

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

高橋直樹¹・兵動正幸²・吉本憲正³・山本陽一⁴

¹正会員 工修 三井住友建設株式会社 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

E-mail: tnaoki@smcon.co.jp

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

E-mail: hyodo@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

E-mail: nyoshi@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 工博 三井住友建設株式会社 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

E-mail: yoichiyamamoto@smcon.co.jp

本論文では、粘土・砂互層地盤の地震動特性に関してオンライン地震応答実験を行い、粘土の圧密状態および層厚等が互層地盤の地震動特性に与える影響について考察した。まず最初に粘土の圧密状態を未圧密から過圧密に変化させた実験結果から、その非線形な履歴変形特性とそれが砂層の応答や液状化の程度に与える影響について調べた。次に、粘土層の層厚や配置を種々に変化させた実験結果から、粘土・砂互層地盤の地震動特性における粘土層の影響を明らかにした。最後に、地盤に蓄積する塑性ひずみエネルギーを評価する指標として累積損失エネルギーに着目し、これと地盤応答性状との関連について考察した。

Key Words : clay layer, nonlinearity, seismic response, liquefaction, pseudo-dynamic test
cumulative dissipation energy

1. はじめに

1985年にメキシコで起きたミチオカン地震によるメキシコ市の被害事例¹⁾や、1989年アメリカで起きたロマ・プリータ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の被害事例^{2)~5)}は、軟弱な粘土層の影響により地震動が増幅して被害を大きなものにした代表的な例である。後者では、軟弱地盤上の加速度は硬い地盤上の記録に比べて2~3倍ほど大きいことが報告されている⁵⁾。これに対して、軟弱粘土が免震層としての機能を発揮した結果、地震による被害を免れた例もある。その一例としては、関東大震災による被災を免れた帝国ホテルの事例⁶⁾が挙げられる。帝国ホテルの設計者FLWrightは、この基礎を軟弱粘土層に浮かぶフローティング基礎として設計していることから⁸⁾、本例は軟弱地盤の減震効果を狙った設計・施工の一例として位置付けることができる。このように軟弱粘土は地震動に対して増幅・減震の両面を持つものであり、その非線形化が地表面応答にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることが重要である。

一方、地震動を著しく減衰させるものに砂の液状化が

ある。液状化した地盤は著しい剛性低下を示すため上層へのせん断波の伝播が妨げられ、その結果地震応答加速度が小さくなる。液状化により地震動が減衰した典型的な事例としては、1995年に発生した兵庫県南部地震が挙げられる¹⁰⁾。この地震では、液状化により港湾施設や埋立て人工島に地盤被害が生じ、これを機に各種構造物の耐震設計が大幅な見直しをされることとなった¹¹⁾¹²⁾。

ところで、兵庫県南部地震では埋立層の下に堆積する沖積粘土層の圧密状態の違い、すなわち非線形性の違いが埋立層の液状化程度に大きく影響を与えたことが数値解析によって推定されている¹³⁾。山口ら¹⁴⁾は同様の課題に対して、埋立層のまさ土に関しては再構成試料による供試体から復元力特性を評価し、沖積粘土層については数値モデルを用いたオンライン地震応答実験を実施し、神戸沖合人工島地盤におけるまさ土のひずみの発達がその下に堆積する沖積粘性土のせん断強度の増加に伴い大きくなること、および沖積粘性土の剛性がまさ土の過剰間隙水圧の上昇量、すなわち液状化程度に与える影響は少ないことも明らかにしている。

しかしながら、これらの検討では着目する沖積粘土層

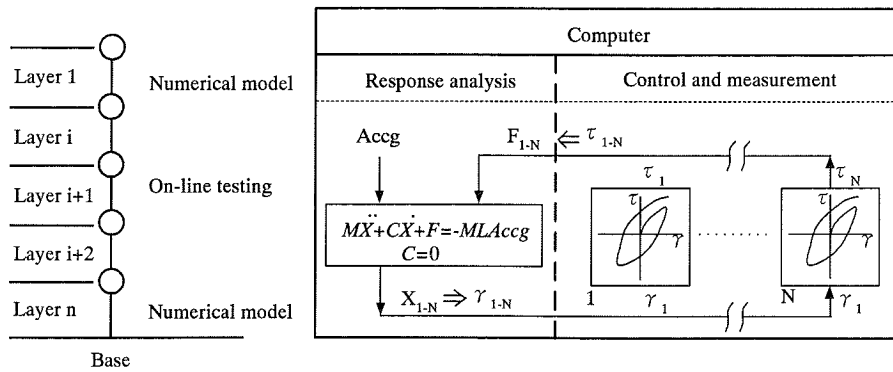
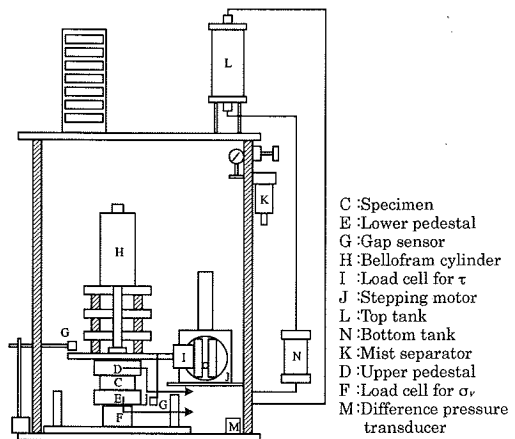


図-1 オンライン地震応答実験の概念

の非線形性の評価は数値モデルによるものであるため、実際の現象を理解するためにはこれをさらに精度良く評価することが必要であると思われる。また、神戸人工島地盤は埋立層の下に沖積粘土層が堆積する地層構成であるが、現実には粘土層の層厚や層序は様々であり、これらの組み合わせにおいて粘土・砂互層地盤の地震動特性に与える粘土層の影響について明らかにすることが重要であると考えられる。

本研究では粘土・砂互層地盤の地震動特性に関してオンライン地震応答実験を実施し、粘土の圧密状態が互層地盤の振動特性に与える影響に関して詳細に検討した。さらに、粘土層の層厚や配置を種々に変化させた実験を行い、粘土・砂互層地盤の地震動特性における粘土層の影響について検討を行った。

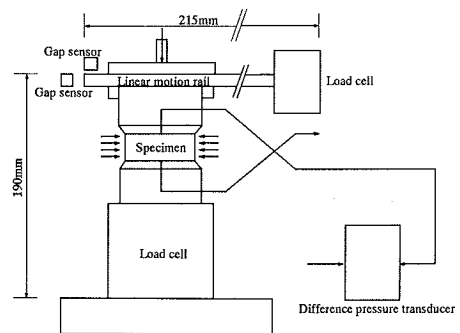


(a) 装置の概要

2. オンライン地震応答実験の概要

(1) オンライン地震応答実験の概念

オンライン地震応答実験の原理を図-1に示す。本システムは日下部ら¹⁹⁾により開発されたものであり、そのアルゴリズムは以下の通りである。まず、解析対象地盤を質点系にモデル化し、基盤面から地震動を入力する。つぎにコンピュータにより質点系の振動方程式を解き、各質点の応答変位を求める。そして、得られた変位に相当するせん断ひずみをコンピュータ制御により供試体を与え、その時自動計測された復元力を用いて次のステップの応答変位を計算する。すなわち、本手法はこれらの過程を地震動が継続する間繰り返すことにより時々刻々に変化する地盤の非線形な復元力を要素実験の供試体から直接求め、それをオンラインで応答解析に結びつけて地震時の地盤の挙動をシミュレートするものである。なお、要素実験部分には、図-2(a)～(b)に示す日下部ら¹⁹⁾によ



