

落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ

A SURVEY OF DESIGN OF ROCK SHEDS AND AN APPROACH TO IMPROVED DESIGN

吉田 博*・榎谷 浩**・右城 猛***・柴田健次****

By Hiroshi YOSHIDA, Hiroshi MASUYA, Takeshi USHIRO and Kenji SHIBATA

A survey of the design method of preventive structures against rock falls and an improved design procedure are presented.

At first, a current investigative procedure of slopes before the design of preventive structures is outlined and a present design method is generally remarks. Secondly, a motion of falling rocks and an estimation of falling speed and location of rocks are described.

Thirdly, many formula estimating impact design load derived from the elastic contact theory, the elastic or visco-elastic and plastic theory and experimental results are discussed.

Finally, a rational design procedure is proposed.

Keywords: rock shed, falling rock, design method, slope

1. ま え が き

道路交通の安全確保を図るため、道路整備の一環として道路防災対策事業が進められており、落石対策においても着実にその成果をあげてきている。

落石防護工の設置にあたっては、斜面調査による岩石の特定、落下経路、跳躍量、落下位置および速度などの推定、落石による衝撃力およびクッション材による緩衝効果の検討、防護工の選定、防護工の動的挙動の検討などを必要とする。しかし、比較的地形、地質条件に恵まれている欧米諸国には参考となるデータ¹⁾に乏しく、わが国においても断片的にこれらの研究が進められていたが、1978年には日本鉄道施設協会より、1983年には日本道路協会よりこれらの研究を集大成した落石対策の手引²⁾および落石対策便覧³⁾が、それぞれ発刊され、現場技術者および設計者に、効果的に利用されてきた。

しかし、発刊以来すでに7~11年を経過し、その内容

が実状に必ずしもマッチしない面も見受けられ、内容の見直しの要望もでてきている。特に、1989年6月に発生した福井県越前海岸での落石覆工(以後、ロックシェッドという)の崩壊事故^{4),5)}は、社会的に大きい関心を呼び、改めて落石防護に対する考え方を明確にする必要性に迫られている。

本報告はこのような観点から、ロックシェッドの設計の現状とその問題点について述べ、ロックシェッドの設計に対する基本的な考え方およびより合理的な設計手法について検討する。

2. 落石の調査および覆工設計の現状

現在、ロックシェッドの設計は、一般に図-1に示す手順で行われている。以下、このフローチャートに従い、各項目ごとにその内容を検討する。

(1) 調 査

落石対策の調査にあたっては、落石が予想される区域、落石の発生形態、規模、運動形態、地形、地質条件等を的確に判断しなければならない。

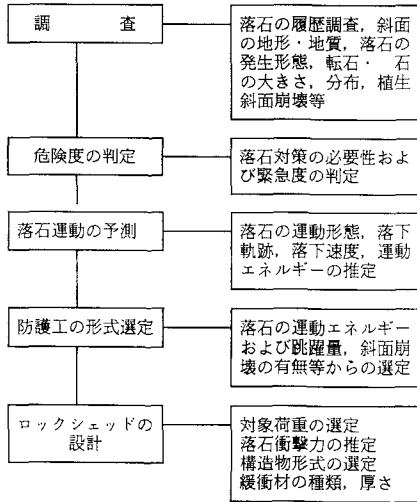
落石危険箇所では、落石が繰り返し発生していることが多い³⁾ので、落石の履歴調査を実施するとともに、現地踏査により、落石予備物質の有無を確認する必要がある。

* 正会員 工博 元・金沢大学教授
(〒932-01 小穴部市水島 561)

** 正会員 工博 金沢大学助手 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

*** 正会員 (株)第一コンサルタンツ常務取締役
(〒780 高知市高須新町 3-1-5)

**** 正会員 日本工営(株)関東支店設計課長
(〒330 大宮市宮町 3-13-2)



図一 ロックシェッドの設計の手順

落石のエネルギーは、落石や斜面の特性により著しく異なるため、落石の発生地点、重量、形状、斜面の勾配、凹凸、樹木の繁茂状況、浮石、転石の分布状況等を調査する必要がある。また、必要に応じてボーリング等により危険箇所地盤性状を把握することもある^{3), 6)~11)}。

(2) 危険度の判定

落石の危険度とは、対象物件への影響を災害の発生頻度と規模から総合的に判定した結果であり、判定方法および判定事例は、落石対策便覧³⁾の資料編に指針案が記載されている。しかし、調査がかなり大がかりであること、オーソライズされた方法がないこと、また、○×の数^{2), 11)}や点数による評価^{6), 13)}により、落石の相対的危険度は評価できても絶対的危険度を判定することは困難である。このような採点法を補完する手法として、土質力学的考察に基づいた検討もみられる^{14)~16)}が、実用化には詰めるべき問題が残されている。

このような実状から、一般的に危険度の判定は現場踏査時に行い、地形的要素として、斜面が高かったり、勾配が急峻であったり、オーバーハングしているなどの場合、危険度が高いと判断している。落石の形態としては、玉石や岩塊の抜け落ち型の場合は、地山全体の緩みや固結度、剝離型の場合は、岩盤の割れ目の発達程度や方向を観察して危険度が判定される³⁾。

(3) 落石防護工の選定

落石対策工は、落石予備物質を取り除いたり、斜面に固定する落石予防工と、斜面から転落あるいは落下してくる落石を受け止める落石防護工に分類される。

落石防護工には、落石防止網、落石防止柵、落石防止壁等の比較的落石エネルギーの小さい場合に対する構造物と、大きなエネルギーに対処できるロックシェッドに分類される^{3), 17)}。

落石防護工の選定にあたっては、落石エネルギー、地形条件、地質条件、道路条件、施工条件等を考慮して選定される。ロックシェッドの場合は、他の落石防護構造物と比べ、構造規模が大きく、高価であり、また、永久構造物として使用されることから、より信頼性および耐久性に優れた設計が求められている。

ロックシェッドには、PC（プレストレストコンクリート）製、RC（鉄筋コンクリート）製、鋼製のものがあり、これらは主として、落石規模、施工条件などにより使い分けられている³⁾。

