

## 直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性能に関する遠心振動実験

佐藤正義\*・田地陽一\*\*・張 至鎬\*\*・田蔵 隆\*\*

### Seismic Performance by Comparison of Batter-pile and Vertical-pile Foundation using Centrifuge Modeling

Masayoshi SATO\*, Yoichi Taji\*\*, Jiho JANG\*\*, and Takashi TAZOH\*\*

*\*Disaster Risk Research Unit,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
m.sato@bosai.go.jp*

*\*\*Institute of Technology, Shimizu Corporation, Japan  
y.taji@shimz.co.jp, jangjiho@shimz.co.jp, tazoh@shimz.co.jp*

#### Abstract

It was carried out centrifuge tests to clarify the seismic behavior of batter-pile foundations. A vertical-pile foundation and a batter-pile foundation with four kind of a superstructure, were installed parallel to each other in a soil container filled with dry sand, and were excited simultaneously. Through a comparison of the acceleration and displacement response of the footing, as well as the axial and bending strains of the piles for the two pile foundations, the kinematic and inertial response of the seismic behavior of the batter-pile foundation was experimentally investigated.

**Key words** : Batter-pile, Vertical-pile, Centrifuge modeling, Seismic performance

#### 1. はじめに

軟弱地盤における構造物の基礎工法としては、工期と工費の利点から杭基礎が最も良く用いられる。杭基礎に斜杭を用いれば水平剛性を向上させることができることから、大きな水平外力が作用する地震時の耐震性は向上するはずである。しかし、そのほとんどが直杭であり、斜杭が採用されることは非常に少ない。斜杭が採用されない理由としては、(1) 地盤沈下が生じた場合、それに伴う曲げや軸力が作用して、基礎構造としての安全性を脅かす、(2) 地震時に大きな押し込み・引き抜き力を生じさせる可能性がある、(3) 都市部の建物では隣地境界の制約で、斜杭を用いることが困難な場合がある、(4) 斜杭基礎の地震時挙動の解明が十分でなく、斜杭を用いることの長所・短所が明確になっていない、などといったことが挙げられる。一方で、近年、耐震性に優れ、しかも安価でかつ施工が容易な杭基礎工法が強く要望されており、これらを満足する工法の1つとして斜杭が注目されはじめ、斜

杭の精度の良い施工法の開発と同時に、斜杭に関する地震時挙動特性に関する研究が行われてきている。地震観測とその数値解析に基づくもの<sup>1)</sup>、3次元のFEM解析<sup>2)</sup>や遠心振動実験によるもの<sup>3), 4)</sup>等も見られるが、直杭基礎の耐震性の研究が過去30年以上にわたって精力的に実施されてきたのに対し、斜杭基礎については十分に研究がなされていると言えない面がある。

本研究は、斜杭基礎の耐震性能を評価するため遠心振動実験<sup>5), 6)</sup>を実施したものである。斜杭基礎の地震時挙動特性を把握するためには、通常用いられている直杭基礎との比較が重要であるので、乾燥砂を用いてせん断土槽に直杭基礎と斜杭基礎を並行に設置し、両者を同条件で加振し、杭に発生する軸ひずみおよび曲げひずみの対比から、斜杭の地震時挙動特性を明らかにする。ここでは、斜杭の本質的かつ基本的な地震時挙動特性の解明を目的としたため、実験は構造物無し、それぞれ4本柱で支持された長周期の構造物、短周期の構造物、剛体構造物お

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 災害リスク研究ユニット

\*\* 清水建設株式会社 技術研究所

よびフーチングと杭のモデルで行い、構造物の違いが杭の曲げひずみと軸力に及ぼす影響を周波数領域および時刻歴で比較する。

## 2. 遠心振動実験の概要

### 2.1 実験の試験体

斜杭基礎の地震時挙動特性を明らかにするには、同じ入力地震動の下で、直杭基礎との地震時応答と対比することにより、定量的かつ定性的な議論が可能となる。この方法が最も直接的で有効な手段であると考えられるが、それには直杭基礎と斜杭基礎の振動実験を、それぞれ全く同じ地盤条件で、同じ加振をするという実験を行う必要がある。しかし、そのような同じ加振条件の実験を行うことはほとんど不可能に近い。そこで図 1 の遠心振動実験の試験体図に示すように、直杭基礎と斜杭基礎をせん断土槽内に並行に設置し、2つの実験モデルを同じ土槽内で同時に加振するという方法を採用した。これによって、同じ地盤条件下でしかも同じ入力地震波での実験が可能となり、上記の問題は解消できる。ここでは、地盤のせん断振動を模擬する目的で、せん断土槽を用いて実験を

