

地盤条件を考慮した連続地中壁と杭による複合基礎に関する研究

保井 美敏^{*1}

金子 治^{*1} 伊勢本昇昭^{*1}
 東口 剛^{*2} 流田 隆^{*2}
 佐野 大作^{*1}

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。軟弱層の下位にN値から判断する限り杭の支持層としては不十分であるが比較的剛性の大きな中間層があり、その下位に支持層が堆積するような地盤を対象にした複合基礎に関する検討を実施した。このような地盤では、水平剛性の大きな連壁を、支持地盤まで根入れせず中間層までとし、鉛直支持力は杭に負担させることが複合基礎の合理化に繋がることから、中間層までの連壁（改良型複合基礎）とした場合について解析的に検討した。その結果以下のような結論が得られた。

- 1) 杭基礎に対する複合基礎の頭部水平変位量の減少割合は連壁の長さに依存し、中間層の影響はほとんど受けない。連壁長さ15mの改良型複合基礎の頭部水平変位量は、杭基礎に対し大きく減少し、41mのオリジナル複合基礎に対し2倍以下となる。
- 2) 基礎部の最大加速度応答値は、改良型複合基礎では、杭基礎の8割程度の値となる。
- 3) 杭基礎では剛性が変化する中間層に応力集中するのに対し、改良型複合基礎では応力集中は小さくなる。
- 4) 軟弱層が支持地盤まで続き中間層が存在しない地盤で連壁を短くすると、杭の連壁先端部位置で最大曲げモーメント程度の大きさの応力集中が生じる。

Study on Composite Foundation of Wall and Piles Considering Site Ground Condition

Mitoshi YASUI^{*1} Noriaki ISEMOTO^{*1}
 Osamu KANEKO^{*1} Takashi NAGAREDA^{*2}
 Tsuyoshi HIGASHIGUCHI^{*2} Daisaku SANNO^{*1}

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 rational application for composite foundation and pile foundation considering site ground condition. The results are summarized as follows;

- 1) The static lateral displacement ratio composite foundation to a pile foundation depends on length of wall. The displacement of foundation for 15m length of wall is twice the one for 41m length of wall.
- 2) The maximum response acceleration for a composite foundation of 15m length wall is under 80% that for the pile foundation.
- 3) For the concentration of bending moment on pile, the pile foundation occur at the boundary of soft soil and hard soil, the composite foundation of the 15m length dose not occur.
- 4) On the soft ground site, the composite foundation for 15m length wall occur contrition of bending moment at the edge of wall. The value of concentration bending moment is nearly same one of maximum pile bending moment.

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 構造設計部

^{*1} Technical Research Institute ^{*2} Structural Engineering Dept.

地盤条件を考慮した連続地中壁と杭による複合基礎に関する研究

保井 美敏^{*1} 伊勢本昇昭^{*1}
 金子 治^{*1} 流田 隆^{*2}
 東口 剛^{*2} 佐野 大作^{*1}

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地中壁（以降「連壁」と称す）で取り囲んだ工法である。連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。筆者らは、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)}。また、複合基礎と比較用の杭基礎との水平剛性の違いを確認するとともに、地震力に対する連壁および連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、遠心力場における静的実験を実施し、静的な抵抗機構について明らかにしてきた^{7)~9)}。

本報告では、連壁と杭の特性を考慮した地盤条件に応じた複合基礎の合理的な適用を目的として、有限要素モデルを用いた静的解析による基礎変位量に関する検討、2次元弾性FEMによる動的效果に対する検討¹⁰⁾を解析的に行った。

2. 地盤条件を考慮した複合基礎の概念

連壁と杭の複合基礎において、地震時水平力の大部分は連壁が負担している。ここでは、連壁と杭の特性を利用し、連壁を短くした複合基礎（以降「改良型複合基礎」と称す。）について検討した。しかし、水平抵抗力を大きくするため、外周に比較的短い地中補強壁を設置した文献では、外周壁下端部位置での杭への応力集中が報告されている¹¹⁾。このようなことから、ここでは、地盤構成を考慮し、一連の検討を実施することとした。