(4) 落石径および落石重量の推定

設計の対象とする落石の大きさは、過去の資料、現地踏査などにに基づき決定される¹⁷⁾。一般には耐用期間中に起こると考えられる落石を対象としているが、落下の可能性についての判定は、設計者の経験的判断に委ねられていることが多い。

(5) 落石の運動と落下位置・落下速度の推定

落石の発生位置は、現地踏査により設計の対象となる落石の最高地点を推定して決めている。特に落下高が高く明瞭な選急点がある場合には、その位置を落下位置としている。

落石の運動形態、落下位置および落下速度の推定法については、章を改めて検討する。

(6) 落石による衝撃力およびその分布

ロックシェッドの設計のための落石による衝撃力の算定法およびその分布については、章を改めて検討する。

(7) ロックシェッドの設計

落石防護工の設計は、落石防止網、落石防止柵、落石防止擁壁などのように、落石の運動エネルギーと構造物の塑性変形による吸収エネルギーに基づいた設計法と、ロックシェッドのように落石の衝撃荷重を静的荷重に置き換えて、弾性理論に基づく許容応力度法による設計法に分けられる³⁾。前者は構造形式が比較的単純で、変形容量の計算が簡単であるが、後者にあつては、構造物の規模および重要度が大きく、したがって変形の許容値の決定が困難であることなどによっている³⁾。

ロックシェッドの設計荷重として、落石荷重以外に積雪荷重、雪崩荷重、崩土荷重、堆積土荷重等についても必要に応じて考慮される。

前述のとおり、現在、ロックシェッドは落石対策便覧を参考にして設計されている。落石対策便覧では、ロックシェッドの設計は許容応力度法によるのが適当であるとし、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。すなわち、道路橋示方書¹⁸⁾に規定されている許容応力度を使用し、規定されていない事項については、コンクリート標準示方書^{19), 20)}などが参考になるとしている。さらに、荷重の組合せに対する許

表一 既往の現場落石実験の概要

地名	実験	斜面の特性				落石の特性			運動特性							
		斜面種類	地質	立木	硬度	凹凸	平均勾配(度)	落差(m)	石質	形状	重量(kgf)	等価摩擦係数	最大速度残存係数	反発係数	速度エネルギー比	最大跳躍量
雷電甲	1961	自然	転石(滑りスリ)	無し	—	大	38~47(43)	不明	自然石	角状	170~1720	0.60	0.60	—	—	—
神戸	1967	人工法面	土砂	無し	—	小	45	20	人工石	円筒	66~600	0.28	0.85	0.4~0.6(0.5)	—	—
岩殿	1972	自然	崖錐	有り	—	中	36	不明	自然石	角状	—	0.42	0.65	—	—	—
浅利橋	1972	自然	崖錐	無し	—	中	40	不明	自然石	角状	—	0.37	0.75	—	—	—
東伊豆	不明	自然	崖錐	有り	—	中	42	42	自然石	角状	0.75×0.85×1.30m	0.39	0.75	0.48~0.86(0.67)	0.2~0.7(0.45)	max=3.7m(図より)
藤原A	1973	自然	軟岩	無し(伐採)	シムシトバー硬度 450 ± 90kgf/cm ²	大	55	65	河床石	丸状	30~80	0.15	0.95	0.48~0.26	0.53±0.22	max=4.0m(90%は2m以下)
藤原B	1973	自然	土産砂錐	無し(伐採)	中山式 4 ± 2(mm)	小	40	75	河床石	丸状	30~80	0.23	0.85	0.52~0.31	0.53±0.21	max=4.7m(98%は2m以下)
愛岐	1973	自然	土砂	無し(伐採)	中山式 2 ± 3(mm)	中	27~35(32)	30	自然石	角状	20~2000	0.27	0.75	0.25~0.80(0.50)	0.2~0.7(0.45)	—
高松	1980	切取	軟岩	無し	シムシトバー硬度 5~26	中	52	30	自然石	塊状板状	19~800	0.18	0.925	—	—	max=5.7m(84%は2m以下)
鳴門	1983	切取	軟岩	無し	シムシトバー硬度 10~36	小	48	25.5	自然石	塊状	6~47.5	0.31	0.85	—	0.1~0.9	max=2.3m(95%は2m以下)
広島	1987	切取	崖錐	無し	—	大	38	62.8	自然石	塊状	20~40000	0.28	0.8	m=0.55 σ=0.18	0.3~0.95	max=2.7m(95%は2m以下)
北川村*	1968	自然	崖錐	有り	—	大	43	48	自然石	塊状	0.55×0.70×1.0m	0.70	0.5	—	0.2~0.6	—
大月町*	1988	自然	軟岩	有り	—	小	56	46	自然石	塊状	落下時に破砕	0.67	0.74	—	0.3~0.5	—

痕跡調査による。

容応力度の割増率は、道路橋示方書における地震時の規定を準用している。

道路橋における荷重、許容応力、荷重の組合せに対する許容応力の割増などについては、数多くの研究が成され、その成果が反映されているが、ロックシェッドにおけるそれらの研究はきわめて少なく、落石時の許容応力度の割増率を道路橋示方書における地震時の規定に準じて決定しているなど、道路橋に準じた取扱いもやむを得ない面もあるが、基本的にはロックシェッドは橋梁とは異なった設計思想で設計されるべき性格の構造物であると考えられる。

3. 落石の運動形態

(1) 運動形態の分類

落石防護工を計画・設計するうえで、斜面を落下する落石の跳躍量・平面的落下経路・防護工への衝突速度を予測することはきわめて重要といえる。これらの予測を誤ると、落石の防護工上の飛び越え、防護工設置外への落下、あるいは防護工の破壊等によって重大な事故を招くおそれがある。

