

飽和砂質地盤の原位置パイピング試験

日外勝仁・品川俊介・佐々木靖人

1. はじめに

豪雨時の河川被災の重大な事象である破堤の原因として、越水、堤体浸食、堤体浸透などの堤体の損傷に起因したもの他、堤体基礎地盤の浸透・パイピングによる堤体の沈下・陥没^{1),2)}がある。本稿では特に、基礎地盤のパイピングに起因する堤防被災について検討する。

河川堤防の浸透安全性の評価においては、堤防の尻部の局所動水勾配値に着目し、土粒子が動くかどうかという理論基準を基に物性値のばらつきを考慮した安全側の値が照査基準³⁾とされている。その基準によると、直轄河川堤防の3割以上の区間が要対策と判定される。また別の調査によると、堤体漏水と基礎地盤漏水箇所との区間延長比率は約10:1となっており⁴⁾、基礎地盤のパイピングに対し詳細調査を必要とする箇所が数パーセント程度存在すると推定される。

実際のパイピング現象の進行は、土粒子のかみ合わせや拘束圧の影響、粘着力の作用など様々な要因によって支配されていると考えられる。そこで、土砂の流出により引き起こされる基礎地盤下のパイピング空洞の成長性、すなわちパイピングのし易さ（パイピング抵抗性）を評価できれば、要対策箇所の優先順位付けに有効な手法が開発できる可能性がある。

土木研究所地質チームではこれまで、パイピングメカニズムの解明を目的としてパイピングが進行しやすい土質条件を明らかにするために室内模型実験を実施し、粒度構成や締固め度の違いによりパイピングの発生しやすさが異なること^{5),6)}、パイピングの進行タイプに逐次進行破壊型と一貫貫通破壊型の2つがあること⁴⁾や、X線CTスキャナーを用いた観察によりパイピング進行過程を明らかにしてきた⁷⁾。また、サンプリング試料に基づいた室内実験による評価には課題が多いことから、河川堤防基礎地盤のパイピングしやすさを評

価する原位置試験方法の開発に取り組んできた。

本稿では、河川堤防基礎地盤の浸透安全性評価における対策の優先順位付けを目的に開発した、飽和砂質地盤を対象とした原位置パイピング試験方法について、その基本的概念、開発過程で行った実験結果を示すとともに、開発した試験装置及びその実施方法について述べる。

2. 飽和砂質地盤を対象とした原位置パイピング試験の基本的概念

本試験方法は、地盤に近接して2本のボーリング孔を削孔し、一方から地盤に注水し、他方の孔内水位を一定に保つことで2孔間の動水勾配を制御する。そして動水勾配を段階的に大きくし、地盤内に設置した打ち込み式間隙水圧計の値の変化や孔内の様子を観測し、最終的に孔内でパイピングにより2孔間が貫通するまでの注水圧と各種の観測結果から、地盤のパイピング抵抗性を把握するものである。

本試験方法の特長は、次のようである。

- ①原位置で観測することから、地盤の構造を極力乱さない状態で試験が実施できる。
- ②河川堤防の基礎地盤の状況と同様に、川表側から川裏に向けて動水勾配をかけ、水平方向にパイピングを進行させることができる。

本方法を実用化することにより、原位置における地盤のパイピング抵抗性をピンポイントで把握することができる。本方法を高精度な地盤調査（たとえば高密度サウンディング⁸⁾や高分解能の物理探査など）と組み合わせることによって、真に対策が必要な基礎地盤を抽出することが可能となる。

3. ピット地盤におけるパイピング実験⁹⁾

3.1 実験方法

深さ4m、幅4m、奥行3.5mのピットに、最大粒径850 μ mに調整した川砂を締固め度90%で120cm築造し、パイピングの実験対象層とした。築造中、定位置に間隙水圧計を埋設するとと

もに試験を実施する深度にボーリング孔（注水孔先端部及び注水孔・揚水孔のケーシング管）に見立てた塩ビ管を 50cm 間隔で立て、さらにその上に難透水層として粘性土を 75cm、さらにその上部に砂質土を 70cm 築造した。築造した地盤の断面構造及び注水孔、揚水孔と間隙水圧計の配置を図-1 に示す。注水孔は先端の裸孔部に有孔管を挿入し、そこから水平方向に注水する。また揚水孔は孔底を裸孔とし、孔底部分を通じて孔外から水が浸透する。なお孔内水位は汲み上げによって一定の深度に保った。

