

岩盤上の表土が落石の跳ね返り速度に及ぼす影響に関する研究

右城 猛¹・楠本雅博²・篠原昌二³・木下賢司⁴

¹正会員 博士(工学) 株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

E-mail:t-ushiro@daiichi-c.co.jp

²正会員 工学修士 株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

³ 株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

⁴ 工学修士 国土交通省四国地方整備局 (〒760-8554 高松市福岡町4-26-32)

直径54cm, 質量0.2tのコンクリート球を平坦な岩盤と表土を被せた人工地盤に自由落下させて跳ね返り速度を求めた。さらに、跳ね返り速度の算定法を提案し実験結果と比較した。その結果、1)跳ね返り速度は地盤支持力から決まる限界速度以上にはならないこと、2)岩盤上に表土が落石径程度被っていれば跳ね返り速度は土砂地盤と同じになること、3)提案した方法で計算すると、衝撃加速度、衝撃作用時間、跳ね返り速度を高い精度で予測することができること等を明らかにすることができた。

Key Words : *rock fall, field experiment, rock bed, top soil, concrete ball, acceleration, impact force, velocity of restitution, coefficient of restitution, strain energy, bearing capacity*

1. まえがき

落石運動の予測法には、既往の落石実験から得られた経験則に基づく手法と数値シミュレーション手法がある¹⁾。設計の実務では落石対策便覧に示されている経験則による手法²⁾を用いることが多い。しかしながら、経験則では落石の形状・寸法、斜面の形状や地質など現地の多様な条件を適切に反映させることができない。

このようなことから、近年、落石の運動をより定量的かつ合理的に予測する目的で各種の数値シミュレーション手法が開発され、実務においても活用されるようになってきている。しかしながら数値シミュレーションにおいては、斜面や落石のモデル化、計算パラメータの与え方、計算結果の妥当性の確認法などの課題が残されている³⁾。

落石運動の形態には、回転、滑り、跳躍、衝突があるが、斜面を落下する落石の運動は跳躍と衝突が主体的であることが筆者らの行った現場落石実験で明らかになっている^{3) 4)}。このため、衝突による運動の変化を解析することができれば、落石の運動を予測することが可能になる。

落石が斜面に衝突した後の跳ね返り速度は、衝突速度の斜面法線方向成分の増加に伴って減少することが古賀ら⁷⁾、右城ら⁸⁾による模型実験、Wuら¹⁰⁾による人工斜面

での落石実験で明らかにされている。

跳ね返り速度は、衝突速度以外に斜面の地質や表土の影響を受けるものと考えられるが、これらの影響を定量的に評価して跳ね返り速度を解析的に求める手法は確立されていない。

本論文は、落石の跳ね返り速度の予測法の確立を目的としたものである。採石跡地の平坦に仕上げられた岩盤面を利用し、その上にコンクリート球を直接あるいは表土を被せた人工地盤に自由落下させ、地盤の破壊形態を観察すると共に衝撃加速度を測定し、跳ね返り速度を求めた。その上で跳ね返り速度の算定法を提案し、その妥当性を確認した。

2. 実験概要

(1) 実験の方法

実験は、コンクリート球に回転を与えることなく落下させることができるように設計された空気圧方式の離脱装置でコンクリート球を挟み、トラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、平坦に仕上げられた岩盤面あるいはその上に表土を被せた地盤面に自由落下させた(図-1、写真-1)。

実験ケースは表-1に示す通りである。

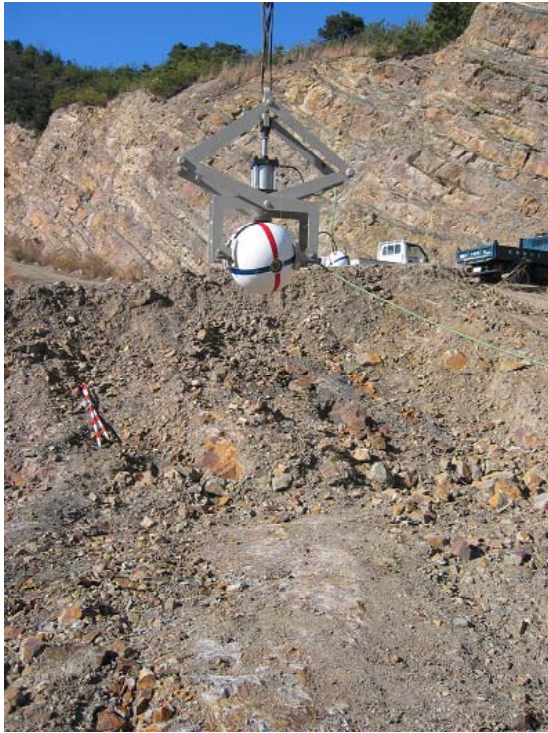
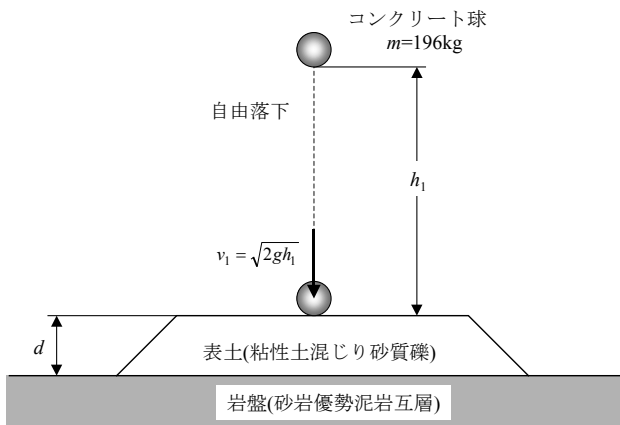


