

砂粒子表面形状が非排水ねじり単純せん断時の 変相線と破壊線に及ぼす影響

日下部 伸¹・森尾 敏²・兵動正幸³・村田秀一⁴

1 正会員 (株)奥村組 技術研究所 (〒300-33 つくば市大砂 387)

2 正会員 工博 (株)奥村組 電算センター (〒545 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

3 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

4 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

本研究では先ず、既存の基準化された比較的簡単な二つの試験法（ふるい分析と最小密度試験）を組合せた簡便な方法で砂粒子表面形状を定量的に評価する方法を提案した。次いで、粒子表面のぎざの程度が異なる典型的な3種類の砂を対象に、単調載荷とひずみ振幅漸増方式の繰返し非排水ねじり単純せん断実験を実施し、変相線と破壊線の相違を調べた。その結果、砂粒子表面形状の相違は、変相線の差異として現れ、これが液状化に対するねばりに関係すること、及び提案した正規化最大間隙比による定量化法は、ぎざの程度により異なる繰返し載荷時の変相線の応力比や変相時に動員される摩擦角を評価する指標として有用であることが明らかになった。

Key Words : grain surface roughness, phase transformation line, torsional simple shear, microscopy

1. まえがき

粒状体のせん断挙動が、粒子形状の影響を強く受けることは、古くから指摘されている¹⁾。粒子形状の表現法に関する既往の研究は数多くあり、吉村²⁾や吉田³⁾は、それらの研究を概観した上で、より客観的な粒子形状の定量化法としてコンピュータによる画像処理を援用した方法を提案している。これらの研究は主として、排水条件での三軸圧縮や平面ひずみ圧縮試験による単調載荷時のせん断挙動やせん断帯に着目している。

一方、繰返し非排水三軸試験時の液状化抵抗と粒子形状の関係については、畠中ら⁴⁾、吉村²⁾の研究がある。

また、粒子形状よりも、さらに微視的な粒子表面形状の差異により、液状化抵抗の指標の一つである繰返し応力振幅比が大きく（1.5～2.0倍程度）異なると言う報告がある^{5), 6)}。これらの研究は、電子顕微鏡等による粒子表面の定性的な観察結果と繰返し非排水三軸試験による液状化抵抗を論じている。

砂の液状化抵抗に関して、粒子表面の粗さの相違が無視し得ない重要な要因であるという報告は、従来の研究が十分考慮し得ていなかった砂粒子表面形状の微視的特徴の評価の見直しを促すものである。兵庫県南部地震（1995.1）を調査・検討した上でなされた土木学会の「提言」には、液状化判定における細目の見直しも取り上げられている⁷⁾。

筆者らは、砂粒子表面の「ぎざぎざ」の程度が異なる典型的な2種類の砂を対象にし、通常の応力振幅一定方式の繰返し載荷時の液状化挙動の違いについて検討するとともに、オンライン地震応答実験手法^{8), 9)}を用いて地震時挙動の差異について調べてきた¹⁰⁾。

その結果、粒子の集合体としての形状特性（粒度分布）や個々の粒子の全体的・部分的形状が類似であっても、ぎざの有無により、いわゆる液状化強度曲線、および地震応答液状化抵抗が大きく異なること、また変相線の勾配に有意な差異があることを明らかにした。

すなわち、繰返し載荷時に、ぎざの有る砂粒子間で相対変位が生じるためには、極端な粒子破碎がない場合、必然的に体積膨張側のミクロなダイレクシーラーの繰返しを伴う。そのため、ぎざの無い砂に比べ、ぎざの有る砂は、繰返し載荷時に変相線の勾配が小さく液状化抵抗が強くなることが筆者らの実験¹⁰⁾において確認された。

ぎざ無しの砂の有効応力が90～100%減少する間に発達するせん断ひずみ γ は±0.5%程度であり、この値は粒子1個の全体的形態（角張り、丸み）よりも、粒子表面のぎざの程度に対応した値と言える¹⁰⁾。これらの研究事例は、ぎざの定量化の必要性を強く示唆するものと言える。

本稿では、先ず砂粒子表面形状の簡便な定量化法を提案する。次に粒子表面のぎざの程度が異なる典型的な3種類の砂を対象に、単調載荷、及びひずみ振幅漸増方式

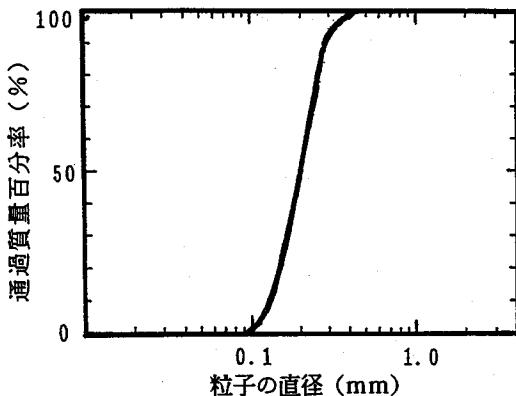


図-1 粒径加積曲線（正規化粒度）

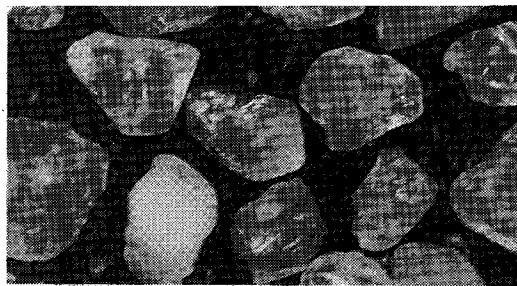
の繰返し非排水ねじり単純せん断（GA）実験を行った結果について述べる。この（GA）実験はひずみ振幅を制御する為、応力振幅一定方式の液状化挙動に比べひずみ増分が安定している。したがって、ぎざの程度により異なるミクロなダイレタンシー特性を調べる上で有用と思われる。また、ぎざ有りと無しについて実施した通常の応力振幅一定方式の繰返し非排水ねじり単純せん断時の液状化挙動についても併記している。

これらの結果に基づき、粒子表面形状が異なる砂の変相線と破壊線を調べ、提案した定量化法で得られた表面形状の特性値がぎざの程度により異なる変相時に動員される摩擦角を評価する指標として有用であることを示す。

