

上部構造・基礎構造一体解析による耐震性能評価

根本 恒^{*1}

性能設計の普及や巨大地震の経験から、基礎も含めた建築物の大地震時の挙動をより厳密に予測することが耐震性能評価に必要であり、そのための上部構造・基礎構造一体モデルによる非線形解析の重要性が増している。一方、非線形性を持たせた一体モデルに対する知見は主に動的解析によるもので、静的解析については少ない。ここで、一体モデルに静的漸増載荷解析を適用することで、動的解析に比べて簡易にかつ設計実務に近い手法で耐震性能評価が可能となると考え、一体モデルの妥当性を検証し、その普及に努めている。本報告では、一体モデル化手法と一体解析を利用した耐震性能評価事例を報告し、その有用性を示す。

キーワード：一体解析、静的非線形漸増載荷解析、地盤ばね、杭体非線形モデル、耐震性能評価

1. はじめに

建築物の構造設計において、大地震時における建築物の耐震性能を評価することは重要な項目の一つである。しかし、多くの場合は上部構造が対象で、基礎構造はいわゆる二次設計が建築基準法上義務づけられていないこともあり、殆ど行われていない。また、杭基礎は上部構造と分離されて設計されることが一般的で、地震時の挙動による相互の影響、特に杭の鉛直方向の変位が上部構造に与える影響が評価されていない。ここで、上部構造と杭・地盤を一体としたモデル（一体モデルと称す）に静的非線形漸増載荷解析法を適用（一体解析と称す）することで、上記の課題を考慮した杭基礎も含めた建築物の耐震性能評価が可能となると考えており、本報告ではその一体モデル化手法と一体解析の適用事例を示している。なお、本報告は、一体モデルの構築方法と解析結果の妥当性を検討した「一体解析に基づく限界耐力計算法の適用に関する研究委員会（一般社団法人建築研究振興協会内、2003年～2006年）」および、基礎の耐震診断手法の整備を目的とした「基礎構造の耐震診断手法に関する研究委員会（一般財団法人ベターリビング内、2009年～2013年）」の成果を基としている^{1)～8)}。

2. 一体解析

一体解析の基本的な考え方は、一般的に行われている上部構造の静的非線形漸増載荷解析に杭基礎および地盤を付加して同様の解析を行うことである。図-1に一体モデルの模式図を示す。解析には既存の一貫構造設計プロ

ラムや汎用の応力解析プログラムを利用するが、一貫構造計算プログラムを利用する場合は、構造設計に用いる上部構造のデータに杭および地盤ばね（鉛直方向は杭周面摩擦ばねと杭先端支持ばね、水平方向は水平地盤ばね）を付加すればよく、水平載荷前の初期応力に長期荷重時の応力を転用できる等でデータ入力の手間が省けるメリットがあるが、デフォルト値による諸条件が一体解析に整合するかの確認が必要である（例えば、上部構造では一般的な剛床仮定が地中部では成立しないことに対する剛床の扱い、初期応力・変形状態にある鉛直方向地盤ばねの水平加力時の伸縮は想定どおりか、等）。一方、汎用の応力解析プログラムでは、境界条件はじめ詳細な条件設定をデータとして自ら作成・入力することでモデルの細部までコントロールできるが、データ入力の手間は膨大になる。それぞれのメリット、デメリットを充分理解しての使用が肝要である。

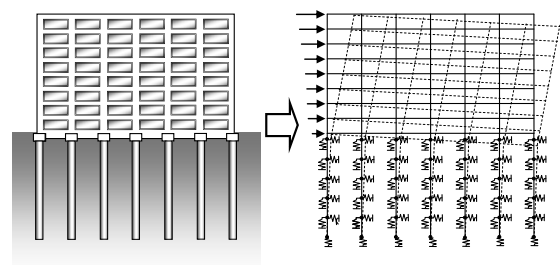


図-1 一体モデルの模式図

(1 構面を描いているが、解析は立体フレームで行う)

