

れた主要な時刻歴を実験結果と比較して図 16 に示す。解析結果は実験における建屋加速度、パイルキャップ変位を良く再現しており、杭頭接合部の簡易モデルと逐次軸力依存型モデルで違いはほとんどない。両解析ケースとも、押し込み側杭の杭頭曲げモーメントが引抜き側杭と比べて大きくなる実験結果の傾向を概ね良く再現している。より詳細に見ると、解析ケース C-SH-D では、逐次杭頭軸力を杭頭モーメント-回転角関係に反映しているため、Pile-AD 杭頭曲げモーメントが  $T=1.24s$  付近において一旦減少しその後増加する現象が良く再現されている。一方、C-SH-E では、引抜き側に最小軸力時のモデルを用いているため、引抜き側の曲げモーメントを過小評価している。

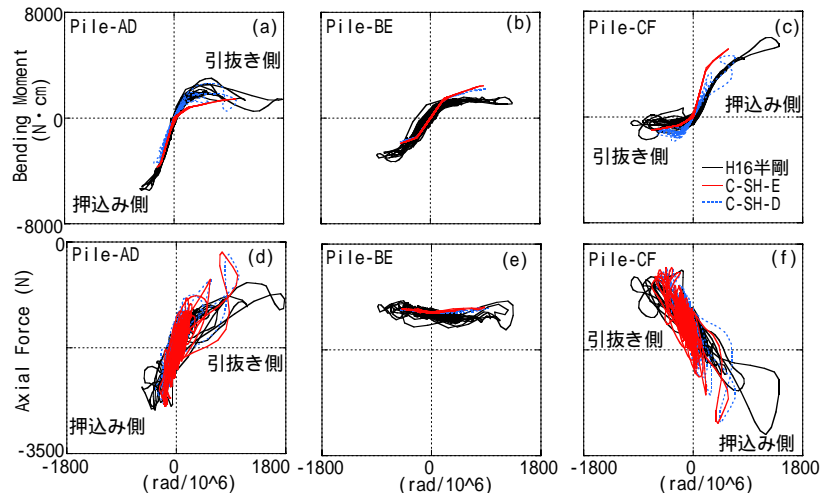


図 17 杭頭曲げモーメント-回転角、軸力-回転角の関係

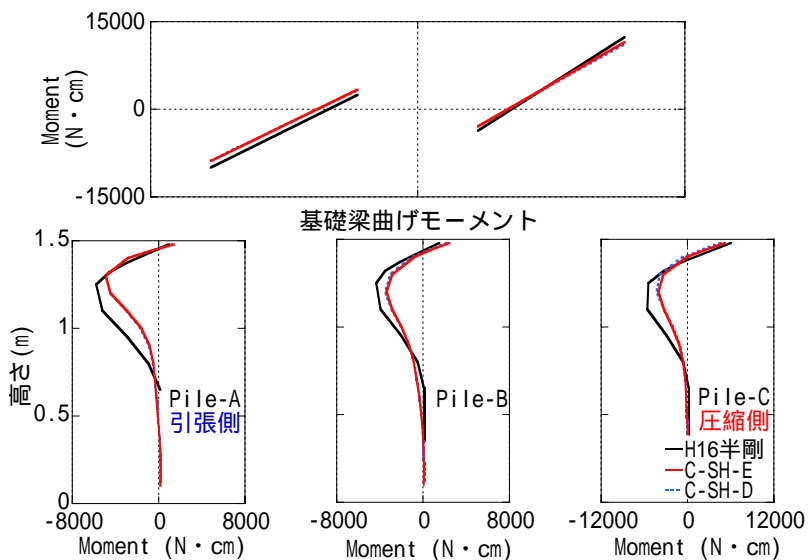


図 18 慣性力が最大となる時刻の曲げモーメント

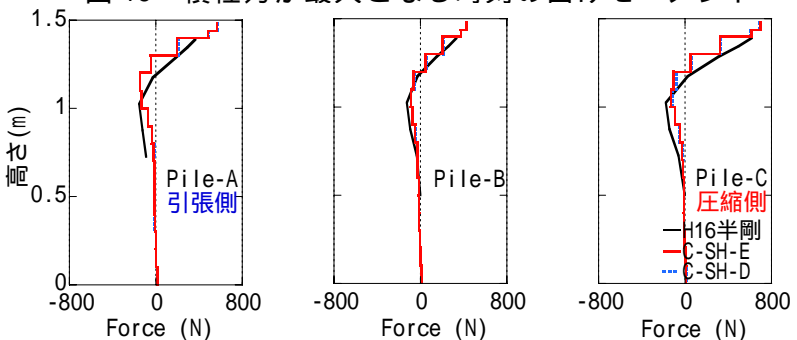


図 19 慣性力が最大となる時刻のせん断力

杭頭の曲げモーメント-回転角、軸力-回転角の関係を図 17 に示す。解析結果は、第一象限において、回転角が急激に伸びる現象 ( $T=1.24s$  付近) を適切に評価できていない。これは、 $T=1.24s$  付近において、パイルキャップ変位が解析・実験ともにプラス側であるのに対し (図 16(b))、地表面変位は実験結果と解析結果で異なり、解析結果は構造物の影響によりプラス側となっている (図 16(c))。これは、本解析 (2次元解析) において、地盤と杭の節点を共有させたため、地盤と杭間に相対変位が生じる3次元的な挙動が評価できていないためと考えられる。C-SH-D では、Pile-AD の M- $\theta$  関係において、第一象限で一旦モーメントが増大しその後減少している様子 (図 17(a)) や、Pile-CF の第一象限において回転角の増大に伴い徐々にモーメントが増大する現象 (図 17(c)) をより正確に再現している。C-SH-E では、押し込み側において、初期の回転剛性を過大評価しているため、C-SH-D に比べ、回転角を若干過小評価している (図 17(c))。

