

論文 基礎梁の地震時応力に関する解析的研究

郭濟蒼^{*1}・林静雄^{*2}・坂田弘安^{*3}・香取慶一^{*4}

要旨：基礎構造には、大地震時に建物を安定して支持する機能を確保するために、合理的な設計が必要である。地震時に生じる基礎梁の応力にはフーチングや杭などの構造が影響すると考えられるが、この点について明確な資料はない。本研究では、2棟の建築物について弾塑性フレーム解析を行い、地震時の基礎梁の応力に及ぼす杭の配置や支持状態の影響について考察している。

キーワード：基礎構造、フーチング、杭、基礎梁、フレーム解析、

1. はじめに

基礎構造は上部構造から作用する鉛直荷重と水平荷重を安全に地盤に伝達し、大地震時にも建物を安定して支持する機能を確保するために、合理的な設計が必要である。1995年兵庫県南部地震における基礎の被害では、杭のみならず、基礎スラブや基礎梁までもが被害を受けている。日本建築学会の「建築基礎構造設計規準・同解説」[1]、「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」[2]等による基礎梁の設計では、基礎梁は降伏ヒンジ形成の確認と降伏ヒンジ形成後の補修が困難な地中に設けられる構造であること、原則として、基礎梁を含めて、基礎構造は建物全体を安定に支持する機能を有していることの2点を考慮し、基礎梁端部に降伏ヒンジを計画しないこととしている。しかしながら、基礎梁の地震時応力に対しては基礎フーチングや杭の性状が影響するので、それを考慮すると基礎の各部に生じる曲げモーメントやせん断応力がフーチングを無視した場合と異なることがある。しかし、この点については明確な資料がないことから、基礎梁の応力はフーチングを無視して求め、別に杭頭固定の条件で求めた杭の応力を考慮した上で、地中梁に十分なゆとりを持たせるものとしている。さらに、水平力が作用する場合に杭頭に生ずる曲げモーメントやせん断力および引拔力等の応力を基礎梁に安全に伝達させるために、杭とフーチングの接合方法やフーチング内の応力にも十分に留意する必要がある。

ここでは、2棟の建物について、基礎フーチングや杭を考慮した弾塑性フレーム解析を行い、地震時の基礎梁や1階柱の応力に及ぼす杭の長さや配置の影響について考察している。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

本研究では、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1991」[3]（以下「RC規準」と言う）の付録3・構造計算例2と実際ある構造物の2棟について弾性と弾塑性のフレーム解析を行った。それぞれの解析例は3つの基本的モデルによる解析をしている。

モデル1は、剛域の影響を無視し、基礎フーチング部分の影響も考慮しない、最下階の柱芯と

*1 東京工業大学 大学院 工修（正会員）

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 教授、工博（正会員）

*3 愛知産業大学 造形学部建築学科 助教授、工博（正会員）

*4 東京工業大学 建築物理研究センター 助手、工修（正会員）

基礎梁芯の交点をピン支持と考えて応力解析を行う。

モデル2は、剛域の影響と杭の配置を考慮する。最下階の柱脚は剛な基礎フーチングで連結し、杭頭の位置でピン支持とする。すなわち杭の軸方向剛性を無限大とするがモーメントは負担しないと考える。今回の解析では、剛域は、RC 規準[3]によって定めている。

モデル3は、モデル2にかえてさらに、杭の影響も考慮する。Chang 式[4]による最初の杭モーメントが零となる点をピン支持とし、土による反力は無視する。さらに杭の長さは、基礎梁の応力分布に影響するので、長さを変えた解析も行う。

