

河川堤防の浸透対策として用いられるドレーン工の 長期安全性に係る要素試験と開削調査

石原雅規・東 拓生・佐々木哲也

1. はじめに

河川堤防は、原則的に、劣化しにくい材料と考えられている土で作られていること等を背景に、河川堤防においては長期安全性に係る調査・研究は少ない。

しかし、大きな出水がなくても、はらみ出しのような堤防の変状が見られることは少なくない。また、軟弱地盤上に作った堤防では、圧密沈下により堤防の沈下や不陸、亀裂などの変状が長期間にわたり生じ続けることもある。このような事象も、長期安全性の低下と捉えることができる。このように長期安全性は、河川堤防にとって身近な問題であり、維持管理を効率的に実施していく上では、長期安全性に係るメカニズムや実態の把握が不可欠であると考えられる。

本報では、現場からも多くの懸念が寄せられている重大な課題の1つであるドレーン工の長期安全性に関する試験・調査結果を報告する。ドレーン工は、主に法すべり対策として堤防裏法尻に設置される強化対策の1つである。雨水や河川水の浸透により、図-1に示すようにドレーン工近傍において比較的大きな動水勾配が繰返し作用する。この大きな動水勾配により、堤体材料の中の小さ

な粒子が徐々に移動することが考えられる。移動した粒子はフィルタ近傍に集まることもあると言われている¹⁾。いわゆる、目詰まりである。目詰まりは、ドレーン工の機能低下の原因となり、河川堤防の長期安全性の低下に繋がるおそれがある。

そこで、高い動水勾配による土粒子の移動と目詰まりの発生を詳しく把握するための要素試験と、実際の河川堤防に設置されていたドレーン工が機能低下を起こしているかどうかを直接把握するための既設ドレーン工の開削調査を実施した。

2. 要素試験

2.1 実験装置と材料

ドレーン工周辺の水の流れは、どちらかと言えば、横向き浸透が卓越していると考えられる。要素試験で横向き浸透を行おうとした場合には、重力の影響を受け、要素上側境界部分が緩くなり、局所的に流速が大きくなり、要素試験として成立しづらい。そこで、実際の向きとは異なるが、下向きの繰返し浸透を与えることとした。

繰返し浸透実験の装置を図-2に示す。供試体の高さは40cmであり、その端部の構造は上下で同じである。供試体に厚さ3mmの不織布（フィルタ材）が接し、その外側に有孔板がある。給水槽

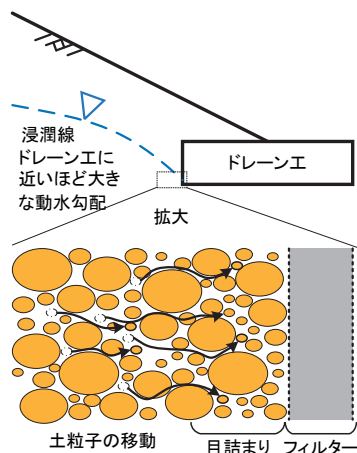


図-1 ドレーン工周辺の動水勾配と粒子移動

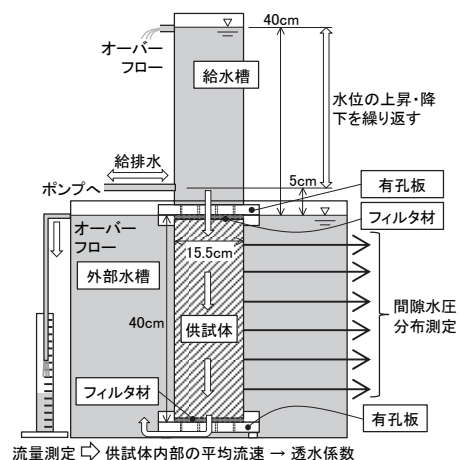


図-2 試験装置の概要

の水位を上下することによって、供試体に繰返し浸透を与えることができる。また、供試体を詰めたモールドの側面6深度に設けた孔と水圧計とをチューブで接続した。これにより、供試体内6深度の間隙水圧を計測可能とした。ただし、計測した間隙水圧は各深度の平均値ではなく、孔近傍の供試体の状態の影響を強く受けていることが推測される。

供試体は、全体が水没するように外部水槽内に設置されている。供試体を通過した水は外部水槽に流入するようになっているため、外部水槽から流れ出る流量を測定することで、供試体の平均的な透水係数を求めた。

