



軟弱粘土地盤のせん断特性と地震時の地盤挙動の関係

山口 晶¹⁾、吉田望²⁾、飛田善雄³⁾

1) 正会員 東北学院大学工学部、助教授、博士(工学)

e-mail:yamaguti@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

2) 正会員 東北学院大学工学部、教授、工学博士

e-mail:yosidan@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

3) 非会員 東北学院大学工学部、教授、工学博士

e-mail:tobita@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

要約

軟弱粘土地盤の地震時の地盤挙動を調べるためにオンライン試験を行った。対象は粘性土地盤上に岸壁等の構造物が存在する地盤である。実験の結果、地表面の最大加速度の上限値は地盤の動的なせん断強度とせん断剛性によって推定できることが分かった。また、粘性土地盤は地震動を繰返し受けた場合、地表面の最大加速度は大きくなり、地盤のせん断ひずみの大きさには大きな変化がないことが分かった。地震動終了後に発生する粘性土地盤の沈下によって間隙比が減少し、見かけの圧密降伏応力が増加することが確認できた。

キーワード：粘性土地盤、最大加速度、せん断強度、せん断剛性

1. はじめに

粘性土地盤は、砂質土の液状化のような急激な力学特性の変化を起こさないため、液状化ほどは研究されていない。しかし、現在では空港建設や都市開発により、沿岸部や都市周辺部の軟弱地盤上に多くの構造物が建設されている。これらの構造物に対しては粘性土地盤の地震時挙動が大きな影響を及ぼす可能性がある。

これまで、軟弱粘性土地盤上では地震被害が大きくなると一般に考えられてきた。しかし、近年の研究から、必ずしも軟弱層を有する地盤上で地震被害が多くなるわけではないことが分かっている。風間ら¹⁾は、軟弱地盤の地震応答と被害の関係を明らかにするため、中間に軟弱粘土層を有する地盤の遠心振動台試験を行っている。その結果、粘土層が強震時に著しい剛性低下を起こすため粘土層より上方の地盤の加速度応答が小さくなること、速度応答と変位応答にはそのような傾向は見られなかったこと、軟弱地盤の強震時における地震応答加速度が比較的硬い地盤のそれより小さくなることが確認できたとしている。著者の一人は、1995年兵庫県南部地震における神戸人工島を対象としてオンライン実験²⁾と遠心振動台³⁾を用いて埋立層 沖積粘土層地盤の地震時挙動を詳細に調べた。その結果、埋立層の液状化に対して、下層にある沖積粘土層の地震時挙動が大きな影響を与えていることを示した。古田ら⁴⁾も地震応答計算により、神戸人工島の沖積粘土層の圧密度と埋立層の液状化被害について、同様の結論を得ている。高橋ら⁵⁾は、本研究で用いたものと同様のオンラインシステムを用い、砂と粘土層の互層地盤について、粘土層の層厚

や配置を変えた実験を行い、粘土地盤が地震被害に与える影響を考察している。また、軟弱層を免震層ととらえ、構造物に入力される加速度の低減に積極的に利用する研究^{6), 7), 8)}も行われている。このように実験的研究では、軟弱地盤上で地震被害が軽減されるという傾向が得られている。なお、土のせん断強度と地盤の地震時挙動の関係については、末富ら⁹⁾が地震応答解析により、兵庫県南部地震の粘土層が地表面の地震時挙動に与える影響を調べている。その結果、最大加速度、計測深度、SI値の大きさは中間弱層のせん断強度によって決まることを示した。

これらの研究から、中間の軟弱粘土層のせん断剛性とせん断強度が上部の地盤の地震時挙動に大きな影響を与えることが示されている。しかし、これらの実験は地盤の地震応答とせん断強度やせん断剛性との関係について定量的な関連付けを行っていない。また、末富らの研究は数値解析の結果であり、実験的手法による裏付けがなされていない。

地盤工学会の粘性土の動的性質に関する研究委員会¹⁰⁾は、粘性土地盤について検討すべき課題として、増幅特性、動的せん断強度・変形特性、残留変形に加え、沈下特性を挙げている。粘土に繰返し履歴を与えた場合、過剰間隙水圧が生じ消散する過程で体積が減少する。従って、粘性土地盤も地震動終了後長期間にわたり沈下が生じることが分かっている^{11), 12), 13)}。また、繰返し履歴によって圧密した粘性土の変形特性は正規圧密粘性土と異なること、沈下量は最大せん断ひずみ量に比例することが分かっている^{11), 13)}。ただし、これらの実験は粘土供試体に正弦波でせん断応力を与えているもので、地震波のようなランダム波との関係を求めたものではない。また、地震動履歴によって発生した圧密沈下が、その次の地震動に対する応答に与える影響を調べた研究も存在しない。

本研究は、粘土地盤の地震時のせん断挙動及び地震後の沈下挙動と、続けて地震履歴を受けた場合の地震応答について実験的に調べることを目的とした。オンライン試験を用いて、供試体に地震動を加えた後に排水圧密する試験方法を数回繰返す試験により、これらを検討した。入力地震動として、兵庫県南部地震、三陸はるか沖地震、新潟中越地震、宮城県沖地震から求めた人工地震加速度時刻歴を使用した。また、オンライン試験終了後の粘土供試体を取り出して標準圧密試験を行なうことにより、せん断履歴が圧密降伏応力に与える影響を調べた。なお、試験結果を考察するにあたり、粘土層のせん断強度に特に着目した。この理由は、地盤がせん断破壊されるような巨大地震(レベル2地震動)に対しても地盤挙動を検討する必要があると考えたためである。なお、本実験では、粘土層の地震時挙動の影響を求めるとを最優先としたため、地盤条件は水平成層地盤で、1質点というきわめて簡素化した実験を行った。簡素化することによって粘土層が地盤の地震挙動に与える影響を層分割の影響を考えずに直接得ることができると考えたためである。

2. オンライン試験

オンライン試験とは地震応答解析の構成モデル部分を要素試験に置き換えたもので、その計算結果は構成モデルに依存しないという利点をもつ¹⁴⁾。従って、非線形性が卓越するような地盤の変形量の調査に利用できる可能性を持っている¹⁵⁾。

