

落石の速度に関する現場実験

株式会社第一コンサルタンツ 右城 猛
同 技術部設計二課 楠本 雅博
同 技術部設計二課 篠原 昌二

1. はじめに

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の予測が重要である。この予測には等価摩擦係数を用いた経験則が一般に用いられており、落下高さに伴い落下速度が増加する。しかし、落下速度には上限速度があると推測されることから、落石の運動形態を詳細に把握することを目的で、国土交通省四国地方整備局四国技術事務所の委託を受けて現場落石実験を実施した。

本論文は、自然斜面落石実験の方法と落石の落下速度について述べたものである。

2. 実験の方法

斜面を落下する落石の運動は、斜面の幾何学的形状、地質の硬軟、植生状況、落石の形状・寸法などに影響される。自然斜面落石実験は、これらが落石の運動軌跡、並進速度、角速度、運動エネルギー、跳躍量に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたものであり、斜面高さ 41m、平均勾配 44 度の自然斜面で実施した。供試落石は、辺長 0.66m で質量 0.52t のコンクリート立方体が 6 個、直径 0.54m で質量が 0.2t のコンクリート球が 7 個、質量 0.12~2.06t の自然石が 11 個である。コンクリート供試体の内部には、衝撃力を計測するため三軸加速度計を埋め込んだ。実験では立木伐採前、伐採後のそれぞれで球を 5 回、立方体を 5 回、岩塊を 10 回落下させた。このうち詳細な解析を行ったのは、立木伐採前が球体、立方体、岩塊のいずれも 2 ケースずつ、立木伐採後は球体 3 ケース、立方体 5 ケース、岩塊 10 ケースである。

3. 実験結果

写真 - 1 は、コンクリート球を落下した自然斜面実験から得られたものである。写真にはビデオカメラで撮影された 1/30 秒毎の落下経路が示されている。加速度波形は内蔵した加速度計で計測された合加速度を表している。コンクリート球が斜面に接触すれば衝撃加速度として表れるが、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。加速度波形による衝撃の発生とビデオ画像で確認された着地位置の対応を示した。

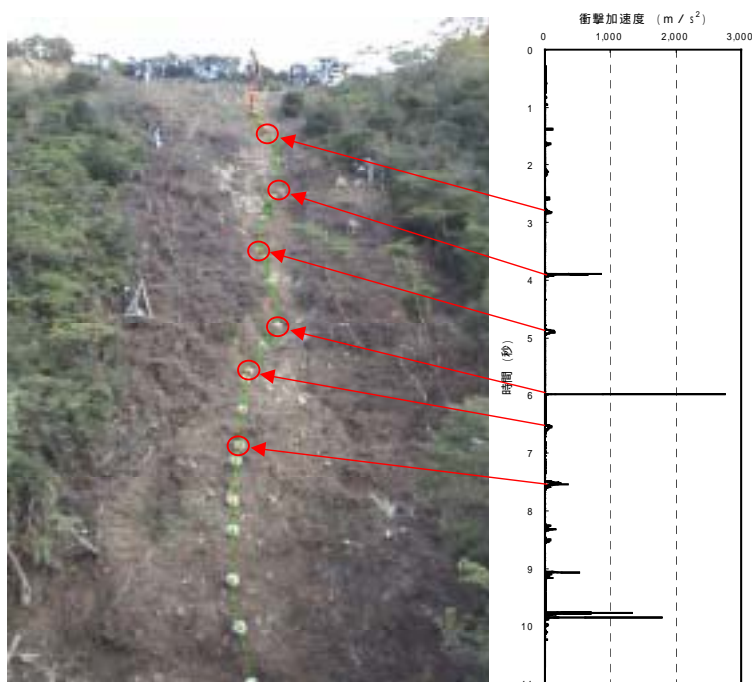


写真 - 1 自然斜面実験状況と衝撃加速度波形

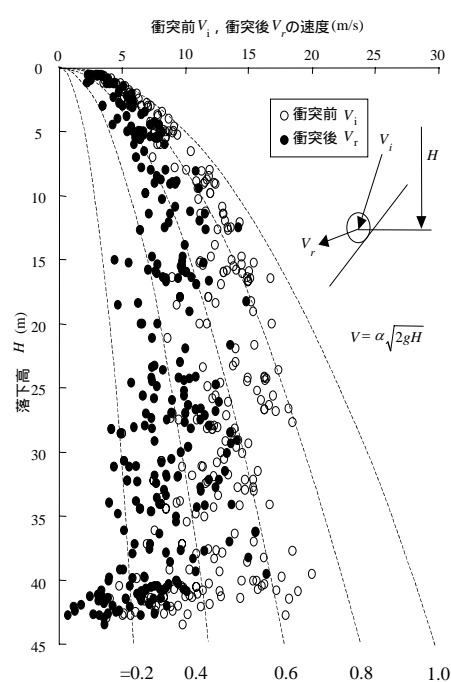


図 - 1 落下高さと同進速度

ビデオ画像のみからは跳躍運動か転がり運動かの識別は困難であるが、加速度波形をみればコンクリート球の運動形態を正確に把握することができる。ビデオ画像の三次元座標解析による落下供試体の位置計測と、衝撃加速度波形による飛行時間から落石の落下速度を解析した。

