

3.3.4 杭頭半剛接合構法を採用した建物の地震時挙動に関する研究

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3カ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

(2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物と地盤の模型振動実験（杭頭半剛接合試験体[変動軸力の大きい建屋モデル]）
 - 2) 模型振動実験を対象とした解析的検討
 - 3) 杭頭接合条件を考慮した実建物の地震時挙動に関する解析的検討（杭頭接合部の回転性能に軸力変動の影響を考慮したモデルを用いた解析）
 - 4) 杭頭半剛接合構法を採用した建物の耐震設計のガイドライン
- (c) 結論ならびに今後の課題
 - 1) 結論
 - 2) 今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成14～16年業務のまとめ

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 杭頭半剛接合構法を採用した建物の地震時挙動に関する研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
大成建設(株)技術センター 建築技術研究所 建築構工法研究室	室長 課長 課長代理	真島正人 長尾俊昌 船原英樹 石崎定幸

(c) 業務の目的

1995年兵庫県南部地震では、杭頭部の破壊によって、多数の構造物に不同沈下や傾斜などの被害が生じた。これらの被害事例によって、従来の杭頭接合方法(剛接合)が過大な地震力に対しては不利な場合があることが再認識された。これを契機に、杭頭をピン接合や半剛接合とする新しい杭頭接合方法(以後、杭頭半剛接合構法と総称する)の研究開発が精力的に進められ、杭頭半剛接合構法が、地震時に杭頭部や基礎梁の応力を低減し、耐震安全性向上に有効であることが明らかにされつつある(例えば¹⁾)。しかし、既往の研究では、主に杭頭接合部の構造性能に着目した静的な検討に留まっていることが多く、動的相互作用を考慮した構造物全体での有効性を実験的に検証したものは少ない。

本研究の目的は、杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物の地震時挙動を実験並びに解析によって明らかにし、その効果を実証するとともに、その課題を示すことにある。また、これらの成果を反映した合理的な耐震設計のガイドラインを構築することである。

(d) 3カ年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成14年度:

杭頭半剛接合構法の既往の研究事例に関する文献調査から、現状の技術動向を調査した。

杭頭接合条件を考慮した実建物の地震時挙動に関する解析的検討を実施し、杭頭接合条件が、地震時における杭・基礎梁の曲げ応答および建屋応答に与える影響について検討した。

2) 平成15年度:

杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物と地盤の模型振動実験(杭頭剛接合および半剛接合試験体[変動軸力の小さい建屋モデル])を実施した。実験結果における杭頭剛接合試験体と半剛接合試験体の比較から、地震時における杭頭半剛接合構法の杭基礎被害軽減効果、および本構法が建屋応答に与える影響について検討した。

3) 平成16年度:

杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物と地盤の模型振動実験(杭頭半剛接合試験体[変動軸力の大きい建屋モデル])を実施する。

模型振動実験を対象とした解析的検討を実施する。

杭頭接合条件を考慮した実建物の地震時挙動に関する解析的検討（杭頭接合部の回転性能に軸力変動の影響を考慮したモデルを用いた解析）を実施する。
杭頭半剛接合構法を採用した建物の耐震設計のガイドラインを作成する。

(e) 平成 16 年度業務目的

昨年度に引き続き、杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物と地盤の模型振動実験を実施する。本年度は、外側の杭により大きな変動軸力を発生させ、変動軸力下における杭頭半剛接合構法を採用した建物の地震時挙動を把握する。

杭頭半剛接合構法を採用した建物の地震時挙動を再現できる杭頭半剛接合部のモデル化手法について、模型振動実験に対するシミュレーション解析から検討する。杭頭半剛接合構法を採用した実大建物に対する 2 次元 FEM 解析において、杭頭接合部の回転性能に軸力変動の影響を考慮したモデルによる解析を実施し、建物の地震時挙動を把握し、その効果を再検証する。

これまでの成果を反映した杭頭半剛接合構法を採用した建物の耐震設計法を提案し、その適用性と留意点を明らかにする。

(2) 平成 16 年度の成果

(a) 業務の要約

建屋のアスペクト比を前年度に比べ約 2 倍とした杭基礎建物（半剛接合）-地盤の模型振動実験を実施した。杭頭を半剛接合とした場合、軸力変動と杭配置の影響により、押込み側の杭頭曲げモーメントは剛接合とした場合の値に近づくこと、杭頭せん断力は剛接合の値を上回ること（最大で 1.3 倍程度生じた）を明らかにした。模型振動実験を対象とした 2 次元 FEM 解析において、杭頭半剛接合部の曲げモーメント-回転角関係を逐次軸力変動の影響を考慮した回転バネでモデル化することにより、建物応答および杭頭固定度が押込み側や引抜き側杭の曲げモーメント・せん断力に与える影響を精度良く再現できることを示した。

杭頭半剛接合構法を採用した実大建物の地震時挙動を、提案した杭頭半剛接合部のモデルを用いた 2 次元 FEM 解析から検討し、構法の効果と問題点を示した。

本構法の効果を評価できる設計法として、固定度を考慮した Chang 式による手法と梁バネモデルによる手法を提案し、実験結果や実大建物の解析との比較からその適用性と留意点を明らかにした。

(b) 業務の成果

1) 杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物と地盤の模型振動実験（杭頭半剛接合試験体 [変動軸力の大きい建屋モデル]）

a) 実験方法

平成 15 年度の実験²⁾と比較して、主な変更点は、模型建屋の重心高さを高くしたことである。また、模型則³⁾に基づく時間と長さの縮尺は 1/15 である。

) 実験装置

実験には、昨年同様、大成建設株式会社所有の3軸振動台(テーブル寸法：4×4m)およびせん断土槽(2.7(W)×1.2(D)×1.5m(Z))を使用した。表1に3軸振動台の仕様を示す。