本試験で想定した地盤を図1に示す。粘性土地盤上に岸壁等が存在する1質点の地盤を想定した。表1に試験条件を示す。入力地震加速度時刻歴は人工地震波を用いた。これらは計算の元とした地震の名前から、それぞれ1978年宮城県沖地震(OF波)、1994年三陸はるか沖地震(SAN波)、1995年兵庫県南部地震(PI波)、2004年新潟中越地震(ODI波)とした。なお、地震加速度は5Hz以下の成分を用いている。PI波、SAN波、ODI波に対しては係数をかけて入力加速度の大きさを変えた試験を行っている。入力地震加速度時刻歴を図2に示す。

使用した試験は簡易型単純せん断試験¹⁶⁾である。簡易単純せん断試験機の写真と概要を図3に示す。拘束圧は等方圧を負圧によって与え、追加分の垂直圧は供試体上部のペロフラムシリンダーによって与える。ゴムスリーブは厚さ0.3mmの通常のゴムスリーブを用いた。粘土地盤を想定した試料としてカオリン粘土を用いた。

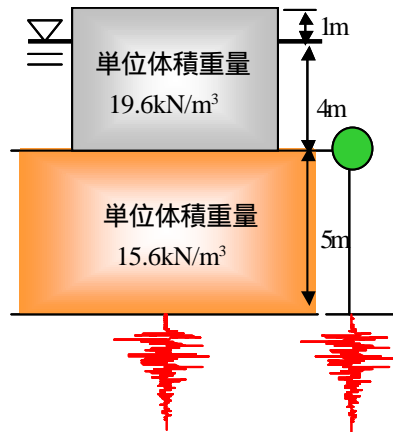


図1 対象地盤模式図

表1 試験条件

実験名	PI05	PI075	PI10	SAN10	SAN20	OF10	ODI10	ODI15
入力波	PI波	PI波	PI波	SAN波	SAN波	OF波	ODI波	ODI波
係数	0.5	0.75	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.5
最大加速度 (m/s ²)	3.65	5.48	7.30	5.42	10.84	1.11	6.29	9.43

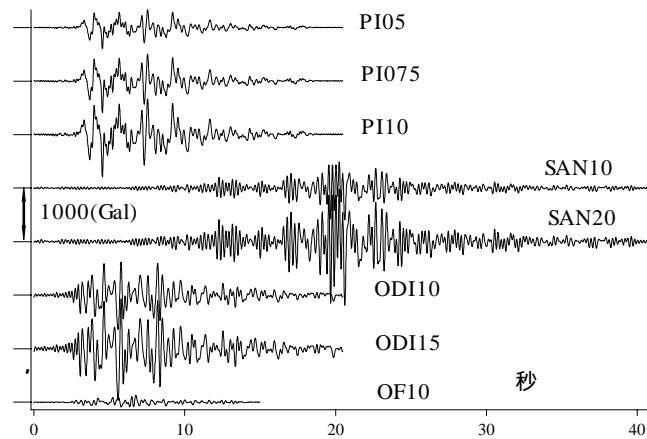


図2 入力加速度時刻歴

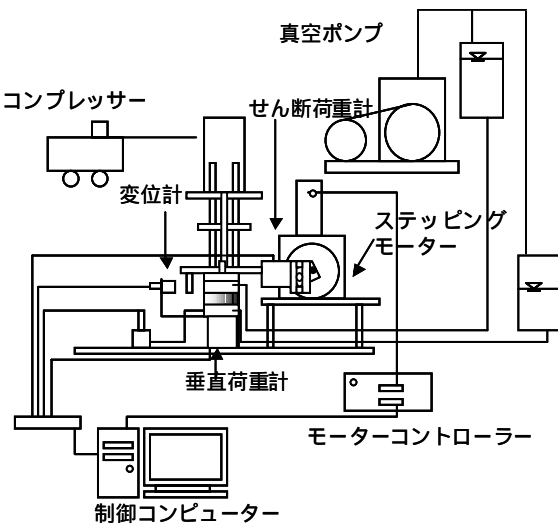
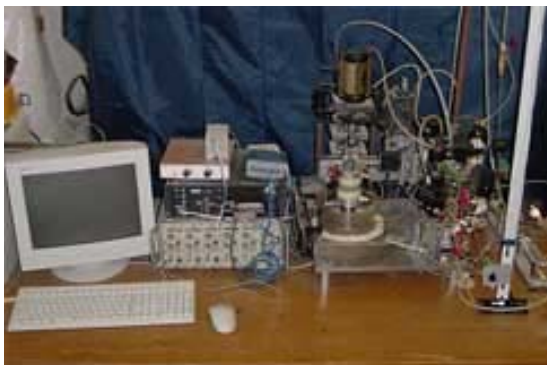


図3 試験装置の写真と概要図

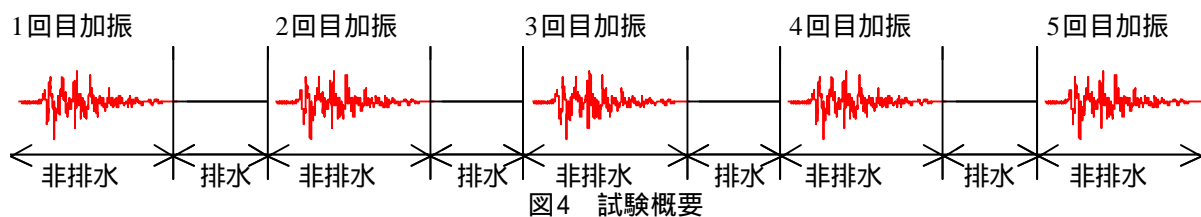


図4 試験概要

試料作製手順は次の通りである。まず、カオリンを液性限界の2倍程度の含水比で練り混ぜ、圧密容器に流し73.5kPaで圧密する。3 σ 法で圧密終了を確認後、簡易型単純せん断試験機にセットする。セットしたのち、管路やゴムスリーブと試料の間の空気を抜くため、二重負圧法で脱気水を十分流す。次に、垂直応力を73.5kPa、 K_0 値を一般的な値として0.5に仮定し、側圧を34.3kPaとして数分間圧力をかけて試験機になじませる。地震波の載荷時は非排水条件(非排水で高さ一定)とし、加振終了後排水を行い、排水量を計測する。排水時は試験機の構造上の問題により、垂直方向の変位の拘束を解除し、まず等方応力34.3kPaで圧密したのち、垂直圧を追加してせん断直前の状態と同じ応力状態にしている。従って、圧密時には側方変位が許されているため、厳密には K_0 状態は保持されておらず、原位置の圧密状態とは異なっている。排水時間は非排水状態にしたときに間隙水圧が上昇しなくなるまでとした。概ね10分程度であった。加振時と排水時の試験概要図を図4に示す。5回このサイクルを繰返した後、供試体を取り出し、標準圧密試験により圧密降伏応力を求めた。