落石の運動形態は、すべり・転がり・跳躍・衝突運動に分類される。斜面上で発生した落石はこのような運動形態を繰り返しつつ、運動エネルギーを増加しながら落下する。ところが、これらの運動は、斜面の形状・勾配・凹凸・地質・植生状況、落石の形状・寸法・石質等の影響を顕著に受けるため、運動力学的理論解析だけでもって予測することはきわめて困難である²¹⁾。

こうしたことから、これまで、現場落石実験^{12), 21)~27)}、

模型実験²⁸⁾、落石斜面での痕跡調査に基づいた研究^{29), 30)}によって運動形態を解明する試みがなされてきた。

(2) 落石の運動特性

落石の運動形態の解明を目的とした現場落石実験としては、表一に示すものがあり、これらの実験結果から以下のような落石の運動特性が明らかにされている。

a) 落石の速度

斜面上を落下する落石の速度(V)は、同一高さからの自由落下速度(V₀)に比べて小さい。

速度残存係数 α (= V/V₀) は、崖錐斜面の場合 α = 0.6~0.85^{24), 25), 27), 29)} (それぞれの実験結果を包含する最大値)、岩盤斜面の場合 α = 0.85~0.96^{23), 24), 31)} である。ただし、立木があるとこれより小さな値となる³⁰⁾。

落石の運動をすべり運動と仮定したとき、落石の速度と同一の速度を与える動摩擦係数を等価摩擦係数 μ (= tan θ(1-α²), θ: 斜面勾配) と定義すれば、等価摩擦係数は、崖錐斜面で μ = 0.2~0.6^{24), 25), 27), 29)}、岩盤斜面で μ = 0.15~0.3^{23), 24), 31)} となる。ただし、立木があるとこれよりも大きくなる³⁰⁾。

斜面上を落下する落石の速度は、落差が 40~50 m になると一定値に収束する傾向にある^{24), 27)}。

b) 反発係数、落石の運動エネルギー

落石が斜面に衝突する際の反発係数は、斜面の凹凸や落石の形状の影響が顕著に現われ、実験値のばらつきが大きい、その平均値は崖錐斜面・岩盤斜面にかかわらず 0.5 程度である^{24)~27)}。

速度エネルギー比 (斜面に衝突する直前と直後の運動エネルギーの比) も、反発係数とほぼ同様の傾向がみら

れ、平均値は0.5程度である^{24), 25), 27)}。

落石の運動エネルギーは、線速度エネルギーと回転エネルギーの和で表わされ、回転エネルギーは線速度エネルギーの約1/10である^{31), 32)}。

c) 落石の跳躍量

落石の軌跡の包絡線は、ある落差まで2次曲線で増大するが、それを越えると一定値に収束する傾向がみられる^{24), 27)}。

最大跳躍量は、ほとんどが2 m以下である^{23), 24), 27), 31)}が、斜面の凹凸が大きい場合には5~6 mに達することもある¹²⁾。

d) 落石の平面的落下経路

落石は、地形のコンターラインの法線に対してある分散角をもって落下する。分散角は、落石の規模が大きいほど小さい^{27), 31)}。

(3) 落石の運動軌跡、落下速度の予測

落石の運動軌跡あるいは落下速度を予測する方法は、経験則による方法と力学的数値解析による方法とに大別される。

落石対策便覧³⁾では、落石の最大跳躍量の標準値として2.0 mを、また、落下速度(V)の推定式として等価摩擦係数(μ)を用いた式、 $V = \sqrt{2gH[1 - (\mu/\tan\theta)]}$ を採用している。ここに、 g は重力の加速度、 H は落下高さ、 θ は斜面の勾配である。これは、前者の予測法に基づいたものであり、過去の実験データのほぼ最大値(または最小値)が与えられているため予測を大きく誤るおそれは少ない。しかしながら、この方法では、斜面の性状を定量的に評価した予測が行えないという欠点がある。たとえば、斜面勾配が急変している場合、あるいは凹凸が著しい場合に出現する跳躍量の大きい運動を予測することができない。

また、式(1)は、ある落差になると落下速度が一定値に収束するという実験結果を反映したものになっていないため、落差の大きい斜面に適用すると落下速度を過大に評価するおそれがある。

数値解析法は、落石を質点あるいは剛球にモデル化し、すべり、転がり、跳躍および衝突の運動形態に応じてそれぞれ運動方程式^{29), 32)}あるいは衝撃運動方程式²⁸⁾を適用し、落石の運動軌跡、落下速度などを計算で求めるものである^{33)~35)}。数値解析を行うためには、反発係数、速度エネルギー比、速度残存係数、等価摩擦係数等の運動特性値を推定する必要があるが、これまでの落石実験でも明らかなように実験データのばらつきが非常に大きく、信頼できる特性値を決定することは困難である。

こうしたことから、石城ら²¹⁾は落石実験データをもとに転がり運動から跳躍運動に移行する限界速度、飛び出し角度、斜面への衝突前と衝突後の速度比等の正規分布

確率密度関数を求め、確率密度関数の95%信頼区間で乱数を発生させ、確率論的に決定した値を用いて落石の運動軌跡をシミュレーションする方法を提案するとともに、鳴門での落石実験²³⁾より得られた確率密度関数を別の類似実験斜面に適用し、落石の最大跳躍量をかなりの精度でシミュレートできることを確認している。また、吉田ら³⁵⁾、古賀ら²⁸⁾は実験結果の再現性が高い運動基礎方程式に関する研究を行い、石城らと同様な手法で落石の軌跡、落下速度のシミュレーションを試みている。

他方、ヨーロッパにおいてもシミュレーションに関する研究がなされている³⁶⁾。フランスでは、地形データ、斜面の地質、落石の形状・大きさ、落石の破碎、斜面の状態、衝突時のエネルギー散逸などをパラメーターとした二次元あるいは三次元解析が、Louis Rochet³⁴⁾によって試みられている。また、スイスには、落石が斜面へ衝突した場合の運動エネルギーおよび速度の損失に関するRitichieの実験的研究³⁷⁾があるほか、スイス道路交通・エネルギー経済省監修の設計指針、落石防護(第2版)¹⁾のなかに、落石の落下経路・エネルギーの計算方法および数値計算例が示されているが、いずれも、落石防護工の設計にそのまま適用するには、多くの問題を含んでいる。

