

3.3.2 大型土槽実験の地盤物性の試験

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2か年の年次実施計画
- (e) 平成18年度業務目的

(2) 平成18年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 実験内容
 - 2) 実験装置
 - 3) 実験条件および方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 液状化強度特性
 - 2) 動的変形特性
 - 3) 静的変形特性
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

大型土槽実験の地盤物性の試験

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京電機大学理工学部建設環境工学科	教授	安田 進	yasuda@g.dendai.ac.jp
同上	学生	斉藤盛文	
同上	学生	鈴木秀明	

(c) 業務の目的

E ディフェンスで平成 17 年度から実施されている地盤・基礎構造物の大型土槽実験では、試料としてアルバニー珪砂が用いられている。この実験の結果の評価を行う際、試料土であるアルバニー珪砂の動的変形特性(地盤剛性と減衰)、液状化特性、液状化後の変形特性、液状化後の体積圧縮特性等の特性を知っておく必要がある。このような土質特性は試料の密度や排水条件、拘束圧などによって大きく変化する。また、室内試験装置によっても少し異なることもある。

そこで、実験が行われる密度や排水条件に対し、繰返しねじりせん断試験装置、繰返し三軸試験装置を用いて動的変形特性、液状化強度特性、液状化後の変形特性、液状化後の体積圧縮特性などを求めることとする。この際、実大実験では 5m 程度の深さの土槽が用いられる予定となっているため、これに見合う 10kPa といった低拘束圧から 50kPa 程度の拘束圧まで実験を行うこととする。低拘束圧では実験装置や方法に特別な考慮が必要であり、特殊な繰返しねじりせん断試験装置を用いて実験を行って特性を求める。

(d) 2 か年の年次実施計画

- 1) 平成 17 年度：E ディフェンスの大型土槽実験で予定されている 70% の相対密度に関し、繰返しねじりせん断試験や繰返し三軸試験を行って、液状化強度特性、液状化後の変形特性、体積圧縮特性などを求めた。そして、これらの特性に拘束圧や試験装置の違いなどが与える影響を調べた。また、これらの室内実験結果と中型振動台を用いた実験の結果の比較も行った。
- 2) 平成 18 年度：大型実験で作製された地盤の物性を把握するため、平成 17 年度の大型実験の結果をうけて、地盤材料の液状化、地盤のせん断剛性等の実験を行い、実験結果の評価に役立てるとともに、数値シミュレーション解析の解析定数の設定データとする。

(e) 平成 18 年度業務目的

低拘束圧用の繰返しねじりせん断試置を用いて、大型土槽実験用に用いているアルバニー珪砂について液状化特性、動的変形特性、静的変形特性を求める実験を行う。また、比較のために豊浦砂でも同様な実験を行う。液状化特性の相対密度は平成 17 年度と同様の 70% とし、拘束圧は 10, 20, 50kPa の三段階で実験を行う。そして平成 17 年度の結果と合

わせて液状化強度に与える広い範囲の拘束圧の影響に関してまとめる。動的変形試験も70%の相対密度で作製した供試体に、10、20、50kPaの三段階の拘束圧を加えて実験を行う。そして、低拘束圧下でのせん断剛性に与える拘束圧の影響に関してまとめ、さらに、E-ディフェンスの大型土槽で測定されたせん断剛性との比較を行う。静的変形特性では、供試体の密度を非常に緩いものから密なものまで広い範囲で変え、単調載荷を行い、その時のせん断応力～せん断ひずみ関係および応力経路を求める。拘束圧も10、20、50kPaの三段階とする。これにより、せん断ひずみの増大とともにせん断応力が急激に減少する限界の密度を求める。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 業務の要約

低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置を用いて、大型土槽実験用に用いているアルバニー砂について液状化特性、動的変形特性、静的変形特性を求める実験を行った。また、比較のために豊浦砂でも同様な実験を行った。液状化特性を求める実験は、70%の相対密度の供試体に、10、20、50kPaの三段階の拘束圧を加えて行った。平成17年度の結果と合わせて液状化強度に与える広い範囲の拘束圧の影響に関してまとめたところ、100kPa～50kPaの拘束圧の範囲では液状化強度比は変化しないのに対し、これより拘束圧が小さくなると、液状化強度比は大きくなっていくことが明らかになった。動的変形試験も同じ密度と拘束圧で実験を行った。その結果、低拘束圧下でも通常の拘束圧下と同じように、拘束圧が大きくなるとせん断剛性が大きくなる傾向が得られた。また、E-ディフェンスの大型土槽で測定されたせん断剛性との比較を行ったところ、繰返しねじりせん断試験結果の方が多少小さい結果となった。静的変形特性では、供試体の密度を非常に緩いものから密なものまで広い範囲で変え、単調載荷を行った。その結果、せん断ひずみがある値になるとせん断応力が減少する限界の相対密度は、-5%程度となった。この限界の相対密度は豊浦砂のそれよりかなり小さい結果となり、両砂のせん断特性が異なることが窺えた。

(b) 業務の実施方法

1) 実験内容

平成18年度は液状化特性、動的変形特性、静的変形特性に関する三種類の実験を行った。これらの実験内容および条件を表1に示す。いずれも同じ低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置を用いた。

液状化特性に関する実験は平成17年度から行っているが、平成17年度の末に載荷装置を改良してゴム張力の補正をしながら正弦波応力が出せるようになったため、この装置を用いて10、20、50kPaと拘束圧を変えて実験を行った。そして、液状化強度に与える拘束圧の影響に関してまとめを行った。この実験では平成17年度と同様に70%の相対密度で実験を行った。

動的変形特性試験は10、20、50kPaと拘束圧を変えて実験を行った。相対密度は液状化特性を求める実験と同じ70%とし、動的変形特性に与える拘束圧の影響を調べた。また、

アルバニー珪砂に加えて豊浦砂でも実験を行い，試料が異なった場合の動的変形特性の違いも調べた。

静的変形特性に関する試験では，70%の相対密度から非常に緩い密度まで数段階密度を変えた供試体を作製し，密度が異なった場合の静的変形特性を調べた。砂が緩く堆積していると，非排水状態で載荷しても途中からせん断応力が減少して一気に破壊してしまう現象が生じるが，この限界の密度に関して特に検討を行った。また，豊浦砂についても同様の実験を行い，試料の違いが限界の密度に与える影響に関して考察を行った。

表 1 平成 18 年度に行った三種類の実験の内容と条件

実験の種類	試料	拘束圧 (kPa)	相対密度 (%)
液状化特性を求める実験	アルバニー珪砂	10, 20, 50	70
動的変形特性を求める実験	アルバニー珪砂	10, 20, 50	70
	豊浦砂	50	55
静的変形特性を求める実験	アルバニー珪砂	10, 20, 50	-60 ~ 69
	豊浦砂	20	29 ~ 69

2) 実験装置

平成 17 年度に引き続き低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置を用いた。これを写真 1、2 に示す。供試体の寸法は外形 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の円筒状である。この供試体に上部からねじりせん断力を与えるようになっている。ただし、50kPa 程度以上の通常の拘束圧に比べて，低拘束圧の場合には供試体のせん断抵抗も小さくなって，ゴムス



写真 1 低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置のセル

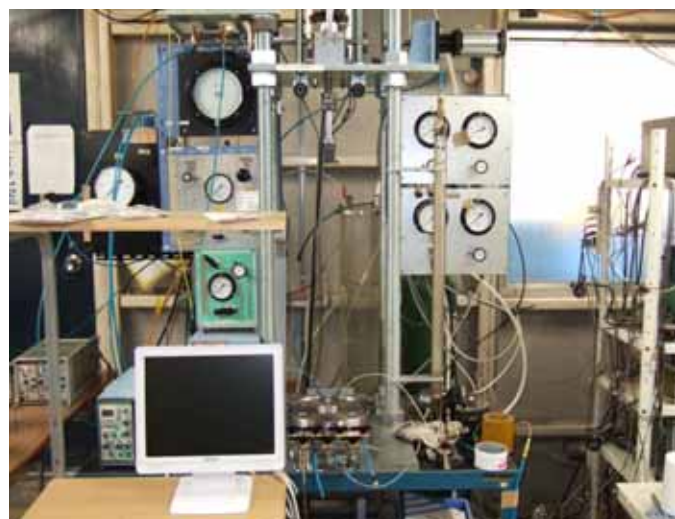


写真 2 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置

リーブの張力の影響を無視できないことや、低い圧力をコントロールせねばならないため、以下の点に特別な配慮がされている。

i) 円筒形の供試体を用いたねじりせん断試験では、供試体の外側と内側にゴムスリーブを設ける必要がある。そして、供試体と同時にこのゴムスリーブもねじられるため、その張力も発生し、供試体上部に設置したトルク計には、供試体のせん断抵抗とゴムスリーブの張力を合わせたトルクが計測されることになる。供試に与える拘束圧が大きい時には、供試体のせん断抵抗も大きいため、このゴムスリーブの張力の影響は無視できるが、10kPaといった低拘束圧になり、しかも液状化して大きな回転角が発生する場合にはこの張力が大きく影響してくる。このため、トルク計で計測された値からゴムスリーブの張力を差し引いて供試体に加わったせん断応力を計算することはもとより、一般に行われるせん断応力振幅一定の繰返しせん断試験を行う場合には、繰返し载荷中にゴムスリーブ張力を常に補正しながら载荷する必要がある。

このため、平成 17 年度では、まず、ゴムスリーブの張力を補正しながら繰返し载荷を行い易いように、载荷装置としてメガトルクモータを用いた。この場合、メガトルクモータは回転速度一定の制御とした。回転速度一定の試験を行うと、1 サイクルに要す時間が

