

建物—杭基礎—地盤系 模型振動実験

SHAKING TABLE TEST OF MODEL BUILDING-PILE-SOIL SYSTEM

みず の は つ かず
水 野 二 十 一*

1. はじめに

地震時における杭の破損例は、福井地震(1948)、新潟地震(1964)、十勝沖地震(1968)、宮城県沖地震(1978)において報告されている^{1),2)}。このうち、新潟地震については、砂質土の液状化が原因であるとよく知られているが、その他の地震における破損例については、その原因が必ずしも明らかになっていない。各例における原因究明と杭の水平耐力設計法への反映が期待されるところである。また、地震時における杭の挙動についても、建物・杭基礎・地盤の同時地震観測が各所で行われ、資料も蓄積されつつある³⁾。

一方、建物の杭の水平耐力の算定は、上部構造の設計とは直接関係なく、上部構造のベースシャー(Base Shear)を杭頭に割りふる形で行われる。その算定式には、ブロムス(Broms)式、チャン(Chang)式が使われる。この考え方は、従来より主に土木方面で杭の水平耐力の算定で用いられてきたもので、地震により建物の一次モードが励起されるという事実に一応基づいている。しかし、地盤の卓越周期はおよそ1.5秒~0.1秒の間で変化するものであり、建物の基礎固定時固有周期も、構造種別・規模により、およそ5秒からほとんど剛体と考えてよいものまで種々様々である。これらのあらゆる組合わせに対して、上述のモード(建物が励起して、ベースシャーが杭頭に作用するモード)が卓越するという保証があるわけではない⁴⁾。仮に、地盤の卓越周期が建物の基礎固定時固有周期より長いケース(軟弱地盤に建つ杭支持建物の典型)を考えてみる。この場合、建物・杭基礎・地盤連成系の1次固有モードは、地盤が励起して建物がそれに付き合う形で揺れるモードであり、2次固有モードは、建物が励起してベースシャーが杭頭に作用し、地盤がベースシャーを受けもつモード(通常的设计で考えるモード)となる。そのようなケースでは、地盤が励起するモードの方が杭体にとって厳しくなることは、十分予測されることである。

また、現行的设计で考えている、建物が励起するモードの場合においても、設計上解決すべき問題がある。すなわち、通常の建物では、フーチング・地中ばり・地下室があって杭はそれ以深にあり、ベースシャーの何割かは、これ

らの根入れ部分周囲の地盤の受働土圧的な力で負担されるからである。しかし、地震時でも受働土圧のすべてが動員されるわけではなく、その負担する力は、地震時の根入れ部と地盤の接触面の地震時の変位によって決まるものである。

このような背景のもとに企画・実施された建物・杭基礎・地盤系の振動実験について、原型と模型、相似則、地盤材料の選定と製作、模型建物・杭基礎の設計、実験結果を紹介する。

2. 実験の目的と原型の設定

本実験の主たる目的は、次の二点である。

1) 現行的设计法で考えている、建物が励起するモードにおいて、ベースシャーの何割が杭頭に作用し、何割が地下根入れ部地盤の受働土圧的な力で負担するかを把握する。得られた結果を、杭の水平耐力設計の資料とする。

2) 地盤が励起するモードが、杭体にとって、どの程度厳しいか検討する。

原型については、軟弱地盤に建つ杭支持建物の最も典型的なケースとして、地盤の卓越周期 T_G が、建物の基礎固定時固有周期 T_B より長いケースを採用した。図-1に示すように、原型は、軟弱地盤(表層厚24m、地盤のS波速度91 m/s、卓越周期 T_G 1.1 秒)に建つ、場所打ち杭(直

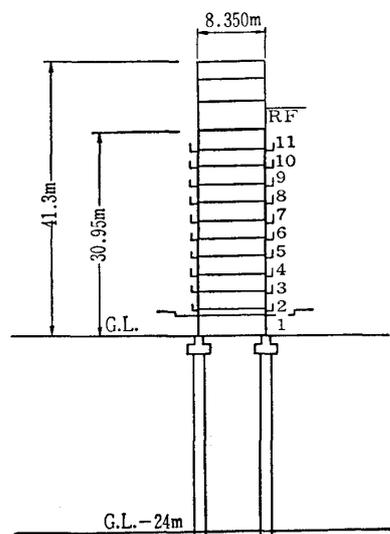


図-1 原型(断面図)