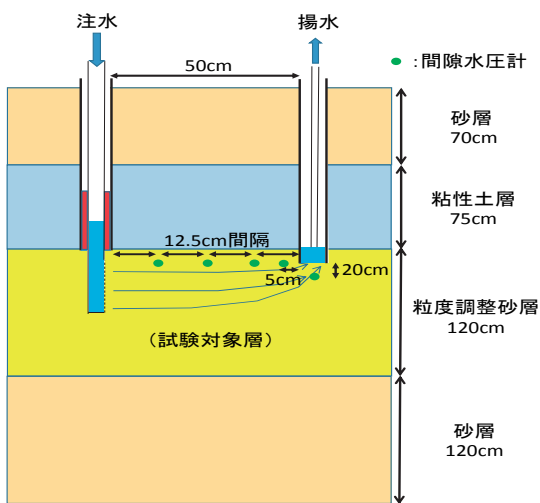


図-1 築造した地盤の断面構造と機器の配置

実験開始に当たっては注水孔先端部に見立てた塩ビ管をゆっくりと上部に引き抜き、裸孔となった注水孔先端部にストレーナー管とパッカーを組み合わせた注水試験機を挿入し、その後、砂質地盤を飽和させた。

注水は実験開始時の地下水位を基準に水位を 10cm 上昇させて 3 分間維持することを基本に段階的に水位を上昇させ、その時の注水流量、間隙水圧計や孔内水位の計測、カメラによる孔内観察を行った。各種計測や観測結果を踏まえ、特に変化が認められた場合は同じ水位をさらに 3 分間維持して経過を観察し、最終的にパイピングによって 2 孔間が貫通するまで実施した。そして注水量、間隙水圧計の計測結果、孔内観察結果を総合して局所的な透水性状の変化を推定し、パイピング進行段階を判定した。

3.2 実験結果と考察

間隙水圧等を水位換算した値を第 1 縦軸、透水性を意味する注水量を注水位で除した値を第 2 縦軸に示した実験の経時変化を図-2（上グラフ）

に示す。水位の値は、試験開始時の初期値とした変化差分を表示している。また、パイピングの進行段階を、①ボーリングの発生期、②パイピング破壊の発生～パイピング空洞の拡大期、③水みちの形成期の 3 期に区分し、2 孔間の平均動水勾配、間隙水圧の特徴的な変化、[注水量/注水位]（これを「透水性指標」という）の変化、孔内カメラ観察結果と、それら計測・観察結果を総括した現象解釈などをまとめて図-2（下表）に示す。以下に実験の時系列に沿って、実験結果を考察する。

① 現行の評価基準（動水勾配：0.5）

計測・観察結果に目立った変化は認められない。

① ボーリングの発生期（動水勾配：1.2）

揚水孔内の観察において、地盤中に含まれていたと思われる空気が小さな気泡となって孔底から上昇してきたことから、ボーリングが発生し、揚水孔底付近の地盤で乱れが発生し始めたものと判断される。その後 3 分経過後に、[揚水孔から 5cm の間隙水圧値]が低下し始め、[揚水孔の間隙水圧値]にほぼ一致したところで低下が収まった。2 点間の水圧値の一致は、揚水孔近傍の 5cm 区間で地盤が乱され、ほぼ連続する粗の領域となったことを示すものと考えられる。

②-1 パイピング破壊の発生期（動水勾配：1.6）

土砂噴出による孔内水の濁りが揚水孔内の観察で確認されたが、間隙水圧値には顕著な変化は認められなかった。その後揚水孔底において、土砂噴出と沈静化が断続的に繰り返している状況が観察されたことから、この時点でパイピングによる土砂の移動が開始したものと判断される。

②-2 パイピング空洞の拡大期（動水勾配：2.2）

土砂噴出の直後、急激な孔内水位の上昇が発生し、揚水によりその後緩やかに水位が低下した。それまではほぼ一致していた[揚水孔から 5cm の間隙水圧値]と[揚水孔の間隙水圧値]との間に差異が認められるようになったこととあわせると、土砂噴出時に揚水孔底付近が閉塞したことを示唆する。[揚水孔から 12.5cm の間隙水圧値]や[揚水孔から 25.0cm の間隙水圧値]にも同傾向の起伏が現れていることから、注一揚水孔間において、比較的大きな破壊が発生し、透水性が一時的に変わる程度の空洞が形成したと推定される。またその後、注水位の変化が、[揚水孔の間隙水圧値]にまで影響を与えるまでになったことを示している。