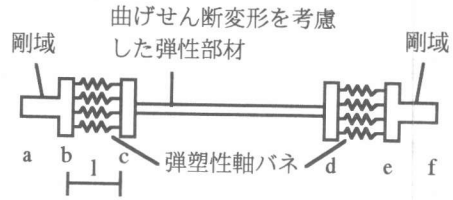


図1 弾塑性部材モデル

2.2 弾塑性バネフレーム解析

本解析法は、部材の両端に有限の長さ l を持つ複数の弾塑性軸バネを設けることによって、部材の弾塑性性状をフレーム解析に組み込んだものである。図1に示すように a-b 部分、e-f 部分は剛域であり、c-d 部分は曲げせん断変形を考慮した弾性部材である。この弾性部材の軸芯は、断面の重心位置に置く。b-c 間、d-e 間には、複数の弾塑性軸バネを設ける。コンクリート断面を層状に分割し、その各層をひずみと応力が一定の一つの軸バネとし、一つ一つの軸バネにコンクリート、鉄筋などの材料の性質を持たせることにより、断面の軸力と曲げモーメントの相関関係を考慮した解析を行うことができる。コンクリートや鉄筋の応力-ひずみ関係は、文献[5]に用いられたものとし、コンクリートのひずみ軟化を起こさないものとし、鉄筋のひずみ硬化を考慮する。

3. 解析例1

3.1 解析

「RC 規準」の付録3・構造計算例2を参考して、弾性フレーム解析と弾塑性バネフレーム解析を行う。この建物は、鉄筋コンクリート造3階建（地下なし）事務所建物で、x 方向5スパン、y 方向3スパンの均等ラーメン構造であるが、y 方向の両妻面は全

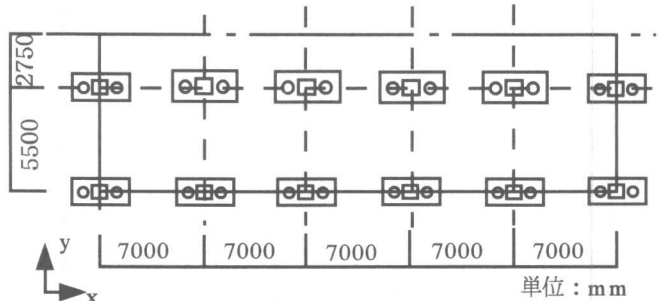


図2 解析例1基礎伏図

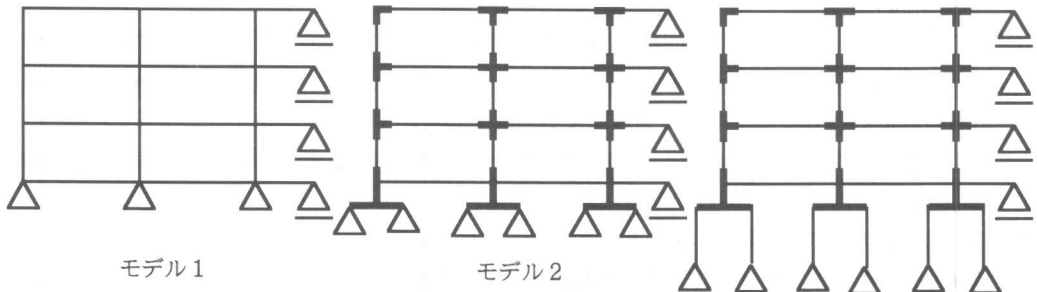


図3 解析例1のモデル化

モデル3

階にわたり無開口の耐震壁となっている。建物は長さ 12m の PHC 埋め込み杭によって支持されていると想定する。各柱下は 2 本杭で支持している。図 2 に基礎伏図を示す。コンクリートは普通コンクリートで設計基準強度は 20.6N/mm^2 、ヤング係数は $2.06 \times 10^4\text{N/mm}^2$ である。鉄筋は SD345、ヤング係数は $2.06 \times 10^5\text{N/mm}^2$ である。杭は PHC 杭、 $\phi 350\text{mm}$ 、ヤング係数は $3.92 \times 10^4\text{N/mm}^2$ である。図 3 に示すように建物を平面骨組にモデル化し、各モデルについて弾性解析を行い、1 次設計地震時応力を計算する。杭を考慮するモデル 3 では、杭の長さは Chang 式によれば、N 値が 20 の場合 2.0m となる。また、柱の軸方向変形を考慮する。静的漸増荷重による弾塑性解析では左から右に各層で水平力を 1 次設計時せん断力になるまでかける。モデル 3 では、杭の長さが基礎梁の応力に及ぼす影響を考慮するため、杭の長さは 1.5m (モデル 3a)、2m (モデル 3b)、4m (モデル 3c)、5m (モデル 3d) として 4 種類のモデルで弾塑性フレーム解析を行う。

