土木学会論文集 No. 645／III-50, 63-76, 2000. 3

粘性土の繰返しせん断特性に及ぼす載荷速度の影響

山本陽一[1]・兵動正幸[2]

[1]正会員　工博　三井建設株式会社　技術研究所　（〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1）
[2]正会員　工博　山口大学教授　工学部社会建設工学科　（〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557）

本研究は，塑性指数の異なる再構成粘性土に対して圧密条件や初期応力状態，そして載荷周波数を種々に変化させた非排水繰返し三軸試験を行い，粘性土の繰返しせん断特性に及ぼす載荷速度の影響を調べたものである．まず，過剰間隙水圧や変形挙動，有効応力比・ひずみ関係に着目してこれらの繰返しせん断挙動に及ぼす載荷速度の影響について検討した．そして，繰返しせん断強度に及ぼす載荷速度の影響を整理し，異なる載荷周期における繰返し強度・塑性指数関係に対して定量化を試みた．その結果，様々な圧密条件や初期応力状態にある粘性土の載荷速度依存性を考慮した繰返し強度の予測・評価が可能となることが示された．

Key Words *: clay, cyclic strength, cyclic triaxial test, frequency, initial shear stress, over consolidated clay, plasticity index, rate effect*

1．はじめに

一般に，粘性土はそのせん断挙動において顕著な周波数（速度）依存性を示すことが知られている．

せん断力が問題となる繰返し外力として，地震動や波浪，交通荷重といったものが挙げられるが，これらはいずれも異なる載荷周期を有する繰返し外力である．さらに，これらの繰返し外力による地盤内の載荷速度やひずみ速度は，土の非線形性の影響を受けて様々に変化し得る．したがって，粘性土の非排水繰返しせん断特性を検討するためには，載荷速度の影響を念頭においた評価が必要となる．また，室内要素試験において，通常用いられる数秒から数十秒程度の載荷周期と，地震その他の繰返し外力における載荷周期との相違や対応を考える上でも，この問題は重要となろう．

粘性土の載荷速度依存性に関する研究は，その問題の重要性から古くより行われており，特に強度との関連で調べられたものが多い[1), 2), 3), 4)]．

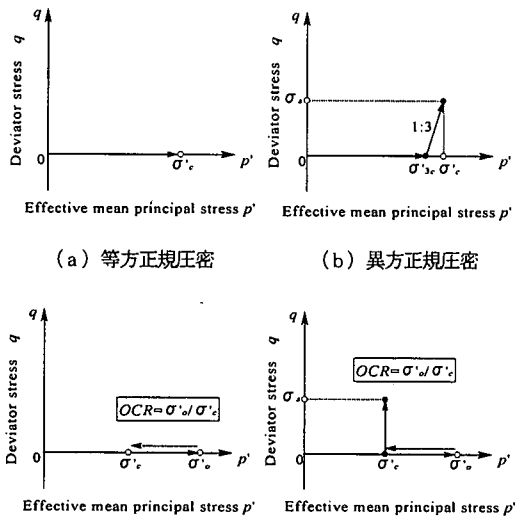
初期の研究として Bjerrum[5)] は，正規圧密粘土の静的非排水強度はひずみ速度の対数に対して直線的に増加することを示している．繰返し載荷に対しては，梅原ら[6)]や大根田ら[7)]，松尾ら[8)]，Procter and Khaffaf[9)]，湯澤ら[10)]により貴重なデータと知見が得られている．これら繰返し強度に着目した試験結果に共通しているのは，載荷速度（周波数）が速い場合ほど繰返し強度が増加するということである．載荷周波数が粘性土の繰返し強度に与える影響の程度として，周波数の 10 倍の変化に対して約 10～30%程度強度増加を示すようであるが，それぞれのケースで様々である．

松井ら[11)]は，非排水繰返しせん断を受けた粘土の間隙水圧は繰返し回数とともに増加し，同じ繰返し回数に対しては載荷周波数が遅いほど大きく発生することを示し，載荷周波数の異なる場合の過剰間隙水圧は，繰返し回数によっても一義的に表すことができないとしている．また，第二著者ら[12)]は以前に飽和粘土を対象として載荷速度依存性に着目した定ひずみ速度の繰返し三軸試験を行い，従来の応力制御式による繰返し三軸試験と比較を行った．そこでは，両試験法の特徴と有効性，そして，繰返し応力比・繰返し回数関係におけるひずみ速度一定と載荷周波数一定とした場合の速度効果の違い等について現象面から議論した．

これら既往の研究成果から，載荷速度の変化に対する粘性土の基本的な強度や挙動の把握がなされたが，載荷速度の影響と関連させて正規圧密や過圧密といった圧密条件や初期せん断応力等の様々な初期応力状態について検討した例は見られない．特に初期せん断応力については，これが卓越する領域において粘性土は繰返しせん断破壊を生じ易いことが指摘されていることから[13), 14)]，初期せん断応力下にある粘性土に対する載荷速度の影響を明らかにすることは，重要なことであると考えられる．

表-1　試料の物性値

Name	G_S	w_L (%)	w_P (%)	I_P	F.C. (%)	C.C. (%)	Soil
Itsukaichi	2.532	124.2	51.4	72.8	98.0	59.0	Clay
Arakawa	2.659	49.8	32.0	17.8	96.0	38.0	Silt



（a）等方正規圧密　（b）異方正規圧密

（c）等方過圧密　（e）異方過圧密

図-1　圧密方法

また，物理特性の中でも粘性土の特徴を最も端的に表す指標である塑性指数と載荷速度の関連について，その定量的な評価がほとんど試みられていない．

このように，繰返し載荷に対する粘性土の載荷速度依存性に関する問題は，非常に重要であるという認識にもかかわらず，未解明の部分が多く残されているのが実状のようである．このことが，粘性土の繰返し強度や変形に係わる動的問題を実務設計レベルで評価・検討する際に,問題を複雑にしているようにも思われる．

本研究はこれらの背景を踏まえて，塑性指数の異なる再構成粘性土に対して圧密条件や初期応力状態，そして載荷周波数を種々に変化させた繰返し三軸試験を行い，粘性土の繰返しせん断特性に及ぼす載荷速度の影響を検討したものである[15), 16), 17)]．

2．試験条件

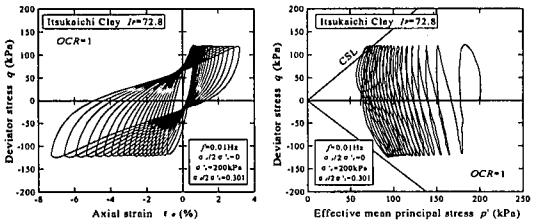
試験に供した試料は，表-1 に物性値を示す Itsukaichi clay（I_P=72.8）と Arakawa silt（I_P=17.8）のいずれも再構成粘性土試料である．再構成試料は，あらかじめ液性限界の二倍以上の含水比で十分練り返した濁液状の試料を予備圧密セル内に投入し，鉛直圧密応力 σ_{vc}=10, 20kPa

表-2　繰返し試験条件（Arakawa silt）

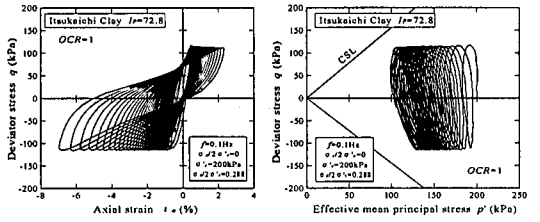
Test No.	σ'_w (kPa)	σ'_c (kPa)	σ'_{3c} (kPa)	σ_d (kPa)	OCR	$\sigma_d/2\sigma'_c$	f (Hz)	W_l (%)	e_l	e_c
AN01F	50	100	100	0	1	0.222	0.10	46.5	1.207	1.071
AN05F	50	100	100	0	1	0.272	0.10	44.8	1.159	1.030
AN08F	50	100	100	0	1	0.342	0.10	45.3	1.171	1.028
ARD10B	50	100	100	0	1	0.199	0.10	43.4	1.195	1.015
AN06F	50	100	100	0	1	0.218	0.02	44.9	1.163	1.031
ARD20A	50	100	100	0	1	0.238	0.02	44.1	1.169	1.011
ARD20C	50	100	100	0	1	0.184	0.02	46.5	1.198	0.993
ARD20E	50	100	100	0	1	0.325	0.02	44.1	1.209	1.016
AN02F	50	100	100	0	1	0.260	1.00	46.5	1.171	1.045
AN03F	50	100	100	0	1	0.295	1.00	46.5	1.192	1.058
AN04F	50	100	100	0	1	0.358	1.00	45.1	1.171	1.040
AN09F	50	100	73	80	1	0.304	1.00	44.7	1.158	1.033
AN11F	50	100	73	80	1	0.277	1.00	44.1	1.141	1.007
AN12F	50	100	73	80	1	0.255	1.00	44.7	1.158	1.020
AN17F	50	100	73	80	1	0.243	1.00	45.2	1.170	1.014
AN13F	50	100	73	80	1	0.275	0.02	44.1	1.152	1.016
AN20F	50	100	73	80	1	0.215	0.02	45.1	1.179	1.032
ARD24B	50	100	73	80	1	0.303	0.02	43.4	1.146	0.995
ARD24E	50	100	73	80	1	0.237	0.02	42.1	1.132	0.996
AN14F	50	100	73	80	1	0.274	0.10	44.9	1.168	1.015
AN15F	50	100	73	80	1	0.254	0.10	44.8	1.167	1.030
AN16F	50	100	73	80	1	0.233	0.10	45.0	1.156	1.014
AN18F	50	100	73	80	1	0.310	0.10	44.8	1.160	1.017
AN19F	50	100	73	80	1	0.224	0.10	44.8	1.164	1.012

