

(42) 落石の運動に関するフィールド実験結果について

RESULTS OF FIELD OBSERVATION ON ROCK FALL BEHAVIOR

氏平増之¹⁾、細谷昭悟²⁾、高貝暢浩³⁾、小川健太⁴⁾

Masuyuki UJIHIRA, Shougo HOSOYA, Nobuhiro TAKAGAI and Kenta OGAWA

¹⁾工博 北海道大学助教授 工学部資源開発工学科(060 札幌市北区北13条西8丁目)²⁾北海道大学大学院生 工学部資源開発工学科(060 札幌市北区北13条西8丁目)³⁾元北海道大学大学院生・現日本工営(株)(102 東京都千代田区麹町5-4)⁴⁾元北海道大学大学院生・現日鉱金属(株)(061-23 札幌市南区定山溪849)

キーワード：落石、岩石形状、落下速度、回転速度、跳躍量

(rock fall, rock shape, falling velocity, rolling velocity, jumping height)

1. はじめに

近年、我が国では道路網が急峻な斜面をもつ山岳地帯、沿岸地帯まで拡充され地域経済の発展に寄与してきた。他方、これらの地帯では落石に対する対策が必要になってきている。落石に対しては、「発生箇所」、「落石規模」、「落石挙動」等の推定や防護工の「衝撃強度」等に関する研究が必要である^{1) 2) 3)}。「落石挙動」に関しては、挙動が岩石形状、斜面の傾斜角、凹凸、植生状況等によって複雑に変化するため、理論的解析が難しいとされている^{1) 11)}。落石挙動をシミュレーション等で的確に予測するためには、種々の斜面条件下における運動に関する基礎データが必要である。

本研究では、碎石場の原石投下時の落石をビデオカメラで撮影・分析し、落下速度等に関する基礎データをまとめ、特徴を見出そうとした。その結果、岩石形状により落石挙動が少なからず変化することが判明してきた。以下に、岩石の形状分類法と、形状をパラメータとした落下挙動の変化について述べる。

2. 岩石の形状分類法⁴⁾

岩盤斜面における落石では、岩石の形状が異なると運動形態や運動軌跡が異なる^{5) 6)}。したがって、一定の基準で岩石の形状を分類しておき、形状をパラメータとして取り扱う必要がある。角の部分の円磨された砂や小礫等の碎屑粒子の形状分類は、古くから堆積学や土質工学の分野でなされているが^{7) 8)}、発破で起砕された直後あるいは斜面が崩落した直後の円磨されていない角礫状岩石の形状分類は、著者等の知るかぎり見当たらない。このため岩石の形状分類を試みた。碎屑粒子の形状分類法を参考にし、落石に関する研究での岩石形状の表現等を考慮して、角礫状岩石の形状は、塊状、板状、棒状の3種類に分類するのが実用上合理的であると考えた。

物体の形状判定は人が心理学的次元で行うものであり、心理学的次元と対応する物理的次元には縦横比、周囲の長さ、各頂点の角度の標準偏差等が挙げられている⁹⁾。本研究では、形状判定は心理学的次元で行い、その判定結果を物理的次元である軸径間の比(中軸径/長軸径、短軸径/長軸径)と対応づけることとした。碎石場に堆積している岩石塊200個が塊状、板状、棒状のどれに属するかを北海道大学の学生に肉眼判定してもらった。詳細は省略し結果のみを図-1に示す。

