

河川堤防基礎地盤の原位置パイピング特性調査法の実用化研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木 靖人、品川 俊介、
日外 勝仁、菅原 雄

【要旨】

河川堤防基礎地盤におけるパイピング特性について、空洞の拡大進展のしやすさをも考慮に入れた新たな評価方法の開発を目的に、2本のボーリング孔と注水装置からなる「原位置パイピング試験法」を開発し、その試験手順を手引きとしてとりまとめた。透水性指標（注水量/注水圧）や複数地点の間隙水圧値の変化から、パイピング進行段階を推定し、その段階毎の動水勾配によりパイピング抵抗性の評価が可能であることを示した。また、浸透によるパイピング空洞の拡大メカニズムを把握するために、模型パイピング実験中の土層地盤の X 線 CT スキャンによる可視化を行い、浸透に伴って局所的な目詰まりや破壊が移動しながら繰り返すことでパイピングが進行するというプロセスを観察により明らかにした。

キーワード：パイピング、原位置試験、河川堤防基礎地盤、動水勾配、水みち

1. はじめに

豪雨時の河川被災の重大な事象に破堤が挙げられる。破堤は、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害¹⁾でも見られた越水や、堤体浸食、堤体浸透などの堤体の損傷に起因したものの他、堤体基礎地盤の浸透・パイピングによる堤体の沈下・陥没が原因とみられる事例²⁾、地震による基礎地盤や堤体の液状化などが原因と考えられるものがある。本研究では特に、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、堤防のり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。

しかし、パイピングは地盤下で進行する現象で、直接的な観測や計測が難しいこともあり、ばらつきのある自然地盤における発生及び進行のメカニズムについては、十分に解明されていない。

近年では、粒子法などによって、土粒子のかみ合わせとその間隙を流れる浸透流を解くことでパイピングの評価を行おうとする研究がなされ始めている。しかしながら、これらの研究が実用的な段階に至るまでには時間がかかるものと思われる。

土木研究所では先行研究である「河川堤防の基礎地盤の透水特性調査手法に関する研究」(H19～22)において、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も逐次進行破壊型と一気貫通破壊型の 2 つがあること⁴⁾などを明らかにしてきた。また、土粒子の配列状況等を維持した試料のサンプリング、あるいは状況を同じく再現した再調整試料を準備することが極めて難しく、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現位置試験方法の開発に取り組んできた。

本研究は、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とし、先行研究の成果を土台に、原位置パイピング試験方法の開発を目指したものである。

先行研究において製作した原位置パイピング試験装置の実用化に向けた装置改良と適用検証等を行った。また、パイピング試験中の各段階の模型土層をX線CTスキャンによって観察し、パイピング進行メカニズムの把握を行った⁷⁾。さらに、その結果を踏まえつつ、土粒子が動き始める段階ではなく、地盤中の細粒分の移動にともなう空洞の拡大のし易さ自体をパイピング抵抗性として原位置で直接評価できる試験方法の開発を行った^{8), 9)}。

2. 研究方法

2.1 ピット地盤におけるパイピング試験

2.1.1 試験概要

本研究で考案した原位置パイピング試験は、図-1に示すように、注水と揚水を2孔で行うクロスホール法である。本研究では、パイピング試験装置のプロトタイプを製作し、模擬地盤を作成したピット地盤において試行実験を重ねた後、河川堤防基礎地盤において現地実証試験を行いながら、試験装置の改良や施工手順及び評価指標の検討を行ってきた。

本試験法の概要は、注水孔から注水し、一定距離離れた揚水孔から揚水することで2孔間に水頭差を生じさせ、浸透・パイピングにより実験地盤中に土砂

の移動を誘発し、最終的に水みちとなって2孔間が貫通するまでの状況から、試験対象層の2孔間のパイピング抵抗性を評価するものである。

試験においては、注水圧を階段波状に上昇させ、2孔及びその間に打設する間隙水圧計測箇所における各点間平均動水勾配値の変化と、揚水孔に設置した孔内カメラによる土砂の噴出状況等を総合的に評価することにより、動水勾配の増加に伴って土砂の吸出しによる空洞が水の出口側から供給側に向かって拡大していくというパイピング進行過程の把握を行うとともに、実験地盤における平均動水勾配との関係解明を試みた。

2.1.2 試験条件

試験条件としては、注水位が一定となるように注水量を自動制御して注水孔から注水を行い、1ステージ3分として注水位を10cm刻みで上昇させた。なお、注水量や間隙水圧値、揚水孔内カメラ映像に変化が認められた場合は、1ステージ単位で同じ注水位を継続し、経過を観察した。

本試験法の特徴としては、注水と揚水を同時に同じ深度で行い、注水と揚水が行われる2点を結ぶ線分上に浸透水の最大量が流れるようにすることで、その区間でのパイピング発生を促すものである。また、自然の堆積状態の土粒子配列構造及び拘束条件を維持したまま、現実の堤防直下と同じ水平方向の浸透現象を評価できる点も、採取試料による室内再現実験に比べ、本原位置試験法の利点と考えられる。

ピット試験では、最大粒径 $850\mu\text{m}$ に調整した河砂を締固め度90%で締め固めた砂質地盤層に水平に注水しつつ、孔底が同深度となるように、注水孔から50cm離れた箇所に設置した、揚水孔の水位が一定となるように揚水を行った。注水した水が水平に浸透するように、注水孔の仕上げとしては、下部側面に水の出入りする孔を設けた有底のケーシング管を立て込み、揚水孔では、底のないケーシング管

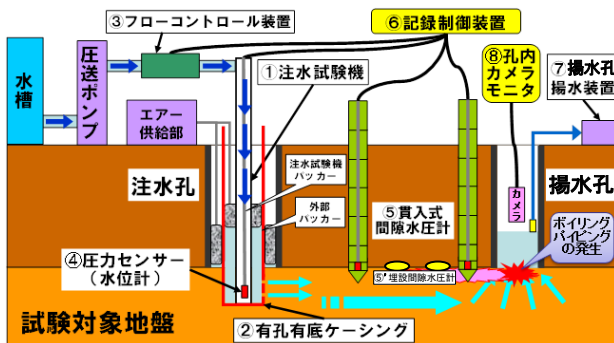


図-1 ピット地盤での原位置パイピング試験イメージ図

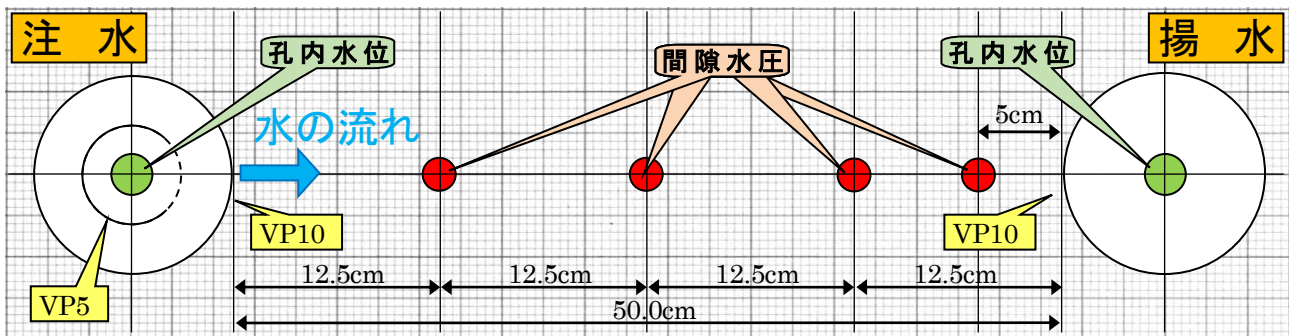


図-2 実験配置図 (試験孔及び間隙水圧計)

