

分力計を用いた水理構造物に作用する衝撃的流体力評価

Measurements of impulsive fluid forces acting on hydraulic structures with multi components load cell

林建二郎*

Hayashi Kenjiro

*Ph. D. 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

The impulsive fluid forces acting on the partial part of composite breakwater model for breaking waves and the whole part of dam model for hydraulic bore were measured by using multi components load cells (LMC). The impulsive forces measured by the load cells include the inertia and damping forces produced by the response acceleration and velocity of these hydraulic structures and LMC. The net values of these impulsive fluid forces are evaluated by using the linear vibration equation which approximate the motion of these hydraulic structures attached on the load cells (LMC). It should be noted that the inertia and fluid damping forces produced by the response acceleration and velocity of these hydraulic structures in water are included this net values of impulsive fluid forces.

Key Words: *Impulsive fluid force, load cell, hydraulic structures, breaking wave, hydraulic bore*
 衝撃的流体力, 分力計, 水理構造物 (防波堤, 堰堤, 円柱), 砕波, 段波

1. はじめに

河川・海岸構造物に作用する洪水流や土石流¹⁾, 砕波や津波等^{2), 3)}による衝撃的流体力の的確な評価は, これら構造物の性能設計において重要である. 高周波数成分を有し時間変化が大きい衝撃的流体力の計測には, 固有振動数 f_n が十分に高い応答性の良い圧力計や多分力計が必要である^{4)~8)}. 構造減衰定数 h に依存するが, 通常は作用流体力周波数 f の5倍以上の固有振動数 f_n が $(5f < f_n)$ が必要とされている.

構造物表面の局部に作用する法線方向の力 (= 圧力) を計測する圧力計に対し, 多分力計は構造物全体あるいは広い範囲に作用する力をまとめて計測する⁹⁾. 固有振動数 f_n が十分に高い圧力計を数多く用いて構造物全表面の局所圧力の同時計測を行い, 得られた全表面圧力分布の積分を行えば, 構造物全体に作用する衝撃的流体力の評価は可能である. しかし, その実施は物理精度のおよび経済的に中々困難である.

一方, 多分力計を使用すれば, 物体の全体に作用する衝撃的流体力の評価は容易に可能である. しかし, 分力計に模型構造物を取り付けると, 構造物の質量が分力計の計測系に付加される結果, 分力計の固有振動を上げことは中々困難であり, 流体力の高周波数に対する応答性が懸念される.

筆者らは, 多分力計を用いて砂防堰堤や防波堤等の水理

構造物全体に作用する衝撃的流体力の計測を試み^{10)~12), 15)}, 検知された計測値より正味の衝撃的流体力評価法に対する検討を行なっている. 本報告は, 前報¹⁰⁾に対する考察の修正を行ない, 新たな実験を加え更なる考察を行ったものである.

2. 衝撃的流体力計測値に対する評価式

2.1 振動方程式¹⁰⁾

分力計に取り付けられた模型構造物に力が作用すると, 力計内の受感部に相当する梁部材には曲げモーメントが生じる. この曲げモーメントを梁部材表面に貼られたひずみゲージを用いて距離間隔が異なる数箇所測定すれば, 構造物全体に作用する力と曲げモーメントの評価が可能である⁹⁾. また, ひずみゲージの貼り方, および梁の部材数やその組み合わせ構造を工夫すれば, 構造物に作用する力の3方向成分や3方向軸周りの曲げモーメント成分の計測が可能である (6分力計).

衝撃的流体力の流れ方向成分 $F_x(t)$ を計測する多分力計内のひずみ計測用梁部の振動を, 次式の1自由度の線型振動方程式で近似する^{4), 5)}.

$$(M_a + M_b) d^2x/dt^2 + C dx/dt + Kx = F_x(t) \quad (1)$$

式中、 M_a は分力計内のひずみ計測用梁部の等価質量、 M_b は分力計に取り付けた構造物の等価質量、 C は等価構造減衰係数、 K は等価バネ係数、 x は構造物の等価変位量である。

通常、(1)式は(2)式の形で示される。

$$\begin{aligned} d^2x/dt^2 + (2\pi f_{na})^2 h_a dx/dt + (2\pi f_{na})^2 x \\ = F_x(t) / (M_a + M_b) \end{aligned} \quad (2)$$

h_a は、次式で定義される等価構造減衰定数である。

$$h_a = C / (4\pi f_{na} (M_a + M_b)) \quad (3)$$

f_{na} は、次式で定義される構造物を取り付けた分力計の固有振動数である。

$$f_{na} = \{K / (M_a + M_b)\}^{1/2} / (2\pi) \quad (4)$$

(1)式の左辺第3項は、分力計が検知する力 $F_a(t)$ であり(5)式が得られる。

$$F_a(t) = Kx \quad (5)$$

分力計は、等価変位量 x に対応する分力計内の計測梁に生じたひずみ量をひずみゲージを用いて評価し、力 $F_a(t) = Kx$ を検知する。

(1)式より、分力計が検知する力 $F_a(t)$ は(6)式で表される。

$$F_a(t) = F_x(t) - (M_a + M_b) d^2x/dt^2 - C dx/dt \quad (6)$$

作用流体力 $F_x(t)$ が定常の場合 (静的) には、 $d^2x/dt^2 = 0$, $dx/dt = 0$ より、 $F_a(t) = F_x(t)$ となる。従って、分力計が検知する力 $F_a(t)$ は、作用流体力 $F_x(t)$ と一致する。

