

# 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

## MEASUREMENTS OF IMPULSIVE FLUID FORCES ACTING ON HYDRAULIC STRUCTURES WITH MULTI COMPONENTS LOAD CELLS

林建二郎<sup>1</sup>  
Kenjiro Hayashi

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 防衛大学校准教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

The total value of 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 attached on LMC. The net values of these impulsive fluid forces are evaluated by using the linear vibration equation which approximate the motion of the load cells attached these hydraulic structures.

**Key Words :** Impulsive fluid force , multi components load cell , breakwater, breaking wave, dam, hydraulic bore

### 1. はじめに

河川・海岸構造物に作用する洪水流や土石流、碎波や津波等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(減衰定数 $h$ に依存するが例えば: $5f < f_n$ ,  $f$  = 衝撃的流体力の周波数)応答性の良い圧力計や多分力計が必要である<sup>1)~5)</sup>。

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<sup>6)</sup>。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・精度的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、構造物を取り付けた分力計測系の固有振動を上げることは中々困難であり、その応答性が懸念される。

本研究は、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、検知された計測値より正味の衝撃的流体力の評価法に対する検討を行なったものである<sup>7)</sup>。

### 2. 計測原理

#### (1) 基礎振動方程式

分力計と一体となった構造物模型に力が作用すると、分力計内の力受感部となる梁部材には、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が距離間隔がそれぞれ異なる数箇所所で測定すれば、構造物全体に作用する力とモーメントの評価が可能である<sup>8)</sup>。また、ひずみゲージの貼る方向、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方向各軸周りの曲げモーメント成分の計測が可能である(多分力計)。

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<sup>1),2)</sup>。

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

$$d^2 x / dt^2 + (2 \pi f_{na})^2 h_0 dx / dt + (2 \pi f_{na})^2 x = F_x(t) / (M_a + M_b) \quad (2)$$

式中、 $M_a$ は分力計内のひずみ計測用梁部の等価質量、

$M_b$ は構造物の等価質量、 $C$  は等価減衰係数、 $K$  は等価バネ係数、 $x$  は堰堤の等価変位量である。  $h_a$  は次式で定義される等価減衰定数である。

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

$f_{na}$  は、次式で定義される剛な構造物を設置した分力計測系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項の $K x$  は、分力計が検知する力 $F_d(t)$ であり、(5)式が得られる。

$$F_d(t) = K x \quad (5)$$

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 $F_d(t) = K x$ を検知する。(1)式より、 $F_d(t)$  は(6)式で表される。

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

作用流体力 $F_x(t)$ が定常である静的の場合には、 $d^2 x / dt^2 = 0$ ,  $dx / dt = 0$  より  $F_d(t) = F_x(t)$ となる。従って、分力計が検知する力 $F_d(t)$ 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には、分力計が検知する $F_d(t)$ には、 $F_x(t)$ の他に慣性力( $= -(M_a + M_b) d^2 x / dt^2$ )と減衰力( $= -C dx / dt$ )が含まれている。

$F_d(t) = K x$ は復元力であり、構造物の変位(変形)量  $x$  を決めるものである。変位量 $x$  が許容変位量以下であれば構造物は安全である。 $F_x(t)$ は構造物に作用する正味の外力であり、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 $F_x(t)$ は、通常、単発現象であり多くの周波数成分を有するが、片幅振幅 $F_A$ と周波数  $f$  を有する次式の三角関数で近似すると、

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

応答変位量  $x$  は、(1)式の解として次式で表される。

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

式中の $X_A$ と  $\alpha$ 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。

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

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

(8), (9)式を(5)式へ代入すると、

$$F_d(t) = K X_A \sin(2 \pi f t - \alpha)$$

$$= F_A / \{1 - (f / f_{na})^2\}^2 + (2h_a(f / f_{na}))^2\}^{1/2} \sin(2 \pi f t - \alpha) \quad (11)$$

(11)式より分力計が検知する力 $F_d(t)$  は、強制振動外力となる衝撃的流体力 $F_x(t)$ より、(10)式の $t$ と(12)式で示される位相遅れ $\alpha$ と増幅率 $A_m$ を有していることが分かる。

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

## (2) 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 $f_{na}$  に比べて十分小さい場合には、(9), (10)式で示される応答変位 $x$  の振幅  $X_A$  と位相差  $\alpha$ はそれぞれ次式で表され、

