変形する土質しゃ水材料の透水特性に及ぼす 圧密条件、鉛直応力及び変位速度の影響

久野 彰大^{1*}·高畠 正治²

¹電源開発㈱ 技術開発部 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 ²電源開発㈱ 技術開発部 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 室リーダー *E-mail: akihiro_hisano@jpower.co.jp

断層変位に伴う地表面変位が生じた場合、変位箇所直上およびその周辺の構造物が被害を受ける可能性 がある。特に、フィルダムなどの貯水機能を有する盛土構造物が地表面変位により変形した場合、構造物 内部の変形と、浸透流への影響について検討することが必要である。

本研究はロックフィルダムを対象として、変形を受けた土質しゃ水材料の透水特性を把握することを目 的とする。本稿は著者らが製作した実験装置を用いた、段階的な供試体の変形を伴う透水実験の方法と結 果について報告するものである。圧密条件、鉛直応力及び変位速度をパラメータとした今回の実験条件に おいては、実験材料の透水係数はせん断に伴い概ね小さくなる結果を得た。

Key Words : fill dam, impervious materials, shear deformation, coefficient permeability

1. はじめに

これまで、断層活動によって生じた地表面変状(断層 変位)に伴い上部構造物が被害を受ける事例が報告され ている。例えば、1999 年 8 月 17 日に発生したトルコ・ コジャエリ地震や、同年 9 月 21 日に発生した台湾集集地 震では、断層変位により橋、鉄道、ダムなどの土木構造 物が甚大な被害を受けた^{1),2,3}。中でも集集地震において は、断層変位により、重力式コンクリートダムである石 岡ダム本体の右岸側基礎直下に約 7.5m の段差が生じ、 決壊に至る被害を受けた。また国内においても、2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通り地震や、2016 年 4 月 16 日に発生した平成 28 年(2016 年)熊本地震では、地 表地震断層の出現が確認され、多くの構造物が被害を受 けている⁴(土木学会地震工学委員会:平成 28 年(2016 年)熊本地震 地震被害調査結果 速報会の開催につい て http://committees.jsce.or.jp/eec2/node/76)。

このように、断層変位に伴う地表面変位が生じた場合、 変位箇所直上およびその周辺の構造物が被害を受ける可 能性がある。特にフィルダムなどの貯水機能を有する盛 土構造物が地表面変位により変形した場合、構造物内部 の変形と、浸透流への影響について検討することが必要 である。

そこで本研究では、ロックフィルダムを対象として、 変形を受けた土質しゃ水材料の透水特性を把握すること を目的に、中空円筒供試体を用いたねじりせん断実験装 置を製作し、これを用いて透水実験を行った。

本稿は著者らが製作した実験装置の内容と、その実験 装置を用いた、段階的にせん断変位を受ける土質しゃ水 材料の透水実験方法と結果について報告するものである。

2. 実験装置概要

(1) 実験装置

実験装置の概要と寸法を図-1及び図-2に示す。本実験 装置は、中空円筒供試体に対し、所定の垂直力およびせ ん断変位を与えながら、供試体に通水し、供試体からの 排水量を基に透水係数を求めることができる。垂直力と せん断変位はそれぞれ独立して供試体に付与することが できる。垂直力は、垂直力載荷装置により、供試体の上 部から、油圧アクチュエーターを動力としたシリンダー を介して、加圧板により付与することができる。せん断 変位は、AC サーボモーターで駆動する回転台により、 供試体の底面から一定の回転変位を付与することができ る。

供試体の容器となる、中空円筒モールドを**写真-1**に示 す。中空円筒供試体は、内管と外管で構成される中空円 筒モールド内に設置される。供試体の通水方向は、供試 体内側から外側の水平方向である。供試体の通水量は、



図-1 せん断透水実験装置の概要



(単位: mm)

図-2 せん断透水実験装置の寸法

排水槽に流出した排水量を指標としている。

供試体の通水量の大きさは、水圧により調整しており、 エアーコンプレッサーを用いて、水圧を増減することが できる。

(2) 計測方法

本実験の計測項目は次のとおりである。

- (1) 供試体にかかる鉛直荷重
- (2) 供試体の鉛直変位



写真-1 中空円筒モールド

- (3) 供試体のせん断ひずみ(回転変位)
- (4) 供試体からの排水量
- (5) 供試体からの排水の水温

鉛直荷重は、ロードセルにより計測した。鉛直変位は、 ダイヤルゲージ型変位計にて計測した。せん断ひずみは、 回転台の中に設置されたポテンションメーターで得られ る回転角度を基に算出した。供試体の排水量およびその 水温は、デジタルはかりとデジタル温度計にてそれぞれ 計測した。

