

## 細粒分流出を伴う透水を受けたまさ土の力学特性

## Mechanical Properties of Masado Affected by Permeation with Suffusion

石丸太一 Taichi ISHIMARU (山口大学大学院創成科学研究科)  
鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)  
若松知季 Tomoki WAKAMATSU (山口大学大学院創成科学研究科)  
神山 惇 Atsushi KOYAMA (宮崎大学工学部)

築造年代が古いため池堤体では、内部侵食による経年劣化が懸念される。堤体内部では、貯水による水の浸透を長期間受けた結果、細粒分が土中を移動し、堤体外に流出している可能性がある。しかしながら、内部侵食の影響を受けた堤体の力学特性は明らかになっていない。本研究では供試体の土粒子が流出可能なように改良した三軸圧縮試験機において、鉛直下向きの一次元透水を行った後、排水せん断を行うことで、細粒分の流出が力学特性にどのように影響を与えるのかを検討した。その結果、細粒分含有率 5%の場合はピーク強度が低下し、細粒分含有率が 10%の場合はピーク強度が増加する結果となった。また、間隙比の変化のみで強度の変化を説明できず、細粒分流出を伴う透水が骨格構造を変化させたと結論付けた。

キーワード：ため池堤体、内部侵食、浸透流、三軸圧縮試験、せん断強度 (IGC : D-03, D-04, D-06)

## 1. はじめに

農林水産省<sup>1)</sup>によると、日本全国には約 20 万基のため池が存在する。ため池は年間降水量が他の地域よりも相対的に少ない中国地方の瀬戸内海側や四国地方に多く分布している。ため池の約 7 割は近世以前に築造された古いものである。

そのうちの多くが、近年の農業従事者の減少により、ため池の管理が難しくなっており、老朽化が進み、漏水や断面変形、パイピングといった変状が生じているのが現状である。そのような中、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震ではため池が決壊し、下流に甚大な被害をもたらした<sup>2)</sup>。これより、全国各地でため池の地震に対する安全性の一斉点検が平成 25 年度から実施されている。特に下流域への大きい被害が想定されるため池に対する点検が優先的に実施され、堤体の土質・断面調査、耐震整備等およびハザードマップの作成が行われている。また、ため池の被災は地震だけでなく豪雨でも起こり、最近では、平成 29 年九州北部豪雨災害、平成 30 年の西日本豪雨災害などにおいてもため池が決壊し、下流域に大きな被害が発生した。今後も懸念される豪雨や地震に備えて、老朽化したため池の安全性評価と防災対策の高度化は喫緊の課題である。

豪雨によるため池の被災形態は主に浸透破壊、すべり破壊、越流破壊の 3 つに分類される<sup>3)</sup>。ため池堤体のように貯水を目的とした土構造物内部は、水の浸透作用を受けて堤体内にパイプ状の孔隙ができ、進展・拡大していく現象(パイピング)が発生することがある。パイピングが堤体法面まで達するとその箇所でも漏水を誘発し、さらには堤体全体の崩壊の一因になる<sup>4)</sup>。堀ら<sup>5)</sup>は豪雨による

ため池の被災形態の中でも浸透破壊の事例が多くみられることを明らかにした。

パイピングのように土粒子が間隙中を移動し、流出する現象は内部侵食といい、ため池老朽化の原因の 1 つとされている。内部侵食に関する既往の研究として、Kenney et al.<sup>6)</sup> は内部侵食の安定度と材料の粒度分布形状の関係を明らかにし、安定指標を提案した。前田ら<sup>7)</sup>は模型実験と個別要素法による数値シミュレーションを実施し、粒度分布形状に起因する間隙構造と内部侵食の安定性の関係を調べた。藤澤ら<sup>8)</sup>は間隙流体による土粒子の輸送作用を数値的に表現する手法を提案した。これらの研究は、内部侵食が発生する条件や進行メカニズムについて検討したものであり、内部侵食が進行した結果として地表面に変状が現れる堤体の破壊現象をターゲットとしている。

しかし、内部侵食の影響が地表面に現れないケースもあり、図-1 に模式的に示すように、粗粒な土粒子が形成する骨格を維持したまま、細粒な土粒子が流出する現象—Suffusion (細粒分流出) が指摘されている<sup>10)</sup>。シルトや細砂などの粒径の小さい土粒子は、粗粒な土粒子の接点間でベアリングのような働きをすると考えられ、それらが流出した結果、脆弱な骨格構造に変化すると考えられる。この不安定な状態で外力を受けると、急激なコラプスを起こす可能性があることから、こうした細粒分流出が進行した堤体は豪雨や地震によって表面上の変状がないまま突然崩壊に至る可能性がある。Sato et al.<sup>9)</sup>、佐藤ら<sup>10)</sup>は三軸試験機において細粒分流出を再現することで、透水によって供試体の剛性が低下することを明らかにし、透水による微少な土骨格構造の劣化を指摘している。しかしながら、使用された土試料は 1 種類のみであり、細粒分流出による強度・変形特性の変化について、異なる土試

