

締固めた土の一軸圧縮試験結果に 及ぼす飽和度の影響

常田 亮*・亀井 健史**

(平成6年9月28日 受理)

EFFECTS OF VARIATIONS IN DEGREE OF SATURATION ON UNCONFINED COMPRESSION TEST RESULTS OF COMPACTED SOIL

Makoto TOKIDA and Takeshi KAMEI

To investigate the effects of variations in degree of saturation on unconfined compression test results of the compacted soil, unconfined compression tests were performed on the compacted soil with different initial dry density and initial degree of saturation.

The observed effects of initial dry density and initial degree of saturation of the compacted soil are discussed by a detailed look at unconfined compressive strength and deformation characteristics.

1. はじめに

一般的に、土は土粒子およびその間隙を満たす水と空気の三相混合体であり、間隙が完全に水で満たされている土を飽和土、それ以外の土を不飽和土と呼んでいる。多雨多湿な気候の日本では、地下水位が比較的高いため土質工学上問題となる地盤の多くは飽和状態にあり、不飽和土の問題は特殊な問題として考えられてきた。しかしながら、盛土や地下水位より上部にある地盤等の実際に土木工事の対象となる土は、不飽和状態にあることが知られており、飽和度が100%を僅かに低下したり土中の間隙内に気泡が生じて間隙水圧が負圧になっている試料まで考慮すると、不飽和土の範囲はかなり拡大されるものと考えられる。また、室内試験に用いられている通常の試料は、完全な飽和状態で存在することが少なく、サンプリングによる応力解放に伴い試料中に負の間隙水圧が発生している場合には、その負の間隙水圧が試験結果に大きな影響を及ぼすことが指摘されている¹⁾。したがって、不飽和土の強度・変形特性を解明することは、地盤のせん断特性を評価する上で工学的に重要な要素のひとつであることが容易に想定される。

上記のような点に着目して、不飽和土の力学的挙動を解明することを目的とした研究例が数多く報告されている。その代表例として、Aitchison²⁾や Jennings³⁾および Bishop⁴⁾は、飽和土の有効応力原理を不飽和土に対して適用するために、不飽和土に関する有効応力式の提

* 環境都市工学科助教授

** 基礎地盤コンサルタンツ (株) 地盤物性研究室室長

案を行っており、Bishop⁴⁾の提案式が気相の項を含んでいる点で包括的な表現式であるといわれている。また、Bishop and Donald⁹⁾は、不飽和土の排水三軸圧縮試験を実施した結果、試験中に側圧と間隙水圧の差および間隙空気圧と間隙水圧の差を一定となるように変化させた場合には、不飽和土の応力-ひずみ曲線はほとんど影響を受けないのに対して、両者のどちらか一方のみを変化させた場合には大きな影響を受けることを明らかにし、不飽和土の力学的挙動が有効応力式⁴⁾に支配されていることを示した。さらに、Bishop and Blight⁶⁾は、4種類の締固めた不飽和試料に対して三軸圧縮試験、一軸圧縮試験および等方圧密試験を実施し、有効応力原理に基づいて不飽和土の強度・変形特性およびサクシジョンの影響等の検討を行い、有効応力式中の実験定数 λ の決定法を提案している。

軽部ら⁷⁾は、締固めた不飽和カオリンに対して5種類の排気・排水三軸圧縮試験を行い、破壊応力に及ぼすダイレイタンスの影響やひずみの応力径路依存性について明らかにし、不飽和土の力学的特性が飽和土の延長線上にあることを示唆した。また、向後⁸⁾は等価間隙水圧を導入して有効応力を定義し、これを修正カムクレイ型の飽和土構成式に適用して不飽和土の塑性ポテンシャル関数を提案している。

これに対して、Jennings and Burland⁹⁾は、不飽和粘性土に対して圧密試験を実施した結果、圧密の途中段階で供試体を水浸させてサクシジョンを解放した場合、サクシジョンの解放に伴って有効応力が減少して体積膨張が予想されるにもかかわらず、急激な圧縮変形（コラプス）が生じる場合のあることを明らかにし、有効応力式⁴⁾が適用できる限界の飽和度は、粘性土では90%以上でありシルト質土の場合には50%以上であると報告している。しかしながら、コラプスは水浸に伴って有効応力が減少し、せん断破壊が発生して急激な圧縮変形を起こすものであり、一概に有効応力原理を否定する根拠にはならないとの指摘もある¹⁰⁾。また、阿部・川上¹¹⁾は不飽和土に対して K_0 圧密試験を行い、不飽和土を水浸した場合に発生するコラプスは、粒子間力が消失することによりせん断破壊を起こし、負のダイレイタンスが生じることに起因しているものと考えられ、不飽和土のコラプスは必ずしも有効応力原理を否定する挙動ではないと述べている。

