

飽和度の違いがカオリンの 一軸圧縮試験結果に及ぼす影響

常田 亮*・亀井 健史**

(平成7年9月28日受理)

Influence of Degree of Saturation on Unconfined Compression Test Results of Kaolinite

Makoto TOKIDA and Takeshi KAMEI

In order to investigate the influence of degree of saturation on unconfined compression test results of the compacted kaolinite, unconfined compression tests were performed on the compacted soil with different initial dry density and initial degree of saturation.

As a consequence, the unconfined compressive strength and the deformation modulus increase with the decrease in the degree of saturation. In addition, linear correlations between the unconfined compressive strength and the suction at failure are obtained. The applicability of these results and conclusions to natural soils will require further research.

1. はじめに

不飽和土の力学特性に関する研究は、Bishop らの研究^{1)~3)}を端緒に1960年代より活発に行われるようになり、不飽和土の体積変化挙動やせん断挙動を有効応力の概念に基づいて説明しようとする研究が数多く実施されてきた^{4),5)}。その結果、不飽和土の力学的挙動をある程度統一かつ合理的に表現できるような有効応力式⁶⁾が提案されるに至っている。しかしながら、不飽和土は気相、液相及び固相の三相混合体であるためにその要素試験が複雑であり、不飽和土の力学的挙動を統一的に説明するまでには至っていないとの指摘もある⁹⁾。上記の点を考慮して、村田ら⁷⁾は、不飽和土の力学的挙動を評価する応力パラメーターとしてサクションに着目し、不飽和粘性土に対して間隙水圧と間隙空気圧および外的荷重を独立に制御した圧縮試験とせん断試験を実施し、不飽和粘性土の体積変化特性および応力-ひずみ関係に及ぼすサクションの影響を明らかにするとともに、不飽和土の力学的挙動を評価するための応力パラメーターとしてのサクションの有意性についても検討している。また、軽部ら⁸⁾は、不飽和試料に対して排水及び非排水三軸圧縮・伸張試験を行い、不飽和土の圧縮・せん断挙動に及ぼすサクションの影響を構造レベルおよび粒子間レベルで解明している。

* 環境都市工学科助教授

** 島根大学理学部地質学科助教授

一方、不飽和土の地盤工学上の重要な問題のひとつであるコラプス現象の解明を目的とした研究例が報告されている。その代表例として、Jennings and Burland⁹⁾は、不飽和粘性土に対して圧密試験を行い、Bishopの有効応力原理¹⁾の適用に関する限界を示している。しかしながら、コラプス現象は水浸による有効応力の低下に伴って地盤のせん断強さが減少し、その結果、大きな圧縮変形が発生するものであり、有効応力の原理に反する現象ではないとの報告例¹⁰⁾もある。また、亀井・榎本^{11),12)}は、不飽和土の膨潤挙動とコラプス沈下挙動を定量的に把握することを目的として、シルト質土に対して標準圧密試験装置を応用した膨潤試験およびコラプス沈下試験を実施し、膨潤特性およびコラプス沈下特性に及ぼす初期飽和度と初期乾燥密度および上載圧の影響を定量的な面から解明している。

これに対して、不飽和土の強度・変形特性に関しては、川原・畠山¹³⁾が沖積粘土と洪積粘土に対してサクシジョンの測定を伴う一軸圧縮試験を行った結果、不飽和土の一軸圧縮強さと初期サクシジョンの間には、明瞭な相関関係が認められると報告している。また、島田・西村¹⁴⁾は、まさ土に対してサクシジョンを制御した排気・排水一面せん断試験を行い、サクシジョンが40kPa程度以上になるとせん断強度がほとんど増加しなくなると述べている。さらに、締固めた不飽和シルトに対して排気・排水三軸圧縮試験を実施した結果、強度特性に及ぼすサクシジョンの影響は、シルト質土よりも粘性土に大きく表われるとの報告例もある¹⁵⁾。

以上のように、不飽和土の強度・変形特性は、全応力、間隙水圧および間隙空気圧に支配されており、初期飽和度および初期乾燥密度の影響を大きく受けていることが容易に想定される。この点を考慮して、筆者ら¹⁶⁾は、初期乾燥密度および初期飽和度を変化させて静的に締固めたDLクレイに対してサクシジョンの測定を伴う一軸圧縮試験を実施し、初期飽和度および初期乾燥密度が一軸圧縮強さと変形係数に及ぼす影響をある程度定量的に示している。しかしながら、上記の報告¹⁶⁾は、シルト質土に関するものであり不飽和粘性土の強度・変形特性に及ぼす初期飽和度と初期乾燥密度の影響に関しては、未解明な点が残されている。