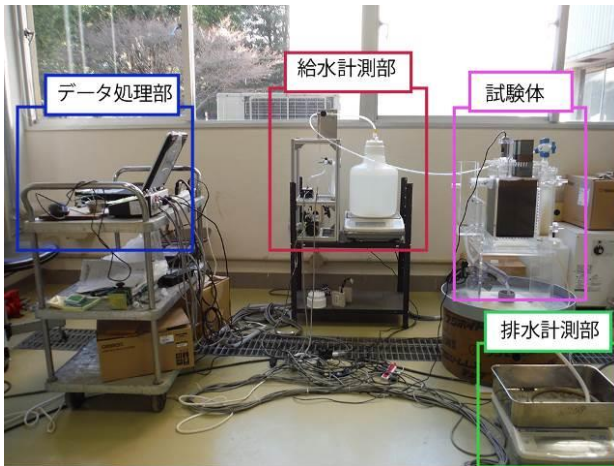


図-3 模型パイピング実験装置概要

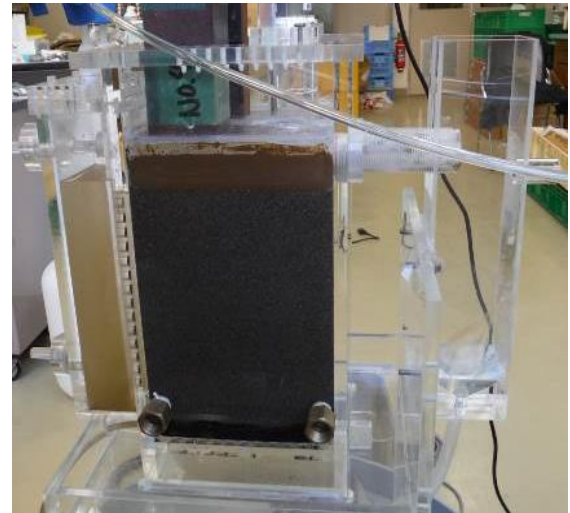


図-5 実験地盤の飽和浸水状況

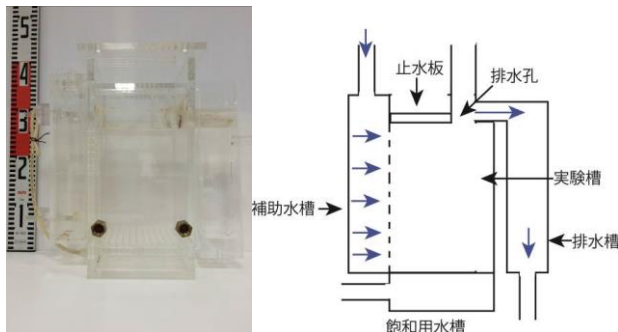


図-4 模型実験槽及び試験体概要図

とした。試験深度において、複数の間隙水圧計を設置し、2孔間における局所的な透水性状の経時変化から、パイピング進行段階の推定を行った。本ピット試験では、地盤製作時に小型の間隙水圧計を埋設したが、実際の現地試験においては、2.3 で後述する貫入式間隙水圧計（ $\phi 25\text{mm}$ ）を地盤に打込むことで、複数地点の間隙水圧を把握する。本ピット試験での間隙水圧計及び注水孔/揚水孔配置は図-2 に示すとおりである。間隙水圧計は、注水/揚水の線分上に配置するものとし、2孔間を4等分する位置に3箇所、パイピング空洞が発生し成長し始めると想定された揚水孔近傍の1箇所を追加した、計4箇所とした。

本試験法は、河川水位が高く大きな動水勾配が発生している時の河川堤防基礎地盤の評価を想定しているため、本ピット試験では、粘性土層（難透水層）の下位に飽和した砂質地盤（透水層）が位置する二層構造とし、その層境の位置を試験深度として、注水口と揚水孔底、及び間隙水圧計を配置した。また、試験深度より浅いところにある地下水位を初期水位として、10cm 刻みで注水位を上昇させていき、パイピングにより注水孔と揚水孔が繋がった時点を試験終了とした。

2.2 模型パイピング実験の X 線 CT スキャン観察

2.2.1 実験目的

室内模型地盤への給水試験状況を逐次 X 線 CT による撮影を繰り返すことで、通常であれば目視することの出来ないパイピングに伴って生じる空洞の成長過程を可視化し、パイピングの進行メカニズムを把握することを目的とした。

2.2.2 実験装置概要

装置は、給水量を計量しつつ任意の給水圧で試験体へ給水する給水計測部、パイピング現象を発現させる試験体、試験体から流出する土砂及び排水の量と排水水の濁度を計測する排水計測部、それらの装置から得られる情報を収集し機器の動作を制御するデータ処理部から構成される（図-3 参照）。

装置の各部位の詳細を以下に示す。

(1) 給水計測部

給水計測部は試験体へ水を任意の水圧で供給する機能を有する部位である。給水圧は空気ポンプ（IBS 製 FD-5）と水タンクの間に設置する大気との差圧を計測する微差圧計（横河電気製 JP208）で監視・管理した。また測定した圧力の値はデータロガー（オムロン製 ZR-RX45RA）で収録した。この際の測定間隔は 0.2 秒とした。

給水量の計測は水タンク重量の減少量から求めた。この際に水タンク重量は電子天秤（エー・アンド・デイ製 GX-30K）で取得した。また得られたデータをデータ処理部のパソコンに転送したうえで、表示ソフトウェア（エー・アンド・デイ製 WinCT RS-Weight Ver.5.10）を用いて実験中に監視した。

(2) 試験体

試験体は、模型地盤（土砂）を充填する実験槽（容

量 4.5L、重量 6.5kg、W150mm×D150mm×H200mm)、実験槽へ水を飽和させるための下部の飽和用水槽、水飽和後に水圧をかけて水を注入する側部の補助水槽、実験槽からの排水を受け排水計測部へと導く排水槽から構成されている(図-4、図-5参照)。

実験槽と補助水槽との仕切り板には、幅 30mm、高さ 170mm の範囲で有孔のストレーナ区間を設け、給水部とした。実験地盤にパイピングを発生させる弱点箇所として、実験地盤上部の亚克力製止水板に $\phi 50\text{mm}$ の排水孔を設けた。さらに給水部と排水孔との接点間隔は 100mm とした。

飽和用水槽は実験槽の下部に配置し、実験槽との境界には水が容易に浸透出来るよう不織布と支えとなる通水板(多数の穴が開いた板)を具備させている。補助水槽は実験槽の正面左側に配置し、同じく実験槽との境界には水が容易に浸透出来るように不織布と支えとなる通水板(多数の穴が開いた板)を具備させている。実験槽の排水側上部にはカメラ(サンコー製 Dino-Lite Premier M polarizer)を設置し、土砂の流出や水の動きを動画撮影ができるようにした。また、撮影した映像は表示ソフトウェア(サンコー製 DinoCapture2.0)により、データ処理部のパソコンでリアルタイム観察した。実験槽の排水側には、排水を受け排水計測部へと導く排水槽を設置した。

(3) 排水計測部

排水計測部は、試験体から流出した排水をアルミ容器に受け、排水に含まれる土砂重量を連続して測定する部位である。この際、アルミ容器の重量の変化つまり排水量の測定は電子天秤(エー・アンド・デイ製 GX-10K)を用いた。さらに給水量の変化と同じようにデータはデータ処理部のパソコンに転送し、表示ソフトウェア(エー・アンド・デイ製 WinCT RS-Weight Ver.5.10)を用いて実験中に監視した。

(4) データ処理部

データ処理部は以下の機能を持つ。

- 給水計測部に設置の微差圧計データ収集・表示
- 給水計測部に設置の計量器データ収集
- 試験体排水孔上部設置のカメラでの動画撮影
- 排水計測部に設置の計量器データ収集

