# 河川堤防におけるパイピング進行性評価 のための合成局所動水勾配を用いた 評価手法の検討

# A STUDY ON EVALUATION APPROACH OF PIPE-PROGRESSION USING THE COMBINATION OF LOCAL HYDRAULIC GRADIENTS EVALUATED BY USING SEEPAGE ANALYSIS

# 田中 秀岳<sup>1</sup> · 笹岡 信吾<sup>2</sup> · 福島 雅紀<sup>3</sup> Hidetake TANAKA, Shingo SASAOKA and Masaki FUKUSHIMA

<sup>1</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
<sup>2</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
<sup>3</sup>正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

Since the Yabe River levee has been breached in 2012, the interest has emerged in levee breaches caused by piping phenomena. In this paper the applicability of local hydraulic gradients to evaluate the progression of piping is examined. In the experiment we identified the ongoing erosion stopped after piping had occurred. The results of the piping progression were reproduced and analyzed in the simulation. We found that the composite local hydraulic gradients, which was the combination of a horizontal and vertical component of local hydraulic gradients, showed the fixed values regardless of the thickness of soil foundations. If this method can be established, it is possible to examine priority of measures and evaluate safety of temporary embankments.

Key Words : River levee, piping, model experiment, seepage analysis

## 1. はじめに

平成24年7月九州北部豪雨に伴う出水により、矢部川 右岸7.3kpの河川堤防が決壊した. 矢部川の決壊では, 基礎地盤の砂層に河川水が浸透し堤防川裏法尻からパイ ピングが発生した. その後,基礎地盤の砂が流出し水み ち(以下では、漏水・噴砂により空洞が生じる現象をパ イピング、生じた空洞を水みちと呼称する)が川裏法尻 から川表に向かって徐々に延伸したことで、堤体が沈 下・陥没し、決壊に至ったと考えられている<sup>1)</sup>、一方で、 基礎地盤への河川水の浸透に伴うと推測される漏水やパ イピングといった現象が全国の河川で報告されているが, その多くは堤防決壊に至るような致命的な破壊現象には 至らず終息している. パイピングの発達から決壊へつな がる可能性が高い箇所を抽出するためには、その過程の 定量的評価が必要である. そのためには、パイピングの 進行性(水みちの延伸の有無)を評価することが堤防の 浸透の安全性を向上するうえで有用となると考える.

## 2. 既往研究

西村ら<sup>2)</sup>は基礎地盤が透水性の異なる二層を有する構 造(以下「複層」)において、上層の層厚が薄いことや 上層に比べて下層の透水性が高く、その差が大きいこと、 堤内側が行止り構造であること等の条件で、堤体と基礎 地盤の境界においてパイピングが発生しやすいことを明 らかにした. 基礎地盤が単一の地層である場合(以下 「単層」)や、複層であっても上層に対して下層の透水 性が低い場合は、川裏側基礎地盤の間隙水圧が高まりに くく、比較的パイピングは発生しづらい. ただし、基礎 地盤の間隙水圧が高まる条件が揃えば、単層でもパイピ ングが発生する. 上野ら3は、単層に対して法尻部を抽 出した模型を用いて、大きな水圧が作用する条件を作り だすことによりパイピングを発生させ、基礎地盤の間隙 水圧が高まる条件では単層でもパイピングの進行が見ら れることや単層におけるパイピングにおいては、水平方 向の浸透が卓越し水みちが延伸していくことを示した.



また、漏水・噴砂は発生するもののパイピングがある程 度進行した後に進行が止まってしまう事例を笹岡ら<sup>4</sup>が 示している.堤防模型実験で透水層の厚さを変えずに、 その幅を川表から川裏に向けて狭めた模型を作成し、パ イピングを発生させる実験を行った.パイピングが発生 し、水みちが延伸したものの、水みちの進行が川表まで 発達せず、停止したことを確認した.その後、水みちの 透水性を仮定した浸透流解析を行うことで、その現象を 再現している.次に田中ら<sup>5</sup>は、笹岡ら<sup>4</sup>と同様に水みち をモデル化することで、堤防法尻部を抽出した模型実験 について、再現解析を試みており、パイピングによる水 みちの進行について、簡易に表現する手法を提案した. こうしたパイピングの進行性を評価できればパイピング による堤防の破壊メカニズムの解明につながるとともに、 進行性の有無は対策優先度の検討に活用できると考える.

