

レベル2地震動下の液状化および液状化後の 変形特性に与えるエイジング効果

東京電機大学理工学部 安田 進
東京ガス(株)防災・供給センター 清水善久・小金丸健一
基礎地盤コンサルタンツ(株) 森本 巖

1. はじめに

液状化の発生および液状化による構造物や地盤の変形に与える要因の一つに、地盤が堆積した後の時間、つまりエイジングがある。これまでに行われてきた室内実験によると、供試体に拘束圧をかけておくこと次第に液状化強度が増加することが分かっている¹⁾。そして、砂に細粒分を多く含むほど液状化強度は増加する傾向にあることが指摘されている。また、東京の埋立地における N 値と埋立後の年代の関係を調べたところ、年代とともに N 値は少し上がり、その上がり方はやはり細粒分を多く含むほど顕著であることが分かっている³⁾。

これらは数時間から数十年の間のエイジング効果の事例であるが、さらに時間を長く考えて、沖積砂質土層や洪積砂質土層までを対象にすると、当然の事ながら、年代が古くなるほど液状化の強度は上がることは想像に難くない。この場合も、一般に細粒分を含むほど液状化し難くなるのではないかと想像される。

さて、レベル2地震動を想定して液状化の判定をしてみると、例えば、東京の低地のほとんどの場所で液状化が発生するとの結果になりがちである。東京低地には沖積層である上部有楽町層が広く分布し、これが液状化してしまうとの判定になることが多い³⁾。ところが、1923年関東地震では東京低地の全面に渡って液状化したわけではないようである。そこで、筆者達は上部有楽町層の液状化強度に関して液状化試験を行い、また、年代測定もおこなってエイジングの影響を検討してきた。さらに、液状化による構造物や地盤の変形量についてもエイジングの影響があり、年代が古いほど液状化が発生したとしても構造物は被害を受けにくいのではないかと考え、液状化後の変形特性についても実験を行ってきた。

ここではこれらのいくつかの検討結果を総合して、液状化の強度および液状化後の変形特性に与えるエイジングの効果に関してまとめてみた。

2. 室内実験でエイジング効果を調べた研究

木村・龍岡らは繰返し三軸試験により液状化強度に与えるエイジング効果を研究した¹⁾。試料としては豊浦砂と浅間山砂が用いられた。細粒分含有率はそれぞれ0%、2.41%、供試体の相対密度は80%である。これらの試料を三軸セル内で1(または0.1)、16、64、1630時間ほど圧密し、その後繰返し載荷を行って、液状化強度特性が求められた。得られた液状化強度比 R_L (以後、20回の繰返し載荷で5%の両ひずみ振幅に達する繰返しせん断応力比で定義)を圧密時間との関係でプロットすると図1のようになる。上、下部の○印はそれぞれ浅間山砂、豊浦砂の試験結果を示しているが、両者とも時間とともに液状化強度は増加し、1630時間経つと、それぞれ1.3、1.2倍程度増加している。

類似の実験を安田ら²⁾も行った。ここでは図2に示すような長期圧密装置を作製し、最大で約3000時間ほどの長期圧密を行った。本当はセル内で長期圧密を行うのが良いが、長期にわたるため、ここでは図2の装置によって外で圧密した供試体を三軸セルに移して試験を行っている。用いた試料は細粒分含有率が4%、68%の山砂と浚渫土である。試験結果を図1、3に示すが、木村・龍岡らの実験と同様に、液状化強度比は圧密時間とともに増加した。また、細粒分含有率が多い浚渫土の方が液状化強度の増加割合は大きかった。なお、ここでは圧密時間と称しているが、1次圧密は数時間で終了しているため、以後の実験内容と合わせると“堆積後の経過時間”と呼んだ方が良く、以後は堆積後の経過時間と呼び変えることとする。

さて、安田ら³⁾は福岡市の2地点の沖積砂層、2地点の埋立砂層、1地点の砂丘砂層から採取した不攪乱試料に対し、繰返し三軸試験を行って、エイジングが液状化強度に与える影響に関して研究を行った。この埋立では数年前に行われていた。不攪乱試料での試験が終わったあと、それぞれの試料を不攪乱試料と同じ密度に詰め直し、その再構成試料でも繰返し三軸試験を行った。図4に沖積砂、埋立砂、再構成砂ごとに、細粒分含有率と液状化強度比の関係を示す。これに見られるように、沖積砂、埋立砂、再構成砂とも細粒分含有率が多くなるにつれて液状化強度も大きくなる傾向となった。また、全般に沖積砂の液状化強度が最も大きく、埋立砂、再構成砂と小さくなった。埋立砂は高々数年前に堆

