

連続地中壁と杭の複合基礎に関する静的遠心模型実験

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。このような複合基礎の抵抗機構を明らかにする目的で、遠心载荷装置を用い、連続地中壁杭と円形杭の複合基礎、連壁のみの基礎及び複合基礎の比較対象とする杭基礎について静的実験を行った。その結果以下のような結論が得られた。

1. 複合基礎は、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、連壁と複合基礎では顕著な剛性の差異は認められず、複合基礎と杭基礎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、载荷荷重、基礎変位による比較で、ほぼ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。

Static 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 static centrifuge model tests for composite foundation and pile foundation. The results are summarized as follows ;

1. For a box-type diaphragm wall, the rigidities of diaphragm wall foundation and composite foundation are nearly equal. The composite foundation is large rigidity to a pile foundation. The inner friction of parallel direction wall and inner pile are very small resistance for a load
2. Both composite foundation and diaphragm wall foundation, the resistance is mainly parallel direction wall for load, they are same ratio of resistance for load parallel direction wall to perpendicular direction wall.
3. The inner pile head bending moments ratio of composite foundation to pile foundation are about 0.1～0.25.
4. The bending moment distribution of perpendicular wall is different from inner pile, the head moment ratio of front to back for load direction are three times

*¹技術研究所 *²構造設計部*¹Technical Research Institute *²Structural Engineering Dept.

連続地中壁と杭の複合基礎に関する静的遠心模型実験

保井 美敏 伊勢本昇昭
金子 治 流田 隆
東口 剛

1. はじめに

複合基礎は、建物を支持する基礎杭の外周部をボックス状に配置した連続壁で取り囲んだ工法である。連続壁の高い水平剛性により、応答変位の低減効果や液状化対策効果が期待できるだけでなく、上部構造の揺れを低減できる可能性がある。筆者等は、このような複合基礎の有効性を実験的に検証する目的で、遠心载荷装置を用いた動の実験を実施し、その結果について報告した^{1)~6)}。

引続き、比較用の杭基礎との水平剛性の違いを確認すると共に、地震力に対する連続壁および連続壁に囲まれた内部地盤や内部杭の挙動を把握し、複合基礎としての抵抗機構を明らかにする目的で、動の実験と同様に50Gの遠心力場における静的実験を実施した^{7)~9)}。本報告では、実験概要、要素試験として実施した面内壁に関する摩擦試験結果及び実験結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 模型および地盤概要

図-1、図-2は、それぞれ複合基礎と比較用の16本杭基礎の模型および土槽の断面を示す。大型の剛土槽(600mm×600mm、高さ500mm：下部200mmは台座)を使用し、模型は動の実験に使用したものと同一アルミ製である。模型の諸元を一覧して表-1に示す。杭および連壁の頭部はフーチングに剛接合し、先端部は支持層上に設置している。载荷用のジャッキは、杭頭部のフーチングを挟込むように設置し、能力は事前検討結果より、最大载荷重40kN、最大ストローク±10mmとした。

地盤材料には、気乾状態の豊浦標準砂を使用し、空中落下法により所定の相対密度(85%前後)の地盤を作成した。ただし、支持層(厚さ50mm)は、落下させた後治具を用いて転圧して締固めた。

2.2 実験ケース

実験ケースを一覧して、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、合計8ケースの実験を実施した。連壁のみの場合(CASE1)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、複合基礎の内部杭だけを取り出した4本杭(CASE3)との剛性相和を複合基礎(CASE2)の剛性

表-1 模型の諸元

基礎種別	部材名	諸元	
		材料	寸法・重量
杭基礎	フーチング	材料：アルミ	寸法：250mm×250mm×30mm 重量：45.2N
		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)
	複合基礎	フーチング	材料：アルミ 寸法：250mm×250mm×30mm 重量：49.6N
		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	材料：アルミ 寸法：200mm×200mm×250mm, t=2.5mm 重量：15.0N		

