

大型土槽実験のための液状化地盤作成法の研究 (その2) 各種方法で作成した砂供試体の密度・飽和度・ 液状化特性

佐藤 正義¹・後藤 茂²

¹工博 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

²工博 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

The sample preparation methods, such as pluviation through air and filled with de-aired water, are ordinary used for laboratory soil dynamic tests and model tests for keeping a uniform density of samples and completely saturation. But it is very hard to use these sample preparation methods for the large-scale soil model tests because the model test need a huge amount of soils and water. Laboratory liquefaction tests were conducted on the sand samples that were prepared by some kinds of methods, such as sedimentation in water, compacting dry or wet sand and filled with not de-aired water. The main issue of this study is an influence of sample densities and/or degree of saturation for their liquefaction resistance, and strain increasing tendency on post-liquefaction were also discussed.

Key Words : liquefaction resistance, sample preparation method, saturation, laboratory test

1. 研究の目的

通常の液状化に関する模型実験や要素試験では供試体の密度を均一にしたり完全飽和させたりする目的から、空中落下法等による供試体作成や、脱気水の通水などによる飽和手順等が行われている。防災科学技術研究所では三木市に2005年4月完成をめざして実大三次元震動破壊実験施設(愛称：E-ディフェンス)の建設を進めているが、これを利用した大型土槽実験では、300~350m³と膨大な量の地盤模型を作成することを計画している。このような大型土槽を用いた液状化実験では使用する土砂や間隙水の量が莫大であり、小規模な土槽実験や要素試験で行っている手順をそのまま適用することは非常に困難である。これまで、大型地盤を作成する方法として、水中落下法による方法を中心として検討してきた^{1),2)}が、他の方法も視野にいれ、E-ディフェンスでの実験において最も効率的で液状化実験に適した地盤の作成方法や地盤材料を決定することが必要である。E-ディフェンスでは、可能性のある地盤作成法として、水中落下法、空中落下法、締め固め法、地盤飽和法として真空法、CO₂置換法がある。また、使用する地盤材料として、乾燥砂だけでなく、含水比の小さい湿潤砂を使用できないかを検討する必要がある。これは、液状化実験に使用した砂を乾燥させて、それ

を再使用するのは大規模な装置と労力が必要となるので、ある程度まで大気乾燥させて含水比の小さい湿潤砂の状態にして、それを再使用することができれば効率的であるためである。

そこで、本研究では大型土槽を用いた液状化実験を効率よく進めるための基本データを得ることを目的として、想定される各種の地盤作成方法と地盤材料で作成された供試体の飽和状態や相対密度等を調べるとともに、液状化特性を検討した。

2. 試験条件

試験に使用した砂試料はアルバニー#48珪砂であり、これは大型土槽による液状化実験で使用が予定されているものである。図-1に粒度分布を示すが、豊浦砂に近い粒度分布を持つ砂である。表-1に土粒子密度および最大・最小密度試験結果を示す。

液状化特性は繰返し中空ねじり試験を行って求めた。供試体は外径100mm、内径60mm、高さ100mmの円筒形である。供試体は所定の方法で作成・含水させた後に有効拘束圧98kPaで圧密させた後に密度及び飽和状態(B値)を調べた。液状化試験の繰返し载荷は0.01Hzで行った。

供試体の作成方法は空中落下法、水中落下法及び締め固め法の3種類であり、供試体の密度は密詰め供試体が相対密度で75%、ゆる詰め供試体が

表-2 試験条件の組み合わせ

地盤作成法	地盤密度		間隙水		使用砂の状態	
	ゆる詰め	密詰め	脱気水	水道水	表乾砂	湿润砂
空中落下 +通水飽和	○	○	○		○	
水中落下 (通水せず)	○		○	○		○
締め固め +通水		○	○	○	○	○

表-1 アルバニー硅砂の物理的性質

土粒子密度	g/cm ³	2.653
最大密度	g/cm ³	1.806
最小密度	g/cm ³	1.503

40%を目標とした。間隙水として使用する水は通常の脱気水の他に脱気を行わない水道水の試験もやっている。また、使用する砂の状態は乾燥状態のものと水分を5%保有するものの2種類の試験を行った。この5%水分保有状態は予備試験により求めた値であり、水中に堆積させた砂から水分を切った状態に相当する値である。