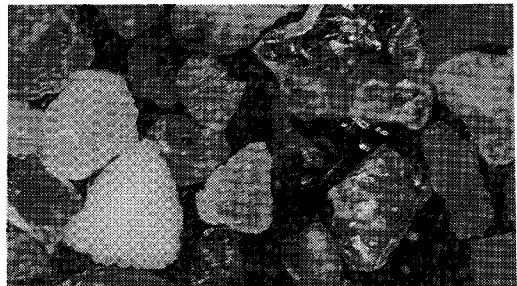
2. 砂粒子表面形状の簡便な定量化法

粒子表面のぎざの程度や有無は、間隙比で表示される特性値に反映されることが容易に想像される。砂がとりうる間隙比の幅 ($e_{\max} - e_{\min}$) は、種々の変形特性と良い対応があるとされている¹¹⁾。しかし、最大間隙比 e_{\max} や最小間隙比 e_{\min} の値は、粒子形状や粒径、粒度分布の影響を受ける^{2), 12)}。そこで、ここでは粒子表面形状以外の要因が間隙比に与える影響を極力避けるために、写真-1に示す様に粒子形状が概ね類似で、かつ粒子表面のぎざの程度が異なる典型的な3種類の砂（ぎざ無し、中間、ぎざ有り）を対象にした。

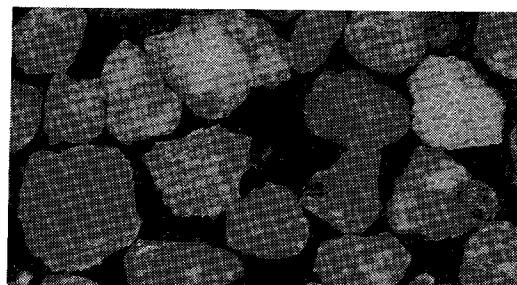
本研究で使用した3種類の砂は、それぞれ、ぎざ無しの豊浦砂が市販品、中間の久慈浜砂は茨城県・日立市久慈浜海岸で、ぎざ有りの若狭砂は福井県・若狭湾海岸で採取したものである。そして、豊浦砂以外の2種類の砂の粒度分布が図-1に示す豊浦砂と同一となるように 75, 106, 250, 425 μm の4枚のふるいを使用して調整し、この試料を一連の実験に用いた。



(a) 豊浦砂：ぎざ無し



(b) 久慈浜砂：中間



(c) 若狭砂：ぎざ有り

写真-1 粒子表面形状

この様に、豊浦砂と同一粒度に調整された粒度の砂を「正規化粒度砂」と呼び、その最大間隙比を「正規化最大間隙比 e^*_{\max} 」と定義する。すなわち、この e^*_{\max} の値が砂粒子表面形状の相違を反映した特性値であることが期待される。この場合、粒子表面形状以外の要因が最大間隙比に及ぼす影響を除去するために、どの様な正規化をするかは、実用性も含めて重要である。ここでは、我が国の標準砂として各種の実験データが最も豊富で、品質的にも安定して供給されている豊浦砂を基準とすることが、この種の研究の第一歩と判断した。

ところで、液状化による噴砂の粒度分布の調査事例¹³⁾は多くあるが、噴出過程の分級作用等により、採取試料の粒度が必ずしも液状化砂層の粒度を代表していないとの指摘もある。その点を踏まえた上で検討ではあるが、調査された多くの噴砂の粒度は、ほぼ豊浦砂と同一の粒

表-1 正規化粒度砂の諸元

砂の種類	e^*_{\max}	e^*_{\min}	間隙比幅	$\rho_s (\text{g/cm}^3)$
豊浦：ぎざ無し	0.975	0.607	0.368	2.645
久慈浜：中間	1.077	0.674	0.403	2.708
若狭：ぎざ有り	1.218	0.747	0.471	2.705

度に調整可能の様である。しかし、仮にこの様な調整ができない試料の場合には、例えば $250 \mu\text{m}$ ふるいを通過し $106 \mu\text{m}$ ふるいに残留する（あるいは $425 \mu\text{m}$ 通過 $250 \mu\text{m}$ 残留）試料について別途、修正正規化最大間隙比のようなものを定義し、正規化最大間隙比との対応を図ることも考慮する必要があるかも知れない。

表-1 に 3 種類の正規化粒度砂の諸元を示す。同表から明らかな様に、粒度が同一であるにもかかわらず、ぎざ無しの豊浦砂とぎざ有りの若狭砂の e^*_{\max} の差は 0.243 に及ぶことがわかる。土質工学会基準による砂の最小密度試験の目標値は、「豊浦標準砂」で $1.335 \pm 0.005 (\text{g/cm}^3)$ である¹⁴⁾。この目標値を最大間隙比で表示すると 0.9813 ± 0.0074 となり、前述の e^*_{\max} の差 0.243 は、同試験法で想定する測定誤差の約 33 倍にもなる。

これは、本研究でぎざの有無の両極端の典型として用いたぎざ無しの豊浦砂とぎざ有りの若狭砂の間に位置する砂のぎざの程度を 33 段階に分類することが可能であることを示唆している。この程度の分解能を有する方法は工学的問題に適用可能と思われる。

ここに提案する正規化最大間隙比による砂粒子表面形状の定量化法は、次の様な特長を有する。

- ①既存の基準化された比較的簡単な二つの試験法（ふるい分析と最小密度試験）を組合せた簡便な方法である。
- ②相当、多くの砂粒子を使用し、粒子表面形状を三次元的に評価する。
- ③液状化予測等の工学的問題に適用可能な分解能を有している。

以下では、ぎざの程度が異なる典型的な 3 種類の砂の正規化最大間隙比 e^*_{\max} と非排水せん断時の破壊線・変相線の関係を調べることとする。

3. 非排水せん断時の破壊線・変相線と e^*_{\max}

(1) 実験方法

実験は、中空ねじりせん断装置を用い、 $K = \sigma'_H / \sigma'_V = 0.5$ の異方圧密状態から非排水ねじり単純せん断条件で実施した。3 種類の試料について空中落下法により中空

表-2 実験ケース

記号	砂の種類	相対密度(%)	せん断方法
豊緩单	豊浦	50	単調載荷
久緩单	久慈浜	52	単調載荷
若緩单	若狭	49	単調載荷
豊密单	豊浦	85	単調載荷
久密单	久慈浜	81	単調載荷
若密单	若狭	84	単調載荷
豊緩繰	豊浦	45	繰返し載荷
久緩繰	久慈浜	50	繰返し載荷
若緩繰	若狭	46	繰返し載荷
豊密繰	豊浦	78	繰返し載荷
久密繰	久慈浜	82	繰返し載荷
若密繰	若狭	81	繰返し載荷