*建設省 建築研究所 研究員

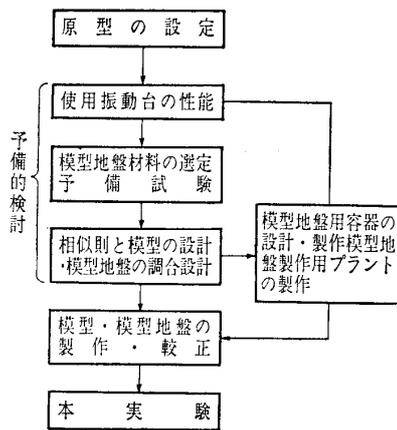


図-2 模型実験ブロックチャート

径 1.5m) に支持された11階高層住棟 (鉄骨鉄筋コンクリート) である。本実験の対象としては、はり間方向の1ユニット分 (基礎固定時固有周期 T_B 0.63 秒) を考える。

3. 模型地盤材料の選定・相似則・模型の設計

模型実験のブロックチャートを図-2に示す。本実験の使用振動台は、筑波・建築研究所の中型振動台 (電気油圧サーボ式, 最大加振力 30 tf・G, 最大積載重量 20 tf, 最大振幅 ±10 cm, 台寸法 3m×4m, 周波数 0~50 Hz) である。

3.1 模型地盤材料の選定と予備試験

模型地盤材料の候補として、砂, シリコンラバー, ゼラチン, ポリアクリルアミド等について検討を加えた。これらのうち、砂は緩詰めでも S波速度が大きく、時間の相似比を満足させるには模型が必然的に大きくなることから、また、シリコンラバーは経年変化がなく実験の再現性が保証される長所があるものの、材料そのものが高価で模型が小さくなることから、更にゼラチンは弾性定数の温度依存性が大きく、かつゆせん(湯煎)のための設備が必要なことからそれぞれ採用を見合わせた。一方、ポリアクリルアミドはヤング係数で大略 0.1~1 kgf/cm² とかなりの幅で硬軟を調整できること、調合により固まるまでの時間が調整できること、比較的安価であることなどから模型地盤材料の最有力候補とした。

表-1 模型地盤材料の変形係数 [上段 kgf/cm²] と S波速度 [下段, m/s]

主剤 (%)	ベントナイト (%)	0	5	10	15	20
5	—	—	—	—	F 0.95	—
10	—	—	—	—	H 2.50 6.45	—
20	—	—	—	—	I 13.0 15.74	A 13.0
30	C 6.70	D 8.80	B 10.60	E 17.80 20.52	G 17.80	—

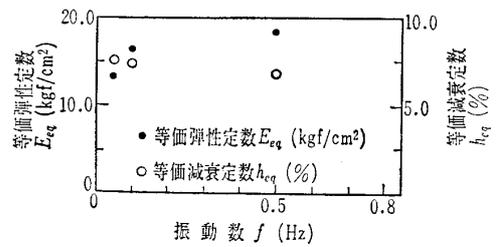


図-3 弾性定数・減衰定数と振動数 (振動三軸試験結果, A試験体)

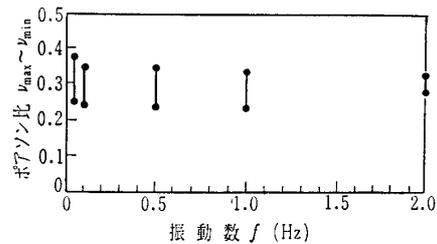
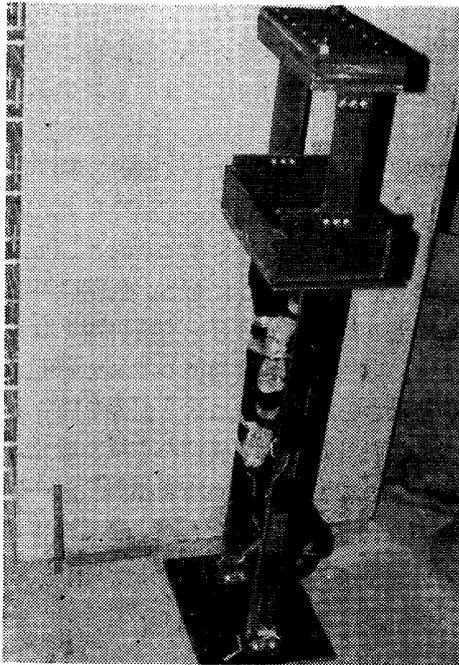


図-4 ポアソン比と振動数 (振動三軸試験結果, A試験体)

