

# 細粒分を含む砂質土の液状化特性と液状化強度評価 に関する一考察

矢島 寿一<sup>1</sup>・沼田 佳久<sup>2</sup>・中根 淳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 鉄建建設(株) 技術研究所 主任研究員 (〒286-0827 千葉県成田市新泉 9-1)

<sup>2</sup>正会員 鉄建建設(株) 技術研究所 研究員 (〒286-0827 千葉県成田市新泉 9-1)

<sup>3</sup>正会員 鉄建建設(株) 技術研究所 主任研究員 (〒286-0827 千葉県成田市新泉 9-1)

本研究では、細粒分を含む砂質土の液状化特性を調べるために、繰返し非排水三軸試験を行った。その結果、細粒分を含む砂質土のひずみ両振幅  $DA=5\%$ 、繰返し回数  $N_c=20$  で規定される液状化強度は、相対密度一定条件では細粒分含有率 20%付近で最小となることが判明した。しかし、この液状化強度評価方法では細粒分を含む砂質土の液状化強度をうまく評価していないことから、液状化強度評価方法に限界過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma'_{\text{cr}}$ )を用い液状化強度を検討した結果、ひずみ両振幅  $DA=5\%$ 、繰返し回数  $N_c=20$  や過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma'_{\text{cr}}$ )=95%の液状化強度評価方法よりも細粒分を含む砂質土の液状化強度をうまく評価できることが判明した。

*Key Words* : liquefaction, fines content, cyclic undrained triaxial test, pure water pressure

## 1. はじめに

地震時に生じる液状化現象は地盤やその上の構造物に大きな被害を生じさせることから、多くの研究が行われてきた。これら液状化現象解明のための研究の多くは粒径のそろったきれいな砂に対するものであった。しかし、1976年の唐山地震において、粒径  $D=0.075\text{mm}$  以下の細粒分を含む砂地盤でも液状化が生じることが知られるようになり、1987年の千葉県東方沖地震や1989年のロマ・プリエタ地震でも細粒分を含む砂地盤の液状化現象が確認されている<sup>1)</sup>。さらに、1995年の兵庫県南部沖地震においても細粒分を含む砂地盤が液状化を生じていることも明らかとなっている<sup>2)</sup>。

細粒分を含む砂質土の液状化特性に関する研究は近年、多くの研究が行われており、古関ら<sup>3)</sup>は、種類の異なる細粒分を豊浦砂に混入し液状化強度を調べ、細粒分の塑性指数が高いものほど液状化強度が高くなることを明らかにしている。また、黄ら<sup>4)</sup>はシルト含有率(0~100%)の異なる豊浦砂の液状化強度を調べ、相対密度一定条件ではシルト含有率30%で液状化強度が最小となることを明らかにし、この原因はシルト分含有率によるダイレイタンスの差であることを解明した。また、桑野ら<sup>5)</sup>は、カオリン粘土含有率(0~40%)の異なる豊浦砂の静的・動的非排水せん断試験を行い比較をしている。その結果、

粘土分含有率が増加すると静的せん断試験で供試体は強い収縮傾向を示し、液状化強度は粘土分含有率10~20%で最小となり、液状化強度と静的伸張強度には粘土分含有率によらずほぼ比例的関係があることを明らかにしている。さらに、佐藤ら<sup>6)</sup>はDLクレーの含有率(0~40%)の異なる豊浦砂と細粒分を含むまき土の細粒分含有率(0~40%)を調整したまき土の液状化特性を調べている。その結果、細粒分含有率の増加に伴う液状化強度の低下はCU試験での有効応力経路に見られるダイレイタンス特性の傾向と整合し、負のダイレイタンスを強く示す材料ほど液状化強度は小さくなること、また、骨格間隙比と細粒分間隙比が両方とも最大間隙比よりも大きくなるような範囲では液状化強度は大きく低下し、その範囲が広いほど液状化強度の低下率は大きくなることを明らかにした。

これら既往の研究での液状化強度評価方法はいずれもひずみ両振幅  $DA=5\%$ 、繰返し回数  $N_c=20$  回という従来の粒径のそろったきれいな砂に対する液状化強度評価方法に沿って行われたものである。しかしながら、細粒分を含む砂質土の繰返し載荷時の過剰間隙水圧挙動や軸ひずみ挙動は粒径のそろったきれいな砂のそれとは異なることが指摘されており、従来の液状化強度評価方法では問題が生じることが懸念される。

そこで、本研究では、粒径  $D=0.075\text{mm}$  以下を含

表-1 試料番号

TOYOURA						
試料番号	T100-00	T95-05	T90-10	T85-15	T80-20	T70-30
重量比(砂:細粒分)	100:0	95:5	90:10	85:15	80:20	70:30
塑性指数: $I_p$	NP	NP	NP	NP	NP	NP
$D_{50}$ (mm)	0.22	0.215	0.21	0.205	0.2	0.18
$D_{30}$ (mm)	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.075
$D_{10}$ (mm)	0.12	0.114	0.075	0.008	0.0027	0.0006
均等係数: $U_c$	1.83	1.89	2.84	25.6	74.1	300
曲率係数: $U_c'$	0.97	0.92	1.26	10.3	26.7	50.7
NARITA						
試料番号	N100-00	N95-05	N90-10	N85-15	N80-20	N70-30
重量比(砂:細粒分)	100:0	95:5	90:10	85:15	80:20	70:30
塑性指数: $I_p$	NP	NP	NP	NP	NP	NP
$D_{50}$ (mm)	0.31	0.305	0.3	0.28	0.27	0.24
$D_{30}$ (mm)	0.195	0.183	0.17	0.155	0.14	0.075
$D_{10}$ (mm)	0.138	0.12	0.075	0.008	0.0027	0.0006
均等係数: $U_c$	2.25	2.54	4.05	35	100	400
曲率係数: $U_c'$	0.89	0.92	1.3	10.7	26.7	38

