

連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験



保井 美敏*1

伊勢本昇昭*1 金子 治*1
流田 隆*2 東口 剛*2

概 要

軟弱地盤に建設される超高層建物の基礎構造の一つとして、円形杭をボックス状に配置した連壁杭で囲んだ複合基礎がある。複合基礎にすることにより、基礎の応答変位や上部構造物の揺れの低減効果が期待できる。これらの効果について、遠心載荷装置を用い、模型地盤のみ、連続地中壁杭と円形杭の複合基礎及び複合基礎の比較対象とする杭基礎に支持される構造物の動的実験を行った。その結果以下のような結論が得られた。

1. 取り扱いが容易な乾燥粘土と砂の混合材料は、遠心載荷実験で軟弱な粘性土を模擬するのに有効である。
2. 複合基礎は杭基礎に比べて、振動数比（地盤の1次固有振動数に対する基礎固定時建物固有振動数の比）にかかわらず基礎の応答変位を低減する効果が認められた。また、振動数比が1に近づくほど建物の応答加速度及び応答変位を低減する効果が顕著であった。
3. 建物の応答スペクトル比（複合基礎/杭基礎）は振動数比の影響を受け、振動数比が0.7程度まで大きくなると、全周期帯1以下であった。一方、基礎の応答スペクトル比は振動数比の影響はほとんどなく、すべてのケースで、0.2秒付近では1以上で、0.4秒より長周期側では、1以下であった。
4. 複合基礎では、連壁で囲むことにより内部杭に生じる応力を1/4程度まで抑制する効果が認められた。

DYNAMIC CENTRIFUGE MODEL TESTS FOR COMPOSITE FOUNDATION OF WALL AND PILES

Mitoshi YASUI*1 Noriaki ISEMOTO*1
Osamu KANEKO*1 Takashi NAGAREDA*2
Tsuyoshi HIGASHIGUCHI*2

A composite foundation of wall and piles is employed foundation work of tall building constructed at soft soil site. The composite foundation is expected to reduce foundation displacement. This paper presents dynamic centrifuge model tests for composite foundation and pile foundation. The results are summarized as follows;

1. The material of mixed dry bentonite and sand is useful of centrifuge test
2. The foundation response displacement of the composite foundation is less than that of pile foundation. The building response acceleration and response displacement of composite foundation are less than those of pile foundation, according as predominant frequency ratio of building to ground is close 1.0.
3. The building response spectrum ratio of composite foundation to pile foundation is less than 1.0, when predominant frequency ratio of building to ground is larger than 0.7. The foundation response spectrum ratio of composite foundation to pile foundation is less than 1 when the period is longer than 0.4seconds.
4. The inner piles stress ratio of composite foundation to pile foundation are about 0.25.

*1 技術研究所 *2 構造設計部

*1 Technical Research Institute *2 Structural Engineering Dept.

連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験

保井 美敏*1 伊勢本昇昭*1
 金子 治*1 流田 隆*2
 東口 剛*2

1. はじめに

軟弱地盤に建設される超高層建物の基礎構造の一つとして、通常の円形杭（以降、杭と称す。）をボックス状に配置した連壁杭で囲んだ複合基礎がある。複合基礎は、信頼性の高い鉛直支持力、基礎の応答変位の低減効果、液状化対策効果等が期待でき、さらに建物の揺れも低減できる可能性が高い。これらの効果は、解析的手法により検討されているが、実験的手法により検証した事例はほとんど見られない。

本研究では、土の自重による土圧（拘束圧）の影響が考慮でき、縮小モデルで実大サイズの実験が可能な遠心载荷装置を用い、連続地中壁杭と杭の複合基礎および複合基礎の比較対象とする杭基礎に支持される構造物の動的応答特性を把握する目的で50Gの遠心力場において一連の実験^{1),2),3),4)}を行った。本報告では、実験概要と実験結果について報告する。

