

三軸試験装置における飽和砂の再液状化抵抗に及ぼす構造異方性の影響

Effect of Fabric Anisotropy on Reliquefaction Resistance of Saturated Sand
using Conventional Triaxial Test Apparatus

鈴木輝一*・小田匡寛**・川本健***・藤森啓之****

Kiichi SUZUKI, Masanobu ODA, Ken KAWAMOTO and Hiroyuki FUJIMORI

*博(工) 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

**工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

***農修 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

****工修 東日本旅客鉄道(株) 大宮新幹線保線区 (〒331-0043 埼玉県大宮市大成町3-125)

It is well known that a saturated sand sample lowers sharply the resistance to liquefaction when it has once been pre-sheared beyond a threshold value. This paper is to discuss the effect of the fabric anisotropy of sand, based on the analysis of the experimental results, and based on the light of recent findings about the anisotropy in microstructure. Column-like structure, through which the increasing stress is mainly transmitted, grows parallel to the major principal stress direction. The column-like structure is stable so long as the major stress is applied parallel to the elongation direction of the structure. However, it becomes extremely unstable when the major stress is rotated. The excess pore pressure increases markedly under cyclic loading, in particular, when the connected voids are stressed perpendicular to their elongation direction. This is the reason why the pre-sheared sand loses sharply the liquefaction resistance in a subsequent liquefaction test.

Key Words: sand, liquefaction, conventional triaxial test, fabric anisotropy

1. まえがき

日本海中部地震において顕著であったように、一度液状化した地盤は、その後、以前に受けた地震よりも小さな地震によって再液状化すること、すなわち、液状化抵抗が減少することが知られている¹⁾。これは、液状化が一旦生じると、過剰間隙水圧の発生、その後に続く圧密沈下によって、地盤の密度が増加し、それによって液状化しにくくなるという一般的なメカニズムとは異なり、別のメカニズムによってのみ説明が可能であることを示している。

液状化抵抗に及ぼす影響要因としては、供試体作製方法、密度、拘束圧、粒度分布、飽和度、初期構造異方性、小ひずみ履歴、大ひずみ履歴、過圧密、密度の不均一性等があげられる。これらの影響要因の中で、実地盤における再液状化時の液状化抵抗の減少の要因としては、

まず、液状化によって生じる不均質な層、すなわち、密度のかなり小さな層の存在が考えられる。Emery et al.²⁾は、振動台模型実験によって、液状化後、地盤の上部にゆるい層が形成されることを見つけ、このようなゆるい層の存在が、液状化抵抗の減少の理由であるとしている。Sasaki and Taniguchi³⁾も振動台実験において、加振前と加振後のコーン貫入抵抗を比較し、加振後、地盤の下部ではコーン貫入抵抗が大きくなるのに対して、上部では逆に小さい値になることを示している。

また、Castro⁴⁾は、三軸試験装置による液状化試験においても、供試体上部にゆるい層の存在を確認している。しかしながら、三軸試験装置において、密度を変えた試料を水平に互層とした供試体による圧縮試験⁵⁾および液状化試験⁶⁾の結果では、密度の不均一性による影響は小さく、圧縮強度および液状化抵抗は平均間隙比にのみ依存していることを示している。このように、再液状化

時の抵抗に及ぼす要因を考える場合、対象が実地盤または模型実験の挙動なのか、あるいは単純せん断試験装置による要素実験なのか、それとも三軸試験装置による要素実験なのかを分けて考える必要がある。

一方、龍岡⁷⁾は三軸試験装置を用いて、圧密試料を液状化後、再圧密した場合と、圧密試料を排水除荷後、再圧縮した場合の挙動を調べ、液状化した試料は著しく圧縮性に富み、液状化によって砂の構造が圧密前の弱い状態に戻ったと指摘している。また、Finn et al.⁸⁾は、単純せん断試験および三軸試験において、大ひずみ履歴を与えた後に、再圧密後、液状化試験を行った結果、再圧密によって間隙比が小さくなっているに関わらず、液状化抵抗が著しく低下していることを示した。Seed et al.⁹⁾は、大型単純せん断試験装置において、小ひずみ履歴を与えた後に、再圧密後、液状化試験を行った結果、逆に液状化抵抗が大きくなっていることを示した。液状化抵抗の大きさが、先行するひずみ履歴の大きさに依存することは、Ishihara and Okada¹⁰⁾、鈴木、鈴木¹¹⁾でも同様に示されている。

また、松岡他¹²⁾は、単純せん断試験装置を用いた繰返し等体積試験を行い、最初の繰返し等体積試験によって生じたせん断変形の残留状態、すなわち、片寄った構造状態が、次の繰返し等体積試験での抵抗の大きさに影響するとしている。これに関連して、大原、山本¹³⁾は、三軸試験装置を用いた液状化試験においても、液状化後の供試体の形状が、再液状化抵抗の大きさに影響すると報告している。更に、Ishihara and Okada¹⁴⁾は、三軸試験装置における液状化抵抗の大きさは、ひずみ履歴の大きさだけでなく、再液状化試験開始時のひずみ状態、すなわち、先行ひずみを得るのに、圧縮側あるいは伸張側のどちらの除荷によっているかが大きく影響するとしている。

本論文では、三軸試験装置を用いた再液状化試験時において、液状化抵抗が著しく低下するという現象の要因として、ひずみ履歴または構造の変化に着目して検討する。まず、非排水繰返し載荷（液状化試験と同じ試験条件）によるひずみ履歴、初期構造異方性、それに排水単調載荷によるひずみ履歴が、それぞれ液状化抵抗にどれだけ影響を及ぼすのかについて、三軸試験装置を用いて調べ、液状化抵抗の大きさだけの比較でなく、応力経路等の挙動特性から総括的に検討を行う。次いで、個別要素法¹⁵⁾による既往の数値実験によって得られている知見をもとに、室内要素実験結果という巨視的な観点からのみでなく、微視的構造の観点からも考察を行う。

