

落石実験概要

1. 業務の背景と目的

落石対策においては、防護工に持ち込まれる落石のエネルギーと衝突高さの算定が極めて重要である。これらについては、一般に、落石対策便覧の方法が用いられているが、平成13年度と14年度に落石防護柵基礎の合理的な設計手法を確立する目的で実施した重錘衝突実験の結果、落石対策便覧で算定される落石エネルギーは、実際よりもかなり過大に評価している可能性が高いことが判明した。

そこで、本業務では、最新の計測機器を用いて斜面を落下する落石の運動エネルギーの大きさを正確に把握するとともに、落石の速度、運動エネルギー、衝突高さを合理的に予測する手法の確立を目的とし、自然斜面および人工斜面において落石実験を実施した。また、実験結果に基づいて落石運動の簡易的予測法を検討した。

2. 実験の概要

実験は、愛媛県土居町にある愛媛砕石工業(株)の敷地内の自然斜面と採石跡地を借地し、平成15年11月から平成16年1月にかけて行った。以下に実験の概要を示す。

(1) 実験の種類と目的

表 2.1 実験の種類と目的

実験の種類	実験の目的
平坦面での自由落下実験	衝突速度が法線方向速度比(反発係数)に及ぼす影響、岩盤に堆積した表土厚が法線方向速度比(反発係数)に及ぼす影響を調べる。
人工斜面での自由落下実験	斜面の傾斜角が法線方向速度比、接線方向速度比に及ぼす影響、接線方向速度と角速度の関係、落石形状が衝突時の挙動に及ぼす影響、平坦地盤での転がり運動の形態と転がり摩擦係数を調べる。
自然斜面での落下実験	落石の運動形態、落下経路、飛行軌跡、落石到達位置、跳躍量を把握する。 落下高・斜面傾斜角・落石質量・立木の有無が落石速度に及ぼす影響、落石質量が落石の到達位置に及ぼす影響、斜面傾斜角、落石の質量が跳躍量に及ぼす影響を調べる。 速度残存係数、等価摩擦係数の値を調べる。

(2) 供試落石

供試落石は、コンクリート製の立方体 (0.6 × 0.6 × 0.6m, 質量 0.52t) が 6 個, コンクリート製の球体(直径 0.54m, 質量 0.2t) が 7 個, 自然石(質量 0.12 ~ 2.06t) が 11 個である。

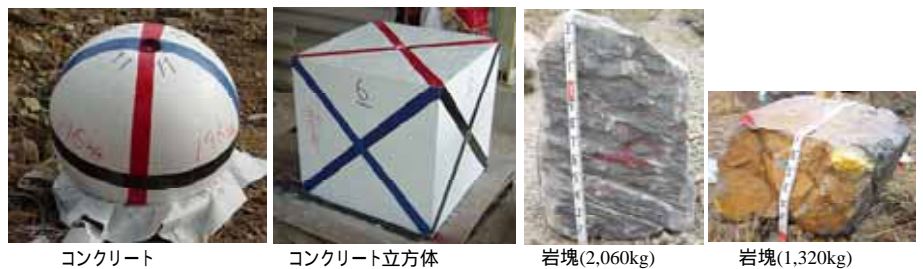


写真 2.1 供試落石

コンクリート製の供試体の内部には、ケーシングパイプで保護した三軸の加速度センサーと加速度データロガーを埋め込んだ。コンクリートの設計基準強度は $f_{ck}=50\text{MPa}$ であるが、岩盤に自由落下させたコンクリート球については衝撃力によって割れるのを防ぐため $f_{ck}=90\text{MPa}$ とした。

岩塊は、採石場で切り出した砂岩塊で、圧縮強さ 202MPa, 見掛け比重 2.62 である。

(3) 計測機器

実験に用いた主な計測機器を表 2.2 に示す。

表 2.2 計測機器の仕様

計測機器	メーカーおよび機種名	仕様
加速度データロガー	曙ブレーキ工業	加速度容量 $\pm 187.6G$, 量子化ビット数 12bit, サンプルング 2kHz (1/2000sec 刻み), 1回のサンプルング時間は 60sec
高速ビデオカメラ	ディテクト HAS-200R	毎秒 200 コマ, シャッタースピード 1/10000sec
デジタルビデオカメラ	SONY DCR-TRV20, DCR-TRV50	焦点距離 $f_{35}=48\text{mm}$, (35mm 換算; $w_{35}=36\text{mm}$, $h_{35}=24\text{mm}$)
トータルステーション	JEC	