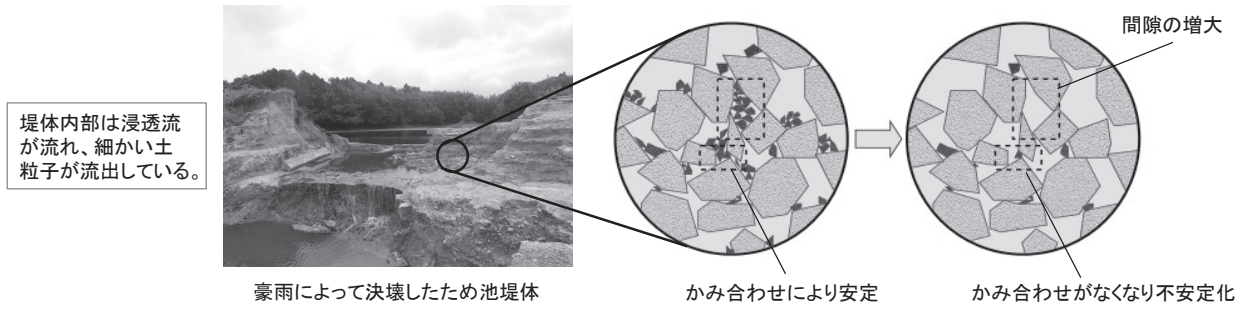


図-1 Suffusion による堤体の脆弱化のイメージ図

料間での比較検討はなされていない。

本研究では、供試体の土粒子が流出可能なように改良した三軸圧縮試験機で供試体に対して鉛直下向きの一次元透水を行った後、排水せん断を実施した。また、新たに細粒分含有率の異なる土試料を用いて、透水による強度・変形特性の変化の違いを調べた。さらに、排出してくる土粒子の量や粒径を調べることで、供試体の間隙比や土骨格構造がどのように変化しているのかを考察した。

表-1 使用した土試料の物理特性

土試料	細粒分含有率 $F_c$ (%)	均等係数 $U_c$	土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	塑性指数 $I_p$
Fc-5	5.2	19.4	2.625	NP
Fc-10	10.0	32.9	2.610	

## 2. 使用した土試料

本研究に用いた土試料は、山口県宇部市で採取したまさ土である。西日本では、堤体土にまさ土を使用したため池が存在する<sup>11)</sup>。表-1 および図-2 に、本研究で使用した土試料の物理特性、粒径加積曲線をそれぞれ示す。本研究では、細粒分含有率が 5.2% である通常の宇部まさ土に加え、細粒分含有率が 10% になるように宇部まさ土を粒度調整した土試料を作製し、透水による土粒子の流出量や強度変化の違いを細粒分含有率に着目して比較した。以降、土試料については細粒分含有率の数字を用いて、“Fc-5”、“Fc-10”と表記する。Fc-10 は、宇部まさ土から 75 $\mu$ m ふりをを用いて抽出した細粒分を最終的な細粒分含有率が 10% になるよう通常の宇部まさ土に加えて調整した。土質分類法では、2 種類とも細粒分まじり砂質礫に中小分類される。

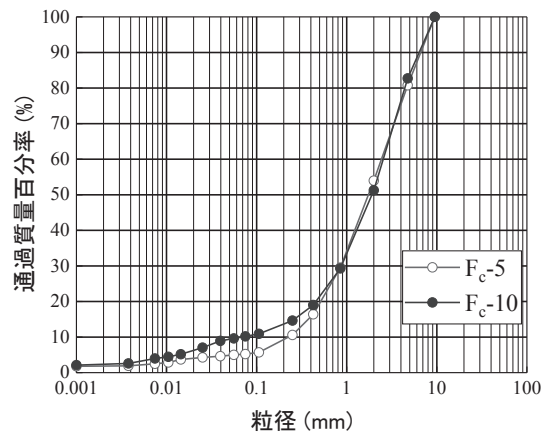


図-2 土試料の粒径加積曲線

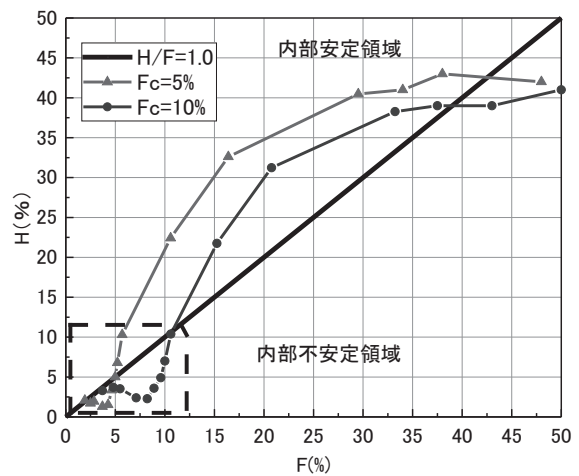


図-3 土試料の H-F 曲線

Kenney et al.<sup>6)</sup>は粒状材料が形成する間隙のくびれ径を基にした幾何学的観点から土粒子の移動しやすさを判定する内部安定指標を提案している。粒径加積曲線のある粒径  $d$  から 4 倍の粒径  $4d$  までの土粒子が形成する間隙くびれ径の最大が  $d$  となることを明らかにした上で、土粒子の流出実験が実施されており、ある粒径  $d$  までの通過質量百分率を  $F$  (%)、 $d$  から  $4d$  までの質量百分率を  $H$  (%) としたとき、「 $H/F \geq 1.0$ 」は内部安定、「 $H/F < 1.0$ 」は内部不安定としている。また、検討する範囲は均等係数  $U_c$  が 3 以上で粒径幅が広い場合は  $F < 20\%$  の範囲、均等係数  $U_c$  が 3 以下で粒径幅が狭い場合は  $F < 30\%$  の範囲となっている。Fc-5、Fc-10 ともに均等係数  $U_c$  が 3 以上なので、検討範囲は  $F < 20\%$  となる。図-3 に今回使用した 2 種類の土

