

# 液状化した砂におけるねじりせん断試験 によるひずみ速度依存性の検討

苔口聖史<sup>1</sup>・下川淳嗣<sup>2</sup>・高地潤<sup>3</sup>・東畑郁生<sup>4</sup>・芳川あ弥<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-0033 文京区本郷7-3-1)

<sup>2</sup>五洋建設(株) 土木名古屋支店 (〒460-8614 名古屋市中区錦三丁目2番1号)

<sup>3</sup>東京大学 工学部土木工学科専攻

<sup>4</sup>正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

<sup>5</sup>東京大学元学生

土構造物が液状化した時に起こる変形を推定するためには、液状化砂の性質を理解することが重要である。数多くの模型試験より液状化した砂には、粘性流体としての速度依存性があるという報告がなされている。しかし液状化砂の応力ひずみ特性を導き出すためには、要素せん断試験を行う事が必要である。本研究では、豊浦標準砂による中空ねじり試験を行い、液状化した砂の挙動に粘性流体としての速度依存性は見られないことを示した。また、自重による影響が無視できるスチロール粒子を試料に用いて、高さ方向に一律な応力場での速度依存性の検証を、中空ねじり試験機と、高速大変形せん断が可能である三分割式中空ねじり試験機により実施した。その結果、その摩擦角に速度依存性は見られないことがわかった。

*Key Words*: liquefaction, large deformation, rate dependency, sand

## 1. 序論

1964年の新潟地震を契機に、液状化に関する研究が盛んに取り行なわれるようになった。その結果、液状化発生のメカニズムの解明や、発生予測法<sup>1)</sup>の作成に関しては、ほぼ全容を把握できるようになってきた。しかし、1986年の日本海中部地震以来、液状化地盤の側方流動が、地中構造物に及ぼす被害<sup>2), 3), 4)</sup>について関心が集まってきている。流動する地盤が、埋設管や杭などの地中構造物に及ぼす外力の推定や被害予測を行うためには、液状化した砂の変形特性を把握する事が先決となる。そのため、流動する地盤の物性<sup>5), 6), 7)</sup>や、地中構造物に及ぼす力を調べるために、数多くの研究が模型試験<sup>8), 9), 10)</sup>を通して精力的に行われている。

この流動地盤と構造物の相互作用<sup>11)</sup>を評価するために、従来は地盤と構造物とをばねで連結し、その変位量に見合った荷重が発生するとして、外力を評価していた。しかし、特に線形ばねの場合、その変位に比例して荷重が大きくなるという概念を、せん断ひずみが数百%のオーダーで発生する流動地盤に当てはめると、計算さ

れる荷重が過大になるという問題がある。

それに対して最近の研究から、流動地盤は液体的な挙動を示すという見方が指摘されている。これは、液状化によって土の剛性はほぼ無視できる程度にまで減少し、地盤はひずみ速度に依存した応力を発生し、速度依存性を有するというものである。

この理論の正当性を裏付けるものとして、Towhata. et. al<sup>12)</sup>は1gの振動台上に模型地盤を造成し、これを液状化させるとともに、内部に設置された埋設管を横挽きして、地盤内反力を測定した模型試験について報告している。この実験から、間隙水圧がほとんど下がらない完全液状化中では、地盤反力は図-1で示すように管の横挽き速度に比例した応力を発揮すること、過剰間隙水消散後は、地盤内反力は摩擦力が卓越して、速度には依存しないことが指摘された。また完全液状化中における地盤内応力から、見かけの粘性係数を逆算し、その値は、渦無しの水の粘性(20°Cで0.001Pa秒)に比べて10万倍程度異なる、0.1kPa秒のオーダーであることも示された。

この埋設管模型試験により、液状化地盤と構造物との相互作用には、粘性流体としての速度依存性が存在する

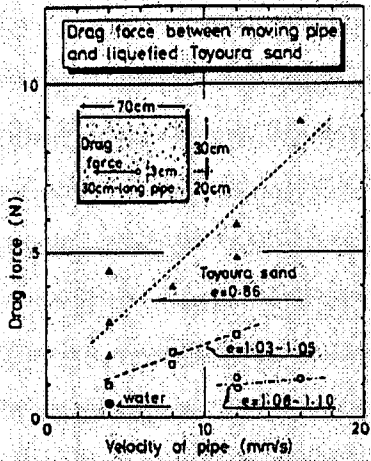


図-1 埋設管横挽き速度と地盤反力の関係<sup>1)</sup>

と考えられた。しかし模型実験では、模型地盤内の応力やひずみ不均一であり、またその詳細な測定もできないため、データの解釈が多くの仮定に依存してしまう。さらに、得られた見かけの粘性係数も非現実的な大きさである。そのため液状化砂の応力ひずみ特性を導き出し、広く一般的な状況の解析に適用するためには、要素せん断試験による検討が不可欠である。

そこで本研究では要素せん断試験を行い、液状化後の砂の速度依存性について考察した。試験装置には、応力ひずみ測定が明確に決定できる中空ねじり試験と、大変形せん断を目的に製作された、三分割式中実ねじり試験機<sup>13)</sup>を用いた。また試料には、粒径の均一な豊浦標準砂と、比重が1.04で水中では自重による有効応力の影響がほとんど存在しない、スチロール粒子を用いて考察を行った。

参考となる既往の研究として、砂の液状化後の挙動に関する要素試験<sup>14), 15)</sup>がある。試験装置には中空ねじりせん断試験機を使用し、試料に豊浦標準砂を用いている。実験では、応力振幅一定の繰返しせん断で液状化させた後に静的単調載荷を行い、繰返し載荷時に受けた最大せん断ひずみの大きさや、間隙流体の粘性が、液状化後の単調載荷に与える影響について検討している。それによると、最大せん断ひずみの大きさに依存して、完全液状化状態が長く続くこと、また間隙流体の粘性が大きいほど、せん断応力の回復が早くなることを指摘している。さらに液状化後の単調載荷速度により、発揮されるせん断応力が大きくなるという点についても言及している。しかしここで得られた速度による違いは微小であり、粘性流体としての挙動を示すほどの違いではない。また液状化の程度が及ぼす影響に関しても、得られた結果にはばらつきがあるため、定量的な判断を下すには若干不十分である。

