

# 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

地盤工学研究室 高坂 紀久子

指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

これまでの土質力学は、土の中でも飽和土を中心に体系化されてきた。しかしながら、降雨による斜面の安定問題・土構造物への影響、トンネル掘削に伴う切羽の安定問題を正確に評価する場合に不飽和土の強度評価は不可欠である。これらの諸問題に対応するために、不飽和土の試験方法の技術的な進展が期待される。また、不飽和土のせん断試験は時間を要する・試験装置が高価・試験の複雑さなどの問題を抱えていることより実用的でない。そのため、強度定数を簡易に求める手法を開発することは実務的問題に寄与することにつながるといえる。既往の研究から、土の強度定数である見掛けの粘着力  $c$  は供試体の空気侵入値(AEV)までは飽和土として増加することが明らかになっている。<sup>1)</sup> しかし、不飽和化したときの強度増加は土によって異なるため、推量することは難しい。本研究では、不飽和土用の特殊な試験装置を必要としない通常のせん断試験から、不飽和土の強度特性を求める手法の検討を行い、簡易不飽和土一面せん断試験を提案する。

## 2. 試験試料

非塑性シルトである DL クレイ、また、実際の施工現場の試料である東北新幹線三本木原トンネルより採取した砂、新潟県柏崎市米山付近で採取した粘土(ラテライト系粘土)を用いて試験を行った。図-1 に、各試料の粒径加積曲線と土粒子密度を示す。図-2 に、各試料の水分特性曲線を示す。

## 3. 試験作製・試験方法

既往の研究結果<sup>1), 2)</sup>から試験条件を求め、含水比と間隙比をパラメータとした定圧一面せん断試験を行った。表-1 に DL クレイの不飽和三軸圧

縮試験のサクシオンと含水比を示す。表-2 に三本木原砂の不飽和三軸圧縮試験のサクシオンと含水比を示す。表-3 に米山粘性土の不飽和三軸圧縮試験のサクシオンと含水比を示す。定圧一面せん断試験の供試体の大きさは直径 6cm、高さ 2cm である。供試体は、乾燥状態の試料に、霧吹きで蒸留水を加えて含水比を調整した後、3 層に分けて所定の間隙比になるよう、突き棒による打撃で締固めまたは静的締固めによって作製した。DL クレイと三本木原砂のせん断速度を 0.1mm/min、米山粘性土のせん断速度を 0.005mm/min とし、せん断変位が 7mm になるまでせん断を行った。

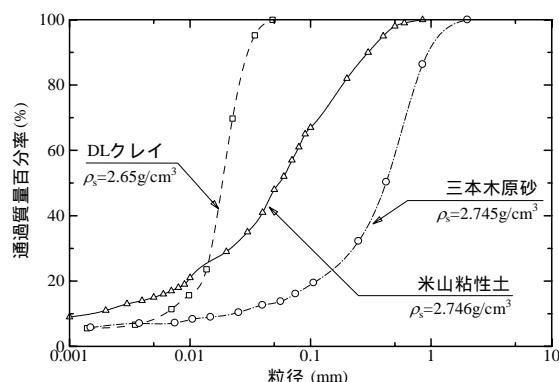


図-1 粒径加積曲線

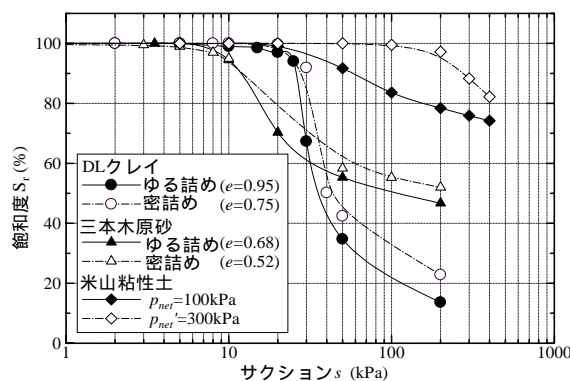


図-2 水分特性曲線

表-1 DLクレイの不飽和三軸圧縮試験のサクシオンと含水比

	サクシオン $s$ (kPa)	含水比 $w$ (%)
ゆる詰め ( $e=0.95$ )	30	25.0
密詰め ( $e=0.75$ )	50	12.0
	200	6.0