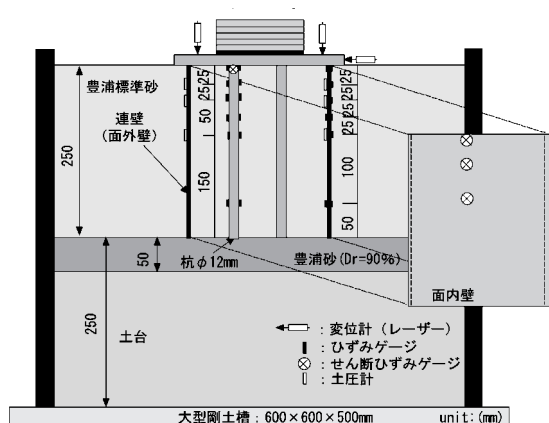


図-1 複合基礎模型断面 (CASE2-2)

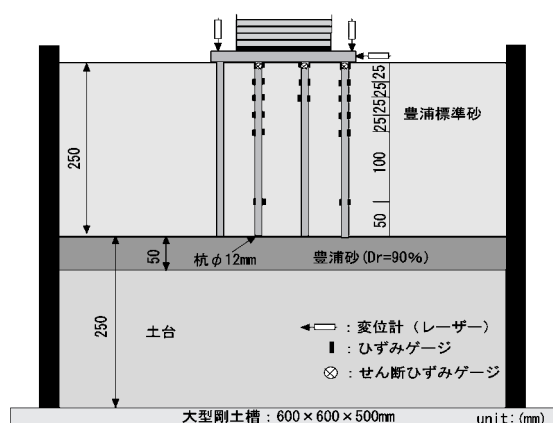


図-2 16本杭基礎模型断面 (CASE4-2)

表-2 試験ケース一覧

実験ケース	模型	载荷方法	検討項目
CASE1-1	1)連壁模型 (面内壁：両面摩擦なし)	正負交番多サイクル	・面内壁外面の摩擦抵抗 ・面内壁内面の摩擦抵抗
CASE1-2	2)連壁模型 (面内壁：内面摩擦なし)		・面外壁および面内壁の深さ方向応力分布 ・面外壁と面内壁の荷重分担 ・面外壁外面と内面の土圧性状
CASE1-3	3)連壁模型 (面内壁：両面摩擦あり)		・面外壁頭部における隅角部と中央部の応力性状
CASE2-1	複合基礎 (内部杭：φ12mm, 4本) (外周壁：t2.5mm)	一方向载荷	・複合基礎頭部の荷重分担 〔杭、面内壁、面外壁〕 ・内部杭の杭頭応力 〔16本杭(CASE4-1)との比較〕
CASE2-2	複合基礎 (内部杭：φ12mm, 4本) (外周壁：t2.5mm)	正負交番多サイクル	・複合基礎の深さ方向応力分布 ・内部杭の応力分布 〔16本杭(CASE4-2)との比較〕 〔4本杭(CASE3)との比較〕
CASE3	4本杭基礎 (φ12mm, 4本)	正負交番多サイクル	・4本杭の深さ方向応力分布 〔連壁(CASE1-3)+4本杭(CASE3)と複合基礎(CASE2-2)との比較〕
CASE4-1	16本杭基礎 (内部杭：φ12mm, 4本) (外周杭：φ10mm, 12本)	一方向载荷	・群杭(8/16本)における荷重分担 〔内部杭と外周杭の相違〕
CASE4-2	16本杭基礎 (内部杭：φ12mm, 4本) (外周杭：φ10mm, 12本)	正負交番多サイクル	・内部杭と隅杭の深さ方向応力分布 ・地盤、杭の非線形挙動

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。また、比較用の16本杭(CASE4)は、複合基礎(CASE2)との水平剛性の違いに着目したものである。CASE2とCASE4については、1方向载荷と交番载荷の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；以降「杭基礎」と称す)の荷重分担率に着目しているのに対し、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。いずれも、载荷速度：0.375mm/min、荷重保持時間：0.5minの変位制御方式とした。

