

液状化地盤での土の不均質性による流動ポテンシャル についての中空ねじりせん断試験

Flow potential in liquefied ground due to soil non-uniformity by torsional shear tests

中央大学理工学部土木工学科 正会員 國生剛治
同 学生員 岸本 隆

1. はじめに

液状化という名前の由来は、もともと飽和砂が地震のショックによって固体から液体への不連続的变化を起こし、それが甚大な構造物被害をひきおこすことを強調する意味からであったと思われる。したがって、設計者に明確な変化を意識付け、注意を喚起するために、適切な範囲においてその変化点を明確に定義しそれを重視することは意味のあることと思われる。適切な範囲とは、その点を境に地盤の強度・剛性などが劇的に変化し、いわゆる流動ポテンシャルを示し始める場合で、まずは緩い砂地盤が対象となろう。

一方、上記のような明確な流動性の変化が起こらない場合に、現状の液状化判定結果で間隙水圧の100%上昇または軸ひずみ両振幅5%到達に対応して決められた $F_L=1.0$ を下回ることを強調し過ぎることは問題である感じられる場面が最近ますます多くなってきた。その原因は、L2地震動の下では、液状化の検討対象とされる土の範囲が、文字通りの液状化を起こしやすい緩い砂から、密な砂、粘性土を含んだ砂、礫質土など多様な土にまで広がってきたためである。これらの土では、液状化判定で定義される点（現在広く使われているのは載荷繰返し回数20回で軸ひずみ両振幅5%に達した時点で、間隙水圧100%上昇にもほぼ対応）を越えるとひずみの成長は大きくなるもののそれほど急激ではなく、載荷繰返しごとにサイクリックモビリティによる強度の回復が明確におき、固体から液体への明確な変化とは異なるかなり連続的变化にとどまる。このような場合においては、液状化判定で $F_L=1.0$ 以下かどうかだけを重視しすぎ、そこを越えてはならない一種の限界値として扱う現行の設計法は、設計者に誤解や混乱をもたらすとともに、構造物の経済設計の観点からも弊害がある。

ある点を境として固体から流動ポテンシャルを持った液体への明確な変化が起きるような場合にはその変化点を重視し、そこで設計法を不連続的に変える必要がある。粘着力のない土において、密度が緩い場合がそれに当たる。しかし、室内土質試験機を用いた非排水試験によると、相対密度が30%程度と極めて緩い砂でも10数%程度のせん断ひずみでせん断強度の回復が起き、それ以上の大ひずみまでほぼ無抵抗でせん断変形するような流動ポテンシャルは現れないことが分かっている。いっぽう、実際にはたとえば新潟のきれいな砂からなる原地盤では相対密度が30~40%はあったと思われるが、50%~100%を越えると思われる大ひずみによる地表面勾配の緩い地盤流動が起きている(Kokusho and Fujita, 2002)。つまり、原地盤では要素試験よりはるかに流動ポテンシャルが大きく表れるといえよう。

この主な原因としては、要素試験では液状化状態での土粒子の沈降現象を考慮しておらず(大川, 1997)、特に密度の緩い砂ではその問題点が顕在化しやすいことが挙げられる。すなわち、要素試験は均質な砂について完全な非排水条件で行われるが、実地盤の砂は多かれ少なかれ不均質性を有している。そのために、砂層全体としては非排水条件であっても局所的には排水条件となって間隙水の移動あるいは間隙の再配分が起き、それが局所的な弱部を生み出す(National Research Council 1985)。不均質性の程度や連続性が強い場合、たとえば低透水シームが連続的に挟在している場合などには、その直下に間隙の大きな部分あるいは極端な場合には水膜が形成され、それが滑り面となって極めて小さなせん断抵抗で大きなせん断変形が可能となる(Kokusho, 1999)。

これ以外にも大きな地震の直後に余震が頻繁に起きる場合、砂がこのような小さな地震を受けると正のダイレイタンシーが生じにくくなるのが室内実験により示されている(Meneses et al. 1998)。したがって、直後の余震もある程度の影響をおよぼしている可能性があるが、不均質性に起因した間隙の再配分は実地盤においては無視し得ないほど大きいと考えられる。その効果は砂の密度が限界値より緩い場合にとくに顕著となると考えられるが、その発生限界を室内実験や理論に基づいて決めることは現状では難しい。むしろ既往の液状化調査で、流動ポテンシャルによる大被害を起こした条件を分析することにより、限界相対密度あるいは限界貫入抵抗値を定めるべきであろう。この変化点を境に液體的挙動が顕著とな