建屋慣性力が最大となる  $T=1.24s$  における杭・基礎梁の曲げモーメント分布、杭のせん断力分布を図 18・19 に実験結果とともに示す。この時刻断面の杭の曲げモーメント・せん断力分布では、C-SH-D と C-SH-E の違いはほとんどない。両解析結果は、押し込み側の杭頭曲げモーメントが大きく、引抜き側が小さい実験結果の傾向や、押し込み側杭の杭頭に大きなせん断力が生じる実験結果の傾向を概ね良く再現している。また、解析結果は、基礎梁に生じる曲げモーメントの実験結果を良く再現している。一方で、解析結果は、地中部の最大曲げモーメントを若干過小評価している点や、引抜き側の杭頭せん断力が実験結果と比較して若干大きい点など実験結果と異なる部分もある。これは、2次元解析において、地盤と杭の節点を共有したため、地盤と杭の相対変位が大きくなる地表面付近の地盤反力を過大評価したこと、および背後地盤が杭を引張っているため杭配置が杭頭せん断力の分配に与える影響を適切に評価できていないためと考えられる。

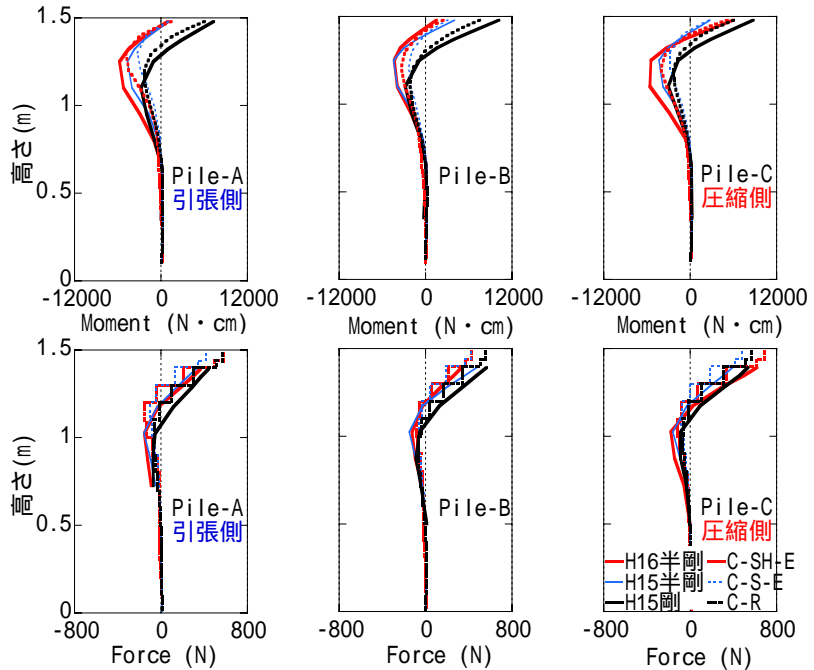


図 20 杭のモーメント・せん断力分布における各試験体の解析結果と実験結果の比較

各試験体の解析結果と実験結果の比較

ここでは、H15 剛・半剛接合、H16 半剛接合試験体の実験結果と解析結果(C-R,C-S-E, C-SH-E[簡便な杭頭半剛接合モデル])について比較検討を行う。慣性力が最大となる  $T=1.24s$  付近の杭の曲げモーメント分布を実験結果と解析結果で比較して図 20 に示す。図では実験結果を実線、解析結果を点線で示している。解析結果は、アスペクト比を高くすることにより、押し込み側と引抜き側の杭頭曲げモーメントの違いが顕著となる実験結果の傾向を良く再現している。また、杭頭せん断力についても、押し込み側杭において、C-SH-E が C-R と比較して約 1.2 倍程度生じているなど、解析結果と実験結果は良く対応している。

結論

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し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。また、杭頭における回転バネにおいて、軸力変動の影響を回転角の正負で押し込み側あるいは引抜き側に分類した簡便なモデル化手法を提案した。杭頭半剛接合部にその簡便なモデルを用いた解析と逐次軸力変動の影響を反映させたモデルを用いた解析を比較した場合、建屋応答や建屋慣性力最大時における曲げモーメント・せん断力分布に明確な違いがないことを示した。ただし、簡便なモデルでは、押し込み側杭の杭頭回転角が若干過小評価される傾向がある。

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）

H14 年度に実施した「杭頭接合条件を考慮した実大建物の解析的検討」<sup>5)</sup>では、2次元 FEM による地盤-杭基礎建物の全応力解析から、杭頭半剛接合構法が杭・基礎梁のモーメント低減に対して有効である可能性および杭頭接合条件が上部構造の応答に与える影響が少ないことを示した。ここでは、さらに、軟弱地盤に建つ実大建物を想定し、杭頭半剛接合部の回転バネにおいて、3.3.4-(2)-(b)-2)-a)と同様に、逐次軸力変動の影響を反映させたモデルを用いた解析(以下、J-S-D)と簡易なモデルによる解析(J-S-E)の比較検討を行う。さらに、半剛接合モデルによる解析と剛接合モデルによる解析(J-R)との比較を行い、本構法を採用した杭基礎建物の地震時挙動について検討する。

a)解析方法

解析手法は、2次元 FEM に基づく全応力解析とした(図 21)。建屋は、8 階建て鉄筋コンクリートラーメン構造(8 スパン、アスペクト比 0.5)を想定し、線形梁要素によりフレームとしてモデル化した(H14 年度アスペクト比 0.5 モデル)。建屋の一次固有周期は 0.5 秒である。杭は、1600 の場所打ち杭(長期軸力 3920N)であり、線形梁要素でモデル化した。杭間隔と杭径の比は 3.75 である。J-R では、杭と基礎梁の節点を共有させた。

