建物—地盤連成系モデルの振動台実験による杭基礎への地震作用の基本性状

FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS ON SEISMIC EFFECT TO PILE FOUNDATION BY SHAKING TABLE TEST FOR MODEL OF BUILDING-SOIL INTERACTION SYSTEM

飯場 正紀*, 田守 伸一郎**, 北川 良和***

Masanori IIBA, Shin'ichiro TAMORI and Yoshikazu KITAGAWA

In order to clarify seismic action to a pile foundation and stress of piles in a soil-structure interaction system, a shaking table test on a model of superstructure, pile foundation and soil deposit was carried out. Effects of the sway and rocking motions of foundations and vibrations of the soil deposit on the pile foundation are investigated. Especially the effect of the contact condition between an embedment of foundations and surrounding soil, that is, backfill and friction at the embedment, on the stress of piles is focused. The backfill is very effective to reduce the force to piles, and the rocking motion of embedment has much influence to the bending moment of piles.

Keywords : Frame with wall column, Model specimen, Shaking table test, Seismic action, Rocking motion of embedment, Pile bending moment

壁式ラーメン構造、模型試験体、振動台実験、地震作用、基礎回転動、杭曲げモーメント

1. はじめに

軟弱地盤における建物の耐震設計においては、建物と地盤との動的相互作用効果が重要であり、この効果を検証するためにこれまで地震観測や振動実験（振動台実験、起振機実験）が行われてきた。解析的な研究も含めた動的相互作用研究の近年の動向に関しては、井口によって要約されている¹⁾。建物への有効入力や建物周期特性などの動的相互作用現象の解明には地震動観測結果に基づいた検討が必要であることから、1970年代から上部構造、杭基礎および表層地盤の同時地震動観測が始められた²⁾³⁾。その後、建物や地盤の加速度のみでなく、杭のひずみや基礎根入れ部土圧の観測も追加されるようになった⁴⁾⁵⁾。近年の大地震動においても、建物の地震時挙動が観測され、動的相互作用の観点からの現象解明がなされる⁶⁾⁷⁾とともに、大地震動における動的相互作用効果の建物応答への影響⁸⁾に関する議論が活発になってきた。また、高層建物や免震建物のような特殊な建物でない一般的な中低層建物の地震動観測データが非常に少ないことを踏まえ、一般的な建物における地震動観測が始められている⁹⁾¹⁰⁾。しかし地震動観測に基づく検討は、貴重なデータを提供するもののケーススタディ的な検討にとどまることが多く、動的相互作用に関する要因を総合的に分析するには長期間の観測結果の蓄積が必要となっている。

建物の地震時挙動は、上部構造の振動特性に加えて表層地盤の振動特性の影響を大きく受けるため、上部構造のみならず表層地盤の動的性状も加味した現象の把握が重要となる。建物の基礎部分は、地震動が作用する部分であるとともに、上部構造の慣性力に抵抗す

る部分でもある。特に杭基礎に生じる応力・変形の算定においては、上部構造の慣性力と表層地盤の振動(外力として地盤変位も含むことから、合わせて地震作用と呼ぶ)の影響度について検討する必要がある。JR関連の設計基準では古くから地盤変位の影響を取り入れた地震作用の考え方(応答変位法と呼ばれている)が示されていた¹¹⁾。地盤変位の影響¹²⁾¹³⁾とともに、基礎構造の安全性に関するクライテリアに関する研究¹⁴⁾も杭基礎の耐震設計に不可欠であり、基礎の根入れ効果についても真剣に議論する時期となっている¹⁵⁾。

今回、上部構造として動的相互作用効果が大きくなる比較的剛性の高い壁式ラーメン鉄筋コンクリート構造を対象とし、上部構造—基礎構造—地盤連成系の縮小モデルを用いた振動台実験を行う機会を得た¹⁶⁾。本論文では、上部構造の振動特性と杭基礎の入力・抵抗機構に及ぼす動的相互作用の基本性状を明らかにするために、模型試験体の設計の考え方を示すとともに、実験結果に基づいて、基礎入力動や上部構造の周期・減衰特性等への動的相互作用の影響を検討した。さらに基礎根入れ部周辺の地盤条件の違いによる上部構造のベースシア・転倒モーメントおよび地盤変位の杭曲げモーメントへの影響度について検討を加えた。ここでは上部構造、基礎構造、地盤ともに弾性的挙動を示す領域を検討範囲としている。

2. 杭基礎への地震作用(入力と抵抗機構)の概念

図1に、上部構造—杭基礎—地盤連成系における基礎部分での入力作用および抵抗機構の概念を示す¹⁷⁾¹⁸⁾。図1b)に、上部構造(基礎根入れ部の質量も含む)を取り除いた杭基礎—地盤系の状態を示す。

* 独立行政法人建築研究所構造研究グループ
上席研究員・博士(工学)

** 信州大学工学部建設工学科 助教授・工博

*** 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
教授・工博

Chief Research Engineer, Structural Engineering Group, Building Research Institute, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Architecture & Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu University, Dr. Eng.

Prof., Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Eng.

