

過圧密粘性土の非排水せん断特性に 及ぼすひずみ速度の影響

常田 亮*・亀井 健史**

INFLUENCE OF STRAIN RATE ON UNDRAINED SHEAR CHARACTERISTICS OF OVERCONSOLIDATED COHESIVE SOIL

Makoto TOKIDA and Takeshi KAMEI

In order to investigate the influence of strain rate on undrained shear characteristics of overconsolidated cohesive soil, two types of triaxial compression tests (\overline{CIUC} TEST and \overline{CIRIUC} TEST) were performed on remoulded cohesive soil under different strain rate.

The observed effects of strain rate and overconsolidation histories are discussed by a detailed look at effective stress path, strength and deformation characteristics.

1. はじめに

一般的に、地盤内の土要素がせん断応力を受ける場合、道路や滑走路においては極めて短時間に応力が加えられるのに対して、永久構造物による荷重の場合には、非常に長い期間応力が一定に保たれており、その載荷速度には大きな相違のあることが容易に想定される。また、近年軟弱地盤において建設される諸施設の大型化に伴い、地盤改良後の大規模掘削工事やプレロード工法が実施されているが、その後の地盤の力学的挙動を評価する場合には、土の吸水膨張に伴う力学的挙動の変化、すなわち過圧密履歴を考慮することが必要不可欠であると考えられる。

一方、室内実験の三軸試験におけるひずみ速度は、通常排水せん断試験の場合、供試体内に過剰間隙水圧が発生しないように、また、間隙水圧の測定を伴う非排水せん断試験の場合には、供試体内の過剰間隙水圧の均等化などを考慮して決定されている。これに対して、間隙水圧の測定を実施しない非排水せん断試験の場合には、土質工学会¹⁾により一応の目安が提案されている (Fig.1 参照)。したがって、ひずみ速度が土のせん断特性に及ぼす影響を解明することは、地盤の強度・変形特性を評価する上で非常に重要な要素の一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、ひずみ速度が土のせん断特性に及ぼす影響を解明するために、正規圧密試料を対象とした研究例がこれまでに数多く報告されている。その代表例として、Skempton and Bishop²⁾は、Taylor³⁾および Casagrande and Shannon⁴⁾が実施した試験結果

* 土木工学科 講師

** 基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤物性研究室室長

を整理した結果、砂の場合には変形速度を1%/minから1000%/minに増加させてもせん断強さは10%程度のわずかな増加であったが、粘土の場合には約50%の増加が認められたと報告している。また、乱さない粘性土に対してひずみ速度を0.00094%/minから1.1%/min(約1170倍)に変化させた圧密非排水三軸圧縮試験を実施した結果、非排水せん断強さが30%程度増加したとの報告例もある⁵⁾。さらに、赤井ら⁶⁾は、変形速度を0.07%/minから14%/minの範囲で5種類に変化させた圧密非排水三軸圧縮試験を行い、変形速度の増加に伴って破壊時の主応力差は増大し、過剰間隙水圧は逆に減少することを明らかにしている。

Kimura and Saitoh⁷⁾は、ひずみ速度が供試体内の過剰間隙水圧の挙動に及ぼす影響を解明するために、3種類の異なる塑性指数を有する粘性土試料に対してKo圧密非排水三軸圧縮試験を行った。その結果、供試体の端部および中央部の過剰間隙水圧は、ひずみ速度が0.07%/min程度でほぼ均等化すると報告している。また、Nakase and Kamei⁸⁾は、塑性指数が異なる3種類の練返し飽和粘性土に対して、ひずみ速度を0.7, 0.07, 0.007%/minの3種類に変化させたKo圧密非排水三軸圧縮・伸張試験を実施し、ひずみ速度が応力-ひずみ関係、過剰間隙水圧および有効応力径路などの非排水せん断特性に及ぼす影響を明らかにしている。

一方、過圧密試料に関しては、Richardson and Whitman⁹⁾が、正規圧密および過圧密粘性土(OCR=16)に対してひずみ速度を0.002%/minから1.0%/min(約500倍)に変化させた三軸圧縮試験を行い、非排水せん断強さは両試料ともひずみ速度の増加に伴って増大し、ひずみ速度がせん断強さに及ぼす影響は、過圧密粘性土が正規圧密粘性土よりもわずかに大きくなるとの結果を得ている。また、Robertsonら¹⁰⁾は、Leda粘土(OCR=23)を用いて三軸圧縮試験を行った結果、ひずみ速度を0.00072%/minから約400倍に増加した場合には、非排水せん断強さが25%程度増加することを明らかにしている。

