

落石防護工の設計上の課題

(株)第一コンサルタンツ 右城 猛, 加賀山肇
 田中工業(株) 田中登志夫
 愛媛大学大学院理工学研究科 矢田部龍一

1. まえがき

わが国の道路においては、落石防護網、ポケット式落石防護網、落石防護柵、落石覆工などの落石防護工が採用されている。

それらの設計手法は落石対策便覧¹⁾に紹介されているが、現場経験だけで決められ、理論的な裏付けがされないままになっているものもある。

本論文では、使用頻度が高いポケット式落石防護網と落石防護柵の設計上の課題を述べる。

2. 落石のエネルギー

2.1 落石のエネルギーと速度の算定式

落石のエネルギーの算定には、図1に示す「そりモデル」²⁾に基づいた手法が一般的に用いられている。落石発生源から落差 H の地点までの傾斜角を θ とすると、その間の摩擦損失エネルギーは次式で表される。

$$E_L = mg \frac{\tan \phi}{\tan \theta} H \quad (1)$$

ϕ は斜面と落石の等価摩擦角である。等価摩擦係数 μ との関係は次式で表される。

$$\mu = \tan \phi \quad (2)$$

落差 H の位置のエネルギーは次式となる。

$$E_w = mgH - E_L = \alpha_E mgH \quad (3)$$

α_E はエネルギー残存係数で式(4)となる。

$$\alpha_E = 1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \quad (4)$$

E_w が落石の運動エネルギー(= $1/2mV^2$)に等しいとおくと、速度 V は式(5)のように表される。

$$V = \sqrt{2\alpha_E gH} \quad (5)$$

2.2 落石実験による等価摩擦係数

(1) 実験の概要

筆者らは平成15年度に国土交通省四国地方整備局四国技術事務所の委託を受け、愛媛県土居町の自然斜面で落石実験を行った^{3),4)5)}。

実験斜面を図2に示す。斜面の高さは約45mである。斜面の上部は傾斜角45度で基岩(砂岩と泥岩の互層)が露出している。下部は傾斜角35度で崖錐が堆積している。

実験では直径0.54mのコンクリート球(0.2t)10個、一辺0.6mのコンクリート立方体(0.52t)10個、採石場から切り出し砂岩塊(0.12~2.06t), 20個を落下させて落下軌跡を観測し、速度を求めた。

(2) 等価摩擦係数

実験の前に、30kg~200kgの砂岩塊11個を斜面の上から落下させて停止位置を調べた。質量30kg程度の小規模な岩塊は岩盤露出部と崖錐堆

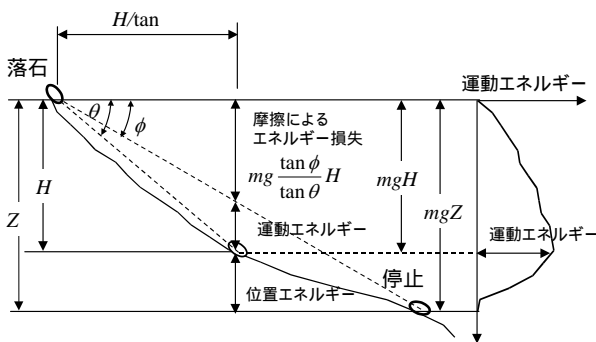


図1 そりモデル

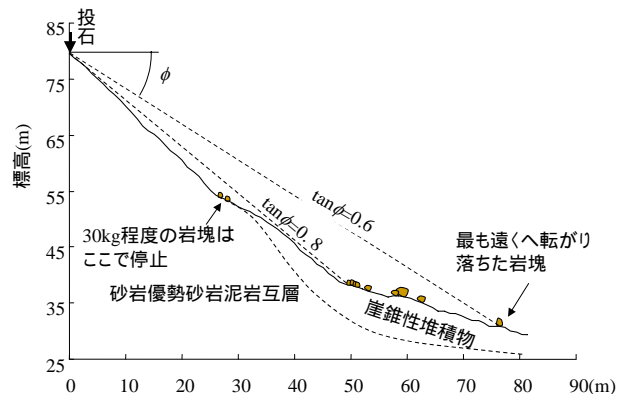


図2 実験斜面と落石の停止位置⁴⁾

積部の境界付近で停止した。100kg以上の岩塊は図2の～の位置で停止した。式(2)で等価摩擦係数を算定すると $\mu = 0.6$ となる。

(3) そりモデルの妥当性

実験から得られた落石の軌跡の一例を図3(左)に示す。そりモデルでは落石の運動形態をすべり運動と仮定しているが、実際は跳躍運動である。落石は飛行と衝突を繰り返しながら斜面を落下する。

