

水平抵抗杭を有する建築基礎構造形式の開発 - 水平抵抗杭の効果に関する実験的研究 -

星野 昭雄* 淵上 勝志*
磯貝 哲也* 三藤 正明*

要 旨

軟弱な沖積地盤あるいは埋め立て地に立地する杭支持建物を対象として、水平抵抗杭を持つ新しい基礎構造形式を提案し、その有効性に関する基礎資料を得るために大型振動台を用いた模型振動実験を行った。本構造形式では水平抵抗杭に地震時に発生する水平力の一部を負担させるために、支持杭と水平抵抗杭の分担率が設計時に適切に評価されなければならない。静的な杭頭加力実験（水平載荷試験）及び加振実験から、水平抵抗杭が負担する水平力は全体の4割程度であり、設計時の設定値とほぼ一致することが確認された。また、杭に発生する応力は、Changの式などを用いた評価手法により実験結果をよく反映することが確認された。以上より、本構造形式の有効性に関する基礎資料を得ることができた。

1. 目的

本研究では、軟弱な沖積地盤あるいは埋め立て地に立地する杭支持建物の新しい基礎構造形式の提案とその有効性について検討を行うことを目的としている。

一般に杭基礎は、建物の重量と地震時の水平力に対して十分に抵抗するだけの耐力を確保していなければならない。それゆえ、兵庫県南部地震では水平力に対する支持力の不足による杭の被災で建物の鉛直支持能力が失われ、建物に構造上あるいは機能上の大きな被害をもたらした事例がかなりの数確認されている。

ここで提案する構造形式は支持杭の間に短杭（以後水平抵抗杭とする）を配置し、地震時の水平力を負担させることにより、支持杭の応力低減を図り耐震安全性を向上させ、かつ基礎工事のコスト低減を図ることを目的としたものである。

本構造形式では、図-1に示すようにそれぞれの機能

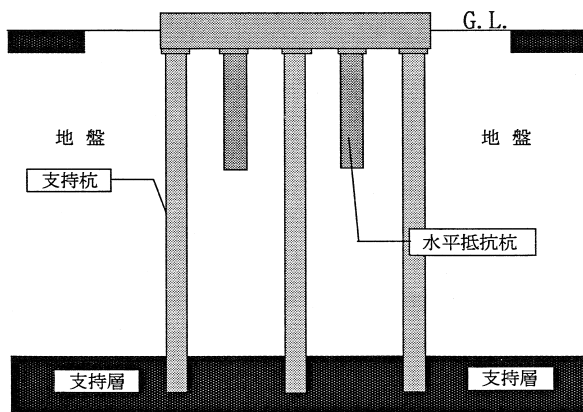


図 - 1 提案基礎構造形式の概念図

に応じて杭を配置する。すなわち建物の鉛直力の支持を目的とした支持杭を柱下に設置し、地震時の水平力を負担する抵抗杭を支持杭の間に設置する。杭の機能分離を明確にすることにより、耐震安全性の余裕度を確保するとともに、損傷を制御することで被災時に早期かつ安価な復旧が図れる。

上記の構造形式を実際に採用するに当たり、その有効性を実験的・解析的に確認しなければならない。そこで本論文では、本提案工法の効果を確認するために、支持杭のみの場合との比較実験を行ったので、その結果を報告する。本実験では、縮尺模型を用いた大型振動台による振動実験を行い、支持杭と水平抵抗杭の水平力の分担

表 - 1 適用相似則と原型・模型の関係

	原型	相似則	模型
建物		λ	
固有周期(s)	1.0	$1/\lambda^{0.75}$	0.124
固有振動数(Hz)	1.0	$\lambda^{0.75}$	8.052
質量 (基礎部)		$1/\lambda^3$	4.40kN
(建物上部)		$1/\lambda^3$	3.01kN
杭			
杭径(cm) 支持杭	170	—	7.5
支持杭	130	—	6.0
抵抗杭	150	—	6.5
杭長 支持杭	21.0m	$1/\lambda$	130cm
抵抗杭	7.5m	$1/\lambda$	46.5cm
杭間隔	9.0m	$1/\lambda$	55.8cm
EI (N・cm ²)		$1/\lambda^{4.5}$	
地盤			
ρ (kN/m ³)	17.65	1.0	17.65
固有振動数(Hz)	2.72	$\lambda^{0.75}$	21.9

* 技術研究所

及び上部構造の応答値に着目した。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体はせん断土槽内に作製した地盤模型、杭基礎・建物模型を用いた。検討対象実建物(以後原型と略記する)は支持層GL-20mのRC造10階建てラーメン構造の場所打ち杭基礎建物を想定する。模型は対象建物の一部を取り出し作製する。模型の作製に当たって、井合¹⁾が示す1G場での非線形の相似則を適用する。この考えに基づいて求めた相似則と原型・模型との関係を表-1に示す。長さの縮尺比は(せん断土槽の大きさ等を考慮)1/16.14(=16.14)とした。建物模型及び模型地盤の形状・寸法を図-2に示す。

原型の設計は「地震力に対する建築物の基礎の設計指針²⁾」に基づき、従来通りの支持杭のみの設計を行い、水平抵抗杭は杭長を $L=1.5$ として、支持杭の間に配置し、設計を行った。

模型地盤は、せん断土槽内に乾燥した相馬砂を散布し、深さ100mmごとに締め固めながら、原地盤でN値20相当となるように管理しながら、地盤高さ1200mmとなるように作製した。

杭基礎・建物模型は、原型5×4スパンの中央部2×2スパンをモデル化した。杭はアルミニウム管を用いて作製し、支持杭のみのモデル(CASE1)では70mm, $t=3.0$ mm, $L=1300$ mmとし、水平抵抗杭をもつモデル(CASE2)では支持杭を60mm, $t=3.0$ mm, $L=1300$ mm、抵抗杭を65mm, $t=3.0$ mm, $L=465$ mmとした。このとき杭模型の断面は、原型の断面2次モーメントを相似則に応じて縮小したため断面積・杭径は相似則と一致しない。杭頭部は鉄製の基礎にボルト接合した。

モデル化範囲に相当する重量の約1/2を基礎部に配し、残りを上部建物重量にそれぞれ割り当てた。上部建物は鉄製の重りと板バネから構成され、原型の一次固有周期を1.0秒とし、相似則を介して周期特性が一致するように板バネの剛性を決定した。板バネはアングルを介して基礎にボルト接合した。建物模型の諸元は次のとおりである。