キーワード：液状化、地震、細粒分含有率、室内実験、地盤調査

連絡先：〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 東京電機大学理工学部 TEL.049-296-2911, FAX.049-269-6501

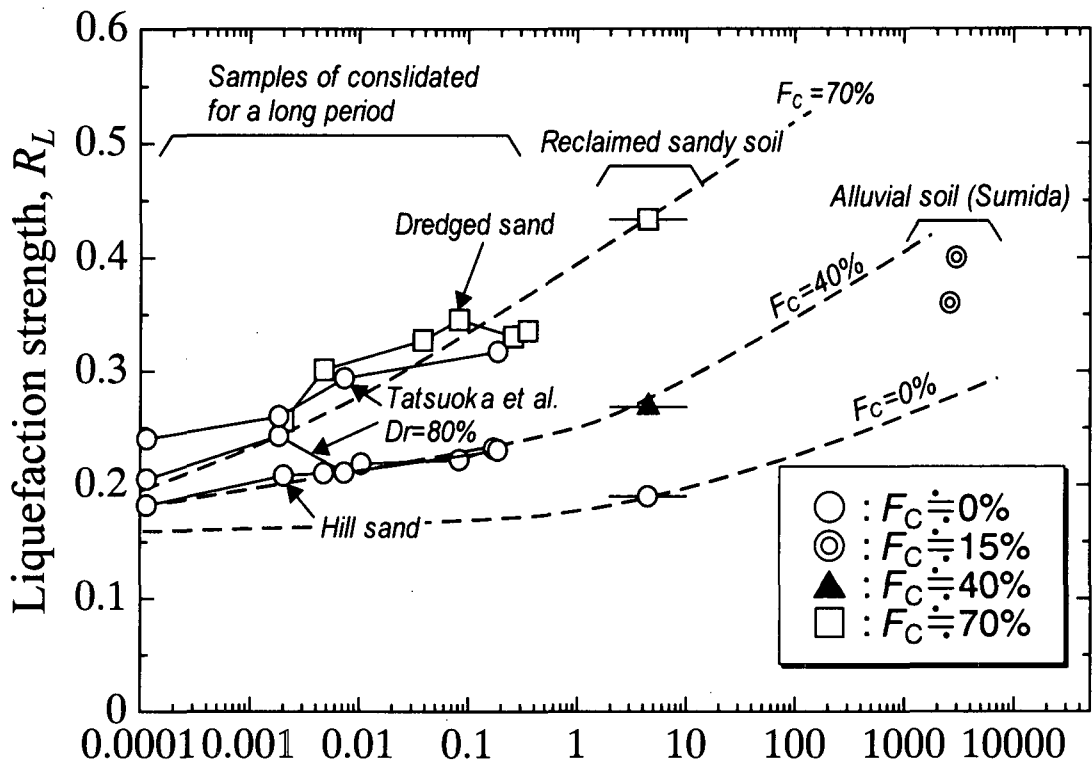


図1 堆積後の液状化強度の時間変化と細粒分含有率の関係

積したのにも拘わらず、それを詰め直した再構成試料より液状化強度は大きかった。前述したように埋立砂は数年前に造成されているため、これを5年程度とみなして、細粒分含有率が40%と70%の時の液状化強度比を図4から読みとって図1にプロットしてみた。そうすると、前述の三軸試験による2つの研究結果の延長線上のプロットが行えた。以下にはさらに長年月でのデータのプロットを試みる。

3. 東京低地の沖積層とその再構成試料の液状化試験

東京低地には数 m の厚さで上部有楽町層と呼ばれる沖積砂層が広く堆積している。この沖積砂層およびその下部の下部有楽町粘性土層の液状化強度を調べるために、著者は1923年関東地震で液状化した箇所としなかった箇所の2地点で深さ方向に連続して不攪乱試料を採取し、繰返し三軸試験を行った⁴⁾⁵⁾。また、使用した試料を同じ密度に詰め直した再構成試料においても繰返し三軸試験を行った。西亀有では4丁目の高木神社隣の公園で試料採取を行ったが、この一帯は関東地震の際に噴水が多く発生し、また、すぐ北側に位置する古隅田川に向かって流動が生じた。一方の地点の墨田3丁目は液状化が発生していないと判断される。