以上のような観点から、本研究では、初期乾燥密度と初期飽和度を変化させて静的に締固めた不飽和カオリンに対して、サクシジョンの測定を伴う一軸圧縮試験を実施し、不飽和粘性土の強度・変形特性に及ぼす初期乾燥密度と初期飽和度の影響について検討した。また、試料の粒度組成の違いが、不飽和土の強度・変形特性に及ぼす影響についても考察した。

2. 試料および実験方法

2-1 試料

実験に使用した試料は、主成分が粘土分であるカオリンである。試料の物理的特性と粒径加積曲線を Table 1 と Fig. 1 に示す。供試体は直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱形とし、供試体密度の均質性を考慮して、直径 5 cm、高さ 20 cm のモールド内の試料を 1 cm/min のひずみ速度で静的に締固めて作成した。また、供試体の内的条件は既

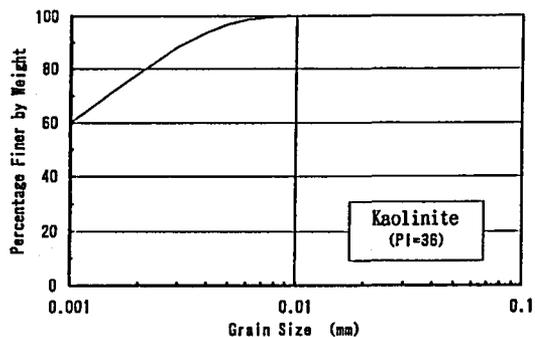


Fig. 1 Grain size distribution curve of sample

Table 1 Index properties of soil sample

Soil Sample	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_P (%)	I_P	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Kaolinite	2.679	73.1	36.7	36.4	0	3	97

往の研究例¹⁶⁾を考慮して、初期飽和度 S_{r1} を20, 40, 60, 80, 85, 90, 95%の7種類とし、初期乾燥密度 ρ_{d1} を1.266g/cm³ (0.85 ρ_{dmax}), 1.043g/cm³ (0.7 ρ_{dmax}) の2種類とした。なお、本研究では、初期乾燥密度が1.266g/cm³ の場合には初期飽和度が20%, 初期乾燥密度が1.043g/cm³ の場合には初期飽和度が90, 95%の条件に関する実験が、供試体成形が不可能であったので実施できなかった。

2-2 実験方法

実施した実験は、サクシヨンの測定を伴うひずみ制御方式の一軸圧縮試験であり、データのばらつきを考慮して同一条件の供試体に対して2本以上行った。また、せん断時のひずみ速度は1.0%/minとした¹⁷⁾。なお、一軸圧縮試験は不飽和土用三軸室を使用して行い、セル圧および間隙空気圧は大気圧 ($\sigma_c = u_a = 0$) とした。

3. 実験結果および考察

3-1 初期サクシヨンと初期飽和度および初期乾燥密度の関係

Fig. 2 および Fig. 3 は、初期サクシヨン S_{u1} と初期飽和度 S_{r1} および初期乾燥密度 ρ_{d1} の関係を示している。ここで、図中の一点は、同一条件の供試体より得られた S_{u1} の平均値である。また、両図にはDLクレイの試験結果¹⁶⁾を併記した。

カリオンおよびDLクレイの S_{u1} は、 ρ_{d1} によらず S_{r1} の増加に伴って減少する傾向を示しており、その減少割合は、 S_{r1} が40%と85%の場合を比較すると、カオリンでは45%程度であるのに対して、DLクレイの場合には約35%となっており、カオリンの減少割合がDLクレイよりも大きいことがわかる。また、同 S_{r1} 条件下における S_{u1} は、カオリンがDLクレイよりも大きな値を示しており、両者の差は S_{r1} の増加に伴って減少し、 S_{r1} が40%の場合には20kPa程度であったものが、 S_{r1} が80%以上になると約10kPaとなっている。さらに、 S_{u1} は、Fig. 3 に示すように、 S_{r1} によらず ρ_{d1} の増加に伴って減少しており、その減少

