

余裕間隙比の概念に基づいた非塑性シルトの 繰返し強度と剛性低下の評価

宋炳雄¹・安原一哉²・村上哲³・小峯秀雄⁴

¹工博 (株)茶山コンサルタント地盤工学部 (〒137-824 韓国ソウル市瑞草区方背3洞537-18 Powercomm Bldg.)

E-mail: songbw@dasan93.co.kr

²フェロー会員 工博 茨城大学教授 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: yasuhara@civil.ibaraki.ac.jp

³正会員 工博 茨城大学助手 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: murakami@civil.ibaraki.ac.jp

⁴正会員 工博 茨城大学助教授 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: komine@civil.ibaraki.ac.jp

本研究は単純せん断試験機を用いて繰返し強度と剛性に及ぼす初期せん断応力の影響を調べることを主たる目的としている。特に、非塑性シルトの繰返し載荷時及び繰返し載荷後のせん断強度と剛性の劣化特性を粘土、砂とまさ土と比較して余裕間隙比の立場から考察した。実験結果から非塑性シルトは他の土より繰返し強度は最も小さく、載荷回数の増加による剛性低下も最も顕著であることが余裕間隙比の概念で統一的に説明できることが分かった。また、剛性の低下に及ぼす初期せん断応力の影響も大きいことも分かった。これらを総合して、他の砂質土に比べ非塑性シルト地盤は液状化する可能性が高く、初期せん断応力が大きくなるに伴って繰返し剛性の低下も顕著になることを示した。

Key Words : *direct simple shear test, shear strength, stiffness, initial static shear stress, volume decrease potential, equivalent stiffness ratio*

1. はじめに

地震による被害事例をレビューして見ると地盤災害は、土の種類によらず発生することが分かる。例えば、1964年米国のアラスカ地震¹⁾の場合は、鋭敏な粘性土地盤で大きな被害が起きた例として知られている。1989年米国のLoma Prieta地震²⁾の場合は、CaliforniaのMoss Landing海洋研究所で細粒分を含む土の液状化やその後の側方流動が観測されたことが報告された。また、1994年米国のNorthridge地震³⁾の場合は、シルト質砂で液状化後の側方流動と共に粘土地盤で繰返し破壊による側方変位が発生したと報告されている。1995年兵庫県南部地震⁴⁾の場合、砂質まさ土と礫などで構成されている地盤で大規模の液状化や側方流動が発生した。

また、最近1999年トルコのKocaeli地震⁵⁾の場合、Adapazari地域における被害も非塑性シルトやシルト質砂地盤で発生した液状化によるものと考えられており、アパートが集中している住宅団地で被害も多かったと報告されている。この事例では上部構造物の荷重(アパート)により構造物下の土は密な状態であったと判断されるが、上部構造物の荷重による初期せん断応力が作用している地盤で、地震荷重によるせん断強度と剛性の低下による部分液状化が発生したと報告されている⁵⁾。

以上、過去に報告された事例を見ると地震時地盤被害に及ぼす初期せん断応力、あるいは繰返し強度と剛性に及ぼす初期せん断応力の影響の重要性を指摘できる。本研究では単純せん断試験機を用いて詳しく、特に非塑性シルトについてこのことの重要性を検討することを目的にしている。

2. 実験の概要と用語の定義

2. 実験の概要と用語の定義

(1) 実験装置と用いた土の物性

図-1は茨城大学が所有するNGIタイプの単純せん断試験機である。実験は直径7cmと高さ3cmの供試体をワイヤメンブレインの中に入れて行う。鉛直

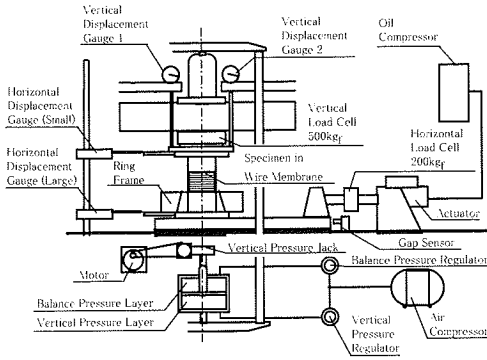


図-1 NGIタイプの単純せん断試験装置

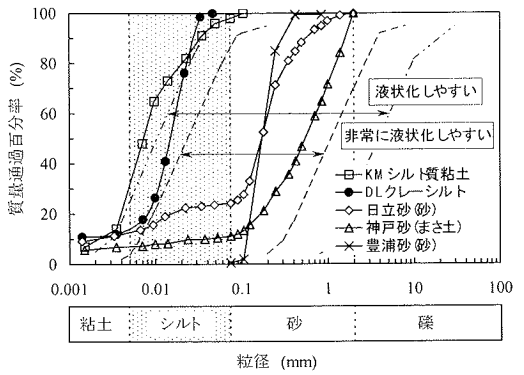


図-2 粒度分布曲線

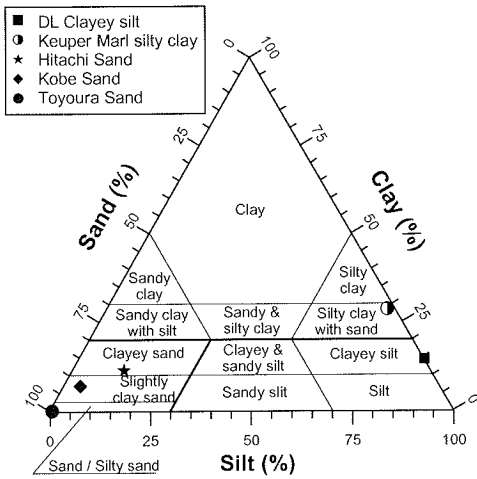


図-3 三角座標による土の分類

表-1 土の特性

	KM シルト 質粘土	DL クレー シルト	日立砂	神戸砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.79	2.64	2.69	2.64
有効内部摩擦角 ϕ (°)	25	23	31.5	30
最大間隙比 e_{max}	-	1.47	1.45	0.81
最小間隙比 e_{min}	-	0.71	1.03	0.47
均等係数 U_c	4	24	100	33
曲率係数 U_c'	1.4	8.6	30.3	5
シルトの含有率	68	82	11.5	4
粒度分布の良否	否	否	否	良

圧力は空圧制御で5MPa、水平圧力は油圧制御で2MPaまで加えることができる。変位計は図-1に示すように鉛直と水平に2つずつ設置されている。そのうち水平変位は供試体の上下で測定された。なお、図-1で供試体の底部が水平に動いてせん断試験が行われるので水平変位は下部でしか測定されないが、上部で発生する微小変位量もチェックするために上部にも水平変位計を設置した。NGIタイプの単純せん断試験機は K_0 圧密条件下で圧密させた後、定体積条件を保つために供試体の高さを変えずに鉛直応力を調節しせん断試験を行うので、過剰間隙水圧 Δu は繰返しせん断応力 τ を与える前後の鉛直有効応力 σ_v' と σ_v'' の差から決められる。図-2は本研究で使った4種類の土の粒度分布曲線である。クーパーマールシルト(以下、KMシルト質粘土)及びDLクレーシルトは岩石を粉砕して得られたもので、日立砂は茨城県日立市の住宅造成地で採取した砂、神戸砂は1995年兵庫県南部地震で被害を受けたポートアイラ

ンドから採取されたまさ土である。図-2には地盤工学会の設計基準⁹⁾による液状化しやすい粒度分布の範囲を併記しているが、これによれば豊浦砂、日立砂と神戸砂は液状化発生の可能性が非常に高い範囲に分布し、DLクレーシルトは液状化発生の可能性がある。しかし、KMシルト質粘土は液状化が発生しにくい土と判断される。

図-3は三角座標による土の分類である⁷⁾。これによるとKMシルト質粘土はシルト質粘土、DLクレーシルトは粘土質シルトに属しており、日立砂と神戸砂は粘土分を含んだ砂であるが、日立砂が神戸砂より粘土分が多い。表-1には本研究で用いた土の特性をまとめている。全試料は再構成した正規圧密状態であるので粘着力はない。また、KMシルト質粘土は塑性指数がある土であり、最大・最小間隙比を調べる方法がないので対象から除いた。図-2と図-3の結果を用いて日本統一土質分類法で粒度分布の良否を判別した⁸⁾。

