

(16) 斜面性状を考慮した落石防護構造物の衝撃力評価とその応用

(株) 第一コンサルタンツ ○右城 猛
元・金沢大学 吉田 博
日本サミコン(株) 細川 豊

1. まえがき

1989年7月20日に福井県の国道305号で発生した落石事故以来、ロックシェッドの安全性の評価に対する関心がこれまで以上に高まり、既設ロックシェッド及び上部斜面の点検調査が全国的に実施されている。

遠山洞門は、鉄筋コンクリート製円形ラーメン形式のロックシェッドとして昭和61年に建造されたものであるが、最近の調査で、設計時に想定されていた規模をはるかに超える転石が上部斜面に存在することが明らかになった。¹⁾

本報文では、当該斜面の性状を考慮した落石の運動のシミュレーションを行ない、落石による衝撃力を予測し既設洞門の安全性を判定するとともに、発砲スチロールを用いた洞門補強工法について紹介する。

2. 斜面の状態

当該洞門が建造されているのは、一般県道高知伊予三島線の高知県土佐郡大川村北川地先であり、四国のほぼ中央に位置する、四国山脈の一部をなす井野川山(標高1342m)の北斜面に位置する当該斜面は、過去に2度の崩壊を生じている。斜面勾配は30~40°と極めて急峻であり、洞門の上方25m(標高350m)付近までは基岩盤の露頭が見られるが、標高350~410mにかけては厚さ7mの崖錐性堆積物が分布している。この崖錐性堆積物は長径1.5~2mの規模の転石を多数含有し、これらが落石予備軍を構成している。基岩盤の地質は三波川帯に属する塩基性片岩であり、片理面は流れ目になっている。また、開口亀裂の発達により浮石化が進行し、長径2m程度のブロック状に剥離して落下する危険性が高い。

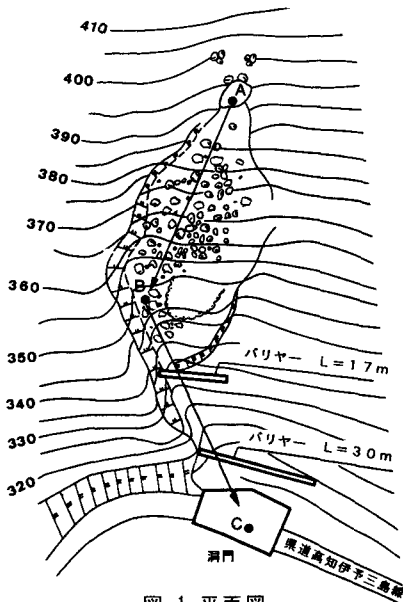


図-1 平面図

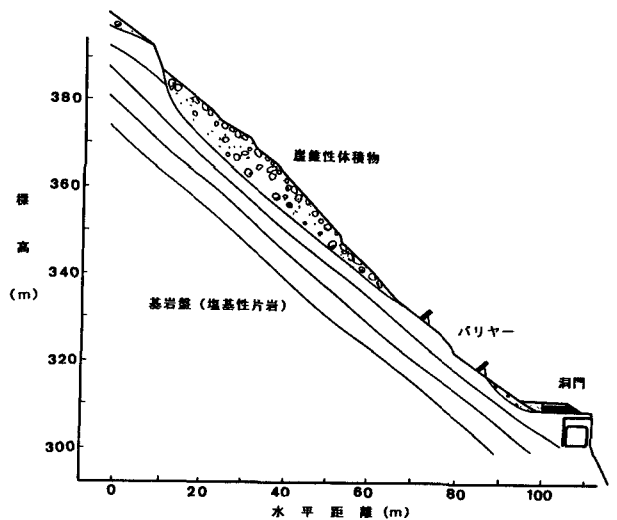


図-2 横断面図

3. 既設洞門の安全性の評価

3. 1 遼山洞門の構造概要

当該ロックシェッドは落石重量2.0t,自由落下高20mを想定し,衝撃荷重148.4tfとして設計をされている.構造形式はスパン5.65mの下端固定の鉄筋コンクリート門形ラーメン構造であり,屋根スラブ上にはクッション材として厚さ1.15~1.47mの砂が敷かれている.落石時における梁中央部の設計断面力は軸力 $N=28.59tf$,曲げモーメント $M=115.11tf\cdot m$ である.梁断面は落石荷重によって決定され, $H=1.1m$, $B=0.7m$ となっている.²⁾