供試体の作成方法及び含水方法の組み合わせを表-2に示す。空中落下法で供試体を作成し、脱気水を用いた通常の方法により飽和させるケースはアルバニー硅砂の基本的液状化特性を求めるためのものであり、密詰め供試体とゆる詰め供試体の双方について試験を行っている。

水中落下法による供試体の作成は土槽に水を張って上から試料砂を投入する状態を想定して行ったものであり、使用する水も脱気水と通常の水道の2通りで行っている。また、このような作成方法では密な地盤は作成できないので、ゆる詰め供試体を対象に試験を行っている。

締め固めによる供試体の作成は土槽においても締め固めで地盤を作成する方法を想定したものであり、目標密度も高い方を設定している。但し、通水による飽和は脱気水を使用する場合は真空下で行ったが、水道水を用いる場合には供試体内を真空にせずに通水した。

すべての供試体の初期有効拘束圧は98kPaであり、背圧は25 kPaである。この背圧の値は大型土槽の実験での土槽中央部の間隙水圧を想定して定めた。

3. 試験結果

(1) 基本形の場合

図-2に空中落下法で作成し、脱気水を通水した供試体のせん断応力比と所定の両振幅せん断ひずみにいたる載荷回数との関係を示す。各供試体の相対密度とB値は図中に数字で示してある。密詰め供試体は相対密度が74%~77%であり、ほぼ目標密度と同じになったが、ゆる詰め供試体の相対密度は51%~56%と目標密度より多少高めになった。これは、所定の拘束圧を作用させたときの圧密収縮量

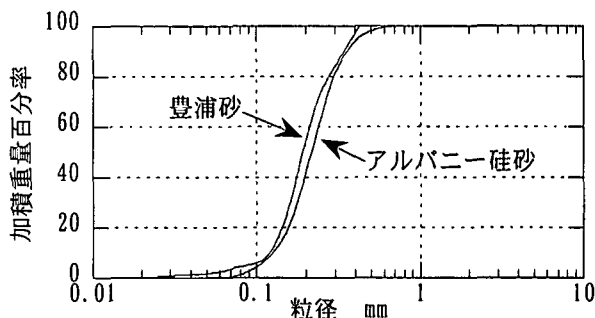


図-1 アルバニー硅砂の粒度分布

が大きかったためである。但し、両者とも密度のバラツキは比較的少なく、また、全ての供試体のB値は98%程度であり、ほぼ完全に飽和している。

図から読みとった載荷回数10回で両振幅せん断ひずみが15%になるせん断応力比の値を相対密度との関係で示したのが図-3であり、図には龍岡による豊浦砂の結果が付記してある。今回のアルバニー硅砂の結果はゆる詰め供試体はほぼ豊浦砂に対応しているが、密詰め供試体は豊浦砂に比較して液状化抵抗はるかに高いことが明らかになった。

一方、図-2では密詰め供試体は所定のせん断ひずみ毎の載荷回数が判別できるが、ゆる詰め供試体では判別ができない。図-4、図-5に典型的な供試体の試験時のタイムヒストリーを示すが、ゆる詰め供試体では過剰間隙水圧上昇時にせん断ひずみが一気に増加している。反対に、密な供試体ではひずみの増加が漸増的であり、一般的な密な供試体の特徴を示している。

(2) 水中落下供試体の場合

図-6、図-7は水中落下法で作成した供試体のせん断応力比と所定の両振幅せん断ひずみにいたる載荷回数との関係であり、両者の違いは間隙水(脱気水または水道水)の相違である。供試体の相対密度は脱気水を使用した場合で20%~43%であり、水道水を使用した場合が28%~32%と基本形のゆる詰め供試体より低くなった。また、密度のバラツキは脱気水を使用した場合の方が大きくなった。しかし、図から明らかのようにせん断応力比と載荷回数との関係は水道水を用いたケースではバラツキが大きく、これは、水道水を用いた場合のB値のバラツキが極めて大きいことを反映したものと思われる。脱気水を使用した供試体ではB値が90%以上になっているのに対し、水道水を使用した供試体のB値は7%~55%と低く、部中の特性曲線もB値

