

鋼製橋脚—地盤連成系の大地震時挙動

河村康文¹・葛西昭²・宇佐美勉³

¹学生会員 名古屋大学 大学院工学研究科土木工学専攻(博士課程前期課程) (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工修 名古屋大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³フェロー会員 D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

本研究は、杭基礎を有する鋼製橋脚の地震時挙動を予測するための解析モデルの構築を目的としている。鋼製橋脚は、橋脚頂部に質点を有する1自由度モデルとし、フーチングを剛体、杭ははり要素、地盤は平面ひずみ要素によりモデル化することで解析モデルを作成している。橋脚の復元力モデルは2パラメータモデルを使用し、地盤は非線形性を考慮した等価剛性、等価減衰定数を用いた。橋脚の固有周期と地盤の固有周期、および地震動の卓越周期が非常に近接している場合には、地震時応答は非常に大きく、鋼製橋脚—基礎—地盤全体を考慮した挙動把握の必要性を示している。

Key Words : seismic response analysis, maximum displacement, residual displacement, soil-structure interaction.

1. 緒言

鋼製橋脚の大地震時における挙動を把握する際には、橋脚だけでなく基礎や地盤の挙動も考慮することが非常に重要である。これは、構造物と地盤の動的相互作用が影響するためであり、構造物と地盤を一体として挙動を推定する必要がある。また、一般に地盤材料は、比較的小さなひずみにおいても非線形性を呈し、履歴によってエネルギーを吸収し、また、地盤の無限性により、地下への逸散減衰があるため、橋脚の地震時における応答は、地盤を固定とした場合と比較して変化することが予想される。

また、杭基礎については、杭体と地盤を弾性と仮定した変位法[1]が適用されているが、植木らの研究[2]によると、大規模地震が発生した際には、基礎に大変形が生じる可能性があり、現行設計法を拡張した形で大規模地震時における杭基礎の設計を行うと、安全性を過大評価する可能性があることが分かってきた。

そこで本研究では、地盤をII種地盤に限定し、鋼製橋脚—基礎—地盤連成系のモデルを構築して地震応答解析を行う。そしてまず、杭径を変化させた場合での橋脚の応答変位の比較を行い、杭基礎が橋脚の応答変位に与える影響を調べる。次に、地盤を固定とした場合の地震時挙動との比較を行うことによって、大地震時における地盤の考慮の必要性について検討する。なお、橋脚および基礎については非線形モデルを導入し、地盤については、非線形地盤と等価な剛性、減衰定数を有する等価線形地盤を用いて解析を行った。なお、地震応答解析には、汎用構造解析プログラムTDAPIII[3]を用いた。

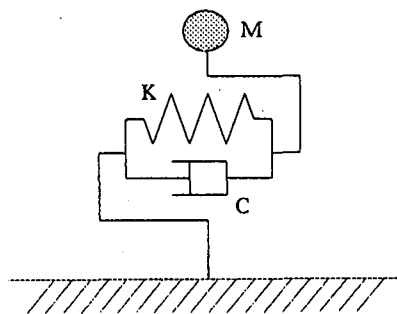


図-1 地盤固定モデル

2. 解析手法

(1) 解析モデル

本研究では、地盤を考慮した際の地震時挙動の比較、および効果の検討を行うために、2つの解析モデルを構築した。以下に概要を示す。

図-1に示されるモデルは、地盤を固定としたモデルとして、鋼製橋脚を上部構造を含めた1自由度の集中質点系に置換したものである。橋脚の復元力モデルは、名古屋大学で開発された復元力モデル(2パラメータモデル[4]と称す)を使用した。以下、このモデルを地盤固定モデルと呼ぶ。

図-2に示されるモデルは、橋脚については地盤固定モデルと同様に1自由度系のモデルで表現し、地盤に対して有限要素分割を行ったモデルである。以下、このモデルを地盤メッシュモデルと呼ぶ。この地盤メッシュモデルでは、地盤要素として平面ひずみ要素を用

表-1 地盤データ (II種地盤)

	深度 (m)	層厚 (m)	単位体積重量 γ_s	せん断波速度 (m/s)	せん断弾性係数 (tf/m ²)	ポアソン比	減衰定数	地盤の種類
1	5.5	5.5	1.7	171	5070	0.47	0.02	粘性土
2	8.0	2.5	1.7	171	5070	0.47	0.02	粘性土
3	10.5	2.5	1.7	172	5050	0.47	0.02	砂質土
4	13.5	3.0	1.7	171	5070	0.47	0.02	粘性土
5	16.4	2.9	1.9	197	7550	0.47	0.02	砂質土
6	20.0	3.6	1.9	295	16840	0.47	0.02	砂質土

