

繰返し単純せん断を経験した土の透水性変化

Water Permeability Changes of Sandy Soil Subjected Cyclic Simple Shearing

齊藤王二郎	Ojiro SAITOH	(中央大学大学院)
石田和希	Kazuki ISHIDA	(中央大学大学院)
熊谷悠	Yuu KUMAGAI	(中央大学大学院)
齋藤邦夫	Kunio SAITOH	(中央大学)
石井武司	Takeshi ISHII	(中央大学)

透水性は土の重要な性質の一つであり、地盤工学に関する多くの問題に関わっている。一般的に透水性を表わすパラメータである透水係数は定数として取り扱われるが、決して不変的な値ではない。すなわち、地震により繰返し载荷を経験する土はダイレイタンスー特性により透水性が変化すると考えられるからである。そこで本研究では、珪砂 7 号に対し繰返し単純せん断試験と変水位透水試験を行って、繰返し载荷に伴う透水係数変化に関する基礎データを収集した。その結果、透水係数変化は体積変化特性と同様に、双曲線モデルで表現出来ることを示し、推定式を構築する際のパラメータについて考察した。

キーワード：透水係数、単純せん断試験、繰返し载荷、ダイレイタンスー、双曲線モデル (IGC : D-4, D-6)

1. はじめに

透水性は土の最も基本的な性質の一つであり、河川や海岸堤防の浸透問題あるいは地下水の揚水問題をはじめ、フィルダムのコア材や廃棄物処分場の遮水材における設計を支配する。透水の程度を表す透水係数は、採取試料に対する室内透水試験や原位置透水試験によって直接求めるのが普通であるが、粒径や間隙比などから推定する場合もある。

通常、地盤の透水係数は、対象とする設計課題において定数として取り扱われるが、廃棄物処分場における遮水層では埋立て厚さの増大や地震のような繰返し荷重を受けて、漸次変化することが考えられる。この時、透水係数が使用された基準値より大きくなることが懸念される。

透水係数は、それを砂に限れば粒径、間隙比に依存する。さらに、せん断によって生じる体積変化の特性は、相対密度 D_r 、せん断ひずみ γ 、鉛直有効応力 σ_v' あるいは応力履歴などの要因に強く依存する。

そこで本研究では、珪砂 7 号を試料に選び、同試料のせん断に伴う体積変化と透水係数の関係について調べた。特に本研究では新たに繰返し単純せん断・透水試験装置を試作し、せん断と透水が対をなすように組み合わせた一連の試験を行い、繰返し回数に伴う供試体の体積ひずみと透水係数の変化を克明に捉え、载荷回数 N 、相対密度 D_r 、せん断ひずみ γ 、鉛直有効応力 σ_v' の影響について検討した。

2. 試験内容

2.1 試験装置

透水性に及ぼす繰返しせん断の影響を適切に把握するには、i) 供試体に一樣な変形を与えることができること、ii) せん断変形した後の供試体の通水断面積が合理的に評価できることが、試験装置の要件である。上述した要件を極力満たすため、図-1 に示す繰返し単純せん断・透水試験装置を試作した。すなわち、同図に示すように 4 つのヒンジ支点を有する可動剛板内で矩形供試体を異方圧密し、剛板上端を強制的に変位させ、その剛性を利用して供試体全体に両振りの一様なせん断変形をひずみ制御で与えた。また、通水断面積の算出ではせん断後の供試体断面積を A とし、せん断中の供試体鉛直変位量 ΔH と体積変化量 ΔV を精度高く測定し、 $\Delta V = A \cdot \Delta H$ の関係が成り立つことを利用して、 A を逆算した。なお、後述するように全試験を通じてせん断中の体積変化 ΔV は正の値をとり(収縮側)、供試体がベDESTALより大きくなる不都合は認められず、通水断面積の評価は妥当なものと考えられる。

供試体に作用させる鉛直有効応力は、同装置上部に備えたペロフラムシリンダー、拘束圧はセル内の空気圧、せん断応力は载荷ねじでヒンジ付き剛板上部を強制的に傾けて所定のせん断ひずみを与えた。鉛直有効応力ならびにせん断応力は図中のロードセル、鉛直変位及びせん断変位量はそれぞれ鉛直変位計、水平変位計で測定している。

また、繰返しせん断により供試体に発生する体積変化は、**図-1**中に示す経路を通じて水の移動として体積計に導かれる。せん断後の透水試験はブロックで経路を切り替え、供試体下部チューブを体積計に、上部チューブを越流水槽に接続することで行った。なお、体積計は、せん断時には容量5cc・最小目盛0.01ccのものを、透水試験時には容量80cc・最小目盛0.2ccのものを用いた。