写真-1 コンクリート球と離脱装置



表土厚さ $d=0.0\text{m}, 0.1\text{m}, 0.2\text{m}, 1.8\text{m}$

図-1 実験の方法



写真-2 岩盤から採取したコア

表-1 実験ケース

実験の種類	表土厚(m)	落下高(m)
表土なし	0.0	2,4,6,8,10,15
表土あり	0.1	10
	0.2	10
	1.8	5,10,15

落下回数は各ケースとも3回とした

表-2 表土の土質試験結果

項目		試験結果
一般特性	湿潤密度 $\rho_t (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.8
	土粒子の密度 $\rho_s (\text{g}/\text{cm}^3)$	2.69
	自然含水比 $w_i (\%)$	6.2
粒度特性	石分 75mm以上(%)	0
	礫分 2~75mm(%)	62
	砂分 75 μm ~2mm(%)	25
	シルト分 5~75 μm (%)	8
	粘土分 5 μm 未満(%)	5
	最大粒径 (mm)	37.5
	均等係数 U_c	411.6
コンシステンシー	液性限界 $w_L (\%)$	28.3
	塑性限界 $w_p (\%)$	22.9
	塑性指数 I_p	5.4
土質分類	地盤材料の分類名	粘性土混じり砂質礫
	分類記号	(GS-Cs)

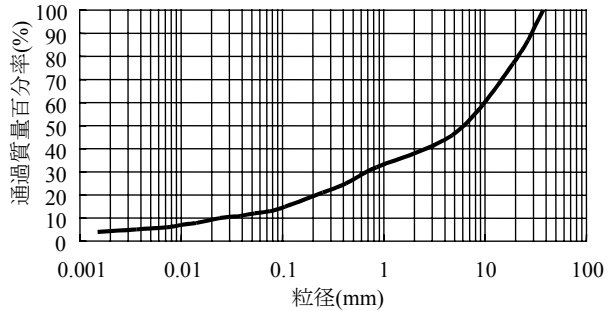


図-2 表土の粒径加積曲線

(2) 岩盤および表土の物理特性

a) 岩盤

岩盤は和泉層群の砂岩泥岩互層である。実験を行った付近で比較的亀裂の少ない砂岩を選んで一軸圧縮試験用のコアを採取したが、写真-2に示すように亀裂が多く、試験に供することができなかった。このため、点載荷試験を行って一軸圧縮強さを推定した。その結果は、 $q_u=130\text{MPa}$ であった。

採石場を所有する愛媛砕石工業(株)が亀裂が入っていない砂岩塊を用いて行った一軸圧縮試験では、 202MPa の強度が確認されている。

b) 表土

表土の土質試験結果を表-2に、粒径加積曲線を図-2に示す。湿潤密度は現地で水置換法で求めた。



写真-3 コンクリート球と加速度計

図-3 コンクリート球の衝突と跳ね返り

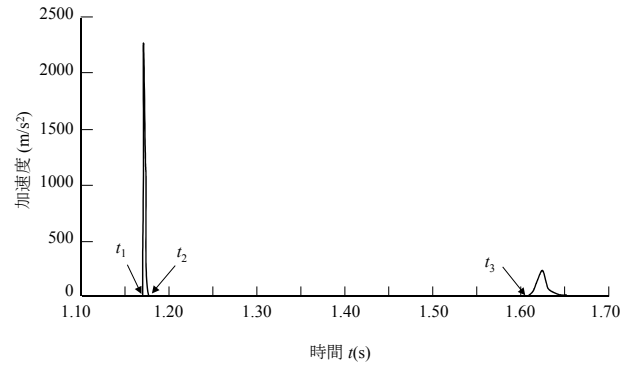


図-4 3方向合成加速度波形



写真-4 衝突後のコンクリート球の跳ね上がり

(3) コンクリート球

実験に使用したコンクリート球を写真-3(左)に示す。直径0.54m、質量196kgである。コンクリートの圧縮強度は90MPaである。球の内部には写真-3(右)に示すの加速度センサー(φ5cm×6cm)とデータロガー(φ6cm×20cm)をケーシングパイプで保護して埋め込んだ。

加速度計は半導体加速度計で、周波数帯域は430Hz以上、応答周期は0.0023秒、有効計測範囲は-1690～1690m/s²、感度誤差±8%である。

(4) 計測の方法

コンクリート球が地面に衝突すると写真-4に示すように跳ね上がる。この挙動を詳細に観察するため、デジタルビデオカメラ(1コマ 1/30秒)で撮影するとともに、球の内部に埋め込んだ加速度計で3方向の加速度を測定した。3方向合成加速度の一例を図-4に示す。加速度のサンプリング速度は2,000Hzである。加速度には重力加速度も含まれているが、衝撃加速度に比べれば小さいので地面との接触の判定には影響しない。

加速度計は、コンクリート球が離脱装置から離れるとスイッチが自動的に入り測定を開始する仕掛けになっている。球が完全に停止した時点でスイッチをオフにし、データをパソコンに取り込んだ。

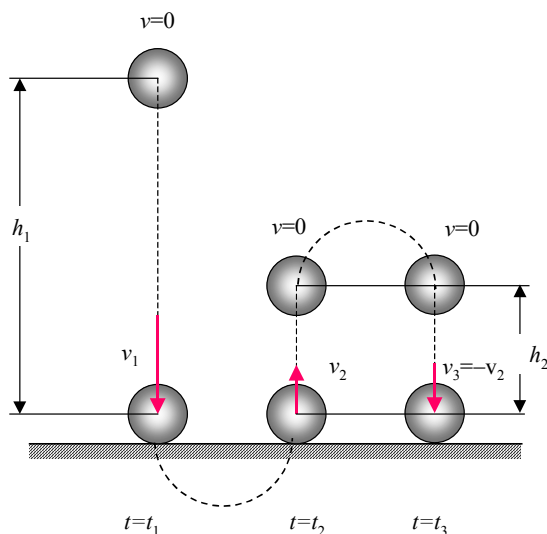
地面に衝突する速度 v_1 は式(1)で、衝突後の跳ね上がり速度 v_2 は式(2)でそれぞれ求めた。

$$v_1 = \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{t_f}{2} g \quad (2)$$