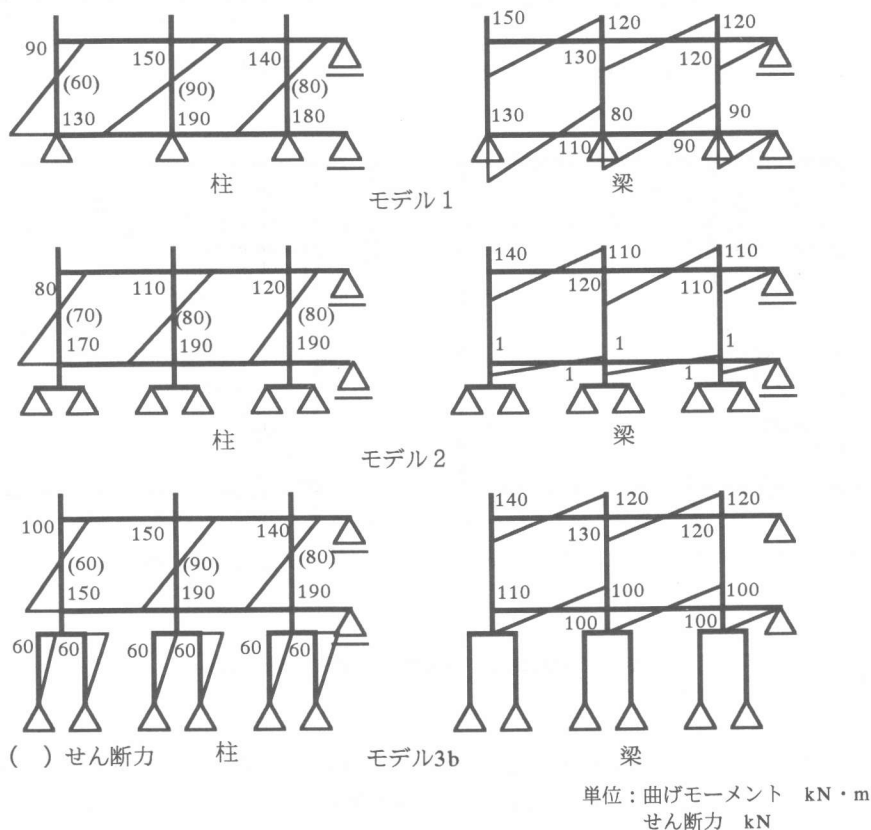
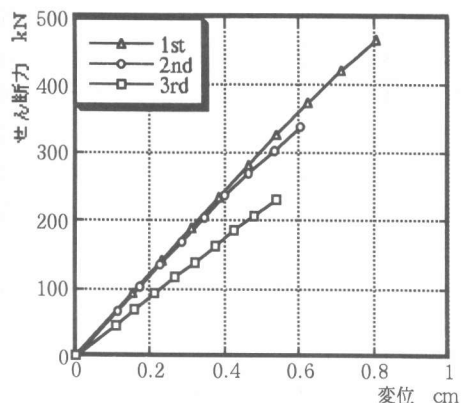