表-3　繰返し試験条件（Itsukaichi clay）

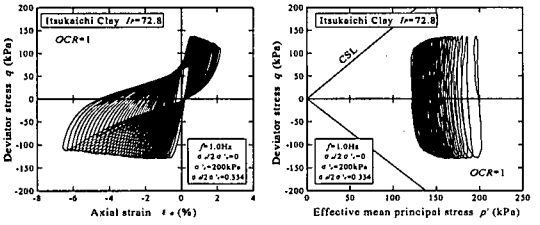
Test No.	σ'_w (kPa)	σ'_c (kPa)	σ'_{3c} (kPa)	σ_d (kPa)	OCR	$\sigma_d/2\sigma'_c$	f (Hz)	W_l (%)	e_l	e_c
HN01F	50	200	200	0	1	0.288	0.10	108.0	2.657	1.943
HN03F	50	200	200	0	1	0.345	0.10	105.2	2.584	1.890
HN04F	50	200	200	0	1	0.407	0.10	109.7	2.739	1.968
HN32F	50	200	200	0	1	0.268	0.10	107.2	2.652	1.913
HN05F	50	200	200	0	1	0.280	1.00	104.5	2.584	1.913
HN06F	50	200	200	0	1	0.310	1.00	104.9	2.612	1.922
HN07F	50	200	200	0	1	0.334	1.00	110.5	2.734	1.935
HN08F	50	200	200	0	1	0.374	1.00	104.6	2.594	1.912
HN11F	50	200	200	0	1	0.352	4.00	110.9	2.739	1.945
HN12F	50	200	200	0	1	0.349	4.00	109.4	2.699	1.925
HN13F	50	200	200	0	1	0.374	4.00	111.9	2.771	1.955
HN14F	50	200	200	0	1	0.332	4.00	111.8	2.757	1.951
HN15F	50	200	200	0	1	0.301	0.01	112.6	2.775	1.977
HN29F	50	200	200	0	1	0.265	0.01	107.5	2.659	1.917
HN30F	50	200	200	0	1	0.375	0.01	107.8	2.663	1.918
HN31F	50	200	200	0	1	0.247	0.01	107.9	2.658	1.911
HN16F	50	200	160	120	1	0.284	0.10	111.4	2.759	1.893
HN17F	50	200	160	120	1	0.338	0.10	111.4	2.765	1.910
HN18F	50	200	160	120	1	0.260	0.10	111.9	2.744	1.894
HN19F	50	200	160	120	1	0.235	0.10	111.9	2.751	1.897
HN20F	50	200	160	120	1	0.252	0.01	105.6	2.616	1.859
HN21F	50	200	160	120	1	0.220	0.01	106.0	2.610	1.825
HN22F	50	200	160	120	1	0.294	0.01	105.6	2.608	1.841
HN23F	50	200	160	120	1	0.201	0.01	106.2	2.627	1.863
HN24F	50	200	160	120	1	0.175	0.01	106.4	2.626	1.846
HN25F	50	200	160	120	1	0.282	1.00	106.5	2.626	1.867
HN26F	50	200	160	120	1	0.260	1.00	106.5	3.741	2.721
HN27F	50	200	160	120	1	0.309	1.00	107.2	3.688	2.668
HN28F	50	200	160	120	1	0.364	1.00	106.0	2.615	1.833
HN34F	50	200	160	120	1	0.398	1.00	103.3	2.549	1.799
HN41F	50	100	100	0	2	0.501	0.10	100.4	2.488	1.862
HN43F	50	100	100	0	2	0.548	0.10	103.3	2.558	1.890
HN44F	50	100	100	0	2	0.469	0.10	102.8	2.540	1.881
HN45F	50	100	100	0	2	0.625	0.10	103.4	2.557	1.879
HN47F	50	100	100	0	2	0.526	1.00	102.6	2.532	1.888
HN48F	50	100	100	0	2	0.658	1.00	102.5	2.522	1.874
HN50F	50	100	100	0	2	0.572	1.00	102.4	2.538	1.906
HN36F	50	100	100	0	2	0.498	0.01	102.9	2.531	1.873
HN37F	50	100	100	0	2	0.570	0.01	103.0	2.548	1.888
HN39F	50	100	100	0	2	0.462	0.01	100.6	2.496	1.857
HN51F	50	100	100	0	2	0.454	0.01	102.2	2.542	1.914
HN65F	50	100	100	0	2	0.643	0.01	93.1	2.311	1.748
HN52F	50	100	80	60	2	0.465	0.10	103.3	2.568	1.888
HN55F	50	100	80	60	2	0.389	0.10	98.7	2.447	1.827
HN60F	50	100	80	60	2	0.549	0.10	98.1	2.443	1.837
HN56F	50	100	80	60	2	0.381	0.01	98.4	2.445	1.835
HN57F	50	100	80	60	2	0.437	0.01	98.7	2.455	1.832
HN59F	50	100	80	60	2	0.520	0.01	98.6	2.456	1.840
HN61F	50	100	80	60	2	0.470	1.00	98.2	2.452	1.845
HN62F	50	100	80	60	2	0.550	1.00	97.2	2.427	1.841
HN64F	50	100	80	60	2	0.623	1.00	93.1	2.306	1.751



（a）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0，f=0.01Hz

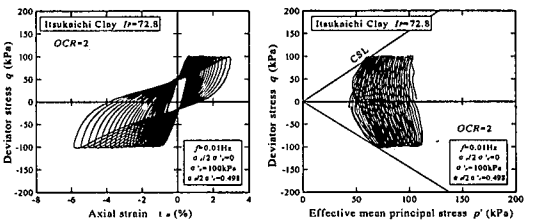


（b）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0，f=0.1Hz

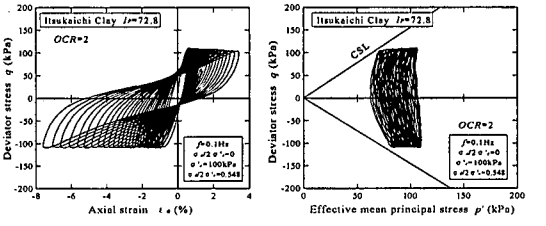


（c）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0，f=1.0Hz

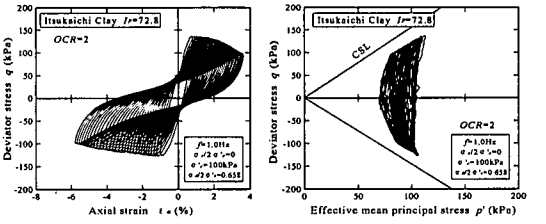
図-2　軸差応力・軸ひずみ関係と有効応力経路
(Itsukaichi clay，等方正規圧密)



（a）OCR=2，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0，f=0.01Hz



（b）OCR=2，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0，f=0.1Hz



（c）OCR=2，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0，f=1.0Hz

図-3　軸差応力・軸ひずみ関係と有効応力経路
(Itsukaichi clay，等方過圧密)

とそれぞれ 1 日づつ段階的に載荷した後，σ_{vc}=50kPa で 2 週間載荷させて作成した．実施した試験は，荷重振幅制御式の非排水繰返し三軸試験であり，供試体の寸法は概ね直径 5cm，高さ 10cm の円柱供試体である．供試体の側面には，圧密促進のためにペーパードレーンを巻き付けている．また，供試体端面の摩擦を軽減するために，上部および下部ペデスタルのポーラスストーン上には，中央部に直径 5mm の穴をあけたテフロンシートを敷設している．せん断中の過剰間隙水圧の測定は，これを通じて供試体上部および下部において行われた．

圧密は，**図-1** にその経路を示すように，等方応力状態と初期せん断応力を負荷した場合について，それぞれ正規圧密と過圧密を行っている．繰返し載荷波形は正弦波とし，載荷周波数をf=0.01～4Hz の範囲で変化させた．

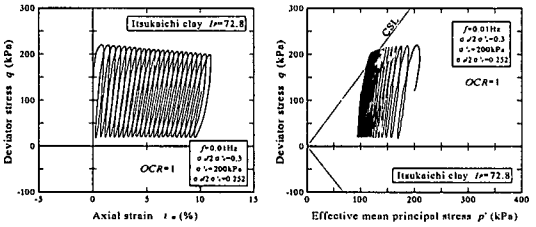
表-2，**表-3** に，それぞれ Arakawa silt と Itsukaichi clay の両再構成試料に対する非排水繰返し三軸試験条件を示す．表中の添字 i，c はそれぞれ三軸セルでの圧密前と圧密後（繰返し載荷開始前）の状態を意味している．σ'_{vy}は，供試体の圧密降伏応力である．

初期せん断応力比$\sigma_s/2\sigma'_c$は，Arakawa silt で 0.4，Itsukaichi clay で 0.3 である．過圧密は Itsukaichi clay に対してのみ行い，過圧密比は OCR=2 としている．

