

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

土木研究所 正会員 ○日 外 勝 仁
 土木研究所 正会員 品 川 俊 介
 土木研究所 正会員 佐々木 靖人

1. はじめに

豪雨時の河川被災の特に重大なものに堤防の決壊がある。破堤については、地震によるものを除き、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害でも見られた越水破堤¹⁾や、堤体浸食、堤体浸透などの堤体に起因したもの他、堤体基礎地盤の浸透・パイピングによる堤体の沈下・陥没が原因とみられる事例²⁾もある。

河川堤防の浸透に対する安全性の照査基準³⁾により、直轄河川堤防の 3 割以上の区間が要対策と判定されている。その全ての箇所がパイピング破壊につながるわけではないが、浸透に係る漏水の被災実績調査において、堤体漏水と基礎地盤漏水箇所の区間延長比率は約 10 : 1 となっており⁴⁾、数パーセントではあるが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あると思われる。

筆者らの研究では、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行い、粒度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。

本研究では、堤体基礎地盤のパイピング抵抗性を原位置において直接評価する手法の開発を行っている。本稿では、開発した原位置パイピング試験法（図-1、図-2 参照）（特願 2015-104668「パイピング現象評価方法及びパイピング現象評価装置」）を解説するとともに、実大のピット実験において観測されたパイピング進行状況から、パイピングの進行過程と抵抗性評価指標について考察するものである。

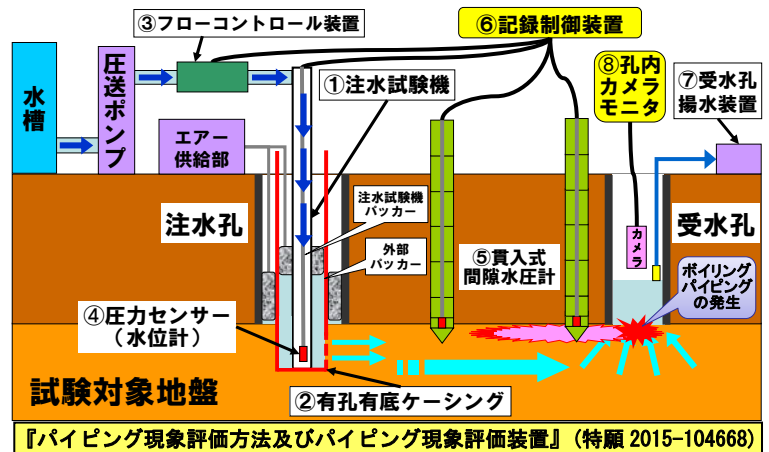


図-1 原位置パイピング試験イメージ図



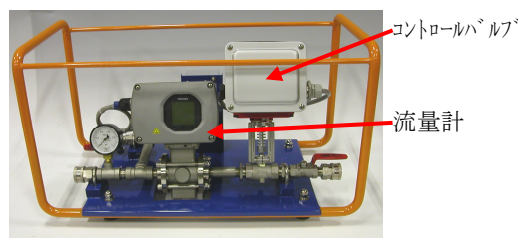
(a) 原位置パイピング試験機器設置状況



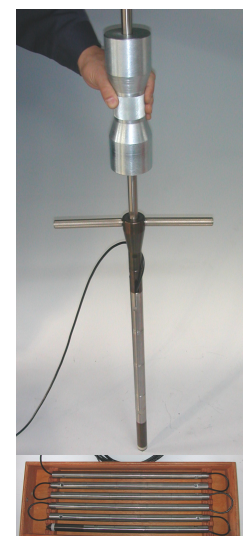
(b) 注水試験機



(c) 記録制御装置



(d) フローコントロール装置



(e) 貫入式間隙水圧計

図-2 原位置パイピング試験装置概要

キーワード 河川堤防基礎地盤、パイピング、原位置パイピング試験、動水勾配、水みち

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所 地質チーム TEL. 029-879-6769 E-mail : agui@pwri.go.jp