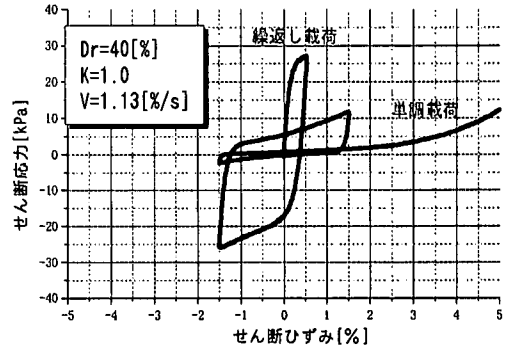


図-2 繰返し載荷と単調載荷の応力ひずみ関係

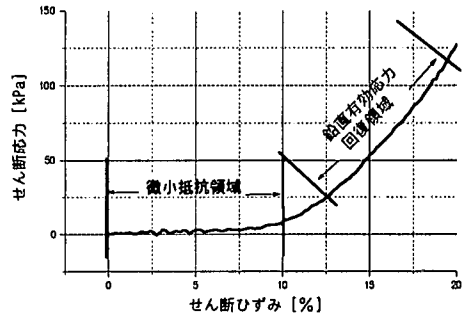


図-3 単調載荷におけるの応力ひずみ関係

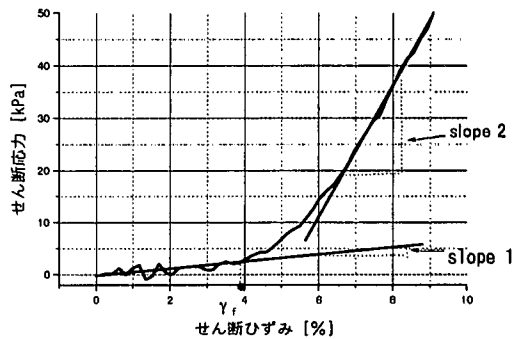


図-4 単調載荷におけるの応力ひずみ関係

## 2. 中空ねじりせん断試験における豊浦標準砂の速度依存性の検討

### (1) 実験方法

中空ねじりせん断試験装置には、軸方向とねじり載荷に高速載荷が可能である、メガトルクモーターを使用している。また試料に豊浦標準砂を用い、空中落下法とCO<sub>2</sub>の使用により飽和させ、試料を作成した。内径6cm、外径10cm、高さ20cmの中空供試体にB値0.96以上を要求し、平均有効応力100kPaで側方変形を拘束して圧密

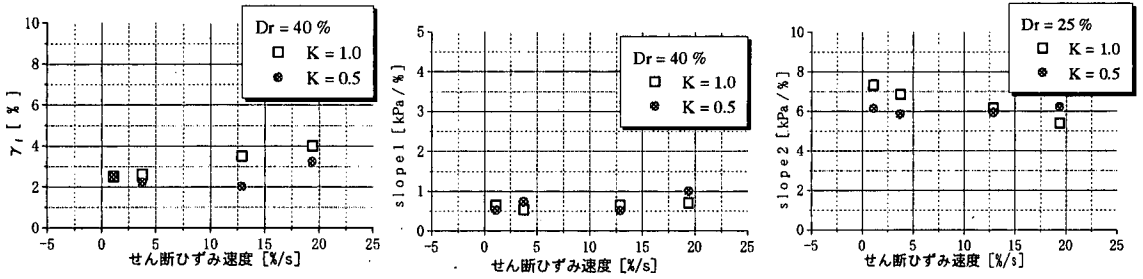


図-5 相対密度40%における速度依存性の比較 (繰返しせん断ひずみ 1.5%)

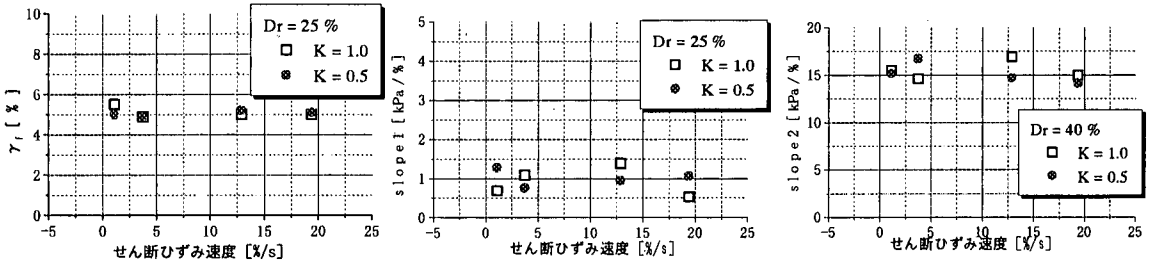


図-6 相対密度25%における速度依存性の比較 (繰返しせん断ひずみ 0.5%)

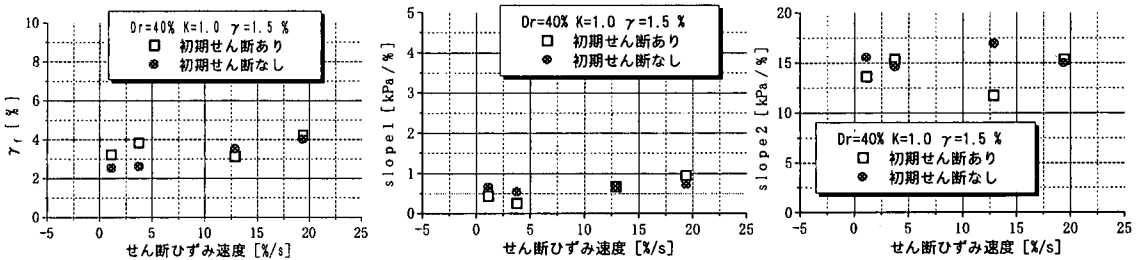


図-7 初期せん断による違い (繰返しせん断ひずみ 1.5%)

した。その後、繰返しせん断 (図-2) によって過剰間隙水圧を96%以上上昇させ、さらに1サイクルの所定ひずみ履歴を与えた。ここで、所定ひずみ履歴とは、せん断ひずみが所定の上限值 (例えば1.5%) を越えない繰返しせん断である。そして非排水状態のままひずみが0%の状態から様々なねじりせん断ひずみ速度で単調載荷を行い、液状化後の挙動の違いについて考察した。またせん断ひずみ速度以外の条件として、相対密度や圧密時の応力比K値、繰返しせん断履歴、初期せん断などの条件の違いについても考察する。