一方、 $F_x(t)$ が時間変動する場合 (動的) には、分力計が検知する $F_a(t)$ には、 $F_x(t)$ の他に、慣性力 ($= -(M_a + M_b) d^2x/dt^2$) と構造減衰力 ($= C dx/dt$) が含まれる。

$F_a(t) = Kx$ は復元力であり、構造物の強度や耐地盤支持力の評価において重要である。 $F_x(t)$ は構造物に作用する外力 (= 強制振動外力) であり、外力に対する構造物の振動応答問題において重要である。

強制振動外力となる衝撃的流体力 $F_x(t)$ を、片幅振幅 F_A と周波数 f を有する次式の三角関数で表すと、

$$F_x(t) = F_A \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

応答変位量 x は、(1)式の解として次式で表される。

$$x = X_A \sin(2\pi ft - \alpha) \quad (8)$$

式中の X_A と α は、応答変位量の片振幅と位相遅れであり (9), (10)式でそれぞれ示される。

$$X_A = (F_A/K) / \{1 - (f/f_{na})^2\}^{1/2} + \{2h_a(f/f_{na})\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\alpha = \tan^{-1} [2h_a(f/f_{na}) / \{1 - (f/f_{na})^2\}] \quad (10)$$

(8), (9)式を(5)式へ代入すると、

$$\begin{aligned} F_a(t) &= KX_A \sin(2\pi ft - \alpha) \\ &= F_A / \{1 - (f/f_{na})^2\}^{1/2} + \{2h_a(f/f_{na})\}^{1/2} \sin(2\pi ft - \alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

(11)式より分力計が検知する力 $F_a(t)$ は、強制振動外力となる衝撃的流体力 $F_x(t)$ より、(10)式で示される位相遅れ α と、次式の増幅率 A_m を有していることが分かる。

$$A_m = [1 / \{1 - (f/f_{na})^2\} + \{2h_a(f/f_{na})\}^{1/2}] \quad (12)$$

2.2 衝撃的流体力周波数 $f \ll$ 固有振動数 f_{na} の場合

作用衝撃流体力の周波数 f が固有振動数 f_{na} に比べて十分小さい場合には、(9), (10)式で示された応答変位 x の振幅 X_A と位相差 α はそれぞれ次式で表される。

$$X_A = F_A / K \quad (13)$$

$$\alpha = 0 \quad (14)$$

(8)式で示された応答変位量 x は(15)式となり、(7)式で示された衝撃的流体力 $F_x(t)$ との位相差も存在しない ($\alpha = 0$)。

$$x = (F_A/K) \sin(2\pi ft) \quad (15)$$

従って、(11)式で示された分力計が検知する力 $F_a(t)$ は(16)式となり、衝撃的流体力 $F_x(t)$ との位相差も無く ($\alpha = 0$)、衝撃的流体力 $F_x(t)$ と一致する。

$$\begin{aligned} F_a(t) &= F_A \sin(2\pi ft) \\ &= F_x(t) \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 衝撃的流体力周波数 $f =$ 固有振動数 f_{na} の場合

作用衝撃流体力の周波数 f が固有振動数 f_{na} と一致する共振の場合には、(9), (10)式で示された応答変位 x の振幅 X_A と位相差 α はそれぞれ次式で表される。

$$X_A = (F_A/K) / (2h_a) \quad (17)$$

$$\alpha = \pi/2 \quad (18)$$

従って、(11)式で示された分力計が検知する力 $F_a(t)$ は(19)式となる。

$$F_a(t) = \{F_A / (2h_a)\} \sin(2\pi ft - \pi/2) \quad (19)$$

共振時における分力計が検知する力 $F_a(t)$ は、(7)式で示す衝撃的流体力 $F_x(t) = F_A \sin(2\pi f t)$ より位相遅れ $\alpha = \pi/2$ と、次式の増幅率 A_m を有していることが分かる。

$$A_m = |F_a(t)| / |F_x(t)| = 1 / (2h_a) \quad (20)$$

例えば、等価構造減衰定数 $h_a = 0.1$ の場合、共振時の分力計が感知する力 $F_a(t)$ は、(6)式のように慣性力と構造減衰力を合わせて検知するため、衝撃的流体力 $F_x(t)$ の5倍 ($A_m = 5$) となる。この増幅率 A_m は、等価構造減衰定数 h_a の増加に伴い減少する。

3. 消波ブロック混成堤の一部に作用する衝撃力の推定

天端水深 $h = 33.1\text{cm}$ のマウンド上に設けた直立護岸壁の一部 (径 $= 5\text{cm}$ の円形部) に作用する砕波波圧と被覆用消波ブロック衝突の合力からなる衝撃力を、片持梁形式の1分力計で計測した結果¹¹⁾ を図-1に示す。作用波の周期は $T = 1.67\text{s}$ 、沖波波高は $H_o = 16\text{cm}$ である。本1分力計が検知する力 $F_a(t)$ のサンプリング周波数は 1000Hz とした。

本1分力計は、十分に剛と見なせる鉄製の直立護岸壁模型の岸側背面に片持ち梁形式で取り付けられている。本分力計に分銅を載荷し、載荷位置での変位量をダイヤルゲージ (精度: $1/100\text{mm}$) で実測し、等価バネ係数 K を評価した。等価質量 M_a は次式より決定した。

$$M_a = K / (2\pi f_{na})^2 \quad (21)$$

1分力計の等価バネ係数は $K = 43478\text{ gf/cm}$ 、等価質量は $M_a = 0.320\text{ gf/(cm/s}^2)$ 、固有振動数 (空中) は $f_{na} = 58.7\text{Hz}$ 、構造減衰定数 (空中) は $h_a = 0.112$ であった。これら値は、再評価実験を行い、前報¹⁰⁾での評価値を適正値に修正した値である。

