

# 液状化地盤における基礎構造物の振動性状 に関する基礎的研究

澤田 亮<sup>1</sup>・西村昭彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光明二丁目8-38)

E-mail : sawada@rtri.or.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 (株) ジェイ・エフ・総研(パブリック) (〒185-0034 東京都国分寺市伊二丁目8-38)

本研究では、液状化の進行に伴う基礎構造物の固有振動数の変動に着目して入力波の卓越振動数との関係で生じる過度的な共振現象を把握し、その際の動的応答特性を明確にすることを目的として模型振動実験を実施した。その結果、液状化進行中に共振状態となる場合、入力波の卓越振動数より若干低い振動数が卓越し、そのため過大な応答状態になることが観測された。また、基礎構造物周辺の液状化層の運動効果を考慮するため質量項に付加質量を考慮した簡易な動的解析法で、地盤の性状や構造物の固有振動数の変化による基礎構造物の複雑な挙動を把握することができた。さらに、基礎構造物に発生する断面力を推定する際に、この液状化層の運動効果の影響を考慮することにより精度よく算定することができた。

**Key Words:** *liquefaction, foundation, natural frequency, shaking table test, additional inertia force*

## 1. はじめに

地震時に生じる液状化現象の把握は、構造物の耐震設計を行う上で非常に重要な課題である。1964年の新潟地震以降、液状化を考慮した構造物の耐震設計法について精力的に研究が進められ、その成果は今日の耐震設計法に反映されている。液状化を考慮した構造物の耐震設計法は、液状化の程度により地盤の支持力等を低減させた条件で構造物の安定解析を実施し、安全性を照査することが一般的である<sup>1)</sup>。この場合、液状化抵抗率などの指標を用いて液状化程度を把握し、その値に応じて地盤反力係数などを低減している。

また、1995年の兵庫県南部地震で注目された液状化による地盤の側方流動に関する研究が各機関で盛んに実施され、側方流動を考慮した構造物の耐震設計法が提案されている<sup>2)</sup>。

しかし、これらの研究はいずれも液状化状態における構造物の性状を検討したものであり、液状化の進行に伴う構造物の挙動の時間的な変化に着目したものではない。液状化過程における構造物の挙動についての研究は数例しかなく、液状化の進行に伴う

構造物の性状がどのように変化するかを定量的に評価するに至っていない。

既往の研究によれば、液状化進行過程において、構造物の固有振動数が次第に減少していくこととなるため、入力波の卓越振動数との兼ね合いで、過渡的な共振現象が発生する場合があることも指摘されている<sup>3)</sup>。このことは、液状化を考慮した構造物の耐震設計を実施する上で、液状化進行過程における構造物の挙動の把握が極めて重要であることを示唆している。

一方では、液状化が発生しても側方流動が生じないような条件では、構造物の被災程度が近隣の液状化しない地盤条件上の構造物よりも小さい、いわゆる液状化免震の効果も報告されている<sup>4)</sup>。このことは、液状化を考慮する構造物の設計において、いたずらに構造諸元を大きくすることなく経済的な設計が可能であることを示している。

液状化地盤における構造物の挙動の変化は、液状化により地盤が軟化することによる強度の低下及び構造物に被災が生じた場合にはその影響による構造物の剛性低下による固有振動数の変化に関連している。

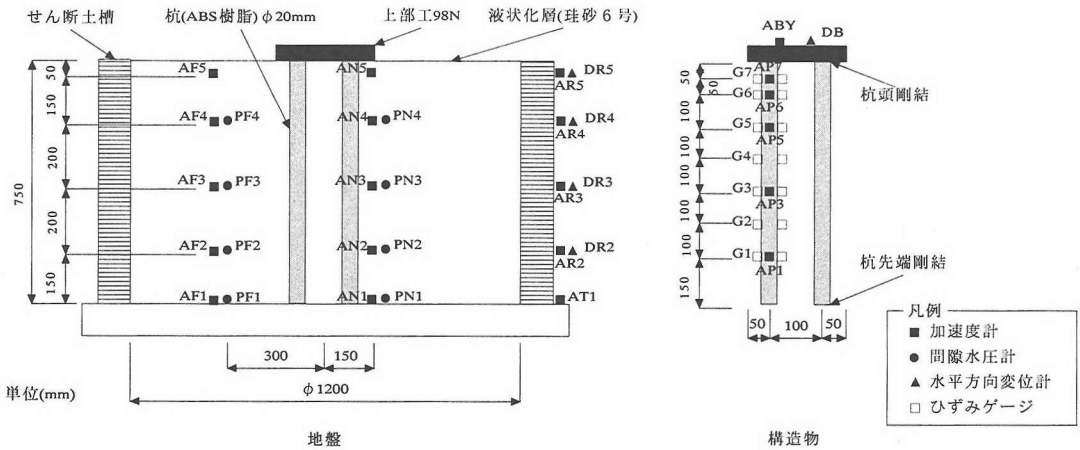


図-1 模型実験概要

液状化による構造物の被災原因は、側方流動の影響によるところが多いが、液状化過程における構造物の状況を把握することは、側方流動を含めた液状化地盤における構造物の合理的な耐震設計を構築することに繋がる。

そこで本研究では、上述の内容を踏まえて液状化の進行に伴う構造物の固有振動数の変動に着目して入力波の卓越振動数との関係で生じる過度的な共振現象などを把握し、その際の動的応答特性を明確にすることを目的とした検討を実施した。

## 2. 模型振動実験

実験は、液状化時の動的応答特性を明確にすることを目的とし、液状化地盤における構造物の固有振動数の変化を把握することを目的として、1 G場における振動実験を実施した。

### (1) 実験概要

実験は、図-1に示すように円形大型せん断土槽(φ=1200mm, h=750mm)を用い、土槽中央に基礎模型(4本杭)を配置して実施した。液状化層には珪砂6号(比重2.65, 最大間隙比1.13, 最小間隙比0.73, 均等係数1.62)を用い、水中落下法で目標相対密度を60%として作成した。ここで、間隙水には水を用いている。図-2には、地盤材料の変形特性を調べるための繰返し三軸試験結果より得られた実験に用いた地盤材料である珪砂6号のせん断弾性係数～ひずみ振幅関係を示す。試験は非排水条件で有効拘束圧98 kN/m<sup>2</sup>で行い、それぞれの載荷段階での10回目の繰返し載荷における等価ヤング率および履歴減衰

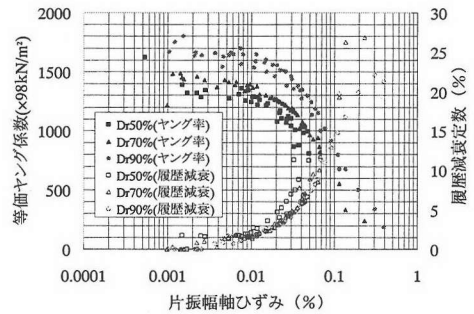


図-2 珪砂6号の動的変形特性

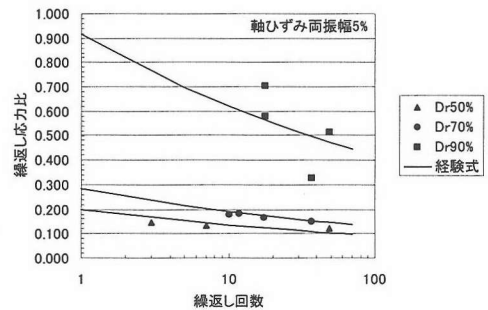


図-3 珪砂6号の液状化強度比～繰返し回数関係

率と片振幅ひずみの関係で整理している。これによると、相対密度の違いによる等価ヤング率および履歴減衰のひずみ依存性に大きな差はないと考えられる。また、規準ひずみは約0.005程度であり、最大減衰定数は0.3程度であると考えられる。なお、室内土質試験時に設定した拘束圧よりも模型実験時の有効拘束圧は低いことから、室内土質試験からは相対密度の違いによる影響を主眼に調査した。また、