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

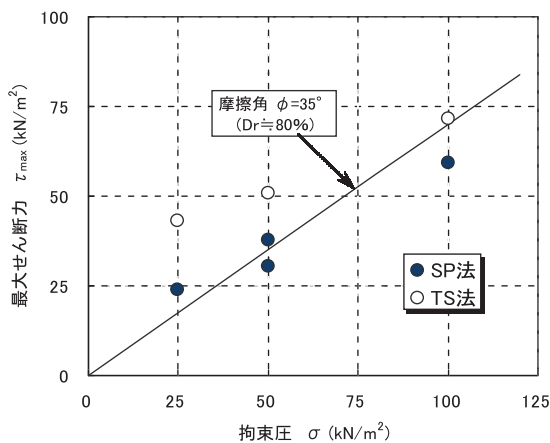


図-3 摩擦試験結果

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。図-1、図-2には、それぞれ深度方向の応力分布に着目したCASE2-2およびCASE4-2の計器配置を示す。これに対し分担率に着目したCASE2-1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について頭部ひずみを測定した。CASE4-1でも、内部杭2本、外周杭6本について頭部ひずみを測定した。また、連壁のみのCASE1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箇所曲げひずみを測定した。面外壁の土圧については、内外両面で測定した。

3. 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当たっても、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は、表面粗さ100μmを目標とし、サンドペーパー(#100)を貼付ける方法(以下SP法)および砂粒(豊浦砂)を貼付ける方法(以下TS

法)の2種類の方法を選定した。

表-3は、上記2種類の方法により粗面処理した直径60mmの試験片に対し、表面粗さを測定した結果を示す。さらに一面せん断試験機を用い、拘束圧と摩擦抵抗の関係を調べるための摩擦試験を実施し、その結果を図-3に示す。実験に対応する応力レベル(100kN/m²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7ケースの実験終了後に表面粗さを測定した結果も示すが、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、壁面にグリースを薄く塗布した上に厚さ0.1mmのメンブレンを貼付ける方法を採用した。

4. 実験結果

4.1 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サイクルで荷重したCASE 2-1およびCASE 4-1については、多サイクルで荷重した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0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荷重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。

各実験ケース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、正方向の処女荷重時ではCASE 1-3の約80%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⁹⁾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、内部杭のみ(CASE 3)の剛性は杭基礎の40%程度となっている。