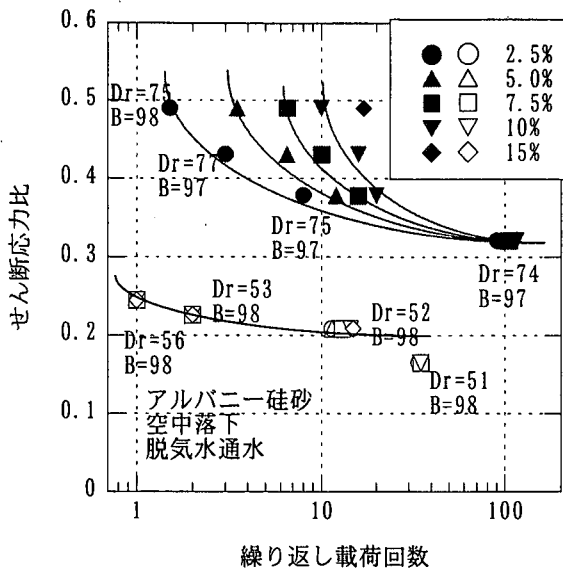


図-2 空中落下で作成し、脱気水通水した供試体の液状化特性

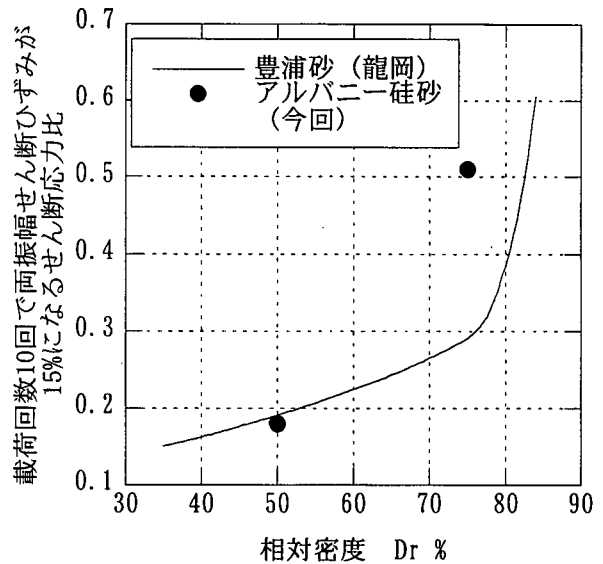


図-3 液状化強度（荷回数 10 回，両振幅せん断ひずみが 15%）と相対密度の関係

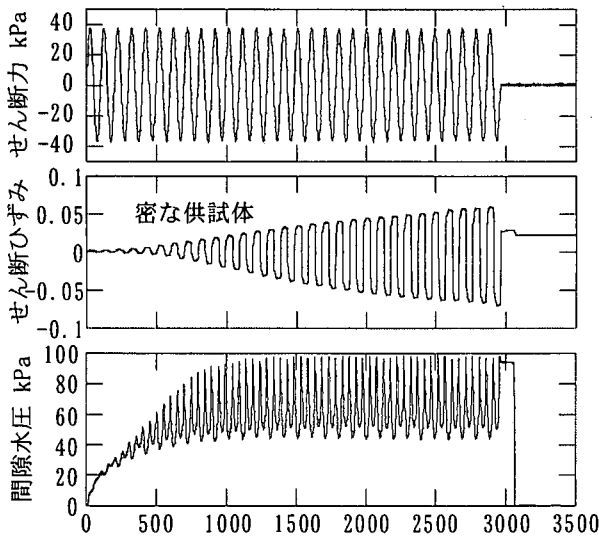


図-4 密な供試体 (Dr=75%, B=0.97) の液状化試験時のタイムヒストリー

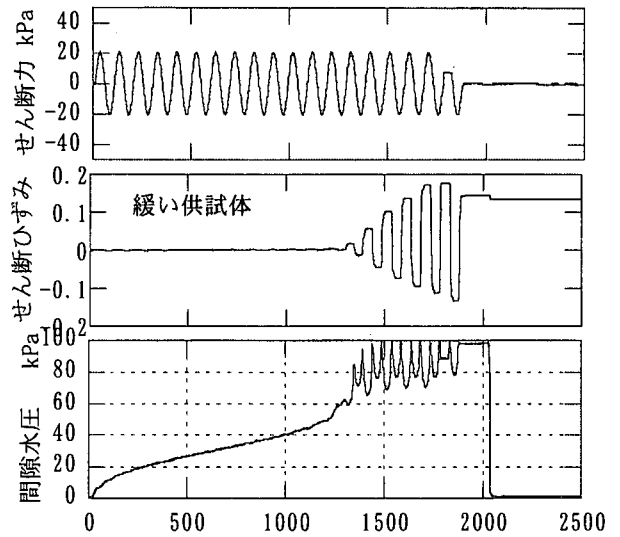


図-5 緩い供試体 (Dr=52%, B=0.98) の液状化試験時のタイムヒストリー

が特に低い供試体 (B=7%) の結果を無視してを引いた。

水中落下法による供試体は相対密度が基本形ゆる詰め供試体より低いことを反映して液状化特性曲線も基本形ゆる詰めより多少下方に位置している。但し、水道水を用いた水中落下法によるものは脱気水を用いた水中落下法によるものより強度が高く、基本形ゆる詰めとほぼ同様の値を示している。これも水道水を用いた供試体の方がB値が低いことを反映した可能性が高いと思われる。

(3) 締め固め供試体の場合

図-8、図-9は締め固めにより作成した供試体のせん断応力比と所定の両振幅せん断ひずみにいたる荷回数との関係であり、供試体作成に使用した砂の状態が乾燥であるか湿潤であるかで分けてある。乾燥砂を用いた供試体の密度は相対密度で70%、

74%であり、基本形密詰め供試体の密度とほぼ対応しているが、湿潤砂の供試体の密度はそれより低く、59%、63%になった。これは、湿潤状態の設定値である含水比5%が水中堆積状態から引き上げた砂の含水比に対して設定したため、締め固めを行うには水分が多すぎたためと考えられる。

それぞれのグラフには基本形密詰め供試体及びゆる詰め供試体の特性曲線が記載してあるが、乾燥砂を締め固めた供試体の試験結果はほぼ基本形密詰め供試体に相当する値を示しており、通水に用いた水によってB値が99%と53%に異なっているが、試験結果に顕著な差はない。それに反して、湿潤砂を締め固めた供試体の試験結果は通水に使用した水により大きな差が生じている。脱気水を使用してB値が98%になった供試体は基本形ゆる詰め供試体程度の液状化抵抗しか示さないのに対し、水道水を使用したものはB値が17%と低く、液状化