(4) 実験斜面

実験斜面の状況を写真 2.2 に示す。自然斜面は立木を伐採する前の状態である。

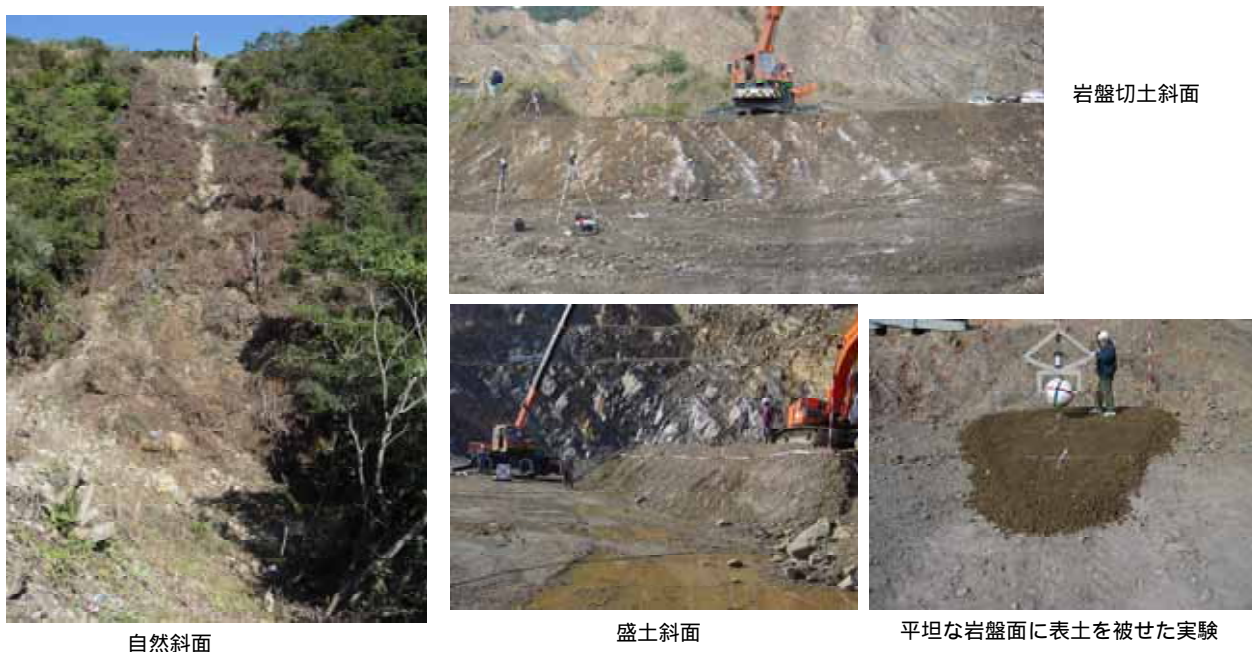


写真 2.2 実験斜面

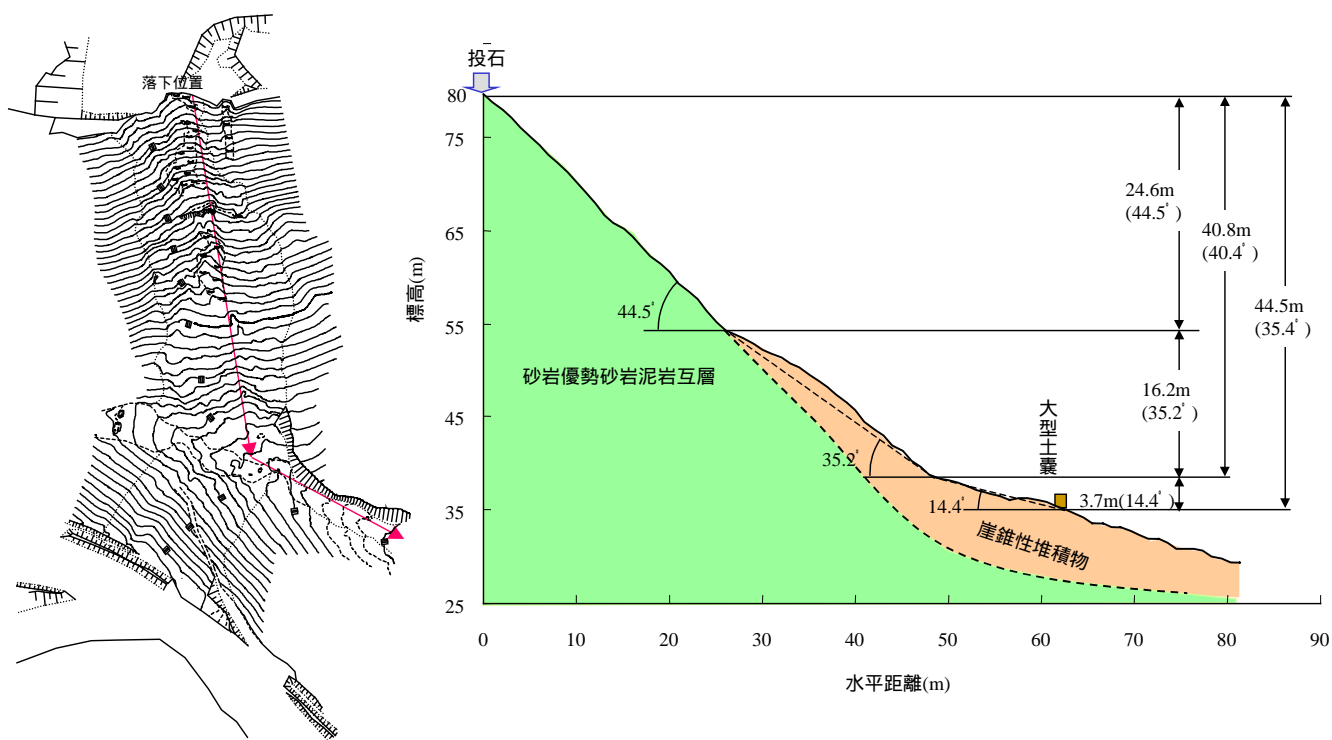


図 2.1 自然斜面の平面図と縦断図

(a) 自然斜面

自然斜面の平面図と縦断図を図 2.1 に示す。落石の投下地点は、沢地形をしている。斜面の高さは約 41m で、上部 25m の範囲は $C_L \sim C_H$ クラスの基岩盤が露出し、傾斜角は約 44 度である。それより下には崖錐が堆積し、傾斜角は約 35 度になっている。斜面の平均傾斜角は 40.4° である。斜面下部は谷になっているが、平時に水は流れていない。直径 20cm ~ 50cm 大の岩塊を含む崩積が堆積している。

基岩が露頭する上部斜面は裸地である。下部斜面には、マツ、ナラ、雑木がまばらに生えている。マツ、ナラの幹径は、10 ~ 20cm である。

(b) 人工斜面

岩盤切土斜面は、和泉層群の砂岩泥岩互層で、高さ約 3m で傾斜角は $20 \sim 40^\circ$ である。岩盤の一軸圧縮強さは、点載荷試験から $q_u=130N/mm^2$ と推定される。

盛土斜面は、採石跡地の平坦地に粘性土混じり砂質礫を高さ 1.8m に盛り、重機(バックホー)で締固めて作製した。斜面傾斜角は 30° と 45° の 2 種類である。