3. 試験結果

3.1 せん断応力-せん断ひずみ関係と有効応力経路

PI10、PI05、SAN20、ODI15の1回目、3回目、5回目のせん断応力-せん断ひずみ関係を図5に示す。1回目のせん断応力-せん断ひずみ関係をみると、PI10のせん断ひずみが大きく発生しており、それ以外のケースは5%以下のひずみ量となっている。図5のPI10の加振1回目のケースをみると、せん断応力がひずみの増加によらずほぼ頭打ちになっていることから、このケースでは地盤中のせん断応力が地盤のせん断強度に達したと推定できる。なお、1回目の実験のうち粘性土が加振によりせん断強度に達したと推定できるのはPI10のみである。3回目と5回目のせん断応力-ひずみ関係はどの試験も1回目のものよりループの膨らみが減少しており割線せん断剛性の増加が見られる。地震動を繰返し受けることによって地盤の割線せん断剛性が増加することが示された。

図6にPI10、PI05、SAN20、ODI15の1回目と5回目の有効応力経路を示す。PI10では有効応力経路が変相線に達しており、特に5回目ではダイレイタンスーによる有効応力の回復が顕著に表れている。また、1回目より5回目の方が有効応力の低下が少ない。これは履歴後の圧密により間隙比が減少したため、負のダイレイタンスーが減少し、正のダイレイタンスーが発揮されたためである。また、PI10以外の試験では、PI10ほどではないものの同様の傾向が見られた。

図7に地表面の最大加速度と地盤の最大せん断ひずみの関係を示す。PI10以外の試験結果は、最大加速度と最大せん断ひずみの関係がほぼ比例関係である。PI10は他の試験に比較して最大加速度に対してせん断ひずみ量が大きい。図5でみたように、PI10以外の実験は大きな非線形挙動を示しておらず、地盤中のせん断応力がせん断強度に達しているのがPI10だけであることを考えると、地盤のせん断強度が地盤の最大加速度に影響を与えていることが推測できる。

3.2 入力地震波と地盤挙動の関係

図8に入力した加速度時刻歴の最大値と最大ひずみの関係を示す。図7と同様に同程度の加速度の場合、PI10のみせん断ひずみ量が大きくなっている。図9に入力波の最大速度と最大ひずみの関係を示す。速度が0.8m/sec以下の場合にはほぼ比例しているが、ここでもPI10のみがその比例関係から大きくはずれている。地盤の最大せん断ひずみ量は、入力された速度や加速度に対してある程度比例関係はあ