3. 2 落石速度の推定

落石の落下速度は,斜面の等価摩擦係数 μ を用い, $V=\sqrt{2gH\{1-(\mu/\tan\theta)\}}$ として予測することが多い.³⁾しかしながら,この方法では,斜面の性状(斜面の地質,斜面形状)を定量的に評価した予測を行なうことができない.⁴⁾そこで,当該斜面においては,以下に示す運動方程式を適用し,モンテカルロシミュレーション法によって落石の落下速度および落下位置を予測した.

(A) 落石の基礎運動方程式

落石の運動の基本形態は滑り運動と回転運動(これらを総称して線運動と呼ぶ),跳躍運動および衝突運動とに分類される.これらの運動方程式は(1)~(8)式などで表される.⁵⁾

(1)滑り運動 斜面上を落石が滑り落ちる場合,落石は摩擦以外にも各種の抵抗を受ける.これら全ての抵抗は,落下速度に比例すると仮定した方が合理的である.この抵抗係数を Ck とし,斜面の傾斜角を θ ,初速度を V_0 とすると,斜面に沿う t 秒後の滑り速度 V , t 秒間に滑る斜面方向の距離 S は次のように与えられる.

$$V = \frac{\alpha}{Ck} + (V_0 - \frac{\alpha}{Ck}) \exp(-Ck \cdot t) \dots\dots\dots (1) \quad , \quad S = \frac{\alpha}{Ck} t + \frac{1}{Ck} (V_0 - \frac{\alpha}{Ck}) \{1 - \exp(-Ck \cdot t)\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに, α :斜面方向の加速度($=g(\sin\theta - \mu \cos\theta)$), μ :斜面の等価摩擦係数であり,滑り始める条件は, $\tan\theta > \mu$ で表される.

(2)回転運動 落石を半径 r の球と仮定すると,落石が滑ることなく回転しながら斜面に沿って落下する場合の運動方程式は滑り運動の場合と同じく(1),(2)式で表される.ただし,式中の加速度 α には(3)式を用いる.なお,滑らずに回転する条件は(4)式で示される.

$$\alpha = \frac{r^2}{\kappa^2 + r^2} g \cdot \sin\theta \dots\dots\dots (3) \quad , \quad \frac{r^2}{\kappa^2 + r^2} \tan\theta \leq \mu \dots\dots\dots (4)$$

ここに, κ :球の回転半径

(3)跳躍運動 斜面上の l 点(x_0, y_0)から初速度 V_0 ,水平となす角 β で飛出す落石の t 秒後の水平方向と鉛直方向の速度成分(V_x, V_y)および座標(x, y)は,空気抵抗係数 α_k を考慮した(5),(6)式で求めることができる.

$$V_x = V_0 \cos\beta \cdot \exp(-\alpha_k \cdot t) \quad , \quad V_y = \frac{g}{\alpha_k} + (V_0 \sin\beta - \frac{g}{\alpha_k}) \exp(-\alpha_k \cdot t) \dots\dots\dots (5)$$

$$x = x_0 + \frac{V_0}{\alpha_k} \cos\beta \cdot \{1 - \exp(-\alpha_k \cdot t)\} \quad , \quad y = y_0 + \frac{g \cdot t}{\alpha_k} + \frac{1}{\alpha_k} (V_0 \sin\beta - \frac{g}{\alpha_k}) \{1 - \exp(-\alpha_k \cdot t)\} \dots\dots\dots (6)$$

