

# 地中連続壁と杭の複合基礎に関する遠心模型実験

## Centrifuge Model Tests for Composite Foundation of Wall and Pile

新井 寿昭*	今村 眞一郎**
Toshiaki Arai	Shinichirou Imamura
武内 義夫*	宮崎 啓一**
Yoshio Takeuchi	Keiichi Miyazaki
萩原 敏行**	
Toshiyuki Hagiwara	

### 要 約

複合基礎は、建物を支持する基礎杭の外周を地中連続壁で囲んだ工法であり、地中連続壁は耐震壁として地震に抵抗するとともに、支持杭として建物を支えることもできる。本研究では、複合基礎の地震時挙動を把握し、合理的な耐震設計手法を確立することを目的として、遠心振動載荷装置を用いた動的模型実験および静的水平載荷実験を計画した。本論文では、動的模型実験結果について述べたものである。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 動的遠心模型実験概要
- § 3. 実験結果
- § 4. まとめ

### § 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は、上部構造物の荷重を支持することに加えて、地震荷重に対しても抵抗することが必要となる。地震時には、上部構造物からの慣性力に加えて、軟弱地盤では地盤の変形が大きくなるために、場合によっては基礎構造に対して外力として作用することが想定される。このような場合には、耐震性を向上させるために通常の杭基礎に代わって、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採用される。近年では、軟弱地盤における複合基礎の採用事例が増えつつあり、東京都江戸川区、中央区、江東区に建つ超高層建物では、複合基礎が全体の約 30% と、その割合が多くなっている<sup>1)</sup>。

複合基礎は、基礎構造を剛強とすることに加えて、基礎や上部構造物の地震時応答を低減させる効果も期待さ

れる。これらの効果については、解析的手法により定性的に確認されているが、実験的に検証した事例は少ない。また、複合基礎を設計する際に用いる地盤反力係数の評価方法は、建築分野ではいまだ確立されておらず、土木構造物の設計指針類の手法を準用しているのが現状であり、設計手法には多くの安全側の仮定が含まれていると考えられる。このようなことから、本研究では、複合基礎の地震時挙動を定量的に把握し、基礎に作用する外力のメカニズム、杭および連壁の水平抵抗機構を検討することにより、合理的な耐震設計手法を確立することを目的として、遠心振動載荷装置を用いた動的模型実験および静的水平載荷実験を計画した。本論文では、動的模型実験概要および結果について述べる。

### § 2. 動的遠心模型実験概要

#### 2-1 実験装置および実験手法

地中深い場所に設置される基礎構造には、土の自重による拘束圧の影響が大きいことから、実大に近い寸法の大規模な実験装置が必要となる。したがって、今回は縮小モデルでも実大サイズを模擬することが可能な遠心振動載荷装置を用い、50G の遠心力場で実験を行った。

本研究では、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、縮小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困難であることから、

\* 技術研究所技術研究部建築技術研究課

\*\* 技術研究所技術研究部土木技術研究課

第一ステップとして応力レベルのほか、以下に述べる項目に着目してモデル化を行った。

実験システムを図-1に示す。実験模型地盤は、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(Dr=80~85%, h=300mm)を作製し、模型を設置した後に、乾燥粘土(ベントナイト)と砂(珪砂)を質量比7:3の割合で混合・攪拌した試料を締固めながら上層(h=250mm)を作製した。

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=2.5mm)を決定した。連壁内に設置する杭本数は4本とし(以降、内部杭と称する)、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φ12mm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(50G場:m=140N)を決定し、プロトタイプの基礎固定時の建物固有周期(50G場:T=0.044sec)を目標に板ばねの寸法(h=100mm, D=90mm, t=2.0mm)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(4×4本)とし(以降、杭基礎と称する)、複合基礎の内部杭と同様の諸元を有する4本杭を中心に、建物重量に対する応力度が複合基礎と同じになるようφ10mm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-1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、基礎と建物の加速度および水平変位を測定した。