③ 水みち形成期（動水勾配：2.8）

土砂噴出の後の急激な水位上昇と揚水による水位低下を頻繁に繰り返すようになる。揚水装置の不具合により生じた揚水孔の水位上昇の影響が、注水孔に近い[揚水孔から 37.5cm の間隙水圧値]にまで現れている。また、注水量を注水位で除した透水性指標において、これまでのパイピング進行段階では、ほぼ増減なしか、同一の注水位において細粒分の水押しに伴う目詰まりと思われる現象によってやや減少傾向が見られる程度であったものが、明瞭な増加傾向を示すようになった。この透水性指標は、ダルシー則が成立していると仮定すると、常に同じ値となる。この指標値が増加しているということは、試験対象地盤の透水性が顕著に上昇している、すなわち、2 孔間に渡る一連の粗の領域である水みちが形成され、その規模（経路断面積）も拡大傾向にあると推定される。その後、2 孔間を完全に空洞でつなぐパイピングホールが貫通し、その時点で注水を停止した。

4. 実地盤における原位置パイピング試験¹⁰⁾

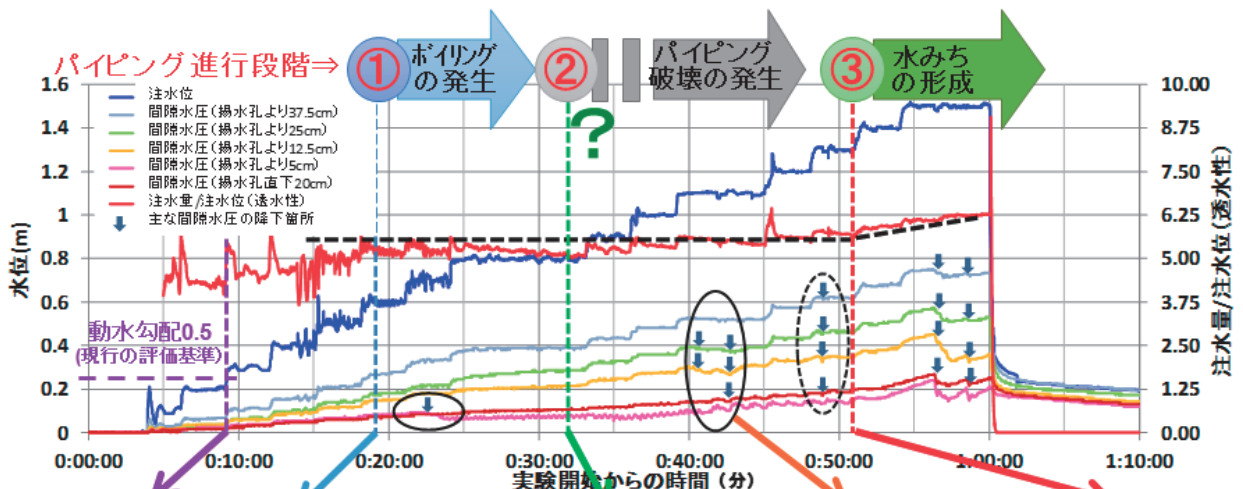
4.1 試験装置の概要

現地実験による試行錯誤を基に改良を重ね、現地地盤で施工可能な試験機を作り上げるとともに、観測機器の配置方法を確立した。開発した原位置パイピング試験の概要図及び試験状況をそれぞれ図-3、4 に示す。

原位置パイピング試験装置は、大きく分けて、注水部、揚水部、データ計測部の3つから構成される。装置の各部位の詳細を以下に示す。

(1) 注水部

注水部は、ボーリングによって施工される注水孔とその中に設置される注水試験機（図-5）、注水試験機に水を供給する流量制御装置（図-6）及び水槽からなる。注水孔のケーシング管は、試験地盤層に水を浸透させる部分にストレーナーの穴が設けられており、孔壁を維持し、ケーシング管内に土砂が流入しないように、穴を目の細かい金