跳躍開始から t 秒後の速度の斜面垂直方向成分 V_v は(7)式で示され,最大跳躍量は $V_v=0$ のときに生じる.

$$V_v = V_0 \sin\beta - g \cdot t \cdot \cos\theta \dots\dots\dots (7)$$

(4)衝突運動 斜面への衝突前の入射角を β_1 ,入射速度を V_1 ,衝突後の反射角を β_2 ,反射速度を V_2 とすれば,衝突後の速度の斜面垂直方向成分 V_{v2} および斜面方向成分 V_{H2} は次のように与えられる.

$$V_{v2} = e \cdot V_1 \sin\beta_1 \quad , \quad V_{H2} = \rho \cdot V_1 \cos\beta_1 \dots\dots\dots (8)$$

ここに, e :反発係数, ρ :速度の斜面方向成分の減衰係数

(5)線運動から跳躍運動への移行 落石が線運動をしている場合,線速度 V が限界速度 V_{cr} を超えると跳躍運動へ移行する.この時の限界速度 V_{cr} は実験データから決定する必要がある.

(B) シミュレーションの方法

数値解析によって落石の運動軌跡,落下速度を計算するためには反発係数,減衰係数,摩擦係数,抵抗係数等の運動特性値を決定する必要があるが,これらの値は斜面の凹凸や落石の形状等さまざまな影響を受け大きくばらつくため,確定量とするよりも確率変量とみなすのが合理的である。⁵⁾

そこで,反発係数や減衰係数等の運動特性値が正規分布するものと仮定し,過去の落石実験データから各々の運動特性値の確率密度関数を求め,その95%の信頼区間において正規乱数を発生させ運動特性値を決定し,図-3に示す方法でシミュレーションを行なった。

シミュレーションに用いた地形横断面図は,図-1に示すA-B-C測線に対するものであり,これは落石の平面的落下経路を考慮して決定した。落石の発生源は,転石の存在する最上部(洞門上85.6m)とした。また,シミュレーションに用いた確率密度関数のパラメータは表-1に通りにある。岩盤斜面の値は菌原A斜面,崖錐斜面の値は広島での落石実験結果からそれぞれ得られたものである。⁵⁾なお,抵抗係数は各々の実験斜面に対してシミュレーションを行ない,試行錯誤によって決定したものである。

(C) シミュレーションの結果

シミュレーションは信頼性を考慮して250回行なった。そのうちの25回分の結果を図-4に示す。この図より,落石の殆どが5m以下の跳躍量を示し,斜面途中で大きく跳躍するケースは1割程度と予測される。洞門のサンドクッション材到達時点の落下速度を度数分布で描くと図-5のようになる。これを正規分布とみなすと,平均速度は21.7m/s,標準偏差は6.66 m/s,信頼度95%の速度は34.75m/sとなる。なお,250回のシミュレーションで出現した最大速度は39.0m/sであった。

3. 3 安全性の評価

洞門上に到達する落石の速度を35m(換算自由落下高62.5m,速度残存係数0.85)とし,落石対策便覧式で洞門に作用する衝撃力を算定すると,わずか0.7tの落石で当該洞門の設計荷重に等しくなる。斜面上には落石の恐れのある1~10tの規模の転石が多数存在しており,現状では極めて危険と判断される。

4. 対策工法の選定

重量2t以上の規模の転石対策としては,当初,転石の除去および法枠による斜面への固定が考えられていたが,転石が極めて不安定な状態にあること,斜面が急勾配であること,転石の分布している位置が洞門から70mと高いこと等から作業時の安全確保が困難である。そこで,緩衝効果が非常に高く,しかも超軽量である発砲スチロール(以後EPSと呼ぶ)を既設洞門のサンドクッション材上に最大2.5mの厚さで敷くとともに(図-6),洞門近くの斜面上にバリヤーを2段に設置するものとした。バリヤーの緩衝材には従来砂が用いられてきたが,ここでは,エネルギー吸収を大きくするためEPSを2mの厚さで敷くことにした。