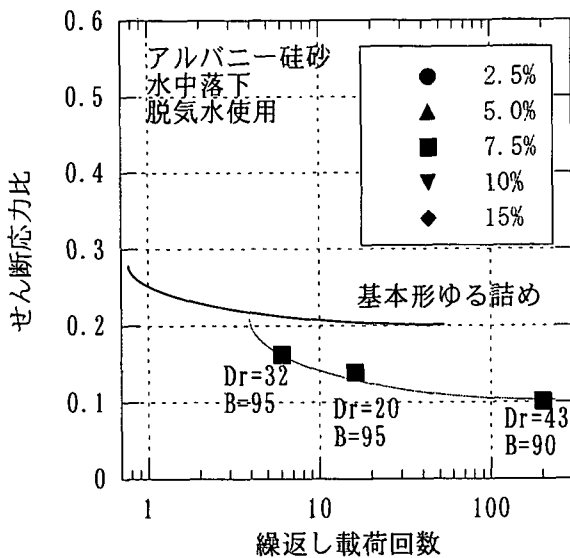


図-6 脱気水使用の水中落下法で作成した供試体の液状化特性

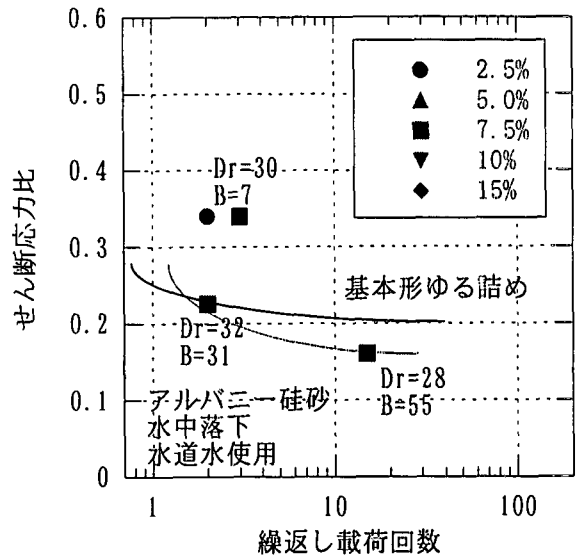


図-7 水道水使用の水中落下法で作成した供試体の液状化特性

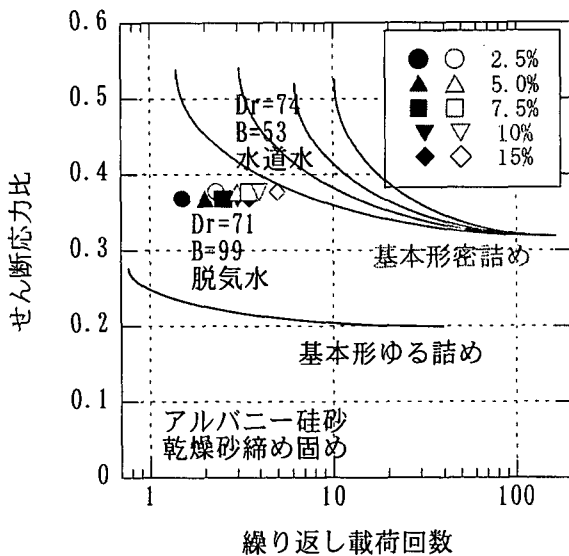


図-8 乾燥砂の締め固めで作成した供試体の液状化特性

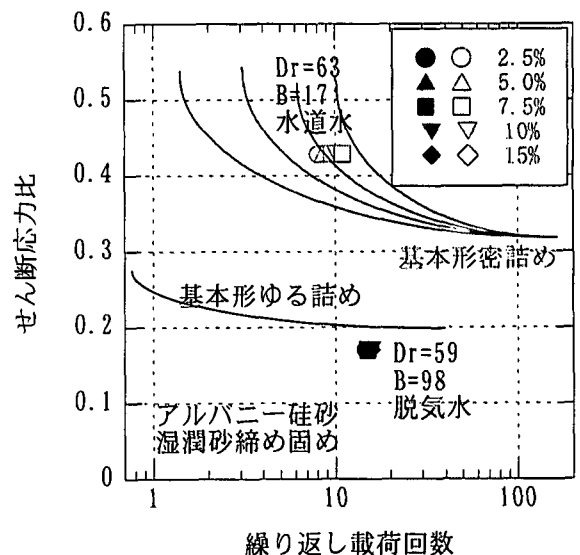


図-9 湿潤砂の締め固めで作成した供試体の液状化特性

抵抗も基本形密詰め供試体レベルの値になっている。両供試体の相対密度の差は4%程度でしかないので、この試験結果の差は両者のB値の差（ $B=98\%$ と $B=17\%$ ）を反映したものと考えられる。

(4) 飽和度を調整した供試体の場合

供試体の作成方法などにより密度が異なると液状化強度が異なることは既往の研究でも知られていたが、今回の検討ではB値の相違による液状化抵抗の相違が大きく現れた。特に、B値が50%程度であれば液状化抵抗は飽和した供試体と大きな相違は見られないが、B値が7%及び17%の供試体は液状化抵抗は相対密度が同レベルの他の供試体よりかなり高い液状化抵抗を示した。そこで、飽和度の低い供試体の液状化抵抗を検討するために飽和度を調整した供試体を作成し、液状化試験を行った。

供試体の作成は水中落下および締め固めの2種類の方法で行い、どちらの場合も脱気水を用いて飽和状態の供試体を作成した。飽和度の調整は、その後所定の量の空気を間隙に送り込むことによって行い、B値が15%程度になるように調整した。

