

液状化過程における杭基礎構造物の 地震時応答特性

大塚康司¹・玉手聡²・末政直晃³・片田敏行⁴・上坂直弘⁵

¹正会員 工修 株式会社建設技術研究所 九州支社技術第二部 (〒810-0041福岡県福岡市中央区大名2-4-12)

²正会員 工修 独立行政法人産業安全研究所 (〒204-0024東京都清瀬市梅園1-4-6)

^{3,4}正会員 工博 武蔵工業大学 工学部土木工学科 (〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

⁵学生会員 武蔵工業大学 工学研究科土木工学専攻 (〒158-8557東京都世田谷区玉堤1-28-1)

液状化によって地盤剛性が急激に低下すると杭に作用する地盤反力も低下する。この結果、地盤-杭基礎-構造物系の振動特性が変動し、液状化の進行過程において地盤-杭基礎-構造物系と地震波が共振した場合は、過渡的に大きな応答が起こる可能性があると考えられる。そこで本研究では、動的遠心模型実験によって液状化の進行過程における地盤-杭基礎系の振動特性の変動が上部構造物の応答に与える影響やその結果として杭に与えるダメージについて検討した。その結果、全体系の加速度応答は上部構造物と地盤-杭基礎系の振動特性を個別に捉えることによって定性的に把握することができたが、杭の応答は加速度応答とは異なる結果となった。

Key Words : *liquefaction, ground-pile foundation-structure system, natural frequency, resonance, centrifuge model test*

1. はじめに

兵庫県南部地震では杭基礎で支持された構造物にも液状化により多くの被害が生じた。しかし、その被害形態は、杭基礎が損傷を受けたものの上部構造物は軽微な被害にとどまった場合や逆に杭基礎に損傷は見られないものの、上部構造物に被害が見られたもの等、様々であった¹⁾。このような現象が起こる原因は、主として杭基礎構造物の地震時耐力の違いにあると考えられるが、他に地盤-杭基礎-構造物系(以下全体系)に及ぼす杭基礎系の振動特性の違いが考えられる。一般に地盤が液状化すると、地盤剛性が急激に低下し、それに伴って杭の地盤反力も低下する。これにより、地盤-杭基礎系の振動特性が変動するため、構造物は複雑な応答を示す。そして、この過程で地盤-杭基礎-構造物系と地震波が共振すると、過渡的に大きな応答が生じる可能性もある²⁾。

そこで本研究では、液状化の進行過程における地盤-杭基礎系の振動特性の変動が全体系の応答に与える影響や結果として杭に与えるダメージについて検討することを目的として、動的遠心模型実験を実施した。実験では、まず液状化による地盤性状の変化を、層厚を変えた乾燥砂地盤で模擬した一連のスウィープテストを実施した。次いで、これらの結果から特徴のある2つの入力振動数を設定して、同じ模型を用いた飽和砂地盤の液状化実験を実施した。

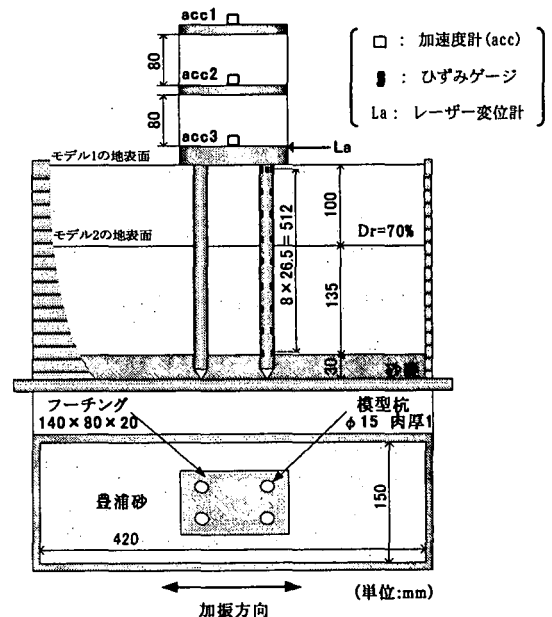


図-1 模型実験装置の概要

2. 液状化の進行を乾燥砂地盤で模擬した実験

(1) 実験概要

模型実験装置の概要を図-1に示す。本実験で用いた試料は気乾状態の豊浦砂である。次にせん断土槽内部をゴムメンブレンで覆い、模型杭4本を群杭としてせん断土槽底部に設置した後に平均粒径5mmの砂礫を高さ30mm敷き詰めた。その後、空中落下法を用いてDr=70%の地盤を作製した。その際、モデ