表-2 三本木原砂の不飽和三軸圧縮試験のサクシオンと含水比

	サクシオン $s$ (kPa)	含水比 $w$ (%)
ゆる詰め ( $e=0.68$ )	10	15.0
	50	13.5
	100	12.0
	200	11.0
密詰め ( $e=0.52$ )	10	14.5
	50	13.0
	100	11.5
	200	10.5

表-3 米山粘性土の不飽和三軸圧縮試験のサクシオンと含水比

サクシオン $s$ (kPa)	含水比 $w$ (%)
100	25.0
200	28.0
400	30.0

#### 4. 試験結果および考察

今回の試験では、鉛直応力を 50kPa, 100kPa, 200kPa または 100kPa, 150kPa, 200kPa 一定で3種類の試験を行った。鉛直応力 200kPa の試験結果を図-3, 図-4, 図-8, 図-9 および図-13 に示し、他の鉛直応力については考察のみ述べる。

図-3 にゆる詰め DL クレイの一面せん断挙動、図-4 に密詰め DL クレイの一面せん断挙動を示す。それぞれ、(a)にせん断応力-せん断変位関係、(b)に鉛直変位-せん断変位関係を示す。図-3(a), (b)において、含水比 6%・12%と含水比 25%・飽和では、その挙動が異なっている。図-3(a)では含水比 6%・12%では、ピーク強度はせん断変位が 2mm 程度で表れているが、含水比 25%・飽和では、はっきりとしたピークは見られない。また、図-3(b)の鉛直変位も含水比 6%・12%では体積は膨張傾向を示しているが、含水比 25%・飽和では、