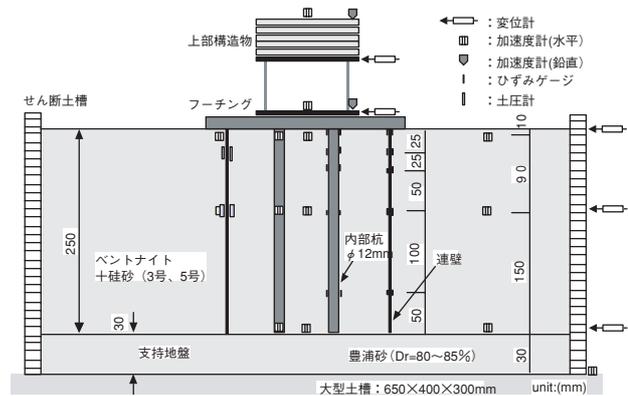


図-1 実験システム(複合基礎)

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 (61.3Hz)	2.0
CASE 1-2		5.0
CASE 2-1	40 (43.3Hz)	2.0
CASE 2-2		5.0
CASE 3-1	140 (23.2Hz)	2.0
CASE 3-2		5.0
CASE 3-3		16.3

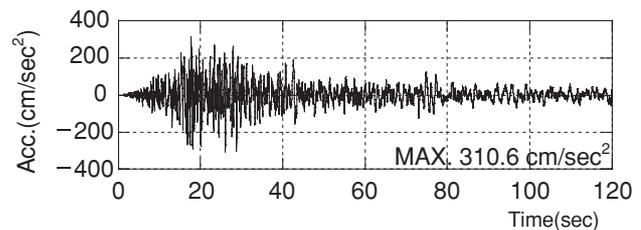


図-2 入力地震動(RINKAI 92h)

2-2 実験内容

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ケースの実験を行った。なお、入力地震動には、南関東地震を想定して作成された図-2に示すRINKAI 92hを用い、実験時には時間軸を1/50に、最大値を表-1に示す加振レベルに調整して入力した。

§ 3. 実験結果

3-1 時刻歴波形および最大応答値

実験結果を代表して、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-3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。また、建物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を図-4に示す。図の横軸は、地盤に対する建物の振動数比を表している。なお、模型を設置した実験の計測結果から算出した地盤の固有振動数には、模型構造物の影響が含まれていると考えられた。したがって、ここでは地盤のみの実験を同定した結果<sup>2)</sup>から、地盤の1次固有振動数を算出した。

建物応答(図中塗りつぶし)では、加速度比および変位比ともに地盤と建物の固有振動数が近くなると、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様な傾向を示している。

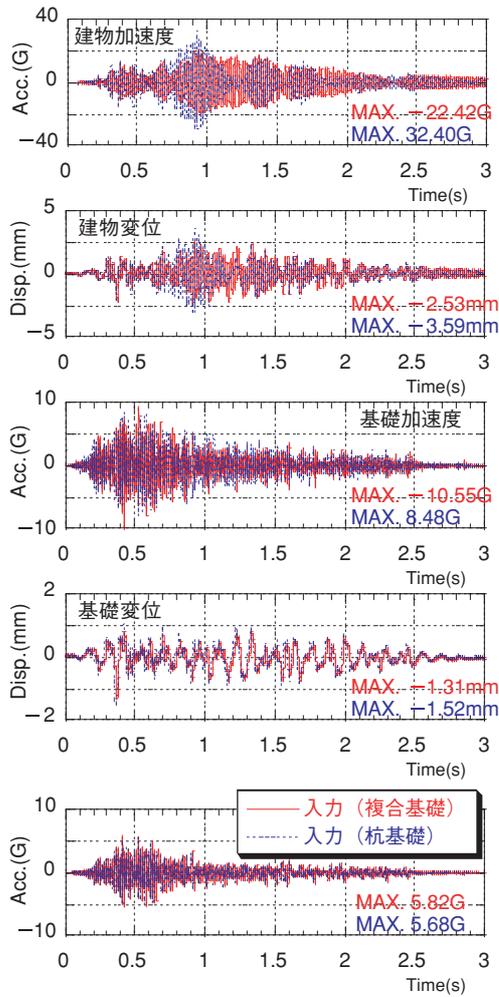
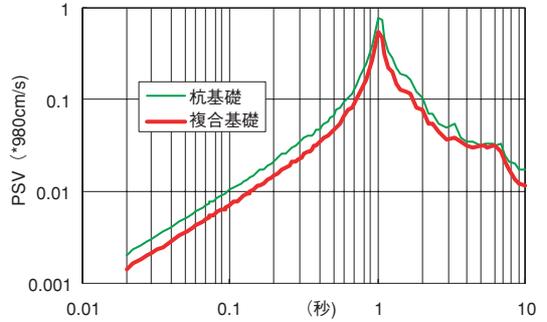