供試体（外径 100 mm, 内径 60 mm, 高さ 100 mm）を作製した。異方圧密は、先ず有効側方向応力 $\sigma'_H = 0.315 (\text{kgt/cm}^2)$ を等方的に載荷後、異方分の有効軸方向応力 $\Delta\sigma'_v = 0.315 (\text{kgt/cm}^2)$ を載荷し、所定の $\sigma'_v = 0.630 (\text{kgt/cm}^2)$ とした。

非排水ねじり単純せん断は、以下に示す龍岡ら¹⁵⁾の方法にならった。

異方圧密後の供試体を非排水条件にし、中空円筒供試体の中空部に満たした脱気水の出入りを止め、せん断中の供試体高さを一定に保った。これにより、供試体の体積ひずみ = 0, 軸方向ひずみ = 0, 外半径及び内半径方向ひずみ = 0 を保つことになり、正確な単純せん断変形モードを可能とする。

単調載荷 (MT) 実験のせん断ひずみ速度は、 $\dot{\gamma} = 0.1\%/\text{min}$ である。繰返しせん断は、通常の応力振幅一定方式とひずみ振幅漸増方式 (GA) の実験を実施した。ここでいう (GA) 実験は、第 1 波目のせん断ひずみ片振幅 γ_{SA} を $\pm 2.5 \times 10^{-4}$ とし、第 2 波目以降順次 $\pm \gamma_{SA}$ を 1.5 倍間隔で漸増させる正弦波を用いている。ひずみが徐々に増加しながら液状化に至るという点で地震時の挙動により近いと言えよう。繰返しせん断時の $\dot{\gamma}$ の値は (MT) 実験と同様とした。3 種類の正規化粒度砂の緩詰め、密詰め供試体に対して (MT), (GA) 実験を実施した。これらの実験ケースを表-2 に示す。尚、応力振幅一定方式の繰返しせん断は、後述のごとく緩詰

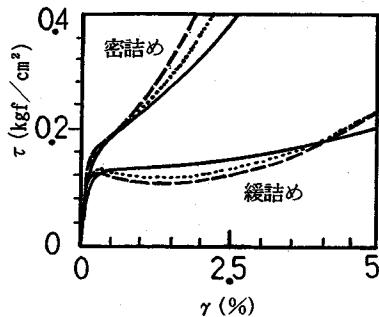


図-2 τ - γ 関係

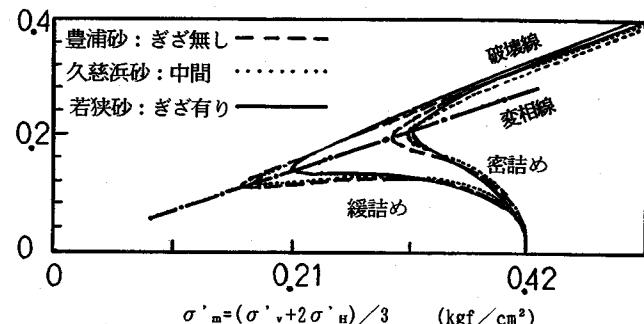


図-3 有効応力経路

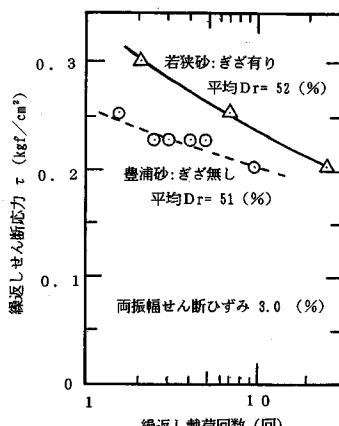


図-4 繰返しせん断応力と載荷回数の関係

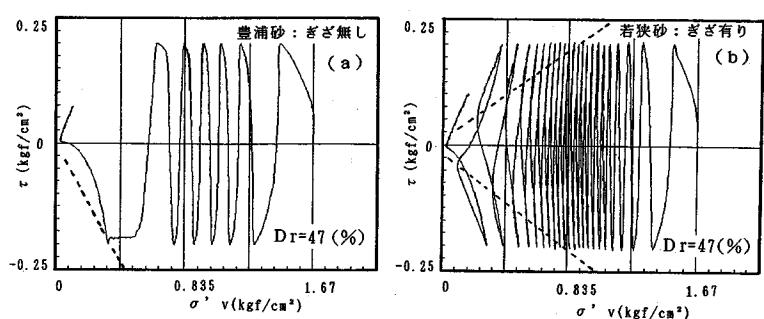


図-5 応力振幅一定時のぎざ無しと有りの有効応力経路

めのぎざ有りと無しについてのみ実施した。

(2) 単調載荷 (MT) の実験結果

図-2 に単調載荷のせん断試験で得られたせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係を示す。さらに、図-3 には対応する有効応力経路を掲げた。これらの図より、典型的なこの 3 種類の砂の基本的な非排水せん断特性として以下のことが明らかである。

τ - γ 関係はそれぞれ、ぎざの程度に応じて遷移的に変化しているものの、せん断の初期には顕著な差は認め難い。せん断応力-平均有効主応力平面での変相線および破壊線は、ぎざの程度に拘わらず同一の線で表示されそうである。この限りにおいて、3 種類の砂の単調載荷時の非排水せん断特性は、大差がなく、ほぼ同様であると言う判断も可能である。

しかしながら、図-3においてダイレタンシー挙動が反転する変相点には、それぞれ有意な差が認められる。ぎざ無しの豊浦砂、中間の久慈浜砂、ぎざ有りの若狭砂の順に σ'_m の減少がより小さい位置で応力経路が反転している。これは、筆者ら¹⁰⁾が既に指摘した様に、ぎざ有りの方が液状化抵抗が大きいことと関連している。

ぎざの程度が非排水せん断特性に与える影響は、単調載荷ではこの程度の差異であるが、以下では、応力振幅一定方式の通常の繰返しせん断及び、繰返しせん断ひずみが漸増していく、ひずみ振幅増加 (GA) 実験で、ぎざの程度がどの様な影響を与えるかについて示す。