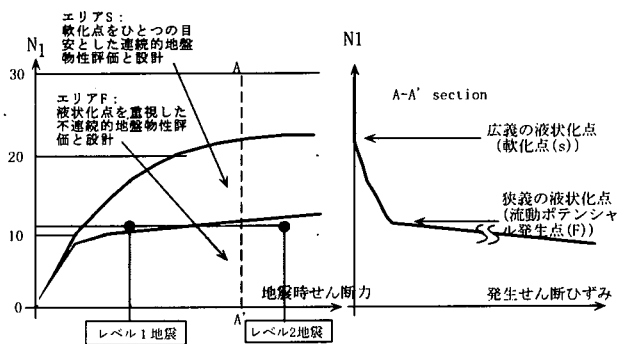


図1 地震時せん断応力の大きさと砂地盤のN値の関係に基づいた設計の考え方

る場合、液状化後の変形量を精度良く評価することは容易ではないため、現状では地盤改良などの方策を講じる場合ことが推奨されている。しかし、このような液状化地盤での大変形の定量評価法の確立は性能設計の導入など設計の合理化にとって不可欠であり、いっそうの研究が必要である。

この点を多少具体的に説明するために、地震力と地盤のN値の関係で示したのが図1である。通常の液状化判定(5%両振幅ひずみに対応)のカーブと流動ポテンシャルを示す限界(狭義の液状化)のカーブを概念的に示している。たとえば、A-A'という断面で考えれば、地盤中に発生するせん断ひずみは5%両振幅ひずみ(間隙水圧上昇率100%にほぼ対応)の軟化点(S)を越えても変化はほぼ連続的であり、連続的に評価可能である。一方狭義の液状化点(F)を越えると砂は流動的となり、ひずみは不連続的に急増する。レベル1地震においては、構造物をわずかな変形にとどめることが必要であり、必要であれば地盤改良などによりN値を少なくともエリアSの範囲に持つてくる必要がある。その同じN値の地盤が図1に示すようにレベル2地震を受けた時にエリアFに入る場合には、信頼性の高い変形量の算定は現状では容易ではなく、重要な構造物についてはエリアSに入るようにすることが望ましいと言えよう。

流動ポテンシャルを発揮し始める限界は新潟地震の例などを参考にして大体的見当で言えば、きれいな砂の場合には、相対密度で50%、基準化N値では $N_1=10$ 程度がその限界の代表値になるのではないと思われる。Ishihara(1993)は細粒分含有率が30%以下の砂が流動的破壊を起こす限界N値として有効上載圧98kPaの下で $N=8\sim 9.5$ を提案しているが、 $N_1=10$ はこれともほぼ整合する。また、新潟の大規模な流動を起こした地盤で $N_1=10$ 程度であった例も示されている(Kokusho and Fujita, 2002)。実際は、地震動の大きさにも依存し、大きな地震ほどそれほど密度の低くない地盤でも流動ポテンシャルを帯びやすくなると考えられるため、L2地震動では限界N値は多少大きい側にずれることも考えられる。一方、N値が10程度かそれより小さい緩い砂地盤ではこの限界線は既往の液状化判定の限界線(DA5%ひずみに対応)とほぼ一致し、 $F_L=1.0$ の条件はそのまま流動ポテンシャルの発揮を意味することになると考えられる。いずれにしても、この限界線についてはまだ不明な点が多く、これからの研究により精度を上げていく必要がある。

本研究では実際の砂地盤では一般的に行われる要素試験よりも流動ポテンシャルが大きく現れる理由を地盤の不均質性の観点から探るために、中空ねじり試験機を用いた特殊な方法による繰り返しせん断を行う。そのために新たに工夫した試験法による砂の水平地盤と傾斜地盤を想定しての繰り返し載荷試験、さらに砂とシルトの複合供試体の繰り返し載荷試験を行い、地盤の不均質性が流動ポテンシャルに与える影響を検討する。

2. 試験法

自然の地盤は一般的に不均質性に富み、特に水平成層構造をなしていることが多いことは、例えば筆者らの行った2地点の砂地盤での地盤調査でも明らかである(Kokusho and Kojima, 2002)。図2はこのような成層地盤の液状化時の挙動を中空円筒供試体においていかに再現するかについて、両者の対応関係を示している。地震時に成層砂地盤が液状化すると砂層と低透水シームの透水速度すなわち沈下速度に大きな差があるために、砂粒子のみからなる砂層が先に沈下・再堆積し、低透水シーム直下に上昇してきた余剰間隙水が捕捉され水膜が生成されることは既に筆者らの行った1次元土槽の模型実験(Kokusho, 1999; Kokusho and Kojima, 2002)でも明らかになっている。