2.2.3 モデル地盤条件

- ① 実験槽の飽和用水槽側の底面と補助水槽側の側面には、ポリエチレン不織布(繊維径 $18\mu\text{m}$)を土砂吸い出し防止フィルタとして張り付けた。
- ② 実験地盤層の材料としては、川砂を細粒分含有

率 $F_c=5\%$ 、最大粒径が $850\mu\text{m}$ になるように粒度調整したものを用いた。また、試料の締固め度は 85%程度として 5cm 毎に段階的に製作し、全体の試験層厚を 15cm とした。

- ③ 川砂の上位には粘性土を層厚 5cm 程度で敷設した。下層の実験地盤層とのなじみがよくなるように適度に締固めを行った。また排水孔直下にあたる粘性土は除去した。
- ④ 川砂の上位には亚克力製の止水板を設置した。この止水板と試験体本体の亚克力板との境界にはシリコンシーラントを詰め、浮き上がり防止のために 12kg 程度の重しを載せた。
- ⑤ 実験地盤は飽和用水槽と飽和用メスシリンダーをチューブでつなぎ、メスシリンダーに水を追加することで飽和させた。実験地盤槽を壊さないように一時間程度かけて水の追加を行った。完成したモデル地盤を図-5 に示す。

2.2.4 実験手法

試験体の X 線 CT 撮影とモデル地盤を用いた透水試験を連続して 10 回繰り返した。当初の実験計画では、注水を継続した状態の試験体を定期的に X 線 CT 撮影する予定であったが、CT 画像構築に必要な千枚以上の画像撮影には時間がかかりすぎ、その間の試験体の状態を固定するのは極めて困難であった。そのため、X 線 CT 撮影を行う度に試験体の水を落とし、不飽和な状態で撮影を行った後に透水試験を再開することとし、計 10 回の試験を行った。そのときの実験条件を以下に示す。

(1) モデル地盤調整

試験体の下部にある飽和用水槽から水を注入し試料を飽和状態にした。この際に試料を破壊しないように 1 時間程度かけゆっくりと注水した。透水試験終了後 30 分程度かけて水抜きを行った。また X 線 CT スキャナによる撮影終了後、試験体を同じく 1 時間程度かけて飽和状態に戻し、透水試験を再開した。

(2) X 線 CT スキャン撮影

1 回の透水試験ごとに水抜きを行い、その試験体を X 線撮影した上で、CT 画像を構築した。X 線 CT にはニコンメトロロジー製 XT H320LC を使い、画像解析にはボリュウムグラフィックス製 VGStudio MAX2.2 を用いた。撮影は 180kV、 $400\mu\text{A}$ の条件で行い、アルミフィルタ 0.5mm を用いた。

(3) 注水圧

試験体への注水にあたっては、実験地盤を一気に

壊してしまわないように、レギュレータを調整してポンプ圧 3KPa を 5 分かけた後にさらに 5KPa を 1 分かける、という 2 段階の昇圧を行った。

2. 3 原位置パイピング試験装置概要

現地地盤における実証試験の結果を基に試験機を改良するとともに、観測機器の配置方法を確立した。その結果、本試験機により人工的にパイピング現象を発生させ、そのときの地盤状況を各種センサによりモニタリングできる試験機となった。

前節のピット試験で用いた試験機からの最も大きな改良点は、注水孔の構造である。管周辺からの漏水防止のために二重管構造としていた注水孔を、掘削及び鋼管設置における地盤の乱れを最小限に抑えるため単管構造に変更した。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-6、図-7 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

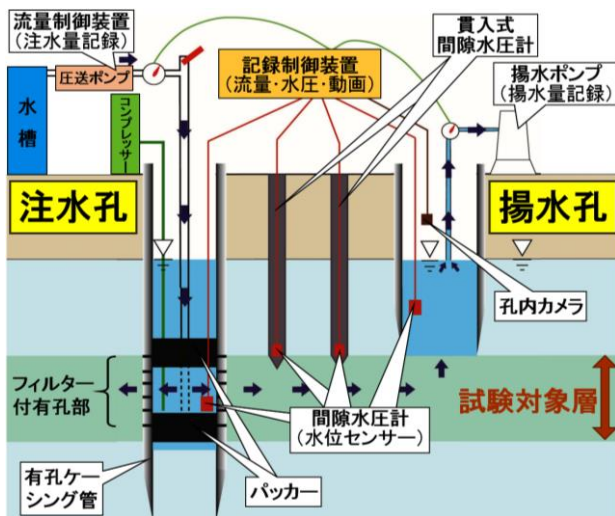


図-6 原位置パイピング試験概要図



図-7 現地試験状況

注水部は、図-8、図-9、図-10 に示すとおり、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と、注水試験機に水を供給する流量制御装置及び水槽からなる。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、穴を目の細かい金属製フィルタで保護している (図-8(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、注水試験機の下端部には水位センサが内蔵されており、注水圧を計測できるようにになっている。



(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

水位センサ内蔵



(c) コンプレッサ

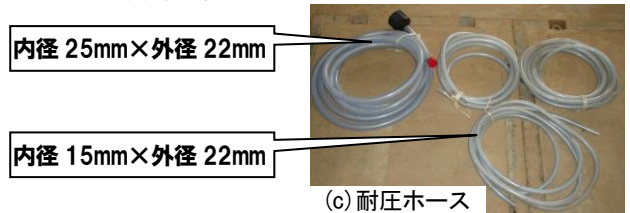
図-8 注水孔ケーシング管及び注水試験機ほか



(a) 簡易水槽



(b) 送水ポンプ



(c) 耐圧ホース

図-9 簡易水槽及び送水ポンプ



図-10 流量制御装置

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なし、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部位である。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ことになるが、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。このため揚水にあたって、ポンプには、土砂の混じった泥水を孔内で水位一定となるように汲み上げ続けられる機能が求められる。そこで本試験においては、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。なお、揚水を行う経路の一部は透明な素材とし、地上部において排水の濁りを目視できる仕様とした。

(3) データ計測部

水位（水圧）センサにより、注水孔では注水圧を、揚水孔では孔内水位を計測している。また、注水孔と揚水孔の間試験区間においては、図-11 に示す貫入式の間隙水圧計により、2孔間を補間する目的で複数地点の間隙水圧を計測している。孔内水位及び間隙水圧値並びに注水量については、図-12 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確認できる仕様となっている。

また、揚水孔においては、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から、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、 $\phi 25\text{mm}$ 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、先端に内蔵された小型間隙水圧計は耐衝撃仕様であり、図-11 の様に重錘による手動の打ち込みが可能となっている。

3. 研究結果

3. 1 ピット地盤におけるパイピング試験結果

2 孔間の平均動水勾配の値がパイピング進行段階によってどう変わるのか、また、注水量を注水位で除した透水性を表す指標値が増加に転じた時点の動水勾配値や、その増加割合とパイピングホール貫通に至るまでに要する時間から、試験対象地盤のパイピングのしやすさ（空洞の発生しやすさと水みちの