具体的な地盤条件として、図1に示すような、N値から判断する限り杭の支持層としては不十分であるが比較

的剛性の大きな中間層（以降「中間層」と称す）が軟弱層の下位にあり、更にその下位にN値50を超える安定した支持層が堆積するような地盤を対象にした。このような地盤では、水平剛性の大きな連壁を、支持地盤まで根入れ（図1(a)）せず中間層まで（図1(b)）とし、鉛直支持力は杭に負担させることで、連壁の水平抵抗力を減少させることなく、連壁（主として水平力負担）と杭（主として鉛直力負担）の特性を生かした複合基礎が適用できる可能性が大きい。ここでは、中間層までの長さの連壁と支持層に根入れした杭の複合基礎（図1(b)：改良型複合基礎）の有効性について、連壁を支持層に根入れした複合基礎（図1(a)：以降「オリジナル複合基礎」と称す）及び杭基礎（水平力、鉛直力ともに杭で負担）と比較検討する。

3. 有限要素モデルを用いた静的解析による検討

検討対象とする中間層が存在する地盤構成は表1に示す通り、14m以深に中間層、40m以深に支持層を想定しており、中間層から深度方向に剛性が大きくなる構成（CASE1）と中間層の下にやや剛性の小さい層が存在する（CASE2）地盤構成とした。また、比較のために中間層がない地盤構成（CASE3）も検討した。

表1 検討対象地盤構成

| 深さ(m) | CASE1 : CASE2 : CASE3 | | |
|-------|-----------------------|-----|-----|
| | Vs(m/s) | | |
| 0-14 | 120 | 120 | 120 |
| 14-25 | 250 | 350 | 120 |
| 25-40 | 300 | 200 | 120 |
| 40- | 450 | | |

対象複合基礎の平面形状は42m×42mで、厚さ1.5mの連壁と軸径2.5mの内部杭で構成されている。内部杭の間隔は6.0mである。解析モデルは図2に示す1/4断面の有限要素モデルを用いており、弾性解析を実施した。改良型複合基礎は軸径2.2mの外周杭が6m間隔で連壁に沿って配置されている。また、杭基礎は杭頭部分も軸径と同じストレート杭とした。

連壁はシェル要素、杭は梁要素として、それぞれに地盤ばねを接続した。内部地盤と連壁の摩擦ばねは静的実験結果を基に考慮していない⁸⁾。連壁内の地盤と内部杭の地盤ばねも動の実験結果から地震時には、ほとんど一緒に挙動することが明らかになっているが⁵⁾、慣性力時

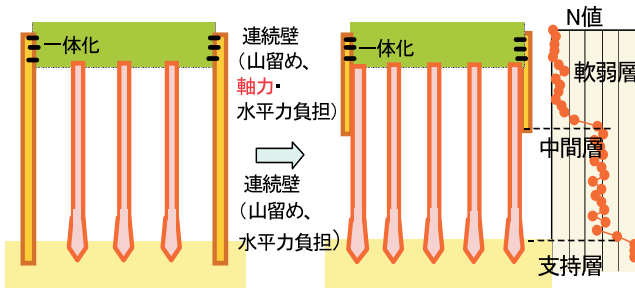


図1 中間層をもつ地盤での複合基礎の概念

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 構造設計部

のみの挙動は明らかになっていないので、本検討では考慮することとした。

解析はCASE1～CASE3のそれぞれで、連壁を支持層（GL-40m）に根入れたオリジナル複合基礎、中間層（GL-14m）までとした改良型複合基礎、杭基礎の3タイプの基礎形式について実施した。連壁の根入れは1mとし、改良型複合基礎は連壁長15m、オリジナル複合基礎は41mとなっている。