本試験では、成層地盤における低透水シームを上下の載荷盤であらわし、砂の供試体が表すその間に挟まれた砂層と透水性の大きな違いを考慮して、上部載荷盤の鉛直変位を拘束する。低透水シーム下面の平らな境界を再現するために上部載荷盤の下面に取り付けられている金属の歯を取り外して平坦にしている。さらに、液状化して有効応力が失われたあと、供試体の自重でおきる側方への変形も拘束するために、供試体の外側のメンブレンのまわりに非延性の透明なフィルムを巻いている。非延性のフィルムと外メンブレンとの間の摩擦はほとんどないことが確かめられており、供試体のせん断変形の拘束効果は無視しうると考えられる。その結果、供試体の外側だけでなく内側の変形も抑えることができた。また、水膜生成を不透明のゴムメンブレンを通して鮮明に捉えるために、内セル内部に発光ダイオードを設置し光を内側から放射方向に発光できる(吉川、2001)。

試験装置は供試体外径100mm、内径60mm、高さ200mmの空圧制御式中空ねじりせん断試験機である。供試体は基本的に空中落下法により作成したが、 $D_r=20\%$ より緩いものについてはウェットタンピングによる。試験をするにあたって、B値0.95以上まで飽和度を高め、有効拘束圧98kPaで等方圧密し、その拘束圧で非排水繰り返し載荷をおこなった。試料は豊浦標準砂($\rho_s=2.643\text{g/cm}^3$)を用いている。

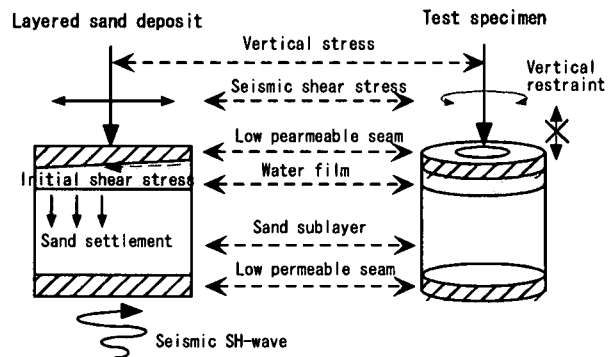


図2 実際の成層不均質地盤と要素試験供試体の対比

3. 非排水繰り返し試験

地震時に非排水状態での繰り返しせん断応力によって地盤の間隙水圧が上昇した場合について、ひずみの増大によるサイクリックモビリティと流動ポテンシャルの発生のメカニズムを検討する。ここでの試験は図2の原地盤と試験供試体との対応関係において、成層地盤がほぼ水平であることを想定し、初期せん断応力ゼロの状態からの繰り返し載荷試験である。応力比は $R = \tau_d / \sigma'_c = 0.20 \sim 0.21$ 、載荷周波数は 0.1Hz としている (鈴木, 2002)。

図3は $Dr=41\%$ での軸変位非拘束試験 (通常の液状化試験) の応力～ひずみ関係、図5はその時のせん断応力、せん断ひずみ、間隙水圧、軸力、軸変位の時刻歴である。図4は $Dr=39\%$ での軸変位拘束試験の応力～ひずみ関係、図6はその時のせん断応力、せん断ひずみ、間隙水圧、軸力、水膜厚さの時刻歴である。軸変位拘束試験では間隙水圧が 100% 上昇した後、土粒子の沈降により供試体と上部載荷盤の間に水膜が成長する。その厚さはビデオ画像により、せん断応力ゼロの時点での供試体上部の水膜生成部から5ヶ所の平均厚さを示している。両試験にはそれぞれ過剰間隙水圧が 100% まで上昇した点 (初期液状化点) が示されているが、軸変位非拘束試験・鉛直変位拘束試験ともにそれまでの載荷回数は 3.5 回となっており試験法による大きな差はない。

図3, 図5の通常の液状化試験では、過剰間隙水圧の上昇がほぼ 100% に達したあたりからせん断ひずみが増大し、それ以降はせん断ひずみの増減に対応したせん断応力の変動 (サイクリックモビリティ) が生じる。それに対応し、過剰間隙水圧の半周期ごとの変動が激しくなる。初期液状化から載荷回数 3 回で供試体のせん断ひずみは試験装置の測定限界 (両振幅約 25%) に達してしまう。

