

# オンライン地震応答実験による粘土・砂互層地盤の地震動特性

## Seismic Response Properties of Stratified Ground by On-Line Pseudo-Dynamic Response Test

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

山本 陽一 YOICHI YAMAMOTO

三上 博 HIROSHI MIKAMI

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、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を明らかにし、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。

**キーワード**：粘土層、地震動特性、液状化、オンライン

A series of on-line pseudo-dynamic response tests have been conducted to investigate the influence of the degree of consolidation, layer thickness and other properties of clay on the earthquake response characteristics of alternating layers of clay and sand. First, the stress history and degree of consolidation of clay was varied to investigate the clay's nonlinear deformation characteristics, and their influence on the response and degree of liquefaction of sand layers. Then, the thickness and configuration of the clay layers were varied to investigate the overall influence of clay layers on the earthquake response characteristics of sands layered with clays.

**Key Words**: Clay layer, Nonlinearity, Seismic response, Liquefaction, Pseudo-dynamic test

### 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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。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が挙げられる。帝国ホテルの設計者 F.L.Wright 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<sup>4),5)</sup>、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<sup>6)</sup>。

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<sup>7)</sup>。山口ら<sup>8)</sup>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、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を明らかにしている。

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

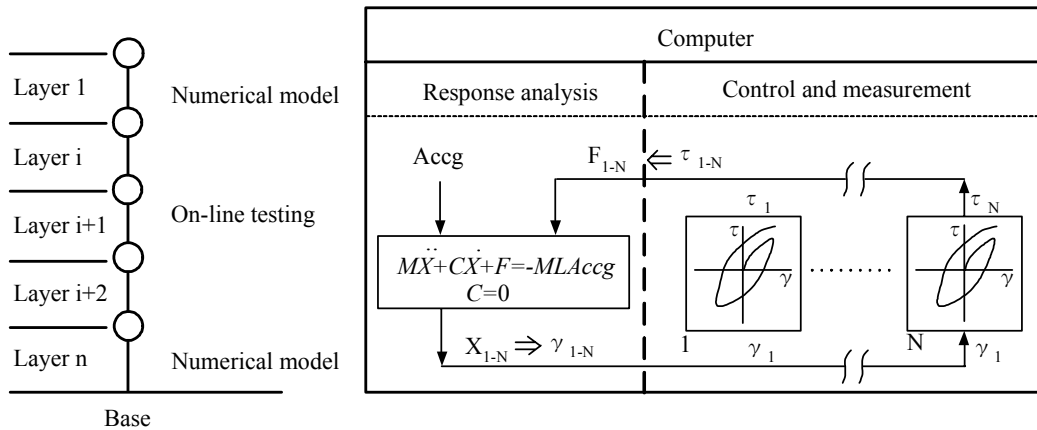


図-1 オンライン地震応答実験の概念

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。

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。

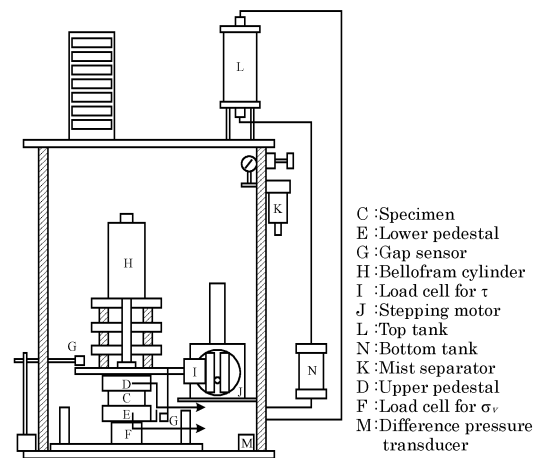


図-2 簡易単純せん断試験装置

## 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<sup>9)</sup>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に与え、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に示す日下部ら<sup>10)</sup>によ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<sup>11)</sup>。