試料の H-F 曲線を示す。横軸に F (%)，縦軸に H (%) を取ったグラフで，H/F=1.0 の基準線を示している。これにより，基準線以下の土粒子は移動する可能性があり不安定と判断される。図-2 の粒径加積曲線にプロットされている点を検討対象とし，それぞれの粒径を  $d$  とし，H, F を求め，図-3 にデータをプロットした。2 種類の土試料において，それぞれ  $D_5$  ( $\approx 75\mu\text{m}$ )， $D_{10}$  ( $\approx 75\mu\text{m}$ ) 以下の範囲 (図中の破線囲み) で内部不安定と判断されたため，細粒分が移動できる間隙空間を有する粒度分布であるといえる。また，流速の影響を受けやすい細粒分の流出に着眼していることもあり<sup>12)</sup>，今回使用する土試料は内部侵食が発生しやすい粒度分布であると判断した。

### 3. 透水を受けたまさ土に対する三軸圧縮試験

#### 3.1 試験装置

図-4 に本試験で用いた三軸圧縮試験機の模式図を示す。試験の測定項目は軸荷重，軸変位，体積変化および間隙水圧である。供試体は直径 5cm，高さ 10cm の円柱状である。透水時に供試体から土粒子が流出するようにペDESTAL に漏斗状のくぼみを設けるとともに，ペDESTAL から下部タンクまでの管路を従来の内径 2mm から 4.5mm に拡張したシンプレックスチューブに交換した。供試体の下部端面には 250 $\mu\text{m}$  または 425 $\mu\text{m}$  の網目状のメッシュ，6mm 径の孔を 21 個開けたアクリル板の順にペDESTAL に設置した (写真-1)。供試体上部に上部タンク，供試体下部に下部タンクを接続し，供試体に下向きの浸透流を与えることで細粒分流出を発生させる。下部タンクに供試体を通じた排水と侵食した土粒子が集まる仕組みとなっている (写真-2)。本試験機は，上部および下部タンクの両方に背圧を作用させ，透水中の有効拘束圧を保つように留意した。透水を行わないケースではアクリル板とメッシュの代わりにポーラスストーンとろ紙を用いた。

#### 3.2 試験方法

空気乾燥させたまさ土に初期含水比10%になるよう加水し，所定の間隙比となるように内径5cm，高さ10cmの二つ割りモールド内で突固めて成形し，ペDESTAL に設置した。次いで，背圧100kPaを作用させて，間隙圧係数B値が0.95以上であることを確認した後，有効拘束圧 $\sigma'_v=30\text{kPa}$ で等方圧密した。その後，供試体に浸透流を発生させる場合は，上部タンクの初期水位を基に動水勾配が5になるように上部タンクの高さを調節した。ため池堤体と類似する河川堤防では，河川堤防指針<sup>13)</sup>により照査基準として裏のり尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値が0.5より小さくなるように定められており，室内試験における動水勾配は原位置として過大な値であり，しかも後述する限界動水勾配を大きく超えていることに留意する必要がある。本実験では，動水勾配が小さいと土粒子が流亡せず，

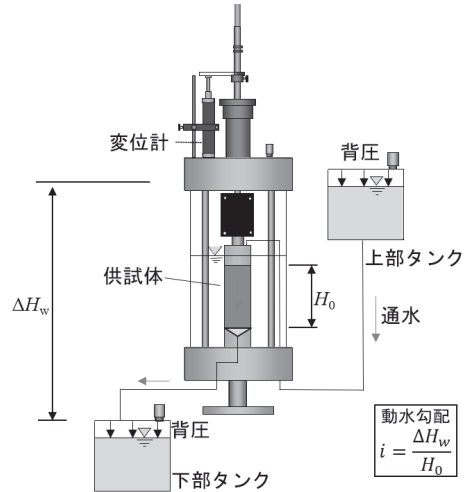


図-4 改良した三軸試験圧縮装置

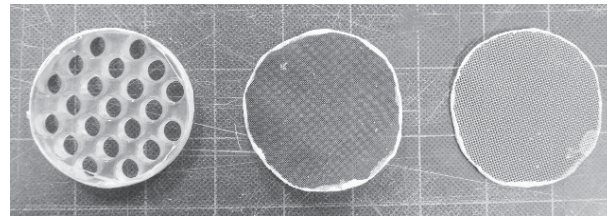


写真-1 アクリル多孔板と各種メッシュ (左からアクリル多孔板，250 $\mu\text{m}$  メッシュ，425 $\mu\text{m}$  メッシュ)

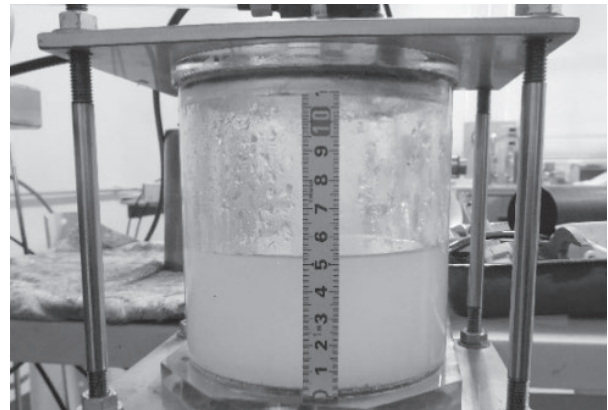


写真-2 下部タンクに集まる排水の様子

逆に大きすぎると下部タンクにつながる配管で土粒子が詰まることから，細粒分流出が起こるような動水勾配を設定した。下部タンクの容量 (785ml) が一杯になるまで透水を行った後，直ちにひずみ速度0.2%/minで軸ひずみが15%に至るまで排水せん断を行った。試験終了後，下部タンクに集められた排水の濁度を測定した。排水を炉乾燥したのち，排出土砂の質量を測定した。また，ふるい分けによる排出土粒子の粒度分析を行った。なお，透水を行わない場合は，圧密終了後ただちに排水せん断した。