2.2 使用試料及び試験方法

使用した試料は、**表-1**に、粒径加積曲線を**図-2**にそれぞれ示す。これらのデータより、**表-1**の**表-1**は豊浦砂に類似した粒度特性を有することが分かる。

繰返し単純せん断・透水試験に用いた矩形供試体の寸法は、縦60mm×横60mm×高さ40mmで空中落下法により作成した。供試体にはまずCO₂ガスを通気させ、さらに脱気水を通水させて飽和状態となるようにつとめた。

背圧100kPa、静止土圧係数K₀=0.5の下で異方圧密した供試体に対し、**表-2**に示す3つの試験条件シリーズを設定して各条件に対し1ケースずつ繰返し単純せん断・透水試験を実施した。Aシリーズは相対密度(圧密終了時の値)に着目した試験であり、せん断ひずみ $\gamma=2\%$ 、鉛直有効応力 $\sigma'_v=100\text{kPa}$ とし、相対密度Dr=42.6, 55, 66, 71.6および82.7%の5ケース行った。Bシリーズはせん断ひずみの影響を把握するための試験であり、Dr=80%、 $\sigma'_v=100\text{kPa}$ とし、 $\gamma=0.5, 1, 1.5, 2$ および3%の5ケース設定した。3つ目のCシリーズは、鉛直有効応力に着目した試験シリーズでDr=80%、 $\gamma=2\%$ に固定し、 $\sigma'_v=100, 200$ ならびに300kPaの3ケースとした。

各試験シリーズでは共に、せん断ひずみ速度を $\dot{\gamma}=1.5\%$ / minとし排水条件で供試体をせん断した。せん断試験と対をなす透水試験は圧密終了時にまず行い、繰返し载荷1サイクルごとの終了時に $\gamma=0\%$ の条件下で実施した。つまり、透水試験回数は1回の試験当たり計11回になる。

3. 試験結果と考察

3.1 変形特性(ダイレイタンシー特性)

図-3は繰返し载荷に伴う、体積ひずみ ϵ_v (収縮が正)とせん断ひずみ γ の関係である。同図はA~Cシリーズに対応した試験結果であり、相対密度Dr、せん断ひずみ γ 、有効鉛直応力 σ'_v のパラメータの最大値と最小値に対応する結果を示した。これらのグラフから、繰返し载荷に伴い、土は膨張と収縮を繰り返しながら体積ひずみを蓄積する傾向が共通して認められる。体積膨張傾向は、相対密度、

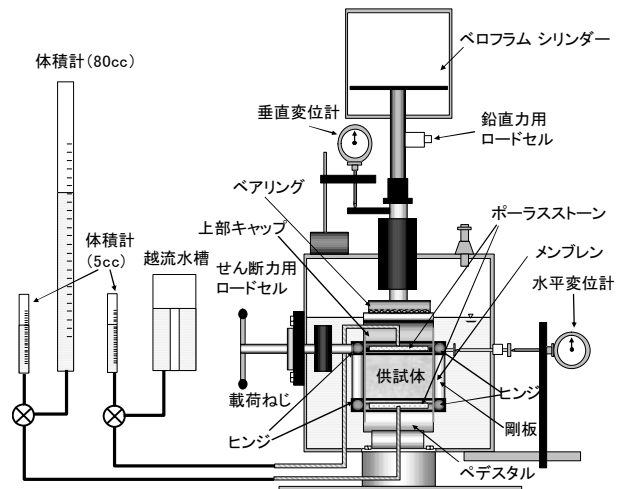


図-1 単純せん断試験機

表-1 砂砂7号の物性値

$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	e_{max}	e_{min}	$D_{50}(\text{mm})$	$D_{10}(\text{mm})$	U_c
2.647	1.234	0.669	0.176	0.120	1.55

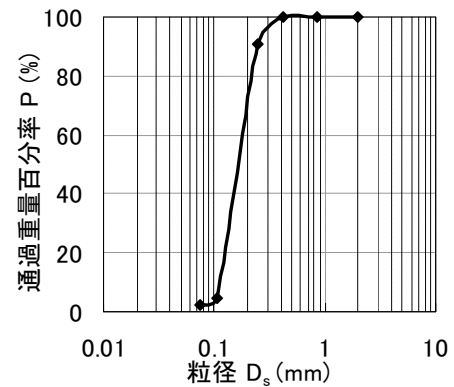


図-2 砂砂7号の粒径加積曲線

表-2 試験条件

		$D_r(\%)$	$\gamma(\%)$	$\sigma'_v(\text{kPa})$
Aシリーズ	1	42.6	2	100
	2	55		
	3	66		
	4	71.6		
	5	82.7		
Bシリーズ	①	78.8	0.5	100
	②	80.8	1	
	③	81	1.5	
	④	82.7	2	
	⑤	80.3	3	
Cシリーズ	I	82.7	2	100
	II	82.2		200
	III	80.9		300

