

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04426

研究課題名(和文) 開水路中に設置された構造物に作用する定常流による抗力及び揚圧力の数値流体解析

研究課題名(英文) Computational fluid dynamics simulations of lateral and uplift forces acting on structures set in steady open channel flows

研究代表者

小山 毅 (Koyama, Tsuyoshi)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：50572608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は数値流体解析手法を用いて、準定常状態に達した津波および河川堤防の決壊・越流によって生じた氾濫流が構造物に及ぼす抗力及び揚圧力を評価し、適切な解析手法を確立することである。大型並列計算機を用いた有限体積法による3次元解析および開発実装した非静水圧分布を考慮した浅水方程式を用いた2次元平面数値流体解析ソルバーを用いて、開水路中の自由表面流れにさらされた角柱形状構造物の流況を精緻に評価し、フルード数、閉塞率が抗力・揚圧力に及ぼす影響を評価する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

関東東北豪雨(2015)、西日本豪雨(2018)、令和元年東日本台風による集中豪雨(2019)、令和2年7月豪雨(2020)と近年集中豪雨が増加傾向にあり、増水により河川が氾濫し、堤防が決壊した際の住宅等の建築構造物への被害は甚大である。このような氾濫流によって建築や住宅が滑動・流出する被害を防止し、耐水対策を講じるために流れが構造物に及ぼす水平力や揚圧力を評価する必要がある。本研究はこのような力を数値計算によって評価する手法を提案する点で大きな社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to use CFD to establish methods to evaluate the lateral and uplift force acting on structures subject to quasi-steady tsunami or flood flow arising from overflow or embankment collapse. Large scale computation employing Finite Volume Methods in 3D simulations as well as a developed 2D non-hydrostatic shallow water equation solver are used to simulate the free surface flow around rectangular prisms in open channel flow and to evaluate the effect of the Froude number and blockage ratio on the lateral and uplift forces.

研究分野：建築構造

キーワード：数値流体解析 洪水 津波 開水路 揚圧力 抗力 フルード数 閉塞率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年の東北地方太平洋沖地震に伴って発生した津波、2015年の関東東北豪雨によって発生した鬼怒川の氾濫流など、近年増加傾向にある水災害により、多くの建築構造物が倒壊、転倒、流出の被害を受けた。人命・財産保護の観点より、水の流れが構造物に及ぼす力学的な影響を知り構造物の耐水安全性を評価できるようにする必要がある。準定常的な流れにさらされた建築構造物に作用する水平力は抗力、鉛直力は揚圧力と呼ばれ、その組み合わせ荷重と構造物の耐力の大小によって構造物の被害が決定する。2011年の甚大な被害を踏まえ、「建築物荷重指針」

(2015年改訂)には津波荷重の章が追加され、準定常的な流れにおける抗力・揚圧力の評価式が提案されている。評価式には、建築物の建設地点の「建築物がないと仮定した」ときの浸水深や流速を用いることになっている。抗力は当然流速や浸水深に強く依存するが、自由表面を有する水流ではさらにフルード数(Fr, 流速を重力加速度と浸水深の平方根で除した値)や対象構造物が置かれた周囲の構造物の状況に大きく依存する。この周囲の構造物の状況を表す水理学的パラメーターとして閉塞率(建物の幅と水路幅などに代表される水が流れうる断面の幅の比)と呼ばれる構造物周りの水の流れやすさを表す指標が挙げられる。対象構造物の周囲に他の建築物が近接している場合は閉塞率が大きく、水流が堰き止められ、対象構造物前後で浸水深の差および水の変形が大きく、住宅の周囲が開けている場合は閉塞率が小さく、構造物周囲の水の変形が小さい。水流に置かれた構造物に作用する抗力への閉塞率とFrの影響に関する実験的研究は行われているがその数は少ない。桑村や池谷らは板や角柱に関して調査しているが、常流(Fr<1)における閉塞率の影響や、射流(Fr>1)における板と角柱の作用抗力の違いに関しては未解明である。また、池谷らの抗力評価に用いた背面浸水深の評価手法などには改善の余地を有する。揚圧力に関しても、桑村や池谷らによる実験が行われているが、メカニズムの解明にはいたっていない。また、数値流体解析を用いてパラメーターの影響を扱った研究や調査は極めて少ない。

