

II-413

振動外力を受ける斜面上の捨石の挙動に関する数値的検討

豊橋技術科学大学 建設工学系 正 青木 伸一
 大阪大学工学部 土木工学科 正 榎木 亨
 大阪大学大学院 土木工学科 学 伊藤 禎和

1. まえがき 捨石堤の設計公式については、ハドソン公式に波の周期や不規則性の影響を考慮する形で改良がなされてきたが、近年では捨石に働く波力が直接測定されるようになり、より詳細な検討が行われるようになってきている。この測定された波力をより精度の高い設計公式にまで発展させるためには、捨石堤の破壊の指標である捨石の移動と結びつけて考えることが必要であり、そのためには、波力に対する捨石の動的挙動を明らかにしておくなければならない。本研究は、このような視点に立った基礎的な研究として、斜面上に突出した単一の捨石が振動外力を受ける場合に、捨石を転落させるのに必要な外力の大きさに及ぼす種々のパラメータの影響を、数値的に検討したものである。

2. 運動方程式とその解法 図-1に示すように、傾斜角 Φ の斜面上に固定された球状の捨石AおよびB(半径 b)上に置かれた捨石C(半径 a)の挙動を解析する。外力 R は、水平軸と角度 ϕ をなすものとし、 $R = A \cos(2\pi t/T - \epsilon)$ のように表されるものとする。またその水平及び鉛直成分を R_T, R_L とする。図中 α, β は、それぞれ捨石Cと捨石A, Bの静止位置での中心を結んだ直線と鉛直軸とのなす角である。捨石Cと捨石A, Bとの接点における垂直抗力 N_A, N_B は、捨石Cの水中重量を Wg とすると、力の釣り合いより次式で与えられる。

$$N_A = \frac{(Wg - R_L) \tan \beta + R_T}{\sin \alpha + \tan \beta \cos \alpha}, \quad N_B = \frac{(Wg - R_L) \tan \alpha - R_T}{\sin \beta + \tan \alpha \cos \beta} \quad (1)$$

N_A, N_B の値によって捨石Cの運動形態が規定され、 $N_A > 0, N_B < 0$ のとき捨石A上での運動、 $N_A < 0, N_B > 0$ のとき捨石B上での運動、 $N_A > 0, N_B > 0$ のとき静止、 $N_A < 0, N_B < 0$ のとき浮き上がりとなる。捨石A上で運動する場合の基礎方程式は、A, Cの中心を結ぶ線分の静止位置からの回転角を θ_A とすると、接線方向および法線方向の慣性力を含めた力の釣り合いおよびCの中心回りの回転に関する運動方程式として以下のように表される。

$$\text{接線方向:} \quad M(a+b) \frac{d^2 \theta_A}{dt^2} = R_T \cos(\alpha - \theta_A) + (R_L - Wg) \sin(\alpha - \theta_A) + k_2 F_s \quad (2)$$

$$\text{法線方向:} \quad M(a+b) \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 = -R_T \sin(\alpha - \theta_A) + (R_L - Wg) \cos(\alpha - \theta_A) + N_A \quad (3)$$

$$\text{回 転:} \quad \frac{2}{5} Ma \frac{d\omega}{dt} = k_1 F^* - k_2 F_s \quad (4)$$

ここに、 M は捨石Cの質量、 ω は回転角速度、 F_s は滑り摩擦力、 F^* は転がり抵抗力であり、 k_1, k_2 は、捨石間の接点での滑りの方向および回転方向から決まり、 1 または -1 をとる係数である。運動形態としては、回転のみを行う場合と、回転と滑りを伴う場合の2種類があるが、これらは、接線方向の外力が最大静止摩擦抵抗と等しくなる条件で場合分けして取り扱った。なお(2)～(4)式は、Runge-Kutta法を用いて数値積分した。同様の解析が土屋ら(1984)によって漂砂の移動限界の解析に対して行われているが、本解析では摩擦抵抗の評価法が改良されている。