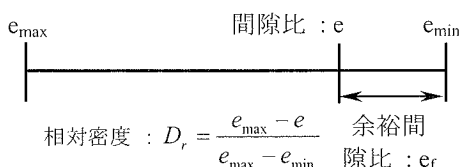


図-4 余裕間隙比の定義

表-2 拘束圧力を与える前後の供試体の状態

		KMシルト質粘土	DLクレーシルト	日立砂	神戸砂
拘束圧力 (kPa)		196	196	98	98
間隙比 e	圧密前	0.83	1.16	1.32	0.71
	圧密後	0.63	0.94	1.05	0.61
余裕間隙比 e_f		-	0.23	0.01	0.14
相対密度 D_r (%)	圧密前	-	42	30	30
	圧密後	-	70	96	59

(2) 供試体の製作と試験条件

本研究でKMシルト質粘土、日立砂や神戸砂は茨城大学の既存研究に供したものであるが、DLクレーシルトは今回の実験で行われたものである。図-3でDLクレーシルトは粘土質シルトに分類されるが、塑性指数がない非塑性シルトであるので、DLクレーシルトの供試体は日立砂と神戸砂のように相対密度 D_r を基準にして供試体を作成した。表-1で日立砂と神戸砂の最大・最小密度は試験方法JIS A 1224によって調べたが、その方法は細粒分100%のDLクレーシルトには適用できない⁹⁾。しかし、細粒分を15%以下含む砂の場合はASTMのD4254方法Cを用いて最小密度を得られる⁹⁾。DLクレーシルトはその範囲を超えるが、ASTMのD4254方法Cで最小密度を求めた。また、イギリス標準(BS)によるとシルト質土の最大密度は4.5kgのランマと直径10cmのモールドを用いて締固め実験から求められるので⁷⁾、C-b法(JIS A 1210)⁹⁾から求めた。

なお、DLクレーシルト供試体は上記の方法で求めた相対密度 D_r を約42%として繰返しせん断試験を行った。このとき供試体の飽和密度は1.85g/cm³であった。日立砂と神戸砂は30%の相対密度 D_r で供試体を作製し、KMシルト質粘土は69 kPaで予圧密された粘土ブロックからトリマで均一な供試体を作成した。なお、KMシルト質粘土の塑性指数は19.7、液性限界は38.6%である。KMシルト質粘土、日立砂と神戸砂の供試体の飽和密度はそれぞれ1.98g/cm³、1.86g/cm³と1.98g/cm³である。

表-2は拘束圧力を与える前後の供試体の状態を表している。塑性がない土は相対密度 D_r で比較した

表-3 繰返しせん断試験条件

	KMシルト質粘土 DLクレーシルト	日立砂 神戸砂
圧密鉛直応力の速度	196 kPa/hr	
入力波	0.1 Hzの正弦波	
載荷回数	50回	
制御方法	応力制御	
最大ひずみ	±10%	
初期せん断応力 (kPa)	0/9.8/19.6	0/4.9/9.8
初期せん断応力の載荷速度	応力制御下196 kPa/hr	

が、塑性があるKMシルト質粘土は間隙比 e の変化のみ調べた。ここで、日立砂は拘束圧力を与えた後も相対密度 D_r の変化は他の土に比べて大きいことが特徴である。なお、表-2に示した余裕間隙比(Volume decrease potential, e_f)は図-4と式(1)で定義される¹⁰⁾。

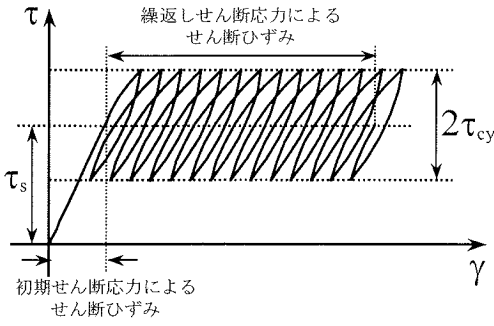
$$e_f = e - e_{\min} = (1 - D_r) \cdot (e_{\max} - e_{\min}) \quad (1)$$

ここで、 e は現在の間隙比、 e_{\min} と e_{\max} は最小と最大間隙比、 D_r は相対密度である。また、表-2で圧密前後の相対密度 D_r の差は結構大きい。日立砂と神戸砂の場合は細粒分を含む砂であることと供試体の初期相対密度 D_r が小さ過ぎることで拘束応力の増加によって砂の間に細粒分が満たされて相対密度 D_r が大きく増加したと判断される。また、図-2で日立砂は神戸砂より粒度分布が良いので同じ拘束応力に対して圧縮性が高いと思われる。

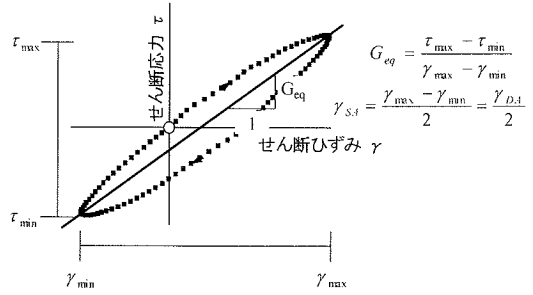
等体積単純せん断試験試験の手順は以下の通りである。すなわち、最大196 kPaの有効鉛直応力で圧密させた後応力制御で繰返しせん断応力を加えた。繰返し荷重は0.1Hzの正弦波であり、初期せん断応力は定圧密応力の条件下196 kPa/hrの速度で19.6 kPaまで与えている。各試料に対する試験条件を表-3にまとめている。

(3) 用語の定義

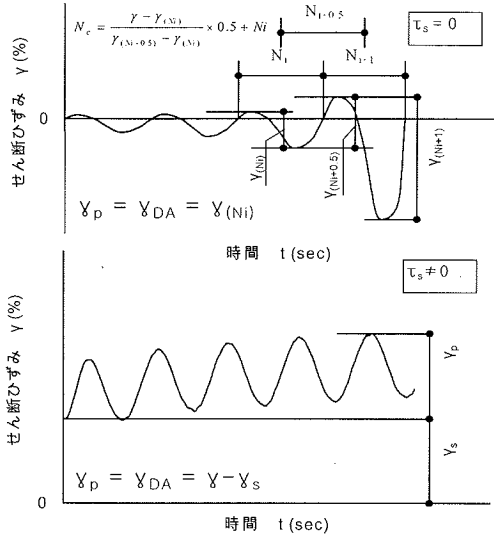
図-5(a)は初期せん断応力 τ_s の定義を示している。前述のように初期せん断応力 τ_s は繰返しせん断試験を行う前に、ある目標値に達するまで一定の速度



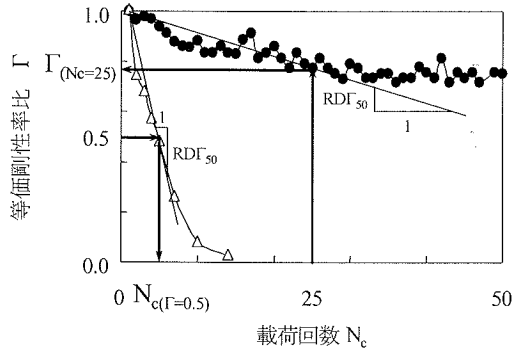
(a) 初期せん断応力



(c) 等価剛性率



(b) ピークせん断ひずみの定義



(d) 等価剛性率比の低下比

図-5 用語の定義

(196 kPa/hr)で作用させた。図-5(b)はピークせん断ひずみ γ_p の定義を示しているが、初期せん断応力 τ_s がない場合は、繰返しひずみの最大と最小振幅の差になる両振幅せん断ひずみ γ_{DA} とした。一方、初期せん断応力の影響がある場合、両振幅せん断ひずみ γ_{DA} を決められないときが多いので、繰返し応力によって発生したせん断ひずみをピークせん断ひずみ γ_p とした^{11), 12)}。また、荷回数 N_c は図-5(b)に示した関係から決めた⁹⁾。なお、荷回数比 $N_c R$ は式(2)のように表すことにする。

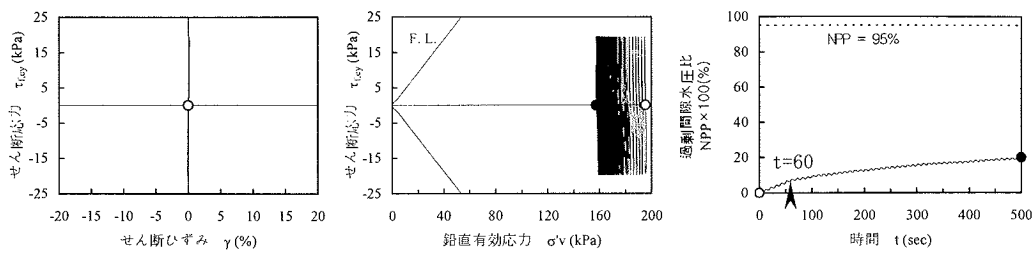
$$N_c R = N_{c(x\%)} / N_{c(1\%)} \quad (2)$$