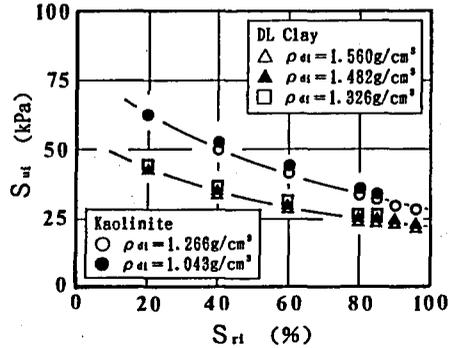


Fig. 2 Relationship between initial suction and initial degree of saturation

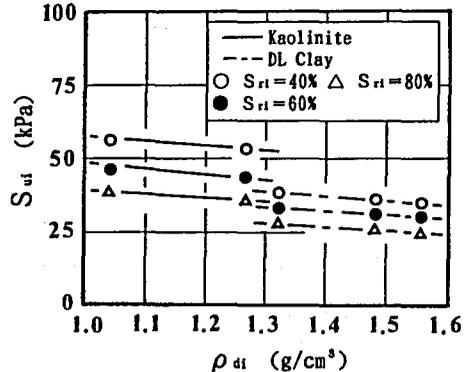


Fig. 3 Relationship between initial suction and initial dry density

傾向には試料の粒度組成の違いによる相違が認められない。

以上のことより、 S_{ul} は試料の粒度組成の違いによらず S_{rl} および ρ_{dl} の増加に伴ってほぼ同様の減少傾向を示すことがある程度明らかとなった。

3-2 圧縮応力と軸ひずみの関係

異なる初期乾燥密度 ρ_{dl} を有する供試体の圧縮応力と軸ひずみの関係を、Fig. 4 (a), (b)に示す。 ρ_{dl} が 1.266g/cm^3 の場合、圧縮応力は軸ひずみの増加に伴って増加し、変形特性は若干異なるものの圧縮応力-軸ひずみ曲線には、初期飽和度 S_{rl} によらず明瞭なピークが認められる。また、圧縮応力-軸ひずみ曲線は、 S_{rl} が80%以下の場合には、約2%~3%の軸ひずみで破壊に至っているのに対して、 S_{rl} が90%以上になると破壊ひずみが8%程度に増大している。これに対して、 ρ_{dl} が 1.043g/cm^3 の場合、応力-ひずみ曲線は、 S_{rl} が80%以下の条件では明瞭なピークを示すが、 S_{rl} が85%になると明瞭なピークが認められず、圧縮応力は軸ひずみが6%程度に達するとほぼ

一定値を示している。また、 S_{rl} が60%以下の場合には、圧縮応力-軸ひずみ曲線は、軸ひずみが約2%に達すると破壊に至っているのに対して、 S_{rl} が80%を越えると破壊ひずみが9%程度に急増している。さらに、同軸ひずみ条件下における圧縮応力は、 ρ_{dl} によらず S_{rl} の増加に伴って減少する傾向を示しており、 S_{rl} が40%と85%の場合を比較すると、一軸圧縮強さの減少割合は30%~40%程度となっている。

3-3 せん断時のサクシオンと軸ひずみの関係

Fig. 5 (a), (b)は、異なる初期乾燥密度 ρ_{dl} を有する供試体のせん断時のサクシオン S_u と軸ひずみの関係を示している。せん断時のサクシオンは、初期飽和度 S_{rl} が85%以下の場合には ρ_{dl} によらず軸ひずみの増加に伴って僅かに増加する傾向を示しており、同様の傾向は既往の研究例^{10),18)}においても報告されている。これに対して、 S_{rl} が90%を越えると、せん断時のサクシオンは軸ひずみの増加に伴って僅かに減少し、軸ひずみが7%~8%程度に達すると徐々に増加する傾向を示している。これは、 S_{rl} が90%以上の場合には、せん断の初期に正の間隙水圧が発生していることを示唆しているものと考えられ、同様の傾向はDLクレイ¹⁰⁾においても認められている。したがって、 S_{rl} が90%以上の場合には、試料の粒度組成の違いによらずせん断の初期に正の間隙水圧が発生するものと考えられる。また、サクシオン-軸ひずみ曲線は、 S_{rl} が同じ場合には破壊ひずみが若干異なるものの ρ_{dl} によらず

