

非定常流中の建物に作用する流体力の直接測定

DIRECT MEASUREMENT OF HYDRODYNAMIC FORCE ACTING ON A BUILDING IN UNSTEADY FLOWS

河原能久¹・伊藤 康²・内田龍彦³・家藤憲司⁴

Yoshihisa KAWAHARA, Yasushi ITO, Tatsuhiko UCHIDA and Kenji IEFUJI

¹フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 修(工) (株) 建設技術研究所 大阪本社河川部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

³正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴非会員 東京都消防庁 (〒100-8119 千代田区大手町1-3-5)

With the increase of heavy rainfall numerical simulation of urban flooding has received more attention of river engineers than ever and has been an indispensable tool for flood mitigation planning. In this study we carry out large scale of experiments where we measure hydrodynamic forces acting on buildings and water depths in unsteady flows with high accuracy. The direct measuring apparatus devised in this study is found to provide with accurate hydrodynamic force on a building. The experiments with different location and layout of the buildings reveal that the force on a building in unsteady flows can be estimated by the summation of hydrostatic pressure around the building except the impact force of the flood front.

Key Words: Urban flooding, hydrodynamic force, buildings, direct measurement, three component force transducer, hydrostatic pressure

1. 序論

近年、台風や集中豪雨によって洪水氾濫が頻発しており、ハード対策とソフト対策の一体化した減災体制の構築が求められている。ソフト対策の検討においては信頼性の高い氾濫解析が不可欠であるが、都市構造が氾濫流に及ぼす影響を正確に表現する解析手法の開発が求められている。

岩佐ら¹⁾は、浅水方程式によって氾濫流の挙動を表現し、差分法による氾濫解析モデルを確立した。それ以降の氾濫解析手法は概ね岩佐らの手法に準じているが、複雑な都市構造が氾濫流に及ぼす影響のモデル化や建物が氾濫流から受ける流体力の適切な評価法について研究が進められてきた。末次ら²⁾³⁾は、家屋の抵抗を抗力係数で表現し、水理実験により抗力係数の特徴を調べ、家屋の抗力係数と面積占有率を用いた等価粗度係数によって家屋群の抵抗を評価している。この手法は実務での氾濫解析に使用されている³⁾。また、福岡ら⁴⁾は家屋群に作用する流体力を直接計測し、家屋群の抗力係数が家屋配置によって大きく変化することを示すと同時に、水深を用いた流体力評価法とこれを考慮した氾濫解析手法を提案

している。この流体力の評価法は家屋の被災評価にも用いられている。また、秋山ら⁵⁾は定常な開水路流中で直角柱の迎角等を系統的に変化させ、その抗力係数を測定している。重枝ら⁶⁾は2次元ダムブレイクによる非定常流実験において、構造物が設置された氾濫域での氾濫流の水深、流速ベクトルおよび構造物に働く流体力の実験データを得ており、解析結果と比較している。さらに、福留ら⁷⁾は刈谷田川での破堤氾濫流を再現するために、大規模な水理実験、数値解析及び水防・避難活動の検討を行っている。このように、氾濫流が建物等に及ぼす流体力についてはその周辺の圧力差から算出できること、また、その流体力の評価法を組み込んだ氾濫解析によって複雑な構造を有する都市域での氾濫流をかなり良好に再現できることが報告されるに至っている。しかし、非定常流を用いた実験は限られており、氾濫流のフロントの衝突により急激な変化を示す流体力の評価方法や氾濫解析手法の適用性をさらに検討することが必要である。

一方、著者ら⁸⁾は、地盤高や土地利用等のデータがデカルト座標系で整備されていることを考慮して、高精度の氾濫解析手法を提案している。その手法は、計算格子内での地盤の起伏、様々な土地利用に応じた底面粗度係数の分布、樹木などの抵抗体・建物等の配置を考慮でき