これらの2地点における地盤調査および土質試験結果をまとめて図5, 6に示す。墨田3

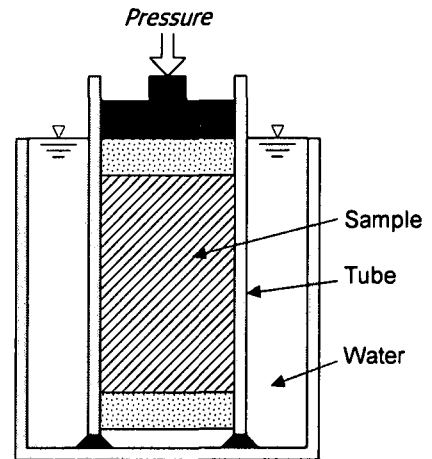


図2 供試体を長期圧密した装置²⁾

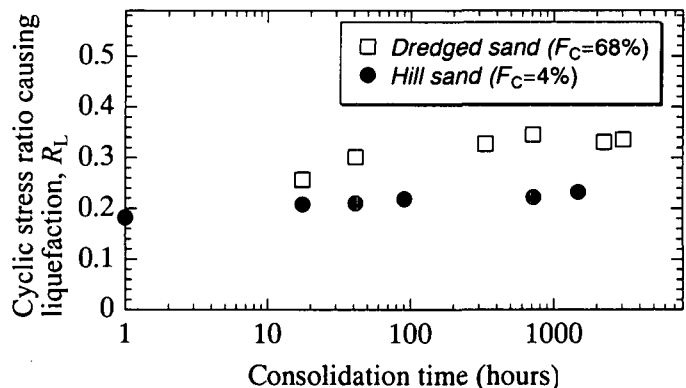


図3 2種類の砂質土における圧密時間と液状化強度の関係²⁾

丁目、西亀有 4 丁目において上部有楽町層はそれぞれ 6.5m, 11m 以上の深さまで堆積していた。墨田 3 丁目では GL-6.5m 以深の砂混じりシルト層とシルト層は下部有楽町層である。図には示していないが、墨田 3 丁目での細粒分含有率は上部から、細砂層で 10~40%, シルト混じり細砂層で 20~70%, 砂混じりシルト層で 50~90%, シルト層で 80~90%であった。一方、西亀有 4 丁目の細粒分含有率はシルト質砂層で 20%, 細砂層で 5~10%, 中砂層で 5~15%, シルト混じり中砂層で 10%, 細砂層で 5~15% 程度であった。地下水位は墨田 3 丁目では GL-1.6m, 西亀有 4 丁目では GL-1.5m であった。また、上部有楽町砂層不攪乱試料の液状化強度比は墨田 3 丁目では 0.34~0.43 程度、西亀有で 0.27~0.40 程度であった。ただし、墨田 3 丁目の下部有楽町層でも液状化強度比は 0.28~0.30 と、かえって上部有楽町層より小さかった。

一方、再構成試料における液状化強度比を見てみると、上部有楽町層に関しては両地点とも同じような値となり、0.16~0.19 程度であった。これはかなり液状化しやすい値と言える。また、墨田 3 丁目の下部有楽町層においても細粒分含有率は上述したように 50~90%もあるのに、液状化強度比は 0.19~0.23 程度しかなかった。

さて、墨田 3 丁目では採取した試料のうち、GL-3.0m と GL-3.9m の試料に関し、木片や貝などをもとに C14 による年代測定を行って見た。その結果をその深度における液状

化強度比と細粒分含有率との関係で表 1 に示す。この測定によるとこれらの砂の年代は 2970 年、2600 年程度前との結果になった。深さが浅い割にはかなり古い時代の堆積層とすることができよう。これらの年代と液状化強度比を図 1 にプロットすると◎となった。なお、細粒分含有率は表 1 に示すようにそれぞれ 14.8%, 22.7%であった。

