

落石覆工への荷重係数設計法の適用について

APPLICATION OF LOAD RESISTANCE FACTOR DESIGN TO ROCK-SHEDS

梶谷 浩*、梶川康男**、黒川敏広***

Hiroshi MASUYA, Yasuo KAJIKAWA and Toshihiro KUROKAWA

*金沢大学工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

**金沢大学工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

***住友建設株式会社名古屋支店 (〒460 名古屋市中区栄3-23-18)

This paper presents an application of load resistance factor design to rock-sheds which are constructed to prevent roads from falling rocks. Rock-sheds are subjected to dead load, snow load, rock impact load and avalanche load. Method of modeling rock-sheds, the assumptions of several limit states of a rock-shed and the procedures for evaluations of these loads in the consideration of limit state probability are concretely explained. Furthermore, numerical examples for prestressed concrete rock-sheds of revers L type by this method are shown based on the target probability given by allowable stress design and some discussions and remarks about load factor are shown.

Key Words: rock-shed, load factor, limit state, design method

1. まえがき

山岳地域あるいは海岸地域では、落石の発生により交通の安全性が損なわれる可能性が大きく、安全確保のために落石覆工が建設されることが多い。落石といった特種な荷重を受ける落石覆工の設計法や安全性について多くの解明すべき問題が指摘されている¹⁾。写真-1は1989年7月に福井県越前町で発生した岩盤崩壊による落石覆工の破壊を示したものである。このような落石災害が後を断たず、落石覆工の合理的な設計を目的として、落石による荷重の評価方法をはじめ設計法に関して近年特に積極的な研究がなされている^{2,3)}。

現在、落石覆工の設計は、通常、落石対策便覧に基づいて行なわれている。すなわち、落石による衝撃荷重をある弾性理論に基づく算定式により推定し、緩衝材による荷重分散を考慮して等分布荷重に置き換え、許容応力度設計法で落石覆工は設計されている⁴⁾。しかし、落石の発生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捉えることが妥当であると報告されている⁵⁾。また、そのばらつきは材料強度のそれよりも大きいと考えられる。

そこで、この不確定性を有する荷重を評価するため、本研究では、荷重係数設計法の適用を試みた。この設計法は、確率論的手法を用いて解析を行ない、それぞれの荷重に対して均等な安全性を得ようとするものである。しかし、落石問題では荷重の評価自体が十分確立されたものではなく、覆工の限界状態それ自体も明らかにされていないわけではない。本研究では、落石覆工の構造のモ

デル化、荷重の取り扱い方法、限界状態の設定そして限界状態に対する超過確率などをいくつかの仮定の基で具体的に示し、許容応力度法による設計の目標値(ターゲット確率)を用いることにより、逆L型PC製落石覆工を対象として荷重係数設計法を適用した。そして、豪雪地帯における落石覆工の荷重係数を具体的に求めいくつかの知見を得ている。



写真-1 落石覆工の破壊
(福井県越前町、1989年7月)

2. 荷重係数設計法の落石覆工への適用

2.1 荷重係数設計法の概要^{6,7,8)}

許容応力度設計法は、構造物に使用される材料の強度に着目したものであり、使用材料の応力とひずみの関係が、フックの法則に従うという条件のもとで考えられている。すなわち、設計荷重により各部材に働く応力度が、

計算された許容応力度 σ_a を超えないように、部材断面を決定するものである。

一般に、 n 種の荷重が作用する構造物の許容応力度設計法による応力照査式は、次式のように表わされる。

$$\psi_j' \sigma_a \geq \alpha_{j1} L_{j1} + \alpha_{j2} L_{j2} + \dots + \alpha_{jn_j} L_{jn_j} \quad (1)$$

($j=1, 2, \dots, m$)

ここに、 m :荷重の組合せ総数、 n_j : j 番目の荷重の組合せにおける荷重の総数、 $\alpha_{j1}, \dots, \alpha_{jn_j}$: j 番目の荷重の組合せに対する応力度への変換係数、 $L_{j1}, \dots, L_{jn_j}$: j 番目の荷重の組合せに対する公称設計荷重、 ψ_j' : j 番目の荷重の組合せにおける許容応力度の割り増し係数、 σ_a :許容応力度である。

一方荷重係数設計法では、応力照査は、一般に次式を用いて行なうことができる。

$$\psi_j \sigma_j \geq \gamma_{j1} \alpha_{j1} L_{j1} + \gamma_{j2} \alpha_{j2} L_{j2} + \dots + \gamma_{jn_j} \alpha_{jn_j} L_{jn_j} \quad (2)$$

($j=1, 2, \dots, m$)

σ_j :抵抗応力度、 $\gamma_{j1}, \dots, \gamma_{jn_j}$: j 番目の荷重の組合せにおける荷重係数 $\alpha_{j1}, \dots, \alpha_{jn_j}$: j 番目の荷重の組合せに対する応力度への変換係数、 $L_{j1}, L_{j2}, \dots, L_{jn_j}$: j 番目の荷重の組合せに対する公称設計荷重、 ψ_j : j 番目の荷重の組合せにおける抵抗応力の割り増し係数である。この式は、ある荷重の組合せ j に対する限界抵抗値が、荷重の公称値を荷重係数倍したものを組合せることによって生ずる荷重効果より、大きいことを要求している。

これらの各荷重係数 γ_{jn_j} は、確率論的に決定されるべきものであるが、最適な値を求めるのは一般には非常に困難であることから、ある程度経験的に決定されてきた。最適な荷重係数を求めるために多くの方法が提案されているが、本研究では以下の手順で荷重係数を決定することにした。

- 1) 対象とする典型的な構造物をいくつか考える。この選定された構造物を $S_1, S_2, \dots, S_N$ とする。
- 2) 各構造物 S_i に対して、限界状態とする抵抗応力度を定める。
- 3) 各構造物 S_i を、それぞれの荷重の組合せのもとで、適当な荷重係数を用いて設計を行なう。ここで、1つの構造物に対して、それぞれの荷重の組合せにおいて求められた設計変数の中で最大のものを採用する。
- 4) 3)で設計された各構造物 S_i を、それぞれの荷重の組合せのもとで限界状態を超える確率を算出する。
- 5) 算出される限界状態を超える確率に対する目標値(ターゲット確率)を定める。そのために、目的関数を次式のように定める。この目的関数 Ω を用いることにより $P_{F_j}^{(i)}$ を独立に考慮するのではなく、目標値 $P_{F_j}^*$ のまわりのばらつきを最小化し最適な荷重係数を求めることが可能である。

$$\Omega = \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\log P_{F_j}^{(i)} - \log P_{F_j}^*}{\log P_{F_j}^*} \right\}^2 \quad (3)$$