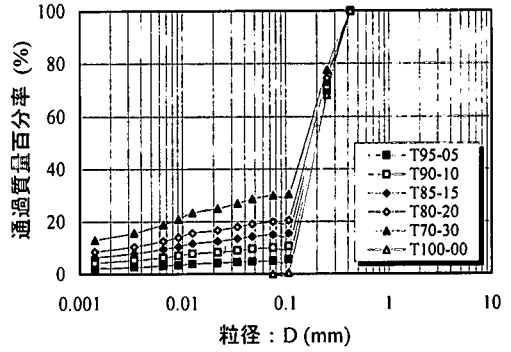


図-1 (b) TOYOURA シリーズの粒径加積曲線

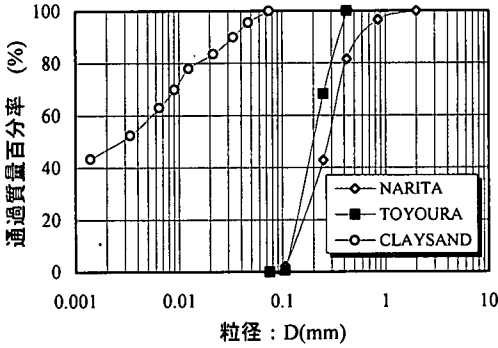


図-1 (a) 各試料の粒径加積曲線

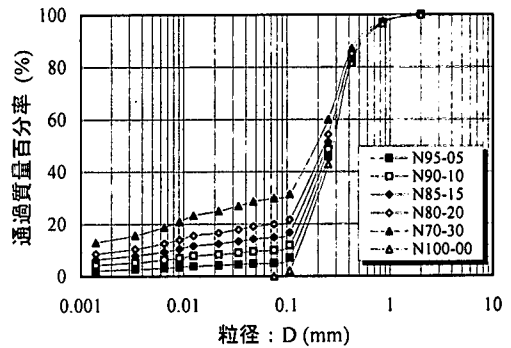


図-1 (c) NARITA シリーズの粒径加積曲線

まない豊浦砂と成田砂の2種類の砂に対して、粒径  $D=0.075\text{mm}$  以下の低塑性の Claysand を細粒分含有率調整して、細粒分含有率の異なる砂質土を作成し、この細粒分含有率の異なる砂質土の相対密度( $D_r$ )は昭和 62 年に飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会<sup>7)</sup>が行った一斉試験条件と同じ条件である  $D_r=70\%$ 一定とし、圧密非排水圧縮・伸張試験および圧密非排水繰返し三軸試験(液状化試験)を行って、細粒分含有率が液状化特性に及ぼす影響について調べた。また、この液状化試験結果をもとに、細粒分含有率が繰返し載荷時の過剰間隙水圧挙動や軸ひずみ挙動に及ぼす影響を調べ、現在の液状化強度評価方法であるひずみ両振幅  $DA=5\%$ 、繰返し回数  $N_c=20$  回や過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma'_v$ ) $=95\%$ が細粒分を含む砂質土の液状化強度を評価しているか検討を行い、今回新たに提案した限界過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma'_v$ ) $_{LT}$ による液状化強度の評価と比較を行った。

## 2. 試験方法

### (1) 使用材料

試験に使用した砂および細粒分は図-1 (a)の粒

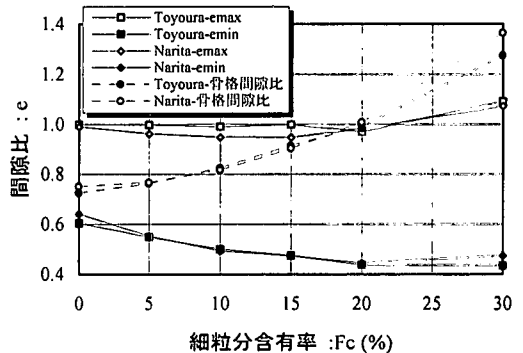


図-2 間隙比と細粒分含有率の関係

径加積曲線を持つ粒径( $D$ ) $=0.075\text{mm}$  以下を洗い流した豊浦砂と成田砂(千葉県成田市近郊より採取)および粒径( $D$ ) $=0.075\text{mm}$  以上を削除した低塑性の Claysand である。(Claysand とは  $D=0.075\text{mm}$  の粒径を主体とする低塑性の粉体状の粘性土である。)この豊浦砂と成田砂に Claysand を重量比で表-1 のように混合した。この各試料の粒径加積曲線は図-1 (b), (c) のようになり、試料番号を T100-00~T70-30(TOYOURA シリーズ), N100-00~N70-30(NARITA シリーズ)とした。

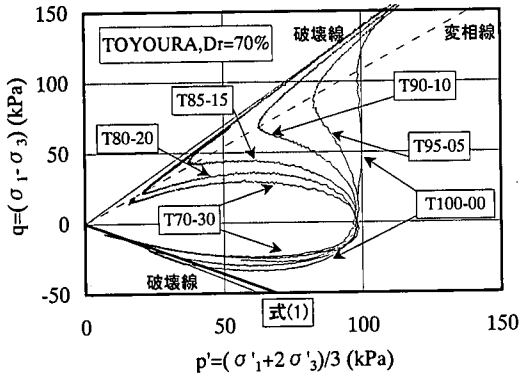


図-3 TOYOURAの有効応力経路

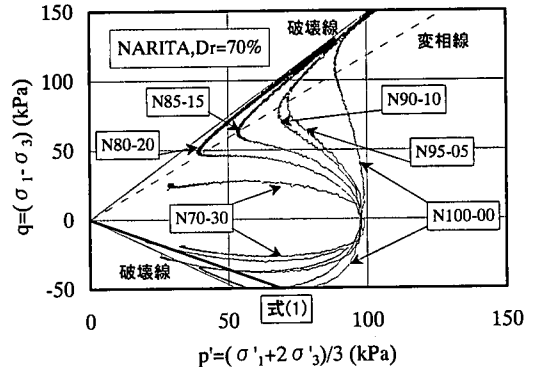


図-4 NARITAの有効応力経路

### (2) 供試体作成方法

砂の最大・最小密度試験(JGS T 161-1990)は細粒分含有率が10%を越えるような砂質土には適用範囲外であるが、本研究では細粒分含有率の異なる試料に対しても、この試験を行い、相対密度(Dr)を一定条件として供試体を作成した。各試料の最大間隙比( $e_{max}$ )と最小間隙比( $e_{min}$ )の関係を図-2に示す。

三軸試験に用いる供試体寸法は直径( $\phi$ )=50mm、高さ(H)=100mmである。供試体作成方法は振動台の上に二つ割りモールドをセットしたペダスタルを固定し、試料により異なる一定加速度を与えながら乾燥試料を所定の供試体作成用ルートより落下高さの無い状態で落下させ作成した。この供試体作成方法により、細粒分の飛散や土粒子の分級は最小限に押さえられた。