図-1中に黒実線で示す1分力計が検知した $F_a(t)$ 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ーク値をとり、その後は、固有振動数 f_{na}

で振動しながらゆるやかに減少している。この $F_a(t)$ には、(6)式に示すように、強制振動外力となる衝撃的流体力 $F_x(t)$ の他に慣性力 ($= M_a d^2x/dt^2$) と構造減衰力 ($= Cdx/dt$) が含まれている。

図-1中に緑色実線で示す $F_x(t)$ は、(5)式 ($x = F_a(t)/K$) より逆算した変位量 x と、その変位速度 dx/dt 、変位加速度 d^2x/dt^2 の時系列値を(1)式に代入して得られ値であり、本分力計に作用する砕波波圧とブロック衝突力の合力の推定値である。つまり、この推定値 $F_x(t)$ は、分力計が検知する実測値 $F_a(t)$ より慣性力 ($= (M_a + M_b) d^2x/dt^2$) と構造減衰力 ($= Cdx/dt$) を取り除いた値である。これら慣性力、構造減衰力の影響が除去されている結果、 $F_x(t)$ のピーク値は $F_a(t)$ のそれより減少している。

$F_x(t)$ は、時刻 $t_1 = 0.025\text{s}$ に発生し、 $t_2 = 0.030\text{s}$ でピーク値を示している。この時間差を立ち上がり時間 t_r と定義すると $t_r = 0.005\text{s}$ となり、1分力計の固有周期 $T_{na} (= 1/f_{na}) = 0.017\text{s}$ との比は $t_r/T_{na} = 0.29$ となる。石川ら¹²⁾ が提案している応答の判定基準では、 $0 < t_r/T_{na} < 0.5$ の範囲における応答現象は「衝撃的応答」と分類される。

ピーク値達成後の $F_x(t)$ は、振動成分を有しながらしばらく一定値を保ち、時刻 $t_3 = 0.045\text{s}$ で0となっている。従って、 t_1 から t_3 の間の $F_x(t)$ は、砕波波圧とブロック衝突力の衝撃的な合力波形と見なせる。

その後、 $F_x(t)$ は $t_4 = 0.07\text{s}$ 付近まで増加し、 $0.07\text{s} < t$ では徐々に減少している。時間領域 ($0.045 < t < 0.07$) における $F_x(t)$ は、1分力計の載荷面に作用する完全重複波の波圧によるものと考えられる。

$F_x(t)$ の小さな振動成分は、最初の衝撃的な力の作用による1分力計の減衰自由振動によるものと考えられる。水中で振動する物体には、振動速度 ($= dx/dt$) の2乗に基づく (流体) 抗力と振動加速度 ($= d^2x/dt^2$) に基づく (流体) 慣性力が作用する。これら流体力が作用する結果、空中の場合に比べて、水中における構造物の固有振動数は減少し、構造減衰定数は増加する^{13,14)}。本実験においては、(流体) 抗力に比べて (流体) 慣性力が卓越している。

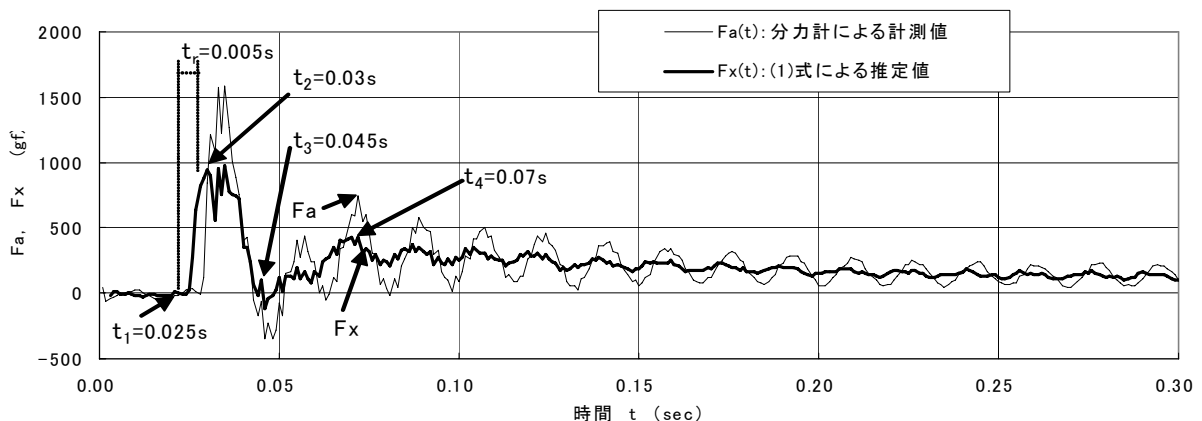


図-1 消波ブロック混成堤の一部に作用する衝撃力の推定

4. 砂防堰堤に作用する衝撃的流体力の推定

4.1 実験の概要¹⁵⁾

実験には、長さ12m、幅0.5m、高さ0.4mの可変勾配水路を使用した。水槽一区間の床を底上げし、1/50と1/5勾配の急勾配な河床（ベニヤ板製）を作製した。水路上流端の堰を急開放し段波（洪水流）を発生させた。