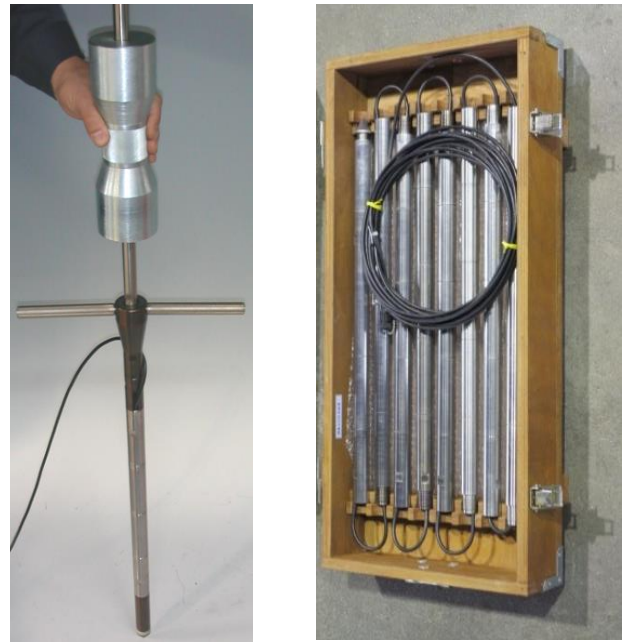


図-11 貫入式間隙水圧計（4m）



流量

孔内水位

間隙水圧

区間動水勾配

(流量／注水圧)

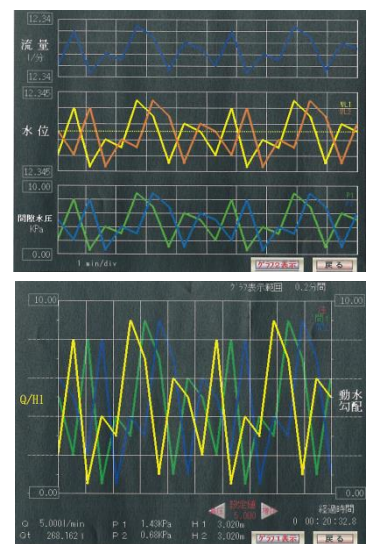


図-12 記録制御装置と表示画面

拡大しやすさ) を評価するというのが、開発した原位置パイピング試験方法の特徴である。

実大スケールのピット地盤において原位置パイピング試験装置を用いた本試験は、実際のパイピング現象がどのような動水勾配で進行するのかを把握しようとするものである。

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-13(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、

- ボイリングの発生期
- パイピング破壊の発生～パイピング空洞の拡大期
- 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] (透水性指標) 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-13(下表)に示す。以下に実験の時系列に沿って、観測事象についての考察を述べる。

① 現行の評価基準 (動水勾配 : 0.5)

計測データ及び観察結果に目立った変化は認められない。

② ボイリングの発生期 (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

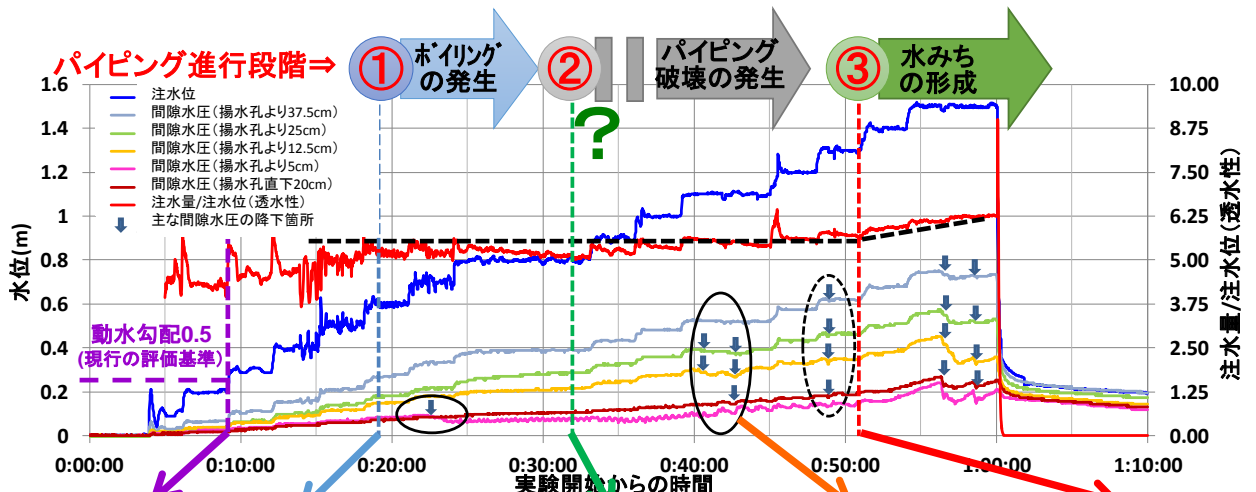
と思われる空気が小さな気泡となって孔底から上昇してきたことから、ボイリングが発生し、揚水孔底付近の地盤で乱れが発生し始めたものと判断される。その後3分経過後に、[揚水孔から5cmの間隙水圧値]が低下し始め、[揚水孔の間隙水圧値]にほぼ一致したところで低下が収まった。このことは、揚水孔近傍の5cm区間で地盤が乱され、ほぼ連続する粗の領域となったことで、間隙水圧値も一致したものと考えられる。

②-1 パイピング破壊の発生期 (動水勾配 : 1.6)

揚水孔内の観察において、土砂噴出による孔内水が濁り始めが確認された。間隙水圧値には顕著な変化は認められない。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、土砂の噴出が明瞭に確認された時点以降で、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)

揚水孔内の観察において、土砂噴出の後、急激な水位上昇が発生し、揚水によりその後緩やかに水位







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て、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-13 パイピング進行段階と実験結果

が低下する結果となった。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様になったことから、土砂噴出時に揚水孔底付近が閉塞したことを示唆している。[揚水孔から 12.5cm や 25.0cm 離れた間隙水圧値]にも同傾向の起伏が現れていることから、注/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）

揚水孔内の観察において、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。揚水装置の目詰まりにより生じた揚水孔の水位上昇の影響が、注水側の[揚水孔から 37.5cm 離れた間隙水圧値]にまで現れている。また、注水量を注水位で除した透水性を表す指標において、これまでのパイピング進行段階では、ほぼ増減なし、同一ステージ内において細粒分の水押しに伴う目詰まり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）も拡大傾向にある状況が推定される。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たため、その時点で注水を停止した。

3.2 模型パイピング実験結果

3.1 で示したピット地盤でのパイピング試験結果では、孔内カメラ観察と地盤中に埋設した間隙水圧

計の値の変化より、パイピングの進行過程を推定したが、より直接的な観測によってパイピング過程を把握する目的で、X線 CT スキャナによるパイピング実験中の模型地盤の可視化を試みた。その結果、土粒子の移動とパイピング空洞の形成過程が把握でき、水みちが貫通するまでの評価すべきパイピング進行段階毎の具体的な局所地盤状況を明らかにすることができた。所見を以下に示す。

- パイピングの空洞は水の出口から入口に向かって拡大していく。
- 空洞とおぼしき「粗領域」が、入口と出口でつながると、通水量が激増する。
- 局所的な目詰まりは、発生と破壊を繰り返しながら移動し、最終的に貫通空洞を形成する。

3.2.1 圧力変化

10回の実験における注水圧状況を図-14に示す。

3KPa：レギュレータで調整した後、規定値には1回目の実験では約130秒、2回目以降の実験では80秒かけて到達した。

5KPa：レギュレータで調整した後、約20秒～30秒で規定値に到達した。

3.2.2 給水量の変化

実験を経る毎に積算給水量の増加を図-15に示したものである。実験を繰り返すことで、積算給水量の増加が見て取れる。また実験6と10で多量の給水が生じたのがわかる。

3.2.3 排水量の変化

実験を経る毎に積算排水量の増加を図-15に示したものである。実験を繰り返すことで、積算排水量の増加が見て取れる。排水量が給水量よりも少ないことは装置の構造上全量回収出来なかったことに起因する。また、実験6と10において多量の排水が生じたのがわかる。