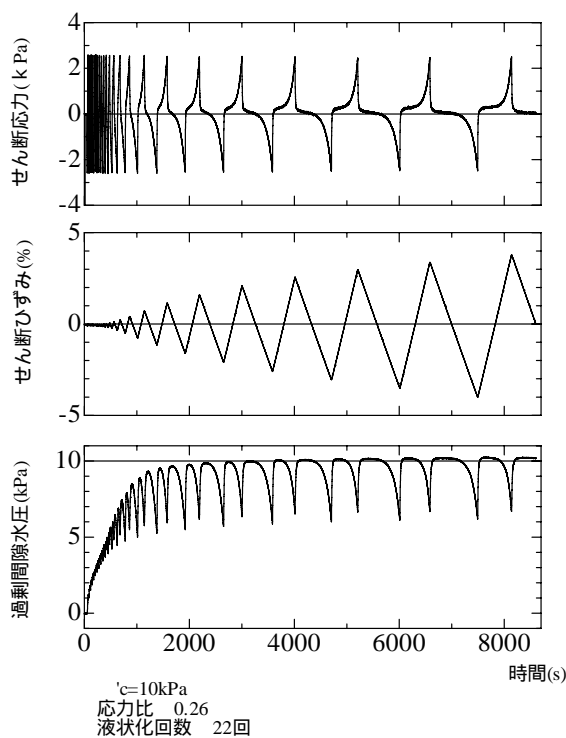


図 1 回転角速度一定で行った低拘束圧繰返しねじりせん断試験の生データ例

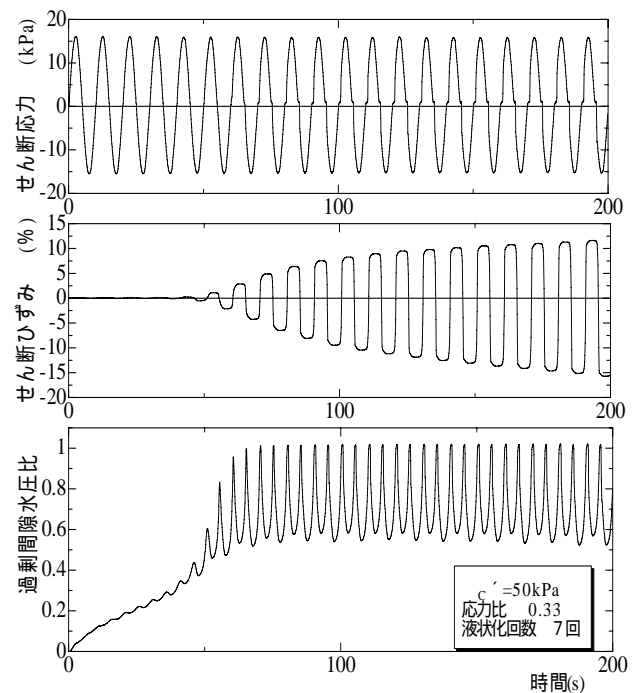


図 2 コンピュータでフィードバックして正弦波応力载荷を行った低拘束圧用繰返し試験の生データ例

次第に長くなっていく。そのため横軸に時間をとると、図 1 に示すように一定の周期にはならない。また、せん断力の方向を変転するのをなめらかにに行いにくいいため、三角波の繰返しせん断力を与えざるを得なかった。このような载荷方法をとると、通常行っている液

状化試験より 10 倍程度も長い時間を要した。その結果、液状化強度が小さくなったのではないかと思われたため、正弦波応力制御ができる載荷装置を、平成 17 年度の末に作製した。これは、発生するトルクをフィードバックしてコントロールするとともに、さらに、載荷途中でゴムスリーブの張力を差し引きできるようにコンピュータで制御するようにしたものである。この装置を写真 2 に示す。この装置を用いて行った実験の例を図 2 に示す。これに示すように、ゴム張力を考慮しても振幅一定で正弦波の繰返しせん断応力が得られるようになった。

ii) 低拘束圧の場合、レギュレータで拘束圧を制御するとその精度が問題となる。そこで、水頭差により精度良く拘束圧を加えるようにした。

iii) 供試体キャップを軽くするなど、セル全体で低拘束圧を意識した軽量化、高精度化をした。

なお、このような実験装置の工夫と同時に、実験過程でも低拘束圧ではいくつかの注意が必要である。その一つに試料の詰め方がある。中空の供試体を作製するためにポートからチューブを介して試料をモールド内に詰めていったが、その際、円周方向に詰めていくことになる。これを一方向だけにしていると、供試体にその影響がはいるため、反転させながら詰めていくといった注意を払った。

3) 実験条件および方法

a) 用いた試料の物理特性

本研究では平成 17 年度と同様に E ディフェンスの大型土槽実験で使用されるアルバニー砂と豊浦砂を用いた。これらの土粒子の密度試験、最小・最大密度試験を表 2 に示す。なお、アルバニー砂の土粒子密度などは昨年試験した値を示してある。

表 2 用いたアルバニー砂と豊浦砂の物理特性

物理特性	アルバニー砂	豊浦砂
土粒子の密度	$s = 2.630 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$s = 2.650 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
最小密度と最大間隙比	$d_{\min} = 1.513 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $e_{\max} = 0.738$	$d_{\min} = 1.340 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $e_{\max} = 0.978$
最大密度と最小間隙比	$d_{\max} = 1.738 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $e_{\min} = 0.513$	$d_{\max} = 1.653 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $e_{\min} = 0.603$
平均粒径	$D_{50} = 0.30 \text{ (mm)}$	$D_{50} = 0.46 \text{ (mm)}$
細粒分含有率	$F_c = 0 \text{ (\%)}$	$F_c = 0 \text{ (\%)}$

b) 液状化試験

液状化の試験は一般に行われているように、繰返しせん断応力振幅一定で液状化が発生するまで繰返し載荷を行う方法で行った。このため、まず供試体を所定の密度で作製した

後，飽和させ，所定の拘束圧を加えた。供試体の相対密度は平成 17 年度と同じ 70%とした。拘束圧は 10，20，50kPa とした。所定の拘束圧のもとで圧密が終了した後，非排水状態にして供試体が破壊するまで繰返しせん断応力を加えた。その波形は 0.1Hz の正弦波応力となるように制御した。

実験結果は，繰返しせん断応力とあるせん断ひずみに達する回数で整理した。一般に液状化発生時点の判断は，繰返しねじりせん断ひずみ両振幅が 7.5% ($D_A = 7.5\%$) で判断されるため，このひずみ振幅と，その他，1.5%、3%となる回数でも整理した。また，液状化強度比 R_L (非排水繰返し強度比) としては，20 波の繰返しで 7.5% のせん断ひずみ両振幅に達するせん断応力比 $R_L(N_L=20, D_A=7.5\%)$ とした。

c) 動的変形特性試験

動的変形特性試験は地震応答解析に用いる目的で行った。まず供試体を所定の密度で作製した後，飽和させ，所定の拘束圧を加えた。供試体の相対密度は液状化試験と同じ 70%とした。拘束圧も液状化試験と同様に 10，20，50kPa とした。所定の拘束圧のもとで圧密が終了した後，非排水状態にして一定振幅の繰返しせん断応力を加えた。その波形は 0.1Hz の正弦波応力とした。

地震応答解析では広いひずみ範囲での動的変形特性が必要である。一般的に行われているように，微小ひずみから大ひずみレベルの広いひずみ範囲での動的変形特性を求めるため，一つの供試体でひずみレベルを段階的に上げていく方法をとった。一つの段階では一定の振幅の正弦波せん断応力を 11 波与えた。そして，次の段階に移る時は過剰間隙水圧を消散させるため，一旦排水状態にし，再び非排水状態にして次の段階の载荷に移った。ひずみ範囲は $10^{-6} \sim 10^{-1}$ と非常に広い範囲に及ぶため，微小から小ひずみの間はギャップセンサーで，それより大きなひずみではポテンシオメータで回転角を測定した。

実験終了後，各段階の 10 波目におけるヒステリシスループを描いた。そして，ループの頂点どうしを結んで等価せん断剛性率 G を求め，ヒステリシスループの面積などから減衰定数 h を求めた。

なお，アルバニー珪砂と比較するために豊浦砂でも実験を行った。ただし，豊浦砂でこれまで良く行われてきている値との比較も考えて，相対密度が 55% の供試体に対し，50kPa の拘束圧のもとで実験を行った。

d) 静的変形特性試験

静的変形特性は広い密度範囲における変形特性の違いを調べるために行った。まず供試体を所定の密度で作製した後，飽和させ，所定の拘束圧を加えた。供試体の相対密度は 70% から 70% 程度の間とし，数段階変えた。拘束圧も液状化試験や動的変形特性試験と同様に 10，20，50kPa とした。所定の拘束圧のもとで圧密が終了した後，非排水状態にしてひずみ制御方式でせん断ひずみを増加していった。

実験結果はせん断ひずみ～せん断応力関係で整理し，さらに平均有効主応力 p' とせん断応力 q による応力経路でも示した。供試体には等方な拘束圧 p が加えてあるため， p' は p から過剰間隙水圧を差し引いた値とした。

なお，相対密度がマイナスといった，大変緩い供試体を作製する場合には，粉碎した氷

を砂に混ぜて、それをモールドに詰める方法をとった。これにより、アルバニー-珪砂では-60%までの緩い供試体が作製できた

(c) 業務の成果

1) 液状化強度特性

a) 液状化強度曲線

液状化試験を行った生データ例は図 2 に示したが、これに見られるように今回の供試体は相対密度が 70%と中密なため、過剰間隙水圧比が 60%程度以上になっても一気にせん断ひずみ振幅が急増するのではなく、徐々に大きくなる結果となった。そこで、10, 20, 50kPa の拘束圧に対して、繰返しせん断応力比 $R = \sigma'_v / \sigma'_c$ とせん断ひずみ両振幅 D_A が 1.5%、3%、7.5%となる回数の関係(液状化強度曲線)をとって示すと図 3~5 となった。

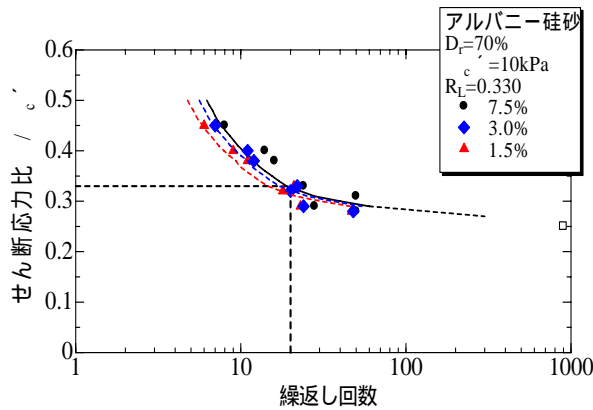


図 3 低拘束圧の繰返しねじりせん断試験で求めた液状化強度曲線 ($\sigma'_c = 10\text{kPa}$)

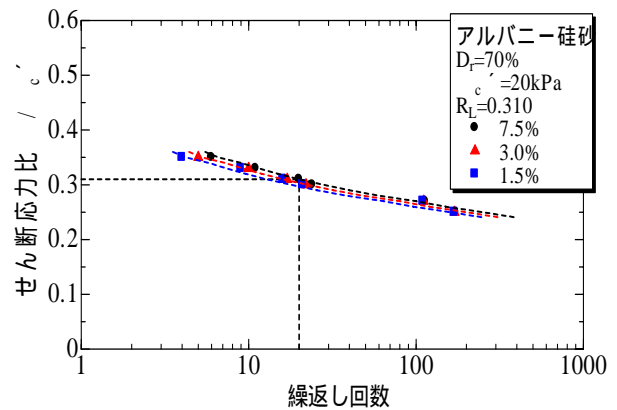


図 4 低拘束圧の繰返しねじりせん断試験で求めた液状化強度曲線 ($\sigma'_c = 20\text{kPa}$)

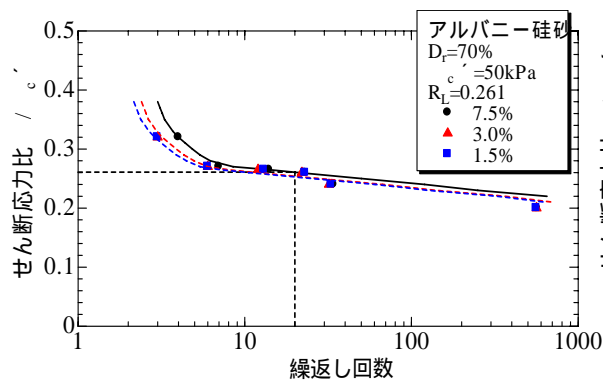


図 5 低拘束圧の繰返しねじりせん断試験で求めた液状化強度曲線 ($\sigma'_c = 50\text{kPa}$)