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

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

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

$$X = (F_A / K) \sin(2 \pi f t) \quad (15)$$

従って、(11)式で示される分力計が検知する力 $F_d(t)$ は(16)式となり、衝撃的流体力 $F_x(t)$ との位相差も無く( $\alpha = 0$ )、振幅も等しく衝撃的流体力 $F_x(t)$ と一致する。

$$F_d(t) = F_A \sin(2 \pi f t) = F_x(t) \quad (16)$$

## (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)式で示される応答変位 $x$  の振幅  $X_A$  と位相差  $\alpha$ 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)分力計が検知する力 $F_d(t)$ は(19)式となる。

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

共振時における分力計が検知する力 $F_d(t)$ 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。

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

例えば、等価減衰定数  $h_a = 0.1$ の場合、共振時の分力計が感知する力 $F_d(t)$  は、(5)式のように慣性力と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、等価減衰定数 $h_a$  の増加とともに減少する。

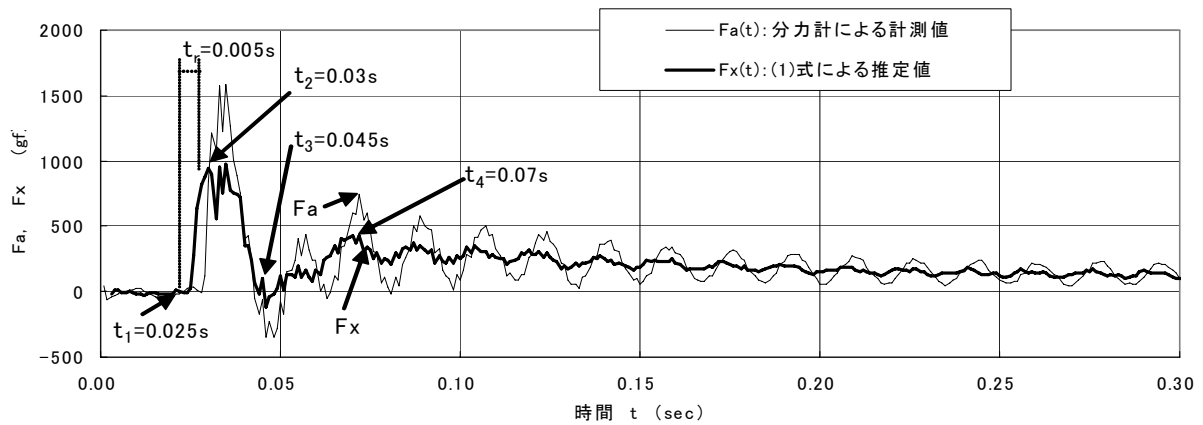


図-1 消波ブロック混成堤に作用する衝撃力の推定

### 3. 直立護岸に作用する衝撃的流体力 $F_x(t)$

天端水深  $h = 33.1\text{cm}$  のマウンド上に設けた直立護岸壁模型の一部（載荷面の径  $D_c = 5\text{cm}$ ）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分力計で計測した結果<sup>8)</sup>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  $1000\text{Hz}$  である。

本1分力計は、十分に剛な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。1分力計の等価質量は  $M_a = 0.484\text{ gf/(cm/s}^2\text{)}$ 、等価バネ係数は  $K = 66006\text{ gf/cm}$ 、空中固有振動数は  $f_{na} = 58.7\text{Hz}$ 、減衰定数は  $h_a = 0.112$  であった。等価バネ係数  $K$  は次式より算定した。

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

図-1に黒実線で示す1分力計が検知した  $F_a(t)$  は、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を示し大きなピーク値をとり、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。この  $F_a(t)$  には、(6)式に示す強制振動外力となる衝撃的流体力  $F_x(t)$  の他に慣性力  $(=M_a d^2x/dt^2)$  と減衰力  $(=C dx/dt)$  が含まれている。

図-1に灰色実線で示す  $F_x(t)$  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  $dx/dt$  および変位加速度  $d^2x/dt^2$  の時系列値をそれぞれ(1)式に代入して得られた、本分力計に作用する砕波波圧力と消波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  $F_a(t)$  より慣性力  $(=(M_a + M_b) d^2x/dt^2)$  と減衰力  $(=C dx/dt)$  を取り除いた値である。分力計部が有する慣性力、減衰力が概ね除去されている結果、 $F_x(t)$  のピーク値は  $F_a(t)$  のピーク値より減少している。

