

大阪大学工学部土木工学科 正員 青木伸一
大阪大学工学部土木工学科 正員 樫木 亨

1. まえがき

従来、捨石や消波ブロックを用いた海岸構造物の安定性については、波浪条件と捨石などの移動量を直接結びつけて論議される場合が多く、捨石等の移動のメカニズムについてはあまり検討されていない。近年、より信頼性の高い設計式の確立に向けて、捨石やブロック単体に作用する波力の特性が明かにされてきているが、外力に対する捨石等の動的な応答については、移動限界を議論した研究を除いて、取り扱われた例がほとんどない。本研究は、水平床上で振動外力を受ける比較的慣性の大きな物体が、転がりやすりを伴った運動をする場合の動的応答特性を、数値計算によってパラメーター解析したものである。

2. 運動方程式とその解法

図-1に示すように、摩擦のある水平床におかれた球状の捨石を考える。石の質量は M 、水中重量は Wg で表す。水平外力 H は石の重心を通るものとし、捨石の位置および速度に無関係に $H = A \sin \omega t$ とおいた。また F および T はそれぞれ摩擦力及び転がり抵抗モーメントを表している。石の運動を、重心の水平移動距離 x および重心まわりの回転角 θ で表すと、運動方程式は次のように表すことができる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = H + k_1 F \quad (1) \quad , \quad I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -k_1 F - k_2 T \quad (2)$$

ここに I は石の慣性モーメントであるが以下では球体を仮定して $I = 2/5 Ma^2$ を用いる。ただし a は石の半径である。また k_1 および k_2 はいずれも+1あるいは

-1の値をとる係数であり、それぞれ石のすべり(すべり量 x_s は $x_s = x - a\theta$ で与えられる)および回転の速度の符号によって決まる。これは摩擦力及び転がり抵抗モーメントが常に石のすべり及び回転を妨げる方向に働くため、このために運動方程式は非線形な方程式になる。さらに摩擦力 F は石が回転のみの運動をする場合と、回転にすべりを伴う場合とで取り扱いが異なる。すなわち、水平力 H が最大静止摩擦力 $\mu_s Wg$ を越えない範囲では $dx/dt = a d\theta/dt$ という適合条件を用いることにより、(2)式が F を含まない θ のみの方程式に書き換えられるため F を与える必要はない。石がすべりを伴っている場合には、 F は動摩擦係数 μ を用いて $F = \mu Wg$ で与えられる。一方、転がり抵抗モーメント T は、石の表面あるいは水平床上の凹凸によって生じる回転抵抗を表すもので、 $T = \mu^* a Wg$ で表される。ここに、 μ^* は運動転がり抵抗係数である。ただし転がりについても、摩擦力による回転モーメントが最大静止転がり抵抗モーメント $\mu_s^* a Wg$ を越えたときに石は転がりをはじめるとする。

運動方程式(1)および(2)を無次元表示するために、次のような無次元パラメーターを用いる。

$$\tau = \omega t, \quad X = \frac{x}{a}, \quad \alpha = \frac{A}{\mu_s Wg}, \quad \beta = \frac{\mu Wg}{Ma\omega^2}, \quad \gamma = \frac{\mu_s}{\mu}, \quad \varepsilon = \frac{\mu^*}{\mu} \quad (3)$$

ここに α は外力と最大静止摩擦力の比を、 β は動摩擦力と慣性力の比を表すパラメーターであり、それぞれ外力パラメーターおよび周波数パラメーターと呼ぶことにする。 γ および ε はそれぞれ動摩擦係数と静止摩擦係数および運動転がり抵抗係数の比を表している。なお静止転がり抵抗係数 μ_s^* については、 μ^* の4倍で与えられるものと仮定した。これらのパラメーターを用いることにより、無次元表示された運動方程式を得るが、すべりを伴う場合については次式のようなになる。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} = \frac{5}{7} \alpha \beta \gamma \sin \tau + k_1 \beta \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \theta}{d\tau^2} = \frac{5}{2} \beta (-k_1 - k_2 \varepsilon) \quad (5)$$

前述したように、 k_1 および k_2 の値が $d(X-\theta)/d\tau$ および $d\theta/d\tau$ の符号によって異なるため式(4)および(5)は非線形な方程式となるが、あらかじめ k_1 および k_2 を定数として解析解を求めておき、 k_1 あるいは k_2 の符号が変わる(すべりおよび回転の方向が変わる)度に解析解の未知定数を数値的に決定するという方法を用いて石の運動を時系列的に追っていくことができる。

3. 計算結果

図-2に、外力及び運動の時系列の一例を示す。図中 X_s は $X-\theta$ すなわち x_s/a であり、無次元化されたすべり量を表している。いま外力を $\sin$ 関数で与えているので、転がりよ