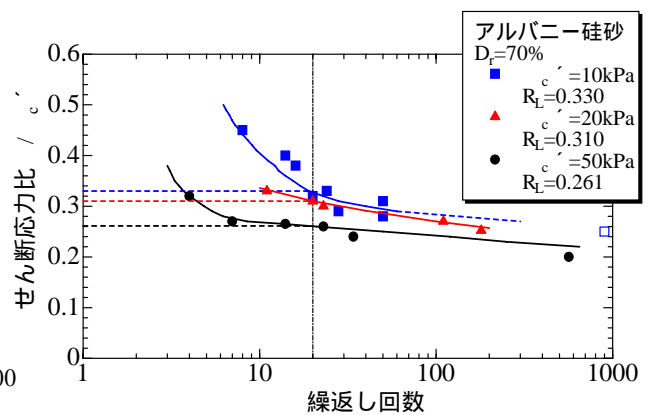


図 6 三段階の拘束圧における液状化強度曲線の比較 ($D_A = 7.5\%$)

これらの図に見られるように、中密な供試体のために1.5%～7.5%のせん断ひずみが発生する回数は数回異なる結果となった。一般にせん断ひずみ両振幅が7.5%となった時点に液状化したと判断するため、このひずみ振幅の関係だけを取り出して比較すると図6となった。

20波で液状化する液状化強度比 $R_L(N_L=20, DA=7.5\%)$ を読みとると、10、20、50kPa それぞれに対して0.330、0.310、0.261となり、低拘束圧領域では拘束圧が低いほど液状化強度比は大きくなった。

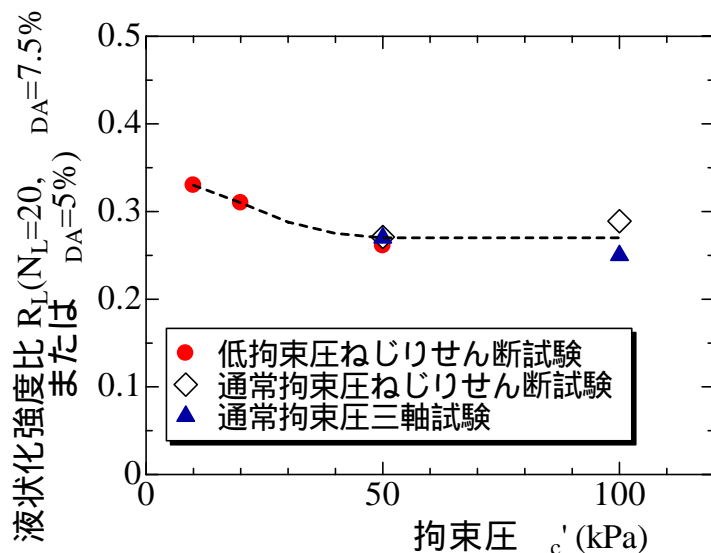


図7 液状化強度比に与える拘束圧の影響のまとめ

b) 液状化強度に与える拘束圧の影響

上述したように低拘束圧領域では拘束圧が小さくなると R_L は大きくなった。平成17年度に行った通常拘束圧の繰返しねじりせん断試験結果と繰返し三軸試験を合わせて、液状化強度比と拘束圧の関係をすべてプロットしてみると図7となった。これにみられるように通常拘束圧の繰返しねじりせん断試験や繰返し三軸試験で得られた100～50kPaでの液状化強度比は、拘束圧にあまり影響されなかった。これに対し、低拘束圧用繰返しねじりせん断試験で得られた50～10kPaでの液状化強度比は拘束圧が小さくなるにつれて大きくなる結果となった。また、50kPaの拘束圧での三種類の試験装置による液状化強度比はほぼ同じ値となった。

2) 動的変形特性

a) ヒステリシスループ

動的変形特性試験の結果のうち代表的なヒステリシスループとして、20kPaの拘束圧における6段階のひずみレベルにおけるループを図8に示す。これに見られるように、ひずみが微小な時のループはほとんど直線に近いが、ひずみレベルが上がるにつれて膨らんできた。さらにひずみが大きくなると、ブーメラン型になってきた。この傾向は豊浦砂などの通常の砂の通常の拘束圧におけるヒステリシスループに似ていると言えよう。他の拘束圧でもこの傾向は同様であった。

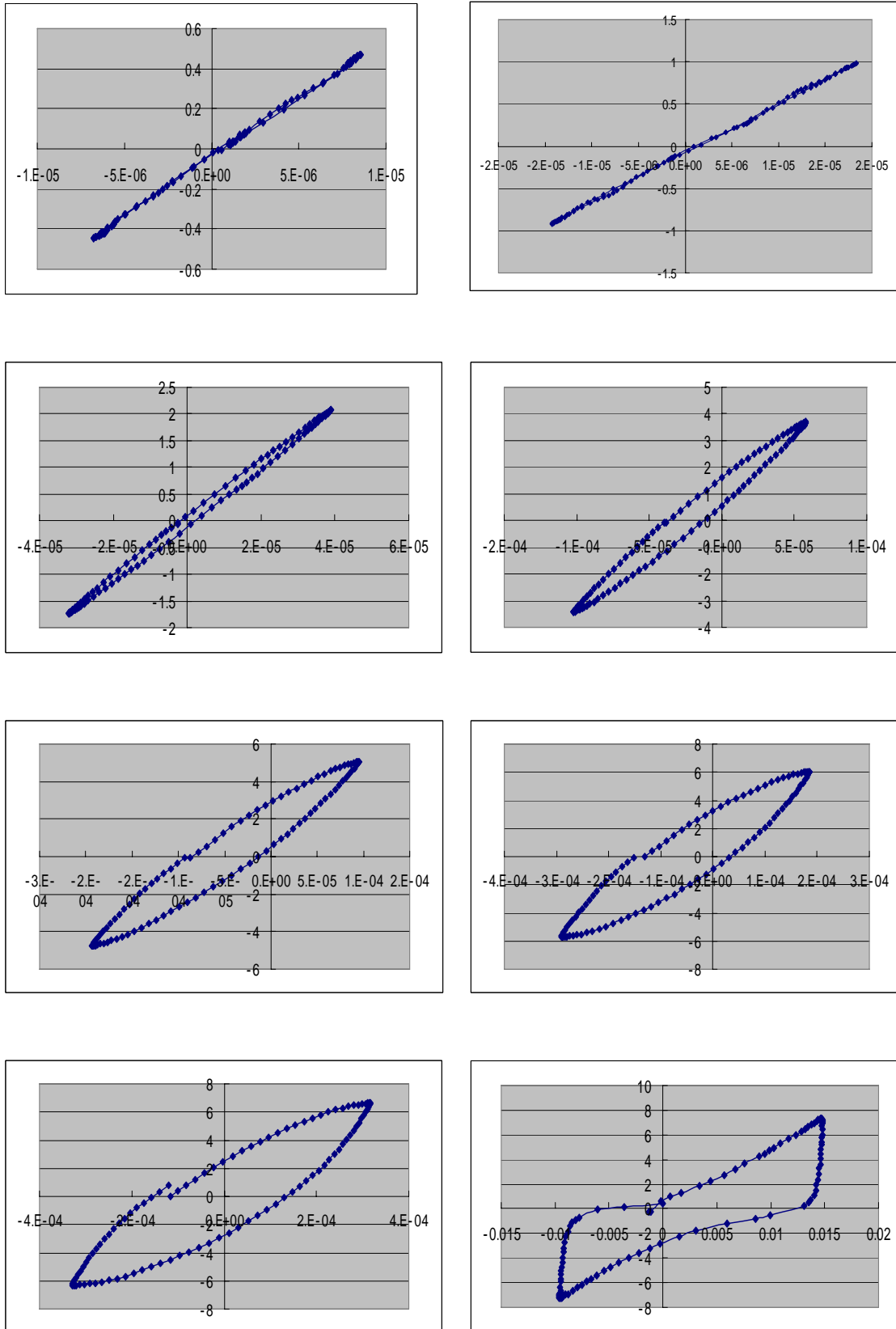


図 8 動的変形特性試験におけるヒステリシスループの例 ($c'=20\text{kPa}$)

b) せん断ひずみ振幅と等価せん断剛性率，減衰定数の関係

ヒステリシスループから等価せん断剛性率，減衰定数を求め，せん断ひずみ片振幅に対してプロットすると図 9～11 となった。まず，等価せん断剛性率について見てみると，三つの拘束圧とも，せん断ひずみ振幅が 10^{-5} 程度より小さい場合は，等価せん断剛性率の値はほぼ一定の値となった。その値は 10，20，50kPa の拘束圧に対し，それぞれ 45，60，110kPa 程度と，拘束圧が大きいほど大きくなった。せん断ひずみ振幅が 10^{-5} より大きくなると等価せん断剛性率は急激に低下した。そして， 10^{-3} 程度のせん断ひずみ振幅になるとその低下割合が少なくなった。 10^{-3} 程度のひずみでは 10，20，50kPa の拘束圧に対し，それぞれ 4，8，16kPa 程度と，拘束圧が大きいほど大きくなった。

一方，減衰定数はひずみ振幅が 10^{-5} 程度より小さい場合はほぼゼロであり，それより大きくなると徐々に大きくなった。 10^{-3} 程度のひずみでは 10，20，50kPa の拘束圧に対し，それぞれ 12，14，9% 程度となった。拘束圧の影響はあまり見られなかった。通常の砂では緩い場合非排水状態で実験すると 10^{-2} 程度以上のひずみになると過剰間隙水圧が大きく発生し，ヒステリシスループが極端にブーメラン状になり，減衰定数はひずみが大きくなるとかえって低下する傾向を示すが，今回の実験では 20kPa の拘束圧で多少その傾向が見られたものの，顕著ではなく，他の拘束圧では明らかでなかった。

次にそれぞれの拘束圧において，各ひずみ時における等価せん断剛性を微小ひずみ時の等価せん断剛性で除した“せん断剛性比”を求め，せん断ひずみ片振幅に対してプロットすると図 12 となった。この図をもとに， 10^{-5} より大きなせん断ひずみで等価せん断剛性が落ち始めるひずみレベルを比較してみると，拘束圧が小さいほど落ち始めるひずみレベルが少し小さくなった。また，この図には三段階の拘束圧における減衰定数も比較しているが，拘束圧が小さいほど多少減衰定数が大きくなる傾向も見られた。

