

令和元年6月5日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16380

研究課題名(和文)高濃度流を用いた破堤氾濫挙動解析と破堤発生メカニズムの解明

研究課題名(英文)On the analysis of levee break using high concentration flow and elucidation of levee failure mechanism

研究代表者

田中 貴幸(Tanaka, Takayuki)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：70548437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：毎年のように発生する豪雨により、堤防の決壊や越水による洪水氾濫が頻発し、全国各地で甚大な被害が発生している。そこで本研究では、湾曲部を有する河道を対象に、土堤を用いた破堤実験により破堤発生箇所を明らかにするとともに、木製模型による実験および数値解析により流れの三次元構造について解明を試みた。また、粘性流体を対象に、開水路流の流速分布をPIV法により明らかにし、さらに植生群落や側岸凹部を有する場合の開水路乱流の構造についても明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

湾曲部を有する河道の破堤発生メカニズムを明らかにすることで、破堤箇所の想定がより容易となり、河道整備の優先順位を決定する上で重要な知見を得ることができる。また、粘性の異なる流れにおいて、流動機構を明らかにすることで洪水時の実河川の流れ構造を予測するための知見を得ることができる。さらに、植生や側岸凹部などの構造物を有する開水路流れの乱流構造を知ることで、洪水流の挙動についても予見することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：Due to heavy rainfall that occurs every year, levee failures and floods due to overflowing occur frequently, causing massive damage in various parts of the country. Therefore, in this study, for a channel with a curved part, the break occurrence site is clarified by the break test using a soil embankment. In addition, we tried to elucidate the three-dimensional structure of the flow by experiments and numerical analysis with a wooden model. Furthermore, the flow distribution of open channel flow is clarified by PIV method for viscous fluid, and the structure of open channel turbulence in the case of having vegetation communities and side cavities is also clarified.

研究分野：水工学，防災工学

キーワード：破堤解析 高濃度流 開水路乱流

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

毎年のように発生する大型台風や集中豪雨により、堤防の決壊や越水による洪水氾濫が頻発し、全国各地で壊滅的な被害を受けている。その中で、破堤箇所形状に注目すると、1945年から2006年の間における国直轄河川の破堤箇所（計432箇所）の法線形状の割合は直線部で最も発生していることが認められた。近年においても、平成27年9月関東・東北豪雨では鬼怒川や渋井川で主に直線部において破堤が発生している。これは、河道湾曲部に比べ直線部では河川整備の優先順位が高くないことが主な原因と考えられるが、より詳細な破堤メカニズムについての解明が急務となっている。

このような背景により、破堤に関する研究は実験や数値解析によりこれまでも行われているものの、越流氾濫時において河道の不安定性を予見する上で重要な河道内の流れの三次元乱流構造について詳細に検討した事例はほとんど見受けられない。また、破堤が発生する場合には土砂を多く含む高濃度流となることも考えられ、濃度の違いによる影響についても検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、種々の法線形状における破堤時の洪水氾濫挙動について清水や高濃度流を対象に解明することを目的とする。まず、湾曲部を有する河道において、清水にて破堤発生箇所を明らかにし、河道内の乱流構造を明らかにすることで破堤発生メカニズムについて明らかにする。高濃度流については、まずは基本となる直線河道を対象に、濃度の違いが流れ構造に与える影響について解明する。その後、粘性の違いによる破堤発生状況について検討する。さらに、植生群落や側岸凹部などを有する場合の開水路乱流の構造を明らかにすることで、それらが破堤発生に与える影響についても検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 破堤氾濫解析に関する研究

破堤氾濫解析においては、図1のように土堤模型を用いて実験を行うとともに、河道内の流れについては非越流状態では数値解析、越流状態では木製の堤防模型を用いて実験により解析した。

破堤解析に関する実験は、全長180cm、幅90cmの模型台上に、川幅が20cmとなるように、幅5cm、高さ10cmの堤防模型を作成して行った。今回の実験においては、湾曲部の曲率半径は60cm、接線角は60°である。