) 模型試験体概要

模型試験体の概要を図1および写真1に示す。杭・杭頭半剛接合部については、昨年用いた模型を使用した。地盤は、昨年同様に相対密度90%を目標として、締め固めて作成した。杭頭の固定度は、杭頭接合面の軸力を管理することにより調整できる仕組みとなっている(図1)。建屋は重錘と板バネから構成され、アングルを用いてパイルキャップ上に固定されている。本年度は、パイルキャップ上部から建屋重錘上部までの距離を504mmとし(昨年度：213mm)、重心の位置を高くした。昨年同様、板バネの厚みを調整し、建屋重心位置が等しく周期の異なる2種類の試験体(短周期モデル・長周期モデル)を作成した。

) 計測項目

動的な計測項目の概要を図2に示す。加振前には、杭および杭頭接合部の軸力導入用ボルトのひずみを測定し、各杭の初期軸力を把握した。

) 実験ケース

試験体の種類を表2に示す。ホワイトノイズ加振から得られた、パイルキャップに対する建屋頂部の加速度伝達関数のピーク周期を表に合わせて示す。H16年度の試験体は短周期・長周期ともに、H15年度試験体と比較して、若干周期が短い結果となった。

加振ケースを表3に示す。入力地震波は、昨年同様、告示波(模擬地震波：建告1461号に基づいて作成)および八戸波NS・UD成分(実地震波)とした(図3)。

表1 3軸振動台の仕様

積載荷重	最大196kN
振動台寸法	4 m × 4 m
最大変位	X ± 20cm, Y ± 20cm, Z ± 10cm
最大速度(単軸加振)	X ± 100cm/s, Y ± 100cm/s, Z ± 50cm/s
(3軸加振)	X ± 45cm/s, Y ± 45cm/s, Z ± 22.5cm/s
最大加速度	X ± 1.0G, Y ± 1.0G, Z ± 1.0G
加振振動数	DC ~ 50Hz

表2 試験体の種類

	杭頭接合条件	建屋	建屋の固有周期 (s)
H16年度	半剛接合	短周期モデル	0.065
		長周期モデル	0.105
H15年度	杭頭剛接合	短周期モデル	0.069
		長周期モデル	0.113
	杭頭半剛接合	短周期モデル	0.076
		長周期モデル	0.113

表3 加振ケース

No	入力レベル		入力波	上下動
1	30gal		ホワイトノイズ	無
2	レベル1	稀に発生する地震動	地震波(告示波)	無
3	レベル1		地震波(八戸波)	無
4	レベル1	最大水平速度25cm/s相当	地震波(八戸波)	有
5	レベル2	極めて稀に発生する地震動	地震波(告示波)	無
6	レベル2		地震波(八戸波)	無
7	レベル2	最大水平速度50cm/s相当	地震波(八戸波)	有

