

Research Report of the National Institute  
of Industrial Safety, NIIS-RR-2003 ( 2004 )  
UDC 624.15:624.131.54:624.13:69.033:550.348

## 地中構造物と地盤の動的な相互作用による地盤反力特性に関する研究

玉手 聡\* , 豊澤康男\* , 末政直晃\*\* , 片田敏行\*\* , 平野秀司\*\*\*

### Studies on Dynamic Interactions of Ground, Foundation and Superstructure

by Satoshi TAMATE\*, Yasuo TOYOSAWA\*, Naoaki SUEMASA\*\*,  
Tosiyuki KATADA\*\* and Syuji HIRANO\*\*\*

**Abstract:** In the last decade, three large earthquakes, including the Hyogoken Nanbu earthquake, have occurred in Japan and severely damaged many structures. As a result, engineers have rushed to strengthen the seismic resistances of structures in preparation for earthquakes. Countermeasures need to be taken against earthquakes in loading machine structures, such as tower crane systems, as much as in buildings. Although the seismic design generally used for buildings might be applied to the design code of the loading machines, it should not be adopted without careful consideration because seismic characteristics of loading machines are different from those of buildings.

The purpose of this research is to clarify the dynamic interaction of the ground, the pile foundation and a superstructure such as a loading machine. Three types of centrifuge tests were carried out. In horizontal loading tests of a pile group in clay in a centrifuge, it was observed that the subgrade reaction of the pile was rapidly decreasing as the number of cyclic loadings increased. Dynamic centrifuge tests of a pile foundation in clay were conducted to investigate the behaviors of the subgrade reaction during earthquakes. The results showed that the distribution of the subgrade reaction of the pile was strongly influenced by the vibration mode of the ground. A series of dynamic centrifuge tests for a superstructure with two degrees of freedom supported by a pile foundation in sand was carried out to confirm the influence of the vibration mode of the superstructure with seismic damage of the structure. The results showed that, regarding seismic damage of the foundation, the bending moment at the pile head was increased at the second natural frequency of the superstructure in the case of soft ground.

**Keywords:** Dynamic interaction, Seismic response, Subgrade reaction, Pile foundation, Centrifuge model tests

---

\* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

\*\* 武蔵工業大学工学部都市基盤工学科 Musashi Institute of Technology, Department of Civil Engineering

\*\*\* 武蔵工業大学工学研究科修士課程 Musashi Institute of Technology, Student of Master Course

### 1. はじめに

兵庫県南部地震(1995.1月)や宮城県沖地震(2003.5月)に示されるように、近年、日本国内において大規模地震が多く発生しているが、このような地震が発生する確率は今後一層高まるものと考えられている。このような状況を背景として、種々の構造物に対する耐震性能の向上が求められている<sup>1)</sup>が、これは機械構造物においても例外ではなく、これらの耐震強化を行なうことは社会的要請となっている。

近年、クレーンなどの作業用機械構造物は効率化を目的として広く導入されており、さらに技術開発に伴って多様化・大型化する傾向にある。このような機械構造物の耐震性を評価するためには、構造耐力や振動特性を把握したうえで、一般構造物の耐震評価技術を援用することが重要である。

一般に地震時の構造物の振動特性は、上部構造物のみならず、地盤や基礎などの下部構造体の振動特性にも大きな影響を受ける<sup>2)</sup>。特に地盤は繰り返し荷重によって、容易にその剛性や強度が低下するため、構造物全体の振動特性の評価をより複雑なものにしている<sup>3)</sup>。これより、既存の耐震評価技術においても下部構造体の影響の評価は未だ確立されていない。

そこで本研究は杭基礎で支持された作業用機械構造物を対象として、その地震時の安定性について検討したものである。しかしながら、機械構造物の振動特性は広範囲に及ぶため、ここでは上部構造物と下部構造体の動的な相互作用に的を絞って、機械構造物の地震時安定性に関する定性的な知見を得ることを目的とした。具体的には、模型杭の水平交番試験を行ってその地盤反力を調べた後、杭基礎の動的模型実験を実施し、下部構造体の動的相互作用を検討した。次いで上部工を有する基礎の振動実験を行うことにより、上部工と下部構造体の相互作用について検討を行った。

### 2. 杭基礎の水平交番載荷試験

本試験は、地中に埋設される杭基礎構造物と地盤との相互作用による動的な反力特性を明確にすることを目的としたものである。特に軟弱地盤においては、地震時に杭と地盤の間に相対変位が生じるため、杭周辺地盤の強度低下や杭と地盤の間に隙間が発生するなどの複雑な挙動を示すことが考えられる<sup>4),5)</sup>。このような現象は構造物の地震時応答に大きな影響を与える可能性があるため、動的な地盤反力特性を正しく把握する事は極めて重要となる。そこで本試験では遠心場において模型杭の水平交番載荷試験を実施し、得られた地盤反力～杭変位関係から軟弱地盤中の杭の挙動について検討した。

#### 2.1 実験概要

実験装置をFig. 1に示す。実験容器は内寸幅500mm、高さ400mm、奥行300mmの鋼製である。杭には場所打ちコンクリート杭(800mm)を想定して、遠心加速度50G場で曲げ剛性EIが一致するように、直径15mm、内厚1mmのアルミ製模型杭を用いた。フーチングには4本の杭を配置し、その内の2本には杭内側にひずみゲージを取り付けて、曲げモーメントを計測した。また杭間隔は群杭効果を避けるため杭径の5倍とした。

実験条件をTable 1に示す。模型地盤の作成では、スラリー状にした藤ノ森粘土に対して、予め圧密応力10kPaにて予備圧密を行い、その後強度が深さに比例するように透水圧密、遠心圧密を行った。ケース1では正規圧密状態を想定したため、遠心加速度50G場において地表面の有効上載圧が10kPaとなるようにジルコン砂( $\rho_s = 4.63\text{g/cm}^3$ )を表層に敷いた。ケース2では、表層にジルコン砂を敷設せず、表層部分を過圧密状態とした。なお、全ての圧密終了の判断は2 $\sigma$ 法に従った。

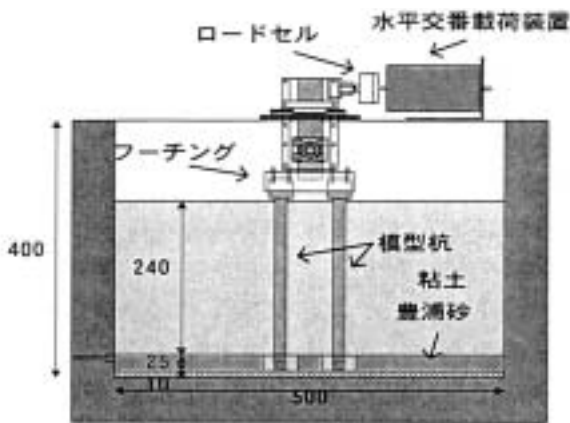


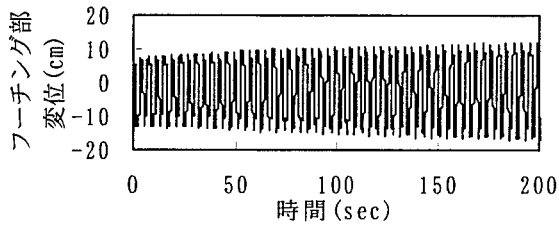
Fig. 1 Schematic diagram of horizontal cyclic loading test  
水平交番載荷試験の実験装置