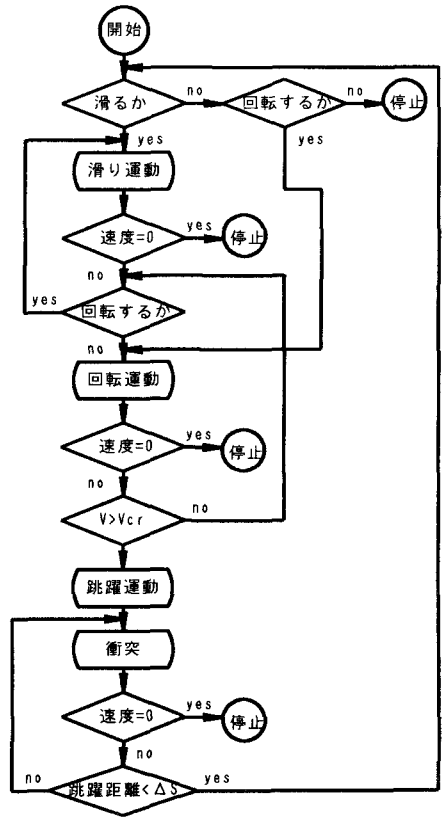


図-3 シミュレーションの方法

表-1 シミュレーションに用いた斜面定数

	岩盤斜面部		崖錐斜面部	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
反発係数	0.55	0.28	0.58	0.26
摩擦係数	0.69	0.18	0.48	0.06
減衰係数	0.58	0.25	0.77	0.17
抵抗係数	0.10	—	0.40	—