ここに、 $P_{F_j}^{(i)}$ は構造物 i が限界状態 F_j を超える確率、 $P_{F_j}^*$ はターゲット確率、 N_s は限界状態の数、 N は構造物の数である。

6) 目的関数が最小になるように荷重係数を定める。

2. 2 落石覆工のモデル化

落石覆工としての代表的な構造物を解析の対象とするものとし、図-1に示すように、PC製逆L型落石覆工を構造物モデルとして選定した⁹⁾。PC製逆L型落石覆工は、プレテンション方式で製造された主ばりとポストテンション方式で製造された柱の2部材から成るもので、柱のアンボンドPC鋼材を主ばり内に通して緊張することにより2部材を剛結した2ヒンジラーメン構造である。ヒンジの一方は、柱部材にあらかじめ設置されているヒンジであり、谷側受台の天端面にヒンジ部分が位置するように柱下端を受台の中に埋設している。ヒンジの他方は山側受台上に設置されたアンカーボルトによるヒンジであり、主ばりの端部と山側受台をアンカーボルトにより連結している。

各諸元については、落石覆工の場合、建築限界および道路規格によって制限を受けるため、本研究では、使用実績の多い範囲でいくつかのモデルを考え、支間長 L が、8~12mのものを設定した。したがって、図-2に示すように、設計変数としては主ばりの高さ H と柱天端幅 B_{cu} を考えるものとした。文献9の標準設計では、特別な場合を除き $B_{cu}=H$ としたはりと柱の組み合わせとなっており、本研究においてもそれに従った。

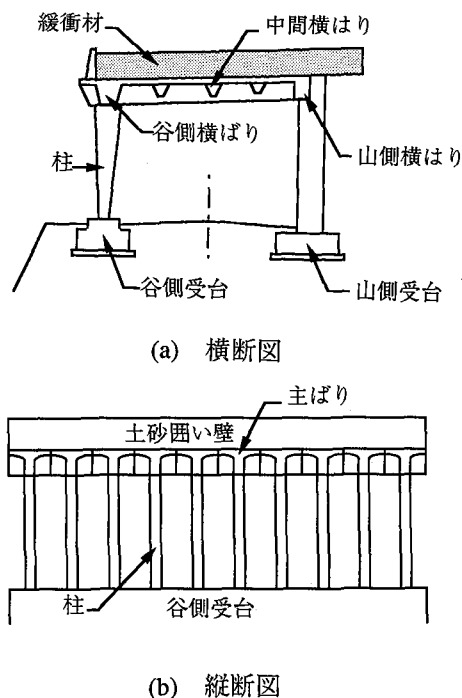
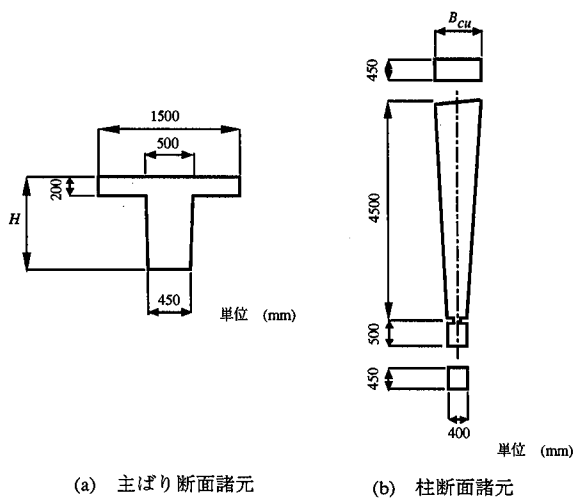


図-1 PC製逆L型落石覆工の基本構造



(a) 主ばり断面諸元

(b) 柱断面諸元

図-2 落石覆工の断面と設計変数

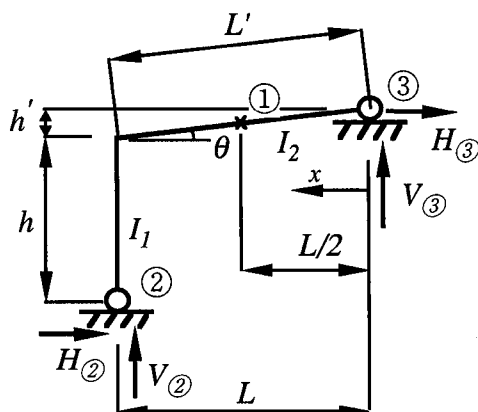


図-3 落石覆工の骨組みモデル

落石覆工の道路横断方向面内の挙動に着目し写真-1に示した破壊例を参考に図-3に示すような骨組モデルと着目点を設定した。着目点①ははりの断面、着目点②、③はヒンジ鉄筋の断面を決定する際に支配的となる。各着目点における断面決定は、着目点①の場合ははりの曲げモーメントのみを考慮し、そして着目点②、③の場合は支点の水平反力のみを考慮することにした。

2.3 対象とする荷重の種類

落石対策便覧によると、落石覆工を設計するにあたり考慮すべき荷重の組合せは、表-1に示す項目の中から該当するものを選択するものとしている。

逆L型落石覆工では、土圧は擁壁で受け持たれ、落石覆工には直接作用せず、崩土による堆積土は、崩落後取り除かれる場合も多いので考慮しないことにした。また、本研究では、目的関数 Ω の収束計算により荷重係数を決

定するため、未知変数の個数はできるだけ少ないほうが望ましく、ならびに、豪雪地帯の落石覆工の設計に主眼を置いているため、死荷重(D)、積雪荷重(S)、落石荷重(P)、雪崩荷重(A)を代表的に解析の対象として選定した。本研究で用いる荷重の組合せを表-2に、また、対象とした荷重の種類と、作用位置、作用方向を図-4に示す。

