

繰返し変形作用時の砂の残留強度について

環境社会基盤工学課程 松浦知希
指導教員：豊田浩史

1. はじめに

残留強度は排水せん断あるいは定圧せん断においてせん断応力がピーク値を越え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される¹⁾。残留強度は、すべり面にはたらく最小のせん断強度であることから、主に地すべりの安定解析や橋台の設計などに用いられる指標となっている。

既往の研究²⁾より、地震時には図1のように、地盤はすべり面が生じることで破壊が起こることが確認されており、また、そのときの地盤の水平変位を表したグラフを図2に示す。図2より、地震時に地盤は水平方向に繰返しせん断されることで一方向に変形が進んでいっていることがわかる。しかし、現在設計などで用いられている残留強度は、一方向に単調にせん断されることで変形が進むことを想定している

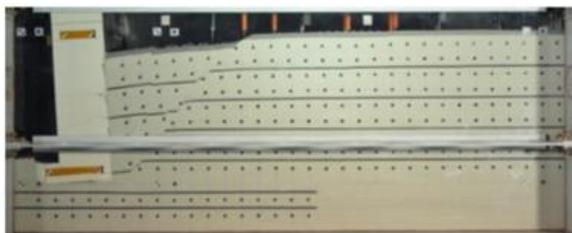


図1 地震時の地盤の変形の様子

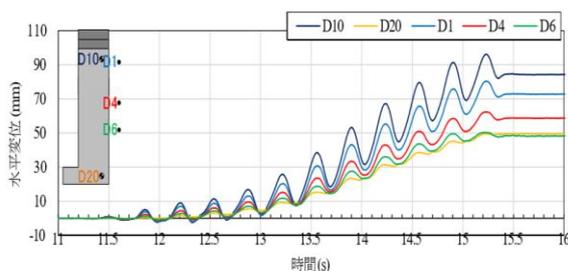


図2 地震時の地盤の水平変位

ものである。そのため、実際の地震時の地盤の変形の進展は、現在の残留強度の想定されている地盤の変形の進展と異なったものになっている。しかしながら、地震時の地盤の変形のように繰返しせん断された場合の残留強度は明らかになっていないのが現状である。もし、せん断のされ方の違いが残留強度に影響を及ぼす場合には、今までの残留強度を用いた設計方法を見直す必要性が出てくる。

そこで本研究では、地震時の地盤の挙動をリングせん断試験によって再現し、繰返し変形時の残留強度が単調変形時と比較してどの程度異なるのかを確認することを目的としている。

2. 試料および試験方法

本研究では、砂の残留強度を求めるために、乾燥砂を用いた定圧リングせん断試験を行った。

(1) リングせん断試験装置

本試験で用いたリングせん断試験装置の概要を図3に示す。本試験装置は残留強度を測定するために開発された試験装置である。試験装置の基本的な構造は、上下に重ねたリングで環状供試体を外側と内側の両方から拘束し、土に垂直応力を作用させながら、円周方向にせん断応力を加えるものである。繰返し一面せん断とは異なり、連続的に大変位を与えることが出来るため、せん断面の状態をより原位置に近い状態で再現できるところが大きな特徴である。また、せん断中には、ほぼ断面積が変わらないことから地すべりでの残留強度を求めるために使用