パイピング進行段階	現行の評価基準	①ボイリングの発生	②パイピング破壊の発生?	パイピング空洞の拡大	③水みちの形成
動水勾配	(局所) 0.5	(平均) 1.2	(平均) 1.6	(平均) 2.2	(平均) 2.8
間隙水圧の変化	変化なし	揚水孔より5cmの値が低下し始める。	変化なし	揚水孔より25cmの値に落ち込みが認められる。	揚水孔での水位変化が、37.5cm離れた箇所にも影響。
注水量/注水位(透水性)の変化	変化なし	同左	同左	同左	増加傾向に転ずる。
孔内カメラ観察	変化なし	【19:12】孔底より小気泡が生じ、縁に細かな泡が付着し始める。濁りはなし。 	【32:10】土砂噴出により孔内水が濁り、水面上に細かな泡が集まり始める。 	【41:39】土砂噴出の後、急激な水位上昇が発生。 	【50:50】水面が細かな泡で覆われ、水位上昇と揚水による水位低下を繰り返す。 
解釈	—	少し後の揚水孔底周辺の地盤の乱れにより、水の流りに僅かな変化が発生。	この時点以降、土砂噴出⇔沈静化を断続的に繰り返し、パイピングが進行開始した可能性あり。	比較的大きな破壊が発生し、透水性が一時的に変わる程度の空洞形成が推定。	2孔間の水みちが形成され、規模の拡大が推定。

図-2 パイピング進行段階と実験結果

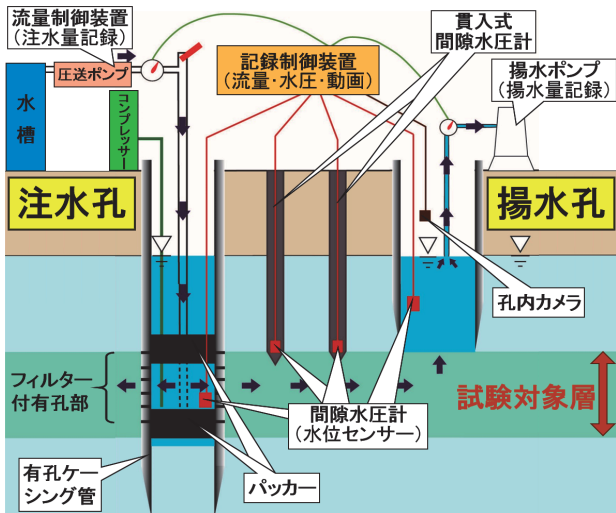


図-3 原位置パイピング試験概要図



図-4 現地試験状況



(a) ケーシング管 (フィルタ付き有孔部)



(b) ダブルパッカー式注水試験機

図-5 注水孔ケーシング管及び注水試験機

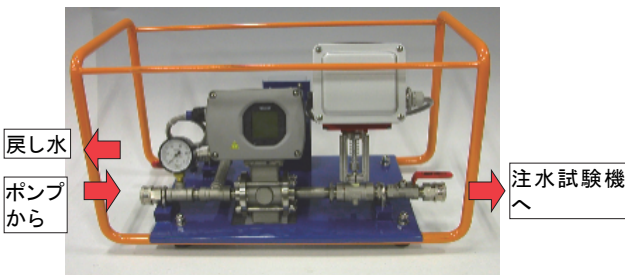


図-6 流量制御装置

属製フィルターで保護している (図-5(a)参照)。

注水試験機は、ダブルパッカー式になっており、ケーシング管の有孔部が 2 つのパッカーの間に位置するように設置される。また、注水試験の下

端部には水位センサーが内蔵されており、注水圧を計測できるようになっている。

流量制御装置は、注水圧が一定となるように自動で流量を制御する機能を有している。

(2) 揚水部

揚水部は、ケーシング管の底に試験地盤層が露出する形とし、パイピング試験の進行にともなって、土砂の吸い出しが生じ始める起点となる。また注水孔への注水により、試験箇所周辺の地下水位は上昇するが、揚水孔では自然水位 (初期水位) に保つべく揚水が行われる。このため揚水には、土砂による管の目詰まりやエア噛みが生じないように、チューブポンプを用いた。

(3) データ計測部

水位 (水圧) センサーにより、注水孔では注水圧を、揚水孔では孔内水位を計測する。また注水孔と揚水孔の間の試験区間においては、図-7 に示す貫入式の間隙水圧計により、2 孔間を補間する複数地点の間隙水圧を計測する。孔内水位及び間隙水圧値並びに注水量は、図-8 に示す記録制御装置によりデータを記録するとともに、各種計測値のほか、区間動水勾配や流量を注水圧で除した透水性指標値などの経時変化を表示パネル上で計測中に確認できる。

また揚水孔には、水面直上に孔内カメラを設置し、土砂噴出による水の濁りや細かな気泡発生の有無など、パイピングの進行状況を把握する一手段としている。

なお、貫入式間隙水圧計は、直径25mmで長さ50cmのロッドを8本まで接続でき、深度4m以浅の間隙水圧を計測できる。また、図-7のように重錘による手動の打ち込みが可能である。

