

繰返し載荷による不飽和砂質土の強度特性

地盤工学研究室 三浦大右
指導教員 豊田浩史

1. はじめに

2004年に発生した新潟県中越地震により旧山古志村を中心とした地域で斜面崩壊や地すべりなどの土砂災害が発生し、多くの箇所で大規模な河道閉塞が発生した。長岡市においては、地震の3日前に、台風23号により約100mmの降雨を記録した。これにより斜面が水を含んでいたため、多くの崩壊が起こったことが指摘されている。そこで本研究では斜面崩壊箇所より採取した不攪乱試料及び攪乱試料を用いて飽和度を考慮して繰返し三軸試験を行い、不飽和砂質土の強度特性を検討する。

2. 試験試料の物性値と供試体作成方法

本研究には旧山古志村小松倉および榎木の斜面崩壊箇所より採取した試料を用いた。これら2種類の試験試料の密度と粒径加積曲線を図-1に、水分特性曲線を図-2に示す。図-1の密度と粒径加積曲線より小松倉砂と榎木砂は両試料とも密度が 2.653g/cm^3 であり、砂が大部分を占めているのがわかる。細粒分は小松倉砂が約10%、榎木砂は約19%含まれており、少し多めである。また小松倉砂の最小・最大間隙はそれぞれ0.663と1.143であり榎木砂はそれぞれ0.676と1.207であった。

試料は供試体作製の効率上、2mmふるい通過分を使用した。榎木砂、小松倉砂ともに湿潤となるよう含水率を調整し、原位置での間隙比は小松倉砂が $e=0.66$ 、榎木砂が $e=0.85$ であったため同程度になるようにマイターボックスを用いて直径50mm、高さ125mmの中実円柱形になるよう締固めて作製した。なお、不攪乱試料についてはトリミング法にて作製した。塊状をなした不攪乱試料をトリマーのセットし、側面を所定の直径になるように成型した後、マイターボックスを使用し所定の高さとなるように成型した。

3. 試験装置

三軸圧縮試験装置は、圧力をコントロールできるセル室とそれにつながる空気・水系の経路によって構成されている。供試体上部のキャップおよび下部のペDESTアルには、ポーラスメタルやセラミックディスクが取り付けられており、供試体内の間隙水の出入りはこれを通じて行われる。

4. 不攪乱砂質土の静的・動的せん断特性

4.1 試験方法と試験条件

ここでは旧山古志村小松倉の崩壊斜面より採取した不攪乱試料および間隙比を調整した攪乱試料を用いて実験を行った。はじめに不攪乱試料と間隙比調整をした攪乱試料の強度特性を比較するとともに、試料の乱れ具合が不飽和化による見かけの粘着力にどのように影響するかを検討するため、静的三軸圧縮試験を行った。次に地震時を想定して繰返し三軸試験を行い、攪乱試料と不攪乱試料の動的せん断特性を比較検討した。静的三軸圧縮試験の試験ケースを表-1に、繰返し三軸試験の試験ケースを表-2に示す。

飽和砂を用いての静的三軸圧縮試験は供試体を試験機にセットし二重不圧法を用いて飽和させ、バックプレッシャーはすべての試験ケースにおいて200kPaとし、せん断は軸ひずみ速度0.05%/min、 p' 一定のもと、排水条件でせん断を行った。

