

論文 乾燥砂地盤における大径 RC 杭の遠心場振動破壊実験

金田 将吾*1・林 和宏*2・田村 修次*3・齊藤 大樹*2

要旨: 大径鉄筋コンクリート杭の地震時損傷挙動の解明, および建物上部構造の地震応答に与える影響を考察するため, 地盤-杭-建物連成系の遠心場振動実験を実施した。振動台実験では, 鉄筋とモルタルからなる RC 杭模型に, 曲げ損傷およびせん断破壊が発生した。杭部材が損傷することで, 入力加速度に対する建物の応答加速度の比は低下し, 建物基礎部の変位と作用慣性力の関係は非線形挙動を示した。しかし, 杭部材に曲げ損傷が発生した程度では建物の沈下や傾斜はあまり変化しない。建物の沈下と傾斜が大きく進展するには, 杭部材が軸方向に大きく縮変形するせん断破壊が生じる必要があった。

キーワード: 遠心実験, 乾燥砂, 鉄筋コンクリート杭, 破壊挙動, 最大慣性力

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震や 2011 年の東北地方太平洋沖地震などの大地震後には, 建物の杭部材被害が多数確認されている^{1)~3)}。しかし, 大地震下での杭部材の損傷挙動や, 建物上部構造の地震応答に及ぼす影響については, 不明な点が多い⁴⁾。また, 損傷が目に見える上部構造と異なり, 地中の杭部材は地震後の損傷判定が難しい。2016 年の熊本地震では, 激震地区の益城町役場において, 被災後の建物診断に基づき一度は継続使用することが決まったが, その後の詳細調査で地中杭部材に重篤な損傷が見つかったため, 建物を取り壊すに至った⁵⁾。

地盤-杭-建物連成系において, 杭部材の損傷を実験的に研究した例は少ない。田村ら⁶⁾は, 直径 150mm 程度の小型鉄筋コンクリート系杭 (以後, RC 杭) を対象とし, 大型せん断土槽を用いた振動台実験によって, 杭基礎構造の地震時損傷挙動を検討した。樋口ら⁷⁾は, 遠心力載荷装置を用いて, RC 杭の鉄筋の一部が降伏した場合の連成系挙動を実験的に検討した。しかし, 直径 1m 以上の大径 RC 杭の損傷が進展し, 連成系としての極限応答に達する強非線形領域の地震応答は検討されていない。

そこで著者ら⁸⁾は, 乾燥砂地盤における大径 RC 杭の地震時損傷挙動解明を目指し, 簡易杭模型を用いた遠心場振動破壊実験を実施した。当該実験で用いた簡易杭模型は, RC 部材の曲げ破壊挙動や, 最大耐力以降の劣化性状を概ね再現できた。研究では, 杭の曲げ破壊によって応答が極限に達する場合に関して, 連成系の地震時挙動や最大耐力などを検討した。

本研究はこれに続き, 大径 RC 杭がせん断破壊する場合について, 連成系の地震時損傷挙動解明に向けた遠心場振動破壊実験を実施する。実験では, RC 部材のせん断破壊が再現可能な精密断面杭模型を用い, 過去の地震被

害と同じく杭頭部にせん断破壊を発生させる。また, 地中の杭部材の損傷評価法構築に向けて, 杭のせん断破壊が建物上部構造の地震応答に与える影響を考察する。

2. 実験概要

実験は京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用い, 50G 場で実施した。図-1 に実験で用いた精密杭模型の断面を示す。杭断面は径 $D=25\text{mm}$ (実大スケールで 1.25m) で, 降伏応力 374N/mm^2 の主筋 4 本 (径 1.2mm) と圧縮強度 6.03N/mm^2 のモルタルから成り, せん断補強筋 (降伏応力 432N/mm^2 , 径 0.8mm) は 15mm ピッチのスパイラル配筋とした。表-1 は, 本研究で用いた杭模型と, 建築基礎構造設計例集⁹⁾に記載されている径 1.8m の RC 杭実大断面例の比較を示す。本研究で用いた杭模型の 50G 場における作用軸力比は $n = N/N_0 = 0.24$ (部材の降伏応力 [モルタルの断面積と圧縮強度の積, および鉄筋の断面積と降伏軸力の積の和] $N_0 : 4652\text{N}$, 作用軸力 $N : 1127\text{N}$, いずれも模型スケールの値) である。一方, 実大断面例における最大作用軸力比は $n = 0.10$ である。さらに, 杭模型の主筋比と帯筋比の値も, 実大断面例と概ね等しい値を取っている。