図-3 時刻歴波形 (CASE 1-2)

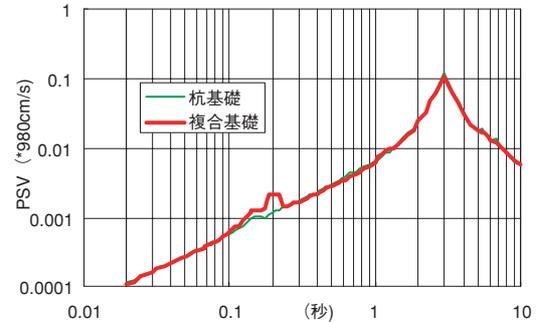
### 3-2 応答スペクトル

複合基礎および杭基礎における CASE 1-2 (振動数比 0.70) と CASE 3-1 (振動数比 0.21) の、建物応答加速度 (プロタイプに変換) の擬似速度応答スペクトル ( $h=0.5\%$ , 以降、応答スペクトルと称する) を図-5 に示す。

CASE 1-2 は、複合基礎、杭基礎ともに同様なスペクトル形状で、建物の固有周期 (1.0 秒) 付近でピークを

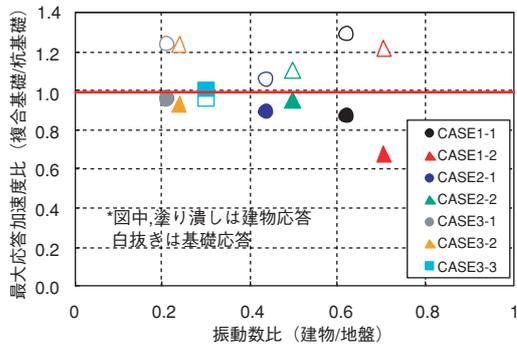


(1) CASE 1-2: 建物応答

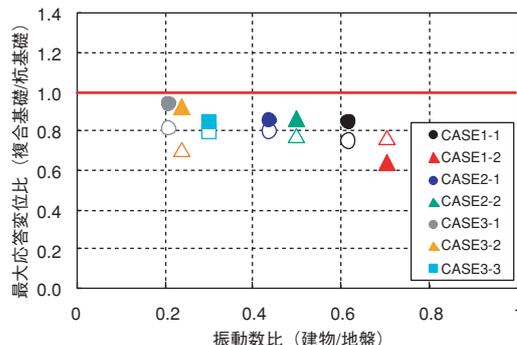


(2) CASE 3-1: 建物応答

図-5 擬似速度応答スペクトル

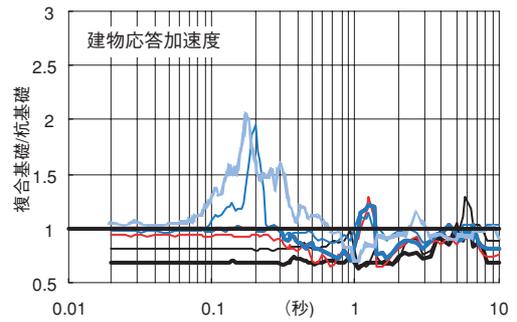


(1) 最大応答加速度比

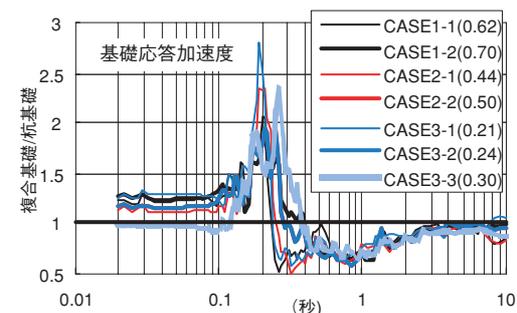


(2) 最大応答変位比

図-4 最大応答比



(1) 建物応答



(2) 基礎応答

図-6 応答スペクトル比

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、CASE 3-1では、複合基礎と杭基礎の応答値はほぼ同様であるが、複合基礎では、建物固有周期(2.9秒)付近のほか、短周期(0.2秒)付近にもピークを有しており、杭基礎とは異なる特性で応答している。

