

# 有限要素法地震応答解析：ケーススタディに見る長所と問題点

Finite Element Earthquake Response Analysis, its Advantage and Disadvantage from Case Study

吉田 望 (よしだ のぞむ)  
東北学院大学教授 工学部環境土木工学科

船原 英樹 (ふなはら ひでき)  
大成建設株式会社 副主任研究員

小林 義和 (こばやし よしかず)  
日本大学助手 理工学部土木工学科

小林 恒一 (こばやし こういち)  
株式会社 技術開発本部

## 1. はじめに

多くの設計は、設計指針に基づいて行われる。設計指針では、単純化された条件で外力や変形などの設計条件が決められ、それに基づいた計算を行うことになっている。一方、最近では設計にも有限要素法に基づく地震応答解析が用いられることも珍しいことでは無くなり、また、照査などではかなり使われるようになっている。設計指針に基づく方法と比べると、より実際に近い現象を求めることができるというのが、地震応答解析が用いられる理由と考えられる。

しかし、極度の非線形挙動を伴う様な地盤の挙動を含む地震応答解析は、使用に際しエンジニアとしての技量を要求されるというのが現状であろう。そして、使い方を誤ると、判断を誤らせる結果となることもある。

本論では、地盤中の杭の解析を通して、有限要素法地震応答解析の長所と短所について検討した結果を報告する。

## 2. 解析対象

解析の対象としたのは、1995年兵庫県南部地震の際に被害を受けた杭である<sup>1)</sup>。構造物は深江浜の護岸から350 m内陸部に位置し、上部構造は鉄骨3階建てのビル、杭はA種PC杭（杭径40 cm、杭長28 mを解析の対象とした）であり、地盤はまさ土で昭和39～45年にかけて埋め立てられている。3本の杭の被害状況が孔中内視カメラで調べられている。図-1に被害の状況と柱状図を示す<sup>1)</sup>。杭の被害は地下水位以下の埋土層付近で発生

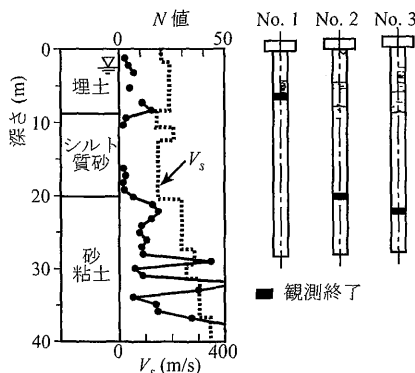


図-1 杭の亀裂と柱状図

している。

## 3. 設計指針に基づく方法

文献2)では、建築基礎構造設計指針<sup>3)</sup>で推奨される方法で解析を行っている。すなわち、 $N$ 値と液状化強度より液状化層のひずみを2%と設定し、図-2に実線で示すように、地表で16 cmとなる変位を設定し、応答変位法により杭のモーメントを求めている。杭と遠方地盤を結ぶばね（以下、相互作用ばねと呼ぶ）の力学特性も文献3)に基づく地盤反力係数および極限地盤反力から求めている。解析では、杭の引抜きと押し込みに伴う軸力の違いを考慮している。図-2に地盤変位のみを作用させたときの杭の変位とモーメントを示すが、最大モーメントはGL-9 m付近で杭の降伏モーメントを超え、実被害とはほぼ対応しているとしている。また、解析では杭頭でも降伏モーメント（127 kNm）を超えるモーメントが発生しているが、実被害ではNo. 2杭の被害のみがこれに相当する亀裂が見えている。

## 4. 有限要素法による解析

地盤-杭系の解析には、地盤を有限要素法の固体要素で、杭を梁材としてモデル化する方法、梁要素としてモデル化された杭と自由地盤を相互作用ばねでつなぐ方法等が多く使われる。ここでは、後者を用いた解析を行う。これは、設計で用いられる応答変位法を動的に拡張した方法であること、実務でも使われる方法であることに加え、杭、地盤はそれぞれに複雑な非線形特性を示すため、