各試料供試体の相対密度(Dr)は等方圧密( $p=98\text{kPa}$ )後に  $Dr=70\%$ となるよう上記の供試体作成方法を繰返し行った。各試料供試体の細粒分と間隙部分を間隙とみなした骨格間隙比と細粒分含有率の関係を図-2に示す。

### (3) 試験方法

供試体を三軸室にセットした後、二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )を供試体内に流し供試体の飽和度を高め、供試体のB値は0.95以上となることを確認した。

試験は圧密非排水(CU)圧縮試験、圧密非排水(CU)伸張試験と圧密繰返し非排水三軸試験(液状化試験)を行い、全て圧密時の等方圧密圧( $p$ )は  $p=98\text{kPa}$ とした。CU圧縮および伸張試験での軸ひずみ速度は0.1%/minとした。また、繰返し試験での周波数は0.1Hzのsin波で載荷を行った。

### 3. 圧密非排水圧縮・伸張特性

細粒分を含む TOYOURA の圧密非排水圧縮・伸張試験時の有効応力経路( $q \sim p'$ 関係)を示すと図-3のようになり、圧縮側の有効応力経路は T95-05~T80-20 までは細粒分含有率が多い試料ほどせん断初期に有効応力経路が左側にシフトし、それ以降、破壊線(実線)に沿うように右側に上昇している。しかし、T70-30 では有効応力経路は最も左側にあるが破壊線に沿った有効応力経路の上昇は見られない。このことから、相対密度が  $Dr=70\%$ 一定条件で細粒分含有率( $F_c$ )が変化する砂質土のせん断時のダイレイタンスー挙動は  $F_c=30\%$ 以内の場合、 $F_c$ が大きくなるほど、せん断初期は負のダイレイタンスーを強く生じ、せん断が進むと  $F_c=20\%$ 以下では、正のダイレイタンスーに転じることがわかる。このダイレイタンスーの反転する部分をつなげた線を変相線と呼ぶが、変相線は細粒分含有率によらず一つの線(点線)で示されている。また、伸張側の有効応力経路は圧縮側同様、細粒分含有率が大きくなるほど、左側にシフトするがこの傾向は圧縮側のように明確には現れておらず、ゴムスリーブの張力補正を行い、供試体端面のフリクションカットは行わなかった今回の伸張試験結果からは伸張側の変相線は判定できなかった。

次に、NARITA の圧密非排水圧縮・伸張試験時の有効応力経路( $q \sim p'$ 関係)を示すと図-4のようになり、TOYOURA と同様に、圧縮側は細粒分含有率が大きくなるほど、せん断初期のダイレイタンスーは負のダイレイタンスーを強く生じ、せん断が進むと  $F_c=20\%$ 以下では、正のダイレイタンスーに転じている。

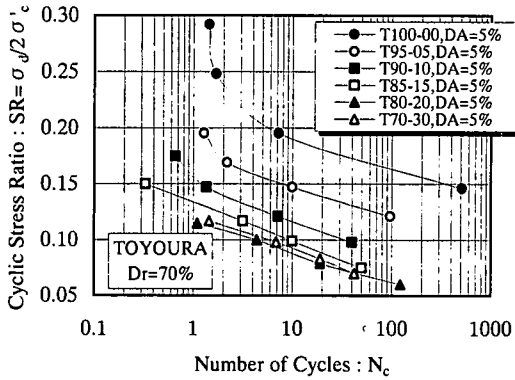


図-5 TOYOURA の繰返し応力比と繰返し回数の関係

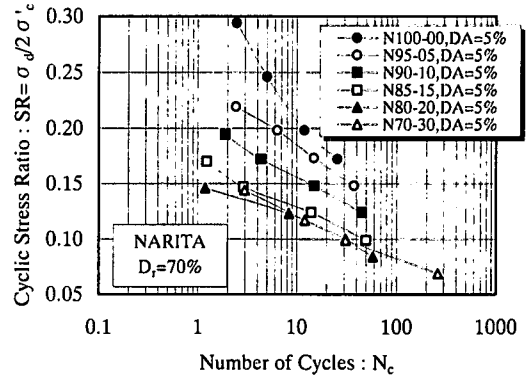


図-6 NARITA の繰返し応力比と繰返し回数の関係

#### 4. 液状化特性

##### (1) 液状化強度

液状化試験によって得られた相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件の TOYOURA と NARITA の繰返し応力比 (SR) と繰返し回数 ( $N_c$ ) の関係を図-5, 6 に示す。ここでの繰返し回数はひずみ両振幅 (DA) が  $DA=5\%$  時のものである。これより、TOYOURA, NARITA と繰返し応力比は細粒分含有率が大きくなるほど低下している。そこで、ひずみ両振幅が  $DA=5\%$  で繰返し回数が  $N_c=20$  回時の繰返し応力比 (液状化強度:  $SR_{20}$ ) と細粒分含有率 ( $F_c$ ) の関係を示したのが図-7 であり、これより、TOYOURA も NARITA も  $SR_{20}$  は  $F_c=20\%$  付近で最も小さくなっている。 $F_c$  の増加による  $SR_{20}$  の低下は、細粒分と空隙を間隙とみなした骨格間隙比の影響を受けていると考えられることから、骨格間隙比と細粒分含有率の関係を示すと図-2 のようになり、TOYOURA も NARITA も骨格間隙比は  $F_c=20\%$  で T100-00, N100-00 の最大間隙比  $e_{max}$  とほぼ等しくなっており、非常に緩い状態にあることがわかる。したがって、細粒分含有率 ( $F_c$ ) の増加に伴い細粒分を含む砂質土は図-3, 4 に示す有効応力経路に見られるように負のダイレイタンシーを強く示す材料となるため液状化強度が小さくなるものと考えられる。これらのことは、黄ら<sup>9)</sup> や佐藤ら<sup>10)</sup> の結果と一致しており、図-7 には既往の研究<sup>9,10)</sup> における細粒分 (粘土分) を含む砂質土の  $SR_{20}$  と  $F_c$  ( $C_c$ ) の関係も付記してあるが、これら既往の研究と本データは同様の傾向を示している。

##### (2) 時刻歴

液状化試験時の軸差応力 ( $q = \sigma_d$ )、過剰間隙水圧 ( $\Delta u$ )、軸ひずみ ( $\epsilon_s$ ) の時刻歴図を図-8 ~ 12 に示す。ここで、図-8 は T100-00 の  $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.195$ 、