2. 模型地盤

2.1 材料概要と動的三軸試験

本実験では、乾燥粘土（ベントナイト）と砂（珪砂）を重量比7：3の割合で混合・攪拌した試料を用いた。この材料の動的特性を把握するため動的三軸試験を実施した。動的三軸試験では、拘束圧依存性を把握するため、拘束圧49kN/m²および拘束圧98kN/m²で実施した。図-1にせん断ひずみとせん断剛性の関係を、図-2にせん断ひずみと減衰定数の関係を示す。実験試料の密度に多少の違いがあるため（拘束圧49kN/m²では $\gamma = 14.4\text{kN/m}^3$ 、拘束圧98kN/m²では $\gamma = 13.9\text{kN/m}^3$ ）、せん断剛性、減衰定数とも多少の相違が生じたが、拘束圧依存性は少ないと考えられる。

2.2 遠心载荷実験

50Gの遠心場における模型地盤の動的特性を把握するため、地盤のみの動的遠心载荷実験を実施した。図-3に遠心载荷実験の計測器配置を示す。地盤は2層になっており、締め固めた豊浦砂（Dr=80%）の層と今回の対象層である。計測項目は加速度と変位である。遠心载荷実験は、50G場で、図-4に示すパルス加振を含む4ステップで行った。地震動入力加振実験には模型実験と同じRINKAI92hを時間軸、加速度の大きさを相似則により調整して用いた。

パルス加振結果を図-5に示す。パルス加振結果のせん断波速度は155m/sとなり、動的三軸試験の微小ひずみレベルの値とほぼ同じであった。深さ方向には図-5(b)に示すようにほぼ一定な値を示した。

図-6に2G入力と16.3G入力の最大せん断ひずみ分布

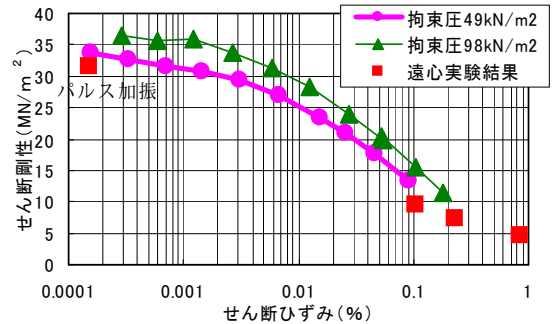


図-1 せん断ひずみとせん断剛性の関係

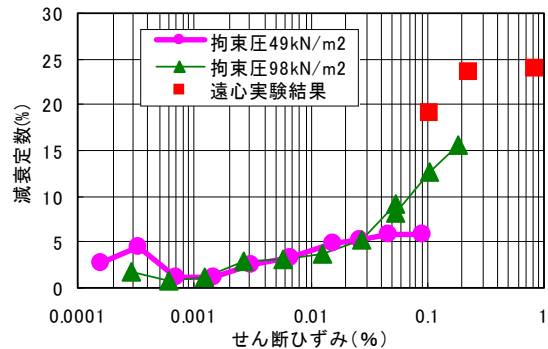


図-2 せん断ひずみと減衰定数の関係

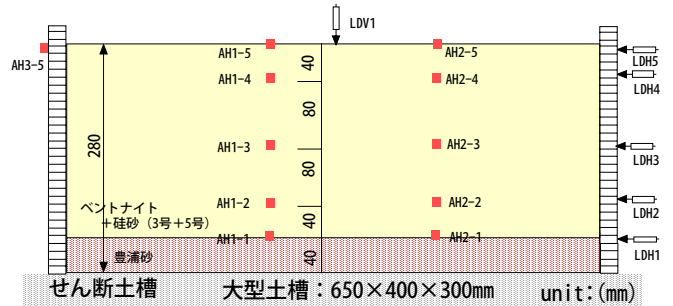


図-3 遠心载荷実験装置概要（地盤のみ）

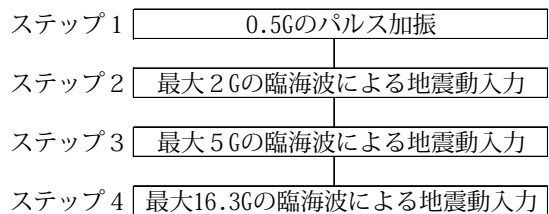


図-4 遠心载荷実験ステップ（地盤のみ）

を示す。最大せん断ひずみは、上部を除けば深さ方向にほぼ一定な値を示し中央部では各地震動入力に対しそれぞれ0.18% (2G)、0.4% (5G)、1.5% (16.3G)であった。