ここに、 h_1 は落下高、 t_f はバウンドした球の跳ね上がり期間の時間、 g は重力加速度である。

コンクリート球が地面に衝突してバウンドすると図-4に示すような加速度波が現れるので、跳ね上がり期間の時間は、跳ね上がり開始と着地のタイムラグ($t_f = t_3 - t_2$)



より求めた。

3. 跳ね上がり速度の解析法

(1) 衝突時のコンクリート球の挙動

コンクリート球が初速度 v_1 で地盤に衝突すると、図-5(a)に示すような加速度 $a(t)$ が発生する。この加速度は落下高 9.6m, 表土厚 0.1m の条件で行った実験から得られたものである。

コンクリート球が地盤に対して十分剛であると見なせば、球の衝突期間中の速度 $v(t)$ は式(3)で求めることができ、図-5(b)となる。

$$v(t) = v_1 - \int_0^t a(t) dt \quad (3)$$

球の変位 $x(t)$ は式(4)で求められ、図-5(c)となる。

$$x(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (4)$$

落下前のコンクリート球の持つ位置エネルギーと、コンクリート球が地盤に対して成す仕事に等しいとすると、地盤のひずみエネルギー $E_s(t)$ は式(5)で求められ、図-5(d)となる。ただし、コンクリート球の質量を m とする。

$$E_s(t) = m \int_0^t a(t)v(t) dt \quad (5)$$

この実験ケースにおける加速度の最大値は 2250m/s^2 、衝撃作用時間は 0.015 秒である。速度が 0 となる $t=0.01$ 秒付近までが圧縮期間、それ以降が回復期間である。

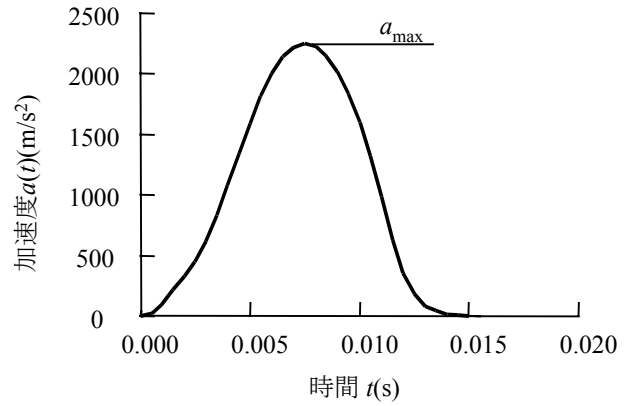
剛なコンクリート球が v_1 の速度で地盤に衝突すると、コンクリート球の運動エネルギーの大半が、一旦は地盤のひずみエネルギー $E_s(t)$ に変換される。ひずみエネルギーには、表土の土粒子の移動や破砕、岩盤のせん断破壊で消費されるエネルギー E_p と、土粒子および岩盤の弾性ひずみエネルギー E_e があり、弾性ひずみエネルギーのみが運動エネルギー E_2 として回復する。

(2) 跳ね返り速度と反発係数

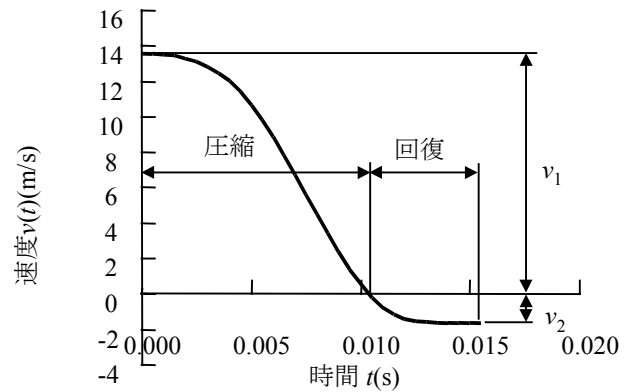
衝撃力 $P(t)=ma(t)$ と変位 $x(t)$ の関係は図-6 のようになる。衝突速度が速くなると、地盤が破壊されるため加速度は頭打ちになる傾向が見られる。そのときの衝撃力 $P_{\text{max}}=ma_{\text{max}}$ を地盤の支持力 Q_u と見なす。

衝撃力-変位関係が図-6 のような曲線を示すのは $P(t)=0$ の時点で速度 v_1 をもち、衝撃力の発生期間中速度が図-5(b)で示したように減衰するためである。

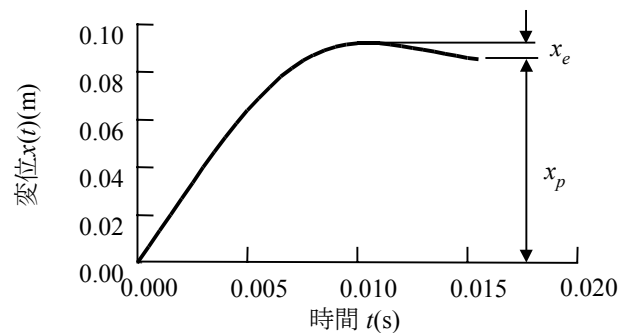
変位は、衝撃力がピークを過ぎてもピーク値 P_{max} の 1/2 程度に減少するまでは増加する傾向が見られる。このため、解析上は図-7 のようにモデル化する。



(a) 加速度



(b) 速度



(c) 変位

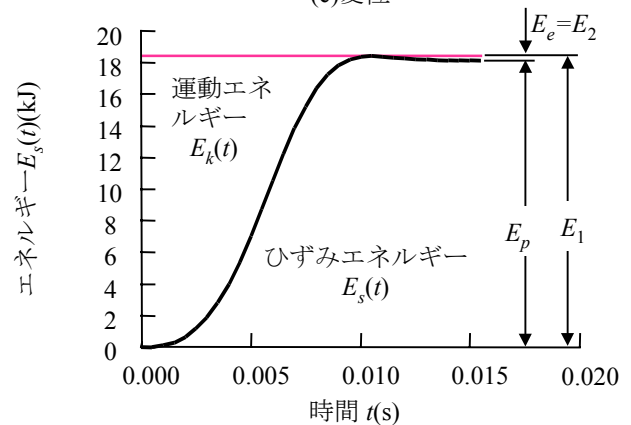


図-5 加速度、速度、エネルギー(落下高10m, 表土厚0.1m)