供試体の諸元を表-1に、粒径加積曲線を図-3に示す。供試体は、硅砂4号の間隙中を硅砂8号の細粒分がすり抜けるように移動する現象を想定し、硅砂4号の間隙の体積を占める硅砂8号の割合を、供試体1は50%、供試体2は75%、供試体3は100%、供試体4は120%となるよう配合し、目標相対密度80%となるよう作成した。

2.2 実験方法

給水層の水位を外部水槽の水面上5cmから40cmまでの間で繰返し上昇・降下させた。給水層の水位が外部水槽の水面から40cm（動水勾配が約1.0）のときに供試体側面の間隙水圧及び供試体を浸透してきた水の流量を測定した。これらの実験操作を4供試体同時に自動的に3,000回繰返し、間隙水圧、透水係数等の供試体の物性の変化を調べた。供試体の透水性によっても異なるが、1回の上昇・降下に概ね数分かかるため、3,000回

で1～2週間かかった。なお、3,000回という回数は、透水係数の変化を確認しながら設定したものであるが、実際の堤防で経験する外力としてはかなり長い期間に相当するものと考えられる。

2.3 間隙水圧分布の変化

給水槽の水位が40cmの時の、供試体の間隙水圧の深度分布を図-4に示す。静水圧を引いているため、供試体上端の水圧は給水槽の最高水位0.4mに相当する水圧、下端の圧力は0となり、供試体が均質であれば初期の圧力はこの2点を結ぶ直線上に分布することになる。本実験では全体的に、下に凸の形を示している。傾きが急なほど透水係数が相対的に高く、緩いほど相対的に低いこ

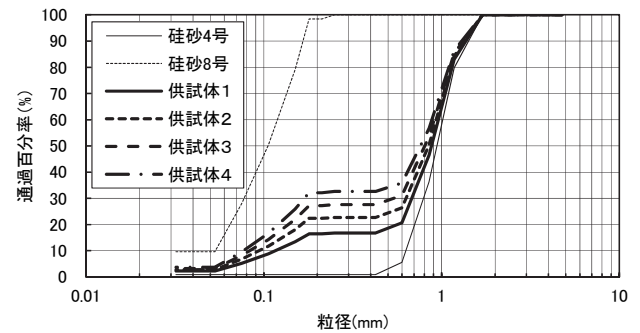


図-3 供試体を使用した材料の粒径加積曲線

表-1 供試体の諸元

項目	供試体1	供試体2	供試体3	供試体4
土粒子の密度(g/cm ³)	2.640	2.642	2.644	2.645
最大密度(g/cm ³)	1.930	1.946	1.959	1.958
最小密度(g/cm ³)	1.523	1.549	1.579	1.576
乾燥密度(g/cm ³)	1.823	1.842	1.860	1.859
相対密度(%)	78.0	78.0	78.0	78.0
細粒分含有率(%)	8.1	23.5	27.3	33.9