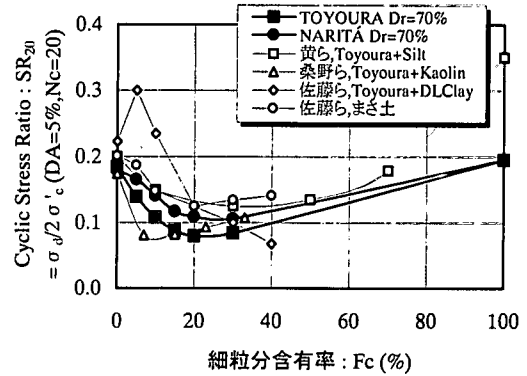


図-7 液状化強度と細粒分含有率の関係

図-9 は T80-20 の  $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.100$ 、図-10 は N100-00 の  $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.246$ 、図-11 は N80-20 の  $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.123$ 、図-12 は Claysand の  $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.225$  である。

これらの図から、細粒分含有率 ( $F_c$ ) が  $F_c=0\%$  の T100-00, N100-00 と細粒分含有率が  $F_c=20\%$  の T80-20, N80-20 では与えた軸差応力は異なるが過剰間隙水圧 ( $\Delta u$ ) と軸ひずみ ( $\epsilon_s$ ) 挙動に違いがある。すなわち、相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件の場合、細粒分含有率が  $F_c=0\%$  では、図-8, 10 に示すように、 $\Delta u$  は繰返し応力载荷とともに徐々に上昇し、ある点より急激に拘束圧付近まで増加する、その後、その波形は M 字のような挙動を繰返す。これと関連して、 $\epsilon_s$  は  $\Delta u$  が急激に増加する付近より大きくなり始め、これ以降徐々に大きくなる。一方、細粒分含有率が  $F_c=20\%$  となると、図-9, 11 に示すように、 $\Delta u$  は繰返し载荷とともに徐々に上昇し、ある点より急激に拘束圧付近まで増加する、その後、その波形は M 字のような挙動を示す。しかし、 $\epsilon_s$  は  $\Delta u$  が急激に増加する付近より大きくなるが、それ以降、 $\epsilon_s$  は  $F_c=0\%$  のように徐々に大きくなるはず、急激に大きくなってしまふ。このような  $\epsilon_s$  の

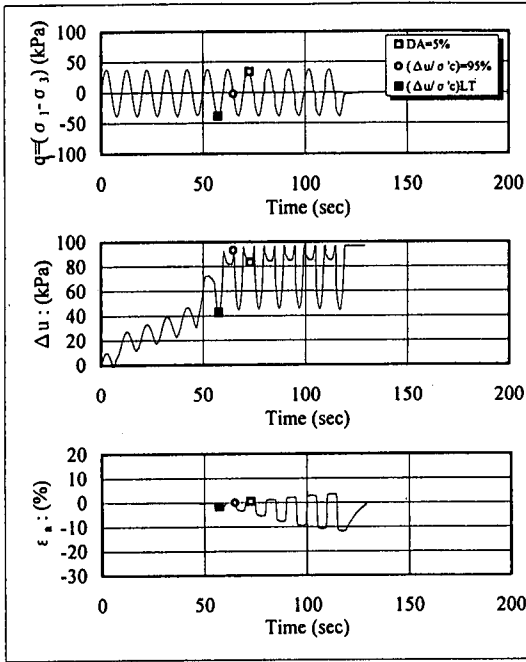


図-8 時刻歴図(T100-00,  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.195$ )

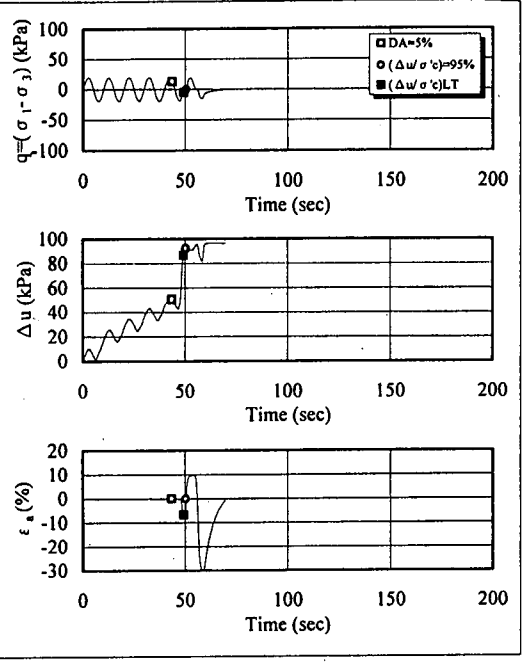


図-9 時刻歴図(T80-20,  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.100$ )

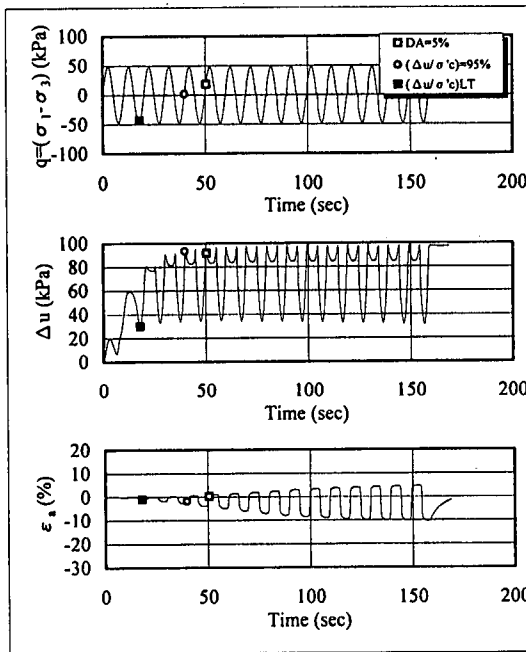


図-10 時刻歴図(N100-00,  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.246$ )