堤防模型の材料には、珪砂と藤森粘土を2:1で混合したものを用いた。締固めは、土質の締固め試験のC法をもとに作成し、土の乾燥密度は $1.742\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.936\text{g}/\text{cm}^3$ の範囲で行った。模型作成後、模型に水を流して破堤箇所の検討を行い、さらに木製の堤防模型を用いて水位や流速を計測する。流速の点計測にはI型およびL型の電磁流速計を用いた。流速の多点同時計測についてはビデオカメラによるPIV (Particle Image Velocimetry) 法を用い、水表面の流速を計測した。さらに、数値解析によって内部構造の解析を試みる。数値解析は、iRICソフトウェアのNaysCUBEソルバーを用いて解析を行った。数値解析については湾曲部を有する河道において、曲率半径および接線角を変化させて様々な形状にて流動機構の検討を行った。

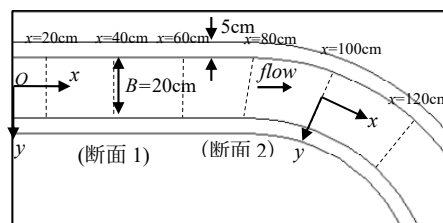


図1 河道形状

#### (2) 粘性流体を用いた開水路流に関する研究

粘性を有する流体を用いた開水路流の流れ構造解析を行った。粘性流体として、PSA（ポリアクリル酸ソーダ）水溶液を用い、低粘度流体による開水路流れの乱流構造解析を実験により行う。粘度の測定にはFungilab社製の粘度計Voscolead Advanceを用いた。PSA水溶液は、100~700mg/lの11個の濃度を対象とし、PSA水溶液と実河川の粘度を比較するために豊川、木曾川および庄内川から実河川のサンプルを採水した。開水路実験においては、長さ10m、幅0.4m、高さ0.25mの開水路に清水および100mg/l~700mg/lの10個の濃度を対象に、流量3 l/sの下で実験を行った。流速計測にはPIV法を用いた。

#### (3) 植生、側岸凹部等を有する開水路流に関する研究

植生群落および側岸凹部を有する流れにおいては、凹部アスペクト比の違いが流れの抵抗特性や流動機構に与える影響について実験的に検討した。実験は上記と同様の開水路装置を用い、流速の点計測を電磁流速計で、多点同時計測をPIV法で行った。植生および側岸凹部を流下方向に連続的に設置し、擬似等流場を形成して抵抗特性および乱流構造について解析した。

植生帯の模型にはプラスチック板に水流に追従して撓む6.10 ナイロンブリュウスル（直径0.242mm、曲げ剛性 $1.45 \times 104\text{g} \cdot \text{cm}^2$ ）を6.5cmの高さに揃え、0.5cm間隔で貼り付けたものを使用した。不透過性の側岸凹部流れに関しては、水路左岸側にアクリル板によって遮断物を設置して側岸凹部を形成した。遮断物高さも植生帯と同様に6.5cmとし、遮断物内に水が浸入しない構造とした。植生帯および遮断物の幅は10cmとし、植生帯および遮断物の流下方向長さは30cmに設定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 破堤氾濫解析に関する研究

越流状態を対象に行った破堤実験の結果を図2に示す。流状態では湾曲流入付近の内岸側で最も破堤が発生した。ここで、ポイントゲージにより水位分布を計測したところ、越流状態では、図1における  $x=0\text{cm}$  から  $x=80\text{cm}$  において内岸側の水位が外岸側の水位より高くなることが認められた。このため、内岸側の水位が高くなったことにより、内岸側から多く水が流出し、堤防上部から堤防模型が削られていき破堤に至ったと考えられる。また、非越流状態では内岸側の破堤は発生せず、全て外岸側で破堤し、中でも湾曲流入付近において最も破堤した。

