

模型杭基礎と液状化現象

Liquefaction Characteristics of a Model Pile Foundation

よし かわ まさ あき* あら の まさ のぶ
吉 川 正 昭* 荒 野 政 信**
やま だ よし かず***
山 田 善 一***

1. はじめに

国土が狭く、人口密度の高い我が国では、地震による液状化が予測されるからという理由で、構造物の建設地点を変更することは難しい。砂地盤の地震による液状化は、固体状の土が間隙水圧の上昇により液状になり、外力に対する抵抗力を失う現象で、抵抗力が減る点をみれば一般の破壊現象と違わない。一般の破壊と違うのは液状化が有効応力低下に伴う破壊という砂地盤特有の現象を伴う点にある。前報¹⁾で述べたように、砂地盤中に杭基礎がある場合の液状化現象の諸特性を調べる模型振動実験が幾つか行われている^{2),3)}。この結果、液状化した砂層中の杭基礎構造物の応答が入力振動数と液状化する周辺地盤を含めた基礎構造物の固有振動数に影響されることを示している。また、完全液状化前の動土圧は完全液状化後の動土圧の約3倍から5倍程度であることが示されている⁴⁾。これらの成果は、液状化現象のメカニズムの理解に役立ち、地盤が液状化しても構造物が安定するような工法の開発が行われ、諸事業の耐震設計に反映されるに至りつつある。

一方、液状化地盤と構造物の非線形な動的相互作用により生じる現象の把握という観点からみると、過剰間隙水圧が上昇し、有効応力がゼロに至る過程や完全液状化が生じる直前での杭基礎構造物の動特性の評価は十分なされていない。そこで本研究は、液状化防止効果を求めるために行った一連の模型振動実験のうち、模型杭基礎と地盤全体系の非線形動的相互作用により生じる現象を解明し、耐震設計の資料に供しようとしたものである。

2. 実験の目的と方法

2.1 実験の目的

本研究では対象構造物を群杭基礎（4本杭）としている。フーチング形状は縦30m、横30m、厚さ3m、場所打ち杭は杭径5m、杭長27m、杭間隙は直径の4.4倍の22mとし、4本を正方形に配置したものを想定している。上部構造は剛性が大きく、フーチングと同一挙動をする単純構造とし、杭先端は支持層に根入れされた支持杭とする。本論の目的

を次に示す。

- i) 弱震時（30ガル）における杭基礎-地盤全体系の共振特性を調べる。
- ii) 弱震時と強震時（100ガル）における杭基礎-地盤全体系の過剰間隙水圧、振動土圧などの最大値を比較し、耐震設計の基礎資料とする。
- iii) 強震時における地盤単一系と杭基礎近傍地盤の復元力特性曲線、入力波数50波の加速度に対する応答加速度、せん断ひずみ、過剰間隙水圧、振動土圧を比較することにより、杭基礎-地盤全体系の非線形動的相互作用により生じる現象の特徴、すなわち液状化完成直前の杭基礎の動的挙動を解明する。なお、本研究では、地表面へ自由に排水できる振動台実験のため、過剰間隙水圧が有効上載圧を越えることはできない。過剰間隙水圧が有効上載圧にほぼ等しくなる状態を液状化完成時、至らない状態すなわち30ガル入力時を液状化進行時と称した。

2.2 模型材料および実物との相似則

実物想定値と模型目標値、模型と実物の相似則と相似比の関係は前報¹⁾に示したとおりである。杭とフーチングの模型はアルミニウムで製作した。模型と実物の杭とフーチングの曲げ剛性の相似則を近似的に満足させるため、円形杭、フーチングともに中空にした。上部構造物をフーチングの付加質量として取り扱うとき、動的相互作用により生じる現象を求める目的に対し、フーチング模型の形状は、基本的な動特性に影響を及ぼさないと考えて、上下面を正方形とする直方体とした。杭頭とフーチングは剛結している。

2.3 実験設備と実験条件

振動台の概略図と性能、測定に用いた加速度計、間隙水圧計、土圧計、せん断ひずみ計、変位計の仕様、正方形枠を積み重ねて、せん断振動を生じやすくした土槽は前報¹⁾と同じである。

測定位置は図-1に示すように、せん断土槽の中央に設置した杭基礎に対し、地表と地中部に加速度計 $A_1 \sim A_7$ 、間隙水圧計 $P_1 \sim P_6$ 、せん断ひずみ計 $S_1 \sim S_3$ 、杭基礎に土圧計 $E_1 \sim E_3$ を配置した。本研究では、杭基礎構造物とその近傍地盤の液状化現象を調べるために、加速度計、間隙水圧計、ひずみ計、土圧計のそれぞれは、表層部 A_1, P_1, S_1, E_1 、地中部 A_2, P_2, S_2, E_2 、地中深部 A_3, P_3, S_3, E_3 と