表-1 落石覆工における荷重の組合せ

荷重の種類 設計時の状態	死荷重	土圧	堆積土	積雪	落石	崩土	雪崩	地震	自動車衝突	施工時
常時	○	○	○	○						
落石	○	○			○					
崩土	○	○				○				
雪崩	○	○					○			
地震	○	○						○		
自動車衝突	○	○	○	○					○	
施工時										○

表-2 本研究における荷重の組合せ

荷重の組合せ	考慮する荷重	照査式
Case1 (積雪時)	死荷重D+積雪荷重S	$\sigma_y \geq \alpha_D \gamma_{D1} D + \alpha_S \gamma_{S1} S$
Case2 (落石時)	死荷重D+積雪荷重S+落石荷重P	$\sigma_y \geq \alpha_D \gamma_{D2} D + \alpha_S \gamma_{S2} S + \alpha_P \gamma_{P2} P$
Case3 (雪崩時)	死荷重D+積雪荷重S+雪崩荷重A	$\sigma_y \geq \alpha_D \gamma_{D3} D + \alpha_S \gamma_{S3} S + \alpha_A \gamma_{A3} A$

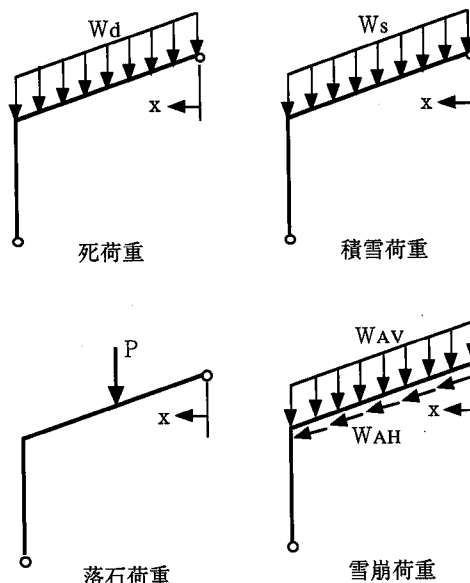


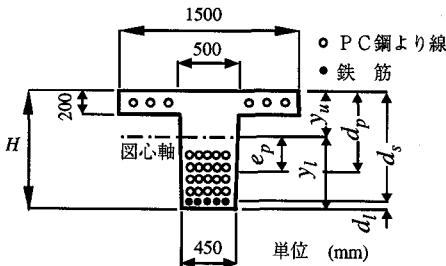
図-4 本研究で対象とした荷重

本研究で用いるコンクリートの設計基準強度を600 kgf/cm²とし、P C鋼材はプレテンション用として1T12.4 P Cより線を用いることとした。また、鉄筋は主ばりと

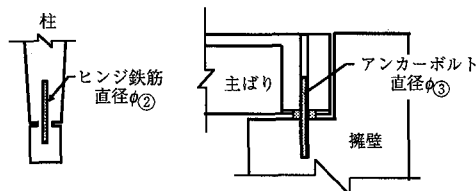
柱ヒンジ部には、SD30A熱間圧延異形鋼棒を使用し、主ばり支承部アンカーボルトには、SR24熱間圧延鋼棒を使用するものとした。これらの材料特性値は表－3に示す通りである。

表－3 材料特性値

コンクリート	
仕 様	JIS A 5308
設計基準強度(kgf/cm ²)	600
単位重量(kgf/m ³)	2500
ヤング係数(kgf/cm ²)	450000
乾燥収縮度	0.0002
クリープ係数	3.0
P C 鋼材	
種 類	SWPR7A
呼称(mm)	1T12.4
公称断面積(mm ²)	92.9
引張強度(tf)	16.3
降伏点(tf)	13.9
ヤング係数(kgf/cm ²)	2000000
レラクゼーション(%)	3.0以下
伸び(%)	3.5以上
鉄 筋	
種 類	SD30A SR24
許容引張応力度(kgf/cm ²)	1800 1400
ヤング係数(kgf/cm ²)	2100000



図－5 主ばり断面図



(a) 柱下端ヒンジ部 (b) 主ばり支承部

図－6 ヒンジ部詳細

設計で考慮する4種類の荷重によるはりの曲げモーメントに対する断面力照査面として、主ばり中央断面を考え、各支点の水平反力に対する断面力照査面として、各ヒンジ鉄筋を考える。図－5に主ばり断面図、図－6に各ヒンジ部の詳細を示す。なお、ヒンジ鉄筋および、アンカーボルトはそれぞれ4本ずつ配置することにする。

用いた4種の荷重と応力度への変換方法を以下に示す。

(1) 死荷重

死荷重として主ばりと緩衝材の自重を考えると、主構間隔を $l(=1.5\text{m})$ 当りの死荷重は、次式で与えられる。

$$w_d = \gamma_{d0} A_c + \gamma_d h_d l \tag{4}$$

ここに、 γ_{d0} ：はりの単位重量($=2.5\text{tf/m}^3$)、 A_c ：はりの断面積、 γ_d ：サンドクッションの単位重量($=1.8\text{tf/m}^3$)、 h_d ：サンドクッション層厚($=90\text{cm}$)である。

死荷重による位置 x での曲げモーメント M_d は、

$$M_d = -\frac{1}{2} w_d x^2 + \frac{w_d l x}{2} \left\{ \left(1 + \frac{1+n}{4(k+1)} \right) - \left(1 - \frac{1+n}{4(k+1)} \right) \tan \theta \right\} \tag{5}$$