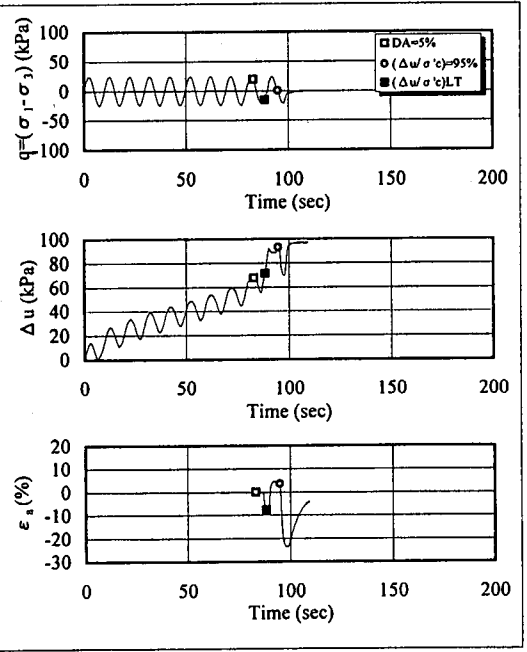


図-11 時刻歴図(N80-20,  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.123$ )

急激な増加挙動は図-12に示す Claysand( $F_c=100\%$ )の場合ではみられず、 $F_c=100\%$ での $\epsilon_v$ の挙動はどちらかというとならぬものに近いものである。したがって、相対密度が $Dr=70\%$ 一定条件の場合、過剰間隙水圧の上昇に伴う軸ひずみの急激な増大は細粒分含有率が $F_c=20\%$ 付近、すなわち、

液状化強度が最も小さくなる付近での挙動であり、これ以上 $F_c$ が増加した場合には、 $\epsilon_v$ の挙動は徐々に $F_c=100\%$ の挙動に近づくものと考えられる。そして、 $F_c=100\%$ での $\Delta u$ は繰返し荷重とともに上昇するがその値は拘束圧付近にはならない。

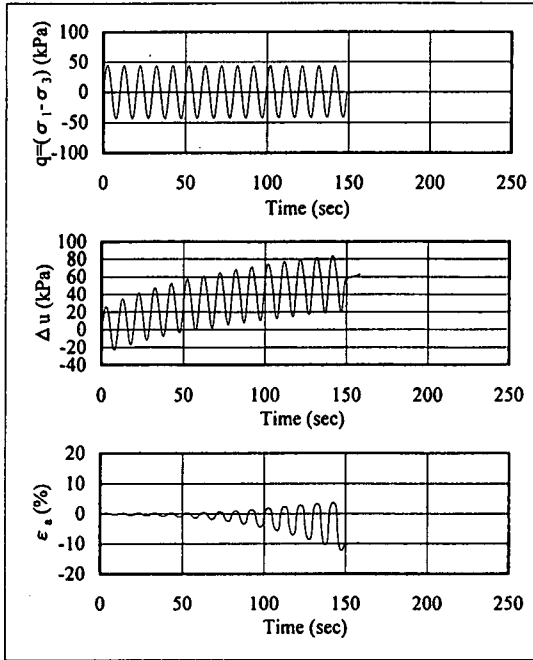


図-1 2 時刻歴図(Claysand,  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.225$ )

### (3) 有効応力経路

繰返し載荷時の有効応力経路( $q \sim p'$ 関係)を図-1 3~1 6に示す。ここで、図-1 3は T100-00 の  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.195$ 、図-1 4は T80-20 の  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.100$ 、図-1 5は N100-00 の  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.246$ 、図-1 6は N80-20 の  $\sigma_d/2\sigma'_c=0.123$  である。なお、図中には静的三軸試験(圧縮・伸張)の有効応力経路も示してある。

これらの図より、TOYOURA, NARITA とも相対密度が  $Dr=70\%$ 一定条件の場合、細粒分含有率が  $Fc=0\%$ では、繰返し載荷に伴い過剰間隙水圧( $\Delta u$ )が蓄積し、有効応力経路は変相線(図中点線)に近づいた時点で、破壊線に接したサイクリックモビリティへ移行している。これに対し、細粒分含有率が  $Fc=20\%$ となると、繰返し載荷に伴い過剰間隙水圧( $\Delta u$ )が蓄積するが、有効応力経路は変相線よりかなり遠い箇所より急激に破壊線に接している。そこで、ひずみ両振幅(DA)が  $DA=5\%$ の点(□点)に着目してみると  $Fc=0\%$ では、サイクリックモビリティ状態に達してからであるのに対し、 $Fc=20\%$ では、変相線よりもかなり遠い点である。

このように相対密度が  $Dr=70\%$ と一定条件下で細粒分含有率によって液状化特性が異なるのは次のようなメカニズムの違いによるものと考えられる。細粒分含有率が低い場合には、砂粒子間の接触が失わ

