

地中連続壁と杭の複合基礎に関する遠心模型実験（その2）

Centrifuge Model Tests for Composite Foundation of Wall and Pile (Part 2)

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

地中連続壁と杭を併用する複合基礎の一つとして、建物を支持する基礎杭の外周を地中連続壁で囲んだ形式がある。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、静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. 静的遠心模型実験概要
- § 3. 実験結果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

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、場合によっては地盤の変形が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。

複合基礎は、連壁の高い水平剛性によって、基礎や上部構造物の地震時応答を低減できる可能性がある。このようなことから、本研究では、複合基礎の有効性を実験的に検証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。既報^{1)~7)}では、複合基礎の地震時挙動を定量的に把握する目的で実施した動的模型実験および結果について報

告した。本報では、複合基礎の水平抵抗機構を明らかにすることを目的とした静的水平載荷実験概要および結果について述べる。

§ 2. 静的遠心模型実験概要

2-1 実験装置および実験手法

複合基礎は地中深い場所に施工されるために、土の自重による拘束圧の影響が大きくなる。したがって、実験は、動的模型実験と同様に遠心振動載荷装置を用い、50 Gの遠心力場で行った¹⁾。

実験システムを図-1および図-2に示す。実験模型地盤は、土槽内下部に厚さ200mmの台座を設けた大型剛土槽(600mm×600mm, h=500mm)内に、気乾状態の豊浦標準砂を用いて所定の相対密度(Dr=85%)となるよう空中落下法により作製した。ただし、支持層(厚さ50mm)は、空中落下後に治具を用いて転圧し、締め固めた。

模型は動的模型実験と同様のものを用いた。模型化の詳細に関しては、文献¹⁾を参照されたい。模型諸元を表-1に示す。連壁模型(200mm×200mm, h=250mm, t=2.5mm)はアルミ製である。連壁内に設置する4本の杭には、径φ12mmの密実のアルミニウム棒を用いた。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、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

* 技術研究所技術研究部

** 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

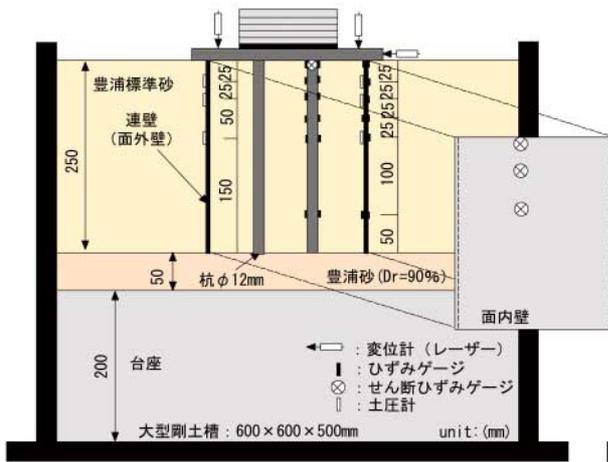


図-1 複合基礎模型断面 (CASE 2-2)

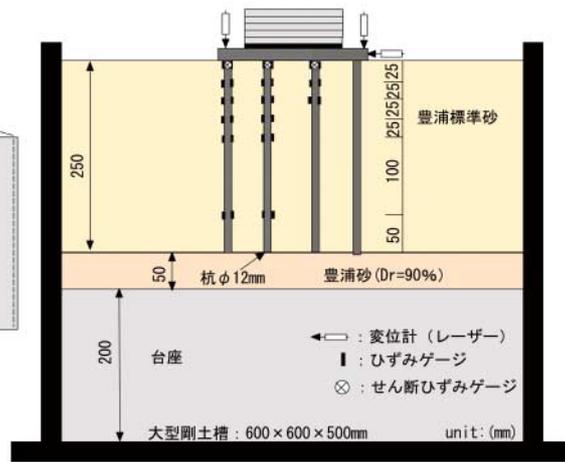


図-2 16本杭基礎模型断面 (CASE 4-2)

