

1995年兵庫県南部地震で被災した杭基礎建物の損傷要因に関する検証

土佐内 優介 小林 勝巳
佐々木 仁

概 要

近年、杭基礎部材の耐震性能に関する実験・研究が盛んに行われており、設計指針等の整備も進められている。筆者らは、建物-杭基礎-地盤の一体解析にこれらの成果を活用して、兵庫県南部地震で被災した杭基礎建物の損傷要因について検証を行っており、地震時に作用した外力の評価や杭基礎建物の損傷要因の評価を試みている。本報告では、それらの検証結果について示す。

検討では建物-杭-地盤を立体フレームにより、一体でモデル化した。一体モデルによる解析を用いて、地震力および地盤変形と、杭基礎建物の損傷について検討を行った。はじめに上部構造の弾性応答解析と地盤の有効応力解析を行い、一体モデルの上部構造に与える地震力と一体モデルの地盤に与える変形を算定し、つぎにこれらの外力を一体モデルに同時に作用させる増分解析を行った。その結果、杭頭および杭地中部の曲げ破壊には地盤変形による外力が大きく寄与したことが、地盤変形による外力は、基礎梁よりも上部の損傷にはほとんど影響しなかったことが確認できた。

A study of cause of damage to pile foundation buildings in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Abstract

A great deal of studies on the seismic performance of the pile foundation structure are being carried out, and seismic design code is improving. We attempted an evaluation of the causes of damage to pile foundation buildings in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake to estimate the seismic force on buildings. This report shows the results of numerical analysis using a 3D frame model that included the buildings, the piles, and the surrounding ground. Analysis of this model was used to consider the combination of inertial force and ground deformation.

First, we conducted elastic response analysis of the upper structures and effective stress analysis of the surrounding ground and estimated the seismic force and the deformation caused to the surrounding ground. Then, we used the model to simultaneously conduct an incremental analysis of these forces on operation. Based on push-over analysis, it was confirmed that seismic force caused by ground deformation contributed greatly to the bending failure of pile-heads and underground piles and that ground deformation does not have an impact on damage to the upper structures.

キーワード: 立体フレーム、一体モデル
 応答変位法、液状化

§1. はじめに

1.1 背景

1994年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震では、杭基礎建物の被災事例が報告されている¹⁾等。それらの中には、上部構造には補修が不要であるにもかかわらず、杭の損傷により建物が傾斜したために継続使用ができなくなった事例が報告されている。また、地震直後には建物傾斜が見られずに継続使用されていたが、本報告で対象とした兵庫県南部地震で被災した建物のように、被災から数十年経過後の免震レトロフィット工事の際に地下を掘削したことで被害が明らかになった事例²⁾もあり、杭基礎建物の被災事例は、現状で把握されている事例数よりも多く存在している可能性が考えられる。

近年では、杭基礎部材の耐震性能に関する実験・研究³⁾が盛んに行われており、設計指針⁴⁾の整備も進められている。筆者らは、建物・杭基礎・地盤の一体解析にこれらの成果を活用しつつ、兵庫県南部地震で被災した杭基礎建物の損傷要因について検証を行っており、地震時に作用した外力の評価や杭基礎建物の損傷要因の評価を試みている。本報告では、それらの検証結果について示す。

1.2 対象建物

(1) 建物概要

本報告で対象とする杭基礎建物は、1973年に竣工した地上8階、地下1階の耐震壁付SRC造の事務所建物である。対象建物は1973年に竣工した庁舎で、地上9F、地下1F、塔屋1Fの鉄骨鉄筋コンクリート造である。建物の平面形状は南北方向が28m、東西方向が57mの長方形であり、階高は、3.55m～4.50mである。

上部構造の形式は、長辺、短辺方向共に耐震壁付ラーメン構造である。スパンは長辺方向が7m×8スパン、短辺方向が7.9m～12mが4スパン(うち1スパンは地下階のみ)である。本建物の主な伏図、軸組図を図1から図4に示す。耐震壁は、連層耐震壁であり、コ字形、またはI字形に平面中央付近に配置されている。使用材料は、鉄骨がSM50A、SS41、鉄筋がSR24、SD24～SD35、コンクリートの設計基準強度 F_c は210～240kg/cm²である。