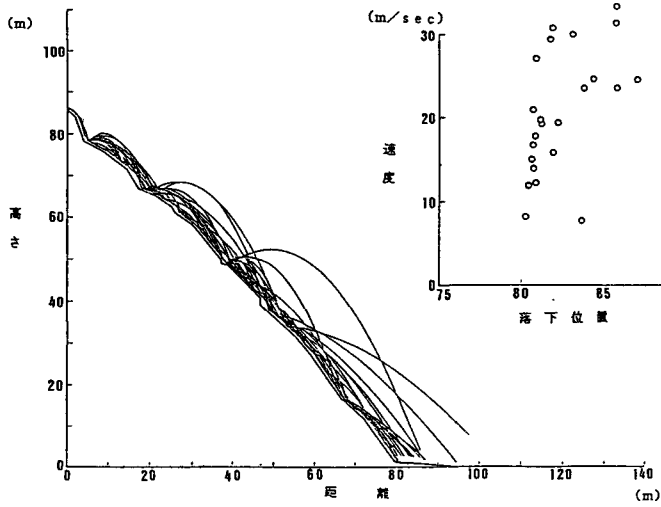


図-4 シミュレーションによる落石の軌跡と速度

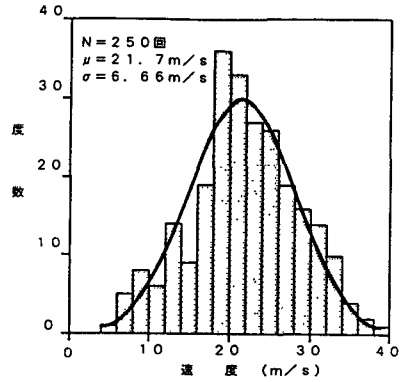


図-5 落下地点の落石の速度

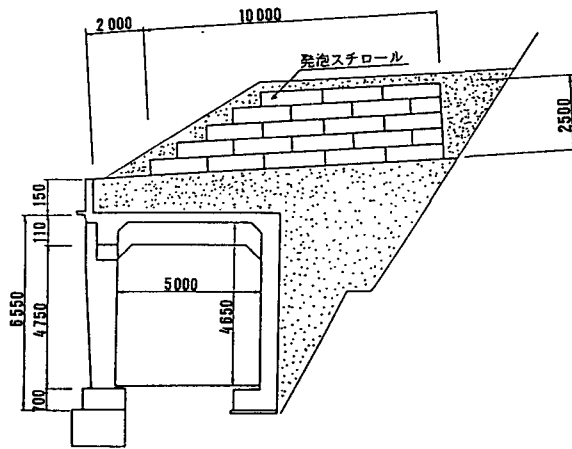


図-6 洞門断面図

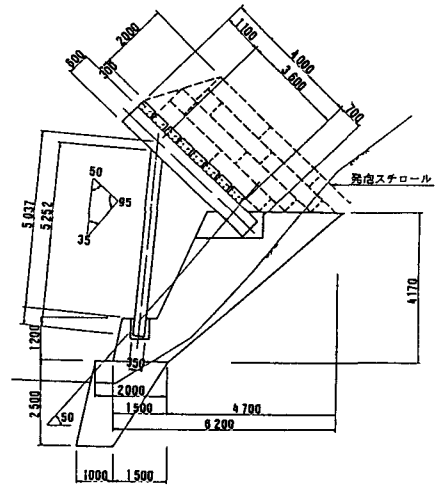


図-7 バリヤー断面図

5. 落石防護構造物の吸収エネルギー

5. 1 バリヤーの吸収エネルギー

バリヤーは図-7に示すように、支柱、受桁、横梁部材によって構成されている。バリヤーによるエネルギー吸収には、各部材の変形や基礎の変位が考えられるが、横梁の変形によるもののみを考慮することにした。横梁はT形断面のRC

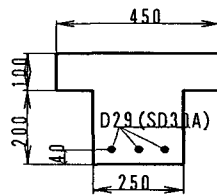


図-8 梁の断面

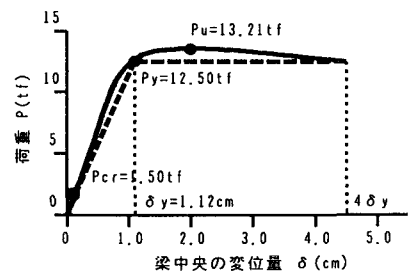


図-9 梁の荷重～変位量関係

構造(図-8)であり、45cm間隔で水平に8本並置され、受桁によって4.0m間隔に単純支持されている。

落石が梁中央に集中荷重として作用するものと仮定すると、梁中央の降伏時たわみ δy は1.12cmとなる。横

梁の荷重~たわみ関係を図-9の破線のように仮定し、限界変形量を $4\delta y$ とすると、横梁1本当たりの吸収エネルギー E_a は $0.49tf\cdot m$ となる。また、各種の落石径に対して、バリアー破壊時の吸収エネルギーを計算すると、図-11のようになる。なお、横梁の上のEPSによる衝撃荷重の分散効果は殆どなく、横梁に作用する衝撃荷重は落石の投影面積にほぼ等しくなることが明らかにされている⁶⁾。従って、落石によって破壊する横梁の数は落石の直径によって決定した。

5. 2 EPSによる吸収エネルギー

EPSによる吸収エネルギーの算定には、重錘の落下実験より得られた吉田の式^{6) 7)}を用いる。

EPSに重錘を落下させた場合、衝撃力とEPSへの重錘の貫入量の関係は図-10のようにモデル化することができる。ここに、 C_5 :EPSの5%歪みに相当する貫入量、 $C_{60}+\bar{e}$:60%に相当する貫入量、 $C_{70}+\bar{e}$:70%に相当する貫入量、 C_{max} :落石の貫入量、 $P_5, P_{60}, P_{70}, P_{80}$:EPSの5%, 60%, 70%, 80%歪みに対するそれぞれの衝撃力、 \bar{e} :EPSへの落石の平均貫入量であり、これらは、落石を直径 d_0 の球体、ESPの厚さを h とすれば(9)~(13)式で与えられる。^{6) 7)}

$$P_5 = 7.854(d_0 + 0.577)^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$P_{70} = P_5 + (P_{60} - P_5)(0.65h + \bar{e}) / (0.55h + \bar{e}) \dots\dots\dots (10)$$