パイピングの進行性に係る要素は外力条件や堤体と基礎地盤の境界条件等,多岐にわたるとともに,複雑であり,現行の照査手法では進行性を評価することが難しい.本論文では笹岡ら4や田中ら5の研究を踏まえて,堤防の条件は不透水性材料を用いた単純構造とし,基礎地盤を構成する材料や層厚の組合せのみを変えた実験を実施し,水みちが進行し決壊に至ったケースと水みちの進行が停止したケースについて,その違いを検証するとともに,局所動水勾配の評価方法の改良点について考察する.

# 3. パイピング進行性評価手法

本検討では、田中ら5を参考に水みちをモデル化した

浸透流解析を用いてパイピングの進行性を評価する手法 を用いた.以下にその概要を示す.

図-1に解析モデルの概要を示す.通常浸透流解析を用 いたパイピングに対する安全性照査では堤防法尻部の局 所動水勾配もしくは揚圧力(G/W)の値を計算することで 安全性を照査する.しかし、本手法では、水みちを浸透 流解析上のモデルとして作成することで、法尻での計算 に加えて、水みちが延伸した後の安全性照査を実施する ことを目的としている.具体的には、水みちになると推 測される部分に、原地盤の10~10,000倍程度の透水係数 を与えることで水みちを模擬し、その先端位置での局所 動水勾配による評価を行った. 図-2には解析結果の例を 示す. 〇がih(水平方向の局所動水勾配), △はiv(水平方向 の局所動水勾配)であり、どちらも評価位置(水みちの 端部)とそこから10cm離れた位置での全水頭の差を距 離(10cm)で除したものである.水みちに透水係数を 与えることで、単なる空洞とは異なり、透水係数によっ ては局所動水勾配が水みちの延伸とともに低下する傾向 が確認できる.これは過去の実験等において確認された, パイピング発生後に水みちの延伸が停止する現象を簡易 的に再現するものだと考える. 笹岡ら4が実施した実験 における再現解析では、透水係数を原地盤の100倍程度 とすることで再現性が得られていたため、本研究でもそ の結果を踏まえて、複層構造の上層の使用材料の100倍 程度の透水係数を与えた浸透流解析を実施した.

#### 4. 水みちの延伸が停止した堤防模型実験

#### (1) 実験方法

水みちの延伸が停止する現象に再現性があることを確認するために、堤防の法尻部を模擬した模型を使用した 実験を行った.使用した模型の模式図を図-3に示す.堤体は透水性の低い粘性土(関東ローム)とした.基礎地 盤は複層構造とし、上層に比べて下層の透水係数が高い 組合せとした.基礎地盤の層厚、土質の組合せは実験ご とに変更して実施した.これは田中ら<sup>5</sup>が確認した水み ちの延伸が停止する現象が基礎地盤土質の組み合わせや 層厚が異なる場合においても再現できることを確認する ために実施した.実施ケースは表-1に示す.基礎地盤の 奥行は10cmとした.地盤には圧力センサーやマノメー タを設置し、圧力値を測定した.なお、実験中に水みち の進行状況を把握することや、実験後に水みちの進行形 状を把握するため、色の変えた発泡ビーズを堤体と基礎 地盤上層の境界に3箇所設置している.