Table 1 Experimental conditions  
実験条件

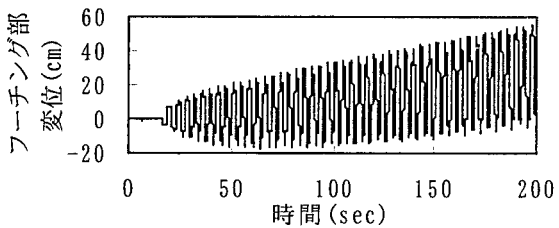
ケース	1	2
地盤条件	正規圧密	過圧密
モーター回転数 (rpm)	約390	
圧力 (MPa)	2.7	
加振周波数 (Hz)	13	

水平交番载荷装置は、交流モーター及びロータリーバルブ、シリンダーからなっており、モーターの回転速度や空圧を調整することにより、種々の周波数や載

荷荷重で交番载荷することができるものである。圧密終了後、この水平交番载荷装置を容器上に設置し、再び遠心加速度50G場に到達させ、再载荷時に発生した間隙水圧が消散するまで再圧密を行い、水平交番载荷実験を行った。計測項目は杭頭部に作用する水平荷重、フーチング部の変位、杭の曲げモーメントである。実験終了後には粘土を切り出して観察した。



Case 1(normal consolidation)  
ケース 1 (正規圧密)



Case 2(over consolidation)  
ケース 2 (過圧密)

Fig. 2 Displacement of footing  
フーチング部変位



Photo. 1 State of soil around pile after experiment (Case 1)  
実験後の杭周辺の地盤状態 (ケース 1)

2.2 実験結果と考察

遠心模型実験の相似則に従い、以下では全て実物スケールに換算した値を用いた。

Fig. 2 にフーチング部変位の経時変化を示す。各ケースとも時間が経つにつれ変位が増加している。加振の間は水平荷重がほぼ同じ値を示していることから、変位の増加は繰り返し载荷により地盤反力が低下したためと考えられる。また、変位量はケース 1 では±10cm程度発生したのに対し、ケース 2 では軸ズレしたものの±20cm以上となり、約 2 倍の変位となった。これは、ケース 2 では表層にジルコン砂を敷設しなかったため、表層部の強度低下が大きかったためと推測される。

ケース 1 における実験終了後の杭周りの地盤状態を Photo 1 に示す。写真から繰り返し载荷により表層のジルコン砂が地表面下に潜り込んだことが確認された。これは、杭頭周りの地盤が繰り返し载荷を受けて軟化し、比重の大きなジルコン砂が軟弱粘土に置換されたためと考えられる。

Fig. 3 にケース 2 における曲げモーメントの加振初期から加振後期までの深度分布を示す。载荷後期において変位の軸ズレが生じたため、分布は非対称になっている。また加振が進むにつれて最大曲げモーメントの発生位置が地盤深くへと移動していることが分かる。これは、繰り返し载荷によって地盤反力が地盤上部から徐々に低下していったためである。

この曲げモーメントの結果を用いて各深度での地盤反力～杭変位関係を算出した。ここでは深さ2.225mと3.550mの地盤反力～杭変位関係をFig. 4 に示す。これより、地盤反力は両者ともに加振が進むにつれて減少しているが、特に初期の5～6波で半減するに至っている点は興味深い。また、加振後期では両者に違いが生じた。すなわち、深さ3.550mではハードスプリング現象（地盤反力の回復現象）が見られるのに対し、深さ2.225mではその現象は見られない。前者においては、剥離あるいは周辺地盤の劣化が杭近傍付近だけに部分的に生じた可能性があり、杭の動的な地盤反力の複雑さを示す結果となった。

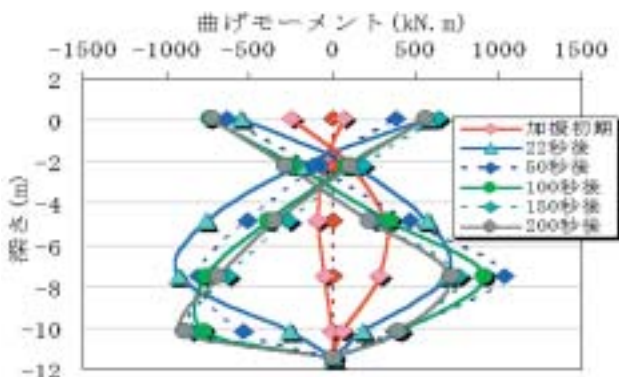


Fig. 3 Depth map of bending moment  
曲げモーメントの深度分布

### 3. 杭基礎の動的遠心実験

前節では、軟弱地盤では地震時に杭と地盤の間に大きな相対変位が生じることで、地盤反力の大幅な低下

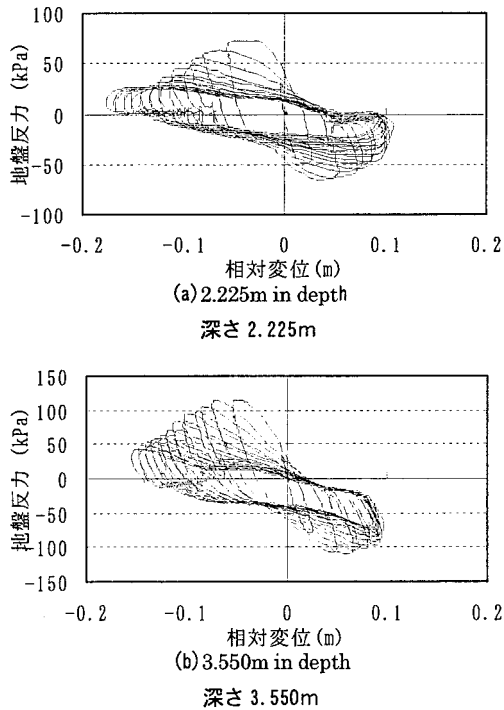


Fig. 4 Relationship between subgrade reaction and pile displacement  
地盤反力～杭変位関係の経時変化

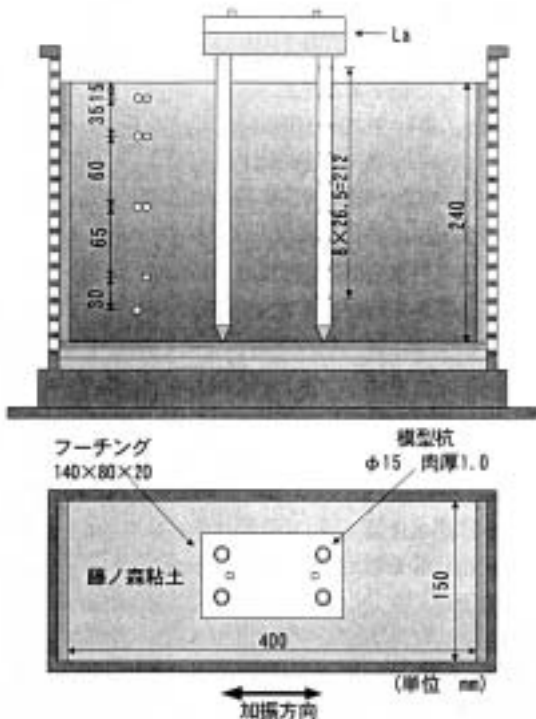


Fig. 5 Schematic diagram of model experimental apparatus

や隙間が起こり、杭の最大曲げモーメントの発生位置が変化することが示された<sup>6)</sup>。しかしながら、粘土地盤に対する振動実験はこれまであまり行われていないため、このような地盤反力特性が構造物の地震時応答へ与える影響については未解明な点が多い<sup>7)</sup>。そこで本節では軟弱地盤における杭基礎の地震時挙動を把握する目的で動的遠心模型実験を行った。