ここで、 $N_{c(x\%)}$ はせん断ひずみが1, 2, 5, 7.5, 10%に達するときの荷回数である。図-5(c)は繰返しせん断応力とせん断ひずみの関係から等価剛性率 G_{eq} と片振幅ひずみ γ_{SA} を決める方法を示している。最

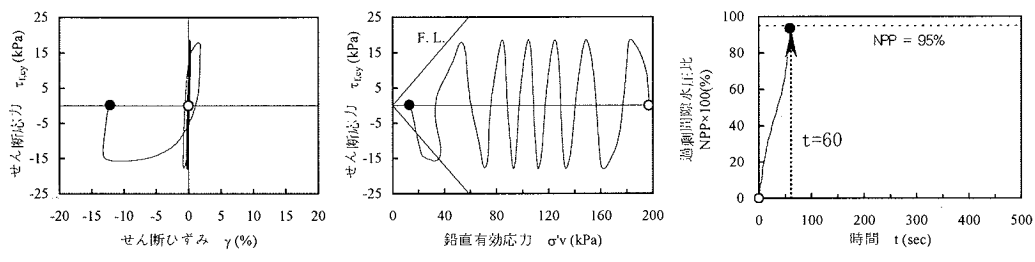
大せん断ひずみ γ_{max} と最小せん断ひずみ γ_{min} の差は両振幅せん断ひずみ γ_{DA} であり、この半分が片振幅せん断ひずみ γ_{SA} になる。図-5(c)に示したように繰返し荷重による1サイクルにおける最大と最小の応力とひずみの差から等価剛性率 G_{eq} が決められる⁹⁾。本研究で用いた4種類の土は用いた拘束応力が違うので等価剛性率 G_{eq} を直接に比較することができないことから等価剛性率比 Γ を使って繰返し応力による剛性の低下特性を比較した。等価剛性率比 Γ は荷回数 N_c が作用するときの等価剛性率 G_{eq} を初期荷回数($N_c=1$)の等価剛性率 $G_{eq(N_c=1)}$ で除して、式(3)のように表すことにした。

$$\Gamma = G_{eq} / G_{eq(N_c=1)} \quad (3)$$

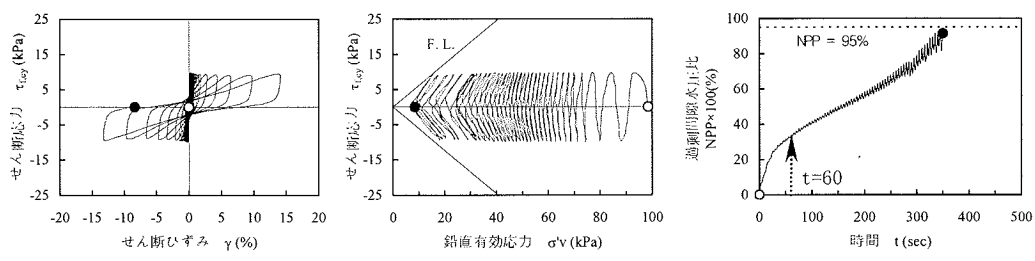
図-5(d)で等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ は等価剛性率比 Γ が0.5まで低下したときの荷回数 N_c の関係



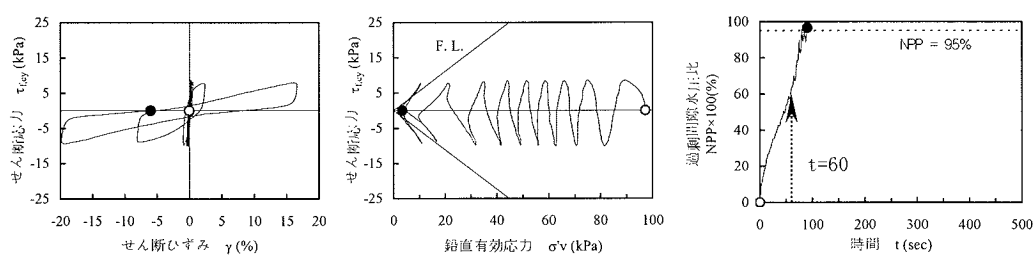
(a) KM シルト質粘土 ($R_{DSS} = 0.1$)



(b) DL クレーシルト ($R_{DSS} = 0.097$, $e_r = 0.23$)



(c) 日立砂 ($R_{DSS} = 0.1$, $e_r = 0.01$)



(d) 神戸砂 ($R_{DSS} = 0.097$, $e_r = 0.14$)

図-6 繰返しせん断試験結果の例 (○ : 出発点, ● : 終着点)

と合わせた等価剛性率比 Γ の傾きである。しかし、
 載荷回数 N_c が 50 まで到達しても等価剛性率比 Γ がほ
 ぼ 0 まで届かない場合は載荷回数 N_c が 25 になるとき
 の等価剛性率比 Γ を用いて等価剛性率比の低下比 RD
 Γ_{50} を決めた。過剰間隙水圧比 (Normalized Pore
 Pressure, NPP) は式 (4) のように過剰間隙水圧 Δu を
 有効鉛直応力 σ'_{vc} で正規化したものである。

$$NPP = \Delta u / \sigma'_{vc} \quad (4)$$

また、繰返し応力比 R_{DSS} は繰返しせん断応力 $\tau_{f, cy}$ を
 有効鉛直応力 σ'_{vc} で正規化したものである。

$$R_{DSS} = \tau_{cy} / \sigma'_{vc} \quad (5)$$

正規化した繰返し応力比 NR_{DSS} は繰返し応力比 R_{DSS} と載荷回数 N_c の関係の中で載荷回数 N_c が5のとき、1%のピークせん断ひずみ γ_p における繰返し応力比 R_{DSS} に対する10%のピークせん断ひずみ γ_p における繰返し応力比 R_{DSS} の比として表したものである。

$$NR_{DSS} = R_{DSS(\gamma_p=10\%)} / R_{DSS(\gamma_p=1\%)} \quad (6)$$

4種類の土に与えた初期圧密鉛直応力 σ'_{vc} は98kPaと196kPaの2種類であるので、式(6)のように初期せん断応力 τ'_s を鉛直応力 σ'_{vc} で正規化した初期せん断応力(Normalized Initial Static Shear Stress, NISSS)を用いてその大きさを表した。

$$NISSS = \tau'_s / \sigma'_{vc} \quad (7)$$

3. 初期せん断応力の影響がないときの非塑性シルトの繰返し応力強度と剛性

(1) せん断ひずみと過剰間隙水圧の時刻歴

図-6は4種類の土に対する繰返し応力比 R_{DSS} が約0.1のときの試験結果を比較したものである。図-6では載荷回数 N_c を50回まで与えた結果、KMシルト質粘土ではせん断ひずみ γ と過剰間隙水圧比NPPはあまり発生していない。一方、DLクレーシルトと神戸砂の片振幅せん断ひずみ γ_{sa} と過剰間隙水圧比NPPはそれぞれ10%以上と95%以上発生している。しかし、日立砂は片振幅せん断ひずみ γ_{sa} が10%以上で過剰間隙水圧比NPPはほぼ95%まで発生している。

なお、図-6でDLクレーシルトは時間が60秒のときに、過剰間隙水圧比NPPがほぼ95%ぐらいになっている。DLクレーシルト供試体の圧密後の相対密度 D_r は70%の中密な状態であるが、他の土より大きな過剰間隙水圧比NPPが発生しやすい。

石原・渡辺¹⁰⁾は相対密度 D_r を一定に保持しても余裕間隙比 e_f まで考慮するべきであると提案した。石原・渡辺¹⁰⁾の砂に関する研究を参考にすると、中密なDLクレーシルトの繰返し強度が小さいことは余裕間隙比 e_f が大きいことに起因すると判断される。また、石原・渡辺¹⁰⁾は砂の液状化は相対密度 D_r と余裕間隙比 e_f に依存するので、同じ相対密度 D_r の砂でも最大と最小間隙比の差が大きい砂が液状化しやすく、逆に相対密度 D_r が小さくてもこの差が小さい砂ならば液状化しにくいとした。なお、火山灰砂質土のシ

