

A new approach to estimate jump heights of falling rocks

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-02-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 勘田, 益男, 荒井, 克彦, KANDA, Masuo, ARAI, Katsuhiko メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/7281

落石跳躍量予測方法の提案

A new approach to estimate jump heights of falling rocks

有限会社斜面防災研究所 / 勘田 益男

5 Institute of Slope Stability / Masuo KANDA

福井大学 / 荒井 克彦

University of Fukui / Katsuhiko ARAI

キーワード：落石，跳躍量，落石シミュレーション

10 Keywords: rock fall, jumping height,
rock fall simulation

1. まえがき

15 落石対策のための防護施設を設計する場合，落石運動
エネルギーと，防護施設位置での衝突高さを推定しなければ
ならない。運動エネルギーの推定には，落石対策便
覧¹⁾による次式が実務で広く用いられている。

$$E = (1 + \beta)(1 - \mu / \tan \theta)W \cdot H \quad \dots (1)$$

20

ここで， E ：落石の運動エネルギー， β ：回転エネルギー
係数（0.1）， μ ：等価摩擦係数（表-1 参照）， θ ：斜面
勾配， W ：落石重量(kN)， H ：落下高さ(m)で，落石の発
生源と落石が衝突する防護施設との落差である。回転エ
25 ネルギー係数は回転エネルギーと線速度エネルギーとの

表-1

比であり，落石対策便覧では既往の落石実験より 0.1 としている。

衝突高さを推定するためには，落石の跳躍量を把握する必要がある。落石対策便覧では図-1 に示す軌跡の最大

図-1

5 跳躍量を採用するとしており，「最大跳躍量 h は，一般的な斜面形状の場合には落石の形状によらず，ほとんどが 2m 以下（総落石数の 80～85%）であるが，斜面に突起があるところを超える」としている。また，「凹凸の少ない斜面では跳躍量が 2m を超えることは少ないが，斜面上の局所的な突起のある場合や，凹凸の多い斜面では，10 跳躍量は 2m 以上になることがあり，落下高さの大きい場合には 4～5m に達することもある」としている。さらに，個々の現場状況に応じた落石運動シミュレーション解析（以下では落石シミュレーションと略称する）を実施15 することが望ましいとしている。

実際の設計では，落石対策便覧における跳躍量が 2m 以上となる条件を明確に把握しにくいことから，跳躍量を 2m 以下として設計している場合が多い。跳躍量を精度よく推定するには，落石シミュレーションを行うことが20 適切であるが，費用や時間の制約から実施できない場合も多い。本報では，著者が過去に実施した落石シミュレーションにおける跳躍量データを集計・整理することにより，簡便で実用的な跳躍量の予測方法を提案する。

25 2. 落石シミュレーションの概要

2.1 落石シミュレーション手法

落石シミュレーション手法は確立されているが，本報では落石シミュレーションによる結果の詳細な分析を行うため，以下で落石シミュレーション手法について説明する。落石シミュレーションには，確率論的な質点系解析法²⁾（以下では質点系解析と称する）と，確定論的に個別要素法などを用いる手法がある。質点系解析は，過去の落石実験データより得られた斜面の凹凸や地盤状態，落石形状などの影響を表わす係数を用いて確率論的に 2次元の運動形態を再現する。後者は，斜面と落石の形状や特性を与えて不連続変形法や個別要素法を適用して時刻歴解析を行う方法で，落石形状の影響が大きい岩盤崩壊に用いられる場合が多い。本報では，利用実績が多い質点系解析を用いる。

質点系解析による落石シミュレーションは以下の特徴をもつ。a) 図-2に示す例のように，防護する衝突面AやBにおける運動エネルギー（衝突速度），衝突位置（高さ）が求められる。b) 落石重量が大きく，図-3に示すように斜面上に緩衝施設を設けて落石運動エネルギーを減ずる対策方法を用いるような場合，衝突する落石運動エネルギーから緩衝施設の吸収エネルギーを減じて，落石運動の継続，停止を判断できる。c) 斜面の任意の位置で傾斜や落石エネルギー減衰を任意に考慮でき，落石エネルギー減衰を考慮する斜面の範囲を指定できる。d) 斜面の任意位置で，その点を通過する落石の地表面高さ，

図.2

図.3

水平となす角度，速度，運動形態などを表現できる。e) 落石シミュレーションの試行回数を指定し，その軌跡を作画でき，その結果を用いて落石対策工設置位置の検討を行える。f) 落石の停止位置を出力でき，落石の到達範囲を確率的に検討できる。

2.2 落石シミュレーションに必要なパラメータ

落石の運動形態を，a)すべり，b)回転，c)跳躍，d)衝突に分類する。運動形態ごとの要因と，その要因を表現するためのパラメータを求める方法を表-2に示す。表-2の運動形態ごとの基礎方程式を以下に示す。

a) すべり運動：図-4(a)に示すように，斜面勾配 θ ，摩擦係数 μ' とし，斜面方向の初速度を V_0 とすると，斜面方向の t 秒後のすべり速度 V ，すべる距離 S は次式で与えられる。

図-4

$$V = V_0 + gt(\sin \theta - \mu' \cos \theta) \quad \dots (2)$$

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} gt^2 (\sin \theta - \mu' \cos \theta) \quad \dots (3)$$

斜面上を落石がすべり落ちる場合，落石はすべり摩擦以外にも，草や樹木，斜面上の微少な凹凸などからの抵抗を受ける。それら全ての抵抗は，運動速度に比例する粘性抵抗と仮定する。この粘性抵抗係数を C_k とすると，式(2)，(3)は次式となる。

25

$$V = \frac{a}{C_k} + \left(V_0 - \frac{a}{C_k} \right) e^{-C_k t} \quad \dots \dots (4)$$

5
$$S = \frac{a}{C_k} t + \frac{1}{C_k} \left(V_0 - \frac{a}{C_k} \right) (1 - e^{-C_k t}) \quad \dots \dots (5)$$

ここで、 a ：斜面方向の加速度であり、次式で表される。

$$a = g(\sin \theta - \mu' \cos \theta) \quad \dots \dots (6)$$

ここで、 g ：重力加速度である。すべりが生じる条件は
10 次式で表される。

$$\tan \theta > \mu' \quad \dots \dots (7)$$

b) 回転運動

15 図-4(b)に示すように、質量 m 、半径 r の球体の落石がすべらずに、回転して斜面を落下する場合、斜面方向の t 秒後の移動速度 V 、移動距離 S は次式で与えられる。
図-4(b)で、 F ：落石と斜面の摩擦力、 N ：落石への斜面反力である。

20
$$V = V_0 + \frac{r^2}{k^2 + r^2} g t \sin \theta \quad \dots \dots (8)$$

$$S = V_0 t + \frac{r^2}{2(k^2 + r^2)} g t^2 \sin \theta \quad \dots \dots (9)$$

25 ここで、 V_0 ：初速度、 k ：球の慣性モーメントと質量の

比の平方根で表される距離で，球の回転半径と称する。
 前述の a) すべり運動と同じように粘性抵抗を仮定すると，移動速度と移動距離は式(4)，(5)と同じ式で与えられる。ただし，式中の加速度 a は次式で与えられる。

5

$$a = \frac{r^2}{k^2 + r^2} g \sin \theta \quad \dots \dots (10)$$

すべらずに，回転して落下する条件は次式で与えられる。

10

$$\frac{r^2}{(k^2 + r^2)} \tan \theta \leq \mu \quad \dots \dots (11)$$

c) 跳躍運動

図-5 に示すように，斜面上のある点 (x_0, y_0) から，水平となす角 β で初速度 V_0 で飛び出す物体の落下点の座標 (x_d, y_d) は次式で与えられる。

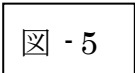


図-5

15

$$x_d = x_0 + \frac{2V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\tan \theta - \tan \beta), \quad y_d = y_0 + (x_d - x_0) \tan \theta \quad \dots \dots (12)$$

20 落石に対する空気抵抗を考慮する場合，空気抵抗係数を α_k とすると， t 秒後の x, y 方向の速度 (V_x, V_y) と位置座標 (x, y) は次式で与えられる。

25

$$V_x = V_0 \cos \beta e^{-\alpha_k t}, \quad V_y = \frac{g}{\alpha_k} + \left(V_0 \sin \beta - \frac{g}{\alpha_k} \right) e^{-\alpha_k t} \quad \dots \dots (13)$$

$$x = x_0 + V_0 \cos \beta \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k}, \quad y = y_0 + \frac{gt}{\alpha_k} + \left(V_0 \sin \beta - \frac{g}{\alpha_k} \right) \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k}$$

．．．．(14)

空気抵抗係数 α_k は速度に比例すると仮定し，一般的な $\alpha_k = 0.001$ を用いる。跳躍開始から t 秒後の斜面垂直方向
5 の速度 V_v は次式で与えられる。

$$V_v = V_{v0} - gt \cos \theta \quad \cdot \cdot \cdot (15)$$

ここで， V_{v0} ： V_0 の斜面直角方向の成分である。最大跳
10 躍量は $V_v = 0$ として求められる。速度 V が限界速度 V_{or} を越すと，回転運動から跳躍運動に移行するとし， V_{or} は実験データに基づいて決定する。

d) 衝突運動

15 図-5 に示すように， β_1 ：斜面への衝突前に入射角度， V_1 ：入射速度， β_2 ：衝突後の反射角， V_2 ：反射速度とすると，衝突後の速度の，斜面垂直，斜面方向の速度成分 V_{v2} ， V_{H2} は次式で与えられる。

$$20 \quad V_{v2} = eV_1 \sin \beta_1 \quad , \quad V_{H2} = \rho V_1 \cos \beta_1 \quad \cdot \cdot \cdot (16)$$

ここで， e ， ρ ：速度の斜面垂直方向，斜面方向の反発係数である。 e ， ρ を用いて，落石の衝突前と後の運動エネルギーの比は次式で与えられる。

25

$$\gamma = \rho^2 \cos^2 \beta_1 + e^2 \sin^2 \beta_1 \quad \cdot \cdot \cdot (17)$$

表-2の中で，理論的に求められるパラメータは基礎運動方程式に関連づけて，以上のように示した。理論的に求められないパラメータは既往の落石実験データに基づいて表-3のように求める。

表-2

表-3

2.3 その他の必要データ

落石シミュレーションは上述のパラメータの他に次のデータを必要とする。①落石の直径，重量とスタート位置，②落下が予想される経路の斜面断面図，③斜面の岩質・土質，植生。落石直径は回転運動の表現に，落石重量は運動エネルギーを求めるために必要である。また，反発係数のように，落石重量によって決まるパラメータもある。斜面の岩質・土質や植生は摩擦係数，粘性抵抗係数，反発係数，限界速度を決めるために必要となる。

2.4 落石シミュレーションの手順

落石の運動形態が様々な条件で変化することを考慮して，落石シミュレーションを図-6に示すフローチャートに従って行う。運動形態の変化の基本的な考え方は以下のとおりである。a) 落石が回転運動している場合，回転運動を続けるか，すべり運動に移行するかを式(11)で判定する。跳躍運動への移行は，2.2 c)の方法で判定する。すべての運動形態に対して速度が0になった場合，