行っているが、2つの挙動特性の異なる構造系を1つのせん断土槽内に設置して振動実験を行うことは、お互いの挙動が影響を及ぼし合う可能性がある。しかし、2つの実験を行うことによる地盤条件ならびに入力地震動の不一致、さらに地盤の非線形振動の再現性の困難さなどを考えると、2つの実験モデルを同じ土槽内で同時に加振するという本方法による実験が、より有効であると考えた。

ここで、表 1 は遠心振動実験に適用した相似則であり、想定する実物に対するモデルの縮尺比は 1:30 であるため、遠心加速度は 30g とした。遠心振動実験に用いたせん断土槽は、内寸法で長さ 770 mm、幅 475 mm、高さ 379 mm である。上部構造物としては、構造物無し、長周期の構造物、短周期の構造物、剛体構造物の場合の実験を実施している。直杭基礎・斜杭基礎ともに杭本数は 9 本、杭頭はフーチングに剛接合、杭下端はピン接合とした。斜杭の傾斜角度は 15 度である。地盤は、7号珪砂(平均粒径  $D_{50}=0.15$  mm, 土粒子密度  $\rho_s=2.635$  g/cm<sup>3</sup>, 最大乾燥密度  $\rho_{max}=1.539$  g/cm<sup>3</sup>, 最小乾燥密度  $\rho_{min}=1.206$  g/cm<sup>3</sup>) の乾燥砂で作成し、相対密度  $Dr=60$  %、地盤深さは 322 mm (実物換算で 9.66 m) の一層地盤とした。

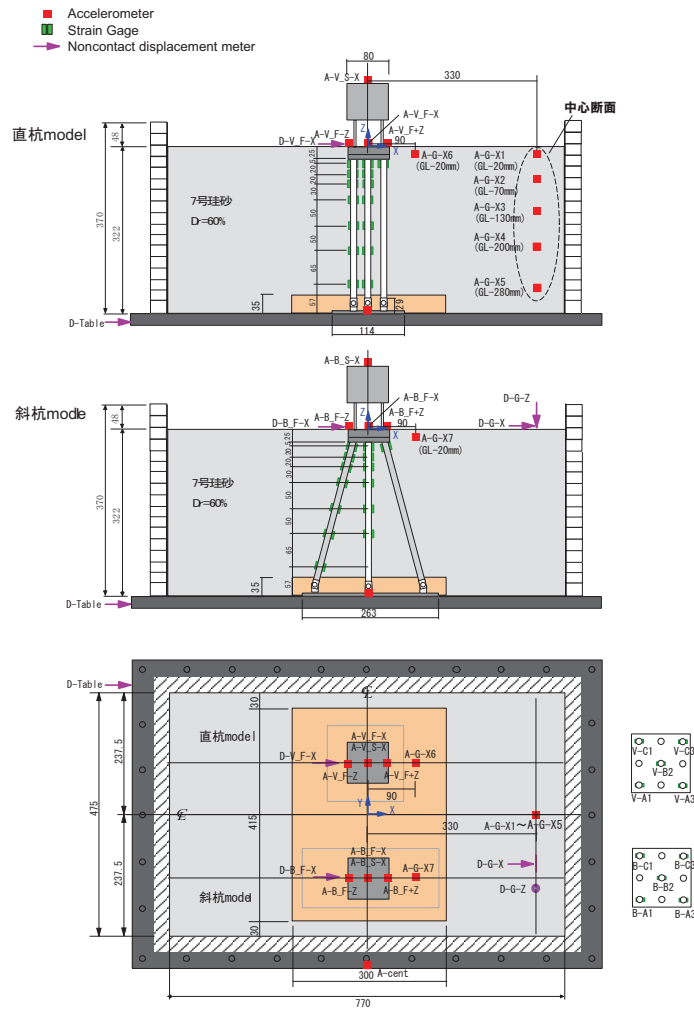


図 1 遠心振動実験の試験体  
Fig. 1 Specimen of Centrifuge test.

表 1 遠心振動実験に適用した相似則  
Table 1 Similitude rule of centrifuge test.