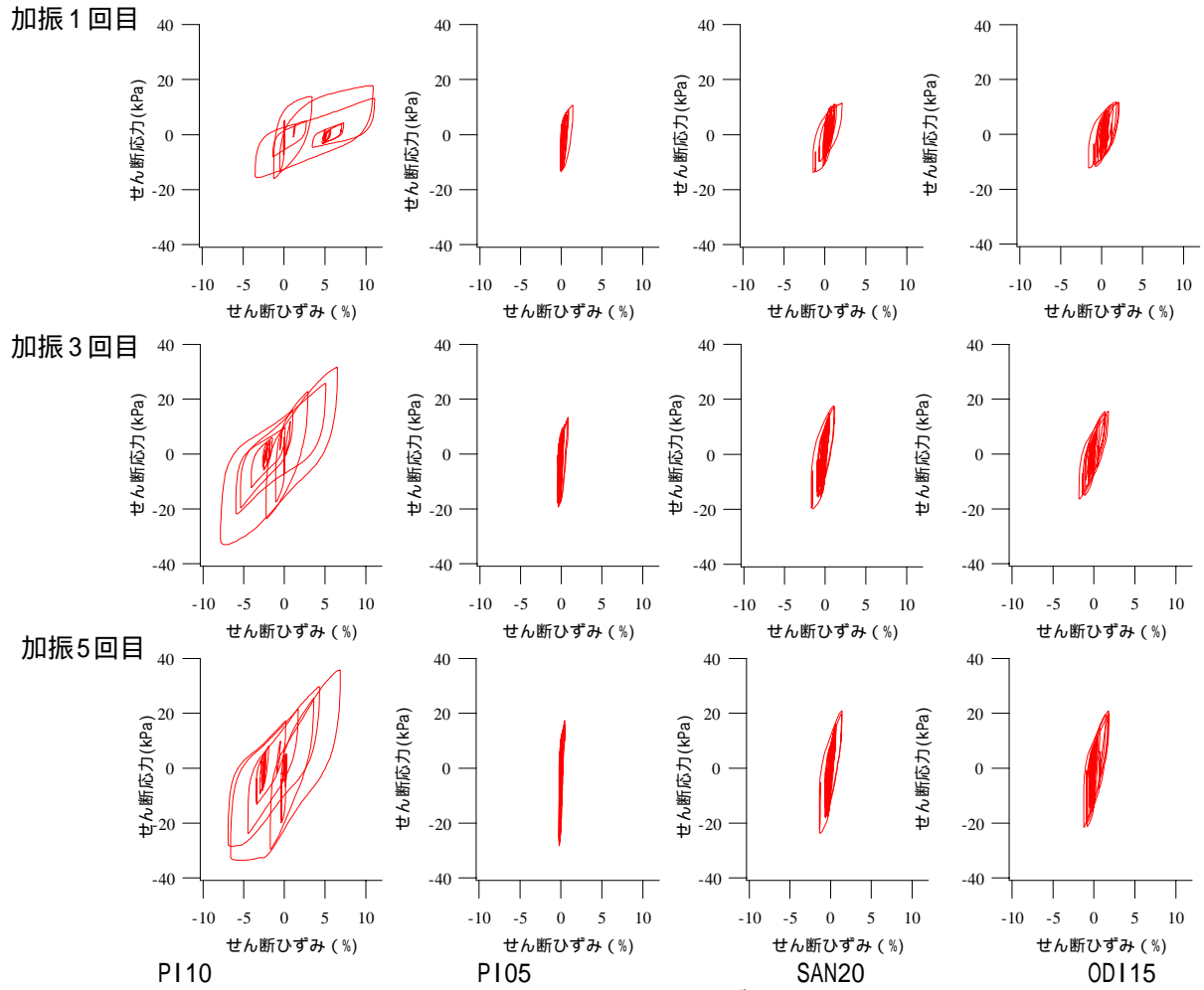


図5 せん断応力-せん断ひずみ関係

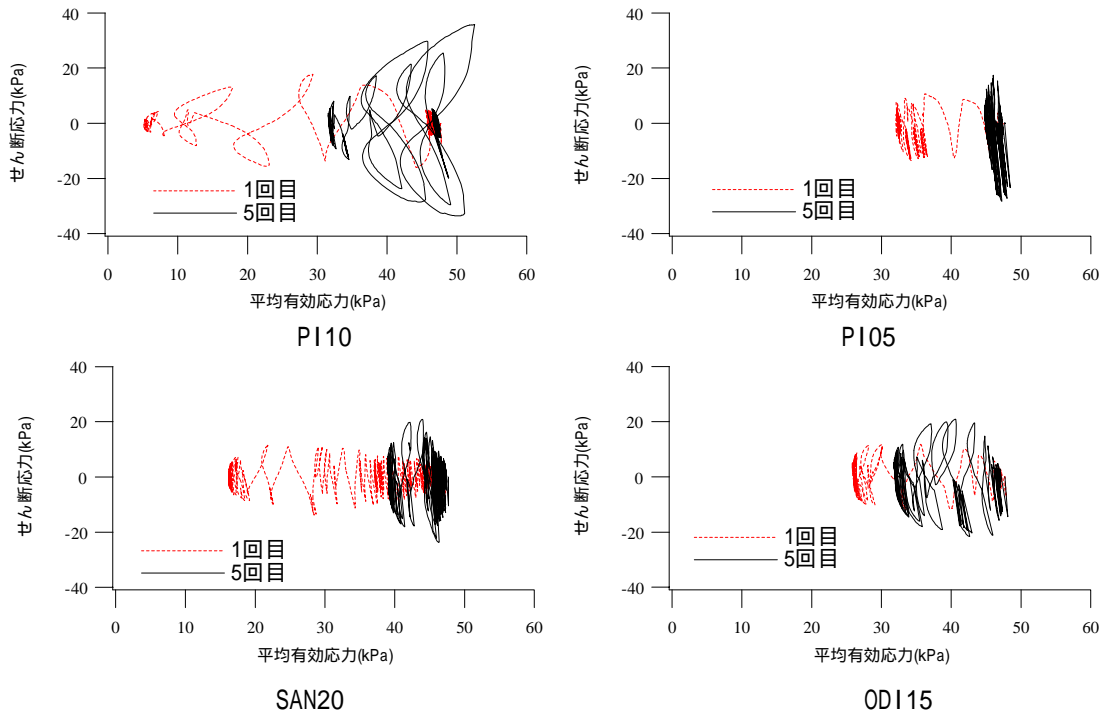


図6 有効応力経路

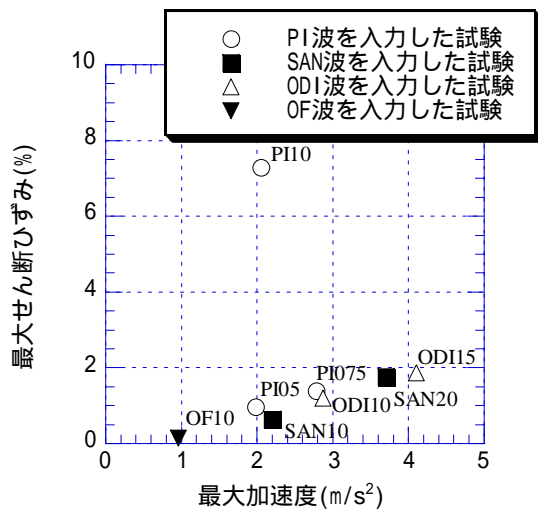


図7 加振1回目の地表面最大加速度と最大せん断ひずみ

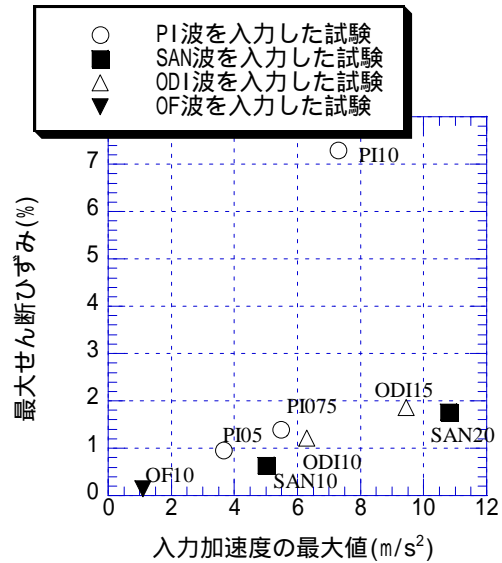


図8 加振1回目の入力最大加速度と最大せん断ひずみ

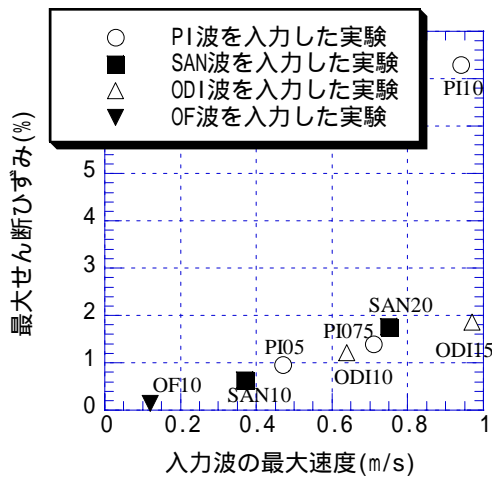


図9 加振1回目の入力波の最大速度と最大せん断ひずみ

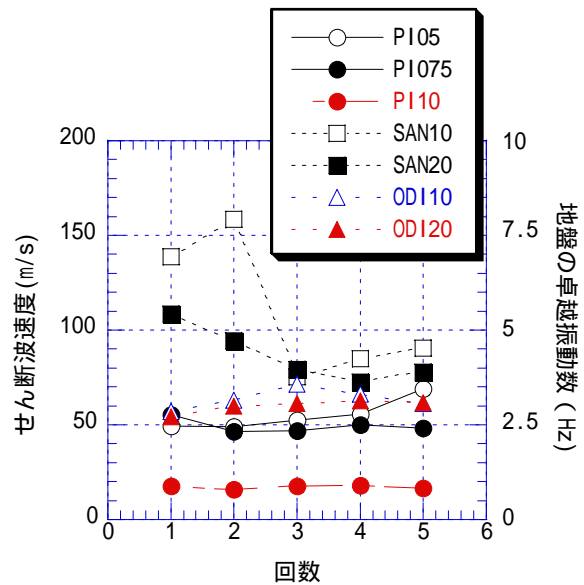


図10 加振回数とせん断波速度

るものの地震波の種類によってはその比例関係から外れて、大きい値となる可能性がある。

3.3 せん断波速度と地盤の固有振動数

想定した地盤の特性を調べるため、基盤面の加速度時刻歴と地表面の加速度時刻歴から、それぞれに共通した特徴的なピークを読み取り、そのピークの発生する時間差から地盤のせん断波速度を求めた。波形のピークは加速度の最大値が発生する1～5秒程度前の比較的大きな特徴的な波、加速度の最大値付近、加速度の最大値が発生した5～10秒程度後の3つから読み取り、せん断波速度を計算してその平均値を求めた。図10に加振回数とせん断波速度及びせん断波速度から1/4波長則により計算した地盤の卓越振動数を示す。加振1回目をみるとPI10のせん断波速度が一番小さく15m/s程度となっている。なお、PI10の場合

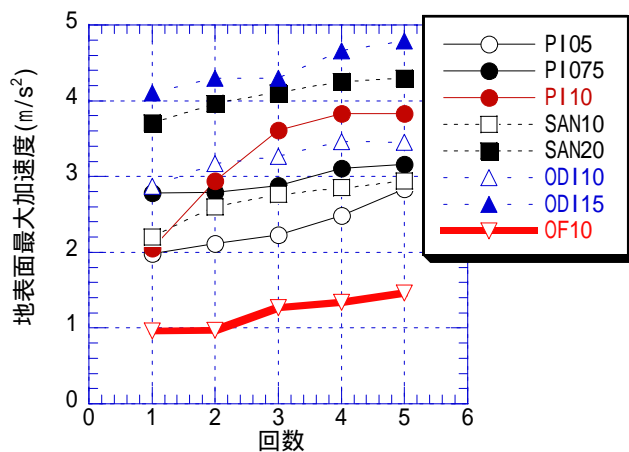


図11 加振回数と地表面最大加速度

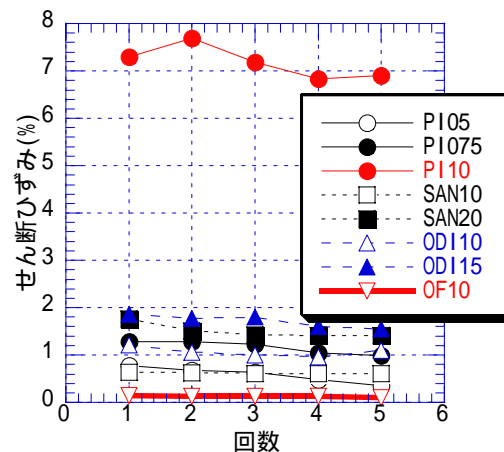


図12 加振回数と最大せん断ひずみ

合は、3区間の全てのせん断波速度が同程度であった。PI10のような载荷初期に大きなせん断応力が発揮される地震では、地盤の卓越振動数が低下することが分かる。