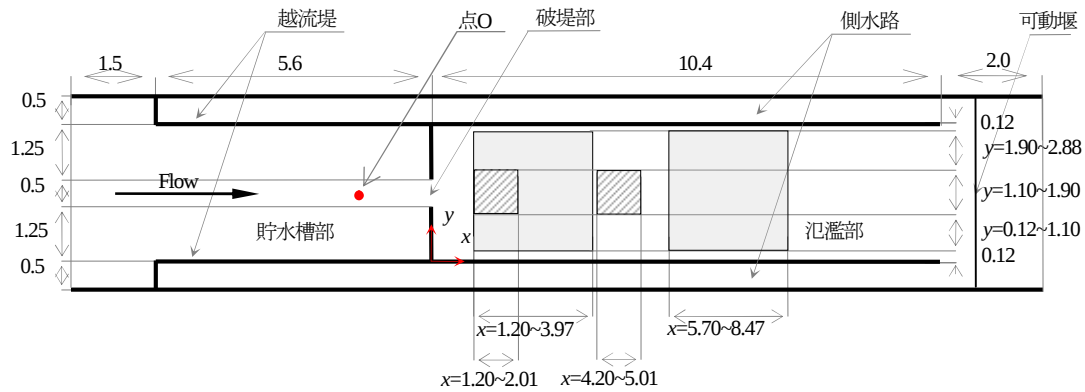


図-1 実験水路（単位：m）

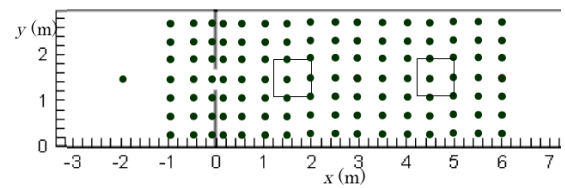
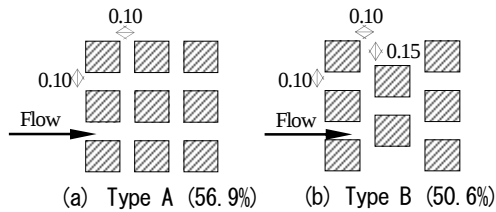


図-3 CaseUS1～US5での水位計測地点

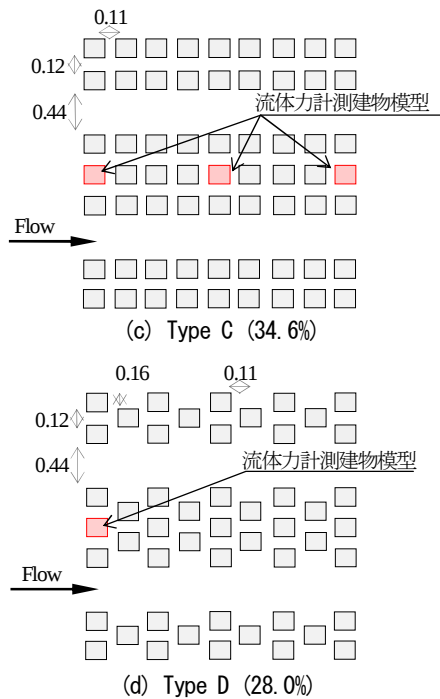


図-2 建物模型群とその建物占有率（単位：m）

表-1 実験条件

Case	建物群 配置部 の流れ＊	建物模型 群の形状	計測項目	初期水位 (cm)	
				貯水槽部	氾濫部
US1	無		水位	14	4
US2					6
US3	射流	Type A			4
US4	常流				
US5	射流	Type B			
US6	常・射流	Type C			
US7	射流		水位		
US8	常流		流体力		
US9	射流	Type D	流体力		
US10	射流	単体			

*そこに建物群が存在しない場合の流れの状態

る長所を有するが、基礎的な非定常流に対する解析手法の検証は十分とは言えない。

本研究の目的は、破堤氾濫流の建物模型に及ぼす流体力の時間的、空間的な特性、特に建物模型に作用する水圧を静水圧と仮定して算出する手法（以降、静水圧モデルとよぶ）の適用性を明らかにすること、また、氾濫解析モデルの検証用データを得ることである。そのために、大型実験水路において、基本的な配置をした建物群を通過する破堤氾濫流を発生させ、建物に作用する流体力の時系列データを高精度で直接測定するとともに、水位の時系列データを多数点において取得した。

2. 破堤氾濫流の実験装置と計測方法

(1) 実験水路と実験条件

本実験では、信頼性の高い実験データを取得することを念頭に置き、湛水している氾濫域に破堤による氾濫流が広がる場合を対象とした。図-1に実験水路の概要を示す。実験水路は貯水槽部と氾濫部より構成され、水路勾配は1/658である。座標軸について、流下方向にx軸、堤防に沿ってy軸、原点を側壁に設定した。河床高の基準をx=10.4mにてz=0.014mとしている。マンニングの粗度係