図4, 図6の軸変位拘束試験では、過剰間隙水圧が 100% に達した時点からせん断ひずみの振幅は図3, 図5よりさらに急激に増大しはじめ、両振幅およそ 25% で試験機の振れ幅の限界に達し頭打ちとなっている。ほぼ同時にせん断応力は減少をはじめ、やがて載荷に対してほとんど回復が見られなくなり、応力～ひずみ関係がほぼ水平なループを描くようになる。間隙水圧、軸力も同様に一定値への収束が見られる。この現象が見られ始める6目付付近からせん断応力がゼロに戻る時点において水膜の生成がごくわずかであるが、確認することができた。それ以降も図6の最下段に示すようにさらに水膜の生成が進行し、試験終了時では約 4mm の水膜厚さを測定した。また図4において水膜生成後の応力～ひずみ関係のほぼ水平につづれた収束ループに見られるわずかな割線せん断剛性は載荷にともない中の砂と一緒にねじられるゴムメンブレンの張力を反映していると思われる。

以上より、シルトシームのような低透水層の直下においては、均質地盤の砂とは異なり、地震時繰り返し応力によって間隙の再配分が起き、応力の回復なしにせん断ひずみの発生が可能となり、流動可能な状態となることが分かる。

図7は繰り返し応力比を $R = \tau_d / \sigma'_c = 0.20 \sim 0.21$ とほぼ一定とした多数の軸変位拘束試験に基づき、間隙水

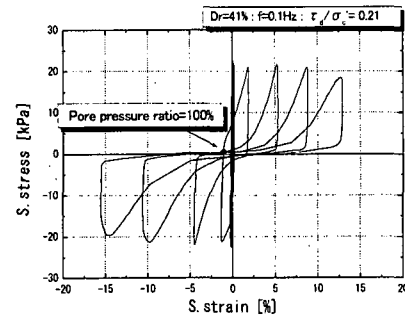


図3 通常の液状化試験における応力～ひずみ関係

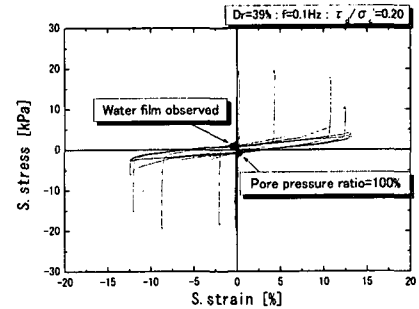


図4 鉛直軸変位を拘束した液状化試験における応力～ひずみ関係

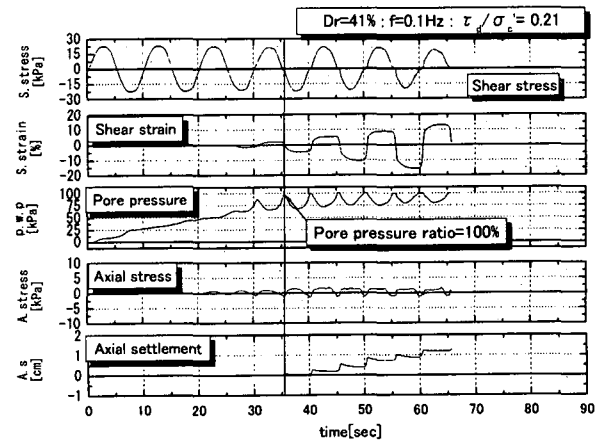


図5 通常の液状化試験での応力・ひずみなどの時刻歴

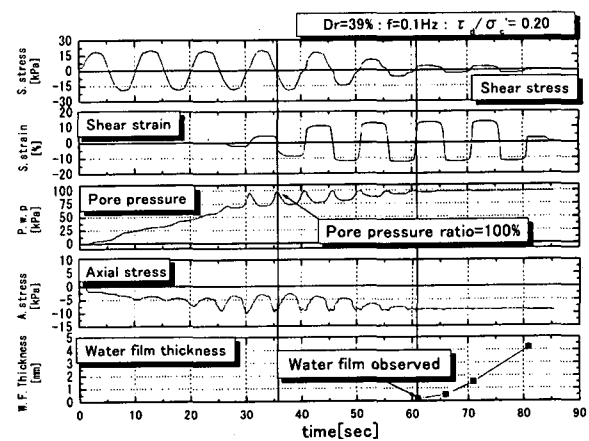


図6 軸変位拘束試験での応力・ひずみなどの時刻歴

圧が 100%上昇した時点までの载荷繰返し回数 (N_L) とせん断抵抗の回復が見られなくなり流動ポテンシャルを示し始めるまでの回数 (N_W) を相対密度 Dr に対してプロットしている。図中の○と△の比較から、間隙水圧 100%上昇までの繰返し回数には軸変位拘束条件による大きな違いは無いことが確認できる。さらに、 $Dr=40\%$ 付近より小さいときには $N_W \approx N_L$ で、初期液状化からほどなく流動ポテンシャルを示すことを示している。一方で、 $Dr=50\%$ 付近より大きいときには初期液状化に達した後も流動可能な状態になるまでに数波以上の载荷繰返しが必要になることが分かる。

