

# 限界繰返し回数による原位置砂地盤の 三軸液状化強度の簡易予測法

岡本正広\*・越智健三\*\*

本論文では、細粒含有率の違う2種類の砂を用いて、非排水繰返しせん断試験を実施し、再構成砂と不攪乱砂の液状化特性の違いについて考察を加えると共に、原位置砂地盤の三軸液状化強度を簡易的に予測する方法について述べている。この方法は、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  および余裕間隙比  $V_d$  という2つのパラメータを用いて、砂の基本的物理特性から液状化強度曲線を想定するものであり、ほぼ初期液状化に対応する両振幅軸ひずみが2%の場合には砂の基本的性質の違いによる液状化特性を概ね予測することができる。

**Key Words** : liquefaction, cyclic undrained shear, sand, density, grain size

## 1. はじめに

原位置砂地盤の液状化抵抗を求めるには、不攪乱試料を採取して、原位置の有効応力状態で圧密した供試体を用いて非排水繰返し単純せん断試験を実施するのが最も直接的である。

しかし、原位置における砂の液状化抵抗を求める目的で試料を採取する場合には、その試料の密度だけでなく微視構造をも変えないで採取する必要がある<sup>1)</sup>。

そのため、このような極めて良質な砂の不攪乱試料の採取が試料採取技術の進歩とともに可能となったもの<sup>2),3)</sup>、現状ではこの方法は非常に高価であること、また高度な技術を要することなどから、不攪乱試料を採取して液状化強度を求める方法が広範囲な地域全体を評価できるほど数多く実施される例は少ない。

通常は、数多く実施される標準貫入試験や物理試験結果から、いわゆる簡易判定法を用いて原位置液状化強度を推定する方法が採られている<sup>4)</sup>。また、広い範囲を対象にして液状化の予測を行う場合には、このような多数のボーリングデータを用いて簡易な解析を数多く行う方が精度的に高い予測が行える場合もある。

現在、液状化の判定方法は各種の方法<sup>5)-8)</sup>が提案されており、調査の目的・範囲・レベル、あるいは対象構造物の規模・種類等を考慮して利用する必要がある。これらの方法は、基本的には  $N$  値などから相対密度  $D_r$  を想定し、 $D_r$  から三軸液状化強度あるいは繰返し単純せん断強度を推定するか、相対密度を介在させないで、直接、三軸液状化強度を推定する方法である。

したがって、原位置砂地盤の地震時単純せん断強度を推定するには、さらに図-1に示すプロセスを用いるこ

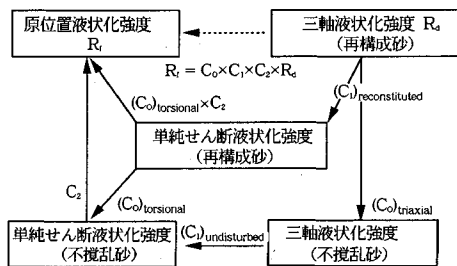


図-1 三軸液状化試験から原位置液状化強度を推定するプロセス

とになる。ここで、図中の  $C_0$  は再構成砂から不攪乱砂への補正係数であり、いわゆる  $C_3 \times C_4$  である<sup>9)</sup>。  $C_1$  は繰返し三軸強度から繰返し単純せん断強度への補正係数であり、  $C_2$  は正弦波荷重から不規則波荷重への補正係数である<sup>9)</sup>。これらの補正係数の実験的および理論的研究は、数多くなされるようになってきたものの、工学的適用性については未だ未確定な部分が多い。

一方、これらの補正係数を用いず、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  を用いて応力比  $SR$  - 繰返し回数  $N_c / (N_c)_{cr}$  関係(強度曲線)自体を直接求める方法は、室内再構成砂において有効な手段であることが龍岡らによって確認されている<sup>9)</sup>。

本研究では、まず細粒含有率の違う2種類の砂を用いて不攪乱砂と再構成砂の非排水繰返し三軸およびねじりせん断試験を実施し、上述した補正係数  $C_0$  および  $C_1$  を検証した。次に、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  および余裕間隙比  $V_d$ <sup>10)</sup> という2つのパラメータを用いて、原位置砂地盤の三軸液状化強度を砂の基本的性質から簡易的に予測する方法について検討した。

## 2. 試料および試験方法

### (1) 試料の物理的性質

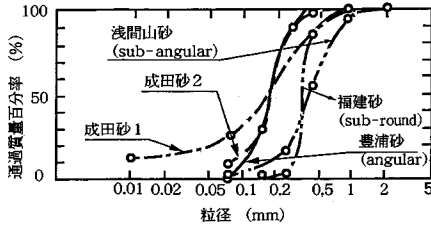
本研究に用いた不攪乱試料は、千葉市郊外の2ヶ所に

\* 正会員 東急建設(株) 技術本部土木技術部  
(〒150 渋谷区渋谷1-15-21 ボーラ渋谷ビル8F)

\*\* 正会員 東急建設(株) 技術本部技術研究所

表一 試料の物理的性質<sup>(11), (12)</sup>

	豊浦砂	福建砂	浅間山砂	成田砂1	成田砂2
$G_s$	2.64	2.65	2.71	2.663	2.702
$D_{50}$ (mm)	0.16	0.35	0.39	0.15	0.17
$U_s$	1.46	1.33	2.44	62.1	2.25
$e_{max}$	0.977	0.888	0.918	1.286	1.035
$e_{min}$	0.605	0.572	0.564	0.763	0.619
$F_s$ (%)	0.0	0.0	2.41	25.3	9.06



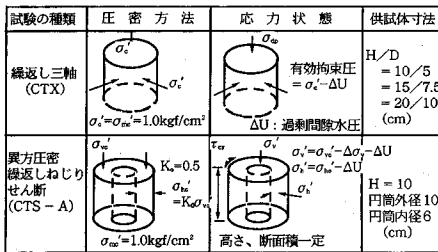
図一 試料の粒度特性<sup>(11), (12)</sup>

表二 実施した試験の種類

試験の種類 (略称)	供試体寸法 高さH 直径D (cm)	成田砂1 再構成砂			成田砂2 再構成砂		
		不 攪乱	AP	WT OCR 1.0 1.5 2.0	不 攪乱	AP	WT
繰返し 三軸	H/D=10/5	●	●	●	●		
	H/D=15/7.5			●	●		●
	H/D=20/10			●	●		
繰返し ねじり	H/D=10/10 内径6	●	●	●			

●: 今回実施した試験

AP: 空中落下法 WT: 不飽和突固め法



図三 試験方法及び応力状態

において、ほぼ水平に堆積した均一な砂層からブロックサンプリングによって採取した。試験に用いた砂、および液状化特性を比較した他の3種類の砂の物理的性質と粒径加積曲線を表一および図一に示す<sup>(11), (12)</sup>。