以上のことから、ひずみ速度が土の強度・変形特性に及ぼす影響に関しては、正規圧密試料のせん断特性に及ぼす影響はかなり解明されているが、過圧密試料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、上記の点に着目し、練返し陸成粘性土に対してひずみ速度を3種類に変化させた等方圧密非排水三軸圧縮試験および等方圧密等方膨潤非排水三軸圧縮試験を実施し、ひずみ速度が過圧密粘性土の非排水せん断特性に及ぼす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、長野県下水内郡豊田村替佐で採取した陸成粘性土(替佐土)を練返し予備圧密したものである。練返し試料の予備圧密は、スラリー状の試料を内径15cm、高さ23cmのモールドに入れ一次的に行った。この際、予備圧密圧力は56kPa、予備圧密期間は10日間とした。試料の物理的特性をTable 1に示す。供試体は直径5cm、

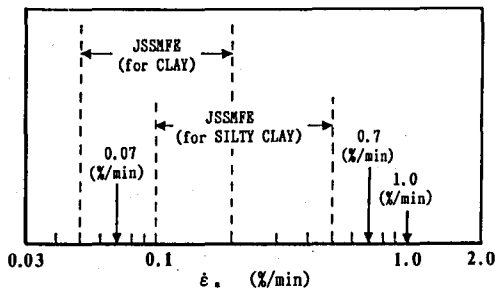


Fig. 1 Adopted strain rate in the present study

Table 1 Index properties of soil sample

Soil Sample	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Kaesa Soil	2.707	54.8	18.7	36.1	44.8	31.3	23.9

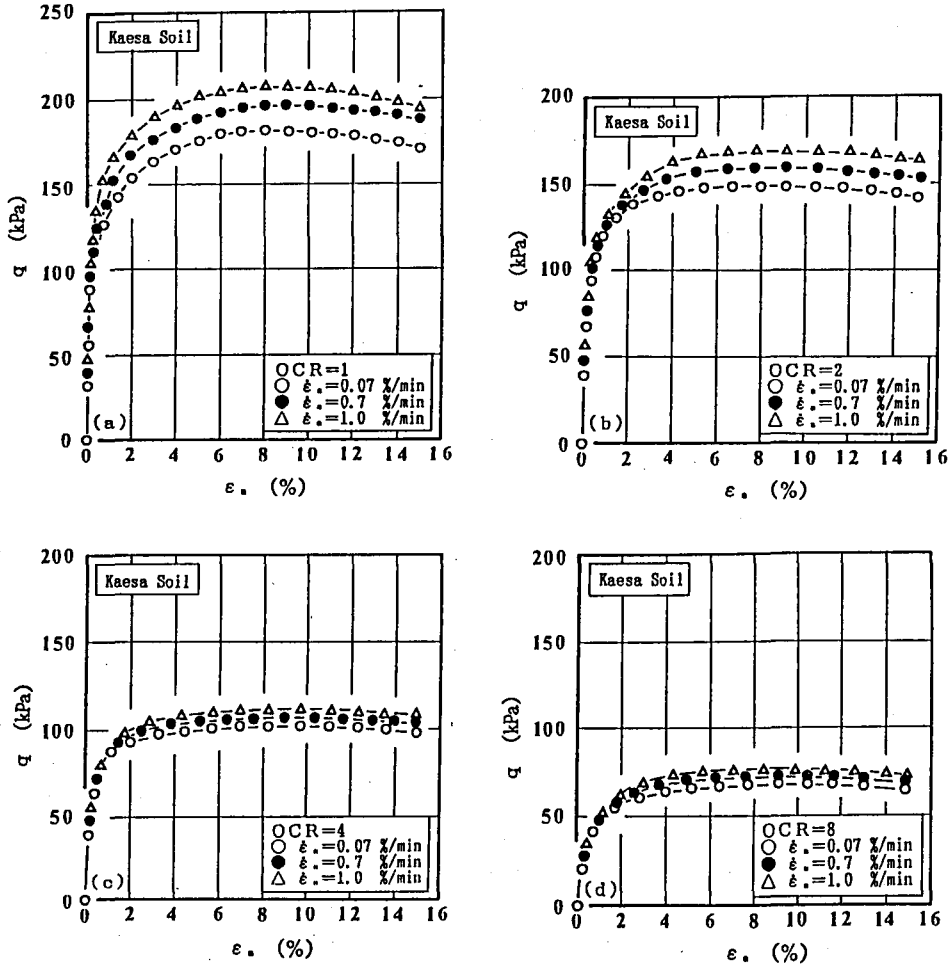


Fig. 2 Typical stress-axial strain curves in \overline{CIUC} TEST and \overline{CIRIUC} TEST