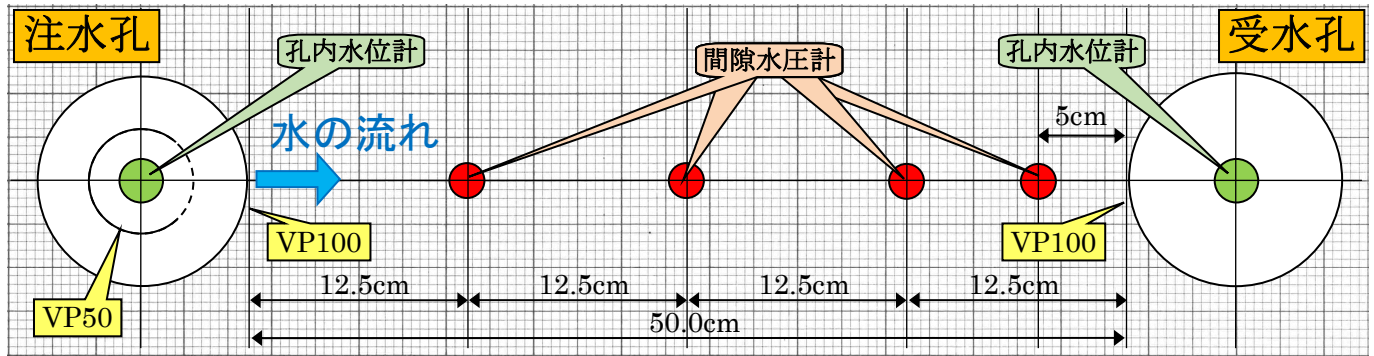


図-3 実験配置図（試験孔及び間隙水圧計）

2. 原位置パイピング実験

開発した原位置パイピング試験法は、図-1、図-2 に示すような2孔間におけるパイピング抵抗性を評価するクロスホール法である。注水孔から注水し、一定距離離れた受水孔から揚水することで水頭差を生じさせ、実験地盤の2孔間に浸透・パイピングによる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を観測した。試験においては、注水圧を階段波状に上昇させ、2孔間の平均動水勾配の値の変化と、受水孔に設置した孔内カメラによる土砂の噴出状況により、パイピング状況の推定を行うとともに、実験地盤における平均動水勾配との関係解明を試みた。実験条件としては、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、受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、注水と受水が行われる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。

実験では、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、受水孔の水位が一定となるように揚水を行った。注水した水が少しでも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、受水孔では、底のないケーシング管とした。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。本ピット実験では、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、図-1、図-2 に示す貫入式間隙水圧計（ $\phi 25\text{mm}$ ）を地盤に打込むことで、複数地点の間隙水圧を把握する。本ピット実験での間隙水圧計及び注/受水孔配置は図-3 に示すとおりである。

3. 原位置パイピング実験結果及び考察

現在用いられている河川堤防の浸透に対する安全性の照査基準³⁾では、被覆土のない場合で、 $i < 0.5$ （ i ；裏のり尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値）となっており、これは土粒子が動き始めるかどうかという理論式を基に地盤物性の幅を考慮して安全側に定められたものであり、土粒子の移動の有無だけではなく、現実には土砂が吸い出されてパイピング破壊にまで至るかどうかを評価するには安全側過ぎる基準といえなくもない。そこで、本研究では、実大の原位置パイピング試験によって、土粒子の移動段階ではなく、実際のパイピング進行段階においてどのような動水勾配であるのかを把握しようとするものである。

第1縦軸として間隙水圧等を水位換算した値、第2縦軸として透水性を意味する注水量を注水位で除した値の経時変化を図-4(上図)に示す。また、パイピングの進行段階を、①ボイリングの発生期、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]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-4(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。