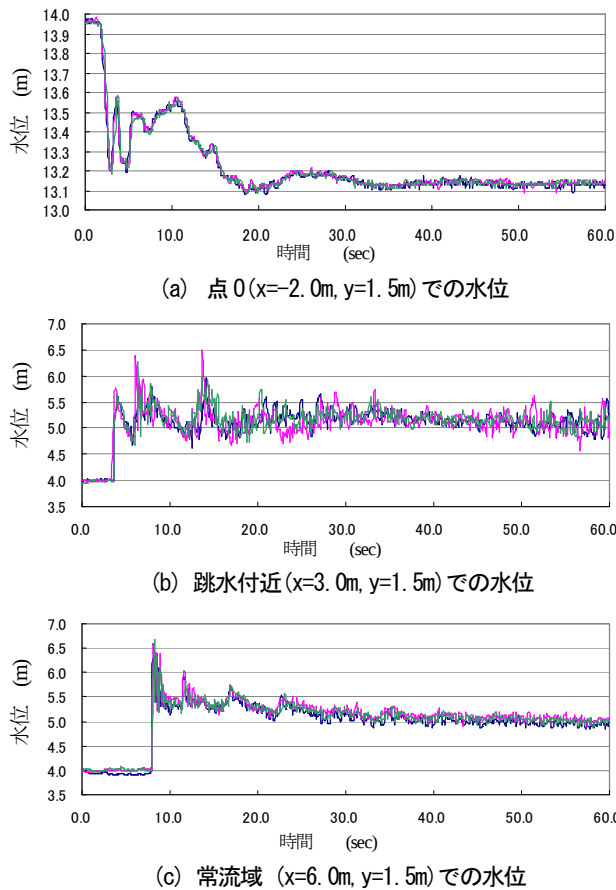


図-4 Case US1における水位の時系列データ

数は $n=0.009$ である。水路中央部に破堤部として0.5mの亚克力製ゲートを設置している。また、貯水槽部には氾濫流量を上回る流量(40ℓ/s)を供給するが、貯水槽両側に高さ0.091mの越流堤を設け、貯水槽内で越流を発生させることによってゲート開放時に貯水槽内の水位が大きく変化しないようにしている。なお、正確な氾濫流量は貯水槽部と氾濫部の流れを同時に数値解析することによって求められる。

水位計測は4台のサーボ式水位計(KENEK社製)を用いて行った。また、例として、図-3にCase US1からUS5における水位計測地点を示す。ただし、建物模型と重なる地点では計測していない。

表-1に実験条件を示す。建物模型の大きさは0.20m(横断方向)×0.21m(縦断方向)であり、非没水型である。また、建物模型群として、配置の影響、建物群の広がりの影響を検討できるように図-2に示す4種類を作成し、Type A, BとType C, Dをそれぞれ図-1に示す氾濫部の同じ模様部分に配置した。

(2) 時刻の調整方法と非定常流の再現性

破堤部のゲートを瞬間的に開放することにより、ダムブレイク流れを発生させ、水位と流体力をサーボ式波高計、分力計によって連続的に計測した。計測時間は70秒、計測間隔は0.1秒である。なお、着目している現象の時

間スケールは0.1秒より長いものであるが、実験開始時刻のずれを精度良く調整するために0.1秒という計測間隔を選んだ。本研究では、実験データの信頼性を高めるために、同一計測点において3回計測し、そのアンサンブル平均を求めている。計測開始から $t_i=10$ 秒後にゲートを手動で開放した。ゲートを開放するタイミングは毎回ずれるため、図-1の点Oに設置した波高計のデータを用いて、次のように時間軸を調整した。すなわち、各計測において負の段波の点Oへの到達時間を t_b 、負の段波到達時間の理論値(=1.93秒)を t_0 とすると、各計測のゲート開放時間のずれは $t'=t_i-t_0$ となる。したがって、ゲート開放時刻を0秒と設定する場合、各計測の時間軸は次式で求められる。

$$t_m = t - t' - t_s \quad (1)$$

図-4に非定常実験の再現性の例としてCase US1の水路中央縦断面上の3地点における水位の時間的変化を異なる色で示す。図-4 (a)は貯水槽部内の時間軸調整点Oでの水位である。破堤部のゲート開放によって発生する負の段波が伝わっている事が明確に確認でき、3回の計測における水位波形は一致している。図-4 (b)は跳水付近の固定点における水位を示している。水位変動が大きいため水位波形に若干の差異が認められるが、フロント到達時間に差異はみられない。図-4 (c)は下流の常流域での固定点における水位であり、水位変動は小さく、水位波形は一致している。これらの結果より、3回の計測結果のアンサンブル平均をとることにより実験結果の信頼性を精度を確保できることが知られる。