結果は、粘性流体としての砂の速度依存性を検討しているため、主にせん断応力-せん断ひずみ関係を示すことにする。図-3に示すのは、液状化後の代表的なせん断応力-せん断ひずみ関係である。これによると、単調載荷時においては、はじめせん断ひずみの増加に伴い、せん断応力がほとんど回復しない微小抵抗領域が存在し、その後下に凸の曲線を描きながら急激にせん断応力が回復を始めて、やがて一定の剛性でせん断応力が回復する

鉛直有効応力回復領域に達する。そこで結果に関する考察を行なうために、図-4で示すように、それぞれの領域に関して線形近似を行い、微小抵抗領域の大きさを $\gamma_1$ 、傾きを Slope1、鉛直有効応力回復領域の傾きを Slope2 と定義して、速度依存性を検討する。簡便な方法ではあるが、速度依存性の有無を検討するには十分な精度を得ることができた。

## (2) K値の違いによる影響

図-5に、せん断ひずみの上限値が1.5%で液状化させた、相対密度40±1%の試料の $\gamma_1$ 、Slope1、Slope2をそれぞれ示す。圧密時の応力比K値 ( $K = \sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$ ) には0.5、1.0の2つをとり、せん断ひずみ速度は1.13、3.76、12.9、19.4 [%/s] の4つのケースについての影響を比較している。これによると、K値やせん断ひずみ速度の違いは、実験に不可避なばらつきを除き、 $\gamma_1$ 、Slope2にほとんど影響を及ぼしていない事が確認される。Slope1が若干影響を受けているようにも見えるが、ニュ

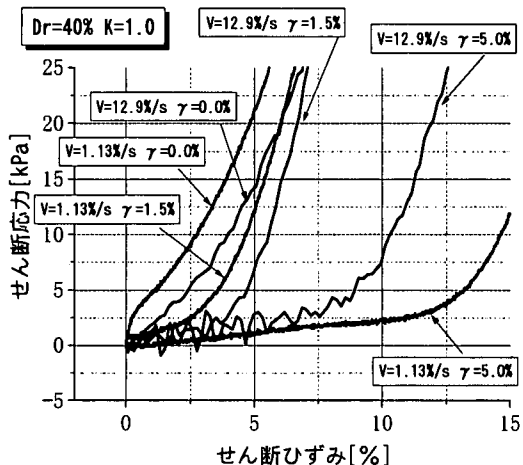


図-8 繰返し履歴の違いによる比較

ートン粘性のようにひずみ速度に比例するような重要なものではない。

また図-6には、せん断ひずみ振幅0.5%で液状化させた、相対密度25%の $\gamma_1$ , Slope1, Slope2をそれぞれ示す。K値やひずみ速度には上記と全く同じケースをとっている。結果に多少のばらつきがあるのは、相対密度が小さく供試体作成が難しいため、強度に個体差が生じたためであり、K値や速度の影響とは言えない。

### (3) 初期せん断の影響

側方流動は、ある程度の勾配を持った斜面が液状化して生じるものであるため、実際の地盤条件を考慮した場合、静的な初期せん断が生じている。そこで、相対密度40%の供試体を等方圧密し、せん断応力20kPaの排水初期せん断を行った後、20kPaのせん断応力振幅で繰返し載荷で液状化させた。その後、せん断ひずみを初期値0%の位置に戻し、ひずみ速度1.13, 3.76, 12.9, 19.4 [%/s]の4ケースで単調載荷した。図-7に示すのは、初期せん断の有無を比較した、 $\gamma_1$ , Slope1, Slope2である。多少のばらつきがあるが、初期せん断の影響により大きく地盤の物性が変化することはないといえる。

### (4) 繰返し載荷時におけるせん断ひずみの影響

序論でも述べたが、液状化後の挙動は液状化の程度にも影響される。繰返し載荷時におけるせん断ひずみ振幅の大きさは、過剰間隙水圧と並び、その程度を示す適切な指標と言える。そこでせん断ひずみ振幅 $\gamma$ を、それぞれ0%, 1.5%, 5.0%と変えた時の影響を、せん断ひずみ-せん断応力関係を用いて比較する。相対密度40%, K値1.0に固定し、せん断ひずみ速度1.13, 12.9, [%/s]のケースをそれぞれ図-8に示す。ここで繰返しせん断

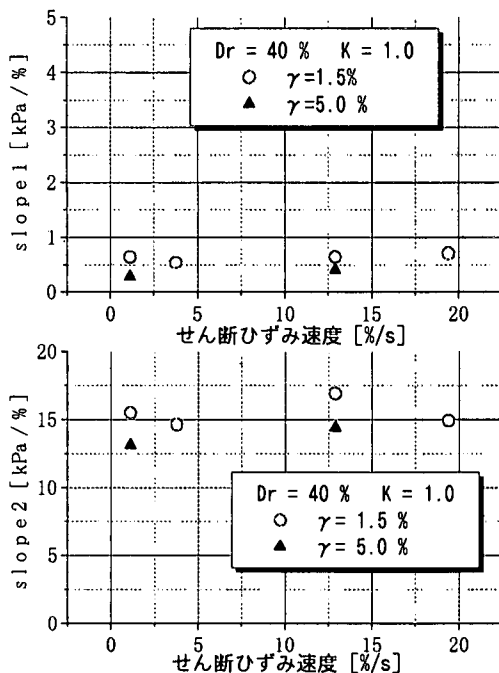


図-9 繰返し履歴の違いによる比較

ひずみ0%のケースとは、繰返し載荷を行わず、外部から間隙水圧を加えて強制的に液状化させたものである。そのため液状化はしているが、砂粒子の骨格構造はそれほど乱されてはいないものと考えられる。

グラフを見ると、 $\gamma=0\%$ のケースでは微小抵抗領域が存在せず、単調載荷と同時に応力の回復が起きているため、繰返し載荷を行ったケースと比べて挙動そのものが異なっていることがわかる。また $\gamma$ の大きさに比例して、微小抵抗領域の大きさ $\gamma_1$ が増加していることも見て取れる。