(5) 実験の方法

(a) 自然斜面

供試体を写真 2.3 に示すようにフォークで掴み、斜面上部の定位置まで運搬し、供試体の下端を地面に接触させた状態でフォークを開いて自重で転落させた。ただし、立方体は自重で転がり落ちないので、フォークの先で軽く押し出した。



写真 2.3 フォークによる投石と加速度計測状況

落石の運動は、斜面上側、正面、落石落下経路の左右の斜面上にデジタルビデオカメラを合計 14 台設置して撮影した。また、落下後にビデオカメラのモニター画面を見ながら供試体が斜面に衝突した位置を確認し、衝突点および停止位置の座標をトータルステーションで測量した。

コンクリート供試体に埋め込んだ加速度計は、フォークから離脱した瞬間にスイッチが入り、3 方向の加速度成分を 1/2000 秒刻みで最大 60 秒間記録できるように設計されている。供試体が停止した時点でスイッチをオフにし、加速度データをパソコンに取り込んだ。

実験は斜面に立木がある状態で 20 ケース、伐採した後に 20 ケース、合計 40 ケース実施した。

(b) 人工斜面

供試体を空気圧方式離脱装置で挟み、トラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、自由落下させた。吊り上げ高さは、ビニールテープで測定した。

落石が斜面に衝突したときの挙動を詳細に観察するため、7 台のデジタルビデオカメラ(1 コマ 1/30 秒)と 2 台の高速デジタルビデオカメラ(1 コマ 1/200 秒)で撮影するとともに、供試落石の内部に埋め込んだ加速度計で三軸方向の加速度を測定した。

また、供試落石が斜面に衝突して運動が停止するまでの経路をトータルステーションで詳細に測量した。

3. 人工斜面での実験結果

供試体を人工斜面へ自由落下させた状況を写真 3.1 に示す。

供試体が岩盤面に衝突すると、衝撃力で岩盤は亀裂面に沿って楔状に破壊する。土砂の場合には、支持力破壊と同様のすべり面が形成される。

平坦地盤にコンクリート球を自由落下させると、写真に見られるように跳ね返る。落下高が低いときは衝突速度に伴って跳ね返り速度が増加するが、落下高が高くなると跳ね返り速度は一定になる。



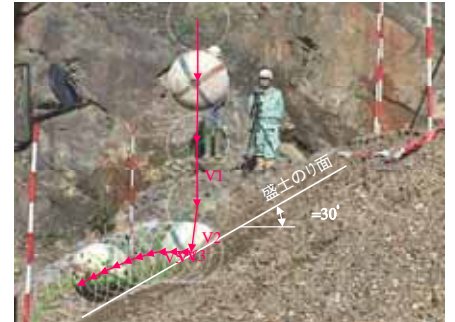
平坦な岩盤に落下させたときの球の跳ね上がり



球を岩盤斜面に落下させたときのバウンド



立方体を盛土斜面に落下させたときのバウンド



球を盛土斜面に落下させたときのバウンド

図 3.1 は平坦地盤の実験から得られた反発係数である。岩盤の場合、落下速度が 7m/s までは、反発係数は 0.3 であるが、それを超えると低下する。衝突速度が 7m/s を超えると跳ね返り速度がおおよそ 2m/s で一定になるためである。

土砂の反発係数は 0.05 程度であるが、衝突速度が 14m/s を超えると岩盤と同様に反発係数は低下する。

図中の曲線は、衝突によって地盤の土粒子に蓄積された弾性歪みエネルギーが、衝突後に運動エネルギーとして回復するものとして求めた理論曲線である。ただし、衝撃力が地盤の支持力に達すると、弾性歪みエネルギーは増加しないとしている。弾性理論による反発係数は実験値と概ね一致する。

図 3.2 は岩盤の表土の厚さと衝撃加速度の関係を表している。表土厚が 0.2m 程度あれば、加速度は土砂の場合と同じになる。

写真 3.1人工斜面での自由落下実験

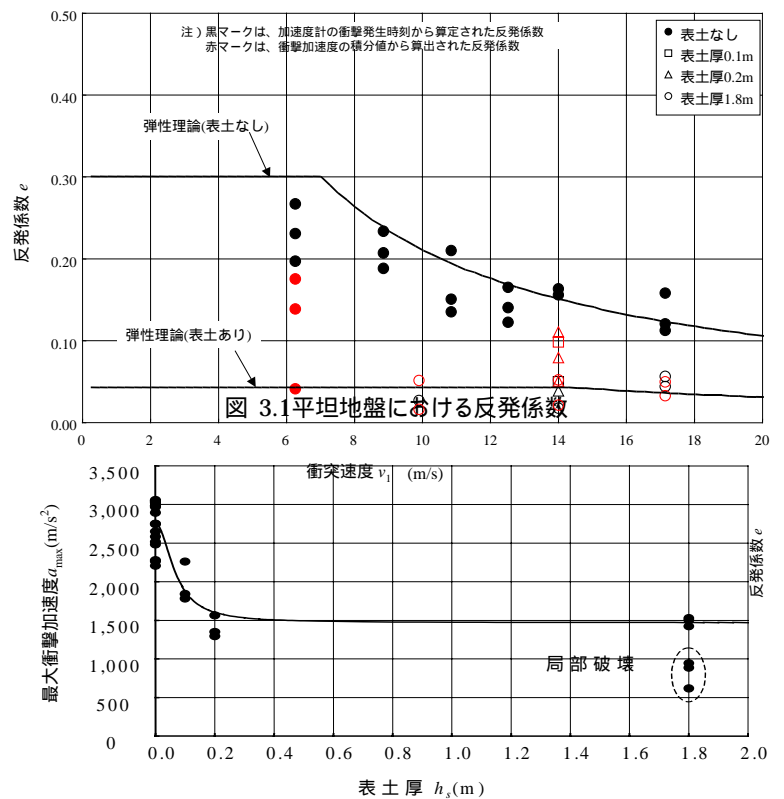


図 3.2 表土厚さの影響

4. 自然斜面での実験結果

(1) 運動形態

写真 4.1 は、立木伐採後にコンクリート球を落下した実験である。球が地面に接触すれば加速度波形として表れるが、飛行中は地面から抗力を受けないので加速度は 0 になる。ビデオ画像のみからは跳躍か転がりかの識別は難しいが、加速度波形を見れば運動形態を正確に把握することができる。