半剛接合モデルでは、杭頭と基礎梁の節点間に回転バネを設けた。基本となる軸力一定時の M- $\theta$  関係は、杭の半径と杭頭軸力をかけて求まるモーメントを最大値とする完全弾塑性の非線形弾性とした。J-S-D では、各解析ステップの軸力を M- $\theta$  関係に反映させた。J-S-E では、事前解析から軸力変動の大きい両端の杭(ラーメン構造のため)について、回転角の正負で押し込み側あるいは引抜き側に分類し、最大あるいは最小軸力時の M- $\theta$  関係を適用した。J-S-E の内側の杭では、長期軸力から最大抵抗モーメントを算出した。

地盤は、14m までを N 値 3 の沖積粘性土(軟弱地盤部分)、14m から 30m までを N 値 10 の洪積粘性土とした。解析に用いるせん断弾性係数は、N 値とせん断波速度の関係<sup>6)</sup>から求めた。地盤は平面ひずみ要素(厚み 3m)でモデル化し、修正 R-O モデル<sup>4)</sup>(基準ひずみ  $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $h_{max}=0.18$ 、 $\alpha=1.727$ 、 $\beta=0.788$ )により非線形性を考慮している。

構造物の要素減衰は 3%、地盤は 2%とした。レーリー減衰は連成 1 次モードに対して 0.1%とした<sup>7)</sup>。

地震波は、八戸波 NS 成分(レベル 2: 最大速度 50cm/s)とし、モデル底部に入力した。

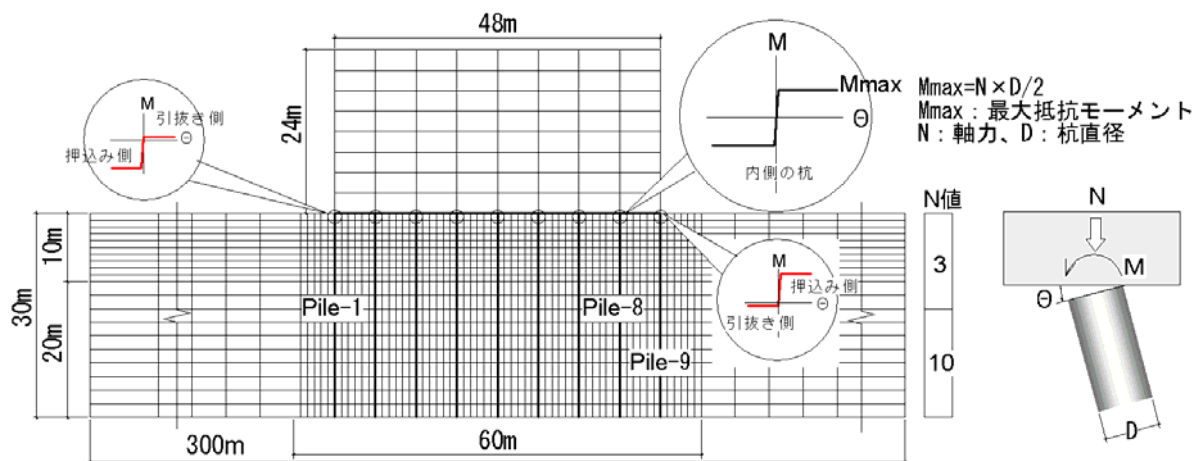


図 21 解析モデル図および簡易な杭頭接合部のモデル化(J-S-E)

b)解析結果

解析より得られた建屋頂部加速度、基礎部変位、杭から十分離れた地表面地盤の変位を図 22 に示す。建屋応答において、J-S-D と J-S-E は重なっており、その違いはほとんど無い。建屋加速度は、模型実験同様、若干半剛接合モデルが J-R と比較して減少している。建屋の周期が地盤の周期より短いため、建屋応答と地盤の応答の位相差は少なく（90 度以下）建屋加速度最大時に、地盤変位が慣性力の作用方向と同じ方向に生じている。

建屋加速度が最大となる  $T=18.6s$  付近の杭の曲げモーメントおよびせん断力分布を図 23 に示す。J-R では、中杭(Pile-8)の杭頭曲げモーメントが外側杭と比較して増大している。これは、基礎梁による杭頭の拘束度が内側と外側杭で異なるためである。軟弱地盤部分（14m 以浅）における杭の応力分布は、前面杭(Pile-9)と後側杭(Pile-1)ではほぼ同じ分布形状を示し、中杭(Pile-8)にはあまり地盤反力が作用していない(せん断力の変化が少ない)。これは、3.3.4-(2)-(b)-2)-b) で述べた通り、2 次元解析において地盤と