Bardenら¹²⁾は、上記のようなコラプスが発生する必要条件として、土が大きな間隙を有しており不安定な構造であること、コラプスを発生させるために十分な大きさの外的応力が作用していること、高いサクシジョンあるいはセメンテーションにより土の構造が一時的な剛性を有していることの三つの条件を上げており、不飽和土の水浸時における体積変化は、初期飽和度、初期乾燥密度および外的荷重により大きな影響を受けているものと考えられる。この点に着目して、榎本・亀井¹³⁾はコラプス沈下が発生しやすいシルト質土に対して圧密試験装置を応用した膨潤試験を実施し、吸水前の初期飽和度および初期乾燥密度がシルト質土の膨潤特性に与える影響を定量的に明らかにしている。また、福田・中沢¹⁴⁾は、盛土地盤の材料としてよく利用される火成岩系風化砂質土に対して水浸試験を行い、コラプス沈下量の算出方法の提案を行っている。

一方、不飽和土の強度・変形特性に関しては、鈴木ら¹⁵⁾が不飽和豊浦砂を用いてサクシジョン一定三軸圧縮試験を実施し、サクシジョンの作用によってせん断強度が増加することを明らかにするとともに、その強度増加量がBishopの有効応力式⁴⁾から説明できると報告している。また、宇野ら¹⁶⁾は締固めた不飽和試料に対して排気・排水三軸圧縮試験を行った結果、

サクシオン応力は密度の影響を受けており、強度特性に及ぼすサクシオンの影響は、シルト質土よりも粘性土に大きく表われると述べている。さらに、沖積粘土と洪積粘土を用いてサクシオンを測定する一軸圧縮試験を実施した結果、一軸圧縮強さと初期サクシオンの間には明瞭な相関関係が認められたとの報告例もある¹⁷⁾。

以上のように、不飽和土の有効応力方式、コラプス現象および強度・変形特性に及ぼすサクシオンの影響等に関してはかなり解明されてきているが、不飽和土の強度・変形特性に及ぼす初期飽和度および初期乾燥密度の影響に関しては、まだ未解明な点が多いのが現状であると考えられる。

本研究では、上記のような点に着目して、初期乾燥密度と初期飽和度を変化させて締固めた不飽和試料に対してサクシオンを測定する一軸圧縮試験を実施し、締固めた土の強度・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ている。

2. 試料および実験方法

2-1 試料

実験に使用した試料は、主成分がシルト分のDLクレーである。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、比較的均質な供試体が得られることを考慮して、直径 5 cm、高さ 20 cm のモールド内の試料を一定ひずみ速度 ($\dot{\epsilon} = 1 \text{ cm/min}$) で静的に締固めて作成した。また、供試体の内的条件は、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 1.326 g/cm^3 ($0.85\rho_{dmax}$), 1.482 g/cm^3 ($0.95\rho_{dmax}$), 1.560 g/cm^3 (ρ_{dmax}) の 3 種類とした。なお、本研究では、供試体成形の都合上、 ρ_{d1} が 1.326 g/cm^3 の場合には $S_{r1} = 90, 95\%$ 、 ρ_{d1} が 1.560 g/cm^3 の場合には $S_{r1} = 20\%$ の条件に関する実験を実施しなかった。

2-2 実験方法

実施した実験は、サクシオンを測定するひずみ制御方式の一軸圧縮試験で、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¹⁸⁾。なお、一軸圧縮試験は不飽和土用三軸室を使用し、セル圧および間隙空気圧を大気圧 ($\sigma_c = u_a = 0$) として実施した。

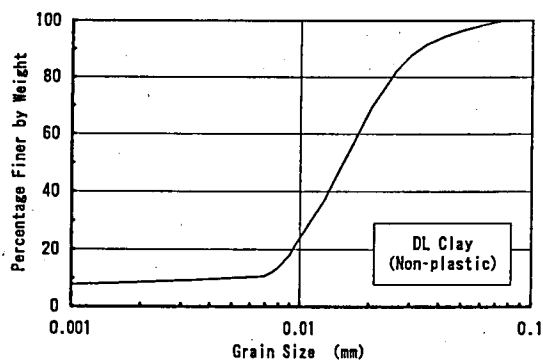


Fig. 1 Grain size distribution curve of sample

Table 1 Index properties of soil sample

Soil Sample	ρ_s (g/cm^3)	w_L (%)	w_P (%)	I_P	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
DL Clay	2.650	NP	NP	NP	0	90.0	10.0