図-10は水中落下で作成し、飽和度を調整した供試体のせん断応力比と所定の両振幅せん断ひずみにいたる載荷回数との関係を示したものである。図には基本形および水中落下による供試体の液状化特性曲線と前節の水中落下供試体で飽和度が低かった供試体の試験結果も付記している。今回の供試体は相対密度が37%程度であり、B値も15%程度でバラツキが少ない。

図から明らかなように、飽和度を調整した供試体の液状化特性曲線は基本形ゆる詰め供試体のものより上に位置しており、前々節で検討した水道水および脱気水を使用した水中落下供試体のもの

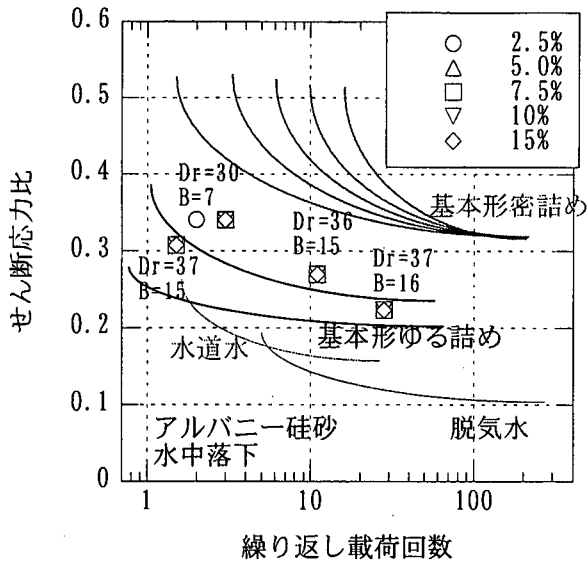


図-10 水中落下で作成し、飽和度を低下させた供試体の液状化特性

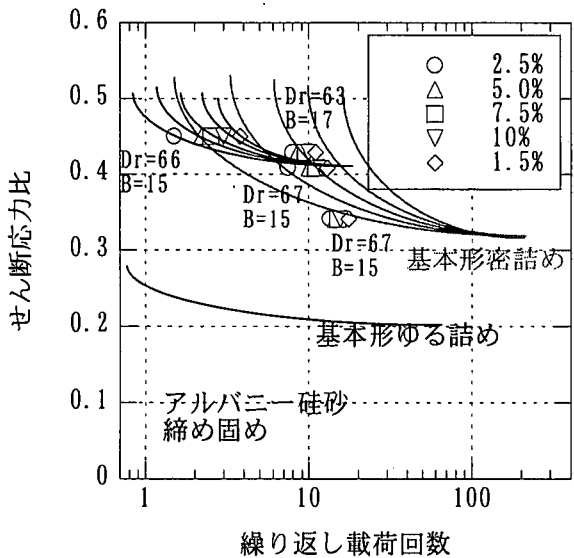


図-11 締め固めで作成し、飽和度を低下させた供試体の液状化特性

より液状化抵抗がかなり高い。但し、前々節の検討でも、B値が7%の供試体はそれより更に高い液状化抵抗を示すことが明らかになった。

図-11は締め固めで作成し、飽和度を調整した供試体のせん断応力比と所定の両振幅せん断ひずみにいたる荷回数との関係を示したものである。図には基本形の液状化特性曲線と前節の検討でB値が低かった湿潤砂を締め固めて水道水を通水した供試体の試験結果も付記してある。今回の供試体の相対密度は67%程度であり、B値は15%でほぼ一定になっている。今回の供試体は基本形密詰め供試体より相対密度が10%程度低い、液状化抵抗は基本形密詰めとほぼ同程度になった。但し、図から明らかかなように、所定の両振幅せん断ひずみになるときの荷回数の差異は基本形密詰め供試体ほど大きくはならず、量振幅せん断ひずみ