表-2に三軸圧縮試験のケースを示す。同表には，使用した土試料，各供試体の透水の有無 (あり：○，なし：×)，

表-2 三軸試験の試験ケース

No.	試料名	透水の有無	メッシュサイズ (μm)	限界動水勾配 $i_c$	初期湿潤密度 $\rho_{10}$ (g/cm <sup>3</sup> )	初期乾燥密度 $\rho_{d0}$ (g/cm <sup>3</sup> )	初期間隙比 $e_0$	圧密後間隙比 $e_c$	透水後間隙比 $e_A$	透水後間隙比 $e_B$
5-0	Fc-5	×	0	-	1.962	1.760	0.487	0.469	-	-
5-0'		×		-	1.971	1.784	0.467	0.453	-	-
				-	1.895	1.717	0.529	0.513	-	-
5-250		○	250	1.10	1.989	1.801	0.488	0.476	0.477	0.482
5-425	○	425	1.11	1.979	1.799	0.478	0.465	0.461	0.468	
10-0	Fc-10	×	0	-	1.966	1.744	0.474	0.453	-	-
10-0'		×		-	1.967	1.782	0.452	0.438	-	-
				-	1.885	1.708	0.528	0.505	-	-
10-250		○	250	1.13	1.961	1.780	0.486	0.461	0.435	0.465
10-425		○	425	1.11	1.958	1.773	0.480	0.471	0.469	0.475

メッシュ径, 限界動水勾配  $i_c$ , 初期湿潤密度  $\rho_{10}$ , 初期乾燥密度  $\rho_{d0}$  および各過程における間隙比を示している. 限界動水勾配  $i_c$  は式 (1) で算出した.

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e_c} \quad (1)$$

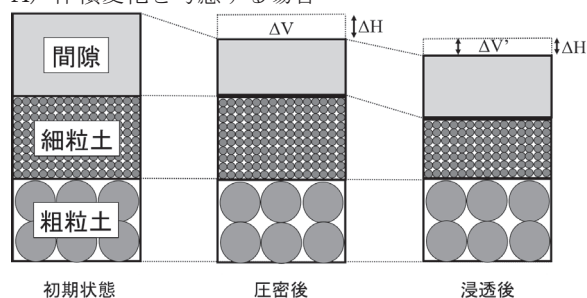
ここで,  $G_s$  は土粒子の比重,  $e_c$  は供試体の圧密後間隙比である. 透水ありのケースは, メッシュ径 250μm, 425μm を用いて, 細粒含有率 5%, 10% それぞれ 2 ケースずつ実施した. なお, 各ケース 1 個の供試体でのデータである. 透水なしのケースは, 初期間隙比を変えて 4 ケースずつ実施した. 最終的に, 透水ありのケースと圧密後間隙比が最も近い試験ケースを 5-0, 10-0 とし, それ以外を 5-0', 10-0' とした.

### 3.3 透水後 (せん断直前) の間隙比 $e_A$ と $e_B$

透水を行うことで生じる土粒子の流出や供試体の体積変化によって間隙比が変化する. 土粒子の流亡による土粒子の密度  $\rho_s$  は一定とし, 乾燥密度  $\rho_d$  の変化を考慮して透水後の供試体の間隙比を算出した. 透水後の供試体乾燥質量は, 試験後に測定し得られる排出土粒子の質量を, 供試体初期乾燥質量から差し引いて算出できるが, 透水後の供試体体積は本試験で用いた試験機で直接測定することができなかった. そこで, 透水時に測定可能な軸変位の変化量からおおよその体積変化を求め, 透水による供試体の体積変化を考慮した場合の透水後の間隙比  $e_A$ , 体積変化を考慮しない場合の透水後の間隙比  $e_B$  を算出した.  $e_A$  を算出する手順は以下の通りである.

透水による体積変化  $\Delta V'$  は, 圧密によって変化した体積  $\Delta V$  とその時の軸変位量  $\Delta H$ , 透水による軸変位量  $\Delta H'$  より式 (2) のように定義する. 圧密時と透水時それぞれにお

A) 体積変化を考慮する場合



B) 体積変化を考慮しない場合

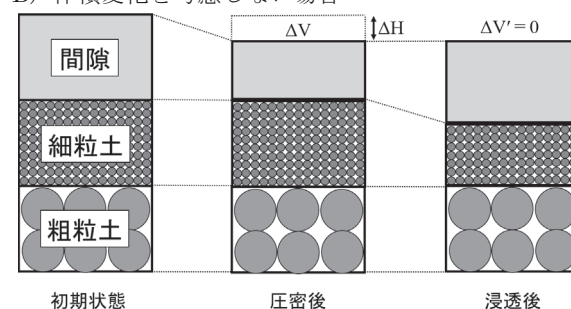


図-5 体積変化のモデル図

いて, 軸変位量に対する水平方向の収縮量が同じになると仮定すると, 圧密時と透水時それぞれにおいて, 軸変位量に対する体積変化量は同じとなる. このとき, 式 (2) における  $\Delta V/\Delta H$  は圧密時の供試体の軸変位量に対する体積変化の比率を表しており, 透水過程で得られた軸変位量に掛けることで, 体積変化量を算出した. しかし, 実際はこの  $\Delta V/\Delta H$  が圧密時と透水時で同じになるとは限らず, 圧密時よりも, 透水時の水平方向の収縮量が大きくなった場合には透水後間隙比が  $e_A$  を下回ることが考えられる.