ラスは相対密度 D_r が大きくても液状化しやすく、ガラスビーズなどは相対密度 D_r が小さくても液状化しにくいことを明らかにしている¹⁰⁾。

図-7は本研究で用いた試料とシラス、ガラスビーズの最大、最小間隙比を比較している。これによるとDLクレーシルトはシラスより最大と最小間隙比の差が大きいので、DLクレーシルトもシラスのように相対密度 D_r が大きくても液状化しやすくなると判断される。

(2) 繰返し強度と載荷回数の関係

図-8は初期せん断応力 τ'_s の影響がないときの繰返し応力比 R_{DSS} と載荷回数 N_c の関係を示している。相対密度 D_r は日立砂、DLクレーシルトと神戸砂の順で小さくなるが、KMシルト質粘土の繰返し応力比 R_{DSS} は他の土より大きいことが分かる。また、塑性指数を持っているKMシルトの場合は、ピークせん断ひずみ γ_p は1%から10%まで発生に載荷回数 N_c がたくさん要るが、DLクレーシルトのピークせん断ひずみ γ_p は1%から10%までほぼ同時に発生することが分かる。

図-9は図-8より繰返し応力比 R_{DSS} が0.1のときのピークせん断ひずみ γ_p に及ぼす載荷回数 N_c の影響を調べた結果を示している。KMシルト質粘土は繰返し応力比が0.1で行った実験結果がないので、近似曲線から予測した。図-9で載荷回数比 N_cR は式(2)を用いて目標になるピークせん断ひずみ γ_p に達するまで必要な載荷回数の増加率とした。KMシルト質粘土はピークせん断ひずみ γ_p が1%から7.5%に至るまでは多くの載荷回数 N_c を要しているが、その後から急速に10%までに達している。日立砂と神戸砂は5%に届くまで多くの載荷回数 N_c を要することが分かる。しかし、DLクレーシルトはピークせん断ひずみ γ_p が1%から10%までほぼ同時に発生することから、DLクレーシルトは他の土より大ひずみが発生しやすいことが分かる。

KMシルト質粘土の最大および最小間隙比 e_{max} 、 e_{min} を求められないので、相対密度 D_r は定義できないので、余裕間隙比 e_f を求められない。内田らによると載荷回数 N_c が小さいときに1, 2, 5, 7.5, 10%のピークせん断ひずみ γ_p の間隙が広いほど正のダイレイタンシーが顕著であり、密な試料であると判断できると報告している^{9), 13)}。その考え方より式(6)を用いてKMシルト質粘土の余裕間隙比 e_f を予測した。その結果、図-10に示すように正規化した繰返し応力比 NR_{DSS} と余裕間隙比 e_f の関係を外挿してKMシルト質粘土の余裕間隙比 e_f を求めた。石原¹³⁾は相対密度 D_r が異なる砂に対して余裕間隙比 e_f が0.3位までは余

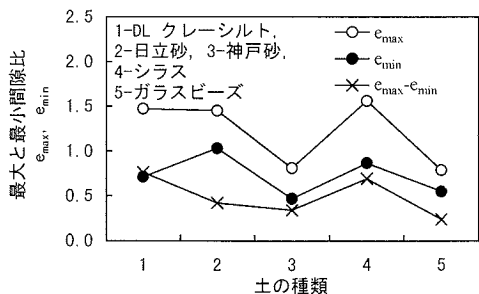


図-7 土の種類による最大と最小間隙比の比較²⁾

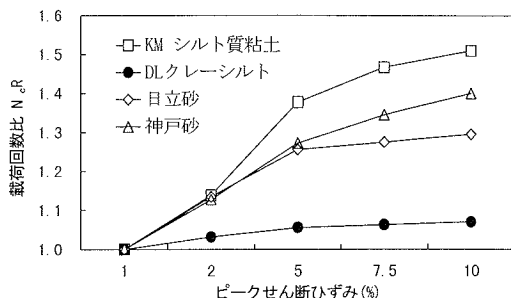


図-9 載荷回数とピークせん断ひずみの関係

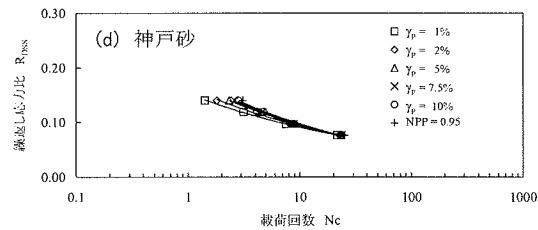
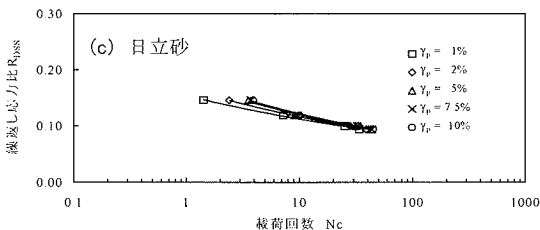
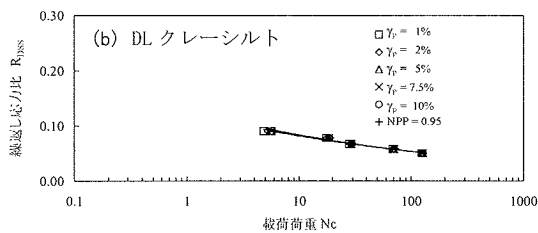
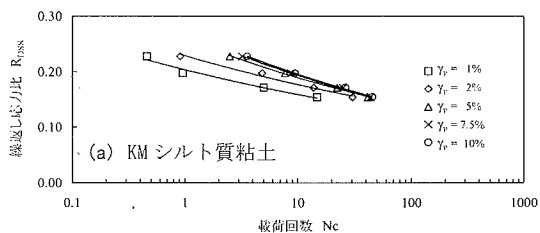


図-8 繰返し応力比と載荷回数の関係

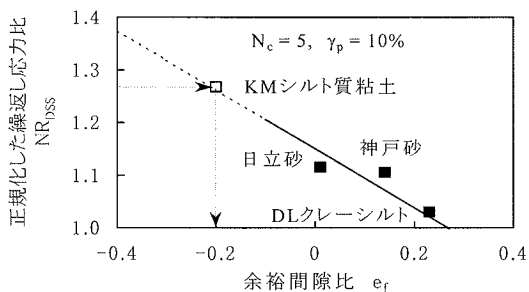


図-10 土の種類に伴う正規化した繰返し応力比と余裕間隙比の関係

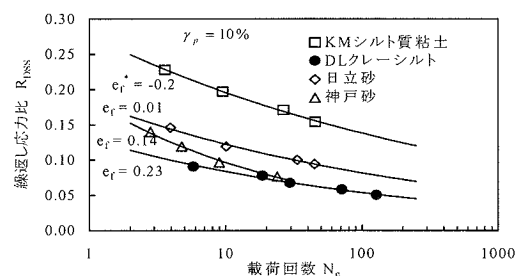


図-12 繰返し応力比と載荷回数の関係 (*は図-10の外挿による)

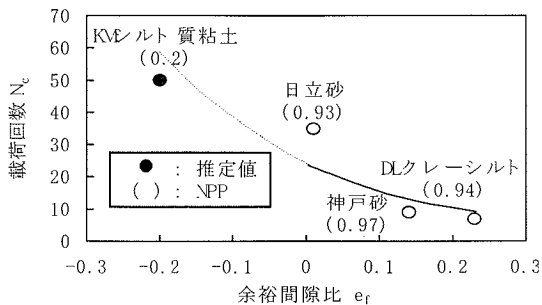


図-11 液状化までの載荷回数と余裕間隙比の関係

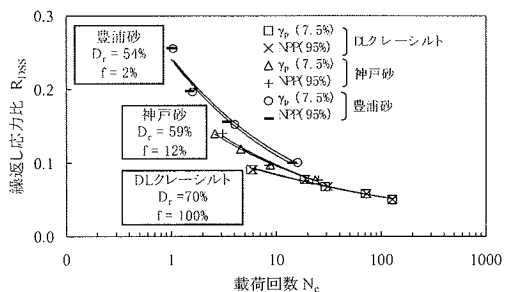


図-13 豊浦砂と繰返し応力比の比較

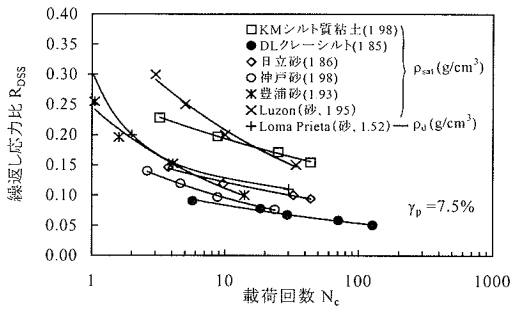


図-14 地震発生地点における様々の砂の繰返し応力比と載荷回数関係の比較

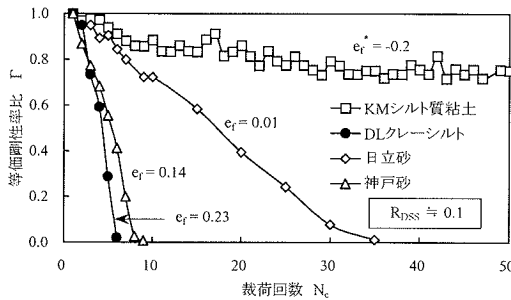


図-16 等価剛性率比と載荷回数との関係(*は図-10の外挿による)