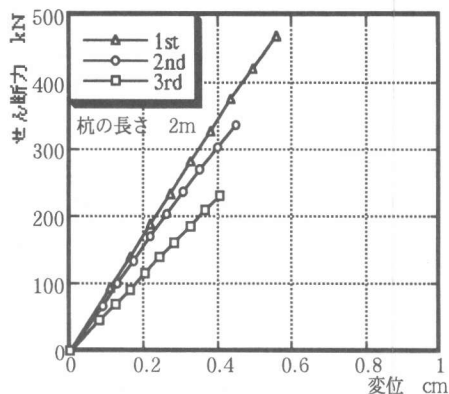
図4 解析例 1 弾性フレーム解析応力図

3.2 解析結果

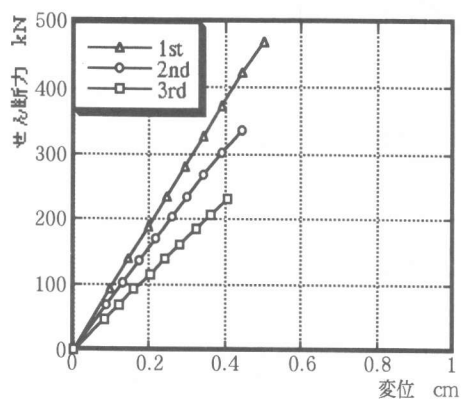
図 4 に、建物の対称性を利用し、弾性フレーム解析によるモデル 1、2、3b の応力図を示す。数字は曲げモーメント、() 内はせん断力である。図からみると、モデルによって基礎梁のモーメントはかなり違う。杭頭でピン支持としたモデル 2 は、基礎フーチングの回転拘束が大きいのでほかの二つモデルと比べると、基礎梁の曲げモーメントがかなり低い。モデル 1 の場合、基礎梁の設計応力はモデル 1 によって計算された基礎梁のモーメントとモデル 3b 杭頭の曲げモーメントの和となるが、杭、柱、梁一体で解いたモデル 3b の基礎梁のモーメントよりかなり大きくなる。



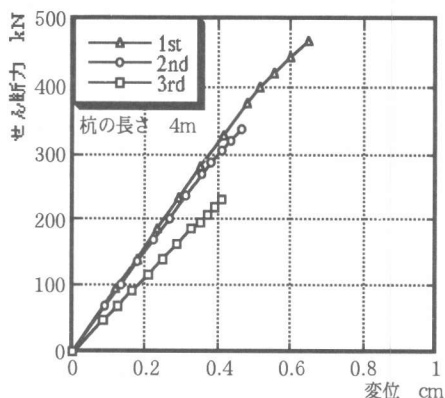
モデル1 層間変位一層せん断力関係



モデル3b 層間変位一層せん断力関係



モデル2 層間変位一層せん断力関係



モデル3c 層間変位一層せん断力関係

図5 解析例1 層間変位一層せん断力関係

弾塑性バネフレーム解析によるモデル1、モデル2、モデル3b、モデル3cの層間変位と層せん断力関係もそれぞれ図5に示す。また、図6には、弾塑性バネフレーム解析によるモデル1、モデル2、モデル3b、モデル3cの応力図を示す。応力図では建物の1階の左端部と右端部の柱、梁についてモーメントとせん断力を示している。数字はモーメント、()内はせん断力である。

モデルによって、1次設計時の層間変位(最終の変位)が異なる。杭を考慮した場合の方が、各層の層間変位が小さくなる。モデル1による基礎梁のモーメントとモデル3b、3cによって求めた杭頭モーメントの和は、杭も一体として解いたモデル3b、3cの基礎梁のモーメントの約2倍となっている。特に基礎梁外端のモーメントの相違が著しい。モデル3b、3cの場合はモデル1の場合より外端柱脚のモーメントが小さく、外端柱の負担せん断力も小さくなり、逆に中柱の負担せん断力が増加している。ここでは、モデル3b、3cしか示していないが、この傾向は、杭の長さを長くするほど著しくなる。杭を一体で解析すると1階柱脚のモーメントが小さくなるので、建物全体の崩壊形も変わる可能性がある。

