迎角をもってダム破壊流れ中に置かれた 正角柱に作用する流体力

HYDRODYNAMIC FORCE EXERTING ON A SQUARE PILLAR WITH ANGLE OF ATTACK BY A DAM BREAK FLOW

秋山壽一郎¹・重枝未玲²・大田和正³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA and Kazumasa OOTA

¹正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 日本学術振興会特別研究員(同上)

³学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

Hydrodynamic forces exerting on a squire pillar(length d) with angle of attack α , placed in the unsteady free surface shear flow, are investigated experimentally, being varied in the range of $\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$. It is found that the assumption of hydrostatic pressure distribution at the front and back side of the pillar is not valid for the case of unsteady free surface shear flow and hydrodynamic force changes with the pressure difference Δh between the front and back side of the pillar. It is shown that $\Delta h/d$ is dependent on the gradient dh/dx of water surface calculated from Ritter solution and $\Delta h/d$ increases with $|dh/dx|$, and the drag coefficient C_d is smaller than that in uniform flows.

Key Words : drag coefficient, square pillar, angle of attach, blockage-ratio, unsteady free surface flow, PTV

1. はじめに

流体中の物体や物体群に作用する流体力については、水工学水理学のみならず風工学等の他の分野でも活発に研究されており、代表的な物体形状の抵抗係数は専門書等でもまとめられている^{1), 2), 3), 4)}。水工学水理学の分野では、流れの場が自由表面せん断流であることが特徴であり、河道内に存在する橋脚や植生などを対象として、そのような場に設置された非水没状態の単体の円柱あるいは円柱群に作用する流体力やその抵抗係数について研究が重ねられている^{5), 6), 7), 8), 9)}。また、氾濫危険区域における家屋などの構造物の危険度評価では、氾濫流が構造物に及ぼす流体力が重要になることから、等流中の非水没状態あるいは水没状態の角柱あるいは角柱群に作用する流体力やその抵抗係数が、高橋ら¹⁰⁾、栗城ら¹¹⁾、福岡ら¹²⁾、著者ら¹³⁾などによって調べられている。著者ら¹³⁾はblockage-ratioと迎角が等流中の角柱の抵抗係数に及ぼす影響が明らかになっていないことを踏まえ、これらについて定量的な検討を加えた。

一方、非定常自由表面流が物体に作用する流体力

については、津波災害を対象として、2次元鉛直壁へのサージフロントの衝突による衝撃力について、Fukui et al.¹⁴⁾、Cross¹⁵⁾、Cumberbach¹⁶⁾、松富¹⁷⁾等によって調べられている。また、非定常流中における物体の流体力については、Alaviによって得られた円柱あるいは角柱にサージフロントが衝突したときの衝撃力の大まかな結果がCross¹⁵⁾の論文の付録に示されている程度であり、そこで指摘されているように、この結果からは有益な情報を得ることは難しい。

角柱あるいは角柱群の抵抗係数の重要性は、必ずしも特定の現象や分野に限定されるものではないが、水工学水理学の分野においては上記の既往の研究例からも明らかなように、①家屋やビル群が氾濫流の挙動に及ぼす影響の評価¹²⁾、②それらが流れから受ける流体力の評価¹⁰⁾、が洪水被害を最小化するための洪水氾濫管理や氾濫流制御にとって不可欠となるところにある。著者ら¹⁸⁾も物体に作用する流体力までも予測できる高精度な市街地氾濫流シミュレーションモデルの構築を現在進めているが、上述したように、角柱あるいは角柱群の抵抗係数が非定常自由表面流中でどのような値を取るのかが全く不明で

あることから、著者ら¹⁹⁾は1次元ダム破壊流れ中に置かれた迎角 $\alpha=0^\circ$ の角柱の抵抗係数について検討を加え、そこでの水理量や抵抗係数の挙動に関する有益な知見を得た。しかし、実験装置と実験条件の設定に起因した理由のため、十分に時間が経過したときの抵抗係数の挙動や迎角の影響を明らかにするには至らなかった。また、代表流速の取り方にも検討の余地があった。

