

地盤の影響を考慮した 鋼製橋脚の耐震性能評価

葛西 昭¹・宇佐美 勉²

¹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)

²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、鋼製橋脚の地震時挙動を精度良く予測する復元力モデル (2パラメータモデル) をもとに、鋼製橋脚-基礎-地盤の連成を考慮した地盤ばねを付与した解析モデルを作成し、鋼製橋脚-基礎-地盤一体の地震時挙動を推定することを目的としている。対象としたII種地盤では、地盤の効果を考慮することによって、地震時挙動が大きく変化することはない、地盤を考慮しない比較的簡易なモデルによって、全体系の地震時挙動は推定できる。また、免震支承の導入、コンクリート充填により、橋脚の損傷度が軽減することを動的解析により立証し、鋼製橋脚の耐震性能を評価している。

Key Words : *steel bridge pier, elasto-plastic seismic response analysis, seismic isolator*

1. 結言

鋼製橋脚を使用する際に、終局限界状態に対する耐震安全性および機能保持性が十分であることを照査することは、今後の耐震設計を行う上で重要である。終局・機能保持耐震設計指針として提案された土木学会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WGの報告書¹⁾では、この点に注目した詳細な検討が行われている。

著者らは文献1)を踏まえて、単柱式の鋼製橋脚に対して、動的解析によって耐震性能評価をまとめた²⁾。この中では、鋼製橋脚の耐震性能向上策として、柱基部へのコンクリート部分充填と免震支承の導入をとりあげている。得られた知見としては、コンクリートを部分的に充填することで、橋脚の最大応答変位および残留応答変位が抑制され、耐震性能を向上させる上で非常に有用な手段であることを立証した。また、免震支承の導入も、地震動の卓越周期をはずすことで、有用な手段の1つであることを示し、両対策を施すことで、最重要構造物であっても、耐震安全性および機能保持性を満足させることが可能であることが示された。

文献2)における解析対象は、各地盤種に準じて震度法設計によって1次設計を行った鋼製橋脚である。しかし、解析モデルには、地盤の効果を考慮することはない、橋脚と地盤は完全に固定されていることを想定している。橋脚がII種地盤のような比較的軟弱な地盤上に位置する場合は、構造物-地盤の動的相互作用のために、橋脚の挙動は、完全固定である場合に比べて変化することが予想される。そこで、本研究では、地盤の効果を地盤ばねで置き換えた解析モデルを用いて、鋼製橋脚の地震時挙動を推定し、文献2)で行われた検討を補完することを目的としている。

2. 解析概要

(1) 解析モデル

図-1に本研究で用いる解析モデルを示す。(a)は橋脚と地盤を完全固定と想定し、免震支承を設置しないモデルである。(b)は(a)に示された解析モデルに対して、地盤ばねを設置したモデルである。(c)、(d)は上記の(a)、(b)に対して免震支承を設置したモデルである。なお、文献2)に記載のモデルは図-1の(a)、(c)である。また、 M_U = 上部構造質量、 M_P = 橋脚躯体質量の30%、 k_P = 橋脚の剛性、 c_P = 橋脚の減衰係数、 k_B = 免震支承の剛性、 k_{ss} = 地盤ばね (スウェー)、 k_{rr} = 地盤ばね (ロッキング) である。

(2) 入力地震動

入力地震動は、道路橋示方書レベル2・タイプII地震動のうち、II種地盤用に作成された地震動3波を用いた。ただし、応答結果をまとめる際には、各地震動による応答の平均をとった。

(3) 復元力モデル

本研究では、図-1に示されるように橋脚部分は水平方向のばねで表現し、橋脚頂部における水平荷重-水平変位関係に対する復元力モデルによって橋脚の挙動を表現する。鋼製橋脚の復元力モデルとしては、図-2に示される劣化域剛性を持つ2パラメータモデル³⁾を適用する。また、コンクリート部分充填鋼製橋脚に対しては、文献4)で提案されており、図-3に示される復元力モデルを適用する。ただし、コンクリート部分充填鋼製橋脚に対する復元力モデルは、文献5)で示