球の運動は飛行と衝突を繰り返す跳躍運動である。立方体や岩塊の運動形態も球と同じである。

(2) 落石の軌跡

図 4.1 は三次元画像解析より求めた落石の軌跡を重ねて描いたものである。

斜面の緩傾斜部から飛び出すと飛行距離が長くなり、落下速度も大きくなっている。

(3) 落下速度

図 4.2 は、落石の速度を示している。印は着地時の速度、印は飛びだし時の速度を表している。斜面に衝突すると速度は急減する。

図 4.3 は、落下高さ H と速度残存係数 α_V の関係を、図 4.4 は斜面勾配 $\tan \theta$ と等価摩擦係数 μ の関係を示している。 α_V はある落下高における実測速度と自由落下速度の比を表す。等価摩擦係数 μ は、落石の回転エネルギーと衝突による損失エネルギーが、すべり運動による損失エネルギーに等値として求められる摩擦係数で、残存係数と式(4.2)の関係がある。

$$V = \alpha_V \sqrt{2gH} \quad (4.1)$$

$$\mu = (1 - \alpha_V^2) \tan \theta \quad (4.2)$$

落石対策便覧では、 α_V および μ を斜面によって決まる定数と見なしているが、 α_V は 1 から 0 へ、 μ は 0 から $\tan \theta$ へと落石の落下に伴って変化する。落石の停止位置では、 $\alpha_V = 0$ 、 $\mu = \tan \theta$ となる。