$$\Delta V' = \frac{\Delta V}{\Delta H} \times \Delta H' \quad (2)$$

この透水による体積変化 $\Delta V'$ により透水後乾燥密度 $\rho_{dA}$ は式 (3) で算出する。

$$\rho_{dA} = \frac{m_{s0} - m_{sd}}{V_0 - \Delta V - \Delta V'} \quad (3)$$

ここで、 $V_0$ は供試体初期体積、 $m_{s0}$ は供試体初期乾燥質量、 $m_{sd}$ は試験終了後に下部タンクから回収した排出土粒子の乾燥質量である。

したがって、透水による体積変化を考慮した場合の間隙比 $e_A$ は式 (4) で算出する。

$$e_A = \frac{\rho_s}{\rho_{dA}} - 1 \quad (4)$$

ここで、 $\rho_s$ は土粒子の密度である。

次に透水による体積変化を考慮しないと仮定した間隙比 $e_B$ を求めた。算出する際には、式 (3) において $\Delta V' = 0$ と考える。よって、透水後乾燥密度 $\rho_{dB}$ は式 (5) で算出する。

$$\rho_{dB} = \frac{m_{s0} - m_{sd}}{V_0 - \Delta V} \quad (5)$$

したがって、透水による体積変化を考慮しない場合の間隙比 $e_B$ は式 (6) で算出する。

$$e_B = \frac{\rho_s}{\rho_{dB}} - 1 \quad (6)$$

実際は、透水による体積膨張の可能性も考えられるが、本研究では体積膨張しないと仮定し、透水後の実際の間隙比は $e_A \sim e_B$ の間に存在することとした。

#### 4. 試験結果と考察

##### 4.1 排出土粒子について

##### 4.1.1 ふり分けによる粒度分析

表-3に排出土粒子の全質量、粒度および侵食率を示す。本実験では、佐藤ら<sup>10)</sup>が定義した、式 (7) で表される侵食率 $R_e$ をパラメータとして結果を整理した。

$$R_e = \frac{m_{sd}}{m_{s0}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

ここに、 $m_{sd}$ は排出土砂の乾燥質量、 $m_{s0}$ は供試体初期乾燥質量である。

表-3より 5-250 以外の試験ケースにおいて、75 $\mu\text{m}$ 以下の土粒子が5~7割占めていることがわかった。5-250は他のケースと比べると細粒分の割合が小さかった。土粒子の割合の合計が100%にならないのは、排出した土粒子の量がわずかであったため、測定誤差が生じたと考えられる。メッシュ径、細粒分含有率による侵食率の違いに傾向はみられなかった。

表-3 排出土粒子の全質量、粒度および侵食率

No.	排水の濁度 (度)	全質量 (g)	粒度 ( $\mu\text{m}$ )	質量 (g)	組成割合 (%)	侵食率 (%)
5-250	303.3	1.36	106~250	0.60	44.1	0.39
			75~106	0.10	7.4	
			~75	0.49	36.0	
5-425	182.8	0.68	250~425	0.03	4.4	0.20
			106~250	0.12	17.6	
			75~106	0.05	7.4	
			~75	0.43	63.2	
10-250	221.8	0.78	106~250	0.07	9.0	0.23
			75~106	0.06	7.7	
			~75	0.43	55.1	
10-425	307.8	0.86	250~425	0.01	1.2	0.25
			106~250	0.1	11.6	
			75~106	0.07	8.1	
			~75	0.61	70.9	