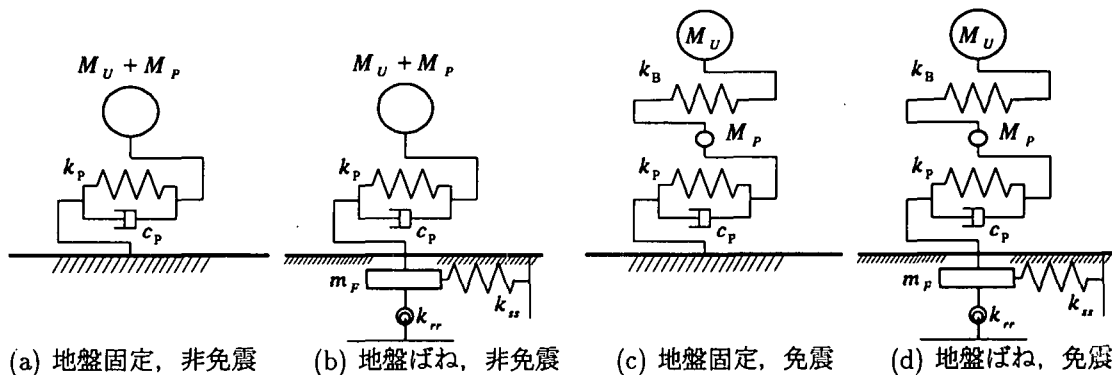


図-1 解析モデル

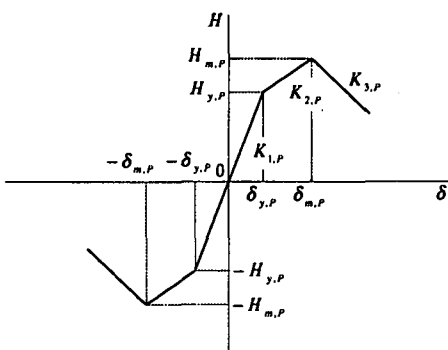


図-2 骨格曲線（コンクリート無充填）

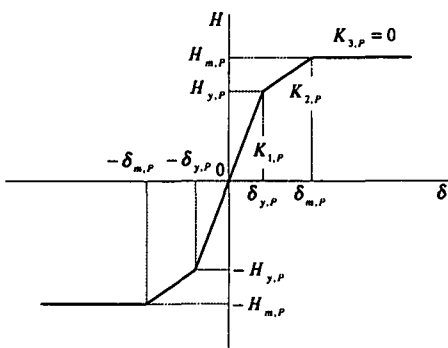


図-3 骨格曲線（コンクリート部分充填）

されるようなコンクリートを最適な高さまで充填した橋脚に対する復元力モデルであるので注意されたい。

免震支承の復元力モデルは、移動硬化型バイリニアとした。なお、骨格曲線を決定するのに必要となる条件は、系全体の固有周期と免震支承の履歴吸収エネルギーとし、文献2)では、系全体の固有周期を種々に変化させたが、本研究では、系全体の固有周期を2秒とし、免震支承の履歴吸収エネルギーが最も大きくなるように、骨格曲線を定めた。

(4) 解析パラメータ

対象とする橋脚は、補剛正方形箱形断面橋脚を想定し、設計は震度法設計で行う。なお、地域別補正係数は1.0とした。設計を行う際に用いられる諸パラメータは、幅厚比パラメータ R 、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ であり、これらは、以下の式によって定義される。

$$R = \frac{b}{nt} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

表-1 地盤条件 (II種地盤)⁸⁾

No.	層厚 H_i (m)	平均 N 値	単位体積重量 w_i (tf/m ³)	地盤の種類
1	2.50	5	1.7	粘性土
2	2.50	10	1.7	砂質土
3	3.00	5	1.7	粘性土
4	2.90	15	1.9	砂質土
5	1.00	50	1.9	砂質土

表-2 杭体の構造特性値

フーチング底面形状	11 m×9 m
フーチング平均高さ h_F	3.5 m
単位体積重量 w_F	2.5 tf/m ³
杭本数 N_P	19 本
杭径 D_P	0.5~0.8 m
杭板厚 t_P	12mm
杭長 l	12 m
杭間長 d	2.5 m
杭の弾性係数 E_P	2.1×10^4 tf/m ²
杭種	鋼管杭
工法	中掘杭工法
杭先端は、セメントミルク噴出攪拌方式	