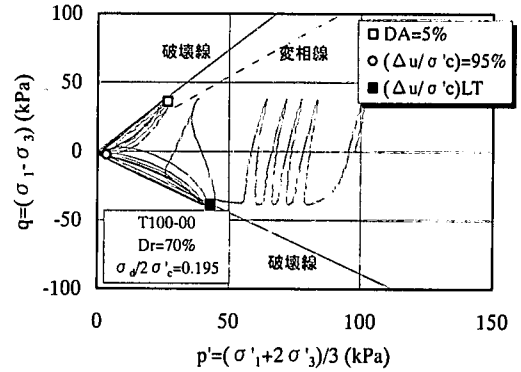


図-1 3 T100-00の有効応力経路

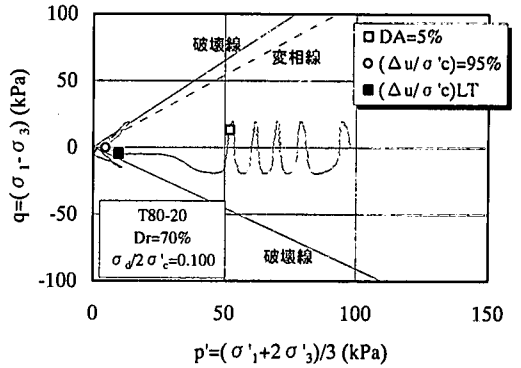


図-1 4 T80-20の有効応力経路

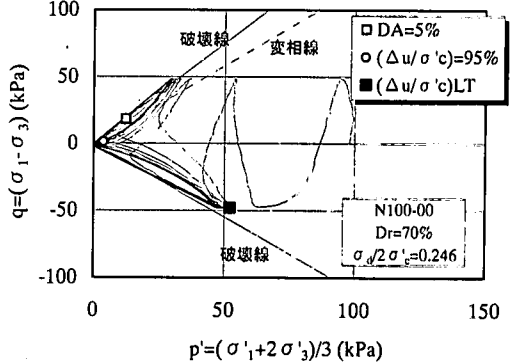


図-1 5 N100-00の有効応力経路

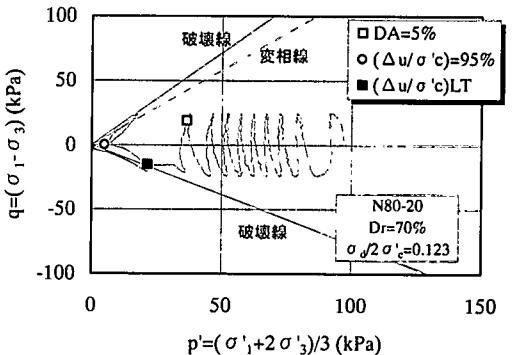


図-1 6 N80-20の有効応力経路

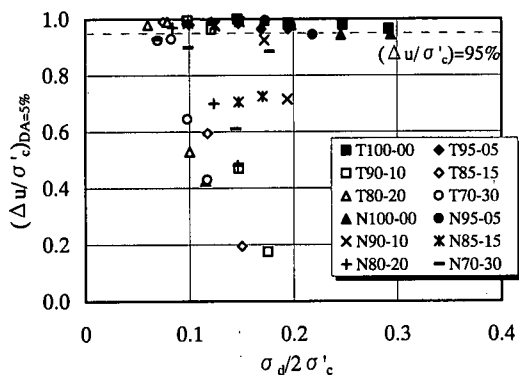


図-17  $(\Delta u/\sigma'_c)_{DA=5\%}$  と  $(\sigma_d/2\sigma'_c)$  の関係

れていないため、骨格がせん断に抵抗し、粒径のそろったきれいな砂と同様に過剰間隙水圧が拘束圧付近に上昇しても軸ひずみは徐々に増加する。したがって、DA=5%となるのはサイクリックモビリティ状態後となる。しかし、細粒分含有率が大きくなると、骨格間隙比からも明らかなように、砂粒子間の接触が失われはじめるため、骨格はある程度せん断に抵抗するが過剰間隙水圧の上昇により砂粒子間の接触が完全に失われてしまい、軸ひずみは急激に増加する。したがって、DA=5%となるのは有効応力経路で示すと変相線よりかなり遠い点となる。

## 5. 液状化強度評価

### (1) DA=5%と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ による評価

液状化強度を評価するための基準値は現在、ひずみ両振幅(DA)が DA=5%と過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)$ が $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ 等がある。そこで、時刻歴図に DA=5%と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ となる点をプロットしたものが図-8～11である。これらの図より、DA=5%(□点)と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ (○点)を比較してみると、T100-00, N100-00 では、DA=5%よりも $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ となる方が時間的に早く、繰返し回数(Nc)で言うと $(Nc)_{DA=5\%} < (Nc)_{(\Delta u/\sigma'_c)=95\%}$ となる。これに対し、T80-20, N80-20 では逆に、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ よりも DA=5%となる方が時間的に早く、繰返し回数は $(Nc)_{DA=5\%} > (Nc)_{(\Delta u/\sigma'_c)=95\%}$ となる。したがって、細粒分含有率(Fc)が Fc=0%では DA=5%の時点で $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ となっているのに対し、Fc=20%では DA=5%の時点で過剰間隙水圧比は $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ とはならず、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ となると軸ひずみ $(\epsilon_a)$ が大きく生じた点となる。そこで、細粒分含有率によって DA=5%時の過剰間隙水圧比がどのようになっているのかを $(\Delta u/\sigma'_c)_{DA=5\%}$ と繰返し応力比

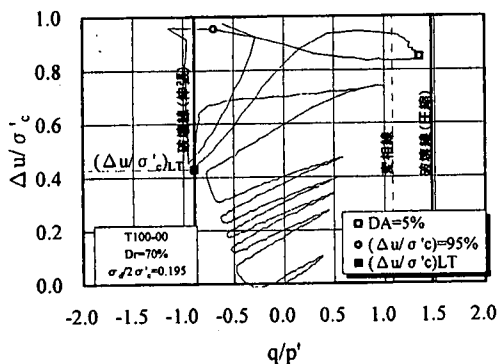


図-18 T100-00の $\Delta u/\sigma'_c$ と $q/p'$ の関係

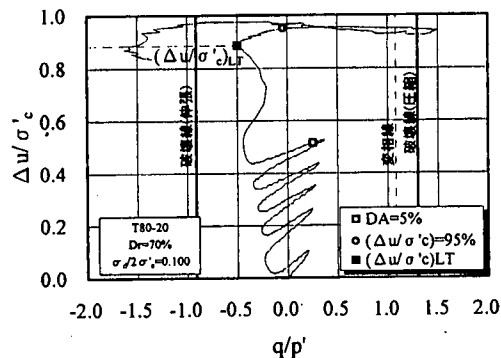


図-19 T80-20の $\Delta u/\sigma'_c$ と $q/p'$ の関係

$(\sigma_d/2\sigma'_c)$ の関係で示すと図-17のようになり、TOYOURA, NARITAとも細粒分含有率(Fc)が Fc=5%以内であれば過剰間隙水圧比は $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ 程度以上となっている。しかし、Fc=10%以上になると TOYOURA, NARITAとも DA=5%では過剰間隙水圧比は $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ 以上とならず、かなりばらついている。これらのことから、相対密度が Dr=70%一定条件の場合、細粒分含有率 Fc=5%以下の砂質土では、DA=5%となると $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ 以上となることから、液状化強度評価の基準値は DA=5%が妥当であると考えられる。しかし、Fc=10%以上となると、DA=5%では $(\Delta u/\sigma'_c)$ が低すぎて液状化状態に至らず、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ では液状化後の状態を示し、DAの値も大きなものとなってしまった。したがって、Fc=10%以上での液状化発生日は、DA=5%と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ の中間にあるものと考えられ、液状化強度評価の基準値を DA=5%も $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ も表現していないと考えられる。

### (2) 限界過剰間隙水圧比による評価

前節において相対密度が Dr=70%一定条件の場合、細粒分含有率(Fc)が Fc=10%以上の砂質土では、ひずみ両振幅 DA=5%や過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$