図1 地盤振動および上部構造(基礎根入れ部を含む)の慣性力作用時の力の釣合

図2 11階建 HFW 建物の概要(単位 mm)

工学的基礎の下方から鉛直入射した地震動により表層地盤が共振する場合を想定すると、地盤変位により強制され杭に変位が発生する。また基礎に根入れ部分を有すると、根入れ側面に作用する土圧は根入れ部分を押す方向に作用し、入力作用となる。一方抵抗要素は主に杭の水平抵抗であり、根入れ部底面の摩擦力は入力または反力として作用すると考えられる。図1c)のように、上部構造が共振する状態では、上部構造(基礎根入れ部も含む)からの慣性力によるベースシアや転倒モーメントが杭基礎に作用し、根入れ部分には水平変位(以下スウェイ変位)や回転角(以下ロッキング角)が生じる。上部構造のベースシアに対し、根入れ部側面の土圧や底面の摩擦および杭で抵抗し、転倒モーメントに対しては杭周囲の摩擦力および杭先端反力等、主に杭の軸方向で抵抗する。実際の地震時の挙動は、図1のb)とc)の状態が重ね合わされることになる。

3. 模型試験体を用いた振動台実験

3.1 模型試験体の設計条件と実験パラメータ

建物の原型は8階、11階、14階壁式ラーメン鉄筋コンクリート構造の建物(以下、HFW(High-rise Framed Structures with Wall Columns)建物と呼ぶ)である。図2に、11階建 HFW 建物の基準階平面と断面を示す。HFW 建物の構造形式は桁行方向が扁平な壁柱と同じ厚さの梁からなる壁式ラーメンであり、梁間方向は両端に壁柱を有する独立耐震壁構造となっている。本実験では、HFW 建物の梁間方向の振動性状に着目し、桁行方向2スパン分をモデル化した。

模型試験体を設計する時、相似則をどう考えるかが検討項目となる。すべての物理定数において、実際の構造物と相似な模型を作製することは不可能であることから、模型の設計にあたって、力と変形の関係の相似性を満足させるためには、どの相似比を満足させるかをあらかじめ検討しておく必要がある²⁰⁾。

本実験で用いた相似比を表1に示す。相似比の決定にあたっては、まず、長さ、加速度、密度を設定相似比とし、他の物理量はバッキンガムのπ定理にしたがった²¹⁾。本実験では、文献22)、23)に示された模型化の考え方を参照し、また同種の材料を用いることとした。重力場での実験であることにより加速度の相似比を1、地

盤材料における原型地盤と模型地盤の関係から密度の相似比を2/3、振動台の寸法・性能に基づく、模型試験体重量や地盤・建物模型の大きさの関係より、長さの相似比を1/40とした。

設定した主なパラメータは、上部構造、地盤、基礎構造、基礎根入れ部周辺地盤状況である。実験シリーズを表2に示す。表中の○印について実験を行った。

- 上部構造(3種類): 上部構造のモデルとして、11階建モデルの他に、8階建、15階建モデル(14階原型建物に1層を追加)を考えた。
- 地盤(2種類): 建築基準法に示される第2種地盤(中程度)と第3種地盤(軟弱)に相当する単層地盤(原型地盤の深さは24m程度、せん断波速度はそれぞれ200、100m/s)を設定した。
- 基礎構造形式(2種類): 杭基礎が対象であるが、杭を取り除いた基礎(以下、直接基礎と呼ぶ)を追加し、杭の有無による動的相互作用効果を比較する。地下階がない場合および地下1階(地下1階は直接基礎のみ)の基礎根入れ部の深さは11階建建物高さの約8%、約16%を設定した。

表2 実験シリーズ

基礎形式 条件	地盤条 件	基礎根入れ 深さ条件	基礎側面 埋戻し条件	基礎底面 接触条件	上部構造階数条件			
					0F*	8F	11F	15F
地盤のみ	第2種	—	—	—	○	—	—	—
	第3種	—	—	—	○	—	—	—
直接基礎	第2種	8%**	有	接触	○	○	○	○
			無		○		○	○
	16%	有				○		
		有				○		
第3種	8%	有				○		
		無				○		
杭基礎	第2種	8%	有	非接触	○	○		○
					無	○		○
			無				○	
			無				○	
第3種			有	接触	○	○		○
			無		○		○	○

注) * 0Fは基礎—地盤系であり、上部構造は存在しない ** 上部構造の高さに対する基礎部分の根入れ深さの比を示す

表1 相似比

項目	次元	相似比
長さ ^a	L	1/40
断面積	L ²	1/1,600
速度	LT ⁻¹	1/6.325
加速度 ^a	LT ⁻²	1/1
時間	T	1/6.325
振動数	T ⁻¹	1/0.158
重量	MLT ⁻²	1/96,000
質量	M	1/96,000
弾性定数	ML ⁻¹ T ⁻²	1/60
密度 ^a	ML ⁻³	1/1.5
曲げモーメント	ML ² T ⁻²	1/3.84×10 ⁵
ばね定数	MT ⁻²	1/2,400
ポアソン比	—	1/1
減衰定数	—	1/1

* 設定相似比

図3 基礎根入れ部周辺の土圧作用の状態

d) 基礎根入れ部周辺条件(3 種類): 基礎根入れ部と周辺地盤との接触条件を、図3のように設定した。

i) 基礎根入れ部側面と底面が地盤と密着(側面埋戻し有、底面接触)。ただし原型の 2 スパン分の模型であるため、振動方向と平行する模型側面には摩擦力が作用しないよう溝(隙間 20mm 程度)を設け、地盤と接触していない。側面の埋め戻し部分の地盤物性は表層地盤のそれとほぼ同一である。ii) 基礎根入れ部の底面のみが地盤と接触。振動直交方向の根入れ側面に隙間(40mm 程度)を設け、土圧は作用しない(側面埋戻し無、底面接触)。iii) 根入れ部側面、底面とも地盤と非接触(底面と地盤との隙間 10mm 程度)。上部構造からの慣性力には杭のみで抵抗する。