表-1 模型諸元

杭基礎	フーチング	材料：アルミ 寸法：250mm×250mm×30mm 重量：45.2N
	杭 (4本×4本)	材料：アルミ 寸法：外周杭(12本) φ10mm, L=250mm 内部杭(4本) φ12mm, L=250mm 重量：外周杭 0.6N/本, 内部杭 1.0N/本 杭間隔：66.7mm(外周杭 6.7D, 内部杭 5.6D)
		フーチング
複合基礎	杭 (2本×2本)	材料：アルミ 寸法：内部杭(4本) φ12mm, L=250mm 重量：内部杭 1.0N/本 杭間隔：66.7mm (5.6D)
		連壁杭

表-2 実験ケース

実験ケース	模型	載荷方法
CASE 1-1	連壁 (面内壁：両面摩擦なし)	正負交番多サイクル
CASE 1-2	連壁 (面内壁：内面摩擦なし)	
CASE 1-3	連壁 (面内壁：両面摩擦あり)	
CASE 2-1	複合基礎 (内部杭：φ12mm, 4本)	一方向載荷
CASE 2-2	(連壁：t 2.5mm)	正負交番多サイクル
CASE 3	4本杭基礎 (内部杭：φ12mm, 4本)	正負交番多サイクル
CASE 4-1	16本杭基礎 (内部杭：φ12mm, 4本) (外周杭：φ10mm, 12本)	一方向載荷
CASE 4-2		正負交番多サイクル

上に設置するものとした。

水平載荷用のジャッキは、杭頭部のフーチングを挟み込むように設置した。ジャッキの能力は、事前検討結果より、最大荷重 40kN、最大ストローク±10mm とした。載荷は、ジャッキの性能および操作性、実験模型の性質などを考慮して、載荷速度：0.375mm/min、荷重保持時間：0.5min の変位制御方式とした。

2-2 実験内容

実験ケースを表-2に示す。連壁のみ、複合基礎、内部4本杭のみ、比較用の16本杭、の4種類に対して、合計8ケースの実験を実施した。連壁のみ(CASE 1)の場合には、面内壁内面と外面の摩擦抵抗機構および面外壁外面と内面の土圧性状を把握することを目的としている。また、複合基礎の内部杭を取り出した4本杭基礎(CASE 3)との剛性を複合基礎(CASE 2)の剛性と比較することによって、内部杭の抵抗機構を検討することも目的としている。複合基礎の比較用である16本杭基礎(CASE 4)は、複合基礎(CASE 2)との水平剛性の違いに着目したものである。CASE 2とCASE 4については、一方向載荷と交番載荷の2ケースずつ実施したが、前者では複合基礎(面内壁、面外壁、内部杭)や

16本杭基礎(内部杭、外周杭)の荷重分担率に着目しているのに対して、後者では特定の杭や連壁に関する深度方向の応力分布に着目している。

2-3 計測方法

主な計測項目は、ジャッキ荷重、フーチング変位、杭および面外壁の曲げひずみ、面内壁のせん断ひずみ、面外壁の土圧である。深度方向の応力分布に着目したCASE 2-2およびCASE 4-2の計測器配置を図-1および図-2に併記した。これに対して分担率に着目したCASE 2-1では、負担せん断力を逆算するために、面内壁、面外壁および全ての杭頭部のひずみを計測した。CASE 4-1でも、内部杭2本、外周杭6本について頭部ひずみを計測した。また、連壁のみのCASE 1では、面外壁の平面位置の違いによる影響を確認するために、中央部、端部、両者の中間部の3箇所まで曲げひずみを計測した。面外壁の土圧については、内外両面で計測した。

2-4 摩擦特性

動の実験結果より、複合基礎の優れた耐震性能は、面内壁の水平剛性に負うところが大きいことが確認されて

いる。そこで、静的実験を実施するにあたって、面内壁の摩擦抵抗に関して、壁面で滑ることなく豊浦砂の内部摩擦角相当の摩擦抵抗を確保するために、壁面を粗面とした。粗面処理方法として、表面粗さ $100\mu\text{m}$ を目標とし、サンドペーパー（＃100）を貼り付ける方法（以下、SP法と称す）および砂粒（豊浦砂）を貼り付ける方法（以下、TS法と称す）の2種類の方法を選定した。