余裕間隙比が大きくなるほど繰返し応力比 R_{DSS} が低下することを示した。その研究結果に基づいて、整理した図-10でDLクレーシルト、日立砂と神戸砂を比べて見ると余裕間隙比 e_r が大きくなるに従って正規化した繰返し応力比 NR_{DSS} が小さくなるのが分かる。3種類の実験結果を外挿するとKMシルト質粘土の正規化した繰返し応力比 NR_{DSS} が最も大きいので、4種類の土の中で余裕間隙比 e_r は最も小さいと思われる。図-10で予測したKMシルト質粘土の余裕間隙比 e_r は負であるが、このことは式(1)から判断して現在の間隙比 e が最小間隙比 e_{min} より小さいことを意味している。

図-11は図-6で繰返し応力比 R_{DSS} が約0.1のとき、KMシルト質粘土を除いて過剰間隙水圧比 NPP が95%付近までの載荷回数 N_c と余裕間隙比 e_r の関係を表している。KMシルト質粘土の余裕間隙比 e_r は図-10から決められた値を用いた。その結果、過剰間隙水圧比 NPP が90%以上まで発生する載荷回数 N_c は余裕間隙比 e_r が増加すると減少することが分かる。なお、図-11における実線は4個のデータを用いて描いた近似曲線である。

図-12は図-8でピークせん断ひずみ γ_p が10%に達したときにおける4種類の土に対する繰返し応力比 R_{DSS} と載荷回数 N_c の関係をまとめたものである。

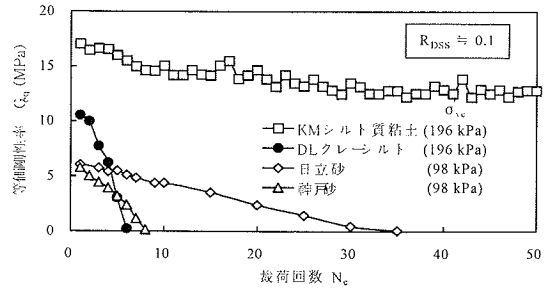


図-15 等価剛性率と載荷回数との関係

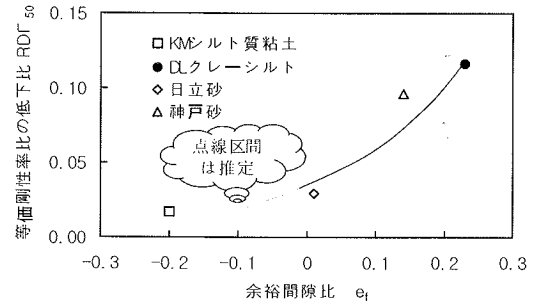


図-17 余裕間隙比による等価剛性率比の低下比

図-12によると塑性指数 I_p があるKMシルト質粘土の繰返し応力比 R_{DSS} が最も大きいことが分かる。また、図-12によればKMシルト質粘土を除いた3種類の土は載荷回数 N_c の増加に伴う繰返し応力比 R_{DSS} は類似していることが分かる。一方、DLクレーシルトは等しい載荷回数 N_c が作用するときに他の土より繰返し応力比 R_{DSS} が小さいことが分かる。これは余裕間隙比 e_r が原因であると判断される。

図-13はDLクレーシルト、神戸砂及び豊浦砂の繰返し応力比 R_{DSS} と載荷回数 N_c の関係を比較したものである。日立砂は過剰間隙水圧比 NPP が90%以上発生しているが、95%まで達していなかったのでここにプロットされていない。豊浦砂の実験結果は一面せん断試験によるものである¹⁵⁾。一面せん断試験と単純せん断試験から得られた繰返し強度に大きな差異は見られないと報告されているので^{9), 16)}、豊浦砂の結果を本研究結果と比較することにする。豊浦砂の相対密度 D_r はDLクレーシルトや神戸砂より小さいが、繰返し応力比 R_{DSS} については、豊浦砂がDLクレーシルトや神戸砂より大きい。

なお、細粒分を含む砂は細粒分を含んでいない砂より過剰間隙水圧比 NPP が1まで届き難いことが報告されている⁹⁾。図-13で豊浦砂は7.5%のせん断ひずみ γ_p が発生する以前に液状化が発生しているが、

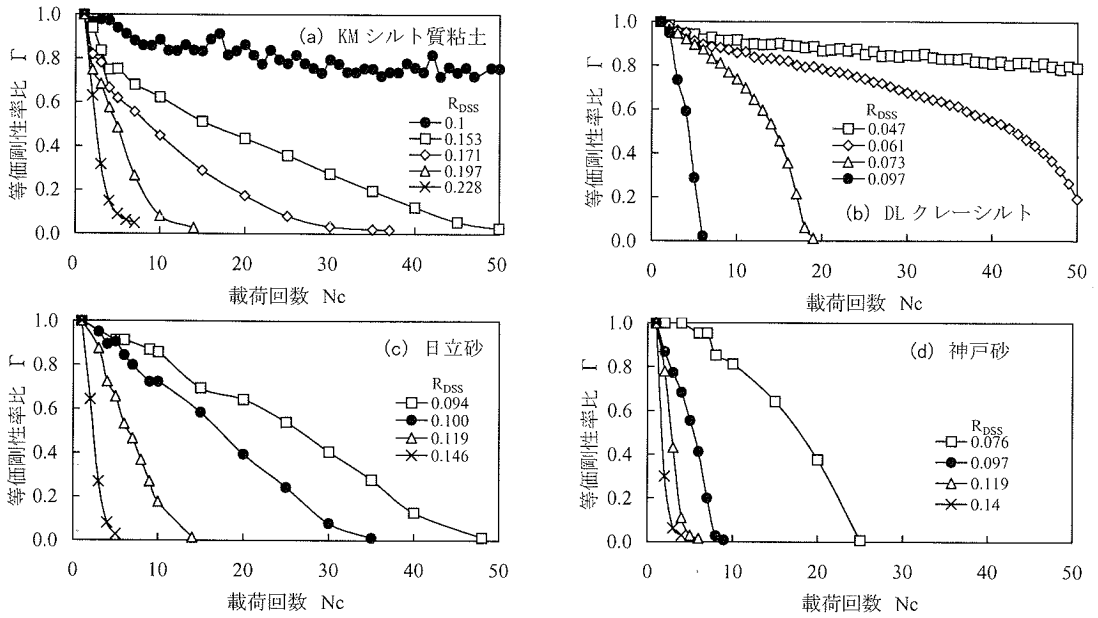


図-18 等価剛性率比の低下に及ぼす R_{DSS} の影響

DLクレーシルトと神戸砂はその後発生している。この現象はDLクレーシルトの細粒分 f が多いので、繰返し応力による過剰間隙水圧比NPPの現しにくいと判断される。

図-14は液状化による地震発生地点における砂のせん断試験結果と本研究の結果を比較したものである。地震事例は1989年米国のCaliforniaのLoma Prieta地震¹⁷⁾と1990年フィリピンのLuzon地震¹⁸⁾である。実験結果は単純せん断試験におけるピークせん断ひずみ γ_p が7.5%のときのものであるが、豊浦砂は一面せん断試験結果である¹⁵⁾。図-14によれば非塑性シルト(DLクレーシルト)は液状化被害を受けた砂地盤より繰返し強度が小さいので、非塑性シルト地盤でも液状化が発生する可能性は高いと予想される。なお、Loma Prieta現場の砂の場合は乾燥密度 ρ_d であるが、他は飽和密度 ρ_{sat} を示している。