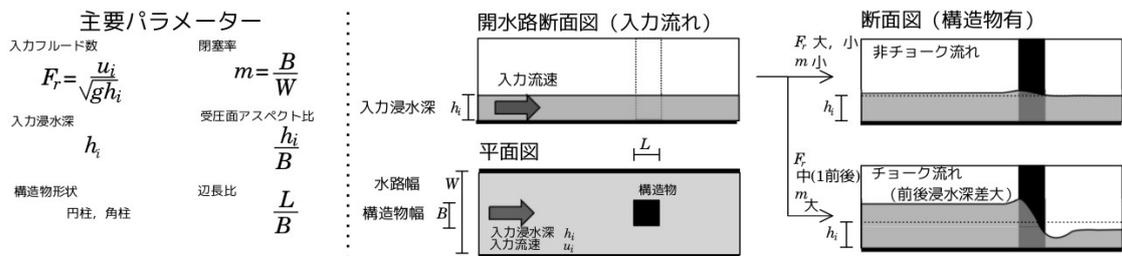


図1 開水路に設置された構造物のセットアップ

2. 研究の目的

本研究の目的は、準定常状態に達した津波および河川堤防の決壊・越流によって生じた氾濫流が構造物に及ぼす抗力及び揚圧力を数値流体解析を用いて評価し、数値流体解析による適切な評価手法を確立することである。

解析対象物とした開水路と設置構造物(角柱)のセットアップを図1に示す。開水路を選択する利点として、多くの実験が開水路で行われているため実験データとの比較が容易である点、閉塞率を小さくすることで壁による閉塞効果を取り除くことも可能である点、境界条件が明確である点、などが挙げられる。Frが1前後、閉塞率が比較的大きい場合は構造物側面で限界水深が表れるチョーク流れが見られ、構造物前後の浸水深の差が増大する傾向がある。それ以外の場合では、浸水深の増大が比較的小さく、非チョーク流れとなる。また、この流況の遷移は主に Fr

と閉塞率の相互に依存する。本研究で行う数値解析では、構造物形状として角柱を選択し、主要なパラメーターであるフルード数や閉塞率を広範囲に変化させて抗力や揚圧力の調査を行う。

また本研究では3次元解析とは別に、2次元平面流体解析である浅水方程式 (Shallow Water Equation, SWE) を用いた、構造物への作用力評価手法を確立する。浸水深に非静水圧分布を仮定することで、静水圧以外の動圧を考慮して構造物周囲の流れをより精緻に計算し、より精度よく抗力・揚圧力を計算することにある。

3. 研究の方法

(1) 3次元数値流体解析

開水路中の構造物へ作用する抗力・揚圧力評価非圧縮性流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式による3次元数値流体解析によって、開水路中に設置された角柱の解析を行う。解析には有限体積法に基づくオープンソース数値流体解析プログラム OpenFOAM を用いる。主要なパラメーターはフルード数 (0~2) や閉塞率 (5% ~ 90%) とし、チョーク流れへの遷移、抗力・揚圧力への影響を調査する。解析結果が存在する低 Fr 流れや、桑村 [1]、Qi [2] や池谷 [3] の実験結果と比較することで本研究の解析結果の妥当性を検証する。3次元流体解析を行う上でもっとも懸念される点が解析に要する時間となる。数値計算のプロトタイピングには通常のパソコンを用い、大規模計算はメモリーの必要性や解析時間短縮のために東京大学 Reedbush スーパーコンピュータを用いる。