表-1 実験ケース

ケース	相対密度	入力波		地盤-構造物系の固有振動数
		加速度	振動数	
CASE1	66.7%	150gal	20.00Hz	14.8Hz
CASE2	71.0%	300gal	7.00Hz	15.0Hz
CASE3	77.5%	80gal	1.00Hz	16.0Hz
CASE4	53.7%	200gal	2.24Hz	13.4Hz

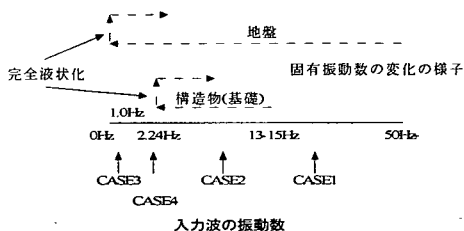


図-4 各ケースの対応関係

図-3には、土の繰返し非排水三軸試験より得られた珪砂6号の液状化強度～繰返し回数関係を示す。試験は有効拘束圧 98 kN/m<sup>2</sup>で行い、軸ひずみ両振幅5%が生じた時の繰返し回数とその際の繰返し応力振幅比で整理している。これによると、相対密度が70%程度までは軸ひずみ両振幅の違いによる影響は少ないことがわかる。また、経験的に定式化されている液状化強度比～繰返し回数の関係<sup>3)</sup>とよく一致していることもわかる。

図-1に土槽と計測点の概要を示す。地盤での計測項目は、各深度における地盤の応答加速度、応答変位、過剰間隙水圧である。また、せん断リングにも加速度計、変位計を設置した。

構造物模型については、基礎は4本杭として上部工は98Nの重量を考慮し、杭先端および杭頭ともに剛結とした。ここで、鉄道構造物の固有振動数は、過去において実施された起振機による振動試験あるいは常時微動測定などにより計測された結果から2 Hz以上であることが確認されており、杭基礎形式の橋脚については概ね5 Hz前後に分布していることが示されている<sup>1)</sup>。

また、模型振動実験においては実物の現象を正しくシミュレートすることが重要であり、一般的には実物と模型の相似関係を保つことが行われる。しかし、本研究では液状化を対象としており、相似則を満足するには土の粒度等や水の粘性を考慮しなければならないが現実的には困難である。本研究では、液状化状態における杭基礎構造物の動的挙動を把握することを主目的としている。このため、杭の挙動に支配的な要因を示す杭の特性値について実物と模型で等しくすることで、実物と同程度の動的特性を満足できるとものと判断した。

なお、この場合の模型の固有振動数は実物よりも大きくなるが、周期特性の変化を把握することが目的であるため、周期の変動範囲幅が大きい方が現象を捉えやすいことなどから上述に示した杭の特性値で模型条件を決定することとした。

よって、杭については曲げ変形が卓越するように考慮し、本実験における地盤条件において $\beta > 10$ となるような杭径および剛性を持つ材料を用いることとした( $\beta$ :杭の特性値,  $l$ :杭長)<sup>2)</sup>。検討の結果、杭径 $\phi 20$ mm, 曲げ剛性28700N/cm<sup>2</sup>からなるアクリル系合成樹脂材 (ABS:アクリロニトリル-ブタジエンスチレン共重合体)を使用した。この材料は、寸法安定性が良好で化学的に不活性である。また、高度の対衝撃性、対薬品性、耐熱性、耐候性を備えている。構造物における計測項目は、図-1に示すように上部工に加速度計および変位計を設置し慣性力を計測した。また、杭基礎にひずみゲージを設置し曲げひずみを計測し、発生断面力を推察した。

なお、地盤、構造物とも計測のサンプリング振動数は100Hzとした。

本研究においては、基礎に作用する荷重特性の把握を目的としており、液状化の発生メカニズムに関する検討を目的としていない。そのため、液状化の発生方法については、特に実現現象を忠実に考慮するものでない。したがって、正弦波による水平一方向加振により全層を確実に液状化させることとした。

ここで、実験は液状化時の動的応答特性を明確にすることを目的としているため、漸増正弦波による水平1方向加振として地盤-構造物系と入力波の固有振動数との関係に応じて表-1に示す4ケースとした。

各ケースは図-4に示すように対応し、液状化の進行に伴う地盤-構造物系の固有振動数の変化を把握できるよう考慮した。ここで、表中の入力加速度レベルは漸増波の最大値を示しており、入力波の振動数が異なる点を勘案し、経験的に設定した。

ここで、模型地盤は相対密度70%程度を目標として設定した。模型地盤の作成は水中落下法で行ったため多少のバラツキが生じたが、図-3の関係より20回における繰返し強度比の範囲がほぼ一定であることから、バラツキの範囲における影響は少ないと判断した。

また、構造物の初期条件を把握するため事前に予備試験として、自由振動試験、水平載荷試験および共振試験を実施した。

## (2) 予備試験結果

構造物の初期条件等を把握する目的で実験に先立

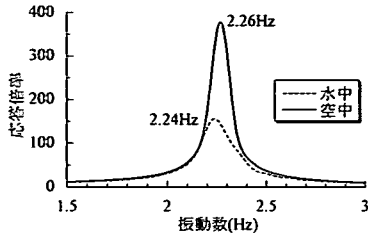


図-5 自由振動試験結果

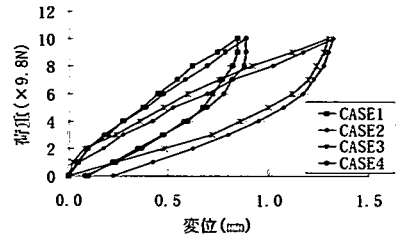


図-6 荷重～変位関係

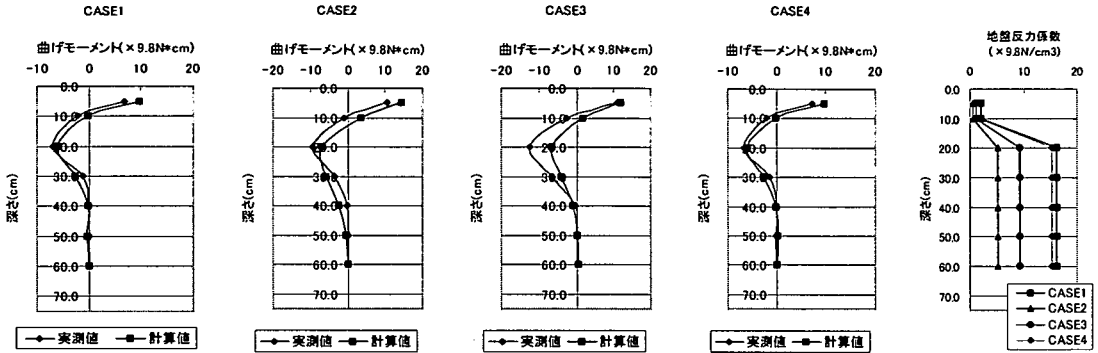


図-7 98N 載荷時の曲げモーメントおよび初期地盤反力係数

ち実施した予備試験の結果を以下に示す。

a) 自由振動試験

自由振動試験は、すべての実験に先立ち、実施した。実験は、液状化状態における地盤-構造物系の固有振動数の目安値を得るために実施し、土槽に構造物を設置した状態およびその後所定の位置まで水を注水した状態で構造物を自由振動させた。結果を図-5に示す。これによると、水中における構造物の固有振動数は2.2Hz程度であることがわかり、液状化状態における地盤-構造物系の固有振動数はこの振動数のよりも低いことが想定される。

b) 水平載荷試験

水平載荷試験は、初期状態すなわち液状化前における地盤反力係数の把握を目的として実施した。試験は、荷重制御で実施し、上部工の重量に等しい98Nまで9.8N/stepで載荷し、その後9.8N/stepで除荷した。得られた荷重～変位関係の結果を図-6に示す。また、98N 載荷時の杭頭変位および曲げモーメントの実測値を説明できる初期地盤反力係数を弾性床上の梁式を用いて繰返し計算から推定した。推定された初期地盤反力係数について図-7に示す。また、その際の曲げモーメントについても併せて示す。これによれば、深さ20cm以深についてはほぼ一定値と推測され、推定された初期地盤反力係数は相対密度が大きいほど小さくなる傾向を示している。しかし、