振動実験に用いる, 乾燥砂地盤-RC 杭-建物上部構造連成系実験モデル概要を図-2 に, 実験モデル諸元を

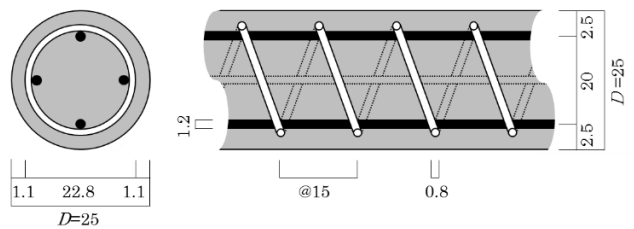


図-1 杭断面[mm]

*1 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻 (学生会員)

*2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 (正会員)

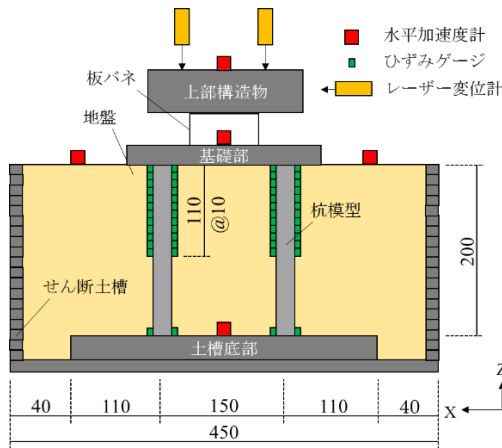
*3 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系

表一2に示す。実験ではせん断土槽を用いて、地震時の地盤変状を再現する。地盤は豊浦乾燥砂を用い、空中落下法で相対密度 $D_r = 60\%$ とした。建物基礎部は杭長を200mm (実大スケールで10m) とした前述の杭模型4本で支持し、杭頭および杭先端を剛接合とした。基礎部の質量は1.77kg、上部構造物の質量は7.42kgであり、上部構造物の固有周期は0.09sec (実大スケールで0.45sec) である。これは、10階建て程度のRC造建物を意図したもので、柱1本の建物質量支配面積を30m²、建物の単位面積あたりの鉛直荷重を9kN/m² とすれば、柱直下の杭1本にかかる鉛直荷重は2,700kNとなり、実験モデルの実大スケール鉛直荷重2,814kNの95.9%に相当する。

振動台実験における計測は、加速度計およびレーザー変位計を用い、上部構造物、基礎部、地表面の水平加速度と上部構造物の鉛直変位を計測した。なお、地表面の水平加速度は2つの加速度計の平均値をとる。また、杭模型両側面の軸方向に、塑性ひずみゲージを添付した。

表一1 本論の精密杭模型と実大断面例の比較

	杭径 D	軸力比 n	主筋比	帯筋比
杭模型 (実大スケール)	1,250mm	0.24	0.92	0.27
実大断面例 ⁹⁾	1,800mm	0.10	1.13	0.26



図一2 実験モデル[mm]

表一2 実験モデル諸元

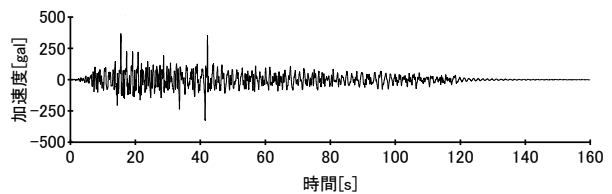
		記号	単位	模型	実大
杭	杭長	L	m	0.2	10
	杭径	D	mm	25	1250
	断面2次モーメント	I	mm ⁴	1.29×10^{11}	2.08×10^4
	鉄筋降伏応力	σ_y	N/mm ²	主筋: 374 帯筋: 432	
	モルタル圧縮強度	σ_c	N/mm ²	6.03	
基礎	質量	M_f	kg	1.77	2.21×10^5
上部構造	質量	M_s	kg	7.42	9.28×10^5
	1次固有周期	f_s	s	0.09	0.45

ゲージ添付位置は、深度方向に杭頭から10mmごとに12カ所と杭先端1カ所の計13カ所で、加振時の圧縮側縁と引張側縁の軸方向ひずみを計測する。ひずみゲージは、直径0.16mm (杭径25mmの1/300以下) のリード線で計測システムに接続しており、実験モデルの地盤変状にも追従できるように、余裕を持った配線とした。以降は全て実大スケールで記述する。