急勾配河床の途中に、図-2に示すようにアルミ製チャンネルの模型堰堤（高さ=100mm、水路横断方向幅=100mm、水路方向長さ=50mm、厚み=5mm、重さ=270gf）を鉛直に設置した。模型堰堤の上端を6分力計（容量=20kgf（=200N）、日章電機（株））に片持梁形式で取り付け、堰堤に作用する流れ方向の全衝撃力 $F_a(t)$ と、 $F_a(t)$ による曲げモーメント $M_{ya}(t)$ を計測した。 $M_{ya}(t)$ の計測原点 S_0 は、水路床面より13.5cm上方の6分力計内にある。堰堤下端と水路床との間隙は1mm以下とした。

堰堤設置時の6分力計の空中における固有振動数と構造減衰定数は、 $f_{na}=500\text{Hz}$ と $h_a=0.1$ であった。堰堤の振動を(1)式で示される線形な1質点系モデルで近似すると、その等価質量は $M_a=1.65\text{gf}/(\text{cm}/\text{s}^2)$ 、等価バネ係数は $K=16224490\text{gf}/\text{cm}$ であった。等価バネ係数 K は、6分力計内に組み込まれているひずみ計測梁の組み立て構造と剛性 EI （ E ：ひずみ計測梁のヤング率、 I ：ひずみ計測梁の断面2次モーメント）より算定した。等価質量 M_a は(21)式より決定した。

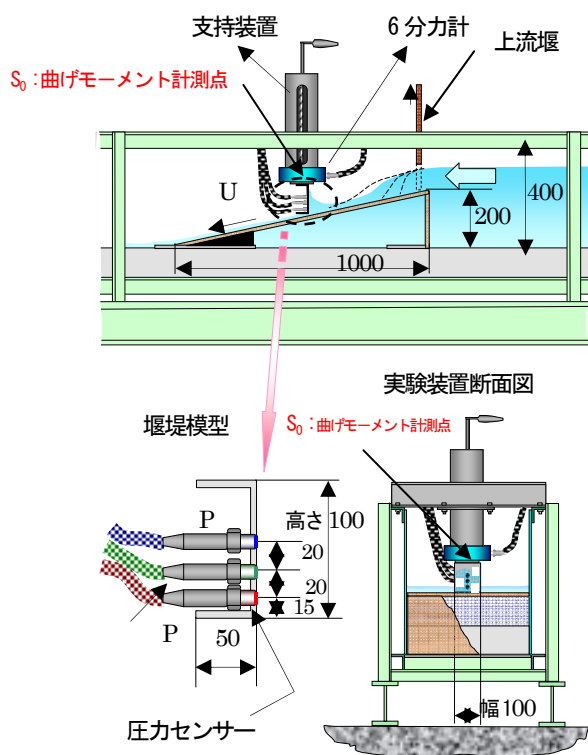


図-2 堰堤に作用する衝撃的流体力の実験装置

堰堤の局所圧力分布を計測するために、3個の圧力計（共和電業（株）、容量200gf/cm²） P_A, P_B, P_C を、堰堤中央線上の堰堤の下端から15cm、35cm、55cmの位置に取り付けた。圧力計の受圧面径は10mm、水中での固有振動数は約2KHzである。

主流の代表流速 U の計測には2成分レーザードップラー流速計（ダンテック社）を使用した。 U の計測点は、堰堤前面側壁より水路横断方向に5cm離れた水路床から1cm上方の位置とした。

4.2 堰堤に作用する正味の衝撃的流体力 $F_x(t)$ の推定

6分力計 ($f_{na}=500\text{Hz}$, $h_a=0.1$) で検知された本模型堰堤に作用する全衝撃力 $F_a(t)$ 、 $F_a(t)$ による曲げモーメント $M_{ya}(t)$ 、ならびにレーザ流速計による主流速 $U(t)$ の計測例を図-3に示す。水路床勾配 $i=1/50$ の場合の結果である。 $t=0.3\text{sec}$ に洪水流の先端が堰堤に到達し、 $t=0.43\text{sec}$ には $F_a(t)$ の最初のピーク値が生じている。この時間差を立ち上がり時間 t_r と定義すると $t_r=0.13\text{s}$ となり、6分力計の固有周期 $T_{na}(=1/f_{na})=(1/500)\text{s}$ との比を求めると $t_r/T_{na}=65$ となる。上記の石川ら¹²⁾ が提案している応答の判定基準では、 $1 < t_r/T_{na}$ の範囲における応答現象は「静的応答」と分類される。

主流の代表速度 U は、 $t=0.3\text{sec}$ ではまだ計測されず $t=0.41\text{sec}$ から計測されている。これは、レーザ流速計の光学系設定条件 (a) U の計測点は床面より1cm上方、(b) 水平面上で交差する2本のレーザ光の下流側光線が、流速測定点より3cm下流側にある) に起因する。代表主流速度 U の時間平均値は約2.6m/sである。

6分力計で検知した $F_a(t)$ と作用流体力の(1)式による推定値 $F_x(t)$ の比較を図-4に示す。 $F_a(t)$ の振動成分は約100Hz以下と6分力計の固有振動数 ($f_{na}=500\text{Hz}$) に比べて十分小さいため、 $F_a(t)$ と $F_x(t)$ の一致は良好である。従って、6分力計の計測値 $F_a(t)$ は、本堰堤に作用する衝撃