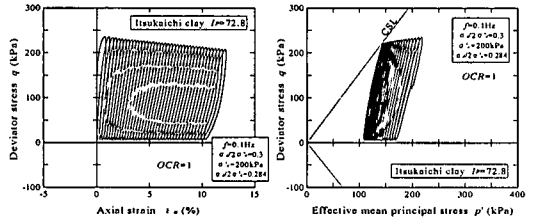
3．繰返しせん断挙動に及ぼす載荷速度の影響

（1）応力・ひずみ関係と有効応力経路

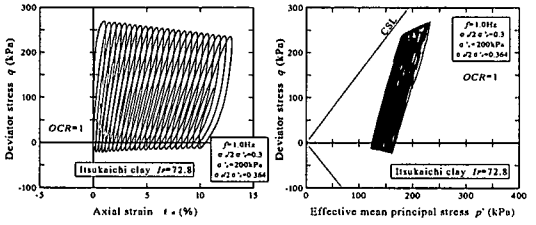
図-2～**図-7** に，Itsukaichi clay（I_P=72.8）と Arakawa silt（I_P=17.8）の非排水繰返し三軸試験結果として軸差応力 q ・軸ひずみ ε_a 関係と有効応力経路を示す．図には，載荷周波数と圧密条件ごとに典型的な試験結果をそれぞれ示している．また，図中の有効応力経路に示した直線は，各圧密条件に対応するひずみ速度 0.1%/min の静的非排水三軸試験結果から求めた限界状態線 CSL である．



（a）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3，f=0.01Hz

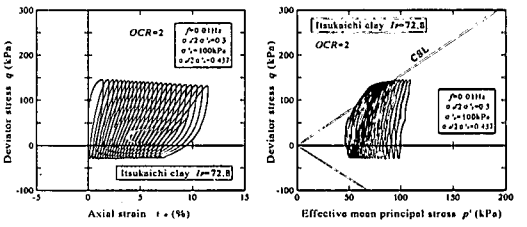


（b）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3，f=0.1Hz

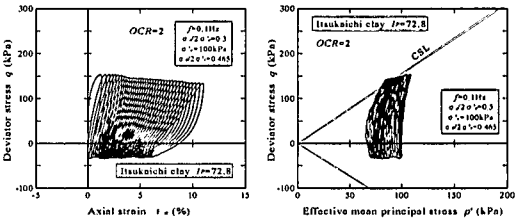


（c）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3，f=1.0Hz

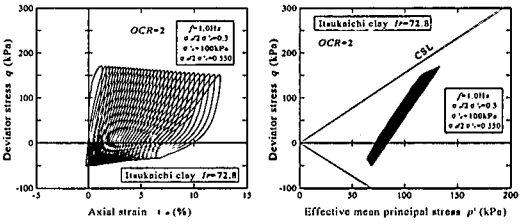
図-4 軸差応力・軸ひずみ関係と有効応力経路
(Itsukaichi clay，異方正規圧密)



（a）OCR=2，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3，f=0.01Hz



（b）OCR=2，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3，f=0.1Hz



（c）OCR=2，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3，f=1.0Hz

図-5 軸差応力・軸ひずみ関係と有効応力経路
(Itsukaichi clay，異方過圧密)

まず，Itsukaichi clay の等方正規圧密と等方過圧密の有効応力経路は，f=0.01Hz と試験条件の内最も緩速の時には，静的試験から得られた限界状態線と交差する形で最終的に定常な状態に至っているが，載荷周波数が速くなるほど限界状態線から離れた位置で定常な状態に至る傾向を示している．また，載荷周波数が速い場合ほど，有効応力経路は立った形になっている．初期せん断応力を負荷した異方正規圧密と異方過圧密の有効応力経路については，f=1.0Hz の結果が全応力経路に近い勾配を有しており，他の緩速載荷の結果に比べて過剰間隙水圧が発生しにくいことを表している．

Arakawa silt の有効応力経路についても，載荷周波数が速い場合ほど限界状態線から離れた位置で定常な状態に至る傾向を示しているが，Itsukaichi clay の場合ほどには載荷速度で大きく変化していないのが特徴的である．

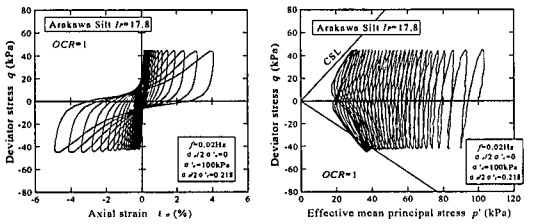
このように，有効応力経路からは，載荷周波数が速い場合ほど有効応力の低下，過剰間隙水圧の発生量が少なくなる傾向にあることが明らかである．そして，この傾向は塑性指数の大きい Itsukaichi clay でより顕著になる様子が分かる．

軸差応力・軸ひずみ関係はいずれの場合についても，等方圧密と異方圧密のそれぞれの応力状態で特徴的な挙動を示しているが，その形状に載荷周波数による明確な違いは認められない．

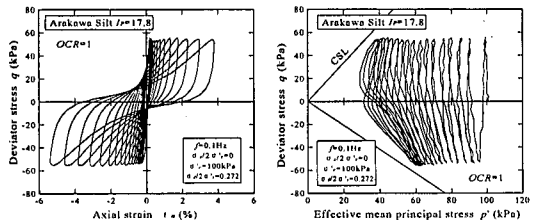
ここで，f=1.0Hz の等方圧密の結果に繰返し応力振幅の低下が認められるが（異方圧密の場合には断面積補正によるものであり，荷重振幅の減少は生じていない），これはこの載荷速度に対する供試体の剛性劣化に試験機が対応しきれていないためである．ただし，軸ひずみ両振幅で 5%までは応力振幅の減少は 10%以内であり許容範囲内[18]にあることを確認している．

（2）過剰間隙水圧および変形挙動

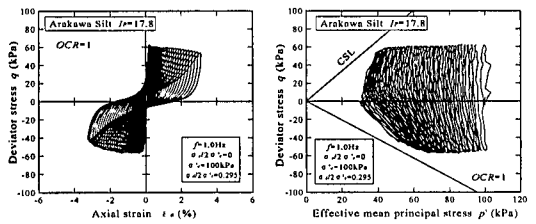
繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ が同程度で，周波数に対して比較した Itsukaichi clay の残留間隙水圧比 u_r/σ'_c および軸ひずみ（等方圧密：軸ひずみ両振幅 ε_{DA}，異方圧



（a）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0, f=0.02Hz

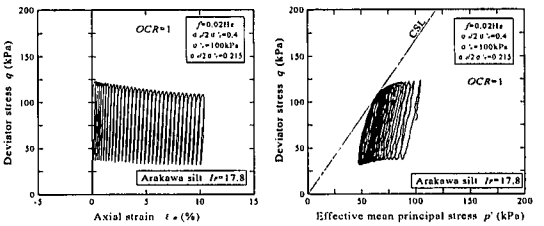


（b）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0, f=0.1Hz

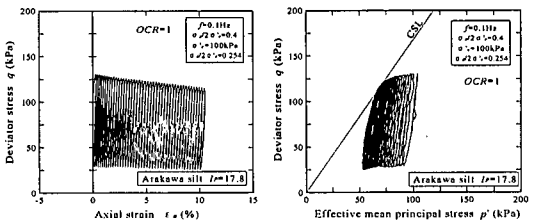


（c）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0, f=1.0Hz

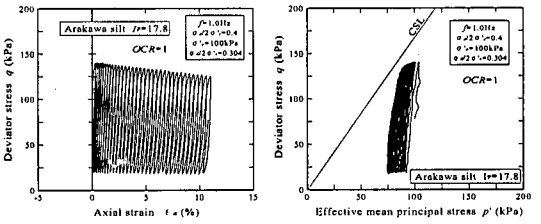
図-6　軸差応力・軸ひずみ関係と有効応力経路
(Arakawa silt，等方正規圧密)



（a）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.4, f=0.02Hz



（b）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.4, f=0.1Hz



（c）OCR=1，$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.4, f=1.0Hz

図-7　軸差応力・軸ひずみ関係と有効応力経路
(Arakawa silt，異方正規圧密)

密：ピーク軸ひずみ ε_p）と繰返し回数 N の関係を整理した各圧密条件ごとの結果を，それぞれ**図-8**（a）～（d），**図-9**（a）～（d）に示す．

いずれの圧密条件の場合についても，周波数の高い方が残留間隙水圧，軸ひずみともその発達にはより多くの繰返し回数を必要としている．また，ε_{DA} または ε_p が10%に達して定常な状態にある時の残留間隙水圧比は，概ね載荷周期の短い場合ほど，小さくなる傾向を示している．

（3）有効応力比・ひずみ関係

図-10（a）～（d），**図-11**（a），（b）にそれぞれ Itsukaichi clay と Arakawa silt の各サイクルにおける軸ひずみ（等方：軸ひずみ両振幅 ε_{DA}，異方：ピーク軸ひずみ ε_p）と繰返し応力ピーク時の有効応力比 η_p との関係を示した．図は，繰返し応力比が同程度の場合における各圧密条件ごとの載荷周波数に対する比較となっている．

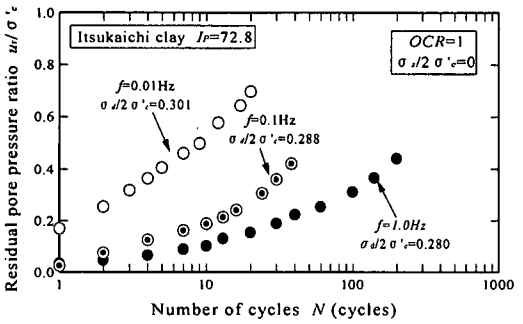
図から，同一のひずみに至るに必要な有効応力比は，載荷周波数の高い場合ほど小さくなることが分かる．また，Itsukaichi clay の場合には，正規圧密，過圧密とも等方応力条件における結果で載荷周波数の影響が顕著であり，初期せん断応力を受けている場合の結果は前者ほどの違いは生じていない．