そのため落石の速度は、図3(右)に示すように不連続に変化する。飛行中は重力加速度によって加速されるが、斜面へ衝突すると減速する。

落石の軌跡から斜面に衝突した地点の速度を求め、それをプロットすると図4になる。図には式(5)で計算した速度曲線も描いている。斜面の等価摩擦係数は $\mu = 0.6$ であるので、そりモデルから推定される速度は着色している範囲になる。

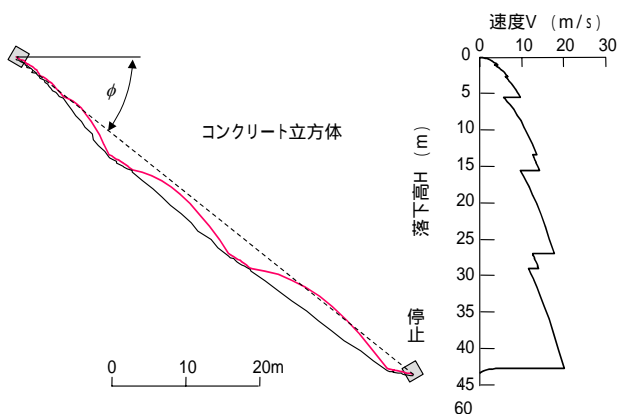


図3 立方体の落下軌跡と速度⁴⁾

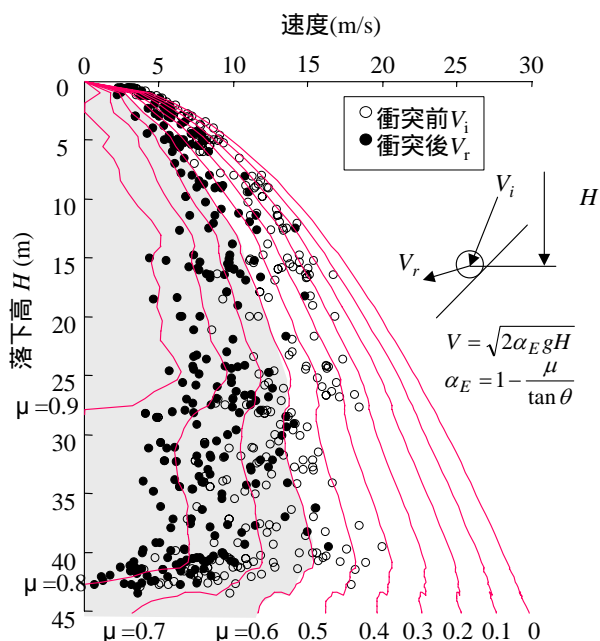


図4 落石速度と等価摩擦係数⁴⁾

$\mu = 0.6$ とした計算速度は、落下高 $H = 30\text{m}$ においては実験データを概ね包絡する。しかしながら $H < 30\text{m}$ では速度を過小に評価し過ぎる。

そりモデルを用いるには、 $H < 5\text{m}$ では $\mu = 0$ 、 $5 < H < 15\text{m}$ では $\mu = 0.2$ 、 $15 < H < 30\text{m}$ では $\mu = 0.4$ というように落下高さに応じて実際の等価摩擦係数より小さい見掛けの等価摩擦係数を用いないと、落石の速度を適切に評価することはできない。