上記2種類の方法により粗面処理した直径60mmの円形試験片に対し、表面粗さを測定した結果を表-3に

表-3 表面粗さ測定結果

	試験片			連壁模型
	TS法 (試験前)	SP法 (試験前)	SP法 (試験後)	SP法 (実験後)
点数	15	15	10	24
平均 (μm)	100.6	93.5	95.4	96.4
標準偏差 (μm)	17.7	24.5	18.1	10.5
変動係数	0.176	0.262	0.189	0.108

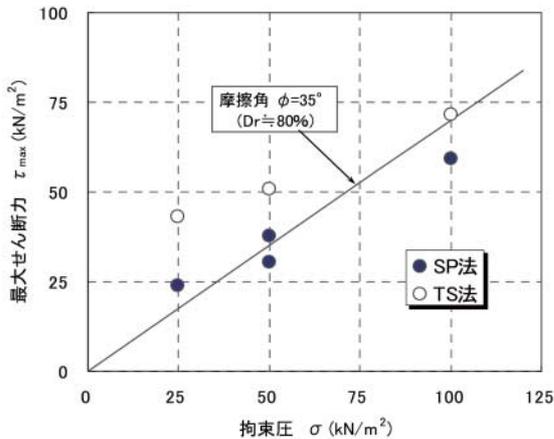


図-3 摩擦試験結果

示す。遠心模型実験に対応する応力レベル ($100\text{kN}/\text{m}^2$ 以下) では、SP法では内部摩擦角と同程度、TS法では内部摩擦角を上回る摩擦抵抗が得られている。この結果より、作業性および粗面の均質性を考慮して、SP法を採用することとした。表-3には、実際に使用した面内壁について8ケースの実験終了後に表面粗さを測定した結果を示すが、試験片の結果と有意な差は認められず、内部摩擦角相当の摩擦抵抗が発揮されたものと考えられる。なお、摩擦抵抗をカットする場合には、連壁表面にグリースを薄く塗布した上に厚さ0.1mmのメンブレンゴムを貼り付け、連壁とメンブレンゴム間で滑らせる方法を採用した。

§ 3. 実験結果

3-1 荷重と変位の関係

各実験ケースの基礎頭部における荷重と変位の関係を図-4に示す。目標値まで1サイクルで載荷したCASE 2-1およびCASE 4-1については、多サイクルで載荷したCASE 2-2およびCASE 4-2の結果を重ねて示す。なお、ここで示した荷重と変位は、所定の遠心加速度を加えた後の値をゼロとしている。また、荷重については、加力装置両側に設置したロードセルの載荷側となる時の値を示している。いずれの結果も概ね対称形を示しており、連壁 (CASE 1) および複合基礎 (CASE 2) では紡錘形の、内部杭 (CASE 3) および杭基礎 (CASE 4) では平行四辺形に近い復元力特性を示している。