(4) 今後の課題

従来、落石の運動形態の予測は、経験的に行われてきた。しかし、落石の運動は、斜面の形状、勾配、凹凸、地質、植生、落石の形状、寸法、岩質などの影響を顕著に受けるため、経験的判断のみで予測を行うのは危険である。斜面勾配が急変している場合や凹凸が著しい場合には、シミュレーション手法による確率論的数値解析も併せて行う必要がある。

シミュレーションの信頼性を高めるためには、落石の運動形態に適合した運動方程式の適用と落石および斜面のモデル化が重要であるが、それ以上に、落石および斜面の物理的、幾何学的特性を斜面条件に応じて適切に評価すること、すなわち、物理的・幾何学的特性を表わす確率密度関数のパラメーター(平均値、標準偏差)の決定が重要である。したがって、今後においては、条件の異なる種々の斜面で落石実験を行いデータの蓄積を図っていく必要がある。また、立木があるような斜面では、落石実験が困難であるため落石斜面での痕跡調査によるデータ収集も必要と思われる。

4. 落石による衝撃力

落石がロックシェッド上に落下したときの衝撃力に関する研究は、昭和40年頃より始められ、いくつかの理論式および実験式が提案されている。その主なものを以下に示す。

(1) 弾性接触理論による研究

落石のサンドクッション上への落下衝突を、サンドクッションを半無限弾性体とし、その上に、落石として剛球が衝突するものと仮定し、A. E. H. Loveの2つの弾性体が衝突するときの物体間の圧力に関する基礎方程式より出発し、Hertzの接触論を用いて2物体間に働く力を衝撃力として導いたもので、一般に振動便覧式としてよばれている次式がある^{3), 38)}。

$$P = 2.46 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W は落石の重量 (tf)、 H は落下高さ (m)、 λ はサンドクッションのラメ定数 (tf/m²) であり、非常に軟らかいもので $\lambda = 100$ tf/m²、軟らかいもので $\lambda = 300 \sim 500$ tf/m²、固いもので $\lambda = 1000$ tf/m² とされているが、土の力学的性質との具体的な関係は明らかにされておらず、落石対策便覧³⁾では $\lambda = 100$ tf/m² が用いられており、これより得られる衝撃力は適当な厚さの緩衝材では、実験結果の値を越えることがないとしている。

この理論式では、実際はサンドクッション厚は有限であること、サンドクッションの非弾性的特性、落石形状の影響等は考慮されていない。これらの問題点を検討するために、重錘形状および有限砂層厚が落石の加速度に与える影響に関する研究も成されている^{39)~41)}が、設計に取り入れられるには至っていない。

(2) 弾性理論および粘弾塑性理論による研究

サンドクッションを弾性ばねと仮定し、落石がそのばね上に衝突するものとして、落石の位置エネルギーとばねのひずみエネルギーが等しいという条件から、衝撃力を導いたものに次式がある⁴²⁾。

$$P = 1.619 k^{1/4} W^{3/4} H^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k はサンドクッションのばね定数 (tf/m³)、 W および H は式(1)と同じである。

式(2)において、サンドクッションは実際には弾性挙動を示さず、ばね定数としてどのような値を用いるかが問題となる。

式(1)の理論的な適用限界を明らかにし、Kelvin・Voigtモデルを用いてサンドクッションの非弾性性質を考慮した衝撃力評価式に次式がある⁴³⁾。

$$P = (W/g) \cdot v K^{1/2} (e^{\mu T_a/2}) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$T_a = \frac{2}{\sqrt{4K - \mu^2}} \cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{K - \mu^2}{\mu(3K - \mu^2)} \sqrt{4K - \mu^2} \right\} \dots\dots\dots (4 \cdot a)$$

$$\mu = 10(W/g)^{-1/3} \dots\dots\dots (4 \cdot b)$$

鉛直荷重に対して、 $v = \sqrt{2gH} \sin \theta$ 、 $K = k_v g/W$ 、水平荷重に対しては、 $v = \sqrt{2gH} \cos \theta$ 、 $K = k_h g/W$ であり、 g は重力加速度 (9.8 m/s²)、 θ は落石の入射角、 k_v 、 k_h はそれぞれサンドクッションの鉛直と水平方向のばね定数 (tf/m) であり、 W および H は式(1)と

同じである。

さらに、ロックシェッドの剛性と質量を考慮したモデルについても研究が行われている^{43)~46)}。これらのモデルによれば、衝撃力の定性的な評価を行うことができるが、落石の衝突に対し複雑な挙動を示すサンドクッションを比較的簡易なモデルを用いて表現しているため、具体的な諸定数の決定方法やモデルの適用範囲が限られるなどの問題点がある。

また、巨視的に連続体であるサンドクッションをある大きさをもった土塊(要素)の集合体と仮定し、各要素間はばねとダッシュポットで連結されていると仮定し、それらの運動方程式を陽な方法で解く個別要素法を用い、落石のサンドクッション中への貫入状況、底面での土圧の発生状況などについて、定量的な評価も行われているが⁴⁷⁾、ばねおよびダッシュポットの定数の決定方法になお問題が残されている^{48)~50)}。

(3) 破壊時のエネルギー吸収を考慮した研究

落石対策便覧³⁾には、落石防止網および柵においては、それらのエネルギー吸収能を考慮した設計がなされているが、ロックシェッドの設計においては考慮されていない。

園田ら⁵¹⁾は、落石が不確定性の強い現象であることより、まれに発生する非常に大きな落石を対象に、ロックシェッドの終局限界状態として曲げ破壊を仮定し、破壊時のメカニズム形成による変形に伴うエネルギー吸収を考慮した落石による衝撃力の評価方法について検討を行っている。