建物および基礎の杭基礎に対する複合基礎の応答スペクトル比をそれぞれ図-6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0.6程度まで大きくなると、0.2秒付近の1以上のスペクトルが消え、全周期帯で1以下となる。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、全実験ケースで同様な形状を示しており、0.4秒より長周期では1以下となっている。

以上のことから、図-4(1)で示した基礎の最大応答加速度比が1.0以上となっていることは、短周期側の影響によるものであることがわかる。

### 3-3 連壁応力および杭応力

#### (1) 深さ方向分布

杭基礎および複合基礎の平面的なひずみ計測位置を図-7に示す。杭基礎では内部杭2本および外周杭隅部1本の計3本について、複合基礎では内部杭1本および面外壁について、深さ方向5断面を対象にひずみ計測を行った。

CASE 1シリーズの杭基礎および複合基礎の曲げモーメント分布を図-8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-7に示す杭1本あたりの計測結果を示している。一方、杭基礎の外周杭(杭3)は、複合基礎の面外壁1枚と同位置の4本分に換算した値として示している。

図-8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。

#### (2) 内部杭の応力

複合基礎と杭基礎で同様の諸元を有する内部杭の最大杭頭曲げモーメント比(複合基礎/杭基礎)を表-2に、せん断力比を表-3に示す。なお、杭頭部のせん断力は、曲げモーメント分布の頭部2点間におけるモーメント差と計測距離の関係から求めた。

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曲げモーメントを抑制する効果が顕著に認められる。また、複合基礎の内部杭に生じるせん断力は、実験ケースにより変動しているが、杭基礎の0.5~0.8倍程度となっており、曲げモーメントと同様に抑制効果が認められる。

内部杭の深さ方向分布で最大値を示す杭頭部の曲げモーメントの周波数特性を図-9に示す。実験結果を代表してCASE 1-2およびCASE 3-2の結果を示す。

杭基礎では、CASE 1-2およびCASE 3-2ともに建

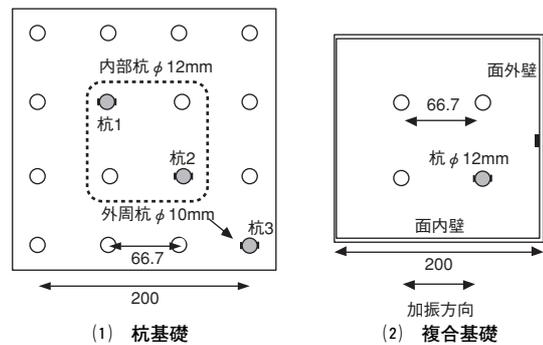


図-7 ひずみ計測位置

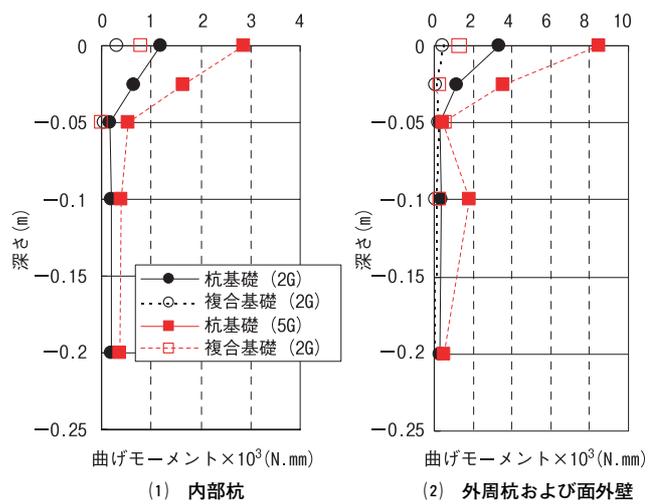


図-8 曲げモーメント分布 (CASE 1シリーズ)