(3) 繰返し荷重による剛性劣化特性

図-15は繰返し応力比 R_{DSS} が約0.1のときの等価剛性率 G_{eq} と载荷回数 N_c の関係を示している。有効鉛直応力 σ'_{vc} がDLクレーシルトとKMシルト質粘土は日立砂と神戸砂より約2倍大きいので、等価剛性 G_{eq} も大きくなっている。図-15によればDLクレーシルトは载荷回数 N_c が増加すると他の土に比べると等価剛性率 G_{eq} の低下が最も著しい。

図-16は図-15で载荷回数 N_c の増加による非塑性シルトの剛性低下の傾向を調べた結果を示したものである。拘束応力が違うので、式(3)を用いて正規

化した。KMシルト質粘土は塑性指数を持っている土であるので剛性の低下は小さい。一方、塑性指数 I_p を有しない3種類の土の中で相対密度 D_r が最も大きく、余裕間隙比 e_r が最も小さい日立砂の剛性低下がDLクレーシルトと神戸砂より遅いことが分かる。DLクレーシルトの等価剛性率 G_{eq} の低下が著しい理由は図-7で示したように最大と最小間隙比の差が大きいことによると判断する。なお、神戸砂の場合はまさ土のコラプス(Collapse)現象の影響が原因であると判断する。

図-17は図-16から求められた等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ と余裕間隙比 e_r の関係を示している。なお、等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ は図-5(d)に定義している。図-17でKMシルト質粘土の余裕間隙比 e_r は図-10より外挿されたものである。図-17から土の種類によらず、余裕間隙比 e_r の増加により等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ は顕著になることが分かる。なお、実線は近似曲線である。

一方、図-18は初期せん断応力 τ_c の影響がない場合における繰返し応力比 R_{DSS} の増加に伴う剛性低下特性を比較したものである。図-18で黒丸のデータは図-15における繰返し応力比 R_{DSS} が約0.1のときの剛性低下を示している。4種類の土に対して繰返し応力比 R_{DSS} が約0.1のときの载荷回数 N_c の増加による剛性低下を比較するとKMシルト質粘土が最も小さい。余裕間隙比 e_r が大きいDLクレーシルトは繰返し応力比 R_{DSS} が小さくても剛性の低下は顕著であることが分かる。

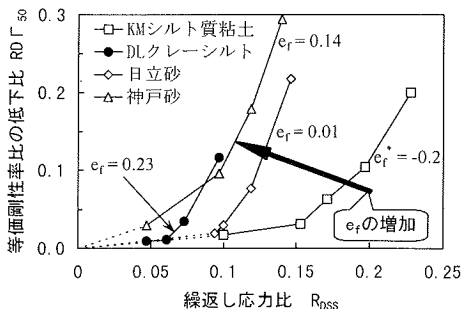


図-19 繰返し応力の増加による剛性の低下比(*は図-10の外挿により求めた。)

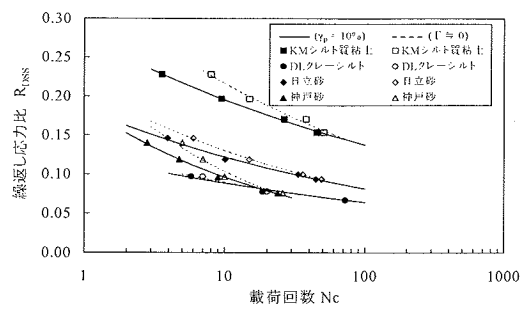


図-21 $\gamma_p=10\%$ と $\Gamma=0$ のとき、繰返し応力比と載荷回数
の関係

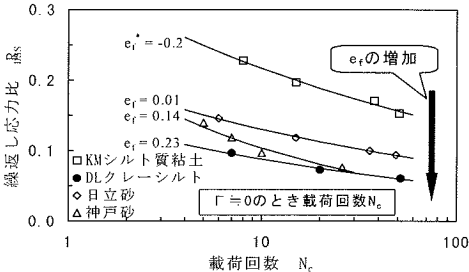


図-20 $\Gamma=0$ のときの繰返し応力比と載荷回数の関係(*は図-10の外挿により求めた。)

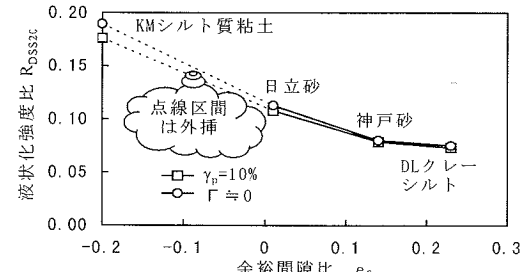


図-22 $\gamma_p=10\%$ と $\Gamma=0$ における、液状化強度比と余裕間
隙比の関係

なお、図-19は図-18で等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ と繰返し応力比 R_{DSS} の関係を示したものである。塑性があるKMシルト質粘土を除いたDLクレーシルト、日立砂と神戸砂の、繰返し応力比 R_{DSS} の増加による等価剛性率比の傾向は余裕間隙比 e_f の大きさが違っても類似していることが分かる。余裕間隙比 e_f を基準にして比較すれば、余裕間隙比 e_f が小さいほど繰返し応力比の増加による等価剛性率比 Γ の低下が小さいことが分かる。

図-20は図-18で等価剛性率比 $\Gamma=0$ における4種類の土に対する繰返し応力比 R_{DSS} と載荷回数 N_c の関係をまとめたものである。本研究で等価剛性率比 Γ が0.05より小さいときの剛性はほとんどなかったので $\Gamma=0$ で表記した。図-20を見れば載荷回数 N_c に対してDLクレーシルトは最小の強度を示している。

なお、図-21は図-12と図-20をまとめて比較したものである。図-21を見ると載荷回数 N_c が少ないときはピークせん断ひずみ γ_p が10%まで発生しても等価剛性率 G_{eq} は維持されていることが分かる。繰返し応力比 R_{DSS} が小さいときは載荷回数 N_c の増加に伴って、ピークせん断ひずみ γ_p と等価剛性率比 Γ をそれぞれ基準に決められた繰返し応力比 R_{DSS} の結果(実線と点線)が一致するように見える。図-21で最大と最小間隙比の差が小さい密な土ほど実線と点線がほぼ当たる載荷回数 N_c が大きい。このことは結果的に最大と最小間隙比の差が小さい密な状態なら強

度と剛性は緩い状態より大きいし、繰返し応力比 R_{DSS} に伴う強度と剛性の低下も遅くなることを示している。

図-22は図-21でピークせん断ひずみ γ_p が10%のときと等価剛性率比 Γ がほぼ0になるときに注目して、載荷回数 N_c が20における液状化強度比 R_{DSS20} を余裕間隙比に対して整理したものである。KMシルト質粘土の余裕間隙比 e_f は図-10で外挿により得られたものである。先に示した図-6, 8で4種類の土は共にピークせん断ひずみ γ_p が10%以上に発生しても過剰間隙水圧比 NPP は100%までは到達していなかったが、KMシルト質粘土を除いた3種類の土で10%のピークせん断ひずみ γ_p のとき、過剰間隙水圧比 NPP が90%以上になるので、本研究では載荷回数 N_c が20で、10%のピークせん断ひずみを発生する繰返しせん断応力比 R_{DSS} を液状化強度比 R_{DSS20} とした⁹⁾。前述のように石原・渡辺¹⁰⁾は相対密度 D_r が違う砂でも余裕間隙比 e_f の増加による繰返し応力比 R_{DSS} が低下することを示したが、図-22は石原・渡辺の繰返し三軸試験の研究結果¹⁰⁾と一致することが分かる。なお、図-22から余裕間隙比 e_f が大きくなるほど、ピークせん断ひずみ γ_p が10%のときと等価剛性率比 Γ がほぼ0になるときの液状化強度比 R_{DSS20} の差は殆どなくなることが分かる。以上から非塑性シルトの液状化強度と剛性が小さいのは余裕間隙比が大きいことに原因であると結論される。