加振回数とせん断波速度を比較すると、PI10以外は加振回数1～3回まではせん断波速度が低下し、加振4～5回目に若干増加する傾向にある。これは初期の地震動で発生した構造の乱れの影響によりせん断波速度が減少するが、加振と圧密の繰返しにより構造が安定してくるためと考えられる。ただし、大きなせん断応力が载荷されたPI10ではせん断波速度に大きな変化は見られなかった。

3.4 地震動の繰返しによる挙動の変化

図11に加振回数と最大加速度の関係を示す。加振回数の増加に伴って最大加速度が増加している。1回目と5回目を比較すると、PI10では 2m/s^2 程度、それ以外の試験では 0.5m/s^2 程度の増加が見られた。なお、PI10以外はせん断波速度が加振回数1～3回までは低下し加振4～5回目に若干増加する傾向にあるにも関わらず、最大加速度が単調に増加している理由は以下のとおりと考えられる。最大加速度はダイレイタンスーにより剛性を回復した影響を含む可能性があるのに対して、せん断波速度は最大値以外の部分を考慮した平均的な値であるためである。

図12に加振回数と最大ひずみの関係を示す。加振回数の増加に伴って最大ひずみが減少する傾向にあるが、その減少量は0.5%程度である。地震動の繰返しが地盤挙動に与える影響については、最大加速度を増加させるが、ひずみの減少に対する寄与は小さいと言える。

3.5 沈下挙動と見かけの圧密降伏応力について

図13に加振1回目終了後の体積ひずみと最大せん断ひずみの関係を示す。地震動履歴に依らずほぼ比例関係にある。図14に加振1～5回目の全体の最終的な体積ひずみと標準圧密試験から求めた見かけの圧密降伏応力の関係を示す。図によると体積ひずみ量に比例して見かけの圧密降伏応力が増加している。長期間自然に圧密された地盤では、地震動履歴を受けることにより、圧密降伏応力が見かけ上増加する可能性がある。自然地盤の粘性土は圧密降伏応力が上載圧より大きくなる。これを一般に年代効果と呼んでいるが、このような現象が起こる理由としては、二次圧密の影響に加えて地震動履歴による体積ひずみの発生の影響もあることが分かる。ただし、本研究に関しては圧密時の応力状態が原位置の地盤とは異なり、側方変位を許しているため定量的には原位置の地盤を比較することはできない。

