

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19560504
研究課題名 (和文) 遠心振動実験による E-ディフェンス大型土槽実験の再現手法の確立に関する研究
研究課題名 (英文) Studies using dynamic centrifuge modeling for reproduction procedure of E-Defense large-scale soil tests
研究代表者 佐藤 正義 (SATO MASAYOSHI) 独立行政法人 防災科学技術研究所 ・ 総括主任研究員 研究者番号 80450261

研究成果の概要：

実大三次元破壊実験装置 (E-ディフェンス) を用いた大型円形せん断土槽で実施された水平地盤中の杭基礎の地震時挙動の実験を実物として、それを遠心振動実験で再現するための実験方法を確立することを目的とする。E-ディフェンス実験における構造物及び地盤の加速度と変位、杭のひずみと詳細に比較することにより、遠心振動実験で実大の挙動を再現するための、地盤の作成方法、構造物のモデル化の精度、振動台加震波の精度などの実験手法を検討する。将来に実施する E-ディフェンスの土槽実験に役立てるとともに、今後の地盤と構造物の耐震性評価のためのデータを蓄積するというねらいもある。

E-ディフェンスで行われた杭-地盤系の大型円形せん断土槽実験 (地盤の直径 8m、地盤高さ 6.3m) に対象にして、再現実験を行った。E-ディフェンスの実験では、上部の構造物の固有周期を変化させ、3種類の地震の観測波によりパラメトリックな加振実験を行っており、遠心振動実験では、E-ディフェンス実験と同じ地盤材料を用い、相似則を満足させたモデルを作成し、E-ディフェンス実験に対応させた加振を実施した。平成 19 年度は縮小率:26.7 の模型 (地盤の直径 300mm、地盤高さ 236mm) を作成して実験を行ったが、加速度応答に関しては概ね再現できたが、模型の縮小率が大きいため構造物の応答にばらつきがあるものがあつた。そのため、平成 20 年度は縮小率:20 (地盤の直径 400mm、地盤高さ 315mm) として、模型のサイズを大きくしたため、模型の精度が向上し、再現実験の結果は平成 19 年度のものより改善された。しかし、平成 19、20 年度の実験とも、変位の再現性については、十分とは言えない結果であつたが、これは再現実験に使用した遠心振動実験装置の振動台の最大変位が小さいためである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地震、地盤工学、耐震、遠心振動実験、杭基礎、相似則、大型土槽実験

1. 研究開始当初の背景

地盤の実験的研究を行おうとする場合、数ケースの比較実験により目的とする現象の解明を行うことが求められることが多い。しかし、大型土槽実験では、数多くの実験ケースを行うことは、費用と期間の面から難しいので、パラメトリックな実験は小型土槽実験で行い、特に重要なものだけ大型土槽実験を行うというのが効率的である。その観点からいうと、遠心振動実験は、土の実験で重要な地盤の応力とひずみの基本的な相似則を満足できており、小型土槽実験でパラメトリックな実験を行うのに適している。しかし、遠心振動実験は土粒子の粒径や地盤振動時のひずみ速度の相似則は満足できないという問題点がある。また、想定する実物に対して、多くの場合1/15～1/50の縮尺比で行われ、モデルの作製においては簡略化したモデルとなってしまう傾向があるため、実験結果として得られるものが、実際の地盤と構造物の地震時挙動をどの程度再現できるかをチェックする、すなわち相似則のチェックを行うことが、非常に重要である。しかし、地盤の地震時挙動に対する問題を取り扱った現象に対しては検証が十分とは言えない状況があると考える。著者らは、これまで大型土槽を用いた乾燥砂の実験、飽和砂の実験および乾燥砂を用いた杭基礎の実験を実物とみなし、これを縮小したモデルによる遠心振動実験を行い、実物の再現性を検討してきた。本文では、その一環として実施した実大三次元破壊実験装置（E-ディフェンス）を用いた大型円形せん断土槽で実施された水平地盤中の杭基礎の地震時挙動の実験について遠心振動実験による再現について検討した。