* 梶奥村組 筑波研究所耐震研究課主任研究員

** 梶奥村組 筑波研究所耐震研究課研究員

*** 京都大学教授 工学部土木工学教室

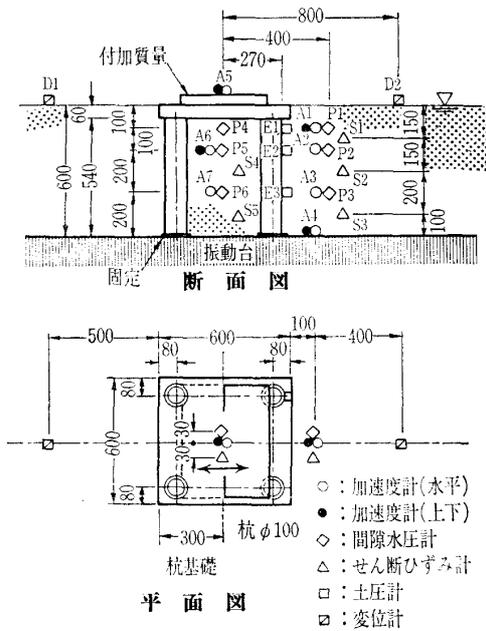


図-1 地盤-杭基礎全体系模型

入力加速度 A_4 、杭基礎頂部の応答加速度 A_5 を用いた。

入力波は地盤単一系の振動台実験¹⁾と同様、加速度振幅30ガルと100ガルの2種類の正弦波を用い、水平方向に加振し、各入力振動数に対し、正弦波数50波とした。地盤は、30ガルと100ガルの入力加速度のそれぞれに対し、目標 V_s の実効値70 m/sを満足するようにした。

3. 実験結果

3.1 単一系

(1) 地盤

水平加振によって生じる模型地盤の共振振動数は30ガル入力時、10 Hzとなる。過剰間隙水圧の上昇、蓄積、消散過程、復元力特性、破壊様相などを弱震時(30ガル入力)と強震時(100ガル入力)で比較し、考察を加えた¹⁾。本研究では杭基礎近傍地盤と地盤単一系、すなわち自然地盤を比較するために入力加速度100ガル、加振振動数10 Hz、波数50波の応答加速度、過剰間隙水圧など10秒間の経時変化を図-2に示す。

(2) 杭基礎

模型群杭(4本杭)の動特性を調べるため、周辺地盤がない状態で杭基礎頂部 A_5 において求めた水平応答時の共振曲線から次のことが分かる。杭基礎の共振振動数25 Hzは入力加速度に依存しない。1/ $\sqrt{2}$ 法による減衰定数は約4%で、応答倍率は19倍となる。

3.2 杭基礎-地盤全体系

(1) 入力加速度30ガルの共振特性

入力加速度30ガル時の杭基礎頂部 A_5 、杭基礎近傍地盤の地表 A_1 と地中部 A_2 、杭基礎で囲まれた地表層部 A_6 の応答加速度の共振曲線を図-3に示す。同図の縦軸は入力加速度 A_4 で基準化した。同図より30ガル入力時の杭基礎-地盤全体系の実験で得られた共振振動数10 Hz、15 Hz、25

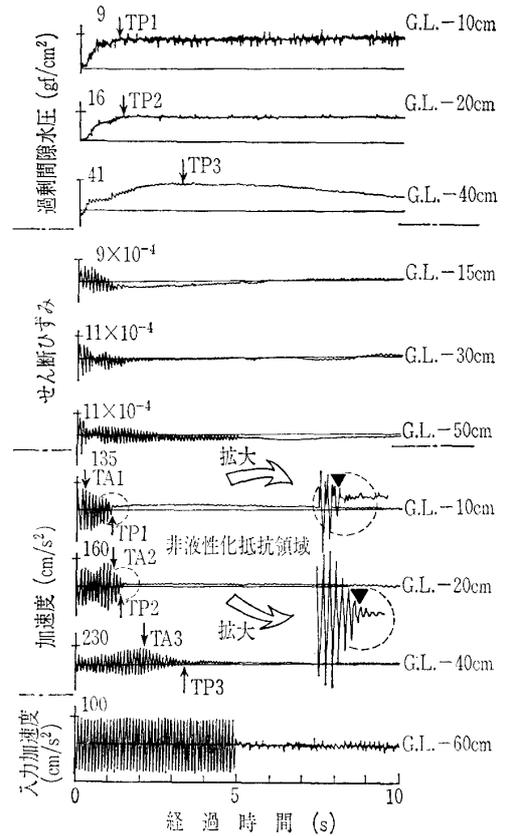


図-2 単一系地盤の応答加速度、ひずみ、過剰間隙水圧(100ガル、10 Hz 正弦波入力時)