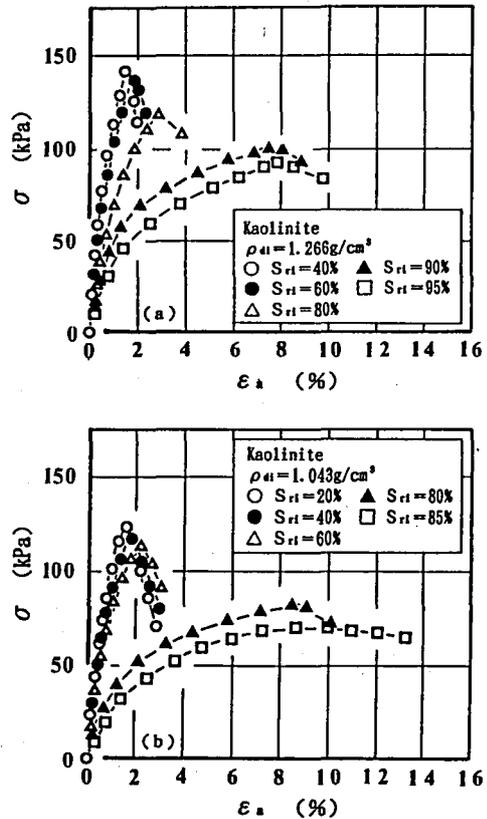


Fig. 4 Typical stress-axial strain behaviour

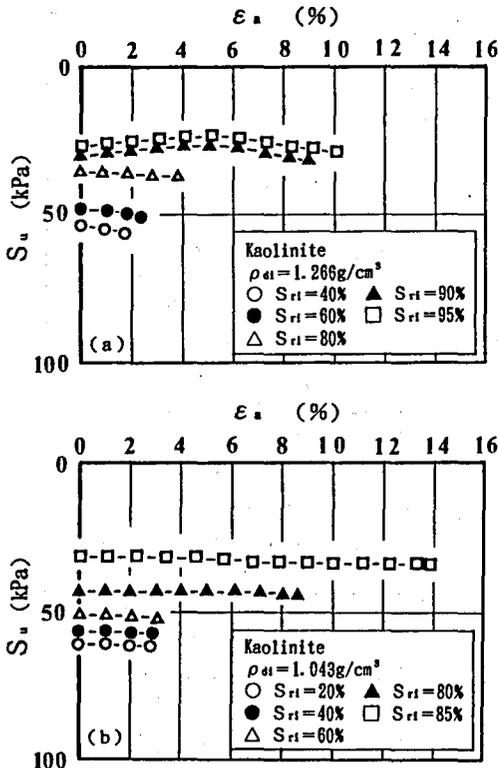


Fig. 5 Typical suction-axial strain behaviour

ほ類似した挙動を示すことがわかる。

3-4 有効応力径路

異なった初期乾燥密度 ρ_{d1} 条件下における

有効応力径路を、Fig. 6 (a), (b)に示す。なお、ここでは、 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ を平均軸差応力、 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ を平均有効応力と定義している。初期飽和度 S_{r1} が90%以上の場合には、有効応力径路は ρ_{d1} によらず平均有効応力の増加に伴って平均軸差応力が増加し、等方圧密非排水三軸圧縮試験より得られた飽和土破壊線 (Failure Envelope) に漸近していき破壊に至っている。これに対して、 S_{r1} が85%以下の場合、有効応力径路は、平均有効応力の増加に伴って平均軸差応力がほぼ直線的に増加し破壊に至っており、この挙動には ρ_{d1} による相違が認められない。また、破壊時の平均軸差応力は、 S_{r1} の低下に伴って増加する傾向を示しており、この傾向は既往の研究例^{16), 19)}においても認められている。さらに、このときの破壊点は、 ρ_{d1} の違いによらず S_{r1} の低下に伴って飽和土破壊線から離れる傾向を示している。

3-5 強度特性

Fig. 7 および Fig. 8 は、一軸圧縮強さ q_u と初期飽和度 S_{r1} および初期乾燥密度 ρ_{d1} の関係を示している。なお、図中の一点は、同一条件の供試体より得られた q_u の平均値であり、両図には DL クレイの試験結果¹⁶⁾を併記した。 q_u は ρ_{d1} によらず S_{r1} の増加に伴って減少す