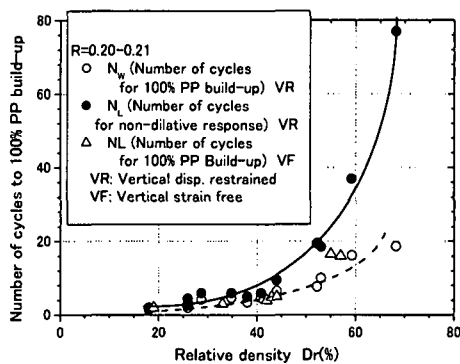


図7 間隙水圧 100%上昇までの回数 N_L 、流動ポテンシャルを示すまでの回数 N_W と相対密度の関係

4. 初期せん断応力下での非排水繰返し試験

ここでの試験は、図2の原地盤と試験供試体との対応関係において成層地盤の地表が明らかな傾斜を持っていることを想定し、初期せん断応力を加えての繰返し载荷試験である(國生ほか, 2002)。初期せん断応力は等方圧密終了時に排水状態で加え、その後 0.1Hz での非排水繰返し载荷に移る。まず、ほぼ同一試験条件の下で軸変位拘束と非拘束(通常の液状化試験)による試験結果を対比する。いずれも相対密度は $Dr=43\sim44\%$ で繰返し载荷の応力比は $R = \tau_d / \sigma'_c = 0.20\sim0.21$ 、初期せん断応力比は $\tau_c / \sigma'_c = 0.19\sim0.20$ (τ_c : 初期せん断応力片振幅、 σ'_c : 初期有効拘束圧) とほぼ同一条件である。

図8は初期せん断を加えた状態での通常の液状化試験の応力~ひずみ関係を示す。初期せん断応力を加えたことにより水圧上昇率 100%に至る前からせん断ひずみが発生しはじめ徐々に増加しているが、各载荷ごとにサイクリックモビリティによるせん断抵抗の回復が起きている。図9は初期せん断を加え軸変位を拘束した試験の応力~ひずみ関係である。過剰間隙水圧が 100%上昇するまでの载荷回数は 2.5 回で図8と差はなく、初期液状化以前では鉛直変位拘束の有無による違いはほとんど見られない。しかし、図9の軸変位拘束試験では初期液状化以降、ひずみの一方向への成長が著しく、载荷回数 3.5 回付近で供試体上部に水膜もしくは間隙の非常に大きな部分の生成にともないせん断応力の減少が見られ、応力~ひずみ関係がほぼ水平につづけたループを描くようになる。試験のビデオ画像より、それとほぼ同時刻に水膜の生成を確認することができ、試験終了時では水膜の厚さは約 0.7mm となった。この試験で砂粒子が沈降するのは、せん断応力から解放され中立状態となる一瞬であることが水膜のビデオ画像や軸非拘束試験の軸変位のデータから読みとれる。以上より、初期せん断応力が動的せん断応力と同等か、小さければせん断応力がゼロとなる中立状態が存在するために、傾斜地盤においても供試体の液状化にともない砂の沈下が進行してシルトシーム直下に間隙の大きな部分あるいは水膜が生成し大きなひずみに対しても流動可能な状態となることが分かる。