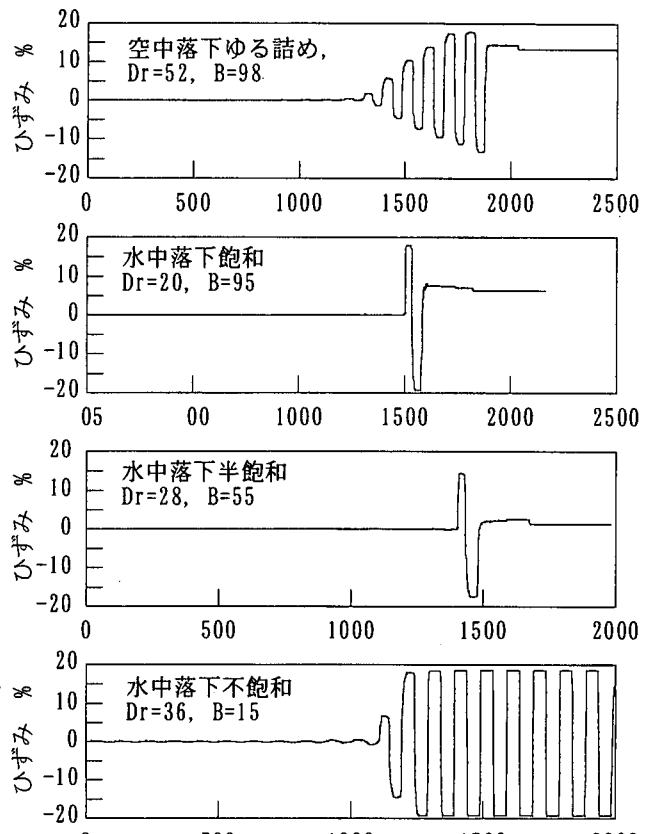


図-12 ゆる詰め供試体の試験時のせん断ひずみ

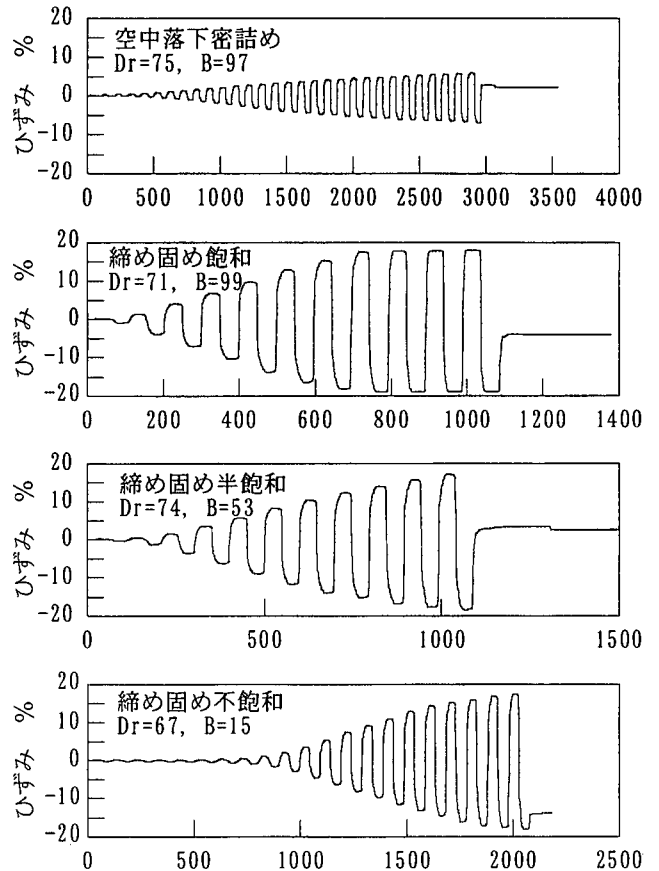


図-13 密詰め供試体の試験時のせん断ひずみ

み振幅が10%および15%に至る載荷回数では基本形密詰め供試体より小さい。

(5) 供試体のひずみ増加傾向

これまでの検討ではせん断応力比と載荷回数で表される液状化抵抗を主体に論じてきたが、模型地盤としての特性としては液状化に至った後の変形性状も考える必要がある。そこで、図-12と図-13にゆる詰め供試体と密詰め供試体の液状化試験時のせん断ひずみの時刻歴変化を示す。但し、図は水中落下および締め固めによる供試体のうちB値が高いもの、中程度のものおよび低いものが示してあるが、空中落下によるものも参考のために加えてある。図から明らかなように、水中落下による供試体は初期は微小であったひずみが突然増大し、所定のひずみ毎の載荷回数も判別できない。これは、B値が低い場合も程度の差はあるが同様の傾向を示している。一方、締め固めによる供試体のせん断ひずみの増加傾向はそれよりも穏やかであり、所定のひずみ毎の載荷回数も判別できる。但し、空中落下による密詰め供試体に比較するとひずみの伸び方は早い。