$F_x(t)$  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分力計測系の固有周期  $T_{na}$

$(=1/f_{na}) = 0.017\text{s}$  との比を求めると  $t_r/T_{na} = 0.29$  となる。石川ら<sup>9)</sup>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、砕波波圧力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。この時間領域  $(0.045 < t < 0.07)$  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。

1分力計の固有周期  $T_{na} = 0.017\text{s}$  と同じ周期を有する  $F_x(t)$  の小さな振動成分は、最初の衝撃的な力による1分力計の減衰自由振動によるものと考えられる。静水中で振動する物体には、振動速度  $(=dx/dt)$  の2乗に基づく抗力と、振動加速度  $(=d^2x/dt^2)$  に基づく質量力  $(=慣性力)$  (=ここでは仮想質量力のみ) が作用する。

$F_x(t)$  の振動成分の位相は、 $F_a(t)$  の振動成分の位相より約  $\pi/2$  ( $=90^\circ$ ) 進んでいる。(2)式より  $F_a(t)$  の位相は、振動変位  $x$  と同位相である。振動速度  $(=dx/dt)$  の位相は、振動変位  $x$  の位相より約  $\pi/2$  ( $=90^\circ$ ) 進んでいる。従って、 $F_x(t)$  の振動成分の支配成分は、1分力計の振動速度  $(=dx/dt)$  の2乗に比例する抗力  $F_D$  の発生と考えられる。この  $F_D$  は、 $KC$  数  $(=2\pi(X_A/D_c))$ 、 $X_A$  : 振動変位  $x$  の片振幅、 $D_c$  : 1分力計の載荷面の径) が小さな領域における抗力係数  $C_D$  の増加によるものと考えられる。

静水中で微小振動する円柱の抗力係数  $C_D$  は、振動量の減少に伴い  $KC$  数  $(=2\pi X_A/D)$  が減少すると、急激に増加することが理論的<sup>10)</sup>、実験的<sup>11)</sup>に明らかにされている。

### 4. 砂防堰堤模型に作用する衝撃力流体力 $F_x(t)$

#### (1) 実験の概要<sup>12)</sup>

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

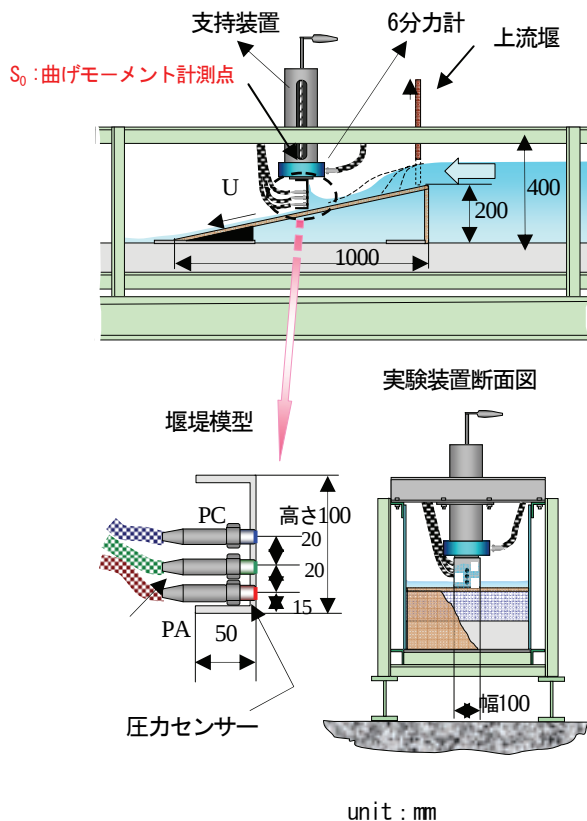


図-2 堰堤に作用する衝撃的流体力の実験装置

1/5勾配の河床を作製した。水路上流端の堰を急開放し清水土石流（洪水流）＝清水段波を発生させた<sup>12)</sup>。

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 $F_x(t)$ 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分力計測系の空中での固有振動数と減衰定数は、 $f_{na}=500\text{Hz}$ と $h_a=0.1$ であった。堰堤模型と6分力計を合わせた等価質量は $M_a=1.65\text{gf}/(\text{cm}/\text{s}^2)$ 、等価バネ係数は $K=16224\text{Kgf}/\text{cm}$ であった。 $K$ は6分力計内のひずみ計測梁の組み立て構造と、曲げ剛性 $EI$ より算定した。