- ・ 模型重量 上部：3.01kN, 基礎：4.40kN
- ・ 等価せん断剛性：7.86kN/cm
- ・ 建物模型一次固有周期：0.124sec

CASE2 模型の全体写真を写真-1に示す。

2.2 計測方法

計測は加速度センサー、ひずみゲージ及び変位計を用いて、それぞれ加速度、ひずみ及び変位を測定する。加速度は地盤5点(AH-1～AH-5)、建物2点(AH-6、AH-7)で測定する。ひずみは杭の曲げモーメント分布を求めるために杭5点/本を測定する。また変位は基礎部と建物最上部2点を測定し、それぞれ地盤との相対変位を求める。計測位

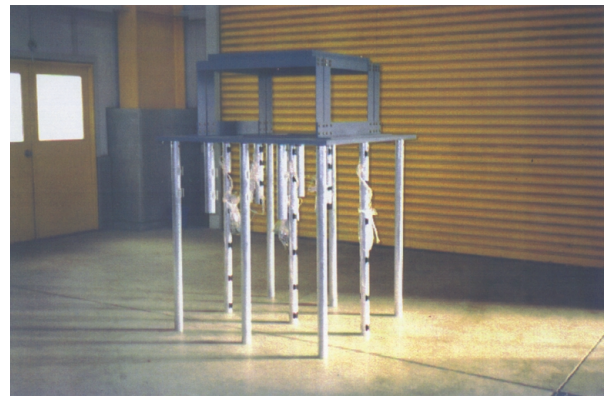


写真-1 実験模型全体図 (CASE2)

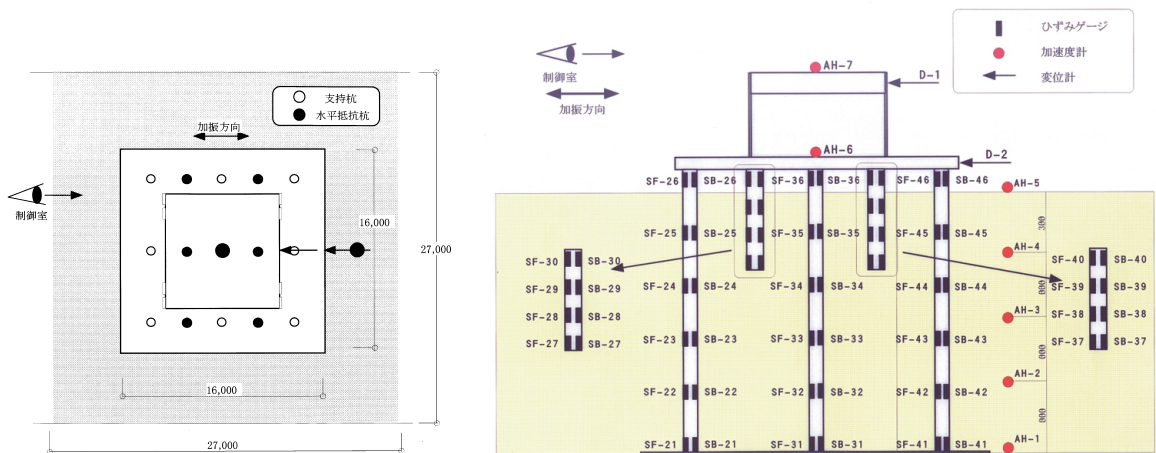


図-2 計測位置図

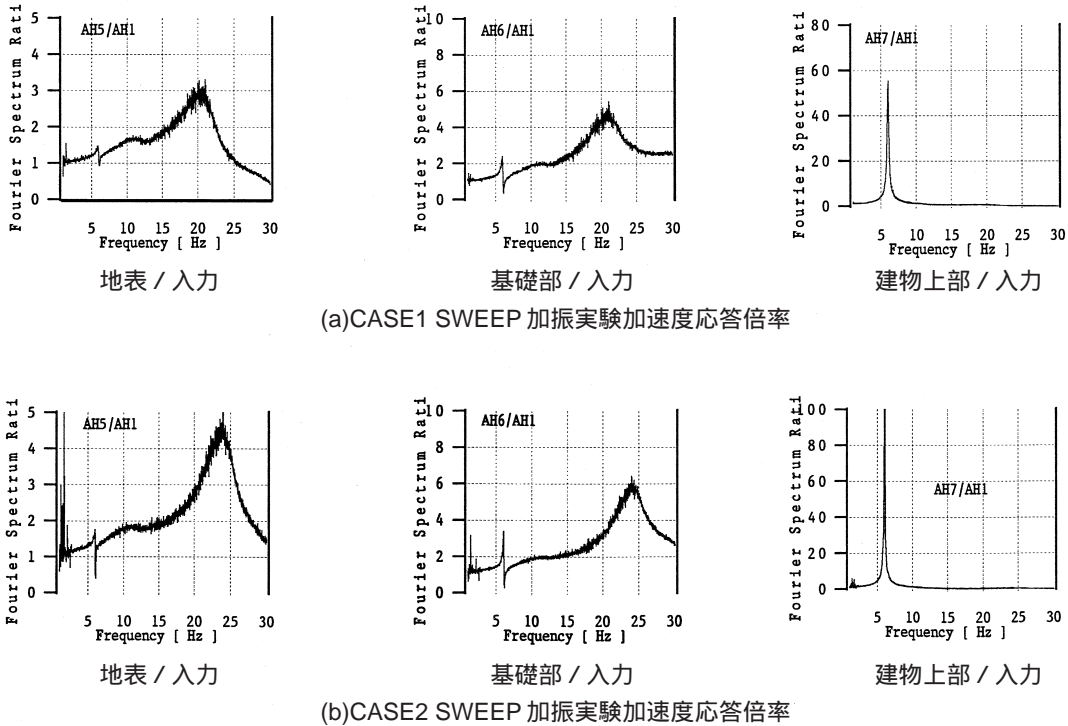


図 - 3 SWEEP 加振実験による応答倍率算定結果

置および計測成分を図 - 2 に示す。データ収録は大型振動台に付随する計測システムを用いて行い、いずれの実験ケースに対しても時刻歴データ取り込みとした。

3. 予備実験

模型の周波数特性及び作製地盤のせん断波速度を算定する目的で、SWEEP加振実験を行った。入力する加振波は3-40HzのSWEEP波である。

3.1 模型の周波数特性

SWEEP加振実験結果より、杭基礎模型及び模型地盤の固有振動数を算定する。算定は以下の方法による。

地盤地表(AH-5)、杭基礎模型基礎部(AH-6)及び建物模型上部(AH-7)それぞれの位置で測定した加速度より、入力加速度との応答倍率を求め、得られた加速度応答倍率の卓越する振動数成分を固有振動数として定義する。