2.3 落石現場から推定された等価摩擦係数

四国は地形が急峻で地質が脆弱なため落石危険箇所が多い。近年では、図5に示す箇所で大規模な落石事故が発生している⁶⁾。

落石現場を調査すると、飛行開始点と着地点に窪みが残されている。また、その間の立木に擦痕が残っていることもある。落石の飛行軌跡における任意の3点の座標値を推定できれば、落石速度を逆算で求めることができる^{7),8)}。

落下高 H の地点における速度 V が既知になれば、式(6)で μ を推定できる。防護柵に落石の衝突による変状があり、変状の程度から落石のエネルギー E を推定できるなら式(7)で μ を逆算できる。

$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right) \tan \theta \quad (6)$$

$$\mu = \left(1 - \frac{E}{mgH}\right) \tan \theta \quad (7)$$

落石現場から逆算によって求めた等価摩擦係数を図6に示す。落石対策便覧では、設計に用いる等価摩擦係数を0.05から0.35の範囲としているが、逆算された等価摩擦係数は0.6~1.2となった。

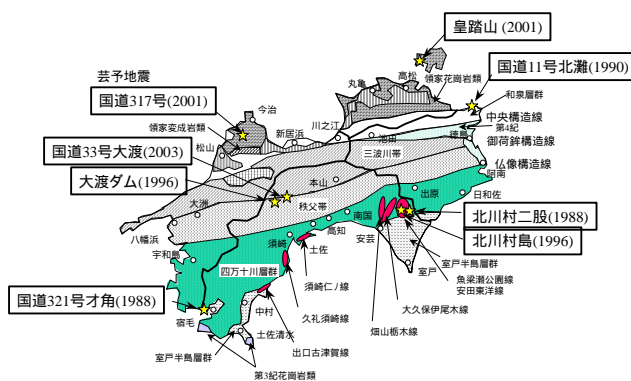


図5 四国の主な落石災害⁶⁾

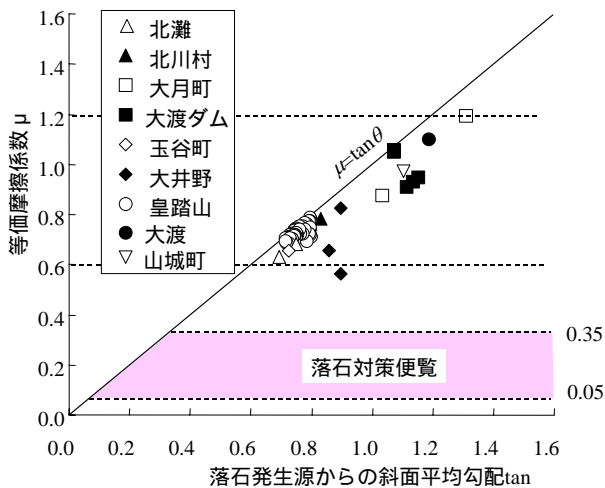


図 6 逆算された等価摩擦係数

2.4 今後の課題

落石対策便覧では、設計に用いる等価摩擦係数を 0.05～0.35 の範囲としているが、筆者らの落石実験や現地調査の結果によれば 0.6～1.2 の範囲にあることが判明した。

落石防護工の設計に 0.05～0.35 のような等価摩擦係数を用いると、極めて過大で不経済な設計になる恐れがある。

例えば、ポケット式落石防護網の設計では $\mu = 0.05$ が一般的に採用されている。斜面の傾斜角を $\theta = 50^\circ$ とすると、エネルギー残存係数は $E = 0.96$ となる。しかし実際の等価摩擦係数が $\mu = 0.8$ であれば $E = 0.33$ となるので、落石エネルギーを 3 倍も過大に評価することになる。

しかしながら、落石防護工を斜面の上部や中腹部に設置する場合には、落石エネルギーを過小に評価する危険性がある。落石の運動はすべり運動ではなく、跳躍運動になるため、そりモデルでは落石の速度やエネルギーを適切に算定することができないためである。