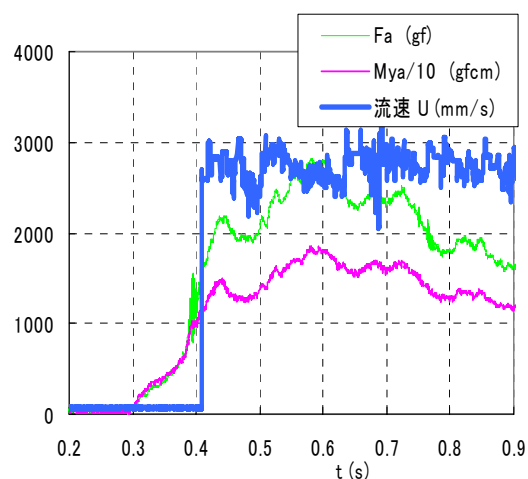


図-3 堰堤に作用する衝撃的流体力の時間変化
(水路勾配 $i=1/50$, 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$)

的流体力 $F_x(t)$ を正確に検知していると考えられる。

但し、 $0.39 < t < 0.4$ では、 $F_a(t)$ の振動振幅は $F_x(t)$ の振動振幅より大きくなっている。これは、6 分力計の固有振動数 ($f_{na} = 500\text{Hz}$) にかなり近い約 700Hz の高周波数成分を有する衝撃的流体力が生じた結果、 $F_a(t)$ の高周波成分が $F_x(t)$ の高周波成分より増幅されたためと考えられる。

4.3 堰堤に作用する実測衝撃的流体力 $F_a(t)$ の作用点

分力計で計測された堰堤に作用する衝撃力 $F_a(t)$ の合力作用点の水路床面からの高さ $S(t)$ の時間変化を図-5 に示す。 $S(t)$ の算定には次式を用いた。 $S_0 (=13.5\text{cm})$ は、曲げモーメント $M_{ya}(t)$ の計測原点から水路床面までの距離である。

$$S(t) = S_0 - M_{ya}(t) / F_a(t) \quad (22)$$

くさび形状の水表面を有する水塊の先端が堰堤模型に衝突する $t=0.3\text{sec}$ では $S(t)=0$ である。 $F_a(t)$ の最初のピーク値が生じる $t=0.45\text{sec}$ では $S(t)=7\text{cm}$ と急上昇している。 $0.45 < t < 0.6\text{sec}$ の間では $S(t)=$ 約 7cm と一定値を保ち、その後は徐々に減少している。

堰堤の設計においては、堰堤への作用衝撃力の合力 $F_a(t)$ による滑動と併せて、 $F_a(t)$ による堰堤の河床面位置での曲げモーメント $M_{yab}(t)$ による転倒を評価する必要がある。曲げモーメント $M_{yab}(t)$ は、 $F_a(t)$ と $F_a(t)$ の合力作用点 $S(t)$ が分れば次式で算定できる。

$$M_{yab}(t) = F_a(t) S(t) \quad (23)$$

4.4 堰堤表面に作用する圧力特性

圧力計によって計測された堰堤表面に作用する局所水圧力 P_A, P_B, P_C の時間変化を図-6 に示す。くさび形状の水表面を有する水塊の先端が堰堤模型に衝突する結果、堰堤の下端から 15cm 、 35cm 、 55cm の位置にある圧力計 P_A, P_B, P_C は、それぞれ時刻 $t = 0.31\text{sec}$ 、 0.355sec 、 0.385sec の順に圧力検知を始め、時刻 $t = 0.33\text{sec}$ 、 0.39sec 、 0.40sec の順で局所的なピーク値を示すことが分る。

圧力 P_A, P_B, P_C に、堰堤の区分面積 $A_A (= \text{高さ } 2.5\text{cm} \times \text{幅 } 10\text{cm})$ 、 $A_B (= \text{高さ } 2.5\text{cm} \times \text{幅 } 10\text{cm})$ 、 $A_C (= \text{高さ } 2.5\text{cm} \times \text{幅 } 10\text{cm})$ をそれぞれ掛けたものの積分値を、圧力計によって検知された堰堤に作用する全衝撃力 $F_P(t)$ とする。

$$F_P(t) = P_A A_A + P_B A_B + P_C A_C \quad (24)$$

$F_P(t)$ と 6 分力計で検知された本堰堤に作用する全衝撃力 $F_a(t)$ の時間変化を図-7 に示す。圧力 P_A, P_B, P_C にも 6 分力計の場合と同様に圧力計内受圧膜部の構造慣性力と構造減衰力が作用する。受圧膜の共振による慣性力と減衰力が含まれている結果、 $F_P(t)$ は大きな振動成分を含んでいる。水塊の堰堤への衝突が開始する $t = 0.3$ より $t = 0.45\text{s}$ までの間では、 $F_P(t)$ と $F_a(t)$ の一致度はほぼ良好である。一方、 $t > 0.45\text{s}$ では $F_P(t)$ は $F_a(t)$ より小さく

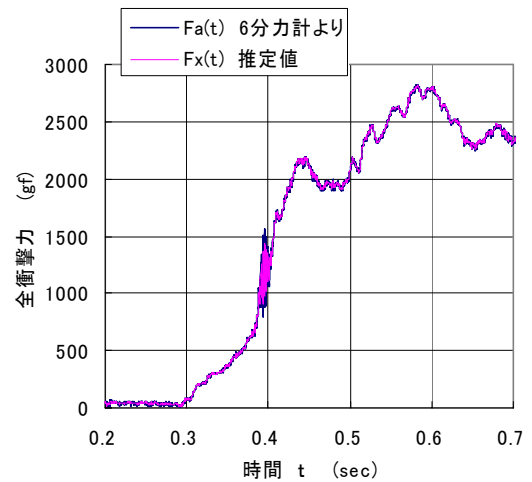


図-4 堰堤に作用する全衝撃力の推定
(水路勾配 $i=1/50$, 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$)

