

## (18) 落石覆工の合理的設計への一提案

元・金沢大学  
(株) 第一コンサルタンツ  
日本工営(株)

○吉田 博  
右城 猛  
柴田 健次

### 1. まえがき

現在、落石覆工(以後、ロックシェッドという)は落石対策便覧<sup>2)</sup>に基づいて設計されているのが一般である。落石対策便覧では、ロックシェッドの設計は許容応力度設計法を適用しており、許容応力度については、基本的には道路橋の場合に準じるものとしている。

しかし、ロックシェッドの設計を支配する落石荷重は、道路橋における荷重に比較してその変動は極めて大きく、また、設計用の断面力を支配する落石の落下位置の予測も困難である。

本報告では、ロックシェッドの設計には限界状態設計法の適用が最も合理的であるとの考えから、その適用に際しての問題点を検討し、現段階で可能な設計手法の一提案を行おうとするものである。

### 2. ロックシェッドの設計

#### 2. 1 荷重の種類とそれらの特性

シェッド構造物の設計荷重としては、死荷重(構造物の自重およびクッション材重量)、土圧、堆積土、崩土、落石、積雪、なだれ、地震、自動車衝突、施工時の荷重などが考えられる。これらの荷重のうち、ロックシェッドを設計する上で重要な荷重としては、死荷重および落石荷重である。

死荷重は落石荷重に比較して、その変動は少ないと考えられるが、落石荷重はその大きさおよび作用位置とも不確定要素が多い。すなわち、落石の発生自身、不規則性の強いものであり、また、斜面上の落下経路および落下速度も多くの因子に依存している。

#### 2. 2 合理的設計法

このように、落石の発生および落下経路、速度は不規則性の強いものであり、それゆえ落石の衝撃力は本来確率変量としてとらえるべきものである。したがって、ロックシェッドは使用状態および限界状態に対する安全性が確率的に保証されるような設計が好ましい。これより、設計思想としては、現行の許容応力度設計法より、限界状態設計法の方が合理的である。

#### 2. 3 ロックシェッドの限界状態

(A) 使用限界状態: ロックシェッドの使用限界状態には2通りの状態が考えられる。

(1) ひびわれの使用限界状態で、ひびわれにより美観を害するか、耐久性 または水密性を損ねる状態・

(2) 損傷の使用限界状態で、ロックシェッドに各種の原因による損傷が生じ、そのまま使用するのが不相当となる状態。

これに対する荷重としては、コンクリート示方書<sup>2)</sup>によれば、使用限界状態の検討に用いる荷重の特性値は「構造物の耐用期間中に、比較的しばしば生ずる大きさのもの」と定義されている。

ロックシェッドの場合には、生起確率が大きい落石(比較的頻繁に発生する落石)に対するものと考えることができる。

(B) 終極限界状態: 部材の断面が破壊に到る場合に相当する。破壊に対する考え方には各種の状態が考えられるが、ここでは、部材の断面の破壊により、コンクリートの破片が落下し、通行車両などに被害が生じない程度の破壊と考えれば十分であろう。

これに対する荷重としては、コンクリート示方書<sup>2)</sup>によれば、終極限界状態の検討に用いる荷重の特性値は「荷重のばらつきを考慮した上で、構造物の施工中および耐用期間中に生ずる最大または最小荷重の期待

値」と定義されている。

ロックシェッドの場合には、耐用期間中に考えられる最大の落石（現時点では落下することはないが、将来、落下の可能性がある岩塊）荷重、または、堆積土荷重と落石荷重または地震荷重の組合せ、およびそれら全ての組合せなどが考えられる。

しかし、本研究では、前述の通り死荷重と落石荷重のみを検討の対象としているので、他の組み合わせについては言及しないことにする。

## 2. 4 荷重の組合せと安全係数

現行設計法では、限界状態設計法における荷重係数および荷重の組合せ係数をすべて1.0 にとっており、許容応力度の割増のみで同時に作用する荷重の不確実性をカバーしている。

ロックシェッドの限界状態設計における材料係数、部材係数、構造物解析係数および構造物係数は、コンクリート示方書<sup>2)</sup> に示される標準的な安全係数を採用してよいと考えられる。