次に実験の進行について述べる.本実験の前に予備実 験として、実施する各ケースと同じ模型を作成し、パイ ピングが発生する外水位を確認した.本実験では、予備 実験の結果を参考にパイピングが発生する水位まで外水 位を上昇させ、パイピング発生後、水みちの延伸が止ま



	基礎地盤構成						
ケース	上層			下層			外水位
番号	土質	透水係数 (m/s)	層厚 (cm)	土質	透水係数 (m/s)	層厚 (cm)	GL+(m)
1	珪砂6号 (D50=0.182mm)	2.71E-05	3	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.10
2	珪砂6号 (D50=0.183mm)	2.71E-05	3	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	15	0.13
3	珪砂6号 (D50=0.184mm)	2.71E-05	5	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.12
4	珪砂6号 (D50=0.185mm)	2.71E-05	5	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	15	0.20
5	珪砂6号 (D50=0.188mm)	2.71E-05	10	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	10	0.50
6	珪砂6号 (D50=0.186mm)	2.71E-05	10	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.15
7	珪砂6号 (D50=0.187mm)	2.71E-05	15	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.24
8	珪砂6号 (D50=0.188mm)	2.71E-05	15	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	5	0.42
9	珪砂6号 (D50=0.188mm)	2.71E-05	15	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	5	0.50
10	珪砂4号 (D50=0.741mm)	7.67E-05	10	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.18
11	珪砂4号 (D50=0.741mm)	7.67E-05	10	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	10	0.18
12	珪砂4号 (D50=0.741mm)	7.67E-05	10	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	15	0.46
13	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	3	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.38
14	珪砂3号 (D50=2.697mm)	5.56E-04	5	珪砂1号 (D50=3.455mm)	1.03E-03	15	0.49

表-2 水みちの進行状況

ケース番号	水みち最終長さ(m)	ケース番号	水みち最終長さ(m)
1	0.3	8	0.4
2	法尻のみ	9	決壊
3	0.1	10	0.4
4	0.3	11	0.1
5	0.3	12	決壊
6	0.05	13	法尻のみ
7	0.2	14	決壊

ることを確認するために5時間程度水位を維持した.た だし、ケース9については、ケース8と比較するため、地 盤条件を同じとしたが、外水位をパイピング発生後に変 化させて実験を行った.モデルの側面は観察のため、強 化ガラスとし、実験中の水みちの延伸状況を観察すると ともに、実験後には堤体を除去し開削調査を行うことで



**図-4** 計算メッシュの例

水みちの形状を把握した.

#### (2) 実験結果

実験後の水みちの進行状況を表-2に示す.ケース2, 13は法尻でのみパイピングが発生し、水みちの形成はほ とんどなかった.ケース12,14はパイピング発生後、水 みちの進行が停止せず水みちが貫通し決壊に至った. ケース9を除くそれ以外のケースではパイピング発生後、 水みちが延伸し、0.05m~0.4mの範囲で水みちの延伸が 停止した.ケース9はケース8と同様の基礎地盤条件とし ており、ケース8で確認されたパイピング発生水位にて、 パイピングが発生したことを確認後、外水位を上昇させ たところ決壊に至った.なお、水みちは各ケース共に開 削の結果、堤体と上層土砂の境界で水路全幅(0.1m)に 数mm~1cmの厚さで発生していたことを確認した.土 質や層厚を変えたケースで水みちの進行と停止を確認で きたことで、パイピングによって生じた水みちの進行が 停止する現象に再現性があることを示すことができた.

#### 5. 堤防模型実験への評価手法の適用検討

## (1) 解析方法

実験の結果を踏まえて、3章で示した手法を用いて浸 透流解析を実施した.使用したソフトはDTRANSU2D-ELである. 使用した解析メッシュの一例を図-4に示す. 各メッシュに透水係数を与え、水みち部についても地盤 と同様にモデル化した.水みちの透水係数は原地盤の 100倍とした.水みちの厚さは実験の観察結果を参考に 1cmとし、長さは与条件として0m~0.9mの範囲で0.1m ピッチで変更した. 解析の妥当性は笹岡ら4が示したよ うにパイピングにより初期変状が生じるまでのピエゾ水 頭による実験値と解析値が対応すること、さらに水みち 形成後、水みちが停止した後の実験値と解析値が対応す ることにより確認している.パイピングの安全性照査値 として水みち先端部での局所動水勾配を用いた. 局所動 水勾配は局所動水勾配を計算する点(水みちの先端)と, 上層の層厚と同じ距離だけ離れた点の圧力差を距離で 割って計算した.外力は水位のみとし定常計算を行った.