図10は軸変位拘束試験により得られた間隙水圧 100%上昇から流動ポテンシャルを示すまでの载荷回数の差 ($N_W - N_L$) と相対密度の関係初期せん断応力の有無それぞれの場合について示したものである。初期せん断応力がない場合、相対密度が $Dr=40\%$ 程度より以上では ($N_W - N_L$) が急激に増加する傾向は図7において既に述べた。その傾向は初期せん断応力の有無にかかわらず、大きな違いはないことが読みとれる。これは、間隙の再配分にもなう土粒子の沈下はせん断応力がゼロとなる一瞬のみ起こり、初期せん断応力の有無に関わらずせん断応力がゼロとなる機会が生じる回数で間隙の再配分の発達速度が決まるためと思われる。つまり、ほぼ平坦地盤であれ傾斜地盤であれ、間隙水圧が 100%上昇した初期液状化時点から流動ポテンシャルを有する真の液

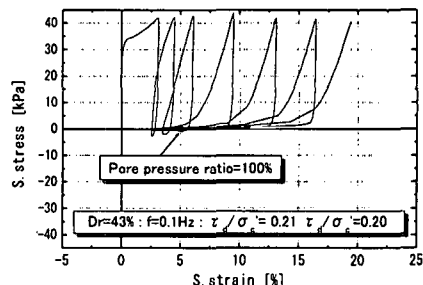


図8 初期せん断応力下での通常の液状化試験の応力~ひずみ関係

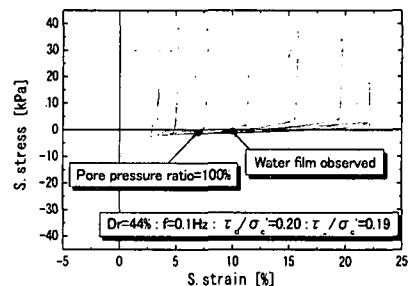


図9 初期せん断応力下での軸変位拘束試験の応力~ひずみ関係

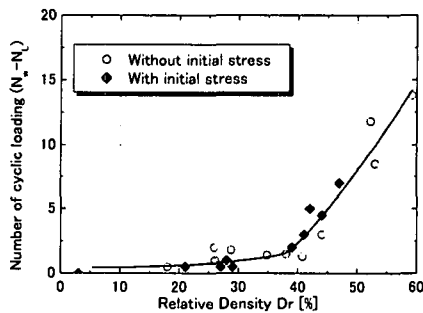


図10 水圧 100%上昇から流動ポテンシャルを示すまでの载荷回数差 ($N_W - N_L$) と相対密度の関係

状化状態になる時点までの繰り返し回数は相対密度が40%程度から急増傾向を示すことが分かる。

5. 砂・シルト複合供試体の非排水繰り返し試験

ここまでは試験機の上部荷重盤を低透水性シームと見なした均質砂を用いたせん断試験について述べてきた。次に、砂の供試体の中に実際に低透水細粒土による不均質性を導入して、軸変位を拘束しない通常の液状化試験を行った。細粒土としてはシルト分80%、粘土分20%で非塑性の石粉を用いた。細粒土の分布状態については、図11(a)(b)のように層状分布、(c)のように柱状分布を中空円筒供試体に導入し、ウェットタンピング法で相対密度 $Dr=30\sim70\%$ になるように砂も細粒土も同じく調整して作成した。さらに豊浦標準砂との均等混合供試体の試験も行った。細粒分含有率はすべてのケースにおいて $Fc=20\%$ 一定とし、層状と柱状の供試体での相対密度は、砂層と細粒分層のそれぞれの相対密度を算出し、各部分の体積による重みつき平均で算出している。また均等混合の場合には均等混合試料による最小・最大密度試験の結果から相対密度を算定した。繰り返し応力比は $R=0.21\sim0.23$ の範囲にある。

図12は過剰間隙水圧が100%に達した初期液状化時点までの荷重回数を縦軸に相対密度を横軸にとり、細粒分を分布させた場合(全体に混ぜた場合と層状、柱状に分布させた場合全てを含む)と豊浦標準砂のみの場合との初期液状化までに要する荷重回数の比較を示している。両者の近似カーブから明らかのように、細粒分を混ぜたり分布させたりした場合、 $Dr=50\%$ 以下において豊浦標準砂のみの供試体より2回ほど早く初期液状化に達し、 $Dr=50\%$ 以上の場合にはその差が急激に広がる。プロットのばらつきはあるが、細粒分の分布形態の違いによる明瞭な差異は見られない。層状分布の場合に細粒分の影響が著しいのは理解しやすいが、柱状分布の場合にも共役せん断応力の作用で液状化しやすい細粒分の影響が同程度に表れるためと思われる。