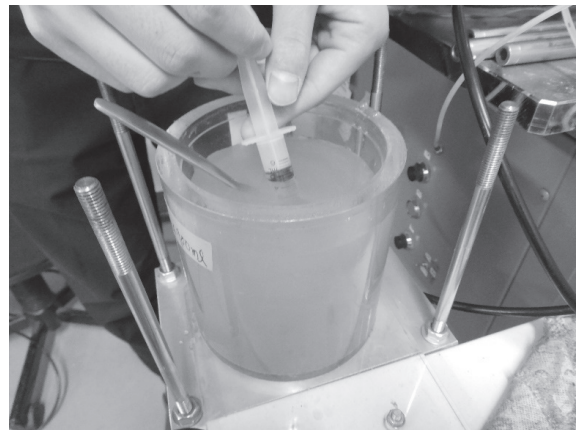


写真-3 下部タンクに回収された排水の濁度測定の様子

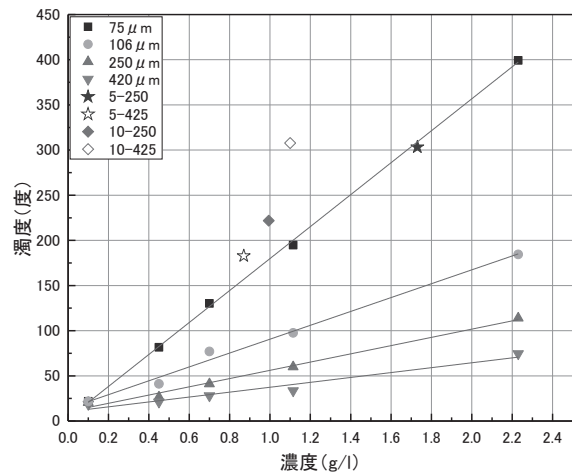


図-6 濁度と濃度の関係

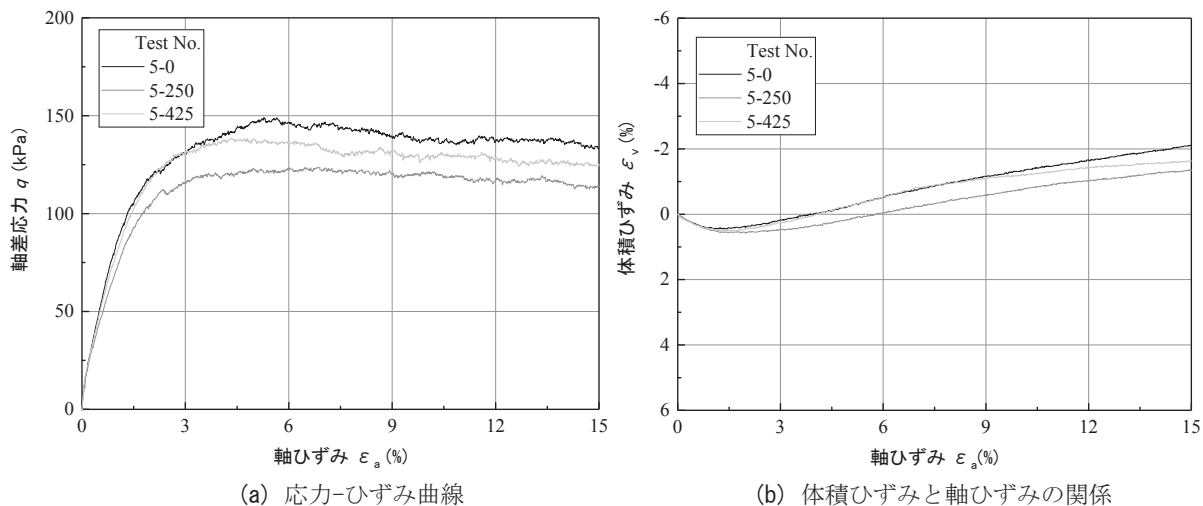


図-7 排水せん断挙動 ( $F_c=5\%$ )

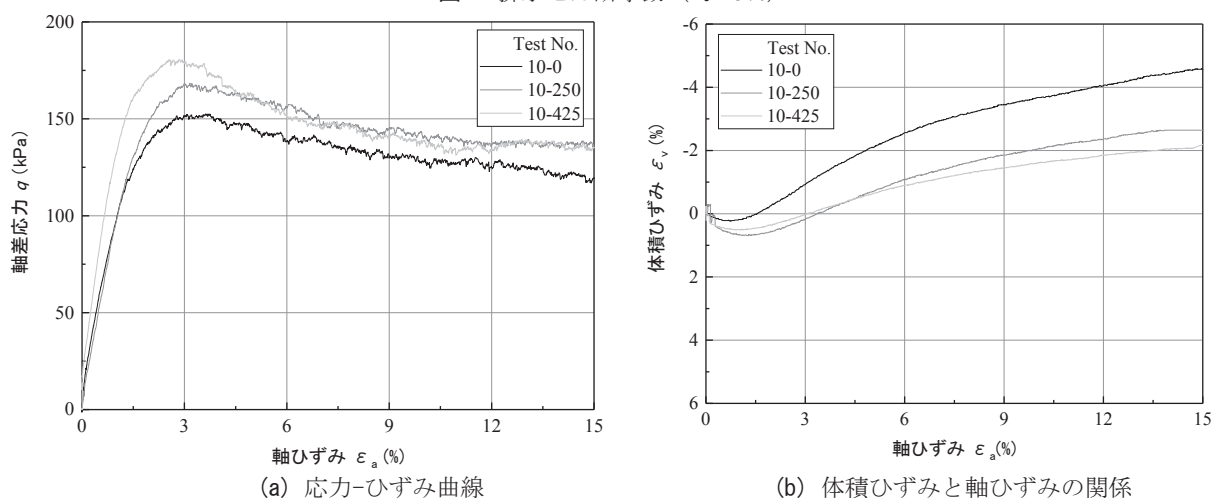


図-8 排水せん断挙動 ( $F_c=10\%$ )

#### 4.1.2 濁度計を用いた粒度分析

4.1.1 では、ふるいを用いた排出土粒子の粒度分析結果を示したが、1g 前後の土粒子に対するふるい分けは測定誤差が生じた。また、沈降分析は、砂質土の場合は 2mm ふるい通過分から炉乾燥質量で 115g 程度をとり、試料とすると規定されているため<sup>14)</sup>、本研究で得られた 1g 前後の排出土砂では適さないと判断した。この項では、その補足として行った濁度計を用いた粒度分析について述べる。

透過・錯乱光測定方式の濁度計は懸濁液中の粒径の小さな粒子により強く反応し、高い濁度値を示すことが分かっている<sup>15)</sup>。この性質を利用することで土懸濁液中の微量な土粒子の粒度を調べた。

以下に述べる①および②のデータを図-6 に示す。横軸の濃度は排水に含まれる土粒子の全質量を、三軸試験機による実験で使用した下部タンク(写真-3)の容量 785mL で除したものである。

① 空気乾燥状態の宇部まさ土を 75 $\mu\text{m}$  のふるいにかけて通過した土粒子を、785mL の蒸留水に所定の量 (0.01g, 0.45g, 0.70g, 1.10g, 1.75g) を入れることで、濃度が異なる疑似排水を作製し、濃度と濁度の

関係を示したもの。同様に、106 $\mu\text{m}$ , 250 $\mu\text{m}$ , 420 $\mu\text{m}$  のふるいを通過した土粒子を用いた結果も示している。

② 表-3 の排水の濁度を“本試験のデータ”とし、所定の濃度に応じた濁度の大きさを示したもの。メッシュ径ごとにそれぞれ示した。

図-6 より、①のグラフは直線関係を示し、同濃度に対して粒径が小さくなるほど濁度が高くなり、近似直線の傾きの勾配が大きくなることが分かった。

5-250 以外の本試験のデータは 75 $\mu\text{m}$  以下の土粒子による近似線より大きな濁度を示したことから、排出土中に 75 $\mu\text{m}$  以下の土粒子が多く含まれていることが推測でき、4.1.1 のふるい分けの結果における傾向と一致した。また、5-250 のデータは 75 $\mu\text{m}$  以下の土粒子による近似線上にデータがプロットされ、他のケースよりも細粒分の割合が小さいという 4.1.1 のふるい分けの結果における傾向と一致した。一方でメッシュ径による侵食の傾向の違いは観察されなかった。

