

粗な浸透層上の波浪変形に関する実験的研究

大成建設(株)正会員 ○白谷宏司
 大阪大学 正会員 榎木 亨
 大阪大学 正会員 出口一郎

まえがき 混成堤捨石マウンド部、捨石傾斜堤、潜堤等の透過性構造物上に波が入射する場合、浸透層内の流れに対する抵抗、及び浸透層表面の境界摩擦によるエネルギー逸散が生じ、構造物周辺の波動場は、これらの構造物が不透過の場合とは異なったものになると考えられる。本研究は、これらの透過性構造物周辺の波浪変形特性を解明するための基礎的研究として、水平半無限で透水性が大きな浸透層上の波高減衰率に対する半実験的な予測手法を構築し、その適用性について検討する。

透水層内の流体運動に対する基礎式 透水性の大きな浸透層内の流れに対する基礎式は、

$$s \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{v}{K_p} u - \frac{C_f}{\sqrt{K_p}} uu \quad s = \frac{1}{\varepsilon} \{1 + (1 - \varepsilon) C_H\} \quad (1)$$

で表される。ここに K_p は長さの2乗の次元をもつ透水係数、 C_f は無次元乱流抵抗係数、 C_H は付加質量係数、 ε は空隙率である。(1)式は非線形方程式であるため、右辺第2、第3項を取りまとめて線形項に置き換える。すなわち、

$$s \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \sigma u \quad (2)$$

ここに f は無次元量、 σ は角周波数である。また、波動を対象としているため、流体運動が周期的であるとして時間項を分離すると、浸透層内においては圧力に関して Laplace 式が成立する。さらに、浸透層上で速度ポテンシャルの存在を仮定する。このときの境界条件は、水表面における力学的・運動学的境界条件、浸透層表面における圧力・鉛直方向流量の連続、浸透層底部における鉛直方向流速が0である。微小振幅波に対する以上の条件を用い、浸透層内外で示された Laplace 式の解の未知定数に対する連立方程式を解く。その結果、(3)式で与えられる分散関係式の解として得られる波数は複素数となる。

$$1 = k \frac{(\gamma s + i) \cosh kh \sinh kh + \gamma \sinh kh \cosh kh}{(\gamma s + i) \cosh kh \cosh kh + \gamma \sinh kh \sinh kh} \quad \gamma = 1/f \quad (3)$$

波数の実部を p 、虚部を q とすると、水位変動は $\eta = a_0 e^{-\gamma x} e^{i(p x - \sigma t)}$ となる。従って、浸透層内のエネルギー逸散により、波の進行と共にその振幅は指数関数的に減衰することになる。

非定常透水試験 本実験において対象とした浸透層は2種類で、それぞれ $d_{50} = 3.18, 1.35 \text{ cm}$ のほぼ均一な碎石から構成されている。前述の手法による、透水層上の波高減衰率について議論するに先立ち、各浸透層モデルの、(2)式中の抵抗係数を推算する。U字管内に作成した浸透層内の、振動流の下での損失水頭を測定し、流速に比例する損失水頭と加速度に比例する損失水頭を、位相差を利用して分離することによって、まず C_H を求めた。図-1に C_H と $u\sigma/g$ (u : 振動流速の振幅) の関係を示す。両浸透層モデルとも、 $u\sigma/g$ の増加と共に C_H は単調に減少し、 $u\sigma/g < 0.05$ では、付加質量力はほぼ0と見なすことができる。次に、図-2に、(1)式の右辺第2、第3項を取りまとめて線形項に置き換えたときの抵抗係数 $f\sigma$ と Reynolds 数の関係を示す。図中実線、及び一点鎖線はそれ