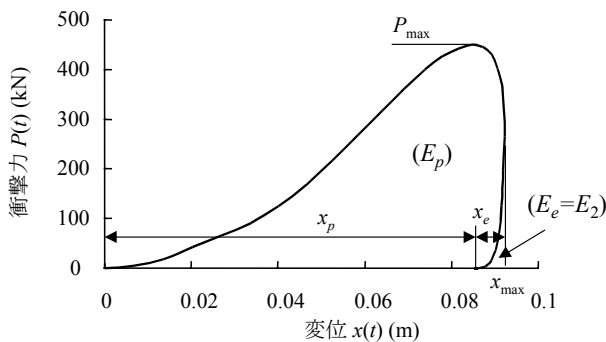
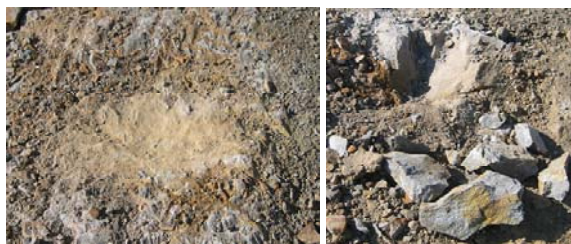


図-6 衝撃力と変位の関係
(落下高10m, 表土厚0.1m)

$$e = -\frac{v_2}{v_1} \quad (9)$$

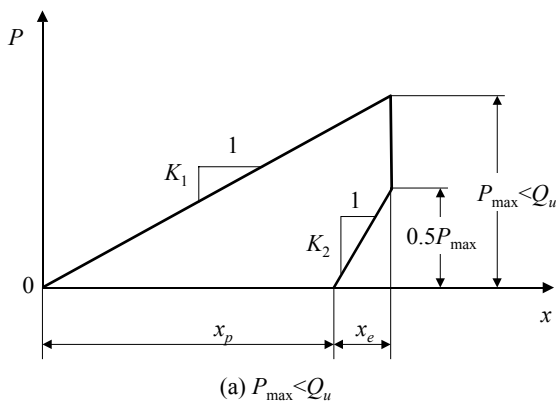


[左上]
岩盤の変形による窪み(落下高4m)
窪みの直径14~15cm, 深さ1cm

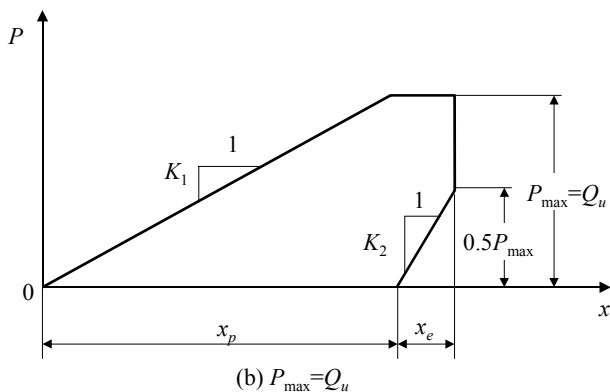
[右上]
岩盤の節理面に沿った
くさび状破壊(落下高6m)

[左下]
衝突時の接触面には
岩盤の破砕粒子が付着

写真-5 衝突後の岩盤およびコンクリート球の状態



(a) $P_{\max} < Q_u$



(b) $P_{\max} = Q_u$

図-7 衝撃力-変位関係のモデル化

衝撃力のピーク P_{\max} が Q_u 未満のときは図-7(a), Q_u に等しくなるときは図-7(b)とする. K_1 は圧縮期間のバネ定数, K_2 は回復期間のバネ定数である.

このようにモデル化すると, 最大衝撃力 P_{\max} , 最大加速度 a_{\max} , 跳ね返り速度 v_2 , 反発係数 e , 回復変位量 x_e , 残留変位量 x_p はそれぞれ式(6)~式(11)で求めることができる.

$$P_{\max} = \min\left\{Q_u, v_1 \sqrt{mK_1}\right\} \quad (6)$$

$$a_{\max} = \frac{P_{\max}}{m} \quad (7)$$

$$v_2 = -\frac{a_{\max}}{2} \sqrt{\frac{m}{K_2}} \quad (8)$$

表-3 実験で推定された支持力とバネ定数

	表土なし(岩盤)	表土あり
Q_u (kN)	600	300
K_1 (kN/m)	36,700	2,300
K_2 (kN/m)	93,000	200,000

$$x_e = \frac{P_{\max}}{2K_2} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} x_p &= \frac{P_{\max}}{K_1} - x_e \quad [P_{\max} < Q_u] \\ x_p &= \frac{Q_u}{2} \left\{ m \left(\frac{v_1}{Q_u} \right)^2 + \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right\} \quad [P_{\max} = Q_u] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Q_u , v_1 ($P_{\max} = Q_u$ となる初速度), v_2 とバネ定数 K_1 , K_2 の関係は式(12)で表される.

$$K_1 = \frac{1}{m} \left(\frac{Q_u}{v_1} \right)^2, \quad K_2 = \frac{1}{4m} \left(\frac{Q_u}{v_2} \right)^2 \quad (12)$$

実験によって推定された地盤支持力 Q_u とバネ定数 K_1 , K_2 を表-3に示す.