さて，同じ実験装置と方法で豊浦砂に関して実験してみた結果を図 13 に示す。図 9～11 と比較してみると，等価せん断剛性が減少し始めたり，減衰定数が上昇し始めるせん断ひずみ振幅はアルバーニ矽砂とあまり差がない結果となった。

c) 等価せん断剛性率と減衰定数に与える拘束圧の影響

等価せん断剛性率と減衰定数に与える拘束圧の影響を定量的にみるために， 10^{-6} ， 10^{-5} ， 10^{-4} ， 10^{-3} のせん断ひずみ振幅における等価せん断剛性率と減衰定数を図 9～11 より読みとってプロットすると図 14，15 となった。図 14 に見られるように，拘束圧が大きくなると各せん断ひずみレベルにおける等価せん断剛性率は明らかに大きくなった。この図は両対数で表しているため，直線になった場合の傾きが拘束圧のべき乗になる。各ひずみレベルとも直線に近いので直線と仮定すると， 10^{-6} ～ 10^{-4} のひずみレベルでは約 $1/2$ 乗になっており， 10^{-3} のレベルになるとほぼ 1 になった。このように，べき乗が $1/2$ ～1 と，ひずみレベルに伴って大きくなる傾向は，豊浦砂を用いた既往の研究における傾向¹⁾と似ている。

これに対し，図 15 を見ると，減衰定数の方は 10^{-4} のひずみレベルでは拘束圧が大きくなると多少小さくなり， 10^{-3} ではその逆と，拘束圧による影響は明瞭に見られなかった。

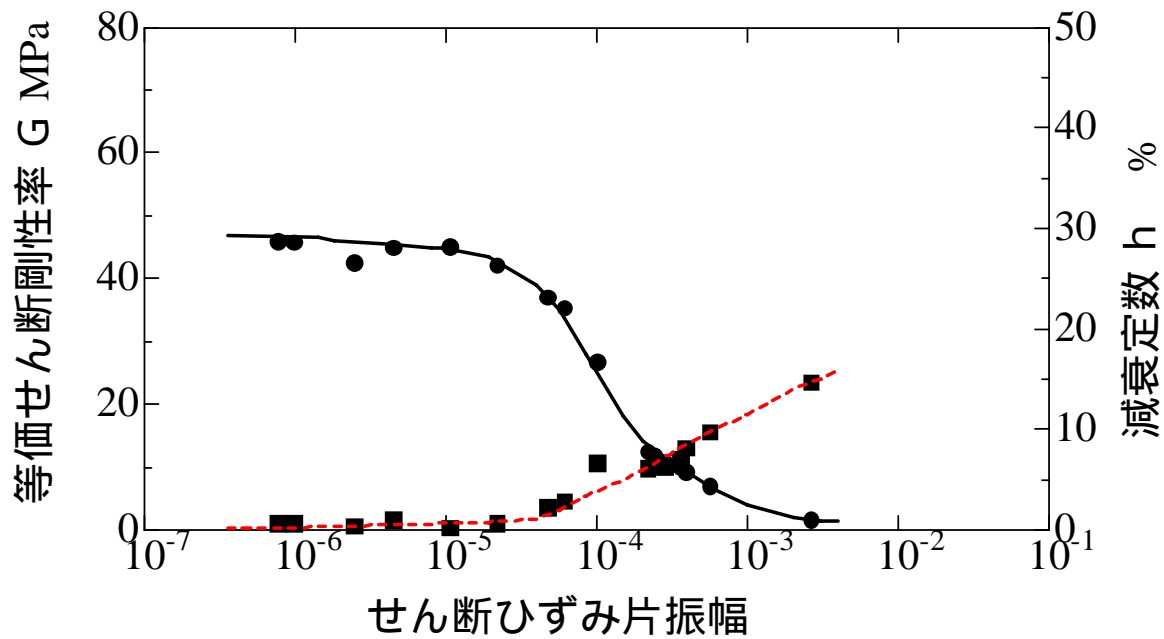


図9 せん断ひずみ振幅と等価せん断剛性率，減衰定数の関係（ $e'=10\text{kPa}$ ）

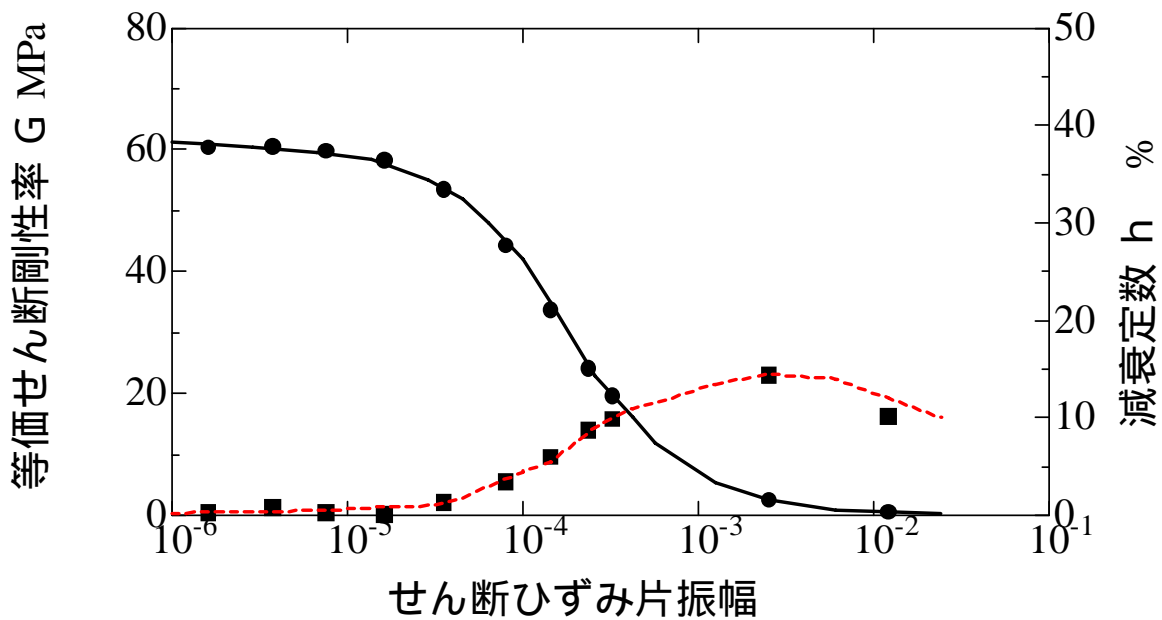


図10 せん断ひずみ振幅と等価せん断剛性率，減衰定数の関係（ $e'=20\text{kPa}$ ）

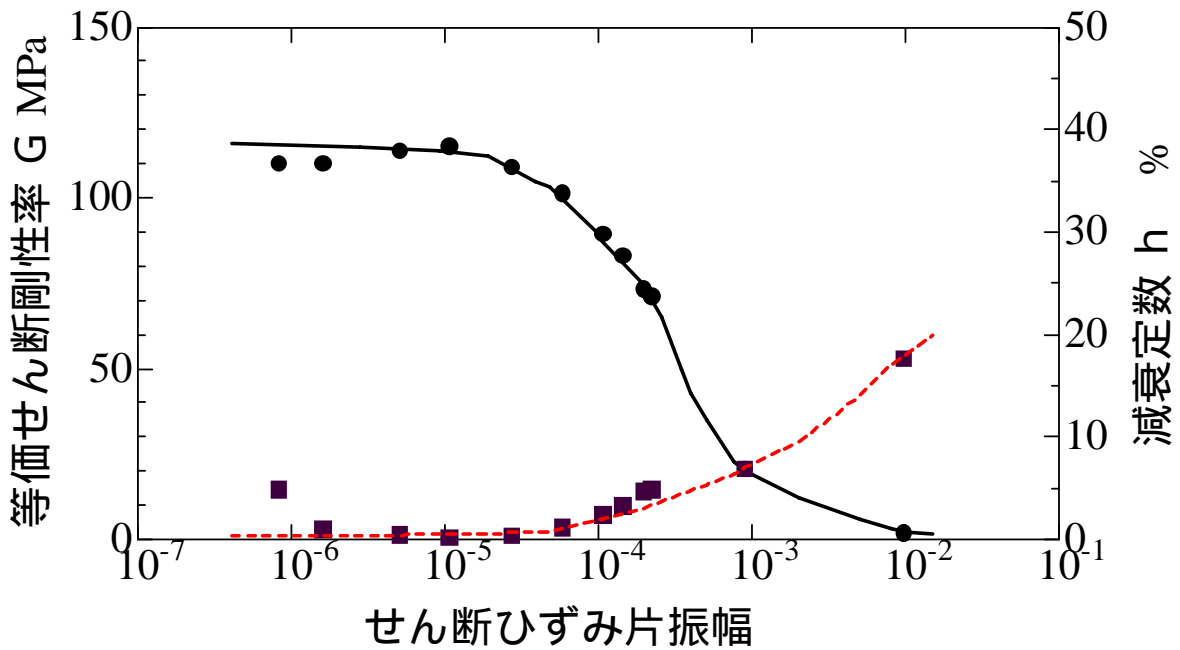


図 11 せん断ひずみ振幅と等価せん断剛性率，減衰定数の関係 ($c' = 50 \text{kPa}$)