2. 三軸試験方法

2.1 試料および供試体作製法

試料は豊浦砂で比重 2.65、平均粒径 0.206mm、均等係数 1.6、最大、最小間隙比はそれぞれ 0.972、0.609 であ

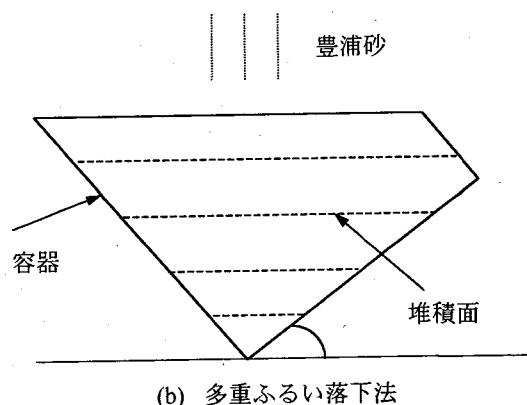
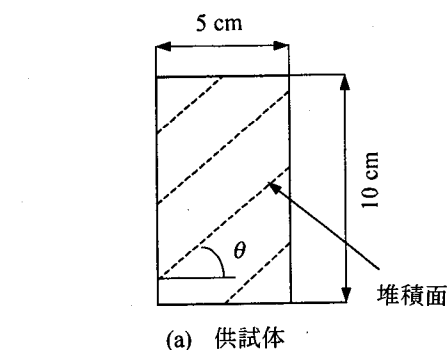


図-1 初期構造異方性を持つ供試体の作製方法

る。間隙比はすべて 0.690 ± 0.020 （相対密度 $D_r = 78 \pm 6\%$ ）とし、供試体の寸法は、高さ 10cm、直径 5cm である。

供試体の作製方法は、再現性が良くかつ比較的均一な構造を有する供試体を作成できる多重ふりい落下法¹⁶⁾を用いた。

2.2 試験方法

作製した供試体に炭酸ガス CO_2 および脱気水を通水させ飽和させた後、背圧を 196.2kPa まで加え、B 値が 0.98 以上であることを確認する。次いで、有効拘束圧 98.1kPa のもとで供試体を圧密させた後、それぞれの供試体に対して以下の 3 種類の実験を行った

(1) 非排水繰返し載荷試験のひずみ履歴の影響

液状化試験と同じ試験状態、すなわち、非排水繰返し載荷試験において、それぞれ軸ひずみ両振幅 1%、2% それに 5% のひずみ履歴を与えた後、圧縮側から伸張側への除荷時で軸ひずみが残留するように載荷を止め、その試料を 98.1kPa で再圧密した後、通常の液状化試験を行う。

(2) 初期構造異方性の影響

液状化抵抗に及ぼす初期構造異方性の影響を調べるために、図-1(a)に示すように堆積角 θ の異なる角度を持つ試料を準備する。堆積角 θ を持つ供試体を作製するために、図-1(b)のように、まず幅 50cm、長さ 50cm のモールドを角度 θ だけ傾け、豊浦砂を多重ふりい落下法で

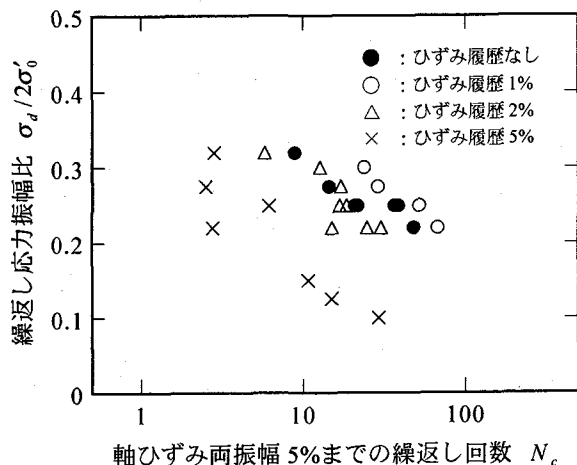


図-2 繰返し載荷回数と繰返し応力振幅比との関係
(非排水繰返し載荷試験のひずみ履歴の影響)

満たす。落下高さは規定の相対密度となるように調整した。堆積させた試料を飽和させた後、供試体を凍結する際の体積膨張を防ぐために真空ポンプで水を吸い出し不飽和にする。堆積面を水平にして、サンプラーを垂直に押し込み試料を採取する。これを一旦冷凍庫に入れ凍結させてから、供試体をサンプラーから取り出す。傾き θ は 0° 、 45° および 90° の3種類とした。

(3) 排水単調載荷試験のひずみ履歴の影響

ここでは、非排水繰返し載荷試験と同様に、排水単調載荷試験において、それぞれ軸ひずみ両振幅0.5%、1%、2%それに4%のひずみ履歴を与えた後、圧縮側で軸ひずみが残留するように載荷を止め、再圧密後、液状化試験を行う。

3. 試験結果および考察

3.1 非排水繰返し載荷試験のひずみ履歴の影響

一度液状化した試料の再液状化抵抗を調べるのに、ここでは非排水繰返し載荷試験におけるひずみ履歴に着目し、後続の液状化試験にどのような影響を及ぼすかについて検討した。図-2には通常のひずみ履歴のない場合の液状化試験結果と、ひずみ履歴を与えた後に行った液状化試験結果の液状化抵抗の比較を示す。与えたひずみ履歴は、軸ひずみ両振幅でそれぞれ1%、2%および5%である。縦軸は繰返し応力振幅比、横軸は軸ひずみが両振幅で5%になるまでの繰返し載荷回数を対数目盛りで表している。図-2から明らかなように、1%のひずみ履歴を与えた場合には、ひずみ履歴がない場合と比較して、若干、液状化抵抗が増加し、ひずみ履歴が2%、5%と増えるに従い液状化抵抗が小さくなり、ひずみ履歴5%では、ひずみ履歴がない場合の液状化抵抗よりも極端に小さくなっていることが分かる。なお、ひずみ履歴を与えた後の間隙比は、それぞれ小さくなっており、それもひ