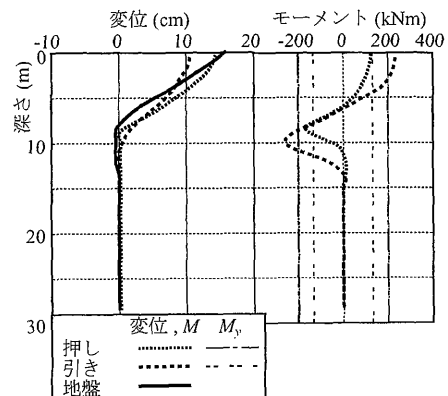


図-2 建築基礎構造設計指針に基づく杭の解析結果

それらを同時に考慮している解析コードは少ないが、後に述べる多入力の手法を使えば、杭と地盤を別々のコードで解析できるという利点もあるためである。

#### 4.1 解析条件

図-3に解析モデルと地盤定数を示す。地盤の動的変形特性は図-4に示す現地より採取した試料の試験結果を用いる。また、相互作用ばねの特性は、弾性定数を道路橋示方書<sup>4)</sup>に従い地盤反力係数から求め、極限地盤反力は文献5)に基づき求め、これらをパラメータとする双曲線モデルに設定した。杭は降伏時と終局時に折れ点を持つ trili-near 型のモーメント-曲率関係を用い、軸力とせん断に関しては弾性とした。

地震波は、サイト近傍で観測された、東神戸大橋の N78E 成分 (図-5) を、基盤複合波として作用させた。

#### 4.2 解析コード

地盤の解析には、地盤の動的変形特性を高精度で再現できる MDM モデル<sup>6)</sup>を用いたコード、SD モデルと呼ばれる弾塑性構成則<sup>7)</sup>を用いた解析コード、および、汎用コード STADAS<sup>8)</sup>を用いた。最初のコードは一次元全応力解析専用、残りの二つは有効応力と全応力解析の両方が可能な多次元解析コードであるが、本論では STADAS では動的変形特性を完全に満たす構成則<sup>9)</sup>を用いた全応力解析のみを行っている。なお、この地盤では液状化の可能性のあるのは地下水位以下の砂層であることは特に高度な判断力がなくても自明と考えられるので、液状化解析ではこの層のみで二相系の解析を行っている。

杭の応答は、STADAS<sup>8)</sup>に、各コードで求めた地盤の変位と加速度の時刻歴および基盤の振動を杭-相互作用ばね系に作用させる多入力解析<sup>10)</sup>により求めた。なお、地盤の影響は構造物に及ぶが構造物の影響が地盤に及ばないような非対称の要素剛性マトリックスではねの特性をモデル化し、図-3の系を一体として解析した結果と比較し、計算結果が6桁以上の精度で一致すること、