(3) 流体力の計測方法とその精度の検証

本実験で製作した流体力計測装置を図-5に示す。模型の前背面のそれぞれ3点で水位を計測する。この方法の特長は、分力計を水路床に固定するのではなく水路上方から吊るし、任意の箇所において模型に作用する流体力を計測できるようにした点にある。一方、この計測方法で注意すべき点は、模型の底部と水路床との隙間内の水と建物模型の前面の水との間で生じる圧力差を無視するために、その隙間をゼロに近づけることと、計測する流体力ベクトルを水路の軸と一致させることである。

図-6に計測装置の精度検証実験の様子を示す。流体力計測模型の前面を $x=5.7\text{m}$ 断面の水路中央に設置し、0.25mm離して建物模型を氾濫部の水路壁と距離が10cmになるまで横一線に並べた。そして、図-5に示すように、流体力計測模型の前背面1cmに波高計を設置し、流体力と同時に水位を計測した。図-7に分力計による計測結果と静水圧モデルによる計算結果を示す。両者の差異は1%未満であり、本方法によって流体力を正確に計測できることがわかった。

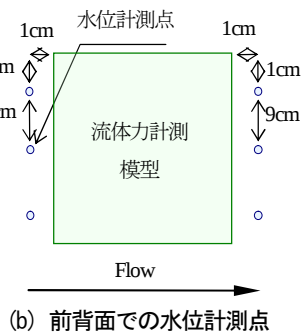
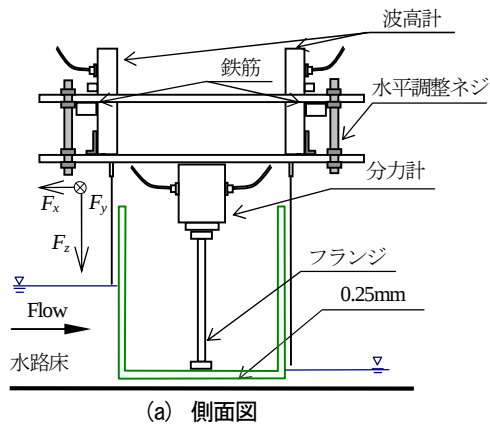


図-5 流体力の計測方法

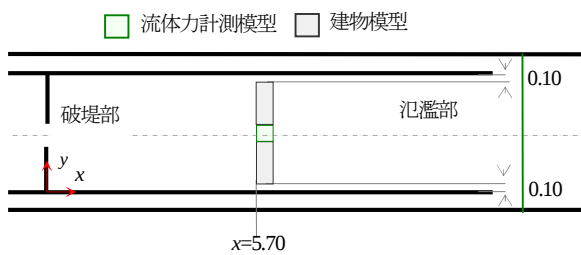


図-6 流体力計測装置の精度検証実験 (単位:m)

3. 実験結果

(1) 非定常流における流体力と静水圧モデルとの比較

図-7に、氾濫部上流部に建物模型群Type Cを配置したCase US7における流体力の計測結果と模型前背面で計測した水位から算出した流体力を示す。水位は3点で計測された値をもとに、全水圧を算出し圧力差を算出している。図-2に示すように流体力計測模型を3カ所に設置して流体力を計測しているが、それらを上流側から順に模型1, 2, 3とよぶこととする。全ての模型において非定常流中においても流体力は概ね静水圧モデルで算出されることが知られる。