4. 液状化強度比に関するエイジングの影響のまとめ

以上の実験結果をもとに、データ数は少ないが、一応 3000 年程度の堆積年代までの液状化強度比のプロットができたことになる。これに再構成試料のデータを付け加えて、おおまかな関係図を作成してみる。

安田らは国内・国外の 27 箇所から採取した種々の細粒分含有率を有す砂質土に対し、一定の方法で試料を詰めて繰返し三軸試験を行った³⁾。ここではまず試料を炉乾燥し、ロートにホースとノズルを付けた器具を用いて一定の落下高さを保つようにして供試体を作製した。落下高さを 30cm としたところ、埋立層からサンプリングした不攪乱試料の密度程度になったため、全試料作製時の落下高を 30cm としている。細粒分含有率が液状化強度に与える影響を論じる時、このように堆積方法を一定にする方法と、相対密度を一定にする方法などがあるが、ここでは、埋立地や河川などの自然堆積の過程では堆積方法が一定と考えた方が良く、このような落下高を一定にする方法をとっている。図 7 に液状化実験結果を示す。これに見られるように、細粒分含有率が多くなると液状化強度比は大きくなった。また、種々の土のデータであるにも関わらず、図中に示した曲線上に比較的よくのって来た。ただし、 $F_c=0\%$ での液状化強度比に対し、100%でも 2.3 割程度しか液状化強度比は大きくなかった。

さて、図 7 の液状化強度比は、種々の細粒分含有率を持つ土における堆積直後の液状化強度比とみなすことができる。そこで、この図から $F_c=0\%$, 40%, 70% における液状化強度比を読みとり、図 1 の 0.0001 年のところにプロットしてみた。

以上、いくつかのデータを図 1 にプロットしてきた。これらをもとに、 $F_c=0\%$, 40%, 70% の土における液状化強度比の経年変化の関係を思い切って描いたのが図中の破線である。これらの破線の関係を模式化して示すと図 8 のようになる。ここに示したように、堆積後の年月とともに液状化強度は増加していき、その増加割合は細粒分が多くほど大きいと考えられる。

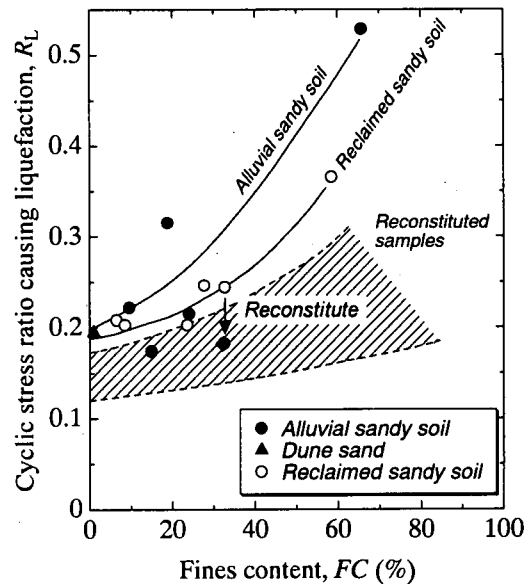


図 4 福岡市の沖積層と埋立層、砂丘砂層における細粒分含有率と液状化強度の関係³⁾

表 1 墨田 3 丁目の試料の年代測定結果

Depth (m)	Measured C14 age (year)	Liquefaction strength, R_L	Fines content, F_c (%)
3.0	2970 ± 40	0.40	14.8
3.9	2600 ± 40	0.36	22.7