*1 技術研究所 *2 構造設計部

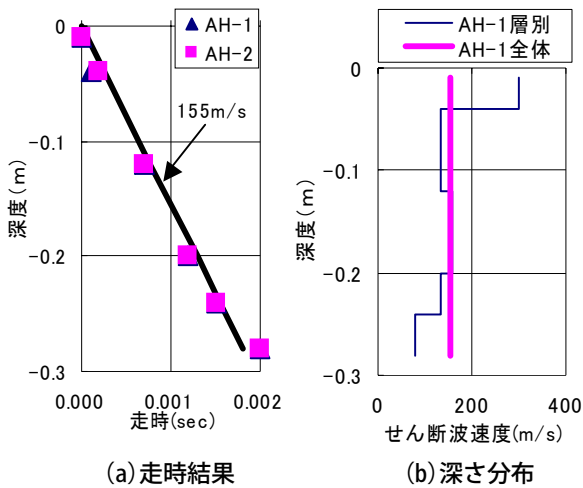


図-5 パルス加振結果

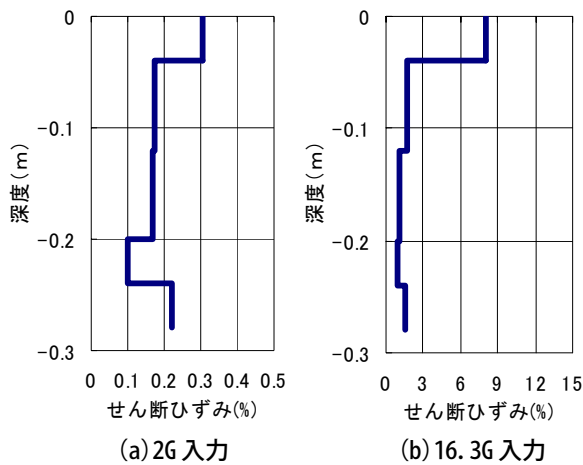


図-6 最大せん断ひずみ分布

2.3 模型実験地盤のせん断剛性と減衰定数

各地震動入力へのせん断剛性は、各深さのフーリエスペクトルを求め、求める区間のフーリエスペクトル比の1次ピークと伝達関数の同定から求めた。16.3G入力のGL-4cm位置のフーリエスペクトルを図-7に示す。深さ方向のフーリエスペクトルはGL位置とGL-4cm位置のフーリエスペクトルがほぼ同じだったので、同定はGL-4cm位置とGL-24cm位置の区間をせん断剛性一定として、この区間のフーリエスペクトル比を用いた。16.3G入力の同定結果を図-8に示す。パルス加振及び同定結果から求めたせん断剛性を図-1に併記している。

減衰定数は、同定したせん断定数を用いたGL-4cm位置の時刻歴応答計算により、最大応答加速度のフィッティングから求めた。結果を図-2に併記している。

結果の整理に用いたせん断ひずみは、最大せん断ひずみの65%を用いている。遠心载荷結果の減衰定数は動的三軸試験結果より大きい、せん断剛性は動的三軸試験でほぼ評価できる。

乾燥粘土と砂の本混合材料は、遠心場の動的特性が動的三軸試験結果でほぼ評価することができ、拘束圧依存性も少なかった。これらのことから、取り扱いが容易な本混合材料は、遠心载荷実験で軟弱な粘性土を模擬するのに有効であることがわかった。

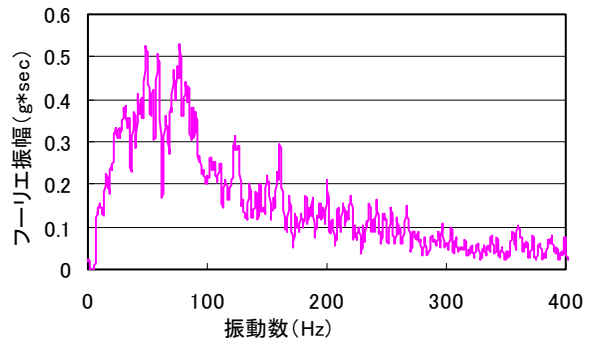


図-7 フーリエスペクトル(16.3G入力、GL-4cm位置)

