

(12) 発泡スチロールの緩衝効果を利用した既設洞門上斜面の巨岩処理法

長野県土木部 山浦 健
長野建設事務所 榛葉 雄次
銚長野技研 ○ 久保田 努
日本サミコン銚 松葉 美晴

1. 概要

これまで、落石覆工上には、落石による衝撃力を緩和させる目的で、砂、砕砂または山土などが敷かれてきたが、これらの緩衝材はその厚さを増加させても緩衝効果には限界があることが明かにされており、これに代わる緩衝材が必要となってきた。

そこで、著者等は砂などの従来の緩衝材に比較して、重量が約100分の1と極めて軽量の発泡スチロールを緩衝材として使用することに着目し、その緩衝効果について、実物大の落石実験を行った。その結果、極めて大きい緩衝効果が得られることが明かとなった。本報告書ではこの発泡スチロールを緩衝材として用いた既設洞門上の斜面の巨岩処理方法を紹介する。

2. 実験計画および方法

2. 1 実験計画

(1) 落石実験用土槽:土槽は厚さ30cmのコンクリートスラブの上に幅5.0m、奥行き5.0m、高さ1.5mのプレキャスト鉄筋コンクリート製のものを組立てた。

(2) 使用する発泡スチロール:単位体積重量(単重)が、 $15\text{kg}/\text{m}^3$ のものを標準とし、比較のために $20\text{kg}/\text{m}^3$ および $12\text{kg}/\text{m}^3$ のものも用いた。発泡スチロールの形状・寸法は、 $2,000\text{mm}\times 1,000\text{mm}\times 500\text{mm}$ である。

(3) 使用する砂:実験現場採取のもの。

(4) 使用重錘:使用重錘の重量は1.0tおよび3.0tとし、高さ10mまたは20mから落下させた。

2. 2 実験の種類

(A) 発泡スチロールのみを用いた実験(Type-1)

厚さの影響、単重の影響、表面の傾斜の影響を調べるため7種類の実験を行った。

(1) 厚さの影響:単重 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 、厚さ100cm、150cmおよび200cm、重錘重量1tおよび3t、高さ10mおよび20m

(2) 密度の影響:単重 $12\text{kg}/\text{m}^3$ および $20\text{kg}/\text{m}^3$ 、厚さ200cm、重錘重量1tおよび3t、高さ10mおよび20m

(3) 傾斜面:単重 $15\text{kg}/\text{m}^3$ 、厚さ116cm、重錘重量1t、高さ10および20m

(B) 砂との互層にたいする実験(Type-2)

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3.0tの重錘を用い、発泡スチロール材は単重 $20\text{kg}/\text{m}^3$ および $15\text{kg}/\text{m}^3$ を用いた。また、落下高さは10mおよび20mである。

(1) 下層(砂)5cm、中間層(発泡スチロール)50cm、上層(砂)95cm、全層150cm

(2) 下層(砂)5cm、中間層(発泡スチロール)100cm、上層(砂)45cm、全層150cm

(3) 下層(砂)55cm、中間層(発泡スチロール)50cm、上層(砂)45cm、全層150cm

(4) 下層(砂)90cm、中間層(発泡スチロール)50cm、上層(砂)10cm、全層150cm

(5) 下層(砂)90cm、中間層(発泡スチロール)100cm、上層(砂)10cm、全層200cm

(6) 下層(砂)90cm、中間層(発泡スチロール)150cm、上層(砂)10cm、全層250cm

(C) 砂のみを用いた実験(Type-3)

上記との比較のために砂層のみの実験を行った。

砂厚90cmについては、1tのみ、120cm および150cm は、3tの重錘を用いた。

(D) 表面処理した実験 (Type-4)

表面処理として5cmおよび10cm厚のモルタルを150cm厚の発泡スチロール上に打設した場合、発泡スチロール材上にプラスチックの網を敷いた場合、土木繊維によるハニカム構造物の浸食防止網を敷きその中に砂を10cm厚で入れた場合の実験を行った。