3. モデル化

上部構造の部材（柱、梁、耐震壁、基礎梁等）の諸定数（部材初期剛性やその剛性低下率等）に特別な配慮は必

*1 建築研究第二部

要なく、そのプログラムの持つ部材の非線形特性を持たせることで対応できる。杭部材は断面性能に非線形性を持たせることがポイントである。杭に付く地盤ばねはすべて地盤の塑性化を考慮するが、既往の知見で算定される非線形ばねを設定する。

3.1 杭

杭部材は、場所打ちコンクリート杭は円形断面、既製コンクリート杭および鋼管杭は円環断面を持つが、部材形状に関わりなく非線形性を持つ断面性能を直接入力することで、その構造性能を表現する。軸力変形特性、せん断力変形特性は上部構造の柱と同様でよい。曲げモーメント変形特性は、部材の曲げ耐力と曲率（ ϕ ）の関係を基にトリリニアの骨格曲線を設定する。杭の設計で部材の曲げモーメント変形性能にトリリニア型の非線形性を持たせることはなじみが薄いと思われるが、比較的扱い易い設定手法が図-2である。これは、断面曲げ解析と呼ばれる計算を利用してトリリニア型のM- ϕ 関係を設定する方法である。杭の断面が平面を保持すると仮定し、計算のパラメータ（当該断面の分割方法、鉄筋断面の扱い方、コンクリート・鉄筋・鋼材の応力-歪み関係、作用する軸力値等）は設計者が適切な値を設定すればよい。図-2には断面曲げ解析結果とトリリニア化したM- ϕ 関係を示している。断面曲げ解析により得られるM- ϕ 関係は曲線となる。この曲線をトリリニア型に近似する方法として、図中では曲線とトリリニア化した直線で作られる図形の面積を利用する方法を示している¹⁾。

一体解析に用いるプログラムによっては部材の骨格曲線にM- ϕ 関係を使えないものがある。その場合は一般に用いられている曲げモーメントと部材回転角（ θ ）の関係でトリリニア型の非線形特性を表現するが、M- θ 関係は曲げモーメントが直線的に変化する逆対称分布を前提としていることに配慮が必要である¹⁾。

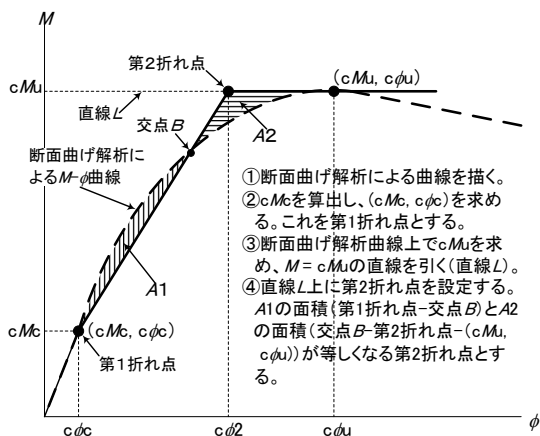


図-2 杭断面の曲げモーメント～変形関係のモデル化例（圧縮軸力の場合）

- ①断面曲げ解析による曲線を描く。
- ② cMc を算出し、 $(cMc, c\phi_c)$ を求める。これを第1折れ点とする。
- ③断面曲げ解析曲線上で cMu を求め、 $M=cMu$ の直線を引く(直線L)。
- ④直線L上に第2折れ点を設定する。A1の面積(第1折れ点-交点B)とA2の面積(交点B-第2折れ点- $(cMu, c\phi_u)$)が等しくなる第2折れ点とする。

3.2 地盤ばね

地盤をばねとしてモデル化するにあたり、既往の知見を利用することを基本にしているとはいえ、実務で非線形性を考慮した荷重-変位関係を設定することはほとんどない。ここでは建築基礎の分野でまとめられている知見を基に設定される荷重-変位関係（この関係を基に地盤ばねが算出される）を、場所打ちコンクリート杭を例にとり紹介する。