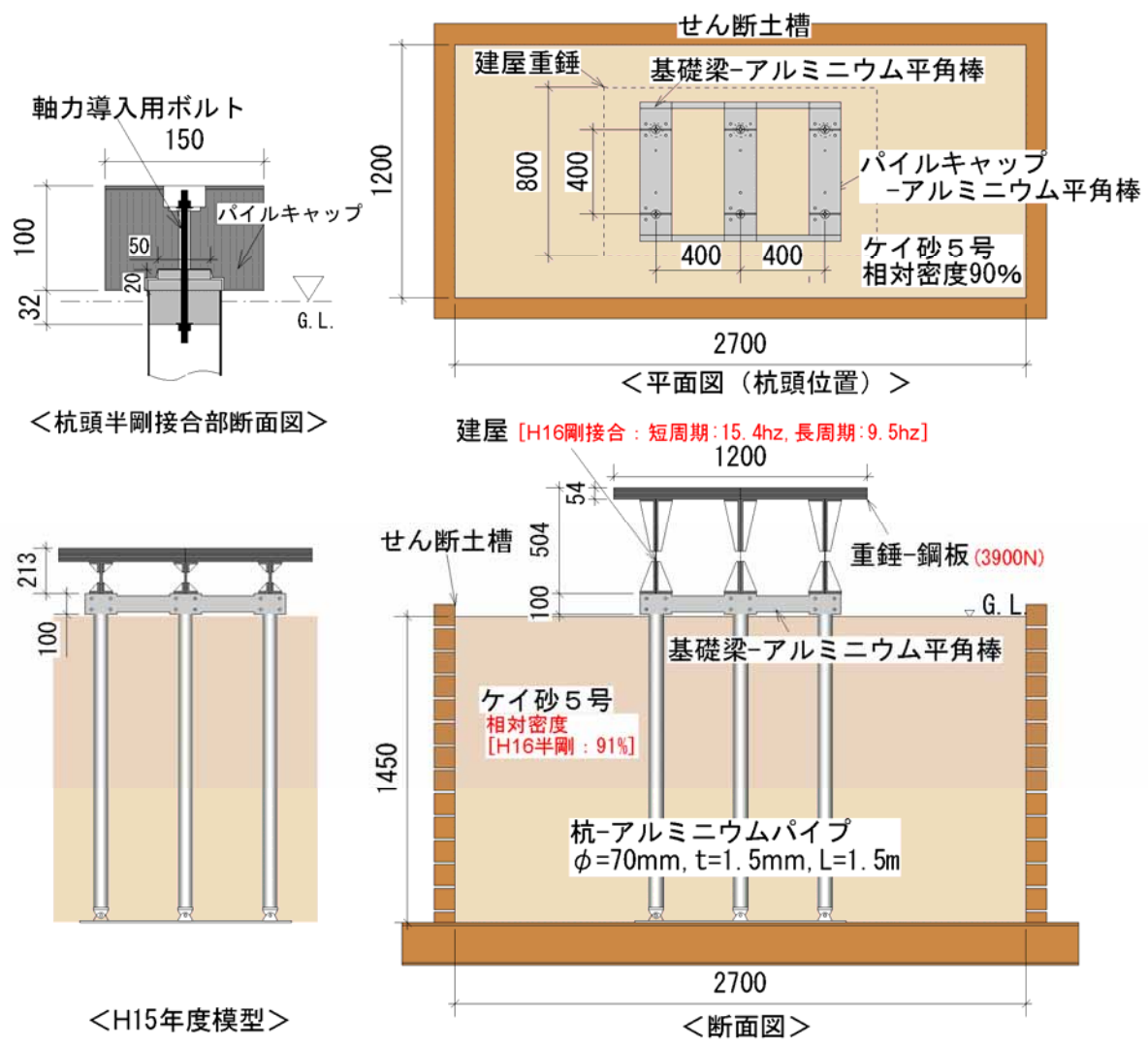


図1 模型試験体の概要

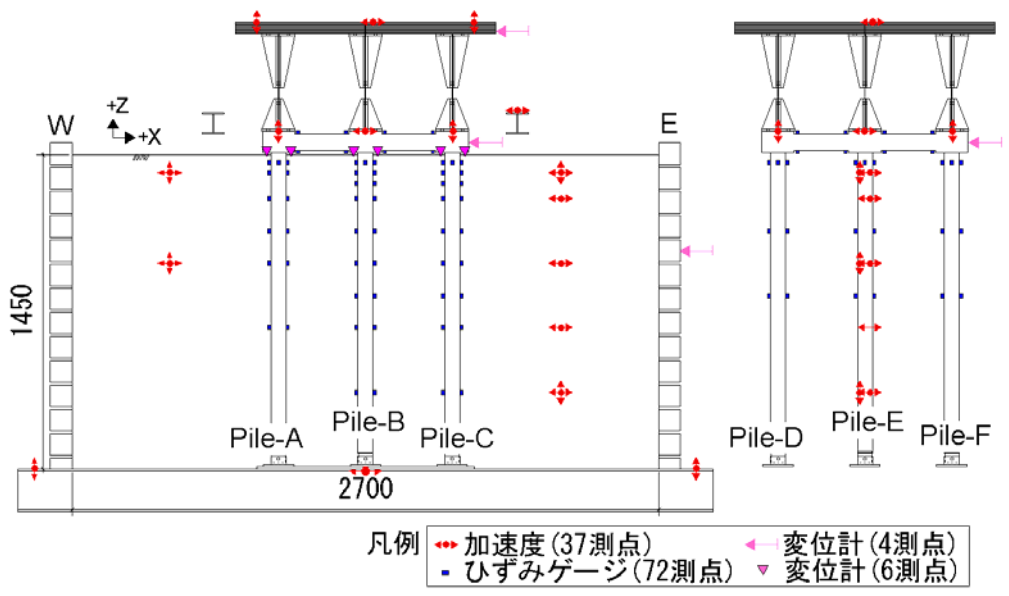


図2 計測項目の概要

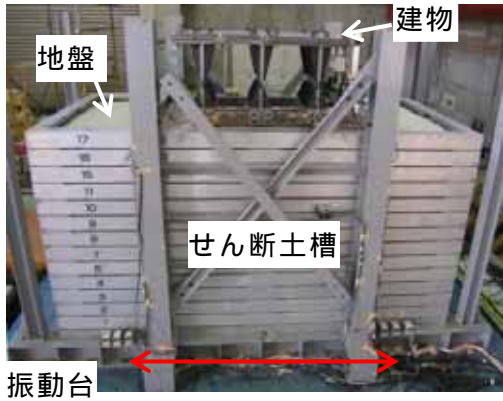


写真 1 試験体写真

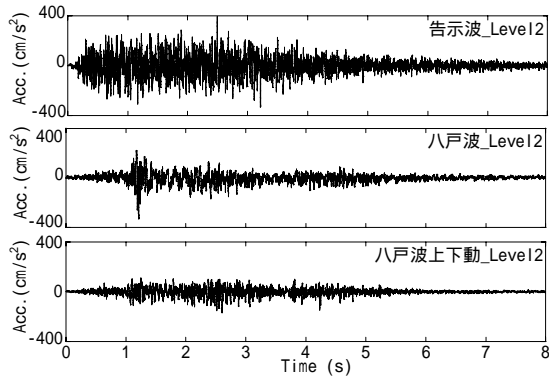


図 3 入力地震波

b) 実験結果

) H16 年度半剛接合試験体と H15 年度剛接合・半剛接合試験体の比較 (建屋短周期モデルにおける八戸波レベル 2 加振時)

ここでは、建屋応答が大きく、端杭に大きな軸力変動が生じた建屋短周期モデル、八戸波レベル 2 加振の結果について、各実験間の比較を行う。

杭頭半剛接合試験体の加振直前の軸力分布を表 4 に示す。昨年同様、杭の軸力・曲げモーメント等は、前後の杭で平均して評価した。杭の軸力の分担は、H15 半剛接合試験体では Pile-BE が大きく、H16 半剛接合試験体では Pile-AD が大きくなっていた

得られた時刻歴を図 4 に示す。図では、建屋応答が比較的大きい 1.0~2.0s 間を拡大して表示している。建屋加速度は、H15 剛接合試験体と比較して、H16・H15 半剛接合試験体が若干減少している。H16 半剛接合試験体のパイルキャップの応答は、

表 4 加振直前の軸力分布 単位(N)