基礎構造は場所打ちコンクリート杭による杭基礎形式である。本建物の杭の断面図を図5(a)に示す。杭径φ1100(主筋16-D19、フープ筋φ13@250)の杭が91本、φ1200(主筋14-D19、フープ筋φ13@250)の杭が33本である。材料強度は、主筋がSD30、せん断補強筋がSR24、コンクリートの設計基準強度 F_c は210kg/cm²である。図5(b)に示すように、杭先端は砂礫層に支持されており、杭頭はGL-6m付近で

あり、杭頭付近の砂、礫混り砂、シルト質砂、砂質シルト層のN値は2～14の範囲である。

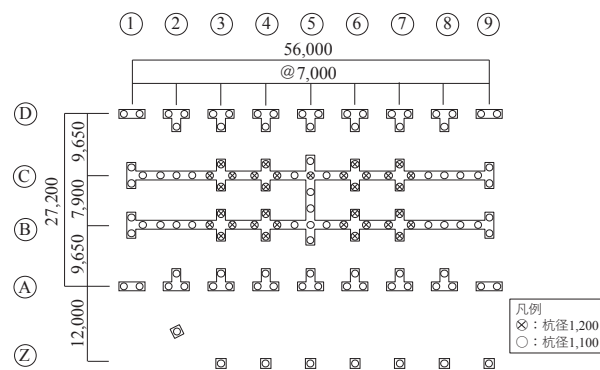


図1 杭伏図

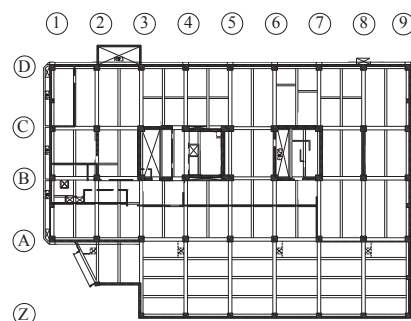


図2 地下一階伏図

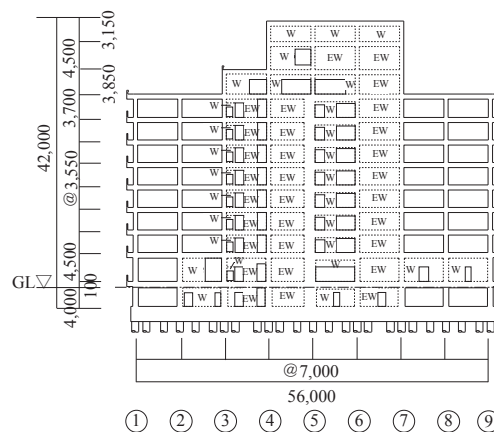


図3 B通り軸組み図

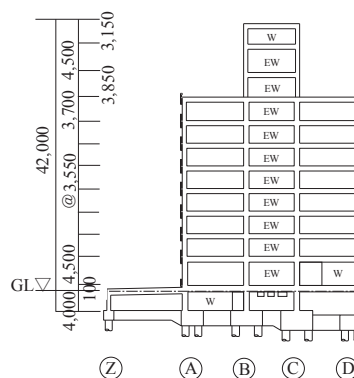


図4 7通り軸組み図

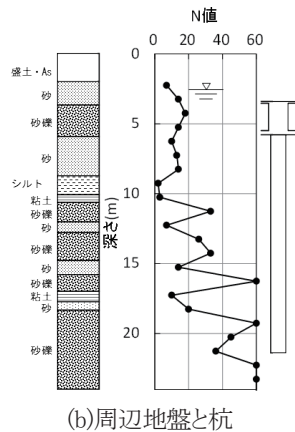
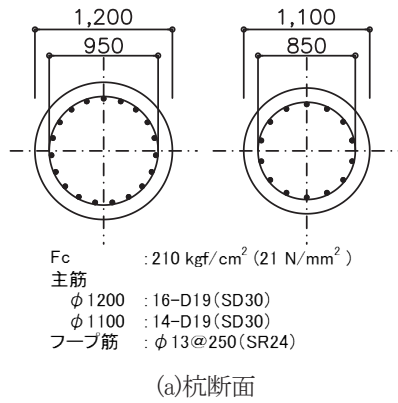