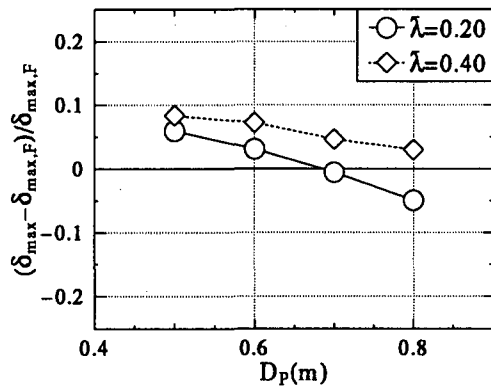
$$\bar{\lambda} = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここに、 n = サブパネル数、 b = フランジ幅、 t = 板厚、 σ_y = 降伏応力、 E = 弾性係数、 ν = ポアソン比、 h = 橋脚高さ、 r = 断面2次半径である。

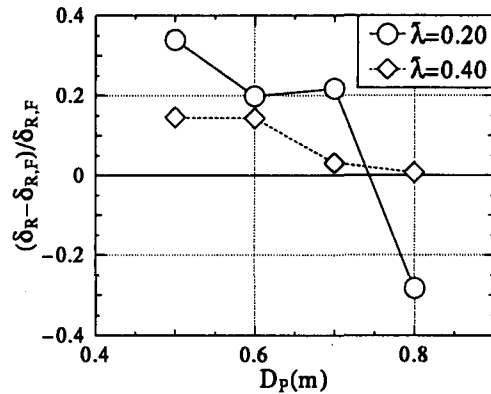
地盤ばねモデルでは、基礎の形態を杭基礎と仮定し、フーチング底面に地盤ばねを設置することによって、地盤および基礎のモデル化を行った。なお、地盤ばね定数は、道路橋示方書 IV 下部構造編⁶⁾、V 耐震設計編⁷⁾を参考に定めた。地盤および基礎の諸元は表-1、表-2に示されている。また、地盤ばねは弾性とした。

本解析に使用した橋脚の各種設定パラメータを、表-3に示す。橋脚の固有周期による影響を見るために、細長比パラメータを0.20から0.50まで変化させて解析を行うこととした。

減衰定数は、道路橋示方書 V⁷⁾に準拠した値を採用する。すなわち、橋脚部分の減衰定数は5%、基礎構造の減衰定数は10%、免震支承の減衰定数は0%とした。減衰マトリクスは、モード解析により、ひずみエネルギーに比例配分するようにモード別減衰定数を算定し、高次モードまで考慮するように定めた。



(a) 最大応答変位



(b) 残留応答変位

図－４ 杭径の違いによる応答の変化

表－３ 解析に用いた橋脚のパラメータ

鋼種	SS400
鋼材の弾性係数 E	206GPa (21,000kgf/mm ²)
鋼材の降伏応力 σ_y	235MPa (24kgf/mm ²)
鋼材のポアソン比 ν	0.3
充填コンクリート強度 σ_{ck}	19.6MPa (2.0kgf/mm ²)
板厚 t	20mm (フランジ, ウェブ共)
補剛材厚 t_s	20mm (フランジ, ウェブ共)
補剛材幅 b_s	233mm
断面形状	正方形箱形
ダイアフラム間隔 l_d	b (b = 断面幅)
幅厚比パラメータ R_f	0.35 (b = 1570mm)
細長比パラメータ λ	0.20~0.50
縦方向補剛材本数	3本 (フランジ, ウェブ共)
縦方向補剛材剛比 γ	$3\gamma^*$ 以上 (γ^* = 最適補剛材剛比)

3. 杭径の違いによる橋脚の応答性状の違い

震度法による地盤ばね定数は、地盤条件である水平反力度と、杭の構造条件から求められ、双方の条件を加味した定数である。そこで、本研究では、地盤条件は一定とし、杭径に変化を与えることで、地盤ばね定数を変化させ、解析上、地盤が比較的大きく変位する場合と、比較的小きく変位する場合を想定した解析を行った。

鋼製橋脚は、コンクリート無充填で細長比パラメータが0.20のものと0.40のものを想定し、杭のパラメータは、表－２に示すとおりである。図－４は、縦軸に橋脚の最大応答変位、あるいは残留変位を地盤固定とした場合の各応答変位との差を地盤固定とした場合の各応答値で除したものをプロットし、横軸には杭径をプロットしてある。