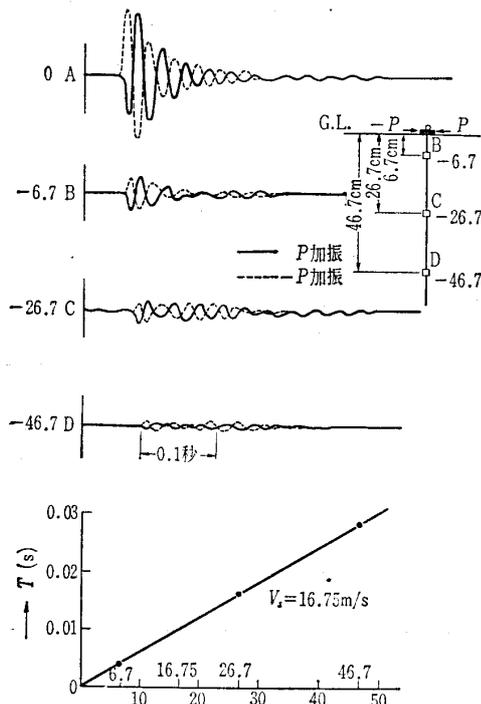
模型地盤材料 (ポリアクリルアミド+ベントナイト) の力学特性を調べるために、調合を変えた試験体 (直径 5 cm, 高さ 10 cm) を作成し、一軸圧縮試験, 簡易ねじり自由振動試験, 振動三軸圧縮試験等を行った⁵⁾。表-1には、一軸圧縮試験より求めた変形係数と簡易ねじり自由振動試験により求めた S波速度を示す。なお、簡易ねじり自由振動試験とは、試験体上にガラス板を載せ、ねじり自由振動実験を生じさせ、その周期を求めるものである。一軸圧縮試験で加えたひずみは最大 5%程度であるが、その範囲内では応力-ひずみ関係は直線であった。また、振動三軸圧縮試験 (振動数: 0.05, 0.1, 0.5, 1 Hz, 軸ひずみ: ±0.5%) 結果の一例を図-3, 図-4に示す。測定振動数の範囲内で、各試験体の等価弾性定数はほぼ等しく、各試験体の等価減衰定数は 0.06~0.09 の間に分布した。また、ポアソン比は 0.22~0.39 の間に分布した。単位体積重量は、調合により多少の変動があり、1.1~1.2 gf/cm³であった。これらの予備試験の結果、模型地盤材料 (ポリアクリルアミド+ベントナイト) は、使用可能との結論を得た。

3.2 相似則と模型化の方針

相似則と模型案の検討は、振動台性能, 模型地盤作製の作業性, 計測条件等の項目について数種の案について検討した。最終的に採用した相似比を表-2に示す。このうち基本的な相似比は、長さ, 時間, 質量の三つであり、各々 1/30, 1/√30≒5.5, 1/3 600 である。他はすべて誘導された相似比である。なお、ここで想定しているのは地震時の杭基礎の挙動であり、地盤の破壊現象ではないことから鉛直方向の重力効果については考えていない。



写真—1 建物・杭基礎模型（土圧合力計設置前）



図—5 板たたき法〔地中展開〕によるS波波形と走時曲線

模型建物のロッキング量は原型とは対応しない。ii) 模型杭の設計においては、杭質量を考慮に入れていないが、鋼材の模型杭質量は、原型に相似則を適用した理想的な値の0.62倍であり、相似則の満足度はさほど悪くない。

製作した建物・杭基礎模型は、建物・基礎根入れ部・杭の各部と全体について校正試験を行い、所定の目標値をどの程度満足しているか調べた。表—4には、原型・模型の諸元を示した。模型の欄には相似則より計算された目標値

表—4 原型・模型諸元

物理量	単位	原型	模型	
			目標値	実現値
建物重量	kgf	446 700	12.4	12.4
建物周期	s	0.63	0.115	0.120
基礎重量	kgf	270 000	7.5	7.5
根入れ深さ	cm	250	8.3	8.3
根入れ部寸法	cm	835.0×520.0	27.8×17.3	27.8×17.3
杭の断面二次モーメント	cm ⁴	2.5×10 ⁷	0.0769	0.0792
地盤深さ	cm	2 400	80.0	80.0
地盤周期	s	1.10	0.20	0.21
S波速度	m/s	91.0	16.6	16.75
杭の寸法	cm	φ=150	5.0×0.57	5.0×0.57

と実現値をあわせて示した。なお、模型地盤のS波速度は後述の板たたき法により測定したものである。

4. 模型地盤の作製

模型地盤の大きさは、長さ3.7m（加振方向）、幅1.6m、深さ0.8mである。模型地盤作製のため、まず、模型地盤用容器と二液混合槽を製作した⁷⁾。容器の側板は、本実験の際には取りはずしができる構造になっている。また、底板には、模型地盤との一体性を保持するため5列の溝（深さ4.5mm、幅100mm）が加振方向と直角方向につけられている。