図-6

落下が停止するとして計算を終了する。b) 落石がすべり運動している場合、すべり運動を続けるか、回転運動に移行するかを式(11)で判定する。法線反発係数 e を $0 < e < 1$ の範囲としているため、落石が跳躍運動を一度始めると、他の運動形態に移行しなくなる。そこで、斜面衝突後の斜面方向の跳躍距離が落石直径の $1/10$ 以下（図-6 中に示す ΔS 以下）になった場合は、回転運動からすべり運動に移行させる。

落石シミュレーションにおける主なパラメータは、信頼区間 95% をもつ正規乱数を用いている。参考文献 3) の結果に従い、落石シミュレーションの試行回数を 300 回、採用値は平均値 + 2 × 標準偏差の値とする。落石シミュレーションの入力データ例を図-7 に示す。

図-7

3. 落石シミュレーションからの跳躍量の推定

3.1 落石シミュレーションの信頼性

図-8 に示すように、富山県の立山有料道路における長大斜面で実施された大規模な落石実験結果⁴⁾で、多数の落石（総数 219 個、最大 400kN）の実際に計測された停止位置は、落石シミュレーションで求めた停止位置と極めて近い結果となることが示された。この結果は落石シミュレーションの精度の高さを検証している。また、落石シミュレーションは極めて多数の実際斜面の落石対策に一般的に適用されている信頼性が高い手法であり、落石シミュレーションによる跳躍量の推定も信頼性がある

図-8

と考えられる。

3.2 落石シミュレーションによる跳躍量データ

著者が過去に行った多数の現場での落石シミュレーション結果から求まる跳躍量を表-4に示す。対象とした現場は以下の方針で選択した。1) 落下高さに制限を設けない, 2) 斜面の土質区分に制限を設けない, 3) 落石重量に制限を設けない, 4) 試行回数 300 回, 「平均値 + 2×標準偏差」を採用している。

表-4

10 落石対策便覧では, 最大跳躍量 h を, 落石重心の軌跡の斜面垂直方向高さの最大値と定義している(図-1)。落石シミュレーションでは, 防護柵のように鉛直方向に防護施設を設ける場合が多いため, 図-9に示すように鉛直方向跳躍量(h_1)の最大値を求めるが, 落石対策便覧の定義と整合させるため, 鉛直方向跳躍量(h_1)から斜面垂直方向跳躍量(h_2)を求めて表-4に示した。したがって, 本報で定義する跳躍量は, 落石対策便覧と同様に斜面垂直方向跳躍量である。表-4中の「到達率」は, 図-7に示すように, 発生源から照査位置まで止まらずに到達した割合である。「崖錐の占める割合」は, 発生源から照査位置までの斜面表面の土質を崖錐と岩盤に区分したときの崖錐の割合である。

図-9

3.3 跳躍量の分析

25 落石跳躍量には様々な要因が影響する。以下では, 著

者の多数の経験に基づいて、跳躍量に影響する多様な要因についての分析とまとめを行う。

a) 突起や凹凸が顕著な場合

図-10 に、落石シミュレーションによる跳躍量の度数
5 分布を示す。跳躍量 2m 以下のケースは 30/63 と半数に
満たない。そこで、跳躍量の極端に大きいケースについ
て個々に検証する。跳躍量が大きいケースは、落石対策
便覧で「斜面上の局所的な突起のある場合や、凹凸の多
い斜面では、跳躍量は 2m 以上になることがある」とし
10 ている場合(以下では突起や凹凸が顕著な斜面と称する)
に相当すると考えられる。著者の経験では、跳躍量が
大きいケースは以下の 3 つの要因(図-11)に分類される。
①斜面中の突起や凹凸、②山麓部(防護位置付近)に遷
急点(斜面上方からみて勾配が緩から急に变化する点)
15 を有する地形、③山麓部(防護位置付近)の法面小段。
要因③は突起の一種ではあるが、人工的な形状であるこ
とから取り扱いを突起とは別とした。

図-12 に要因①のみの、図-13 に要因①と②、図-14 に
要因①と③、図-15 に要因②と③の重なった事例の軌跡
20 図を示す。要因②では下部の斜面勾配が急になるため、
ジャンプ台のように飛び出て跳躍量が増加する。要因②
と③では、防護位置に近い場合、防護施設への影響が大
きくなる。図-12 と図-14 で、斜面全体の地形は同じで、
小段の有無のみが異なるが、小段がある図-14 の跳躍量
25 が明らかに大きい。表-4 で、突起や凹凸が顕著な斜面を

図-10

図-11

図-12

図-13

図-14

図-15

除くと，跳躍量が 2m 以下となる比率は 29/42（約 70%）になる。

b) 斜面勾配

表-4 に基づき，跳躍量と落下高さ H （式 1 参照）の関係を図-16 に示す。落下高さが大きくなると跳躍量が増加する傾向が認められる。跳躍量と斜面勾配の関係を図-17 に示す。斜面勾配と跳躍量の相関は明確ではない。

図-16

図-17

c) 遷急点を有する地形

山麓部に遷急点がある場合，斜面上部の跳躍開始の緩斜面勾配を延長した線から求めた跳躍量（図-18 参照）を表-5 に示す。遷急点の有無の他に突起や凹凸，小段の影響もあるため全体的に跳躍量は大きいですが，遷急点を有する地形のみのケースでの跳躍量は 3m 程度である。

図-18

表-5

3.4 跳躍量予測方法の提案

3.3 の分析結果に基づいて，以下では，精度の高い新たな予測方法の提案を行う。

a) 標準的な値

斜面の地形的要因により跳躍量が大きく変化することを示した。突起や凹凸が顕著な斜面を除いた比較的一様な斜面では，跳躍量 2m 以下の比率が 70%，跳躍量 3m 以下の比率が 90%となった。実際斜面での落石対策の設計で跳躍量 2m 以下と標準的に設定することは，比較的一様な斜面でも危険となる可能性がある。安全側の標準的な値として，跳躍量 3m を提案したい。

b) 落下高さ H (式 1 参照) からの予測

過去の落石シミュレーションの整理結果では、図-16に示したようにバラツキは大きいものの、跳躍量 h (m) と落下高さ H (m) に次のような傾向がある。

5

$$h = 0.01H + 2.0 \quad \dots (18)$$

c) 遷急点を有する地形

遷急点を有する地形の場合の跳躍量を予測する方法を示す(図-19)。遷急点 (x_0, y_0) から跳躍を開始すると仮定する。遷急点に達する速度 V_0 は、式(1)の運動エネルギーから求められる。

図-19

10

$$V_0 = \sqrt{E2g/W} \quad \dots (19)$$

ここで、 E : 落石の運動エネルギー(kJ)、 W : 落石重量(kN)、 g : 重力加速度である。飛び出し角 β は、表-4
15 に示す法線反発係数と接線反発係数を用いて次のように決める。法線反発係数と接線反発係数の設定は平均値からスタートして、法線反発係数は95%信頼区間の上限値に向かって、接線反発係数は95%信頼区間の下限値に向かって数値の組み合わせを変化させる。数回試行すれば
20 傾向が把握できる。跳躍量が最大となるのは、法線反発係数が95%信頼区間の上限値、接線反発係数が下限値の場合となる。以上のデータから式(12)で座標 x_d, y_d を計算して軌跡が与えられ、跳躍量が決まる。

25 4. あとがき

著者が過去に実施した多数の落石シミュレーション結果を整理・分析して，落石跳躍量の新たな予測方法を提案した。提案した方法を用いることで，より精度の高い落石跳躍量の予測が可能になると考えられる。

5

参考文献

- 1) 日本道路協会(2000):落石対策便覧，日本道路協会，422p.
- 2) 勘田益男(2002):落石対策工設計マニュアル，理工
10 図書，210p.
- 3) 日本道路協会(2002):落石対策便覧に関する参考資料－落石シミュレーション手法の調査研究資料－，日本道路協会，422p.
- 4) 土肥行雄・清水晴彦・佐伯滋・吉田博・四藤勝彦
15 (1993):立山有料道路における巨岩処理と落石エネルギー評価，土木学会第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.140-145.

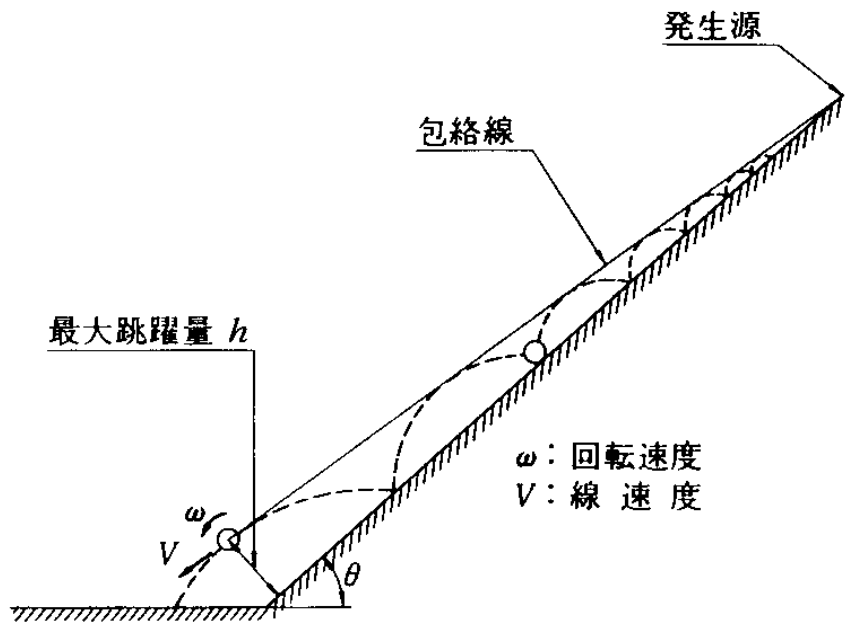


図-1 落石の軌跡の模式図 (その1) ¹⁾

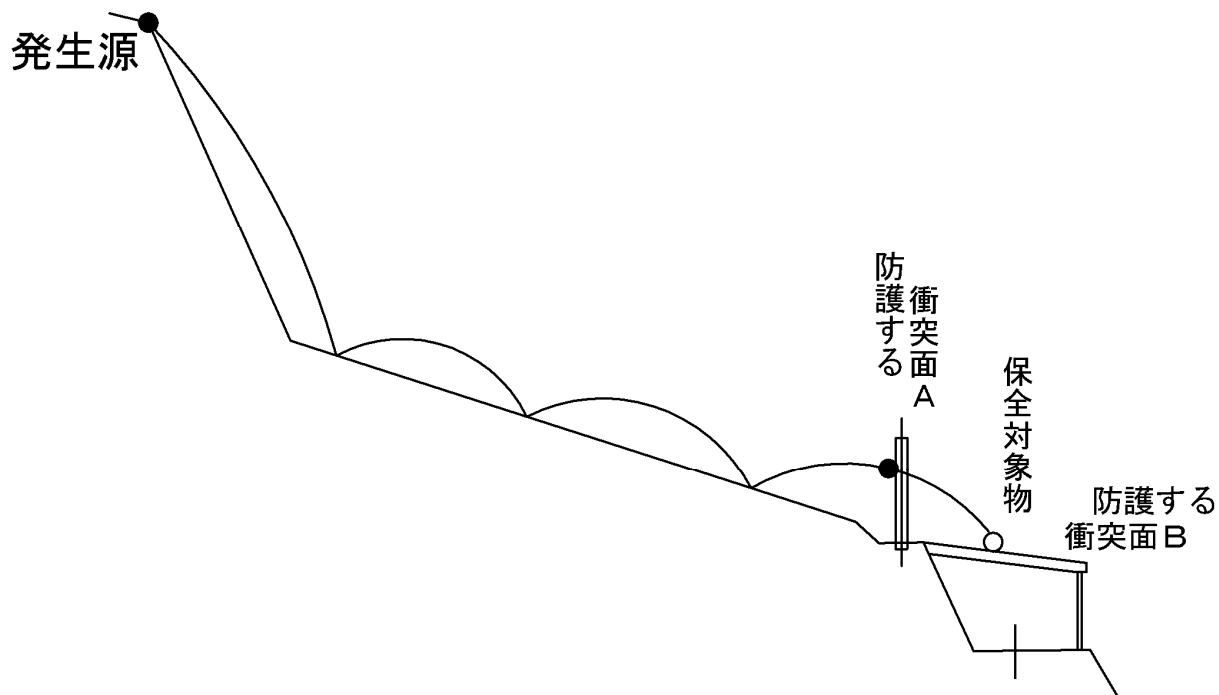


図-2 落石の軌跡の模式図 (その2)