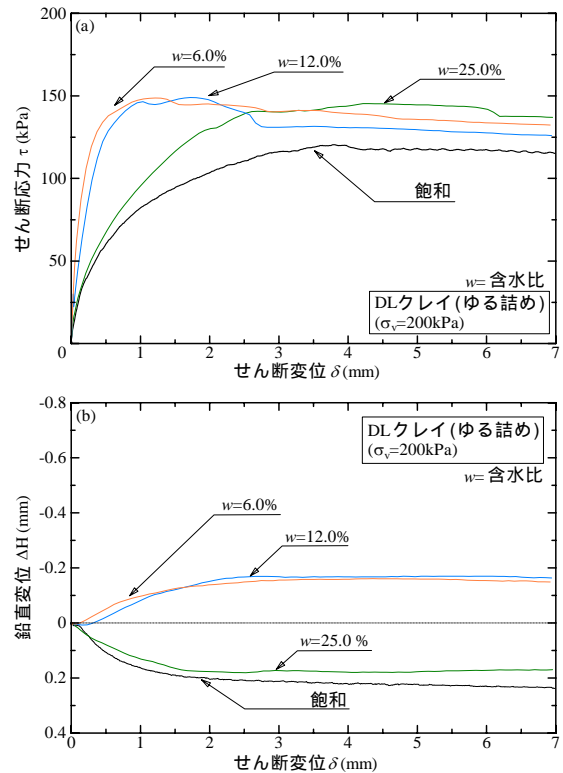


図-3 ゆる詰めDLクレイの一面せん断挙動  
(a)せん断応力-せん断変位関係  
(b)鉛直変位-せん断変位関係

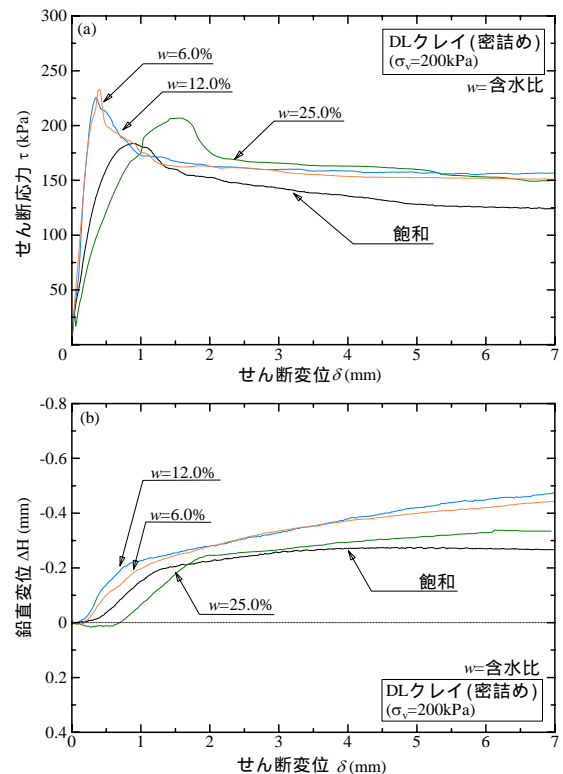


図-4 密詰めDLクレイの一面せん断挙動  
(a)せん断応力-せん断変位関係  
(b)鉛直変位-せん断変位関係

体積は減少傾向を示している．図-4(a)においても含水比 6%・12%と含水比 25%・飽和で応力ひずみの挙動に違いが見られた．含水比 25%は不飽和土の状態であるが，その挙動は飽和土の挙動に非常によく似ている．図-4(b)では，体積は不飽和土と飽和土供試体ともに膨張傾向を示した．他の鉛直応力での結果と比較し，体積変化をみると，飽和試験では鉛直応力が大きくなるほど，体積は圧縮傾向を示し，不飽和試験では鉛直応力が大きくなるほど，体積の膨張傾向は小さいことを示している．また，含水比 25%の不飽和供試体の挙動は飽和供試体の挙動に似ていることが示された．

図-5 ゆる詰め DL クレイの破壊線，図-6 に密詰め DL クレイの破壊線を示す．図-7 に DL クレイの見掛けの粘着力-飽和度関係を示す．表-4 に DL クレイの不飽和三軸圧縮試験と定圧一面せん断試験の強度定数を示す．図-5，図-6 の破壊線より，含水比が低下すると見掛けの粘着力は増加し，破壊線はほぼ平行に上に推移している．不飽和供試体の内部摩擦角  $\phi$  は飽和供試体の内部摩擦角  $\phi_{sat}$  とほぼ同じである．図-7 より DL クレイのゆる詰め供試体では，定圧一面せん断試験から得られる見掛けの粘着力  $c$  と不飽和三軸圧縮試験から得られた見掛けの粘着力  $c$  はよく一致していることが示されている．図-7 の DL クレイの密詰め供試体の結果において，飽和度の高い範囲の定圧一面せん断試験の見掛けの粘着力  $c$  が 不飽和三軸圧縮試験結果よりも低い．これは，本来ならば擬似飽和状態として負の間隙水圧が働かなければいけない状態であるが，一面せん断試験ではその状態を再現できなかったということが考えられる．そのため一面せん断試験を行う際には，供試体の飽和度を考慮し，試験を行う必要があるといえる．表-4 から，サクシオン 30kPa と含水比 25%が対応する(表-1)が，不飽和三軸圧縮試験の密詰めサクシオン 30kPa と定圧一面せん断試験の含水比 25%が大きく異なっていることが示さ

