

分力計による揺動している植生および変動流体力の計測について

防衛大学校 正会員 林 建二郎
 防衛大学校 学生会員 高橋 祐
 防衛大学校 正会員 重村 利幸

1. 目的

河川構造物や河川・湖岸・海岸に生育している植生の水理に関する研究においては、構造物に作用する時間変動流体力^{1),2)}や水中で揺動する物体に作用する流体力の評価も必要である³⁾。物体に作用する全流体力は、物体表面に作用する圧力とせん断力を積分すれば求まる。しかし、圧力やせん断力の多点計測およびその積分はなかなか困難であり、全流体力の計測には分力計が良く用いられている^{4),5)}。本研究は、分力計を用いて、固定物体に作用する変動流力と、水中で揺動している植生に作用する流体力の計測を試みたものである。

2. 計測原理

A) 分力計に取り付けられた固定物体に変動流体力 $FV(t)$ が作用する場合の振動方程式は次式で近似される。

$$(Ma+Mb)d^2y/dt^2 + c.dy/dt + K.y = FV(t) \quad \text{---(1)}$$

式中、 Ma は分力計内のひずみ計測梁部の質量、 Mb : 物体の質量、 c はひずみ計測梁部の減衰係数、 K はひずみ計測梁部のバネ係数、 y はひずみ計測梁部の変位量である。(1)式は通常(2)式のように表現される。

$$d^2y/dt^2 + 2h.2 f_n.dy/dt + (2 f_n)^2y = FV(t)/(Ma+Mb) \quad \text{---(2)}$$

式中、 $h=c/(2.2 f_n.(Ma+Mb))$ はひずみ計測梁部の減衰定数である。 $f_n=\{K/(Ma+Mb)\}^{1/2}/(2)$ は固有振動数である。減衰定数 h および固有振動数 f_n は、本測定系の空中における減衰自由振動実験より求められる。

変位量 y に相当するひずみ計測梁部のひずみ量を、計測梁に貼られたひずみゲージを用いて評価することにより、分力計が検知する力 $Fa(t)=K.y$ を計測できる。作用流体力 $FV(t)$ が定常の場合には、変位量 y は一定であり、変位速度 dy/dt および変位加速度 d^2y/dt^2 は 0 である。従って、(1)式より $K.y=FV(t)$ となり、分力計が検知する力 $Fa(t)=K.y$ は作用流体力 $FV(t)$ と等しい。一方 $FV(t)$ が時間変動する場合には、変動量 y も時間変動する結果、慣性力 $=(Ma+Mb)d^2y/dt^2$ および減衰力 $=cdy/dt$ が生じる。(1)式より(2-a)式が選られる。分力計が検知する力 $Fa(=K.y)$ には、作用流体力 $FV(t)$ の他に慣性力 $=(Ma+Mb)d^2y/dt^2$ および減衰力 $=cdy/dt$ が含まれている。

$$K.y = FV(t) - (Ma+Mb)d^2y/dt^2 - cdy/dt \quad \text{--(2-a)}$$

時間変動する流体力 $FV(t)$ を、正弦関数 $FV(t)=F.\sin(2\pi t/T)$ で表せるとすると、変位量 $y=A\sin(2\pi t/T)$ の片振幅 A と $FV(t)$ に対する y の位相遅れ θ は(3)式、(4)式で示される。 T は作用流体力の周期である。

$$A = (F/K) / \{(1 - (1/T/f_n)^2)^2 + (2h(1/T/f_n))^2\}^{1/2} \quad \text{---(3)}$$