$$P_{60} = 28.510d_0^2 \dots\dots\dots (11)$$

$$P_{80} = P_{100} = 56.290d_0^2 \dots\dots\dots (12)$$

$$\bar{e} = d_0 / 6 \dots\dots\dots (13)$$

衝撃力(P_c)が与えられている場合、EPSによる吸収エネルギー(E_{wc})は(14)~(19)式で求めることができる。

$P_c > P_{80}$ の場合

$$E_{wc} = 0.5[(P_{70} + P_5)\{(C_{70} + \bar{e}) - C_5\} + (P_{80} + P_{70}) \cdot \{h - (C_{70} + \bar{e})\}] \dots\dots\dots (14)$$

$P_{70} < P_c \leq P_{80}$ の場合

$$E_{wc} = 0.5[(P_{70} + P_5)\{(C_{70} + \bar{e}) - C_5\} + (P_c + P_{70}) \cdot \{C_{max} - (C_{70} + \bar{e})\}] \dots\dots\dots (15)$$

$$\therefore C_{max} = C_{70} + \bar{e} + \{h - (C_{70} + \bar{e})(P_c - P_{70}) / (P_{80} - P_{70})\} \dots\dots (16)$$

$P_5 < P_c \leq P_{70}$ の場合

$$E_{wc} = 0.5(P_c + P_5)(C_{max} - C_5) \dots\dots\dots (17)$$

$$\therefore C_{max} = C_5 + \{(C_{60} + \bar{e}) - C_5\}(P_c - P_5) / (P_{70} - P_5) \dots\dots\dots (18)$$

$P_c \leq P_5$ の場合

$$E_{wc} = 0 \dots\dots\dots (19)$$

以上の式を用いて、各種の重量の落石に対するEPSの吸収エネルギーを算定すると図-11のようになる。一点鎖線で描いたバリアー上EPSの吸収エネルギーとは、2個所のバリアーの横梁が破壊する際の吸収エネルギーである。破線で示す洞門上EPSの吸収エネルギーとは、洞門に作用する衝撃力が設計衝撃力($P_c = 148.4tf$)に達する際に吸収するエネルギーの値である。また、バリアー上及び洞門上のEPSの吸収エネルギーとバリアーの横梁の吸収エネルギーの和を全吸収エネルギーとして太い実線で示した。

6. 既設ロックシェッドに作用する衝撃力の評価

当該斜面には、 $W = 1t \sim 10t$ の転石が多数分布している。これらの石が洞門上に落下したときの運動エネルギーは、シミュレーションによって得られた95%信頼値速度残存係数 $\alpha = 0.85$ を用いて計算すると、図-11の中に○印で示したようになり、最大 $220tf\cdot m$ に達することが予想される。

これに対して、バリアー上及び洞門上のEPSとバリアーの梁が吸収することのできるエネルギーは、 $W = 3 \sim 10t$ の落石に対しては $200tf\cdot m$ 程度である。また、運動エネルギーが最大となる $W = 10t$ の落石(落差 $H = 30m$)に対する吸収エネルギーは $230tf\cdot m$ である。

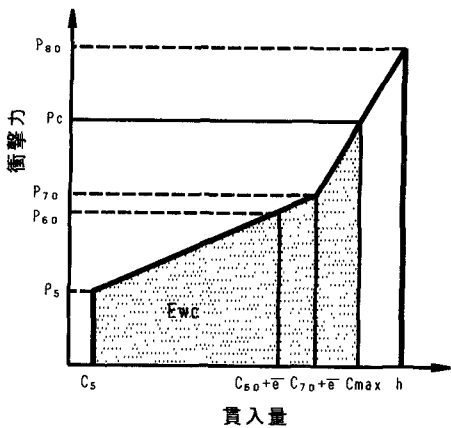


図-10 EPSの衝撃力~貫入量関係

既設洞門の設計対象となっている落石の運動エネルギーが $20\text{tf}\cdot\text{m}$ (落石重量 2t ,自由落下高 20m ,図-11,●印)であることを考えると,EPSを用いた対策によって,約10倍の補強効果が得られたことになる。