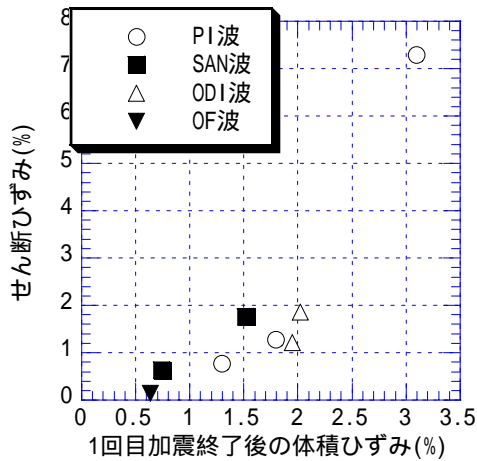


図13 1回目終了後の体積ひずみと最大せん断ひずみ

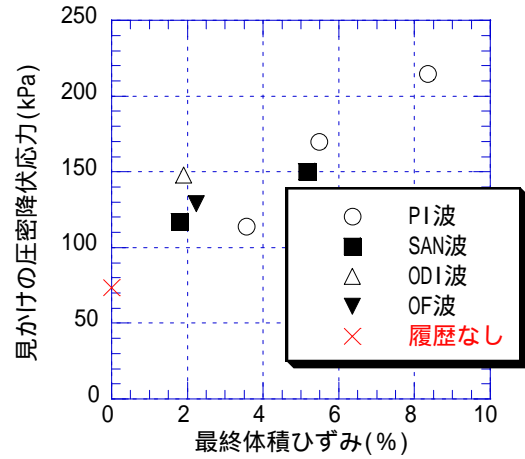


図14 最終体積ひずみとみかけの圧密降伏応力

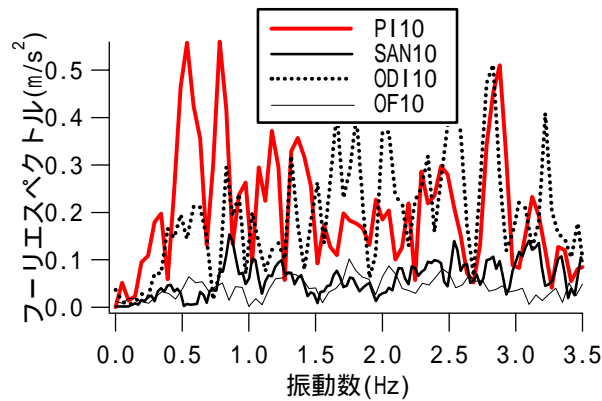


図15 入力加速度のフーリエスペクトル

4. 考察

4.1 地盤のせん断強度と地盤挙動の関係

図5、図7から、PI10のみが他の試験と比較してせん断ひずみが大きく最大加速度が小さいことがわかる。また、図10より、PI10のみ地盤の固有振動数が小さいことが示された。これは地盤のせん断破壊に由来するものと考えられる。図15に入力加速度のフーリエスペクトルを示す。この図から、PI10の入力加速度の卓越振動数は0.5Hz、0.7Hz、2.8Hzであるが、図10に示したPI10の地盤の卓越振動数0.5Hzに一致している。地震動载荷初期に地盤が大きな力でせん断されることによりせん断剛性が低下し、地盤の固有振動数が地震動の固有振動数に一致したため、大きなせん断ひずみが発生したと思われる。

4.2 せん断強度が地盤挙動に与える影響

図7で、PI10のみ他のケースと傾向が異なる理由を考える。加振1回目において、図5から推測された通り、地盤内のせん断応力が地盤のせん断強度に達しているにはPI10のみであった。また、PI10は他の試験と比較して最大加速度が小さく、せん断ひずみが大きく発生している。ここで、地盤のせん断強度が地表面加速度の大きさに与える影響を考える。図16にせん断強度の考え方を示す。図のように検討対象層(本研究では粘土層)で発生する地盤のせん断応力を τ とする。構造物は、単位体積質量 ρ

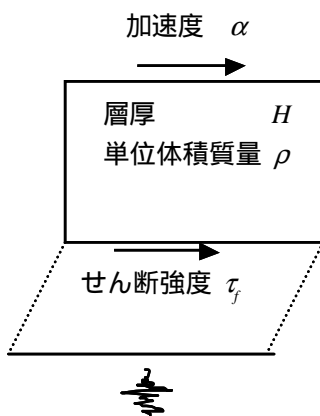
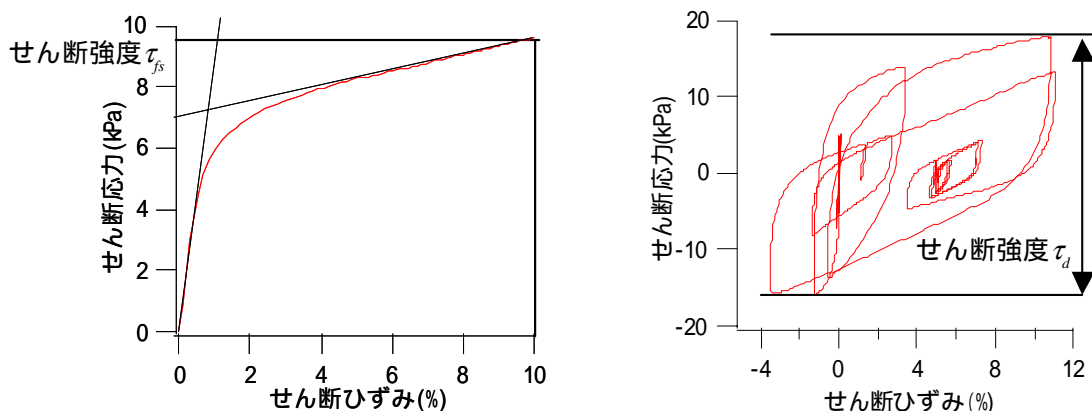


図16 せん断強度の考え方



(a)せん断強度から最大加速度を推定する方法 (b)応力-ひずみ関係から最大加速度を推定する方法

図17 せん断強度の決定方法

層厚 H の剛体として運動すると仮定する。このとき構造物の加速度を α とすると単位面積当たりの加速度と力の関係を表すことができる。ここで、地盤のせん断強度を τ_f とすると、地盤の加速度の上限値 α_{\max} が以下のように求まる。

$$\alpha_{\max} = \frac{\tau_f}{\rho H} \quad \dots (1)$$

ここで、この最大加速度の上限値を上限最大加速度と呼ぶことにする。この値が試験値と対応するか調べる。

地盤のせん断強度 τ_f は、静的試験から求めた τ_{fs} とオンライン試験のせん断応力-ひずみ関係から求めたせん断強度 τ_{fd} から求めることとする。図17に静的試験とオンライン試験によるせん断応力-ひずみ関係とせん断強度の求め方を示す。図17(a)に示すように、静的なせん断試験におけるせん断ひずみ10%のときのせん断強度は9.525kPaとなった。繰返し時のせん断強度は図17(b)に示すように、オンライン試験結果の応力ひずみ関係の履歴ループにおいてひずみの増加によらずある程度一定値を示す部分のせん断応力の幅 τ_d を2で割った値を τ_{fd} とした。