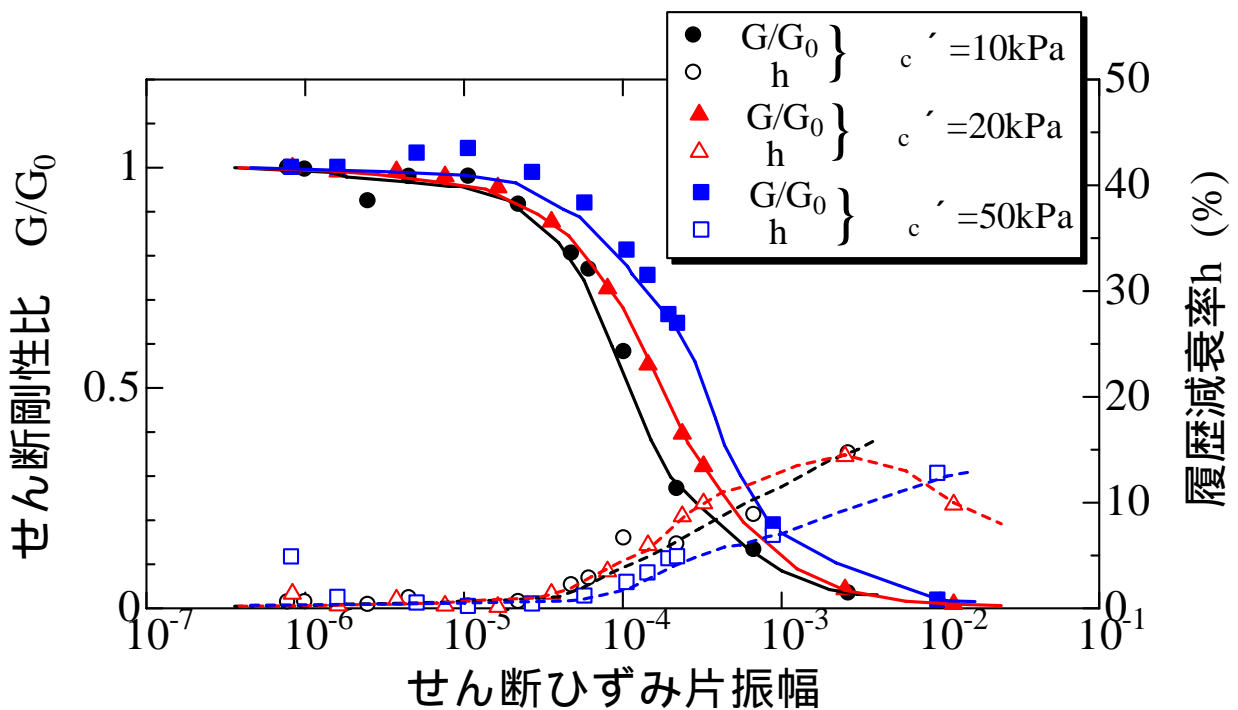


図 12 三段階の拘束圧におけるせん断ひずみ振幅と等価せん断剛性比，減衰定数の関係のまとめ

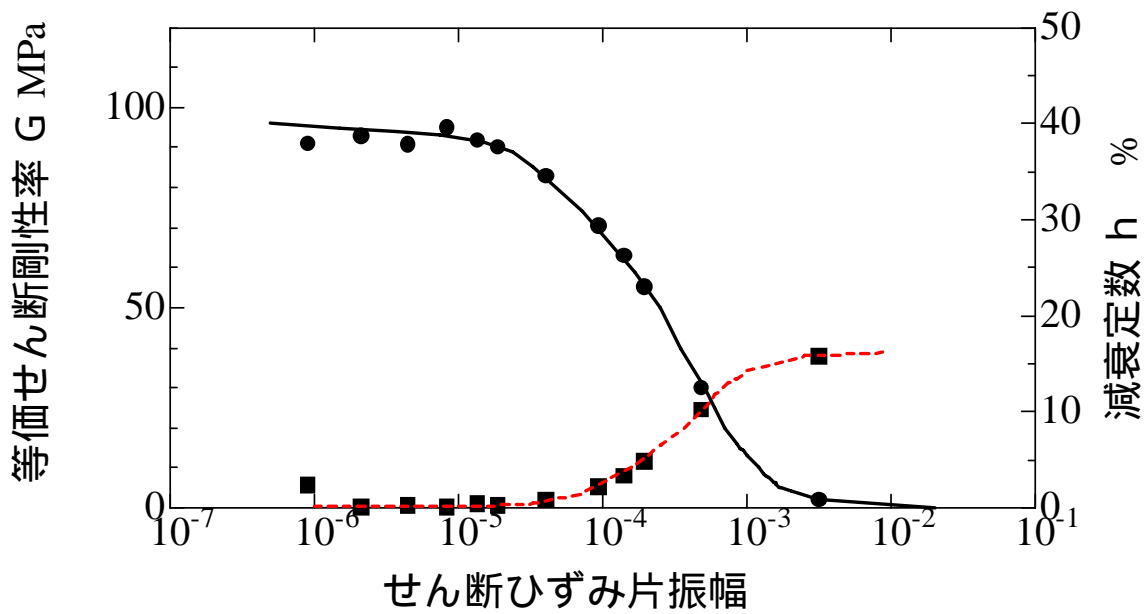


図 13 豊浦砂におけるせん断ひずみ振幅と等価せん断剛性，減衰定数の関係
($c' = 50 \text{ kPa}$)

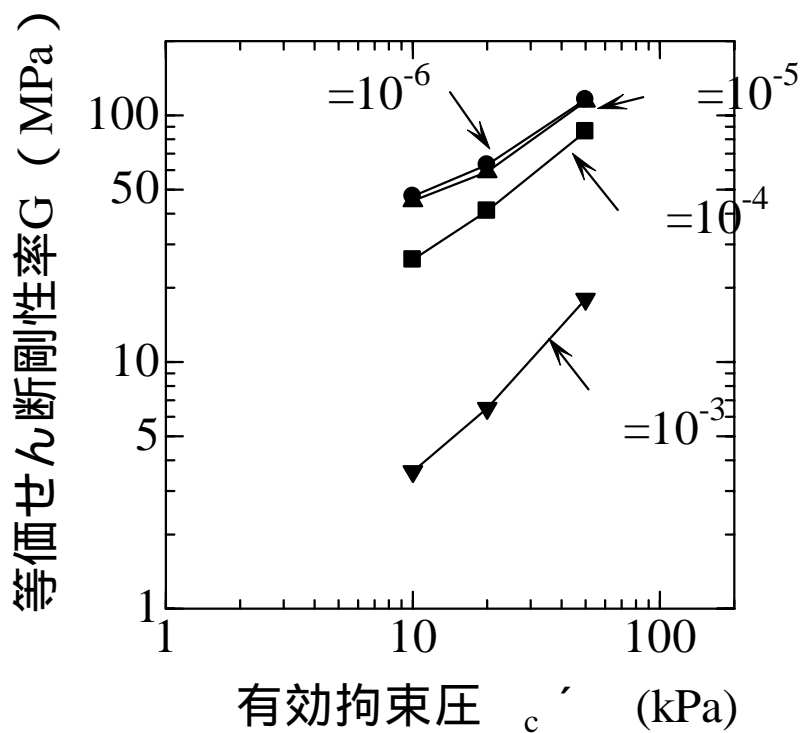


図 14 等価せん断剛性と拘束圧の関係

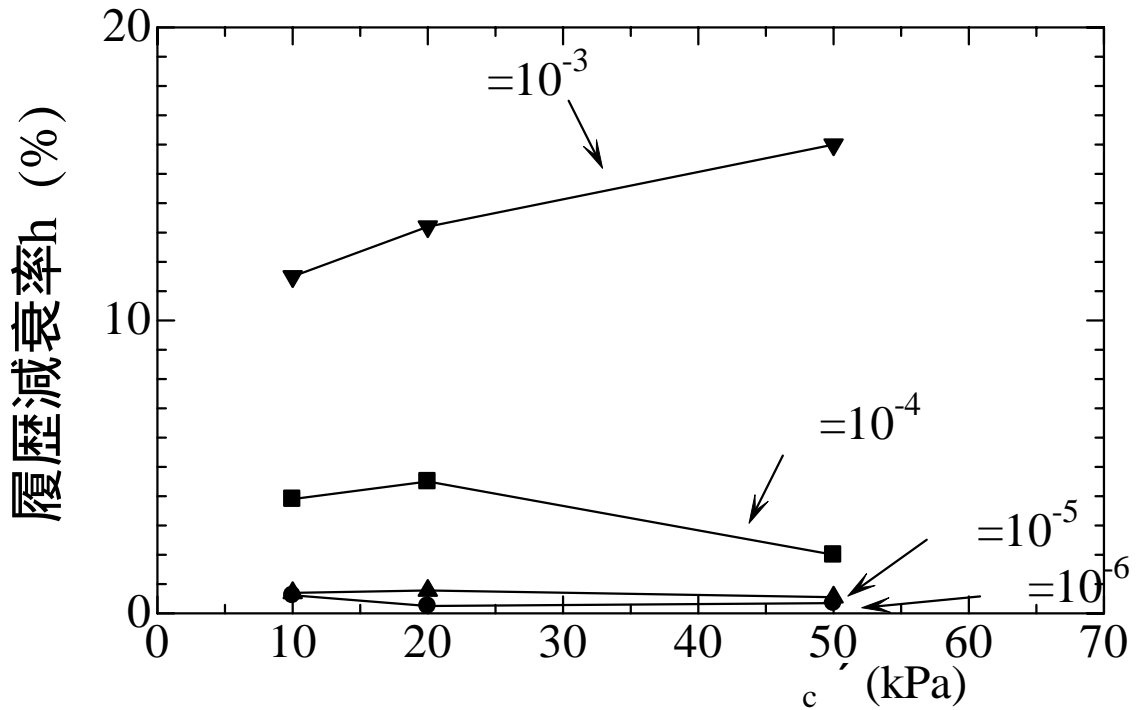


図 15 減衰定数に与える拘束圧の影響

d) 他のデータとの比較

次に、今回の実験で得られたアルバニー硅砂の等価せん断剛性と他のデータとを比較してみた。比較する他のデータとしては、図 13 に示した豊浦砂をもちいて今回行った実験結果と、龍岡らが豊浦砂で行った実験結果¹⁾とした。

図 16 にまず、50kPa の拘束圧のもとでの等価せん断剛性率と間隙比、せん断ひずみ振幅の関係を示す。岩崎・龍岡らは広い間隙比範囲で実験を行っているため、せん断ひずみが 10^{-6} 、 10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 10^{-3} 、 3×10^{-3} の時の値を曲線で結んである。そして、今回行ったアルバニー硅砂と豊浦砂における、これらのせん断ひずみ時の等価せん断剛性率を、 G/G_0 で示している。まず豊浦砂について今回の実験結果と龍岡らの結果を比較してみると、今回の結果の方がほぼ多少小さめとなった。アルバニー硅砂と岩崎・龍岡らの豊浦砂の結果を比較してみてもアルバニー硅砂の方が多少小さい結果となった。

次に、間隙比の影響を消して拘束圧とせん断剛性率の関係を示す方法として、図 17 に示したように、拘束圧と $G/((2.17-e)^2/(1+e))$ の関係²⁾で整理してみた。図 16 と同様に図中の直線は岩崎・龍岡らが豊浦砂に対して求めたものであり、 G/G_0 は豊浦砂とアルバニー砂に対して今回の実験で求めた値である。アルバニー硅砂は 10、20、50kPa の拘束圧のもとでの実験結果である。このような整理にすると龍岡らのデータと今回の豊浦砂、アルバニー硅砂の実験結果とも比較的良好に合ってきた。