図一3に入力地震動を示す。加振は水平1方向とし、入力波は全て臨海波とした。臨海波は文献10)に基づき作成された人工模擬地震動である。加振は[1]~[7]の計7波で、表一3に示すように振幅を漸増させることでモルタル杭模型の損傷を徐々に進展させる計画とし、最大入力加速度38.6gal~835.8galを段階的に入力した。

3. 実験結果

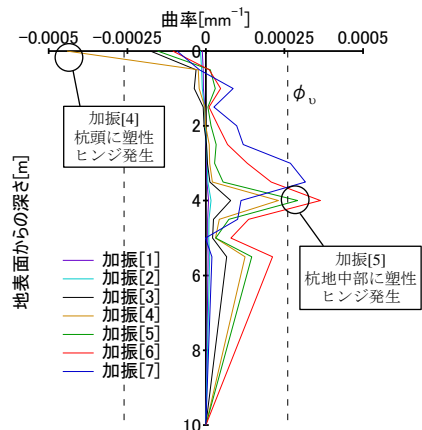
図一4に各加振における基礎部最大変位時の曲率分布を示す。図は縦軸に地表面からの深度、横軸に曲率をと



図一3 入力地震動波形 (臨海波)

表一3 最大入力加速度と杭の破壊性状

加振 番号	最大加速度[gal]		杭の損傷性状
	入力	上部構造物	
[1]	38.6	97.3	
[2]	66.0	172.1	
[3]	133.0	296.9	
[4]	367.1	394.5	杭頭に塑性ヒンジ形成
[5]	692.6	617.9	地中4m付近に塑性ヒンジ形成
[6]	770.3	811.1	
[7]	835.8	622.2	杭頭がせん断破壊



図一4 曲率分布

り、図中の点線は曲率増分解析において算定全塑性モーメントを発揮した際の曲率 ϕ_v である。曲率分布によると、杭模型は加振[1]～[3]では弾性範囲にとどまっていたが、加振[4]で杭頭に塑性ヒンジが形成された。その後、地中部の曲率も増大し、加振[5]で地中4m付近にも塑性ヒンジが形成された。

図-5は全加振終了後の実験モデルを示す。実験モデルの杭模型は、地中部にも多数の損傷が見られる。特に、先の曲率分布に関する検討と同じく、地中部4m付近に顕著な曲げひび割れが確認された。なお、杭模型は杭頭部で激しくせん断破壊しており、基礎部および上部構造物に大きな水平方向残留変形を生じている。この杭頭部せん断破壊は、加振[7]中に発生しており、基礎部および上部構造物が大きく沈下することで、終局を迎えた。なお、表-3に各加振における上部構造物の最大応答加速度と、杭模型の損傷性状を併記する。

図-6に加振[1]～[7]の各加振における上部構造物と地表面の最大応答加速度と、最大入力加速度の関係を示す。加振[6]までは、入力加速度の増大に伴って、上部構造物と地表面双方の応答加速度が増加する傾向にある。これに対し、杭頭部がせん断破壊した加振[7]では、地表面応答加速度が全加振中で最大となる626galを記録したのに対し、上部構造物応答加速度は622galと、加振[6]の最大値811galを下回った。