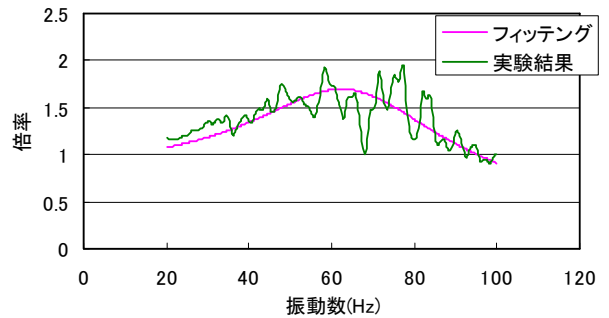


図-8 同定結果(16.3G入力、GL-4cm/GL-24cm)

3. 動的遠心模型実験

3.1 実験概要

本実験では、軟弱地盤に建つ40階程度のRC造構造物(以降、プロトタイプと称す)を対象としている。今回の遠心模型実験では、モデルとプロトタイプとの厳密な相似則を満足させることは難しいことから、応力レベルのほか以下に述べる項目に着目してモデル化を行った。複合基礎の実験システムを図-9に示す。模型地盤は、大型せん断土槽(650mm×400mm, h=300mm)内に、豊浦標準砂を締固めて支持層(h=30mm)を作製し、模型を設置した後に、前述した乾燥粘土(ベントナイト)と砂(珪砂)を7:3の割合で混合・攪拌した試料を締固めて上層(h=250mm)を作製した。

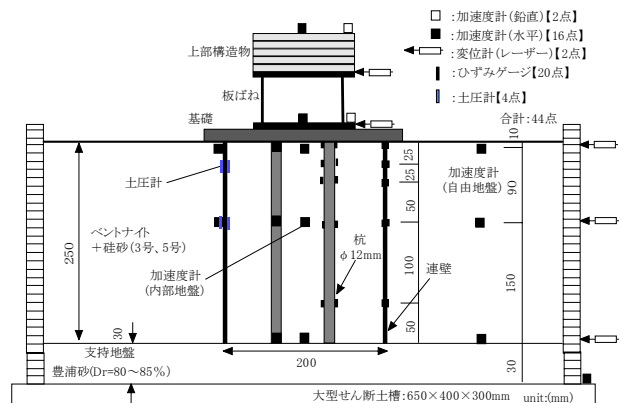


図-9 実験システム(複合基礎)

連壁模型(200mm×200mm, h=250mm)はアルミ製であり、プロトタイプの変形比(せん断変形/曲げ変形)および

相似則を考慮して壁厚 ($t=2.5\text{mm}$) を決定した。連壁内に設置する杭は4本とし、プロトタイプの曲げ剛性比および連壁との面積比ならびに連壁と内部杭の水平曲げ剛性を総合的に判断して、径 $\phi 12\text{mm}$ の密実のアルミニウム棒を用いた。建物模型については、2枚の板ばねとおもりによって構築する1質点系モデルとした。複合基礎の応力がプロトタイプと同程度となるように、標準となる建物重量を決定し ($m=140\text{N}$)、プロトタイプの基礎固定時の建物固有周期 (50g 場: $T=0.044\text{sec}$) を目標に板ばねの寸法 ($h=100\text{mm}$, $D=90\text{mm}$, $t=2.0\text{mm}$) を決定した。また、複合基礎の比較対象となる杭基礎は16本杭基礎 (4×4 本) とし、複合基礎の内部杭と同様の諸元を有する4本杭を中心、建物重量に対する応力度が複合基礎と同じとなるよう $\phi 10\text{mm}$ の外周杭 (密実アルミニウム製) を12本設置した。複合基礎および杭基礎ともに頭部は基礎と剛結、先端は支持層上に設置するものとした。加振中は、図-9に示すように地盤内、杭および連壁の深さ方向に生じる加速度とひずみ、基礎および建物の加速度と水平変位及び連壁の土圧を測定した。

実験ケースを表-1に示す。実験は、複合基礎および杭基礎それぞれに対して入力加振レベルをパラメータとしたものに加えて、地盤と建物の固有振動数比による応答特性に着目するために建物の固有振動数をパラメータとした、計7ケースを行った。