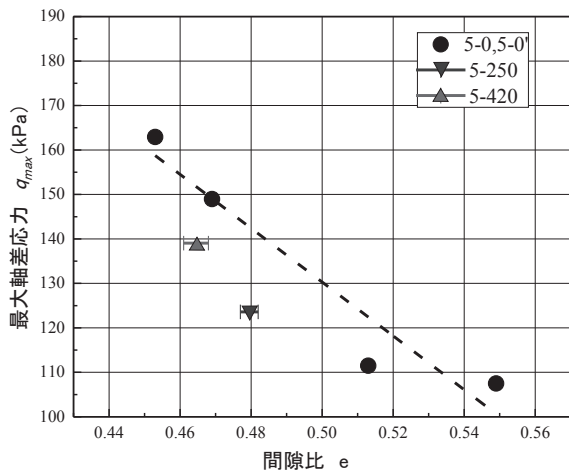


図-9 せん断前間隙比と最大軸差応力の関係( $F_c=5\%$ )

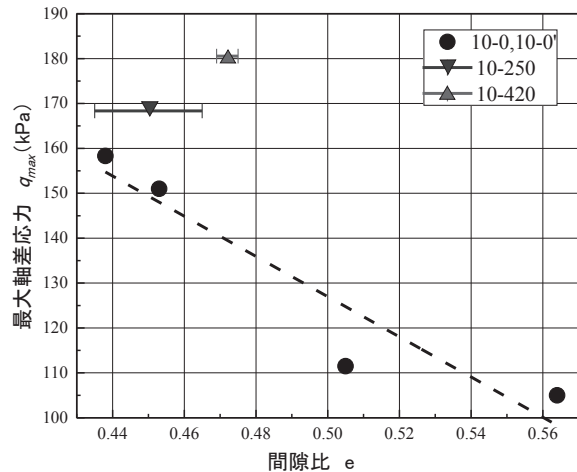


図-10 せん断前間隙比と最大軸差応力の関係( $F_c=10\%$ )

#### 4.2 透水を受けたまさ土の排水せん断挙動

図-7(a), (b)に  $F_c=5$  における排水せん中の軸差応力  $q$  ( $=\sigma_a-\sigma_r$ ,  $\sigma_a$ : 軸方向応力,  $\sigma_r$ : 側方応力) と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係および体積ひずみ  $\varepsilon_v$  と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係を示す。透水なしのケースのデータは,  $e_c$ が透水ありのケースの  $e_c$ に最も近い5-0のデータを示している。図-7(a)より, 250 $\mu\text{m}$ , 425 $\mu\text{m}$  メッシュ径を使用した場合のいずれにおいても, 透水によりピーク強度  $q_{max}$  (最大軸差応力) が低下している。5-250のピーク強度は, 透水なしのケースのピーク強度と比較して30kPa程度の差が生じた。同様に, 定常状態強度 ( $e_a=15\%$ 時の軸差応力) も低下した。図-7(b)をみると, 透水ありのケースでは,  $\varepsilon_v$ が膨張側で小さくなる挙動を示した。

図-8(a), (b)に  $F_c=10$  における軸差応力  $q$  と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係および体積ひずみ  $\varepsilon_v$  と軸ひずみ  $\varepsilon_a$  の関係を示す。透水なしのケースのデータは,  $e_c$ が透水ありのケースの  $e_c$ に最も近い10-0のデータを示している。図-8(a)より, 250 $\mu\text{m}$ , 425 $\mu\text{m}$  メッシュ径を使用した場合のいずれにおいても, ピーク強度, 定常状態強度がともに増加した。一方, 図-8(b)をみると, すべてのケースで, 密詰め挙動を示した。その中でも透水ありのケースでは透水なしのケースに比べて供試体が緩い状態にあったと考えられる。表-2より, 10-425に関しては, 10-0の  $e_c$ より  $e_A$ ,  $e_B$ がどちらも大きいことから, 透水なしのケースに比べて緩い状態であったことが分かる。10-250に関しては, 10-0の  $e_c$ が  $e_A$ より大きく,  $e_B$ より小さいため, 表-2からは, 透水なしのケースに比べて緩いか密か判断できないが, 図-7(b)の体積ひずみ-軸ひずみの関係より緩い状態であったと考えた。 $F_c=10$ では,  $F_c=5$ の傾向とは異なり, 透水なしのケースよりも透水ありのケースの方が密度は低いものの, せん断強度が増加した。