#### 3.1 実験概要

##### a) 加振装置およびせん断土槽

実験で使用した加振装置は油圧式であり、小型の装置ながら高周波で比較的大きな加振力を発生できる特徴がある。なお、本装置の最大加振周波数は200Hzである。

模型土槽として使用したせん断土槽は内寸で幅420mm、高さ270mm、奥行き150mmである。このせん断土槽は、地盤のせん断振動を拘束しないように厚さ15mmのアルミ製水平棒を17段に積み重ねて作られており、そのアルミ棒上下にベアリングを介することで棒同士の摩擦を低減させている。これにより地盤の水平変位の拘束力が減少し、実現象に近い振動状態を再現できる。

##### b) 模型杭

本実験で用いた模型杭は、水平交番試験の結果と比較するために、前節で示した杭と同一のものである。また、本実験においても水平交番試験と同様に4本の群杭基礎を用いた。

##### c) 実験条件

本実験の加振条件をTable 2に示す。作成した地盤はケース1、2の2種類であり、これらに対してそれぞれ大小あわせて2回の加振を行った。ケース1では実物換算値で加振周波数2Hz・140galの正弦波20波で加振した後、2Hz・360galで加振した。ケース2では、それぞれ1Hz・160gal及び1Hz・400galである。

##### d) 実験方法

模型実験装置の概要をFig. 5に示す。本実験では模

Table 2 Experimental conditions  
実験条件

ケース	地盤条件	最大入力加速度 (gal)	加振周波数 (Hz)
1	全層粘土地盤	① 140	2
		② 360	
2	全層粘土地盤	① 140	1
		② 360	

(実物換算値)



型地盤を予め圧密土槽内で作製した後、せん断土槽に設置する方法を採用した。その実験のフローを以下に述べる。実験で用いた圧密土槽は内寸幅400mm、高さ450mm、奥行144mmである。まず試料の藤ノ森粘土を初期含水比80%のスラリー状に調節し、十分に攪拌・脱気した後、容器内に所定の量を投入した。粘土投入後、予備圧密として最終圧密応力が20kPaとなるまで、ペロフラムシリンダーで段階的に加圧した。予備圧密終了後、地盤強度が深さに比例して増加するように浸透圧密を行った。予備圧密、浸透圧密は2t法により、それぞれ圧密終了を確認した。そして模型地盤を成形し、せん断土槽内に設置した。この時、模型杭、加速度計、間隙水圧計などの各種計測センサーをFig. 5に示すように取り付けた。その後、遠心加速度50g場において遠心圧密を行い、2t法により圧密終了を確認し、振動実験を行った。実験終了後、地盤強度の確認のため、粘土を切り出し含水比を測定した。

3.2 実験結果と考察

以下では全て実物換算した値を用いて示す。

a) 応答加速度の結果

Fig. 6は地中部ならびにフーチング部で計測された絶対加速度の応答倍率（測定加速度 / 入力加速度）について経時変化を示したものである。いずれのケースにおいても、加振に伴って応答倍率は低下する傾向を示している。次に杭と地盤の相互作用を調べることを目的として、加速度結果を相対加速度で表示したものをFig. 7に示す。ここで、相対加速度は各深度の絶対加速度から同時刻の基盤部の絶対加速度を差し引いた

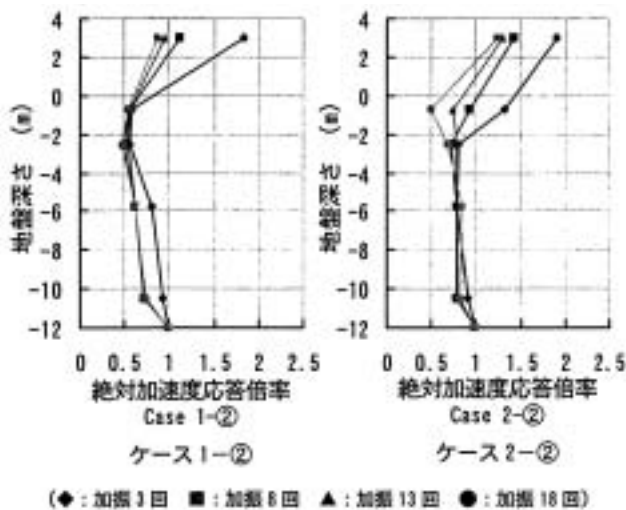


Fig. 6 Absolute acceleration amplification  
絶対加速度応答倍率

ものである。図より、ケース1では地盤の相対加速度は中央部で大きく、地表面および深部で小さくなっており、粘土地盤は2次モードで振動していたことが分かる。また、地盤中央部の相対加速度は、加振初期および終期では小さく、加振中期で最大値を示している。一方、フーチングの相対加速度は加振初期(5.4sec)において大きな値を示すものの、その後加振に伴って小さくなっている。フーチングと地盤の相対加速度を比較すると、最大値を示す時点が異なることに加え、両者が逆位相にあることが特徴的である。これらの傾向は入力加速度が小さいケース1についても同様である。

加振周波数の小さなケース2(1Hz)では、フーチングおよび地盤ともに、加振初期(8.63sec)において大きな相対加速度となり、両者は常に同位相となっている。また、地表面近傍の相対加速度は他に比べて小さくなっているが、これは地盤の劣化によるものと推察される。この点を除けば、地盤の相対加速度は浅くなるにつれて大きくなっており、地盤が1次モードで振動していることを示している。また、これらの傾向は入力加速度が小さいケース2においても確認できる。

以上より、ケース1では地盤が2次モードで、ケース2では地盤が1次モードで振動したといえる。

b) 杭に作用する曲げモーメントの結果

Fig. 8はケース1, 2における曲げモーメントの深度分布をそれぞれの加振時点において示したものである。図より、両ケースともに入力加速度が大きい場合( )の方が曲げモーメントの値も大きくなっている。また、曲げモーメントの最大値は加振初期において最大値となり、その後加振にともなって減少している。これは相対加速度の経時変化と同じ傾向であるが、加振に伴って曲げモーメントが増大した杭の水平載荷試験とは異なる結果となった。従って、地震時の地盤反力およびその変化は杭の水平載荷試験から得られるものとは異なり、構造物の地震時応答の正確な予測のためには地盤反力の正しいモデル化が必要であることが確認された。

ケース1では地盤深部において曲げモーメントが最大となり、曲げモーメント分布が全体的に曲率を有していることから地盤反力が杭全体に作用していることが分かる。それに対しケース2では地表面において最大の曲げモーメントを示し、特に地盤上部の曲げモーメント分布が直線的であることから、地盤反力は地盤上部においては作用しておらず、地表面においては地盤と杭が一体化していると考えられる。このような違いを調べるために地盤と杭の相対変位に着目した。