本研究は、前報¹⁹⁾で得られた知見と問題点を踏まえた上で、ダムや堤防の決壊時等に生じるダム破壊流れが非定常性の強い自由表面流であり、津波氾濫の被災例からも明かなように、構造物等に壊滅的な被害をもたらすことから、そこでの物体に作用する流体力を明らかにすることを目的としたものである。1次元ダム破壊流れ中での迎角を有する非水没状態の正角柱の抵抗係数を算定する際の代表流速の取り方、測定位置による抵抗係数の違いなどについて調べるとともに、その抵抗係数と局所的な水面勾配との関係などを明らかにした。

2. 実験条件および方法

実験装置は、水路底面にアクリル板(マンニングの粗度係数 $n=0.01$)を敷き詰めた水路床勾配 $I=1/1400$ に設定した可変勾配水路(長さ $L=20\text{m}$ 、幅 $B=0.6\text{m}$)の上流側から 13m の位置に水路全幅にわたって可動ゲートを設置し、ゲートの上流側を初期水深 $h_f(=0.12\text{m})$ の貯水槽、下流側の 7m を水の無いドライベッド状態としたものである。実験装置と角柱の設定条件および測定断面などをまとめて図-1に示す。可動ゲートを 0.033 秒以内でほぼ瞬間的に引き上げることで、貯水槽に貯留された水を流出させ、ドライベッド上のダム破壊流れを発生させた。なお、この設定条件では、貯水槽の上流端で反射した波がゲート下流の流れに影響しない無次元経過時間 $t^*=(\tau/(h_f/g))^{1/2}$ は約 217 である。ここに、 g =重力加速度である。

実験では、水路中に一辺の長さ $b(=0.03\text{m})$ の正角柱を設置し、迎角 $\alpha(^{\circ})$ を $0, 15, 30$ および 45 に変化させた。なお、 α が 0° の状態ではblockage-ratio B/d が 20 の条件となっており、投影幅が最大となる $\alpha=45^\circ$ でも、等流中で抵抗係数がblockage-ratioの影響を受けない $B/d \geq 14$ の条件¹³⁾を満足する設定となっている。また、角柱の設置位置、すなわちゲートから測った角柱前面までの距離 x_g は、 $x_g/h_f=7.5$ と 15 に変化させた。接近流速 V は角柱前面から測って $x/d=4, 8, 12$ および 16 の地点で、水深は角柱の前面(前面水深 h_f)と後面(後面水深 h_b)で測定した。接近流速 V は実験で得られた水表面流速 V_s に 0.90 を乗じ求めた。この補正は、1次元ダム破壊流れの鉛直流速分布がほぼ対数則に従うという前報¹⁹⁾の結果を踏まえたものであり、摩擦速度の算定にはアクリル板のマンニングの粗度係数を用いた。実験条件を表-1にまとめて示す。

図-1 実験装置と重要な諸量

表-1 実験条件

I	1/1400
h_f	0.12m
b	0.03m
α	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
x_g	$7.5h_f(0.90\text{m})$ $15h_f(1.80\text{m})$
x	$4d, 8d, 12d, 16d$

測定方法は、ドライベッド上の流れであることを踏まえ、 h_f と h_b をレーザースリット光を用いた画像解析、 V_s を直径 0.006m の多数の発泡スチロール球を用いたPTV解析および抗力 D を2分力計(測定範囲 $\pm 6\text{kgf}(59\text{N})$ 、固有振動数 3.5kHz 、減衰定数 0.15)で計測した。なお、角柱設置時の固有振動数は2分力計の固有振動数の $1/3$ となり、後述する実験時の振動数(図-5)をフーリエ解析した結果は 0.78Hz であったことから、固有振動数の $1/5$ 以内に収まる。従って、測定時の固有振動数の影響は無視できると考えられる。抗力測定のサンプリング間隔は 0.05 秒、サンプリング時間は 45 秒である。各計測はそれぞれ同一条件下で最低5回行いデータの信頼性を高めた。なお、水深データの相対誤差は、 $0.8\% \sim 5.8\%$ で平均すると 4% 程度であり、抗力データの相対誤差は $0.00014 \sim 17\%$ で平均すると 8% 程度の値であった。また、流速データは、PTV解析では4点の位置情報に基づき1つの流速データを算出しており、その誤差はPTV解析の精度に準拠する。