堰堤の圧力分布を計測するために、圧力計(共和電業(株)、容量 $200\text{gf}/\text{cm}^2$ ) $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ を、堰堤中央線上の堰堤下端から15cm、35cm、55cmの位置に設置した。圧力計の受圧面径は10mm、水中固有振動数は $2\text{KHz}$ である。

代表主流速度 $U$ の計測には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、水路床から1cm上方とした。

## (2) 砂防堰堤模型に作用する衝撃的流体力 $F_x(t)$ の推定

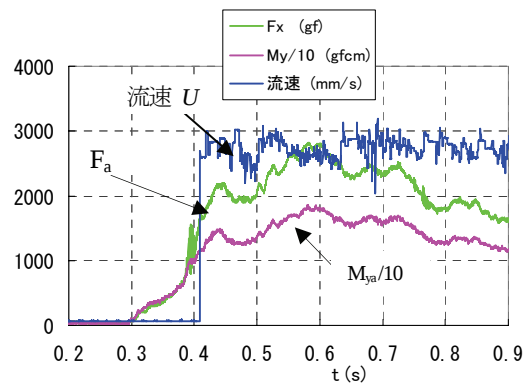


図-3 堰堤に作用する衝撃的流体力の時間変化  
(水路勾配  $i=1/50$ 、主流速度 $U=2.6\text{m/s}$ )

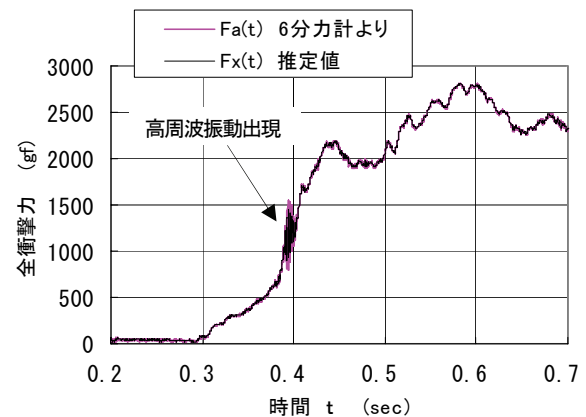


図-4 堰堤に作用する全衝撃力の推定  
(水路勾配  $i=1/50$ 、主流速度 $U=2.6\text{m/s}$ )

砂防堰堤模型を取り付けた6分力計で計測した本模型の流れ方向に作用する全衝撃力 $F_a(t)$ 、曲げモーメント $M_{ya}(t)$ 、ならびに主流速 $U(t)$ の計測例を図-3に示す。水路床勾配は $i=1/50$ 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、本堰堤設置時の6分力計測系の固有周期 $T_{na}(=1/f_{na})=(1/500)\text{s}$ との比は $t_r/T_{na}=38$ となる。上記の石川ら<sup>9)</sup>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 $U(t)$ 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本のレーザービーム光の下流側光線が、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 $2.6\text{m/s}$ である。

6分力計で検知した $F_a(t)$ と(1)式による衝撃的流体力の推定値 $F_x(t)$ の比較を図-4に示す。 $F_a(t)$ の振動成分は約 $100\text{Hz}$ 以下と6分力計測系の固有振動数( $f_{na}=500\text{Hz}$ )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、本堰堤に作用する正味

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。

但し、 $0.39 < t < 0.4$ では約700Hzの高周波振動が発生し、 $F_d(t)$ の振動振幅は $F_x(t)$ のそれより大きくなっている。本力計測系の固有振動数 $f_{na}=500\text{Hz}$ と近い約700Hzの高周波数成分を有する衝撃的流体力 $F_x(t)$ が生じた結果、 $F_d(t)$ の高周波成分が増幅(12)式参照)された結果と考えられる。しかし、高周波数成分の発生原因は不明である。

### (3) 堰堤に作用する衝撃的力 $F_a(t)$ の合力作用点

本堰堤に作用する全衝撃力 $F_d(t)$ 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。式中の $S_0 (=13.5\text{cm})$ は、 $F_d(t)$ による $M_{ya}(t)$ の計測原点から水路床面までの距離である。