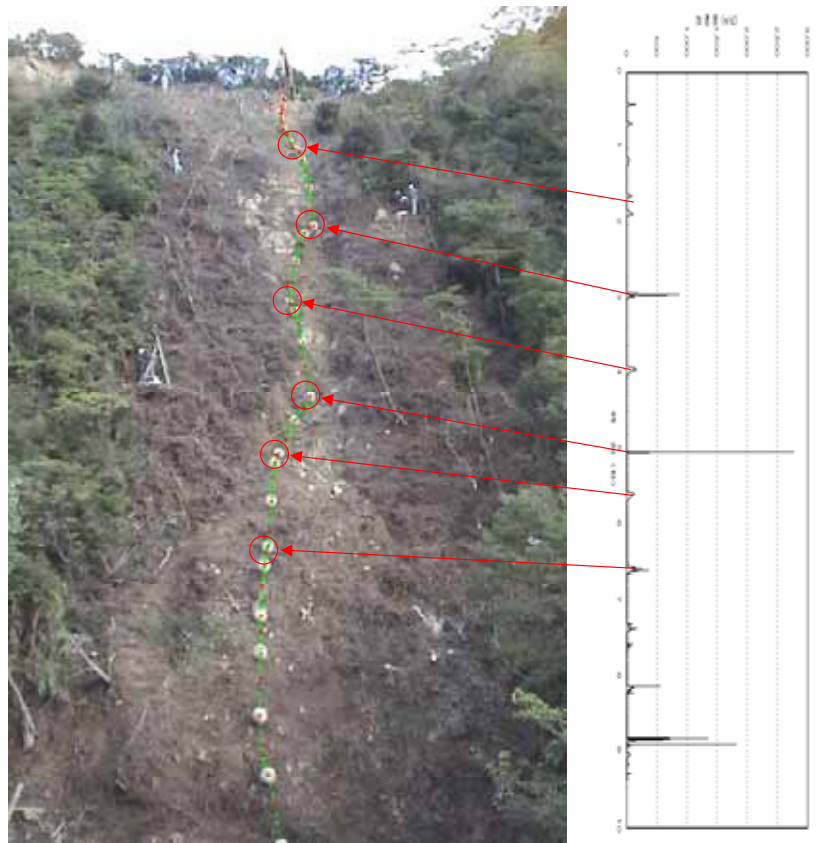


写真 4.1 コンクリート球の落下状況と加速度波形

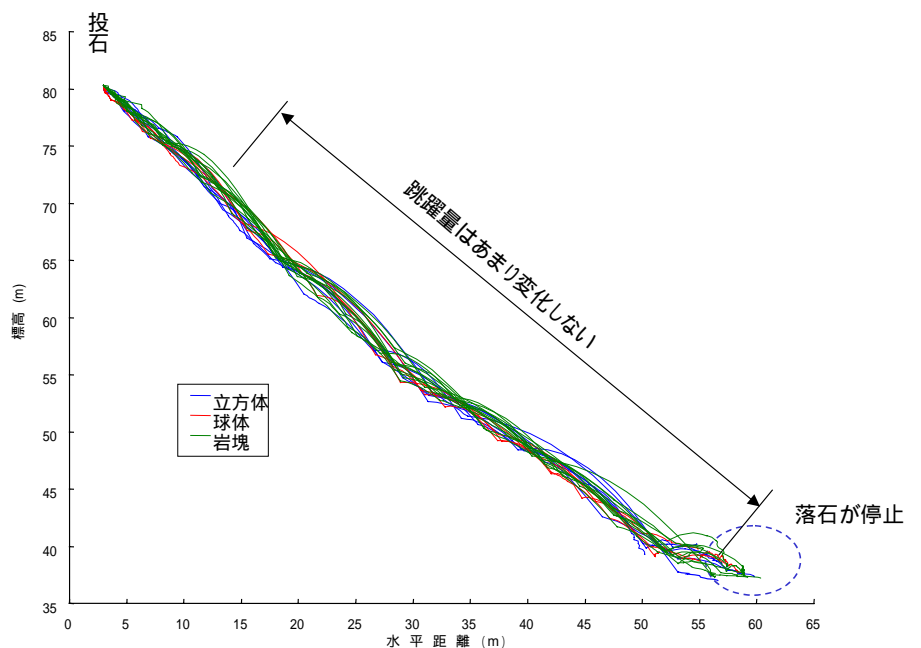


図 4.1 落石の軌跡図

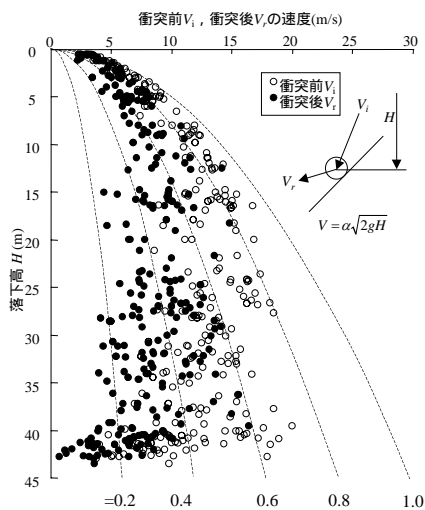


図 4.2 落下速度

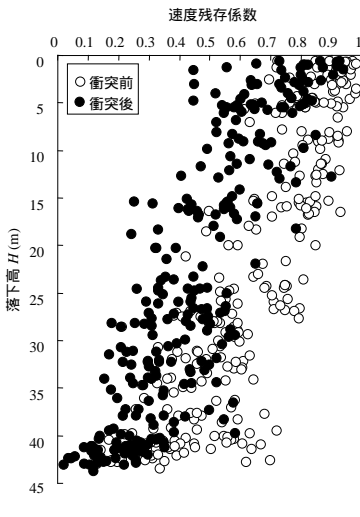


図 4.3 速度残存係数

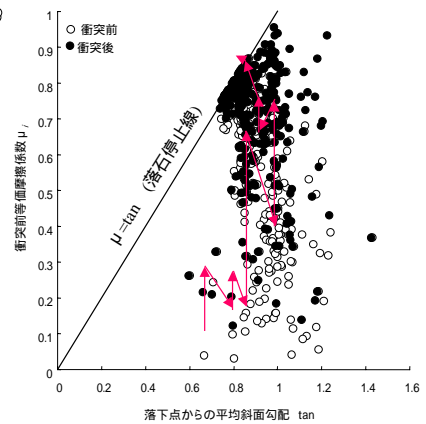


図 4.4 等価摩擦係数

(4) 跳躍量

跳躍量 h と落下高さ H の関係は図 4.5 となる。落下高 10m までは落下高に比例するが、10m を超えると 2m で頭打ちになる。落下高が 35m を超えると跳躍量は 1m 程度になっている。これは、落下高 25m の位置からは崖錐が堆積していることと、崖錐斜面は勾配が緩くなっていることによる影響と思われる。

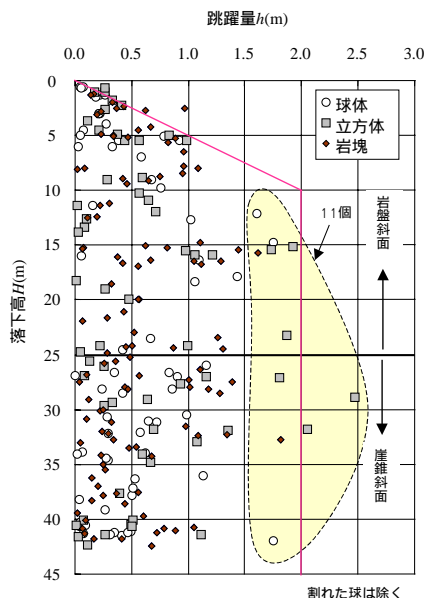
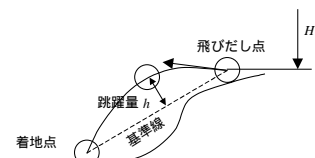


図 4.5 跳躍量



	球体	立方体	岩塊	全体
平均	0.49	0.62	0.55	0.55
中央値	0.35	0.46	0.44	0.43
標準偏差	0.44	0.58	0.41	0.46
分散	0.19	0.34	0.16	0.22
最小	0.02	0.01	0.02	0.01
最大	1.75	2.48	1.82	2.48
標本数	65	60	110	235

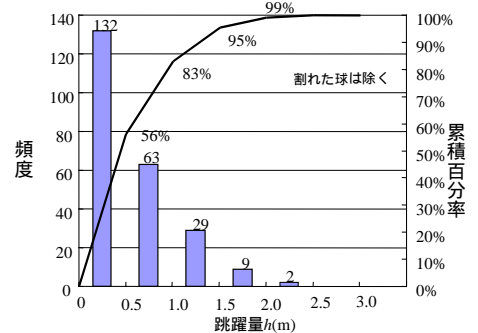


図 4.6 跳躍量の頻度分布

図 4.6 に跳躍量の頻度分布

を示す。標本数 235 個の 95% は跳躍量が 1.5m 以下、99% が 2.0m 以下になっている。跳躍量の最大値は球体が 1.75m、立方体が 2.48m、岩塊が 1.82m である。1.5m 以上の跳躍は、緩傾斜部からの飛び出し、あるいは切株や基岩の突起部へ衝突したときに発生している。

5. 落石運動の簡易計算法

(1) 落石の到達位置

落石の運動は、すべり運動ではないが、落石の停止位置を予測するには「そりモデル」が適用できる。

落石発生源からの平均傾斜角 θ が見掛けの摩擦角 ϕ_d に等しくなった時点で落石は停止する。

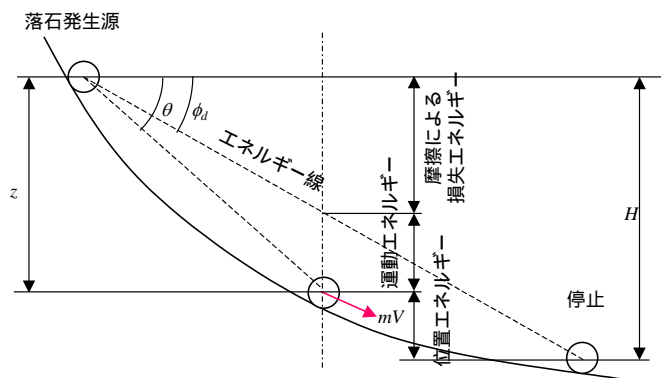


図 5.1 そりモデル

落石実験による見掛けの摩擦角は $32 \sim 38^\circ$ であった。

(2) 落石の速度

飛行中、落石は加速されるが、斜面に衝突するとエネルギーが消費されて減速する。衝突速度が速いほど、消費されるエネルギーも大きくなり、衝突後に飛びだす速度は限界速度以上にならない。飛行による着地速度は、落石発生源からの落下高に関係せず、限界飛びだし速度 V_0 、飛びだし角 α 、飛行区間の斜面勾配 θ に影響される。