荷重係数は荷重の変動、荷重の算出方法の不確実性、荷重特性が限界状態に及ぼす影響などを考慮して決定するのが一般的であるが、前述の通り落石荷重は落石の発生、落下経路および速度とも極めて不規則性が強く、さらに、荷重の算定方法の不確実性などから、このような一般的手法の適用は困難である。

限界状態確率に基づく荷重の組合せ係数および荷重係数の決定法として、現行の設計に整合させながら、均一な信頼性を確保するような荷重係数の組合せを算定するキャリブレーション法なども考えられる。

## 2. 5 ロックシェッドの設計

現段階でロックシェッドに、これまで検討してきたの限界状態設計法を適用するための手順を以下に示す。

### (A) 調査

斜面に存在する岩塊のうち、将来、落下が予想される岩塊を含めて、落下する可能性の大きいものについて推定重量、形状、位置などとともに、落下の危険度をランク別に調査する。たとえば、危険度のランクとして、

ランク A：転石が地上へ2/3以上露出しているもの。岩塊の割れ目が開口し、この岩塊の重心の作用線が底面幅の1/3以内または底面傾斜角が30°より大きく、転落や滑落の危険が大きいもの、

ランク B：転石が地上へ2/3～1/3程度露出しているもの、岩塊の割れ目が開口し、この岩塊の重心の作用線が底面幅の1/3以上または底面傾斜角が30°より小さく、他の岩塊の衝突などの2次的外力が作用しない限り落石に発達する可能性がないもの、

ランク C：転石が表層土に2/3以上埋没しているもの、岩塊の割れ目が密着し、一体となっており、岩塊の転落や滑落の可能性はないが、表層崩壊や大規模岩盤崩壊などにより落石に発達する可能性のあるもの、などが考えられる。

### (B) シミュレーション

上記のランク A の岩塊のように、比較的頻繁に落下が予想される岩塊およびランク B および C のように、将来落下が考えられるがすぐには落下するとは考えられない大きな岩塊について、それぞれ、落下のシミュレーションを行い、ロックシェッドに到達するときの速度および位置の分布を求める。落石の速度より求める衝撃力の推定式には確率変数と考えられる係数が含まれており、これを考慮した荷重係数を設定する必要がある。

### (C) 終極限界状態の検討

荷重の生起確率に応じて許容しうる損傷限度を設定する。たとえば、生起確率の比較的大きい荷重に対しては、ほとんど補修を必要としない軽微な損傷程度のわずかなひびわれまでを、生起確率の極めて小さい荷重に対しては、崩壊（人命の損失の可能性のある。）は避けるが、ひびわれが顕著で剥落が発生するような再使用不能の損傷は許容するなどの検討が必要である。

### (D) 構造上の検討

せん断によるぜい性的な破壊をさけるため、せん断に対すに安全度を曲げに対する安全度より大きくとる。また、急激な破壊を防ぐために、構造上の塑性ヒンジが形成される部分には十分なじん性をもたせるなどの配慮が必要である。

さらに、構造物が塑性変形性能を発揮し、損傷が想定した損傷以内におさまるように、たとえば、シアスパン比を大きくとる、軸方向鉄筋比を小さくする、軸方向圧縮応力比を小さくする、スターラップ比、帯鉄筋比を大きくする、などの配慮は当然必要であろう。

### 3. 限界状態設計のための設計荷重の検討例

#### 3.1 斜面調査

落石の危険度の判定法として高速道路調査会<sup>3)</sup> および旧日本国有鉄道<sup>4)</sup> のものがよく知られているが、これらはいづれも、落石の危険度の判定法というよりむしろ、斜面全体の総合的な落石に対する危険度の評価法である。したがって、この評価方法によってロックシェッドの設計用落石を決定することは不可能である。

ここでは、例を用いて設計用の落石の決定方法についての一手法を提案する。

図-1はロックシェッド建設予定路線の斜面調査例の結果の一部を示している。図中の○印は転石・浮石の存在位置を示しており、これらの近傍に付された記号、例えば、5×40Aは、等価直径が40cmの転石または浮石が5個存在し、その危険度がAであることを示している。ここでいう危険度とは、前述の転石または浮石個々の落下に対する危険度である。