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Ramberg-Osgood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台の簡易単純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変位を拘束し側圧一定で行った。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土（小野田粘土）と豊浦砂（ $\rho_s=2.643\text{g/cm}^3$ ,  $e_{\max}=0.973$ ,  $e_{\min}=0.635$ ）である。粘土は再構成試料とし、あらかじめ液性限界の2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 $\sigma_{vc}=10$ ,  $20\text{kPa}$ とそれぞれ1日ずつ段階的に载荷した後、 $\sigma_{vc}=50\text{kPa}$ 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 $\sigma_h'$ と異方分の有効軸方向応力 $\sigma_v'$ 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は、有効土

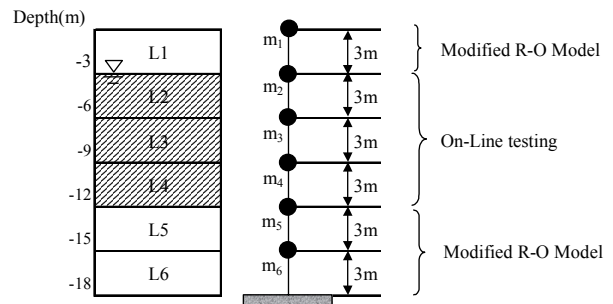


図-3 地盤モデル

表-1 小野田粘土の物性値

Name	$\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$W_L$ (%)	$W_p$ (%)	$I_p$	F.C. (%)	C.C. (%)
Onoda clay	2.601	80.9	34.9	46.0	84.5	37.5

表-2 実験ケース

Layer	TEST CASE							
	SSS	SSC <sub>(U50)</sub>	SSC	SSC <sub>(OCR5)</sub>	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 <sub>(U50)</sub>	Clay	Clay <sub>(OCR5)</sub>	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)	$\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\tau_f$ (kPa)	$G_0$ (kPa)	$\alpha$	$\beta$
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

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

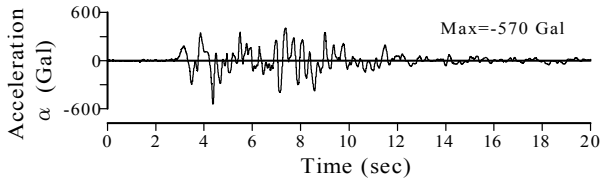


図-4 入力波

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<sub>U50</sub>が圧密度50%の未圧密粘土、SSC<sub>OCR5</sub>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、初期せん断剛性は所定の相対密度に対応した $N$ 値を求め、これを用いて計算したせん断弾性係数に拘束圧依存性を考慮して有効拘束圧の0.5乗に比例する形で算定した。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。

#### 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<sub>U50</sub>、SSCおよびSSC<sub>OCR5</sub>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。

##### (1) せん断応力 $\tau$ -せん断ひずみ $\gamma$ 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 $\tau$ -せん断ひずみ $\gamma$ 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 $\tau$ 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。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、粘土の剛性は最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。

##### (2) 加速度 $\alpha$ の時刻歴応答波形

図-6は各質点における応答加速度 $\alpha$ 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) 地震応答の周波数特性

表層波（質点m1）および入力波の応答スペクトルを図-7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<sub>U50</sub>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<sub>U50</sub>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<sup>12)</sup>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