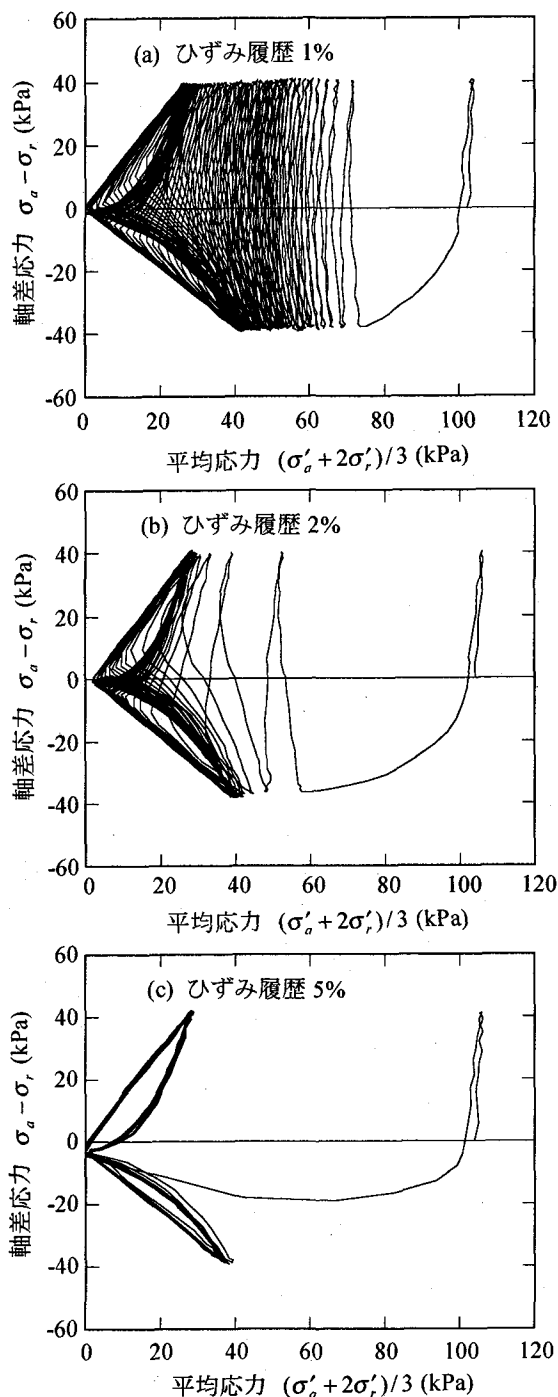


図-3 有効応力経路
(非排水繰返し載荷試験のひずみ履歴の影響)

ずみ履歴が大きいほど小さくなる傾向を示している。同様な結果は、既往の研究⁹⁾¹¹⁾によっても報告されている。

次に、この違いが何に起因しているかを見てみる。図-3は、ひずみ履歴を1%、2%それに5%を与えた場合の液状化試験の有効応力経路である。最初の圧縮側における載荷では、ひずみ履歴の大きさに関わらず有効応力経路（あるいは過剰間隙水圧変化）はほぼ同じであるが、除荷後の伸張側における載荷では、かなり違った傾向を

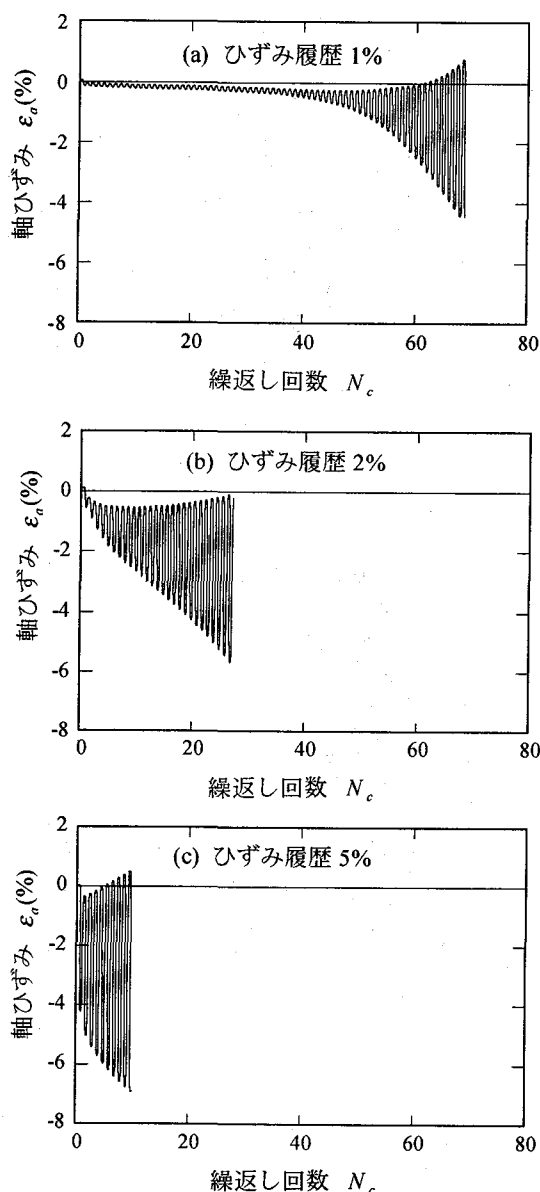


図-4 繰返し载荷回数に対する軸ひずみの変化
(非排水繰返し载荷試験のひずみ履歴の影響)

示しており、ひずみ履歴が大きいほど、平均有効応力の減少（あるいは過剰間隙水圧の増加）を示していることが分かる。また、図-4には繰返し载荷回数に対する軸ひずみの変化を示してあるが、ひずみ履歴の大きさに関らず伸張側でひずみが卓越している。これらの結果から推察するに、一度液状化した土粒子の構造は、圧縮側の载荷にはあまり変化せず、伸張側の载荷に対して、極端に弱い構造になっていることが推察される。

3.2 初期構造異方性の影響

3.1のひずみ履歴を与えた場合の液状化試験の結果から、ひずみ履歴の大きさに応じて生じた構造異方性の影響が大きいことが明かとなった。そこで、ここでは、初

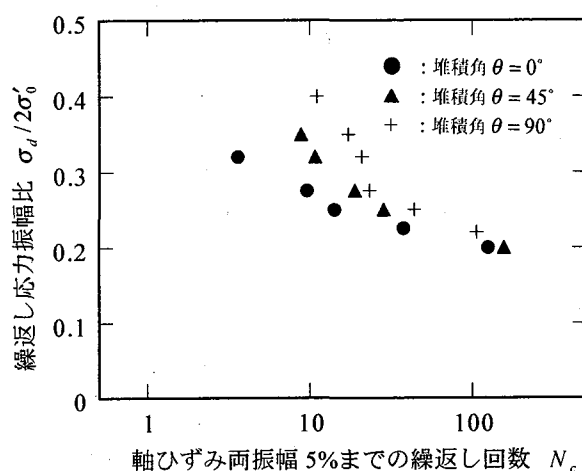


図-5 繰返し载荷回数と繰返し応力振幅比との関係
(初期構造異方性の影響)

期の堆積した状態での土粒子の卓越配列および土粒子の接点方向の卓越配列による異方性、すなわち初期構造異方性に着目して、その影響について検討した。対象とした堆積角 θ は 0° 、 45° 、 90° の3種類である。

