

II-311 波浪による人工海藻の動揺特性

京都大学工学部 正 酒井哲郎、正 浅野敏之、学 上田康浩

1. はじめに 人が海に親しむ場として海浜が重視されるようになり、近年では景観を損なわない消波構造物及び養浜工法の一つとして人工海藻が考えられるようになった。しかしその研究の歴史は浅く、波による人工海藻の運動については明らかにされていない。本研究では、既に浅野(1987)によって提案されている、波浪による人工海藻の運動モデルを検討・改良し、改良したモデルの結果といくつかの実験結果を比較し考察する。

2. 理論 波力による人工海藻の運動を考えるに当たり、次のような波力による柱体の横振動モデル(例えば石田(1984))を考える。

$$\rho_* b w \ddot{\xi} + C_1 \dot{\xi} + E I \xi z z z z \\ = 1/2 \cdot C_D \rho_w b (u - \dot{\xi}) |u - \dot{\xi}| + (C_H - 1) \rho_w b w (\dot{u} - \ddot{\xi}) + \rho_w b w \dot{u}$$

この式の右辺第1項の抗力項を

$$1/2 \cdot C_D \rho_w b (u - \dot{\xi}) |u - \dot{\xi}| = 1/2 \cdot C_D \rho_w b |u| |u - C_D \rho_w b |u| \dot{\xi}$$

と変形し、 $C_1 = 0$ とすると、波浪による人工海藻の単位長さ当りの運動方程式を得る。

$$\{\rho_* + (C_H - 1) \rho_w\} b w \ddot{\xi} + (\rho_w C_D b |u|) \dot{\xi} + E I \xi z z z z \\ = 1/2 \cdot \rho_w C_D b |u| u + \rho_w C_H b w \dot{u} \quad (1)$$

ここで、 ρ_* 、 ρ_w : 海藻及び水の密度、 b : 海藻の幅、 w : 海藻の厚さ、 C_H : 慣性力係数、 C_D : 抗力係数、 ξ : 波の進行方向の海藻各部分の変位、 u : 波の進行方向の水粒子速度、 E : 海藻のヤング率、 I : 海藻の断面2次モーメント、 z : 海底面を原点とする鉛直上向き座標、上付き $\cdot$ は時間 t に関する1階微分、上付き $\ddot{\cdot}$ は時間 t に関する2階微分、下付き $z z z z$ は z による4階微分を意味する。

海藻は海底面をヒンジとする棒状の運動をするとし、海藻の長さを l 、海藻頂部の変位を ζ として、 $\xi = z/l \cdot \zeta$ 、 $\xi_z = \zeta/l$ とし、 $0 \leq z \leq l$ で積分すると、

$$1/2 \cdot \{\rho_* + (C_H - 1) \rho_w\} b w l \ddot{\zeta} + 1/2 \cdot \rho_w C_D b l |u| \dot{\zeta} + \int_0^l E I \xi z z z z d z \\ = 1/2 \cdot \rho_w C_D b l |u| u + \rho_w C_H b w l \dot{u}$$

となる。ここで、式(1)中の諸量は全て z の関数ではないものとしている。

この式の右辺の第2項の慣性力項は、海藻の厚さ w が小さいために抗力項に比べて無視できる。さらに抗力項をフーリエ展開してその第1項のみを考慮すると、 $u = \hat{u} \cos \sigma t$ として、右辺は次式となる。

$$P_0 \cdot \cos \sigma t = 4 \rho_w / 3 \pi \cdot C_D \hat{u}^2 b l \cos \sigma t$$

さらに片持ち梁の先端に働く力とたわみの関係から考えて、

$$\int_0^l E I \xi z z z z d z = 3 E I / l^3 \cdot \zeta$$

とした。また左辺第2項の $|u|$ を、簡単のため流速振幅 $\hat{u}$ とした。 $C_H = 2.0$ とし、さらに、

$$n = [3 E I / l^3 / \{1/2 \cdot (\rho_* + \rho_w) b w l\}]^{1/2}、 \\ h = 1/2 \cdot \rho_w C_D b l \hat{u} / 2 [1/2 \cdot (\rho_* + \rho_w) b w l \cdot 3 E I / l^3]^{1/2}、 \\ p_0 = P_0 / \{1/2 (\rho_* + \rho_w) b w l\}$$

と置換すると、式(1)は次式のような振動外力を受ける2階線形常微分方程式になる。

$$\ddot{\zeta} + 2 h n \dot{\zeta} + n^2 \zeta = p_0 \cdot \cos \sigma t$$

この強制解として、次のような結果が得られる。

$$\zeta = 8 / 3 \pi \cdot \hat{u} / \sigma \cdot \cos (\sigma t - \phi)、 \\ \phi = \tan^{-1} \{ (2 h \sigma / n) / (1 - \sigma^2 / n^2) \} \quad (2)$$