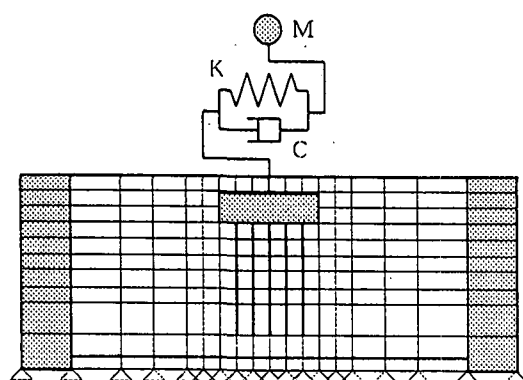


図-2 地盤メッシュモデル

い、フーチングは剛体、杭には弾塑性のはり要素を用いた。また、地盤の側面および底面には、地震動の反射を抑制する粘性境界を配置した。なお、地盤は弾性的の場合と、非線形性を考慮した等価剛性、等価減衰定数をもつ等価線形の場合の2種類を使用した。前者を弾性地盤メッシュモデル、後者を等価線形地盤メッシュモデルと呼ぶ。

(2) 杭の設計

本解析では、地盤メッシュモデルでは、鋼管杭を用いた杭基礎を仮定する。表-2に諸数値を示す。なお、本解析では、杭の厚さは一定とし、杭の直径を0.5~0.8(m)で0.1(m)おきに変化させた計4本の杭を震度法設計に基づいて設計し、杭径のちがいによる橋脚の挙動の比較を行った。

(3) 基盤面での地震動

地盤メッシュモデルの解析では、工学的基盤面における地震動を入力する。また、地盤メッシュモデルにおける解析は、地盤材料に対して線形、等価線形の2種類を考慮して行った。地盤が線形の場合には、土質柱状図、 N 値分布、PS検層結果から求められる地盤の物性値をそのまま用いればいいが、等価線形地盤の場合には、各層において、非線形性を考慮した剛性、等価減衰定数

表-2 杭のデータ

使用鋼種	SKK400
降伏応力 σ_y	2.40×10^4 (tf/m ²)
曲げ剛性 EI	4.84×10^4 (tf · m ²)
杭の直径 R	0.5, 0.6, 0.7, 0.8(m)
杭の厚さ t	0.012(m)

が必要である。基盤面での地震動の推定および等価剛性、等価減衰定数の算定にはプログラムSHAKE[5]を用いた。SHAKEでは地震時における非線形性を等価線形化法で考慮しているが、そのためには、各層ごとにせん断弾性定数 G および減衰定数 h のひずみ依存特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係を準備する必要がある。これらは、文献[6]を用いて求めた。

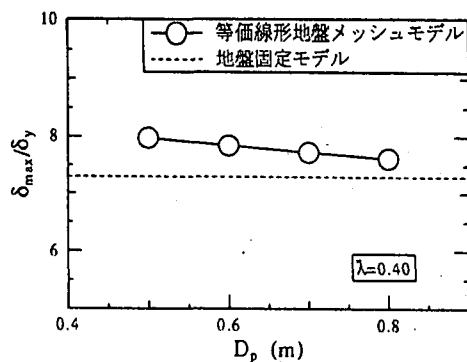
(4) 数値解析手法

本解析で対象とした鋼製橋脚は、正方形補剛箱形断面を有し、幅厚比パラメータ $R_f=0.35$ 、細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.20 \sim 0.50$ （固有周期 $T=0.42 \sim 1.05$ ）として、震度法設計により上部構造重量を定めた橋脚である。また、数値解析は直接時間積分法によって行い、数値積分法としてNewmarkの β 法($\beta=0.25$)を用いた。時間間隔は、地盤固定モデルおよび地盤ばねモデルでは0.002s、地盤メッシュモデルでは0.001sとした。減衰定数は、橋脚に対して0.05、弾性地盤に対しては0.02とし、モード減衰定数はひずみエネルギー比例型減衰を適用した。また、入力地震動は、道路橋示方書V（耐震設計編）に規定されるレベル2・タイプII地震動のうち、II種地盤用3波（FUKIAI, JRT-EW-M, JRT-NS-M）を使用した。なお、本解析で想定した地盤として、文献[7]におけるII種地盤データを用いた。これらの地盤データを表-1に示す。