図5 杭姿図と周辺地盤のN値

設計基準強度とした。柱梁接合部は剛域とし、材端ばねは柱フェイス位置に配置して、フェイス位置から $0.25D$ (D : 梁せい) 入った位置を剛域端とした。フェイス位置から剛域端までは弾性梁要素とした。材端の曲げ特性はトリニアでモデルし、ひび割れモーメント M_c 、剛性低下率 α_y は建築物の構造関係基準解説書⁶⁾付録1-3に、降伏モーメント M_y は鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁷⁾に従って算定した。降伏モーメント算定時の鉄筋・鉄骨の降伏強度は規格値の1.1倍とした。せん断ばねはバイリニアモデルとし、せん断耐力 Q_u の算定は文献⁶⁾の付録1-4に従った。

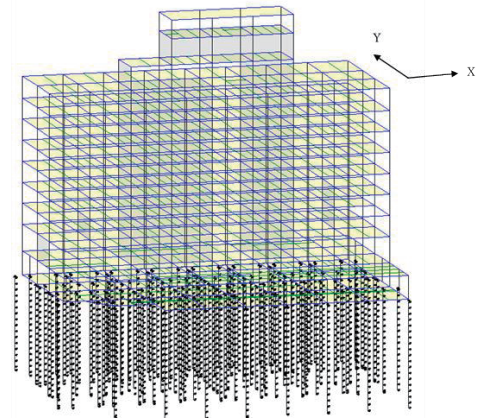


図6 解析モデル

(2) 被害状況の概要

各杭の損傷パターンは既往の文献⁵⁾で報告されているとおりである。杭は合計 124 本であり、今回の掘削により、杭頭接合部から $1D$ (D : 杭径) の範囲に曲げ破壊が見られた杭が全体の 90%以上、杭頭付近にせん断破壊を生じた杭が 9 本、杭頭接合部にずれを生じた杭が 4 本あった。地震直後に行われた調査においては、上部構造には外壁、柱梁、耐震壁にひび割れは生じたが、軽微な補修が必要な程度で、耐震性能上、大きな問題はないとされている。杭周辺の掘削時、建物直下の地盤には液状化の痕跡が確認されている。

§2. 建物-杭-地盤の一体モデルによる解析条件

2.1 各部材のモデル化

ここでは、解析モデルについて示す。図6に示すモデルのように、立体フレームにより建物と杭基礎をモデル化した。上部構造の各層は剛床とし、部材や材料の降伏後剛性は初期剛性の1/1000とした。

(1) 梁のモデル化

梁は、材端に曲げばね、せん断ばねを配置したはり要素でモデル化した。ばね特性の設定では、コンクリート強度は

(2) 柱のモデル化

柱の曲げ変形、軸変形は材端のマルチスプリングでモデル化する。図7(a)は断面分割例を示している。コンクリートの応力-ひずみ関係は図7(b)のような剛性低減型トリニアで、鉄筋・鉄骨は図7(c)のような降伏強度を折れ点とするバイリニアでモデル化した。は梁のフェイス位置にマルチスプリングを配置し、 $0.25D$ (D : 柱せい) 内側を剛域端とする。部材の塑性ヒンジ長さは $0.1 \times L_0$ (L_0 : 部材内法長さ)とした。せん断ばねはバイリニアモデルとし、せん断耐力 Q_u の算定は文献⁶⁾付録1-4節に従った。コンクリート強度は設計基準強度、鋼材の降伏強度は規格値の1.1倍とした。