4. 実験結果

(1) 衝突時の挙動と地盤の変形

a) 表土がない場合

写真-4 は高さ 6m から盤面に球を自由落下させたときの様子である. 白色の円弧は 1/30 秒間隔で撮影されたビデオカメラの画像を基にして描いている. 球は岩盤面に衝突した後, 跳ね上がり, その後再び着地している. 衝突時に岩盤の表面は振動

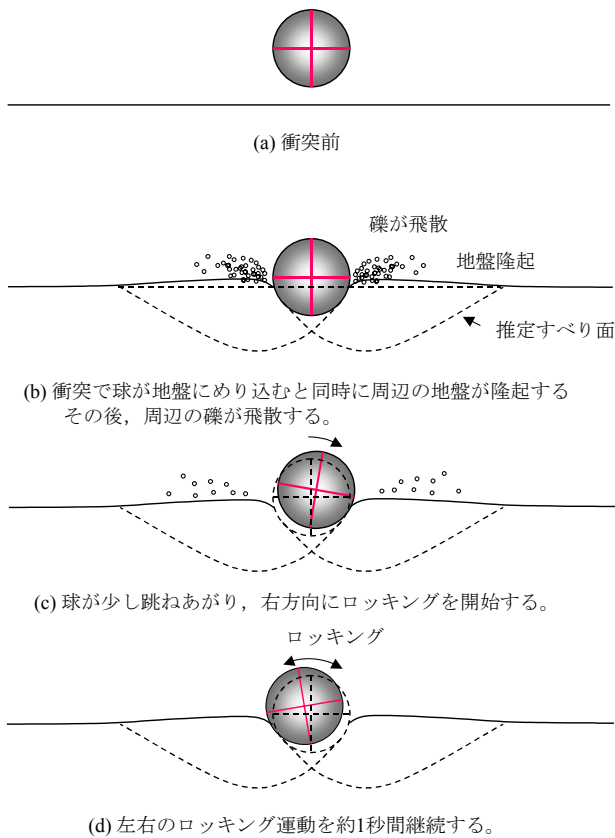


図-8 衝突の様子(表土厚 1.8m)

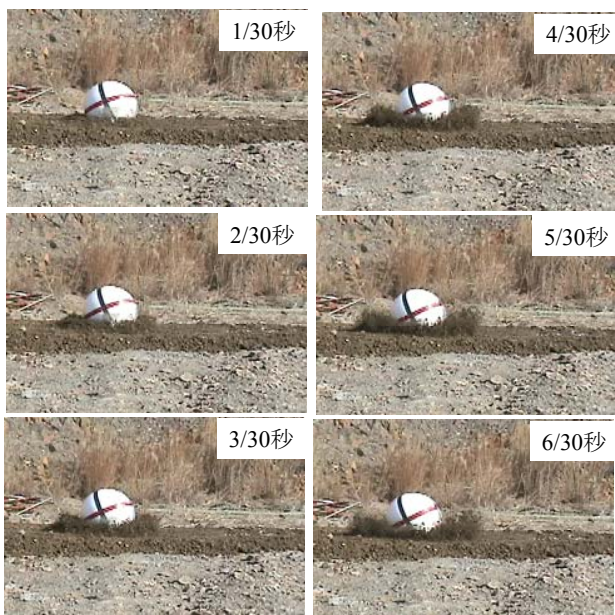


写真-6 衝突の様子(表土厚 0.1m)

して波打つ。

衝突後の岩盤の状態を写真-5に示す。節理が発達していない個所では、写真-5(左上)に示すように岩盤が変形して曲面の窪みができた。窪みの深さは約1cmであった。岩盤に節理が発達した個所では写真-5(右上)に



写真-7 衝突後の表土の窪み(表土20cm, 落下高10m)

D11誤り

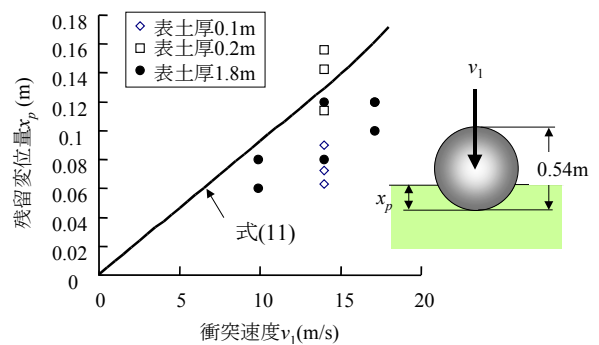


図-9 コンクリート球の貫入量

示すように、節理面に沿ってくさび状に破壊した。

コンクリート球の接触面には、写真-5(左下)に見られるように岩盤の破碎粒子が付着する。付着は落下高さに関わらず窪みの直径と同じ 14~15cm 幅の範囲であった。窪み深さを 1cm として接触幅を計算すると 14.6cm となり計算値と整合した。

b)表土がある場合

コンクリート球を厚さ 1.8m の表土に落下させたときの様子は図-8 のようになる。衝突と同時に周辺の地盤が隆起する。その後、衝突点周辺の土砂が飛散する。そして、球は左右にロッキングし、約 1 秒後に停止した。衝突時に地盤が隆起するのは、地盤内部に破線で示すようなせん断面が発生するためと考えられる。

表土が薄いと地盤の隆起の様子は確認できないが、表土があると衝突点周辺の土砂は写真-6のように飛散するのが確認できた。

衝突によってコンクリート球は土砂に貫入し、写真-7 に見られるような曲面の窪みを形成する。窪みの表面は土粒子が押し潰されて滑らかになる。

窪みの深さから測定した残留変位と衝突速度の関係は図-9となる。表土が1.8mの場合の残留変位は、衝突速度とほぼ比例する。図中の曲線は式(11)による計算値である。