		Symbol	Scale ratio	Unit	Prototype	Centrifuge (1/30)
Soil	Height	H	1/N	mm	9,660	322
	Length	L	1/N	mm	23,100	770
	Width	L	1/N	mm	14,250	475
	Mass	M	1/N <sup>3</sup>	kg	5,246,720	188.4
	Density	$\rho_t$	1	kg/cm <sup>3</sup>	1.60	1.60
Pile	Length of pile	L	1/N	mm	8,700	290
	Diameter	D	1/N	mm	228.6	7.62
	Thickness	t	1/N	mm	3.05	0.32
	Young's modulus	E	1	MN/m <sup>2</sup>	2.06E+05	7.10E+04
	Area	A	1/N <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	2.16E-03	7.34E-06
	Geometrical moment of inertia	I	1/N <sup>4</sup>	m <sup>4</sup>	1.37E-05	4.90E-11
	Normal stiffness	E · A	1/N <sup>2</sup>	MN	4.45E+02	5.21E-01
	Bending stiffness	E · I	1/N <sup>4</sup>	MNm <sup>2</sup>	2.83E+00	3.48E-06
Footing	Thickness	D	1/N	mm	750	25.0
	Length	L	1/N	mm	2,400	80
	Mass	M	1/N <sup>3</sup>	kg	33,912	1.256
Structure	Thickness	D	1/N	mm	2,100	70
	Length	L	1/N	mm	2,400	80
	Mass	M	1/N <sup>3</sup>	kg	94,954	3.517
	Column length	H	1/N	mm	1,500	50
	Natural frequency	f	N	Hz	1.6	48
Input wave	Shaking acceleration	$\alpha$	N	gal	200	6,000
	Time	t	1/N	sec	30	1
	Frequency	f	N	Hz	1	30



写真 1 遠心振動実験の試験体外観  
Photo 1 Specimen of Centrifuge test.



写真 2 遠心振動実験の斜杭模型(左)と直杭模型(右)  
Photo 2 Model of batter-pile (left side) and vertical-pile (right side).

表 2 測定計器の数量表  
Table 2 Number of transducers.

	加速度-X	加速度-Z	変位-X	変位-Z	曲げひずみ	軸ひずみ
Table	1	1	1			
地盤	9		1	1		
直杭	2	2	1		15	5
斜杭	2	2	1		15	5
計	14	5	4	1	30	10
合計					64	

表 3 加振ケース一覧

Table 3 List of excitation case.

Wave	Frequency of Input Motion (Hz)	Maximum Acc. of Input Motion (Gal)	Superstructure			
			No structure	Structure 1.6Hz	Structure 7.0Hz	Rigid structure
SWEEP	1.0-10Hz	5	○	○	○	○
		15	○	○	○	○
		30	○	○	○	○
Sine wave	2.0Hz	150	○		○	
	3.0Hz	150	○	○	○	○
	4.0Hz	150	○		○	
	5.0Hz	150	○		○	
	6.0Hz	150	○		○	
	7.0Hz	150	○	○	○	○
	8.0Hz	150	○		○	
Earthquake wave	Rinkai	50	○	○	○	○
		100	○		○	
		200	○	○	○	○
	TAFT_NS	50	○	○	○	○
		100	○		○	
		200	○	○	○	○

写真 1 は遠心振動実験の試験体外観、写真 2 は遠心振動実験の斜杭模型(左)と直杭模型(右)実験模型である。

計測チャンネルは、表 2 に示すように加速度計 (19 ch)、変位計 (5 ch)、ひずみゲージ (40 ch) であり、計測成分の総数は 64 チャンネルである。

2.2 実験ケース

加振波の種類は、正弦波掃引加振、2～8 Hz の正弦波 10 波加振、地震波加振として臨海波、タフト波である。正弦波掃引加振、地震波加振は、入力最大加速度を変えて、表 3 に示すように計 50 ケースの加振を行った。ここでは主に正弦波掃引加振、正弦波 10 波加振の結果について述べる。

3. 実験結果

3.1 地盤の周波数伝達関数

正弦波掃引加振から得られた基盤（土槽底板）入力波に対する地表の加速度応答の周波数伝達関数および位相を図 2 に示す。正弦波 5 gal 入力において地盤の卓越振動数は 3.2 Hz であるが、15 gal 入力、さらに 30 gal 入力と