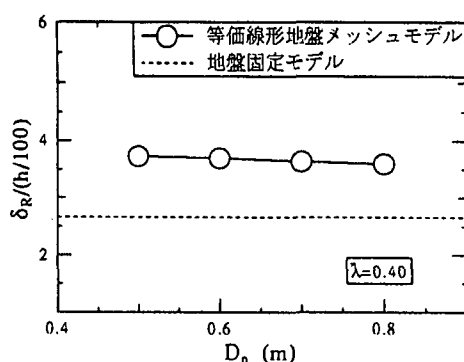
3. 解析結果

(1) 杭径の違いによる応答変位の変化

図-3は、等価線形地盤メッシュモデルにおいて、細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.40$ の橋脚について、杭径を0.5(m)~0.8(m)まで変化させた場合の、橋脚の応答変

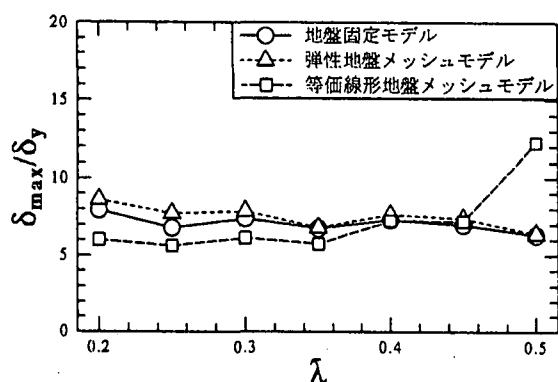


(a) 最大応答変位

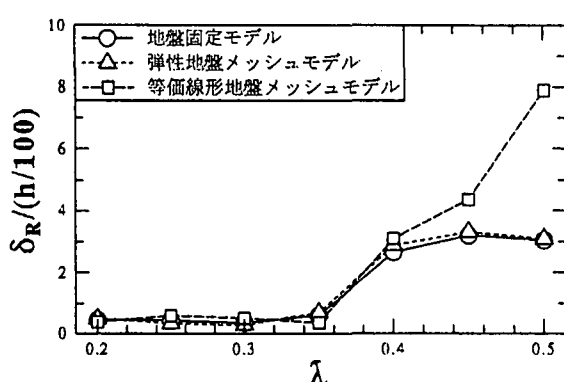


(b) 残留応答変位

図-3 杭径の違いによる応答の変化



(a) 最大応答変位



(b) 残留応答変位

図-4 応答変位—細長比パラメータ関係 (II種地盤)

位を比較したものである。横軸には杭径 D_p 、(a)の縦軸には最大応答変位 δ_{max} を降伏変位 δ_y で割って無次元化したもの、(b)の縦軸は、残留応答変位 δ_R を橋脚高さ h の1/100の量で割って無次元化したものを示す。また、細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.40$ における地盤固定モデルの応答変位を破線で示す。

図-3より、最大応答変位と残留応答変位の双方において、杭径を大きくした場合、多少橋脚の応答変位が小さくなり、 $D_p=0.8(m)$ の時に最も応答値が軽減した。これは、杭径が大きくなることによって、基礎の抵抗力が増加するためである。しかしながら、杭径のちがいが橋脚そのものの挙動に及ぼす影響は小さい。II種地盤は比較的軟らかい地盤であるため、地盤の振動に依存してしまうためだと考えられる。これにより、杭径を大きくすることによって、橋脚の応答を大幅に低減させるのは困難である。また、地盤固定モデルの応答変位と比較すると、全体的に地盤固定モデルよりも応答変位が大きくなった。なお、杭径を大きくするにつれて基礎が強固になり、地盤固定モデルの応答値へ漸近する。

(2) 細長比パラメータの違いによる応答変位の変化

次に、杭径 $D_p=0.8(m)$ とし、橋脚の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を0.20~0.50と変化させた場合について、各モデルにおける応答変位を解析した。図-4に結果を示す。横軸には固有周期をとり、縦軸には、図-4(a)は最大応答変位 δ_{max} を降伏変位 δ_y で割って無次元化したもの、(b)は残留応答変位 δ_R を橋脚高さ h の1/100で割って無次元化したものを示す。なお、これらは、レベル2タイプII地震動3波を入力した場合の各応答値の平均をとった。また、弾性地盤メッシュモデルの固有周期は1次の固有周期を用い、等価線形地盤メッシュモデルについても同じものを用いた。

図-4より、地盤固定モデルと弾性地盤メッシュモデルは、ほぼ同じ応答値を示す。一方、等価線形地盤メッシュモデルは、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が0.40までは、他の2モデルよりも最大応答変位が小さくなった。これは、構造物と地盤の動的相互作用、特に、地下への逸散減衰による効果が現れたためである。ところが、 $\bar{\lambda}$ が0.40以上では、最大応答変位、残留応答変位とも他の2モデル