各実験のピーク荷重と変位の関係を図-5に、荷重-変位関係から求めた割線剛性と変位の関係を図-6に示

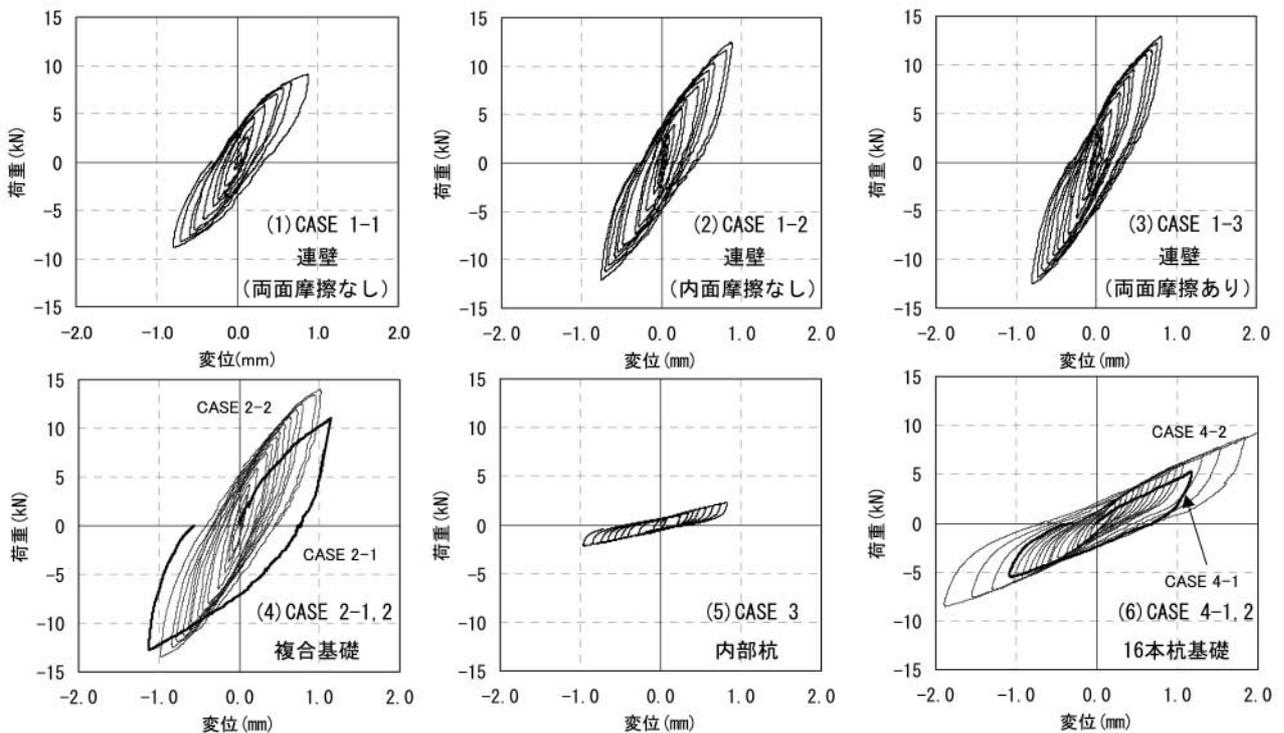


図-4 荷重-変位関係

す。図-4 および図-5 に示した面内壁の摩擦特性を変化させた連壁実験（CASE 1-1~1-3）から、面内壁両面の摩擦をなくしたCASE 1-1の剛性は、CASE 1-2 およびCASE 1-3 に比べて小さく、正方向の処女載荷時ではCASE 1-3の約90%となっている。このCASE 1-1とCASE 1-3の剛性差は、変位が増大するほど大きくなっている。一方、面内壁内面の摩擦をなくしたCASE 1-2の剛性は、CASE 1-3と同程度となっている。これは、連壁で囲まれた内部の地盤が連壁とともに変形しているためと考えられる。このことは、面内壁の外面に比べて内面の摩擦抵抗は非常に小さいことを示唆しているものと考えられる。

次に、複合基礎（CASE 2-2）の剛性は、連壁（CASE 1-3）と内部杭（CASE 3）それぞれの剛性の単純和ではなく、連壁（CASE 1-3）と同程度の剛性となっている。これは、複合基礎では、ボックス状に一体化した連壁の構造的な剛性が大きいこと、また、内部杭周辺の地盤が杭と一体となって変形している⁶⁾ことによるものと考えられる。このことから、複合基礎の内部杭は、抵抗要素として寄与していないことがわかる。また、杭基礎（CASE 4-2）の水平剛性は複合基礎（CASE 2-2）や連壁（CASE 1-3）の40%程度であり、このことから連壁の水平剛性が大きいことが示唆される。なお、内部杭（CASE 3）の剛性は杭基礎の40%程度となっている。

次に、目標値まで1サイクルで載荷した実験では、複合基礎および杭基礎ともに、多サイクル載荷実験に比べて、若干剛性が低下している。1サイクル載荷実験時の最大変位と同程度の変位を示す多サイクル載荷実験時の剛性を比較すると、複合基礎では30%程度、杭基礎では20%程度低下している。

図-6 に示した割線剛性と変位の関係では、いずれの実験ケースも変位の増大とともに割線剛

性が低下しており、変位が大きくなるほど割線剛性の低下率は小さくなっている。特に剛性の小さい内部杭と杭基礎でその傾向が顕著である。

3-2 荷重分担率

連壁および複合基礎の載荷ステップごとの荷重分担を図-7に示す。ここで、面内壁のせん断力は中央位置に設置したせん断ひずみゲージから、面外壁および杭のせん断力は上部2点間における曲げモーメント差と計測距離との関係から求めた。載荷荷重と計測値から求めた全体のせん断力とは概ね整合していることを確認している。