落石のエネルギーの予測にそりモデルを適用するのが妥当なのか、妥当とすればどのような等価摩擦係数を採用すべきかなどについて今後研究する必要がある。

3. ポケット式落石防護網の設計

3.1 吸収エネルギーの算定手法

ポケット式落石防護網に落石が衝突すると、図 7 のように金網およびワイヤーロープが変形し、落石のエネルギーを吸収する。

落石対策便覧¹⁾では、ポケット式落石防護網の

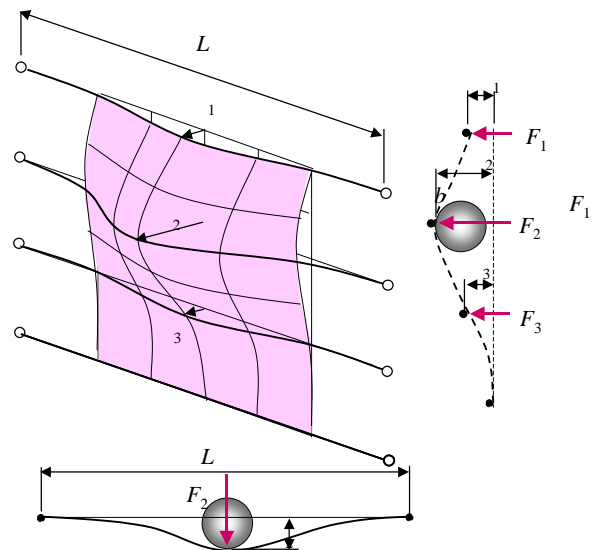


図 7 ポケット式落石防護網の変形

可能吸収エネルギー E_T を式(6)で算定するものとしている。

$$E_T = E_N + E_R + E_L \quad (8)$$

ここに、 E_N は金網の吸収エネルギー、 E_R はワイヤーロープの吸収エネルギー、 E_L は質量 m_1 の落石が質量 m_2 の落石防護網と非弾性衝突 ($e=0$) するときの散逸エネルギーであり次式で表す。

$$E_L = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_W \quad (9)$$

ここに、 E_W は落石のエネルギーである。

3.2 重錘衝突実験

図 8 は新しいポケット式落石防護網であるロングスパンの開発用の実験装置である。車輪を付けた 0.5t の重錘を、落差 20m のレール上を走らせてネットに衝突させた。重錘を転がり運動とすれば $e=2/3$ なので衝突エネルギーは 67kJ となる。

写真 1 は衝突時と衝突後のネットの変形状況である。ネットの変形で重錘エネルギーを吸収した。

可能吸収エネルギーを落石対策便覧で算定すると $E_T = 83\text{kJ}$ であった。内訳は $E_N = 22\text{kJ}$ 、 $E_R = 9\text{kJ}$ 、 $E_L = 49\text{kJ}$ である。

3.3 吸収エネルギーの算定手法の妥当性

落石の速度とエネルギーの変化を模式的に表すと図 9 となる。落石の運動エネルギーは金網とロープの歪みエネルギーに変換される。運動エネルギーの全てが歪みエネルギーに置き換わった時点で落石は一旦静止する。その後、金網とロー