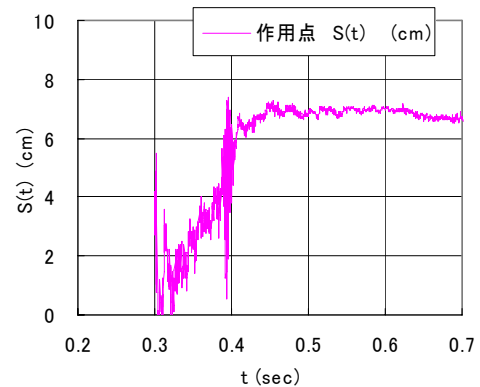


図-5 全衝撃力 $F_a(t)$ の合力作用点 $S(t)$
(水路勾配 $i=1/50$, 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$)

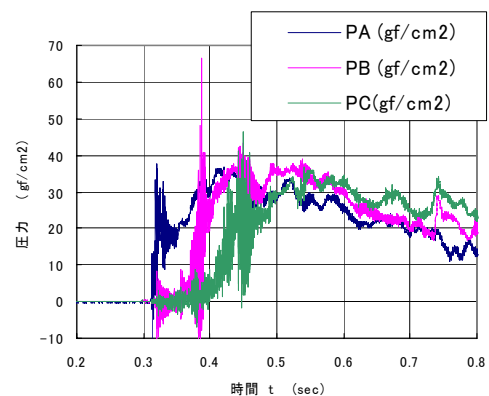


図-6 局所圧力の時間変化
(水路勾配 $i=1/50$, 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$)

なっている。これは、堰堤前面の水深が圧力計 P_C の高さ (=55cm) より大きく増加したためである。

全衝撃力 $F_P(t)$ の評価においては、堰堤全表面の圧力の空間分布および時間変化特性を精度良く計測する必要がある。今回の計測においては、水深方向のわずか3点にの圧力計測による圧力分布形より評価された $F_P(t)$ と、 $F_a(t)$ の一致度は良好であった。従って、本堰堤模型においては、横断方向に概ね様な圧力分布を有する2次元性の強い衝撃力が発生していると推定できる。

P_A , P_B , P_C の値には、圧力計の固有振動数に等しい約2000Hzの周波数成分が多く含まれている。従って、 P_A , P_B , P_C には、(6)式に示すように、強制振動外力となる受圧面幕に作用する正味の水圧の他に、共振による受圧面幕の振動速度と加速度にそれぞれ比例する、減衰力(= $C dy/dt$)と慣性力(= $M_a d^2y/dt^2$)とが含まれている。受圧面膜部の等価バネ係数と減衰定数が分かれば、(1)式を用いた正味の局所水圧の評価が可能である。

5. 堰堤に作用する砕波波力¹⁰⁾

4章の実験で用いた堰堤模型を幅50cm, 高さ40cm, 長さ10mの水槽内に設置し、砕波波力による衝撃的流体力の計測を行なった。水路床勾配は $i=0$ 度(水平床)である。静水深は $d=7$ cm である。

長波を発生させ、その砕波が堰堤模型に衝突した時の衝撃流体力の時間変化の1例を図-8に示す。 $F_a(t)$ は本堰堤に作用する全衝撃力、 $F_x(t)$ は(1)式による衝撃的流体力の推定値である。 $F_a(t)$ の振動成分は約90Hz以下と6分力計の固有振動数($f_{na}=500$ Hz)に比べて十分小さいため、 $F_a(t)$ と $F_x(t)$ の一致は良好である。従って、6分力計の計測値 $F_a(t)$ は、本堰堤に作用する衝撃的流体力 $F_x(t)$ を正確に検知していると考えられる。

砕波が到達する前には堰堤前面の水位が低下するため、模型堰堤には沖方向への波力が作用している。立ち上がり時間は $t_r=0.03$ s となり、6分力計の固有周期 T_{na} (= $1/f_{na}$) = (1/500)s との比を求めると $t_r/T_{na}=15$ となる。上記の石川ら¹²⁾ が提案している応答の判定基準では、 $1 < t_r/T_{na}$ の範囲における応答現象は「静的応答」と分類される。

4章の段波(洪水流)の場合における立ち上がり時間 $t_r=0.13$ s に比べて、本実験での $t_r=0.003$ s は短い。これは、本堰堤に衝突する砕波の前面形状は、段波(洪水流)の場合と比べて、直立した平面のようになり鉛直方向により一様化している結果と考えられる。

6. 直円柱に作用する砕波波力

5章で用いた水槽に直径 $D=3$ cm の円柱を鉛直に設置(直円柱)し、長波による砕波を作用させた。図-9に波の進行方向に作用する水平波力 $F_a(t)$ の記録例を示す。静水深は $d=11$ cm であり、波高 $H=7$ cm の砕波が作用している。図中には、同時に計測された、円柱真横での水位変化 η および床から高さ $z=5$ cm の位置における波の水平水粒子速

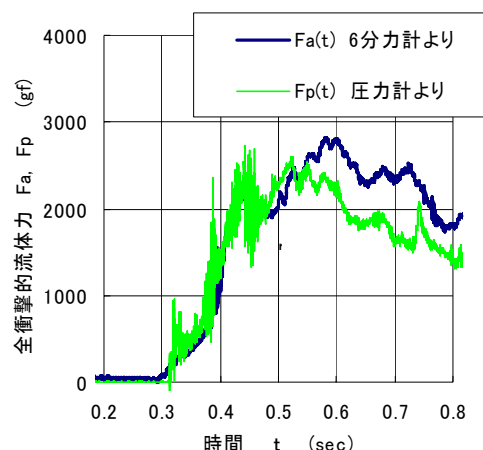


図-7 全衝撃的流体力の時間変化
(水路勾配 $i=1/50$, 主流速度 $U=2.6$ m/s)