連壁基礎では、全体荷重の89~94%を面内壁が負担している。CASE 1-1の面内壁分担はCASE 1-3に比べて約4%低くなっており、摩擦抵抗の影響が現れているが、全体剛性に対してその影響は小さい。また、複合基礎では面内壁92%程度、面外壁5%程度、内部杭は3%程度 の分担率となっており、面内壁と面外壁の分担割合は連壁基礎（CASE 1-3）とほぼ同様の傾向を示している。これは、複合基礎の内部杭の分担率が小さいためと考えられる。

3-3 内部杭の曲げモーメント

(1) 深さ方向分布

複合基礎（CASE 2-2）と杭基礎（CASE 4-2）の正負交番多サイクル実験の曲げモーメント比較位置を図-8に示す。以降の検討では、加力方向に対して計測位置

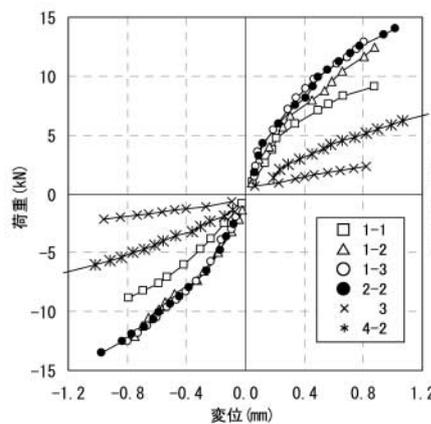


図-5 ピーク荷重-変位関係

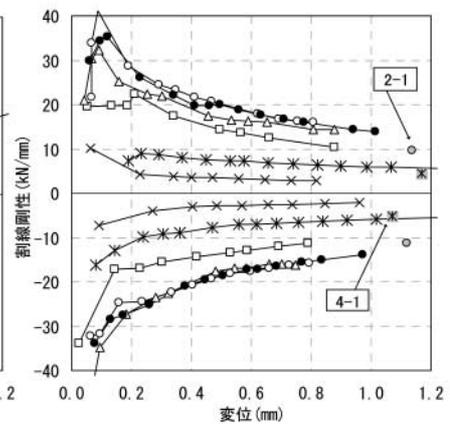


図-6 割線剛性-変位関係

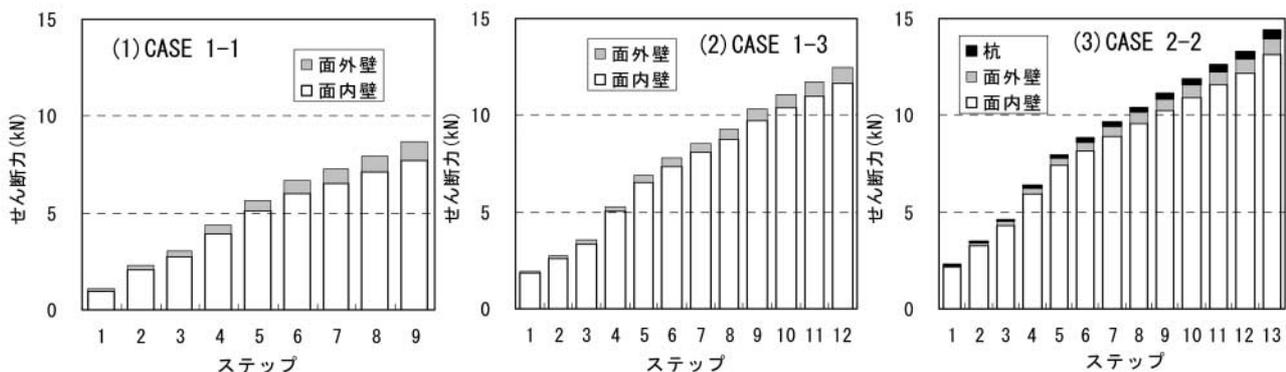
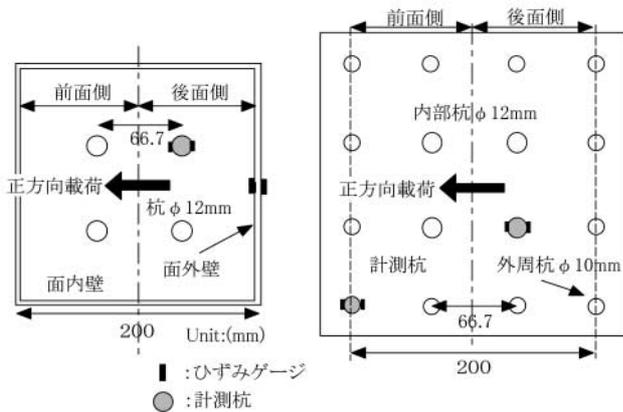