2. 研究の目的

実大三次元破壊実験装置（E-ディフェンス）を用いた大型円形せん断土槽で実施された水平地盤中の杭基礎の地震時挙動の実験を実物として、それを遠心振動実験で再現するための実験方法を確立することを目的とする。E-ディフェンス実験における構造物及び地盤の加速度と変位、杭のひずみと詳細に比較することにより、遠心振動実験で実大の挙動を再現するための、地盤の作成方法、構

造物のモデル化の精度、振動台加震波の精度などの実験手法を検討する。将来に実施するE-ディフェンスの土槽実験に役立てるとともに、今後の地盤と構造物の耐震性評価のためのデータを蓄積するというねらいもある。

3. 研究の方法

(1) 研究の概要

E-ディフェンスで行われた杭-地盤系の大型円形せん断土槽実験（地盤の直径 8m、地盤高さ 6.3m）を対象として、再現実験を行った。E-ディフェンスの実験では、上部の構造物の固有周期を変化させ、3種類の地震の観測波によりパラメトリックな加振実験を行っており、遠心振動実験では、E-ディフェンス実験と同じ地盤材料を用い、相似則を満足させたモデルを作成し、E-ディフェンス実験に対応させた加振を実施した。平成 19 年度は縮尺比 1/26.7 のモデル（地盤の直径 300mm、地盤高さ 236mm）を作成して実験を行い、加速度応答に関しては概ね再現できたが、モデルの縮小率が大きいため構造物の応答にばらつきがあるものがあつた。そのため、平成 20 年度は縮尺比 1/20（地盤の直径 400mm、地盤高さ 315mm）として、モデルのサイズを大きくしたため、モデルの精度が向上し、再現実験の結果は平成 19 年度のものより改善された。

(2) E-ディフェンス大型円筒形せん断土槽実験

E-ディフェンス実験に用いた土槽は、円筒形でその内寸法は内径 8.0m×高さ 6.5m である。写真 1 に E-ディフェンス大型円筒形せん断土槽の外観を示す。地盤材料は、豊浦砂とよく似た粒度分布のアルバーニー珪砂を相対密度約 60%の乾燥状態で用いており、非液状化地盤の実験である。加振実験では、固有周期、地震波の種類と加振加速度を変化させて、パラメトリックな実験を実施している。1 質点系の構造物を重錘 (28.0t) およびフーチング (10.0t) とその間の 4 本柱 (短周期構造物: 1=1m のパイプ、剛体構造物: 1=0.3m のパイプ、長周期構造物: 1=0.3m の免震ゴム) で構成している。群杭基礎は、本数 9 本 (3 行 3 列)、鋼管 (外径 $D=152.4\text{mm}$ 、厚さ $t=2\text{mm}$ 、長さ $l=5.8\text{m}$) で、杭の境界条件は杭頭剛結、下端ピン構造である。



写真1 E-ディフェンス実験における円筒形せん断土槽実験

(2)遠心振動実験(H19年度、縮尺比 1/26.7)

遠心振動実験の土槽は、写真2に示すようにサイズ：内径 300mm×高さ 243mm であり、E-ディフェンスで実施した円筒形せん断土槽実験の試験体を 1/26.7 に縮小化したもので、構造物と群杭基礎の模型も表1に示す相似則に添って縮小した模型を作成している。模型地盤材料はE-ディフェンス実験と同一の砂を用い、地盤作成方法も同一の方法である。

遠心振動実験の計器配置を図1に示す。E-ディフェンスの加振実験では、固有周期、地震波の種類と加振加速度を変化させて、パラメトリックな実験を実施しているが、今回の遠心振動実験による再現の対象としたのは、①剛体構造物、兵庫県南部地震 JR 鷹取波の NS 成分、最大加速度 81Gal、1 方向加振および②短周期構造物、TAFT 波の NS 成分、最大加速度 76Gal、1 方向加振である。