表-1 実験条件

ケース	構造形式	地盤の層厚	入力振動数(Hz)
1	地盤-杭基礎系	モデル1(減らさない)	30~200
2		モデル2(100mm減らす)	20~200
3	地盤-杭基礎-構造物系	モデル1(減らさない)	15~200
4		モデル2(100mm減らす)	15~140

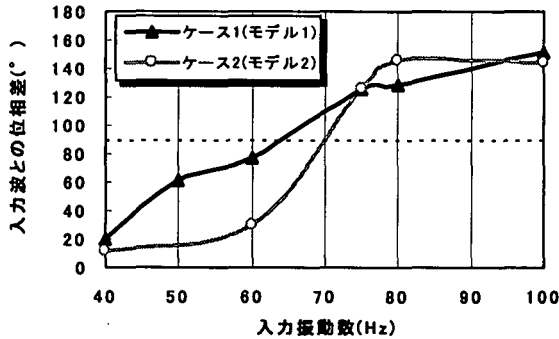


図-3 入力振動数と位相差の関係

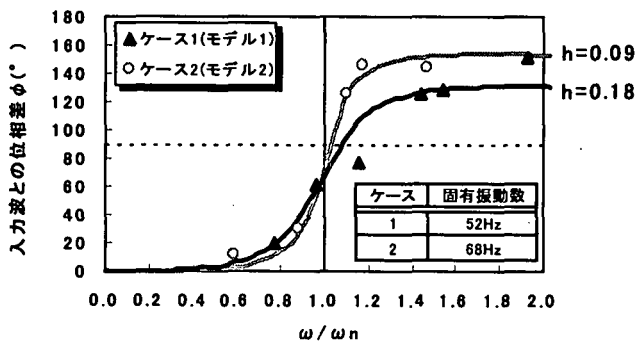


図-4 位相曲線

ル1とモデル2では異なる層厚を設定した。即ち、モデル1は層厚を減らさない場合で液状化の比較的初期の状態を想定したものである。モデル2では地盤の層厚を100mm減らし、液状化がかなり進行した状態を想定した。模型地盤を作製した後、模型フーチングを設置し杭頭部を固定した。なお、杭先端部は自由端としている。

遠心加速度 50g場において、飽和砂地盤が振動により劣化し、地盤バネがいくらか低減した状態を想定し、かつ砂の水中密度と乾燥密度の違いを勘案して、ここでは遠心加速度を18.8gに設定した。また、実験は杭基礎のみを用いたケース1,2とこれに上部構造物を取り付けたケース3,4の、計4ケースである。実験条件を表-1に示す。加振時の入力波として、最大加速度約2gの正弦波20波を設定した。

(2) 実験結果及び考察

ケース1,2の加振実験によって得られた加速度応答倍率(acc3/入力加速度)曲線を図-2に示す。ケース1では明確なピークは確認できず、入力振動数に係らずほぼ一定の値となった。しかし、地盤の層厚を減らしたケース2では75Hz付近で応答倍率のピークが確認できる。

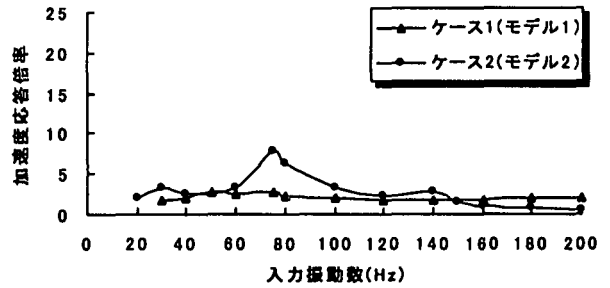
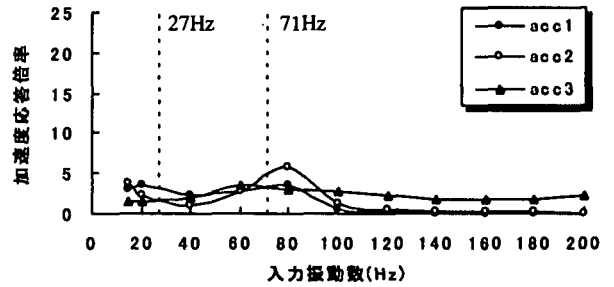
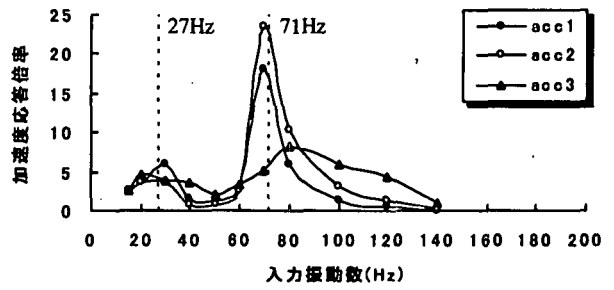