今回試験を行った砂は、74  $\mu\text{m}$  以下の細粒分を25%以上も含む成田砂1試料と豊浦砂の粒径加積曲線と比較的似ているが、細粒分を9%含む成田砂2試料の2種類である。均等係数  $U_s$  はそれぞれ62.1と2.25であり、成田砂1試料の均等係数は、他の4種類の砂と比較してかなり大きい。

(2) 供試体の準備方法と試験方法

表二および図三に今回行った試験の種類および応力状態・方法を示す。本研究では不攪乱砂および再構成砂の供試体について非排水繰返し三軸およびねじり単純せん断試験を実施した。それぞれの供試体は以下のように作製した。

不攪乱砂は、ブロックサンプリングによって採取したので三軸用供試体はブロックからトリマーで切りだし、成形した後、シールをして凍結保存した。ねじり用供試体は、ブロックごと凍結させ、試験時にダブルコアカッターで切り出したものをマイターボックスで成形した。解凍は、三軸セルにセットした供試体に負圧0.1  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  (9.81 kPa) をかけた状態で行った。

また、再構成供試体は、不飽和突固め法 (WT法) で作製し、広い範囲の供試体密度で試験を行った。成田砂1試料について空中落下法 (AP法) でも作製した。WT法を採用した主な理由は、細粒分を含む砂では最も高い密度が得られ、また前もって軸方向に応力履歴を与えるため、ひずみが極度に伸長側に片寄ることなく比較的等方的な粒子構造を持つ供試体が作製できるからである。

以上の方法で作製した供試体は、炭酸ガスを透過し、脱気水を通水後、背圧を三軸試験では  $\sigma_{BP}=2.0$  (196.2 kPa)、ねじり試験では1.0  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  (98.1 kPa) 加え、スケンプトンの  $B$  値  $\geq 0.98$  とした。その後、三軸試験では有効拘束圧  $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  (98.1 kPa) で等方圧密後、またねじり試験では  $\sigma'_{nc}=0.75 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  (73.6 kPa) で等方圧密後、軸荷重を増加させて異方圧密 ( $K_0 = \sigma'_{nc}/\sigma'_{vc}=0.5$ ,  $\sigma'_{mc}=1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  (98.1 kPa))、軸方向変位を拘束した平面ひずみ状態で、非排水繰返しせん断を行った。載荷周波数は  $f=0.1 \text{ Hz}$  である。また、同様に作製した供試体について排水三軸試験も実施した。

3. 試験結果

(1) 排水三軸試験結果

図一四にWT法で再構成砂と不攪乱砂の排水三軸試験結果を示す。図一四によれば、拘束圧  $\sigma'_c=2.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  (196.2 kPa) の場合のように、不攪乱試料の密度より、より密に再構成試料を作製すると、両者の間には明確な排水せん断特性の相違は認められない。

軸ひずみ～体積ひずみの関係でも不攪乱試料と再構成試料とはほとんど違いは認められない。これは、再構成試料の負のダイレタンシー特性を不攪乱試料と同じにした吉見らの結果と同様の傾向である<sup>(13)</sup>。

しかし、拘束圧  $\sigma'_c=1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  (98.1 kPa) の場合のように不攪乱試料と同程度の密度で作製した再構成試料と不攪乱試料との間には明らかに違いが認められる。

吉見らは、細粒分のない気乾状態の砂を空中落下法で作製し、軸ひずみが0.1%程度生じるように3万回の軸差応力を与えて負のダイレタンシー特性を不攪乱試料と同じにしているが、今回のように細粒分を多量に含む成田砂のような場合には、圧密後の間隙比を少し密な状態に設定し、供試体を不飽和突固め法で作製すると、不攪乱試料とほぼ同じ負のダイレタンシー特性を与えるよう

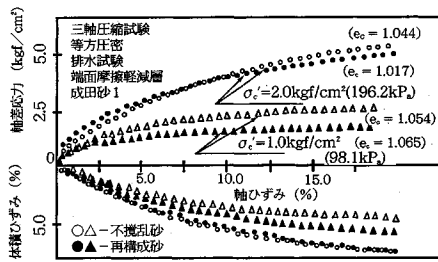


図-4 排水試験結果

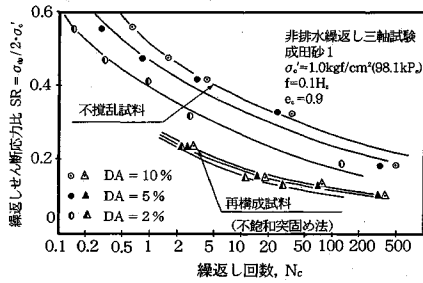


図-6 応力比-繰返し回数の関係

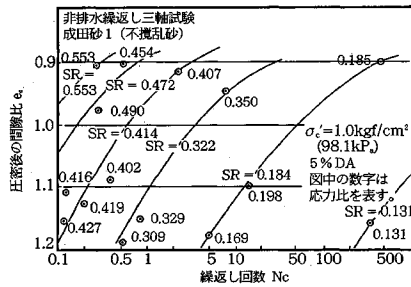


図-5 不攪乱砂の試験結果 (DA=5%の場合)

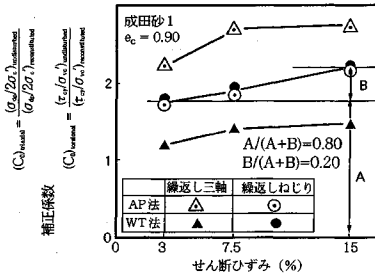


図-7 補正係数  $C_0$  とせん断ひずみとの関係

である。

(2) 非排水繰返し試験結果

a) 不攪乱砂と再構成砂の液状化強度の関係

図-5に不攪乱砂の典型的な試験結果例として成田砂1試料の三軸液状化試験結果(両振幅軸ひずみ5%の場合)を示す。図-5に示すように、不攪乱砂でも圧密後の間隙比にかなりのバラツキがあることから、ひずみレベル(5% DAの他に2%, 10% DA)に応じた強度曲線から、代表的な間隙比として  $e_c = 0.9$  のときの応力比-繰返し回数の関係を求めれば、図-6の如くなる。

そこで、三軸およびねじりせん断試験においてこのようにして求めたある間隙比の応力比-繰返し回数の関係より、繰返し回数  $N_c = 4 \sim 21$  回の範囲において再構成砂から不攪乱砂への補正係数  $C_0$  ( $C_3 \times C_4$ )<sup>9)</sup> を求めて、図-7に示す。ここで言う  $C_0$  とは、不攪乱砂の応力比を再構成砂のそれで除した値である。また、 $N_c = 4 \sim 21$  回は、従来の方法(Seed, 石原らの方法)<sup>14), 15)</sup>で液状化強度を定義するのに用いられてきた範囲である。