連壁頭部水平変位量（以下「基礎変位量」と称す）についての結果を図3に示す。結果はオリジナル複合基礎の基礎変位量との比で示している。これより、いずれのCASEも連壁長15m以上の場合には、杭基礎（連壁長0m）に対し基礎変位の低減効果が顕著で、オリジナル複合基礎に対しても2倍以下の変位となっており、静的に水平剛性が大きいことがわかる。杭基礎に対する基礎変位量の減少割合は連壁の長さ依存し、中間層の影響はほとんど受けにくいことがわかる。

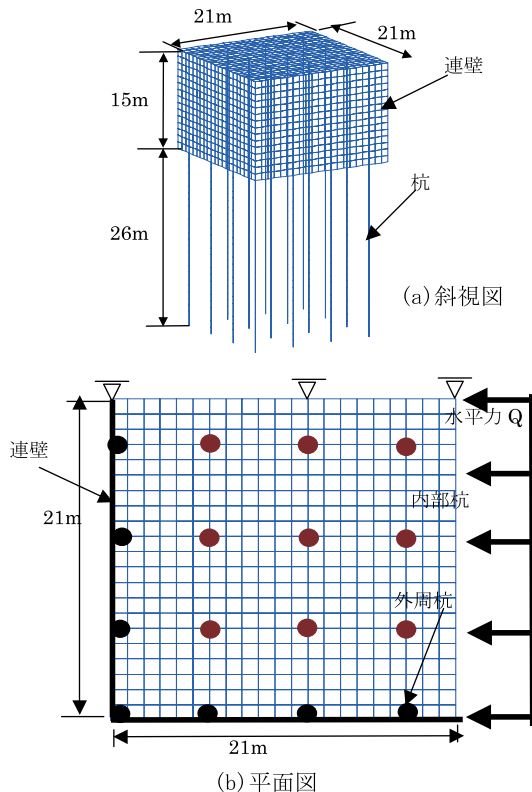


図2 有限要素モデル（改良型複合基礎のCASE）

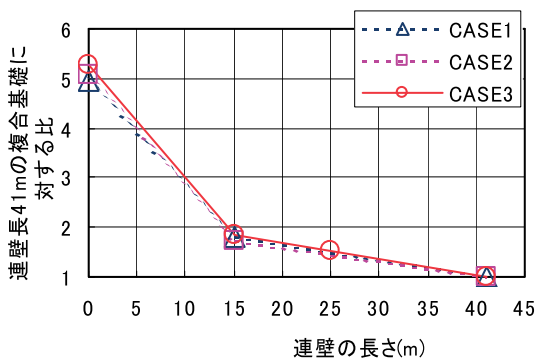


図3 連壁長さと変位量

4. 2次元FEMによる動的検討

4.1 動的遠心模型実験のシミュレーション解析

動的効果の検討に用いる解析モデルについて、遠心模型実験結果をシミュレーションすることにより検討した。

図4に示す実験装置を用いた50G場での動的遠心載荷実験（実験詳細は文献2）を参照）結果について、2次元弾性FEMによるシミュレーション解析を実施した。連壁のモデル化は、面外壁はビーム要素に、面内壁は面外壁に接続する平面応力要素とした。地盤の剛性と減衰は、事前に地盤のみで実施した動的遠心載荷実験の結果をスペクトルフィッティングで評価した値と動的三軸試験結果を参考に決定した。

結果の一例として上部構造物周期2秒（1G場）の複合基礎（入力16.3G(50G場)）及び杭基礎（入力5G(50G場)）について、基礎部（図4参照）の応答加速度波形(50G場)の主要動部と擬似応答スペクトル(1G場に変換)を図5に示す。応答加速度波形は、両者共比較的良く対応している。擬似速度応答スペクトルは、複合基礎では0.5～1.0秒付近でシミュレーション結果がやや大きいもののほぼ良い対応を示し、杭基礎では良い対応を示している。