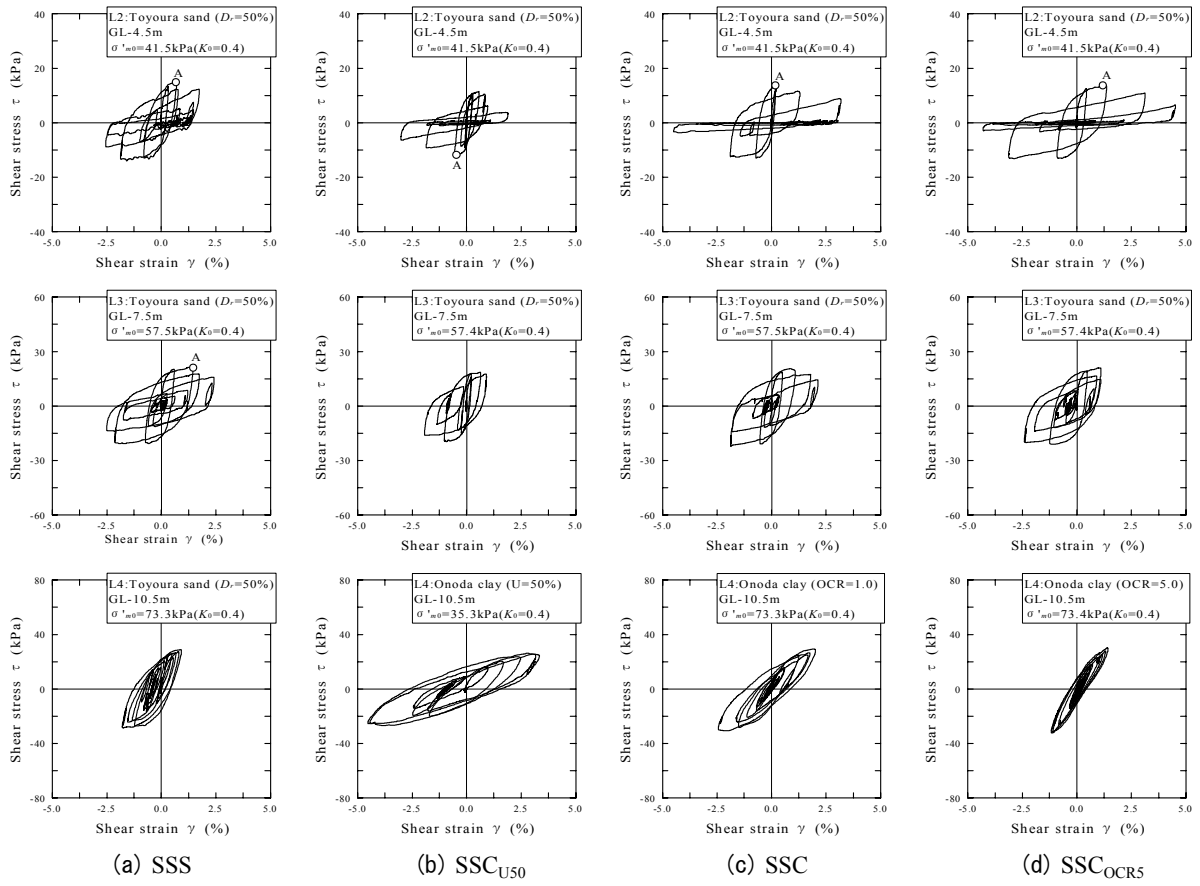


図-5 せん断応力  $\tau$  -せん断ひずみ  $\gamma$  関係

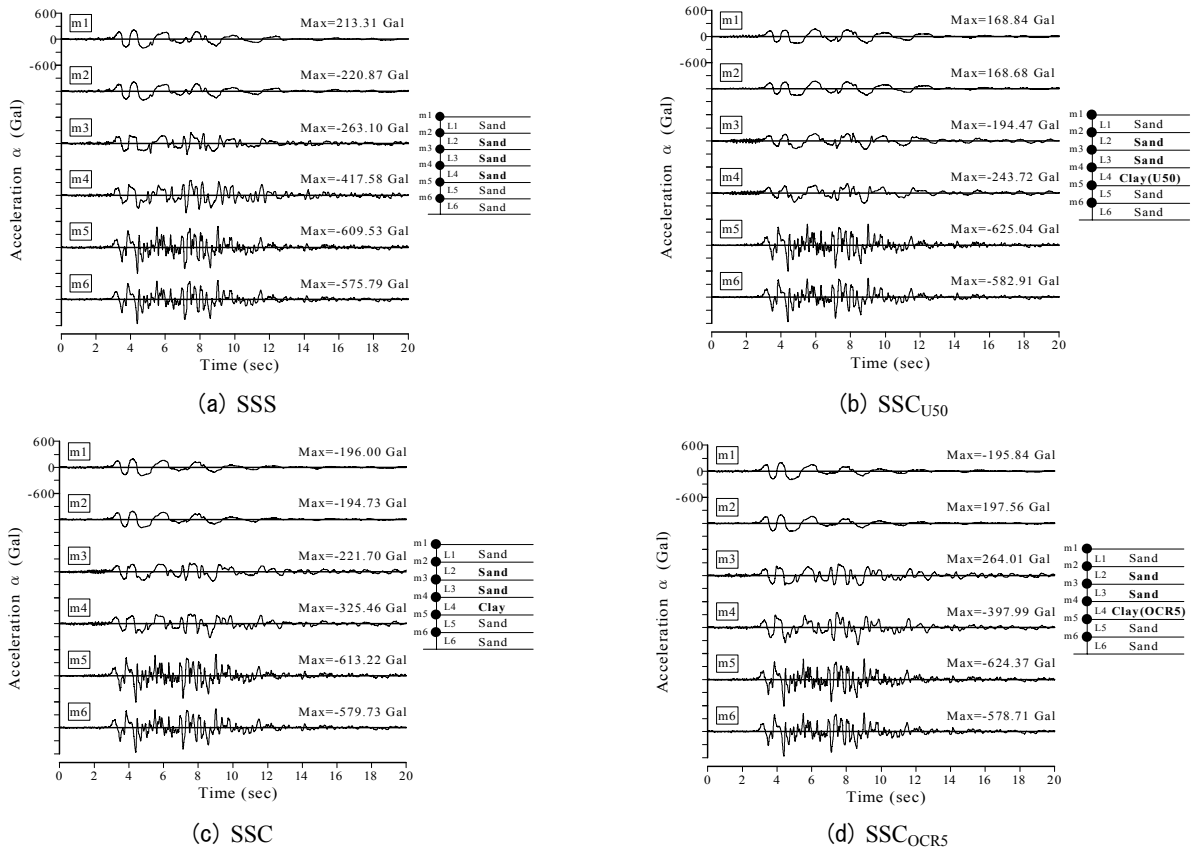


図-6 応答加速度  $\alpha$  の時刻歴

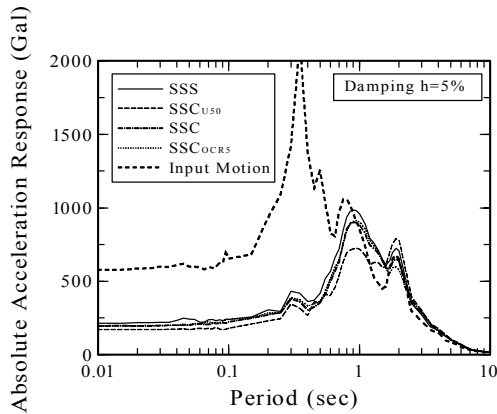


図-7 地表および入力波の加速度応答スペクトルの比較

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, CCS, 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 $\tau$ - せん断ひずみ $\gamma$ 関係および有効応力経路

図-8に SCS, CSS, CCS および CCC の L2 層～L4 層におけるせん断応力  $\tau$  - せん断ひずみ  $\gamma$  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。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。

#### (2) 加速度 $a$ の時刻歴応答波形

図-9は SCS, CSS, CCS および CCC における各質点の応答加速度  $a$  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。なお、地表面応答加速度は粘土層が上層に位置するほど、その層厚が厚いほどが大きくなるのがわかる。

#### (3) 地震応答の周波数特性

図-10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-10(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のがわかる。また、図-10(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. 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