図-7より、補正係数  $C_0$  は、三軸試験の場合、供試体作製法(堆積構造)の影響を受け、統一的に表わすことができないが、ねじりせん断試験の場合には、ほぼ統一的に表わすことができ、補正係数  $C_0$  は明らかにひずみレベルが大きくなると増加する傾向にある。ここに、ねじりせん断試験の場合、両振幅せん断ひずみ DA 3% は、いわゆる初期液状化に対応しており、図中に示すAの部分は負のダイラタンシーが不攪乱砂と再構成砂の間で異なることによるものと考えられる。また、Bの部分は、不攪乱砂と再構成砂でサイクリック・モビリ

ティーが異なることによるもので、両振幅せん断ひずみ DA 15% における  $C_0$  の値の約20%を占めており、原位置の液状化強度を過小評価しないためにはAの部分の負のダイラタンシーばかりでなく、B部分も無視できないことを示している。

このように、同一の密度にもかかわらずダイラタンシー効果に差が生じる原因としては不攪乱砂が長期  $K_0$  圧密や応力履歴などによるセメンテーションにより部分的なブロック化現象が生じ、このブロック間でのダイラタンシーが生じるため、あたかもより高い密度の試料をせん断しているような結果として表われてきたものと考えられる<sup>16)</sup>。その模式図を図-8に示す。

以上のように考えると、再構成砂の間隙比を不攪乱砂のそれよりも、より密にして非排水繰返し試験を行えば、不攪乱試料の三軸液状化強度を推定できる可能性がある。

図-9は、図-5に示すような各ひずみレベルにおける間隙比-繰返し回数の関係から再構成砂と不攪乱砂の応力比-間隙比の関係を求めたものであり、また図-10はこの関係を軸ひずみに対応して示したものである。図-10より、今回の試料の場合、再構成砂の三軸液状化強度から不攪乱試料のそれを推定しようとするときには、再構成砂の間隙比を約1/1.25にすれば推定できるようなのである。

b) 三軸液状化強度に及ぼす過圧密履歴の影響

図-11は、成田砂1の試料について繰返し回数  $N_c = 10$  で両振幅軸ひずみがそれぞれ DA 2, 5, 10% 生じるときの応力比と過圧密比 O.C.R との関係を示したもの

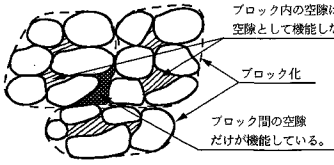


図-8 不攪乱砂の見掛けの高密度化現象の模式図

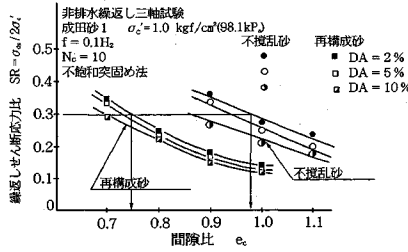


図-9 応力比～間隙比の関係

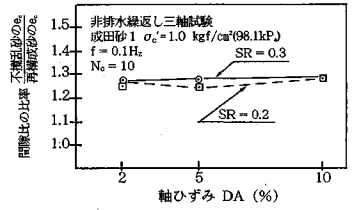


図-10 不攪乱砂と再構成砂の間隙比の比率と軸ひずみとの関係

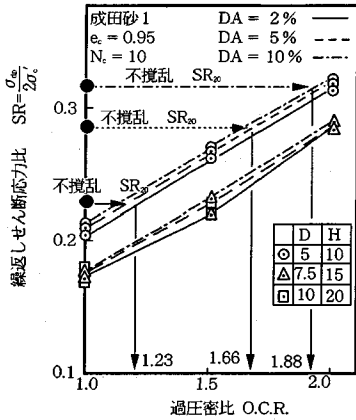


図-11 過圧密比と応力比の関係

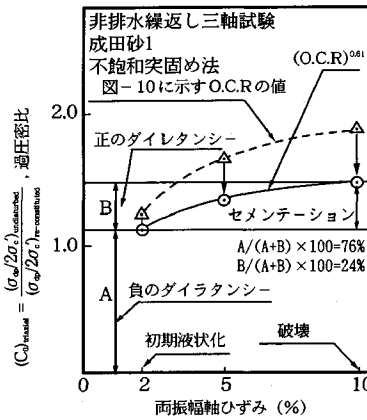


図-12 不飽和固締め法で作製した供試体の補正係数  $C_0$  とひずみとの関係 (O.C.R. との比較)

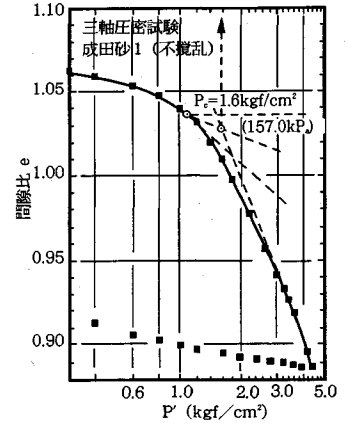


図-13 三軸圧密試験結果 (不攪乱試料)

である。不攪乱成田砂1については、表-1に示すように直径5cmの供試体で三軸液状化試験を実施しているので、メンブレンペネトレーションの影響を考慮し、同一直径の5cmの場合で不攪乱砂と再構成砂で比較すると、不攪乱砂の両振幅軸ひずみDA2, 5, 10%の応力比に対応するO.C.R.はそれぞれ1.23, 1.66, 1.88である。

図-12は、このO.C.R.と図-7に示すWT法で作製した再構成試料の結果から求めた補正係数 $C_0$ と比較したものであり、 $C_0$ はO.C.R.に対しては下式で与えられる。

$$(C_0)_{\text{triaxial}} = \frac{(\sigma_{dp}/2\sigma_c')_{\text{undisturbed}}}{(\sigma_{dp}/2\sigma_c')_{\text{reconstituted}}} \doteq (O.C.R.)^{0.61} \quad \dots \dots \dots (1)$$

一方、不攪乱試料を用いて三軸条件下で等方圧密試験を実施した結果を図-13に示す。図-13より圧密降伏応力を求めれば、 $P_c = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$  (157.0 kPa)である。試料採取位置の掘削前の有効上載圧は、図-23に示すように、 $\sigma_v' = 1.6 \times 6.0 \doteq 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  (98.1 kPa)であることより、原位置砂地盤の過圧密比は、 $(O.C.R.)_F = P_c / \sigma_v' = 1.6 / 1.0 = 1.6$ であると想定され、両振幅軸ひずみ5%のO.C.R.=1.66と良く対応している。したがって、原位置砂地盤の過圧密比O.C.R.が求まれば、補正係数 $C_0$ を予測できる可能性がある。

c) 三軸液状化強度とねじりせん断液状化強度との関

係

図-14にはねじりせん断試験の両振幅せん断ひずみが7.5% DA (三軸試験では5% DA) 生じるときの、繰返し回数 $N_c$ と補正係数 $C_1$ との関係を示したものである。ここに、補正係数 $C_1$ は、動的単純せん断強度と繰返し三軸強度との比である。