繰返し載荷を与えなかった場合は、砂の挙動が異なり他との比較が困難なので、 $\gamma=1.5\%$ ,  $5.0\%$ についてのSlope1, Slope2と速度の関係を図-9に示す。これによると、Slope1は微小であり、繰返し載荷時のひずみ $\gamma$ には、あまり影響されない。さらに $\gamma=5.0\%$ では、速度に依存して剛性が若干大きくなっているようにも見える。そこで $\gamma=5\%$ でのせん断応力-せん断ひずみ関係を、相対密度別に図-10に示す。これによると、K値やせん断ひずみ速度の違いにより、微小抵抗領域においてその大きさに差が生じていることが見て取れる。特にDr=60%の場合は、傾きにも違いが出ていることがわかる。また、図-11にDr=40%,  $\gamma=1.5\%$ でのせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。全てのケースにおいて $\gamma=5.0\%$ のものより微小抵抗領域が小さくなっていることが確認できる。

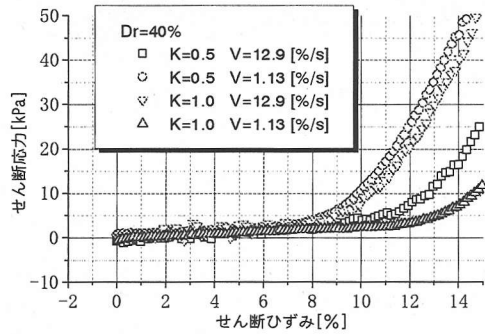
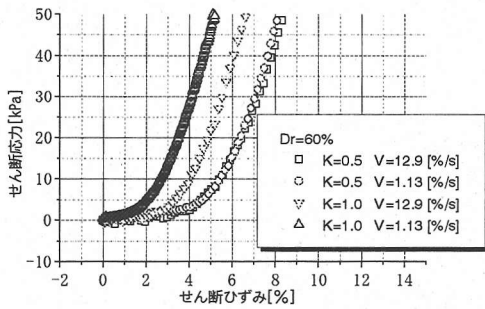


図-10 繰り返しひずみ振幅5%における実験結果

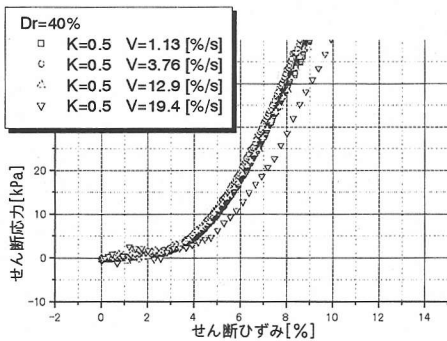
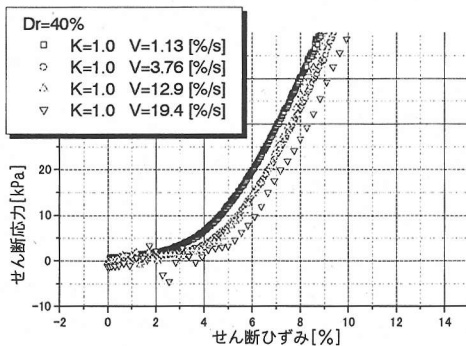


図-11 繰り返しひずみ振幅1.5%における実験結果

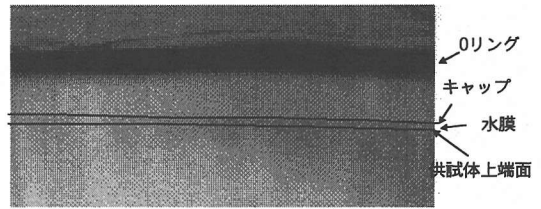


写真-1 キャップ直下に発生した水膜

以上の結果から、繰返し履歴が大きくなるに連れて、微小抵抗領域での挙動に、せん断ひずみ速度やK値の影響が現れるものと考えられた。しかし、相対密度40%、 $\gamma=5.0\%$ で液状化させた実験においてその後検討を行ったところ、供試体上端と上部キャップとの間に、写真-1で示すような厚さがおよそ1mm程度の水膜が確認された。水膜は、砂の負のダイレタンスによって生じたもので、せん断応力伝達機構の劣化を意味する。またそれによって、微小抵抗領域の傾きや大きさに影響を及ぼすことは容易に想像がつく。相対密度が40%のケースでは、繰返しせん断ひずみが2%を越えると部分的に砂とキャップのかみ合わない部分を確認された。よって、 $\gamma=1.5\%$ のケースでは速度やK値の影響が見られず、 $\gamma=5.0\%$ のケースで違いが見られた。だが、これは水膜の影響であり、ひずみ速度やK値によるものではない。水膜の発生は観察実験によると、一様に起こるわけではなく、部分的に発生していくため、同じせん断ひずみ振幅を与えても、その後の単調載荷においてばらつきが生じるものと思われる。また単調載荷による砂のダイレタンスにより、水膜が消失していく過程を観察したところ、水膜が見えなくなってきた時点でせん断応力が急激に回復することがわかった。 $\gamma=1.5\%$ で水膜の発生していない場合でも微小抵抗領域が存在することを考慮すると、微小抵抗領域は繰返し履歴の大きさと水膜の有無の両方により大きく影響されるのであろう。そして水膜の有無は、微小抵抗領域における見かけ上の挙動にばらつきを生じさせる大きな要因となる。従って、水膜が発生したと考えられる実験結果を過大に重要視せぬよう、注意が必要である。よって図-6、図-7に意味がある。

### (5) 鉛直有効応力回復領域における評価

(4)で、微小抵抗領域における傾きや大きさに関しては、繰返し履歴の大きさと水膜の有無に決定されることがわかった。そこで鉛直有効応力回復領域における、支配的な要因について考察する。前述した結果から、速度に依存しない事はわかっているため、ここでは相対密度Dr(%)に関して検討してみる。(2)、(3)、(4)で記載した実験ケースについて図-12に示すと、線形の関係があり以下の式で近似できる事がわかる。