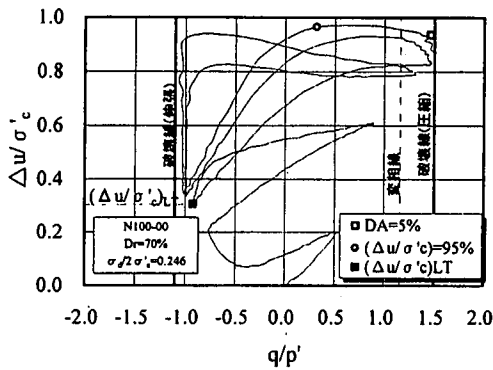


図-20 N100-00の $\Delta u/\sigma'_c$ と $q/p'$ の関係

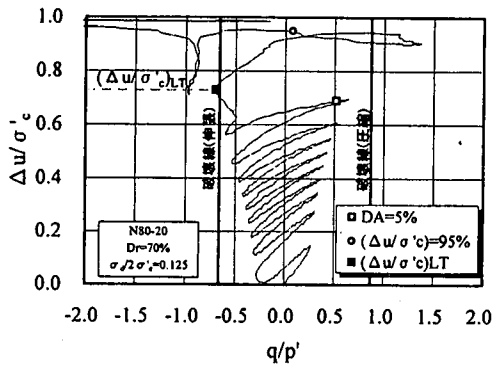


図-21 N80-20の $\Delta u/\sigma'_c$ と $q/p'$ の関係

が液状化強度評価を説明しておらず、 $F_c=10\%$ 以上の液状化発生点は $DA=5\%$ と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ の間にあることを示した。そこで液状化試験の結果を過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)$ と応力比 $(q/p')$ の関係で整理すると図-18~21のようになり、TOYOURA, NARITAとも繰返し載荷に伴い $\Delta u/\sigma'_c$ は上昇し、最終的には伸張側と圧縮側の破壊線に到達している。この状態の中で、過剰間隙水圧の挙動に着目すると、 $\Delta u/\sigma'_c$ は伸張側の破壊線付近の $q/p'$ に到達した時に急変し、そこから一挙に上昇して圧縮側の破壊線の $q/p'$ に至ることがわかる。この $\Delta u/\sigma'_c$ が急変する点は供試体が液状(流動)的な挙動を示す点であると考えられ、この点での過剰間隙水圧比をここでは限界過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ と呼ぶことにする。

この限界過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ が時刻歴図(図-8~11)や有効応力経路(図-13~16)においてどの位置にプロット(■点)されるかをみると、時刻歴図ではT100-00, N100-00とも時間的には $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT} < (\Delta u/\sigma'_c)=95\% < DA=5\%$ となり、繰返し回数 $(N_c)$ は $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ が一番少なくなる。しかし、T80-20, N80-20では $DA=5\% < (\Delta u/\sigma'_c)_{LT} < (\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ となり、 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ 時の繰返し回数 $(N_c)_{LT}$ は $DA=5\%$ よりも大きく、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ よ

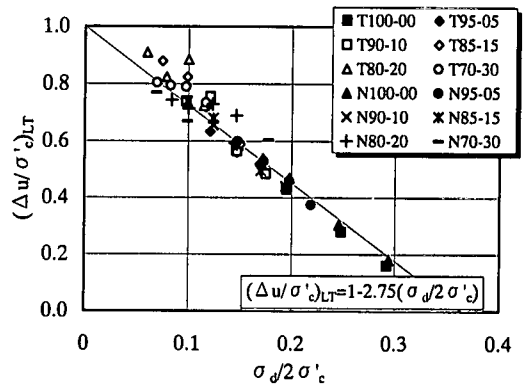


図-22  $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ と $(\sigma'_v/2\sigma'_c)$ の関係

りも小さくなっている。また、有効応力経路では、T100-00, N100-00とも $DA=5\%$ は圧縮側の破壊線付近、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ は原点付近、 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ は伸張側の破壊線付近となっている。しかし、T80-20, N80-20では $DA=5\%$ は破壊線より遠い点、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ は原点付近であり、 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ は $DA=5\%$ と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ の中間で伸張側の破壊線付近を示している。以上のことから、限界過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ は相対密度が $Dr=70\%$ 一定条件の場合、細粒分含有率が $F_c=10\%$ 以上での $DA=5\%$ と $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$ の間にある液状化発生点を示しており、相対密度が $Dr=70\%$ 一定で $F_c=10\%$ 以上の砂質土の液状化強度を評価しているものと考えられる。

そこで、相対密度が $Dr=70\%$ 一定条件で細粒分含有率が $F_c=10\%$ 以上での、限界過剰間隙水圧比 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ と繰返し応力比 $(\sigma'_v/2\sigma'_c)$ の関係を示すと図-22のようになり、 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ と $\sigma'_v/2\sigma'_c$ の間には、一義的な関係が得られ、この関係は式(1)で表される。

$$(\Delta u/\sigma'_c)_{LT} = 1.275 \sigma'_v/2\sigma'_c \quad (1)$$

この関係は与える繰返しせん断力において、算出される過剰間隙水圧以上の間隙水圧が発生した場合に土は液状(流動)的な動きをしていることを意味している。しかし、式(1)については、細粒分の塑性指数が低塑性で相対密度が $Dr=70\%$ 一定の場合に適用できるものである。

また、式(1)と破壊線との関係を見るために式(1)を $q \sim p'$ 面上に描くと図-3, 4のようになり、当然、式(1)は伸張側の破壊線の内側に示され、今回は判定できなかった伸張側の変相線付近を示している。しかし、今回提案した式(1)は限られた条件下で適用されるものであり、破壊線や変相線は砂、細