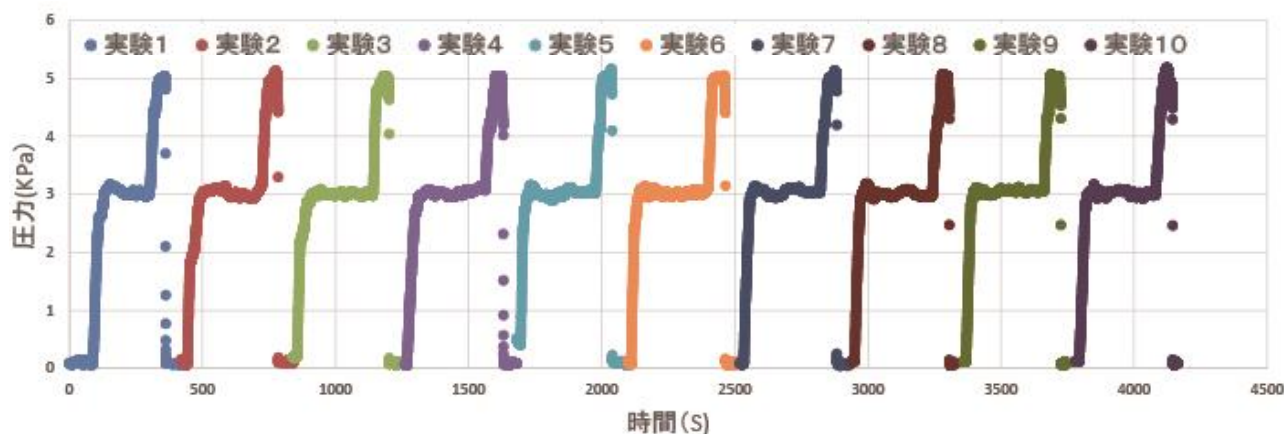


図-14 圧力変化

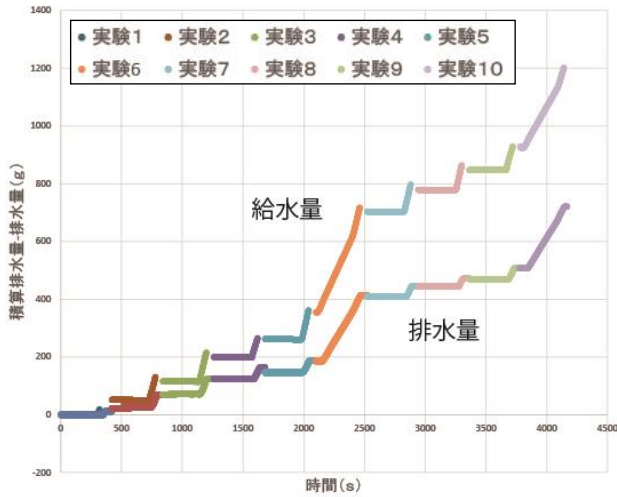


図-15 積算給水量・排水量の時間変化

3.2.4 排水孔部の観察結果 (図-16 参照)

実験 1~5、7~9：ポンプ圧を 3KPa にした際は給水チューブに水の動きはなく、排水孔で噴砂及び流水は観察されなかった。これらはポンプ

圧を 5KPa にした後に排水孔の給水部側部分に気泡と砂粒子の動きが観察された。また実験終了間際には激しい泡と濁った水が排水の出口方向へ吸い出される様子が観察された。

実験 6：ポンプ圧を 3KPa にした際は給水チューブ内で水の動きが観察され、排水孔で発泡と土粒子及び水の移動・流出が観察された。この際の水は濁りが少なかった。さらにポンプ圧を 5KPa にした後に排水孔の給水部側部分に激しい気泡と砂粒子の動きが観察された。特に実験終了間際には激しい気泡と濁った水が排水の出口方向へ吸い出される様子が観察された。

実験 10：ポンプ圧を 3KPa にした際は給水チューブ内で水の動きが観察され、排水孔で気泡と土粒子及び水の移動・流出が観察された。この際の水は濁りが少なかった。さらにポンプ圧を 5KPa にした後も弱い気泡と僅かな粒子の移動、水の流れが観察された。これは実験終了間際も