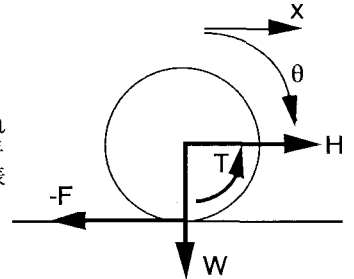


図-1 定義図

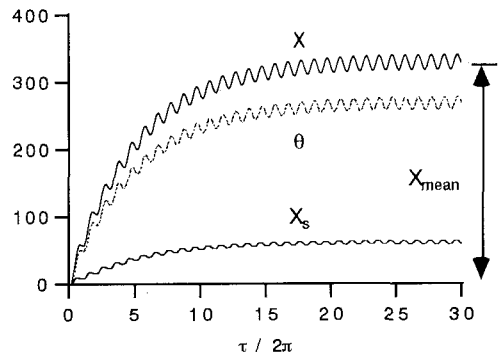


図-2 運動の時系列の一例

りもすべりに対する抵抗が大きい場合には、石は摩擦力による回転モーメントが最大静止転がり抵抗モーメント $\mu_s a W g$ を越える瞬間に転がりはじめ、次いで摩擦力が最大静止摩擦力を越えるときに滑動が生じる。その後石は振動しながら x の正方向に転がっていくが、今回行った計算ではすべて、最終的には図-2に示すように石は初期の静止位置から X_{mean} だけずれた地点で定常的な往復運動を示した。したがって以下では、運動の代表値として、定常変位 X_{mean} 、運動変位の全振幅 $|X|$ 、すべりの全振幅 $|X_s|$ 、および回転の全振幅 $|\theta|$ を選び、これらと式(3)中のパラメーターとの関係を論ずる。

図-3～図-6に4つの独立パラメーターの影響を示す。ただし運動振幅 $|X|$ 、 $|X_s|$ 、 $|\theta|$ についてはいずれも10倍した値をプロットしてある。図-3より、外力パラメーター α が3付近からすべりが発生し、 α の増大とともにすべりは大きくなるが、逆に回転は一定となり、結局 X_{mean} 、 $|X|$ とも α の増大とともに単調に増加することがわかる。図-4は、運動の代表値が周波数パラメーターと比例関係にあることを示しているが、これは運動が外力周期の2乗に比例して大きくなることを意味している。図-5は、摩擦力に対する相対的な転がり抵抗の影響を示しているが、 ε の増大とともにすべり振幅は漸増し、回転振幅は漸減する。その結果運動振幅 $|X|$ は ε の影響をほとんど受けないが、定常変位 X_{mean} は ε の増大とともに減少する。図-6には静止摩擦係数と動摩擦係数の比 γ の影響を示すが、回転は γ の影響をほとんど受けないのに対して、すべりは γ の増大とともに増大し、 X_{mean} 、 $|X|$ とも γ が増大するにつれて大きくなっている。

4. あとがき

捨石を用いた構造物に限らず、従来海岸構造物の安定性については波力に偏った論議がなされており、破壊時の構造物の動的な応答にはほとんど注意が払われていなかった。本研究は、構造物の破壊時の応答特性を明かにし、設計に反映させようという試みの1つとしてはじめたものである。したがって、ここでは外力を極めて単純化して取り扱っており、また実際の捨石の挙動には隣あう石の影響や重力(斜面勾配)の影響を無視できないため、本研究の結果をそのまま捨石の安定問題に適用することは困難である。今後は、より実際の条件について検討し、合理的な設計法の確立に向けて研究を進める予定である。

本研究を行うにあたり、ご尽力いただいた五百旗頭弘憲君(J R 東海)に感謝致します。また本研究は石原藤次郎奨学金(防災研究協会)の援助を受けたことを記して謝意を表します。

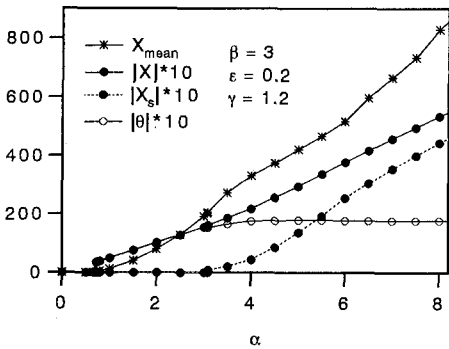


図-3 外力パラメーターの影響

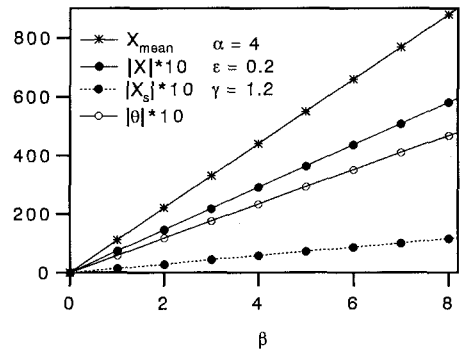


図-4 周波数パラメーターの影響

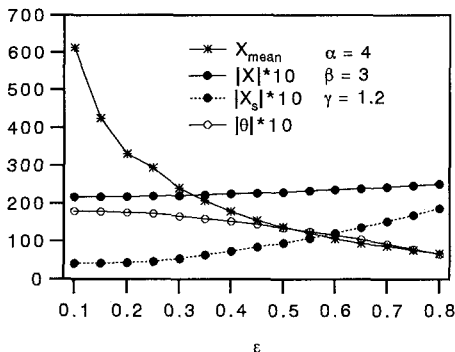


図-5 相対転がり抵抗係数の影響

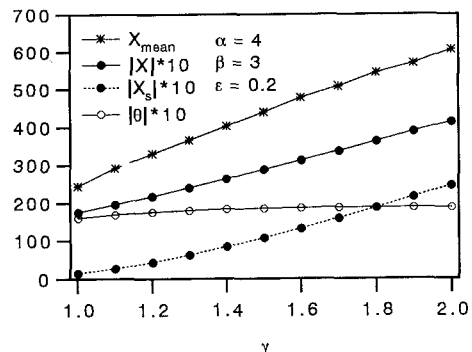


図-6 摩擦係数比の影響