3.2 模型試験体の特徴と特性

上部構造－杭基礎－地盤連成系模型試験体および加速度計の配置と記号を図4に示す。

(1) 上部構造模型とその特性

11 階上部構造模型における各階の質量、剛性等をまとめ、表3に示す。図5に示すように、上部構造模型は鋼材を用いて作製され、板バネの柱(幅 53~104mm、厚さ 1.6~3.2mm)と床位置でのおもり(厚さ 12mm で平面が 100mm 角と 120mm 角の鉄板を 1 枚ずつ)から構成されている。

実験結果から得られた 8、11、15 階建上部構造模型の基礎固定時の固有振動数と減衰定数の値を表4に示す。計算値は上部構造模型の値(表3)に基づいて固有値計算した結果である。加振条件における減衰定数にはわずかに差が見られるものの、固有振動数はほぼ一定の値である。上部構造模型の固有振動数の実測値と計算値を比較すると、1 次モードでは計算値の方がわずかに高くなっている。

(2) 杭基礎模型とその特性

図6に示す杭基礎模型(基礎根入れ部と 4 本の杭で構成されている)の基礎根入れ部はアクリルとアルミニウム製であり、基礎根入れ部の剛性は非常に大きい。基礎根入れ部および杭模型の諸元を表5に示す。上部構造の階数に関係なく、基礎根入れ部および杭は同じ寸法であるが、基礎根入れ部の質量は上部構造の階数に対応させ調整した。杭の頭部は基礎根入れ部底面に接合されており、ほぼ杭頭回転拘束の条件が満たされている。杭模型は鋼板(幅 38mm、厚さ 4.5mm)の周辺にゴムを張り付けて円柱状(直径 38mm、長さ 487mm)にし、断面形状と曲げ剛性を原型と相似にしている。杭の曲げ剛性、減衰定数は、杭頭固定の片持ち梁の静的試験、自由振動試験から評価し、曲げ剛性は 57.5Nm²、減衰定数は 5.5% である。杭先端は地表面から 550mm の位置にある。杭先端はせん断波速度の大きい地盤に支持される条件が必要であるが、原型地盤のせん断波速度 400m/s 以上に対応する地盤模型が作製できなかったこと、および杭先端を振動台上に直接支持させると杭先端で鉛直変位が発生しないことを考慮して、杭先端は第 2 種地盤と同様の物性を有する層に支持されている(図4参照)。

Randolph 他²⁴⁾、増田他²⁵⁾の方法により²⁶⁾、3.1 節

表3 11 階建上部構造

階	模型の諸元		
	質量(kg)	剛性(N/m)	高さ(mm)
11	2.50	54.6	69.5
10	2.45	97.1	69.6
9	2.52	97.0	69.6
8	2.44	125.0	70.0
7	2.52	128.0	70.0
6	2.47	189.0	69.6
5	2.58	175.0	69.6
4	2.53	261.0	69.8
3	2.66	256.0	69.8
2	2.55	414.0	66.9
1	2.53	449.0	66.9

表4 上部構造の基礎固定時の固有周期と減衰定数

建物階数	次数	実験値				計算値
		自由振動		スリープ加振		
		振動数(Hz)	減衰定数	振動数(Hz)	減衰定数	
8F	1	24.4	0.00190	24.4	0.00254	27.2
	2	67.0	----	----	----	66.9
11F	1	18.6	0.00182	18.5	0.00296	20.3
	2	50.5	----	----	----	53.6
	3	84.5	----	----	----	81.1
15F	1	11.2	0.00185	11.2	0.00285	13.1
	2	32.2	----	32.2	0.00253	32.0
	3	54.4	----	----	----	51.8
	4	75.2	----	----	----	71.1
	5	93.6	----	----	----	87.7
備考	自由振動波形のFFT処理		1次固有振動数付近のバンドパスフィルタ処理後の波形の対数減衰率	共振曲線のピーク振動数	共振振動数での増幅率(A)より、1/2Aから算定	模型の各質量及び各柱寸法に基づいてばね、質量モデルを作成

図4 上部構造－杭基礎－地盤連成系模型試験体および計測点位置(単位 mm)

図5 11 階建上部構造模型試験体 (単位 mm)

図6 基礎根入れ部と杭模型 (単位 mm)

表5 基礎根入れ部・杭模型の諸元

		寸法(mm)		質量(kg)	
		直径	長さ	直接	杭
基礎根入れ部	8階建	平面300x300 根入れ深さ63	7.02	8.31	
	11階建		8.09	8.33	
	15階建		10.4	10.9	
杭(共通)		直径(mm)	長さ(mm)	密度(ton/m ³)	
		38.0	487	2.06	

の設定パラメータに示した原型地盤と模型地盤における杭頭剛性を求め、その結果を比較すると表6となる。模型において鉛直剛性がやや小さくなるが、相似な関係はほぼ満足されている。

(3)地盤模型とその特性

地盤模型の平面寸法を加振方向3m、加振直交方向2mとした(図4参照)。基礎根入れ部模型の平面寸法に対して、地盤の平面寸法は加振方向で10倍、加振直交方向で6.7倍の大きさを有している。また地盤模型の高さに対する長さの比が約5倍ある。地盤を大きくした理由は、できる限り地盤のせん断変形を卓越させること、および地盤模型の境界からの反射波の影響を小さくすることによっている。さらに地盤が一様にせん断変形するために、水野・岡野他の実験で用いられた方法²⁷⁾を採用し、地盤の振動方向と直交する地盤側面に厚さ1mmのステンレス製の板を取り付け、地盤側面での鉛直変位の発生を防止している。地盤模型の境界での反射波を発生させずに、地盤の曲げ変形を防止する方法として、ウレタンフォーム²⁸⁾や水ガラス²⁹⁾などが用いられているが、本実験では周辺境界条件の解析モデル作成の容易さを考慮して、ステンレス板のみとした。