高さ10cmの円柱形¹⁾とし、上述した試料からワイヤーソーとトリマーを用いて切り出して成形した。

2-2 実験方法

実験は、ひずみ制御方式の等方圧密非排水三軸圧縮試験 (\overline{CIUC} TEST) と等方圧密等方膨潤非排水三軸圧縮試験 (\overline{CIRIUC} TEST) である。せん断時のひずみ速度は、0.07, 0.7, 1.0%/min の3種類とした。Fig. 1に本研究で使用したひずみ速度の適用範囲を示す。また、初期有効拘束圧 σ_{ci}' は196kPaとし、圧密、膨潤およびせん断過程を通して供試体に98kPa

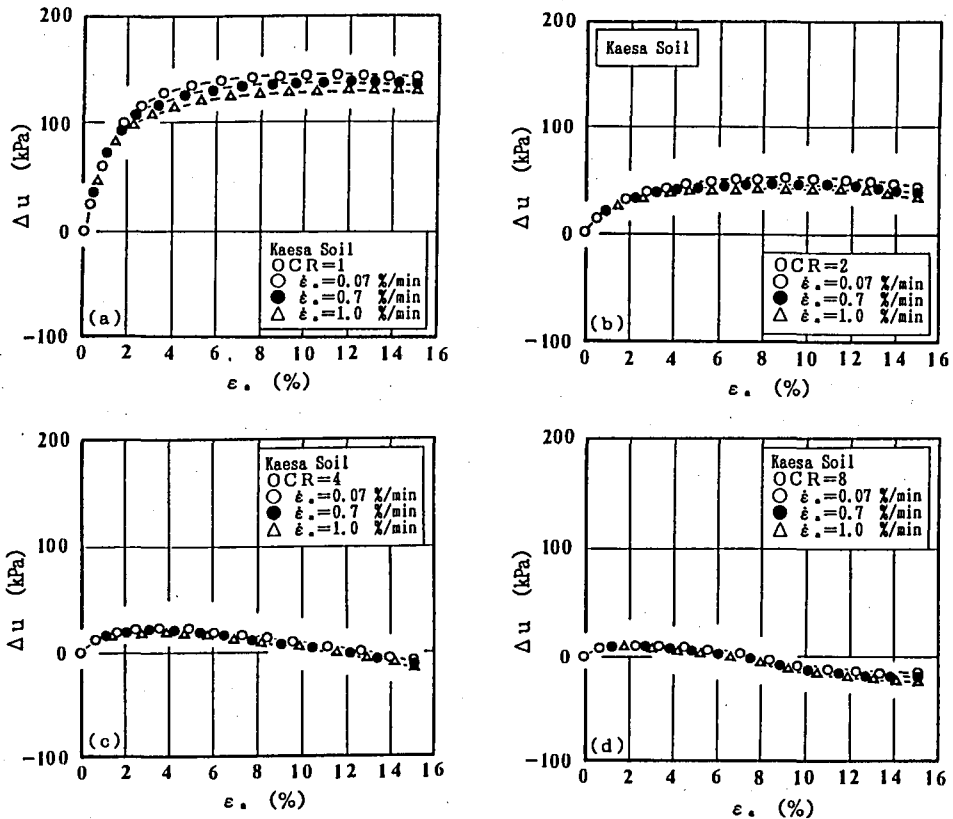


Fig. 3 Typical excess pore pressure-axial strain curves in $\overline{\text{CIUC}}$ TEST and $\overline{\text{CIRIUC}}$ TEST

のバックプレッシャーを作用させた。なお、圧密および膨潤時間は、3t法^{1),11)}を考慮して24時間とした。

a) 等方圧密非排水三軸圧縮試験 ($\overline{\text{CIUC}}$ TEST)

196kPaの初期有効拘束圧で等方圧密した後、非排水圧縮せん断試験を行った。

b) 等方圧密等方膨潤非排水三軸圧縮試験 ($\overline{\text{CIRIUC}}$ TEST)

196kPaの初期有効拘束圧で等方圧密した後、所定の過圧密比となるように有効拘束圧 σ'_c を98kPa, 49kPa, 25kPaとして等方膨潤し、供試体を過圧密状態とした。これに対する過圧密比OCRは、2, 4, 8である。膨潤終了後、非排水圧縮せん断試験を行った。

3. 実験結果および考察

3-1 応力-軸ひずみの関係

Fig. 2(a)~(d)は、正規および過圧密状態の試料の応力-軸ひずみ関係を示している。図より、過圧密比が同じ場合、応力-ひずみ挙動は、ひずみ速度によらずほぼ類似した形状を示すことがわかる。また、同じひずみ条件下における主応力差は、ひずみ速度の増加に伴って増大し、ひずみ速度が0.07%/minと1.0%/minの場合を比較すると、最大主応力差の増加割合は、正規圧密試料の場合には約15%であるのに対して、過圧密試料(OCR=8)の場合