ただし w が小さいとして $4 h^2 \sigma^2 / n^2 \gg (1 - \sigma^2 / n^2)^2$ と仮定している。

ϕ の値は、 $C_D=2.0$ 、 $EI=0$ では $\phi=\pi/2$ となり、 EI の値が大きくなると ϕ の値は小さくなる。このことから、柔らかい人工海藻の変位は、水位の変化より約 $\pi/2$ だけ位相が遅れることが分かる。

3. 実験結果との比較 上で述べたモデルを検証するために、浅野・筒井(1987)の実験結果、運輸省第3港湾建設局(1988)の人工海藻水理模型実験の結果および運輸省港湾技術研究所(1988)の実験結果を解析した。浅野・筒井の実験と第3港湾建設局の実験では、水槽底面に人工海藻を群生させ、波による人工海藻の挙動と波の様子をビデオで撮影している。港湾技術研究所の実験では、一本の人工海藻の運動を撮影している。これらのビデオから、水位変化と海藻頂部変位を測定した。このような方法で行った読み取り結果の例を図-1 に示す。これを見ると、さきに述べたように海藻頂部変位は水位変化よりおよそ $\pi/2$ 位相が遅れていることが分かる。

次に、図-1 の曲線から読み取った波高 H と波の周波数 f から、式(2)を用いて求めた海藻頂部の変位 $\hat{u}$ の振幅の2倍と、図-1 の曲線から読み取った海藻頂部の変位振幅の2倍とをグラフにプロットしたものが図-2 である。この際、式(2)における $\hat{u}$ には、海藻頂部の高さにおける $\hat{u}$ の $1/\sqrt{2}$ 倍を用いた。これは、 u の値を水深方向に平均したもの、海藻頂部の $\hat{u}$ の値よりも小さくなることを考慮したものである。

これを見ると、浅野・筒井の実験結果は理論値とほぼ一致することが分かる。運輸省第3港湾建設局の実験結果についても、同様のことが言える。しかし、港湾技術研究所の実験は、理論値を大幅に上回っている。ビデオの観察では人工海藻は直立した状態で振動しており、他の2つの実験の素材に比べて剛性がかなり大きいように思われる。不一致の理由として、この場合には人工海藻が波動下で共振運動をしている可能性もある。

最後に、本研究は運輸省第3港湾建設局神戸調査設計事務所の「人工海藻による養浜工開発調査の研究」の1部として実施したものであることを付記する。また貴重なビデオを提供して頂いた神戸調査設計事務所および港湾技術研究所に感謝する。

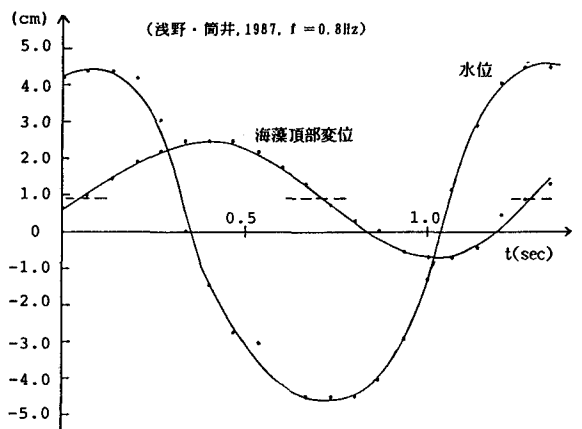


図-1 海藻頂部変位の実験結果の例

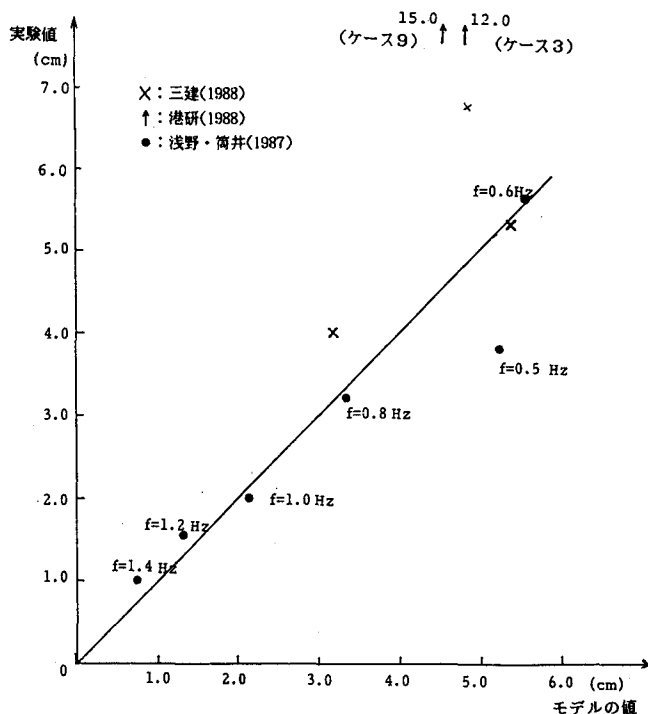


図-2 人工海藻頂部の変位の2倍の実験結果と理論値