と表され、 k ははりの剛比、 $n=h'/h$ である。これを応力度へ変換すると、

$$\sigma_{D1} = M_d y_l / I_c \tag{6}$$

となる。ここに、 I_c ははりの断面2次モーメント、 y_l は図心から下縁までの距離である。死荷重の応力度への変換係数は、 w_d で評価することにより、

$$\alpha_{D1} = s_{D1} / w_d \tag{7}$$

と表される。また、支点②での応力度への変換係数は、

$$\alpha_{D2} = H_2 / w_d (\pi \phi_2^2 / 4) \tag{8}$$

で表される。ここに、 H_2 は支点②における水平反力である。支点③における変換係数も同様に求められる。

(2) 積雪荷重

単位面積当りの積雪荷重は

$$q_s = \gamma_s H_s \tag{9}$$

で与えられるとした。 γ_s は積雪の密度($=0.35\text{tf/m}^3$)、 H_s は設計積雪深である。これより、主構間隔当りの積雪荷重は、

$$w_s = q_s l \tag{10}$$

となる。 l は主構間隔である。この荷重を用いて死荷重と同様にして応力度への変換係数を求めることができる。

(3) 落石荷重

落石による衝撃力は次式で表される落石対策便覧式を用いた⁴⁾。

$$P_0 = 2.455 W^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \tag{11}$$

ここに、 W ：落石重量(tf)、 H ：落下高さ(m)、 λ ：ラメ定数(tf/m²)である。本研究では、設計で通常用いられている $\lambda=100\text{tf/m}^2$ を用いた。落石荷重はクッション内で分散され落石覆工に作用する。本研究の対象とするPC落石覆工では、荷重の作用する主ばりの荷重分担率が0.4程度から0.7程度であることが知られている¹⁰⁾。ここでは、分担率 $\beta=0.54$ と仮定し¹¹⁾、

$$P = \beta P_0 \tag{12}$$

が対象とする主ばりに作用するとした。落石荷重の応力

度への変換係数は死荷重の場合と同様に求められる。

(4) 雪崩荷重

単位面積当りの雪崩荷重 q_A は、

$$q_A = \gamma_A \frac{H_s}{2} \left(\frac{\sin(\theta_{sl})}{\sin(\theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{13}$$

で与えられるとした¹²⁾。ここに、 γ_A は雪崩の見かけの密度(=0.45tf/m)、 θ_{sl} は山斜面の勾配である。主構間隔 l 当りの鉛直方向荷重 w_{AV} と水平方向荷重 w_{AH} は次のように与えられる。

$$w_{AV} = q_A (1 + \mu \sin \theta \cos \theta) l \tag{14a}$$

$$w_{AH} = \mu q_A \cos^2 \theta \tag{14b}$$

ここに、 μ は雪崩の動摩擦係数(=0.3)である。雪崩の応力度への変換係数も死荷重と同様に求められる。

2. 4 実荷重のモデル化

目標とする荷重係数を算定するにあたって、構造物に作用する実荷重の強度や発生頻度の確率特性を定める必要がある。ここでは、これまでの荷重実態調査により収集された観測データおよびそれらの分析結果を基に実荷重をモデル化した。

(1) 死荷重

死荷重には、構造物に使用されているコンクリートと鋼材、また、落石覆工上の緩衝材として用いられている砂が考えられる。コンクリートおよび鋼材の単位体積重量は、過去の実測データより正規分布とみなせるが、その変動係数は極めて小さいことが知られている。また、緩衝材として用いられている砂も、変動は少ないものと考えられる。したがって、これらの死荷重の値は十分に信頼のおけるものとし、一定値と考えた。

(2) 積雪荷重

積雪荷重により、ある応力状態を超える確率は、地上積雪 q_s の最大値の近傍で起こると考えられる。そこで、地上積雪荷重の各年度ごとの最大値の分布を考える。確率の当てはめに用いる分布について検討したところ、極値Ⅰ型分布を用いることにした¹³⁾。次式で表される積雪荷重モデルの確率分布関数を用いた。

$$F_s = \exp[-\exp\{-a_s(q_s - u_s)\}] \tag{15}$$

ここに、 q_s は式(9)で与えられる積雪荷重であり、定数 a_s と u_s は40.16と0.0853である。

(3) 落石荷重

落石の発生は、一般にポアソン過程であると考えられる。そこで、落石覆工の設計荷重に関する実態調査¹⁵⁾に基づき設計対象とした落石重量と落下高さから式(12)を用いて落石荷重を算出し指数分布を用いてモデル化した。用いた落石荷重モデルの確率分布関数は、次式のように表される。

$$F_p = 1 - \exp(-a_p P) \tag{16}$$

ここに、 P は式(12)で与えられる落石荷重であり、定数 a_p は0.2128である。

(4) 雪崩荷重

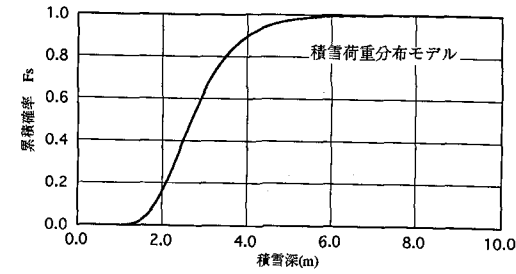
落石荷重の場合と同様に、雪崩荷重もパルス的に発生するものであり、その発生頻度はポアソン分布に従うも

のとした。また積雪厚の上層半分が雪崩となり、雪崩層は1m以上と仮定した。用いた雪崩荷重モデルの確率分布関数は、次式のように表される¹³⁾。

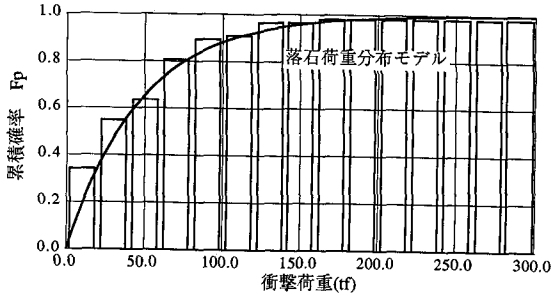
$$F_A = 1 - \exp(-a_A(q_A - u_A)) \tag{17}$$