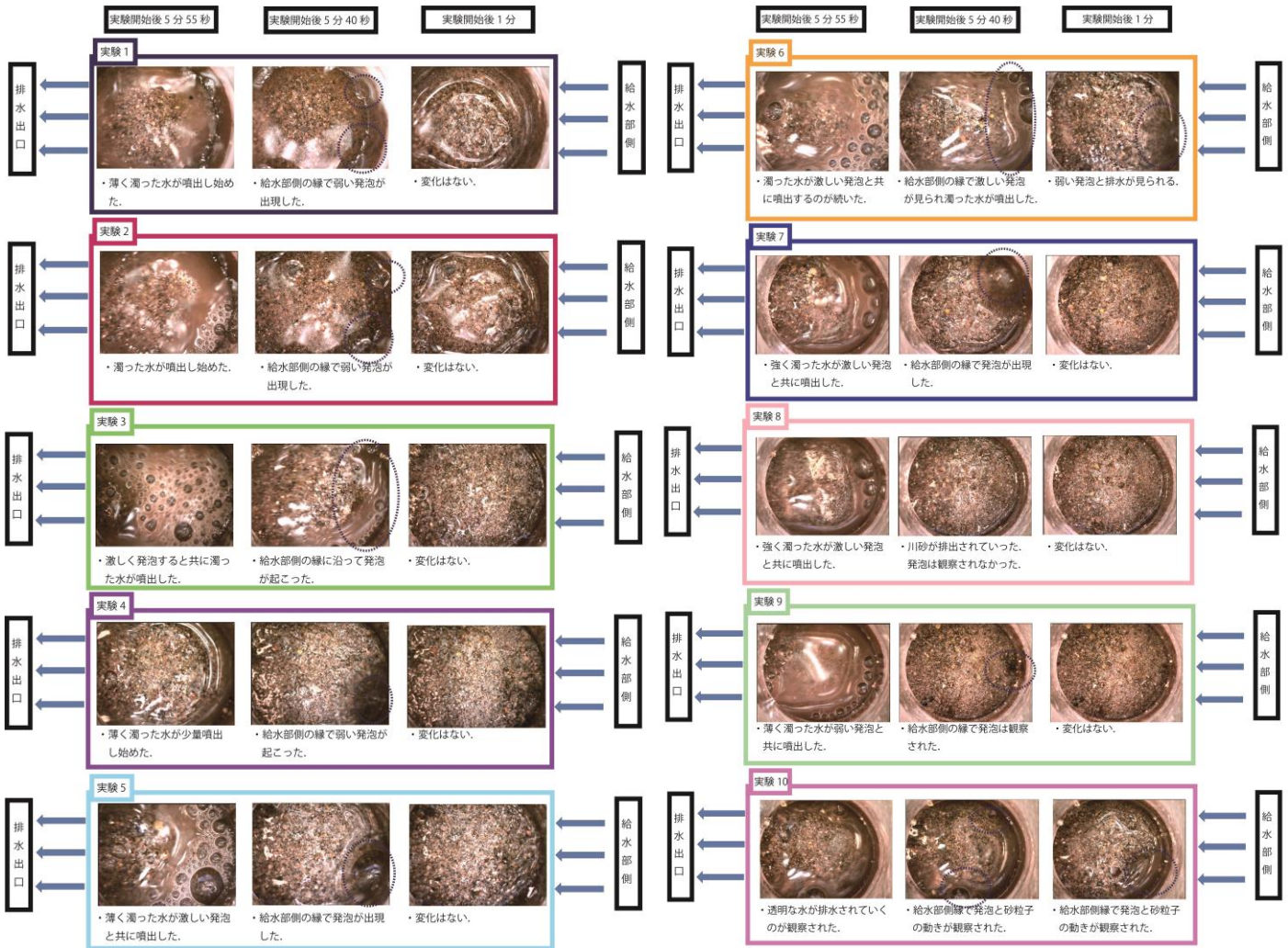


図-16 排水孔直上からの観察結果

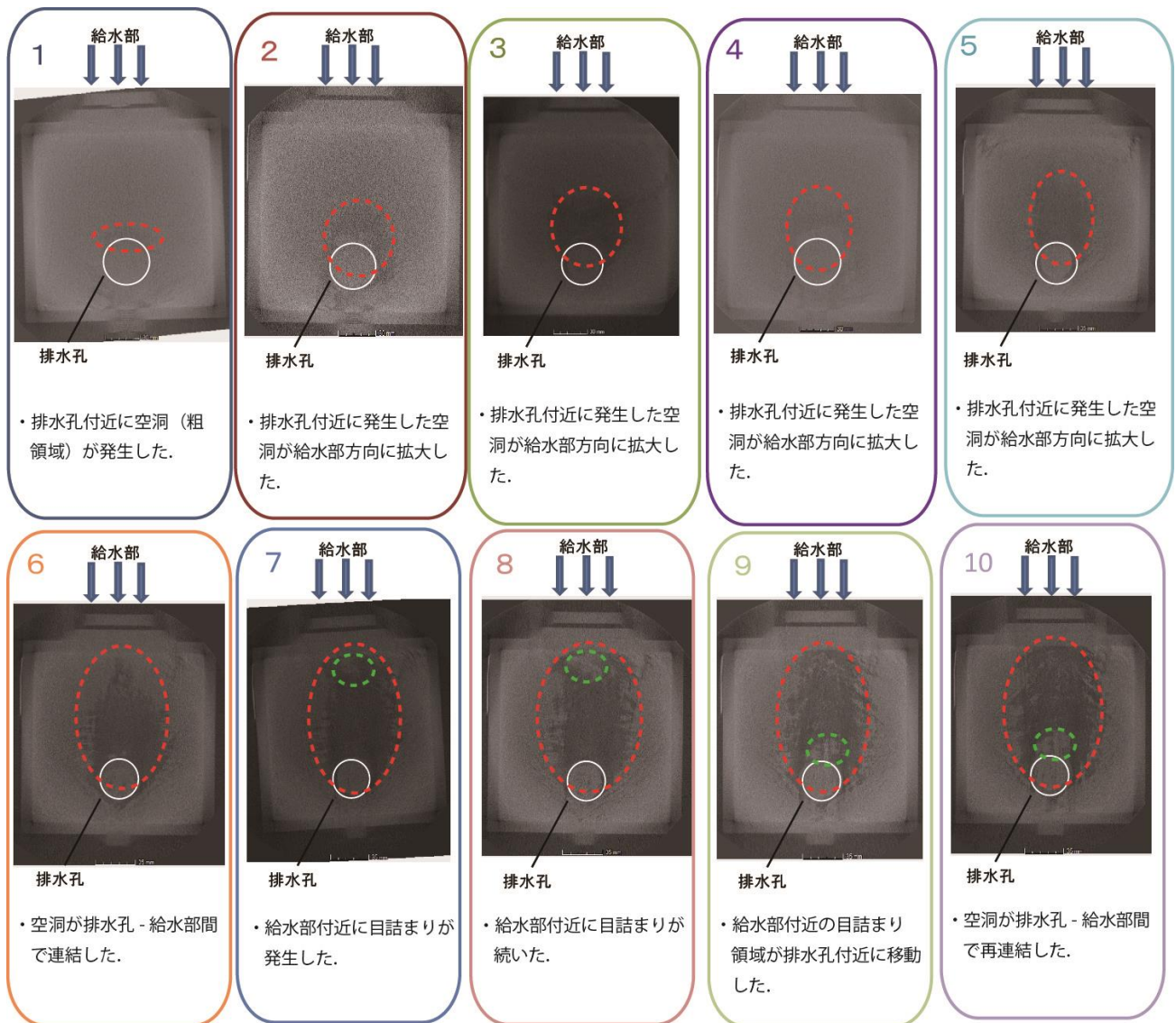


図-17 X線CT画像

続いた。流れていく水はほぼ透明であった。

3.2.5 X線CT スキャナによる観察結果

実験 1～10 をそれぞれ行った後に X線 CT スキャナで試験体を撮影した。観察の結果、土砂が流されて形成された空洞は必ず粘性土と川砂境界に生じていた。このため、構築した CT 像から境界部の断面図を切り出した（図-17 参照）。以下に実験ごとの所見を示す。

実験 1: 排水孔周辺に線状と円状の暗色の部位が存在している。

実験 2: 排水孔周辺に線状と円状の暗色の部位が存在している。また暗色の部位は実験 1 よりも給水孔側へ大きくなっている。

実験 3: 排水孔周辺に線状と円状の暗色の部位が存在している。暗色の部位は実験 2 よりもさらに

給水部側へ大きくなっている。

実験 4: 排水孔周辺に線状と円状の暗色の部位が存在している。暗色の部位は実験 3 と大きさは変わらない。線状の暗色の部位が排水孔付近で目立つ。

実験 5: 排水孔周辺に線状と円状の暗色の部位が存在している。暗色の部位は実験 4 に比べて給水部側へ大きく拡大している。

実験 6: 排水孔周辺に線状と円状の暗色の部位が存在している。暗色の部位が給水部のストレーナ壁まで到達した。

実験 7: 排水孔と給水部間に暗色の部位が存在する。給水孔側に灰色の部位が存在する。

実験 8: 実験 7 と同じ状態が続く。

実験 9: 排水孔と給水部の間に暗色の部位が存在す

る。実験 7、8 に比べれば小さいが給水部側に灰色の部位が存在する。実験 8 で存在しなかった白色部が排水孔付近に存在する。

実験 10：排水孔と給水部の間に暗色の部位が存在する。実験 9 に比べて給水孔付近の暗色の部位の幅が大きくなっている。実験 7、8、9 で存在した給水部側の灰色の部位が消失している。実験 9 と同じく白色部が排水孔付近に存在する。

3.2.6 考察

給水量、排水量、排水孔直上の観察と X 線 CT 撮影の結果について以下に考察する。

- 実験 1～10 終了後に得られた CT 像断面図は、排水孔側から給水部側へ暗色の部位が延びていく様子を捉えている。このことは、空洞が排水孔側から給水孔側へ伸張していったと解釈される。
- 実験 1～5 終了後に得られた CT 像断面図は、排水孔側の川砂が排出され、空洞を形成したことを示す。さらに断面図は給水部-排水孔間が連続していないことを示すため、排水孔で観察された濃い濁水と土の噴出は排水孔付近の川砂が吸い出されていることを示す現象と考えられる。
- 実験 6 終了後に得られた CT 像断面図は給水部と排水孔の間で空洞が連結したことを示している。実験 1～5 に比べて給水量及び排水量が増大したことは、給水部-排水孔間で水の動きを阻害する川砂が排出された結果と考えられる。
- 実験 7～9 終了後に得られた CT 像断面図は給水部側に灰色部位の存在を示し、目詰まりを起こしたことを示唆する。このことが実験 6 で増大した給水量が再び減少した原因の可能性がある。
- 特に実験 9 終了後に得られた断面図には実験 8 終了後に存在しなかった白色部が排水孔付近に存在する。土粒子の移動を伴って新たに目詰まり領域が生じた可能性を示唆する。
- 実験 10 終了後に得られた CT 像断面図は、実験 9 終了後に比べて給水部付近の暗色の部位の幅が大きくなっている。また実験 7～9 終了後に存在した給水部側の灰色の部位が消失していること、給水量-排水量が再び増大し、かつ透明な水が流れていることは給水孔-排水孔が貫通する空洞により完全に連結したと考えられる。