(b) 荷重試験装置の詳細

図-2 簡易単純せん断試験装置

り試作された簡易直接せん断試験機を用いた。また、多層からなる地盤の全てをオンライン実験することは、シ

ステムが高価になるばかりでなく作業も煩雑化する。そこで、本実験では液状化や大変形が予想される地盤要素部分のみを要素実験で復元力を求め、その他の部分は修正Ramberg-Osgood（以下、修正R-O）モデルで復元力を求めるサブストラクチャ法を採用した。

(2) 解析方法

オンライン地震応答実験の地震応答計算には、次の運動方程式を用いた。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F = -MLA_{ccg} \quad (1)$$

$$C = 0 \quad (2)$$

ここに、 M ：質量マトリックス、 C ：減衰マトリックス、 F ：復元力ベクトル、 L ：単位ベクトル、 K ：剛性マトリックス、 X ：相対変位ベクトル、 A_{ccg} ：入力加速度である。

数値積分法には第1ステップでは線形加速度法を用い、第2ステップ以降では衝撃加速度法を採用した¹⁷⁾。ステップにより積分法を変えた理由は、第1ステップでは衝撃加速度法に必要なそれ以前の変位やせん断応力が未知であるためであり、第2ステップ以降では線形加速度法の接線剛性の精度の信頼性が低いためである。

3. オンライン地震応答実験方法

(1) 地盤モデル

地盤モデルは、図-3に示すように深度18mの水平成層地盤を想定し、これを6分割して一次元の質点系モデルで置き換えたものとした。このうちL2層～L4層（GL-3m～GL-12m）の復元力を要素実験により実測し、他の層の復元力は修正R-Oモデルにより算定した。ここで、L2層～L4層は液状化層となる $D_r=50\%$ の砂層または粘土層を想定し、地下水位より上のL1層は $D_r=50\%$ の砂層、L5層～L6層は $D_r=80\%$ の砂層としてそれぞれ非液状化層となるようにモデル化した。

(2) 要素実験

要素実験は3台の簡易せん断試験機を用いて実施した。载荷は非排水状態で鉛直方向の変位が生じないようにして側圧一定で行った。そのため、体積ひずみゼロ、鉛直ひずみゼロという条件から水平方向ひずみがゼロとなり、単純せん断条件となる。なお、载荷はステッピングモーターによるという実験設備の制約上、リアルタイム加振とはなっていない。要素実験に供した試料は、表-1に物性値を示す山口県小野田市で採取された海成粘

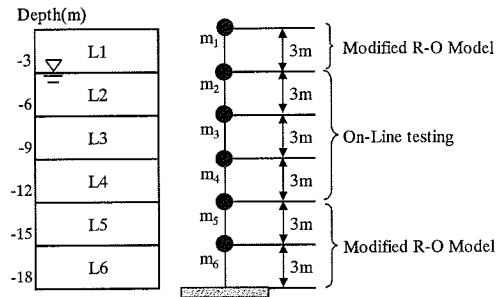


図-3 地盤モデル

表-1 小野田粘土の物性値

Name	ρ_s (g/cm^3)	W_L (%)	W_P (%)	I_P	F.C. (%)	C.C. (%)
Onoda clay	2.601	80.9	34.9	46.0	84.5	37.5

土（小野田粘土）と豊浦砂（ $\rho_s=2.643g/cm^3$, $e_{max}=0.973$, $e_{min}=0.635$ ）である。粘土は再構成試料とし、あらかじめ液性限界の二倍以上の含水比で十分練り返した試料を予備圧密セル内に投入し、鉛直圧密圧力 $\sigma_{vc}=10$, 20kPaとそれぞれ1日づつ段階的に载荷した後、 $\sigma_{vc}=50kPa$ で2週間载荷させて再構成試料を作製した。一方、砂供試体は、所定の相対密度となるように水中落下法により作製した。供試体の寸法は概ね直径60mm、高さ40mmである。ただし、圧密時間を短縮し試験実施期間の制約緩和を図るために、粘土供試体のみ高さを20mmとした。圧密は静止土圧係数 K_0 を0.4に設定した異方圧密とし、圧密圧力は $K_0=0.4$ となるよう有効側方向応力 σ'_h と異方分の有効軸方向応力 σ'_v を所定の値になるまで段階的に加えるものとした。なお、圧密度50%の未圧密粘土供試体に関しては、沈下量が同一の試料を用いて求めた圧密度100%の沈下量の50%に達した時点で鉛直ひずみを拘束し、供試体内の間隙水圧が一樣になるまで数時間放置した後実験を開始した。一方、過圧密比5の過圧密粘土供試体に関しては、有効土被り圧の5倍の圧密圧力で一次圧密を終了させ、その後、有効拘束圧を所定の値に戻して実験を開始した。

(3) 実験・解析条件

オンライン地震応答実験は表-2に示すように要素実験により復元力を求めるL2層～L4層を対象として、粘土層の圧密状態、層厚および配置を様々に変化させて実施した。表中の実験ケース名はL2層～L4層の土質を表し

表-2 実験ケース

Layer	TEST CASE							
	SSS	SSC _{U50}	SSC	SSC _{OCRS}	SCS	CSS	CCS	CCC
L1				Sand($D_r=50\%$)				
L2	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Clay	Clay
L3	Sand	Sand	Sand	Sand	Clay	Sand	Clay	Clay
L4	Sand	Clay _{OCRS}	Clay	Clay _{OCRS}	Sand	Sand	Sand	Clay
L5				Sand($D_r=80\%$)				
L6				Sand($D_r=80\%$)				

表-3 解析パラメータ

Layer	Thickness (m)	γ_r (kN/m ³)	τ_r (kPa)	G_0 (kPa)	α	β
L1	3	19.1	13.87	48697.35	2.451	2.293
L2	3	19.1	On-Line	On-Line	-	-
L3	3	19.1	On-Line	On-Line	-	-
L4	3	19.1	On-Line	On-Line	-	-
L5	3	19.6	128.47	152007.31	2.451	2.293
L6	3	19.6	159.78	164682.78	2.451	2.293

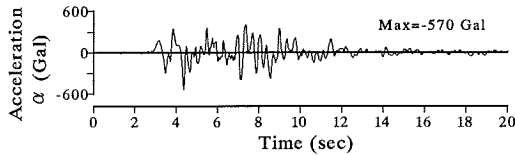


図-4 入力波

ており、砂 (Sand) , 粘土 (Clay) それぞれの頭文字をとり、例えばSSCではL2層~L3層が砂、L4層が粘土となる。なお、L4層が粘土となるケースに関しては、SSC_{U50}が圧密度50%の未圧密粘土、SSC_{OCRS}が過圧密比5の過圧密粘土を用いたケースを表している。それ以外のケースでは、何れも正規圧密の供試体を対象としている。修正R-Oモデルの解析パラメータは、表-3に示すように決定した。減衰定数 h_{max} は0.25とし、初期せん断剛性 G_0 は、Meyerhof¹⁸⁾が示した式(3)の関係から所定の相対密度 D_r に対応した N 値を求め、その N 値を用いてImai and Tonouchi¹⁹⁾の式(4)から算定した。入力波には、図-4に示す1995年兵庫県南部地震においてポートアイランドでアレー観測されたPI-79mNS成分(最大加速度570Gal)を用いた。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (3)$$

ここに、 D_r : 相対密度 (%)

σ'_v : 有効上載圧 (kPa)

$$G_0 = 98(144N^{0.68}) \quad (4)$$

ここに、 G_0 : 初期せん断剛性 (kPa)

なお、本研究で用いるサブストラクチャ法では、全体系の精度は数値モデルまたは要素試験のどちらか低い方に依存するものと考えられる。実験結果を保証するためには、数値モデルのモデル化の精度が要素実験部分をモデル化したときに得られるであろう精度に比べてできるだけ高くなければならない²⁰⁾。そこで、数値モデルの精度を保証するために、修正R-Oモデルは剛性低下が少なく複雑な非線形性を示さない層に適用した。一方、要素試験については、各供試体のばらつきによる再現性の問題が挙げられる。そこで、要素試験の再現性を高めるために、砂供試体の密度管理を所定の相対密度の±1%以内とした他、粘土については予圧密装置により作製した大型のブロック供試体から切り出したものを供試体として使用した。