表1 遠心振動実験に適用した相似則 (H19年度、縮尺比 1/26.7)

		Symbol	Scale ratio	Unit	1G large scale test (E-Defense)	Centrifuge(1/26.7) Operational model
Soil	Height	H	1/N	mm	6,300	236
	Diameter	L	1/N	mm	8,000	300
	Density	ρ t	1	kg/cm ³	1.95	1.95
Pile	Length of pile	L	1/N	mm	5,800	217
	Diameter	D	1/N	mm	152.4	6.00
	Thickness	t	1/N	mm	2	0.20
	Young's modulus	E	1	MN/m ²	2.06E+05	7.10E+04
	Area	A	1/N ²	m ²	9.45E-04	3.64E-06
	Geometrical moment of inertia	I	1/N ⁴	m ⁴	2.67E-06	1.53E-11
	Normal stiffness	E · A	1/N ²	MN	1.95E+02	2.59E-01
Footing	Bending stiffness	E · I	1/N ³	MNm ²	5.51E-01	1.09E-06
	Thickness	D	1/N	mm	500	18.7
	Length	L	1/N	mm	1,600	60
Structure	Mass	m	1/N ³	kg	1.00E+04	5.28E-01
	Thickness	D	1/N	mm	1,400	52
	Length	L	1/N	mm	1,600	60
Input wave	Mass	m	1/N ³	kg	2.80E+04	1.47E+00
	Column length	H	1/N	mm	1000	37
	Natural frequency	f	N	Hz	12	320
	Excitation accleration	α	N	gal	500	13,350
Input wave	Time	t	1/N	sec	40	1.498127341
	Frequency	f	N	Hz	1	26.7

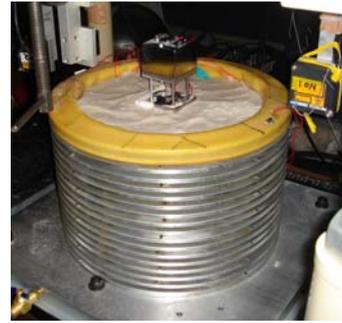


写真2 遠心振動実験における円筒形せん断土槽実験 (平成19年度、縮尺比 1/26.7)

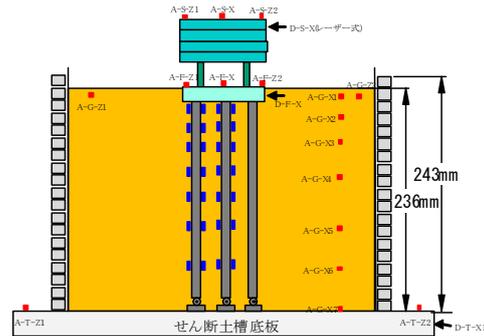


図1 遠心振動実験における円筒形せん断土槽実験の計器配置 (平成19年度、縮尺比 1/26.7)

(3) 遠心振動実験(H20年度、縮尺比 1/20)

遠心振動実験の土槽は、写真3に示すようにサイズ：内径 400mm×高さ 357mm であり、E-ディフェンス土槽実験の試験体を 1/20 に縮小化したもので、模型は表2に示す相似則に添って縮小している。本遠心振動実験の計器配置を図2に示す。本実験においても遠心振動実験による再現の対象としたのは、(2)の平成19年度、縮尺比 1/26.7 の実験と同様である。

表2 遠心振動実験に適用した相似則 (H20年度、縮尺比 1/20)