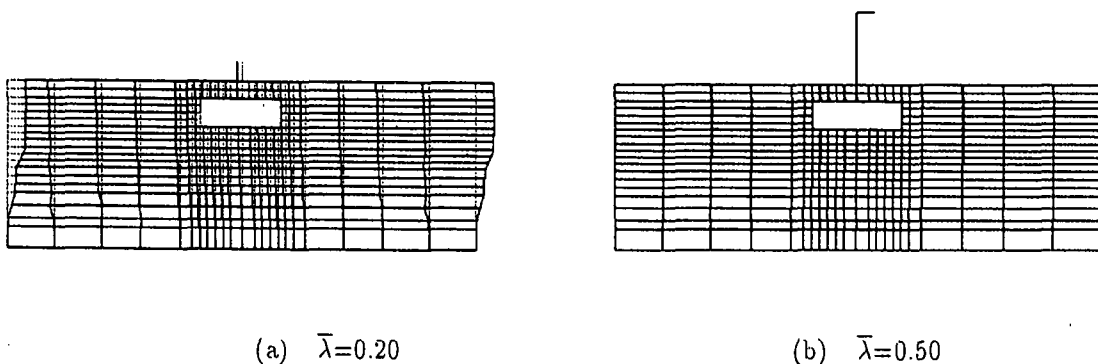


図-5 モード変形図

ルよりも応答変位が非常に大きくなった。これは、橋脚の固有周期と等価線形地盤の固有周期が近接し、地震動の卓越周期と合致したためである。以下で、その理由について述べる。

(3) 等価線形地盤の固有周期

各細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ における等価線形地盤メッシュモデルの固有周期を求めたところ、どの細長比パラメータにおいても1.1(sec)程度となった。そこで、各細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ でのモード変形図を求めた。図-5(a)には、細長比パラメータ $\bar{\lambda}=0.20$ での1次モードの変形図、(b)には $\bar{\lambda}=0.50$ での1次モードの変形図を示す。なお、図-5では、橋脚頂部における水平変位量によって橋脚の変形を示していることに注意されたい。

図-5(a)では、橋脚は1次モードで変形していない。これは、II種地盤が比較的軟らかいため、1次モードでは地盤の変形が卓越的になるからである。したがって、1次モードの固有周期は地盤の固有周期に依存する。一方、図-5(b)では、橋脚は1次モードで変形している。これは、図-4において、等価線形地盤メッシュモデルの応答変位が地盤固定モデルよりも大きくなった原因の1つである。これより、1次モードが橋脚および等価線形地盤がともに大きく変形するモードである場合、橋脚の地震時応答も著しく大きくなると言える。

4. 結言

本研究では、地盤をII種地盤と仮定し、鋼製橋脚を1自由度モデルで表現された解析モデル(地盤固定モデル)に対して、地盤との連成効果を見るために地盤に対して有限要素法を適用したモデル(地盤メッシュモデル)を用いて解析を行った。

まず、等価線形地盤メッシュモデルにおいて、杭径を変化させた場合は、橋脚の応答に多少の影響が見られた。しかし、II種地盤は軟らかい地盤であるため、地盤の振動に依存し、杭径を大きくすることによる橋脚の応答を著しく低減させることは困難である。

次に、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を変化させて地盤固定モデルと等価線形地盤メッシュモデルとを比較した場合、構造物と地盤の動的相互作用により応答変位の大きな差が見られた。また、橋脚、地盤の固有周期、地震動の卓越周期が合致するあたりでは等価線形地盤メッシュモデルの応答変位が他のモデルよりも非常に大きくなった。

本解析では地盤を等価線形地盤として解析を行ったが、実際は、非線形地の盤メッシュモデルで解析するのが理想である。現時点では、解析時間および解の収束などに課題が残っている。これについては、簡易モデルの構築が望まれる。また、杭についても、今回は単に杭径を変えたにすぎず、細部にわたる設計が必要である。これらは、今後の研究課題としたい。また、地盤の連成を考慮した多径間連続橋の挙動についても今後検討する予定である。

参考文献

- [1] (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (IV 下部構造編)，丸善，1990.2.
- [2] 植木博ら：群杭の水平方向抵抗特性に関する研究，土木学会論文集，No.541/III-35，1996，pp.35-46.
- [3] (株) アーク情報システム：TDAP III 理論説明書 Ver.1.73，1997年1月.
- [4] 鈴木森晶ら：鋼製箱形断面橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析，土木学会論文集，No.549/I-37，1996年10月，pp.191-204.
- [5] (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997年3月.
- [6] Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B.: SHAKE a Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC, 72-12, December, 1972.
- [7] 建設省土木研究所 地震防災部振動研究室：地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE/DESRA—，土研資料第1778号，1982.