

武蔵工業大学 地盤環境工学研究室 様
独立行政法人 産業安全研究所 様

1. はじめに

地震時に発生する液状化により杭基礎に受ける被害は、北海道南西沖地震(1993年)では杭頭部での曲げせん断破壊や、地中部での破断などの例が、また兵庫県南部地震(1995年)では、杭基礎が損傷したものの上部構造物の被害が軽微である例や、逆に杭基礎に損傷がないのに上部構造物に被害が見られるなど多様な例があった。

一般に地震発生時に地盤が液状化すると、液状化中の地盤剛性の低下によって杭基礎に作用する地盤反力が低下するため、杭基礎 - 構造物系の固有振動数は小さくなる。この液状化の進行中に地盤 - 杭基礎系の固有振動数と地震波の卓越振動数が一致すると過渡的な共振現象が起り、過大な応答状態になる場合がある。そこで、本研究は、液状化の進行中における過渡的な共振現象に着目し、地盤 - 杭基礎 - 構造物系の動的相互作用が構造物の挙動や杭に生じる曲げモーメントに与える影響を検討することを目的として、武蔵工業大学 都市基盤工学科 地盤環境工学研究室と独立行政法人 産業安全研究所の共同研究として行われた。¹ 地盤モデルの応力を実地盤と同じ状態に保つことのできる遠心模型実験装置²(図-1)(独立行政法人産業安全研究所所有)と振動による土の動きを拘束しないせん断土槽³(写真-1)を採用したことにより、地震時の実地盤の力学特性に合わせた実験が可能となった。

2. 液状化地盤の模型

せん断土槽の内部全体をゴムメンブレンで覆い、その底に平均粒径5mmの砂礫を層厚30mm敷き詰めた上に、乾燥豊浦砂(粒径1mm以下)を使用して、液状化前地盤(液状化現象の比較的初期の地盤)と液状化進行中地盤の2種類を作製した。液状化前地盤は、せん断土槽の最上部まで乾燥砂を入れた模型地盤である。液状化進行中地盤は、層厚を減らせば乾燥砂で飽和砂の代替ができることを確認してあるので、液状化前地盤の最上部より層厚を100mm下げて製作してある。

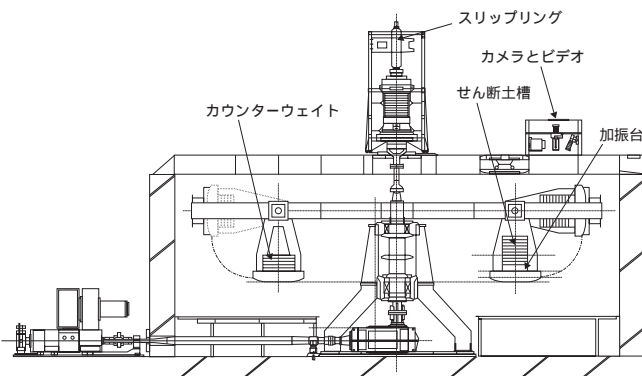


図-1 遠心模型実験装置

それぞれの地盤には直径15mm、厚さ1mmのアルミ管(弾性杭)を4本設置し、場所打ち杭による群杭を模擬した。したがって、液状化前地盤では杭全体が砂で支持された状態であり、液状化進行中地盤では突出杭の状態が与えられている。杭の頭部をフーチングに固定し、その上に構造物を設置した。せん断土槽、地盤、センサ類の取り付け概要を図-2に示す。

3. センサと実験

杭中心の曲げひずみを測定するため、杭の両側面9か所に18枚のひずみゲージを貼り付け、両側面2枚を1組とし、2ゲージ法で配線

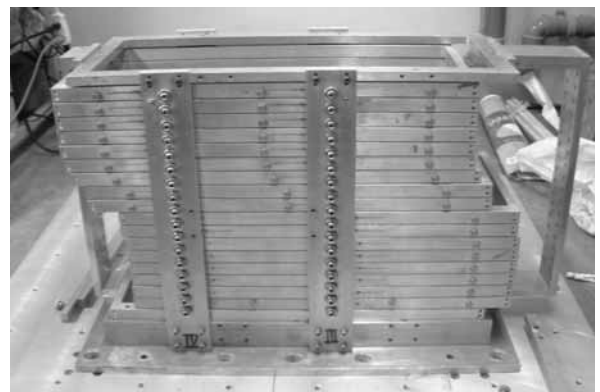


写真-1 せん断土槽

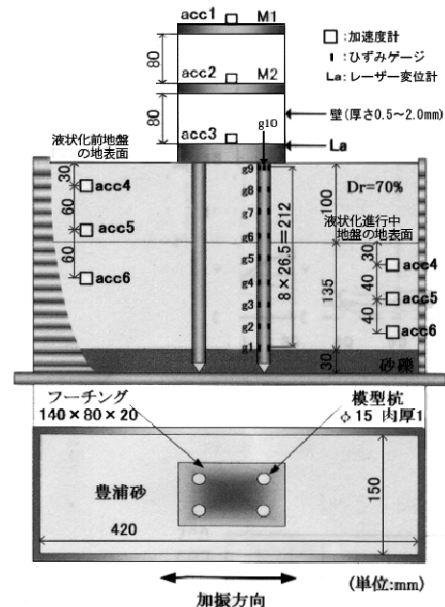


図-2 せん断土槽、地盤、センサの取り付け

1 本実験は武蔵工業大学地盤環境工学研究室 上坂直弘(現 当社技術本部特機部)の修士論文。

2 遠心模型実験装置は、実物を1/nに縮尺した地盤模型に重力加速度n倍の遠心加速度を作用させ、実地盤の応力状態を地盤模型内に再現する実験手法である。装置のアームの両端に取り付けられているスウィングアップ方式のプラットフォームの片端に供試体(せん断土槽)を、他端に供試体の重量に応じたカウンターウェイトを搭載する。概要:最大遠心加速度200G,最大積載荷重500kg,回転半径(最大外径2.68m,載荷面2.31m,試料箱中心2m),最大回転数(中心軸300rpm,駆動軸1750rpm),設置箇所地下。

3 せん断土槽(内寸幅420mm,高さ270mm,奥行き150mm)は、厚さ15mmのアルミ製水平枠を17段積み重ねて作られている。枠は加振時に慣性力を低減させるため内部を中空にして軽量化しており、枠の上下にベアリングを組み込み、枠同士で起こる摩擦を低減させてせん断振動を拘束しないよう製作されている。

した。杭頭部には軸力を測定するためのひずみゲージ1枚(両ゲージともKFG-10-120-C1-11 L3M3R 共和電業製)を貼り付けた。模型地盤と上部構造物の応答加速度を測定するため加速度計(容量±100G)を3個ずつ設置した。入力加速度を測定するため加振台に三軸型加速度変換器(AS-TA 共和電業製)を取り付けた。加振時の変位測定としてフーチングにはレーザー変位計(容量40±10mm)を、せん断土槽にはL.V.D.T.式変位計(容量±30mm)を使用した。

実験は、地盤のみ、地盤と杭(フーチングを含む)のみを設置した地盤-杭基礎系、その上に上部構造物を設置した地盤-杭基礎-上部構造物系の3グループで行われた。地盤と上部構造物の固有振動数を表-1に示す。遠心模型実験装置によって得られた遠心加速度場(18.8G)において、プラットフォームに搭載された油圧式加振機で最大入力加速度2Gで20~200Hz(10Hz)間隔の正弦波加振を行った。実験装置の運転は地上のコントロールルームにあるコンピュータの制御で行われ、測定データはスリッピングを介して遠心载荷試験計測装置(共和電業製 特別注文品)で集録された。

表-1 地盤と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)
液状化前地盤	70	
液状化進行中地盤	75	
上部構造物の壁厚(mm)	0.5	31
	1.0	71
	1.2	115
	1.5	133
	1.7	137
2.0	182	

4. 実験結果

加速度応答倍率

上部構造物の壁厚が1.7mmの場合における加速度応答倍率を図-3に示す。液状化前地盤と液状化進行中地盤では応答倍率の卓越は3箇所に見られ、それぞれの振動モードは同一になった。しかし、液状化前地盤では40Hz付近の振動数で卓越し、応答倍率はフーチングより上部構造物の値が大きく、TOPでは10倍の値が発生した。このことから40Hzは地盤-杭基礎-構造物系の固有周期であるといえる。液状化進行中地盤では35, 80, 140Hzで卓越した。35Hzの上部構造物の応答は、フーチングよりも上部構造物の方が大きく現れた。80Hzは板厚1.7mmの1次固有振動数と重なり、フーチングの固有振動数にも等しいため、フーチングは上部構造物より大きな挙動を示した。140Hzの上部構造物に卓越した挙動が生じているのは上部構造物の2次固有振動数が地盤の影響から発生したことにより生じたと考えられる。以上により、液状化の発生とともに地盤-杭基礎-上部構造物の共振振動数が大きく変化することが言えた。

杭に生じる曲げモーメント

入力振動数に対する杭基礎の地中部と杭頭部における曲げモーメントの応答特性を図-4に示す。液状化前地盤では壁厚1.7mmの1次固有振動数において地中部で曲げモーメントの最大値が生じ、1.0mmでは杭頭部で地盤-杭基礎系の影響を受け曲げモーメントの最大値が生じている。0.5mmは上部構造物の挙動が小さいため曲げモーメントはほとんど生じていない。液状化進行中地盤の曲げモーメントは液状化前地盤に比べ全体的に大きくなり、1.7mmでは地中部で1次固有振動数と地盤-杭基礎系の固有振動数で、0.5mm, 1.0mmは地盤-杭基礎系の振動特性で最大曲げモーメントが生じた。

本研究では、弾性杭だけでなく、非線形挙動を考慮した塑性杭および飽和砂地盤についても同様な実験を実施した。

これらの実験結果を通して、杭で支持された構造物の地震時の安定性は、それが立地する地盤と地震動の種類に強く影響を受けることが確認できた。

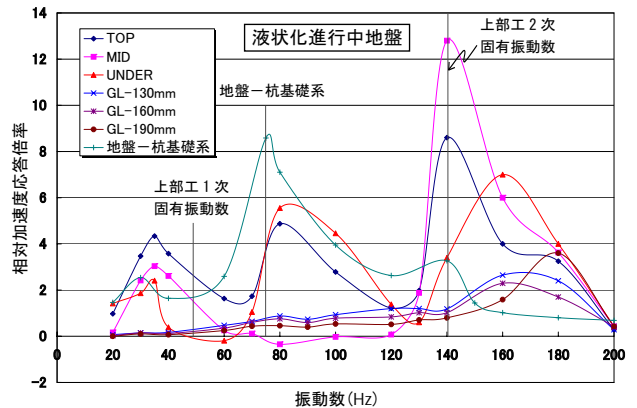
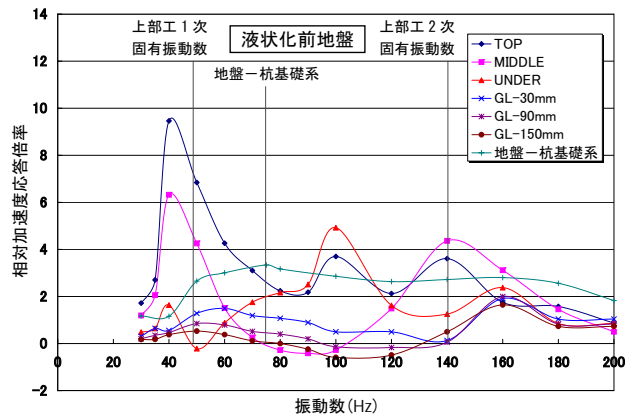


図-3 壁厚1.7mmの加速度応答倍率
(上図 液状化前地盤, 下図 液状化進行中地盤)

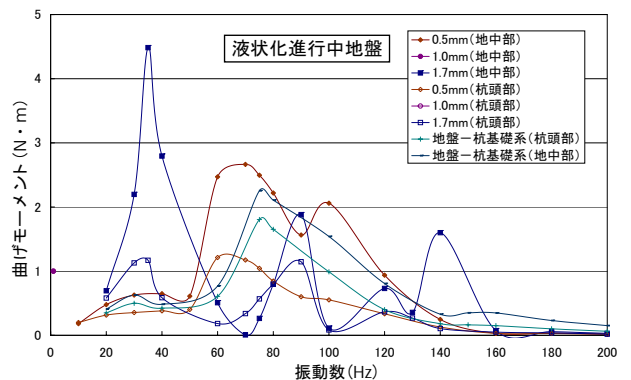
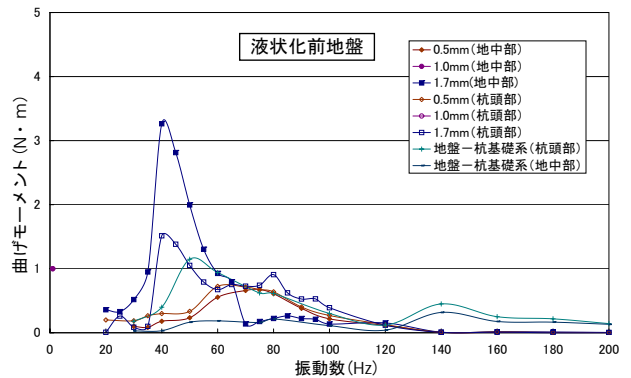


図-4 杭に生じる曲げモーメント
(上図 液状化前地盤, 下図 液状化進行中地盤)

本文中の敬称は、省略させていただきました。