また、石川ら⁵²⁾は、鋼製砂防ダムのエネルギー吸収特性の解明を目的として、鋼部材の衝撃破壊について実験的および解析的研究を行い、衝突条件と破壊形式、限界吸収エネルギーなどの関係を明らかにしている。鋼製砂防ダムの研究^{53), 54)}では、岩石が直接鋼製砂防ダムに衝突することを前提としており、衝撃力の作用時間はロックシェッドの場合に比較してきわめて短い、ロックシェッドの衝撃力の評価に示唆を与える研究である。

(4) 実験を中心とした研究

鋼材倶楽部⁵⁷⁾では、実物大の鋼製ロックシェッドを用いて、わが国で最初の落石実験を行っている。実験で得られた最大加速度より、衝撃力は次式で表わされる。

$$P = \alpha (WH/g) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 α は比例定数であり、落下位置により異なる値をとる。

この研究により、落石の衝撃力の概要が初めて実験的に明らかになった。

吉田ら⁵⁸⁾は、3種のサンドクッションを用いて、実物大の落石実験を行い、加速度波形における作用時間 T_a に着目し、次式で表わされる実験式を示している。

$$P = \alpha (W/g)(V/T_0) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 α は所定の信頼度を得るための係数である。

この研究では、実験結果を用いて、運動量と力積が近似的に等しいという理論的な仮定に基づき導出されている。しかし、落石の加速度にその質量を乗じて得られる衝撃力（以後、重錘衝撃力という）は、さらにサンドクッションを介して伝播されることなどを考えると厳密にはロックシェッドに作用する衝撃力を表わしてはいないことになる。

吉田・榎谷らは、コンクリート基礎上のサンドクッション上への落石実験を行い、落石の加速度とサンドクッション底面の土圧についてその特性を調べ、その結果、ロックシェッドの荷重を考える場合、土圧をその作用範囲で積分して得られる衝撃力（以後、積分土圧という）の方が落石の加速度よりも合理的なことを明らかにしている^{59)~62)}。これまで行われた落石実験結果をデータベース化し、土圧による衝撃力により、式（6）に類似の形で次のような衝撃力評価式を示している^{63)~66)}。

$$P = \beta_0 (W/g)(V/T_0) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 T_0 は衝撃力の作用時間(s)、 β_0 はサンドクッションの厚さの影響を表わす係数で、おのおの次式で表わされる。

$$T_0 = (0.0481 - 0.00064 H) W^{0.270} (U_c/U_{c0}) \dots \dots \dots (8)$$

$$\beta_0 = -4.81 (h/h_0) + 5.84 \quad (h/h_0 < 1) \dots \dots \dots (9 \cdot a)$$

$$\beta_0 = 1.03 \quad (h/h_0 \geq 1) \dots \dots \dots (9 \cdot b)$$

ここに、 h はサンドクッション厚 (cm)、 U_c は均等係数、 h_0 は基準サンドクッション厚 (90 cm) と U_{c0} は基準均等係数 (=1.53) である。

(5) 衝撃力の分布

衝撃土圧を測定した最初の研究は文献(58)であり、その後の研究においては、衝撃土圧の測定が一般的となっている。衝撃土圧の測定結果より、ロックシェッドに作用する落石による衝撃力の分布は、落下点下の中央に集中していることが明らかとなっている。

(6) 重錘衝撃力と積分土圧

落石実験においては落石をモデル化した重錘が用いられているが、重錘がクッション材に衝突したときの重錘衝撃力と、重錘衝撃力がクッション材中を伝播し、分散してクッション材底面に到達したときの積分土圧の比較は、文献(39)~(41)、(61)でなされており、重錘の底面形状により異なること、底面が球形の場合は両者がほぼ等しいこと⁶¹⁾、クッション材の付加質量の影響が考えられること^{39)~(41)}などが指摘されている。

(7) ロックシェッドに及ぼす動的影響

落石による衝撃力がロックシェッドに及ぼす動的影響を明らかにするために、PC製ロックシェッド屋根部を用いて落石実験を行い、ロックシェッドの応答係数の考

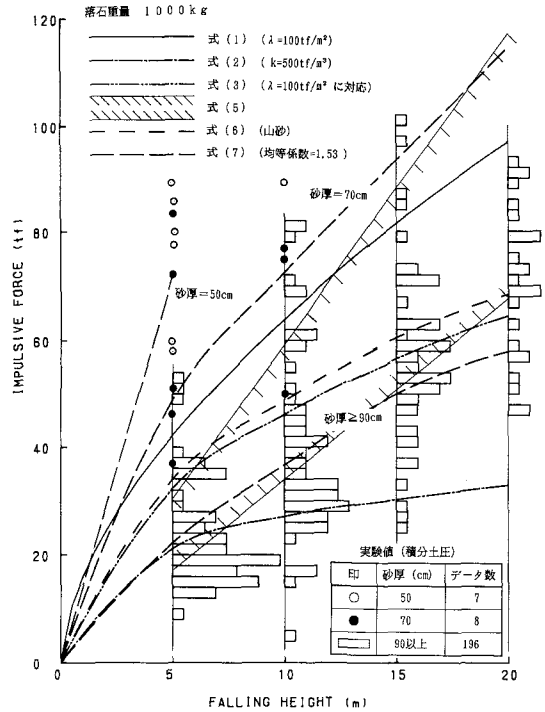


図-2 落下高さ と 衝撃力

え方を明らかにしている^{67)~69)}。また、鋼製ロックシェッドに対する理論的検討もなされている⁷⁰⁾。これは橋梁における衝撃係数に対応したものであり、PCロックシェッドにおいては衝撃係数として、最大1.4を取ればよいことを明らかにしている。

(8) 衝撃力評価に関するまとめ

図-2は重量1tの落石に対する代表的な衝撃力推定式を示したものである。参考のために、吉田、榎谷^{63)~66)}が行った実験結果がヒストグラムで示されている。図中のヒストグラムは、各落下高さの縦軸から水平に度数が取られており、図中の最小ブロックが度数1を表わす。