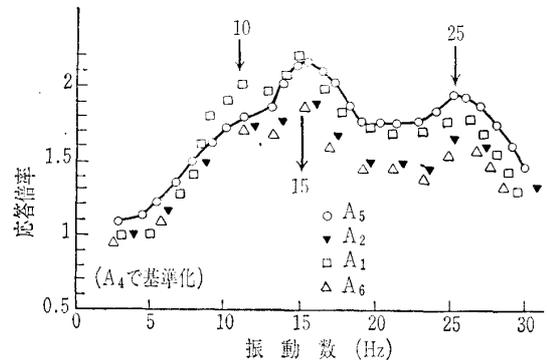


図-3 共振曲線(全体系 A_1 , A_2 , A_5 , A_6 , 入力30ガル時)

Hzは次の振動に起因している。10 Hz、25 Hzはそれぞれ地盤単一系、杭基礎単一系の共振振動数であることから、これらが卓越したことがわかる。15 Hzは杭基礎-地盤全体系の振動に起因していると考えられる。

(2) 100ガルと30ガル入力時の最大応答値

入力加速度30ガルの50波正弦波加振では、応答波形の変化はほとんどなく、定常状態が求められた。入力加速度100ガル時、前報¹⁾の地盤単一系の破壊モードで述べたように、模型地盤の強度低下が上層から下層へと生じ、最大変位が地表から地中へと移行していく。非線形性の強い材料を用いた振動台実験では応答加速度が変化するため、共振曲線は求められない。そのため、100ガル入力時、正弦波の加振振動数をいくりにするかは非常に難しい。既往の振動台実験結果^{1)~5)}から、液状化の程度が大きいのは、杭

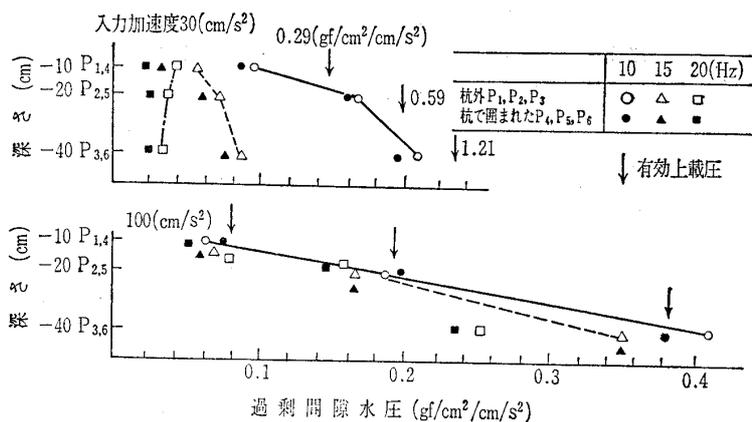


図-4 過剰間隙水圧の最大値分布

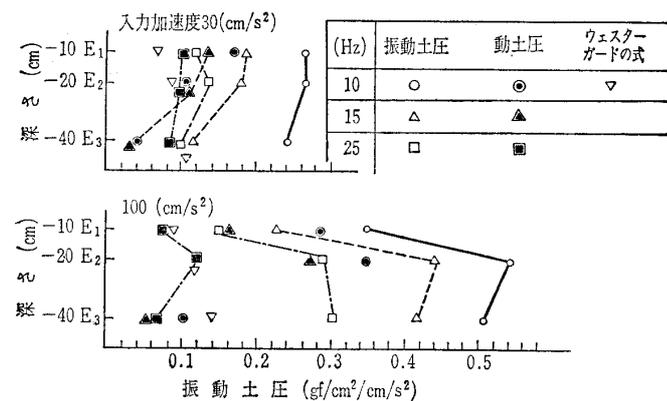


図-5 振動土圧の最大値分布

基礎-地盤全体系や地盤単一系の共振振動数近傍などの杭基礎近傍地盤に大きなひずみが生じる振動数を杭基礎-地盤全体系に与えるときであることが分かっている。

そこで、微小入力30ガル時の共振振動数 10 Hz, 15 Hz, 25 Hz 時での、100ガル入力による液状化現象を調べた。過剰間隙水圧、振動土圧、変位それぞれの最大値を図-4~6に示した。同図は入力振動数に対して同一の入力加速度による応答評価をするため、これらの応答物理量を入力加速度で割ることにより基準化している。過剰間隙水圧分布図-4に有効上載圧を矢印記号を用いて示した。30ガルと