加速度波形から明らかなように、斜面を落下するコンクリート球の運動は飛行と衝突を繰り返す跳躍運動が主体的であった。立方体や岩塊の運動形態もコンクリート球と同じであり、投石の直後にわずかにすべり運動と転がり運動が見られたが、直ぐに飛行運動へ移行した。その後は衝突と飛行を繰り返し斜面下端の谷部へ落下した。谷部の岩塊に衝突してそのまま停止することもあったが、少し回転した後に停止することが多かった。停止直前にはわずかにすべり運動が見られた。解析で得られた落下高さと並進速度を図 - 1 に示す。白丸は飛行運動から斜面に衝突する直前の速度を、黒丸は斜面から飛び出した直後の速度を表している。図 1 には速度残存係数で求められる落下速度を並記した。投石直後の速度残存係数は 1.0 になっており自由落下速度に近いが、落下に伴って速度残存係数は 1.0 から 0 へと変化している。衝突前の着地速度は地形勾配に支配されるが、衝突後の飛びだし速度は斜面との衝突によってエネルギーが失われるため 15m/s 以下になっていると考えられた。

図 - 2 は衝突後の飛びだし速度 V を、法線方向速度 V_n 、接線方向速度 V_t に分解して示したものである。速度を分解する際の基準面は、飛びだし点と着地点を結んだ線としている。実験では局所的な地形形状から入射角が大きくなった跳躍が 3 ケース見られた。落下直後は落下に伴い法線方向、接線方向ともに速度が増加しているが、法線方向速度は落下高さ 7m 程度で 5m/s、接線方向速度は落下高さ 13m 程度で 15m/s 程度に漸近する傾向が見られる。このことから落下速度には斜面条件で決定される上限速度が存在すると推測される。

落石が飛行中は加速されて速度を増すが、斜面に衝突するとエネルギーが消費されて減速する。衝突した地盤が破壊すると消費されるエネルギーが大きくなり、衝突後に飛びだし速度は限界速度以上にならないと考えられる。つまり、飛びだし速度は、落石発生源からの落下高が低く着地速度が遅い個所では地盤が破壊されず落下高さの影響を受け大きくなる。しかし、衝突速度が地盤を破壊する臨界速度を超えると落下高さに関係なく、斜面の勾配や起伏、地質によって決定される速度になると考えられる。また、飛行による着地速度は、落石発生源からの落下高とは関係せず、飛行時間すなわち、飛びだし速度、飛びだし角度、飛行区間の斜面勾配に支配される。このことから斜面条件がほぼ一様な実験斜面では、図 - 2 に示したような上限速度が存在すると推測される。

4. まとめ

自然斜面落石実験の結果、落石の速度は等価摩擦係数を用いた予測法のように落下高さに伴い大きくなるのではなく、落石と斜面条件による上限速度を持つと推測される。今後、過去の実験記録や落石事例を精査し、条件の異なる斜面での実証実験を行うことなどにより、合理的な落石速度の予測法を確立する必要がある。

[参考文献]

- 1) 四国技術事務所技術課：実斜面における落石の落下実験について、四国技報，第 3 巻 6 号，2004.1
- 2) 右城猛，楠本雅博，篠原昌二，大西一賢，田中秀和：落石の運動機構に関する研究その 1～5，地盤工学会四国支部技術研究発表会，2004.

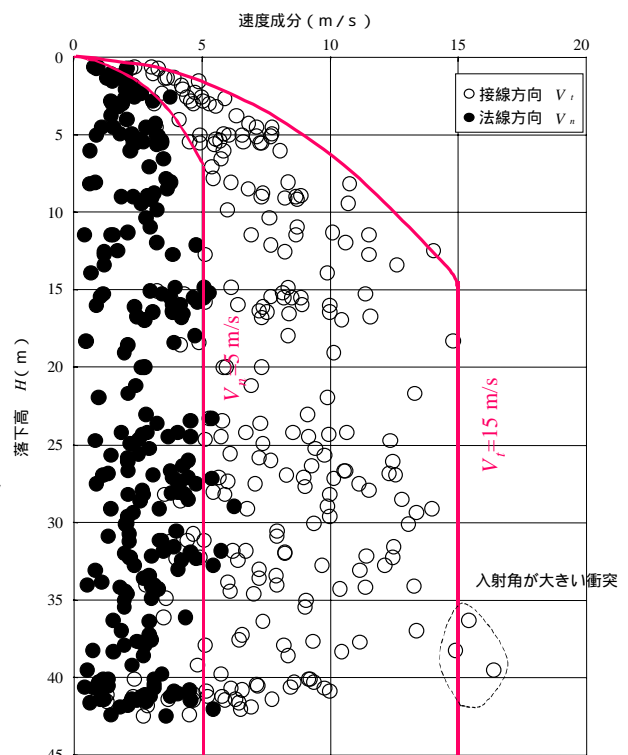


図 - 2 落下高と落下速度成分