

Super HRC システム - 超々高層 R C 住宅の開発 大断面地中連続壁



金子 治*1

千葉 脩*1

概 要

高性能 RC 造超高層建築物 (*Super HRC システム*) の基礎構造として、戸田式地下連続壁工法：TO-SSD 工法による大壁厚のボックス型連壁杭を用いることで、特に軟弱地盤においては上部構造も含めた建物全体での設計合理化が可能になる。本報ではさらなる合理化および品質確保をはかるために実施した掘削試験および入隅のある特殊な平面形状のボックス型連壁杭の水平載荷時の挙動に関する解析的検討の結果、以下の見解が得られた。

- (1) 大壁厚・大深度掘削が可能バケット式掘削機：MEH 掘削機の施工性能および品質を掘削試験により確認し、(財)日本建築センターより掘削機使用に関する追加評定を取得した。これにより最大厚さ 2.0m、最大深さ 150m まで施工可能で、かつ軟弱地盤での高い施工能率を発揮する MEH 掘削機の使用が可能となった。
- (2) 3次元有限要素法を用いた解析的検討により、入隅のある特殊な平面形状のボックス型連壁杭の水平載荷時の剛性評価方法について確認した。さらに、杭+連壁からなる複合基礎としての挙動に関し、抵抗要素としての周辺地盤の評価方法、杭と連壁の応力分担の傾向について把握した。

DEVELOPMENT OF “*Super HRC SYSTEM*” WIDE DIAPHRAGM WALLS

Osamu KANEKO*1

Osamu CHIBA*1

Box-shaped diaphragm walls with wide thickness that designed and built by Toda Substructure System of Diaphragm walls (TO-SSD) are employed as foundation structures of the Super high performance RC high-rise housing system. The authors tried to rationalize the system through experimental and analytical studies.

In situ excavation experiment using a bucket type excavation machine; MEH that represented high performance especially in soft soil deposits was carried to confirm ability and quality. Therefore this machine was authorized by BCJ to use in TO-SSD.

Stiffness of walls that had rectangular plan with concaved corners was certified by analytical method using 3-dimensional FEM model. Performance as a composite foundation structure, effects of surrounded soils and stress distribution between piles and walls were confirmed by the same model.

*1 技術研究所

*1 Technical Research Institute

Super HRCシステム-超々高層RC住宅の開発

大断面地中連続壁

金子 治*1
千葉 脩*1

1. はじめに

高性能RC造超高層建築物(**Super HRC**システム)の基礎構造としては、特に軟弱地盤では剛性と強度の高い(戸田式地下連続壁工法:T0-SSD工法による)大壁厚のボックス型連壁杭が採用される。本報では、基礎構造の合理化および品質確保のために実施した以下の2つの検討結果について報告する。

- ①大壁厚大深度掘削が可能でかつ軟弱地盤での適用性が高いバケット式掘削機:MEH掘削機の施工性能および品質確認のために実施した掘削試験
- ②入力動算定モデル用の連壁杭の剛性評価、および周辺地盤の影響を考慮した連壁杭と丸杭からなる複合基礎の水平載荷時の挙動についての解析的検討

2. 大断面对応掘削機の掘削試験

2.1 掘削機の適用性

地下連続壁工法による基礎構造の構築においては、施工品質を確保し設計性能を担保するためには、掘削壁厚、深度および地盤種別に対する掘削機の適用性、施工性を確認する必要がある。また、適切な掘削機を用いることで施工能率を向上させることも可能になる。

地下連続壁工法は(財)日本建築センター基礎評定委員会の評定工法であり、使用掘削機についても評定対象となっている。T0-SSD工法においては表-2.1に示す掘削の使用実績があり、これらの評定を取得している、このうち大深度・大壁厚対応としては水平ドラムカッター型EMX(エレクトロミル)掘削機があり、この掘削機は硬質地盤では優位性が発揮されるが、軟弱地盤では過剰設備となる可能性がある。