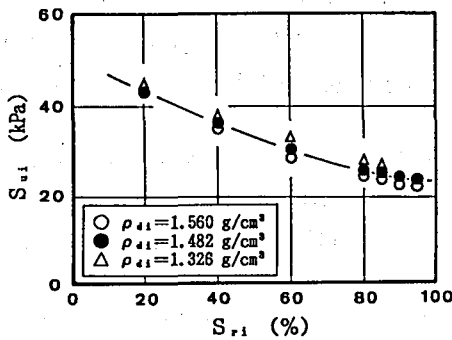


Fig. 2 Relationship between initial suction and initial degree of saturation

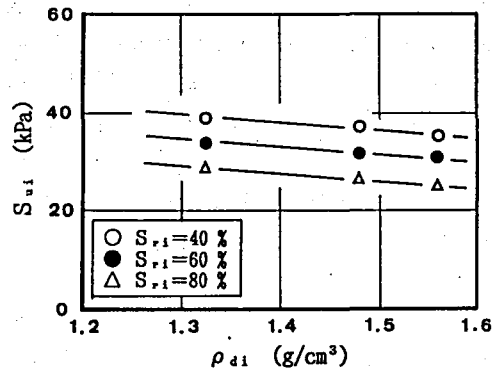


Fig. 3 Relationship between initial suction and initial dry density

3. 実験結果および考察

3-1 初期サクシオ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、初期サクシオンと初期飽和度および初期乾燥密度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初期サクシオンの平均値である。図より、初期サクシオンは、全初期乾燥密度条件において初期飽和度の増加に伴って減少する傾向を示しており、初期飽和度が80%程度に達するとほぼ一定値 ($S_{u,i} \approx 0.23$) となっていることがわかる。また、初期飽和度の増加に伴う初期サクシオンの減少割合は、初期飽和度が20%と95%の場合を比較すると、初期乾燥密度によらず約50%を示した。同様の傾向は、既往の研究例^{19),20)}においても認められており、初期サクシオンは初期飽和度の影響を大きく受けているものと考えられる。さらに、初期サクシオンは、Fig. 3 に示すように、初期飽和度によらず初期乾燥密度の増加に伴ってほぼ直線的に低下しており、初期乾燥密度が1.560g/cm³の場合の初期サクシオンは、初期乾燥密度が1.326g/cm³の場合よりも5%~10%程度小さな値を示している。

以上のことより、締固めた土の初期サクシオンは、初期乾燥密度よりも初期飽和度の影響を大きく受けているものと考えられる。

3-2 圧縮応力-軸ひずみの関係

初期乾燥密度を変化させた場合の圧縮応力と軸ひずみの関係を Fig. 4 (a)~(c) に示す。初期乾燥密度が1.560g/cm³の場合、圧縮応力-軸ひずみ曲線には初期飽和度によらず明瞭なピークが認められ、軸ひずみが1.1%~1.5%程度に達すると破壊に至っている。これに対して、初期乾燥密度が1.482g/cm³および1.326g/cm³の場合には、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によらず明瞭なピークが認められる。また、両初期乾燥密度条件において、初期飽和度が80%以下の場合には軸ひずみが1.5%程度で破壊に至っているのに対して、初期飽和度が80%を越えると破壊ひずみは約2%~3.5%と増大している。さらに、同軸ひずみ条件下における圧縮応力は、全初期乾燥密度条件において初期飽和度の増加に伴って減少しており、初期飽和度が95%と20%の場合 ($\rho_{d,i} = 1.482\text{g/cm}^3$) を比較すると、一軸圧縮強さの減少割合は約50%と