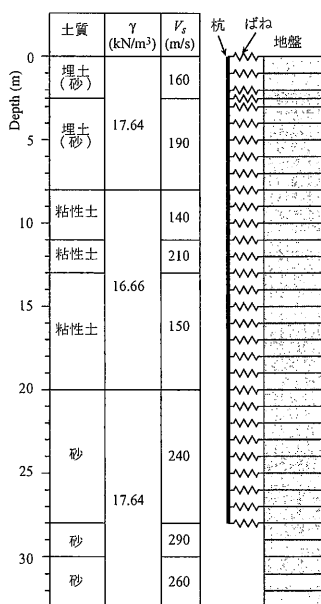


図-3 解析モデルと地盤定数

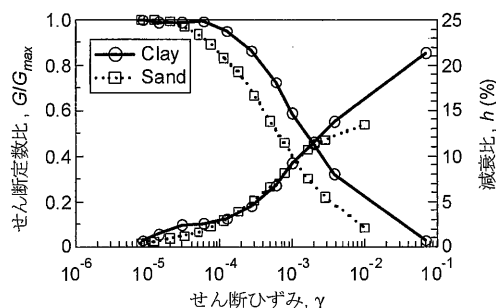


図-4 動的変形特性

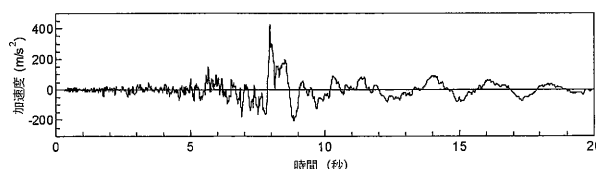


図-5 入力に用いた地震動

自由地盤の解析範囲を大きく取り対称の要素剛性マトリックスを用いた一体解析とは、工学的に十分な一致度があることを確認している。

#### 4.3 解析結果と考察

図-6 (a)に三つの解析コードによる地盤の最大変位と杭の曲げモーメントを比較して示す。なお、地盤の最大変位の発生時刻はほぼ同時であった。まず、二つの全応力解析モデル (MDM model, STADAS) では同じ様な動的変形特性を用いているためか、地盤の変位形状は非常に似ているが、GL-20 m 以深の変位が異なるため、地表の変位では 3 cm 程度の差が発生している。また、GL-8 m 付近では地盤変位の形状が若干異なり、これらがモーメント分布の差となって現れている。最大モーメント分布をみると、GL-20 m で最大となっているが、ここは、せん断波速度が急変する所であり、変位分布を見てもこの位置で折れ曲がった形状となっており、これがモーメントが大きくなった理由である。杭の被害調査は図-1に示されるように、最深で GL-22 m まで行われているが、1本のみであり、この杭では亀裂が見られないことから、他の杭の状況が分からないとはいえ、解析は実情を反映していない可能性がある。次に、実際に被害が発生している、地下水位以下の埋土の部分ではモーメントの値は小さく、実被害とは対応していないことが分かる。これらの結果から、このケースでは、全応力解析では杭の被害の説明はできないことが分かる。

次に、液状化の発生を考慮した有効応力解析 (SD モデル) の結果を見ると、全応力解析ではモーメントの大きかった GL-20 m 位置では全応力解析に比べかなり小さくなり、降伏モーメントより小さい値となっている。また、液状化の発生する GL-2.5~8 m ではほぼ全域で最大モーメントは破壊モーメントを超え、大きな被害が発生していることを示唆しているが、これは No. 3 杭の被害に対応しているものと見ることができる。

これらの結果を、前章で示した、設計指針による方法と比較してみると、想定される杭の被害の程度は、有効

応力地震応答解析では液状化層近傍の全域にわたる亀裂が想定され、より No. 3 杭の被害に近いといえる。地表変位は、設計指針による方法では 16 cm であったのに対し、非線形地震応答解析ではいずれも 30 cm のオーダーで、約 2 倍の値となっており、この差が被害予測に影響しているとも考えられる。すなわち、入力を正しく評価しないと結果は当然正しくないという教訓が得られる。

次に、GL-20 m 位置を見ると、設計指針による方法ではモーメントはほとんど発生

していないが、地震応答による方法では大きなモーメントが発生している。実被害ではこの位置では被害が発生していないようであるが、もう少し地震力が多ければ被害が発生したことが想定される。しかし、設計指針による方法では、この位置でひずみの著しい不連続が発生するというメカニズムを想定しない限り、このことを予見することは困難であり、設計指針に基づく方法の欠点といえる。有限要素法解析では自然にこのような現象が表現され、大きな長所となっている。

#### 4.4 各種要因の影響

本論で示す相互作用ばねを用いる方法は実務でも用いられることの多い手法であるので、ばねの使い方について検討する。検討したのは次の三つのケースで、その結果を図-6 (b)に示す。図で実線 (Total stress) で示したのは図-6 (a)でSTADASとして示したものであり、これに比べて各種の要因がどのように影響するかをみる。

1) 多入力解析では理論上、入力点で速度と変位の両方を入力すれば一体解析と同じ結果が得られる。しかし、応答変位法の動的な拡張ということから、変位しか入力しないケースも考えられる。このケースを図-6 (b)で点線 (displacement) として示す。深いところでは両者の差はほとんどないが、地表近くなると差が大きくなり、一体解析の結果とは全く異なる応答を示している。このことは、多入力解析を行うのであれば、変位のみならず速度も必要であることを意味している。