(1) 杭先端支持ばね

モデル化の方法を図-3に示す。既往の杭鉛直載荷試験の荷重～沈下関係を基に（式1）の定数 α 、 n を与えて荷重～沈下曲線を描きトリリニア化する方法である^{9),10),11)}。

$$\frac{S_p / D_p}{0.1} = \alpha \frac{R_p / A_p}{(R_p / A_p)_u} + (1 - \alpha) \left\{ \frac{R_p / A_p}{(R_p / A_p)_u} \right\}^n \quad (式 1)$$

ここで、

α, n : 載荷試験に基づく定数 S_p : 杭先端沈下量 (m)

D_p : 杭先端直径 (m) R_p : 杭先端荷重 (kN)

A_p : 杭先端断面積 (m^2)

$(R_p / A_p)_u$: 杭先端極限荷重度 (kN/m^2)

参考文献^{9),10),11)}を参考に杭先端の極限支持力度を求め、 $(R_p / A_p)_u$ の値とする。また、定数 α 、 n の例として、場所打ちコンクリート杭で $\alpha=0.3$ 、 $n=2$ 等が提案されている。これらの数値を持つ（式1）により描ける曲線を基に各折れ点が求まる。なお、引抜き方向のばね値は杭先端が地盤から離間した以降において0とする。

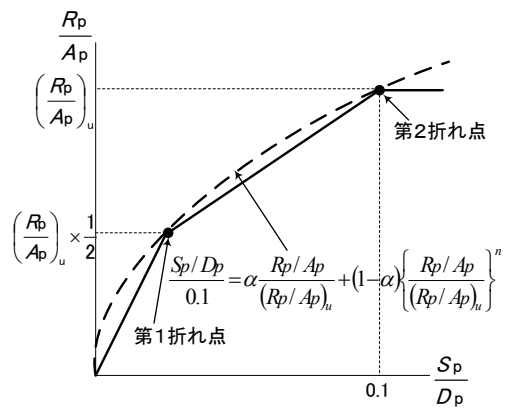


図-3 杭先端地盤ばねのモデル化

(2) 杭周面摩擦ばね

モデル化の方法を図-4に示す。既往の杭鉛直載荷試験から得られた摩擦 R ～沈下量 S 関係を基にした式から極限摩擦抵抗力を求める。また、極限摩擦抵抗力に対応する杭の変位量が地盤種別ごとに整理されている。これらを基に杭周面摩擦抵抗力～変位関係のトリリニアモデルを設定する¹²⁾。引抜き方向の特性は未解明なところが多く、参考文献¹³⁾等を参考に充分安全側の設定とすべきである。

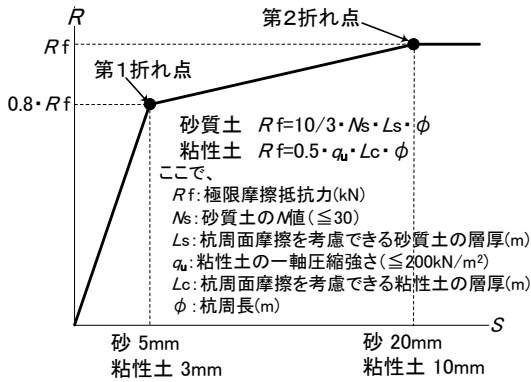


図-4 杭周面摩擦ばねのモデル化

杭先端支持ばね、杭周面摩擦ばねについては弾性理論解に基づく設定方法もある¹⁴⁾。

(3) 水平地盤ばね

参考文献⁹⁾に示されている式(静的水平載荷試験結果を分析して得られた式)に基づくが、一体解析が地震時の評価(特に大地震時に着目して)に用いられることに配慮したモデル化¹⁾が図-5である。