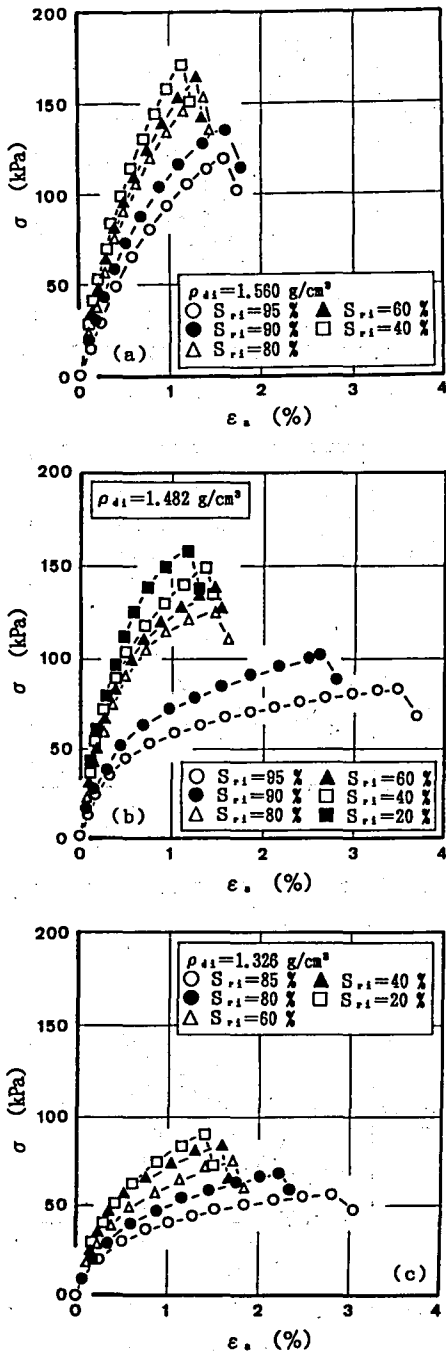


Fig. 4 Typical stress-axial strain behaviours

場合 ($\rho_{d1}=1.482, 1.560\text{g/cm}^3$), 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低下し, 軸ひずみが1.0%程度に達すると徐々に増加する傾向が認められる。このことは,

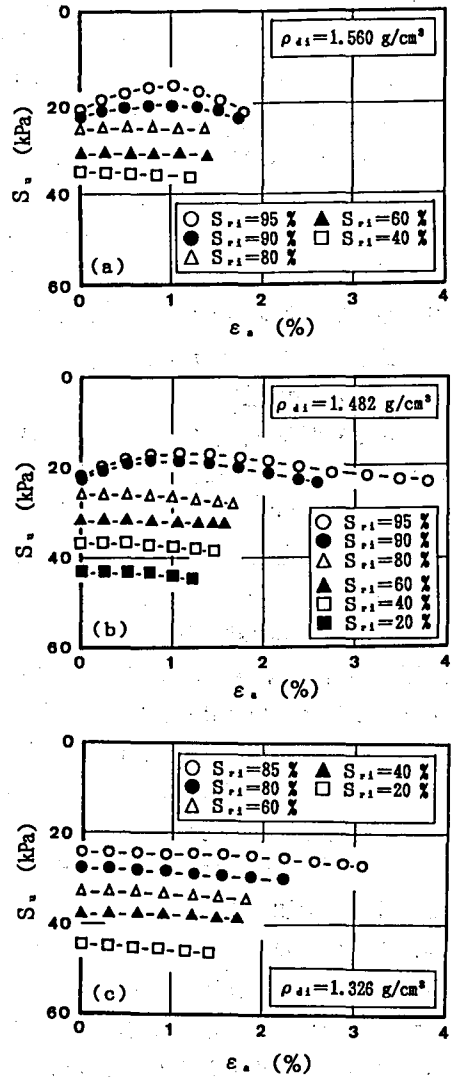


Fig. 5 Typical stress-axial strain behaviours

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)~(c)は, 初期乾燥密度を変化させた場合のせん断時のサクシオンと軸ひずみの関係を示している。初期飽和度が90%以上の

初期飽和度が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る。これに対して初期飽和度が80%以下の場合には、せん断時のサクシオンは全初期乾燥密度条件において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¹⁹⁾においても報告されている。また、サクシオン—軸ひずみ曲線は、初期飽和度が同程度の場合には、破壊ひずみが若干異なるものの初期乾燥密度によらずほぼ同様の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条件における有効応力径路を、Fig. 6(a)~(c)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。初期飽和度が95%の場合 ($\rho_{d1} = 1.482, 1.560 \text{ g/cm}^3$) には、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) に漸近していき最終的に破壊に至っている。これに対して初期飽和度が90%以下の場合には、有効応力径路は初期乾燥密度条件によらず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する傾向を示しており、この傾向は既往の研究例²¹⁾とも一致している。また、破壊時のせん断応力は初期飽和度の低下に伴って増大しており、このときの破壊点は、飽和度の低下に伴って飽和土破壊線から離れていく傾向を示している。