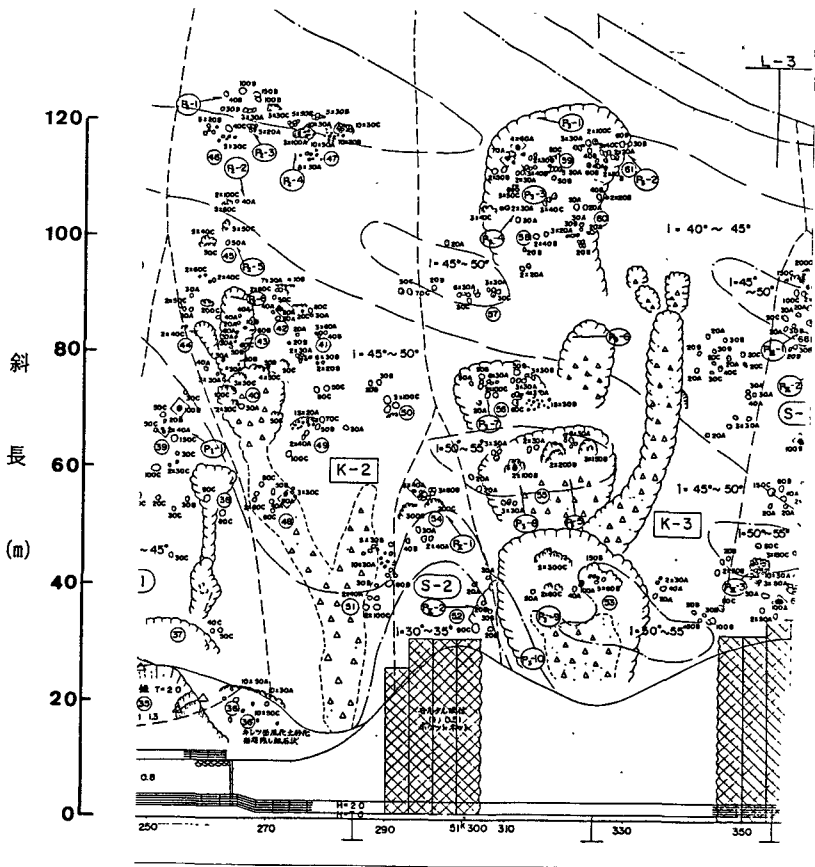


図-1 斜面調査の例

### 3. 2 設計用落石の特定

ここでは、図-1の斜面区画線で仕切られた斜面K-2およびK-3について検討する。これらの斜面上に点在する落石を、斜面に沿った長さ（以後、斜長という）の20m間隔に区切り、その範囲に存在する転石および浮石を大きさおよびランクごとに集計し、その度数分布を示したものが図-2および3である。

これらの図より、たとえば、斜面K-2の斜長120~140mでは、直径100cmのものが2個、150cmのものが1個存在するが、いずれもランクBであり、ランクAのものは直径30cmである。同様に、斜長100~120mの区間についても、ランクAは50cmで、100cmのものがランクBおよびCである。

使用限界状態の検討に用いる荷重として、ランクAの岩塊を、終極限界状態に対するものとしてランクBおよびCの岩塊を対象とした場合、斜面K-2では、使用限界に対する岩塊として、斜長120~140mでは直径30cmのものを、斜長100~120mでは50cmのものを対象とすればよく、終極限界に対する岩塊としては、斜長120m~140mの直径150cmのものを対象とすればよい。

同様に斜面K-3においては、使用限界および終極限界に対する岩塊として、斜長100~120mで、それぞれ、60cmおよび100cmのものを対象とすればよいことが理解される。

### 3. 3 使用限界および終極限界に対する設計断面力

斜面K-3における斜長110m（想定シェッド上74m）から、等価直径60cm（重量0.294t）および100cm（重量1.362t）の岩塊をそれぞれ260回落下させるシミュレーションを行った。直径60cmに対するシミュレーションの内、25回分の落下軌跡を図-4に示す。