3. 実験結果

代表水深として角柱の前面水深 h_f を用いた抵抗係数 C_d は、式(1)で定義される。等流の場合とは異なり、ここで対象としているような非定常流では接近流速 V が時空間的に変化するので、その取り方によって C_d 値は大きく変化する。従って、 V の選択に

(a) $\alpha = 0^\circ$

(b) $\alpha = 15^\circ$

(c) $\alpha = 30^\circ$

(d) $\alpha = 45^\circ$

図-2 各迎角 α での異なった位置での接近流速 V の時系列

図-3 各迎角 α での角柱の前面水深 h_f の時系列

図-4 各迎角 α での角柱の後面水深 h_b の時系列

あたっては慎重な検討が必要である。そのような観点から、 $x_g/h_f=15$ の場合の各 α での V の時系列について調べたものが、図-2である。ここで、先述したように、 $t_* \approx 217$ 以内のデータは貯水槽の上流端で反射した波が影響しないものとなっている。図中では V の時系列が測定位置 x との関係で識別できるように表示している。これより、測定位置とは無関係に、 V は同様な傾向を示し、 $t_* \approx 100$ を境にして挙動が変化し、 t_* が約100以下では減衰するが、それ以上ではほぼ一定となることがわかる。また、 α に対する傾向的な依存性は $t_* \leq 100$ では認められないが、 $t_* > 100$ では角柱に流れが当たる際に発生する波の影響もあり、 α の影響を識別することは難しい。

測定位置に着目すると、 $t_* \leq$ 約100では測定位置とはほぼ無関係に V は同様な傾向を示すが、 $t_* = 100 \sim 217$ では各 x/d の流速変動の標準偏差は、 $x/d=4, 8, 12$ および 16 でそれぞれ $0.07, 0.054, 0.063$ および 0.063 であり、 $x/d=8$ で最も流速変動が小さくなることが認められた。なお、紙面の都合で図は省略するが、 $x_g/h_f=7.5$ の場合は流速の測定位置がゲートからより離れているために流速変動は小さくなるが、 $t_* \approx 100$ を境とした V の全体的な傾向は同じであり、 $x/d=8$ で流速変動が最も弱い点も同様であった。これより、 $V_{x/d=8}$ が接近流速として最適であると考えられるので、以下の議論ではこの接近流速を用いる。

図-3と図-4は、それぞれ $x_g/h_f=15$ の場合の角柱の

前面水深 h_f と後面水深 h_b の時系列を示したものである。 h_f は t_* の増加とともに僅かに減少する傾向があるが、ほぼ一定値を取る。 α の影響については、 h_f では僅かに認められるが、 h_b では変動の範囲内であり、その影響は認められない。一方、 h_b は $t_* \approx 80 \sim 100$ を境にして挙動が変化し、 t_* が約80以下では増加するが、それ以上ではほぼ一定となることがわかる。なお、以上のような傾向は、 $x_g/h_r=7.5$ の場合も同様であった。

図-5 は、 $x_g/h_r=15$ における各 α での抗力 D の時系列を示したものである。全体的に t_* の増加とともに若干減少する傾向と明確な α の影響が認められる。なお、 $x_g/h_r=7.5$ の場合も全体的な傾向と α との関係はほぼ同様であった。