Itsukaichi clay と Arakawa silt とを比較した場合，塑性指数の高い前者の方が有効応力比・ひずみ関係に与える周波数の影響の大きいことが分かる．

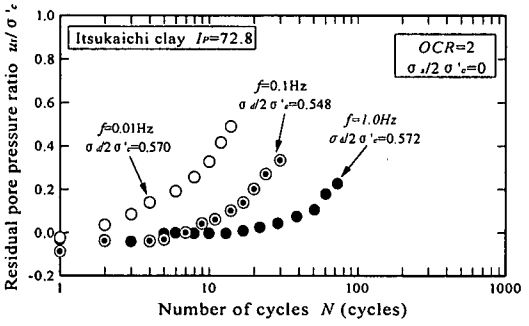
4．繰返しせん断強度に及ぼす載荷速度の影響

（1）繰返し強度と載荷周波数の関係

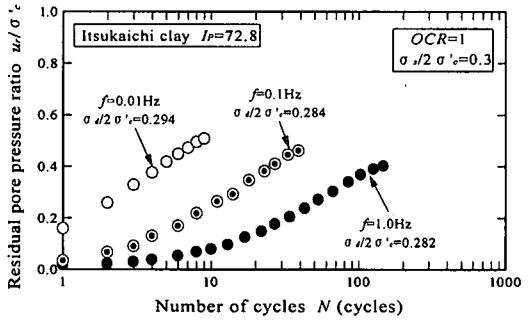
図-12（a），（b），**図-13**（a）～（d）に Arakawa silt, Itsukaichi clay それぞれの圧密条件について，所定の軸ひずみ両振幅 ε_{DA}=5%またはピーク軸ひずみ ε_p=5%に至るに必要な繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を，周波数に対して比較したものを示す．いずれ



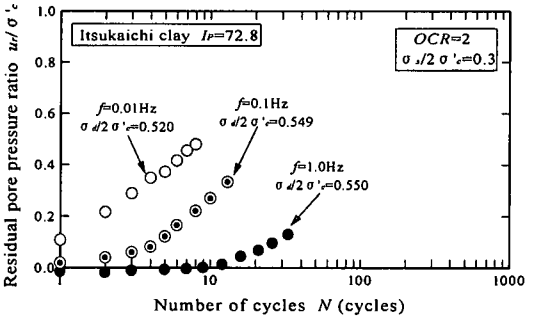
（a）等方正規圧密（OCR=1, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0）



（b）等方過圧密（OCR=2, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0）

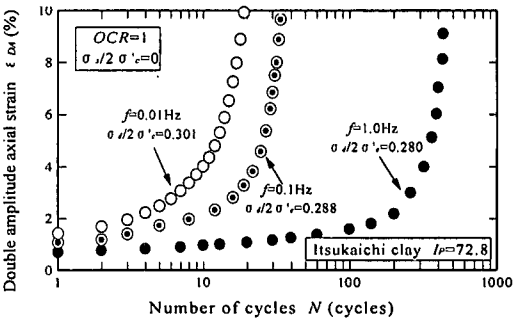


（c）異方正規圧密（OCR=1, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3）

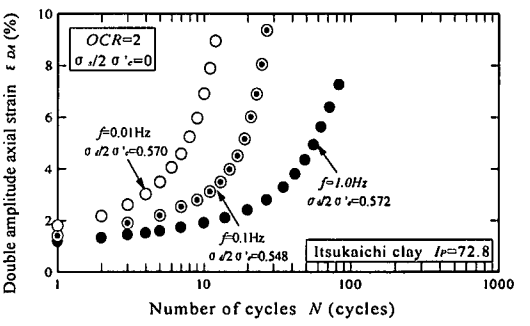


（d）異方過圧密（OCR=2, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3）

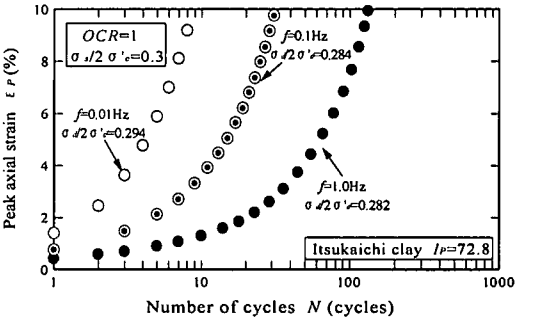
図-8　残留間隙水圧比と繰返し回数の関係
(Itsukaichi clay, I_P=72.8)



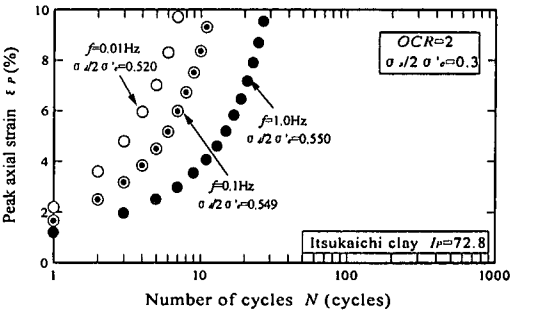
（a）等方正規圧密（OCR=1, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0）



（b）等方過圧密（OCR=2, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0）

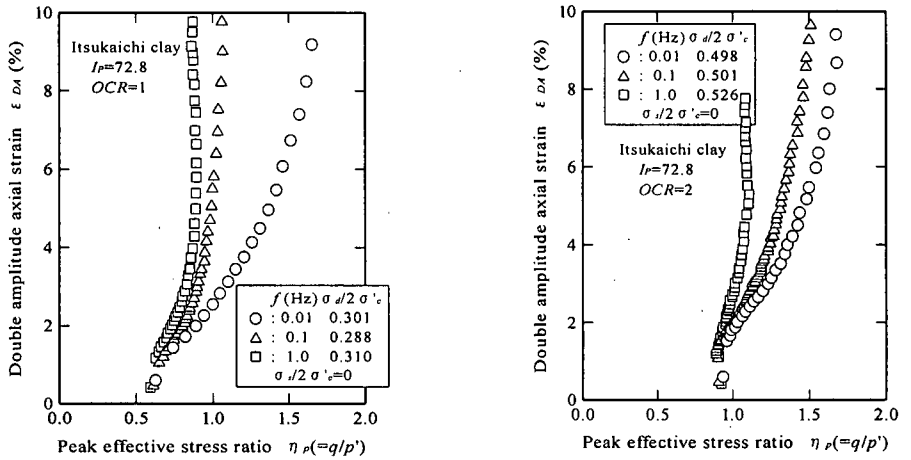


（c）異方正規圧密（OCR=1, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3）

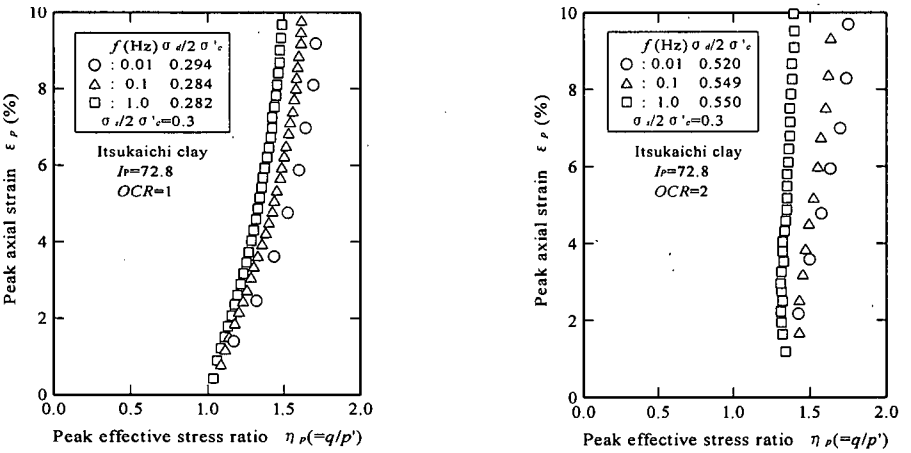


（d）異方過圧密（OCR=2, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3）

図-9　軸ひずみと繰返し回数の関係
(Itsukaichi clay, I_P=72.8)

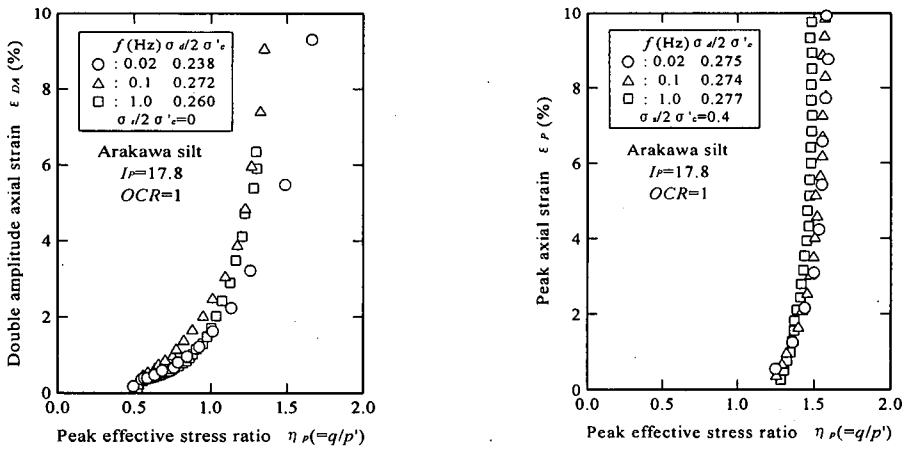


（a）等方正規圧密（$\sigma_s/2\sigma'_c$=0, *OCR*=1）　（b）等方過圧密（$\sigma_s/2\sigma'_c$=0, *OCR*=2）



