

防波堤直立部の滑動に対する数値的検討

豊橋技術科学大学 建設工学系 奥部綾子
豊橋技術科学大学 建設工学系 正員 青木伸一

1. まえがき

防波堤に対する外力である波力の推定精度は近年著しく向上したにもかかわらず、その波力に対する防波堤の安定性については静的な釣合式が未だ用いられているといった不合理がある。防波堤の滑動量を考慮に入れた設計法として、期待滑動量（伊藤ら、1966）の考え方があるが、これを実現させるためには滑動に対する詳細な検討が必要である。また、破壊を起こす場合でも急激に機能を失うような破壊は避けなければならないという観点からも、防波堤の破壊時の挙動についての検討が必要であろう。

本研究では、滑動限界を越える波力が作用した場合の防波堤直立部の動的滑動応答を数値的に解析し検討を行った。

2. 防波堤直立部の滑動の運動方程式

図-1に示すように、摩擦のある水底面上に置かれた質量 m 、水中重量 $m\alpha g$ の防波堤直立部に波力 F_w が加えられることにより滑動を行う場合について考える。 $(\alpha=1-(\rho V/m))$ 、 ρ ：流体の単位体積重量、 V ：直立部の水面下体積）。

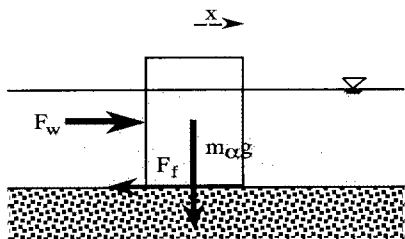


図-1

直立部は、 F_w が最大摩擦力 $F_{fs}=f_s m\alpha g$ （ f_s ：静止摩擦係数）を越えた時点で滑動を始める。滑動している直立部には、面から運動を妨げる向きに運動摩擦力 $F_f=f m\alpha g$ （ f ：運動摩擦係数）が働く。滑動量を x とし、次の3つの場合を考える。

1) 流体抵抗を無視した場合

波力を周期 T 、振幅 F_0 で振動する力として $F_w=F_0 \sin \omega t$ と与えると（ $\omega=2\pi/T$ ）、運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{x} = F_w + \beta F_f \quad (1)$$

ここに β は、滑動の速度の符号で決まる値で、+1または-1の値をとる係数とする。

2) 流体抵抗を考慮した場合

防波堤直立部は、周期 T_R で運動をすることにより水深 h の流体からの抵抗 F_R を受ける。これを考慮した運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{x} = F_w + F_R + \beta F_f \quad (2)$$

ここで、 F_R は次のように置くことができる。

$$F_R = -M\ddot{x} - N\dot{x} \quad (3)$$

M ：付加質量、 N ：減衰係数

微小振幅波理論によれば、 M 、 N は次式のように与えられる。

$$M = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8\rho h^2 \sin^2 k_n h}{(k_n h)^2 (\sin 2k_n h + 2k_n h)} \quad (4)$$

$$N = \frac{8\omega_R \rho h^2 \sinh kh}{(kh)^2 (\sinh 2kh + 2kh)} \quad (5)$$

ここに、 $\omega_R^2 = gk \tanh kh = -gk_n \tanh k_n h$

$$(\omega_R = 2\pi/T_R) \quad (6)$$

従って、この場合の運動方程式は次式となる。

$$(m+M)\ddot{x} + N\dot{x} = F_w + \beta F_f \quad (7)$$

3) 波力の波形を変えた場合

波力波形の尖鋭度を変えるために、正弦的に与えていた波形を、次式の合成波形に置きかえる。

$$F_w = 0.8F_0 \sin \alpha t + 0.2F_0 \sin(2\alpha t - \pi/2) \quad (8)$$

運動方程式は(7)式と同様である。

3. 計算結果及び考察

運動方程式から求めた解を用いて、滑動量に及ぼす流体抵抗、摩擦係数、波力、波形の影響について検討をおこなう。

1) モデルケース

モデルケースとして、直立部（幅6m、高さ10m）の質量 $m=129000\text{kg/m}$ 、静止摩擦係数 $f_s=0.6$ 、運動摩擦係数 $f=0.55$ 、水深 $h=8\text{m}$ の場合についての計算をおこなった。

図-2は、正弦波形の場合と合成波形の場合の滑動状況である。波力の振幅 F_0 の最大値は、双方とも最大摩擦力を5%超過させた値である。正弦波形の場合は一波ごと往復運動をしているが、合成波形では、一波ごとに一定の滑動量を生じ、滑動量は増え続けている。これは、合成波形にしたことにより負の方向への波力が最大摩擦力を越えることをなくしたため生じたものである。一波あたりの滑動量の差は、波形を変えたことによる波力の作用時間の差から生じたものである。