(2) 2次元数値流体解析

非静水圧分布を考慮した浅水方程式ソルバーの開発非圧縮性流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式を浸水深方向に積分した浅水方程式にもとづく有限体積法流体解析ソルバーを開発実装する。ソルバーは前項同様 OpenFOAM を拡張して開発を行う。本研究では、一般的な浅水方程式とは異り、構造物周りの不均一な流れを表現するために浸水深方向の変数分布を次のように仮定する。平面内の流速分布を線形、鉛直方向の流速分布は2次式、圧力分布は線形な静水圧分布と2次式の動圧分布を導入し、変数が増える分支配方程式の数も増える [4]。抗力は構造物表面の静水圧および動圧を積分して求める。解析ソルバーの妥当性を検証するためには、前項の3次元流体解析結果や既往の論文結果と比較を行う。非静水圧分布浅水方程式ソルバーにおいて、流速・圧力変数および支配方程式数の増加に連れ、数値解析が不安定になった場合には減衰を適宜増やし安定化を図る。

4. 研究成果

開水路に設置された構造物に作用する力に関して次の点が明らかとなった。

(1) 水理学的考察

開水路に設置された角柱に作用する抗力に及ぼすフルード数及び閉塞率の影響を、構造物前後の流れの運動量保存則や流れの連続性を用いて考察し、抗力係数の評価手法を提案した。開水路の流れは一層流と異り、気液二層流であるため Choking 現象が生じ、本評価手法でこの Choking 現象を含め既往実験で見られる傾向を概ね捉えることができた。本提案手法によって得られたフルード数と抗力係数の

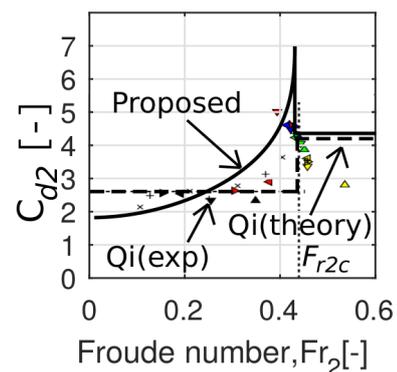


図2 フルード数と抗力係数 (閉塞率 0.2)

関係を既往研究と比較した結果を図2に示す。Yarnellによる式を用いることでNon-choking flow（図中でFr2がおよそ0.45以下）における抗力係数の増加傾向をモデル化することができている。

(2) 2次元解析非静水圧ソルバーの導出と実装

非圧縮性流体の支配方程式であるNavier-Stokes方程式を浸水深方向に積分した浅水方程式による2次元解析手法を有限体積法のフレームワークで実装できる形式で導出し、有限体積法流体解析ソルバー(2次元解析非静水圧ソルバー)として有限体積法プログラムopenFOAMに実装した。用いたソルバーは、一般的な静水圧を近似した浅水方程式とは異り、構造物周りの不均一な流れを表現するために浸水深方向の変数分布を次のように仮定した。平面内の流速分布を線形、鉛直方向の流速分布は2次式、圧力分布は線形な静水圧分布と2次式の動圧分布を導入する。得られたソルバーは、波が短くなるにつれ、従来のBoussinesq仮定(項)より優れた分散関係を有することが示された。

(3) 水平力の評価

(a) 2次元解析

実装した2次元解析非静水圧ソルバーを用いて、開水路中に設置された角柱に作用する水平力を計算し、静水圧を近似した既往モデルによる計算結果、既往論文実験結果と比較することで、その有効性の検証を行った。開発した2次元解析非静水圧ソルバーは静水圧を仮定した既往モデルと異り、既往実験結果で観察されるChoking現象を再現することができ、流況も概ね合致した(図3参照)。ただし、チョーキングに移行するフルード数や抗力係数に実験(Qi[2])との差異が見られた(図4参照)。境界条件等の違いが影響していると考えられる。