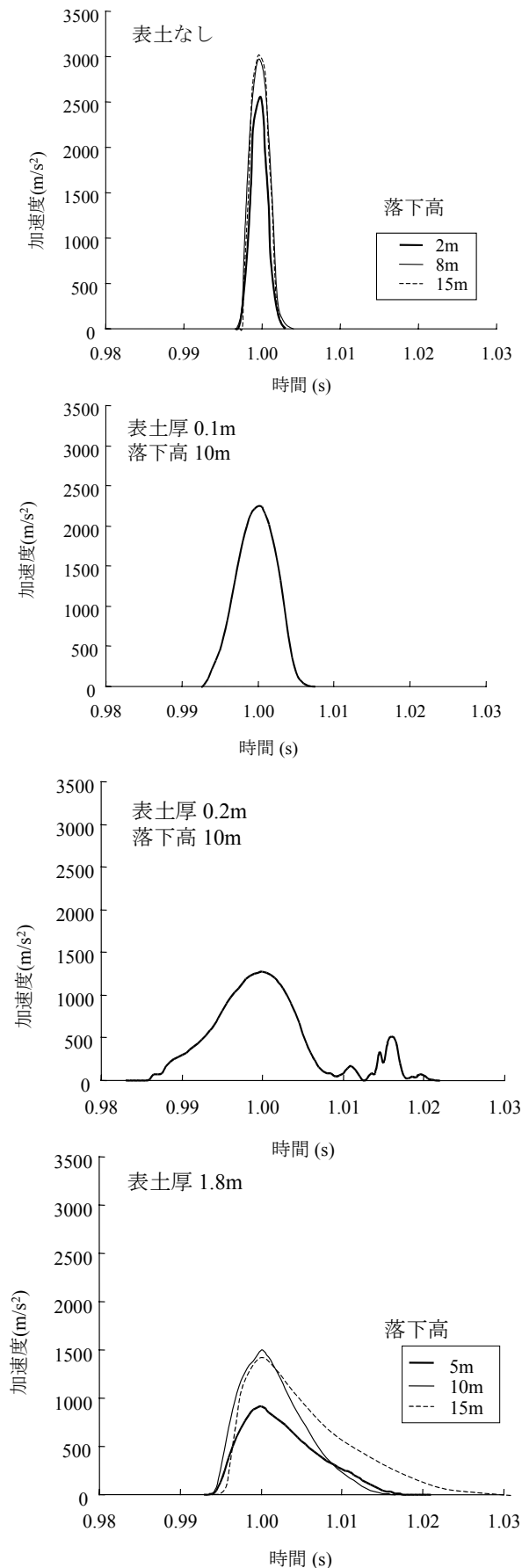


図-10 加速度波形

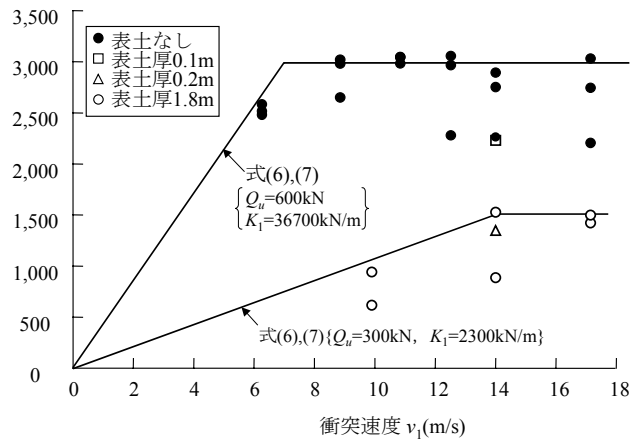


図-11 衝突速度と最大加速度の関係

表土厚と残留変位量の関係は明確でない。表土厚が0.1mのときには、窪みの底に岩盤が現れていたが、0.2mのときは土砂が残っており、1.8mの場合と明確な違いは認められなかった。図-9で、表土厚1.8mよりも表土厚0.2mの残留変位が大きくなったデータがプロットされている原因は、表土と岩盤の境界条件の影響によるものと推測される。

(3) 加速度

衝突によって最初に出現した加速度の3方向成分を合成して求めた波形の代表的なものを図-10に示す。ただし、実験条件の違いによる衝撃の作用時間を比較できるように、時間軸は加速度波のピークが1.0秒となるように描いている。D13修正

a)最大加速度

衝突速度 v_1 と最大加速度 a_{max} の関係を図-11に示す。表土がないときの最大加速度は、衝突速度に関係なく $2,200 \sim 3,000 \text{ m/s}^2$ の範囲にばらついている。表土を被せたときは衝突速度に比例して増加するものの $1,500 \text{ m/s}^2$ で頭打ちになる傾向が見られる。

図-11に描いている曲線は、式(6)および式(7)で求めたものである。実験結果の上限を示している。

衝突速度が遅いと地盤は弾性的な応答をする。しかし衝突速度が速くなると衝撃力で地盤がせん断破壊し、最大加速度は頭打ちとなる傾向が見られる。衝撃加速度のばらつきが大きいのは、岩盤の強度が亀裂密度や亀裂の方向の影響を受けるためと考えられる。

テルツァギーの支持力公式は式(13)で表される。この式は、静的荷重を受ける剛体円盤を対象としているが、近似的な目安値としてならコンクリート球に対する動的支持力の推定においても適用できると思われる。

$$Q_u = \frac{\pi B^2}{4} (1.3cN_c + 0.3\gamma BN_\gamma) \quad (13)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} N_c &= \cot \phi (N_q - 1) \\ N_q &= \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \exp(\pi \tan \phi) \\ N_\gamma &= (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