模型地盤の層構成と特性を、表7に示す。模型地盤はポリアクリルアミドとベントナイトを用いて製作した²⁰⁾²⁹⁾。第2種地盤は単層構造であるのに対し、第3種地盤は、地盤層の下部に厚さ50mmのせん断波速度の大きい層(第2種地盤と同様の物性)を有する2層構造である。地盤模型の特性は、S波検層、スイープ加振およびテストピースの自由ねじり試験結果から求めた。スイープ加振による第2種、第3種地盤の増幅特性を図7に示す。図中、CH00は地表中央の加速度応答である。第2種、第3種地盤のせん断波速度の平均値はそれぞれ約23.9、14.3m/s、減衰定数は約1.9、3.8%である。地盤の共振振動数は第2種地盤で1次10.1Hz、2次31.5Hz、第3種地盤で1次6.41Hz、2次17.5Hzとなっている。

3.3 計測項目

計測項目は、地盤、基礎、建物内の加速度(図4参照)、基礎側面および底面での土圧、杭の曲げひずみである。加速度計はひずみゲージ式

表6 杭頭剛性の比較

	鉛直剛性(kN/m)	第2種地盤	第3種地盤
		2.17E+06	1.19E+06
原型値	表層地盤	層厚24m Vs=200m/s ポアソン比0.45	層厚24m Vs=100m/s ポアソン比0.48
	杭先端地盤	Vs=400m/s、ポアソン比0.4	
	杭	場所打ちRC杭、径1.5m 杭頭位置:地表から2.54m	
模型の目標値	鉛直剛性(kN/m)	904	496
模型値	鉛直剛性(kN/m)	820	406

表7 模型地盤の特性

地盤種別	第2種地盤(中程度)	第3種地盤(軟弱)
地盤構成	GL 0.59m Vs	GL 0.54m Vs1 0.05m Vs2
S波速度(m/s)	Vs=23.9m/s	Vs1=14.3m/s Vs2=23.9m/s
卓越振動数(Hz)	1次 10.1Hz 2次 31.5Hz (スイープ実験)	1次 6.41Hz 2次 17.5Hz (同左)
減衰定数(%)	3.27 テストピース 1.89 スイープ実験 1.86 地震動加振実験	2.23 テストピース 自由ねじり試験 4.31 スイープ実験 3.26 地震動加振実験
密度(t/m ³)	1.37	1.11

a)第2種地盤

b)第3種地盤

図7 第2種および3種地盤の増幅特性

(±2g)であり、上部構造(7点)、基礎根入れ部(5点)、地盤内(10点)に設置した。図8a)に基礎根入れ部の側面での土圧計(容量19.6~147kPa)の配置を示す。地下階なし模型の場合、各側面に3点取り付けられている。図8b)に、杭の曲げひずみ計測位置を示す。4本ある杭の内、1本は6点、他3本は杭頭の2点の曲げひずみを計測する。

3.4 加振内容とデータ処理方法

1)自由振動実験

上部構造の頂部に衝撃を加え、自由振動を発生させ、得られた自由振動波形の複数の繰返し(5周期以上)から平均的な固有振動数および対数減衰率を求めた。

2)スイープ加振実験

振動台は建築研究所の中型振動台(3×4mのテーブルを有する油圧式水平一軸振動台、20ton積載時で最大加速度1g、最大変位150mm、最大速度1m/sの加振が可能)を用いた。また振動台における加速度波形の制御するために、入力補償システムを使用した³⁰⁾。振動台からの入力として、スイープ波加振を行った。スイープ波加振は加振時間の短縮が可能となり、短時間の信号から求められる伝達関数も十分な精度が確保されることが報告されている³¹⁾。本実験では目標加速度振幅0.5m/s²、振動数漸増、振動数範囲:2-50Hz、スイープ時間:約70秒の対数スイープ加振を採用した。

振動台の加速度振幅に対する各部の伝達関数の算定には、高速フーリエ変換を用い、変換後のフーリエスペクトルに3回のハニングウィンドウをかけた。

4. 基礎入力動の特性と基礎部分で地震作用性状

基礎入力動の評価には無質量基礎の応答結果が必要であるが、基礎質量の影響は小さいことが報告されていることから³²⁾、ここでは上部構造のない基礎-地盤系の応答結果を用いて基礎入力動の検討を行った。スイープ

a)土圧計

b)杭ひずみ計配置

図8 基礎根入れ部の土圧計と杭の曲げひずみ計測位置(単位mm)

a) 第2種地盤

b) 第3種地盤

図9 基礎構造による基礎水平入力動比の比較および簡易評価結果

を行った。スイープ加振における基礎入力動の水平成分を地表面応答のそれと除した値(以下、基礎水平入力動比と呼ぶ)の基礎構造による比較(第2種および第3種地盤、土圧作用)を図9に示す。図からわかるように、基礎水平入力動比はほぼ1より小さく、振動数とともに減少している。また基礎水平入力動比は杭基礎で小さく、杭抵抗により水平入力動が低減されている。図中、基礎底面位置(杭基礎の場合は杭頭位置)における地盤変位を地表面変位で無次元化した値(図で地盤変位)を併せて示す。地盤変位は簡易的に式(1)で与えた。

$$u_g(z) = u_{gs} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) = u_{gs} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_g} \frac{z}{H}\right) \quad (1)$$