$$\tan \theta = 2h(1/T/f_n) / \{1 - (1/T/f_n)^2\} \quad \text{---(4)}$$

(3)式より、作用流体力の周波数 $(1/T)$ が固有振動数 f_n に比べて十分小さい場合 $\{(1/T/f_n) < 0.2\}$ には、 $A \approx$ 概ね F/K となり、分力計が検知する力 $Fa(t)=K.y$ は作用流体力 $FV(t)=F.\sin(2\pi t/T)$ と概ね一致する。作用流体力の周波数 $(1/T)$ と固有振動数 f_n が一致する場合(共振)には、 $A=(F/K)/(2h)$ となる。この場合、分力計が検知する力 $Fa(t)=K.y$ は、実際の作用流体力 $FV(t)=F.\sin(2\pi t/T)$ の $(1/(2h))$ 倍となる。例えば減衰定数 $h=0.1$ の場合の共振時においては、分力計は実際の作用流体力の 5 倍の力を検知する。また、また(4)式より共振時には位相差 $\theta=90^\circ$ となり、分力計で検知される力の位相は作用流体力より $1/4$ 周期遅れることが分かる。一方、作用流体力の周波数が固有振動数 f_n に比べて十分小さい場合には、位相差 θ も小さい。従って、変動流体力の計測には、対象とする作用流体力の周波数 $(1/T)$ に比べて十分高い固有振動数 $\{5(1/T) < f_n\}$ を有する分力計を使用する必要がある。

B) 分力計に取り付けられた植生が水中で揺動している場合の振動方程式は(5)式で示される。

$$(Ma)d^2y/dt^2 + cdy/dt + K.y = FV(t) + FIB(t) \quad \text{---(5)}$$

式中、 $FV(t)$ は揺動している植生に作用する流体力、 $FIB(t)$ は質量 Mb の植生が揺動する結果生じる慣性力である。

キーワード 変動流体力、植生揺動、分力計、振動方程式、共振、波の透過率

連絡先 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 Tel 0468-41-3810

植生の質量 M_b が小さい場合には、 $F_{Ib}(t)$ は無視できる。また、作用流体力の周波数 ($1/T$) に比べて十分高い固有振動数 ($5(1/T) < f_n$) を有する分力計を使用した場合、(5)式左辺の第1項および第2項の影響は無視できる。従って、このような場合には $K \cdot y = FV(t)$ となり、分力計が検知する力 $F_a(t) = K \cdot y$ は作用流体力 $FV(t)$ と等しい。

3. 結果および考察

宍道湖・中海産の「コアマモ」一株（葉の枚数=3枚、葉長=約30cm、葉幅=約1mm、重さ=0.2gf）に作用する波の進行および鉛直方向波力 F_x 、 F_z を水路床の下面に設けた2分力計（容量200gf、 $f_n=120\text{Hz}$ ）を用いて計測した。容量線式波高計を植生の真横に設置し波の水位変化を計測した。実験水深は現地の代表水深である $d=60\text{cm}$ とした。使用した規則波の周期は $T=0.8 \sim 3.0\text{sec}$ の6通り、波高の範囲は $H=2 \sim 26\text{cm}$ とした。作用波力 F_x 、 F_z および水位の時間変化の一例を図-1に示す。 F_x 、 F_z は2分力計で検知された流体力であるが、コアマモの質量は $M_b=0.0002\text{gfs}^2/\text{cm}$ と小さいため、揺動によって生じる慣性力 $F_{Ib}(t)$ は無視できる。従って、 F_x 、 F_z はコアマモに作用する流体力を示している（(5)式参照）

本実験に用いたコアマモが、密度 $N=2000$ 、 4000 、 6000 、 8000 株/ m^2 の状態で水深 $d=60\text{cm}$ の水域に植生幅 B に渡って生育している場合、 $T=2\text{s}$ 、 $H_1=25\text{cm}$ の波が透過した場合の透過率 K_t の算定結果を図-2に示す。計算に用いた植生の密度 N は、季節変動する現地における植生密度の代表値である。 K_t の算定において必要な植生群内での波の損失エネルギーは、植生に作用する流体力 F_x 、 F_z と波の水粒子速度の積で評価した⁶⁾。

変動流体力計測の一例として、直立護岸壁の局所に作用する砕波波圧とブロック衝突力を力計 ($f_n=58\text{Hz}$ 、 $h=0.1$) を用いて計測した結果⁷⁾を図-3に示す。力計で検知した F_a は、砕波波圧とブロック衝突力の作用に伴い鋭い立ち上がりを示し大きなピク値をとり、その後は、固有振動数 f_n で振動しながらゆるやかに減少している。従って本 F_a の値には、慣性力 $= (M_a + M_b) d^2y/dt^2$ および減衰力 $= cdy/dt$ の影響が含まれている。