100ガルの入力加速度で過剰間隙水圧を割ることにより基準化したため、両者の有効上載圧は異なっている。同図より、入力100ガル時は初期有効上載圧に過剰間隙水圧が等しくなることが分かる。

振動土圧図-5は動土圧と過剰間隙水圧の和、すなわち杭と地盤間の振動により生じる過剰全応力である。また、応答変位モード図-6には地盤単一系の振動実験結果を自然地盤の変位モードとして併記した。同図より30ガル入力時、10 Hz, 15 Hz, 25 Hzのそれぞれは地盤主働、杭基礎-地盤全体系、杭基礎主働による共振であることが推定できる。すなわち、10 Hzのモードは地盤単一系が杭基礎近傍地盤よりも大きな応答変位を示すため、地盤振動に起因している。25 Hzのモードは、地盤単一系より杭基礎近傍地盤のモードの方が大きいため、杭基礎の振動に起因している。15 Hzのモードは地盤単一系と杭基礎近傍地盤のモードがほぼ等しいため、杭基礎-地盤全体系の振動が卓越したと考えられる。

(3) 杭基礎-地盤全体系各部の応答特性

液状化完成時について、杭基礎-地盤全体系各部の経時変化を図-7を用いて調べる。紙面制約の関係で15 Hzと25 Hz入力時の応答結果を省略したが、同図の10 Hz入力時に比べて、15 Hz時は液状化完成に至り、最大応答値を生じる傾向が類似している。25 Hz時は入力波数50波以内では、過剰間隙水圧が上昇中で最大値に至らず、液状化進行中にある。

次に、代表振動数10 Hz時の地盤単一系と杭基礎近傍地盤のせん断応力-ひずみ復元力特性曲線を図-8に示す。入力波数を50波としたため、10 Hzの場合、波数は経過時間を10倍したものとなっており、縦軸は応答加速度から求めたせん断応力、横軸は測定せん断ひずみを示した。

4. 考察

4.1 最大応答値の比較

30ガル時、全体系の共振振動数10 Hz, 15 Hz, 25 Hzに対して求めた杭基礎近傍地盤の過剰間隙水圧の最大値分布図-4、杭面の振動土圧図-5と変位モード図-6を用いて、入力加速度30ガルと100ガル時を比較する。

(1) 過剰間隙水圧

有効上載圧はG.L.-10 cm, -20 cm, -40 cmのそれぞれで、9.3 gf/cm², 18.5 gf/cm², 37.1 gf/cm²となり、過剰間隙水圧の最大値は図-4から30ガル入力時、有効上載圧の0.2から0.4を占める。100ガル入力時、両者は25 Hz時を除いてほぼ等しくなる。30ガルと100ガル入力時の過剰間隙水圧はそれぞれ液状化進行中と液状化完成状態を示す。30