図-9では、氾濫部常流部に建物模型群Type Cを配置したCase US8における流体力の計測結果と静水圧モデルに

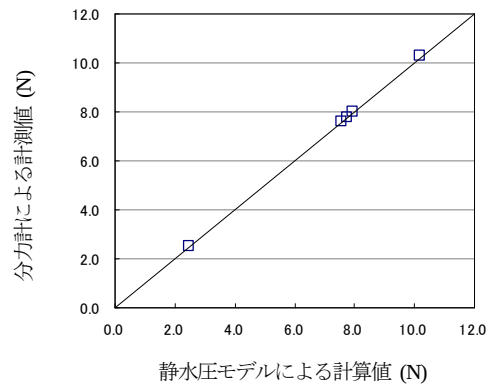
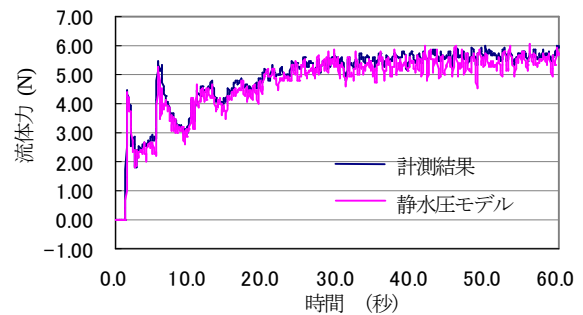
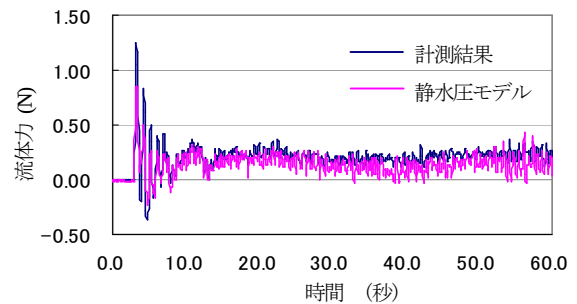


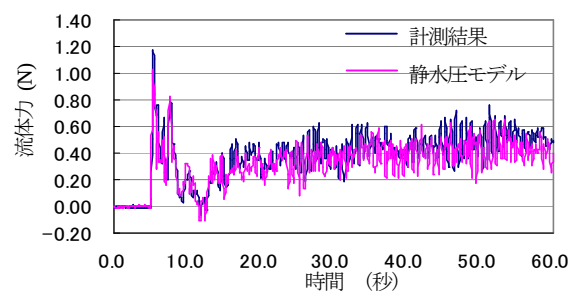
図-7 流体力の比較



(a) 流体力計測模型1



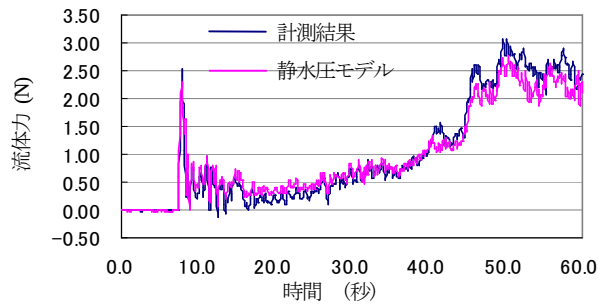
(b) 流体力計測模型2



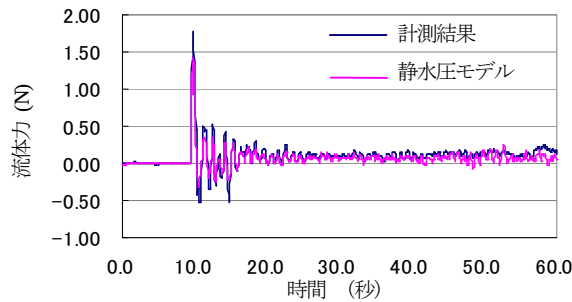
(c) 流体力計測模型3

図-8 Case US7での計測された流体力と静水圧モデルとの比較

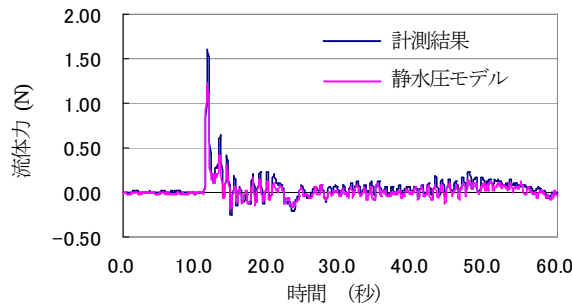
よる計算値を比較している。図において、ゲート開放から約30秒後から流体力が上昇しているが、これは建物模型群の上流部における跳水によって水位上昇が著しくなり、模型前背面での水深差が大きくなったためである。図-9(c)において、ゲート開放から約25秒後において流