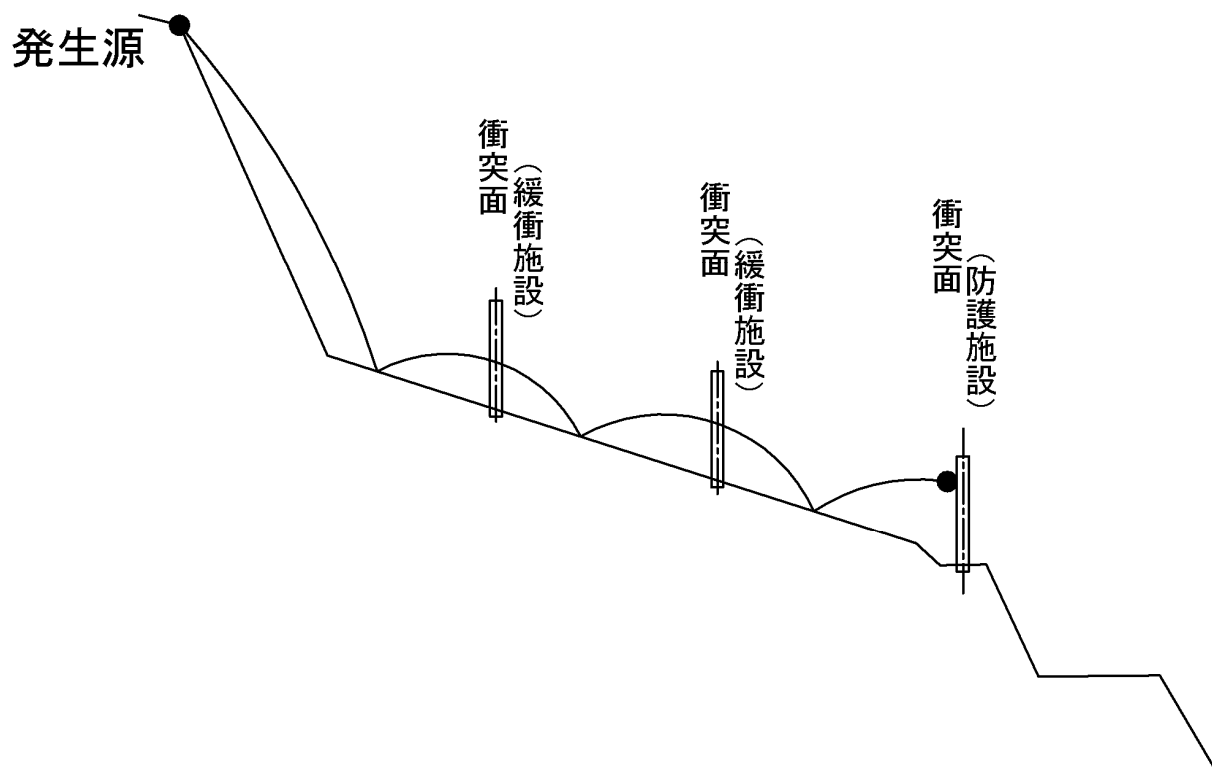
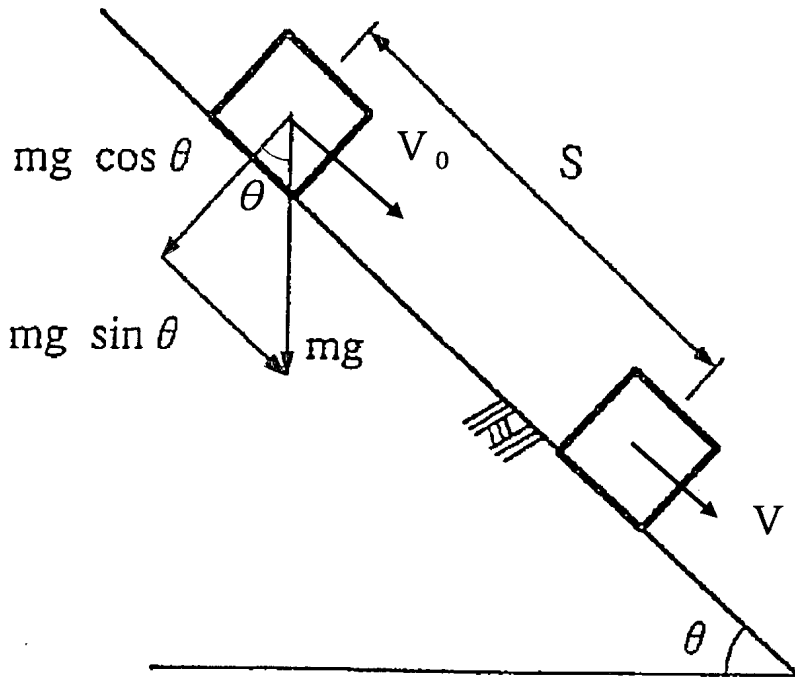
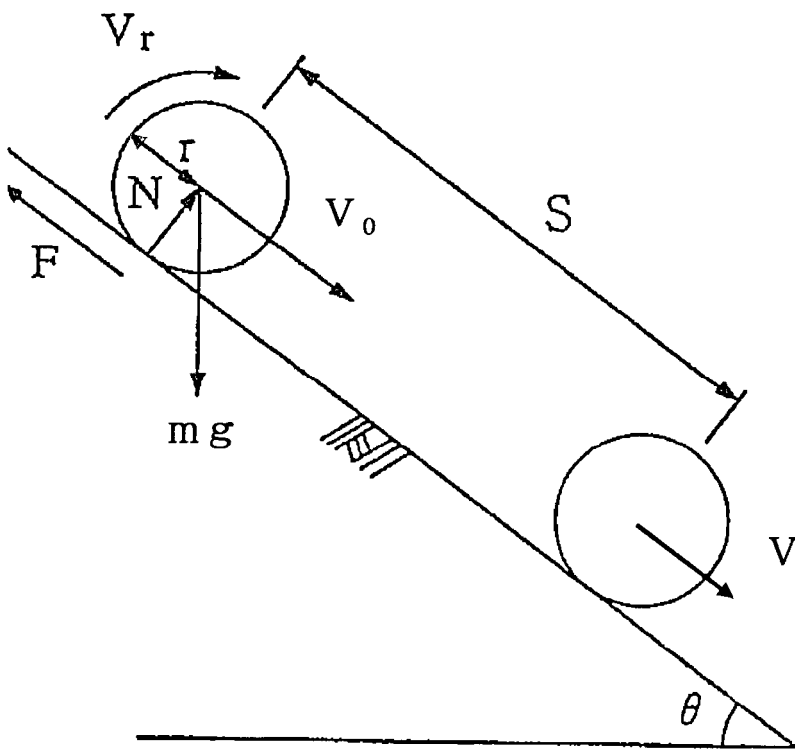