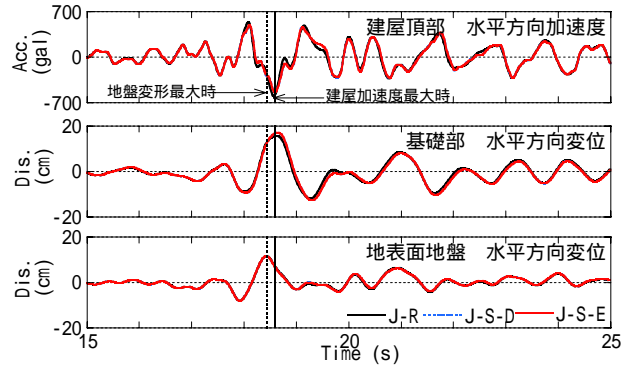


図 22 解析より得られた時刻歴

杭が節点を共有しているために、杭とその背後地盤が引張合うためと考えられる。この時間断面において、半剛接合部のモデル化の違いが杭の曲げモーメント・せん断力分布に与える影響はほとんど無いことがわかる。半剛接合モデルにおける杭頭曲げモーメントは、押し込み側(Pile-9)で、J-R に近づき、中杭(Pile-8)では、J-R と比較して 3 割程度に低減している。また、杭頭半剛接合モデルにおける杭頭せん断力は、押し込み側杭では、J-R と比較して約 1.2 倍程度に増大し、中杭では 3 割程度に低減している。これらの傾向は模型振動実験結果と良く対応している。深度 14m 以深の杭の曲げモーメントは、J-R と半剛接合モデルの間で顕著な差が確認できない。こ

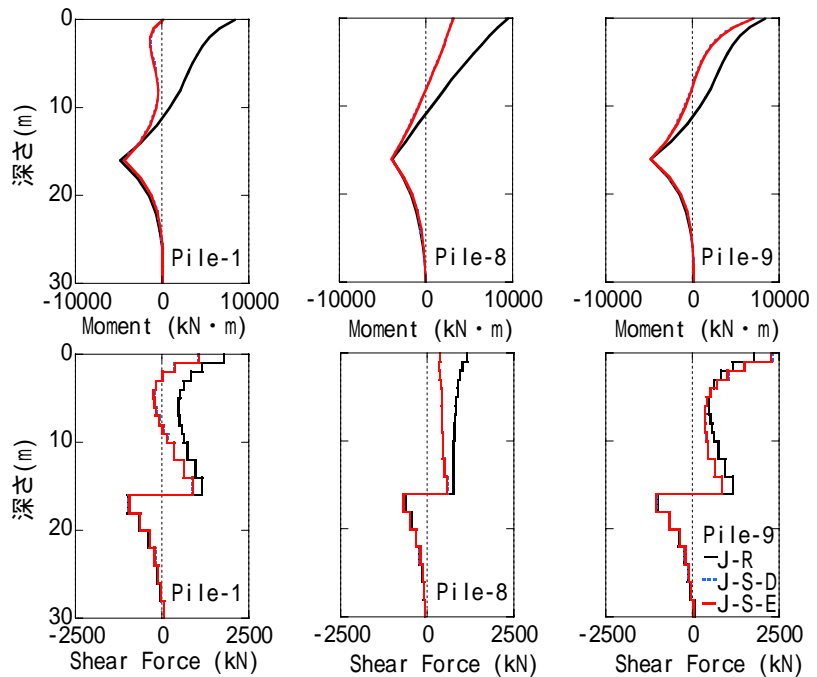


図 23 慣性力が最大となる  $T=18.6s$  付近の杭の M・Q 分布

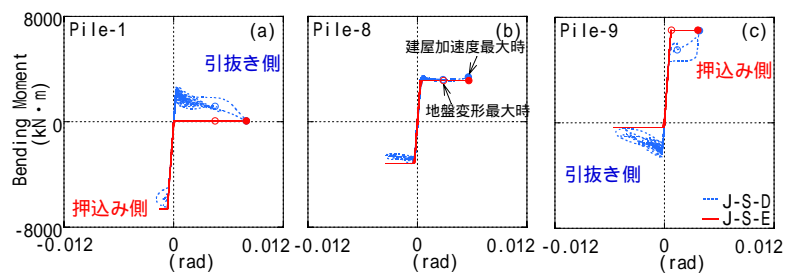


図 24 杭頭曲げモーメント-回転角

れは、深度 14m 以深の杭応力には、地盤変形の影響が支配的であるためと考えられる。

半剛接合モデルの杭頭の曲げモーメント-回転角の関係を図 24 に示す。J-S-D では、曲げモーメントが、軸力の変動を反映している様子がわかるが、建屋加速度最大時( 図中 ) には、J-S-E とほぼ等しい曲げモーメントと回転角となっている。

#### c) 結論

軟弱地盤に建つ実大建物に対する 2 次元 FEM 解析から、杭頭を半剛接合とした場合、建屋の応答が若干減少し、軸力変動の少ない中杭では安定した杭頭曲げモーメントの低減効果が期待できることを示した。一方で、杭頭半剛接合モデルの押込み側の杭頭には、軸力変動や杭配置の影響により、剛接合とした場合と比較して 1.2 倍程度のせん断力が生じる可能性があることを示した。また、想定した 2 層地盤における解析では、地中部杭応力の要因が地盤変形であったため、杭頭接合条件が杭地中部最大応力に与える影響は少なかった。杭頭半剛接合部のモデル化において、回転バネに逐次軸力変動の影響を考慮した解析と簡易なモデルによる解析を比較した場合、建屋応答や建屋慣性力最大時における曲げモーメント・せん断力分布に明確な違いがないことを示した。

#### 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

既往の杭基礎建物では、ほぼ剛接合と見なせる杭頭の接合方法を採用し、杭頭接合条件を剛接合と仮定し、設計を行っていることが多い。ここでは、杭頭半剛接合構法を採用した建物へ現行の設計法を適用する際の、留意点・改良すべき点などを明らかにするため、設計手法を模型振動実験や想定した実大建物へ適用した結果と、実験結果および動的解析結果を比較する。