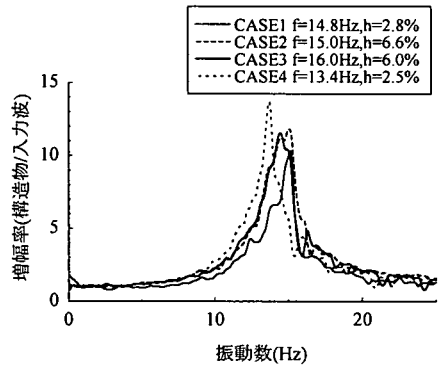


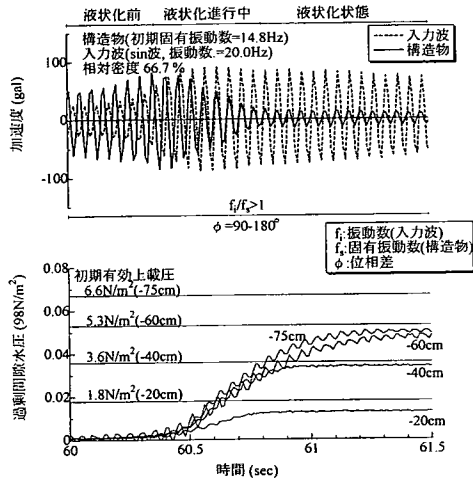
図-8 共振試験結果

深さ方向に対するバラツキは相対密度が大きいほど少ないことがわかる。これらは、相対密度が小さい方が杭頭付近における地盤の乱れの影響が大きいと考えられる。しかし、いずれのケースについても半無限長の杭としての曲げモーメント分布を示しており、 $\beta l > 10$ を満足していることが確認できる。

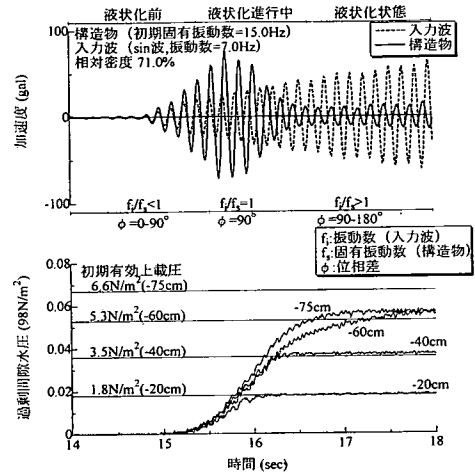
c) 共振試験

共振試験は、構造物及び地盤の初期固有振動数の把握を目的として実施した。試験は、広域周波数帯域を用いて加振し、液状化が発生しないように最大加速度10gal程度の加振レベルで実施した。

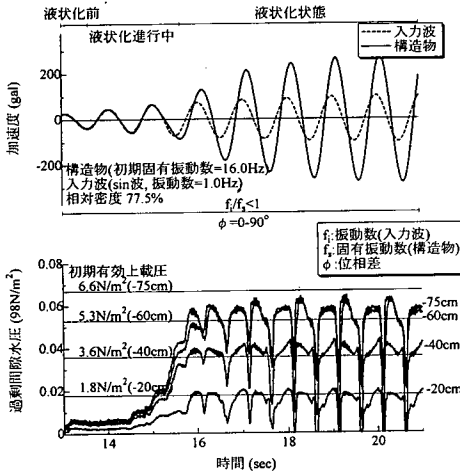
CASE1



CASE2



CASE3



CASE4

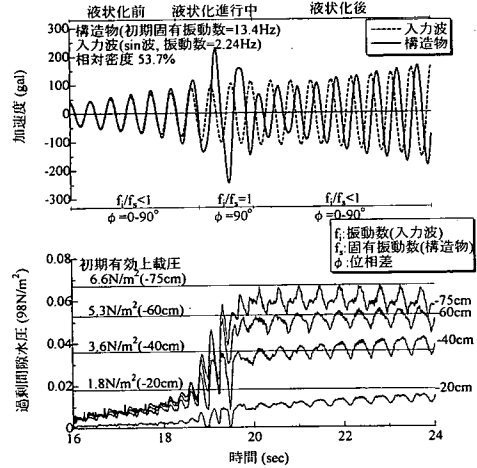


図-9 構造物の応答加速度および過剰間隙水圧の時刻歴波形

結果を図-8に示す。これによると、地盤-構造物系の初期固有振動数は概ね13~16Hzにあることがわかり、これからも地盤条件は各ケースとも大きな差がないと考えられる。

なお、広域周波数帯波の振動数特性は0.5~50Hzであり、地盤のみの初期固有振動数は地盤の周波数関数からこの範囲内にはないことが確認された。よって、地盤のみの初期固有振動数は50Hz以上であることが考えられる。

### (3) 実験結果

各ケースにおける代表的な構造物の応答加速度、入力波、過剰間隙水圧の時刻歴を図-9に示す。また、

発生曲げモーメントを図-10に示す。CASE1では構造物の固有振動数よりも大きな振動数を入力波の振動数とした。したがって、液状化の進行に伴い、構造物の応答値が減少する傾向になることを確認するのを目的とした。構造物の応答値は液状化前で最大値となっており、過剰間隙水圧が上昇し始めると応答値は減少している。位相差に着目すると液状化前では180°ずれているが、過剰間隙水圧が上昇するにつれてさらに位相がずれるのがわかる。

CASE2では地盤-構造物系の初期の固有振動数と液状化地盤中での固有振動数の中間の値を入力波の振動数とし、液状化進行中における過度的な共振現象の把握を目的とした。構造物の応答値は液状化進