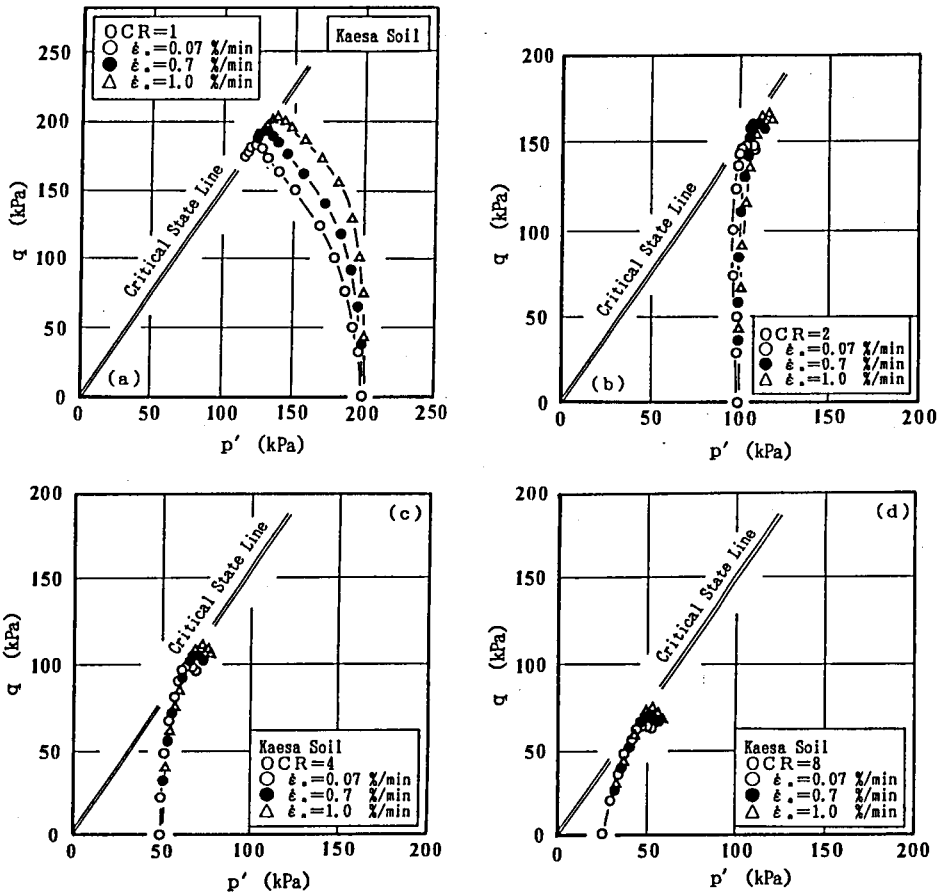


Fig. 4 Typical effective stress paths in \overline{CIUC} TEST and \overline{CRIUC} TEST

には8%程度となっており、正規圧密状態の試料においてひずみ速度の影響が表われやすくなっているものと考えられる。さらに、応力-ひずみ曲線の初期勾配は、正規および過圧密試料ともひずみ速度の増加に伴って大きくなる傾向が認められる。

3-2 過剰間隙水圧-軸ひずみの関係

過剰間隙水圧と軸ひずみの関係を Fig. 3 (a)~(d) に示す。同過圧密比条件下における過剰間隙水圧-軸ひずみ挙動は、ひずみ速度によらずほぼ類似した形状を示している。まず、正規圧密試料の挙動に着目すると、同ひずみ条件下における過剰間隙水圧の発生量は、ひずみ速度の増加に伴って低下している。このことは、先述したひずみ速度の増加に伴う主応力差の増加現象を裏付けており、同様の傾向は Nakase and Kamei⁹⁾の研究においても確認されている。

一方、過圧密試料の場合、過圧密比が2の試料の同ひずみ条件下における過剰間隙水圧の発生量は、ひずみ速度の増加に伴ってわずかに低下している。これに対して、過圧密比が4および8の試料では、過剰間隙水圧-軸ひずみ曲線は、ひずみ速度が0.7%/minと1.0%/minの場合、ほぼ一致した挙動を示し、0.07%/minの場合のみ同ひずみ条件下の過剰間隙