#### (2) 合成局所動水勾配を用いた評価について

パイピング現象において砂が流動する場合に,砂粒子 は鉛直方向の水圧と水平方向の水圧を受けて流動してい ると考えられる.字野ら<sup>9</sup>は模型実験を通して水平方向 の限界動水勾配を求めており,その値は鉛直方向の限界 動水勾配の0.15~0.35倍であろうと述べている.また, 粒子の限界流速は鉛直方向から水平方向に向けて角度の 変化に対して連続的に変化するものと推定している.本 検討では,パイピングの進行時に鉛直成分と水平成分の どちらが卓越しているのか,明確化するため水平方向と 鉛直方向の局所動水勾配の両成分を合わせた検討を行っ た.鉛直成分と水平成分を合成した値を合成局所動水勾 配icombとした.合成局所動水勾配は局所動水勾配の水平 成分(i<sub>b</sub>)と鉛直成分(i<sub>v</sub>)を用いて以下の式で計算した.

$$i_{comb} = \sqrt{i_h^2 + i_v^2} \tag{1}$$

合成局所動水勾配の土粒子が移動する限界の値(限界 合成局所動水勾配)は宇野ら<sup>9</sup>の指摘通り局所動水勾配 の角度によって変化するものと考えられるが,複層構造 であれば概ね上層の土質や層厚によって変化することが 確認されたため,パイピングが発生する上層の土質に よって固有の限界合成局所動水勾配の値と角度の組合せ が存在する可能性があると考えた.

#### (3) 解析結果

表-1の実験ケースに対して、実施した浸透流解析の結 果を上層の土質ごとに分けて図-5~図-7に示す.結果の うち、水みちが延伸している範囲の合成局所動水勾配を 「進行」として赤色で示した.水みちの延伸が停止した 先の範囲の計算結果は「停止」として水色で示した.

合成局所動水勾配の値は、土質に限らず水みち長さ 0m(法尻)の値から水みちが延伸することで一旦低下す



る傾向が確認できる.上層が珪砂3号(D50=2.697mm) のケースでは0.2m以上に水みちが延伸することで合成局 所動水勾配の値が上昇し,6号(D50=0.182mm)ではほぼ 横ばいか,低下傾向,4号(D50=0.741mm)は横ばいかや や上昇する傾向を示す.実験では水みちが0.4mを超えて 停止したケースは確認されていないが,計算でも水みち が0.4m以上になると局所動水勾配が上昇,もしくはほぼ 維持されることから実験結果と符合すると考える.

また,合成局所動水勾配の値と角度の関係を図-8及び 図-9に示す.ここでいう角度とはihを水平方向成分(x), i,を鉛直方向成分(y)とした場合の水平方向からの角度 (0)を示す(図-10参照).局所動水勾配の角度は浸透の 主となる流れの向きを示すものであり,最も圧力勾配が 急になる方向を示すと考えられる.

上層の土質によりやや値の変化に違いはあるものの, 珪砂6号(D50=0.182mm)では合成局所動水勾配の値は 概ね1.2~1.8付近でパイピングが発生し,水みちの停止 時には0.6~1.2程度を示している.また,合成局所動水 勾配の角度はパイピング発生時と比較して0°~5°程度 水平方向に傾いている.ケース8においては合成局所動 水勾配が1.4程度でパイピングが発生し,法尻から0.4m 程度水みちが進行して停止した.その際の合成局所動水 勾配は1.2程度,角度は5°程度初期より水平に傾いてい た.決壊に至ったケース9においてはケース8と同様の基 礎地盤条件としており,ほぼ同様の外水位においてパイ ピングが発生したことを確認している.図-5において水 みちの進行に応じた合成局所動水勾配を示したが,ここ で最低値となる値をプロットした.その際の合成局所動 水勾配の値は1.5程度であった.