それぞれの実験ケースに対して得られる応答倍率を図 - 3 に示す。SWEEP加振より次のことが示唆される。

模型地盤の卓越振動数はCASE1で21Hz付近に、CASE2で24Hz付近にみられる。

基礎部ではCASE1で21Hz付近、CASE2で24Hz付近に卓越振動数があらわれ、地盤 - 杭連成系の卓越振動数は地盤の卓越振動数とほぼ一致する。

建物模型の卓越振動数は6.0Hz近辺にみられる。

3.2 地盤のせん断波速度

N値20相当の地盤を作製するため、相馬砂の単位体積重量 $\gamma_s=17.65(\text{kN/m}^3)$ とすると、 $N=20$ のときにはせん断波速度 $V_s=245\text{m/sec}$ となる。したがって作製する模型地盤の目標せん断波速度は、相似則により $245/2.004=122.25(\text{m/sec})$ となる。

SWEEP加振によるそれぞれの実験ケースの模型地盤の卓越振動数は前節より得られる。模型地盤高さが1.2mであることから模型地盤のせん断波速度は以下のように求められる。

CASE1の場合

$$V_s=4Hf=4 \times 1.2 \times 21.051=101.04(\text{m/sec})$$

CASE2の場合

$$V_s=4Hf=4 \times 1.2 \times 24.026=115.33(\text{m/sec})$$

以上より、模型地盤は目標値 (N 値 = 20) より若干柔らかめに作製された。

4. 水平載荷実験結果

作製した地盤の水平地盤反力係数を算定する目的で、杭頭部に水平力を作用させ、杭頭の水平変位と杭に発生する曲げモーメントを測定する。荷重は、基礎部に連結したワイヤーロープを介してジャッキを用いて与え、ロードセルよりその大きさを求める。載荷は正負1回の繰り返し加力とする。変形は、基礎部に取り付けた変位

計(D-2)から求める。

CASE1については、加振実験の前後に水平荷重実験を行い、CASE2は加振実験後のみに水平荷重実験を行った。図-4にCASE1及びCASE2それぞれの杭頭の水平荷重-水平変位曲線を示す。図-4から以下のことがわかる。

実験前後の荷重-変位関係は大きく異なり、実験中の加振により地盤が締め固められたと考えられる。CASE1は、CASE2に比べ杭頭変位が大きくなるに伴い、地盤の非線形性の影響が顕著に現れている。これよりCASE1はCASE2よりも緩い地盤が作製されたことが確認され、このことは地盤のせん断波速度の算定結果と一致する。

図-5に杭に発生する曲げモーメント分布を示す。図中に示す分布形状は、それぞれ杭頭変位が凡例に示す値のときのものである。

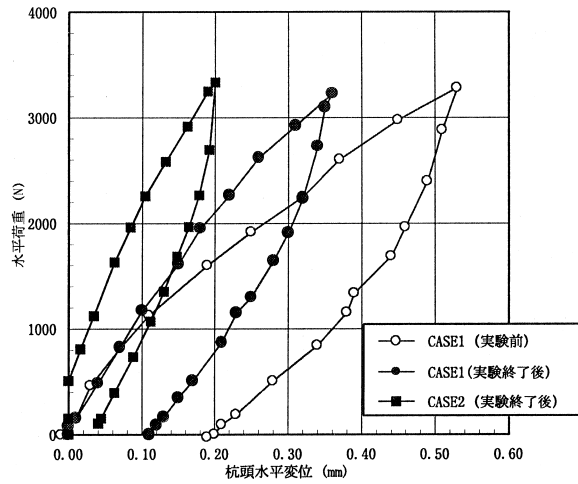


図-4 杭頭の水平荷重-水平変位曲線

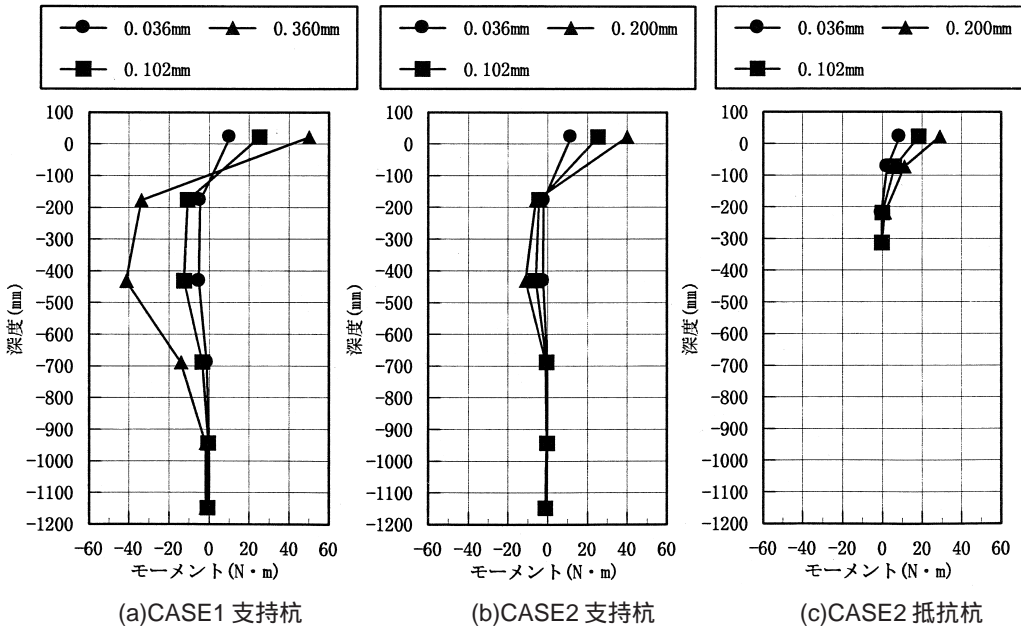


図-5 水平荷重実験時の曲げモーメント分布

表-2 水平地盤反力係数の算定結果

実験ケース	杭種	実験結果			算定結果			
		杭頭変位 y_0 (mm)	水平荷重 H (N)	杭頭水平力 Q (N)	水平地盤反力係数 N/mm^3		β 1/cm	
					杭頭固定	杭頭ピン	杭頭固定	杭頭ピン
CASE1	支持杭	0.068	825.3	91.7	0.0569	0.2486	0.0242	0.035
		0.154	1613.1	179.2	0.0458	0.1941	0.0229	0.0321
		0.260	2619.9	291.1	0.0432	0.1818	0.0226	0.0324
CASE2	支持杭	0.016	808.8	51.0	0.4952		0.0505	
		0.062	1628.9	104.0	0.1719		0.0387	
		0.132	2581.4	164.8	0.1078		0.0345	
	抵抗杭	0.016	808.8	57.9	0.4664		0.0442	
		0.062	1628.9	115.7	0.1619		0.0340	
		0.132	2581.4	183.4	0.1016		0.0301	