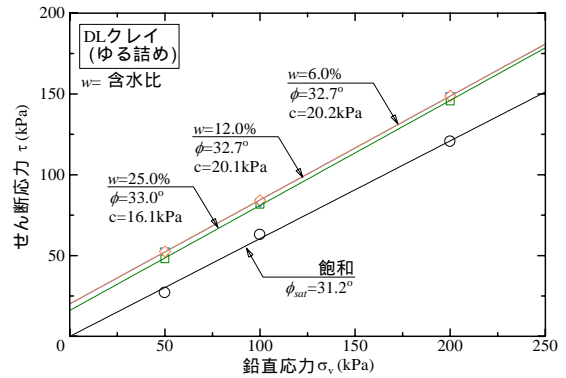


図-5 ゆる詰め DL クレイの破壊線

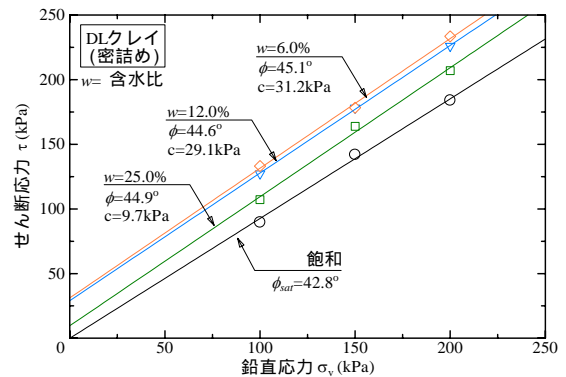


図-6 密詰め DL クレイの破壊線

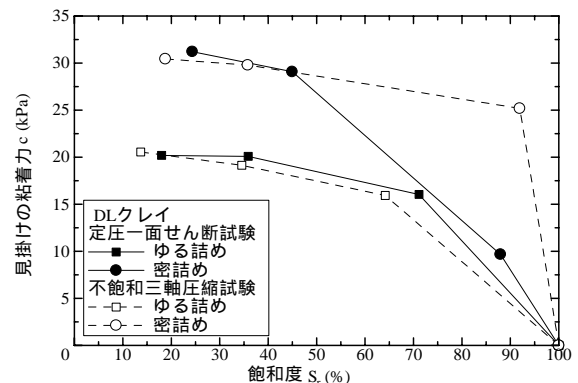


図-7 DL クレイの見掛けの粘着力-飽和度関係

表-4 DL クレイの強度定数

	不飽和三軸圧縮試験		
	サクシオン $s$ (kPa)	見掛けの粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)
ゆる詰め ( $e=0.95$ )	飽和	0.0	31.9
	30	15.9	
	50	19.1	
	200	20.6	
密詰め ( $e=0.75$ )	飽和	0.0	43.9
	30	25.2	
	50	29.8	
	200	30.4	
	定圧一面せん断試験		
	含水比 $w$ (%)	見掛けの粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)
ゆる詰め ( $e=0.95$ )	飽和	0.0	31.7
	25.0	16.1	33.0
	12.0	20.1	32.8
	6.0	20.2	32.7
密詰め ( $e=0.75$ )	飽和	0.0	43.3
	25.0	9.7	44.9
	12.0	29.1	44.6
	6.0	31.2	45.1

れる。その他、サクシオン 50kPa と含水比 12%、サクシオン 200kPa と含水比 6%が対応し、結果はよく一致している。

図-8 にゆる詰め三本木原砂の一面せん断挙動、図-9 に密詰め三本木原砂の一面せん断挙動を示す。それぞれ、(a)にせん断応力-せん断変位関係、(b)に鉛直変位-せん断変位関係を示す。図-8(a)では、飽和供試体の挙動はひずみ硬化型であるといえる。不飽和供試体では若干のピークが見られる。図-8(b)では、飽和供試体の体積は圧縮しているが、不飽和供試体は、最初は正のダイランシーを示すがせん断強度の発現とともに体積は膨張傾向を示す。体積変化は、飽和試験では鉛直応力が大きくなるほど、体積は圧縮傾向を示し、不飽和試験では鉛直応力が大きくなるほど、体積の膨張傾向は小さいことが確認できた。また、含水比が低くなると体積の膨張傾向が大きくなること示された。図-9(a)の応力-ひずみ曲線には大きく緩やかなピークを示している。含水比による強度の差はよりはっきりと見られる。また、含水比 13.5%・15%では飽和よりもピーク強度の発現が遅い。図-9(b)では飽和・含水比 13.5%・15%では、せん断直後の体積は正のダイランシーを示し、その後膨張している。含水比 11%・12%・13.5%では体積は膨張傾向を示している。密詰め三本木原砂においても、含水比が低下するほど、せん断強度は増加し、体積膨張の傾向は大きくなること示された。また、含水比が低下するほど、せん断応力の立ち上がり早く、ピーク強度に早く達している。

図-10 ゆる詰め三本木原砂の破壊線、図-11 に密詰め三本木原砂の破壊線を示す。図-12 に三本木原砂の見掛けの粘着力-飽和度関係を示す。表-5 に三本木原砂の不飽和三軸圧縮試験と定圧一面せん断試験の強度定数を示す。図-10、図-11 より不飽和土の破壊線は飽和土の破壊線とほぼ平行であり、含水比が低下すると上に推移している。図-12 より定圧一面せん断試験の強度増加傾向と