ここに、 q_A は式(13)で与えられる積雪荷重であり、定数 a_A と u_A は27.17と0.0768である。

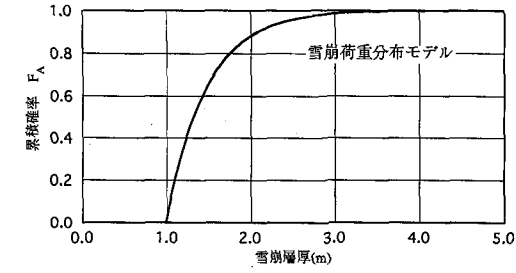
図－7に本研究に用いた積雪荷重、落石荷重そして雪崩荷重モデルを示す。



(a) 積雪荷重



(b) 落石荷重



(c) 雪崩荷重

図－7 用いた荷重モデル

2. 5 限界状態の設定

本研究では落石覆工の限界状態として以下の5つの状態を設定した。

限界状態Ⅰ：曲げモーメントおよび軸方向力によるコンクリートの応力度が、引張強度に達する限界状態

限界状態Ⅱ：曲げモーメントおよび軸方向力によるコンクリートの応力度が、コンクリートの設

計引張強度に達する限界状態

限界状態Ⅲ：曲げひびわれ幅が、許容ひびわれ幅に達する限界状態

限界状態Ⅳ：谷側柱下端のヒンジ鉄筋がせん断降伏応力度に達する限界状態

限界状態Ⅴ：山側はり支承部アンカーボルトがせん断降伏応力度に達する限界状態

各限界状態に対応する応力として、限界状態Ⅰでは零、限界状態Ⅱでは $0.5f_{ck}^{2/3}/1.0$ (f_{ck} : コンクリートの設計基準強度)、限界状態Ⅲでは文献14に示されているひびわれ幅が許容ひびわれ幅に達する増加応力度、限界状態ⅣとⅤでは $f_{yk}/\sqrt{3}$ (f_{yk} : 鉄筋の降伏応力度)を用いた。

2.6 荷重の組合せに対する限界状態を超える確率

各荷重の組合せに対する限界状態を超える確率は、以下のように表せるとした。

荷重の組合せCase1に対して、

$$P_{1F}(z;T)=[1-\{1-P_1(z)\}^T]\exp(-v_pT)\exp(-v_A T) \quad (18)$$

荷重の組合せCase2に対して、

$$P_{2F}(z;T)=1-\exp(-v_pT)-\{1-P_1(z)\}^T[\exp\{-v_pTP_2(z)\}-\exp(-v_pT)] \quad (19)$$

荷重の組合せCase3に対して、

$$P_{3F}(z;T)=1-\exp(v_A T)-\{1-P_1(z)\}^T[\exp\{-v_A TP_3(z)\}-\exp(v_A T)] \quad (20)$$

ここに、 v_p と v_A は落石と雪崩の年当りの発生確率、 z は組合せ荷重下での限界状態を越える事象を表す状態変数、 T は期間(年)、 $P_1(z)$ は積雪により限界状態を超える確率、 $P_2(z)$ は1回の落石により限界状態を超える確率、 $P_3(z)$ は1回の雪崩により限界状態を超える確率である。

3. 荷重係数設計法による計算結果および考察

3. 1 設計に関する条件設定とターゲット確率

(1) 構造物の諸元

荷重係数設計法を適用する対象構造物の設計変数は、図-2に示した通りであるが、具体的には、主はり支間長 L は、8、9、10、11、12mの5種類の値を設定した。表-4に、設定した5種類のPC製逆L型落石覆工のモデルの諸元を示す。

表-4 落石覆工モデルの諸元

構造物 番号	支間長 L (m)	柱高さ h (m)	桁勾配 θ (度)
No.1	8.0	5.07	10.0
No.2	9.0	5.07	10.0
No.3	10.0	5.07	10.0
No.4	11.0	5.07	10.0
No.5	12.0	5.07	10.0

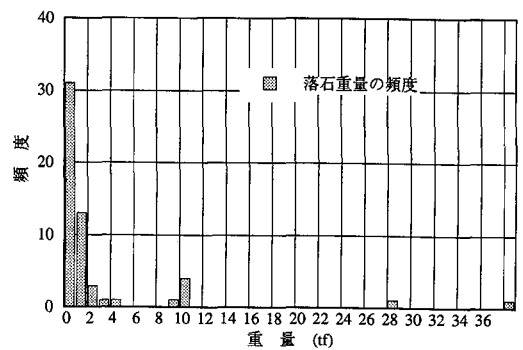
(2) 設計荷重の設定

荷重係数体系の設計法を導入するにあたって、まず設計照査式に用いる公称荷重を設定する必要がある。橋梁

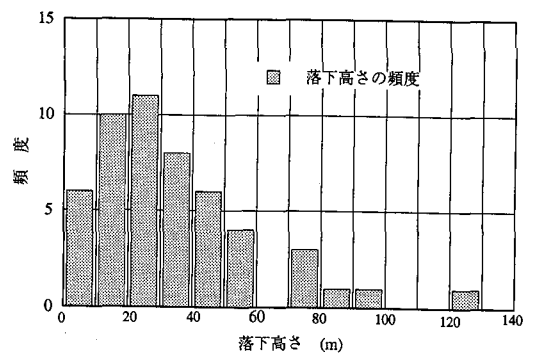
の交通荷重のように統一された設計荷重は設定されておらず、各設置個所において現場の状況により経験的に設計荷重が定められている。したがって、本研究では以下に示すようにして、6通りの公称設計荷重の組合せを設定した。

まず、積雪と落石の荷重分布モデルの確率分布関数(式(15)、(16))より、それぞれ90.0%と95.0%の値を与える積雪深と落石による衝撃荷重を求め、それらを設計荷重とした。また、雪崩層厚は積雪深の半分とした。

しかし、落石による衝撃荷重については、実際に頻繁に起こりえる荷重よりも、大きな値と考えられるためもう1つの現実的な落石荷重を設定した。図-8は、文献15のデータに基づくものであるが、これより最も頻度の高い落石の重量(1.0(tf))と落下高さ(30(m))を用いて式(12)より求めた衝撃荷重(62.4(tf))をもう1つの落石の設計荷重とした。表-5に設計荷重の値を、また、表-6にはその組合せを示す。



(a) 落石重量



(b) 落石落下高さ

図-8 設計で想定された最大規模の落石¹⁵⁾

表-5 落石と積雪の設計荷重

設 計 荷 重	重量1.0tf、落 下高さ30.0mに 対する荷重値	90%値	95%値
落石による衝撃荷重 P (tf)	64.4	108.2	140.8
積雪深 H_s (m)	—	4.0	4.6