図-7 載荷ステップごとの荷重分担

が中心より前部分（以降、前面側と称す）と、中心より後部分（以降、後面側と称す）に分けている。曲げモーメントの符号は正負交番载荷で反転するため、一連の比較では頭部が正符号となるように合わせている。複合基礎（CASE 2-2）および杭基礎（CASE 4-2）の内部杭（前面側）の曲げモーメントを図-9に示す。両者とも杭頭固定条件に対応した地中曲げモーメント分布を示すが、载荷荷重に対する曲げモーメントの大きさは、杭基礎の方が大きい。

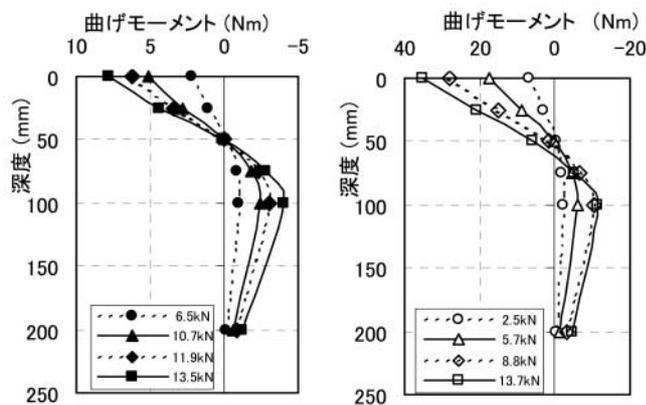
次に、複合基礎（CASE 2-2）と杭基礎（CASE 4-2）の内部杭に関して、前面側・後面側それぞれに同程度の载荷荷重で比較した曲げモーメントを図-10に示す。同程度の载荷荷重では、前面側・後面側ともに複合基礎の曲げモーメントが小さく、図-10に示した荷重では、杭頭曲げモーメントでみると、複合基礎は杭基礎の0.10~0.15程度となっている。この原因としては、複合基礎では、周囲を囲んだ連壁の剛性が大きく、载荷荷重の大部分が連壁で負担され、杭に大きな力が作用していないこと等が考えられる。

図-11に、複合基礎と杭基礎の正負荷重について内部杭曲げモーメント（前面側と後面側）を示す。いずれも、前面側が後面側より多少大きくなっている。



(1) 複合基礎 (CASE 2-2) (2) 杭基礎 (CASE 4-2)

図-8 曲げモーメント分布比較位置



(1) 複合基礎 (CASE 2-2) (2) 杭基礎 (CASE 4-2)

図-9 内部杭の曲げモーメント分布 (前面側)

(2) 杭頭曲げモーメント

杭基礎 (CASE 4-2) の内部杭に対する複合基礎 (CASE 2-2) の内部杭（前面側および後面側）杭頭曲げモーメント比について、载荷荷重毎を図-12に、基礎変位毎を図-13に示す。なお、杭頭曲げモーメントは载荷荷重で基準化している。平均的には変位による比が大きいものの、複合基礎の杭基礎に対する内部杭の杭頭曲げモーメントは、概ね0.1~0.25程度で、動の実験結果¹⁾の0.25と同等か小さな値となっている。