3. 岩石の真重量の推定⁴⁾

斜面から落下しそうな岩石がある時、その運動エネルギー、衝撃荷重等がどれほどかを算定するには重量を知ることが必要で

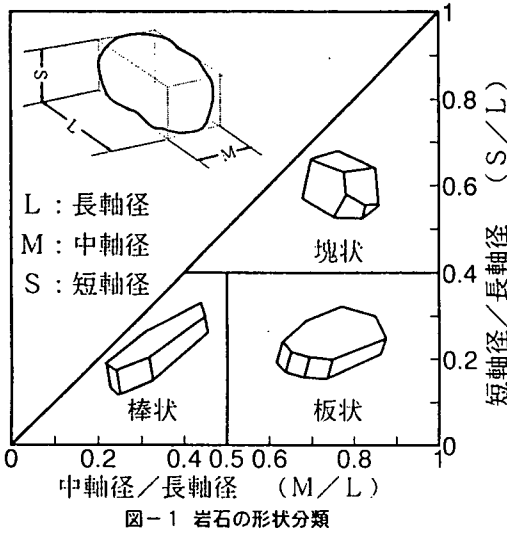


図-1 岩石の形状分類

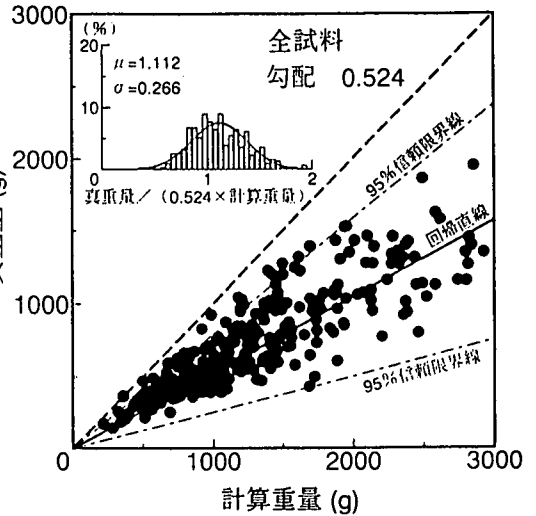


図-2 真重量と計算重量の関係

ある¹⁰⁾。岩石重量のおよその値は、単純に3つの軸径の積に単位体積重量を乗ずることで計算重量が得られるが、その計算値は過大評価された値である。できるだけ真重量に近い推定をすることが好ましい。ここでは、角礫状岩石（輝石安山岩）を対象とし、計算重量から真重量を推定するときの重量補正定数を求めた。

図-2は岩石塊320個の真重量の測定値と計算重量の関係をプロットしたものである。縦軸が真重量、横軸が計算重量である。真重量の測定値を回帰直線上の値で割った比のヒストグラムを同図左上に示した。また、表-1は図-1で分類した形状ごとの相関係数、回帰直線の勾配（重量補正定数）、真重量の測定値を回帰直線上の値で割った比の標準偏差を示している。詳細は省略するが、図-2と表-1から本フィールド実験で対象とした岩石の真重量は、岩石形状を考慮せず、計算重量に重量推定定数（0.524）を乗じた値で与えることができる。

表-1 重量の推定における補正定数

	試料数	相関係数	回帰直線の勾配 (重量補正定数)	(真重量/回帰直線上の値) の分布の標準偏差
全試料	320	0.823	0.524	0.266
塊状試料	111	0.776	0.512	0.274
板状試料	129	0.808	0.525	0.263
棒状試料	80	0.912	0.533	0.245

4. フィールド実験の概要

実験箇所には、発破後の原石の運搬にオープンシュート法を採用している小樽市内の碎石場の斜面を選定した。図-3は斜面概念図である。実験斜面は、勾配の違いにより斜面1（傾斜角43°、斜面長40m）と、斜面2（傾斜角39°、斜面長67m）に分かれている。斜面2は斜面1に対して走向が時計回りに約5°ねじれた関係にある。また、2つの斜面の間には傾斜角約80°高さ約3mの小さな段差が存在している。平面的な斜面形状は沢型斜面や尾根型斜面ではなくいわゆる直線型斜面である。投石の落下経路は元々はベンチ状を呈していたが、実験時には投下された原石の堆積でほぼ一様な傾斜角を呈していた。なお、本論文では座標軸を図-3に示すように設定する（Y軸は紙面の手前方向を正とする）。

斜面頂部から投下される岩石は、輝石安山岩（圧縮強度 1,340 kgf/cm²、密度 2.64 g/cm³）である。岩質は硬いが岩体には柱状節理が発達しており発破後の岩石は角礫状を呈している。本研究では、2章で述べたように投下された岩石の形状を塊状、板状、棒状の3つに分類した。岩石の3つの軸径がビデオ画像で明瞭に測れる場合は図-1の分類法で形状判定を行った。しかし、長軸径を測定したが、長軸径と直交する2つの軸径（中軸径、短軸径）が確定できない場合は3種類の形状のどれに最も近いかを目視で判断した。