- (1) 単重15kg/m³、厚さ150cm、重錘重量1t、表面モルタル5、10cm、高さ20m
- (2) 単重20kg/m³、厚さ200cm、重錘重量3t、表面プラスチックの網、高さ20m
- (3) 単重15kg/m³、厚さ150cm、重錘重量3t、表面浸食防止網、高さ10、20m

2. 3 測定項目

測定項目及び測定システムを以下に示す。

- a) 重錘加速度(負値)の測定、b) 緩衝材底面の衝撃土圧の測定、
- c) 土槽側面に作用する衝撃土圧の測定、
- d) 動的ひずみ測定器、e) A/D変換およびアーケ処理システム

3. 実験結果および考察

3. 1 重錘衝撃力と積分土圧

落石の衝撃力として2通りのものが用いられる。第一は、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り、第二は、重錘衝撃力が構造物に直接作用する圧力で、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得られる衝撃力である。重錘が緩衝材に衝突する瞬間を時間零とし、横軸に時間(msec)を、縦軸に重錘衝撃力を実線で、積分土圧を破線でプロットしたものが図-1である。本実験においては、Type-1の単層の場合はほとんどの積分土圧は重錘衝撃力より小さく、Type-2の砂との互層の場合はほとんどの積分土

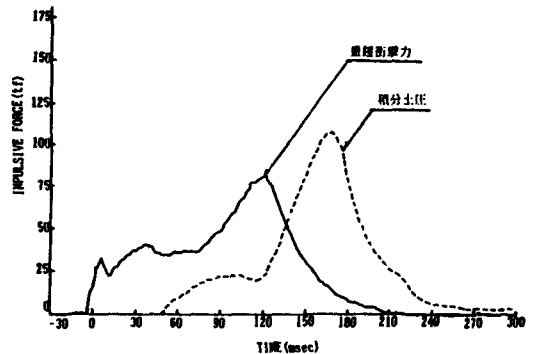


図-1 重錘衝撃力と積分土圧

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、検討は重錘衝撃力で評価することにする。

3. 2 重錘衝撃力による検討結果

(A) Type-1 (単層の場合)

- (1) 厚さの影響: 落石に見合ったある程度の厚さが必要であるが、厚さの増加に比例した効果は期待できない。
- (2) 単重の影響: 発泡スチロールの単重は15kg/m³が限界である。
- (3) 傾斜の影響: 一樣厚さの場合と、傾斜面の場合に関しては、両者の差異は認められない。
- (4) 表面処理の影響: 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場合と類似している。

(B) Type-2 (砂との互層の場合)

- (1) 互層の緩衝材厚が、いずれも150cmに対するものでは、発泡スチロール材の厚さが100cm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、発泡スチロール材の厚さが50cmでは発泡スチロール材の挿入位置にあまり関係がない。
- (2) 最下層に90cmの砂を敷き、その上に発泡スチロール材を厚さ50cm、100cm および150cmで並べた場合の比較を行うと、発泡スチロール材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。

(C) Type-3 (砂のみの場合)

重錘重量3t，落下高さ20mに対する，砂厚120cm および150cmの重錘衝撃力は，その差異はほとんど認められない。

4. 設計への適用

4. 1 発泡スチロールの応力-ひずみ関係の近似

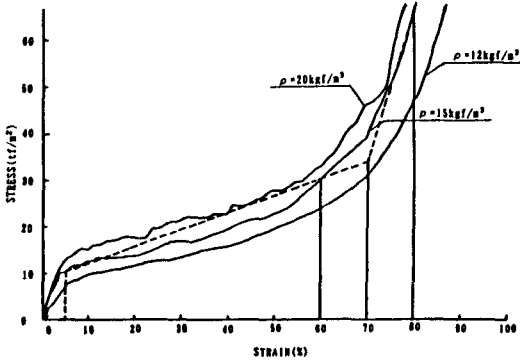


図-2 発泡スチロールの応力-ひずみ関係

図-2は発泡スチロールの単重が 12kg/m^3 、 15kg/m^3 および 20kg/m^3 に対する応力-ひずみ関係をプロットしたものである。横軸はひずみ(%)を、縦軸は応力(kg/cm^2)を示している。応力-ひずみ関係を求めるための供試体は、直径 10cm 高さ 10cm の円筒供試体を用いた。図-2より、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%および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。単重 15kg/m^3 のものについては破線で示したように3本の直線で近似する。