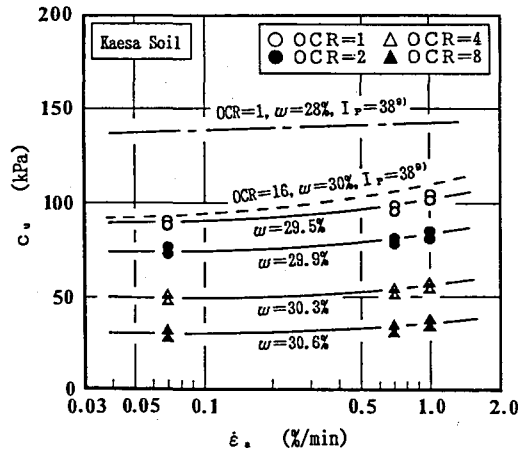


Fig. 5 Effect of strain rate on the undrained shear strength

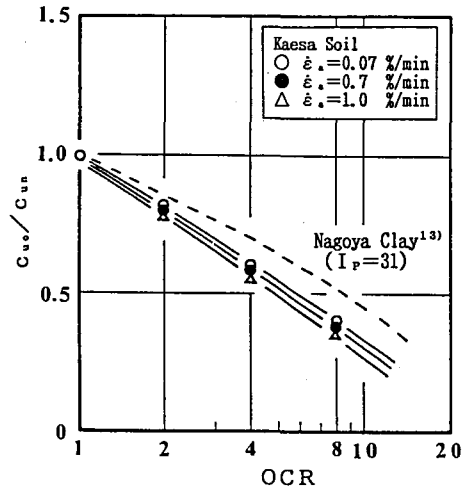


Fig. 6 Relationship between strength ratio and overconsolidation ratio

水圧の発生量がわずかに大きくなっている。このことより、ひずみ速度が過剰間隙水圧一軸ひずみ挙動に及ぼす影響は、過圧密比の増加に伴って小さくなっているものと考えられる。また、過剰間隙水圧の発生量は過圧密比の増加に伴って低下しており、過圧密比が4と8の試料の場合には、軸ひずみが各々約13%と約8%で過剰間隙水圧が負圧に転じている。

3-3 有効応力径路

Fig. 4 (a)~(d)は、正規および過圧密試料の有効応力径路を示している。正規圧密試料の場合、ひずみ速度によらず主応力差の増加に伴って過剰間隙水圧が上昇することにより平均有効主応力が減少し、有効応力径路はCritical State Line (C.S.L.)に漸近していき、最終的には破壊に至っている。また、このときの有効応力径路の形状は、ひずみ速度によらず弓形の状態境界面¹²⁾を示している。さらに、同平均有効主応力下における主応力差は、ひずみ速度の増加に伴って大きくなっている。これは、ひずみ速度の増加に伴って過剰間隙水圧の発生量が低下し、その結果、主応力差が増大していることに起因しているものと考えられる。

一方、過圧密試料の場合には、せん断に伴う過剰間隙水圧の発生量が正規圧密試料よりも低下するために、有効応力径路は、ひずみ速度によらず主応力差の増加に伴って平均有効主応力が増加してほぼ直線的にC.S.L.に漸近する傾向を示している。また、過圧密比が2の試料の場合、同平均有効主応力下の主応力差は、ひずみ速度の増加に伴ってわずかに増加する傾向が認められる。これに対して、過圧密比が4および8の試料になると、ひずみ速度が0.7%/minと1.0%/minの場合には、有効応力径路はほぼ一致した挙動を示し、0.07%/minの場合のみ同平均有効主応力下における主応力差がわずかに小さくなっている。

3-4 非排水せん断強さとひずみ速度および過圧密比の関係

Fig. 5は、正規および過圧密試料の非排水せん断強さとひずみ速度の関係を示している。なお、図中の一点鎖線及び破線は、Richardson and Whitman⁹⁾の試験結果を示している。非排水せん断強さは、両試料ともひずみ速度の増加に伴ってわずかに増大する傾向を示している。この傾向は、既往の研究例⁹⁾においても認められており、非排水せん断強さはひずみ

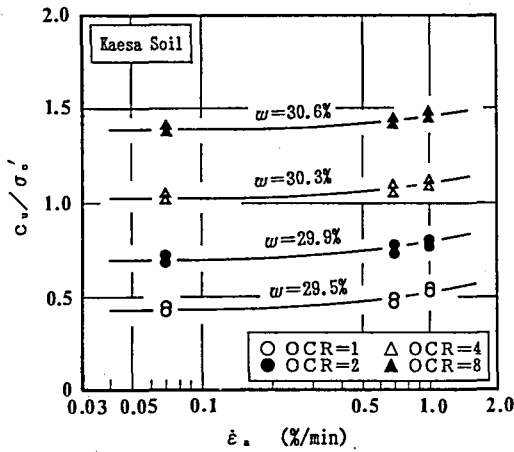


Fig. 7 Effect of strain rate on the ratio of the undrained shear strength to the present effective consolidation pressure

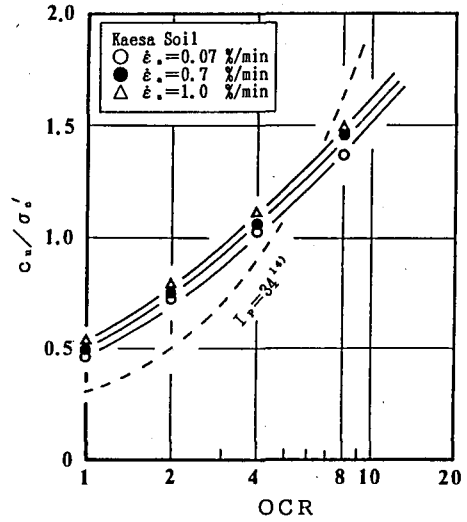


Fig. 8 Effect of overconsolidation history on the ratio of the undrained shear strength to the present effective consolidation pressure