260回の落下に対し、想定したシェッドのはり上に落下するものは、直径60cmおよび100cmの落石に対し、それぞれ、101回および103回であり、ほとんどがシェッド背面のポケット部に落下することがわかる。

シェッドはり上に落下した場合のサンドクッションとの衝突時の速度から、落石対策便覧式より計算した衝撃力の度数分布を図-5に示す。ここに、落石対策便覧式はあくまで実験式と考え、確定量として取り扱うことにした。

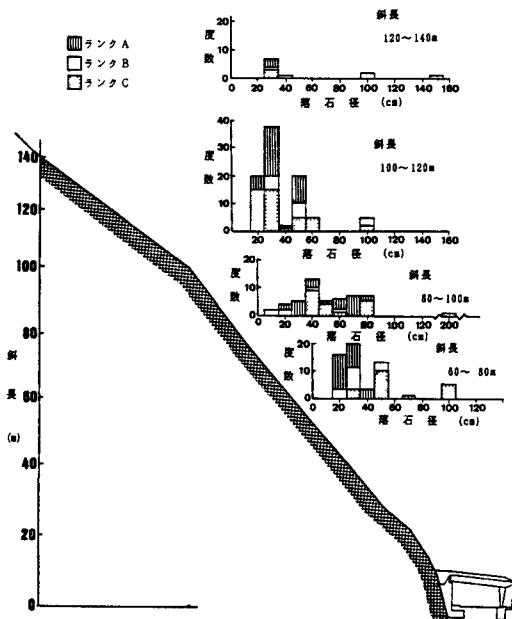


図-2 斜面上の岩塊の度数分布  
(斜面K-2)

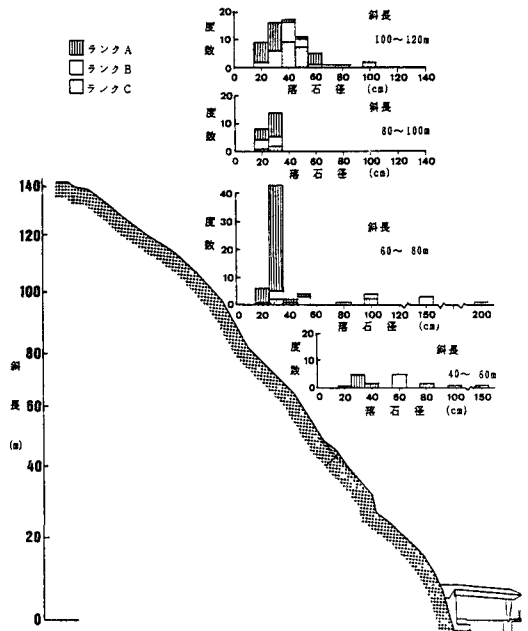


図-3 斜面上の岩塊の度数分布  
(斜面K-3)

図において、度数分布には2つの山があり、第一の山は斜面上を小さく跳躍しながら落下する場合に、第二の山は斜面途中の凹部から大きく跳躍する場合に対応しているものと思われる。

図-6は、想定したシェッドのはりが、スパン11.5mで単純支持されているものと仮定し、はりに上に落下した場合にはりに発生する最大曲げモーメントの度数分布を示している。ここに、衝撃力の分散は考慮せず、集中荷重とみなしている。