ここに、 u_g 、 u_{gs} はそれぞれ地盤変位、地表面変位、 λ は波長、 f 、 f_g はそれぞれ波の振動数、地盤の1次卓越振動数、 z 、 H はそれぞれ深さ、地盤層厚である。

さらに杭変位は式(2)から求め、図9に杭頭での値を示した。

$$E_p I_p \frac{d^4 u_p}{dz^4} + B_p k_h (u_p - u_g) = 0 \quad (2)$$

ここに、 u_p 、 E_p 、 I_p 、 B_p はそれぞれ杭の変位、弾性定数、断面2次モーメント、直径であり、 k_h は水平地盤反力係数である。なお境界条件は杭頭で回転拘束、杭先端でピンとした。水平地盤反力係数は式(3)に示す Francis の提案式から求めた³³⁾。

$$k_h = 1.3 \frac{E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{E_s B_p^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (3)$$

ここに、 E_s 、 ν はそれぞれ地盤の弾性定数、ポアソン比であり、ポアソン比は0.35を用いた。式(3)より第2種、第3種地盤の水平地盤反力係数は、それぞれ66.3、17.3(MN/m³)である。第2種地盤の場合、地盤変位および杭頭変位の計算値は、実験結果の上限を包絡し、実験結果との対応度は良い。一方、第3種地盤の場合、振動数の増加とともに、杭の効果をやや過大評価する傾向を示している。

図10に、基礎根入れ部の側面土圧・底面摩擦作用の有無による基礎水平入力動比(第2種地盤)を示す。基礎根入れ部周辺の土圧作用の有無による差は少ないが、土圧・摩擦が作用しなくなると高振動数域で値が上下に変動する割合が大きくなっている。

図11に、杭基礎の回転入力動の基礎根入れ部周辺地盤条件での比較を示す。ここで基礎回転入力動比は角加速度に基礎半幅を乗じた

図10 基礎水平入力動比の基礎周辺地盤条件による比較(第2種地盤)

a) 第2種地盤

b) 第3種地盤

図11 杭基礎における基礎回転入力動比の基礎周辺地盤条件による比較

図12 基礎根入れ部に作用する入力と抵抗要素とその割合

値を地表面応答で除した値とした。基礎回転入力動比も周辺土圧の作用の有無による影響は小さい。地盤の1次卓越振動数近辺では基礎回転入力動比は小さいが、地盤の2次卓越振動数近辺でその割合は地表面応答の2割程度であり、11階建物頂部の水平動に換算すると、地表面応答と同程度となっている。基礎回転入力動は無視できる大きさではないが、地盤の2次卓越振動数付近での現象であることを考えると、基礎回転動の建物応答への影響は小さい。

図12に、地盤の1次卓越振動数における基礎構造および周辺地盤条件による基礎根入れ部に作用する入力と抵抗の関係を示す。基礎根入れ部慣性力、側面土圧および杭頭水平力は、基礎根入れ部慣性力が最大値を示す時刻における値である。図1に示したように、地盤振動に強制された結果、基礎が振動するため、基礎の側面土圧は

基礎に対して入力として作用している。杭基礎の場合、杭は抵抗要素となるが、基礎根入れ部底面の摩擦力は第2種地盤では抵抗、第3種地盤では入力として作用し地盤条件により差が生じる。地盤が軟らかくなると、側面土圧と杭抵抗の割合がやや大きくなっている。

5. 連成系における上部構造の振動特性と基礎部分での外力分担

地盤との連成系における上部構造の振動特性は、上部構造の自由振動実験結果から求めた。表8および表9に、それぞれ連成系における上部構造の共振振動数と対数減衰率の一覧および建物頂部に占めるスウェイ、ロッキング、建物変形の割合の一覧を示す。

(1) 上部構造の共振振動数

基礎固定時の共振振動数(f_{BF})に対する、杭基礎(側面埋戻し有)における連成系の共振振動数(f_b^*)の比は、第2種、第3種地盤でそれぞれ59~68%、43~48%と低くなる。周辺土圧が作用しない場合(側面埋戻し無)や直接基礎の場合にはさらに低下する。

(2) 連成系の振動モード

図13に、自由振動における建物頂部の加速度応答に占める杭基礎のスウェイ、ロッキング、上部構造の応答の割合を、建物階数別、基礎根入れ部周辺地盤条件別に示す。共振振動数が低下する要因として、基礎のロッキング成分がかなりの割合を占めていることが挙げられる。基礎根入れ部周辺に土圧が作用しなくなると、基礎のロッキング成分はやや増加するが、スウェイ成分の増加が顕著である。

(3) 上部構造の減衰定数

基礎固定時における上部構造の対数減衰率は、0.2%程度であるのに対し、連成系では第2種地盤で2~3%程度、第3種地盤で4~5%程度となる。表7より、地盤の減衰定数は、第2種、第3種地盤でそれぞれ約1.9%、3.8%であり、上部構造の減衰定数は、地盤の材料減衰定数と同等かまたはそれより大きい値になっている。この結果は、上部構造の減衰には地盤の材料減衰に加えて、地下逸散による振動エネルギーの消散が関係していることを示すものである。