以上のことより、不飽和土の有効応力径路は、初期乾燥密度によらず初期飽和度が95%程度の場合には飽和土破壊線に漸近する挙動を示すのに対して、初期飽和度が90%以下になると初期飽和度の低下に伴って破壊点が飽和土破壊線から離れていく傾向を示すことが明らかとなった。また、不飽和土の有効応力径路の挙動は、初期飽和度が同じ場合には初期乾燥密度の違いによる影響をほとんど受けないものと考えられる。

3-5 強度特性

Fig. 7 および Fig. 8 は、一軸圧縮強さと初期飽和度および初期乾燥密度の関係を示して

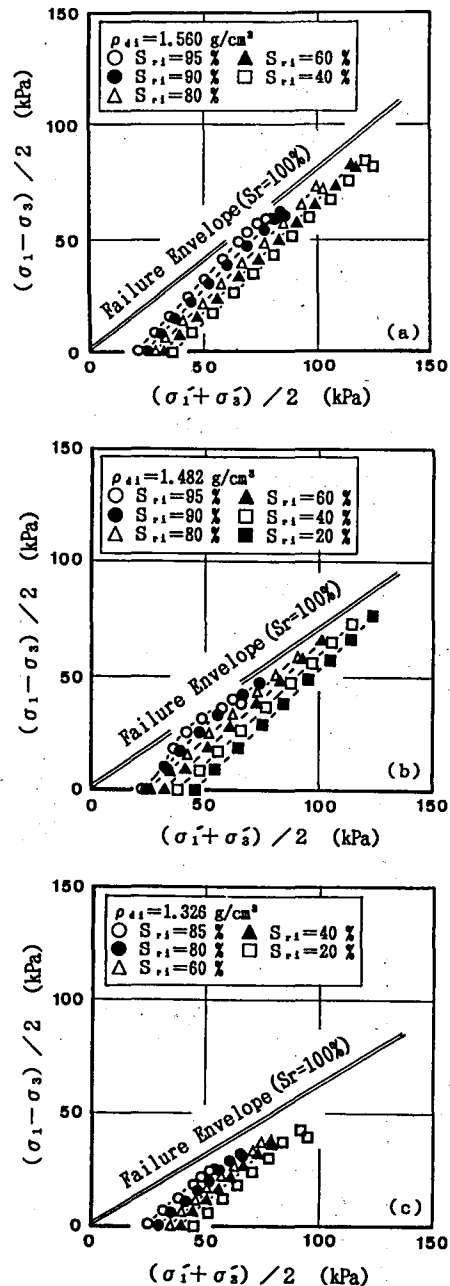


Fig. 6 Typical effective stress paths

Fig. 7 および Fig. 8 は、一軸圧縮強さと初期飽和度および初期乾燥密度の関係を示して

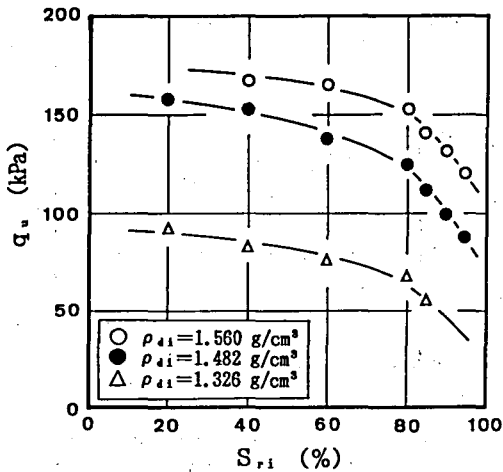


Fig. 7 Relationship between the compressive strength and initial degree of saturation