表-1 実験ケース

実験ケース	建物重量(N) (固有振動数)	入力加振 レベル (G)
CASE 1-1	20	2
CASE 1-2	(61.3Hz)	5
CASE 2-1	40	2
CASE 2-2	(43.3Hz)	5
CASE 3-1	140 (23.2Hz)	2
CASE 3-2		5
CASE 3-3		16.3

3.2 実験結果

(1) 時刻歴結果

結果を代表してCASE 1-2の建物および基礎の応答加速度、応答変位の時刻歴波形を入力加速度とともに図-10に示す。基礎の応答加速度は入力加速度と類似した形状を示しているが、建物ではその傾向は認められず、建物の固有振動数で振動していることがわかる。基礎の応答加速度および応答変位ともに、複合基礎と杭基礎では同様の応答性状を示しており、複合基礎の最大応答変位は杭基礎の8割程度まで抑制されている。一方、建物の応答加速度および応答変位ともに、最大値を示す0.9秒付近までは、複合基礎と杭基礎では概ね同様の性状を示しており、複合基礎の最大応答加速度および最大応答変位は杭基礎の約7割まで抑制されている。

基礎および建物における、杭基礎に対する複合基礎の最大応答加速度比および最大応答変位比の結果を図-11、12に示す。図の横軸は、地盤の1次固有振動数に対する

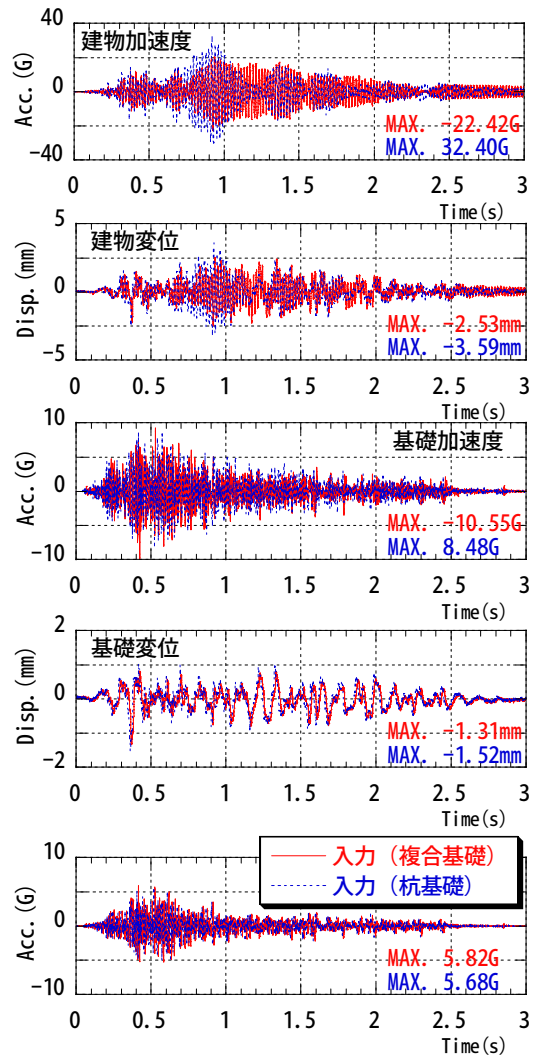


図-10 時刻歴波形 (CASE1-2)