速度の影響を受けていることがわかる。また、ひずみ速度の増加に伴う非排水せん断強さの増加割合は、ひずみ速度が0.07%/minと1.0%/minの場合（増加率約14倍）を比較すると、正規圧密試料の場合には約15%であるのに対して、過圧密試料（OCR=8）の場合には8%程度となっており、ひずみ速度が非排水せん断強さに及ぼす影響は、正規圧密試料にわずかに大きく表われている。この要因としては、本研究の場合、ひずみ速度の増加割合が約14倍と小さく、正規および過圧密試料のせん断前の含水比の差が1%程度と小さくなっている点が考えられる。

過圧密試料の非排水せん断強さ c_{u0} と正規圧密試料の非排水せん断強さ c_{un} の比を非排水せん断強度比 c_{u0}/c_{un} と定義し、吸水膨張に伴う強度減少の割合と過圧密比との関係を Fig. 6 に示す。ここで、図中の一点は、同一圧密条件の供試体より得られた非排水せん断強度比の平均値を示している。非排水せん断強度比は、ひずみ速度によらず過圧密比の増加に伴って低下する傾向を示している。また、過圧密比の増加に伴う非排水せん断強度比の低下割合は、ひずみ速度が速くなるに伴ってわずかに大きくなっており、ひずみ速度の影響が認められる。さらに、Nakase¹³⁾が乱さない海成粘性土（名古屋粘土： $I_p=31$ ）に対して実施した等方圧密等方膨潤非排水三軸圧縮試験結果（ $\dot{\epsilon}_a=0.06\%/min$ ）と比較すると、過圧密比の増加に伴う非排水せん断強度比の低下傾向は、替佐土が名古屋粘土¹³⁾よりもやや大きめに表われている。これは、名古屋粘土と替佐土の塑性指数が異なる点と名古屋粘土の土粒子構造が二次圧密やセメンテーションなどの時間効果等の影響によって発達したものになっているために、吸水膨張による強度減少の割合が替佐土よりも小さくなっていることに起因しているものと考えられる。

Fig. 7 は、非排水せん断強さとせん断時の有効拘束圧の比を強度増加率と定義し、その強

度増加率とひずみ速度との関係を示している。図より、強度増加率は、ひずみ速度の増加に伴ってわずかに増大しており、過圧密比によらずほぼ類似した増加傾向を示すことがわかる。また、強度増加率は、ひずみ速度によらず過圧密比の増加に伴って大きくなる傾向を示している。このことを明瞭に表わすために、強度増加率と過圧密比との関係を Fig. 8 に示す。強度増加率は、過圧密比の増加に伴って増大しており、同様の傾向は、Ladd and Foott¹⁴⁾の試験結果や Kamei and Nakase¹⁵⁾が実施した Ko 圧密 Ko 膨潤非排水三軸圧縮・伸張試験においても認められている。

以上のことより、土の非排水せん断特性を評価する場合には、土の内的諸条件とひずみ速度の適用範囲を十分に考慮することの必要性を示唆した。

3-5 変形係数とひずみ速度および過圧密比の関係

Fig. 9 は、変形係数とひずみ速度との関係を示している。ここで、変形係数は応力-ひずみ曲線上において、主応力差が最大主応力差の $1/2$ となる点と原点を結ぶ割線係数で定義した。変形係数は、正規および過圧密試料ともひずみ速度の増加に伴って増大する傾向を示しており、ひずみ速度が $0.07\%/min$ と $1.0\%/min$ の場合を比較すると、その増加割合は全試料において 18% 程度を示した。また、過圧密試料の変形係数は、ひずみ速度によらず正規圧密試料よりも小さくなっている。

変形係数と過圧密比との関係を Fig. 10 に示す。ここで、図中の一点は同一圧密条件の供試体より得られた変形係数の平均値を示している。図より、変形係数はひずみ速度によらず、過圧密比の増加に伴って低下する傾向を示している。このような傾向は、中瀬ら¹⁶⁾が名古屋粘土に対して実施した等方圧密等方膨潤非排水三軸圧縮試験においても認められている。この主要因としては、せん断時の有効拘束圧の低下によって非排水せん断強さが減少し、このため、変形係数も減少したものと考えられる。