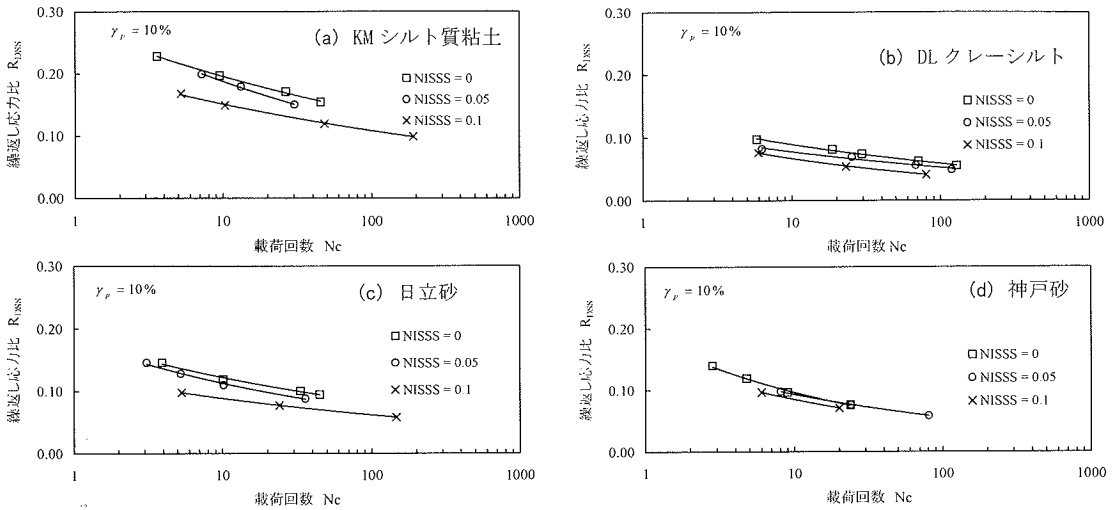


図-23 初期せん断応力を受けたときの繰返し応力比と载荷回数との関係 ($\gamma_p = 10\%$)

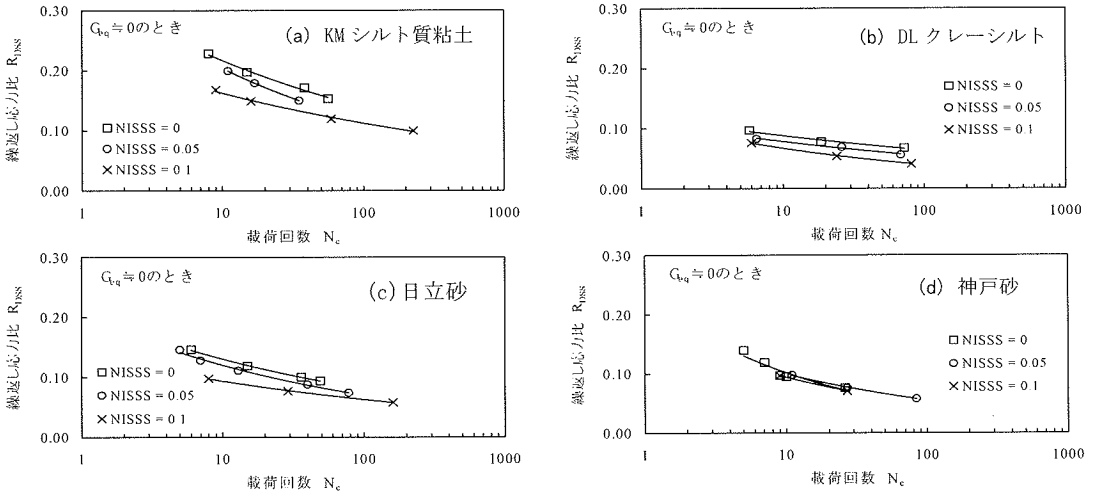


図-24 繰返し応力比と载荷回数との関係に及ぼす初期せん断応力の影響 ($G_{eq} \approx 0$)

4. 非塑性シルトの繰返し強度と剛性特性に及ぼす初期せん断応力の影響

(1) 繰返し強度に及ぼす初期せん断応力の影響

図-23は4種類の土に対するピークせん断ひずみ γ_p が10%に達したときの繰返し応力比と载荷回数との関係に及ぼす初期せん断応力 τ_s の影響を示している。ここで、初期せん断応力比 $NISS$ は式(7)に定義されている。DLクレーシルトの繰返し応力比 R_{DSS} は初期せん断応力比 $NISS$ の増加に伴って低下することが分かる。しかし、神戸砂は初期せん断応力比 $NISS$ の影響をあまり受けないことが分かる。

図-24は図-20と同様に等価剛性率 $\Gamma \approx 0$ における繰返し応力比 R_{DSS} と载荷回数 N_c の関係に及ぼす初期せん断応力 τ_s の影響を示したものである。図-24で繰返し応力比 R_{DSS} と载荷回数 N_c の関係の傾向は図-23のそれと似ていることが分かる。

また、図-25, 26はそれぞれ図-23, 24から载荷回数 N_c が20のときの液状化強度比 R_{DSS20} と余裕間隙比 e_r の関係に及ぼす初期せん断応力 τ_s の影響を調べた結果をまとめたものである。図-25から4種類の土とも初期せん断応力 τ_s が増加すると液状化強度 R_{DSS20} は低下するが、土の種類により低下の様子は異なっていることが分かる。

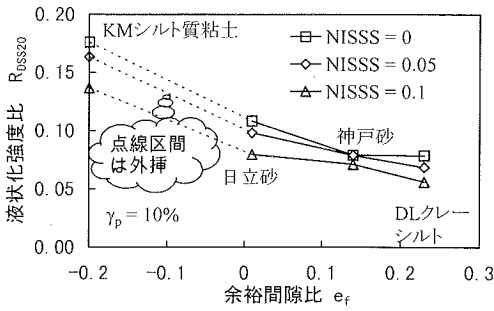


図-25 液状化強度比と余裕間隙比の関係 ($\gamma_p=10\%$)

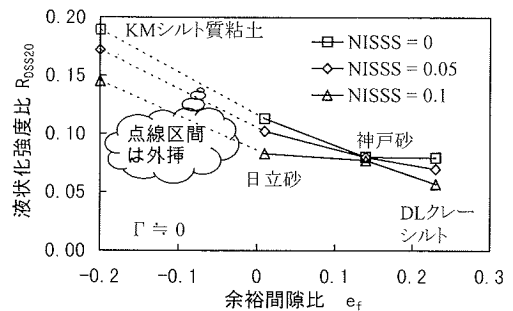


図-26 繰返し応力比と余裕間隙比の関係 ($\Gamma=0$)

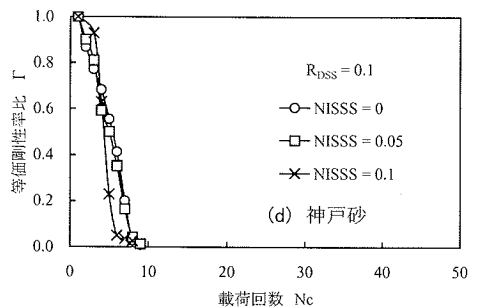
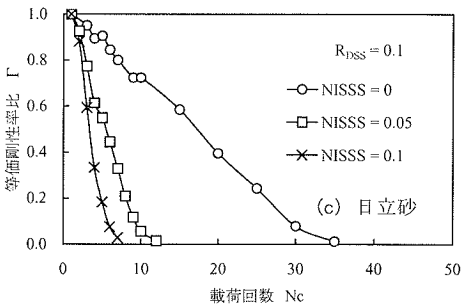
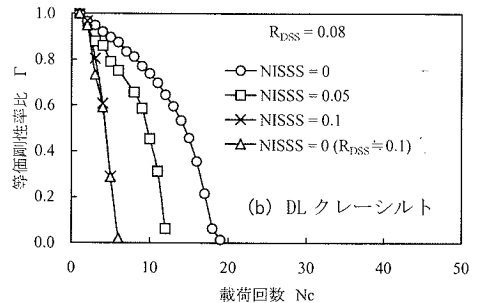
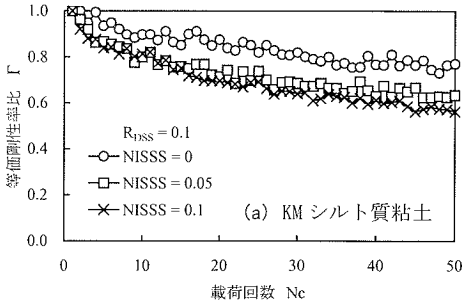