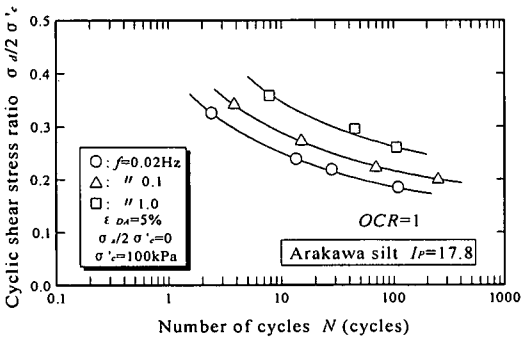
（c）異方正規圧密（$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3, *OCR*=1）　（d）異方過圧密（$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3, *OCR*=2）

図-10　ピーク有効応力比・ひずみ関係に及ぼす周波数の影響（Itsukaichi clay）

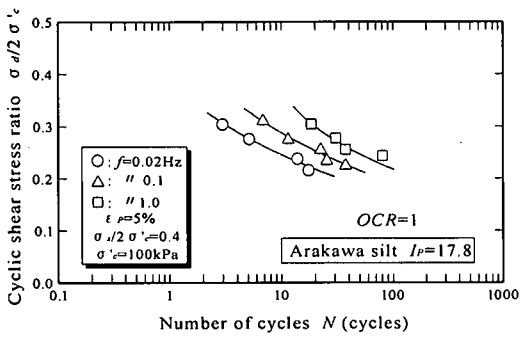


（a）等方正規圧密（$\sigma_s/2\sigma'_c$=0, *OCR*=1）　（b）異方正規圧密（$\sigma_s/2\sigma'_c$=0.4, *OCR*=1）

図-11　ピーク有効応力比・ひずみ関係に及ぼす周波数の影響（Arakawa silt）



（a）等方正規圧密（ε_{DA}=5%, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0, OCR=1）



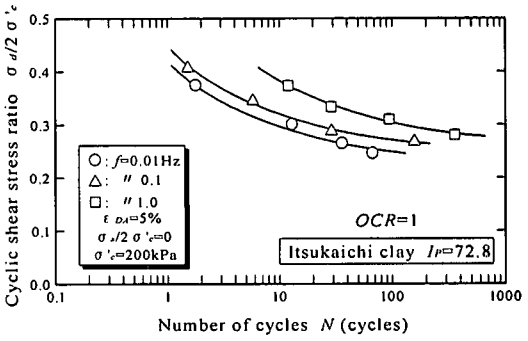
（b）異方正規圧密（ε_P=5%, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.4, OCR=1）

図-12 繰返し強度曲線に及ぼす周波数の影響 (Arakawa silt)

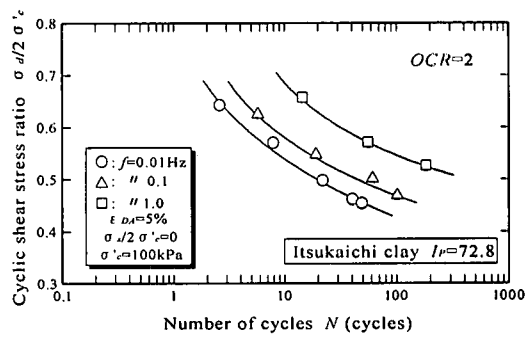
の圧密条件の場合についても，周波数の高い場合ほど繰返し強度曲線は上方に位置し，高い繰返し強度を有していることが分かる．また，この時の強度曲線は周波数ごとにほぼ平行に推移している．

次に，Itsukaichi clay について規定ひずみをパラメータとし，N=20 回における繰返しせん断応力比を周波数の対数に対して比較したのが，**図-14** である．等方正規圧密供試体では，f=4.0Hz についても試験を実施しているが，この周波数では両振幅ひずみが 2%を越えてそれ以上のひずみになる辺りから，繰返し荷重振幅が急激に減少して荷重振幅一定条件での強度曲線が得られなかったため，f=4.0Hz のデータについては ε_{DA}=2%のみをプロットしている．図の結果より，概ね規定するひずみの大きさに拘わらず周波数に対する強度の増加割合は一定であると言えそうである．また，等方正規圧密と等方過圧密のf=1.0Hz, ε_{DA}=10%を除いたデータについては，周波数の対数に対して繰返し強度は直線的な増加傾向を示している．

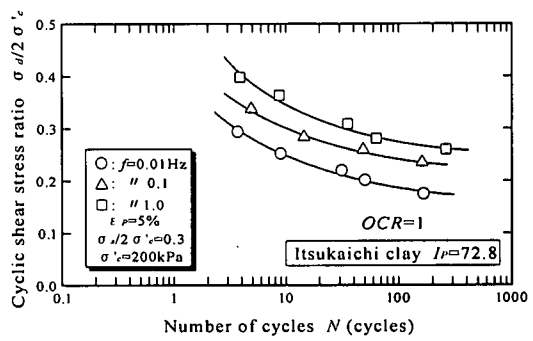
さらに，**図-15** は，等方供試体 ε_{DA}=2%，初期せん断応力を受けた異方供試体 ε_P=2%でそれぞれ規定した場合の繰返し応力比と周波数の関係を，繰返し回数につい



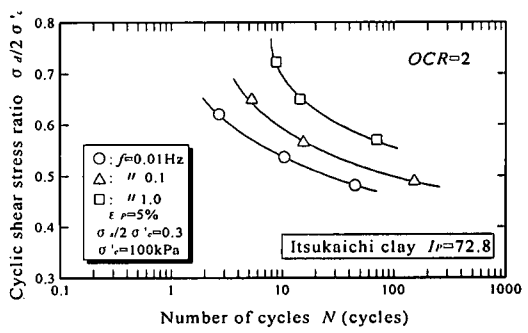
（a）等方正規圧密（ε_{DA}=5%, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0, OCR=1）



（b）等方過圧密（ε_{DA}=5%, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0, OCR=2）

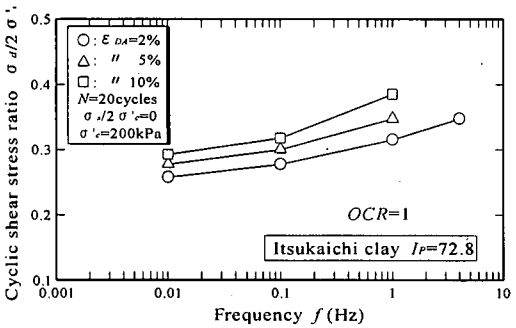


（c）異方正規圧密（ε_P=5%, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3, OCR=1）

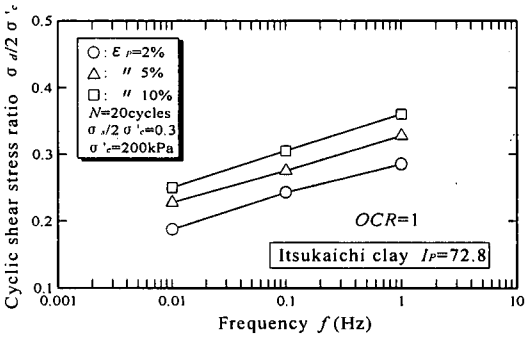


（d）異方過圧密（ε_P=5%, $\sigma_s/2\sigma'_c$=0.3, OCR=2）

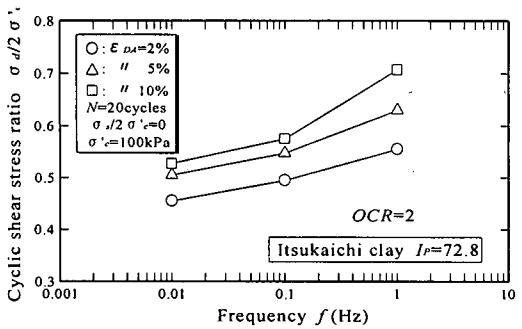
図-13 繰返し強度曲線に及ぼす周波数の影響（Itsukaichi clay）



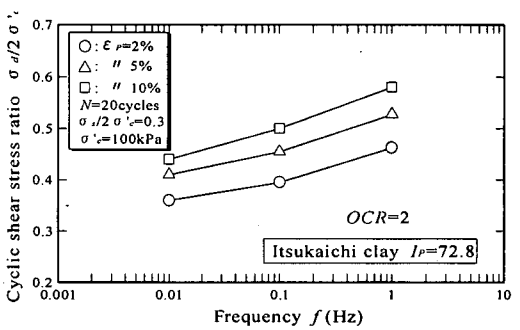
（a）等方正規圧密



（b）異方正規圧密

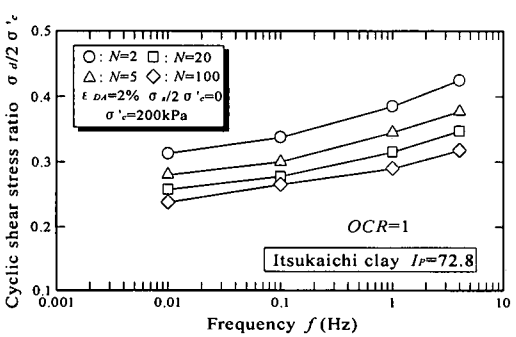


（c）等方過圧密

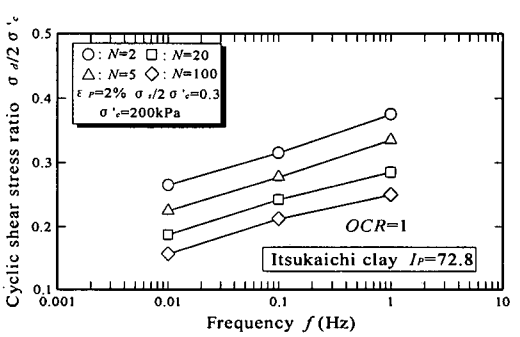


（d）異方過圧密

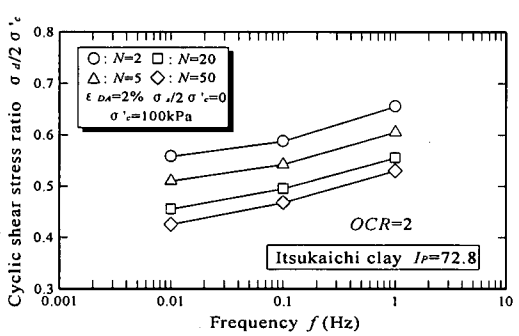
図-14　規定ひずみに対する繰返し強度と周波数の関係（Itsukaichi clay, N=20 回）