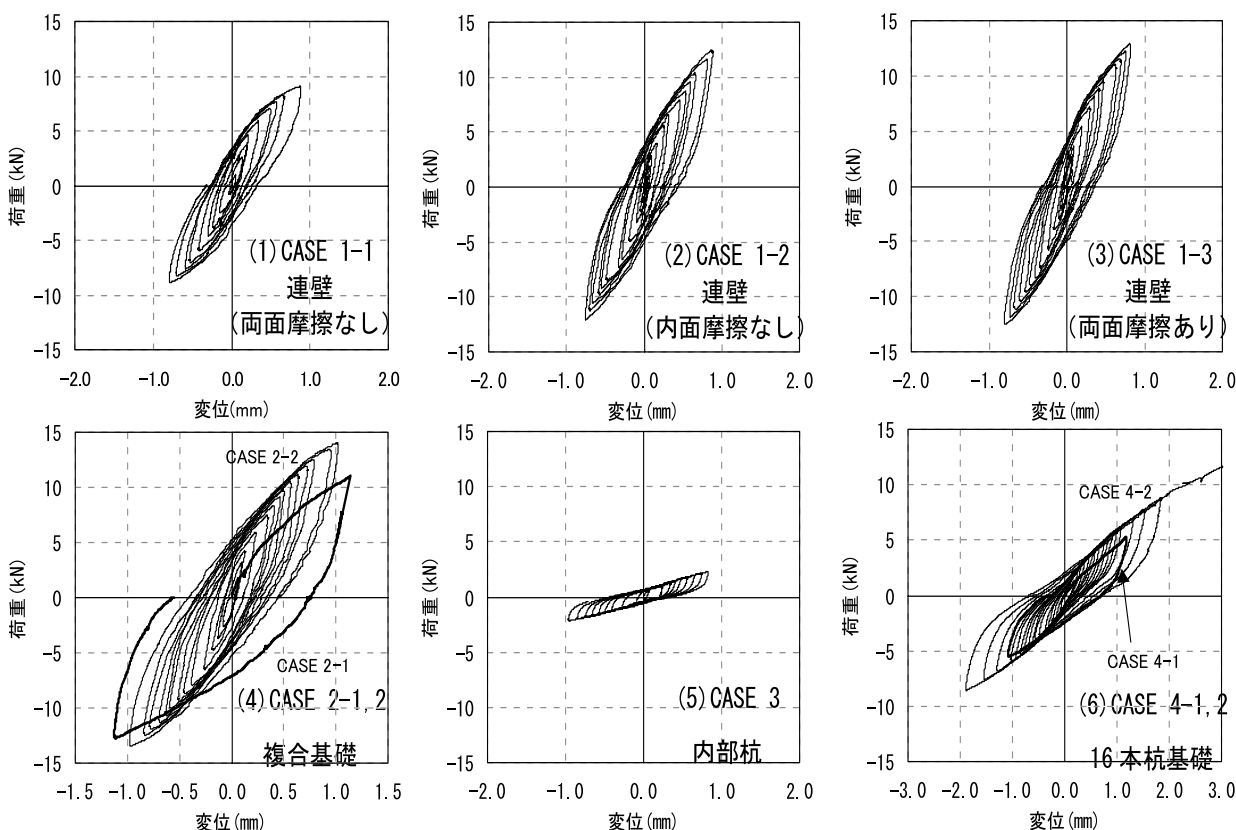


図-4 荷重-変位関係

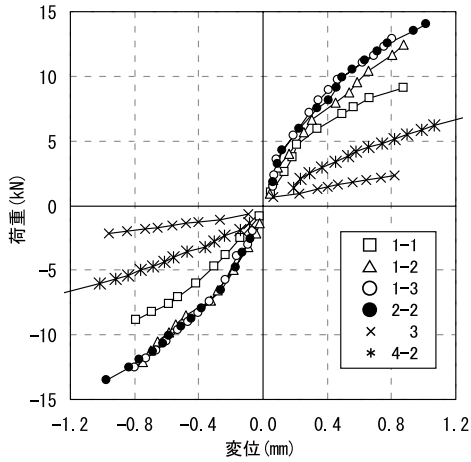


図-5 ピーク荷重-変位関係

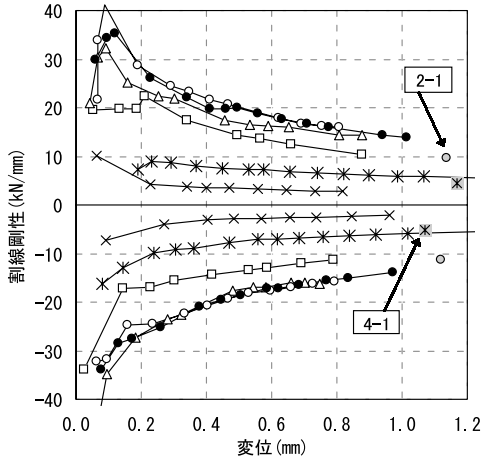


図-6 割線剛性-変位関係

次に、目標値まで1サイクルで载荷した実験では、複合基礎および杭基礎ともに、多サイクル载荷実験に比べて、若干剛性が低下している。1サイクル载荷実験時の最大変位と同程度の変位を示す多サイクル载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にともなって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。