以上の検討から,斜面上に存在する転石が落下したとしても,これによって発生する衝撃力は,洞門の設計衝撃力を超えることはないと判断される。

7. あとがき

落石による衝撃力を評価する上で,落石の速度及び落下地点を予測することは極めて重要である。しかしながら,その予測手法は確立されておらず,これまで,主として現場技術者の経験的判断によってなされてきた。

当該現場においては,これまでに行なわれている落石実験データを用いて,モンテカルロシミュレーション法による予測を試みた。そして,シミュレーションより得られた落石の速度を用いて,既設洞門に作用する衝撃力を算定するとともに,衝撃緩衝材としてEPSを用いた補強工法の検討を行なった。

EPSは,サンドクッション材に比べて緩衝効果が非常に大きく,しかもその効果にばらつきが少ないことが近年の研究で明らかになっている。^{6) 7)}また,超軽量($15\text{kg}/\text{m}^3$)であるため,ほとんど死荷重を増加させずに既設落石構造物の補強が可能となる。

当該洞門は, $20\text{tf}\cdot\text{m}$ の落石運動エネルギーに対して設計されたものであるが,バリエーと洞門との上にそれぞれ厚さ 2m , 2.5m のEPSを敷設することにより,約 $200\text{tf}\cdot\text{m}$ の落石エネルギーに耐えることになり,落石に対する安全性を約10倍に高めることができた。

今後,既設ロックシェットの補強対策を行なう際に,本報文がなんらかの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 本山土木事務所,長崎工業(株):県道高知伊予三島線道路災害防除工事設計及び地質調査委託業務報告書,平成2年3月
- 2) 本山土木事務所,(有)サン土木コンサルタント:県道高知伊予三島線交通安全施設整備洞門工設計委託業務報告書,昭和60年度
- 3) 日本道路協会:落石対策便覧,昭和58年7月
- 4) 吉田博,榎谷浩,右城猛,柴田健次:落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ,土木学会論文集,1990年,9月
- 5) 吉田博,右城猛,榎谷浩,藤井智弘:斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価,構造工学論文集,投稿中
- 6) 日本サミコン(株),太陽工業(株),(株)長野技研:発砲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,平成2年2月
- 7) 吉田博,松葉美晴,法貴貴志郎,久保田努:発砲スチロールの落石に対する衝撃効果に関する実験的研究,土木学会論文集,投稿中

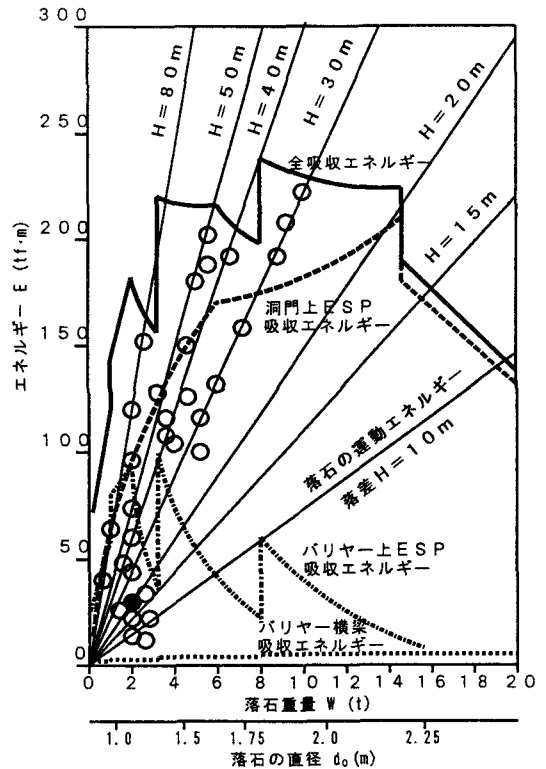


図-11 落石の重量とエネルギーとの関係