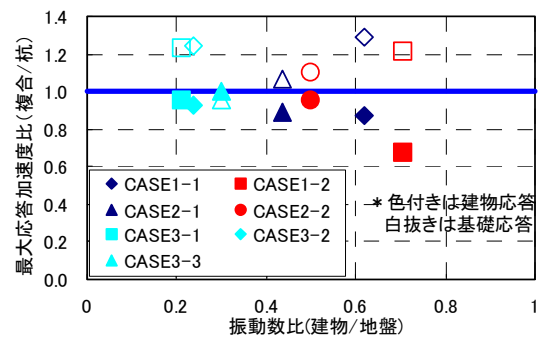


図-11 最大応答加速度比

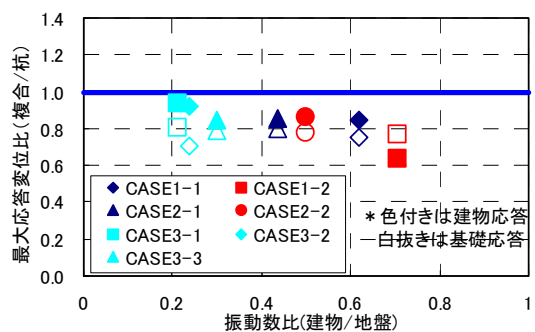


図-12 最大応答変位比

基礎固定時建物固有振動数の比(以降、振動数比と称す。)で表している。なお、今回実施した実験の計測結果から算出した模型周辺地盤の固有振動数には、基礎構造物の影響が含まれていると考えられたことから、地盤の1次固有振動数は、事前に地盤のみで実施した同じ入力加振レベルの結果を用いた。建物応答(図中塗りつぶし)では、最大加速度比および最大変位比ともに振動数比が1に近くなると、複合基礎の応答が低減する効果が顕著に表れている。一方、基礎応答(図中白抜き)では、加速度比はほとんどの実験ケースで1.0以上、変位比は0.8程度となっており、振動数比の影響は認められず一般的な傾向を示している。

(2) 応答スペクトル

図-13,14にCASE1-2(振動数比0.70)とCASE3-1(振動数比0.21)で、建物応答加速度(相似則により1G場に変換)の擬似速度応答スペクトル(h=5%、以降、応答スペクトルと称す。)を、複合基礎及び杭基礎について示す。CASE1-2は、複合基礎、杭基礎とも同様なスペクトル形状で、建物の固有周期(0.82秒)付近でピークを示し、複合基礎の応答値は杭基礎のそれより全周期帯で小さい。一方、CASE3-1では、複合基礎と杭基礎の応答値はほぼ同じであるが、複合基礎では、建物固有周期(2.2秒)付近の他、短周期(0.2秒付近)にもピークを持ち杭基礎とは異なる特性で応答している。

建物及び基礎の杭基礎に対する複合基礎の応答スペクトル比(以降、応答スペクトル比と称す。)をそれぞれ図-15,16に示す。建物の応答スペクトル比は、振動数比の影響を受け、振動数比が0.7程度まで大きくなると、0.2秒付近の1以上のピークが消え、全周期帯で1以下となる。

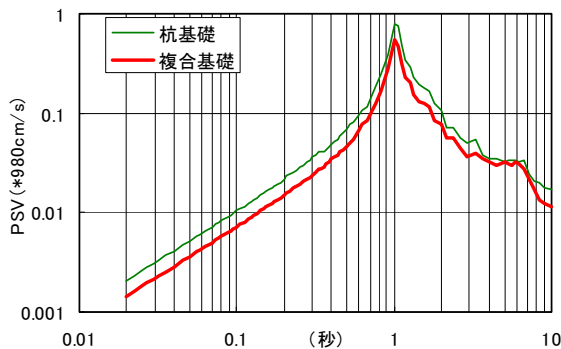


図-13 擬似速度応答スペクトル(建物、CASE1-2)

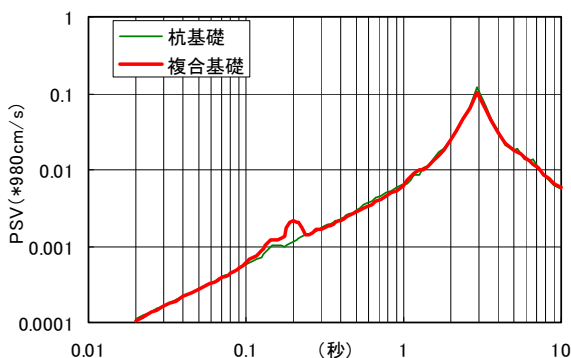


図-14 擬似速度応答スペクトル(建物、CASE1-3)

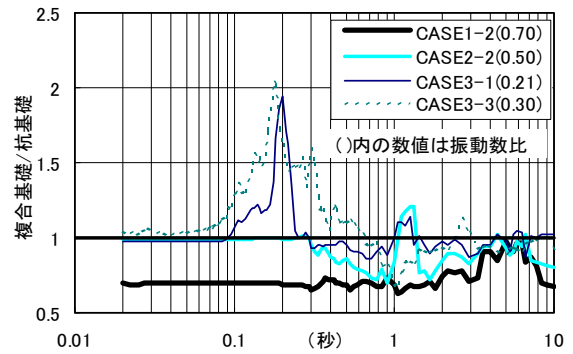


図-15 応答スペクトル比(建物応答)