Fig. 9 は杭と地盤の絶対変位の深度分布である。ここで、絶対変位は絶対加速度を2階積分することにより算出したものであり、図はフーチングにおける絶対加速度が最大の時の結果である。また、基盤においては地盤と杭の絶対変位は同一であると仮定するとともに、杭のたわみは地盤変位に比べて小さいものと考え、地中の杭の絶対変位は基盤とフーチングの変位を直線補間することにより求めた。これより、ケース1においては、杭と地盤の間には大きな相対変位が地盤全体で発生しているが、基盤とフーチングの変位差は小さい。このことからケース1では基礎の慣性力は主として地盤反力に起因するものであり、杭体のたわみによる反力の寄与は少ないと言える。また、このことより曲げモーメントが地中部で最大を示したと考えられる。一方、ケース2では杭と地盤の相対変位はほとんど生じておらず、むしろ基盤とフーチングの変位差が大きくなっている。このことからケース2では基礎の慣性力は地盤反力によるものではなく、主として杭体のたわみに起因するものであると言える。また、このことよ

り曲げモーメントが杭頭部で最大となったと考えられる。ただし、この杭体のたわみによる反力は基盤と杭体との接合面に作用するせん断力や地盤深部における地盤反力によって釣り合う必要があるため、地盤深部における曲げモーメントが比較的大きな値となっている。

このような地盤反力の発現の違いは、地盤の振動モードの違いによると考えられる。すなわち、ケース1のように地盤が2次モードで振動する場合には地盤中央部の地盤反力に対して地盤上・下部の地盤反力が逆向きに打ち消しあうように作用する。一方、ケース2のように地盤が1次モードで振動する場合には地盤反力が低減するように杭基礎が地盤と同方向に1次モードで変形する。結果として、1次モードの場合には杭頭部で大きな曲げモーメントが発生するに至っている。但し、本実験においてはフーチングに上部工が上載されていないため、杭基礎は相対的に剛な構造体であったことも理由の一つである。そこで上部工との相互作用については次節で検討を行った。

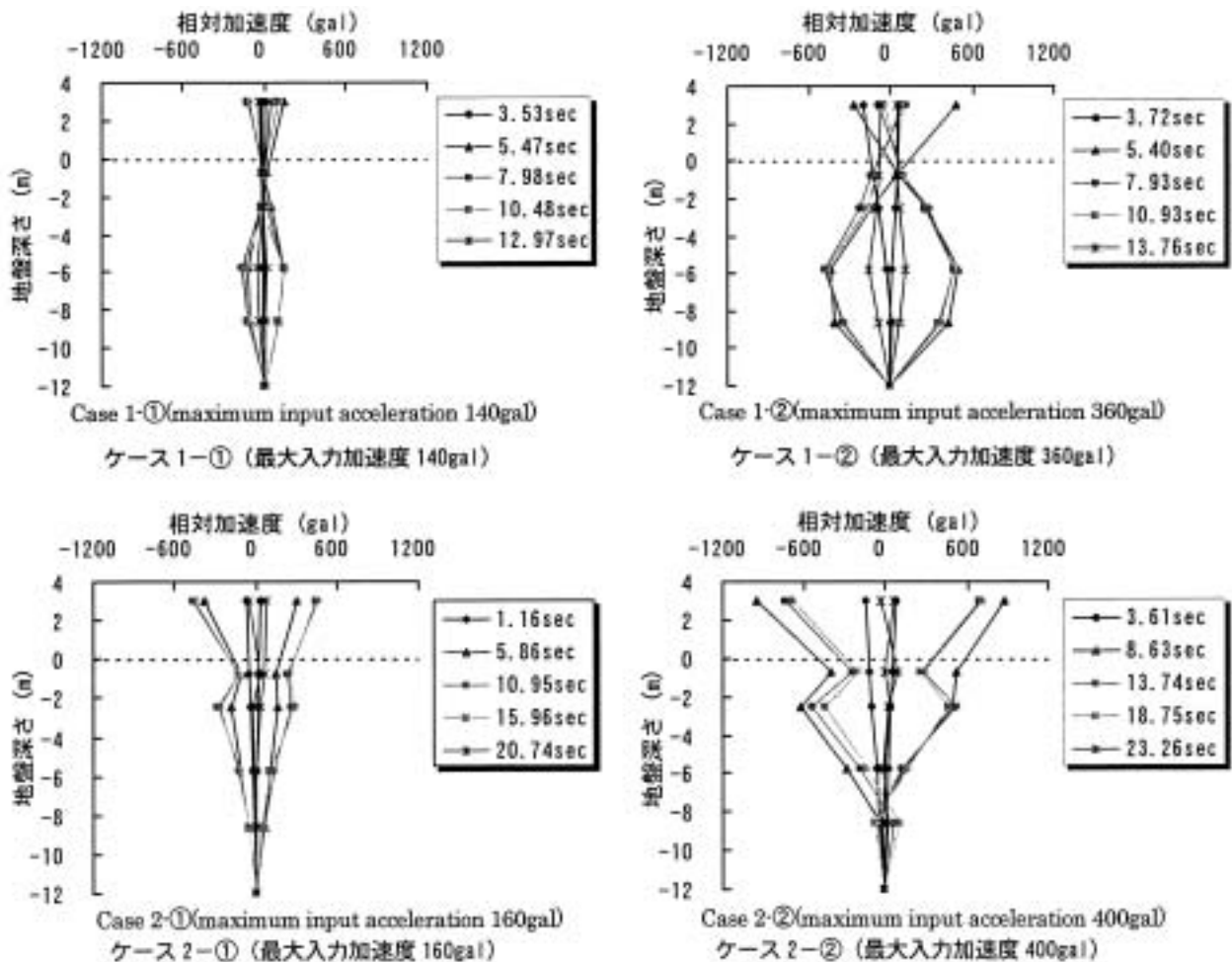


Fig. 7 Distributions of relative accelerations  
相対加速度の深度分布

4. 杭基礎で支持された構造物の動的遠心実験

前節までは、杭と地盤の相互作用に関連して、地盤反力特性並びに地震時の杭基礎と地盤との関係に着目したものであった。しかしながら、既往の研究成果や

多くの地震被害調査によると、一般的には上部工の振動特性が構造物全体の振動応答に大きな影響を与えることは明らかである<sup>8),9)</sup>。従って、ここでは上部工の応答特性と地盤 - 杭基礎系の応答特性との関連性について検討した。