4.2 作業工程

本試験法は、サンプリング試料による試験ではなく、現地の堆積構造や土粒子のかみ合わせや拘束状態を保ったまま、原位置で実際の堤防基礎地盤の水平方向の浸透状況を再現したパイピング試験であることに大きな特徴がある。実証試験により明らかとなった実施上の数多くの課題を踏まえた、できる限り地盤を乱さない原位置パイピング試験孔作成の留意点を以下に示す。

試験孔の設置にあたっては、回転掘削時の注水孔ケーシング管のフィルター部 (図-5(a)参照) への粘土分付着による目詰まりや、打撃あるいは

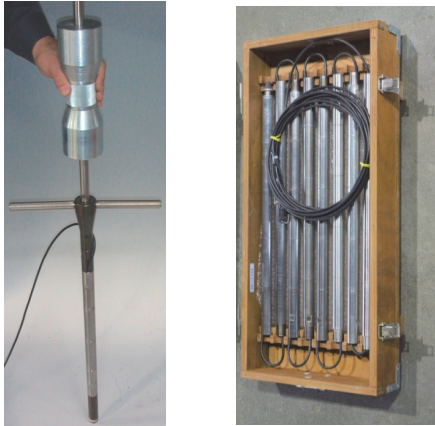


図-7 貫入式間隙水圧計 (4m)

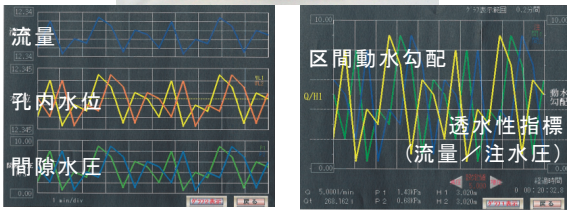


図-8 記録制御装置と表示画面

バイブレーション貫入時の振動による液状化を可能な限り回避するため、クローラー搭載型ボーリング機の油圧機構を用い、刃先付きケーシング管を静的圧入する方法を標準工法と定め、パイプロの使用は最小限に留める。また、地盤の透水性状に与える影響を少しでも抑えるために無水掘りとする。

実際にパイピングが想定される透水性の高い飽和砂質地盤でボーリング掘削を行う際には、サンプラー引き上げ時にサンプラー下端部で土質コアが即座に切断されずに、発生した負圧により孔底周辺の土砂が孔内に引き込まれ、地盤が乱されることがある。その防止として、ケーシング掘りでケーシング管を先行挿入した後に、管内の土砂を管底に 50cm 程度残るようにサンプラーで採取除去することとした。その結果、土砂自体の重量と土砂と管との摩擦力の和によって、ケーシング管内の土砂移動を抑制することができる。

また、揚水孔ではケーシング管内の土砂を管底まで全て取り除く必要があるが、地下水位下の緩い砂質地盤では、サンプラーによる土砂除去を行

おうとすると、上記のように地盤が乱される。そこでサンプラーによる土砂除去に代わる工法として、孔底に土砂が残った状態で孔内注水後に攪拌し、泥水化させてから排水することで、管内下部の土砂を除去しながら孔内洗浄を兼ねる合理的な工法を開発した。しかしながら本工法をもってしても、時間の経過とともに生じる揚水孔底の地盤隆起やボイリングは避けられないため、施工後すぐに試験を開始する。

注水孔削孔時には、有孔部を設けたケーシング管を使用する。有孔部には目開き $150\mu\text{m}$ の金網を貼り付けることで、孔壁を最大限保持しながら地盤への注水が可能である。有孔部の先端は 50cm の無孔部とし、上述のようにケーシング管を先行挿入し、先端部に土砂を残しながら掘削する。そのことで、ストレーナー部の地質をサンプラーで引き上げて確認することができる。地質を確認しながらストレーナー位置を微調整することで、狙った層へのピンポイントの注水が可能となる。土質性状を直接確認した孔を注水孔とすることで、層相の側方変化が激しい河川堆積物においても計画通りの注水試験が行えるだけでなく、土質性状確認のための別孔は必要なくなるため、削孔による地盤の乱れが少しでも抑えられる。

4.3 パイピング抵抗性の評価方法

図-2 で示したように、原位置パイピング試験において観測される各種情報からパイピング進行段階を推定できることから、その段階に至ったときの動水勾配値を、パイピング抵抗性の評価指標値とする方法を提案する。評価に必要な観測項目、試験方法、進行段階の確認方法、及びパイピング特性の評価方法を以下にとりまとめる。