図-7～10に加振[2]、[4]、[6]、[7]について50秒間の

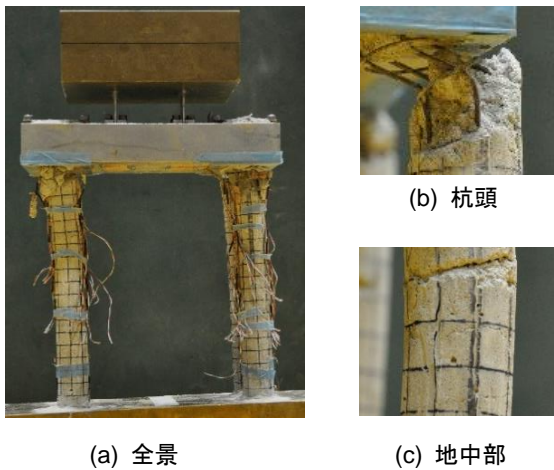


図-5 実験後の杭模型損傷状況

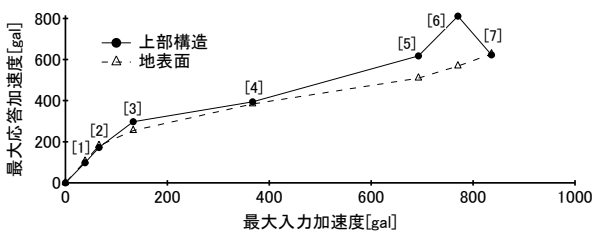


図-6 最大入力加速度-最大応答加速度関係

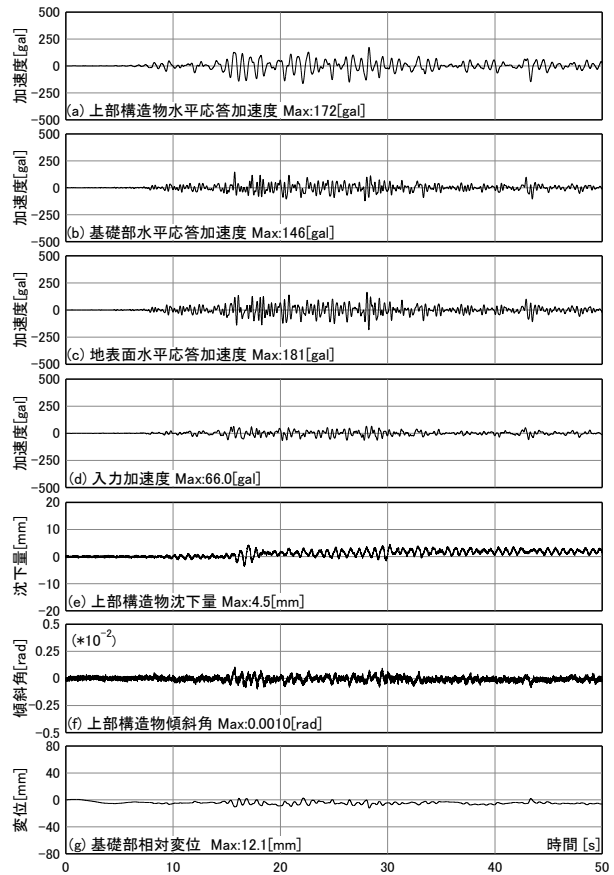


図-7 加振2 (杭模型弾性状態)

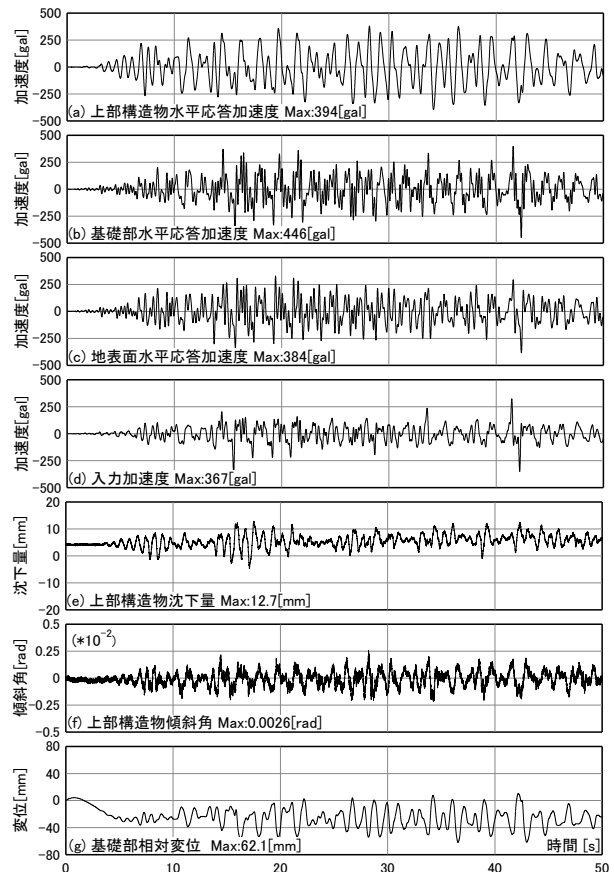


図-8 加振4 (杭頭塑性ヒンジ形成時)