不飽和砂に関しては、飽和砂と同様に二重不圧法を用いて一度飽和させ、その後サクシオン50kPaで

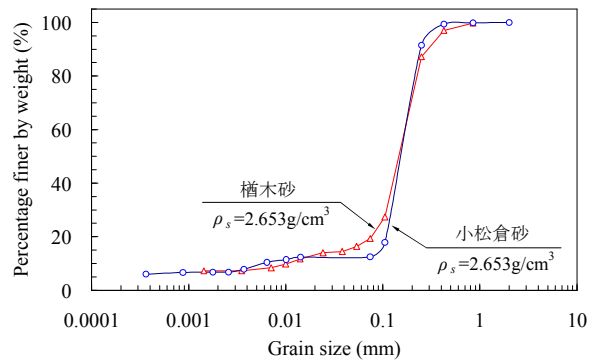


図-1 粒径加積曲線

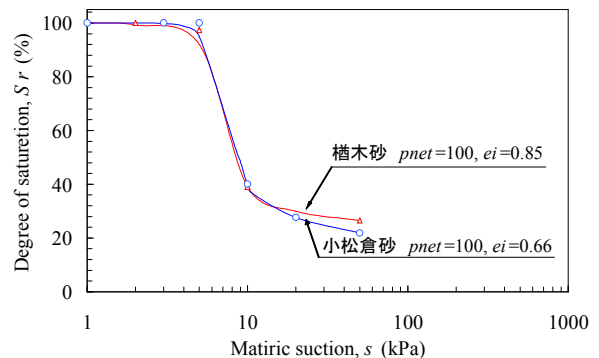


図-2 水分特性曲線

供試体の不飽和化を行った。せん断は軸ひずみ速度 0.0125%/min, p_{net} 一定, 排気排水条件でせん断を行った。繰り返し三軸試験に関しては静的三軸圧縮試験同様に二重負圧法で飽和させ, 軸ひずみ速度 0.12%/min とし, 定体積で繰返しせん断を行った。

4.2 結果

旧山古志村小松倉の試料を用いて行った静的三軸圧縮試験の結果より得られた破壊線を図-3 に示す。より攪乱飽和砂の内部摩擦角 ϕ は 42.0° , 粘着力 c は 0 kPa であり, これをサクシオン 50kPa 作用させて不飽和化すると内部摩擦角 ϕ は 43.0° , 粘着力 c は 9.0kPa となった。不攪乱飽和砂の内部摩擦角 ϕ は 41.1° , 粘着力 c は 10.0kPa であり, これをサクシオン 50kPa 作用させて不飽和化すると内部摩擦角 ϕ は 43° , 粘着力 c は 18.5kPa となった。飽和不攪乱砂に関しては粘着力が 10.0kPa 生じているが, これは年代効果による固結が粘着力となって現れたと考えられる。以上のことより攪乱試料と不攪乱試料のどちらも不飽和化による粘着力の増加は約 9.0kPa と等しく, 不攪乱不飽和砂は攪乱不飽和砂に比べ固結分だけ粘着力が大きいことが分かる。したがって不攪乱試料を不飽和化した場合, 不飽和化による見かけの粘着力に加え, 年代効果による固結力分だけ大きな値となって現れると考えられる。また, 内部摩擦角に関しては, 攪乱試料及び不攪乱試料ともにほぼ等しく, サクシオン 50kPa を作用させて不飽和化してもほぼ変化していない。このことから同じ試料に

おいては, 内部摩擦角は含水状態および乱れ具合に支配されないと考えられる。次に繰返し三軸試験の結果について述べる。繰返し三軸試験結果の一例として, 片振幅比 60kPa で繰返し载荷を行った場合の, 9 回繰返し载荷後の攪乱試料と, 130 回繰返し载荷後の不攪乱試料の結果を図-4 に示す。図-4 より片振幅が 60kPa の場合, 攪乱試料は 9 回繰返し载荷後には平均主応力が 5.5kPa まで低下し, ひずみが 5% を超えたのに対し, 不攪乱試料は 130 回繰返し载荷後に平均主応力が 11.3kPa までしか低下せず, ひ

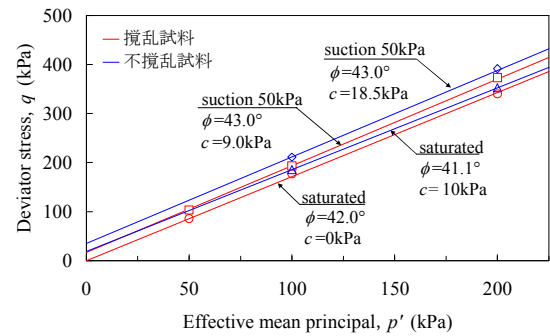


図-3 小松倉砂の破壊線

表-1 静的三軸試験ケース

飽和	試料の状態	e	p' (kPa)	B.P. (kPa)
	攪乱		50	
	100			
	200			
	-			
不攪乱		0.66	100	200
			200	
			-	
不飽和	試料の状態	e	p_{net} (kPa)	Suction (kPa)
	攪乱		50	
		100		
		200		
		-		
不攪乱		0.66	100	50
			200	
			-	