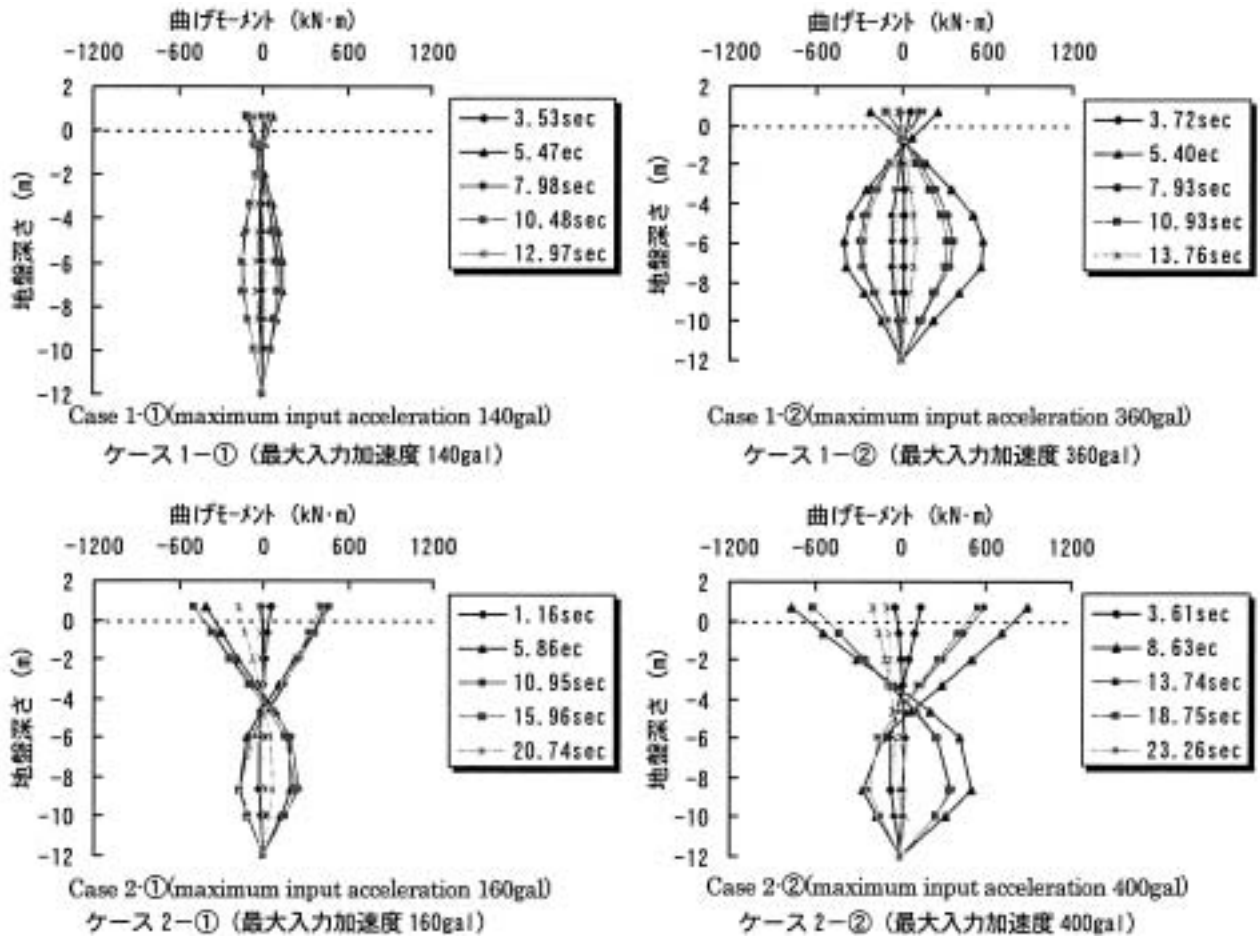


Fig. 8 Distributions of bending moment of piles  
曲げモーメントの震度分布

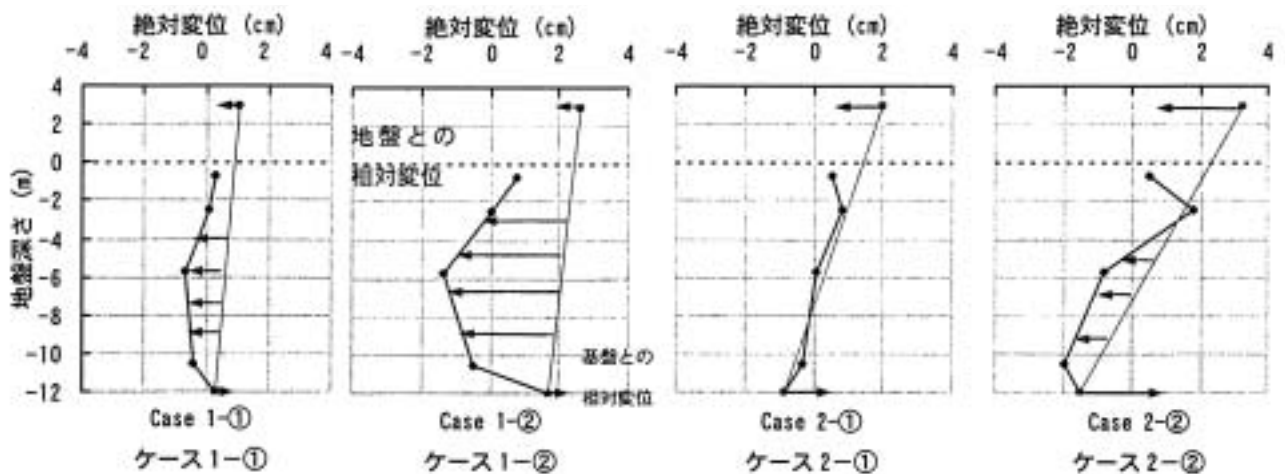


Fig. 9 Distributions of relative displacement between pile and ground  
杭および地盤の変位の深度分布

構造物の振動時の応答特性を実験的に調べるにはスウィープ試験（振動数を変化させた低負荷繰返し振動実験）がよく採用されている。これにより構造物の振動時における周波数特性や固有周期等を把握することができる。しかしながら、飽和砂や粘土を用いた実験では、例えば低加速度の加振においても液状化や軟化が発生し、地盤状態が変化するため、繰返し試験であるスウィープ試験は適さない。そこで、本実験では模型地盤に乾燥砂を用いて、模型構造物のスウィープ試験を行った。また、乾燥砂層の層厚を変化させることにより、擬似的に表層付近の地盤の液状化や軟化を再現することとした<sup>10)</sup>。

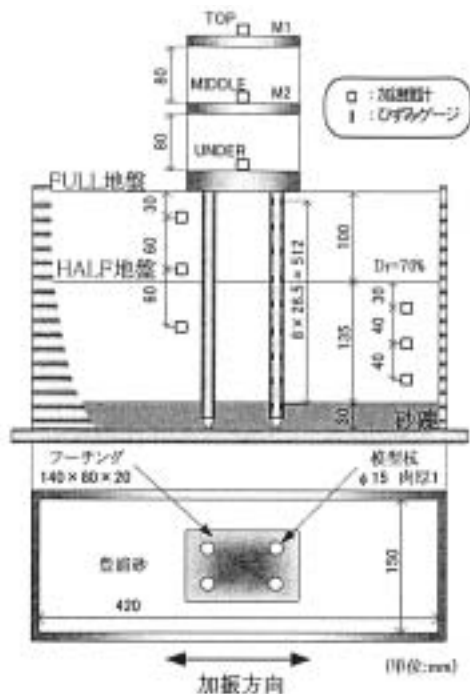


Fig. 10 Schematic diagram of model 模型実験装置

Table 3 Natural frequencies of superstructure 上部構造物の固有振動数

	1次固有振動数 (Hz)	2次固有振動数 (Hz)
壁厚 0.5mm	12	31
壁厚 1.0mm	27	71
壁厚 1.7mm	47	137

Table 4 Predominant frequency of foundation 地盤 - 杭基礎系の卓越振動数

	卓越振動数 (Hz)
地盤 - 杭基礎系 (FULL)	70
地盤 - 杭基礎系 (HALF)	