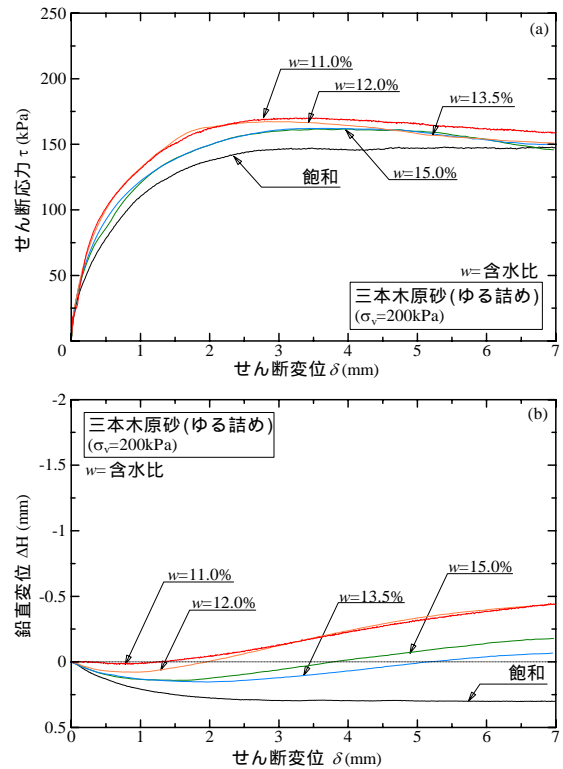


図-8 ゆる詰め三本木原砂の一面せん断挙動  
(a)せん断応力-せん断変位関係  
(b)鉛直変位-せん断変位関係

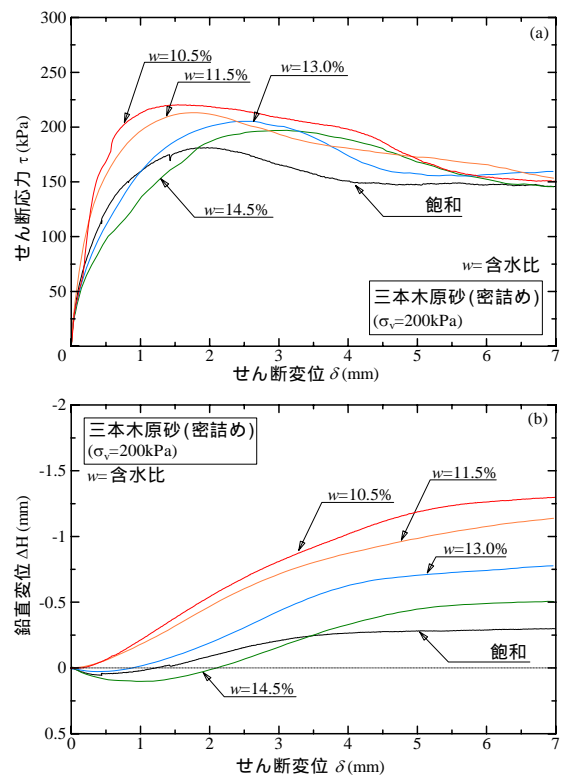


図-9 密詰め三本木原砂の一面せん断挙動  
(a)せん断応力-せん断変位関係  
(b)鉛直変位-せん断変位関係

不飽和三軸縮試験の強度増加傾向は同じであることが示される。ゆる詰めと密詰めでは、密詰めの場合の強度増加の割合が大きい。表-5より、不飽和三軸圧縮試験と定圧一面せん断試験結果の強度定数がよく一致していることが示される。