表-2 繰返し三軸試験ケース

飽和	試料の状態	間隙比	p'	B.P. (kPa)	q (kPa)
	不攪乱				0.66
	40				
攪乱	0.66	100	200	60	
				40	
				30	

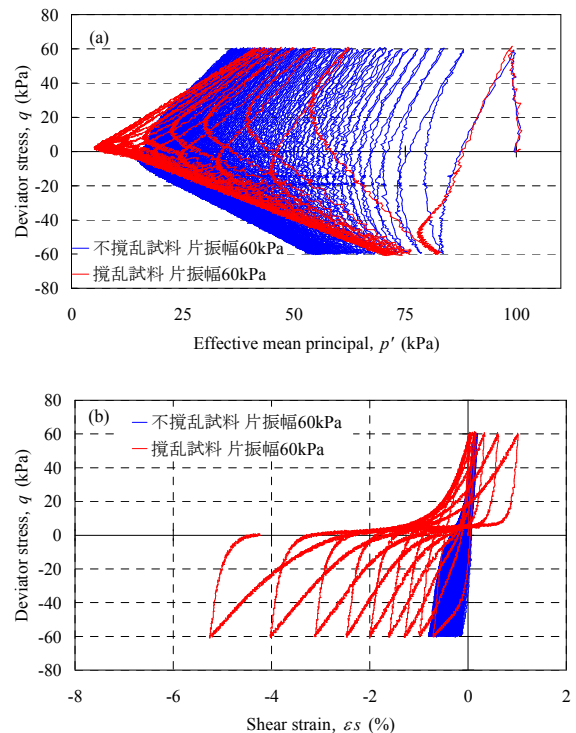


図-4 片振幅 60kPa の繰返し三軸試験結果

(a) せん断応力-平均主応力関係

(b) せん断応力-せん断ひずみ関係

ずみは1%に満たないことが分かる。

片振幅 40kPa で繰返し載荷した場合は、28.5 回繰返し載荷後の攪乱試料は平均主応力が 3.6kPa まで低下し、6% 近くのひずみが生じたのに対し、不攪乱試料は、300 回繰返し載荷後の平均主応力が 65kPa までしか低下せず、ひずみは 0.5% も生じていなかった。これらより不攪乱試料は攪乱試料に比べ繰返し載荷による強度低下が少なく、先に述べた年代効果による固結が影響していると考えられる。また、不攪乱試料及び攪乱試料に関係なく、片振幅が大きくなるほど平均主応力の低下が早いことがわかる。

5. 不飽和砂質土の動的せん断特性

5.1 試験方法と試験条件

ここでは、旧山古志村植木の崩壊斜面より採取した攪乱試料を用いて飽和・不飽和砂質土の繰返し三軸試験を行った。この結果から、不飽和化及び繰返し載荷条件の違いによる繰返しせん断特性の変化を検討する。試験ケースの詳細は表 - 3 に示す。不飽和条件である cyclic 4 及び cyclic 5 は、どちらもサクシオンが変化する試験であるが、体積変化の条件が異なる。cyclic 4 は、 p が一定となるように制御し、繰返し載荷に伴い体積が変化する。また、cyclic 4 は間隙空気が一定となる排気条件と、間隙空気の圧縮が考えられる非排気条件がある。これに対し cyclic 5 は、cyclic 1 の飽和繰返しせん断試験と同じく定体積条件となるように、繰返しせん断中に体積変化が起きないように制御を行った。

不飽和繰返し三軸試験は、間隙比を調整した試料を用いた。二重負圧法を用いて一度飽和させた後、サクシオン 10kPa で不飽和化を行い、軸ひずみ速度 0.12%/min として繰返しせん断を行った。