次に初期液状化以降の挙動について見ると、図13は細粒分含有率 $Fc=20\%$ 、平均 $Dr=40\%$ の条件で、細粒分を図11(c)のように供試体の上から下まで柱状に分布させて $R=0.23$ の応力比で試験を行った時の応力~ひずみ関係である。図3に示した相対密度が $Dr=41\%$ 、応力比が $R=0.21$ で豊浦砂のみの試験結果と比較すると、繰り返し数2.5回で初期液状化に達した後せん断ひずみの伸びとせん断応力の減少は著しく、細粒分の大きな影響を示唆している。

これに対して、図14は同じ量の細粒分を図11(b)のように水平2層で砂層中に分布させた平均 $Dr=39\%$ の供試体の $R=0.23$ での応力~ひずみ関係である。液状化までの荷重回数は2.5回と層状に分布させた場合との違いは見られない。その後すぐにせん断応力の急激な減少が生じた後、荷重回数0.5回で応力がほとんど回復しない状態へ収束している。

細粒分を図11(a)(b)のように水平層状に分布させた場合と図11(c)のように柱状に分布させた場合の多くの実験結果を比較したのが図15である。ばらつきは大きいですが、ひずみに対して応力の回復が生じなくなり流動性を示すまでの荷重回数に明瞭な違いが表れている。このように液状化してからの流動ポテンシャルに柱状分布の場合と大きな差が見られたのは、細粒分の水平成層分布により供試体内部で間隙の再配分が起りやすく、細粒分シームの直下に間隙の大きな部分が形成され応力の回復なしに大きなひずみが生じやすくなるためであると考えられる。

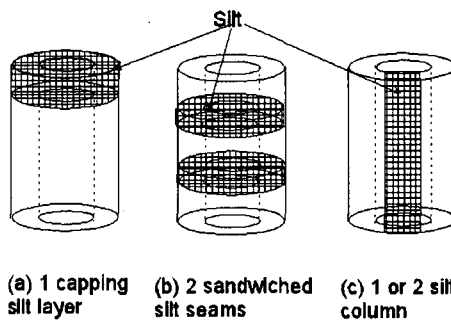


図11 供試体での砂とシルトの分布状態

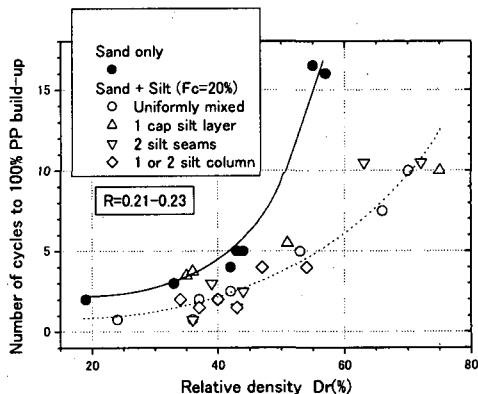


図12 豊浦標準砂のみの供試体と細粒分を分布させた供試体との液状化強度の比較

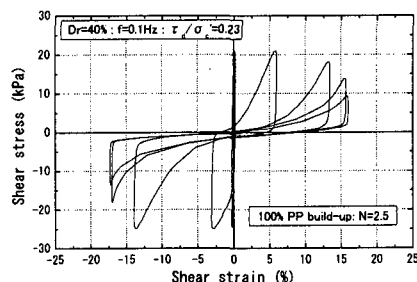


図13 細粒分を柱状に分布させた時の応力~ひずみ関係

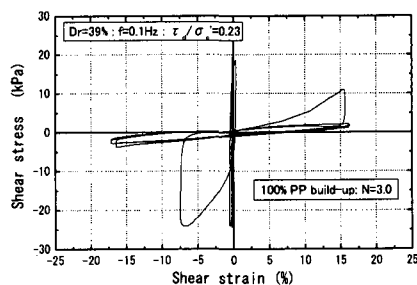


図14 豊浦砂3層、細粒分2層の水平成層の応力~ひずみ関係

以上より、砂層中に水平成層の不均質性が存在する場合、間隙水圧が100%程度上昇した後の流動ポテンシャルの大きさに細粒分の水平成層が大きな影響をおよぼすことが明確に示された。