図-6は、 $x_g/h_r=7.5$ と15における各 α での抵抗係数 C_d を各 α での等流中の抵抗係数 C_{ds} で除した C_d/C_{ds} の時系列を示したものである。 C_{ds} の値は、 $\alpha=0^\circ$ 、 15° 、 30° および 45° の順に、2.12、1.71、1.78および1.79である¹³⁾。同図より、 $x_g/h_r=7.5$ と15のいずれも C_d/C_{ds} は $t_* \approx 100$ を境にして傾向が変化し、 t_* が約100以下では増加していくが、それ以上では主に D と V の変動に起因するばらつきが認められるものの、平均的には $C_d/C_{ds} \approx 1.0$ の一定値となる。前報¹⁹⁾では $C_d/C_{ds} \approx 0.5$ なる結果を得たが、これは接近流速として角柱の位置での角柱がないときの流速を用いたことに起因している。また、 α の影響は若干認められるが、強い依存性は認められない。

C_d の傾向については、 t_* の関係よりも局所的な流れの状態を表すパラメータとの関係として捉えた方が好ましいと考えられる。そこで、以下のような検討を行った。

角柱の前面と後面の圧力差 ΔP は、それぞれ静水圧分布が成立すると仮定すると、式(2)のようになる。等流中の正角柱の抗力 D は、どの α でも2分力計から得られる D と水深測定から得られる ΔP はよく一致しており、 $D \approx \Delta P$ で表せることがわかっている¹³⁾。式(1)と式(2)を用いると、 C_d は式(3)のように書き換えられる。

$$C_d = \frac{2D}{\rho V^2 A} \quad (1)$$

$$D \approx \Delta P = \frac{\rho g (h_f^2 - h_b^2) d}{2} \quad (2)$$

$$C_d = F_r^{-2} \left(\frac{\Delta h}{d} \right) \left(\frac{d}{h_f} \right) \left[\left(2 - \left(\frac{\Delta h}{d} \right) \left(\frac{d}{h_f} \right) \right) \right] \quad (3)$$

ここで、 ρ =水の密度、 A =角柱の投影面積($=dh_f$)、 d =角柱の投影幅、 F_r =角柱の前面水深に基づくFroude数($=V/(gh_f)^{1/2}$)、 Δh =角柱前面と後面の水深差($=h_f-h_b$) および g =重力加速度である。

等流中では、式(3)の左辺を右辺で除したパラメータ ϕ ($=C_d F_r^2 / (\Delta h/d) (d/h_f) [(2 - (\Delta h/d) (d/h_f))]$)

図-5 各迎角 α での抗力 D の時系列

(a) $x_g/h_r=7.5$

(b) $x_g/h_r=15$

図-6 各迎角 α での C_d/C_{ds} の時系列

図-7 各迎角 α での ϕ と $\Delta h/d$ との関係

図-8 $(\Delta h/d)^*$ と水面勾配 dh/dx との関係

は、2分力計で直接測定した D に基づく C_d 値と流れの場の測定から得られた Δh , h_r および V を用いると、1.0に近い値を取らなければならない。しかし、当然のことながら、静水圧分布の仮定が成立しない場合はそうはならない。図-7は、 $x_g/h_r=7.5$ と15における各 α での ϕ と $\Delta h/d$ との関係をプロットしたものである。これから明らかなように、データの散らばりは認められるものの、いずれの x_g でも $\Delta h/d > 1.7$ では $\phi < 1.0$ 、それ以下の $\Delta h/d$ では $\phi \approx 1.0$ となっており、 $\Delta h/d$ が小さくなると各 α に応じて $\phi = 1.0$ に漸近していくことがわかる。これは、 $\Delta h/d < 1.7$ では静水圧分布の仮定が成立していることを示唆している。ここで、 C_d の時系列(図-6)で見ると、 $\Delta h/d \approx 1.7$ となる経過時間は $t_* \approx 100$ であり、図-2から明らかなように、そこでは V は急激に減少している。