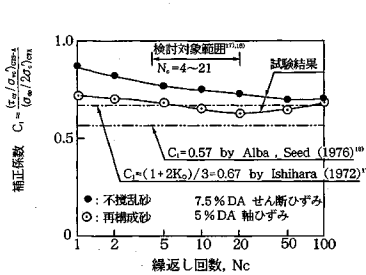
図中には $C_1 = (1 + 2K_0) / 3 = 0.67$  ( $K_0 = 0.5$ )の石原らの理論値<sup>17)</sup>、 $C_1 = 0.57$ のAlba, Seedらの実験値<sup>18)</sup>を示した。図-14によれば、再構成砂の $C_1$ は、 $N = 4 \sim 21$ 回の範囲では石原らの理論値 $C_1 = 0.67$ にほぼ対応しているが、不攪乱砂の場合には、繰返し回数の小さいところ、すなわち応力比の大きいところでは、これらの値は $C_1$ の値を過小評価しているようである。

これは、三軸試験の伸張状態において、応力比が大きくなると不攪乱供試体の変形の非一様性、すなわち、強度の強い部分と弱い部分との差が大きいことが反映し、いわゆるネッキング現象(強い部分は変形せず、弱い部分に変形が片寄る)が生じるため、三軸液状化強度を過小評価したためであると考えられる。

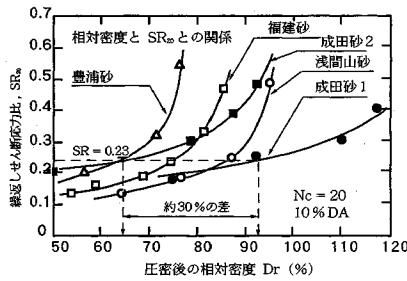
#### 4. 再構成砂の非排水繰返し試験における応力比～繰返し回数関係

##### (1) 相対密度を指標とした液状化強度

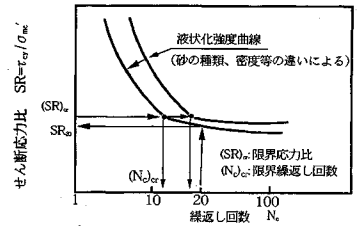
図-15は、相対密度を指標とした液状化強度 $SR_{20}$ を



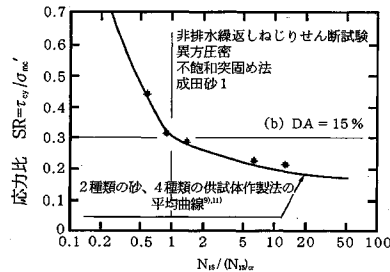
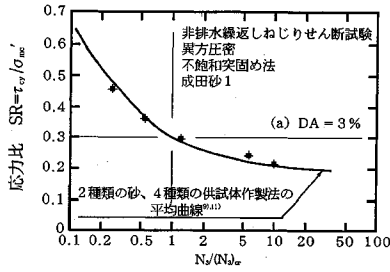
図一14 補正係数  $C_1$  と繰返し回数  $N_c$  との関係



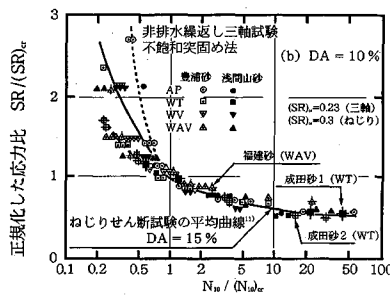
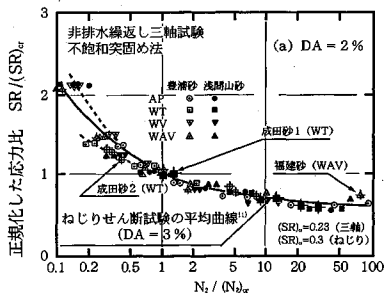
図一15 応力比  $SR_{20}$  と相対密度との関係<sup>9), 19)</sup>



図一16 限界繰返し回数の説明図<sup>9)</sup>



図一17 ねじりせん断試験における  $SR \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係



図一18 三軸試験における  $SR / (SR)_{cr} \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係

5種類の砂についてそれぞれ示したものである<sup>9), 19)</sup>。ここで言う  $SR_{20}$  は、繰返し回数20回で両振幅軸ひずみ  $DA 10\%$  を生じるときの応力比である。なお、相対密度を求めるための  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  は土質工学会基準<sup>20)</sup>によって求めた。

図一15より、細粒分を含まない豊浦砂、浅間山砂、福建砂の3種類の砂において、 $SR_{20}$  は0.23付近から急激に増加する傾向があり、相対密度の少しの増加に対して強い非線形性を示す。細粒分を含む2つの試料にも、これほど強い非線形性ではないが同様の傾向が認められる。

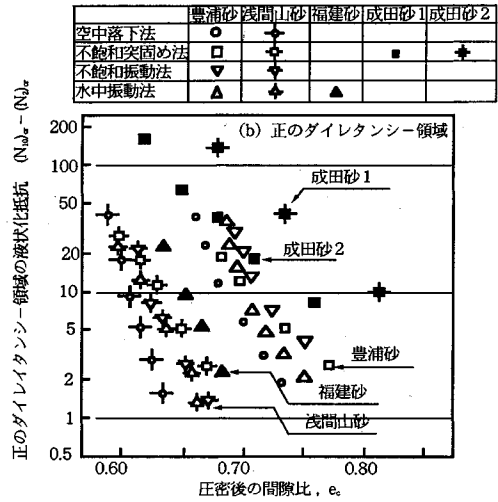
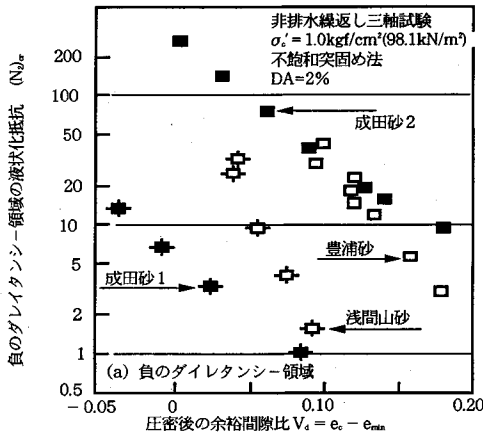
そこで、このときの相対密度を5種類の砂で比較すると豊浦砂や成田砂2試料と成田砂1試料とでは約30%の差があり、砂の種類の影響が大きく、 $Dr > 60\%$  という密な範囲では相対密度を指標として  $SR_{20}$  を簡便に表現することはかなり困難である。