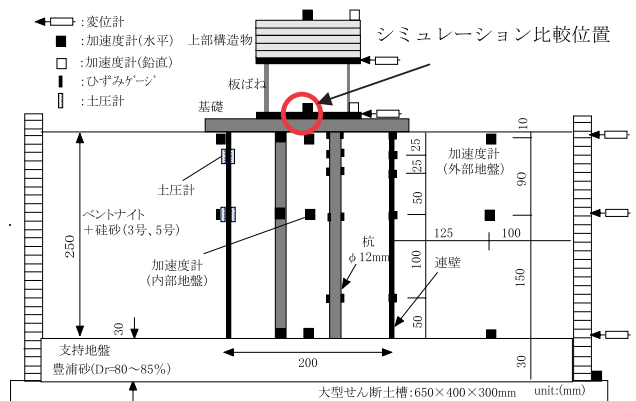


図4 実験装置概要と比較位置

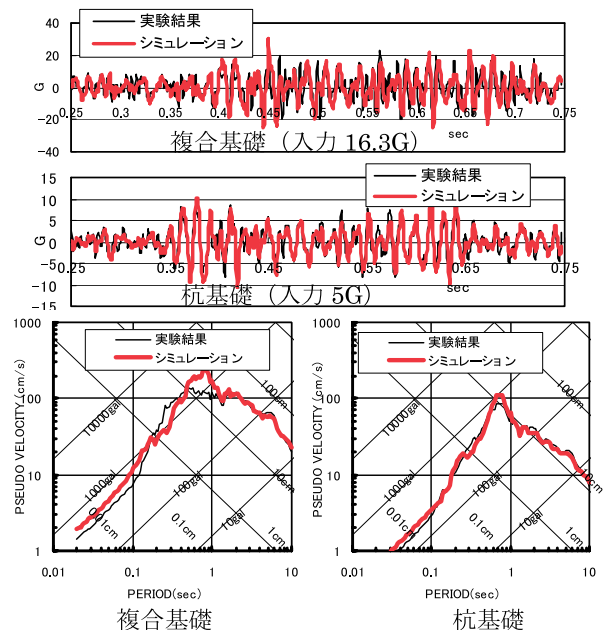


図5 応答加速度波形と擬似応答スペクトル

4.2 中間層がある地盤のケーススタディ

動的実験結果のシミュレーションを行った2次元FEM弾性解析により、中間層がある地盤について解析的に検討した。解析対象とする地盤構成は静的解析を実施した地盤と同様（表1参照）で、15m以深に中間層、40m以深に支持層を想定しており、中間層から深度方向に剛性が大きくなる構成（CASE1）、中間層の下位にやや剛性の小さい層が存在する構成（CASE2）、比較のために軟弱層が支持層まで続く（CASE3）地盤構成とした。

解析モデルを図6に示す。建物は一質点に置換した（固有周期1.2秒）。各CASEは、連壁が支持層までのオリジナル複合基礎のケースと、中間層までの改良型複合基礎（CASE3は連壁長さを中間層位置と同じとした）のケース、杭基礎のケースの3ケースとした（図6の表参照）。減衰は地盤5%、建物3%とし、入力地震動は臨海波を用いた。