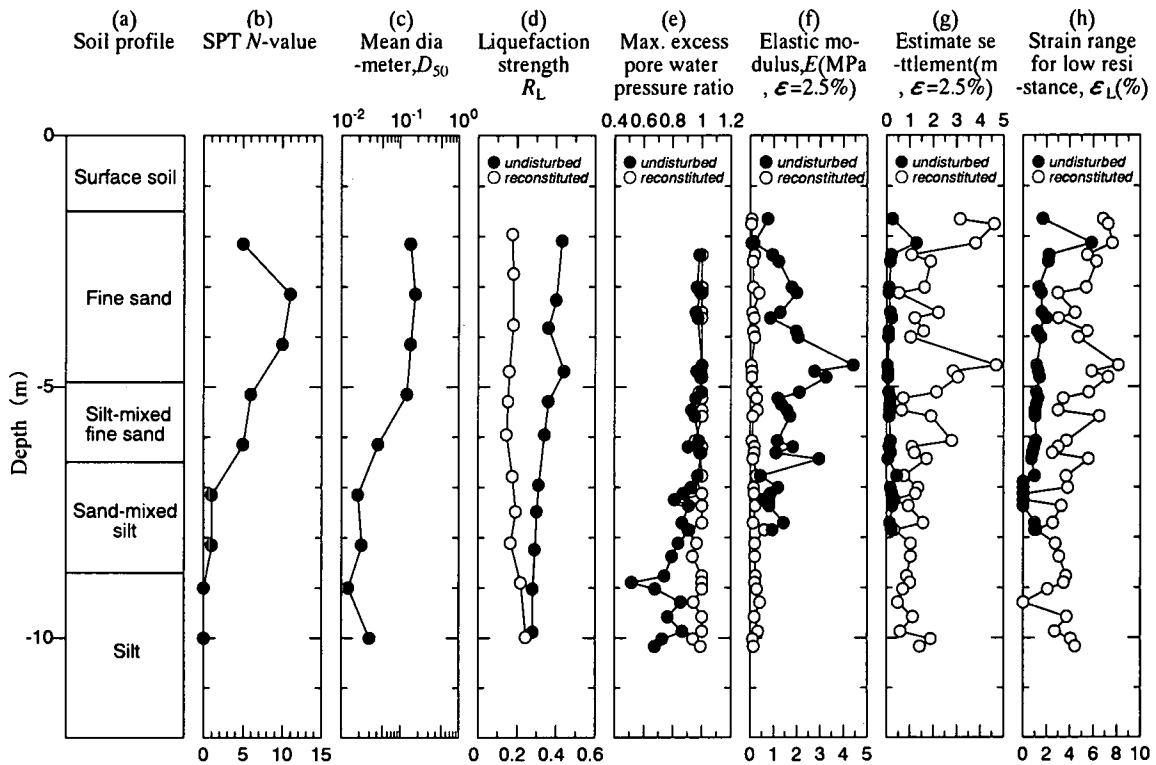


図5 墨田3丁目の調査箇所における柱状図, N値, 粒径, 液状化強度, 液状化後の変形特性⁴⁾

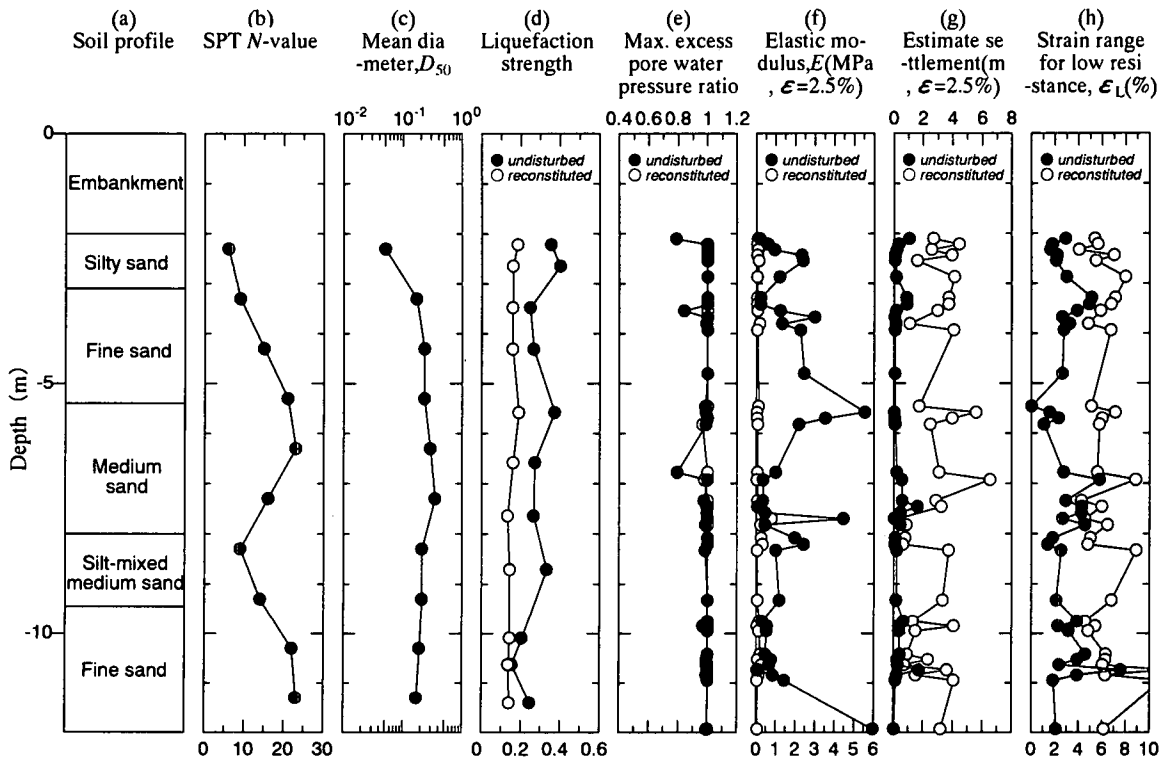


図6 西亀有4丁目の調査箇所における柱状図, N値, 粒径, 液状化強度, 液状化後の変形特性⁵⁾

5. 液状化後の変形特性に与えるエイジングの影響

図5に示したように、1923年関東地震で液状化しなかった墨田3丁目から採取した試料の液状化強度比は0.34~0.43

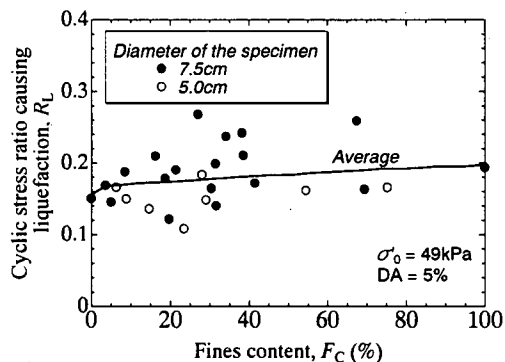


図7 一定の落下高で詰めた試料の液状化強度³⁾

程度であった。この地震時の地表面加速度は記録されていないが、東京下町の被害の程度からみて、墨田3丁目あたりでは300~400gal程度の地表面最大加速度になっていたのではないかと推察される。もし、地表面最大加速度を350galと仮定して、道路橋示方書の方法に従って地盤内で発生する繰返しせん断力比Lを計算してみると、GL-3mから-10mの深度で0.41~0.55程度となる。従って、液状化に対する安全率 F_L はこの深度で0.97~0.52となる。この値に従うと、図5に示した柱状図のすべての砂質土層、シルト層が関東地震時に液状化したことになる。これは関東地震の際にこの箇所でも液状化が発生しなかった事実と反することになる。