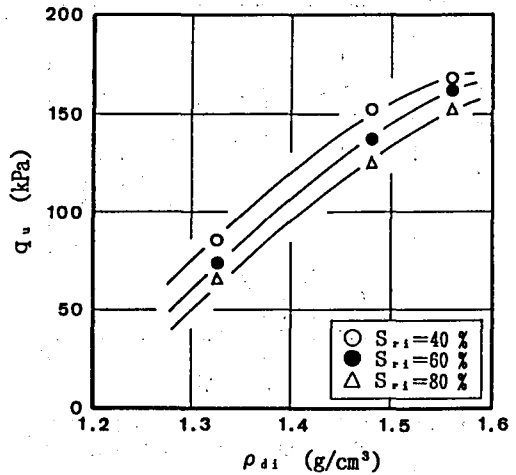


Fig. 8 Relationship between the compressive strength and initial dry density

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一軸圧縮強さの平均値を示している。図より、一軸圧縮強さは、初期乾燥密度によらず初期飽和度の増加に伴って低下する傾向が認められ、初期飽和度が80%を越えるとその減少割合が急増しており、初期飽和度が40%と95%の場合を比較すると、その減少割合は初期乾燥密度が1.560g/cm³の場合には約30%であるのに対して、初期乾燥密度が1.482g/cm³になると40%程度を示すことがわかる。この主要因としては、初期飽和度の高い試料ほど供試体内のサクシオンが低下しており、その結果、見掛け上の粘着力が減少するために、初期飽和度の増加に伴って一軸圧縮強さが低下しているものと考えられる。また、一軸圧縮強さは初期飽和度によらず初期乾燥密度の増加に伴って急増する傾向が認められ、初期乾燥密度が1.560g/cm³の場合の一軸圧縮強さは、初期乾燥密度が1.326g/cm³の場合よりも2倍～3倍程度大きな値を示している。これは初期乾燥密度の増加に伴って土粒子の骨格構造が発達したものに起因しているものと考えられる。さらに、一軸圧縮強さは、Fig.9に示すように、初期乾燥密度条件によらず破壊時サクシオンの増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示している。上記の傾向は、阿部・川上¹¹⁾の研究においても報告されており、このことは、一軸圧縮試験結果を破壊時サクシオンを用いて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を示唆しているものと考えられる。

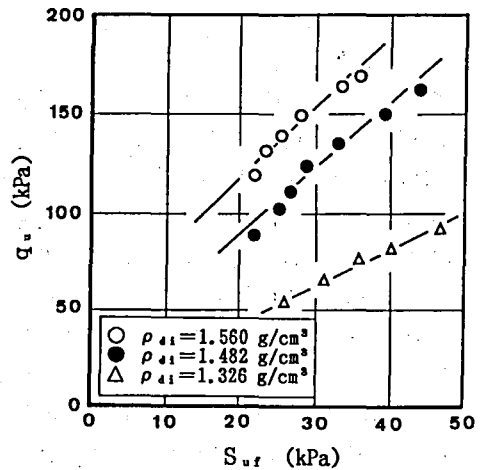


Fig. 9 Relationship between the compressive strength and the suction at failure

初期飽和度によらず初期乾燥密度の増加に伴って急増する傾向が認められ、初期乾燥密度が1.560g/cm³の場合の一軸圧縮強さは、初期乾燥密度が1.326g/cm³の場合よりも2倍～3倍程度大きな値を示している。これは初期乾燥密度の増加に伴って土粒子の骨格構造が発達したものに起因しているものと考えられる。さらに、一軸圧縮強さは、Fig.9に示すように、初期乾燥密度条件によらず破壊時サクシオンの増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示している。上記の傾向は、阿部・川上¹¹⁾の研究においても報告されており、このことは、一軸圧縮試験結果を破壊時サクシオンを用いて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を示唆しているものと考えられる。

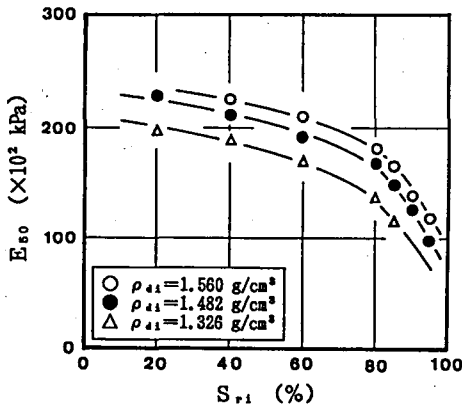


Fig. 10 Relationship between the modulus of deformation and initial degree of saturation