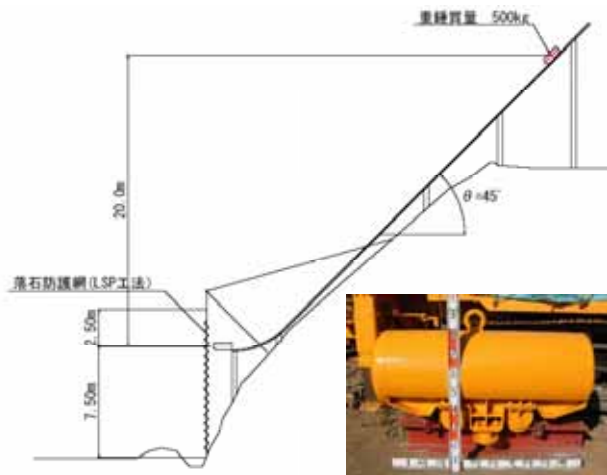


図 8 ロングスパンの実験装置

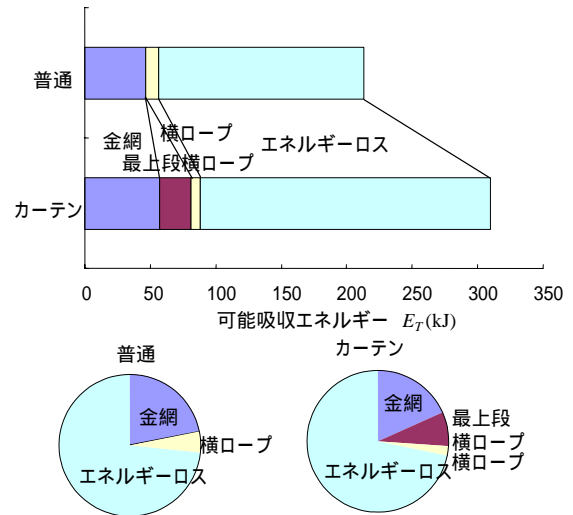
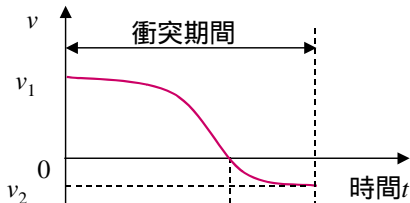


図 10 ポケット式落石防護網の吸収エネルギー



写真 1 重錘衝突時と衝突後の金網の変形

速度の変化



エネルギーの変化

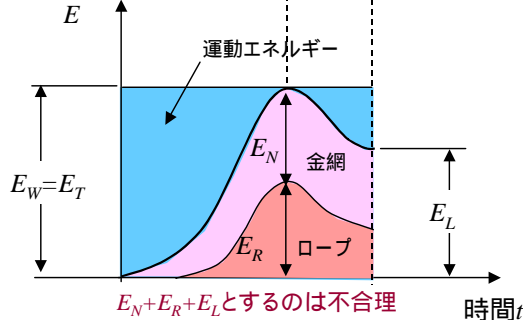


図 9 ポケット式落石防護網の重錘衝突実験

ブの歪みが回復され、落石の運動エネルギーに変わり落石は跳ね返る

金網とロープの歪みは完全には回復しない。写真 1(右)に見られるように変形が残留する。

図 9 に示すように $E_N + E_R$ は衝突期間中に金網とロープの歪みに転化されるエネルギーである。 E_L は衝突後に残留するエネルギーである。 $E_N + E_R$ と E_L を足し合わせるの是不合理である。式(8)は式(10)に改める必要がある。

$$E_T = E_N + E_R \quad (10)$$

式(10)で実験に用いたロングスパンの可能吸収エネルギーを算定すると $E_T = 31 \text{kJ}$ となる。推定された重錘の衝突エネルギーの 1/2 よりも小さい。落石対策便覧式では、金網あるいはワイヤーロープの吸収エネルギーを過小に評価することが考えられる。

3.4 今後の課題

幅 30m、高さ 18m のポケット式落石防護網の可能吸収エネルギーを落石対策便覧の手法で算定した。その結果を図 10 に示す。支間 3m の通常のポケット式落石防護網も、スパン 30m のカーテンネットにおいても全吸収エネルギーの約 3/4 を E_L が占めている。理論上の可能吸収エネルギーは、落石対策便覧式で算定していた値の 1/4 となる。

性能を 4 倍も過大評価していたにも関わらずこれまで問題になっていない。これは、下記の 2 つの理由により、偶然バランスのとれた設計になっていた可能性がある。

金網とロープの可能吸収エネルギーが、実際には計算値よりも大きい。

落石の運動エネルギーに対しても数倍過大に評価している。

落石対策便覧の式では、ポケット式落石防護網のエネルギー吸収性能を適切に評価できないことが明らかになった。合理的で精度の高い算定式の開発が必要である。

4. 落石防護柵の設計

4.1 重錘衝突実験の方法

筆者らは、平成13年度と14年度に四国地方整備局四国技術事務所から委託を受けて落石防護柵に重錘を衝突させる実験を行った^{9),10)}。

高さ1.0m、厚さ0.6m、延長4.5mのコンクリート基礎に高さ1.5m、延長3mの防護柵を設置し、写真2に示すような架台に0.47tの重錘を吊り下げ、それを防護柵に衝突させた。防護柵にはストーンガードと呼ばれる市販のワイヤーロープ金網式落石防護柵を使用した。