#### 4.1 実験概要

遠心模型実験装置の概要をFig. 10に示す。本実験で用いた試料は気乾状態の豊浦砂である。模型地盤の作成方法は次のとおりである。まずせん断土槽内部をゴムメンブレンで覆い、模型杭4本を有する基礎を群杭基礎としてせん断土槽底部に設置した。次に平均粒径5mmの砂礫を高さ30mm敷き詰め、その後空中落下法を用いてDr = 70%の地盤を作製する。地盤の層厚は実験ケースで異なっており、FULL地盤は層厚を減らさない場合で、比較的良質な地盤を想定したものである。一方、HALF地盤は地盤の層厚をFULL地盤に比べて100mm減らしたものであり、液状化や軟化が進行した状態を想定したものである。模型地盤を作製した後、基礎上に上部工を設置する。その後遠心加速度場(18.8G)において、最大入力加速度2Gで種々の振動数の正弦波加振を行った。実験条件をTable 3, 4に示す。なお、地盤 - 杭基礎系の振動実験とは基礎上に上部工を設置しないで振動させたケースであり、前節の基礎の振動実験と対応するものである。その他のケースでは全てに上部工を設置しているが、本実験では上部工の壁(りんせい銅)の厚さを変えることにより上部工の固有振動数を変化させている。

#### 4.2 実験結果と考察

上部工の壁厚0.5mmの加速度応答倍率をFig. 11に示す。ここで加速度応答倍率は基礎の相対加速度を入力加速度で除した値である。図中には地盤 - 杭基礎系の加速度応答倍率も記している。壁厚0.5mmのFULL地盤における加速度応答倍率は、上部工の固有振動数(12Hz)では卓越せず、130Hzまでは入力された加速度より小さくなっていることが分かる。HALF地盤では加速度応答倍率は上部工の1次固有振動数である12Hz付近と、地盤 - 杭基礎系の卓越振動数の70Hz付近で卓越した。

次に壁厚1.0mm (Fig. 12)を使用したケースでは、FULL地盤とHALF地盤の双方において上部工の1次固有振動数27Hz付近では卓越した挙動は生じなかった。しかしながら、上部工の2次固有振動数71Hzの近辺では双方の地盤で応答が卓越した。特に、HALF地盤では上部工の2次固有振動数と地盤 - 杭基礎系の卓越振動数が極めて近いので、共振によって過大な応答が発生したと考えられる。

壁厚1.7mmの加速度応答倍率をFig. 13に示す。両地盤ともに、応答倍率の卓越は上部工の1次、2次及び



地盤 - 杭基礎系の卓越振動数の3ヶ所で明確に現れており、両地盤の振動モードは同様であった。しかし応答倍率の大小関係は地盤により異なっており、FULL地盤では上部工の1次固有振動数(40Hz)で、HALF地盤では上部工の2次固有振動数(140Hz)で応答倍

率が最も大きくなった。

入力振動数と杭に生じる曲げモーメントをFig.14に示す。これは各振動数において杭に作用する地中部と杭頭部の曲げモーメントを示したものである。これより、FULL地盤では壁厚1.7mmの1次固有振動数にお