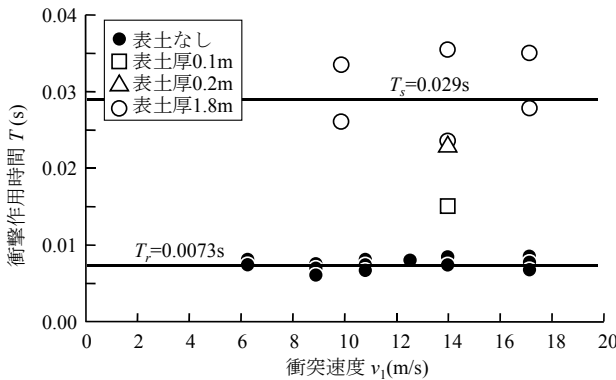


図-12 衝突速度と衝撃作用時間の関係

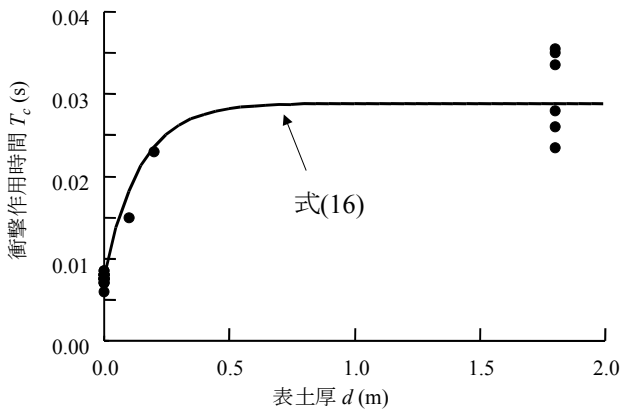


図-13 表土厚と衝撃作用時間の関係

ここに、 B は球の接地幅、 c は地盤の粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 γ は地盤の単位体積重量である。

表土なしの場合、 $\gamma=26\text{kN/m}^3$ 、 $\phi=0$ として $Q_u=600\text{kN}$ となる粘着力を逆算で求めると $c=5\text{MPa}$ となる。この値は、点載荷試験から推定される粘着力 $c=q_u/2=65\text{MPa}$ の1/13と小さいが、点載荷試験は亀裂の少ない岩塊を用いていることを考えればオーダー的に妥当と判断される。

表土厚1.8mの場合は、 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ 、 $\phi=40$ 度として $Q_u=300\text{kN}$ となる粘着力を逆算で求めると $c=29\text{kPa}$ となる。土質が粘性土分を13%含んだ砂質礫であるのでこの値は経験的に妥当と判断される。

なお、設置幅 B は地盤への球の衝突速度によって変化するが、実験結果を参考にして、表土なしは $B=0.15\text{m}$ 、表土厚1.8mの場合は $B=0.5\text{m}$ として計算した。

以上のことより a_{\max} の上限が地盤の支持力に影響されることは、少なくとも定性的に間違いのないと思われる。

b) 衝撃作用時間

衝突速度と衝撃作用時間の関係は図-12、表土厚と衝撃作用時間の関係は図-13のようになる。

衝撃作用時間は、表土がない場合は0.005~0.01秒、表土厚が1.8mのときは0.025~0.035秒となっている。表土厚が0.5m程度あれば1.8mのときと大差がない。衝突速度は衝撃作用時間に関与していない。

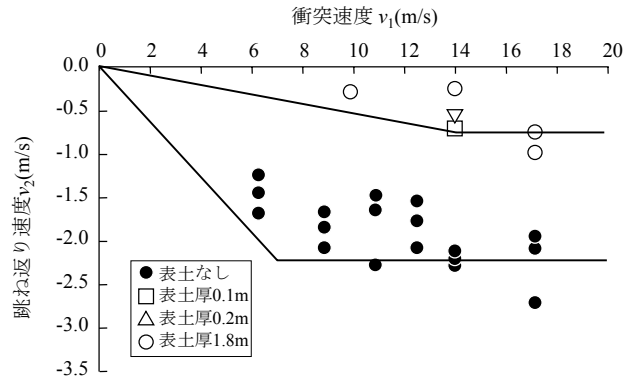


図-14 跳ね返り速度

コンクリート球の衝突による地盤の応答を、単純にバネ(K_1)—質点(m)系の単振動と見なせば、衝撃作用時間 T は固有振動の半周期となるので、式(15)で求められる。

$$T = \pi \sqrt{\frac{m}{K_1}} \quad (15)$$

式(15)に表-3に示したバネ定数 K_1 を代入して衝撃作用時間を算定すると、表土なし場合は $T_r=0.0073\text{s}$ 、表土ありの場合は $T_s=0.029\text{s}$ となり実験結果とほぼ一致する。

式(16)は、表土の厚さ d を考慮した衝撃作用時間 T_c を推定する式である。

衝撃作用時間は、表土を少し厚くするだけで急激に長くなるが、表土が0.5m程度より厚くなれば頭打ちとなる傾向が見られる。このような特性を表現するには、力学的な裏付けはないが式(16)が適している。

$$T_c = T_s \left[1 - \exp \left\{ -\frac{K_t}{T_s} (d + d_0) \right\} \right] \quad (16)$$

ただし、

$$d_0 = \frac{T_s}{K_t} \ln \left(1 - \frac{T_r}{T_s} \right) \quad (17)$$

ここに、 K_t は曲線の接線勾配である。

図-13に描いている曲線は $T_r=0.0073\text{s}$ 、 $T_s=0.029\text{s}$ 、 $K_t=0.2\text{s/m}$ として計算したものである。実験結果によくフィットしている。

(4) 跳ね返り速度と反発係数

式(2)によって求めた跳ね返り速度 v_2 と式(1)で求めた衝突速度 v_1 の関係は図-14となる。 v_2 は v_1 の増加に伴って減少するが、ある速度で一定になる傾向が見られる。

表土がないときの v_2 の限界速度は $-2 \sim -2.5\text{m/s}$ 、表土があるときは $-0.5 \sim -1.0\text{m/s}$ である。