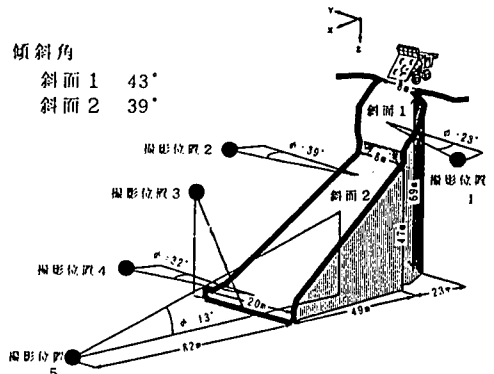


図-3 実験斜面の概念図

落石の挙動は2台のVTR (VICTOR GR-T707, GR-SZ3) を使い、図-3の撮影位置1~5で撮影した。録画した画像をビデオデッキ(サイバテック CT-9801C)を通してコンピューター(NEC PC-9801FS)のディスプレイ上に映し、長軸径がほぼ40cm以上の岩石の軸径、重心の変位量、回転数を1コマ単位(1/30s)で読み取った。また、撮影位置が走向線上にないため、図-3で示した補正角 ϕ 、 ψ を用いて軸径、重心の変位量を補正した。

5. フィールド実験結果と考察

本章では、ビデオ画像から解析された落石挙動に関する基本的な諸特性のうち、落下速度、回転速度、跳躍量、走向方向への拡がり、運動エネルギー等についてまとめた結果を示し考察を加える。

5.1 落下速度

一般に斜面に沿って落下する落石の速度は、同一高さから自由落下する速度に比較して小さい。測定された落石の落下速度と自由落下速度の関係としては次式が提唱されている⁹⁾。

$$V = \alpha V_0 = \alpha \sqrt{2gH} \quad (1)$$

ここに、 α は速度残存係数と定義されている係数であり、 g は重力加速度、 H は垂直落下高さである。 α は、落石の落下運動を斜面上のすべり運動と仮定して求める。本実験では0.78となった。図-4は、(1)式の落石速度曲線とともに、斜面に衝突する直前の衝突速度 V と垂直落下高さ H との関係を落石形状別に分けてプロットしたものである。データ数は250個である。衝突速度は衝撃荷重の算定に重要である。既往の実験結果によれば、垂直落下高さが40mを超えると衝突速度は一定値(終速度)に収束する傾向のあることが報告^{11) 12)}されているが、本実験では、地形的条件のため垂直落下高さ40m付近での測定を行っていないので詳しく言及することはできない。しかし、その傾向はみられる。さらに、形状別にみると、塊状および板状岩石が全体的に衝突速度が速い傾向がみられる。塊状と板状岩石においては回転軸の変動が少なく、かつ速度の速い跳躍運動に移行しやすいことが1つの理由と考えられる。

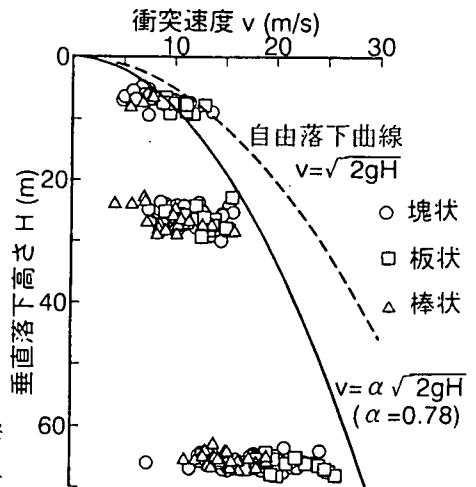


図-4 衝突速度と垂直落下高さの関係

5.2 回転速度

図-5の概念図に示すように落石が1秒間に何回転(n 回転)するかを求め回転速度 $\omega = 2\pi n$ を求めた。図-6に斜面脚部($H=65m$ 付近)での形状別

図-5 回転速度の測定概念図

回転速度の分布を示した。回転速度は塊状岩石では $(0\sim 10) \times 2\pi$ rad/s、板状岩石では $(0\sim 8) \times 2\pi$ rad/s、棒状岩石では $(0\sim 7) \times 2\pi$ rad/sである。回転速度は落石の形状別にみると塊状と板状の間ではほとんど差異が見られず、両者のとも最も頻度が高いのは $(4\sim 5) \times 2\pi$ rad/sである。これに比べ、棒状岩石では分布全体が原点側に寄り塊状、棒状岩石より回転速度が遅い。棒状岩石は落下中に回転軸が変わ