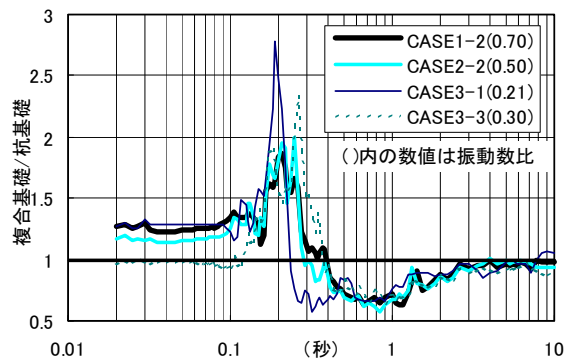


図-16 応答スペクトル比(基礎応答)

一方、基礎の応答スペクトル比は、振動数比の影響はほとんどなく、全ケースで同様な形状をしており、0.2秒付近で1以上となり、0.4秒より長周期側では1以下となっている。

(3) 連壁応力および杭応力

建物重量20Nと140Nの曲げモーメント分布を図-18,19に示す。ここでは、杭頭部あるいは面外壁頭部の応力が最大となる時刻の深さ方向分布を示している。内部杭については杭基礎(杭1)および複合基礎ともに図-17に示す1本あたりの計測結果を示している。また、杭基礎の外周杭は、複合基礎の面外壁と同位置の4本分に換算した値として示している。

図-18,19に示した結果から、杭基礎および複合基礎ともに、頭部で最大値を示す分布形状を示している。複合基礎と杭基礎で同様の諸元を有する内部杭の杭頭曲げモーメント比(複合基礎/杭基礎)を表-2に示す。曲げモーメント分布および表-2から、建物重量および入力加振レベルにかかわらず、複合基礎の内部杭は杭基礎の1/4程度となっており、連壁で囲むことにより内部杭に生じる応力を抑制する効果が顕著に認められる。また、外周杭(×4本)と面外壁の頭部応力を比較すると、外周杭は面外壁の5.0~9.0倍程度の応力が生じている。複合基礎では、面外壁に生じている応力が杭基礎の外周杭に比べて小さいにもかかわらず、内部杭の応力が著しく抑制されている事実から、連壁模型の形状効果(ボックス状)が大きく影響しており、面内壁の負担が大きいことを示唆していると考えられる。

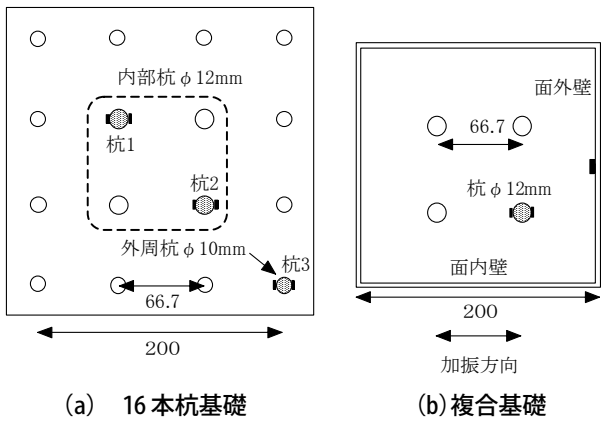


図 - 17 ひずみ計測位置

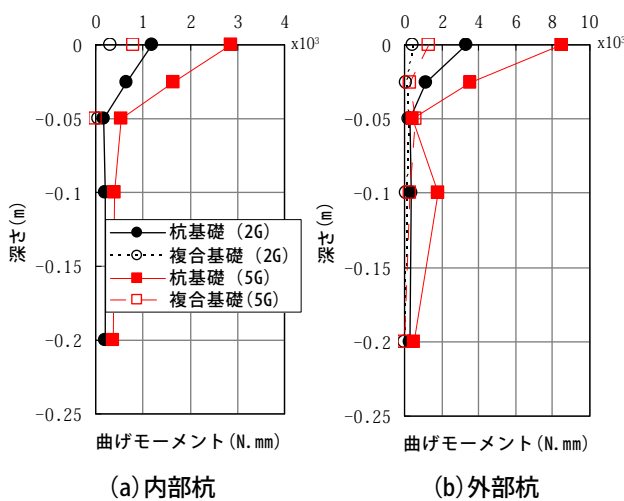


図 - 18 曲げモーメント分布 (建物重力 20N)