4. 2 衝撃力の分散

衝突の初期では比較的広い範囲に衝撃力は分散し、重錘の貫入と共に範囲が狭くなるものと思われる。衝突の初期の分散直径 d_1 は、 $d_1 = d_0 + 2\lambda \tan 30^\circ$ （発泡スチロールの破壊形状より推定。 d_0 は重錘の直径、 λ は発泡スチロールの1層の厚さ）で、最大貫入時の分散直径 d_2 ，貫通時の分散直径 d_3 および各分散面積は以下のように仮定する。

$$d_2 = 1.1 \cdot d_0, \quad d_3 = 1.05 \cdot d_0, \quad A_1 = \frac{1}{4} \pi d_1^2, \quad A_2 = \frac{1}{4} \pi d_2^2, \quad A_3 = \frac{1}{4} \pi d_3^2$$

4. 3 重錘衝撃力と貫入量

(A) 発泡スチロール材のみの場合 (Type-1)

重錘が発泡スチロールに貫入している時の速度 $v(t)$ は、発泡スチロールへの衝突時の速度 v_0 から、加速度の絶対値 $\alpha(t)$ の積分値を減ずれば得られる。また、重錘の貫入量 $C(t)$ は、速度を積分すれば得られる。この様子を示した例が図-3である。

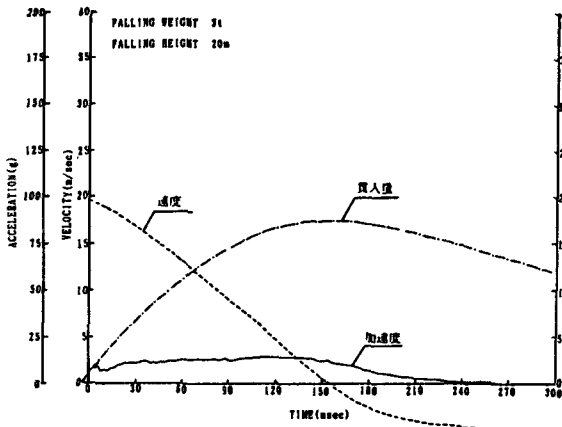


図-3 重錘の加速度・速度・貫入量 $h=2.0\text{m}$

加速度 $\alpha(t)$ に重錘重量を乗じ、重錘の貫入量 $C(t)$ の時間的変化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。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 E_w は、最大貫入量 C_{\max} までの積分値である。また、重錘の持つエネルギー E_p は、 $E_p = WH$ で、各実験ケースごとに E_w を求め、 E_p と比較したところ、 $E_w = E_p$ の関係がきわめて高い精度で得られた。

詳しくは文献1)を参照されたい。

(B) 砂のみの場合 (Type-3)

発泡スチロール材のみの場合と同様にして、重錘衝撃力-貫入量関係をもとめ、砂の吸収エネルギー E_w と重錘の持つ位置エネルギー E_p を比較したところ、両者の関係はきわめてよく一致した。

4. 4 設計衝撃力

(A) 重錘の平均貫入量

重錘底面の形状を考慮するため、重錘の平均貫入量として突起面の体積平均高さとした。

(B) 衝撃力-貫入量関係のモデル化

(1) 発泡スチロールの衝撃力-貫入量関係

図-4 に発泡スチロール厚さ150cm、重錘重量 $W=3t$ 、落下高さ $H=20m$ に対する実験の衝撃力-貫入量関係が示されている。発泡スチロール厚さが不足し、重錘が持つ位置エネルギーを発泡スチロールが吸収するには、過大な変形が必要で、最大貫入量付近では急激に衝撃力が増加している。以上の近似直線として式(1)を示す。また、 P_{70} は P_5 と P_{60} の延長線上にあるものとする。

$$P_5 = \sigma_5 A_1, P_{60} = \sigma_{60} A_2, P_{100} = \sigma_{80} A_3 \quad (1)$$