試験体ケース	Pile-AD	Pile-BE	Pile-CF
H16半剛接合	1700	1100	1400
H15半剛接合	1200	2000	900

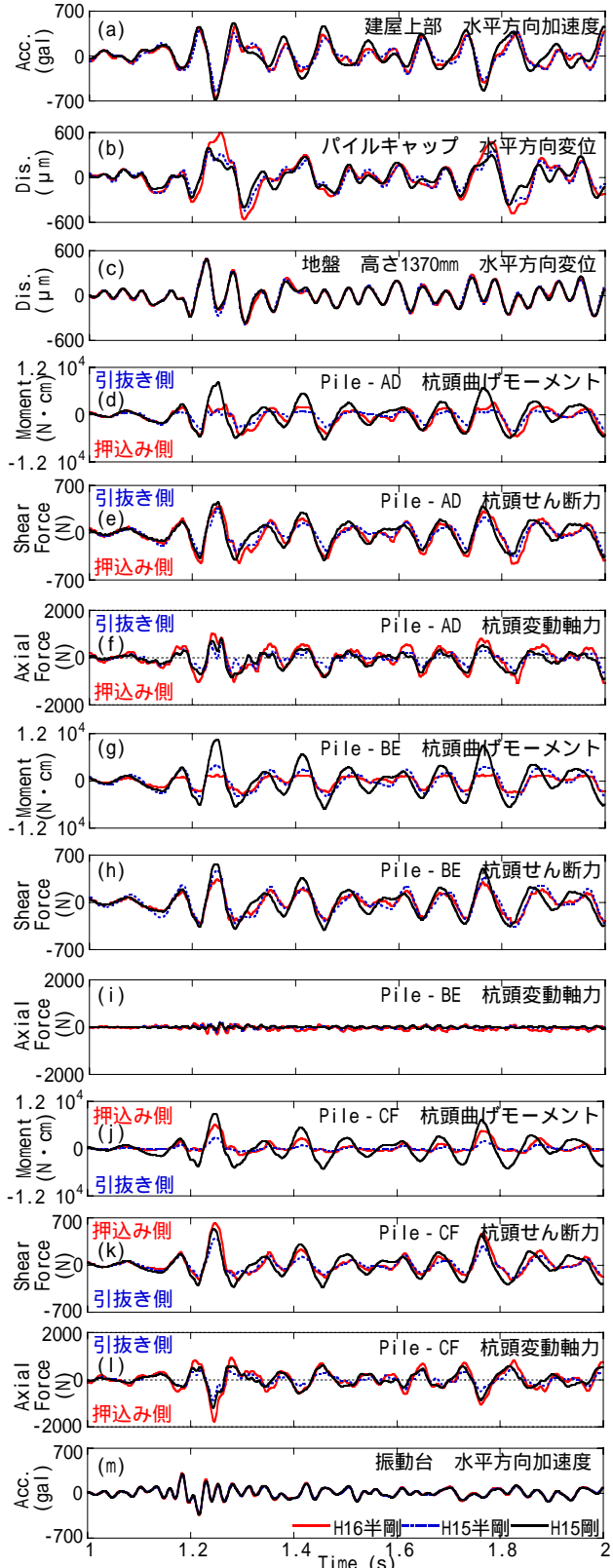


図 4 時刻歴 (T=1.0~2.0s)

H15 剛・半剛接合試験体と比較して、1.24s 付近で大きく異なり、増加している。これは、建屋アスペクト比を大きくしたことにより、柱脚に大きな曲げモーメントが発生し、その曲げ戻しによる影響と考えられる。H16 半剛接合試験体の杭頭軸力の変動量は、H15 剛・半剛接合試験体と比較して大きくなっており、建屋アスペクト比を大きくした影響が確認できる。H16 半剛接合試験体の曲げモーメントは、押し込み側では、建屋アスペクト比の小さい H15 半剛接合試験体より大きくなり、H15 剛接合試験体に近い値となっている。また、H16 半剛接合試験体の杭頭せん断力は、押し込み時に、H15 剛接合試験体より大きくなっている。

杭頭の曲げモーメント-回転角、杭頭接合面の軸力-回転角の関係を図 5 に示す。H16 半剛接合と H15 半剛接合試験体を比較した場合、軸力-回転角関係の傾きは、H15 半剛接合試験体に比べて H16 半剛接合試験体が大きくなっており、建屋アスペクト比を大きくした影響が確認できる。また、曲げモーメントの絶対値が軸力に依存していることが確認できる。

建屋からの慣性力が最大となる $T=1.24s$ 付近における杭の曲げモーメント分布・せん断力分布を図 6 に示す。また、同時刻の地盤反力分布を試験体ごとに図 7 に示す。杭のせん断力・地盤反力は、曲げモーメント分布から評価した。なお、各杭頭のせん断力の合計値は、建屋とパイルキャップの慣性力の和と概ね対応している。杭頭半剛接合試験体の杭の曲げモーメントは、杭頭剛接合試験体と比較して、杭頭で減少し地中部で増大する傾向が