FV は、 F_a より逆算した変位量 y および dy/dt 、 d^2y/dt^2 を(2-a)式に代入して選ばれた作用流体力の推定値である。共振による慣性力、減衰力の影響が概ね除去されている結果、 FV のピク値は F_a のそれより減少している。

参考文献

- 1) 斎藤ら：単一半径トリピングワイヤ付き円柱に作用する流体力、水工学論文集、第38巻、pp.469-474、1994.
- 2) 山本、林ら：護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について、水工学論文集、第44巻、pp.1053-1058、2000.
- 3) 林ら：水辺植生に作用する波力と消波機能に関する研究、海岸工学論文集第48巻(2)、pp.891~895、2001.
- 4) 林、藤井ら：開水路中における円柱群に作用する流体力に関する実験、水工学論文集、第45巻、pp.475-480、2001.
- 5) 本溜、福井：植生群に作用する流体力、第29回関東支部技術研究会講演概要集、pp.184-185、2002.
- 6) 高橋、林ら：湖岸に生育している水辺植生に作用する波力と消波機能に関する研究、第29回関東支部技術研究会講演概要集、pp.242-243、2002.
- 7) 山口、林ら：砕波による消波ブロックの直立壁への衝突力計測について、第29回関東支部技術研究会講演概要集、pp.244-245、2002.

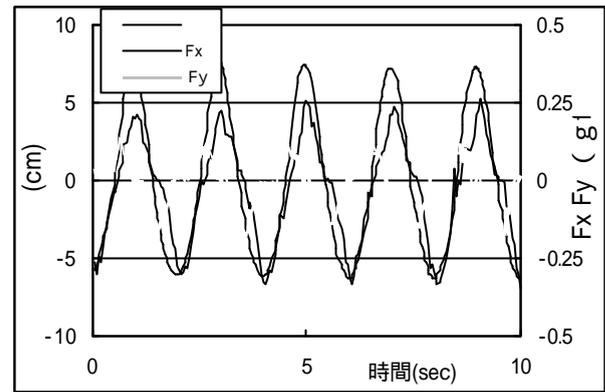


図-1 コアマモに作用する流体力 ($T=2\text{sec}$, $H=18\text{cm}$, $d=60\text{cm}$)

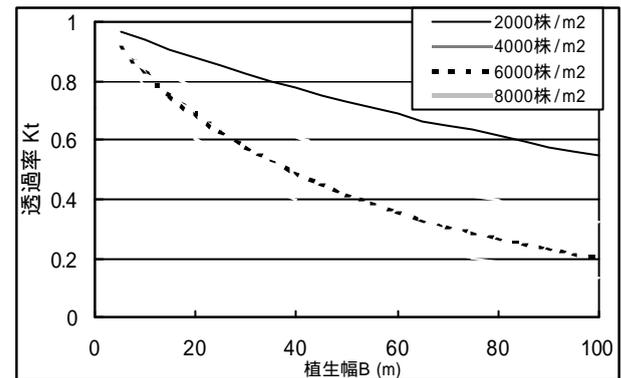


図-2 コアマモ群による消波効果 ($T=2\text{sec}$, $H=18\text{cm}$, $d=60\text{cm}$)

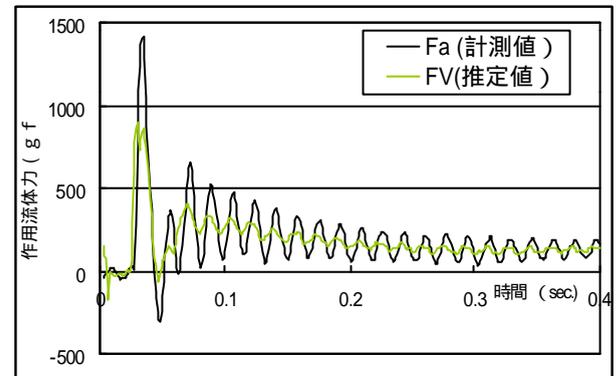


図-3 変動流体力の計測値と推定値
(直立護岸壁に作用する砕波波圧とブロック衝突力)