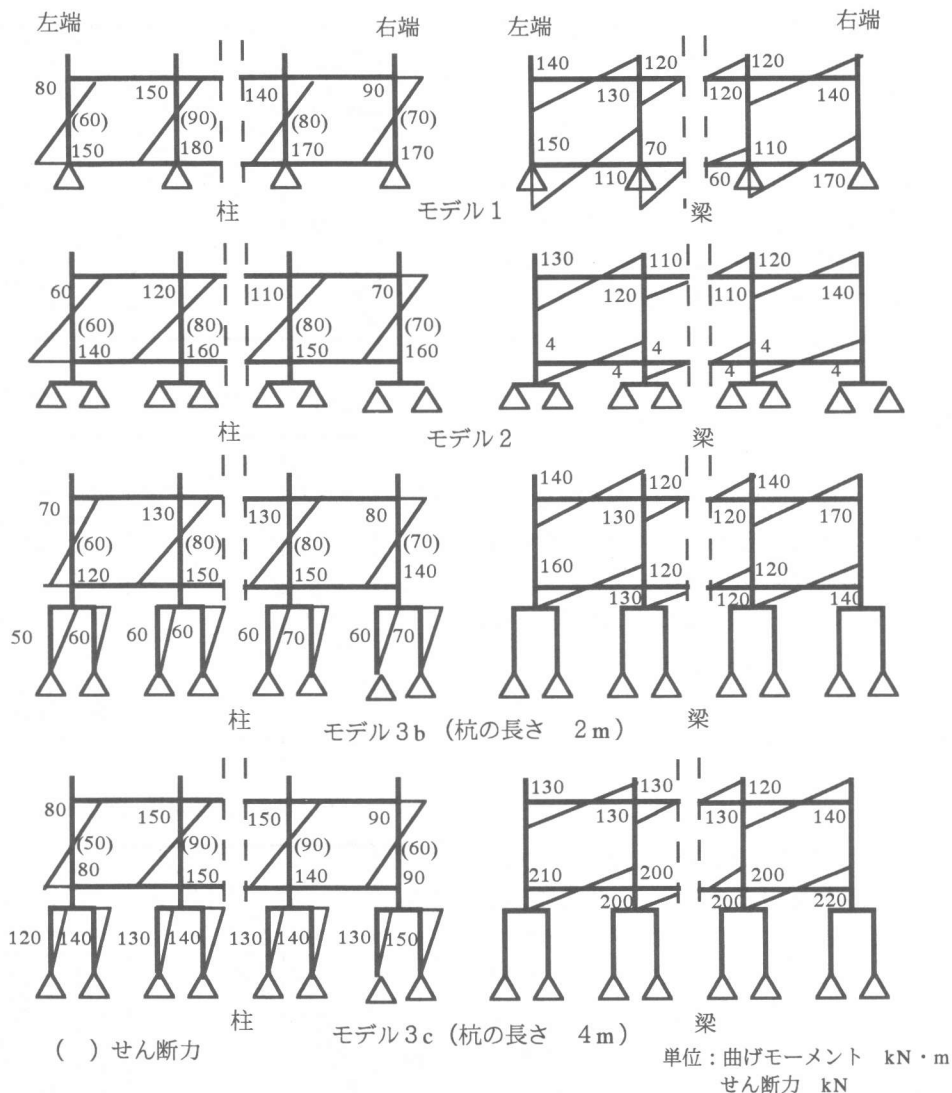


図6 解析例1弾塑性フレーム解析応力図

4. 解析例2

4.1 解析方法

実際の鉄筋コンクリート構造物について弾塑性バネフレーム解析を行う。この建物は、鉄筋コンクリート造7階建（地下なし）共同住宅で、高さが19.75m、x方向5スパンラーメン架構、一部壁付構造で、y方向2スパン架構、一部壁付構造である。建物は長さ21mのPHC埋め込み杭によって支持されている。一番外側の柱下は1本杭で支持し、他は杭3本で支持する。図7に基礎伏図を示す。コンクリートは普通コンクリート、基礎梁のコンクリートの設計基準強度は $23.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、

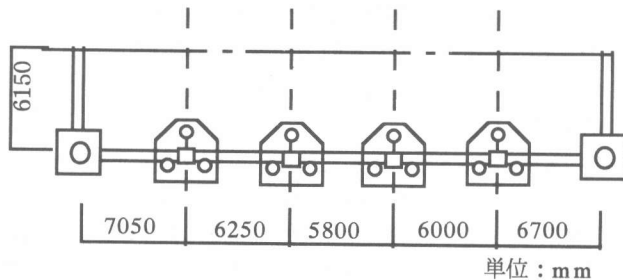


図7 解析例2基礎伏図

図7に基礎伏図を示す。コンクリートは普通コンクリート、基礎梁のコンクリートの設計基準強度は $23.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、

ヤング係数は $2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、せん断弾性係数は $G=8.82 \text{ N/mm}^2$ 、鉄筋はSD345、ヤング係数は $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、杭はPHC杭、 $\phi 600\text{mm}$ 、コンクリートのヤング係数は $3.92 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ とする。建物を平面骨組にモデル化し、柱の軸方向変形を考慮し、各階の左から右に各層で水平力を一次設計時せん断力になるまでかける、静的漸増荷重による弾塑性解析を行う。