模型地盤を、S波速度16.6m/sが一般的な地盤に打ちあげるため更に検討を加えた。最終的な調査は重量比でポリアクリルアミド主剤濃度24.29%、ベントナイト濃度3.36%とした。これは、作業性を損わない範囲のベントナイト濃度で、かつ主剤濃度を最小にする条件から決まったものである。地盤作製は1バッチごと約5cmの割合で、深さ73.2cmを14バッチで打設した。その後実験計測〔静的水平載荷試験、自由振動実験〕を行いながら約8cm（2バッチ）を打設した。打設した模型地盤の品質管理は、一日一回の割合で任意のバッチから3個の試験体（直径5cm、高さ10cm）を作り、一軸圧縮試験と簡易ねじり自由振動実験により、変形係数とS波速度を調べた。図—5には、模型地盤中に埋めこまれた加速度計を利用した、板たたき法〔地中展開〕によるS波波形と走時曲線を示す。これより求められたS波速度は16.75m/sで、目標値16.6m/sに対して十分満足できる値と言える。なお、ここまでの実験プロセスは、新宿の建築研究所で実施され、その後筑波の建築研究所へ運ばれ、主に振動台実験が行われた。

5. 本実験

5.1 計測項目及び実験条件

計測項目は、加速度22点、杭曲げひずみ6点、根入れ部

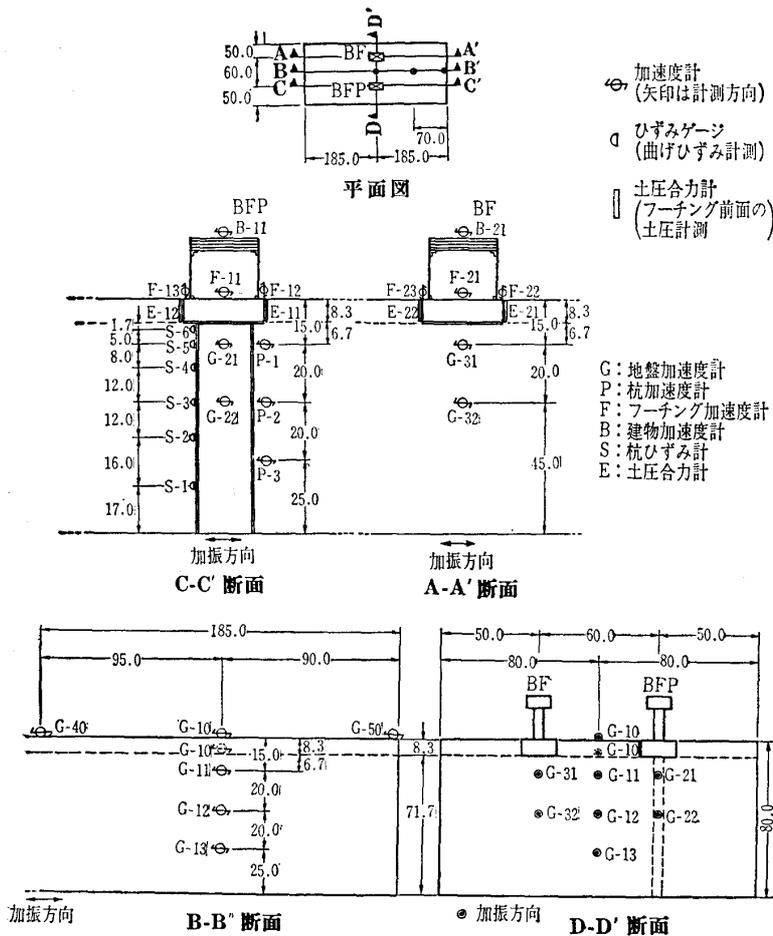


図-6 模型及び計測センサー配置

土圧合力4面である。加速度計はすべて、ひずみゲージタイプのもので、①建物・地表面用としてAS-1C(規格1G), AS-2C(規格2G)[共和電業], ②地中用としてAS10F-5(規格2G)[ST研究所]である。杭のひずみゲージは、各点4ゲージ法とした。また土圧合力計は、超小型圧力センサー(PS-5 kA, 容量5 kgf/cm², 共和電業製)とゴム板より成る圧力受感素子4個に支持されたアクリル板である。なお合力計の出力は、4個の圧力センサーの出力を並列に結線して一つの出力とした。図-6には、模型と計測センサーの配置を示す。なお、杭のない建物(略称

BF)は、杭支持建物(略称BFP)と同一諸元で、杭の有無の影響を調べるために設置したものである。

実験は、地盤の最土層から順次はがすことにより、地下根入れ部の埋込み深さを変えて実施した。8.3 cm埋込みがある状態をG10状態、埋込みが全くない状態をG00状態、その中間の状態をG05状態と略称することにする。ただし、この三者では、地盤の固有振動数 f_g は、わずかであるが異なっている。

5.2 静的水平載荷試験

静的水平載荷試験は、滑車を通したピアノ線におもりをつけるすことにより、根入れ部に水平加力を与えるものである。測定はダイヤルゲージによる変位測定と杭のひずみ測定等である。図-7に、根入れ部の荷重変位曲線を、図-8には、16 kgf, 32 kgf加力時の杭曲げモーメント分布を示す。いずれの図においても、実線は、G10状態(完全埋込み)、破線はG00状態(埋込みなし)を示している。これらの結果より、ベースシャーが杭頭に作用するモードに対しては、地下根入れ部が有効に働き、杭頭曲げモーメントを低減させていることが分かる。根入れ部の水平力分担率を、根入れ部の水平抵抗/根入れ部と杭の水平抵抗の和と定義し、図-7の荷重変位