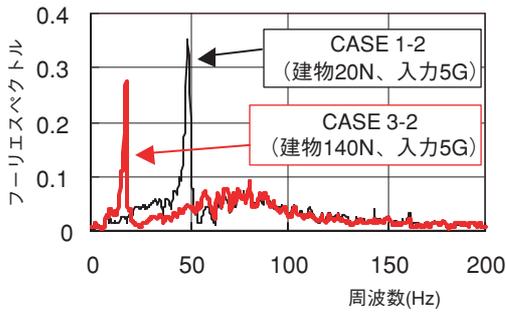
表-2 内部杭の曲げモーメント比

実験ケース	16本杭基礎 曲げモーメント ×10 <sup>3</sup> (N.mm)	複合基礎 曲げモーメント ×10 <sup>3</sup> (N.mm)	曲げモーメント比 (複合/16本杭)
CASE 1-1	1.21	0.30	0.25
CASE 1-2	2.87	0.79	0.28
CASE 2-1	1.20	0.29	0.24
CASE 2-2	3.39	0.79	0.23
CASE 3-1	1.03	0.28	0.28
CASE 3-2	2.96	0.82	0.28
CASE 3-3	8.18	2.13	0.26

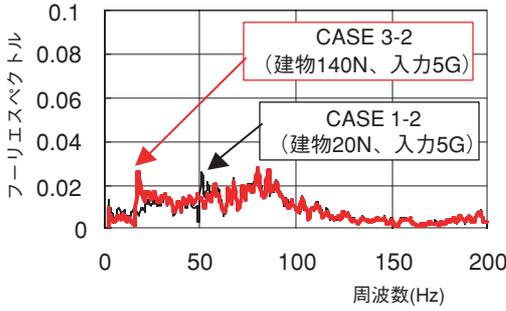
表-3 内部杭のせん断力比

実験ケース	16本杭基礎 せん断力 (N)	複合基礎 せん断力 (N)	せん断力比 (複合/16本杭)
CASE 1-1	22.4	11.7	0.52
CASE 1-2	48.4	29.3	0.60
CASE 2-1	20.6	11.7	0.57
CASE 2-2	45.1	29.2	0.65
CASE 3-1	17.0	11.4	0.65
CASE 3-2	40.6	31.3	0.77
CASE 3-3	86.4	71.5	0.83

物の固有振動数で明瞭なピークを有し、地盤の固有振動数でも卓越している。一方、複合基礎では杭基礎ほど明



(1) 杭基礎 (内部杭)



(2) 複合基礎 (内部杭)

図-9 応力の周波数特性

瞭なピークは認められず、CASE 1-2 および CASE 3-2 ともに地盤の固有振動数付近で卓越しており、そのピーク値は杭基礎の1/4程度である。また、建物の固有振動数ではピークが急減して谷になっている。これは、複合基礎が建物の応答を拘束しているためと考えられる。

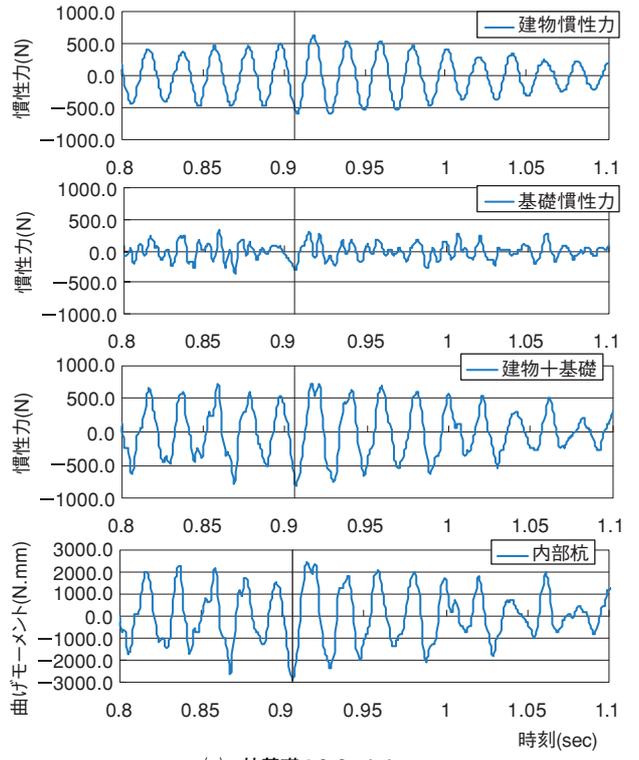
そこで、上部構造物の応答を確認するために、結果を代表してCASE 1-2の杭基礎および複合基礎の建物慣性力、基礎慣性力、全体慣性力（建物+基礎慣性力）、内部杭の杭頭曲げモーメントの時刻歴波形を図-10に示す。なお、内部杭の最大曲げモーメントが発生している時刻（図中、実線）を中心にして、杭基礎では0.8~1.1sec、複合基礎では0.3~0.6secの範囲を拡大して示す。