モデル化で用いる水平地盤反力係数を(式2)に、塑性地盤反力を(式3)～(式5)に示す。また、図-5に骨格曲線のモデル化の考え方を示す。(a)が4つ折れ線、(b)が3つ折れ線を表している。 k_h に(式2)中にある係数Aのみを加味した水平地盤反力係数による水平地盤反力p～水平変位y関係を描き、その曲線に近接するように骨格曲線を設定する。式中の係数Bの与え方の違いで4つ折れ線、3つ折れ線が作られる。また、3つ折れ線での第1折れ点および4つ折れ線での第2折れ点の変位は1cmとする。

$$k_h = \alpha \cdot (A \cdot B \cdot C \cdot E_0) \cdot D_p^{-3/4} \cdot \xi \cdot y^{-1/2} = A \cdot B \cdot C \cdot k_{h0} \cdot y^{-1/2} \quad (式2)$$

ここで、

k_h : 水平地盤反力係数 (kN/m³)

k_{h0} : 水平変位 1cm (基準変位) 時の水平地盤反力係数
 $= \alpha \cdot \xi \cdot E_0 \cdot D_p^{-3/4}$ (kN/m³)

α : 変形係数の評価法によって決まる定数 (m⁻¹) で、80 (粘性土でN値から E_0 を導く場合は60) とする。

A: 水平載荷試験時のクリープの影響を除くための係数で、2とする¹⁵⁾。

B: 地盤の応答ひずみによる影響を考慮するための係数で、4つ折れ線を設定する場合は杭の水平変位が0～0.06cmの間で4、0.06cm以降は1とする。3つ折れ線を設定する場合はすべての範囲で1とする。

C: 杭近傍地盤の相対変位の影響を考慮するための係数で、杭の水平変位1cmまでは1、それ以降は1/3と

する。

E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)

ξ : 群杭効果を考慮した係数

D'_p : 無次元化杭径 (杭径をcmで表した無次元数値)

y' : 水平変位量をcm単位で表した無次元量で、折れ線を設定する際は1とする。

砂質土 $p_{max} = \kappa \cdot K_p \cdot \gamma \cdot z \quad (式3)$

粘性土 $z \geq 2.5D_p$ では $p_{max} = \lambda \cdot c \quad (式4)$

$z < 2.5D_p$ では $p_{max} = 2 \cdot (1 + \mu \cdot z/D_p) \cdot c \quad (式5)$

ここで、

p_{max} : 塑性地盤反力 (kN/m²)

K_p : 受働土圧係数

γ : 単位体積重量 (kN/m³)

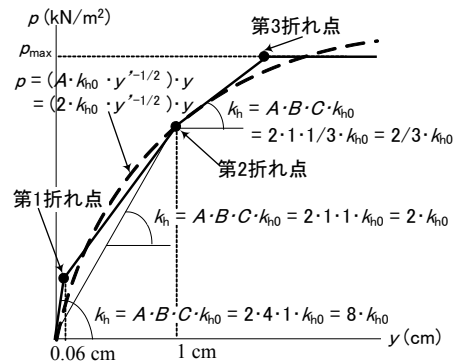
z : 深度 (m)

D_p : 杭径 (m)

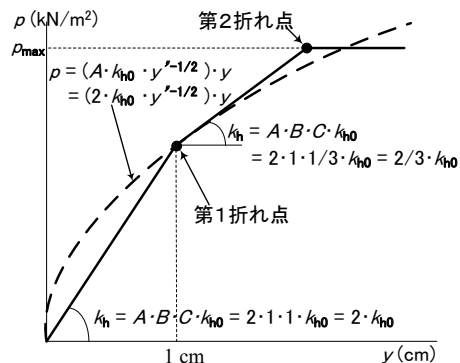
c : 粘着力 (kN/m²)