次に珪砂4号(D50=0.741mm)のケース10では、パイピ ング発生時には合成局所動水勾配の値は1.0程度である が、水みち停止時には0.6程度であった.また、角度は パイピング発生時と比べて4°程度水平に傾いていた. ケース11ではパイピング発生時で1.3程度、停止時は1.2 程度であった.決壊に至ったケース12では、図-6におい て水みちの進行に応じた合成局所動水勾配を示したが、 ここで最低値となる値をプロットした.その際の合成局 所動水勾配は1.4程度、角度は37°程度であった.

同様に珪砂3号(D50=2.697mm)においては、パイピング発生時の合成局所動水勾配の値は1.4程度であり、水みち停止時には1.2程度、角度の差は1°程度であった. 決壊に至ったケース14では、合成局所動水勾配の値は 1.3程度と水みちの進行が停止したケース13と比較して やや高く、角度が34°程度と水平に傾いていた.

以上より、今回用いた基礎地盤材料においてはパイピングの発生する法尻付近では、合成局所動水勾配はやや大きい角度を有しているものが水みちの延伸によって角度が水平に傾いていく傾向が確認できた.また、水みちの進行が停止したケースにおいては、パイピング発生時には珪砂6号(D50=0.182mm)であれば概ね42°~47°程度、珪砂4号(D50=0.741mm)であれば44°程度、珪砂3号

(D50=2.697mm) であれば37°度程度の角度を中心に 変動しているようである.また,水位をパイピング発生 時の外水位に維持したが決壊したケース12及び14におい ては上層の土質が同じで水みちの進行が停止したケース と比較して(ケース12に対してケース10,11,ケース14 に対してケース13で)合成局所動水勾配の角度が水平に





図-10 合成局所動水勾配の値と角度の模式図

傾いていることが確認できる.

#### (4) 考察

珪砂6号(D50=0.182mm)のケースにおいては合成局所 動水勾配の値が0.6~1.6付近においてパイピングの発生 と水みちの進行・停止が変化していることが確認できた. 水みちの停止は下層の土質や層厚に関わらずほぼ1付近 の値を示した点が興味深い.多少のバラつきはあるもの の,これは珪砂6号(D50=0.182mm)の限界動水勾配が1付 近であることを示すものと考えられる.ケース1~8は水 みち進行後は合成局所動水勾配が1を下回ったため、水 みちが停止したものと推測することができた.

珪砂4号(D50=0.741mm)のケースにおいては合成局所

動水勾配が0.6~1.3程度の間で水みちの進行と停止が変 化していることを確認した. 珪砂3号(D50=2.697mm)の ケースにおいては合成局所動水勾配1.4程度が限界動水 勾配と推測される、パイピング発生時と水みち停止時の 角度はほぼ変わらないため、単純に合成局所動水勾配が 限界動水勾配を下回ったために進行が停止したと考えら れる. また, 同程度の合成局所動水勾配によってパイピ ングが発生し決壊に至ったケース14については、角度が 35°程度と水平に傾いており、水みちが進行しやすかっ たことが推測できる.一方で、同一ケースで水みち発生 時と水みち停止時を比較すると水みち停止時のほうで角 度が水平に傾いている. 合成局所動水勾配の値が低下し ているため水みちが停止したものと推察される. また, 珪砂3号(D50=2.697mm), 4号(D50=0.741mm)の計算結果 では角度が大きいほどパイピング発生時の局所動水勾配 が大きい傾向が確認できる.角度と合成局所動水勾配値 の両方を考慮した水みちの進行性評価は今後の課題とい える.水みちの停止を確認できた実験は, 珪砂6号 (D50=0.182mm)以外の材料については1~2ケースであっ たため、今後さらに水みちの進行状況や進みやすさを詳 細に確認していくことが必要である.

## 6. まとめ

本検討では合成局所動水勾配を用いたパイピングの進 行性評価について、堤防模型実験の再現解析をもとに適 用性を確認した.局所動水勾配の水平成分と鉛直成分を 合成した値を指標として用いることで土質ごとに水みち の進行と停止についての閾値を設定できる可能性を示し た.このようなパイピング進行性評価手法が確立できれ ば対策優先度の検討や簡易的な堤防の安全性評価が可能 になると考える.