4.2 解析結果

解析例1と同じく3つのモデル化を用い、弾塑性フレーム解析だけ行う。1次設計時せん断力に到達するまでの1階から3階までの層間変位と層せん断力は図8に示す。解析例2でも解析例1とほぼ同じ結果が得られる。1階の層せん断力と層間変位の関係は、モデルによってかなり違う。モデル1の層間変位が一番大きく、剛性もかなり低下している。基礎フーチングの影響を考慮したモデル2と3では、まだ弾性範囲に収まっている。

5. 結論

本研究は、地震時の基礎梁の応力に及ぼす杭の配置や支持状態の影響について考察するために、2棟の建物について弾塑性フレーム解析を行った。これらから以下の結論を得たが、構造物が終局耐力に達したときには、モデルによって崩壊形も変わる可能性があり、このような現象については、今後の研究課題としたい。

- 1) 杭を一体として解いたモデルは、外端柱脚のモーメントも外端柱の負担せん断力も小さくなり、逆に中柱の負担せん断力が増加している。
- 2) モデルによって、基礎梁外端のモーメントの相違が著しい。

謝辞 本研究を行うにあたり、ご助言を頂きました東京工業大学和田研究室の市橋重勝氏に深く感謝いたします。また、本研究は東京工業大学建築物物理研究センターにおける共同研究として行われたものである。

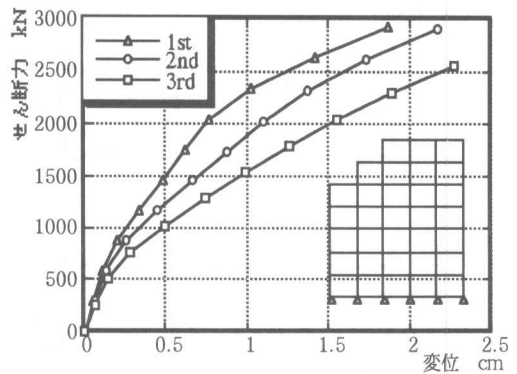
参考文献 [1] 建築基礎構造設計規準・同解説、日本建築学会、1988

[2] 建築耐震設計における保有耐力と変形性能、日本建築学会、1990

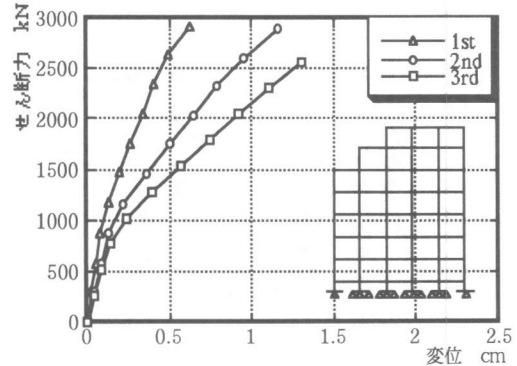
[3] 鉄筋コンクリート構造計算構造規準・同解説、日本建築学会、1991

[4] Y. L. Chang: Discussion on "Lateral Pile-Loading Tests" by Feagin., ASCE, 1937, pp. 272~278

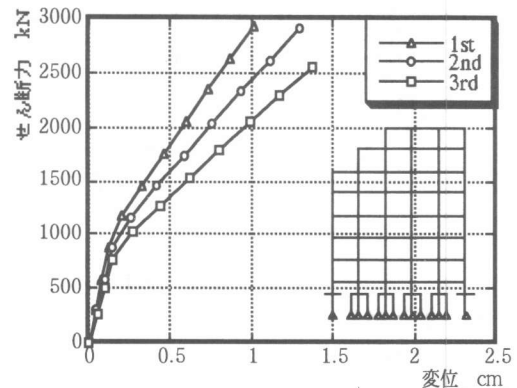
[5] 坂田弘安 他：軸方向変形の拘束効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの弾塑性性状に関する実験研究、日本建築学会構造系論文報告集、P. 45-55、No. 380、1987. 10



モデル1 層間変位一層せん断力関係



モデル2 層間変位一層せん断力関係



モデル3 層間変位一層せん断力関係

図8 解析例2 層間変位一層せん断力関係