κ, λ, μ : 群杭効果を考慮した係数、

単杭の場合は $\kappa = 3.0, \lambda = 9.0, \mu = 1.4$



(a) 4つ折れ線へのモデル化



(b) 3つ折れ線へのモデル化

図-5 水平地盤ばねのモデル化

4. 一体解析事例

一体解析事例の対象建物として、新耐震基準以前に設計され、液状化のある地盤に建つ建物を選定し

た。これは新規の設計物件ではなく既存建物への適用となるが、一体解析が基礎構造を含めた建物全体における終局状態の把握に適していること、および基礎構造の耐震診断へも適用できることが明解となるモデルと考えたためである。モデル建物は鉄骨造3階建て、短辺方向1スパン(9 m)、長辺方向6スパン(5 m × 6 = 30 m)とした。地盤概要は地表から-3.75mが埋土、~-11.05mが礫混り砂質土、~-19.0mがシルト質粘土、~-28mが砂・粘性土・礫の互層で支持層は細砂である。第2層の礫混り砂質土が液状化の可能性が高い土質である。杭はPHC杭A種、杭径は建物四隅が350mm、それ以外が450mmで、杭先端はGL-28mにある。図-6がモデル建物の外観である。解析ケースとして、原地盤の物性で評価した水平地盤ばね (Case1) と第2層が液状化するとして水平地盤反力係数と塑性水平地盤反力を低減(液状化地盤における補正係数 $\beta=0.12$)した水平地盤ばね (Case2) の2ケースを設定した。加力方向は短辺方向で、図-6において左から右方向への加力である。モデル化は、上部構造の鉄骨部材はパイリニア、基礎梁(RC部材)はトリリニア、杭部材は作用軸力を2次設計レベルの値で決め打ちした断面解析を基としたトリリニアとした。地盤ばねはトリリニアとしたが、鉛直方向の地盤ばねのうち杭周面摩擦ばねは摩擦抵抗力が小さいので設定せず、杭先端支持ばねのみ設定した。解析プログラムは汎用応力解析プログラムMIDAS-Genである。

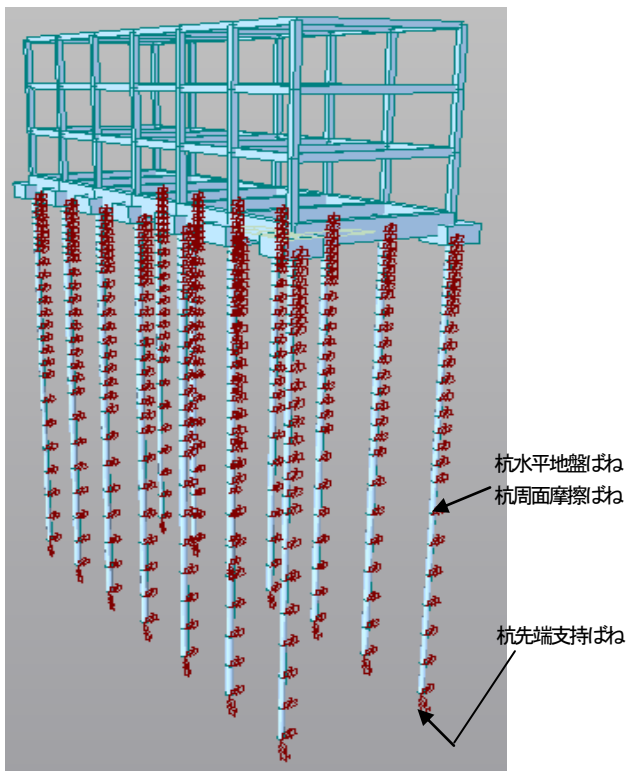


図-6 モデル建物の外観

図-7に上部構造の層せん断力~層間変位関係を、図-8に杭頭部のせん断力~水平変位関係を示す。地盤条件に原地盤と液状化した地盤という違いがあっても上部構造への影響はほとんど見られないことがわかる。一方、杭への影響は大きく、ベースシア係数 $C_b=0.2$ までは両地盤は近似した挙動を示すが、それを超えるとCase2の変位が急激に増え、液状化の影響が現れている。