4.2 荷重分担率

連壁および複合基礎の载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。载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%を面内壁が分担している。CASE 1-1の面内壁分担は、CASE 1-3に比

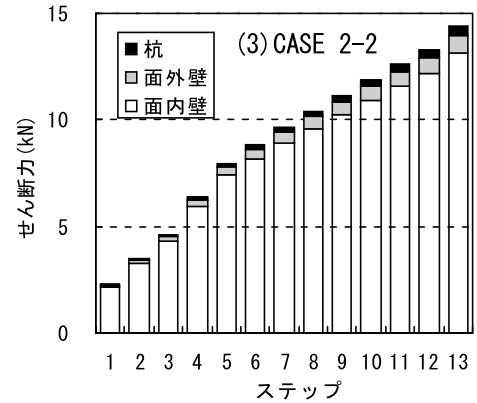
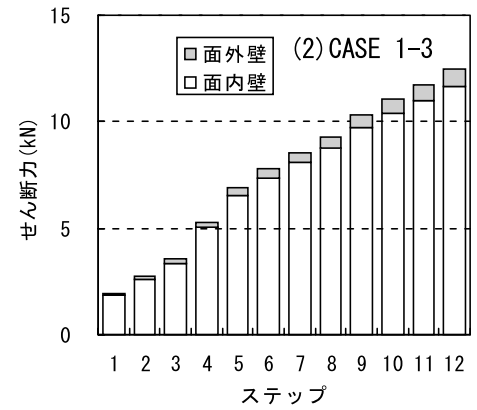
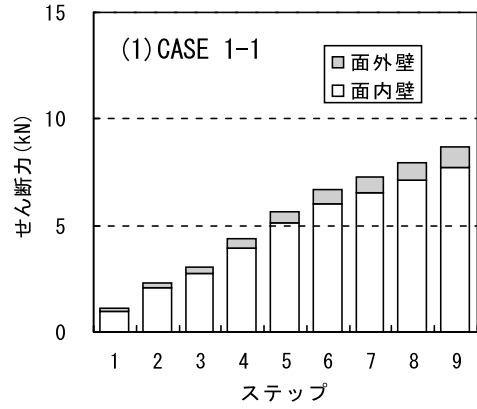


図-7 载荷ステップごとの荷重分担

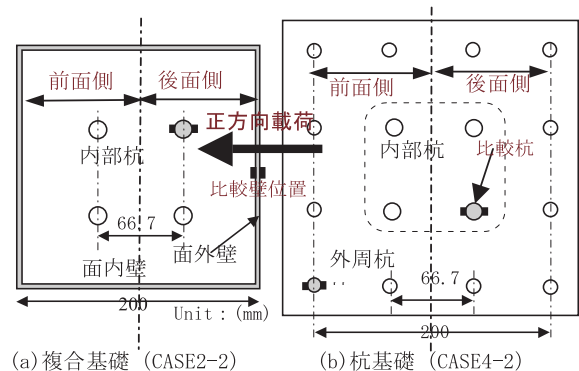


図-8 曲げモーメント分布比較位置

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。

4.3 内部杭の曲げモーメント

複合基礎（CASE2-2）と杭基礎（CASE4-2）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、計測位置が中心より前部分（以降「前面側」と記す）と、中心より後部分（以降「後面側」と記す）に分けている。曲げモーメントの符号は正負荷重で反転するため、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（CASE2-2）及び杭基礎（CASE4-2）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、載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（CASE2-2）と杭基礎（CASE4-2）の内部杭に関して、同等の載荷荷重での曲げモーメントを前面側・後面側で比較して図-10に示す。同等の載荷荷重では、前面側・後面側とも、複合基礎の曲げモーメントが小さく、図-10の荷重では、杭頭曲げモーメントでみると、複合基礎は杭基礎の0.1~0.15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、載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。いずれの基礎も、前面側が後面側より多少大きくなっている。