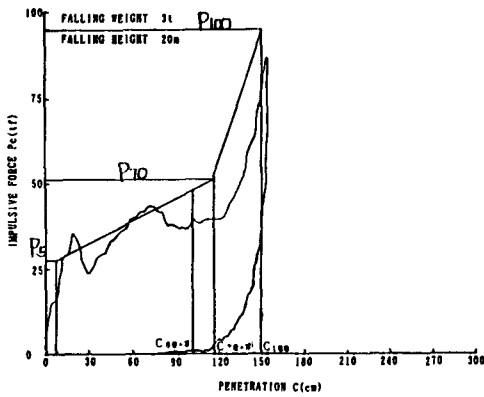


図-4 衝撃力貫入量関係のモデル化

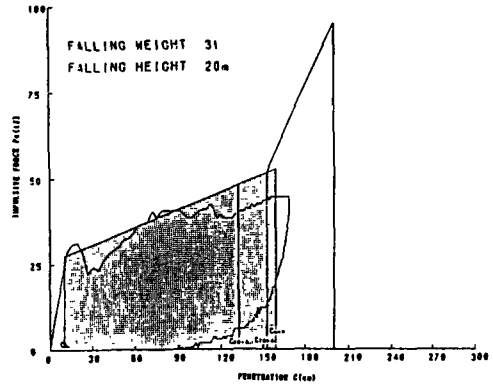


図-5 発泡スチロールの重錘衝撃力貫入量関係

(2) 砂の衝撃力-貫入量関係

紙面の都合により本報告では割愛する。詳しくは文献1)を参照されたい。

(C) 設計衝撃力公式(精算式)

(1) 発泡スチロール単層の場合

(2) 砂と発泡スチロールの互層の場合

紙面の都合により本報告書では割愛する。詳しくは文献1)を参照されたい。

ただし、発泡スチロール単層の場合に関して精算式で得られた値と本実験で得られた実験値との比較を図-6に示す。

(D) 実用式の提案(簡易式)

(1) 発泡スチロール単層の場合

いま、発泡スチロールの単重を $\rho=15kg/m^3$ 、落石は完全球形で単位重量 $\rho_R=2.6t/m^3$ 、発泡スチロール1層厚さ $\lambda=0.5m$ として各式を整理すると実用式は式(2)となる。この時、ひずみ70%における衝撃力 P_{70} の推定値 P' を求めるため $\theta=0$ として求めた。

式(2)は d_0 を直接代入することによって偏平な落石にも対応することができる。すなわち、落石直径 d_0 が小さくなれば、必要厚さ T が大きくなり、衝撃力 P が小さくなる。反対に落石直径 d_0 が大き