図-2 加速度応答倍率曲線(地盤-杭基礎系)



ケース3 (モデル1: 層厚を減らさない場合)



ケース4 (モデル2: 層厚を減らした場合)

図-5 加速度応答倍率曲線(地盤-杭基礎-構造物系)

ケース1,2において入力波とフーチング部の加速度応答の位相差に着目し、まとめたものを図-3に示す。この結果より、入力振動数が高くなるにつれて位相差が大きくなっていることがわかる。そこで、杭基礎系をフーチング部を質点とした1自由度系のモデルとみなし、この位相差を用いて杭基礎系の固有振動数の同定を試みた。

入力加速度が正弦波であるとき、その応答波と入力加速度波の位相差 ϕ は、式(1)で表せる³⁾。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{2h(\omega/\omega_n)^3}{1 - (1 - 4h^2)(\omega/\omega_n)^2} \right) \quad (1)$$

ω : 入力加速度の円振動数

ω_n : 系の固有円振動数

h : 減衰定数

式(1)中の減衰定数 h と系の固有円振動数 ω_n は未知数であるため、あらかじめ (ω/ω_n) を軸にとり減衰定数 h を変化させたものを描き、実験で得られた結果をフィッティングさせた(図-4)。これより、層厚を減少させることにより、減衰定数は0.18から0.09に半減し、固有振動数は52Hzから68Hzに増加する結果となった。当初、層厚の減少により杭が突出するため、固有振動数は低下するものと期待されたが、むしろ地盤の固有振動数の増加に引きずられ

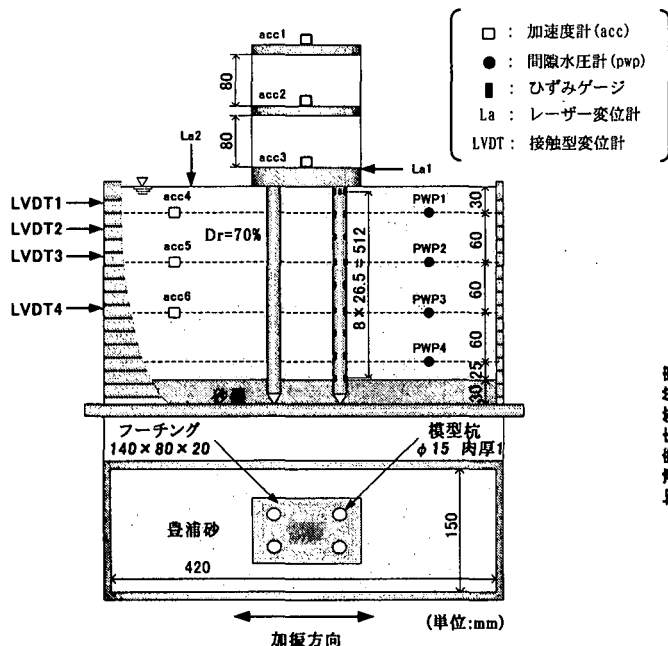


図-6 模型実験装置の概要

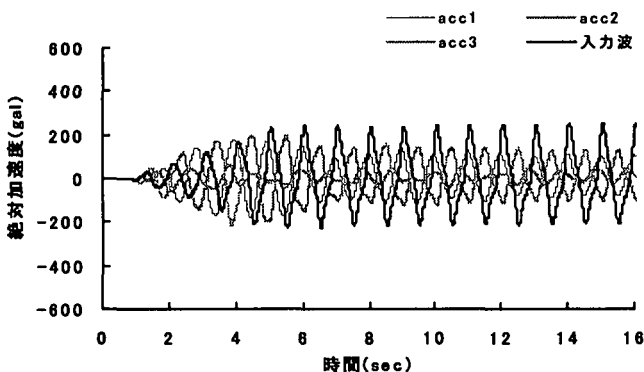


図-8 時刻歴応答 (ケース5: 50Hz 時)