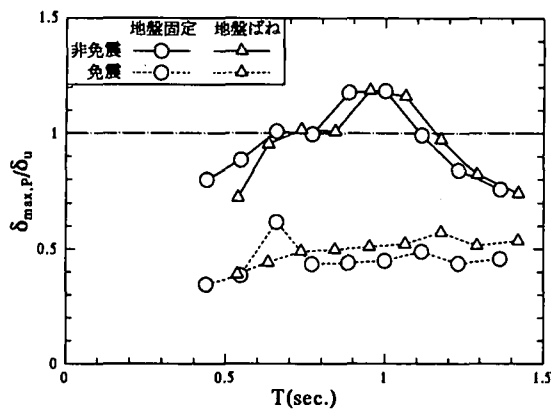
図－４(a)より、杭径が大きくなるに連れて橋脚の最大応答変位は小さくなっていることが分かる。特に、細長比パラメータ $\lambda = 0.20$ のときは、 $D_p \geq 0.7$ (m)で、地盤固定とした場合に比べて、最大応答変位が小さくなっている。これは、杭径が大きくなるに連れて、地盤ばね定数は大きくなり、基礎の受け持つ復元力が増加するためである。図－４(b)のような残留変位についてはさらに顕著にその差が確認できる。基礎の形状

に応じて、地盤固定を想定した場合よりも応答値が小さくなる可能性があるため、橋脚と基礎の合理的な設計法を必要とする。次節では、本節で最も応答の小さくなった $D_p = 0.8$ (m)の場合について、耐震性能評価を行っている。

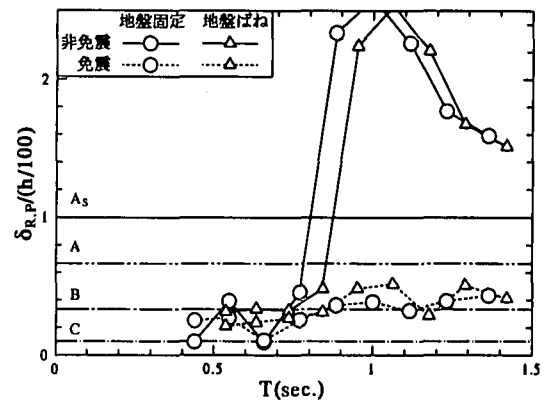
4. 鋼製橋脚の耐震性能評価

文献2)では、橋脚が地盤に完全固定となる条件の下で解析が行われている。地盤ばね定数は、橋脚の剛性に比べて非常に大きいため、振動特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。そこで、文献2)の成果を地盤の影響を考慮することで、どの程度まで利用できるかを検証するために、ある種のパラメータに限定して地盤の影響を考慮した解析を通して耐震性能評価を行い、文献2)の結果の有用性を示す。

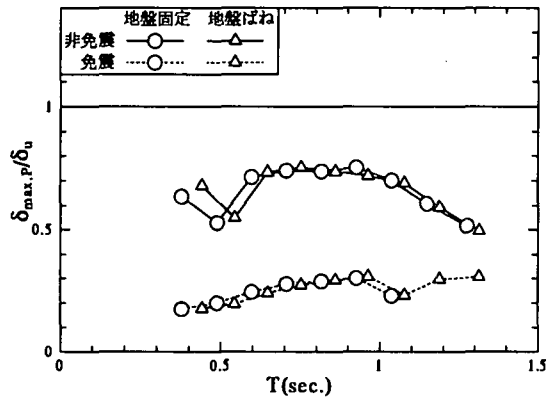
図－５(a)において、丸印は地盤固定モデルによる応答を表し、三角印は地盤ばねモデルによる応答を表している。非震橋脚で地盤固定の場合は $T = 0.65 \sim 1.15$ sで最大変位損傷度が1を越えており、耐震安全性を満足していない。地盤ばねの場合は $T = 0.65 \sim 1.2$ sと若干満足しない領域が増加する。また、応答が地盤固定に比べて大きくなる場合もあるため、耐震安全性を判断する上で、地盤を考慮することが必要である。また、免震橋脚については、応答値が著しく低減し、解析を行った $T = 0.44 \sim 1.42$ sでは、耐震安全性を満足した。ただし、地盤ばねの場合には $T = 0.7$ 付近から地盤固定の場合に比べて、応答が大きくなっている。従って、免震橋脚においても、地盤を考慮した耐震安全性評価が必要であることが分かる。この傾向は図－５(b)の残留変位損傷度においても同様であった。特に、 $T = 1$ s付近では免震橋脚で地盤固定の場合BランクとCランクの遷移域であったものが、地盤ばねの場合、明らかにBランクとなっているため、機能保持評価が異なることがあるため注意を要す。なお、損傷度ランクにつ