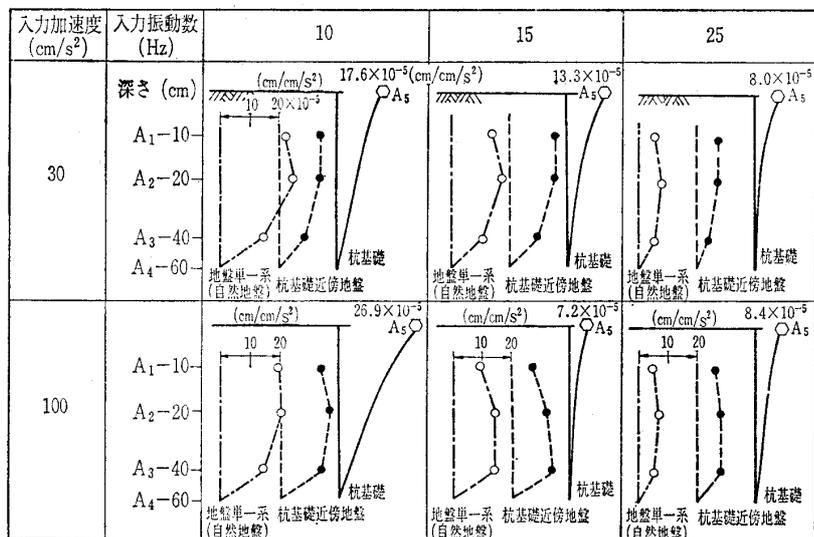


図-6 応答変位モード

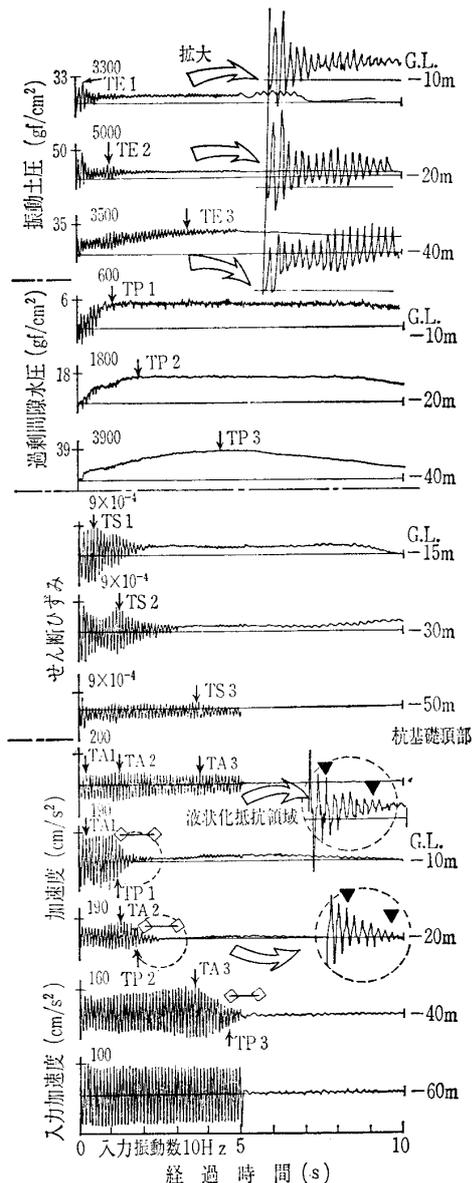


図-7 全体系の応答加速度，せん断ひずみ，過剰間隙水圧，振動土圧（入力100ガル時）

ガル入力時は各入力振動数に対し，過剰間隙水圧分布が異なり，100ガル入力時は振動数にほとんど依存せず，最大値を示す。

(2) 振動土圧

振動土圧最大値の深度分布図-5から，30ガル，100ガル入力時とも応答変位の大きさに対応した25Hz，15Hz，10Hzの順に振動土圧は大きい。30ガル入力時に比べて，100ガル入力時は表層部E₁の振動土圧が地中部より小さくなる。振動土圧の最大値分布型は，30ガルと100ガル入力時それぞれ地表最大型と地中最大型を示す。全応力で表示した図-5の振動土圧から，図-4の過剰間隙水圧を引いた動土圧分布も振動土圧と同様の分布を示す。

液状化現象を，周辺地盤が懸濁した流体とみなし，Westergaard（ウェスターガード）の動水圧公式⁶⁾により，10Hz時の振動土圧を求め，図-5に併記した。計算結果は実験結果よりかなり小さくなる。

(3) 変位モード

地盤単一系，杭基礎近傍地盤と杭基礎の変位振幅最大値によるモード図-6から，30ガルと100ガル入力時，各振動数に対する変位モードの特徴は次のようである。

入力振動数10Hzと15Hz時，地盤単一系の方が杭基礎近傍地盤より大きな変位分布を示し，地盤が杭を振動させる。一方，25Hz時，杭基礎近傍地盤の方が地盤単一系より少し変位分布が大きい。これは杭先端固定による影響のため，杭が地盤を押しつけて振動したためであろう。地盤のモードは30ガルと100ガル入力時，それぞれ地表部のよく揺れる一次せん断型と地中深部のよく揺れる下腹ぶくれ型を示す。この分布は振動土圧の最大値分布と類似し，杭と地盤の動きに土圧が抵抗したためといえる。なお，変位モードは杭と地盤の位相を考慮していない。しかし，地盤単一系すなわち自然地盤の破壊モード¹⁾で明らかなように，液状化が進行すると，一次せん断型は入力波数の増加に伴い下腹ぶくれ型に移動する。このとき，杭と地盤は逆位相となり，杭には曲げ応力が作用すると考える。

4.2 破壊時の動特性

杭基礎-地盤全体系と地盤単一系の各応答値の経時変化図-7，2を用いて，液状化完成に至る過程とその前後を拡大して，破壊時の相互作用特性を考察する。

(1) 液状化抵抗領域

地盤単一系の過剰間隙水圧図-2より，各層の過剰間隙水圧が最大値に達する時刻TP₁，TP₂，TP₃の大小関係に対応して，液状化完成は表層から地中深部へと移行することが分かる。各層の最大応答加速度の生じる時刻TA₁，TA₂，TA₃はそれぞれTP₁，TP₂，TP₃より短く，過剰間隙水圧が上昇中に，各地層の最大応答加速度や最大せん断ひずみが生じることが分かる。各層がTP₁，TP₂，TP₃に至ると液状化が完成し，応答加速度，せん断ひずみはゼロに接近する。地中深部の過剰間隙水圧が最大値に達するTP₃以降は，地盤全層が泥水状態に近づき，せん断振動は下層から上層に伝播せず，地盤は振動しなくなる。