このように、落石の衝撃力評価を目的とした理論的、実験的な研究が進められ、ある程度は衝撃力の推定が可能となってきた。しかし、以下のような問題点が残されている。

- a) 衝撃力の最大値は、サンドクッションの状態により大きな変動が認められる。
- b) ロックシェッドの構造特性が及ぼす動的効果を考慮することが、より合理的と考えられる。
- c) ロックシェッドの設計においても、エネルギー吸収能に基づき設計することが合理的と考えられるが、そのためには、ロックシェッドの各種の破壊形式、それに対応する吸収エネルギーについて明らかにする必要がある。
- d) クッション材としてサンドクッション以外のもの

を用いる場合、別途、衝撃力評価についての研究が必要である^{36),71)}。

5. ロックシェッドの設計

(1) 荷重の種類とそれらの特性

ロックシェッドには、前述のとおり単に落石のみを防護するものほか、なだれとともに落下する小規模の落石を防護するもの、土砂崩壊および落石を防護するものなどがある。ここでは、簡単のため落石防護のみを対象としたロックシェッドを取り扱うことにする。

すでに述べたように、現在、ロックシェッドの設計は落石対策便覧に基づいている。落石対策便覧では、死荷重、土圧、堆積土、積雪、落石、崩土、なだれ、地震、自動車衝突、施工時の荷重から、各種の組合せを考え、設計にあたっては、これらの組合せの中から該当するものを選択することになっている。ここでは、これらの荷重のうち、死荷重と落石荷重についてのみ検討する。

a) 死荷重

死荷重は、ロックシェッドを形成している各種構造材料および付属部材材料に単位体積重量を考慮して求められるものと、緩衝材の砂などの重量である。

死荷重の変動は、材料の単位重量の変動および材料の体積、すなわち、構造物の断面寸法の変動および緩衝材の厚さの変動に起因しており、後者は前者に比較して多少大きいとは考えられるが、他の荷重の変動に比較してきわめて少ない。

b) 落石荷重

ロックシェッドの設計を支配する落石荷重は、すでに述べたように他の荷重に比較して、その変動はきわめて大きく、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⁷²⁾。

(2) 合理的設計法

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とらえるべきものである。ロックシェッドの設計には、落石の重量、落下高さ、発生頻度に関する統計資料に基づいた信頼性理論の適用が理想的と考えられるが⁷²⁾、それらの資料が現段階では不十分であり、信頼性理論の適用は困難である。

また、ロックシェッドの設計法としては、破壊に対する安全度の確保が弾性理論に基づく許容応力度法より確実であり、荷重の特性も荷重係数を適当に変えることにより設計に反映することが可能である塑性理論に基づいた終極強度設計法の方が合理的である⁷³⁾と思われる。

a) 限界状態設計法

ロックシェッドには一般に、鋼製、PC製およびRC製のものがあるが、ここでは、PC製およびRC製のものについて述べる。鋼製のものについては、PC製およ

びRC製のものと同様の考え方が適用できる。

昭和61年に土木学会コンクリート標準示方書¹⁹⁾（以後、コンクリート示方書という）が大改訂され、限界状態設計法^{72),73)}が採用された。

コンクリート示方書においては、限界状態として、終極限界状態、使用限界状態および疲労限界状態に区分しているが、ロックシェッドにおいては、疲労限界状態については検討する必要がなく、終極限界状態および使用限界状態の2つについて検討する。

前述のとおり、荷重には変動があるので、設計において考慮する荷重として、コンクリート示方書では、荷重の特性値を用いることを想定している。さらに、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うえで、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」とし、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。

限界状態設計法では、これらの特性値を用いて計算された設計用の断面力 S_d と試験値の変動を想定したうえで、大部分の試験値がその値を下回らないように設定された材料強度の特性値 f_k を用いて計算された断面の耐力などの抵抗値 R_d が次式を満足すれば、構造物の安全性が保証される。

$$R_d/S_d \geq \gamma_i \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 γ_i は構造物の重要度、あるいは、限界状態に達したときの社会的影響の程度を考慮するための構造物係数である。

b) ロックシェッドの限界状態

コンクリート示方書には、使用限界状態および終極限界状態に対するいくつかの例が挙げられている。ロックシェッドの使用限界状態および終極限界状態について検討してみる。

使用限界状態——ここで検討している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。第1は、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であり、第2は、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が考えられる。これに対する荷重としては、生起確率が大きい落石（比較的頻繁に発生する落石）に対するものである。

終極限界状態——ロックシェッドの終極限界状態としては、部材の断面が破壊に至る場合に相当する。ただし、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範囲の破壊と考えねばならない。この程度の断面の破壊においては、車両限界を

越えるような大きな変位，変形は生じない。もちろん，剛体としての安定性は保たれているものとする。不静定構造物の場合に，メカニズムへ移行するほどの大きな部材断面の変形は，コンクリートの破片の落下などの可能性があり，ロックシェッドの終極限界状態としては好ましくない。

終極限界状態に対する荷重としては，ロックシェッドの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，落下の可能性のある岩石）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，およびそれらすべての組合せなどが考えられる。

c) 荷重の組合せと安全係数

ロックシェッドの設計に際し落石対策便覧では，いくつかの荷重の組合せを提唱している。このうち，たとえば落石と堆積土は同時に作用させないこと，地震時の検討においては，堆積土を100%考慮することになっていることなど，実際の設計にマッチしない例もみられる。

このような矛盾は，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ようとしていることに起因している。

すでに述べたとおり，落石荷重を生起確率が大きい落石に対するものと，ロックシェッドの耐用期間中に落下の可能性のある比較的大きい落石，すなわち，生起確率が小さい落石に対するものの2つに分類した。

それらのおのおのに対し，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が，荷重組合せ係数は，同時に作用する荷重の生起確率などを考慮して定める必要がある。