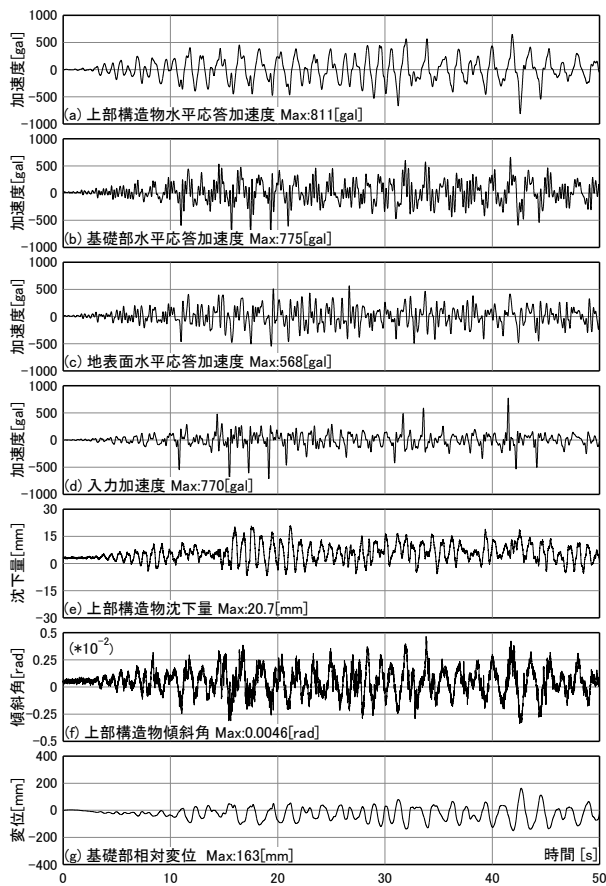


図-9 加振 6 (上部構造物最大応答時)

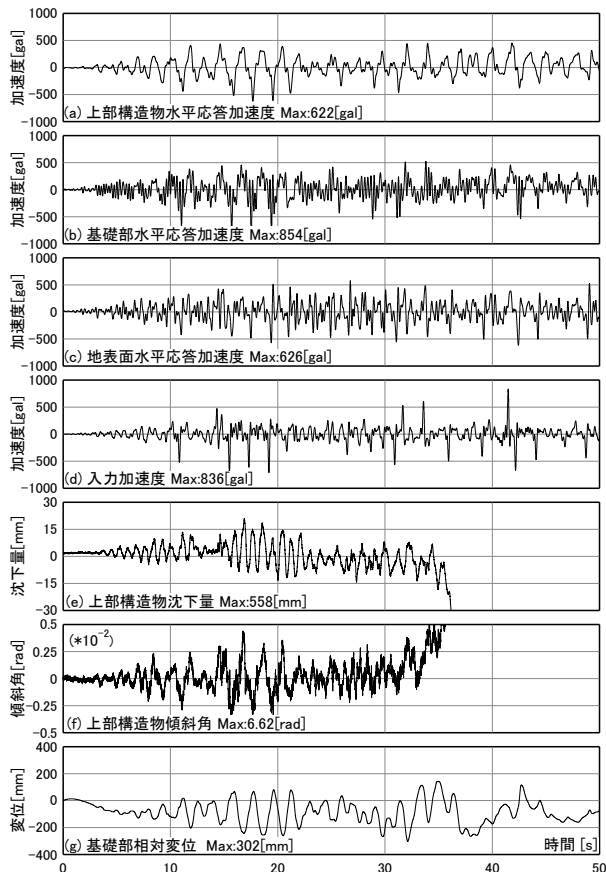


図-10 加振 7 (最終加振)

主要時刻歴を示す。図はそれぞれ、[2]杭模型弾性状態、[4]杭頭塑性ヒンジ形成時、[6]上部構造物の応答加速度最大時、[7]最終加振の時刻歴で、図(a) 上部構造物応答加速度、(b) 基礎部応答加速度、(c) 地表面応答加速度、(d) 入力加速度、(e) 上部構造物沈下量、(f) 上部構造物傾斜角、(g) 土槽底部に対する基礎部相対変位を示す。当該変位は、土槽底部および基礎部に設置した水平加速度計の積分値を採用する。

杭模型弾性状態の加振[3]では、最大入力加速度に対する上部構造物の最大応答加速度の応答倍率が 2.61 倍、基礎部の応答倍率が 2.21 倍であった。これに対し、加振[4]では上部構造物、基礎部それぞれの応答倍率が 1.07 倍、1.22 倍と大きく減少している。これは、加振[4]で杭頭に塑性ヒンジが形成され、入力加速度が上部構造物や基礎部に伝達されにくくなったためと考えられる。さらに、上部構造物の応答加速度が全加振中最大となった加振[6]では、上部構造物と基礎部の応答倍率がそれぞれ 1.05 倍と 1.01 倍となり、杭部材の損傷が進展するごとに建物の応答加速度が低下する傾向を確認した。