4.2 実験結果

実験に伴う防護柵の変状を写真3に示す。重錘の落下高さ $z=1$ mでワイヤーロープ固定部の端末支柱のウェブプレートが局部変形を生じ、ナットが緩んだ。 $z=2.5$ mにするとウェブプレートに亀裂が入り、それ以降の繰り返し载荷は不可能になった。このため鋼板で補強した上で実験を続けた。

$z=3$ mで衝突させると、金網の鉄線が部分的に破断して小さな穴が開いた。 $z=4$ mでロープを構成するワイヤーが重錘衝突位置で一部破断した。 $z=5$ mにするとロープが完全に破断して重錘が金網を突き破った。

4.3 落石防護柵の吸収エネルギー

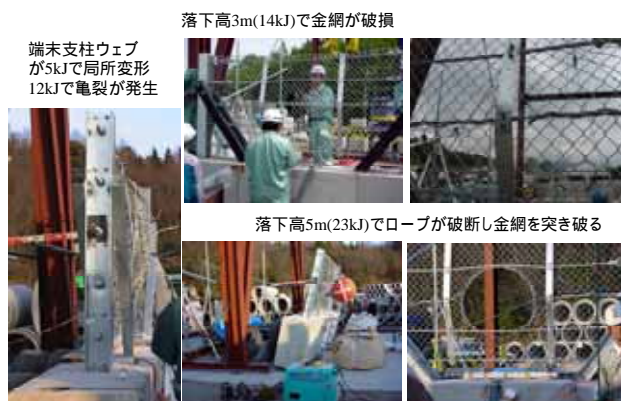
実験に用いた落石防護柵の吸収エネルギーを落石対策便覧に準拠して算定すると31.7kJとなる。内訳は金網が25kJ、ワイヤーロープが6.7kJである。ところが、実際に吸収できたエネルギーは23kJと少ない。両者が異なるのは下記の原因によると推測される。