せん断ひずみが大きく、鉛直有効応力が小さい条件で顕著である。同時に、体積ひずみ蓄積量は、相対密度が小さく、せん断ひずみ、鉛直有効応力が大きいものの方が大きくなる。これは、繰返しせん断によって生じる一般的なダイレイタンシー特性の表れ方と一致している。

図-4は、繰返し回数Nと体積ひずみ ϵ_v の関係を示したものである。これより、全てのケースにおいて体積ひずみは繰返し回数の増加に伴い、収束傾向を示しながら一様に

繰返し単純せん断を経験した土の透水性変化

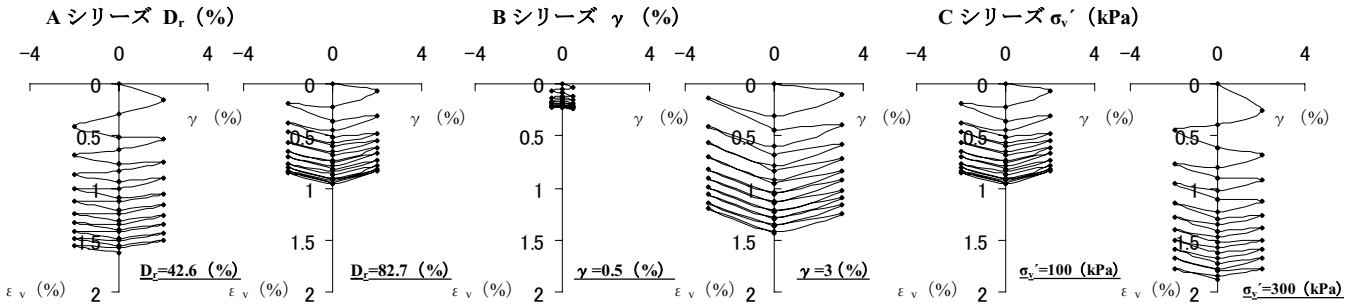


図-3 体積ひずみ ϵ_v ~ せん断ひずみ γ 関係

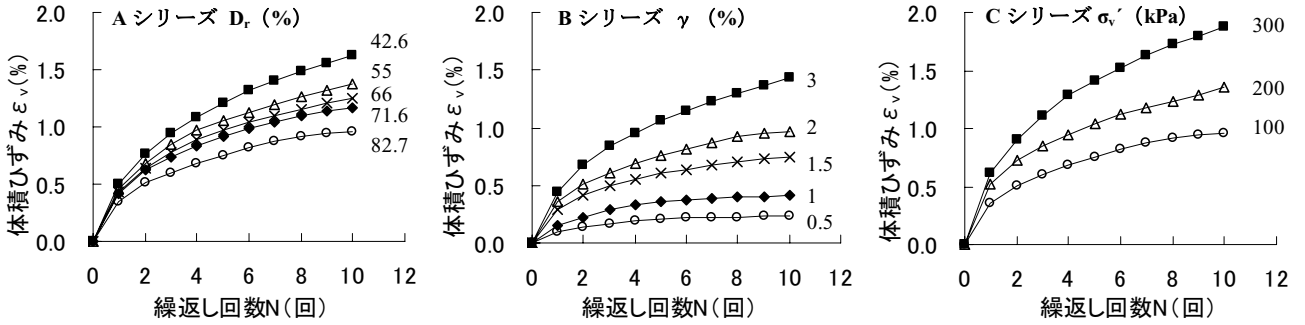


図-4 体積ひずみ ϵ_v ~ 繰返し回数 N 関係

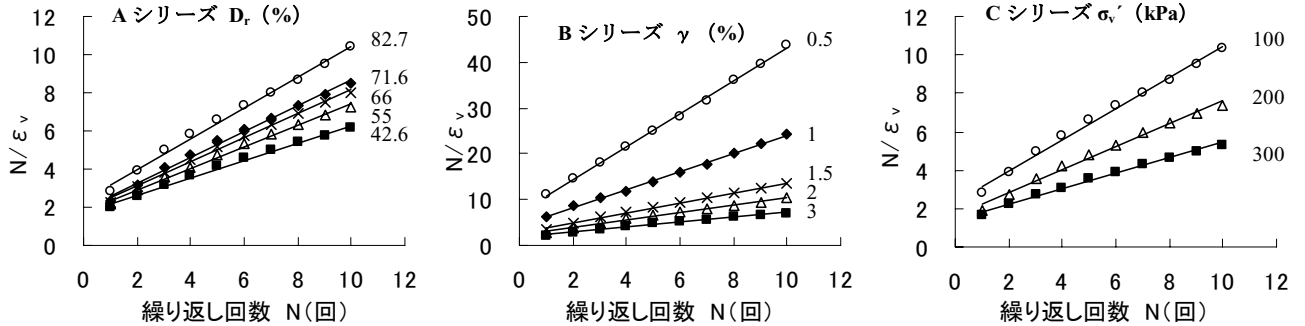


図-5 繰返し回数 N に対する体積ひずみ ϵ_v

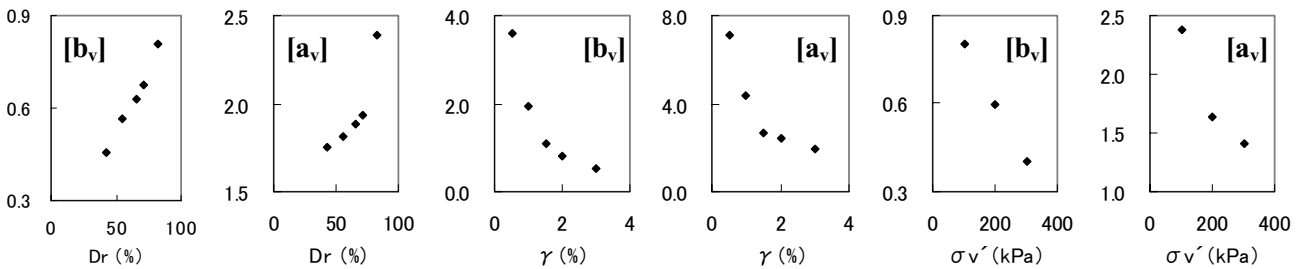


図-6 相対密度 D_r , せん断ひずみ γ , 鉛直有効応力 σ'_v に対する係数 a_v , b_v の傾向

増加することがわかる. このような挙動を表現する式として(1)式のような双曲線関数が用いられる¹³⁾.

$$\epsilon_v = \frac{N}{a_v + b_v N} \quad (1)$$

これを式変形して(2)式を得る.

$$\frac{N}{\epsilon_v} = a_v + b_v N \quad (2)$$

(2)式を用いて試験結果を整理したものが図-5 である. この図から体積ひずみと繰返し回数の関係は直線関係となり, (1)式を用いてモデル化できることがわかった. そこで(1)式中の係数 a_v , b_v を図-5 における結果に対して, 線形

最小二乗法を適用し, 回帰した直線の切片ならびに傾きから読み取った. a_v , b_v は, 相対密度, せん断ひずみ, 拘束圧の違いによる影響を反映していることは明らかである. この点を明白にするため, 各パラメータに対し, 図-5 で評価した a_v , b_v を対応させた結果が図-6 である. D_r に対する a_v , b_v は増加傾向を示すが, γ ならびに σ'_v については減少傾向となった. ここで, $N \rightarrow \infty$ としたときまで(1)式が成り立つならば, 繰返し载荷によって最終的に到達する体積ひずみを(3)式により推定することが可能である.