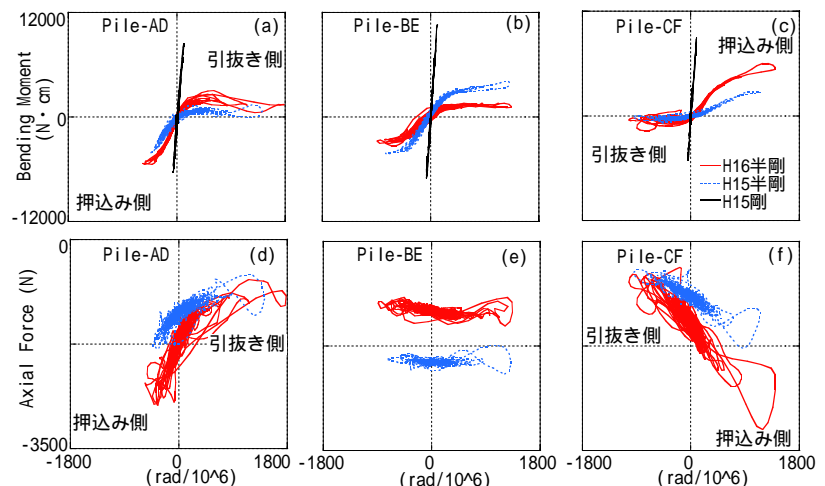


図 5 杭頭曲げモーメント-回転角、杭頭軸力-回転角の関係

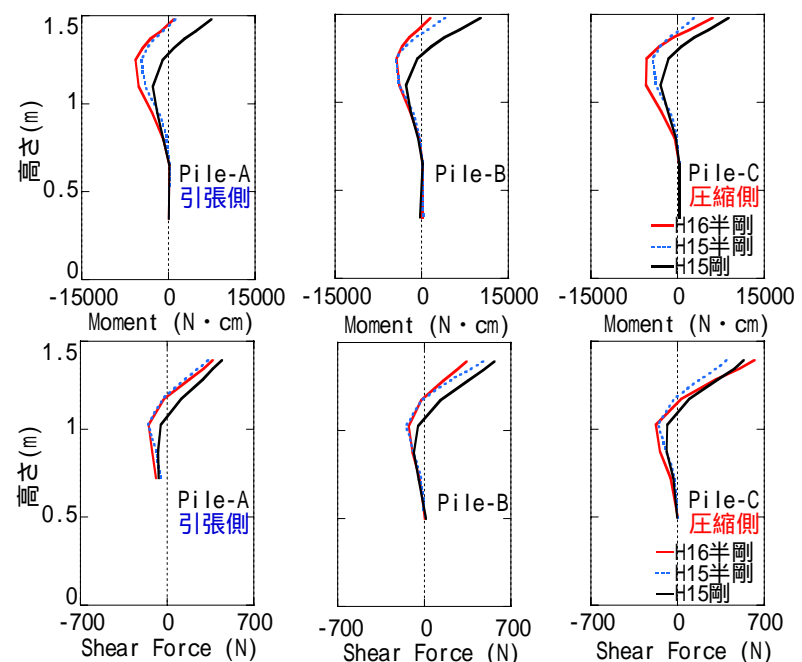


図 6 慣性力が最大となる時刻 ($T=1.24s$ 付近) の曲げモーメント・せん断力分布

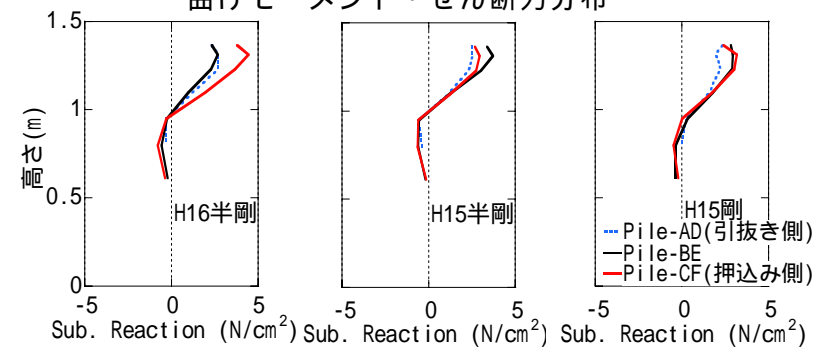


図 7 慣性力が最大となる時刻の地盤反力分布

あるが、H16 半剛接合試験体では、押し込み側と引抜き側のモーメント分布の違いが H15 半剛接合試験体と比較して顕著となり、押し込み側杭頭では、H15 剛接合試験体に近い曲げモーメントが生じている。H16 半剛接合試験体の杭に生じるせん断力は、軸力変動の影響により固定度が增大した押し込み側の杭に大きく集中し、剛接合試験体を上回り（約 1.2 倍程度）、引抜き側では逆にせん断力が減少している。杭に生じる地盤反力は、H15 剛接合試験体では、前側杭（押し込み側杭：Pile-CF）と中杭（Pile-BE）の地盤反力がほぼ等しく、それらは後側杭（引抜き側杭：Pile-AD）の地盤反力と比べて大きくなっている。この要因として以下の 2 つが挙げられる。一つ目は、中杭では、杭頭が両側から基礎梁により拘束されているため、杭頭の固定度が增大したことである。二つ目は、後側に位置する杭に反力として生じる地盤の領域が、前側杭により乱されて緩んでいるためである（ここでは、これが、杭頭せん断力の分配に与える影響を杭配置による影響と称す）。一方、H16 半剛接合試験体では、押し込み側杭に大きな地盤反力が生じ、中杭および引抜き側杭の地盤反力は小さくなっている。以上のことから、H16 半剛接合試験体において、押し込み側の杭頭せん断力が剛接合試験体と比較して増加したことは、軸力変動による押し込み側杭の固定度の増加と後側杭へ作用する地盤反力が杭配置の影響により減少したためと考えられる。

また、半剛接合試験体の中杭では、杭頭せん断力は剛接合試験体と比較して減少している。これは、半剛接合試験体では、杭頭剛接合試験体と比較して建屋加速度が若干減少する分、杭頭せん断力の合計が減少し、さらに押し込み側に集中するためと考えられる。

なお、半剛接合構法には、基礎梁に生じる曲げモーメントも低減する効果があるが、H16 年度試験体と H15 年度試験体では、柱脚に生じるモーメントが異なり、その効果を直接評価できないため、ここでは検討していない。

）全加振ケースにおける H16 年度杭頭半剛接合試験体と H15 年度杭頭剛・半剛接合試験体の最大値の比較

ここでは、全加振ケースについて、杭に生じた最大曲げモーメント・最大せん断力および建屋の応答値を比較する。H16・H15 半剛接合試験体の実験前（全加振前）の長期軸力を表 5 に示す。H15 半剛接合試験体建屋短周期モデルでは、中杭（PileBE）の軸力が大きい、他の試験体では、端杭の軸力が大きくなっている。

<建屋に生じた最大加速度(図 8)>

H16・H15 半剛接合試験体に生じる建屋加速度は、H15 剛接合試験体と比較して、Level1 加振では各加振で大小関係が異なるが、Level2 入力では、減少する傾向が確認できる。このことから、杭頭接合部を半剛接合とした場合、入力レベルが大きくなるに従い、杭頭曲げモーメント低減効果がより発揮され、建屋加速度が減少する傾向があると考えられる。

<基礎に生じた最大変位(図 9)>

H16・H15 杭頭半剛接合試験体の基礎の最大変位量は、概ね、剛接合試験体と比較して増大する傾向が確認

表 5 実験前の軸力分布

単位(N)

試験体ケース		PileAD	PileBE	PileCF
H16半剛接合試験体	短周期	1700	1100	1400
	長周期	1500	1200	1400
H15半剛接合試験体	短周期	1300	1800	1000
	長周期	1700	1100	1500

できる。ただし、H15 半剛接合試験体と比較して、H16 半剛接合試験体の最大変位

量が大きいのは、建屋アスペクト比を大きくしたためと考えられる。

<杭に生じた最大曲げモーメント (図 10) >

ここで、杭の最大曲げモーメントとは、全深度での最大値とする。PileBE では、軸力変動の影響が少ないため、H16 半剛接合試験体においても安定した曲げモーメント低減効果が確認でき、剛接合と H16・H15 半剛接合試験体を比較した場合、レベル 1 加振において平均で 7 割、レベル 2 では 4 割程度に低減している。一方、端杭では、初期軸力の大きさ、変動軸力および入力地震波の影響により、低減効果が僅かな杭 (H16 半剛接合、長周期モデル PileAD) もあるが、レベル 2 加振では、平均で 7 割程度に低減している。