加速度が大きくなるにつれ、地盤の卓越振動数は 3.0 Hz、2.9 Hz と変化し、加速度応答倍率も低下している。これは、地盤のせん断ひずみの増加に伴うせん断剛性の低下と減衰の増加によるものである。

3.2 斜杭基礎と直杭基礎に関する周波数伝達関数の比較

加速度 15 Gal の正弦波掃引加振における基盤入力波に対するフーチングの加速度応答の周波数伝達関数を図 3 に示す。同様に、構造物の加速度応答の周波数伝達関数を図 4 に示す。図 3 において、(a) は構造物無し、(b) は構造物周期が 1.6 Hz (基礎固定条件)、(c) は構造物周期が 7.0 Hz (基礎固定条件)、(d) は剛体構造物に関するものである。(a) の約 3.0 に見られるピークは地盤の 1 次固有振動数、(b) の約 1.6 Hz のピークは構造物の固有振動数によるものである。(c) は地盤の固有振動数位置ではなくそれより低い振動数位置で、直杭基礎は約 1.9Hz、斜杭基礎は約 2.2 Hz にピークが見られる。共通して約 6～7 Hz に見られるピークは、図 2 では大きなピークではないので、杭-地盤系の固有振動数によるものではないかと考える。

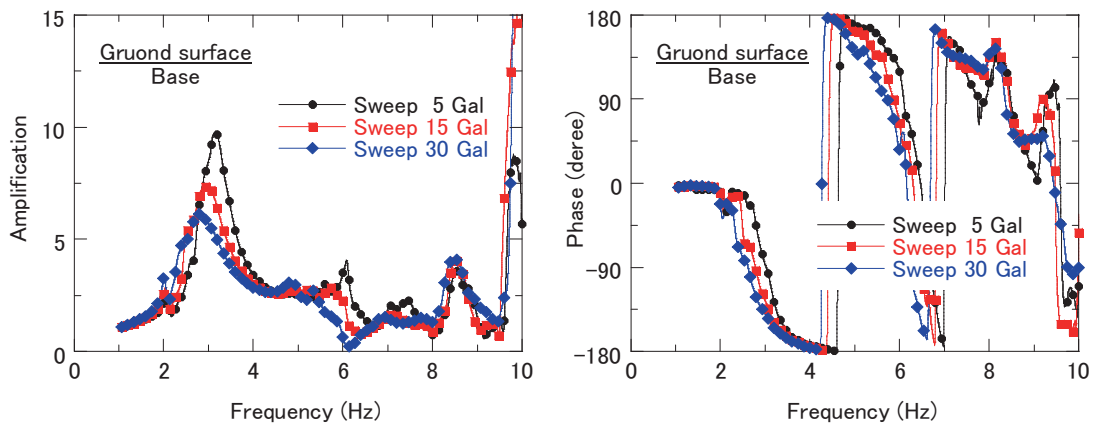


図 2 基盤入力波に対する地表の加速度応答の周波数伝達関数と位相(正弦波掃引加振)  
Fig. 2 Frequency transfer functions and phases of ground acceleration for input wave (Sine sweep excitation).

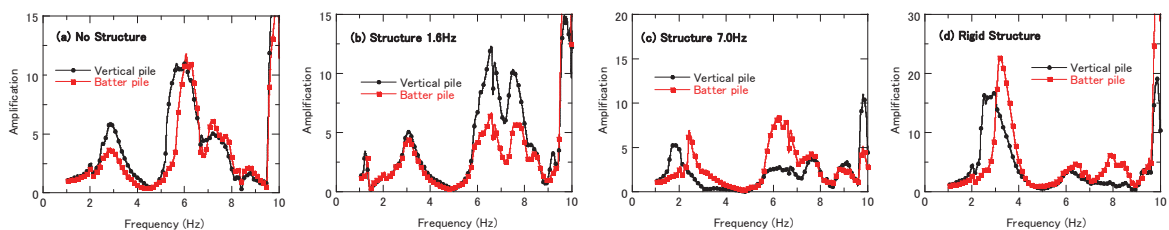


図3 基盤入力波に対するフーチングの加速度応答の周波数伝達関数(正弦波掃引加振 15 Gal)  
 Fig. 3 Frequency transfer function of footing acceleration for input wave (Sine sweep excitation 15 Gal).