表－6 設計荷重の組合せ

荷重の組合せ番号	①	②	③	④	⑤	⑥
落石荷重 (tf)	64.4	64.4	108.2	108.2	140.8	140.8
積雪層厚 (m)	4.0	4.6	4.0	4.6	4.0	4.6

(3) ターゲット確率の設定

2. 5で設定した限界状態に対応するターゲット確率を決定することが必要となる。ここでは、確率分布関数の99.0%値を与える荷重を設計荷重として用い、構造物について許容応力度設計法による設計を行ない、それが限界状態Ⅰ～Ⅴを超える確率を算出し、その値をターゲット確率とする。これにより、大まかには、現行の許容応力度設計法による構造物の平均的な限界状態を表していると考えられる。ここでの許容応力度設計法とは、全ての荷重係数を1.0として解析を行なったものであり、抵抗係数の割増は行っていない。その理由としては、荷重係数が目的関数Ωの値に与える影響をより直接的に見るためである。

表－7に、許容応力度設計法による解析結果を示す。表の下欄に設定される各限界状態に対するターゲット確率を示す。各ターゲット確率を比較すると、ヒンジ鉄筋せん断降伏限界状態Ⅳ、Ⅴよりも、主ばり曲げひびわれ限界状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲがかなり大きな値を示している。また、表－7から、本計算例（期間1年）では確率の絶対値は全体的に小さいが、荷重の組合せ2によって限界状態を超える確率が他の荷重の組合せによって限界状態を超える確率よりも卓越しており、落石に対して現行設計では安全性はそれほど高くないように思われる。すなわち落石荷重は積雪荷重や雪崩荷重よりも落石覆工の破壊に及ぼす影響が大きいということになり、部材断面は荷重の組合せ2によって決定される場合が多いことがわかる。

3. 2 目的関数と荷重係数

前述した条件のもとで、PC製造L型落石覆工に荷重係数設計法を適用し、それぞれの荷重係数の組合せに対する目的関数Ωの値を算出した。

数回の試算の結果、 γ_{S1} 、 γ_{S3} 、 γ_{A3} を変化させても、目的関数Ωの値にほとんど変化が認められなかった。すなわち、部材断面の決定は荷重の組合せ2によるところが大きく、荷重の組合せ1と3を考慮する必要は少ないことが言える。これは、設定した設計荷重のうち、豪雪地帯におけるそれ自体比較的大きい積雪荷重と雪崩荷重であっても、落石荷重に比べれば小さいことが原因であると考えられる。したがって、以下は荷重の組合せ2の荷重係数の決定に着目し計算を行なうことにする。

図－9に荷重係数と目的関数Ωとの関係を等高線を用いて示したものである。図中の各線は、目的関数Ωの値に対する等高線である。したがって、最適な荷重係数の組合せは、Ωの最小値を示している部分である。表－8は、この結果により荷重の組合せCase2（落石時）に対する

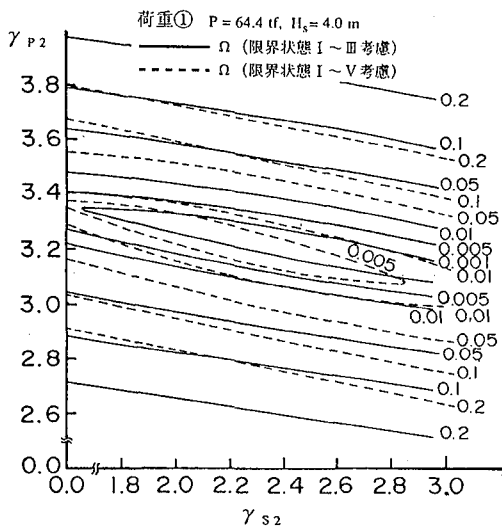
設計照査式を具体的に示したものである。

図より最適な荷重係数の組合せでは、いずれの場合も、積雪荷重の荷重係数 γ_{S2} に対し、落石荷重の荷重係数 γ_{P2} はかなり大きな値を示している。また、Ωの等高線の傾きが γ_{P2} に関して大きくなっている。これらより、構造物の破壊に及ぼす影響は積雪荷重よりも落石荷重によるところが大きいことがわかる。