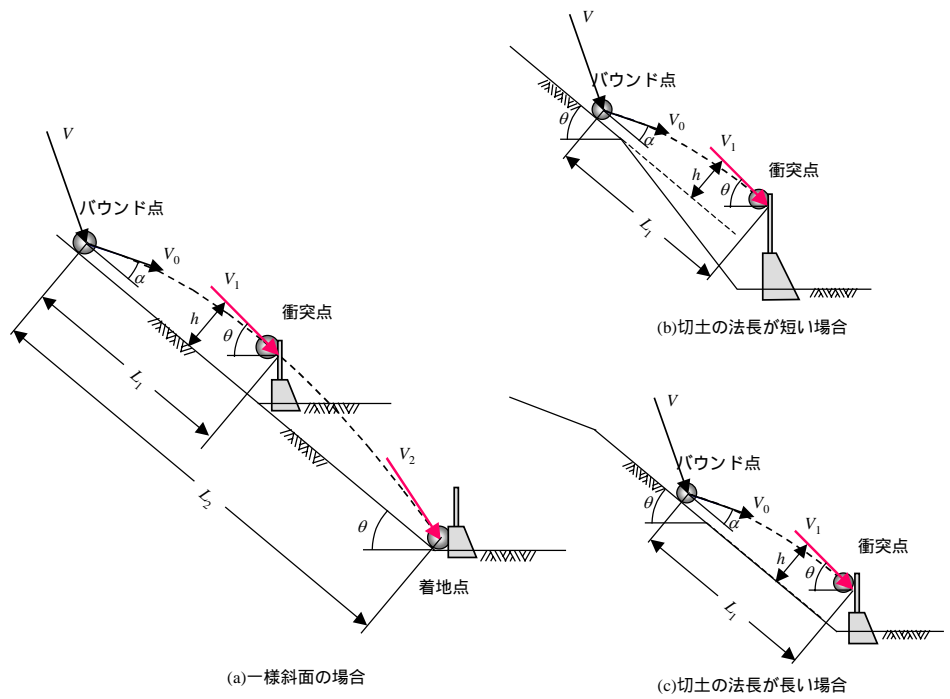


図 5.2 落石の飛行軌跡と速度

跳躍量が最大となる時の速度 V_1 、その地点までの飛行距離 L_1 はそれぞれ次のように表される。

$$V_1 = V_0(\cos \alpha + \tan \theta \sin \alpha) \leq \sqrt{2gH_1} \quad (5.1)$$

$$L_1 = \frac{(V_0 \sin \alpha)^2}{2g \cos \theta} (2 \cot \alpha + \tan \theta) \quad (5.2)$$

着地点の速度 V_2 、その地点までの飛行距離 L_2 は次のようになる。

$$V_2 = V_0 \sqrt{(2 \sin \alpha \tan \theta + \cos \alpha)^2 + \sin^2 \alpha} \leq \sqrt{2gH_2} \quad (5.3)$$

$$L_2 = \frac{2(V_0 \sin \alpha)^2}{g \cos \theta} (\cot \alpha + \tan \theta) \quad (5.4)$$