図-5に繰返し応力振幅比と軸ひずみ両振幅5%までの繰返し载荷回数との関係を示す。明らかに、初期構造異方性による液状化抵抗の違いが見られる。すなわち、堆積角 θ が 0° の場合に液状化抵抗は小さく、堆積角 θ が 45° 、 90° となるに従い大きくなっているのが分かる。堆積角 θ が 0° の場合が、図-2のひずみ履歴のない場合に相当する。堆積角 θ を変えることによって、堆積角 θ が 0° の場合よりも液状化抵抗が著しく減少するという傾向は見られない。

図-6に応力経路の比較を示す。堆積角 θ が 0° から 90° となるに従い、圧縮側の最大応力比（平均応力に対する軸差応力の比）はほぼ同じであるが、伸張側の最大応力比が大きくなっていることが分かる。また、図-7と図-8に、それぞれ、繰返し载荷回数に対する軸ひずみの変化、軸差応力・軸ひずみ関係を示す。これらの図では、軸ひずみが卓越する载荷方向に違いが見られる。すなわち、堆積角 θ が 0° の場合は伸張側、 θ が 90° の場合は圧縮側に軸ひずみが卓越して生じるのに対して、堆積角 θ が 45° の場合は両側に生じている。同様な結果は既にMiura and Toki¹⁷⁾によっても報告されている。

これらの現象は、堆積角 θ による影響のみならず、試験装置の性質による影響を含んでいることに留意する必要がある。すなわち、図-9に示すように、中間主応力の相対的大きさを示す b 値 $\{=(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)\}$ が、圧縮側で0.0、伸張側で1.0という応力状態であり、かつ最大主応力方向が圧縮側と伸張側では 90° 不連続に変化する。更に、全応力の平均応力については、圧縮側で増加、伸張側で減少させた試験である。図-5～8は、これらの影響の組み合わせの結果である。

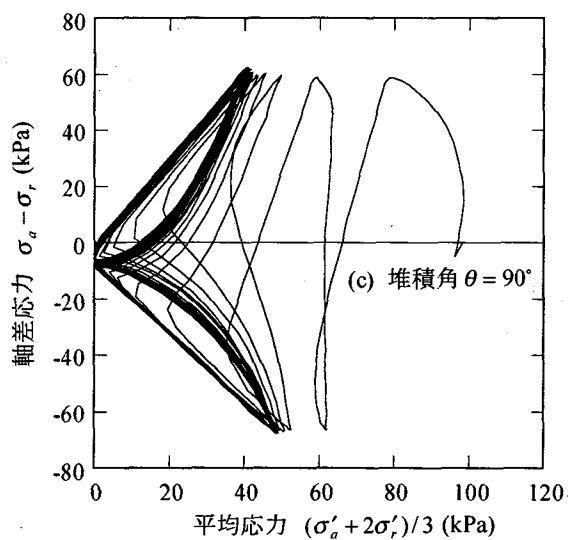
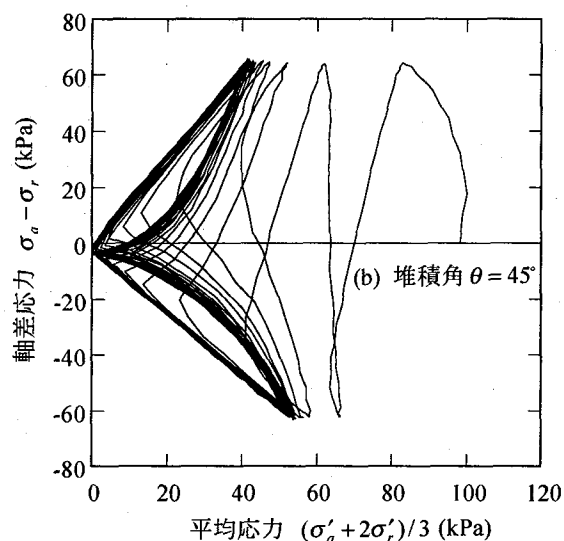
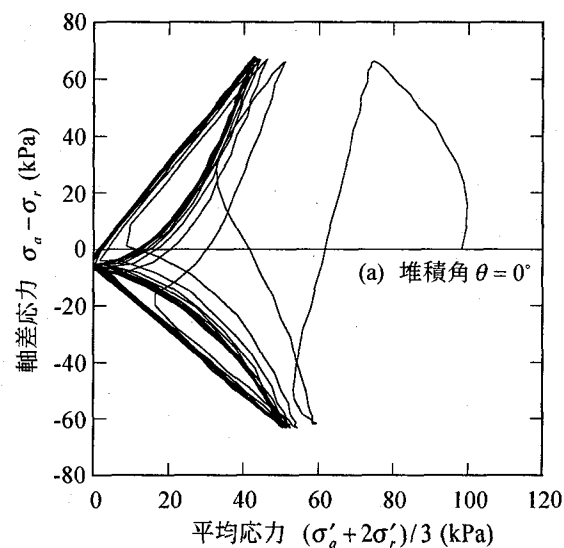


図-6 有効応力経路
(初期構造異方性の影響)

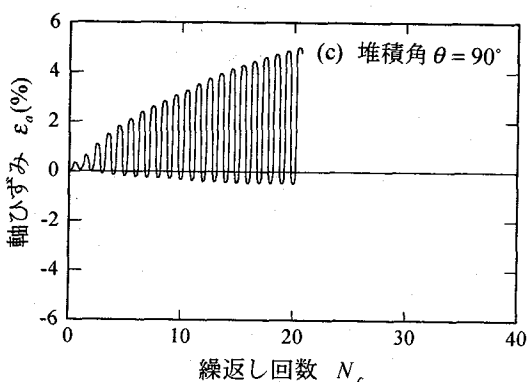
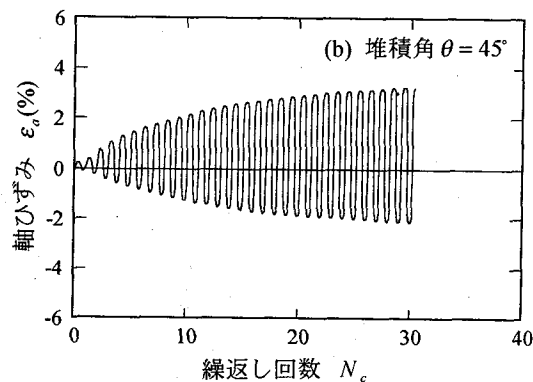
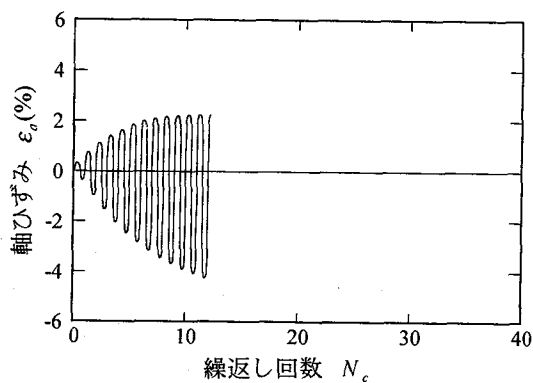