##### a) 杭頭半剛接合構法の耐震設計において特に留意すべき事項

特に留意すべき事項として、以下の A～C を挙げるが、これらには相互関係がある。

##### A. 杭頭曲げモーメントの適切な評価 (杭頭接合部の適切なモデル化)

杭頭接合部の曲げモーメント-回転角関係および軸力・せん断力の伝達機構を適切にモデル化する。構法によっては、軸力が曲げモーメント-回転角に影響を与える機構もあり、これらの相互作用を適切に評価する必要がある。曲げモーメント-回転角のモデル化には、その非線形性を回転バネで直接モデル化する方法がある。また、杭頭曲げモーメントを評価するには、杭頭を剛接合とした場合に杭頭に生じる曲げモーメントの理論解に対する比を用いる方法等がある。

##### B. 地中部杭応力の適切な評価

杭頭の固定度が低下することにより、地中部のモーメントが増大する傾向がある。また、杭地中部の曲げモーメントは、地中部地盤反力の影響を大きく受けるため、地盤の非線形性や地震時の地盤変形の影響を適切に評価する必要がある。

##### C. 杭頭せん断力の適切な分配

各杭で杭頭の固定度が異なる場合、固定度が高い杭にせん断力が集中する。また、群杭の後側杭では地盤反力が減少するため、前側杭にせん断力が集中する傾向が強まる。従って、軸力に応じて杭頭の固定度が増大する構法の場合、転倒モーメントによる軸力変動および杭配置による影響を適切に評価する必要がある。

b) 杭頭半剛接合構法を採用した建物に対する耐震設計手法

上記設計上の留意点を考慮し、一般的に行われる耐震設計法を拡張し、以下の手法を杭頭半剛接合構法の耐震設計手法として提案する。

杭頭固定度を考慮した一様弾性地盤中の理論解（固定度を考慮した Chang 式<sup>8)</sup>）

これは、所謂 Chang 式に杭頭の固定度の影響を考慮する方法である。ここで、固定度は、杭頭を剛としたときの杭頭曲げモーメントの理論解に対する比で定義される。杭頭固定度は、杭頭の回転剛性により評価できるため、曲げモーメント-回転角関係が非線形化するモデルに対しても割線剛性を用いることにより、適用可能である。杭頭の固定度が異なる杭間における杭頭せん断力の分配を評価するためには、杭頭変位が等しい条件を与える必要がある。また、群杭の影響を評価する必要がある場合には、各杭の地盤反力係数にその影響を考慮した非線形特性を与えることも可能である。本実験における半剛接合部のように、杭頭の曲げモーメント-回転角の関係が非線形弾性の挙動を示すモデルに適用する場合、杭頭に作用する荷重に応じて、杭頭の固定度や地盤反力係数を変化させ、杭頭変位が等しくなるまで、繰り返し計算を行うことになる。

多層地盤中の杭を対象とし、杭および地盤の非線形性を考慮する方法<sup>9)</sup>（梁-ばねモデルによる方法）

杭を梁要素、地盤を離散化したバネ要素でモデル化する梁-バネモデルにおいて、杭頭部の M- $\theta$  関係等に適切な回転バネ要素等を導入する解析手法である。本手法では、と比較し、杭体の非線形性や深さ方向の地盤物性の変化、さらに地震時地盤変形の影響も考慮することが可能である。さらに、基礎梁や建屋を適切にモデル化することにより、基礎スラブの回転や杭頭変動軸力を直接評価することもできる。

c) 「耐震設計手法」の適用例とその妥当性の検証

）模型振動実験に対する設計法の適用（地盤変形の影響が比較的少ない場合）

検討対象は、3.3.4-(2)-(b)-1)における H16 半剛接合試験体（建屋短周期モデル）の実験結果とし、八戸波 L2 入力時の建屋慣性力が最大となる  $T=1.24s$  付近（図 4 参照）とした。設計手法として、固定度を考慮した Chang 式および 梁-バネモデルを適用した。における地盤反力係数は、H15 剛接合試験体に対する杭頭荷重-変位関係における杭頭荷重-変位関係から Chang 式を用いて逆算した地盤反力係数-変位関係を適用した。では、その地盤反力係数-変位関係を各深さの地盤-杭間バネに適用した。各設計法に作用させる慣性力は、 $T=1.24s$