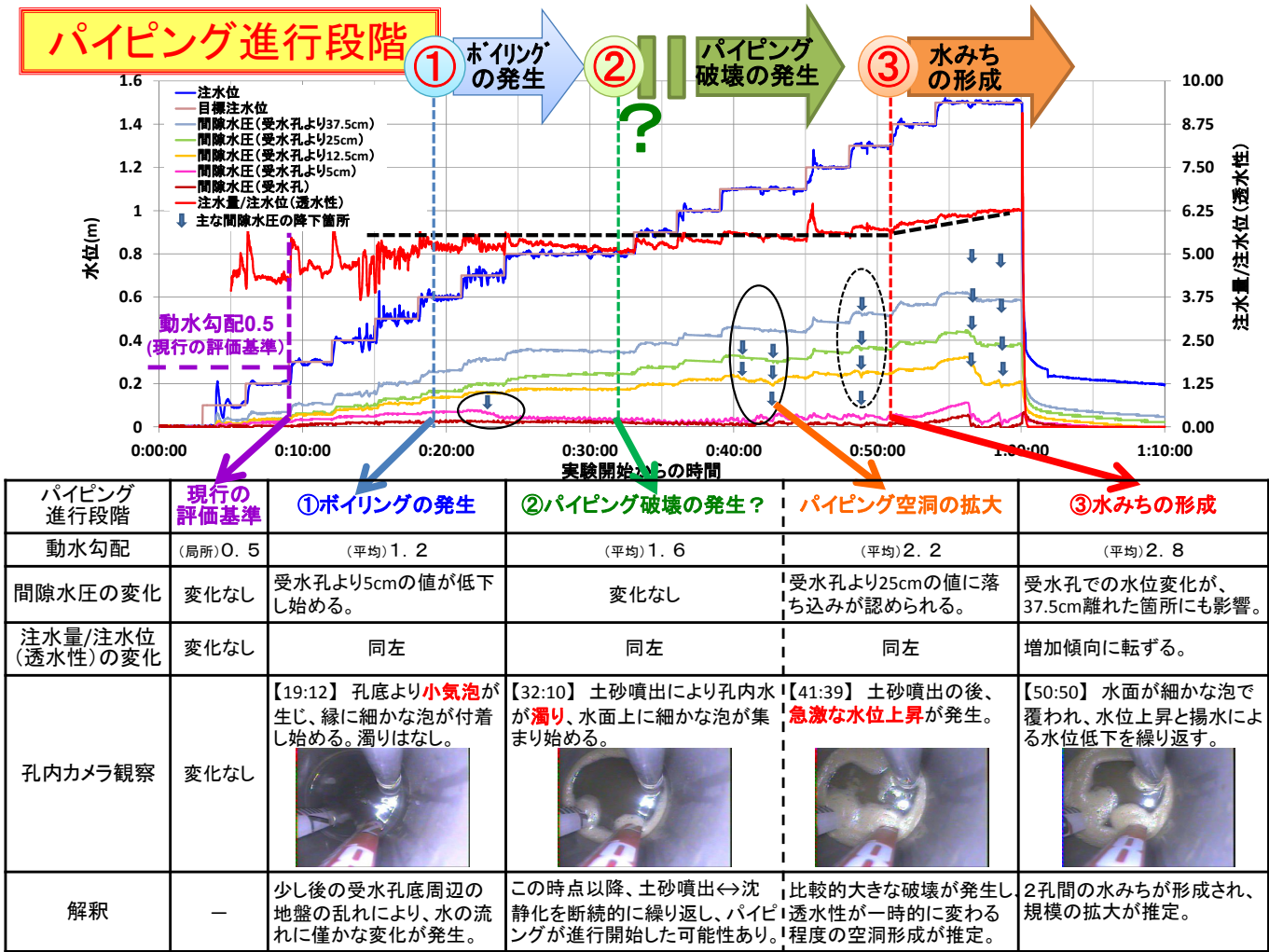


図-4 パイピング進行段階と実験結果

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。

① ボイリングの発生期（動水勾配：1.2）

受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、受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、[受水孔から5cmの間隙水圧値]が低下し始め、[受水孔の間隙水圧値]にほぼ一致したところで低下が収まる結果となった。このことは、受水孔近傍の5cm区間で地盤が乱され、ほぼ同一の粗の領域となったことで、間隙水圧値も一致したことを意味している。

②-1 パイピング破壊の発生期（動水勾配：1.6）

受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た事が確認される。間隙水圧値には顕著な変化は認められない。受水孔底において、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）

受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が低下する結果となった。それまではほぼ一致していた[受水孔から5cmの間隙水圧値]と[受水孔の間隙水圧値]とに差異が認められるようになったことから、土砂噴出時に受水孔底付近が閉塞したことを示唆している。[受水孔から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/受水孔

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、[受水孔の間隙水圧値]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）

受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受水孔の水位上昇の影響が、注水側の[受水孔から 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。この指標は、同じ注水圧比率であればどの程度、水が地盤に入っているか、すなわち地盤の透水性状を示しており、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ている。

4. まとめ及び今後の検討

室内模型規模の実験ではなく、原位置試験機による実大実験においても、動水勾配の増加に伴い、水の出口側から供給側に向かって、土砂の吸い出しによる空洞が拡大していくというパイピング進行過程が推定できた。本試験法による 50cm 区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と、その透水性指標の増加割合（勾配）と、パイピングホール貫通に到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拡大のしやすさ）を評価できる可能性が確認された。

また、今回考察した空洞拡大というパイピング進行過程は、計測データや観察結果という状況証拠に基づいた推定にすぎないものである。実際に、発生した空洞が拡大することで2点間をつなぐ水みちとなり、その後より径の大きな通水経路が形成されていくのかについては、X線 CT スキャナによる直接的な空洞観察を行うこと⁷⁾などで、更なるパイピング進行メカニズムの解明に努めたい。

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1月18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1月18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1月18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，土木学会関東支部第43回関東支部技術研究発表会（投稿中），2016.