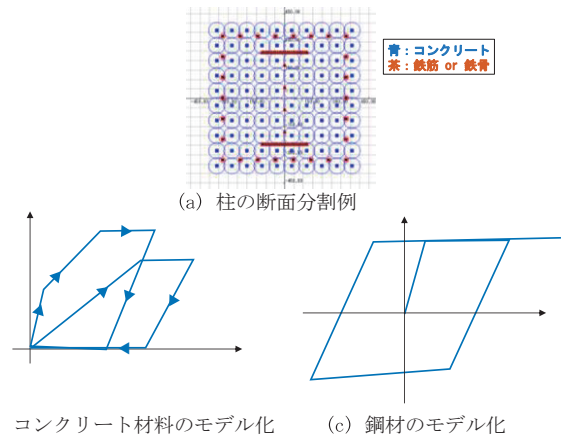


図7 柱のモデル化

(3) 壁のモデル化

耐震壁は図8に示すように、2本の側柱と壁面を3本柱モデルに置換した。軸変形および面内方向曲げ変形は壁面および側柱のマルチスプリング、せん断変形はせん断ばね、面外方向の曲げ変形とせん断変形は側柱のマルチスプリングによりモデル化している。コンクリートの応力-ひずみ関係はトリニアで、鉄筋は降伏強度を折れ点とするバイリニアでモデル化した。部材の塑性ヒンジ長さは $0.1 \times L_0$ (L_0 : 部材内法高さ)とした。せん断ばねはトリニアモデルとし、ひび割れせん断耐力 Q_c 、終局せん断耐力 Q_u の算定は文献⁹⁾付録の1.3節に従う。壁の側柱の両端は壁面内方向に対してピン接合とした。また、境界梁は剛体とした。

地下階の耐震壁は、付帯柱心と杭心の位置があていないことによるプログラム上の制約があるため、マルチスプリングでモデル化できない。そのため、等価なせん断剛性となるブレースに置換してモデル化した。

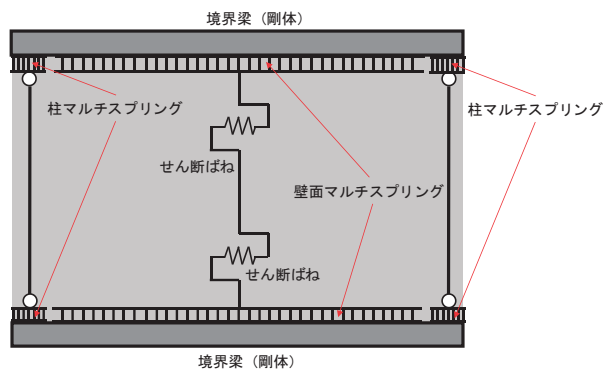


図8 耐震壁のモデル化

(4) 杭のモデル化

杭は軸方向に1m程度ずつに分割し、曲げ変形と軸変形はマルチスプリングでモデル化した。マルチスプリングの数は、概ね100個程度とした。マルチスプリングのうち50%の要素が降伏に達したときを杭の曲げヒンジ形成したと判定することとした。せん断変形はバイリニア型せん断ばねでモデル化し、各杭のせん断耐力 Q_u は杭を矩形の柱とみなして算定した。

杭頭と基礎梁の接合部には回転ばねを配した。杭頭回転ばねには建物平面の中心付近に位置するB-5の $M-\theta$ 関係を用いた。杭頭接合部の終局モーメント M_u と原点を結ぶ直線の傾きを初期剛性 K_r とし、 M_u に達した後の剛性を $0.001 \times K_r$ とするバイリニアにモデル化した。 $M-\theta$ 関係の算定では、ほとんどの杭頭付近でコンクリートが脆弱であったことを考慮し、コンクリートの圧縮強度 σ_B は 21 N/mm^2 と仮定した。

2.2 地盤のモデル化

(1) 杭-地盤間の水平地盤ばね

自由地盤の変形によって生じる水平力を杭に伝達するための地盤ばねは、図5(b)に示すボーリング柱状図をもとに、建築基礎構造設計指針⁸⁾を参照して設定した。地盤ばねの初期剛性の算定には、 N 値から推定したヤング係数 E_0 を用いた。また、液状化が発生すると想定される層の初期剛性は、液状化の影響を考慮して過剰間隙水圧比の平方根に応じて低減した初期剛性を解析の初めの段階から用いた。本モデルでは地盤ばね間の相互作用は考慮しない。また、鉛直方向地盤ばねは取り付けておらず、杭先端地盤の鉛直剛性や杭周面摩擦は考慮していない。

2.3 外力の設定

(1) 自由地盤の地盤変形による外力

被災直後の被害調査から、対象建物周辺の地盤には液状化の痕跡が見られた。そこで、増分解析で自由地盤に与える強制変位は、有効応力解析によって算定した。基盤波には、深部地盤の不整形性を考慮された既往の文献⁹⁾による波形を用いた。図9に杭先端に対する自由地盤の最大相対変位分布を示す。杭頭深さ位置の最大相対変位は274mmであった。