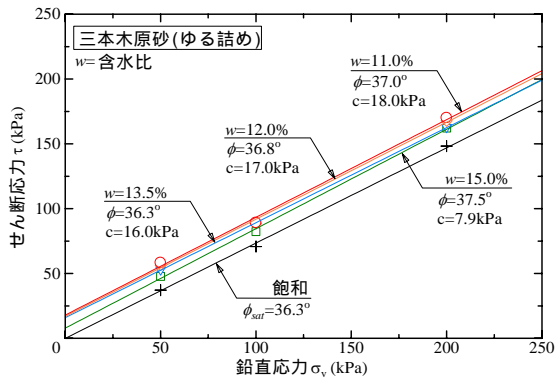


図-10 ゆる詰め三本木原砂の破壊線

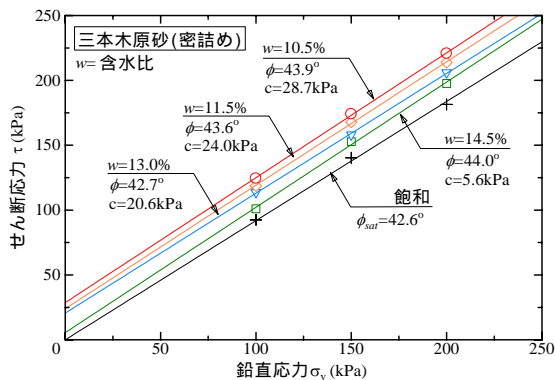


図-11 密詰め三本木原砂の破壊線

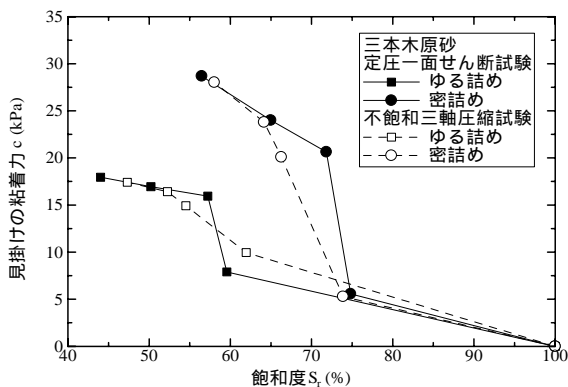


図-12 三本木原砂の見掛けの粘着力-飽和度関係

図-13 に米山粘性土の一面せん断挙動を示す。(a)にせん断応力-せん断変位関係,(b)に鉛直変位-せん断変位関係を示す。図-13(a)では不飽和土の挙動と飽和土の挙動で若干の違い確認された。また、含水比 25%と含水比 28%・30%でも挙動が

表-5 三本木原砂の強度定数

	不飽和三軸圧縮試験			
	サクション $s$ (kPa)	見掛けの粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)	
ゆる詰め ( $e=0.68$ )	飽和	0.0	36.2	
	10	9.9		
	50	14.9		
	100	16.4		
	200	17.4		
密詰め ( $e=0.52$ )	飽和	0.0	43.1	
	10	5.3		
	50	20.1		
	100	23.8		
		定圧一面せん断試験		
	含水比 $w$ (%)	見掛けの粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)	
ゆる詰め ( $e=0.68$ )	飽和	0.0	36.3	
	15.0	7.9	37.5	
	13.5	16.0	36.3	
	12.0	17.0	36.8	
	11.0	18.0	37.0	
密詰め ( $e=0.52$ )	飽和	0.0	42.6	
	14.5	5.6	44.0	
	13.0	20.6	42.7	
	11.5	24.0	43.6	
	10.5	28.7	43.9	

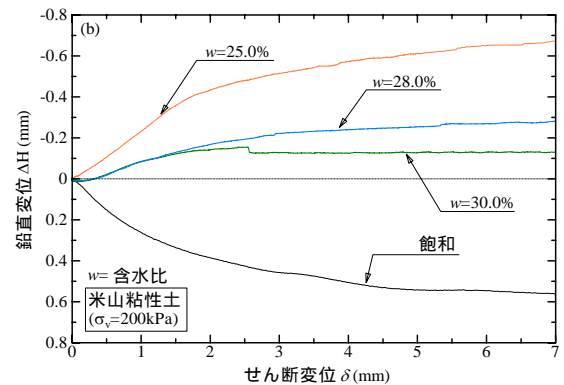
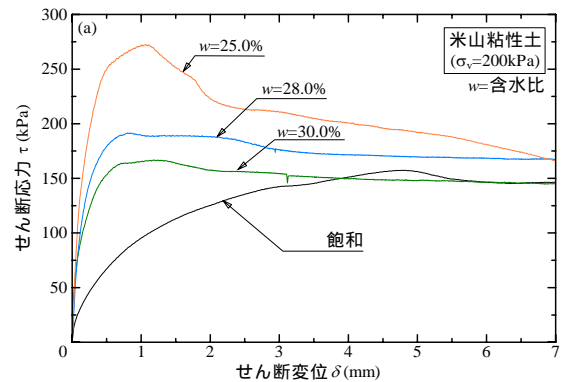