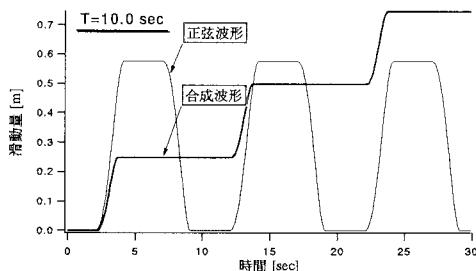


図-2 滑動量の時間による変化

2) 流体抵抗の影響

図-3は、防波堤直立部が周期 T_R で往復運動を行うことによって受ける流体抵抗を表す付加質量 M と減衰係数 N の T_R による変化を示したものである。 M は T_R が小さいほど、 N は T_R が大きいほど大きくなっていることがわかる。滑動計算においては、まず $M=N=0$ といた計算の滑動波形から運動の半周期を読みとり、これに対する M 、 N を求める。次にこの M 、 N を用いて滑動を再び計算し、運動周期が一定値に達するまで繰り返し計算を行う。

図-4は、流体抵抗を考慮した場合の一波当たりの最大滑動量 S_{max} と流体抵抗を無視した場合の一波当たり最大滑動量 S_0 の比を縦軸、減衰係数 N を横軸にとり、 N の値の滑動量への影響を示したものである。ただし、 M をパラメータとして示してある。 N が大きくなるほど滑動量は急激に減少しているが、 M の影響はあまり大きく現れていない。

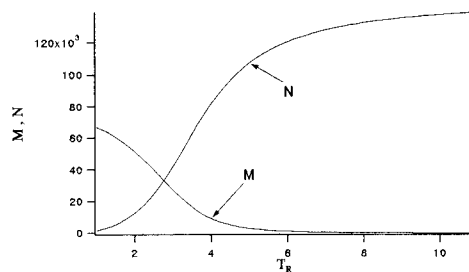


図-3 流体抵抗の直立部の運動周期による変化

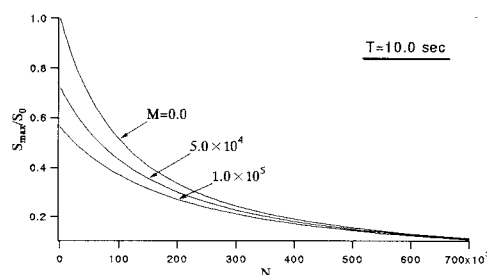


図-4 減衰係数による最大滑動量の変化

3) 運動摩擦係数の影響

防波堤直立部と捨石地盤の静止摩擦係数 f_s はふつう0.6にとられるが、運動摩擦係数 f の値ははっきりとわかっていないため、 f がどのように滑動に影響するのかを調べる。

図-5は、 f を変化させた時の一波当たりの最大滑動量 S_{max} と f と f_s が同じ値($f=f_s=0.6$)の時の一波当たりの最大滑動量 S_0 の比を縦軸、 f/f_s を横軸にとって示したものである。図から、 f の10%の減少で滑動量が数倍に変化していることがわかり、動摩擦係数は滑動量に対して大きな影響を及ぼしているといえる。また、図中で波力の周期 T をパラメータとしており、周期が滑動量に及ぼす影響も大きいことがわかる。これは、周期により作用時間の差が生じるためである。

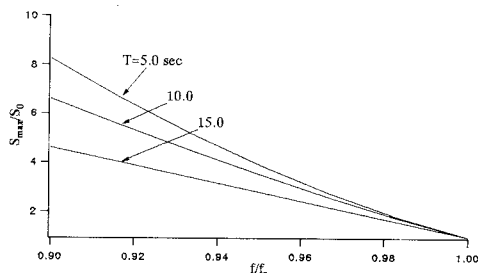


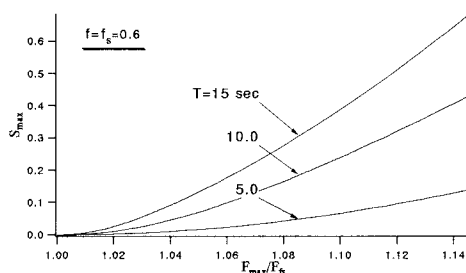
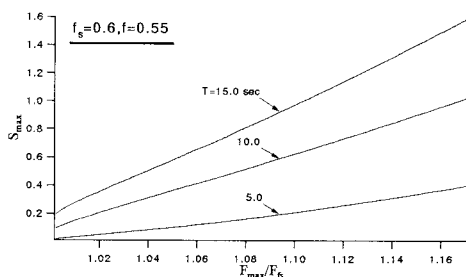
図-5 運動摩擦係数の滑動量への影響

4) 波力の大きさの影響

図-6、7は、最大滑動量 S_{max} を縦軸、波力の最大値 F_{max} と最大摩擦力 F_{fs} の比を横軸にとったものである。図-6は、運動摩擦係数 f を0.6、図-7は0.55としている。

両図から、波力のわずかな超過が大きな滑動を引き起こすことがわかる。

また、運動摩擦係数の違いから、滑動を始める際の挙動の違いが見られ、図-6の場合は滑動は波力が増加するとともに徐々に滑動量も増加するが、図-7の場合は波力が最大摩擦力を越えてすぐに急激な滑動を起こしていることがわかる。

図-6 波力の大きさの滑動量への影響 ($f=0.6$)図-7 波力の大きさの滑動量への影響 ($f=0.55$)

4. あとがき

今回の研究は、防波堤直立部の運動や、与える波力を簡略化した数値計算である。今後、影響が大きいことがわかった波力波形、摩擦に対する詳細な検討及び、直立部の回転運動まで含めた挙動の解析を行う予定である。