3-4 面外壁と外周杭の曲げモーメント

複合基礎の面外壁 (CASE 2-2) と杭基礎の外周杭 (CASE 4-2) のそれぞれ前面側での曲げモーメントを図-14に示す。面外壁は中心位置の曲げひずみを全断面積分に、外周杭はコーナー杭を4倍（本数倍）し全断面積分にして示している。外周杭は内部杭と同様な分布性状となっているのに対し、面外壁は地中最大曲げモーメントの位置が内部杭よりも地表近くで現れており、分布性状が異なっている。このように、面外壁の単位幅当たりの曲げ剛性が小さい影響が現れている。

面外壁と外周杭の正負荷重での前面側と後面側の曲げモーメントを図-15に示す。杭基礎の外周杭は前面側が後面側より多少大きな値である。一方、面外壁は、前

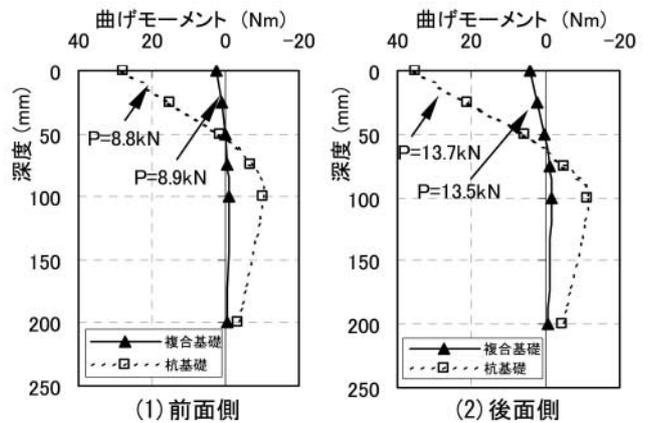
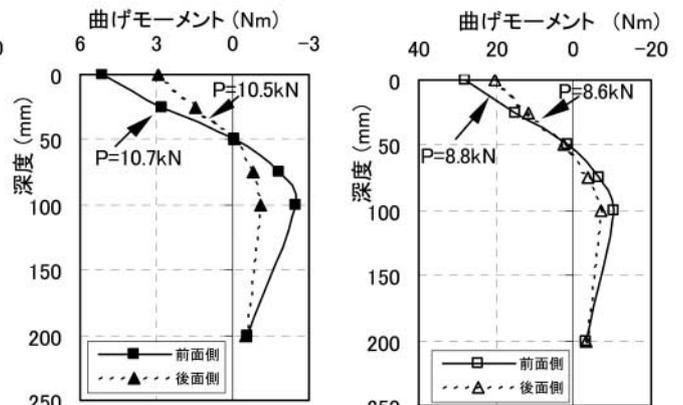


図-10 内部杭の曲げモーメント分布 (基礎形式の比較)



(1) 複合基礎 (正負荷重) (2) 杭基礎 (正負荷重)

図-11 内部杭の曲げモーメント分布 (前・後面側比較)