一方，杭基礎-地盤全体系の経時変化図-7から，杭基礎近傍地盤と地盤単一系との過剰間隙水圧，応答加速度とせん断ひずみの経時変化の顕著な相違点は次のようである。杭基礎近傍地盤各層の液状化完成に至る時間TP₁，TP₂，TP₃から，約1秒程度遅れて各地層の応答加速度，せん断ひずみはゼロに近づく。地盤単一系では過剰間隙水圧が有効上載圧に至ると，応答加速度，せん断ひずみがすぐにゼロになるのに対し，杭基礎-地盤全体系ではこの状態ですぐに液状化に至らず，地盤がせん断抵抗力を有する領域が存在する。本研究ではこの領域を液状化抵抗領域と称し，図-9に模式図を示す。

波状化抵抗領域の応答加速度波形前半の振幅はピーク値を有し，ひずみ硬化の現象⁷⁾が現れる。後半は次第に波形が崩れてゼロに至る。同位相で杭に作用していた地盤は，軟化現象のため地盤の共振周期が伸び，杭と地盤間に位相

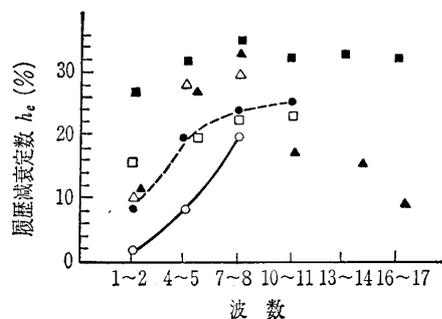
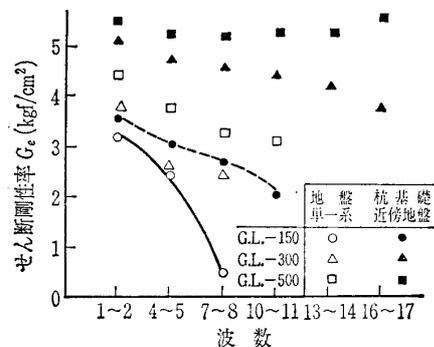
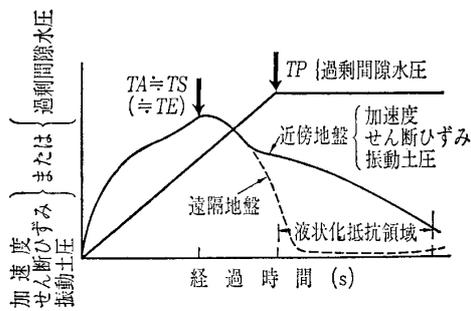
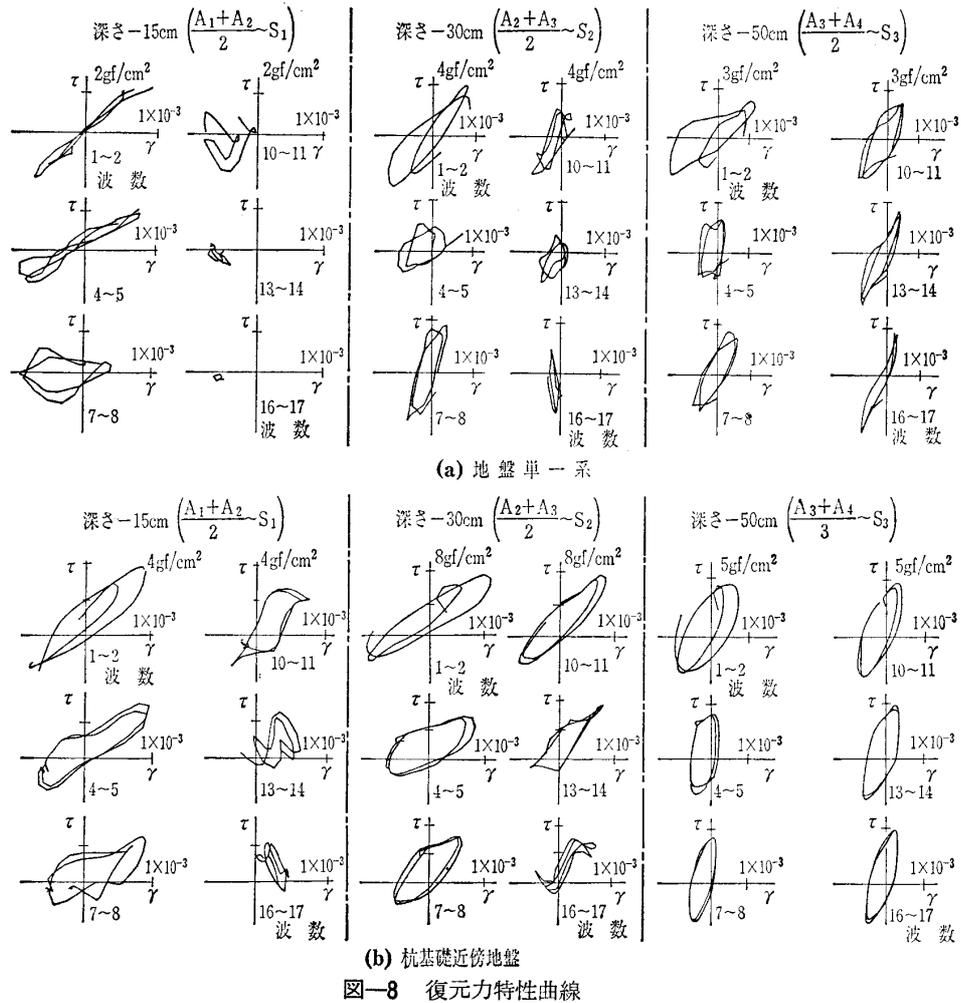