反発係数と衝突速度の関係は図-15となる。反発係数は、衝突速度が小さい範囲では一定値を示すと推測されるが、衝突速度がある速度以上になると減衰する傾向を示す。

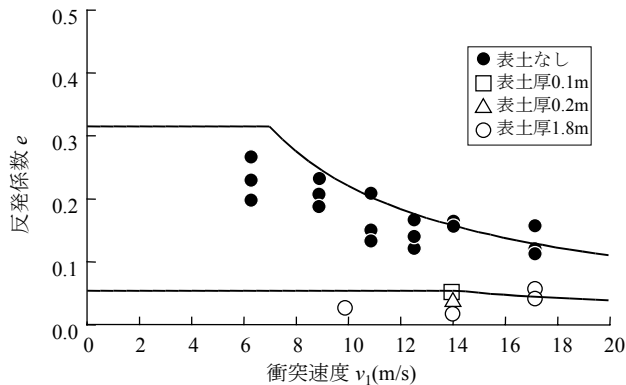


図-15 反発係数

図-14に描いている曲線は式(8)、図-15の曲線は式(9)を用いて表-3の条件で求めたものである。

解析結果は実験値とよく一致している。3章で提案した手法を用いれば、跳ね返り速度を合理的かつ精度良く推定することが可能である。

衝突速度が速くなると反発係数が減少する傾向は、古賀ら^{7),8)}、右城ら⁹⁾、Wuら¹⁰⁾による実験結果と一致する。

5. まとめ

直径54cm、質量0.2tのコンクリート球を平坦な岩盤と表土を被せた人工地盤に自由落下させ、衝撃加速度、跳ね返り速度を求めた。さらに、跳ね返り速度の算定法を提案し実験結果と比較した。その結果、下記のことが明らかになった。

- ① 衝突速度が速くなると地盤が破壊するので加速度はある値以上にはならない。加速度の上限値は地盤の支持力に影響される。
- ② コンクリート球を衝突させたときの地盤支持力の目安は、テルツァギー式で算定できる。
- ③ 衝突後の跳ね返り速度は、衝撃力が地盤支持力より小さいと衝突速度に比例する。衝撃力が支持力に達すると、跳ね返り速度もある限界速度で一定になる。今回の実験における岩盤の限界速度は $-2 \sim -2.5\text{m/s}$ 、表土

があるときは $-0.5 \sim -1.0\text{m/s}$ であった。

- ④ 反発係数は、衝突速度が小さい範囲では一定値を示すが、衝撃力が地盤支持力に達すると衝突速度の増大に伴い減少する。
- ⑤ 岩盤上に落石径程度の表土が被っていると、跳ね返り速度は土砂地盤と同じになる。
- ⑥ 提案した方法で計算すると、衝撃加速度、衝撃作用時間、跳ね返り速度、反発係数を比較的高い精度で予測することができる。

6. あとがき

斜面を落下する落石は、①ある限界速度をもつこと、②勾配が一樣である斜面での跳躍量は2m程度であること、③平坦に近い斜面に衝突すると大きく減速することが既往の現場落石実験^{4)~7)11)~18)}で明らかになっている。

これらの現象は、落石の跳ね返り速度が地盤の支持力から決まる限界速度以上にならないという今回の研究結果からある程度説明することができる。しかしながら、斜面を落下する落石は、斜面垂直方向の速度成分以外に接線方向の速度成分および角速度をもっているため、衝突によるこれらの速度変化のメカニズムを解明しない限り完全に説明することはできない。

落石が斜面に衝突したときの速度変化のメカニズムに関する研究は別途発表する予定である。

謝辞：本研究は、国土交通省四国地方整備局四国技術事務所の「平成15年度落石防護対策検討業務委託」において実施したものである。業務を実施するにあたり、落石防護技術検討会の場を通じて愛媛大学工学部環境建設工学科の矢田部龍一教授、小野田ケミコ（株）の古賀泰之氏、(独)土木研究所耐震研究グループ長の松尾修氏から貴重なご助言を賜った。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料，p.5，2002。
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，pp.9-20，2000。
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料，pp.377-380，2002。
- 4) T.Ushiro, H.Tsutsumi: Movement of rockfall and a study on its prediction, International Symposium on Geotechnical & Environmental Challenges in Mountainous Terrain, Kathmandu, Nepal, pp.367-375, 2001.
- 5) 古賀泰之・伊藤良弘・森下義・鷺田修三・谷口栄一：落石防災対策に関する調査報告書（その1），土木研究所資料，第2770号，pp.132-140，1989。
- 6) 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31-8，pp.42-47，1989。
- 7) 右城猛，篠原昌二，谷田幸治，八木則男：落石の斜面衝突

- 運動に関する研究, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会構造工学委員会衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会, pp.91-96, 2000.
- 8) Wu,S.-S.: Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Record 1031, pp.1-5, 1985.
- 9) 榎谷浩: 落石覆工の落石による衝撃力に関する研究, 大阪市立大学博士論文, p.22, 1988.
- 10) 佐々木康,谷口栄一,舟見清巳,谷本亘,堀口正巳: 落石の跳躍量に関する実験: 第14回日本道路会議論文集, pp.113-115, 1981.
- 11) 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トの設計法に関するシンポジウム論文集, pp.48-54, 1983.
- 12) 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.106-119, 1991.
- 13) 氏平増之, 細谷昭悟, 小川健太, 高貝暢浩: フィールドにおける落石の落下挙動—岩盤斜面の落石に関する研究 (第1報) —, 資源と素材Vol.112, 資源・素材学会, pp.843-850, 1996.
- 14) 氏平増之, 細谷昭悟, 小川健太, 高貝暢浩: 落石の運動エネルギーと到達距離の関係—岩盤斜面の落石に関する研究 (第2報) —, 資源と素材Vol.113, 資源・素材学会, pp.309-316, 1997.
- 15)

(2005. 1. 1 受付)

EFFECT OF SURFACE SOIL OVER THE BEDROCK ON THE REBOUND SPEED OF FALLING ROCK BOULDERS

Takeshi USIRO, Masahiro KUSUMOTO, Shouji SHINOHARA and Kenji KINOSHITA

To study the effect of surface soil on the rebound speed of falling rocks, a concrete ball of diameter 54cm and weight 0.2t was freely dropped onto a flat artificial ground made of bedrock and surface soil cover. The rebound speeds during each drop were determined, which were then compared with the values obtained from a newly proposed method for the estimation of rebound speed. As a result, the following points were understood: 1) the rebound speed does not exceed the value of critical acceleration, which depends on the bearing capacity of the ground; 2) if the bedrock is covered with a surface soil equivalent to the size of the falling rock, the rebound speed will be similar to that on a granular ground; and 3) the impact acceleration, impact time, and rebound speed can be precisely estimated from the proposed method.