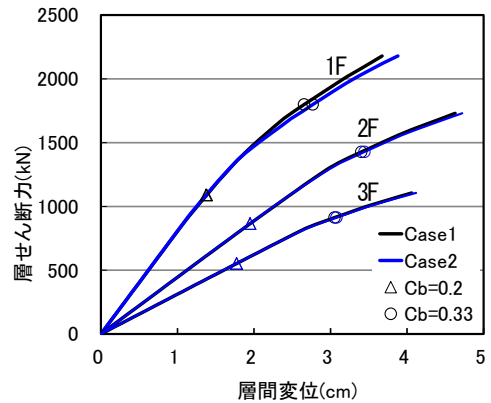


図-7 層せん断力~層間変位関係

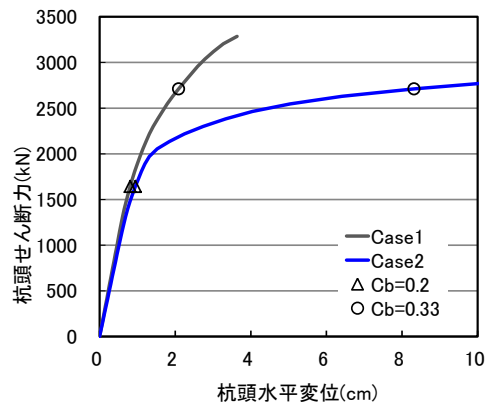


図-8 杭頭せん断力~杭頭水平変位関係

杭部材(圧縮側の杭径450mm)に生じる曲げモーメント、水平変位を図-9、図-10に示す。 $C_b=0.2$ と $C_b=0.33$ (上部構造の層間変形角はCase1が $1/96$ 、Case2が $1/94$)の荷重に対する値である。なお、図には値の大きい杭上部のみを示している。 $C_b=0.2$ でCase1とCase2を比較すると杭頭変位はほぼ同じだが杭体の変形が始まる深度がCase2の方がやや深い。 $C_b=0.33$ では、Case2の曲げモーメント、変形ともに杭体の深い位置から生じる傾向が顕著で、杭頭部の値も大きい。

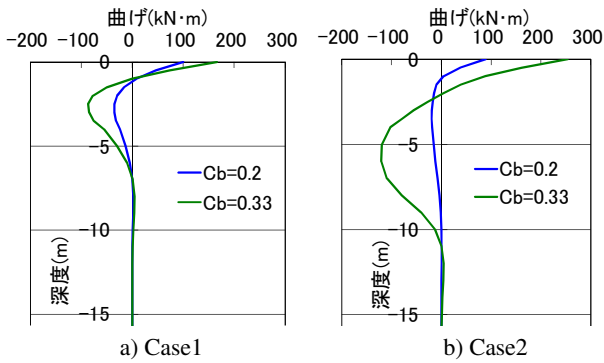


図-9 杭の曲げモーメント (Cb=0.2 および 0.33)

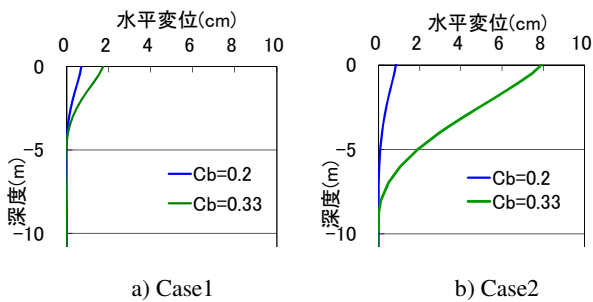
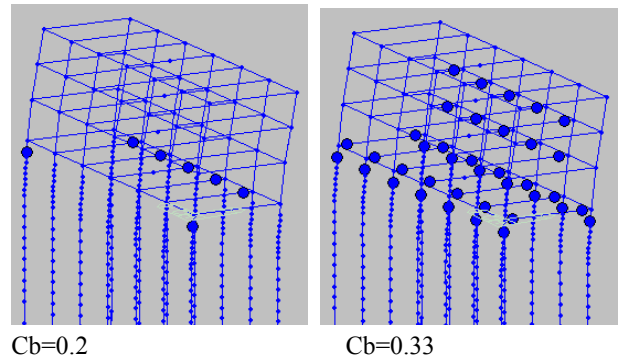