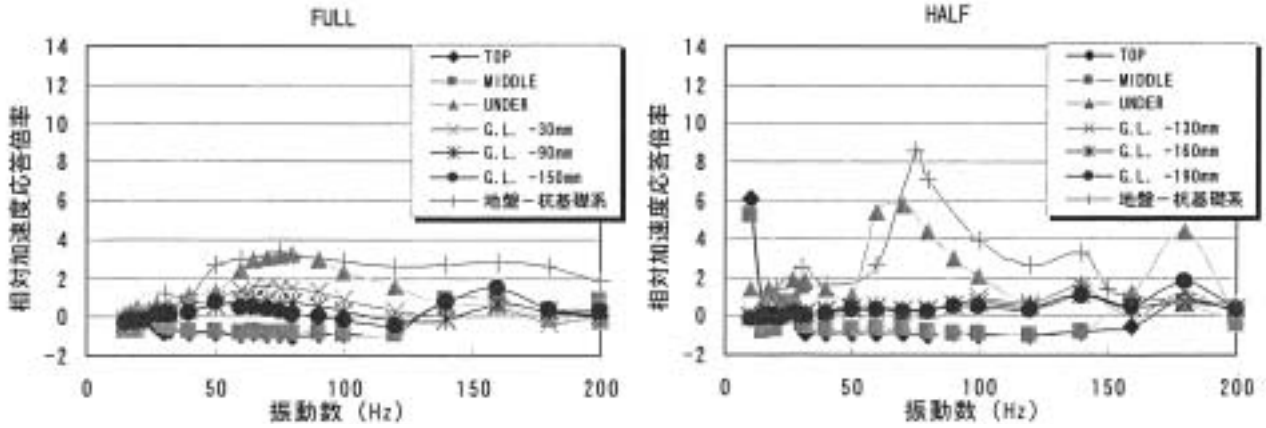


Fig. 11 Acceleration amplification with input frequency (0.5mm) 壁厚0.5mmの加速度応答倍率

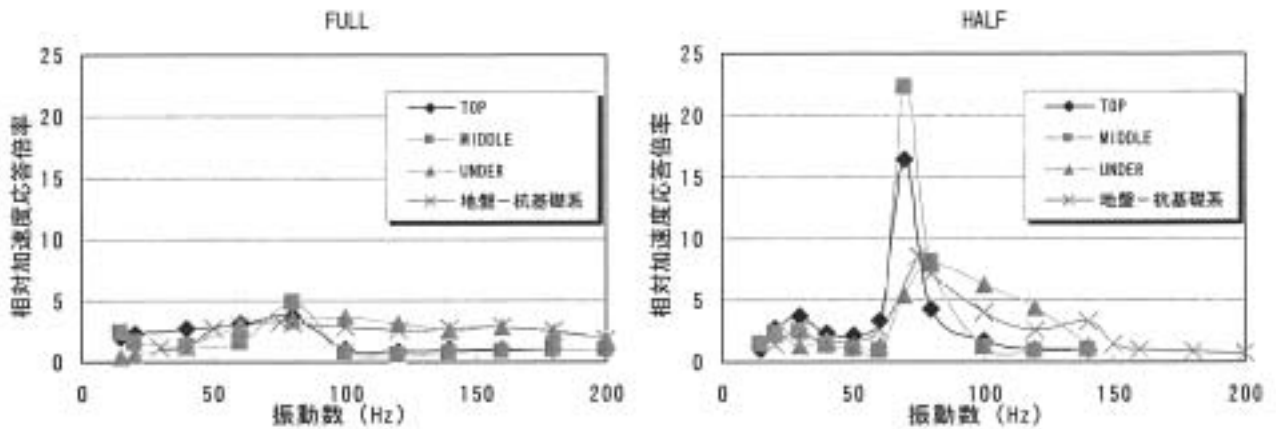


Fig. 12 Acceleration amplification with input frequency (1.0mm) 壁厚1.0mmの加速度応答倍率

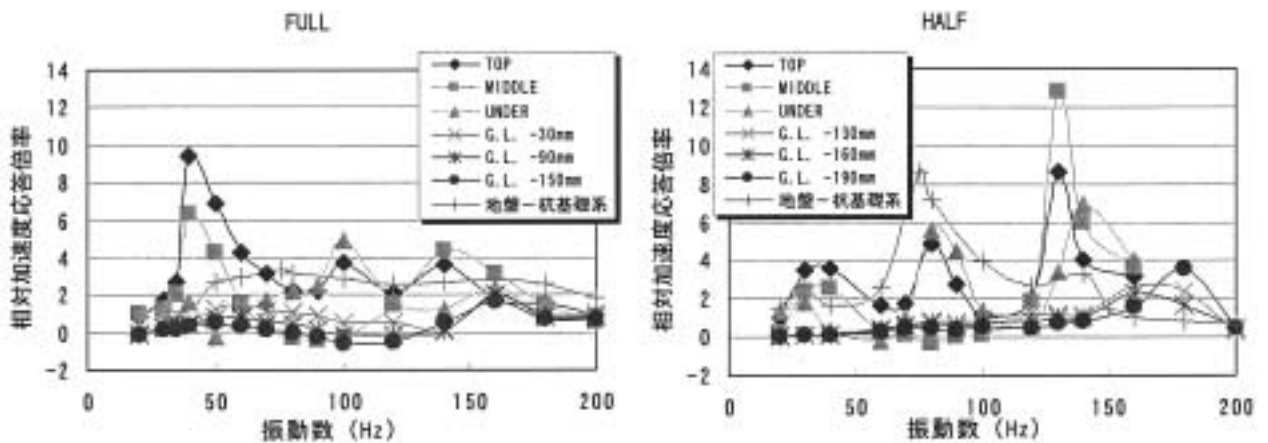


Fig. 13 Acceleration amplification with input frequency (1.7mm) 壁厚1.7mmの加速度応答倍率

いて地中部の曲げモーメントが最大となり、1.0mmでは地盤 杭基礎系の固有振動数付近で杭頭部の曲げモーメントが最大となった。なお、0.5mmのケースでは上部構造物の応答倍率が小さかったために、曲げモーメントはほとんど生じなかった。

HALF地盤で発生した曲げモーメントはFULL地盤に比べて全体的に大きくなり、壁厚1.7mmのケースでは地中部で上部工の1次固有振動数と地盤 - 杭基礎系の卓越振動数で、壁厚0.5mm、1.0mmのケースでは地盤 杭基礎系の卓越振動数で最大曲げモーメントが生じた。

これらの結果より、上部構造物の応答特性や杭に生じる曲げモーメントは、地盤 - 杭基礎系の応答特性や地盤条件に大きな影響を受けることが確かめられた。しかしながら、これらの相互作用は極めて複雑であるため、個々の実験ケースを精査しても全体像を把握することが難しい。そこで、上部構造物の1次、2次固有振動数および地盤 - 杭基礎系の卓越振動数に関する

次のようなパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ を導入し、相互作用の関係を把握することとした。すなわち、

$$\alpha = \frac{n_\alpha - n_1}{n_2 - n_1} \quad \beta = \frac{n_\beta - n_1}{n_2 - n_1}$$

である。ここで $n_1$ ：上部工1次固有振動数、 $n_2$ ：上部工2次固有振動数、 $n_\alpha$ ：入力波の振動数、 $n_\beta$ ：地盤の振動数である。

$\alpha$ 、 $\beta$ で整理した相対加速度応答倍率をFig. 15に、杭に生じる曲げモーメントをFig. 16に示す。

FULL地盤（地盤反力が十分に期待できる）に、入力振動数が上部工の2次固有振動数に近い入力振動数が作用した場合（ $\alpha = 1$ ）は、上部工の応答倍率と杭に発生する曲げモーメントがいずれもあまり大きく現れず、構造物の被害は軽微であると考えられる。しかしながら、入力振動数が上部工の1次固有振動数付近にある場合（ $\alpha = 0$ ）は、応答倍率と曲げモーメントは共

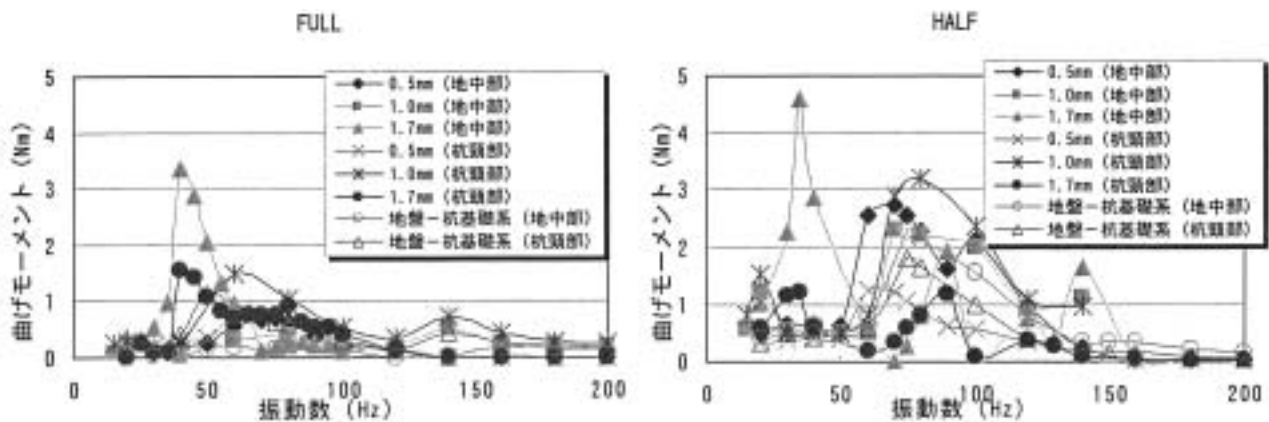


Fig. 14 Bending moment of pile  
杭に生じる曲げモーメント

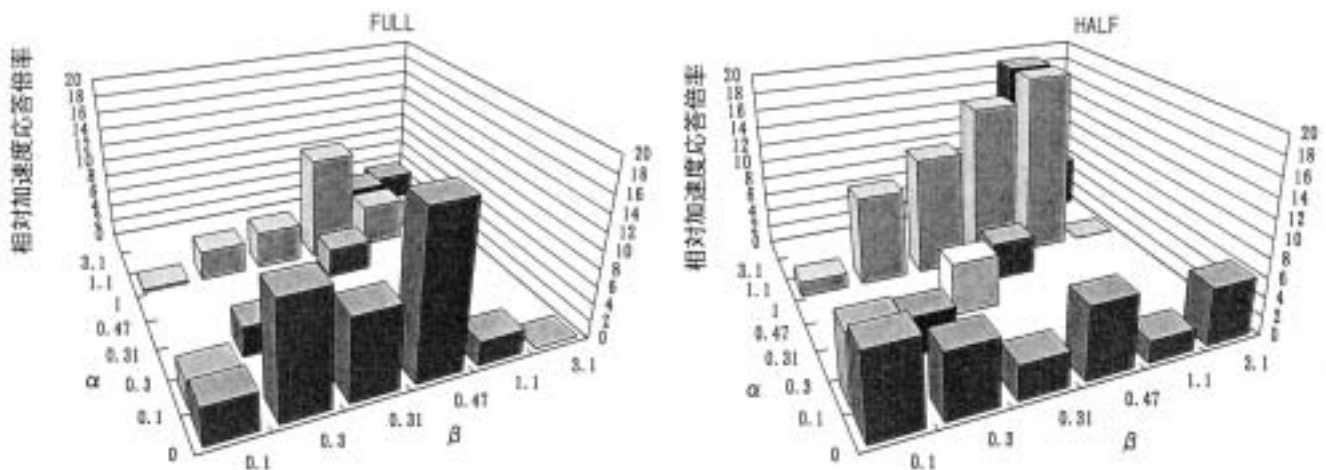


Fig. 15 Relative acceleration amplification with  $\alpha$  and  $\beta$ ,  
による相対加速度応答倍率