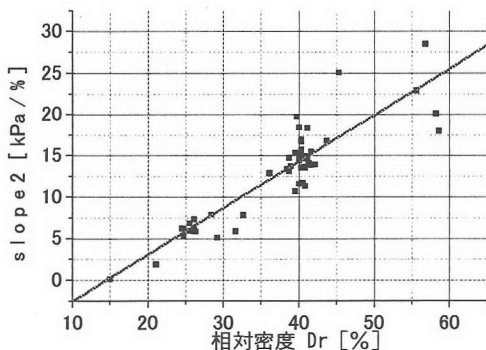


図-12 slope2と密度の関係

$$\text{slope2} = -8.17 + 0.561 * \text{Dr} \quad (1)$$

これより、有効応力回復後の挙動は密度に支配される事がわかる。以上の結果より、中空ねじり試験を用いた砂の研究では、速度依存性を示唆する結果は全く見られなかった。

### 3. スチロール粒子を試料に用いた速度依存性の検討

#### (1) 試料

砂の中空ねじりせん断試験では、供試体上端では液状化して有効応力が喪失されても、厳密に言えば砂粒子の水中単位体積重量により、供試体下部では鉛直有効応力が生じている。本研究における中空供試体を例に取れば、供試体上下で約2kPaもの開きが生じていることになる。

しかし実際の振動台模型試験では、過剰間隙水圧が発生して、間隙水の上向き浸透流が起こる。その際砂粒子には、浮力とは別に下から噴き上がる流体力を受けるため、有効応力の喪失した状態になる。前述した砂の中空ねじり試験で速度依存性が見られなかったのは、この違いが影響している可能性はある。しかし要素試験で、このような砂粒子の浮遊状態を作り出すことは不可能である。

その点を解決するために、供試体試料に写真-2で示すスチロール粒子を用いた。スチロールは表面が滑らかな球形の物質であり、大きさもほぼ均一で、平均粒径は約0.8mmと砂の4倍程度の大きさである。そして何より比重が1.04と小さいため、水中単位体積重量がほぼ0となり、自重による鉛直有効応力の発生が微小であり、ほぼ均一な応力場が得られる。これにより、液状化時には、模型試験での地盤状態に近い応力場を再現することが可能になった。

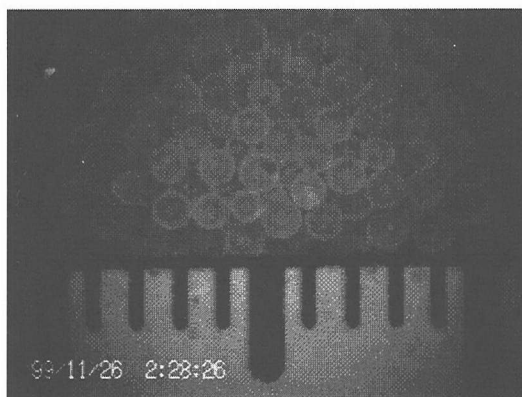


写真-2 スチロール粒子 (1目盛りは1mm)

#### (2) 実験方法

初めに中空ねじり試験を行い、砂と同等の結果が得られることを検証した。実験方法は豊浦砂の場合と同じであるが、スチロールは粒径が砂に比べて大きい為、メンブレンペネトレーションが生じて繰り返し载荷では液状化しなかった(水圧が70%くらいしか上昇しなかった)ため、外部から間隙圧を加えて、強制的に液状化させた。

また液状化時における砂の大変形特性を調べるには、中空ねじり試験だけでは不十分である。中空ねじり試験機は、応力ひずみを的確にコントロールできるというメリットがある反面、軸方向がひずみ制御であるため高速せん断後すぐに有効応力が回復してしまい、ひずみ数百%レベルでの低拘束状態を作り出せないこと、またメンブレンで拘束されているため、せん断ひずみが20%程度までしかねじれないなどの制限がある。

そこでこれらの問題点を解決するために、図-13で示す様な三分割式中実ねじり試験装置を考案した。軸荷方向にベロフラムシリンダー、ねじり荷方向にメガトルクモータを用いているため、低拘束状態での高速せん断が何サイクルでも可能である。供試体はメンブレンの代わりにせん断リングで拘束され、またリング間に鋼球をはさんでいるため、低摩擦で回転角に制限なくねじることが可能である。更に供試体上部キャップは三分割されており、それぞれにロードセルが取り付けられているため、キャップごとにかかる応力を独立に測ることが可能である。そのため、砂とリング間の摩擦に影響されやすい外側部分と、ひずみ分布が一樣でない中心部分のデータを取り除いた、中間部分のみのデータ測定が可能になった。三分割式中実ねじり試験機における実験手順は、半径9cm、高さ約9cmの円柱供試体を飽和させ、鉛直応力100kPaで圧密した後、供試体高さ一定で、くり返し荷

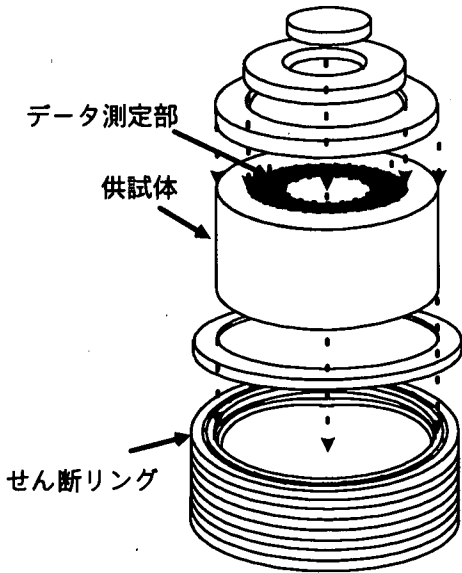


図-13 三分割式中実ねじり試験機模式図

を行い液状化させ、鉛直有効応力を低いまま一定で高速荷重を行なう。ここで液状化とは鉛直有効応力が初期の5%以下になった状態を示す。中空ねじり試験と違い低拘束状態が保てるため、同じ供試体で何サイクルでも高速せん断可能である。

### (3) 中空ねじり試験結果

図-14に中空ねじりせん断試験における、せん断力-せん断ひずみ関係を示す。繰り返し荷重を行っていない砂の実験結果と挙動がよく似ており、単調荷重後すぐに応力が回復している。従って、スチロール粒子がせん断試験の対象になりうる事が確認された。ちなみに単調荷重開始付近における傾きを、速度と間隙比をそれぞれ横軸に取ってプロットしたものを図-15に示す。この結果から、スチロールには、速度依存性はなく密度依存性が存在することが分かる。厳密に言えば、全て同じ相対密度で速度のみ変えた結果を比較する必要があるが、供試体作成の都合上、間隙比をタッピングなどで調整することが不可能であるため断念している。但し速度が1.13と19.4 [%/s]のケースは20倍もの速度差があるにもかかわらず、密度が同じなために、剛性が同じになっている。