(2) 限界繰返し回数を指標とする液状化強度

龍岡ら<sup>9), 21)</sup>が提案している限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  と

は、図一16に示すように特定の応力比(限界応力比  $(SR)_{cr}$ )に対応する繰返し回数である。この限界繰返し回数を用いて砂の繰返し非排水強度曲線を整理すると、砂の種類、供試体作製法、密度等によらず一義的に表すことができ、強度曲線が最も異なったように見える部分の特徴をとらえた方法であり、この部分に対応する応力比を限界応力比としている。図一17(a), (b)は、龍岡らの実験結果<sup>9), 21)</sup>に今回のねじりせん断試験結果を加えたものであり、それぞれ両振幅せん断ひずみ3, 15%において、応力比  $SR = \tau_{cr} / \sigma'_{cr}$  と限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$ 、 $(N_{15})_{cr}$  で正規化した繰返し回数  $N_c / (N_c)_{cr}$  との関係を示したものである。少なくとも3種類の砂の4種類の試料作製法に対して、ねじりせん断試験から得られる  $SR \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係は一義的に決定できるようである。

そこで、ねじりせん断試験における  $SR \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係の平均曲線を用い、ねじりせん断試験と同一の砂、同一の試料作製法による三軸試験結果と比較した



図一19 液状化抵抗と間隙比との関係

結果を図一18に示す。(a)には両振幅軸ひずみ2% DAの場合を、(b)には軸ひずみ10% DAの場合を示す。また同図には中国福建砂の結果<sup>11), 12)</sup>も示した。

これらの図は、三軸試験では  $(SR)_{cr} = (\sigma_{dp} / 2\sigma'_c) = 0.23$  で、ねじりせん断試験では、 $(SR)_{cr} = (\tau_{cg} / \sigma'_{mc}) = 0.30$  で応力比  $SR$  を正規化している<sup>9), 21)</sup>。図一18(a)よりいわゆる初期液状化に概略一致する両振幅軸ひずみ2%に対しては、ねじりせん断試験の  $SR / (SR)_{cr} \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係との差はあまり大きくない。ところが、図一18(b)の両振幅軸ひずみ10%に対しては試料作製法により、三軸試験の  $SR / (SR)_{cr} \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係の形が異なってくる。すなわち、空中落下法では  $\log N_c / (N_c)_{cr} < 1$  における勾配  $|\delta(SR / (SR)_{cr}) / \delta(\log N_c / (N_c)_{cr})|$  は、三軸試験の方がねじり試験より大きく、他の試料作製方法では逆に小さくなっている。したがって、三軸試験における  $SR / (SR)_{cr} \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  の強度曲線は、供試体作製法の影響を受け、空中落下法では過大評価、他の方法では過小評価する可能性があるが、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  は、砂の液状化抵抗の指標となりうると考えられる。

### 5. 砂の液状化抵抗の指標 $(N_c)_{cr}$ の予測法

以上述べたように、三軸試験において限界繰返し回数を用いて表した強度曲線  $SR / (SR)_{cr} \sim \log N_c / (N_c)_{cr}$  関係は、DA=10%においては供試体作製法の影響を受け、空中落下法では過大評価、他の方法では過小評価する可能性があるが、初期液状化に対応する DA=2% においては砂の種類および密度に関係なく一本の曲線として表わされるとしても実用上さしつかえないと判断される。

したがって、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  を砂の液状化抵抗を表わす指標とすれば、 $(N_c)_{cr}$  が求まると砂の種類や密度にかかわらず、砂の液状化抵抗が基本的曲線の形と

して表現することができる。

そこでここでは、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  の特性について考察を加える。限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  は、図一16に示すように砂の種類、密度等によって種々変化するものであるから、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  を考える上では砂の種類の違いに加え、もう一つの要素として、密度との関係を考える必要がある。

液状化強度と密度との関係を考えるとき、いわゆる初期液状化までに相当する負のダイレタンシー効果とサイクリック・モビリティ現象において観察される正のダイレタンシー効果とに分けて考える必要がある。

そこで、三軸試験における限界応力比として図一15より応力比  $(SR)_{cr} = 0.23$  を採用し、この载荷応力比に対して供試体密度との関係をそれぞれ調べてみた。

図一19(a)は、概略初期液状化に対応する両振幅軸ひずみ DA 2% が生じるまでの限界繰返し回数  $(N_2)_{cr}$  と余裕間隙比  $V_d$ <sup>10)</sup> の関係を示したものである。余裕間隙比  $V_d$  は、土質工学会基準に基づく最小間隙比  $e_{min}$  を用いて、次式より求めた。

$$V_d = e_c - e_{min} \dots \dots \dots (2)$$

また、図一19(b)は、両振幅軸ひずみ DA 2% から DA 10% に至るまでの繰返し回数  $\{(N_{10})_{cr} - (N_2)_{cr}\}$  と圧密後の間隙比  $e_c$  との関係を示したものである。

図一19より各々の物理的性質の異なった5種類の砂の正のダイレタンシー領域の液状化抵抗は、限界繰返し回数  $(N_c)_{cr}$  を用いて表わすと、砂の密度そのものに依存するようであり、同様に、負のダイレタンシー領域の液状化抵抗は、砂の余裕間隙比に依存するようである。

なお、ここでは概略初期液状化に対応する両振幅軸ひずみ DA 2% が生じるまでを負のダイレタンシー領域とし、両振幅軸ひずみ DA 2% から10%に至るまでを正のダイレタンシー領域と称している。また、負のダイレ

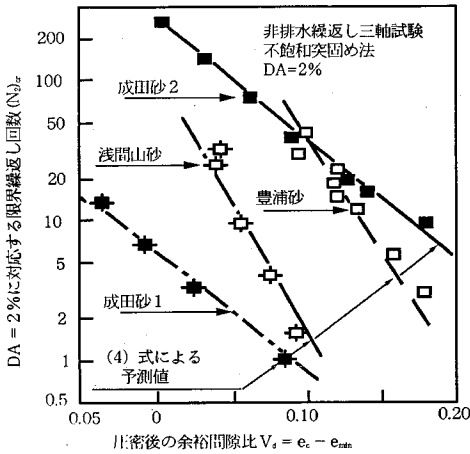


図-20 負のダイレイタンス領域の液状化抵抗の実験値と予測値の比較

タンシー領域では余裕間隙比を、正のダイレイタンス領域では間隙比をそれぞれ採用した理由は、 $(N_{2})_{cr}$ あるいは $\{(N_{10})_{cr} - (N_{2})_{cr}\}$ をほぼ直線関係で表わすことができたからである。

これらの関係は、細粒分を多量に含む砂と含まない砂では、明らかに直線の傾きが異なっている。

したがって、たとえば、豊浦砂とほぼ同じ平均粒径の成田砂2試料と豊浦砂との強度特性の違いを評価するには、平均粒径  $D_{50}$  だけでなく他の要因も考慮する必要がある。