5.2 試験結果

植木砂による飽和・不飽和三軸圧縮試験から得ら

表 - 3 繰返し三軸試験ケース

飽和	間隙比	載荷条件	排水条件	p' (kPa)	B.P. (kPa)	q (kPa)	
	$e = 0.85$	cyclic 1	非排水		100	200	60* 40* 30* 24* 20*
不飽和	$e = 0.85$	cyclic 4	排気・非排水	100	10	80* 60* 40*	
			非排気・非排水	100	10	60 60	
		cyclic 5	排気・非排水	100	10	40 30	

* 辻岡による結果を使用。

れた破壊線を図 - 5 に示す。図 - 5 より飽和砂をサクシオン 10kPa で不飽和化すると、内部摩擦角はほとんど変化せず、粘着力は 4.9kPa 増加していることが分かる。続いて繰返し三軸試験結果の一例として、片振幅 40kPa で行った場合の不飽和砂と飽和砂の繰返し三軸試験結果を図 - 6 に示す。図 - 6 より飽和砂に比べ不飽和砂は平均主応力の低下が遅く、液状化するまでの繰返し載荷数が多いことが分かる。また、繰返し載荷により生じるせん断ひずみも少ないことが分かる。飽和砂及び不飽和砂の繰返し三軸試験結

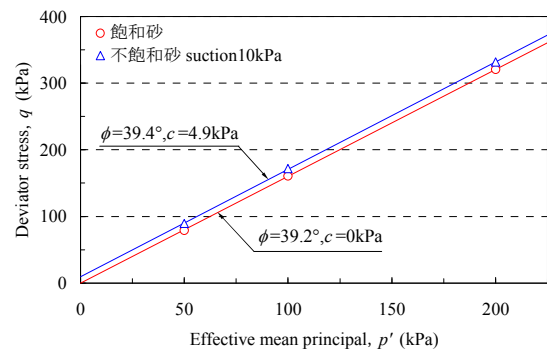


図 - 5 植木砂の破壊線

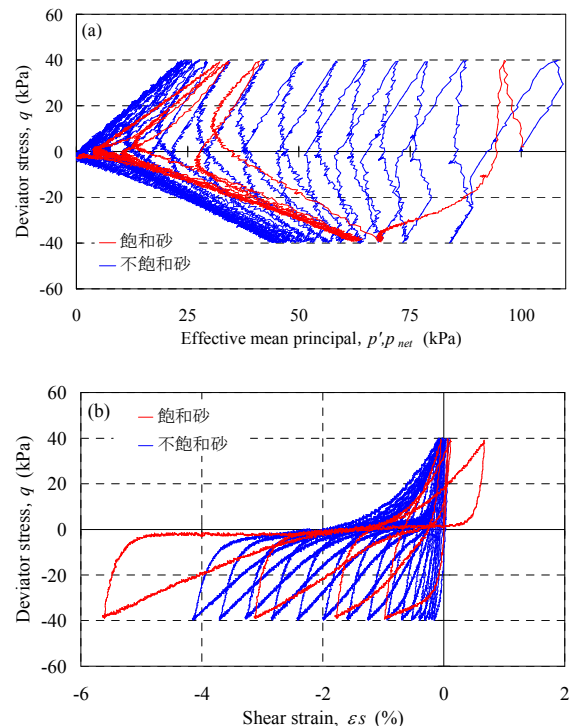


図 - 6 片振幅 40kPa の繰返し三軸試験結果

(a) せん断応力 - 平均主応力関係

(b) せん断応力 - せん断ひずみ関係

果より、求めた全応力に基づく内部摩擦角を図-7に示す。図-7より繰返し回数の増加に伴い内部摩擦角が減少することが分かる。また、片振幅が大きいほど内部摩擦角の減少が早くなること分かる。さらに、片振幅が同じでも不飽和砂は飽和砂に比べ内部摩擦角の減少が少ないことが分かる。制御の違いによる繰返しせん断ひずみと繰返し載荷回数との関係を図-8に示す。図-8より飽和砂(cyclic 1)と不飽和砂(cyclic 5)は繰返し載荷回数の増加に伴って繰返しせん断ひずみが増加するのに対して、不飽和砂(cyclic 4)は載荷回数が増加しても、1回載荷後に生じた繰返しせん断ひずみが増加しないことがわかる。最後に、cyclic 4で150回繰返し載荷した