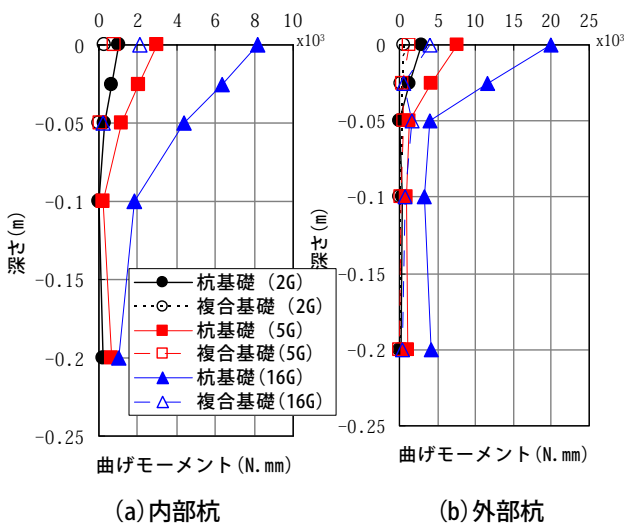


図 - 19 曲げモーメント分布 (建物重量 140N)

4. まとめ

今回の一連の遠心載荷装置を用いた実験から以下のことが明らかになった。

- 1) 取り扱いが容易な乾燥粘土と砂の混合材料は、遠心載

表 - 2 内部杭の杭頭曲げモーメント比

建物重量	入力加振レベル	杭基礎モーメント	複合基礎モーメント	モーメント比 (複合/杭)
20N	2.0G	1.21	0.30	0.25
	5.0G	2.87	0.79	0.28
40N	2.0G	1.20	0.29	0.24
	5.0G	3.39	0.79	0.23
140N	2.0G	1.03	0.28	0.28
	5.0G	2.96	0.82	0.28
	16.3G	8.18	2.13	0.26

*モーメントの単位は、 $10^3 \text{N}\cdot\text{mm}$

- 荷実験で軟弱な粘性土を模擬するのに有効である。
- 2) 複合基礎は杭基礎に比べて、振動数比 (地盤の1次固有振動数に対する基礎固定時建物固有振動数の比) にかかわらず基礎の応答変位を低減する効果が認められた。また、振動数比が1に近づくほど建物の応答加速度及び応答変位を低減する効果が顕著であった。
 - 3) 建物の応答スペクトル比 (複合基礎/杭基礎) は振動数比の影響を受け、振動数比が0.7程度まで大きくなると、全周期帯1以下であった。一方、基礎の応答スペクトル比は振動数比の影響はほとんどなく、すべてのケースで、0.2秒付近では1以上で、0.4秒より長周期では、1以下であった。
 - 4) 複合基礎では、連壁で囲むことにより内部杭に生じる応力を杭基礎の1/4程度まで抑制する効果が認められた。

今後は、複合基礎の水平力分担機構を詳細に検討するために、静的な遠心載荷実験を実施する予定である。

本報告で掲載した実験は、戸田建設・西松建設共同研究プロジェクトに於いて実施されたものである。本プロジェクト共同研究者である西松建設技術研究所、武内義夫氏、宮崎啓一氏、萩原敏行博士、今村眞一郎氏、新井寿昭氏に深甚なる謝意を表します。

謝辞: 本研究の実施にあたって、東京工業大学工学部建築学科 時松孝次教授に貴重なご意見、ご指導をいただきました。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 保井他: 連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心載荷実験 (その1)、第38回地盤工学研究発表会、2003, pp1463-1464
- 2) 新井他: 連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心載荷実験 (その2)、第38回地盤工学研究発表会、2003, pp1465-1466
- 3) 保井他: 連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心載荷実験 (その3)、建築学会大会梗概集、2003, pp389-390
- 4) 新井他: 連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心載荷実験 (その4)、建築学会大会梗概集、2003, pp391-392