最終加振[7]では、杭頭にせん断破壊が生じた影響を受けて、上部構造物の最大応答加速度は 622gal と加振[6]の 77%程度に低下し、入力加速度に対する応答倍率も 0.74 倍と大きく減少した。これは、杭頭のせん断破壊によって大きく耐力が低下したため、建物の地震応答が頭打ちになったためと考えられる。

4. 最大慣性力の変化

図-11 に、各加振の基礎部最大水平変位と、建物に作用した最大慣性力の関係を示す。ここに、慣性力は上部構造物の加速度と質量 M_s の積、基礎部の加速度と質量 M_f の積、2 つの値の和と定義する。図は縦軸に最大慣性力を、横軸に基礎部最大変位をとる。基礎部最大変位については、図中の実線が基礎部と土槽底部（振動台）との相対変位を、点線が基礎部と地表面の相対変位を示している。また、図中の数字は加振番号を示す。

最大慣性力は、土槽底部との相対変位、地表面との相対変位ともに、加振[1]～[3]で概ね線形関係にある。これに対し、杭頭に塑性ヒンジが形成された加振[4]では、最大慣性力-基礎部変位関係に、やや非線形化が見られるものの、図-6 の最大応答加速度ほど顕著な変化ではない。最大慣性力-基礎部変位関係に顕著な非線形化が見られるのは、土槽底部との相対変位は杭頭がせん断破壊した加振[7]のみ、地表面との相対変位は杭地中部に 2 点目の塑性ヒンジが形成された加振[5]以降であった。

図-12 に、杭模型弾性状態の加振[2]と、上部構造物最大応答時の加振[6]における、慣性力-基礎部変位関係の比較を示す。図はそれぞれ縦軸に慣性力を、横軸に基礎

部変位をとり、(a)は基礎部と土槽底部の相対変位を、(b)は基礎部と地表面の相対変位を示す。また、図中の破線は、加振[2]に基づく剛性と、加振[6]における最大耐力を示す。

図(a)の基礎部と土槽底部の相対変位では、杭模型が弾性範囲にあった加振[2]の挙動が既に線形ではなく、杭模型の塑性化が進化した加振[6]の履歴も綺麗な紡錘形ではない。これは、鋼管杭の一部塑性化を扱った文献(11)でも見られた挙動である。当該挙動の原因の一つは、砂地盤が完全弾性体ではないことが挙げられる。また、地盤変状を伴う連成系の場合、振動台からの加速度入力によって杭周辺地盤に生じた慣性力の一部が、時間差をもって杭部材を通じ建物に伝達される。これは、杭-建物系と周辺地盤の固有周期が一致しないためである。上記の要因等から、基礎部と土槽底部の相対変位を対象とした場合、小振幅加振でも慣性力-基礎部変位関係が線形にはならない。

これに対して、図(b)の基礎部と地表面の相対変位においては、杭模型が弾性範囲にあった加振[2]において概ね線形挙動、曲げ損傷が進化した加振[6]ではほぼ紡錘形と言える履歴が見られる。これは、建物に生じた慣性力が、杭部材を通じて周辺の表層地盤の水平方向反力と釣り合っている機構に起因すると考えられる。杭部材に作用する水平方向の地盤反力は、弾性理論上は杭-地盤間の相対変位量と比例関係にある。無論、上記のように砂地盤が完全弾性体ではないが、本論の実験では概ね線形比例関係と言える履歴が示された。

実建物を対象とした地震後の損傷判定では、損傷に伴って判定指標がある程度変化しなければ、精度の良い評

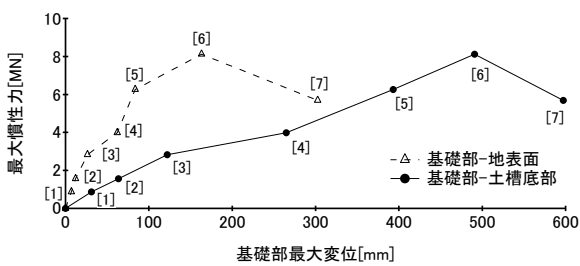
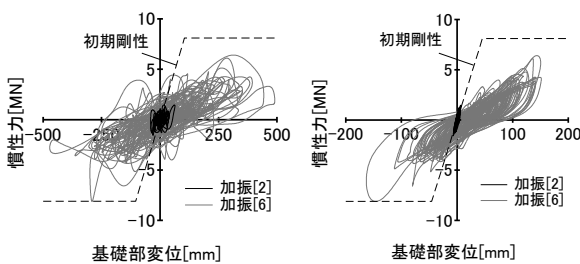