今回実験においては基礎地盤の上層の材料として選定 した珪砂6号(D50=0.182mm)以外の材料においては水み ちの延伸が停止したケースが各1ケースしか確認できな かったため、今後は実験ケース数を増やし、土質によっ て異なる閾値を確認していくことが必要である.これに より、基礎地盤を構成する材料構成、層厚等の条件と外 力条件を踏まえると、パイピングによる水みちの進行の 有無を確認することが出来るようになると考える.また、 実験に限らず、実堤防に対して適用性を検討していくこ とも必要である.現地の被災事例において地盤条件、外 力条件を整理した上で本手法を適用することにより堤防 のもつパイピングに対する耐力を評価できる可能性があ る.そのためにはさらに現地堤防におけるパイピングの 進展状況を詳細に確認し、水みち形状の整理や、水みち の進行状況の詳細な確認・分析が必要である.

また,本手法の現地適用性を確認するためには,パイ ピングの発生,水みちの進行,決壊に至るプロセスを水 理的に解き明かすことが必要である. そのため、実験 データの詳細な分析と浸透流解析,水理解析を関連づけ, 現象の理解をさらに進めていく. さらに、現地への適用 性を考慮すると、堤防の崩壊現象と練成させていく必要 がある.森ら<sup>7</sup>は、砂層基礎地盤に過剰間隙水圧が作用 する状態になると、 せん断抵抗が低下して堤体の崩壊が 起こることを明らかにしている、上野ら8や高汁ら9は噴 砂に伴い形成された水みちにより堤体が変形することに よって,水みちを閉塞させ,パイピングの進行に影響を 与えることを確認しており、堤体土の材料特性や強度に より、堤体が変形しにくいほどパイピングの進行性が高 いことを指摘している.また、上野ら8は堤体が崩壊し 法尻部の土砂堆積が上向きの水圧に対するカウンターと なり、水みちの進行を遅らせる効果があったことを報告 している. これらパイピングの進行に伴う現象は幅広い 技術分野にまたがるとともに複雑である.引き続き、実 験、解析及び被災事例の分析等を通じて一つ一つ現象を 理解し、現場への適用を目指して定量的な評価を実施で きるよう検討していきたい.

#### 参考文献

- 午部川堤防調査委員会: 午部川堤防調査委員会報告書, pp.4-1~4-60, 2013
- 2) 西村柾哉,前田健一,櫛山総平,高辻理人,泉典洋:透水性 基礎地盤を有する河川堤防のパイピング条件に基づく点検フ ローの提案,第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.13-16, 2017.
- 3) 上野俊幸,笹岡信吾,中村賢人,福島雅紀,諏訪義雄:模型 実験に基づくパイピング発生パターンと局所動水勾配の関係, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.63-66, 2017.
- 4) 笹岡信吾,上野俊幸,福島雅紀,諏訪義雄,栗原朋之,坂本 淳一,神原隆則:実流速による河川堤防基礎地盤の水みち進 行判定の試算,河川技術論文集,第24巻,pp.607-612,2018.
- 5)田中秀岳,笹岡信吾,瀬崎智之,福島雅紀:浸透流解析を用 いた簡易的なパイピング進行性評価手法の堤防模型実験への 適用性検討,河川技術論文集,第25巻,pp.565~570,2019.
- (6) 宇野尚雄,杉井俊夫,佐藤健:土の浸透破壊の発生・拡大機構に関する研究,平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書,1989.
- 7) 森三史郎,林愛美,小高猛司,崔瑛,李圭太,原大知:全断 面堤体模型を用いた高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸 透破壊に関する検討,第71回年次学術講演会,2016
- 8) 上野俊幸, 笹岡信吾, 森啓年, 中村賢人, 福島雅紀, 諏訪義 雄: 模型実験に基づいた河川堤防のパイピング発達に係わる 土質条件の分析, 河川技術論文集, 第23巻, pp.405-410, 2017.
- 9) 高辻理人,前田健一,西村柾哉,牧洋平,泉典洋:異なる堤 体材料を用いた透水性基盤を有する河川堤防の浸透破壊進展 メカニズム解明,第6回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.25-28,2018. (2020.4.2受付)