表10に、上部構造のベースシア(基礎根入れ部分の慣性

力を含む)に対する基礎根入れ各部分での反力としての負担割合を示す。図1に示すように、抵抗要素として、基礎根入れ部の側面土圧・底面摩擦および杭の水平抵抗力がある。側面土圧と杭の水平抵抗による負担力は計測値に基づいて算定した。底面摩擦負担分はベースシアから側面土圧と杭の水平抵抗力を引いた値となる。ここでは基礎根入れ部の側面土圧の負担力は、側面に取り付けた土圧計測値の平均値に面積を乗じて求めた。また前後の2面で計測された側面土圧の作用方向が逆位相となるため、両面の土圧が反力として有効であるとした。杭については、均質地盤に設置された半無限長の杭を仮定(Changの式を適用)し、実験で得られた杭曲げモーメント分布から最小2乗法により、杭の水平抵抗力とロッキング角を求めた。得られたロッキング角は実験における基礎のロッキング角とほぼ対応していた。基礎根入れ部の側面土圧による分担率が非常に大きく、その場合には杭の水平抵抗力の分担率は小さくなる。

表8 連成系における上部構造の共振振動数と対数減衰率

地盤条件	基礎条件	根入れ深さ(%)	側面埋戻し	底面接触	建物条件								
					8階建			11階建			15階建		
					$f_b^*(Hz)$	f_b^*/f_{BF}	$h(\%)$	$f_b^*(Hz)$	f_b^*/f_{BF}	$h(\%)$	$f_b^*(Hz)$	f_b^*/f_{BF}	$h(\%)$
なし	基礎固定				24.4	1.000	0.191	18.6	1.000	0.184	11.2	1.000	0.181
第2種地盤(中程度)	直接	8	有	密着	12.2	0.500	2.12	7.94	0.428	2.90	5.25	0.467	2.53
			無					5.86	0.316	3.78			
	杭	8	有	密着				9.28	0.500	2.26			
			無		16.5	0.675	1.71	10.9	0.585	1.85	6.96	0.620	1.98
第3種地盤(軟弱)	直接	8	有	密着				9.16	0.494	2.49			
			無					8.79	0.474	2.89			
	杭	8	有	密着	4.76	0.257	2.64	4.76	0.257	2.64			
			無		11.7	0.480	4.73	7.94	0.428	3.78	5.25	0.467	4.39
								7.32	0.395	4.91			

表9 連成系における上部構造のスウェイ、ロッキング、建物変形率

地盤条件	基礎条件	根入れ深さ(%)	側面埋戻し	底面接触	建物条件								
					8階建			11階建			15階建		
					スウェイ	ロッキング	建物変形	スウェイ	ロッキング	建物変形	スウェイ	ロッキング	建物変形
なし	基礎固定				0.001	0.008	0.991	0.001	0.013	0.986	0.001	0.009	0.990
第2種地盤(中程度)	直接	8	有	密着	0.066	0.592	0.342	0.044	0.749	0.207	0.035	0.715	0.250
			無					0.056	0.815	0.129			
	杭	8	有	密着				0.078	0.640	0.282			
			無		0.018	0.421	0.561	0.051	0.474	0.476	0.056	0.456	0.487
第3種地盤(軟弱)	直接	8	有	密着				0.157	0.495	0.348			
			無					0.155	0.549	0.296			
	杭	8	有	密着				0.054	0.821	0.125			
			無		0.155	0.547	0.298	0.153	0.605	0.242	0.110	0.609	0.281
								0.154	0.567	0.279			

表10 ベースシアに対する基礎での荷重分担率

地盤 条件	基礎条件	根入 れ深 さ (%)	根入れ条件		建物条件														
			側面 埋戻し	底面 接触	8階建					11階建					15階建				
					ベ ー ス シ ア (N)	根 入 れ 側 面 土 圧(N)	土 圧 分 担 率	杭 抵 抗(N)	杭 分 担 率	ベ ー ス シ ア (N)	根 入 れ 側 面 土 圧(N)	土 圧 分 担 率	杭 抵 抗(N)	杭 分 担 率	ベ ー ス シ ア (N)	根 入 れ 側 面 土 圧(N)	土 圧 分 担 率	杭 抵 抗(N)	杭 分 担 率
第2種 相当	直接基礎 杭基礎	8	有	密着	5.09	2.12	0.416			6.82	3.99	0.585			5.38	3.74	0.696		
					4.45	1.03	0.231	1.12	0.252	6.07	2.12	0.349	0.58	0.096	7.44	4.95	0.665	(0.15)	(0.02)
	トレン チ		分離						7.06			3.23	0.457						
									6.93			7.95	1.147						
第3種 相当	直接基礎 杭基礎	8	有	密着						6.77	6.15	0.909							
					4.81	1.77	0.368	2.10	0.437	7.43	3.08	0.415	2.42	0.326	10.06	6.26	0.622	2.12	0.211
	トレン チ								7.53			4.76	0.632						

a) 上部構造階数別

b) 基礎根入れ部周辺地盤条件別

図13 スウェイ、ロッキング、建物変形率

図14 上部構造—杭基礎—地盤系の増幅特性(上部構造別)

6. 建物-地盤全体系の増幅特性と杭曲げモーメントへの影響

(1) 上部構造-杭基礎-地盤系の増幅特性

図 14 に、地盤底面(振動台入力)の加速度振幅に対する建物頂部の加速度および杭頭曲げモーメントの各増幅特性の上部構造別の比較を示す。連成系における上部構造の共振振動数および地盤の卓越振動数での増幅率は大きい。特に 11 階建物の場合、上部構造と地盤との共振振動数が非常に近接したため、加速度応答および杭曲げモーメント応答は非常に大きい。地盤の卓越振動数付近での杭頭曲げモーメントは、上部構造慣性力とともに、地盤変位の影響(図 14 で、建物無しが地盤振動のみの影響を示す)も受けている。