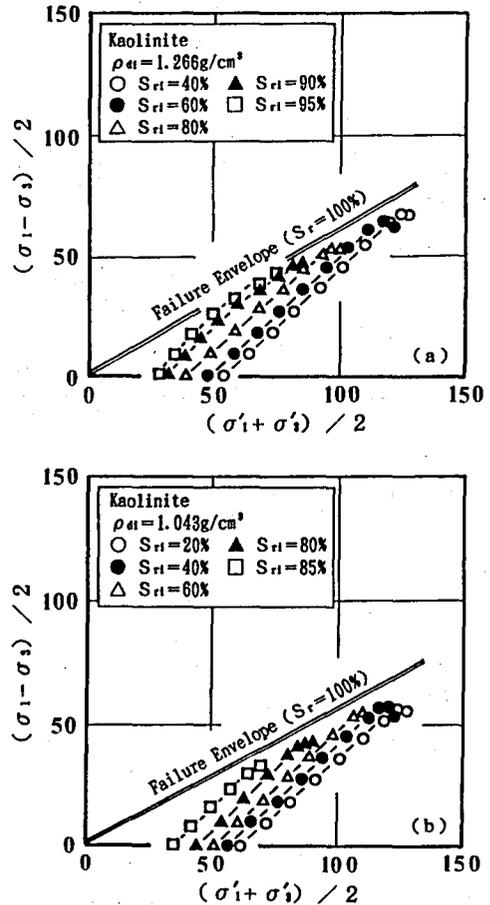


Fig. 6 Typical effective stress paths

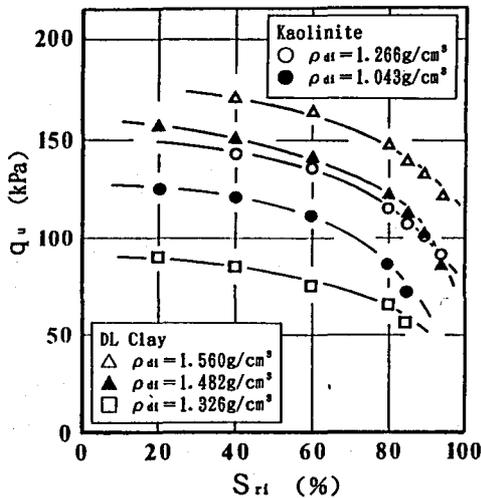


Fig. 7 Relationship between the compressive strength and initial degree of saturation

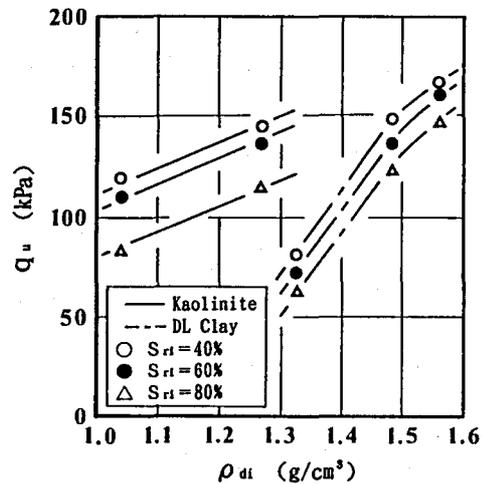


Fig. 8 Relationship between the compressive strength and initial dry density

る傾向が認められ、 S_{r1} が80%以上になると減少割合が増大しており、その値は S_{r1} が40%と85%の場合を比較すると、カオリンでは30%~40%程度、DLクレイの場合には約40%である。この主要因としては、 S_{r1} の増加に伴って初期サクションが低下し、その結果、見掛けの粘着力が減少しているためであると考えられる。また、 S_{r1} が80%以上になると q_u の減少割合が増大する現象は、既往の研究例¹¹⁾において報告されているように、 S_{r1} が80%程度に達すると膨潤変形量が急増することと密接な関係にあるものと考えられる。さらに、同 S_{r1} 条件下における q_u は、 ρ_{d1} の増加に伴って増加する傾向を示しており、カオリンの場合には20%~30%程度 ($\rho_{d1} = 1.043\text{g/cm}^3$, 1.266g/cm^3 を比較)、DLクレイでは約70%~85% ($\rho_{d1} = 1.326\text{g/cm}^3$, 1.482g/cm^3 を比較)の増加割合となっている。これは、DLクレイの主成分がシルト分であるために、 ρ_{d1} の増加に伴って正のダイレイタンスの影響を大きく受けており、その結果、 q_u の増加割合が大きくなったものと考えられる。

Fig. 9は、カオリンとDLクレイの q_u と破壊時サクション S_{ur} の関係を示している。 q_u は ρ_{d1} によらず S_{ur} の増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示しており、既往の研究例¹⁰⁾においても同様の傾向が認められている。このことは、不飽和土の一軸圧縮試験結果を有効応力で整理することによって、内部摩擦角と粘着力を算出することが可能であること