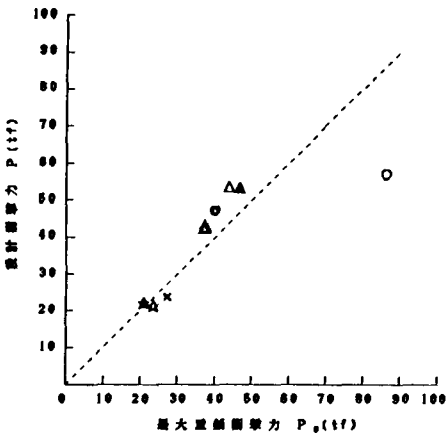


図-6 設計式と実験結果の比較

なれば、 T が小さく、 P が大きくなる。これは、自然の理にかなった結果と言える。

- ①. $d_0 = 0.902^3 W$, $= d_0 / 6$ (m),
- ②. $P_5 = 7.854 (d_0 + 0.577)^2$ (tf)
- ③. $P_{60} = 28.510 \cdot d_0^2$ (tf),
- ④. $P' = 1.182 \cdot P_{60} - 0.182 \cdot P_5$ (tf)
- ⑤. $T \geq 3.077 \cdot \frac{1}{P' + P_5} W H$ (m)
- ⑥. $P = \frac{2 W H}{0.55 T +} (P_{60} - P_5) + P_5^2$ (tf) $\leq P_{70}$
- ⑦. $P_{70} = P_5 + \frac{0.65 T +}{0.55 T +} (P_{60} - P_5)$ (tf)
- ⑧. $C_{max} = \frac{2 W H}{P + P_5} + 0.05 T \leq 0.7 T$ (m)

(2)

(2) 砂と発泡スチロールの互層の場合

紙面の都合により本報告書では割愛する。詳しくは文献1)を参照されたい。

5. 実施例

5.1 巨岩処理への適用

栃木県での例を紹介する。

本現場は、国道121号線に架設されたPC製の単純梁形式の落石覆工で、その代表的な測点横断を図-7に示す。設計当時の設計条件は以下の通りであった。

- 1) 落石荷重 重量 $W = 0.5$ t, 落下高さ $H = 20.0$ m
- 2) 設計震度 水平震度 $k_h = 0.20$, 鉛直震度 $k_v = 0.00$
- 3) 緩衝材(砂) 敷均厚さ $h_c = 0.7$ m, 単位重量 $\gamma_c = 1.8$ t/m³
- 4) 桁の設計耐力 $M_{cr} = 108$ t m

その後の斜面見直しで、オーバーハングした斜面を削除することとなった。

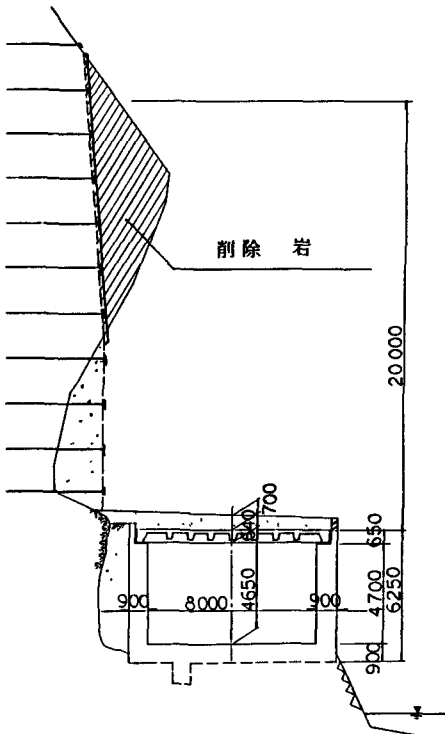


図-7 落石覆工測点横断例

当初、岩削除は小割りにして設計落石荷重とする予定であったが、調査の結果、岩に亀裂があり $W = 3$ t ~ 5 t程度の荷重となることが判明した。これらの対応として、①. PC桁の補強、②. ロックネットの架設(仮設材)、③. 鋼製の落石減勢工の架設、④. 発泡スチロールによる衝撃力の低減などが、経済面、施工面等から検討され、④の発泡スチロールによる衝撃力の低減工法が採用された。