4. 粘土の圧密状態が地震動特性に与える影響

本章では、実験ケース SSS, SSC_{U50}, SSC および SSC_{OCRS} から得られた結果を比較することにより、粘土の圧密状態が地震動特性に与える影響に関して考察する。なお、本実験はひずみ制御による応答実験であるため、例えば、一般に応力制御の要素試験で行われているようにひずみ振幅の大きさを液状化を定義するのは適当ではないと考える。そこで、本研究では有効応力が低下してゼロになった状態を液状化と定義し、また有効応力が早い時点でゼロとなりその後ひずみが増大するような場合を激しく液状化と定義することとした。

(1) せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係および有効応力経路

図-5に各ケースのL2層~L4層におけるせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係を示す。全層砂層となるSSSに関して、L2層およびL3層におけるせん断応力 τ は図中○印で示したA点において最大値に達し、それ以降では減少に転じている。A点は時刻歴では入力開始後3~4秒に相当し、このときのひずみはL2層が0.67%、L3層が1.4%、過剰間隙水圧比は前者が0.36、後者が0.34であり、せん断応力の減少はひずみ振幅がそれほど大きくない範囲で生じていることがわかる。A点以降、剛性の低下が進行して液状化に至り、ひずみが激増してせん断応力がほぼゼロに近づいている。これに対してL4層は2%程度のひずみが生じて若干の剛性低下が認められるものの、液状

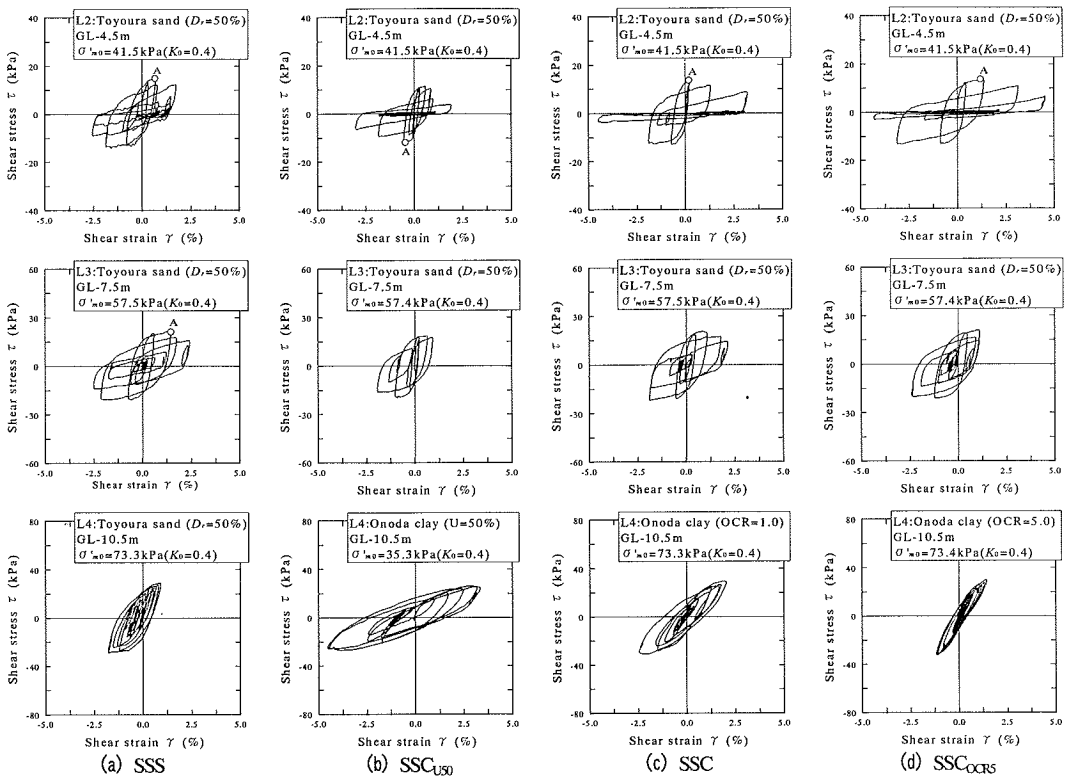


図-5 せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係

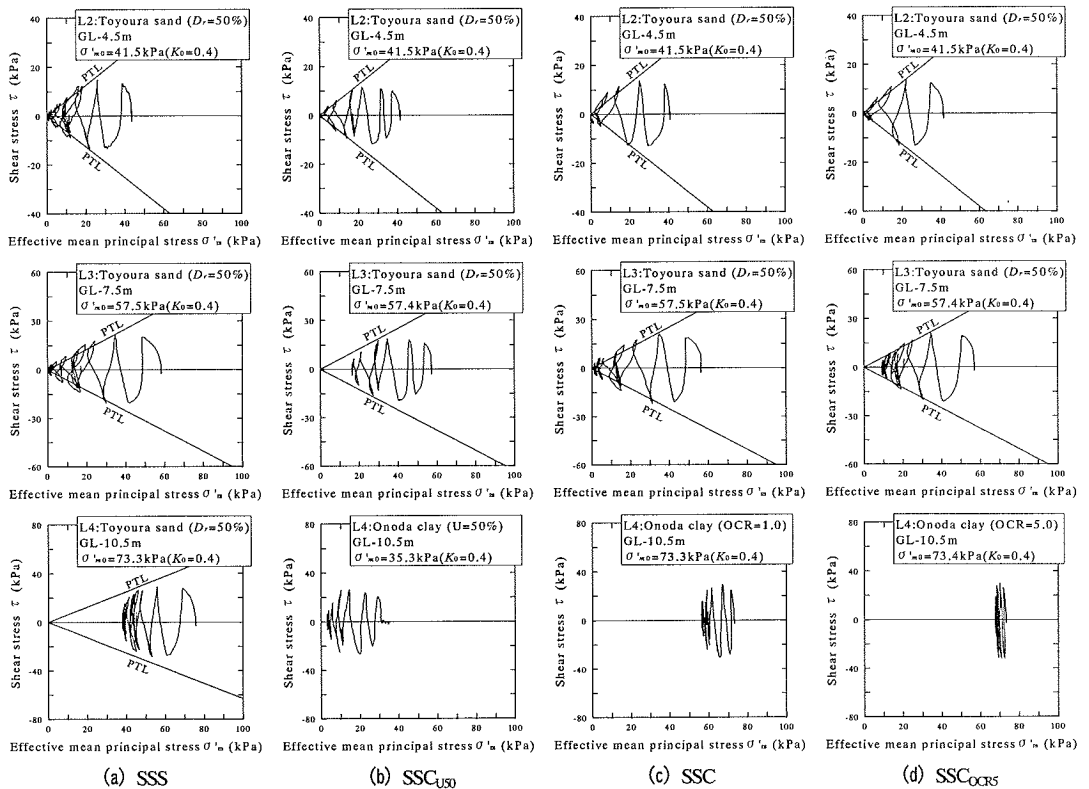


図-6 有効応力経路

化には至っていない。一方、L4層が粘土層であるケースをみると、粘土の剛性が未圧密・正規圧密・過圧密の順で大きくなり、それに依存してひずみが小さくなるのがわかる。さらに履歴ループの形状が、過圧密粘土ほど細くかつた形となっていることが明らかである。このことは、粘土の非線形な履歴変形特性はその軟らかさに応じて異なることを示している。さらに、粘土の剛性は大ひずみに至っても砂の液状化のような極端な低下を示さずある程度の値を保持していることが特徴的である。砂であるL2層およびL3層は、SSSと同様に液状化またはそれに近い状態にある。ただし、L4層が未圧密・正規圧密・過圧密の順で最上層のひずみの発達が顕著となり、激しく液状化していることが認められる。このことから、粘土層の非線形な履歴変形特性は上層に位置する砂層の液状化程度に大きく影響を与えることが理解できる。