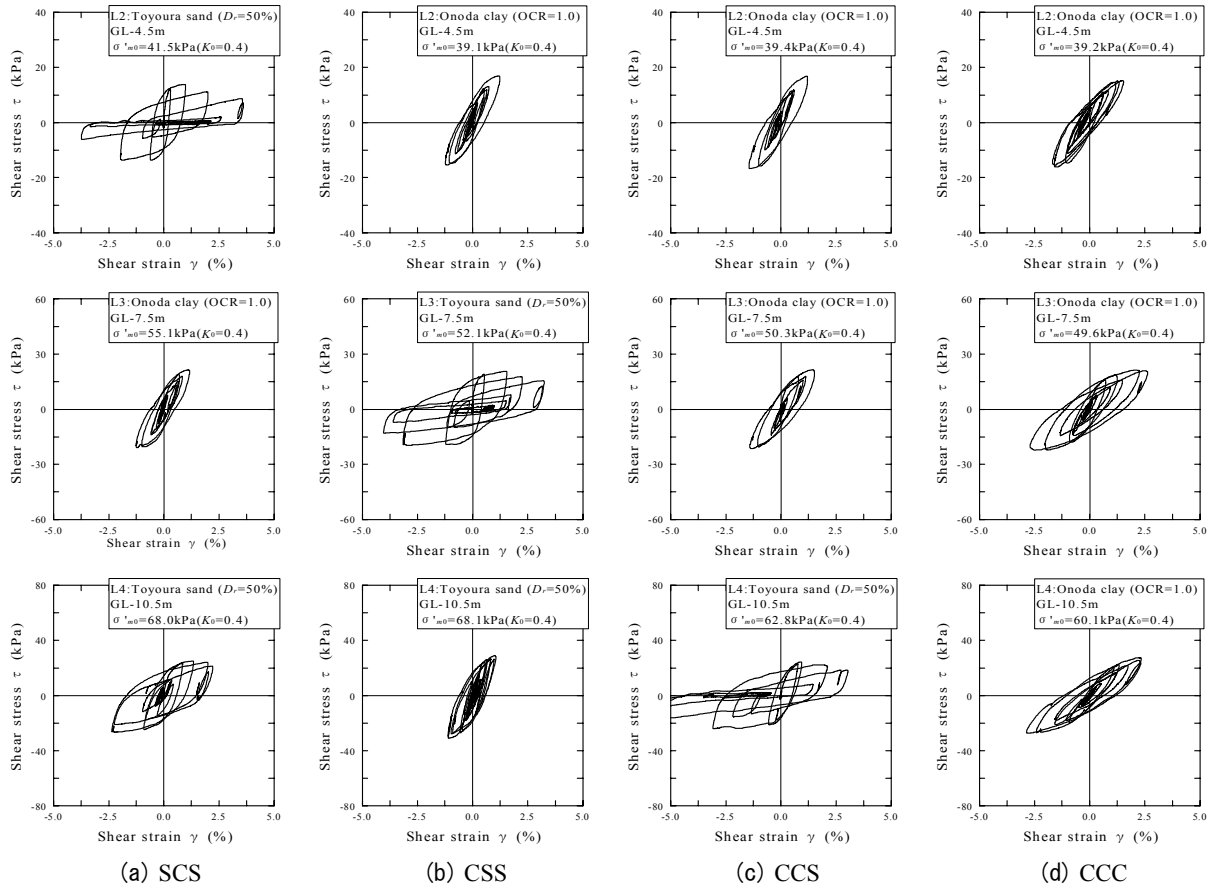


図-8 せん断応力  $\tau$  -せん断ひずみ  $\gamma$  関係

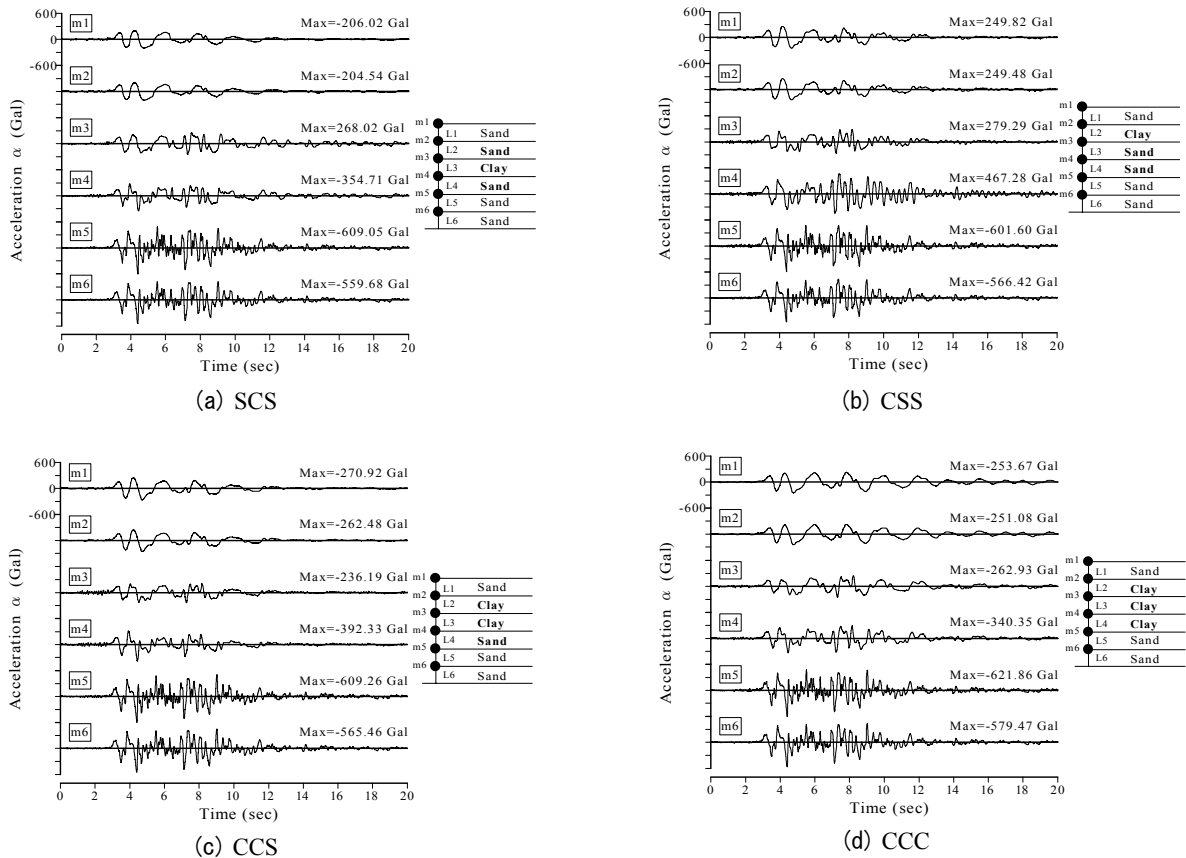
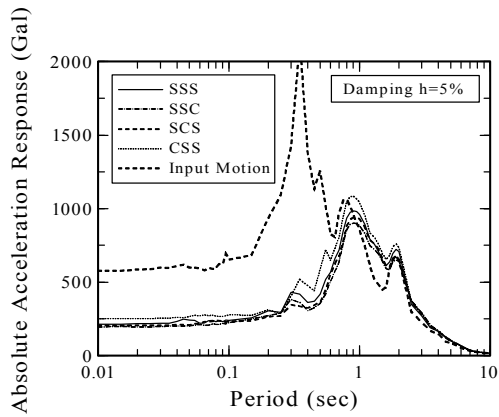
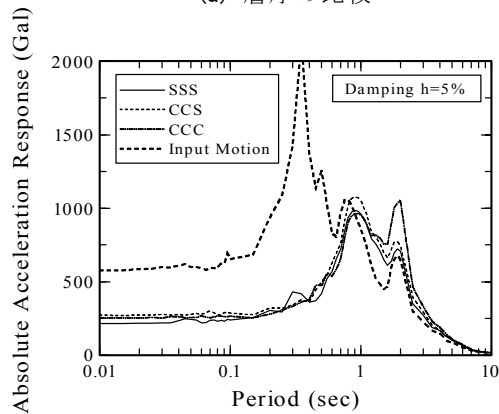


図-9 応答加速度  $\alpha$  の時刻歴



(a) 層序の比較



(b) 層厚の比較

図-10 加速度応答スペクトル

考えられる。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 粘土の非線形な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。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。

謝辞：本研究を進めるに当たっては、山口大学兵動正幸教授ならびに吉本憲正助手、オンライン地震応答実験の開発者である榎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 Auvinet, 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 Geotechnica Journal*, Vol.36, No.3, pp.582-583, 1999.
- 3) 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, 1994.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Ohta, H., Hagino, Y., Udaka, Y. and Demura, Y. : Seismic amplifying effect of soft clay layers, *Proceedings of the 14th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.859-862, 1997.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 柴田明德：最新耐震構造解析, 森北出版株式会社, 1981.
- 12) 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.