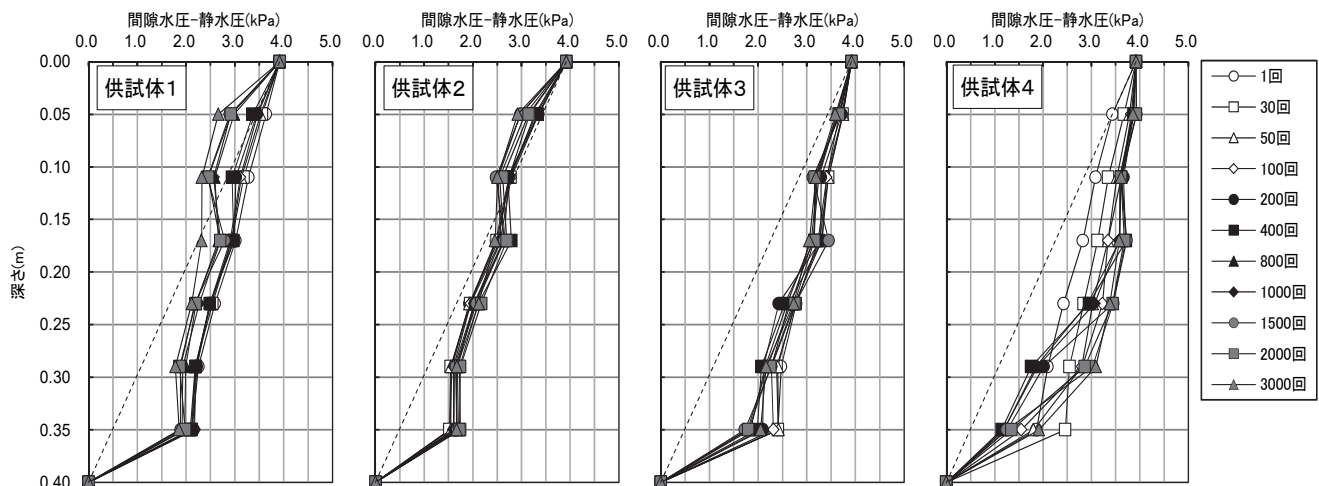


図-4 供試体の間隙水圧から静水圧を減じた圧力の深度分布

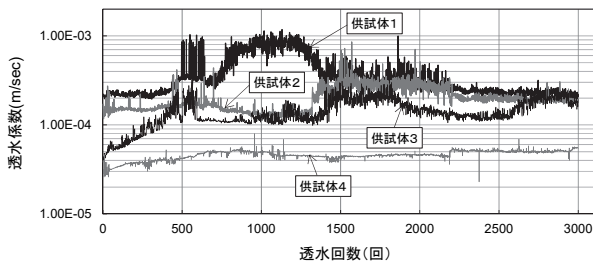


図-5 供試体の平均的な透水係数の変化

とを表わすため、供試体下端の1区間の透水性がそれより上部よりも低いことを意味している。局所的で、繰返し初期からその傾向が表れているため、供試体下端に設置したフィルタ材が影響していることが考えられる。次に繰返し回数の増加による変化を見ていきたい。供試体2は繰返し回数が増加しても、水圧分布が変化していない。粒子が移動していないことを表わしているものと考えられる。供試体1と3は、繰返し回数の増加とともに、下に凸の形状が解消するような変化を示している。供試体4では、他の供試体に比べると変化が大きいが、供試体下部の透水性が低下する目詰まりのような挙動は、繰返し回数30回までで見られたが、その後は、逆に目詰まりが解消されるような方向に水圧分布が変化した。