このような矛盾は、東京の上部有楽町層、下部有楽町層を扱っているとよく出くわす。特に、レベル2地震動を対象にした場合、サンプリングして液状化試験を行ってみると、粘性土といえども液状化すると結果になりやすい。この最大の原因は、室内液状化試験において、通常、繰返し両ひずみ振幅が5%になった場合に液状化が生じたと判定していることにある。細粒分が少ない砂の場合はこの時点と過剰間隙水圧比が1.0になる時点とがほぼ一致し、確かに液状化して強度が急減したとみなせるが、細粒分を多く含むと両時点が一致しなくなり、液状化発生の定義自体がおかしくなるのである。

このことを定量的に調べるために、まず、図5、6に示した液状化試験の結果を、両ひずみ振幅が10%に達するまでに上昇した最大過剰間隙水圧比で整理した。これが図9、10である。これらの図に示されるように、再構成試料の場合、細粒分含有率が100%近いものでも過剰間隙水圧比はほぼ1.0まで上がった。これに対し、不攪乱試料の場合には、細粒分含有率が多いほど最大過剰間隙水圧比は小さくなる傾向を示した。例えば、 $F_C=30\%$ 程度でも過剰間隙水圧比は既に1.0を下回り、0.95から0.98程度となった。このことは、細粒分を多く含むと、通常の液状化発生の定義である両軸ひずみ振幅が5%程度に達しても、まだ、有効応力ゼロにならず残っており、ある程度の強度や剛性を有していることを意味している。