図-6は同一層の有効応力経路を示したものである。なお、砂の有効応力経路には、本システムの非排水静的試験(オフライン)から求めた豊浦砂の変相線PTL(Phase Transformation Line)も併せて示している。また、未圧密粘土となるSSC_{U50}のL4層には実験開始時に圧密圧力の50%(35.3kPa)が過剰間隙水圧として残留していたものと考え、有効応力経路はこれを考慮して示している。L2層およびL3層は、全てのケースで変相線PTLを越えると同時に変形が急激に進行して液状化またはそれに近い状態に至っている。L4層に関しては、砂では変相線PTL近傍まで有効応力が減少するもののゼロとはならず、最終的に初期有効拘束圧の5割程度の値を保持して定常状態に至っている。これに対して粘土の有効応力の減少程度は圧密状態に依存して異なり、過圧密粘土の場合にはそれが初期拘束圧の1割程度であるのに対して、未圧密粘土では9割程度と大きくなる。したがって、未圧密粘土は砂のような液状化が生じないまでも、有効応力の低下によるせん断抵抗の減少が著しいことが明らかである。

(2) 加速度の時刻歴応答波形

図-7は各質点における応答加速度 α の時刻歴を示したものである。質点m2をみると、全てのケースで振動に伴って減衰して波形が長周期化していることが認められる。この傾向は質点m1も同様であった。これらは液状化によりL2層およびL3層の剛性が著しく低下して上層への地震動の伝播を抑制したためである。一方、質点m4をみると、SSSの砂の結果に対して粘土の波形には長周期成分が卓越している様子が認められ、未圧密粘土でこの傾向が顕著である。このことは、粘土層が高振動数成分に対するフィルターとしての機能を有することを意味している。このような粘土の効果は、それ自体に液状化のような極端な剛性低下が無いことから、地盤が塑性

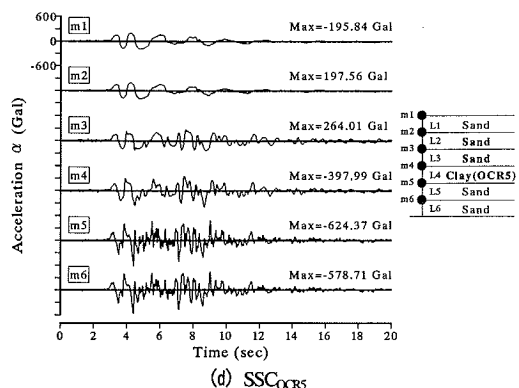
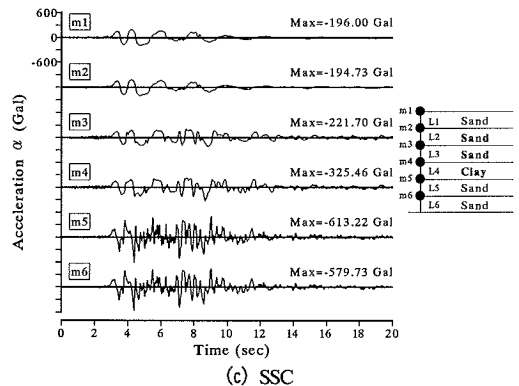
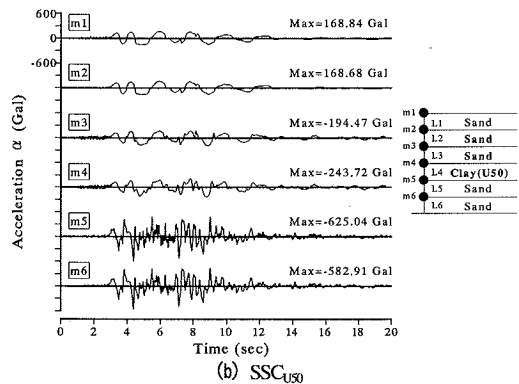
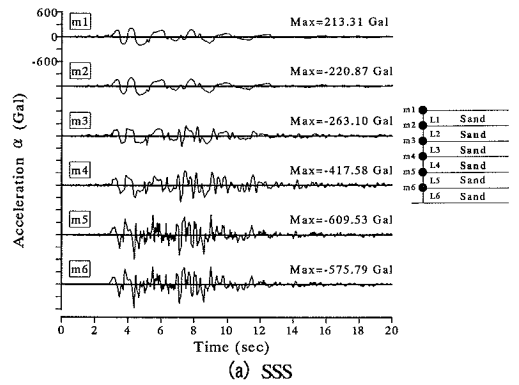


図-7 応答加速度 α の時刻歴

変形することにより消費されるエネルギーが大きいことに起因するものと予測される。

(3) 最大応答加速度と最大せん断ひずみの深度分布

各ケースにおける最大応答加速度 α_{max} の深度分布を図-8に示す。加速度はL4層 (GL-9m~GL-12m)において大きく減衰し、それより上層では地表に向かって緩やかな減衰傾向を示している。このL4層における減衰程度は砂よりも粘土のほうが大きく、また粘土間の比較では未圧密粘土ほどその程度が大きくなることわかる。このような加速度の減衰は、図-9に示す最大せん断ひずみ γ_{max} の深度分布からも理解されるようにひずみの大きさに依存し、ひずみが大きく発達して非線形化が卓越する場合に大きくなること明らかである。

図-9に示すSSSとSSC_{ocrs}との結果を比較すると、L3層およびL4層の最大せん断ひずみは同等であるが、L2層のそれは前者が2.5%であるのに対して後者は4.5%と約2倍の値を生じている。L4層が粘土層であるケースではこの層のひずみの大きさに関わらず、地表に近いL2層においていずれもSSSより大きなせん断ひずみを生じている。このことから、本ケースにおいて下層に粘土層を含んでいる場合には、粘土層の存在が上層の液化化層のひずみを増長させていると考えられる。

(4) 地震応答の周波数特性

図-10は質点m2~質点m4における加速度のフーリエ・スペクトルを示したものである。上層側の質点m2に関して、1Hzよりも高振動数側のスペクトル値はSSSで卓越しているのに対して、それよりも低振動数側となる0.5Hz付近のスペクトル値がSSC_{u50}で卓越していることが特徴的である。これに対して、下層に位置する質点m4をみると、1Hzよりも低振動数側の分布形状は全ての実験ケースで類似しているが、それよりも高振動数側の成分は未圧密・正規圧密・過圧密・砂の順で卓越する形となっている。しかしながら、今回実験した地盤では、何れも非線形性が卓越する軟弱な地盤構成となっており、固有周期にはフーリエ・スペクトルでみる程の違いが認められなかった。

次に、表層波 (質点m1) および入力波の応答スペクトルを図-11に示す。入力波の卓越周期は0.3秒付近であるのに対して、表層波のそれはいずれのケースでも地盤の非線形化により1秒付近となり長周期化している。表層波に関する比較では、固有周期が1秒付近よりも短周期側の応答がSSSで最も大きく、粘土層を有するケースではせん断強度の低下に伴って未圧密のSSC_{u50}で最も小さくなっていることがわかる。この結果は、粘土がいわゆる免震的な作用をしたと解釈できる。一方、固有周期