(3) 応力振幅一定方式の繰返し実験の結果

この実験では、 σ'_v と σ'_H は、それぞれ 1.67, 0.67 kgf/cm² であり、側方土圧係数 K は 0.40 で実施した。

図-4 は、繰返しせん断応力と両振幅せん断ひずみが 3 (%) に達する繰返し回数の関係を示している。同一の空中落下高さで作製された供試体の相対密度 Dr の平均値は、ぎざ無しの豊浦砂で 51 (%), ぎざ有りの若狭砂で 52 (%) である。同図は、両者の粒度が同一で、相対密度がほとんど等しいにもかかわらず、ぎざ有りの若狭砂の液状化抵抗が、ぎざ無しの豊浦砂に比べ強いことを示している。

次に、相対密度が同一 (47 (%)) の供試体に、同一の繰返しせん断応力 (0.20 kgf/cm²) を作用させた場合の有効応力経路を図-5 に示す。同図に破線で示した変相線の勾配は、単調載荷時と異なり、ぎざの有無による有意な差が認められる。さらに、ぎざ無しの豊浦砂では一方的な体積収縮傾向が顕著であるのに対し、ぎざ有りの若狭砂では載荷初期の数波以降、体積収縮傾向が抑制

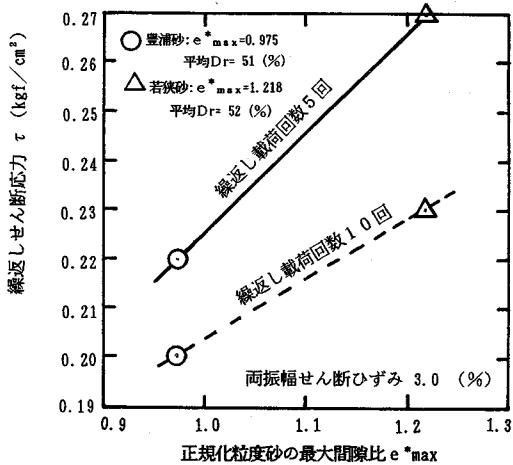


図-6 e^*_{max} と繰返しせん断応力の関係

されており、両者の相違が明らかである。砂粒子表面形状の違いがダイレタンシー挙動、変相線の差異として現れ、これが液状化抵抗の相違に関係していることが伺える。

この点に関して、本研究で提案した正規化最大間隙比 e^*_{max} と液状化抵抗の対応を図-4 の実験結果に基づいて整理すると以下の様になる。

図-6 は、繰返し載荷回数が 5 回及び 10 回で両振幅せん断ひずみが 3 (%) に達する繰返しせん断応力 τ と e^*_{max} の関係を示したものである。ぎざの程度による液状化抵抗の差異を図-4 の縦軸の繰返しせん断応力で比較したものである。

一方、図-7 は、繰返しせん断応力が 0.20 及び 0.25 kgf/cm² で両振幅せん断ひずみが 3 (%) に達する繰返し載荷回数と e^*_{max} の関係を示したものである。ぎざの程度による液状化抵抗の差異を図-4 の横軸の繰返し載荷回数で比較したものである。

ここでの比較は、緩詰め砂のぎざ無しと有りの 2 点のみであるが、これらの図から e^*_{max} の値が大きい程、液状化抵抗が大きくなる傾向が伺える。液状化抵抗に関連する砂粒子表面のぎざの程度を定量化する方法として、正規化粒度砂による正規化最大間隙比の値が採用可能なことを示唆している様である。