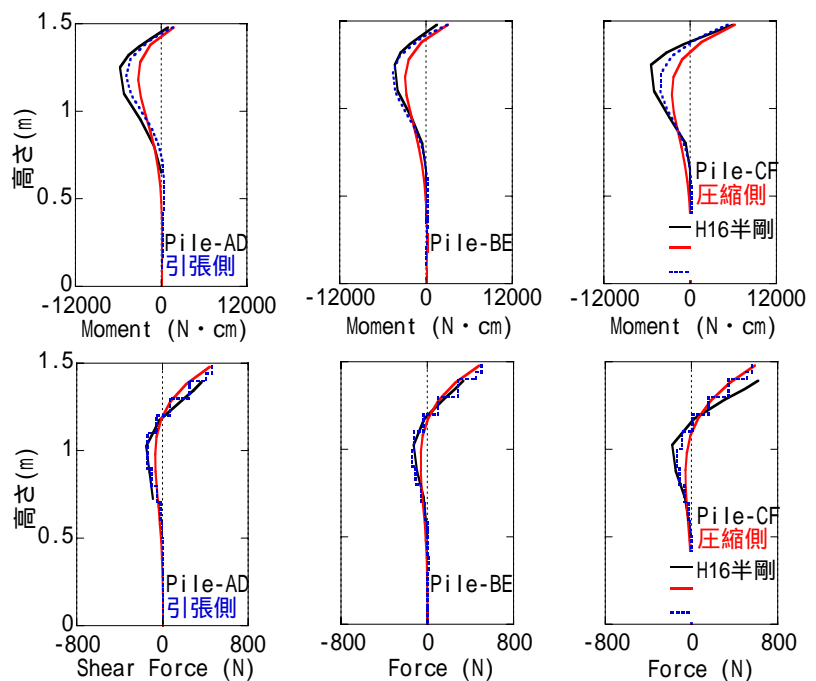


図 25 実験結果と耐震設計法の比較

における重錘とパイルキャップの加速度記録より求めた慣性力とした。なお、 $T=1.24s$  付近では、地盤変形の影響が少ないためでは、地盤強制変形を作用させていない。杭頭の  $M$ - $\theta$  関係は、簡易モデル(3.3.4-(2)-(b)-2-a))とした。では、杭頭変位が等しくなるまで、地盤反力係数の非線形性および杭頭曲げモーメント-回転角関係の非線形性について繰り返し計算を行った。では、構造物全体をフレームでモデル化し、慣性力を静的に作用させた。

設計法 および により得られた各杭の曲げモーメント・せん断力分布を実験結果と比較して図 25 に示す。杭頭に着目した場合、 においても、適切な解析条件を与えることにより、各杭の杭頭曲げモーメントおよび杭頭せん断力が、 と同様に良く評価できていることがわかる。Pile-CF の杭頭せん断力が実験結果と比較して若干小さいのは、杭配置の影響が考慮されていないためと思われる。地中部に着目した場合、 では実験結果と比較して曲げモーメント・せん断力をかなり過小評価しているのに対し、

ではその発生位置および大きさを良く再現できていることがわかる。

) 想定した実大建物に対する耐震設計法の適用 (地盤変形の影響が大きい場合)

ここでは、3.3.4-(2)-(b)-3)において想定した杭頭半剛接合構法を採用した建物に対し、設計法、設計法 (地盤強制変形なし・あり) を適用した。ただし、実大実験のデータが無い場合、ここでは、2次元 FEM を用いた全応力解析結果と比較・検討する。設計法を適用した時間断面は、建屋加速度が最大となる時刻  $T=18.6s$  付近(図 22)とした。設計法 において、杭頭せん断力合計が 2次元 FEM の解析結果と一致するよう、モデルに慣性力を作用させた。地盤反力係数・地盤バネは、基礎構造設計指針<sup>9)</sup>にならい、 $N$  値より基準地盤反力係数を評価し、非線形性・群杭効果を考慮した。杭頭接合部は簡易モデル(3.3.4-(2)-(b)-3-a))によりモデル化した。また、設計法 の地盤強制変形を作用させた解析では、建物から十分離れた地点における地盤変位の深度分布を作用させた。

設計法 により得られた各杭の曲げモーメント・せん断力分布を実験結果と比較して図 26 に示す。杭頭に着目した場合、 においても、適切な解析条件を与えることにより、各杭の杭頭曲げモーメントおよび杭頭せん断力が、 と同様に良く評価できていることがわかる。Pile-CF の杭頭せん断力が実験結果と比較して若干小さいのは、杭配置の影響が考慮されていないためと思われる。地中部に着目した場合、 では実験結果と比較して曲げモーメント・せん断力をかなり過小評価しているのに対し、