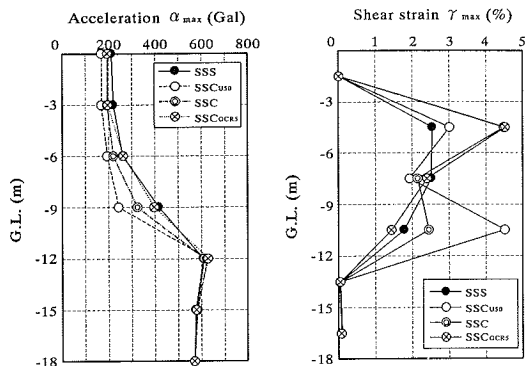
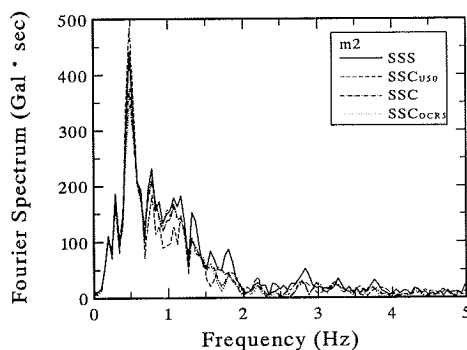
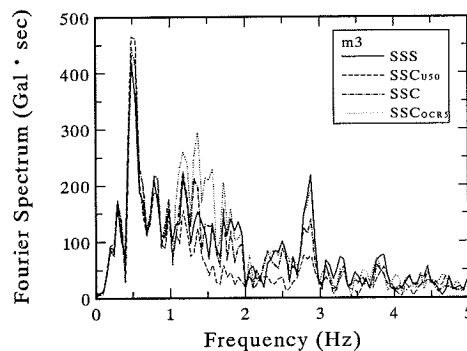


図-8 最大加速度 α_{max} の深度分布

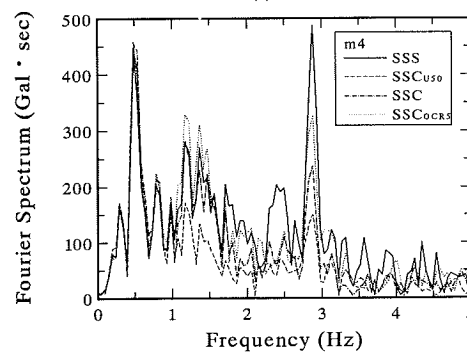
図-9 最大せん断ひずみ γ_{max} の深度分布



(a) m2



(b) m3



(c) m4

図-10 応答加速度フーリエスペクトル

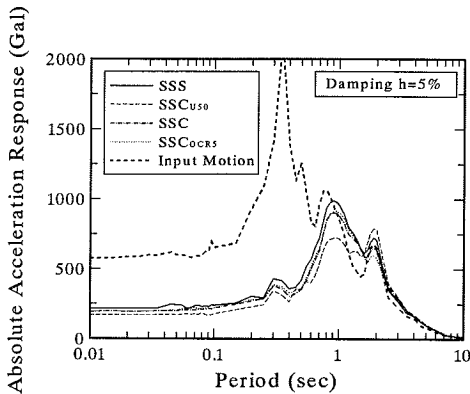


図-11 地表および入力波の加速度応答スペクトルの比較

がそれよりも長周期側ではこの傾向が逆転し、特に2秒付近の応答はSSC_{U50}が最大となることが認められる。したがって、短周期側でみられた粘土の免震効果は長周期側では発揮されず、逆に増幅傾向を示すことが認められる。

以上のことから、液状化層の下に粘土層がある場合には、その粘土層が短周期側の構造物に対しては免震的な効果を発揮するが、長周期側の構造物に対してはその効果が期待できないことが確認された。なお風間ら²⁴⁾は、地盤条件との関連で地表面応答に及ぼす軟弱地盤の影響について検討し、地表面以下に軟弱層がある場合にはその塑性化によって地表面の最大加速度応答は小さくなるものの振動の長周期成分は大きく減衰しないことを示しており、本結果もこれを支持するものである。

5. 粘土の互層状態と粘土の層厚が地震動特性に与える影響

本章では、実験ケースSSS、SSC、SCS、CSS、CSS、CCSおよびCCCから得られた結果を比較することにより、粘土層の層厚および配置が粘土・砂互層地盤の地震動特性に与える影響に関して考察する。

(1) せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係および有効応力経路

図-12にSCS、CSS、CCSおよびCCCのL2層～L4層におけるせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係を示す。砂層に粘土層が挟まれるSCSのL2層は、剛性低下に伴いひずみが発達し液状化に至っていることがわかる。一方、粘土

層の直下に位置するL4層は図-5で示した砂層のみのSSSのそれと比較してひずみの発達が著しいことが認められる。また、CSSのL3層およびCCSのL4層も同様の傾向を示している。これらの層に関して図-13に示す有効応力経路をみると、いずれも有効応力が大きく減少しており、特にSCSのL4層を除いては変相線PTLを越えると同時に変形が急激に進行して液状化、またはそれに近い状態に至っていることがわかる。したがって、粘土層の直下に砂層がある場合には、その層の非線形化が著しくなるものとする。L2層～L4層が粘土であるCCCは、いずれの層も2%を超えるひずみが生じているものの、液状化のような著しい剛性低下を示していない。また、有効応力経路をみると、有効応力は初期拘束圧の3-4割程度の減少に留まり、定常状態に至っていることがわかる。

(2) 加速度の時刻歴応答波形

図-14はSCS、CSS、CCSおよびCCCにおける各質点の応答加速度 α の時刻歴を示したものである。L2層が液状化したSCSにおける質点m2の波形には長周期化と振動に伴う減衰が認められるのに対して、質点m3および質点m4の波形には著しい減衰傾向はみられない。これは、L4層が液状化に至らず剛性低下が少なかったためである。CSSに関しては、質点m2の波形がL3層が液状化したにも関わらず比較的短周期成分が多いことに気付く。その原因は、質点m4の波形に短周期成分が卓越して応答が大きくなっていることから、剛性低下の少ないL4層の応答が上層の地震応答に影響を与えたためであると考えられる。次にCCSの結果をみると、粘土層である質点m2および質点m3の応答が振動に伴い減衰していることが明らかである。これは、正規圧密粘土は地震動継続中に砂の液状化のような著しい減衰は示さないことから、L4層が液状化したことにより上層へのせん断波の伝播を抑制したことが原因であると思われる。最後にCCCの結果をみると、全ての質点の波形に若干の長周期化は認められるものの、砂の液状化のような極端な減衰を示していないことが特徴的である。

(3) 最大応答加速度と最大せん断ひずみの深度分布

SSS、SSC、SCS、CSS、CCSおよびCCCにおける最大応答加速度 α_{max} の鉛直分布を図-15に示す。加速度は全てのケースで地表面に向かって減衰傾向を示し、特にL3層～L4層(GL-6m～GL-12m)の区間での減衰が著しいことがわかる。ただし、その分布形状は各ケースで異なり、図-15(a)に示すSSCとCSSとの比較から認められるように、粘土層が上層に位置するほど、地表面応答加速度が大きくなっていることがわかる。さらに、図-15(b)から明らかのように、粘土層厚の増大に伴い地表面