<杭に生じた最大せん断力 (図 11) >

H16 半剛接合試験体の端杭に生じる最大せん断力は、剛接合試験体より大きくなる傾向が確認でき、H15 剛接合試験体と比較して、最大で約 1.3 倍程度生じている。これは、先に述べた通り変動軸力により固定度が增大した影響と、杭配置による影響と考えられる。一方、H16・H15 半剛接合試験体の中杭に生じる最大せん断力は、レベル 1 入力では顕著でないが、レベル 2 入力では、H15 剛接合試験体と比較して明確(平均で 8 割程度)に低減している。これは、半剛接合試験体では、慣性力の要因である建屋加速度が若干減少する傾向があるのに加え、押し込み側杭が負担するせん断力が増加するため、中杭のせん断力が減少したと考えられる。

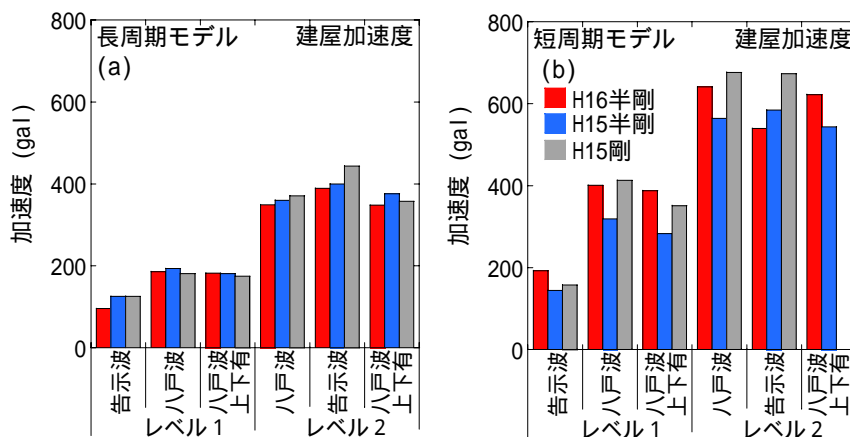


図 8 建屋に生じた最大加速度

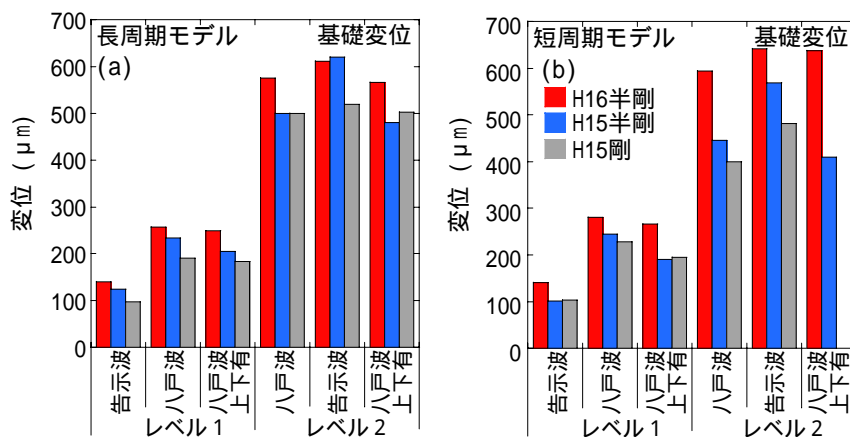


図 9 基礎に生じた最大変位

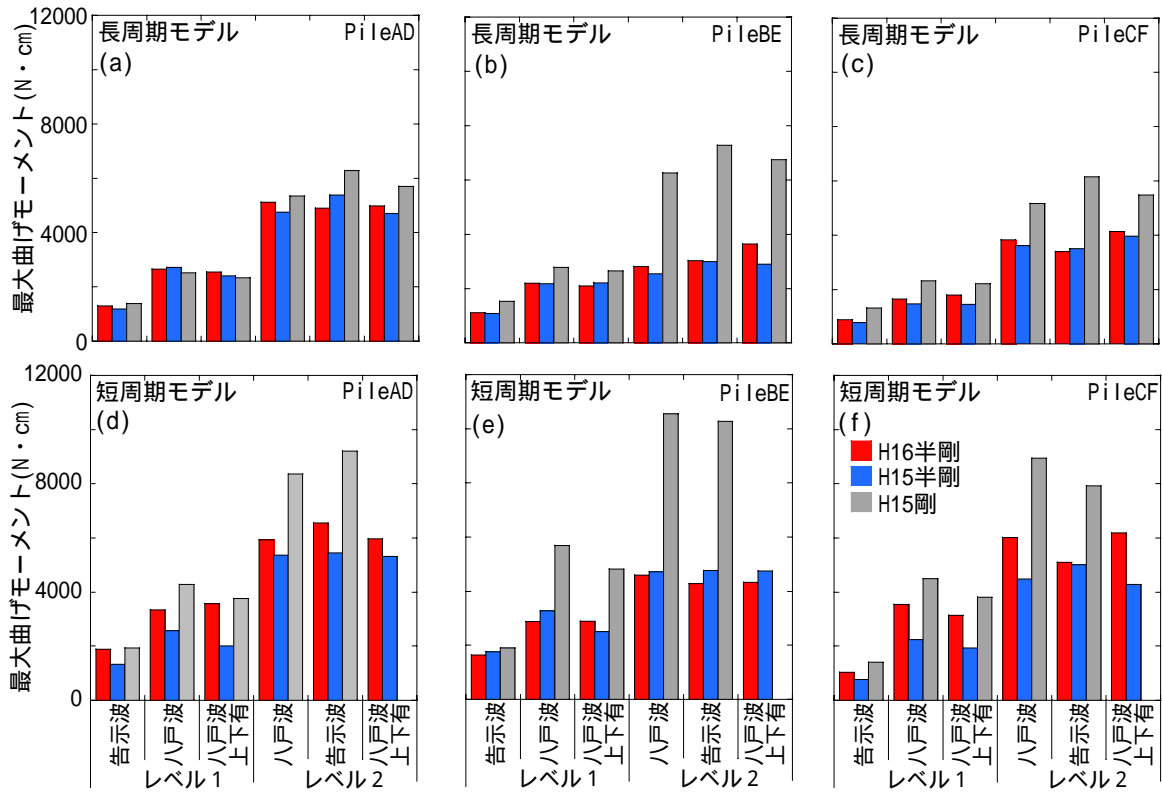


図 10 杭に生じた最大曲げモーメント

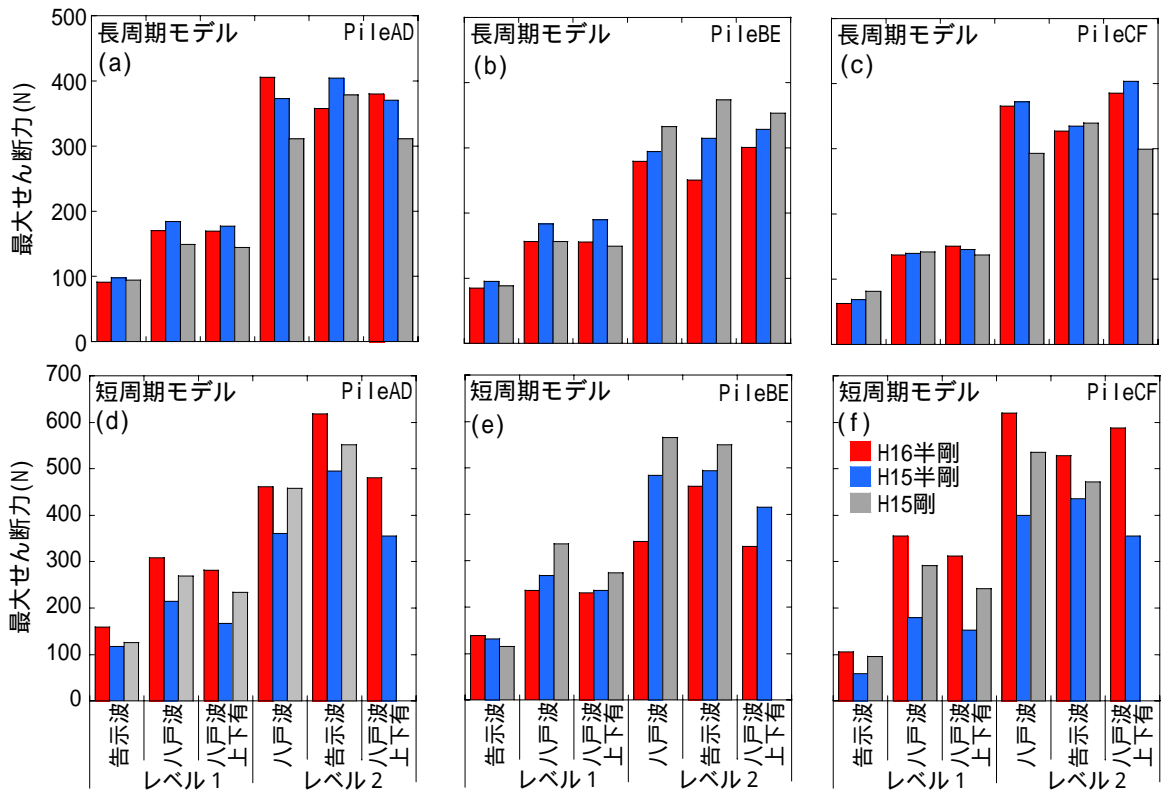


図 11 杭に生じた最大せん断力

) 結論

昨年度の結論をふまえ、以下に模型振動実験より得られた結論を示す。