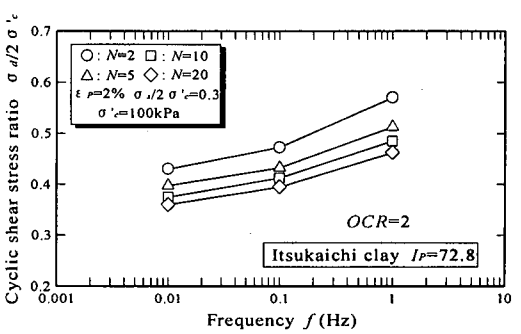
（a）等方正規圧密



（b）異方正規圧密

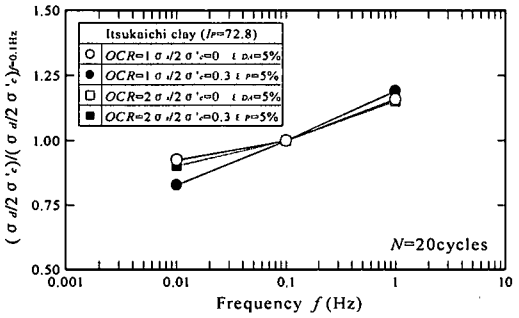


（c）等方過圧密

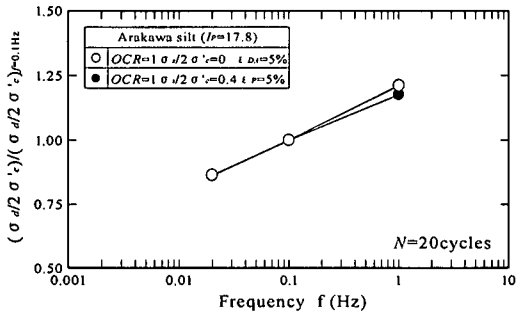


（d）異方過圧密

図-15　繰返し回数に対する繰返し強度と周波数の関係（Itsukaichi clay, ε =2%）



（a）Itsukaichi clay（N=20 回，ε =5%）



（b）Arakawa silt（N=20 回，ε =5%）

図-16 各圧密条件の正規化した繰返し強度に及ぼす周波数の影響

て比較したものである．図から，規定ひずみによる比較と同様に，繰返し回数についても周波数に対する繰返し強度の増加割合が，その大きさに関わらずほぼ一定であることを示しており，梅原ら[6]や大根田ら[7]の初期せん断を加えていない単純せん断試験結果と同様の知見を与えている．これらのことから，ここで規定した範囲の大きさであれば，いずれの基準ひずみ，繰返し回数を用いて破壊強度を定義しても，繰返し強度に及ぼす載荷周波数の影響程度は，ほぼ一様と見なせるものと考える．

図-16（a），（b）は，繰返し回数 N=20 回における各周波数の繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ を，f=0.1Hz の時の繰返しせん断応力比（$\sigma_d/2\sigma'_c$）$_{f=0.1\mathrm{Hz}}$ で正規化した応力比と周波数の関係を，それぞれ Itsukaichi clay，Arakawa silt の各圧密条件で比較したものである．Itsukaichi clay では，異方正規圧密の場合が周波数に対する繰返し強度の変化が最も大きく，他の圧密条件については，いずれも周波数に対する繰返し強度の変化は同程度であることが認められる．一方，Arakawa silt では，等方正規圧密，異方正規圧密の結果とも周波数に対する繰返し強度の変化は同程度であるが，Itsukaichi clay に比べて繰返し強度に及ぼす周波数の影響の程度は大きいようである．これらのことから総合的に判断すれば，粘性土の載荷速度に対する繰返し強度の増加傾向に圧密条件や初期応力条件の違いによる影響は少ないものと考えられるので，実用上は載荷周波数の影響を同程度とみなして評価しても問題ないものと考える．

（2）繰返し強度・塑性指数関係に及ぼす載荷速度の影響

a）速度効果係数と塑性指数の関係

ここでは，粘性土の繰返しせん断強度における載荷速度依存性が，塑性指数とどのような関係にあるか，周波数を種々に変化させて行われた既往の粘性土に対する繰返し試験結果と[7), 8), 9), 10), 15), 16)]と本試験結果を交えて考察する．ここでまず，粘性土の繰返しせん断強度は，周波数の対数に対して直線関係が成り立つものと仮定する．そして，繰返しせん断応力比（$\sigma_d/2\sigma'_c$）$_{f_a}$ と周波数の関係を図-17 に示すように，ともに f=0.1Hz の場合で正規化して得られた結果を次式で回帰することとした．

$$\frac{(\sigma_d/2\sigma'_c)_{f_a}}{(\sigma_d/2\sigma'_c)_{f=0.1\mathrm{Hz}}}=1+\mu\log_{10}\left(\frac{f_a}{0.1}\right) \qquad (1)$$

ここで，μ は図中直線の勾配であり載荷周波数が速くなることによる強度比の増加率を表していることから，これを載荷周波数に対する粘性土固有の速度効果係数と定義する．また，f_a は任意の載荷周波数を表している．図から，速度効果係数 μ は通常の規定範囲のひずみや繰返し回数を用いて繰返し強度を定義した場合に，これらの大きさにかかわらず優位な違いがないことが認められるので，ここでは規定するひずみや繰返し回数の大きさによらず同等とみなせるものと考え以後検討を進める．

表-4 に，ひずみ振幅 5%，繰返し回数 N=10 回で定義された種々の載荷周波数における繰返し強度を，式（1）で回帰して求めた速度効果係数 μ と試料，試験に関する緒元をまとめた（Procter & Kaffaf[9] の試験結果については f=0.1Hz での試験が実施されていないので，行われた周波数での試験結果をもとに f=0.1Hz の繰返し強度を外挿して求め整理を行っている）．既往の試験結果の内，大根田ら[7]の結果は，非排水の繰返し単純せん断試験より求められたものであり，他の試験結果はいずれも非排水繰返し三軸試験より求められている．また，単純せん断試験による大根田ら[7]の結果は K_0 正規圧密，三軸試験による結果は等方正規圧密粘性土に対するものであり，いずれも初期せん断応力が負荷されていない正規圧密条件となっている．また，整理に用いた繰返し強度は前者で片振幅せん断ひずみ γ_{SA}=5%，後者では軸ひずみ両振幅 ε_{DA}=5%の場合を採用している．試験は概ね f=1.0～0.01Hz の範囲の載荷周波数で実施されている．

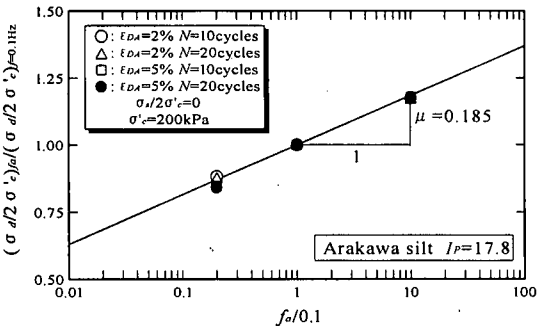


図-17 速度効果係数の算定方法（Arakawa silt）

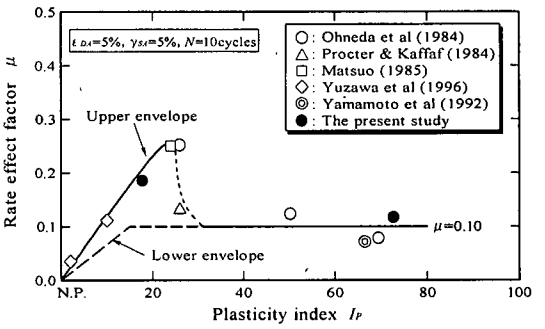


図-18 速度効果係数と塑性指数の関係（正規圧密粘性土）

表-4 既往の繰返し試験の緒元と速度効果係数 μ

Sample	I_P	f (Hz)	μ	Test	Symbol	Reference
Kawasaki clay I	50.3	1.0, 0.25, 0.1, 0.025, 0.01	0.123	Cyclic simple shear	○	Ohneda et al (1984)
Kawasaki clay II	25.9	0.5, 0.1	0.252	Cyclic simple shear	○	Ohneda et al (1984)
Kinkai clay	69.5	1.0, 0.1	0.078	Cyclic simple shear	○	Ohneda et al (1984)
Arakawa clay	24.0	1.0, 0.1	0.250	Cyclic triaxial	□	Matsuo et al (1985)
Derwent clay	26.0	1.0, 0.2, 0.05, 1/120	0.131	Cyclic triaxial	△	Procter & Kaffaf (1984)
M2	2.0	1.0, 0.1, 0.01	0.035	Cyclic triaxial	◇	Yuzawa et al (1996)
M10	9.9	1.0, 0.1, 0.01	0.111	Cyclic triaxial	◇	Yuzawa et al (1996)
Ariake clay	66.5	0.1, 0.02, 0.01	0.071	Cyclic triaxial	◎	Yamamoto et al (1992)
Arakawa silt	17.8	1.0, 0.1, 0.02	0.185	Cyclic triaxial	●	-
Itsukaichi clay	72.8	1.0, 0.1, 0.01	0.117	Cyclic triaxial	●	-