以上の結果から、自重の影響が生じない浮遊状態の粒子でも速度依存性は見られず、密度依存性が見られることが分かった。また砂の代わりに使用したスチロールは、摩擦角の大きさの違いから剛性は異なるが、液状化後の挙動は砂に類似していることが判明した。しかし、繰り返しせん断によって液状化させられなかったことが、本実験の限界であった。

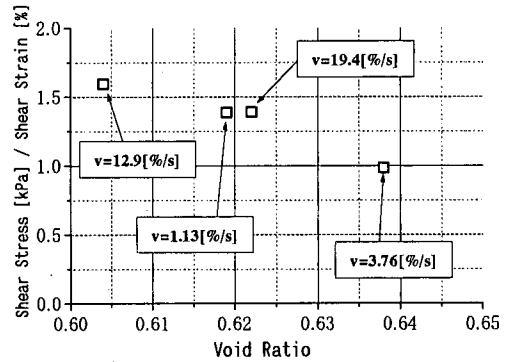


図-14 スチロールの実験結果

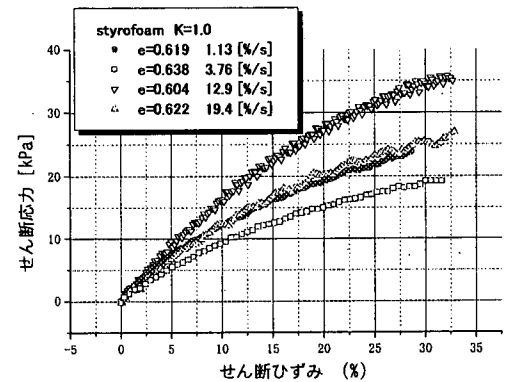
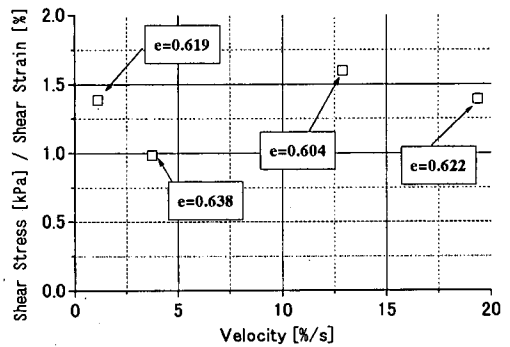


図-15 スチロール実験における剛性の検討

### (4) 三分割式中実ねじり試験結果

この試験機では、繰り返しねじりによって液状化を起こさせ、さらに低有効応力で繰り返し荷重と合わせて、ひずみ速度の影響を考察した。ここで示す結果は、すべて中間部分のキャップで測定した応力とひずみである。図-16に正負方向への高速せん断時の応力経路を示す。この図から、高速せん断時においては鉛直有効応力を低圧状態に保てることを見てとれるが、完全に一定圧のま

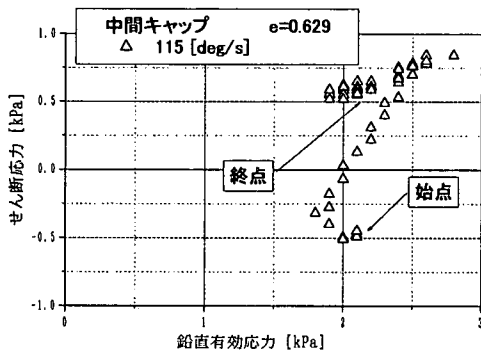
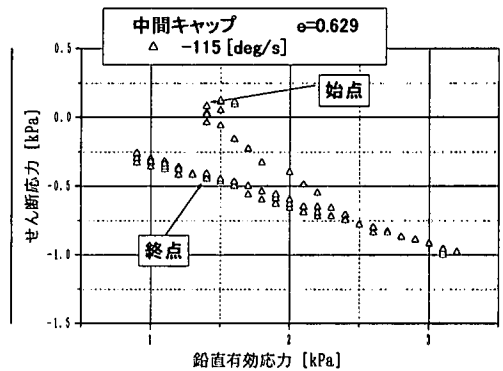
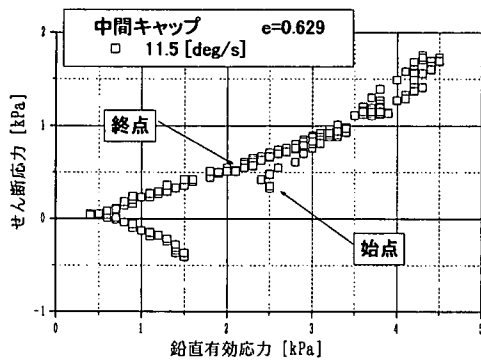
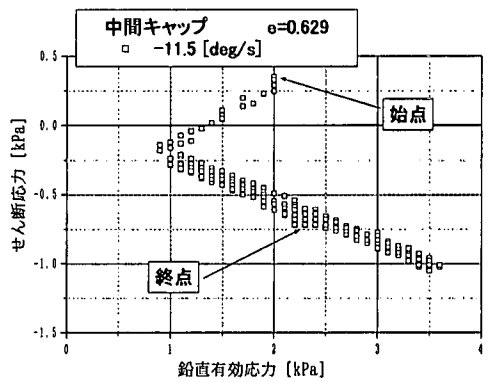
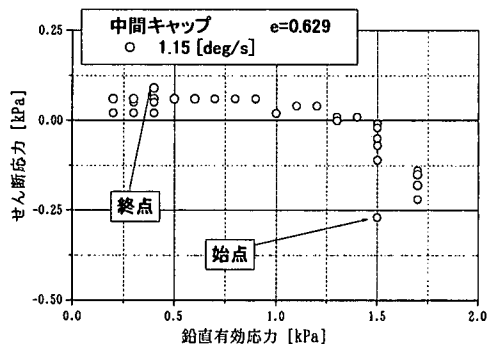