そこで、この関係を定式化するために、平均粒径  $D_{50}$  の他に、細粒分含有率  $F_c$  と均等係数  $U_c$  の2つの要因を考慮して、正のダイレイタンス領域、および負のダイレイタンス領域の液状化抵抗を表わす限界繰返し回数をそれぞれ予測してみた。

その結果、正のダイレイタンス領域の液状化抵抗は、前述したように供試体作製法の影響を受け、ややバラツキが見られるものの、以下に示す式(3)で、また、負のダイレイタンス領域の液状化抵抗は、式(4)で予測できるようである。なお、両式はそれぞれ表-1に示す各試料の  $D_{50}$ 、 $F_c$ 、 $U_c$  と  $\{(N_{10})_{cr} - (N_{2})_{cr}\}$  との関係、あるいは  $(N_{2})_{cr}$  との関係より、その平均勾配を求めて導いたものである。

$$\begin{aligned} & \{(N_{10})_{cr} - (N_{2})_{cr}\} \\ & = \exp(-4.40 \cdot D_{50} - 0.23 \cdot F_c + 0.07 \cdot U_c + C) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $F_c \leq 5\%$  のとき  $C = -15.4 \cdot e_c + 12.5$

$F_c > 5\%$  のとき  $C = -9.3 \cdot e_c + 10.5$

$$(N_{2})_{cr} = \exp(-4.57 \cdot D_{50} - 0.14 \cdot F_c + 0.01 \cdot U_c + C) \quad (4)$$

ここに、 $F_c \leq 5\%$  のとき  $C = -16.7 \cdot V_d + 4.0$

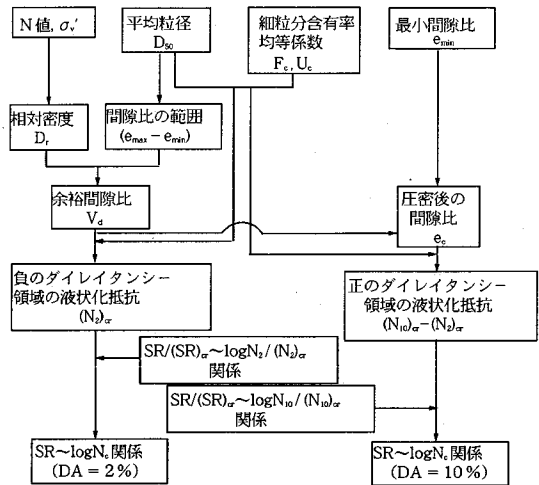


図-21 限界繰返し回数を用いて原位置砂の三軸液状化強度を求めるフロー

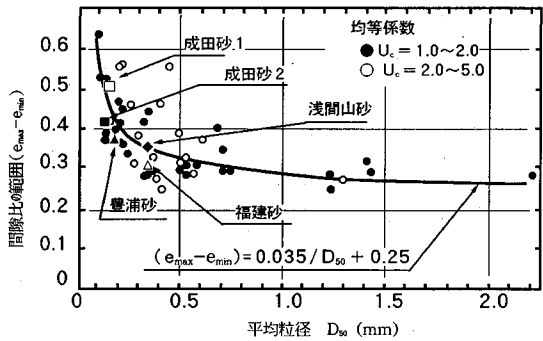


図-22 平均粒径  $D_{50}$  と間隙比の範囲  $(e_{max} - e_{min})$  との関係<sup>10)</sup>

$$F_c > 5\% \text{ のとき } C = -8.6 \cdot V_d + 4.5$$

図-20は、負のダイレイタンス領域の液状化抵抗  $(N_{2})_{cr}$  を予測式、式(4)で求め、実験値と比較したものであり、両者はかなり良く一致しており、初期液状化に対応する両振幅軸ひずみ2%の液状化抵抗は、砂の基本的物理特性(ここでは平均粒径、細粒分含有率、均等係数)を用いて予測することができよう。

## 6. 原位置砂地盤の三軸液状化強度の簡易予測法<sup>22)</sup>

### (1) 予測法

上述したように、三軸強度から単純せん断状態への補正係数は、今回実施した再構成砂ならびに不攪乱砂の試験結果、あるいは豊浦砂の試験結果<sup>23)</sup>から石原らの理論式<sup>17)</sup>で表わすことができる。したがって原位置の不攪乱砂の三軸液状化強度が予測できれば、不規則波形に対する問題を除けば、原位置砂地盤の液状化抵抗が推定可能となる。そこでここでは、砂の基本的性質(ここでは、平均粒径  $D_{50}$ 、細粒分含有率  $F_c$ 、均等係数  $U_c$ )から、原位置砂地盤の三軸液状化強度を予測する方法について

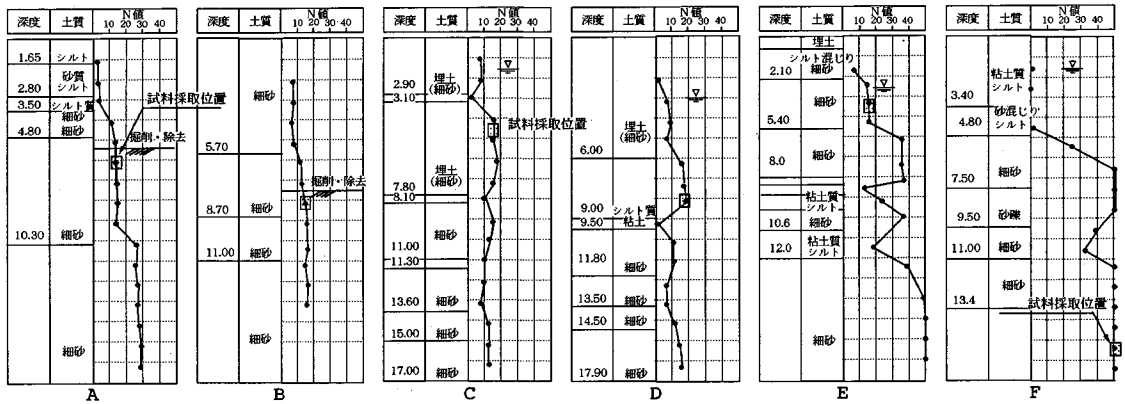


図-23 原位置試験採取位置の土質性状と N 値分布

述べる。

そのフローを図-21 に示す。以下、その方法について概略説明する。

- ① まず、砂の平均粒径  $D_{50}$ 、細粒分含有率  $F_c$ 、均等係数  $U_c$  を粒度試験を行って求める。
- ② 次に、土質工学会基準<sup>20)</sup>に基づいて最小間隙比  $e_{min}$  だけを求める。ただし、細粒分含有率  $F_c < 5\%$  の場合に限らない。なお、最大間隙比  $e_{max}$  は、主に以下に示す 2 つの理由から求めない。
  - 1) 最大間隙比  $e_{max}$  の求め方は土質工学会の基準になっているものの、その求め方はかなり難しく、個人的誤差が入りやすい。
  - 2) 簡易予測法であるから極力実施する試験は少なくしたい。
- ③ 標準貫入試験の N 値より、原位置の砂の相対密度をマイヤホフの式より推定する。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{(\sigma'_v + 0.7)}} \quad (\%) \quad (\sigma'_v: \text{kgf/cm}^2) \dots (5)$$