このようにして求めた速度効果係数 μ と塑性指数 I_P の関係を，図-18 に示す．図中のプロットからは，I_P=20 付近をピークに，それ以下の塑性指数では N.P.で μ=0 となる形で繰返し強度に及ぼす周波数の影響の程度が少なくなり，ほぼ I_P=30 以上の粘性土では繰返し強度に及ぼす周波数の影響は同程度で，載荷周波数の 10 倍増に対して約 1 割の強度増加となっている．

この結果によると，I_P=20 付近の繰返し強度は，載荷周波数の 10 倍増に対して 2 割から 3 割近く増加することを表しており，載荷速度の影響を最も強く受ける塑性指数の範囲となっている．しかしながら，塑性指数の低い領域については，細粒土の活性度や鉱物組成，砂分含有量，さらには砂骨格の密度等の異なる様々な状態の土が存在する．ちなみに，ここでの整理に用いた既往の試験結果の内，I_P<30 の Kawasaki clay II と Arakawa clay, Arakawa silt は砂分が少なく活性の低いシルトが卓越した粘性土であり，M2, M10 は I_P=30 の粘土に豊浦砂を人工的に混入させた試料で，砂分が卓越した試料である．それ以外の試料はいずれも粘土分が卓越した試料となっている．したがって試料の物性からは，粘土分が卓越した状態の粘性土については，概ね μ=0.1 程度であり，シルト分が卓越している場合には，これよりも大きな値になることが多いと言えそうである．

これらのことから，図-18 の関係を表す包絡線として，上部包絡線と下部包絡線とに分けて表した．ここで，I_P<30 の下部包絡線についてはデータの不足から明らかではないものの，液状化の可能性が指摘される塑性指数の目安として I_P≦15 が指摘されていることから [19), 20)]，I_P=15 を境として，これ以下の塑性指数では砂質土的性質が強くなり速度効果が低減し，これ以上の塑性指数では粘土分が卓越する状態も存在するものと考え，この時の速度効果係数は μ=0.1 とほぼ一定値を示すものと見なした．これより，I_P<30 の粘性土については上部包絡線と下部包絡線で囲まれる領域に様々な速度効果を示す試料が存在し，I_P≧30 では概ね μ=0.1 と試料に拘らず一定になると考えた．

b）載荷速度依存性を考慮した繰返し強度・塑性指数関係の定量化

繰返し回数 N=20 回で軸ひずみ両振幅 ε_{DA}=5%に至るに必要な繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と塑性指数 I_P の関係において，載荷周波数がどのような影響を与えているか，またその影響の定量化を試みるために，図-19（a），（b）に示す検討を行った．図にはおよその目安として砂質土，中間土，粘土の領域についても表示している．

図中のプロットには，本試験結果の他，図-18 で整理した既往の試験結果の内，湯澤ら [10)] や著者ら [15)] のデータも用いた．その他の試験データについては，繰返し応力比が静的強度で正規化した値で定義されており，静的強度に不明な点があったため，ここでの整理には用いなかった．また，図中には以前に著者らが種々の粘性土に対

して繰返し三軸試験を実施し，粘性土の繰返し強度と塑性指数関係として多くのデータが得られているf=0.02Hzの試験結果を示している[21), 22)]．いずれの試験結果も等方正規圧密供試体に対するものである．

粘性土の繰返し強度と塑性指数関係については，著者らにより初期せん断応力比および過圧密比をパラメータとする提案式[21), 22)]が得られていることから，ここでの検討にはこの提案式を参考にして用いることとした．

まず，図-19 中の f=0.01Hz の試験結果を基準とする繰返し強度・塑性指数関係を定量化する．次式は著者らの提案する等方正規圧密粘性土に対する推定式[21), 22)]をf=0.01Hz，ε_{DA}=5%の場合に修正したものである（著者らが先に提案した等方正規圧密粘性土の推定式[21), 22)]はN=20 回，f=0.02Hz，ε_{DA}=10%に対するもの）．

$$\left(\sigma_d/2\sigma'_c\right)_{f=0.01\mathrm{Hz}} = 0.0007I_p + 0.2275 \qquad (2)$$

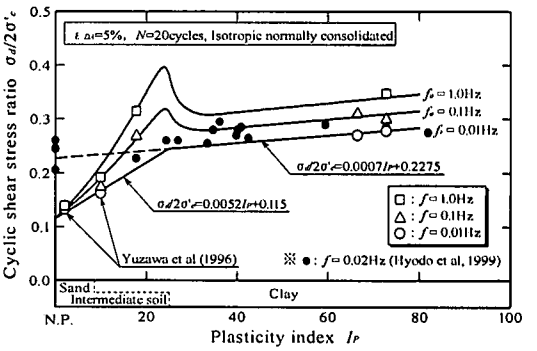
ただし，$I_p \geqq 25$，ε_{DA}=5%

ここで，式（2）の関係は著者らの実施した試験データに対してはほぼ満足できる対応を示しているが，図-19 中の破線で表される I_p<25 の部分については，湯澤ら[10)]の試験結果とは大きく異なる．これは，先に述べたように一般に中間土と呼ばれる低塑性の試料については，砂分と細粒分の混合比が多様に異なるものから非活性シルト単体のものまで様々なものが存在し，また砂骨格の初期密度にも大いに依存することから，それぞれが様々な繰返し強度を有しているためである．ここの検討では，繰返し強度・塑性指数関係に対する載荷周波数の影響を評価することを目的としているので，塑性指数の低い部分については周波数を変化させた低塑性の試験データとして唯一得られている湯澤ら[10)]のデータを包絡するよう，I_p=25 を境に評価を分けて f=0.01Hz の繰返し強度・塑性指数関係に対して比例関係を与えた．

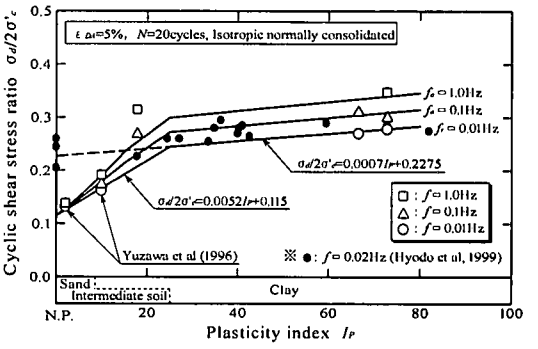
このように定義した f=0.01Hz の繰返し強度・塑性指数関係と図-18 の上部包絡線から与えられる速度効果係数 μ を，任意の周波数での繰返し強度を基準値として用いられるよう式(1)を補正した次式に代入して，f_a=0.1Hz と 1.0Hz の繰返し強度・塑性指数関係を求めた結果が図-19（a）であり，同様に下部包絡線より与えられる μ を用いて換算した結果が，図-19（b）である．

$$\left(\sigma_d/2\sigma'_c\right)_{f_a} = \left(\sigma_d/2\sigma'_c\right)_{f_r}\left[\frac{1+\mu\log_{10}\left(\dfrac{f_a}{0.1}\right)}{1+\mu\log_{10}\left(\dfrac{f_r}{0.1}\right)}\right] \qquad (3)$$

ここで，f_a，f_r はそれぞれ任意の載荷周波数と基準とする載荷周波数を表しており，ここではf_r=0.01Hz となる．



（a）図-18 の上部包絡線を用いた算定結果



（b）図-18 の下部包絡線を用いた算定結果

図-19　繰返し強度・塑性指数関係の定量化

また，図中のいずれも実線で示されるf_a=0.1Hz と 1.0Hz の繰返し強度・塑性指数関係が換算結果を表している．

図-19（a）の実線は当然のことではあるが，周波数を変化させた試験データをほぼ包絡しており，フィッティングとしては良好な対応にある．しかしながら，f=0.1Hz と 1.0Hz の換算結果は I_p=25 付近で強度低下を生じる傾向を示しており，粘性土の繰返し強度が塑性指数とともに増加するという一般的な知見[7), 8), 21), 22), 23), 24)]や実用を考えた場合に問題を含んだ結果となっている．

図-19（b）の適用結果は，I_p=17.8 の Arakawa silt の結果を除けば，これ以下の塑性指数の低い場合やこれ以上の高塑性の場合も含めて試験データと実線で表される換算結果は良好な対応にある．また，塑性指数が大きくなるほど強度が高くなると同時に，載荷周波数に対する強度増加も大きくなる傾向を示している．粘性土の速度依存性が粘性に起因するものだとすれば，一般的には塑性指数の増加とともに粘性も高まると考えられるので，この傾向は一般的な粘性土の現象をよく表現しているように思われる．

このことから，少なくとも I_p=30 程度以上の粘性土に

関しては速度効果係数μ=0.1 とする評価は妥当であると考えられる．一方，これ以下の低塑性の粘性土については様々な状態が考えられることから問題は複雑であるが，速度依存性の本質的な現象のメカニズムについて今後継続した検討が必要と思われる．