ただし、 H_1, H_2

は落石発生源からそれぞれ V_1, V_2 を算定する位置まで落下高さである。

落石の速度は着地する際に最大となるが、その場合は図 5.2(a) に示すように防護柵には衝突しない。防護柵の設計では、一般に最大跳躍量となる高

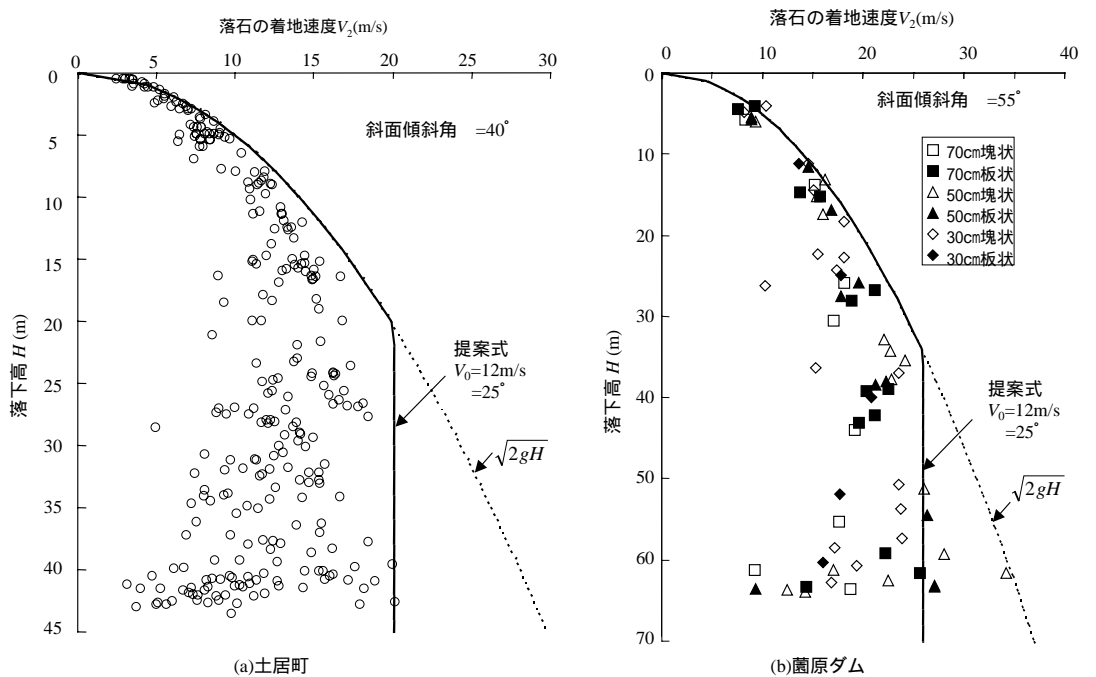


図 5.3 提案式による着地速度と落石実験の比較

さに落石が衝突するものとしているので、防護柵への衝突速度は式(5.1)で求めることができる。なお、道路際に切土のり面があって斜面勾配が変化している場合には、その法長に応じて図 4.2(b),(c)のように考えて計算することができる。

図 5.3 は、今回の落石実験および園原ダムの実験結果と式(4)において $V_0=12\text{m/s}$ 、 $\alpha=25^\circ$ の条件で求められる着地速度を比較した結果である。提案式で求めた速度は実験データを包絡する。

限界飛びだし速度と飛びだし角については、斜面条件によって異なるため今後検討していく必要があるが、 $V_0=12\text{m/s}$ 、 $\alpha=25^\circ$ が妥当と思われる。

(3) 運動エネルギー

落石が防護柵に衝突するとき(跳躍量が最大になるとき)の運動エネルギー E は、回転エネルギー比 β を用いて式(5.5)で表すことができる。落石対策便覧では $\beta=0.1$ としているが、回転エネルギー比は落下に伴って変化する。飛びだし速度を V_0 、衝突点からの落下高を z とすると、飛行中の回転エネルギー比は式(5.6)で表される。落石を半径 r の球と見なし、飛びだし時の接触面の相対速度を 0 とすれば、は式(5.7)となる。

$$E = \frac{1}{2} m V_1^2 (1 + \beta) \quad (5.5)$$

$$\beta = \frac{I \omega^2}{m V^2} = \frac{I \omega^2}{m V_0^2 + 2 m g z} \quad (5.6)$$

$$\beta = \frac{0.4}{1 + \sin^2 \alpha \tan \theta (2 \cot \alpha + \tan \theta)} \quad (5.7)$$

図 5.5 は落石の質量を 0.3t として提案式と落石対策便覧で落石の運動エネルギーを比較した結果である。落石対策便覧に比べて提案式によるエネルギーはかなり小さくなる。

(4) 跳躍量

落石対策便覧では、跳躍量を一律に 2m と決めているが、跳躍量 h は飛びだし速度 V_0 、飛びだし角 α 、落石径 D の影響を受け、式(5.8)のように表される。ただし、跳躍量 h は図 5.1(a)に示すように測定するものとする。

$$h = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(V_0 \sin \alpha)^2}{2g \cos \theta} + D \right\} \quad (5.8)$$

落石径 D をパラメータとして、斜面傾斜角 θ と跳躍量 h の関係を計算すると図 5.5 となる。図 5.6 は式(5.8)で求められる跳躍量と落石実験結果を比較したものである。提案式で求められる跳躍量は、今回の実験および園原ダムの実験の 90% をカバーする。

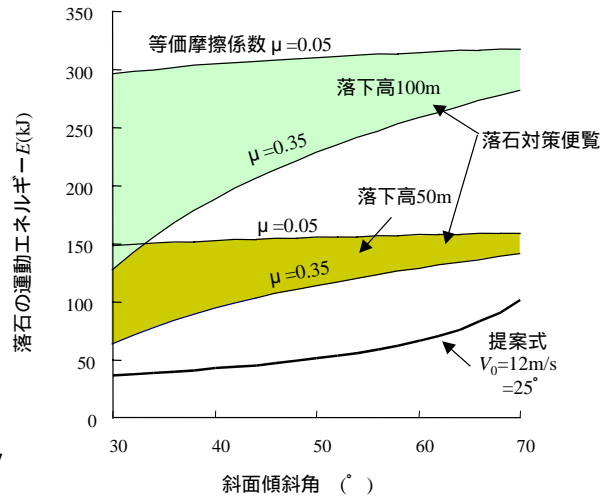


図 5.4 落石の運動エネルギー(落石質量 0.3t)

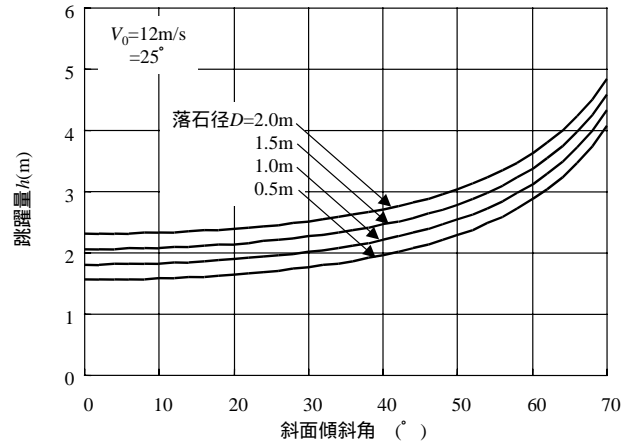


図 5.5 提案式による斜面傾斜角と跳躍量の関係

6. まとめ

(1) 落石実験

斜面を落下する落石の運動形態は、飛行と衝突を繰り返す跳躍運動である。

運動開始直後の落石の速度は、自由落下速度に近い。飛行中は重力加速度を受けて速度を増すが、斜面に衝突すると地盤のせん断破壊でエネルギーが消費され減速する。

衝突後の飛びだし速度は、地盤

土粒子の弾性歪みエネルギーの回復による。このため、飛びだし速度は限界速度以上にはならない。

速度残存係数 v や等価摩擦係数 μ は、斜面によって決まる定数ではない。 v は 1 から 0 へ、 μ は 0 から \tan へと落石の落下に伴って変化し、落石停止位置では、 $v=0$ 、 $\mu=\tan$ となる。