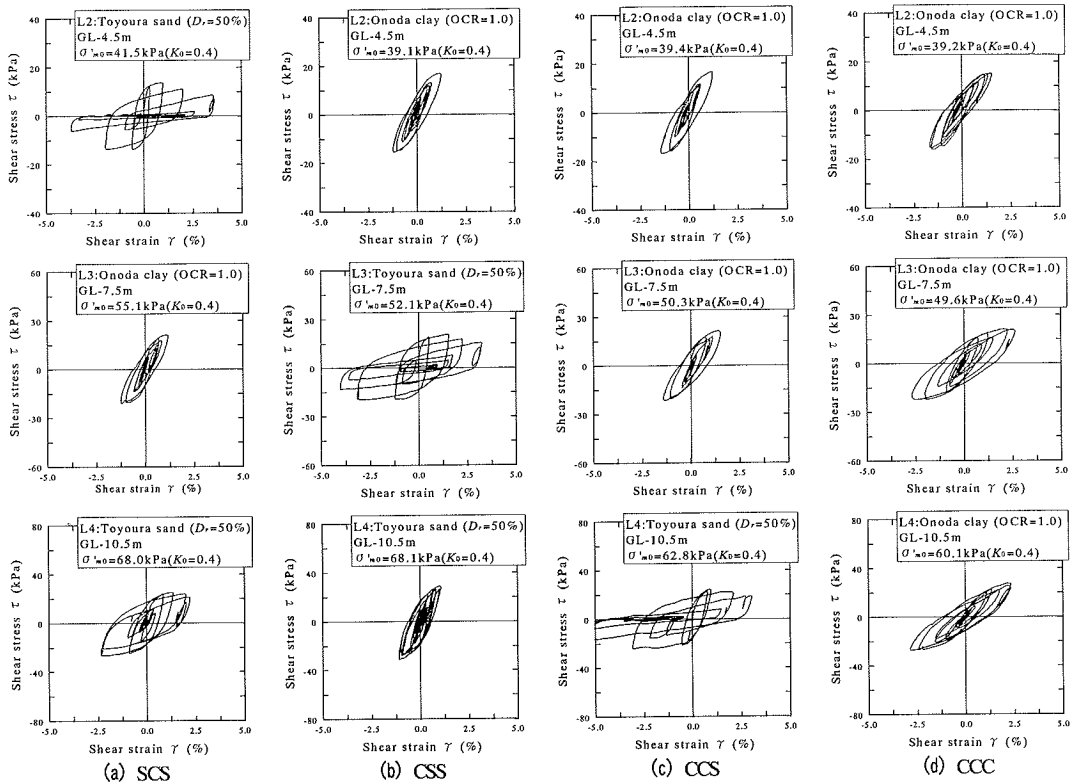


図-12 せん断応力 τ -せん断ひずみ γ の関係

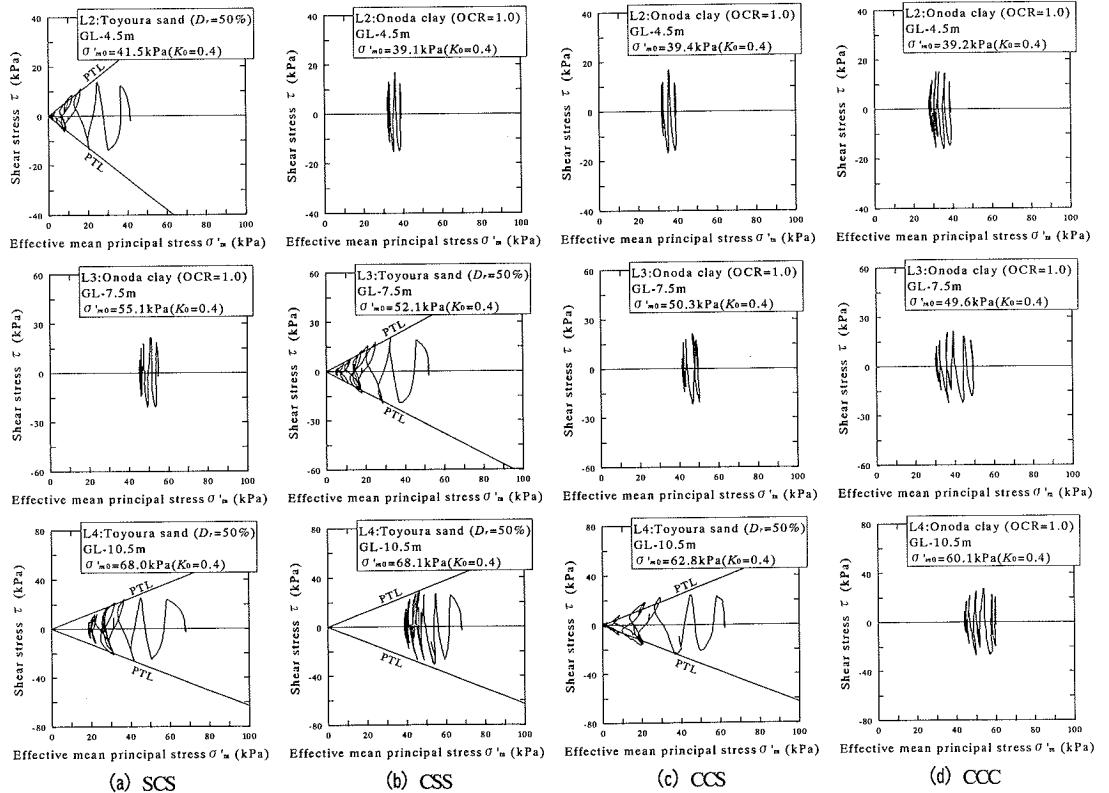


図-13 有効応力経路

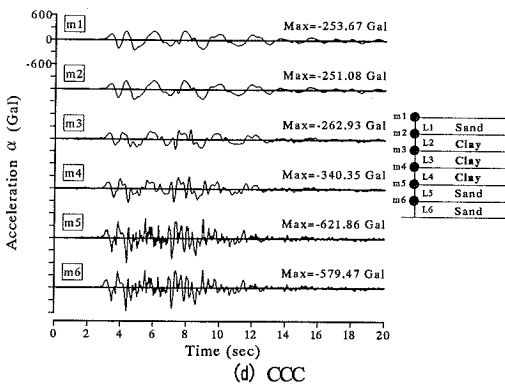
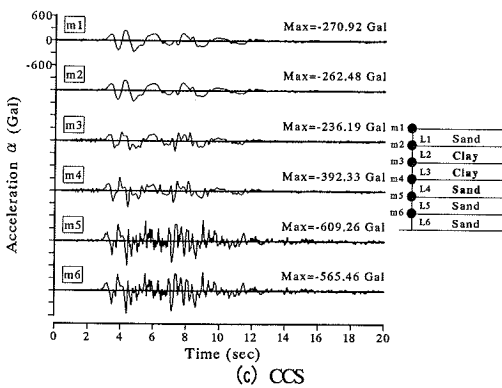
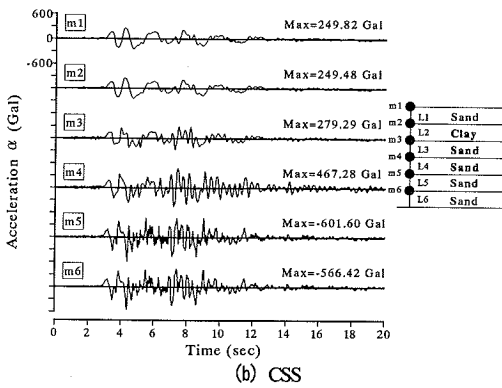
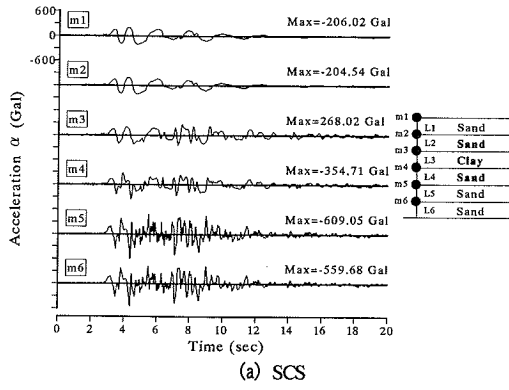