図-27 等価剛性率の低下に及ぼす初期せん断応力の影響

特に、KMシルト質粘土と日立砂の液状化強度比 R_{DSS20} の低下に及ぼす初期せん断応力比 NISS の影響はそれが小さい (NISS=0.05) ときにはあまり大きくないが、NISS が大きい (NISS=0.1) ときは影響が著しくなることが分かる。しかし、まき土は初期せん断応力比 NISS の影響があまりないことが分かる。DLクレーシルトは初期せん断応力比 NISS の増加により低下する液状化強度比 R_{DSS20} の低下は他の土より顕著であり、これから初期せん断応力比 NISS の影響が大きい土は DLクレーシルトであることが分かる。

(2) 等価剛性率に及ぼす初期せん断応力の影響

図-27 は等価剛性率比 Γ と 載荷回数 N_c の関係に及ぼす初期せん断応力 τ_s の影響を調べたものである。図-27 で DLクレーシルトを除く 3 種類の土は繰返

し応力比 R_{DSS} が約 0.1 であるが、DLクレーシルトは NISS を加えた後、0.1 の繰返し応力比 R_{DSS} を与えると供試体は破壊に至ったので、繰返し応力比 R_{DSS} を 0.08 までしか加えられなかった。

図-27 で KMシルト質粘土を除くと塑性指数がない 3 種類の土では NISS=0.1 の場合の等価剛性率比 Γ と 載荷回数 N_c の関係はほとんど類似しており、載荷回数 N_c が 10 以下の範囲で等価剛性率 Γ は急激に低下する傾向がある。一方、塑性指数 I_p が NP ではない KMシルト質粘土では等価剛性率 Γ は図-18 と同様にほとんど低下することはない。図-27(b) では DLクレーシルトの場合、NISS の増加による等価剛性率 G_{eq} の低下傾向は上に凸の形状を示しているが、日立砂と神戸砂はほぼ直線的に低下することが分かる。これに対し、KMシルト質粘土は載荷回数 N_c が 50 になっても

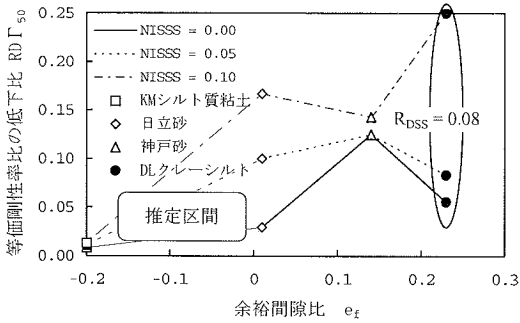


図-28 余裕間隙比と等価剛性率比の低下比に及ぼす初期せん断応力の影響

等価剛性率比 Γ は顕著に低下しない。図-28は図-27から得られた等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ と余裕間隙比 e_f の関係を示している。等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ の定義は図-5(d)で表している。図-28からNISSが増加すると等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ は増加することが分かるが、等価剛性率比の低下比 $RD \Gamma_{50}$ に及ぼすNISSの影響は土の種類によらないと考えられる。石原¹⁴⁾は相対密度 D_r が異なる土でも余裕間隙比 e_f が増加すると、繰返し応力比 R_{DSS} は低下するという指摘した。それを考慮する、図-28の結果は1つの余裕間隙比 e_f に対する結果であるが、異なる相対密度 D_r でも傾向はあまり変わらないことを示している。また、図-28はDLクレイシルトの剛性低下に及ぼす初期せん断応力の影響は他の土より著しいことを表わしている。

5. 結論

本研究は繰返し単純せん断試験によって非塑性シルトに対する繰返し強度と剛性の低下に及ぼす初期せん断応力の影響を調べ、余裕間隙比 e_f の概念に基づいた評価を試みた。以上、得られた結果は以下の通りである。

- 1) 非塑性シルトの液状化強度は他の砂質土より小さい。この原因は他の砂質土に比べて非塑性シルトの余裕間隙比が大きいためと考えられる。
- 2) 載荷回数増加による非塑性シルトの剛性の低下は他の土に比べて最も著しく、剛性低下に及ぼす初期せん断応力の影響も大きい。
- 3) 非塑性シルトは他の土より最大と最小間隙比の範囲が大きいため密な状態であっても余裕間隙比が大きくなる。したがって、非塑性シルトは液状化しやすく、また、初期せん断応力の増加によって剛性の低下が大きくなると考えられる。

- 4) 以上のように砂質土の液状化強度と繰返し剛性は従来慣用されている相対密度より、余裕間隙比によって統一的に説明できる可能性があるため、この点に注目したデータの集積が望まれる。

謝辞：本研究のうち、KMシルト質粘土、日立砂と神戸砂の単純せん断試験を行った平成9年度茨城大学大学院工学研究科修了の横川青児氏（現、不動建設）と小島淳氏（現、八千代エンジニアリング）に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) Stark, T. and Contreras, I.: Fourth avenue landslide during 1964 Alaskan Earthquake, *Journal of Geotech. and Geoenv.Eng.*, Vol. 124, No. 2, pp. 99-109, 1998.
- 2) Boulanger, M. W., Meyers, L., H., Mejia, L., H. and Idriss, I. M.: Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta Earthquake, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 146-158, 1998.
- 3) Holzer, T. L., Bennett, M., J., Ponti, D. J., and Tinsley, J.: Liquefaction and Soil Failure During 1994 Northridge Earthquake, *Journal of Geotech. and Geoenv.Eng.*, Vol. 125, No. 6, pp. 438-452, 1999.
- 4) Hamada, M., Isoyama, R., and Wakamatsu, K.: Liquefaction-induced ground displacement and its related damage to lifeline facilities, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp. 81-97, 1996.
- 5) 地盤工学会：1999年トルコ・コジャエリ地震，台湾・集集地震調査報告書，地盤工学会，2000(CD-ROM)。
- 6) 地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，現場技術者のための土と基礎シリーズ，20，土質工学会，1993。
- 7) Head, K.: *Manual of soil laboratory testing*, Vol. 1, 2nd ed., Pentech Press, London, 1992.
- 8) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，土質工学会，1990。
- 9) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，第一回改訂版，地盤工学会，2000。
- 10) 石原研而，渡辺忠雄：飽和土の液状化および粒度と間ゲキ比の影響，第7回土質工学研究発表会，313-316，1972。
- 11) Vaid, Y. P. and Chern, J. C.: Effect of Static shear on resistance to liquefaction. *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 1, pp.47-60, 1983.
- 12) Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. and Murata, H.: Undrained cyclic and monotonic triaxial behaviour of

- saturated loose sand. *Soils and Foundations*, vol. 34, No. 1, pp.19-32, 1994.
- 13) 内田昭彦, 鹿野秀馬, 時松孝次: 原位置凍結法で採取した砂試料の動的強度特性と静的排水せん断特性の関係, 第25回土質工学研究発表会, Vol.1, pp.767-768, 1990.
- 14) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版社, 1998.
- 15) 大島昭彦, 高田直俊, 住武人, 本郷隆夫: 砂の繰返し定体積一面せん断試験と繰返し非排水三軸試験の比較, 第33回地盤工学会発表会, Vol. 1, pp.721-722, 1996.
- 16) Tang, Y.X., Hanzawa, H. and Yasuhara, K: Direct shear and direct simple shear test results on a Japanese marine clay. *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Vol.1, pp.107-112, 1994.
- 17) 耐震工学委員会: ロマプリータ地震被害調査報告, 土木学会論文集, 第424/III-14, pp.19-68, 1990.
- 18) 土木学会: 1990年フィリピン・ルソン地震震害調査報告, 土木学会, 1993.

(2002.9.11 受付)

AN EVALUATION FOR CYCLIC SOFTENING OF NON-PLASTIC SILT USING THE CONCEPT OF VOLUME DECREASE POTENTIAL

Byung-Woong SONG, Kazuya YASUHARA,
Satoshi MURAKAMI and Hideo KOMINE

The purpose of this study is to investigate the influence of initial static shear stress (ISSS) on cyclic softening of non-plastic silt using volume decrease potential. Through comparing results from cyclic direct simple shear (DSS) tests, it was known for non-plastic silt that (1) although cyclic strength was smaller, cyclic softening of strength was faster, (2) maximum stiffness of non-plastic silt was not smaller than others, but decrement of stiffness with increasing the number of load cycles was more eminent, and the influence of ISSS on stiffness degradation was the largest among them, and (3) liquefaction feasibility of silty soils was explained in terms of the volume decrease potential as well as relative density.