以上のことを踏まえ、推定されるパイピングの進行過程を以下に示す。

- ①水圧によって排水孔付近の土砂が排出された領域（粗領域）が形成される。

- ②水圧がかかり続けることで、排水孔側から給水部側に向けて粗領域が拡大していく。

- ③粗領域が給水部-排水孔間で連結することで、給水量と排水量が増大する。

- ④稀に、給水部-排水孔間で目詰まりが発生する。この際には給水量と排水量が減少する。

- ⑤水圧がかかり続けることで、目詰まり領域は移動していく。

- ⑥目詰まり領域だった土砂が排除され、粗領域が再び給水部-排水孔間で連結する。この際に給水量と排水量は増大する。

- ⑦水圧をかけ続けることで、土砂は排出され続け、粗領域は拡大していく。

- ⑧水圧に見合った大きさの水みちが形成されると、それ以上の土砂の排出は起こらず、透明な水が流れていく。

3.3 原位置パイピング試験方法

3.3.1 パイピング抵抗性の評価方法

図-13 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が明らかとなったことから、そのパイピング進行段階に至ったときの試験地盤の動水勾配値を、パイピング抵抗性を評価する指標値とする方法を提案するものである。評価に必要となる観測項目、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
- 間隙水圧（2 孔間に複数直線配置）
- 注水量、揚水量
- 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推定
- ⑥ パイピング進行時の動水勾配等を、地盤のパイピング抵抗性の指標とする

(3) 進行段階の確認方法

- ①ボーリングの発生：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

* パイピング空洞の拡大： 孔内水位の急上昇の観察と、間隙水圧の一時的な急減（ただし、この段階では全体の透水性を表す注水量／注水位は、上下動を繰り返しつつもほぼ一定）

③水みちの形成： 注水量／注水位の増加の確認（進行性の破壊が生じていることがわかる）

(4) パイピング特性の評価

②ないし③時点の平均動水勾配の値により、パイピング抵抗性の評価が可能。

3.3.2 原位置パイピング試験の準備工程

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。そのため、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、策定した原位置パイピング試験孔準備工程を図-18に示す。

実際の試験孔の設置にあたっては、地盤を可能な限り乱さないことを最重要視しており、回転掘削時の注水孔ケーシング管のフィルタ部（図-8(a)参照）への粘土分付着による目詰まりや、打撃あるいは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、YBM製ECO-1V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、バイプロの使用は最小限に留めた。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による削孔としている。

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、カブラ引き上げ時にカブラ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ることで、地盤を乱してしまう事象が何度か確認されている。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程度残るようにカブラで採取除去することとした。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留めるためには、管底に残す土砂長は50cm程度で十分であることを、これまでの複数の現地実験により確認している。

また、揚水孔ではケーシング管内の土砂を孔底まで全て取り除くことになるため、地下水水位下の緩い砂質地盤におけるカブラによるコア採取に代わる工法として、ケーシング管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する工法を開発した。なお、本工法は、地盤の乱れを可能な限り抑えた管底地盤面の露出方法ではあるが、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、施工後すぐの試験開始が望まれる。また本工法は、孔内の洗浄も同時に行えるうえに、注水孔においてはカブラで拾いきれない少量の土砂の除去にも活用できる。

注水孔削孔時には、有孔部を設けたケーシング管を使用した。有孔部には篩目開き150 μ 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も、管内から地盤への注水が可能となる構造とした。万が一、ケーシング管下端部で地盤の乱れが生じた場合においても、注水が行われる有孔部の下部に50cm程度の無孔部を設けて離隔距離をとることで、注水が行われる試験対象層に及ぶ影響は極めて小さくなるものと推察される。また、カブラで採取した土砂からパイピング試験を行うべき試験対象層としての適性を確認し、ケーシング管の有孔部が試験対象層の深度に位置するように微調整することで、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できることで、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という利点もある。