荷重係数は，4. で述べた荷重の変動，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必要がある。

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いくつかの方法が提案されているが，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^{74), 75)}などが考えられる。

d) ロックシェッドの設計

これまでの検討より，以下に示す手法によるロックシェッドの設計法が望ましいと考えられる。2. に述べた手順に従って説明する。

調査——斜面に存在する岩塊のうち，落下する可能性の大きいものについて重量，形状，位置などを調査する。また，すぐには落下しないが，将来，落下が予想される

岩塊についても，同様の調査を行う。

シミュレーション——比較的頻繁に落下が予想される岩塊および将来落下が考えられる大きな岩塊について，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推定衝撃力の不確実性および落下速度の不確実性より荷重の特性値 f_k および荷重係数 γ_f を設定する。また，落下位置の推定の不確実性を考慮して，構造解析係数 γ_a を設定する。

終極限界状態の検討——荷重の生起確率に応じて許容し得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，生起確率のきわめて小さい荷重に対しては，崩壊（人命の損失の可能性はある）は避けるが，ひびわれが顕著で剝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。

構造上の検討——せん断による脆性的な破壊を避けるため，せん断に対する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靱性をもたせるなどの配慮が必要である⁷⁶⁾。

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収まるように，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構造細目について，十分な検討が必要である⁷⁶⁾。

6. あとがき

本報告では，落石防護工の設置にあたっての，斜面調査，これに基づく落石防護工，特に，ロックシェッドの設計の現状と問題点を概説するとともに，これらに関連する研究成果と今後の展望について解説した。さらに，より合理的な設計の考え方の提案も行った。

今後の落石防護工の設計に参考になるところがあれば幸いである。

参考文献

- 1) Heierli, W., Merk, A. and Temperli, A.: Schutz gegen Steinschlag (2. Auflage), Eidgenossisches Verkehrs und Energiewirtschaftsdepartment Bundesamt für Strassenbau, pp. 21~29, Nov., 1985.
- 2) 日本鉄道施設協会：落石対策の手引，pp. 78~148, 1978年3月。
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧，pp. 1~239, 1983年7月。
- 4) 建設省道路局：一般国道305号崩落事故の概要，道路，No. 582, pp. 64~65, 1989年8月。

- 5) 平野昌繁・奥西一夫・諏訪 浩：1989年越前海岸落石災害に見られる地形地質特性と岩盤崩壊過程，第8回日本自然災害学会学術講演会要旨集，pp.60~61，1989年9月。
- 6) 池田和彦・小橋澄治：地形・地質からみた落石の傾向と発生予測，施工技術，Vol.6，No.8，pp.17~21，1973年8月。
- 7) 馬場和秋・吉川利雄：落石の予知，施工技術，Vol.6，No.8，pp.23~31，1973年8月。
- 8) 馬場亮介・高木 寿：国鉄における落石の実態と対策—四国の場合—，施工技術，Vol.6，No.8，pp.32~39，1973年8月。
- 9) 中村直衛・村上敏雄・大山保束：落石予知と対策工—愛岐道路の例—，施工技術，Vol.6，No.8，pp.40~47，1973年8月。
- 10) 清家幸蔵：落石予知と対策工—静岡県の場合—，施工技術，Vol.6，No.8，pp.48~51，1973年8月。
- 11) 森野亮宏：斜面の災害危険度と崩壊発生の予測に関する研究，鉄道技術研究所，1985年3月。
- 12) 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。
- 13) 道路防災施設調査特別委員会：道路防災施設調査報告書，1980年3月。
- 14) 筋内寛治：落石の調査と対策，地質と調査，No.33，pp.38~46，1987年。
- 15) 村上幸利・筋内寛治：転落型落石の発生機構に関する基礎的研究，土質工学会論文報告集，Vol.27，No.1，pp.109~116，1987。
- 16) 村上幸利・筋内寛治：転落型落石の危険度評価法について，土質工学会論文報告集，Vol.28，No.3，pp.197~203，1988年9月。
- 17) 建設省土木研究所：落石防災対策に関する調査報告書(その1)，(その2)，土木研究所資料，No.2770，2771，1989年2月。
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，日本道路協会，1978年。
- 19) 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。
- 20) 檜貝 勇：コンクリート標準示方書を道路橋などの設計に適用する場合の問題点，コンクリート工学，Vol.27，No.9，1989年9月。
- 21) 右城 猛・大原健史・明坂宣行・吉崎和人：実験データを用いた落石の運動軌跡のシミュレーション，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.88~91，1986年7月。
- 22) 佐々木康・谷口栄一・舟見清巳・谷本 旦・堀口正巳：落石の跳躍量に関する実験，第14回日本道路会議特定課題論文集，pp.113~115，1981年10月。
- 23) 右城 猛・村上哲彦：落石の飛跳高の推定，第1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.48~54，1983年7月。
- 24) 日本道路公団東京支社，建設企画コンサルタント：落石実験調査報告書，1973年11月。
- 25) 日本道路公団東京支社，建設企画コンサルタント：愛岐落石防護柵耐衝撃力測定実験報告書，1973年11月。
- 26) 神戸大学工学部土木工学科・(株)神戸製鋼所：神鋼型落石防止柵実地試験報告書，1967年4月。
- 27) 吉田 博・右城 猛・柴田健治・榎谷 浩：斜面上の落石の運動形態に関する研究，落石防災研究会，1989年8月。
- 28) 古賀泰之・伊藤良弘・鷺田修三・森下 義：落石の運動軌跡の予測法に関する検討，土木技術資料，Vol.31，No.8，1989年8月。
- 29) 福岡正巳：落石の運動機構について，第11回日本道路会議特定課題論文集，pp.96~98，1973年10月。
- 30) 右城 猛：2・3の落石斜面でのシミュレーション解析の検証，北陸道路研究会35周年記念シンポジウム論文集，1988年10月。
- 31) 建設省土木研究所・(株)建設企画コンサルタント：落石の跳躍量に関する現場実験報告書，1980年10月。
- 32) 福岡正巳：落石の機構，施工技術，Vol.6，No.8，pp.14~16，1973年8月。
- 33) 大房高明・福田富男：落石による擁壁の衝突速度と落下軌跡の算定，土木技術，Vol.33，No.5，pp.36~41，1978年5月。
- 34) Rochet, L. : Application des modeles numeriques de propagation a l'etude des eboulements rocheux, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussees, No.150-151, pp.84~95, Sept.-Oct., 1987.
- 35) 斎藤武文・吉田 博・榎谷 浩：落石の落下位置および速度に関する一推定法，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.98~104，1986年7月。
- 36) 吉田 博：ヨーロッパにおけるなだれ・落石防護について，北陸道路研究会35周年記念シンポジウム論文集，pp.1~14，1988年10月。
- 37) Ritchie, A.M. : An Evaluation of Rockfall and it's Control, Research Project No. HPS1-(22), Department of Highways, Washington State Highway Commission, April, 1963.
- 38) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，pp.320~324，1985年10月。
- 39) 建設省土木研究所動土質研究室：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書，土木研究所資料，第1822号，1982年3月。
- 40) 佐々木康・古賀泰之：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.340，pp.127~137，1983年12月。
- 41) 古賀泰之・佐々木康：敷砂上の落石の衝突現象に関する考察，土木学会論文集，No.346，pp.27~35，1984年6月。
- 42) 和仁達美・赤沢 稔：鉄道土木施工法，山海堂，pp.263~271，1963年4月。
- 43) 園田恵一郎・小林治俊・鈴木輝男：ロックシェッドに対する落石荷重計算法(ヘルツ式の改良)について，第1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.25~35，1983年7月。
- 44) 三上敬司・能町純雄・松岡健一：落石覆工への落石による衝撃力に関する評価，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別冊，pp.1~10，1986年7月。