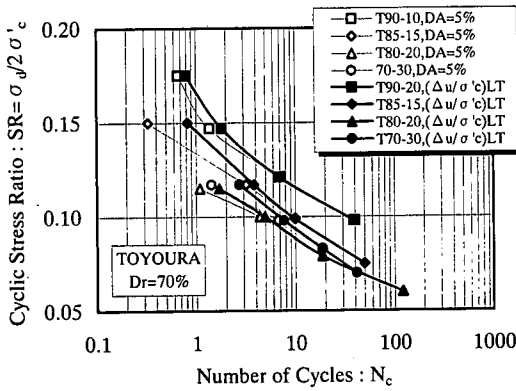


図-2 3 TOYOURA の  $\sigma_d/2\sigma'_c$  と  $N_c$  の関係

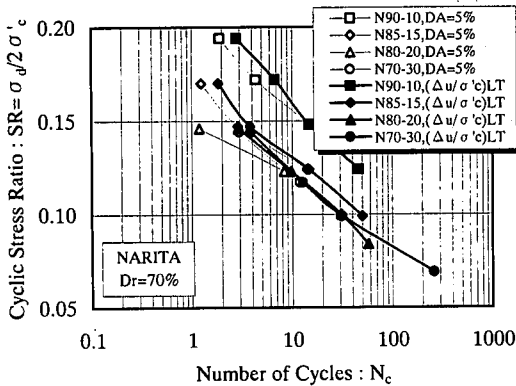


図-2 4 NARITA の  $\sigma_d/2\sigma'_c$  と  $N_c$  の関係

粒分の種類や相対密度等によって変化するものであるから、式(1)の一般性を検討するためには今後多くの砂や砂質土に対して試験を行う必要がある。

この限界過剰間隙水圧比( $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ )を液状化強度評価のための基準値とし、細粒分含有率が  $F_c=10\%$  以上の場合の繰返し応力比(SR)と繰返し回数( $N_c$ )の関係が  $DA=5\%$  と比較して示すと図-2 3, 2 4 のようになり、TOYOURA, NARITA とも SR は繰返し回数( $N_c$ )が  $N_c=10$  回以上では  $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$  と  $DA=5\%$  に差はないが、 $N_c=10$  回以下となると  $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT} > DA=5\%$  となり、特に地震時に想定される繰返し回数  $N_c=20$  回以下について、SR は  $F_c=10\%$  以上では  $DA=5\%$  より大きな液状化強度(SR)を得られる。

## 6. まとめ

本研究では相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件で細粒分含有率( $F_c$ )を  $F_c=0\sim 30\%$  の範囲で変化させた砂質土の液状化特性と液状化強度評価について検討を行い、明らかになったことをまとめると以下ようになる。  
 (1) 細粒分を含む砂質土の圧縮非排水圧縮・伸張試験の結果、相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件の場合、細

粒分含有率( $F_c$ )を大きくすると有効応力経路はせん断初期において負のダイレイタンスを強く示す、この原因は、骨格間隙比を調べた結果、骨格間隙比が  $F_c=0\%$  の最大間隙比( $e_{max}$ )以上になり、砂粒子の構造が緩い状態になるためであることがわかった。

(2) 細粒分を含む砂質土の液状化試験の結果、相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件の場合、細粒分含有率( $F_c$ )が大きくなると、ひずみ両振幅  $DA=5\%$ 、繰返し回数  $N_c=20$  回での液状化強度( $SR_{20}$ )は低下し、負のダイレイタンスを強く示す  $F_c=20\%$  で最小となることが判明した。

(3) 細粒分を含む砂質土の液状化強度評価の規定値をひずみ両振幅  $DA=5\%$  と過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma'_c$ )= $95\%$ で行ったが、相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件の場合、細粒分含有率( $F_c$ )が  $F_c=5\%$  以下であればこの規定を適用できるが、 $F_c=10\%$  以上となると  $DA=5\%$  では  $(\Delta u/\sigma'_c)$  が低すぎて液状化状態に至らず、 $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$  では液状化後の状態を示し、この2つの規定値では  $F_c=10\%$  以上の液状化強度を評価していないことが判明した。

(4) 液状化試験時の挙動を過剰間隙水圧比( $\Delta u/\sigma'_c$ )と応力比( $q/p'$ )の関係で整理すると、相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件の場合、細粒分含有率に関係なく、 $\Delta u/\sigma'_c$  は伸張側の破壊線付近の  $q/p'$  に到達した時に急変し、そこから一挙に上昇して圧縮側の破壊線の  $q/p'$  に至る供試体が液状(流動)的な挙動を示す点が存在し、この点の過剰間隙水圧比をここでは限界過剰間隙水圧比( $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ )と呼ぶ。

(5) 相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件で、細粒分含有率( $F_c$ )が  $F_c=10\%$  以上の限界過剰間隙水圧比( $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ )を示す点は時刻歴図、有効応力経路では  $DA=5\%$  と  $(\Delta u/\sigma'_c)=95\%$  の中間であり、液状化発生点を示しており、 $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$  は  $F_c=10\%$  以上の細粒分を含む砂質土の液状化強度を評価しているものと考えられる。

(6) 相対密度が  $Dr=70\%$  一定条件で細粒分含有率が  $F_c=10\%$  以上での、限界間隙水圧比( $(\Delta u/\sigma'_c)_{LT}$ )と繰返し応力比( $\sigma_d/2\sigma'_c$ )の間には一義的な関係が得られた。

## 参考文献

- 1) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp.17~22, 1991.
- 2) 建設省土木研究所: 平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告, 土木研究所報告, 第196号, 1996.
- 3) 古関潤一, 石原研而, 藤井光久: 細粒分を含む砂の三軸液状化試験, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.595~596, 1986.

- 4) 黄大振, 柳沢栄司, 菅野高弘: シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp.25 ~ 33, 1993.
- 5) 桑野二郎, 飯村博忠, 中澤博志, 杉原弘一: 粘土分含有が砂質土の非排水繰返しせん断特性に及ぼす影響, 粘性土の動的性質に関するシンポジウム発表論文集, (社)地盤工学会, pp.143~148, 1995.
- 6) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.271~282, 1997.
- 7) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会: 飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, (社)土質工学会, pp.1~35, 1988.

(1998. 4. 24 受付)

## A STUDY ON LIQUEFACTION STRENGTH EVALUATION METHODS AND LIQUEFACTION PROPERTIES OF FINE CONTAINING SAND

Juichi YAJIMA, Yoshihisa NUMATA and Atsushi NAKANE

Undrained triaxial tests were performed on fine containing sands in order to investigate the effects of fine fraction on the liquefaction properties of sand. The results show that the liquefaction strength, which is determined by the double amplitude axial strain  $DA = 5\%$ , and the number of cycles  $N_c = 20$ , takes the minimum value when the fine fraction is about 20%, if the relative density remains constant. This method, however, does not effectively evaluate the liquefaction strength of fine containing sand. Therefore, the authors investigated an alternative evaluation method using the limit excess pore water pressure ratio  $(\Delta u/\sigma'_c)_{L.T.}$ . The latter method is judged more effective for evaluating the liquefaction strength of fine containing soil than the conventional method.