(1) 荷重が1本のワイヤーロープに集中

落石対策便覧では、上下の2本のワイヤーロープで均等に落石荷重を受け持つものと仮定しているが、実際には1本のワイヤーロープに荷重が集中する。

図11は重錘の衝突によって生じたワイヤーロープ取り付け部の引出棒の歪みである。歪みは

写真2 落石防護柵の重錘衝突実験⁹⁾



落下高3m(14kJ)で金網が破損

端末支柱ウェブが5kJで局所変形12kJで亀裂が発生

落下高5m(23kJ)でロープが破断し金網を突き破る

写真3 落石防護柵の変状¹⁰⁾

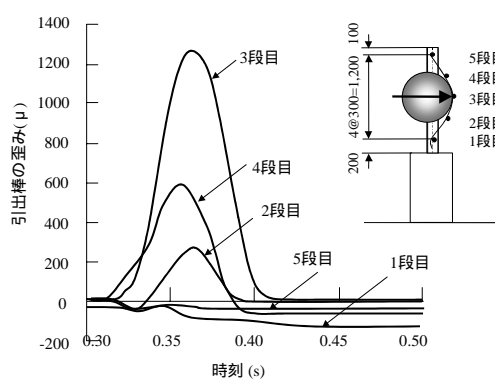


図11 引出棒のひずみ¹⁰⁾

重錘が衝突した3段目のワイヤーロープに集中している。

(2) ロープの歪みは長さ方向に一様でない

落石対策便覧では、ワイヤーロープの歪みは全長にわたって一様と仮定しているが、間隔保持材、

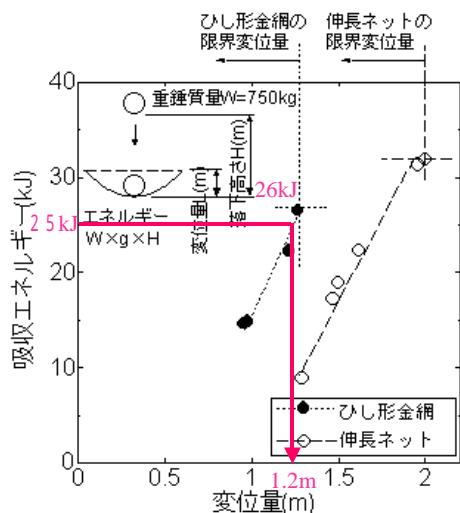


図 12 金網の変位量と吸収エネルギー¹¹⁾

金網，中間支柱で拘束されているため，歪みは延長方向に一定とはならず，落石の衝突点付近に集中する。

(3) ワイヤロープが金網の変形を拘束

鉄道総合技術研究所は，金網の変形特性について調べている^{11),12)}。それによると，スパン 3m で両端を拘束した菱形金網が 25kJ のエネルギーを吸収するには，図 12 に示すように金網が約 1.2m たわまなければならない。

落石防護柵の場合は，ワイヤロープが上下方向に 30cm 間隔に張られて，金網の変形を拘束している。このため，金網は 30～40cm 程度しか孕み出せないで，金網が吸収できるエネルギーは想定している値の 1/2 以下と思われる。

4.4 今後の課題

ストーンガードの名称で古くから使用されているワイヤロープ金網式落石防護柵は，全国に多くの実績がある。性能が優れていると思われるが，実験によっていろいろな問題点が明らかになった。また，落石対策便覧の式では，落石防護柵のエネルギー吸収性能を適切に評価できないことが明らかになった。

今後は，端末支柱へのワイヤロープの取り付け方などの改善を行う必要がある。また，可能吸収エネルギーを合理的かつ高い精度で算定できる実用的な式の開発が必要である。

5. まとめ

(1) 設計の実務では，落石エネルギーの算定にそ

りモデルが用いられているが，その妥当性と適用する等価摩擦係数について再検討する必要がある。

- (2) ポケット式落石防護柵の吸収エネルギーの算定式は，理論的に問題がある。
- (3) 落石対策便覧式で落石防護柵の可能吸収エネルギーを算定すると過大に評価する。
- (4) 落石防護柵では，金網の吸収エネルギーを一律 25kJ としているが，吸収エネルギーは金網の拘束条件で異なる。
- (5) ストンガードは，端末支柱へのワイヤロープの取り付け方などの改善が必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧,2000.
- 2) 小橋澄治，佐々恭二：地すべり・斜面災害を防ぐために，山海堂，1990.
- 3) 国土交通省四国地方整備局四国技術事務所，(株)第一コンサルタンツ：平成14年度 落石防護柵基礎の設計手法検討業務委託，2003.
- 4) 右城猛，楠本雅博，篠原昌二，木下賢司：落石の運動機構に関する実験的研究 土木学会論文集F Vol.62 NO.2, 377-386, 2006.6
- 5) 右城猛，楠本雅博，篠原昌二：落石の速度に関する現場実験，第26回日本道路会議，日本道路協会，2005.
- 6) 右城猛，玉井佐一，明坂宣行，山岡幸弘，八木則男：高知県における落石災害と落石の運動特性，土木学会論文集No.581/ -37,pp39-48，1997年12月
- 7) 右城猛：落石の速度に関する考察，第9回西日本技術士会研究業績発表会，日本技術士会，2003.年10月
- 8) 右城猛：斜面上を落下する落石の速度に関する考察，防災土木Vol.10，北陸PC防雪技術協会，2003.
- 9) 国土交通省四国地方整備局四国技術事務所，(株)第一コンサルタンツ：平成15年度落石防護対策検討業務委託，2004.
- 10) 右城猛，篠原昌二，松山哲也：落石防護柵の重錘衝突実験，第26回日本道路会議，日本道路協会，2005年10月
- 11) 佐溝 昌彦：小規模落石を対象とした新型落石防護工とその耐荷力，第139回鉄道総研月例発表会，2001.
- 12) 村石尚，杉山友康，佐溝昌彦，安藤和幸：静的荷重下における落石防護ネットの変形特性，土木学会論文集 NO.693 / VI-53，95-103，2001.12