6. 結論

- 軸変位拘束の非排水繰返し試験においては、細粒シーンを模擬した上部荷重盤の直下で間隙の再配分が生じることにより、応力-ひずみ関係での応力回復がなくなり、これにより液状化した砂が流動性を帯びることが示された。
- 傾斜地盤や構造物基礎近傍の砂を想定して初期せん断応力を加えた場合、鉛直変位拘束の繰返し試験においても、繰返し応力が初期せん断応力を上回る場合には、間隙の再配分にもない応力の回復が生じなくなり流動性が表れた。
- 今回の室内試験によれば、きれいな砂の場合、 $Dr=40\%$ 程度より小さいときは間隙水圧が100%上昇したあと程なく流動性を発揮するが、 $Dr=50\%$ 程度より密なときは間隙水圧100%程度上昇後も数波以上の荷重回数が必要となり、初期液状化に達しても直ちに流動性を帯びることはない。
- これらの試験結果に基づき、多少安全側をとって $Dr=50\%$ 以下を流動ポテンシャル発生の一つの条件と考えると、それに対応した基準化N値（有効上載圧98kPaの下でのN値）は慣用式では $N_1=10$ となり、この程度のN値が流動しやすい目安と考えられそうである。
- 豊浦標準砂に細粒分を20%の一定割合で加えた供試体の液状化試験を行った結果、細粒分を層状に分布させた時と柱状に分布させた時を比較すると、間隙水圧100%上昇までの荷重回数にほとんど差は見られないにもかかわらず、前者の場合にはひずみの伸びに対する有効応力の回復が起きにくく大きな流動性が発揮されることが示された。
- 以上より、従来の要素試験と実地盤で発揮される流動ポテンシャルの違いは、原位置での砂の不均質性とくに透水性の異なる薄層の重層構造により、砂層全体としては非排水条件であっても局所的には排水条件となり、これにより間隙の再配分が起きることが大きな原因であると言える。

本研究の一部に平成14年度文部科学省科学研究費補助金基盤B(2)「液状化地盤での水膜生成・流動メカニズムの定量化」（代表研究者：國生剛治）ならびに平成14年度文部科学省科学研究費補助金基盤B(1)「土の物性からみたレベル2地震動に対する砂礫や密な砂の動的挙動」（代表研究者：後藤 聡 山梨大学助教授）の一部を使用した。また、砂・シルト複合供試体の試験には2002年度卒研 並木竜也君の大いなる貢献があった。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- Ishihara, K. (1993). "Liquefaction and flow failure during earthquakes." Rankine Lecture, *Geotechnique* 43, No.3, 351-415.
- Kokusho, T. (1999): Formation of water film in liquefied sand and its effect on lateral spread, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE, 125(10), 817-826.
- Kokusho, T. and Kojima, T. (2002): Mechanism for postliquefaction water film generation in Layered sand, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(2), 129-137.
- Kokusho, T. and Fujita, K. (2002): Site investigation for involvement of water films in lateral flow in liquefied ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(11), 917-925.
- 國生剛治、鈴木広太、岸本 隆(2002):「中空ねじりせん断試験機を用いた水膜生成メカニズムの研究」、第11回日本地震工学シンポジウム、CD版、No.140.
- Meneses, J., Ishihara, K. and Towhata, I. (1998). "Effects of superimposing cyclic shear stress on the undrained behavior of saturated sand under monotonic loading." *Soils and Foundations*, 38(4), 115-127.
- National Research Council (1985). "Liquefaction of soils during earthquakes" *Committee of Earthquake Engineering, Commission of Engineering and Technical Systems*, National Academy Press, Washington, D.C.
- 大川秀雄(1997):「液状化の発生メカニズムを考える」土木学会論文集 No.568/III-39, 13-20.
- 鈴木広太(2002):「中空ねじりせん断試験機による水膜生成メカニズムの研究-影響因子の検討-」2001年度修士論文、中央大学大学院理工学研究科.
- 吉川太郎(2001):「中空ねじりせん断試験機による水膜生成メカニズムの研究」2000年度修士論文、中央大学大学院理工学研究科.

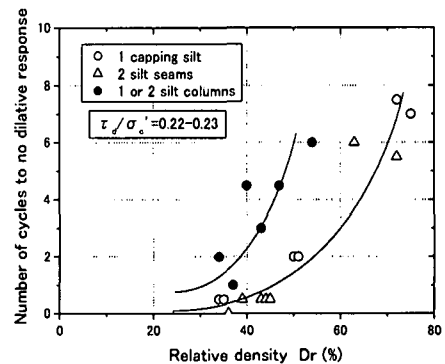


図 15 シルトが層状分布と柱状分布した供試体における応力の回復が見られなくなるまでの荷重回数と相対密度の関係