曲線のG10とG00の同一変位に対して試算すると約40%となる。

5.3 自由振動実験

杭支持建物と杭なし建物の自由振動実験を行い、この時に生じる建物・杭基礎地盤系二次固有振動数、モードの検討を行った。この連成系二次モードは、「建物が励起し、ベースシャーが杭頭に作用するモード」と前に述べたもの

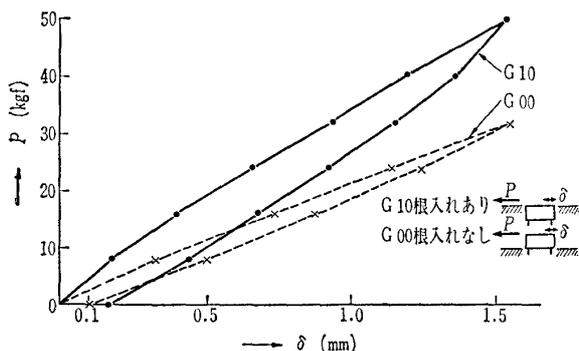


図-7 荷重変位曲線(静的水平載荷試験)

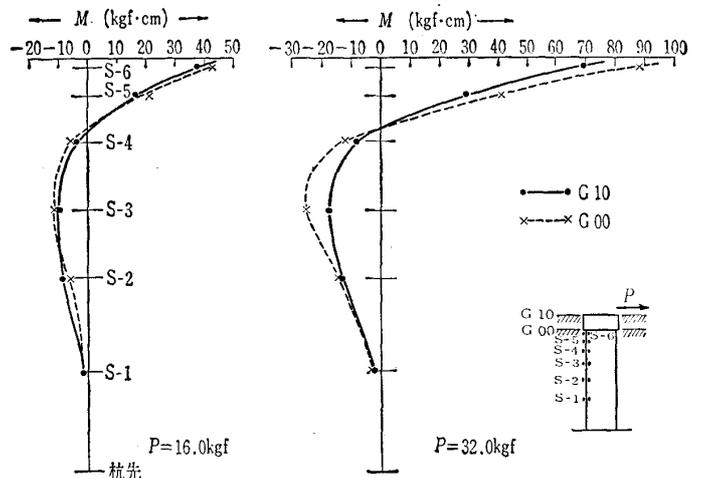


図-8 杭の曲げモーメント分布(静的水平載荷試験)

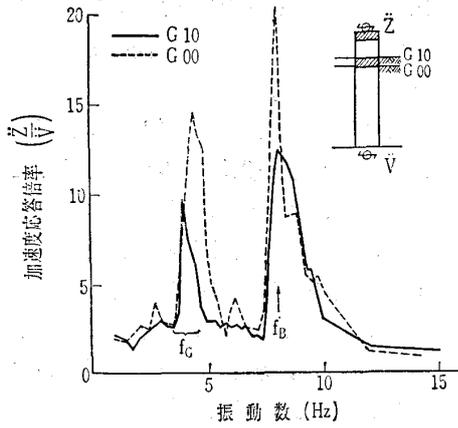


図-9 建物 (BFP) の加速度応答倍率

表-5 自由振動実験結果

試験場	試験体	根入れ 深さ	固有 振動数 (Hz)	減衰 定数 (%)	変形率 (%)		
					スウェイ	ロッキング	相対 変形
新宿百人町	BFP	G10	8.39	2.6	8	2	90
		G05	8.31	2.3	6	11	83
		G00	7.87	2.5	7	25	68
	BF	G10	7.02	3.4	7	31	62
		G05	7.34	3.6	7	28	65
		G00	6.33	2.5	11	32	57
筑波	BFP	G10	8.05	2.5	8	3	89
		G05	8.05	3.4	11	3	86
		G00	7.81	3.0	13	3	84
	BF	G10	7.11	1.8	4	25	71
		G05	6.65	1.8	8	27	65
		G00	6.33	2.6	10	38	52

である。杭支持建物・杭なし建物のいずれの場合も、連成系二次固有振動数は基礎完全固定時の建物固有振動数 8.33 Hz (表-4 参照) より小さくなっていることが、表-5 に示した結果より分かる。これは、根入れ部が横方向に移動 (スウェイ) したり回転 (ロッキング) したりするためであり、構造物と地盤の動的相互作用の一つの現象である。表中変形率とあるのは、模型建物の変位 (根入れ部のスウェイによる変位、ロッキングによる変位、建物と基