2) 多入力解析で要求される三つの入力の内、慣性力を考慮しないケースを、図では波線 (No inertia) で示した。全体解析とほとんど同じ結果であり、これまでいわれていた、地中線状構造物は自身で応答せず、周辺地盤の挙動に支配されるということが実証された。

3) 地下水位以下の埋土層は液状化する。この影響を考慮するために、相互作用ばねの剛性と強度を1/10に設定した。このケースを図で一点鎖線 (Liquefaction) として示す。全体解析とほとんど差が見られない。すなわち、液状化を考慮するのであれば、地盤の解析から考慮しておかないと妥当な結果が得られない。

#### 5. おわりに

本論では、有限要素法に基づく地震応答解析が通常の設計手法に対してどのような特徴を持っているかを、実被害の解析を通して検証した。設計指針による方法と比べると、例えば設計指針では想定したメカニズムだけを対象としているのに対して、有限要素法では種々の要因が自然に考慮され、現象がより明らかになるという長所があることが分かった。一方、本論で対象としたような技術者の判断が要求される問題では、正しく問題設定をしないと有用な解が得られないということも分かった。

#### 謝 辞

本論は、地盤工学会「液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関する研究委員会」の活動で行った研究をまとめたものである。特に、(株)シーテック、恒川和久氏には地震

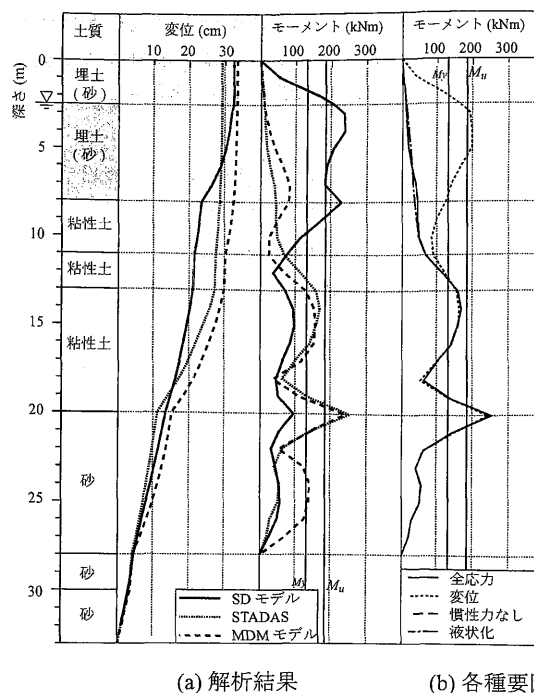


図-6 地盤変位と杭の曲げモーメントの比較

応答解析を実施していただいた。これら関係各位に感謝します。

#### 参 考 文 献

- 1) 建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会 (BTL 委員会): 兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する研究, 建築研究報告, No. 138, 建設省建築研究所, pp. II-39~41.
- 2) 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 2004.
- 3) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001改訂, 2001.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, IV 下部構造編, p. 567, 2002.
- 5) 岸田英明・中井正一: 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 日本建築学会論文報告集, 第281号, pp. 41~55, 1979.
- 6) 熊崎幾太郎・上田 稔: 全応力履歴モデルによるポートアイランドのまさ土地盤の非線形地震要素シミュレーション, 第34回地震工学研究発表会, pp. 1957~1958, 1999.
- 7) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Modelling of sand behaviour based on state concept, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 3, pp. 115~127, 1998.
- 8) Yoshida, N. and Tsujino, S.: STADAS, A Computer program for static and dynamic analysis of ground, Part 1: basic equation, Reports of Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co., Ltd., No. 18, pp. 107~115, 1992.
- 9) 吉田 望・辻野修一・石原研而: 地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 1639~1640, 1990.
- 10) 田中 勉・吉田 望・亀岡裕行・長谷川豊: 地中構造物の多入力解析, 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp. 49~50, 1983.

(原稿受理 2005.2.28)