4.1 水平地盤反力係数の算定

水平地盤反力係数 k_h が深さによらず一様の場合の弾性支承梁の基本方程式は(1)式で与えられる。

$$EId^4y / dx^4 + k_h By = 0 \quad \text{---(1)}$$

水平地盤反力係数 k_h が深さによらず一様であると仮定(いわゆるChangの式による)し、上記の理論式に、実験から得られる杭頭変位 y_0 と水平荷重 H を用いて水平地盤反力係数 k_h を逆算する。このとき、支持杭は「無限長の

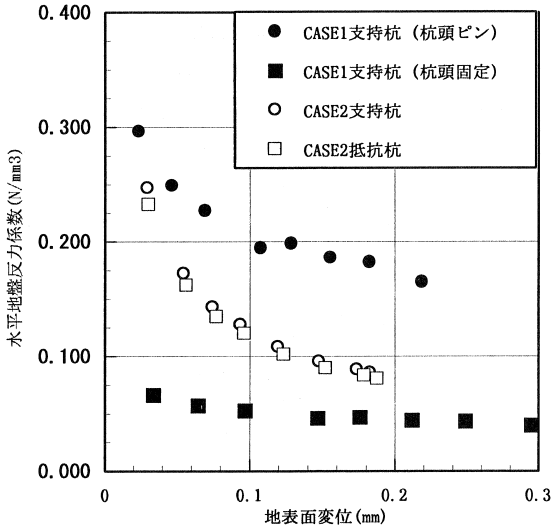


図 - 6 水平地盤反力係数と地表面杭変位

杭」、抵抗杭は杭先端自由の「有限長の杭」とした。

また、模型の杭頭は地表より100mm突出しているため、計算も杭頭突出杭として扱う。

表 - 2 に水平地盤反力係数の算定結果を示す。図 - 5 (a)のCASE1に着目すると、杭中間部に発生するモーメントが大きくなっている。これは杭頭が十分に固定されず、この模型は杭頭部で回転自由度を有していると考えられる。従って、CASE1に関する算定は杭頭固定と杭頭ピンの両モデルを用いて行った。

図 - 6 に算定した水平地盤反力係数と地表面水平変位の関係を示す。杭頭変位の増加に伴い、水平地盤反力係数は低下するという、地盤の非線形性が現れていることがわかる。

4.2 モーメント分布

前節で算定した水平地盤反力係数 k_h (深さによらず一様)杭頭水平力 Q 、及び模型杭の曲げ剛性を用いて杭応力の算定を行い、実験から得られる曲げモーメント分布と比較した結果を図 - 7 に示す。

実測値と解析値を比較するとCASE2は支持杭、水平抵抗杭とも曲げモーメントの分布性状は良い対応を示している。しかしながら、地表面付近では解析値は実測値に対し約7割程度の値となっている。この要因の一つとしては水平地盤反力係数を深さによらず一様としてモデル化していることが考えられる。曲げモーメントに関して

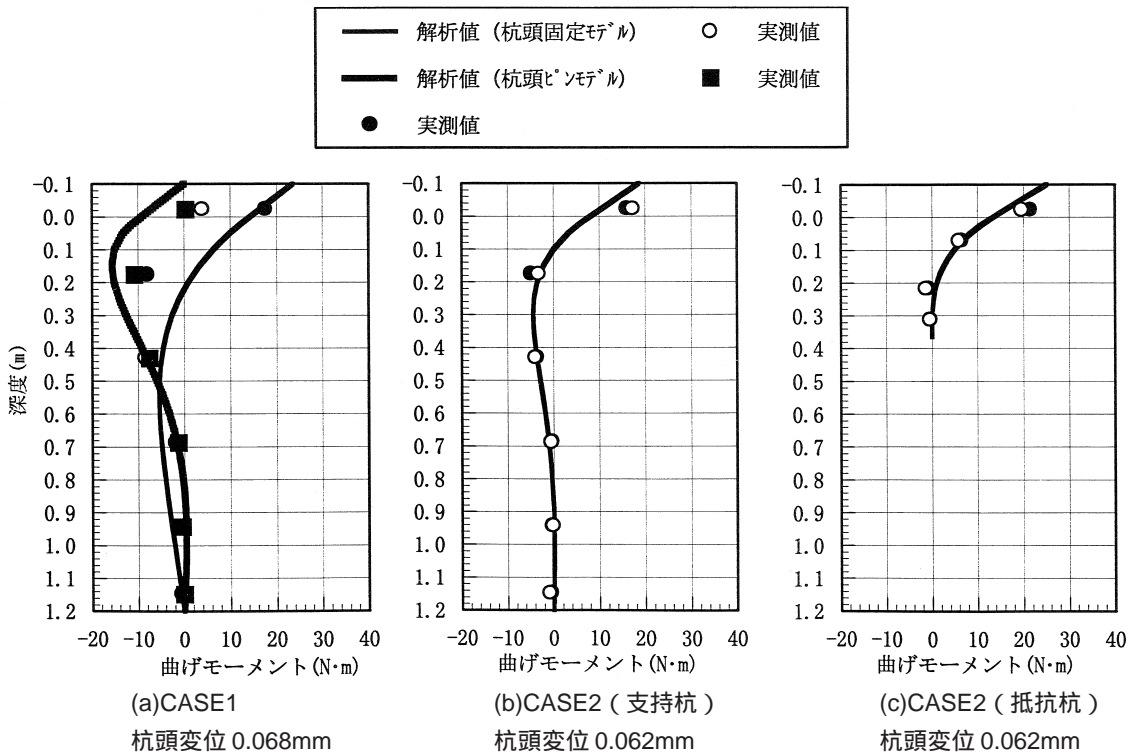


図 - 7 実験結果と計算結果から得られる曲げモーメント分布の比較

実測値との対応を向上するためには、地盤の上載圧の効果を考慮し、深さによって地盤反力係数が増加するモデル(Rees-Matlock 法)などを適用することが必要であると考えられる。

また、CASE1に関しては杭頭の条件を杭頭固定・杭頭ピンとしたモデルの解析値を合わせて図示しているが、地表面付近ではいずれの解析モデルも実測値との対応は良くない。また、各杭(支持杭1,2,3)の実測値にばらつきもみられ、実験CASE2と同様に地盤のモデル化を検討するとともに、基礎底板の回転や杭頭の固定度の影響などを考慮する必要があると考えられる。