(a) 流体力計測模型1



(b) 流体力計測模型2

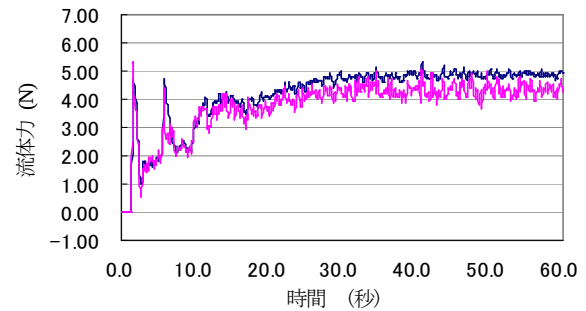


(c) 流体力計測模型3

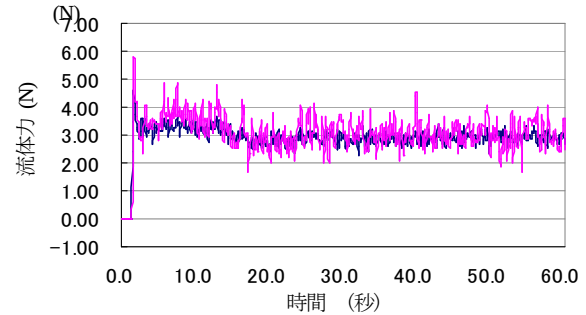
図-9 Case US8での計測された流体力と
静水圧モデルの比較

体力が若干ではあるが負の値を示しているのは、下流端に位置している可動堰からの反射波によって背面水深が上昇したためである。なお、Case US7に比べてCase US8では、衝突時の流体力が模型2、3で大きくなっている。これは、フロントが流下につれて、水路壁での繰り返し発生する反射波が重なり、衝突時の水深がCase US7に比べて大きくなるためである。Case US8においても流体力計測模型1、2、3の全てにおいて静水圧モデルは直接計測した流体力を概ね再現している。

図-10は、上流部に建物模型群Type Dを配置したCase US9と、上流部前面の水路中央に建物模型の単体を配置したCase US10の流体力計測結果と静水圧モデルによる計算値を示している。Case US9の波形はCase US7（流体力計測模型1）と相似であるが、破堤約8秒後に到達する第2波（図-11）によって生じる流体力の値や、破堤流出量が落ち着きだした約40秒以降の値が、Case US7に比べ小さい。これは、建物模型群Type D内の第2列目によって流体力計測模型1の背面の水深は堰上がり、背面から



(a) Case US9



(b) Case US10

図-10 Case US9, US10での計測された流体力と
静水圧モデルの比較

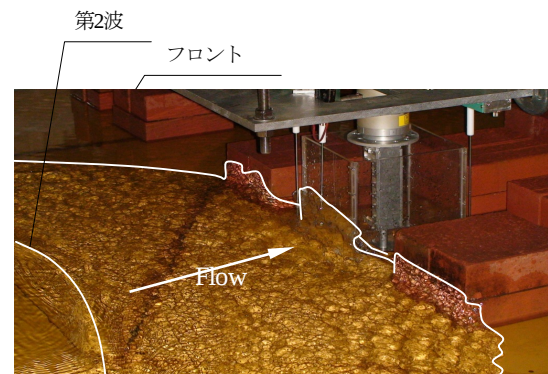
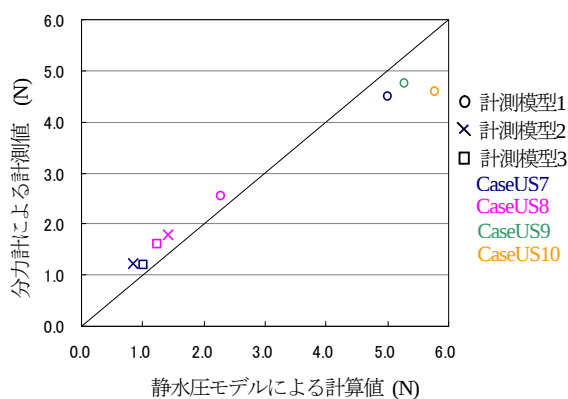