以上の検討を踏まえた上で、砂粒子表面のぎざの程度と繰返し載荷時の変相線・破壊線について、より詳しく検討を加えたひずみ振幅漸増方式の実験結果について以下に示す。

(4) ひずみ振幅漸増(GA) 実験の結果

この実験では、 σ'_v と σ'_H は、それぞれ 0.630, 0.315 kgf/cm² であり、側方土圧係数 K は 0.50 で実施した。

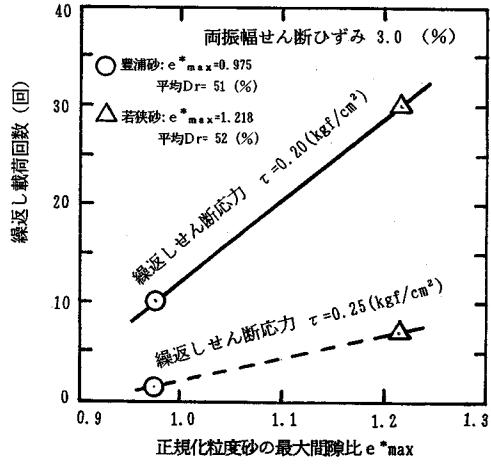


図-7 e^*_{max} と載荷回数の関係

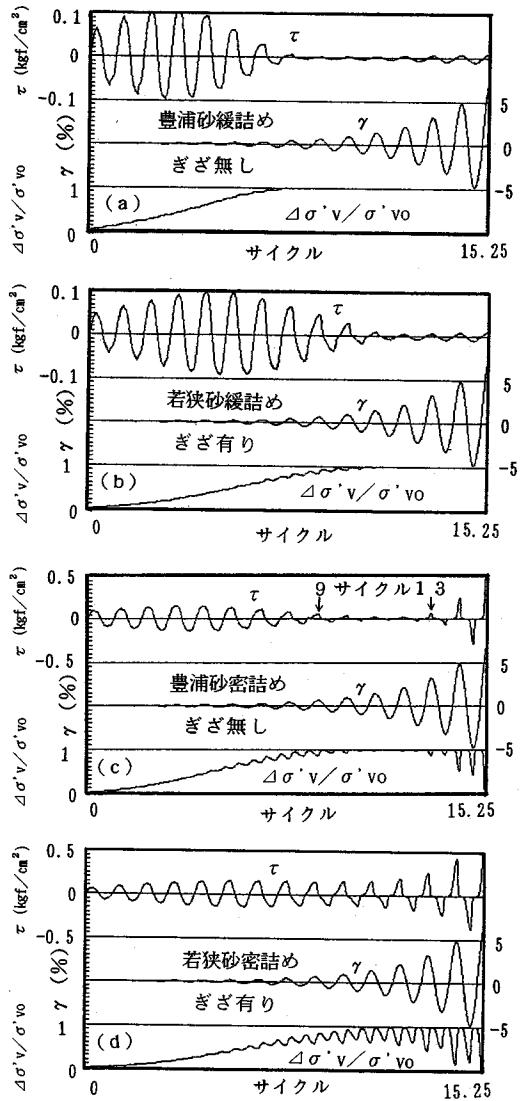


図-8 GA 実験の τ , γ , $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v$

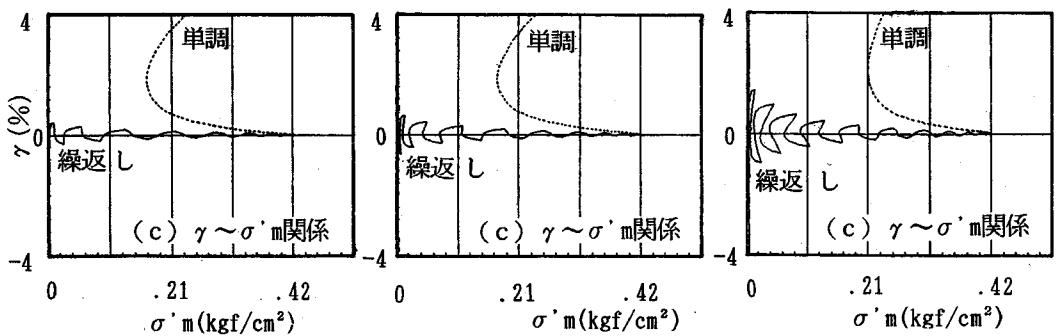
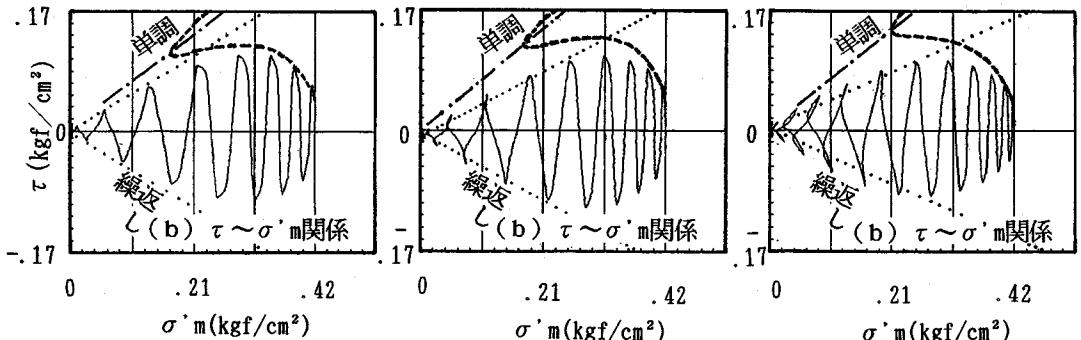
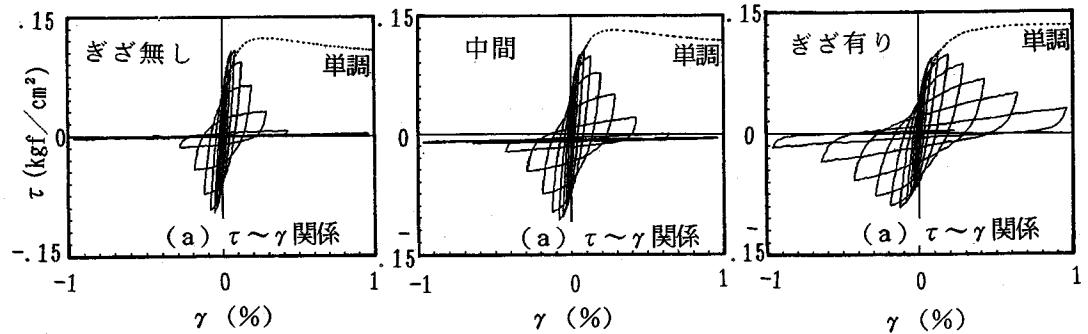


図-9 豊浦砂緩詰め繰返し

図-10 久慈浜砂緩詰め繰返し

図-11 若狭砂緩詰め繰返し

ひずみ振幅漸増方式の実験では、第1波目のせん断ひずみ片振幅 γ_{SA} を $\pm 2.5 \times 10^{-4}$ とし、第2波目以降、順次土 γ_{SA} を1.5倍間隔で漸増させる正弦波を用いた。

図-8は、ぎざ無しの豊浦砂とぎざ有りの若狭砂の緩詰め及び密詰めについて、各サイクルにおけるせん断応力 τ 、せん断ひずみ γ 、有効軸方向応力比 $\Delta\sigma'/v_0$ の変化を示している。ここに、 $\Delta\sigma'_v$ は有効軸方向応力の変化量、 v_0 は初期有効軸方向応力である。

同図から明らかな様に、同一の粒度、相対密度、初期応力状態、せん断变形条件、せん断ひずみ履歴であっても、液状化過程での挙動は、ぎざの有無により大きく異なる結果となっている。

緩詰め砂の(a)、(b)で比較すると、せん断応力の

最大値はぎざの有無にかかわらずほぼ同一の値である。しかし、ぎざ無しの豊浦砂が急激にせん断抵抗を喪失していくのに対し、ぎざ有りの若狭砂はせん断抵抗の低下が緩慢でありネバリを発揮している。

密詰め砂の(c)、(d)で比較すると、ぎざ無しの豊浦砂が第9サイクル以降、急激にせん断抵抗を喪失し、第13サイクルまでこの状態が継続している。この間に発達したせん断ひずみの両振幅は、約5% ($\gamma = \pm 6.4 \times 10^{-3}$ から $\gamma = \pm 3.2 \times 10^{-2}$) にも達する。一方、ぎざ有りの若狭砂ではせん断抵抗の低下がほとんど無く、ほぼ単調に増加している。両者の差は、歴然としている。