図-10 せん断剛性率 G と履歴減衰定数 h

差を生じ、杭に大きな曲げが作用すると考えられる。

液状化抵抗領域の軟化現象は地盤単一系と杭基礎近傍地盤の復元力特性図-8と同図より求めたせん断剛性率 G 、履歴減衰定数 h と波数の関係図-10から説明できる。表層部、地中部の液状化抵抗領域はそれぞれ約10波目、約15波目の復元力図に対応している。これらの波数以上になると、各層の復元力履歴ループの紡錘形状が急変する。杭基礎近傍地盤の形状より、地盤単一系のループ形状の方が中心点から移動し、非線形挙動が大きい。表層部のループは逆S字型、S字型や負の勾配を持つ形状など特異な形状を示すが、地中深部では表層部に比べて紡錘形状が崩れない。また、せん断剛性 G と履歴減衰定数 h は地盤単一系より杭基礎近傍地盤の方が大きく、波数の増加に伴い G は低下、 h

は増大する。10波目を越えると表層部の G は求められず、S型ループのため杭基礎近傍地盤地中部で h が減少する場合も生じる。

(2) 杭基礎の応答特性

No. 1687

杭基礎頂部の応答加速度は、図一7より杭基礎近傍地盤各層の応答加速度が最大値に達する TA_1 , TA_2 , TA_3 に対応して、3つのピーク振幅を示す。応答倍率はそれぞれ約2.2倍、約2倍、約1.4倍となる。 TA_1 時には、地盤表層部の応答倍率2倍よりも杭基礎頂部の方が大きい。杭面に取り付けた各層の振動土圧も TA_1 , TA_2 , TA_3 に対応して、ほぼ同時刻の TE_1 , TE_2 , TE_3 で最大値を示す。振動土圧と杭頂部の応答加速度の間に位相差がみられないことから、周辺地盤が杭を動かすことにより振動土圧の最大値は生じたものと考えられる。

次に、液状化抵抗領域を通過し、周辺地盤が振動しなくなると表層部の振動土圧は最大値の半分程度に減少する。地盤の杭を拘束する力、すなわち杭の横方向抵抗力が激減し、杭基礎近傍地盤が泥水状態に近づくと、杭に作用する振動土圧は小さくなる。支持杭を対象としたので、周辺が泥水状態に至ると杭基礎は支持層の動きに左右される。杭基礎頂部は入力加速度と同位相で振動し、逆に杭基礎が周辺地盤を振動させる。周辺地盤の減衰効果のため、杭頭の応答倍率は約1.2倍と小さい。地中深部では表層部ほど杭面の振動土圧が小さくならない。これは、深部では過剰間隙水圧が上部へ消散し、せん断強度が上層より速く回復するのに対し、表層部は下層からの過剰間隙水圧の供給が続くためである。