図-3 緩衝施設のある斜面を落下する落石の運動



(a) すべり運動



(b) 回転運動

図-4 落石のすべり運動と回転運動

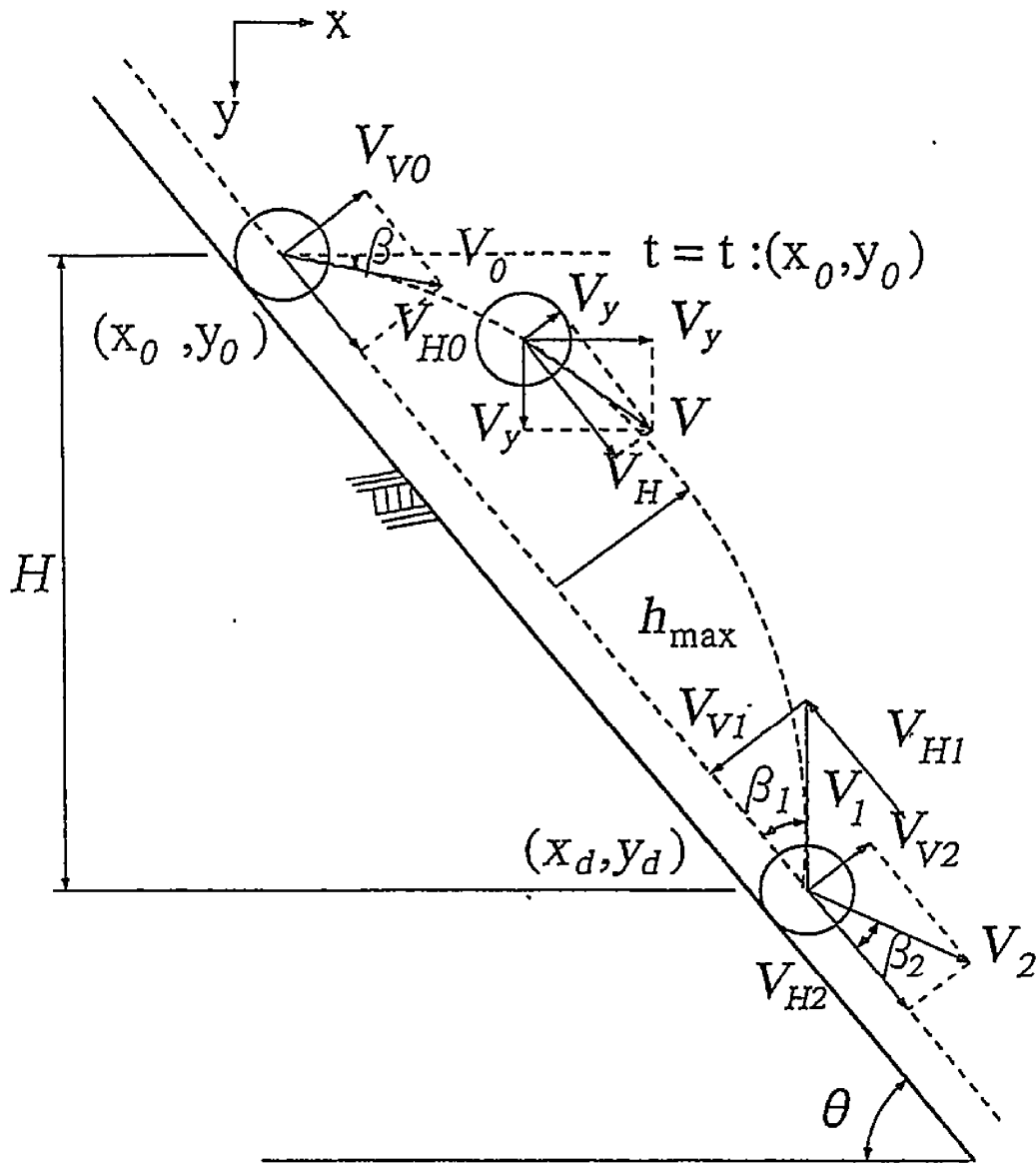


図-5 落石の跳躍運動と衝突運動

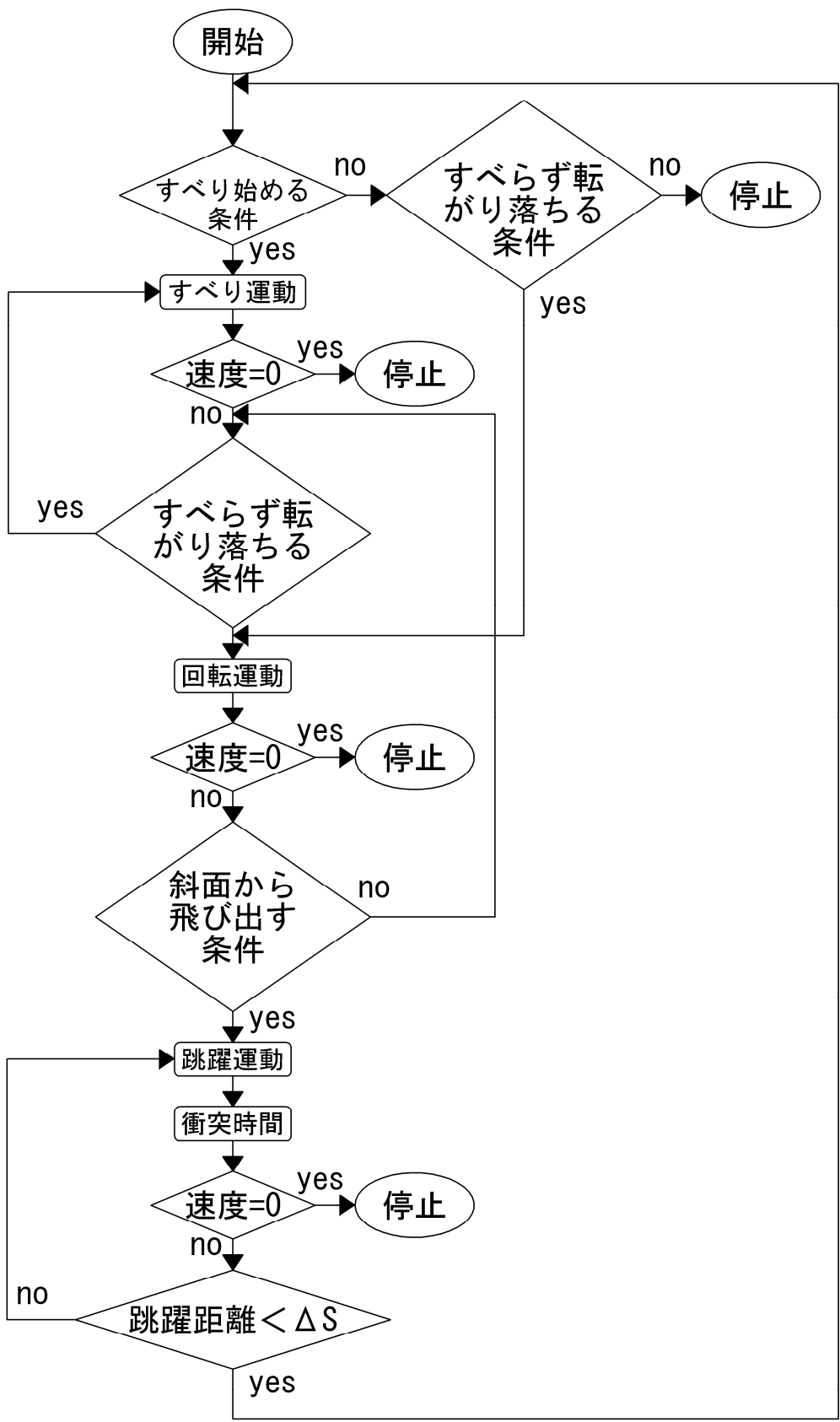


図-6 落石シミュレーションの手順²⁾

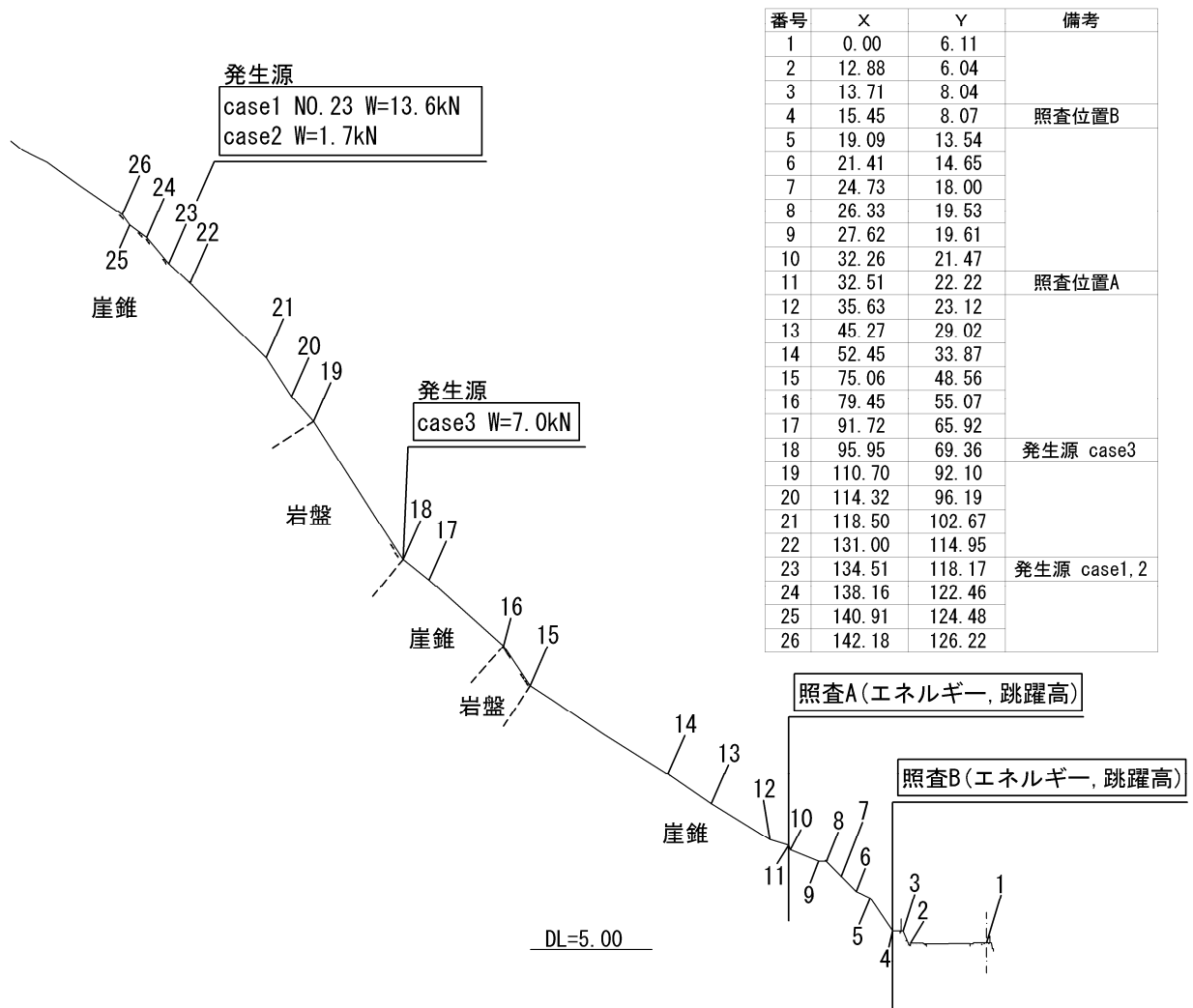


図-7 落石シミュレーションのデータ入力例

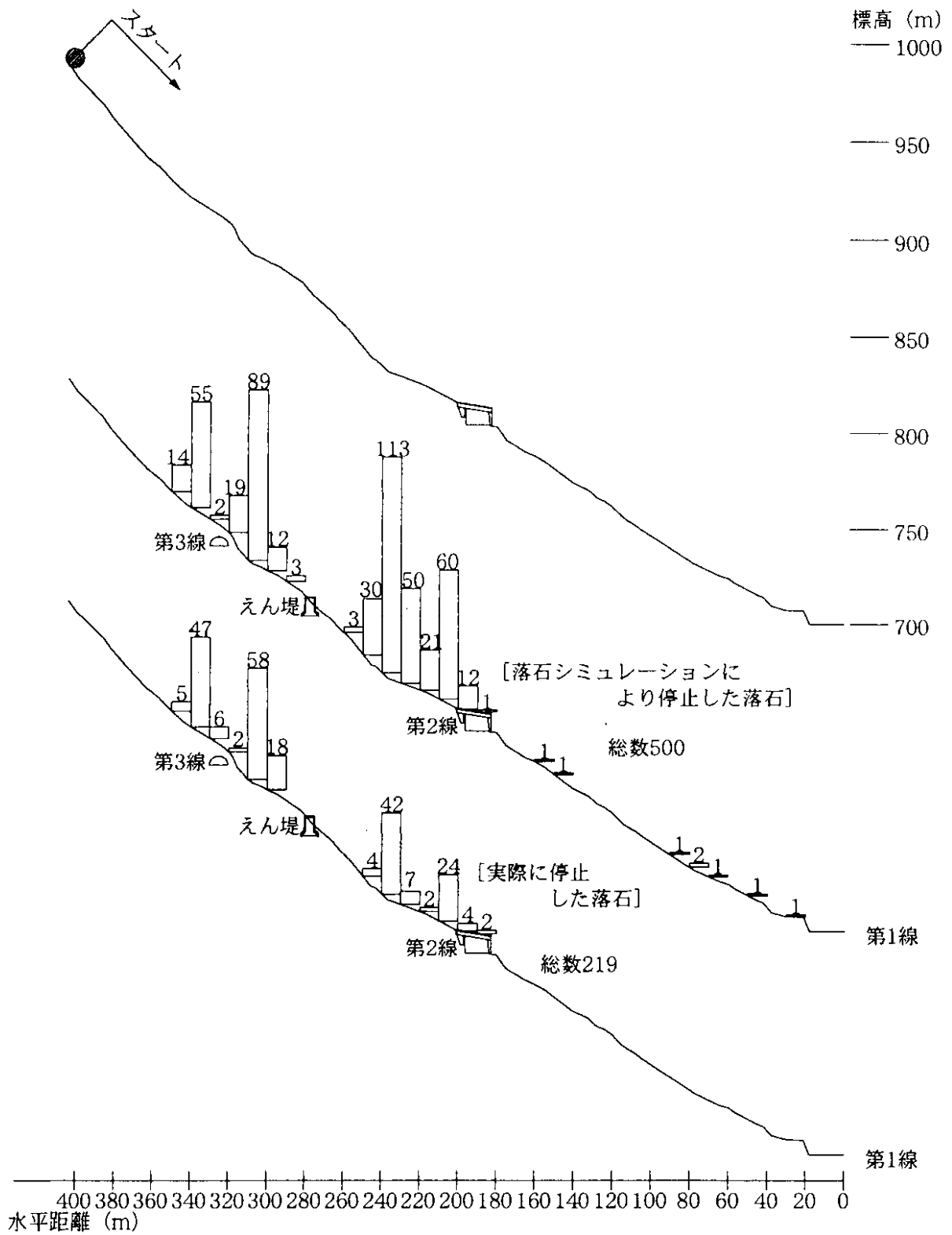


図-8 立山有料道路での現場実験と落石シミュレーションによる度数分布⁴⁾

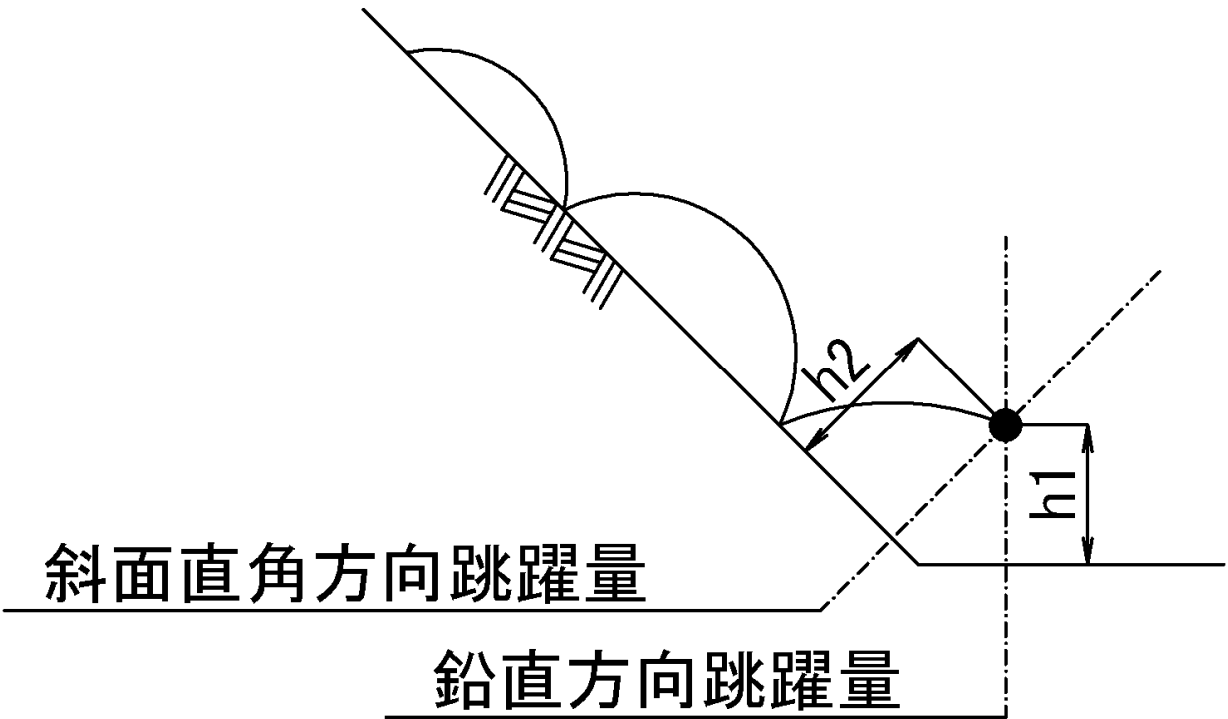


図-9 落石シミュレーションにおける跳躍量照査のパターン

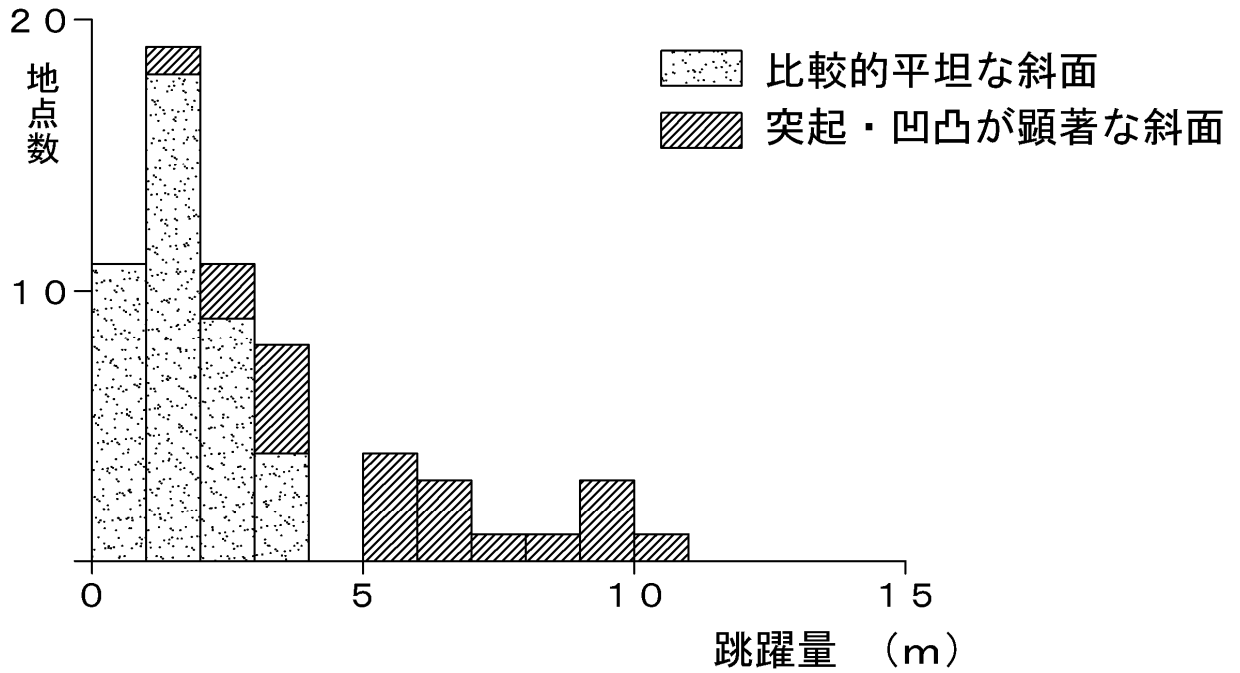


図-10 落石シミュレーションにおける跳躍量ごとの度数分布

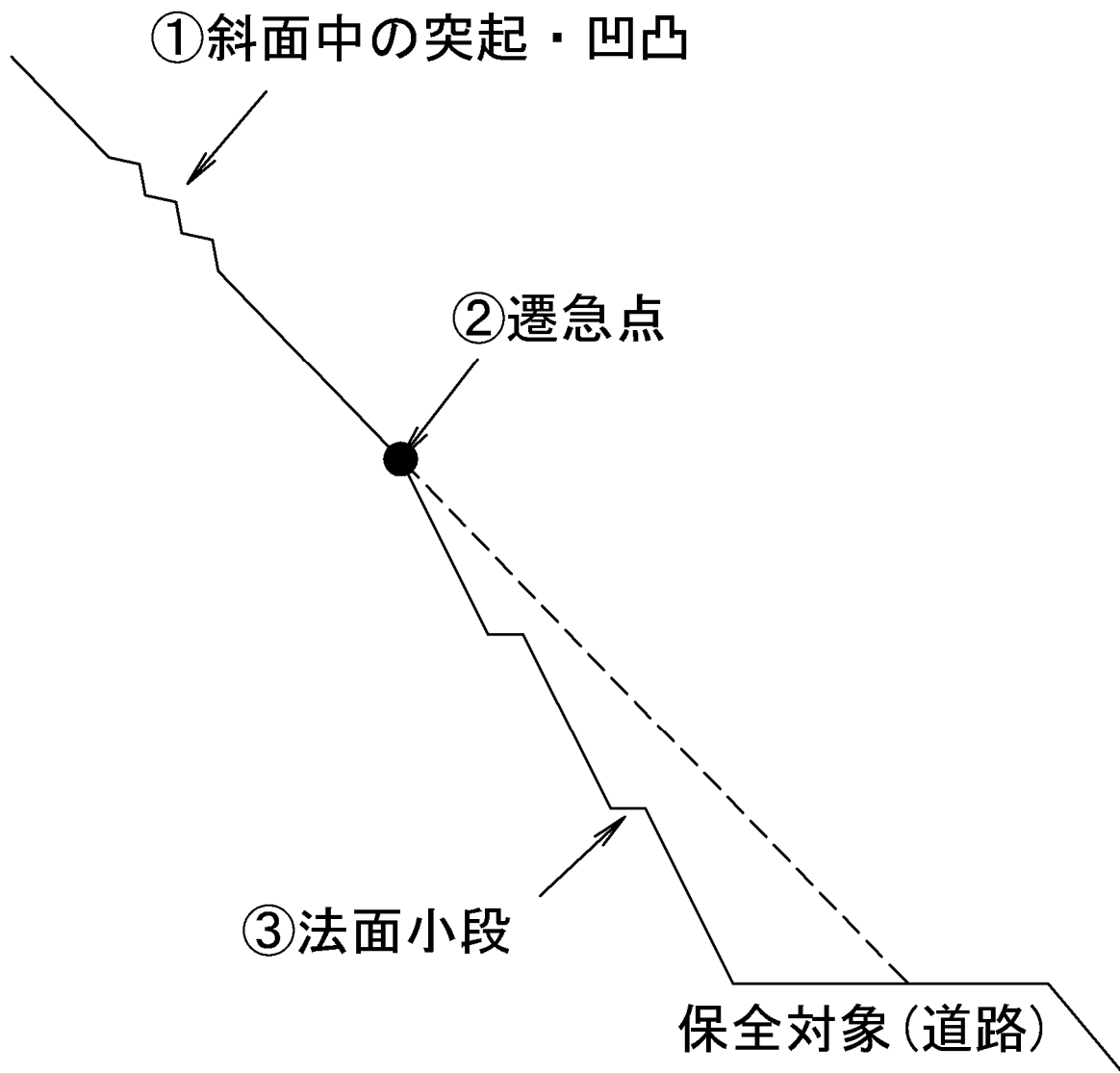


図-11 突起や凹凸が顕著な斜面の模式図

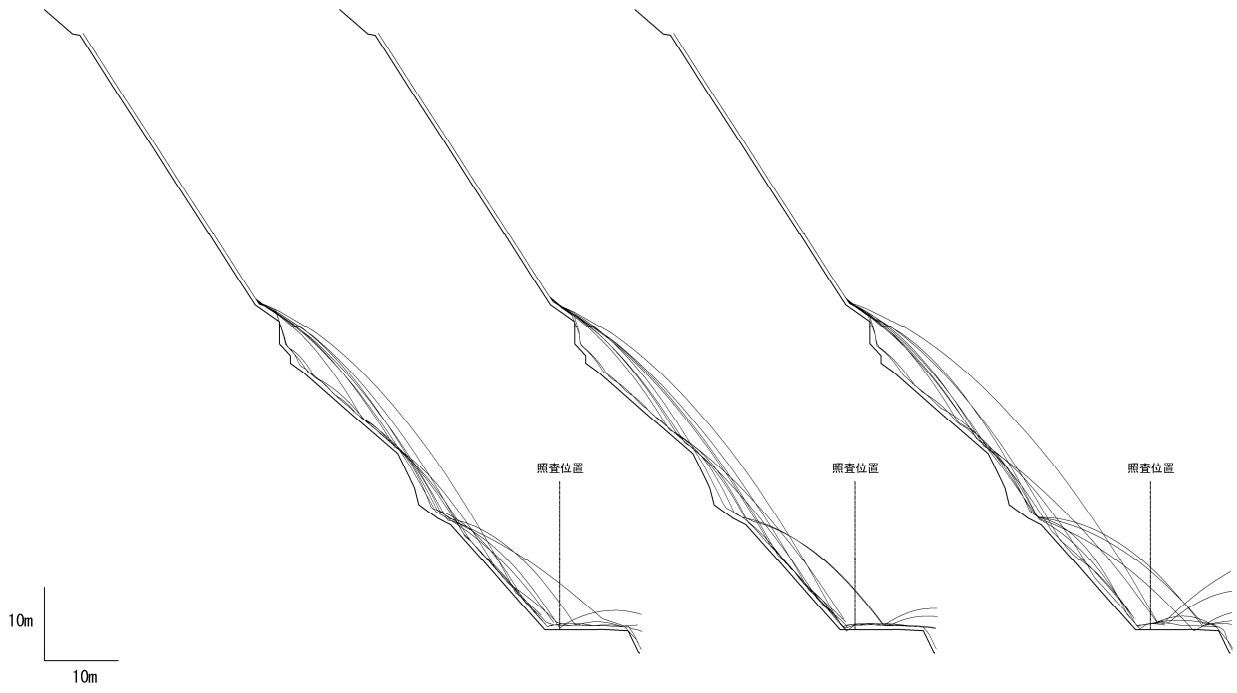


図-12 突起・凹凸が顕著な斜面での落石シミュレーションの例

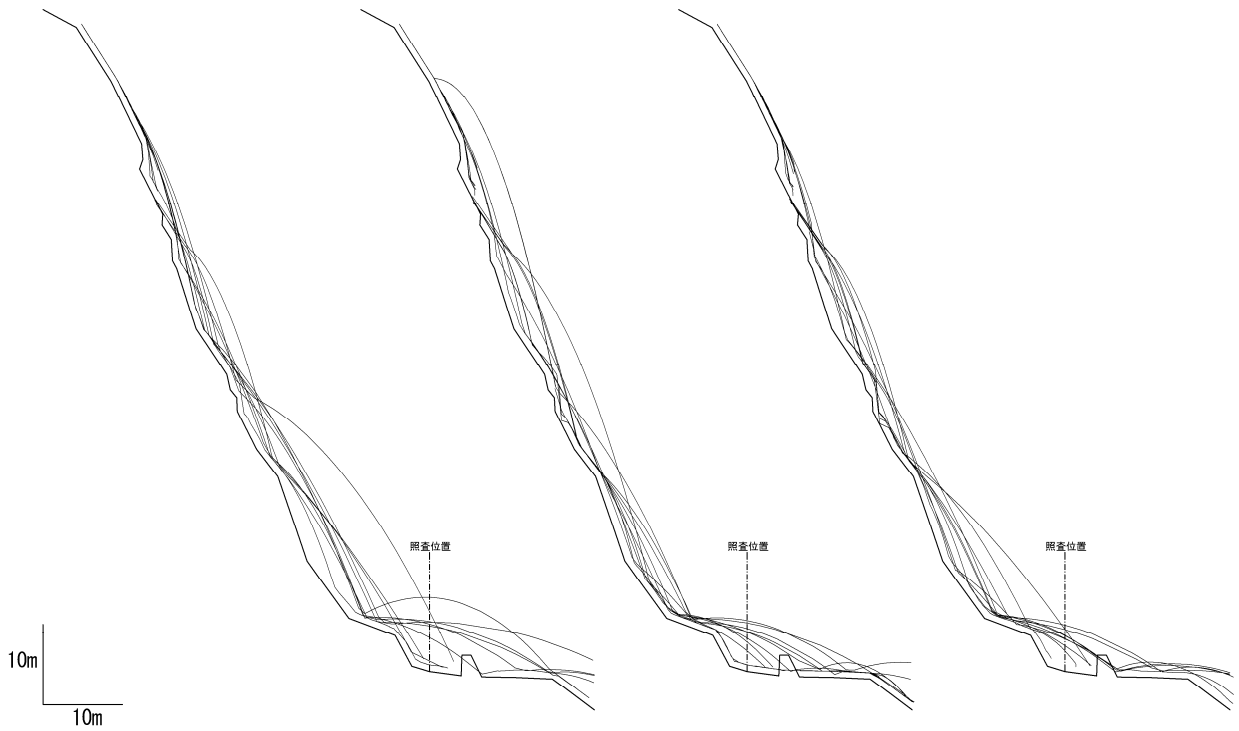


図-13 突起・凹凸が顕著で山麓部が遷急点を有する地形の斜面での落石シミュレーションの例

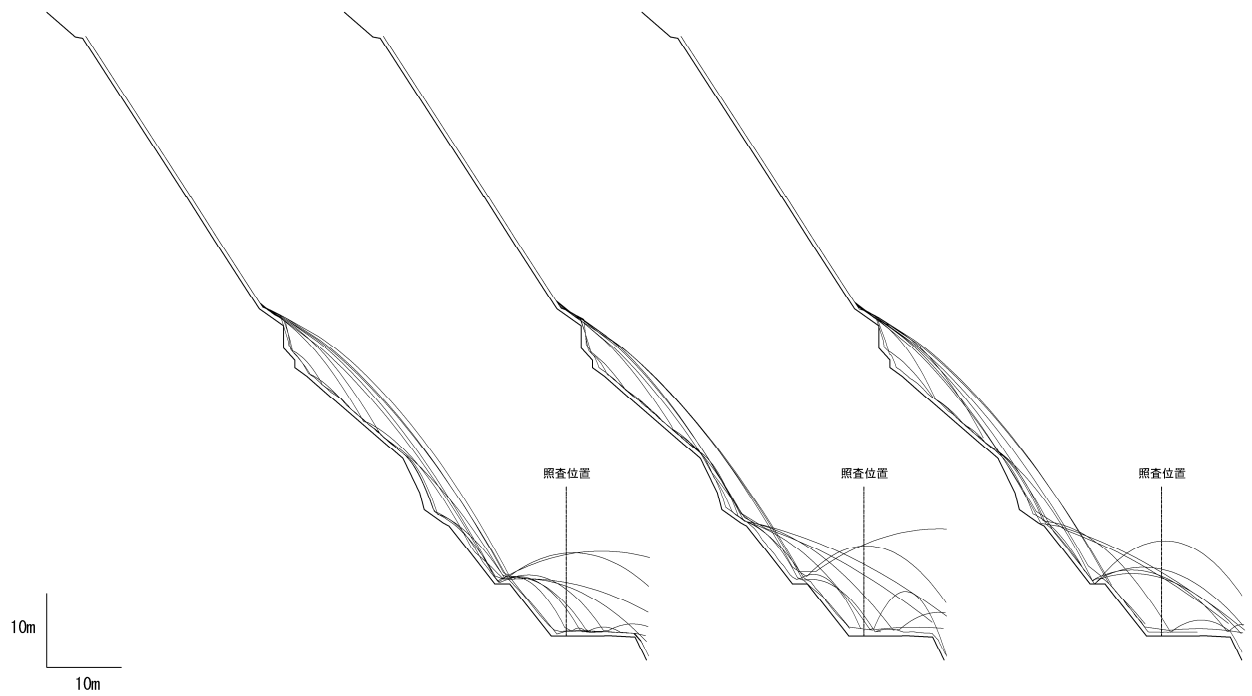


図-14 突起・凹凸が顕著で山麓部に法面小段をもつ斜面での落石シミュレーションの例

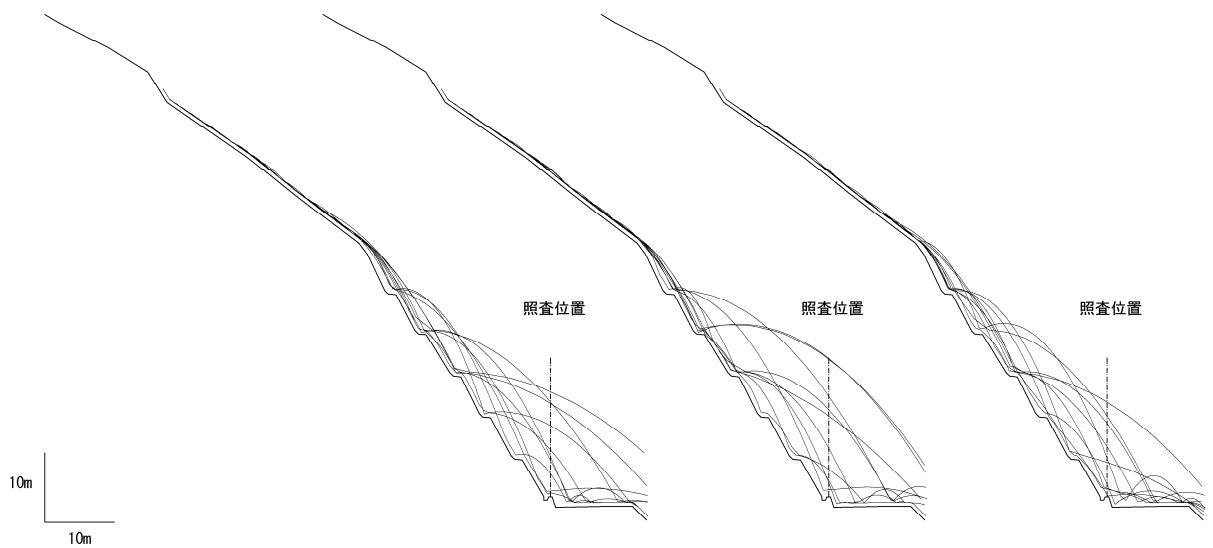


図-15 山麓部が遷急点を有する地形で法面小段をもつ斜面での落石シミュレーションの例

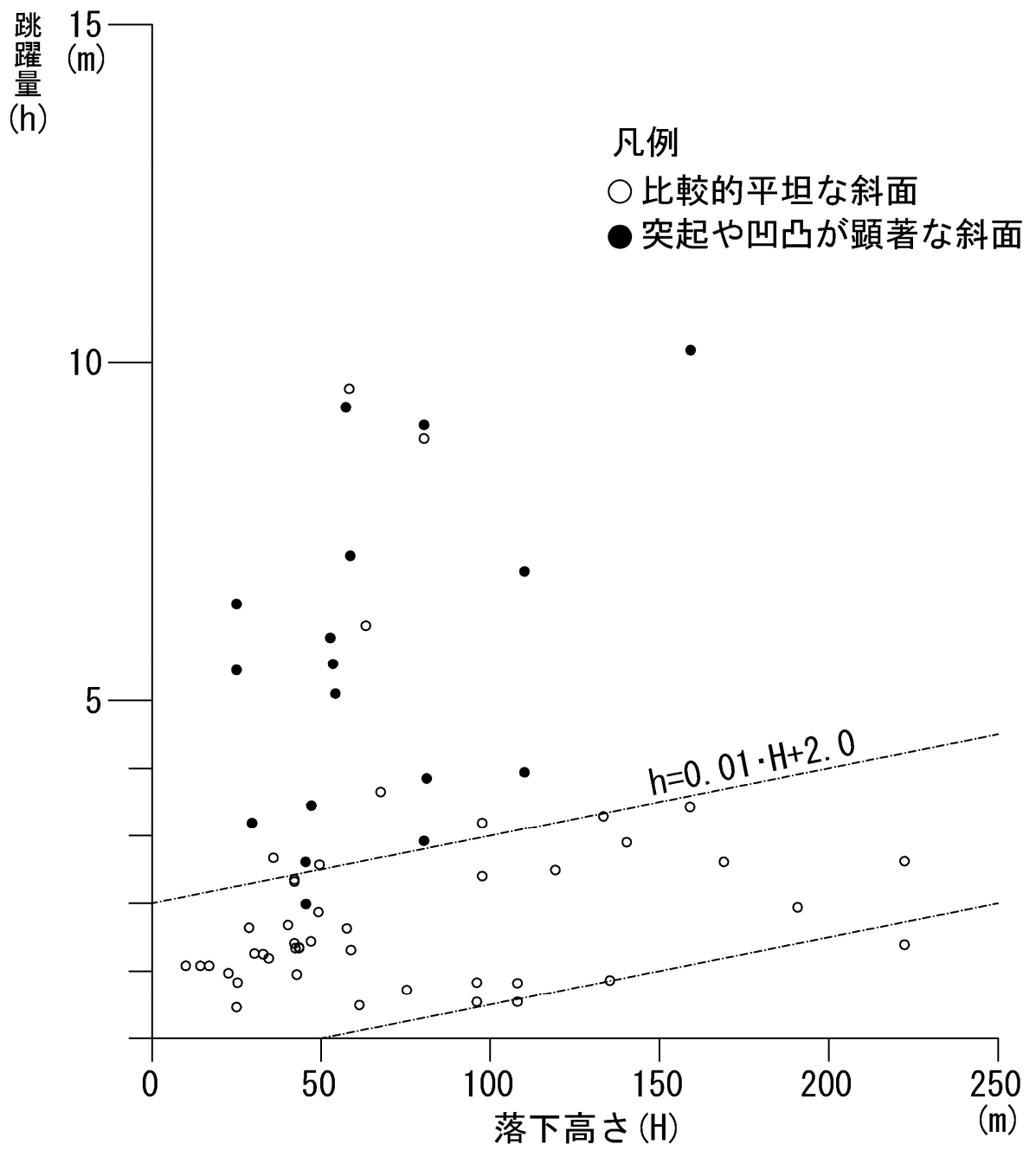


図-16 跳躍量と落下高さの関係

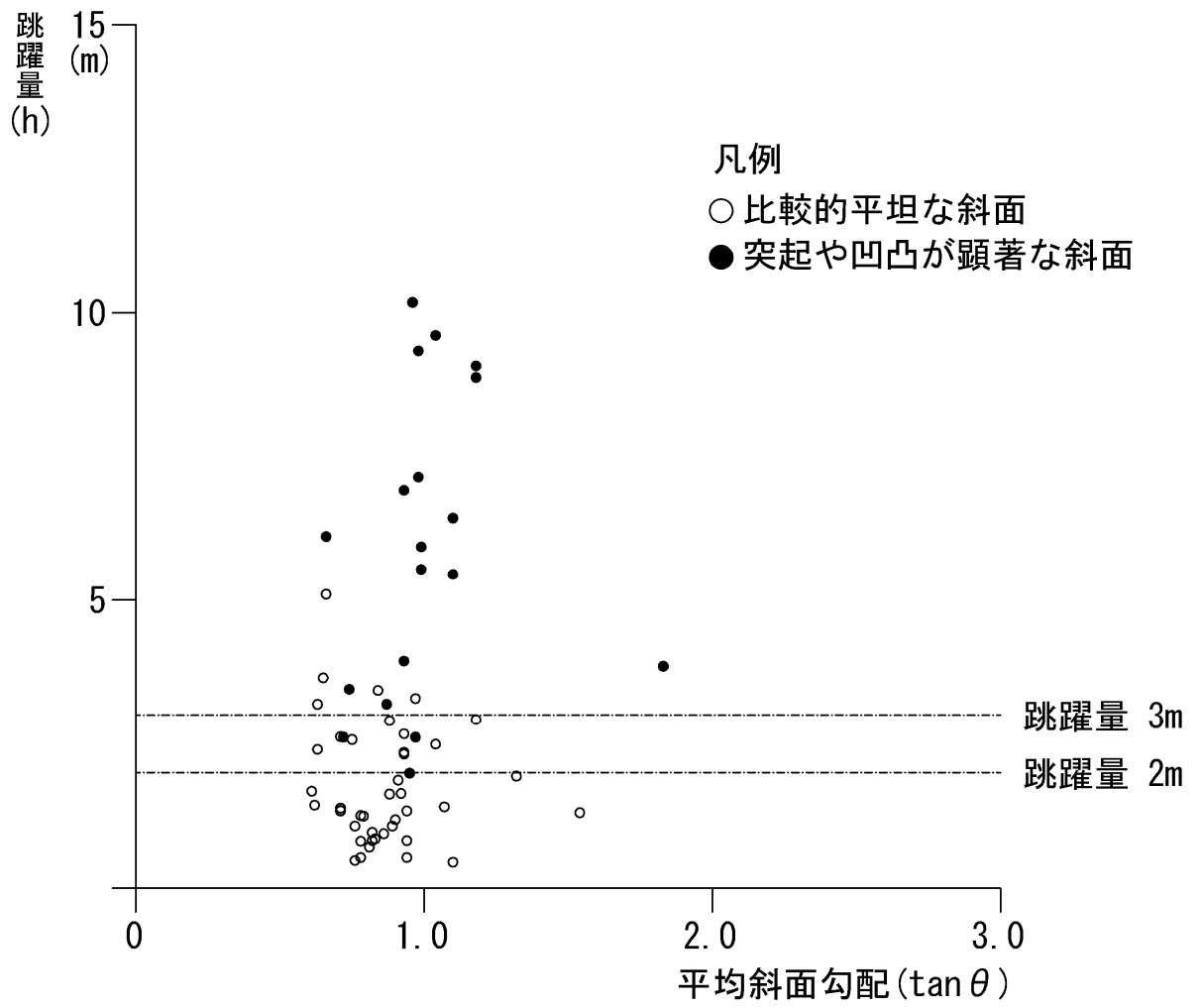


図-17 跳躍量と平均斜面勾配の関係

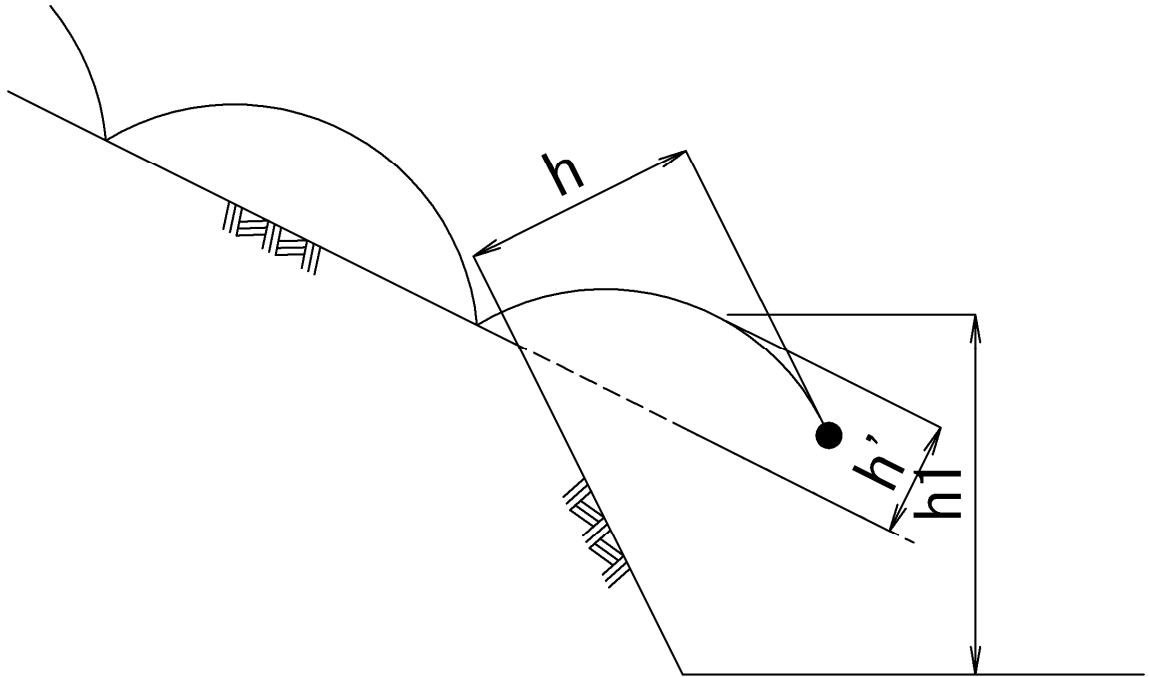


図-18 遷急点を有する地形における上部緩斜面の延長線に対する跳躍量

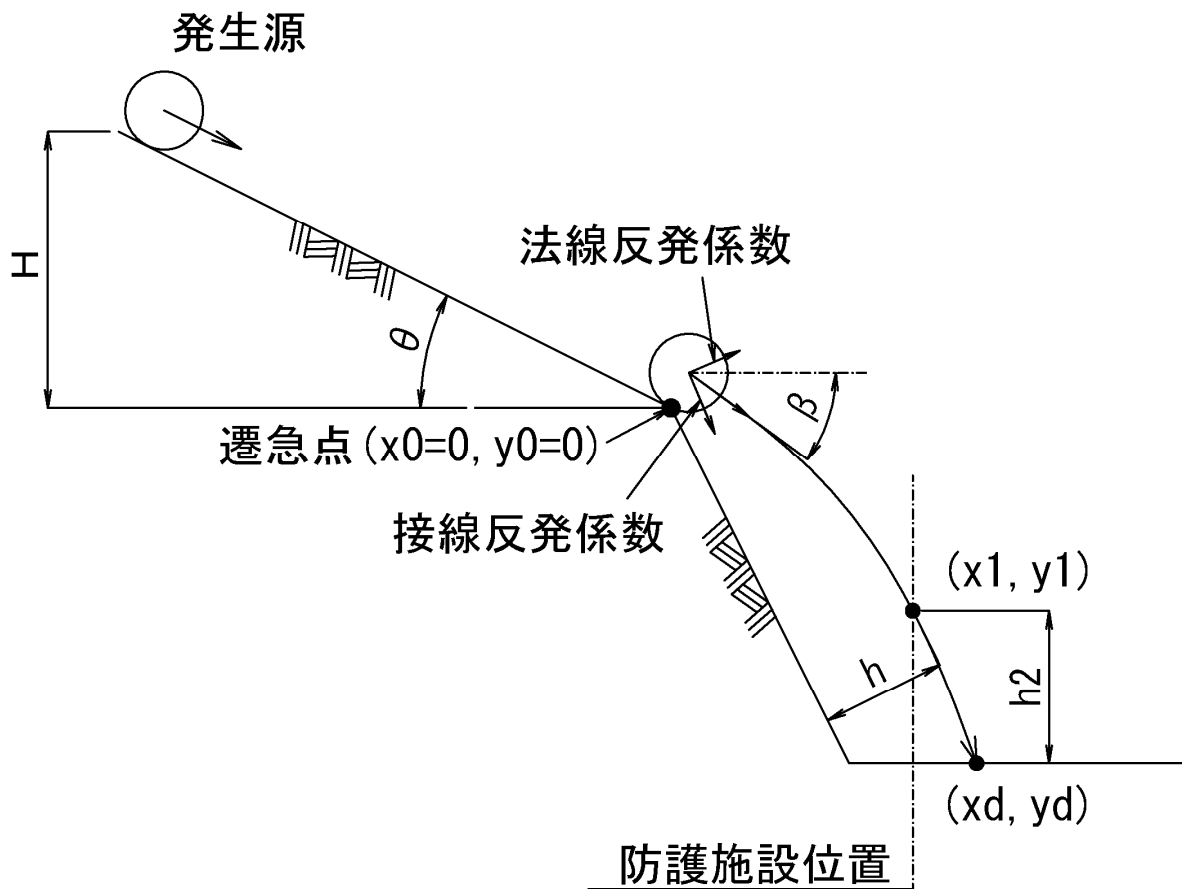


図-19 遷急点を有する地形における落石の跳躍量

表-1 斜面の種類と等価摩擦係数 μ の値¹⁾

区分	落石および斜面の特性	設計に用いる μ	実験から得られる μ の範囲