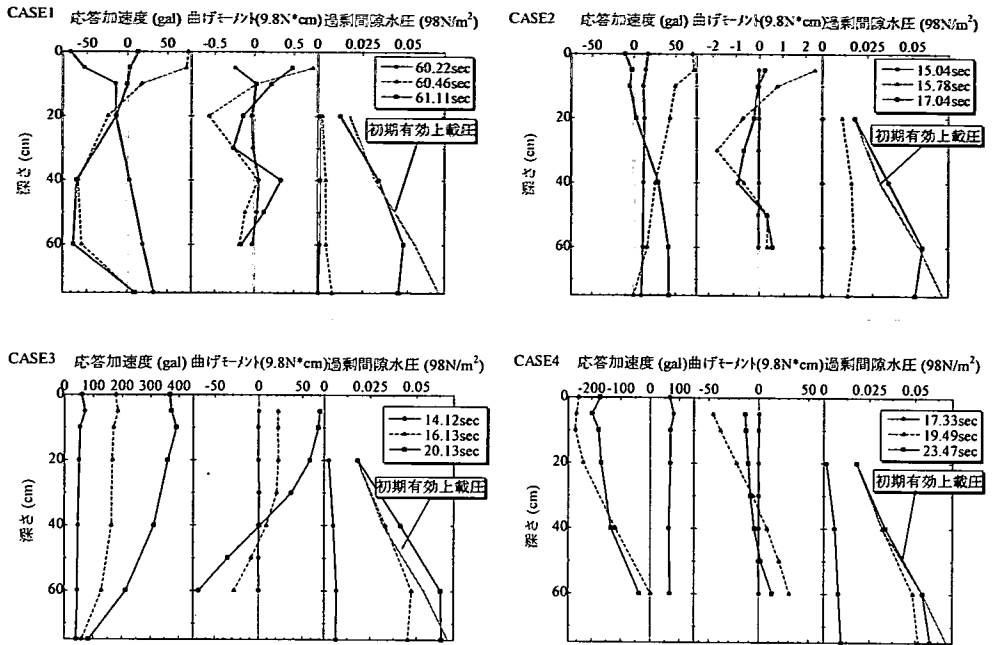


図-10 代表的時刻における杭の応答加速度および発生曲げモーメントの鉛直分布

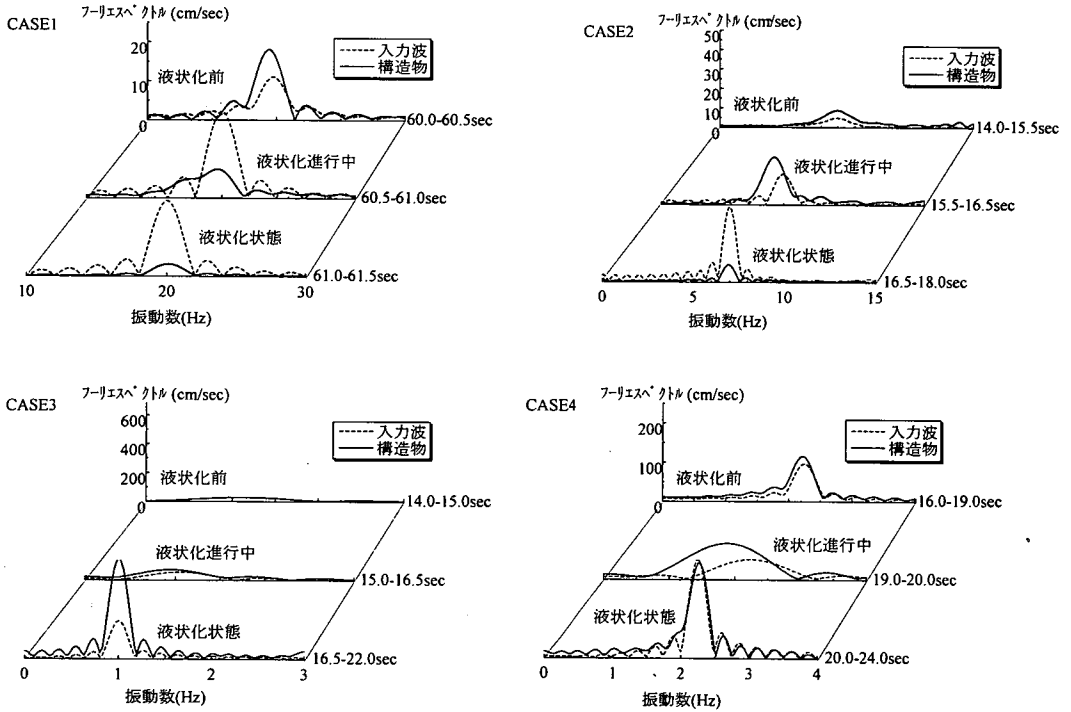


図-11 ランニングスペクトル

行過程で最大値を示している。入力波との位相差に着目すると、初期状態では同位相であるが、過剰間

隙水圧が上昇する過程においては位相が  $90^\circ$  ずれており、地盤-構造物系の固有振動数が低下し共振状

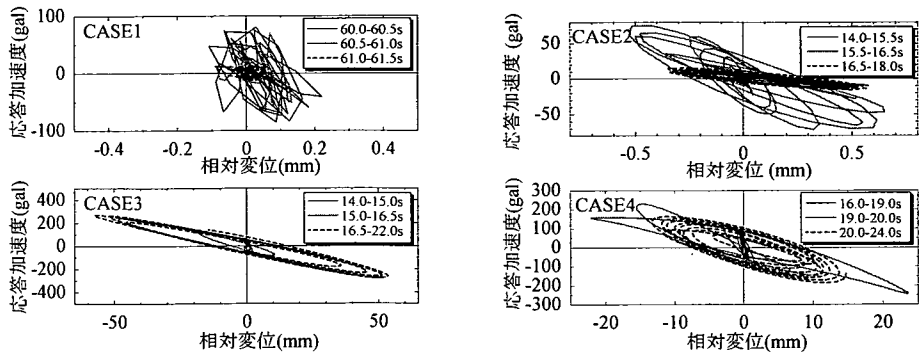


図-12 履歴性状の変化

態に移っていることがわかる。液状化後は逆位相になっており、さらに固有振動数が低下していることがわかる。

CASE 3 では地盤-構造物系の液状化地盤中における固有振動数よりも小さな振動数を入力波の振動数とした。この場合は、液状化の進行に伴い構造物の応答値が増加する傾向にあることを確認することを目的とした。構造物の応答値は液状化状態で最大となる傾向を示している。入力波との位相差に着目すると、初期状態では同位相であるが、過剰間隙水圧の上昇とともに位相のずれが生じている。液状化状態ではほぼ  $90^\circ$  ずれていると考えられ、地盤-構造物系の固有振動数が低下し共振状態に移っていることがわかる。

CASE 4 では地盤-構造物系の液状化時における固有振動数と同じ振動数を入力波の振動数とした。よって、完全液状化時における構造物の応答値の把握を目的とした。構造物の応答値は過剰間隙水圧が初期有効上載圧にほぼ等しくなった時点で最大値を示している。入力波との位相差に着目すると、初期状態では同位相であるが、過剰間隙水圧が上昇し、ほぼ初期有効上載圧と等しい時点では位相が  $90^\circ$  ずれており、地盤-構造物系の固有振動数が低下し共振状態に移っていることがわかる。液状化後は  $0 \sim 90^\circ$  と考えられ、さらに固有振動数が低下していることがわかる。

次に、固有振動数の変化を明確に確認するため、過剰間隙水圧が上昇する時刻付近におけるランニングスペクトルを求めた。図-11 に結果を示す。これらによると、過剰間隙水圧の上昇に伴いスペクトル値が増減しており、固有振動数が変化していることが明確にわかる。しかし、CASE 1 以外については、過剰間隙水圧が上昇中は構造物の共振曲線は入力波

の振動数と一致せず、若干低い振動数が卓越しているのがわかる。また、その場合には共振曲線の裾幅が広く、減衰定数が大きいことも予測される。

また、各ケースにおける構造物天端における応答加速度と応答相対変位の関係を過剰間隙水圧の上昇程度に応じて整理したものを図-12 に示す。CASE 1 は高い振動数による加振のため変位振幅が小さくその様子は顕著に現れてはいないが、その他のケースでは過剰間隙水圧の上昇に伴い、地盤ばねが低下していく様子が見られる。ここで、履歴ループの大きさは、CASE 2 では構造物の応答が大きくなる過剰間隙水圧の上昇中に最大となっている。CASE 3 では液状化状態で最大となり、CASE 4 では過剰間隙水圧が初期有効上載圧にほぼ等しくなった付近で最大となっている。なお、履歴減衰は過剰間隙水圧の上昇中が最大であることが推測され、前述したランニングスペクトルより推定される減衰定数と同様の傾向にあると考えられる。

図-13 には地盤-構造物系の固有振動数から推定される地盤ばねの低下程度と過剰間隙水圧の関係を示す。また、図-14 にはせん断土槽のせん断リングの変位から推定したせん断弾性係数と過剰間隙水圧の関係を示す。これらからも、過剰間隙水圧の上昇に伴い地盤ばねが低下していく様子を観察することができる。なお、履歴性状が明瞭でない CASE 1 の結果は反映させていない。