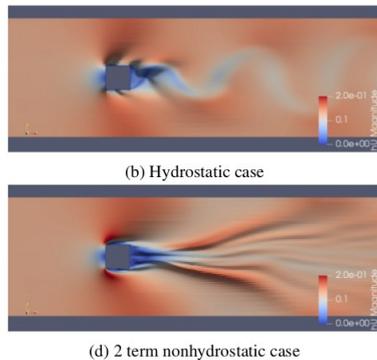


図3 2次元開水路 Choking 流れ(b)静水圧モデル,(d)本モデル

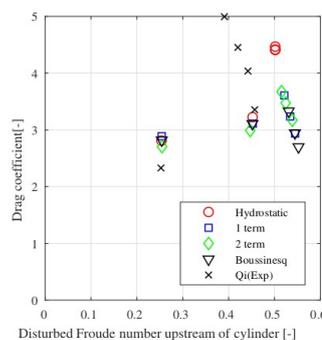


図4 2次元解析：フルード数と効力係数

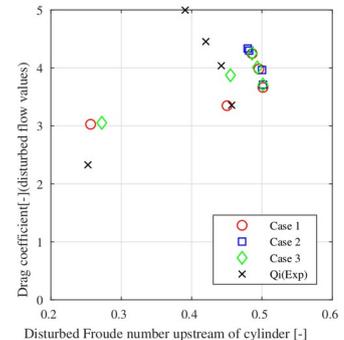


図5 3次元解析：フルード数と効力係数

(b) 三次元解析

2次元解析に較べて、実験に近い傾向を示したがチョーキングに移行するフルード数は既往実験結果(Qi[2])より大きく、抗力係数も低い値となった(図5参照)。差異の原因として、既往実験における角柱下流の境界条件の情報不足が挙げられ、解析においても下流境界条件をパラメータとして解析を行った。常流、射流ともに適用できる点、下流側の浸水深を規定できる点などを考慮して、上流境界条件として一定流量を与え、下流境界条件として平均流速を調節した場合がもっとも適当な結果が得られることが示された。

(3) 揚圧力

3次元解析により開水路中に設置された角柱に作用する揚圧力の評価を行った。数値解析における揚圧力は角柱底面と水路底面の間にわずかな隙間を空け、角柱底面に作用する圧力を積分することで算出する。角柱底面を通過する水流速は隙間の減少とともに低下し、揚圧力が増加して一定値に収束することが確認された。揚圧力を評価するために十分小さいと考えられる隙間は平行平板間に流れる層流からおおよそ算出可能であることが示された。数値解析から得られた揚圧係数は、既往実験(桑村[1])と同様の傾向を示したが、実験と比較して2割以上高い値が算出された。その要因として、既往実験における角柱下流の境界条件の情報不足が挙げられる。また隙間が十分小さい場合、角柱底面の圧力分布は角柱底面の辺上の圧力分布を境界条件としたポアソン分布に概ね従うことが示された。この結果は、開水路底面に設置された角柱の揚圧力を、数値解析上の隙間を設けない3次元数値流体解析および隙間を設けることができない2次元数値解析から算定するが可能であることを示唆し、揚圧力の評価に特別な解析を必要としない点から有用である。

<引用文献>

- [1] 桑村仁：氾濫流に建つ直方体構造物の抗力と揚圧力，日本建築学会構造系論文集，Vol. 81, pp. 219-227, 2016.
- [2] Qi, Z. X. and Eames, I. and Johnson, E. R: Force acting on a square cylinder fixed in a free-surface channel flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 756, pp. 716-727, 2014.
- [3] 池谷 毅，末長 清也，福山 貴子，秋山 義信，鈴木 紀雄，館野 公一：反射特性を考慮した陸上構造物に作用する津波波力の評価法，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 71, No. 2, pp. 985-990, 2015.
- [4] Ghamry, H.K. and Steffler P.M.: Effect of Applying Different Distribution Shapes for Velocities and Pressure on Simulations of Curved Open Channels, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 11, pp. 969-982, 2002.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小山毅
2. 発表標題 開水路に設置された角柱に作用する定常流による水平力の抗力係数に及ぼす流出境界条件の影響
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）学術講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 小山毅
2. 発表標題 ゲート急開による遡上津波水槽実験 のOpenFOAM数値流体解析
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会（北陸）学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 小山毅
2. 発表標題 開水路定常流を受ける角柱に作用する抗力に及ぼす フルード数及び閉塞率の影響に関する水理学的考察
3. 学会等名 日本建築学会大会(東北)学術講演会・建築デザイン発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 KOYAMA, TSUYOSHI
2. 発表標題 EVALUATION OF LATERAL FORCE ON A SQUARE CYLINDER FIXED IN CHANNEL FLOW USING NON-HYDROSTATIC SWE EQUATIONS
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering(国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------