杭頭半剛接合試験体の杭および基礎梁の曲げモーメントは、剛接合試験体と比較して低減する傾向にある。特に、軸力変動の少ない中杭では、安定した低減効果が確認でき、レベル1で7割程度、レベル2加振では4割程度に低減した。軸力変動の大きい端杭についても、レベル2加振で平均して7割程度に低減した。ただし、初期軸力、変動軸力および入力地震動の影響により、低減効果が僅かな加振ケースも確認された。

杭頭半剛接合試験体の端杭に生じる杭頭せん断力は、軸力変動および杭配置の影響により押し込み側杭（前面杭）に集中する傾向が確認され、最大で剛接合試験体の1.3倍の値が生じた。一方、中杭に生じる杭頭せん断力は、入力レベルが大きい場合、建屋応答の減少や押し込み側杭へせん断力が集中する影響により、減少する傾向が確認された。

レベル1加振では、杭頭半剛接合試験体と杭頭剛接合試験体で、建屋の応答（加速度）に顕著な違いは確認されなかったが、レベル2加振では、半剛接合試験体の加速度値が剛接合試験体と比較して若干減少する傾向が確認された。基礎の変位量は、半剛接合試験体の方が剛接合試験体と比較して若干増加する傾向が確認された。

表6 解析対象と解析ケース

解析ケース記号	杭頭接合部のモデル化	解析対象(入力地震波)	
C-SH-D	逐次軸力依存型モデル	H16半剛接合(建屋短周期モデル)	八戸波 Level2
C-SH-E	簡易モデル		
C-R	剛	H15剛接合(建屋短周期モデル)	
C-S-E	簡易モデル	H15半剛接合(建屋短周期モデル)	