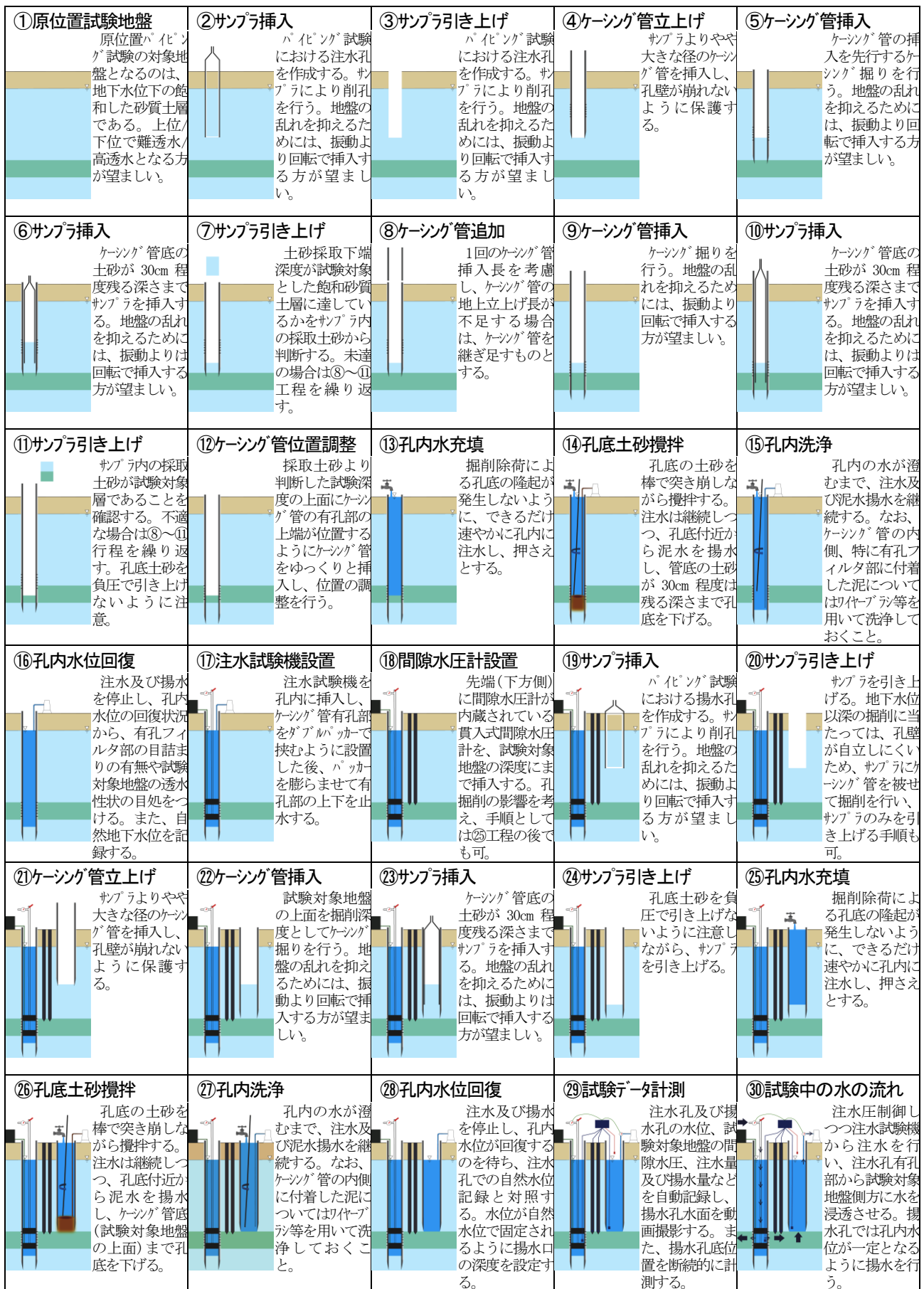


図-18 原位置パイピング試験孔準備工程

3.3.3 マニュアル

本研究結果を基に、「河川堤防基礎地盤のパイピング特性調査マニュアル」の素案を表-1に示す。

表-1 河川堤防基礎地盤のパイピング特性調査マニュアル（素案）

<p>1. 総説</p> <p>1. 1 本マニュアルの目的</p> <p>本マニュアルは、河川堤防の基礎地盤の浸透安全性評価および対策の実施に当たって、対策の優先順位付けを目的に実施される、原位置パイピング試験の実施方法を定めるものである。</p> <p>1. 2 原位置パイピング試験方法</p> <p>原位置パイピング試験方法は、地盤への注水を行う注水孔と、孔内水位を一定に保つように揚水する揚水孔を設け、注水孔から揚水孔に向けて動水勾配を与えて、二孔間でパイピング現象を発生させることで、原位置地盤のパイピング抵抗性を把握する方法（「パイピング現象評価方法及びパイピング現象評価装置」（特願 2015-104668））である。</p> <p>1. 3 原位置パイピング試験方法の適用</p> <p>1. 原位置パイピング試験方法は、地下水面下にある地盤に適用可能である。</p> <p>2. 原位置パイピング試験方法は、河川堤防基礎地盤の浸透対策検討箇所もしくは対策予定箇所を実施する。</p> <p>2. 試験方法</p> <p>2. 1 試験装置の構成</p> <p>原位置パイピング試験装置は、注水孔ケーシング管（有孔管）、揚水孔ケーシング管、注水試験機、注水制御および記録装置、打ち込み式間隙水圧計、注水用ポンプ、揚水用ポンプ、排水量計測・記録装置および貯水槽からなる。</p> <p>2. 2 事前準備</p> <p>調査地点の地形、地質、地盤の透水特性および地下水位の情報を取得し、試験対象地点およびその試験対象地盤の深度を決定する。</p> <p>2. 3 注水孔の掘削</p> <p>1. 注水孔ケーシング管（有孔管）を「試験孔の作成方法及びこの試験孔を用いた試験方法」（特願 2016-058328）によって設置する。</p> <p>2. 削孔後、地下水位（平衡水位）を確認し、地質および地下水位を考慮して揚水孔の</p>
--

<p>孔底の深度を決定する。</p> <p>2. 4 打ち込み式間隙水圧計の打設</p> <p>原則として注水孔の有孔部の上端深度に合わせるように、打ち込み式間隙水圧計を打設する。</p> <p>2. 5 揚水孔の掘削および試験装置の接続</p> <p>揚水孔ケーシング管を対象深度に設置する。ただし、揚水孔は仕上げを行う前に試験装置を接続して揚水孔が仕上がり次第、直ちに試験が実施できるようにする。</p> <p>2. 6 揚水孔の掘削仕上げ</p> <p>揚水孔の仕上げを、「地盤の削孔方法」（特願 2016-058329）によって行い、直ちに試験実施の準備を行う。</p> <p>2. 7 試験の実施</p> <p>1. 揚水孔が仕上がり次第、できる限り速やかに試験を開始する。</p> <p>2. 原則として3分ごとに10cmずつ注水位を上昇させる。</p> <p>3. 注水位、注水量、揚水量、注水量/注水位、間隙水圧計、孔内状況および孔底の深さ変化等を記録し、これらに変化がある場合には、同一の注水位を保持する。</p> <p>4. 注水量あるいは揚水孔の水位が著しく変動した場合、もしくは注水位が規定の水位（たとえば5m）に至った場合、試験を終了する。</p> <p>3. 評価方法</p> <p>3. 1 試験ごとの限界動水勾配の決定</p> <p>試験ごとに、注水位、注水量、揚水量、注水量/注水位、間隙水圧計、孔内状況および孔底の深さ変化等の時間変化記録を基に、パイピングの進行段階を評価し、試験ごとの限界動水勾配を決定する。</p> <p>3. 2 地点ごとの限界動水勾配の決定</p> <p>地点ごとに、相互に1m以上離れた近傍箇所でも3回以上の試験を実施し、それらを比較・吟味し、その地点の妥当な限界動水勾配の代表値を決定する。</p> <p>3. 3 地点間の限界動水勾配の比較</p> <p>比較を行おうとする複数地点の限界動水勾配の代表値の比較により、パイピング特性の比較を行う。</p> <p><参考>試験の実施例</p>
--

4. まとめ

①原位置パイピング試験法の確立

現地地盤における実証試験の結果を基に試験機を改良するとともに、観測機器の配置方法を確立した。その結果、試験機により人工的にパイピング現象を発生させ、そのときの地盤状況を各種センサによりモニタリングできるようになった。パイピング現象の評価方法、原位置パイピング試験装置及び原位置試験方法に関して、以下に示す3件の特許出願を行った。

- ・「パイピング現象評価方法及びパイピング現象評価装置」 (特願 2015-104668)
- ・「試験孔の作成方法及びこの試験孔を用いた試験方法」 (特願 2016-058328)
- ・「地盤の削孔方法」 (特願 2016-058329)

②パイピング進行プロセスの把握

X線CTスキャナを用いた浸透中の模型地盤の可視化を行い、「局所的な目詰まりは、発生と破壊を繰り返しながら移動し、最終的に貫通空洞を形成する」ことを現象として確認するとともに、土粒子の移動とパイピング空洞の形成過程の把握から、評価すべきパイピング進行段階の具体的な局所地盤状況を明らかにした。また、現地実験によってパイピングプロセスと動水勾配値との関係を明らかにした。

③パイピング特性調査法の確立

地下水面下に存在する地盤を対象に、原位置パイピング試験において観測される各種の情報からパイピング進行段階を推定し、試験対象地盤のパイピングしやすさを評価する方法を提案した。

研究の成果を、「河川堤防基礎地盤のパイピング特性調査マニュアル(素案)」としてとりまとめた。

参考文献

- 1) 鬼怒川堤防調査委員会(国土交通省関東地方整備局ホームページ): <http://www.ktr.mlit.go.jp/river/bousai/index00000036.html> (2016年6月30日閲覧)
- 2) 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): http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01-plan_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf (2016年6月30日閲覧)
- 3) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(平成24年2月改訂)、p.192、2012.
- 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、
<http://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2010/pdf/pro-2-3.pdf> (2016年6月30日閲覧)

- 5) 吉田直人、倉橋稔幸、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、地盤工学会、第45回地盤工学研究発表会平成21年度発表講演集、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)、地盤工学会、第46回地盤工学研究発表会平成23年度発表講演集、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、土木学会関東支部、2016年3月.
- 8) 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、土木学会関東支部、2016年3月.
- 9) 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、地盤工学会、pp.947-948、2016年9月.

A STUDY ON THE PRACTICAL APPLICATION OF AN IN-SITU PIPING TEST ON THE RIVER LEVEE FOUNDATION

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Geology and Geotechnical
Engineering Research Group
(Geology)

Author : SASAKI Yasuhito
SHINAGAWA Shunsuke
AGUI Katsuhito
SUGAWARA Yu

Abstract : The purpose of this study is the development of a new evaluation method that takes into account the expansion easiness of the cavity on the piping characteristics in the river levee foundation. We developed the in-situ piping testing method consisting of a water injection device and two boreholes, and put together the test procedure as a guide. On the basis of changes in the permeability index (water injection amount / Note water pressure) and the pore water pressure of plural points, it has become possible to estimate the piping advanced stage. Possibility of evaluating the piping resistance of the test soil by hydraulic gradient value for each stage was shown. Further, in order to grasp the extension mechanism of piping cavity corresponding to the penetration, the soil on the model piping experiments were visualized by X-ray CT scan. As a result, the process of the progress of the piping by repeating while moving the local clogging or destruction has been revealed based on the observation.

Key words : piping, in-situ test, river levee foundation, hydraulic gradient, water path