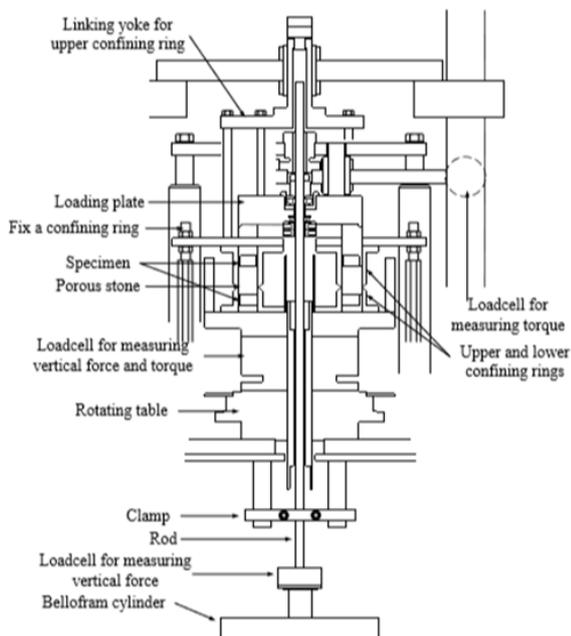


図3 リングせん断試験装置概要

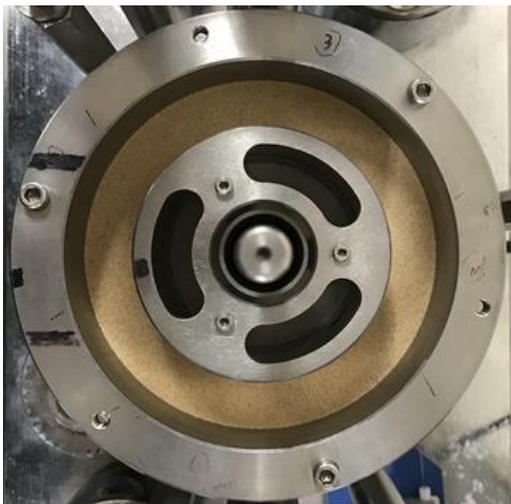


図4 環状供試体

される³⁾。

(2) 試料および供試体

本研究のリングせん断試験では、乾燥砂を用いた供試体で試験を行った。試料は乾燥砂として豊浦砂を使用した。供試体は、高さ 2.5cm、外径 15cm、内径 10cm の上の図4のような環状供試体とした。試験時には上リング部分を固定し、下リング部分を回転させることでせん断を

行うが、そのときの供試体の環の幅の中心部分のずれをせん断変位とした。また、試験条件ごとに、用いる試料の質量を変えることで供試体の相対密度を変化させて試験を行った。

(3) 試験方法

試験条件による相対密度 D_r で供試体を作製、設置したのち、垂直応力 σ を 30kPa で一定にし、30 分間予備圧密を行う。予備圧密が終了後、せん断時のリング同士の摩擦を考慮して、上リングと下リングの隙間を 0.2mm 開ける。その後、垂直応力 σ を試験条件によって変更し、30 分間圧密を行う。圧密が終了後、供試体のせん断強さ τ が残留強度に至るところまで単調または繰返し のせん断を行う。しかし、残留強度は試料や飽和状態などによって異なり、残留強度に至ったとする明確な基準は定められていない。本試験において、変位で 33mm (角度で 30deg) 以上せん断を行うことで残留強度の発現を確認することができたため、今回は全ての試験条件で変位 33mm 以上になるまでせん断を行うこととした。

また、繰返し変形では、地震時の地盤の変形を再現するために、時計回り (正転) に 3deg せん断した後、反時計回り (反転) に 2deg せん断し、これを繰り返していくことで、せん断を行った。せん断時のせん断速度は、単調、繰返し変形ともに、地盤工学会基準「土の圧密定圧一面せん断試験方法」(JGS 0561-2009)で標準とされている 0.2mm/min としてせん断を行った。

(4) 試験条件

以下の表 1 に本試験での試験条件を示す。本試験では、単調、繰返し変形ともに、相対密度 D_r を 40% (緩)、60% (中密)、80% (密) とし、それぞれで垂直応力 σ を 50, 100, 200kPa と変化させた場合の計 18 パターンで試験を行った。それぞれの試験条件で求められたピーク強度、残留強度を比較することで、せん断方法、相対

表 1 試験条件

せん断方法	Dr(%)	垂直応力 σ (kPa)		
		50	100	200
単調	40	50	100	200
	60	50	100	200
	80	50	100	200
繰返し	40	50	100	200
	60	50	100	200
	80	50	100	200

密度 Dr, 垂直応力 σ の違いが残留強度に及ぼす影響について考察した。

3. 試験結果

単調変形, 繰返し変形それぞれの試験結果について以下にまとめる。

(1) 単調変形時試験結果

以下の表 2, 図 5 に単調変形時の試験結果を示す。表 2 と図 5 より, それぞれの相対密度 Dr で垂直応力 σ が大きくなるにつれてピーク強度, 残留強度ともに大きくなっていることがわかる。このことから, せん断時に垂直応力が増加すると砂粒子間の摩擦が大きくなり, その結果, 供試体の強度が増加すること考えられる。また, 垂直応力が同じ場合, 相対密度が大きくなるにつれて, ピーク強度が全体的に増加していることがわかる。このことから, 元々の供試体の密度が密であるほど, せん断時の供試体の最大のせん断強さ τ が増加することが確認できた。このように, 相対密度と垂直応力の組み合わせによってピーク強度は大きく変わることがわかる。