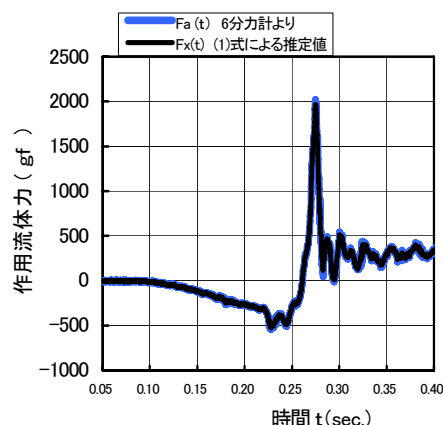


図-8 堰堤に作用する砕波波力

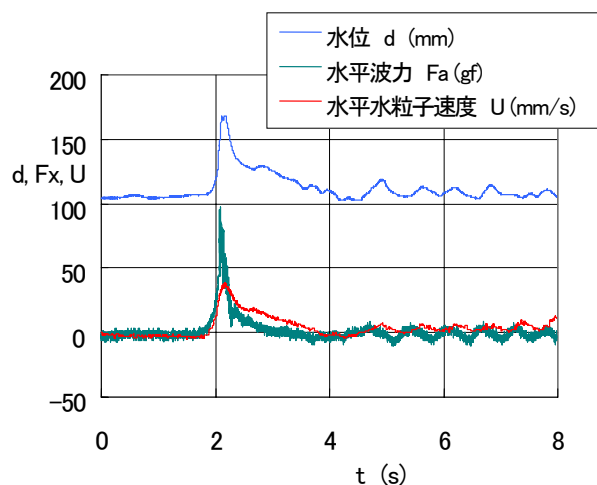


図-9 直円柱に作用する砕波波力, 水位, 水粒子速度
($d=11$ cm, $H=7$ cm, $H/d=0.64$)

度 U の記録も示している。砕波が作用した結果、直円柱には衝撃的な力 $F_a(t)$ が作用していることが分かる。

図-10 に砕波波力の詳細な時間変化を示す。3 分力計に取り付けた本直円柱の等価質量は $M_a = 0.132 \text{ gf} / (\text{cm/s}^2)$ 、等価バネ係数は $K = 17198 \text{ gf/cm}$ である。空中での固有振動数は $f_{na} = 57.5 \text{ Hz}$ 、減衰定数は 0.026 である。3 分力計で検知された砕波波力 $F_a(t)$ は、本直円柱の静水中における固有振動数 $f_{nw} = \text{約 } 47 \text{ Hz}$ と等しい周波数成分を有していることが分かる。

この $F_a(t)$ から(1)式を使用して慣性力と減衰力を取り除いた正味の流体力 $F_x(t)$ の推定値にも、約 47 Hz の周波数成分がかなり残っている。この周波数成分は、本直円柱が水中で微小振動する時に作用する流体慣性力と流体減衰力で構成されていると考えられる¹⁴⁾。円柱の振動加速度を用いて算定した流体慣性力を図中に緑線で示す。付加質量係数は $C_m = 1$ とした。この流体慣性力の振動成分は、約 47 Hz の周波数成分を有する $F_x(t)$ の振動成分と概ね同じ大きさである。従って、本ケースにおいては、流体減衰力に比べて流体慣性力が卓越している(支配的)ことが分かる。

7. おわりに

分力計を用いて構造物全体に作用する衝撃的流体力の計測を試みた。本研究の主要な結果を要約すると、以下の通りである。

- 1) 分力計に取り付けた構造物の作用流体力に対する振動は、a) 構造物が剛な場合や、b) 弾性構造物に作用する流体力の空間分布形が明らかな場合には、一自由度の線形強制振動方程式で近似できる。この場合においては、作用流体力 $F_x(t)$ が定常の場合(静的)、分力計が検知する力 $F_a(t)$ は $F_x(t)$ と一致する。しかし、 $F_x(t)$ が時間変動する場合、分力計が検知する $F_a(t)$ には、 $F_x(t)$ の他に、構造物と分力計の梁部が有する慣性力と減衰力が含まれている。従って、非定常な正味の流体力 $F_x(t)$ の計測においては、分力計が検知する $F_a(t)$ から、これら慣性力と減衰力を取り除く必要がある。

なお、分力計が検知する $F_a(t)$ は復元力であり、構造物の強度や耐地盤支持力の評価において重要である。 $F_x(t)$ は作用流体力であり、構造物に作用する外力となり構造物の応答振動問題において重要である。

- 2) 直立護岸壁模型の一部(直径 = 5 cm の円形部)に作用する砕波波圧力と被覆用消波ブロック衝突力の合力からなる衝撃力を1分力計を用いて計測した。1分力計の固有振動数(空中)が $f_{na} = 58.7 \text{ Hz}$ と低いため、1分力計が検知した $F_a(t)$ は、a) 砕波波圧力とブロック衝突力の作用に伴い鋭い立ち上がり大きなピーク値を示し、b) その後は、1分力計の固有振動数 f_n で自由振動しながらゆるやかに減少した。

この $F_a(t)$ から、1分力計が有する慣性力と構造減衰力の影響を取り除いた正味の衝撃的流体力 $F_x(t)$ のピーク値は、 $F_a(t)$ のピーク値より減少することが分った。