$$(\epsilon_v)_\infty = \frac{1}{b_v} \quad (3)$$

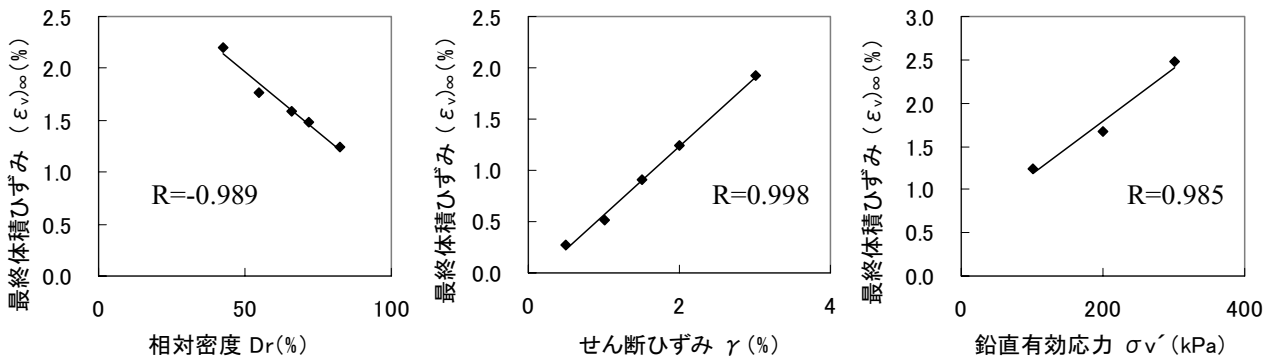


図-7 相対密度 D_r , せん断ひずみ γ , 鉛直有効応力 σ'_v に対する最終体積ひずみ $(\varepsilon_v)_\infty$

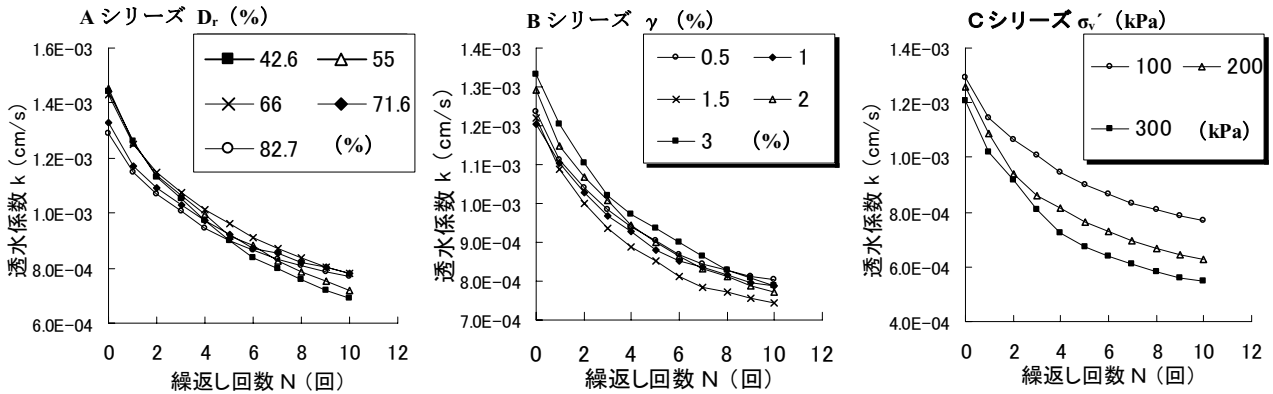


図-8 透水係数 k ~ 繰返し回数 N 関係

すなわち, (3)式より係数 b_v によって最終体積ひずみ $(\varepsilon_v)_\infty$ が決定できる. 各ケースについて求めた最終体積ひずみは図-7 に示すようになった. 同図に相関係数も示す. これより, 最終体積ひずみは, 相対密度が小さく, せん断ひずみ, 鉛直有効応力が大きくなるほど大きな値となり, 今回行った範囲では線形で表現できることが分かった.

3.2 透水係数変化特性

繰返し载荷に伴う透水係数変化を, 透水係数変化が体積変化と密接に関わる点に着目し, 以下考察する.

圧密終了時と繰返し载荷 1 回終了ごとに計測した透水係数を図-8 に示す. 図-8 はそれぞれ, 相対密度 D_r , せん断ひずみ γ , 拘束圧 σ'_v をパラメータとした場合の繰返しせん断回数 N に対する透水係数の変化である. これよりすべてのケースにおいて透水係数は繰返し回数 N に対して単調に減少し, かつ一定値に収束する傾向が認められる. また, 供試体条件としての相対密度, せん断条件としてのせん断ひずみに関する限り, それらのレベルによる透水係数変化に及ぼす差異はそれほど大きくない. むしろ, 鉛直有効応力レベルの違いが, 透水係数変化に与える影響が大きいことが分かる.