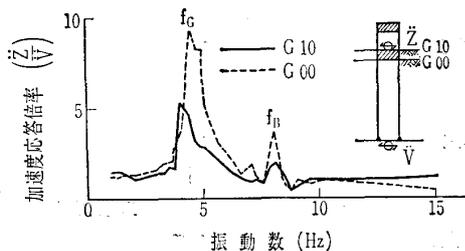


図-10 根入れ部 (BFP) の加速度応答倍率

礎の相対変位の和) に占める各成分の割合を示すものである。杭支持建物は、杭なし建物と比較するとロッキング率が低く、固有振動数の低下の割合も小さいことが分かる。言葉を代えて言えば、杭支持建物は、杭のない建物と比較するとロッキングを生じにくいと言える。

5.4 振動台定常加振実験

写真-2 には、振動台実験の様態を示すが、本節以降では、杭支持建物の結果についてのみ述べる。図-9、図-10 には、各々、模型建物・根入れ部の加速度応答倍率 (建物・根入れ部の加速度 / 振動台加速度) を示す。横軸は振動数である。図中、二つの大きな応答ピークが認められるが、4 Hz 付近のものは、建物・杭基礎・地盤系一次モード (地盤が励起するモード) によるもので、8 Hz 付近のものは、建物・杭基礎・地盤系二次モード (建物が励起するモード) によるものである。以下、前者の振動数を f_G 、後者の振動数を f_B と略称する。図中、 f_G が、根入れ部を完全に埋め込んだ G10 状態と埋込みのない G00 状態とで、変化するのは、模型地盤の深さが約 8 cm 変わるからである。この f_G のモードは、建物の自由振動実験、根入れ部・杭の水平載荷試験では現れず、模型地盤を加振する振動台実験で初めて現れる。次に、 f_B のピークに着目して、根入れの効果について考えてみる。この場合も、G10 状態と G00 とで固有振動数は変化する。これは、埋込みの効果の一つであるが、その変化は、自由振動実験で見たようにわずかである。G10 状態と G00 状態との大きな違いは、埋込みのある G10 状態の、 f_B における加速度応答倍率が低下していることである。この原因は、埋込みにより地下逸散減衰 (基礎部分から波動が放射されることによって建物・基礎の見掛けの減衰が増す現象) が増加するためで

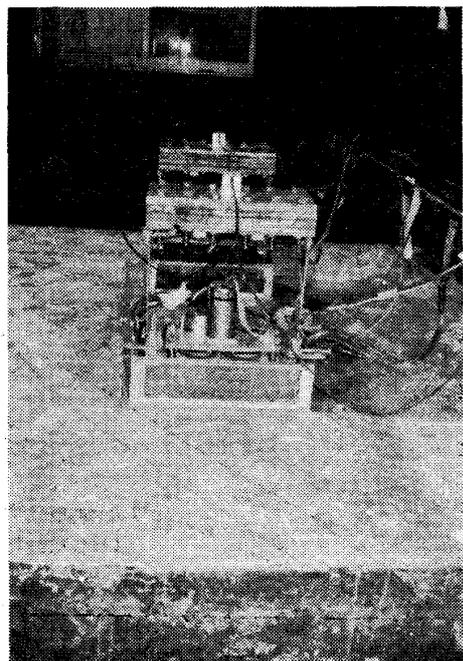


写真-2 振動実験 (向こう側 BFP, こちら側 BF G00 状態)

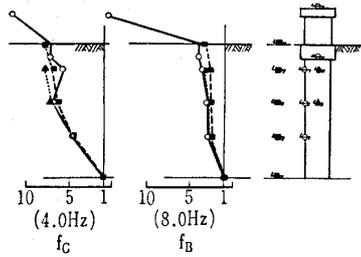


図-11 f_G, f_B におけるモード (G10)
(位相無視, 絶対値で示す)

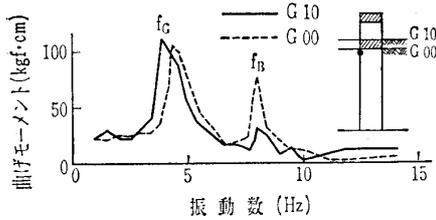


図-12 杭頭曲げモーメント周波数応答曲線

ある。

図-11には、建物、杭基礎、杭間地盤、遠方地盤の f_G, f_B におけるモード (変位) を示す。埋込みは G 10 状態である。図中の変位は、位相を無視した絶対値で示してあるので、 f_B におけるモードは、水平載荷試験 (図-8) に示した形状とは一致しないが、同一のものである。この図から、 f_G のモードは、地盤が励起し建物・杭が付き合う形で揺れ、 f_B におけるモードは、建物が励起しベアシャーが杭基礎に働くことがよく分かる。