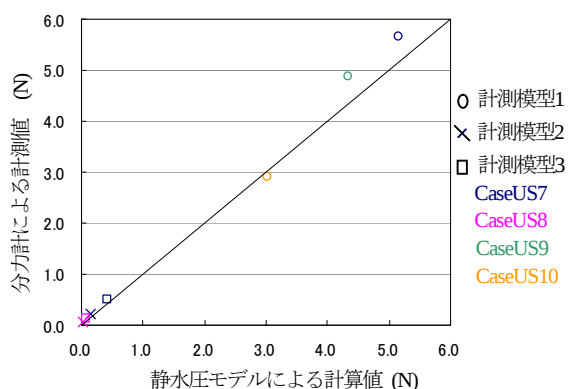
図-11 Case US9での模型に衝突する流れ

の流体力が大きくなったためである。Case US10での流体力は、衝突時を除くと、Case US7の流体力計測模型1の結果より小さい。これは、流体力計測模型1の背面水深はCase US7に比べて小さいが、模型が単体であり前面で堰き止める幅が小さいために前面での水深が小さくなるためである。すなわち、背面水深の減少量よりも前面水深の減少量の影響が大きいためである。また、Case US10では建物模型単体であるためその前背面の水位変動が激しいため、静水圧モデルによる波形の振幅が大きくなっている。図-10より、Case US9, US10ともに静水圧モデルによる評価の妥当性が確認される。

図-12に、Case US7～US10のフロント衝突時の流体力の瞬間値と破堤流出量が一定値に近づく約40秒以降の流体力の平均値について、実験値と静水圧モデルによる計算値の比較を示す。ただし、Case US8の流体力計測模型



(a) フロント衝突時



(b) 擬似定常時

図-11 静水圧モデルの適用性の検討

1での結果は定常に達していないと見なし、ここでは除外する。衝突時に関して、上流部で計測したCaseでは、静水圧モデルは実験値に比べて大きい値を示している。これは衝突時の激しい水位変動を波高計が正確に捉えていないことに起因すると考えられる。一方、下流部で計測したCaseでは、静水圧モデルは実験値よりも小さい値を算出している。この差異は衝突時の動圧分であると考えられる。これらの結果から、静水圧モデルには衝突時の流体力の再現性に課題があると言える。定常状態に関しては、上流部で計測したCaseでは、静水圧モデルは実験値に比べ小さい値を示しており、衝突時の特性とは逆である。これは、建物模型周辺の水位が複雑であり、静水圧モデルでの再現が容易ではないためかと推測している。しかし、全Caseにおいて、静水圧モデルの再現性は衝突時に比べると良好である。

4. 結論

本研究では、基本的な建物配置を通過する破堤氾濫流において、建物に作用する流体力と多数点での水位を高精度に連続計測し、流体力と水深の関係を検討した。主な知見は以下の2点である。

- 1) 分力計を取り付けた流体力計測模型を上方から吊るす方法により、建物模型に作用する流体力を高精度で計測できることを示した。
- 2) 非定常流においても、建物模型に作用する流体力は建物周辺の静水圧差から求める静水圧モデルではほぼ評価できることを示した。ただし、衝突時の流体力評価への適用性にはまだ検討の余地がある。

参考文献

- 1) 岩佐義明, 井上和也, 水鳥雅文: 氾濫水の水利の数値解析法, 京都防災研究所年報, 第23号B-2, pp.305-317, 1980.
- 2) 末次忠司, 栗城稔: 改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.41-50, 1998.
- 3) 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) —シミュレーションの手引き及び新モデルの検証—, 土木研究所資料, 第3400号, 1996.
- 4) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 密集市街地に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.23-26, 1998.
- 5) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 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.827-832, 2002.
- 6) 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.
- 7) 福留康智, 末次忠司, 菊森佳幹, 川口広司: 平成16年7月新潟・刈谷田川破堤氾濫流の再現実験と活動実態調査に関する研究, 河川技術論文集, 第12巻, pp.7-12, 2006.
- 8) 内田龍彦, 河原能久: 二次元浅水流の保存型CIP陽解法の開発とその検証, 応用力学論文集, Vol.9, pp.917-924, 2006.

(2008. 9. 30受付)