3. 実験材料と供試体作成

(1) 実験材料

実験材料は、土質しゃ水材料の一例として、実際のロ ックフィルダムの土取場近くで採取した花崗岩まさ土と 礫混じり粘性土の混合材料である。実験材料の粒度分布 を図-3に示す。実験材料の粒度分布は、実在するダム土 質しゃ水材料の粒度分布を基に、実験装置の制約上、最 大粒形を 2mm に調整した。2mm 以下の粒度分布につい ては、実在するダム土質しゃ水材料の 2mm アンダー粒 度と近似となるような混合比を検討し、実験材料を作成 した。

実験材料の物理試験結果を表-1に示す。また、実験材料の突固めおよび透水試験結果を表-2、図-4に示す。表-2 で使用した記号のうち、Wopt は最適含水比、 ρdmax は最大乾燥密度、k100 は最大乾燥密度での透水係数、k95 は締固め度 95%における透水係数を表す。透水試験は、JIS A 1218:2009 に基づき実施した。



⊠–3	実験材料の粉度分布
	大败们们们又们又几个

表-1 実験材料の物理試験結果	Ł
-----------------	---

項目	実験材料	
土粒子の比重 G_s	2.614	
液性限界 WL(%)	69.6	
塑性限界 Wp(%)	39.4	
塑性指数Ip	30.2	

	W_{opt}	$\rho_{\rm dmax}$	k_{100}	k_{95}
	(%)	(g/cm^3)	(cm/s)	(cm/s)
実験材料	31.9	1.353	4.2×10^{-7}	5.4×10^{-7}



(2) 供試体作成

最適含水比に調整した実験材料を、中空円筒モールド に入れ、最大乾燥密度の95%となるように、2.5kg ラン マーで突固めた。

4. 実験方法



図-5 せん断透水実験 実験フロー

(1) 実験方法

本実験装置を用いたせん断透水実験の方法を図-5 に 示す。まず、供試体を含む中空円筒モールドを回転台に 設置し、供試体を飽和させるため、一日通水した。次に、 供試体を所定の鉛直応力にて圧密した後、せん断前の透 水係数を算出した。その後、回転台により供試体にせん 断変位を順次作用させ、所定のせん断ひずみにて透水係 数を算出した。

(2) 透水係数とせん断ひずみの定義

本稿に示す透水係数及びせん断ひずみの値は、次の考 え方に基づくものである。

中空円筒供試体内の水の流れは、供試体内を水平一様 に生じる二次元浸透放射流であると仮定すると、この時 の水平方向透水係数は次式で計算することができる⁵。

$$k_{h} = 0.366 \frac{Q}{Lh(t_{2} - t_{1})} \log\left(\frac{r_{2}}{r_{1}}\right)$$
 (1)

ここで、 k_h :水平方向透水係数 (cm/s)、Q:排水量 (cm³)、 L:供試体高さ (cm)、h:水頭差 (cm)、 t_2 - t_1 :計測時間 (s)、 r_1 は供試体の内径 (cm)、 r_2 は供試体の外径 (cm) である。

また、本実験のせん断ひずみ γ_Hは次式で定義した。

$$\gamma_H = \frac{r\Delta\theta}{H} \tag{2}$$

ここで、Hは供試体高さ(cm)、rは中空円筒供試体の

平均半径 (cm)、 $\Delta \theta$ は中空円筒供試体の回転角(ラジアン)である。

(3) 実験条件

実験条件を表-3に示す。本実験では拘束圧として鉛直 応力を供試体に作用させており、その大きさは、実ダム 内部に作用する土被り厚さに起因する鉛直応力を推定し て決定した。事前検討結果を踏まえ、供試体に十分せん 断面を形成できるように、せん断ひずみ 50%に到達した 時点で実験を終了した。また、せん断速度は、地盤工学 会の JGS0551:2009 を参考にしつつ、最大せん断ひずみ 50%までせん断変位を与えることを考慮し、1%/min を基 本とした。せん断に伴う透水特性に対する鉛直応力、せ ん断速度、圧密条件の影響を確認するために、Case1、 Case2 及び Case3 をそれぞれ行った。