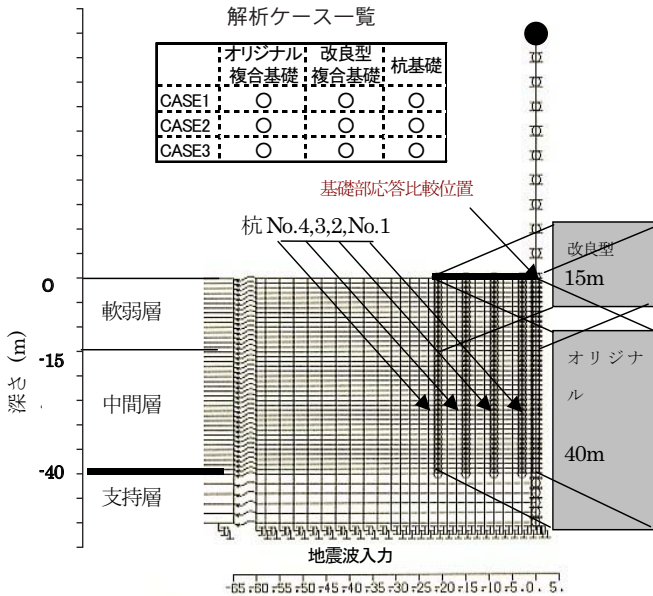


図6 解析モデルと解析ケース

CASE1のオリジナル複合基礎、改良型複合基礎、杭基礎の基礎部応答加速度波形とその応答スペクトルを図7に示す。オリジナル複合基礎、改良型複合基礎ともに杭基礎より全体的に小さな応答になっており、応答スペクトルで見れば、1秒付近より短周期側でオリジナル複合基礎、改良型複合基礎とも杭基礎より小さくなっていることがわかる。

基礎部と建物の杭基礎に対する最大応答加速度の比と連壁先端長さの関係について図8に示す。いずれのケースも、基礎部及び建物とも連壁長さ（0mが杭基礎）が深くなると最大応答加速度が減少している。連壁が中間層位置までの長さでは、建物の最大応答加速度は中間層に依存せずいずれのCASEもほぼ同様な値であるが、基礎部の最大応答加速度は、中間層があるCASE1、CASE2では軟弱層が続くCASE3よりも大きく減少し、杭基礎の70~80%となっている。中間層がある地盤では、改良型複合基礎とすることが、最大応答値からも有効であることがわかる。

基礎部について、改良型複合基礎、杭基礎のオリジナル複合基礎に対する擬似速度応答スペクトル比を中間層があるCASE1, CASE2について図9に示す。いずれのCASEでも1秒付近より短周期側で、杭基礎のスペクトル比は1より大きくなっており、複合基礎の効果が表れている。改良型は杭基礎同様1秒付近より短周期側で1より大きくなるが、その程度は杭基礎より小さく複合基礎の効果が表れている。

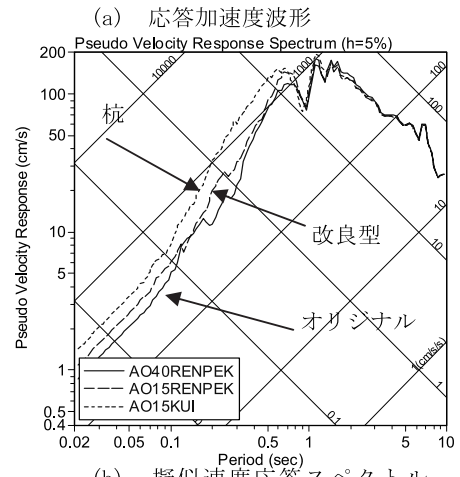
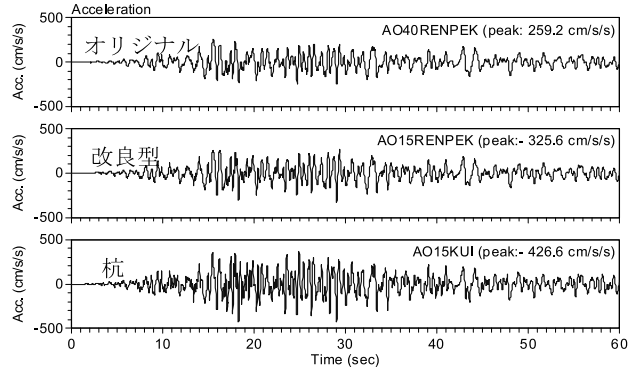


図7 基礎部の加速度波形と応答スペクトル (CASE1)