図-12には、杭頭曲げモーメントの周波数応答曲線を、図-13には、 f_G, f_B における杭の曲げモーメント分布を示す。これらの図より、次のことを指摘できる。1) 杭頭曲げモーメントは、 f_B におけるよりも f_G における方が大きい。この傾向は、埋込みのある G 10 状態でより顕著であり、この場合 f_G の杭頭曲げモーメントは、 f_B のその約 3.7 倍となっている。2) f_G における杭の曲げモーメント分布は、やや特異な形状を示している。すなわち、杭

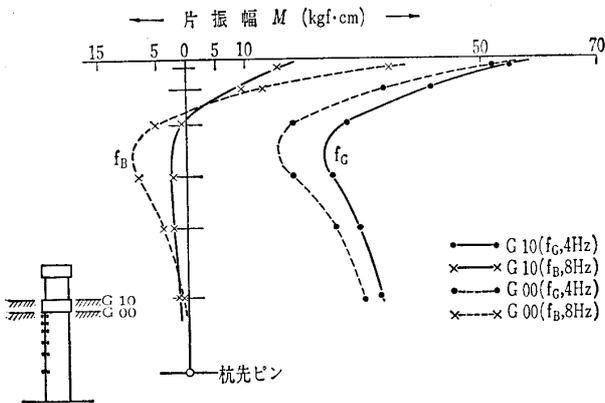


図-13 $f_G \cdot f_B$ における杭の曲げモーメント分布 (G10, G00)

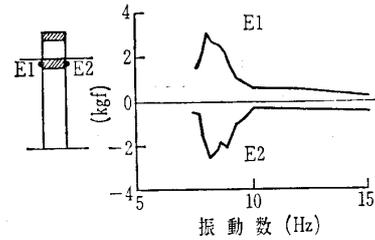


図-14 土圧合力周波数応答曲線

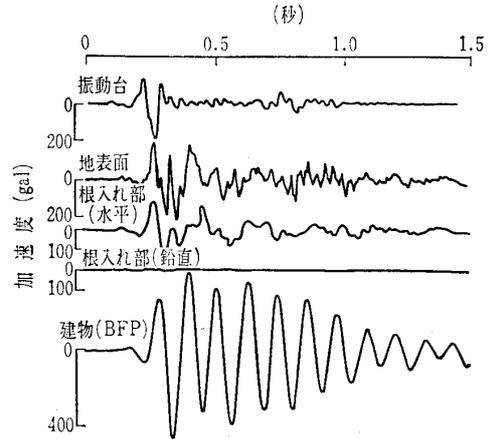


図-15 ランダム加振実験
(El Centro 入力, G10) 加速度波形

が地盤とともに変形するとともに、建物が励起しベアシャーが杭頭に作用するモードが混在していると思われる曲げモーメント分布である。この原因の一つとしては、模型地盤の減衰定数が 7~8% と原型と比較的良好な対応を示しているのに反し、模型建物 (鋼材) の減衰は特に考えなかったため、小さな振幅では減衰定数がかなり小さいことがあげられる。今後の模型製作で検討を要する事項である。3) 上述の現象は、 f_G が f_B よりも小さい (地盤の卓越周期が建物の固有周期より長い) ケースの結果である。このような場合、今後、杭の設計に、地盤が励起する f_G のモードを考えていく必要があることを示唆するものである。

図-14には、G 10 状態における土圧合力の周波数応答曲線を示す。 f_G 付近の結果は、両土圧合力計が同位相を示し検討の余地があるため図には示していない。 f_B においては、両土圧合力は逆位相となり応答のピークを呈している。建物の励起する f_B で、両面の土圧合力計が逆位相になることは、いままで述べた結果とよく符合することである。この結果を用いて、 f_B における地下根入れ部の水平力分担率 (G 10) を計算すると、約 40% となる。また、杭の水平力分担率は、25% 程度となる。

5.5 振動台ランダム加振実験

入力地震波は、ホワイトノイズ、地震波 (El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW), パルスの 4 種である。なお、地震波は、可能な限り相似則に適合するように、時間軸を 1/5 に縮小した。結果の一例として、El Centro 入力, G10