そこで、軟弱地盤における施工で合理性が高く、大深度・大壁厚にも対応できるクラムシェルバケット型のMEH掘削機を本システムに採用できるよう、掘削実験を行って施工性を確認し、追加評定を取得することとした。適用壁厚は0.6~2.0m(掘削試験壁厚)、最大深さ150mである。

2.2 掘削試験概要

(1) 使用する掘削機

今回用いた掘削機はMEH-1220型掘削機で、写真2-1に示すようにワイヤー懸垂したバケット本体の自重により土砂を直接つかみ取る方式で、先端のシェルをコントロールするための油圧ユニットを内蔵したバケット部とそれを搭載するベースマシンで構成される。バケット本体には、掘削レベルを感知するセンサーおよび姿勢制

表-2.1 評定取得済みの掘削機

掘削機名	適応壁厚	最大深度
水平ドラムカッター式EMX掘削機(エレクトロミル)	0.65-2.4m	150m
垂直カッター式BWロングウォールドリル掘削機	0.4-1.2m	100m
クラムシェルバケット型MHL掘削機	0.5-1.2m	55m



写真-2.1

表-2.2 施工管理調査内容

調査項目	調査内容	調査方法
掘削精度	掘削溝形状、壁厚調査	超音波溝壁測定装置
掘削深さ、形状	掘削深さ調査	重錘付き検尺テープ
掘削能率	掘削機械の性能把握	作業時間測定
スライム沈降量	スライム堆積厚調査	重錘付き検尺テープ
スライム処理	スライム処理効果	重錘付き検尺テープ
安定液の性状	安定液性状変化の把握	表2.3
逸水	異常逸水の確認	目視

御(垂直保持)のための特殊傾斜計と精度調整ガイドを内蔵しており、偏位が生じた場合はただちに地上操作により修正できるシステムとなっている。

(2) 試験規模

掘削試験の実施規模は、壁厚2.0m、掘削長さ7.2m(先行2、後行1=3ガット)、掘削深さ18m、壁面積129.6m²である。施工管理のための調査実施内容を表2.1に示す。施工はT0-SSD工法施工指針に示された同タイプのMHL掘削機の施工方法に準じて行った。

*1 技術研究所

表 - 2.3 掘削精度測定結果

測定位置	中心変位量 最大値(mm)	掘削深さ (mm)	鉛直精度	最大変位量 (mm)	最大壁厚 (mm)	最小壁厚 (mm)
先行 1	19	1804	1/949	61	2082	2069
	26	1809	1/696	65	2052	2017
	30	1807	1/602	65	2095	2060
先行 2	28	1812	1/647	57	2052	2021
	37	1818	1/491	77	2076	2000
	15	1817	1/1211	48	2069	2052
後行	43	1815	1/422	87	2087	2017



写真 - 2.2

(3)地盤概要

試験は神奈川県大和市において実施した。試験地盤は平均N値7程度のローム層が地表から15、6mと厚く堆積しており、下部2-3mは粘土化している。本試験では-15、16m付近より出現するN値50以上の砂礫層まで掘削している。孔内水位はGL-10.4mであったが、不圧水としての滞水と考えられ、試験実施深さまでは地下水位以浅と判断される。

2.3 試験手順および試験結果

(1) 掘削手順、掘削精度管理、施工能率

事前にバックホーにて深さ2.0mの先行掘りを行った後、所定の深さまで、掘削溝横では重錘付き検尺テープにより掘削深さを確認しながら、オペレータ室内では表示される傾斜感知装置(バケット本体に内蔵)の測定結果を注視して、必要に応じてオペレータ室内の作動押しボタンにより精度調整ガイドを調整し、施工管理値1/300以上の精度が確保できるよう修正操作を行いながら、掘

表 - 2.4 安定液管理試験項目

管理項目	管理試験内容	試験器具
比重	土砂混入量, 希釈度	マッドバランス
粘性	流動性, 希釈度	ファンネル粘度計
濾過水量	造壁性	濾過試験器
泥膜厚		濾過試験器
砂分量	土砂混入量	砂分計
pH	イオン分混入量,安定性	ガラス電極pH計