残留強度は, 垂直応力が同じ場合に相対密度の変化によらず, 多少差があるものの, ほぼ一定の値になっていることがわかる。このことから, 残留強度は, 供試体の初期密度によって変化せず, せん断時の垂直応力の大きさによって変化することが確認できた。

表 2 単調変形時試験結果

相対密度 Dr(%)	垂直応力 σ (kPa)	ピーク強度 (kPa)	残留強度 (kPa)
40	50	47.7	42.8
	100	83.6	73.1
	200	144.3	136.1
60	50	47.7	40.2
	100	87.2	71.8
	200	154.1	134.2
80	50	53.9	39.5
	100	98.6	69.5
	200	181.2	134.2

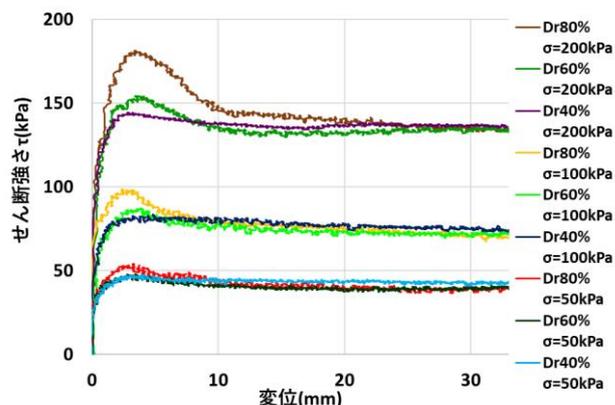


図 5 単調変形時試験結果

(2) 繰返し変形時試験結果

繰返し変形時の試験結果のグラフは, 図 6 のようになる。このグラフからでも, ピーク強度と残留強度は求めることができるが, 単調変形時の試験結果との比較を行いやすくする目的で, 正転時のそれぞれのピーク値を結んだ包絡線を, 本試験では繰返し変形時の試験結果として用いることとした。

以下の表 3, 図 7 に繰返し変形時の試験結果を示す。表 3 と図 7 より, それぞれの相対密度 Dr で垂直応力 σ が大きくなるにつれてピーク強度, 残留強度ともに大きくなっていることがわかる。このことから, 繰返し変形時でもせん断時に垂直応力が増加するに伴って強度が増

加することが確認できた。また、あまり顕著ではないが、垂直応力が同じ場合、相対密度が大きくなるにつれてピーク強度は増加していることがわかる。このことから、単調変形時ほどではないが、供試体の初期密度が密であるほど、せん断時の供試体のピーク強度も大きいことが確認できた。これも単調変形時ほどではないが、相対密度と垂直応力の組み合わせによってピーク強度は大きく変化する。

残留強度は、垂直応力が同じ場合に相対密度の変化によらず、ほぼ一定の値になっていることがわかる。このことから、繰返し変形時でも残留強度は供試体の初期密度によって変化せず、せん断時の垂直応力の大きさによって変化することが確認できた。

4. 試験結果の比較

以下に単調変形時と繰返し変形時の試験結果の比較についてまとめる。

(1) ピーク強度と残留強度の比較

以下の図 8, 9, 10 にそれぞれの相対密度 Dr で単調変形と繰返し変形の試験結果を比較したものを示す。図 8, 9, 10 より、相対密度 Dr が 40, 60% のときは繰返し変形時の方が単調変形時よりもピーク強度は大きくなっているのに対し、相対密度 $Dr80%$ のときは単調変形、繰返し変形ともほぼ一定の値となっているこ

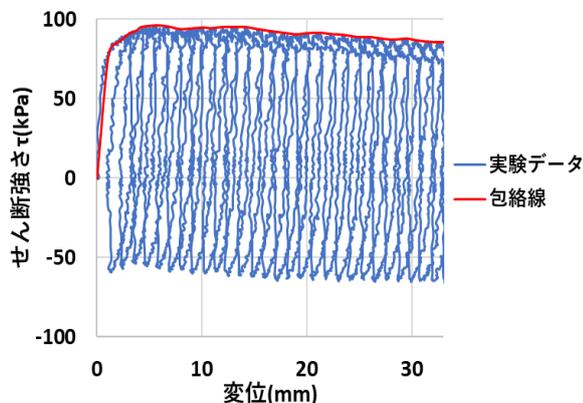


図 6 繰返し変形時のグラフ

表 3 繰返し変形時試験結果

相対密度 $Dr(\%)$	垂直応力 $\sigma(\text{kPa})$	ピーク強度 (kPa)	残留強度 (kPa)
40	50	51.6	45.1
	100	94.7	86.5
	200	172.4	156.4
60	50	53.2	45.1
	100	95.7	85.2
	200	175.3	157.4
80	50	55.8	47.7
	100	100.2	83.3
	200	180.2	156.7