Hiroshi SHIRATANI Toru SAWARAGI Ichiro DEGUCHI

それ $d_{50}=3.18, 1.35\text{cm}$ の浸透層モデルの、定常透水試験より得られた線形抵抗係数を示している。 $f\sigma$ は周波数特性を持つものの、Reynolds数に対しほぼ一次関数となり、(1)式で示される運動方程式の、流速、及び流速の2乗に比例する項の存在を裏付ける結果となっている。更に、線形抵抗係数 f は、図-4中に示すように、K. C. 数及びReynolds数の関数として、簡単な関係式で近似的に表すことができる。この f を用いると、分散関係式から、非線形抵抗を含む透水効果によるエネルギー逸散量を表す q が求められる。

浸透層上の波高減衰 図-4に、波高伝達率に対する実験値と計算値の比較を示す。図中破線は透水効果のみによる計算値、実線は透水及び境界摩擦を考慮した計算値である。浸透層表面における境界摩擦に対しては、Riedelらが示した、比較的大きな粗度を有する振動流境界層に対する摩擦係数の算定式を用いて、エネルギー保存式より逸散率を求めた。なお、 C_n 及び f を算定する際の流速に関しては、浸透層を不透過とした場合の、微小振幅波理論による底部水粒子速度の振幅を用いている。透水及び境界摩擦を考慮した計算値は、実験値と比べ、 $d_{50}=3.18\text{cm}$ の場合は良好な一致を示しているが、 $d_{50}=1.35\text{cm}$ の場合はエネルギー逸散をやや過大評価している。しかし、一波長程度の距離で伝達率が $0.6\sim 0.7$ となり、透水性の小さな海底砂床上と比べ、極めて大きなエネルギー逸散が生じていることが実験値、計算値より示される。

あとがき 以上を示した計算値は、線形抵抗係数及び付加質量係数の誤差が大きな影響を与える。これらの値は、厳密には場所の関数であり、その適用方法を、先に示した手法よりも改善すれば、本研究で示した波高減衰率の予測精度はさらに向上すると思われる。

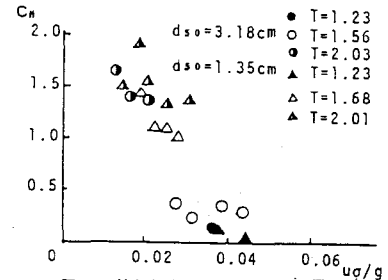


図-1 付加質量係数と $u\sigma/g$ との関係

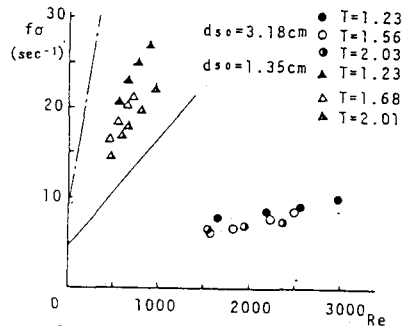


図-2 線形抵抗係数とReynolds数の関係

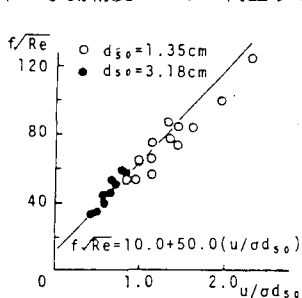


図-3 f/Re とK.C.数との関係

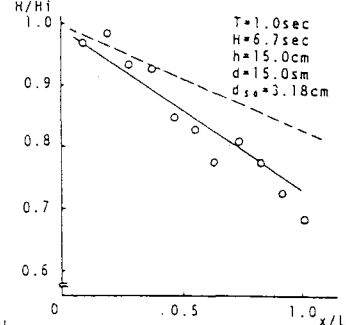
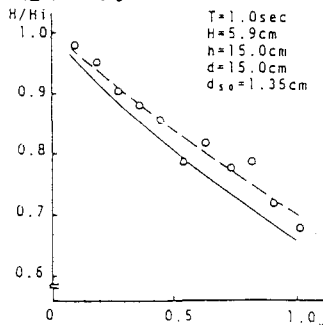


図-4 波高伝達率

参考文献

Riedel, H. P. and Kamphuis, J. W. and Brebner, A. : Measurement of Bed Shear Stress under Waves , Proc. of 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, Vol. 1, pp. 587~603, 1972.