(2) 上部構造に作用する外力

上部構造への地震力を設定するために、上部構造モデルを用いて、有効応力解析で算定した地表面の応答加速度波形を入力波とした弾性応答解析を行った。このとき、建物頂部における最大応答加速度は 5.75 m/s^2 、最大速度は 0.315 m/s 、最大変位は 0.047 m であり、最大層間変形が生じたのは7層で、最大層間変形角は 0.0016 rad であった。また、地下震度は1階層せん断力係数が0.20のときに水平震度0.10と仮定した。

一体モデルの増分解析では上部構造に作用する外力と同時に自由地盤における地盤変形による外力を作用させる。地盤変形分布は、建物重量に対する杭頭せん断力の合計 $\Sigma Q_0/\Sigma W$ が0.285に相当するとき、杭頭位置の自由地盤変位が274mmとなるように漸増させることとした。

地震力は各層の重心位置に作用させ、自由地盤変位は、杭の長さ方向1mごとに取り付けた水平地盤ばねを介して杭に作用させた。

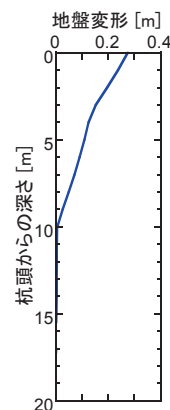


図9 地盤変形

§3. 増分解析による検討

3.1 解析ケース

外力の与え方について、図10に示す。地震時の外力分布と杭の破壊性状について考察するため、外力として上部構造に地震力のみを与える解析(以降、Case1とする)と、地震力と地盤変形を与える解析(以降、Case2とする)を行った。水平力は各階平面の重心位置に、地盤変形は自由地盤に与えた。各Caseの荷重方向は地震動の主軸方向に合わせて北西方向とした。

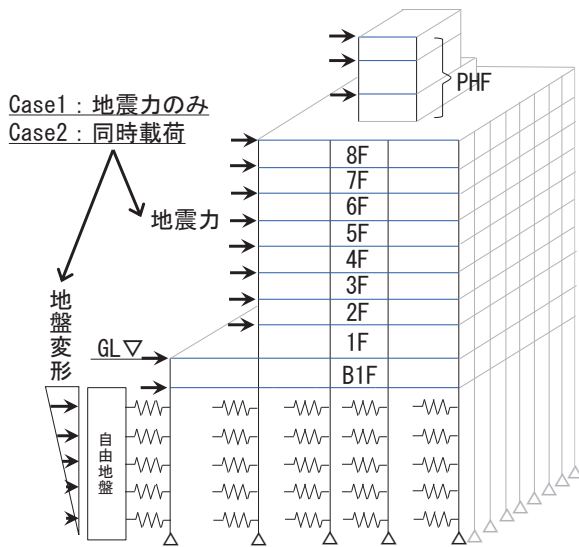


図10 解析で考慮する外力

3.2 荷重変形関係

図11にCase1とCase2の増分解析による各層の層せん断力と層間変位を示す。杭頭位置の変位は、杭頭くい先端に対する杭頭の相対変位を示している。また、図中の○、□、△は前述の $\Sigma Q_0/\Sigma W$ が0.10、0.20、0.30に達した時点における各層の変形分布である。外力として地盤変形も考慮した場合には、杭先端に対する杭頭の相対変位が大きくなり、 $\Sigma Q_0/\Sigma W$ が0.10の時点で95mmに達した。