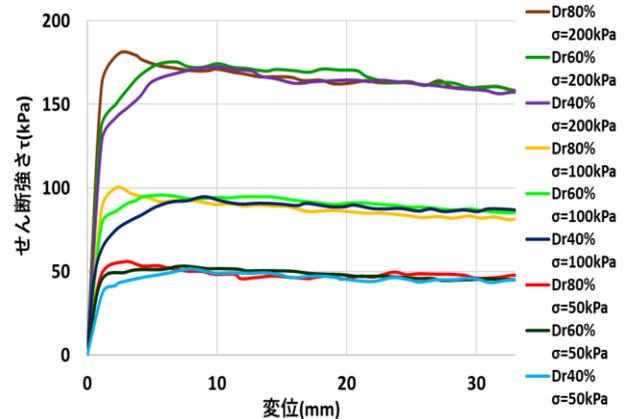


図 7 繰返し変形時試験結果

とがわかる。この結果より、ピーク時にもとの供試体の密度が緩いまたは中密の場合、繰返し変形時に供試体は単調変形時よりも密になり強度が大きくなること、また、密度が密な場合、これ以上密にはならないため、繰返し変形時と単調変形時のピーク強度はほぼ一定になることが確認できた。

また、相対密度 $Dr40\%$ ・垂直応力 $\sigma=50\text{kPa}$ 時を除いて全体的に繰返し変形時の方が単調変形時よりも大きい残留強度になっていることがわかる。繰返し変形時には、単調変形時残留状態時のよりも供試体が密になり、残留強度が大きくなったのではないかと考えられる。垂直応力の増加に伴って残留強度が増加している