削を進めた

各ガット掘削終了後、超音波溝壁測定装置により掘削溝形状を確認した。測定状況を写真-2.2に示す。調査結果は壁厚方向先行3ヶ所、後行1箇所である。その結果、表-2.2に示すように鉛直精度は1/1211~1/422、最大変位量48~77mm、掘削壁厚もすべて2,000mm以上となり、全管理目標を満足する掘削精度が確保できていることを確認した。

続いて所定深さまで掘削後、ガットごとに掘削機を用いて底ざらいを行って土砂を排出した後、重錘付き検尺テープにより掘削深さを調査した。調査ポイントは各ガット9ヶ所で、掘削深さは18.0~18.25mと、所定の掘削深さを確保できていたことを確認した。

さらに、掘削終了までの所要時間から求めた掘削能率は、先行ガットで11.2-11.5m²/hour(22.4-23.0m³/hour)、後行ガットで20.1m²/hour(19.4m³/hour)と、掘削性能について定量的に把握した。

(2)安定液の配合、管理

本試験では、土質試験結果に基づき、土砂分離性の高いポリマー系安定液(配合は、水1m³あたりベントナイト20kg、CMC2kg)を用いることとした。なお、安定液の再利用は行わず、すべて新液を作成、追加した。

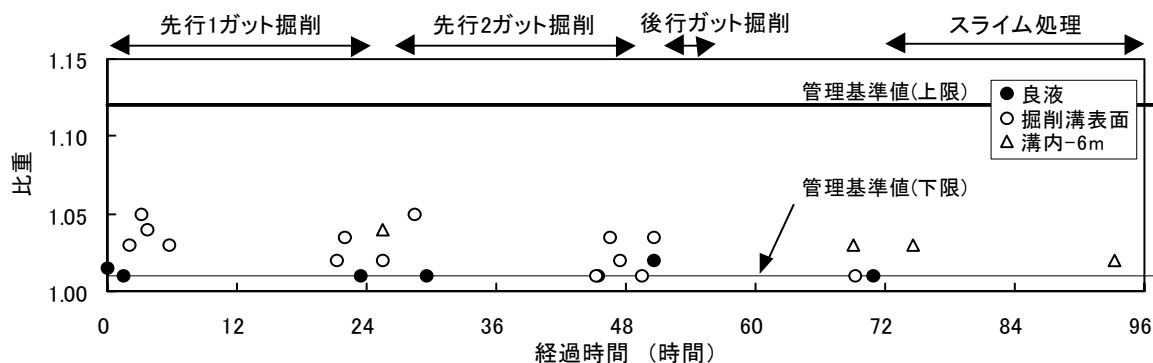


図 - 2.1 安定液管理試験結果(比重)

表-2.3に安定液の管理項目および方法を示す。管理項目6項目のうち、比重の管理結果を図-2.1にし示す。これを含め、掘削およびスライム処理時に使用した安定液は、掘削時に掘削溝表面で採取したものも含め、すべて管理基準値以内で、良好な掘削が行われたことを確認した。図中(△)に示すように、先行1ガット掘削後およびスライム処理後に掘削溝内の深部からの採取も行ったが、深部においても安定液はスライム処理時の管理基準値以