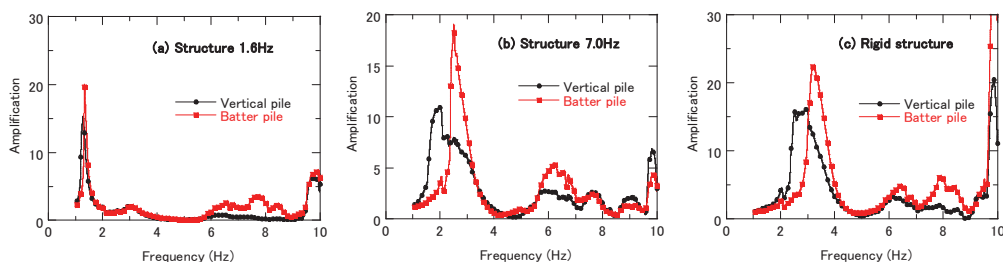


図4 基盤入力波に対する構造物の加速度応答の周波数伝達関数(正弦波掃引加振 15 Gal)  
 Fig. 4 Frequency transfer function of structure acceleration for input wave (Sine sweep excitation 15 Gal).

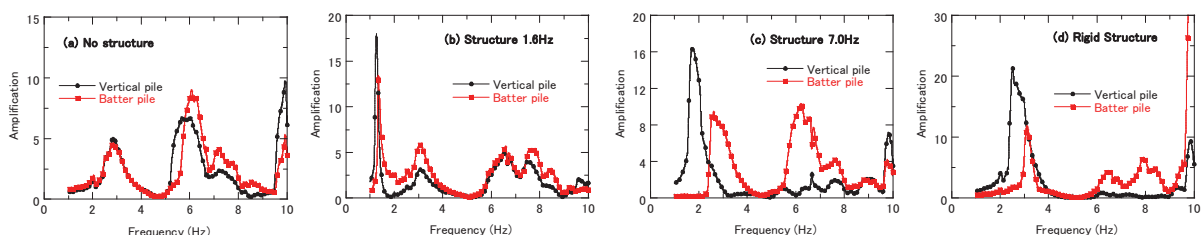


図5 基盤入力波に対する曲げひずみの周波数伝達関数(正弦波掃引加振 15 Gal)  
 Fig. 5 Frequency transfer function of bending strain of pile for input wave (Sine sweep excitation 15 Gal).

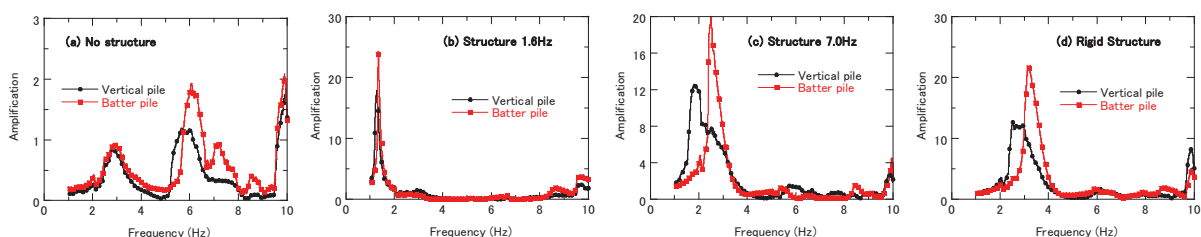


図6 基盤入力波に対する軸ひずみの周波数伝達関数(正弦波掃引加振 15 Gal)  
 Fig. 6 Frequency transfer function of axial strain of pile for input wave (Sine sweep excitation 15 Gal).

図4において、(a)は構造物周期が1.6 Hz(基礎固定条件)、(b)は構造物周期が7.0 Hz(基礎固定条件)、(c)は剛体構造物に関するものであるが、これらは図3の(b)、(c)、(d)に対応しており、フーチングの応答が構造物で増幅されたものとなっている。