図-7 繰返し载荷回数に対する軸ひずみの変化
(初期構造異方性の影響)

更に、堆積角 θ が 0° と 90° の場合について、再液状化試験を行い、その応力経路を示したのが、図-10である。ここで、興味あることは、堆積角 θ に関わらず、両者共、3.1のひずみ履歴を与えた場合の液状化試験と同様に伸張側で極端に弱い構造を示していることである。

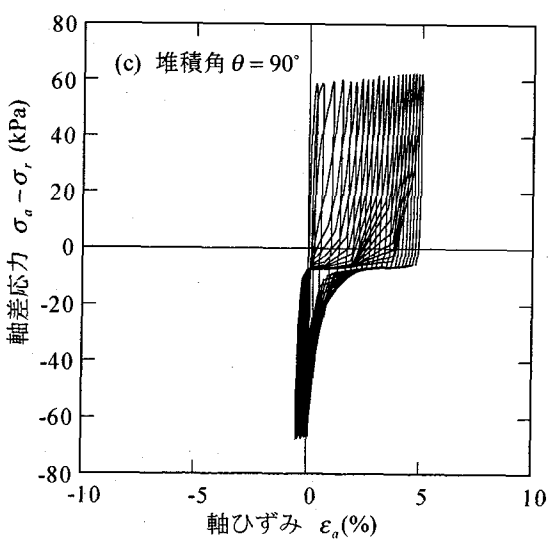
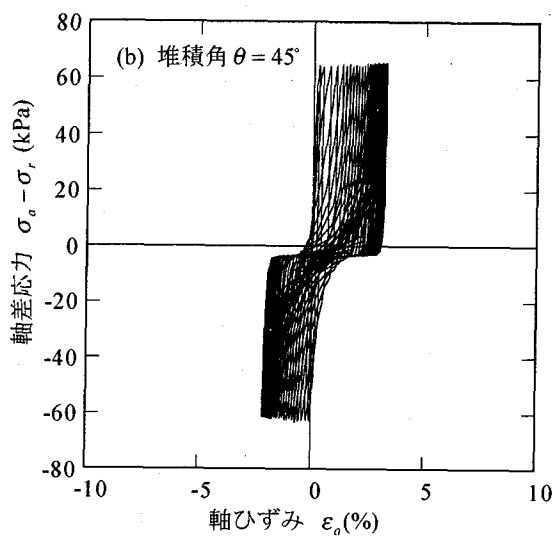
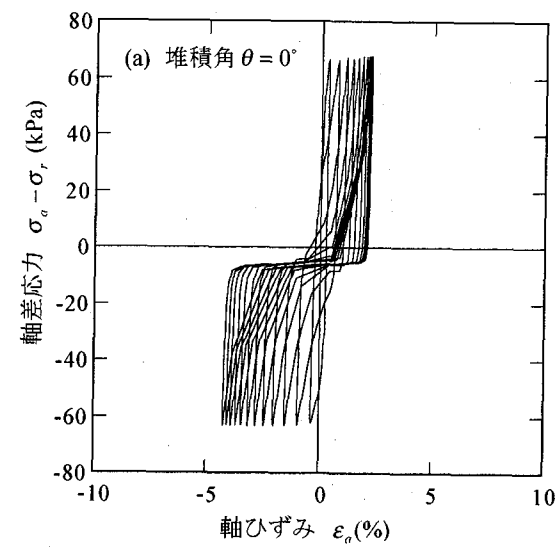
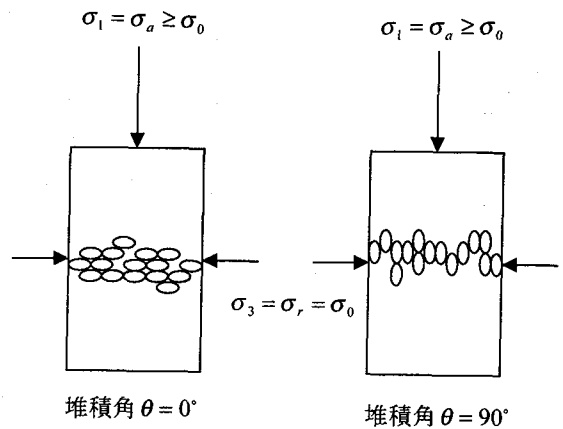
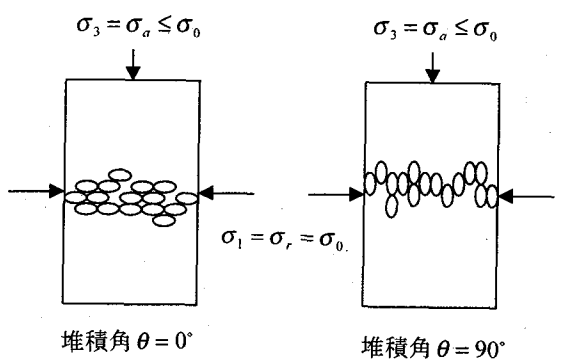


図-8 軸差応力・軸ひずみ関係
(初期構造異方性の影響)



(a) 圧縮状態



(b) 伸張状態

図-9 初期構造異方性を有する砂の载荷状態

3.3 排水単調载荷試験のひずみ履歴の影響

3.2の実験結果から、一度液状化した試料の構造異方性は、通常、多重ふるい落下法によって作製される性質とは別個のようである。ここでは、3.1の非排水繰返し载荷でひずみ履歴を与えるのではなく、排水単調载荷試験でひずみ履歴0.5%、1%、2%、それに4%を与えた場合について検討した。それぞれひずみ履歴を与えた後、液状化試験を行い、繰返し応力振幅比と軸ひずみ両振幅5%までの繰返し载荷回数を示したのが図-11である。また、ひずみ履歴0.5%、1%、2%の場合の有効応力経路および繰返し载荷回数に対する軸ひずみの変化を図-12、図-13に示す。ここでの結果は、いずれも非排水繰返し载荷試験でひずみ履歴を与えた場合と同様な傾向を示している。