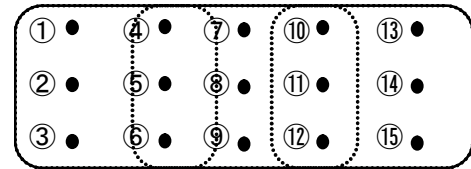


図-2.2 スライム測定位置

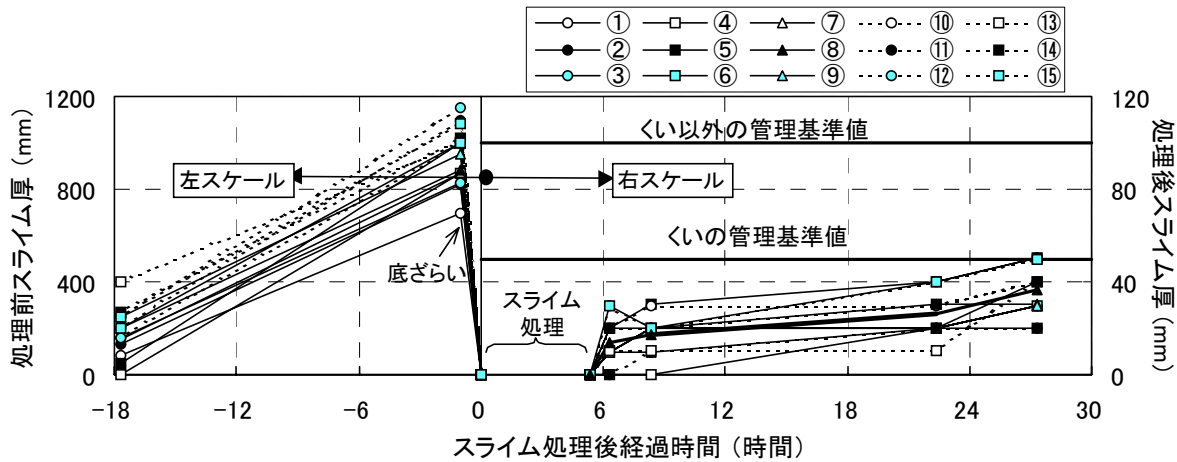


図-2.3 スライム測定結果

内となっており、スライム処理時の良液置換が適切に行われたことを確認した。

(4)スライム処理

掘削完了後、1晩置いた翌朝に掘削機を用いて底ざらいをおこなって残留土砂を排出し、その後安定液を補給しながらエアリフト(先端袴状リバース管:400×700mm)を用いてスライムを排出した。補給安定液はすべて新液である。なお、エアリフトの先端は溝底より10～20cm間隔をあけ、溝底を傷めないようにした。

スライム厚は掘削深さ調査と同じ重錘付き検尺テープを用いて行った。測定ポイントは図-2.2に示す12点である。測定の結果、図-2.3に示すように、掘削完了後は700-1200mmの土砂が沈降したが、スライム処理後は17、22時間後でもスライム沈降量は平均26-37mmと、本工法のスライム量の管理目標値である50mm以下(その他の場合100mm以下)となり、スライム処理が適切に行われ、管理目標を満足できたことを確認した。

2.4 まとめ

MEH掘削機を用いて壁厚2.0mの地中連続壁の掘削試験を行い、(1)鉛直精度、掘削壁厚は管理値を満足し、かつ所定の掘削深さを確保できたこと、(2)掘削能率、(3)掘削およびスライム処理時に安定液はすべて管理基準値以内であったこと、(4)エアリフトによりスライム処理が適切に行われ、スライム厚は管理目標となったこと、を確認した。

以上より、施工性能を確認し、所定の品質を確保するのに必要な施工管理方法を把握することができたことから、本試験結果をとりまとめ、(財)日本建築センターより

MEH掘削機に関する追加評定(BCJ-評定F0006、平成12年9月22日付)を取得した。

3. ボックス型連壁杭の剛性評価

3.1 検討目的

本システムのようなボックス型連壁杭を採用した場合、上部構造-基礎構造-地盤連成系の相互作用を考慮した基礎入力動算定および基礎構造の設計における連壁杭の水平剛性および地盤ばねの適切な評価が重要である。特に、連壁杭は剛性が非常に高く、建物全体の耐震性能に大きな影響を及ぼす可能性があることから、その水平剛性を適切に評価することが重要である。

そこで以下に、入力動算定モデル用の連壁杭の剛性評価方法および周辺地盤の影響を考慮した連壁杭と丸杭からなる複合基礎の水平載荷時の挙動について検討した結果を示す。

3.2 ボックス型連壁杭単体の剛性評価

相互作用を考慮した地震応答解析では、上部、基礎構造を質点に集約し、基礎側面に地盤ばねを取り付けたモデルを用いることが多く、基礎部分のモデル化においては3次元の形状効果を考慮した連壁杭のせん断、曲げ剛性の評価が必要である。そこで、連壁杭のみをモデル化して3次元FEM解析による評価を試みた。対象とした連壁杭は図-3.1に示すように、壁厚1.8m、平面は46.5m角で入り隅があるボックス型とし、杭頭部から杭先端までの長さ:hは43.0m、平面的に1/4をモデル化した荷重は12.5MN(全荷重P=50MN)とし、面内壁(加力方向と平行な