前述したように, 繰返し回数に対する透水係数の収束性がパラメータによって違いがあることに注目して, 圧密終了時の透水係数 k_0 で繰返し载荷ごとの透水係数変化 Δk

を基準化して, 透水係数変化率 $\Delta k / k_0$ として示したものが図-9 である. これより, 全てのケースにおいて体積ひずみ同様, 透水係数変化率は繰返し回数の増加に伴い, 収束傾向を示しながら一様に増加することがわかる. よって (4)式を変形した(5)式を用いて双曲線近似を行った.

$$\frac{\Delta k}{k_0} = \frac{N}{a_k + b_k N} \quad (4)$$

$$\frac{N}{\Delta k / k_0} = a_k + b_k N \quad (5)$$

その結果が図-10 である. 透水係数変化率と繰返し回数との関係は直線関係となり, (4)式を用いて双曲線近似が可能なが分かった. 相対密度, せん断ひずみ, 拘束圧の違いに関して a_k , b_k をプロットしたものが, 図-11 である. b_k は相対密度が大きく, せん断ひずみ, 鉛直有効応力が小さくなるほど大きな値となり, b_v と同様の傾向を示す. a_k は相対密度に関して, $D_r=42.6\%$ を除いて正の相関, 鉛直有効拘束圧に関して負の相関が確認でき a_v と同様の傾向を示した. しかしながら, せん断ひずみに関しては明白な相関性を見出すことが出来なかった.

ここで, 透水係数変化率に関しても体積ひずみ同様, $N \rightarrow \infty$ としたときまで(4)式が成り立つと仮定し, 最終透水係数変化率 $(\Delta k / k_0)_\infty$ を(6)式により算出した. 図-12 にその結果を示す.