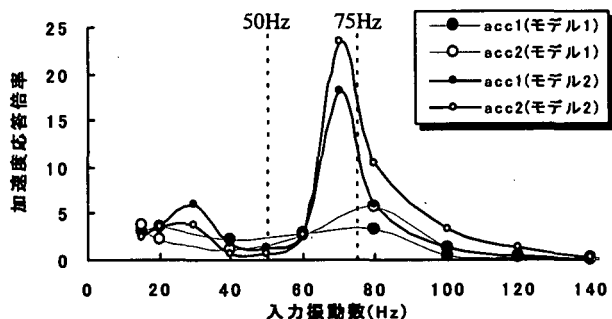


図-7 乾燥砂地盤を用いた実験結果と本実験の入力振動数

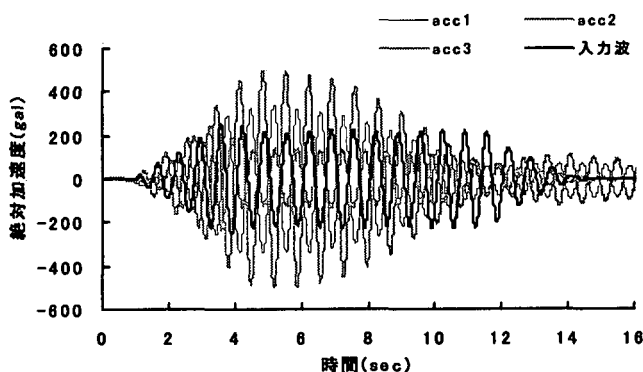


図-9 時刻歴応答 (ケース6: 75Hz 時)

る形で増加したものと考えられる。

ケース3,4の実験から得られた加速度応答倍率曲線を図-5に示す。なお、同図には別途実施した振動実験から得られた、上部構造物模型の1次と2次の固有振動数(27Hz,71Hz)を併記してある。図より、ケース3,4の基礎部(acc3)の加速度応答曲線は、上部構造物が上載されたにも係らず、ケース1,2のそれとほぼ同様となった。また、上部構造物の応答は、層厚の違いで大きく異なり、応答倍率の最大値はケース3では80Hzで約5.8(acc2)、ケース4では70Hzで約23.4(acc2)となった。ケース3では、地盤-杭基礎系の固有振動数は52Hz(推定)であり、上部構造物の固有振動数とは一致しない。一方、ケース4では地盤-杭基礎系の固有振動数68Hz(推定)が上部構造物の2次の固有振動数(71Hz)と近いために全体系として70Hz時の応答が卓越したと考えられる。

3. 飽和砂地盤を用いた加振実験

(1) 実験概要

模型実験装置の概要を図-6に示す。飽和砂地盤は

2.と同様の方法で作製した乾燥砂地盤を脱気槽に入れ十分に脱気した後、水の50倍の粘性を有するシリコンオイルを土槽底部より徐々に流入させて飽和させたものである。

表-2は本実験で行った加振条件(入力波は正弦波を使用)であり、図-7は図-5の一部に本実験で使用した入力振動数を併記したものである。ケース5の入力振動数(50Hz)は、ケース1の結果から推定した地盤-杭基礎系の固有振動数(52Hz)付近の振動数であり、ケース6の入力振動数(75Hz)は液状化の進行過程での共振現象を期待して、ケース3,4の結果において全体系の応答特性が大きく変化した時の振動数である。

(2) 実験結果及び考察

以下の図は全て実物換算してある。

a) 応答加速度の経時変化

図-8,9は、各ケースの入力波と構造物に設置した各加速度応答(acc)の時刻歴を示したものである。各ケースの入力加速度振幅は約200galでほぼ一定であり、同じ入力加速度で加振されていることが確認