$D_r \geq 60\%$  の密な砂に対しては、下式に示す国生らの方法<sup>24)</sup>より推定する。

$$D_r = 36 \times \left( \frac{N}{\sigma'_v + 1.5} \right)^{0.37} \quad (\%) \quad (\sigma'_v: \text{kgf/cm}^2) \dots (5')$$

- ④ 砂の平均粒径  $D_{50}$  から最大間隙比と最小間隙比の範囲 ( $e_{max} - e_{min}$ ) を図-22 に示す関係から推定する<sup>10)</sup>。この場合、 $D_{50}$  と ( $e_{max} - e_{min}$ ) との関係は次式で表わすことができる。

$$(e_{max} - e_{min}) = 0.035/D_{50} + 0.25 \dots (6)$$

- ⑤ ③および④より余裕間隙比  $V_d$  を次式から求める。
- $$V_d = e_c - e_{min}$$
- $$= (1 - D_r) (e_{max} - e_{min})$$
- $$= \left( 1 - 0.21 \sqrt{\frac{N}{(\sigma'_v + 0.7)}} \right) \cdot (0.035/D_{50} + 0.25)$$
- ..... (7)

$$V_d = \left( 1 - 0.36 \times \left( \frac{N}{\sigma'_v + 1.5} \right)^{0.37} \right) \cdot (0.035/D_{50} + 0.25)$$

( $D_r \geq 60\%$ )

..... (7')

- ⑥ ⑤で求めた余裕間隙比  $V_d$  と①で求めた砂の平均粒径  $D_{50}$ 、細粒分含有率  $F_c$ 、均等係数  $U_c$  から、式 (4) を用いて負のダイレタンシー領域の液状化抵抗 ( $N_2$ )<sub>cr</sub> を推定する。
  - ⑦ 次に図-18 (a) に示すように正規化した繰返し回数  $N_c/(N_c)_{cr}$  と応力比  $(SR)/(SR)_{cr}$  の強度曲線を用いて、⑥で求めた限界繰返し回数 ( $N_2$ )<sub>cr</sub> と限界応力比  $(SR)_{cr} = 0.23$  より、ある応力比に対する繰返し回数を求めれば応力比～繰返し回数の関係が得られる。次に、破壊に相当する両振幅軸ひずみ  $DA = 10\%$  の場合の応力比～繰返し回数の関係は以下のようにして求める。
  - ⑧ ⑤で求めた余裕間隙比  $V_d$  と②で求めた最小間隙比  $e_{min}$  より、原位置の砂地盤の密度を求める。
- $$e_c = V_d + e_{min} \dots (8)$$
- ⑨ 式 (4) と⑧で求めた  $e_c$  を用いて、正のダイレタンシー領域の液状化抵抗  $\{(N_{10})_{cr} - (N_2)_{cr}\}$  を求める。
  - ⑩ ⑥で求めた ( $N_2$ )<sub>cr</sub> と⑨で求めた  $\{(N_{10})_{cr} - (N_2)_{cr}\}$  より ( $N_{10}$ )<sub>cr</sub> を求める。

- ⑪ 以下、同様に、図-18 (b) を用いて、ある応力比に対する繰返し回数を求めれば両振幅軸ひずみ  $DA = 10\%$  のときの応力比～繰返し回数関係が得られることになる。

(2) 適用例

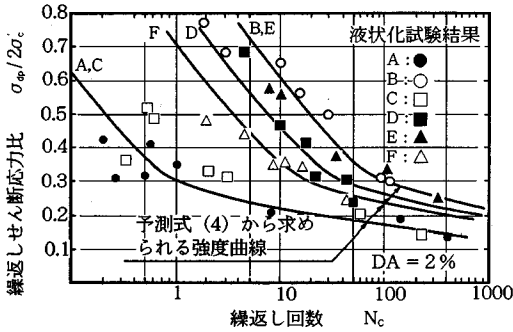
ここでは、図-18 (b) および図-19 (b) に示すように三軸液状化試験から求まる強度曲線は、両振幅軸ひずみ  $DA = 10\%$  においては供試体作製法の影響を受けるので、その影響の少ない、いわゆる初期液状化に対応する両振幅軸ひずみ  $DA = 2\%$  の場合について予測値と不攪乱試験料の三軸液状化試験結果を比較した。

図-23 に試験採取位置の土質性状・N 値分布および試験採取深度を示す。図-23 に示す A, B 地点は表-2 に示す成田砂 1, 2 の採取地点であり、C, D は埋立て



表一 予測式に用いた各サイトの土質データおよび限界繰返し回数 ( $N_{2cr}$ )

	A	B	C	D	E	F
N値	14	17	12	18	17	50
$\sigma_v$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.1	0.1	0.5	0.6	0.25	1.7
D <sub>10</sub> (%)	80.3	86.3	66.4	79.7	83.5	99.5
D <sub>50</sub> (mm)	0.15	0.17	0.24	0.50	0.26	0.30
F <sub>200</sub>	25.3	9.1	5.0	1.0	6.0	15.0
U <sub>c</sub>	62.1	2.3	2.38	3.0	2.3	24.3
V <sub>s</sub>	0.059	0.015	0.396	0.070	0.043	0.015
( $N_{2cr}$ ) <sub>o</sub>	0.9	83.1	1.0	34.7	85.8	15.9



図一 24 三軸液状化試験における応力比～繰返し回数関係の予測値と実験値の比較 (DA=2%)

地盤の沖積砂層を、また、E, F は埋立て地盤の洪積砂層を対象とした。

A, B 地点は前述したように、表土を掘削後ブロックサンプルで、また他の地点は、サンドサンプラーで液状化試験に用いた試料を採取した。

表一に予測に用いた土質データおよび式(4)で予測した限界繰返し回数 ( $N_{2cr}$ ) を示す。表一に示すように、B と E 地点は、平均粒径にやや違いが見られるものの N 値や均等係数、細粒分含有率が、ほぼ同値であることから求められる液状化抵抗 ( $N_{2cr}$ ) もほぼ同値であるのに対して、A と C 地点は、砂の基本的性質や相対密度がかなり違うにもかかわらず、予測された負のダイレタンシー領域の液状化抵抗 ( $N_{2cr}$ ) は、それぞれ 0.9 と 1.0 とほぼ同値である。