杭基礎では、内部杭の曲げモーメントが最大となる時刻では、建物と基礎が同位相で挙動しているために、より大きな慣性力が基礎に作用している。一方、複合基礎の建物と基礎は位相ずれが生じているために、内部杭に作用する慣性力は杭基礎に比べて約1/3まで減少している。

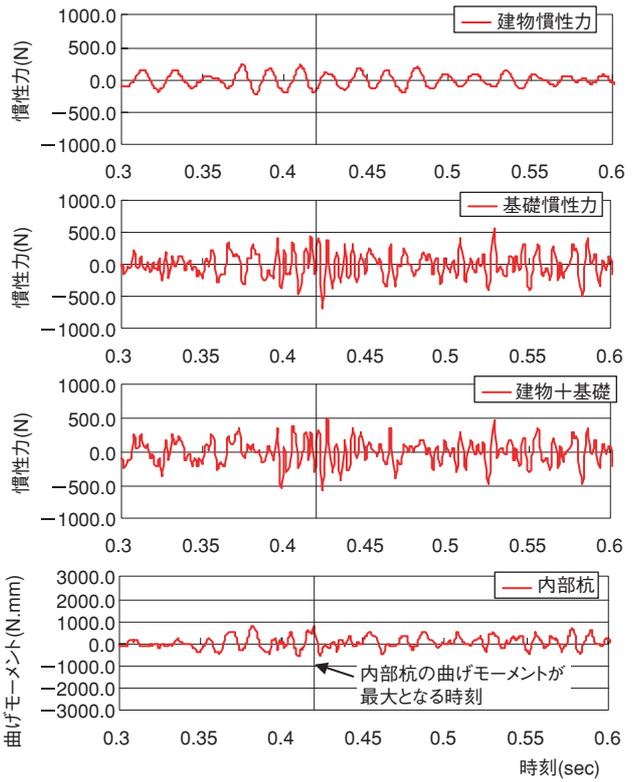
表-2および表-3で示した杭基礎に対して複合基礎の内部杭で応力が抑制された事実は、図-9のスペクトルおよび図-10の時刻歴波形から、杭頭応力が最大となる時刻では基礎に作用する上部構造物からの慣性力が小さくなったためと考えられる。

(3) セン断力分担率

図-8に示した杭基礎の外周杭（×4本）と複合基礎の面外壁（1枚）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



(1) 杭基礎：0.8~1.1sec



(2) 複合基礎：0.3~0.6sec

図-10 時刻歴波形 (CASE 1-2)

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、面内壁の負担が非常に大きいことを示唆していると考えられる。

そこで、基礎に作用する上部構造物からの全体慣性力（建物+基礎）が最大となる時刻の基礎頭部に生じるせん断力分担率を図-11に示す。杭基礎の外周杭および複合基礎の面内壁のせん断力は、基礎に作用している慣性力

からひずみを計測した内部杭4本分、複合基礎ではさらに面外壁2枚分のせん断力を差し引くことによって求めた。なお、図中には基礎に作用している慣性力と基礎各部に生じているせん断力の値(単位:N)を示している。

杭基礎では、内部杭の負担率は15~23%程度となっている。一方、複合基礎の内部杭は2~12%、面外壁では1~7%を負担している。このことから、複合基礎では、基礎に作用している慣性力に対して、大部分が面内壁で負担していることがわかる。なお、複合基礎では、建物の重量が大きくなるほど内部杭の負担が少なくなり、代わって面内壁の負担が増えている。一方、入力加速度に対する影響は認められない結果となった。また、複合基礎の内部杭に生じているせん断力は、実験ケースによって変動が認められるが、杭基礎に対して0.14~0.56程度まで抑制されていることがわかる。