表−3 実験ケース

ケース名	せん断速度	過圧密比	鉛直応力	推定土被り 厚さ
Case1-1	1%/min	-	0kPa	Om
Case1-2	1%/min	-	100kPa	5m
Case1-3	1%/min	-	200kPa	10m
Case1-4	1%/min	-	400kPa	20m
Case1-5	1%/min	-	1,200kPa	60m
Case1-6	1%/min	-	1,600kPa	80m
Case1-7	1%/min	-	2,000kPa	100m
Case2	約 300%/min	-	2,000kPa	100m
Case3	1%/min	10	200kPa	10m

5. 実験結果

(1) 鉛直応力の影響

実ダム内部の土質しゃ水材料は、その自重により、深 さ方向に異なる拘束圧が作用していると考えられる。こ こでは、異なる鉛直応力条件下においてせん断を受ける 土質しゃ水材料の透水特性を確認するために、種々の鉛 直応力条件においてせん断透水実験を実施した。

なお、今回実施した全ての実験条件において、徐々に せん断された供試体は、せん断ひずみ5~15%の範囲で、 せん断面が水平方向に形成された。一例として、鉛直応 力 100kPa におけるせん断に伴う供試体の変形状況を図 -6 に示す。せん断ひずみ 10%時において、白く見えるマ ーカーが供試体中央部でずれており、水平方向にせん断 面が形成されていることが確認できる。

各鉛直応力条件における、せん断に伴う透水係数の推移を図-7に示す。せん断に伴い、透水係数は概ね小さくなった。また、鉛直応力が大きくなるに伴い、圧密後の透水係数は小さくなった。

各鉛直応力条件における、せん断に伴う供試体の鉛直



図-6 鉛直応力 100kPa における せん断に伴う供試体の変形状況



図-7 各鉛直応力条件における 透水係数とせん断ひずみの関係



変位を図-8に示す。ここで供試体はせん断に伴い、次第 に鉛直下方に変位した。これは、せん断に伴う負のダイ レイタンシーにより供試体の体積が小さくなり、より締 まった状態になったためであると考えられる。このこと は、せん断に伴い透水係数が小さくなったことと整合的 である。また、概ね鉛直応力が大きくなるに従い、鉛直 下方への変位量も大きくなる傾向がある。その他の特徴 として、せん断ひずみが概ね30%まではせん断に伴い次 第に鉛直下方に変位するものの、せん断ひずみがさらに 大きくなると、供試体はほとんど変位しなくなる傾向が ある。鉛直応力0kPaでは、せん断に伴い、供試体はほと んど変位しなかったものの、透水係数は次第に小さくな った。この一因として、細粒分の移動に伴う供試体内の 目詰まりの発生が考えられる。

(2) 変位速度の影響

これまでの実験で設定したせん断速度は、前述のとおり1%/minとした。これを本実験装置の回転台の速さに 換算すると約0.0006cm/sとなる。一方、地震時に断層が すべる速度(ここでは、断層すべり速度と呼ぶ。)につい ては種々の報告があり、例えば東京大学地震研究所 (http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/seno/withdrawal.slowslip.html) によると、断層すべり速度は概ね1m/s程度の値をもつよ うである。そこで、せん断透水特性に及ぼすせん断速度 の影響を簡易的に確認するため、せん断速度を相対的に 大きくした実験を行った。すなわち、実験装置の制約も 考慮し、せん断速度を約300倍の約0.2cm/sとした。

せん断速度を約0.2cm/s、鉛直応力2,000kPaにおける、 せん断に伴う透水係数と鉛直変位の推移を図-9 及び図 -10 に示す。なお、回転速度が大きいため、これまでの 実験結果と比較して、透水係数を算出したせん断ひずみ の大きさに若干のばらつきがある。また、トルク不足に より回転台が停止したため、せん断ひずみ 17.5%で実験 を打ち切った。せん断速度1%/minの実験結果と同様に、 透水係数はせん断に伴い小さくなった。また、供試体は せん断に伴い、鉛直下方に変位した。

(3) 圧密条件の影響

一般に土質材しゃ水材料は、土のような粒径の細かい 土質材料で主に構成されており、そのような土質材料が 過圧密状態でせん断を受けると、正のダイレイタンシー により体積が膨張することが知られている。正のダイレ イタンシーにより体積が膨張した土質材料は、間隙比が 増大し、透水係数が大きくなることが予想される。ここ では、実験材料のせん断一透水特性に及ぼす圧密状態の 影響を確認するため、過圧密状態の供試体をせん断変形 させたときの透水係数の変化を調べた。