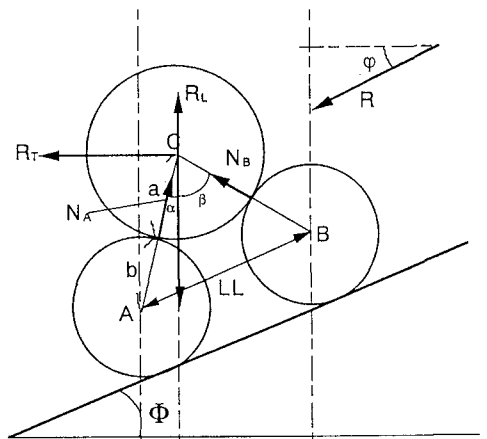


図-1 斜面上の球状捨石に作用する力の釣り合い

3. 計算結果 図2～図6は、突出した捨石を転落させるのに要する外力の振幅 A と水中重量 Wg の比を、種々のパラメータに対してプロットしたものである。計算条件は、基本ケースとして、 $\tan\Phi=0.3$, $a=b=0.5m$, $LL=1.2m$, $\phi=\Phi$, 静止摩擦係数 $\mu=0.8$, 動摩擦係数 $\mu'=0.7$, 静止転がり抵抗係数 $\mu^*=0.4$, 動転がり抵抗係数 $\mu'^*=0.1$, 外力周期 $T=5s$ とし、パラメータを変化させたグラフにおいては、原則的にその他のパラメータを基本ケースと同一にしている。図-2は斜面勾配の影響をみたものであるが、ハドソン公式と同様に、斜面勾配に反比例する形で転落しやすくなることがわかる。図-3は下部の捨石A, Bの半径 b を変化させた場合のグラフであるが、下部の捨石径を大きくすることによって安定化することがわかる。図-4は外力の角度 ϕ の影響を示しているが、外力の角度には極値を示す値が存在し、外力の向きが接線方向を向く場合に最も転落しやすくなっている。なお図中の破線は、捨石がRocking motionを開始する限界値を示したものであるが、外力の向きによっては、捨石A, B間で振動するだけで転落しない状態も存在することを示している。図-5は外力周期 T の影響をみたもの（ただし $\mu^*=0.3$ としている）であり、図-4と同様に破線はRocking motionを開始する限界値を示している。これより、周期が短い領域では周期の影響を強く受けるのに対し、周期が長くなると外力振幅のみで転落限界が規定されることがわかる。図-6は動転がり抵抗 μ'^* の値を変化させた場合のグラフである（ただし $T=3.5s$ としている）。これより、動転がり抵抗が大きくなるとRocking motionのみを示す領域が拡大することを示している。

4. あとがき 本研究では、前報(1993)で著者らが行った試みを発展させ、斜面上に突出した捨石の挙動を解析し、捨石の転落限界に及ぼす種々のパラメータの影響を考察した。本計算モデルを捨石の安定問題に適用するには、外力の評価や隣り合う捨石の影響など、さらに考慮しなければならない課題は多い。しかしながら、従来行われてきたような、波の特性と捨石の移動量を直接関連づけるような研究では得られない、新しいパラメータの影響に対する知見が得られることから、今後捨石に作用する波力の特性と結びつけることにより、より精度の高い設計公式に発展させることができると考える。最後に、本研究は石原藤次郎奨学金（防災研究協会）の援助を受けて行った研究の一部である。記して謝意を表する。

参考文献 土屋ら(1984): 漂砂の移動限界の理論, 第31回海講。青木・樫木(1993): 振動外力を受ける捨石単体の動的応答に関する数値的検討, 第48回土木学会年次講演会。

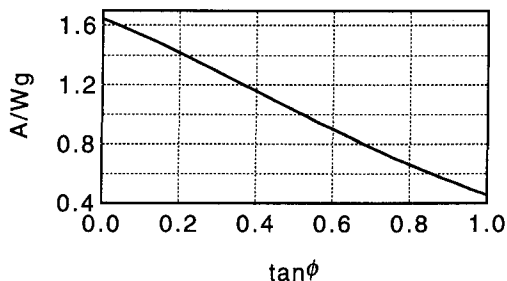


図-2 斜面勾配の影響

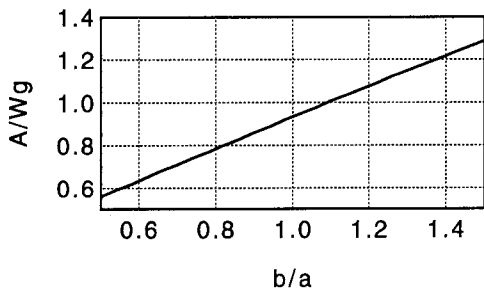


図-3 下部捨石間隔の影響

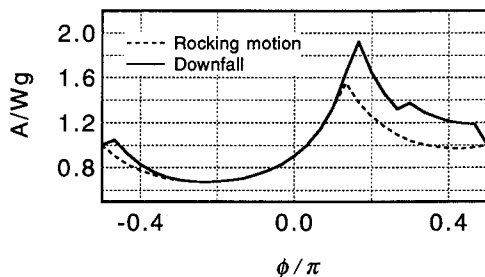


図-4 外力の作用角度の影響

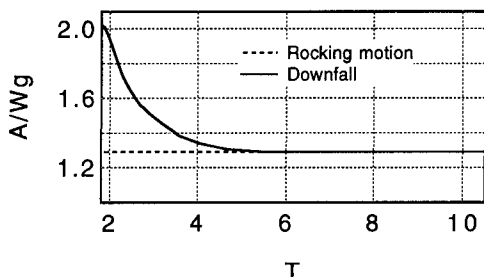


図-5 外力周期の影響

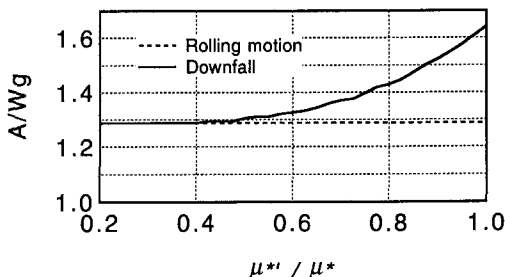


図-6 動転がり抵抗係数の影響