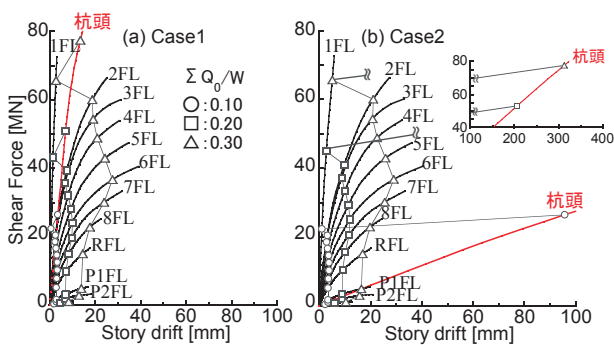


図11 荷重変形関係

3.3 杭頭曲げヒンジと実被害の比較

図12にCase1、Case2における5通りとB通りの損傷評価($\Sigma Q_0/\Sigma W=0.20$ 時)を示す。地盤変形を考慮しないCase1の場合には、杭には曲げひび割れが生じる程度であるが、上部構造には耐震壁のせん断破壊や梁の曲げ降伏が発生している。地盤変形と地震力を考慮したCase2では、Case1と概ね同様の上部構造の損傷に加えて、複数の杭頭および杭中間部にも曲げ降伏が生じている。このことから、掘削調査にて多数の杭で観察された杭頭曲げ破壊には、地盤変形による外力が大きく寄与したと考えられる。

また、地盤変形を考慮したCase2では基礎梁の曲げ降伏発生タイミングが遅れる箇所がある一方で、基礎梁より上部の柱、梁、耐震壁の損傷発生状況は地盤変形を考慮しないCase1と変わらなかった。

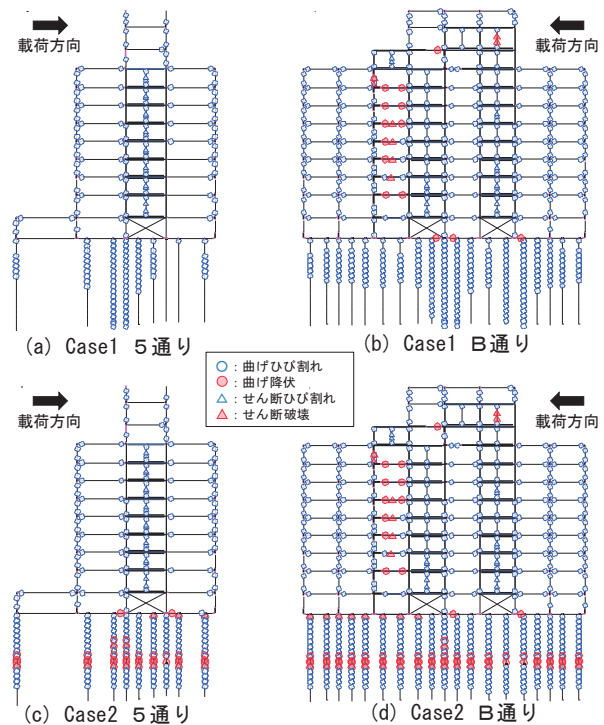


図12 ヒンジ発生状況 ($\Sigma Q_0/\Sigma W=0.20$)

§4. 慣性力と地盤変形の位相差を考慮した検討

地震直後に行われた調査では上部構造に耐震性能上、大きな問題はないことが確認されており、本報告で行った解析は、上部構造の実被害に比べて損傷を過大評価していると考えられる。そこで図13に上部構造の弾性応答解析による一階層せん断力と、有効応力解析による自由地盤変位と過剰間隙水圧比を示す。これによると、一階層せん断力の最大応答は9.2秒で生じている。同時刻における液状

化層の過剰間隙水圧比は0.4程度である。地盤変位の最大応答は過剰間隙水圧比が0.8程度に上昇した10.7秒で生じており、この前後のサイクルにおける層せん断力のピークは前述の9.2秒時点に比べて0.65倍程度以下になっている。このことから、上部構造の最大層せん断力と地盤の最大変形は同時には作用していなかった可能性が考えられる。地盤変形による地上一階以上への影響はほぼ見られなかったことから、Case2では上部構造に作用した地震力を過大に評価していると推察され、これが上部構造の損傷を過大評価した一因となった可能性が考えられる。

そこで、図14にせん断力を0.65倍に低減した解析の損傷評価を示す。この場合でも、ヒンジ発生タイミングが遅れるものの上部構造にはヒンジが生じる結果となっており、上部構造の損傷を過大評価してしまっていることを確認した。