図-11 最大慣性力の変化



(a) 基礎部-土槽底部 (b) 基礎部-地表面

図-12 荷重変形関係 (加振[2], [6])

価が難しい。図-11に示すように、基礎部と地表面の相対変位量は、基礎部と杭先端間の相対変位の1/3程度であった。しかし、実験モデルにおいて杭頭に塑性ヒンジが形成された加振[4]における基礎部-地表面間の最大相対変位は約6cm、地中部にも損傷が生じた加振[5]で約8cm、杭部材の損傷が更に進展し建物の地震応答が全加振中で最大となった加振[6]では約16cmにも達していた。既往の研究(12)などでは、建物内に複数設置した地震計の記録から、上部構造物各階の応答加速度や損傷度を推定する手法が提案されている。実験結果に基づけば、上記システムに地表面の加速度を取得する地震計を1台加えることで、地中杭部材の損傷評価がある程度可能となる。評価対象の杭部材先端に加速度計を追加設置するよりは、建物周辺の地表面加速度を計測する方がより簡便である。本論では、地中杭部材の損傷評価(モニタリング)に用いる指標の一つとして、建物に作用した慣性力と、基礎部-地表面間の相対変位関係が適用できると考える。

5. 杭部材損傷後の実験モデル挙動

図-13,14に、各加振における最大入力加速度と、上部構造物沈下量、および傾斜角の関係をそれぞれ示す。図は縦軸に沈下量と傾斜角を、横軸に最大入力加速度をとり、実線は加振中の最大値を、破線は残留値を示す。上部構造物沈下量は2つのレーザー変位計(図-2参照)の平均値をとり、傾斜角は2つのレーザー変位計の差分を、変位計間の距離32mmで除した値をとる。なお、加振[7]では杭頭のせん断破壊で基礎部が大きく沈下・傾斜したことにより、加振中にレーザー変位計が一部レンジアウトした。

図-13の上部構造物沈下量では、加振の進行に伴い徐々に最大値、残留値が増加し、杭頭がせん断破壊した

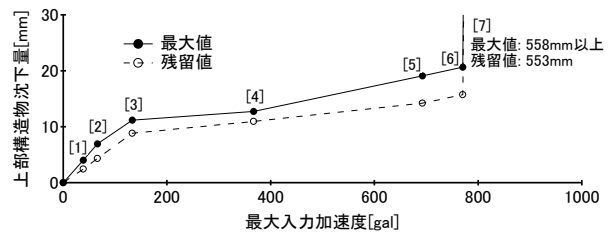


図-13 最大入力加速度-上部構造物沈下量

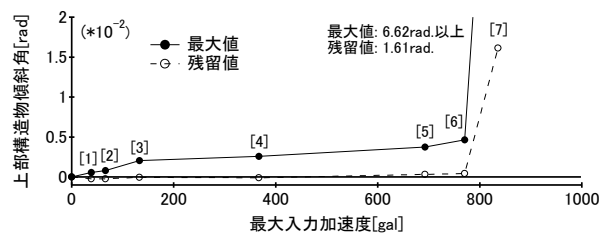


図-14 最大入力加速度-上部構造物傾斜角

加振[7]で最大値が 558mm 以上、残留値が 553mm と極端に大きな値を取った。逆に、加振[6]までの沈下量は最大 20mm 程度の範囲に留まっている。文献 8)にも記したように、RC 杭基礎構造の建物においては、せん断破壊に伴う杭部材の軸方向縮が生じない限り、建物の顕著な沈下は生じない結果となった。

図-14 の上部構造物傾斜角についても、図-13 の沈下量と同様の傾向が見られる。杭頭がせん断破壊した加振[7]では、加振中の最大値と残留値の双方が極端に大きな値を取るが、杭の曲げ損傷が相当進展しているはずの加振[6]では 1/200rad.以下の範囲で留まっている。