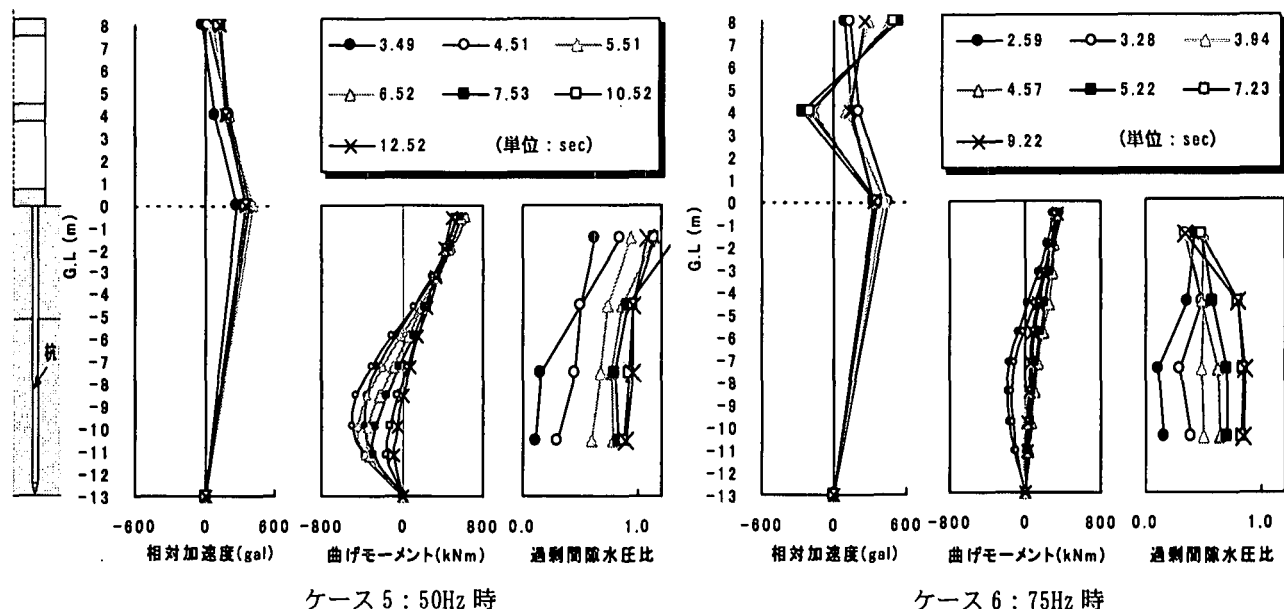


図-10 曲げモーメントの深さ方向分布

できる。絶対加速度の応答を比較すると、ケース5ではacc1, acc3が加振初期の約5.0secまで入力波とほぼ同等の加速度振幅で振動している。しかし、液状化の進行に伴って徐々に減衰し、入力加速度より小さな応答(acc1で約120gal, acc3で約140gal)となった。その後、構造物の各加速度応答はほぼ一定となり、定常振動した。

一方、ケース6の絶対加速度応答は液状化の進行過程(3~9秒)で大きく増幅し、特にacc2が5.5sec時で入力加速度の約2.5倍の応答(約500gal)を示した。しかし、その後の応答においては液状化のさらなる進行に伴って減衰し、やがて入力加速度より小さい値となった。また、入力波と各加速度応答波の位相差に着目すると、両ケースとも特に加振初期の液状化過程で入力波と各加速度応答波の位相が徐々にずれている。加振時における応答倍率の大きな変化や位相差の変化により、本ケースにおいては液状化の進行過程における過渡的な共振が生じたものと考えられる。

液状化実験では、入力加速度の大きさや地盤劣化の有無の違いのために、乾燥砂地盤の実験で観測されたような上部構造物の高い応答倍率には至らなかったが、液状化進行過程における応答の変化は、乾燥砂実験から予想された結果と定性的には同様であった。従って、層厚や遠心加速度を適切に設定すれば、実験が比較的容易な乾燥砂地盤の実験によって、広範囲な振動数域における構造物の応答の概略が把握できると思われる。

b) 曲げモーメントの深さ方向分布

図-10は、ケース5,6で液状化の進行過程における構造物の応答を相対加速度(各acc-入力加速度)による振動モードで表したものと、そのとき杭に生じる曲げモーメント、さらに地盤中の液状化の進行程度を表す過剰間隙水圧比を深さ方向の分布にしたものである。

両図より液状化の進行程度(過剰間隙水圧比)と構造物の応答の違いによって杭に生じる曲げモーメントの分布が大きく異なることが分かる。ケース5では液状化の進行過程の4.51sec時に最大となり杭頭部付近で約640kNm、地盤深部のG.L.-10m付近で約-500kNmと大きな値を示している。その後、液状化の進行に伴って地盤中における最大曲げモーメントが発生する深さが地盤深部に進行していき、地盤深部の曲げモーメントは徐々に小さくなった。

一方、ケース6では上部構造物が大きな応答を示したにも係わらず、杭に生じる曲げモーメントはケース5に比べ小さく、その分布が各時間で異なる形状を示した。しかし、ケース6でも曲げモーメントは液状化の進行過程で最大となり、その後液状化の進行によって地盤深部の曲げモーメントが徐々に小さくなる点はケース5と同様であった。

4. 結論

本研究によって以下の知見を得た。

- ・液状化の進行を乾燥砂地盤で模擬することで液状化過程における全体系の振動特性を定性的に把握することができた。
- ・上部構造物と地盤-杭基礎系の固有振動数が一致すると全体系の応答は大きくなった。
- ・液状化過程において杭に生じる曲げモーメントは構造物の加速度応答と異なる傾向を示した。

参考文献

- 1) 時松：液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響，土と基礎，Vol.47, No.6, pp53-56, 1999.
- 2) 澤田，西村：液状化地盤中の基礎構造物の挙動に関する実験的研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp597-600, 1997.
- 3) 小坪：土木振動学，pp70-80，森北出版，1973.