A	硬岩，丸状；凹凸小，立木なし	0.05	0～0.1
B	軟岩，角状～丸状；凹凸中～大，立木なし	0.15	0.11～0.2
C	土砂・崖錐，丸状～角；凹凸小～中，立木なし	0.25	0.21～0.3
D	崖錐・巨礫混じり崖錐，角状；凹凸大～中，立木あり～なし	0.35	0.31～

表-2 落石の運動形態の分類と落石シミュレーションに必要なパラメータ²⁾

運動形態	要因	パラメータ	パラメータの算出法
すべり運動	斜面の状況	摩擦係数 (μ')	実験データ (乱数)
	斜面の状況 (斜面の凹凸, 地盤へのめりこみ, 植生)	粘性抵抗係数 (C_k)	実験実測値に基づくシミュレーションによる逆算
回転運動	落石の形状	回転半径 (k)	理論
	斜面の状況 (斜面の凹凸, 地盤へのめりこみ, 植生)	粘性抵抗係数 (C_k)	実験実測値に基づくシミュレーションによる逆算
跳躍運動	空気抵抗	空気抵抗係数 (α_k)	理論
衝突運動	落下の速度	法線反発係数 (e) 接線反発係数 (ρ)	実験データ (乱数)
すべり運動から回転運動への移行	落下の加速度	落下の加速度 (a)	理論
回転運動から跳躍運動への移行	落石の形状 斜面の状況	限界速度 (V_{0r})	実験データ (乱数)

表-3 既往の落石実験から求めたパラメータ

()内の数値は標準偏差を示す

名 称	数 値		落石重量 条件 (kN)	斜面条件	データの出典
摩擦係数	平均値	0.69(0.18)	$W < 10$	岩盤	菌原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	0.48(0.06)	$W < 10$	崖錐	菌原B斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	0.69(0.18)	$W \geq 10$	岩盤	立山有料道路(富山県)の実験
	平均値	0.59(0.09)	$W \geq 10$	崖錐	立山有料道路(富山県)の実験
粘性抵抗係数	0~1.2		なし	植生や細部の凹凸	菌原A・B斜面, 岩殿(日本道路公団), 甲田(金沢大学)の実験
法線反発係数	平均値	0.54(0.28)	$W < 10$	岩盤	菌原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	0.58(0.26)	$W < 10$	崖錐	菌原B斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	0.275(0.28)	$W \geq 10$	岩盤	立山有料道路(富山県)の実験
	平均値	0.275(0.22)	$W \geq 10$	崖錐	甲田(金沢大学)の実験