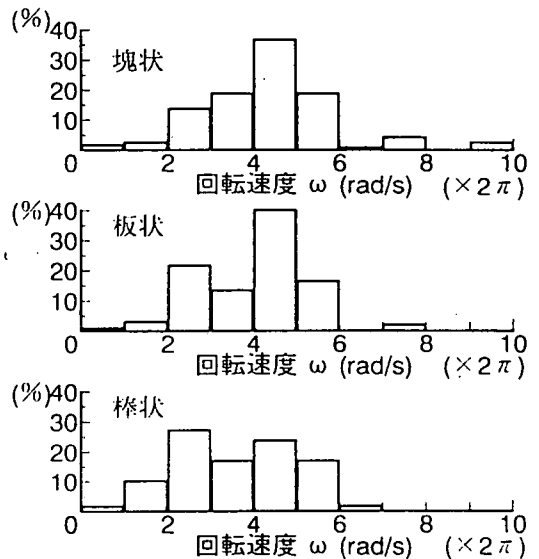


図-6 回転速度の分布

り易く、そのため運動形態が回転、すべり、跳躍と変わり易いことが原因と考えられる。

5.3 跳躍量

跳躍運動をしている岩石のみを取り上げ、形状別に跳躍量がどの程度であるかをまとめた。跳躍量とは図-7に示すように斜面に衝突した時の重心の位置が衝突後斜面に垂直にどの程度変位した

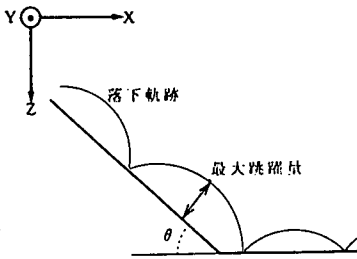


図-7 最大跳躍量の測定概念図

かを示す量である。跳躍量は落石防護工の設計外力の作用限界位置を推定するのに重要である。図-8は本実験での最大跳躍量 h と垂直落下高さ H の関係を示した。データ数は200個である。一般に最大跳躍量は落石形状によらず、ほとんど2m以下であると報告^{6) 11)}されており、本実験の場合も最大跳躍量は落石形状によらず約2m以下が大部分を占めている。垂直落下高さが20~30mのところでは最大跳躍量が2mを超える岩石が測定されたが、これは図-3の斜面1と斜面2の間にある小段差の影響と考えられる。したがって、最大跳躍量は斜面の凹凸や小段差等により影響を受けること考慮しておく必要がある。

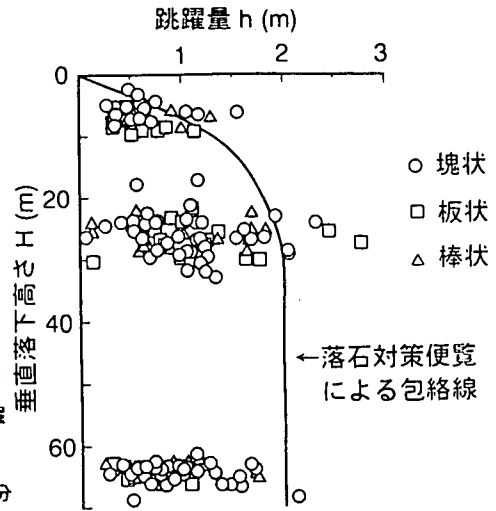


図-8 最大跳躍量と垂直落下高さの関係

5.4 走向方向への拡がり

落石の斜面走向方向への

拡がり (Y方向への拡がり)

は、図-9に示すように原

石投下点(A)と落石が斜面脚

部に到達した点(B)とを結ん

だ線分がX軸となす角で示

す。どの程度走向方向に拡

がるかは落石防護工の長さ

を設定する上で非常に重要

である。図-10は、Y方向への拡がりの分布を岩石の形状別

にヒストグラムで示したものである。データ数は300個である。

一般に拡がりの幅は45°程度以内と言われているが^{6) 11)}、本

実験結果は拡がり が最も大きい板状岩石の場合、49°であり通

常言われている値より若干大きくなった。板状岩石は図-11

に示すように垂直落下高さが増加する(落下速度が増加する)