ではその発生位置および大きさを良く再現できていることがわかる。

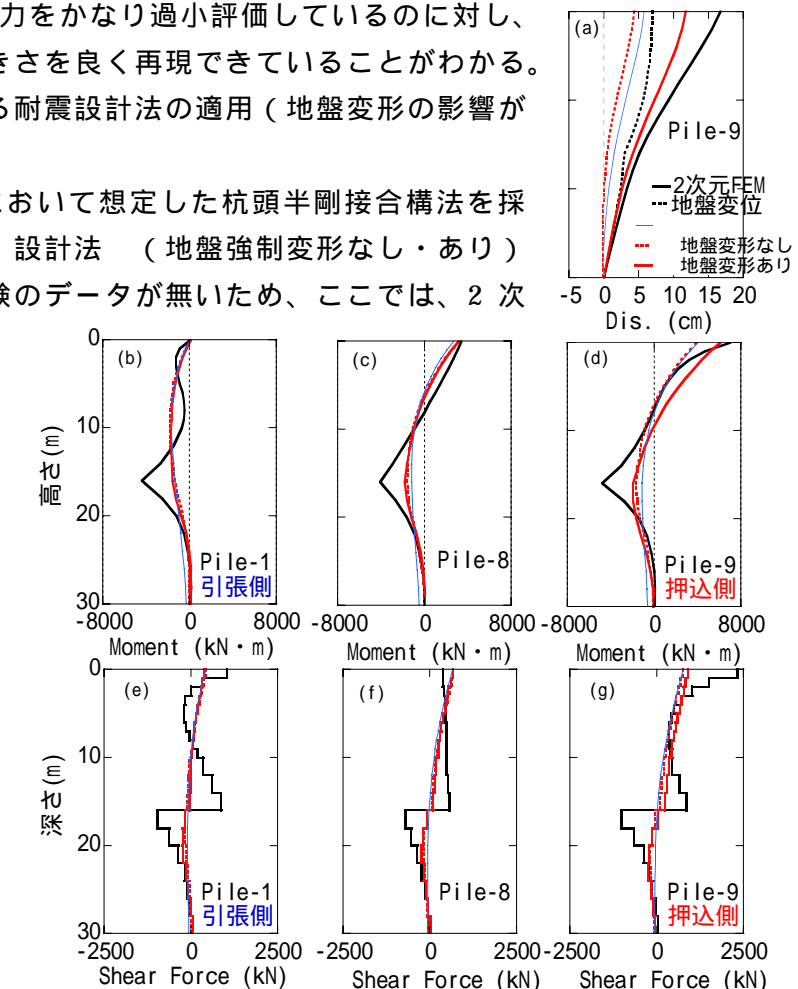


図 26 設計手法の適用例と 2次元 FEM の比較

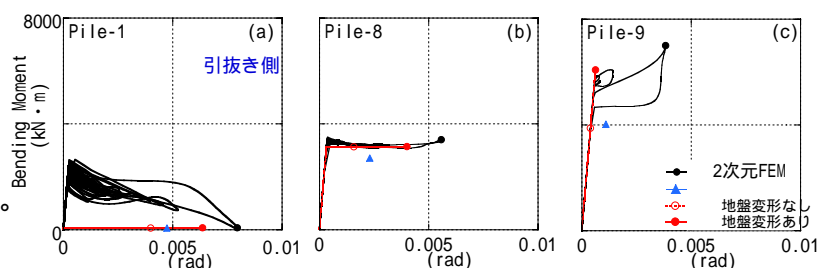


図 27 設計手法の適用例と 2次元 FEM の比較 ( $M$ - $\theta$  関係)

力・変位分布を図 26 に、杭頭曲げモーメント-回転角の関係を図 27 に示す。設計法による結果は、2次元 FEM と比較して、地中部の曲げモーメント・せん断力が小さく、押し込み側にせん断力が集中する傾向が小さい。これらは、3.3.4-(2)-(b)-3-b)で述べた 2次元 FEM における地盤と杭の節点共有方法の問題や有限要素法と梁-バネモデルにおける地盤のモデル化の違い、解析定数の問題（動的解析で必要となる解析定数と静的解析で必要となる解析定数が異なり、そのため N 値からの評価式自体も異なる）などが関係しており、今後の研究課題と言える。

設計法 と を比較した場合、 における地中部曲げモーメントやせん断力が と比べて小さい。これは、 では一様地盤を仮定しているため、地中部杭応力を適切に評価できていないためと考えられる。設計法 において地盤変形を与えた場合、杭頭曲げモーメント-回転角関係が線形範囲にある Pile-9 の杭頭曲げモーメント・せん断力が、地盤変形を考慮しない場合と比較して増大している(図 26(d),(g))。杭頭曲げモーメントが非線形化した Pile-1・8 では、地盤変形を与えた場合、回転角が増大している(図 27(a),(b))。また、杭の変位についても、地盤強制変形の影響が図 26(a)から確認できる。以上のことから、地盤変形の影響が大きい軟弱地盤において、地中部杭応力、杭頭の回転角、杭の変位などを適切に評価するためには、梁バネモデルによる解析を採用し、地盤変形の影響を適切に評価する必要があると考えられる。

### c) 結論

以上の結果をもとに、提案した設計手法の特徴と適用範囲をまとめて表 7 に示す。ただし、本検討結果は、上部構造物と杭が弾性範囲内での結果である。

表 7 提案する設計手法の特徴とその適用範囲

	A.杭頭曲げモーメントの適切な評価	B.地中部杭応力の適切な評価	C.杭頭せん断力の適正な分配	適用範囲
固定度を考慮したChang式	固定度 にて評価することができる。ただし、軸力変動の影響を考慮する必要がある。	評価は難しい。	杭頭変位が等しい条件を与える必要がある。また、必要に応じて、群杭の影響を考慮する。	損傷限界状態の検討まで適用可能
梁-バネモデル	回転バネ要素などにより評価することができる。ただし、軸力変動の影響を考慮する必要がある。	各層ごとに地盤バネを適切に評価する必要がある。また、必要に応じて地盤強制変形を作用させる。	基礎梁(および建屋)をモデル化するよことにより、詳細に評価することができる。必要に応じて、群杭の影響を考慮する。	終局限界状態の検討まで適用可能

### (c) 結論ならびに今後の課題

#### 1) 結論

杭頭半剛接合構法を採用した杭基礎建物-地盤の模型振動実験およびその 2次元 FEM によるシミュレーション解析、さらに実大建物に対する解析的検討から以下の結論を得た。

杭頭半剛接合構法は、杭頭曲げモーメントの軽減に対して有効であり、特に軸力変動の少ない杭では安定した低減効果が期待できる（レベル 2 加振で、模型振動実験では 4 割程



度、実大建物の解析では 3 割程度に低減した)。杭頭半剛接合構法を採用した建物では、建屋応答が若干減少する傾向があり、中杭の杭頭せん断力が低減する可能性もある。ただし、変動軸力や杭配置の影響により、押し込み側杭にせん断力が集中する傾向がある。

2次元 FEM における杭頭半剛接合部のモデル化方法としては、曲げモーメント-回転角関係を軸力変動の影響を逐次考慮した回転バネでモデル化する方法が考えられる。この方法により、模型振動実験における建物応答および杭頭固定度が押し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良く再現できることを示した。また、杭頭半剛接合部のモデル化において、軸力変動の影響を簡便に考慮するモデル化方法を提案し、この手法においても、建屋応答や建屋慣性力最大時における曲げモーメント・せん断力分布を逐次軸力変動の影響を考慮したモデルと同様に良く評価できることを示した。