2.4 透水係数の変化

図-5に供試体全体の平均的な透水係数の変化を示す。透水性が低下するような傾向は見られず、

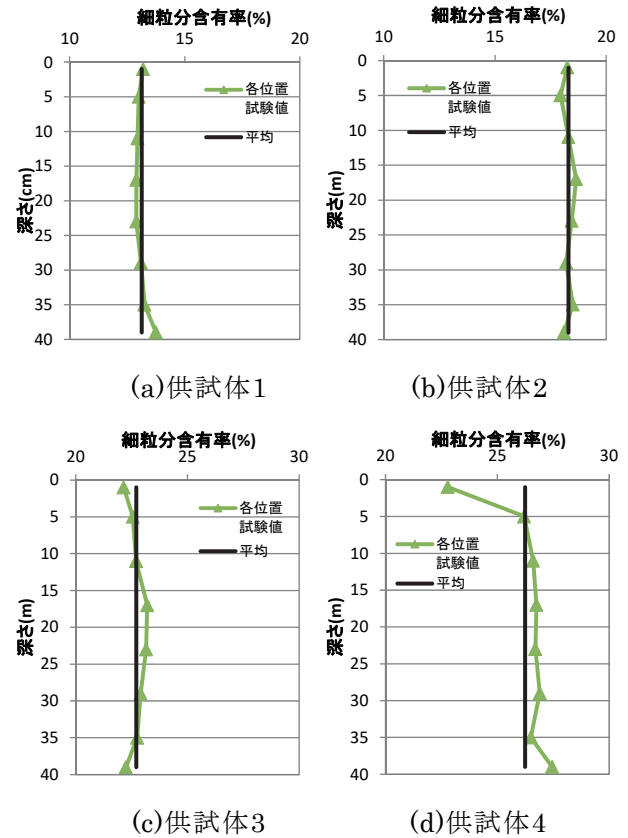


図-6 実験後の供試体の細粒分含有率分布

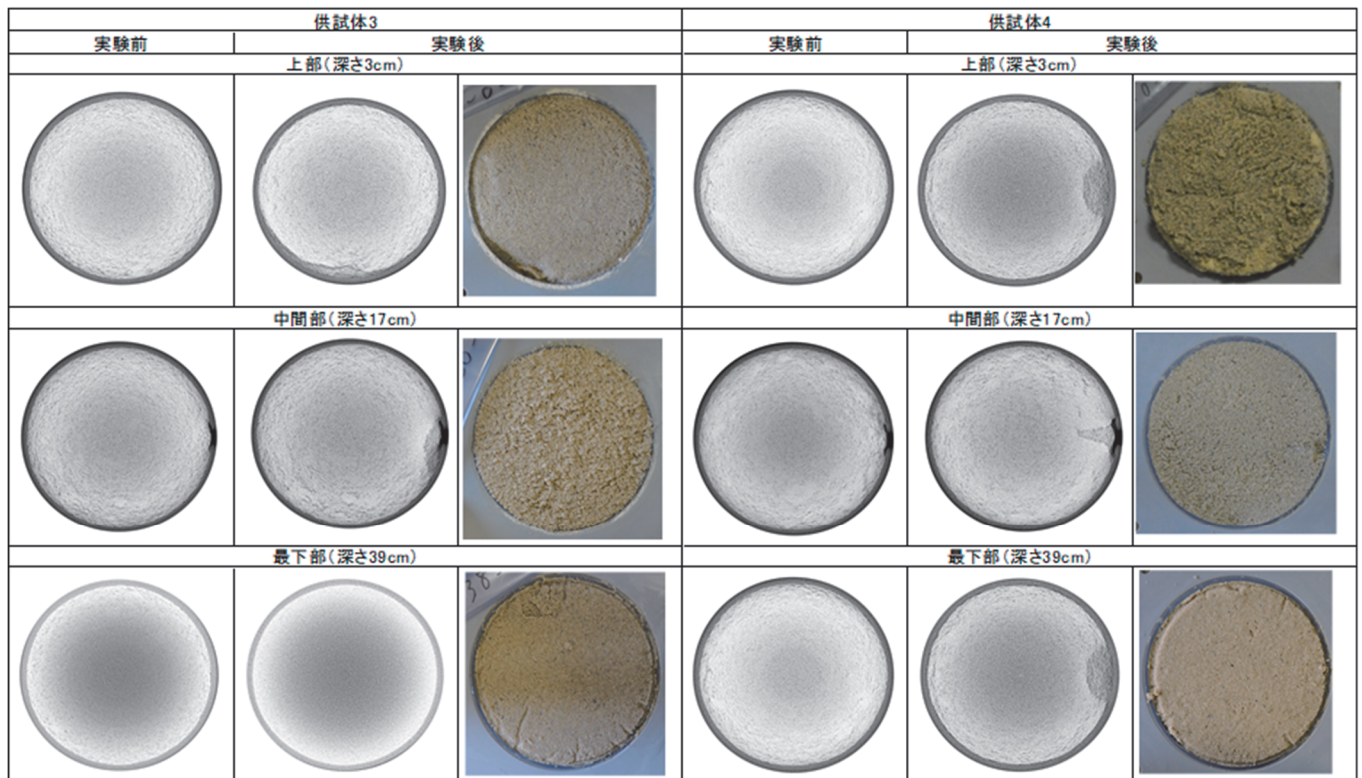


図-7 CT画像と切り出し写真

俯瞰的に見れば、初期に比べ透水係数が大きくなる傾向が見られる。透水係数が上下動しているのは、土粒子の移動により、流れやすい部分と流れにくい部分が生じ、これが遷移することに伴って発生しているのではないかと推測しているが、詳細は不明である。

2.5 粒度試験

次節で述べるCT撮影後の供試体を上下方向に8分割し、粒度試験を行った。細粒分の含有率の分布を図-6に示す。供試体1では下部で細粒分含有率が増加し、他の深度は少し減少している。供試体2では深度毎に増減がバラついていてものの、概ね変化がない。供試体3では供試体中央部で細粒分含有率が上昇し、上面と下面で減少している。供試体4では上部で細粒分含有率が大きく減少し、他の深度では上昇している。