発泡スチロール厚さは現場の条件から厚さ $T = 2.5$ mとして固定し、安全側をとって砂による緩衝効果を無視して、発泡スチロールのみによる緩衝効果を計算した。計算は桁の耐力モーメントを発生させる集中荷重 P を下回る落石荷重 P' を想定して、落石荷重、落下高さを逆算するという手法を取った。その結果、発泡スチロール厚さ $T = 2.5$ mでは、

$$\textcircled{1}. W = 3 \text{ t}, H = 20 \text{ m}$$

$$\textcircled{2}. W = 5 \text{ t}, H = 10 \text{ m}$$

程度の条件まで、現行の落石覆工が耐え得る荷重と判明した。以上は斜面の調査結果から得られた条件を満足するものである。また、桁の破壊荷重までを想定した計算では

$$\textcircled{3}. T = 5 \text{ m}, W = 10 \text{ t}, H = 15 \text{ m}$$

となり、一部区間では、発泡スチロール厚さ $T = 5$ mが敷設されている。

5. 2 巨岩対策への応用

長野県での3箇所のロックシェッドについて報告する。

(A) 事例-1

本工事は既設のP C製ロックシェッド上に用いたもので、福井県の事故の後の緊急点検により、現設計が想定している以上の落石の可能性が指摘されたものである。

	既設設計条件	調査後設計条件
落石荷重	3.0 t	3.0 t
落下高さ	13 m	70 m

前記実用式(砂と発泡スチロールの互層)から既設シェッド耐力に見合う発泡スチロール厚を求め計画したものが図-8である。谷側端部は、標準ブロック(1.0X2.0X0.5m)を斜めに切断した形状の、三角ブロックを用いて敷設基面に対して1:2の勾配とした。発泡スチロールの劣化と飛散防止のための表面処理として、モルタル吹付け5.0cmを施した。

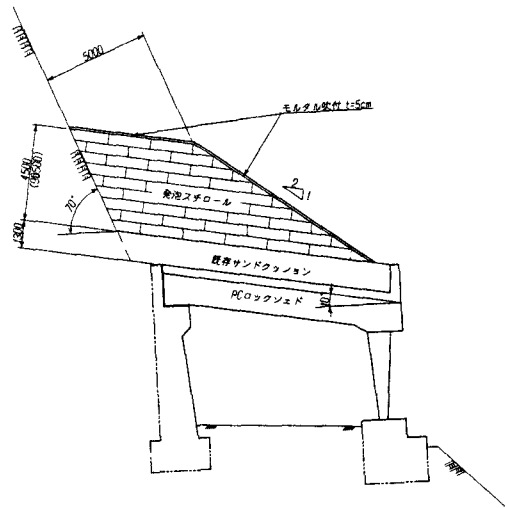


図-8 発泡スチロールの積み重ね(事例-1)

(B) 事例-2

事例-1と同様に既設のRC落石覆工上に用いたものであり、発泡スチロールに期待する緩衝効果は下記のとおりである。

落石重量	1.4 t
落下高さ	60 m
落石対策便覧による衝撃力	226 t
既設覆工許容衝撃力	120 t

計画断面を図-9に示す。現地は落石を積極的に谷側に落とすような状況にないため、谷側を直立壁とした。歩道の接近する区間では、ロックフェンスを設け、リバウンドによる外への飛び出し防止を図っている。

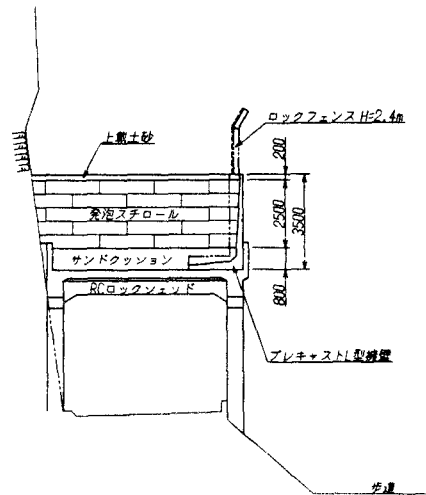


図-9 発泡スチロールの積み重ね(事例-2)

(C) 事例-3

本例は新設のRC造ロックシェッドに採用したものであるが、前2例と異なり、緩衝材としての効果より、軽量盛土材としての意味で用いたものである。設計条件は次のとおりである。