5. 振動実験

水平抵抗杭の動的な効果を確認するために、大型振動台による振動実験を行った。加振波は正弦波加振と不規則波加振とし、正弦波加振は100Gal ~ 500Galの段階加振とする。加振振動数は予備実験等の結果より以下のように定める。

地盤の卓越振動数による正弦波加振

正弦波 20Hz 10波 100,200,300,400,500Gal

建物模型の卓越振動数による正弦波加振

正弦波 6Hz 10波 50Galのみ

上記の中間の振動数による正弦波加振

正弦波 10Hz 10波 100,200,300,400,500Gal

また、不規則波加振は模擬波 BCJ-L2³⁾を用い、相似則により時間軸を縮尺した波形を用いる。

5.1 応答加速度

(1)地盤加速度分布

加振中の最大応答加速度分布を図-8および図-9に示す。このときCASE1では、実験中に地表加速度計(AH-5)に不具合が生じ、加速度を測定することができなかった。

各加振ケース毎に次のことが明らかになった。

実験 CASE1 の場合

10Hz、20Hzの場合も300Galを超えると地表近くでの加速度の増幅が小さくなり、地盤の非線形性の影響が現れている。

実験 CASE2 の場合

10Hz加振時には400Galを超えると地盤の非線形性の影響が顕著に現われ、20Hz加振では200Galを超えた時点で影響が現れてきている。

(2)建物・地盤加速度応答倍率

模型基礎部及び模型建屋上部での入力加速度に対する応答加速度のフーリエスペクトル比を図-10に示す。図中の点線はCASE1を、実線はCASE2をそれぞれ示す。実験結果は次のようにまとめることができる。

地盤の固有振動数が卓越する加振実験の場合(正弦波 20Hz、図-10(a)(c))

基礎部(AH-6)での水平抵抗杭による加速度応答低減効果は認められない。むしろ30Hz以上の周波数領域では応答倍率が大きくなっている。

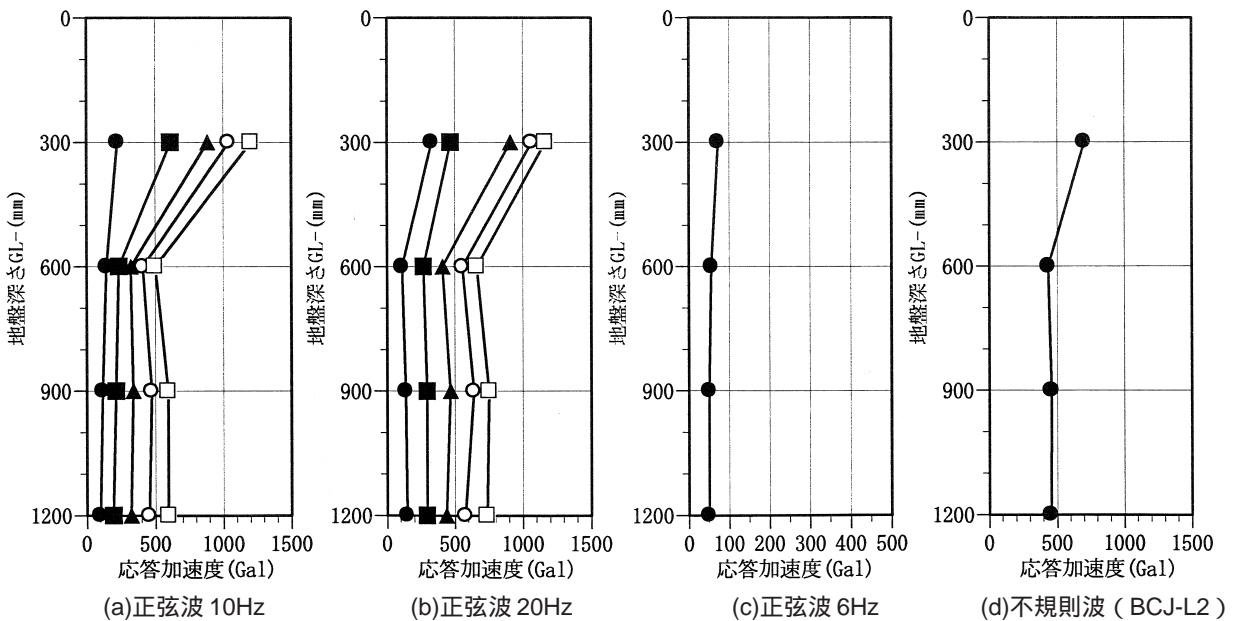


図-8 地盤の最大応答加速度分布 (CASE1)

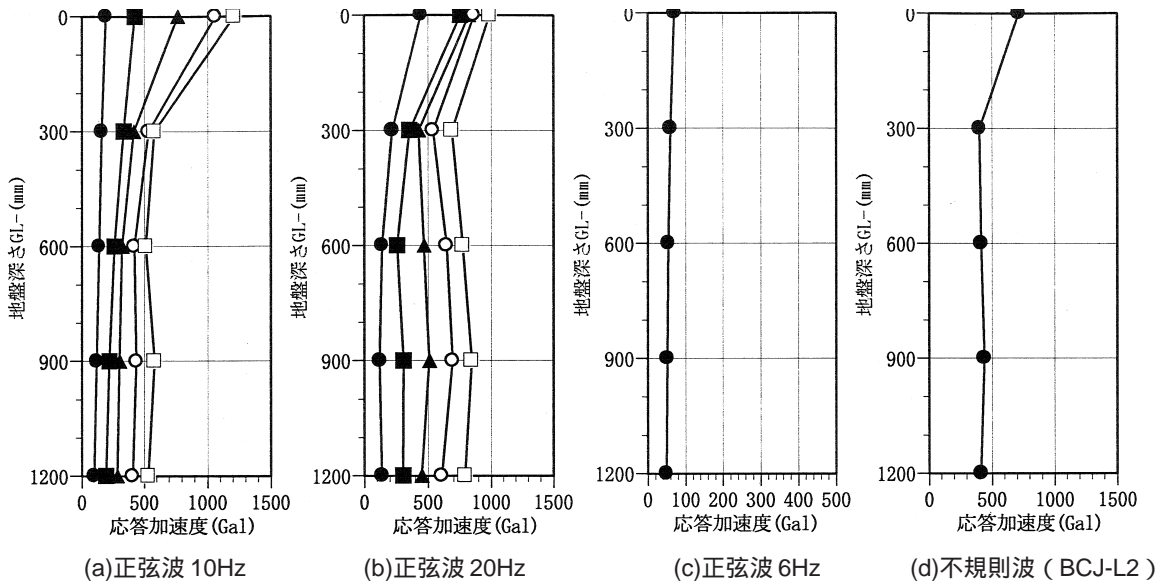


図 - 9 地盤の最大応答加速度分布 (CASE2)