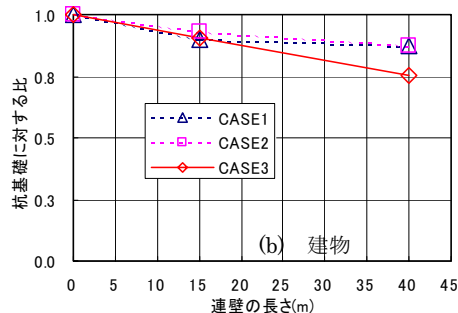
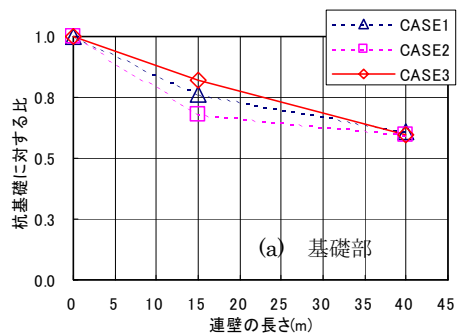


図8 最大応答加速度の比較（杭基礎に対する比）

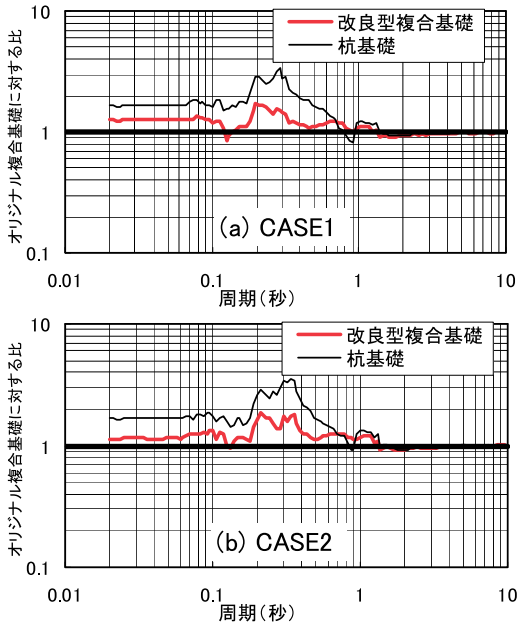


図9 擬似速度応答スペクトル比

各CASEについて、杭基礎と改良型複合基礎の内部杭の最大曲げモーメント分布（杭Noは図6参照）を杭基礎の最大曲げモーメント値（杭No.2の杭頭部の値）との比で図10に示す。中間層がある地盤の杭基礎は、いずれのCASEでも中間層位置で応力集中が生じている。その大きさはCASE2で大きく最大曲げモーメントの約50%である。一方、改良型複合基礎ではいずれのCASEでも応力集中は小さく、杭頭曲げモーメントの大きさも約25%となっており、オリジナル複合基礎の実験結果と同様な値⁴⁾となっている。

軟弱層が支持地盤まで連続するCASE3では、杭基礎には応力集中が生じていないが、改良型複合基礎には、連壁先端部位置で最大曲げモーメント程度の大きさの応力集中が生じている。このように、杭基礎の応力集中の面からも地盤条件を考慮した改良型複合基礎が有効であることがわかる。

4. まとめ

3次元の有限要素モデル及び2次元弾性FEMによる解析的検討から、比較的剛性の大きな中間層が堆積する地盤条件の場合には、連続地中壁を短くした改良型複合基礎（支持地盤に対し40%程度の長さ）に関して以下の結論が得られた。

- ①杭基礎に対する基礎変位量の減少割合は、連壁の長さに依存し、中間層の影響はほとんど受けない。連壁長15mの改良型複合基礎は、41mのオリジナル複合基礎に対し2倍以下の基礎変位量となる。
- ②基礎部の最大加速度応答値は、改良型複合基礎では杭基礎の8割以下となる。
- ③杭への応力集中では、杭基礎では剛性が変化する中間層との境界で応力集中するのに対し、改良型複合基礎では応力集中は小さくなる。