壁)の杭頭レベルに分布して与えた。あわせて面外壁(加力方向と直交する壁)の剛性を0とした上で各要素の上下変形を拘束したモデル(せん断比較モデル)の解析も実施している。

水平変位(全断面モデル δ_{ms} 、せん断比較モデル δ_s)の深さ方向

分布を図-3.2に示す。ここで、せん断比較モデルの変位分布形状はせん断変形と見なせ、かつ平均頭部変形($t \delta_s$) 1.411mmに対し、壁杭のウェブ部内法のみを有効として求めた等価せん断剛性($[GA_s/K]c$) $c=1.559 \times 10^6 \text{ MN/m}^2$ 、 $\kappa=1.0$ から式(1)を用いて求めたせん断弾性変形($t \delta_{sc}$)は1.422mmと、ほぼ一致しており、せん断剛性(変形)は弾性論で評価できることがわかった。さらに、全断面モデルによる頭部変形($t \delta_{ms}$)から上記のせん断変形を引いた値を曲げ変形($t \delta_m$)として式(2)により等価曲げ剛性(EI_e)を求めると、表-3.1に示すように、平面保持の仮定により求めた曲げ剛性： EI の59%となった。

$$t \delta_{sc} = \frac{P \cdot h}{[GA_s/K]c} \quad \dots\dots(1)$$

$$EI_e = \frac{P \cdot h^3}{3 \cdot t \delta_m}; \quad t \delta_m = t \delta_{ms} - t \delta_{sc} \quad \dots\dots(2)$$

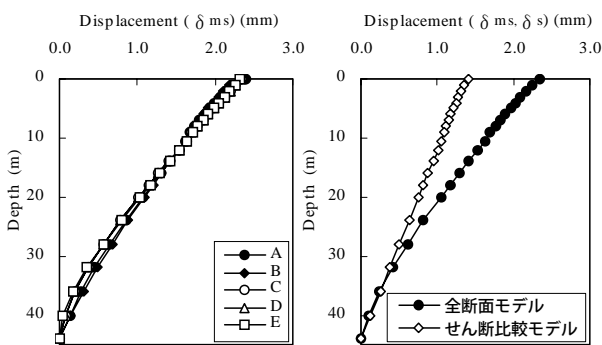


図-3.2 水平変位

表-3.1 等価曲げ剛性の比較

$t \delta_{sc}$ (mm)	$t \delta_{ms}$ (mm)	$t \delta_m$ (mm)	EI_e (MN・m ²)	EI (MN・m ²)	EI_e/EI
1.411	2.385	0.974	1.458×10^9	2.449×10^9	0.59

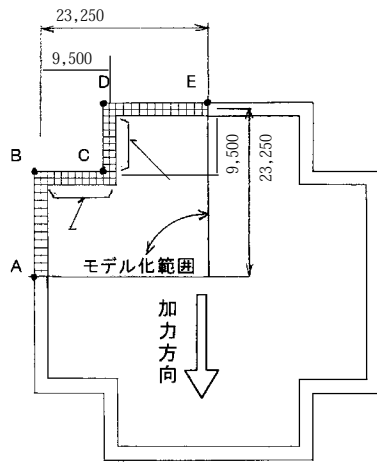


図-3.1 解析モデル

以上より、このようなボックス型連壁杭ではせん断剛性は弾性論で評価できるものの、曲げ剛性を平面保持の仮定から導くと、やや過大評価となることが確認された。

3.3 周辺地盤を考慮した連壁杭の剛性評価

連壁杭と杭(丸杭)からなる複合基礎では、水平剛性評価および水平荷重の負担率の算定にあたって、剛性の高

表-3.2 解析ケース一覧および応力負担率

CASE	パラメータ	内部杭応力負担率 ()は外杭含む
1	基本ケース	9.45% (12.2%)
2	内部地盤なし	0.21% (3.14%)
3	周辺地盤剛性 1/2	9.27% (12.0%)
4	連壁杭剛性 1/3	16.3% (20.8%)
5	面内壁のみ	14.5% (18.2%)
6	面外壁のみ	28.7% (37.4%)
7	連壁杭なし	—