と立った状態で車輪のように回転運動をする傾向があり、一旦

回転運動を開始すると外的要因が加わらない限り跳躍運動に移

行する以外は、そのままの運動を続ける。したがって、板状岩

石は走向方向への進行が不安定になり形状別にみた場合、最も

拡がりが大きくなったと考えられる。板状岩石は一般に安全と

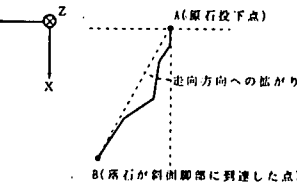


図-9 走向方向への拡がりの測定概念図

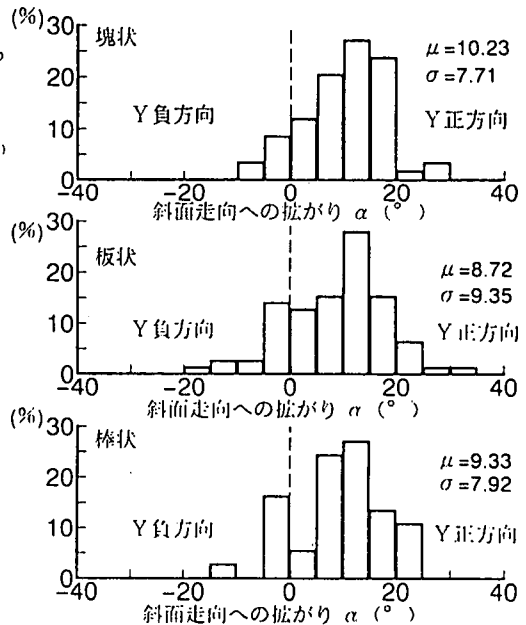


図-10 走向方向への拡がりの分布

みなされているが、落石のY方向への拡がりからみると、板状岩石が車輪のように回転する長大斜面では必ずしも安全とは考えられない。

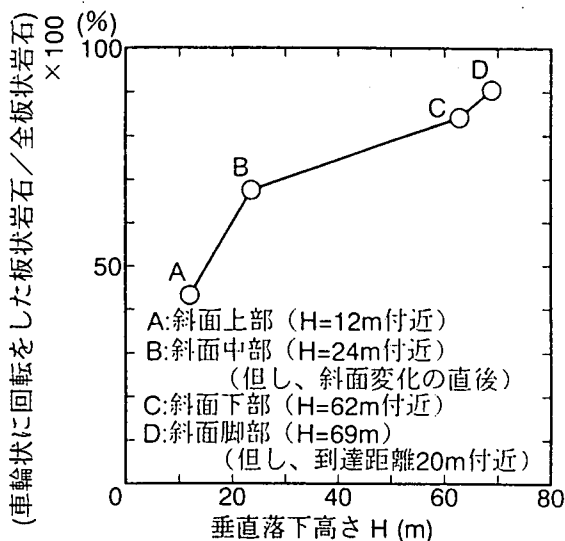


図-1-1 板状岩石のうち車輪状の回転をする割合

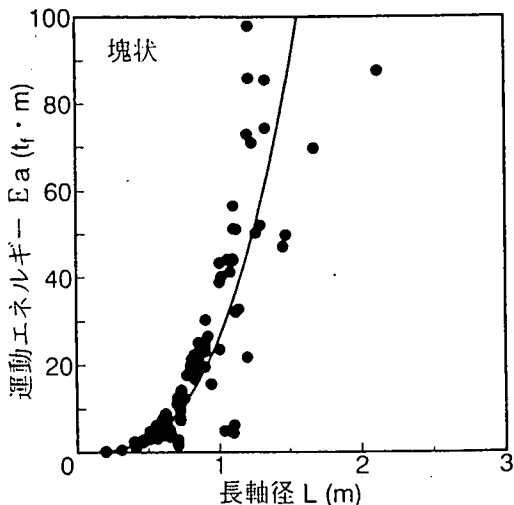


図-1-2 運動エネルギーと長軸径の関係

5. 5 運動エネルギーと長軸径の関係

落石防護工をエネルギー基準⁶⁾に基づき設計する場合に必要とする落石の運動エネルギーについて述べる。斜面脚部付近における落石の運動エネルギー E_a は、線速度エネルギーと回転エネルギーの和として次式により表される。