#### 4.3 せん断前の間隙比とピーク強度の関係

4.2では, 間隙比が類似した試験ケースによる結果を比較したが, 微小な間隙比の違いが強度に影響を与えている可能性は排除できない。この項では, 間隙比と4.2で顕著に差が現れたピーク強度の関係を直接示すことで透水による強度への影響を検討した。図-9, 10にそれぞれ  $F_c=5$ ,  $F_c=10$ におけるせん断前(透水終了後)の供試体の間隙比と  $q_{max}$  の関係を示す。透水ありのケースの間隙比を示す横線は左端が  $e_A$ , 右端が  $e_B$  である。10-250では, 式(2)における圧密時の供試体の軸変位量に対する体積変化の比率を表す  $\Delta V/\Delta H$  が他のケースより大きかったため,  $e_A$ の値が小さくなり, 間隙比の差が広がったと考えられる。圧密時, 軸変位量に対する水平方向の収縮が他のケースに比べ大きかったと推測できるが, 今回, その理由は特定できなかった。図中に示す破線は, 透水なしのケース(各4点)の近似線である。この近似線より, 間隙比が小さくなる(密になる)につれて,  $q_{max}$ の値が大きくなっていることが分かる。図-9では, 5-250および5-425の点が近似線よりも下に示された。一方, 図-10では, 10-250および10-425のデータが近似線よりも上に示された。 $F_c=5$ ,  $F_c=10$ 両ケースに共通する特徴は, 近似線とは少し外れた位置に透水ありの結果が示されたことである。近似線とのピーク強度の差は10-425がもっとも大きく, その差は約30kPaであった。

この近似線と透水ありの試験結果の差から, せん断直前の間隙比が同じでも, 透水の有無で力学特性が異なることが分かった。4.1の結果より, 土粒子の流出量は全体のわずかでしかなく, この力学特性の違いは骨格構造の変化が関連していると考えられる。兵動ら<sup>16)</sup>は砂, シルト, 粘土などが入り混じった中間土の中でも, 細粒分含有率の低い中間土は粗粒土が形成する骨格構造がその強度特性を支配し, 細粒土は補助的に影響を及ぼすと指摘している。図-3のH-F曲線や4.1の結果から透水により間隙を移動した土粒子のほとんどは細粒分であったと考え

られることから、透水により細粒土の強度発現に対する補助的な効果は  $F_c-5$  では減少し、 $F_c-10$  では増加したといえる。

## 5. 結論

本研究では、三軸圧縮試験機において細粒分の流出が可能な状態で透水を行うことで、せん断特性や侵食状況にどのような影響があるのか、細粒分含有率を変化させた供試体を用いて検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 侵食状況を調べたところ、細粒分含有率やメッシュ径のサイズに関わらず、流出土砂には細粒分が多く含まれ、 $75\mu\text{m}$  よりさらに細かい土粒子が多いことが分かった。しかし、メッシュ径による侵食率の違いに傾向はみられなかった。
- 2) 細粒分含有率が 5% では透水を受けることでピーク強度、定常状態強度がともに低下した。
- 3) 細粒分含有率が 10% では透水を受けることでピーク強度、定常状態強度がともに増加した。一方で、透水ありの方が透水なしのケースに比べて密度が低かったことが示唆された。
- 4) 間隙比-ピーク強度関係から細粒分含有率が 5%、10% の両ケースにおいて、密度変化に対応しない強度の変化が認められ、せん断直前の間隙比が同じでも、透水の有無で力学特性が異なることが分かった。これにより、透水による土粒子接点間の細粒分の剥離や目詰まりといった骨格構造の変化も強度変化に影響を与えたと推測できる。

供試体への透水量は下部タンクの容量 (785ml) 以下と制限があり、半ば強制的に透水の打ち切りを定めた。しかし、この細粒分流出現象は長期的に徐々に進行する現象であると考えられる。今後は、下部タンクの容量を増やし、通水量や動水勾配の変動といった透水履歴の違いが力学挙動にどのように影響を与えるか検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) 農林水産省：「ため池」  
[http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai\\_saigai/b\\_tameike/](http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/) (閲覧日：2019年6月15日)。
- 2) 田中忠次，龍岡文夫，毛利栄征：東北地方太平洋沖地震による藤沼湖の決壊原因調査について，第23回

- ダム工学会，23巻，2号，pp.99-114，2013。
- 3) 農林水産省農村振興局整備部防災課：ため池管理マニュアル，p.5，2015。
- 4) 永井茂，田中勉：浸透破壊トラブル事例の集積とその要因の分析，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第20号，pp.269-278，2016。
- 5) 堀俊和，毛利栄征，青山咸康：豪雨による農業用ため池の破壊原因と被災の特徴，農業土木学会論文集，No.218，pp.253-263，2002。
- 6) Kenney, T. C., and Lau, D: Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215-225, 1985.
- 7) 前田健一，近藤明彦：粒度分布形状に起因する内部侵食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響，土木学会論文集 A2 (応用科学)，Vol.70, No.2, pp.507-517, 2014。
- 8) 藤澤和謙，村上章，西村伸一：土の内部で生じる土粒子侵食の解析手法，農業農村工学会論文集，No.260, pp.85-93, 2009。
- 9) Sato, M., Kuwano, R.: Laboratory testing for evaluation of the influence of a small degree of internal erosion on deformation and stiffness, *Soils and Foundations*, Vol.58, pp.547-562, 2018。
- 10) 佐藤真理，桑野玲子：内部侵食が地盤の変形・強度特性に及ぼす影響の定量的評価，生産研究，66巻，4号，pp.3-7，2014。
- 11) 山本哲朗，宮崎晃一，勝部安昭，寺山 崇，三浦老章，中野利春：2001年芸予地震により被災した東広島市内のため池調査，土と基礎，50巻，11号，pp.45-47，2002。
- 12) Justin, J. D.: The Design of Earth Dams, *Trans of ASCE*, Vol.87, pp.49-54, 1923.
- 13) 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 (改訂版)，pp.46-47，2012。
- 14) 公益社団法人地盤工学会：土質試験 基本と手引き 第二回改訂版，p.30，2014。
- 15) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，No.698, pp.93-98, 2002。
- 16) 兵動正幸，金郁基，中田幸男，吉本憲正：砂・粘土混合土の非排水せん断強度特性に及ぼす細粒分の影響，土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp.215-225, 2010。

(2019年6月17日 受付)