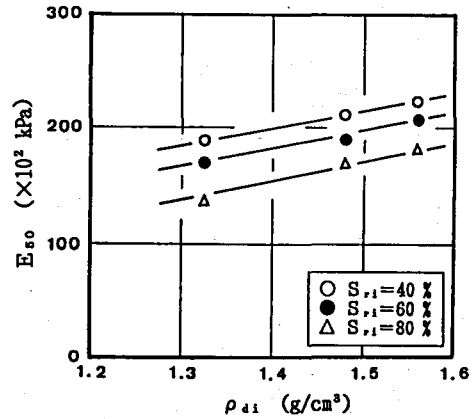


Fig. 11 Relationship between the modulus of deformation and initial dry density

以上のことより、締固めた土の強度特性を評価する場合には、土の初期飽和度と初期乾燥密度を十分に考慮することの必要性を示唆した。

3-6 変形特性

変形係数と初期飽和度および初期乾燥度の関係を Fig.10 と Fig.11 に示す。ここで、変形係数は圧縮応力-軸ひずみ曲線上において、一軸圧縮強さの1/2となる点と原点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変形係数の平均値を示している。変形係数は、一軸圧縮強さと同様に全初期乾燥密度条件において初期飽和度の増加に伴って減少する傾向を示しており、初期飽和度が80%を越えるとその減少割合が急増している。これは初期飽和度の増加に伴って一軸圧縮強さが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、初期飽和度の増加に伴う変形係数の減少割合は、初期飽和度が40%と95%の場合 ($\rho_{d,i}=1.482, 1.560\text{g/cm}^3$) を比較すると、約50%を示した。さらに、変形係数は、初期飽和度によらず初期乾燥密度の増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向が認められ、初期乾燥密度が1.560g/cm³の供試体の変形係数は、全初期飽和度条件において初期乾燥密度が1.326g/cm³の場合よりも1.2~1.4倍程度大きな値を示している。変形係数と破壊時サクシヨンの関係を Fig.12 に示す。図より、変形係数は、破壊時サクシヨンの増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示すことがわかる。

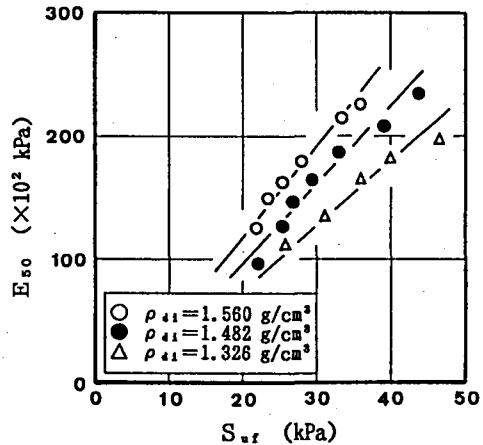


Fig. 12 Relationship between the modulus of deformation and the suction at failure

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、内部摩擦角と初期飽和度の関係を示している。内部摩擦角は、初期乾燥密度条件によらず初期飽和度の増加に伴って僅かに増加する傾向を示しており、初期飽和度が40%

Table 2 Summary of unconfined compression test results

ρ_{d1} (g/cm ³)	S_{r1} (%)	w (%)	S_{u1} (kPa)	S_{uf} (kPa)	q_u (kPa)	E_{s0} (kPa)	ε_r (%)	ϕ' (°)
1.560	20	5.3						
	40	10.5	35	37	168.8	22500	1.1	44.4
	60	15.8	32	34	165.2	21100	1.3	44.8
	80	21.1	25	28	148.7	18000	1.4	45.5
	85	22.4	24	26	140.7	16500	1.4	45.5
	90	23.7	23	24	135.0	15000	1.6	45.5
	95	25.0	23	24	120.5	12100	1.6	46.4
	100	26.4						46.6
1.482	20	5.9	43	45	157.6	23500	1.2	38.6
	40	11.9	37	39	150.8	21300	1.4	38.9
	60	17.8	32	34	138.7	19500	1.5	40.5
	80	23.8	26	28	125.0	16800	1.5	41.1
	85	25.3	25	27	112.4	15200	1.7	41.4
	90	26.8	23	25	101.3	12800	2.6	41.8
	95	28.3	23	24	86.0	9800	3.6	42.0
	100	29.7						42.3
1.326	20	7.5	45	47	91.2	19600	1.4	29.9
	40	15.1	38	40	82.2	18600	1.6	30.5
	60	22.6	33	36	75.4	16800	1.7	31.6
	80	30.1	29	31	67.4	13500	2.2	32.5
	85	32.0	24	26	54.4	11500	2.8	33.4
	90	33.9						
	95	35.8						
	100	37.7						39.7