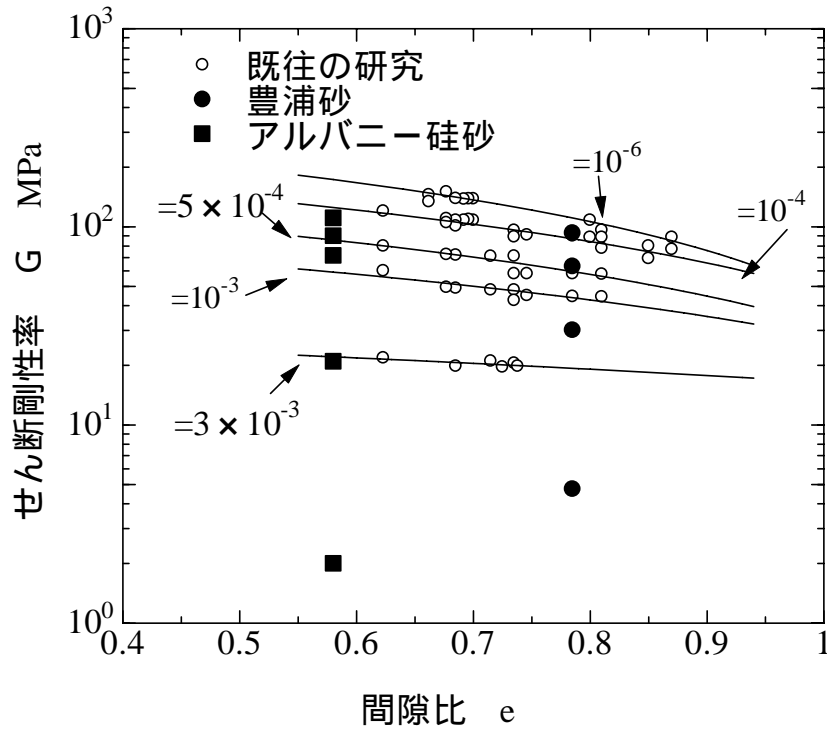


図 16 間隙比とせん断剛性率の比較

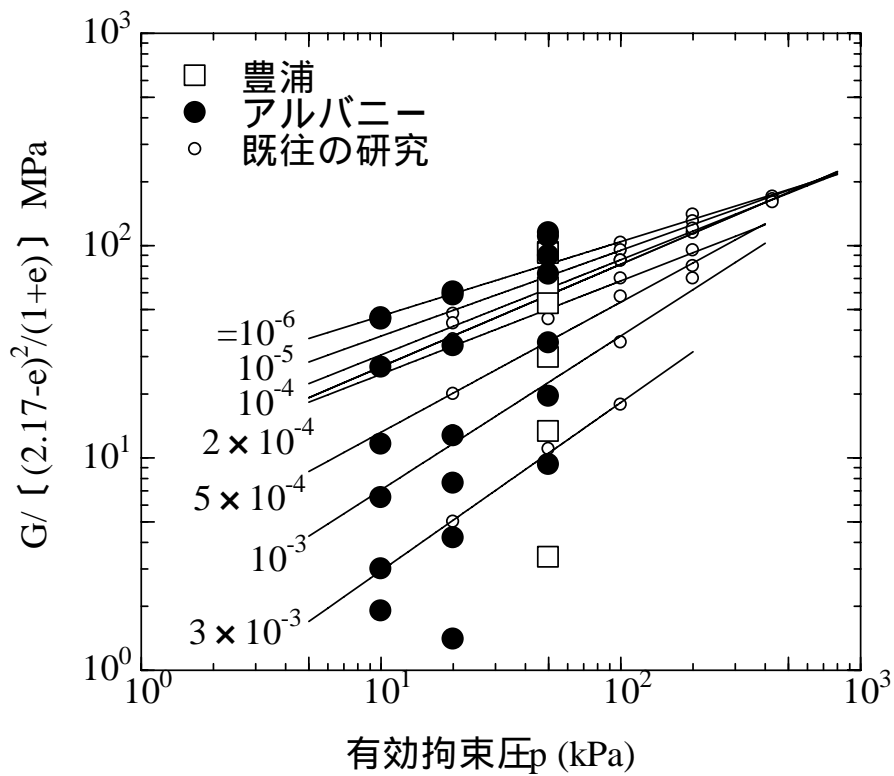


図 17 拘束圧とせん断剛性率の比較

e) E-ディフェンスにおける大型土槽での S 波速度測定結果との比較

E-ディフェンスでは平成 17 年度～18 年度に液状化の実験が行われてきている。その際、大型土槽内に試料を詰めたと、深さ方向の S 波の分布も測定されている。そこで、この S 波速度からせん断剛性を計算し、前述したアルバーニ-砂の繰返しねじりせん断試験結果と比較してみた。比較を行ったのは、平成 17 年度の報告書の p.537 に示されている護岸背後地盤の飽和と乾燥のデータ ($D_r=60\%$) と p.506 の杭の実験ケース A の乾燥の値 ($D_r=70\%$) である。これらのデータから各深度の有効上載圧を推定し、平均有効主応力を求めた。

図 18 にこのようにして求めた有効拘束圧とせん断剛性の関係を示す。図にはまた、繰返しねじりせん断試験で得られた微小ひずみ時の等価せん断剛性もプロットしてある。まず、S 波測定から求めたせん断剛性をまず見てみると、拘束圧が大きくなると大きくなる傾向となった。また、相対密度が 60% のものより 70% の場合の方がせん断剛性は大きくなった。飽和状態と乾燥状態でも多少異なった。繰返しねじりせん断試験は 70% の相対密度の供試体に対して飽和状態で行っており、丁度同じ条件のものが大型土槽で測定が行われていない。このため S 波測定結果と厳密な比較は出来ない。ただし、70% の乾燥の S 波測定結果と比較してみると、繰返しねじりせん断試験の方が多少小さなせん断剛性となっているように見受けられた。

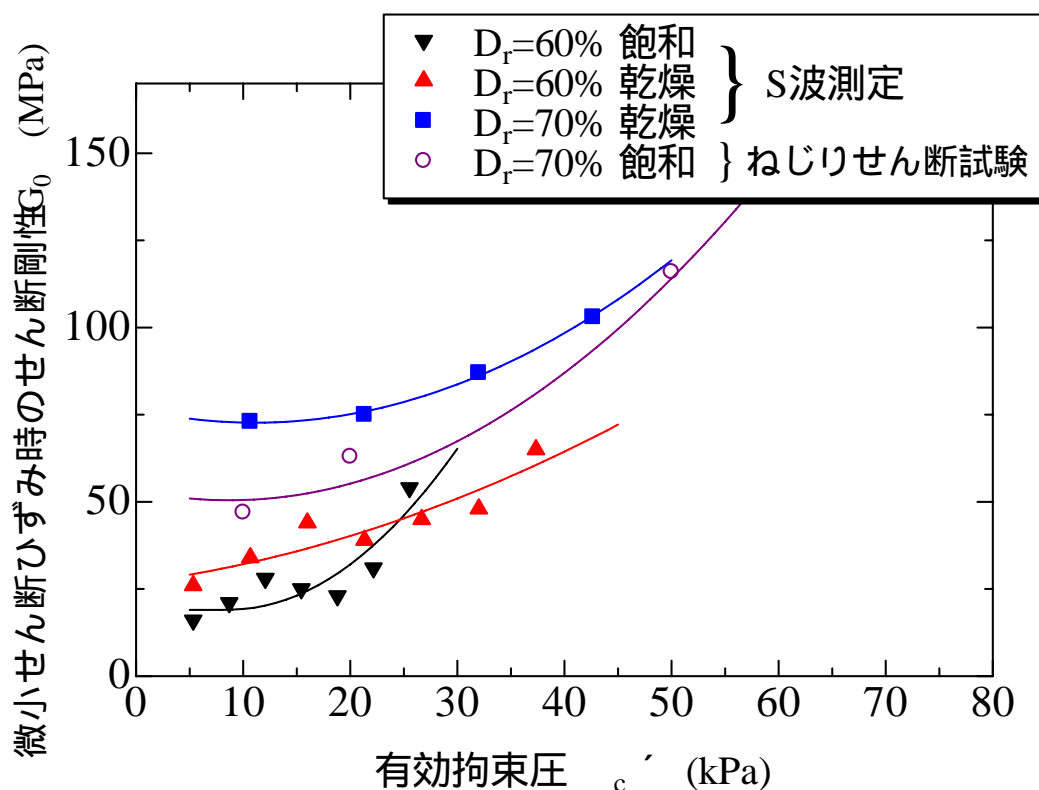


図 18 大型土槽における S 波測定と繰返しねじりせん断試験とのせん断剛性の比較

3) 静的変形特性

静的変形特性を求める試験結果のうち、まず、アルバニー-珪砂のせん断ひずみ～せん断応力関係を図 19～21 に、豊浦砂のそれを図 22 に示す。両砂のデータとも密度が大きい場合は、せん断ひずみとともにせん断応力が上がっていき、一旦その上昇傾向がゆるやかになったあと、再び上昇する傾向となった。これに対し、密度がある値より小さい場合は、せん断応力がピークを迎えたあと、ストンと応力が下がる傾向を示した。また、アルバニー-珪砂の拘束圧が異なったものを比較してみても、この傾向は同じであった。

次に、このデータを応力経路で描いてみると図 23～26 となった。両砂とも密度が高い供試体では応力経路が変相角を超えると、破壊線に沿って乗り上がっていく傾向を示した。また、密度は小さくなるとともに過剰間隙水圧が多く発生するため、応力経路は一度原点の方に向かって進み、その後破壊線に沿って乗り上がる傾向を示した。これに対し、密度がある程度より小さくなると、変相角に達したあと、急激に原点に向かって進む応力経路となった。

そこで、応力経路がこのように急激に原点に向かって進むようになる限界の密度を、以上の結果から推定してみた。これを正確に求めるためには、数多くの密度で実験をしなければならない。今回はそこまで数多くの実験を行ってはいないので、概略の値を推定してみた。その値を表 3 に示す。

表 3 応力経路が異なる限界の密度の概略値

試料	拘束圧(kPa)	限界の相対密度の概略値(%)	限界の間隙比の概略値
アルバニー-珪砂	10	-5	0.750
	20	-5	0.750
	50	-5	0.750
豊浦砂	20	30	0.866

これを見ると、限界の相対密度はアルバニー-珪砂では-5%であり、豊浦砂では 30%程度と大幅に異なる結果となった。これをさらに比較するため、図 27 に両砂の間隙比範囲と限界の間隙比を示してみた。この図を見ると、両者の限界の相対密度は大きく異なったものの、それは最大、最小間隙比が大きく異なるからであり、間隙比で比較した場合には両砂の限界値はあまり差がないように思われた。

(d) 結論ならびに今後の課題

E-ディフェンスの大型土槽実験用に用いているアルバニー-珪砂について、土槽内の土が受けていると同程度の低拘束圧下における液状化特性、動的変形特性、静的変形特性を、繰返しねじりせん断試験装置を用いて求めた。その結果、以下のような結論が得られた。

i) 100kPa～50kPa の拘束圧の範囲では液状化強度比は変化しないのに対し、これより拘束圧が小さくなると、液状化強度比は大きくなることが分かった。

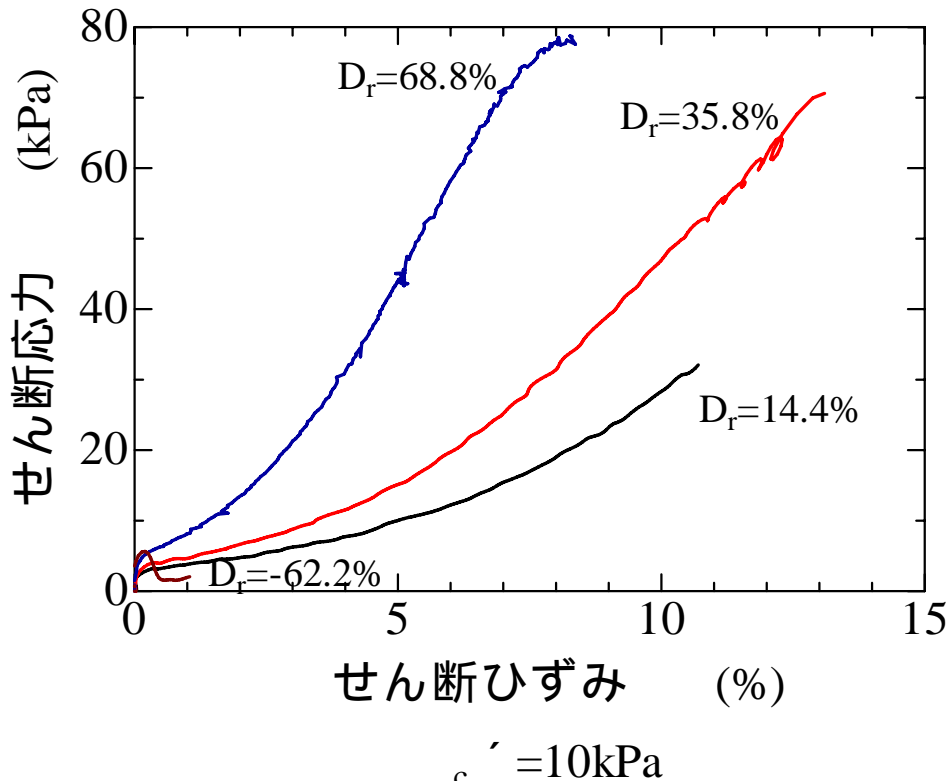


図 19 単調載荷試験におけるアルバニー珪砂のせん断応力～せん断ひずみ関係 ($c' = 10\text{kPa}$)