$$\left(\frac{\Delta k}{k_0}\right)_\infty = \frac{1}{b_k} \quad (6)$$

繰返し単純せん断を経験した土の透水性変化

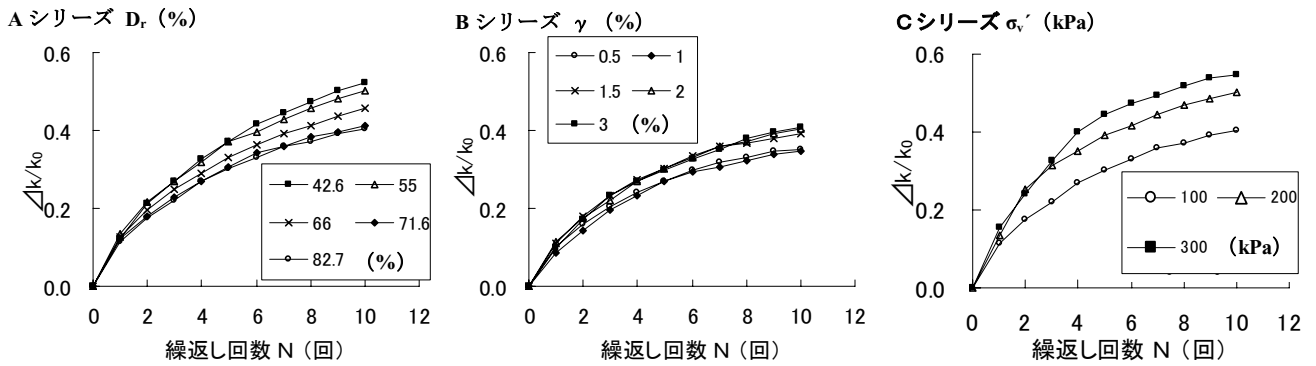


図-9 透水係数変化率 $\Delta k/k_0$ ～繰返し回数 N 関係

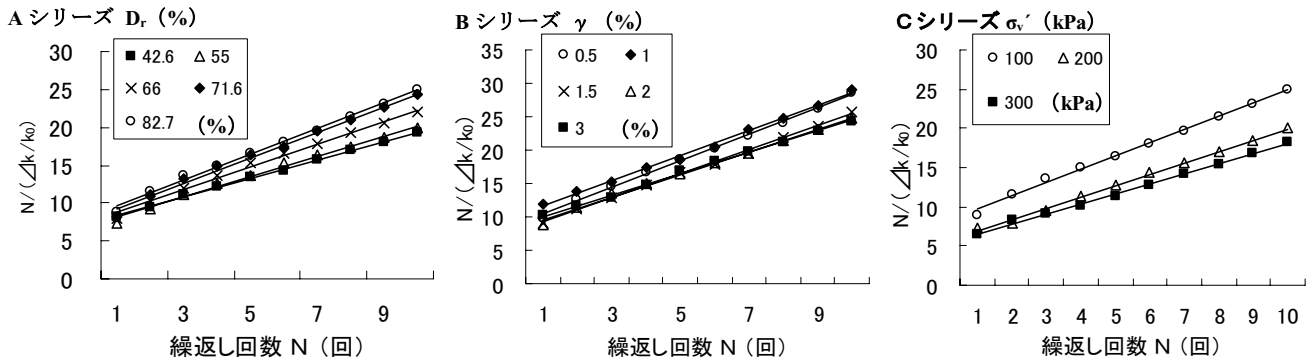


図-10 繰返し回数 N に対する透水係数変化率 $\Delta k/k_0$

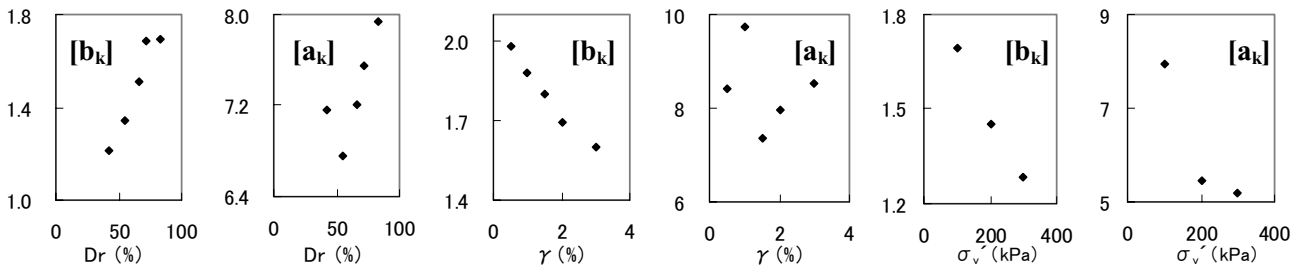


図-11 相対密度 D_r 、せん断ひずみ γ 、鉛直有効応力 σ'_v に対する係数 a_k 、 b_k の傾向

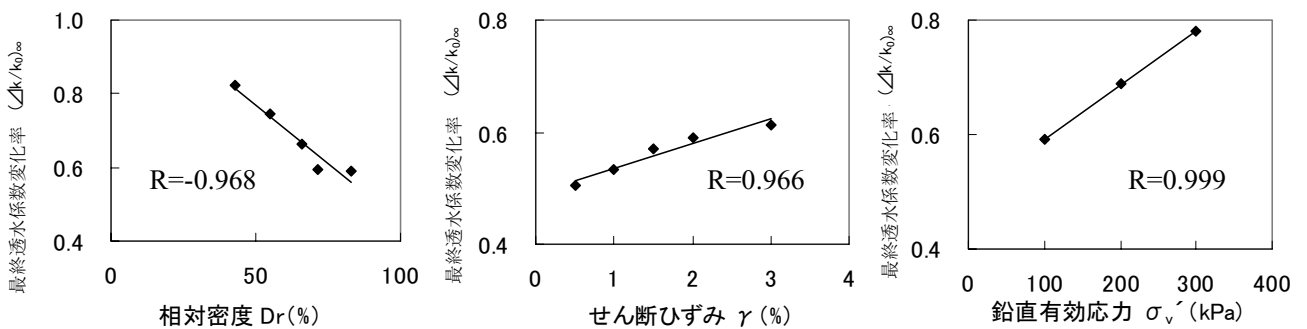


図-12 相対密度 D_r 、せん断ひずみ γ 、鉛直有効応力 σ'_v に対する最終透水係数変化率 $\Delta k/k_0$

これより、最終透水係数変化率は、最終体積ひずみ同様、相対密度が小さく、せん断ひずみ・鉛直有効応力が大きくなるほど大きな値となり、今回行った範囲では線形で表現できることが指摘できる。

3.3 透水係数変化推定式に関する考察

相対密度、せん断ひずみ、鉛直有効拘束圧に関して、

$N=10$ の体積ひずみと透水係数関係を図-13 に、 $N=\infty$ の時の最終体積ひずみと最終透水係数変化率関係を図-14 示す。これより、繰返し载荷により同量の体積ひずみを生じてても、体積ひずみの違いを生じさせるパラメータの種類が異なる場合には、透水係数変化率にも有意な違いが表れることが分かる。すなわち図における直線の傾きが大きいほど透水係数変化が大きいといえ、 $D_r > \sigma'_v > \gamma$ の関係があり、