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。

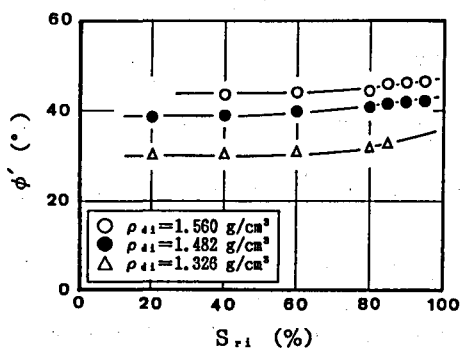


Fig. 13 Variation in ϕ' with initial degree of saturation

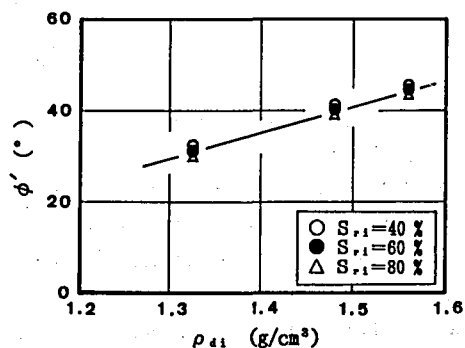


Fig. 14 Variation in ϕ' with initial dry density

と95%の場合を比較すると、その増加割合は5%~10%程度となっている。また、内部摩擦角は、Fig.14に示すように、初期乾燥密度の増加に伴ってほぼ直線的に増加しており、初期乾燥密度が 1.560g/cm^3 の供試体の内部摩擦角は、初期乾燥密度が 1.326g/cm^3 の場合よりも40%~50%程度大きな値を示している。このことより、DLクレーの内部摩擦角は、その主成分がシルト分であるために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。

Table 2は、今回実施したサクションを測定する一軸圧縮試験結果を取りまとめている。

4. 結 論

本研究では、締固めた土の強度・変形特性に及ぼす初期乾燥密度および初期飽和度の影響を解明するために、静的締固めにより作成した不飽和供試体に対してサクションを測定する一軸圧縮試験を実施した。

以下に、本研究より得られた主要な結論を列記する。

- 1) 一軸圧縮強さおよび変形係数は、初期飽和度の増加および初期乾燥密度の低下に伴って減少する傾向を示した。また、初期飽和度の増加に伴う両者の減少割合は、初期飽和度が40%と95%の場合を比較すると、一軸圧縮強さで30%~40%程度、変形係数の場合には約50%であった。
- 2) 一軸圧縮強さおよび変形係数は、初期乾燥密度によらず破壊時サクションの増加に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示した。このことは、試験結果を破壊時サクションを用いて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できる可能性を示唆しているものと考えられる。
- 3) 内部摩擦角は初期飽和度の増加に伴って僅かに増加し、その増加割合は、初期飽和度が40%と95%の場合を比較すると、全試料において5%~10%程度であった。また、内部摩擦角は、初期飽和度によらず初期乾燥密度の増加に伴ってほぼ直線的に増加し、初期乾燥密度が 1.560g/cm^3 の試料の内部摩擦角は、飽和度が85%以下の場合、初期乾燥密度が 1.326g/cm^3 の場合よりも約40%~50%大きな値を示した。

以上のことより、締固めた土の強度・変形特性を評価する場合には、初期飽和度および初期乾燥密度が、そのせん断特性に重要な影響を与える主要因のひとつであるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 川上 浩：不飽和土の強度と変形，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.1~10，1987.
- 2) Aitchison, G.D. : Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils, Pore Pressure and Suction in Soils, pp.47~52, 1960.
- 3) 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.
- 4) Bishop, A. W. : The measurement of pore water pressure in the triaxial test, Pore Pressure and Suction in Soils, pp.38~46, 1960.
- 5) 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.
- 6) 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.
 - 7) 軽部大蔵・加藤正司・勝山潤一: 不飽和カオリンの有効応力と力学定数, *土木学会論文集*, No.370/III-5, pp.179~188, 1987.
 - 8) 向後雄二: 不飽和土の力学挙動に対する弾塑性論的解釈と解析, 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.69~78, 1987.
 - 9) Jennings, J. E. B. and Burland, J. B.: Limitations to the use effective stress in partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol. 12, No.2, pp. 125~144, 1962.
 - 10) Leonards, G. A.: Discussion on the paper by Jennings and Burland, *Geotechnique*, Vol. 12, No.4, pp.354, 1962.
 - 11) 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.
 - 12) Barden, L., McGown, A. and Collins, K.: The collapse mechanism in partly saturated soil, *Engineering Geology*, 7, pp.49~60, 1973.
 - 13) 榎本雅夫・亀井健史: 水浸に伴う不飽和シルトの膨潤特性, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, pp.459~462, 1993.
 - 14) 福田 護・中沢重一: 盛土地盤の浸水に伴う沈下とその解析について—マサ土のような風化砂質土を対象として—, *土質工学会論文報告集*, Vol.17, No.2, pp.65~73, 1977.
 - 15) 鈴木 壽・山田拓男・松田 敏: 不飽和豊浦砂の変形・強度特性におけるサクション効果, 第26回土質工学研究発表会講演概要集, pp.677~678, 1991.
 - 16) 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.
 - 17) 川原孝洋・島山正則: 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.
 - 18) 土質工学会編: 土質試験法 [第2回改訂版], 1979.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 土質工学会編: 不飽和土, *ジオテクノート* 5, pp.77~85, 1993.