		Symbol	Scale ratio	Unit	1G large scale test (E-Defense)	Centrifuge(1/20) Operational model
Soil	Height	H	1/N	mm	6,300	315
	Diameter	L	1/N	mm	8,000	400
	Density	ρ t	1	kg/cm ³	1.95	1.95
Pile	Length of pile	L	1/N	mm	5,800	290
	Diameter	D	1/N	mm	152.4	7.62
	Thickness	t	1/N	mm	2	0.32
	Young's modulus	E	1	MN/m ²	2.06E+05	7.10E+04
	Area	A	1/N ²	m ²	9.45E-04	7.34E-06
	Geometrical moment of inertia	I	1/N ⁴	m ⁴	2.67E-06	4.90E-11
	Normal stiffness	E · A	1/N ²	MN	1.95E+02	5.21E-01
Footing	Bending stiffness	E · I	1/N ³	MNm ²	5.51E-01	3.48E-06
	Thickness	D	1/N	mm	500	25.0
	Length	L	1/N	mm	1,600	80
Structure	Mass	m	1/N ³	kg	1.00E+04	1.26E+00
	Thickness	D	1/N	mm	1,400	70
	Length	L	1/N	mm	1,600	80
	Mass	m	1/N ³	kg	2.80E+04	3.50E+00
Input wave	Column length	H	1/N	mm	1000	50
	Natural frequency	f	N	Hz	12	240
	Excitation accleration	α	N	gal	500	10,000
	Time	t	1/N	sec	40	2
Input wave	Frequency	f	N	Hz	1	20

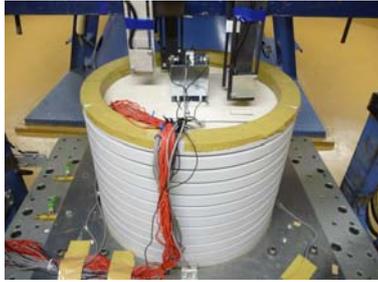


写真3 遠心振動実験における円筒形せん断土槽実験 (平成20年度、縮尺比1/20)

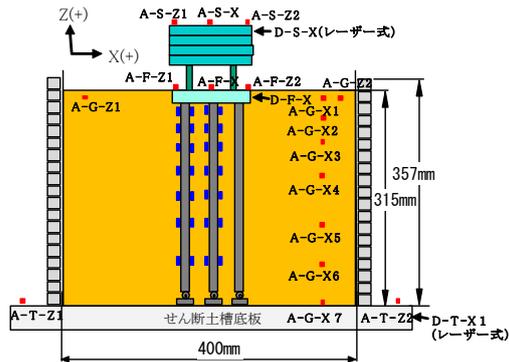


図2 遠心振動実験における円筒形せん断土槽実験の計器配置 (平成20年度、縮尺比1/20)

4. 研究成果

(1) 遠心振動実験(H19年度、縮尺比1/26.7)とE-ディフェンス実験の比較

図3に地盤加速度の応答に関する遠心振動実験とE-ディフェンス実験結果の比較(剛体構造物、JR鷹取波加振)、同様に図4に構造物、フーチング、杭ひずみの応答を示す。なお、杭ひずみ(杭頭より-900mm)は後に行ったE-ディフェンス実験の破壊加振で杭が折損した位置のものを選択した。図3の(c)は振動台入力加速度の比較であるが、遠心振動実験のものの方がE-ディフェンスの大型実験よりも大きいという傾向が見られ、地表(GL-500mm)と地中(GL-3000mm)の応答についても遠心振動実験のほうが大きい。図4の(a)構造物、(b)フーチングの応答は比較的一致しているが、(c)杭ひずみの応答は遠心振動実験のほうがかなり大きくなっている。図5に地盤加速度の応答に関する遠心振動実験とE-ディフェンス実験結果の比較(短周期構造物、TAFT波加振)、同様に図6に構造物、フーチング、杭ひずみの応答を示す。図5の(c)は振動台入力加速度の比較であるが、図4の場合と同様の傾向を示し、地表と地中の応答も同様である。図6の(a)構造物