接線反発係数	平均値	0.58(0.25)	$W < 10$	岩盤	菌原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	0.77(0.17)	$W < 10$	崖錐	菌原B斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	0.78(0.25)	$W \geq 10$	岩盤	立山有料道路(富山県)の実験
	平均値	0.78(0.18)	$W \geq 10$	崖錐	立山有料道路(富山県)の実験
限界速度	平均値	4.69(2.02)	なし	岩盤	菌原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値	8.5(2.5)	なし	崖錐	菌原B斜面(日本道路公団)の実験

表-4(a) 過去に行った落石シミュレーション結果 (その1)

地 点	落石重量 (kN)	落下高さ (m)	平均斜面 勾配(θ)	鉛直方向跳 躍量(m)	斜面垂直方 向跳躍量(m)	到達率	崖錐の占 める割合
石川 A	2.0	54.2	33.6	11.23	5.10	163/300	80%
石川 B	2.0	40.2	31.4	1.97	1.68	290/300	100%
石川 C	2.0	67.6	33.1	4.36	3.65	109/300	100%
石川 D	2.0	42.4	39.3	1.73	1.34	290/300	100%
石川 E	1.0	30.3	37.8	1.60	1.26	226/300	100%
石川 F	7.0	16.9	37.2	1.35	1.08	236/300	100%
石川 G	1.7	75.3	38.9	0.93	0.72	278/300	100%
石川 H	158.2	169.0	35.6	3.21	2.61	275/300	100%
石川 I	58.0	58.8	57.0	2.41	1.31	299/300	30%
石川 J	51.0	81.2	61.3	8.02	3.85	268/300	10%
石川 K	21.0	49.5	36.7	3.21	2.57	199/300	100%
石川 L	13.6	80.4	49.8	14.05	9.08	300/300	30%
石川 M	17.0	25.0	47.8	9.58	6.43	167/300	40%
石川 N	17.0	25.0	47.8	8.12	5.45	186/300	40%
石川 O	17.0	25.0	47.8	0.69	0.46	139/300	40%
石川 P	13.6	80.4	49.8	13.75	8.88	238/300	10%
石川 Q	13.6	80.4	49.8	4.52	2.92	198/300	10%