- 45) 三上敬司・能町純雄・松岡健一・岸 徳光：落石による落石覆工への衝撃力に関する評価，構造工学論文集，Vol.33A，pp.559～569，1987年3月。
- 46) 岸 徳光・吉田絃一・松岡健一・能町純雄：層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol.34A，pp.817～826，1988年3月。
- 47) 吉田 博・榎谷 浩・今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析，土木学会論文集，No.392，pp.297～306，1988年4月。
- 48) Cundall, P. A., Strack, O. D. L. : A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47～65, Jan., 1979.
- 49) 木山英郎・藤村 尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，No.333，pp.137～146，1983年5月。
- 50) 大町達夫・荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について，構造工学論文集，Vol.32A，pp.715～723，1986年3月。
- 51) 園田恵一郎：限界状態設計法とロックシェッドの設計，北陸道路研究会35周年記念シンポジウム論文集，pp.22～34，1988年10月。
- 52) 齋藤英明・石川信隆・大野友則・水山高久：鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する基礎的研究，土木学会論文集，No.386/I-8，pp.321～328，1987年10月。
- 53) 矢澤昭夫・水山高久・下東久巳：土流中の巨礫の衝突による鋼管の変形，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.54～57，1986年7月。
- 54) 鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，砂防・地すべり技術センター，1987年。
- 55) 吉田 博・石塚賢吉・細川 豊：落石によるロック・シェード上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，No.444，pp.38～43，1978年2月。
- 56) 吉田 博・榎谷 浩：落石の衝撃力実験結果と各種推定式の関連について，第1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.9～16，1983年7月。
- 57) 鋼材倶楽部：新しい落石覆いの開発に関する研究，研究報告書，1973年4月。
- 58) 吉田 博・竹島 忠・古市進作・石塚賢吉：ロック・シェード上の落石による衝撃力の推定に関する実験，道路，No.428，pp.35～41，1976年10月。
- 59) 吉田 博・榎谷 浩・鈴木哲次・岡 衛・永木卓美：サンドクッション上への落石の衝撃力とその伝播について，第1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.1～8，1983年7月。
- 60) 金沢大学工学部構造力学研究室：防護覆い上への落石による衝撃力の推定に関する研究，落石実験報告書（I），1984年1月。
- 61) 吉田 博・榎谷 浩・鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃上圧に関する実験的研究，土木学会論文集，No.352，pp.61～70，1984年12月。
- 62) Yoshida, H., Masuya, H. and Ihara, T. : Experimental Study of Impulsive Design Load for Rock Sheds, IABSE Proceedings P-127/88, pp.61～74, Aug., 1988.
- 63) 吉田 博・榎谷 浩・佐藤 真・井原朋美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について，構造工学論文集，Vol.33A，pp.571～583，1987年3月。
- 64) 榎谷 浩・佐藤 真・吉田 博：落石実験データベースの作成について，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.58～63，1986年7月。
- 65) 榎谷 浩・吉田 博・佐藤 真：落石実験データベースに基づく衝撃力の評価，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.64～70，1986年7月。
- 66) 吉田 博・榎谷 浩：落石覆の設計荷重の評価に関する研究，昭和58～59年度文部省科学研究費補助金（試験研究（2）），研究成果報告書，1985年3月。
- 67) 吉田 博・細川 豊・石塚賢吉：落石によるロック・シェードの動的効果に関する実験，道路，No.438，pp.54～58，1977年8月。
- 68) 吉田 博・榎谷 浩・岡 衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について，土木学会論文集，No.362，pp.461～470，1985年10月。
- 69) 金沢大学工学部構造力学研究室，ビー・エス・コンクリート：実物落石覆工の落石実験について，実験報告書，1979年12月。
- 70) 合津 尚・岩村二三男・橋 吉宏：固有周期を考慮した鋼製ロックシェッドの構造に関する考察，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.132～139，1986年7月。
- 71) 佐野常昭・松井 清・吉田 博・榎谷 浩・清水 公：鋼製防護壁上への落石実験について，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.9～20，1986年7月。
- 72) 園田恵一郎・小林治俊・鈴木輝男：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年7月。
- 73) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，第2版，共立出版，1979年6月。
- 74) Sinozuka, M. : Load Combination and Load Resistance Factor Design, Proc. of IABSE Symposium, Tokyo, Sept., 1986.
- 75) 篠塚正宣・久保雅邦：限界状態確率に基づく設計荷重の組合せと荷重係数の一決定法，土木学会論文集，No.386/I-8，pp.301～310，1987年10月。
- 76) 太田 実：ロックシェッド設計に対する基本的考え方について，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，別冊，1986年7月。