い連壁杭で基礎を囲んでいることの効果を3次元で評価する必要がある。そこで、図-3.3に示す周辺地盤および下部地盤を含むモデルを用いて3次元FEM解析を行った。丸杭ははり要素とし、杭頭は剛なスラブを設け固定し、加力はスラブを介して与えている。実施した解析ケースの一覧を表-3.2に示す。

解析結果のうち、CASE1の連壁杭、外部地盤(加力方向後方)および連壁に囲まれた丸杭(内部杭)の変位(杭先端レベルを0とした相対変位)の深さ方向分布の比較を図3-4(a)に示すが、連壁と内部杭はほぼ一体で動いており外部地盤と分布形が異なっている。また図-3.4(b)に示す内部地盤のないCASE2の連壁杭変位はCASE1とほぼ一致しており、面内壁のみのCASE5もCASE1と近似した分布形であった。これに対し、図-3.4(c)に示す連壁杭および周辺地盤の剛性を低下させたCASE3、4や面外壁のみの

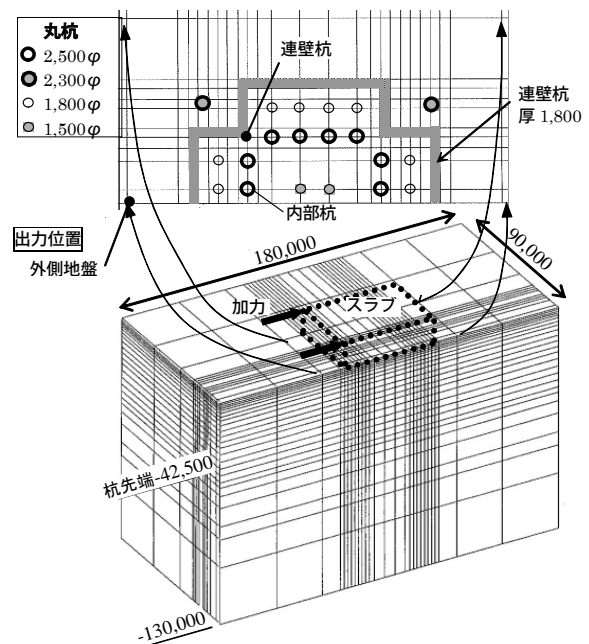


図-3.2 解析モデル

CASE6では、図-3.4(d)に示す連壁杭のないCASE7における内部杭のような外部地盤に追従した分布形に近づいて行った。

以上より、内部地盤は基礎全体の水平剛性にほとんど寄与しておらず、かつ複合基礎の水平剛性の評価には面内壁が支配的であることがわかる。

図-3.5(a)(b)には曲げモーメント分布を、表-2には内部杭の杭頭せん断力の総和と入力荷重との比=内部杭の応力負担率を示す。図-3.5(a)に示すCASE1、3では杭頭曲げが卓越した、内部地盤の影響があまりみられない形状となっており、内部地盤の寄与はほとんどないことがここからもわかる。また、CASE3では地盤剛性の違いにもかかわらずモーメント分布・内部杭の応力負担率ともCASE1との差は小さく、ボックス型連壁杭に囲まれた内部杭の挙動は地盤のばらつきの影響を受けにくいと考えられる。また、図-3.5(b)に示すCASE5~7の比較では、内部杭の発生モーメントに対しても影響が大きいのは面内壁であると判断される。