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

先端の尖ったくさび形状をした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。 $F_d(t)$ 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 $S(t) = \text{約}7\text{cm}$ 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、作用衝撃力 $F_d(t)$ による滑動やせん断破壊と併せて、 $F_d(t)$ による堰堤の河床面位置での曲げモーメント $M_{ya}(t)$ による転倒や曲げ破壊を評価する必要がある。曲げモーメント $M_{ya}(t)$ は、 $F_d(t)$ と $F_a(t)$ の合力作用点 $S(t)$ が分れば $M_{ya}(t) = F_x(t) S(t)$ で算定可能。

### (4) 堰堤表面に作用する圧力特性

堰堤表面の局所水圧力 $P_A, P_B, P_C$ の時間変化を図-6に示す。くさび形状水表面を有する水塊が堰堤模型に衝突する結果、堰堤の下端から15cm、35cm、55cmの圧力計 $P_A, P_B, P_C$ は、それぞれ時刻 $t = 0.31\text{sec}, 0.355\text{sec}, 0.385\text{sec}$ の順に圧力の検知を始め、時刻 $t = 0.33\text{sec}, 0.39\text{sec}, 0.40\text{sec}$ 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。

$$F_P(t) = P_A A_A + P_B A_B + P_C A_C \quad (23)$$

$F_P(t)$ と $F_d(t)$ の時間変化を図-7に示す。圧力 $P_A, P_B, P_C$ には、圧力計内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。

高周波数成分を平滑化した $F_P(t)$ の時間変化と $F_d(t)$ との一致度は、水塊の堰堤への衝突が開始した $t = 0.3$ から $t = 0.45\text{s}$ の間ではほぼ良好である。一方、 $t > 0.45\text{s}$ では $F_P(t)$ は $F_d(t)$ より小さい。これは、堰堤前面の衝突水深が圧力計 $P_C$ の高さ(=55cm)より大きく増加した結果である。

水深方向のわずか3点の圧力分布計測より評価した $F_P$

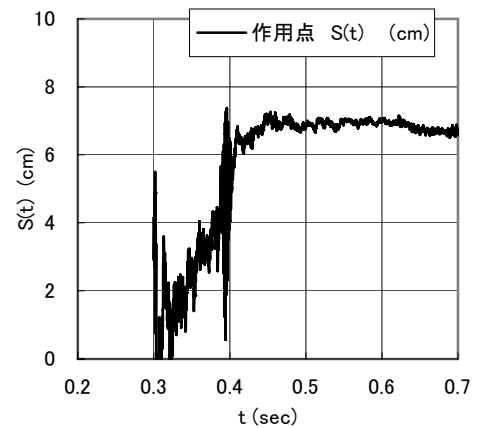


図-5 全衝撃力 $F_d(t)$ の合力作用点  
(水路勾配  $i=1/50$ , 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$ )

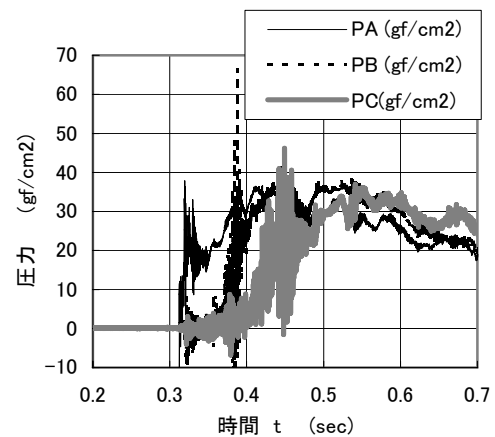


図-6 局所圧力の時間変化  
(水路勾配  $i=1/50$ , 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$ )

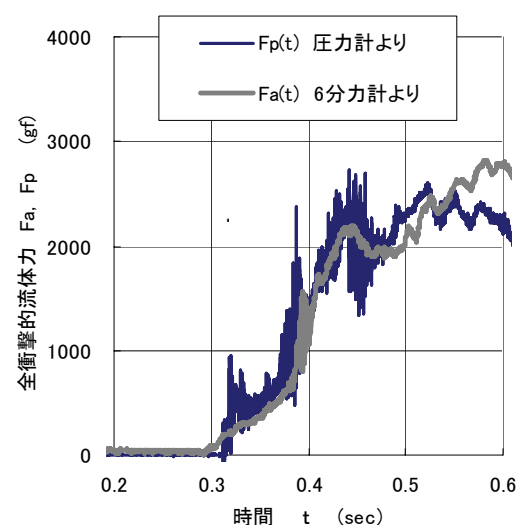


図-7 全衝撃的流体力の時間変化  
(水路勾配  $i=1/50$ , 主流速度 $U=2.6\text{m/s}$ )