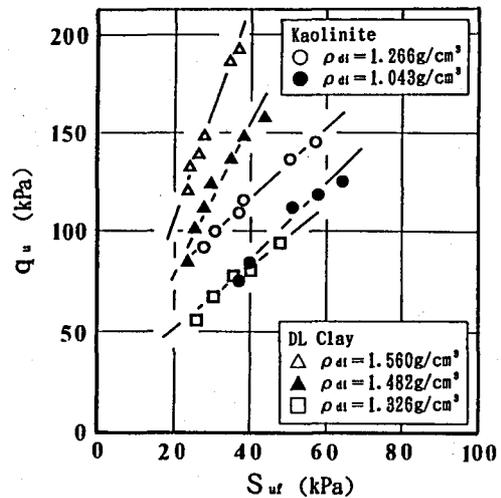


Fig. 9 Relationship between the compressive strength and the suction at failure

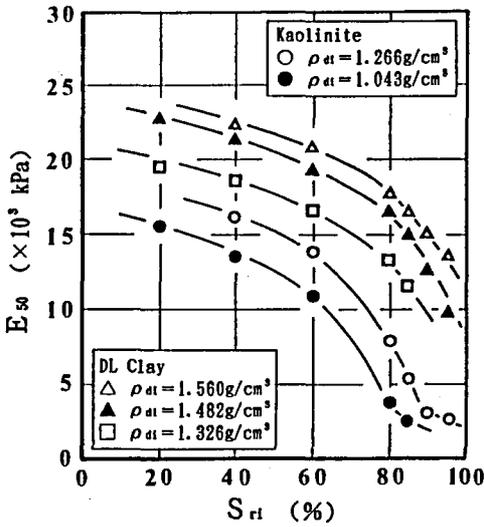


Fig. 10 Relationship between the modulus of deformation and initial degree of saturation

を示唆しているものと考えられる。

3-6 変形特性

変形係数 E_{50} と初期飽和度 S_{r1} および初期乾燥密度 ρ_{d1} の関係を、Fig.10と Fig.11に示す。ここで、 E_{50} は圧縮応力-軸ひずみ曲線上において、一軸圧縮強さ q_u の1/2となる点と原点とを結ぶ割線係数で定義した。なお、図中の一点は、各供試体条件における E_{50} の平均値を示しており、両図にはDLクレイの試験結果¹⁶⁾を併記した。 E_{50} は、全 ρ_{d1} 条件下において S_{r1} の増加に伴って減少しており、その減少傾向は粒度組成の違いによらずほぼ類似した挙動を示している。これは、 q_u が S_{r1} の増加に伴って減少していることが、その主要因であるものと考えられる。また、 S_{r1} の増加に伴う E_{50} の減少割合は、 S_{r1} が40%と85%の場合を比較すると、カオリンでは約70%~80%、DLクレイの場合には30%~35%程度である。さらに、両試料の E_{50} は、 S_{r1} によらず ρ_{d1} の増加に伴って増加する傾向を示しており、その増加割合は、カオリンの場合には約20% ($S_{r1}=40, 60\%$) ~50% ($S_{r1}=80\%$) ($\rho_{d1}=1.043 \text{ g/cm}^3, 1.266 \text{ g/cm}^3$ を比較)、DLクレイでは15%~20%程度 ($\rho_{d1}=1.326 \text{ g/cm}^3, 1.482 \text{ g/cm}^3$ を比較) である。

Fig.12は、カオリンとDLクレイ¹⁶⁾の E_{50} と破壊時サクション S_{ur} の関係を示している。

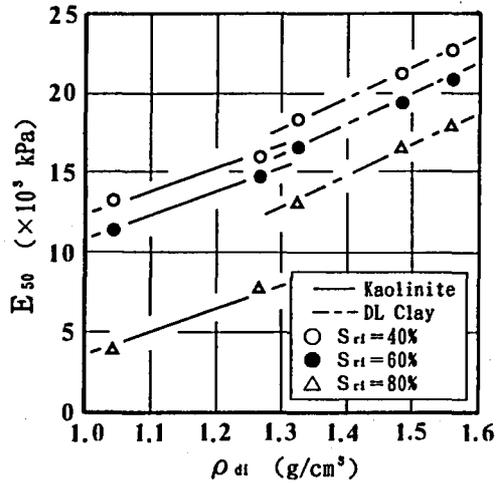


Fig 11 Relationship between the modulus of deformation and initial dry density

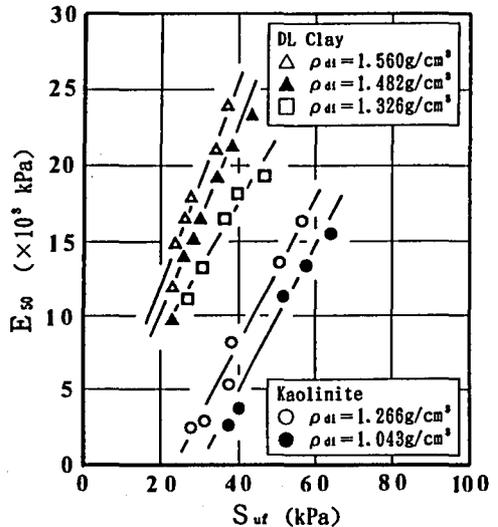


Fig. 12 Relationship between the modulus of deformation and the suction at failure