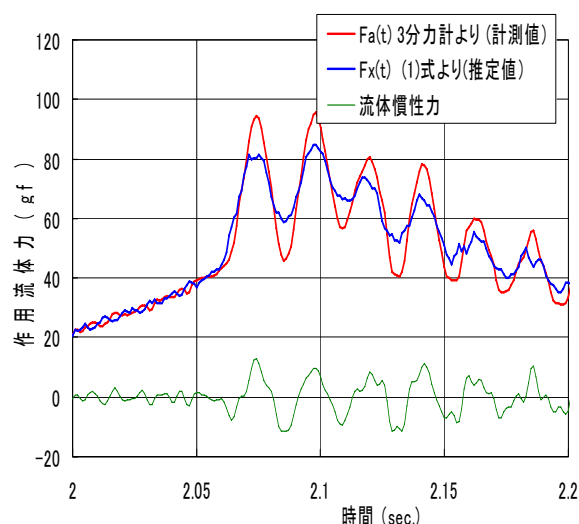


図-10 円柱に作用する砕波波力の詳細
($d = 11 \text{ cm}$, $H = 7 \text{ cm}$, $H/d = 0.64$)

- 3) 堰堤模型に作用する全衝撃力を6分力計で計測した。6分力計の固有振動数が $f_{na} = 500 \text{ Hz}$ と高い結果、6分力計が検知した $F_a(t)$ は、 $F_a(t)$ から堰堤模型と6分力計の梁部が有する慣性力と構造減衰力の影響を取り除いた正味の衝撃的流体力 $F_x(t)$ とよく一致した。従って、衝撃的流体力の計測においては、固有振動数が十分高い分力計を必要とする。
- 4) 6分力計を用いて計測した堰堤に作用する全衝撃力 $F_a(t)$ と $F_a(t)$ による曲げモーメント $M_{ya}(t)$ より、全衝撃力 $F_a(t)$ の合力作用点の水路面からの高さ $S(t)$ を評価した。くさび形状の水表面を有する水塊の先端が堰堤模型に衝突すると、 $S(t)$ は0 から $F_a(t)$ のピーク値が生じる時間までの間に急上昇することが分った。
- 5) 3個の圧力計を用いて堰堤表面に作用する局所水圧力 P の空間分布および時間変化特性を調べた。それぞれの圧力値に堰堤の区分面積を掛けた積分値を、圧力計によって検知された堰堤に作用する全衝撃力 $F_p(t)$ とした。 $F_p(t)$ と分力計を用いて計測した堰堤に作用する全衝撃力 $F_a(t)$ との一致度は良好であった。従って、本堰堤模型においては、横断方向に概ね様な圧力分布を有する2次元性の強い衝撃力が発生していると推定できる。
- 6) 堰堤に作用する砕波波力の立ち上がり時間 t_r は、砕波の前面形状が鉛直方向により一様化しているために、段波(洪水流)の場合より短いことが分かった。
- 7) 円柱に作用する砕波波力を計測した。設置した円柱の固有振動数が小さい場合、作用波力に対する円柱の共振現象が生じる結果、作用波力は大きな振動成分を有することが分かった。

参考文献

- 1) 三好岩生・鈴木雅一：土石流の衝撃力に関する実験的研究：新砂防, Vol. 43, No. 2 (169), p.11-19, 1990.

- 2) 松富英夫：砕波段波衝突時の圧力分布と全波力，海岸工学論文集，第 38 巻，pp.626-630, 1991.
- 3) 有川太郎・中野史丈・大坪大輔・下大迫健一郎・石川信隆：遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.836-840, 2007.
- 4) 合田良実・原中祐人・北畑正記：直柱に働く衝撃砕波力の研究，港湾技術研究所報告，第 5 巻第 6 号，pp.1-30, 1966.
- 5) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃波圧とその測定について，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp.317-321, 1983.
- 6) 橋本晴行・村上浩史・平野宗夫・鳥野 清：土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究，土木学会論文集 No.565/II-39, pp.85-95, 1997.
- 7) 林建二郎・高橋 祐・重村利幸：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，土木学会第 57 回年次学術講演会後援概要集第 2 部門，Disk 1, 2002.
- 8) 由井孝昌・服部昌太郎：衝撃砕波圧におよぼす直立壁体の変形効果，海岸工学論文集，pp.317 第 39 巻，pp.681-685, 1992.
- 9) 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局，pp.584-585, 1997.
- 10) 林建二郎：多分力計による水理構造物に作用する衝撃的流体力の計測，水工学論文集，第 52 巻，pp.721-726, 2008.
- 11) 山口貴之・上野紗代・林建二郎・大野友則：消波ブロック被覆堤におけるブロックの動揺・衝突現象の解明のための水理模型実験，第 27 回海洋開発論文集，Vol.18, pp.404-412, 2002.
- 12) 石川信隆・井上隆太・林建二郎・長谷川祐治・水山高久：土石流モデルを用いた衝撃的流体力の測定実験について，第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会構造力学委員会，2006.
- 13) Bearman, P. W., Downie, M. J., Graham, J. M. R. and Obasaju, E. D.: Forces on cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter number, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 154, pp.337-356, 1985.
- 14) Hayashi, K. and Chaplin, J. R.: Damping of a vertical cylinder oscillating in still water, Proceeding of the First International Offshore and Polar Engineers, pp.346-353, 1991.
- 15) 林建二郎・石川信隆・松浦順二：分力計による壁体に作用する衝撃流体力計測，第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，CD-ROM II-75, 2006.

(2009 年 4 月 9 日 受付)