に大きくなる傾向を示す。特に地盤 - 杭基礎系の卓越振動数が上部工の1次と2次の固有振動数の間にある場合には非常に大きな応答倍率となる危険性がある。

一方、HALF地盤（液状化や強度軟化が発生する）の場合には、FULL地盤の場合と結果が大きく異なっている。すなわち、上部工の応答倍率や杭の曲げモーメントは、入力振動数が上部工の1次固有周波数よりも2次固有周波数に等しいとき（ $\alpha = 1$ ）に大きくなると言える。さらにこれらは地盤 - 杭基礎系の卓越振動数が上部工の2次固有周波数に近くなるほど（ $\beta \rightarrow 1$ ）、大きくなる傾向を示している。次に入力振動数が上部工の1次固有周波数に近い場合（ $\alpha \rightarrow 0$ ）には、上部工の応答倍率と杭の曲げモーメントはトレードオフの関係にあることが分かる。このことは上部工が被災した場合には杭の損傷は少なく、逆に杭が損傷した場合には上部工の被害は軽微であることを示しており、実際の地震被害の状況とよく一致していると考えられる。これらの結果より、地震による構造物の損傷の形態や度合いは地盤条件によって大きく異なるため、構造物被害を軽減するためには地盤条件を十分に加味する必要があると言える。

### 5. まとめ

本論文では、地盤 - 杭基礎 - 上部構造物の3者の動的な相互作用に関して基礎的な知見を得ることを目的として、1) 杭基礎の水平交番荷試験、2) 杭基礎の動的遠心実験、3) 杭基礎で支持された構造物の動的遠心実験を実施した。これらより得られた結論は以下の通りである。

#### 1) 杭基礎の水平交番試験

軟弱粘土地盤中における杭の水平交番荷試験（一定ピーク荷重条件）より、繰返し荷回数増加に伴って、地盤上層の地盤反力は急激に減少し、杭体に発

生する最大曲げモーメントの発生位置は深くなること分かった。但し、このような地盤反力 - 変位関係は深さや繰返し回数によって複雑に変化するため、杭基礎構造物に関する精度の良い地震時応答を得るためにはさらなる検討が必要であることが分かった。

#### 2) 杭基礎の動的遠心実験

杭に生じる地盤反力や曲げモーメントの深度分布は、地盤の振動モードにより大きく異なることが確かめられた。特に地盤の振動モードが1次であるとき、杭基礎は地盤と一体化する方向に変位し、杭頭部で最大の曲げモーメントが発生する。一方、地盤の振動モードが2次であるとき、杭基礎と地盤の相対変位は小さくなり、杭体に発生する曲げモーメントは地中部で最大となること分かった。

#### 3) 杭基礎で支持された構造物の動的遠心実験

杭基礎で支持された構造物の地震時応答に関して、地盤反力が十分に期待できる良質な地盤の場合には、上部工の1次固有振動数が全体系の応答について最も考慮すべき振動数となり、そのとき加速度応答倍率と杭体に発生する曲げモーメントが最大となる。一方、地盤上部の地盤反力があまり期待できない場合には、上部工の2次固有振動数について十分な検討が必要である。特に地盤 - 杭基礎系の卓越振動数がそれに近づくとともに、加速度応答倍率や杭体の曲げモーメントがともに増大する。

### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会編：道路橋示方書・同解説・耐震設計編，pp.119-126，2002.
- 2) 時松孝次：地盤および基礎構造から見た建物被害，土と基礎，vol.44，No.2.Ser.No.457.pp.14-18，1996.
- 3) 大川寛：地震時における軟弱粘土地盤と杭基礎の

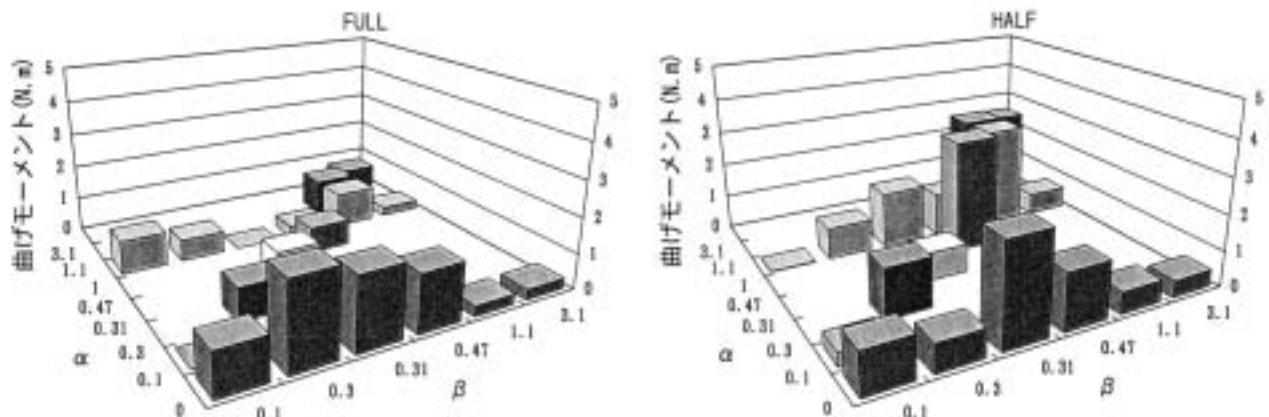


Fig. 16 Bending moment of pile with  $\alpha$  and  $\beta$  による杭に生じる曲げモーメント

- 動的相互作用の解明，武蔵工業大学修士論文，2002.
- 4) 田村敬一：ロマ・ブリエータ地震によるサイプレス通りの地震動特性，土木技術資料，第33巻，第7号，pp.51-55，1991.
- 5) 伯野元彦，横山功一，佐藤安一郎：模型杭基礎の復元力特性に関するオンライン・リアルタイム実験，土木学会論文集，第200号，pp.85-95，1972.
- 6) 伊藤和也：杭と地盤の間に発生する隙間が構造物の地震応答に与える影響，武蔵工業大学修士論文，2000
- 7) Ross W. Boulanger，Christina J. Curras，Bruce L. Kutter，Daniel W. Wilson，Abbas Abghari：Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses，Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，Vol.125 No.9 (September)，pp.750~pp.759，1999.
- 8) 西村明彦，室野剛隆，永妻真治：杭基礎構造物の地震時挙動に関する実験的研究，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1581-1586，1998.
- 9) 日本建築センター，地震力に対する建築物の基礎の設計指針，1984.
- 10) 上坂直弘：一体系構造物における基礎杭の地震時挙動，武蔵工業大学修士論文，2003.
- (平成15年11月26日受理)