等流中での $\Delta h/d$ を $\Delta h/d_s$ と表示すると、 $\Delta h/d_s$ は各 α に応じた一定値を取る¹³⁾。非定常流中の $\Delta h/d$ と $\Delta h/d_s$ との差、すなわち $(\Delta h/d)^* (= \Delta h/d - \Delta h/d_s)$ が流れの非定常性に起因した角柱前後面の無次元余剰水深差となる。そこで、 $x_g/h_r=7.5$ と15における各 α での $(\Delta h/d)^*$ とRitter解から得られる角柱の設置位置での水面勾配 dh/dx との関係について調べたものが図-8である。ここで、図中の実線は $t_* = 217$ 、破線は $t_* = 100$ である。 α の影響があること、両者の関係には x_g/h_r による違いが認められることなどが図からわかるが、特に $(\Delta h/d)^*$ と dh/dx の間には強い相関があることが明確に認められる。これは次のような理由によると考えられる。

図-7では x_g/h_r による明確な傾向の違いは認められないことから、これを勘案すると、図-8での $(\Delta h/d)^*$ の x_g/h_r に対する依存性は dh/dx に起因していると判断される。Ritter解を微分すると式(4)の関係が得られる。このように、1次元ダム破壊流れの局所的な dh/dx は t_* と x/h_r に依存するので、 t_* が同じであっても x_g/h_r が異なると dh/dx は異なってくる。

$$\frac{dh}{dx} = -\left(\frac{2}{9t_*}\right) \left(2 - \left(\frac{x_g}{h_r}\right) \left(\frac{1}{t_*}\right)\right) \quad (4)$$

図-9は、 $x_g/h_r=7.5$ と15における C_d/C_{ds} と dh/dx との関係について調べたものである。これより、 x_g/h_r

図-9 C_d/C_{ds} と水面勾配 dh/dx との関係

(a) $h_r=1m$

(b) $h_r=3m$

(c) $h_r=5m$

図-10 D/D_s と x_g/h_r および t_* との関係

に対する依存性が認められ、 C_d/C_{ds} は全体的に1.0より小さな値を取り、 $|dh/dx|$ の減少とともに1.0に漸近することがわかる。また、 α に対する依存性も認められる。

以上のことより、1次元ダム破壊流れ中に置かれた正角柱の C_d 値は等流中のものより小さい値を取り、その値はRitter解から得られる角柱の設置位置での dh/dx に依存している。ただし、一般的に非定常流の dh/dx は時空間的に変化するため、1次元ダム破壊流れ中の C_d 値は x_g/h_r の値によって変化する。本研究では測定位置が $x_g/h_r=7.5$ と15の2点に限定されているため、これら以外の C_d 値の傾向について議論することはできないが、この2点の結果よりおよそその C_d 値を推定することは可能である。

図-10は、1次元ダム破壊流れ中に置かれた正角柱の C_d/C_{ds} が最大でも1.0にしかならなことを踏まえ、ダム破壊流れが $\alpha=0^\circ$ の正角柱に作用する流体力 D と同じ水深での等流($I=1/1000$, $n=0.01$)での D_s との流体力比 D/D_s と x_g/h_r との関係について検討を加えたものである。 C_d 値、投影面積 $A(=hd)$ および水の密度を共通とすると、式(1)より $D/D_s=(V/V_s)^2$ が得られる。ここで、 V と V_s は1次元ダム破壊流れと等流の場合の接近流速である。式(5)と式(6)は、それぞれ1次元ダム破壊流れに関するRitter解より得られる任意の点 x_g/h_r での流速と水深である。 V としては、 $x/d=8$ での値を用い、式(5)より算定した。一方、 V_s としては h を式(6)より与え、マニング公式より算定した。 D/D_s は、 h_r 、 t_* および x_g/h_r で変化するの、図-10では $h_r=1.0$ 、3.0および5.0mに変化させるとともに、 $t_*=20$ 、60、100および150に変化させた。なお、式(6)より $x_g/h_r \leq 2t_*$ なる関係があるので、この範囲内での結果のみ図示されている。

$$V = \frac{2}{3} \sqrt{gh_r} \left\{ \left(\frac{x_g - 8d}{h_r} \right) \frac{1}{t_*} + 1 \right\} \quad (5)$$

$$h = h_r \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3t_*} \left(\frac{x_g}{h_r} \right) \right)^2 \quad (6)$$