Table 2 Summary of unconfined compression test results

ρ_{d1} (g/cm ³)	S_{r1} (%)	w (%)	S_{u1} (kPa)	S_{ur} (kPa)	q_u (kPa)	E_{50} (kPa)	ϵ_r (%)	ϕ' (°)
1.266	20	8.3						
	40	16.6	53	56	145.2	16100	1.6	28.3
	60	24.9	45	49	138.5	13800	1.7	28.8
	80	33.2	37	39	116.8	7900	2.8	29.5
	85	35.3	36	37	112.4	5100	3.0	30.2
	90	37.4	30	31	102.0	3100	7.6	30.5
	95	39.4	29	29	93.5	2600	8.1	30.8
	100	41.5						31.3
1.043	20	11.7	62	65	125.4	15600	1.6	26.5
	40	23.4	56	58	120.3	13300	1.8	27.1
	60	35.1	47	50	113.8	11300	2.2	27.7
	80	46.8	38	40	86.5	3800	8.6	28.0
	85	49.8	36	37	73.3	2600	8.8	28.5
	90	52.7						
	95	55.6						
	100	58.5						29.8

注) 初期飽和度100%の条件における内部摩擦角は、等方圧密非排水三軸圧縮試験結果より算出した。

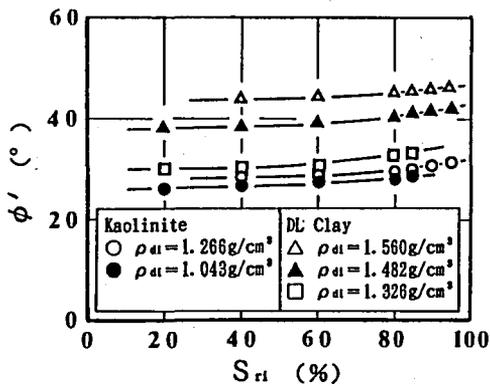


Fig. 13 Variation in ϕ' with initial degree of saturation

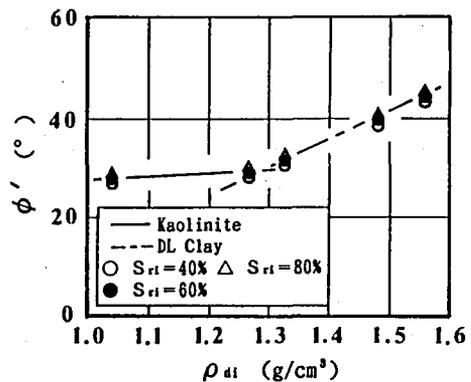


Fig. 14 Variation in ϕ' with initial dry density

図より、カオリンおよびDLクレーの E_{50} は、 S_{ur} の増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示しており、試料の粒度組成の違いによる相違が認められないことがわかる。

3-7 内部摩擦角と初期飽和度および初期乾燥密度の関係

Fig.13は、初期乾燥密度 ρ_{d1} を変化させた場合の内部摩擦角 ϕ' と初期飽和度 S_{r1} の関係を示している。 ϕ' は ρ_{d1} によらず S_{r1} の増加に伴って増加する傾向を示しており、 S_{r1} が40%と85%の場合を比較すると、その増加割合は、カオリンでは1°~2°程度、DLクレイの場合には約1°~3°である。また、同 S_{r1} 条件下における ϕ' は、DLクレイがカオリンよりも大きな値を示している。これは、 S_{r1} が同じ場合には、DLクレイの初期サクシヨン S_{u1} の値がカオリンよりも小さいことに起因しているものと考えられる。さらに、 ϕ' は、Fig.14に示すように、 S_{r1} によらず ρ_{d1} の増加に伴って増大する傾向を示しており、その増加割合は、カオリンの場合には約5% ($\rho_{d1}=1.043\text{g/cm}^3$, 1.266g/cm^3 の場合を比較) であるのに対して、DLクレイでは40%~50%程度 ($\rho_{d1}=1.326\text{g/cm}^3$, 1.482g/cm^3 の場合を比較) となっている。これは、DLクレイの主成分がシルト分であるために、 ρ_{d1} の増加に伴って正のダイレイタンスの影響を大きく受けており、その結果、 ϕ' の増加割合が大きくなったものと考えられる。