加速度 15 Gal の正弦波掃引加振における基盤入力波に対する曲げひずみの周波数伝達関数を図5に示す。同様に、

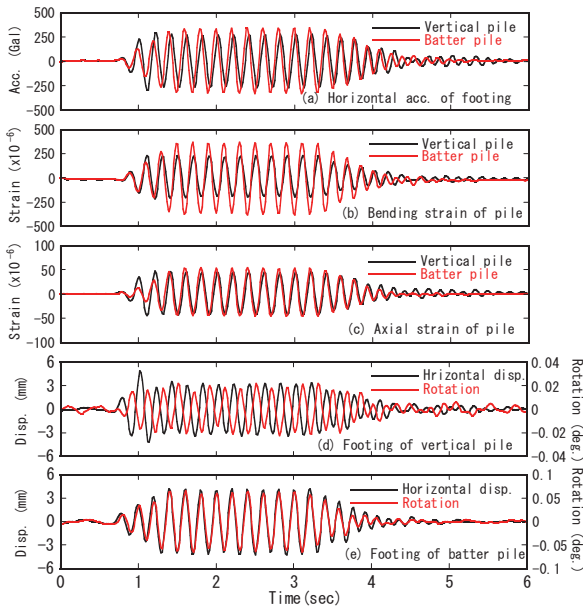
軸ひずみの周波数伝達関数を図6に示す。図5および図6は、フーチングおよび構造物の周波数伝達関数と類似の形状を示している。構造物の固有振動数では、概ね、曲げひずみに関しては直杭基礎の方が斜杭基礎よりも大きく、軸ひずみに関しては斜杭基礎の方が直杭基礎よりも大きくなるという傾向を示している。

### 3.3 斜杭基礎と直杭基礎に関する時刻歴の比較

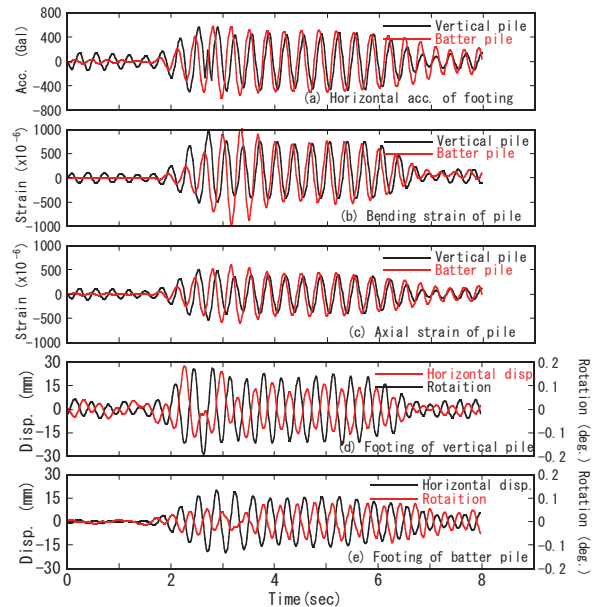
構造物無しにおける正弦波 5Hz 加振の時刻歴を **図 7** に示す。上から、(a) フーチング加速度、杭頭の (b) 曲げひずみおよび (c) 軸ひずみ、(d) 直杭基礎および (e) 斜杭基礎のフーチング水平変位と回転角である。同様に、剛体構造物における正弦波 3 Hz 加振の時刻歴を **図 8** に示す。直杭基礎と斜杭基礎のフーチングの水平加速度応答に関しては、**図 7**、**図 8** とともに概ね同じであるため、フーチングの水平変位による杭頭の曲げひずみは両者で同程度である。**図 7** の曲げひずみは斜杭基礎のほうが直杭基礎よりかなり大きい、**図 8** では斜杭基礎と直杭基礎は同程度である。軸ひずみに関しては、**図 7** と **図 8** とともに、斜杭基礎と直杭基礎は同程度である。**図 9** にフーチングの水平変位と回転角の符号の定義を示す。**図 7** の (d) では直杭基礎のフーチング水平変位と回転角は逆位相であり、フーチングが変位した方向にお辞儀するような回転になるのに対し、(e) の斜杭基礎では直杭基礎の場合とは逆の

回転動でフーチングは反りあがる回転になっていることが分かる。一方、**図 8** の (d) 直杭基礎と (e) 斜杭基礎では、フーチング水平変位と回転角は両者ともに逆位相となっている。これにより、構造物無しの場合、斜杭基礎はフーチングが変位した方向にお辞儀するような回転になるのに対し、剛体構造物の場合は、構造物の慣性力により、フーチングが反りあがる回転を押さえ込んで、直杭基礎と同じ方向の回転になっている。一般に、フーチングが変位した方向にお辞儀するような回転になると杭頭曲げモーメントは緩和されるので、剛体構造物の場合、斜杭基礎で曲げモーメントが緩和されて、曲げひずみが小さくなったものと考えられる。