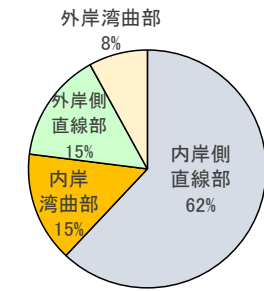


図2 破堤の割合(越流)

図3に非越流状態を対象に、数値解析により求めた2つの湾曲河道における半水深での流速強度のコンター図を表す。いずれにおいても湾曲部外岸側にて流速が極大値を示している。湾曲後には湾曲形状の違いにより外岸側の流速差が顕著に現れている。このように河道湾曲部において、曲率半径や接線角の違いにより流れ構造が大きく変化することを明らかにし、その影響を受け破堤発生箇所が変化することを明らかにした。

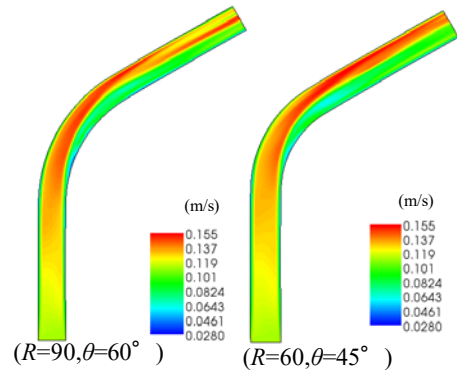


図3 湾曲部を有する流れの数値解析(流速強度)

また、越流状態における流動機構の検討については、木製模型により常に越水が発生している状況を対象に実験を行った。これにより、越流発生箇所にて破堤が発生しやすい状況を確認し、遠心力効果や越流を伴うことにより乱れ構造が変化することを明らかにした。

##### (2) 粘性流体を用いた開水路流に関する研究

粘性を有する流体および土砂を多く含む実河川の粘性実験を行った。PSA水溶液と実河川におけるサンプルの各体積濃度におけるせん断速度とせん断応力の関係において、PSA水溶液は高濃度土砂流と同様に、せん断応力は体積濃度に依存し、同一せん断速度において体積濃度の増大に応じて増加傾向を示すことが確認できた。また、PSA水溶液の各体積濃度におけるせん断速度と粘性係数の関係について検討したところ、粘性係数はせん断速度の増加に伴い低下傾向を示し、体積濃度の増加により上昇傾向にあることが明らかになった。このため、高濃度土砂流は非ニュートン流体特性を持ち、体積濃度の増大に伴いその非ニュートン流体特性は顕著になることが明らかになった。

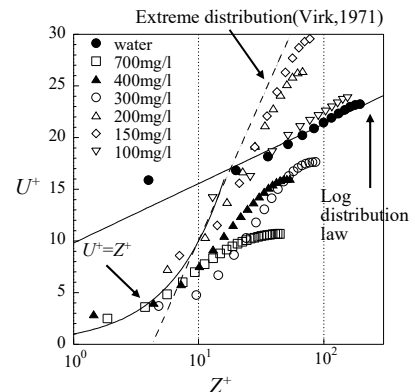


図4 粘性流体による主流速の片対数分布

開水路実験においては、PIV法により鉛直方向の流速を計測した。粘性濃度  $275\text{mg/l}$  以上においては清水流と異なり、主流速は底面近傍で抑えられ、なだらかな曲線分布を描く。 $125\text{mg/l} \sim 200\text{mg/l}$  では水面付近において清水よりも主流速が速くなっていることが認められた。 $100\text{mg/l}$  では清水とほぼ同じ流速分布を示した。主流速の片対数鉛直分布を図4に示す。流れが層流化されていない清水や  $275\text{mg/l} \sim 400\text{mg/l}$  では一部対数分布則で近似できるが、 $125\text{mg/l} \sim 250\text{mg/l}$  ではVirの極限分布に近づいている。これは、粘性低層が広がることで乱流層の流速が大きくなり、極限分布状態における流速分布に近づいたためであると考えられる。このように、PSA水溶液濃度の違いによる粘性特性を把握し、低粘度流体の開水路流れにおける流れ構造を明らかにした。