§ 4. まとめ

今回実施した実験範囲内の動的模型振動実験から、以下のことが明らかとなった。

① 複合基礎は杭基礎に比べて、地盤および建物の固有振動数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、地盤と建物の固有振動数が近づくほど建物の応答加速度および応答変位を低減する効果が顕著であった。

② 建物の応答スペクトル比(複合基礎/杭基礎)は、振動数の影響を受け、振動数比が0.6程度まで大きくなると、全周期帯で1以下となった。一方、基礎の応答スペクトル比には振動数比の影響は認められず、全ての実験ケースで、0.4秒より長周期では1以下であった。

③ 複合基礎では、内部杭に生じる曲げモーメントを杭基礎の1/4程度まで抑制する効果が認められた。

④ 複合基礎の内部杭の曲げモーメントが最大となる時刻では、建物と基礎は位相ずれが生じ、基礎に作用する慣性力は杭基礎の約1/3程度となった。

⑤ 上部構造物の慣性力に対する内部杭の負担は、杭基礎では15~23%、複合基礎では2~12%程度であった。また、複合基礎では面内壁の負担が80%以上となっており、その負担率が大きいことがわかった。

今後は、シミュレーション解析を実施するとともに、連壁内部で囲まれた地盤と杭および連壁、ならびに自由地盤(外周地盤)との関係についてさらに詳細に検討する予定である。また、今回報告できなかった静的水平載荷実験結果については、地震力に対する地中連続壁および杭の各部分の抵抗機構(地盤反力、摩擦抵抗)を詳細に検討していく予定である。

さらに、コストパフォーマンスの向上を目指して、例えば、耐震性に対する効果を考慮した上で、地中連続壁長さを最適化したより合理的な工法(特許申請中)など、

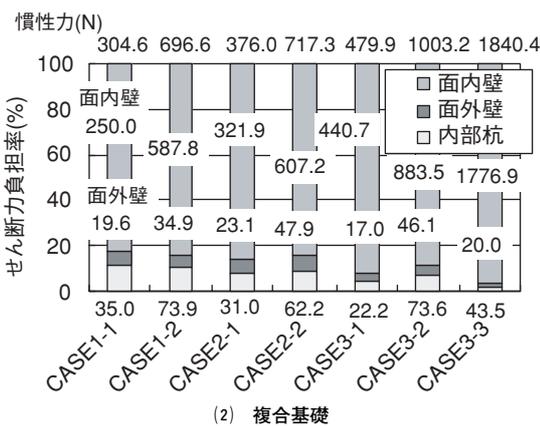
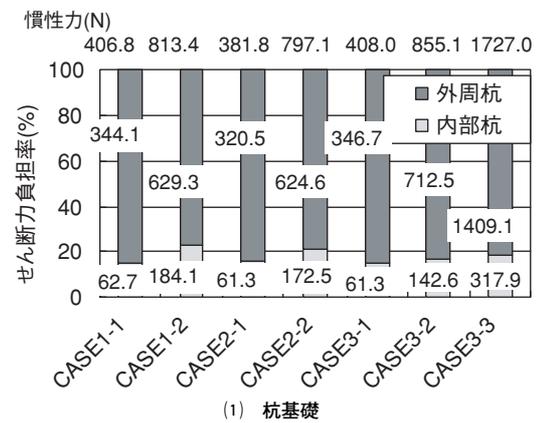


図-11 せん断力分担率

複合基礎工法の耐震性と施工性、コストに関する総合的な検討を進める予定である。

謝辞：本実験の実施にあたって、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、ご指導を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 和泉信之：NewRC以後-新しい高層・超高層RCの傾向，建築技術，pp.144-149，2002. 7.
- 2) 保井美敏ほか：連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験(その1：模型実験地盤の特性)，第38回地盤工学研究発表会，pp.1463-1464，2003. 7.
- 3) 新井寿昭ほか：連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験(その2：実験概要と最大応答結果)，第38回地盤工学研究発表会，pp.1465-1466，2003. 7.
- 4) 保井美敏ほか：連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験(その3：基礎と建物の結果)，2003年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.389-390，2003. 9.
- 5) 新井寿昭ほか：連続地中壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験(その4：連壁応力と杭応力)，2003年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.391-392，2003. 9.