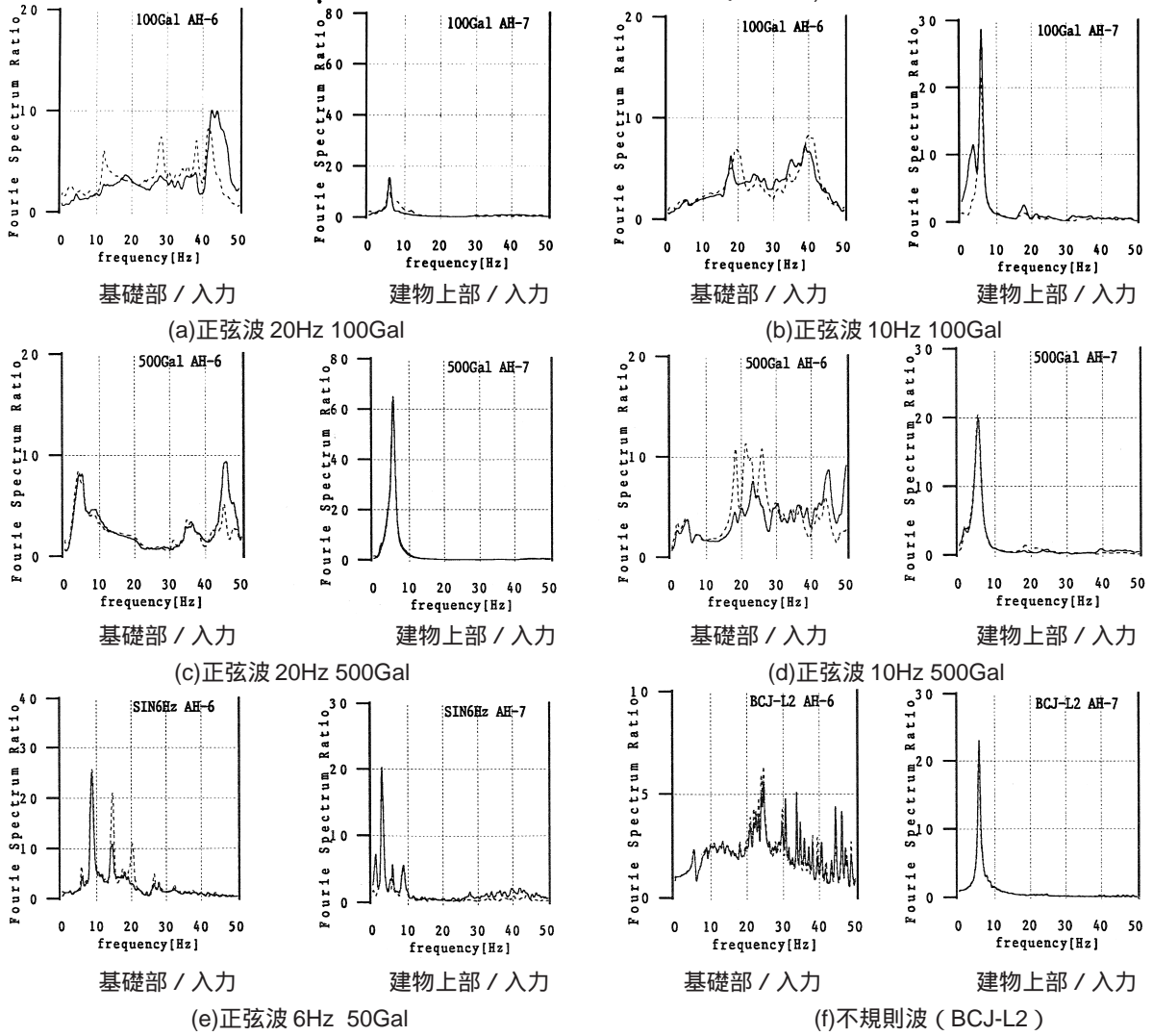


図 - 10 応答加速度倍率の比較

また建屋上部については、水平抵抗杭の有無による変化はみられない。

建屋固有振動数が卓越する加振実験の場合
(正弦波 6Hz, 図 - 10 (e))

基礎部 (AH-6) では 10Hz 以下の応答倍率に変化は見られないが、10Hz 以上の成分で CASE2 の応答は 1/2 ~ 1/3 に低減している。

また、建屋上部の応答倍率は水平抵抗杭の有無に関わらずほとんど変化はみられない。

地盤の固有振動数と建屋固有振動数の中間周期の加振実験の場合 (正弦波 10Hz, 図 - 10 (b)(d))

基礎部 (AH-6) では、加速度レベルが小さい領域では応答倍率に大きな変化は確認されない。しかしながら加速度レベルが大きくなると、30Hz を境に大きな変化がみられる。30Hz 以下の振動数成分は約 1/2

程度に低減され、30Hz 以上の成分は約 2 倍程度応答倍率が大きくなっている。

また建屋上部では、水平抵抗杭の有無による変化は見られないが、入力レベルが大きくなると応答倍率は小さくなるのがわかる。

不規則波加振実験の場合 (BCJ-L2, 図 - 10 (f))

基礎部 (AH-6) での水平抵抗杭による加速度応答低減効果は認められず、建屋上部の応答倍率も水平抵抗杭の有無に関わらずほとんど変化はみられない。

5.2 応答水平変位

それぞれの加振ケースについて模型基礎部の水平変位 (D-2) と入力加速度の関係を図 - 11 に示し、水平抵抗杭の応答変位に及ぼす影響を検討する。このとき、CASE1 (支持杭のみの場合) を ○ で、CASE2 (支持杭 + 水平抵抗杭がある場合) を ● で示す。