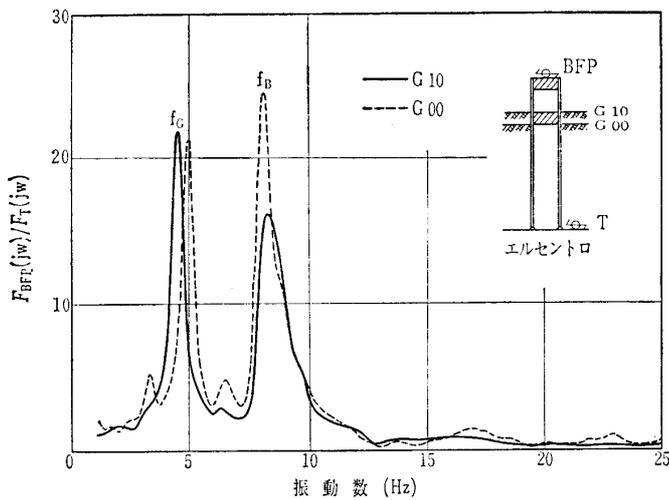


図-16 ランダム加振実験 建物(BFP)の加速度応答倍率

の場合の波形を図-15に示す。振動台加速度の最大値は187 galである。また、図-16には、建物(BFP)の加速度フーリエスペクトル比(建物のフーリエスペクトラム/振動台のフーリエスペクトラム)を示す。この場合においても、定常加振実験同様、 f_G 、 f_B に共振ピークが認められる。しかし、時系列の応答(図-15)で見ると、振動台の最大加速度に対する建物・基礎の最大加速度の比は、各々2.50、0.95と定常振動実験と比較して、かなり小さな値になっていることが分かる。これは、地震波の非定常性のためと考えられる。

6. おわりに

建物・杭基礎・地盤系の模型振動実験につき、原型の設定、相似則、模型製作等の実験計画のプロセスと静的水平載荷試験、模型建物自由振動実験、振動台定常加振実験、振動台ランダム加振実験の結果を紹介した。本実験は、初めての試みであり、実験の細部については、検討すべき事柄も多い。プログラムの開発で言えば、やっとプログラムが結果を打ち出すようになったデバック完了の段階と言える。今後とも、このような模型実験を試みるつもりである。

なお、本実験は、日本住宅公団の委託により社団法人建築研究振興協会に設けられた「高層住棟における地中梁・

基礎の地震時受働土圧に関する開発研究」委員会(委員長小泉安則都立大教授、昭和52年～昭和54年10月)の活動の一環として昭和53年度に実施されたものである。初年度は文献調査と実験計画原案の立案が行われ¹⁰⁾、次年度に実験が下記のワーキンググループ(五十音順)により行われた。

伊藤幸爾郎(建研)、小関憲幸(芝工大院生、現犬飼建設)、北川良和(建研)、杉村義広(建研)、花里利一(東工大院生、現群馬大)、三浦賢治(都立大)、水野二十一(建研)、森 信夫(清水建設研究所)

ワーキンググループに参加された方々に謝意を表すとともに、委員会運営に多大な尽力をいただいた建築研究所阪口理第四研究部長をはじめ関係各位に深謝するものです。

参考文献

- 1) 水野二十一：地盤と震害・建築物関係一えびの地震・十勝沖地震・宮城県沖地震一、基礎工，pp. 37～50，1978. 11
- 2) 飯場正紀・水野二十一：基礎構造の震害例一特に杭基礎について一，日本建築学会東海支部研究報告集，第18号，1980. 2
- 3) 例えば，建設省建築研究所：構造物及び周囲地盤中での地震測定一軟弱地盤杭基礎実大建物における地震測定，建設省総プロ・新耐震設計法の開発報告書・51-IV-1-(1)，建・報・1，1977年3月，〔王子五丁目住宅公団住棟での地震観測，担当：国土開発技術研究センター，鹿島建設技術研究所〕
同：地盤構造物系の振動解析，建設省総プロ・新耐震設計法の開発報告書，51-IV-1-(2) 建・報1，1977年3月，〔豊島五丁目住宅公団住棟での地震観測，担当：杉村義広(直轄)〕
- 4) 水野二十一：建物根入れ地下部一クイ系の地震時挙動とその設計法〔既往の実験観測調査の整理〕，昭和52年度建築研究年報，pp. 65～74
- 5) 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回土質工学研究発表会論文集，pp. 109～112，1979. 6
- 6) 水野二十一：建物-杭-地盤系模型実験における原型の設定と模型化の方法について，昭和53年度建築研究年報
- 7) 片山郁夫・伊藤幸爾郎・杉村義広：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2)，第14回土質工学研究発表会論文集，pp. 113～114，1979. 6
- 8) 小関憲幸・水野二十一・三浦賢治・森信夫：杭支持建物における根入部・杭の水平力分担率模型実験(その1)，一原型の設定，実験概要，静的自由振動実験結果一，日本建築学会大会学術講演梗概集，1979. 9
- 9) 花里利一・伊藤幸爾郎・北川良和・杉村義広：杭支持建物における根入部・杭の地震時水平力分担率模型実験(その2)一振動台実験結果一，日本建築学会大会学術講演梗概集，1979. 9
- 10) 建築研究振興協会：高層住棟における地中梁・基礎の地震時受働土圧に関する開発研究報告書(その1)，1978. 2
- 11) 建築研究振興協会：高層住棟における地中梁・基礎の地震時受働土圧に関する開発研究報告書(その2)，1979. 10
(原稿受理 1980. 3. 5)

※

※

※