Table 2 は、今回実施したサクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験結果をとりまとめている。

4. 結 論

本研究では、初期飽和度および初期乾燥密度の違いが不飽和土の一軸圧縮試験結果に及ぼす影響を解明するために、静的締固めにより作成した供試体に対してサクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験を実施した。また、粒度組成の違いが締固めた不飽和土の強度・変形特性に及ぼす影響についても検討を行った。

以下に、本研究より得られた主要な結論を列記する。

- 1) 同初期飽和度条件下における初期サクシヨンは、カオリンがDLクレイよりも大きな値を示した。したがって、初期サクシヨンは、試料の主成分が粘土分である場合には主成分がシルト分である場合よりも大きくなるものと考えられる。
- 2) 一軸圧縮強さおよび変形係数は、試料の粒度組成の違いによらず初期飽和度の増加および初期乾燥密度の低下に伴ってほぼ類似した減少傾向を示すことが明らかとなった。また、初期飽和度の増加に伴う一軸圧縮強さの減少割合は、初期飽和度が40%と85%の場合を比較すると、カオリンでは30%~40%程度、DLクレイでは約40%であった。これに対して、変形係数の減少割合（初期飽和度が40%と85%の場合を比較）は、カオリンでは約70%~80%であるのに対して、DLクレイの場合には30%~40%程度であった。
- 3) 初期乾燥密度の増加に伴う内部摩擦角の増加割合は、DLクレイでは40%~50%程度 ($\rho_{d1}=1.326\text{g/cm}^3$, 1.482g/cm^3 の場合を比較) であるのに対して、カオリンの場合には約5% ($\rho_{d1}=1.043\text{g/cm}^3$, 1.266g/cm^3 の場合を比較) であった。このことより、試料の主成分がシルト分である場合には、内部摩擦角は初期乾燥密度の影響を大きく受けるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Bishop, A. W.: The measurement of pore pressure in the triaxial test, Pore pressure and Suction in Soils, pp. 38~46, 1960.

- 2) Bishop, A. W. and Donald, I. B.: The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus, Proc. 5th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 13~21, 1961.
- 3) Bishop, A. W. and Blight, G. E.: Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, Geotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 177~197, 1963.
- 4) Jennings, J. E. B.: A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils, Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 26~30, 1960.
- 5) Aitchison, G. D.: Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils, Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 47~52, 1960.
- 6) 足立紀尚・岡二三生: 不飽和土の試験法と力学挙動, 土と基礎, Vol. 29, No. 6, pp. 27~33, 1981.
- 7) 村田秀一・兵頭正幸・安福則之: サクションを用いた不飽和土の力学的挙動の評価, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム論文集, pp. 11~16, 1987.
- 8) 軽部大蔵・苗村康造・森田 登・岩崎哲雄: 不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第269号, pp. 105~119, 1978.
- 9) Jennings, J. E. B. and Burland, J. B.: Limitations to effective stress in partly saturated soils, Geotechnique, Vol. 12, No. 2, pp. 125~144, 1962.
- 10) 阿部廣史・川上 浩: 不飽和土の負の間隙水圧とコラプス現象, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム論文集, pp. 45~54, 1987.
- 11) 亀井健史・榎本雅夫: 水浸に伴う不飽和シルト質土の膨潤特性, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 89~96, 1994.
- 12) 亀井健史・榎本雅夫: 締め固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 97~104, 1994.
- 13) 川原孝洋・畠山正則: 応力解放に伴うサクションと一軸圧縮強さの関係, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 797~798, 1993.
- 14) 島田 清・西村伸一: 不飽和まさ土の強度特性に与えるサクションの影響, 第27回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 743~744, 1992.
- 15) 宇野尚雄・杉井俊夫・松崎康隆・安藤功朗: 不飽和シルトの変形と強度に関する研究, 第27回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 741~742, 1992.
- 16) 常田 亮・亀井健史: 締め固めた土の一軸圧縮試験結果に及ぼす飽和度の影響, 長野工業高等専門学校紀要, 第28号, pp. 63~73, 1994.
- 17) 土質工学会編: 土質試験法〔第2回改訂版〕, 1979.
- 18) 土質工学会編: 不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集, 1992.
- 19) 土質工学会: 不飽和土, ジオテクノート5, pp. 77~85, 1993.