$N=\infty$ でより顕著である。

図-13, 14における特性より透水係数変化量 Δk は、体積ひずみに対して線形性を示し、相対密度 D_r 、せん断ひずみ γ 、有効鉛直応力 σ_v' 等のパラメータに依存する。つまり Δk は(7)式のように表わせることが把握された。

$$\Delta k = f(\varepsilon_v) \quad (7)$$

4. まとめ

繰返し単純せん断試験と変水位透水試験を行うことで、繰返し载荷と透水係数変化の関係について次のように取りまとめることができる。

- (1) 繰返し载荷に伴う透水係数変化 Δk は、体積ひずみ ε_v に対して直線関係が認められた。

- (2) 双曲線モデル

$$\frac{\Delta k}{k_0} = \frac{N}{a_k + b_k N}$$

における、係数 b_k は相対密度 D_r が大きく、せん断ひずみ γ 、鉛直有効応力 σ_v' が小さくなるほど大きな値となる。

- (3) 係数 b_k から求めた、最終透水係数変化率 $(\Delta k/k_0)_\infty$ は、相対密度が小さく、せん断ひずみ、鉛直有効応力 σ_v' が大きくなるほど大きな値となり、今回行った範囲では線形で表現できる。
- (4) パラメータの違いによる、透水係数変化への影響度は相対密度、鉛直有効応力、せん断ひずみの順に大きい。

謝辞：今回の研究に際し、株式会社誠志工の伊藤氏には、試験機の開発から改良に至るまで親身に対応して頂き大変お世話になりました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 八木則男：繰返しせん断による砂の体積変化と過剰間隙水圧，土木学会論文報告集，No.257，pp.79-90，1978.
- 2) 大岡弘：準平面ヒズミ条件下での排水および非排水状態における砂の繰返しせん断性状，土質工学会論文報告集，Vol.16，No.3，1976.
- 3) 岩本一平，國生剛治：単純せん断試験を用いた試料の沈下特性，礫質土の力学特性に関するシンポジウム，pp.217-222，2001.
- 4) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，第一回改訂版，第6編 透水試験と圧密試験 第2章 土の透水試験，pp.334-347，2000.
- 5) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，第一回改訂

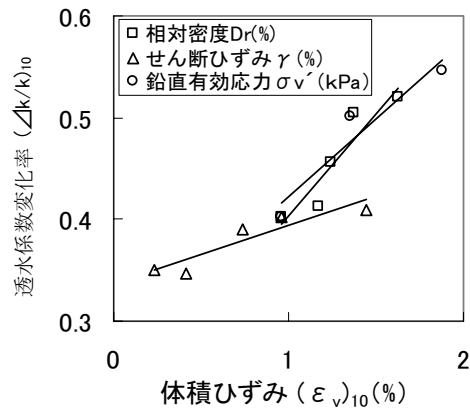


図-13 $N=10$ における透水係数変化率～体積ひずみ関係

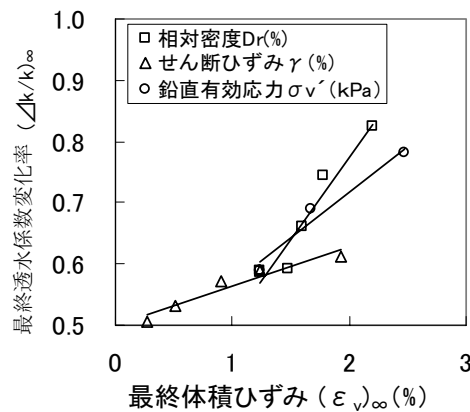


図-14 $N=\infty$ における透水係数変化率～体積ひずみ関係

版，第7編 せん断試験 第8章 基準化されていない繰返し試験，pp.714-722，2000.

- 6) 酒井吉郎，有泉浩蔵，原昭夫，清田芳治，鈴木康嗣：粒状体の体積変化特性定式化（その1）負のダイレイタンシーの定式化，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，構造I，pp.1061-1062，1988.
- 7) 松本尚志，青柳隆之，原昭夫，清田芳治，鈴木康嗣：粒状体の体積変化特性定式化（その2）正のダイレイタンシーの定式化，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，構造I，pp.1063-1064，1988.
- 8) 檜尾正也，中井照夫，星川拓哉，吉田英生：単調および繰返し载荷を受ける砂のダイレイタンシー特性と異方性，地盤工学会論文報告集，41(3)，pp.107-124，2001.
- 9) 三浦均也，前田健一，長谷川敬寿，土岐祥介：種々の砂のストレス-ダイレイタンシー関係，第25回土質工学研究発表会，pp.499-502，1990.
- 10) 森田悠紀雄，坪田邦治，西垣誠，小松満：粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数推定法，土と基礎，53(7)，pp.5-7，2005.
- 11) 清水孝昭，青木雅路：砂質土における透水係数のひずみ依存性に関する考察，地盤工学研究発表会発表講演集，40，1297-1298，2005.

(2009年6月29日 受付)