図一24 は、式(4)で求められた液状化抵抗 ( $N_{2cr}$ ) を用いて予測した応力比～繰返し回数関係と実験値を示したものである。A, C および B, E 地点の液状化抵抗 ( $N_{2cr}$ ) は、それぞれほぼ同値であることから、予測される強度曲線も同じになり、1つの曲線として表している。図一24に示す実線が予測値であるが、応力比の大きいところでは予測値は、実験値を上まわっている傾向が見られるが、全体的には砂の基本的性質の違いによる液状化特性を捉えており、初期液状化に対応する砂の液状化抵抗は本方法で概ね予測可能である。

### 7. 結 論

以上、細粒分含有率の違う 2 種類の砂を用いて再構成

および不攪乱砂の非排水繰返し三軸およびねじりせん断試験を実施した結果、以下のことが分った。

(1) 再構成砂と不攪乱砂の液状化強度は、同一の密度にもかかわらず、ダイレタンシー効果に差が生じ、初期液状化以降にもその傾向は認められる。その主な原因は、不攪乱砂が、長期  $K_0$  圧密や応力履歴などによるセメンテーションにより部分的なブロック化現象が生じ、このブロック間でのダイレタンシーが生じるため、あたかもより高い密度の試料をせん断しているような結果として表わされてきたものと考えられる。

(2) したがって、再構成砂の間隙比を不攪乱砂のそれよりも密な状態にして非排水繰返し試験を実施すれば不攪乱砂の液状化強度を推定できる可能性があり、今回の試料の場合には、再構成砂の間隙比を約 1/1.25 にすれば推定できる。

(3) 再構成砂の液状化強度から不攪乱砂への補正係数は、三軸試験の場合、堆積構造の影響を受け一義的に表わすことができないが、ねじりせん断試験の場合にはほぼ統一的に表わすことができる。

(4) ねじりせん断試験における液状化強度曲線は限界繰返し回数を用いて正規化すると、砂の種類、供試体作製法によらず、一義的に決定できるが、三軸試験における強度曲線は、正規化しても供試体作製法の影響は残る。

(5) 正のダイレタンシー領域の液状化抵抗を限界繰返し回数  $\{(N_{10})_{cr} - (N_{2cr})\}$  を用いて表わすと、密度そのものに依存し、負のダイレタンシー領域の液状化抵抗 ( $N_{2cr}$ ) は、余裕間隙比に依存する。

(6) 正および負のダイレタンシー領域の液状化抵抗は、砂の基本的性質(平均粒径、細粒分含有率、均等係数)を用いて予測することができる。

(7) 原位置不攪乱試料の三軸液状化強度は、上述した砂の基本的性質に加え、N 値、有効鉛直応力から相対密度を介在して余裕間隙比と間隙比そのものを推定することによって、予測することが可能である。

<謝辞> 本研究を進めるに当たり、東京大学生産技術研究所の龍岡文夫教授、横浜国立大学のプラダンテージ B. S. 助教授に御指導いただきました。末筆ながら、感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y. : Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, Soils and Foundations, Vol.24, No.4, pp.131-145, 1984.
- 2) Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. and Endo, M. : Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed Tokyo Gravel, Soils and Foundations, Vol.28, No.4, pp.57-68, 1988.

- 3) Hatanaka, M., Sugimoto, M. and Suzuki, Y. : Liquefaction resistance of two alluvial volcanic soils sampled by insitu freezing, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.3, pp.49~63, 1985.
- 4) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.641~646，1978.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1990年2月.
- 6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1989年6月.
- 7) 日本鉱業協会：捨石，鉱さい堆積場建設基準及び解説，1982年12月.
- 8) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，1988年1月.
- 9) 越智健三・龍岡文夫：埋立て砂地盤の液状化防止締固め密度の設定方法について，土質工学シンポジウム，pp.65~70，1984.
- 10) 石原研而：土質動力学の基礎，pp.231~293，鹿島出版会，1976年.
- 11) Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fujii, S. : Effect of sample preparation method on cyclic undrained strength of sand in triaxial and torsional shear tests, *Bulletin of ERS*, No.17, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, pp.29~61, 1984.
- 12) 王 中正・越智健三・龍岡文夫：中国福建標準砂の三軸試験による液状化強度 I, II, III, 生産研究 36 卷 5, 7, 8 号, 1984.
- 13) 吉見吉昭・時松孝次・山崎 勉：密な砂の排水せん断特性と非排水繰返しせん断特性の比較，土質工学シンポジウム，pp.163~166，1984年.
- 14) Seed, H.B. and I.M. Idriss : Simplified procedures for evaluating soil liquefaction potential, *Proc. ASCE*, Vol.97, SM8, pp.1249~1273, 1971.
- 15) Ishihara, K. : Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol. 17, No.3, pp.1~17, 1977.
- 16) 岡本正広・越智健三：攪乱および不攪乱成田砂の三軸液状化強度，土木学会第40回年次学術講演会，pp.7~8，1985年.
- 17) Ishihara, K. and S. Li : Liquefaction of saturated sand in triaxial torsion shear test, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.2, pp.19~39, 1972.
- 18) P.De. Alba, H.B. Seed and C.K. Chan : Sand liquefaction in large-scale simple shear test, *ASCE*, Vol.102, No.GT9, pp.909~927, 1976.
- 19) 岡本正広・越智健三：密な砂の基本的性質と液状化特性，第22回土質工学研究発表会，pp.575~576，1987年.
- 20) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，第8章砂の最大密度・最小密度試験，pp.106~115，1990.
- 21) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M. : Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23~41, 1986.
- 22) 岡本正広・越智健三：原位置砂地盤の三軸液状化強度の簡易予測法，土木学会第42回年次学術講演会，pp.122~123，1987年.
- 23) 岡本正広・越智健三：大型ねじりせん断試験による砂の液状化抵抗，土木学会第43回年次学術講演会，pp.408~409，1988年.
- 24) 国生剛治・吉田保夫・長崎 清：密な砂地盤の  $N$  値による液状化判定法，第19回土質工学研究発表会，pp.559~562，1984.

(1993. 4. 27 受付)

## A SIMPLIFIED ESTIMATION OF TRIAXIAL LIQUEFACTION POTENTIAL OF SAND DEPOSIT BY CRITICAL NUMBER OF LOADING CYCLES

Masahiro OKAMOTO and Kenzo OCHI

Cyclic undrained behavior were investigated by means of triaxial and torsional shear tests on undisturbed and reconstituted samples of two kinds of sands including fines. Based on the test results, a simplified method is proposed for the estimation of liquefaction potential of sand deposit by critical number of loading cycles,  $(N_c)_{cr}$ . The estimated liquefaction strength curves for six kinds of sand deposit were almost coincident with test results until the double amplitude axial strain becomes around 2%, verifying a considerable potential of the proposed method.