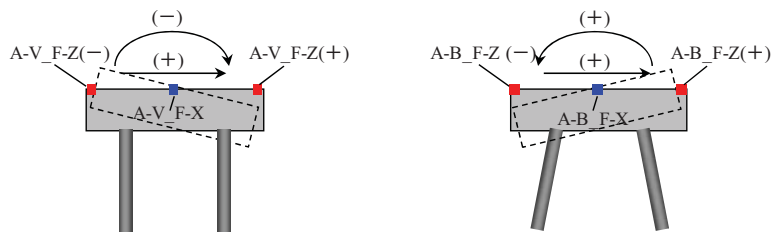
本研究では遠心振動実験により、直杭基礎との比較により斜杭基礎の地震時応答特性の把握を試みたが、斜杭基礎はかなり複雑な挙動をすると考えられ、今後数値解析による検討をあわせて行い、その地震時挙動の解明を進めてゆく必要がある。



**図 7** 構造物無しにおける正弦波 5 Hz 加振の時刻歴  
**Fig. 7** Time histories of sine wave 5 Hz without structure.



**図 8** 剛体構造物における正弦波 3 Hz 加振の時刻歴  
**Fig. 8** Time histories of sine wave 3 Hz with rigid structure.



**図 9** 直杭と斜杭のフーチングの水平変位と回転角の符号の定義  
**Fig. 9** Definition of symbol for horizontal displacement and rotation of footing on vertical-pile and batter-pile.

#### 4. まとめ

本研究によって得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 周波数伝達関数の応答倍率は、構造物の固有振動数において、曲げひずみは直杭基礎のものの方が斜杭基礎よりも大きく、軸ひずみは斜杭基礎の方が直杭基礎よりも大きくなるという傾向を示す。
- 2) 構造物無しの場合、直杭基礎はフーチングが水平方向に変位すると、その方向にお辞儀をするような回転をするのに対し、斜杭基礎は直杭基礎の場合とは逆の回転となる。
- 3) 剛体構造物のように大きな慣性力が発生する場合、直杭基礎はフーチングが水平方向に変位すると、その方向にお辞儀をするような回転をするのに対し、斜杭基礎は直杭基礎の場合と同じの回転をして、曲げひずみを緩和する。

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金の基盤研究 (C)、研究期間：H21～H23年度、課題番号：21560531 および H21～H22年度防災科学技術研究所の所内競争資金により実施いたしました。ご協力いただいた多くの方々に対し、ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Tazoh, T., Shimizu, K., and Wakahara, T. (1987) : Seismic observations and analysis of grouped piles Geotechnical Special Publication, No.11, Dynamic Response of Pile Foundations, ASCE, 1-20.
- 2) Gerolymos, N., Giannakou, A., Anastasopoulos, I., and Gazetas, G. (2008) : Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses. Bulletin of Earthquake Engineering: Vol.6, No.4, 705-722.
- 3) 大川賢紀・亀井宏之・木村 亮・張 鋒(2003) : 斜杭を有する群杭基礎の動的挙動に関する実験的検討. 土木学会論文集, No.729/III-62, 31-41.
- 4) Tazoh, T., Sato, M., and Jang, J. (2010) : Seismic behavior of batter Pile foundation –Kinematic response–. Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, Paper No.5.81a, 1-12.
- 5) 高田直俊・日下部治(1987) : 講座 遠心模型実験 3. 原理. 土質工学会, 土と基礎, 89-94.
- 6) 佐藤正義(2010) : 地盤－杭－構造物系の大型せん断土槽実験を対象とした遠心振動実験による再現. 防災科学技術研究所, 研究報告, No.77, 7-18.

(2011年8月1日原稿受付,  
2011年9月28日改稿受付,  
2011年9月30日原稿受理)

## 要 旨

本研究は、斜杭基礎の耐震性能を評価するため遠心振動実験を実施したものである。斜杭基礎の地震時挙動特性を把握するためには、通常用いられている直杭基礎との比較が重要であるので、乾燥砂を用いてせん断土槽に直杭基礎と斜杭基礎を並行に設置し、両者を同条件で加振し、杭に発生する軸ひずみおよび曲げひずみの対比から、斜杭の地震時挙動特性を明らかにした。実験結果により、周波数伝達関数の応答倍率は、構造物の固有振動数において、曲げひずみは直杭基礎のものの方が斜杭基礎よりも大きく、軸ひずみは斜杭基礎の方が直杭基礎よりも大きくなるという傾向を示す事が分かった。

**キーワード：**E-ディフェンス，大型土槽実験，遠心振動実験，杭基礎，相似則