また、いずれのケースにおいても過剰間隙水圧比が 0.9 以上を維持している場合、目視による観測より液状化した地盤の挙動が流体的であることが確認された。

#### (4) 模型実験のまとめ

液状化進行過程における挙動について検討するた

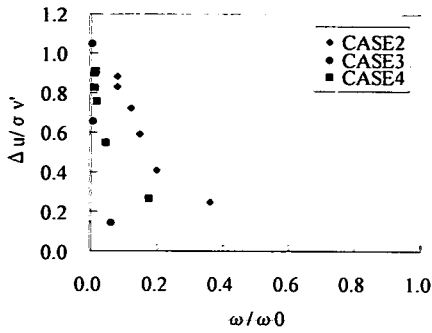


図-13 過剰間隙水圧比と円固有振動数の関係

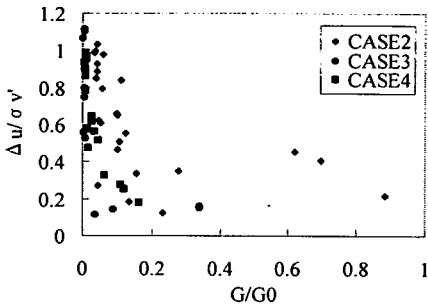


図-14 過剰間隙水圧比とせん断弾性係数の関係

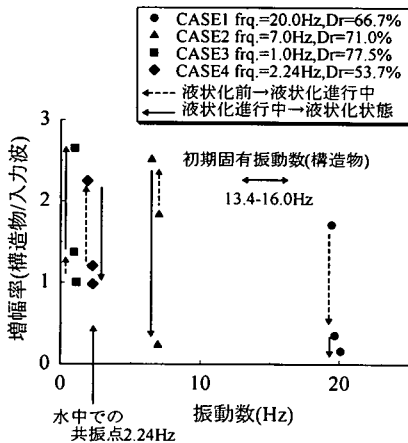


図-15 液状化の進行に伴う共振点の変化

め、液状化による構造物の固有振動数の変化に着目して1G場での模型振動実験を実施した。

その結果、構造物と入力波の関係において、液状化が進行する過程で過渡的な共振現象が生じることを確認した。また、ランニングスペクトルから構造物の加速度フーリエスペクトル値が、液状化の進行に伴い変化することを確認し、過剰間隙水圧の上昇

中では、入力波の卓越振動数よりも若干低い振動数が卓越する現象が確認された。

また、液状化進行過程に履歴性状の変化についても把握し、過剰間隙水圧の上昇中は履歴減衰が大きいたことが確認された。このことから、ランニングスペクトルで確認された卓越振動数に若干のずれが生じたと考えられる。

図-15には、液状化の進行に伴う共振点の変化の様子を示す。これによると液状化状態よりも低い振動数を入力波としたCASE3では、液状化状態において応答が増幅する傾向を示しており、水中における共振曲線と一致する傾向を示していない。

また、液状化状態での振動数を入力波としたCASE4においては、液状化状態では増幅の傾向が小さく、水中での共振曲線ほど増幅はしていない。これらのことは、液状化時の地盤-構造物系の固有振動数を水中での固有振動数と推定したが、実際には土の付加質量の影響で推定値より若干小さかったためと推測される。したがって、実際にはCASE3とCASE4の間に液状化時の固有振動が存在すると考えられる。この付加質量等の影響については空中と水中における共振曲線の差からも推測される。

### 3. 動的応答値の検証

模型振動実験で確認された構造物と入力波の関係において液状化が進行する過程で過渡的な共振現象が生じることなど、液状化の進行に伴ない動的応答値が変化する現象について数値解析により検証した。

#### (1) 解析モデル

動的応答値の推定は、構造物を1質点で表現し、地盤および杭をばねで表現する1質点系モデルによる時間領域における逐次非線形解析により実施した。この際、過剰間隙水圧の変化に応じて地盤のばね定数を変化させ、擬似的に有効応力の変化の影響を取り込む手法とした。

#### a) 運動方程式

動的解析モデルは非線形1質点系モデルとし、地盤は非線形、基礎(杭)は線形として考慮した。ここで、1質点系モデルは図-16に示すように、杭のみによるばねと地盤のみによるばねを並列で表現したモデルとした。

これは、液状化のように地盤の状態が劇的に変化するような現象を考えた場合、地盤の非線形性を単独で考慮の方が現象を容易にとらえることができると考えたからである。図-16に示すようにそれぞ



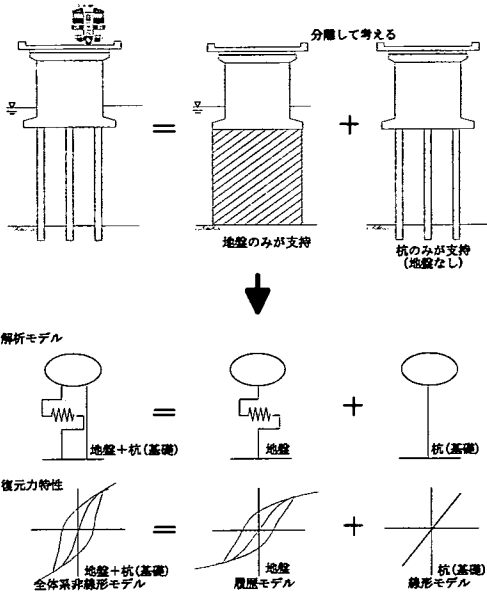


図-16 1質点系並列モデルによる解析イメージ

れの非線形特性を単独に考慮するため、複雑な非線形特性も比較的容易に考慮することができる。

なお、この場合杭と地盤を独立に考慮することになるので、動的相互作用を含むことはできない。そこで、この問題については杭周辺地盤の質量効果を考慮することで動的相互作用を近似することとし、地盤の付加質量を運動方程式の質量項に考慮することとした。ここで、模型振動実験結果によれば、過剰間隙水圧比が一定値以上を維持している場合の地盤の挙動が流体的であることが確認された。この場合、液状化地盤が杭に及ぼす荷重特性としては、杭の振動による周囲の液状化層（流体塊）の運動である付加慣性力効果<sup>2), 3)</sup>が想定される。その場合、上述したように杭周辺地盤の付加質量を運動方程式の質量項に加えることで付加慣性力効果を考慮することになるので、液状化状態においても杭周辺地盤の質量を考慮して解析を実施した。

また、地盤ばねについては、過剰間隙水圧の上昇程度に応じて骨格曲線および履歴曲線の変化をさせることとし、有効応力の変化を擬似的に考慮することとした。なお、並列型モデルは耐震壁など複雑な非線形特性を持つと考えられる部材の履歴性状をモデル化するために建築の分野で提案<sup>5)</sup>されているが、ここでは、地盤と杭の非線形特性に着目してこれらを組合せたことが新しい試みである。

この場合、運動方程式は式(1)のように表せる。

$$\ddot{x} + 2h(\omega_{str} + \omega_{soil})\dot{x} + (\omega_{str}^2 + \omega_{soil}^2)x = -\ddot{z} \quad (1)$$

ここに、 $\omega_{str}$ ：杭の固有円振動数、 $\omega_{soil}$ ：地盤の固有円振動数、 $h$ ：減衰定数である。

なお、減衰については、一般に逸散減衰、履歴減衰等がある。ここで、逸散減衰の効果については初期減衰として速度に比例した減衰定数で評価することとした。なお、履歴減衰の影響は地盤の非線形特性を履歴モデルで考慮することで評価されることになる。

ここで、模型振動実験の目視観測より過剰間隙水圧比が一定値以上を維持している場合の地盤の挙動が流体的であることが確認された。このことは、液状化地盤が構造物に及ぼす荷重特性を流体的な性質で近似できることを示唆している。この場合の荷重特性としては、構造物の振動による周囲の液状化層（流体塊）の運動である付加慣性力効果が想定される。そこで、質量項に付加質量を加え、付加慣性力効果を考慮した解析を実施することとした。

### b) 地盤材料の非線形特性

液状化時には過剰間隙水圧の上昇にともない、地盤のせん断耐力、せん断剛性が低下する。そこで、地盤の非線形特性は、過剰間隙水圧の上昇程度に応じて骨格曲線および履歴曲線の変化を考慮するモデルとし、骨格曲線を修正 R-0 モデルで表現し、履歴曲線は Masing 則に従うものとした（式(2)参照）。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{max}} (1 + \alpha |\tau|^\beta) \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma^* + \frac{1}{G_{max}} (\tau - \tau^*) \left[ 1 + \alpha \left( \frac{|\tau - \tau^*|}{2} \right)^\beta \right]$$