加振終了後の表層部の最終沈下量は入力加速度100ガル、入力振動数10Hz時、約1cmであった。沈下分だけ基礎周辺地盤の埋込効果⁸⁾が小さくなり、基礎の突出長が長くなる分だけ杭基礎-地盤全体系の共振振動数が移動することになる。杭側面の地盤が泥水状態になると、杭基礎単一系が呈したような共振状態が生じる。支持層、すなわち入力基盤と杭基礎単一系の振動数が一致しない配慮が必要である。

5. ま と め

本研究で得られた模型杭基礎の地盤の液状化現象による諸特性を要約すると以下のとおりである。

- (1) 30ガル入力時、入力振動数10Hz、15Hzと25Hzに対応した模型杭基礎-地盤全体系のモードは、それぞれ地盤、模型杭基礎-地盤全体系と杭基礎の卓越した振動を主体とする。
- (2) 杭面の振動土圧とこれから過剰間隙水圧最大値を引いた動土圧、杭基礎近傍地盤の応答変位の最大値分布は入力加速度30ガルと100ガルで相違が見られ、それぞれ一次せん断型と下腹ぶくれ型を示す。
- (3) 杭基礎近傍地盤の過剰間隙水圧の最大値は表層から地中へと移動し、一定値を保ったあと、地中から表層へと減少していく。杭面の振動土圧は杭基礎近傍地盤の応答加速度最大値とほぼ同時に最大値を生じ、液状化完成後は地中深部を除いて半減する。
- (4) 地盤単一系、すなわち自然地盤では過剰間隙水圧が

最大値に達すると同時に応答加速度、せん断ひずみはゼロに近づくのに対し、杭基礎近傍地盤ではすぐにゼロにならない。杭と地盤の相互作用、すなわち制振効果により生じる現象としてこの領域を液状化抵抗領域と称した。

- (5) 液状化完成前の周辺地盤が大きく振動するとき、杭頂部は最大加速度を示し、液状化抵抗領域を通過して、液状化が完成すると周辺地盤がせん断振動を中止する。支持層の振動を杭が伝えるため、逆に杭が表層地盤を動かす。液状化完成時、泥水状地盤による減衰効果のため、杭頭の応答倍率は液状化完成前に比べて約半分となる。
- (6) 支持杭の耐震設計上、次のことを明らかにした。
 - i) 液状化抵抗領域では、地盤が長周期化し、杭と地盤の間に位相差を生じ、杭に大きな曲げ応力が生じる。
 - ii) 液状化完成時、支持層すなわち、入力基盤と杭基礎単一系の共振振動数が一致すると、泥水状態の中で杭の振動が大きくなるため、両者が共振しない配慮が必要である。

6. あとがき

大口径支持杭を対象としたので、地盤の軟化や液状化現象に対し、模型群杭の剛性が大きく、振動土圧や動的な地盤反力係数は液状化完成時にゼロにならない。地盤が泥水状態になると、地盤の杭に対する拘束力すなわち、水平支持力はゼロに近づくため、耐震設計上、杭の剛性を大きくする必要はある。このとき、杭基礎単一系の剛性が支持層と共振しないように配慮しなくてはならない。

入力波数の増加に対し、せん断剛性が減少し、地盤の共振振動数は低下する。群杭基礎単一系の剛性が小さく、泥水状態の地盤と杭基礎が共振する場合も別に考える必要がある。

参 考 文 献

- 1) 吉川正昭・荒野政信・山田善一：模型砂層地盤の液状化現象、土と基礎、Vol. 34, No. 12, pp. 19~25, 1986.
- 2) 岩崎敏男・常田賢一ほか：砂質地盤の流動化および杭基礎構造物の動的応答特性に関する模型振動実験、土研資料、第1605号、1980.8.
- 3) 吉田常松・植松幹夫：液状化砂中の杭の動的挙動の研究、第5回日本地震工学シンポジウム、pp. 657~664, 1978.11.
- 4) 岩橋敏広・国生剛治・当麻純一ほか：地震時液状化を考慮した取水路立杭の大型模型振動実験、電力中央研究所、研究報告381024、1981.11.
- 5) 岩崎敏男・龍岡文夫・吉田精一：砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験、土木研究所資料、第1152号、1976.6.
- 6) 古賀泰之・間三男：水浸砂層の液状化沈下現象に関する振動実験、土木研究所資料、第1063号、1976.8.
- 7) 片田敏之・伯野元彦：液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第306号、pp. 1~10, 1981.2.
- 8) 吉川正昭・吉川実・土岐憲三：高架橋基礎の制振効果に関する実験的研究、土質工学会論文報告集、Vol. 26, No. 1, pp. 163~173, 1986.3.

(原稿受理 1986.7.24)