石川 R	56.2	63.2	33.6	7.98	6.11	289/300	80%
石川 S	17.5	58.3	46.1	16.5	9.61	300/300	40%
富山 A	10.0	119.2	46.2	3.60	2.49	300/300	60%
富山 B	20.0	140.3	41.5	3.88	2.90	300/300	100%
富山 C	10.0	133.4	44.2	4.59	3.29	300/300	100%
富山 D	10.0	159.2	43.8	14.10	10.18	300/300	100%
富山 E	10.0	42.1	43.0	3.17	2.32	299/300	100%
富山 F	30.0	42.1	43.0	3.21	2.35	300/300	100%
富山 G	509.6	47.0	31.8	1.69	1.44	14/300	100%
福井 A	66.3	159.0	39.9	4.47	3.43	300/300	100%
福井 B	37.0	32.9	38.4	1.60	1.25	151/300	100%
福井 C	13.6	96.0	43.2	0.74	0.54	292/300	80%
福井 D	13.6	110.1	42.8	5.37	3.94	180/300	80%
福井 E	1.7	96.0	43.2	1.14	0.83	218/300	80%
福井 F	1.7	110.1	42.8	9.42	6.91	145/300	80%
福井 G	7.0	61.3	37.3	0.61	0.49	240/300	90%
福井 H	7.0	47.1	36.6	4.30	3.45	101/300	90%

表-4(b) 過去に行った落石シミュレーションの結果 (その2)

地 点	落石重量 (kN)	落下高さ (m)	平均斜面 勾配(θ)	鉛直方向跳 躍量(m)	斜面垂直方 向跳躍量(m)	到達率	崖錐の占 める割合
新潟 A	1.7	29.6	41.1	4.23	3.19	298/300	70%
新潟 B	5.0	108.0	37.9	1.04	0.82	198/300	90%
新潟 C	10.0	108.0	37.9	0.69	0.54	180/300	90%
新潟 D	5.0	43.5	35.5	1.64	1.34	300/300	90%
新潟 E	10.0	43.5	35.5	1.66	1.35	295/300	90%
新潟 F	5.0	222.4	35.4	3.21	2.62	300/300	100%
新潟 G	10.0	222.4	35.4	1.71	1.39	293/300	100%
新潟 H	5.0	97.6	32.1	2.84	2.40	40/300	100%
新潟 I	10.0	97.6	32.1	3.77	3.19	15/300	100%