図 15 に、11 階建物における、基礎根入れ部周辺地盤条件による杭頭曲げモーメントの増幅特性を示す。土圧が作用しない場合には、連成系における上部構造の共振振動数が低下し、地盤卓越振動数と離れるため、増幅率は小さくなる。図 16 に、基礎根入れ部周辺地盤条件による、連成系における上部構造の共振振動数での上部構造-杭基礎系の加速度分布および杭の曲げモーメント分布(一部基礎根入れ部土圧を含む)を示す。基礎根入れ部周辺の条件が異なると、杭の曲げモーメント分布に大きな差が生じている。

(2) 上部構造慣性力と地盤変位の杭曲げモーメント分布への影響

ここで上部構造-杭基礎-地盤系における杭の曲げモーメントの簡易評価を行う。杭の曲げモーメントの算定にあたっては、均質地盤に設置された半無限長の杭を仮定(Chang の式を適用)する。このとき杭応力に影響する要因として、上部構造のベースシア(基礎根入れ部の慣性力も含む)、基礎根入れ部のロッキング角と地盤変位を考える。杭頭に作用する水平力は、表 10 のベースシア分担率に基づき、杭 1 本の値として求め、基礎のロッキング角は実験値を用いた。地盤変位は式(1)を用い、地表面変位は振動数と地表面の加速度振幅より求め、式(2)より杭変位・応力を求めた。

図 17 に、基礎根入れ部周辺地盤条件による杭曲げモーメント分布の計算値と実験値の比較を示す。基礎根入れ部土圧・底面摩擦とも作用しない場合、杭曲げモーメントは杭頭水平力によるモーメントが支配的である。また基礎根入れ部のロッキングによ

図 15 上部構造-杭基礎-地盤系の杭頭曲げモーメント増幅特性(基礎根入れ部周辺地盤別)

図 17 上部構造慣性力と地盤変位による杭曲げモーメント分布の計算値と実験値の比較(基礎根入れ部周辺地盤別、11 階建物)

図 16 上部構造-杭基礎-地盤系の連成系共振振動数増幅分布(基礎根入れ部周辺地盤別、11 階建物)

り、水平力と同等の曲げモーメントが杭頭に生じるが、水平力による曲げモーメントとは向きが反対となるため、両者の影響を合わせると杭頭曲げモーメントは小さくなり、杭頭ピン条件での分布形と調和的となる。次に底面摩擦のみが作用する場合、杭頭曲げモーメントへの基礎根入れ部のロッキングの影響は大きく、さらに側面土圧と底面摩擦が作用すると、上部構造のベースシアの一部しか杭に作用しないため、基礎根入れ部のロッキングによる影響が顕著となる。一方、地盤卓越振動数では、地盤変位により生じる杭曲げモーメントの割合も大きく、地盤変位の影響を考慮する必要がある。

7. まとめ

壁式ラーメン構造を有する建物の梁間方向を対象とした上部構造－杭基礎－地盤連成系モデルによる振動台実験を行い、地震時における杭基礎への入力作用および抵抗機構に関する基本的特性の検討を行った。主な検討結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 地表面の応答に対する基礎入力動の比は振動数とともに低下し、直接基礎に比べて杭基礎の方が低下の割合が大きい。これは地盤変位に対する杭の抵抗によると考えられる。地下階がない場合、地盤の2次卓越振動数周辺での回転入力動は、地表面応答の2割程度であり、11階建物頂部の水平動に換算すると、地表面応答と同程度となっている。地盤の2次卓越振動数付近での現象であることを考えると、基礎回転動の建物応答への影響は小さいと考えられる。
- 2) 上部構造の剛性が大きい建物では、基礎のロッキング変位の影響が大きく、根入れ部側面が埋め戻された杭基礎の場合、連成系における上部構造の共振振動数は基礎固定時のそれに対して、第2種、第3種地盤でそれぞれ59～68%、43～48%である。
- 3) 基礎固定時の上部構造の減衰定数(約0.2%)に比べて、連成系の減衰定数は、第2種、第3種地盤でそれぞれ2～3%程度、4～5%程度と増加する。この値は地盤の材料減衰よりも大きく、地下逸散による振動エネルギーの消散効果が含まれていると考えられる。
- 4) 杭基礎は上部構造のベースシアや転倒モーメントに加えて地盤変位の影響を受ける。基礎のロッキングによる杭頭の曲げモーメントの大きさは、上部構造のベースシアのすべてが杭に作用した場合の水平力による値とほぼ同程度となる。このとき曲げモーメントの向きは逆となる。ベースシアの一部が根入れ部の側面土圧や底面摩擦で負担されるにつれて、杭頭の水平力が低減するため、基礎のロッキングの影響が顕著となる。また地盤卓越振動数では、地盤変位により生じる杭曲げモーメントの割合も大きく、その影響を考慮する必要がある。

謝辞

本研究は、HFW 構造設計・施工計画指針作成を目的とした「HFW 推進委員会」(日本建築センター)の研究活動の一環として設置された HFW 構造性能分科会、HFW 指針分科会のもと、「入力地震動評価に関する実験的研究」に関する作業部会(主査: 松島豊筑波大名誉教授)で実施されたものである。また実験の遂行に当たり、水野二十一建築研究所研究専門役より多くの助言を頂いた。ここに関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 井口道雄: 動的相互作用研究の近年の動向と今後の課題-1980年以降の日本の動向を中心として-, 第6回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム資料集, 日本建築学会, pp.5-28, 2001.3
- 2) 太田外気晴、丹羽正徳、上野薫: 軟弱地盤上杭基礎建物の地震応答性状、第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.540-546, 1978.11
- 3) Sugimura, Y.: Earthquake Observation and Dynamic Analysis of Pile Supported Buildings, Procs. of the 4th Japan Earthquake Engineering Symposium,