次に地盤がせん断破壊しない場合のせん断特性と加速度の関係を考える。図5のせん断応力-ひずみ関係に示されているとおり、PI10以外の試験の地盤のせん断応力は、せん断強度に達していない。そこで、塑性変形があまり発生していない場合のせん断応力-ひずみ関係の傾きを割線せん断剛性と定義し、その割線せん断剛性と加速度の関係を求める。図18に割線せん断剛性の考え方の模式図を示す。割線

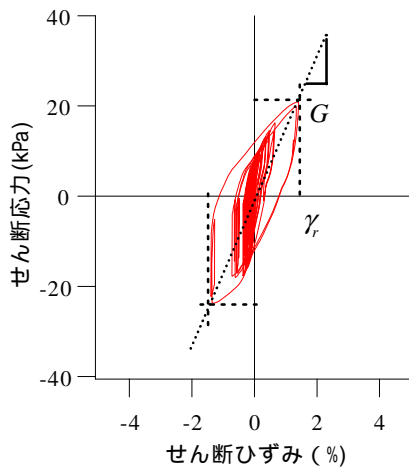


図18 割線せん断剛性の考え方

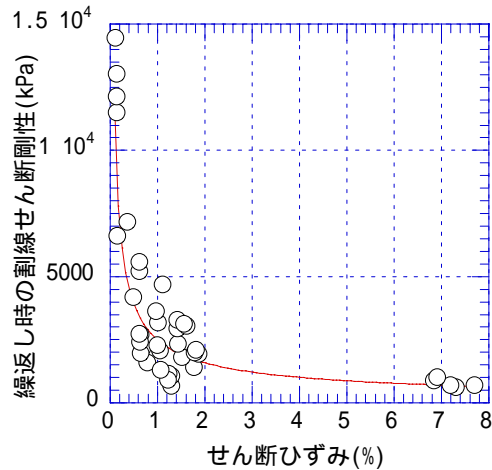


図19 オンライン実験時の割線せん断剛性

せん断剛性はせん断応力とせん断ひずみの最大値を結んだ直線の傾きを考えている。最大せん断ひずみを γ_r 、割線せん断剛性を G と考える。この範囲を正弦波で単振動すると考えた場合、このとき質点の加速度は以下の式となる。

$$\ddot{x} = -\gamma_r \frac{G}{\rho H} \sin \sqrt{\frac{G}{\rho H^2}} t \quad \dots (2)$$

この式の振幅が上限最大加速度となる。式中のせん断剛性としては、静的せん断試験の初期せん断剛性を利用する場合と、オンライン試験結果からせん断ひずみと割線せん断剛性の関係を読み取り近似式を求める場合の2種類を考えた。静的せん断試験から求めたせん断剛性は、図17(a)に示したように、载荷初期の直線部分をせん断剛性とした。このときのせん断剛性は935kPaとなった。図19はオンライン試験結果のせん断応力-せん断ひずみ関係の履歴ループの傾きを図18のように読み取りそれを割線せん断剛性として、そのときのせん断ひずみ量に対してプロットした図である。このときの割線せん断剛性とひずみの関係の近似式は以下ようになった。

$$G = 2492.5\gamma^{0.65} \quad \dots (3)$$

図20に図7の地表面の最大加速度と地盤の最大せん断ひずみの関係に、上記の方法でせん断強度と最大せん断ひずみから計算した上限最大加速度を描いた図を示す。細い点線が静的せん断強度から求めた上限最大加速度、太い点線がオンライン試験の履歴ループから求めたせん断強度から求めた上限最大加速度である。細い実線が静的せん断剛性から求めた上限最大加速度、太い実線がオンライン試験の履歴ループから求めた割線せん断剛性で計算した上限最大加速度である。なお、式(2)中の γ_r は、最大せん断ひずみの値を用いた。即ち、各試験ケースにおいて最大せん断ひずみの時に取りうる最大の加速度を求めている。オンライン試験の履歴ループから求めた上限最大加速度は当然ながらPI10の試験結果と一致している。地盤の動的強度とせん断剛性を適切に求めることができれば、地盤の上限最大加速度を求めることができることが分かった。静的なせん断剛性から推定した上限最大加速度が試験値と一致していない理由は、次のように考えられる。静的試験から求めたせん断剛性はひずみの大きさに依らず一定値となっている。しかし、繰返し载荷時にはせん断剛性が図19に示したようにせん断ひずみの大きさに依存する。静的試験によるせん断剛性から推定した上限最大加速度は、せん断剛性のひずみ依存性を表現していないためにオンライン試験に一致しなかったと考えられる。

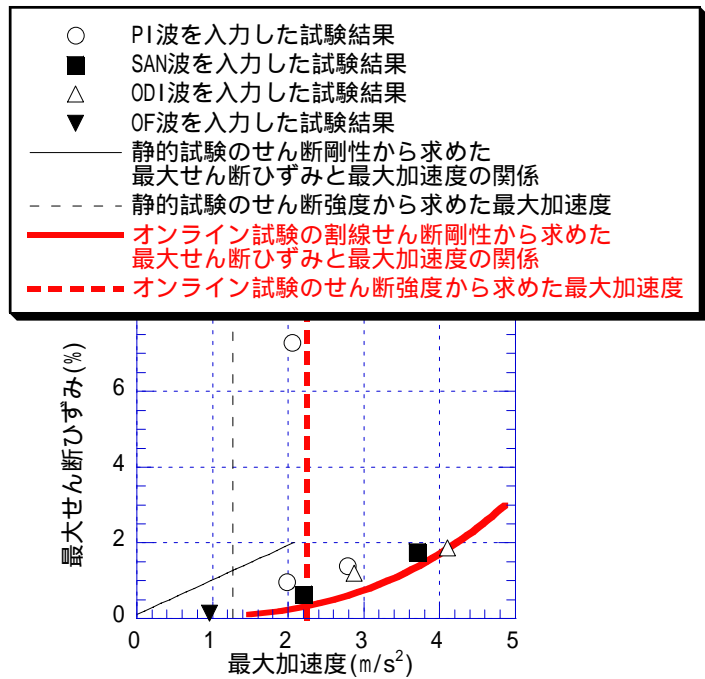


図20 地表面最大加速度と最大せん断ひずみの関係及び計算で求めた最大上限加速度

なお、上記で行った計算はあくまで1質点のモデル地盤が最大せん断ひずみ量を振幅として単振動したと仮定したものである。地盤内における地震動の増幅を含む深さ方向の加速度分布などは考慮されていない。