これらの変化の傾向は、図-4に示した間隙水圧分布の変化と整合している所が多く見られる。例えば、供試体2の変化が少ない点は、間隙水圧と細粒分で共通している。また、供試体3では下端や供試体4の上端では細粒分が減少しており、間隙水圧分布は急勾配に変化（透水性が大きく変化）している。

2.6 X線CT

実際にどのように細粒分が移動したかを見るために、実験前後の供試体をX線CT撮影した。その断面画像と対応する深度の写真を図-7に示す。紙面の都合上、供試体3と供試体4のみとした。

CT画像は、濃い色の部分ほど低密度（間隙が多い）の状態にあることを表わしている。供試体3の中間部と供試体4の実験後のCT画像には、右側に色の濃い部分が見られる。ちょうど間隙水圧の測定位置に当たっており、水圧計測の際に微量ではあるが水が出入りしたことにより、供試体を乱したと考えられる。

実験前のCT画像には、深度によらず痘痕状の模様が見られる。大きな間隙の部分と小さい部分が比較的均質に分布していたと考えられる。実験後のCT画像では、痘痕状の模様がはっきりしたり、消えたりし、変化している様子が確認できた。供試体によらず上部～中間部で模様がはっきりした。逆に下部では、供試体3のように模様が消えている場合があった。供試体4のCT画像では分りにくいですが、下部と中間部の写真を比較すると、

中間部でより多くの間隙が確認できる。上部～中間部ではこのような微細な水みちが形成され、透水性が大きくなっていると考えられる。

必ずしも細粒分含有率の深度分布と整合しないが、粒子が移動し、下部では間隙が埋まり、上部～中間部では水みちが形成され、局所的には目詰まりのような現象が生じるものの供試体全体ではむしろ透水性が高くなったものと考えられる。供試体1や2でも同様であった。

2.7 要素試験のまとめ

本実験の結果、細粒分の移動は、目詰まりのみを引き起こすものではなく、微細な水みちを形成する要因にもなりうるものであることが明らかとなった。また、今回の実験条件では、全体的な透水係数が下がることはなく、むしろ上昇する傾向が見られた。ここでは紹介しないが、細粒分がさらに移動しやすいとされる粒度分布でも同様の試験を実施し、よく似た結果が得られている²⁾。土粒子の移動とドレーン工等の機能の関係の全てが明らかになったわけではないが、かなり厳しい外力条件でも機能消失に繋がるような実験結果は得られなかった。要素試験に関して詳しくは参考文献^{2)~4)}を参照されたい。

3. 開削調査

3.1 調査方法・試験方法

河川堤防の川裏法尻の既設ドレーン工の背後地盤の開削調査及び土質試料の採取を行い、その粒度試験等を行うことで、ドレーン工周辺の土粒子の移動について検討した。

調査は表-2に示す6河川9箇所で行った。ドレーン工の施工から概ね5年、10年、20年経過した箇所から外力経験の違いにも着目して箇所選定が行われた。

写真-1に土質試料採取状況を示す。ドレーン工

表-2 調査箇所一覧

調査河川名	箇所	ドレーン施工からの年数	外力経験の程度
佐保川（奈良県）	左岸 0.8k	概ね 5 年	はん濫危険水位以上
	左岸 3.0k-80m	概ね 10 年	はん濫危険水位以上
斐伊川（島根県）	右岸 7.5k	概ね 10 年	はん濫危険水位未満
紀の川（和歌山県）	右岸 11.2k+40m	概ね 5 年	はん濫危険水位未満
	右岸 16.0k	概ね 10 年	はん濫危険水位未満
木曽川（愛知県）	左岸 8.8k	概ね 10 年	はん濫危険水位未満
嘉瀬川（佐賀県）	右岸 7.55km	概ね 5 年	はん濫危険水位未満
	左岸 12.0k	概ね 10 年	はん濫危険水位以上
那珂川（茨城県）	左岸 16.0k	概ね 20 年	はん濫危険水位以上