図-13 米山粘性土の一面せん断挙動  
(a)せん断応力-せん断変位関係  
(b)鉛直変位-せん断変位関係

異なった。含水比 28%・30%の応力-ひずみ曲線は緩やかなピークを示した。一方、含水比 25%は、はっきりとしたピークを示す応力-ひずみ曲線となった。図-13(b)では、飽和土試験において体積は大きく圧縮傾向を示した。不飽和土試験において体積は膨張傾向を示し、含水比が低下するほどその傾向は大きくなった。どの鉛直応力の結果においても含水比が低いほど、初期せん断応力の立ち上がり早い。また、含水比 25%と含水比 28%・30%では応力ひずみ曲線の傾向に違いが見られた。

図-14 に米山粘性土の破壊線を示す。図-15 に米山粘性土の見掛けの粘着力-飽和度関係を示す。表-6 に米山粘性土の不飽和三軸圧縮試験と定圧一面せん断試験の強度定数を示す。図-14 の米山粘性土の破壊線は平行ではなく、ばらつきがみられる。図-15 より、定圧一面せん断試験から得られた見掛け粘着力  $c$  は不飽和三軸圧縮試験の見掛け粘着力  $c$  よりも低いことが示されている。表-6 の不飽和三軸圧縮試験と定圧一面せん断試験結果を比較するとその差が大きいことははっきりとわかる。米山粘性土の供試体作製方法や圧密時間などを検討し、試験を行う必要があると考えられる。

## 5. 結論

- 1) 非塑性の試料であれば、不飽和土の強度を簡易不飽和土一面せん断試験から求めることができる。
- 2) 擬似飽和状態にある試料については負の間隙水圧(サクション)を考慮した全応力を載荷し試験を行う必要がある。
- 3) 塑性試料に関しては、簡易不飽和土一面せん断試験からは正確な不飽和土の強度を求めることができない。

以上の結果より、適用範囲は限られるが、簡易不飽和土一面せん断試験は、飽和度と粘着力の関係を求める簡易試験方法として有用である。

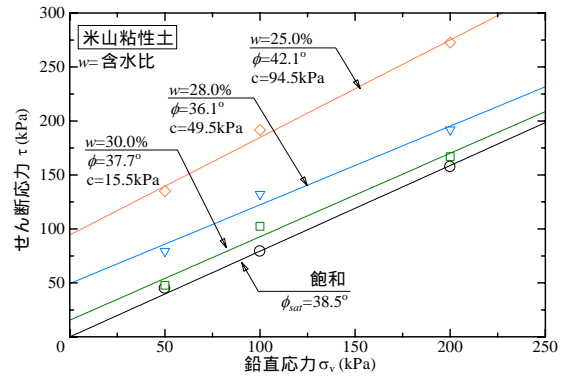


図-14 米山粘性土の破壊線

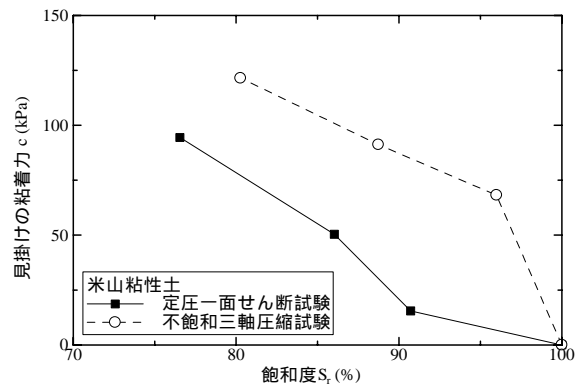


図-15 米山粘性土の見掛けの粘着力-飽和度関係

表-6 米山粘性土の強度定数

不飽和三軸圧縮試験		
サクション $s$ (kPa)	見掛けの粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)
飽和	0.0	38.3
100	68.2	
200	91.2	
400	121.5	
定圧一面せん断試験		
含水比 $w$ (%)	見掛けの粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)
飽和	0.0	38.5
30.0	15.5	37.7
28.0	49.5	36.1
25.0	94.5	42.1

## 6. 参考文献

- 1) 河野敬, 不飽和砂質土の強度評価手法に関する基礎的研究, 長岡技術科学大学大学院建設工学専攻修士論文, 2007.3
- 2) 三村八一, 東北新幹線トンネル施工現場より採取した砂の不飽和せん断特性, 長岡技術科学大学大学院建設工学修士論文, 2006.3