##### (3) 植生、側岸凹部等を有する開水路流に関する研究

河道内に存在する植生群落や側岸凹部領域は、河川における生物の多様性や親水性を育む上で重要な役割を担っている。本研究では流下方向に植生群落や側岸凹部を連続的に配置した条件において、凹部アスペクト比の違いが流れの抵抗特性や流動機構に与える影響について実験的に検討した。

これにより、流れの抵抗特性については、非越流状態および越流状態においても類似の抵抗を示すものの、その大小関係がアスペクト比により異なることを明らかにした。また、PIV法を用いて流動機構について解析することで、異なる鉛直位置における水平面の乱流構造について解明するとともに、非越流状態に比べ越流状態では3次元性の高い運動量輸送形態となることを明らかにした。また、側岸凹部のアスペクト比を変化させた際に、乱れエネルギーの収支式における乱れの生成項の空間分布の変化についても明らかにし、凹部開口部周辺の生成項の値と流れの抵抗特性とは相関性が高いことを確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① TAKAYUKI TANAKA, TERUNORI OHMOTO, TURBULENT STRUCTURE IN OPEN CHANNEL WITH LONGITUDINALLY CONTINUOUS SIDE CAVITIES, 38th IAHR World Congress, 査読有, 2019
- ② 田中貴幸, 大本照憲, 澤洗太, 流下方向に連続的に配置された側岸凹部を有する開水路流れの乱流構造, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, Vol. 74, No. 5, 2018, pp. I\_787-I\_792
- ③ TAKAYUKI TANAKA, TERUNORI OHMOTO, KOTA SAWA, FLOW RESISTANCE AND TURBULENT STRUCTURE IN OPEN CHANNEL WITH SUBMERGED PERMEABLE AND IMPERMEABLE SIDE-CAVITIES, 21th IAHR APD Congress, 査読有, 2018, pp.577-582
- ④ TAKAYUKI TANAKA, TERUNORI OHMOTO, INFLUENCE OF LONGITUDINARY DISCONTINUOUS VEGETATION ARRANGEMENT PATTERN ON TURBULENT STRUCTURE IN OPEN CHANNEL, 37th IAHR World Congress, 査読有, 2017, pp.577-582
- ⑤ 田中貴幸, 大本照憲, 内藤良介, 越流状態における透過性および不透過性の側岸凹部を有する開水路流の抵抗特性と流動機構, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, Vol. 73, No. 4, 2017, pp. I\_745-I\_750
- ⑥ TAKAYUKI TANAKA, TERUNORI OHMOTO, EFFECTS OF VEGETATION ARRANGEMENT PATTEN WITH SIDE CAVITY ON FLOW RESISTANCE AND TURBULENT STRUCTURE IN OPEN CHANNEL, 20th IAHR APD Congress, 査読有, 2016

[学会発表] (計 5 件)

- ① 飯田真帆, 田中貴幸, 越流状態における植生群落を有する開水路流れの乱流構造解析, 平成 30 年度 土木学会中部支部研究発表会, 2019, pp.137-138
- ② 山中峻司, 田中貴幸, 流下方向における橋脚間隔の違いが開水路流れに与える影響, 平成 30 年度 土木学会中部支部研究発表会, 2019, pp. 153-154
- ③ 小池功晃, 田中貴幸, 澤洗太, 河道湾曲部周辺における越流発生時の破堤状況と流動機構, 平成 30 年度 土木学会中部支部研究発表会, 2019, pp. 155-156
- ④ 澤洗太, 田中貴幸, 河道湾曲部における破堤発生状況と洪水流挙動の解析, 平成 29 年度 土木学会中部支部研究発表会, 2018, pp. 149-150
- ⑤ 内藤良介, 田中貴幸, 流下方向に不連続的植生群落を有する開水路流れの三次元乱流構造, 平成 28 年度 土木学会中部支部研究発表会, 2017, pp. 115-116

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※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、研究者個人に帰属されます。