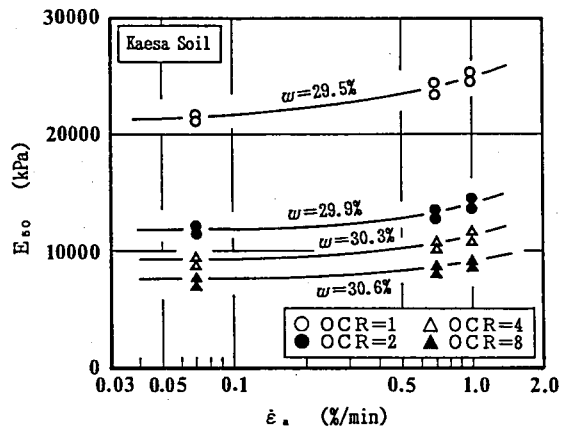


Fig. 9 Effect of strain rate on the modulus of deformation

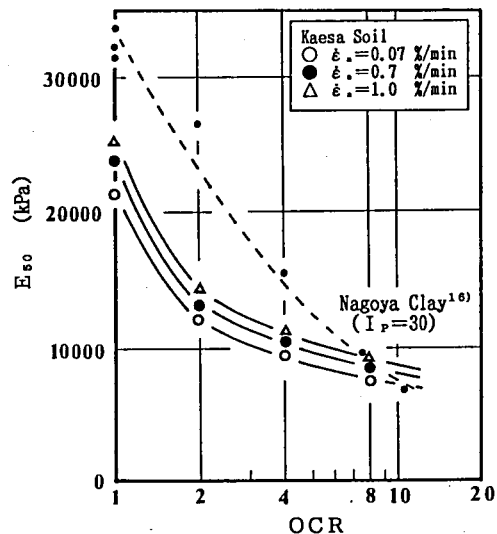


Fig. 10 Effect of overconsolidation history on the modulus of deformation

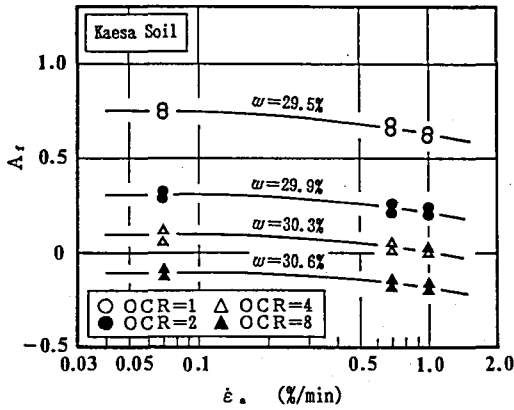


Fig. 11 Variation in A_r values with strain rate

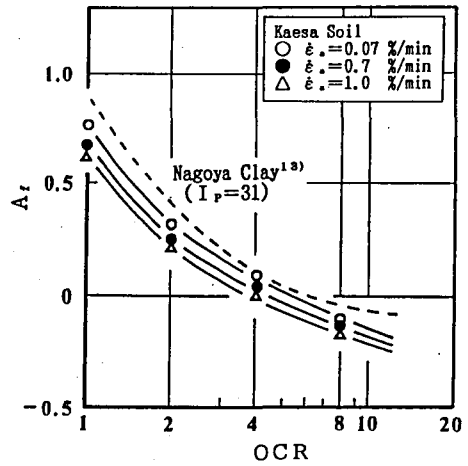


Fig. 12 Variation in A_r values with overconsolidation ratio

Table 2 Summary of triaxial compression test results

OCR	$\dot{\epsilon}_a$ (%/min)	c_u (kPa)	c_u/σ'_c	$(\epsilon_a)_r$ (%)	E_{50} (kPa)	A_r
1	0.07	90.1	0.451	6.8	21400	0.757
	0.7	98.3	0.492	7.5	24000	0.671
	1.0	103.2	0.516	8.1	25200	0.628
2	0.07	74.5	0.745	7.2	12000	0.314
	0.7	80.2	0.802	7.8	13000	0.243
	1.0	84.3	0.843	8.3	13900	0.209
4	0.07	50.9	1.018	7.7	9600	0.108
	0.7	52.9	1.058	8.4	10800	0.071
	1.0	54.8	1.096	8.8	11300	0.057
8	0.07	34.3	1.372	8.4	7500	-0.114
	0.7	36.0	1.441	8.7	8400	-0.129
	1.0	36.9	1.475	9.1	8800	-0.171

3-6 三軸圧縮試験結果

Fig. 11 は、破壊時の間隙圧係数 A_r とひずみ速度との関係を示している。図より、破壊時の間隙圧係数 A_r は、ひずみ速度の増加に伴って低下する傾向を示しており、このことは、ひずみ速度の増加に伴って過剰間隙水圧の発生量が低下していることに起因しているものと考えられる。また、破壊時の間隙圧係数 A_r は、Fig. 12 に示すように、ひずみ速度によらず過圧密比の増加に伴って低下しており、過圧密比が4程度になるとほぼ0に近い値を示し、過圧密比が8の場合には負の値に転じている。上記のような傾向は、Nakase¹³⁾の研究にお