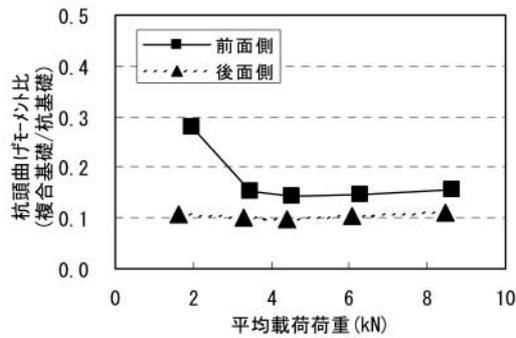


図-12 載荷荷重に対する内部杭の杭頭曲げモーメント比

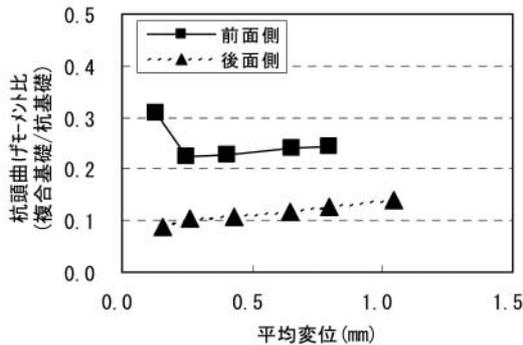


図-13 基礎変位に対する内部杭の杭頭曲げモーメント比

面側が後面側の3倍以上の頭部曲げモーメントとなっており、外周地盤が受働抵抗として作用することが考えられる。

§4. まとめ

今回実施した静的水平載荷実験から、以下のことが明らかとなった。

- (1) 複合基礎では、ボックス状に一体化した連壁の構造的な剛性が大きいことから、連壁 (CASE 1) と複合基礎 (CASE 2) では顕著な剛性の差異は認められず、複合基礎 (CASE 2) と杭基礎 (CASE 4) では剛性差が大きい。また、連壁の面内壁内面の摩擦抵抗および複合基礎の内部杭は、抵抗要素としては非常に小さい。
- (2) 複合基礎、連壁基礎ともに、全体荷重の大部分を面内壁で分担しており、面内壁と面外壁の分担率は概ね同様の傾向を示している。
- (3) 複合基礎内部杭の杭頭曲げモーメントは、杭基礎内部杭の杭頭曲げモーメントに対して、載荷荷重、基礎変位による比較で、概ね0.1~0.25となった。
- (4) 面外壁の曲げモーメントは、内部杭とは異なった分布性状であり、複合基礎の頭部曲げモーメントは、前面側が後面側の3倍以上となった。

本報告は、西松建設・戸田建設共同研究プロジェクトにおいて実施されたものである。本プロジェクトの共同研究者である戸田建設技術研究所：伊勢本昇昭氏、保井美敏氏、金子治氏、構造設計部：流田隆氏、東口剛氏に深甚なる謝意を表します。

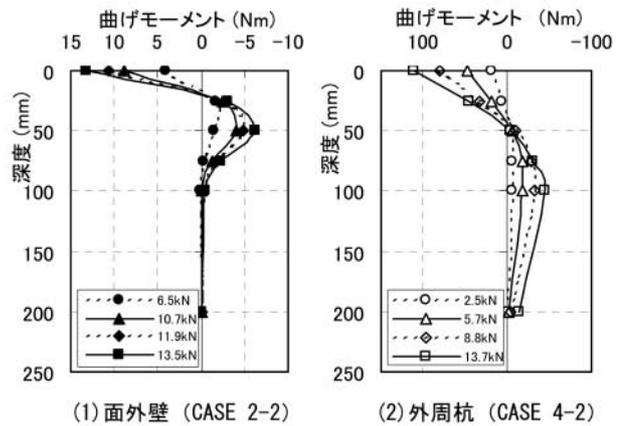


図-14 面外壁及び外周杭の曲げモーメント分布（位置比較）

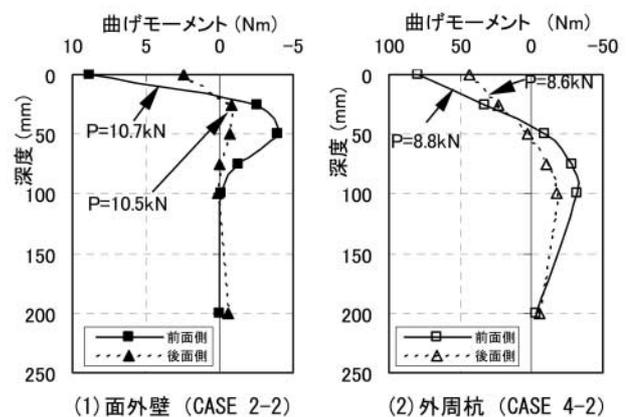


図-15 面外壁及び外周杭の曲げモーメント分布（位置比較）

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) 新井寿昭ほか：地中連続壁と杭の複合基礎に関する遠心模型実験，西松建設技報，VOL. 27，pp. 25-30，2004.
- 2), 3) 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），（その2），第38回地盤工学研究発表会，pp. 1463-1466，2003. 7.
- 4), 5) 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），（その4），2003年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 389-392，2003. 9.
- 6), 7) 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5），（その6），第39回地盤工学研究発表会，pp. 1773-1776，2004. 7.
- 8) ~10) 伊勢本昇昭ほか：連続地中壁と杭の複合基礎に関する静的遠心模型実験（その1）~（その3），2004年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 489-494，2004. 8.