新潟 J	1.7	42.1	46.9	2.07	1.41	300/300	90%
新潟 K	55.0	135.3	39.6	1.12	0.86	236/300	90%
三重 A	67.3	10.0	41.8	-	1.08	300/300	100%
三重 B	67.3	22.6	39.3	1.26	0.97	300/300	70%
三重 C	33.7	14.3	41.6	-	1.08	300/300	100%
三重 D	33.7	25.3	39.5	1.08	0.83	300/300	80%
三重 E	5.1	45.4	44.2	-	2.61	283/300	70%
三重 F	5.1	52.7	44.7	-	5.93	283/300	80%
三重 G	5.1	57.3	44.5	13.10	9.34	61/300	80%
三重 H	17.85	45.5	43.5	-	1.99	292/300	70%
三重 I	17.85	53.5	44.7	-	5.54	292/300	80%
三重 J	17.85	58.6	44.5	10.01	7.14	97/300	80%
三重 K	5.1	28.7	42.5	-	1.64	286/300	80%
三重 L	5.1	35.9	42.9	-	2.67	286/300	80%
三重 M	11.0	34.5	41.9	-	1.19	300/300	70%
三重 N	11.0	42.8	40.6	-	0.95	126/300	80%
三重 O	41.0	49.2	42.3	-	1.87	300/300	80%
三重 P	41.0	57.6	41.3	-	1.63	300/300	80%
三重 Q	208.0	190.8	52.8	3.20	1.94	298/300	20%

表-5 遷急点を有する地形をもつ地点の上部緩斜面延長線からの跳躍量

	①斜面中の突起	②山麓部遷急点の有無	③山麓部の法面小段	鉛直方向跳躍量(m)	斜面垂直方向跳躍量(m)	上部緩斜面延長線上の垂直方向跳躍量(m)
石川 A		○	○	11.23	5.10	3.52
石川 I		○		3.21	2.61	0
石川 K	○	○		8.02	3.85	2.41
石川 N		○	○	9.58	6.43	3.14
石川 O		○	○	8.12	5.45	2.16
石川 S		○	○	7.98	6.11	0.57
石川 T		○	○	16.5	9.61	0.76
福井 D		○		5.37	3.94	0.27
福井 F		○		9.42	6.91	3.24
福井 H		○		4.30	3.45	0
富山 D	○	○		14.10	10.18	6.57
新潟 A	○	○		4.26	3.19	1.68
三重 G	○	○		13.10	9.34	7.92
三重 J	○	○		10.01	7.14	5.71