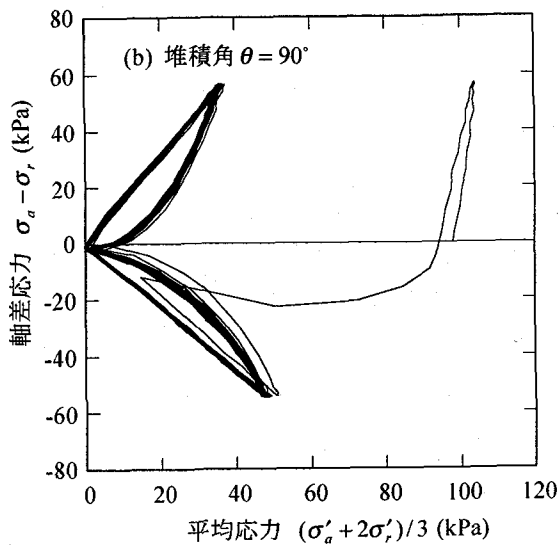
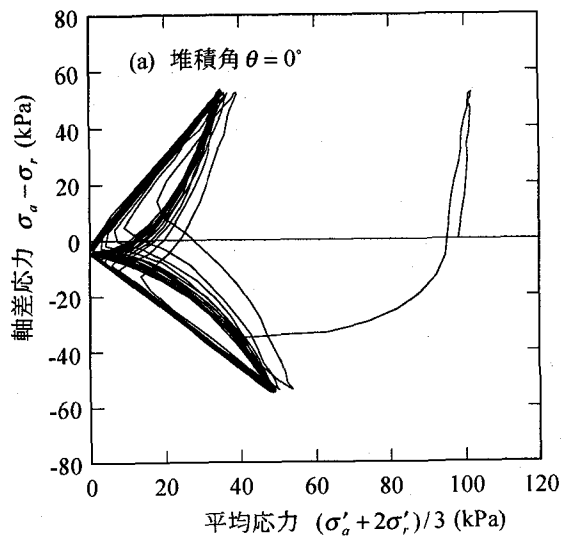


図-10 再液化時の有効応力経路
(初期構造異方性の影響)

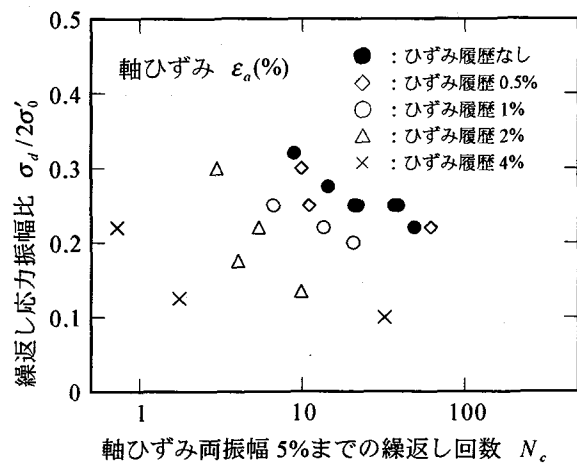


図-11 繰返し載荷回数と繰返し応力振幅比との関係
(排水単調載荷試験のひずみ履歴の影響)

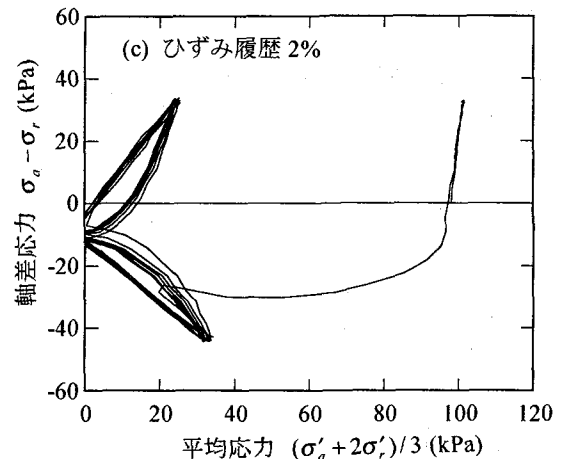
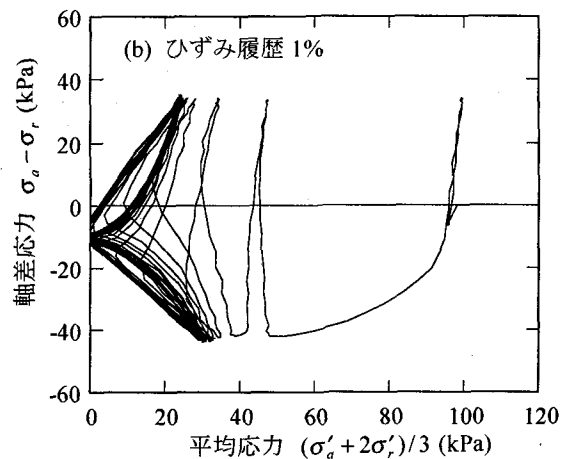
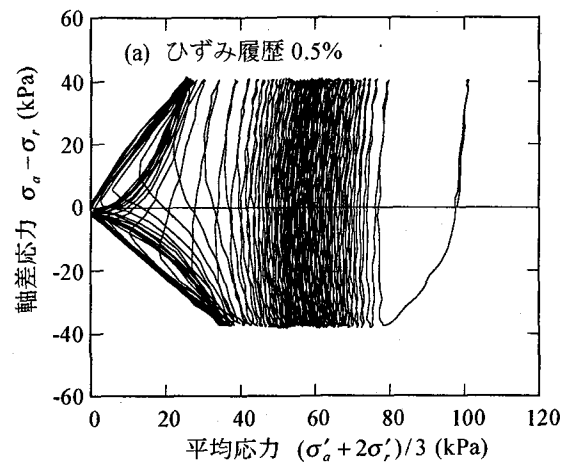


図-12 有効応力経路
(排水単調載荷試験のひずみ履歴の影響)