4. 試験結果の分析

今回のアルバニー珪砂の液状化試験結果では供試体の作成方法や使用した砂の含水状態および使用した水の種類により供試体の密度や飽和度に大きな差が生じた。

相対密度に着目すると水中落下で作成した供試体が極めて低く、脱気水を用いた水中落下ではパラッキも大きくなっていった。一方、締め固めによる供試体では使用する水よりも初期の砂の状態の影響が強く、湿潤砂を用いる場合は乾燥砂よりもかなり密度が低い。これは設定した湿潤状態である含水比5%がかなり水分の多い状態であったことを反映したものと考えられる。

B値では使用した水による影響が顕著に表れており水道水を用いた供試体のB値はかなり低く、パラッキも大きい。

液状化強度に対しては供試体の作成方法や密度だけでは論じられない相違が生じている。これは既往の豊浦砂を用いた研究^{3),4)}でも供試体のB値が低下すると液状化抵抗が上昇することが報告されており、アルバニー珪砂においても同様の傾向が現れたものと解釈できる。但し、B値が50%程度の供試体の液状化抵抗は飽和のものとはあまり差はないが、B値が15%程度になると液状化強度に大きな差が生じている。これは、アルバニー珪砂のB値と飽和度の関係⁵⁾によれば、B値=50、15%はそれぞれ飽和度で98.3%と90.3%に対応し、前者に比較して後者の間隙空気量がはるかに多いことを反映しているためと思われる。

液状化後のひずみ増加傾向はアルバニー珪砂ではB値の影響をあまり受けず、供試体の作成法や密度の影響を受けている結果になっていた。

5. 結論

供試体作成方法や間隙水の種類を変えて室内液状化試験を行った結果、アルバニー#48珪砂の特性として以下のことが明らかになった。

1. アルバニー#48珪砂の液状化抵抗は相対密度が低い場合は豊浦砂とほぼ同様になるが、相対密度が高い場合は豊浦砂より高くなる。
2. 水中落下で作成した供試体の密度はきわめて低く、液状化時のひずみの増加も急激である。
3. 締め固めによる供試体の密度は比較的高く、液状化に伴うひずみの増加も比較的漸増的である。
4. 供試体の飽和状態は使用する間隙水の影響を受け、脱気していない水道水を使用するとB値が低くなる。
5. 供試体のB値が低下すると液状化抵抗は上昇するが、液状化に伴うひずみの増加傾向はあまり変化しない。

謝辞：本研究は、文部科学省 振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」プロジェクトの内、「大型地盤・基礎模型の作成と計測技術の高度化」のテーマで実施したものであり、本プロジェクトの関係者の方々の多大な努力の基に進められており、関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 佐藤正義, 阿部秋男, 水野二十一, 田村修次: 液状化土槽実験における飽和度評価のためのP波測定と液状化時の地盤変位測定, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関するシンポジウム, pp.89-94, 2002年3月
- 2) 佐藤正義, 阿部秋男: 液状化実験用の地盤作成法と液状化時の地盤変位測定, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関するシンポジウム, pp.77-82, 2002年2月
- 3) 社本康広, 後藤茂: 不飽和砂の液状化抵抗の評価法(その1) - 繰返せん断履歴効果を考慮した液状化抵抗の評価法 -, 第37回地盤工学研究発表会, pp1985-1986, 2002
- 4) 後藤茂, 社本康広: 不飽和砂の液状化抵抗の評価法(その2) - 繰返せん断履歴効果を与えた不飽和砂の液状化試験 -, 第37回地盤工学研究発表会, pp1987-1988, 2002
- 5) 後藤茂, 佐藤正義: 大型土槽実験のための液状化地盤作成法の研究(その1) 模型地盤間隙での水道水の溶存酸素量と飽和度の変化, 第4回構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関するシンポジウム, 2003