図-14 応答加速度 α の時刻歴

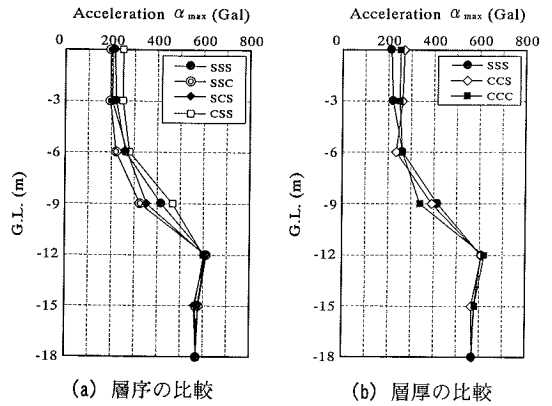


図-15 最大加速度 α_{max} の深度分布

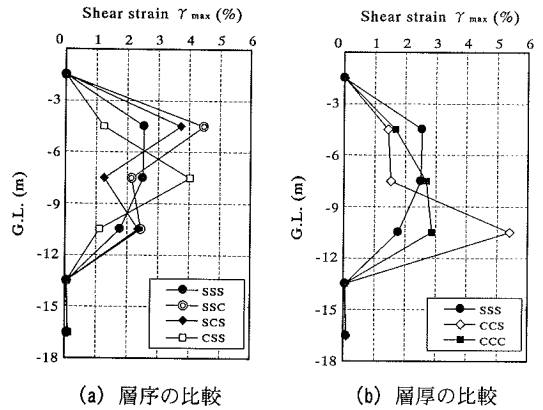


図-16 最大せん断ひずみ γ_{max} の深度分布

応答加速度が大きくなることも興味深い。岩崎ら²²⁾は1854年12月23日の安政東海地震と24日の安政南海地震で、鋭敏な粘土層の厚さが厚くなるほど地表での被害が大きくなった東大阪地区の被害事例を報告しており、本結果もこれに整合するものである。

同一ケースにおける最大せん断ひずみ γ_{max} の深度分布を図-16に示す。L2層～L4層のひずみの分布形状は、粘土層が上層に位置するCSSおよびCCSでは、その直下の砂層のひずみが大きく発達し、粘土層が下層に位置するSSCおよびSCSでは上層の砂層のひずみが大きくなる傾向が認められる。このことから、粘土・砂互層地盤において粘土層の存在は、前章でも明らかであったように周辺の砂層の液状化によるひずみの発達を増長させる作用をもたらしていると考えられる。

次に、砂層、粘土層がそれぞれ単層となるSSSとCCCとの比較において、前者のL2層～L4層のひずみ分布形状は下層のL4層で小さく上層のL2層では液状化に伴い

増加するのに対して、後者のそれは下層のL4層で大きく上層で小さくなる傾向にある。ただし、粘土層は液状化を生じないまでも振動中のひずみは液状化を生じた砂層と比較して小さくない。

(4) 地震応答の周波数特性

図-17は表層波（質点m1）および入力波の応答スペクトルを示したものである。入力波と表層波の比較からは、入力波の卓越周期が0.3秒付近であるのに対して、表層波のそれは地盤の非線形化により長周期側に伸びていることがわかる。図-17(a)から、固有周期が2秒よりも短周期側の応答は、粘土が上層にあるCSSで最大となり、粘土が深部に位置するのに従って小さくなることがわかる。また、図-17(b)から、固有周期2秒付近の応答が、粘土層厚の増大に伴い大きくなっていることが明らかである。

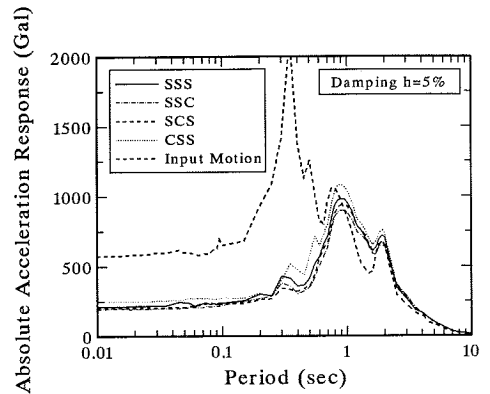
以上のことから、粘土層の短周期成分を遮断するフィルターとしての機能は、それが下層に位置する場合にのみ有効であり、上層に位置する場合には短周期成分を増幅させる傾向があるものと思われる。さらに、粘土層厚が大きい場合には、長周期成分も増幅させる傾向にあるものとする。

6. 累積損失エネルギー

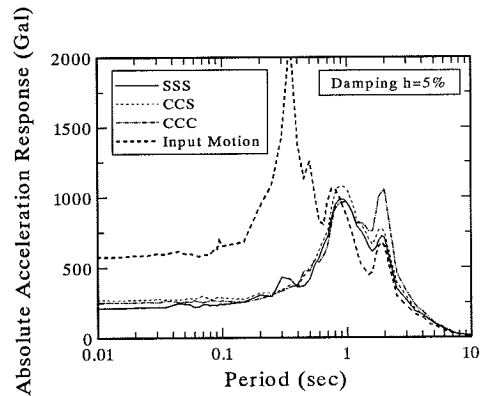
地震動を減衰させる要因としては、前章までに示した地盤の剛性低下とともに、その非線形化に伴う履歴減衰の増加が挙げられる。そこで、本章では地盤に蓄積する塑性ひずみエネルギー量を評価する指標として累積損失エネルギー ΔW ^{23,24)}に着目し、これと地盤応答性状との関連について考察する。

ここで、累積損失エネルギー ΔW は図-5で示したせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係におけるループの面積から算出されるものである。Sugano and Yanagisawaら^{23,24)}は、初期拘束圧で正規化した累積損失エネルギーは要素実験法の種類によらずほぼ一義的に決まることを明らかにしている。したがって、本章では累積損失エネルギー ΔW を初期の平均有効主応力 σ'_m で除して求めた正規化累積損失エネルギー $\Delta W/\sigma'_m$ （以下、累積損失エネルギーと称す）で評価することとした。

図-18に累積損失エネルギーの深度分布を示す。まず、圧密状態の比較となる図-18(a)をみると、L4層の累積損失エネルギーは粘土層のほうが砂層よりも大きく、また過圧密・正規圧密・未圧密の順で増大していることが明らかである。さらに、L4層の累積損失エネルギーが大きいほどその上層の累積損失エネルギーが小さくなるこ

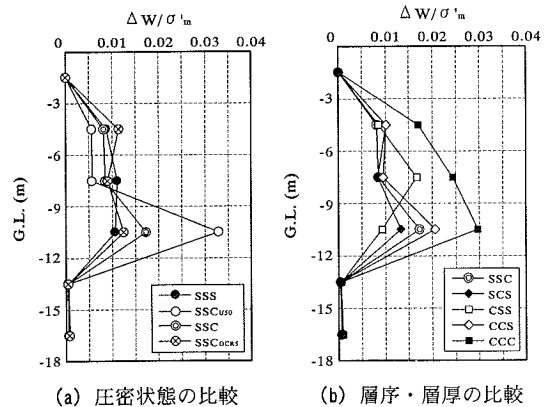


(a) 層序の比較



(b) 層厚の比較

図-17 加速度応答スペクトル



(a) 圧密状態の比較

(b) 層序・層厚の比較

図-18 累積損失エネルギーの深度分布

とが認められる。これは、L4層で地震エネルギーが大きく消費され、その上層へ伝達される地震動が抑制されたことによるものと考えられる。このことから、粘土の減衰効果はその剛性が低下することにより地震動の伝播を抑制することに加え、粘土の消費エネルギーが大ききことによるものであることが確認される。一方、層序・層厚の比較となる図-18(b)に関して、粘土層の下に砂層があるSCS、CSSおよびCCSの結果をみると、累積損失エネルギーの分布形状は、粘土層の直下の砂層で大きくなる形状となっている。このような分布形状は、図-16で示した最大せん断ひずみ γ_{max} のそれと類似したものである。しかしながら、下層に粘土層が位置するSSCでは、上層のL2層の最大せん断ひずみは大きかったが累積損失エネルギーは小さく、ひずみの分布形状とは一致していない。このことから、下層に粘土層が存在する場合には、粘土層の減衰効果により地震動の伝播は抑制されるが、粘土層は砂層に比べてより長周期側の成分を増幅させるため、液状化を生じて固有振動数が大きく低下した砂層に対してはひずみを増加させる方向に作用していると考えられる。