いても報告されており、このことは、過圧密比の増加に伴って過剰間隙水圧の発生量が低下し、過圧密比が8になると破壊時の過剰間隙水圧が負圧になることを示唆している。

Table 2は、今回実施した等方圧密および等方圧密等方膨潤非排水三軸圧縮試験結果をとりまとめている。

4. 結 論

本研究では、せん断時のひずみ速度が過圧密試料の非排水せん断特性に及ぼす影響を明らかにするために、練返し陸成粘性土に対して等方圧密および等方圧密等方膨潤非排水三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果を列記する。

1) ひずみ速度を0.07%/min から1.0%/min に増加させた場合(約14倍)、正規圧密および過圧密状態の試料の非排水せん断強さは8%~15%程度増大し、変形係数は約18%増大することが明らかとなった。また、今回実施した三軸試験のように、ひずみ速度の増加割合が14倍程度と比較的小さい場合には、ひずみ速度が非排水せん断強さに及ぼす影響は、正規圧密状態の試料が過圧密状態の試料よりもわずかに大きくなった。したがって、土のせん断特性を評価する場合には、土の内的諸条件とひずみ速度の適用範囲を十分に考慮する必要があるものと考えられる。

2) 破壊時の軸ひずみは、正規圧密および過圧密状態の両試料ともひずみ速度の増加に伴って大きくなる傾向を示し、破壊時の間隙圧係数 A_r は逆に低下する傾向を示した。

3) ひずみ速度が粘性土の強度・変形特性に及ぼす影響を検討した結果、ひずみ速度は、正規圧密および過圧密試料の強度・変形特性に類似した影響を及ぼすことがある程度明らかとなった。また、ひずみ速度が速い三軸試験を実施した場合には、強度・変形特性を過大評価する可能性のあることを定量的に示した。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土質試験法 [第2回改訂版]，1979。
- 2) Skempton, A.W. and Bishop, A.W. : "Soils", Chapter X of Building Materials, North Holland Publ. Co., Amsterdam, pp. 417~482, 1954.
- 3) Taylor, D.W. : 9th Progress report on shear research to U.S. Water Engineers, MIT-Publ., 1943.
- 4) Casagrande, A.W. and Shannon, W.L. : Stress-deformation and strength characteristics of soils and soft rocks under transient loading, Harvard Soil Mechanics Series, No. 31, 1948.
- 5) Vaid, Y.P. and Campanella, R.G. : Time-dependent behavior of an undisturbed clay, The University of British Columbia Soil Mechanics Series, No. 33, 1977.
- 6) 赤井浩一・山本順一・小沢良夫：飽和粘土のせん断における間げき水圧の挙動について，土木学会論文報告集，No. 85, pp. 1~6, 1962.
- 7) Kimura, T. and Saitoh, K. : The influence of strain rate on pore pressures in consolidated undrained triaxial tests on cohesive soils, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, pp. 80~90, 1983.
- 8) Nakase, A. and Kamei, T. : Influence of strain rate on undrained shear characteristics of

- K_0 -consolidated cohesive soils, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 1, pp. 85~95, 1986.
- 9) Richardson, A.W. and Whitman, R.V. : Effect of strain rate upon undrained shear resistance of saturated remoulded fat clay, *Geotechnique*, Vol. 13, No. 4, pp. 310~324, 1963.
 - 10) Robertson, P.K., Vaid, Y.P. and Campanella, R.G. : Strain rate behavior of ST. Jean Vianney clay, *The University of British Columbia Soil Mechanics Series*, No. 34, 1978.
 - 11) Kamei, T., Ogawa, S. and Tanaka, N. : The variation in undrained shear characteristics during consolidation process, *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 3, pp. 91~98, 1987.
 - 12) Atkinson, J.H. and Bransby, P.L. : *The mechanics of soils*, McGraw-Hill Book, London, 1978.
 - 13) Nakase, A. : The effect of overconsolidation on the undrained strength of clay, *Report of the Harbour and Research Institute*, Vol. 7, No. 1, pp. 3~24, 1968.
 - 14) Ladd, C.C. and Foott, R. : New design procedure for stability of soft clays, *JGED, ASCE*, Vol. 100, No. GT7, pp. 763~786, 1974.
 - 15) Kamei, T. and Nakase, A. : Undrained shear strength anisotropy of K_0 -overconsolidated cohesive soils, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 3, pp. 145~151, 1989.
 - 16) 中瀬明男・小林正樹・勝野 克 : 圧密および膨張による飽和粘土のせん断強度の変化, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 8, No. 4, pp. 103~143, 1969.