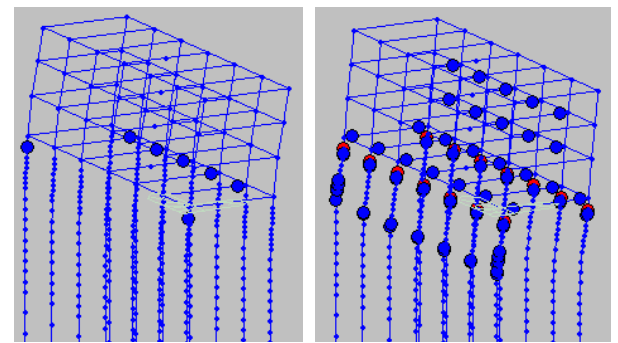
図-10 杭の水平変位 (Cb=0.2 および 0.33)

図-11 にヒンジ発生状態を表した図を示す。青丸が第1折れ点、赤丸(図では青丸に隠れて一部しか見えない)が第2折れ点を越えた状態を示す。Cb=0.2では、Case1, Case2ともに中スパンの基礎梁が第1折れ点(ひび割れモーメント)に、引抜き側の両隅の杭の杭頭部が第1折れ点(降伏モーメント)に達している。Cb=0.33では上部構造3階および2階床梁が第1折れ点(降伏モーメント)に達しているのはCase1, Case2共通の状態であるが、杭のヒンジは両者で異なっている。すなわち、Case1では圧縮側、引張側すべての杭頭部が第1折れ点(降伏モーメント)を超えた状態であるのに対して、Case2はすべての杭頭部が第2折れ点(終局モーメント)に達しているのに加え、引張側の杭で地中部にも降伏ヒンジが生じている。Cb=0.2を過ぎてからのヒンジ発生の進展具合がCase2の方が早いことがわかる。

このように、一体解析を用いると上部構造の状態変化と比較しながら杭や地盤の崩壊の様子を推察することができる。これらの結果を基に杭体の耐震診断⁸⁾を行うと表-1と評価できる。本モデル建物の場合、上部構造が保有耐力に達する以前に多くの杭頭が降伏している。特に地盤が液状化するCase2の場合は、杭の性能レベルが「地震後の空間確保の確認」を満足しない時点において上部構造は層間変形角1/94で、まだ保有耐力までには余裕があり、基礎の耐震性能が上部構造に比べて劣っていることが明らかである。



a) Case1



b) Case2

図-11 ヒンジ発生状態図

表-1 耐震診断結果

Case1 (原地盤) の場合

対象		判定指標	性能レベル
杭体	圧縮側	Cb = 0.33 で全ての杭の杭頭部が My を超えた	地震後の空間確保が確認できる
	引張側	Cb = 0.2 で2本の杭が My を超えた。 Cb = 0.33 で全ての杭の杭頭部が My を超えた。	

Case2 (液状化地盤) の場合

対象		判定指標	性能レベル
杭体	圧縮側	Cb=0.33 で全ての杭の杭頭部が Mu に達した	地震後の空間確保が確認できない
	引張側	Cb=0.2 で2本の杭が My を超えた。 Cb=0.33 で全ての杭の杭頭部が Mu に達した。全ての杭の地中部が My を超えた。	

5. おわりに

一体解析に用いる杭体、地盤のモデル化手法および解析事例について報告した。建築物の設計においては杭基礎を非線形モデルとして解析することがまれなこともあり、一体モデルと解析プログラムとの相性やデータ入力作業の煩雑さなど、実際に解析を経験することで分かる課題が多くある。特に一体モデルを構築するにあたっての様々な仮定でモデル化、解析結果は変わり得ること(例