$$E_a = W V^2 / 2 + I \omega^2 / 2 \quad (2)$$

ここに、 W は落石の重量、 V は落下速度、 ω は回転速度である。また、慣性モーメント I は、岩塊を直六面体とみなして(3)式で求めた。

$$I = W \times (L^2 + M^2) / 12 \quad (3)$$

ここに、 L は長軸径、 M は中軸径である。落石の運動エネルギー E_a と長軸径 L の関係(塊状)を図-1-2に示した。データ数は300個である。また、これを次式を用いてべき乗近似した曲線も同図に示した。

$$\ln(E_a) = a_0 + a_1 \times \ln(L) \quad (4)$$

上式で a_0 と a_1 は定数である。形状別のこれらの値とそれぞれの相関係数 r を以下に示す。

- ① 塊状岩石 : $a_0=3.262$ 、 $a_1=2.993$ 、 $r=0.916$
- ② 板状岩石 : $a_0=2.207$ 、 $a_1=3.812$ 、 $r=0.860$
- ③ 棒状岩石 : $a_0=1.735$ 、 $a_1=2.957$ 、 $r=0.780$

したがって、(4)式は本実験における斜面脚部付近での E_a と L の関係を示す式であるが、 L と E_a の間にかんがりの明瞭な関係が認められ、同じ形の関数を用いることによって落石の運動エネルギーをその長軸径から簡便に推定できる可能性がある。

6. まとめ

本論文では、碎石場の斜面で行った落石の挙動に関するフィールド実験の結果を述べた。本実験によって得られた結果と知見は次のようである。

- (1) 落石における岩石形状を塊状、板状、棒状の3種類に分類することを提案した。角礫状岩石の真重量は、長・中・短軸径の積に密度と単位質量当たりの重量を乗じた計算重量に重量補正係数0.524を乗じた値で推定した。
- (2) 本実験における速度残存係数 α は0.78であった。また、垂直落下高さが40mを超えると落石の衝突速度は一定値に収束す

ると言われているが、本実験ではその傾向が認められたが明瞭ではない。

- (3) 回転速度は塊状と板状岩石の間にはほとんど差異が見られなかったが、棒状岩石は塊状、板状岩石より遅かった。
- (4) 最大跳躍量は大部分が2m以下であった。しかし、斜面の勾配や走向の変化によっては2mを越す岩石もあり得るので注意する必要がある。
- (5) 走向方向への拡がりは板状岩石の場合、斜面が長大であればあるほど大きくなり板状岩石が安全であるとは言えない。
- (6) 落石の運動エネルギーはその長軸径から簡便に推定できる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) 吉田 博、榎谷 浩、右城 猛、柴田健次：落石覆工の設計と合理的設計へのアプローチ、土木学会論文集、第421号/VI-13、pp.213-222、1990.
- 2) 氏平増之、高貝暢浩、小川健太、水島照悦：斜面における落石堆積物の偏析性を利用した落石粒度分布推定法について - 最大落石径の推定に関する基礎的研究 (第1報) - 、資源と素材、Vol.111、No.3、pp.155-161、1995.
- 3) 氏平増之、小川健太、細谷昭悟：振動検出用ケーブルセンサを用いた震源位置標定システムに関する研究、北海道応用地学合同研究会論文集、No.7、pp.33-38、1996.
- 4) 氏平増之、細谷昭悟、高貝暢浩、小川健太、小野修司：岩石の形状分類法と重量推定値の関係、資源と素材、Vol.112、No.3 pp.10-15、1996.
- 5) 氏平増之、高貝暢浩、小川健太：岩盤斜面における落石の運動に関する研究、北海道応用地学合同研究会論文集、No.6、pp.23-31、1995.
- 6) 日本道路協会：落石対策便覧、pp.8-219、丸善、1983.
- 7) Zingg, T. : Die Schotteranalyse und ihre Anwendung auf die Glattalschotter、Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen、Vol.15、pp.39-140、1935.
- 8) 最上武雄：土質力学、pp.893-903、技報堂、1973.
- 9) 大山 正：実験心理学、pp.59-78、東京大学出版会、1989.
- 10) 氏平増之、高貝暢浩、鈴木 守、佐藤公則、岩佐卓実：北海道南西沖地震における落石災害と衝撃荷重の推定、北海道応用地学合同研究会論文集、No.5、pp.1-10、1994.
- 11) 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、Vol.37A、pp.1603-1616、1991.