写真・1 土質資料採取状況

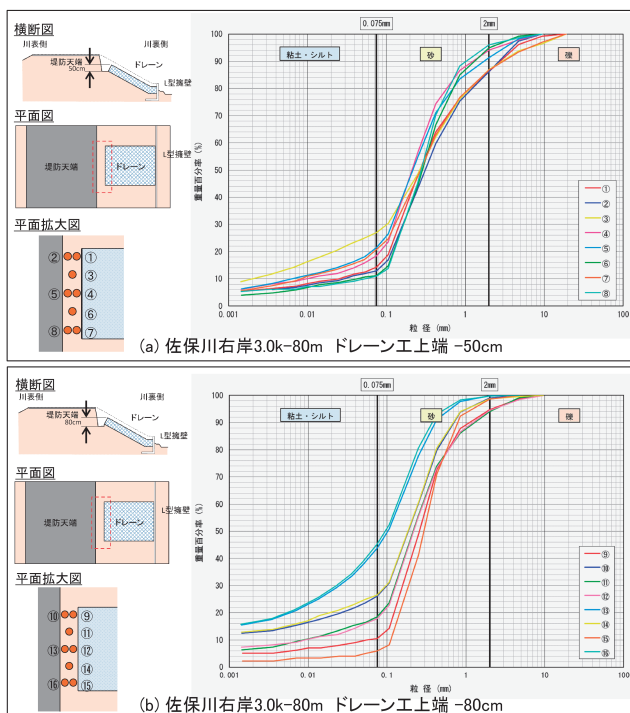


図-8 粒度試験結果の一例

背後の堤体を掘削し、表面を削りとって均した後、採取位置を決定した。試料採取には、できる限りコアカッターを用い、ドレーンにできる限り近い位置とドレーンから20～30cm離れた位置の元々の土質の差異が少ないとみられる位置において、土質のばらつきの影響を排除するため、それぞれ複数箇所で行った。

3.2 調査・試験結果

図-8に粒度試験の一例として、佐保川右岸3.0k-80mのドレーン工上端-50cmと上端-80cmの深度の粒径加積曲線を示す。

ドレーン工上端-50cmでは、ドレーン工に近い位置と遠い位置で粒度分布に大きな差が見られない。

一方、ドレーン工上端-80cmについては、ドレーン工に近い位置での粒径加積曲線が全体的に下方に位置しており、細粒分の流出が疑われる。一般的には、ドレーン工の背後の上端付近よりも下端（底面）付近で、降雨や出水による浸透流が多く発生することが推測されることから、ドレーン工の下側で粒径加積曲線の違いが大きくなったことが考えられる。

このような状況を総括的に分析するため、ドレーン工の遠近の位置で採取した試料の細粒分含有率及び粘土分含有率を比較した。図-9にその結果を示す。細粒分含有率は、概ね20～50%の範囲で細粒分含有率が低下または増加するデータが多くみられ、浸透流により土粒子が移動した可能性を示唆するものと考えられる。しかし、細粒分含有率が20%以下と50%以上の範囲では、遠近でほぼ同じ値であった。粘土分含有率についても、概ね同様の結果となっており、粘土分含有率が小さい10～20%の範囲で遠近の差が大きくなっている。細粒分を多く含む土は、透水係数が小さく、浸透量が少なく、場合によっては粘着力も効くために、土粒子の移動が少ないことが考えられる。また、細粒分含有率が小さい場合にも、流出しやすい土粒子自体が少ないので、粒度分布が変化しにくいことが考えられる。このようなことから、ある範囲の細粒分を有する土で、土粒子の移動が顕著に生じることが考えられる。

顕著な土粒子の移動が疑われる箇所が含まれる佐保川においては、経過年数が5年の箇所（左岸0.8k）に比べ、10年の箇所（左岸3.0k-80m）の細粒分含有率がドレーン工に近い位置でより低くなる傾向が見られた。細粒分がドレーン工に流出した可能性があり、そうであれば、過去には氾濫危険水位の経験した影響も大きいと考えられる。

土粒子の移動が疑われる箇所は、佐保川と紀の川の一部の箇所のみであり、それ以外の多くの箇所では、遠近の粒度分布に有意味な差は見られなかった。

3.3 開削調査のまとめ

既設のドレーン工の背後地盤の開削調査及び土質試料の採取を行い、その粒度試験等を行うことで、ドレーン工周辺の土粒子の移動について検討した。細粒分含有率が概ね20～50%（粘土分含有率では10～20%）の範囲では、ドレーン工か