これより、 D は D_s より常に大きくなり、同一地点であれば t_* が小さいときには大きく、 x_g/h_r とともに増加することがわかる。これは、 x_g/h_r が大きくなると接近流速が大きくなるためである。以上のことより、ダムや堤防の決壊時には構造物は等流中よりもはるかに大きな流体力を受けることになるので、その設計には十分な配慮が必要であることがわかる。

4. 結論

本研究より、1次元ダム破壊流れ中に置かれた正角柱の流体力について以下のような結論が得られた。(1)抵抗係数 C_d は等流中のものより小さい値を取り、その値は角柱のない場合のRitter解から得られる角柱の設置位置での局所的な水面勾配 dh/dx に依存する。ただし、そこで C_d 値では破壊点からの無次元

距離 x_g/h_r の値によって変化する。

(2)流体力 D は等流中のものより大きな値を取る。 D の傾向は x_g/h_r とともに増加し、 t_* が小さくなると増加する。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、本学学部4年生の浅野孝典君および伊瀬知栄人君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 椿 東一郎：水理学II(第2章)，森北出版，1991。
- 2) 永井莊七郎：改訂水理学(第15章)，コロナ社，1972。
- 3) 本間 仁，安芸皎一：物部水理学(第15章)，岩波書店，1962。
- 4) 流体力学ハンドブック：丸善，pp.232，1987。
- 5) 永井莊七郎，倉田克彦：開水路流れの中の円柱の相互干渉，土木学会論文報告集 第196号，pp.57-64，1971。
- 6) 林 健二郎，藤井優広，重村利幸：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。
- 7) 斎藤 隆，羽田野袈裟義，奥野雅晴：直列2円柱に作用する流体力，水工学論文集，第34巻，pp.229-234，1990。
- 8) 宮川朝浩，福岡捷二，名尾耕司：近接した円柱橋脚まわりの河床変動と流体力，水工学論文集，第44巻，pp.1059-1064，2000。
- 9) Li, R. and Shen H. W. : Effect of tall vegetations on flow and sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.99, HY5, pp.793-814, 1973。
- 10) 高橋 保，中川 一，加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京都大学防災研究所年報，第28号，1985。
- 11) 栗城 稔，末次忠司，海野 仁，田中義人，小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)，土木研究所資料，第3400号，1996。
- 12) 福岡捷二，川島幹雄，横山 洋，水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集，No.600/II-44，pp.23-32，1998。
- 13) 秋山壽一郎，重枝未玲，浦 勝，小林俊彦，大田和正：定常自由表面流中の正角柱に働く流体力，水工学論文集，第46巻，pp.827-831，2002。
- 14) Fukui, Y., Nakamura, M. Shiraishi, H. and Sasaki, Y.: Hydraulic study on tsunami, *Coastal Eng. in Japan*, Vol.6, pp.67-82, 1963。
- 15) Cross, R.H.: Tsunami surge forces, *J. of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, WW4, pp.201-231, 1967。
- 16) Cumberbatch, E.: The impact of a water wedge on a wall, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.7, pp.353-374, 1960。
- 17) 松富英夫：碎波段波衝突による衝撃力について，土木学会論文集，第399号/II-10，pp.147-155，1988。
- 18) 重枝未玲，秋山壽一郎，浦 勝，小林俊彦：洪水氾濫流と構造物に働く流体力の数値シミュレーション，水工学論文集，第46巻，pp.833-838，2002。
- 19) 秋山壽一郎，重枝未玲，浦 勝，小林俊彦，大田和正：非定常自由表面流中の正角柱に働く流体力，水工学論文集，第46巻，pp.1205-1210，2002。

(2002. 9. 30受付)