そこで、墨田3丁目と西亀有4丁目の試料に対し、通常の液状化試験に加えて、液状化後の変形特性を求めることを行ってみた。この試験では、繰返し荷重を終了した後、非排水状態のまま単調荷重を行い、その時の応力~ひずみ関係を求めた。これは、繰返しねじりせん断試験にて、液状化後の変形特性を求めるために行ってきた方法⁶⁾と同様の荷重方法をとったものである。図11、12に墨田3丁目の試料における不攪乱試料、再構成試料の液状化後の応力~ひずみ関係を示す。再構成試料の場合、図12に見られるように、小さい軸差応力で大きなひずみが発生するという“剛性が非常に小さい領域(微小抵抗領域と呼ぶ)”があり、その後、剛性が回復し軸差応力が大きくなっていく傾向を示した。この剛性が回復する過程で過剰間隙水圧は下がっていった。これに対し、不攪乱試料の場合は図11に見られるように、

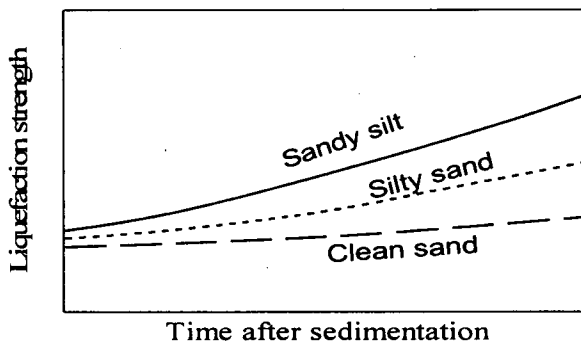


図8 液状化強度の時間変化に関する模式図

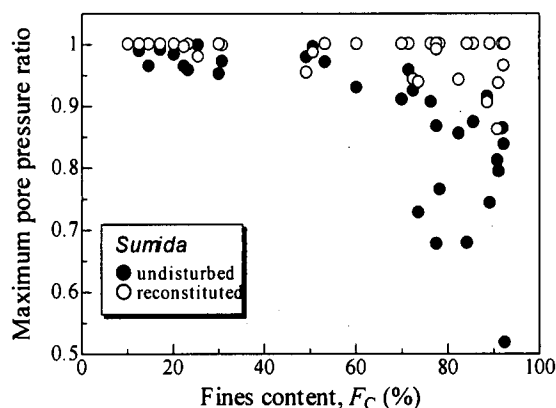


図9 墨田3丁目の不攪乱試料、再構成試料における最大過剰間隙水圧比の比較

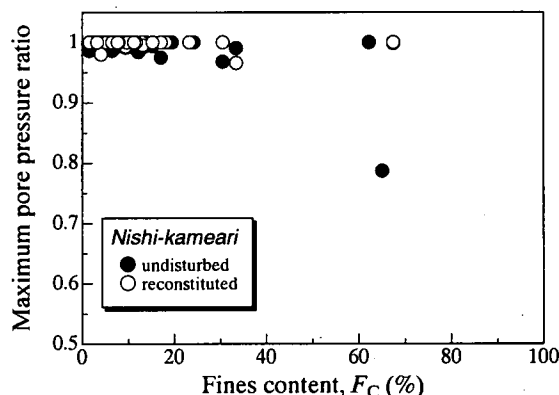


図10 西亀有4丁目の不攪乱試料、再構成試料における最大過剰間隙水圧比の比較

剛性が小さい微小抵抗領域は狭く、少しひずみが発生したところですぐ剛性は回復する傾向を示した。

図 5(h), 6(h)にはこのようにして求めた微小抵抗領域のひずみ ϵ_L を示す。○は再構成試料, ●は不攪乱試料の微小抵抗領域を示すが、両図に見られるように、再構成試料に比べて不攪乱試料の方が微小抵抗領域ははるかに小さい値となった。さらに、軸ひずみ $\epsilon=2.5\%$ までの割線係数(弾性係数)を両図の(f)に示す。これも再構成試料では真の意味の液状化を生じているため大変小さな値となっているが、不攪乱試料の場合はあまり小さな値になっていない。これらの微小抵抗領域と弾性係数の違いから、再構成試料の場合は繰返し载荷により真の液状化が生じ、建物の沈下や地盤の流動など大きな変形を生じることが発生するのに対し、細粒分をかなり含んだ不攪乱試料の場合は繰返し载荷によって両ひずみ振幅がかなり大きくなったとしても、大きな建物の沈下や地盤の流動は生じないという事ができよう。