④軟弱層が支持地盤まで続く中間層が存在しない地盤で連壁を短くすると、杭の連壁先端部位置で最大曲げモーメント程度の大きさの応力集中が生じる。

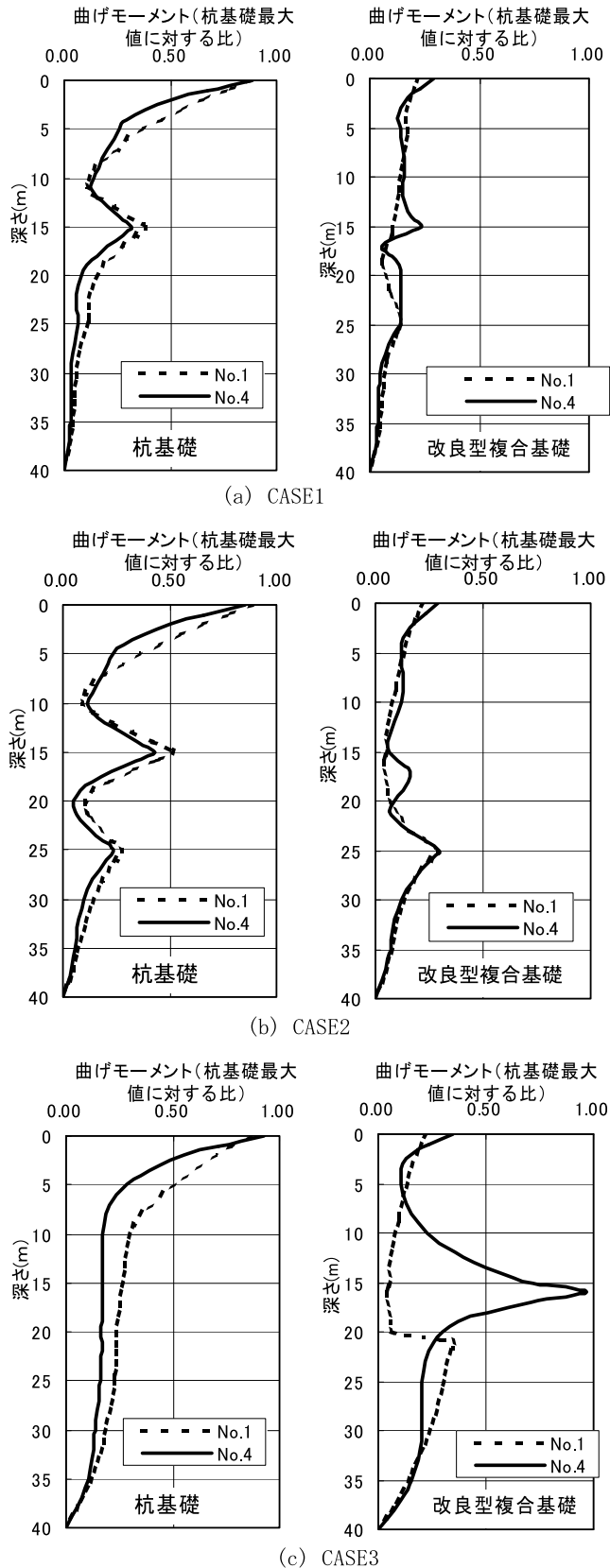


図10 最大曲げモーメント分布

今後は、建物や基礎部の応答特性に対する影響を明らかにし、改良型複合基礎の有効性をより明確にしていくことが重要である。

本報告で掲載した内容は、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, 2）、第38回地盤工学研究発表会、2003
- 3),4) 保井、新井他：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, 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, 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1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004
- 10) 保井、伊勢本他：連続地中壁と杭の複合基礎に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、2005
- 11) 長瀧、妹尾：建物周囲に設置した地中壁による杭基礎の水平力低減効果、日本建築学会構造系論文集、第467号、1995