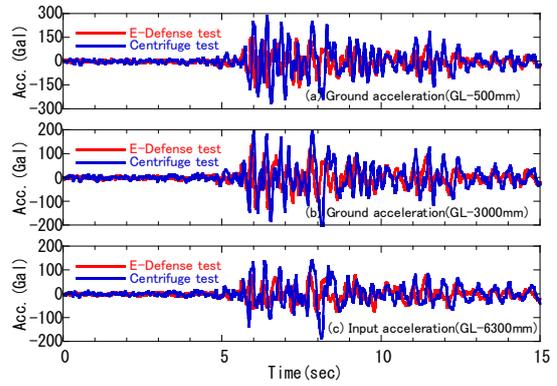


図3 地盤加速度の応答に関する遠心振動実験(H19年度、縮尺比1/26.7)とE-ディフェンス実験結果の比較(剛体構造物、JR鷹取波加振)

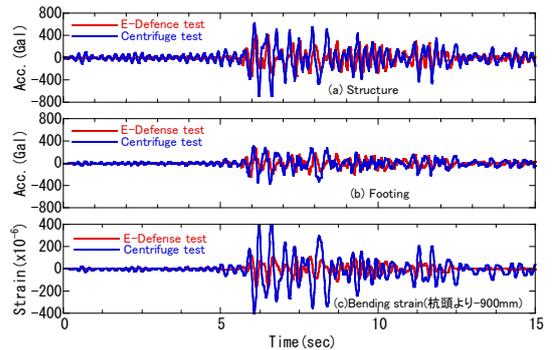


図4 構造物とフーチング、杭ひずみの応答に関する遠心振動実験(H19年度、縮尺比1/26.7)とE-ディフェンス実験結果の比較(剛体構造物、JR鷹取波加振)

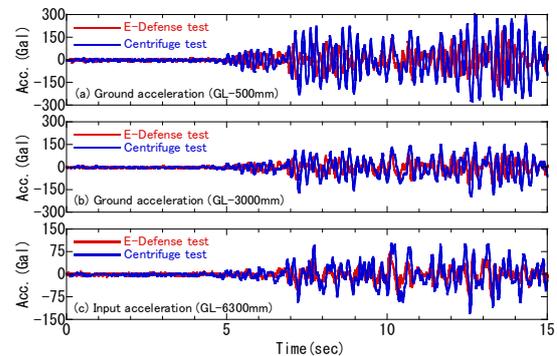


図5 地盤加速度の応答に関する遠心振動実験(H19年度、縮尺比1/26.7)とE-ディフェンス実験結果の比較(短周期構造物、TAFT波加振)

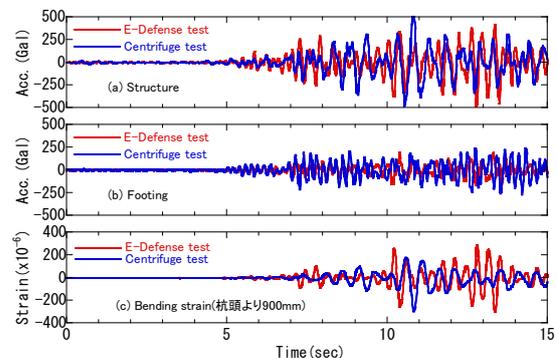


図6 構造物とフーチング、杭ひずみの応答に関する遠心振動実験(H19年度、縮尺比1/26.7)とE-ディフェンス実験結果の比較(短周期構造物、TAFT波加振)

と(b)のフーチングに関しては比較的良好に一致しているが、(c)の杭ひずみは大型実験のほうがかなり大きい。

以上のH19年度、縮尺比1/26.7における遠心振動実験のE-ディフェンスの大型実験の再現性については、比較的一致しているものもあるが、全般的には再現性はあまりよいとは言えないという結果である。