(1) 観測項目

- 注水孔水位、揚水孔水位、注水量、揚水量
- 2 孔間に設置する貫入式間隙水圧計の値
- 揚水孔水面のカメラ観察

(2) 試験方法

- ① ボーリングを 2 孔掘削
- ② 2 孔で注/揚水することで、水平浸透を再現
- ③ 注水孔では注水位を段階的に上昇
- ④ 揚水孔は揚水により水位一定に管理
- ⑤ 注水量、地盤の間隙水圧の測定、揚水孔内カメラ観察により、パイピングの進行状況を判定

- ⑥ パイピングの進行段階ごとの動水勾配値を、地盤のパイピング抵抗性の評価指標とする
- (3) 進行段階の確認方法
- ① ボイリングの発生：泡の発生の観察と揚水孔近傍の間隙水圧の低下
- ② パイピング破壊の発生：水の濁りや土砂噴出の観察
- ③ 水みちの形成：透水性指標の増加の確認
- (4) パイピング特性の評価
- ②ないし③時点の動水勾配値により、パイピング抵抗性の評価が可能

5. まとめ

河川堤防基礎地盤の浸透安全性評価における対策の優先順位付けを目的に、飽和砂質地盤を対象とした原位置パイピング試験方法を考案した。そして実際に現地で実験可能な装置を開発するとともにその実施方法、評価方法を提案した。

なおこれらの試験方法に関して 3 件の特許の出願を行った。また今後、パイピングの進行段階の把握について、現地実験により再現性の確認を行うとともに、これらの成果を「河川堤防基礎地盤のパイピング特性調査マニュアル」（仮称）として公表する予定である。

謝 辞

特許技術（特開2016-217043）の開発にあたっては、元土木研究所研究員（現：国土交通省関東地方整備局下館河川事務所）吉田直人氏、元土木研究所交流研究員（現：株式会社地圏総合コンサルタント）中川清森氏のご協力を得ました。また、現地実験に際しては国土交通省下館河川国道事務所のご協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 古賀雷四郎、内田一郎：遠賀川の堤防決壊及び漏水について、土と基礎、Vol.2、No.4、pp.4～7、1954
- 2) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書、国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所ホームページ、2013、http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01plan_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf
- 3) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針、p.6、国土交通省ホームページ、https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/gijyutukaihatu/pdf/teibou_sekkei.pdf
- 4) 土木研究所地質チーム：河川堤防の基礎地盤の透水特性調査手法に関する研究、土木研究所平成22年度重点プロジェクト研究報告書、24p.、土木研究所ホームページ、2011、<http://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2010/pdf/pro-2-3.pdf>
- 5) 中川清森、吉田直人、品川俊介、佐々木靖人：河川堤防基礎地盤のパイピング進行に対する抵抗性に関する室内実験、第45回地盤工学会研究発表会発表講演集、pp.889～890、2010
- 6) 中川清森、品川俊介、吉田直人、日外勝仁、佐々木靖人：河川堤防基礎地盤のパイピング抵抗性に関する室内実験（その2）、第46回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.999～1000、2011
- 7) 菅原雄、日外勝仁、品川俊介、佐々木靖人：X線CTスキャナを用いたパイピング進行過程の観察、第43回土木学会関東支部技術研究発表会論文集、II-82、2016
- 8) 品川俊介、日外勝仁、佐々木靖人：土層強度検査棒による河川堤防基礎地盤の高密度サウンディング調査、第1回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム委員会報告・講演概要集、土木学会、pp.64～65、2013
- 9) 日外勝仁、品川俊介、佐々木靖人：河川堤防基礎地盤のパイピング抵抗性評価のための原位置パイピング試験方法の開発、第43回土木学会関東支部技術研究発表会論文集、II-81、2016
- 10) 日外勝仁、品川俊介、佐々木靖人：河川堤防基礎地盤を対象とした原位置パイピング試験方法の開発、第51回地盤工学研究発表会講演集、pp.947～948、2016

日外勝仁



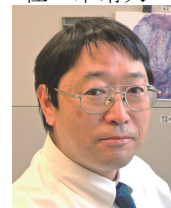
研究当時 土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム主任研究員、現 土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム主任研究員、博（工）
Dr. Katsuhito AGUI

品川俊介



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 主任研究員
Shunsuke SHINAGAWA

佐々木靖人



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 上席研究員
Yasuhito SASAKI