杭頭半剛接合構法に対する設計手法として、簡便な杭頭固定度を考慮した Chang 式による方法、梁-バネモデルによる方法を提案した。両方法ともに、実験結果の杭頭曲げモーメント・杭頭せん断力を良く再現できることを確認した。また、梁-バネモデルによる方法では、地中部杭応力についても、実験結果を良く再現した。ただし、群杭の影響については、今後より詳細に検討する必要があることを示した。

## 2) 今後の課題

杭頭半剛接合構法は、従来の接合構法に比べて地震時の杭頭部の被害を軽減できるとともに、掘削土量を削減できるなど環境的なメリットも大きい。そのため、本構法の実施適用件数は増加傾向にある。本研究は、小型模型を用いた振動台実験であり、杭および構造物が弾性範囲内において、その効果と地震時挙動を解明した。今後解決すべき課題としては、「杭・建屋非線形化時の挙動の把握」「液状化地盤での適用の可能性の検討」「建屋根入れの影響の把握」「地震後における残留変形の有無の検討」「群杭による影響の把握」などが挙げられる。本構法を採用した実建物は、現時点では巨大地震に遭遇しておらず、その挙動は未解明と言える。従って、本構法がさらに展開・普及されるためには、これらの課題の解決を目的とした実大実験を実施する必要があると考えられる。

## (d) 引用文献

- 1) 原孝文, 安田聡, 川端一三, 小室努, 是永健好, 辰濃達: 主筋を基礎に定着させない場所打ちコンクリート杭の開発その 1 ~ 2, 日本建築学会大会, 構造, pp.187-190, 2002.8.
- 2) 石崎定幸, 真島正人, 長尾俊昌, 青島一樹, 船原英樹, 堀井良浩: 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 その 1 ~ 2, 日本建築学会大会, 構造, pp.763-766, 2004.8
- 3) Iai, S.: Similitude For Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Soils and Foundations Vol.29, No.1, pp105-118, Mar. 1989
- 4) 大崎順彦, 原昭夫, 清田芳治: 地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案, 第 13 回土質工学研究発表会講演集, pp.1057 ~ 1060, 1978
- 5) 船原英樹, 青島一樹, 真島正人, 石崎定幸, 藤井俊二: 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解析的検討, 日本建築学会大会, 構造, pp.693-694, 2003.9.

- 6) Imai, T.: P- and S-Wave Velocities of The Ground in Japan, Proc. of the 9th Int. Conf. ICSMFE, Vol.2, pp.257 ~ 260,1977
- 7) 日本建築学会：入門・建物と地盤の動的相互作用、pp259
- 8) 杉村義広：杭頭回転拘束度および杭長を考慮した杭の水平抵抗理論解,日本建築学会構造系論文集,第 365 号,pp132-143,1986.7
- 9) 日本建築学会：基礎構造設計指針(2001),pp269

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
真島正人 石崎定幸 船原英樹 長尾俊昌	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 その3 杭頭接合部に大きな変動軸力を作用させた実験結果	2005 年日本建築学会大会	平成 17 年 9 月 (発表予定)
石崎定幸 真島正人 船原英樹 長尾俊昌	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 その4 解析的検討	2005 年日本建築学会大会	平成 17 年 9 月 (発表予定)

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成14～16年業務のまとめ

#### 1年目：

杭頭半剛接合構法の既往の研究事例に関する文献調査を行い、本構法に関する現状の技術動向を把握した。

杭頭接合条件を考慮した実大建物の地震時挙動に関する解析的検討から、本構法が地震時の杭・基礎梁の曲げ応答を低減できる可能性を示した。

#### 2年目：

杭頭部を剛接合あるいは半剛接合とした杭基礎建物-地盤系の模型振動実験を実施した。杭頭部を半剛接合とした場合、軸力変動の少ない杭では常に安定した曲げモーメント低減効果が確認でき、最大曲げモーメントが剛接合と比較してレベル1加振時では7割程度、レベル2加振時では4割程度に低減した。それに対応し、基礎梁に生じる曲げモーメントも低減することを示した。また、杭頭の接合条件が建屋応答に与える影響は少ないことを実証した。

#### 3年目：

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)-地盤系の模型振動実験を実施し、前年度の実験と比較検討した。杭頭を半剛接合とした場合、軸力変動の影響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き、杭頭せん断力は剛接合とした場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。一方で、引抜き側の杭では、杭頭曲げモーメント・せん断力が剛接合と比較して大きく低減した。

2次元FEMを用いた模型振動実験に対するシミュレーション解析を実施した。杭頭半剛接合部の曲げモーメント-回転角の関係を逐次軸力依存型の非線形弾性バネ要素によりモデル化することにより、杭の曲げモーメント・せん断力・建屋応答、さらに押込み側杭にせん断力が集中する現象を良く再現できることを示した。また、軸力変動の影響を簡便に考慮した半剛接合部のモデル化方法を提案した。簡便なモデルによる解析は、逐次軸力変動の影響を考慮した解析と同程度に、建物応答や慣性力最大時の杭応力分布を評価できることを示した。

軸力変動の影響を考慮した杭頭半剛接合モデルを用いた、実大建物の地震時挙動に関する解析的検討を実施した。提案した杭頭半剛接合部のモデル化手法により、実大建物の地震時の挙動を詳細に再現できる可能性を示した。

本構法の効果を評価できる設計法として、簡便なChang式を拡張した手法、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。