(2) 遠心振動実験(H20年度、縮尺比1/20)とE-ディフェンス実験の比較

図7に地盤加速度の応答に関する遠心振動実験とE-ディフェンス実験結果の比較(剛体構造物、JR鷹取波加振)、同様に図8に構造物、フーチング、杭ひずみの応答を示す。なお、杭ひずみ(杭頭より-900mm)は後に行った破壊加振実験で杭が折損した位置のものを選擇して示した。図7の(c)は振動台入力加速度の比較であるが、両者の一致度は比較的良好だが、ややE-ディフェンスの大型実験のほうが大きいという傾向が見られる。(a)は地表加速度、(b)は地中加速度であるが、やはり大型実験のほうがやや大きい。図8の(a)構造物、(b)フーチング、(c)杭ひずみの応答もやや大型実験のほうが大きいという傾向を示しているが、概ね再現性は良い。図7と図8で全般的にE-ディフェンス大型実験のほうが大きいのは、入力加速度がやや大きいためと考えられる。

図9に地盤加速度の応答に関する遠心振動実験とE-ディフェンス実験結果の比較(短周期構造物、TAFT波加振)、同様に図10に構造物、フーチング、杭ひずみの応答を示す。図9の(c)は振動台入力加速度の比較であるが、両者の波形の一致度は振幅も位相も一部を除いて比較的良好。(a)の地表加速度と(b)の地中加速度も、概ね一致していると言える。図10の(a)構造物において位相はよく一致しているが振幅は大型実験のほうが大きい。(b)のフーチングに関しては比較的良好に一致しているが、(c)の杭ひずみは大型実験のほうが大きい。これは、構造物の加速度が大型実験のほうが大きいためと考えられる。

以上のH20年度、縮尺比1/20における遠心振動実験のE-ディフェンスの大型実験の再現性については、H19年度、縮尺比1/26.7に比較すると全般的に一致は向上していると言える。これは、模型の縮尺比が1/26.7から1/20となったためと考えられる。すな

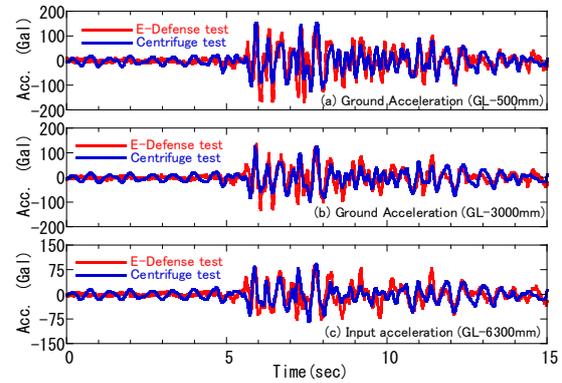


図7 地盤加速度の応答に関する遠心振動実験(H20年度、縮尺比1/20)とE-ディフェンス実験結果の比較(剛体構造物、JR鷹取波加振)

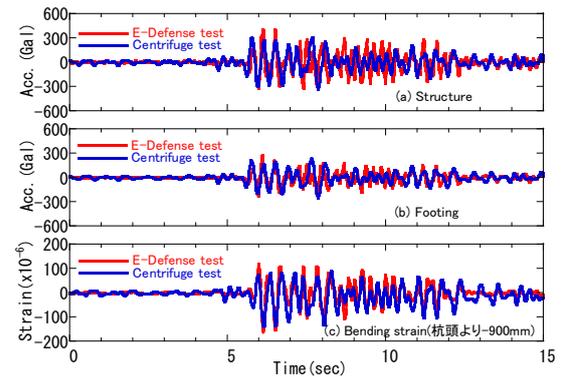


図8 構造物とフーチング、杭ひずみの応答に関する遠心振動実験(H20年度、縮尺比1/20)とE-ディフェンス実験結果の比較(剛体構造物、JR鷹取波加振)