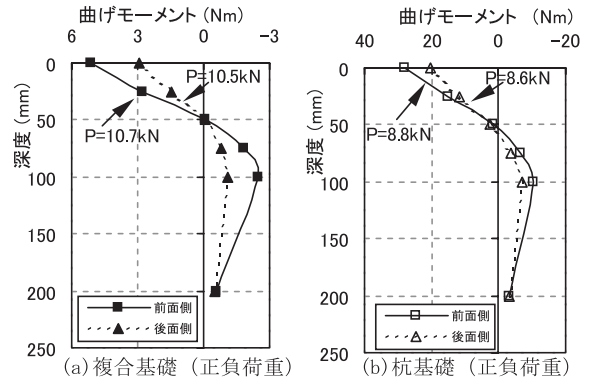


図-11 内部杭の曲げモーメント分布（前・後面側比較）

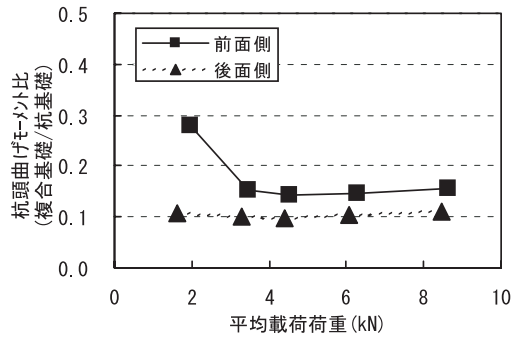


図-12 載荷荷重に対する内部杭の杭頭曲げモーメント比

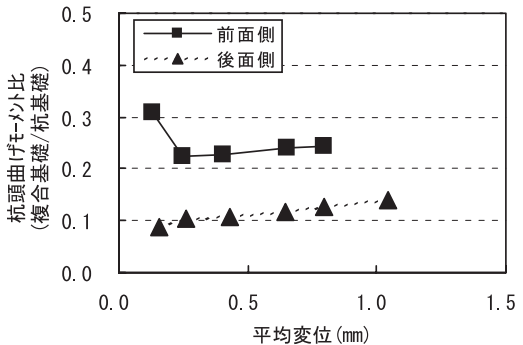


図-13 基礎変位に対する内部杭の杭頭曲げモーメント比

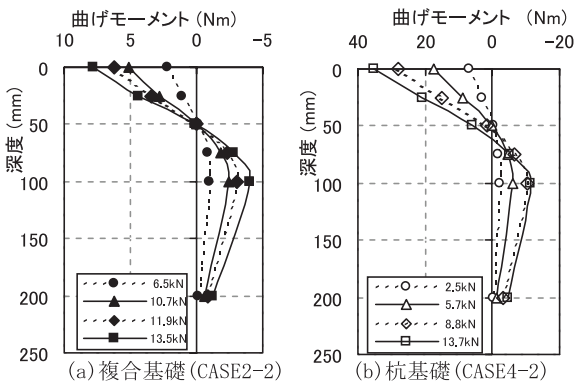


図-9 内部杭の曲げモーメント分布（前面側）

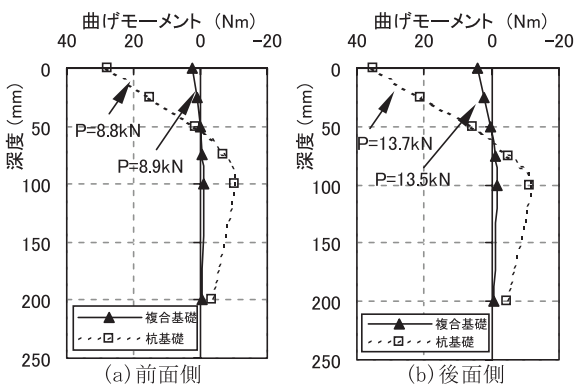


図-10 内部杭の曲げモーメント分布（基礎形式比較）

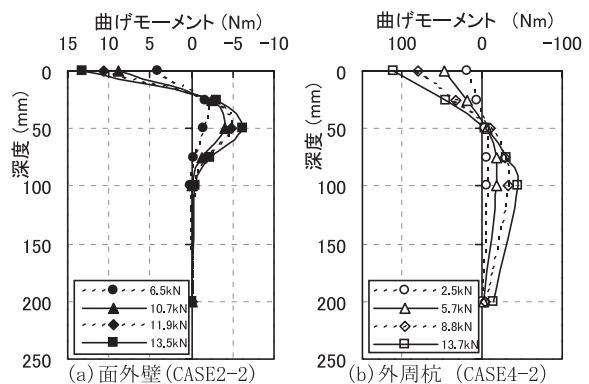


図-14 面外壁及び外周杭の曲げモーメント分布（前面側）

杭基礎（CASE4-2）の内部杭に対する複合基礎（CASE2-2）の内部杭（前面側及び後面側）杭頭曲げモーメントの比を載荷荷重ごとで図-12、基礎変位ごとで図-13に示す。杭頭曲げモーメントは載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、ほぼ0.1～0.25程度で、動的实验結果¹⁾の0.25と同等か小さな値となっている。

4.4 面外壁と外周杭の曲げモーメント

複合基礎の面外壁（CASE2-2）と杭基礎の外周杭（CASE4-2）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しているのに対し、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、分布性状が異なる。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について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、前面側が後面側の3倍以上の頭部曲げモーメントとなっ