落石重量	27 t
落下高さ	15 m
落石対策便覧による衝撃力	700 t
土砂堆積の可能性	あり
谷側基礎	深礎杭

このような条件の下で通常のロックシェッドを計画すると非現実的な形状寸法となる。対策として、土砂の堆積角度まで発泡スチロールによる軽量盛土を行ったものである。これによる落石の衝撃力は極めて小さくなり、堆積土の荷重も軽量の発泡スチロールに置き換えられるため、荷重は大幅に軽減され、結果的に図-10に示す構造となった。表面処理は事例-1の三角ピースは使用せず、階段状に積み重ねた発泡スチロールの表面をコンクリートで埋め、平面とした。これは、表面処理材自身の安定と、破損時の補修は容易でない形状のため、頻度の多い中小規模の落石に対しては、表面コンクリートの質量で抵抗するよう意図したものである。

以上が実施例であるが、次に一般的な手法を整理して示す。

5.3 既設覆工での一般的な補強法と問題点

既設覆工での斜面見直しによる補強方法としては、次の2点が考えられる。

- ①. 覆工本体の耐力増強
- ②. 落石荷重の低減

①の覆工本体の耐力増強は、経済性、施工性から考えて、大工事となり一般的には採用される可能性は少ないと思われる。②の落石荷重の低減方法としては、

- ①. 斜面上での構造物構築による落石荷重減勢
- ②. 覆工上面での衝撃力緩和

の2点が考えられるが、斜面上での作業は危険を伴う上、経済性、施工性からもあまり好ましい工法とはいえない。結局、覆工上での衝撃力緩和工法が、现阶段では最適な工法と考えられる。

次に発泡スチロールを用いた場合の一般的な手順を示す。

- (1) 落石条件の設定 ~ 落石荷重； W ，落下高さ； H ，落下位置（自由落下，転石，覆工背面部）
- (2) 覆工耐力の設定 ~ 覆工本体，下部工
- (3) 許容落石荷重の逆算 ~ 覆工耐力以下の落石荷重 P' の逆算
- (4) 発泡スチロール厚さの計算 ~ 落石条件から許容落石荷重 P' になるように発泡スチロール厚さ T を求める。
- (5) 発泡スチロールの敷設 ~ 敷設幅，敷設延長，固定方法，表面保護の決定。

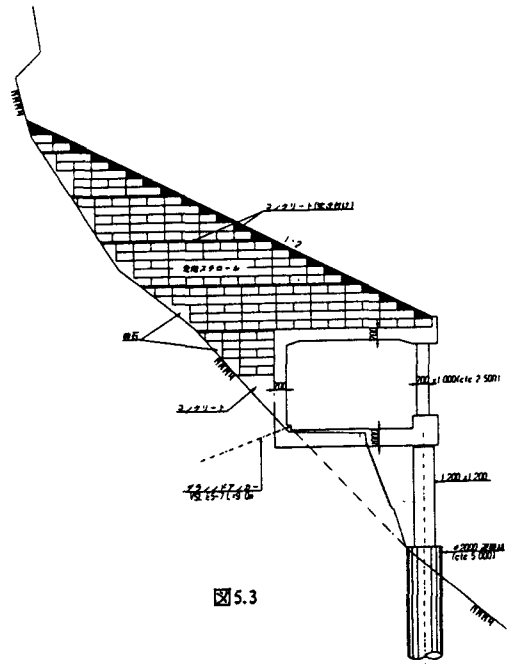


図-10 発泡スチロールの積み重ね（事例-3）

(2)～(4)については、計算のみであるので、それほどの問題は無い。しかし、(1)落石荷重の設定、(5)発泡スチロールの敷設に関しては、今後の課題として、さらなる研究が必要である。特に敷設幅、固定方法に関しては、落石のリバウンド量、斜め入射時の水平力などが解明されなければならない。

著者らは、上記の問題点を現在研究中あり、次回の機会に発表する予定である。

6. 参考文献

1) 日本サミコン(株)・太陽工業(株)・(株)長野技研:発泡スチロールの落石による衝撃力の緩衝効果に関する実験報告書, '90.2, pp.1～102