ところで、Kazamaら²⁷⁾は、兵庫県南部地震の際の埋立層となるK.P.-4mにおける累積損失エネルギーは0.016であったことをアレー記録から推定し、また加賀谷ら²⁸⁾は要素実験から求めたまさ土の累積損失エネルギーの上限値は約0.02であることを示している。本研究における液状化層の累積損失エネルギーはこれらと同程度であるが、粘土の累積損失エネルギーは0.03程度と大きな値となった。

7. まとめ

本研究では、層厚10m程度の液状化層を対象として、粘土層が地震動特性に与える影響に関して、粘土の圧密状態や層序・層厚を様々に変えてオンライン実験を実施し詳細に検討した。さらに、粘土層の層厚や配置を種々に変化させた実験を行い、粘土・砂互層地盤の地震動特性における粘土層の影響について検討を行った。ここで対象とした地盤モデルは、実地盤における全ての地盤構成に対応するものではないが、現実的なモデルであると考えられる。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 粘土の非線形履歴変形特性はその圧密状態に応じて異なることが確認された。またその違いが上層の液状化程度に影響を与え、上層のひずみの発生量は、未圧密・正規圧密・過圧密の順で大きくなることが明らかとなった。

- ② 液状化層の下に粘土層がある場合には、それが固有周期が短い構造物に対しては免震的な効果を発揮するが固有周期が長い構造物に対しては増幅傾向を示すことが明らかとなった。また、その免震効果は粘土層が深い位置にある場合にのみ有効であり、粘土層が上層に位置する場合には、固有周期が短い構造物の応答を増幅させることを示した。
- ③ 粘土層の深度を変化させた実験結果から、粘土層の直下でひずみの発達が顕著となることが確認された。
- ④ 粘土層が上層に位置するほど、その層厚が厚いほど地表面の応答加速度が大きくなることが明らかとなった。
- ⑤ 累積損失エネルギーは粘土層のほうが砂層よりも大きく、また過圧密・正規圧密・未圧密の順で増大することが確認された。
- ⑥ 下層に粘土層が存在する場合には、粘土層の減衰効果により地震動の伝播は抑制されるが、粘土層は砂層に比べてより長周期側の成分を増幅させるため、液状化を生じて固有振動数が大きく低下した砂層に対してはひずみを増加させる方向に作用していると考えられた。

謝辞：本研究を進めるにあたっては、オンライン地震応答実験の開発者である(株)奥村組日下部氏にご指導いただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Mendoza, M.J. and Arvinet, G: The Mexico Earthquake of September 19,1985:behavior of building foundations in Mexico City, *Earthquake Spectra Journal, EERI*, Vol.4, No.4, pp.835-853, 1988.
- 2) Yasuhara, K.: Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta earthquake: Discussion1, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, No.3, pp.582-583, 1999.
- 3) 土木学会耐震工学委員会：ロマプリータ地震震害調査報告、土木学会論文集, No.421/VI-13, pp.25-42, 1990.
- 4) 土木学会耐震工学委員会：ロマプリータ地震震害調査報告、土木学会論文集, No.422/I-14, pp.11-83, 1990.
- 5) 土木学会耐震工学委員会：ロマプリータ地震震害調査報告、土木学会論文集, No.424/III-14, pp.19-68, 1990.
- 6) 軟弱地盤における地震動増幅と被害に関する研究委員会：委員会報告、軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.152-155, 1994.
- 7) 福武毅芳：地盤特性を利用した免震基礎、2001年日本建築学会大会(関東)、パネルディスカッション資料、構造部

- 門(基礎構造)：新しい耐震基礎構造の可能性と課題，pp.17-29, 2001.
- 8) 明石信道：旧帝国ホテルの実証的研究，東光堂書店，pp.347-359, 1972.
- 9) Wright, F. L., 二川幸夫：グローバルアーキテクチャー—帝国ホテル(審判の日にそなえる建築)—，No.53, 1980.
- 10) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド，六甲アイランド)報告書，1995.
- 11) 土木学会地震工学委員会地震荷重研究小委員会：レベル2地震動と設計荷重の課題，1997.
- 12) 土木学会：特集 阪神大震災からの教訓，土木学会誌，Vol.85, pp.28-70, 2000.
- 13) Ohta, H., Hagino, Y., Udaka, Y. and Demura, Y. : Seismic amplifying effect of soft clay layers, *Proc. of the 14th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.859-862, 1997.
- 14) 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/III-58, pp.181-195, 2002.
- 15) 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層系砂質地盤の液状化挙動，土質工学会論文報告集，Vol.30, No.3, pp.174-184, 1990.
- 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/III-46, pp.299-304, 1999.
- 17) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版株式会社，1981.
- 18) Meyerhof, G.G. : Discussion of Session 1, *Proc. 4th ICSMFE*, Vol.3, p.10, 1957.
- 19) Imai, T. and Tonouchi, K. : Correlation of N value with S wave velocity and shear Modulus, *Proc. 2nd ESOPT*, pp.57-72, 1982.
- 20) 中島正愛，石田雅利，安藤和博：サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法，日本建築学会構造系論文報告集，No.417, pp.107-117, 1990.
- 21) 風間基樹，柳澤栄司，稲富隆昌：地表面応答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/III-40, pp.219-230, 1997.
- 22) 岩崎好規，諏訪靖二，山本浩司：地盤データベースによる東大阪の歴史地震被害と鋭敏粘土の解析，土木学会第46回年次学術講演会概要集，III, pp.18-19, 1991.
- 23) 片田敏行，阿部幸樹，東山 晃：ひずみエネルギー蓄積効果を用いた飽和砂地盤の液状化過程の考察，土木学会論文集，第388号/III-8, pp.43-50, 1987.
- 24) 風間基樹，鈴木崇弘，柳澤栄司：地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用，土木学会論文集，No.631/III-48, pp.161-177, 1999.
- 25) Sugano, T. and Yanagisawa, E. : Undrained shear behavior of sand under surface wave stress conditions, *Proc. of the 9th. Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.71-74, 1991.
- 26) Sugano, T. and Yanagisawa, E. : Cyclic undrained shear behavior of sand under surface wave stress conditions, *Proc. of the 10th. WCEE*, Vol.3, pp.1323-1327, 1992.
- 27) Kazama, M., Masuda, M., Yamaguchi, A. and Yanagisawa, E. : Liquefaction strength of decomposed granite soil inferred from array records, *Proc. of the 12th Engineering Mechanics Conf., ASCE*, pp.478-481, 1998.
- 28) 加賀谷俊和，風間基樹，柳澤栄司：定ひずみステップ載荷試験によるまさ土の液状化強度の評価，第53回土木学会年次学術講演会，pp.132-133, 1998.

(2003.5.14 受付)

ON LINE PSEUDO-DYNAMIC RESPONSE TEST ON STRATIFIED GROUND CONSISTING OF LAYERS OF CLAY AND SAND

Naoki TAKAHASHI, Masayuki HYODO, Norimasa YOSHIMOTO
and Yoichi YAMAMOTO

A series of on-line pseudo-dynamic response tests was conducted to investigate the influence of the degree of consolidation and layer thickness of clay on the earthquake response characteristics of alternating layers of clay and sand. The clay's nonlinear deformation characteristics and their influence on the response of contiguous sand layers were examined. The thickness and configuration of the clay layers were varied to investigate the overall influence of clay layers on the earthquake response characteristics of sand layered with clay. The relationship between the cumulative dissipation energy and the response properties of ground is discussed.