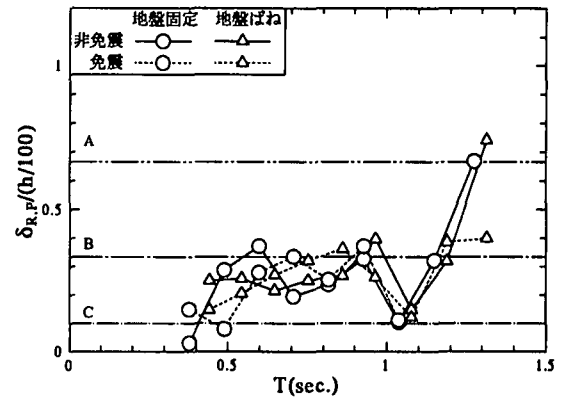
(a) 最大変位損傷度 (コンクリート無充填)



(b) 残留変位損傷度 (コンクリート無充填)



(c) 最大変位損傷度 (コンクリート充填)



(d) 残留変位損傷度 (コンクリート充填)

図-5 最大変位損傷度および残留変位損傷度

いては、文献2)を参照されたい。

コンクリート部分充填鋼製橋脚の場合は、コンクリート無充填鋼製橋脚の場合のような違いは表れず、最大変位損傷度については、図-5(c)より固有周期が同一であれば、地盤固定モデルと地盤ばねモデルでは橋脚の損傷度は等しい。残留変位損傷度については、地盤の有無による影響は顕著には表れなかった。

5. 結言

本研究では、鋼製橋脚を1自由度モデルで表現したモデルに対して、地盤との連成効果を見るために、地盤ばねを導入し、地盤との連成効果の有用性及び地盤ばね導入による応答性状についての考察を行い、また、免震支承を設置した際の耐震安全性を照査することを目的としていた。

以下に、本研究における結論をまとめる。

1. 地盤ばね定数が大きくなるに連れて、橋脚の応答値は小さくなる傾向がある。
2. コンクリート無充填橋脚およびコンクリート充填橋脚あるいは、それに対して免震支承を有する橋脚のいずれにおいても、地盤の効果を考慮しても耐震性能評価に顕著な差は表れない。

などが、得られた知見である。

なお、本論文では橋脚と地盤との連成効果を弾性の

地盤ばねで考慮した。しかし、兵庫県南部地震クラスの地震動では地盤の非線形性が無視できず、特に、残留応答変位を推定する際には地盤の非線形性が影響を及ぼすことが予想される。また、基礎の形状は杭径のみを変化させたに過ぎない。橋梁システム全体の終局耐震設計法を確立するためには、いくつかの課題が残されている。

参考文献

- [1] 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG(主査:宇佐美勉):鋼橋の耐震設計指針と耐震設計のための新技術, 1996.7.
- [2] 子林稔, 宇佐美勉, 葛西昭:免震および非免震鋼製橋脚の耐震性能評価, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.177-192, 1999.4.
- [3] 鈴木森晶, 宇佐美勉, 寺田昌弘, 伊藤努, 才塚邦宏: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, pp.191-204, 1996.10.
- [4] 子林稔, 宇佐美勉, 鈴木森晶:コンクリート部分充填鋼製橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp.859-868, 1997.3.
- [5] 葛西昭, 葛西彬, 宇佐美勉:コンクリート部分充填鋼製橋脚の耐震性能, 橋梁と基礎, Vol.31, No. 9, pp.23-29, 1997.
- [6] 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.
- [7] 日本道路協会:道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編), 丸善, 1996.12.
- [8] (社)日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料, 1998.3.