図-16 スチロール実験の応力経路

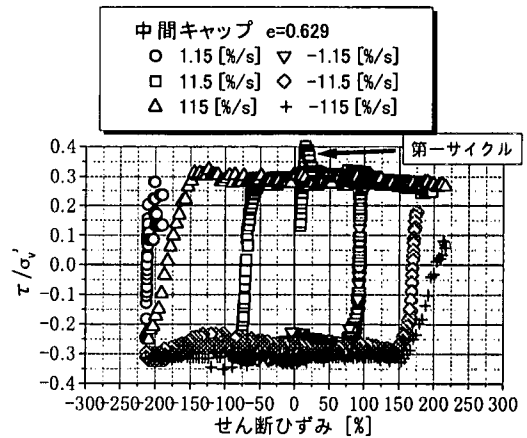
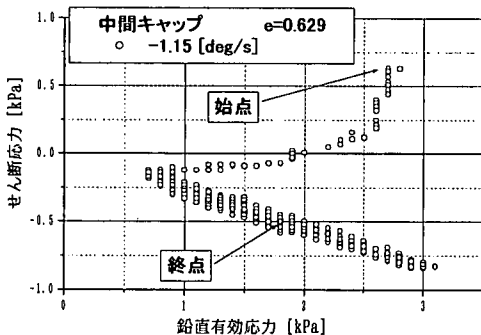


図-17 スチロール実験のせん断ひずみと摩擦角の関係

ま保つことはできなかった。ペロフラムシリンダーが一定に保てるのは、三分割されたキャップ全体の平均応力だからである。そのため、速度のみの影響を比較するた



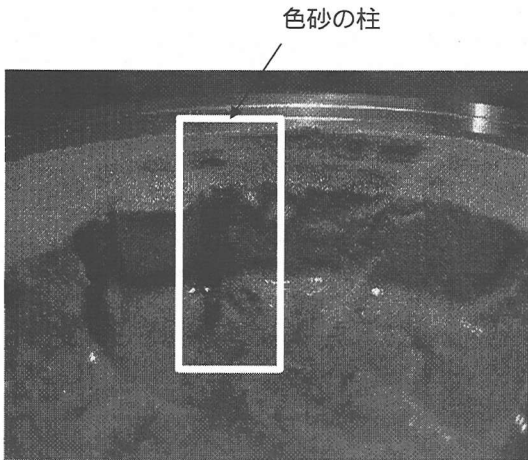


写真-3 せん断後の供試体内部の様子（豊浦砂）

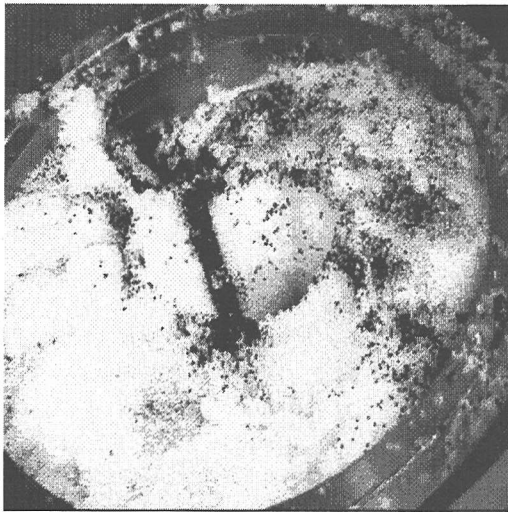


写真-4 せん断後の供試体内部の様子（スチロール）

めには、せん断応力を鉛直有効応力で割った摩擦角 $\tau/\sigma_v'$ を用いることにした。

図-17で示すのは、せん断ひずみと摩擦角 $\tau/\sigma_v'$ の関係である。せん断ひずみは、供試体上端の変位を高さで割った値である。これによると、最初のせん断においてはピーク強度が発揮されるが、2回目以降のせん断ではそれが見られない。応力比すなわち摩擦角は常に一定値に落ち着き、またせん断ひずみ速度によらずほぼ一定の値となることがわかった。しかし摩擦角一定という現象を考えた場合、供試体内部ではどのような変形が生じているのか予測がつかない。

三分割式中実ねじり試験装置考案当初は、試料に豊浦標準砂を用いて実験を行った。しかし、色砂を用いてせ

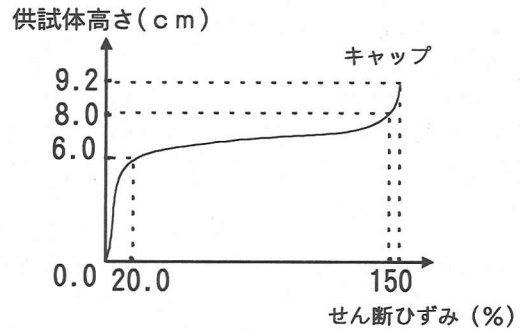


図-18 供試体内部のせん断ひずみ分布概念図

ん断後の供試体内部の観察実験を行なったところ、写真-3で示すように、内部ではせん断ひずみがほとんど発生せず、キャップと供試体上端部の境界でのみひずみが進行していることが判明した。結果として境界の性質を測っただけで、砂の物性を正しく測定することができなかった。その原因として、砂の自重によるところが多い。砂では液状化させても、粒子の自重により鉛直有効応力が発生するため、高さ方向に強度差が生じ、最も弱くなる上端でせん断すべり層が発生してしまうのである。

そこで試料にスチロールを用いて、高さ方向の自重の影響を無くした状態で、速度依存性を検討した。しかし結果を見るとやはり滑り面が生じているように思われた。そこで砂の試験同様、供試体内部の観察実験を行った。写真-4で示すのは、150%せん断ひずみ（回転角約180度）をおこさせた時の供試体内部の写真である。黒く着色したスチロール粒子の柱に沿って、供試体を掘削した。黒い粒子が、供試体高さ9.2cm全体にわたってせん断変形した領域を示している。黒いスチロール粒子の柱が供試体上半で大移動・大変形したことがわかる。せん断ひずみの高さ方向の分布概念図を図-18に示す。これによると、下から6cmくらいまでは一様に変形しているが、そこから2cmほどの領域に大せん断ひずみが発生していることが分かる。

このように、新たに考案した三分割式中実ねじり試験機を、スチロールを用いて速度依存性を検討した所、供試体の物性を測定することは可能になったが、供試体の上半にのみ大せん断ひずみが発生した。このようにひずみ分布が一様ではなかったにせよ、測定された図-17の摩擦角は、供試体内部の大変形域の剛性を反映しており、そこには速度依存性は見られなかった。