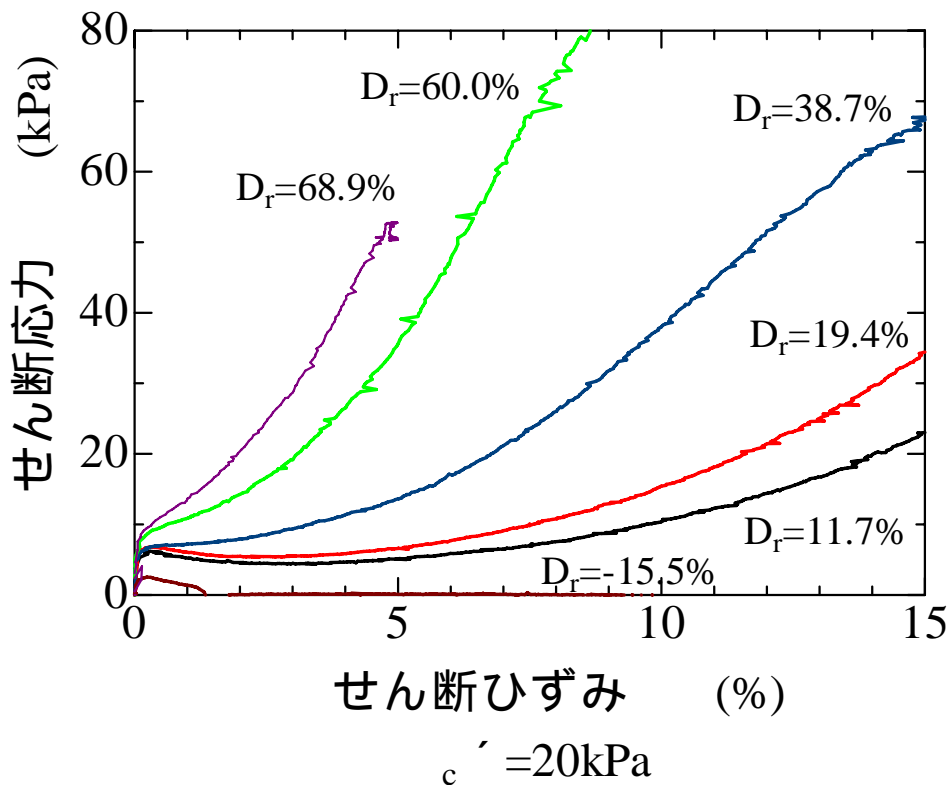


図 20 単調載荷試験におけるアルバニー珪砂のせん断応力～せん断ひずみ関係 ($c' = 20\text{kPa}$)

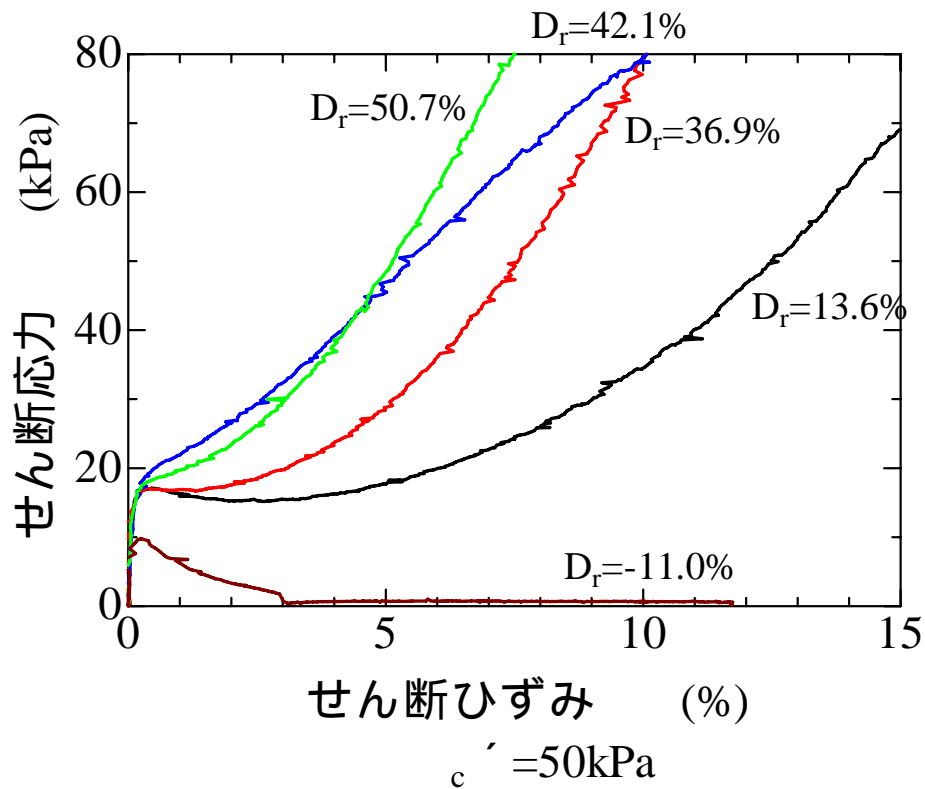


図 21 単調載荷試験におけるアルバニー砂のせん断応力～せん断ひずみ関係 ($c' = 50\text{kPa}$)

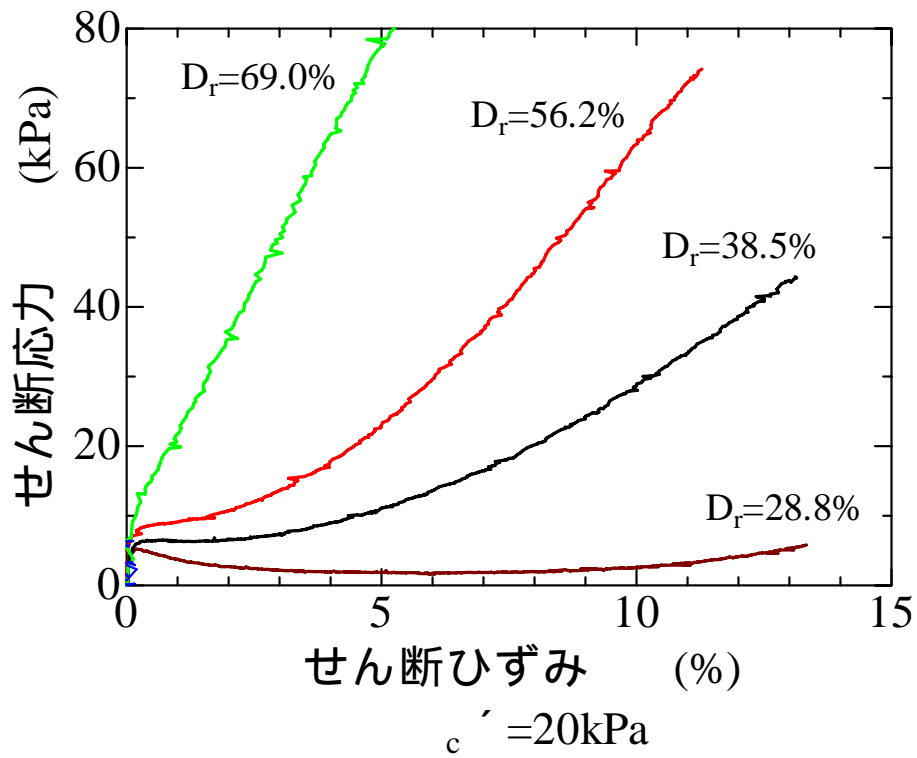


図 22 単調載荷試験における豊浦砂のせん断応力～せん断ひずみ関係 ($c' = 20\text{kPa}$)

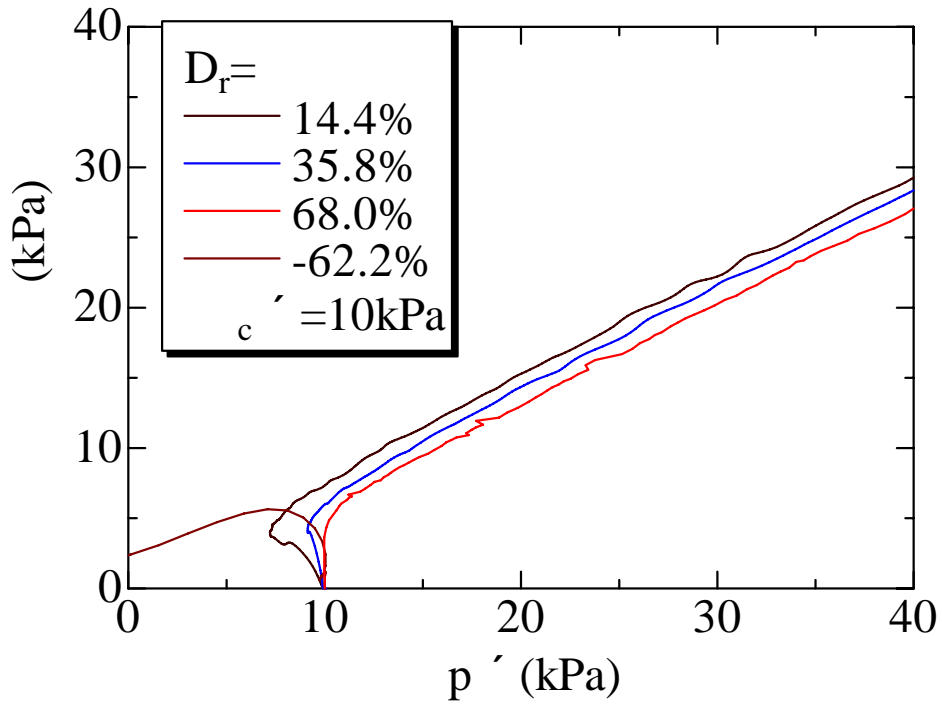


図 23 単調載荷試験におけるアルバニー珪砂のせん断応力経路 ($c' = 10 \text{ kPa}$)