ぎざ無しの豊浦砂の場合、一度、有効応力がゼロに達すると、たとえ密詰めであっても、ひずみ増分の生じ方

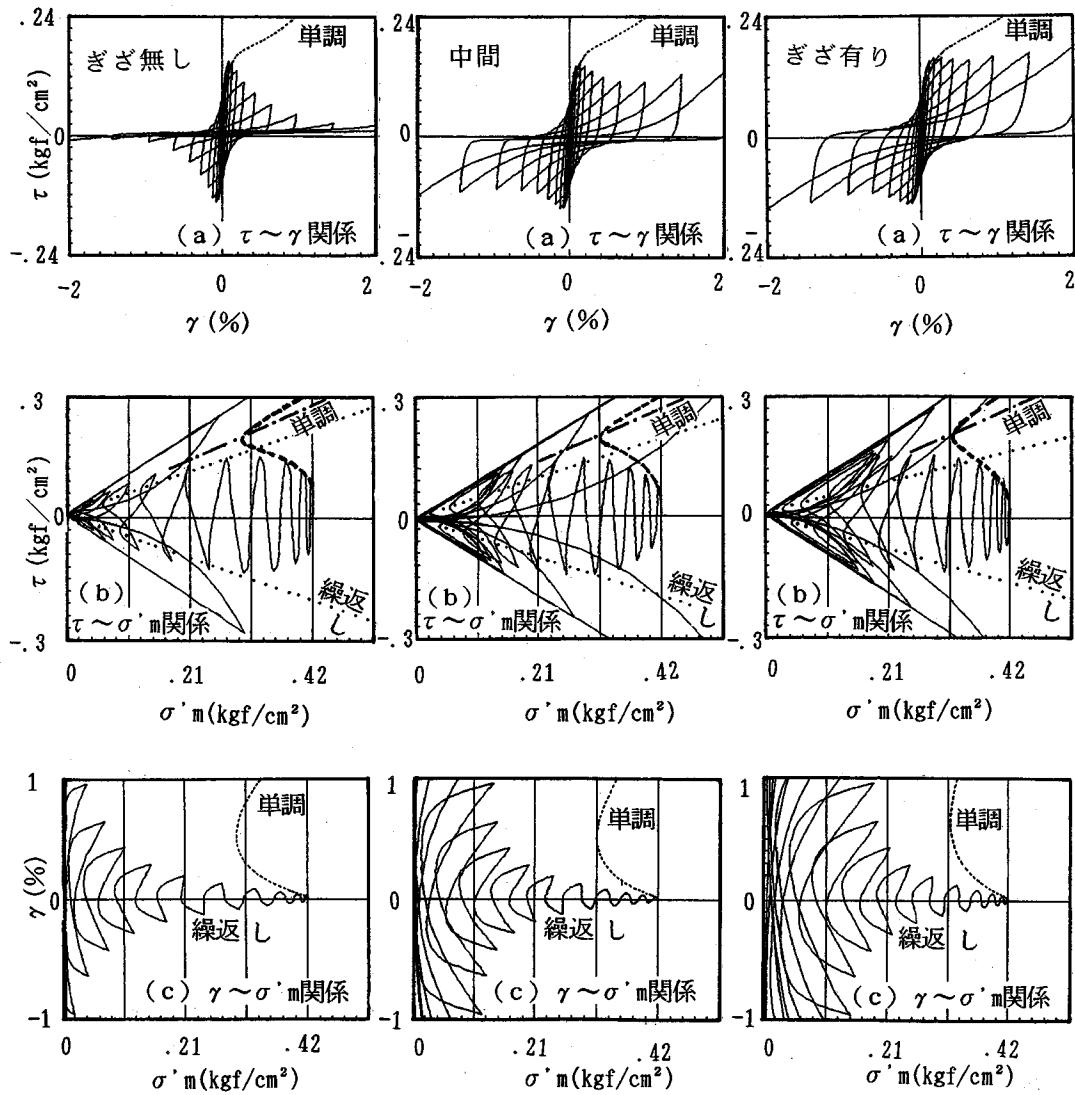


図-12 豊浦砂密詰め繰返し

図-13 久慈浜砂密詰め繰返し

図-14 若狭砂密詰め繰返し

によっては、いわゆるサイクリック・モビリティによるせん断抵抗の大きな回復がないまま、せん断ひずみの両振幅の増分が約5%にも発達している。応力振幅一定方式の試験では、ややもすると見落としがちなこの挙動には、注意を払う必要がある様に思われる。すなわち、応力振幅一定の試験では通常、数回ないし数十回の「一定応力振幅のまま」で液状化を発生させるため、密詰め砂の場合、特に大きな繰返し応力振幅を設定することになる。これは、載荷の第一波からいきなり大きなひずみの発生とその直後における変相線・破壊線への到達を招く。

そのため、ひずみが漸増しながらも最終ダイレイテイト線とも考えられる破壊線に沿って著しくダイレイテイトせず

に、徐々に有効応力が減少しながら液状化に至る様な挙動に関する情報が、応力振幅一定の試験では結果的に欠落しがちになる恐れがある。

さて、図-9, 10, 11は、3種類の砂（ぎざ無しの豊浦砂、中間の久慈浜砂、ぎざ有りの若狭砂）の緩詰め状態での τ - γ 関係（a）、有効応力経路（b）、せん断ひずみ γ -平均有効主応力 $\sigma' m$ 関係（c）を示している。同じく図-12, 13, 14は、密詰め状態の実験結果を示している。図中には単調載荷（MT）実験の結果も併記した。同図の（b）では、破線で単調載荷の有効応力経路を、一点鎖線で単調載荷の変相線を、点線でひずみ振幅漸増の繰返し載荷の変相線を示した。

これらの図より以下のことが知れる。

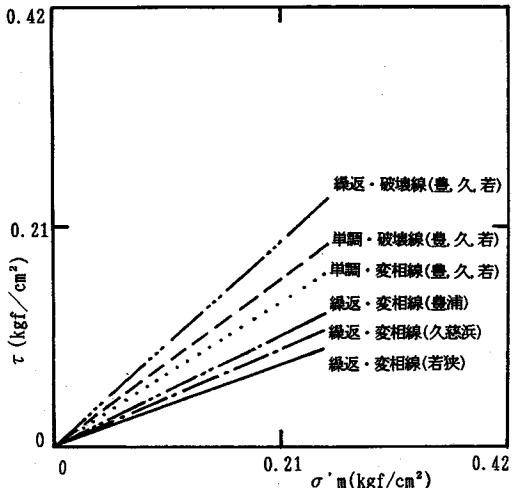


図-15 単調と繰返し載荷の変相線・破壊線

- ①同一のひずみ履歴を与えられた時、粒子の集合体としての形状特性(粒度分布)や個々の粒子の全体的・部分的形状が類似であっても、ぎざの程度により繰返せん断時の τ (復元力) の変化が著しく異なる。
- ②密詰め砂の (b) から明らかな様に単調載荷 (MT) とひずみ振幅漸増の繰返し載荷 (GA) の破壊線および変相線はそれぞれ異なる。
- ③(GA) の変相線はぎざの程度により異なる。
- ④ダイレタンシー挙動が反転する変相点のせん断ひずみ γ は、図 (c) が示す様に (MT) で約 2% (緩詰め砂) と 0.5% (密詰め砂), (GA) で 0.025 ~ 0.05% であり、(MT) と (GA) では γ が 2 術ほど異なる。