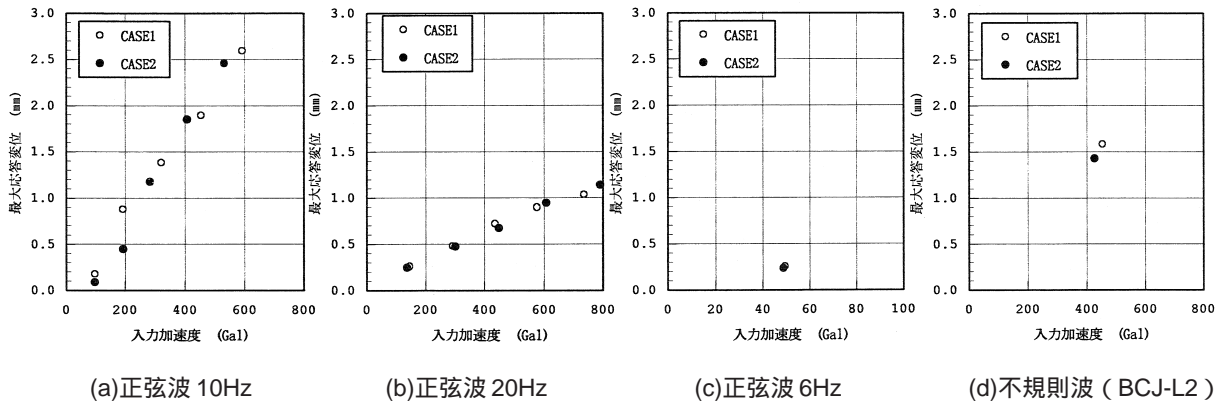


図 - 11 入力加速度と基礎部応答変位の関係

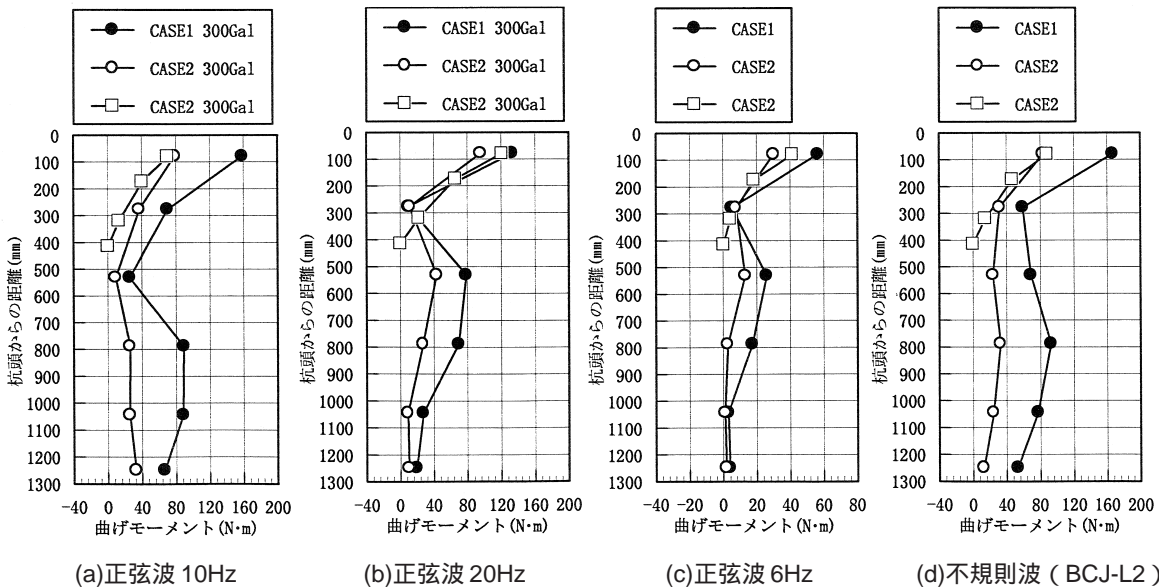


図 - 12 各加振実験時の最大曲げモーメント分布

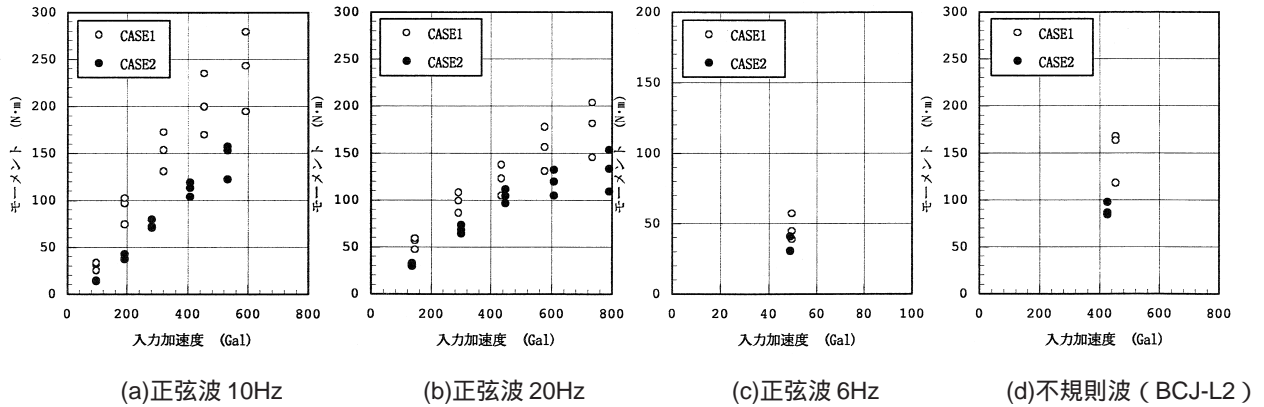


図 - 1 3 入力加速度との杭頭最大モーメントの関係

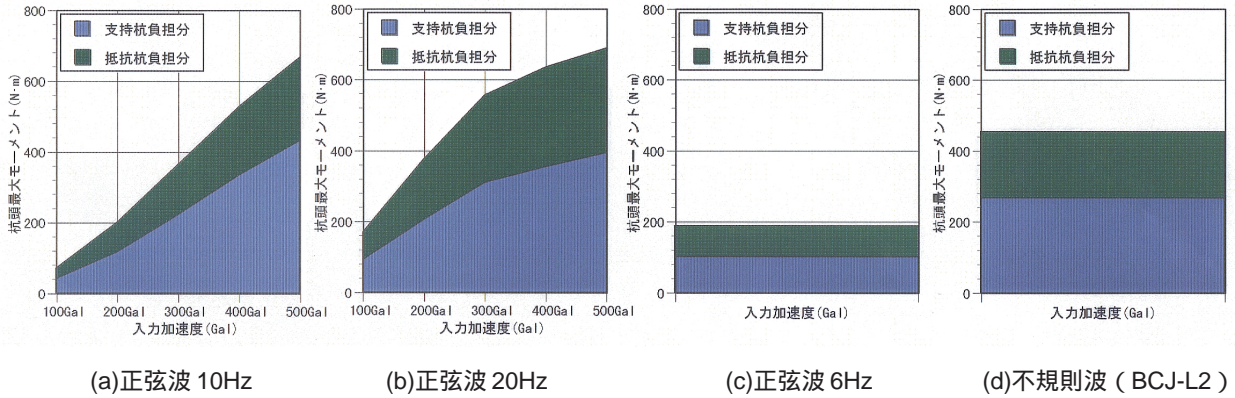


図 - 1 4 支持杭と水平抵抗杭のモーメント分担率

CASE1 及び CASE2 とともに入力加速度と応答変位の関係はほぼ同じ傾向で、同程度の入力加速度に対しての応答変位はほぼ同じ値を示し、水平抵抗杭による差異は認められなかった。