4.3 沈下挙動と見かけの圧密降伏応力について

図13に示されているように、粘性土の体積ひずみ量は、地震時に発生した最大せん断ひずみ量にほぼ比例している。特に軟弱な粘土の場合は、地震時にせん断ひずみ量が大きく発生する可能性があるため、沈下量も増加する可能性がある。

図14から体積ひずみ量に応じて見かけの圧密降伏応力が増加することが示されている。地震動によって乱された粘土はその後の圧密によって土粒子構造が地震動を受ける前よりも強くなり、結果的に見かけ上圧密降伏応力が増加したと考えられる。粘性土のこのような性質は振動締め固め工法や動圧密工法など、乱した後の圧密による土粒子構造の再構築を目的とした工法が粘性土地盤にも適用可能であることを示唆している。

また、長期間圧密された地盤は土被り圧より若干圧密降伏応力が大きく、間隙比も小さくなることが知られている。このような現象の原因として地震動による圧密沈下が含まれる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、粘性土地盤の地震時挙動を調べるために、水平成層地盤を想定してカオリン粘土を用いてランダム波による1質点のオンライン試験を行った。その結果、以下のことが示された。

- ・本研究のような粘性土の水平地盤においては上限最大加速度が存在し、その値は地盤のせん断強度とせん断剛性から推定できる。地盤中に発生するせん断応力が小さい地震についてはせん断剛性から推定した上限最大加速度が、地盤のせん断応力がせん断強度に達するような大きい地震に関してはせん断強度から推定した上限最大加速度が適用できる。
- ・地震動によって発生した最大せん断ひずみ量に比例した沈下量が発生する。また、発生した体積ひずみ

量に比例して見かけの圧密降伏応力が増加する。粘性土のこのような性質は地盤改良の一手法として利用できる可能性がある。

・地震動履歴とその後の圧密を繰返した場合、最大加速度は増加するが、最大せん断ひずみは大きくは変化しないことが分かった。

なお、本研究は水平成層地盤の1層地盤を1質点で行った実験であり、不整形地盤や多層地盤については今後の検討課題である。本試験結果を実務に反映させるためには、更に層分割を細かくした詳細な研究が必要とされる。

参考文献

- 1) 風間基樹、柳沢栄司、稲富隆昌：地表面に及ぼす中間軟弱粘土層の非線形性の影響、土木学会論文集、No.575/ -40、1997年、pp219-230.
- 2) 山口晶、風間基樹、日下部伸：神戸沖合人工島地盤のオンライン地震応答実験、土木学会論文集、No.701/ -58、2002年、pp181-195.
- 3) Yamaguchi, A., Kazama, M., Toyota, H., Kitazume, M. and Sugano, T.: Effects of the stiffness of soft clay layer on strong motion response, Soils and Foundations, Vol.42, No.1, 2002, pp.17-33.
- 4) 古田竜一、八島厚、渦岡良介、竹内法道：埋立層直下に位置する沖積粘土層の圧密度の差異が人工島液状化特性に及ぼす影響、土木学会論文集、2003年、No.729/ -62.
- 5) 高橋直樹、兵動正幸、吉本憲正、山本陽一：粘土・砂互層地盤の地震動特性に関するオンライン地震応答実験、土木学会論文集、No.764/ -67、2004年、pp.207-219.
- 6) 鈴木康嗣、菅原良次、松本尚志、三浦賢治：地震応答を低減させるための人工地盤、土と基礎、Vol.44、No.5、1996年、pp.9-12.
- 7) 綿引泰治、足立格一郎、沼倉貴雄、保田崇、佐野義尚：人工地盤による免震構造(免震地盤)の地震応答低減効果に関する解析的研究、土木学会第58回年次学術講演会、2003年、pp.229-230.
- 8) 福武毅芳：液状化を積極利用した地盤免震技術、日本地震工学会大会-2003梗概集、2003年、pp.400-401.
- 9) 末富岩雄、澤田純男、吉田望、土岐憲三：地震動の上限と地盤のせん断強度の関係、土木学会論文集、No.654/I-52、2000年、pp.195-206.
- 10) 地盤工学会 粘性土の動的性質に関する研究委員会：SA(現況)部会報告 3 粘性土の動的問題に関わるメカニズムとケースヒストリー、粘性土の動的性質に関するシンポジウム発表論文集、1995年、pp.54-87.
- 11) 松井保、小原秀夫、伊藤富雄：飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響、土木学会論文報告集、No.257、1977年、pp.41-51.
- 12) 松田博、安原一哉：非排水繰返しせん断を受けた飽和粘土の圧密、土と基礎、Vol.39、No.12、1991年、pp.71-77.
- 13) 大原資生、松田博、末岡光樹：繰返し载荷に伴う擬似過圧密粘土の特性、土木学会論文集、No.364/ -4、1985年、pp.249-252.
- 14) 日下部伸、森尾敏、有本勝二：オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動、土質工学会論文報告集、Vol.30、No.3、1990年、pp.174-184.
- 15) 風間基樹、仙頭紀明、山口晶、渦岡良介：地盤耐震工学におけるオンライン実験手法の適用、土と基礎、Vol.51、No.2、2003年、pp.19-22.
- 16) 日下部伸、森尾敏、岡林巧、藤井照久、兵動正幸：簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用、土木学会論文集、No.617/ -46、pp.19-304、1999.

(受理：2006年5月30日)

(掲載決定：2006年11月20日)

Relationship Between Shear Properties and Behavior of Soft Clay Ground during Earthquake

YAMAGUCHI Akira¹⁾, YOSHIDA Nozomu²⁾ and TOBITA Yoshio³⁾

1)Assistant Professor, Faculty of Engineering , Tohoku Gakuin University

2)Professor, Faculty of Engineering , Tohoku Gakuin University

3)Professor, Faculty of Engineering , Tohoku Gakuin University

ABSTRACT

We conducted hybrid on-line tests to study the behavior of soft clay ground during an earthquake. The objective site has a quay on the soft clay ground. We showed that we could estimate the maximum acceleration from the shear strength and the shear stiffness of the clay during an earthquake. If the shear stress of the clay reaches the shear strength during an earthquake motion, the maximum acceleration decreases but the strain does not change. We showed that the void ratio decreased and consolidation yield stress increased because of the ground settlement after earthquake.

Key Words: *Soft clay ground, Maximum acceleration, Shear strength , Shear stiffness*