ここで、 $\gamma=0.5\%$ という値は、砂粒子の長軸長と短軸長の比が 1 : 0.5 で、粒子の規則配列が高位の Simple Cubic の場合、長軸長の $\pm 1/400$ の変位に相当する¹⁰⁾。

すなわち、ひずみ振幅漸増の繰返し載荷時の、変相点到達時のひずみ振幅の値 ($\gamma=0.025 \sim 0.05\%$) は、粒子の全体的形状 (角張り、丸み) よりもむしろ、粒子表面のぎざの大きさに対応していることを示している。

- ⑤これに対し、図-2, 3, 12, 13, 14 から明らかな様に、密詰め砂が破壊線に到達する時のせん断ひずみは、(MT) と (GA) で大差が無く約 1.5% 程度である。

ところで、異方圧密後の非排水繰返しねじり単純せん断では、主応力軸方向の回転、中間主応力係数の変化及び、破壊線の拘束圧依存性の影響などが混在する。従って、本研究では、砂粒子表面形状の影響のみを厳密に分離して評価することは、できていない。しかし、実際の

地震時の液状化過程は、異方圧密後の非排水繰返しねじり単純せん断に近い状態が存在すると考えられる。これらを踏まえた上で、以下に変相線と破壊線の対応を検討する。

図-15 は単調と繰返し載荷の破壊線、変相線を $\tau-\sigma'_m$ 平面で整理したものである。ただし、緩詰め砂の繰返し載荷では破壊線が特定できなかったため、繰返し載荷時の破壊線は密詰め砂の実験結果から求めた。他のケースの破壊線と変相線は、表-2 に示した相対密度の緩詰め砂と密詰め砂の両方の実験結果から求めた。

同図は以下の事を示している。

- ①繰返し載荷時の変相線の応力比 (τ/σ'_m) は、ぎざの程度の影響を受け、ぎざ無し、中間、ぎざ有りの順に小さくなる。
- ②繰返し載荷時の破壊線は、ぎざの程度に関わらず单一の線で表される。
- ③単調載荷時の変相線と破壊線は、ぎざの程度に関わらずそれぞれ単一の線で表される。
- ④繰返し載荷時の変相線の応力比は、単調載荷時のそれに比べ小さい。
- ⑤繰返し載荷時の破壊線は、単調載荷時の破壊線に比べ応力比が大きい。

以上の (MT), 及び (GA) 実験結果は、次のことを示唆している様である。

- ①単調載荷時の変相線と破壊線は、粒度分布や個々の粒子の全体的形状 (角張り、丸み) を反映したいわばマクロなダイレタンシー特性により決定される。
 - ②繰返し載荷時の変相線が粒子表面形状の差異によるミクロなダイレタンシー特性により決定されるのに對し、繰返し載荷時の破壊線は単調載荷時と同様にマクロなダイレタンシー特性により決定される。
- これは、変相線到達時のひずみ振幅が粒子の全体的形状 (角張り、丸み) よりもむしろ、粒子表面のぎざの大きさに対応するのに対し、破壊線到達時にはよりスケールの大きな粒子の全体的形状の影響が顕在化するひずみレベルに達していることによるものと考えられる。
- ③単調と繰返し載荷時の破壊線の相違は、破壊線に至る過程で経験するミクロなダイレタンシー挙動の履歴の差異を反映している。

すなわち、単調載荷では後にも先にも唯 1 回だけ変相点を経て破壊線に至る。繰返し載荷では、図-12, 13, 14 の (b) に明らかな様に、ひずみ増分方向の反転と変相点到達が繰返された後に破壊線に至る。そのため、単調載荷と繰返し載荷では供試全体としては単純せん断変形が再現されていても、砂粒子集合体間での接触状態や外力を伝達するのに有効に作用している粒子が形成する構造は、破壊線

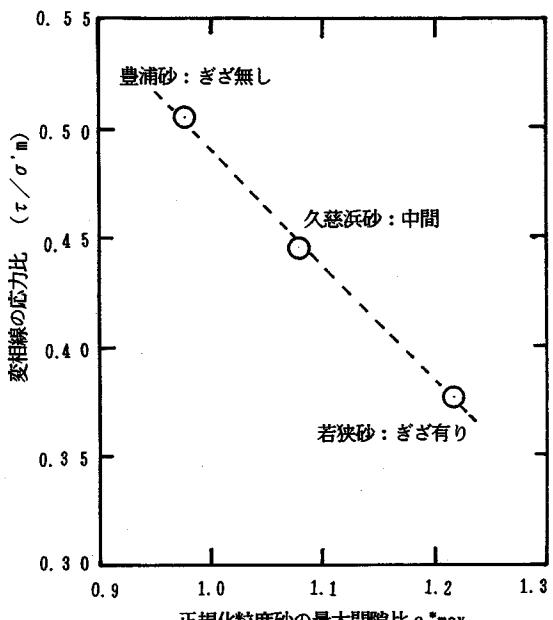


図-16 e^{*max} と繰返し載荷時の変相線の応力比

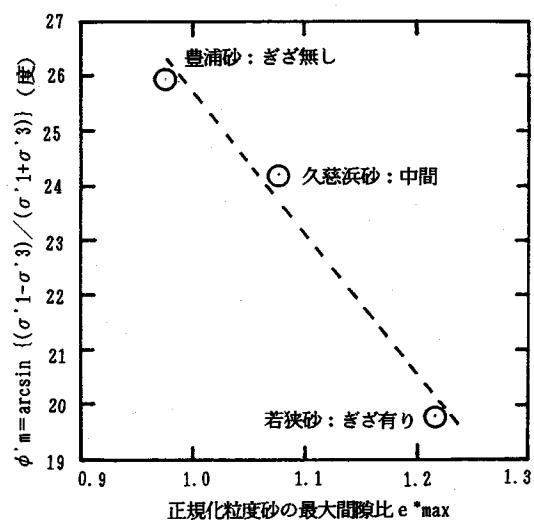


図-17 e^{*max} と繰返し載荷の変相時に動員される摩擦角

到達時には異なっていると思われる。単調と繰返し載荷時の破壊線の相違は、この様な履歴の差が影響していることが考えられる。

(5) 繰返し載荷の変相線と正規化最大間隙比 e^{*max}

以上に示した結果は、砂粒子表面形状の相違がダイレタンシー挙動及び変相線の差異として現れ、これが液状化に対するねばりに関係していることを明らかにしている。ここでは、本研究で提案した正規化最大間隙比による砂粒子表面形状の定量化法が、どの程度、繰返し載荷