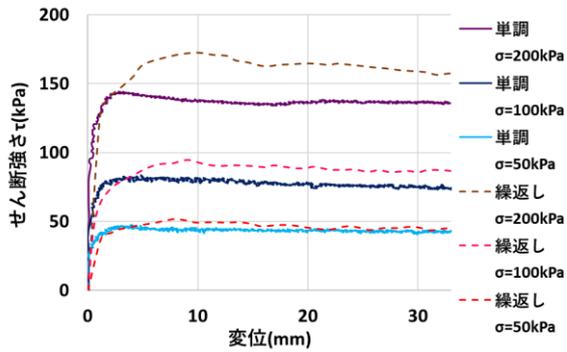


図8 試験結果比較 Dr40%

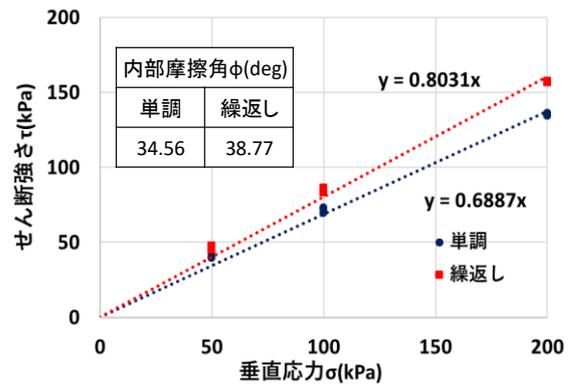


図11 残留強度の内部摩擦角φ

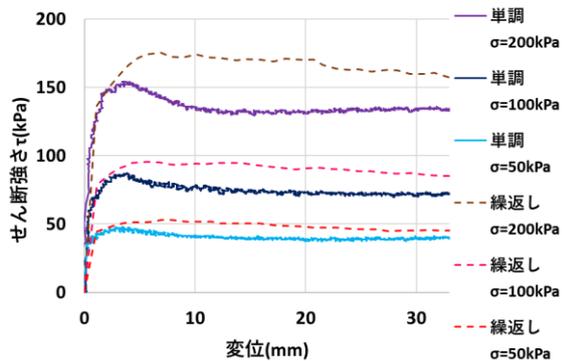


図9 試験結果比較 Dr60%

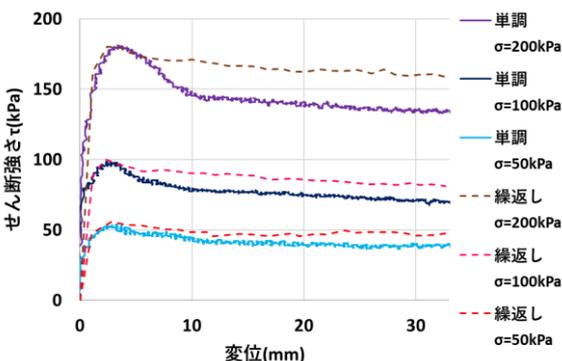


図10 試験結果比較 Dr80%

ことや、垂直応力が同じ場合に相対密度によらず残留強度がほぼ一定になっていることなど、全体的に単調変形時と同じような傾向を示すことがわかった。

(2) 内部摩擦角φの比較

以下の図11に、縦軸に残留強度、横軸に垂直応力σをプロットした際の近似直線から得られ

る内部摩擦角φを示す。本試験より、残留強度は垂直応力σが同じ場合に相対密度Drによらず一定になることが確認できたため、図11には全ての残留強度をプロットすることで内部摩擦角を求めた。内部摩擦角はクーロンの破壊基準より求めた。クーロンの破壊基準は以下に示す通りである。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

ここで、τ:せん断強さ、c:粘着力、σ:垂直応力、φ:内部摩擦角である。本試験では供試体に乾燥砂を用いているため、理論上では粘着力cは0になる。そのため本試験では、近似直線の切片を0として、内部摩擦角φを求めた。

繰返し変形では38.77degになっており、繰返し変形時の方が数値で4.21deg、割合で約12%程度大きい値となっていることがわかる。このことより、残留状態では繰返し変形時の方が単調変形時よりも供試体は密になっていることが推測される。以上より繰返し変形時には残留強度を割り増しで考える必要があるといえる。

5. 結論

以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 繰返し変形でもピーク強度、残留強度の傾向は単調変形と同じような傾向を示す。
- 2) 供試体が中密より緩い場合は、繰返し変形の

方がピーク強度は大きくなる，密な場合は，どちらもほぼ同じになる．

- 3) 初期密度によらず，残留強度は全体的に繰返し変形の方が大きくなる．
- 4) 残留強度の内部摩擦角 ϕ は約 12%程度繰返し変形の方が大きくなる．

以上の結果より，供試体が密である場合，ピーク強度はほぼ変わらないが，最終的な残留強度は繰返し変形の方が大きくなるため，地震による破壊を考えると，砂の残留強度は，内部摩擦角 ϕ で約 12%程度割り増しで考える必要がある．

参考文献

- 1) 鈴木素之，小林孝輔，山本哲朗，松原剛，福田順二：リングせん断試験における粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響，山口大学工学部研究報告，Vol.55，No.2，pp.121-134，2005．
- 2) 鈴木健一，池本宏文，佐名川太亮，阿部慶太，高崎秀明，西岡英俊：橋台の地震時土圧発現機構に関する一考察，土木学会論文集 A1，74 巻，4 号，pp. 341-350，2017．
- 3) 高坂紀久子：不飽和土の力学特性を求めるための簡易な試験手法の開発，長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文，2008．

謝辞

本研究を行うにあたり，多くの方々から多大なるご支援，ご指導頂きました．

豊田浩史准教授には，実験，論文，発表練習など多くの面でご指導頂き，学部 4 年の約 1 年間大変お世話になりました．また，いろいろな相談にも乗って頂き，多くの助言を頂きました．ここに改めて厚く感謝の意を表します．

高田晋技術職員には，実験機器の取り扱い方や試験方法についてご教授頂き，研究の方針に迷った時などには的確な指示や助言を頂き，研

究を進めるうえで大変お世話になりました．ここに改めて厚く感謝の意を表します．

修士課程 2 年の門脇悠太氏，齊藤悠耶氏には，論文の書き方や発表の仕方などをご指導頂き，様々な日常生活の相談にも乗って頂きました．ここに改めて感謝の意を表します．

修士課程 1 年の早川飛翼氏，吉田岬氏には，日々の生活の上でいつも気にかけて頂き，いろいろな面で大変お世話になりました．ここに改めて感謝の意を表します．