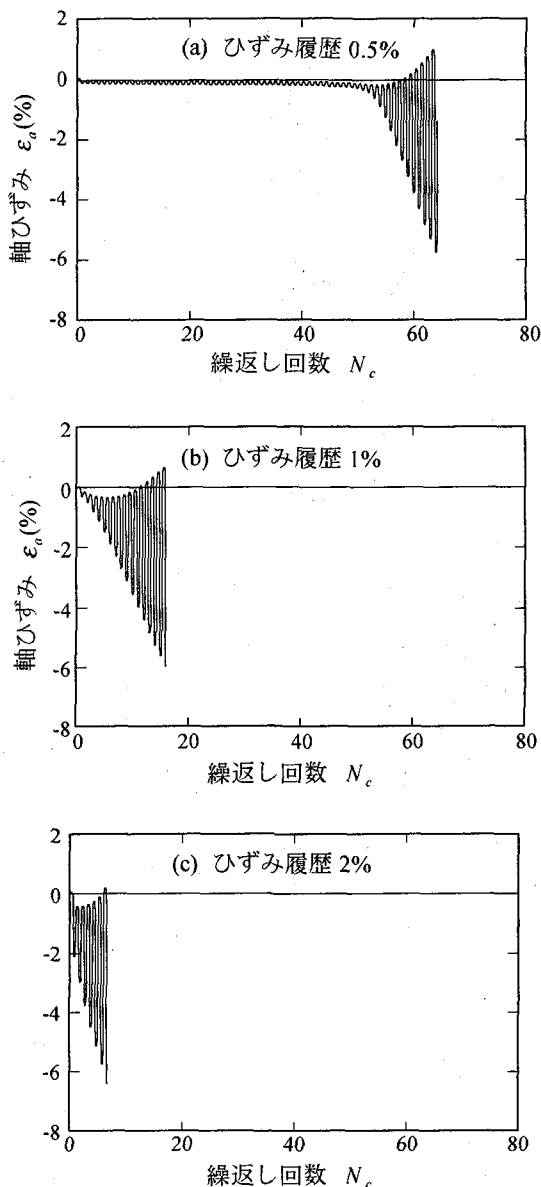


図-13 繰返し載荷回数に対する軸ひずみの変化
(排水単調載荷試験のひずみ履歴の影響)

3.4 液状化抵抗とひずみ履歴との関係

更に、液状化抵抗とこれらのひずみ履歴との関係を調べるために、非排水繰返し載荷試験でひずみ履歴を与えた場合と、排水単調載荷試験でひずみ履歴を与えた場合の繰返し載荷回数20回での繰返し応力振幅比と与えた最大軸ひずみの大きさを比較したのが図-14(a)である。ここで、繰返し載荷回数20回の繰返し応力振幅比は、軸ひずみ両振幅5%の時の液状化抵抗から、最小2乗法を用いて求めている。次に、与えた最大軸ひずみの大きさではなく、ひずみ履歴を与えた後の圧縮側からの除荷によって得られる残留軸ひずみ量を求めて、繰返し応力比と残留軸ひずみ量との関係を示したのが図-14(b)である。図-14(a),(b)から、液状化抵抗の大きさは、ひずみ履歴を与えた時の排水条件や単調、繰返し載荷条件によ

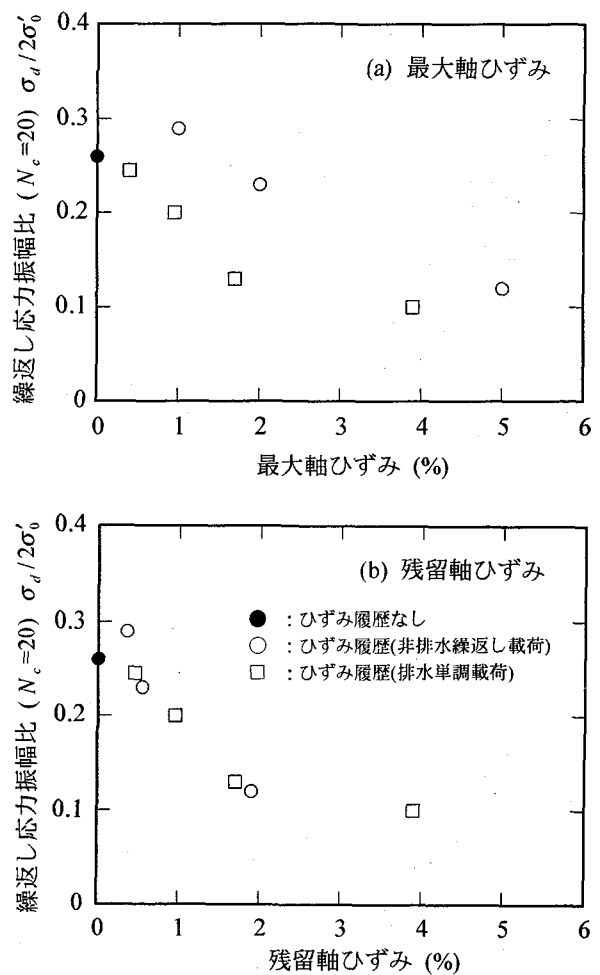


図-14 繰返し載荷回数 20 回での繰返し応力比とひずみ履歴の関係

らず、最大軸ひずみの大きさでなく、残留ひずみの大きさに応じて決まることが確認された。

4. 微視的構造の観点からの考察

要素実験結果を用いた巨視的観点からは、再液状化試験における液状化抵抗の著しい低下は、伸張側の極端な構造異方性によるところが大きいと推察されるが、ここでは、更に微視的構造の観点から、どのような構造異方性になっているのかを考察してみる。Oda et al.⁽⁸⁾は、光弾性材料のロッドを用いた2次元圧縮試験によって、粒子間の接点の方向が最大主応力軸方向に集中し、初期構造異方性とは別の構造異方性、すなわち誘導異方性を示し、構造的には最大主応力軸方向に効果的に力を伝達する柱構造の形成となっていることを明らかにしている。また、この柱構造は、最大主応力方向に新たな接点を作ることによってというよりもむしろ、最小主応力方向において存在していた接触の喪失によって形成されることを述べている。