ここに、 $\gamma$ ：せん断ひずみ、 $\tau$ ：せん断耐力、 $G_{max}$ ：微小ひずみレベルでのせん断弾性係数、 $\gamma^*$ ：折り返し時のせん断ひずみ、 $\tau^*$ ：折り返し時のせん断耐力である。

ここで、式(3)で示される修正 R-0 モデルの骨格曲線および履歴曲線の  $\alpha$ 、 $\beta$  については、 $\beta$  すなわち  $h_{max}$  は過剰間隙水圧によらないとし、 $\alpha$  については規準ひずみを近似的に式(3)で表現すると、式(4)に示すようになる。ここで、式(4)における地盤剛性を過剰間隙水圧の関数とすれば、 $\alpha$  も過剰間隙水圧の関数となる<sup>6)</sup>。

$$\gamma_{0.5} = \gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}} \quad (3)$$

$$\alpha = \left( \frac{2}{\gamma_{0.5} G_{max}} \right)^\beta = \left( \frac{2}{\tau_{max}} \right)^\beta \quad (4)$$

ここに、 $\gamma_{0.5}$ ： $G \sim \gamma$  関係で  $G$  が  $G_{max}$  の 1/2 になるときのせん断ひずみ、 $\gamma_r$ ：規準ひずみ、 $\tau_{max}$ ：最大せん断耐力である。

過剰間隙水圧過剰間隙水圧の上昇による地盤剛性

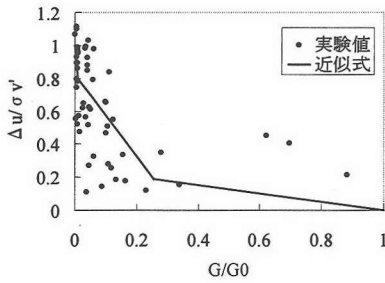


図-17 過剰間隙水圧比とせん断弾性係数の関係

の低下程度は式(5)で示す模型振動実験結果から得られた図-14に示す関係によることとした。ここで、図-14で示された過剰間隙水圧比とせん断弾性係数の関係には有効上載圧との相関がないことから、式(5)は過剰間隙水圧比に応じたせん断弾性係数の低減程度を評価するものとした。図-17には図-14と式(5)の関係比較したものを示す。なお、低減後のせん断耐力についてはモール・クーロンの破壊基準により算定することとし、その際に有効上載圧は過剰間隙水圧の上昇に応じて低下し、内部摩擦角は図-17の関係に準じて低減するとして考慮した。

$$\begin{aligned} \frac{G}{G_0} &= -4.0 \left( \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \right) + 1.0 & \left( 0.0 < \left( \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \right) < 0.186 \right) \\ \frac{G}{G_0} &= -0.4 \left( \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \right) + 0.33 & \left( 0.186 < \left( \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \right) < 0.8 \right) \\ \frac{G}{G_0} &= -0.05 \left( \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \right) + 0.05 & \left( 0.8 < \left( \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \right) < 1.0 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $G/G_0$ :せん断弾性係数の低下率、 $\Delta u/\sigma'_v$ :過剰間隙水圧比である。

## (2) 実験結果のシミュレーション

上述した手法により実験結果をシミュレーションした。表-2に解析条件を示す。

ここで、杭体のばね定数は図-5に示す水中(地盤のない状態)における自由振動実験結果より推定した。なお、ここでは実験モデルが杭上下端ともに固定条件であることから回転ばねは考慮しないこととした。

また、地盤のばね定数については、共振試験で確認された初期条件における地盤-構造物系の固有振動数と一致するように定めた。表-2には設定した条件での各ケースにおける初期固有振動数も示してある。これらによると、概ね設定した解析モデルは実験値を満足していることがわかる。

なお、1質点系でモデル化したことによる地盤ばねの非線型特性は規定する地盤のせん断耐力などに

表-2 解析条件

ケース	CASE2	CASE3	CASE4
質量	構造物	98N	
	付加	631.8N	
杭	ばね定数	19.8N/cm	
地盤	初期せん断弾性係数	1078.0N/cm <sup>2</sup>	980.0N/cm <sup>2</sup>
	逸散減衰	0.02	
初期固有振動数	実験	15.00Hz	16.00Hz
	解析	14.71Hz	14.03Hz
		13.40Hz	13.68Hz

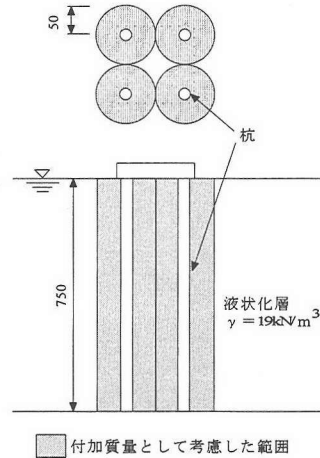


図-18 付加質量の範囲

については、実験より過剰間隙水圧比が1.0となった最下端(-600mm)における値を用いることとした。したがって、過剰間隙水圧についても最下端における値を用いた。

前述した液状化地盤の荷重特性を評価するために考慮する付加慣性力については杭基礎の振動の影響範囲が不明確であるため、模型実験より得られた地盤-構造物系の固有振動数を説明できる付加質量の範囲を試行錯誤的に検討した。その結果、液状化状態における地盤-構造物系の固有振動数を概ね説明できる付加質量として図-18に示すように杭径の5倍の範囲における土塊について考慮することとした。

図-19に応答加速度の時刻歴について実験値と比較した結果を示す。また、図-20には履歴性状を比較したものを示す。なお、実験のシミュレーションは液状化進行中あるいは液状化状態での応答が顕著であるCASE2, 3, 4について実施した。

液状化進行中の共振現象を想定したCASE2では、過剰間隙水圧が1.8N/m<sup>2</sup>付近(過剰間隙水圧比0.4)で共振していることがわかる。また、実験値と解析値の応答加速度の時刻歴を比較した結果、解析値は実験値よりも若干大きめの値を示しており、共振現象以降の挙動については乱れがあるものの、概ね実

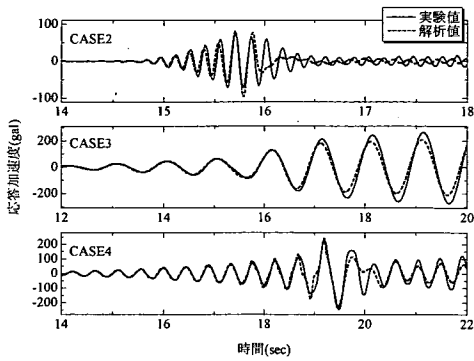


図-19 応答加速度の時刻歴波形の比較

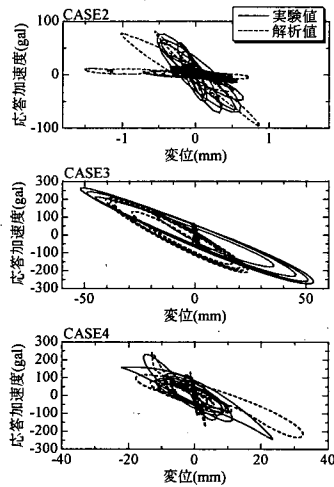


図-20 履歴性状の比較

験値を説明できていると考えられる。また、解析値は変位が大きく、共振現象中の履歴ループが少ない。これは、共振現象以降の地盤の急激な剛性低下の影響で変位が急増しているためと考えられるが、全体的な傾向は説明できていると考えられる。

過剰間隙水圧が上昇するにつれて共振現象に近づくことを想定した CASE 3 では、解析値は実験値より若干小さめの値を示している。これは、液状化時の地盤-構造物系の固有振動数および減衰定数の評価の影響と考えられる。しかし、解析値は実験値の傾向をよく説明できていると考えられる。