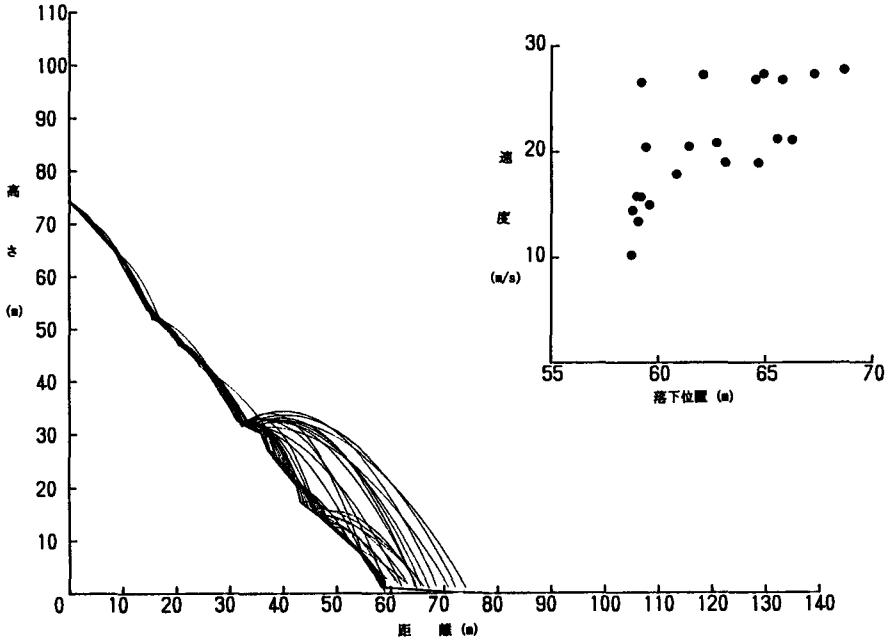


図-4 落下軌跡の例

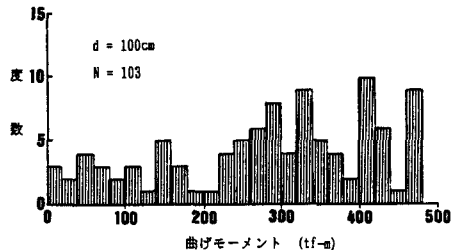
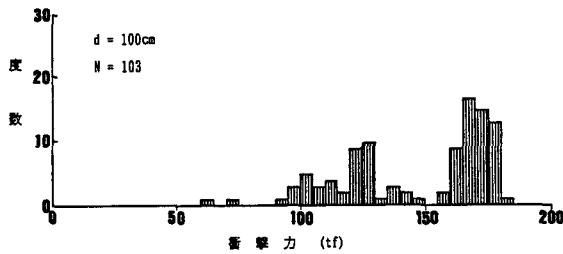
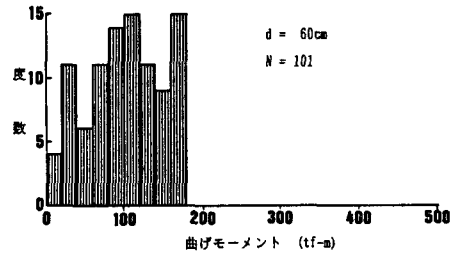
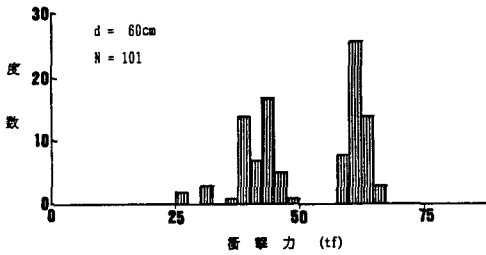


図-5 衝撃力の度数分布

図-6 曲げモーメントの度数分布

これより、斜面K-3における使用限界状態に対する落石(直径60cm)の設計衝撃力は68tf、設計曲げモーメントは180tf-m、終極限界状態に対する落石(直径100cm)の設計衝撃力は185tf、設計曲げモーメントは480tf-mに、それぞれ、荷重修正係数 $\rho_f$  ( $\rho_f > 1.0$ ) を乗じた値であるとしての設計が可能であろう。

#### 4. あとがき

本研究では、発生、斜面上での落下経路および到達時の速度とも、極めて不規則性が強い落石に対する防護構造物としてのロックシェットの合理的設計のための一つの提案を行った。

手法には検討の余地が十分あると考えられるが、現段階では許され得るものと思う。今後は、どのような斜面の特性値を用いれば各斜面ごとに落下シミュレーションを必要としないかの検討が重要な課題であると考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1)日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月。
- 2)土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，土木学会，1986年10月。
- 3)高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研究報告書，1974年2月。
- 4)日本鉄道施設協会：落石対策の手引，1978年3月