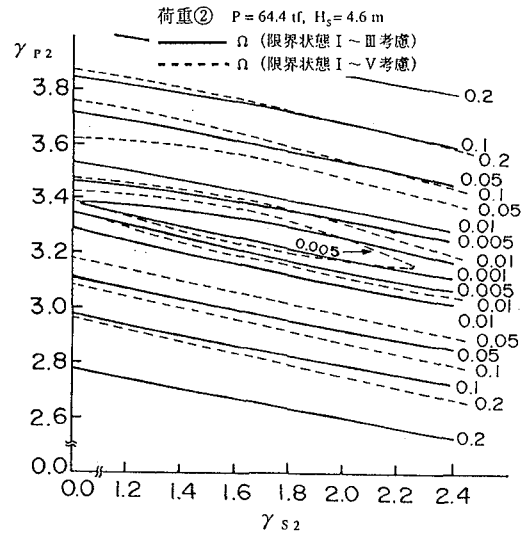
表－7 許容応力度による解析結果とターゲット確率

No.1	H=117.3 (cm) $\phi_{\text{S}}=2.8$ (cm) $\phi_{\text{A}}=3.1$ (cm)			
限界状態	P_{1F}	P_{2F}	P_{3F}	合計
Ⅰ	0.000E+00	0.554E-01	0.000E+00	0.554E-01
Ⅱ	0.000E+00	0.297E-01	0.000E+00	0.297E-01
Ⅲ	0.000E+00	0.170E-02	0.000E+00	0.170E-02
Ⅳ	0.000E+00	0.124E-02	0.000E+00	0.124E-02
Ⅴ	0.000E+00	0.162E-02	0.000E+00	0.162E-02
No.2	H=124.9 (cm) $\phi_{\text{S}}=3.1$ (cm) $\phi_{\text{A}}=3.5$ (cm)			
限界状態	P_{1F}	P_{2F}	P_{3F}	合計
Ⅰ	0.000E+00	0.565E-01	0.000E+00	0.565E-01
Ⅱ	0.000E+00	0.301E-01	0.000E+00	0.301E-01
Ⅲ	0.000E+00	0.169E-02	0.000E+00	0.169E-02
Ⅳ	0.000E+00	0.116E-02	0.000E+00	0.116E-02
Ⅴ	0.000E+00	0.122E-02	0.000E+00	0.122E-02
No.3	H=132.2 (cm) $\phi_{\text{S}}=3.3$ (cm) $\phi_{\text{A}}=3.8$ (cm)			
限界状態	P_{1F}	P_{2F}	P_{3F}	合計
Ⅰ	0.000E+00	0.578E-01	0.596E-07	0.578E-01
Ⅱ	0.000E+00	0.306E-01	0.000E+00	0.306E-01
Ⅲ	0.000E+00	0.172E-02	0.000E+00	0.172E-02
Ⅳ	0.000E+00	0.154E-02	0.000E+00	0.154E-02
Ⅴ	0.000E+00	0.128E-02	0.000E+00	0.128E-02
No.4	H=139.6 (cm) $\phi_{\text{S}}=3.6$ (cm) $\phi_{\text{A}}=4.1$ (cm)			
限界状態	P_{1F}	P_{2F}	P_{3F}	合計
Ⅰ	0.000E+00	0.588E-01	0.477E-06	0.588E-01
Ⅱ	0.000E+00	0.308E-01	0.000E+00	0.308E-01
Ⅲ	0.000E+00	0.155E-02	0.000E+00	0.155E-02
Ⅳ	0.000E+00	0.139E-02	0.000E+00	0.139E-02
Ⅴ	0.000E+00	0.132E-02	0.000E+00	0.132E-02
No.5	H=146.4 (cm) $\phi_{\text{S}}=3.9$ (cm) $\phi_{\text{A}}=4.4$ (cm)			
限界状態	P_{1F}	P_{2F}	P_{3F}	合計
Ⅰ	0.000E+00	0.605E-01	0.346E-05	0.605E-01
Ⅱ	0.000E+00	0.315E-01	0.000E+00	0.315E-01
Ⅲ	0.000E+00	0.168E-02	0.000E+00	0.168E-02
Ⅳ	0.000E+00	0.127E-02	0.000E+00	0.127E-02
Ⅴ	0.000E+00	0.135E-02	0.000E+00	0.135E-02
限界状態		ターゲット確率		
Ⅰ		5.78E-02		
Ⅱ		3.06E-02		
Ⅲ		1.67E-03		
Ⅳ		1.32E-03		
Ⅴ		1.36E-03		

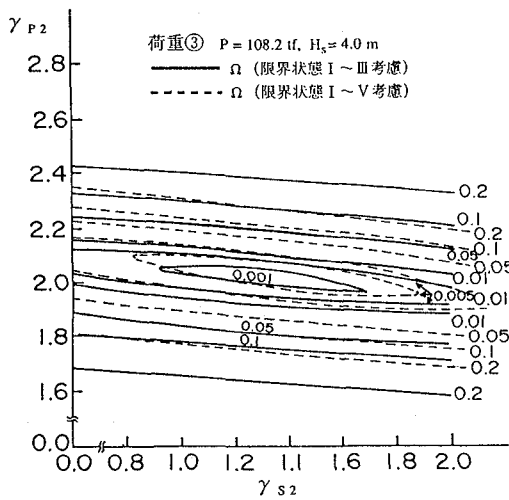
設計荷重の組合せ①、③、⑤または②、④、⑥を比較すると、設計積雪荷重を変化させていないにもかかわらず、設計落石荷重を大きくするにしたがって γ_{S2} は小さな値を示していく傾向がある。よって、ここで示した程度の落石荷重を設計荷重として用いた場合には、積雪荷重は重要度は小さく、表－1に示した落石対策便覧での落石時の荷重の組合せは、現行のままでよいことがこのことから確認できる。



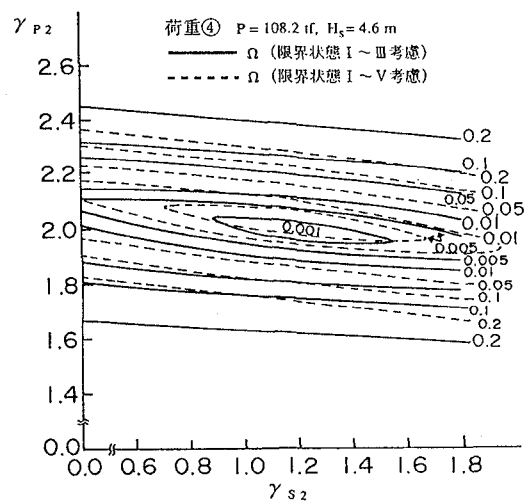
(a) 荷重①での荷重係数と目的関数



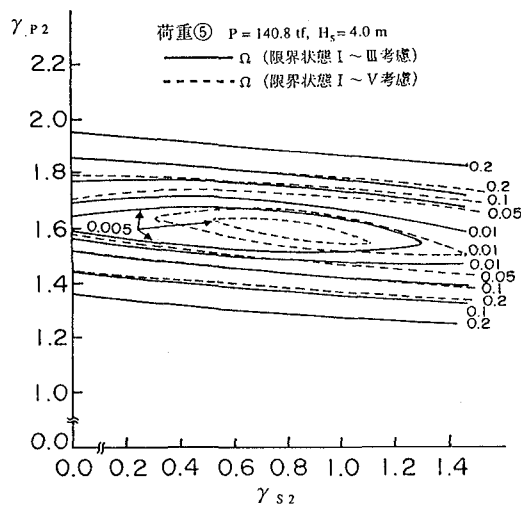
(a) 荷重②での荷重係数と目的関数



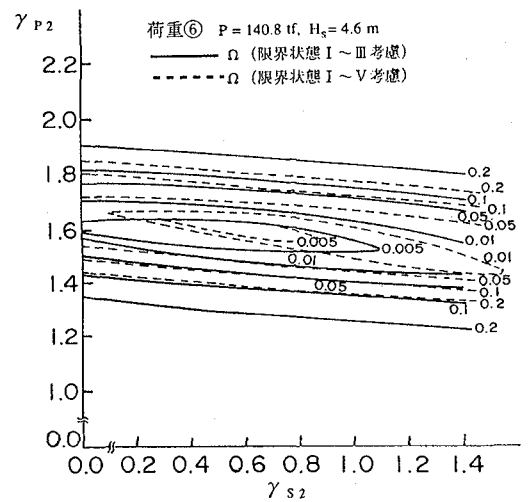
(c) 荷重③での荷重係数と目的関数



(c) 荷重④での荷重係数と目的関数



(e) 荷重⑤での荷重係数と目的関数



(e) 荷重⑥での荷重係数と目的関数

図-9 荷重係数と目的関数の関係((Case2: 落石時))