以上のように、建物の基礎部がある程度剛強な場合、杭部材に曲げ損傷が発生した程度では、建物の沈下や傾斜角にはほぼ影響がない。従って、被災建物の傾斜が小さい場合でも、RC 杭の曲げ破壊は相当進展している可能性がある。逆に、建物の傾斜がある程度大きい場合、杭部材はせん断破壊のような脆性的な損傷が発生している可能性が高いと言える。

6. まとめ

本研究では、乾燥砂地盤—RC 杭—建物連成系の遠心場振動破壊実験を実施し、以下の結果を得た。

- 1) 振幅を徐々に漸増させた計 7 波の臨海波を実験モデルに入力したところ、RC 杭模型部材の杭頭部と地中部で曲げによる損傷が発生、進展した。その後、杭頭がせん断破壊することで建物が大きく沈下、傾斜し終局に至った。
- 2) 杭部材に損傷が発生すると、入力加速度に対する上部構造物の応答倍率は低下し、慣性力と基礎部変位の関係は非線形挙動を示す。これは、杭部材の損傷や劣化によって、基礎部や上部構造物に入力加速度が伝達されにくくなったためと考えられる。特に、本論では、地中杭部材の損傷評価に用いる指標の一つとして、建物に作用した慣性力と、基礎部—地表面間の相対変位関係の非線形化に着目した。
- 3) 建物の基礎部がある程度剛強な場合、杭部材に曲げ損傷が発生した程度では、建物の沈下や傾斜角にはほぼ影響がない。従って、被災建物の傾斜が小さい場合でも、RC 杭の曲げ破壊は相当進展している可能性がある。逆に、建物の傾斜がある程度大きい場合、杭部材はせん断破壊のような脆性的な損傷が発生している可能性が高いと言える。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究 (A) (課題番

号: 16H02374, 研究代表者: 田村修次)の一部として行われた。また、実験実施においては、高橋産業経済研究財団からの助成(研究代表者: 林和宏)と、(当時)豊橋技術科学大学大学院生の八森渉君に協力いただきました。

参考文献

- 1) 大場新太郎, 濱川尚子: 1995年兵庫県南部地震における杭の損傷による建物固有周期の変化, 日本建築学会構造系論文集第495号, pp.63-70, 1997年5月
- 2) 中澤明夫, 難波伸介, 蘓鉄盛史, 時松孝次, 大岡弘, 社本康広, 中澤瑤子: 兵庫県南部地震において大きく傾斜した高層建物の杭基礎の被害調査, 日本建築学会構造系論文集第520号, pp.69-76, 1999年6月
- 3) 金子治, 中井正一: 東日本大震災において被害を受けた杭基礎の耐震性の評価, 日本建築学会構造系論文集第79巻第695号, pp.83-91, 2014年1月
- 4) 日本建築学会: 大会(中国)構造部門(基礎構造)パネルディスカッション資料 大地震時の杭基礎の耐震設計, 2008年9月
- 5) <http://mainichi.jp/articles/20161013/ddl/k43/040/341000c>
- 6) 田村修次, 肥田剛典: 大型せん断土槽を用いた液状化実験における RC 杭の破壊が構造物挙動に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集第74巻第635号, pp.91-96, 2009年1月
- 7) 樋口俊一, 堤内隆広, 大塚林菜, 伊藤浩二, 江尻讓嗣: RC 造杭基礎構造物の遠心模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), pp.642-651, 2012年
- 8) 八森渉, 林和宏, 田村修次, 齊藤大樹: 乾燥砂地盤—RC系杭—建物系の極限応答に関する遠心場振動実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39 pp.817-822, 2017年7月
- 9) 日本建築学会: 建築基礎構造設計例集, pp.294
- 10) 日本建築防災協会: 動的設計用入力地震動の設定に関する検討に関する報告書, 1992年3月
- 11) 秀川貴彦, 宮本裕司, 田村修次: 杭の塑性化と建物応答に着目した杭支持建物の遠心力場における実験的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.289-292, 2009年6月
- 12) 森井雄史, 岡田敬一, 白石理人, 杉本浩一, 寺田岳彦, 佐藤俊明, 飛田潤: 地震直後における建物健全性評価のための限られた階の加速度記録に基づく建物全層応答推定評価手法 - 鉄骨構造 18 層試験体の振動台実験結果に基づく検討 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.730, pp.2045-2055, 2016.12