えば地震時変動軸力による杭体 M- ϕ モデルへの影響, 鉛直方向地盤ばねの設定による建物ロッキングへの影響³⁾等)に注意が必要である。

設計者の経験が豊富で部材の塑性化以降の解析も比較的精度よく再現できる上部構造と, そもそも物性のばらつきが大きく, 非線形モデルでの解析経験が少ない地盤を一緒に解こうとする一体解析は, モデルの作成のみならず解析結果の解釈に対しても多くのエネルギーを要する作業である。一方, 耐震性能に関する情報を多く得られる手法でもある。参考文献⁸⁾では上部構造と基礎構造相互の影響の考慮や建物全体の状態の追跡ができる静的解析法として一体解析を推奨している。また, 杭頭半剛接合工法をはじめとする様々な工夫により杭頭応力の低減, ひいては基礎梁断面の縮減が図られているが, この場合の上部構造の部材応力は杭を除外した上部構造だけの基礎固定モデルで算出される場合が多く, 十分な基礎梁剛性を前提にした上部構造・基礎構造分離モデルでの応力算出に対する根拠がおろそかになっていると思われる。この場合に一体モデルを用いた応力算定が精確な応力評価に有用である。

なお, 本報告は一体解析手法の普及を目的とした報告^{16), 17)}を再構成したものである。今後, データ入力の省力化等の解析ツールの整備が図られ, 一体解析が有用な解析手法として展開されることで, 基礎を含めた建築物の耐震性能評価が身近なものになると考えている。

参 考 文 献

- 1) 渡辺一弘他: 一体解析による耐震性能評価手法の検討 (その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 509-516, pp. 679-680, 2004. 8
- 2) 梅村美孝他: RC造共同住宅の耐震設計における外力分布に関する研究 (その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 217-220, 2004. 8
- 3) 渡辺一弘他: 一体解析による耐震性能評価手法の検討 (その6~その10), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 485-494, 2005. 9
- 4) 渡辺一弘他: 一体解析による耐震性能評価手法の検討 (その11~その12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 565-568, 2006. 9
- 5) 井川望他: 一体解析による杭基礎構造の地震時応力・変形の検討, 構造工学論文集 Vol. 53B, pp. 345-352, 2007. 3
- 6) 渡辺一弘: 地盤・杭・建物の一体モデルの実施例, 建築技術, No. 716, pp. 173-175, 2009. 9
- 7) 都市再生機構編: 地盤・基礎・建物一体解析による建物の構造設計指針 (案)・同解説, 2007
- 8) ベターリビング: 基礎構造の耐震診断指針 (案), 2013
- 9) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001
- 10) 山肩邦男他: 場所打ちコンクリート杭の極限先端荷重および先端荷重~沈下量特性に関する統計的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第423号, pp. 137-146, 1991. 5
- 11) 持田悟他: 場所打ちコンクリート杭の支持力性能 (その1) 先端荷重-先端沈下特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 725-726, 2000. 9
- 12) 伊勢本昇昭他: 場所打ちコンクリート杭の支持力性能 (その2) 周面摩擦力~変位特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 727-728, 2000. 9
- 13) 基礎工: 特集 杭の引抜き抵抗, Vol. 39, No. 11, 2011. 11
- 14) 金子治: 基礎設計における諸問題と解決法 第5回 鉛直ばねの設定, 基礎工, Vol. 40, No. 2, pp. 79-82, 2012. 2
- 15) 富永晃司: 単杭の水平加力試験結果に基づく水平地盤反力係数-クリープ変位を除いた係数評価法の提案-, 構造工学論文集, Vol. 50B, pp. 491-496, 2004. 3
- 16) 根本 恒: 基礎設計における諸問題と解決法 第12回 上部構造・基礎構造一体解析の事例紹介 (建築モデル化), 基礎工, Vol. 40, No. 9, pp. 89-92, 2012. 9
- 17) 根本 恒: 一体解析による耐震診断事例, 基礎工, Vol. 42, No. 5, pp. 57-59, 2014. 5

Estimation of Earthquake-proof Capacity by Push-over Analysis on Building-pile-soil System

Hisashi NEMOTO

Prediction of the behavior of not only a superstructure but also a substructure is indispensable for estimation of the earthquake-proof capacity of a building because of the performance-based design and the experience of the huge earthquake. The push-over analysis on the building-pile-soil system, the excellence of which is convenient in practice in comparison with dynamic analysis, is useful for estimating earthquake-proof capacity of a building with piles. This report develops the method of modeling of piles and soil adjacent to the pile. The result of the push over analysis on a building with piles also clarifies the process of damages.