表一 8 設計照査式 (Case2: 落石時)

設計荷重	照 査 式	
	限界状態Ⅰ～Ⅲ考慮	限界状態Ⅰ～Ⅴ考慮
①	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 2.50S + \alpha_P 3.20P$	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 2.20S + \alpha_P 3.23P$
②	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 1.85S + \alpha_P 3.23P$	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 1.60S + \alpha_P 3.30P$
③	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 1.30S + \alpha_P 2.01P$	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 1.37S + \alpha_P 2.03P$
④	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 1.20S + \alpha_P 2.02P$	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 1.19S + \alpha_P 2.02P$
⑤	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 0.60S + \alpha_P 1.59P$	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 0.83S + \alpha_P 1.59P$
⑥	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 0.51S + \alpha_P 1.58P$	$\sigma_y \geq \alpha_D 1.00D + \alpha_S 0.62S + \alpha_P 1.60P$

次に、限界状態をすべて考慮した場合と限界状態ⅡⅢだけを考慮した場合を比較すると、 γ_{P2} に関してはあまり変化していないが、 γ_{S2} に関しては限界状態すべてを考慮した方が、 γ_{S2} の値の小さい方に全体的にシフトしている。これより、各ヒンジ鉄筋のせん断については、積雪荷重による影響が小さいことがわかる。また、本研究では落石が落石覆工に対して鉛直に落下する場合のみを解析したが、鉛直線より角度をもって落下する場合には、落石荷重による水平反力が大きくなるためこの傾向は、より顕著に現れると推定される。

落石荷重に対する荷重係数は本解析例では上述したように大きな値が得られた。一般的にこのまま適用できるものではないが、他の荷重係数よりもかなり大きい落石覆工における落石荷重の重要性を改めて再確認することができた。

今後、落石覆工を建設する地域（あるいは特定の地形条件）、その地域の気候による落石荷重特性や積雪荷重特性を合理的に規定することができればより安全性に信頼のおける設計へのアプローチが可能と考えられる。

また、本研究では、落石覆工を静的な荷重を受ける骨組み構造として取り扱い、限られた限界状態の仮定のもとで行ったが、本方法をさらに実用的に発展させるには落石覆工の実際の限界状態と限界状態における落石荷重の一層の解明が必要と考えている。

4. 結 論

本研究では、荷重係数設計法のPC製逆L型落石覆工への適用を試みた。本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 荷重分布の設定や落石覆工の限界状態の仮定に基づき超過確率を求め、逆L型PC落石覆工への荷重係数設計法の具体的な適用方法を示した。
- 2) 本研究の範囲内では、PC製逆L型落石覆工の部材断面の決定は落石時の荷重の組合せ (Case2) によるところが大きく、各荷重の最大値を同時に組合せて設計照査する必要が小さいことが明らかになった。

3) 落石時の荷重の組合せ (Case2) において構造物の破壊に及ぼす影響は、積雪荷重よりも落石荷重によるところが大きい。また、十分に信頼できる落石荷重を設計荷重として用いた場合には、積雪荷重を見積る必要が小さいと考えられる。

4) 各ヒンジ鉄筋のせん断による破壊については、主ばりの曲げによる破壊に比べ積雪荷重による影響は小さい。

本研究では、落石覆工を静的な荷重を受ける骨組み構造として取り扱い、限られた限界状態を仮定のもとで行ったが、落石覆工に対するこのような設計方法をさらに実用的に発展させるには、落石覆工の実際の限界状態と限界状態における落石荷重の評価とともに、落石覆工を建設する地域の気候による落石荷重特性や積雪荷重特性も一層明らかにしていく必要があると考えている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、吉田博先生（元金沢大学）、北浦勝教授（金沢大学）ならびに池本敏和氏（金沢大学）に貴重なお教えを頂いた。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉田博、榊谷浩、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、第421号、pp.213-222、1990。
- 2) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1563-1572、1993。
- 3) 園田佳巨、石川信隆、園田恵一郎、大田俊昭：PC落石覆工の耐力評価と安全性照査法に関する研究、土木学会論文集、No.495、pp.83-92、1994。
- 4) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983。
- 5) 園田恵一郎、小林治俊、鈴木照男：信頼性設計法のロックシェッドへの適用の一試み、第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集、pp.110-117、1986。
- 6) 阪神高速道路公団、総合技術コンサルタント：荷重係数設計法の導入に関する確率論的研究、阪神高速道路公団、pp.4-14、1984。
- 7) M. Kitaura, T. Ikemoto, S. Wakabayashi: Application of LFRD to Substructures of Bridges, Memoirs of Faculty of Technology, Kanazawa University, Vol.19, No.2, pp.43-54, 1986。
- 8) 久保雅邦：道路橋における交通荷重の実態特性から見た確率論的評価に関する研究、学位論文、pp.141-162, 1991。
- 9) 九州ロックシェッド協会：PCロックシェッド標準設計（逆L型）、九州ロックシェッド協会、1988。
- 10) 土木学会：構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法、土木学会、pp.153-248、1993。
- 11) 藤井智弘、榊谷浩、前川幸次、梶川康男：プレキャストPC桁の静的挙動とロックシェッド設計への応用、構造工学論文集、Vol.36A、pp.1293-1303、1990。

- 12)日本建設機械化協会：新防雪工学ハンドブック、日本建設機械化協会、pp.143-301、1977.
- 13)日本気象協会富山支部：富山県降雪及び気温観測調査報告書、日本気象協会富山支部、1988.
- 14)土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編、1991.
- 15)建設省土木研究所機械施工部動土質研究室：落石防災対策に関する調査報告書（その2）、土木研究所資料第2771号、1991.

（1994年9月14日受付）