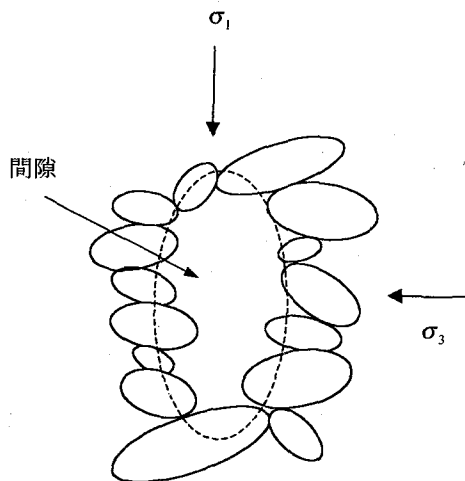


図-15 土粒子の柱構造¹⁸⁾

Oda et al.¹⁸⁾が示した柱構造は図-15のようである。孤立した間隙は、二つの隣接する柱の間で細長い間隙を作り、柱構造および細長い間隙が最大主応力方向に平行して成長する。そのため、軸応力が大きければ大きいほど、異方性が強くなる。Iwashita and Oda¹⁹⁾は、個別要素法による数値実験でも細長い間隙を持つ柱構造の存在を明らかにしている。ここで、軸応力と柱構造との関係は、圧縮ひずみと柱構造との関係と言うこともでき、繰返し載荷を含めたより一般的な場合には、残留ひずみと柱構造との関係となろう。すなわち、残留ひずみが大きいほど、柱構造による異方性の程度が大きいことを意味し、図-14(b)の繰返し回数20回での繰返し応力比と残留軸ひずみとの関係は、その繰返し応力比と柱構造の異方性の程度との関係を示していると言える。

この強い異方性を持つ構造は、最大主応力方向が固定されている限り、載荷した応力に有効に耐え得るが、繰返し三軸試験のように最大主応力方向が、それまでの最小主応力方向に変化する場合、細長い間隙は容易に閉じてしまうことになる。これが再液化化試験における伸張側での極端な過剰間隙水圧の発生を引き起こし、液化化抵抗の著しい低下の原因となっているものと考えられる。

5. 結論

三軸試験装置を用いた再液化化試験において、液化化抵抗が著しく低下する理由を調べるために、非排水繰返し載荷試験（液化化試験と同じ試験条件）時のひずみ履歴の影響、初期構造異方性の影響、更に排水単調載荷によるひずみ履歴による影響について実験を行い、その挙動特性について検討を行った。なお、ここでは、いずれのひずみ履歴も、圧縮側から伸張側への除荷時で軸ひずみが残留するように与えており、この条件を前提として

いる。更に、個別要素法による既往の数値実験からの最新の知見をもとに考察を加えた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) ひずみ履歴を与えた試料の液化化試験結果から、液化化抵抗の大きさはひずみ履歴の大きさに依存し、かつ、一度液化化した土粒子の構造は、圧縮側にはあまり影響を受けず、伸張側において、極端に弱い構造になっていることが観察された。
- (2) 堆積角 θ が 0° 、 45° 、 90° の3種類の初期構造異方性試料の液化化試験では、堆積角 θ に依存して軸ひずみが卓越する載荷方向に違いが見られた。それは、試験装置の特質、すなわち、中間主応力の相対的大きさ b 値、それに載荷の平均応力の大きさが、圧縮側と伸張側で異なっていることと、堆積角 θ をパラメータとした初期構造異方性の特質とが相互に寄与した結果であることに留意する必要がある。
- (3) 初期構造異方性試料の再液化化試験においては、堆積角 θ に関らず伸張側で極端に弱い構造になっている。すなわち、大きなひずみ履歴を与えた後、あるいは液化化後は、最初の初期構造異方性とは全く別の構造異方性を示すと考えられる。
- (4) 液化化抵抗の大きさは、ひずみ履歴を与えた時の排水条件や単調、繰返し載荷条件によらず、ひずみ履歴を与えた後の残留ひずみの大きさに依存する。
- (5) 微視的構造の観点から考察するに、残留ひずみに応じた構造異方性、すなわち、細長い間隙を間に持つ柱構造が最大主応力方向に生じ、再液化化試験のように、最大主応力方向が柱に垂直な方向に変化する場合、細長い間隙が容易に閉じることによって、液化化抵抗の著しい低下を生じていると考えられる。

参考文献

- 1) Yasuda, S. and Tohno, I. : Sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake, Soils and Foundations, Vol.28, No.2, pp.61-72, 1988.
- 2) Emery, J.J., Finn, W.D.L. and Lee, K.W. : Uniformity of saturated sand specimens, ASTM, STP 523, pp.182-194, 1973.
- 3) Sasaki, Y. and Taniguchi, E. : Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits, Soils and Foundations, Vol.22, No.3, pp.1-14, 1982.
- 4) Castro, G. : Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.1, No.101, No.GT6, pp.551-569, 1975.
- 5) 徳江俊英, 松本悟 : 砂の不均一互層供試体の三軸圧縮試験, 第27回土質工学研究発表会, pp.559-560, 1992.
- 6) 藤森啓之, 飯坂誠二, 川本健, 小田匡寛, 鈴木輝一, 佐藤正行 : 液化化強度に及ぼす層構造の影響に関する

- る実験的研究, 第 53 回土木学会年次大会, III-A87, pp.172-173, 1998.
- 7) 龍岡文夫: 三軸せん断装置による砂の変形特性に関する基礎的研究, 東京大学博士論文, 1972.
 - 8) Finn, W.D.L., Bransby, P.L. and Pickering, D.J.: Effect of strain history on liquefaction of sand, Proc. ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934, 1970.
 - 9) Seed, H.B., Mori, K. and Chan, C.K.: Influence of seismic history on liquefaction of sands, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.103, No.GT4, pp.257-270, 1977.
 - 10) Ishihara, K. and Okada, S.: Effects of stress history on cyclic behavior of sand, Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.31-45, 1978.
 - 11) 鈴木輝之, 鈴木利文: 飽和砂の再液化強度に及ぼす密度と構造の変化の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.28, No.2, pp.187-195, 1988.
 - 12) 松岡元, 山崎浩元, 松原義仁, 青木康, 原康彦: 粒子構造の変化に着目した再液化現象の解析, 第 20 回土質工学研究発表会, pp.625-626, 1985.
 - 13) 大原資生, 山本哲朗: 振動台による飽和砂の再液化特性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.2, pp.123-132, 1982.
 - 14) Ishihara, K. and Okada, S.: Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand, Soils and Foundations, Vol.22, No.3, pp.109-125, 1982.
 - 15) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
 - 16) 土岐祥介, 三浦清一: 室内実験に用いる砂供試体の作成法について, 第回土質工学シンポジウム, pp.173-180, 1979.
 - 17) Miura, S. and Toki, S.: Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits, Soils and Foundations, Vol.24, No.3, pp.69-84, 1984.
 - 18) Oda, M., Nemat-Nasser, S. and Konishi, J.: Stress-induced anisotropy in granular masses, Soils and Foundations, Vol.25, No.3, pp.85-97, 1985.
 - 19) Iwashita, K. and Oda, M.: Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.124, No.3, pp.285-292, 1998.

(1999 年 9 月 17 日受付)