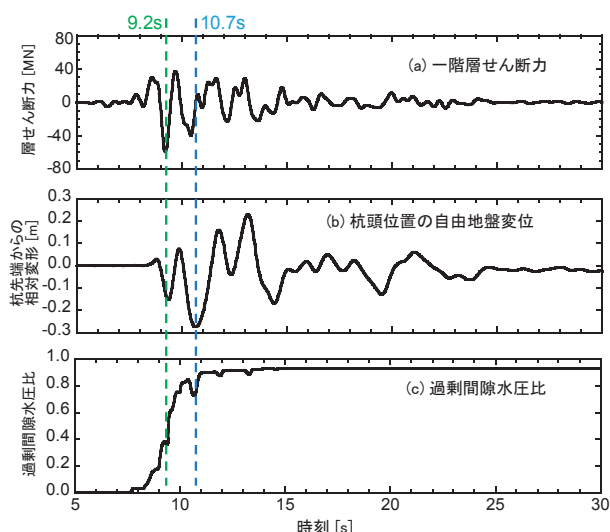


図13 層せん断力と地盤変形の応答波形

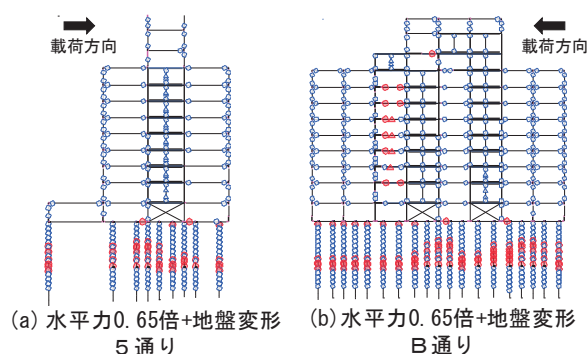


図14 層せん断力低減時のヒンジ発生状況

($\Sigma Q_0 / \Sigma W = 0.20$)

§5. まとめ

本報告では建物－杭－地盤の一体モデルによる増分解析により、地震時の地盤変形と層せん断力に関する検討を行い、以下の知見を得た。

(1) 杭頭および杭中部の曲げ破壊には地盤変形による外力が大きく影響した。

(2) 地盤変形による外力は、基礎梁より上部の損傷にはほとんど影響しなかった。

今後は時刻歴応答解析も実施し、地震時の外力について更に検討を行いたいと考えている。また、地下階の根入れ部の地震時挙動も杭損傷に影響を与えた可能性があるため、あわせて検討を進めたい。

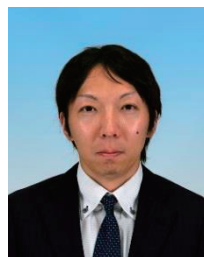
謝辞 本検討にあたり、北海道大学教授 飯場正紀先生、建築研究所 平出務様には貴重なご意見とご指導を賜りました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 金子治、中井正一、阿部秋男、飯場正紀、久世直哉、平出務：2011年東日本大震災における建築物の杭基礎の被害状況と要因分析、地盤工学会誌、Vol.62、No.1、pp.16-19、2014.1
- 飯場正紀、植木暁司、田中良一、小林勝巳、佐々木聡、柏尚稔、平出務：1995年兵庫県南部地震による場所打ちコンクリート杭の損傷と被害要因その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 547-548、2015
- 向井智久、平出務、長澤和彦、河野進、岸田慎司、金子治、小林勝巳、木谷好伸、今井康幸：大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造性能評価に関する研究 その1～15、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 575-604、2017.8
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎高造部材の耐震設計指針（案）・同解説、2017.3
- 田中良一、飯場正紀、小林勝巳、佐々木聡、柏尚稔、平出務：1995年兵庫県南部地震による場所打ちコンクリート杭の損傷と被害要因その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 549-550、2015
- 国土交通省国土技術政策総合研究所、建築研究所、監修：建築物の構造関係技術基準解説書
- 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2001.10
- 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2014.1
- 永野正行、大野晋、古山田耕司、加藤研一：兵庫県南部地震時の神戸市内における基盤地震動及び地盤増幅特性、日本建築学会構造系論文集、第511号、pp. 77-84、1998

ひとこと

杭基礎の耐震設計に関する実験・研究が盛んになってきています。杭基礎建物の損傷要因を明らかにして今後の技術開発や設計に活用していきたいと思えます。



土佐内 優介