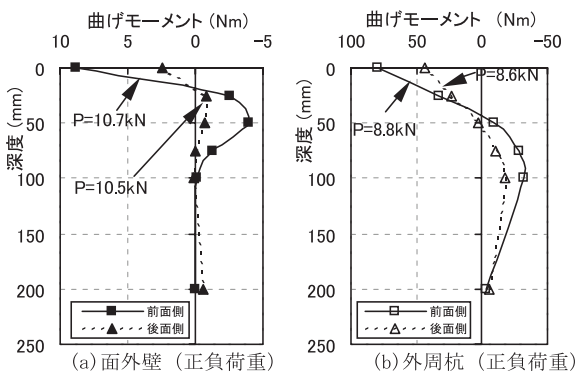


図-15 面外壁及び外周杭の曲げモーメント分布 (位置比較)

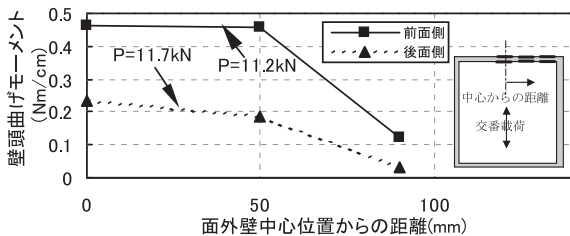


図-16 面外壁の頭部曲げモーメント分布 (連壁基礎CASE1-3)

ており、外周地盤が受働抵抗として作用していることが考えられる。

連壁基礎（CASE1-3）での正負荷重時の面外壁について中心位置から端部までの頭部曲げモーメント分布を1cmの単位幅当たりにして図-16に示す。前面側、後面側とも中心から50mmまではほとんど変化せず、端部で面内壁の拘束を受け小さな曲げモーメントとなっている。

5. まとめ

一連の静的実験結果から、以下の結論が得られた。

- 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、連壁と複合基礎では顕著な剛性の差異は認められず、複合基礎と杭基礎では剛性差が大きい。また、連壁の面内壁内面の摩擦抵抗及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、ほぼ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)、2) 保井、新井他：連続壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験（その1～2）、第38回地盤工学研究発表会、2003
- 3)、4) 保井、新井他：連続壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験（その3～4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003
- 5)、6) 保井、新井他：連続壁と杭の複合基礎に関する動的遠心模型実験（その5～6）、第39回地盤工学研究発表会、2004
- 7)、8)、9) 伊勢本、新井、保井他：連続壁と杭の複合基礎に関する静的遠心模型実験（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004