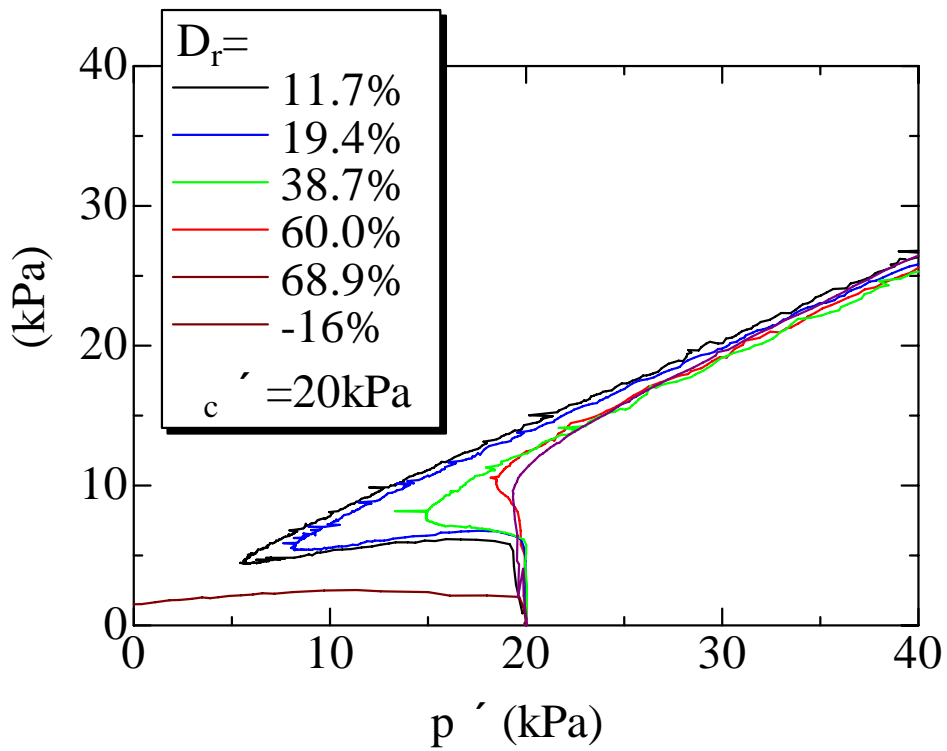


図 24 単調載荷試験におけるアルバニー珪砂のせん断応力経路 ($c' = 20 \text{ kPa}$)

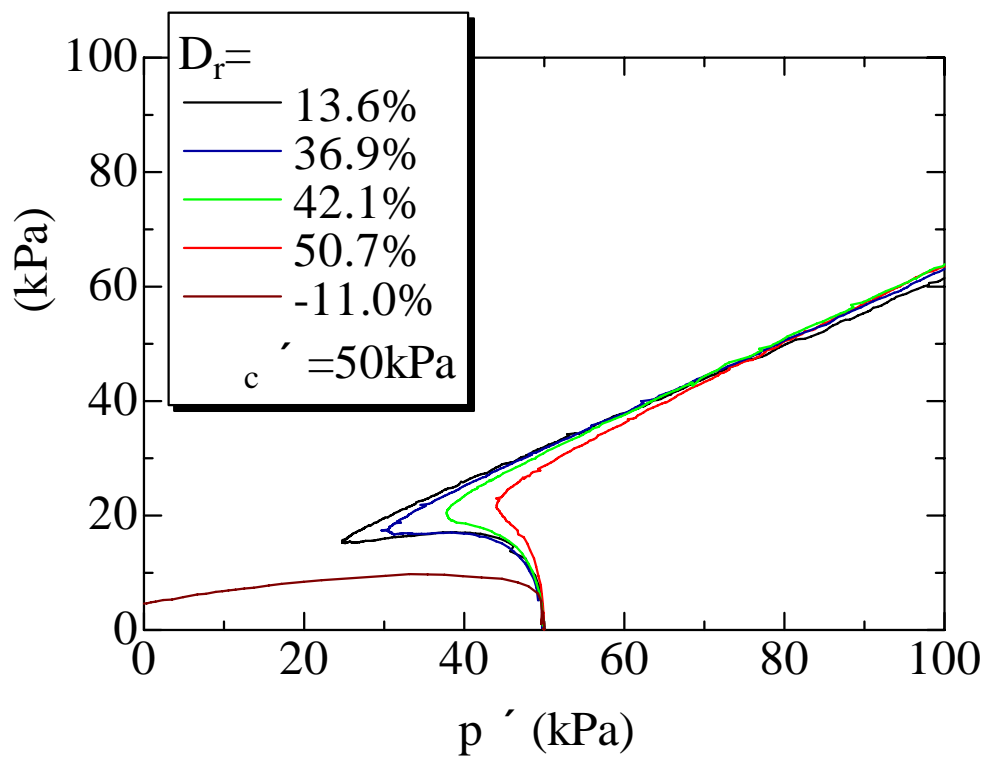


図 25 単調載荷試験におけるアルバニー珪砂のせん断応力経路 ($c' = 50 \text{ kPa}$)

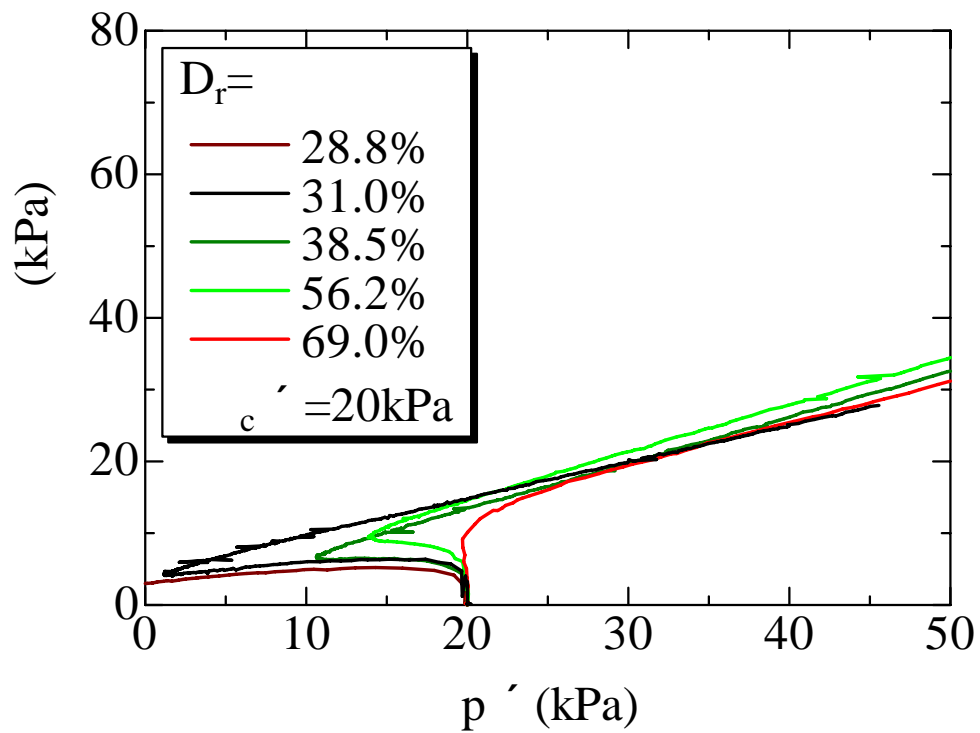


図 26 単調載荷試験における豊浦砂のせん断応力経路 ($c' = 10 \text{ kPa}$)

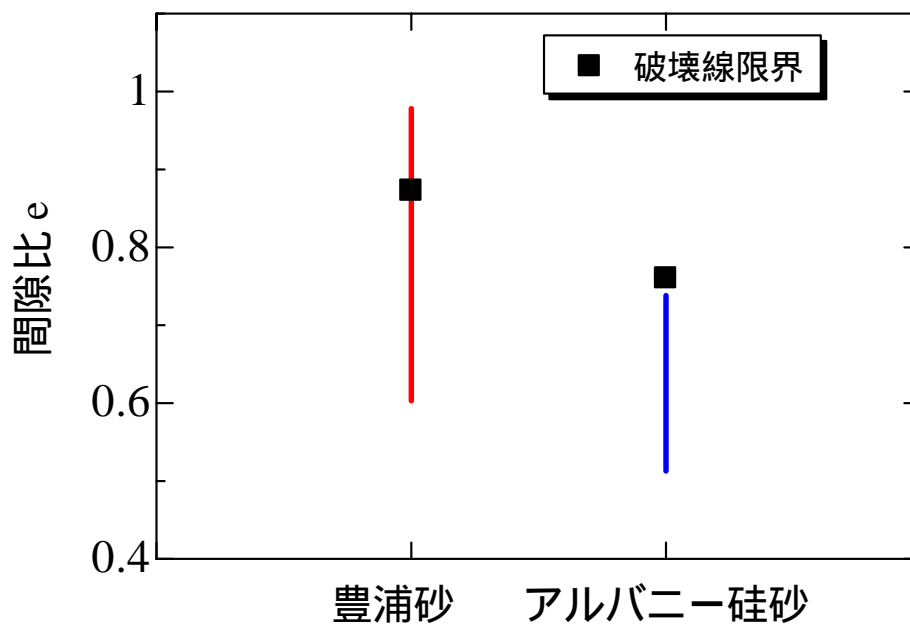


図 27 アルバニー-珪砂と豊浦砂の間隙比範囲と限界の間隙比の比較

ii) 低拘束圧下でも通常の拘束圧下と同じように、拘束圧が大きくなるとせん断剛性が大きくなる傾向となった。

iii) 単調載荷時において、せん断ひずみがある値になるとせん断応力が減少する限界の相対密度は、アルバニー-珪砂では-5%程度となった。この限界の相対密度は豊浦砂のそれよりかなり小さい結果となり、両砂のせん断特性が異なることが窺えた。

今回用いたアルバニー-珪砂は、我が国で実験によく用いてきている豊浦砂に比べて丸っこい粒形をしている。このためか、最大・最小間隙比や液状化強度など、種々の物理・力学特性が豊浦砂に比べてかなり異なっている。今回は液状化特性、動的変形特性、静的変形特性に関して検討してみたが、他の特性に関しても今後研究されることが望まれる。

(e) 引用文献

1) Iwasaki, T., F. Tatsuoka and Y. Takagi : Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.39-56, 1978.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
安田 進 齊藤盛文 鈴木聡司	低拘束圧領域における拘束圧の違いが液状化変形特性に与える影響について	第 61 回土木学会年次学術講演会	平成 18 年 9 月

安田 進 斉藤盛文 鈴木秀明	低拘束圧領域における動的変形 特性に与える拘束圧の影響につ いて	第 42 回地盤工学研究発表 会	平成 19 年 7 月（発表予 定）
----------------------	--	---------------------	--------------------------

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし