

液状化地盤における鋼管杭の遠心载荷実験

正会員○小野原公一^{*1} 同 木村祥裕^{*2} 同 田村修次^{*3} 同 栗木周^{*4}

2. 構造 - 4. 基礎構造 建築構造

鋼管杭, 動座屈, 液状化, 遠心载荷実験

1. 序

これまでの研究によって, 静的解析により液状化地盤において鉛直力及び水平力が作用するときの鋼管杭の座屈挙動, 最大軸力と最大作用モーメントの関係を明らかにした¹⁾。さらに, 動的解析により杭頭に初期軸力及び変動軸力が作用するときの鋼管杭の動座屈挙動を明らかにし, 係数励振現象により地震時に早期に動座屈が生じる可能性を示した²⁾。

現行の設計指針³⁾では, 一般に軟弱地盤であっても軸圧縮力によって生じる鋼管杭の曲げ座屈は, 地盤の水平剛性によって十分拘束できると考えられている。しかし, 地震時に地盤が液状化した場合, 上屋構造物の慣性力によって生じる $P-\Delta$ 効果により転倒モーメントが偶力として杭頭に作用すると, 軸圧縮力の増加に伴い, 細長比の大きい鋼管杭は曲げ座屈を生じる可能性がある。

そこで本研究では, 遠心载荷実験により, 上屋構造物・杭基礎における鋼管杭の動座屈崩壊挙動を再現し, そのメカニズムを解明する。

2. 鋼管杭の遠心载荷実験概要

図 1 に試験体及び計測位置を示す。試験体は杭-基礎部-上屋構造物系とした。遠心载荷実験は, 京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用いて行った。遠心装置の半径は 2.5m である。実験は全て 40g 場で行った。今回の実験では, 予備実験として地盤拘束が無い状態で実験を行い, その後液状化地盤で実験を行った。液状化地盤における地盤モデルは, 図 1 に示すように全層液状化層とし, ケイ砂で相対密度-11%程度とした。間隙水は, 粘性を水の約 40 倍に調整したメトロローズ溶液を用いた。加速度計, 歪ゲージ及び間隙水圧計は図 1 に示すように配置した。杭頭, 杭端は固定しており, 基礎部の水平変位も拘束しているが, 基礎部の回転は許容している。

表 1 に試験体の諸元を示す。実験装置の性能を考慮し, 杭材にはアルミ材 A1050S, 板バネにはアルミ材 A5052 を用い, その他の部分には SS400 を用いた。アルミ材と鋼材では弾塑性状態での実挙動に違いはあるが, 鋼管杭は塑性加工により製作され, アルミ材と同様, 明瞭な降伏点をもたない Round House 型となる。杭材の長さに関しては, 予備解析により動座屈を生じ

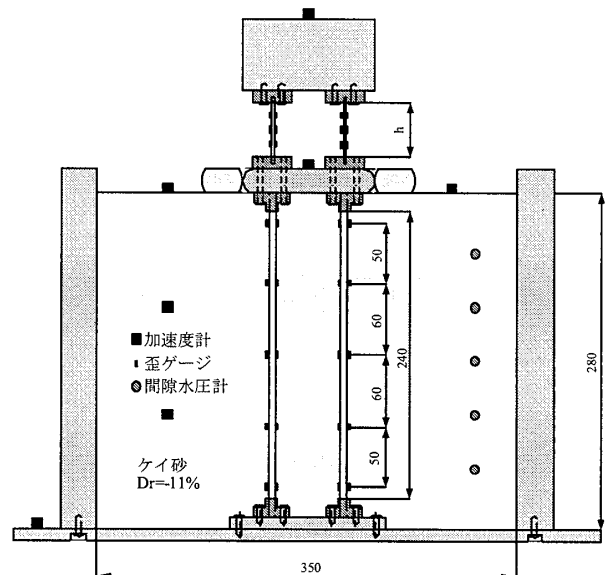


図 1 試験体及び計測位置(単位: mm)

表 1 試験体諸元

	項目	模型 スケール	実大 スケール
上屋構造物	重量(N)	30.5	1.95×10^6
板バネ	板厚(mm)	2	80
基礎部	重量(N)	13.0	0.83×10^6
杭材	長さ(mm)	240	9600
	外径(mm)	6	240
	板厚(mm)	0.5	20
	曲げ剛性(N・m ²)	2.17	5.54×10^6

表 2 試験体パラメータ

試験体	地盤	板バネ長さ h(mm)		最大水平 加速度振幅 (gal)	上屋固有周期 T (s)	
		模型 スケール	実大 スケール		模型 スケール	実大 スケール
a-1	地盤	45	1800	100→180	0.024	0.99
a-2	無し	35	1400	100	0.022	0.89
b-1	液状化	45	1800	200	0.030	1.18
b-2	地盤	35	1400	200	0.029	1.14

る杭材の長さを検討し、実験装置の性能を考慮して長さを設定した。

表 2 に試験体パラメータを示す。また、加振には正弦掃引波を用い、実大スケールにおいて加振開始 10 秒後から 50 秒間で入力波の周期を 2.0 秒から 0.3 秒まで下降させた。最大水平加速度振幅は表 2 に示す通りである。また、表 2 に示す固有周期は上屋構造物の固有周期である。

図 2 及び表 3 に杭材の引張試験結果及び材料特性を示す。図 2 において、縦軸に応力 $\sigma(\text{N/mm}^2)$ 、横軸に歪 $\epsilon(\%)$ を示す。杭材に使用した A1050S は明確な降伏点を示さないため、ここでは 0.2% 耐力を降伏応力と定義し、降伏応力を $\sigma_y=136\text{N/mm}^2$ とする。また、ヤング率は $E=6.58 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ である。

試験体は、板バネの剛性に比べ基礎部の剛性が非常に大きいため、動座屈発生まではロッキング振動や柱脚曲げモーメントによる影響は少ない。本実験は、動座屈発生までは、上屋構造物の水平変形による重心移動と、曲げ変形による $P-\Delta$ 効果による圧縮荷重の増加による鋼管杭の動座屈挙動を把握するものである。

また、本実験においては静的解析の結果を元に、杭材中央の水平変位が材長の 0.3% に達した時点で動座屈とみなす。

3. 鋼管杭の遠心載荷実験結果

図 3 に土槽底部の水平加速度応答時刻歴を示す。図 3 (i) に試験体 a-1 における最大水平加速度振幅 100gal 時、図 3 (ii) に試験体 b-1 における最大水平加速度振幅 200gal 時の土槽底部の水平加速度応答時刻歴を示す。縦軸は土槽底部の水平加速度 $a(\text{cm/s}^2)$ 、横軸は時刻 $t(\text{s})$ である。

図 4、図 5、図 6 に試験体 a-1、a-2 における最大水平加速度振幅が 100gal 時の応答時刻歴を示す。図 4 に上屋構造物の水平加速度応答時刻歴、図 5 に杭材中央の軸歪応答時刻歴、図 6 に杭材中央の水平変位応答時刻歴を示す。図 4 において、縦軸は上屋構造物の水平加速度 $a(\text{cm/s}^2)$ 、図 5 において、縦軸は杭材中央の軸歪 $\epsilon(\%)$ 、図 6 において、杭材中央の水平変位 u を材長 l で除した u/l を百分率(%)で表したものである。横軸は全て時刻 $t(\text{s})$ である。また、図 6 における破線は動

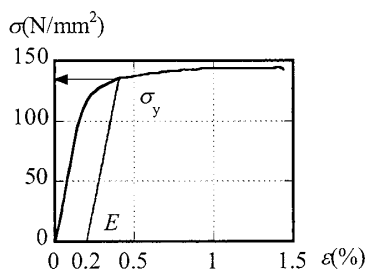


図 2 杭材の引張試験結果

表 3 杭材の材料特性
(単位: N/mm^2)

σ_u	145
σ_y	136
E	6.58×10^4
E_{st}	727

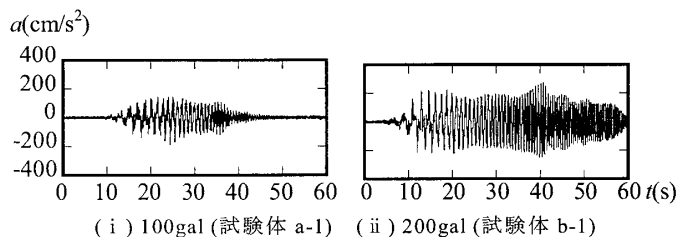


図 3 土槽底部の水平加速度応答時刻歴

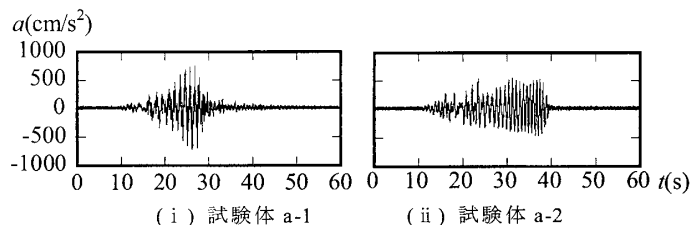


図 4 100gal 時の上屋構造物の水平加速度応答時刻歴(地盤無し)

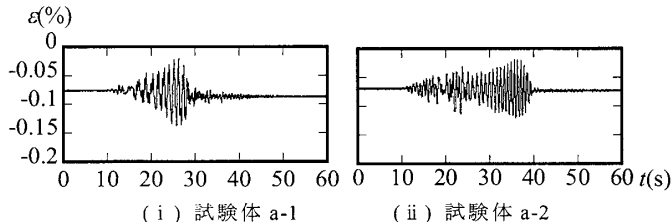


図 5 100gal 時の杭材中央の軸歪応答時刻歴(地盤無し)

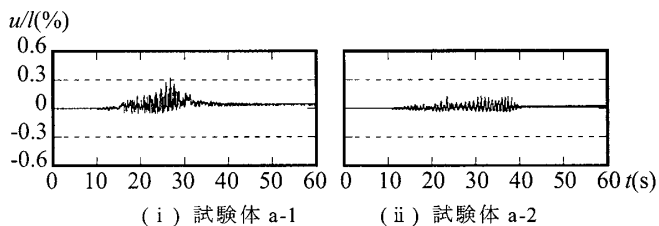
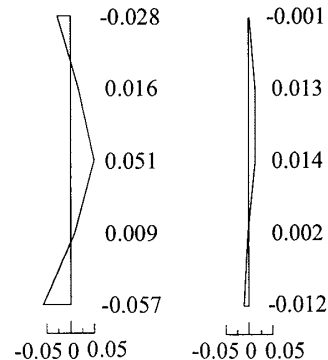


図 6 100gal 時の杭材中央の水平変位応答時刻歴(地盤無し)

座屈発生時の水平変位

である。図 4 において、試験体 a-1 では 27s 付近で周期が 1.08s、a-2 では 35s 付近で周期が 0.81s のときに上屋構造物が共振している。

図 4、図 5 において、上屋構造物が共振することにより、杭材の軸



(i) 試験体 a-1 (ii) 試験体 a-2

図 7 100gal 時の杭材の最大曲げ歪分布(地盤無し)(単位: %)

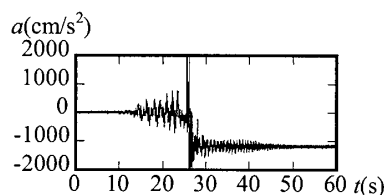


図8 崩壊時の上屋構造物の水平加速度応答時刻歴(地盤無し)

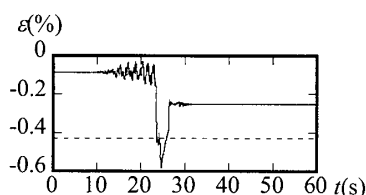


図9 崩壊時の杭材中央の軸歪応答時刻歴(地盤無し)

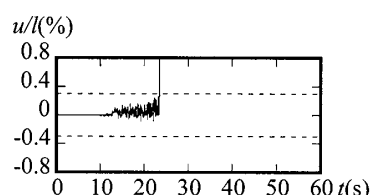


図10 崩壊時の杭材中央の水平変位応答時刻歴(地盤無し)

歪が大きく変動している。また、板バネの長さが $h=45\text{mm}$ の試験体 a-1 の方が $h=35\text{mm}$ の試験体 a-2 より軸歪の変動が大きくなっている。また、図 6 において、試験体 a-1 は動座屈を生じているが、試験体 a-2 は動座屈を生じていない。

図 7 に試験体 a-1, a-2 における最大水平加速度振幅が 100gal 時の最大曲げ歪分布を示す。杭材には初期たわみがあるため、軸力の増加に伴い曲げ歪も大きくなる。動座屈を生じた試験体 a-1 では、動座屈の発生により基礎部の回転拘束が弱まりロッキング振動の影響を受けたため、より大きい曲げ歪が生じている。

図 8, 図 9, 図 10 に試験体 a-1 における試験体崩壊時の応答時刻歴を示す。最大加速度振幅は 180gal である。図 8 に上屋構造物の水平加速度応答時刻歴, 図 9 に杭材中央の軸歪応答時刻歴, 図 10 に杭材中央の水平変位応答時刻歴を示す。図 9 における破線は静的座屈荷重が作用した場合の軸歪で、静的座屈荷重の値より杭材の引張試験結果を元に算定している。静的座屈荷重式を以下に示す。

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad (1)$$

ここで、 EI は杭材の曲げ剛性である。図 8 において、23s 付近で周期が 1.22s のときに上屋構造物が共振している。図 9 において、静的座屈荷重が作用した場合の軸歪の値を瞬間的に上回った。図 10 において、共振と同時に水平変位が大きくなり、最終的には動座屈により杭材が崩壊した。

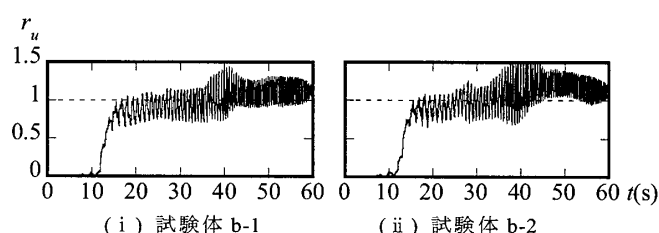
図 11, 図 12, 図 13, 図 14 に液状化地盤における試験体 b-1, b-2 の応答時刻歴を示す。最大加速度振幅は 200gal である。図 11 に過剰間隙水圧比応答時刻歴, 図 12 に上屋構造物の水平加速度応答時刻歴, 図 13 に杭材中央の軸歪応答時刻歴, 図 14 に杭材中央の水平変位応答時刻歴を示す。図 11 において、縦軸は過剰間隙水圧比 r_u , 横軸は時刻 $t(\text{s})$ を表す。図 13 における破線

は静的座屈荷重が作用した場合の軸歪である。図 11 において、どちらの試験体も 12s 程度から過剰間隙水圧が上昇し、15s 付近で液状化した。30s 付近から 1 を大きく超えているのは、基礎部の沈下により過剰間隙水圧が瞬間的に上昇したためである。図 12 において、試験体 b-1 では 19s 付近で周期が 1.29s, a-2 では 20s 付近で周期が 1.24s のときに上屋構造物が共振している。図 13 において、液状化地盤の場合も地盤無しの場合と同様に上屋構造物の共振により杭材の軸歪が大きく変動している。また、図 14 において、杭材の水平変位が大きくなり、最終的に動座屈により崩壊した。

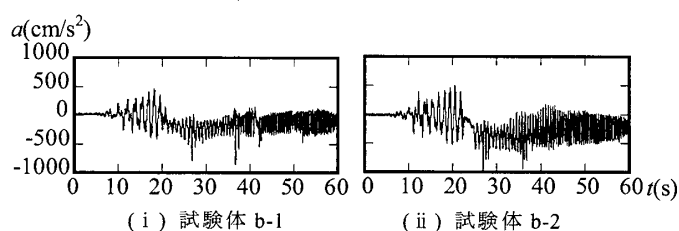
写真 1 に液状化地盤における加振後の最終崩壊状態の一例を示す。杭材中央では曲げ座屈が生じ、水平変形の増加に伴って屈伏するとともに、杭端では局部座屈が生じた。

図 15 に液状化地盤における上屋構造物水平加速度-杭材軸歪関係を示す。縦軸は上屋構造物の水平加速度 $a(\text{cm/s}^2)$, 横軸は杭材中央の軸歪 $\epsilon(\%)$ を表す。加速度の変動が徐々に大きくなり、片振幅が 500gal 程度に達したときに急激に軸歪が増大し崩壊に至った。

図 16 に崩壊時の最大曲げ歪分布を示す。試験体 b-2 の杭材中央がやや低い値となったが、どの試験体も両端固定の境界条件に近い曲げ歪分布となった。また、杭頭の方が杭端よりも小さい値となっているが、これ



(i) 試験体 b-1 (ii) 試験体 b-2
図11 過剰間隙水圧比応答時刻歴(液状化地盤)



(i) 試験体 b-1 (ii) 試験体 b-2
図12 上屋構造物の水平加速度応答時刻歴(液状化地盤)

は基礎部の回転を許容しているため杭頭の固定度が杭端よりも低いのである。

表 4 に実験結果一覧を示す。ここで示す初期圧縮力、最大圧縮力、最小圧縮力は実験で得られた初期軸歪、最小軸歪、最大軸歪の値より杭材の引張試験結果を元に算定した。また、最大上屋水平変位 δ は実験で得られた上屋構造物の水平加速度を 2 階積分して求めた。ここでは模型スケールで示す。板バネの長さが長い試験体 a-1, b-1 の方が a-2, b-2 よりも大きい曲げ歪が生じている。また、地盤が無い場合も液状化地盤の場合も、崩壊時の圧縮力はどの試験体においてもほぼ同程度の値となった。

4. 結

- 1) 遠心载荷実験により、地盤拘束が無い場合と液状化地盤の場合における、杭-基礎部-上屋構造系の鋼管杭の動座屈崩壊挙動を示した。
- 2) 上屋構造物の板バネの長さや杭材の長さとの関係を変動軸力や初期圧縮力との関係を明らかにし、それらが鋼管杭の動座屈崩壊挙動に与える影響を示した。

【謝辞】

本研究は「平成 23 年度京都大学防災研究所共同研究」による成果である。ここに、深く感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 木村祥裕, 武本大聖: 液状化地盤において鉛直及び水平荷重を受ける鋼管杭の終局挙動, 鋼構造年次論文報告集, 2010.11
- 2) 木村祥裕, 野田将司, 木村洋介: 液状化地盤において変動

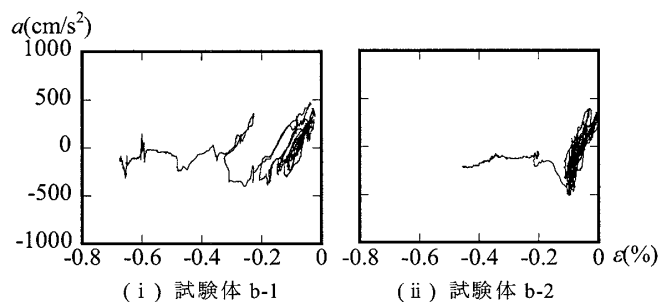


図 15 上屋構造物水平加速度-杭材軸歪関係(液状化地盤)

軸力を受ける鋼管杭の動座屈挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp531-534, 2009.11

3) 日本建築学会: 基礎構造設計指針・同解説, 1988

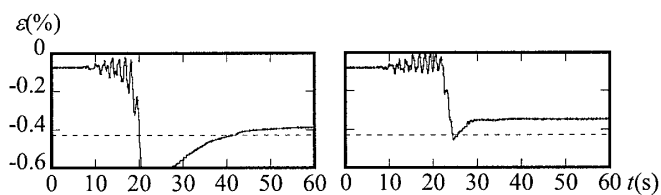


図 13 杭材中央の軸歪応答時刻歴(液状化地盤)

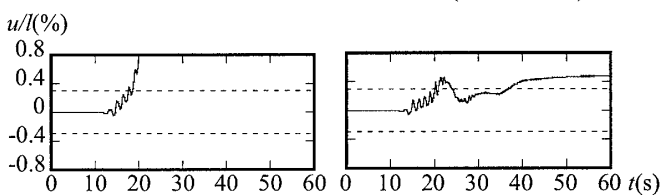


図 14 杭材中央の水平変位応答時刻歴(液状化地盤)

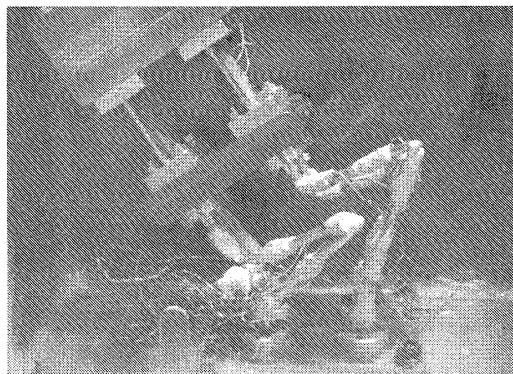


写真 1 最終崩壊状態(液状化地盤)

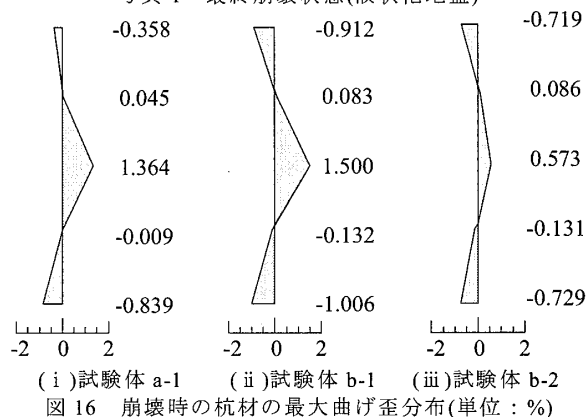


図 16 崩壊時の杭材の最大曲げ歪分布(単位: %)

表 4 実験結果一覧

試験体	地盤	最大水平 加速度振幅 (gal)	最小 軸歪 (%)	最大 軸歪 (%)	最大 曲げ歪 (%)	初期 圧縮力 N(N)	最大 圧縮力 N _{max} (N)	最小 圧縮力 N _{min} (N)	最大上屋 水平変位 δ(mm)	崩壊 時間 (s)
a-1	地盤 無し	100	-0.169	0.006	0.051	410	910	-20	2.8	—
		180	-0.961	0.573	1.364	435	1241	-1205	4.5	26
a-2	地盤 無し	100	-0.180	0.007	0.014	410	960	-20	2.1	—
b-1	液状化 地盤	200	-0.866	0.979	1.500	450	1217	-1223	3.5	21
b-2		200	-1.000	0.932	0.573	470	1223	-1219	3.3	23

*1 長崎大学大学院工学研究科 博士前期課程

*2 東北大学大学院工学研究科 教授 博士(工学)

*3 京都大学防災研究所 准教授 博士(工学)

*4 京都大学大学院 博士前期課程

Graduate Student, Graduate School, Nagasaki University
Professor, Graduate School of Engineering,

Tohoku University, Dr. Eng

Assoc. Prof., Kyoto University, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School, Kyoto University