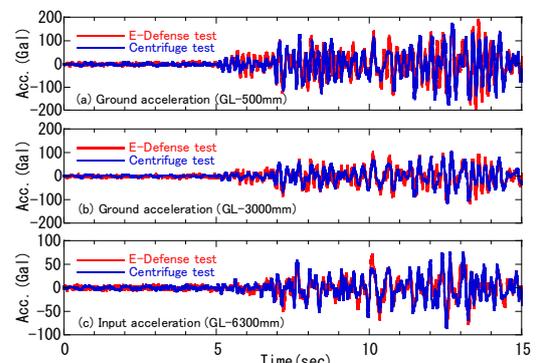


図9 地盤加速度の応答に関する遠心振動実験(H20年度、縮尺比1/20)とE-ディフェンス実験結果の比較(H20短周期構造物、TAFT波加振)

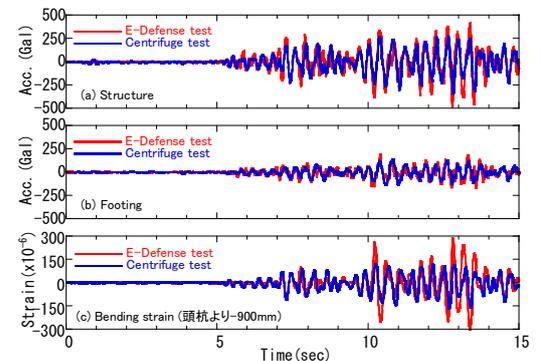


図10 構造物とフーチング、杭ひずみの応答に関する遠心振動実験(H20年度、縮尺比1/20)とE-ディフェンス実験結果の比較(短周期構造物、TAFT波加振)

わち、遠心振動実験の実物に対する再現性は模型の縮尺比が小さい方が、地盤と構造物の製作精度が向上して、再現性が向上すると考えられる。

しかし、平成 19、20 年度の実験とも、変位の再現性については、十分とは言えない結果であったが、これは再現実験に使用した遠心振動実験装置の振動台の最大変位が小さいためである。

4. 研究成果

- (1) 実大三次元破壊実験装置 (E-ディフェンス) を用いた大型円形せん断土槽で実施された水平地盤中の杭基礎の地震時挙動の実験について遠心振動実験による再現についてのデータを得ることができた。
- (2) 遠心振動実験の大型実験の再現性検討において、過去に全く研究例のない模型の縮尺比 (1/26.7、1/20) を変化させた実験をすることができた。
- (3) 平成 19 年度は縮小率:26.7 の模型(地盤の直径 300mm、地盤高さ 236mm)を作成して実験を行ったが、加速度応答に関しては概ね再現できたが、模型の縮小率が大きいため構造物の応答にばらつきがあるものがあつた。
- (4) 平成 20 年度は縮小率:20(地盤の直径 400mm、地盤高さ 315mm)として、模型のサイズを大きくしたため、模型の精度が向上し、再現実験の結果は平成 19 年度のものより改善された。
- (5) 遠心振動実験の実物に対する再現性は模型の縮尺比が小さい方が、地盤と構造物の製作精度が向上して、再現性が向上するということがわかつた。
- (6) 平成 19、20 年度の実験とも、変位の再現性については、十分とは言えない結果であったが、これは再現実験に使用した遠心振動実験装置の振動台の最大変位が小さいためである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- 1) 佐藤正義・内田明彦、遠心振動実験による E-ディフェンス大型土槽の杭-地盤系の実

験の再現、第 43 回地盤工学研究発表会 CD-Rom、pp. 1653-1654. 2008 年(査読無し)

- 2) 佐藤正義・田端憲太郎、矢板護岸と背後地盤の杭基礎の大型側方流動実験に関する遠心実験によるシミュレーション (その 2)、土木学会第 63 回年次学術講演会(平成 20 年 9 月)、pp. 33-34. 2008 年(査読無し)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

独立行政法人防災科学技術研究所・防災システム研究センター・総括主任研究員・佐藤 正義
研究者番号：80450261

(2) 研究分担者

独立行政法人防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センター・主任研究員・田端 憲太郎
研究者番号：30282958