液状化直後（過剰間隙水圧比 1.0）の共振現象を想定した CASE 4 では、解析値は液状化進行中の共振現象を想定したケースと同様に共振現象以降の挙動については乱れがある。これは、液状化直後の地盤-構造物系の固有振動数を水中（地盤のない状態）における振動試験より推定し、その振動数を入力振動数としたものであるが、実際には付加質量の影響な

どでこの振動数よりも低い振動数が液状化直後の振動数であったため、CASE 3 と同様に液状化進行中に共振現象を想定したようになったためと考えられる。しかし、解析値は概ね実験値を説明できていると考えられる。

なお、液状化直後の地盤-構造物系の固有振動数は 1.25Hz 程度であり、これは水中における固有振動数に付加質量を考慮したものに等しい。従来は水中（空中）における固有振動数を液状化時における地盤-構造物系の固有振動数と仮定していたが、これに付加質量を考慮するモデルの方が良好であることが分かった。

### (3) 発生断面力の検証

模型振動実験の結果から、液状化した地盤の挙動が流体的であることが確認されている。また、上述した動的応答値の検証解析結果からも付加慣性力の影響を無視することはできないと考えられる。この場合、液状化地盤の付加慣性力は基礎に対してその影響を無視することはできないと考えられる。すなわち、付加慣性力は軟弱地盤における地盤変位荷重と同様な地盤からの外力としての性質を持つものと考えられる。そこで、液状化地盤中の基礎構造物に発生する断面力を算定する上で、流体的な性質で近似される液状化地盤の付加慣性力を液状化地盤の流体の慣性による力に等価であるとして考慮して杭に対する断面力を検証した。

また、液状化に至る過程では地盤のひずみが増大することから地盤変位に依存する土圧的な外力が杭に与える影響を考慮することが考えられる。しかし、この場合は過剰間隙水圧の上昇に伴い地盤反力係数が低減することでその影響程度はあまり大きくないことも推察される。よって、杭の発生断面力の検証に際して、杭の断面力は付加慣性力による外力と地盤変位に依存する土圧が外力として作用することにより発生すると考える。

したがって、杭の断面力を算定する際の静的解析モデルは図-21 に示すようにモデル化し、杭に発生する断面力は弾性床上の梁による方法を用い、式(6)の関係で示されるように考えることとした。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = (F_{add} + F_G) - (\eta \dot{y} + k_h D y) \quad (6)$$

ここに、 $EI$ : 模型杭の剛性 ( $N \cdot cm^2$ )、 $\eta$ : 液状化地盤の粘性係数 ( $N \cdot sec/cm^2$ )、 $\dot{y}$ : 模型杭の変位速度 ( $cm/sec$ )、 $k_h$ : 地盤反力係数 ( $N/cm^3$ )、 $y$ : 模型杭の変位 ( $cm$ )、 $D$ : 模型杭の直径 ( $cm$ )、 $F_{add}$ : 付加慣性力 ( $N/cm$ )、 $F_G$ : 地盤変位に依存する土圧 ( $N/cm$ ) である。

ここで、右辺第 1 項は外力項で液状化地盤の付加

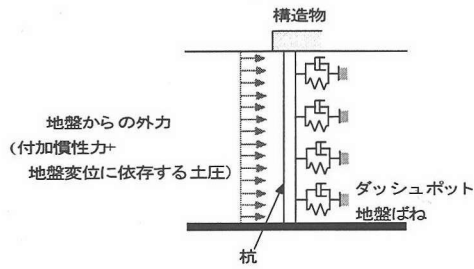


図-21 静的解析モデルの概要

慣性力と地盤変位に依存する土圧的な外力が作用することを表現している。第2項は杭の運動による地盤からの反力項で、液状化地盤の挙動が流体的であることから外力の作用による杭の変形速度に比例する粘性減衰力が抵抗として作用することを考慮している。また、杭の変形量に比例する地盤反力についても抵抗として作用することを表現している。

ここで、流体の慣性による力は、構造物が静止流体中を運動している場合と構造物は静止状態で流体が運動している場合が考えられる。ここでは構造物が振動している場合の検証解析であることから前者を考慮する。また、杭は円柱であることを考慮するとこの場合の算定式は式(7)で表現される<sup>7)</sup>。

$$F_{add} = \pi A^2 \frac{\gamma}{g} \alpha_{(t)} \quad (7)$$

ここに、 $F_{add}$ : 単位長さ当たりの流体の慣性力 (N/cm),  $\alpha_{(t)}$ : 応答加速度 (gal),  $\gamma$ : 液状化層の単位体積重量 (N/cm<sup>3</sup>),  $A$ : 考慮する流体の有効半径 (cm),  $g$ : 重力加速度 (gal) である。

ここで、付加慣性力の考え方を図-22 に示す。流体の慣性力は杭の全長で考慮し、動的解析で考慮した付加質量と等価になる範囲について考え、図-22 に示すように杭に作用するものとした。この場合、流体の慣性力は杭の振動に起因して発生することから、流体の慣性力は杭の応答加速度を用いて算定することとした。

また、過剰間隙水圧比に応じて地盤反力係数が低減することを考慮した。地盤反力係数の低減は過剰間隙水圧の上昇による地盤のせん断弾性係数の低下で考慮することとし、その低下程度は図-7 に示す水平載荷試験より得られた初期地盤反力係数を過剰間隙水圧比に応じて式(5)に示す関係より低減した。

解析は、図-10 に整理した液状化進行中および液状化状態とし、図中の時刻における杭の応答加速度および過剰間隙水圧比を用いた。また、杭頭および杭先端の固定条件が剛結であり、水平変形のみが卓越する構造であるため、4本杭を1本の等価な杭に

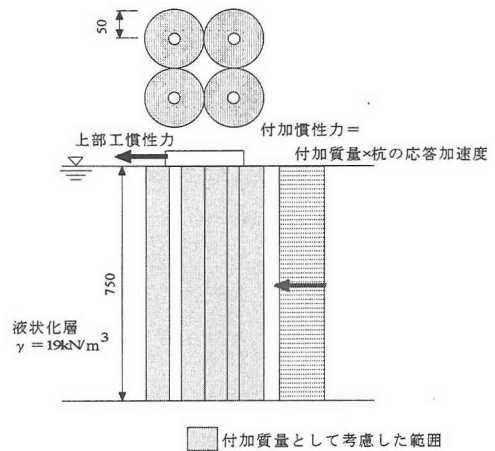


図-22 杭に作用する付加慣性力

置換して解析を実施した。よって、すべての杭に均等に外力が作用することを想定している。

解析結果を図-23 に示す。いずれのケースにおいても付加慣性力の影響を考慮することで実験値を概ね説明できていると考えられる。特に、過剰間隙水圧が十分に上昇し、完全な流体的な性状であると想定される場合にはよい一致を見せている。また、付加質量を考慮した動的解析結果との整合性も満足する結果となった。

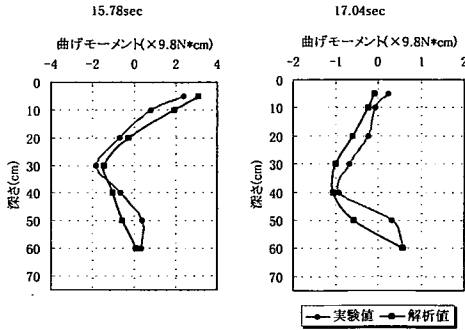
ここで、図-24 に示すように過剰間隙水圧が上昇する過程においては地盤変位による土圧の影響が残っていると考えられ、CASE2 ではその傾向が顕著である。しかし、過剰間隙水圧が十分に上昇した場合には地盤反力係数の低減程度が大きいこと、杭の断面力に及ぼす影響は小さいことが想定される。なお、図-24 に示している地盤変位による土圧は地盤と杭との相対変位による荷重である。