$t$ )と $F_A(t)$ の一致度がほぼ良好であった。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作用したと推定できる。

$P_A, P_B, P_C$ には、圧力計の固有振動数に等しい約2KHz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、強制振動外力となる受圧面幕に作用する正味の衝撃水圧の他に、共振による受圧面幕の減衰力( $=Cdy/dt$ )と慣性力( $=M_0 d^2y/dt^2$ )とが含まれている。正味の局所衝撃水圧の評価には、(1)式による計算が必要である。

## 5. 堰堤に作用する砕波波力

4章の実験で用いた堰堤模型を幅50cm、高さ40cm、長さ10mの2次元造波水槽内に設置し、砕波波力による衝撃力の計測を行なった。水路床勾配は  $i = 0$  (水平床)である。静水深は  $d = 7\text{cm}$  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力の時間変化を図-8に示す。 $F_d(t)$ は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。 $F_d(t)$ の振動成分は約90Hz以下と6分力計測系の固有振動数( $f_{na} = 500\text{Hz}$ )に比べて十分小さいため、 $F_d(t)$ と $F_x(t)$ の一致は良好である、計測値 $F_d(t)$ 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。

砕波到達以前に堰堤前面水位が低下するため、堰堤には沖方向への波力が作用している。 $F_d(t)$ の立ち上がり時間は $t_r = 0.025\text{s}$ であり、堰堤設置時の6分力計測系の固有周期 $T_{na} (= 1/f_{na}) = (1/500)\text{s}$ との比を求めると $t_r/T_{na} = 12.5$ となる。石川ら<sup>9)</sup>が提案している応答判定基準では、 $1 < t_r/T_{na}$ の範囲における応答現象は「静的応答」と分類される。

4章の清水土石流(洪水流) = 清水段波の立ち上がり時間 $t_r = 0.13\text{s}$ に比べて、本実験での $t_r = 0.025\text{s}$ は短い。これは、本堰堤に衝突する砕波の前面形状は、清水土石流(洪水流) = 清水段波の前面形状より、直立した平面のようになって一様化している結果と考えられる。

## 6. おわりに

本研究で得られた主要な成果は次のとおりである。

- 1) 衝撃流体力 $F_x(t)$ の振動数よりも十分に高い固有振動数を有する分力計を使用すれば、構造物全体に作用する衝撃的流体力 $F_x(t)$ の計測が可能なることを確認した。
- 2) 6分力計を用いて計測した堰堤に作用する全衝撃力 $F_d(t)$ と $F_d(t)$ による曲げモーメント $M_y(t)$ より、 $F_d(t)$ の合力作用点の水路床面からの高さ $S(t)$ 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 $F_d(t)$ のピーク値が生じ間に急上昇することが分った。
- 3) 堰堤に作用する砕波波力の立ち上がり時間 $t_r$ は、砕波前面形状が一様化しているために、清水土石流(洪水流) = 清水段波の場合より短くなること分った。

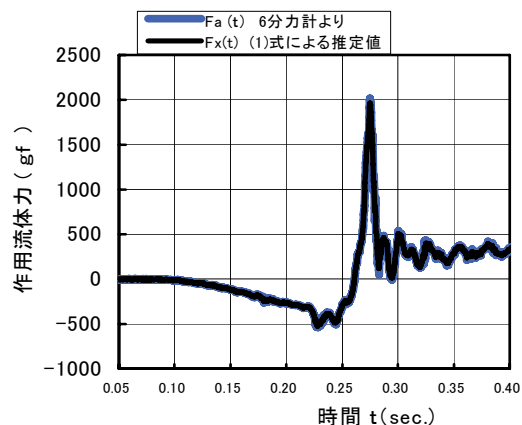


図-8 堰堤に作用する砕波波力

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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，1997.
- 7) 林建二郎：分力計による衝撃的流体力計測，第4回流体力の評価とその応用に関するシンポジウム講演集，pp. 25-30，2006.
- 8) 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. 18，2002.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

(2007. 9. 30受付)