$

発泡スチロールのみの場合：実設計にあたっては、発泡スチロール厚さ 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。

式 (16) に $\bar{e}=0$ を代入して、ひずみ 70 % における衝撃力 P_{70} の近似値 P' を求め、発泡スチロールの必要厚さの推定値 h' を求める。得られた衝撃力に対し、 $C_{\max} < 0.7 h'$ の条件を満足していることを確認する。

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

$$h' > 3.077 \frac{1}{P' + P_5} WH \quad \text{(m)} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P' \\ h' \end{aligned}} \right\}$$

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

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

$$C_{\max} = \frac{2 WH}{P + P_5} + 0.05 h' < 0.7 h' \quad \text{(m)}$$

..... (A.2)

砂と発泡スチロールの互層の場合：発泡スチロールのみの場合と同様に落石を完全球形および発泡スチロールの単位体積重量を $\rho = 15 \text{ kgf/m}^3$ と仮定し、発泡スチロール厚さ h は既知とする。

$$P_0 = 15.49 W^{2/3} H^{3/5} \quad \text{(tf)}$$

$$S_0 = 1.8 \frac{WH}{P_0} \quad \text{(m)} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P_0 \\ S_0 \end{aligned}} \right\}$$

$$\alpha_1 = \frac{P_{60} - P_5}{0.55 h + \bar{e}} \quad \text{(tf/m)}$$

$$\alpha_2 = \frac{P_{100} - P_{70}}{0.30 h + \bar{e}} \quad \text{(tf/m)}$$

$$\beta = \frac{S_0}{P_0} \quad \text{(m/ft)}$$

$$P_{70} = P_5 + \alpha_1 (0.65 h + \bar{e}) \quad \text{(tf)}$$

$$P_E = \sqrt{2 WH \alpha_1 + P_5^2} \quad \text{(tf)}$$

$$\gamma = (P_{70} + P_5)(0.65 h + \bar{e}) \quad \text{(tf-m)}$$

$$\delta = P_{100}^2 - P_{70}^2 \quad \text{(tf}^2\text{)}$$

求める衝撃力 P は次の 3 ケースに分けられる。

(i) $P < P_{70}$ のとき

$$P = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_1 \beta}} P_E \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P \\ C_{\max} \end{aligned}} \right\} \dots\dots\dots \text{(A.4)}$$

$$C_{\max} = \frac{0.65 h + \bar{e}}{P_{70} - P_5} (P - P_5) + 0.05 h$$

(ii) $P_{70} < P < P_{100}$ のとき

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_2 \beta}} \sqrt{\alpha_2 (2 WH - \gamma) + P_{70}^2} \\ C_{\max} &= \frac{0.30 h - \bar{e}}{P_{100} - P_{70}} (P - P_{70}) + 0.07 h + \bar{e} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(A.5)}$$

(iii) $P_{100} < P$ のとき

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 \beta}} \sqrt{\alpha_2 (2 WH - \gamma) - \delta} \\ C_{\max} &= h + \beta P_5 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(A.6)}$$

参 考 文 献

- 1) 鋼材倶楽部：新しい落石覆いの開発に関する研究，1973 年。
- 2) 吉田・竹島・古市・石塚：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，pp.35~41，1976 年 10 月。
- 3) 建設省土木研究所：敷砂上の落石による衝撃力の推定に関する実験報告書，土木研究資料，1822 号，1978 年 2 月。
- 4) 吉田・榎谷：落石の衝撃力実験結果と各種推定式の関連について，第 1 回落石シンポジウム，pp.9~16，1983 年 7 月。
- 5) 佐々木・古賀：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，340 号，pp.127~137，1983 年 12 月。
- 6) 金沢大学構造力学研究室：防護覆い上への落石による衝撃力の推定に関する研究，落石実験報告書，1984 年 1 月。
- 7) 吉田・榎谷・鈴木：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文集，第 352 号，p.61~70，1984 年 12 月。
- 8) 吉田・榎谷・佐藤：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.33 A，pp.571~583，1987 年 3 月。
- 9) 吉田・榎谷・藤井・前川：鋼製落石防護柵の落石による衝撃特性，土木学会論文集，第 409 号 / VI-11，pp.75~84，1989 年 9 月。
- 10) 発泡スチロール土木工法開発機構：設計マニュアル，発泡スチロール土木工法技術資料，発泡スチロール土木工法開発機構
- 11) 久楽・青山・竹内・松橋：発泡スチロールを路床に用いたときの応力変形に関する一考察，第 23 回土質工学研究発表会講演集，pp.1973~1974，1988 年 6 月。
- 12) 三木・塚本・平野：発泡スチロールを用いた壁体構造物の挙動計測，第 22 回土質工学研究発表会講演集，1987 年 6 月。
- 13) 久楽・青山・竹内・武智：発泡スチロールの破壊機構とその異方性，第 23 回土質工学研究発表会講演集，pp.1971~1972，1988 年 6 月。
- 14) 後藤・佐野・松村・村田：軽量盛土舗装体の 3 次元弾性解析，第 23 回土質工学研究発表会講演集，pp.1991~1992，1988 年 6 月。

(1990.8.9・受付)