図12 2次元 FEM 解析モデル

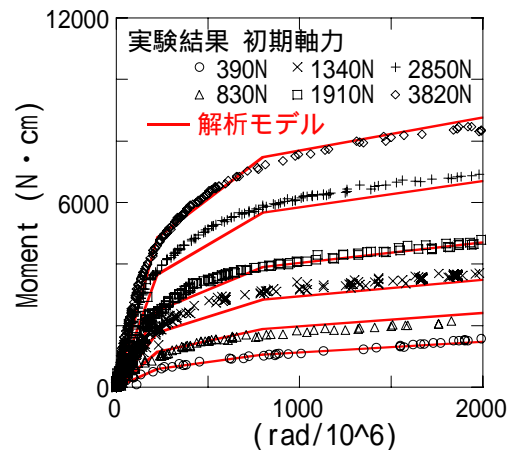


図13 杭頭接合部要素試験結果と解析モデル

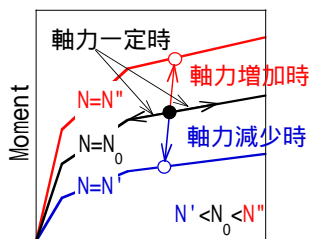


図14 杭頭回転バネ-逐次軸力依存型モデル

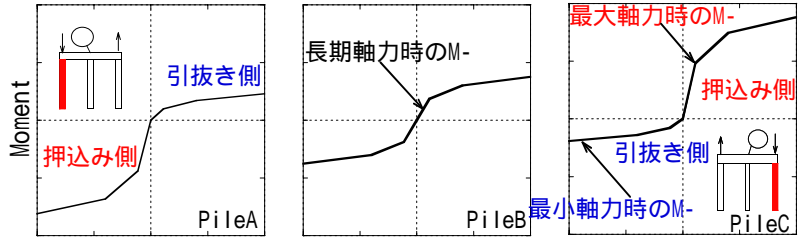


図15 杭頭回転バネ-簡易モデル

2) 模型振動実験を対象とした解析的検討

杭頭半剛接合構法を採用した建物の地震時挙動を適切に評価できる杭頭半剛接合部のモデル化方法について検討した。

a) 解析方法

解析は2次元 FEM による全応力解析とした。解析対象と解析ケースを表 6 に示す。まず、H16 半剛接合試験体を対象とし、杭頭接合部のモデル化をパラメータとした解析を行った。その後、各試験体の実験結果と解析結果を比較検討した。解析モデルを図 12 に示す。地盤は平面ひずみ要素によりモデル化し、非線形性は修正 R-O モデル⁴⁾により評価した。修正 R-O モデルのパラメータは低拘束圧下の中空ねじりせん断試験結果に基づき設定した。杭・基礎梁・板バネは線形梁要素によりモデル化した。杭頭半剛接合部の予備試験から得られた杭頭曲げモーメント(M)-回転角(θ)の関係を図 13 に示す。杭頭半剛接合部は、トリリニア型の非線形弾性の回転バネによりモデル化し、その初期剛性、第一折れ点・第二折れ点後の剛性は初期軸力の一次関数として評価した(図 13)。杭頭半剛接合部については、軸力変動の影響を逐次 M- θ 関係に反映させたモデル(逐次軸力依存型モデル)と簡便に軸力変動の影響を考慮したモデル(簡易モデル)の2つのモデルを用いた解析(C-SH-D と C-SH-E)を実施した。逐次軸力依存型モデルでは、各解析ステップの杭頭軸力をその M- θ 関係に反映させた(図 14)。簡便なモデルでは、軸力変動の大きい端杭について、回転角の正負で押込み側あるいは引抜き側に分類し、それぞれ実験結果における最大軸力あるいは最小軸力時の M- θ 関係を取るものとした(図 15)。減衰は連成1次・2次の振動数に対して1%のレーリ減衰を与えた。

b) 解析結果

杭頭半剛接合試験体に対する解析結果と実験結果の比較(杭頭接合部モデル化の検証)

C-SH-D および C-SH-E の解析より得ら

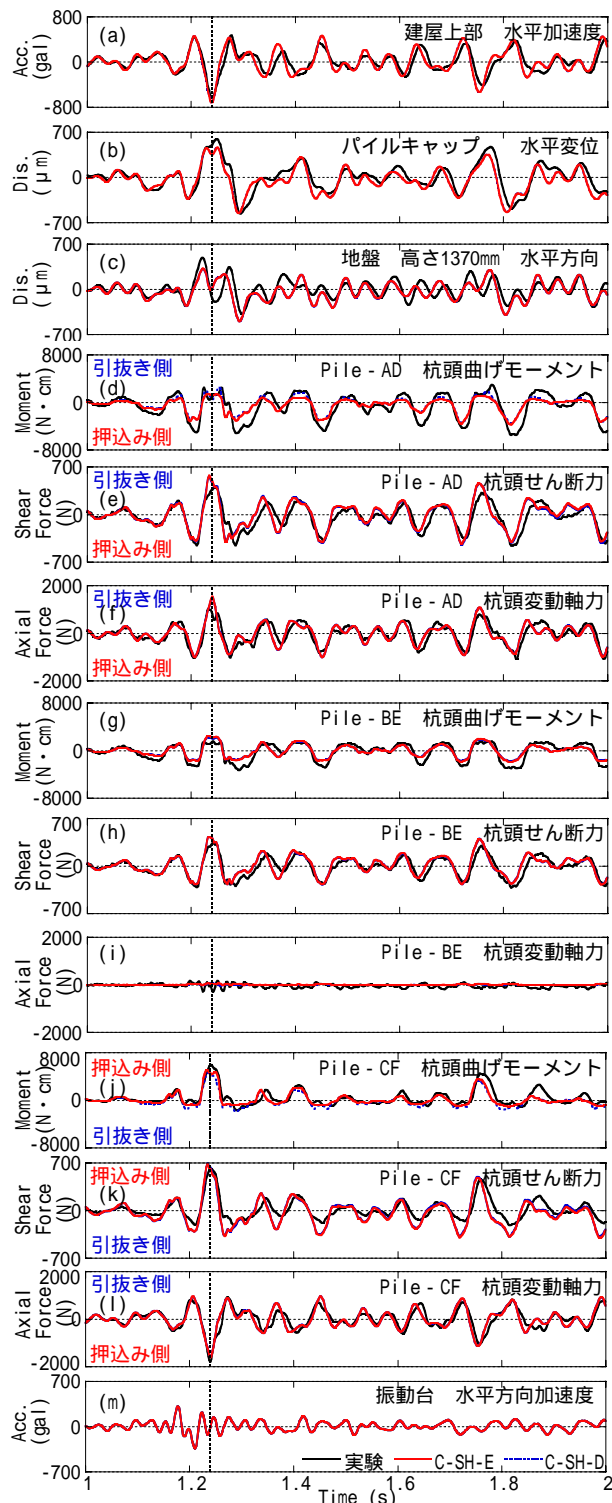


図 16 時刻歴(実験結果と解析結果の比較)