#### 4. 考察

本研究では、液状化した砂の速度依存性について要素

実験を通して検討を行なった。その結果、液状化した砂の応力ひずみ関係に、有意な速度依存性は見られないことが分かった。

ではなぜ、パイプ横挽き試験などに代表される振動台模型試験で、速度依存性が見られたのか疑問が残る。理由として、速度依存性が見られた際、加振による繰返しせん断も同時に起こっていたことが挙げられる。

織田<sup>16)</sup>は中空ねじり試験で、繰返しねじり載荷を同時平行させた状態での三軸強度は、繰返し載荷速度と単調載荷速度の比に影響されることを指摘している。本研究における実験はすべて、単調載荷のみであり、模型試験でいう加振後の挙動に当たる。冒頭でも述べたが、パイプ横挽き試験でも加振後の挙動には速度依存性が見られなかったことから、この考えはあながち間違いではなかろう。つまり、単に有効応力を失った状態での砂の挙動に速度依存性はなく、何らかの外的要因が働く状態でのみ、砂は液体的な挙動を示すといえるのではなかろうか。これは今後の課題であろう。

## 5. 結論

本研究で得られた結果によれば、ニュートン粘性流体に見られるような顕著なひずみ速度依存性は、液状化砂には観察されなかった。

(1) 豊浦標準砂を用いた中空ねじり試験結果から、液状化後の微小抵抗領域において、その剛性やひずみはせん断ひずみ速度、K値、初期せん断などに依存しないことが分かった。

(2) 微小抵抗領域の傾きや大きさに直接的に影響を与える要因は、繰返し載荷時のせん断履歴である。しかし大きな繰返し履歴を与えると、中空ねじり試験機ではその構造上、供試体上端に水膜が発生し、それが液状化後の挙動にばらつきを生じさせる原因となる。

(3) 鉛直有効応力回復領域においては、密度依存性があり、せん断ひずみ速度やK値、初期せん断などの影響はない。

(4) スチロールを用いた中空ねじり試験から、粒子の自重による影響を無くした状態での挙動にも速度依存性は見られず、密度依存性のみ見られた。

(5) 低拘束状態での高速大変形せん断が可能である、三分割式中空ねじり試験機では、供試体内部にせん断滑り層が発生してしまうため、模型試験で見られる様なせん断ひずみを発生させることは不可能であった。しかしそれでもなお、スチロールを試料に用いた同試験結果から、摩擦角に速度依存性は存在しなかった。

## 参考文献

- 1) 佐々木康, 宇高薫, 宮本康司: 液状化の継続時間を考慮した盛土の被害予測手法に関する研究, 土木学会中国支部技術発表会, 1997.
- 2) 東畑福生, 堀越研一: 液状化地盤における建物の沈下事例の解析, 第32回地盤工学研究発表会論文集, Vol.1, pp.973-974, 1997.
- 3) 宮島昌克, 長谷川正道, 北浦勝, 小池武, 北野豊: 液状化に伴う側方流動が地中構造物に及ぼす影響に関する実験的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, 第2巻, pp.1363-1368, 1994.
- 4) Sato, H., Hamada, M. & Doi, M.: An experimental study of effects of laterally flowing ground on in-ground structures, *Proc. 5th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-94-0026*, pp.405-414, 1994.
- 5) 高田至郎, 永井淳一: 液状化地盤の動的剛性および減衰特性, 建設工学研究所報告, 第29号, pp.53-98, 1987.
- 6) 宮島昌克, 北浦勝, 北野豊: 液状化の程度による地盤物性値の変化に関する実験, 土木学会年次講演会概要集, 3, pp.548-549, 1994.
- 7) Miyajima, M., Kitaura, M., Koike, T. & Hasegawa, M.: Experimental study on characteristics of liquefied ground flow, *Proc. IS-Tokyo, 95 The First International Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema*, pp.969-974, 1995.
- 8) 佐藤博, 土居賢彦, 大保直人, 本田満彦, 浜田政則: 動的遠心模型実験装置による砂地盤の側方流動現象に関する基礎実験, 土木学会年次講演会概要集, 3A, pp.520-521, 1994.
- 9) 湯浅明, 佐藤博, 土居賢彦, 川上哲太郎, 浜田政則: 液状化砂の流動特性に関する実験的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, 第3巻, pp.877-882, 1994.
- 10) 豊田浩史: 液状化地盤の側方流動模型実験と動的予測手法の開発, 東京大学博士論文, p.380, 1995.
- 11) 大友敬三, 岩橋敏広, 清水幹夫, 朱牟田善治, 浜田政則: 杭基礎に作用する側方流動の荷重特性, 第22回地盤工学研究発表会論文集, pp.95-98, 1993.
- 12) Towhata, I., Vargas-Monge, W., Orense, R. P., and Yao, M.: Shaking Table Tests on Subgrade Reaction of Pipe Embedded in Sandy Liquefied Subsoil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 18, No.5, pp.347-361, 1999.
- 13) 下川淳嗣: 液状化した砂の高速変形における速度依存性の検討, 東京大学修士論文, 1998.
- 14) 規矩大義, 安田進, 安川武志, 門馬宏典: 繰返し載荷時のせん断履歴が液状化後の流動特性に与える影響, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp.325-328, 1998.

- 15) 樋口桂意, 青木直子, 安田進, 森本弘光: 液状化後の砂の  
変形特性に与える間隙流体の粘性の影響, 第34回地盤工学  
研究発表会, pp.1033-1034, 1999.
- 16) 織田隆志: 繰り返しねじりせん断を受ける砂の非排水三軸

強度に関する実験, 東京大学修士論文, 1997.

(2000. 3. 27 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON STRAIN - RATE DEPENDENCY IN POST - LIQUEFACTION BEHAVIOUR OF SAND

Kiyoshi KOKEGUCHI, Atsushi SHIMOKAWA, Jun KOHCHI,  
Ikuo TOWHATA and Aya YOSHIKAWA

Many model shaking tests to date have suggested extremely high strain-rate dependency in the rigidity and strength of liquefied sand. The present study conducted, firstly, torsion shear tests in which liquefied specimens were subjected to monotonic shear at a variety of strain rates. Different from model tests, the present test results did not indicate rate dependency. In the second stage, moreover, the limited magnitude of strain in the above-mentioned tests were overcome by developing a new testing instrument. Tests on specimen of Styrofoam grains, which had very small buoyant unit weight in water did not exhibit rate dependency either.