- pp.463-470, 1975.11
- 4) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用、Ⅲ資料編、Ⅲ-2 模型実験と観測の方法, pp.318-323, 1996.4
- 5) 矢島淳二: 杭基礎の耐震設計に関する諸問題、第2編第1章1.1 杭基礎の地震観測の現状、建築基礎の設計施工に関する研究資料6、日本建築学会, pp.111-116, 2000.4
- 6) 塩一男: 釧路地方気象台の地震記録に見られる地盤と建物の相互作用効果およびそのシミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第470号、pp.75-84, 1995.4
- 7) 安井謙、井口道雄、赤木久真、林康裕、中村充: 1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察、日本建築学会構造系論文集、第512号、pp.111-118, 1998.10
- 8) 林康裕、藤森健史、安井謙、井口道雄: 1995年兵庫県南部地震における相互作用効果と建物応答、日本建築学会構造系論文集、第520号、pp.45-51, 1999.6
- 9) 福和伸夫: 耐震設計における動的相互作用に関わる課題、第6回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム資料集、日本建築学会、pp.135-150, 2001.3
- 10) 福和伸夫、飛田潤: 建物－地盤の動的相互作用から見た強震観測、第2回強震データの利用に関するシンポジウム資料集、日本建築学会、pp.57-68, 2000.12
- 11) 運輸省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説-耐震設計、丸善、pp.107-111, 1999.10
- 12) 宮本裕司、酒向裕司、喜多村英司、三浦賢治: 非線形、液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第471号、pp.87-95, 2001.5
- 13) 許斐信三、松尾雅夫、杉村義広: 杭基礎の耐震設計に関する諸問題、第2編第2章応答変位法、建築基礎の設計施工に関する研究資料6、日本建築学会、pp.135-150, 2000.4
- 14) 小林勝巳: 基礎の設計法とクライテリア、第6回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム資料集、日本建築学会、pp.99-114, 2001.3
- 15) 藤原薫: 杭基礎の耐震設計に関する諸問題、第1編第2章2.2 地下室は耐震性能上効果があるか、建築基礎の設計施工に関する研究資料6、日本建築学会、pp.19-28, 2000.4
- 16) 北川良和、松島豊他: 地盤・建物連成系におけるせん断力係数分布－高層壁式ラーメン構造に関する研究－(その1)～(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造B、pp.819-826, 1988.10
- 17) 飯場正紀: 杭体の応力に及ぼす地盤振動の影響(その1)(その2)、日本建築学会東海支部研究報告集、pp.101-108, 1983.2
- 18) 小林勝巳、森伸一郎: 基礎構造の耐震設計と相互作用を考慮した地震荷重、第5回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム資料集、日本建築学会、pp.107-120, 1998.5
- 19) 杉村義弘、徐挺: 簡単なモデル解析による建物と地盤の動的相互作用、建築技術、pp.52-55, pp.83-92, 2001.6
- 20) 水野二十一: 建物－杭基礎－地盤系モデル振動実験、土と基礎、Vol.28, No.5, pp.47-54, 1980.5
- 21) 江守一郎、D.J.シュエリング: 模型実験の理論と応用、技報堂出版、1981
- 22) 小関憲幸、水野二十一、三浦賢治他: 杭支持建物における根入れ部・杭の地震時水平力分担率モデル実験(その1)(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1727-1730, 1979.9
- 23) 飯場正紀、水野二十一、北川良和他: 模型試験体による動的相互作用効果に関する研究(その1)～(その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.645-648, 1981.10, pp.673-676, 1982.10
- 24) Randolph, M. F. and C. P. Wroth: Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles, J. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, No. GT12, pp.1465-1488, 1978.12
- 25) 増田 彰、土方勝一郎他: 群杭の動的インピーダンス簡便評価法(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.339-340, 1993.9
- 26) 国土交通省建築研究所編著: 改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景、ぎょうせい、pp.89-99, 2001.3
- 27) 水野二十一、岡野創他: 動的相互作用の模型振動台実験における地盤側面境界処理(その1)せん断境界処理装置の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造B、pp.189-190, 1985
- 28) 三浦賢治、伊藤幸爾郎、北川良和他: 地震時の基礎根入れ部土圧と杭応力に関する模型実験(その1)から(その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.619-624, 1980.9
- 29) 水野二十一、森信夫、小関憲幸: 模型地盤としてのポリアクリルアミドの材料的性質(その1)、第14回土質(現地盤)工学研究発表会論文集、pp.109-112, 1979.6
- 30) 鹿嶋俊英、北川良和、田中洪、水野二十一: 電算機－振動台オンラインシステムによる動的加力実験に関する研究、第4回電子計算機利用シンポジウム、日本建築学会、1982
- 31) 内藤幸雄、石橋敏久: 新しい加振法による振動台実験の改善、品質管理、Vol.34, 11月臨時増刊号、日科技連出版社、pp.193-198, 1983.11
- 32) 松島豊、水野二十一、岡野創他: 有効入力に着目した埋込み構造物の模型振動実験とその解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造B、pp.517-526, 1986.8
- 33) 横山幸満: くい構造物の計算法と計算例、山海堂、pp.77-78, 1977.11

(2002年6月10日原稿受理、2003年1月9日採用決定)