また、解析の対象としている時刻は、杭の応答加速度のピーク値で考えている。したがって、杭の変形速度は0であるため、変形速度に比例する地盤からの抵抗としての粘性減衰力は作用しないので解析では粘性減衰力の影響を考慮していない。

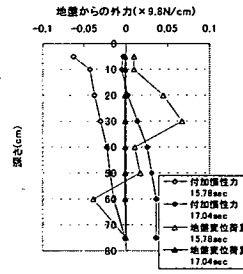
一般に軟弱地盤では地盤変位荷重を考慮する応答変位法<sup>8)</sup>が適用される。液状化地盤でもこれに習う場合が多いが、この場合液状化地盤の地盤変位量の推定や地盤反力係数との関係などに課題が残る。

しかし、本研究で示した方法による解析結果では動的解析結果とも整合していることなどからも液状化状態では地盤変位荷重よりも杭の応答加速度による付加慣性力が支配的であることを示唆するものとなった。

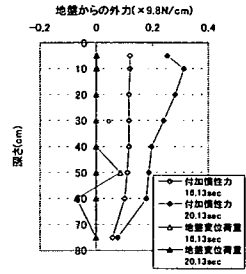
CASE2



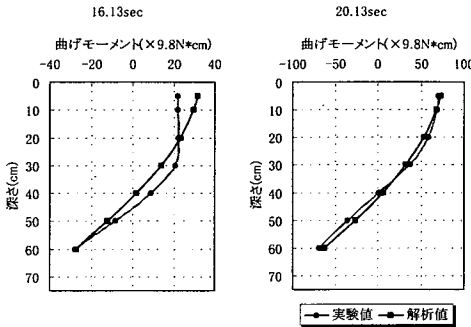
CASE2



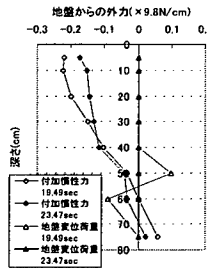
CASE3



CASE3



CASE4



CASE4

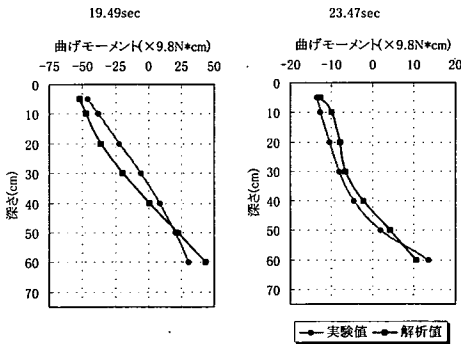


図-24 地盤からの外力の比較

図-23 曲げモーメント分布の比較

(4) 数値解析のまとめ

非線形1質点系の並列型モデルを用いて実験結果より得られた構造物の動的応答値の検証を実施した。また、弾性床上の梁理論により基礎の発生断面力の検証も実施した。

その結果、液状化地盤中の構造物の応答値を推定する際、基礎構造物周辺の液状化層の運動効果を考慮することで固有周期などの振動特性を的確に把握できることがわかった。これは、液状化地盤の質量効果として付加慣性力を考慮して解析することで良好な結果を得ることができるが、このことは液状化

地盤を流体的性質で近似できることを示唆している。

また、解析に用いた並列型モデルは、過剰間隙水圧比が0.6~0.8付近で急激に応答値が低下することで変位が急増するなど実験結果をうまく説明できていないケースもあるが、全体的にはよく実験結果を説明していると考えられ、並列型モデルによって液状化時の構造物の挙動を把握することが可能であるとえられる。

この並列型モデルを用いれば、今回の解析では線形とした杭部材についても非線形特性を導入することで、容易に地盤、杭の非線形特性を考慮した液状化地盤における構造物の動的解析が実施できると考えられる。

しかし、実構造物を1質点系モデルに置換した場合に地震動の入力位置および地盤全体を考慮した過剰間隙水圧の設定等課題も多い。

また、過剰間隙水圧に応じた地盤の非線形特性の変化モデルについての検証を室内土質試験結果の解析により実施する必要がある。

4. まとめ

液状化の進行に伴う構造物の固有振動数の変動に着目した動的応答値の検討を実施した。

その結果、1 G 場における模型振動実験より、構造物と入力波の関係では、液状化が進行する過程で過渡的な共振現象が生じることを確認した。また、ランニングスペクトルから構造物の加速度フーリエスペクトル値が、液状化の進行に伴い変化することを確認し、過剰間隙水圧の上昇中は履歴減衰が大きいため、その場合に共振状態になると入力波の卓越振動数より若干低い振動数が卓越し、過大な応答状態になることが推測された。このような現象は、実地震波においても地震波の卓越振動数との関係で起こりうる可能性があり、実験で示されたように液状化に至る過程における地盤-構造物系の固有振動数との関係では完全液状化状態になる前の段階で応答値が大きくなり構造物が損傷する可能性があると考えられる。

また、実験結果のシミュレーション解析より、液状化地盤中の構造物の応答値を推定する際、基礎構造物周辺の液状化層の運動効果を付加質量として考慮することで固有振動数などの振動特性を的確に把握できることがわかった。なお、基礎構造物に発生する断面力についても、この液状化層の運動効果を付加慣性力として考慮することで精度よく把握することもわかった。これらのことは液状化地盤を流体的性質で近似できることを示唆している。

さらに、解析に用いた非線型 1 質点系の並列型モデルを用いることで液状化のように劇的に地盤の性状が変化するような場合においても構造物の動的挙動を比較的簡易に精度よく把握する可能性を見出した。なお、本解析モデルを実構造物の設計に適用するには、構造物の静的非線型解析より得られる荷重～変位関係を地盤-構造物系の骨格曲線として評価し、ばね定数および復元力特性を設定することが考えられる。しかし、この場合は静的非線形解析における作用荷重の増加に伴う過剰間隙水圧の評価およびそれに応じた地盤反力係数の低下程度との関係と動的解析における過剰間隙水圧の上昇程度と地盤の剛

性の低下程度との関係についての整合性の評価などに課題が残されている。

以上のことから、液状化地盤における構造物の動的応答特性（振動性状）の時間的変化を把握することができ、液状化地盤における地盤-構造物系の動的相互作用を検討する上での基礎資料を得ることができた。

謝辞：模型振動実験の実施にあつては、東急建設（株）技術研究所に絶大なるご協力をいただいた。末筆ではあるが記して謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 例えば、日本国有鉄道：建築物設計標準（基礎構造物・抗土圧構造物），1986年3月。
- 2) 澤田亮，西村昭彦：液状化による地盤の側方流動が基礎構造物に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集，第694号/Ⅲ-57，pp. 1-16，2001。
- 3) 岩崎敏男，龍岡文夫，坂場義雄，野間博伸：流動化する砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験，第12回土質工学研究発表会，pp. 965-968，1977。
- 4) 澤田亮，西村昭彦：液状化を考慮した基礎の限界状態設計法の一試案，基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム，pp. 273-278，1995年5月。
- 5) 石丸辰治：構造物の動的解析，21，建築技術，pp. 159-168，1983. 3。
- 6) 足立紀尚，龍岡文夫：新体系土木工学 18 土の力学（Ⅲ）- 圧密・せん断，動的解析-，技報堂出版，1981。
- 7) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1986。
- 8) 大橋勝弘，西村昭彦：地盤変位を考慮した基礎の耐震設計（1），構造物設計資料 No. 50，国鉄構造物設計事務所，pp. 6-11，1977. 6。

(2002. 4. 25 受付)

## BEHAVIOR OF PILE FOUNDATION DURING LIQUEFACTION

Ryo SAWADA and Akihiko NISHIMURA

Verification analyses of shaking table tests were carried out. These aimed at resonance that occurred according to advance of liquefaction. Consequently, a simplified dynamic analysis method has been proposed for prediction of complicated behavior of foundation in company with change of natural frequency considering additional inertia force of liquefaction ground is considered. And good approximation of bending moment of foundation can be achieved by considering additional inertia force of liquefaction ground.