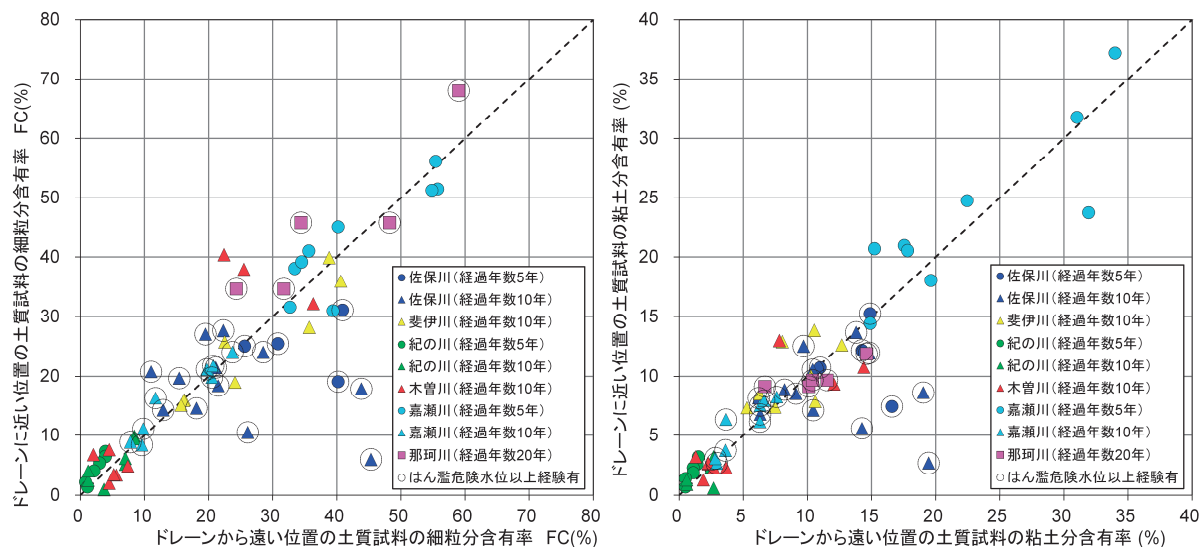


図-9 ドレーン工からの距離による細粒分・粘土分含有率の比較

ら近い箇所と遠い箇所の細粒分含有率の差が大きい箇所があり、土粒子の移動が発生した可能性を示唆している。施工からの経過年数や、外力経験（過去の高い水位の経験）の有無の影響を受けている可能性もある。一方で、土粒子の移動が疑われる箇所は限られており、多くの箇所では、粒度分布に有意な差が確認できなかった。開削調査に関して詳しくは参考文献⁵⁾を参照されたい。

4. 最後に

繰返し浸透による粒度構成の変化を調べるため、要素試験及び開削調査を実施した。

これまでのところ、粒度構成の変化が一部で見られた（開削調査の場合には、疑われる箇所が存在した）。要素試験では粒度構成が変化しても全体的な透水性は大きくなる傾向を示し、開削調査ではドレーン工近傍の細粒分が減る方向の変化が大きく、明確な目詰まりは確認できなかった。

要素試験も開削調査も、必ずしも十分な数とは言えず、今後とも試験条件や、調査箇所の追加が

必要であると考えられる。

開削調査は、水管理・国土保全局治水課、取りまとめを実施した近畿地方整備局、調査箇所の各地方整備局とともに、実施したものである。調査に協力頂いた行政関係者、施工業者、調査・試験関係者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 山岡一三、西形達明、坪井康之：ジオテキスタイルのろ過機能と目詰まり現象、第30回土質工学シンポジウム発表論文集、1985
- 2) 富澤彰仁、佐々木亨、石原雅規、佐々木哲也：土粒子の移動に着目した繰返し浸透実験、第74回土木学会年次学術講演会、2019
- 3) 東拓生、秋場俊一、佐々木哲也、石原雅規：河川堤防の浸透流による土粒子の移動に関する繰返し浸透実験（その1）、第52回地盤工学研究発表会、2017
- 4) 秋場俊一、東拓生、石原雅規、佐々木哲也：河川堤防の浸透流による土粒子の移動に関する繰返し浸透実験（その2）、第52回地盤工学研究発表会、2017
- 5) 土木研究所：河川堤防の浸透対策工の長期安全性に係る開削調査、土木研究所資料、第4389号、2019

石原雅規



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任
研究員
ISHIHARA Masanori

東 拓生



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任
研究員
AZUMA Takuo

佐々木哲也



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席
研究員
SASAKI Tetsuya