落石の速度は、飛びだし地点の斜面勾配に影響され、飛行時間が長くなると速度も速くなる。

落石の質量が大きいと速度は速くなる。立木の有無による有意な差異は見られなかった。

跳躍量は 95% が 1.5m 以下、99% が 2m 以下であった。斜面途中に緩傾斜部あるいは切株や岩盤の突起があると跳躍量は大きくなる。

(2) 落石運動の簡易計算法

地這りなどで用いられる「そりモデル」を用いれば、落石の到達位置を簡単に予測できる。

飛びだし速度は限界速度以上にならないことに着目し、限界飛びだし速度を初速度として落石運動を予測する簡易計算法を提案した。

提案式で限界飛びだし速度 $V_0=12\text{m/s}$ 、飛びだし角度 $\theta=25^\circ$ として求めた速度と跳躍量は、今回の実験および過去に行われている園原 A の実験結果と一致する。

7. 研究成果の活用によって期待できる効果

落石実験で得られた知見およびそれに基づいた落石運動の簡易計算法を今後の落石対策に活用することにより、下記のような効果が期待できる。

(1) 落石対策の必要性の判断

落石が斜面を転がって道路まで到達するか、斜面の途中で停止するか判断は、これまで現場技術者の勘に頼ってきたが、提案した「そりモデル」を用いれば、落石の停止位置を簡単に予測することが可能で、それによって落石対策の必要性を客観的に判断することができる。

(2) 落石対策のコスト縮減

提案式を用いれば、落石の運動エネルギーを適切に評価できる。落下高さや斜面勾配にもよるが、落石対策便

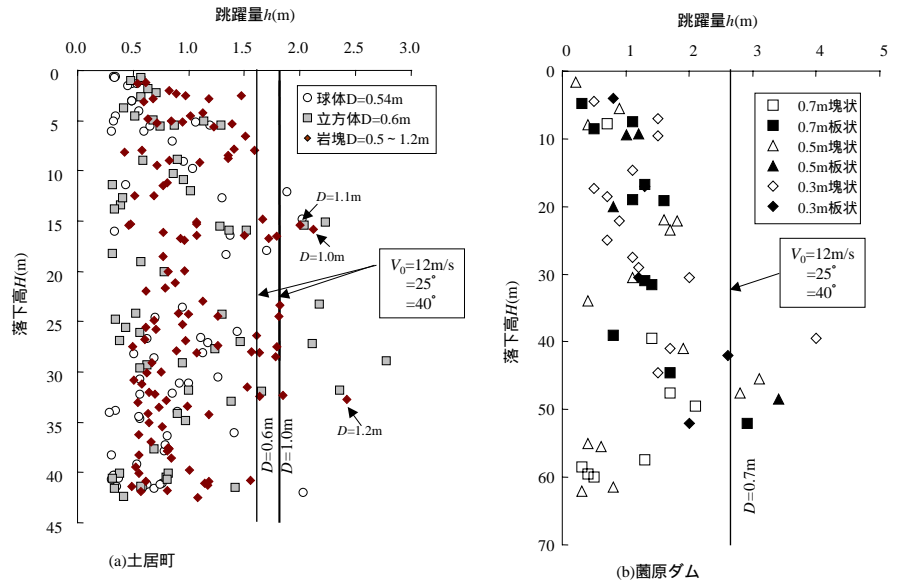


図 5.6 提案式による跳躍量と落石実験の比較

覽で求められる値の 1/3 ~ 1/10 程度になるので、大幅なコスト縮減が可能になる。

(3) 既設落石防護柵の安全性の評価

既設の落石防護柵は、現場技術者の経験的判断で設置されてきたが、写真 7.1 に見られるように、ほとんどの防護柵は期待通り、あるいはそれ以上の機能を発揮している。しかしながら、エネルギー吸収性能が 50kJ の標準的な落石防護柵を落石対策便覧で照査すると大概の場合アウトになる。これに対して提案式によれば、落石質量が 0.3t の場合、斜面傾斜角が 49° 以下であれば落石発生源からの落差に関係なく落石エネルギーは 50kJ 以下になる。提案式を用いると、落石質量と斜面傾斜角のみの情報で既設の防護柵の安全性を適切に評価できる。



(4) 地形の形状や落石径を考慮した防護柵の高さの決定

落石対策便覧では跳躍量を一律に 2m と決めているため、落石が防護柵を飛び越えて道路に落下する事故が起きることがある。提案式では、斜面勾配、落石径を考慮したものになっているので、落石の跳躍量を合理的に求めることができる。

写真 7.1 芸予地震による落石

8. 今後の課題

今回の落石実験による特筆すべきことは、「落石の速度は、落石発生源からの落下高に支配されない。地盤の支持力等から決まる限界飛びだし速度と、飛行地点の地形の幾何学的形状に支配される」という自然法則の発見であった。

この自然法則を根拠にした簡易計算法を提案したが、限界飛びだし速度と飛びだし角は、斜面の地質、落石の大きさの影響を受けると考えられる。今後は、日本道路協会の「落石対策便覧に関する資料集」に掲載されている既往の事例等に提案式を当てはめ、発見された自然法則が普遍性のあるものかどうかを確認するとともに、斜面条件に応じた限界飛びだし速度と飛びだし角の具体的な数値の決定法について研究する必要がある。

また、今回の落石実験で得られた知見および検討結果を落石対策事業に活用していくには、落石対策便覧に反映させる必要がある。そのためには、落石防護柵だけでなく、落石覆工など全ての落石防護工の設計法への利用も視野に入れ、設計に用いる落石速度や跳躍量の信頼範囲について検討をすると共に、各種の地形条件を考慮した具体的な計算法を示す必要がある。

本業務の実施にあたっては、斜面防災、落石問題の学識経験者で構成される技術検討会(委員長：矢田部龍一愛媛大学教授)にご指導頂いた。委員の皆様へ深甚の感謝を申し上げます。