現在，実務設計等で粘性土の繰返し強度を取り入れた評価が必要となるケースが増えつつある状況を考えれば，その適用に際して載荷周波数の影響を何等かの形で考慮しなければならないことは，ここに示した試験結果からも明らかである．**図-19**（b）に示した速度効果係数の下部包絡線を用いて換算した検討結果は，I_P=20 付近の強度を低めに評価する場合もあるが，ここではf=0.01Hz の繰返し強度・塑性指数関係を基準にしているため，基準とする周波数より高い卓越周波数を有する地震（1～2Hz 程度）や波浪（0.1Hz 程度）等を想定した場合には，結果的に安全側の評価になる．したがって，現状では，実務設計レベルで粘性土の載荷速度依存性を考慮した繰返し強度を評価に取り入れる方法として，暫定的に速度効果係数としては**図-18** の下部包絡線で与えられる関係を用いて，繰返し強度を想定される外力の卓越周波数相当に換算する方法が適当と思われる．

また，試験結果を想定する繰返し外力の周波数に直接換算する場合とは別に，塑性指数等から粘性土の繰返し強度を予測し載荷速度の影響を考慮しようとする場合，基準となる粘性土の繰返し強度と塑性指数とを関連付けた関係式が必要となる．これについてはいくつかの提案がなされている[21), 22), 24), 25)]．著者らが提案する方法[21), 22)]では，正規圧密のみならず，疑似過圧密や過圧密，そして初期せん断応力を受ける場合の粘性土の繰返し強度を地盤調査・試験として比較的一般的に行われている液性・塑性限界試験（塑性指数），圧密試験結果（降伏応力，過圧密比）から推定することができる．また，本文で示されたように，粘性土の載荷速度に対する繰返し強度の増加傾向は，繰返し強度を規定するひずみや繰返し回数の他，圧密条件や初期応力条件の違いによる影響は少なく，実用上，載荷周波数の影響をこれらの要因にかかわらず同程度とみなすことができる．したがって，仮に著者らが提案する方法[21), 22)]から推定される粘性土の繰返し強度を基準として，これにここで示された速度効果係数の関係を適用すれば，様々な圧密条件や初期応力状態における粘性土の繰返し強度を対象とする外力の載荷速度に応じて簡便な形で補正することができる．

5．まとめ

本研究は，圧密条件や初期応力状態，そして塑性指数の異なる再構成粘性土に対して載荷周波数を種々に変化させた繰返し三軸試験を行い，粘性土の繰返しせん断特性に及ぼす載荷速度の影響を検討した．本研究により得られた知見を要約すると以下の通りである．

1)　有効応力経路からは，載荷周波数が速い場合ほど有効応力の低下，過剰間隙水圧の発生量が少なくなる傾向にある．さらに，この傾向は塑性指数の大きいItsukaichi clay でより顕著であった．応力・ひずみ関係については，周波数の違いによる明確な影響は認められなかった．

2)　等方，異方圧密，正規および過圧密のいずれの圧密条件についても，周波数の高い方が残留間隙水圧，軸ひずみとも，その発達により多くの繰返し回数を必要としている．また，最終的な残留間隙水圧比は周波数に対応して概ね周波数の高い場合ほど小さくなる傾向を示す．

3)　同一のひずみに至るに必要な有効応力比は，載荷周波数の速い場合ほど小さくなる傾向が見られた．また，正規圧密，過圧密とも等方圧密における結果で載荷周波数の影響が顕著であり，初期せん断応力を受ける場合の影響は小さかった．高塑性と低塑性の粘土では前者の方が，有効応力比・ひずみ関係に見られる載荷周波数の影響の大きいことが認められた．

4)　圧密条件や初期応力条件に関わらず，いずれの基準ひずみ，繰返し回数を用いて破壊強度を定義しても，繰返し強度に及ぼす載荷周波数の影響はほぼ同等であり，その強度は載荷周波数の対数に対して概ね単調に増加する傾向が認められた．

5)　周波数を種々に変化させて行われた既往の試験結果と本試験結果を整理して，速度効果係数μと塑性指数I_Pの関係を示した．この関係から，I_P=20 付近をピークにそれ以下の塑性指数では，N.P.でμ=0 となる形で繰返し強度に及ぼす周波数の影響が減少する傾向にあることが分かった．また，I_P=30 以上の粘性土では繰返し強度に及ぼす周波数の影響は同程度で，載荷周波数の 10 倍に対して約 1 割の強度増加を示した．

6)　粘性土の繰返し強度と塑性指数の関係に及ぼす載荷速周波数の影響の定量化を行った．予測結果は試験結果との間に概ね良好な対応が得らた．これにより，様々な圧密条件，初期応力状態にある粘性土の載荷速度依存性を考慮した繰返し強度の予測・評価が可能となることが示された．

参考文献

1) 大崎順彦：動的一軸・三軸および直接せん断試験，土の動的性質とその応用，土質工学会，pp. 29-56, 1964.

2) Schimming, B. B., Haas, H. J. and Sax, H. C. : Study of dynamic and static failure envelopes, *Proc., ASCE*, SM2, pp. 105-123, 1966.

3) Olson, R. E. and Parola, J. F. : Dynamic shearing properties of

compacted clay, *Proc., Int. Symp. on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, University of New Mexico, pp. 173-181, 1967.

4) 石原研而：土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp. 217-220, 1982.

5) Bjerrum, L. : Embankment on soft ground, *ASCE, Proc., Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, Vol. 2, pp. 1-54, 1972.

6) 梅原靖文，大根田秀明，樋口嘉章：粘性土の動的強度特性に関する周期の影響，第 17 回土質工学研究発表会講演集，pp. 1713-1716, 1982.

7) 大根田秀明，梅原靖文，樋口嘉章：振動単純せん断試験による粘性土の繰返し強度特性について，港湾技術研究所報告，第 23 巻，第 4 号, pp. 71-94, 1984.

8) 松尾修，唐沢安秋，古賀泰之：種々の粘性土の動的強度特性とその考察，第 20 回土質工学研究発表会講演集，pp. 645-648, 1985.

9) Procter, D.C. and Khaffaf, J.H. : Cyclic triaxial tests on remoulded clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No.10, pp. 1431-1445, 1984.

10) 湯澤謙一郎，枝英次，神田政幸，桑野二郎，竹村次朗：中間土の液状化強度に及ぼす周波数の影響，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集Ⅲ，pp.166-167, 1996.

11) 松井保，小原秀夫，伊藤冨雄：飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響, 土木学会論文集, 第257号, pp. 41-51, 1977.

12) 兵動正幸，四宮圭三，安福規之，村田秀一：定ひずみ速度繰返し三軸試験による粘性土と砂質土の動的強度について，土木学会論文集，No. 523/Ⅲ-32, pp. 9-18, 1995.

13) Hyodo, M., Yamamoto, Y. and Sugiyama, M. : Undrained cyclic shear behaviour of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.4, pp.1-11, 1994.

14) 兵動正幸，内田一徳：講座 粘性土の動的性質, 2. 粘性土の動的問題の分類，土と基礎，Vol. 46, No. 6, pp. 53-58, 1998.

15) 山本陽一，兵動正幸，村田秀一，安福規之，杉山太宏：粘土の非排水繰返しせん断特性に及ぼす載荷周波数の影響，第 27 回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 903-906, 1992.

16) 兵動正幸，杉山太宏，山本陽一，河田頼治：繰返しせん断を受ける正規圧密および過圧密粘土の間隙水圧とひずみの評価，土木学会論文集，第 487 号/Ⅲ-26, pp.79-88, 1994.

17) 山本陽一，兵動正幸：初期せん断を受ける正規圧密粘土の繰返し強度に及ぼす周波数の影響，第 32 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 817-818, 1997.

18) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp. 424-425, 1997.

19) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，技報堂，pp. 163-169, 1988.

20) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅴ耐震設計編）・同解説，丸善，pp. 91-95, 1996.

21) 兵動正幸，村田秀一，河原弘明，川手伸哉，米村公貴，上俊二：年代効果を有する不攪乱海成粘土の原位置非排水繰返しせん断強度の評価，第 30 回土質工学研究発表会講演集，pp. 937-940, 1995.

22) Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Yamamoto, Y. and Fujii, T. : Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp.45-58, 1999.

23) 大根田秀明，梅原靖文，樋口嘉章，入澤一明：大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質（その 4）動的変形および強度特性，港湾技研資料，No.498，pp. 115-136, 1984.

24) Ishihara, K. and Yasuda, S. : Cyclic strength of undisturbed cohesive soils of western Tokyo, *Proc., Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading*, pp.57-66, 1980.

25) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），1997.

(1999. 2. 12 受付)

THE RATE EFFECT ON CYCLIC SHEAR CHARACTERISTICS OF CLAYS

Yoichi YAMAMOTO and Masayuki HYODO

In order to investigate the rate effect on cyclic shear characteristics of clays with various plasticity, a series of undrained cyclic triaxial compression tests has been performed applying cyclic loads with various frequency. Firstly, the effect of frequency on the development of excess pore pressure and axial strain was investigated. Then the relation of axial strain against effective stress ratio was correlated by the cyclic load frequency.

As the major work of the present study, the cyclic shear strengths of clays with various plasticity were investigated and formulated in terms of plasticity index and load frequency. As a result it has become possible to evaluate the cyclic shear strengths of soils with various plasticity and initial stress condition subjected to various frequency of cyclic loads.