従って、液状化の発生だけでなく、液状化発生による構造物および地盤の変形に関してエイジングの影響があり、これを考慮してレベル2地震動に対する性能設計を行う必要があると言えよう。

6. まとめ

レベル2地震動を念頭におき、液状化の発生お

よび液状化後の構造物や地盤の変形に与えるエイジングの効果に関し、繰返し三軸試験を行って検討した。その結果以下のような結果が得られた。

- (1)砂質土の液状化の強度は堆積後に次第に大きくなっていくが、その強度増加割合は細粒分を多く含むほど大きい。
- (2)細粒分を含む砂では液状化後の応力-ひずみ関係にもエイジングは大きく影響している。そのため、レベル2地震動を対象とした性能設計において液状化による構造物および地盤の変形を検討する場合、エイジングの影響も考慮する必要がある。

なお、本研究は(財)地震予知総合研究会の研究委員会の一環として行ったものである。関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1)木村勝・龍岡文夫・Pradhan, T.: 長期圧密及び過圧密された2種の砂の三軸液状化強度, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.591-594, 1986.
- 2)安田進・古閑功一・宮本孝行: 埋立後の液状化強度に関する室内実験, 土木学会第46回年次学術講演会講演集, III, pp.264-265, 1991.
- 3)Yasuda, S., Wakamatsu, K. & Nagase, H.: Liquefaction of artificially filled silty sands, *Ground Failure Under Seismic Conditions, ASCE STP*, pp.91-104, 1994.
- 4)安田進・清水善久・小金丸健一・松本昇・岩谷裕: 東京の沖積砂層における液状化の新しい考え方, 土木学会第55回年次学術講演会講演集, III, A120, 2000.
- 5)安田進・清水善久・小金丸健一・糸井秀利・小鹿大介: 1923年関東地震で液状化した亀有地区の地盤特性, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.391-392, 2001.
- 6)安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638 /III-49, pp.71-89, 1999.

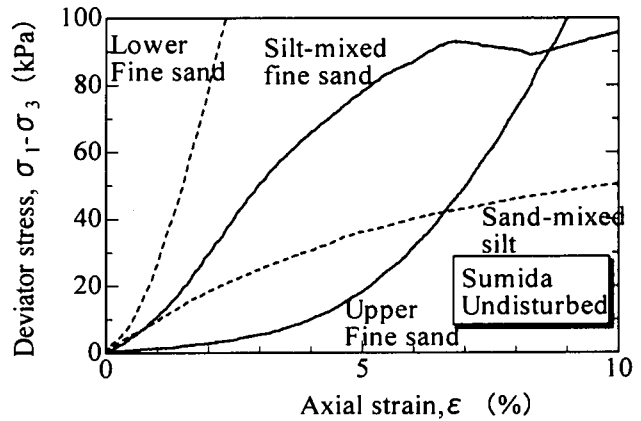


図 11 墨田3丁目の不攪乱試料における液状化後の変形特性⁴⁾

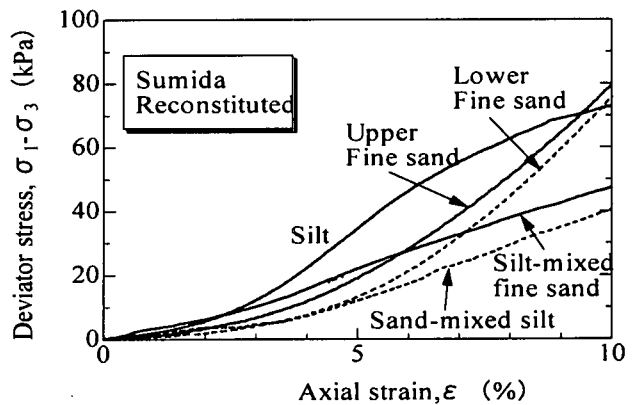


図 12 墨田3丁目の再構成試料における液状化後の変形特性⁴⁾