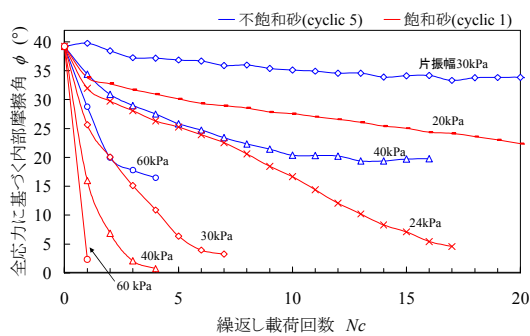


図-7 内部摩擦角と繰返し載荷回数との関係

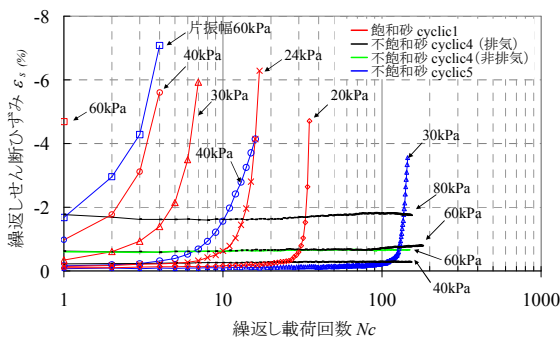


図-8 繰返しせん断ひずみと繰返し載荷回数との関係

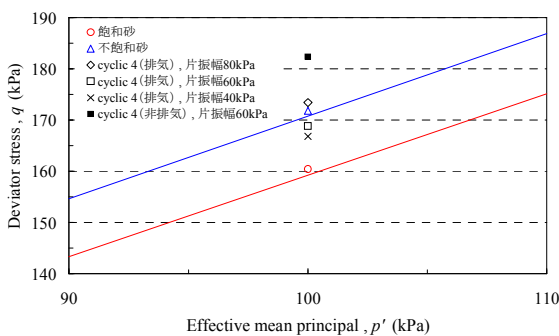


図-9 150回繰返し載荷後のせん断強度

後のせん断強度を図-9に示す。図-9より繰返し載荷後の不飽和砂は強度低下を引き起こさなかった。cyclic 4の非排気条件に関しては、排気条件に比べ強度が大幅に増加している。これは、非排気条件でせん断試験中に間隙空気圧が逃げたことによるものだと考えられる。

6. 結論

本研究では、実際に崩壊した斜面の土を用いて繰返しせん断特性を検討した。

本研究で得られた知見をいかに示す。

- (1) 斜面崩壊箇所から採取した試料の内部摩擦角は、乱れ具合及び飽和度によらず一定である。
- (2) 不攪乱試料をサクシオン 50kPa で不飽和化した場合の粘着力は、不飽和化による見せかけの粘着力に加え、年代効果による固結分が足されて現れる。
- (3) 不攪乱試料は攪乱試料に比べ、固結の影響で繰返し載荷による強度低下が少ない。
- (4) 繰返し載荷による強度低下は全応力に基づく内部摩擦角の減少として表すことができる。
- (5) 不飽和砂は定体積条件を除いては、繰返し載荷によりほとんど強度低下を起こさなかった。

参考文献

- (1) Jennings, J.E. and Burland, J.B. (1962): Limitation to the use of effective stress in partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144
- (2) Terzaghi, K. (1936): The shearing Resistance of Saturated Soils, *Proc. 1st ICSMFE*, Vol.1, pp.54-56
- (3) Rendric, L. (1936): Relation between Void Ratio and Effective Principal Stress for Remoulded Silty Clays, *1st ICSMFE*, Vol.3, pp.48-51
- (4) 軽部大蔵、加藤正司：不飽和土の間隙水の分布模型、不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題に関するシンポジウム発表論文集、社団法人土質工学会、不飽和地盤の安定性に関する研究委員会、pp.103-110、1993.
- (5) 辻岡考彦：豪雨や地震時における不飽和斜面の強度評価、pp. 61-103, 2006
- (6) 吉見吉昭：砂地盤の液状化、pp.31-41, 1980.