3.4 まとめ

- ・相互作用を考慮した地震応答解析に用いるための、3次元FEMおよび弾性論に基づく、ボックス型連壁杭の剛性評価方法を示した。
- ・複合基礎としての水平剛性には内部地盤はほとんど寄与しておらず、面内壁が支配的であることがわかった。

4. おわりに

高性能RC造超高層建築物(*Super HRC*システム)の基礎構造としての大断面のボックス型連壁杭に関する試験および解析的検討により以下の成果が得られた。

- (1) 大壁厚・大深度掘削が可能でかつ軟弱地盤での適用性が高いバケット式掘削機:MEH掘削機の施工性能を掘削試験により確認し、(財)日本建築センターより掘削機に関する追加評定を取得した。
- (2) 解析的検討により水平載荷時の連壁杭の剛性、および複合基礎としての挙動について、本システム特有の評価方法について把握した。

[参考文献]

- 1) 和泉他、高性能RC造住宅の耐震設計法(その1)、2001年度日本建築学会大会、
- 2) 藤堂他、大断面連続地中壁の地震時挙動、戸田建設技術研究報告、No. 27、2001

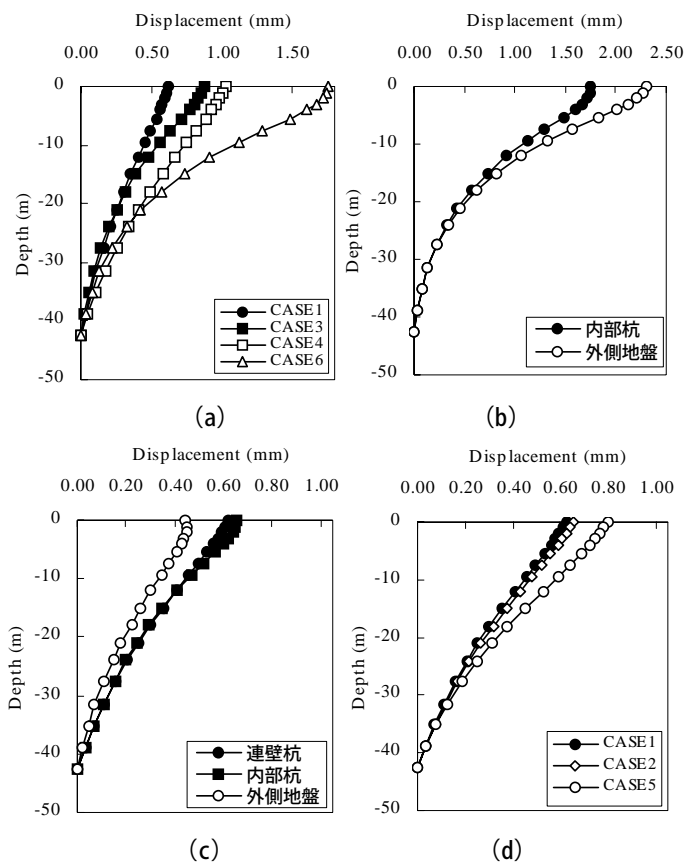


図-3.4 水平変位の比較

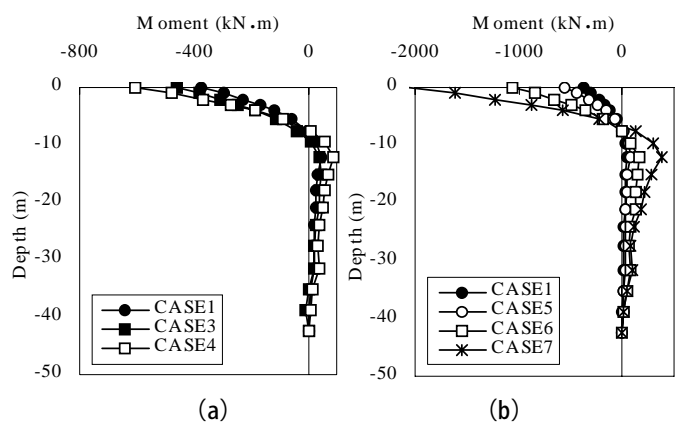


図-3.5 杭曲げモーメント