時の変相線の相違を表現し得るかについて以下に述べる。

図-16は、正規化最大間隙比 e^{*max} と繰返し載荷時の変相線の応力比の関係を示す。また図-17は、正規化最大間隙比 e^{*max} と変相時に動員される摩擦角の関係を示す。尚、図-16の変相線の応力比は、緩詰めと密詰めの両方の実験結果から求めた。また、図-17の変相時に動員される摩擦角は、緩詰めの場合、有効応力がかなり小さい領域での算定になるため、測定誤差の影響を避けて密詰めの実験結果のみから求めた。

さて、今回の実験データの範囲では、両図は砂粒子表面のぎざの程度により異なる変相線の応力比や変相時に動員される摩擦角と e^{*max} が両算術目盛り上でほぼ直線関係にあることを示している。すなわち、粒子表面が完全に平滑でかつ平行関係に無い限り、砂粒子間で繰返し相対変位が生じると、必然的に体積膨張側のミクロなダイレタンシーの繰返しを伴う。このミクロなダイレタンシー特性を反映した変相線の応力比や変相時に動員される摩擦角を評価する指標として正規化最大間隙比 e^{*max} が有用であることを示している。

4. まとめ

既存の基準化された比較的簡単な二つの試験法（ふるい分析と最小密度試験）を組合せた簡単な方法で砂粒子表面形状を定量的に評価する方法を提案した。粒子表面のぎざの程度が異なる典型的な3種類の砂を対象に、単調及びひずみ振幅漸増方式の繰返し非排水ねじり単純せん断実験を実施し、変相線と破壊線の相違を調べた。本研究で得られた主要な知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 砂粒子表面形状の相違は、ダイレタンシー挙動及び変相線の差異として現れ、これが液状化に対するねばりに関係する。
- 2) 提案した正規化最大間隙比は、砂粒子表面形状に関する固有の材料特性を表すものであり、相対密度や拘束圧等のような状態量ではない。この正規化最大間隙比は、液状化抵抗を統一的に評価する上で、新に加えるべき重要な要因である。
- 3) 提案した正規化最大間隙比による定量化法は、ぎざの程度により異なる繰返し載荷時の変相線の応力比や変相時に動員される摩擦角を評価する指標として有用である。
- 4) 繰返し載荷時の変相線の応力比は、単調載荷時と比べて小さい。これに対して、繰返し載荷時の破壊線は、単調載荷時の破壊線に比べ、逆に応力比が大きい。
- 5) 単調と繰返し載荷時の破壊線の相違は、複数の変

相点を含むミクロなダイレタンシー挙動の履歴の差異を反映している様である。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : *Soil Mechanics in Engineering Practice*, p.85, JOHN WILEY & SONS, New York, 1948.
- 2) 吉村 優治：砂のような粒状体の粒子形状と一次性質、二次性質に関する研究、長岡技術科学大学博士論文、1994.
- 3) 吉田 振：砂の破壊に伴うひずみの局所化とせん断帯の発生、東京大学博士論文、1994.
- 4) Hatanaka, M. et al. : Liquefaction Resistance of Two Alluvial Volcanic Soils Sampled by In Situ Freezing, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.3, pp.49-63, 1985.
- 5) 中村博久, 脇坂良男：砂粒子表面の微視的特性と強度特性、第 25 回土質工学研究発表会, pp. 759-760, 1990.
- 6) 工藤宗治, 長友八郎, 佐藤 栄：液状化強度における砂粒子の微視的性質の影響、土木学会西部支部研究発表会, pp. 500-501, 1993.
- 7) 土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」：土木構造物の耐震基準等に関する提言、土木学会誌, Vol. 80, pp. 1-7, 1995. 7.
- 8) 日下部 伸, 森尾 敏, 有本 勝二：オンライン地震応答実験による 2 層系砂地盤の液状化挙動、土質工学会論文報告集, Vol. 30, No. 3, pp. 174-184, 1990.
- 9) Kusakabe, S. and Morio, S. : The Development of a Substructure On-Line Testing System for Seismic Response Analysis of a Geotechnical System, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.2, pp.117-125, 1995.
- 10) 日下部 伸, 森尾 敏：粒子表面形状が異なる砂の地震応答液状化抵抗、土木学会論文集, No. 517 / III -31, pp. 149-158, 1995.
- 11) 前田 健一, 三浦 均也ら：一次的性質の異なる砂の変形・破壊挙動の相対密度依存性、第 28 回土質工学研究発表会, pp. 611-614, 1993.
- 12) 福本武明：砂の分類特性としての最大・最小間隙比の効用、土木学会第 37 回年次学術講演会, III, pp. 635-636, 1982.
- 13) 例えは、森 伸一郎, 沼田 淳紀ら：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.
- 14) 土質工学会編：土質試験の方法と解説, p. 110, 1990.
- 15) Tatsuoka, F. et al. : A cyclic undrained simple shear testing method for soils, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.12, No.4, pp. 269-280, 1989.

(1995. 11. 27 受付)

EFFECTS OF GRAIN SURFACE ROUGHNESS ON PHASE TRANSFORMATION AND FAILURE LINES UNDER UNDRAINED TORSIONAL SIMPLE SHEAR

Sin KUSAKABE, Satoshi MORIO, Masayuki HYODO
and Hidekazu MURATA

This paper examined the effect of grain surface roughness on phase transformation line and failure line under undrained torsional simple shear. To begin with, the term "normalized maximum void ratio e^*_{\max} " was defined as a measure of grain surface roughness. Then, monotonic loading test, stress control liquefaction test of constant amplitude and strain control liquefaction test with gradual increase in strain amplitude were carried out using sands of the same gradation with different surface roughness. Finally, the relationships between e^*_{\max} and phase transformation line were discussed. The test results suggest that the effects of microscopic dilatancy originated from grain surface roughness are significant on undrained shear behavior.