過圧密比 10、鉛直応力 200kPa における、せん断に伴 う透水係数と鉛直変位の推移を図-11 及び図-12 に示す。 透水係数はせん断前後でほとんど変化しなかった。一方、 供試体はせん断に伴い次第に鉛直上方に変位した。これ



図-9 Case2 透水係数とせん断ひずみの関係



図-10 Case2 鉛直変位とせん断ひずみの関係



図-11 Case3 透水係数とせん断ひずみの関係



図-12 Case3 鉛直変位と透水係数の関係

は、せん断に伴う正のダイレイタンシーにより、供試体 の体積が膨張したためである。供試体の体積が膨張する と、間隙比が大きくなり、透水係数が大きくなると考え られるが、今回の実験では鉛直上方の変位量が最大でも 0.3mm 程度と僅かであったため、供試体の透水係数はほ とんど変化しなかったと推察される。

6. まとめ

土質しゃ水材料のせん断に伴う透水係数の変化を算出 するためにせん断透水実験装置を製作し、一例として最 大粒径を調整した実ダムの土質しゃ水材料に対し鉛直応 力、せん断速度及び圧密条件を変えてせん断透水実験を 行った。本実験により得られた知見は以下の通り。 (1) 鉛直応力の大きさを変えてせん断透水実験を行った。

その結果、鉛直応力の大きさに関わらず、実験材料の透水係数はせん断に伴い概ね小さくなった。

 (2) 観測値から推定される断層すべり速度を踏まえて、 せん断速度を大きくしたせん断透水実験を行った。その 結果、透水係数はせん断に伴い小さくなった。これは、 本実験で設定したこれまでのせん断速度(1%/min)で得られたせん断一透水関係と変わらない結果である。
(3) 過圧密状態の実験材料を用いてせん断透水実験を行

った。その結果、せん断に伴い正のダイレイタンシーに より供試体は鉛直上方に変位(膨張)したものの、透水 係数はほとんど変化しなかった。

今回の実験条件においては、せん断速度が変化した場 合であっても、せん断に伴う透水係数の変化に違いは見 られなかった。ただし、今回設定した2種類のせん断速 度は、観測値から推定される断層すべり速度と比べてい ずれもかなり小さい値であることから、今後実験装置を 改良する余地があると考えている。

また、本実験で使用した実験材料は最大粒径 2mm と なるように粒度調整したものであり、実際の土質しゃ水 材料は数十mmから数百mm程度の大きな粒径をもつ土 質材料から構成されているため、せん断に伴う変形状態 や変形後の透水状態に相違がある可能性がある。

土質しゃ水材料のせん断に伴う透水特性を把握するた め、今後も引き続き実験を実施する所存である。

参考文献

- 当麻純一、橋本隆雄:1999 年トルコ・コジャエリ地 震調査速報、土木学会誌、Vol.84, pp.87-90, 1999.
- 2) 能島暢夫呂:1999 年トルコ・コジャエリ地震の被害 調査報告、土木計画学シンポジウム「災害リスク研究 の最前線と社会への提言」、2000.
- 3) 大町達夫: 1999 年台湾集集地震によるダムの被害に ついて、ダム工学、Vol.10, No.2, pp.138-150, 2000.
- 4) 黒澤英樹、楮原京子、三輪敦志、佐藤ふみ、今泉俊文、 宮内崇裕、橋本修一、中島秀敏、白澤道生、内田淳一: 2011年4月11日福島県浜通りの地震に伴う地表地震 断層―いわき市田人町塩ノ平における露頭観察とボ ーリング調査(速報)―、活断層研究、Vol.36, pp.23-30, 2012.
- 5) 酒井左武郎、川北米良: 放射流式透水試験器の試作実験について、土木学会論文集、Vol.64, pp.39-47, 1959.

EFFECT OF CONFINING STRESS, SHEAR RATE AND CONSOLIDATION ON DEFORMED IMPERVIOUS SOILS

Akihiro HISANO, Masaharu TAKABATAKE

We developed the apparatus for torsional shear - permeability test on hollow cylindrical specimen of soils in order to examine the relation between the shear deformation and the permeability of the impervious materials for rock fill dams. As a fundamental approach concerning the permeability change of impervious materials deformed by the vertical offset, we conducted the permeability test concerning the confining stress, the shear rate and the consolidation. It was found that the coefficient of permeability after shear deformation did not increase under the condition of this experiment.