加振振動数によって応答変位量は大きく異なり、10Hz加振時に比べて20Hz加振時には、1/2程度しかなかった。

5.3 杭に発生する曲げモーメント

実験モデルCASE1及びCASE2の加振実験より得られた杭各部のひずみ量より、ひずみ測定位置に発生している曲げモーメントを測定全時刻について算定した。得られた最大曲げモーメントの分布を図 - 1 2 に示す。

図中の M_s は支持杭、 M_h は抵抗杭に発生するモーメントを示す。

また、それぞれの加振ケースについて杭頭に発生する最大曲げモーメントと入力加速度の関係を図 - 1 3 に示し、抵抗杭による支持杭の応力低減効果について検討する。このとき、CASE1(支持杭のみの場合)を M_s で、CASE2(支持杭 + 水平抵抗杭がある場合)を M_{sh} で示す。

いずれの加振ケースについても支持杭杭頭部に発生するモーメントは、水平抵抗杭を併用することで、低減されることがわかる。また、杭頭だけでなく杭中間部に発生するモーメントも水平抵抗杭を併用すると低減されている。

図 - 1 4 に CASE2 振動実験時の杭頭に発生するモーメントの支持杭と水平抵抗杭の分担率を示す。いずれの加振波の場合も支持杭と水平抵抗杭の応力(曲げモーメント)分担率は6:4程度となる。

5.4 建物 - 地盤系の履歴特性

建物基礎部及び上部に設置した加速度計の応答加速度を用いて、杭頭部に作用する慣性力を算定する。得られる慣性力と基礎部応答変位の関係を図 - 1 5 に示す。水平抵抗杭の有無による大きな違いはみられないが、加振波によって履歴曲線の形状は大きく異なっている。曲線が描く面積は正弦波10Hz加振時が最も大きく、逸散減衰が大きいことがわかる。

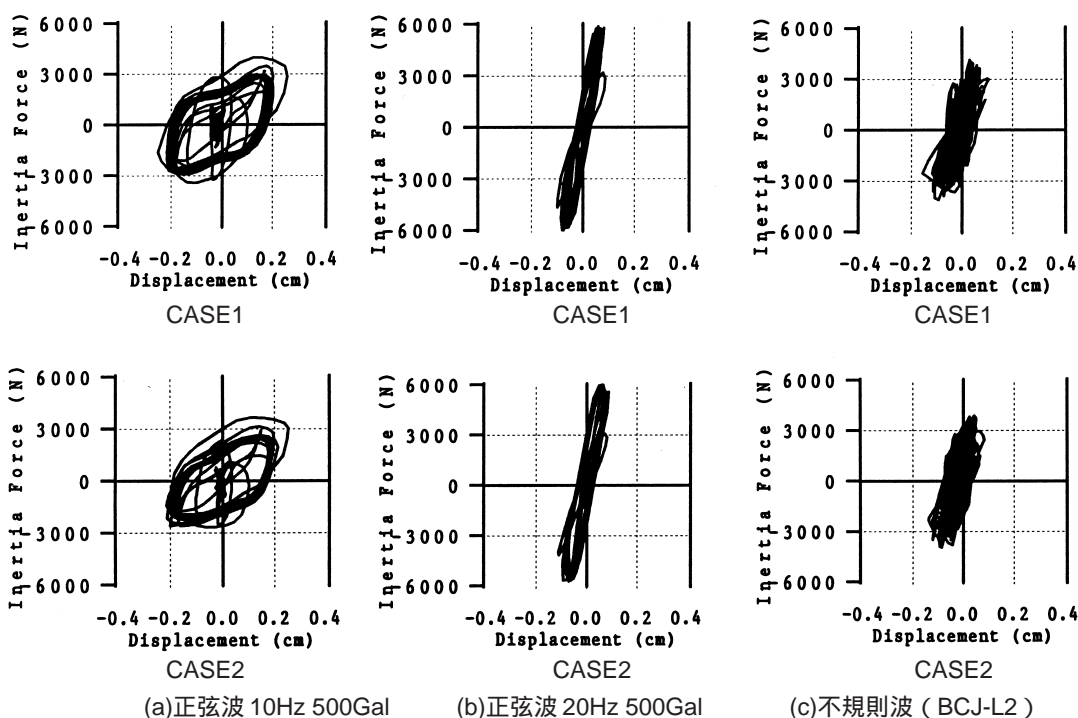


図 - 1 5 基礎部変位と慣性力の関係

6. まとめ

本提案工法の効果を支持杭のみの場合との比較から、応答性状、支持杭と水平抵抗杭の水平力の分担及び杭に発生する応力の評価手法を確認するための基礎資料を得ることを目的として、縮尺模型を用いた大型振動台による振動実験を行った。その結果より、以下のことが明らかになった。

Changの式から得られるモーメント分布形状や支持杭と水平抵抗杭のモーメント分担率は水平載荷試験結果と良く一致する。

支持杭と水平抵抗杭の応力(曲げモーメント)分担率はいずれの加振波の場合も6:4程度となり、数値解析による予測通りの結果が得られた。

建物上部の応答倍率は、加振周波数によって大きな違いは現れなかった。しかしながら基礎部の加速度応答倍率は、大きく異なる傾向を示した。水平抵抗杭による低減効果は、20Hz加振では微小領域(地盤ひずみ)で認められ、10Hz加振では地盤が非線形性を示す領域で認められた。

加振実験において、支持杭には地盤振動の影響により、杭頭部のみでなく杭中間から杭先端部にも比較的大きなモーメントが発生する。しかし支持杭のみの場合と比較し杭中間部においても応力低減効果が認められた。

以上より、水平抵抗杭を有する基礎構造形式の有効性が確認され、Changの式などを用いた評価手法により、杭に発生する応力を予測することが可能であることが明らかになった。しかしながら、水平抵抗杭による上部構造(建屋)の応答低減効果については有意な差は得られなかった。地盤条件の差による応答低減効果については今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるに当たって、東京工業大学和田章教授に適切な御指導を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井合進：1 g場での地盤 - 構造物 - 流体系の模型振動実験の相似則、港湾技術研究所報告、第27巻、第3号 1988.
- 2) 日本建築センター：地震力に対する建築物の基礎の設計指針、昭和59年
- 3) (財)日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)、平成4年3月
- 4) 杉本三千雄 他：大型せん断土槽を用いた液化地盤におけるRC杭基礎の振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造B、pp.543 ~ 544、1998